

# 修士論文

ニュートリノレスダブルベータ崩壊探索のための  
キセノンガス TPC におけるシンチレーション光検出

東北大学理学研究科  
物理学専攻

浦野壮規

2024 年

## 概要

現在までに標準理論は、観測された物理現象の説明として大いに成功している。しかしながら、宇宙創成時に同数存在したはずの粒子反粒子の対称性が破れ、反物質が消えて物質のみの宇宙が形成された事実を標準理論では説明できない。また、ニュートリノ振動の観測により、ニュートリノに質量があること、そしてその質量が他の素粒子と比べて不自然に軽いことが判明したが、ニュートリノの質量が0とされる標準理論では、この謎を説明することができない。これらの問題を解決する鍵となりうるのが、ニュートリノのマヨラナ性である。ニュートリノは電荷をもたないため、粒子と反粒子が同一粒子であるマヨラナ粒子である可能性があり、ニュートリノのマヨラナ性の検証は非常に重要なテーマの一つである。ニュートリノのマヨラナ性を検証するための最も有力な手法として、ニュートリノレスダブルベータ崩壊 ( $0\nu 2\beta$ ) の探索が挙げられる。

AXEL 実験では、高圧キセノンガス・タイムプロジェクションチェンバー (TPC) を用いて  $0\nu 2\beta$  の探索を行う。非常に稀な現象である  $0\nu 2\beta$  観測に必要な検出器の要件として、低背景事象、高エネルギー分解能が挙げられる。AXEL 実験では、イベントに伴い生じた電離電子を ELCC (Electroluminescence Light Collection Cell) と呼ばれる独自の機構で検出することで、高エネルギー分解能と優れた飛跡再構成能力を実現する。TPC としてはもちろん、ELCC の性能を最大限発揮するためには、イベントの発生点の ELCC からの垂直距離 (=  $z$  位置) 情報を知り、電離電子再結合などの  $z$  位置依存の補正をする必要がある。

$z$  位置情報は、イベントに伴い即座に発生するシンチレーション光検出から電離電子検出までの時間差で得られるが、現状では検出できるシンチレーション光量が少なく、誤った  $z$  位置情報を得るミスリコンストラクション確率が高い状況にある。また、キセノン等の貴ガスのシンチレーション波長は真空紫外光であり、直接検出には特殊な光検出器が必要となる。将来的に検出器を大型化し、世界最高感度での  $0\nu 2\beta$  探索を見据えるにあたり、シンチレーション検出技術の改良によるエネルギー分解能の向上は不可欠である。

そこで本研究では、光子の波長変換と捕獲を同時に行うことで、安価な光検出器で効率的にシンチレーション光を検出することをコンセプトに、新型シンチレーション検出器を独自に研究開発をした。基幹となる波長変換材コート板の作成を、スピンコーティングによって行い、高品質のコーティングを得ることができた。試作した新型シンチレーション検出器について、キセノンガス環境下での  $\alpha$  線由来のシンチレーション検出により評価し、要求性能を満たすことが分かった。現在は AXEL 180 L 試作機を用いて PMT との性能比較評価を行っている。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>3</b>
1.1	ニュートリノ	3
1.2	ニュートリノレスダブルベータ崩壊	3
1.3	代表的な $0\nu 2\beta$ 探索実験	5
1.4	本研究の内容	6
<b>第 2 章</b>	<b>AXEL 実験</b>	<b>7</b>
2.1	Time Projection Chamber (TPC)	7
2.2	キセノンガス	8
2.3	AXEL 検出器の概要	9
2.4	AXEL 実験の現状と将来計画	14
<b>第 3 章</b>	<b>新型シンチレーション検出器の設計</b>	<b>17</b>
3.1	研究背景	17
3.2	新型シンチレーション検出器のコンセプト	20
3.3	新型シンチレーション検出器の開発	22
3.4	光学シミュレーターによる性能推定	27
<b>第 4 章</b>	<b>新型シンチレーション検出器の製作</b>	<b>32</b>
4.1	波長変換材コーティング手法の比較検討	32
4.2	スピンコーティング用溶剤	34
4.3	スピンコーティングに用いる機材	35
4.4	コーティングの評価	35
4.5	スピンコーティング実験	40
4.6	アウトガス評価と対策	48
4.7	新型シンチレーション検出器製作	50
4.8	本章のまとめ	50
<b>第 5 章</b>	<b>ミニチェンバーでの性能評価</b>	<b>52</b>
5.1	測定目的	52
5.2	測定セットアップ	52

5.3	MPPC と PMT のゲインの測定	56
5.4	$\alpha$ 線由来イベントのデータ取得	60
5.5	考察	64
<b>第 6 章</b>	<b>AXEL 180 L 試作機での性能評価</b>	<b>65</b>
6.1	測定セットアップ	65
6.2	データ解析	67
6.3	測定後のセットアップの確認	68
6.4	今後の予定	70
<b>第 7 章</b>	<b>まとめと今後の展望</b>	<b>71</b>
	<b>参考文献</b>	<b>74</b>



# 第1章

## 序論

### 1.1 ニュートリノ

ベータ崩壊時に観測されるベータ線の連続的なエネルギー分布の説明として、1930年にW.Pauliによって「電氣的に中性な粒子」の存在が予言された [1]。この粒子は「ニュートリノ」と呼ばれ、実験的観測を待つことになった。1956年、F.Reinesらが原子炉の前に検出装置をおき、原子炉の運転にともなう信号の変化を確認した。原子炉中での核分裂反応に伴って中性子過剰核が生成されてベータ崩壊が起こるが、その際に放出された反電子ニュートリノと、検出器の水分子中の原子核との反応（逆ベータ崩壊）により生じた中性子と陽電子を観測することで、ニュートリノの存在が証明された [2]。

ニュートリノはその反応性の低さから未だに謎が多い粒子である。標準理論においてニュートリノは電荷、質量ともに0の三世代フレーバーを持つフェルミオンであるとされている。しかし、実際にはニュートリノのフレーバーが変化するニュートリノ振動現象の発見により、わずかに質量をもつことが判明している。だが、その質量固有値の測定は出来ておらず、他のフェルミオンと比べて不自然に軽い理由の解明や質量階層性の決定は未だなされていない。

ニュートリノのマヨラナ性の検証は大きな課題の一つである。電荷をもたないニュートリノは、粒子と反粒子が同一であるマヨラナ粒子である可能性がある。ニュートリノがマヨラナ粒子である場合には、シーソー機構によりニュートリノの不自然に軽い質量を説明しうる [3]。また、シーソー機構で必要とされる重いマヨラナニュートリノが存在していた場合には、宇宙の粒子反粒子の非対称性を説明する仮説である、レプトジェネシスが初期宇宙で起きていた可能性がある [4]。つまり物質のみの宇宙の起源の解明という点においても、ニュートリノのマヨラナ性の検証は非常に重要である。

