

2017 年度修士論文

高時間分解能光検出器 MCP-PMT の内部残留ガスによる
光電面劣化のメカニズムの研究

名古屋大学理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻

高エネルギー素粒子物理学研究室

学籍番号 261601426

室山玄太

平成 30 年 3 月 30 日

概要

フレーバー物理などにおいて崩壊粒子の識別は親粒子の情報を知るために重要である。粒子識別の方法としてシンチレーション光やチェレンコフ光を用いるものがあり、その識別能力の向上には光検出器の高い性能が必要になる。Micro-Channel-Plate (MCP)-PMT は高い時間、位置分解能を持ち、これらの要求を満たす光検出器である。しかし、一般的な PMT に比べて光電面の量子効率 (QE) の低下が早く、寿命が短いという欠点がある。積算出力電荷に応じて QE は低下するため、高頻度衝突実験において長期間使用する際に問題となる。

光電面の QE 低下の原因として、MCP 上に吸着した残留ガスが挙げられる。それらは増幅過程の電子と衝突し中性ガスやイオンとなり、QE を低下させていると考えられている。我々は Belle II 実験でチェレンコフ光を利用した粒子識別装置 TOP カウンターで MCP-PMT を使用するため、長寿命化の研究を行ってきた。ガスの吸着防止に MCP に Atomic Layer Deposition (ALD) を施すなどの対策を行い Belle II 実験の 5 年間の物理ランで使用可能な MCP-PMT を開発した。量産品の寿命の個体差が約 50 % あるため、他実験への応用を踏まえると効率的な寿命対策により個体差を抑え、かつ長寿命な MCP-PMT を生産する必要がある。そのため、私は理解が不十分な QE 低下メカニズムの解明を目指した。

私はイオンの種類、量およびそのエネルギーに着目し、これを調べた。イオンは MCP から放出されると光電面へと衝突するまで電場によって加速する。その際のエネルギーは 1 keV 程度であり PMT の印加電圧に依存するため、これを変化させることでその影響を調べることができる。イオンの種類と量はアフターパルスを利用し測定した。これはイオンが光電面に到達した際に放出する二次電子による信号であり、イオンの質量に依存した時間差を伴ってやってくる。この時間差と頻度の測定からイオンの種類と量が同定できる。私はアフターパルス測定システムを構築し、ALD 寿命対策によるイオンの種類と量の変化を調べた。またイオンのエネルギーの変化と寿命の相関を直接調べるため、PMT の印加電圧を変化させて寿命測定を行えるように測定ベンチに改良を施した。さらに残留ガス対策のため MCP 上にある Al 薄膜を取り除いた PMT を作成し、Al 薄膜の有無によるイオンの変化や寿命の変化を調べた。

アフターパルスの測定結果から、ALD 未対策品では主に H^+ と He^+ が確認された。ALD 対策品では H^+ が約 50 %、 He^+ が約 25 % に減少していたが新たに H_2O^+ が確認された。膜無し品では H^+ 、 He^+ や H_2O^+ は膜有り品と同様の分布を示したが、新たに Al 膜で阻止されていた重いイオンとみられるものが確認された。これらのイオンのうち、 He^+ は光学窓の石英ガラスを透過する性質があること、 H_2O^+ は長寿命の ALD 対策品でのみ確認されることから QE 低下にはほとんど寄与していないと考えられる。寿命測定の結果、膜無し PMT の寿命は同タイプの膜有り品に比べて短いことから、Al 膜により阻止されていた重いイオンや中性ガスが光電面の QE 低下を引き起こしている可能性がわかった。

本研究で MCP-PMT 内部のイオンの分布を調べる測定システムを構築することができ、光電面寿命低下に対して He^+ 、 H_2O^+ は寄与しないことがわかった。

目次

第 1 章	イントロダクション	3
第 2 章	MCP-PMT	5
2.1	MCP-PMT の基本原理	5
2.1.1	増幅原理	5
2.1.2	寿命特性	6
2.2	TOP カウンター用 MCP-PMT	6
2.2.1	基本特性	6
2.3	これまでの寿命対策	10
2.3.1	イオン対策	10
2.3.2	中性ガス対策	11
2.3.3	ALD コーティング	12
2.3.4	MCP-PMT のタイプ	12
2.4	研究目的	13
第 3 章	アフターパルス測定	14
3.1	アフターパルスの発生原理	14
3.1.1	イオンフィードバック	14
3.1.2	アフターパルス	14
3.2	測定方法	18
3.3	測定結果	19
3.3.1	膜有り MCP-PMT	19
3.3.2	膜無し MCP-PMT	26
3.4	光電面寿命とイオン	27
3.5	アフターパルス測定のまとめ	28
第 4 章	寿命測定	30
4.1	寿命測定の手法	30
4.1.1	測定方法と既存のセットアップ	30
4.1.2	改良点	31
4.2	測定	34
4.2.1	印加電圧変化	34
4.2.2	膜無し PMT	38
4.2.3	寿命測定中のアフターパルス頻度の変化	39
4.3	測定のまとめ	40

第 5 章 結論	42
付録 A 測定した全 MCP-PMT のアフターパルス時間差分布と出力電荷比分布	44
A.1 初期量産型	44
A.2 ALD 型	46
A.3 寿命改善型 ALD	48
A.4 膜無し寿命改善型 ALD	50
付録 B 光学窓を遮蔽した状態での光電面劣化加速試験	51
B.1 光学窓の遮光	51

第1章 イントロダクション

フレーバー物理やハドロン物理において、崩壊モードの決定は新物理の探索や精密測定には不可欠である。そのためには高精度での崩壊粒子の識別が重要となる。荷電粒子が発する光を利用した Time-Of-Flight (TOF) 検出器やチェレンコフ光によるリングイメージを利用した Ring-Imaging-Cherenkov (RICH) 検出器などでは、使用する光検出器の性能がその識別効率に大きく影響する。光検出器の時間分解能が高ければ、TOF 検出器ではより高い運動量の粒子まで識別することが可能になる。また RICH 検出器では、微弱なチェレンコフ光を優れた位置分解能で測定、リングを再構成することが識別能力向上につながる。さらにこれらを組み合わせて識別能力を向上させた Belle II 実験の Time-Of-Propagation (TOP) 検出器 [1] では時間・位置分解能の両方が重要になる。Micro-Channel-Plate (MCP)-PMT このような要求を満たす光検出器である。しかし、MCP-PMT は一般的な PMT に比べて光電面の量子効率 (QE) の低下が早く、寿命が短い。QE が低下すると光子検出数が低下し時間分解能や位置分解能が悪化する。QE は出力電荷に応じて低下するため高頻度衝突実験では長期間使用するためには QE 低下を抑えた寿命改善品が必要となる。

我々は TOP カウンターに使用する MCP-PMT の寿命改善の研究を長年行ってきた。光電面の QE 低下の要因として、MCP 上に吸着した残留ガスが挙げられる。具体的なメカニズムは不明だが、これらが増幅過程の電子と衝突し、イオンや中性ガスとなって MCP を通り抜け光電面へと到達し、劣化させていると考えられている。中性ガスをブロックする構造を内部に設けたり、MCP 表面に残留ガスの吸着を抑える Atomic Layer Deposition (ALD) を施すなどの対策を行い、Belle II 実験の 5 年間の物理データ測定で十分に使用可能な MCP-PMT の開発に成功した。しかし量産品の寿命の個体差は約 50 % ありバラつきが大きいと、今後様々な実験で使用するには安定して長寿命を持つ PMT の生産が必要となる。私は効率的な寿命対策を行うために、残留ガスによる光電面の劣化プロセスの解明を目指した。

中性ガスによる光電面の劣化はは先行研究 [3] で確認されている。本研究では残留ガスの中でもイオンの寄与を中心に測定を行った。イオンは MCP から放出されると光電面に衝突するまで電場によって加速される。この間に得るエネルギーは PMT の印加電圧に依存し、最終的に 1keV 程度になる。また衝突の際、イオンは光電面から二次電子を放出させる。この電子が基となった信号はアフターパルスと呼ばれイオンの質量に依存した時間差を伴ってやってくる。私はこの一連の現象に着目し、アフターパルスの測定から PMT 内部のイオンの種類や量の同定を試みた。またイオンが光電面と衝突する際に持つエネルギーが変化すれば光電面の劣化度合いも変わると考え、PMT への印加電圧を変化させて寿命測定を行った。

本論文の構成は、以下の通りである。

第二章で MCP-PMT の構造や基本原理、寿命特性や既存の対策について述べ、光電面の QE 低下について現在わかっている部分をまとめる。第三章ではイオンによる QE 低下メカニズムを調べるためのアフターパルスの測定について説明する。特に後期量産型で長寿命の ALD 対策品のアフターパルスは今回初めて測定を行う。量産品のタイプごとに得られた結果から寿命対策により PMT 内部のイオンにどのように変化したかを議論する。また、残留ガス対策の Al 薄膜を取り除いた MCP-PMT の測定を行い、膜有り品と比較することで薄膜の効果を調べた。第四章では寿命

測定について詳しく述べる。特に印加電圧と寿命の関係は PMT の寿命の個体差もありこれまで詳しく測定されていなかったが、今回既存のセットアップを改良し、同一の PMT の印加電圧を寿命測定中に変化できるようにした。その結果、個体差に依らない測定が可能になった。さらにアフターパルス測定システムも組み込み、出力電荷量に対してアフターパルスがどのように変化するかを調べた。また Al 薄膜無し MCP-PMT の寿命測定を行い、第三章で得られた薄膜の効果も踏まえ、残留ガスによる光電面の QE 低下の影響を調べる。第五章では、本研究から新たに得られた結果をまとめ、QE 低下のプロセスを解明するための今後の展望について述べる。

第2章 MCP-PMT

粒子が発する光を利用した粒子識別検出器において、Micro-Channel-Plate (MCP)-PMT は高い時間分解能と位置分解能を持つことから高い粒子識別能力を発揮できると期待される光検出器である。本章ではこの MCP-PMT の基本性能について述べた後、本研究の主題である光電面の長寿命化の必要性について述べる。

2.1 MCP-PMT の基本原理

2.1.1 増幅原理

MCP-PMT は通常のダイノードの代わりに増幅部分として複数枚のマイクロチャンネルプレート (MCP) を持つ。図 2.1 は MCP と電子増幅の模式図である。MCP の両端には 1 kV 程度の電圧が印加されている。チャンネル内に侵入した電子は内部の電場に沿って加速され、チャンネル壁に衝突することで二次電子を放出する。これを繰り返すことで電子は増幅され、アノードで検出される。チャンネルは電子が壁に衝突を起こさずに通過することがないように一定のバイアス角を持つように設計されている。このような増幅過程を持つため、MCP-PMT は一般的な PMT に比べ小型化や軽量化することができる。さらに電子増幅が狭い範囲で起こるため増幅電子の広がりが小さく、高い時間分解能や位置分解能を持つ。

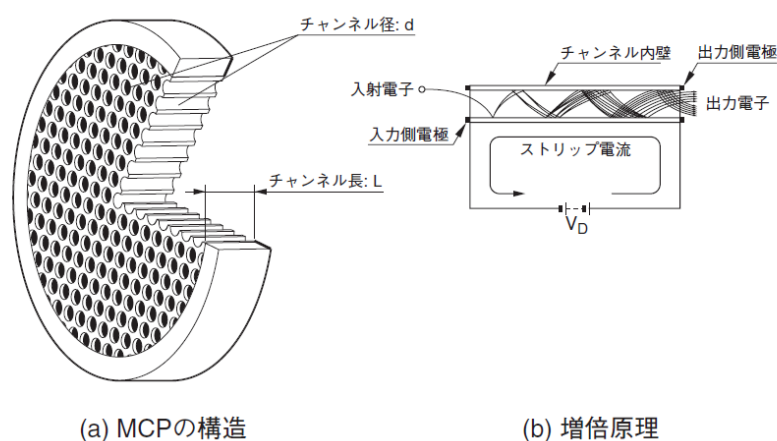


図 2.1: マイクロチャンネルプレートの模式図 [4]

2.1.2 寿命特性

MCP-PMT は上記のような構造から高い時間分解能を持つが、その反面、光電面感度が他の PMT に比べて低下しやすい欠点がある。一般的な PMT の場合、光電面感度の低下はほとんど問題にならず、その寿命特性はダイノードの二次電子放出比の低下などで決まる。しかし、MCP-PMT の寿命特性は積算出力電荷に依存した光電面の量子効率 (QE) の低下によって決まる。そのため、高バックグラウンド環境など出力電荷が大きくなると一般的な PMT に比べて短い期間で QE が低下し、使用が不可能になってしまう。このような寿命特性は MCP-PMT を高ルミノシティ実験などで長期間使う上で重要な性能の一つとなるため、QE が低下しにくい MCP-PMT の開発が盛んに行われている。

2.2 TOP カウンター用 MCP-PMT

Belle II 実験でのチェレンコフ光を用いた粒子識別装置 TOP カウンター用 MCP-PMT[5] は、浜松ホトニクスと共同開発した 1 光子を高い時間分解能と位置分解能で測定可能な光検出器である。その外観は図 2.2 のようなものとなっている。TOP カウンターに並べて敷き詰められるように、外見は角型になっている。内部構造は図 2.3 のようになっている。入射窓は石英、側管はコバル合金でできている。光電面は短波長で高い量子効率を得られるマルチアルカリ (NaKSbCs) 光電面を使用している。増幅部分は 2 枚の厚さ $400\ \mu\text{m}$ のマイクロチャンネルプレート (MCP) が $1\ \text{mm}$ 間隔で設置されており、チャンネルの直径は $10\ \mu\text{m}$ 、バイアス角は 13 度となっている。開口率を高めるためチャンネルは六方最密充填されており、開口率は約 60% となっている。MCP は鉛ガラスで構成されており、表面を水素還元することで二次電子放出層を形成している。また後期の量産型である ALD 型と寿命改善型 ALD では、寿命対策に MCP 表面に原子層堆積 (Atomic Layer Deposition : ALD) を行っている。これらの区別及び残留ガス対策の詳細は後述する。2 段目の MCP 上部にはイオンフィードバックを防止するためアルミ薄膜が設置されている。これらを通り抜けた光電子は 2×10^6 個程度まで増幅され、 4×4 に分割されたアノードで収集される。MCP-PMT の構造及び性能をまとめたものを表 3.3 に示す。

2.2.1 基本特性

量子効率

光電面に入射する光子に対して放出される光電子の比が量子効率 (quantum efficiency : QE) である。光電面は半導体の一種であり図 2.4 のようなバンドモデルとして考えられる。仕事関数以上のエネルギーを持つ入射光子により価電子帯の電子は伝導帯へ励起され、そこから結晶表面へと向かう。そして最後に真空と伝導帯のポテンシャル障壁を超えることで、電子は真空中へ放出される。光電面の QE は材質の仕事関数だけではなく、内部の結晶構造や表面の状態によっても決まる。これは励起電子の内部の運動が結晶の状態によって決まるためである。また電子が励起される確率は波長依存性があるため、QE は波長依存性をもつ。

測定した MCP-PMT の QE の波長依存性を図 2.5 に示す。チェレンコフ光の検出のため低波長側で高い量 QE を示していることが分かる。

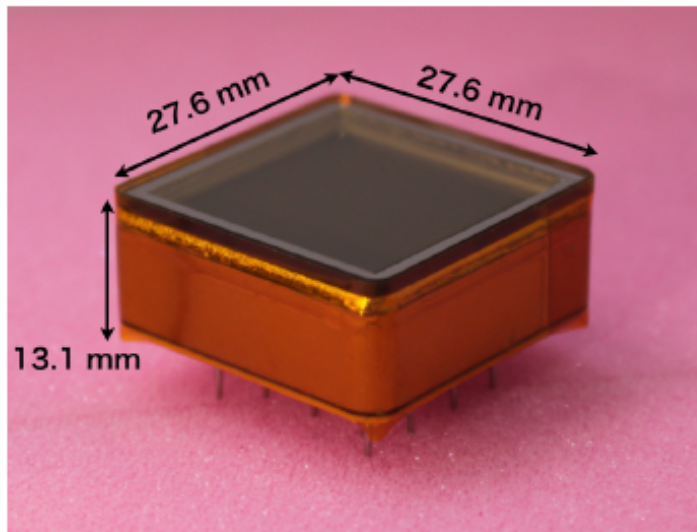


図 2.2: TOP カウンター用 MCP-PMT の外観

型名	R10754-07-M16(N)	
製造	浜松ホトニクス	
外装	寸法	27.6 × 27.6 × 13.1 mm
	入射窓材質	石英ガラス
	入射窓厚さ	1.5 mm
	側管材質	コバール合金
光電面	材質	NaKSbCs (マルチアルカリ金属)
	感度波長	160 - 650 nm
	ピーク波長	360 nm
MCP	材質	鉛ガラス (初期量産型) 鉛ガラス + ALD コーティング (ALD 型、寿命改善型 ALD)
	厚さ	400 μm
	チャンネル径	10 μm
	バイアス角	13 度
	開口率	60 %
	段数	2 段
基本特性	1 光子時間分解能	約 30 ps
	平均量子効率	28% (ピーク波長)
	増幅率	2×10^6
	平均標準印加電圧 (増幅率 : 2.0×10^6)	-3400 V (初期量産型) -2600 V (ALD 型) -2300 V (寿命改善型 ALD)

表 2.1: MCP-PMT の構造及び性能

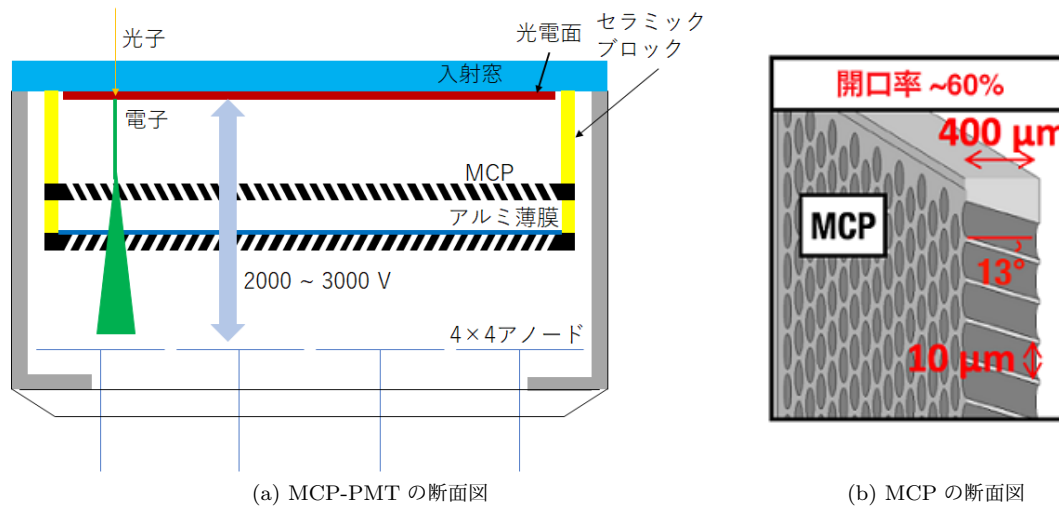


図 2.3: MCP-PMT の内部構造

(1) アルカリ光電面

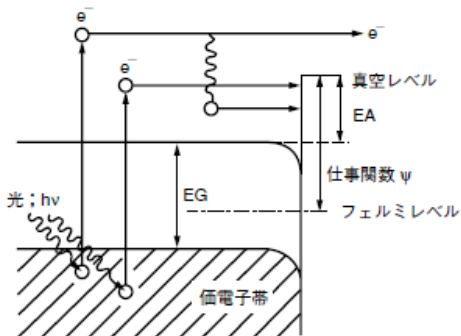


図 2.4: アルカリ光電面での光電効果のバンドモデル [4]

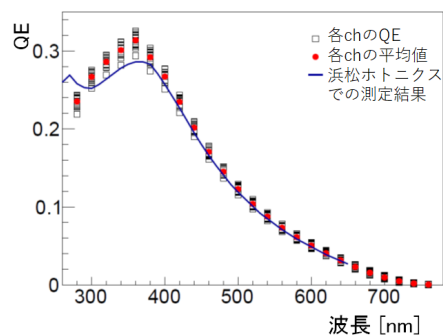


図 2.5: QE の波長依存性

時間分解能

チャンネル内で増幅される電子の増幅時間は $\sim 400\text{ps}$ と非常に短く、また走行中の電子のバラつきも少ないため、MCP-PMT は非常に短い transit time spread (TTS) を持つ。図 2.6 は、測定した MCP-PMT の TDC 分布である。2重ガウシアンによりフィッティングを行い、第一ガウシアンの σ を TTS と定義している。図 2.6 中では p3 が測定系も含んだ TTS に対応する。

