

修士論文

Σp 散乱実験用エアロゲルチェレンコフ検出器の開発

大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻

小林 和矢

平成 28 年度

概要

我々は、大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設において Σp 散乱実験 (J-PARC E40 実験) を計画している。この実験では、 $\Sigma^+ p$ 及び $\Sigma^- p$ の弾性散乱と $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ の荷電交換反応の微分断面積を 10% 以下の高統計精度で測定することを目指している。 $\Sigma^+ p$ 散乱の測定により、このチャンネルにおいて予想されているクォークレベルのパウリ効果による強い斥力の検証を行う。また、 $\Sigma^+ p$ 散乱とはアイソスピンの異なるチャンネルの散乱を測定することにより、ハドロン間相互作用の系統的な研究を行う。J-PARC E40 実験において Σ は π ビームを液体水素標的に照射することで $\pi^\pm + p \rightarrow \Sigma^\pm + K^+$ 反応により生成される。標的上流の K1.8 ビームラインスペクトロメータでビーム π を、下流の KURAMA スペクトロメータで散乱 K^+ を検出することにより Σ 生成をタグする。生成した Σ により散乱される陽子の飛跡と運動エネルギーを標的周りの検出器で測定し運動学を解くことで Σp 散乱の同定を行う。

本研究では、J-PARC E40 実験において使用するエアロゲルチェレンコフ検出器 (AC 検出器) の開発を行った。AC 検出器は、標的下流に設置され Σ 生成反応による散乱 K^+ と、そのバックグラウンドとなる πp 散乱由来の散乱 π の粒子識別を行い、オンラインで散乱 π のイベントを除去するために用いられる。J-PARC E40 実験では高統計精度の測定を実現するために 20 M/spill (1 spill = 2 s) の大強度 π ビームを使用する。効率の良いデータ取得を行うためには AC 検出器によりオンラインでバックグラウンドを除去してトリガーレートを抑えることが重要である。AC 検出器の性能に対する要求は高レート環境下において π に対して 98% 以上の検出効率を持つことである。

AC 検出器の大きさは 480 mm × 400 mm × 80 mm であり、4 つのセグメント (Room1 から Room4) に分かれている。チェレンコフ光の読み出しには磁場に耐性のあるファインメッシュ型の光電子増倍管 (PMT) を 12 個使用する。輻射体として利用するシリカエアロゲルの屈折率の値は 1.10 を選択した。J-PARC E40 実験における各セグメントの想定レートは Room1 から順にそれぞれ、300 kHz, 300 kHz, 250 kHz, 40 kHz である。そのため、AC 検出器には 300 kHz の環境下において 98% 以上の検出効率を持つことが要求される。

初めに試作機を作製し、2016 年 6 月に陽電子ビームを用いたテスト実験を行った。その結果、低いトリガーレートにおいては 99.9% 以上の高い検出効率を達成したが、トリガーレートが高くなると PMT のゲインの減少が起これば性能が低下することが分かった。

次に、最終的なデザインを決定して実機を作製し、2016 年 11 月にテスト実験を行った。このテスト実験では試作機テスト実験の結果を踏まえ、印加電圧を低く設定し信号を回路により増幅して読み出す運用方法を試した。その結果、陽電子ビームに対しては想定レートにおいて 98% 以上の検出効率を達成した。

J-PARC E40 実験において AC 検出器で識別する粒子は π と K であるため、Geant4 を用いた Monte Carlo シミュレーションにより、AC 検出器の π と K に対する性能を見積もった。その結果、 π に対する検出効率は閾値が 6 p.e. 以下であれば 98% を上回ると見積もられた。

最後に J-PARC E40 実験における AC 検出器の運用方法 (トリガー生成回路の構成、ゲインの設定、閾値の設定) を考察した。Veto 信号の生成にはセグメントごとに各 PMT の

信号を足し合わせて閾値電圧を設定する回路を採用することにした。ゲインの設定は1 p.e. ゲイン 60 ch/p.e. が最適であると考えられる。閾値の設定は J-PARC のビーム構造の影響を考慮し、4 p.e. 程度が最適であると考えられるが、AC 検出器の閾値の設定が実験全体に与える影響は小さいことも分かったため、厳密に 4 p.e. である必要はない。

目次

第1章	序論	7
1.1	バリオン間相互作用	7
1.2	ΣN 相互作用	9
1.3	Σp 散乱実験	10
第2章	J-PARCにおけるΣp散乱実験(J-PARC E40実験)	11
2.1	実験概要と目的	11
2.2	実験セットアップ	12
2.2.1	液体水素標的	12
2.2.2	散乱陽子検出器群	14
2.2.3	K1.8 ビームラインスペクトロメータ	15
2.2.4	KURAMA スペクトロメータ	17
2.2.5	大強度ビーム対策	18
2.3	トリガーロジック	19
2.4	本研究の目的	22
第3章	エアロゲルチェレンコフ検出器(AC検出器)	23
3.1	チェレンコフ検出器	23
3.1.1	チェレンコフ放射	23
3.1.2	閾値型チェレンコフ検出器	23
3.1.3	輻射体	24
3.2	AC検出器の基本デザイン	25
3.2.1	AC検出器の役割と要求性能	25
3.2.2	光電子増倍管(PMT)	25
3.2.3	AC検出器のサイズ要求と大強度ビーム対策	26
3.2.4	シリカエアロゲル	28
第4章	試作機の性能評価	30
4.1	試作機の作製	30
4.1.1	反射材	30
4.1.2	エアロゲルの種類	31
4.1.3	試作機のデザイン	32
4.2	陽電子ビームを用いた試作機の性能評価実験	34
4.2.1	性能評価実験の概要と目的	34
4.2.2	セットアップ	36

4.2.3	解析手法	38
4.2.4	結果	44
4.2.5	考察	49
4.3	シミュレーションパラメーターの調整	49
4.3.1	PMT に関するパラメーター	49
4.3.2	シリカエアロゲルに関するパラメーター	52
4.3.3	試作機テスト実験の再現	55
第 5 章	実機の性能評価	57
5.1	実機のデザインと作製	57
5.1.1	実機のデザイン	57
5.1.2	シミュレーションによる実機デザインの評価	59
5.1.3	実機組立て	59
5.2	陽電子ビームを用いた AC 検出器実機の性能評価実験	62
5.2.1	性能評価実験の概要と目的	62
5.2.2	セットアップ	62
5.2.3	解析手法	65
5.2.4	結果	70
5.2.5	考察	76
第 6 章	AC 検出器の J-PARC E40 実験での運用について	78
6.1	シミュレーションによる AC 検出器の性能の見積もり	78
6.1.1	シミュレーションと実機テスト実験の比較	78
6.1.2	π に対する性能の見積もり	81
6.1.3	K^+ に対する誤検出率の見積もり	82
6.2	AC 検出器の J-PARC E40 実験での運用方法の考察	83
6.2.1	トリガー生成回路の構成	83
6.2.2	1 p.e. ゲインの設定	84
6.2.3	閾値の設定	86
第 7 章	まとめ	91
付録 A	LED を用いたゲインドロップの調査	96

目次

1.1	u, d, s クォークで構成されるバリオン 8 重項	8
1.2	各理論モデルによって計算された散乱微分断面積	9
2.1	J-PARC E40 実験における Σp 散乱の概略図	12
2.2	セットアップ全体図	13
2.3	CATCH の 3D モデル	14
2.4	標的上流の検出器	15
2.5	標的周辺及び下流の検出器	16
2.6	予想される K^+ の運動量分布	18
2.7	CH と TOF のヒットセグメントの相関図	19
2.8	SFT の x 層のヒットチャンネルと散乱粒子の運動量の相関	20
2.9	散乱粒子の TOF 検出器におけるエネルギー損失	21
2.10	各散乱粒子の TDC 分布	21
3.1	チェレンコフ放射の様子	24
3.2	本研究で使用するファインメッシュ型 PMT の写真及び構造の模式図	26
3.3	バイアルカリ光電面における放射感度と量子効率	27
3.4	19 段ダイノードのファインメッシュ型 PMT の磁場特性	27
3.5	AC 検出器の基本デザイン	28
3.6	シリカエアロゲルの写真	29
3.7	π と K の運動量の発光閾値と屈折率の関係	29
4.1	反射鏡でのチェレンコフ光の反射の模式図	31
4.2	屈折率 1.10 のノーマルタイプとクリアタイプエアロゲルの 1 cm あたりの透過率	32
4.3	試作機の内部構造	33
4.4	ゲイン較正用の光ファイバー	33
4.5	エアロゲルを入れる前の試作機の写真	34
4.6	東北大学電子光理学研究センターの実験室レイアウト	35
4.7	試作機テスト実験のセットアップ概略図	36
4.8	AC 検出器試作機上の座標	37
4.9	トリガー生成の回路	38
4.10	シャワーベトカウンターの配置図	39
4.11	1 p.e. ゲイン測定の回路図	39
4.12	1 p.e. ゲイン測定で得られた QDC ヒストグラムと印加電圧との関係	40

4.13	陽電子ビームを照射した時に得られる $N_{p.e.}$ ヒストグラム	41
4.14	トリガーカウンターの TDC 分布	41
4.15	シャワーベトカウンターの QDC 分布	42
4.16	閾値電圧に対応する QDC チャンネル数の調べ方	43
4.17	閾値電圧とそれに対応する光電子数の関係	43
4.18	エアロゲルの種類、厚みを変えた場合の光量と検出効率の変化	45
4.19	ビーム入射位置を変えた場合の光量と検出効率の変化	45
4.20	ビーム入射角度を変えた場合の光量と検出効率の変化	46
4.21	ビームレートを変えた場合のゲインドロップと検出効率の変化	47
4.22	印加電圧を変えた場合のゲインドロップと検出効率の変化	48
4.23	閾値を変えた場合の検出効率の変化	48
4.24	ダイノード 1 段における電子 1 個の増幅シミュレーションのフローチャート	51
4.25	増幅過程のポアソン分布平均値の最適化	51
4.26	再現した LED を用いた 1 p.e. ゲイン測定の QDC ヒストグラム	52
4.27	エアロゲル屈折率の波長依存	53
4.28	試作機テスト実験で使用したエアロゲル散乱長	54
4.29	エアロゲルの吸収長係数の最適化	54
4.30	$N_{p.e.}$ ヒストグラムの再現	55
4.31	エアロゲルの種類、厚みの比較の再現	56
5.1	AC 検出器実機のデザイン	58
5.2	実機デザイン検証のためのシミュレーション	59
5.3	ナイロン糸と光ファイバーを張った AC 検出器実機の内部	60
5.4	エアロゲルを入れた AC 検出器実機の内部	60
5.5	エアロゲルタイルの配置図	61
5.6	AC 実機上の座標	63
5.7	トリガー生成の回路	64
5.8	Room3 のソフトウェアサムとハードウェアサムの相関	65
5.9	Room4 の基本位置に陽電子ビームを照射した時の Room4 の各 PMT の $N_{p.e.}$ ヒストグラム	66
5.10	加算した Room4 の $N_{p.e.}$ ヒストグラム	66
5.11	検出効率導出のために付け加えた回路	67
5.12	各 1 p.e. ゲインでの閾値電圧と光電子数の関係	68
5.13	1 スピル内における信号レートの時間変化	69
5.14	Room1 の信号のベースライン付近の拡大表示	70
5.15	ペDESTAL とベースラインのシフト	71
5.16	信号レートに対するゲインドロップの変化	72
5.17	信号レート平均約 300 kHz での使用条件を変えた検出効率の比較	73
5.18	信号レート平均約 600 kHz での使用条件を変えた検出効率の比較	73
5.19	AC 検出器のビーム入射位置依存性	75
5.20	セグメントの中間位置への入射した際の光量	76
5.21	セグメントの中間位置への入射した際の検出効率	77

6.1	シミュレーションと実機テスト実験の $N_{p.e.}$ ヒストグラムの比較	79
6.2	量子効率の補正係数の最適化	80
6.3	補正後のシミュレーションとテスト実験の $N_{p.e.}$ ヒストグラムの比較	80
6.4	π に対する光量の見積もり	81
6.5	π に対する検出効率の見積もり	82
6.6	K^+ に対する誤検出率の見積もり	83
6.7	J-PARC E40 実験での AC veto 生成回路	85
6.8	トリガーレートとデッドタイムの閾値変化	87
6.9	DAQ 効率の閾値変化	88
6.10	K^+ イベントの取得効率 P_K の閾値変化	88
6.11	J-PARC におけるトリガーレートと DAQ 効率関係	89
6.12	J-PARC のビーム構造を考慮した補正を行った DAQ 効率の閾値変化	90
6.13	J-PARC のビーム構造を考慮した補正を行った K^+ イベントの取得効率の 閾値変化	90
A.1	LED を用いたゲインドロップ調査のための回路	96
A.2	ゲインドロップの変化	97

表 目 次

1.1	ΣN のチャンネルのバリオン間ポテンシャル	8
2.1	シミュレーションにより予測されるトリガーレート	22
3.1	チェレンコフ検出器の輻射体の例	24
3.2	使用する PMT の情報	26
3.3	AC 検出器の各セグメントにおける散乱 π の想定レート	28
4.1	AC 検出器試作機の基本設定	37
5.1	AC 検出器実機の各セグメントの内サイズ	57
5.2	AC 検出器実機に使用したエアロゲルのタイルのサイズ	61
5.3	印加電圧のテーブル	64
6.1	得られた量子効率の補正係数 Q	79

第1章 序論

1.1 バリオン間相互作用

基本的な相互作用を記述する理論である標準模型において、物質はレプトンとハドロンに分けられる。レプトンは強い相互作用をしない比較的軽い粒子であり、電子などが含まれる。一方、ハドロンは強い相互作用をする比較的重い粒子であり、さらにバリオンと中間子(メソン)に分けられる。バリオンは3つのクォークから構成され半整数のスピンをもつフェルミオンであり、中間子は2つのクォークで構成され整数のスピンをもつボソンである。我々の世界を形作っている原子核を構成する陽子や中性子はバリオンの一種である。そのため、バリオン間に働く相互作用は古くから興味深い研究対象であり、実験的・理論的に盛んに研究が行われてきた。加速器の発達に伴い多くの NN (核子-核子) 散乱実験が行われ、そのデータをもとに理論も発展してきた。バリオン間の相互作用は非常に近距離 (~ 1 fm) では斥力であり、それより遠い距離では引力であることが知られている。そのうち、遠距離において働く引力については中間子交換に基づく one boson exchange (OBE) モデル [1] によってよく記述できるようになった。しかし、近距離における斥力については十分な理解がされておらず、OBE モデルの中では現象論的に取り扱うにとどまっている。バリオン同士が重なるような近距離において、その間に働く相互作用はバリオンの構成要素であるクォーク間の相互作用に由来すると考えることは自然である。標準模型においてクォークは u, d, c, s, t, b の6種類(フレーバー)存在すると考えられている。しかし、我々の周りに安定して存在しているクォークは u クォークと d クォークのみである。クォーク間に働く相互作用の理解を深めるためには u クォークと d クォークだけでなく他のクォークも含めた系に拡張して研究する必要がある。

核子はアイソスピンの2重項であるので、 NN 系の相互作用を考えた場合 $SU(2)$ アイソスピン空間において2重項同士の合成から

$$2 \otimes 2 = 1 \oplus 3$$

という2つの既約表現が得られる。3重項 ($I=1$) はアイソスピンに対して対称であり、1重項 ($I=0$) は反対称である。次に $SU(2)$ 空間から $SU(3)$ 空間への拡張を考える。3フレーバーの $SU(3)$ 空間に拡張すると、3つのクォークから構成されるバリオンはスピン $1/2$ の8重項とスピン $3/2$ の10重項に分類される。 (u, d, s) のフレーバー空間におけるバリオン8重項を図 1.1 に示す。この8重項のバリオン同士の相互作用を考えた場合、先ほどと同様に合成から

$$8 \otimes 8 = 27 \oplus 10 \oplus 10^* \oplus 8_s \oplus 8_a \oplus 1$$

という6つの既約表現が得られる。このうち、(27) 項、 (8_s) 項、(1) 項の3つの項はフレーバーに対して対称であり、(10) 項、 (10^*) 項、 (8_a) 項の3つの項は反対称である。 NN 系

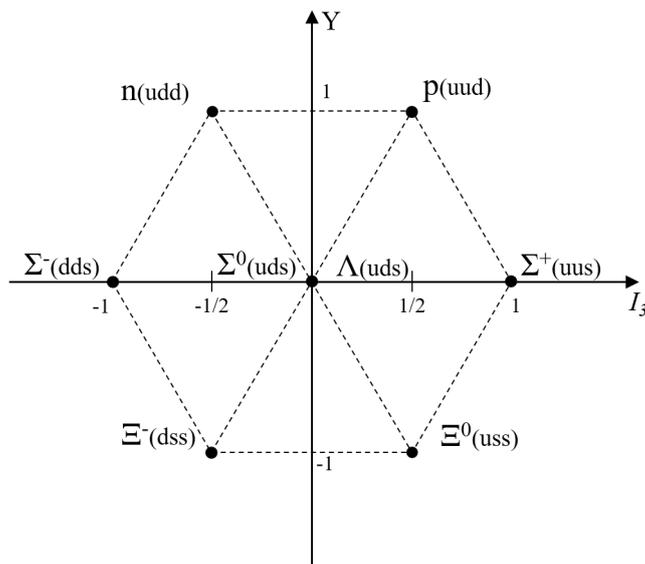


図 1.1: u, d, s クォークで構成されるバリオン 8 重項: 横軸 I_3 はアイソスピンの第 3 成分である。縦軸 Y はハイパーチャージと呼ばれる量子数でバリオン数とストレンジネスの和で定義される。

表 1.1: ΣN のチャンネルのバリオン間ポテンシャル

バリオン間ポテンシャル	spin-singlet	spin-triplet
$\Sigma N(I = \frac{1}{2})$	$\frac{1}{\sqrt{10}}[3(8_s) - (27)]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}[(8) - (10^*)]$
$\Sigma N(I = \frac{3}{2})$	(27)	(10)

におけるアイソスピン 3 重項に対応するチャンネルは (27) 項に含まれ、1 重項に対応するチャンネルは (10^{*}) 項に含まれている。つまり、 NN 系の研究で得られる情報は (27) 項と (10^{*}) 項のみに制限されているということである。他のチャンネルは YN (ハイペロン核子) 系や YY (ハイペロン-ハイペロン) 系に拡張して初めて現れる。

u クォークと d クォークに s クォークを加えた 3 フレーバーの系における相互作用を記述した理論モデルはいくつか存在する。代表的な理論モデルとして、Nijmegen one boson exchange (OBE) モデル [2] と Kyoto-Niigata resonating-group method (RGM) モデル [3] が挙げられる。Nijmegen OBE モデルは前述の OBE モデルを $SU(2)$ 空間から $SU(3)$ 空間に拡張したものである。遠距離における引力は中間子交換により記述しており、近距離の斥力については OBE モデルと同様に現象論的に扱っている。一方、Kyoto-Niigata RGM モデルは斥力の記述にクォーク間相互作用の理論である quark-cluster model (QCM) を取り入れたものであり、近距離における斥力をクォーク間のパウリ効果やグルーオンの交換に基づいて記述している。このモデルでは、(10) 項及び (8_s) 項のチャンネルにおいてクォークレベルのパウリ効果による非常に強い斥力芯の存在が予想されている。

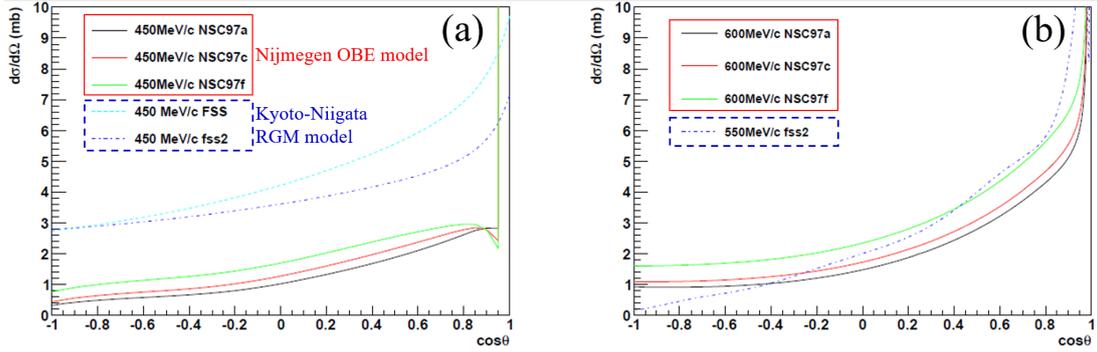


図 1.2: 各理論モデルによって計算された散乱微分断面積: 実線が Nijmegen OBE モデルから計算された値で、破線が Kyoto-Niigata RGM モデルから計算された値。(a) は $\Sigma^+p(I = \frac{3}{2})$ の散乱微分断面積で、各理論モデルによって計算結果が大きく異なっている。(b) は $\Sigma^-p(I = \frac{1}{2})$ の散乱微分断面積で、各理論モデルで大きな違いはない。

1.2 ΣN 相互作用

2体のバリオン間相互作用を実験的に最も効果的に調べる方法は散乱実験である。バリオン間ポテンシャルは6つの既約表現におけるそれぞれのフレーバー基底ポテンシャルの線形結合で表現される。 ΣN のチャンネルに着目するとそのバリオン間ポテンシャルは表1.1のように表される。Nijmegen OBEモデル及びKyoto-Niigata RGMモデルによって計算される Σp 散乱の散乱微分断面積を図1.2に示す。Nijmegen OBEモデルにおける散乱微分断面積の計算にはNijmegen Soft Core (NSC) 97 a, c, fという計算モデルを使用している。Kyoto-Niigata RGMモデルにおける計算にはFSS, fss2という計算モデルを使用している。 $\Sigma N(I = \frac{3}{2})$ でのバリオン間ポテンシャルはspin-singletの(27)項とspin-tripletの(10)項の重ね合わせである。Kyoto-Niigata RGMモデルでは(10)項はパウリ効果から強い斥力が生じるチャンネルであり、また3重項の重みからポテンシャルへの寄与が大きい。したがって、 $\Sigma N(I = \frac{3}{2})$ でのバリオン間ポテンシャルも強い斥力が予測されており、散乱断面積に反映される。しかし、Nijmegen OBEモデルではクォーク間の相互作用を取り入れていないため予測される散乱断面積が大きく異なる{図1.2(a)の実線と破線}。一方、 $\Sigma N(I = \frac{1}{2})$ でのバリオン間ポテンシャルは4つの項の重ね合わせでありそれぞれのポテンシャルへの寄与は小さいため、両モデルで予測される散乱断面積に大きな違いはない{図1.2(b)}。これは、クォーク間のパウリ効果による斥力ではなく中間子交換の効果が強く現れることを示している。

以上のことから、 $\Sigma N(I = \frac{3}{2})$ に対応する Σ^+p チャンネルの散乱断面積を測定することによりクォーク間のパウリ効果の存在を検証することが可能であると考えられる。また、 $\Sigma N(I = \frac{1}{2})$ に対応する Σ^-p チャンネルの散乱断面積を測定することによりSU(3)に拡張された中間子交換モデルの妥当性の検証が可能であると考えられる。このような理由から、 Σp 散乱実験を行うことはバリオン間相互作用の理解を深めるために非常に有効な手法であると言える。

1.3 Σp 散乱実験

通常の NN 散乱実験と比べ Σp 散乱実験は非常に困難である。これは Σ 粒子の寿命が非常に短い ($\tau \sim 10^{-10}$ s) ことに起因している。 Σ が生成されてから標的内で散乱を起こす前に崩壊してしまったり、散乱を起こしても検出する前に崩壊してしまうからである。そのため、過去に行われた Σp 散乱実験では散乱事象を画像として保存し、その事象に関係する粒子をすべて解析するイメージング手法がとられた。この手法の利点は、 Σ の軌跡をすべて記録することで Σ が散乱を起こしたことを確実に保証できる点である。過去の主な Σp 散乱実験として 1960 年代に行われたバブルチェンバー実験 [4] と 1990 年代から 2000 年代初めに KEK PS で行われた E251 及び E289 実験 [5][6][7] が挙げられる。

1960 年代に行われたバブルチェンバーを用いた実験では、 Σ の生成をタグ出来なかったためランダムトリガーでデータを取得していた。また、バブルチェンバーは一度泡を形成し画像を取得してから元の安定な状態に戻るまでに時間がかかるため、入射ビームの強度が制限された。そのため、 Σ の生成には反応断面積の大きい Stopped K 反応が用いられ、 Σ の運動量は 200 MeV/ c 程度に制限された。これらの理由から、この実験では低い運動量領域で数百イベント程度しか散乱事象を同定できなかった。

1990 年代から 2000 年代初めに行われた KEK PS E251 及び E289 実験では、より高い運動量領域で Σp 散乱断面積を測定することを目的としていた。 Σ 粒子は $\pi^\pm + p \rightarrow \Sigma^\pm + K^+$ 反応により生成され、ビームライン上の検出器で π ビームを、標的後方に設置されたスペクトロメータで散乱 K^+ を検出することで Σ 生成のタグを可能としていた。また、 Σ 生成、散乱の標的及び画像取得の検出器としてシンチレーティングファイバーをアクティブ標的として用いており、350 MeV/ c \sim 750 MeV/ c の運動量領域においてデータが取得された。しかし、シンチレーティングファイバーの読み出しに使用された Image Intensifier Tube に使われている蛍光物質の時定数が長い (数 μ s) ため、ビーム強度は 200 k/spill (1 spill = 2 s) 程度に制限された。また、シンチレーティングファイバーに含まれる炭素が準弾性散乱を起こし大きなバックグラウンドとなってしまった。さらに、オフラインの解析において Σp 散乱イベントを正しく同定するためには Σ の飛程が 5 mm 以上必要であった。これらの理由から、同定された散乱事象は数十イベント程度にとどまった。

このように、過去の実験ではいずれも統計精度の低い結果しか得られておらず、 Σp 散乱実験の難しさを表している。しかしながら、前節で述べたように Σp のチャンネルから得られる情報は多く、バリオン間相互作用の理解を深めるために、より高い統計精度での Σp 散乱の散乱断面積の測定が望まれている。

第2章 J-PARCにおける Σp 散乱実験 (J-PARC E40 実験)

2.1 実験概要と目的

我々は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) において Σp 散乱実験 (J-PARC E40 実験) を計画している [8]。この実験では $\Sigma^+ p$ 及び $\Sigma^- p$ の弾性散乱と $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ の荷電交換反応の微分断面積を 10% 以下の高統計精度で測定することを目指している。 $\Sigma^+ p$ 散乱のチャンネルからは $\Sigma N (I = \frac{3}{2})$ の相互作用において予想されているクォークレベルのパウリ効果による斥力芯の実験的検証が期待される。また、アイソスピンの異なるチャンネルを系統的に調べることで YN 相互作用の理解に重要な情報をもたらすことが期待される。本実験において Σ 粒子は $\pi^\pm + p \rightarrow \Sigma^\pm + K^+$ 反応により生成される。 Σ^+ の生成には運動量が 1.4 GeV/c の π^+ ビームを用い、また Σ^- の生成には運動量が 1.3 GeV/c の π^- ビームを用いる。20 M/spill (1 spill = 2 s) の大強度 π^\pm ビームを用いることで目標の統計精度の達成を目指す。過去の実験で問題となった標的内の炭素に起因するバックグラウンドを避けるため、 Σ 生成及び散乱の標的には液体水素を用いる。

Σp 散乱事象の同定には、従来のイメージング手法ではなく散乱された陽子の飛跡と運動エネルギーを測定し運動学を解く手法をとる。この手法について説明する。 Σ の生成及び散乱の概略図を図 2.1 に示す。まず、ビーム π と散乱 K を標的上流及び下流のスペクトロメータで検出し Σ の生成をタグする。また、この時にビーム π と散乱 K の運動量ベクトルを測定することで、2つの運動量ベクトルの差から生成された Σ の運動量ベクトル \mathbf{P}_Σ を再構成する。次に、生成された Σ によって散乱された陽子の運動エネルギー $E_{p' \text{measure}}$ と飛跡を、標的を覆う円筒型の飛跡検出器及びカロリメータにより測定する。散乱陽子の飛跡と Σ の運動量ベクトル \mathbf{P}_Σ から陽子の散乱角度 θ が計算できる。ここで、相対論における二体の弾性散乱を考え Σp の運動学を仮定することで、散乱陽子の運動エネルギー $E_{p' \text{calc}}$ が計算できる。 $E_{p' \text{calc}}$ は

$$E_{p' \text{calc}} = \frac{2m_p |\mathbf{P}_\Sigma|^2 \cos^2 \theta}{(\sqrt{|\mathbf{P}_\Sigma|^2 + m_\Sigma^2} + m_p)^2 - |\mathbf{P}_\Sigma|^2 \cos^2 \theta} \quad (2.1)$$

と表される。ここで m_Σ 及び m_p はそれぞれの粒子の静止質量である。測定された $E_{p' \text{measure}}$ と計算された $E_{p' \text{calc}}$ から ΔE を

$$\Delta E = E_{p' \text{calc}} - E_{p' \text{measure}} \quad (2.2)$$

と定義する。仮定した運動学が正しい場合 $\Delta E = 0$ となる。この ΔE を評価することで Σp 散乱事象を同定する。

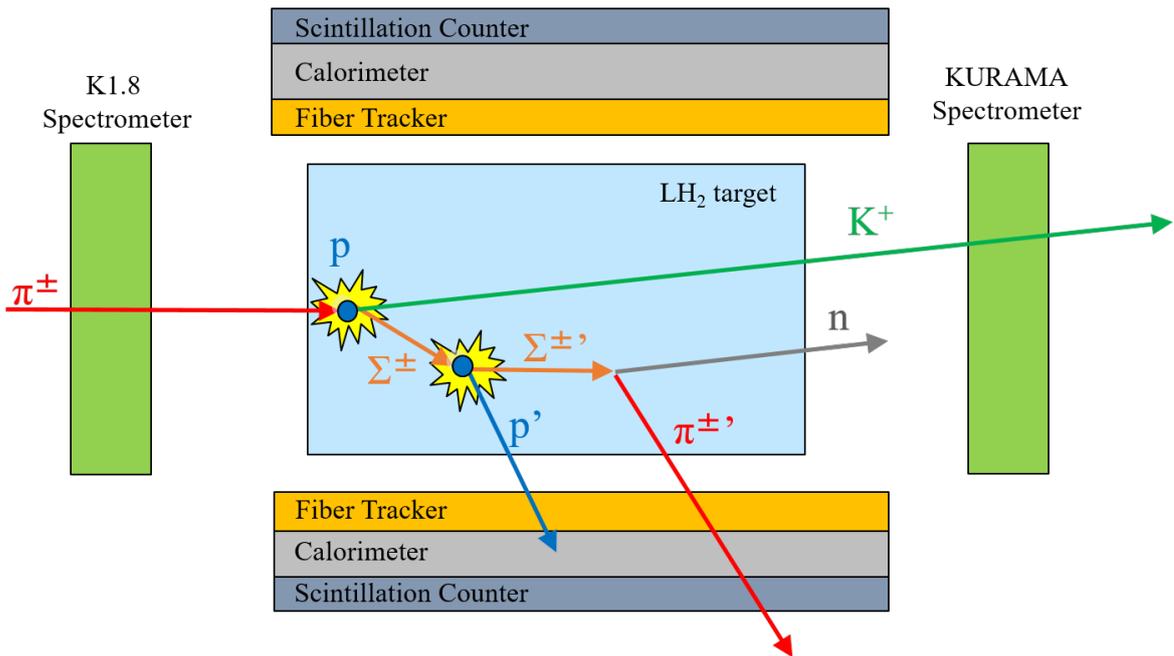


図 2.1: J-PARC E40 実験における Σp 散乱の概略図：ビーム π と標的内の p との反応により Σ が生成され、標的内の別の p と散乱し、やがて崩壊する。

この運動学を用いた手法の利点は2つある。1つ目は検出器が耐えられる範囲でビーム強度を上げることが出来る点である。これにより 20 M/spill という大強度のビームを使用することが可能となる。2つ目は Σ の飛程の長さに制限がなくなる点である。過去の実験では Σp 散乱の同定のために 5 mm 以上の Σ の飛程が必要であったが、J-PARC E40 実験では Σ の飛跡を直接測定する必要がないため、解析上のカットによるイベントのロスを抑えることが出来る。これらの利点から運動学を用いた手法をとることで Σp 散乱の散乱微分断面積を高統計精度で測定することが可能になると期待される。

2.2 実験セットアップ

本実験は、J-PARC ハドロン実験施設の K1.8 ビームラインにおいて行われる。実験のセットアップ全体を図 2.2 に示す。標的には円筒型の容器に入った液体水素を用いる。標的の周りには飛跡検出器、カロリメータ及びシンチレーションカウンターで構成される円筒型の散乱陽子検出器群が設置される。また、標的上流には K1.8 ビームラインスペクトロメータが、下流には KURAMA スペクトロメータが設置される。

2.2.1 液体水素標的

Σ 粒子の生成及び散乱の標的には液体水素を用いる。液体水素は直径 40 mm、長さ 300 mm、厚さ 2.5 mm の円筒型容器に入れ、GM 冷凍機により冷却する。

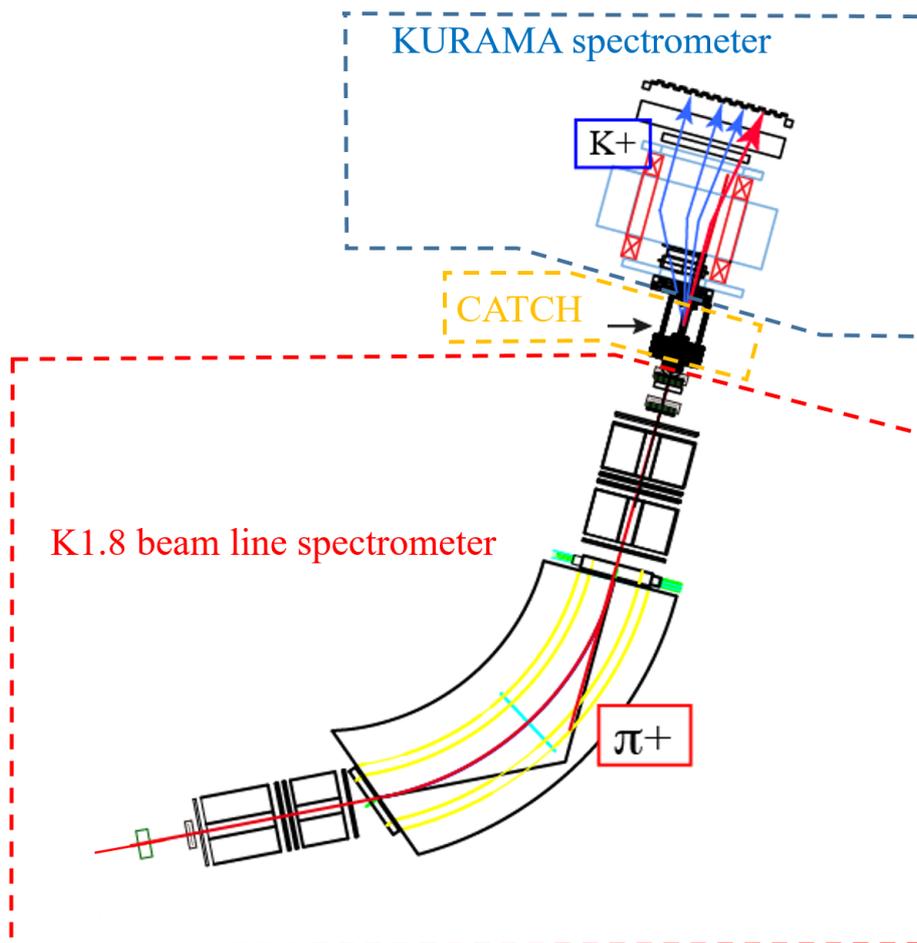


図 2.2: セットアップ全体図

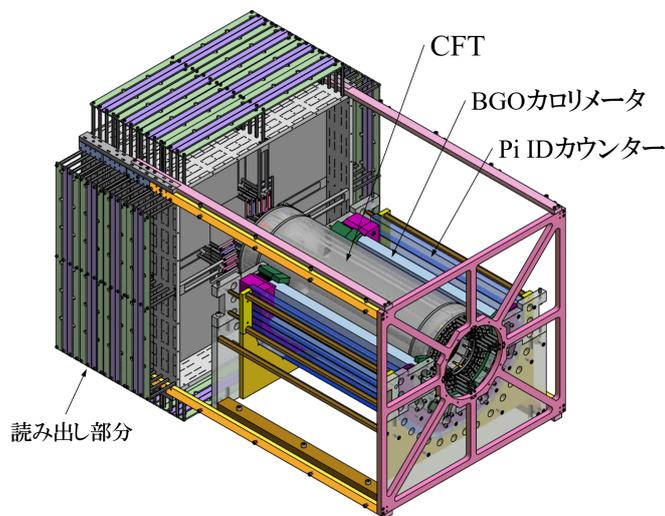


図 2.3: CATCH の 3D モデル : BGO カロリメータと Pi ID カウンターは下半分のセグメントだけが描かれている。

2.2.2 散乱陽子検出器群

標的の周りには円筒型の散乱陽子検出器群 “CATCH (Cylindrical Active Tracker and Calorimeter for Hyperon proton scattering)” が設置される。CATCH は J-PARC E40 実験のために開発するもので、内側から順にファイバートラッカー、BGO カロリメータ及びシンチレーション検出器で構成される。CATCH の 3D モデルを図 2.3 に示す。

