

修士論文

Belle II 実験 TOP カウンター実機用 MCP-PMT  
の性能評価

名古屋大学大学院理学研究科  
素粒子宇宙物理学専攻  
高エネルギー物理学研究室  
学籍番号:261301616  
米倉拓弥

2015 年 1 月 19 日

## 概要

2017年から開始される Belle II 実験では、 $B$  中間子などの稀崩壊を精密に測定することで、標準模型では説明できない新物理の探索などを行う。そのために私たちは石英輻射体と光検出器で構成される粒子識別装置 TOP(Time Of Propagation) カウンターを開発している。 $K/\pi$  中間子からのチェレンコフ光の伝播時間の差  $\mathcal{O}(100 \text{ ps})$  を約 20 個の光子数で判別するため、一光子検出に対して高い時間分解能を持つ光検出器が必要である。これまでの研究で必要な性能を持つ光検出器 MCP(Micro Channel Plate)-PMT の開発に成功し、実際の使用に向けた 512 本の MCP-PMT の量産や性能評価を行う段階となった。

世界的にみても、このような大量の MCP-PMT を実験に使用した例はない。そのため、性能評価を量産に沿って行い、必要な性能を満たさない場合は改善する必要がある。また、実際に使用する 1.5 T 磁場中での TOP カウンターの粒子識別性能の調整や理解のためのデータが必要である。よって、私は 1.5 T 中で MCP-PMT 全数を測定可能なシステムを構築するとともに、量子効率、増幅率、時間分解能、収集効率の測定を行った。

量産の結果、ピーク波長での全数の平均量子効率が 28.6% となり、要求である 28% を満たすことができた。1.5 T 中では増幅率が 10~90% 減少するものの、時間分解能の悪化はないと確認した。収集効率の減少率は 5% 程度で、TOP カウンターの粒子識別性能への影響は十分小さいと確認できた。また、1.5 T 中での各性能の印加電圧依存性の把握によって、各性能の要求を満たしつつ増幅率の調整が可能になった。MCP-PMT の量子効率は総出力電荷量に従って低下するが、増幅率を下げ、量子効率の低下の抑制が可能となった。本研究によって、必要な性能を持つ MCP-PMT の量産を成功させ、実際の使用に向けた性能評価を完了し、TOP カウンターの性能の調整や理解を可能にした。

バックグラウンドの理解が進み、量産品の約半数ある短寿命品の量子効率が実験中に低下すると予想された。そのため、実験中に PMT の交換を行う可能性がある。交換後の量子効率の低下による複数回の交換を防ぐため、短寿命品の約 9 倍以上の長寿命化を目指し、6 種の長寿命化対策を試みた。各対策の試作品の寿命を測定し、必要な寿命を持つ対策を明らかにした。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>TOP カウンター用 MCP-PMT</b>	<b>1</b>
1.1	Belle II 実験	1
1.1.1	Belle II 実験で目指す物理	1
1.1.2	SuperKEKB	2
1.1.3	Belle II 検出器	2
1.2	TOP カウンター	4
1.2.1	TOP カウンターの構造	4
1.2.2	TOP カウンターの粒子識別原理	5
1.3	TOP カウンター用 MCP-PMT の実機設置環境	7
1.3.1	1.5 T の磁場	7
1.3.2	バックグラウンド光子	7
1.4	MCP-PMT	8
1.4.1	MCP-PMT の構造と原理	9
1.4.2	MCP-PMT の基本性能	12
1.5	本研究の目的	19
<b>第 2 章</b>	<b>MCP-PMT 全数の性能測定</b>	<b>21</b>
2.1	MCP-PMT 全数の性能測定の戦略	21
2.2	寸法検査と放電チェック	21
2.2.1	寸法検査	23
2.2.2	放電チェック	25
2.3	QE 測定	25
2.3.1	測定項目	25
2.3.2	セットアップ	26
2.3.3	QE 測定結果	26
2.4	0 T での増幅率、時間分解能、収集効率の測定	28
2.4.1	測定項目	28
2.4.2	セットアップ	29
2.4.3	増幅率の測定結果	30
2.4.4	時間分解能の測定結果	32

2.4.5	相対収集効率 . . . . .	33
2.5	1.5 T 中での増幅率、時間分解能、収集効率の測定 . . . . .	34
2.5.1	以前のセットアップ . . . . .	35
2.5.2	1.5 T 中の収集効率比も測定可能な大量測定用セットアップ . . . . .	38
2.5.3	Coating-MCP-PMT 測定用セットアップ . . . . .	44
2.5.4	測定の再現性 . . . . .	44
2.5.5	HV スキャン . . . . .	46
2.5.6	全数測定の測定手順と測定時間 . . . . .	47
2.5.7	磁場中の特性測定結果 . . . . .	48
<b>第 3 章</b>	<b>MCP-PMT の TOP カウンター実機での配置と増幅率の決定</b>	<b>51</b>
3.1	MCP-PMT の配置 . . . . .	51
3.2	MCP-PMT の増幅率の調整 . . . . .	52
<b>第 4 章</b>	<b>光電面の長寿命化</b>	<b>54</b>
4.1	光電面の劣化と対策 . . . . .	54
4.2	寿命測定の設定アップ . . . . .	55
4.3	測定結果 . . . . .	57
4.3.1	対策 1 の測定結果 . . . . .	57
4.3.2	対策 2 の測定結果 . . . . .	58
4.3.3	対策 3 の測定結果 . . . . .	64
4.3.4	対策 4 の測定結果 . . . . .	66
4.3.5	対策 5 の測定結果 . . . . .	66
4.3.6	対策 6 の測定結果 . . . . .	67
4.4	測定のまとめ . . . . .	68
4.5	寿命対策品の磁場特性 . . . . .	69
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>74</b>
	<b>参考文献</b>	<b>77</b>
	<b>謝辞</b>	<b>79</b>

# 表目次

1.1	TOP カウンターの粒子識別性能 [15] . . . . .	6
1.2	検出光子数に対する TOP カウンターの粒子識別性能 [15] . . . . .	7
1.3	MCP-PMT の構造と性能 . . . . .	11
2.1	外観検査の結果 . . . . .	24
2.2	HV チェックの結果 . . . . .	25
2.3	QE 測定の測定項目 . . . . .	26
2.4	0 T での測定項目 . . . . .	28
2.5	1.5 T 中の測定手順と時間 . . . . .	48
4.1	寿命測定結果のまとめ . . . . .	72

# 目次

1.1	$B^0 \rightarrow \rho^0(K^*)\gamma$ のダイアグラム	2
1.2	SuperKEKB 加速器	3
1.3	Belle II 検出器	3
1.4	TOP カウンターの模式図	5
1.5	TOP カウンターの各部品の模式図	5
1.6	TOP カウンターの粒子識別原理の概略図	5
1.7	Belle II 検出器内の磁場	7
1.8	MCP-PMT へのバックグラウンド光子の頻度 [23]	9
1.9	MCP-PMT の外観	10
1.10	MCP-PMT の断面図	10
1.11	MCP の断面図	10
1.12	電流増幅率と印加電圧の関係 (Coating-MCP-PMT)	12
1.13	MCP-PMT の信号の波形	13
1.14	二次電子放出層の 2 次電子放出比と入射電子エネルギーの関係	14
1.15	増幅率の磁場依存性 [19]	15
1.16	時間分解能の磁場依存性 [19]	15
1.17	磁場中での MCP 内の電子軌道の変化	16
1.18	MCP チャンネル内での電子増幅の飽和	16
1.19	0 T と 1.5 T での MCP-PMT の出力波形 [27]	16
1.20	相対増幅率の HV 依存性	17
1.21	1.5 T 中での収集効率比	17
1.22	中性ガスによる光電面劣化	17
1.23	中性ガスへのセラミック対策とイオンフィードバック対策	18
1.24	一様な光電面劣化	18
1.25	Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-PMT の寿命	19
2.1	MCP-PMT 納入数の推移	22
2.2	測定の戦略	22
2.3	MCP-PMT の図面	23
2.4	外観検査用ジグ	23

2.5	外観検査用ジグの図面 (単位 mm) . . . . .	23
2.6	寸法検査の様子 . . . . .	24
2.7	不合格品の例 (ピンが短い場合) . . . . .	24
2.8	合格品の例 . . . . .	24
2.9	不合格品の例 (ピンが長すぎる場合) . . . . .	24
2.10	HV チェックのセットアップの写真 . . . . .	25
2.11	HV チェックのセットアップの図 . . . . .	25
2.12	QE 測定の設定アップ . . . . .	26
2.13	測定で用いるフォトダイオードの QE の波長依存性 . . . . .	27
2.14	MCP-PMT の QE の面分布 . . . . .	27
2.15	MCP-PMT の QE の波長依存性 . . . . .	27
2.16	納入日と QE 測定の結果 . . . . .	28
2.17	要求を満たす MCP-PMT 全数の QE . . . . .	28
2.18	0 T での増幅率、時間分解能、収集効率測定の設定アップ . . . . .	29
2.19	較正用回路 . . . . .	29
2.20	16 チャンネルディバイダー . . . . .	30
2.21	アンプの較正関数 . . . . .	30
2.22	TDC の較正 . . . . .	30
2.23	典型的な ADC 分布 . . . . .	31
2.24	出力電荷量分布 . . . . .	31
2.25	異なる HV での ADC 分布 . . . . .	31
2.26	増幅率の HV 依存性 . . . . .	31
2.27	チャンネルごとの増幅率 . . . . .	32
2.28	チャンネル内を細かくスキャンした結果 . . . . .	32
2.29	Timewalk の模式図 . . . . .	33
2.30	補正前の TDC 対 ADC 分布 . . . . .	33
2.31	典型的な TDC 分布 . . . . .	33
2.32	時間分解能の HV 依存性 . . . . .	34
2.33	相対収集効率の HV 依存性 . . . . .	34
2.34	収集効率に問題のあった MCP-PMT . . . . .	35
2.35	1.5 T 中の測定の経過 . . . . .	36
2.36	双極電磁石 . . . . .	36
2.37	磁場の一様性 . . . . .	37
2.38	1.5 T 中の測定のセットアップの概略図 . . . . .	38
2.39	測定用のジグ . . . . .	38
2.40	磁場中の特性の測定用回路 . . . . .	38
2.41	低ノイズアンプ (Cosmowave LNA3984WS-L) の線形性測定 . . . . .	39
2.42	TDC の較正 . . . . .	39

2.43	MPPC の ADC 分布 . . . . .	40
2.44	オーバーボルテージと光子検出効率の関係 [29] . . . . .	41
2.45	ブレイクダウン電圧の温度依存性 [29] . . . . .	41
2.46	MPPC の平均検出光子数の温度変化の関数 . . . . .	41
2.47	0 T から 1.5 T での光子検出効率の変化 . . . . .	41
2.48	ディフューザーなしでの MPPC へのレーザー光量の変化 . . . . .	42
2.49	ディフューザーありでの MPPC へのレーザー光量の変化 . . . . .	42
2.50	ディフューザーによる MCP-PMT の時間分解能の悪化 . . . . .	43
2.51	改善後のレーザー光の光路 . . . . .	43
2.52	MPPC によるレーザーの光量モニター . . . . .	43
2.53	ディフューザー改善と MPPC 変更後の MCP-PMT の時間分解能 . . . . .	43
2.54	回路上の検出効率の減少 . . . . .	44
2.55	Coating-MCP-PMT の測定のためのセットアップ変更後の回路図 . . . . .	45
2.56	セットアップ変更後の回路上の検出効率の減少 . . . . .	45
2.57	TDC の Mean 値を用いた Timewalk 補正と補正後の TDC 分布 . . . . .	45
2.58	時間分解能の再現性 . . . . .	46
2.59	磁場中の収集効率比の再現性 . . . . .	46
2.60	チャンネルごとの相対増幅率の測定誤差 . . . . .	46
2.61	Conventional-MCP-PMT の相対増幅率の HV スキャンの結果 . . . . .	47
2.62	Coating-MCP-PMT の相対増幅率の HV スキャンの結果 . . . . .	47
2.63	時間分解能の HV スキャンの結果 . . . . .	47
2.64	磁場中の収集効率比の HV スキャンの結果 . . . . .	48
2.65	PMT ごとの相対増幅率の測定結果 . . . . .	49
2.66	チャンネルごとの相対増幅率の測定結果 . . . . .	49
2.67	Conventional-MCP-PMT の時間分解能の測定結果 . . . . .	49
2.68	Coating-MCP-PMT の時間分解能の測定結果 . . . . .	49
2.69	磁場中の収集効率比の測定結果 . . . . .	50
3.1	読み出し回路側から見た MCP-PMT の配置 [30] . . . . .	52
3.2	MCP-PMT を石英に取り付けた状態 . . . . .	52
3.3	MCP-PMT を囲む筐体 . . . . .	52
3.4	最初に製造される予備の TOP カウンター用の MCP-PMT の配置 . . . . .	53
3.5	2 番目に製造される TOP カウンター用の MCP-PMT の配置 . . . . .	53
4.1	寿命測定のスケジュール . . . . .	55
4.2	出力電荷量と相対ヒットレートのプロット . . . . .	56
4.3	相対ヒットレートが 0.8 のときの出力電荷量対寿命関数の係数 . . . . .	56
4.4	寿命測定の設定アップの概略図 . . . . .	56
4.5	寿命測定の設定アップの写真 . . . . .	57



4.6	対策 1 の測定結果 . . . . .	58
4.7	YH0148 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	58
4.8	YH0148 の相対 QE の面分布 . . . . .	58
4.9	YH0149 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	59
4.10	YH0149 の相対 QE の面分布 . . . . .	59
4.11	YH0160 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	59
4.12	YH0160 の相対 QE の面分布 . . . . .	59
4.13	YH0163 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	59
4.14	YH0163 の相対 QE の面分布 . . . . .	59
4.15	YH0148 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	60
4.16	YH0149 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	60
4.17	YH0160 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	60
4.18	YH0163 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	60
4.19	対策 2 の測定結果 . . . . .	61
4.20	TH0170 の測定中の増幅率の増加 . . . . .	61
4.21	YH0168 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	62
4.22	YH0168 の相対 QE の面分布 . . . . .	62
4.23	YH0170 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	62
4.24	YH0170 の相対 QE の面分布 . . . . .	62
4.25	YH0171 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	62
4.26	YH0171 の相対 QE の面分布 . . . . .	62
4.27	YH0173 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	63
4.28	YH0173 の相対 QE の面分布 . . . . .	63
4.29	YH0168 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	63
4.30	YH0170 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	63
4.31	YH0171 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	63
4.32	YH0173 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	63
4.33	対策 3 の測定結果 . . . . .	64
4.34	YH0159 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	64
4.35	YH0159 の相対 QE の面分布 . . . . .	64
4.36	YH0176 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	65
4.37	YH0176 の相対 QE の面分布 . . . . .	65
4.38	YH0177 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	65
4.39	YH0177 の相対 QE の面分布 . . . . .	65
4.40	YH0184 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	65
4.41	YH0184 の相対 QE の面分布 . . . . .	65
4.42	YH0159 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	66
4.43	YH0176 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	66

4.44	YH0177 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	66
4.45	YH0184 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	66
4.46	対策 4 の測定結果 . . . . .	67
4.47	YH0181 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	67
4.48	YH0181 の相対 QE の面分布 . . . . .	67
4.49	YH0182 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	68
4.50	YH0182 の相対 QE の面分布 . . . . .	68
4.51	YH0181 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	68
4.52	YH0182 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	68
4.53	対策 5 の測定結果 . . . . .	69
4.54	YH0205 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	69
4.55	YH0205 の相対 QE の面分布 . . . . .	69
4.56	YH0205 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	70
4.57	対策 6 の測定結果 . . . . .	70
4.58	YH0155 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	71
4.59	YH0155 の相対 QE の面分布 . . . . .	71
4.60	YH0164 の相対ヒットレートと相対 QE . . . . .	71
4.61	YH0164 の相対 QE の面分布 . . . . .	71
4.62	YH0155 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	71
4.63	YH0164 の相対 QE の波長依存性 . . . . .	71
4.64	寿命対策品の相対増幅率 . . . . .	73
4.65	1.5 T 中での寿命対策品の時間分解能と増幅率の関係 . . . . .	73

# 第 1 章

## TOP カウンター用 MCP-PMT

### 1.1 Belle II 実験

素粒子標準模型で記述されているすべての素粒子は実験によって発見された。しかし、宇宙の物質と反物質の偏りや暗黒物質などの標準模型では説明できない事象があり、謎が残されたままである。標準模型では説明できない事象を探ることで、標準模型を超えた新たな物理を見つけることができると考えられている。新物理に到達するために、加速器を用いた実験では主にエネルギーフロンティアとルミノシティフロンティアの実験が存在する。エネルギーフロンティアでは粒子を出来る限り高エネルギー状態で衝突させ、未知の重たい粒子を生成し直接的に測定する実験である。ルミノシティフロンティアでは特定の粒子を大量に生成し、その粒子の崩壊モードを精密測定し、間接的に新粒子の寄与を見つける実験である。ルミノシティフロンティアの実験の 1 つに Belle II 実験 [1, 2] がある。Belle II 実験は 2017 年から開始される電子、陽電子衝突型加速器 SuperKEKB を用いて、7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させ、B 中間子を生成する。SuperKEKB 加速器 [3] は前身である KEKB 加速器 [4] の約 40 倍のルミノシティ  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を持つ加速器であり、 $50 \text{ ab}^{-1}$  のデータを取得する予定である。

#### 1.1.1 Belle II 実験で目指す物理

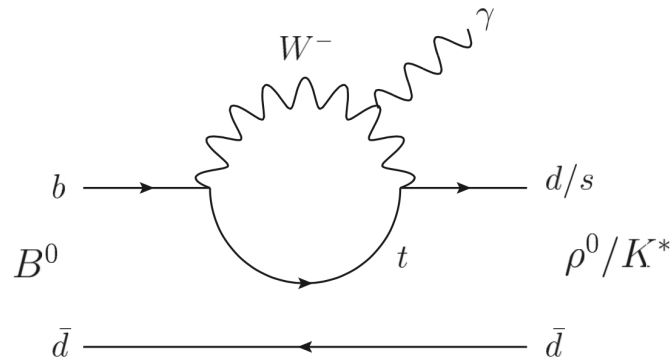
Belle II 実験では電子陽電子の衝突から、主に  $\Upsilon(4S)$  を生成する。 $\Upsilon(4S)$  から生成される B 中間子の崩壊を用いて、標準模型の精密検証や新物理の探索などを行う。

Belle II 実験で測定する B 中間子の稀崩壊の例として  $B \rightarrow \rho \gamma$  崩壊がある。 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  崩壊のダイアグラムは図 1.1 である。b クォークが d クォークではなく s クォークに崩壊する場合は  $B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$  であり、これらの崩壊分岐比には小林益川行列要素  $|V_{td}, V_{ts}|$  が含まれている。よって、崩壊分岐比から、 $|V_{td}/V_{ts}|$  を測定することができる [5]。 $|V_{td}/V_{ts}|$  が標準模型の計算からずれると予想している理論が存在する。

Belle 実験の全データの 85% である  $657 \times 10^6$  個の B 中間子対のデータを用いた解析では [7]、

$$|V_{td}/V_{ts}| = 0.195_{-0.019}^{+0.020}(\text{exp.}) \pm 0.015(\text{theor.}) \quad (1.1)$$

と結果が出ている。理論の不定性よりも実験による測定誤差の方が大きいため、Belle II 実験で統計量を増やし、測定精度の向上を目指す。

図 1.1  $B^0 \rightarrow \rho^0(K^*)\gamma$  のダイアグラム

### 1.1.2 SuperKEKB

図 1.2 は SuperKEKB 加速器の概略図である。前身である KEKB 加速器の約 40 倍のルミノシティを出すために様々な技術が用いられている。加速器のルミノシティは衝突点のビームサイズに反比例し、ビーム電流に比例する。よって、SuperKEKB では衝突点垂直方向にビームサイズを  $1/20$  に絞り、ビーム電流を 2 倍以上高めることでルミノシティの向上を目指している。ビームの衝突の際にビームを絞ることでビーム内の粒子の集合 (以下バンチ) の密度が上がり、衝突頻度を高くすることができる。ビームの衝突はバンチ同士の衝突であるため、バンチの長さの範囲で衝突する。そのため、衝突点のみのビームサイズが小さくても衝突頻度は上がらない。一方、ビームをバンチの長さより小さく絞るとビームが太ってしまう (砂時計効果) [8]。よって、衝突点でのビームサイズが小さくても、バンチ全体でのビームサイズが広がってしまうためルミノシティは上がらない。しかし、ナノビーム方式 [9] の衝突を行うことで砂時計効果の制限よりビームを絞ることが可能となる。そのため、KEKB 加速器のときよりもビーム幅を  $1/20$  に短くすることができ、ルミノシティを向上させることができる。

### 1.1.3 Belle II 検出器

Belle II 検出器は図 1.3 のように電子・陽電子の衝突点を囲むように設置される円筒型の検出器である。高さ 7 m、長さ 7.5 m の検出器で、ピクセル型検出器 (PXD)、シリコンバーテックス検出器 (SVD)、中央飛跡検出器 (CDC)、粒子識別装置 (TOP カウンターと ARICH)、電磁カロリメータ (ECL)、ミュー粒子・中性 K 中間子検出器 (KLM) の 7 つの検出器で構成されている。ミュー粒子・中性 K 中間子検出器 (KLM) 以外は 1.5 T 超伝導ソレノイド電磁石内に設置される。Belle II 検出器の各装置の説明を以下に記述する。

#### ピクセル型検出器

Depleted P-channel Field Effect Transistor (DEPFET) と呼ばれるピクセルセンサーを用いた検出器。荷電粒子によってシリコン中に電子・正孔対が作られ、その電気信号を読み出すこ

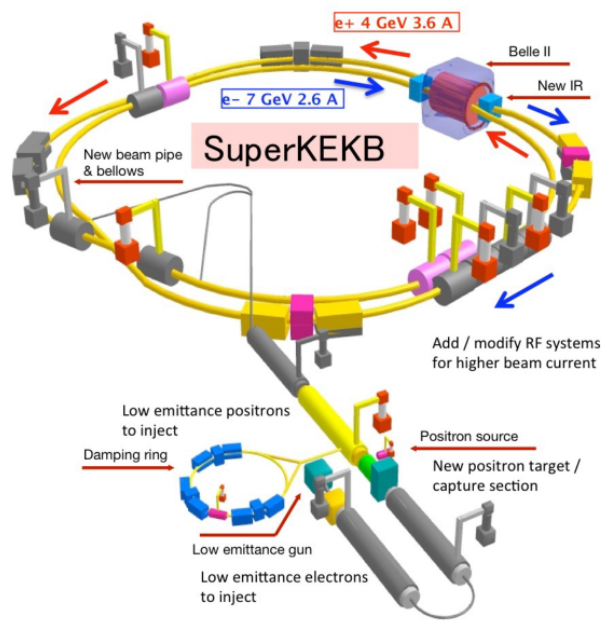


図 1.2 SuperKEKB 加速器

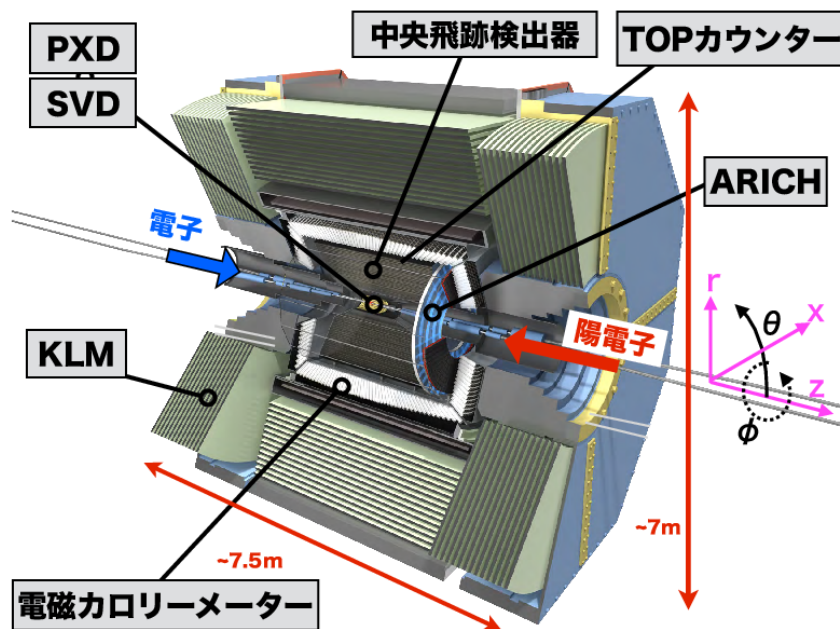


図 1.3 Belle II 検出器

とにより、粒子の通過位置を精密に測定できる。捕らえた荷電粒子の飛跡から B 中間子の崩壊点を精度良く再構成する。

#### シリコンバーテックス検出器

シリコン半導体両面にストリップ状に張った電極で、ピクセル型検出器と同様に荷電粒子がシリコン中を通過した際に作られる電子・正孔対の電気信号を検出する。荷電粒子の飛跡を約 10  $\mu\text{m}$  の精度で検出できる。B 中間子の崩壊点測定に用いる。

#### 中央飛跡検出器

円筒内に細いワイヤーが張られ、内部を混合ガスで満たした検出器。荷電粒子が CDC を横切る際、ガスの分子をイオン化することで生じる電気信号を利用して粒子の飛跡を約 100  $\mu\text{m}$  の精度で測定する。電荷量を測定することで、低運動量の粒子の識別も可能。

#### TOP カウンター

石英輻射体を通過する荷電粒子のチェレンコフ光を石英内で伝搬させ、光検出器で検出する。光子の検出時間と位置からリングイメージを再構成し、粒子識別を行う。バレル部に設置される。

#### ARICH

エアロゲルを通過する荷電粒子が放射するチェレンコフ光のリングイメージを 20 cm 離れた光検出器で検出する。検出光子のリングイメージからチェレンコフ角を測定し、粒子識別を行う。エンドキャップ部に設置される。

#### 電磁カロリメータ

結晶シンチレータ CsI(Tl) に入射した電子やガンマ線が電磁シャワーを起こし、エネルギーに比例した量の光を発生する。それを光検出器 (フォトダイオード) を使って電気信号に変換し、電子や光子のエネルギーを測定する。

#### ミュオン粒子・中性 K 中間子検出器

バレル部は高抵抗電極板測定器 (内層はプラスチックシンチレータ) と 4.7cm 厚の鉄のサンドイッチ構造になった検出器。エンドキャップ部は鉄板とプラスチックシンチレータのサンドイッチ構造。透過力の高い  $K_L$  中間子、およびミュオン粒子をハドロン相互作用の有無から識別する。

## 1.2 TOP カウンター

### 1.2.1 TOP カウンターの構造

TOP カウンター [10–14] は図 1.4 のように 2700 mm $\times$ 450 mm $\times$ 20 mm の石英輻射体と光検出器 MCP(Micro Channel Plate)-PMT を端面に設置した構造の検出器である。図 1.5 のように石英板とプリズム、ミラー、筐体などから構成される。ビーム衝突点から 1200 mm の位置に Belle II 検出器のバレル部を覆うように 16 機設置される。石英輻射体は長さ 1250 mm の石英板 2 枚と両

端に接着されるプリズムとミラーによって構成され、光検出器 MCP-PMT はプリズム端面に設置される。波長分散効果の対策として波長カットフィルターとフォーカシングミラーを導入している [16]。2 枚の石英板を光学接着材で接着し、石英板の両端にそれぞれプリズムとミラーを接着する。そして、筐体である Quart bar box(QBB) に入れる。そして、オプティカルクッキーと呼ばれる光学接着用のシリコンゴムを用いて MCP-PMT をプリズムに接着する。

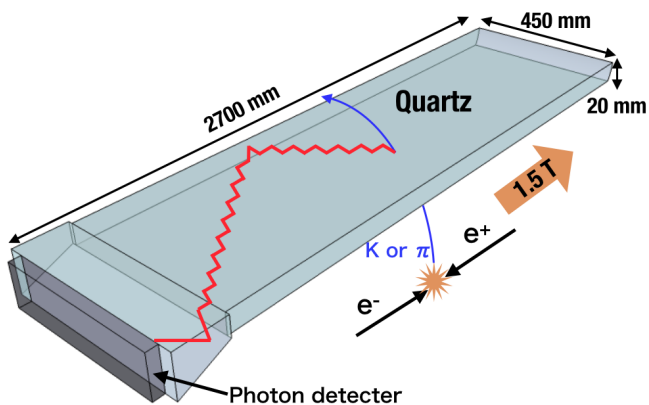


図 1.4 TOP カウンターの模式図

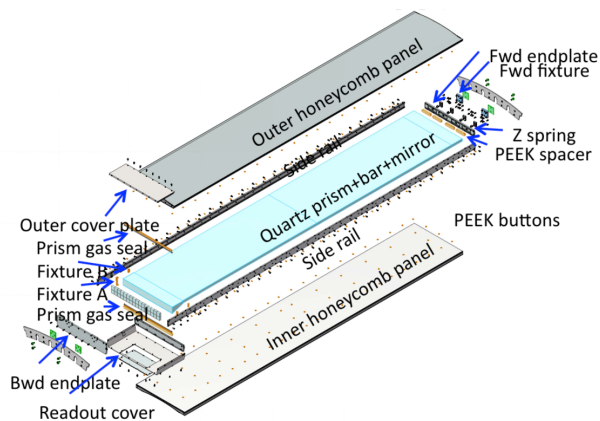


図 1.5 TOP カウンターの各部品の模式図

1.2.2 TOP カウンターの粒子識別原理

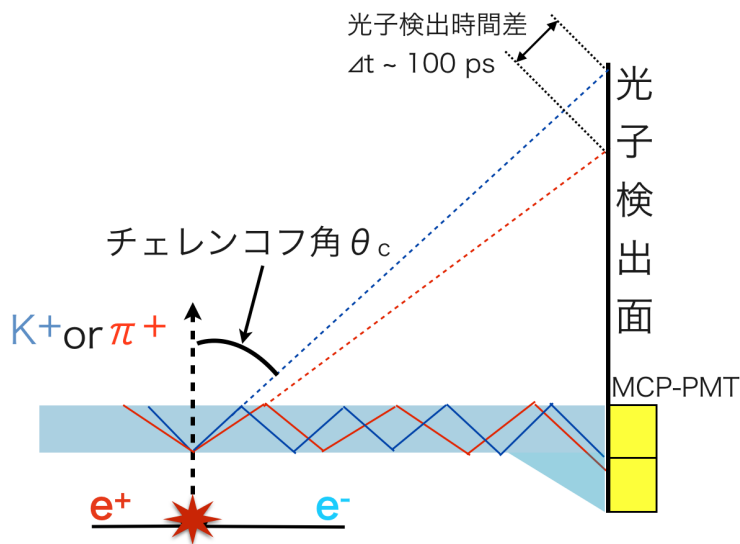


図 1.6 TOP カウンターの粒子識別原理の概略図。赤線と青線はそれぞれ K と  $\pi$  中間子からのチェレンコフ光

石英輻射体に入射した荷電粒子が石英輻射体内でチェレンコフ光を放射する。放射されたチェレ

ンコフ光は図 1.6 のように石英内部で反射を繰り返しながら、石英端面に設置されている光検出器 MCP-PMT に入射する。チェレンコフ光子の検出位置と検出時間からチェレンコフ光のリングイメージを再構成し、チェレンコフ角  $\theta_c$  を求める。 $\theta_c$  は粒子の速度  $\beta$  と石英の屈折率  $n$  を用いて、

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1.2)$$

と表される。また、粒子の質量  $m$  は、

$$m = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \quad (1.3)$$

で表される。ここで、 $p$  は粒子の運動量である。石英の屈折率  $n$  は波長 400 nm で 1.47 であり、運動量  $p$  を中央飛跡検出器の測定から測定すれば、上記 2 つの式を用いて  $\theta_c$  から粒子の質量を求めることができる。よって、 $K$  中間子と  $\pi$  中間子の質量を  $\theta_c$  の測定によって求め、0.5 から 3 GeV/c という広い運動領域で粒子識別を行うことができる。

TOP カウンターの粒子識別性能は近似的に、

$$S \propto \frac{\sqrt{N_p}}{\sigma_{TOP}} \quad (1.4)$$

と表すことができる。 $S$  は識別能力、 $N_p$  は検出光子数 (個)、 $\sigma_{TOP}$  は 1 光子に対する時間分解能である。上式の比例係数は、 $K/\pi$  が生成されチェレンコフ光が検出されるまでの時間、石英輻射体の均質性などによって決まる。よって、荷電粒子発生後の光子検出までの時間を長くすることや、石英輻射体の均質性も重要な要素である。荷電粒子が TOP カウンターに垂直入射した場合、光検出器に到達する光子数は約 130 個であり、3 GeV/c の  $K/\pi$  からの光子の到達時間差は約 100 ps である。よって、1 光子検出可能な高い時間分解能を持つ光検出器が必要となる。そのため、TOP カウンター用の光検出器に MCP-PMT を用いる。

TOP カウンターの粒子識別性能はシミュレーションによって評価されている。表 1.1 は、TOP カウンターを用いた場合の粒子識別性能の Belle 実験 PID システムとの比較である

表 1.1 TOP カウンターの粒子識別性能 [15]