増幅率

MCP-PMT の増幅率は印加電圧に依存する。これは、MCP の二次電子放出比が電子のエネルギーに依存するためである。そのため、浜松ホトニクスでの測定で増幅率が 2×10^6 になる電圧を標準電圧と定めている。それをもとに名古屋大学で印加電圧を変化させる測定を行い、増幅率の印加電圧依存性を求めている。また ALD コーティングを施した MCP では二次電子放出比が鉛ガラ

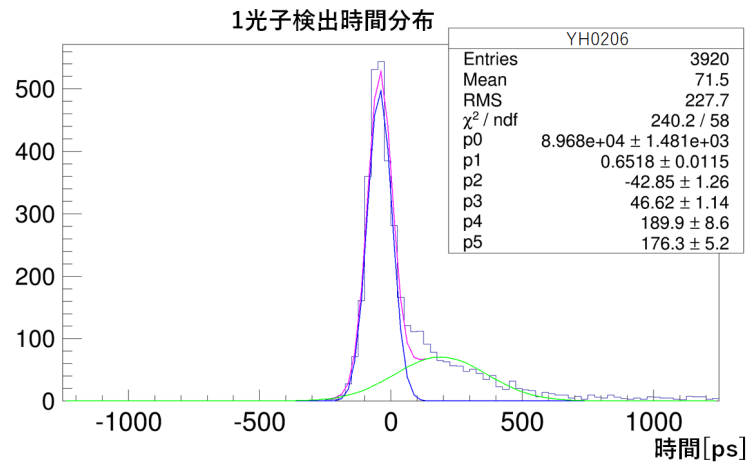


図 2.6: MCP-PMT の TDC 分布

スより大きいため、標準電圧は初期の量産型に比べ低下している。図 2.7 は測定した MCP-PMT の増幅率の印加電圧依存性である。

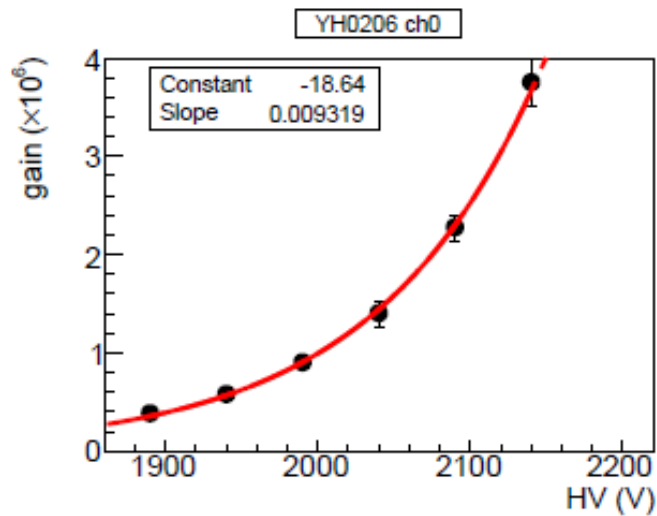


図 2.7: MCP-PMT の増幅率の印加電圧依存性

光電面の QE 低下

先行研究から QE 低下は積算出力電荷に依存することが分かっている。図 2.8 は増幅率を一定にしたときの積算出力電荷に対する QE の変化である。積算出力電荷の増加により徐々に量子効率が低下していることが分かる。

我々は波長 400nm での QE が初期の 80%に低下した際の積算出力電荷を寿命と定義している。出力電荷 Q に対する相対 QE の低下具合は寿命を τ とすると、次のような二次曲線で表せること

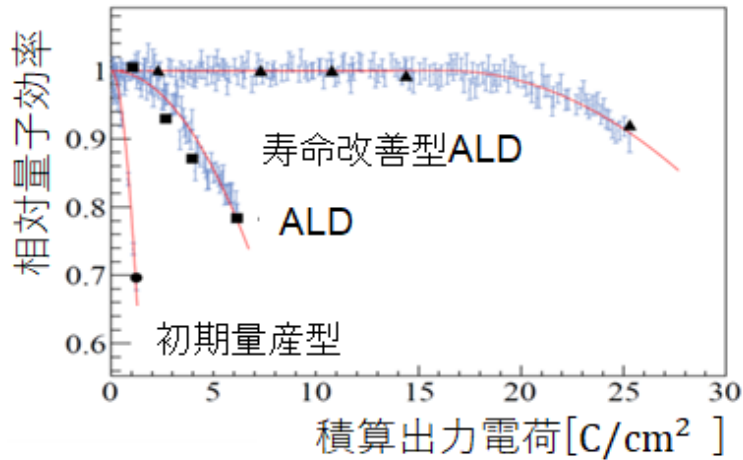


図 2.8: 波長 400nm での MCP-PMT の光電面 QE 低下の様子 (青) と低下曲線 (赤)

が分かっている。

$$\frac{QE(Q)}{QE(0)} = 1 - 0.2 \left(\frac{Q}{\tau} \right)^2 \quad (2.1)$$

QE(0) は初期の QE であり、QE(Q) は電荷を $Q[\text{C}/\text{cm}^2]$ だけ出力した際の QE である。この関係式から、実際に QE を 80% まで低下させずとも落ち初めを測定すれば寿命 τ を測定できる。図 2.8 中の曲線 (赤) は得られたデータ (青) を式 2.1 でフィットして得られた QE 低下曲線である。

光電面の QE 低下の原因として、壁面や MCP 表面に吸着した残留ガスが考えられている。特に MCP は微細構造のため表面積が大きく、相対的に残留ガスの影響が大きい。残留ガスは PMT の製作過程や保存の際に混入する。これらは増幅過程の電子と衝突し、中性ガスやイオンとなって PMT 内部に放出される。光電面へと到達したイオンや中性ガスは仕事関数の増加や結晶構造の変質などを引き起こし、QE を低下させると考えられる。放出されるガスの量が増幅電子に依存するため、光電面の QE は積算出力電荷量が増えると低下する。図 2.9 に波長別の光電面 QE の低下を示す。光電面の QE は長波長側から低下していくことが分かる。

2.3 これまでの寿命対策

我々は寿命低下の原因として PMT 内部の残留ガスを考え、それらの対策を行い寿命を向上させてきた。行った対策は以下のとおりである。

2.3.1 イオン対策

イオン対策として MCP-PMT は内部に Al 薄膜を持つ。チャンネル内で発生したイオンは内部の電場に沿ってチャンネルを通り抜けて光電面へ向かうため、MCP 上部に薄膜を設置することでそれらを抑制することができる。薄膜は通り抜ける電子数も減少させるので、収集効率の維持のため薄膜は後段 MCP 上部に設置されている。表 2.2 は Al 薄膜 1nm あたりのエネルギー損失をアメ

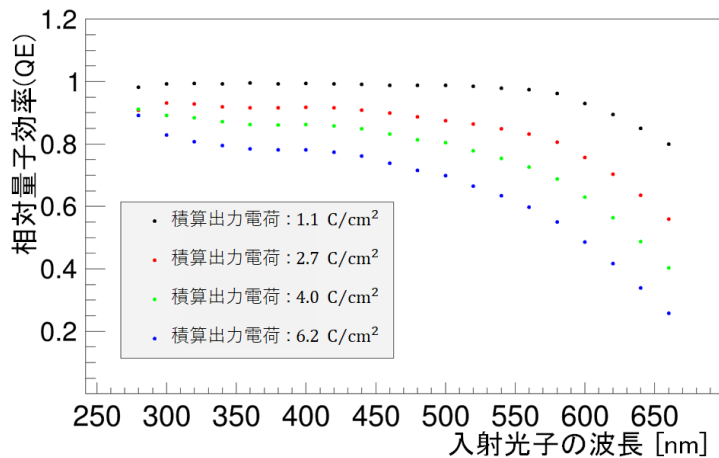


図 2.9: 波長別の光電面の QE 低下

リカ国立標準技術研究所の ESTAR、PSTAR[2] で調べた結果である。1keV の電子と水素イオンが同様な値を示すことから、電場によって十分なエネルギーを得た軽いイオンは前段からだけでなく、後段から薄膜を透過してやってきていることがわかる。しかし、電場からエネルギーを得られない中性ガスや重いイオンなどは Al 膜によってブロックされていると考えられる。

電子	0.020 keV
水素イオン	0.028 keV

表 2.2: 1keV の粒子に対する Al 薄膜 1nm あたりのエネルギー阻止能

2.3.2 中性ガス対策

中性ガス対策として MCP-PMT は MCP と側管の間にセラミックブロックを持つ。中性ガスはイオンと違い内部で散乱を繰り返しながら動き回るため、後段 MCP で発生したものでも薄膜を迂回して光電面へ達することがある。図 2.10 はそのような中性ガスの飛跡である。オレンジの矢印が中性ガスの移動を表している。後段の MCP では増幅電子数が前段に比べて増えるため、より多くの中性ガスが発生する。MCP を通り抜けるものは Al 薄膜でブロックが可能となるが、MCP 間や側管との隙間を通り抜けた中性ガスは光電面へ到達して周辺部の QE を低下させる。これを防止するためにセラミックブロックを導入した。図 2.11 はセラミックブロックの有無での光電面の QE 低下分布の比較である。セラミックブロックの無い PMT は側管の間から中性ガスが入り込むため周辺部の QE が低下していることが分かる。セラミックブロックを設置すると、隙間から出る中性ガスをブロックできたため、周辺部の QE 低下は見られなくなっている。このように中性ガスも光電面の劣化に対して問題になりうるが、それらはセラミックブロックの設置により大きく改善された [3]。

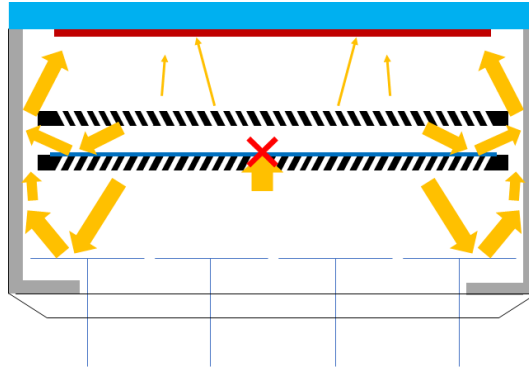


図 2.10: MCP-PMT 中の中性ガスの飛跡

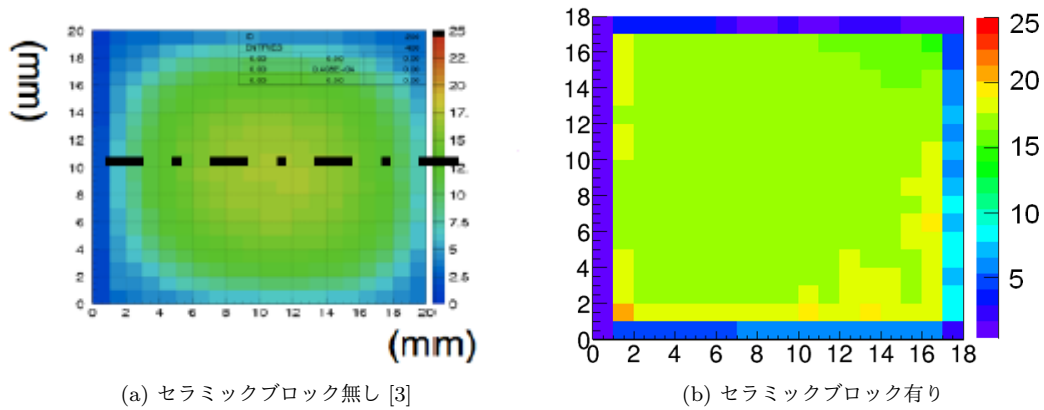


図 2.11: セラミックブロックの有無による光電面の QE 低下分布

2.3.3 ALD コーティング

ALD コーティングは成膜技術の一種で基板上に原子を層状に積み重ねて成膜する。そのため、製造過程で MCP 表面に残留したガスは膜の下に閉じ込められるほか、MCP 表面は原子が規則的に配置された滑らかな状態となるため、新たなガスの吸着も防げる。また二次電子放出層が通常の鉛ガラスと異なるため、ALD コーティングを行うと約 30%ほど印加電圧が減少させることができる。

2.3.4 MCP-PMT のタイプ

施した寿命対策の観点から、量産品として 3 つのタイプの MCP-PMT が存在する。イオン対策と中性ガス対策を行った初期量産型、それらに加え MCP 表面に ALD コーティングを行った ALD 型、さらに残留ガス低下対策をより強化した寿命改善型 ALD[6] の 3 種である。対策を段階的に施した理由は量産途中に Belle II 実験環境下でのビームバックグラウンドの理解が進み、積算出力電荷の予想量が増加したためである。現在の積算出力電荷は増幅率 0.5×10^6 で 5 年間の物理ラン

使用すると約 8 C/cm^2 と予想されている。それぞれの PMT でサンプリング測定した平均寿命は表 2.3 のとおりであり、残留ガス低減対策を強化したことで寿命向上が達成できたことが分かる。

MCP-PMT のタイプ	寿命
初期量産型	平均 1.1 C/cm^2
ALD 型	平均 10.4 C/cm^2
寿命改善型 ALD	13.6 C/cm^2 以上

表 2.3: サンプリング測定での量産品のタイプごとの平均光電面寿命

また Al 薄膜の有無が寿命にどのような影響を与えているかを調べるために、これを取り除いた膜無し寿命改善型 ALD を新たに試作した。基本特性は従来の寿命改善型 ALD と同様の性能を持つが、膜無し PMT では増幅電子が薄膜により減少することがなくなったため、膜有り品に比べ 80% ほどの印加電圧である 1800V 程度で 2×10^6 の増幅率が得られる。

2.4 研究目的

今後様々な素粒子実験で MCP-PMT を使用するには、QE 低下のプロセスを理解し安定した長寿命品を生産することが不可欠である。先行研究での寿命改善の結果から、光電面の QE 低下には PMT の残留ガスの低減や印加電圧の低下が寄与していると考えられる。私はこれらの検証のため、残留ガスの測定と印加電圧を変化させた光電面寿命測定を行った。残留ガスを調べる指標として私はアフターパルスに着目し、その測定システムを構築した。異なるタイプの寿命対策品での測定から寿命と残留ガスの相関を調べた。さらに、光電面寿命測定セットアップを改良し、印加電圧を低下させ増幅率を下げた状態でも寿命測定を行えるようにした。またアフターパルスを QE 低下とともにモニターするために構築したシステムをセットアップに組み込んだ。さらに膜無し品のアフターパルス測定および寿命測定から、Al 膜で阻止されている残留ガスが寿命にどのように寄与するかを議論した。本研究では、これらの測定から光電面の QE 低下メカニズムの解明を目指した。

第3章 アフターパルス測定

本章では MCP-PMT におけるイオンフィードバックとそれによるアフターパルスの発生原理について説明した後、実際の MCP-PMT でどのように測定するかについて述べる。さらに、アフターパルスの時間分布や電荷量の測定から寿命対策の結果で内部の残留ガスがどのように変化し、寿命改善とどのような関連があるかを議論する。

3.1 アフターパルスの発生原理

3.1.1 イオンフィードバック

イオンフィードバックは高真空の PMT 内部で浮遊するガスやダイノード上に吸着するガスが増幅電子と衝突によってイオン化されることで生じる。特に陽イオンの場合は電場に沿って加速しながら光電面や前段のダイノードに向かう。イオンの量は増幅電子数に依存するため、イオンフィードバックはより後段のダイノードで発生しやすい。MCP-PMT は一般的なダイノード構造と異なるため、MCP 内部で発生したイオンも光電面へたどり着くことが可能になる。図 3.1 は MCP-PMT とラインフォーカス型 PMT のダイノードでのイオンの飛跡の違いである。ラインフォーカス型などのダイノードでは電場が互い違いになっているためイオンは光電面へ向かうことなく前段のダイノードに衝突する。そのため、このようなダイノード構造では初段で発生するイオンのみが光電面に到達できる。しかし、初段では増幅電子数も少ないため、その影響は小さくなる。一方 MCP-PMT では電場の向きは光電面-MCP 間で光電面と垂直方向であり、MCP 内部ではバイアス角と平行なためイオンは MCP をすり抜け光電面へと到達できる。そのため、MCP 内部から多くのイオンがフィードバックして光電面へ到達できる。また MCP は表面積が大きくなるため吸着する残留ガスの量も多い。

3.1.2 アフターパルス

光電面やダイノードに到達したイオンは電場から得たエネルギーとともに衝突し、二次電子を放出する。この二次電子が再び増幅されることにより観測される遅延した信号がアフターパルスと呼ばれる。図 3.2 はオシロスコープで見たアフターパルスの波形である。初めの信号がレーザーによるもので、その後遅れてやってくる信号がイオンフィードバックにより発生したアフターパルスである。本論文ではアフターパルスと区別するため初めの信号を本信号と呼ぶことにする。

図 3.2 を見ると、アフターパルスは一定の時間差に集中していることが分かる。これはアフターパルスの時間差がイオンの質量に依存するため、内部に残っている残留ガスによって時間分布に違いができるためである。よって、アフターパルスを測定することで残留ガスを同定することができる。MCP-PMT の場合フィードバックしたイオンは MCP のチャンネルをすり抜けるため、アフターパルスは光電面とイオンの衝突に由来すると考えられる。図 3.3 のように MCP-PMT は分圧されている。イオンが MCP-光電面間 (1) と MCP 内部 (2) のそれぞれで作られる電場によって加