- Cylindrical Fiber Tracker (CFT) は Σ 粒子によって散乱される陽子の飛跡を測定するための検出器である。直径 0.75 mm のシンチレーティングファイバーがビーム方向と平行に張られた Φ 層が 4 層、らせん状に張られた u 層及び v 層がそれぞれ 2 層の計 8 層から構成される。ファイバーの総数は 4932 本になり、読み出しには半導体光検出器 (MPPC) を用いる。
- BGO カロリメータは $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 結晶を使用した無機シンチレーション検出器で、散乱陽子の運動エネルギーを測定するために用いる。24 個のセグメントから構成され標的を囲むように配置される。1 つのセグメントに使われている結晶の大きさは、30 mm \times 25 mm \times 400 mm であり、読み出しには光電子増倍管 (PMT) を用いる。
- シンチレーション検出器 (Pi ID カウンター) は CATCH の一番外側に設置され、BGO カロリメータを突き抜ける粒子の検出を行うプラスチックシンチレーション検出器である。散乱陽子検出の際のバックグラウンドの 1 つに Σ 粒子が崩壊した時に発生する π がある。この π は BGO カロリメータではエネルギーを落とし切らずに突き抜けてくるため、この検出器で検出することでバックグラウンドを減らすことが出来る。34 個のセグメントから構成され標的を囲むように配置される。プラスチックシンチレータに波長変換ファイバーが埋め込まれた構造を持ち、シンチレーション光の読み出しには MPPC を用いる。

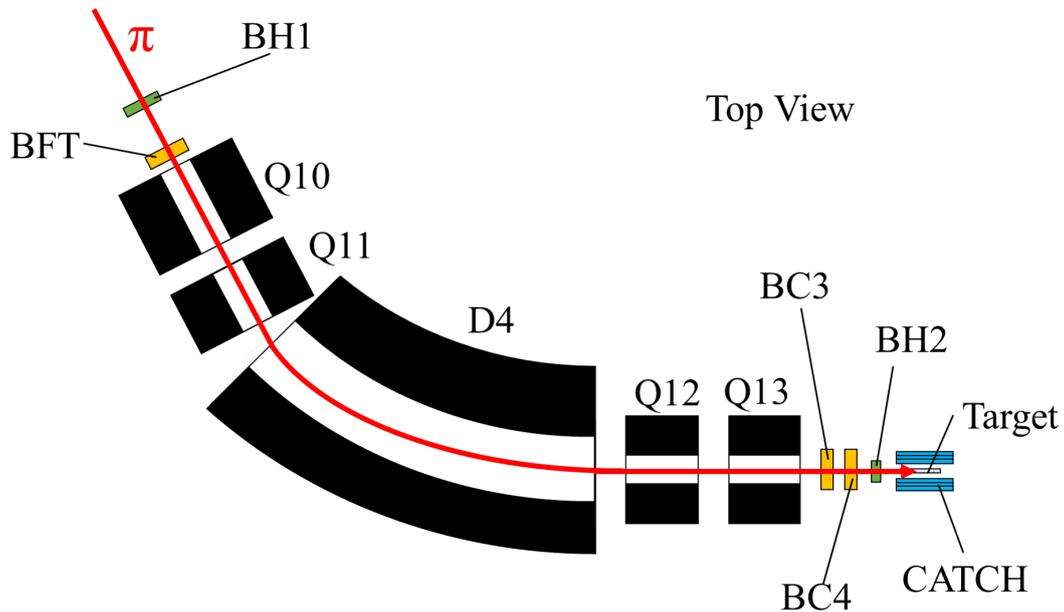


図 2.4: 標的上流の検出器

2.2.3 K1.8 ビームラインスペクトロメータ

K1.8 ビームラインスペクトロメータは標的の上流に設置され、ビーム粒子の粒子識別と運動量の測定を行う。K1.8 ビームラインスペクトロメータは、4 台の四重極電磁石 (Q10, 11, 12, 13) と 1 台の双極偏向電磁石 (D4) により QQDQQ の光学系を形成するマグネット群と、その前後に設置される 2 台のホドスコープ (BH1, BH2)、2 台の MWDC (BC3, BC4) 及びファイバートラッカー (BFT) で構成される (図 2.4)。これらの検出器のうち BFT 以外は K1.8 ビームラインに常設されている既存の検出器である [9]。J-PARC E40 実験においてもこれらの検出器を使用する。

トリガーカウンター

マグネットの上流側に設置された BH1 と下流側に設置された BH2 によりオンラインのビームトリガーを生成する。また、オフラインの解析においてこの 2 台のホドスコープの時間情報を用いてビーム粒子の飛行時間を測定することで粒子識別を行う。

- Beam Hodoscope 1 (BH1) は 11 個のセグメントから構成されるプラスチックシンチレーション検出器である。各セグメントは不感領域をなくすため 1 mm のオーバーラップを持たせて互い違いに並んでいる。シンチレーション光は上下の 2 面からアクリルライトガイドを通して PMT で読み出す。
- BH2 は 8 個のセグメントから構成されるプラスチックシンチレーション検出器である [10]。各セグメントはオーバーラップなく横一列に並んでおり、シンチレーション光は上下の 2 面からアクリルライトガイドを通して PMT で読み出す。

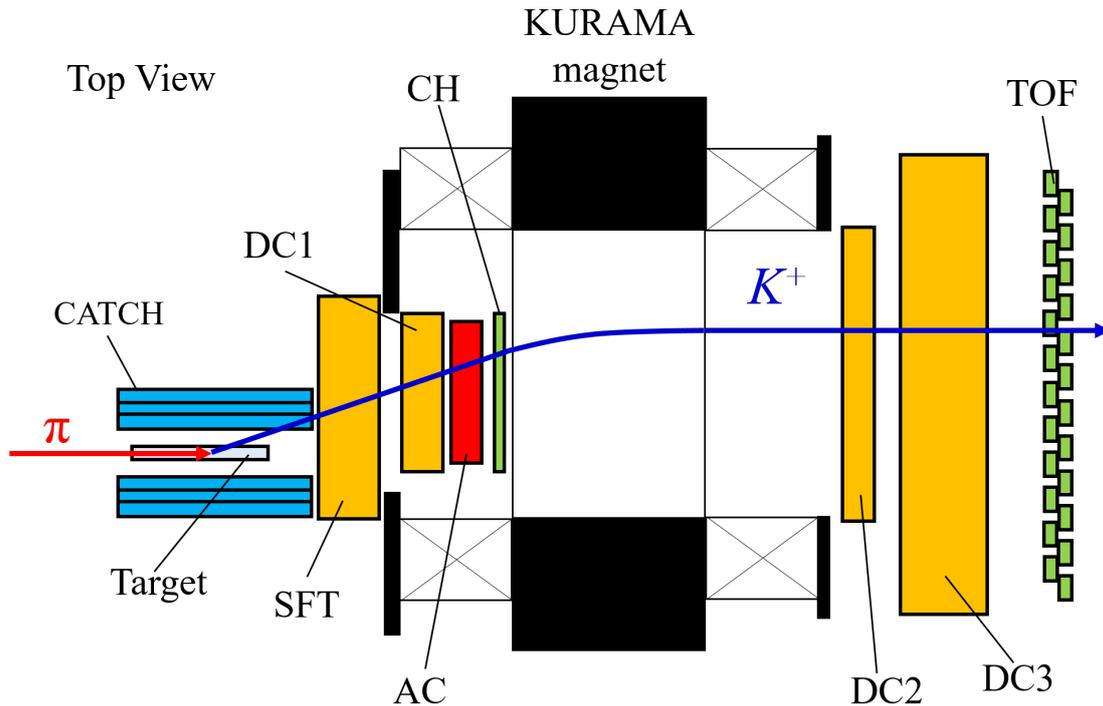


図 2.5: 標的周辺及び下流の検出器

ビームライン飛跡検出器

ビームライン飛跡検出器はビーム粒子の位置情報を取得するために用いる。オフライン解析において、マグネット上流側にある BFT と下流側にある BC3 及び BC4 でマグネット前後の粒子の位置を測定し、飛跡を再構成することでビーム粒子の運動量を求める。

- Beamline Fiber Tracker (BFT) は大強度ビーム環境下において安定に動作することを目的として J-PARC E40 実験のために開発された飛跡検出器である [11]。直径 1 mm のシンチレーティングファイバーを鉛直方向に 160 本並べた面が 2 つあり、不感領域をなくすために互い違いになるように重ね合わせた構造をしている。K1.8 ビームラインスペクトロメータの最上流において、一次元の位置情報を取得する。シンチレーティングファイバーの読み出しには MPPC を用いる。
- Beamline Chamber 3 及び 4 (BC3, BC4) は 6 層 (x, x', u, u', v, v') で構成される Multi-Wire Drift Chamber (MWDC) である。BC3 は上流側から $xx'vv'uu'$ の順の構成となっており、BC4 は $uu'vv'xx'$ の順である。直径 $15 \mu\text{m}$ のセンスワイヤーが 3 mm 間隔で張られており、 u 層は x 層に対して -15° 、 v 層は x 層に対して 15° 傾けてある。 xx', uu', vv' の組み合わせをペアプレーンと呼び、ワイヤーの左右どちらを粒子が通過したかを判別するために、 x', u', v' 層は x, u, v 層に対してワイヤー間隔の半分である 1.5 mm ずらしてワイヤーが張られている。

2.2.4 KURAMA スペクトロメータ

KURAMA スペクトロメータは標的の下流に設置され、生成粒子の粒子識別と運動量の測定を行っている。KURAMA マグネットと、その上流側に設置されるファイバートラッカー (SFT)、MWDC (DC1)、エアロゲルチェレンコフ検出器 (AC 検出器) 及びホドスコープ (CH) と、下流側に設置される2台の MWDC (DC2, DC3) 及び飛行時間カウンター (TOF) で構成される (図 2.5)。

トリガーカウンター

マグネット上流側の CH と KURAMA スペクトロメータ最下流の TOF によりオンラインの散乱粒子のトリガーを生成する。また、オフライン解析において TOF と前述の BH2 で飛行時間を測定することにより散乱粒子の粒子識別を行う。AC 検出器は散乱 K^+ を測定する際のバックグラウンドとなる散乱 π のイベントをオンラインで除去するために用いる。

- Charge Hodoscope (CH) は 64 個のセグメントで構成されるプラスチックシンチレーション検出器である [12]。1 つのセグメントは、11.5 mm × 450 mm × 2 mm のプラスチックシンチレータに直径 1 mm の波長変換ファイバーを埋め込んだ構造をしている。読み出しには MPPC を用いる。不感領域をなくするために各セグメントは 1 mm のオーバーラップを持たせて互い違いに並んでいる。
- Time-Of-Flight wall (TOF) は 24 個のセグメントで構成されるプラスチックシンチレーション検出器である。1 つのセグメントの大きさは、80 mm × 1800 mm × 30 mm で、シンチレーション光は上下の面からアクリルライトガイドで集め PMT で読み出す。不感領域をなくするために各セグメントは 5 mm のオーバーラップを持たせて互い違いに並んでいる。
- Aerogel Čerenkov counter (AC 検出器) は本研究にて開発する J-PARC E40 実験のための粒子識別用検出器であり、散乱 K^+ とバックグラウンドとなる πp の弾性散乱及び非弾性散乱による散乱 π の識別に用いる。詳しくは第 3 章で述べる。

散乱粒子飛跡検出器

散乱粒子飛跡検出器は標的の下流での粒子の位置を測定するために用いる。オフライン解析において、KURAMA マグネット上流での散乱粒子の位置を SFT と DC1 で、下流での位置を DC2 と DC3 で測定し、飛跡を再構成して散乱粒子の運動量を求める。

- Scattered Fiber Tracker (SFT) は J-PARC E40 実験のために開発された飛跡検出器である。直径 1 mm のシンチレーティングファイバーが鉛直方向に並べられた x 層と、直径 0.5 mm のシンチレーティングファイバーが左右にそれぞれ 45° 傾けて並べられた u 層及び v 層の計 3 層から構成される。各層のファイバーの張り方は BFT と同様で互い違いに並べられており、ファイバーの数は x 層が 512 本、 u 層と v 層がそれぞれ 480 本である。読み出しには MPPC を用いており、 x 層はファイバー 1 本につき 1 つの MPPC、 u 層と v 層はファイバー 3 本につき 1 つの MPPC で読み出しを行っている。

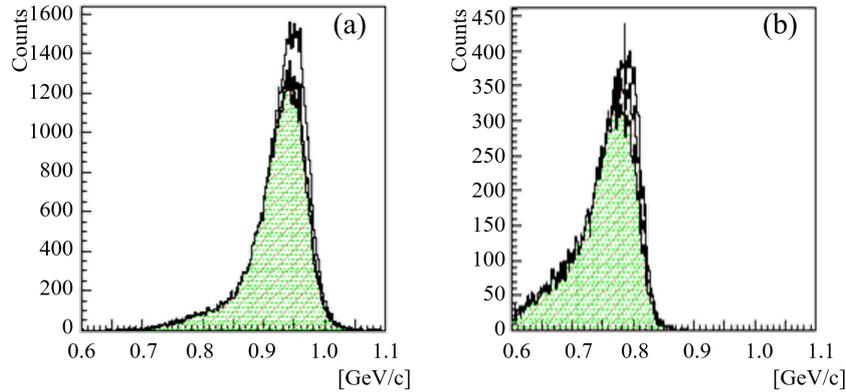


図 2.6: 予想される K^+ の運動量分布 [14]: (a) が Σ^+ 生成の場合、(b) が Σ^- 生成の場合である。白抜きのはistogramが KURAMA スペクトロメーターの角度及び運動量アクセプタンスを考慮した分布、斜線のはistogramがトリガーの効率を考慮した分布、緑色の histogram が DC1 の大強度ビーム対策の効果を考慮した分布である。

- Drift Chamber 1 (DC1) は 6 層 ($xx'uu'vv'$) で構成される MWDC である。ワイヤー間隔は 6 mm である。BC3, BC4 と同様に u 層は x 層に対して -15° 、 v 層は x 層に対して $+15^\circ$ 傾けてワイヤーが張られており、 x', u', v' 層は x, u, v 層に対してワイヤー間隔の半分である 3 mm ずらしている。
- DC2, DC3 は 4 層 ($xx'yy'$) で構成される MWDC である。ワイヤー間隔は 9 mm である。DC1 と同様に x', y' 層は x, y 層に対してワイヤー間隔の半分である 4.5 mm ずらしている。

2.2.5 大強度ビーム対策

J-PARC E40 実験では高統計精度の測定を実現するために、20 M/spill の大強度 π ビームを使用する。標的の下流では、その大強度ビームがバックグラウンドとなるため、いくつかの検出器はその対策が必要である。

まず、トリガー検出器である CH と TOF について、CH はビームが直接当たるセグメントをトリガーに参加させずに運用する。TOF はビームが直接当たる領域のプラスチックシンチレータをアクリルに置き換えることで不感領域とする。

また、標的の下流の KURAMA マグネット上流側に設置される DC1 は大強度ビーム対策としてビームが直接当たる領域を不感状態にする。この対策が取得出来る Σ 生成イベント数 (K^+ イベント数) に与える影響はシミュレーションにより見積もられている [14]。図 2.6 に予想される K^+ の運動量分布を示す。(a) が Σ^+ 生成の場合、(b) が Σ^- 生成の場合である。白抜きのはistogramが KURAMA スペクトロメーターの角度及び運動量アクセプタンスを考慮した分布、斜線のはistogramがトリガーの効率を考慮した分布、緑色の histogram が DC1 の大強度ビーム対策の効果を考慮した分布である。DC1 の大強度ビーム対策が取得される K^+ イベント数に与える影響は 3%程度と見積もられた。

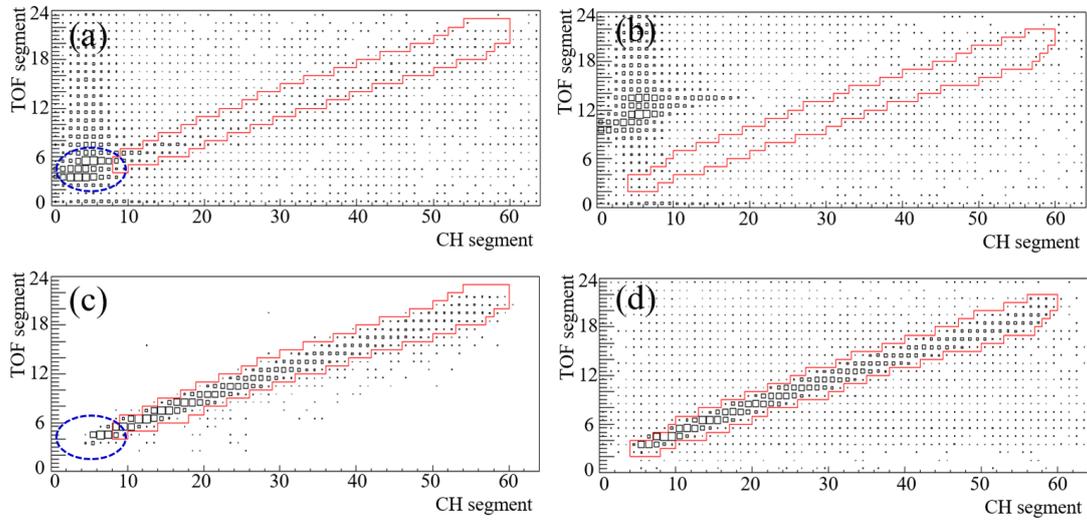


図 2.7: CH と TOF のヒットセグメントの相関図 [14] : (a) が Σ^+ 生成の場合のビーム π 由来のバックグラウンドイベントに対する相関、(b) Σ^- 生成の場合のビーム π 由来のバックグラウンドイベントに対する相関、(c) が Σ^+ 生成の場合の K^+ のイベントに対する相関、(d) が Σ^- 生成の場合の K^+ のイベントに対する相関である。横軸は CH のセグメント、縦軸は TOF のセグメントである。赤線で囲まれた領域が CH-TOF Matrix trigger のアクセプトウィンドウである。 Σ^+ 生成の場合、 K^+ のイベント領域の一部がバックグラウンドの領域と重なるため (青破線で囲んだ領域)、アクセプトウィンドウを小さくしている。

2.3 トリガーロジック

高統計精度での測定のためには効率良くバックグラウンドを減らすトリガーロジックを構築しデータ収集効率を向上する必要がある。ここでは予定されている散乱粒子のトリガーロジックについて説明する。散乱粒子のトリガーに関わる検出器は SFT、CH、AC 及び TOF である。これらの検出器を用いた複数のトリガーを組み合わせることで全体のトリガーロジックを構築する。

- CH-TOF Matrix trigger

KURAMA マグネットの前後にある CH と TOF のヒットセグメントを選択することにより CH-TOF Matrix trigger を生成する。このトリガーによりオンラインレベルでラフに運動量の選択を行う。図 2.7 にビーム π 由来のバックグラウンドと Σ 生成の場合の CH と TOF のヒットセグメントの相関を示す。(a) が Σ^+ 生成の場合のビーム π 由来のバックグラウンドイベントに対する相関、(b) Σ^- 生成の場合のビーム π 由来のバックグラウンドイベントに対する相関、(c) が Σ^+ 生成の場合の K^+ のイベントに対する相関、(d) が Σ^- 生成の場合の K^+ のイベントに対する相関である。 Σ^+ 生成の場合、 K^+ のイベント領域の一部がバックグラウンドの領域と重なるため (青破線で囲んだ領域)、アクセプトウィンドウを小さくしている。

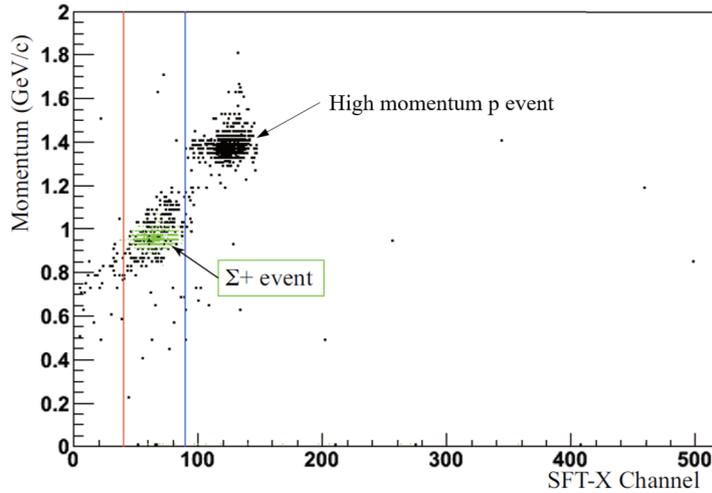


図 2.8: SFT の x 層のヒットチャンネルと散乱粒子の運動量の相関 [14]: この図では TOF のセグメント 7 と CH のセグメント 14 のヒットコンビネーションを選んでいる。横軸が SFT の x 層のチャンネル、縦軸が散乱粒子の運動量である。緑の点が Σ 生成のイベント、黒の点がバックグラウンドのイベントである。2 本の縦線の間がこの TOF と CH のヒットコンビネーションにおける SFT trigger のアクセプトウィンドウで、1.4 GeV/ c 周辺の高運動量の p が除去できる。

- AC veto
AC 検出器によりバックグラウンドとなる πp の弾性散乱及び非弾性散乱による散乱 π を検出し Veto 信号を生成することで、バックグラウンドイベントを除去する。
- SFT trigger
CH と TOF のヒットセグメントの選択に SFT の x 層のヒットチャンネルの情報を加えた 3 次元でマトリックストリガーを構築する。この SFT trigger により、散乱粒子の運動量をより厳しく選択することができる。特に高運動量の p の排除に有効である。図 2.8 に TOF のセグメント 7 と CH のセグメント 14 のヒットコンビネーションを選んだ場合の SFT の x 層のヒットチャンネルと散乱粒子の運動量の相関を示す。横軸が SFT の x 層のチャンネル、縦軸が散乱粒子の運動量である。緑の点が Σ 生成のイベント、黒の点がバックグラウンドのイベントである。2 本の縦線の間がこの TOF と CH のヒットコンビネーションにおける SFT trigger のアクセプトウィンドウで、1.4 GeV/ c 周辺の高運動量の p が除去できる。
- TOF ΔE trigger
TOF 検出器信号の波高情報を利用して粒子を識別する。図 2.9 に散乱粒子の TOF 検出器におけるエネルギー損失を示す。 K^+ とバックグラウンドである陽子のイベントを分けるために $\Delta E=9$ MeV(図中の赤線)に相当する閾値を設定しオンラインで p イベントを除去する。

以上のトリガーを組み合わせて 1st level trigger を生成する。このトリガーにより、各検

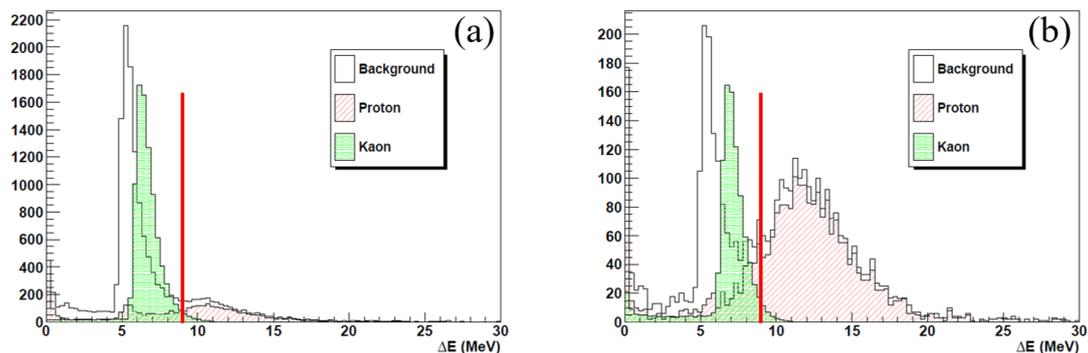


図 2.9: 散乱粒子の TOF におけるエネルギー損失 [14]: (a) が Σ^+ 生成の場合で (b) が Σ^- 生成の場合である。 $\Delta E = 9$ MeV (赤線) に相当する閾値を設定しオンラインで陽子のイベントを除去する。

出器の信号の Analog/Digital (A/D) 変換を開始する。そして、TOF 検出器の TDC 情報を用いた Mass trigger によりそのイベントをアクセプトするかクリアするかを決定する。1st level trigger は常に Veto されているが、Mass trigger によりアクセプトされた場合は Veto をやめてデータ取得が行われる。クリアされた場合は、1st level trigger がそのまま Veto され、すべての A/D 変換をキャンセルする。

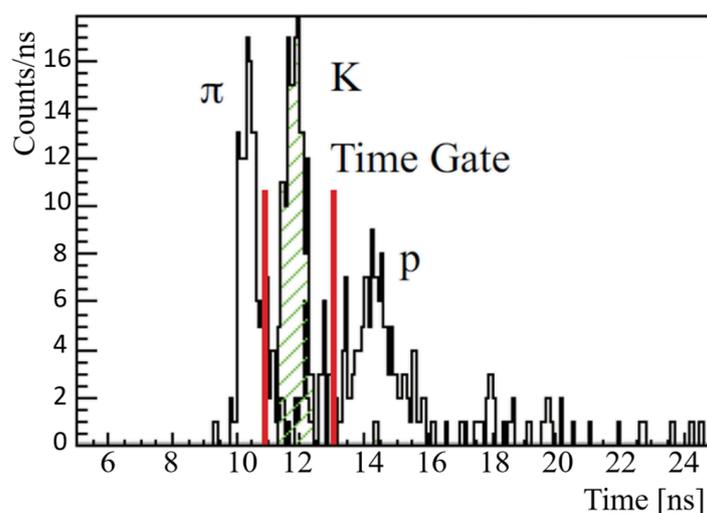


図 2.10: 各散乱粒子の TDC 分布 [14]: この図では TOF のセグメント 5 と CH のセグメント 9 のヒットコンビネーションを選んでいる。横軸は時間で表している。赤線のようなタイムゲートを設定することで K^+ のイベントを選択する。

- Mass trigger (2nd level trigger)
CH と TOF のヒットセグメントの選択に加え、TOF の TDC 情報を利用して飛行時間から散乱粒子の質量を選択する。高運動量の p の速度は K^+ の速度に近い

表 2.1: シミュレーションにより予測されるトリガーレート

	Σ^- production	Σ^+ production
CH and TOF Hit	520 kHz	530 kHz
+ CH-TOF Matrix trigger	23 kHz	64 kHz
+ AC veto	15 kHz	14 kHz
+ SFT trigger	7.9 kHz	8.3 kHz
+ TOF ΔE (1st level trigger)	1.1 kHz	2.4 kHz
+ Mass trigger (2nd level trigger)	212 Hz	745 Hz
Σ production	88 Hz	340 Hz
Total 2nd level trigger Rate	300 Hz	1085 Hz

が、前述の SFT trigger によりそのような p は除去されているためこのトリガーが効果的である。図 2.10 に TOF のセグメント 5 と CH のセグメント 9 のヒットコンビネーションを選んだ場合の各散乱粒子の TDC 分布を示す。赤線のようなタイムゲートを設定することで K^+ のイベントを選択する。

トリガーロジックの目標は、2nd level trigger のレートを 1 kHz 程度にすることである。Geant4 を用いた Monte Carlo シミュレーションによりトリガーロジックの各段階におけるトリガーレートが見積もられている [14]。予測される π ビーム由来のバックグラウンドイベントと Σ 生成イベントのトリガーレートを表 2.1 に示す。ここでは AC 検出器の検出効率を 98% と仮定している。上記のようなトリガーロジックを構成することで、 Σ^- 生成の場合と Σ^+ 生成の場合のどちらにおいても 2nd level trigger のレートを 1 kHz 程度に出来ると見積もられている。

2.4 本研究の目的

J-PARC E40 実験では非常に大強度のビームを使用するため、その環境に耐えうる検出器が必要である。J-PARC E40 実験用として新たに開発する検出器は BFT、SFT、CATCH 及び AC 検出器である。このうち BFT と SFT は開発が完了し、既に K1.8 ビームラインにおいて運用されている。CATCH の開発もおおむね完了している。従って、J-PARC E40 実験実現のために開発が必要な検出器は AC 検出器だけである。

本研究では、J-PARC E40 実験用のエアロゲルチェレンコフ検出器の開発と運用方法 (トリガー生成回路、ゲイン及び閾値の設定) についての考察を行う。開発に関しては、3 章でエアロゲルチェレンコフ検出器の原理や基本的なデザインを説明し、4 章で試作機の性能評価について述べ、5 章で実機の性能評価について述べる。運用方法に関しては、6 章でシミュレーションにより J-PARC E40 実験における AC 検出器の性能の見積もりを行った後、最適なトリガー生成回路の構成、ゲインの設定、閾値の設定について考察する。

第3章 エアロゲルチェレンコフ検出器 (AC検出器)

3.1 チェレンコフ検出器

3.1.1 チェレンコフ放射

荷電粒子が誘電体を通過する際、荷電粒子の速度がその誘電体中での光速度を超えている場合に光が発生する。この現象をチェレンコフ放射 (Čerenkov radiation) といい、発生する光をチェレンコフ光と呼ぶ。この現象は1934年にパーヴェル・チェレンコフによって発見され、その後イリヤ・フランクとイゴール・タムにより原理が解明された。

荷電粒子が絶縁された誘電体を通過すると、誘電体の原子中の電子が乱され偏極が生じる。この偏極が元に戻る際に電磁波が放出される。荷電粒子の速度が小さい場合、放出された電磁波は微弱なため検出はされない。しかし、荷電粒子の速度が誘電体内での光速度より大きい場合、電磁波は互いに干渉し強め合うため光として検出される。誘電体の屈折率を n とすると、誘電体内における光速度は $\frac{c}{n}$ である。荷電粒子の速度を βc とするとチェレンコフ光が発生する条件は

$$\beta c > \frac{c}{n} \quad (3.1)$$

と表される。チェレンコフ光が放出される角度 θ は

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (3.2)$$

となり、この角度に円錐状に放出される。チェレンコフ放射の様子を図3.1に示す。また、単位長さあたりに放出される光子の数 N は

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= 2\pi\alpha z^2 \sin^2 \theta \int \frac{d\lambda}{\lambda^2} \\ &= 2\pi\alpha z^2 \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \int \frac{d\lambda}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

と表される。ここで α は微細構造定数、 z は荷電粒子の電荷、 λ は光子の波長である。

3.1.2 閾値型チェレンコフ検出器

チェレンコフ検出器はチェレンコフ放射の原理を利用した粒子識別をするための検出器であり高エネルギー実験において使用される。チェレンコフ検出器は、閾値型とリングイメージ型に分けられるが本研究で開発するチェレンコフ検出器は閾値型である。閾値型チェレンコフ検出器は、放出されるチェレンコフ光の量により粒子識別を行うものである。

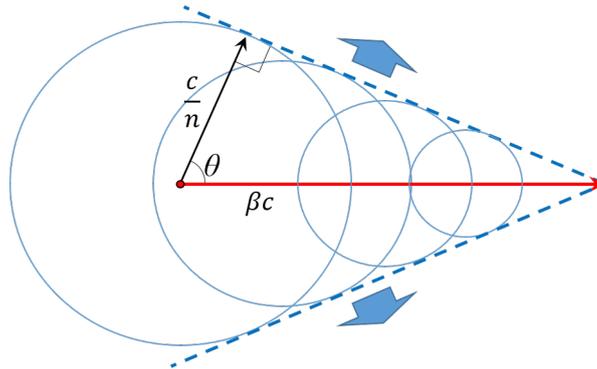


図 3.1: チェレンコフ放射の様子：赤い点が荷電粒子、円が放出される電磁波の波面を表している。発生した電磁波は干渉し強め合うため光として検出される（破線）。

表 3.1: チェレンコフ検出器の輻射体の例

物質	状態	屈折率	β 発光閾値
水	液体	1.33	0.752
ガス (N_2, C_4F_{10} 等)	気体	1.0003 - 1.0010	0.9990 - 0.9997
シリカエアロゲル	固体	1.01 - 1.20	0.833 - 0.990

チェレンコフ光の発生条件は式 (3.1) から通過する輻射体の屈折率によって決まることが分かる。そのため、適当な輻射体を選択すればチェレンコフ光の有無で速度の異なる荷電粒子を識別することが可能となる。閾値型チェレンコフ検出器では検出されるチェレンコフ光の量が重要となる。発生したチェレンコフ光は検出器内で反射や散乱、吸収されながら最終的に光電子増倍管などの光検出器で電気信号として読み出される。チェレンコフ光が吸収されずに光検出器まで到達する効率を $T(\lambda)$ 、光子から電気信号への変換効率を $Q(\lambda)$ とすると、式 (3.3) より実際に検出される光子の数 N_{det} は

$$N_{det} = 2\pi\alpha z^2 L \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{T(\lambda)Q(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda \quad (3.4)$$

となる。ここで L は輻射体の中を荷電粒子が通過する距離、 λ_{min} と λ_{max} は光検出装置において検出できる波長の下限と上限である。この N_{det} を多くすることが、閾値型チェレンコフ検出器の性能に関わってくる。

3.1.3 輻射体

チェレンコフ検出器の輻射体として使われる物質の条件は、検出したい粒子の速度に応じた屈折率を持つことと、発生したチェレンコフ光が光検出器まで到達するために透明度が高いことである。この条件を満たす様々な液体、気体、固体が高エネルギー実験で使用されている。輻射体として使用される物質の例を表 3.1 に示す。

本研究で開発するチェレンコフ検出器の輻射体にはシリカエアロゲルを使用する。シリカエアロゲルは二酸化ケイ素の3次元骨格をもち、90%以上の空気を含む固体の物質である。そのままでは吸湿によりすぐに劣化してしまうが、化学的に疎水処理を施すことにより安定させることができる。透明度が高く気体と液体の中間の屈折率を持つため高エネルギー実験においてチェレンコフ検出器の輻射体として利用されている。また、密度が低く、断熱性が非常に優れているため高性能な断熱材としても利用される。

3.2 AC 検出器の基本デザイン

3.2.1 AC 検出器の役割と要求性能

J-PARC E40 実験における AC 検出器は、標的の下流、KURAMA マグネット直前に設置されるトリガー検出器である。 Σ 生成をタグするための散乱 K^+ 測定の際にバックグラウンドとなる πp の弾性散乱及び非弾性散乱による散乱 π のイベントをオンラインレベルで除去することが目的である。2.3 節で述べたように J-PARC E40 実験では 20 M/spill 大強度ビームを使用するため、最適なトリガーロジックによって効率の良いデータ取得を行うことが重要である。2nd level trigger のレートを 1 kHz 以下にするというトリガーロジックの目標を達成するために AC に要求される性能は、高レート環境下において散乱 π の検出効率が 98% 以上となることである。

3.2.2 光電子増倍管 (PMT)

今回の AC 検出器では、チェレンコフ光の読み出しに光電子増倍管 (PMT) を使用する。しかし、AC 検出器は KURAMA マグネットの直前に設置されるため漏れ磁場の影響を受ける。そのため、ラインフォーカス型の PMT ではなく、磁場耐性のあるファインメッシュ型の PMT を使用する。

本検出器には、浜松ホトニクス製のファインメッシュ型 PMT (R6682) を 12 個使用する。この PMT は過去に Belle 実験で使用されたものである [15]。PMT の基本的な情報を表 3.2 に示す。また、PMT の写真及びファインメッシュ型 PMT の構造を図 3.2 に示す。(a) はファインメッシュ型 PMT の構造を表している。入射窓から入射した光子は光電面で光電効果により電子をたたき出す。この電子は電場により加速され第 1 ダイノードにぶつかり複数の電子をたたき出す。この増幅過程をダイノードの数だけ繰り返して最終的に陽極から電流として取り出される。(b) は 1 段のダイノードにおける増幅の模式図である。ダイノードにぶつかり増幅された電子は格子の隙間から次のダイノードへ向かう。

光電面に入射した光子が光電効果により電子に変換される効率を量子効率と呼ぶ。この量子効率は式 (3.4) における $Q(\lambda)$ に対応し検出器の性能に大きくかかわっている。バイアルカリ光電面における量子効率を図 3.3 に示す。400 nm のあたりが最大で、30% 程度である。

ラインフォーカス型の PMT では、磁場の影響を受けダイノード間での光電子の軌道が変わると次のダイノードに到達する確率が下がり、結果として増幅率が下がってしまう。一方、ファインメッシュ型 PMT では、その構造から光電子の軌道が多少曲がっても次の