### 1.2 ニュートリノレスダブルベータ崩壊

ニュートリノのマヨラナ性の最も有力な検証手段が、ニュートリノレスダブルベータ崩壊の観測である。ベータ崩壊は弱い相互作用により、原子核中の中性子が電子と反ニュー

トリノを放出し、陽子に崩壊する現象である。

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.1)$$

中性子数と陽子数が両方偶数で、かつ原子番号が1つ大きい原子核への遷移が許されない原子核の一部で起こる、1つの原子核が同時に2回ベータ崩壊を起こす事象が二重ベータ崩壊である。通常の二重ベータ崩壊 ( $2\nu 2\beta$ ) では、2つの電子と2つの反電子ニュートリノを放出する。しかし、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合には2つの反ニュートリノが対消滅し、2つの電子のみを放出するニュートリノレスダブルベータ崩壊 ( $0\nu 2\beta$ ) を起こすことが期待される。図 1.1 に二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラムを示す。 $0\nu 2\beta$  の半減期  $T_{1/2}^{0\nu}$  は図 1.1 のファインマンダイアグラムを計算することで、以下の式で

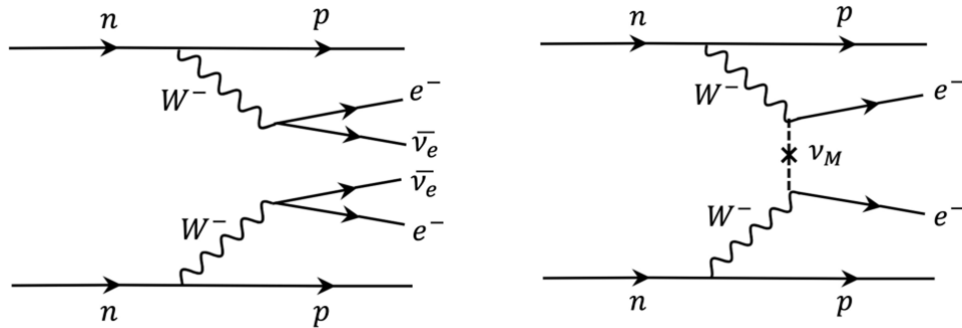


図 1.1 二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラム。図左が  $2\nu 2\beta$ 、図右が  $0\nu 2\beta$  を表す。

求めることができる。

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (1.2)$$

$G^{0\nu}$  は位相空間因子、 $M^{0\nu}$  は原子核行列要素と呼ばれる量である。また、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  はニュートリノ有効質量と呼ばれる、 $0\nu 2\beta$  に寄与する実効的な電子ニュートリノ質量を表す量であり、ニュートリノ混合行列  $U_{\alpha i}$  を用いて以下の式で表される。

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right| \quad (1.3)$$

ここで、 $\alpha (= e, \mu, \tau)$  はニュートリノフレーバーを、 $i (= 1, 2, 3)$  はニュートリノの質量固有状態を表す。 $0\nu 2\beta$  の半減期が分かれば、(1.3) 式からニュートリノの有効質量を計算することができる。

図 1.2 に二重ベータ崩壊時のエネルギー分布の模式図を示す。 $2\nu 2\beta$  では、二重ベータ崩壊時の崩壊エネルギー  $Q$  値を2つの電子と2つのニュートリノが分け合うため、観測される2つの電子のエネルギー和の分布は連続的なスペクトルとなる。しかし  $0\nu 2\beta$  においては、崩壊前の親核が静止しているものとみなすと、崩壊後の娘核と2つの電子の系の運動量は0でなければならない。原子核の質量は電子の質量と比べ非常に大きいため、娘核はほとんど動かず、無視できるレベルになり、二重ベータ崩壊時のエネルギーはほぼ電子に

分配されることになる。そのため、観測される2つの電子のエネルギーの和の分布はQ値付近に鋭いピークとして現れることになる。

このようなエネルギー分布の違いにより、 $0\nu2\beta$ のバックグラウンドとなる $2\nu2\beta$ を判別することができる。しかし、エネルギー分解能が悪いと $0\nu2\beta$ が非常に稀な現象であるために $0\nu2\beta$ のピークが $2\nu2\beta$ の高エネルギー域に埋もれ、切り分けることができなくなる。このため、 $0\nu2\beta$ 探索実験では高いエネルギー分解能が要求される。

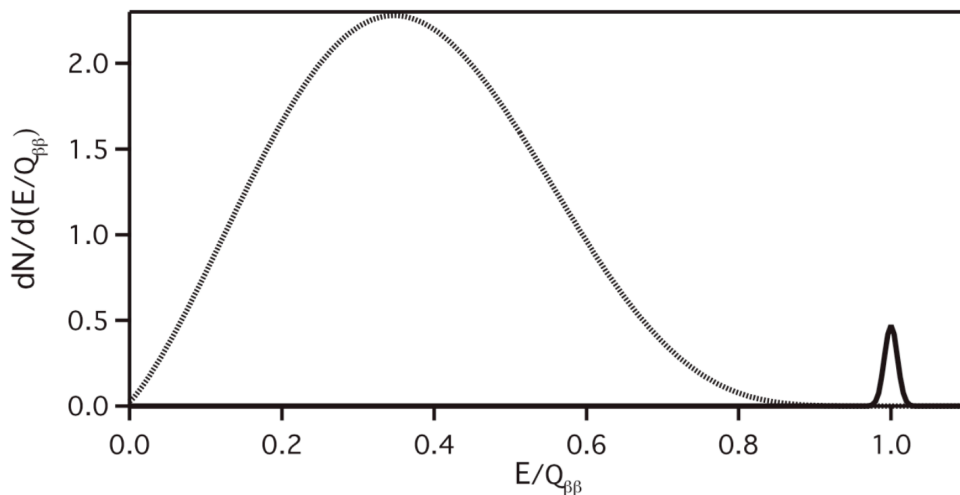


図 1.2 検出器の分解能を踏まえた、二重ベータ崩壊のエネルギー分布の模式図。点線の連続分布が  $2\nu2\beta$  のエネルギー分布を表す。横軸 1.0 付近の実線のピークが  $0\nu2\beta$  エネルギー分布を表している。

### 1.3 代表的な $0\nu2\beta$ 探索実験

ここでは、最も厳しい制限を出している KamLAND-Zen 実験と、本研究と共通点の多い NEXT 実験について説明する。

#### 1.3.1 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験は  $^{136}\text{Xe}$  を用いた  $0\nu2\beta$  探索実験であり、神岡鉱山地下の旧カミオカンデ検出器跡地で実験が行われている。検出器は 1000 トンの液体シンチレータ (Outer-LS) の中心部にミニバルーンが設置された構造になっており、ミニバルーン内部は  $^{136}\text{Xe}$  を濃縮したキセノンガスを溶かした液体シンチレータ (Xe-LS) で満たされている。Outer-LS の周囲を光電子増倍管で囲み、Xe-LS で発生したシンチレーション光を検出することで、エネルギーを測定している。また、Outer-LS は高純度に保たれており、Xe-LS への環境放射線の混入を防いでいる。

KamLAND-Zen 実験では、キセノンを 745 kg 用いた探索を行い、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu2\beta$  半減期

の 90 % 信頼度の下限値として、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.3 \times 10^{26} \text{ 年} \quad (1.4)$$