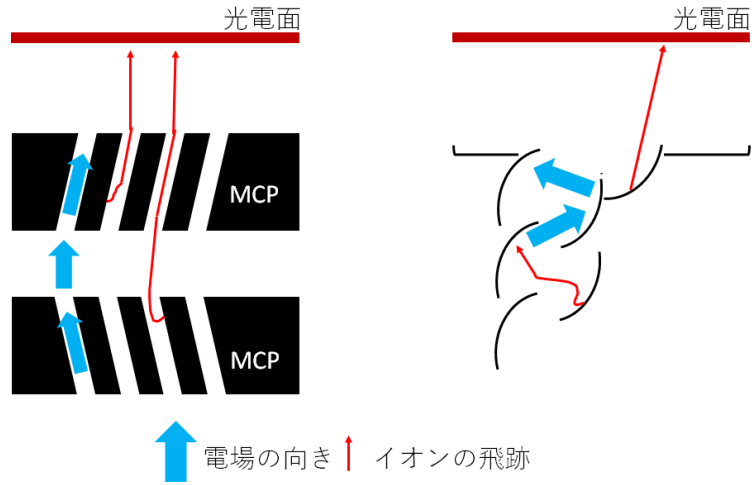


図 3.1: MCP とラインフォーカス型のダイノードでのイオンの飛跡の違い

速されると考えられるので、本信号と前段から来るアフターパルスの時間差とイオンの質量の関係は次のような計算から得られる。

領域 (2) で発生したイオンが初速 0 で PMT 内部に放出されたとし、その放出点の MCP 表面からの深さを x とすると、イオンが MCP 表面に達した際の速さ v_2 及びかかる時間 t_2 は電場中の荷電粒子の運動方程式より

$$ma_2 = qE_2 = \frac{qV_2}{l_2} \quad (3.1)$$

$$l_2 = \frac{1}{2}a_2t_2^2 \quad (3.2)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2l_2}{a_2}} = \sqrt{\frac{2l_2^2m}{qV_2}} \quad (3.3)$$

$$v_2 = a_2t_2 = \sqrt{\frac{2qV_2}{m}} \quad (3.4)$$

となる。なお、 m 、 q 、 a_2 はイオンの質量、電荷及び加速度、 E_2 は (2) での電場の強さである。 l_2 は MCP の厚さであり、

$$l_2 = 0.4 \times 10^{-3} \quad [\text{m}] \quad (3.5)$$

である。 V_2 は MCP 内部で電場が一様と仮定すると、PMT 全体にかける印加電圧を V として x と l_2 を用いて次のように書ける。

$$V_2 = \frac{2.5}{9.5}V \times \frac{x}{l_2} \quad [\text{V}] \quad (3.6)$$

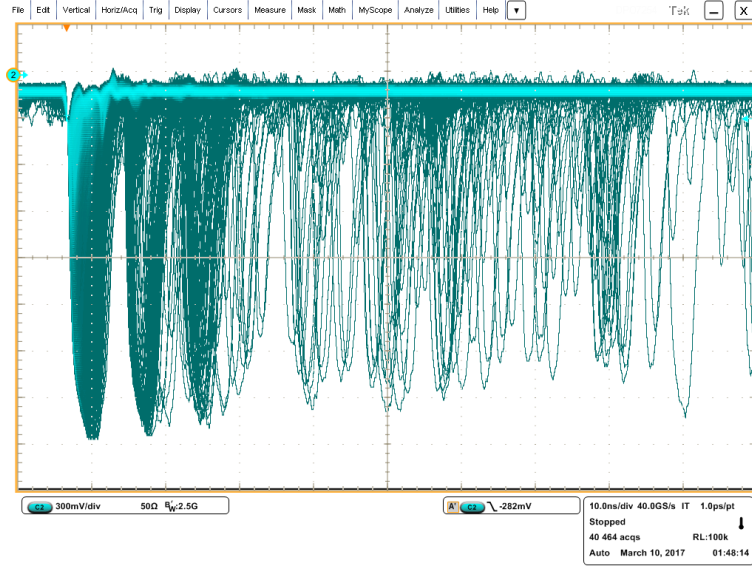


図 3.2: オシロスコープで見たレーザーによる MCP-PMT の信号とアフターパルス

領域 (1) に入ったイオンは初速は v_2 、加速度 a_1 で電場 E_1 内を同様に運動するので

$$ma_1 = qE_1 = \frac{qV_1}{l_1} \quad (3.7)$$

$$l_1 = \frac{1}{2}a_1t_1^2 + v_2t_1 \quad (3.8)$$

$$t_1 = -\frac{v_2}{a_1} + \sqrt{\frac{v_2^2}{a_1^2} + \frac{2l_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{2l_1^2m}{qV_1}} \left(-\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} + \sqrt{\frac{V_2}{V_1} + 1} \right) \quad (3.9)$$

$$v_1 = a_1t_1 + v_2 = \sqrt{\frac{2q}{m}}(V_1 + V_2) \quad (3.10)$$

V_1 と l_1 は MCP 表面と光電面の間の印加電圧および距離であり、

$$V_1 = \frac{0.5}{9.5}V \quad [\text{V}] \quad (3.11)$$

$$l_1 = 2.0 \times 10^{-3} \quad [\text{m}] \quad (3.12)$$

となる。計算結果から、イオンフィードバックの時間差 t_0 及び電場から得るエネルギー E は

$$\begin{aligned} t_0 &= t_1 + t_2 = \sqrt{\frac{2l_2^2m}{qV_2}} + \sqrt{\frac{2l_1^2m}{qV_1}} \left(-\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} + \sqrt{\frac{V_2}{V_1} + 1} \right) \\ &= \sqrt{\frac{28l_2^3m}{5qVx}} + \sqrt{\frac{28l_1^2m}{qVl_2}} \left(-\sqrt{5x} + \sqrt{5x + l_2} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}mv_1^2 = q(V_1 + V_2) \\ &= \frac{qV}{19l_2}(l_2 + 5x) \end{aligned} \quad (3.14)$$

式 3.14 から PMT への印加電圧を考慮すれば、アフターパルスの測定からフィードバックしたイオンの種類が判別できることがわかる。よって、MCP-PMT の光電面劣化に対してアフターパ

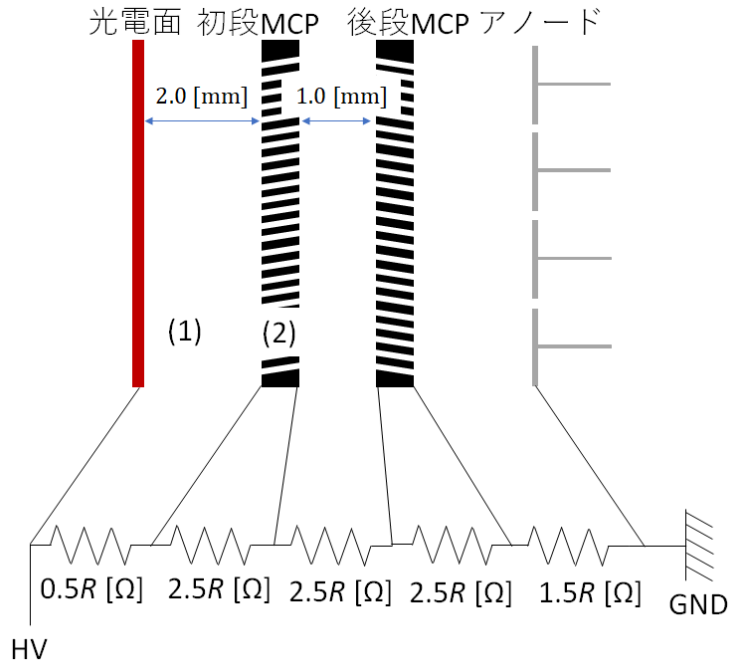


図 3.3: MCP-PMT の抵抗チェーンによる分圧回路

ルスを測定することでどのようなイオンが到達をしているかを調べることができる。また、イオンが持つエネルギーは質量によらず、MCP-PMT の印加電圧に依存することから、光電面の反応が運動エネルギーによるならばより印加電圧の大きな PMT ほど影響を強く受けると考えられる。

膜無し PMT でイオンが後段から発生する場合も同様に計算すると、時間差 t_0^{non} とエネルギー E^{non} は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 t_0^{non} = & \sqrt{\frac{28l_2^3 m}{5qVx}} + \sqrt{\frac{28l_{15}^2 m}{5qVl_2}} \left(-\sqrt{5x} + \sqrt{5x + l_2} \right) \\
 & + \sqrt{\frac{28l_3^2 m}{5qVl_2}} \left(-\sqrt{5x + l_2} + \sqrt{5x + 2l_2} \right) \\
 & + \sqrt{\frac{28l_1^2 m}{qVl_2}} \left(-\sqrt{5x + 2l_2} + \sqrt{5x + 3l_2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$E^{non} = \frac{qV}{19l_2} (11l_2 + 5x) \tag{3.16}$$

ここで、 l_3 は前段 MCP と後段 MCP の間の距離であり、

$$l_3 = 1.0 \times 10^{-3} \text{ [m]} \tag{3.17}$$

である。表 3.1 は $V = 2000[\text{V}]$ 、 $q = +1$ 、 $m = 1[\text{u}]$ 、 $x = 0.4 \times 10^{-3}[\text{m}]$ のときの前段 MCP と後段 MCP での本信号との時間差と光電面衝突時のエネルギーの計算結果である。

この結果から膜無し PMT の場合、後段 MCP からくるイオンの時間差は前段とほぼ同程度であること、後段からくるイオンがフィードバックで得るエネルギーは前段に比べて大きいことがわかる。

	時間差	エネルギー
前段 MCP	6.96[ns]	947[eV]
後段 MCP	7.76[ns]	2761[eV]

表 3.1: $V = 2000[V]$ 、 $q = +1$ 、 $m = 1[u]$ のときの時間差とエネルギーの計算結果

3.2 測定方法

アフターパルスの時間分布の測定は 2012 年に一度行われている [7]。セットアップ及びその結果を図 3.4 に示した。測定した PMT は初期量産型である。表 3.2 が使用した PMT の ID 及び印加電圧である。ディスクリミネータ (1) から出る MCP-PMT からの本信号を VETO 信号とすることで、アフターパルスのタイミングのみをディスクリミネータ (2) で出力させ、CAMAC TDC で読み取る。この結果から、個体差はあるもののアフターパルスの発生頻度は本信号に対して 1 % 程度であること、時間差の分布は 10 ns 付近にピークを持つことが分かった。

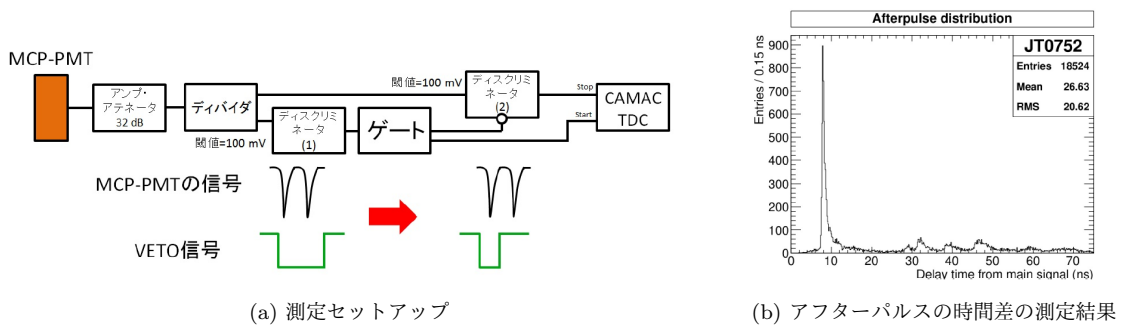


図 3.4: 2012 年のアフターパルス測定セットアップおよびその結果 [7]

ID	印加電圧	アフターパルス頻度
JT0710	3500V	$2.05 \pm 0.41\%$
JT0750	3500V	$0.75 \pm 0.14\%$
JT0751	3500V	$0.76 \pm 0.15\%$
JT0752	3500V	$0.91 \pm 0.18\%$
JT0695	3030V	$0.13 \pm 0.02\%$
JT0898	3200V	$0.22 \pm 0.04\%$
JT0901	3220V	$1.06 \pm 0.21\%$
JT0936	3320V	$0.44 \pm 0.09\%$

表 3.2: 2012 年のアフターパルス測定結果 [7]

この測定では同時に 1 本の PMT のみしか測定できないという問題があった。そこで私は VETO 信号を PMT と独立なものに変更することで、複数の PMT のアフターパルスを同時に測定できるシステムを構築した。図 3.5 はそのセットアップである。レーザーのタイミングに対する MCP-PMT

の本信号の到来時間は各 MCP-PMT でほとんど同じなので、それを考慮に入れて上でレーザーのクロック信号を遅延させることで PMT から本信号を VETO し、TDC2 でアフターパルスのタイミングを測定する。TDC1 で本信号を測定する。ランダムヒットを避けるため、解析の条件として PMT から本信号が TDC1 に入ったという条件を課している。時間差は 2 つの TDC の差から計算するため PMT 内部の電子増幅時間などに依存せず測定が可能となる。2 つの TDC の補正には VETO を入れない状態の測定から行った。VETO を入れない場合は 2 つの TDC はどちらも本信号を測定するので、そのタイミングの差が TDC 由来の時間差となる。これを用いて補正を行うことで、アフターパルスの時間差を 25 ps の精度で測定することができる。同時に ADC を用いてアフターパルスと本信号の両方の電荷量の測定を行った。

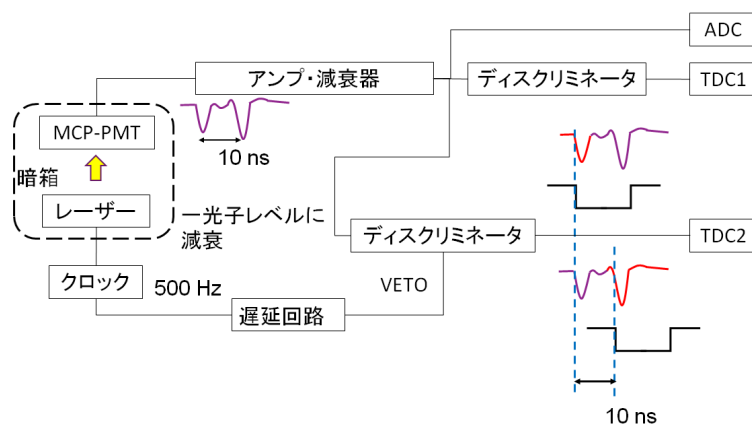


図 3.5: MCP-PMT のアフターパルス同時測定セットアップ

測定した PMT は初期量産型 9 本、ALD 型 5 本、寿命改善型 ALD 5 本、膜無し寿命改善型 ALD 2 本であり、一部に QE が低下した寿命測定サンプル品を用いている。ALD コーティングした MCP-PMT のアフターパルス測定は本測定が初めてとなる。表 3.3 は、測定したそれぞれの PMT の ID 及び測定時の積算出力電荷、相対 QE、寿命、印加電圧である。

3.3 測定結果

3.3.1 膜有り MCP-PMT

時間分布

この測定から得られた膜有り PMT のアフターパルスの分布の一例を図 3.6a に示す。縦軸はアフターパルスイベント数、横軸は本信号からの時間差である。なお、式 3.14 から分かる通り、時間差は PMT の印加電圧にも依存している。各 PMT の時間差を印加電圧に依らず比較するため、測定した値を 3000 V で規格化している。規格化の計算式は下のとおりである。規格化すると印加電圧の異なる PMT でもアフターパルスのピークの位置がそろふことから式 3.14 のモデルが正しいことが確認できた。測定したすべての MCP-PMT の結果は付録に載せる。

$$\text{規格化した時間差 ns} = \text{測定した時間差 ns} \times \sqrt{\frac{\text{MCP-PMT の印加電圧 V}}{3000\text{V}}} \quad (3.18)$$

ID 及びタイプ	積算出力電荷	相対 QE[%]	寿命	標準印加電圧
JT0685(初期量産型)	0 C/cm ²	100	未測定	3260 V
JT0948(初期量産型)	0 C/cm ²	100	未測定	3420 V
JT0940(初期量産型)	0.4 C/cm ²	73	0.3 C/cm ²	3540 V
JT0901(初期量産型)	0.7 C/cm ²	52	0.4 C/cm ²	3220 V
XM0205(初期量産型)	1.6 C/cm ²	18	0.5 C/cm ²	3320 V
JT0936(初期量産型)	1.4 C/cm ²	69	1.0 C/cm ²	3320 V
JT0898(初期量産型)	1.7 C/cm ²	74	1.4 C/cm ²	3030 V
JT0695(初期量産型)	1.7 C/cm ²	72	1.5 C/cm ²	3540 V
XM0376(初期量産型)	2.1 C/cm ²	70	1.8 C/cm ²	3530 V
KT0124(ALD 型)	0 C/cm ²	100	未測定	2350 V
KT0139(ALD 型)	3.1 C/cm ²	72	2.6 C/cm ²	2960 V
KT0033(ALD 型)	6.0 C/cm ²	73	5.2 C/cm ²	2990 V
KT0074(ALD 型)	6.2 C/cm ²	78	5.9 C/cm ²	3000 V
KT0028(ALD 型)	18.0 C/cm ²	76	16.4 C/cm ²	2460 V
YH0208(寿命改善型 ALD)	7.7 C/cm ²	98	16.2 C/cm ²	2150 V
KT0488(寿命改善型 ALD)	5.5 C/cm ²	98	18.8 C/cm ²	2110 V
YH0206(寿命改善型 ALD)	12.0 C/cm ²	96	19.6 C/cm ²	2090 V
YH0205(寿命改善型 ALD)	25.3 C/cm ²	92	29.3 C/cm ²	2300 V
YH0203(寿命改善型 ALD)	31.9 C/cm ²	84	33.2 C/cm ²	2310 V
KT0642(A1 膜無し寿命改善型 ALD)	0 C/cm ²	100	未測定	1880 V
KT0647(A1 膜無し寿命改善型 ALD)	0 C/cm ²	100	未測定	1780 V

表 3.3: アフターパルス測定を行った PMT の詳細 (数値は測定時のもの)

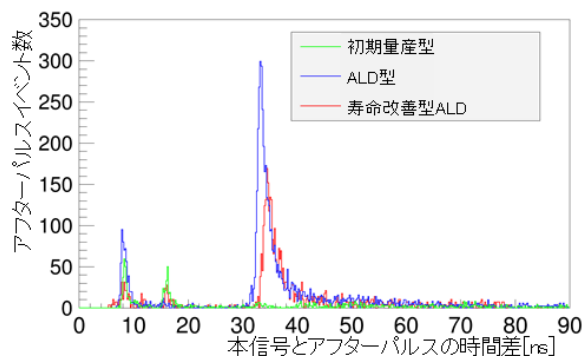
初期量産型は前回の測定結果と同様に 9 ns 付近にピークを持つとともに、15 ns 付近にもピークが現れた。さらに、ALD コーティングした 2 種の PMT の時間分布には初期量産型では何もなかった 35 ns にピークが現れた。このピークは寿命改善型も含め ALD コーティングした全ての PMT で確認され、初期量産型では全く確認されなかったことから、ALD コーティング品特有のものと考えられる。図 3.6b は式 3.14 の計算に基づいたイオンの質量と時間差の関係である。ここからイオンの質量数及び候補は表 3.4 のようになる。製造過程などを考慮すると、35 ns の時間差を

時間差	質量数	候補
9 ns	1 - 2	H ⁺
15 ns	3 - 5	He ⁺
35 ns	18 - 28	H ₂ O ⁺ 、CO ⁺ 、CO ₂ ⁺

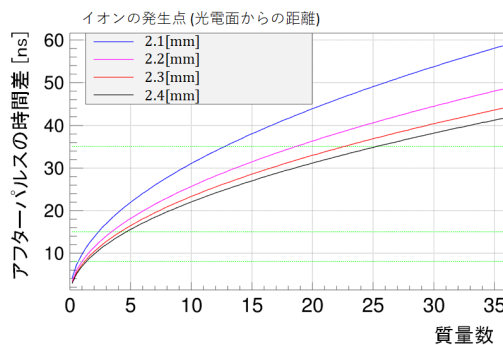
表 3.4: 時間差に対応するイオンの質量数と候補

持ってやってくるイオンは H₂O⁺ であると考えられる (後述)。

ピーク付近のアフターパルス数から、候補のイオンの量が計算できる。アフターパルス頻度は次



(a) 本信号とアフターパルスの時間差の分布



(b) 式 3.14 に基づいたイオンの発生点別の質量数とアフターパルスの時間差の関係。緑線は時間差が 8、15、35ns であることを表している。

図 3.6: アフターパルス測定結果 (左) と時間差の計算結果 (右)

イオンの候補	計測範囲
H ⁺	0 – 12ns
He ⁺	12 – 20ns
H ₂ O ⁺ 、CO ⁺ 、CO ₂ ⁺	20 – 50ns

表 3.5: イベント数の計測範囲

のように計算した。頻度は MCP-PMT の増幅率によって変化するため、規格化を行っている。

$$\text{アフターパルスの頻度} = \frac{\text{アフターパルスの数}}{\text{本信号の数}} \times \frac{2.0 \times 10^6}{\text{MCP-PMT の増幅率}} \times 100 \quad (3.19)$$

各イオンの頻度の計算はピーク周りのイベント数をもとに計算する。イベント数の計測範囲は表 3.5 である。

図 3.7 は 0~90ns の範囲での各タイプごとのイオンの頻度の平均値である。アフターパルス頻度の合計は、初期量産型に比べ、35 ns のピークが新たに表れた ALD 型と寿命改善型 ALD で増加していることが分かる。しかし、9 ns や 15 ns のピーク範囲の頻度は、ALD コーティングを行うことで減少していることが分かる。

イオンの起源

水素イオン

MCP-PMT の製造過程において鉛ガラス製の MCP に対して水素雰囲気中での還元処理を行う。これは絶縁体である鉛ガラスの表面に導電性を持たせ二次電子放出層を得るために行う。この過程はすべてのタイプの MCP-PMT で行う。MCP に残留したこの水素が増幅電子と衝突し、イオン化していると考えられる。ALD コーティングはこの還元処理の後に行うため、ALD 型の 2 種は残留水素がコーティング層の下に閉じ込められるため、量が減少したと考えられる。寿命改善型 ALD は ALD 型よりも残留ガスの低減対策を強化しているため、さらに量が少なくなったと考えられる。

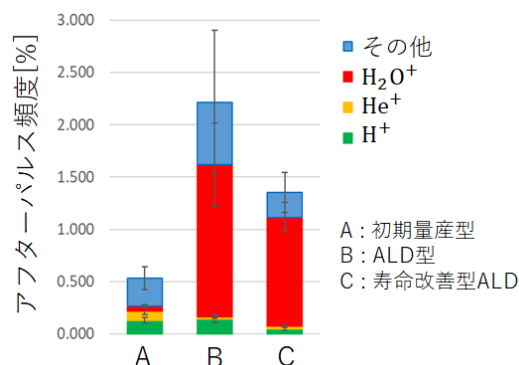


図 3.7: アフターパルス測定から求めたタイプごとのイオンの頻度の平均値。A は初期量産型、B は ALD 型、C は寿命改善型 ALD を表す

ヘリウムイオン

MCP-PMT の光学窓に用いている石英ガラスはヘリウムを透過する性質がある [8] ため、ヘリウムの場合、製造過程での混入か保管中に石英ガラスを透過したのかは判別できない。