表 3.2: 使用する PMT の情報

型番	R-6682
直径	2.5 inch
ダイノード段数	19
入射窓	ホウケイ酸ガラス
光電面	バイアルカリ

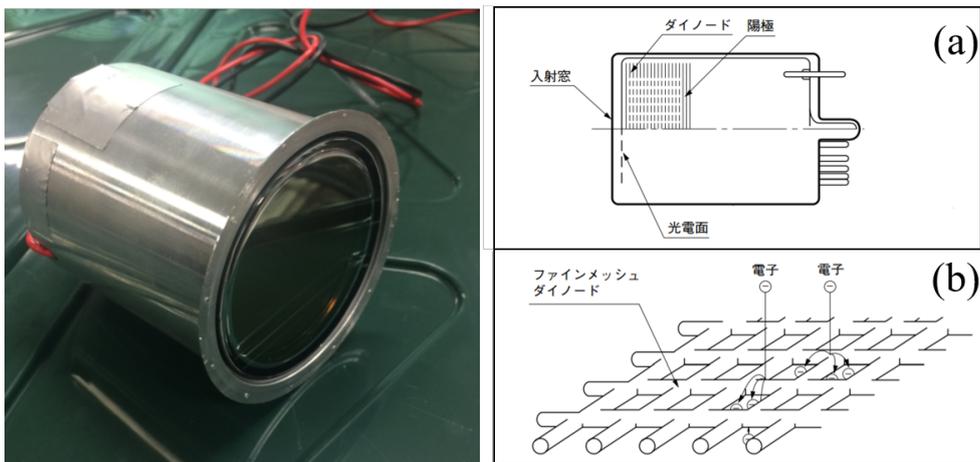


図 3.2: 本研究で使用するファインメッシュ型 PMT の写真及び構造の模式図：(a) はファインメッシュ型 PMT の構造を表している。入射窓から入射した光子は光電面で光電効果により電子をたたき出す。この電子は電場により加速され第 1 ダイノードにぶつかり複数の電子をたたき出す。この増幅過程をダイノードの数だけ繰り返して最終的に陽極から電流として取り出される。(b) は 1 段のダイノードにおける増幅の模式図である。ダイノードにぶつかり増幅された電子は格子の隙間から次のダイノードへ向かう。

ダイノードに到達できるため磁場中でも増幅率を保つことができる。J-PARC E40 実験のセットアップで AC 検出器の位置における漏れ磁場の強さは ~ 0.3 T である。図 3.4 に 19 段ダイノードのファインメッシュ型 PMT の磁場特性を示す。想定される磁場 0.3 T におけるゲインの減少は 10% 以下である。

3.2.3 AC 検出器のサイズ要求と大強度ビーム対策

AC 検出器は標的の下流、KURAMA マグネットの直前に設置されるが、この場所はすでに KURAMA マグネットのエンドガードの内側である。エンドガードの内側には AC 検出器の他に CH も設置されるため、AC 検出器が設置できる空間が限られている。特にビーム方向は 100 mm 程度に制限されている。よって、AC 検出器のサイズはこの設置スペース制限と KURAMA スペクトロメータのアクセプタンスによって決まる。これらの条件から決定した AC 検出器の基本的なサイズは、480 mm \times 400 mm \times 80 mm である。

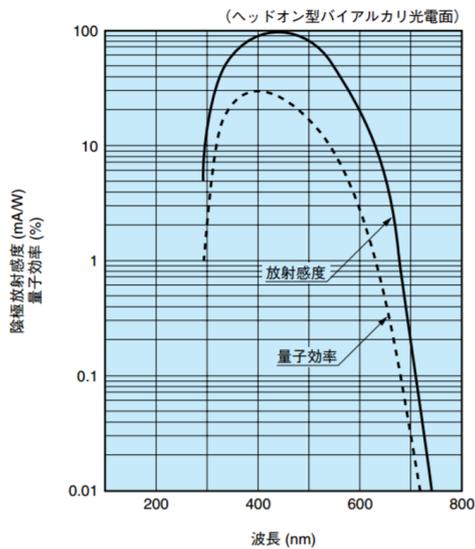


図 3.3: バイアルカリ光電面における放射感度と量子効率 [16]: 放射感度は発生する電流を入射光のエネルギーで割った値である。量子効率は発生光電子数を入射光子数で割った値である。

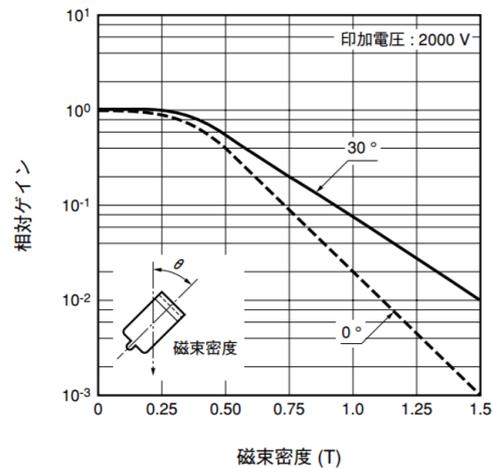


図 3.4: 19 段ダイノードのファインメッシュ型 PMT の磁場特性 [16]: 想定される磁場 0.3 T におけるゲインの減少は 10% 以下である。

今回開発する AC 検出器には高レート環境下でも正常に動作することが求められる。PMT は高いレートにおいてはダイノード間の電流により電圧が下がり、その結果増幅率が下がってしまう。したがって、PMT のレートが高くなり過ぎないようにする必要がある。そのために基本デザインとして 2 つの大強度ビーム対策を検討する。AC 検出器の基本的な構造及びサイズを図 3.5 に示す。

1 つ目の対策は、ビームが直接当たる領域に穴を作ることである。標的で反応せずに突き抜けてくる π ビームのレートは非常に高いため PMT に大きな負担がかかる。これを避けるため、ビームが直接当たる領域には穴をあける。この対策は、AC 検出器ではビーム π の除去をしないことを意味しているが、 π^- ビームの場合は反応せずに突き抜けたビームは KURAMA マグネットにより散乱 K^+ とは逆方向に曲げられトリガーを生成している TOF のアクセプタンス外へ飛んでいくため問題にならない。一方、 π^+ ビームの場合は散乱 K^+ と同じ方向に曲げられるが、トリガー検出器である CH と TOF に前述の大強度ビーム対策を行うためトリガーは生成されない。

2 つ目の対策は、AC 検出器を 4 つのセグメントに分けることである。4 つの独立したセグメントに分けることにより 1 つの PMT にかかる負担を減らすことが出来る。各セグメントを図 3.5 の様に Room1, Room2, Room3, Room4 と名付ける。各セグメントの大きさはシミュレーションによる AC 検出器の位置における散乱 π の想定レートと PMT の大きさによって決定した。想定レートを表 3.3 に示す。ビーム中心に近い Room1 及び Room2 が最もレートが高くなっている。従って、300 kHz の環境下で目的の性能を達成する必要がある。

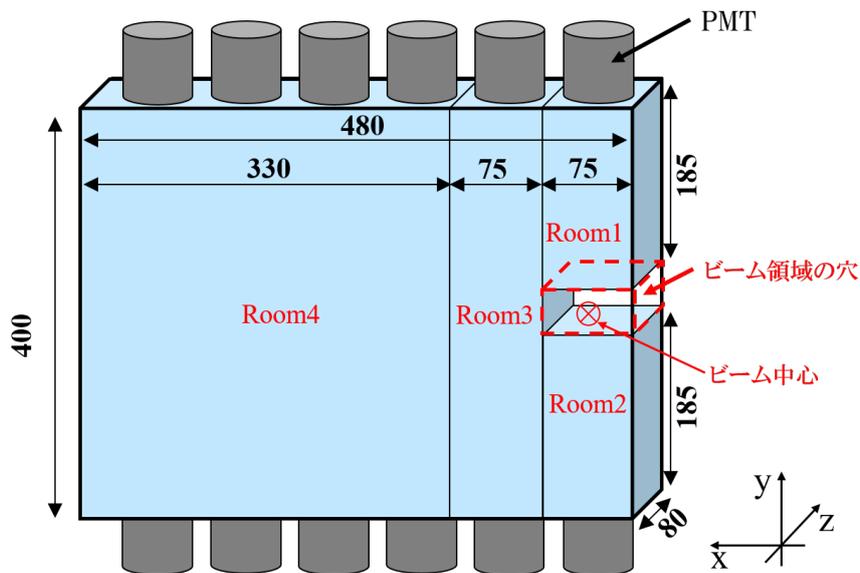


図 3.5: AC 検出器の基本デザイン

表 3.3: AC 検出器の各セグメントにおける散乱 π の想定レート

セグメント	想定レート
Room1	300 kHz
Room2	300 kHz
Room3	250 kHz
Room4	40 kHz

3.2.4 シリカエアロゲル

本研究の AC 検出器で使用するシリカエアロゲルは、千葉大学理学研究科宇宙線物理学研究室に製造を依頼した。この研究室では高エネルギー実験用エアロゲルの研究開発をしており、高い透明度を持つエアロゲルを製造することが可能である。また、疎水処理に使用する化学物質の違いにより、通常（ノーマル）タイプと高透明度（クリア）タイプの 2 種類のエアロゲルを選択できる。クリアタイプはノーマルタイプと比べ透明度が高いが、製造の歩留まりが悪いという欠点を持つ。図 3.6 にノーマルタイプ及びクリアタイプのエアロゲルの写真を示す。

AC 検出器で識別したい粒子は散乱 π^\pm ($\sim 1.4 \text{ GeV}/c$) と散乱 K^+ ($\sim 1 \text{ GeV}/c$) である。そのため π ではチェレンコフ光が発生し、 K では発生しないような屈折率を選択する必要がある。 π と K の運動量の発光閾値と屈折率の関係を図 3.7 に示す。各粒子の曲線より上側の屈折率であるとチェレンコフ光が発生し、曲線から離れるほど発光量は多くなる。丸で囲った領域が識別したい π と K^+ の運動量領域である。散乱 K^+ では発光せず、かつ散乱 π の発光量が最大になるようにしたいため、屈折率 1.10 のエアロゲルを使用する。

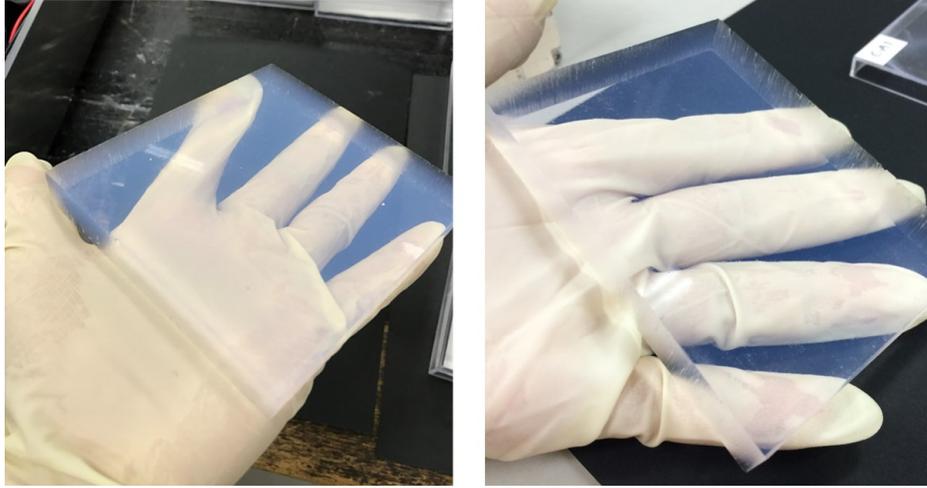


図 3.6: シリカエアロゲルの写真:左がノーマルタイプ、右がクリアタイプ。

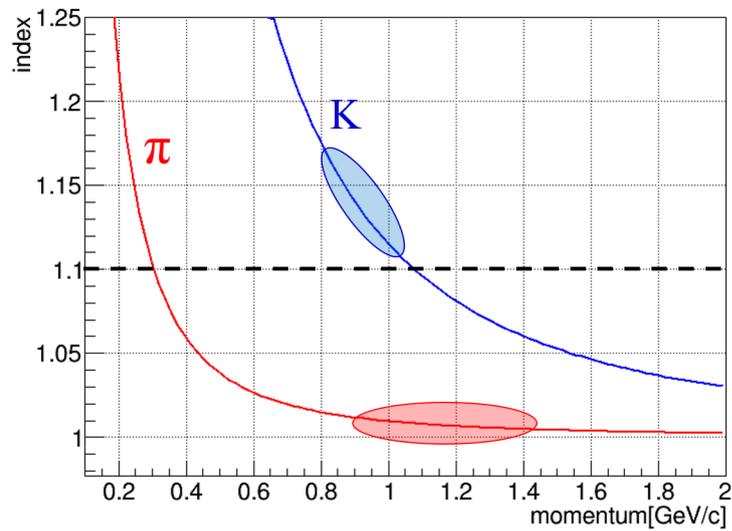


図 3.7: π と K の運動量の発光閾値と屈折率の関係: 各粒子の曲線の値より大きな屈折率であるとチェレンコフ光が発生する。丸で囲った領域が識別したい π と K^+ の運動量領域である。散乱 K^+ では発光せず、かつ散乱 π による発光量が最大となる屈折率 1.10 (破線) のエアロゲルを使用する。

第4章 試作機の性能評価

AC 検出器のデザインの決定及び性能の見積もりを行うため、AC 検出器実機の開発を行う前に実機の Room1 と同じ構造を持つ試作機を製作した。そして、2016 年 6 月に東北大学電子光理学研究センターにおいて陽電子ビームを用いた試作機のテスト実験を行った。この実験では、AC 検出器実機で使用するエアロゲル及び反射材の検討とビームレート耐性の調査を目的としていた。また、AC 検出器実機の性能を見積もるためにテスト実験のデータを用いたシミュレーションパラメーターの調整を行った。

4.1 試作機の作製

4.1.1 反射材

AC 検出器の性能を決める重要な要素の 1 つが反射材である。反射材は式 (3.4) における $T(\lambda)$ に関わっており、発生したチェレンコフ光を効率よく PMT まで届けるためには検出器のサイズや形状に応じて最適な反射材を選択する必要がある。反射の仕方は大きく分けて鏡面反射と乱反射の 2 種類存在する。鏡面反射は入射角と反射角が等しい反射で、鏡のようなよく磨かれた面で起こる。一方、乱反射は入射角度に依らずランダムな方向に拡散される反射で、ざらざらした面で起こる。実機においてどちらの種類の反射材を使用するかを検討するため、鏡面反射する素材と乱反射する素材をそれぞれ使用した 2 台の試作機を作製する。鏡面反射の試作機を AC1、乱反射の試作機を AC2 と名付ける。

これまでいくつかの素材の反射率が測定されている [17]。その結果を踏まえ、鏡面反射材には薄くても反射率が高いメタルミー[®] を、乱反射材には短波長領域において反射率の高いテフロンを用いる。反射率を上げるためにメタルミーは 25 μm のものを 2 枚、テフロンは 80 μm のものを 3 枚重ねて使用する。

鏡面反射の場合、ビームが PMT から遠い場所に当たるとチェレンコフ光が光電面に到達するまでに何度も反射する必要があるため吸収される確率が高くなり、集光効率が下がってしまう。これを防ぐために AC1 には内部に反射鏡を設置する。反射鏡の角度は発生するチェレンコフ光の角度から計算する。最も反射回数を少なくするためには、円錐状に放射されるチェレンコフ光のうち PMT に近い側に放射されるものを PMT の方向に反射させればよい。角度 θ に放出される光をビーム方向と垂直に反射する反射鏡の角度 α は幾何学的に、

$$\alpha = \frac{\theta + 90^\circ}{2} \quad (4.1)$$

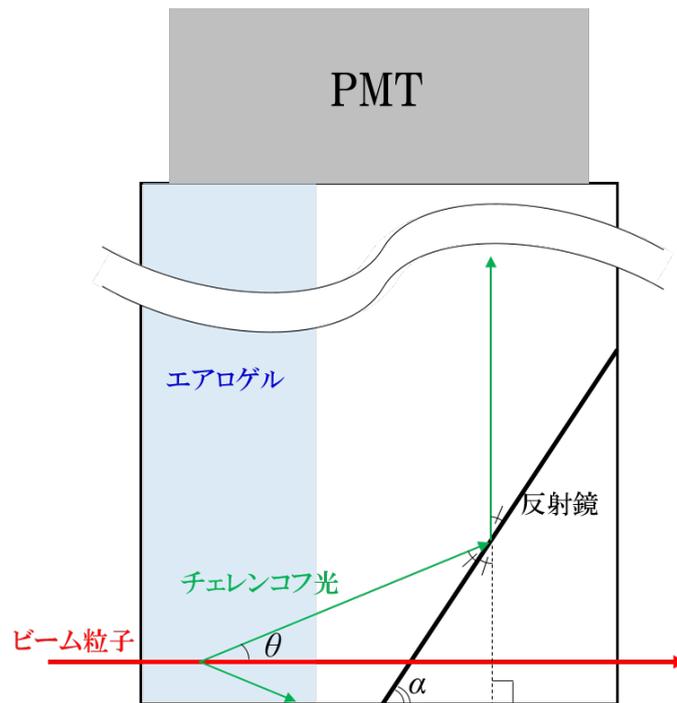


図 4.1: 反射鏡でのチェレンコフ光の反射の模式図：発生したチェレンコフ光を反射鏡により PMT の方向 (図の上方向) に反射させることで集光効率を上げる。反射鏡の最適な角度 α はチェレンコフ光の角度 θ から計算できる。

となる。反射鏡での反射の模式図を図 4.1 に示す。ビーム粒子を π^- 、運動量を $1.3 \text{ GeV}/c$ 、エアロゲルの屈折率を 1.10 とすると式 (4.1) よりチェレンコフ光が放射される角度は $\theta = 23.9^\circ$ であるため、反射鏡の角度は $\alpha = 57^\circ$ となる。実際には工作のしやすさを考え、反射鏡の角度を 60° とした。

4.1.2 エアロゲルの種類

輻射体として利用するエアロゲルについて、屈折率は識別したい粒子の速度から 1.10 と決定したがエアロゲルの種類 (ノーマルタイプ・クリアタイプ) とビーム方向の厚みを決める必要がある。そのため試作機のビーム試験により比較検討を行い、実機で使用するエアロゲルの種類と厚みを決定する。

クリアタイプのメリットは、透過率が高くチェレンコフ光がエアロゲル内で散乱されにくいことである。これは式 (3.4) の $T(\lambda)$ に関わっており、発生したチェレンコフ光を効率よく PMT で読み出せる可能性がある。図 4.2 に千葉大学で測定された屈折率 1.10 のノーマルタイプ及びクリアタイプエアロゲルの 1 cm あたりの透過率を示す。一方、デメリットとしては製造が難しいことである。ノーマルタイプと比べ製造中にひび割れてしまう割合が高く、また製造するタイルごとの厚みの個体差が大きいためビームが当たる場所によって AC の性能にばらつきが出てしまう可能性がある。これらのことを踏まえ、実機におい

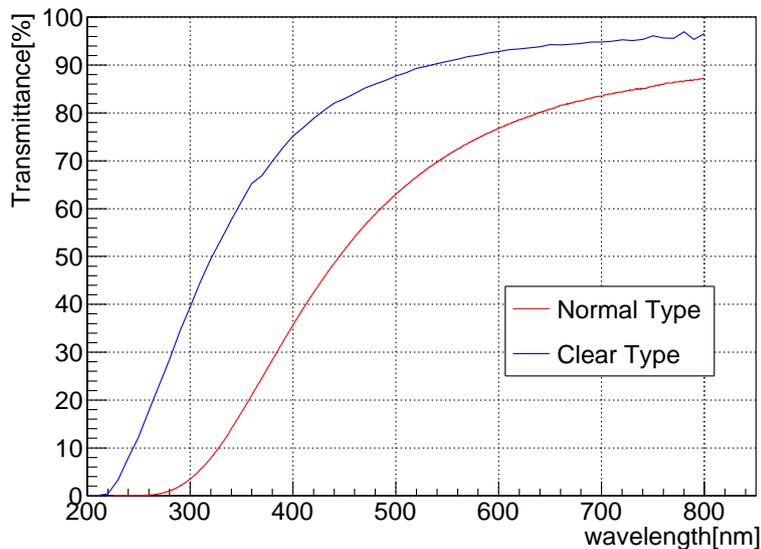


図 4.2: 屈折率 1.10 のノーマルタイプとクリアタイプエアロゲルの 1 cm あたりの透過率：どの波長に対してもノーマルタイプよりクリアタイプの方が透過率が高い。

てどちらの種類のエアロゲルを使用するかを検討する。

エアロゲルのビーム方向の厚みを大きくすることは、式 (3.4) における L を大きくすることで発生するチェレンコフ光の数を増やすことが出来る。しかしながら、エアロゲルと空気の散乱長を比較すると空気の方が長いため、エアロゲルの厚みを減らし空気層を増やすと光が散乱されにくくなり集光効率が上がる可能性がある。この兼ね合いを考えてエアロゲルの厚みを決定する必要がある。

AC 検出器試作機のテスト実験では屈折率 1.10 のクリアタイプ及びノーマルタイプのエアロゲルを使用する予定であった。しかし、クリアタイプについては屈折率 1.10 のエアロゲルの製造が実験までに間に合わなかったため、屈折率 1.09 のエアロゲルを使用した。

4.1.3 試作機のデザイン

試作機の内サイズは実機の Room1 と同じ 75 mm × 185 mm × 80 mm とした。検出器の外枠には 6 mm 厚のアルミニウム板を使用し、粒子入射面には 0.3 mm 厚のアルミニウム板を使用した。検出器の内側には各反射材を貼った。AC1 の反射鏡は 0.3 mm 厚のアルミニウム板を外枠に掘った溝にはめて固定し、表面に反射材を貼った { 図 4.3(a) }。エアロゲルが検出器内で倒れないようにするため、外枠の側面に穴を開け糸を通してエアロゲルを支えるようにした { 図 4.3(b) }。また、後述の LED を用いた PMT の 1 p.e. ゲイン測定をするためには LED の光を検出器内に入れる必要がある。そのため、LED を取り付けた光ファイバーを外枠側面に開けた穴から挿し込むことで検出器内に光を入れるようにした (図 4.4)。また、試作機テスト実験ではエアロゲルの種類、厚みの条件を変えて比較するため頻繁にエアロゲルの入れ替えを行う必要がある。そのため、簡単に入れ替えができ

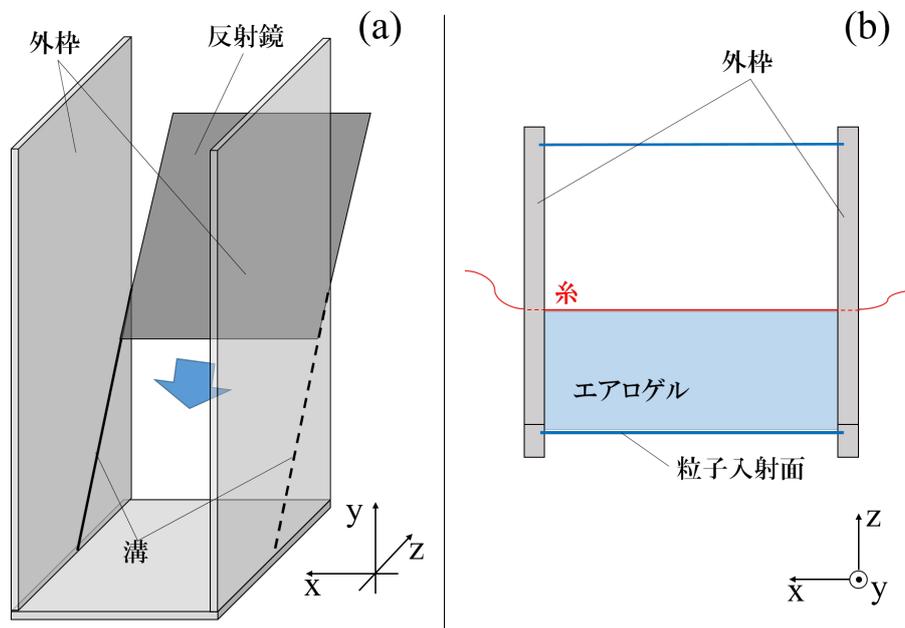


図 4.3: 試作機の内部構造 : (a) は AC1 の反射鏡の構造である。外枠の溝にアルミニウムの板をはめて固定し、表面に反射材を貼る。(b) は糸によりエアロゲルを支えている模式図である。エアロゲルが検出器内で動かないように、外枠に開けた穴に糸を通しエアロゲルを固定する。

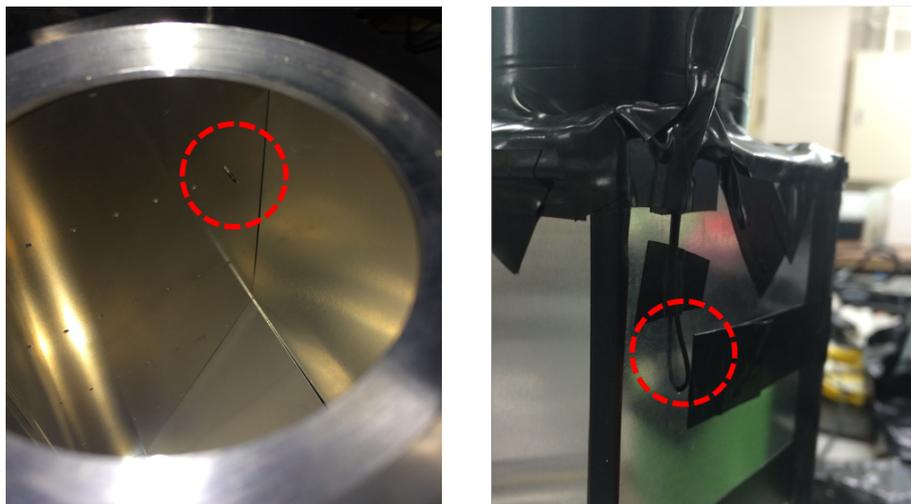


図 4.4: ゲイン較正用の光ファイバー : 左が内側から見た写真、右が外側から見た写真。外枠側面の穴から光ファイバーを挿し込んでいる (赤丸)。この光ファイバーで LED の光を検出器内に入れる。



図 4.5: エアロゲルを入れる前の試作機の写真：右の試作機が鏡面反射材を用いた AC1、左の試作機が乱反射材を用いた AC2 である。この写真のようにビーム上流側の面が開くためエアロゲルの入れ替えが容易に行える。

るようにエアロゲルのあるビーム上流側の面は容易に取り外しが可能な構造にした。エアロゲルを入れる前の 2 台の試作機の写真を図 4.5 に示す。使用したエアロゲルは $75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ のタイルが 2 枚と $75 \text{ mm} \times 85 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ のタイルが 2 枚である。タイルを 2 枚以上重ねる場合は継ぎ目が重ならないように互い違いに入れた。

4.2 陽電子ビームを用いた試作機の性能評価実験

4.2.1 性能評価実験の概要と目的

2016 年 6 月に東北大学電子光理学研究センターにおいて陽電子ビームを用いた AC 検出器試作機のテスト実験を行った。実験は GeV- γ 照射室の検出器テスト用電子・陽電子ビームラインにおいて 2 日間行われた。

東北大学電子光理学研究センターの実験室レイアウトを図 4.6 に示す。線形加速器から入射された電子ビームはブースターストレージリング (BST リング) で最大 $1.3 \text{ GeV}/c$ まで加速される。BST リングを周回する電子ビームに炭素ファイバーでできたラディエータを挿入することで制動放射により高エネルギー γ 線が発生する。この γ 線を GeV- γ 照射室内の金属箔ターゲットに当て対生成により発生した電子・陽電子を RTAGX 双極電磁石により運動量分析し鉛コリメータで絞ることで電子あるいは陽電子ビームを作り出す。ビームの広がり直径 2 cm 程度である。ラディエータを挿入する速度と、 γ 線のターゲットである金属箔の種類を変えることによりビーム強度を調節することが出来る。今回の実験では運動量 $580 \text{ MeV}/c$ の陽電子ビームを利用した。

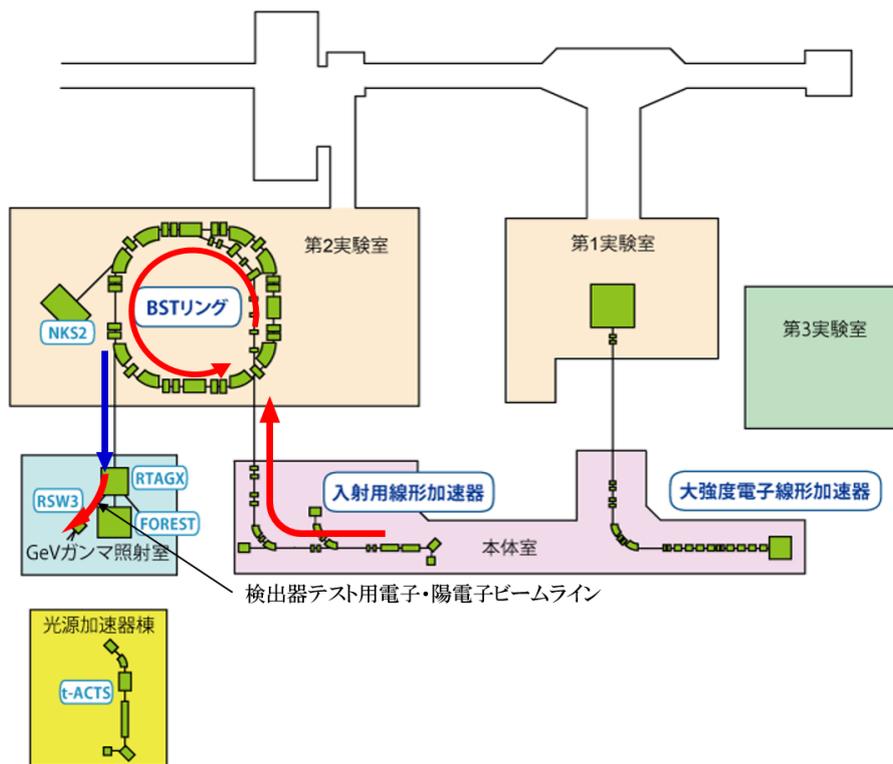


図 4.6: 東北大電子光理学研究センターの実験室レイアウト：赤い矢印は電子あるいは陽電子を表している。青い矢印は高エネルギー γ 線を表している。BST リングを周回する電子ビームにラディエータを接触させて γ 線を発生し、GeV- γ 照射室の金属箔ターゲットに当てることで電子あるいは陽電子ビームを生成する。

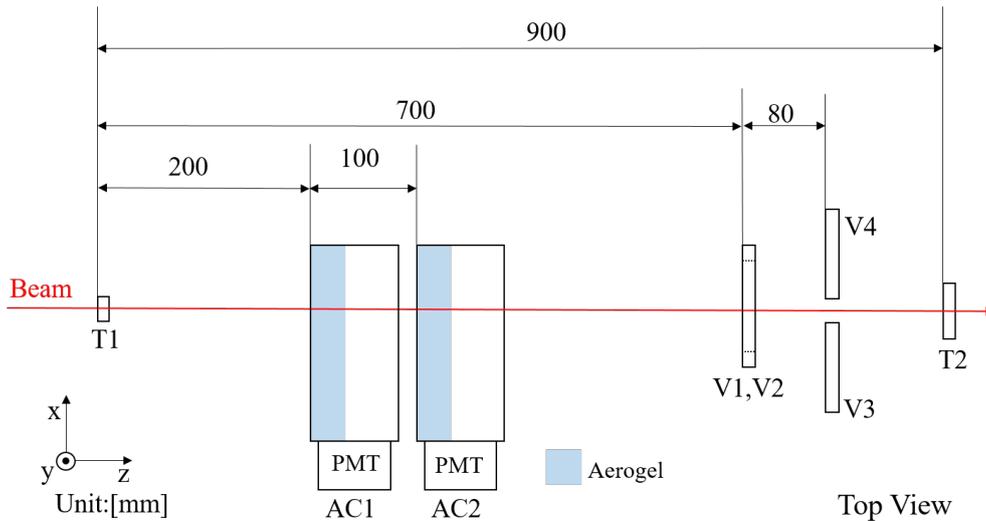


図 4.7: 試作機テスト実験のセットアップ概略図：エアロゲルの種類、厚みを変えた性能の比較の時は図中 AC1 の位置に一台だけ設置した。

この実験の目的は、実機と同じ構造を持つ試作機で性能評価をおこない、実機において使用するエアロゲルの種類、厚み及び反射材の種類の検討をすることと、AC 検出器のレート耐性について評価することである。AC 検出器の性能は光量（光電子数）と検出効率で評価する。実験項目は次の通りである。

- エアロゲルの種類、厚みを変えた性能の比較
- 入射位置依存の調査
- 入射角度依存の調査
- レート依存の調査
- 印加電圧依存の調査
- 閾値依存の調査

これらの項目について性能の評価を行う。

4.2.2 セットアップ

この実験では AC 検出器試作機 (AC1, AC2) の他に、2 台のトリガーカウンター (T1, T2) と 4 台のシャワーベトカウンター (V1, V2, V3, V4) を用いた。セットアップの概略図を図 4.7 に示す。各検出器の QDC 情報の取得には CAEN V792 を使用し、TDC 情報の取得には CAEN V775 を使用した。データ取得のトリガーは T1×T2 で生成した。

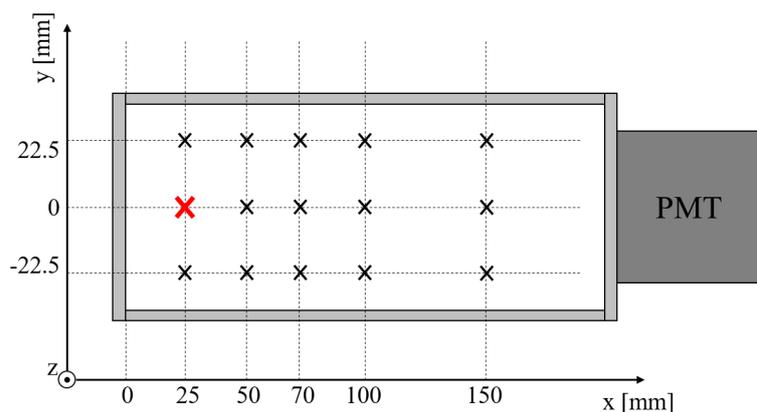


図 4.8: AC 検出器試作機上の座標 : x 方向は PMT と反対側の面を 0 とし、y 方向は中心を 0 とした。基本の入射位置は $(x, y) = (25 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ の点 (赤印) で、それ以外の点は位置依存の調査の際に入射した位置である (黒印)。

表 4.1: AC 検出器試作機の基本設定

設定項目	設定値
エアロゲル種類	AC1 : クリア, AC2 : ノーマル
エアロゲル厚み	30 mm
印加電圧 (1 p.e. ゲイン)	1.8 kV (AC1 : 74.8 ch/p.e., AC2 : 38.4 ch/p.e.)
閾値電圧	20 mV
平均ビームレート (T2 トリガーレート)	1.5 kHz
ビーム入射位置 (x, y)	$(25 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$

- AC 検出器試作機

AC 検出器試作機はエアロゲルの種類、厚みを変えた性能の比較においては 1 台、それ以外の実験項目では 2 台同時に並べ、安定性と位置及び入射角度の変更を容易にするため横に倒して設置する。以下ではビームの入射位置として図 4.8 の AC 上の座標を用いる。x 方向は PMT と反対側の面を 0 とし、y 方向は中心を 0 とした。基本の入射位置を $(x, y) = (25 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ とし (赤印)、位置依存の調査ではこの点を含む x 方向 5 点 \times y 方向 3 点の計 15 点 (黒印) で測定を行った。AC 検出器試作機の基本設定を表 4.1 に示す。各試験項目において調べている項目以外はこの表の設定で測定を行った。

- トリガーカウンター

セットアップの最上流には T1 を設置する。T1 は有感領域が $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ で左右両読みのプラスチックシンチレーション検出器である。ビーム上流側から見て右側の PMT を T1-1、左側の PMT を T1-2 と名付ける。セットアップの最下流には T2 を設置する。T2 は有感領域が $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ で片読みのプラスチックシン

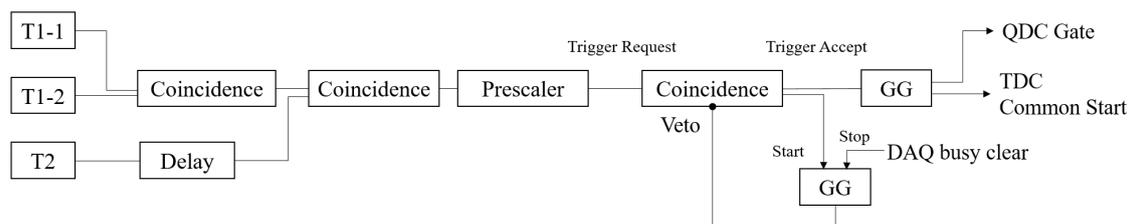


図 4.9: トリガー生成の回路

チレーション検出器である。T1-1 と T1-2 及び T2 のコインシデンスを取ることによりトリガーを生成する。トリガータイミングは T2 で決まる様にした。図 4.9 にトリガー生成の回路図を示す。高いビームレートにおける測定ではデータ取得の効率が悪くなるため、Prescaler モジュールによりイベントをサンプリングしてトリガーレートを減らした。

- シャワーベトカウンター

このテスト実験には陽電子ビームを用いたが、陽電子ビームは物質中で電磁シャワーを起こす可能性がある。電磁シャワーが起こると多数の電子・陽電子が AC 検出器に入射するため、通常よりチェレンコフ光が多く発生し正しい性能評価が出来なくなる。これを防ぐために AC 検出器試作機の後方に 4 台のプラスチックシンチレーション検出器を図 4.15 のように、ビーム中心に 20 mm × 20 mm の穴をあけて配置した。この図の様に V1, V2, V3, V4 と名付ける。V1, V2, V3, V4 は有感領域が 150 mm × 100 mm で片読みのプラスチックシンチレーション検出器である。電磁シャワーを起こして広がった電子あるいは陽電子を V1, V2, V3, V4 で検出することで電磁シャワーを起こしたイベントを特定する。シャワーイベントの除去はオフライン解析で行った。