	Belle II TOP カウンター		Belle 実験	
	$K$ 識別効率	$\pi$ 誤識別効率	$K$ 識別効率	$\pi$ 識別効率
$B \rightarrow \pi\pi$	95.8%	5.4%	88.5%	11.6%
$B \rightarrow \rho\gamma$	98.7%	2.4%	87.5%	10%

また、TOP カウンターの光子検出効率や時間分解能の悪化による  $K/\pi$  識別性能の変化もシミュレーションによって求められている。光子検出効率に対する粒子識別性能を表 1.2 に示す。光子検出効率が 10% 減少した場合、粒子識別性能は減少するものの変化量としては約 1% である。



表 1.2 検出光子数に対する TOP カウンターの粒子識別性能 [15]

	検出光子数 (バックグラウンド)	$\pi\pi$ の識別効率	$\pi\pi$ の誤識別効率	$\rho\gamma$ の識別効率	$\rho\gamma$ の誤識別効率
$\times 1.0$	20+7	97.5%	3.3%	98.5%	2.1%
$\times 0.8$	16+7	96.4%	4.3%	97.6%	2.8%
$\times 0.6$	12+7	94.4%	6.1%	95.8%	4.1%
$\times 0.4$	8+7	90.2%	9.8%	91.3%	6.9%

### 1.3 TOP カウンター用 MCP-PMT の実機設置環境

#### 1.3.1 1.5 T の磁場

Belle II 検出器中で TOP カウンターは 1.5 T の超伝導ソレノイド電磁石内で使用される。ソレノイド内部の磁場は図 1.7 のように見積もられている。MCP-PMT の設置位置は図 1.3 において、 $(r,z)=(120\text{ cm}, -70\text{ cm})$  であり、MCP-PMT の管軸に平行な方向に 1.5 T がかかり、管軸に垂直な方向にはほとんど磁場はかからない。

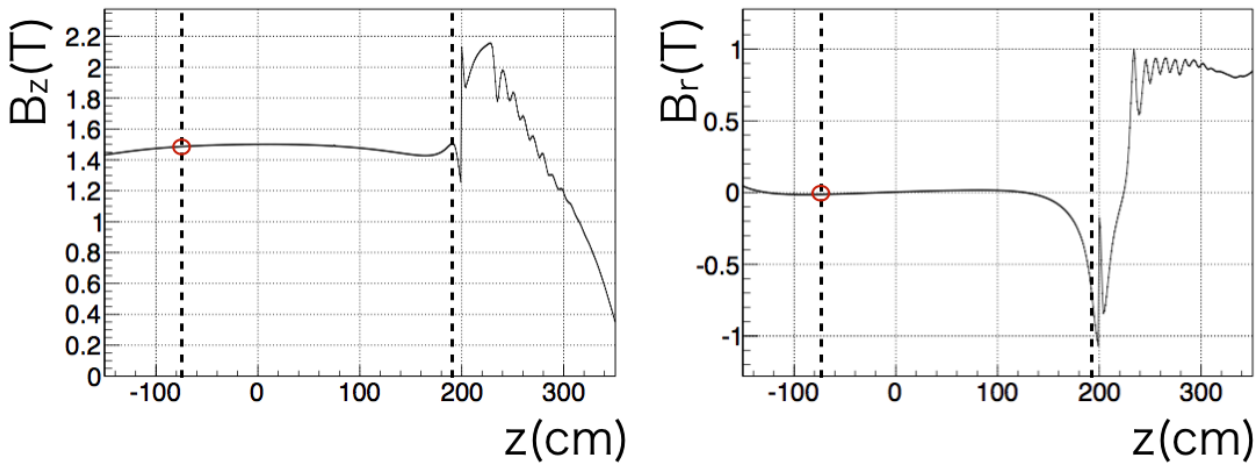


図 1.7 Belle II 検出器内の磁場。点線は TOP カウンターの位置を表している。どちらの図も  $r$  が 120 cm での図。  $B_r$  が管軸に垂直な磁場で、  $B_z$  が管軸に平行な磁場である。  $r, z$  は図 1.3 に定義している。赤丸が MCP-PMT の位置を示している。

#### 1.3.2 バックグラウンド光子

$8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  もの高ルミノシティで実験を行う Belle II 実験では、高頻度の  $\gamma$  線が発生する。発生したバックグラウンド  $\gamma$  線が TOP カウンターの石英輻射体内で対生成し、生成された電子や陽電子からのチェレンコフ光が TOP カウンターにとって最も問題となる。バックグラウンドの量

は電子の High energy ring(HER) と陽電子の Low energy ring(LER) で異なる。 $\gamma$  線の発生機構は主に以下の3つである。

#### 輻射バーバー散乱 (Radiation Barber scattering)

電子と陽電子の弾性散乱過程で光子が放射される。その光子が TOP カウンターに入射し、対生成した電子と陽電子からのチェレンコフ光がバックグラウンドとなる。(以下 RBB $\gamma$ ) また、弾性散乱過程で放射された光子がビームパイプ中を通り、電磁石などの物質に当たり、発生した放射線が TOP カウンターに入射する場合もバックグラウンドとなる。(RBB HER や RBB LER) 輻射バーバー散乱は散乱断面積約 50 nb の電子陽電子反応であり、発生頻度は加速器のルミノシティに比例する。よって、Belle 実験からルミノシティが 40 倍になった Belle II 実験では発生頻度が 40 倍となる。

#### タウシェック散乱

電子 (陽電子) ビームの同じバンチ内の電子 (陽電子) 同士の散乱をタウシェック散乱と呼ぶ。バンチ内から散乱された電子 (陽電子) がビームパイプや電磁石などの衝突点付近の物質に衝突し、制動輻射によって  $\gamma$  線が発生する。タウシェック散乱の発生頻度はビーム電流の他にビームエネルギーの3乗とビームサイズに反比例する。よって、Belle II 実験においては、電子ビームよりも低エネルギーの陽電子ビームの方がタウシェック散乱の発生頻度が高い。また、SuperKEKB ではビームサイズが Belle 実験時よりも 20 倍小さくなり、タウシェック散乱の発生頻度が高くなる。

#### クーロン散乱

加速器のビームパイプ内には残留ガスが存在する。その残留ガスとビームバンチ内の電子 (陽電子) がクーロン散乱を起こすことがある。散乱された電子 (陽電子) がビームパイプや電磁石などの衝突点付近の物質に衝突し、制動輻射によって  $\gamma$  線が発生する。クーロン散乱の発生頻度はビーム電流、真空度の他にビームエネルギーの2乗に反比例する。よって、ビームエネルギーの小さい陽電子のビームで発生しやすい。

これらのバックグラウンドを減らすために、重金属などのシールドやビームパイプのコリメータの設置などの努力が行われてきた。シールドなどを考慮した上で、図 1.8 のように加速器での試験やシュミレーションによって各種のバックグラウンドの量は調べられており、MCP-PMT に入射するチェレンコフ光は PMT1 個あたり 1.5~3 MHz であると見積もられている。

## 1.4 MCP-PMT

Belle II TOP カウンターに使用可能な光検出器を用意するという目的で、MCP-PMT [17-21] の開発から試作品のテスト、実機使用環境下でのテストがこれまでに行われてきた。その研究開発の結果から現在の MCP-PMT の性能や構造が決定され、TOP カウンターに使用可能な MCP-PMT の開発に成功した。MCP-PMT の製造元は株式会社浜松ホトニクスであり、共同で研究を行ってきた。型名は R10754-07-M16(N) である。本章では、開発に成功した MCP-PMT の構造や光子検出原理、各種性能について述べる。

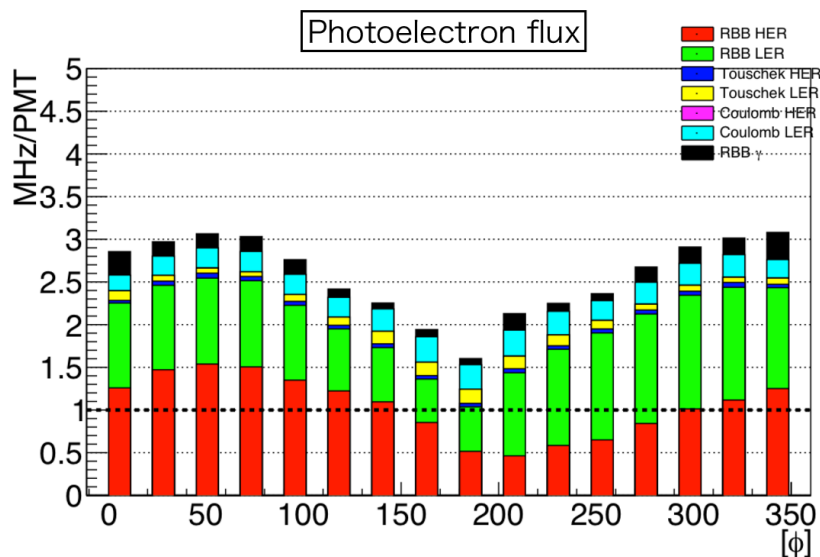


図 1.8 MCP-PMT へのバックグラウンド光子の頻度。各色はバックグラウンドの発生機構の違い。横軸はビームの方向に対する方位角軸 (図 1.3) である。黒い点線は増幅率が  $1.0 \times 10^6$  での Conventional-MCP-PMT の平均的な寿命を示している。

### 1.4.1 MCP-PMT の構造と原理

TOP カウンターに用いる MCP-PMT は図 1.9 のような外観であり、外形  $27.6 \text{ mm} \times 27.6 \text{ mm}$  の角型の光電子増倍管である。TOP カウンターに設置した際に、不感領域を少なくするために角型にしている。図 1.10 は MCP-PMT の断面図である。2 枚のマイクロチャンネルプレート (MCP) が  $1 \text{ mm}$  間隔で PMT 内部に設置されている。MCP の断面図は図 1.11 であり、厚さが  $400 \mu\text{m}$  の薄い鉛ガラスの板に直径  $10 \mu\text{m}$  のチャンネルと呼ばれる穴が  $13$  度の角度で多数あいている。MCP には約  $1 \text{ kV}$  の電圧が印加され、2 枚の MCP の間、光電面と MCP の間、MCP とアノードの間にも図 1.10 のように電圧が印加される。

光子が光電面に入射し、光電面から光電子が放出される。光電子は電場で加速され、MCP のチャンネル内に入射する。そして、鉛ガラスのチャンネル壁面に形成されている 2 次電子放出層に電子が衝突し、2 次電子が放出される。2 次電子は電場で加速され、チャンネル壁面に衝突する。このように衝突と加速を繰り返すことで、2 枚の MCP で約  $10^6$  個に電子を増幅することができる。入射光電子がチャンネルを通り抜けて増幅されないことと、2 次電子放出比の角度依存性 [24] を考慮してチャンネルのバイアス角は  $13$  度になっている。また、角度をつけることで光電面に向かうイオンをある程度トラップできる。増幅された電子は図 1.10 のように 16 チャンネルに分割されたアノードに収集され、検出される。MCP-PMT の構造と性能を表 1.3 にまとめた。

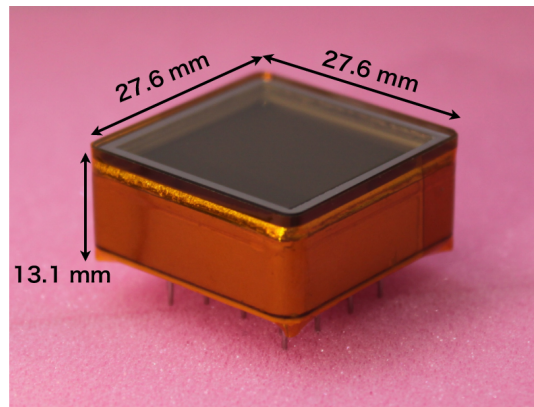


図 1.9 MCP-PMT の外観

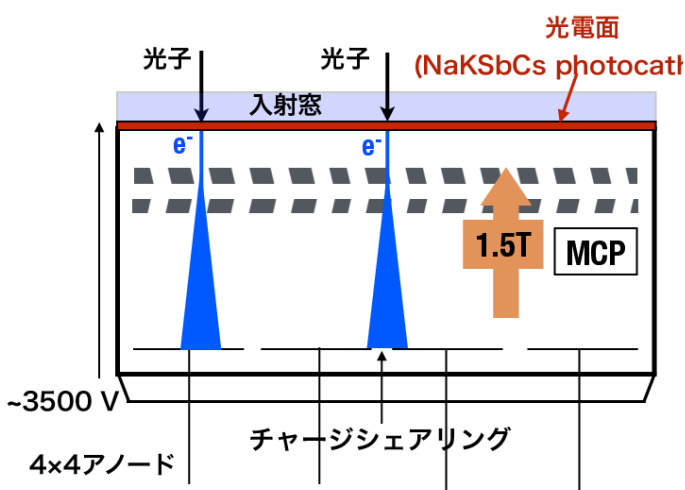


図 1.10 MCP-PMT の断面図

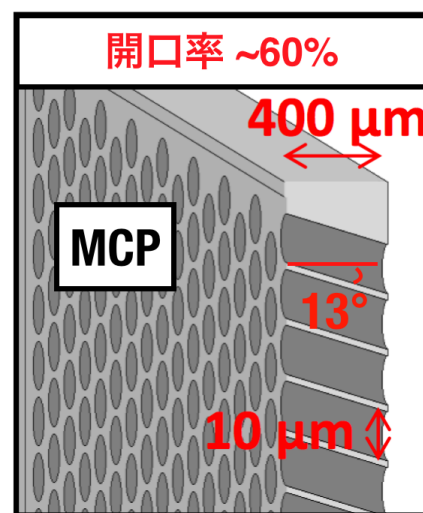


図 1.11 MCP の断面図

**入射窓と光電面**

MCP-PMT の窓材には不純物や格子欠陥が少なく、放射線耐性の強い合成石英ガラスを使用する。光電面にはマルチアルカリである NaKSbCs を使用することで、TOP カウンターに必要なピーク波長 350 から 400 nm での QE が 24% 以上で平均 28% を目指す。

**MCP**

MCP が異なる 2 種類の MCP-PMT がある。Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-PMT である。鉛ガラスをエッチングした際に形成される二次電子放出層を用いているのが Conventional-MCP で、MCP の表面に原子層をコーティングし、二次電子放出層を形成しているのが Coating-MCP である。Coating-MCP-PMT は新たに開発され、Conventional-MCP-PMT

表 1.3 MCP-PMT の構造と性能

MCP-PMT の本体の外径寸法 (H×W×L)	27.6×27.6×13.1 mm (L はピンの長さを除く)
光電面材質	マルチアルカリ (NaKSbCs)
光電面の最小有効寸法	23×23 mm
入射窓の材質	合成石英ガラス
入射窓の厚み	1.5 mm
MCP の種類	Conventional と Coating
MCP の段数	2 段
MCP のチャンネル径	10 $\mu\text{m}$
MCP のチャンネルのバイアス角	13 度
MCP の厚さ	400 $\mu\text{m}$
MCP の開口率	約 60%
アノードチャンネル数	16 チャンネル (4×4)
各アノードの寸法	5.275×5.275 mm
感度波長範囲	160 ~ 650 nm
QE ピーク波長	350 ~ 400 nm
ピーク波長での QE	平均 28%
ピーク波長での QE の最小値	24%
光電面の均一性	70%
印加電圧	-3 kV~-3.9 kV(Conventional) -2 kV~-3 kV(Coating)
増幅率 (0 T 中での典型値)	$2 \times 10^6$
MCP 増幅率均一性	60%
1 光子に対する時間分解能	30 ~ 50 ps
ダークカウント (典型値)	5000 cps
動作温度	-30 ~ +45 °C(推奨温度は +20±10°C)
動作湿度	0 ~ 30%
保存温度	-30 ~ +50 °C(推奨温度は +20±15°C)
保存湿度	45% 以下

よりも寿命を長くすることができる。

#### 印加電圧

浜松ホトニクスで図 1.12 のように電流増幅率を測定し、電流増幅率が  $2 \times 10^6$  になる電圧を標準電圧と定義している。Conventional-MCP-PMT の場合は典型的に -3500 V であり、Coating-MCP-PMT の場合は典型的に -2500 V が標準電圧である。

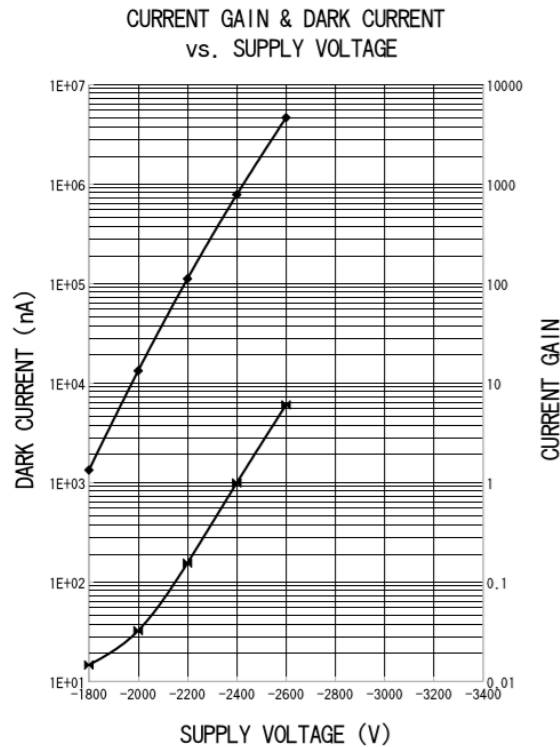


図 1.12 電流増幅率と印加電圧の関係 (Coating-MCP-PMT)

## 1.4.2 MCP-PMT の基本性能

### 量子効率

光電面から放射される光電子数を入射する光子数で割った値が量子効率である。入射光子のエネルギーが光電面物質の価電帯の電子にエネルギーを与え、エネルギーを与えられた電子が光電子として飛び出す。しかし、これらの電子全てが放射されるわけではない。光電面内での電子の吸収や散乱によって光電面表面から脱出できない電子が存在するためである。そのため、量子効率は100%にはならない。また、価電子帯の電子の励起数は光の振動数によるため、量子効率には波長依存性が存在する。量子効率は350から400 nmでピークを持ち、長波長側と低波長側では十数%とQEが低く、光電面の端ほど長波長側でQEが低い。

### 増幅率

MCP-PMTの増幅率は印加電圧によって決まる。標準電圧での1光子に対する増幅率は $\mathcal{O}(10^6)$ で、1光子検出可能な検出器である。増幅率が $2 \times 10^6$ のとき図1.13のように1光子に対して典型的に波高約20 mV、全幅約1 nsの信号を出力する。MCPの二次電子放出層の二次電子放出比は入射電子のエネルギーに対して図1.14のような関係がある。標準電圧では、入射電子のエネルギーが二次電子放出比が最大となるエネルギーよりも低いため、印加電圧を上げることで増幅率を上げることができる。しかし、入射電子のエネルギーが大きくなりすぎると二次電子放出比が低下し、

増幅率も低下する。二次電子放出比が低下する原因は、入射電子のエネルギーが大きくなることで二次電子放出層のより内側で二次電子を生成し、二次電子放出層から二次電子が脱出できなくなってしまうためである。また、電圧を上げすぎると MCP-PMT 内で放電が起き、故障してしまう。二次電子放出層が2次電子を放出すると MCP 内の電荷が失われる。失われた電荷は MCP の電極間の電圧によりチャンネル壁にそって流れる電流によって供給される。短時間に供給可能な電荷量には限りがあり、放出する二次電子が多くなりすぎると電荷の供給が間に合わなくなり、増幅率が低下する。

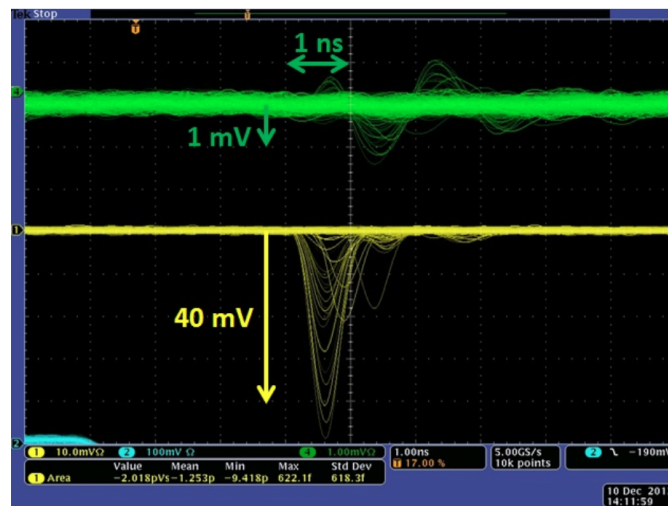


図 1.13 MCP-PMT の信号の波形。下の波形が 1 光子検出時の本信号。上の波形はクロストークである [27]。

### 時間分解能

MCP-PMT は光電面で生成された光電子が増幅されアノードに到達するまでの長さが約 5 mm と短いため高速応答であり、図 1.13 のように全幅で約 1 ns の信号が出力される。MCP のチャンネル径が  $10 \mu\text{m}$  で MCP の厚さが  $400 \mu\text{m}$  であり、狭く短いチャンネル内で電子増幅が起きる。そのため、二次電子の経路差が小さく、30 ~ 50 ps という高い時間分解能を持つ。

### 収集効率

MCP-PMT の収集効率は 0 T 中では MCP の開口率によって決まる。MCP の開口率は約 60% である。MCP にコーティングを施している Coating-MCP でもコーティングの膜厚が 1~10 nm であり、Conventional-MCP と Coating-MCP では開口率は変わらない。

### クロストークとチャージシェアリング

使用する MCP-PMT はマルチアノード型の MCP-PMT である。アノードが  $4 \times 4$  の 16 チャンネルに分割されている。MCP-PMT のチャンネル境界付近に光子が入射した場合、図 1.10 のように二次電子が隣接する他のチャンネルでも検出される。この現象をチャージシェアリングと呼ぶ。

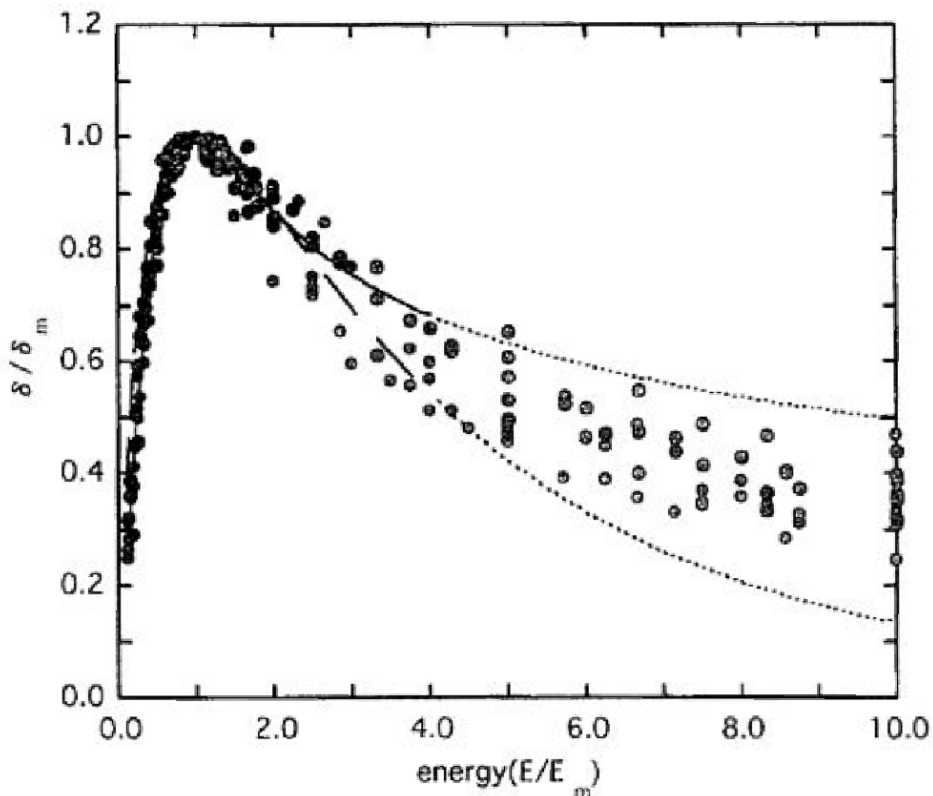


図 1.14 二次電子放出層の二次電子放出比と入射電子エネルギーの関係。横軸は二次電子放出層への入射電子エネルギーを二次電子放出比が最大となる入射電子エネルギーで割ったものである。縦軸は二次電子放出比のピークを 1 として規格化した二次電子放出比の割合である。各点は二次電子放出層の物質のシュミレーション結果の違いである [24,25]。

また、MCP-PMT の信号は約 1 GHz の高周波信号であり、あるチャンネルで信号が出力した場合、電荷の流れに誘発され、周囲の隣接したチャンネルに信号の一部が伝わる。主に MCP 二段目の出口からアノードの間でこの現象が起きると考えられている。MCP 二段目とアノードが静電容量を持ち、RLC 回路を構成してしまう。図 1.13 の上側の波形がクロストークの例であり、本信号に対して約 500 ps 遅れて信号が正方向に立ち上がり、その後負方向に本信号の約 5% の高さまで振れる。チャージシェアリングは本信号と同時に検出され、クロストークは遅れて検出される。

#### 磁場特性

一般に PMT は磁場中で性能が変化する。0.01 T 程度の磁場であっても、ヘッドオン型やサイドイン型の PMT では、電子がダイノード間を移動する際に磁場によって曲げられるため、うまく収集されなくなり、1 光子検出が不可能なほど増幅率が減少する。

ローレンツ力による電子の円運動の半径  $r$  (ラーモア半径) は

$$r = \frac{m_e v}{eB} \quad (1.5)$$



である。磁場に対して垂直な電子速度成分を  $v$ 、 $m_e$  は電子質量、 $e$  は素電荷、 $B$  は磁場である。MCP-PMT の場合は  $\phi 10 \mu\text{m}$  の小さな穴の中で電子増幅を起こすため、ラーモア半径が MCP のチャンネル半径と同程度になるまで磁場の影響を受けにくい。管軸に垂直な磁場が 0.07 T 以内であれば MCP-PMT の特性はほとんど変わらないため、TOP カウンターの MCP-PMT 設置位置では、管軸に平行な 1.5 T の磁場が MCP-PMT の性能に関わってくる。1.5 T 中で 3eV の電子の場合ではラーモア半径は約  $3.9 \mu\text{m}$  である。過去の研究 [19,27] から、図 1.15 のように MCP-PMT の増幅率は 1.5 T 中で 0 T 中の約半分に減少する一方、図 1.16 のように時間分解能は 50 ps 以上に悪化しない。よって、1.5 T 中で TOP カウンターの要求性能を満たすことが試作品と数本の量産品の測定でわかっている。

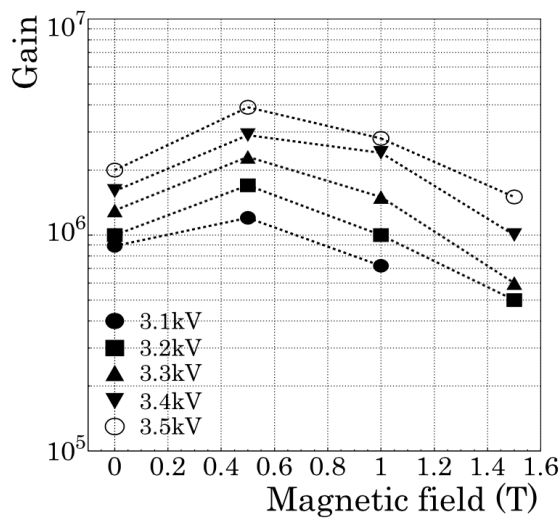


図 1.15 増幅率の磁場依存性 [19]

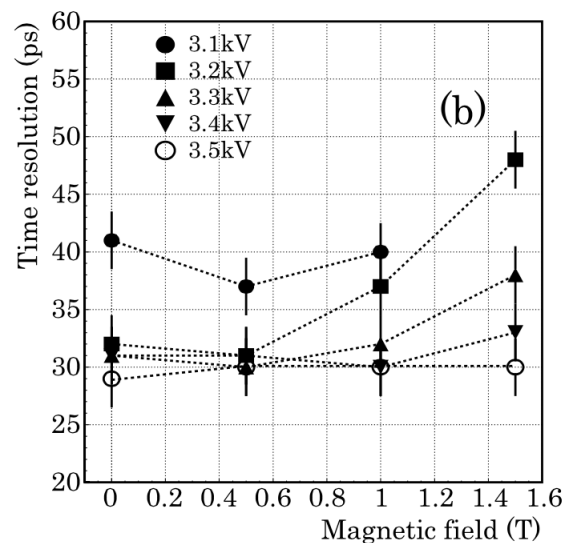


図 1.16 時間分解能の磁場依存性 [19]

図 1.15 の 0.5 T では増幅率が増加し、1.5 T では減少している。このような増幅率の磁場依存性は磁場中での MCP チャンネル内部の二次電子軌道の変化によるものである。MCP-PMT 管軸方向に磁場がかかると図 1.17 のように電子が螺旋運動するようになり、0 T 中に比べて衝突までの電子軌道が短くなり、衝突回数の増加により 0.5T までは増幅率が増加する。さらに磁場が強くなると、二次電子放出層への衝突エネルギーの減少により、増幅率が減少する。また、1 段目から 2 段目の MCP に電子が移る際、0 T 中では電子群が電子同士の反発によりある程度広がるが、磁場中ではその広がりが小さくなる。そのため、図 1.18 のように磁場中では 2 段目の MCP の 1 つのチャンネルに入る電子数が多くなり、チャンネル内で増幅率の飽和が起きる。これによって増幅率は磁場に対して単調に減少する。

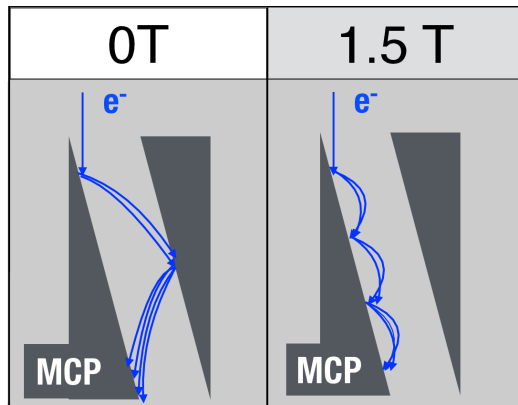


図 1.17 磁場中での MCP 内の電子軌道の変化

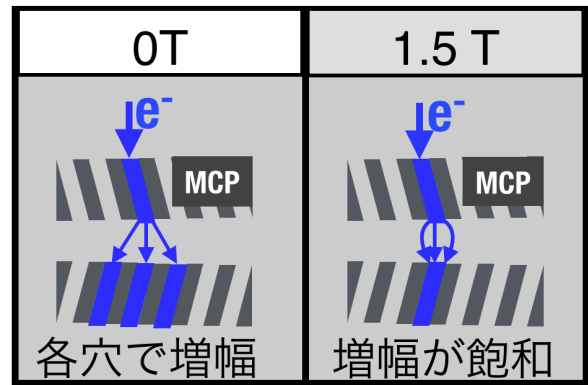


図 1.18 MCP チャンネル内での電子増幅の飽和

図 1.19 は 0 T と 1.5 T 中での MCP-PMT の出力波形の比較である。1.5 T では波高が全体的に小さくなっていることから増幅率が低下していることがわかる。また、波高のばらつきが小さくなっている。これらの原因は上述した 2 つの効果によるものである。

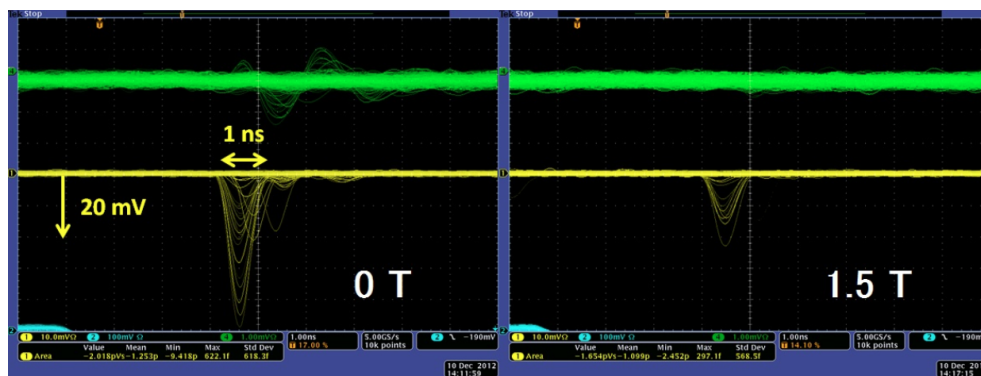


図 1.19 0 T と 1.5 T での MCP-PMT の出力波形 [27]

図 1.20 のように MCP-PMT の HV を変化させても相対増幅率 (0 T の増幅率と 1.5 T の増幅率の比) は変わらない。また、1.5 T の磁場中では収集効率が減少することがわかっている。図 1.21 のように数チャンネル分の測定から 1.5 T 中で収集効率が最大で 6% 程度減少する。しかし、そのときの TOP カウンターの  $K/\pi$  識別効率の低下は 1% 未満と影響は少なく、TOP カウンターへの使用には問題ないとわかっている。