を与えている。これはニュートリノ有効質量で、

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 36 - 156 \text{ meV} \quad (1.5)$$

に対応する [5]。このニュートリノ有効質量の幅は、核行列要素の不定性によるものである。

### 1.3.2 NEXT 実験

NEXT 実験は高圧キセノンガス・タイムプロジェクションチェンバーを用いて  $^{136}\text{Xe}$  による  $0\nu 2\beta$  を探索する実験であり、スペインの地下実験施設 (Laboratorio Subterráneo de Canfranc, LSC) で実験が行われている。この検出器ではドリフトさせた電離電子をアノード電極付近で強電場により加速させることでエレクトロルミネッセンス (EL) 過程を起こさせ、光子として増幅する (2.2 節参照)。試作機による測定では Q 値に近い 2.6 MeV において半値全幅換算で約 1 % の分解能を達成している [6]。また、検出器は飛跡再構成能力を有しており、飛跡の形状から背景事象を除去することができる。

NEXT 実験では、 $0\nu 2\beta$  探索能力実証のために、 $^{136}\text{Xe}$  で濃縮したキセノンガスを 3.5 kg 用いて測定を行い、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu 2\beta$  半減期の下限値として 90 % 信頼度で  $1.3 \times 10^{24}$  年を得ている [7]。将来的にはトンスケール検出器を用いた探索を計画しており、 $^{136}\text{Xe}$  の二重ベータ崩壊の娘核であるバリウム ( $^{136}\text{Ba}$ ) 検出や [8]、圧力容器の側面に波長変換光ファイバーバレルを配置してシンチレーション光の検出効率を上げる [9]、検出器中央にカソード・両端にアノードを設置することで同じカソード電圧で動作領域を倍にする [9] など、様々なアップグレードに向けて、現在開発が進められている。

## 1.4 本研究の内容

本研究は、 $0\nu 2\beta$  探索を目的とする AXEL 実験において、現状問題となっているシンチレーション検出効率の低さ及び  $z$  位置のミスリコンストラクションの解決を目的とした。そのために、受光面積と検出効率の向上を両立する新型シンチレーション検出器の研究開発を行った。

## 第 2 章

# AXEL 実験

### 2.1 Time Projection Chamber (TPC)

TPC は 1974 年に D.R. Nygren により発明された、荷電粒子の飛跡を三次元的に再構成することができる検出器である。TPC の動作原理は以下の通りである。荷電粒子が検出器内の液体ないしガスの検出媒体を通過した際に、その飛跡に沿って検出媒体中の原子が電離され、電子と陽イオンが生じる。電離電子は検出器内にかけられた電場によりドリフトされ、アノード近傍で電気信号に変換される。荷電粒子の通過した時刻を  $t_0$ 、電離電子がアノードに到達した時刻を  $t$ 、電子のドリフト速度を  $v_{drift}$  とすると、電離電子の発生点からアノードまでの距離  $z$  は  $v_{drift} \times (t - t_0)$  で得ることができる。得られた  $z$  位置情報と電離電子が到達したアノードの位置  $(x, y)$  と合わせることで、電離電子の発生点を三次元的に再構築することが可能である。すべての電離電子信号に対して同様の操作を行うことで、荷電粒子の飛跡を三次元的に再構成することができる。発生する電離電子の数は荷電粒子のエネルギー損失に比例するため、電離電子を計数することで荷電粒子のエネルギー損失の測定が可能である。

TPC の原理的なエネルギー分解能は、生成される電離電子の数の統計的な揺らぎの大きさにより制限される。この揺らぎはポアソン分布から予想される量よりも小さく抑えられることが分かっており、電離電子の平均個数  $N$  に対する分散  $\sigma^2$  はファノ因子 ( $0 < F < 1$ ) を用いて、

$$\sigma^2 = F \times N \quad (2.1)$$

と表される。あるエネルギー  $E$  に対するエネルギー分解能の限界値  $\Delta E_{min}$  は半値全幅 (Full Width Half Maximum, FWHM) 換算で以下のような計算式で求めることができる。

$$\frac{\Delta E_{min}}{E} = 2.355 \times \frac{\sigma}{N} \quad (2.2)$$

素粒子実験分野においては TPC の検出媒体としてアルゴンやキセノンをはじめとする貴ガスがよく用いられる。その理由として、電離電子がドリフトされる際にほとんど吸収されず、かつ W 値が小さいためにエネルギー分解能が良いことや、シンチレーション発

光量が大きくかつ反応速度が速いため  $t_0$  の決定が容易なことなどが挙げられる。さらに、自己遮蔽により外部からの  $\gamma$  線バックグラウンドを大幅に減らせること、シンチレーション信号と電離信号の大きさの比から核反跳と電子反跳を区別できるため暗黒物質による核反跳と  $\gamma$  線によるバックグラウンドの識別能力が高いこと、 $^{136}\text{Xe}$  に関しては検出媒体そのものが二重ベータ崩壊核であることなど、新物理探索においても極めて有用であることも大きな理由となっている。

## 2.2 キセノンガス

貴ガスの中でも、特に AXEL 実験で使用するキセノンガスについて述べる。宇宙線やベータ線が入射した際に、相互作用によりエネルギーの一部がキセノン原子に移行し、励起される。励起状態のキセノン  $\text{Xe}^*$  からシンチレーション光が生じる過程を以下に示す [10]。



$\text{Xe}^{2*}$  は励起されたキセノン二量体である。この反応により生じるシンチレーション光の波長は図 2.1 で示すように 175 nm 程度の真空紫外光であり、キセノンガスに対して透明であるため光検出器により検出することができる。この過程の反応時間は数 ns であり、 $\mu\text{s}$  オーダーの電離電子のドリフト時間と比べて十分に短く、荷電粒子が通過するとほぼ同時に検出されることから、キセノンのシンチレーション光検出時刻を  $t_0$  と定める手法はよく用いられる。

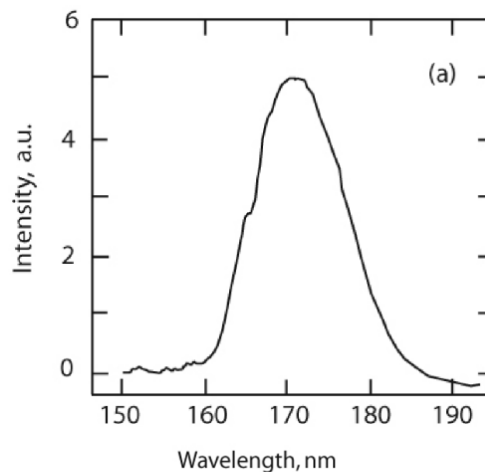


図 2.1 キセノンガスシンチレーション光の波長スペクトル [10]

キセノンガスのファノ因子は  $F = 0.13$  [11] と測定されており、電離電子を一個生成させるのに必要な平均エネルギー  $W = 22.1 \text{ eV}$  [12] を用いると、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu 2\beta$  のエネルギー