4.2.3 解析手法

AC 検出器の性能は光量（光電子数）と検出効率によって評価する。そのために先ず、光量と検出効率の導出方法について説明する。また、閾値依存の調査においては閾値を電圧ではなく光電子数で表す方が適当なため、閾値電圧とそれに対応する光電子数の関係を調べる必要がある。その導出方法についても述べる。

光量

AC 検出器が検出した光量を知るためには、光電子 (photo electron : p.e.) 1 個が PMT で検出された場合得られる電荷量に対応する QDC チャンネル数を調べる必要がある。ここでは、このチャンネル数を 1 p.e. ゲインと呼ぶ。先ず、PMT の光電面に微弱な光が入射した場合に検出される光電子数がポアソン分布に従うことを仮定する。その場合、 N 個の光電子が検出される確率 $P(N)$ は

$$P(N) = \frac{\mu^N e^{-\mu}}{N!} \quad (4.2)$$

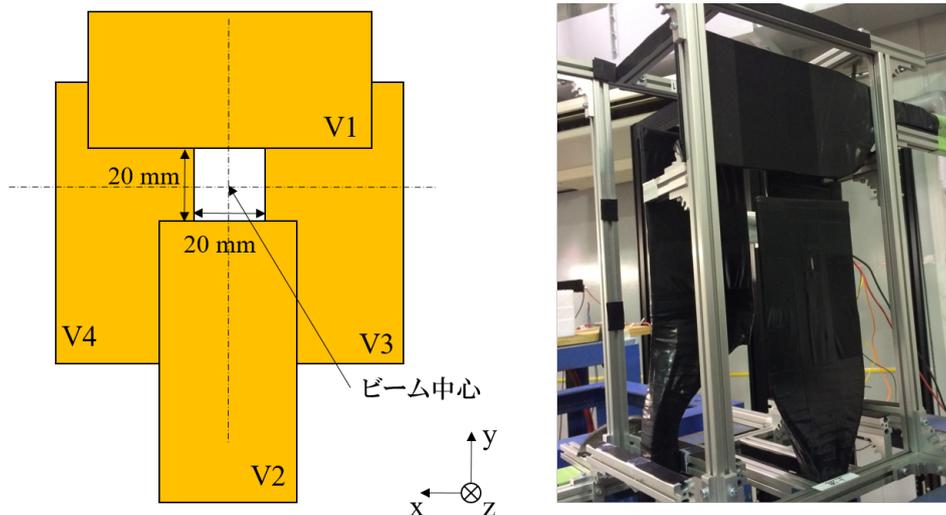


図 4.10: シャワーベトカウンターの配置図：左が配置の模式図で右が実際に配置した写真。ビーム中心に 20 mm × 20 mm の穴をあけて配置する。

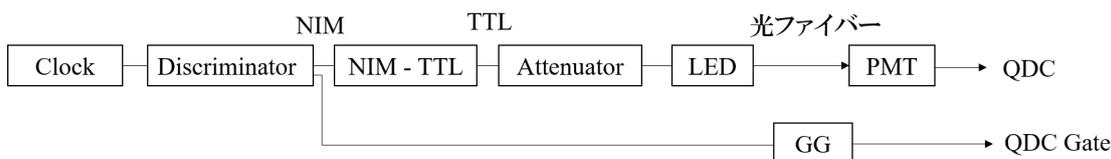


図 4.11: 1 p.e. ゲイン測定の回路図

となる。ここで μ は平均光電子数である。ここで、 $N = 0$ とすると式 (4.2) は次のようになる。

$$P(0) = e^{-\mu} \quad (4.3)$$

すなわち、光電子数が 0 である確率を用いて平均光電子数 μ が計算出来る。QDC ヒストグラム全体のエントリー数に対するペDESTALの量が $P(0)$ に対応する。そこから計算された μ と QDC ヒストグラム全体の平均値 (*mean*) 及びペDESTALの中心値 (*pedestal*) から 1 p.e. ゲイン (*gain*) を

$$gain = \frac{mean - pedestal}{\mu} \quad [\text{ch/p.e.}] \quad (4.4)$$

と求めた。

LED を用いて図 4.11 の回路により PMT の 1 p.e. ゲインの測定を行った。Clock からの周期的な NIM 信号を TTL 信号に変換して LED に入力する。LED の光は光ファイバーを通して検出器内へ入り PMT の光電面に達する。PMT の信号は QDC で読み出す。LED の光量は Discriminator の出力幅を変えたり、Attenuator で減衰して調節する。また、Clock からのもう一つの NIM 信号をゲートジェネレーター (GG) に入力しデータ取得のための

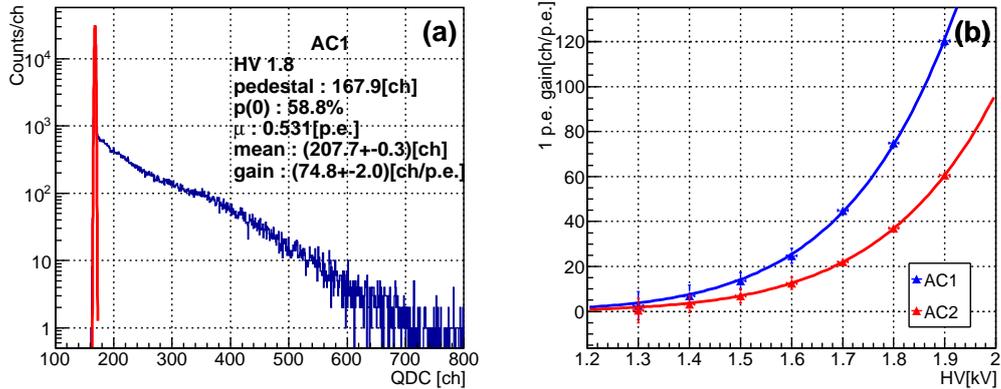


図 4.12: 1 p.e. ゲイン測定で得られる QDC ヒストグラムと印加電圧との関係: (a) は AC1 に 1.8 kV の電圧を印加して 1 p.e. ゲインを測定した場合に得られた QDC ヒストグラムである。ペDESTAL領域をガウス関数でフィッティングし、面積と中心値を求める。その面積から計算される光電子数が 0 である確率とペDESTALの中心値とヒストグラム全体の平均値を用いて 1 p.e. ゲインを計算した。一方、(b) は 1 p.e. ゲインと印加電圧の関係のグラフで、青い点が AC1、赤い点が AC2 である。データ点を $y = ax^b$ の関数でフィッティングし (曲線)、その関数から得られる値をその印加電圧における 1 p.e. ゲインの値とした。

トリガーを生成する。この測定を印加電圧を 1.3 kV から 1.9 kV の範囲で変えて行いゲインと印加電圧の関係を調べた。1 p.e. ゲイン測定の際に得られた QDC ヒストグラムと、1 p.e. ゲインと電圧の関係を図 4.12 に示す。図 4.12(b) のデータ点を $y = ax^b$ の関数でフィッティングし、求めた関数を利用して任意の印加電圧に対する 1 p.e. ゲインを決定した。このように求めた 1 p.e. ゲインの値を用いると QDC のヒストグラムを光電子数 ($N_{p.e.}$) のヒストグラムに変換出来る。あるイベントにおける QDC の値が (adc) の時の $N_{p.e.}$ はペDESTALの中心値 ($pedestal$) とゲイン ($gain$) から

$$N_{p.e.} = \frac{adc - pedestal}{gain} \quad (4.5)$$

と求めることが出来る。陽電子ビームを照射した時に得られた $N_{p.e.}$ ヒストグラムを図 4.13 に示す。このヒストグラムのピーク周辺をガウス関数でフィットすることにより最頻値 (mode) を得る。この最頻値を光量として AC 検出器の性能の評価に用いる。

検出効率

検出効率を求めるにあたって、まずはビームイベントの選別を行う。はじめにトリガーカウンターの TDC 情報を用いてイベントを選別する。図 4.14 にトリガーカウンターの TDC 分布を示す。アクシデンタルバックグラウンドを減らすため 2 本の赤線間のイベントをビームイベントとして選択する。次に、シャワーベトカウンターの QDC 情報を用いて電磁シャワーを起こしたイベントの除去を行う。図 4.15 にシャワーベトカウンターの QDC 分布を示す。赤線より高いチャンネルのイベントは電磁シャワーを起こしたイベントとみなし除去した。このようにして選別されたビームイベント数を N_{Beam} とする。

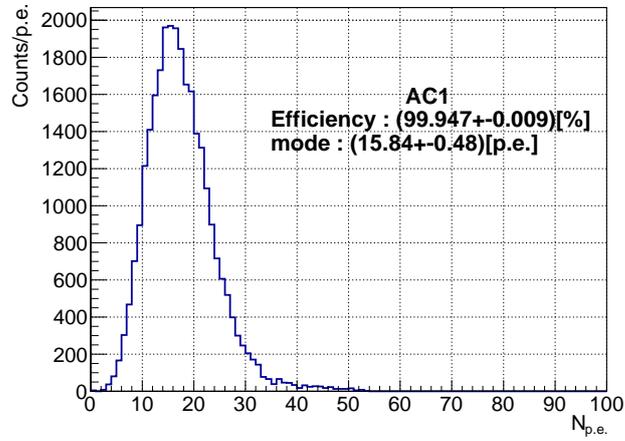


図 4.13: 陽電子ビームを照射した時に得られた $N_{p.e.}$ ヒストグラム : このヒストグラムのピーク周辺をガウス関数でフィッティングし、得られた中心値を $N_{p.e.}$ の最頻値 (mode) とする。この最頻値で性能の評価を行う。

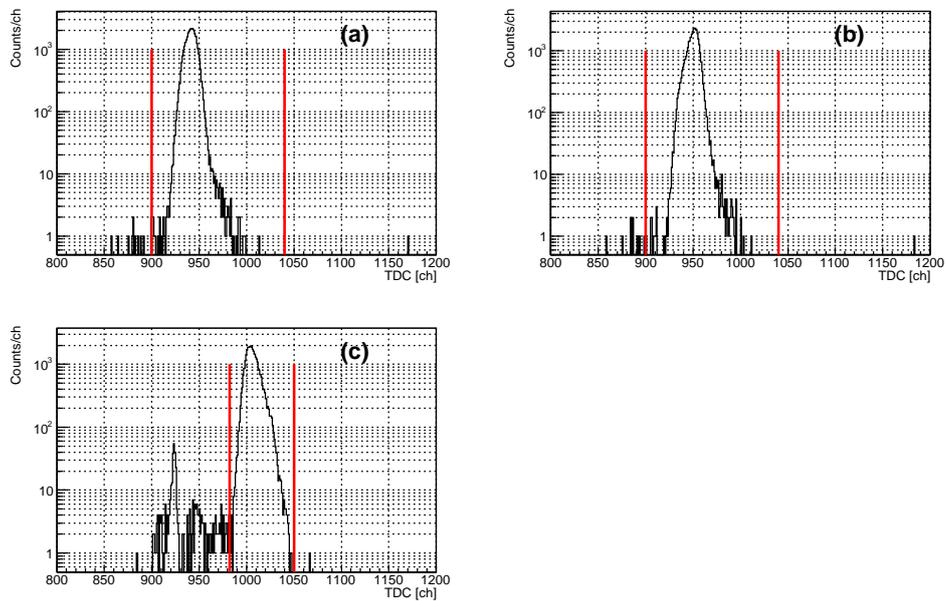


図 4.14: トリガーカウンターの TDC 分布 : 2 本の赤線の間イベントをビームイベントとして選択した。

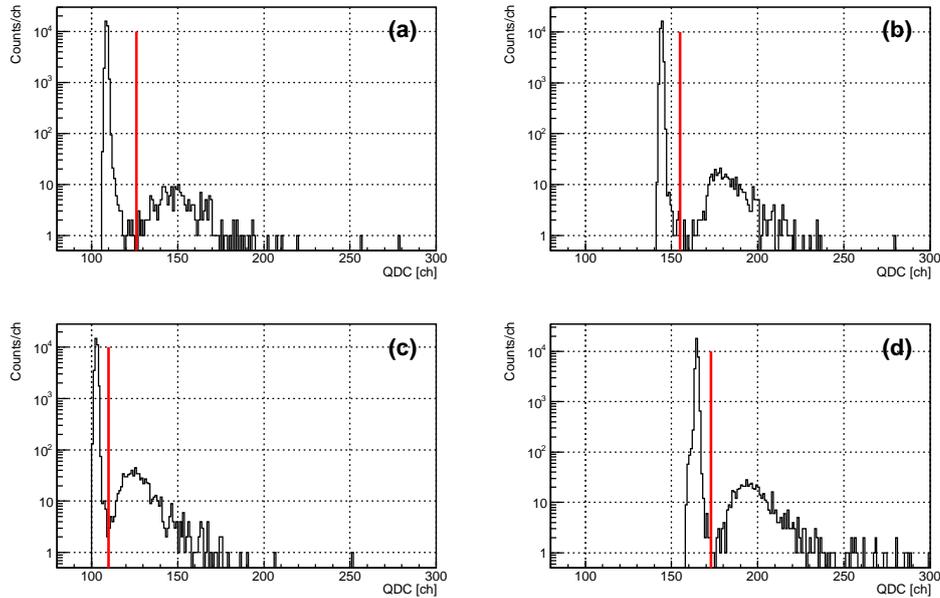


図 4.15: シャワーベトカウンターの QDC 分布：ペDESTAL と信号の間に閾値を設定する (赤線)。閾値より大きいチャンネルのイベントは電磁シャワーを起こしたイベントとみなし除去した。

次に、AC 検出器の $N_{p.e.}$ ヒストグラムに対して 3 p.e. を閾値と定め、それより光電子数の多いイベントの数を N_{AC} とした。この理由は、オンラインで閾値電圧の基本設定としてかけていた電圧は光電子数に変換すると 0.5 p.e. よりも小さく、暗電流による誤検出が起きている可能性があるからである。こうして求めた N_{Beam} と N_{AC} を用いて検出効率 E を

$$E = \frac{N_{AC}}{N_{Beam}} \quad (4.6)$$

と定義した。この E を AC 検出器の性能の評価に用いる。

閾値電圧とそれに対応する光電子数の関係

AC 検出器の QDC 情報と TDC 情報を用いることで、閾値電圧とそれに対応する光電子数の関係を調べた。まず、TDC のエントリーを要求した場合の QDC ヒストグラムを、要求しない場合の QDC ヒストグラムで割ることで階段状のヒストグラムを得る。このヒストグラムを階段関数でフィッティングすることでヒストグラムの変化点、すなわち設定した電圧に対応する QDC チャンネル数を求める。図 4.16(a) は TDC のエントリーを要求した場合と要求しなかった場合の QDC ヒストグラムである。(b) は (a) のヒストグラム同士を割って得られる階段状のヒストグラムである。このヒストグラム (青線) を階段関数でフィッティングして得られた関数 (赤破線) の値が 0.5 (黒破線) となるチャンネル数をヒストグラムの変化点とした。こうして求めたチャンネル数からペDESTAL のチャンネル数を引き、1 p.e. ゲインで割ることにより設定した閾値電圧に対応する光電子数を求めることができる。

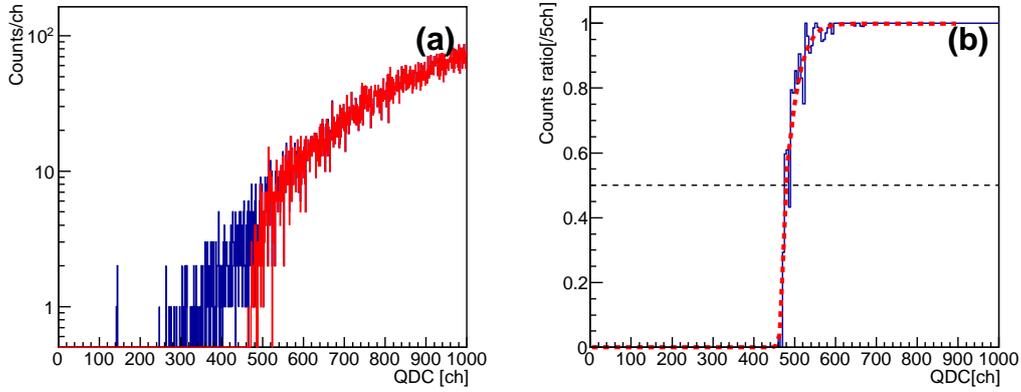


図 4.16: 閾値電圧に対応する QDC チャンネル数の調べ方 : (a) は TDC のエントリーを要求した場合 (赤) と要求しなかった場合 (青) の QDC ヒストグラムである。(b) は (a) のヒストグラム同士を割って得られる階段状のヒストグラムである。このヒストグラム (青線) を階段関数でフィッティングして得られた関数 (赤破線) の値が 0.5 (黒破線) となるチャンネル数を閾値電圧に対応する QDC チャンネル数とした。

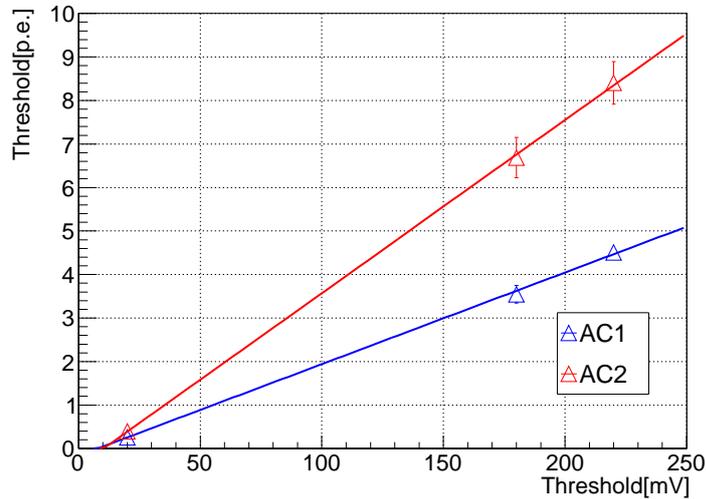


図 4.17: 閾値電圧とそれに対応する光電子数の関係 : 横軸が閾値電圧、縦軸が対応する光電子数である。直線がフィッティングの結果である。AC1 の方が 1 p.e. ゲインが大きいいため得られる直線の傾きは小さくなっている。

この測定を閾値の電圧設定を変えて行うことで閾値電圧とそれに対応する光電子数の関係が分かる。図 4.17 に閾値電圧と対応する光電子数のグラフを示す。このグラフのデータ点を直線でフィッティングすることで電圧とそれに対応する光電子数の関係を表す関数を得ることが出来る。AC1 の方が 1 p.e. ゲインが大きいいため直線の傾きは小さくなっている。

4.2.4 結果

エアロゲルの種類、厚みを変えた性能の比較

前節で述べたように、クリアタイプのエアロゲルは屈折率 1.09 のものを使用した。このため、式 (3.3) より発生するチェレンコフ光は 1 割程度減少する。クリアタイプとノーマルタイプで光量の比較を行う際はその光量の違いの補正をした。今回使用したエアロゲルのタイル 1 枚の厚みは 15 mm である。それぞれの種類のエアロゲルに対して使用するタイルの枚数を変えて測定を行った。用意した数のタイルでは最大 3 枚重ねまでできるが、AC1 は内部に反射鏡を設置するため 2 枚重ねまでとなっている。

結果を図 4.18 に示す。(a) が光量のグラフである。このグラフにおけるクリアタイプの点は屈折率の違いによる光量変化の補正をしている。反射材の違いに関しては、すべての点においてメタルミー[®]を用いた AC1 よりもテフロンを用いた AC2 の方が光量が多くなった。クリアタイプとノーマルタイプを比較すると 1 割程度クリアタイプの方が光量が多くなった。また、エアロゲルの厚みを増やすほど光量が増えていくという傾向が見えた。(b) が検出効率のグラフである。厚みが 15 mm の点では光量のグラフと同じ傾向を示しているが、それよりも厚みが多い場合はすべての点で 99.9% 以上の高い値となった。

位置依存の調査

ビームの入射位置が変わると検出器内でのチェレンコフ光の発生場所が変わるため、AC 検出器の性能はビーム入射位置の依存性があると考えられる。特に AC1 は鏡面反射のため依存性が大きいことが予想される。これを調べるためにビーム入射位置を AC 検出器上の座標で x 方向 5 点 (25 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm, 150 mm) と y 方向 3 点 (-22.5 mm, 0 mm, 22.5mm) を組み合わせた計 15 点で測定を行った。

結果を図 4.19 に示す。ここでは光量の絶対値ではなく傾向を調べるのが目的であるため、クリアタイプに対する光量の補正は行っていない。AC1 は光量、検出効率ともに位置依存性が大きく、特に x=100 mm の点では光量、検出効率ともに低い値となっている。一方、AC2 の光量は y 方向の依存性がほとんどなく、x 方向は単調増加となっている。これは x が大きい位置ほどチェレンコフ光の発生点が PMT に近くなり集光効率が上がるためである。検出効率はどの点においても 99.9% 以上となった。AC1 は鏡面反射材を用いているため、チェレンコフ光の発生する位置により検出器内での反射回数が決まっている。反射回数が多いと PMT に到達する前に吸収される確率が高くなるため、x=100 mm のような性能が低くなる場所があったと考えられる。一方、AC2 は乱反射材を用いているため、どの位置でチェレンコフ光が発生しても一定の確率で少ない反射回数で PMT に到達する光が存在するため、位置の依存性は小さくなる。

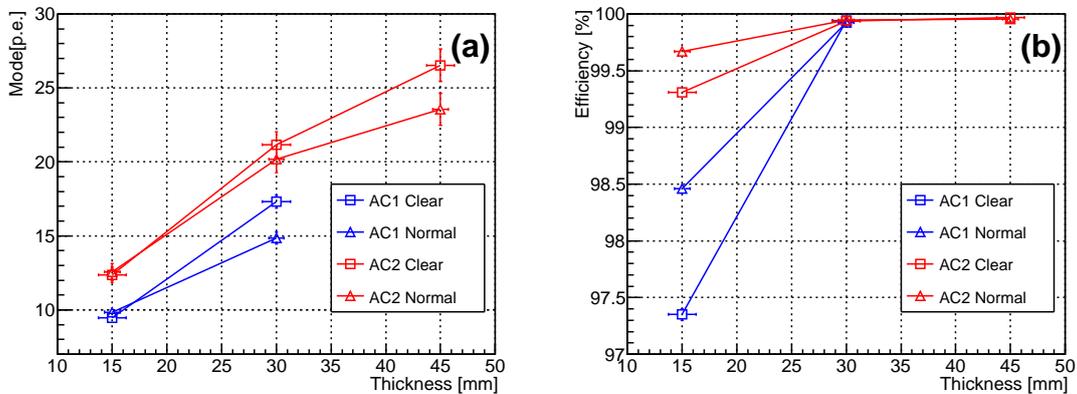


図 4.18: エアロゲルの種類、厚みを変えた場合の光量と検出効率の変化 : (a) は光量のグラフである。このグラフにおけるクリアタイプの点は屈折率の違いによる光量変化の補正をしている。AC1 よりも AC2 の方が、ノーマルタイプよりもクリアタイプの方が光量が多くなった。(b) は検出効率のグラフである。厚みが 30 mm 以上の場合はどの点も 99.9% 以上となった。

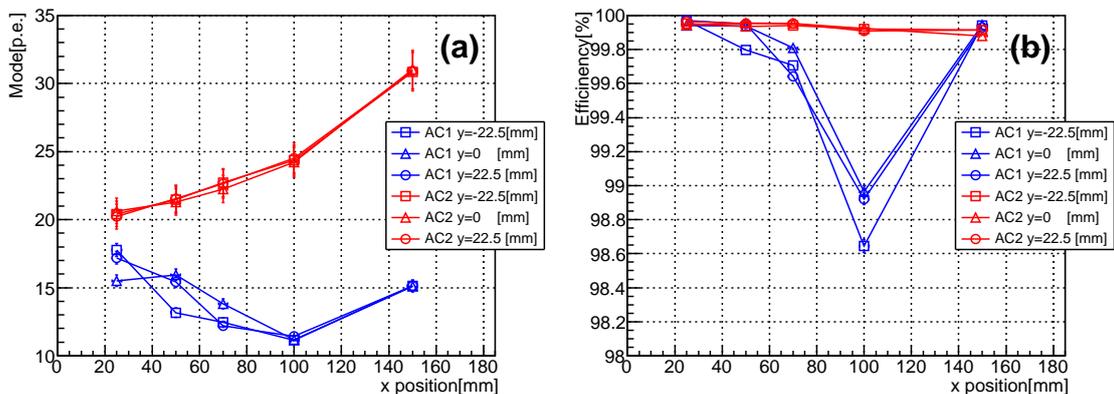


図 4.19: ビーム入射位置を変えた場合の光量と検出効率の変化 : (a) は光量のグラフである。ここでは光量の絶対値ではなく傾向を調べることが目的であるため、クリアタイプに対する光量の補正は行っていない。(b) は検出効率のグラフである。AC1 は光量、検出効率ともに位置依存性が大きい。AC2 の光量は x 方向の依存性がほとんどなく y 方向は単調増加となった。検出効率はどの点も 99.8% 以上でとなった。

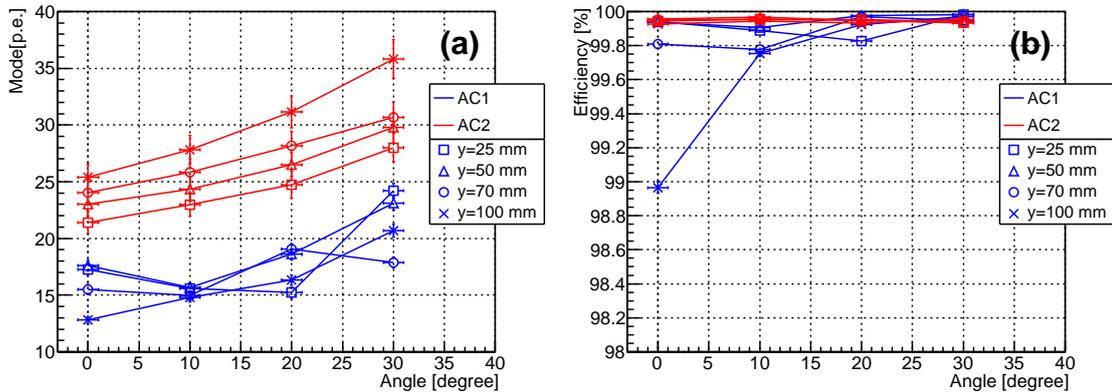


図 4.20: ビーム入射角度を変えた場合の光量と検出効率の変化：(a) は光量のグラフである。位置依存性の場合と同じくクリアタイプに対する光量の補正は行っていない。AC1 は複雑に変化しているが AC2 は単調増加である。(b) は検出効率のグラフである。C1 において 99% を下回る点があるが、それ以外は 99.7% 以上となった。

角度依存の調査

ビームの入射角度が大きくなると式 (3.4) における L が増えるため、光量は増えると考えられる。その依存性を調べるため、 x 方向の位置を変えた 4 点 (25 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm) においてビームの入射角度を 0° から 30° まで変えて測定を行った。

結果を図 4.20 に示す。位置依存性の場合と同じくクリアタイプに対する光量の補正は行っていない。光量は、全体的に予想の通り角度とともに増えているが AC1 は入射位置により異なった角度依存性がみられる。検出効率について、AC1 において 99% を下回る点が 1 点あるが、それ以外は 99.7% 以上となった。

レート依存の調査

J-PARC E40 実験では高レート環境下において AC 検出器を使用するため、レートに対する耐性を調べる必要がある。利用したビームラインではビームレートを調整することが出来るため、ビームレートの異なる 4 点 (1.5 kHz, 30 kHz, 70 kHz, 150 kHz) で測定を行った。ここでは T2 の計数率をビームレートの値として採用した。

結果を図 4.21 に示す。この測定では、PMT ゲインの減少 (ゲインドロップ) により QDC ヒストグラムピークの形が変わるため最頻値ではなく平均値を用いて、ゲインドロップの度合いを評価した。(a) はペDESTAL を差し引いた QDC ヒストグラムの平均値を基本設定 (ビームレート: 1.5 kHz) での平均値で規格化したグラフであり、ゲインドロップの度合いを表している。ビームレートが高くなるにつれダイノード間に流れる電流も大きくなるためゲインドロップが大きくなっていると考えられる。AC1 と AC2 でゲインドロップの傾向が異なっているが、これは 1 p.e. ゲインの違いによるものである。(b) は検出効率のグラフである。閾値の値は一定であるため、ビームレートが高くなりゲインドロップ起ると検出効率が下がる。

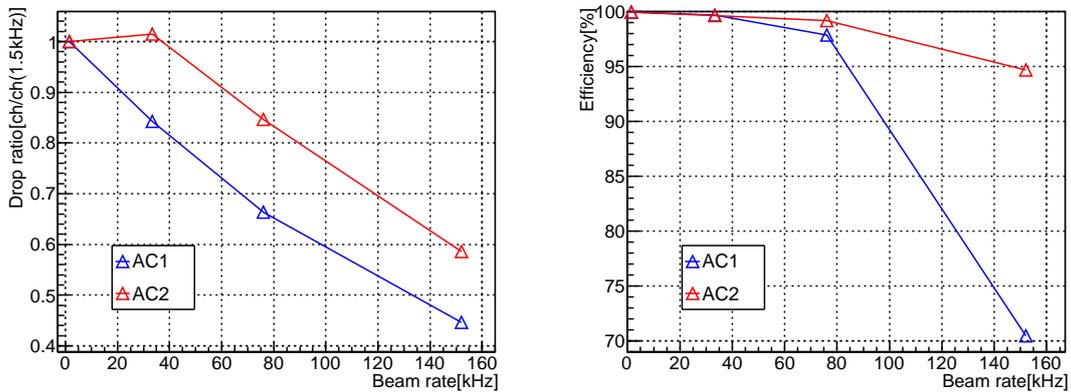


図 4.21: ビームレートを変えた場合のゲインドロップと検出効率の変化：(a) はペDESTALを差し引いた QDC ヒストグラムの平均値を基本設定 (ビームレート：1.5 kHz) での平均値で規格化したグラフであり、ゲインドロップの度合いを表している。ビームレートが高くなるにつれゲインドロップも大きくなっている。(b) は検出効率のグラフである。閾値の値は一定であるため、ゲインドロップが起こると検出効率は下がる。

印加電圧依存の調査

ゲインドロップはダイノード間の電流により起こるため、印加電圧に依存していると考えられる。それを調べるため最もビームレートが高い条件 (150 kHz) において、印加電圧を 0.1 kV ずつ下げて測定を行った。この測定により各電圧におけるレート耐性を調べる。

結果を図 4.22 に示す。レート依存の調査の時と同じく、各測定点での QDC ヒストグラムを基本設定 (ビームレート：1.5 kHz, 印加電圧：1.8 kV) での QDC ヒストグラムと比較することでゲインドロップを評価したい。しかし、印加電圧が異なる場合は元の PMT ゲインが異なるため QDC ヒストグラム同士の比較ができない。そのため、1 p.e. ゲインの値を用いて QDC チャンネル数を $N_{p.e.}$ に変換して比較する必要がある。(a) は $N_{p.e.}$ ヒストグラムの平均値を基本設定での平均値で規格化したグラフであり、ゲインドロップの度合いを表している。印加電圧を下げていくとゲインドロップが回復し、1.4 kV まで下げるとほとんどゲインドロップは見られない。これは印加電圧を下げることでダイノード間に流れる電流が減少したためであると考えられる。先ほどと同じく、AC1 と AC2 でゲインドロップの傾向の違いは 1 p.e. ゲインの違いによるものである。(b) は検出効率のグラフである。ゲインドロップの回復に伴って検出効率も回復している。

閾値依存の調査

AC 検出器の信号にかける閾値電圧を上げていくと検出効率はどのように変化するかを調べる。この測定に限り、AC 検出器の TDC のエントリー数を AC 検出器での検出数 N_{AC} として検出効率を計算した。閾値電圧を変えた 6 点 (20 mV, 60 mV, 100 mV, 140 mV, 180 mV, 220 mV) で測定を行った。

結果を図 4.23 に示す。横軸の閾値は光電子数に変換している。AC1, AC2 ともに閾値を上げていくと検出効率が一度上がってから下がるという傾向がみられた。閾値が低いと

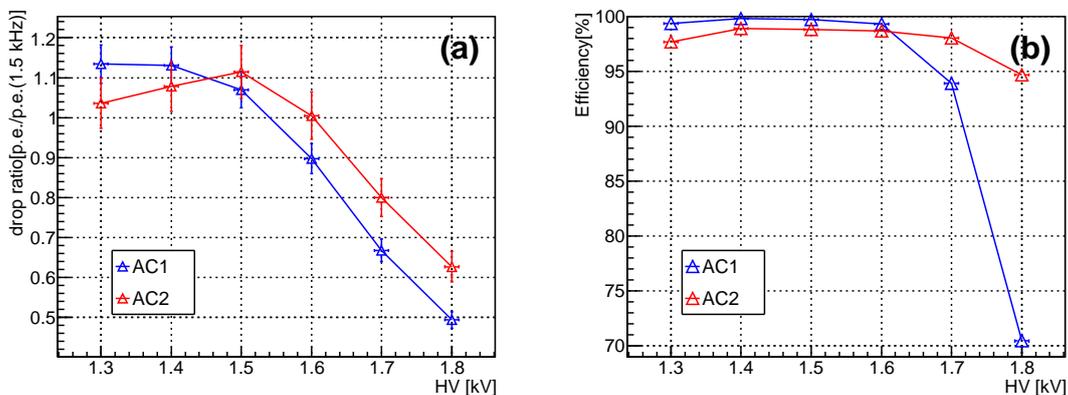


図 4.22: 印加電圧を変えた場合のゲインドロップと検出効率の変化 : (a) は $N_{p.e.}$ ヒストグラムの平均値を基本設定 (ビームレート : 1.5 kHz, 印加電圧 : 1.8 kV) での平均値で規格化したグラフであり、ゲインドロップの度合いを表している。電圧を下げていくとゲインドロップが回復していき、1.4 kV まで下げるとほとんどゲインドロップは見られない。(b) は検出効率のグラフである。ゲインドロップの回復とともに検出効率も回復している。

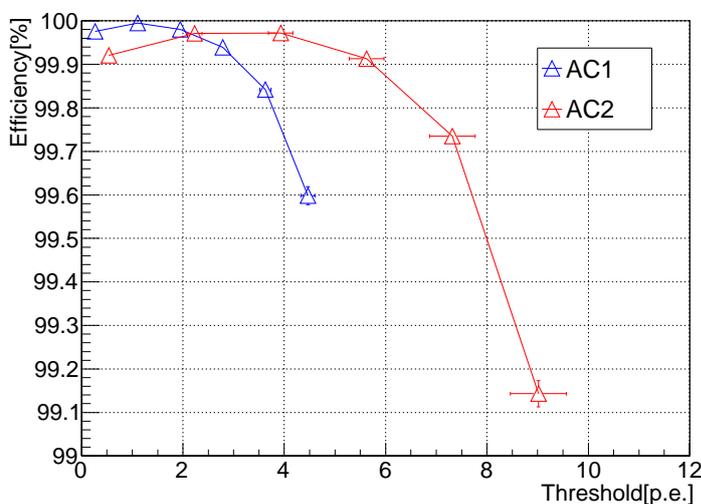


図 4.23: 閾値を変えた場合の検出効率の変化 : 横軸は光電子数に変換した閾値である。AC1, AC2 ともに閾値を上げていくと検出効率が一度上がってから下がるという傾向がみられる。

ここで検出効率が低くなる原因は、Discriminator モジュールのデッドタイムにあると考えられる。Discriminator は閾値を超える信号が入力された場合に信号を出力するが、この時に一定のデッドタイムが生じる。閾値が低いと熱ノイズやランダム事象による信号も閾値を超えてしまいデッドタイムが増えるため、信号の取りこぼしが起こり検出効率が下がったと考えられる。

4.2.5 考察

エアロゲルの種類について、クリアタイプとノーマルタイプの光量の差は1割程度であったが、検出効率はエアロゲルの厚みが30 mm 以上においてはほとんど差がみられなかった。また、今回のテスト実験に屈折率1.10のクリアタイプのエアロゲルが間に合わなかったように、製造に関してクリアタイプの方がリスクが高い。これらのことを考慮し、実機ではノーマルタイプのエアロゲルを採用することにした。

エアロゲルの厚みについて、少なくとも45 mm までは厚みを増やすと光量が増えるという結果が得られたが、検出効率は30 mm 以上ではほとんど変化がなく99.9%以上の高い値となった。このことから、30 mm のエアロゲルで十分な性能が得られると考えられる。よって、実機に使用するエアロゲルの厚みは30 mm とした。

反射材の種類について、鏡面反射材を用いたAC1より乱反射材を用いたAC2の方が光量、検出効率ともに良い結果が得られた。また、AC1はビームの入射位置、角度の依存性が大きく、トリガー検出器としての性能にばらつきが生じることが分かった。これらのことを踏まえ、実機では乱反射材を用いることにした。

レート耐性について、今回の実験で基準とした印加電圧(1.8 kV)では、高レート環境下ではゲインドロップが起き十分な性能が出ないことが分かった。そのため、印加電圧を低くする必要がある。実験結果から1.4 kV程度まで下げるとゲインドロップは十分小さくなることが分かった。しかし、ただ印加電圧を下げるだけではPMTゲインが下がりすぎる心配がある。これらのことを考慮し、実機では低い印加電圧において増幅回路を用いて信号を増幅することを検討することにした。