水イオン

35 ns のピークは ALD コーティング品特有のものであるから、ALD 製造工程由来であると考えられる。一般的な ALD の成膜過程は次のようなものである。自己と結合しない前駆体 A と前駆体 A と結合する前駆体 B を用いて、

1. 基板表面に前駆体 A を投入し、表面の原子と結合させる。
2. 未反応の前駆体 A を排気する。
3. 前駆体 B を投入し、前駆体 A と結合させる。
4. 未反応の前駆体 B を排気する。
5. 前駆体 A を投入し、表面の前駆体 B と結合させる。
6. 2 から 5 の工程を繰り返すことで、一層ずつ原子層を堆積する。

前駆体 A に Al₂O₃ などの酸化物を用いると、一般に前駆体 B は H₂O が使われる [9]。MCP-PMT の具体的な材料は企業秘密となっているが、これらの材料が使われている可能性は高いため、候補の中でもこのピークはこの工程で残留した H₂O によるものと考えられる。

出力電荷比分布

膜有り MCP-PMT のアフターパルスと本信号の出力電荷比分布の一例を図 3.8 に示す。縦軸はアフターパルスイベント数、横軸は典型的な MCP-PMT の出力電荷に対するアフターパルスと本信号の出力電荷比である。これは測定した出力電荷をもとに次のように計算される。

$$\text{出力電荷比} = \frac{\text{アフターパルスと本信号の出力電荷}}{\text{典型的な MCP-PMT の出力電荷}} \quad (3.20)$$

測定したすべての MCP-PMT の結果は時間分布と同様に付録に載せる。

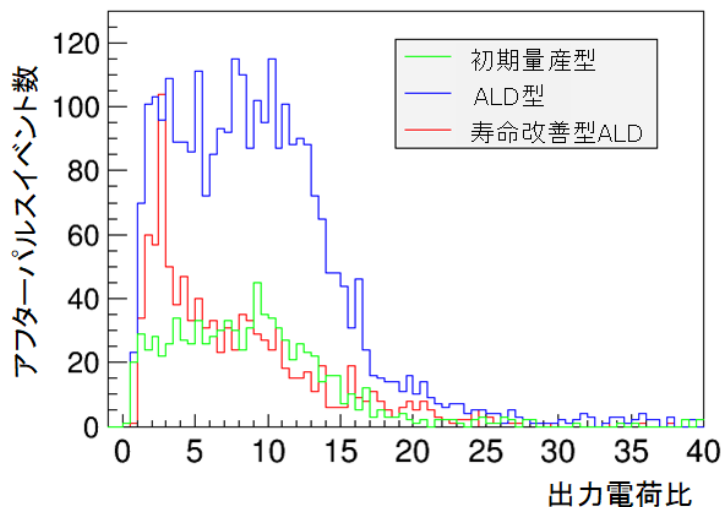


図 3.8: アフターパルスと本信号の出力電荷比

本信号のみの場合は出力電荷比は 1 に相当する。図 3.8 からアフターパルスと本信号の出力電荷量は、本信号のみに比べて 2 倍以上高いことから、アフターパルスの出力電荷は本信号に比べて大きいことが分かる。これはイオンが光子に比べて高いエネルギーを持って光電面に衝突しているため、放出される二次電子が多いことを表している。

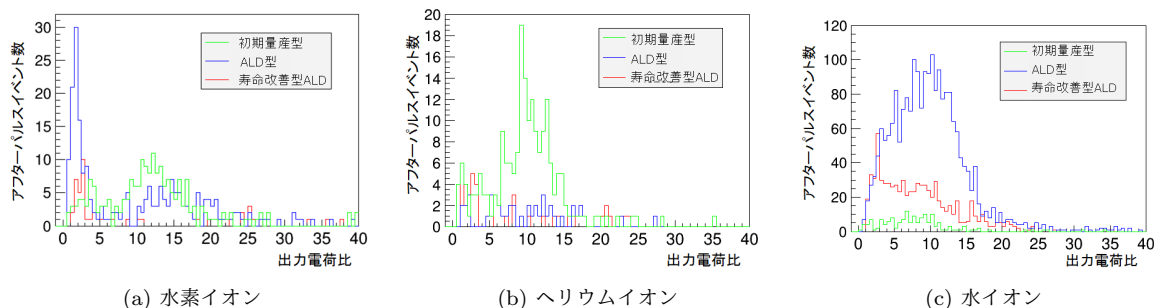


図 3.9: 水素 (左)、ヘリウム (中央)、水 (右) イオンによるアフターパルスの出力電荷比

図 3.9 はイオン別に見た出力電荷比の一例である。各タイプともこの例と同様な傾向を示している。各イオンの出力電荷比分布にピークがあることがわかる。ヘリウムイオンでは初期量産型が一つの比較的細いピークを、水イオンでは ALD 対策品が広がった大きな分布を持つことがそれぞれ確認できる。これらは出力電荷比も大きく、真のアフターパルスイベントであると考えられる。しかし、水素イオンでは出力電荷比の大きな領域に現れる分布の他に、出力電荷比が小さい領域に鋭いピークが存在する。水素イオンは本信号との時間差が小さいため、図 3.10 のように大きなシングルパルスによるリングングの影響でアフターパルス測定用のディスクリミネータが反応することがあり、これらをアフターパルスと誤判定してしまうことがある。出力電荷比の小さな領域のピークは真のアフターパルスイベントではなく、このようなノイズ由来の成分であることも考えられる。その影響を調べるため一部の MCP-PMT で本信号とアフターパルスを分離して出力電荷の

測定を行った。図 3.11 にそのセットアップを示す。

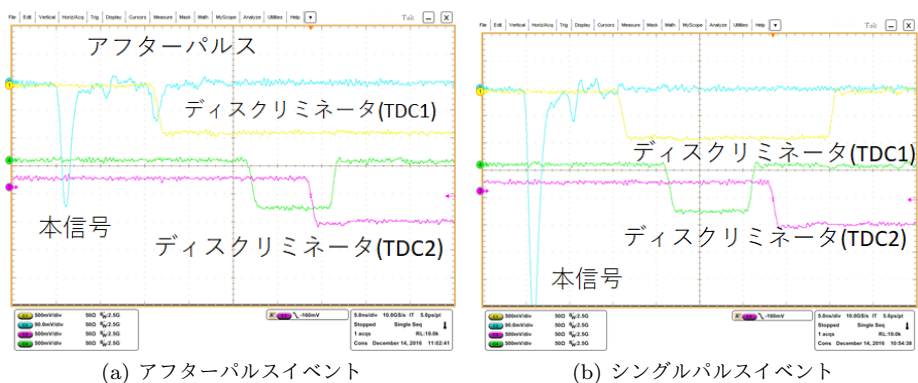


図 3.10: アフターパルスイベントとシングルパルスによるアフターパルスの誤判定

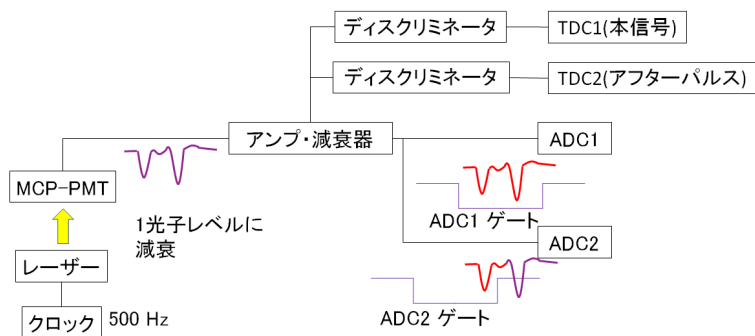


図 3.11: 本信号とアフターパルスの出力電荷測定セットアップ

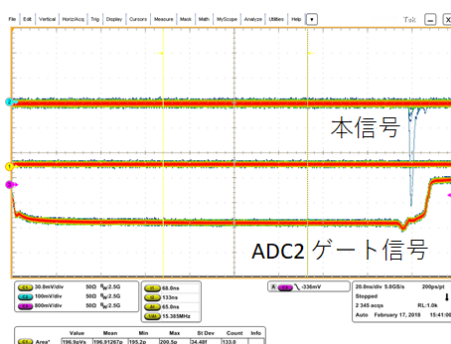
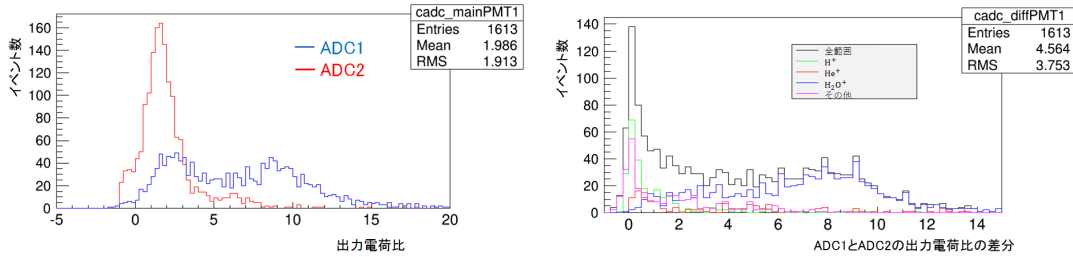


図 3.12: ADC2 のゲート信号と MCP-PMT の本信号の位置関係

ADC のゲート信号のタイミングを変えることで、本信号のみの電荷量を ADC2 を用いて測定し、本信号とアフターパルスの両方の電荷量を測定する ADC1 との差分をとることで、アフターパルスの出力電荷を見積もる。図 3.12 に ADC2 に入力するゲート信号と MCP-PMT からの本信

号を示す。本信号がゲートの端に位置していることが確認できる。アフターパルス信号の判定は図 3.5 と同様な 2 つの TDC を用いて行う。

寿命改善型 ALD でのアフターパルスと本信号に対する出力電荷比の測定結果を図 3.13 に示す。図 3.13a で ADC1 はこれまでの結果と同様に出力電荷比の大きな領域まで広く分布しており、ADC2 は 1 付近にピークを持っていることから本信号のみの出力電荷比を測定できていることが分かる。図 3.13b は ADC1 と ADC2 の差分である。凡例における各イオンの計測範囲は表 3.5 の通りである。なお、その他は時間差が 50ns 以上の領域でのイベントを示している。



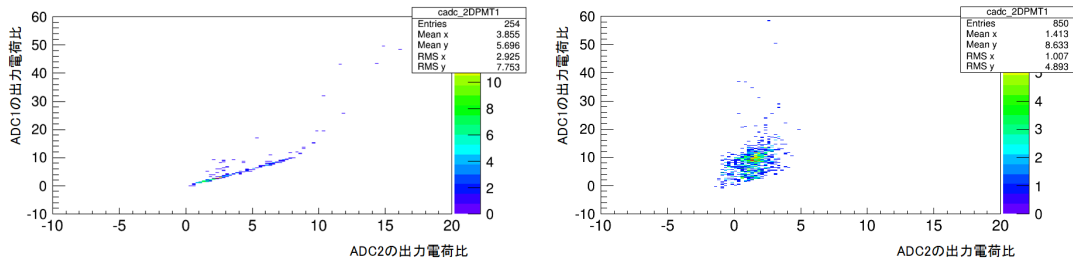
(a) ADC1 と ADC2 の測定結果の比較

(b) ADC2 と ADC1 の差分

図 3.13: 本信号とアフターパルスの出力電荷比の測定結果

アフターパルスの出力電荷は大きいいため、真のアフターパルスイベントであれば ADC1 と ADC2 の差分は大きな値を持つ。図 3.13b からリングングなどによるノイズの混入の少ない H₂O⁺ は大きな値を持っていることが確認できる。逆に差分が 0 付近のイベントは ADC1 と ADC2 で同程度の電荷量が測定されたことを意味するため、先ほど述べたシングルパルスによるリングングや、ダークノイズにより TDC2 にヒットが入ったイベントであることがわかる。図 3.13b ではその他 (ピンク) の領域に来たイベントが差分 0 に分布していることから、これらの領域ではイオンによるアフターパルスはほとんど存在せず、ダークノイズなどが中心であることが分かる。また、H⁺ においても同様に差分 0 にピークを持つ。これらは、図 3.10b のようなシングルパルスによるリングングと考えられる。

このように、アフターパルスイベントのうち H⁺ のように時間差が短いものでノイズの影響が大きいことが分かった。次に図 3.5 で測定したデータを用いてアフターパルスイベントからノイズを分離できるかどうかを調べた。



(a) 水素イオン

(b) 水イオン

図 3.14: 水素イオンと水イオンにおける ADC1 と ADC2 の出力電荷比の相関

2つのADCの2次元分布を図3.14に示す。図3.13の結果と同様に図3.14aではシングルパルス測定しているため二次元分布が線形になっている。アフターパルスイベントの多い図3.14bではダブルパルス測定しているため広がった分布になることが分かる。図3.14aのシングルパルス成分を分離するには、ADC1とADC2の情報が必要になるが、図3.5ではADC1のみしか測定していないため、ノイズ量を見積もることができない。

このようにリングングなどのノイズを調べた結果、時間差分布による H^+ のアフターパルスイベント数の見積もりに大きく影響し、図3.5のセットアップで測定したデータではその見積もりができないことが分かった。

今後の課題

H^+ によるQE低下に関する寄与を調べるためにはリングングなどノイズの影響を見積もる必要がある。しかし、本研究用に測定したデータではアフターパルスのみの出力電荷比を計算できないため、見積もるためには全てのMCP-PMTで図3.11と同様な測定を行う必要がある。そのような測定を行いQE低下との相関の調べることは今後の課題とする。

3.3.2 膜無しMCP-PMT

時間分布

図3.15に膜無し寿命改善型ALDのアフターパルス分布を示す。黒が膜無し品、赤は比較のための膜有り寿命改善型ALDである。膜無し品では膜有り品に見られなかったより遅い成分が存在す

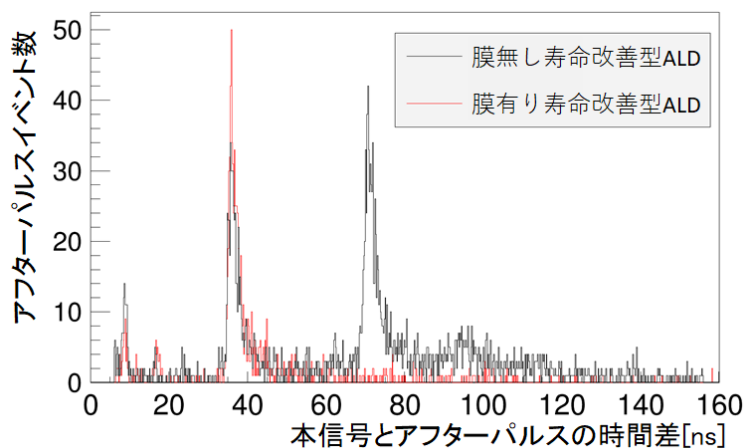


図 3.15: 膜無し品と膜有り品のアフターパルス分布の比較

る。これは時間差が75nsほどであり、式3.15を用いる質量数・分子量換算で100以上のイオンとなる。製造過程を考慮すると光電面に用いるCs(132)やALDの成膜工程で用いるトリメチルアルミル(144)が候補となる。これらのイオンはたとえエネルギーが高くても蒸着されたAl膜を透過できないため膜有り品ではほとんど観測されなかったと考えられる。また、後段MCPでの増幅電子数は前段MCPに比べて 10^3 程度多いため、アフターパルスも後段MCPからより多く来る

と予想されるが、水素やヘリウム、水などの頻度はそれほど変化していないことから、これらのイオンは Al 膜を透過し、後段 MCP から来ていると予想できる。

Al 膜は重いイオンをブロックをしていることから、イオンや原子に対しても阻止能力が十分あることが分かった。そのため、電場からエネルギーを得られない中性ガスも Al 膜でブロックできていると考えられる。

出力電荷比分布

図 3.16 と図 3.17 に膜無し寿命改善型 ALD と膜有り寿命改善品のアフターパルスと本信号の出力電荷比分布を示す。

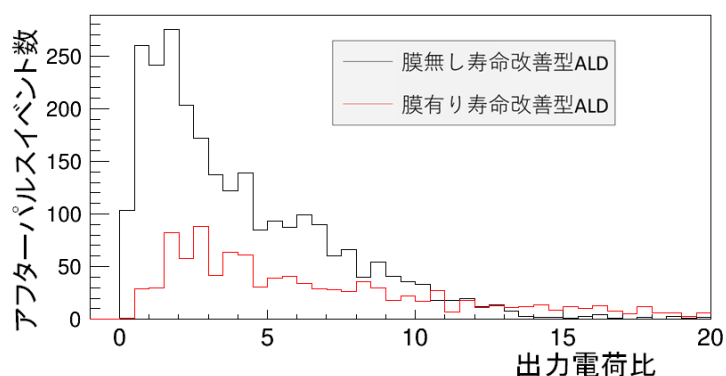


図 3.16: 膜無し品と膜有り品の本信号とアフターパルスの出力電荷比分布

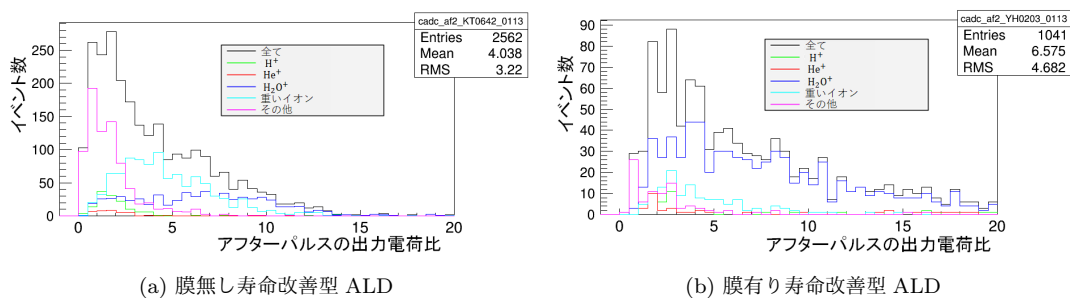


図 3.17: 膜無し品と膜有り品のイオン別の出力電荷比分布

膜有り品でも見られた H^+ 、 He^+ や H_2O^+ などの出力電荷比は膜無し品でも同様な分布を示している。膜無し品特有の重いイオンも、他のイオンと同様に分布することからアフターパルス由来であることがはっきりと確認できた。表 3.6 にそれぞれのイオンの計測範囲を示す。

3.4 光電面寿命とイオン

アフターパルスの時間差分布・出力電荷比分布の測定から、イベント数の見積もりに課題は残るが内部のイオンとして H^+ 、 He^+ と H_2O^+ が確認された。また膜無し MCP-PMT の測定結果が

イオンの候補	計測範囲
H ⁺	0 – 12ns
He ⁺	12 – 20ns
H ₂ O ⁺ 、CO ⁺ 、CO ₂ ²⁺	20 – 50ns
重いイオン	50 – 80ns

表 3.6: 膜無し MCP-PMT のアフターパルスの計測範囲

ら Al 薄膜でブロックされている質量数・分子量 100 程度の重いイオンも内部に存在することが分かった。これらのイオンが光電面の QE 低下に寄与するかを考察する。

ヘリウムイオン

He⁺ は前述の通り光学窓の石英ガラスを透過する。もし He⁺ が QE 低下を引き起こすのであれば保存中の MCP-PMT にも QE 低下は見られると予想される。しかし、真空漏れを除き保存中の MCP-PMT の QE 低下は観測されていない。よって He⁺ は光電面の QE 低下に寄与していないと考えられる。

水イオン

H₂O⁺ は ALD 対策品特有であり、ALD 成膜過程で混入したと考えられる。もし H₂O⁺ が光電面の QE 低下に寄与するのであれば、H₂O⁺ が見られない初期量産型に比べ寿命は短くなると予想される。しかし実際には ALD 対策品は初期量産型に比べて長い寿命を持つことから、H₂O⁺ は光電面の QE 低下に寄与しないと考えられる。

以上のことから、QE 低下に寄与する可能性があるイオンは H⁺ や重いイオンとみられる。このうち、H⁺ による QE 低下の寄与は今後さらなる測定を行う必要がある。重いイオンに関しては、膜無し品の寿命測定結果を踏まえて次章で述べる。