(2.458MeV) を測定する際のエネルギー分解能の限界値  $\Delta E_{min}$  は

$$\frac{\Delta E_{min}}{E_{0\nu 2\beta}} = 2.355 \times \frac{\sigma}{N} = 2.355 \times \sqrt{\frac{0.13 \times 22.1 \text{ eV}}{2458 \text{ keV}}} \simeq 0.25 \% \quad (2.5)$$

と求められる。電離電子の発生時点の揺らぎだけを見た場合、キセノンガスは半導体検出器に迫るような優れたエネルギー分解能を得られる検出媒体であることが分かる。

キセノンガスに高電場をかけると、加速した電離電子がキセノン原子を励起させて式 (2.3) (2.4) の反応を起こす。その際に生じる光子の数は初期電離電子の数と高電場下での移動距離に比例する。このような電場をかけることで起きる電離電子由来の発光過程をエレクトロルミネッセンス過程 (EL 過程) と呼ぶ。EL 過程における単位距離当たりの発生光子数  $dN_{ph}/dx$  は圧力  $p$  と換算電場  $E/p$  の関数として実験的に求められており、キセノンガスの場合、下式のように表される [13]。

$$\frac{dN_{ph}}{dx} [\text{photon/cm}] = (140 E [\text{kV/cm}]/p [\text{bar}] - 116)p [\text{bar}] \quad (2.6)$$

さらに電場を大きくすると、電子がキセノン原子を励起・電離させるだけのエネルギーを持つようになり、電離された電子がまたキセノン原子を励起・電離するようになる。このような電離電子の増幅は雪崩増幅と呼ばれ、電子のドリフト距離に対して指数関数的に電子が増える。雪崩増幅の下では、初期の電離電子の統計的揺らぎも指数関数的に増幅されてしまうため、線形増幅である EL 過程と比べエネルギー分解能が悪化する。そのため、AXEL 実験では EL 過程を用いた電離電子の信号読み出しを行っている。

## 2.3 AXEL 検出器の概要

AXEL 検出器は  $^{136}\text{Xe}$  を濃縮したキセノンガスを 8 気圧で封入した高圧キセノンガス TPC である。検出媒体として、二重ベータ崩壊核である  $^{136}\text{Xe}$  を用いることで、大質量の崩壊核を用いた、優れたエネルギー分解能をもつ検出器を実現している。図 2.2 に AXEL 検出器の概念図を示す。荷電粒子通過時に生じたシンチレーション光は光電子増倍管 (PMT) で検出される。電離電子は検出器内の高電場によりドリフトされ、ELCC (Electroluminescence Light Collection Cell) と呼ばれる検出器で検出される。AXEL 検出器は、増幅揺らぎの小さい EL 過程を用いた電離電子の信号読み出しを行うことで、 $0\nu 2\beta$  の Q 値において半値全幅で 0.5 % 以下のエネルギー分解能の達成を目指している。

以下では、現在 AXEL 実験で用いている 180 L 試作機の構成要素について述べる。

### 2.3.1 ガス容器とガス循環系

現在運用中の 180 L 試作機のガス容器を図 2.3 に示す。体積 180 L のガス容器はステンレス鋼製であり、ELCC 側に 5 つ、PMT 側に 2 つのフィールドスルーフランジが取り付けられている。80 A port は MPPC や PMT のバイアス電圧と信号読み出し線、高圧電圧とセ



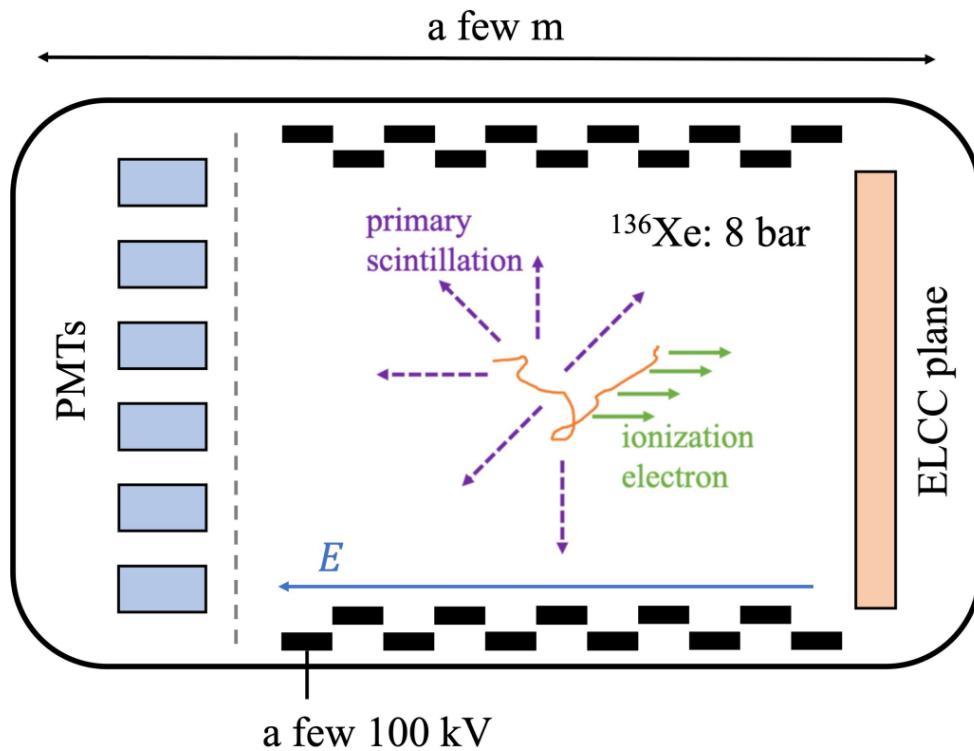


図 2.2 AXEL 検出器の動作概念図

ンサー線を通すために用いられている。50 A port は容器へのガス導入や循環、真空引きに用いられている。

180 L 試作機におけるキセノンガス循環系の概略図を図 2.4 に示す。キセノンガスを純化するため、モレキュラーシーブとゲッターが配置されている。モレキュラーシーブでは、 $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , NMHC を除去することができる。ゲッターでは  $\text{N}_2$  を取り除くことができる。循環経路に取り付けてある露点計では、キセノンガスの露点を測定し、キセノンガス中の水分量をモニターできるようになっている。

### 2.3.2 フィールドケージと Cockcroft-Walton 回路

図 2.5 に 180 L 試作機のフィールドケージと Cockcroft-Walton (CW) 回路を示す。AXEL 実験では、電離電子がドリフト中に再結合し消失することを防ぐために、 $100 \text{ V/cm/bar}$  のドリフト電場を印加することを目標としている。フィールドケージはアルミニウム、もしくは無酸素銅の電極リングからなり、カソード電極からアノード電極までの間に異なる直径のリングが互い違いに並べられている。フィールドケージはカソード電極とアノード電極間の電位差を分割し、均一に電場に分配するように機能する。現在運用中の 180 L 試作機ではフィールドケージの長さは 40 cm である。これに、8 気圧のキセノンガスを導入して測定するためにはドリフト領域には  $32.8 \text{ kV}$  の電位差が必要となる。ELCC には  $12 \text{ kV}$  の電圧を印加するため、カソード電極には  $44.8 \text{ kV}$  を印加する必要がある。また、将