### 光電面寿命

MCP には MCP-PMT 製造時に残留したイオンや中性ガスが付着している。そのイオンや中性ガスを MCP 内で増幅している電子が叩き出す。中性ガスの場合、MCP と側管の隙間を抜けて光電面に到達し、光電面を劣化させる。このとき図 1.22 のように端の QE が減少する。この中性ガスの劣化についてはこれまでの研究から図 1.23 のようにセラミックブロックを MCP と側管の間

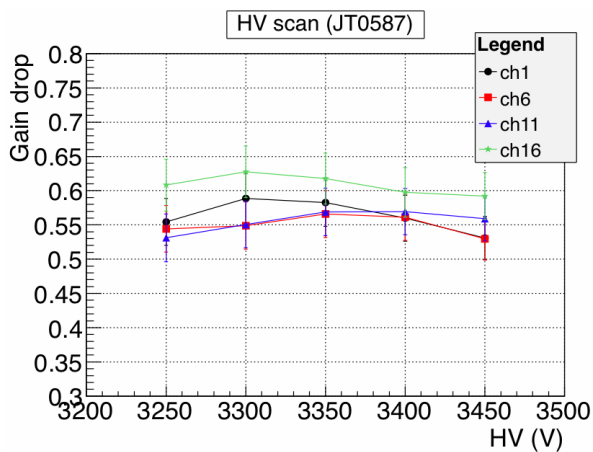


図 1.20 相対増幅率の HV 依存性。プロットの色は MCP-PMT のチャンネルの違い。[27]

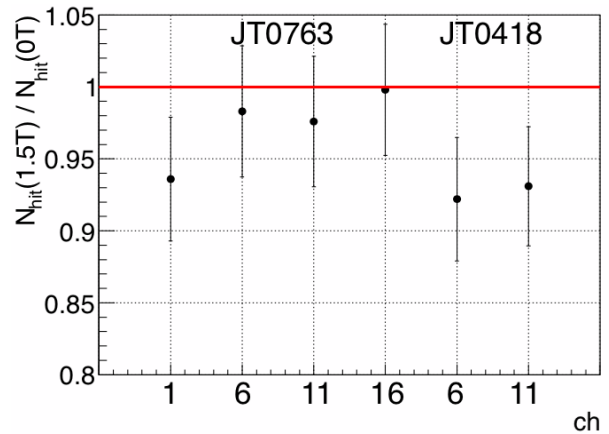


図 1.21 1.5 T 中での収集効率比。横軸はこの測定時に測定した MCP-PMT のチャンネル。縦軸は 1.5 T と 0 T でのヒット数の比。赤線は減少率 0%。プロット上の記号は MCP-PMT の型番 [27]。

に設置することで改善した。

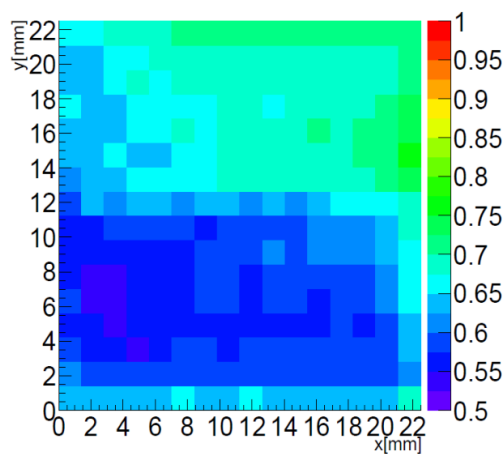


図 1.22 中性ガスによる光電面劣化。x 軸、y 軸は光電面の位置で z 軸が QE の減少率

陽イオンは電場によって図 1.23 のように MCP の穴を通り、光電面に到達し、図 1.24 のように一様に光電面を劣化させる。この現象をイオンフィードバックと呼ぶ。イオンフィードバックを防ぐために、13 度のバイアス角に加え、2 段目の MCP の表面にアルミニウム膜を蒸着している。過去の研究から MCP2 段目の入力面に蒸着するのが、収集効率や時間分解能を維持しつつ光電面の寿命を改善するのに最適であった。

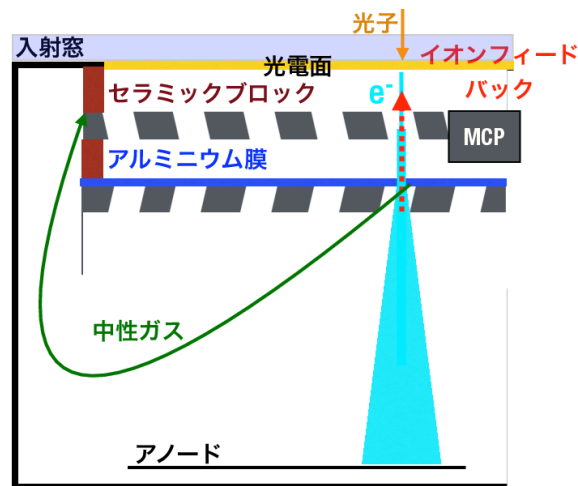


図 1.23 中性ガスへのセラミック対策とイオンフィードバック対策

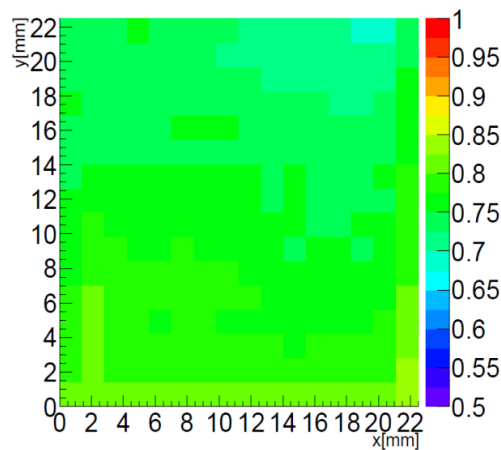


図 1.24 一様な光電面劣化。x 軸、y 軸は光電面の位置で z 軸が QE の減少率

中性ガスもイオンも増幅された電子によって叩きだされるため、光電面の QE の低下は出力電荷量に依存する。よって、QE が 80% まで下がったときの積算出力電荷量をその MCP-PMT の光電面の寿命と定義しているそのため、増幅率が低いほど、寿命に到達するまでの時間が長くなる。MCP-PMT の主な電荷出力源はバックグラウンドからのチェレンコフ光である。Belle II 実験全期間での積算出力電荷量は MCP-PMT の増幅率を  $5 \times 10^5$  と仮定した場合、1.5 から  $3 \text{ C/cm}^2/50\text{ab}^{-1}$  と見積もられている。Coating-MCP-PMT と Conventional-MCP-PMT の寿命は図 1.25 のように Coating-MCP-PMT の方が長い。しかし、その寿命には個体差があり、Belle II 実験全期間でのバックグラウンドの量から必要とされる寿命 1.5 から  $3 \text{ C/cm}^2/50\text{ab}^{-1}$  に対して、約  $3.2 \text{ C/cm}^2$  と余裕のない寿命を持つ Coating-MCP-PMT が図 1.25 のように存在した。そのため、さらなる光電面の寿命改善が必要である。

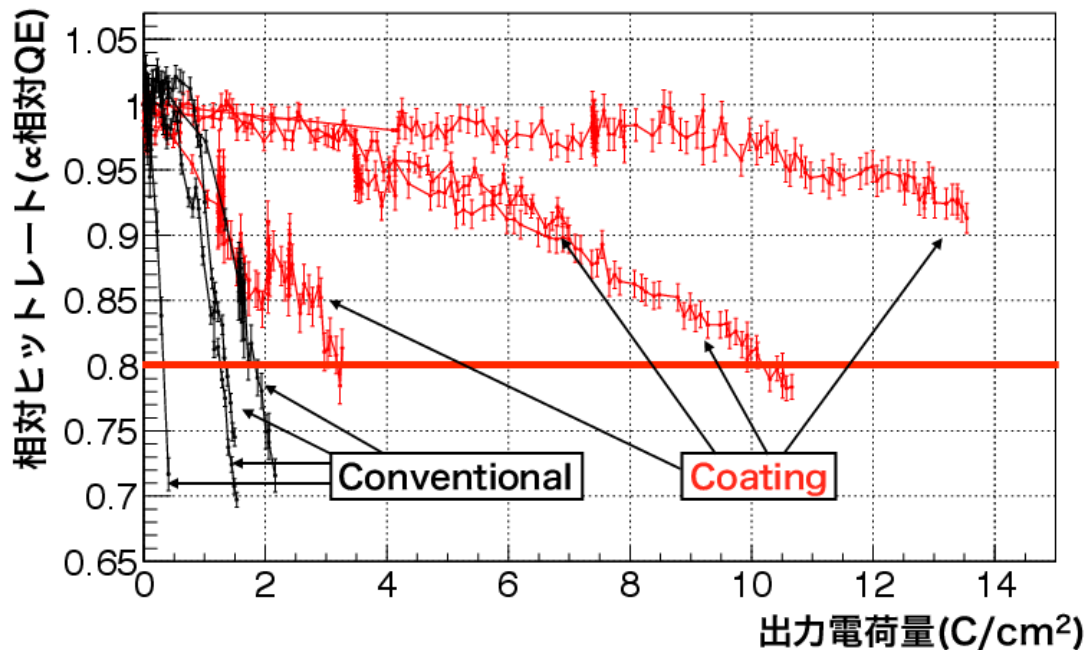


図 1.25 Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-PMT の寿命

## 1.5 本研究の目的

Belle II 実験において、粒子識別装置 TOP カウンターは新物理の探索などに必要な検出器である。TOP カウンターではチェレンコフ光を検出する MCP-PMT の性能が TOP カウンターの粒子識別性能に直結する。これまでに TOP カウンター用の MCP-PMT の開発が行われてきた。そして、開発した MCP-PMT の量産を行い、2014 年 10 月から製造を開始した TOP カウンターに MCP-PMT512 本を実際に使用する段階に到達した。世界的にみても、512 本もの大量の MCP-PMT を量産し、実験に使用した例はなく、製造元の浜松ホトニクスにとっても量産は初の経験だった。よって、要求性能を満たす MCP-PMT を大量に量産し、実際に使用するためには、TOP カウンターに必要な性能である QE、増幅率、時間分解能、収集効率の性能評価を量産に沿って行う必要があった。つまり、浜松ホトニクスでの生産と名古屋大学と KEK での性能測定は二人三脚のように MCP-PMT の量産の成功と実際の使用に向けて進んできたと言える。性能評価を行うことで量産の成功や実際の使用のために必要な以下の項目の実現を目指した。

- 要求性能を満たす MCP-PMT のみを準備し、要求を満たさない MCP-PMT をはじくこと。
- 量産の中で起きる問題を詳細な測定で洗い出し、改善に役立て、少しでも良い性能を持った

MCP-PMT を製造する。

- MCP-PMT の性能を詳細に把握し、TOP カウンターの粒子識別性能の理解する。
- TOP カウンターの性能を最大限引き出すため、MCP-PMT の性能を最大限に引き出せる増幅率に調整できるようにする。

要求性能を満たしていない MCP-PMT をそのまま使用してしまうと TOP カウンターの粒子識別性能が下がってしまう。また、要求性能を満たさない MCP-PMT を確認することで、MCP-PMT の量産段階での問題点を知ることができ、量産をスムーズに進めることに役立つ。MCP-PMT512 本ではチャンネル数が合計 8192 個存在し、全 MCP-PMT、チャンネルごとに個体差が存在する。サンプリングテストでは詳細な性能把握ができないため、MCP-PMT 全数の評価を行う必要がある。TOP カウンターごとの粒子識別性能の把握をあらかじめ行っておき、実験中にその性能が出ているかの指標とする必要がある。そのため、MCP-PMT の各性能から粒子識別性能を見積もるためにも全数の各性能の把握は必要となる。また、MCP-PMT の光電面寿命は出力電荷量に従って低下するため、1.5 T 中で増幅率を極力下げた状態で MCP-PMT を使用し、寿命を延命する必要がある。高い増幅率で MCP-PMT を使用してしまうと MCP-PMT の光電面の劣化が早くなってしまい、実験途中で粒子識別性能の低下を起こしてしまう。増幅率が低すぎても、時間分解能や収集効率が低下し、TOP カウンターに必要な性能を出すことができなくなってしまい粒子識別性能を低下させてしまう。そのため、1.5 T 中で時間分解能や収集効率の要求をみたしつつ寿命を延命可能な低増幅率に調整する必要がある。

また、バックグラウンドの理解が進み、量産品の約半数ある Conventional-MCP-PMT の量子効率が実験中に低下すると予想された。そのため、寿命の短い Conventional-MCP-PMT は実験中に交換を行う。Belle II 実験全期間での積算出力電荷量は MCP-PMT の増幅率を  $5 \times 10^5$  と仮定した場合、1.5 から  $3 \text{ C/cm}^2/50\text{ab}^{-1}$  と見積もられている。そのため、Coating-MCP-PMT にさらに寿命対策を行い、 $3\text{C/cm}^2$  よりも余裕のある寿命を持ち、寿命の個体差の少ない MCP-PMT を開発する必要がある。

## 第 2 章

# MCP-PMT 全数の性能測定

### 2.1 MCP-PMT 全数の性能測定の戦略

1.5 節で述べたことを実現するため、以下の性能測定や検査を MCP-PMT の量産に沿って行った。

- MCP-PMT の寸法検査。
- QE の面分布と波長依存性の測定。
- 1.5 T 中の増幅率、時間分解能、収集効率およびそれらの HV 依存性の測定。

量産品の性能測定によって低 QE などの問題点を見つけ出し、量産途中で、光電面の変更を行った。開発当初は光電面にスーパーバイアルカリを用いていたが、2011 年 11 月以降にはマルチアルカリの NaKSb、2012 年 5 月以降からは NaKSbCs に変更した。MCP については光電面の寿命を延ばすことのできる Coating-MCP が 2013 年 5 月から生産可能となった。よって、量産された MCP-PMT 全数の約半数が Coating-MCP-PMT である。

図 2.1 は MCP-PMT の納入数の推移を表したものである。2011 年 1 月に 550 本の量産を開始し、月に約 20 本のペースで MCP-PMT を量産した。そして、2014 年 3 月に MCP-PMT の生産を一旦完了した。

MCP-PMT の測定は図 2.2 のような戦略で行った。納入された MCP-PMT の寸法検査と放電チェックを行う。次に、QE 測定を行う。QE は磁場中で変化することはないため 0 T 中でのみ測定を行う。増幅率、時間分解能、収集効率については 0 T 中でそれぞれの HV 依存性を測定する。1.5 T 中で各性能の磁場による変化量を 1 点の HV でのみ測定する。1.5 T 中での増幅率や時間分解能、収集効率の変化量は HV 依存性がないため、0 T での HV 依存性と 1.5 T 中で各性能の変化量から、1.5 T 中での各性能の HV 依存性を把握できる。

### 2.2 寸法検査と放電チェック

放電する球や信号を出力しない球、ピンの長さやポッティング材の厚さが適切でないものをそのまま TOP カウンターに使用してしまった場合、読み出し回路に正常に設置できず、実験でデータを取得できないだけでなく、読み出し回路を故障させてしまう。そのため、量産した MCP-PMT 全数が寸法に問題がなく、放電せずに使用できるか確認する必要がある。

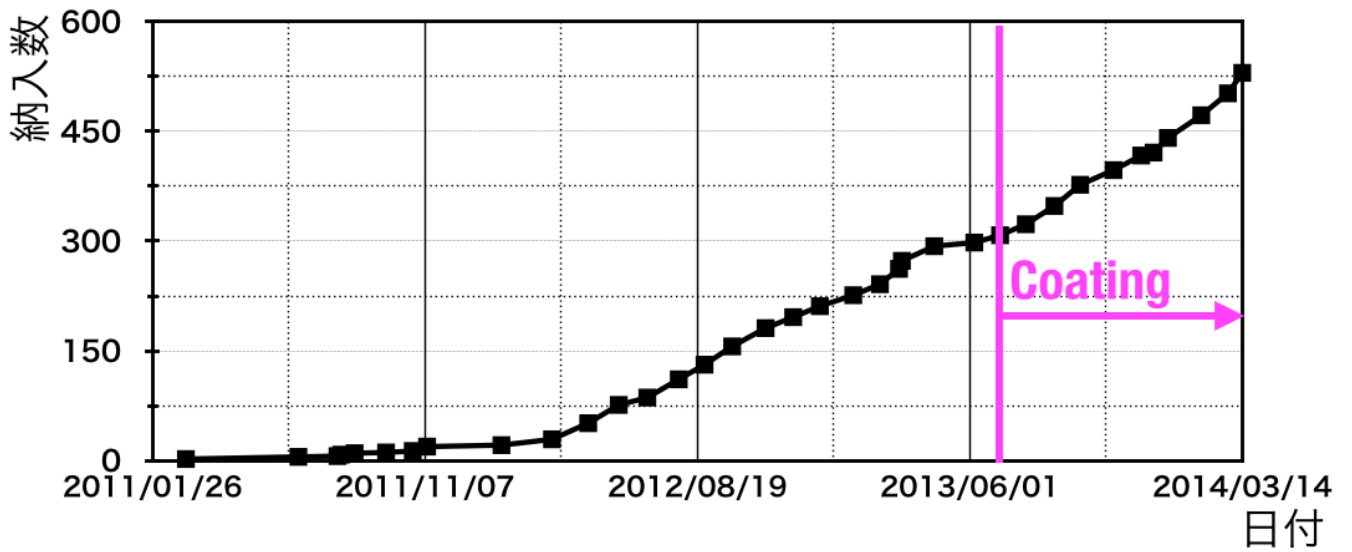


図 2.1 MCP-PMT 納入数の推移

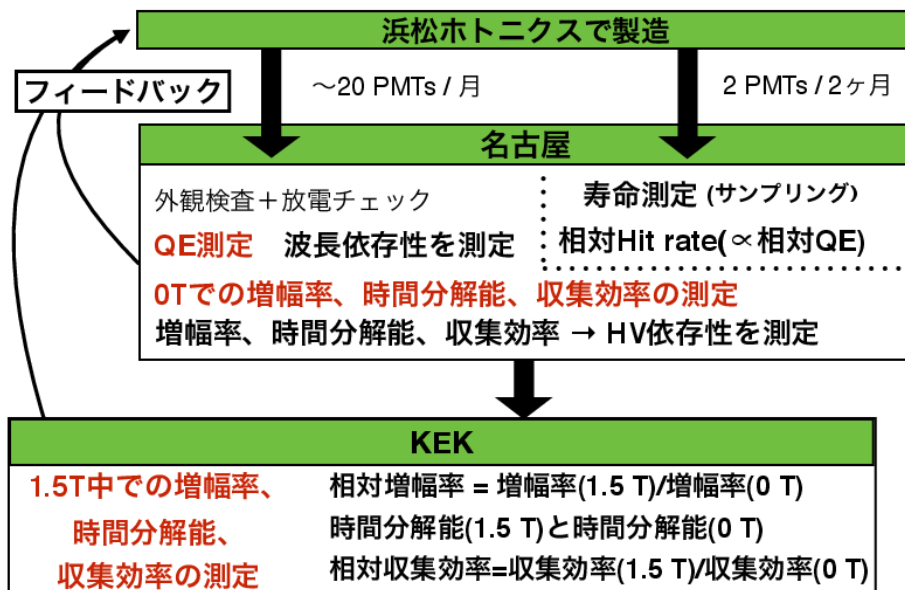


図 2.2 測定の戦略



### 2.2.1 寸法検査

以下の項目をクリアしていれば、ソケットと MCP-PMT 間での放電が発生しないと考えられる。

1. ピンが曲がっていないこと。ピンの直径が  $\phi 0.6$  mm より太すぎないこと。
2. ポッティング材から露出したピンの長さが 2.86 mm 以上確保されていること。
3. 入射窓表面からピン先端が 16.35 以上、16.95 mm 以下であること。

図 2.3 は MCP-PMT の図面である。ピンの直径の設計値は 0.5 mm である。各項目が MCP-PMT のサイズに対応している。これらの項目を簡単に確認するため、図 2.4 のようなジグを作成した。

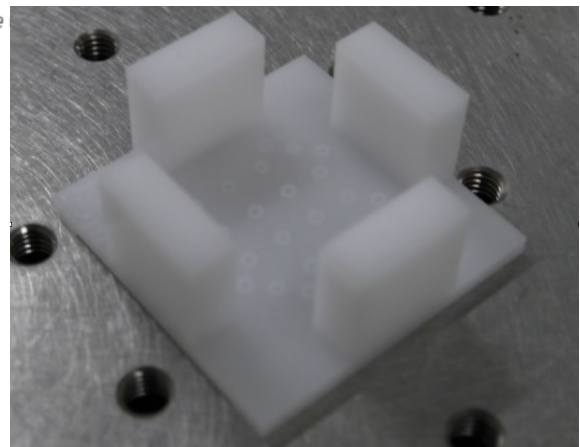
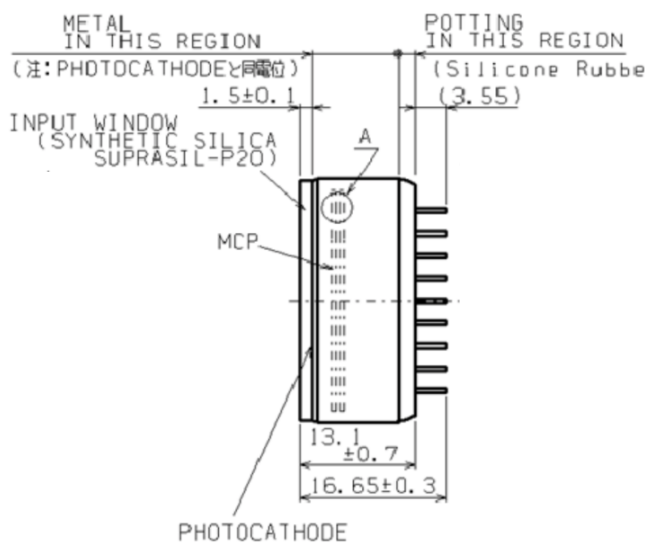


図 2.4 外観検査用ジグ

図 2.3 MCP-PMT の図面

検査用ジグの詳細なサイズは図 2.5 のようになっている。ジグの穴にピンを入れ、図 2.6 のように MCP-PMT を設置する。

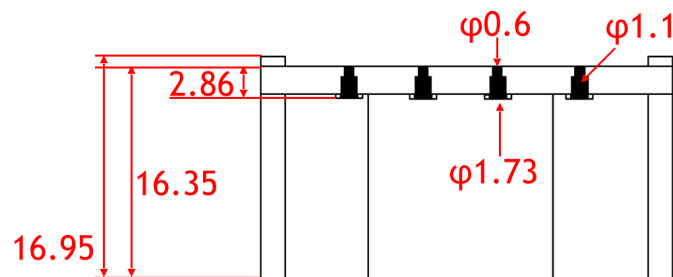


図 2.5 外観検査用ジグの図面 (単位 mm)

$\phi 1.1$  の穴にピンが通過すればピンが曲がっていないと判断できる。 $\phi 1.1$  の穴は実際に使用するピンソケットの直径と同じにしている。次に  $\phi 0.6$  の穴をピンが通過するかどうかでピンの直径が

0.6 mm よりも太すぎないことを確認する。

次に、平面な台の上に図 2.6 のようにジグと MCP-PMT を下向きに置き、検査する。ポッティング材が厚すぎる場合は、ジグが浮き、図 2.7 のようになる。入射窓表面からピン先端が 16.35mm に満たない場合やポッティング材が厚すぎる場合は、ピン先端が図 2.7 のようにジグを突き抜けない。



図 2.6 寸法検査の様子。写真上でジグから飛び出ているものが MCP-PMT のピン。

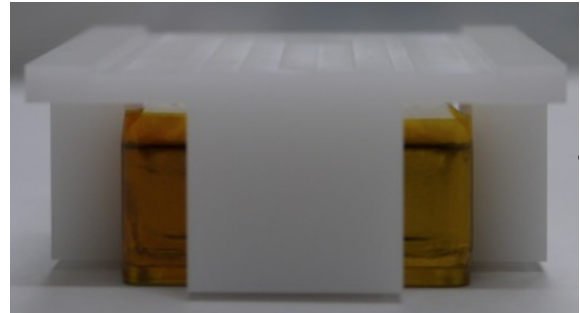


図 2.7 不合格品の例 (ピンが短い場合)

最後に、平面な台の上に図 2.8 のようにジグと MCP-PMT を上向きに置き、検査する。入射窓表面からピンの先端が 16.95mm を超えた場合は図 2.9 のようにピンが長い分だけ PMT 表面がジグからはみ出る。

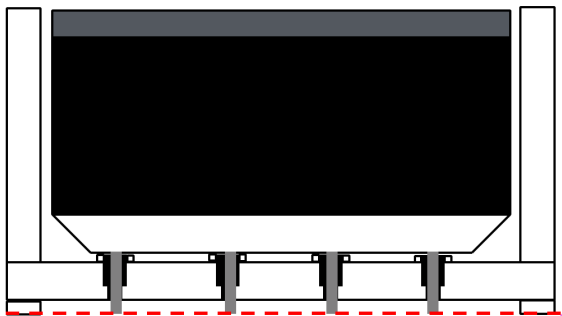


図 2.8 合格品の例

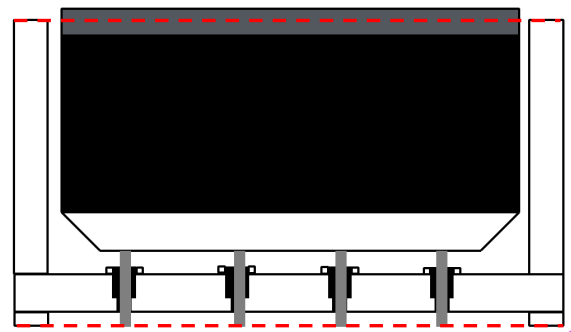


図 2.9 不合格品の例 (ピンが長すぎる場合)

MCP-PMT 全数の外観検査の結果は以下の表 2.1 である。

表 2.1 外観検査の結果

MCP-PMT の種類	検査数	合格品	不合格品
Conventional-MCP-PMT	241 本	236 本	10 本
Coating-MCP-PMT	237 本	211 本	26 本

ポッティング材が変色したものや厚すぎるもの、ピンが曲がったものなどは不合格品とした。不合格品については製造元である浜松ホトニクスに返却し、調整して使用可能なものについてはポッ

ティング材を調節し、再度検査し、使用している。

### 2.2.2 放電チェック

MCP-PMT に印加する HV は典型的に Conventional-MCP-PMT の場合は 3500 V であり、Coating-MCP-PMT の場合は 2500 V である。標準電圧よりも 100V 高い HV を印加し、放電することがないか確認する。同時にダークノイズの確認も行う。ダークカウントレートが 5 kHz を超えていないこととダークノイズの信号波形を確認する。セットアップの写真は図 2.10 のようになっており、セットアップは図 2.11 のようになっている。MCP-PMT の 16 チャンネル分の信号を併合し、+6 dB のアンプで増幅させ、オシロスコープとスケーラーで測定する。

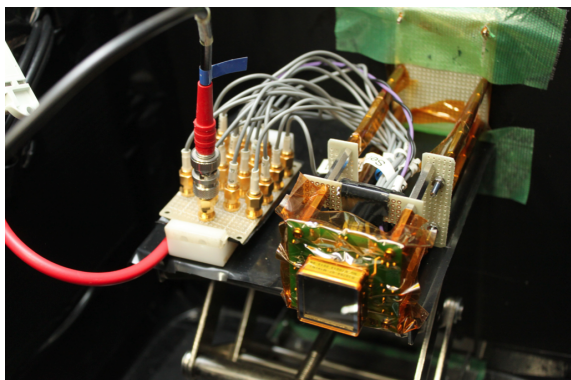


図 2.10 HV チェックのセットアップの写真

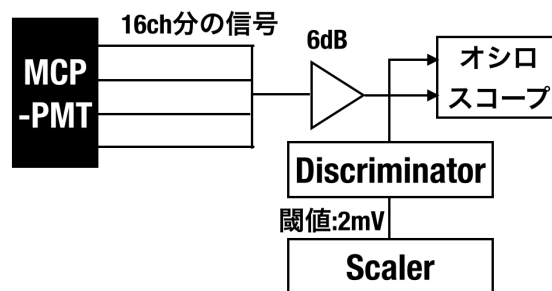


図 2.11 HV チェックのセットアップの図

放電が起き、HV 電源がトリップした場合、ダークノイズのレートが高すぎる場合、ダークノイズの波形に異常がある場合、浜松ホトニクスに返却し、後のレーザーテストは行わない。

HV チェックを MCP-PMT 全数に行った結果が表 2.2 であり、量産された MCP-PMT 545 本の内、522 本が実際に HV を印加し、使用できると確認できた。不合格品については信号が見られないものや放電してしまうものがあった。

表 2.2 HV チェックの結果

MCP-PMT の種類	検査数	合格品	不合格品
Conventional-MCP-PMT	286 本	280 本	7 本
Coating-MCP-PMT	237 本	233 本	4 本

## 2.3 QE 測定

### 2.3.1 測定項目

測定項目は表 2.3 である。18×18 点のスキャンを行い、QE の面分布を測定する。QE が非一様でないか確認する。また、QE の波長依存性を測定し、浜松ホトニクスでの測定結果と名古屋大学

の測定を比較し、クロスチェックする。

表 2.3 QE 測定の測定項目

測定項目	測定点	要求
QE の一様性	18×18 点測定	ピーク波長で面一様性が 60% 以上
QE の波長依存性	280~660 nm(20 nm ずつ)	ピーク波長で 24% 以上

### 2.3.2 セットアップ

図 2.12 は QE 測定のセットアップの概略図である [28]。キセノンランプからの光を分光器とシャープカットフィルターによって波長を選別する。そして、ND フィルターで減光し、スリットで直径 1 mm 未満のスポット光にし、MCP-PMT とフォトダイオード (PD) に光を照射する。MCP-PMT と PD はステージ台上に置いており、ステージを動かすことによって MCP-PMT と PD に交互に光を照射できる。

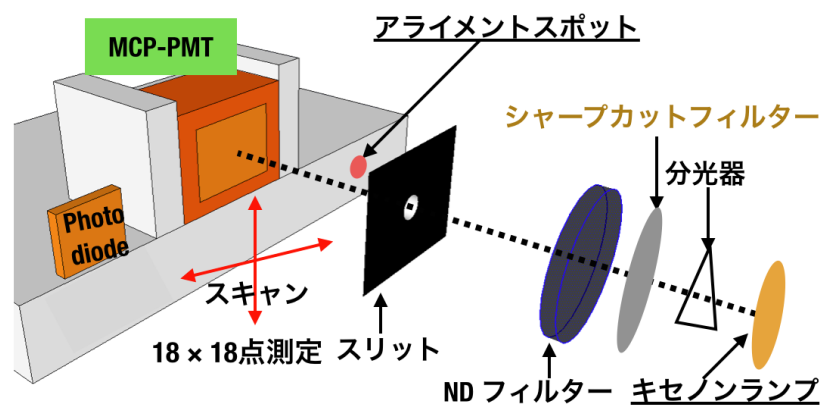


図 2.12 QE 測定のセットアップ

ピコアンメータで MCP-PMT の光電面の電流値  $I_{MCP}$  と PD の電流値  $I_{PD}$  を測定し、PD の QE( $QE_{PD}$ ) を基準として、MCP-PMT の QE( $QE_{MCP}$ ) を求める。

$$QE_{MCP} = \frac{I_{MCP}}{I_{MCP}} \times QE_{PD} \quad (2.1)$$

$QE_{PD}$  はあらかじめ図 2.13 のように測定されている。

### 2.3.3 QE 測定結果

図 2.14 が QE の面分布の測定結果である。波長 380 nm での測定結果であり、色によって QE が一様であるか確認することができる。この MCP-PMT の場合は QE がほぼ一様である。光電面の有効感度領域がスキャンによって見えている。図 2.15 が QE の波長依存性の測定結果である。波

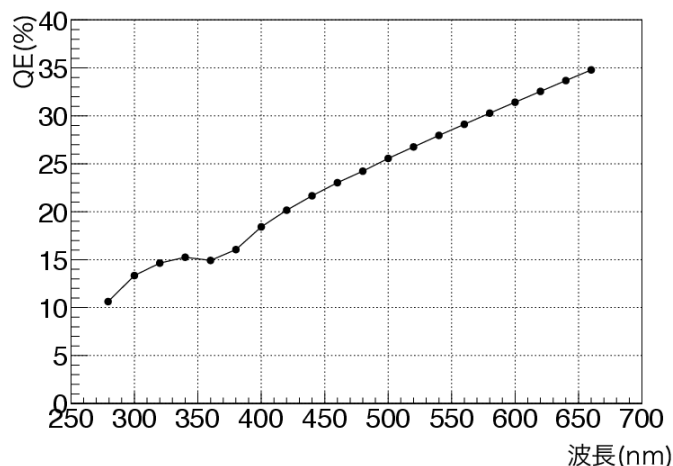


図 2.13 測定で用いるフォトダイオードの QE の波長依存性

長ごとに浜松ホトニクスと名古屋の測定が一致しているか確認している。低波長側で浜松ホトニクスと名古屋の測定でずれが生じているのは浜松ホトニクスと名古屋大学が用いているフォトダイオードが異なり、基準となる QE が異なるためだと考えられる。(名古屋大学で用いているフォトダイオードは QE の波長依存性を 1.7% の精度で把握しているため、名古屋大学の測定データのほうが正しい)