4.3 シミュレーションパラメータの調整

J-PARC E40 実験に用いる AC 検出器実機を作製する前に、その性能を見積もるため Geant4 を用いた Monte Carlo シミュレーションを行う。そのために、先ずシミュレーターの各種パラメータの調整をする必要がある。試作機テスト実験の結果を再現するようにパラメータの調整を行った。AC 検出器実機では乱反射材を使用するため再現には AC2 のデータを用いた。ここでは、特に重要な PMT とシリカエアロゲルに関するパラメータについて説明する。

4.3.1 PMT に関するパラメータ

PMT に関するパラメータは量子効率と 1 p.e. 分布の 2 つである。

量子効率

量子効率は光電面に入射した光子を電子に変換する効率である。3.2.2節の図3.3に使用したPMTの量子効率を示したが、シミュレーションにもこの光子の波長に依存した量子効率を使用する。

1 p.e. 分布

ラインフォーカス型PMTの場合、光電面で変換された電子はすべてのダイノードで増幅され陽極に到達する。しかし、ファインメッシュ型PMTの場合、ダイノードが格子状であるため一定の割合でダイノードに当たらずに格子の間隙を通り次のダイノードへと向かう電子が存在する。そのため、1個の光子が入射した場合に最終的に得られる電子数の分布(1 p.e. 分布)がラインフォーカス型PMTのものと異なる。この影響を考慮する必要がある。ファインメッシュ型PMTの1 p.e. 分布を再現するために増幅過程のシミュレーションを行った。シミュレーションの方法は過去の文献を参考にした[18]。

はじめに、電子1個のダイノード1段における増幅について考える。電子がダイノードに当たらずに格子の間隙を通る確率は参考文献より40%とする。一方、電子がダイノードに当たった場合は当たった位置により増幅されるか吸収されるかが分かれる。ダイノードワイヤーの中心付近に当たると電子は吸収されてしまう。それ以外の部分に当たると電子はポアソン分布に従って増幅される。ダイノードに当たった電子のうち中心付近に当たって吸収されてしまう確率は参考文献より10%とした。増幅される時のポアソン分布を平均値 M の関数として $P(M)$ とする。

ダイノード1段における電子1個の増幅シミュレーションの流れを図4.24に示す。この増幅過程を前段のダイノードで増幅された電子1つ1つに対して行うことでそのダイノードでの増幅をシミュレーションし、ダイノードの段数分繰り返すことでファインメッシュ型PMTでの増幅を再現できる。このPMTでの増幅シミュレーションを繰り返し行うことで1 p.e. 分布を再現する。実際に使用したPMTのダイノードの段数は19段だが、参考文献より6段分増幅を繰り返せば十分1 p.e. 分布を再現出来ることが分かっているため今回もシミュレーションの簡略化のため6段分の増幅を考えた。

この分布を用いて、試作機テスト実験のLEDを用いた1 p.e. ゲインの測定で得られたQDCヒストグラムを再現した。シミュレーションから再現したヒストグラムで1 p.e. ゲインの測定データをフィットして得られる χ^2 の M 依存から M の最適な値を求める(図4.25)。最小値付近を二次関数でフィッティングした結果(赤線)、極小点の M の値は3.49であったため、以後 M の値は3.5を使用する。求めた値 $M = 3.5$ を使って再現した1 p.e. ゲイン測定のQDCヒストグラムを図4.26に示す。青い線が実験データ、赤実線が再現したヒストグラムである。再現にはペDESTAL + 1 p.e. + 2 p.e. + 3 p.e. の分布を用いた(赤破線)。AC検出器のシミュレーションにはこのように求めた1 p.e. 分布を用いる。

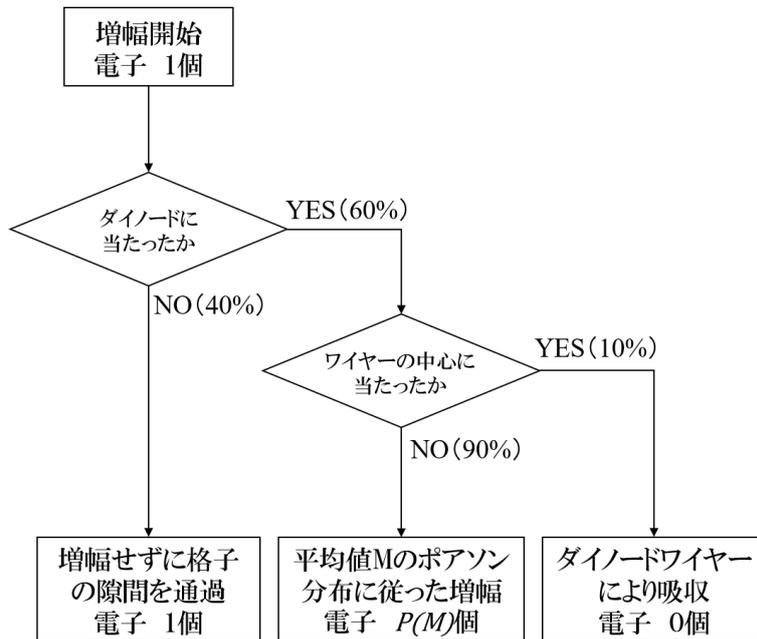


図 4.24: ダイノード1段における電子1個の増幅シミュレーションのフローチャート: この増幅過程を電子1つ1つに対して行うことでそのダイノードでの増幅を再現し、ダイノードの段数分繰り返すことでファインメッシュ型 PMT での増幅を再現した。

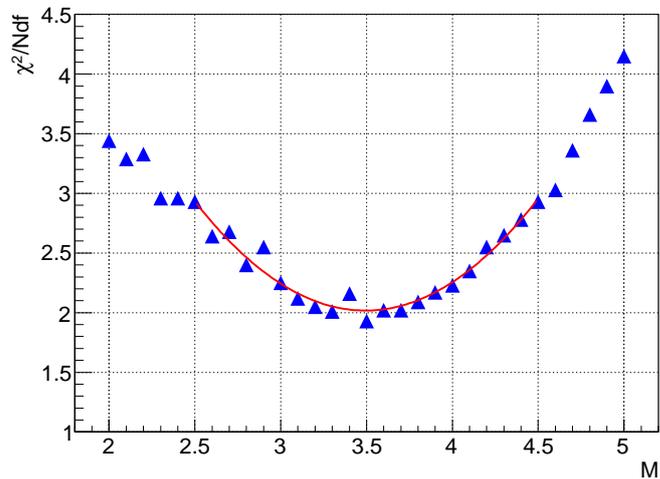


図 4.25: 増幅過程のポアソン分布平均値の最適化: 増幅過程のシミュレーションにより得られた 1 p.e. 分布を用いて再現したヒストグラムで 1 p.e. ゲイン測定の QDC ヒストグラムをフィッティングして得られる χ^2 の M 依存から M の最適な値を求める。横軸は増幅過程におけるポアソン分布の平均値 M で、縦軸が χ^2/Ndf である。最小値付近を二次関数でフィッティングした結果 (赤線)、頂点は $M = 3.49$ となった。

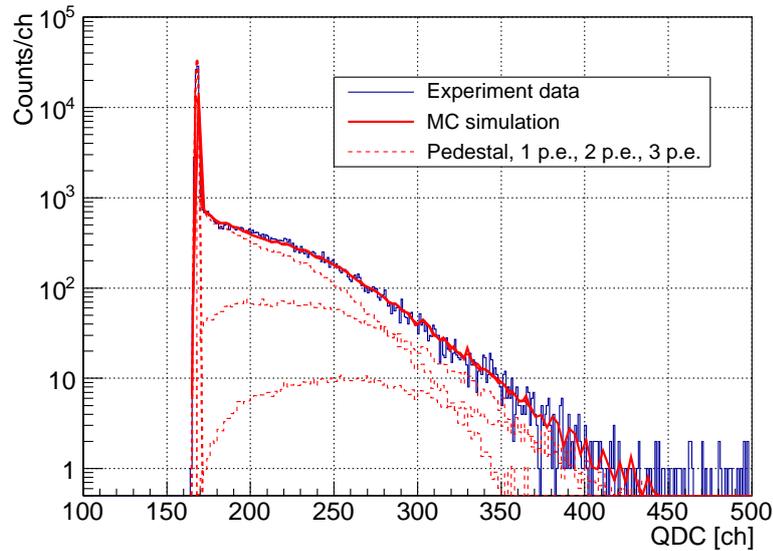


図 4.26: 再現した 1 p.e. ゲイン測定の QDC ヒストグラム：青線が実験データ、赤実線が再現したヒストグラム、再現にはペダスタル + 1 p.e. + 2 p.e. + 3 p.e. の分布を用いた (赤破線)

4.3.2 シリカエアロゲルに関するパラメーター

シリカエアロゲルに関するパラメーターは屈折率、散乱長、吸収長の 3 つである。

屈折率

試作機テスト実験には屈折率 1.10 及び 1.09 のエアロゲルを使用した。この屈折率の値は波長が 405 nm の光を用いて測定された値である。一般的に屈折率には波長依存性があるため、シミュレーションにはその効果を取り入れる。シリカエアロゲルの屈折率の波長依存性は他の文献で調べられている [19][20]。波長依存性についていくつかの計算モデルがあるが、今回は one pole model を用いた。入射光の波長 λ と屈折率 $n(\lambda)$ との関係は

$$n(\lambda)^2 - 1 = \frac{a_0 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (4.7)$$

と表される。ここで、 a_0 は密度に比例した係数である。 λ_0 は定数で参考文献から 90 nm とした。使用したエアロゲルの場合、 $n(\lambda = 405 \text{ nm})$ の値は 1.10 あるいは 1.09 であるためそれぞれの a_0 の値を求めることが出来る。この a_0 と λ_0 から屈折率の波長依存を計算出来る。このように計算した屈折率を図 4.27 に示す。この波長依存をシミュレーションに取り入れた。

散乱長

散乱長は透過率から計算される。本来透過率は散乱と吸収の 2 つの影響によって決まるが、シリカエアロゲルの場合は吸収長が散乱長に比べて非常に長いため、透過率から計算

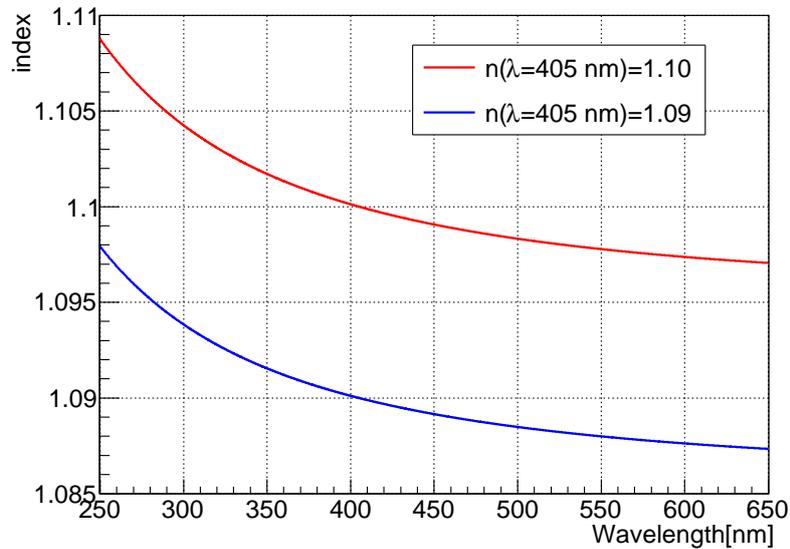


図 4.27: エアロゲル屈折率の波長依存：赤線が 405 nm での屈折率が 1.10 のエアロゲル、青線が 1.09 のエアロゲルである。

される透過長を散乱長とみなすことが出来る。使用したエアロゲルの透過率は千葉大学において測定されており、そのデータを用いて散乱長を計算した(図 4.28)。その値をシミュレーションに取り入れた。

吸収長

シリカエアロゲルの吸収長の測定は非常に困難である。そのため、過去に行われたエアロゲルチェレンコフ検出器のシミュレーションでは実験データを再現するような値を帰納法的に求める手法がとられている。今回もそのようにして吸収長を決定する。波長依存性には様々なモデルがあるが、今回は散乱長と同じ波長依存性を持つと仮定する。入射光の波長が λ の時の吸収長 $L_{abs}(\lambda)$ は散乱長 $L_{scatt}(\lambda)$ を用いて

$$L_{abs}(\lambda) = Abs \times L_{scatt}(\lambda) \quad (4.8)$$

と表すことにする。この吸収長係数 Abs の値を実験データの再現から帰納法的に求める。

吸収長以外のパラメーターを調整した上でテスト実験のセットアップを再現し陽電子ビームを打ち込むシミュレーションを行って $N_{p.e.}$ ヒストグラムを作る。この再現した $N_{p.e.}$ ヒストグラムでテスト実験のデータをフィッティングすることにより得られる χ^2 の Abs 依存から最適な Abs の値を決定する。得られた χ^2 の Abs 依存を図 4.29 に示す。最小値付近を二次関数でフィッティングした結果、極小点の Abs の値は 102.5 となった。以後シミュレーションには $Abs = 100$ という値を使用する。

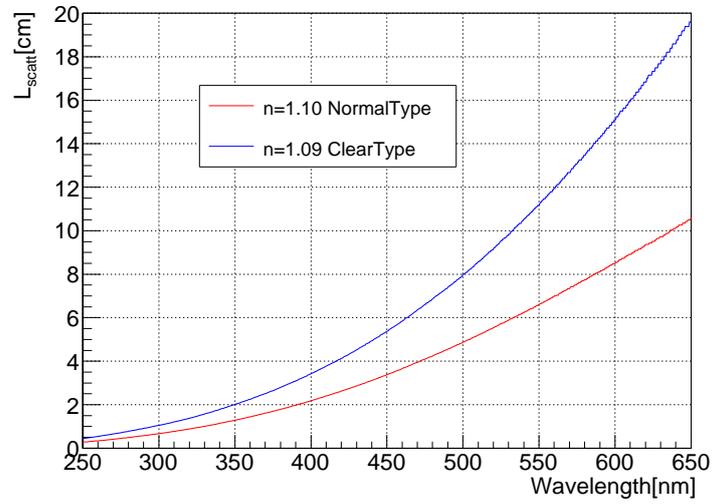


図 4.28: 試作機テスト実験で使用したエアロゲルの散乱長：赤線が屈折率 1.10 ノーマルタイプのアロゲル、青線が屈折率 1.09 クリアタイプのアロゲルである。

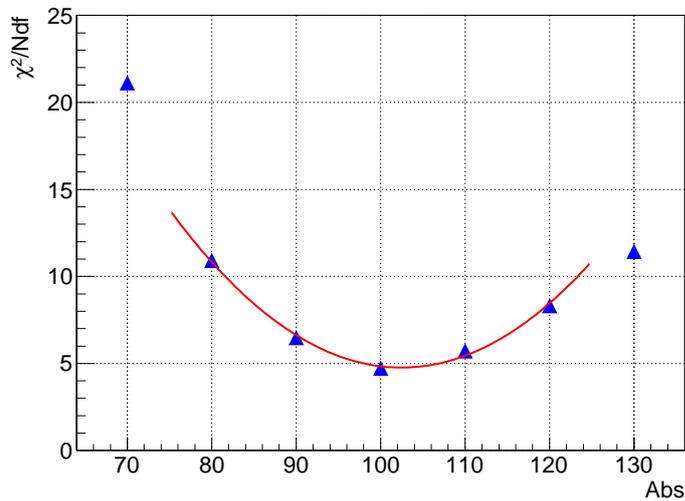


図 4.29: エアロゲルの吸収長係数の最適化：シミュレーションにより再現した $N_{p.e.}$ ヒストグラムで実験データをフィットして得られる χ^2 の Abs 依存から最適な吸収長係数 Abs を求める。最小値付近を二次関数でフィッティングした結果（赤線）、極小点の Abs の値は 102.5 となった。

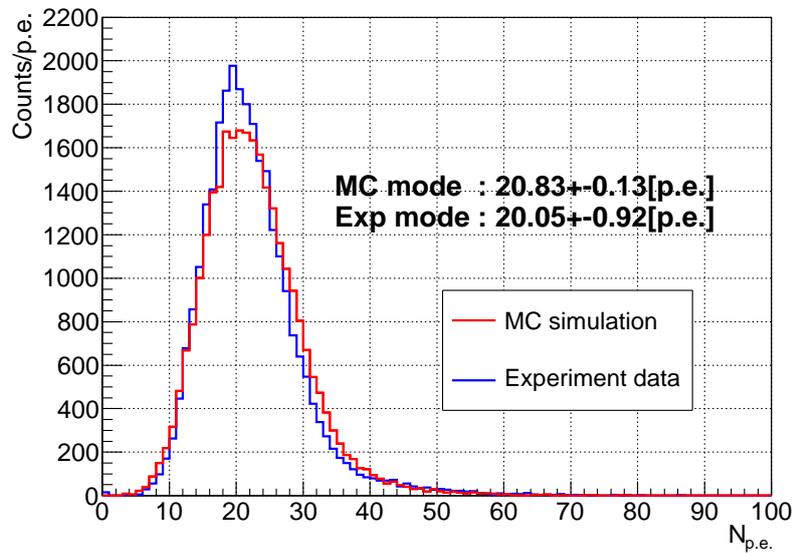


図 4.30: $N_{p.e.}$ ヒストグラムの再現：青線が実験データ、赤線が再現したヒストグラムである。ヒストグラムの最頻値の位置はよく再現できている。

4.3.3 試作機テスト実験の再現

調整したパラメータを用いて、試作機テスト実験の再現を行った。調整したパラメータのうち 1 p.e. ゲイン以外は Geant4 にパラメーターとして入力し、テスト実験と同様に 2 台のトリガーカウンターと 4 台のシャワーベトカウンターを配置し陽電子ビームを打ち込んだ。こうして行ったシミュレーションで得られたデータに対してテスト実験と同様にビームイベントの選別を行い、得られた光電子 1 つ 1 つを 1 p.e. 分布でなませることにより $N_{p.e.}$ ヒストグラムを再現した。図 4.30 に再現した $N_{p.e.}$ ヒストグラムを示す。このヒストグラムは 30 mm 厚のノーマルタイプエアロゲルの場合の例である。前節の吸収長の調整はこの条件のデータを用いたため最頻値は合っている。

別の条件での再現性を確認するためエアロゲルの種類と厚みを変えシミュレーションを行い、光量の傾向を調べた。その結果を図 4.31 に示す。クリアタイプでは全体的に実験データよりもシミュレーションの方が 1 割程度光量が多くなっている。一方、ノーマルタイプではどの厚みにおいても良く再現できている。以上のように試作機テスト実験のデータを用いたパラメータの調整を行うことで、光量にして 10% 程度の精度を持つシミュレーションを行うことが出来た。

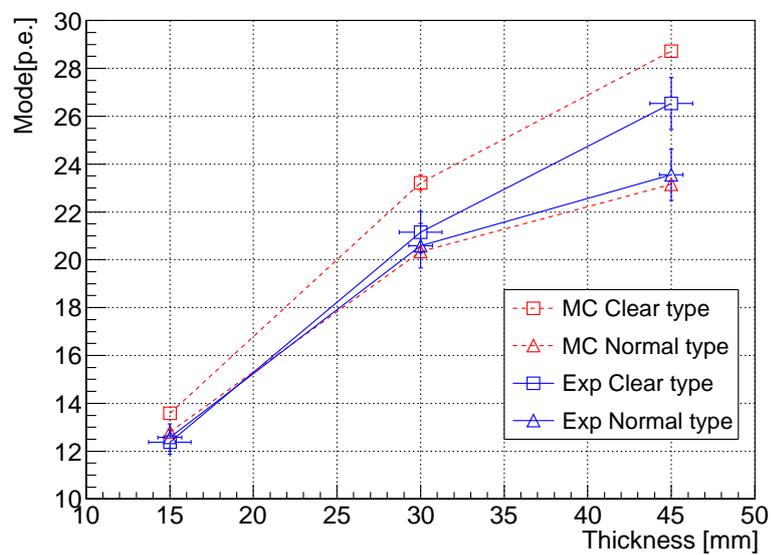


図 4.31: エアロゲルの種類、厚みの比較の再現：青が実験データ、赤がシミュレーションである。また、四角のマークがクリアタイプ、三角がノーマルタイプである。クリアタイプでは全体的にシミュレーションの方が光量が大きくなった。ノーマルタイプではどの厚みにおいてもよく再現できている。

第5章 実機の性能評価

AC 検出器試作機テスト実験の結果から実機のデザインを決定した。そのデザインで実機の作製を行い 2016 年 11 月から 12 月にかけて陽電子ビームを用いたテスト実験を行った。この実験の目的は、レート耐性の調査と AC 検出器の設定 (1 p.e. ゲイン、電圧閾値) を変えた場合の性能評価及び位置依存の調査である。

5.1 実機のデザインと作製

5.1.1 実機のデザイン

AC 検出器試作機のテスト実験の結果から、使用するエアロゲルと反射材を決定した。エアロゲルは 30 mm 厚、屈折率 1.10、ノーマルタイプのもを使用する。反射材は乱反射するテフロンを 3 枚重ねで使用する。

表 5.1 に AC 検出機実機各セグメントの内サイズを示す。エアロゲルを入れる際のバッファとして Room1 と Room2 は $(x, y, z) = (1 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 1 \text{ mm})$ 、Room3 は $(x, y, z) = (1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 1 \text{ mm})$ 、Room4 は $(x, y, z) = (2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 1 \text{ mm})$ の余裕を持たせた。

図 5.1 に AC 検出器実機のデザインを示す。最も外側のフレームには 6 mm 厚のアルミニウム板を用いた。各セグメントは 0.3 mm 厚のアルミニウム板の仕切りで隔てられている (黒矢印)。セグメントの内側には反射材を 3 枚重ねで貼ってある。ビームに近い部分は物質量を減らす必要がある。そのために、Room1 及び Room2 の PMT とは反対側の面は 0.3 mm 厚のアルミニウムを用いた。また、Room1 及び Room2 の側面は外側のフレームとは別パーツとし、6 mm 厚の亚克力を用いた (橙矢印)。外側のフレームはビームから離すために亚克力の側面パーツと 40 mm の距離を空け、六角スペーサーにより側面パーツを支えた。ビーム方向の上流及び下流の粒子入射面は 2 mm 厚の亚克力を用いた。

表 5.1: AC 検出器実機各セグメントの内サイズ

	x	y	z
Room1	76 mm	186 mm	81 mm
Room2	76 mm	186 mm	81 mm
Room3	76 mm	402 mm	81 mm
Room4	332 mm	402 mm	81 mm

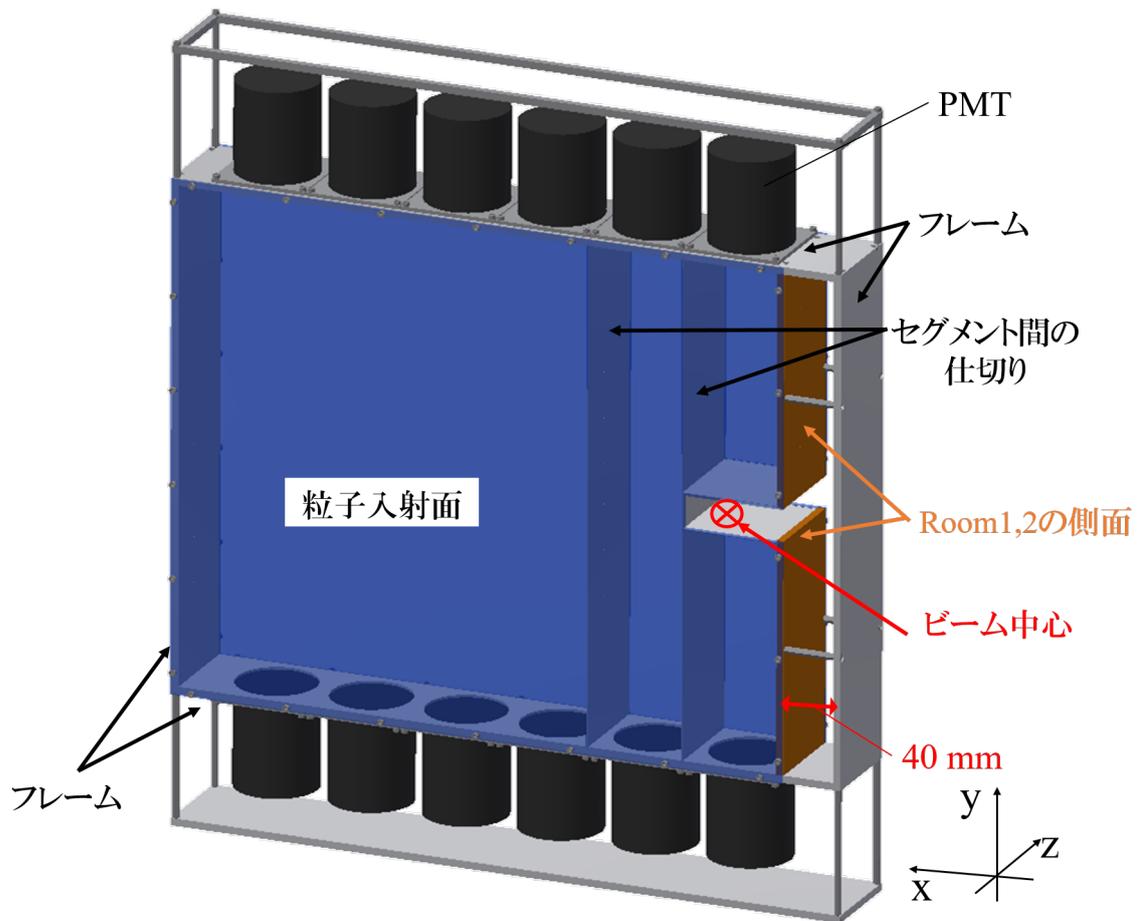


図 5.1: AC 検出器実機的设计: 灰色のパーツにはアルミニウム、青色と橙色のパーツにアクリルを用いる。上下の黒い円柱はPMTである。

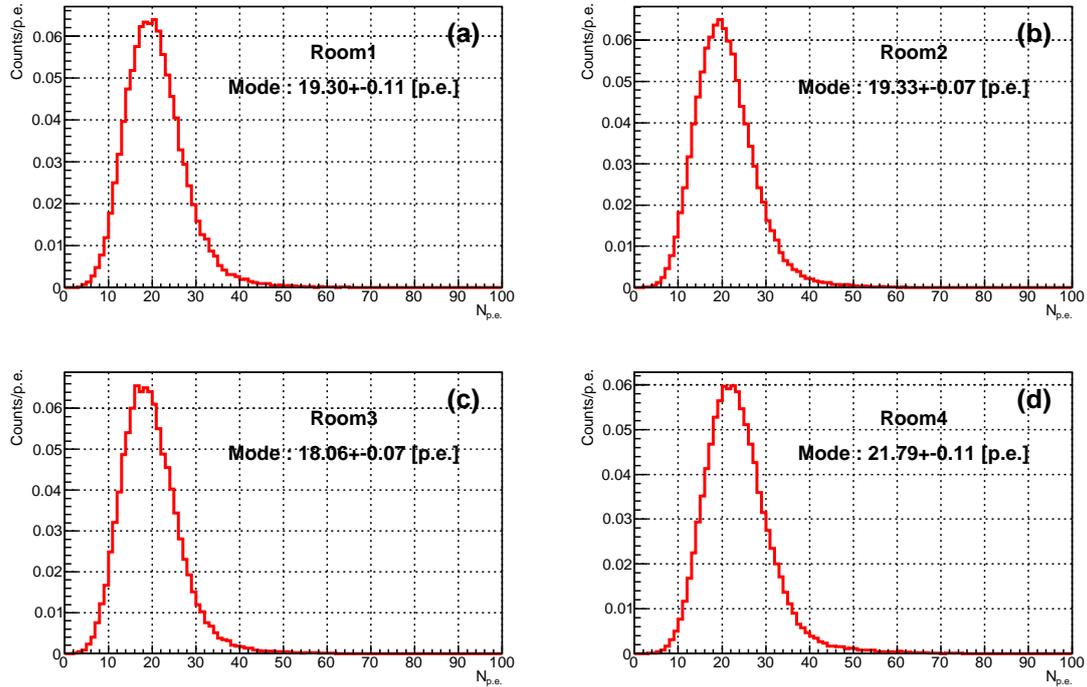


図 5.2: 実機デザイン検証のためのシミュレーション：(a) から (d) はそれぞれ Room1 から Room4 の $N_{p.e.}$ ヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの最頻値は Room1 と Room2 が 19 p.e. 程度、Room3 が 18 p.e. 程度、Room4 が 22 p.e. 程度となった。

5.1.2 シミュレーションによる実機デザインの評価

決定した AC 検出器のデザインで十分な性能が得られるかを検証するため、シミュレーションにより後述の陽電子ビームを用いたテスト実験で得られる光量の見積もりを行った。シミュレーションには前章で調整したパラメータを用いた。Room3 と Room4 はイベントごとにそのセグメントの各 PMT の光電子数を足し合わせた数をセグメントとしての光電子数とし、 $N_{p.e.}$ ヒストグラムを作成した。得られた $N_{p.e.}$ ヒストグラムを図 5.2 に示す。(a) から (d) はそれぞれ Room1 から Room4 の $N_{p.e.}$ ヒストグラムである。それぞれのヒストグラムの最頻値は Room1 と Room2 が 19 p.e. 程度、Room3 が 18 p.e. 程度、Room4 が 22 p.e. 程度となった。試作機では低いビームレートの測定において光量約 20 p.e. で検出効率が 99.9% 以上であったため、このデザインの実機でも同等の性能が得られると見積もられた。

5.1.3 実機組立て

シミュレーションにより、決定したデザインの実機において試作機と同等の性能が見積もられたため実際に組み立てを行った。実機の詳細な構造について説明する。

検出器内でエアロゲルが動くことを防ぐために試作機と同様に側面と仕切りに開けた穴

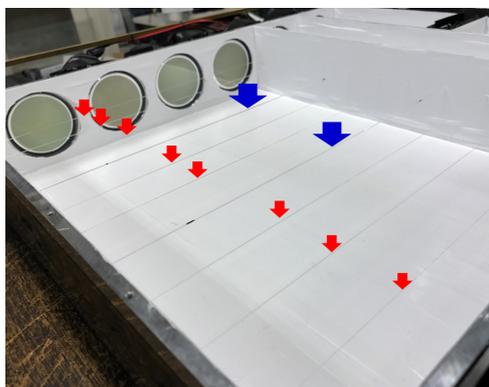


図 5.3: ナイロン糸と光ファイバーを張った AC 検出器実機の内部：赤矢印はナイロン糸を、青矢印は光ファイバーを示している。



図 5.4: エアロゲルを入れた AC 検出器実機の内部：この写真はビーム下流側の面を取り外して撮影した。エアロゲルはナイロン糸により倒れることなく固定されている。

に通した糸により固定する。しかし、今回は使用するエアロゲルの枚数が多く、その重量を支える必要があるため、伸縮性の小さいナイロン糸を 2 本束ねて使用した。

実機でも LED を用いた 1 p.e. ゲインの測定を行うため、LED の光を検出器内へ入れる必要がある。そのために、ナイロン糸を通すために開けた穴と同様の穴を開け、数か所に傷をつけたプラスチック製の光ファイバーを通して、ファイバー端面に LED を取り付けた。こうすることで、光ファイバーにつけた傷から LED の光を各セグメント内へ入れることが出来る。この傷のつけ方で検出器内へ入る光量が変わるため、一部分をマジックで黒く塗ることで光量を調節した。このような光ファイバーを上下 1 本ずつ設置しすべてのセグメントに光が入るようにした。図 5.3 にナイロン糸と光ファイバーを張った実機内部を示す。赤矢印がナイロン糸を、青矢印が光ファイバーを示している。エアロゲルを入れた状態の検出器内部の写真を図 5.4 に示す。この写真はビーム下流側の面を取り外して撮影した。エアロゲルはナイロン糸により倒れることなく固定されている。

エアロゲルのタイル 1 枚の厚みは 15 mm であるため 2 枚重ねて使用する。5 種類のサイズのタイルを使用し、y 方向の継ぎ目が重ならないように互い違いに入れた。表 6.1 に各タイルのサイズを、図 5.5 にタイルの配置を示す。

表 5.2: AC 検出器実機に使用したエアロゲルのタイルのサイズ

サイズ番号	x	y
①	75 mm	85 mm
②	75 mm	100 mm
③	75 mm	50 mm
④	110 mm	100 mm
⑤	110 mm	50 mm

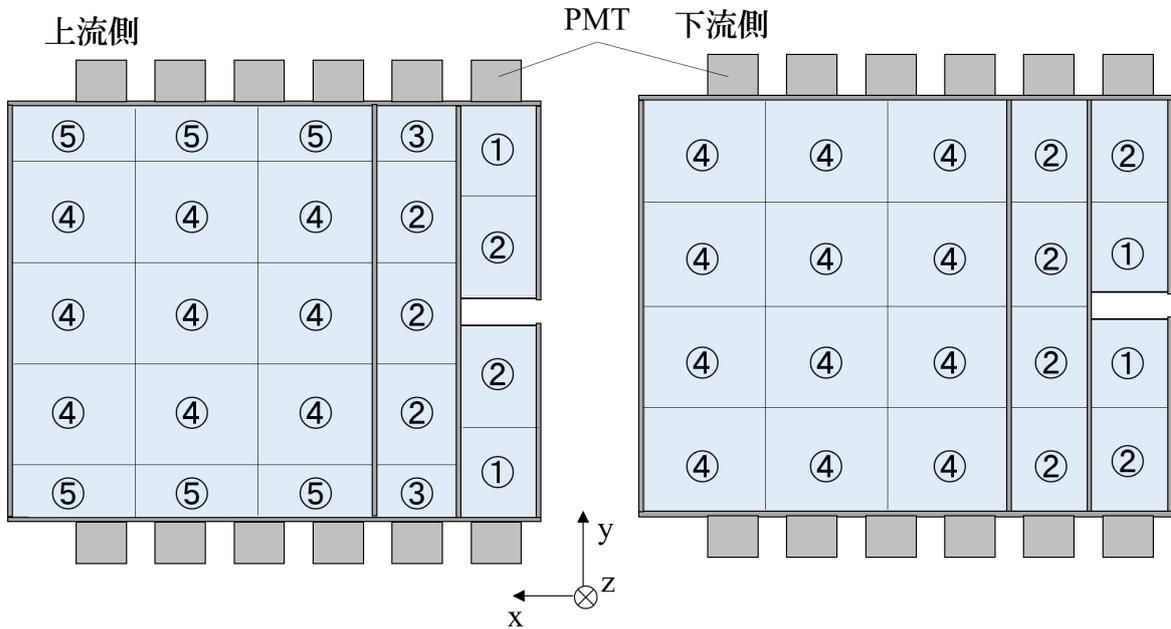


図 5.5: エアロゲルタイルの配置図: 5 種類のサイズのエアロゲルを用いて、y 方向の継ぎ目が重ならないように配置した。① から ⑤ は表 6.1 のサイズ番号に対応している。

5.2 陽電子ビームを用いた AC 検出器実機の性能評価実験

5.2.1 性能評価実験の概要と目的

2016年11月から12月にかけて、東北大学電子光物理学研究センターにおいて陽電子ビームを用いた AC 検出器実機のテスト実験を行った。実験は GeV- γ 照射室の検出器テスト用電子・陽電子ビームラインにおいて運動量 600 MeV/c の陽電子ビームを使用し、3日間行った。この実験の目的は、レート耐性の評価、AC 検出器の設定 (1 p.e. ゲイン、閾値電圧) を変えた場合の性能評価及び位置依存の調査である。AC 検出器の性能は試作機テスト実験の時と同様に光量 (光電子数) と検出効率で評価する。実験項目は次の通りである。

- レート耐性の評価
- AC 検出器の設定 (1 p.e. ゲイン、閾値電圧) を変えた検出効率の比較
- 位置依存の調査
- セグメントの中間位置 (仕切りの位置) への入射の影響の調査

5.2.2 セットアップ

この実験では試作機テスト実験と同様に、AC 検出器の他に 2 台のトリガーカウンター (T1, T2) と 4 台のシャワーベトカウンター (V1, V2, V3, V4) を用いた。AC 検出器を含む各検出器の QDC 情報の取得には CAEN V792 を使用し、TDC 情報の取得には CAEN V755 を使用した。また、AC 検出器の閾値電圧を頻繁に変える必要があるため、Discriminator モジュールとして CAEN V895 を使用し、リモートで閾値電圧の変更を行った。実験 2 日目の測定からは、Hadron Universal Logic module[21] を用いてイベントごとに各検出器のスケーラー情報の取得も行った。

- AC 検出器
ビームの入射位置を表すために図 5.6 のような AC 検出器上の座標を用いた。この座標では J-PARC E40 実験においてビームが通る位置を原点とした。赤印で示した場所を各セグメントの基本入射位置とし、位置依存の測定ではそれに加えて黒印の位置にもビームを照射した。AC 検出器は 12 個の PMT によってチェレンコフ光の読み出しを行う。PMT の識別のために x 座標の小さい順に番号を振り、上側を U、下側を D として図 5.6 のように名付けた。