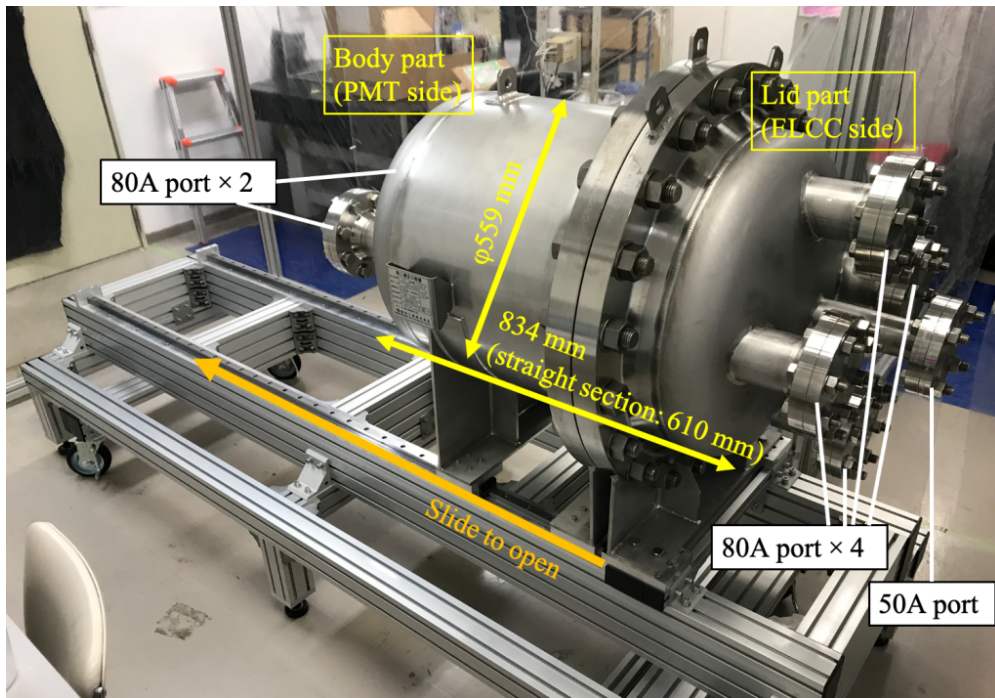


図 2.3 180 L 試作機的气体容器の画像

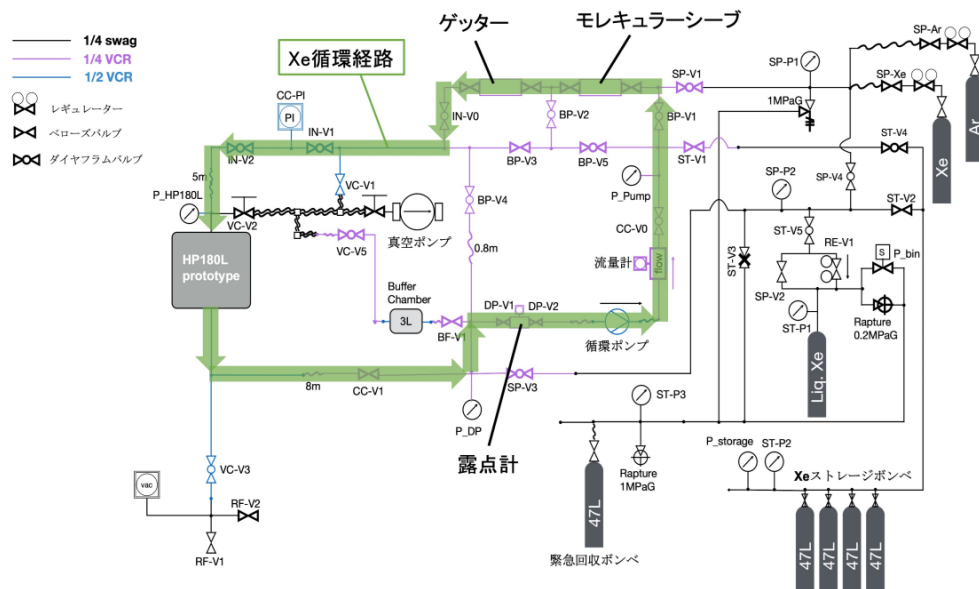


図 2.4 キセノンガス循環系の概略図。緑矢印の経路は測定時のキセノンガス循環路である。

来的に検出器を大型化するにあたり、100 kV 以上の高電圧が必要となる。

このような高電圧をケーブルによって直接印加する場合、ケーブルと圧力容器との間で沿面放電が発生する危険性がある。気密性を保ちながら沿面放電対策を行うには巨大なフィールドスルーが必要となってしまうため、AXEL 実験では圧力容器内で CW 回路を用いて高電圧を発生させている。CW 回路は図 2.6 で示した通り、コンデンサとダイオードで構成されている。抵抗チェーン側のコンデンサ列を平滑コラム、もう一方を押し上げコラムという。図の茶色で示されたコンデンサ二つとダイオード二つのユニットが一段であり、AC 電源を入れると最初の半周期で押し上げコラムが充電され、次の半周期では平滑コラムが充電される。これを繰り返すことで上段まで充電されていく。理想的な  $N$  段の回路に Peak to Peak 値  $V_0$  の電圧を印加したとすると、最上段の平滑コラムからは  $NV_0$  の DC 電圧を得ることができる。CW 回路で生成した電圧は抵抗チェーンを通じてフィールドケージに供給され、ドリフト電場を形成する。

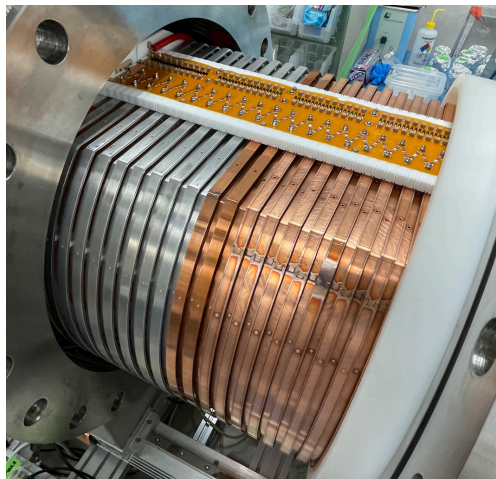


図 2.5 180 L チェンバーのフィールドケージと CW 回路

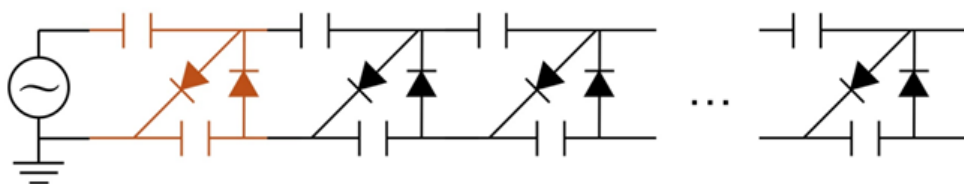


図 2.6 CW 回路の回路図。茶色部を一単位とし、これを複数段組み合わせることで高電圧を得る。

### 2.3.3 ELCC

ELCC は AXEL 実験で独自に開発された電離電子読み出しシステムであり、図 2.7 に示すように、アノード電極と PTFE (ポリテトラフルオロエチレン、テフロン) 板、メッシュ電極、光検出器である MPPC から構成されている。アノード電極と PTFE 板には等間隔