3.5 アフターパルス測定のまとめ

複数個の MCP-PMT のアフターパルスを同時に測定できるシステムを構築し、実際に測定を行った。その時間差分布の測定結果から、TOP カウンター用 MCP-PMT 内部には主に H⁺、He⁺ と H₂O⁺ 及び質量数・分子量 100 程度の重いイオンが存在することが分かった。この測定結果は図 3.2 からオシロスコープで見られる時間差と一致することから、構築したシステムによりアフターパルスが測定できていることが確認できた。

測定されたイオンのうち、He⁺ や H₂O⁺ はその性質から光電面の QE 低下に寄与しないことが判明した。残りのイオンのうち、H⁺ は今回の測定ではノイズの混入もありそのイベント数を見積もることができなかった。今後、図 3.11 のような測定を行うなどして、H⁺ と光電面寿命の相関を調べる必要がある。また、膜無し品のアフターパルス測定の結果から Al 薄膜は重いイオン

や中性ガスをブロックしていることが判明した。これらの寿命に対する寄与は膜無し品の寿命測定の結果をもとに次章で議論を行う。

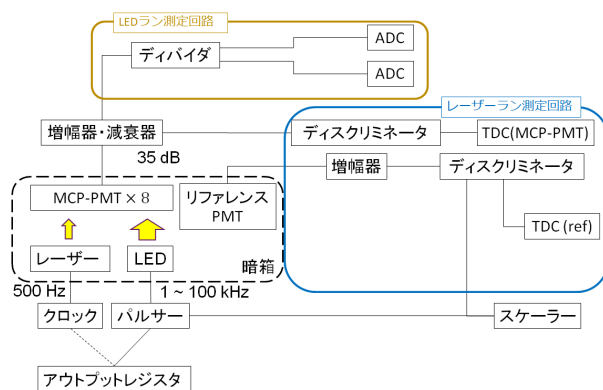
第4章 寿命測定

MCP-PMT の光電面寿命を知るためには、大量の出力電荷を放出させて実際に QE を低下させる必要がある。その際に印加電圧やイオンがどのように影響を与えているかを調べるため、セットアップの改良を行った。その結果、寿命測定中にアフターパルスのモニターや印加電圧を変化させることが可能になった。本章では改良したセットアップで条件を変えて寿命測定を行い、得られた結果から光電面の QE 低下にそれらの条件がどのように寄与するかを議論する。

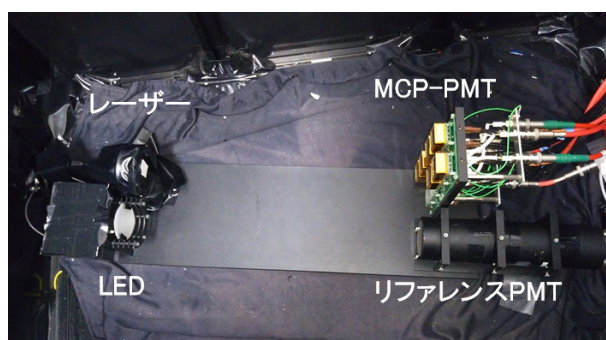
4.1 寿命測定の手法

4.1.1 測定方法と既存のセットアップ

光電面寿命は MCP-PMT に高いレートで光を照射し続け、光電面の QE を通常より早く低下させることで測定を行う。図 4.1 にそのセットアップを示す。読み出し回路は 32 ch あり、1つの PMT の全 16 アノードのうち 4 アノードを 1 ch に統合してして読み出すことで最大 8 個の PMT で同時に寿命測定を行うことができる。QE 低下加速用の光源として LED を使用している。また、LED 照射の合間にレーザーによる検出光子数の測定を行い、QE 低下の変化をモニターする。二つの光源の切り替えは CAMAC のアウトプットレジスタを用いて自動的に行う。以下に測定の具体的な流れを示す。



(a) 寿命測定セットアップのブロック図



(b) 暗箱内部

図 4.1: 寿命測定セットアップ (左) と暗箱内部 (右)

LED 照射

レーザー照射中を除き、寿命測定中は LED を常に点灯して QE 低下を促進させる。LED はパルス電源を用いて 1 kHz ~ 100 kHz のレートで点灯させ、8 個の PMT に一様に光を照射する。初

めの数日は 1 kHz の低レートで測定を行い、測定に問題がなければ段階的にレートを引き上げ最大 100 kHz で測定を行う。PMT からの出力電荷は CAMAC ADC を用いて測定している。なお、CAMAC によるデータ取得は約 1 kHz が限界であるので、MCP-PMT からの出力電荷はサンプリングによる測定となる。そのため、ADC で得た出力電荷量を LED の照射レートで補正することで、全出力電荷量を求めている。LED の照射レートは CAMAC スケーラーを用いてモニターしている。

レーザー照射

寿命測定中に QE のモニターを行うため、数日に一度 LED 照射を止めて波長 400 nm のレーザーによる 1 光子のヒットレート測定を CAMAC TDC を用いて行う。検出光子数は MCP-PMT の QE と収集効率の積で決まるが、収集効率は MCP の開口率に依存し出力電荷が増加しても変化しないため、この測定から波長 400 nm での相対的な QE の変化を見積もることができる。その際、レーザーの光量の変化による検出光子数への影響を抑えるため、リファレンス PMT を用いて光量を測定、検出光子数へ補正をかけている。式 4.1 は相対 QE の計算式である。

$$re.QE_{PMT} = \frac{N_{PMT}^i / N_{ref}^i}{N_{PMT}^1 / N_{ref}^1} \quad (4.1)$$

N_{PMT}^i 、 N_{ref}^i はそれぞれ i 回目のレーザー照射での MCP-PMT 及びリファレンス PMT の検出光子数である。

この相対 QE が 80 % 程度に低下するまで LED 照射とレーザー照射を交互に行う。低下したことが確認されると再び絶対 QE 測定を行い、相対 QE の低下と寿命測定前後の QE の変化が一致することを確認する。図??は測定の流れとその時間を示したものである。

絶対 QE 測定

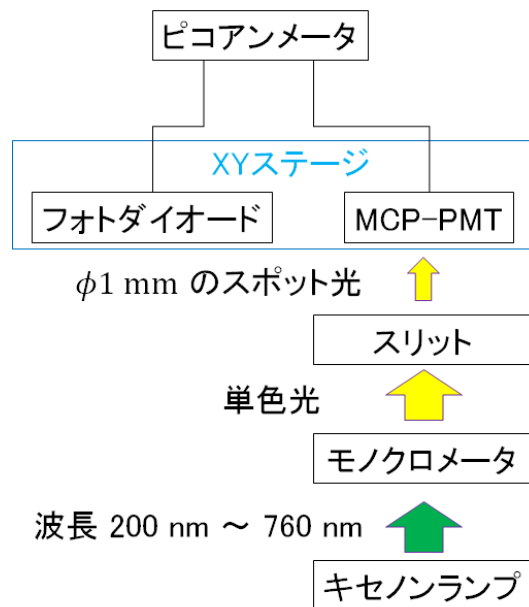
光電面の QE がどの程度低下しているかを調べるため、クロスチェックとして寿命測定の前や途中で絶対 QE の測定を QE 測定ベンチで行う。図 4.2 は絶対 QE 測定セットアップである。キセノンランプを光源としてモノクロメータで波長 280 nm ~ 760 nm の単色光に変化させ、スリットで $\phi 1$ mm のスポット光として MCP-PMT に照射する。光電面と前段 MCP に 200 V の電圧を印加し、光電子により光電面を流れる電流をピコアンメータで読み取る。リファレンス用に絶対 QE が 1.7 % 以下の精度で分かっているシリコンフォトダイオードを用いる。これらの MCP-PMT からの電流を I_{PMT} 、フォトダイオードの電流を I_{PD} として式 4.2 のように比較することで絶対 QE (QE_{PMT}) を導出する。

$$QE_{PMT} = \frac{I_{PMT}}{I_{PD}} \times QE_{PD} \quad (4.2)$$

4.1.2 改良点

高増幅率アンプの導入

先行研究から積算出力電荷と光電面の QE 低下の関係は式??で表せることが分かっている。そのため、既知の寿命を持つ MCP-PMT では QE が下がりすぎていなければその落ち方は予想でき



(a) 絶対 QE 測定のプロック図



(b) XY ステージ上のフォトダイオードと MCP-PMT

図 4.2: 絶対 QE 測定セットアップと XY ステージの写真

る。今回、寿命と印加電圧の相関を調べるため既知の寿命を持つ MCP-PMT の寿命測定をこれまでと異なる印加電圧で行った。仮に印加電圧の変化により寿命が変化するならば、QE の落ち方が予想と異なる曲線に従うと考えられる。そのため、MCP-PMT の寿命の個体差によらずその寿命の変化を判断できる。

しかし、MCP-PMT の印加電圧を低下させるとその増幅率も低下する。既存のセットアップでは、MCP-PMT の増幅率が 2.0×10^6 となった状態で寿命測定を行えるようになっている。そのため、増幅率を低下させるとセットアップ全体の検出効率が低下し、TDC を用いたレーザー照射時の相対 QE のモニターが正しく行えない。今回の測定では、MCP-PMT の増幅率を $0.5 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^6$ の間を変化させる。そのため、既存の 60 倍の増幅率を持つアンプを 4 倍程度増強する必要がある。そのため 32 ch ある読み出し回路のうち、半分の 16 ch 分のアンプをより高増幅率なものへと取り換えた。図 4.3 が導入したアンプボードの外観である。16 ch 分のアンプと分割回路が一つにまとめている。図 4.4 にアンプボードの各 ch の増幅率を示す。アンプの増幅率が従来の約 60 倍から 500 倍程度にまで増強されている事が確認できる。図 4.5 はテストパルスを用いた検出効率の波高依存性である。MCP-PMT の 0.5×10^6 相当の信号で測定ベンチの検出効率が 100% となっていることが分かる。このことから、印加電圧変化により増幅率が低下しても、相対 QE が正しく見積もることが可能となった。

図 4.6 は改良したセットアップである。LED 照射中は出力電荷が大きいため、高増幅率のアンプでは ADC の値が飽和してしまう。そのためレーザーランの際の増幅率モニター用の ADC とは別に LED ランで用いるアンプと ADC を別に用意した。

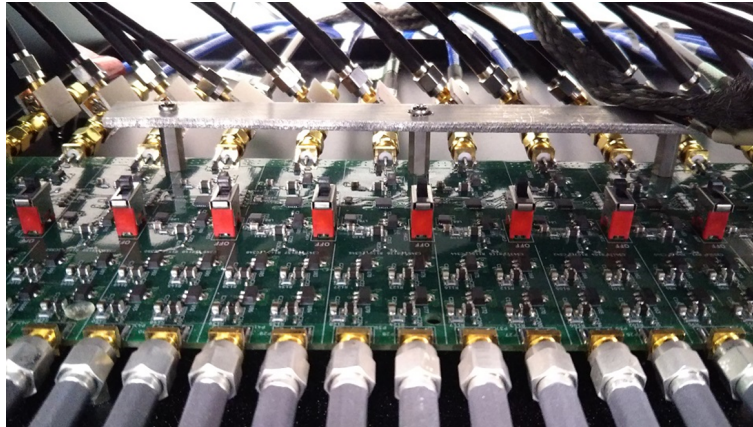


図 4.3: 1-入力、2-出力を 16 ch もつアンプボードの写真

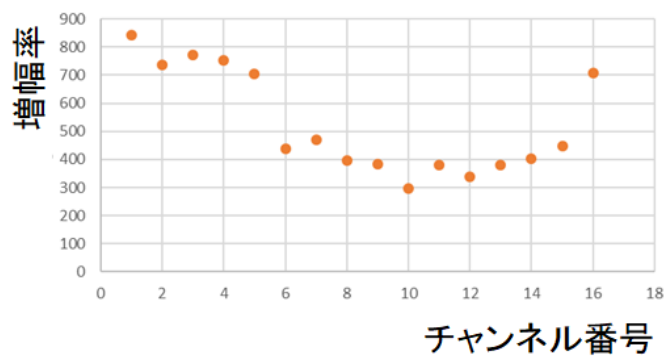


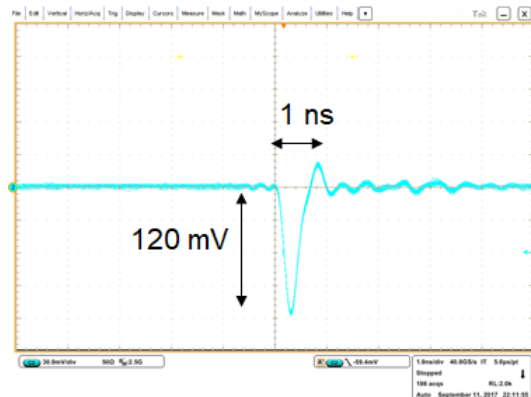
図 4.4: アンプボードの各チャンネルの増幅率

アフターパルス測定システムの組み込み

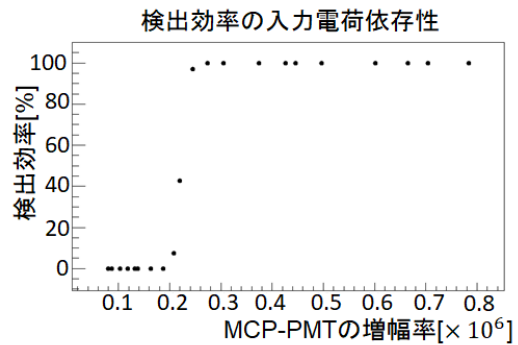
QE 低下中のアフターパルスの変化をモニターするため、第 3 章で構築したシステムをアンプを増強した寿命測定ベンチに組み込んだ。図 4.7 は改良後のセットアップで測定したアフターパルスの時間差分布である。アフターパルスが改良後も同様に測定できていることが分かる。また点線は同じ PMT で印加電圧を変化させた際の分布である。イオンフィードバックにかかる時間差が変わり、ピークの位置が変化していることが確認できた。表 4.1 はアフターパルス測定時の MCP-PMT の印加電圧と H_2O^+ の測定された時間差を表している。

印加電圧が 3000V の際と比較した測定値の時間差と式 3.14 をもとにした計算値の時間差を表 4.2 に示す。測定値と計算値がよく一致しており、セットアップが印加電圧の変化に伴うアフターパルスの時間差を測定できていることが確認できた。

セットアップの改良により寿命測定中の印加電圧変化及びアフターパルスのモニターが可能になった。なお、使用する CAMAC 機器の都合で寿命測定を行う 8 本のうち、一度に測定できるのは 6 本までとなっている。



(a) 入射したテストパルスの例



(b) 検出効率の波高依存性。横軸はテストパルスの電荷量に相当する MCP-PMT の増幅率である。

図 4.5: 高増幅率アンプの検出効率試験

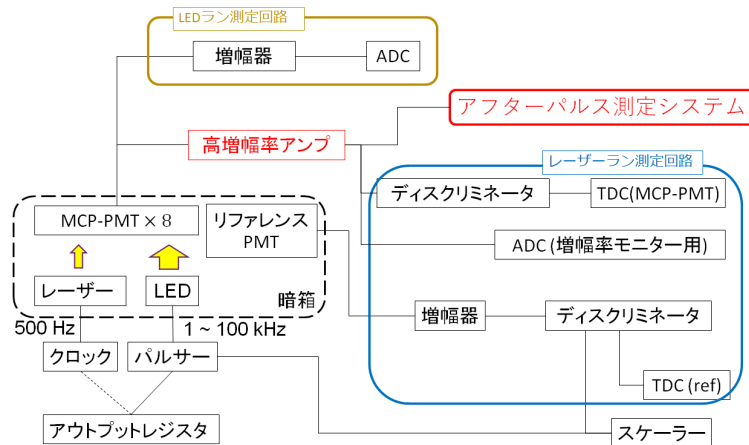


図 4.6: 改良したセットアップ

4.2 測定

イオンフィードバック、印加電圧などの要素が寿命にどのような影響を与えているかを調べるため、次のような測定条件で寿命測定を行った。

4.2.1 印加電圧変化

測定条件

印加電圧の変化と光電面寿命の直接の相関を調べるため、印加電圧を変化させて寿命測定を行った。印加電圧変化はイオンがフィードバックの際に電場から得るエネルギーの変化をもたらすが、中性ガスに関しては影響を及ぼさない。そのため、この測定で寿命に変化が起きればイオンが光電面寿命に影響を与えていることを示唆する。2012年に一度測定が行われた際 [7] は、印加電圧を低くすることで PMT の増幅率を抑えた結果、出力電荷量が抑制され時間的なスケールでの寿命が伸

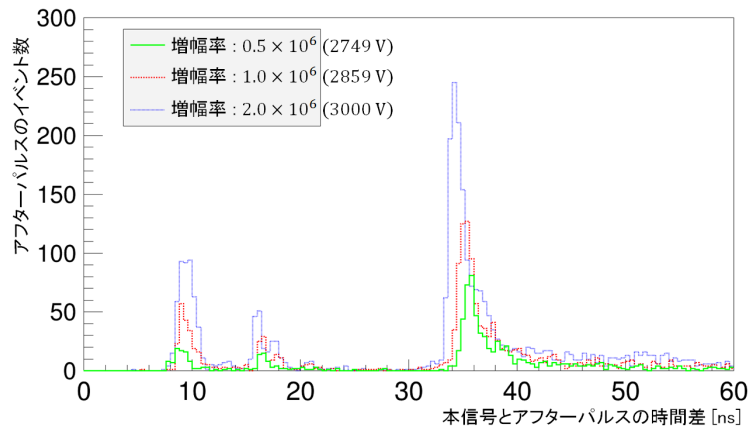


図 4.7: 印加電圧を変化させた際のアフターパルス時間差の変化

印加電圧	H ₂ O ⁺ の時間差
2749V	38.2ns
2859V	37.6ns
3000V	36.9ns

表 4.1: 印加電圧と時間差の変化

びたことは確認された。しかし測定中に印加電圧を変化しなかったため、出力電荷に対する寿命の長短は個体差もあり他の PMT と有意な差は見えなかった。今回の測定では PMT の個体差を排除するため、同一の PMT で印加電圧を段階的に変化させて測定を行う。印加電圧変化の指標としては PMT の増幅率を用いる。1.0 × 10⁶ で測定を行い、QE 低下曲線の傾きが変化するかを調べた。今回寿命測定を行う PMT のうち、初期量産型 2 本、ALD 型 1 本をそれぞれサンプルとして使用する。

測定結果

図 4.8 は印加電圧を変化させて寿命測定した各 PMT の結果である。図 4.8 の赤線はこれまでのフィッティング結果で得られた QE 曲線を示し、青線は印加電圧を低下させ増幅率を 1.0 × 10⁶ で測定した結果、緑線は印加電圧を元に戻し増幅率を 2.0 × 10⁶ で測定した結果、星型は各積算出力電荷での絶対 QE 測定の結果をそれぞれ示す。絶対 QE 測定の結果と相対 QE のモニター値は一致しており、増幅率を変化させてもレーザー照射による信号を検出できていることを示している。