試作機テスト実験の結果を反映し、AC 検出器は高いレート環境下でのゲインドロップを防ぐために印加電圧を低く設定する。しかし、そのままでは信号が小さいためアンプモジュールにより信号を 10 倍に増幅して各 PMT の信号を読み出した。Room3 には 2 個 (2U, 2D)、Room4 には 8 個 (3U, 4U, 5U, 6U, 3D, 4D, 5D, 6D) の PMT があり、これらをそれぞれ 1 つのセグメントとして読み出すために Liner Fan-in-Fan-out (Liner FI/FO) モジュールを用いて 2 個あるいは 8 個の信号を足し合わせた。ただし、Room4 は 4 個ずつの信号を足し合わせた後にもう一度足し合わせることで 8 個の信号を加算した。各 PMT とは別に、この足し合わせた信号の QDC 情報及び

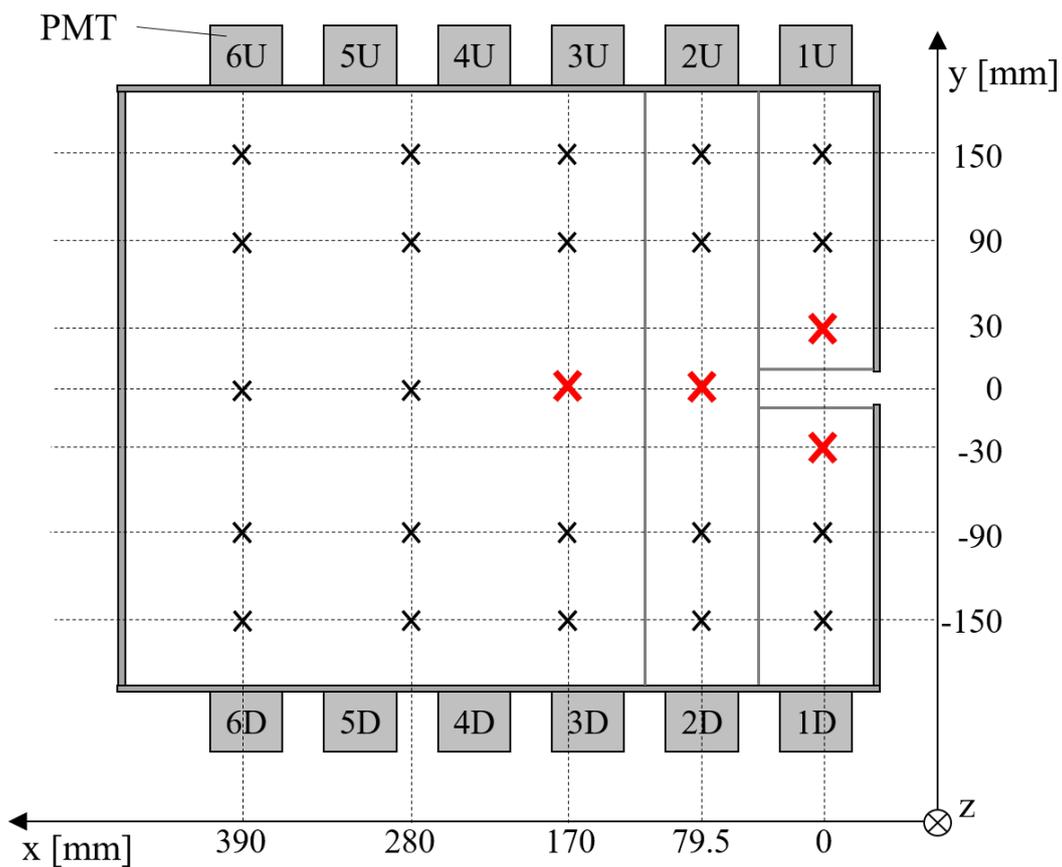


図 5.6: AC 実機上の座標 : J-PARC E40 実験においてビームが通る位置を座標の原点とした。赤印で示した点が各セグメントの基本のビーム入射位置である。それ以外の点 (黒印) は位置依存性の調査の際のビーム入射位置である。PMT は x 座標の小さいものから番号を振り、上側を U、下側を D とした。

表 5.3: 印加電圧のテーブル

1 p.e. ゲイン	印加電圧 [kV]											
	1U	2U	3U	4U	5U	6U	1D	2D	3D	4D	5D	6D
20 ch/p.e.	1.48	1.44	1.34	1.10	1.42	1.24	1.30	1.18	1.24	1.26	1.20	1.10
40 ch/p.e.	1.62	1.56	1.46	1.22	1.56	1.34	1.42	1.28	1.36	1.38	1.30	1.20
60 ch/p.e.	1.70	1.64	1.54	1.28	1.64	1.40	1.50	1.34	1.42	1.46	1.38	1.26

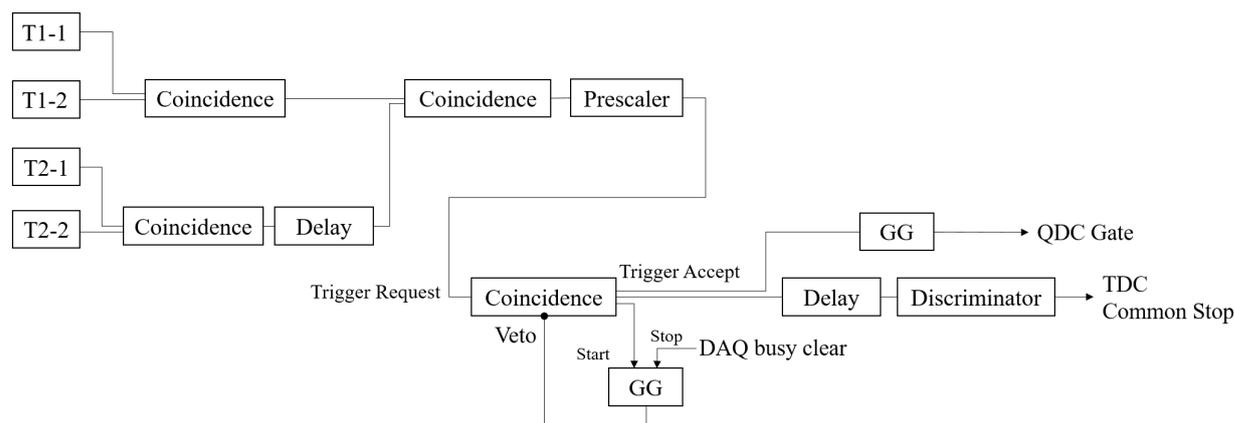


図 5.7: トリガー生成の回路

TDC 情報も取得した。Room3, Room4 では複数の PMT の信号を足し合わせるため、各 PMT の 1 p.e. ゲインを揃え、かつそれを変化させる必要がある。そのため、1 p.e. ゲインが 20, 40, 60 ch/p.e. になる 3 通りの印加電圧のテーブルを実験前に作成した (表 5.3)。1 p.e. ゲインを変えた測定はこの 3 通りで行った。

- トリガーカウンター及びシャワーベトカウンター
この実験では試作機テスト実験と同様に、セットアップ最上流に設置した T1 と最下流に設置した T2 によりトリガーを生成する。また、電磁シャワーを起こしたイベントを除去するために AC 検出器の下流にシャワーベトカウンター V1 から V4 を設置する。T2 以外のカウンターは試作機テスト実験の時と同じものを使用したため、説明は省略する。今回使用した T2 は有感領域が 80 mm × 30 mm で左右両読みのプラスチックシンチレーション検出器である。T1 と同様にビーム上流側から見て右側の PMT を T2-1、左側の PMT を T2-2 と名付ける。トリガータイミングは T2 で決まる様にした。図 5.7 にトリガー生成の回路図を示す。ビームレートが高くなるとデータ取得の効率が悪くなるため、Prescaler モジュールによりイベントをサンプリングした。

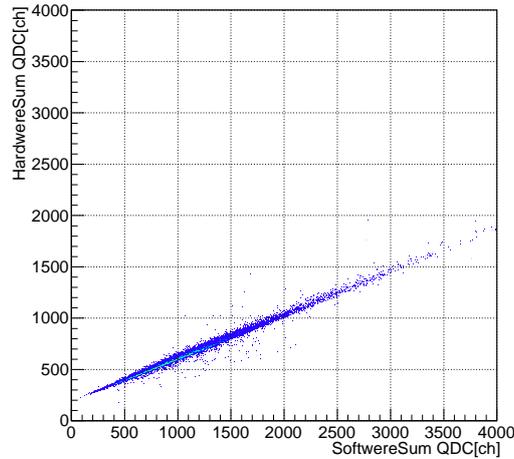


図 5.8: Room3 のソフトウェアサムとハードウェアサムの相関

5.2.3 解析手法

AC 検出器の性能は光量（光電子数）と検出効率によって評価する。ここでは、光量と検出効率の導出方法、閾値電圧から対応する光電子数への変換、スケーラー情報の利用方法について説明する。

光量

試作機テスト実験と同様に、各 PMT の 1 p.e. ゲインは LED を微弱に光らせて取得した QDC ヒストグラムから計算した。この 1 p.e. ゲインの値を用いて QDC チャンネル数から光電子数 ($N_{p.e.}$) へ変換する。

各 PMT については、それぞれの $N_{p.e.}$ ヒストグラムの最頻値をその PMT の光量とする。各セグメントについて、Room1 と Room2 は PMT が 1 個であるため、その PMT の光量をそのままセグメントの光量とした。Room3 と Room4 は複数の PMT があり、個々の PMT の QDC 情報と、Liner FI/FO で足し合わせるハードウェアサムを行った信号の QDC 情報を取得した。Liner FI/FO には各 PMT の信号を Divider で分けて入力したため 1 p.e. ゲインは半分になる。また、一般的に Liner FI/FO のゲインは 1 ではない。よって、ハードウェアサムの QDC に対する 1 p.e. ゲインは各 PMT の 1 p.e. ゲインの平均値に補正係数をかけたものとし、補正係数の値を求めるためにハードウェアサムの QDC の値と、各 PMT の QDC の値を足し合わせたソフトウェアサムの相関をとった。

図 5.8 に Room3 に陽電子ビームを照射した場合の Room3 のソフトウェアサムとハードウェアサムの相関を示す。この傾きから補正係数の値を Room3 の場合は 0.4、Room4 の場合は 0.2 とした。Room4 は 4 個の信号を足し合わせた後にもう一度足し合わせているため補正係数は小さくなるが、それを考慮しても小さい値となった。Room3 と Room4 は、この補正係数を使って計算した 1 p.e. ゲインの値を用いて QDC から $N_{p.e.}$ への変換を行った。また、オフラインの解析ではイベントごとに各 PMT の光電子数を足し合わせてセグメントの光電子数とするソフトウェアサムを行った。

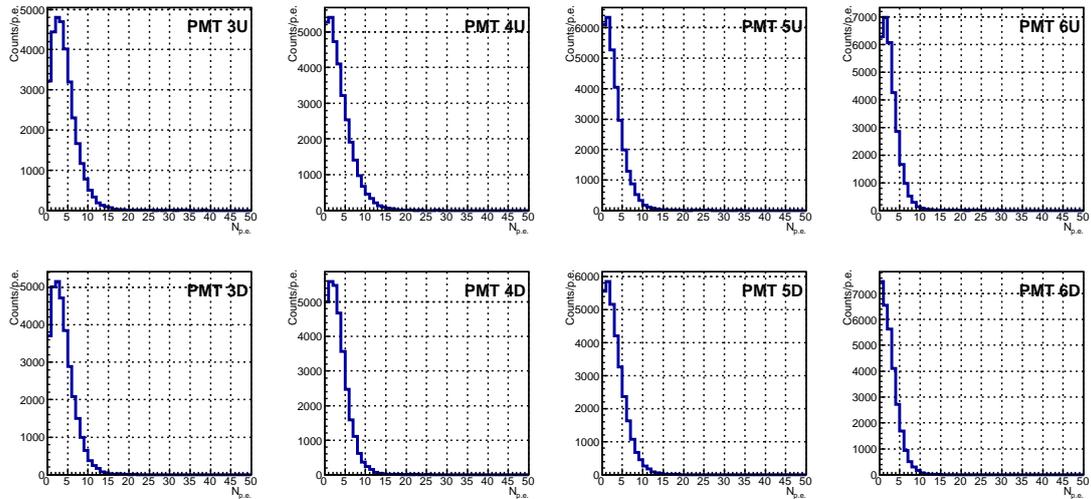


図 5.9: Room4 の基本位置に陽電子ビームを照射した時の Room4 各 PMT の $N_{p.e.}$ ヒストグラム

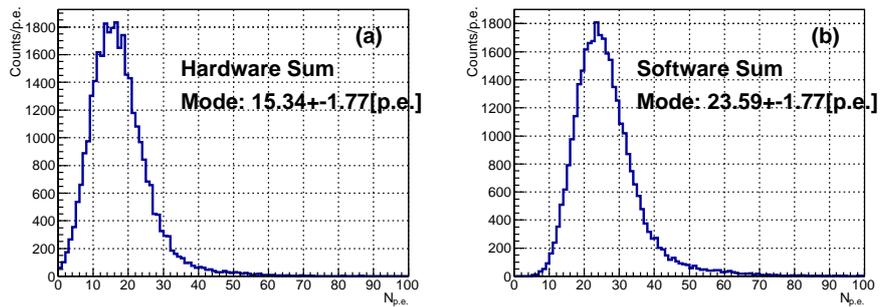


図 5.10: 加算した Room4 の $N_{p.e.}$ ヒストグラム : (a) はハードウェアサムにより得られたヒストグラムで、(b) はソフトウェアサムにより得られたヒストグラムである。足し合わせると十分な光電子数が得られた。ハードウェアサムとソフトウェアサムを比較すると、ヒストグラムの形は同じであるがハードウェアサムの方が光電子数の少ない方へシフトしていた。

図 5.9 に Room4 の基本位置に陽電子ビームを照射した際に得られた Room4 内の各 PMT の $N_{p.e.}$ ヒストグラムを示す。図 5.10 にハードウェアサムとソフトウェアサムにより得られる Room4 の $N_{p.e.}$ ヒストグラムを示す。各 PMT の光電子数は少ないが、セグメント全体としては十分な光量が得られている。しかし、ハードウェアサムとソフトウェアサムのヒストグラム同士を比べるとヒストグラムの形は同じだが、ハードウェアサムの方が全体的に光電子数の少ない方へシフトしている。このシフトの大きさは最頻値の差から 8 p.e. 程度であることが分かる。このシフトの原因は、後述の信号ベースラインのシフトに起因するペDESTALのシフトによるものであると考えられる。より正確な評価のためにオフラ

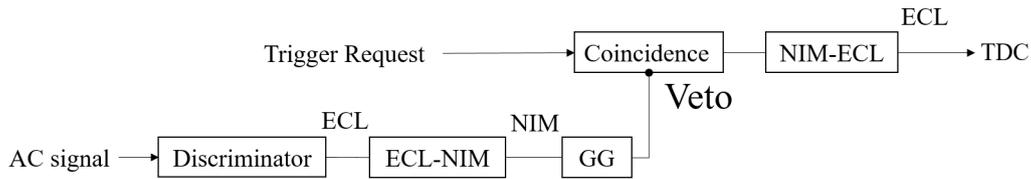


図 5.11: 検出効率導出のために付け加えた回路

イン解析ではソフトウェアサムの $N_{p.e.}$ 、ヒストグラムの最頻値をセグメントの光量とした。

検出効率

試作機テスト実験では、オフライン解析においてトリガーカウンターの TDC 情報によりビームイベントを選別し、シャワーベトカウンターの ADC 情報によりシャワーイベントを除去することで全イベント数を求め、AC 検出器の TDC 情報から検出数を求めることで検出効率を導出した。しかし、この実験では TDC 情報の取得に CAEN V775 を Common Stop モードで使用したため、TDC に入力する Start 信号のレートが高い場合は TDC の不感時間が増え、正確な検出効率が評価できないという問題が起こった。

より正しく検出効率を導出するために、TDC 情報をなるべく用いない解析方針をとった。まず、 N_{Beam} の見積もりには QDC 情報のみを用いる。トリガーカウンターの QDC を確認したところ変わった分布は見られなかったため、シャワーベトカウンターの QDC 情報を用いてシャワーイベントを除去したイベント数を N_{Beam} とした。次に、図 5.11 の回路を実験中に付け加えた。トリガー信号を Coincidence モジュールに入力し、AC 検出器信号の Discriminator 出力を Veto 信号として入力することで、AC 検出器で検出できなかったビームのトリガー信号を選び出す。この信号を TDC で読み出した。AC 検出器の検出効率は非常に高いため、この信号のレートは低くなり TDC の不感時間による問題は起こらない。Room1 と Room2 の測定ではそれぞれの PMT の信号を、Room3 と Room4 の測定ではハードウェアサムをした信号を Veto 信号として入力した。この回路は J-PARC E40 実験における AC 検出器の運用方法に近く、より実用的な検出効率が導出できる。この信号の TDC エントリー数を N_{AC} として検出効率 E を

$$E = 1 - \frac{N_{AC}}{N_{Beam}} \quad (5.1)$$

と計算した。

閾値電圧と光電子数閾値の関係

PMT が 1 個である Room1 と Room2 の閾値電圧と対応する光電子数は、試作機テスト実験と同様にその PMT の QDC 情報と TDC 情報を用いて調べた。Room3 と Room4 に関しては、検出効率をハードウェアサムの信号を使って導出したため、閾値電圧と対応する光電子数の関係もソフトウェアサムではなくハードウェアサムの QDC 情報を使って調べた。

各セグメントの閾値電圧と対応する光電子数の関係から、閾値電圧を光電子数閾値に変換するための関係式を求める。Room3 と Room4 は各 PMT の信号を Divider で分けてか

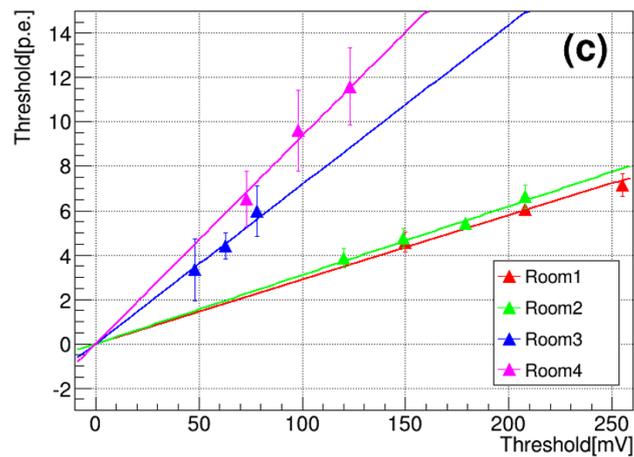
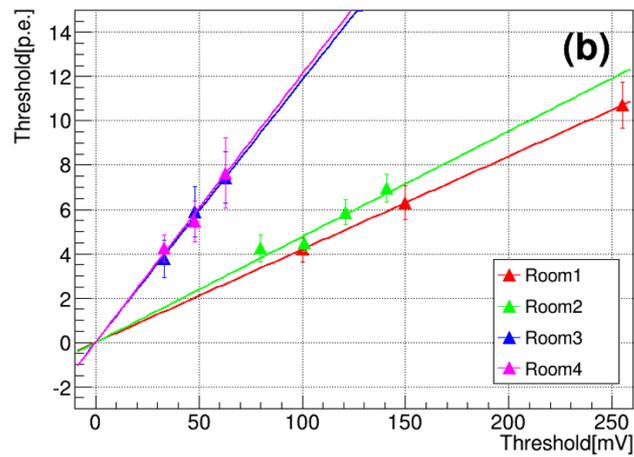
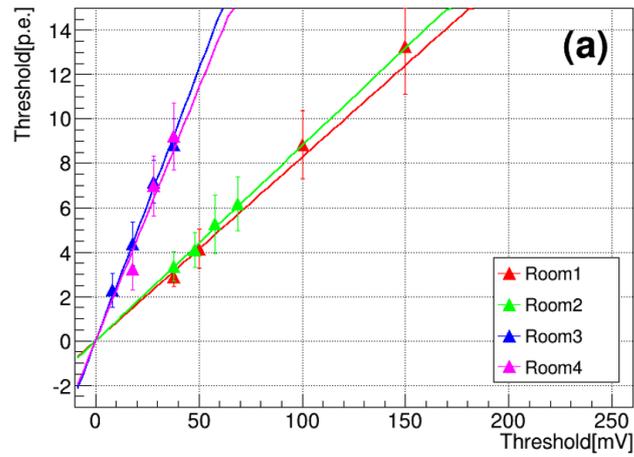


図 5.12: 各 1 p.e. ゲインでの閾値電圧と光電子数の関係 : (a)、(b)、(c) はそれぞれゲイン 20、40、60 ch/p.e. の場合のグラフである。直線がフィッティングの結果である。どのグラフでも Room1 と Room2 の傾きが同程度になり、また Room3 と Room4 の傾きが同程度になった。

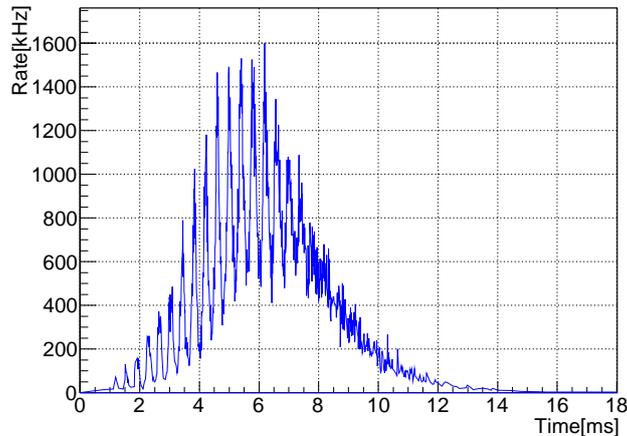


図 5.13: 1 スピルにおける信号レートの時間変化：このグラフは、ビーム 1 スピル内の Room1 の瞬間的な信号レートのグラフである。横軸はスピルの始まりからの時間である。振動しながら山型に変化するスピル構造が見えた。

ら Liner FI/FO へ入力しているため、Liner FI/FO のゲインを考慮しなければ Room1, Room2 の直線の傾きと Room3, Room4 の直線の傾きの比は 1 : 2 になると考えられる。図 5.12 に各セグメントの閾値電圧と対応する光電子数のグラフを示す。(a)、(b)、(c) はそれぞれゲイン 20、40、60 ch/p.e. の場合のグラフである。直線がフィッティングした結果である。どのグラフでも Room1 と Room2 の傾きが同程度になり、また Room3 と Room4 の傾きが同程度になった。このことは、Room3 と Room4 の補正係数に大きな違いがないことを示している。従って、Room4 の補正係数が Room3 と比べて小さい理由は QDC モジュールのチャンネルゲインの差にあると考えられる。

スケーラー情報

この実験では各検出器の信号とクロック信号のスケーラー情報をイベントごとに取得した。そのため、あるイベントに対し 1 つ前のイベントからの検出器信号の増分をクロック信号の増分で割ることにより、瞬間的な信号のレートを見積もることが出来る。オフライン解析ではこの瞬間的な信号のレート情報を利用した。以後、単に信号レートと記す場合は、AC 検出器のビームを照射しているセグメントの瞬間的な信号のレートを指す。

また、信号レートの情報から使用した陽電子ビームが持つビームスピル構造を知ることが出来た。スピルの最初のイベントは一つ前のイベントからある程度時間がたっているため、クロック信号の増分からスピルの始まりを知ることが出来る。Room1 に陽電子ビームを照射した際に得られた Room1 (PMT:1U) の信号レートのビームスピル内の時間変化を図 5.13 に示す。横軸はスピルの始まりからの時間である。使用した陽電子ビームは振動しながら山型に変化するスピル構造を持つことが分かる。振動の周期は 0.2 ms 程度でこれは BST リングを電子が周回する周期とほぼ一致する。

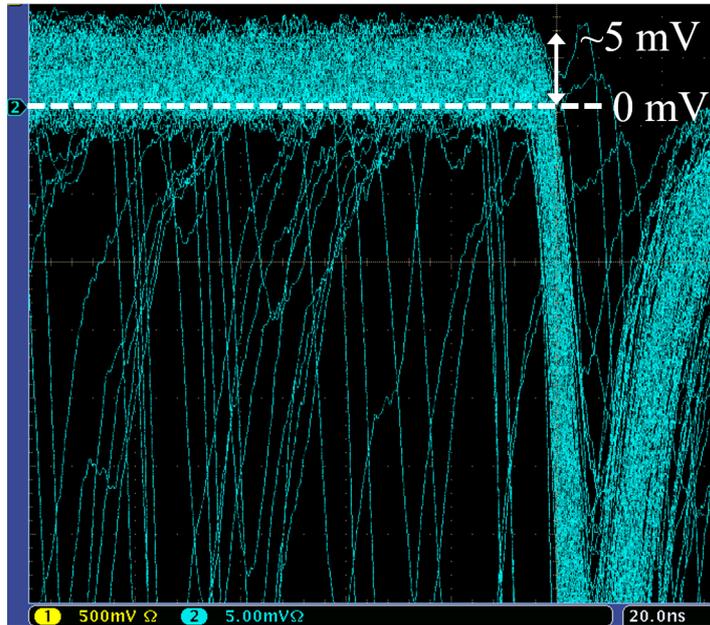


図 5.14: Room1 の信号のベースライン付近の拡大表示：ベースラインが上昇していることが確認できる。その上昇量は最大 5 mV 程度である。

5.2.4 結果

レート耐性の調査

低い印加電圧でのレート耐性の評価を行う必要がある。先ず、実験前に LED の光を用いてゲインドロップの調査を行った(付録)。しかし、その結果では試作機テスト実験の結果と異なる傾向がみられた。より正確にレート耐性を評価するために、信号レートの平均が 500 kHz であるビームを用いて測定を行った。この測定データを前節で示した方法によりスケーラー情報を用いて信号レートによって分け、それぞれの $N_{p.e.}$ ヒストグラムを比較し評価する。しかし、この測定の際に AC 検出器の信号のベースラインが上昇していることが確認されたため、先ずその影響について調べた。

平均が 500 kHz のビームを照射した時の Room1 の信号を図 5.14 に示す。この図は信号のベースライン付近を拡大表示したものである。ベースラインが少し上昇していることが確認できる。その上昇量は最大で 5 mV 程度であった。このベースラインの上昇は PMT の出力が AC カップルである事によるものと考えられる。

ビームを照射しているセグメントとは異なるセグメントの PMT の QDC を確認したところ、その PMT の信号レートに比例してペDESTAL 位置が移動していることが確認できた。QDC で見ているものは電荷量の積分値であるため、ベースラインが上がると電荷量が少なくなりペDESTAL のチャンネル数は小さくなる。QDC モジュールの 1 ch あたりの電荷量を C 、QDC のゲート幅を W 、回路のインピーダンスを Z とすると、ペDESTAL のシフト ΔQDC からベースラインのシフト ΔV は

$$\Delta V = CZ \frac{\Delta QDC}{W} \quad (5.2)$$

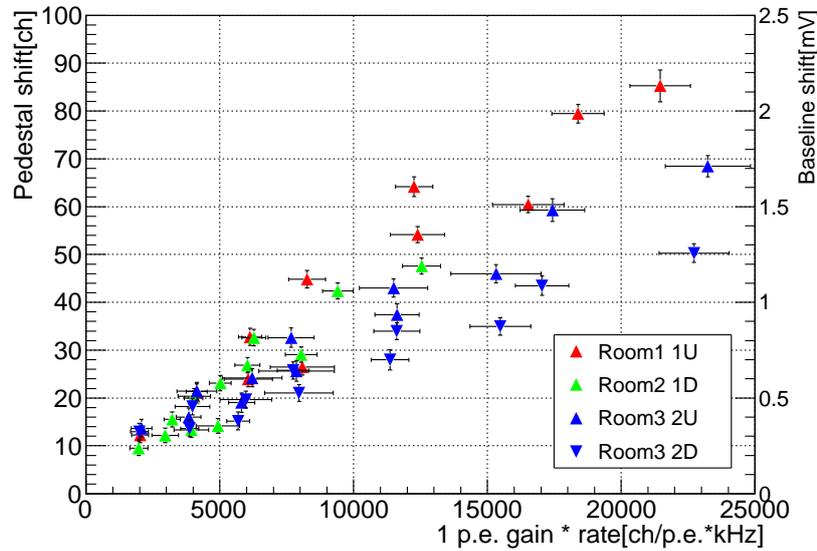


図 5.15: ペDESTALとベースラインのシフト：横軸は1 p.e. ゲインの値に PMT の瞬間的な信号レートをかけたもので、PMT の平均電流に比例した値と考えられる。ペDESTALとベースラインの上昇量はこの値にほぼ比例していることが分かる。

となる。この実験の回路では、 $C=100$ fC、 $W=40$ ns、 $Z=50$ Ω であった。これらの値を用いてペDESTALのシフトからベースラインの上昇量を計算することが出来る。ベースラインの上昇量を Room1, Room2, Room3 の各 PMT について求めた。Room4 については、回路構成の都合により他のセグメントと同時にスケーラー情報を取得できなかったため、ベースラインの上昇量を求めることはできなかった。

図 5.15 にペDESTALとベースラインの上昇量のグラフを示す。横軸は1 p.e. ゲインの値にその PMT の信号レートをかけたもので、PMT の平均電流に比例した値と考えられる。ペDESTALとベースラインの上昇量はこの値にほぼ比例していることが分かる。このグラフから、J-PARC E40 実験での Room1, Room2 の想定トリガーレートである 300 kHz の場合のベースライン上昇量はゲイン 60 ch/p.e. を仮定すると式 5.2 より 2 mV 程度であることが予想される。この値を電圧閾値と光電子数の関係を用いて光電子数閾値に変換すると 0.1 p.e. 以下であるためトリガー生成には影響がほとんどないことが分かった。また、この場合のペDESTALのシフトは QDC が電荷の積分値であるため 80 ch と大きいですが、J-PARC E40 実験において AC 検出器はオンラインでバックグラウンドのイベントを除去することを目的としており、QDC ではなく電圧閾値が重要であるため問題にならないと考えられる。

Room1 の信号レートの平均が 500 kHz である測定データを用いてレート耐性について評価する。まず、測定データを信号レートにより、0 kHz から 200 kHz (平均約 100 kHz)、200 kHz から 400 kHz (平均約 300 kHz)、400 kHz から 800 kHz (平均約 600 kHz) の 3 つの領域に分けてイベントを選別した。それぞれのデータに対してイベントごとに、先ほどのグラフの 1U (Room1) の点を直線でフィッティングして得られた関数と信号レートの値を

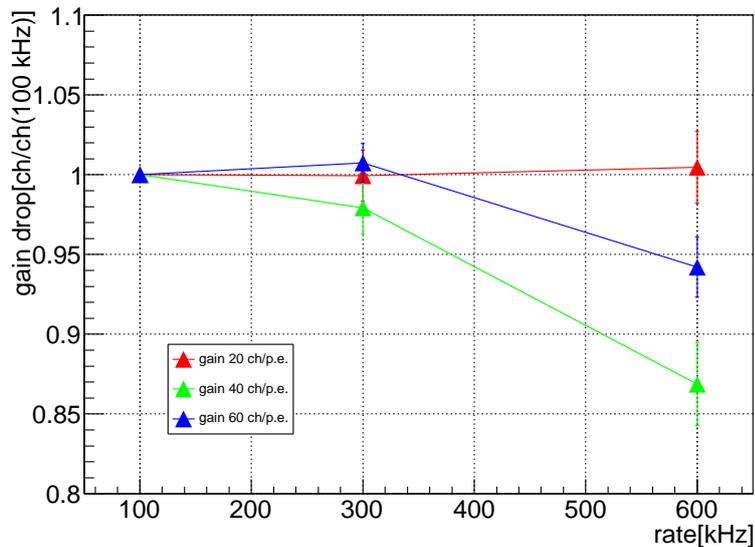


図 5.16: 信号レートに対するゲインドロップの変化：赤がゲイン 20 ch/p.e.、緑がゲイン 40 ch/p.e.、青がゲイン 60 ch/p.e. の場合である。QDC ヒストグラムの最頻値からペDESTALのチャンネル数を引いたものを最もレートの低い信号レート平均約 100 kHz のデータで規格化することでゲインドロップを評価した。

用いてペDESTALシフトの補正を行った。その補正をした QDC ヒストグラムの最頻値からペDESTALのチャンネル数を引いたものを最もレートの低い信号レート平均約 100 kHz のデータで規格化することでゲインドロップを評価した。

図 5.16 に信号レートに対するゲインドロップの変化を示す。赤がゲイン 20 ch/p.e.、緑がゲイン 40 ch/p.e.、青がゲイン 60 ch/p.e. の場合である。ゲイン 20 ch/p.e. ではどの信号レートでもゲインドロップは起こっていない。ゲイン 40, 60 ch/p.e. では信号レート平均約 600 kHz のデータにおいて 1 割程度のゲインドロップが起こっている。また、ゲイン 60 ch/p.e. よりもゲイン 40 ch/p.e. の方がゲインドロップが大きいという傾向がみられたが、これはベースラインシフト補正の不定性によるものであると考えられる。40 ch/p.e. の場合は信号レート平均約 600 kHz のデータにおいても (1 p.e. ゲイン × 信号レート) の値が実際にベースラインのシフト量を測定した範囲に近いためベースラインの補正量は大きく間違っていないと考えられる。一方、ゲイン 60 ch/p.e. の場合は信号レート平均約 600 kHz のデータに対するベースラインの補正量が外挿であるためゲインドロップの度合いが小さく見えていると考えられる。

この測定から、J-PARC E40 実験での想定レートではどのゲインにおいてもゲインドロップはほとんど起こらないことが分かった。

AC 検出器の設定 (1 p.e. ゲイン、閾値電圧) を変えた場合の検出効率の比較

AC 検出器を使用するには 1 p.e. ゲイン、閾値電圧を設定する必要がある。そのため、各設定を変えた場合に AC 検出器の性能がどの様に変化するのか、どの様な設定であれば

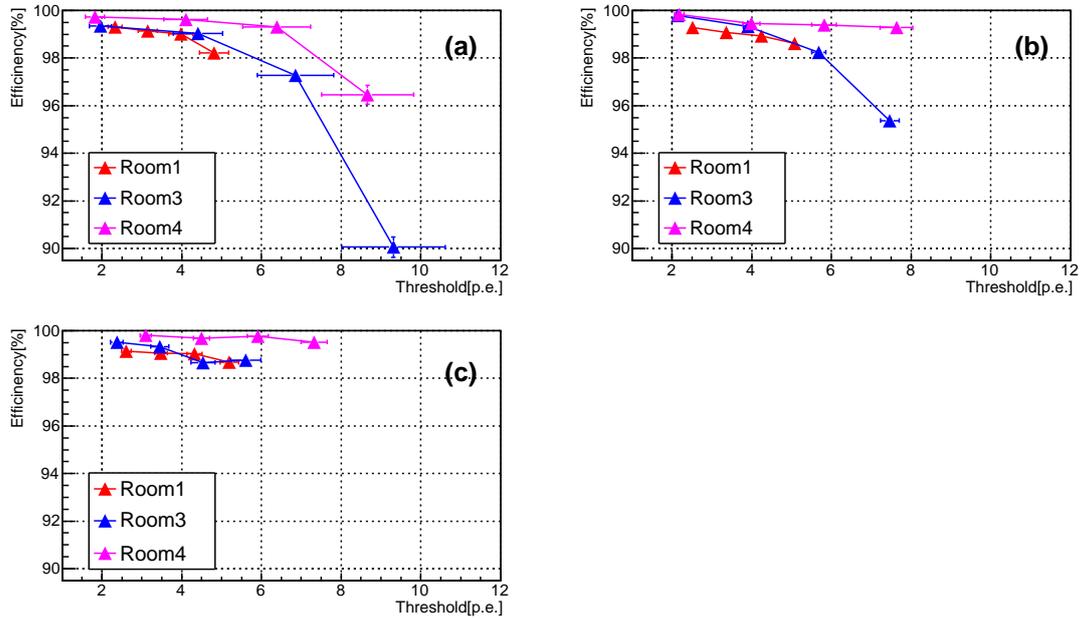


図 5.17: 信号レート平均約 300 kHz での使用条件を変えた検出効率の比較 : (a)、(b)、(c) はそれぞれゲイン 20, 40, 60 ch/p.e. の場合のグラフである。