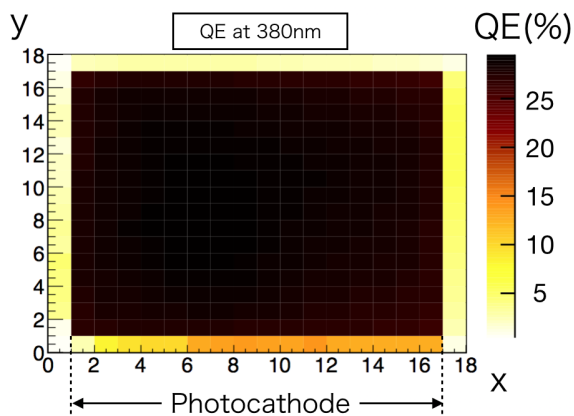


図 2.14 MCP-PMT の QE の面分布。波長 380nm で測定した結果。x 軸、y 軸は測定点の数。z 軸が QE の値。

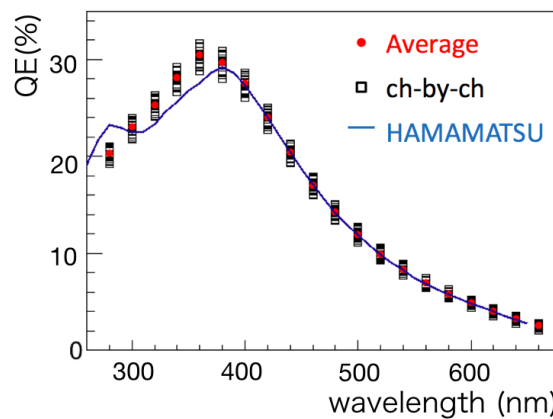


図 2.15 MCP-PMT の QE の波長依存性。赤点は全チャンネルで平均した QE の値。黒点はチャンネルごとの測定点。青線は浜松ホトニクスの測定結果。

図 2.16 は、横軸が納入された日付で縦軸が MCP-PMT ごとの 360 nm での QE である。量産が進むにつれて QE の良い MCP-PMT の生産が行われていることがわかる。また、要求を満たさない球の数が量産が進むにつれて少なくなっている。量産に沿って測定を行い、要求性能を満たして

いないものは浜松ホトニクスに返却した。そして、返却品の QE が低いことから真空シールが不十分だったことなどの改善に貢献し、QE の良い MCP-PMT の生産が行いやすくなった。要求性能を満たしているものみの測定結果が図 2.17 である。515 本の MCP-PMT での QE の平均 (波長が 360nm のとき) が 28.5% であり、要求である 28% を満たしている。

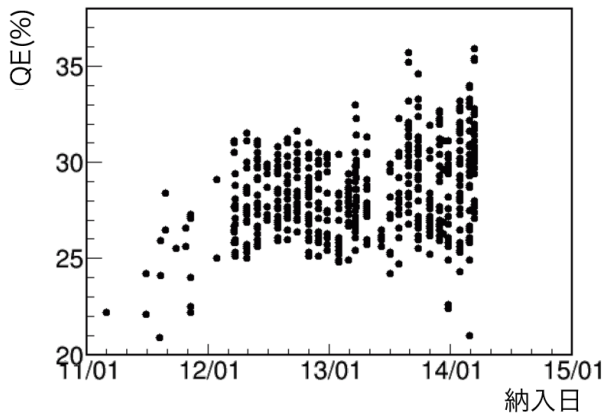


図 2.16 納入日と QE 測定の結果。波長 360 nm での測定結果。黒点は各 PMT ごとの QE。

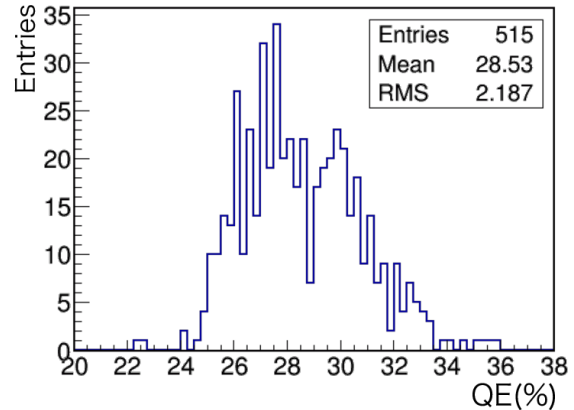


図 2.17 要求を満たす MCP-PMT 全数の QE。波長 360 nm での測定結果。24% 以下のものが 2 本あるが、これらは波長 420 nm で QE が最大となり、その最大値は 24% 以上である。

## 2.4 0 T での増幅率、時間分解能、収集効率の測定

### 2.4.1 測定項目

0 T での性能測定の測定項目は表 2.4 である。0 T 中では各性能の HV 依存性の測定を行う。Belle II 実験中に実際に印加されると予想される範囲内で HV を変えて測定した。Conventional-MCP-PMT では標準電圧から -200 V、-100 V、+0 V、+100 V、+200 V の 5 点を測定し、Coating-MCP-PMT では標準電圧から -200 V、-150 V、-100 V、-50 V、+0 V、+50 V、+100 V の 7 点を測定する。

表 2.4 0 T での測定項目

MCP-PMT の種類	測定点	測定項目
Conventional-MCP-PMT	16 チャンネル	増幅率の絶対値の HV 依存性
Coating-MCP-PMT		時間分解能の絶対値の HV 依存性
		相対収集効率 (PMT ごとの相対値) の HV 依存性

## 2.4.2 セットアップ

図 2.18 はそのセットアップの図である [28]。時間幅が約 15 ps のパルスレーザーの光を ND フィルターで減光し、スリットで直径 1 mm のスポット光にし、1 光子状態で MCP-PMT に照射している。レーザーの光量変化をモニターし較正するために、レーザー光をビームスプリッターで分け、レファレンス用の PMT に照射している。ステージを上下左右に動かすことで、MCP-PMT の 16 チャンネルすべての測定を行える。MCP-PMT の信号は可変アッテネーター (-15.5~0 dB) とアンプの後、ディバイダーで 2 つに分けられる。分けられた信号の 1 つは CAMAC の ADC で電荷量を測定する。ADC への入力信号は可変アッテネータとアンプによって +19.5 から +35 dB に増幅されている。もう片方の信号はディスクリミネータ (閾値 20 mV) で、デジタル信号に変換後、TDC で時間を測定する。ディスクリミネータへの入力信号は +42.5 から 58 dB に増幅されている。

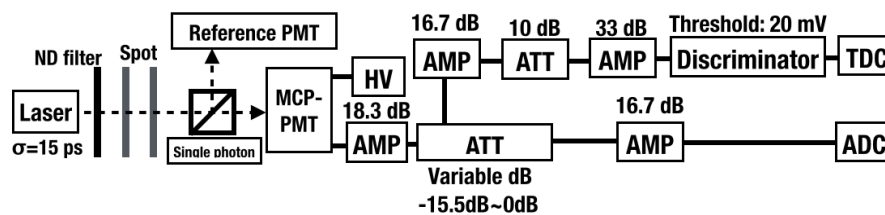


図 2.18 0 T での増幅率、時間分解能、収集効率測定のセットアップ

### 読み出し回路の較正

MCP-PMT の擬似信号を出力する回路を使用し、読み出し回路のアンプゲインや TDC の較正を行った。図 2.19 は較正用の回路図を示したものである。擬似信号をアッテネータで減衰させて、数段階に信号の大きさを変え、図 2.21 のように出力電荷量と入力電荷量の関係を測定した。図 2.20 のような 16 チャンネルディバイダーを用い、16 チャンネル分の読み出し回路の較正を行った。また、擬似信号のタイミングを CAMAC TDC テスターで変え、図 2.22 のように TDC を較正した。

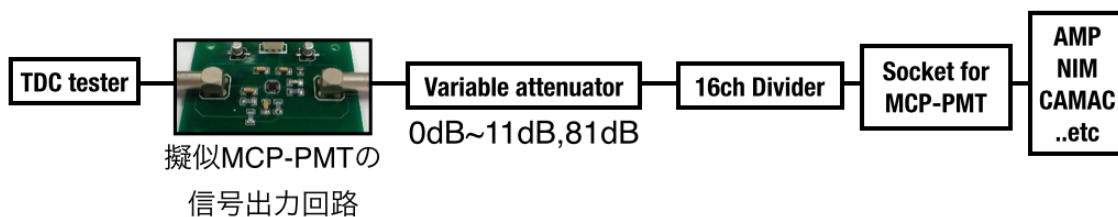


図 2.19 較正用回路

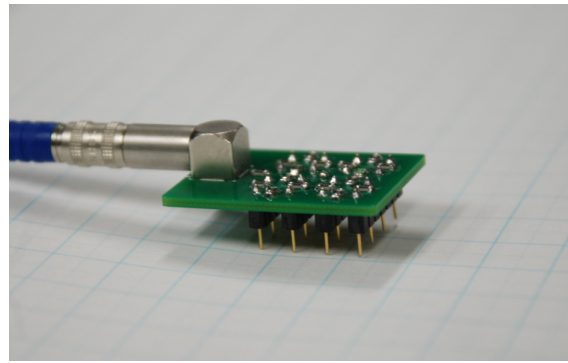


図 2.20 16 チャンネルディバイダー

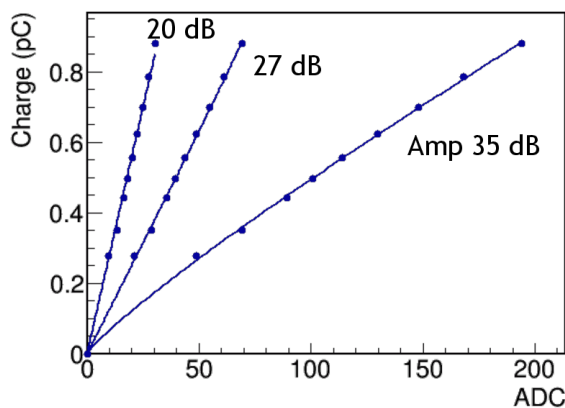


図 2.21 アンプの較正関数。黒点が測定点で実線がフィット関数。可変アッテネータの -15 dB、-8 dB、-0 dB それぞれの較正関数

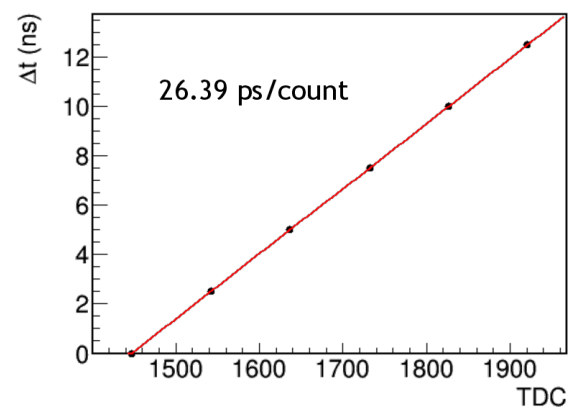


図 2.22 TDC の較正。黒点が測定点。赤の実線がフィット関数。縦軸は TDC テスターでズラした時間

### 2.4.3 増幅率の測定結果

図 2.23 は典型的な MCP-PMT の ADC 分布である。図 2.21 を用いて出力電荷量分布に変換したのが図 2.24 である。出力電荷量分布の Mean 値から増幅率を求める。この出力電荷量分布の場合には増幅率は約  $2.0 \times 10^6$  である。

図 2.25 は HV を変えたときの ADC 分布の違いである。青い実線の場合は HV が 2140 V で増幅率が  $0.5 \times 10^6$ 、赤い点線の場合は 2240 V で  $1.2 \times 10^6$  である。図 2.26 は別の MCP-PMT の HV 依存性を示す。HV を上げることで MCP 壁面に当たる電子の持つエネルギーが増加し、2 次電子放出比が増加するため、増幅率が上がる。1 回の電子衝突での増幅を  $A$ 、衝突回数を  $n$  ( $n \sim 10$ ) とすると、増幅率 Gain は、

$$Gain = A^n = \exp[n \times \ln(A)] \quad (2.2)$$



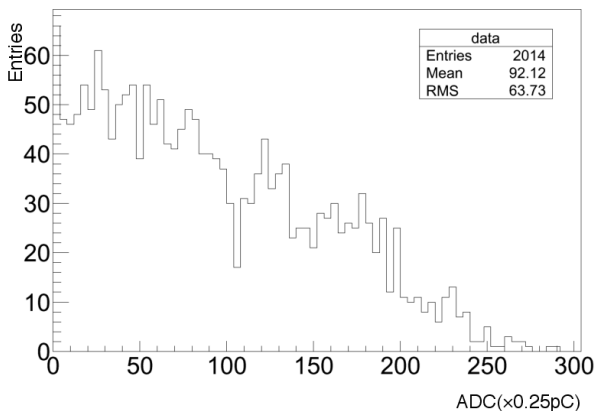


図 2.23 典型的な ADC 分布

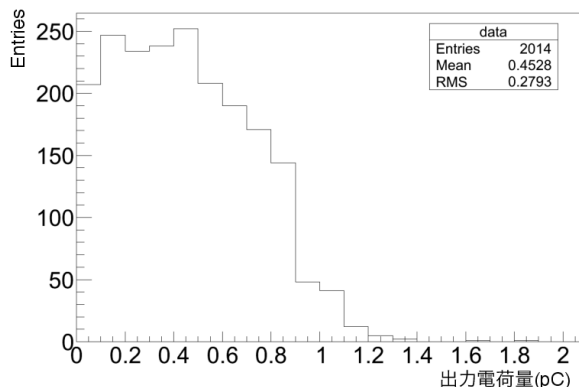


図 2.24 出力電荷量分布

となる。HV を  $V$ 、 $A=1$  のときの HV を  $n \times V_c$  とすると、経験的に  $A = (V/(nV_c))^k$  ( $k$  は定数で約 0.5) である。すなわち、

$$Gain = e^{nk[\ln(V/V_c) - \ln(n)]} \tag{2.3}$$

であり、 $V \gg n \times V_c$  であるため、 $V/V_c \geq \sim 10$  である。よって、 $\ln(V/V_c) \sim aV$  ( $a$  は定数) と近似できる。したがって、

$$Gain = e^{aV+b} \tag{2.4}$$

である。ここで  $b$  は定数。図 2.26 のように式 (3.5) をフィットして  $a$  と  $b$  を求め、増幅率の HV 依存性を把握する。

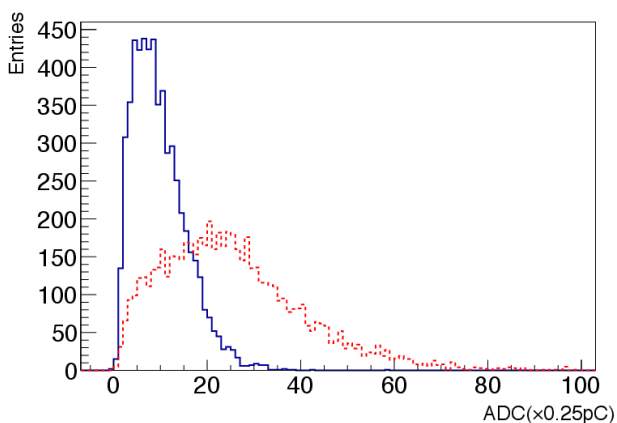


図 2.25 異なる HV での ADC 分布。青い実線は HV が 3380 V のとき。赤い点線は HV が 3430 V のとき。

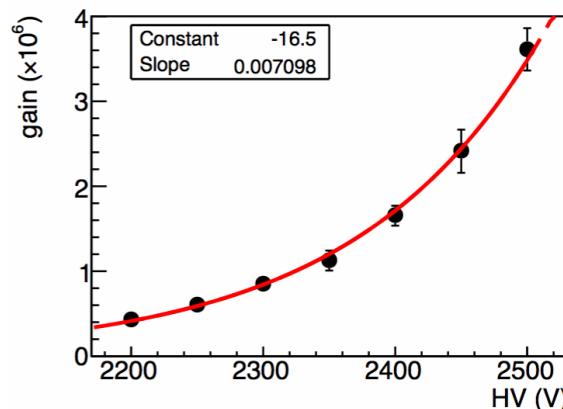


図 2.26 増幅率の HV 依存性。黒点が測定したデータで、赤い実線がフィット関数である。

チャンネルごとの増幅率の測定結果の例を図 2.27 に示す。この MCP-PMT は増幅率がチャンネル間でばらついていることがわかる。チャンネル間のばらつきは MCP の製造過程 (エッチングなど) に生じたものだと考えられる。チャンネル内を細かくスキャンした結果が図 2.28 である。チャンネル内でも増幅率がばらついていることがわかる。

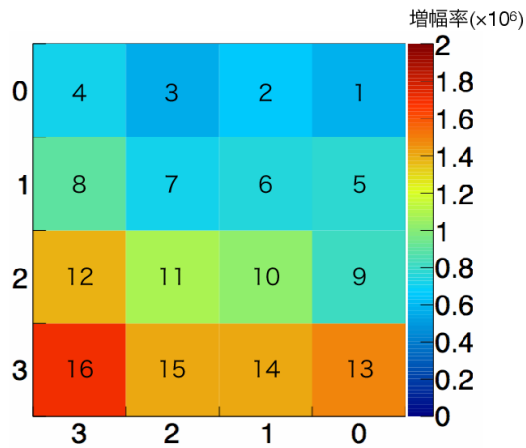


図 2.27 チャンネルごとの増幅率。x 軸と y 軸は MCP-PMT のチャンネルの位置を示し、z 軸は増幅率である。図に記入している番号はチャンネル番号。

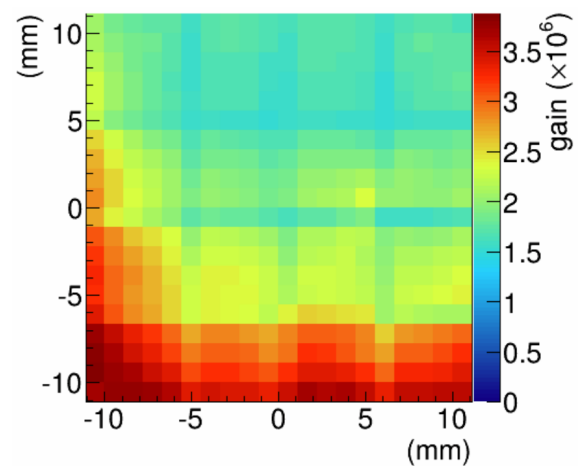


図 2.28 チャンネル内を細かくスキャンした結果。x 軸,y 軸は中心を 0 とした場合の測定点の位置。z 軸は増幅率。

#### 2.4.4 時間分解能の測定結果

アナログ信号をディスクリミネータでデジタル信号に変換する際に、図 2.29 のようにアナログ信号の波高の大きさによってデジタル信号の時間が変化する。これを Timewalk と呼ぶ。そのため、デジタル信号が波高の大小によってふらついてしまい、時間分解能が悪化する。そこで、図 2.30 のような ADC と TDC の相関を用いて Timewalk を補正する。TDC と ADC の相関は以下の式で表す。a、b、c はそれぞれフィッティングパラメータである。

$$TDC = \frac{a}{\sqrt{ADC - b}} + c \quad (2.5)$$

図 2.31 は Timewalk 補正後の TDC 分布である。これを二重ガウス関数でフィットし、ガウス関数の標準偏差  $\sigma$  を時間分解能と定義する。TDC 分布のテール部分は、初段の MCP 表面に当たった光電子が反跳し遅れて検出されたものである。

図 2.32 はある MCP-PMT の時間分解能の HV 依存性の測定結果である。各 HV で時間分解能が 50ps の要求を満たしている。HV が低い場合に時間分解能が 50ps 以上になっている原因は増幅率が低く、測定回路の S/N が悪くなり、回路の時間ふらつきが大きくなったためである。

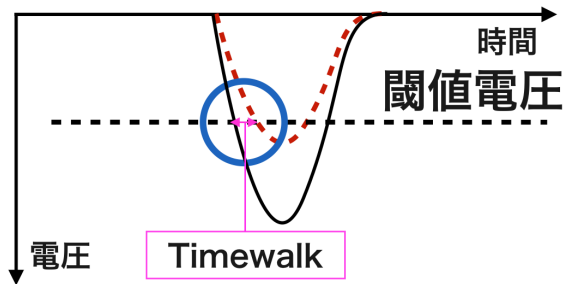


図 2.29 Timewalk の模式図。黒い曲線が信号が大きい場合。赤い点線が信号が小さい場合。黒の点線は閾値電圧。

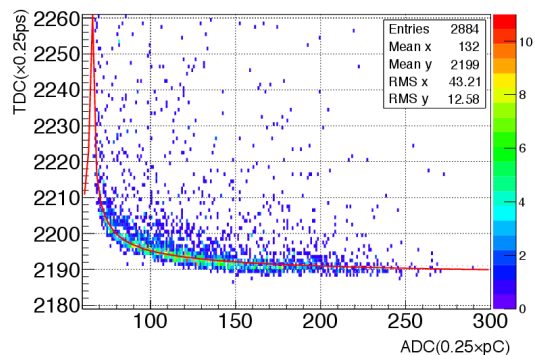


図 2.30 補正前の TDC 対 ADC 分布。赤い実線がフィットした関数。

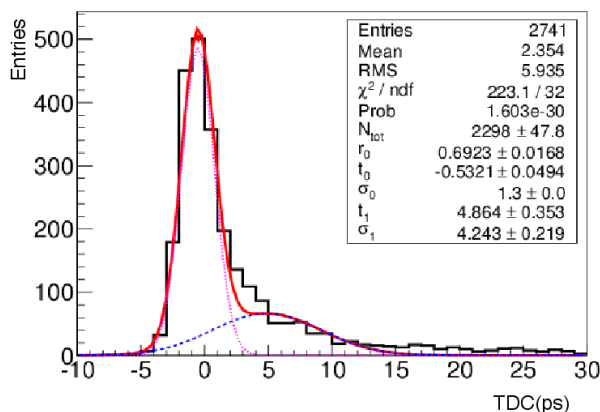


図 2.31 典型的な TDC 分布。黒い実線が TDC 分布。赤い曲線が二重ガウス関数。ピンクと青の点線がガウス関数。

### 2.4.5 相対収集効率

MCP-PMT の収集効率  $CE$  は、リファレンス PMT のヒット数  $N_{ref}$ 、MCP-PMT のヒット数  $N_{MCP-PMT}$  と MCP-PMT の  $QE$  を用いて、

$$CE = \frac{N_{MCP-PMT}}{N_{ref} \times QE} \tag{2.6}$$

と求める。図 2.33 はある MCP-PMT の相対収集効率の HV 依存性の測定結果である。MCP-PMT の収集効率は MCP-PMT の HV あるいは増幅率に依存しないとわかる。図 2.34 のように  $QE$  は正常にもかかわらず、収集効率が一部でほとんど 0 になっている MCP-PMT が 1 つだけ存在した。このような MCP-PMT を測定によって明らかにすることができ、正常に動作していない

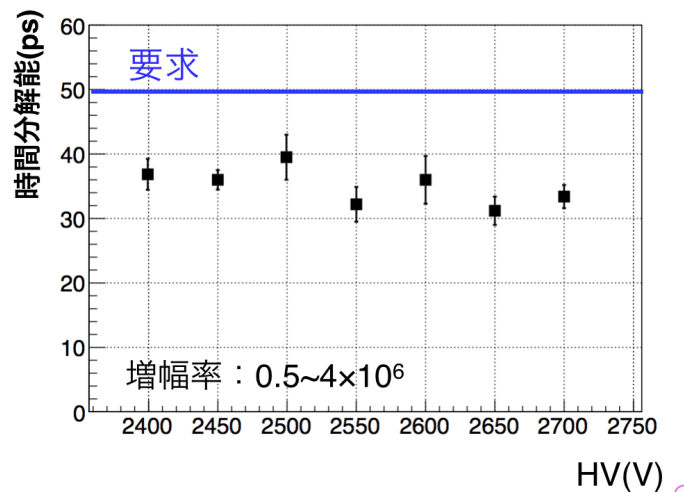


図 2.32 時間分解能の HV 依存性

MCP-PMT を TOP カウンターに使うことがないようにはできた。

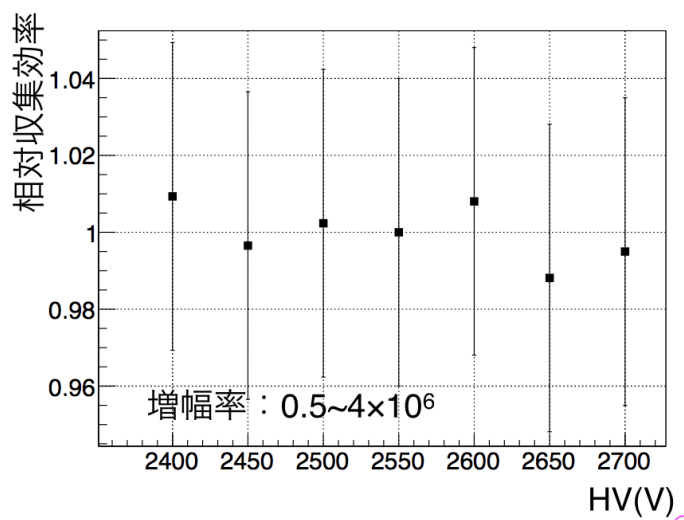


図 2.33 相対収集効率の HV 依存性

## 2.5 1.5 T 中での増幅率、時間分解能、収集効率の測定

Belle II TOP カウンター用 MCP-PMT は Belle II 検出器内の 1.5 T 中で使用される。1.5 T の磁場中では MCP-PMT の増幅率、時間分解能、収集効率が変化する。1.5 T 中での各性能の変化量を知り、以下のことを行うために使用する MCP-PMT 全数を 1.5 T 中で測定した。

- 1.5 T 中の磁場中で MCP-PMT が正常に動作するか確認。
- 1.5 T 中での増幅率の減少率を測定。

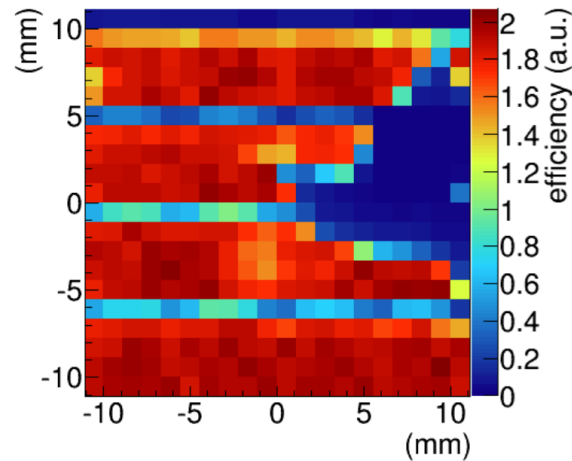


図 2.34 収集効率に問題のあった MCP-PMT。チャンネル内を細かくスキャンした結果である。x 軸,y 軸は中心を 0 とした場合の測定点の位置。z 軸は収集効率。

- 1.5 T 中で収集効率が要求性能を下回らないか確認。
- 1.5 T の磁場によって時間分解能が悪化しないか確認。

過去の研究 [27] によって、増幅率と時間分解能の測定が可能なセットアップが構築されていた。(以前のセットアップ) それに変更を加え、2013 年 8 月から 2014 年 3 月に収集効率も測定可能なセットアップを構築した。(1.5 T 中の収集効率比も測定可能な大量測定用のセットアップ) 図 2.35 は測定の経過を表したものである。約 6 ヶ月で 472 本の測定を行った。前半に Conventional-MCP-PMT、後半に Coating-MCP-PMT の測定を行った。Coating-MCP-PMT の測定のために 8 月にセットアップの変更を行った。(Coating-MCP-PMT 測定用セットアップ)

### 2.5.1 以前のセットアップ

1.5 T 中の測定は、KEK の北カウンターホールにある双極電磁石を用いて行った。図 2.36 は電磁石の写真である。電磁石には高さ 30 cm×幅 70 cm×奥行き 150 cm のスペースがある。このスペース内の磁場の一様性は図 2.37 のように確認されており、MCP-PMT に一様に磁場を印加できる。

3.4 節の 0 T でのセットアップとは主に以下の 2 点が異なる。

- 磁場中に可動ステージを入れることができないため、磁場外に可動ステージを置き MCP-PMT のスキャンを行う。
- 磁場中ではリファレンス用の PMT(ヘッドオン型) を使用することができない。レーザーの光量モニターに MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) を用いる。

また、1.5 T 中の測定のセットアップには以下のことが求められる。

- 16 チャンネル分の増幅率、時間分解能、収集効率の 3 つの性能の 1.5 T 中での変化量を同時

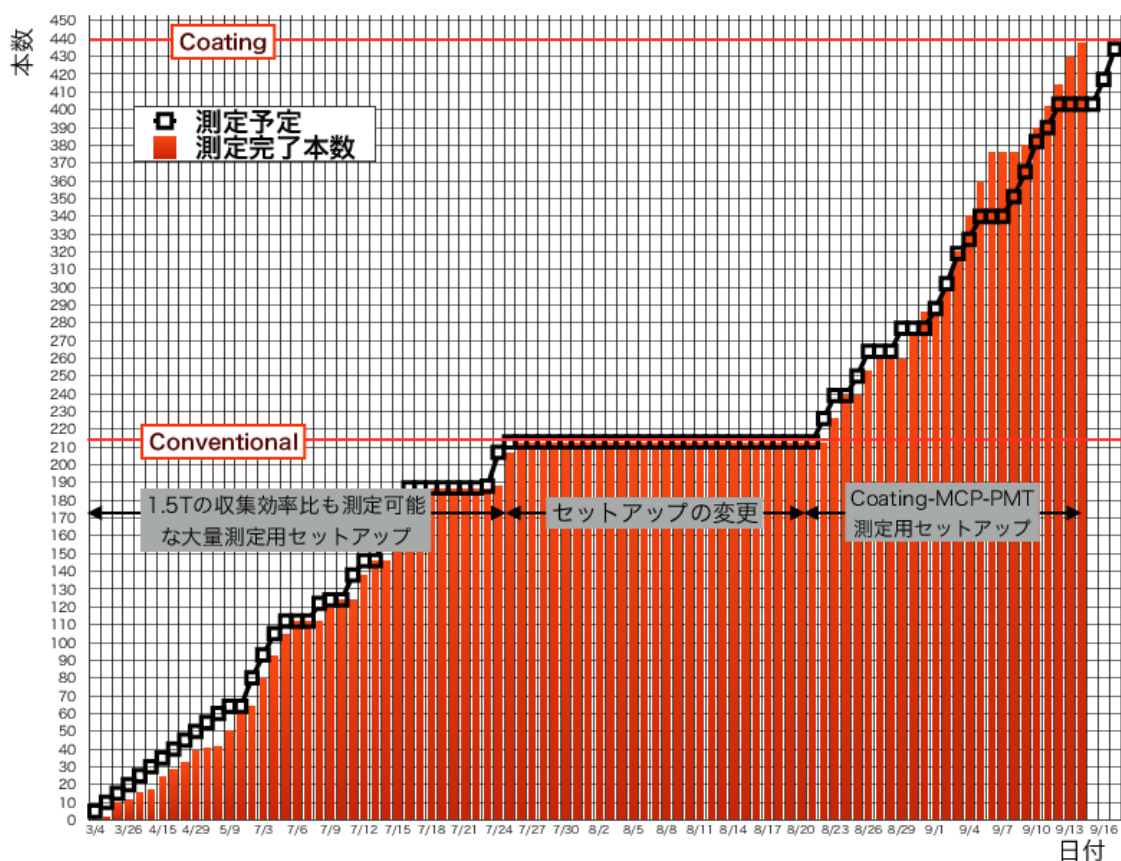


図 2.35 1.5 T 中の測定の経過。黒点が測定予定。赤の棒グラフが測定完了本数。

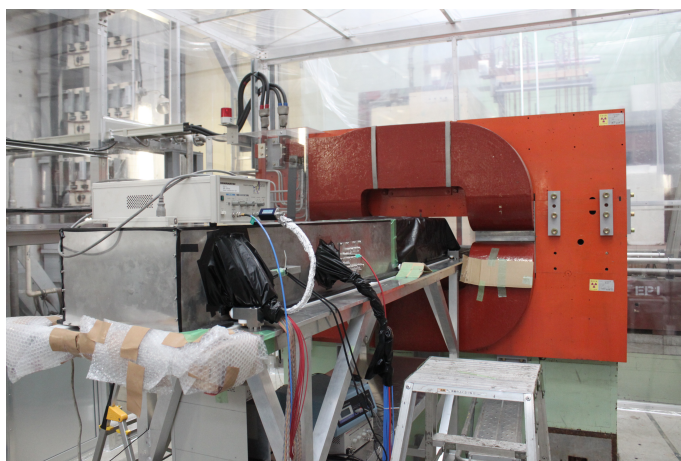


図 2.36 双極電磁石

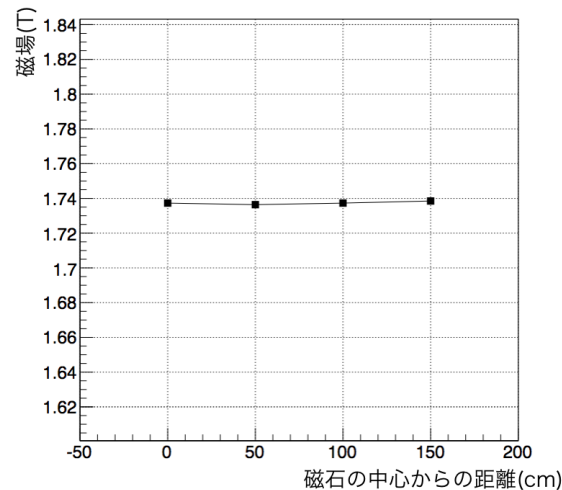


図 2.37 磁場の一様性。電磁石の中心を 0 とし、片側に 150 cm 測定した結果。

に測定できること。

- 増幅率については 20~90% の減少率を測定できる精度を持つこと。時間分解能については 0 T から 1.5 T で悪化していないことの確認及び、50 ps の要求を満たしていることが確認できる精度を持つこと。収集効率については MCP-PMT ごとに数 % の減少が測定できる精度を持つこと。
- 測定者が安定に測定でき、かつ MCP-PMT モジュール作成に間に合う測定スピード。