印加電圧の差	測定値	計算値
251V	1.3ns	1.4ns
141V	0.7ns	0.8ns

表 4.2: 時間差の測定値と計算値の比較

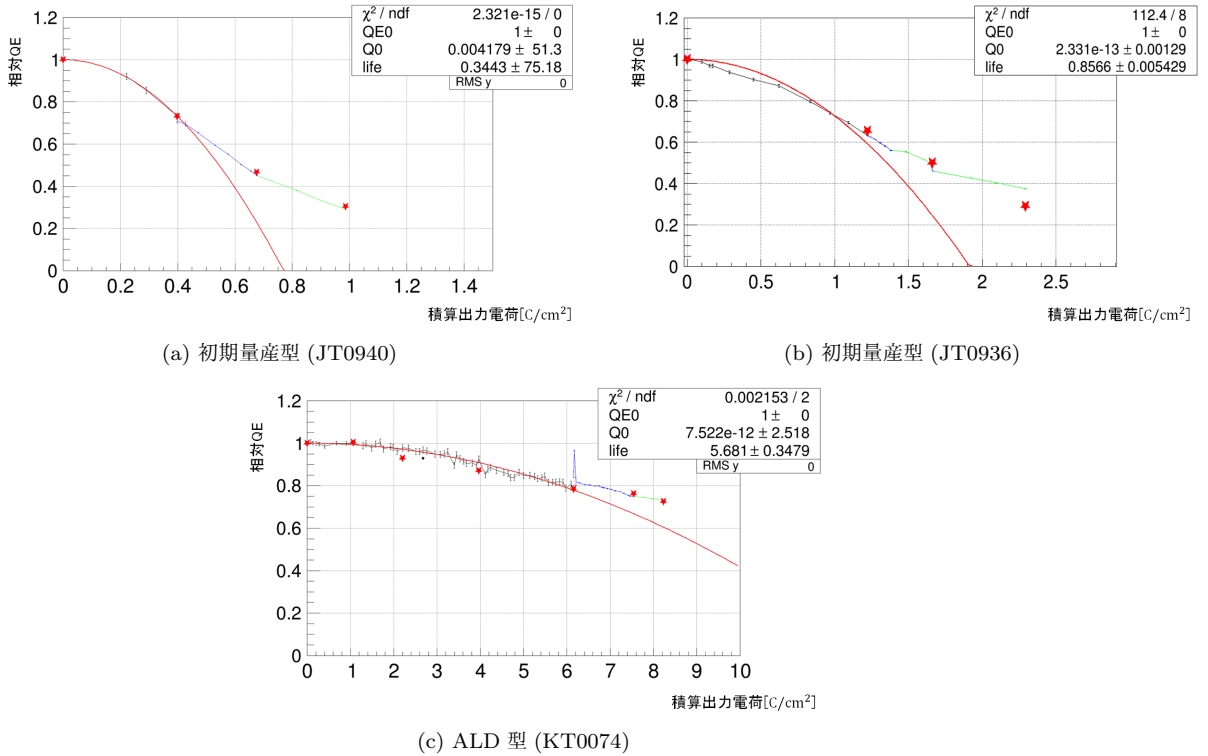


図 4.8: 印加電圧を変化させた際の QE 曲線の変化。赤線は前回測定時の結果、青線及び緑線は今回の測定結果、星型は各積算出力電荷での絶対 QE の測定結果である。

新たなセットアップで得られた結果は、印加電圧を変化させた測定も元に戻した測定の両方で既知の QE 曲線からのズレがあることが分かる。印加電圧を元に戻した測定ではこれまでの測定に対してセットアップの変更以外に条件を変えていないため、得られる結果は既知の QE 低下曲線と一致すると予想できる。絶対 QE 測定の結果から相対 QE は正しくモニターできているとわかったので、図 4.8 の横軸の積算出力電荷の計算に間違いがないかを確認するため、LED 照射時の 1 ファイルごとの出力電荷量をこれまでの測定と比較した。その結果を表 4.3 に示す。なお、JT0940 のみ以前の測定でのファイルごとのデータがなかったため記載していない。

表 4.3 から分かる通り、セットアップ改良前に比べ改良後の 1 ファイル当たりの出力電荷量が増えていることが分かる。増幅率はセットアップの改良前後で変化していないため、1 ファイル当たりの出力電荷量は改良前後で同じであると考え、セットアップの改良後は出力電荷を過剰に見積もっていると考えられる。出力電荷量の補正を行うための測定は今後行うが、簡易な補正とし

PMT の ID	セットアップ	増幅率	1 ファイル当たりの出力電荷量
JT0940	改良前	2.0×10^6	0.160mC
	改良後	2.0×10^6	0.205mC
KT0074	改良前	2.0×10^6	0.110mC
	改良後	2.0×10^6	0.155mC

表 4.3: 以前のセットアップと今回のセットアップでの 1 ファイル当たりの出力電荷量の比較

て、表 4.3 の値をもとにした次のような補正を行った。

$$\text{出力電荷量}_{\text{補正}} = \text{出力電荷量}_{\text{測定}} \times \frac{\text{改良前の 1 ファイル当たりの出力電荷量}}{\text{改良後の 1 ファイル当たりの出力電荷量}} \quad (4.3)$$

式 4.3 をもとに図 4.8 を書き直したものが図 4.9 である。

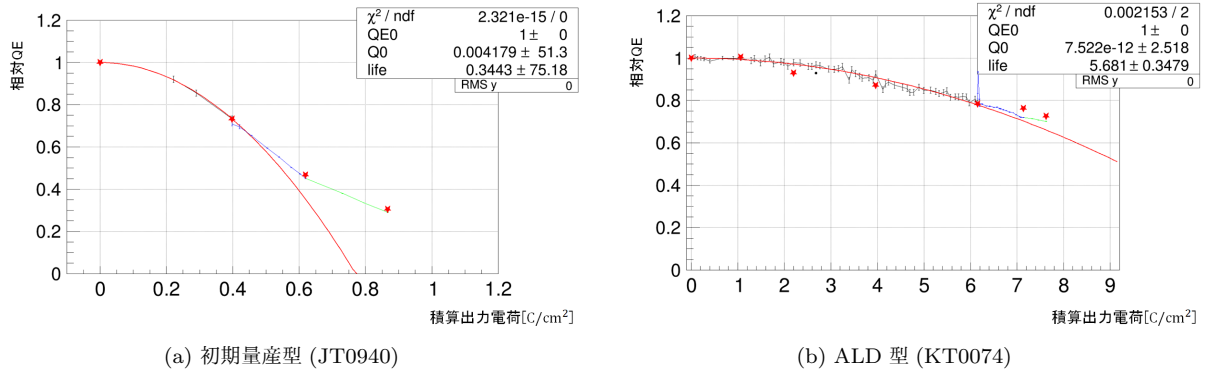


図 4.9: セットアップの改良に伴った出力電荷量の補正を行った後の QE 曲線の変化。赤線は前回測定時の結果、青線及び緑線は今回の測定結果、星型は各積算出力電荷での絶対 QE の測定結果である。

MCP-PMT の QE が非常に低下すると、相対 QE と積算出力電荷量が式??で予想される曲線と一致なくなることが分かっている。図 4.10 はその例である。QE を下げ続けると測定条件を変化させていないにもかかわらず曲線と一致なくなることが分かる。図 4.9a でも補正後の測定結果が既知の QE 曲線からずれているが、相対 QE の低下具合が図 4.10 と同程度であるから、この効果が表れたと考えられる。相対 QE がそこまで低下していない図 4.9b では、補正後の結果は既知の QE 曲線に一致し、改良後のセットアップでも印加電圧の変化による傾きの変化は見られない。このことから、印加電圧の変化させても光電面寿命は変化しないと言える。

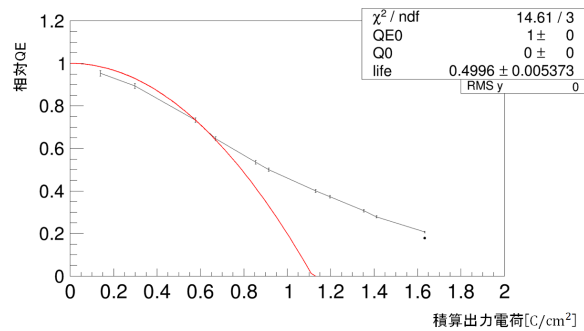


図 4.10: QE を低下させ続けたときの測定結果 (初期量産型 : XM0205)

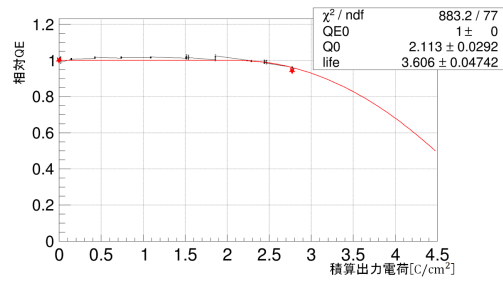
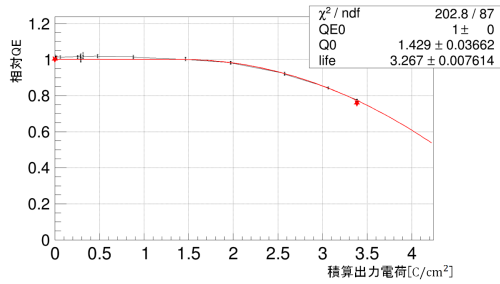
4.2.2 膜無し PMT

測定条件

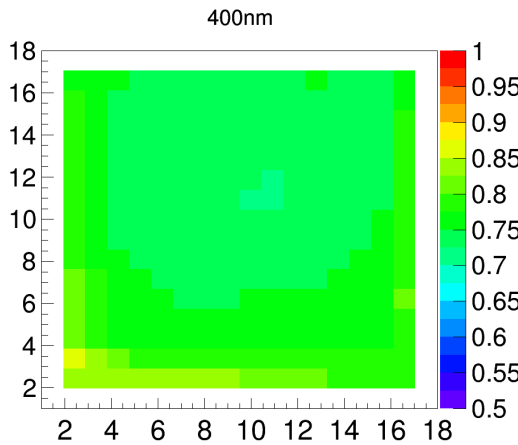
イオン対策 Al 薄膜無し PMT は今回初めて寿命測定を行う。Al 膜を取り除いたことで寿命特性がどのように変化したかをこれまでの測定と同じ条件にするため、セットアップを変更していない部分での測定を行った。

測定結果

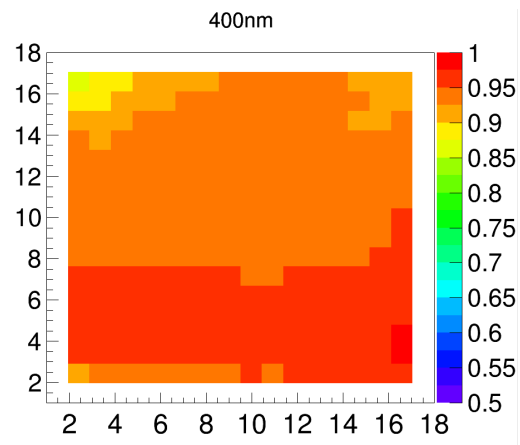
図 4.11 は膜無し PMT 2 本の測定結果である。図 4.11 中の星型は各積算出力電荷での絶対 QE 測定結果である。また表 4.4 はそれぞれの寿命である。2 本のサンプル品の測定結果から、イオン対策 Al 薄膜を取り除いた MCP-PMT の寿命は ALD コーティングを行っていても $3\text{C}/\text{cm}^2$ 程度であることが分かった。Al 膜有り寿命改善型 ALD の光電面寿命は $13.6\text{C}/\text{cm}^2$ 以上であり、Al 膜無し寿命改善型 ALD の光電面寿命はそれに比べて十分に短く、Al 膜の存在は光電面寿命の向上に寄与していると言える。



(a) QE 低下曲線 (KT0642) と絶対 QE 測定結果 (星型) (b) QE 低下曲線 (KT0647) と絶対 QE 測定結果 (星型)



(c) QE 低下比 (KT0642)



(d) QE 低下比 (KT0647)

図 4.11: 膜無し PMT(KT0642(左)、KT0647(右)) の QE 低下曲線と波長 400 nm での QE 低下比

	光電面寿命
KT0642	$3.267 \pm 0.047\%$
KT0647	$3.606 \pm 0.076\%$

表 4.4: 膜無し寿命改善型 ALD の寿命測定結果

第 3 章のアフターパルスの測定結果から、Al 膜は質量数・分子数が 100 程度の重いイオンや中性ガスをブロックしていることが分かっている。一方、軽いイオンは Al 膜を透過することもありアフターパルス頻度は膜有り品とあまり変わらない。したがって、Al 膜を取り除いたことで寿命が低下した要因は膜有り品に比べ重いイオンや中性ガスの影響が増えたためと考えられる。

4.2.3 寿命測定中のアフターパルス頻度の変化

測定結果

図 4.12 は印加電圧を一定にした PMT のアフターパルス頻度を寿命測定中にモニターした結果である。寿命測定開始時は MCP-PMT の増幅率が変化するためアフターパルス頻度も変化してい

るが、測定が安定な状態になるとアフターパルス頻度も一定になる。なお、寿命改善型 ALD は印加電圧を上げた他の PMT からのクロストークがアンプボードを介してノイズとしてのってしまうため、水素イオンの頻度が上昇しているように見えている。

残留ガスは主に製作過程で混入されるため、石英ガラスを透過するガスや真空漏れが起きていなければ製作後に外部から混入することはない。また透過できるヘリウムなどのガスも一般の環境下での存在比は小さく、数か月程度の寿命測定中に混入することは考えにくい。そのため、寿命測定中に PMT 内部に残留したガスの量は一定であると仮定できる。そのためイオンフィードバックや中性ガスとして PMT 内部の残留ガスが放出され続けると時間とともにその量は減少することも考えられる。今回の測定では数 C/cm^2 程度の実出力電荷ではアフターパルス頻度が一定であったことから、残留ガスの放出量はほとんど減少しない可能性が示唆された。

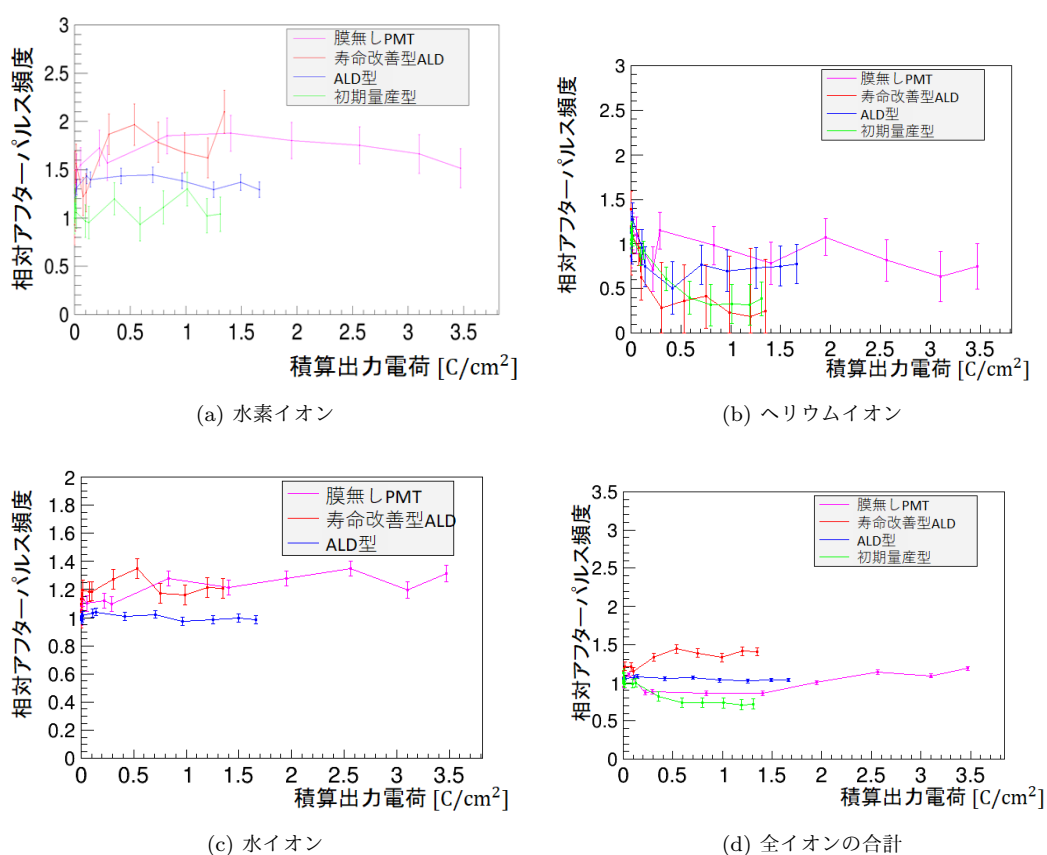


図 4.12: 各イオンの出力電荷に対するアフターパルス頻度の変化

4.3 測定のまとめ

既存の寿命測定ベンチを印加電圧の変化やアフターパルス頻度のモニターなどに対応できるように改良を行った。

印加電圧を変化させた光電面寿命測定では未校正の実出力電荷に簡易な補正を行った結果、光電面寿命に変化がないという結果が得られた。印加電圧変化はイオンのエネルギーに影響するため、今回の結果から光電面の劣化にイオンのエネルギーは相関がないことがわかる。

Al膜無しMCP-PMTは光電面寿命は約 $3C/cm^2$ となり、膜有りの同タイプの寿命である $13.6C/cm^2$ 以上に比べ短いという結果が得られた。第3章の結果からAl膜は中性ガスや質量数・分子量が100程度の重いイオンをブロックしており、水素などの軽いイオンは膜有り品と同程度であることが分かっている。そのため膜無し品の寿命低下には軽いイオンではなく中性ガスや重いイオンが影響していると考えられる。今後膜無し品での重いイオンの量の測定を行うとともに、現在のセットアップでは直接測定できない中性ガスの光電面寿命に対する寄与を調べる測定方法を確立する。

光学窓を遮蔽した状態での寿命測定では、照射部分に比べ遮光部分は光電面のQE低下が少なく、ALD型のMCP-PMTではQE低下分布にステップ構造が確認できた。しかし、初期量産型では遮光部分も波長400nmで相対QEが90%ほどに低下しており、明確なステップ関数も確認できなかった。測定サンプル数が少ないため、これが寿命対策の違いによるものか個体差によるものかは判断できないため、今後さらなる測定を行いサンプル数の増加や出力電荷量による変化を確認する必要がある。

寿命測定中のアフターパルス頻度のモニターから測定中は残留ガスの放出量は出力電荷に依らず一定であることがわかった。残留ガスが寿命測定中に放出され続けることで光電面の劣化が進み、QEが低下するものとみられる。

改良後のセットアップではLED照射に対する出力電荷量が未校正であるが、印加電圧の変化によるMCP-PMTの増幅率の低下をセットアップの検出効率の向上によって抑え、寿命測定中に正しく相対QEがモニターできることを確認した。また印加電圧変化によるアフターパルスの時間差の変化も計算値とよく一致しており、改良したセットアップはほぼ期待した性能を発揮している。このように、寿命測定中にイオンフィードバックを測定するセットアップを確立することができた。測定サンプル数が少数であることから、イオンと光電面寿命に関して有意な結論は得られなかったが、今後サンプル数を増やし議論を行う。さらに、膜無し品の寿命測定から残留ガスによる光電面劣化のうち中性ガスによる影響も大きいことが示唆された。この中性ガスの測定方法は検討中である。

第5章 結論

MCP-PMT は優れた一光子時間・位置分解能を持つ光検出器であり、従来の PMT と置き換えると RICH 検出器や TOF 検出器の性能を向上させることができる。しかし、MCP は大きな表面積を持つ構造であるため吸着した残留ガスにより光電面の QE が低下してしまう。この具体的メカニズムはいまだ理解されていない。我々は Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の長寿命化に向けた研究から、光電面へ向かう中性ガスやイオンのブロック、MCP 表面への ALD コーティング、MCP に吸着した残留ガスの低減などの対策を行うことで寿命が $13.6[\text{C}/\text{cm}^2]$ 以上という MCP-PMT の開発に成功した。しかし、寿命の個体差は 50 %程度といまだに大きく、また一般的な PMT に比べて寿命は短い。他の実験への転用などを踏まえるとさらなる寿命改善品の製作や寿命のバラつきを抑えるなど改善の余地がある。本研究では MCP-PMT の効率的な寿命対策を行うために、残留ガスによる光電面の QE 低下メカニズムの解明を目指した。

私は残留ガスの中でもイオンに注目した。イオンは MCP から放出され、電場によって加速しながら光電面へと到達する。このイオンの種類、量及び電場から得るエネルギーが光電面の QE 低下に影響を及ぼしていると考え、次のような目的の測定を行った。

- イオンの種類と量の測定
- イオンのエネルギーと光電面寿命の関係の測定
- Al 膜無し MCP-PMT の寿命測定

これらの測定を行うために、私は新たな測定システムを構築や改良を行った。

イオンの種類と量の測定は、イオンが光電面にフィードバックした際に出す電子をもとにした信号であるアフターパルスを用いる。私は複数の MCP-PMT で同時にアフターパルスの測定を行うシステムを構築した。測定結果を MCP-PMT 内部電場におけるイオンの運動をモデル化することで得られたアフターパルスの時間差分布と比較することで測定システムが正しく動作していることを確認した。

イオンのエネルギーは MCP-PMT の印加電圧を変化させることでその効果を調べる。印加電圧を低下させると MCP-PMT の増幅率も低下し、測定ベンチの検出効率が低下してしまう。私は既存の寿命測定セットアップび高増幅率のアンプの導入を行い、従来の 1/4 まで増幅率を低下させても検出効率が低下しないよう改良を施した。