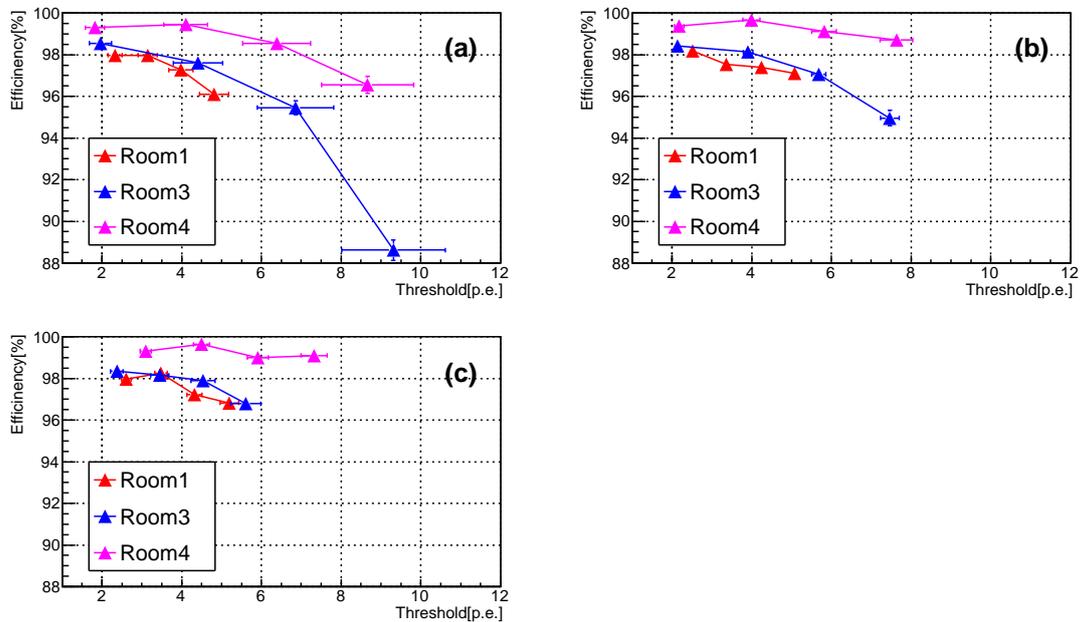


図 5.18: 信号レート平均約 600 kHz での使用条件を変えた検出効率の比較 : (a)、(b)、(c) はそれぞれゲイン 20, 40, 60 ch/p.e. の場合のグラフである。

要求性能を満たすのかを調べた。先ほどと同様に信号レートの平均が 500 kHz の測定で得られたデータを信号レートの値を用いて平均約 300 kHz のデータと、平均約 600 kHz のデータに分け、AC 検出器の設定を変えた場合の検出効率の比較を行った。

まず、図 5.17 に信号レート平均約 300 kHz のデータの結果を示す。これは、J-PARC E40 実験での想定レートと同程度のレートの測定である。(a)、(b)、(c) はそれぞれゲイン 20、40、60 ch/p.e. の場合のグラフである。セグメントを見ると Room4 が最も検出効率が高く、Room1 と Room3 が同程度の検出効率であった。どのゲインでも閾値を 6 p.e. 以下にすれば検出効率が目標の性能である 98% を超えた。

次に、信号レート平均約 600 kHz のデータの結果を図 5.18 に示す。これは想定トリガーレートの約 2 倍のレートである。(a)、(b)、(c) はそれぞれゲイン 20、40、60 ch/p.e. の場合のグラフである。信号レート平均約 300 kHz のデータと同様に Room4 が最も検出効率が高くなった。このレートでは、閾値が 3 p.e. 以上では検出効率が 98% を下回っている。

入射位置依存

ビームの入射位置による光量と検出効率の変化を調べるために、AC 検出器へのビームの入射位置を変えて測定を行った。試作機テスト実験では、ビーム入射位置が PMT に近づくほどチェレンコフ光の発生場所も PMT に近づくため性能は良くなるという結果であった。Room1 内の 3 点、Room2 内の 3 点、Room3 内の 5 点、Room4 内の 15 点の計 26 点において測定を行った。入射位置の詳細は図 5.6 で示した。この測定の際の信号レート平均は約 30 kHz で、ゲインは 40 ch/p.e. であった。閾値電圧は Room1 と Room2 に対しては 90 mV、Room3 と Room4 に対しては 20 mV を設定しており、この閾値電圧は光電子数閾値に変換すると Room1 が 3.5 p.e.、Room2 が 4.1 p.e.、Room3 が 2.0 p.e.、Room4 が 2.9 p.e. であった。

図 5.19 に結果を示す。(a) が光量のグラフである。どのセグメントも y 方向の中心から遠くなるほど光量が多くなっている。Room4 が最も光量が多く、Room1、Room2、Room3 は同程度であった。Room3 の y の値の正負、すなわち検出器の上下を比べた場合、下側の方が光量がやや少ないという傾向が見えた。この原因として、各 PMT の量子効率に個体差があるのではないかと考えられる。(b) は検出効率のグラフである。どの点においても 99% 以上の高い検出効率となっているが、Room2 の $y = -30$ mm の点が上下対称の Room1 の $y = 30$ mm の点と比較して少し低い値となっている。この原因は、各セグメントにかけていた電圧閾値の違いによるものであると考えられる。

セグメントの中間位置 (仕切りの位置) への入射の影響

2 つのセグメント間の仕切りの位置にビームが入射した場合は、各セグメント内でビームがエアロゲルを通過する距離が短くなるため発生するチェレンコフ光が減少する。そのため、1 つのセグメントだけでは十分な光電子数が得られず検出効率が下がってしまう。この対策として、2 つのセグメントの信号を足し合わせて読み出すことで十分な検出効率を得られると考えた。この対策の有効性について調べた。ビームの入射位置は Room1 と Room3 の中間位置である $(x, y) = (40.5 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$ と、Room3 と Room4 の中間位置である $(x, y) = (116 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ とした。入射角度はビームに垂直な面に対して Room1 と Room3 の中間位置では 3° 、Room3 と Room4 の中間位置では 8° とした。この角度は、

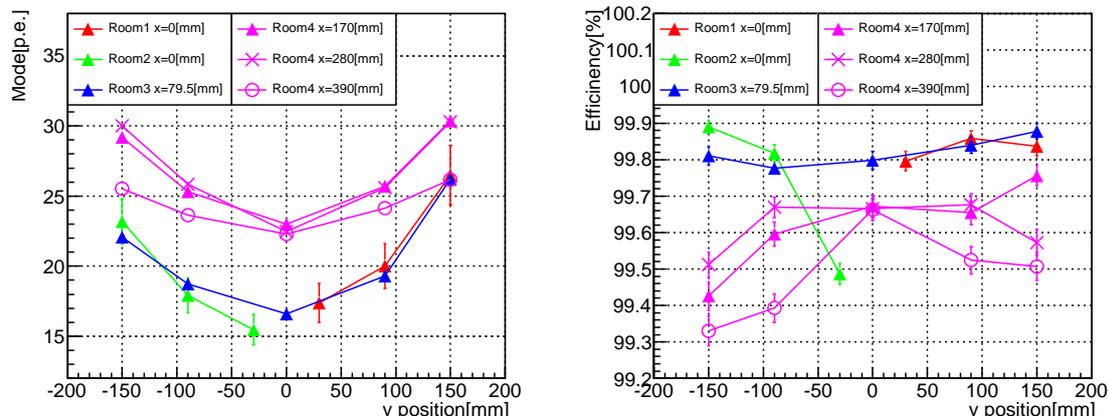


図 5.19: AC 検出器のビーム入射位置依存性 : (a) は光量のグラフである。どのセグメントも y 方向の中心から遠くほど光量が多くなっている。Room4 が最も光量が多く、Room1, Room2, Room3 は同程度であった。(b) は検出効率のグラフである。どの点においても 99% 以上の高い検出効率となっているが、Room2 の $y = -30$ mm の点が上下対称の Room1 の $y = 30$ mm の点と比較して少し低い値となっている。

J-PARC E40 実験のセットアップにおいて標的の中心から発生した粒子が AC 検出器の各セグメントの中間位置に入射する場合の角度である。この測定の際の信号レート平均は約 30 kHz で、ゲインは 40 ch/p.e. であった。閾値電圧は (20 mV, 35 mV, 50 mV) のうちの 2 点あるいは 3 点で測定を行った。この閾値電圧は光電子数に変換するとそれぞれ、2.2 p.e.、3.9 p.e.、5.7 p.e. である。

まず、Room1 と Room3 の中間位置及び Room3 と Room4 の中間位置にビームを照射した際に得られた $N_{p.e.}$ ヒストグラムを図 5.20 に示す。(a) が Room1 と Room3 の中間位置に照射した場合である。ビームの広がりから考えると、1 つのセグメントのみを通過したイベントも含まれるため光電子数の多いイベントもある。しかし、中間位置へ入射したイベントの影響でヒストグラムの形は光電子数の低い方へ広がっている。(b) が Room3 と Room4 の中間位置に照射した場合である。仕切りの位置に入射したイベントも 1 つのセグメントのみを通過したイベントと同程度の光電子数が得られている。

次に、Room1 と Room3 の中間位置及び Room3 と Room4 の中間位置にビームを照射した際の検出効率を図 5.21 に示す。比較のために同じビームレートでの Room1、Room3、Room4 の測定結果も示した (色抜き三角)。Room1 と Room3 の中間位置に入射した時に、Room1 と Room3 の信号を足し合わせて読み出した場合の検出効率は 97% 以下と低い値となった。Room3 と Room4 の中間位置に入射した時に、Room3 と Room4 の信号を足し合わせて読み出した場合の検出効率は各セグメント単体の場合よりは少し下がるものの、閾値が 4 p.e. 以下の点では 98% 以上の検出効率を達成した。各セグメントを隔てる仕切りの厚さは反射材を合わせると約 1 mm である。そのため、入射角度が浅い場合はこの仕切りの分エアロゲルを通過する距離が減り、発生するチェレンコフ光が少なくなる。この影響で Room1 と Room3 の中間位置では 2 つのセグメントの信号を足し合わせて読み

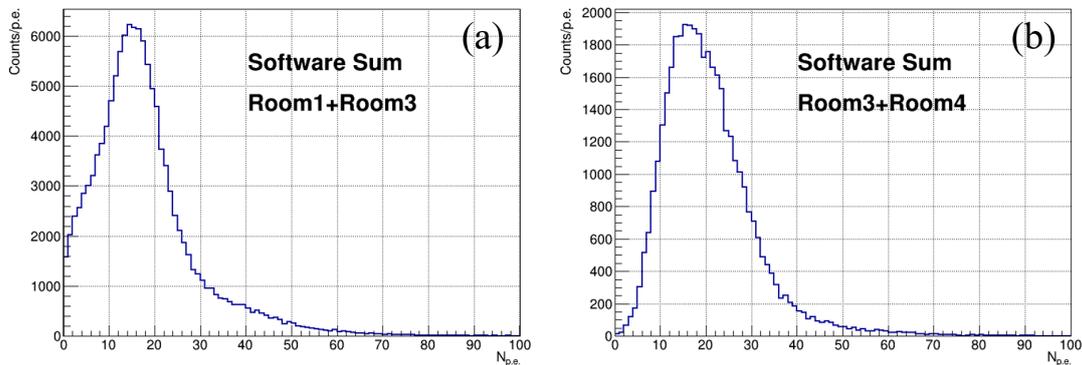


図 5.20: セグメントの中間位置への入射した際の光量：(a) が Room1 と Room3 の中間位置に照射した場合である。ビームの広がりから考えると、1つのセグメントのみを通過したイベントも含まれるため光電子数の多いイベントもあるが、ヒストグラムの形は光電子数の低い方へ広がっている。(b) が Room3 と Room4 の中間位置に照射した場合である。仕切りの位置に入射したイベントも1つのセグメントのみを通過したイベントと同程度の光電子数が得られている。

出しても検出効率が大幅に下がったと考えられる。

5.2.5 考察

今回の実験では、高レート対策として印加電圧を下げ信号を回路で増幅して測定を行った。その結果、信号レートの平均が J-PARC E40 実験における Room1 と Room2 の想定レートの 300 kHz である測定ではゲインドロップはほとんど起きないことが確認できた。また、レートが高くなると PMT の出力が AC カップルであることによるベースラインの上昇がみられたが、その上昇量は数 mV 程度であり閾値光電子数に変換すると 0.1 p.e. 以下であるためトリガー生成への影響はほとんどないことが分かった。これらの結果から、J-PARC E40 実験においてもこのテスト実験と同様に印加電圧を下げ信号を回路で増幅する方式を採用する。

1 p.e. ゲインについて、Room3 と Room4 ではハードウェアサムした信号に閾値電圧を設定するため、各 PMT の 1 p.e. ゲインを揃えることが重要である。1 p.e. ゲインは LED を微弱に光らせた際に得られる QDC ヒストグラムのペDESTAL の中心値と積分値及びヒストグラム全体の平均値から計算される。どのゲインにおいてもペDESTAL の広がり是一定であるため 1 p.e. ゲインの誤差の大きさも大きく変わらない。従って、ゲインが大きいと相対誤差が小さくなる。また、前述のようにゲイン 60 ch/p.e. であっても想定トリガーレートにおいてゲインドロップは起こらないことが確認できた。これらのことを考慮し、J-PARC E40 実験では各 PMT の 1 p.e. ゲインの値を 60 ch/p.e. に設定して AC 検出器を使用する。

実験の結果から想定レートである 300 kHz においては閾値が 6 p.e. 以下では AC 検出器の目標性能である 98 % 以上の検出効率を達成出来ることが分かった。ただし、この値は

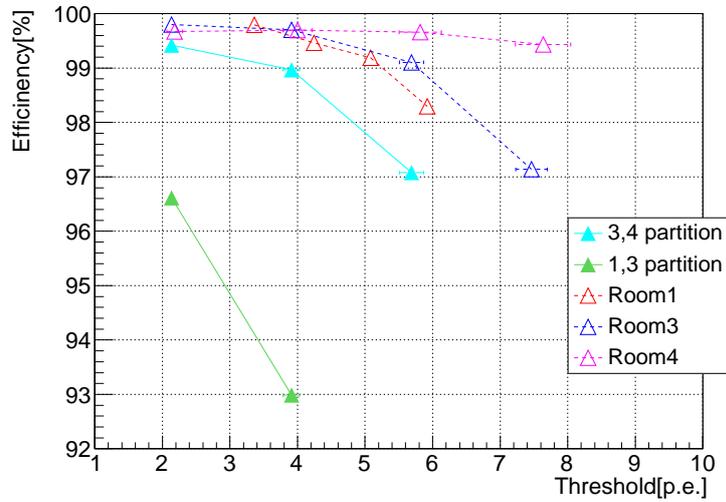


図 5.21: セグメントの中間位置への入射した際の検出効率：比較のために同じビームレートでの Room1、Room3、Room4 の測定結果を示す（色抜き三角）。Room1 と Room3 の中間位置では検出効率が 97%以下と低い値となった。Room3 と Room4 の中間位置では多少低い値となったが 4 p.e. 以下の点では 98%を上回った。

陽電子ビームに対する検出効率であるため、J-PARC E40 実験における閾値の値は第 6 章で述べるシミュレーションによる性能見積りの結果から決定する。

AC 検出器の位置依存の測定の結果、ビームの入射位置が y 方向の中心から離れるほど得られる光電子数が多くなるという結果が得られた。一方、検出効率はどの入射位置に対しても 99%以上という高い値となった。このことから、トリガー検出器として考えた場合の粒子の入射位置による性能のばらつきは小さいといえる。

2つのセグメント間の仕切りの位置へ入射するビームについて、入射角度が大きい Room3 と Room4 の間の場合は2つのセグメントの信号を足し合わせるという対策で問題なく検出出来ることが分かった。しかし、Room1 と Room2 の間は入射角度が小さくこの対策をしても十分な検出効率は得られないという結果であった。J-PARC E40 実験において2つのセグメント間の仕切りの位置へ散乱 π が入射した場合の対処は後ほど議論する。

第6章 AC検出器のJ-PARC E40実験での運用について

この章の前半では、シミュレーションにより AC 検出器の J-PARC E40 実験における性能を見積もる。シミュレーションでは π^\pm と K^+ に対する光電子数と各閾値での検出効率を求める。後半では、AC 検出器の J-PARC E40 実験での運用方法 (トリガー生成回路の構成、ゲインの設定、閾値の設定) について考察する。

6.1 シミュレーションによる AC 検出器の性能の見積もり

テスト実験及びこれまでのシミュレーションでは陽電子に対する AC 検出器の性能を調べた。しかし、実際に J-PARC E40 実験において AC 検出器で識別する粒子は π と K である。そのため、シミュレーションを用いて π と K に対する AC 検出器の性能の見積もりを行う。

6.1.1 シミュレーションと実機テスト実験の比較

π と K に対するシミュレーションを行う前に、先ず 5.1 節において行ったシミュレーションを用いて実機テスト実験の結果と比較する。ゲイン 60 ch/p.e. において各セグメントの基本位置に信号レート平均約 10 kHz のビームを照射した測定の結果を用いた。シミュレーションでもこの基本位置にビームを照射した。図 6.1 にシミュレーションと実験データの $N_{p.e.}$ ヒストグラムを示す。Room3 と Room4 はソフトウェアサムのヒストグラムである。青線が実験結果、赤線がシミュレーションの結果である。(a) から (d) はそれぞれ Room1 から Room4 のヒストグラムである。シミュレーションと実験データでずれが生じている。Room1、Room2、Room3 では実験データの方が全体的に光電子数が少なく、Room4 では多くなった。ヒストグラムの最頻値の差は、Room1 が 2.5 p.e. 程度、Room2 が 4 p.e. 程度、Room3 が 1.5 p.e. 程度、Room4 が 1.5 p.e. 程度である。この原因としては、反射材の貼り方等の工作上的の問題や、各 PMT の量子効率の個体差等が考えられるが、はっきりとした原因は分からなかった。

より現実的に J-PARC E40 実験における AC 検出器の性能を見積もるため、実機テスト実験の結果を用いてシミュレーションのパラメータの補正を行う。光量のずれの原因はいくつか考えられるが、ここでは各 PMT の量子効率の個体差であると仮定し、各 PMT の量子効率に対して補正を行う。元々設定していた量子効率のパラメーターに補正係数 Q をかけた値を新たに量子効率としシミュレーションを行った。このシミュレーションによる $N_{p.e.}$ ヒストグラムで実機テスト実験の $N_{p.e.}$ ヒストグラムをフィッティングして得られる χ^2 の Q 依存から Q の最適な値を求める。

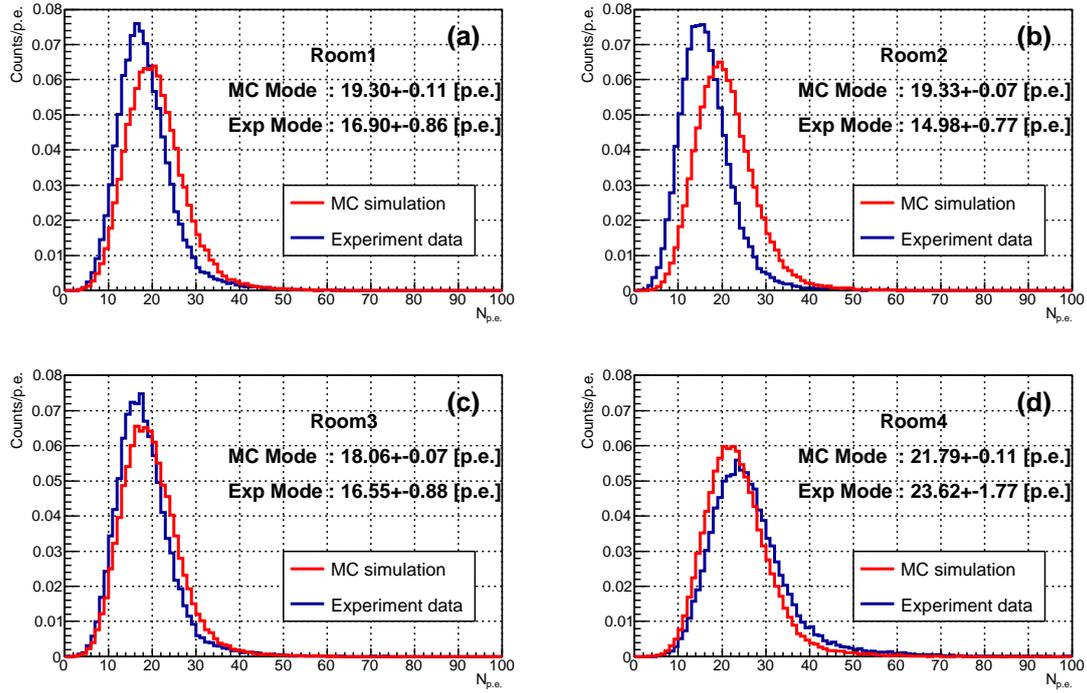


図 6.1: シミュレーションとテスト実験の $N_{p.e.}$ ヒストグラムの比較: 青線が実験結果、赤線がシミュレーションの結果である。(a) から (d) はそれぞれ Room1 から Room4 のヒストグラムである。シミュレーションと実験データとでずれが生じている。Room1、Room2、Room3 では実験データの方が光量が少なく、Room4 では多くなった。

表 6.1: 得られた量子効率の補正係数 Q

セグメント	Room1	Room2	Room3		Room4							
	1U	1D	2U	2D	3U	4U	5U	6U	3D	4D	5D	6D
補正係数 Q	0.88	0.79	0.96	0.90	1.19	1.10	1.03	1.01	1.11	0.99	1.19	0.98

PMT 1U の場合の χ^2 の Q 依存を図 6.2 に示す。最小値付近を二次関数でフィッティングした結果、極小点は $Q = 0.883$ となったため、1U に対する補正係数は 0.88 とした。このようにして 12 本すべての PMT の量子効率の補正係数を求めた。ただし、Room4 の PMT は 0 p.e. の割合が多くこの方法では評価しにくいため、 χ^2 の Q 依存から補正係数 Q の目安を求めた上で Room4 全体の $N_{p.e.}$ ヒストグラムの最頻値が実験データと合うように調整した。このように求めた各 PMT の補正係数 Q の値を表 6.1 に示す。PMT によって 2 割程度の違いがみられた。

補正を行ったシミュレーションと実機テスト実験の比較を図 6.3 に示す。青線が実験結果、赤線がシミュレーションの結果である。(a) から (d) は Room1 から Room4 のヒストグラムである。各 PMT の量子効率に補正を行うことでテスト実験の結果を概ね再現できた。この後に行う J-PARC E40 実験における AC 検出器の性能を見積もりには、ここで求めた量子効率の補正係数 Q の値を用いる。

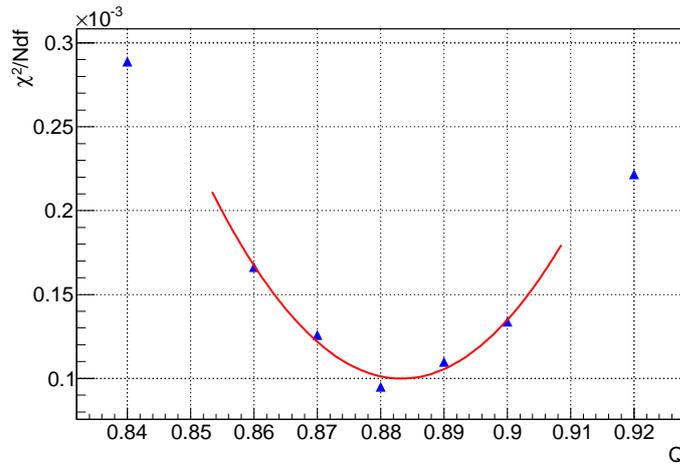


図 6.2: 量子効率の補正係数の最適化：各 PMT に対して、シミュレーションの $N_{p.e.}$ ヒストグラムでテスト実験の $N_{p.e.}$ ヒストグラムをフィッティングして得られる χ^2 の Q 依存から PMT ごとに Q の最適な値を求める。このグラフは PMT 1U の例で、最小値付近を二次関数でフィッティングした結果（赤線）、極小点は $Q = 0.883$ となった。

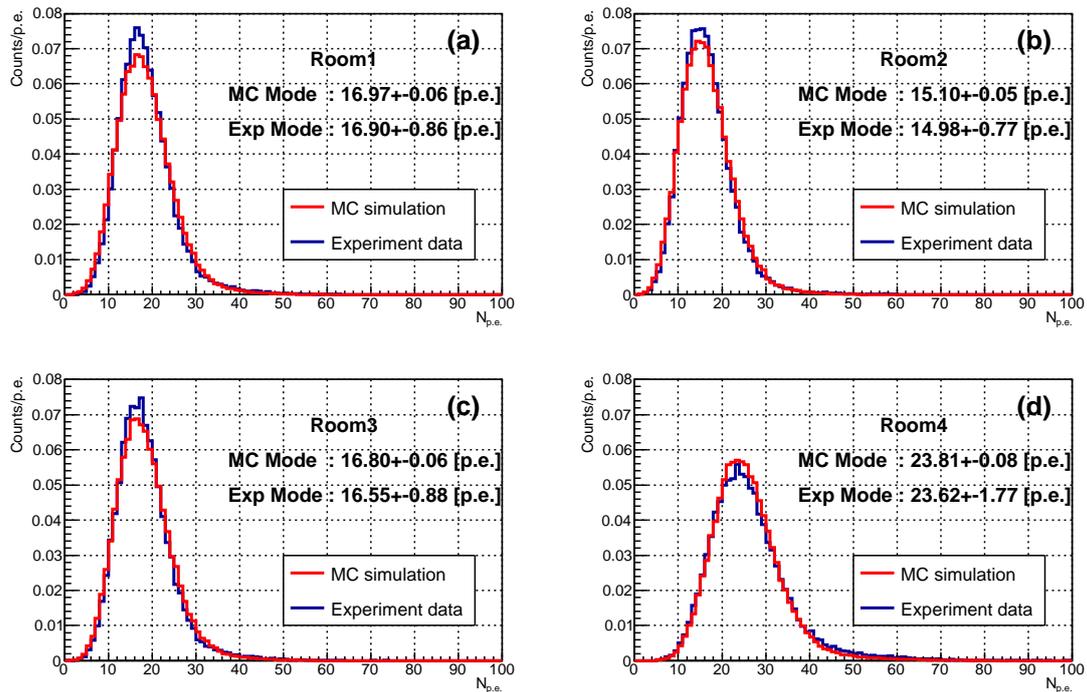


図 6.3: 補正後のシミュレーションとテスト実験の $N_{p.e.}$ ヒストグラムの比較：青線が実験結果、赤線がシミュレーションの結果である。(a) から (d) は Room1 から Room4 のヒストグラムである。各 PMT の量子効率に補正を行うことでテスト実験の結果を概ね再現できた。

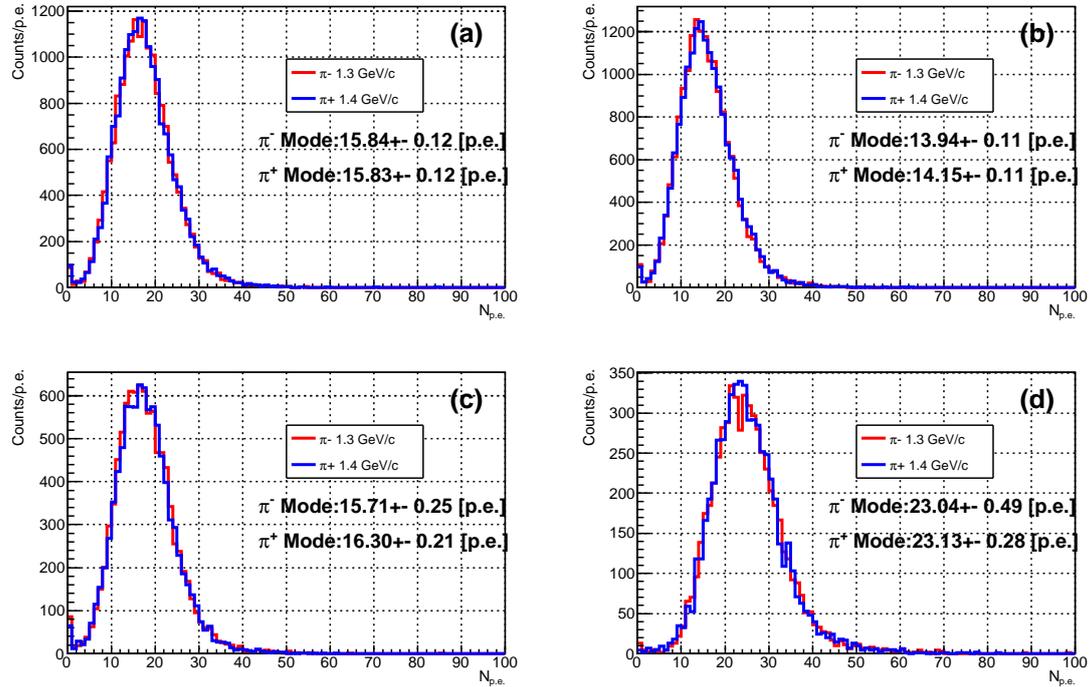


図 6.4: π に対する光量の見積もり : (a) から (d) はそれぞれ Room1 から Room4 のヒストグラムである。赤が $1.3 \text{ GeV}/c$ の π^- に対する光電子数、青が $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^+ に対する光電子数である。

6.1.2 π に対する性能の見積もり

J-PARC E40 実験において AC 検出器で検出し除去する粒子である π が入射した場合のシミュレーションを行い、得られる光量の見積もりを行った。 π は AC 検出器の 80 cm 手前から放射状に広がり、AC 検出器には角度をつけて入射するようにした。これは、J-PARC E40 実験において標的中心で散乱された π が AC 検出器に入射することを想定している。また、AC 検出器への入射位置の分布は、AC 検出器上の原点に近いほど多く、各セグメントの想定レートの比率を再現するような分布とした。この分布には、2つのセグメント間の仕切りの位置も含まれている。解析においては AC 検出器への入射位置によりどのセグメントにヒットしたかを判定した。そのため、 π が2つのセグメントを通るようなイベントは先に通過したセグメントのイベントとして扱っている。J-PARC E40 実験では、 Σ^- の生成に運動量 $1.3 \text{ GeV}/c$ の π^- ビームを、 Σ^+ の生成に運動量 $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^+ ビームを用いる。そのため、シミュレーションでは運動量 $1.3 \text{ GeV}/c$ の π^- 及び運動量 $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^+ を用いた。

図 6.4 にシミュレーションにより得られた $N_{p.e.}$ ヒストグラムを示す。(a) から (d) はそれぞれ Room1 から Room4 のヒストグラムである。赤が $1.3 \text{ GeV}/c$ の π^- に対する光電子数、青が $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^+ に対する光電子数である。2つのセグメント間の仕切りに位置への入射も含んでいるため、0 p.e. のイベントがある。どちらの場合も、各セグメントの光量は Room1 が 16 p.e. 程度、Room2 が 14 p.e. 程度、Room3 が 16 p.e. 程度、Room4

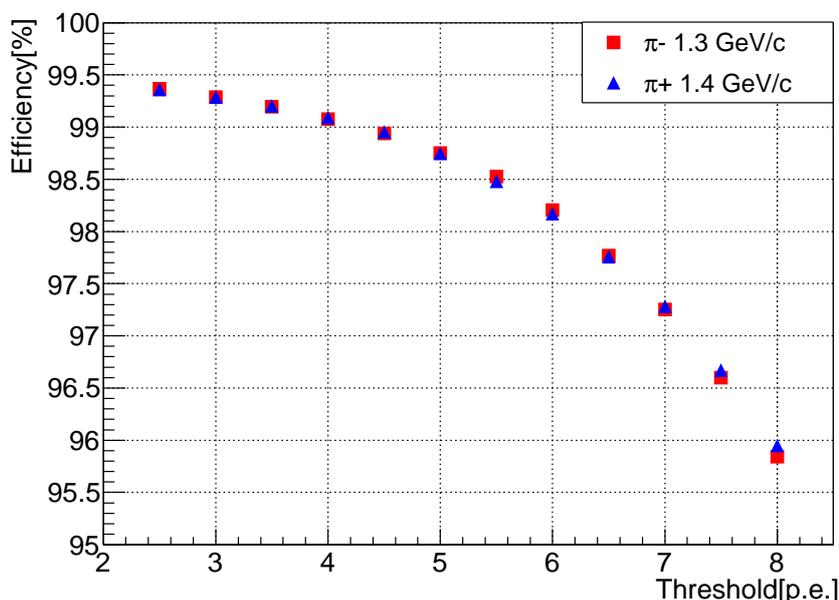


図 6.5: π に対する検出効率の見積もり：赤が $1.3 \text{ GeV}/c$ の π^- に対する検出効率、青が $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^+ に対する検出効率である。閾値が 6 p.e. 以下の点では 98% を上回ると見積もられた。

が 23 p.e. 程度となった。陽電子ビームを用いたテスト実験の結果よりもやや光量が低下した。これは、荷電粒子の速度の違いや AC 検出器への入射位置の違いによるものである。

次に、 $N_{\text{p.e.}}$ ヒストグラムに対し光電子数閾値を設定して検出効率の見積もりを行った。各セグメントのヒストグラムのエントリー数をイベント数とし、設定した閾値より光電子数の多いイベントの数を検出数とした。そして、すべてのセグメントのイベント数と検出数をそれぞれ足し合わせることで、AC 検出器全体でのイベント数と検出数を求め、AC 検出器の検出効率を計算した。図 6.5 に各閾値での AC 検出器の検出効率を示す。赤が Σ^- 生成の場合で $1.3 \text{ GeV}/c$ の π^- に対しての検出効率を示している。青が Σ^+ 生成の場合で $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^+ に対しての検出効率を示している。閾値が 6 p.e. 以下であれば検出率が要求性能である 98% を上回ると見積もられた。

6.1.3 K^+ に対する誤検出率の見積もり

シミュレーションを用いて K^+ に対する誤検出率を見積もる。AC 検出器に使用したエアロゲルの屈折率は散乱 K^+ がチェレンコフ光を出さないような値を選んでいるため、通常 K^+ は AC 検出器では検出されない。しかし、散乱 K^+ が δ 線を発生させることで誤検出が起こる可能性がある。荷電粒子が物質を通過するとその物質の電子が電離するが、その電子自体が他の電子を電離するエネルギーを持つ場合は δ 線と呼ばれる。 K^+ によって発生した δ 線の速度がチェレンコフ光の閾値をこえていた場合、チェレンコフ光が発生し K^+ の誤検出を起こしてしまう可能性がある。

散乱 K^+ の誤検出率を見積もるためにシミュレーションを行った。得られる $N_{\text{p.e.}}$ ヒス

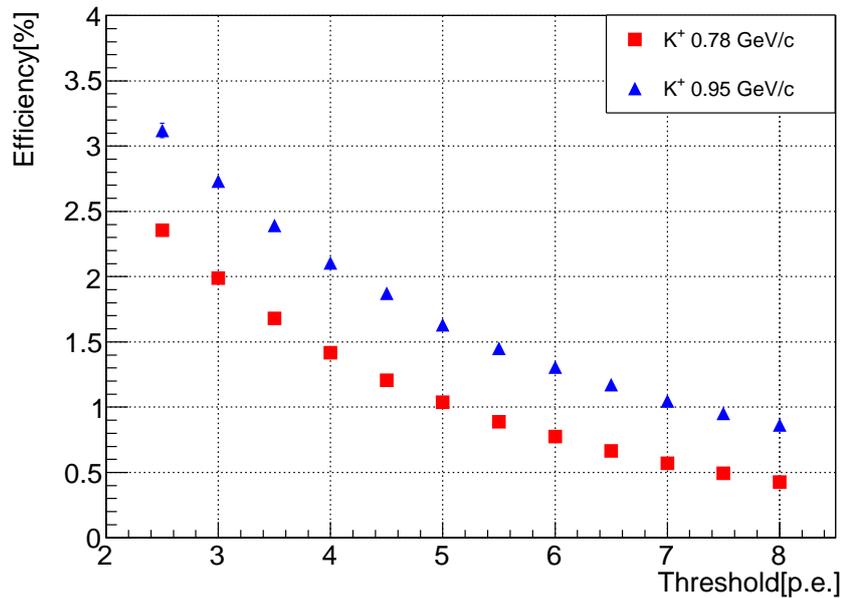


図 6.6: K^+ に対する誤検出率の見積もり : 赤が Σ^- 生成の場合で K^+ の運動量は 0.78 GeV/c とした。青が Σ^+ 生成の場合で K^+ の運動量は 0.95 GeV/c とした。

トグラムに対して光電子数閾値を設定することで K^+ の誤検出率を見積もる。第 2 章の図 2.6 で示した J-PARC E40 実験で予想される放出 K^+ の運動量分布から K^+ の運動量を Σ^- 生成の場合は 0.78 GeV/c、 Σ^+ 生成の場合は 0.95 GeV/c としてシミュレーションを行い、先ほどと同様に K^+ に対する検出効率、すなわち誤検出率を見積もった。図 6.6 に各閾値での誤検出率を示す。閾値を上げると誤検出率は下がっていく。

次節において、シミュレーションにより見積もられた π に対する検出効率と K^+ に対する誤検出率から最適な閾値について議論する。

6.2 AC 検出器の J-PARC E40 実験での運用方法の考察

テスト実験の結果と、シミュレーションによる見積もりの結果を踏まえ、J-PARC E40 実験における AC 検出器の運用方法について考察する。検討する項目は以下の通りである。

- トリガー生成回路の構成
- 1 p.e. ゲインの設定
- 閾値の設定

6.2.1 トリガー生成回路の構成

J-PARC E40 実験において、AC 検出器は散乱 π のイベントをオンラインで除去するために用いられる。トリガー生成回路に AC 検出器の信号を Veto 信号として入力するが、ここではその Veto 信号を生成するための回路について考える。

AC 検出器には 4 つのセグメント (Room1, Room2, Room3, Room4) があり、Room1 と Room2 はそれぞれ 1 個、Room3 は 2 個、Room4 は 8 個の PMT で発生したチェレンコフ光の読み出しを行っている。Room1 と Room2 はそのまま読み出しはよいが、Room3 と Room4 ではどのように読み出すべきかを考える必要がある。テスト実験では各 PMT の信号と、セグメント内の PMT の信号を Liner FI/FO により足し合わせた信号の両方を読み出した。その結果、足し合わせた信号では十分な光電子数となったが、個々の PMT では光電子数が少なく光電子数がゼロにであるイベントも存在した。このことから、個々の PMT に対して閾値電圧を設定することは難しいと考えられる。そのため、Room3 と Room4 は Liner FI/FO により足し合わせた信号に対し閾値電圧を設定し Veto 信号を生成する。