図 2.38 はセットアップの概略図である。電磁石のスペースに暗箱を設置し、暗箱内に測定用のジグや自動ステージを設置する。電磁石のスペースに入る暗箱の端に MCP-PMT の測定に用いるジグを設置する。この部分をスペースから出し入れすることによって MCP-PMT の取り替えができる。MCP-PMT の測定に用いるジグは図 2.39 のようになっている。レーザー光をディフューザーで拡散させ、その光をビームスプリッターで分け、MCP-PMT と光量モニター用の MPPC(S12572-050P) に当てる。MCP-PMT と MPPC に当たる光量を ND フィルターで調整し、1 光子状態の光を照射する。MPPC は 66.5 V で動作させる。このジグはアーム (G10) を介して、磁場外のステージから制御でき、MCP-PMT の 16 チャンネル分の測定が可能となる。

#### 読み出し回路の較正

測定回路は図 2.40 のようになっている。基本的には 3.4 節の 0 T での測定回路と同じである。レーザー光を 1 光子状態で MPPC と MCP-PMT に照射する。MCP-PMT の信号はアンプ (Cosmowave LNA3984WS-L, 43.8dB) で増幅後、CAMAC ADC と TDC で測定する。MPPC の信号は低ノイズアンプ (Cosmowave LNA3984WS-L) で増幅後、CAMAC ADC で測定する。アンプや TDC の較正は図 2.19 のようなセットアップで行う。擬似 MCP-PMT の信号を出力し、アッテネータによって信号の大きさを段階的に変化させる。それを図 2.20 の 16 チャンネルディバイダーで 16 分割し、16 チャンネル分の測定回路に入れる。

擬似 MCP-PMT の信号を用いてアンプの較正曲線を測定した結果が図 2.41 である。ADC1 カ

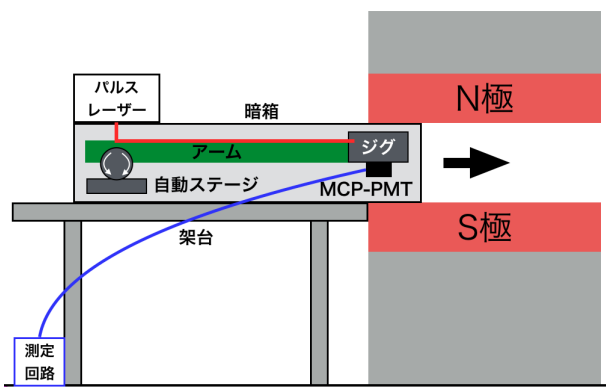


図 2.38 1.5 T 中の測定のセットアップの概略図

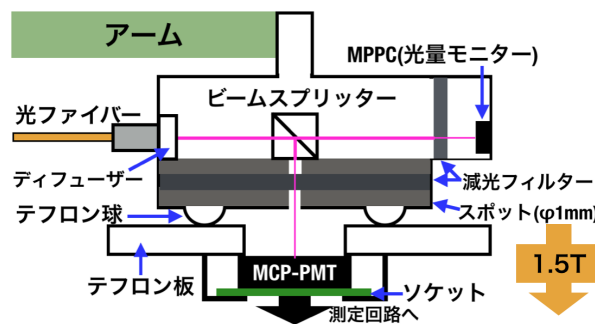


図 2.39 測定用のジグ

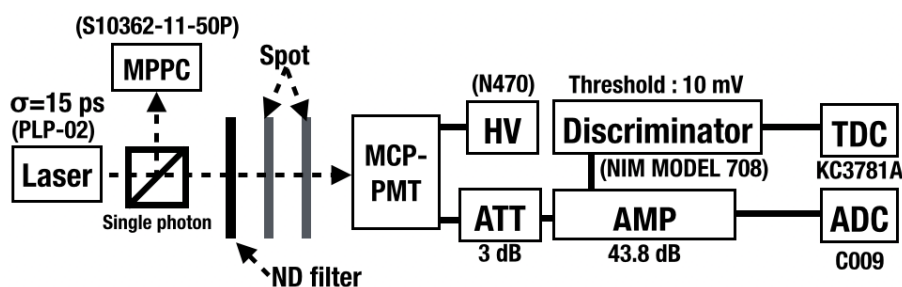


図 2.40 磁場中の特性の測定用回路

ウントが約 0.25 pC に対応する。測定点に対し、3 次曲線をフィットし、較正曲線を求める。図 2.42 は TDC の較正のために測定した結果である。TDC1 カウントが 25 ps に対応する。

### 2.5.2 1.5 T 中の収集効率比も測定可能な大量測定用セットアップ

#### レーザー光量のモニター

MPPC の平均検出光子数からレーザーの光量をモニターする。MPPC の平均検出光子数は MPPC の信号の ADC 分布 (図 2.43) から求められる。ペDESTALにはクロストークやアフターパルスが含まれていないため、ポアソン過程であるとし、全事象中のペDESTALの割合  $P_r$  から以下の式を用いて平均検出光子数  $A_p$  を求める。

$$A_p = -\log P_r \tag{2.7}$$

MPPC の増幅率は、以下の式で求められる。

$$\text{MPPC の増幅率} = \frac{1 \text{ ピクセルが出す電荷量}}{\text{素電荷}} \tag{2.8}$$

よって、ADC 分布のピークの間隔が 1 ピクセルが出す電荷量に対応する。MPPC の ADC 分布に図 2.43 のように以下の関数をフィットさせ、ピークの間隔  $x_1$  を求める。



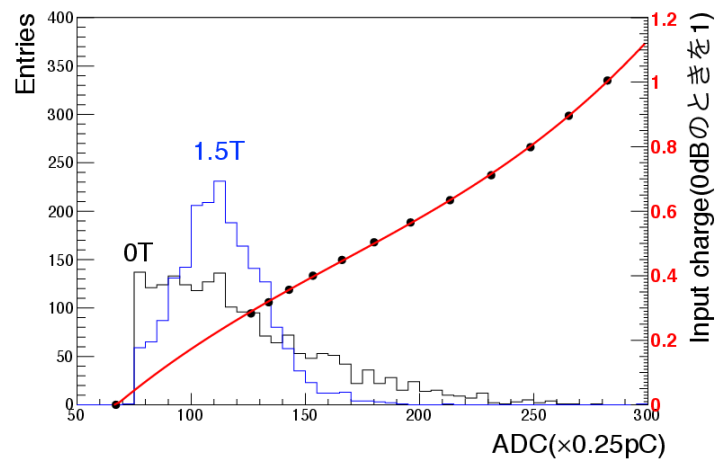


図 2.41 低ノイズアンプ (Cosmowave LNA3984WS-L) の線形性測定。横軸は ADC、左の縦軸は ADC 分布のエントリー。右の縦軸は出力電荷量 (最大の測定点を 0 と規格化したもの)。黒点が測定点、赤の実線が較正曲線。黒のヒストグラムが 0 T での ADC 分布。青のヒストグラムが 1.5 T での ADC 分布。

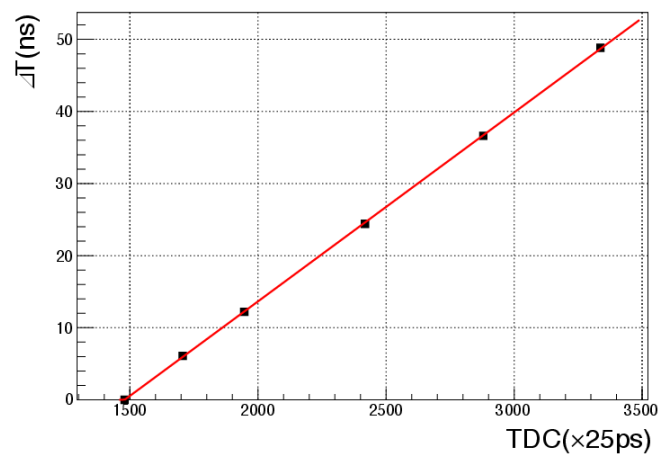


図 2.42 TDC の較正。黒点は測定点。赤線はフィット関数。縦軸は TDC テスターでズラした時間

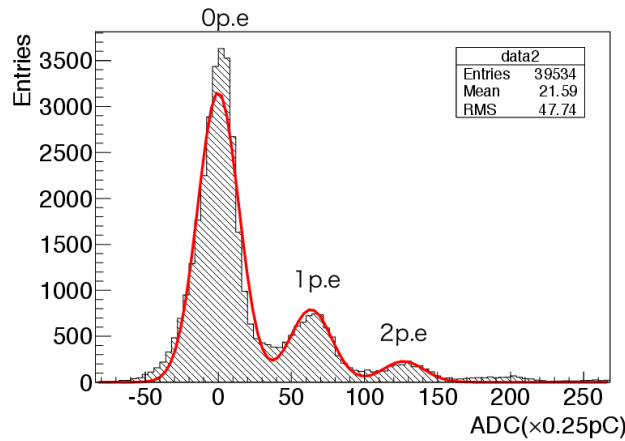


図 2.43 MPPC の ADC 分布。黒のヒストグラムは ADC 分布。赤の実線は増幅率の測定のためにフィットした関数。

$$y = a \times \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{\sigma_0^2}\right) + b \times \exp\left(-\frac{(x - (x_0 + x_1))^2}{\sigma_1^2}\right) + c \times \exp\left(-\frac{(x - (x_0 + x_1 \times 2))^2}{\sigma_2^2}\right) \quad (2.9)$$

$x$  は ADC カウントで  $y$  はエントリーであり、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $x_0$ 、 $x_1$ 、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  はフィッティングパラメータである。

平均検出光子数は測定中の MPPC 素子の温度によって変化する。それは MPPC の光子検出効率が温度によって変化するからである。MPPC の光子検出効率は図 2.44 のようにオーバーボルテージに依存し、増幅率は印加電圧とブレイクダウン電圧に依存する。つまり、光子検出効率も増幅率もオーバーボルテージによって変化する。ブレイクダウン電圧は図 2.45 のように温度依存性がある。そのため、温度が変わることでオーバーボルテージが変化し、光子検出効率も変化する。また、オーバーボルテージが温度変化によって変わることで増幅率も変化する。増幅率をモニターすることで、光子検出効率の変化をモニターし、平均検出光子数でのレーザー光量のモニターにどの程度影響するか確認する。

MPPC の光子検出効率の増幅率依存性を 66.3 V、66.5 V、66.7 V、66.9 V の 4 つの印加電圧で測定した。図 2.46 がその結果である。横軸は MPPC の ADC 分布の 1p.e のピークでの ADC カウント ( $\propto$  増幅率)、縦軸は平均検出光子数である。一次関数をフィットし、増幅率と平均検出光子数の関係を求める。2 回の測定を行い、誤差の範囲内でフィッティング関数のパラメータが再現がとれていることを確認している。この測定中にレーザーの光量が変化していないことを MCP-PMT でモニターした。レーザー光量の変化率は約 1% だった。MCP-PMT の各チャンネルの測定時の MPPC の増幅率を求め、図 2.46 から光子検出効率をモニターする。平均検出光子数の変化率 (最初の測定点を 1 とする) ことで光子検出効率の変化率を知ることができる。0 T と 1.5 T それぞれ 16 チャンネル分の MCP-PMT 測定中 (約 20 分) に MPPC の光子検出効率の変化を求めたものが図 2.47 である。

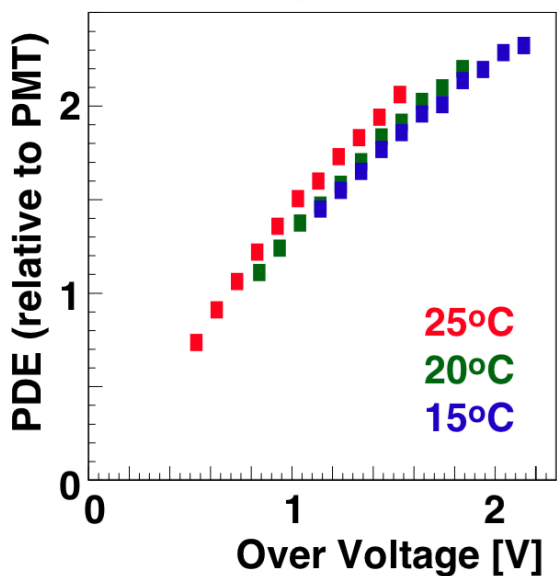


図 2.44 オーバーボルテージと光子検出効率の関係 [29]

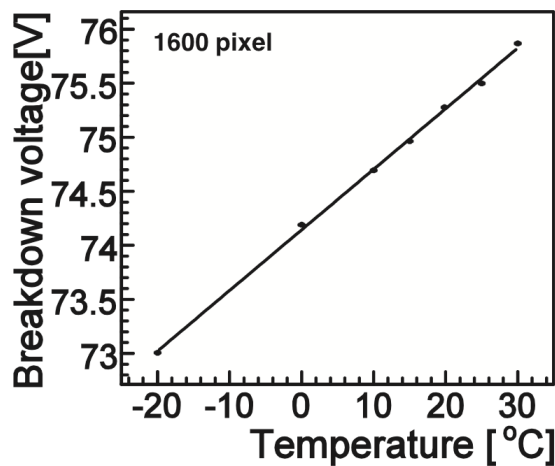


図 2.45 ブレークダウン電圧の温度依存性 [29]

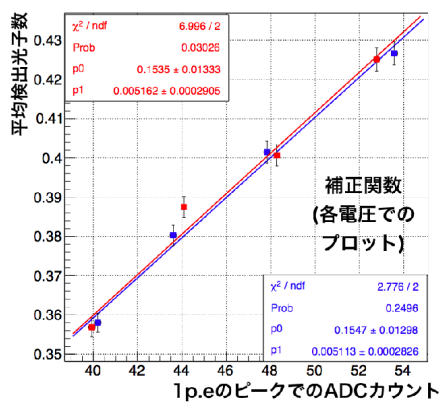


図 2.46 MPPC の平均検出光子数の温度変化の関数。縦軸は平均検出光子数、横軸は 1p.e のピークでの ADC カウントであり、増幅率に比例した値である。赤点は 1 回目の測定点。青点は 2 回目の測定点。それぞれの測定点にフィットした関数が各色の実線である。

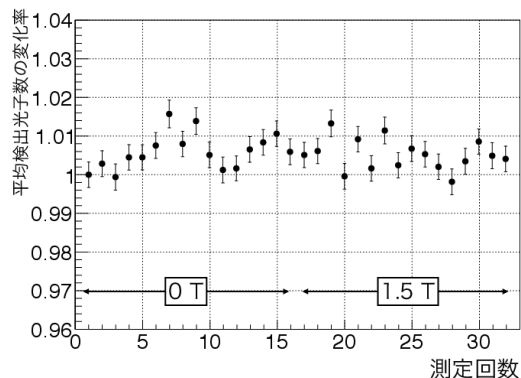


図 2.47 0 T から 1.5 T での光子検出効率の変化。縦軸は光子検出効率の変化率 (平均検出光子数を最初の測定点を 1 と規格化したもの)

光子検出効率の変化量を用いて、MCP-PMT の各チャンネル測定時のレーザー光量をモニターする。図 2.39 のようにレーザーファイバーとビームスプリッターの間にディフューザーを設置している。図 2.39 の MCP-PMT の位置に MPPC を設置し、MPPC の位置と MCP-PMT の位置の両方で測定中のそれぞれに当たる光量の変化率を測定した。ディフューザーを設置しない場合、図 2.48 のように MPPC に当たる光量が約 13% も 1.5 T 中でずれてしまう。ファイバーのコネクタや MPPC の基板が磁場で動くことによって MPPC に当たる光量が変化したと考えられる。そのため、ディフューザーでレーザー光を拡散させて、MPPC に当てることで、図 2.49 のように MCP-PMT の位置と MPPC の位置での光量が変化しないことを確認した。

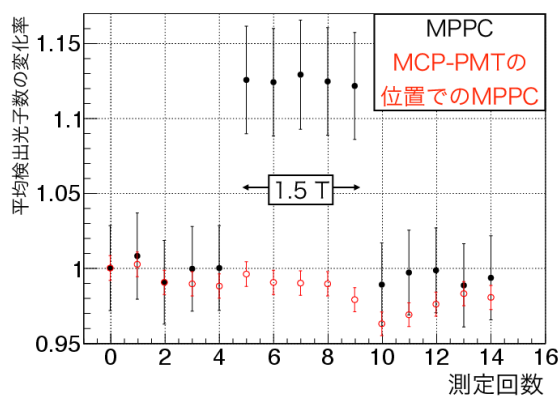


図 2.48 ディフューザーなしでの MPPC へのレーザー光量の変化。縦軸は最初の測定点の平均検出光子数を 1 と規格化したもの (平均検出光子数の変化率)

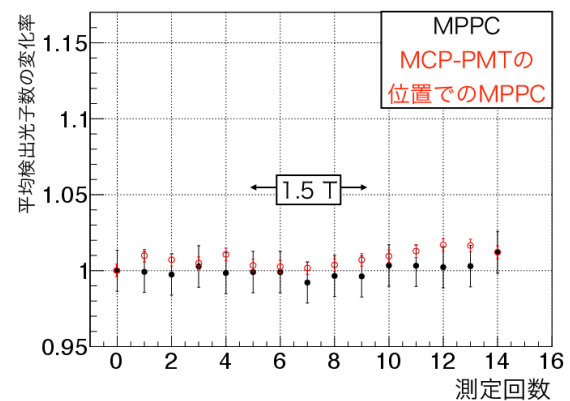


図 2.49 ディフューザーありでの MPPC へのレーザー光量の変化。縦軸は最初の測定点の平均検出光子数を 1 と規格化したもの (平均検出光子数の変化率)

しかし、ディフューザーを設置することで MCP-PMT に当たる光量が低下し、測定時間が 1 チャンネルあたり数十分かかっていた。また、ディフューザーを入れた場合は拡散光が様々なところで反射して遅れて入射することによって、図 2.50 のように TDC 分布の標準偏差が大きくなり、時間分解能の測定ができない状態になってしまっていた。増幅率や時間分解能と共に収集効率の測定し、各性能の相関を正確に把握するために、そして、測定時間を短縮するためにも、各性能を同時に測定できるシステムが必要であった。そのため、MPPC の受光面が 1 mm 角のものから 3 mm 角のものに変更し、ディフューザーの薄さを変更することで図 2.51 のように光を拡散させすぎず、かつ MPPC に当たる光量が 1.5 T と 0 T で変わらないシステムにした。

変更後に測定した平均検出光子数の測定結果は図 2.52 である。この測定結果から 3% 以内にレーザーの光量変化が抑えられていることがわかった。また、変更後ディフューザーありとなしの状態で MCP-PMT の時間分解能を測定した結果が図 2.53 である。ディフューザーがある場合でも約 40 ps の測定ができるようになった。よって、MPPC で光量をモニターしつつ、増幅率、時間分解能、収集効率の測定を同時に行えるシステムを構築することができた。

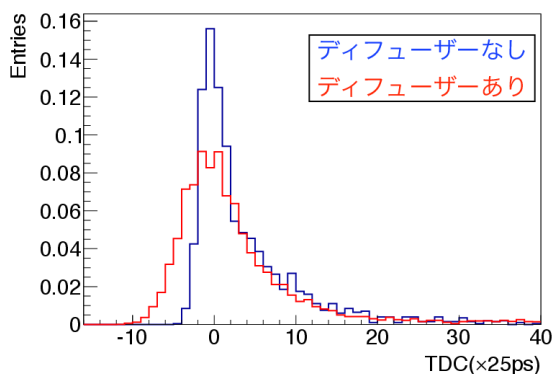


図 2.50 ディフューザーによる MCP-PMT の時間分解能の悪化

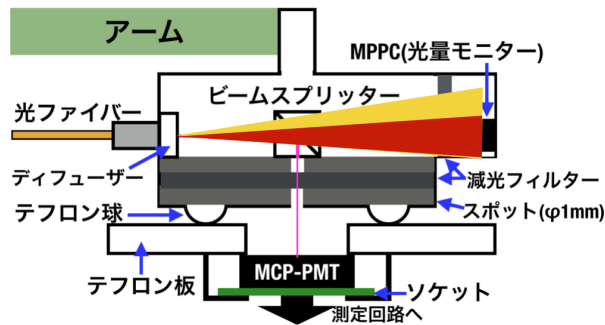


図 2.51 改善後のレーザー光の光路。黄色のところが改善前。赤色のところが改善後。

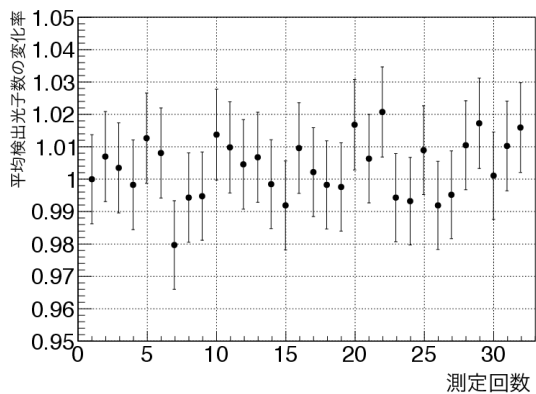


図 2.52 MPPC によるレーザーの光量モニター。縦軸は最初の測定点の平均検出光子数を 1 と規格化したもの (平均検出光子数の変化率)

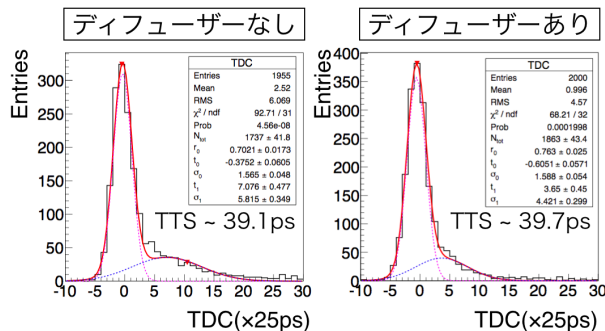


図 2.53 ディフューザー改善と MPPC 変更後の MCP-PMT の時間分解能

回路上の検出効率の減少の確認

MCP-PMT の磁場中の収集効率比は 0 T 中と 1.5 T 中の MCP-PMT のヒット数の割合から求める。MCP-PMT の検出光子数は MCP-PMT からのアナログ信号がディスクリミネータの閾値を超えた数である。1.5 T 中では増幅率が減少するため、閾値を超える信号の数が減ってしまう可能性がある。その場合は回路上で検出効率が減少していることになり、1.5 T 中の MCP-PMT の収集効率の変化量を測定できない。よって、MCP-PMT の信号の波高が低くなっても回路上で検出効率が減少しないか確認する必要がある。そこで、MCP-PMT の信号をアッテネータで減衰させ、ヒット数の変化を測定した。アッテネータでの信号の減衰量は-1、-2、-3、-4、-5、-6、-8、-10 dB

である。測定結果は図 2.54 である。Conventional-MCP-PMT の 1.5 T 中の ADC の Mean 値は低くても約 30 であり、Conventional-MCP-PMT の磁場中の収集効率比は測定可能である。しかし、Coating-MCP-PMT については ADC 分布の Mean 値が低いもので 10 であり、回路上で検出効率が減少してしまい、測定できないことがわかった。そのため、以下のように Coating-MCP-PMT の測定のためにセットアップの変更を行った。

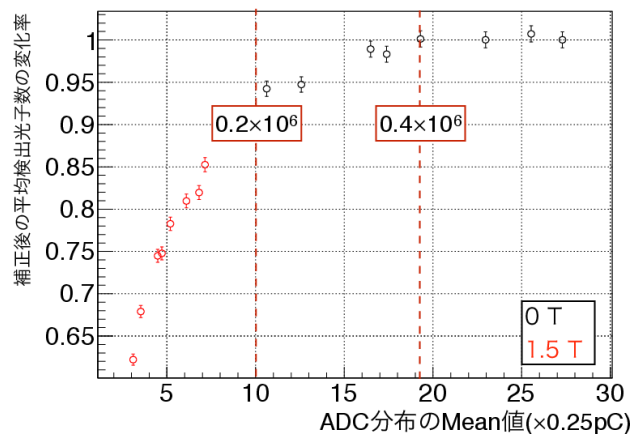


図 2.54 回路上の検出効率の減少。黒点は 0 T 中での測定点。赤点は 1.5 T 中での測定点。縦軸は最初の測定点の平均検出光子数を 1 と規格化したもの (平均検出光子数の変化率)

### 2.5.3 Coating-MCP-PMT 測定用セットアップ

Coating-MCP-PMT の磁場中の収集効率を測定するために、図 2.55 のようにディスクリミネータの前に浜松ホトニクス社のアンプ (C5594、+21 dB) を設置した。アンプを追加したことでノイズも共に増幅されてしまうため、アッテネータの追加 (ディスクリミネータの前) や低ノイズアンプの動作電圧を 6 V から 5.6 V に変更することにより増幅率を調整した。その結果、図 2.56 のように、MCP-PMT の増幅率が低くても回路上で検出効率が減少しないようにできた。

ディスクリミネータの前にアンプを追加したことによって、ADC とディスクリミネータに入射する信号の波形が変わる。そのため、ADC 対 TDC の相関が式 (3.2) に従わなくなる。そこで、図 2.57 のように ADC の値ごとに TDC の Mean 値からの差分をとることで Timewalk を補正した。Timewalk の補正方法の変更後の TDC 分布が図 2.57 であり、50 ps 以内の時間分解能の評価が正しく行える。Timewalk 補正変更前と変更後の TDC 分布は図 2.57 である。TDC 分布の広がりを抑え、時間分解能の測定結果が改善できた。

### 2.5.4 測定の再現性

各性能測定の再現性の確認を 17 本の MCP-PMT で行った。1 回目の測定は 2014 年 3 月から 9 月に行い、2 回目の測定は 2014 年 10 月に行った。図 2.58 は時間分解能の典型的な結果である。ほ

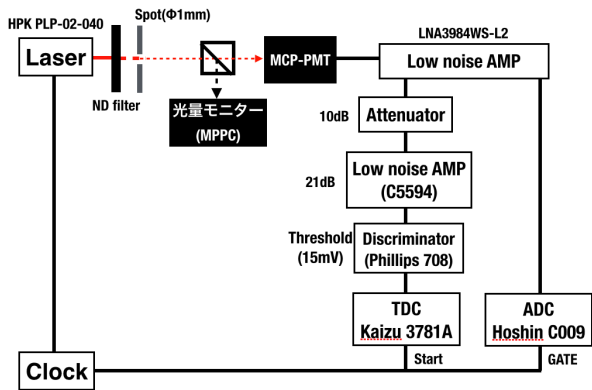


図 2.55 Coating-MCP-PMT の測定のためのセットアップ変更後の回路図

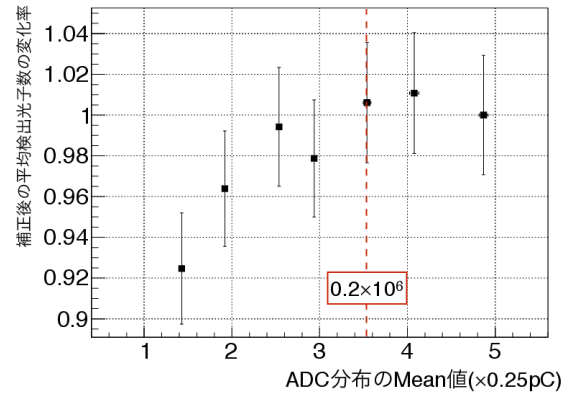


図 2.56 セットアップ変更後の回路上の検出効率の減少。黒点は 1.5 T 中での測定点。縦軸は最初の測定点の平均検出光子数を 1 と規格化したもの (平均検出光子数の変化率)

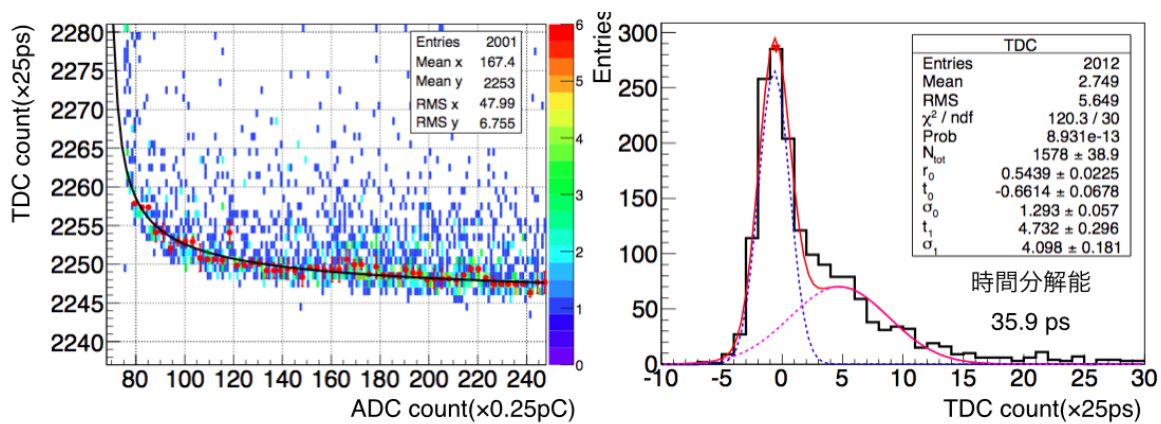


図 2.57 TDC の Mean 値を用いた Timewalk 補正と補正後の TDC 分布。赤点は補正に使用した TDC の Mean 値。赤の実線は従来の Timewalk 補正に使用していたフィット関数。

とんどのチャンネルで再現性のよい測定が行えている。よって、時間分解能の再現性は問題ないと考えられる。図 2.59 は、磁場中の収集効率比の典型的な結果である。17 本の MCP-PMT すべてで再現性の良い結果が得られた。

図 2.60 はチャンネルごとの 1 回目と 2 回目の相対増幅率の違いを求めた結果である。1 回目と 2 回目の違いが 26.5% と測定の統計誤差よりも大きい。そのため、チャンネルごとの相対増幅率の違い 26.5% を系統誤差とした。

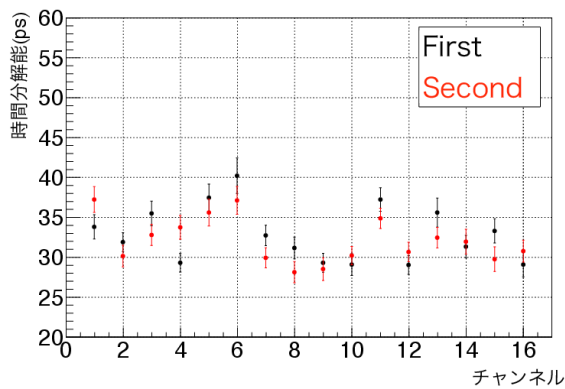


図 2.58 時間分解能の再現性

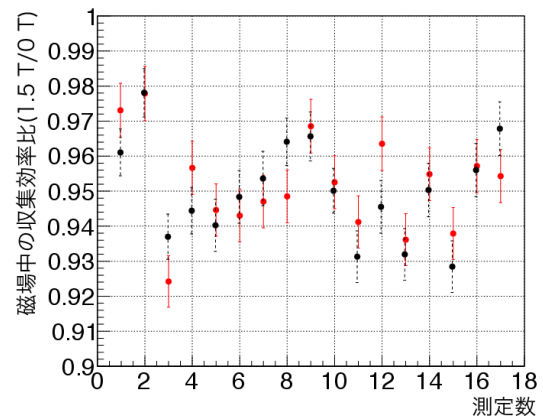


図 2.59 磁場中の収集効率比の再現性

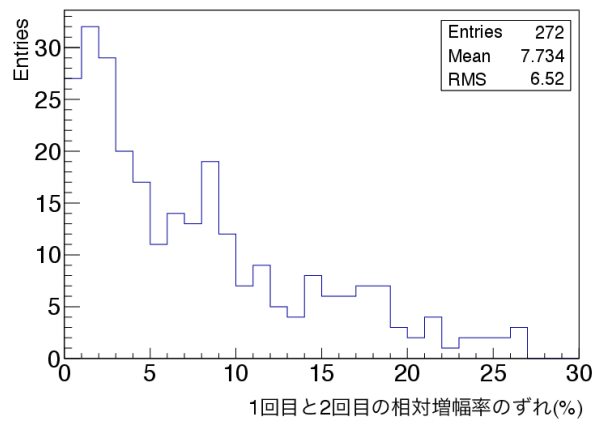


図 2.60 チャンネルごとの相対増幅率の測定誤差

### 2.5.5 HV スキャン

各性能の磁場特性に HV 依存性があるか 8 本の MCP-PMT で確認した。標準電圧と標準電圧から  $\pm 100V$  の 3 点で測定した。図 2.61 は Conventional-MCP-PMT の、図 2.62 は Coating-MCP-PMT の相対増幅率の HV 依存性を測定した結果である。Conventional-MCP-PMT でも Coating-MCP-PMT でも HV を変えても相対増幅率の変化は 25%/100V 以内である。図 2.63 は時間分解能の HV 依存性を測定した結果である。Conventional-MCP-PMT、Coating-MCP-PMT とも時間分解能に HV 依存性がないことを確認した。図 2.64 は磁場中の収集効率比の HV 依存性の測定結果である。Conventional-MCP-PMT、Coating-MCP-PMT とも磁場中の収集効率比に HV 依存性がないことを確認した。以上の結果から、各性能の HV 依存性は磁場によらない。