に穴が開いているセル構造になっている。アノード電極とメッシュ電極で PTFE 板をはさみ、メッシュ電極を接地してアノード電極に負電圧を印加することで、PTFE のセル内に電場を作ることができる。各セルに一つの MPPC が配置されている。PTFE のセル内の電場は  $3\text{ kV/cm/bar}$  とドリフト電場  $100\text{ V/cm/bar}$  と比べて十分大きく、これによって ELCC までドリフトされた電離電子をいずれかのセルの中に引き込まれ、EL 過程を経て光子を生じさせる。発生した光子は真空紫外光に対して高い反射率をもつ PTFE により効率よく集光されて MPPC で検出される。ELCC の各セルでの EL 光検出時刻と  $t_0$  の時間差から三次元的に飛跡を再構築することができる。また、電離電子の数は EL 光強度によって知ることができる。AXEL 実験では液体キセノン TPC ではなくキセノンガス TPC を用いて  $0\nu 2\beta$  の探索を目指している。ELCC の優れた飛跡再構築能力とエネルギー分解能によって  $0\nu 2\beta$  のエネルギーに近い背景事象の除去が可能であることがその理由である。液体キセノンを用いた場合よりも体積当たりの崩壊核の数では劣るが、この問題は検出器を大型化することで解決することができる。

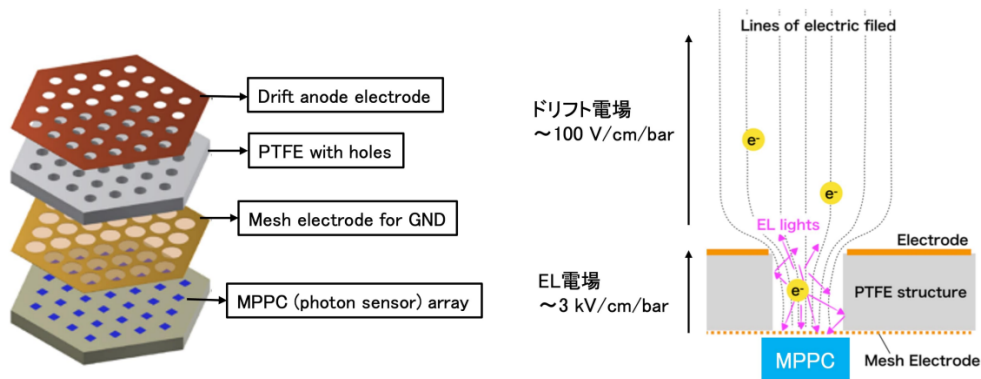


図 2.7 ELCC の構造と検出原理

### 2.3.4 PMT

AXEL 実験で現在運用中の 180 L 試作機では、10 気圧に耐えられる合成石英窓の 26 mm 角 PMT (R8520-406-001) を 7 本用いてキセノンガスシンチレーション光の直接検出を行っている。PMT の前面にはグラウンド電位の保護メッシュを設け、カソード電極の後方に図 2.9 のように PMT を配置している。図 2.8 に示すように、PMT の Quantum Efficiency (Q.E., 量子効率) は 175 nm 波長に対して 30 % で、光電子の収集効率は 70 % である。したがってキセノンガスシンチレーション光の PMT への垂直入射を仮定した場合、検出される割合はおおよそ 21 % 程度である。3.1 節で詳しく述べるが、受光面の大きさは 20.5 mm 角サイズと小さいことや設置数の少なさから、検出できるシンチレーション光信号が小さく、 $z$  位置のミスリコンストラクション確率の高さが課題となっている。

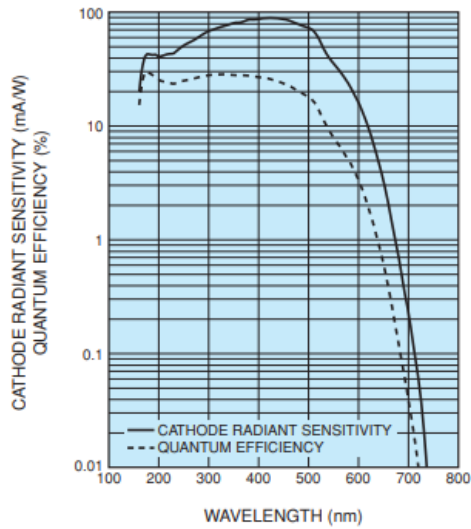


図 2.8 R8520-406-001 の量子効率の波長依存性 [14]

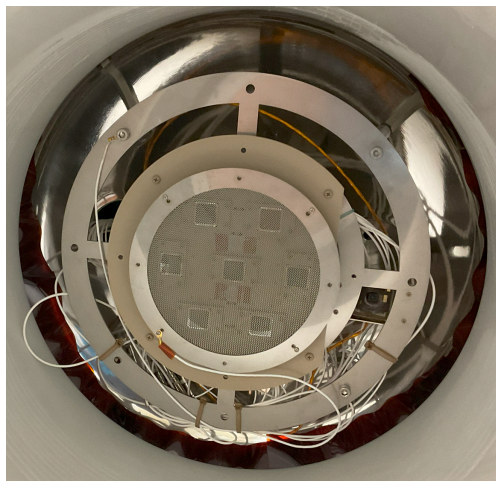


図 2.9 180L 試作機における PMT の配置

## 2.4 AXEL 実験の現状と将来計画

### 2.4.1 AXEL 実験の現状

AXEL 実験では、2018 年まで小型 10 L チェンバーを用いて ELCC の原理実証を行った。以降は検出領域を拡大した 180 L チェンバーを製作、読み出しチャンネル数を段階的に増やして性能評価を行っている。直近の 8 気圧・672 ch・フィールドケージ 18 cm の性能評価では、1836 keV において半値全幅で 0.73 %、Q 値に外挿して 0.60 % のエネルギー分解能を達成している [15]。1836 keV におけるエネルギー分解能の内訳を表 2.1 に



示す。

表 2.1 : 180 L 試作機 における 1836 keV でのエネルギー分解能の内訳 [15]

Error in the time variation correction	0.32 %
Fluctuation of the number of initial ionization electrons	0.29 %
Fluctuation of the EL generation and detection	0.24 %
Error in the EL gain correction	0.23 %
Recombination	0.22 %
Fluctuation of the MPPC non-linearity	0.18 %
$z$ mis-reconstruction	0.13 %
Variation in time bin of time variation correction	$\lesssim$ 0.16 %
Error in the $z$ -dependence correction	$\lesssim$ 0.11 %
Accuracy of the MPPC recovery times	$\lesssim$ 0.11 %
Offset of the baseline	$\lesssim$ 0.09 %
Fluctuation of the attachment	$\lesssim$ 0.02 %
Position dependence of the EL gain	0 %
Waveform processing in the FEB	0 %
Estimation total	0.63 % to 0.67 %
Data total	$(0.73 \pm 0.11)$ %