測定結果から、光電面劣化の原因とされる残留ガスのうち、イオン化したヘリウムや水などの原子は QE 低下に寄与しないこと、光電面寿命はフィードバックするイオンのエネルギーによらない事を初めて確認した。さらに Al 膜無し品の測定結果から、Al 膜でブロックされている中性ガスや重いイオンが寿命の低下に寄与していることが示唆された。本研究により、MCP-PMT の光電面の QE 低下を引き起こす候補として、残留ガスのうち水素イオン、中性ガス、質量数・分子量が 100 程度の重いイオンにまで絞ることができた。今後、立ち上げたイオン測定用セットアップを改良しノイズにより測定ができなかった水素イオンや重いイオンの質量数の同定を行うとともに、新

たに中性ガス測定システムを構築し、光電面劣化を引き起こす原因を調べ QE 低下のメカニズムの
解明を目指す。

付録 A 測定した全 MCP-PMT のアフターパルス時間差分布と出力電荷比分布

A.1 初期量産型

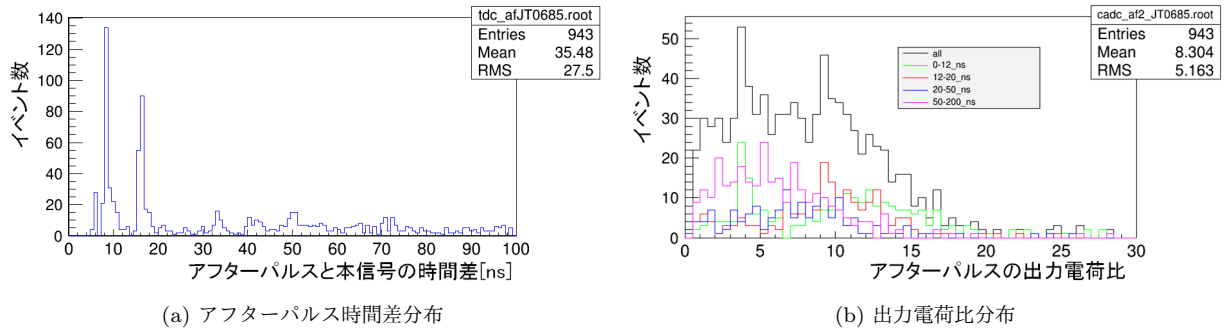


図 A.1: JT0685

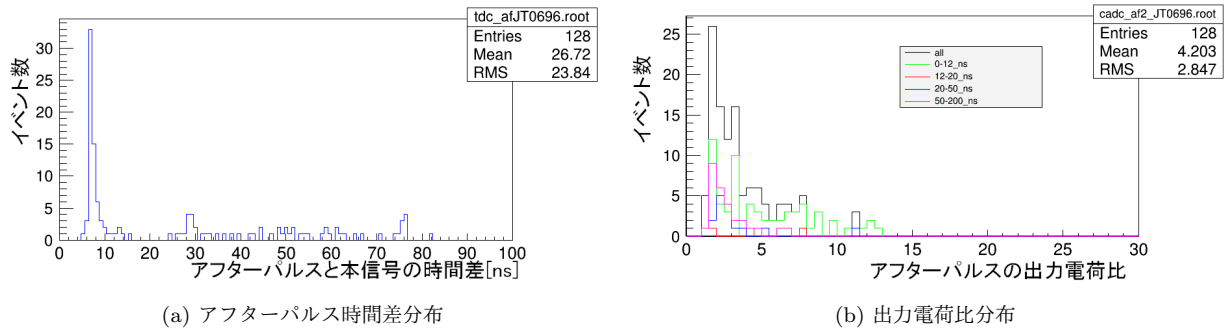


図 A.2: JT0696

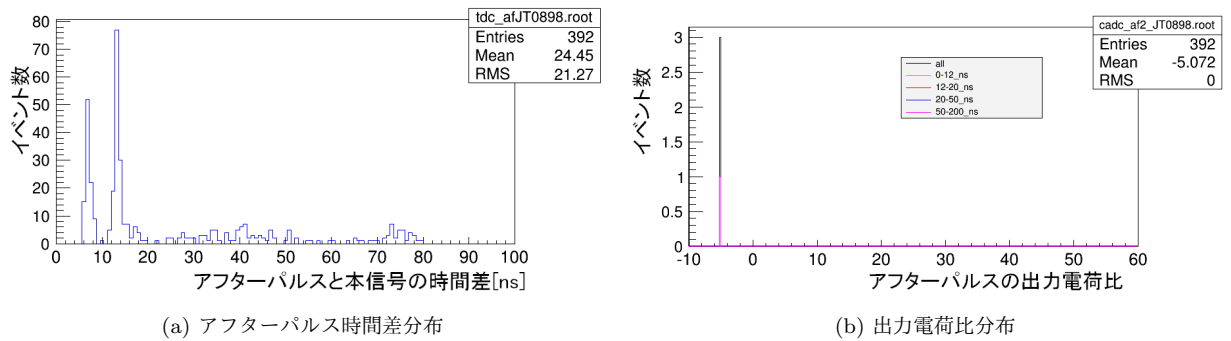
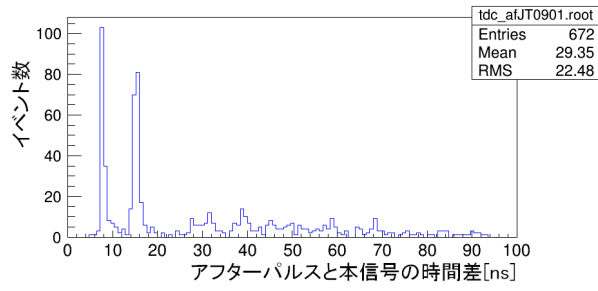
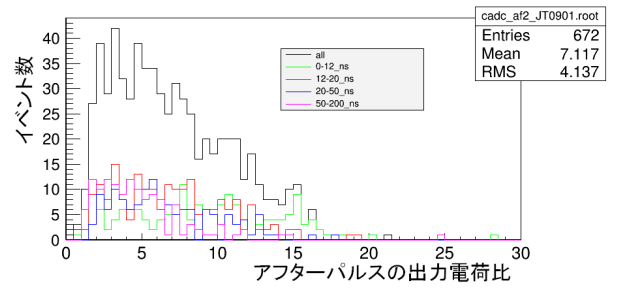