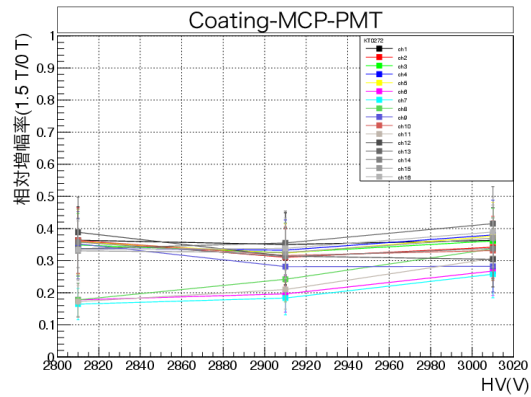
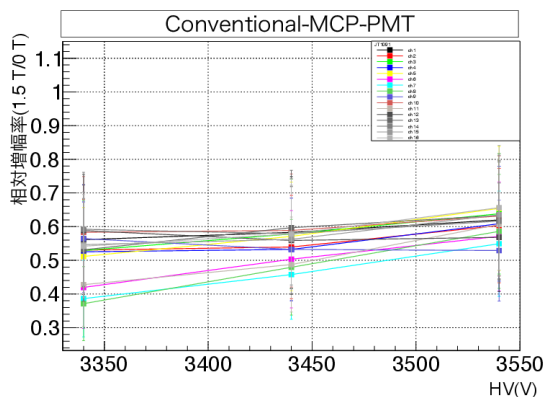


図 2.61 Conventional-MCP-PMT の相対増幅率の HV スキャンの結果

図 2.62 Coating-MCP-PMT の相対増幅率の HV スキャンの結果

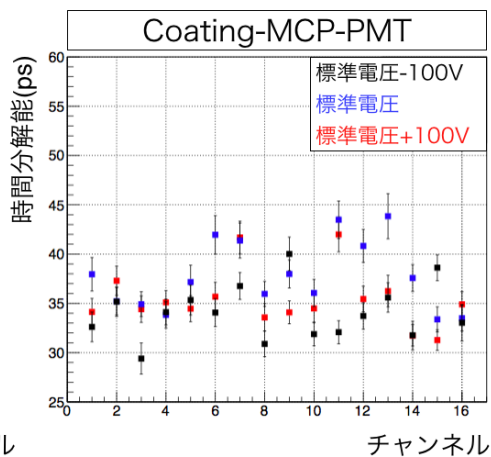
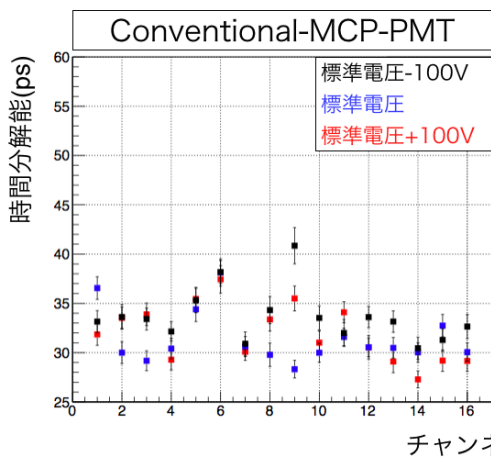


図 2.63 時間分解能の HV スキャンの結果

### 2.5.6 全数測定の測定手順と測定時間

MCP-PMT の 1.5 T 中の磁場特性の測定は表 2.5 のような手順で行った。MCP-PMT を測定ジグに設置する。その後、MCP-PMT のあるチャンネルの中心をヒットレートスキャンし、チャンネル中心を確認する。そして、0 T 中と 1.5 T 中で測定を行う。測定終了後、測定を終えた MCP-PMT を取り外す。

1 日に 1 度、アンプなどの読み出し回路の較正のためのデータを取得する。1 つの MCP-PMT の測定にかかる時間は約 30 分である。

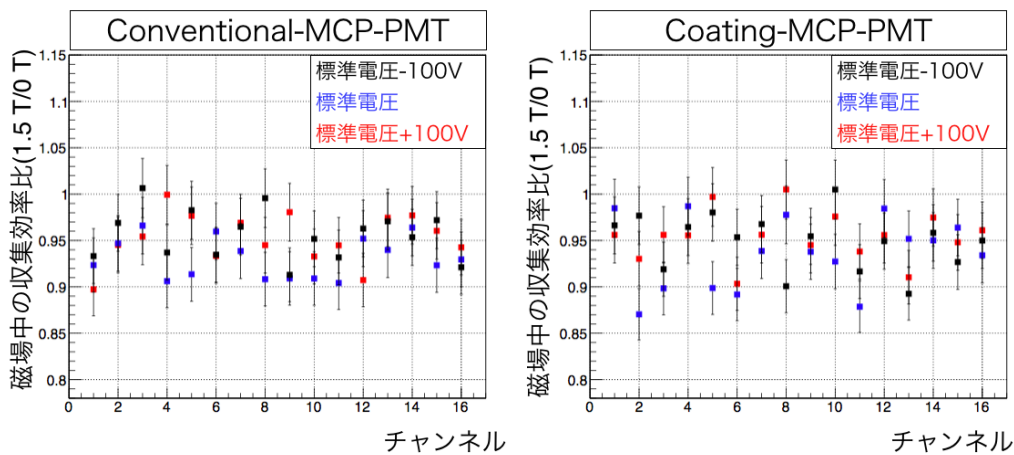


図 2.64 磁場中の収集効率比の HV スキャンの結果。黒点が 1 回目の測定結果。赤点が 2 回目の測定結果。

表 2.5 1.5 T 中の測定手順と時間

1	(アンプと TDC のキャリブレーション) / 日	(8 分)
2	MCP-PMT を設置し、ヒットレートスキャンからチャンネル中心を確認する	10 分
3	0 T 中での測定 (16 チャンネル)	10 分
4	1.5 T 中での測定 (16 チャンネル)	10 分
合計		30 分

### 2.5.7 磁場中の特性測定結果

#### 相対増幅率

図 2.65 は PMT ごとの、図 2.66 はチャンネルごとの相対増幅率の測定結果である。Conventional-MCP-PMT は 10 分の 7 に、Coating-MCP-PMT は 10 分の 3 に増幅率が減少するということがわかった。Coating-MCP-PMT の方が 1.5 T 中で増幅率が減少する理由として MCP の二次電子放出層への電子の入射角と二次電子数の相関が Conventional-MCP と Coating-MCP で異なるということが考えられる。

#### 時間分解能

図 2.67 は Conventional-MCP-PMT の、図 2.68 は Coating-MCP-PMT の時間分解能の測定結果である。

Conventional-MCP-PMT では 0 T と 1.5 T で時間分解能が変化しておらず、50 ps の要求をほとんどのチャンネルで満たしていることを確認した。Coating-MCP-PMT では 1.5 T で時間分解能が悪化しているように見える。しかし、この悪化は磁場によるものではない。変更後のセットアップでは、増幅率が低いと MCP-PMT の信号とノイズの比が低くなり、時間分解能が悪く見え

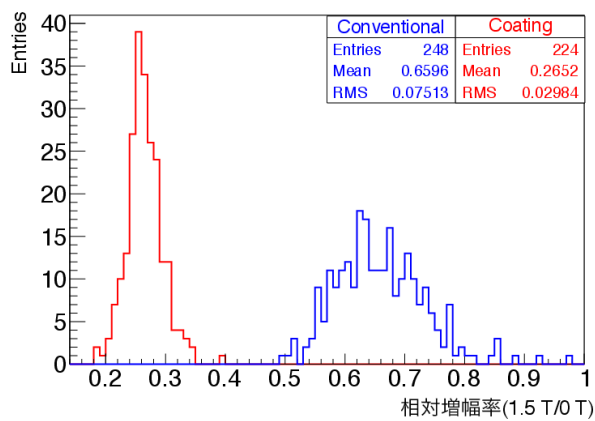


図 2.65 PMT ごとの相対増幅率の測定結果。青のヒストグラムが Conventional-MCP-PMT の測定結果。赤のヒストグラムが Coating-MCP-PMT の測定結果。

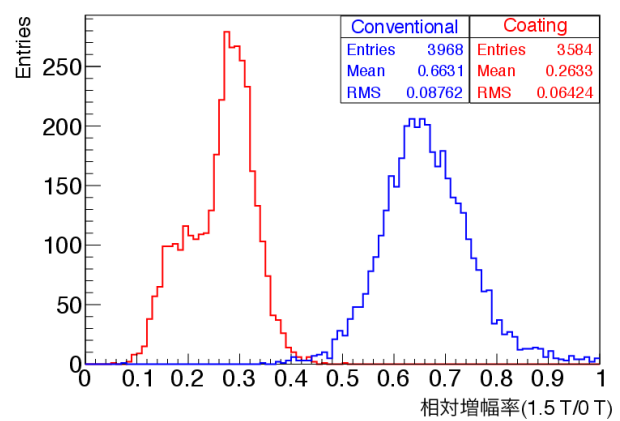


図 2.66 チャンネルごとの相対増幅率の測定結果。青のヒストグラムが Conventional-MCP-PMT の測定結果。赤のヒストグラムが Coating-MCP-PMT の測定結果。

る。読み出し回路への入力信号が大きい場合と小さい場合の時間分解能の差を擬似 MCP-PMT の信号で測定すると約 20ps だった。よって、MCP-PMT の増幅率が低い場合は、回路上で時間分解能が悪く見えている可能性がある。Coating-MCP-PMT の時間分解能が 1.5 T 中で悪化しているように見えている原因は今後詳しく確認する。

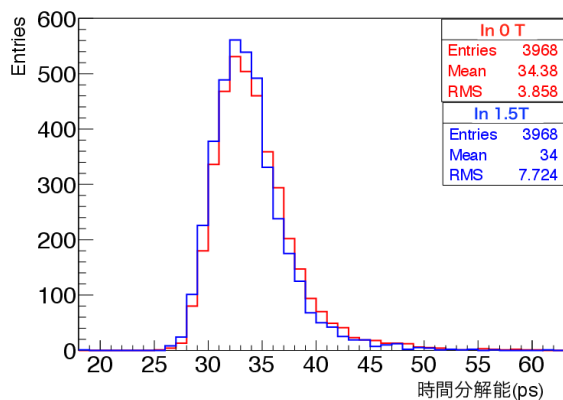


図 2.67 Conventional-MCP-PMT の時間分解能の測定結果。赤のヒストグラムは 0 T 中の、青のヒストグラムは 1.5 T 中の測定結果。

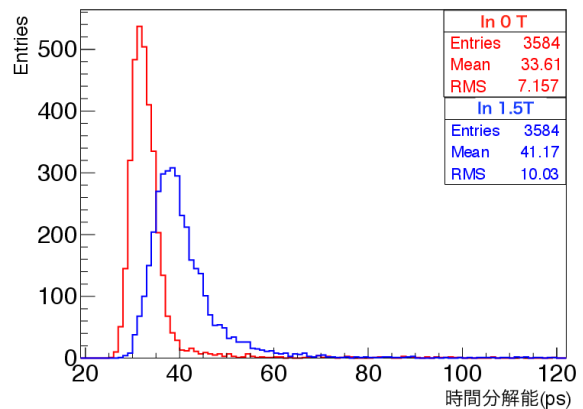


図 2.68 Coating-MCP-PMT の時間分解能の測定結果。赤のヒストグラムは 0 T 中の、青のヒストグラムは 1.5 T 中の測定結果。

### 磁場中の収集効率比

図 2.69 が磁場中の収集効率比の測定結果である。PMT ごとの磁場中の検出効率比の統計誤差は 0.5% 程度である。Conventional-MCP-PMT でも Coating-MCP-PMT でも 1.5 T 中で平均 5% 収集効率が減少することがわかった。5% 程度の減少であれば TOP カウンターの粒子識別効率への影響は 1% 未満で十分小さい。また、Coating-MCP-PMT と Conventional-MCP-PMT で減少率が変わらないということも明らかにすることができた。

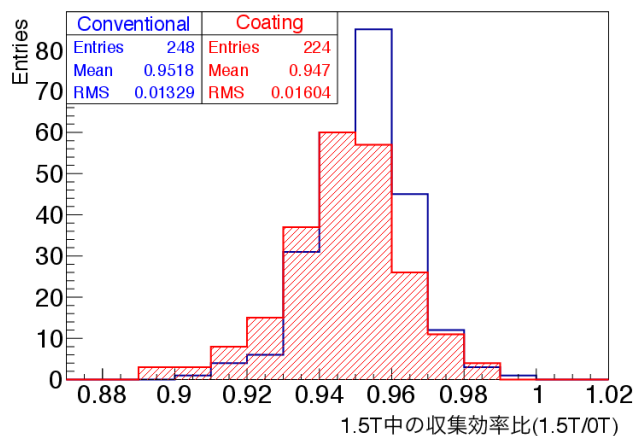


図 2.69 磁場中の収集効率比の測定の結果。青いヒストグラムは Conventional-MCP-PMT の、赤いヒストグラムは Coating-MCP-PMT の測定結果。

## 第3章

# MCP-PMT の TOP カウンター実機での配置と増幅率の決定

MCP-PMT 全数の量子効率、増幅率、時間分解能、収集効率の 1.5T 中での特性と HV 依存性を把握した。測定データを用いて、以下のように MCP-PMT の配置や動作させる増幅率を決定した。

### 3.1 MCP-PMT の配置

各 TOP カウンターに図 3.1 のように MCP-PMT を配置する。図 3.2 のように MCP-PMT は 4 個を 1 つのモジュールにして石英に取り付ける。512 本の MCP-PMT の内、274 個の MCP-PMT が Belle II 実験中に交換が必要な Conventional-MCP-PMT である。MCP-PMT を囲む筐体は図 3.3 のようになっている。中央にスリットが開いており、このスリットから交換が行われる予定である。

以下のことを考慮して MCP-PMT の配置を決定した。

- MCP-PMT の QE には個体差があるため、TOP カウンターごとの平均 QE が偏らないようにする。TOP カウンターごとの平均 QE を全数の平均 28.6% に合わせる。また、1 つの TOP カウンター内で QE がばらつかないように配置を決定する。
- 量産初期には、構造や製造過程の問題から不良 MCP-PMT の割合が大きかった。受入検査をクリアしたものでも QE の低下や放電が使用中に起きやすい可能性がある。そのため、量産初期の MCP-PMT は予備の TOP カウンターに使用したり、MCP-PMT の着脱が行いやすい中央側に配置する。
- MCP-PMT の交換を行う TOP カウンターの数減らすために、1 つの TOP カウンターに Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-PMT ができるだけ混在しないようにする。両方が混在する TOP カウンターでは、交換しやすいようにするため、Conventional-MCP-PMT を中央側に配置する。

図 3.4、図 3.5 に決定した MCP-PMT の配置を示す。図 3.4 は、最初に製造される予備の TOP カウンター用で、Conventional-MCP-PMT のみを用いている。図 3.5 は、2 番目に製造される TOP カウンター用で、Coating-MCP-PMT のみを用いている。1 つの TOP カウンターの QE 平均が約

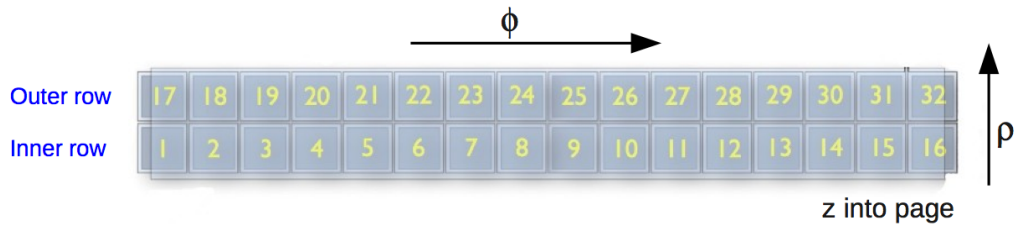


図 3.1 読み出し回路側から見た MCP-PMT の配置 [30]。記入されている番号は配置した MCP-PMT の配置番号である。z は電子ビームの進行方向。 $\phi$  は x、 $\rho$  は r と同義。(図 1.3)

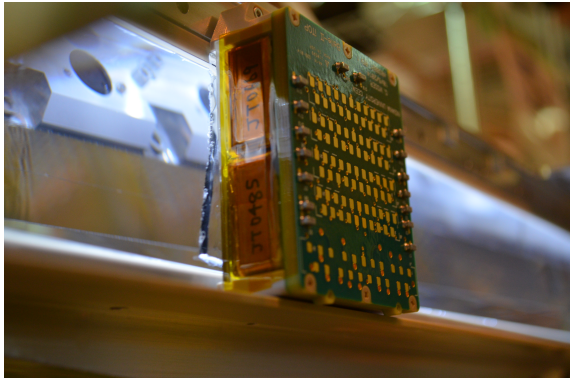


図 3.2 MCP-PMT を石英に取り付けた状態。4つの MCP-PMT を1つのモジュールにしたものが石英に実際に接着されている状態。

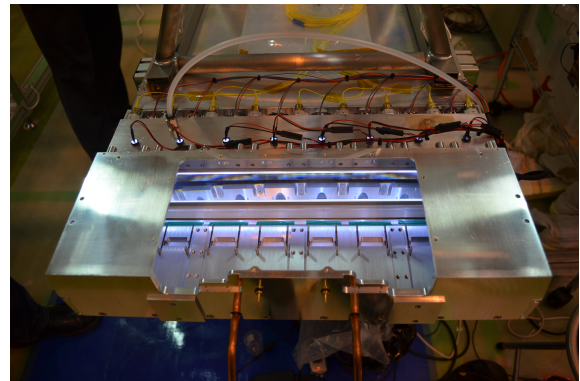


図 3.3 MCP-PMT を囲む筐体

28.6%である。このように、MCP-PMT の交換や故障の可能性を考慮しつつ、QE が TOP カウンターごとと1つの TOP カウンター内で偏らないように MCP-PMT の配置を決定できた。

### 3.2 MCP-PMT の増幅率の調整

0T において、増幅率  $5 \times 10^5$  以上で時間分解能と収集効率は要求を満たすことを確認している。そして、1.5T 中で時間分解能は磁場によって悪化せず、収集効率については5%程度の低下であり、TOP カウンターの粒子識別性能への影響は十分小さいと確認できている。ただし、 $5 \times 10^5$  未満の増幅率では S/N が下がり、時間分解能が悪化してしまう。したがって、総出力電荷量を小さくして光電面の劣化を抑えつつも、TOP カウンターの粒子識別性能を十分に出すことのできる増幅率は  $5 \times 10^5$  である。0 T での増幅率 HV 依存性 (式 2.4) と 1.5 T と 0 T の相対増幅率 (図 2.66) から、1.5 T で  $5 \times 10^5$  の増幅率になるようにあらかじめ HV を設定することが可能である。

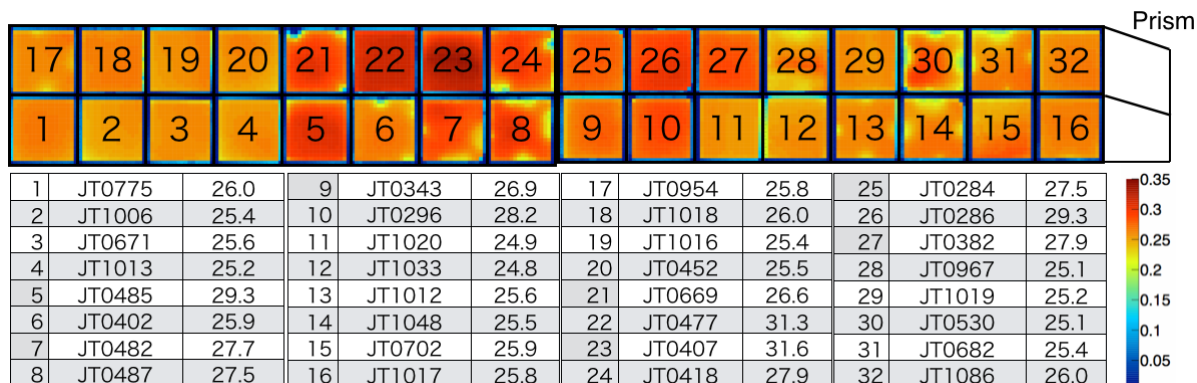


図 3.4 最初に製造される予備の TOP カウンター用の MCP-PMT の配置。図は QE の面分布であり、100% を 1 としている。表の 1 列目は配置番号。2 列目は MCP-PMT の型番。3 列目は 360 nm での QE(%)。

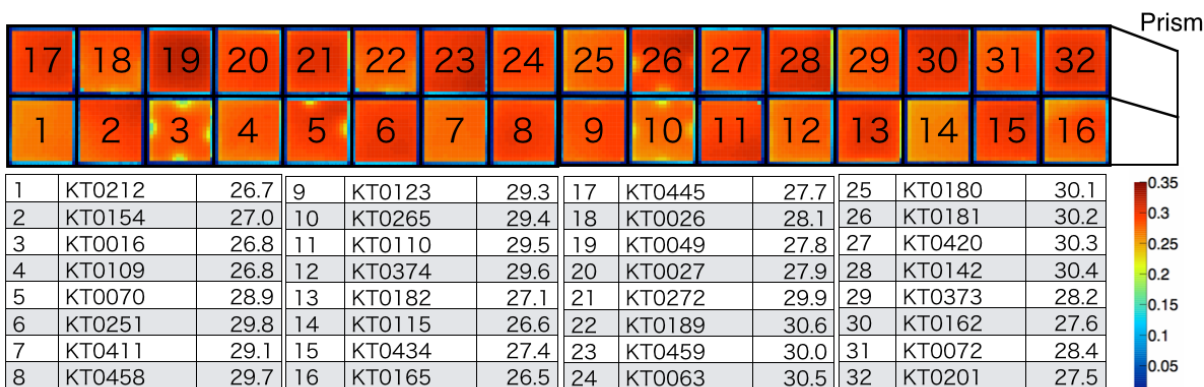


図 3.5 2 番目に製造される TOP カウンター用の MCP-PMT の配置。図は QE の面分布であり、100% を 1 としている。表の 1 列目は配置番号。2 列目は MCP-PMT の型番。3 列目は 360 nm での QE(%)。

## 第4章

# 光電面の長寿命化

さらなる研究課題として MCP-PMT の長寿命化対策がある。Belle II 実験に実際に用いる MCP-PMT の約半数は Conventional-MCP-PMT であり、Belle II 実験期間中に寿命に到達してしまう。そのため、実験途中で Coating-MCP-PMT に交換する必要がある。また、Coating-MCP-PMT でも  $3.2 \text{ C/cm}^2$  と寿命が短い MCP-PMT が存在した。シュミレーションで見積もられている約  $3 \text{ C/cm}^2$  に対して、余裕のある寿命が交換後の MCP-PMT に求められる。そのため、Coating-MCP-PMT の寿命のばらつきを抑えてさらに長寿命化する対策が必要である。この対策で交換後に MCP-PMT が寿命に達することを防ぎ、TOP カウンターの長期的な運転に貢献することができる。6 種類の寿命対策を行った試作品を製造した。寿命対策の試作品の評価について述べる。

### 4.1 光電面の劣化と対策

これまでに寿命測定した Coating-MCP-PMT は図 1.24 のように一様に光電面の QE が低下していた。そのため、MCP-PMT の側管付近から光電面に到達する中性ガスではなく、MCP の穴を通り光電面に到達するイオンが光電面を一様に劣化させていると考えられる。イオンフィードバックの対策のために MCP のチャンネルのバイアス角を  $13$  度にし、2 段目の MCP の入射面に Al 膜をコーティングしている。しかし、それらの対策では MCP-PMT の寿命のばらつきを抑えることができず、寿命の短い MCP-PMT が製造されてしまっていた。そのため、寿命対策の基本的な方針としては MCP-PMT 管内の真空度を高めることで寿命のばらつきを抑えつつ、長寿命化を行うことである。MCP 製造後に電子を多数照射し、残留しているイオンをあらかじめ弾き出しておく対策やガス抜きの改良などが行われた対策の一部である。しかし、詳しいことは述べることができないため、各種対策の説明は割愛する。

1 種類の寿命対策につき 5 本の試作品を製造した。試作品の測定は図 4.1 のように進める予定で行ってきた。納入された試作品を 2014 年 4 月から寿命測定を開始し、各対策の有効性を判断している。最後に、有効である対策を組み合わせた試作品を製造する。そして、その基本的な性能の検査や寿命測定を行った上で残りの量産を行う計画である。

各種対策の有効性の有無は、Coating-MCP-PMT の平均寿命  $8.6 \text{ C/cm}^2$  より寿命が長いかわりに短いかわりで判断する。1 本でも  $8.6 \text{ C/cm}^2$  を下回れば見込みなし、4 本とも上回れば有効である。これまでの寿命測定の結果に図 4.2 のように二次関数をフィットし、それぞれの MCP-PMT の二次関数



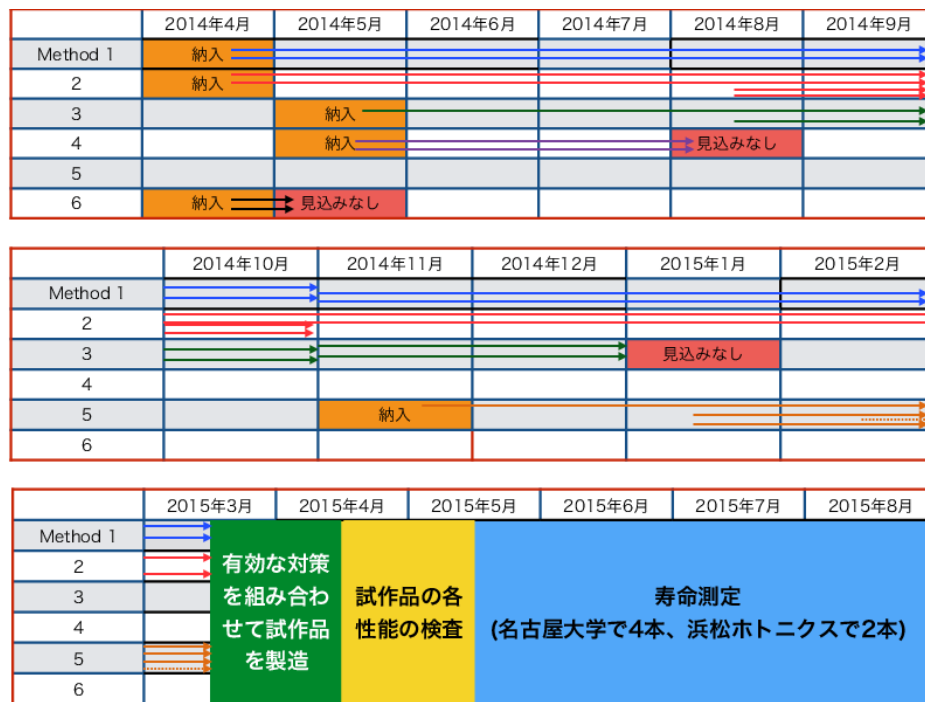


図 4.1 寿命測定のスケジュール。1つの試作品の寿命測定を行っている期間を矢印で記入している。対策の種類ごとに矢印の色が異なる。表の1行目が年月である。

の係数  $a$  と寿命を図 4.3 のようにプロットする。寿命と二次関数の係数  $a$  のプロットに関数 (寿命 (出力電荷量)  $= p_0/\sqrt{|a|}$ ) をフィットし、パラメータ  $p_0$  を求める。これにより、後述する測定結果 (図 4.6) のように任意の寿命の MCP-PMT のヒットレートの推移を推測できる。よって、寿命測定の結果とこの  $8.6 \text{ C/cm}^2$  の曲線を比較することで、寿命の減少が開始した早い段階で  $8.6 \text{ C/cm}^2$  の寿命を持つか推測することができる。

## 4.2 寿命測定の設定アップ

図 4.4 は寿命測定の設定アップの概略図であり、図 4.5 は設定アップの写真である。1度に8本の MCP-PMT を測定可能な設定アップになっている。MCP-PMT の出力信号をアンプによって増幅し、分割し、CAMAC ADC とディスクリミネータに入れる。ディスクリミネータからのデジタルの信号を CAMAC TDC で測定する。

MCP-PMT の光電面の劣化は出力電荷量によるため、LED を用いて多光子を照射し、加速試験を行う。1ヶ月寿命測定を行うことで  $1\sim 2 \text{ C/cm}^2$  の電荷量を出力することができる。

LED 光による出力電荷量は ADC で測定する。

MCP-PMT のヒットレートは量子効率と収集効率の積で、主に開口率で決まる収集効率に変化は生じないため、測定ごとの相対的なヒットレートの変化は相対的な QE の変化に比例する。よって、QE の変化をレーザー光の1光子状態の測定で知ることができる。加速試験の合間に1~2日に1度、レーザー光を用いて相対ヒットレートと増幅率を1光子状態で測定する。増幅率は ADC 分

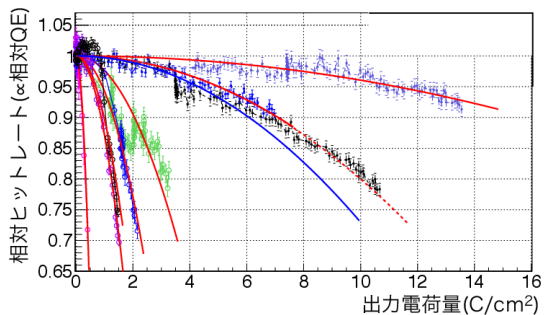


図 4.2 出力電荷量と相対ヒットレートのプロット。赤線はプロットに二次関数をフィットしたものである。青線は寿命が  $8.6\text{C}/\text{cm}^2$  の MCP-PMT ヒットレートの推移。

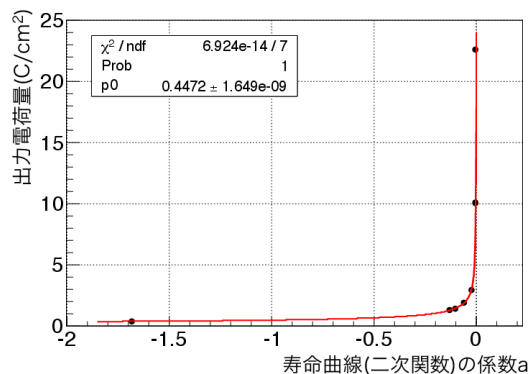


図 4.3 相対ヒットレートが 0.8 のときの出力電荷量対寿命関数の係数。赤線はフィット関数。

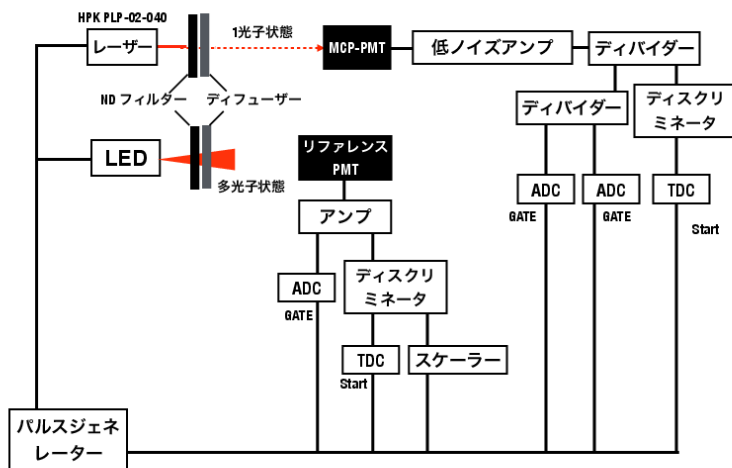


図 4.4 寿命測定の設定アップの概略図

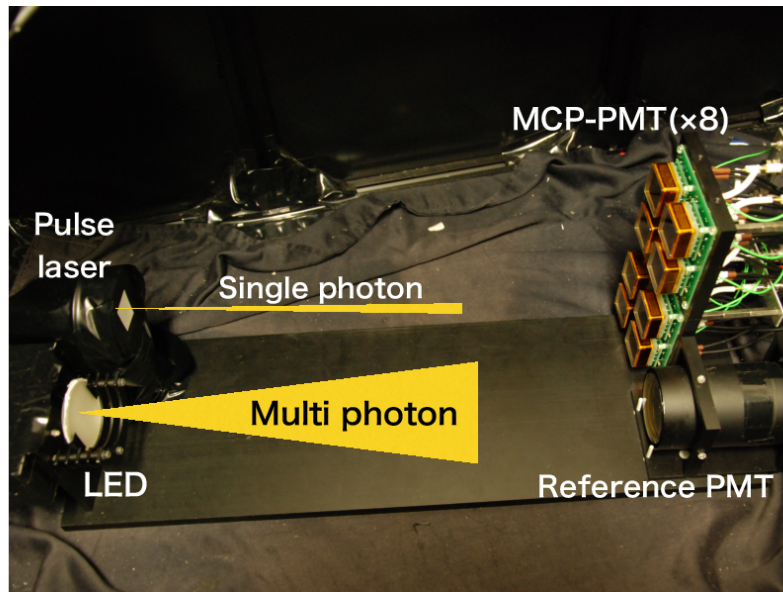


図 4.5 寿命測定の設定アップの写真

布の Mean 値から求め、ヒットレートはレーザーに同期して TDC で検出された信号の数から求める。MCP-PMT のヒットレートをリファレンス PMT のヒットレートで割ることで、レーザーの光量変化を補正する。