エネルギー分解能を制限する要因は、検出器の原理的な制限と、各部の性能向上や長期間の安定した検出器の運用により改善が見込まれるものの二つに分別される。後者としては主に EL 光の統計揺らぎや再結合による電離電子数の揺らぎ、 $z$  位置のミスリコンストラクションなどが挙げられる。EL 光の統計揺らぎ (0.24 %) については、ELCC で用いる MPPC の受光面積拡大により、分解能への寄与を 0.15 % まで抑えられると見積もられている。再結合による電離電子数の揺らぎ (0.22 %) についても、CW 回路での目標電圧値を達成すると原理上分解能への寄与を十分に小さくすることができる。 $z$  位置のミスリコンストラクションはイベントごとのシンチレーション光検出効率を改善することで、分解能への寄与を十分に小さくできると考えられるが、現状の PMT によるキセノンガスシンチレーション光の直接検出では改善をすることは困難である。本研究では PMT よりも高い検出効率が見込まれるシンチレーション検出器の研究開発を行い、その性能を評価した。これについては第 5 章で詳しく述べる。すべての開発が完了した場合には、1836 keV において半値全幅で 0.37 %、Q 値に外挿して 0.32 % のエネルギー分解能の達成が見込まれる。

#### 2.4.2 AXEL 実験の将来計画

現在 AXEL 実験では 180 L 試作機の性能評価と並行し、検出領域を大型化した 1000 L TPC 検出器の建設に向けた研究開発がおこなわれている。1000 L TPC 検出器では  $^{136}\text{Xe}$  を約 20 kg 使用し、AXEL 実験では初めての  $0\nu 2\beta$  探索を行うことで、 $0\nu 2\beta$  探索能力の実

証を目指す。データ取得は宇宙線由来の背景事象を減らすために神岡鉱山地下にておこなわれる。図 2.10 のようにチェンバーはすでに搬入が完了している。1000 L TPC 検出器を用いて低背景事象かつ高エネルギー分解能のもとで3年間安定して測定することができれば、 $0\nu 2\beta$  の半減期の下限值として  $2.1 \times 10^{25}$  年を得られると見積もられている。将来的にはトンスケールの TPC を用いた  $0\nu 2\beta$  探索を目標としており、1 トン TPC 検出器では質量比で 1000 L TPC 検出器の約 50 倍の感度が期待できる。この場合1年の安定した測定により現在の世界最高感度を更新することができる見込みである。

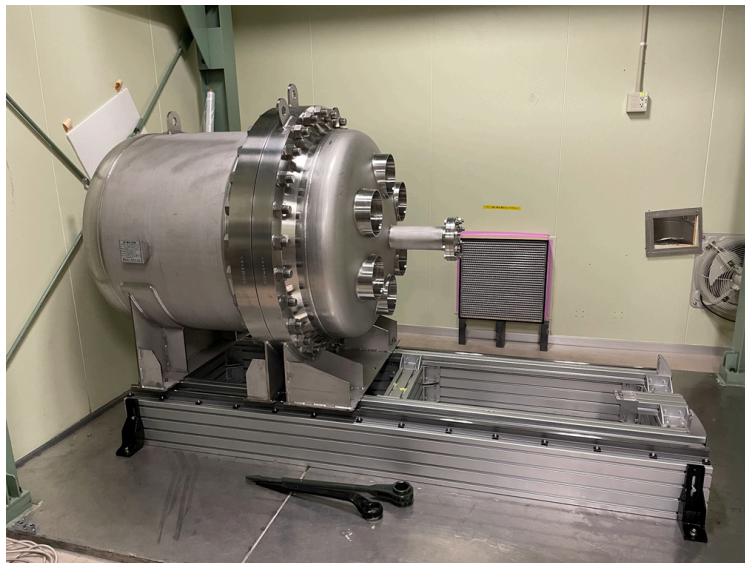


図 2.10 神岡鉱山地下に搬入された 1000 L チェンバー

## 第 3 章

# 新型シンチレーション検出器の設計

### 3.1 研究背景

AXEL 実験では  $0\nu 2\beta$  の Q 値でエネルギー分解能を半値全幅で 0.5 % 以下にすることを目標にしているが、現時点で達成できていない。その原因の一つに表 2.1 で示されている  $z$  位置のミスリコンストラクション (0.13 %) の影響がある。以下では、AXEL 実験での  $t_0$  の決定と  $z$  位置のリコンストラクション手法について述べたのち、 $z$  位置のミスリコンストラクションの原因と、それを解決する上での課題について述べる。

#### 3.1.1 AXEL 検出器における $t_0$ の決定と $z$ 位置のリコンストラクション手法

図 3.1 に典型的な PMT の出力波形を示す。PMT の出力波形について、PMT の閾値はノイズより十分大きく 1 photon-equivalent (p.e.) の波高より低い値に設定してある。図 3.1

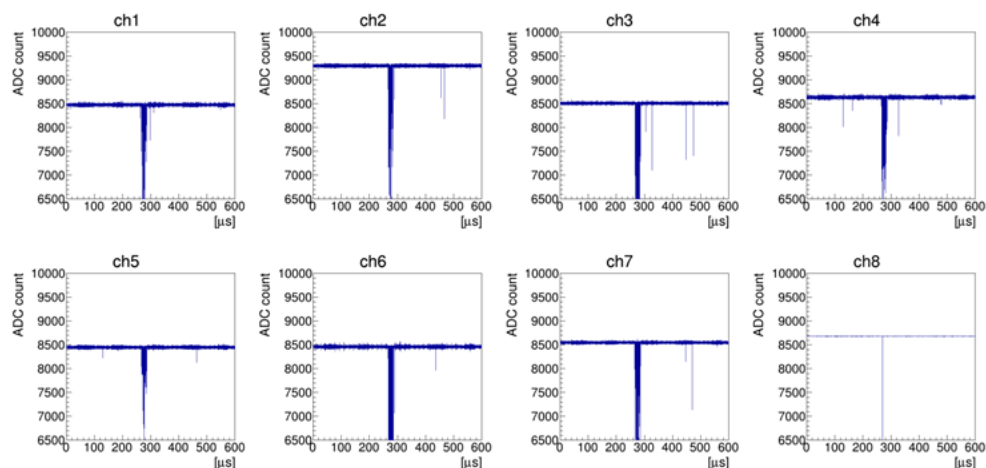


図 3.1 PMT の典型的な波形。ch 4 と ch 5 における約  $130 \mu\text{s}$  でのヒットはシンチレーション信号候補である。約  $300 \mu\text{s}$  でのヒットは、EL 信号である。ch 8 は、PMT の信号ではなく EL 光検出のトリガーである。

で示される通り、PMTにはシンチレーション光だけでなくELCCで生じるEL光も入射する。これらのヒットを区別するため、波形の幅が400 ns以下かつ他のヒットから1  $\mu$ s以上離れているヒットをシンチレーション光候補と判定する。偶発的に生じた信号が $t_0$ の決定に使われることを防ぐため、100 ns以内に2チャンネル以上でシンチレーション光候補判定されたヒットがある場合をシンチレーション光によるクラスターと判定し、その発生時刻を $t_0$ とする。