次に、セグメント間の仕切りの位置に入射した粒子について考える。仕切りの位置に入射した場合は 1 つのセグメントで発生するチェレンコフ光が減り、十分な光電子数が得られず、検出効率が低下する。この対策として、テスト実験では 2 つのセグメントの信号を足し合わせて読み出すことを検討した。その結果、Room1 または Room2 と Room3 の間の場合は入射角度が浅く発生するチェレンコフ光の数が少ないため、2 つのセグメントの信号を足し合わせても検出効率が低くなった。一方、Room3 と Room4 の間の場合は、多少検出効率は下がるものの問題のない範囲であることが分かった。しかしながら、散乱 π の分布はビーム中心に近いほど多く Room3 と Room4 の中間位置への入射は少ないと考えられる。この位置へ入射するイベントも含んだシミュレーションでは、閾値 6 p.e. 以下で 98% を上回る検出効率が見積もられた。また、信号を足し合わせるためには、各セグメントの信号を分ける必要があるため波高が小さくなり閾値の精度が悪くなることが考えられる。これらのことを考慮すると、セグメント間の仕切りの位置に入射する粒子の対策は特に行う必要がないと考えられる。

J-PARC E40 実験において想定している AC 検出器の回路を図 6.7 に示す。各セグメント内の PMT の信号を Liner FI/FO により足し合わせセグメントの信号とする。セグメントの信号に対しそれぞれ閾値電圧を設定し全セグメントの論理和をとり AC 検出器からの Veto 信号とする。

6.2.2 1 p.e. ゲインの設定

試作機テスト実験の結果から、印加電圧が高い場合は AC 検出器に入射する粒子のレートが高くなるとダイノード間に流れる電流によりゲインドロップが起こることが分かった。これを踏まえ、実機テスト実験では印加電圧を低く設定し回路により信号を増幅して読み出す運用方法を検討した。その結果、Room1 と Room2 の想定レートである 300 kHz において 1 p.e. ゲインの値が 20、40、60 ch/p.e. となる印加電圧ではゲインドロップはほとんど起こらないことが確認できた。また、Room3 と Room4 は複数の PMT の信号を足し合わせて読み出し、この足し合わせた信号に対して閾値電圧を設定するため、各 PMT の 1 p.e. ゲインを揃える必要がある。1 p.e. ゲインは微弱な LED の光を入射した際に得られる QDC ヒストグラムのペDESTAL の量から計算される。その誤差はペDESTAL の広がり支配的であるため、1 p.e. ゲインが大きいほど相対的に誤差は小さくなり正確にゲインを揃えることが出来る。これらのことを考慮し、J-PARC E40 実験における 1 p.e. ゲイン

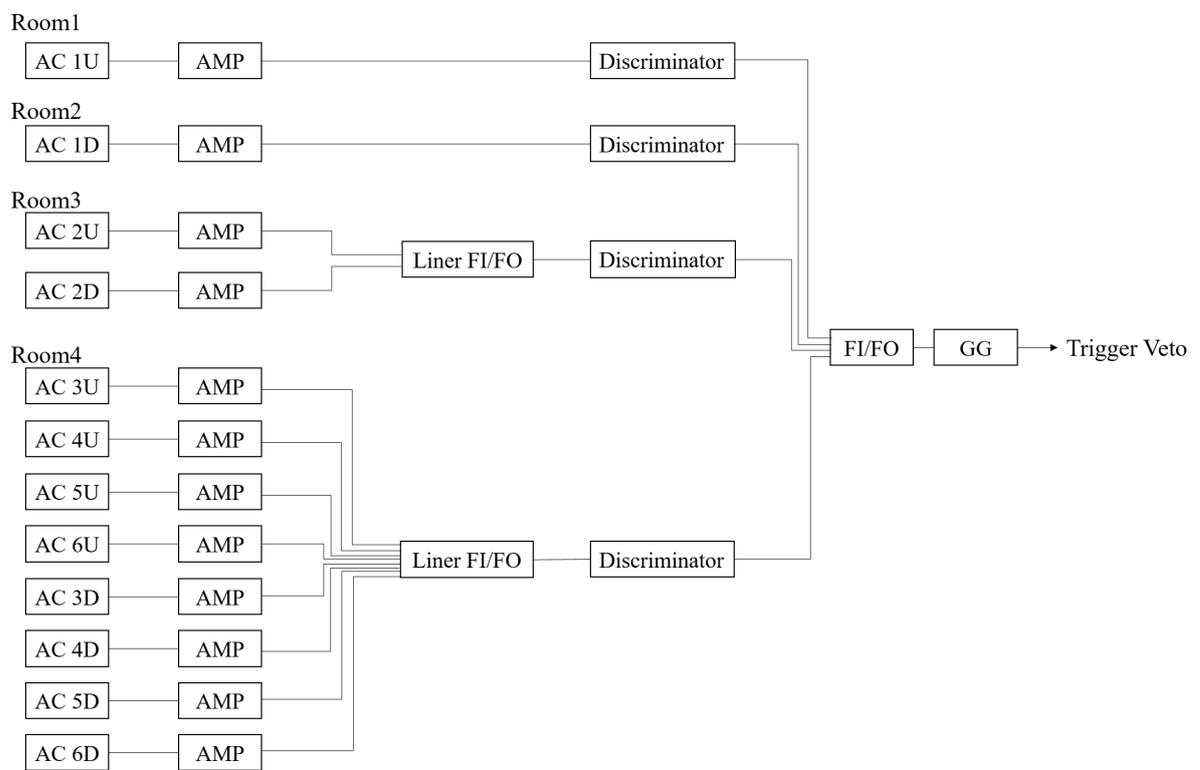


図 6.7: J-PARC E40 実験での AC veto 生成回路 :

の値としては、60 ch/p.e. を採用するのが望ましい。

6.2.3 閾値の設定

閾値の設定を決めるためには、 π に対する検出効率と K^+ に対する誤検出率だけでなくデータ取得の効率 (DAQ 効率) も考慮する必要がある。閾値を下げると π の検出効率は高くなるが、 K^+ の誤検出率も高くなる。また、 K^+ の誤検出率が高くなるとその分 Σ 生成イベント (K^+ イベント) が失われてしまうがトリガーレートは減るため DAQ 効率は良くなる。これらの全体的な最適化を考える必要がある。ここでは、シミュレーションにより見積もられた π の検出効率と K^+ の誤検出率及び想定されるトリガーレートの値を用いて最適な閾値を考える。よりトリガーレートが高い Σ^+ 生成の場合について考える。

DAQ 効率を計算するために、1 秒あたりに発生するデッドタイム (T_{Total}) を求める。そのためには、2nd level trigger がアクセプトされる場合の回路のデッドタイム (T_{Accept}) とクリアされる場合の回路のデッドタイム (T_{Clear})、及びそれぞれの場合のトリガーレートを考える必要がある。

J-PARC E40 実験で使用する回路のそれぞれのデッドタイムは $T_{Accept}=30 \mu s$ 、 $T_{Clear}=14 \mu s$ と見積もられている。

それぞれのトリガーレートを求めるために、 π ビーム由来のバックグラウンドイベントのレートと K^+ イベントのレートについて考える。このバックグラウンドの主な粒子は π と p である。 π のバックグラウンドイベントについて、AC 検出器で除去する前の π のレートは 51 kHz であると想定されている。その値と AC 検出器の検出効率 (E_π) からバックグラウンドの π イベントのトリガーレート BG_π は

$$BG_\pi = 51 \times (1 - E_\pi) \quad [\text{kHz}] \quad (6.1)$$

となる。ここでは、SFT trigger と TOF ΔE trigger では π のイベントは除去されないと仮定している。また、 p のバックグラウンドイベントのレート BG_p は 1.4 kHz と想定されている。バックグラウンドイベントにより 2nd level trigger が生成される割合は 1st level trigger と 2nd level trigger の想定レートの比 $745/2400 = 31\%$ とした。 π と p に対する 2nd level trigger の生成割合は同じだと仮定する。

また、 K^+ のレートは 340 Hz と想定されているため、 K^+ に対する誤検出率を E_K とおくと、2nd level trigger がアクセプトされるイベントのレート (N_{Accept}) とクリアされるイベントのレート (N_{Clear}) はそれぞれ次のように表される。

$$N_{Accept} = 340 \times (1 - E_K) + (BG_\pi + BG_p) \times 0.31 \quad [\text{Hz}] \quad (6.2)$$

$$N_{Clear} = (BG_\pi + BG_p) \times (1 - 0.31) \quad [\text{Hz}] \quad (6.3)$$

ここでは、 K^+ のイベントはすべてアクセプトされるとした。トータルのトリガーレート (N_{Total}) は $N_{Total} = N_{Accept} + N_{Clear}$ となる。 N_{Total} の閾値変化を図 6.8(a) に示す。閾値が上がると AC 検出器により除去されるイベントが減るため N_{Total} は増える。また、1 秒当たりのトータルデッドタイム (T_{Total}) は

$$T_{Total} = N_{Accept} \times T_{Accept} + N_{Clear} \times T_{Clear} \quad (6.4)$$

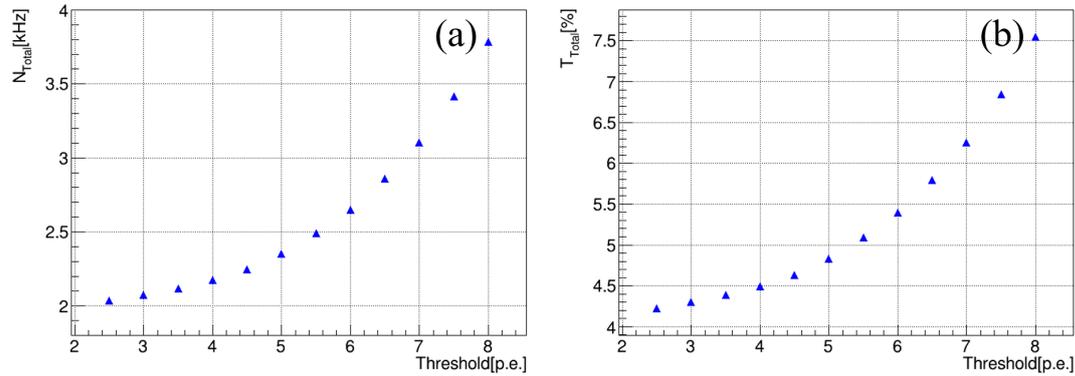


図 6.8: トリガーレートとデッドタイムの閾値変化: (a) がトータルトリガーレート (N_{Total}) の閾値変化のグラフである。閾値が上がると AC 検出器により除去されるイベントが減るため N_{Total} は増える。(b) が 1 秒当たりのトータルデッドタイム (T_{Total}) の閾値変化のグラフである。閾値が上がるとトリガーレートは高くなるためデッドタイムは増えている。

と計算できる。 T_{Total} の閾値変化を図 6.8(b) に示す。閾値が上がるとトリガーレートは高くなるためデッドタイムは増えている。

次に、計算した T_{Total} を用いて DAQ 効率を求める。一般的に計数装置の不感時間 (デッドタイム) の振る舞いは、まひ型 (paralysable) と非まひ型 (nonparalysable) の 2 つのモデルで取り扱われるが、J-PARC E40 実験で使用する回路の場合は非まひ型である。非まひ型モデルに従うと、DAQ 効率 (E_{DAQ}) は

$$E_{DAQ} = \frac{1}{1 + T_{Total}} \quad (6.5)$$

と計算できる。 E_{DAQ} の閾値変化を図 6.9 示す。閾値が上がるとトリガーレートは高くなるため DAQ 効率は低下する。

最適な閾値を決めるために、 K^+ イベントの取得効率 P_K を

$$P_K = E_{DAQ} \times E_K \quad (6.6)$$

と計算した。 P_K の閾値変化を図 6.10 に示す。このグラフから閾値の値が 5 p.e. の時が最も P_K が高くなるのが分かる。よって最適な閾値は 5 p.e. 程度であると考えられる。また、グラフから閾値が 5 p.e. から数 p.e. ずれた場合でも、 K^+ イベントの取得効率 P_K の変化は 1% 以下であることが分かる。このことから、多少 AC 検出器の閾値の設定がずれていても実験全体に与える影響は小さいと言える。

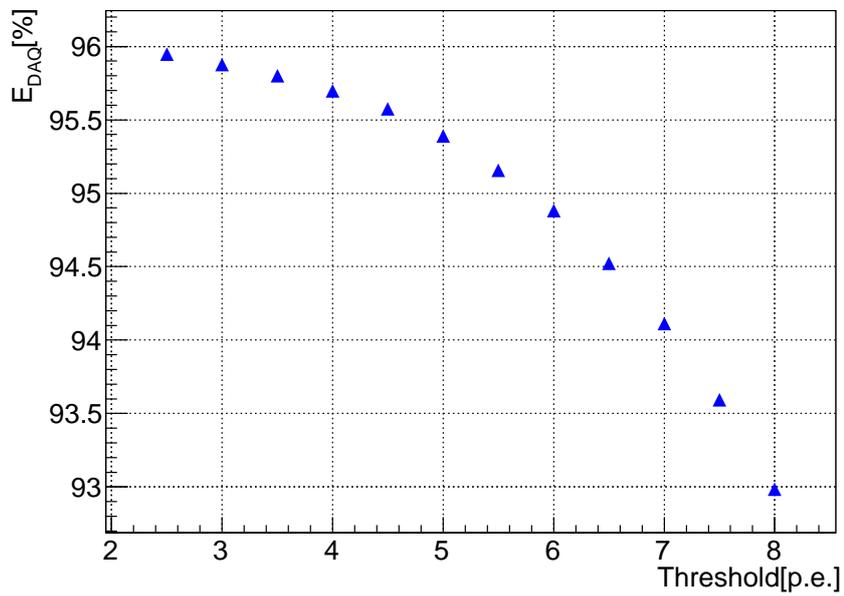


図 6.9: DAQ 効率の閾値変化：閾値が上がるとトリガーレートは高くなるため DAQ 効率は低下する。

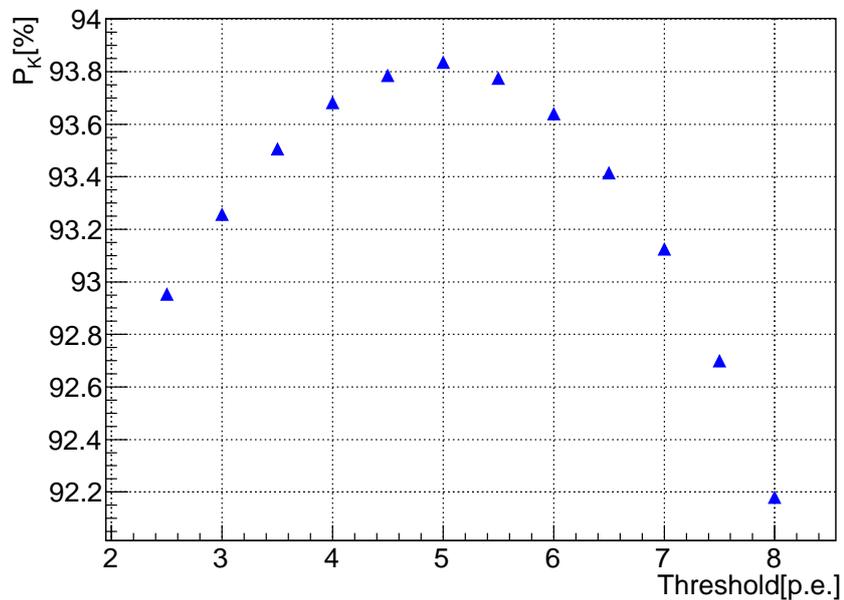


図 6.10: K^+ イベントの取得効率 P_K の閾値変化：閾値の値が 5 p.e. の時が最も P_K が大きくなる。また、閾値が 5 p.e. から数 p.e. ずれた場合でも、 K^+ イベントの取得効率 P_K の変化は 1% 以下である。

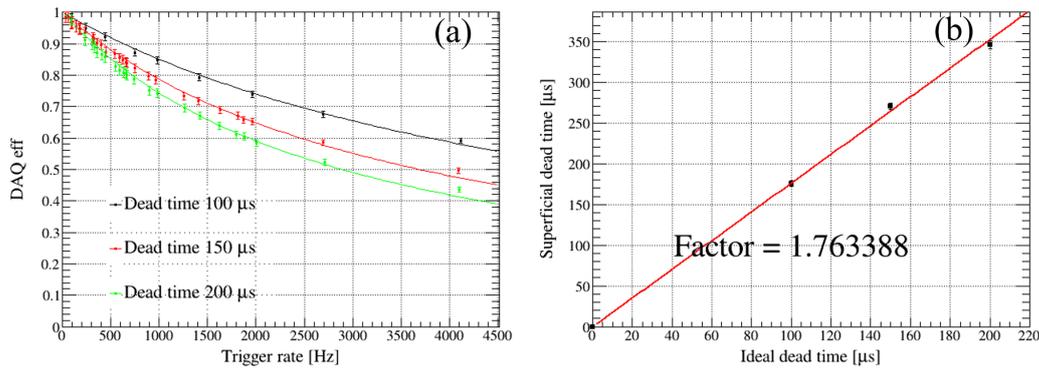


図 6.11: J-PARC におけるトリガーレートと DAQ 効率の関係 : (a) がトリガーレートと DAQ 効率のグラフである。黒がデッドタイム 100 μs の回路を用いた場合、赤がデッドタイム 150 μs の回路を用いた場合、緑がデッドタイム 200 μs の回路を用いた場合である。曲線は非まひ型モデルを用いてフィッティングした結果。(b) が回路のデッドタイムとフィッティングから得られたデッドタイムの相関である。直線はデータ点をフィッティングした結果で、その傾きは 1.76 であった。

最後に、J-PARC のビーム構造を考慮した場合について考察する。J-PARC における実験では、そのビーム構造からデッドタイムが想定よりも長くなり DAQ 効率が低下する傾向がある。過去に、実際に J-PARC のビームを使用し、デッドタイムの異なる回路を用いてトリガーレートと DAQ 効率の関係が調べられたことがある (図 6.11)。(a) がトリガーレートと DAQ 効率のグラフである。黒がデッドタイム 100 μs の回路を用いた場合、赤がデッドタイム 150 μs の回路を用いた場合、緑がデッドタイム 200 μs の回路を用いた場合である。曲線は非まひ型モデルを用いてフィッティングした結果。(b) が回路のデッドタイムとフィッティングから得られたデッドタイムの相関である。直線はデータ点をフィッティングした結果である。この調査では使用した回路のデッドタイムの時間オーダー (数百 μs) での Duty factor は $1/1.76 = 0.567$ と見積もられた。

ここでは、DAQ の時間オーダーにおける Duty factor を 0.5 と仮定し、トータルデッドタイム T_{Total} に対して補正を行って DAQ 効率を計算する。図 6.12 に J-PARC のビーム構造を考慮した補正を行った DAQ 効率の閾値変化を示す。補正前よりも DAQ 効率が 4% 程度低い値となった。この DAQ 効率を用いて、補正を行った K^+ イベントの取得効率 P_K を計算した。図 6.13 に補正を行った K^+ イベントの取得効率 P_K の閾値変化を示す。補正前と比べると P_K は 4% 程度低くなった。このグラフから最も P_K が高くなる閾値の値は 4 p.e. 程度である。また、補正前と同じく P_K が最大になる閾値から数 p.e. ずれた場合でも P_K の変化は 1% 以下であることが分かった。 P_K が最大になる閾値は補正前よりも 1 p.e. 小さな値となった。

以上のことから、J-PARC E40 実験における AC 検出器の閾値の設定はビーム構造を考慮して 4 p.e. 程度が最適であると考えられる。しかしながら、数 p.e. 程度閾値がずれた場合でも実験全体に与える影響は小さいため、厳密にこの値である必要はない。

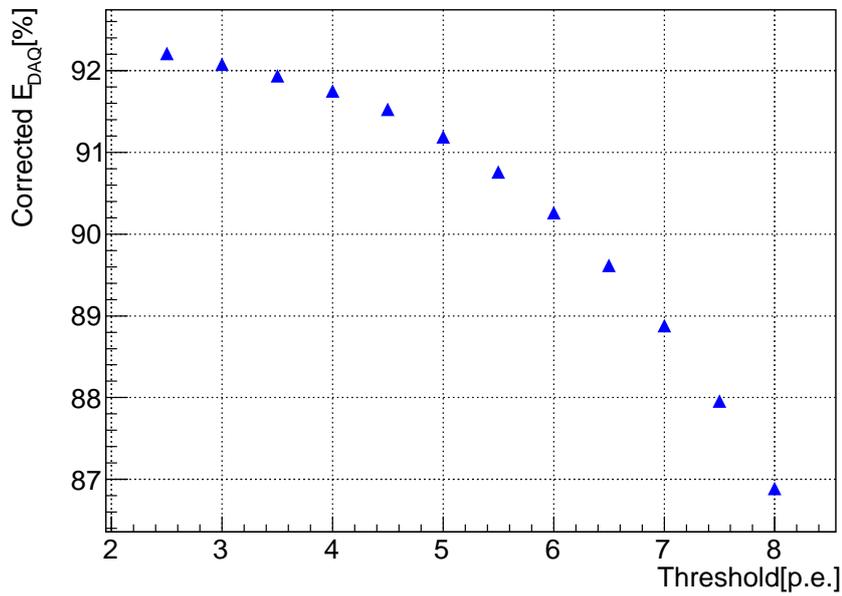


図 6.12: J-PARC のビーム構造を考慮した補正を行った DAQ 効率の閾値変化：補正前よりも DAQ 効率が 4%程度低い値となった。

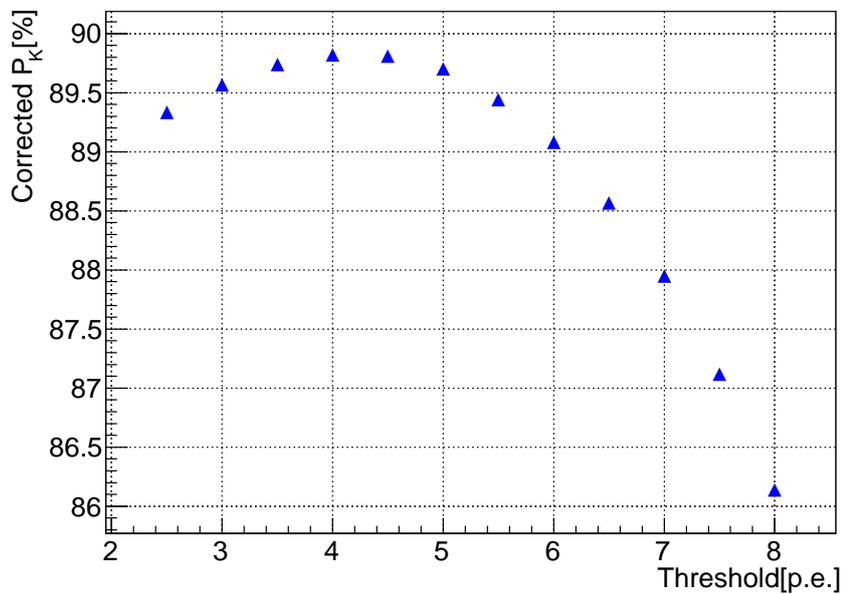


図 6.13: J-PARC のビーム構造を考慮した補正を行った K^+ イベントの取得効率の閾値変化：閾値の値が 4 p.e. 程度で P_K が最大となる。

第7章 まとめ

本研究では、J-PARC E40 実験において使用するエアロゲルチェレンコフ検出器（AC 検出器）の開発を行った。AC 検出器は、標的の下流に設置され Σ 生成反応による散乱 K^+ と、そのバックグラウンドとなる πp 散乱由来の散乱 π の粒子識別を行い、オンラインで散乱 π のイベントを除去するために用いられる。J-PARC E40 実験では高統計精度の測定を実現するために 20 M/spill (1 spill = 2 s) の大強度 π ビームを使用する。効率の良いデータ取得を行うためには AC 検出器によりオンラインでバックグラウンドを除去してトリガーレートを抑えることが重要である。AC 検出器の性能に対する要求は高レート環境下において π に対して 98% 以上の検出効率を持つことである。

AC 検出器の大きさは 480 mm × 400 mm × 80 mm で、高レート対策としてビームが直接当たる領域には穴をあけてある。また、4 つのセグメント (Room1~Room4) に分かれている。J-PARC E40 実験における各セグメントの想定レートは Room1 から順にそれぞれ、300 kHz, 300 kHz, 250 kHz, 40 kHz である。そのため、AC 検出器には 300 kHz の環境下において 98% 以上の検出効率を持つことが要求される。AC 検出器が設置される場所は KURAMA マグネットの直前であるため漏れ磁場の影響を考慮し、チェレンコフ光の読み出しには磁場に耐性のあるファインメッシュ型の光電子増倍管 (PMT) を 12 個使用する。輻射体として利用するシリカエアロゲルは千葉大学理学研究科粒子線物理研究室に開発を依頼した。屈折率は、散乱 K^+ に対してはチェレンコフ光が発生せず、散乱 π の光量が最大になるような値として 1.10 を選択した。

まず、AC 検出器で使用するエアロゲルの種類（ノーマルタイプ、クリアタイプ）及び厚みと反射材（鏡面反射、乱反射）を決めるために反射材の異なる 2 台の試作機 (AC1:鏡面反射, AC2:乱反射) を作製し、2016 年 6 月に東北大学電子光理学研究センターの GeV- γ 照射室において陽電子ビームを用いたテスト実験を行った。エアロゲルの種類、厚みを変えた性能の比較では、AC1 よりも AC2 の方が光量、検出効率ともに良い結果が得られた。全体的にノーマルタイプよりもクリアタイプのエアロゲルの方が光量が多くなったがその差は 1 割程度であった。検出効率についてはエアロゲルの厚さ 30 mm 以上の点において 99.9% 以上という高い性能となった。位置依存を調査した結果、AC1 は依存性が大きいことが分かった。テスト実験の結果とクリアタイプの製造上のリスク等を考慮したところ、AC 検出器実機ではノーマルタイプ、30 mm 厚のエアロゲルと乱反射材を採用することにした。また、レート耐性を調査した結果、印加電圧が高い場合ビームレートが高くなると PMT のダイノード間の電流によりゲインの減少 (ゲインドロップ) が起こることが分かった。

試作機テスト実験の結果を踏まえて AC 検出器実機を作製し、2016 年 11 月から 12 月にかけて東北大学電子光理学研究センターの GeV- γ 照射室において陽電子ビームを用いたテスト実験を行った。この実験では高レート環境でのゲインドロップを防ぐために印加

電圧を低く設定し、信号を回路により増幅させて読み出す運用方法を試した。その結果、J-PARC E40 実験での想定レートではゲインドロップはほとんど起こらないことが確認できた。AC 検出器の設定 (1 p.e. ゲイン, 閾値電圧) を変えた性能の比較を行った結果、想定レート環境下において閾値が 6 p.e. 以下であれば陽電子に対して要求性能である 98%以上の検出効率を達成できることが分かった。

J-PARC E40 実験において AC 検出器が識別する粒子は π と K である。開発した AC 検出器の π と K に対する性能を見積もるために Geant4 を用いた Monte Carlo シミュレーションを行った。まずは、テスト実験の結果を用いてパラメータの調整を行った。そのパラメータを用いてシミュレーションを行い、 π に対する検出効率と K^+ に対する誤検出率を見積もった。その結果、閾値が 6 p.e. 以下であれば π に対して 98%以上の検出効率が達成できると見積もられた。

最後に J-PARC E40 実験における AC 検出器の運用方法 (トリガー生成回路の構成、ゲインの設定、閾値の設定) を考察した。Veto 信号の生成にはセグメントごとに各 PMT の信号を足し合わせて閾値電圧を設定する回路を採用することにした。ゲインの設定は 1 p.e. ゲイン 60 ch/p.e. が最適であると考えられる。閾値の設定は J-PARC のビーム構造の影響を考慮し、4 p.e. 程度が最適であると考えられるが、AC 検出器の閾値の設定が実験全体に与える影響は小さいことが分かったため、厳密に 4 p.e. である必要はない。

謝辞

2年間の研究及び修士論文執筆にあたり、多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

初めに、指導教官である阪口准教授には、毎週のミーティングでの助言や修士論文の較正など様々な場面でお世話になりました。阪口さんのおかげでこの修士論文を書き上げることが出来ました。ありがとうございました。本多特任助教には物理のことからプログラミングのことまで非常に多くのことを教えていただきました。大阪大学、東北大学、J-PARCとすべての場所でお世話になりました。ありがとうございました。同じハイパーグループの先輩方にもお世話になりました。早川さんはJ-PARCに出張した際に面倒を見てくれました。中川さんには解析のいろはを教わりました。中田さんにはテスト実験の際にお世話になりました。先輩方にお金を出してもらって飛んだ竜神大吊橋からのバンジージャンプは一生の思い出です。また、研究グループは異なりますが研究室の同期の片桐君と四ツ永君とは一緒に飲んだり、温泉に行ったりと楽しく研究生活を送ることが出来ました。

東北大学のE40実験のメンバーには、ミーティングでの助言やテスト実験のため東北大学に出張した際にお世話になりました。おかげさまで、2回のテスト実験を無事終えることが出来ました。ありがとうございました。また、テスト実験のためにビームを利用させていただきましたELPHの皆様にお礼申し上げます。

千葉大学の粒子線物理学研究室の方々には、AC検出器に必要なシリカエアロゲルの製造をして頂きました。そのエアロゲルのおかげで十分な性能を持つAC検出器を開発することが出来ました。ありがとうございました。

大学院生活2年間の内、5ヶ月ほどにもなるJ-PARCの出張では多くの方にお世話になりました。長い出張でしたが、楽しく有意義に過ごすことが出来ました。

岸本研究室の皆様には学部生の頃からお世話になりました。広い学生部屋でのびのびと研究が出来ました。月一BBQという素晴らしい催しもあり充実した生活を送ることが出来ました。

まだまだ、ここに書ききれない方々にもお世話になりました。感謝申し上げます。最後に、大学院まで行かせて頂いた両親に深く感謝します。

参考文献

- [1] M. Nagels, T. Rijken, and J. de Swart, Phys. Rev., D15 (1977), 2547 - 2564
- [2] T.A. Rijken, V.G.J. Stoks, Y. Yamamoto, Phys. Rev., C59 (1999), 21
- [3] Y. Fujiwara, C. Nakamoto, M. Kohno, Y. Suzuki, Phys. Rev., C70 (2004), 024001
- [4] F. Lisele, Hfilthuth, W. Foehlich, V. Hepp, and Gunter Zech, Phys. Lett., B37 (1971), 204 - 206
- [5] J.K. Ahn, et al., Nucl. Phys., A648 (1999), 263 - 279
- [6] Y. Kondo, et al., Nucl. Phys., A676 (2000), 371 - 387
- [7] J.K. Ahn, et al., Nucl. Phys., A761 (2005), 41 - 66
- [8] K.Miwa et al, "Measurement of the cross sections of Σ p scattering", Proposal for an experiment at the 50-GeV PS
- [9] T. Takahashi, et al., Nucl. Phys., A835 (2010), 88
- [10] 中川真菜美, J-PARC E10 実験用トリガーカウンターの性能評価, 修士論文
- [11] 松本祐樹, J-PARC 大強度ビームトラッキング用ファイバー検出器の開発, 修士論文
- [12] 大植健一郎, J-PARC E07 実験用 momentum trigger に用いるホドスコープ検出器の性能評価, 修士論文
- [13] R. Honda. Study of Σ N interaction in nuclei using meson beams, Doctor Thesis (2014)
- [14] K.Miwa, et al, Technical Design Report from E40
- [15] A. Abashian, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A479 (2002), 117 - 232
- [16] 浜松ホトニクス株式会社, 光電子増倍管第 3a 版
- [17] 田辺鴻典, (K^- , π^-) 反応によるハイパー核 γ 線分光実験用トリガーカウンターシステムの開発, 修士論文
- [18] R. Enomoto, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A332 (1993), 129 -133

- [19] M.F. Villoro, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A480 (1993), 456 - 462
- [20] T. Bellunato, et al., Eur. Phys. J. C 52, (2007), 759 - 764
- [21] Hadron Universal Logic Module, <http://openit.kek.jp/project/HUL/HUL>

付録A LEDを用いたゲインドロップの調査

PMTは信号のレートが高くなるとダイノード間の電流が増えることでダイノード間の電圧が低下し、ゲインが減少すると考えられる。そのゲインの減少の度合い（ゲインドロップ）を1 p.e. ゲインを測定するために取り付けられたLED及び光ファイバーを用いて調査した。

ゲインドロップは第4章で述べた試作機テスト実験のレート依存性の調査と同様の方法で評価する。1 p.e. ゲイン（印加電圧）を一定にし信号のレートを変えて測定を行い、各レートでのQDCヒストグラムの平均値からペDESTALの中心値を引いた値を最もレートの低い測定での値で規格化してゲインドロップを評価する。

図A.1に測定のための回路を示す。この測定ではAC検出器実機のPMT 1Dを用いて行った。ビーム照射時の環境に近づけるために、周期的な信号ではなく、ファンクションジェネレーターでホワイトノイズを出力しDiscriminatorで閾値を設定することでランダムな信号を生成し、LEDを光らせた。LEDの光量は20 p.e.程度とした。ホワイトノイズの波高とDiscriminatorの閾値を変えることで、PMTの出力信号のレートを調節した。

1 p.e. ゲインの値を40, 70, 90 ch/p.e.として、それぞれに対しPMTの信号レートを1, 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000 kHzと変えて測定を行った。また、PMT AMPで増幅をせずに読み出した信号に対しても調査を行った。この時の1 p.e. ゲインの値は40 ch/p.e.である。

測定の結果を図A.2に示す。横軸は、1 p.e. ゲインとPMTのレートを掛けたものでPMTの平均電流に比例した値と考えられる。ここで、PMT AMPを使用しない測定に対して補正を行っている。PMT AMPの増幅率は10倍であるため1 p.e. ゲインの値を10倍にすることでほかの測定と比較できるようにした。ゲインドロップはどの1 p.e. ゲインでの測定でも、PMTの平均電流が大きくなると一度ゲインが増えた後、減っていくという傾向がみられた。1 p.e. ゲイン×PMTのレートの値が25000 ch/p.e.*kHz程度の時にゲインは最大となっている。しかし、ビームを使った測定ではこの傾向は見えなかった。そのため、この傾向はLEDを用いた測定方法に起因するものであると考えられるが、その詳しい原因は特定できなかった。従って、この方法ではビーム環境下でのゲインの減少を評価することは難しいと言える。

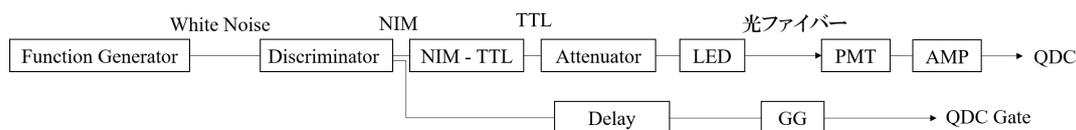


図 A.1: LED を用いたゲインドロップ調査のための回路

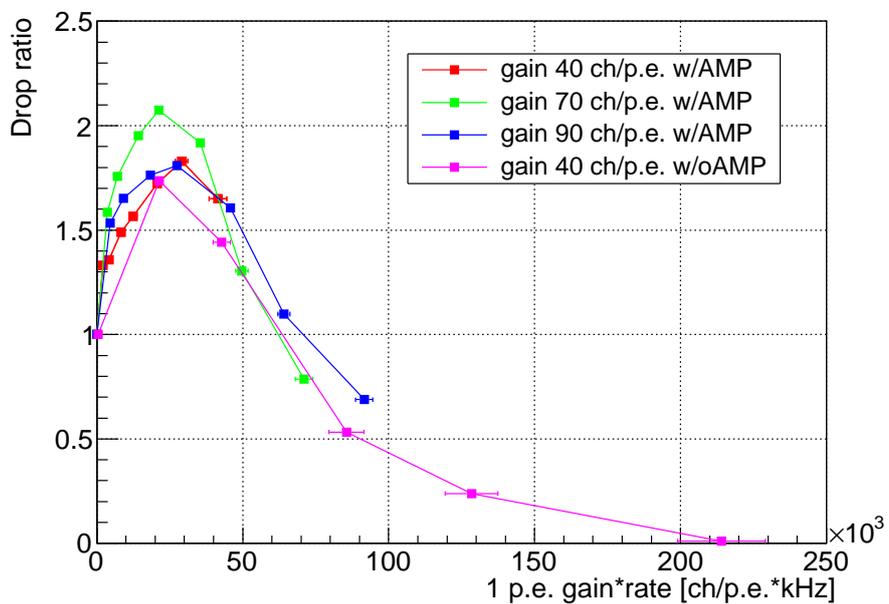


図 A.2: ゲインドロップの変化：横軸は、1 p.e. ゲインと PMT 信号のレートを掛けたもので PMT の平均電流に比例した値と考えられる。PMT AMP を使用しない測定に対しては 1 p.e. ゲインの値を 10 倍に補正することで他の測定と比較できるようにしている。