相対 QE を正確に求めるため、月に約 1 度の頻度で QE 測定を行う。QE 測定を行うことで、相対 QE と相対ヒットレートが一致しているかの確認や波長ごとの相対 QE、相対 QE の面分布の確認が可能である。

## 4.3 測定結果

### 4.3.1 対策 1 の測定結果

図 4.6 が測定結果のプロットである。各プロットが 4 つの MCP-PMT を示しており、青い曲線は Coating-MCP-PMT の平均寿命  $8.6 \text{ C/cm}^2$  の曲線である。凡例に書いてある文字は各 MCP-PMT の型番である。2 つの MCP-PMT については  $8.6 \text{ C/cm}^2$  より長い寿命になると予想される。そのため、4 本中 2 本は  $8.6 \text{ C/cm}^2$  より寿命が長く、寿命改善の見込みがあると考えられる。残り 2 つの MCP-PMT については現在測定中であるが、これらも  $8.6 \text{ C/cm}^2$  より長いように見える。寿命測定開始前後の QE 測定から相対 QE を求めたものが図 4.7~4.18 である。図 4.7 などのように寿命測定中での相対ヒットレートが QE 測定から求めた相対 QE と一致しているか確認する。チャンネルによっては少しずれている。これは測定回路上の検出効率の変化やノイズ量の変化によるものであると考えられる。図 4.8 などのように一様に QE が減少しているため、QE 減少の主原因はイオンによるものであると考えられる。また、図 4.15 のように長波長側から QE が減少する傾向が見られる。以上の結果から、対策 1 は有効な寿命対策である可能性が高いとわかった。以下、相対 QE の面分布や波長依存性、相対ヒットレートとの比較の図は、出力電荷量が YH0148 は 7.5、

YH0149 は 3.9、YH160 は 4.1、YH0163 は 7.3 C/cm<sup>2</sup> での結果である。

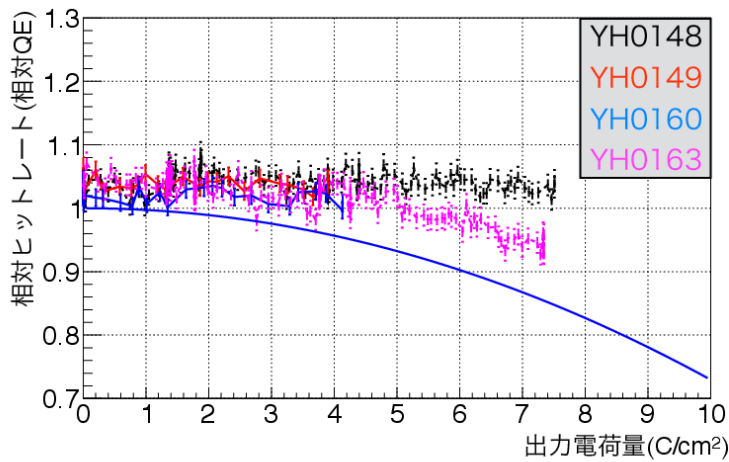


図 4.6 対策 1 の測定結果

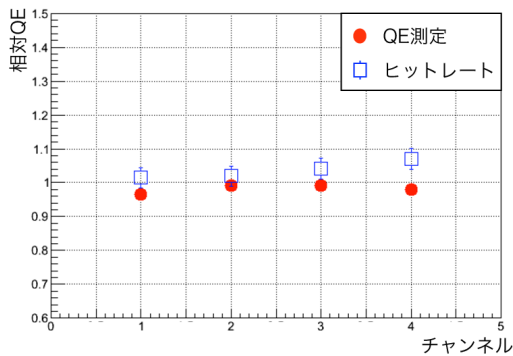


図 4.7 YH0148 の相対ヒットレートと相対 QE

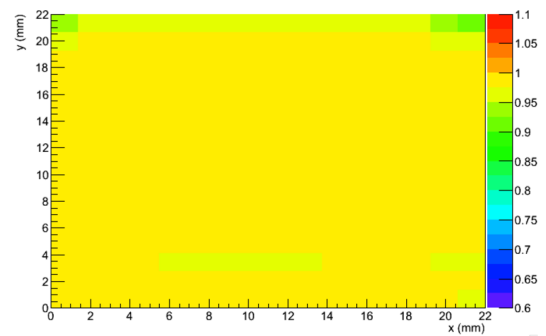


図 4.8 YH0148 の相対 QE の面分布

### 4.3.2 対策 2 の測定結果

図 4.19 が測定結果のプロットである。YH0170 では出力電荷量が増えるにつれて相対ヒットレートが増加している。これは測定開始時の増幅率が低く、図 4.20 測定が進めるたびに増幅率が上がり、読み出し回路上で検出効率が上がっているためだと考えられる。図 4.23 は YH0170 の MCP-PMT の QE 測定の結果と寿命測定の結果を比較したものである。QE 測定の結果では QE は変化していない。また、図 4.24 は YH0170 の相対 QE の一様性の測定結果の図である。全面で

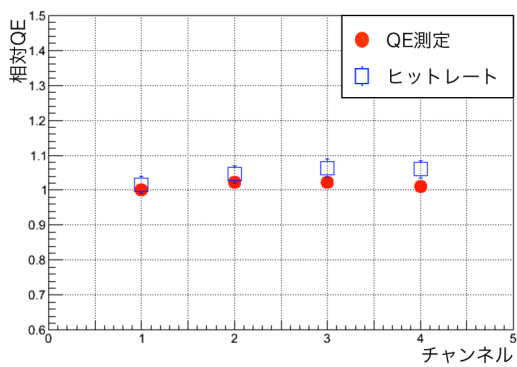


図 4.9 YH0149 の相対ヒットレートと相対 QE

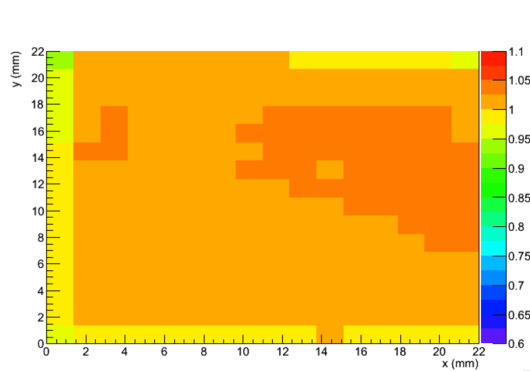


図 4.10 YH0149 の相対 QE の面分布

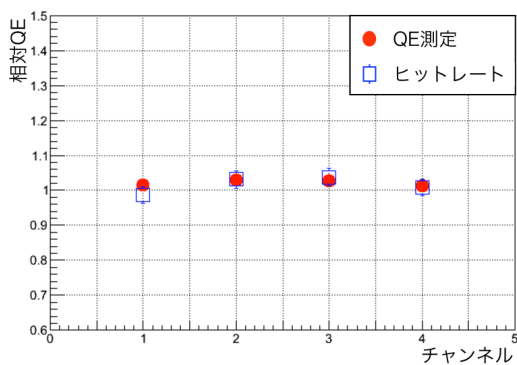


図 4.11 YH0160 の相対ヒットレートと相対 QE

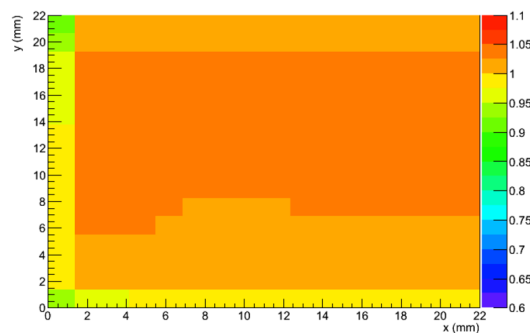


図 4.12 YH0160 の相対 QE の面分布

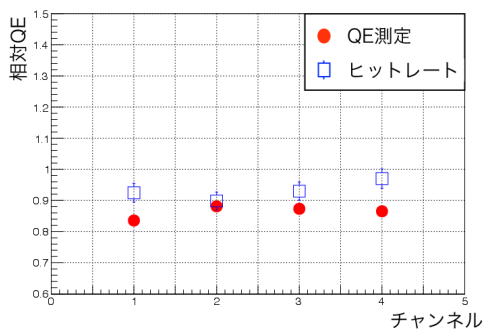


図 4.13 YH0163 の相対ヒットレートと相対 QE

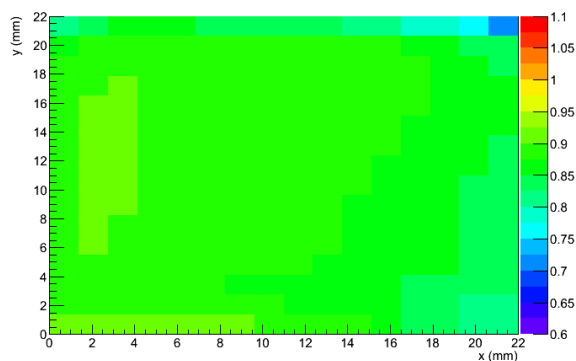


図 4.14 YH0163 の相対 QE の面分布

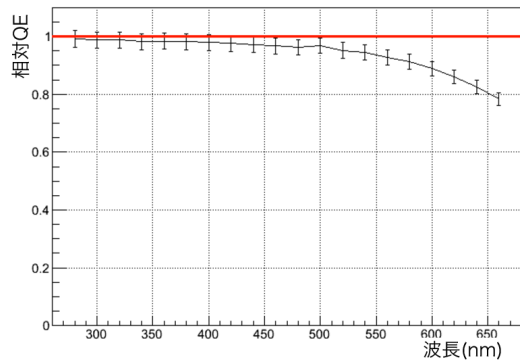


図 4.15 YH0148 の相対 QE の波長依存性

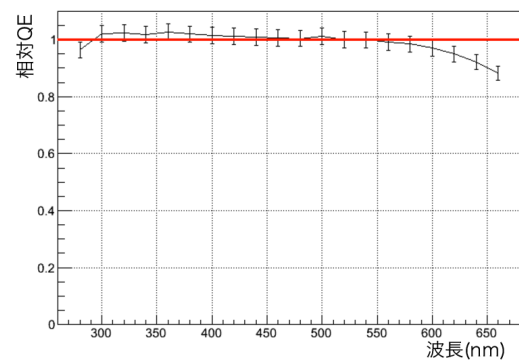


図 4.16 YH0149 の相対 QE の波長依存性

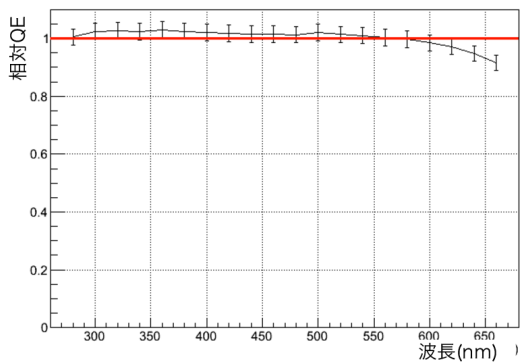


図 4.17 YH0160 の相対 QE の波長依存性

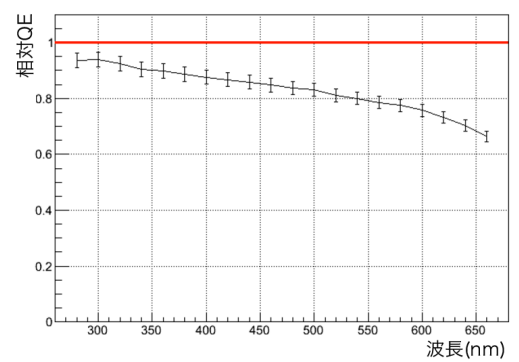


図 4.18 YH0163 の相対 QE の波長依存性

QE が減少していないことが確認できた。よって、この MCP-PMT は  $8.6 \text{ C/cm}^2$  よりも寿命が長いと考えられる。その他の3つの MCP-PMT については測定中であるが、どの MCP-PMT も  $4 \text{ C/cm}^2$  まで QE が減少しておらず、寿命が長いと期待できる。よって、対策 2 は有効な寿命対策である可能性が高いと考えられる。以下、相対 QE の面分布や波長依存性、相対ヒットレートとの比較の図は、出力電荷量が YH0168 は  $5.8$ 、YH0170 は  $7.7$ 、YH171 は  $4.2$ 、YH0173 は  $4.8 \text{ C/cm}^2$  での結果である。

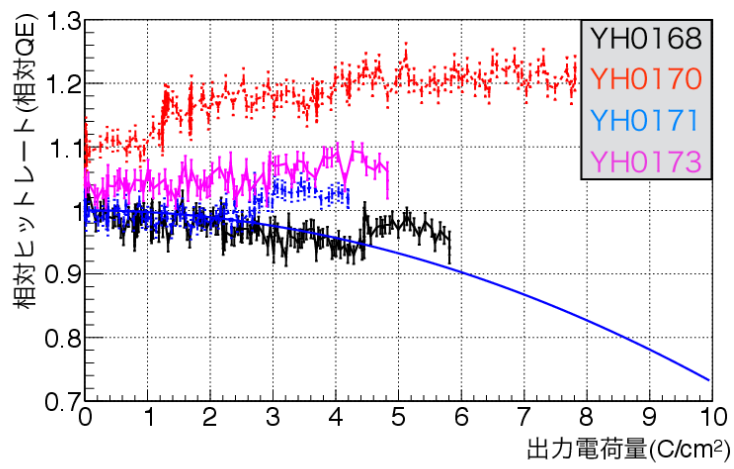


図 4.19 対策 2 の測定結果

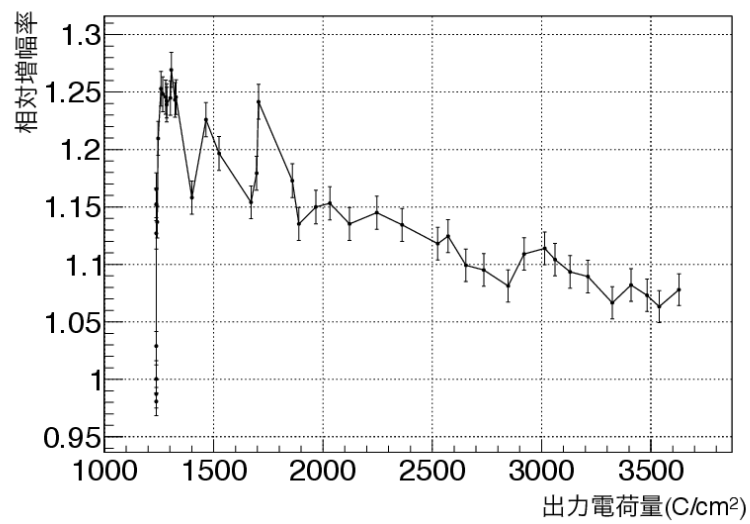


図 4.20 YH0170 の測定中の増幅率の増加。縦軸は増幅率の変化率であり、変化前の点を 1 としている。

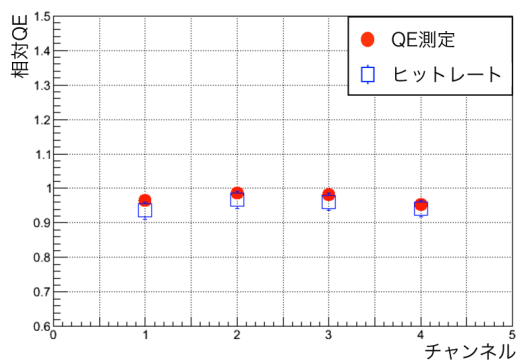


図 4.21 YH0168 の相対ヒットレートと相対 QE

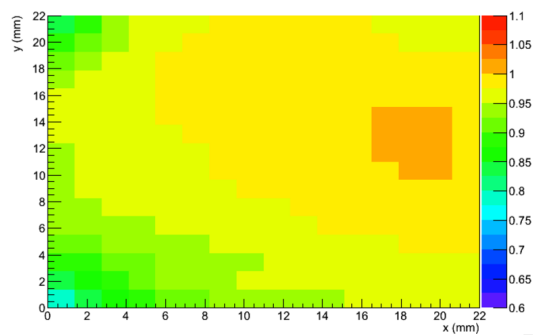


図 4.22 YH0168 の相対 QE の面分布

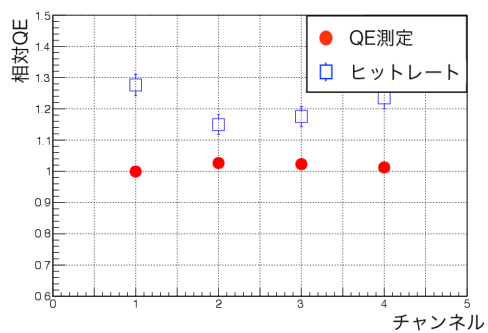


図 4.23 YH0170 の相対ヒットレートと相対 QE

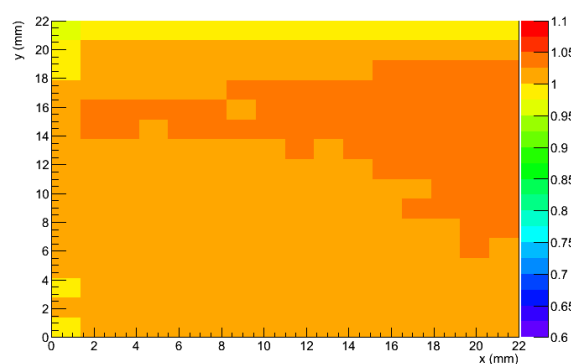


図 4.24 YH0170 の相対 QE の面分布

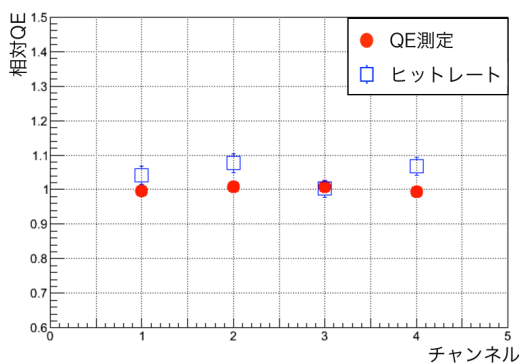


図 4.25 YH0171 の相対ヒットレートと相対 QE

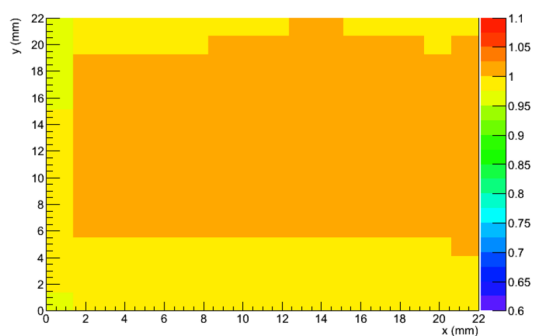


図 4.26 YH0171 の相対 QE の面分布



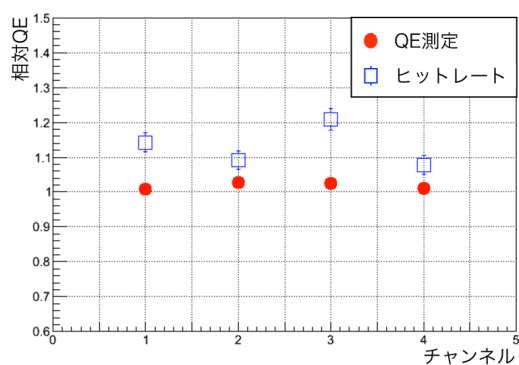


図 4.27 YH0173 の相対ヒットレートと相対 QE

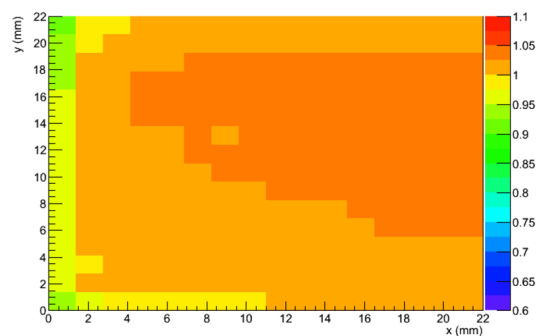


図 4.28 YH0173 の相対 QE の面分布

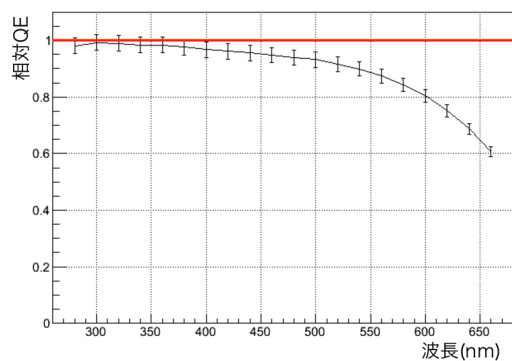


図 4.29 YH0168 の相対 QE の波長依存性

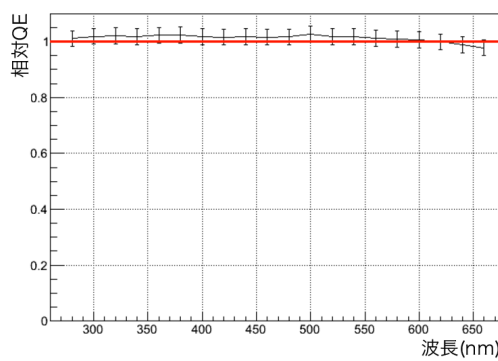


図 4.30 YH0170 の相対 QE の波長依存性

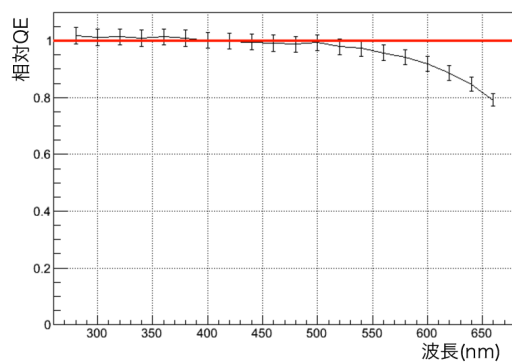


図 4.31 YH0171 の相対 QE の波長依存性

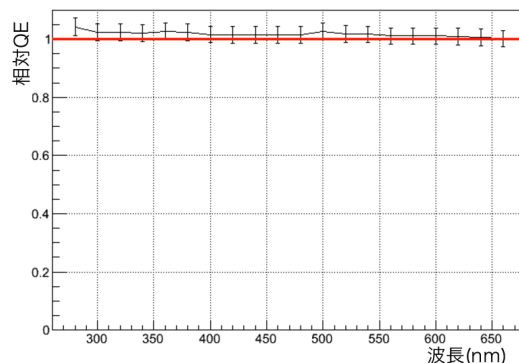


図 4.32 YH0173 の相対 QE の波長依存性

### 4.3.3 対策3の測定結果

図 4.33 が対策3の測定結果の図である。YH0159 では  $8.6 \text{ C/cm}^2$  より寿命が長い。しかし、YH0176 と YH0184 は  $8.6 \text{ C/cm}^2$  の曲線より下回っている。特に、YH0176 では図 4.36 のように相対 QE と相対ヒットレートにズレはなく、 $3.4 \text{ C/cm}^2$  と早い段階で相対 QE が 0.85 以下になっている。図 4.37 のように一様に QE が減少している。よって、イオンフィードバックによる光電面の劣化が QE 減少の主な原因であると考えられる。YH0184 についても同様である。よって、対策3は有効ではないということがわかった。以下、相対 QE の面分布や波長依存性、相対ヒットレートとの比較の図は、出力電荷量が YH0159 は 8.2、YH0176 は 3.5、YH177 は 2.2、YH0184 は  $2.0 \text{ C/cm}^2$  での結果である。

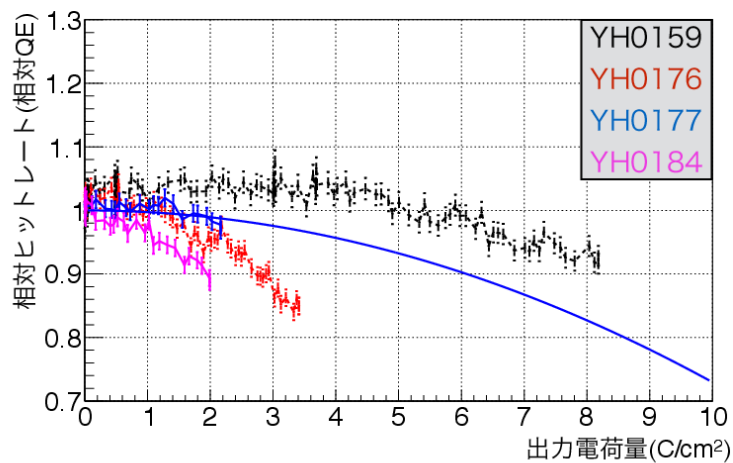


図 4.33 対策3の測定結果

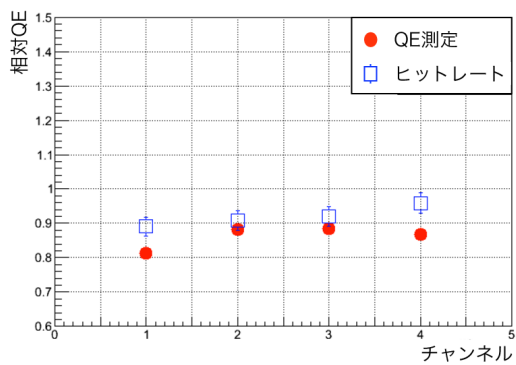


図 4.34 YH0159 の相対ヒットレートと相対 QE

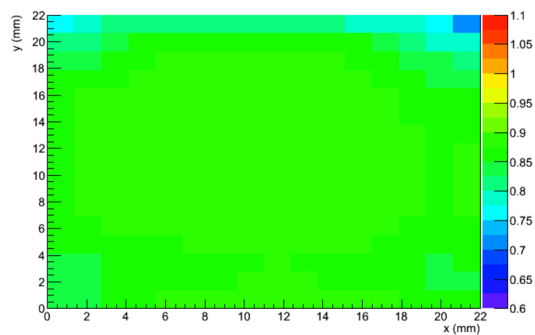


図 4.35 YH0159 の相対 QE の面分布

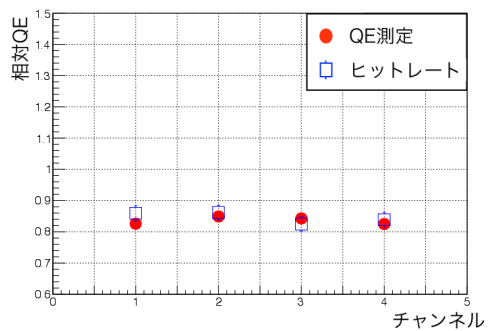


図 4.36 YH0176 の相対ヒットレートと相対 QE

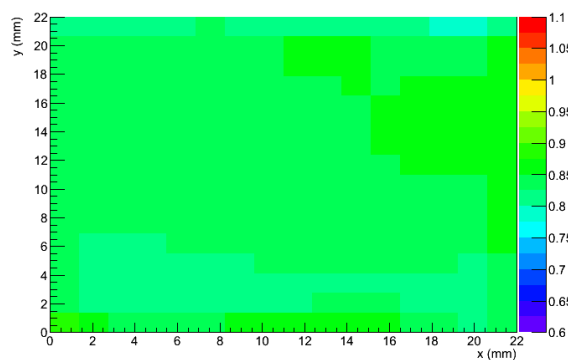


図 4.37 YH0176 の相対 QE の面分布

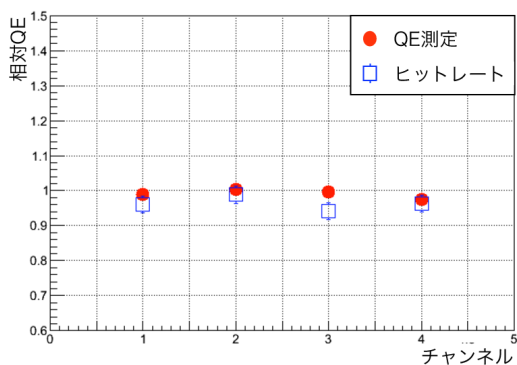


図 4.38 YH0177 の相対ヒットレートと相対 QE

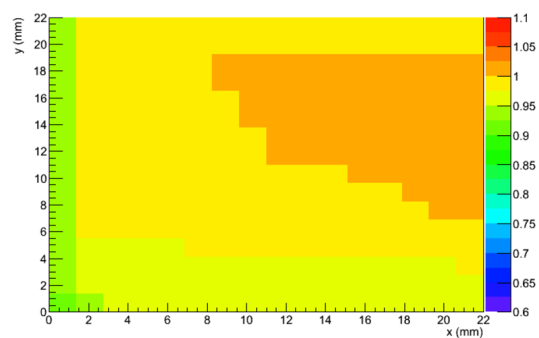


図 4.39 YH0177 の相対 QE の面分布

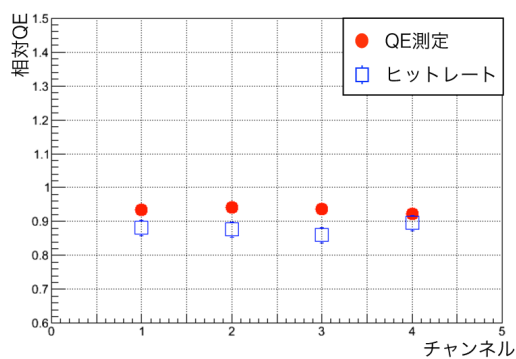


図 4.40 YH0184 の相対ヒットレートと相対 QE

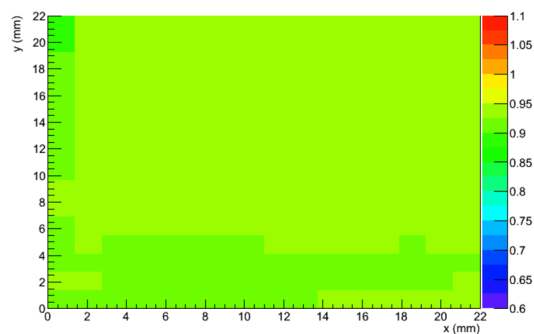


図 4.41 YH0184 の相対 QE の面分布

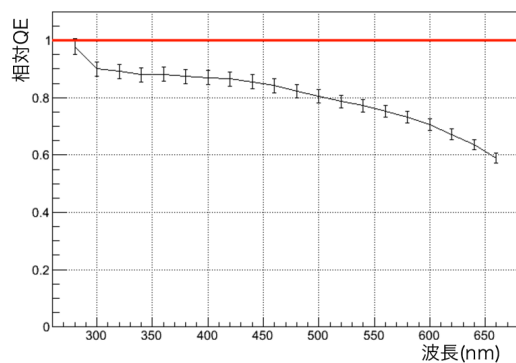


図 4.42 YH0159 の相対 QE の波長依存性

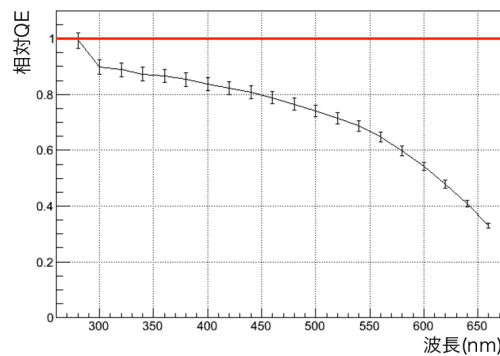


図 4.43 YH0176 の相対 QE の波長依存性

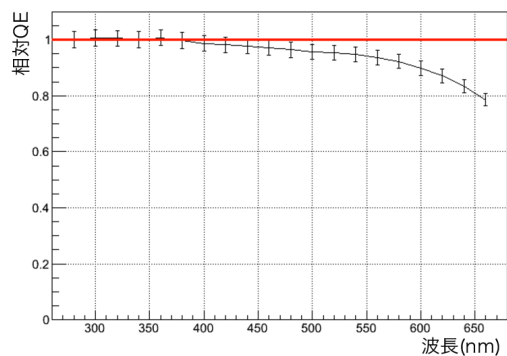


図 4.44 YH0177 の相対 QE の波長依存性

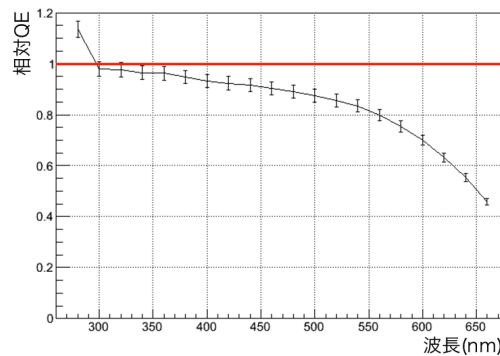


図 4.45 YH0184 の相対 QE の波長依存性

#### 4.3.4 対策4の測定結果

図 4.46 が2つの対策4の測定結果の図である。YH0181は約  $3 \text{ C/cm}^2$ 、YH0182は約  $2 \text{ C/cm}^2$ と寿命が短い。よって、対策4は有効な寿命改善ではないとわかった。YH0181のMCP-PMTのQE測定の結果と寿命測定の相対ヒットレートの結果を比較したものが図 4.47 である。相対QEと相対ヒットレートにズレはなく、本当にQEが減少していると確認できた。また、図 4.48 は相対QEの面分布である。光電面の端でのQEの減少が顕著である。また、光電面の端以外のQEの減少は同様である。よって、光電面の端からの減少は中性ガスの漏れが原因ではないかと考えられる。一様な減少については他の対策品と同様にイオンフィードバックによる光電面の劣化が原因であると考えられる。以下、相対QEの面分布や波長依存性、相対ヒットレートとの比較の図は、出力電荷量がYH0181は  $3.0$ 、YH0182は  $2.0 \text{ C/cm}^2$ での結果である。