図 A.3: JT0898

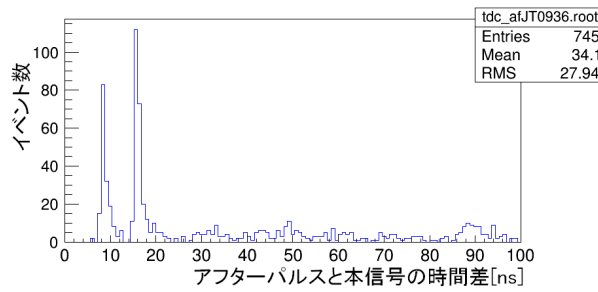


(a) アフターパルス時間差分布

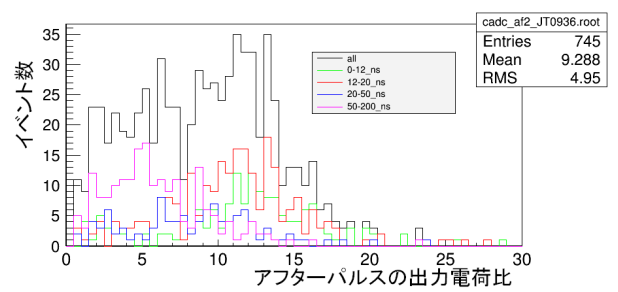


(b) 出力電荷比分布

図 A.4: JT0901

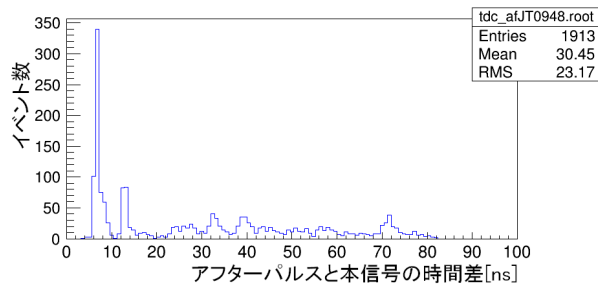


(a) アフターパルス時間差分布

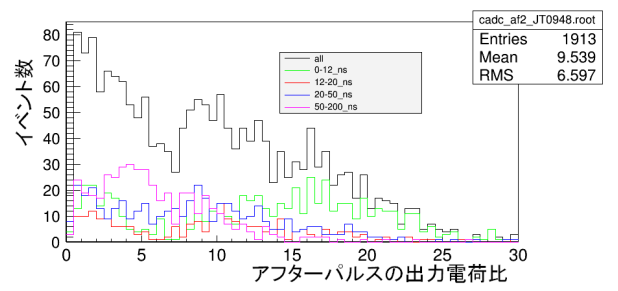


(b) 出力電荷比分布

図 A.5: JT0936

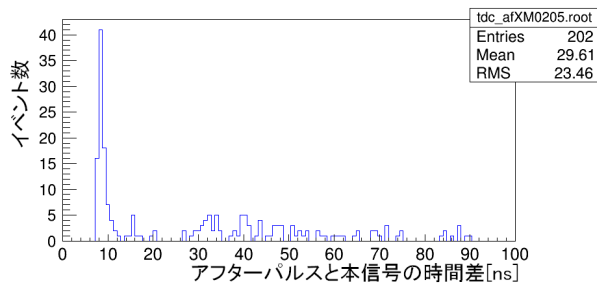


(a) アフターパルス時間差分布

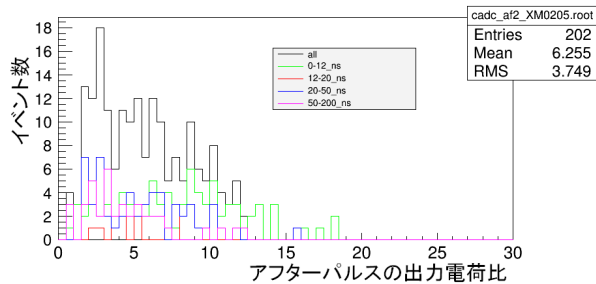


(b) 出力電荷比分布

図 A.6: JT0948

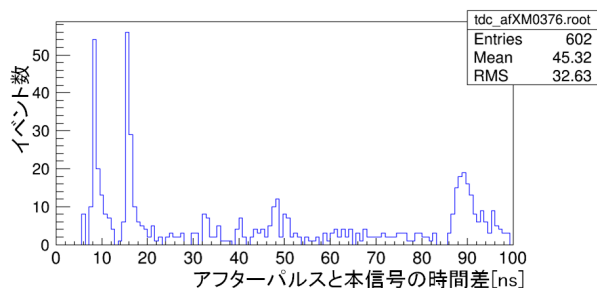


(a) アフターパルス時間差分布

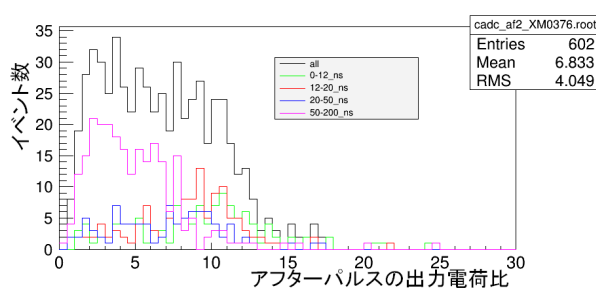


(b) 出力電荷比分布

図 A.7: XM0205



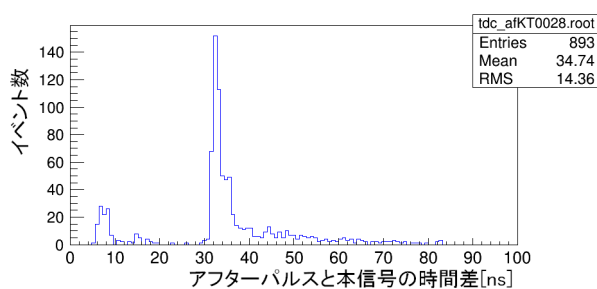
(a) アフターパルス時間差分布



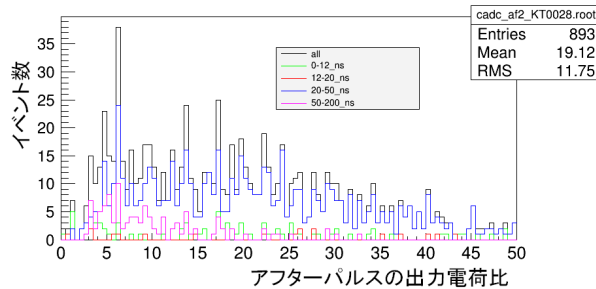
(b) 出力電荷比分布

図 A.8: XM0376

A.2 ALD 型

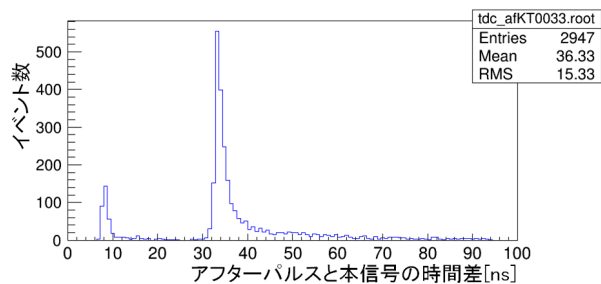


(a) アフターパルス時間差分布

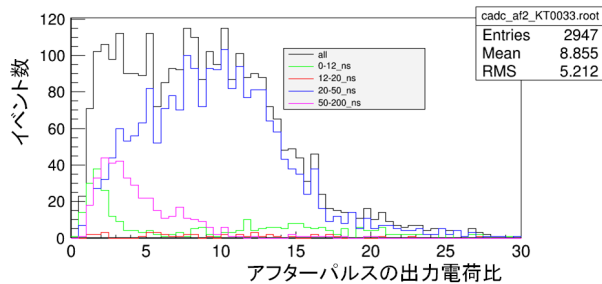


(b) 出力電荷比分布

図 A.9: KT0028

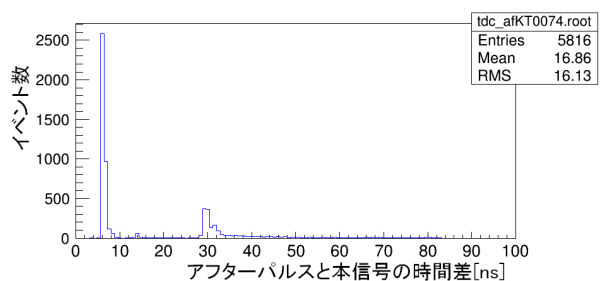


(a) アフターパルス時間差分布

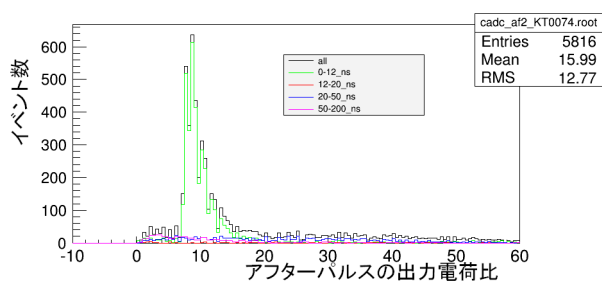


(b) 出力電荷比分布

図 A.10: KT0033

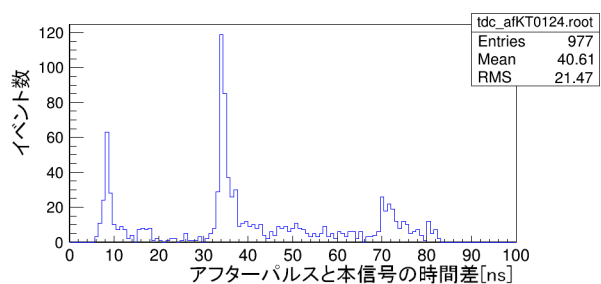


(a) アフターパルス時間差分布

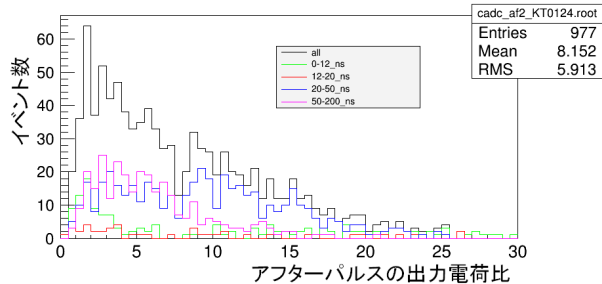


(b) 出力電荷比分布

図 A.11: KT0074

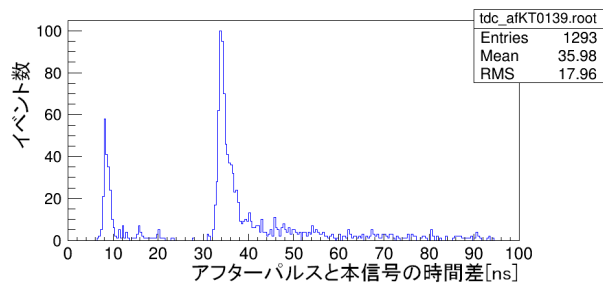


(a) アフターパルス時間差分布

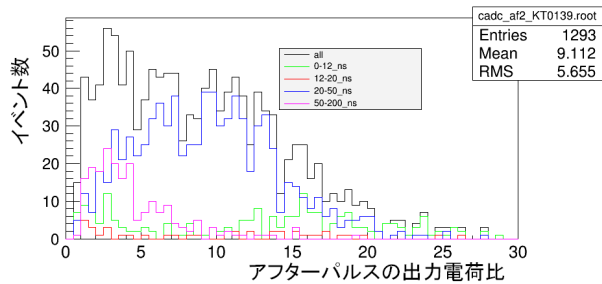


(b) 出力電荷比分布

図 A.12: KT0124



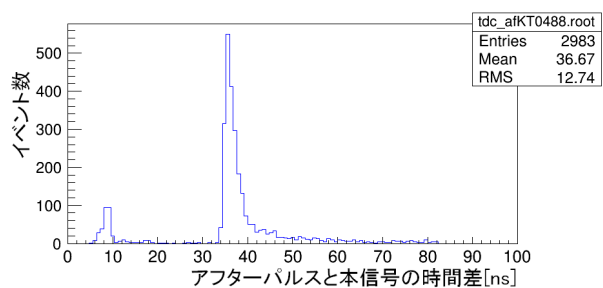
(a) アフターパルス時間差分布



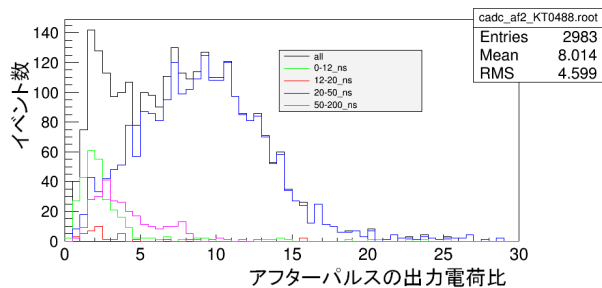
(b) 出力電荷比分布

図 A.13: KT0139

A.3 寿命改善型 ALD

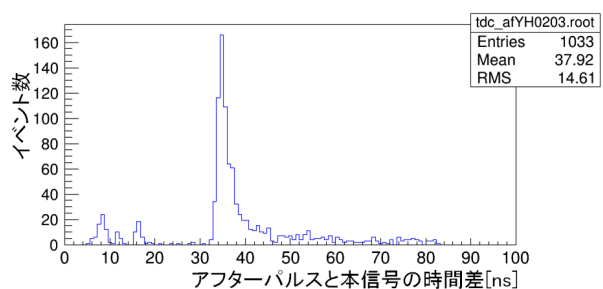


(a) アフターパルス時間差分布

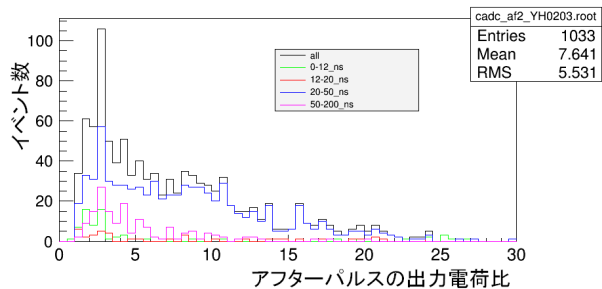


(b) 出力電荷比分布

図 A.14: KT0488

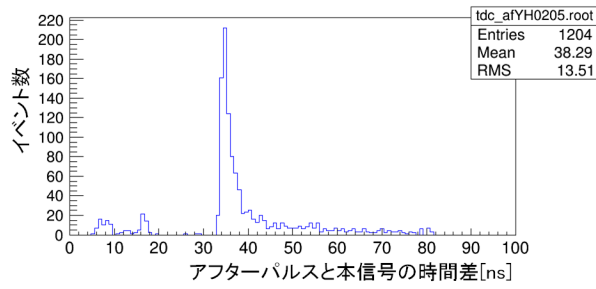


(a) アフターパルス時間差分布

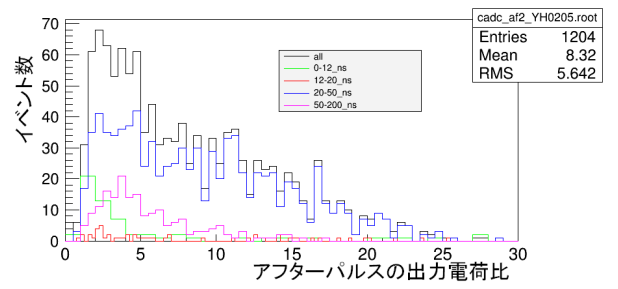


(b) 出力電荷比分布

図 A.15: YH0203

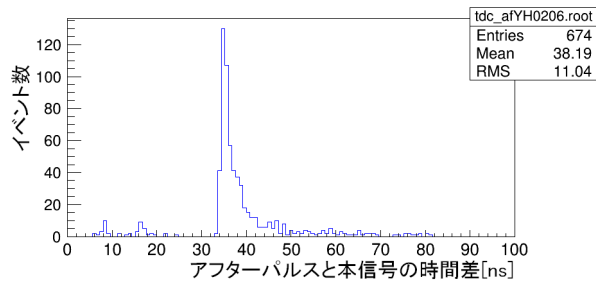


(a) アフターパルス時間差分布

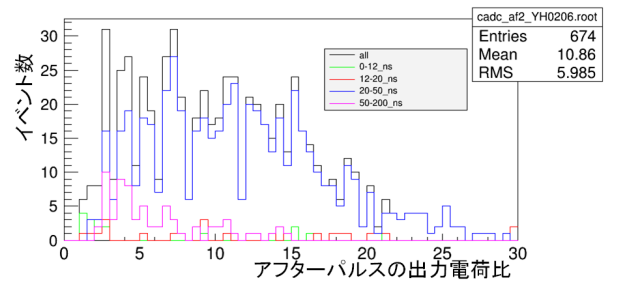


(b) 出力電荷比分布

図 A.16: YH0205

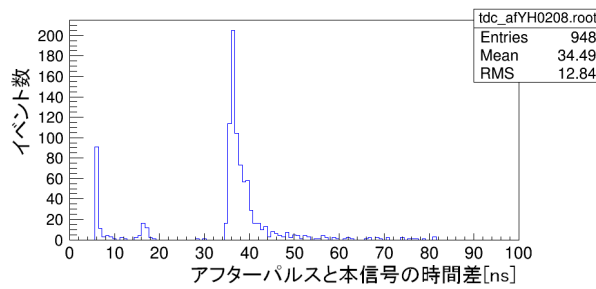


(a) アフターパルス時間差分布

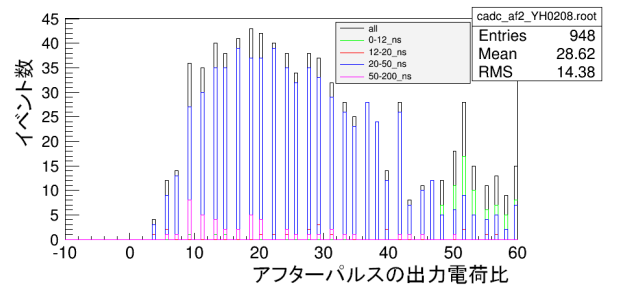


(b) 出力電荷比分布

図 A.17: YH0206



(a) アフターパルス時間差分布



(b) 出力電荷比分布

図 A.18: YH0208

A.4 膜無し寿命改善型 ALD

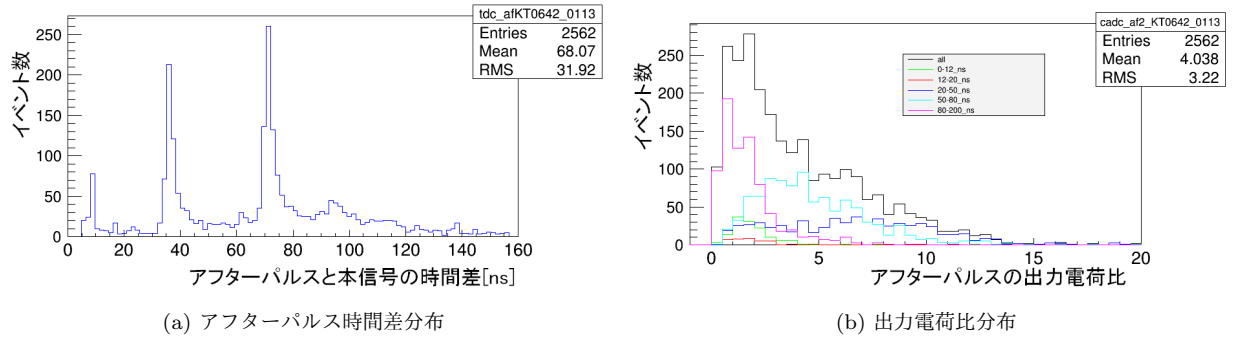


図 A.19: KT0642

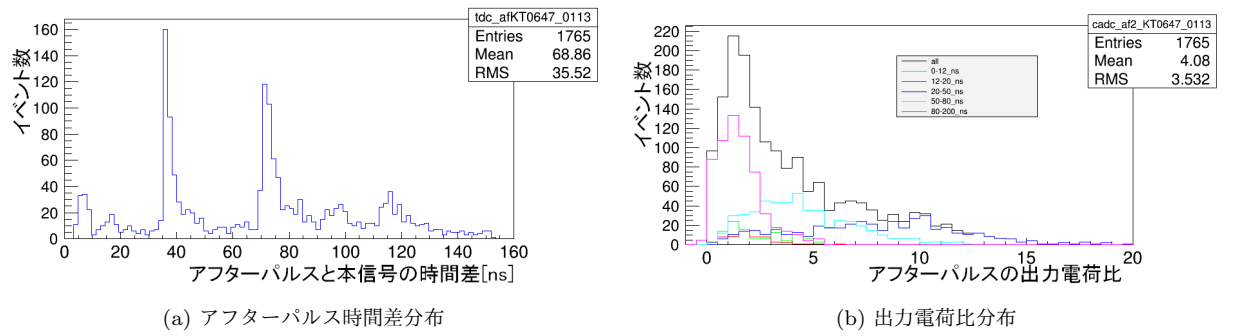


図 A.20: KT0647

付録 B 光学窓を遮蔽した状態での光電面劣化加速試験

B.1 光学窓の遮光

測定条件

一部の PMT では光学窓を遮光して測定を行った。光の当たっている範囲の MCP でのみ電子増幅は起こり、イオンや中性ガスはその領域からのみ発生する。そのためこれらによる光電面の劣化は光を当てている部分で起こる。しかし、中性ガスの場合は PMT 内部をランダムに移動できるため、必ずしも光が当たっている面のみを劣化させるとは限らない。よって遮光部分の QE も低下すれば、中性ガスのランダムな移動による寄与が大きいことわかる。

図 B.1 は光学窓の半面をブラックテープで遮光した様子である。初期量産型、ALD 型、寿命改善型 ALD のそれぞれ 1 本ずつをサンプルとして用いた。この状態で寿命測定を行い遮光部分の QE がタイプごとにどのように変化するかを調べた。

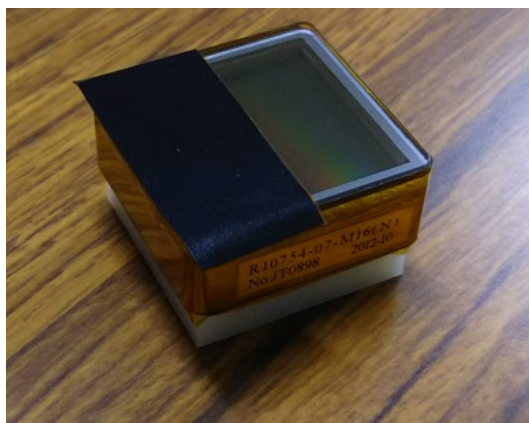


図 B.1: 光学窓を遮光した PMT

測定結果

図 B.2 はそれぞれの PMT の遮光位置を表す。図 B.3 は波長 100nm ごとの MCP-PMT 表面の測定前後での QE の比の分布である。全ての PMT で遮光部分の QE 低下は照射部分に比べて小さいことが確認できる。しかし遮光部分も全く QE が低下しないわけではなく、とりわけ長波長側では遮光部分全体の QE が低下している。図 B.4 は波長別の QE 低下比をまとめたものである。光電面の QE 低下は長波長側から低下するため [10]、同じ出力電荷量でも長波長側ではより QE が低下している。ALD コーティング品の KT0033 と YH0203 はどの波長でも照射と遮光の境界部分でステップ関数のように QE 低下比が変化している。完全なステップ関数にならないのは PMT の光学窓や MCP で反射した光が遮光部分に進入しているためだと考えられる。JT0898 ではステップ関数がさらに緩やかになっており、ALD コーティング品とは異なりすべての波長で遮光部分の QE も一定量低下している。

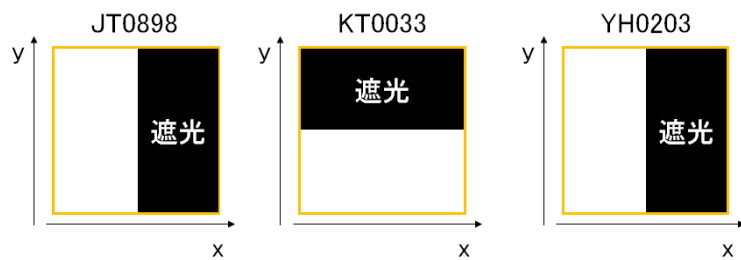
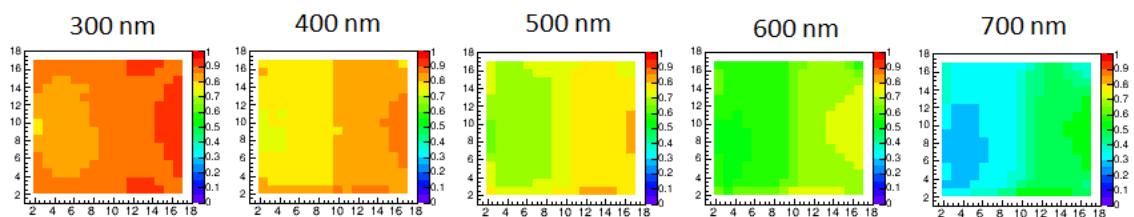
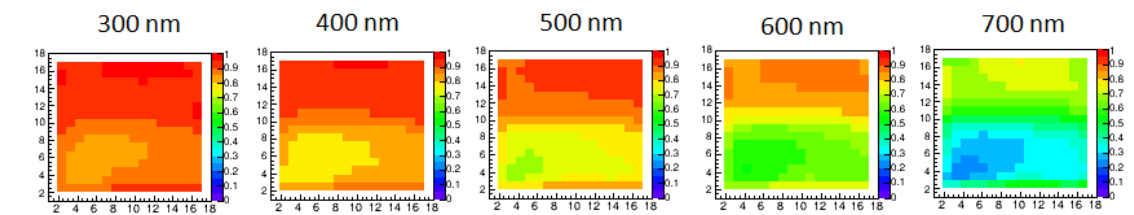


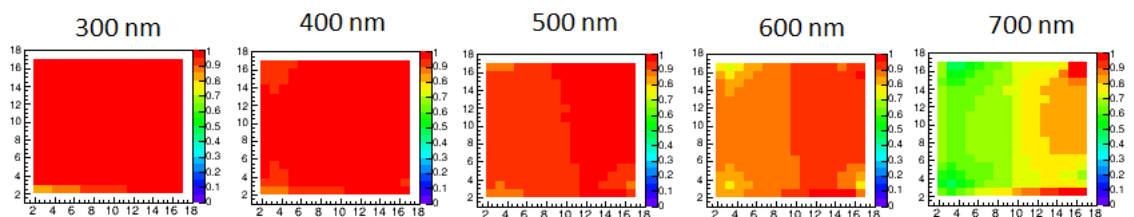
図 B.2: 各 PMT の遮光位置



(a) JT0898



(b) KT0033



(c) YH0203

図 B.3: MCP-PMT の測定前後の QE 比の 2 次元分布

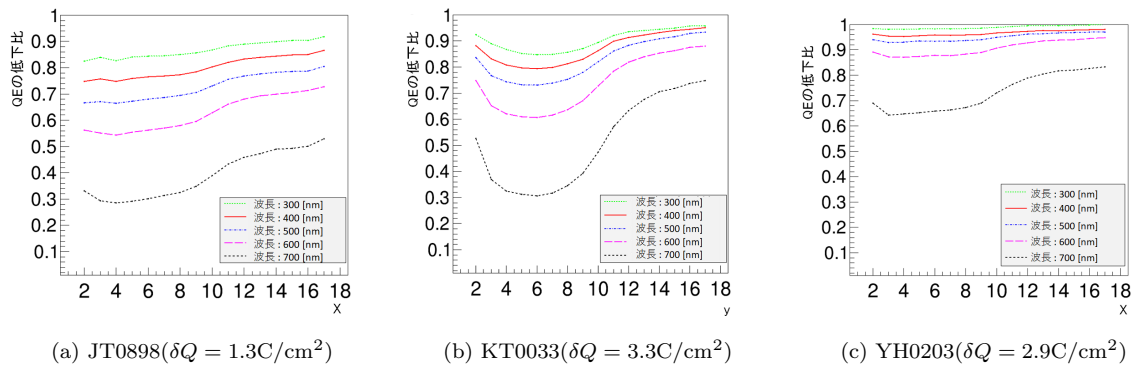


図 B.4: 波長別の QE の低下比。 δQ は今回の測定での出力電荷量を示す

遮光部分で QE 低下が起きた理由が光学窓や MCP での光の反射などによるものか、ダークノイズや遮光に用いたブラックテープの透過によるものかを調べるため、図 B.5a のように MCP-PMT を覆い¹、印加電圧をかけ LED 照射を 1 か月行った。光学窓での反射を防ぐため、ブラックテープで周りを含め遮光している。図 B.5b は 1 か月間印加電圧をかけた後、測定前と比較したものである。このように完全に PMT を遮光すると QE は低下していないことから、ダークノイズやブラックテープの透過による影響がほとんどないことが分かる。よって、遮光部分の QE 低下は照射部分から反射などで光が漏れているためだと考えられる。

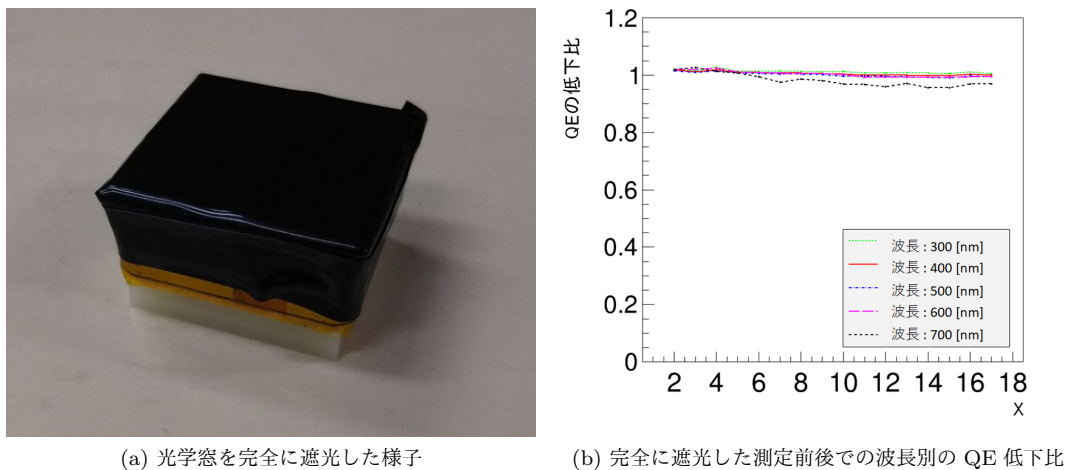


図 B.5: JT0898 の遮光の様子とその結果

イオンフィードバックによって光電面の QE が低下しているなら、遮光部分の QE は低下せず、照射部分のみ低下するステップ構造が確認されると予想される。今回の測定結果では、ALD コーティング品ではステップ関数が確認できたが、初期量産型の JT0898 では明確には確認できなかった。しかし、光学窓内部での反射などの影響で遮光部分に光漏れがあることが分かった。出力電荷量に対する光電面の QE 低下は寿命の長短に依存するため、各タイプで同程度の光漏れがあったと

¹ 半面を遮光した測定ではブラックテープの厚さを 1 枚としたが、全面の遮光では 2 枚使用した

仮定しても寿命の短い初期量産型が大きな影響を受けることになる。そのため、今回の測定で得られた結果が寿命対策の違いによるものなのか、寿命の影響なのかを判断するために今後サンプル数を増加して測定を行う必要がある。

参考文献

- [1] M. Akatsu et al., *Nucl. Instr. and Meth. A***440** (2000) 124 ; T. Ohshima, *ICFA Instr. Bull.* 20 (2000) **10** ; T. Ohshima, *Nucl. Instr. and Meth. A***453** (2000) 331
- [2] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/intro.html>
- [3] 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)
- [4] 浜松ホトニクス株式会社, “光電子増倍管 その基礎と応用 第4版” (2017)
- [5] M. Akatsu et al., *Nucl. Instr. and Meth. A***528** (2004) 763
- [6] 米倉拓弥 修士論文, “Belle II 実験 TOP カウンター実機用 MCP-PMT の性能評価” (2015)
- [7] 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)
- [8] D.E. Swets, R.W. Lee, R.C. Frank, *J. Chem. Phys.*, **34** (1961) 17.
- [9] Richard W. Johnson, et al., *Mater. Today* **17** (2014) 236.
- [10] N. Kishimoto et al., *Nucl. Instr. and Meth. A***564** (2006) 204 ; K. Inami et al., *Nucl. Instr. and Meth. A***560** (2006) 303 ; K. Inami et al., *Nucl. Instr. and Meth. A***592** (2008) 247

謝辞

本研究を行うにあたり様々なご指導を頂いた、飯嶋徹教授、居波賢二准教授、松岡広大特任准教授をはじめとする研究室の皆さまには深く感謝を申し上げます。特に指導教員である居波准教授には、研究の方法やまとめ方など沢山のことを教えていただきました。また飯嶋教授にはミーティングなどでの鋭いご指摘や研究への取り組み方など様々な助言をいただきました。さらに研究会などで自身の研究を話す機会を数多く与えてくださり本当にありがとうございました。松岡特任准教授には MCP-PMT の基礎や実験の方法などだけでなく、測定結果に対する議論など様々なことで関わっていただきました。鈴木一仁特任講師、前田陽祐研究員には実験の相談のみならず KEK での磁場測定など様々な場面で助けていただきました。特任准教授である Alessandro Gaz 氏には研究だけでなく語学の面でも助け舟を出していただきました。また加藤悠司特任助教にはコンピューティングやプログラミングの面で数々のご指導を頂きました。また戸本准教授、堀井助教、中浜准教授をはじめとする ATLAS グループのメンバーの方には、研究室会議や日常での会話の中で鋭いご指摘をいただきました。

廣瀬茂輝研究員には MCP-PMT の先行研究などを詳しく教えていただくだけでなく、研究に向かう姿勢なども示していただきました。また同じ Belle II グループの先輩の小林さん、大森さんには忙しい中自分の測定に付き合ってくれただけでなく、KEK で生き抜くための様々な知恵を与えていただきました。同期の川口さん、都築君には他大学から来た自分を温かく迎えてくれ、不慣れな自分を助けてくれました。また互いに励ましあってきたからこそ研究を行うことができたと思います。

大阪市大での指導教員であり、名古屋大学大学院への進学に背中を押してくださった中野英一准教授には、貴重な機会を与えていただき感謝しています。最後に、このような恵まれた環境で研究ができるように援助を与えてくれた両親と姉に深く感謝の意を表して謝辞といたします。