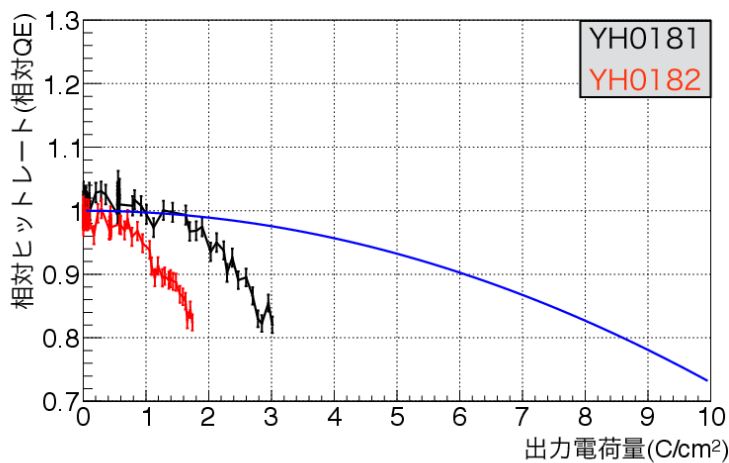


図 4.46 対策4の測定結果

#### 4.3.5 対策5の測定結果

図 4.53 が対策5の測定結果の図である。  $2.4 \text{ C/cm}^2$  までQEの減少は見られなかった。今後さらに測定を行う必要がある。YH0205の寿命測定の相対ヒットレートの結果とQE測定の結果を比較したものが図 4.54 である。寿命測定の結果とQE測定の結果で違いが見られない。また、図 4.55 のようにQEは減少していない。以下、相対QEの面分布や波長依存性、相対ヒットレートとの比較の図は、出力電荷量がYH0205は  $2.4 \text{ C/cm}^2$ での結果である。

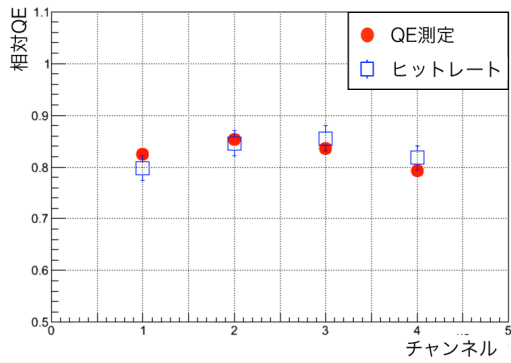


図 4.47 YH0181 の相対ヒットレートと相対 QE

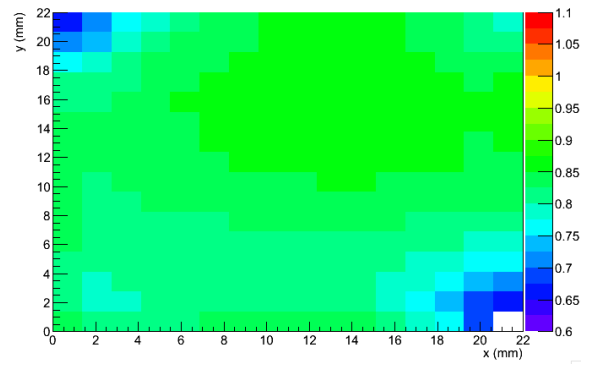


図 4.48 YH0181 の相対 QE の面分布

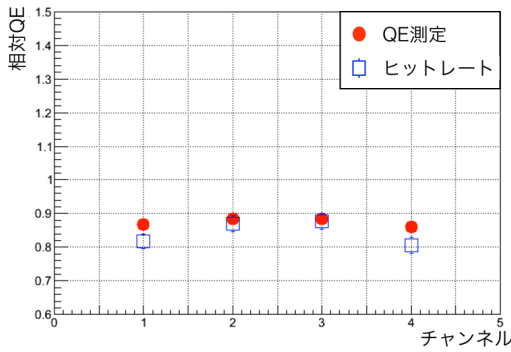


図 4.49 YH0182 の相対ヒットレートと相対 QE

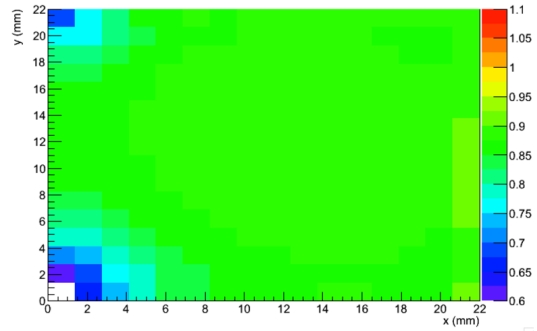


図 4.50 YH0182 の相対 QE の面分布

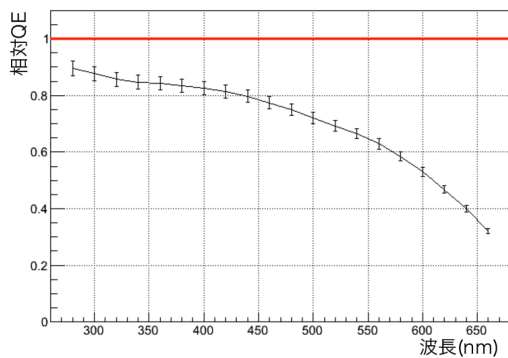


図 4.51 YH0181 の相対 QE の波長依存性

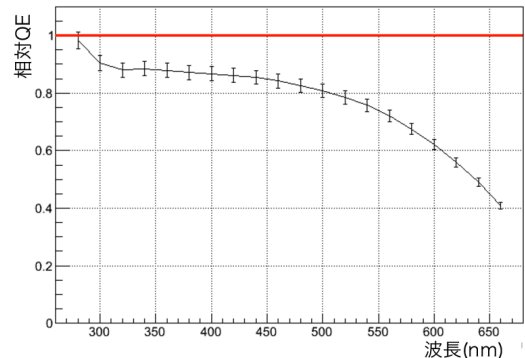


図 4.52 YH0182 の相対 QE の波長依存性

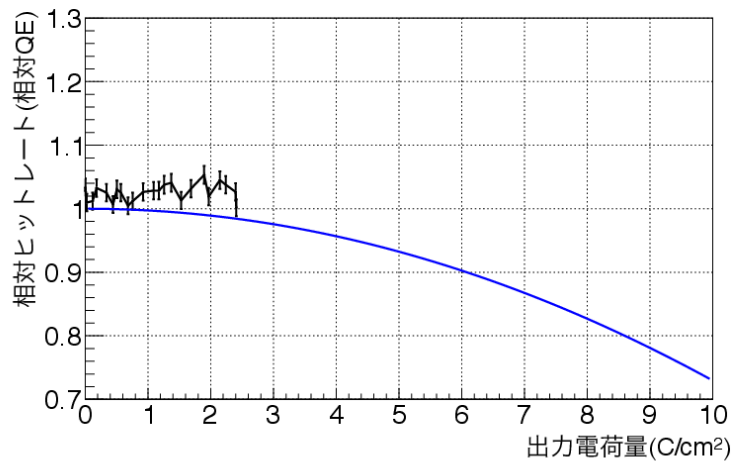


図 4.53 対策5の測定結果

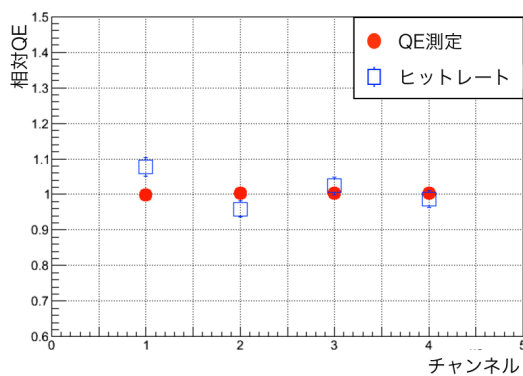


図 4.54 YH0205 の相対ヒットレートと相対 QE

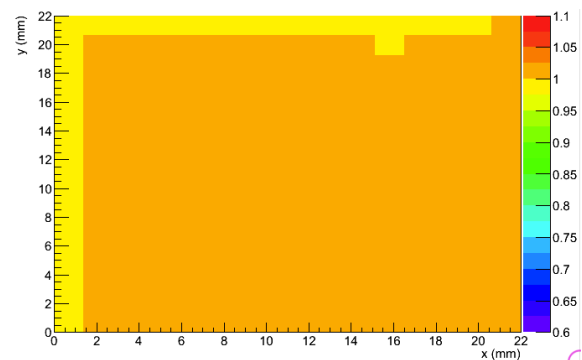


図 4.55 YH0205 の相対 QE の面分布

### 4.3.6 対策6の測定結果

図 4.57 が対策6の測定結果の図である。YH0155 は  $1.2 \text{ C/cm}^2$  で寿命に達した。そのため、対策6は有効な対策ではないとわかった。また、YH0155 の寿命測定の相対ヒットレートの結果と QE 測定の結果を比較したものが図 4.58 である。寿命測定の結果と QE 測定の結果で違いが見られないため、本当に QE が減少していると確認できた。また、図 4.59 のように QE は一様に減少しているとわかった。以下、相対 QE の面分布や波長依存性、相対ヒットレートとの比較の図は、出力電荷量が YH0155 は  $0.9$ 、YH0164 は  $0.8 \text{ C/cm}^2$  での結果である。

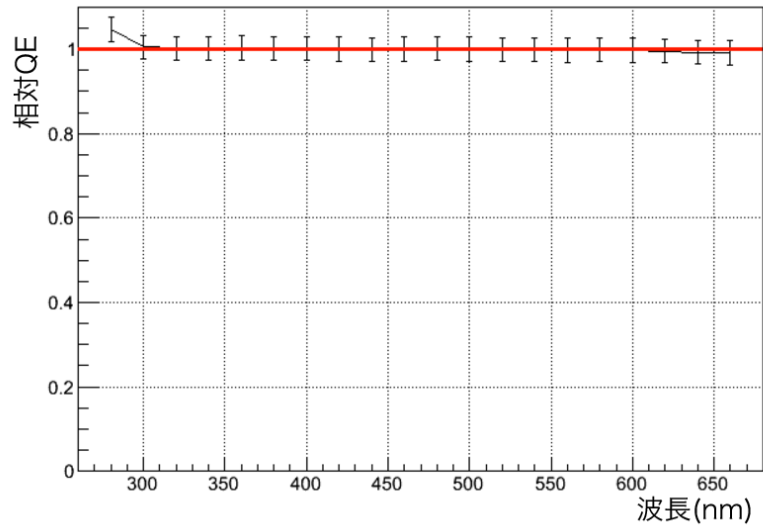


図 4.56 YH0205 の相対 QE の波長依存性

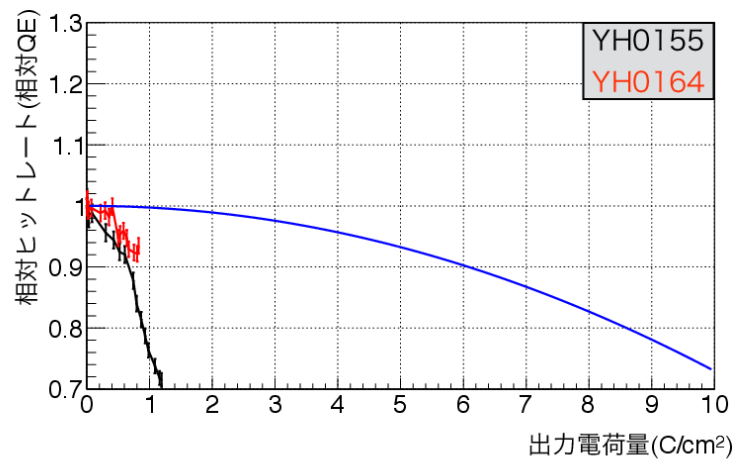


図 4.57 対策 6 の測定結果



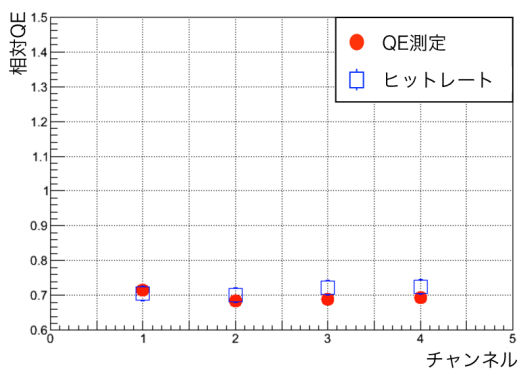


図 4.58 YH0155 の相対ヒットレートと相対 QE

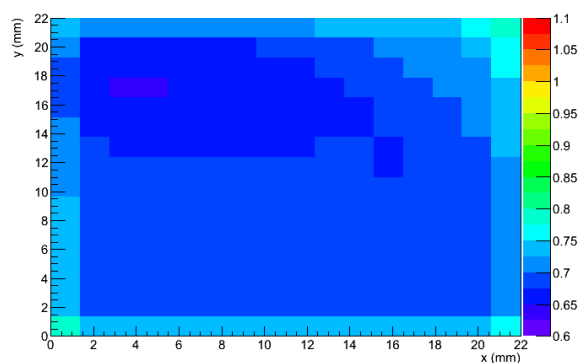


図 4.59 YH0155 の相対 QE の面分布

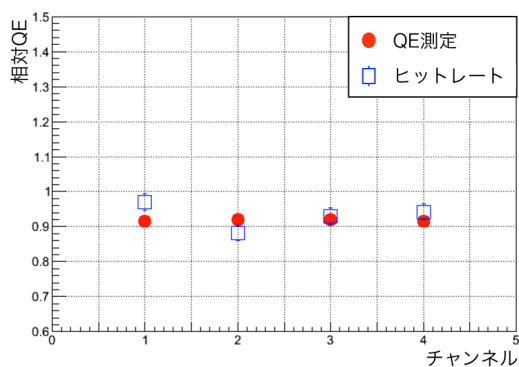


図 4.60 YH0164 の相対ヒットレートと相対 QE

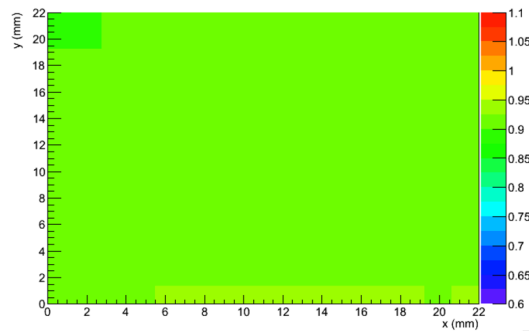


図 4.61 YH0164 の相対 QE の面分布

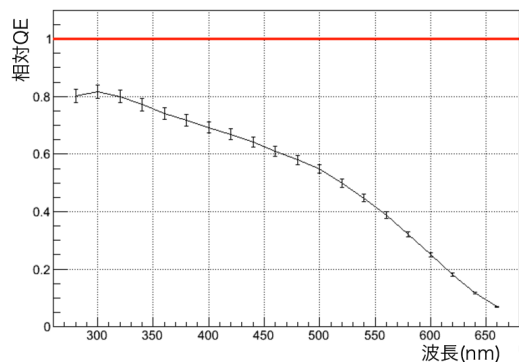


図 4.62 YH0155 の相対 QE の波長依存性

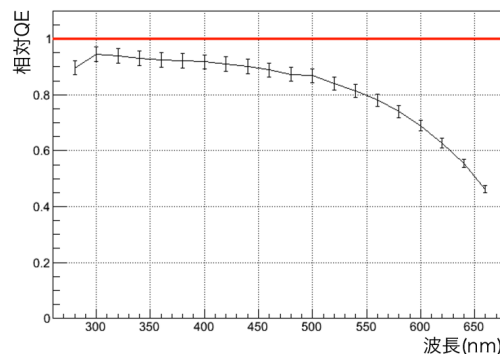


図 4.63 YH0164 の相対 QE の波長依存性

#### 4.4 測定のおとめ

各対策の寿命測定を行ったことと表 4.1 のように寿命対策が有効であるか有効でないか確認することができた。各対策品について製造した 5 本の内、1 本を浜松ホトニクスで測定している。その測定結果も記載している。

表 4.1 寿命測定結果のおとめ

対策の種類	型番	測定場所	寿命 (C/cm <sup>2</sup> )	効果の有無
対策 1	YH0152	浜松ホトニクス	2.6	対策方法が確立していなかった可能性
	YH0148	名古屋大	8.6 以上 (外挿した結果)	有効である可能性が高い
	YH0149	名古屋大	測定中 (3.9 以上)	
	YH0160	名古屋大	測定中 (4.1 以上)	
	YH0163	名古屋大	8.6 以上 (外挿した結果)	
対策 2	YH0169	浜松ホトニクス	測定中 (10 以上)	有効である可能性が高い
	YH0168	名古屋大	測定中 (5.8 以上)	
	YH0170	名古屋大	8.6 以上 (外挿した結果)	
	YH0171	名古屋大	測定中 (4.2 以上)	
	YH0173	名古屋大	測定中 (4.8 以上)	
対策 3	YH0158	浜松ホトニクス	8.0(外挿した結果)	改善の見込みなし
	YH0159	名古屋大	8.6 以上 (外挿した結果)	
	YH0176	名古屋大	4(外挿した結果)	
	YH0177	名古屋大	8(外挿した結果)	
	YH0184	名古屋大	2.7(外挿した結果)	
対策 4	YH0180	浜松ホトニクス	3.3	改善の見込みなし
	YH0181	名古屋大	3.0	
	YH0182	名古屋大	2.0	
対策 5	YH0202	浜松ホトニクス	測定中 (2 以上)	不明
	YH0203	名古屋大	測定待ち	
	YH0205	名古屋大	測定中 (2.4 以上)	
	YH0206	名古屋大	測定待ち	
	YH0208	名古屋大	測定待ち	
対策 6	YH0152_1	浜松ホトニクス	4.9	改善の見込みなし
	YH0155	名古屋大	0.9	
	YH0164	名古屋大	1.4(外挿した結果)	

有効である可能性が高い対策は今後測定を進め、4 つの MCP-PMT 全てで 8.6 C/cm<sup>2</sup> の寿命を超えた場合にその対策が有効であると判断する。そして、有効である対策を合わせて試作品を製造し、寿命が改善されるか確かめる。その後、寿命の改善が確認されれば、TOP カウンター用に量産が行われる。

## 4.5 寿命対策品の磁場特性

対策1と2の試作品について各2本ずつ、増幅率、時間分解能を1.5T中で測定した。1つのMCP-PMTあたり16チャンネルの測定を行った。図4.64は相対増幅率の測定結果である。相対増幅率の平均は約0.28であり、量産品の測定結果である0.26から大きく変わらないと確認できた。図4.65は時間分解能の測定結果である。増幅率が $5 \times 10^5$ 付近から時間分解能の悪化が見られた。これはこれまでの測定結果と同様である。 $0.55 \times 10^6$ 以上では時間分解能に悪化は見られず、50 ps以内の測定結果が得られた。よって、新しい2つの対策品については磁場特性は通常のCoating-MCP-PMTと変わらないと確認できた。

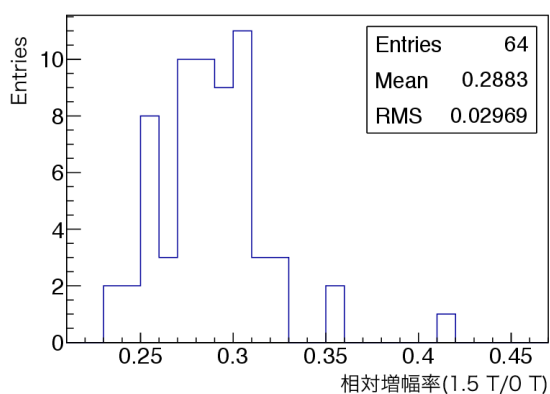


図 4.64 寿命対策品の相対増幅率。各点はチャンネルごとの結果である。

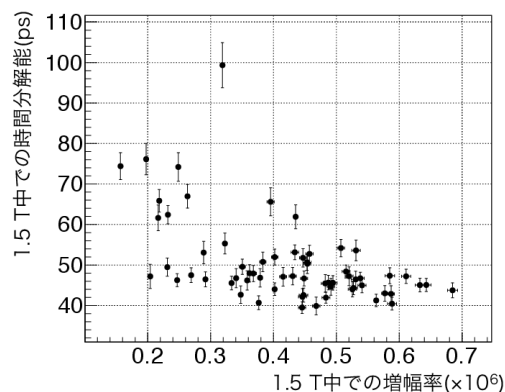


図 4.65 1.5 T 中での寿命対策品の時間分解能と増幅率の関係。各点はチャンネルごとの結果である。

## 第5章

# 結論

2017年の実験開始に向けて、TOP カウンターの開発を行ってきた。チェレンコフ光を検出する MCP-PMT の性能が TOP カウンターの粒子識別性能に直結する。これまでに TOP カウンター用 MCP-PMT の開発が行われ、量子効率がピーク波長で 24% 以上、1 光子検出可能な増幅率を持ち、1 光子に対して 50 ps 以下の時間分解能を持つ MCP-PMT の開発に成功した。また、試作品や一部の量産品の測定によって、実際に使用される 1.5 T の磁場中で TOP カウンターに使用可能な性能を持つことが確認されてきた。現段階では、開発した MCP-PMT を量産し、2014 年 10 月から製造を開始した TOP カウンターに MCP-PMT512 本を実際に使用することを目指している。

世界的にみても、512 本もの大量の MCP-PMT を量産し、実験に使用した例はなく、製造元の浜松ホトニクスにとっても量産は初の経験だった。よって、要求性能を満たす MCP-PMT を量産し、実際に使用するためには、TOP カウンターに必要な性能である QE、増幅率、時間分解能、収集効率の性能評価を量産に沿って行う必要があった。つまり、浜松ホトニクスでの生産と名古屋大学と KEK での性能評価は二人三脚のように MCP-PMT の量産の成功と実際の使用に向けて進んできたと言える。性能評価によって、以下の項目の実現を目指した。

- 要求性能を満たす MCP-PMT のみを準備し、要求を満たさない MCP-PMT をはじくこと。
- 量産の中で起きる問題を詳細な測定で洗い出し、改善に役立て、少しでも良い性能を持った MCP-MT 製造する。
- MCP-PMT の性能を詳細に把握し、TOP カウンターの粒子識別性能の理解する。
- TOP カウンターの性能を最大限引き出すため、MCP-PMT の性能を最大限に引き出せる増幅率に調整できるようにする。

これらを実現するために以下の性能評価や検査を量産に沿って行った。

- MCP-PMT の寸法検査。
- QE の面分布と波長依存性の測定。
- 1.5 T 中の増幅率、時間分解能、収集効率およびそれらの HV 依存性の測定。

性能評価と検査結果は以下である。

### 寸法検査と放電チェック

寸法検査ではピンが曲がっていないこと、ピンの直径と長さ、ポッティング材の検査を行った。検

査用のジグを作成し、Conventional-MCP-PMT を 241 本、Coating-MCP-PMT を 237 本検査した。その結果、ピンの長さが短いものやポッティング材が変色したものなどの不合格品が合計 36 本見つかった。また、放電チェックでは標準電圧よりも 100 V 高い HV を印加し、放電やダークレートの確認を行った。Conventional-MCP-PMT を 286 本、Coating-MCP-PMT を 237 本検査した。その結果、信号が出ないものや放電してしまうものが合計 11 本見つかった。性能評価や TOP カウンターに使用できない MCP-PMT を洗い出すことができた。

### QE の面分布と波長依存性の測定

18 × 18 点のスキャンを行い、QE の面分布を波長ごとに測定した。量産に沿って 515 本の測定を行った。ピーク波長で 24% 以上の QE を持たないものは浜松ホトニクスに返品し、低 QE 品をはじくとともにその後の量産の改善に役立てた。その結果、ピーク波長での全数の平均 QE が要求である 28% 以上を満たす 28.5% と測定結果を得ることができた。

### 0 T 中での増幅率、時間分解能、収集効率の測定

増幅率、時間分解能、収集効率の HV 依存性を 16 チャンネル分測定した。Conventional-MCP-PMT の場合は 5 点、Coating-MCP-PMT の場合は 7 点、HV を変えて測定した。測定結果から各 MCP-PMT で増幅率の HV 依存性を把握した。また、時間分解能、収集効率が増幅率によらず、HV 依存性がないことを確認できた。

### 1.5 T 中での増幅率、時間分解能、収集効率の測定

増幅率、時間分解能、収集効率の 1.5 T 中での特性を 16 チャンネル分測定した。過去の研究で増幅率と時間分解能を測定可能なシステムが構築されていた。しかし、新たに収集効率をそれらの性能と同時に測定する必要があった。また、Coating-MCP-PMT は Conventional-MCP-PMT より 1.5 T 中で約 2.5 倍増幅率が減少するため、その増幅率に合わせたセットアップが必要だった。そのため、Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-PMT の両方の増幅率、時間分解能、収集効率の 1.5 T 中での変化量を同時に測定可能なシステムに変更を行った。そして、2014 年 3 月から 2014 年 9 月にかけて、計 472 本の測定を行った。全数測定の結果から、Conventional-MCP-PMT の相対増幅率は平均約 0.65 で、Coating-MCP-PMT の相対増幅率は平均約 0.26 であることがわかった。Coating-MCP-PMT の方が 1.5 T 中で増幅率が減少する原因は、MCP の二次電子放出層への電子の入射角と二次電子数の相関が Conventional-MCP-PMT と Coating-MCP-PMT で異なるということが考えられる。時間分解能は Conventional-MCP-PMT でも Coating-MCP-PMT でも 1.5 T の磁場によって悪化していないことを確認した。収集効率は 1.5 T 中で平均約 5% 減少するものの TOP カウンターの粒子識別性能への影響は十分小さいと確認することができた。

1.5 T 中での各性能の特性と 0 T での HV 依存性を把握したことで、1.5 T 中で増幅率の調整が可能となった。MCP-PMT の量子効率の低下は総出力電荷量に従って低下するが、これらの測定によって、増幅率を下げ、量子効率の低下の抑制をしつつ、各性能が要求を満たす MCP-PMT の使用が可能になった。

また、バックグラウンドの理解が進み、量産品の約半数ある短寿命品の量子効率が実験中に低下すると予想された。そのため、寿命の短い Conventional-MCP-PMT は実験中に交換を行う。Conventional-MCP-PMT の約 9 倍以上の長寿命化を目指し、6 種類の長寿命化対策を試み、対策品の寿命を測定した。対策 1 と対策 2 では寿命対策が有効である可能性が高いと考えられる結果が

出ている。対策3と対策4と対策6では見込みなしであると判断できる測定結果を得られた。今後さらに測定を進めることで有効な寿命改善を判断し、いくつかの寿命対策を施した MCP-PMT を製造できる。そして、交換後に MCP-PMT の QE が寿命に達しないようにすることができる。

本研究によって、量産の中で起きる問題を詳細な測定で洗い出し、改善に役立て、要求性能を満たす MCP-PMT512 本の量産の成功に貢献した。また、性能評価によって、MCP-PMT の性能を詳細に把握し、TOP カウンターの粒子識別性能の理解や MCP-PMT の性能を最大限に引き出せる増幅率の調整を可能にした。また、Belle II 実験期間中に行われる MCP-PMT の交換後の QE を低下を防ぐために長寿命化対策品を製造し、寿命を評価したことで、有望な寿命対策をいくつか絞り込むことができた。今後さらに測定を進めることで所望の寿命を持つ MCP-PMT の開発が可能となる。

## 参考文献

- [1] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1(2010), arXiv:1011.0352.
- [2] T. Abe, et al., *KEK-REPORT-2010-1*, 2010.
- [3] Y. Ohnishi, et al., Accelerator design at SuperKEKB Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A011  
doi: 10.1093/ptep/pts083 First published online March 26, 2013
- [4] K. Obe, et al., KEKB B-Factory, The Luminosity Frontier Prog. Theor. Phys. (2009) 122  
(1): 69-80. doi: 10.1143/PTP.122.69
- [5] A. Ali et al., Phys. Lett. B 595 (2004) 323
- [6] A. Ali et al., Eur. Phys. J. C 26, 195-200 (2002)
- [7] N. Taniguchi et al. (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 111801
- [8] M A. Furman “Hourglass Effects for Asymmetric Colliders” (1999)
- [9] P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy(2006).
- [10] M. Akatsu, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **440**  
(2000) 124.
- [11] T. Oshima, *ICFA Instrumentation Bulletin* **20** (2000) 2.
- [12] T. Oshima, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **453** (2000)  
331.
- [13] Y. Enari, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **494** (2002)  
430.
- [14] 古賀裕介 修士論文, “Belle II 実験 TOP カウンター実機の光学性能評価” (2012)
- [15] K. Inami., ”Performance and schedule (MC study, robustness)” Belle II Focused Review  
(2011)
- [16] Y. Arita, et al., “Verification of Focusing System for Time-of-Propagation Counter”  
Physics Procedia Volume 37, 2012, Pages 621625
- [17] M. Akatsu, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **528**  
(2004) 763.
- [18] N. Kishimoto, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **564**  
(2006) 204.
- [19] K. Inami, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **592** (2008)  
247.
- [20] T. Jinno, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **629** (2011)  
111.

- [21] K. Matsuoka et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **766** (2014) 148.
- [22] Hamamatsu Photonics Technical Information: MCP assembly, No. TMCP9001E01
- [23] T Nanut et al., "TOP beam background" 19th B2GM (2014)
- [24] E. Arita, Shozo Ino, et al., "Energy and angular distribution of secondary electrons emitted from Si(111)- $7 \times 7$ ,  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag and  $5 \times 2$ -Au surfaces" *Surface Science* Volume 346, Issues 13, Pages L49-L54, 1-356 (1 February 1996)
- [25] 西村賢治、大宅薫、光学モデルを用いた2次電子放出のモンテカルロシミュレーション。沼津工業高等専門学校研究報告第37号、2003年1月
- [26] 神野高幸 修士論文, "光検出器 MCP-PMT の長寿命化に向けた開発研究" (2010)
- [27] 廣瀬茂輝 修士論文, "Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の 実機設置環境における特性評価" (2013)
- [28] 武市秀樹 修士論文, "Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の性能測定システムの構築" (2012)
- [29] 横山 将志 魚住 聖 "Multi Pixel Photon Counter の研究開発" (2007)
- [30] Belle II TOP group The TOP Numbering Scheme version 1.0



## 謝辞

本研究に際して、様々なご指導を頂きました飯嶋徹教授、居波賢二准教授、松岡広大特任助教をはじめとする研究室の皆様へ深く感謝致します。指導教官である飯嶋教授には、本研究を行う機会を与えていただき、その遂行にあたって研究の方向性や考え方などご指導いただき、研究を進展させることができました。居波准教授には、研究の中でわからない点を教えていただいたり、様々な助言をいただきました。松岡特任助教には、研究で不明な点を丁寧に教えていただき、研究や実験の方法などの基本的なところまでご指導いただきました。測定や論文をまとめる際にも遅くまでご指導していただきました。早坂圭司准教授には、研究報告へのコメントでの的確な助言をいただき、何度も助けていただきました。鈴木一仁特任講師、早川知克研究員には、お忙しい中磁場測定に何度もお付き合いいただき、測定準備にもご協力いただきました。また、食事などで KEK での生活を更に豊かにしていただきました。加藤悠司研究員、佐藤優太郎研究員には、休日にもかかわらず測定を行っていただき、プログラミングで行き詰まったときには丁寧に指導いただきました。戸本誠准教授、堀井泰之助教、川出健太郎研究員には、研究報告でいただいた質問によって更に深く自分の研究を見直す機会を得させていただきました。有田義宜さん、若林潤さん、廣瀬茂輝さんには、研究内容や発表スライドに様々な助言をいただきました。同期である白井主紀君、小野木宏太君、古村大樹君には、普段の研究生活で互いに楽しく議論や話をし、様々なアドバイスをいただきました。また、様々な行事や実験などで協力してくれた佐野祐太君、水野嶺君にも深くお礼申し上げます。

高エネルギー加速器研究機構の足立一郎氏、西田昌平氏には、双極電磁石の使用についてご尽力いただき、測定を行うことができました。また、KEK 職員の方々には、旅費の手続きや宿泊などでお世話になりました。この場をお借りして、深く御礼申し上げます。

最後に、長い学生生活を応援していただいた両親と兄弟に深く感謝の意を表して謝辞と致します。