なお、1イベント中で複数のシンチレーション光判定が為された場合には、どちらがEL光に対応するシンチレーション光か不明であり、 $z$ 位置のミスリコンストラクションを引き起こすため、このようなイベントは除外している。

また、シンチレーション光ヒット領域にEL光のような信号が検出される場合もある。図3.2にそのようなPMT波形の例を示す。この場合、EL光のような信号の一部がシンチレーション光ヒットとして誤認される可能性がある。そのため、EL光波形の立ち上がり端から18  $\mu$ s以内にEL光のような信号が検出されるイベントは除外している。

このようなイベント選択を行っても、シンチレーション光検出効率が低い場合には、EL光イベントに対応するシンチレーション光が検出されず、かつ偶発的にシンチレーション光ヒット領域にシンチレーション光のような信号が検出されることにより、 $z$ 位置のミスリコンストラクションが引き起こされることがある。

180 L試作機では、シンチレーション光検出効率の低さが実際に問題となっている。シンチレーション光子一つを生成するための平均エネルギー(W値)が72 eVであることから[16]、1836 keVイベントで生成される光子数は26,000程度と見積もることができる。PMTまでの平均距離を34.5 cm、PMTの受光面サイズは2.05 cm角、PMTの光子検出効率を21%、メッシュの開口率が陽極メッシュで71%、PMTの保護メッシュで67%であることを考慮すると、7つのPMTで検出が期待される光子数は合計で約5.1となる。このため、EL光イベントに対応する正しいシンチレーション光を検出できる割合である $\epsilon$ は小さく、 $z$ 位置のミスリコンストラクションが生じている。

### 3.1.2 $z$ 位置のミスリコンストラクションの確率

前節で述べたように、偶発的なシンチレーション光ヒットにより、 $z$ 位置のミスリコンストラクションが引き起こされる可能性がある。図3.3は1836 keVイベントにおけるシンチレーション光と判定されたヒットクラスター数分布を示している。EL光イベントに対応する正しいシンチレーション光の検出効率を $\epsilon$ 、偶発的に検出されたシンチレーション光ヒットの平均数を $\mu_{acc}$ とした場合、シンチレーション光として検出されるクラスター数が0個または1個である確率はポアソン分布式より以下の通り表せる。

$$P(n_{sci} = 0) = (1 - \epsilon)e^{-\mu_{acc}} \quad (3.1)$$

$$P(n_{sci} = 1) = (1 - \epsilon)\mu_{acc}e^{-\mu_{acc}} + \epsilon e^{-\mu_{acc}} \quad (3.2)$$

図3.3より $\epsilon = 0.60$ 、 $\mu_{acc} = 0.075$ であることが分かる。



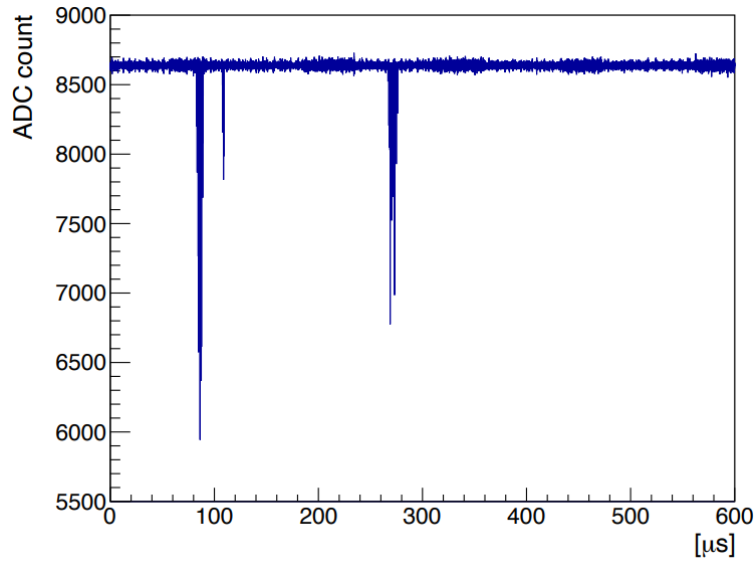


図 3.2 シンチレーション光ヒット領域に EL 光のような信号が検出された PMT 波形の例 (図の 100  $\mu\text{s}$  付近)。このようなイベントは除外される。

解析では 1 ヒットを持つイベントのみが用いられるため、式 (3.2) より  $z$  位置のミスリコンストラクション確率は以下の式で表される。

$$P_{mis} = \frac{(1 - \epsilon)\mu_{acc}e^{-\mu_{acc}}}{P(n_{sci} = 1)} \quad (3.3)$$

したがって、1836 keV イベントの場合にはミスリコンストラクション確率が 5 % だと計算される。この 5 % から、 $z$  補正を通してエネルギー再構成への悪影響を評価した結果が表 2.1 の 0.13 % である。

### 3.1.3 シンチレーション検出の現状と課題

2.6 節で述べた通り、現在 AXEL 実験で運用している 180 L 試作機では PMT を 7 本用いてガスキセノンシンチレーション光の直接検出を行っている。しかしながら、前節で述べた通りシンチレーション光の検出効率の低さ及び  $z$  位置のミスリコンストラクション確率が高いことが問題になっている。

キセノンガスを 8 気圧程度の高圧で運用することを考慮すると、受光面積の拡大のために PMT の合成石英窓の口径を大きくすることは困難である。また PMT 1 本あたり数十万円と高額であることから、数を増やして受光面に敷き詰めることは現実的ではない。

そのため、本研究では PMT によらない効率的な新型シンチレーション検出器の研究開発を行った。

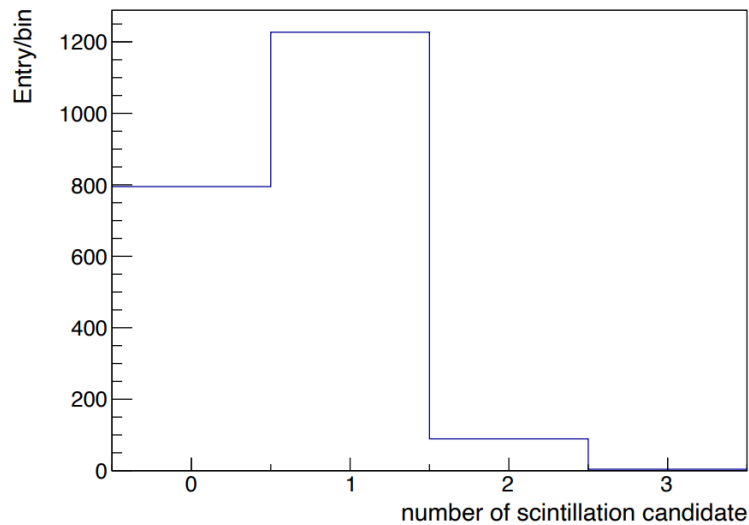


図 3.3 1836 keV イベントにおけるシンチレーション光と判定されたヒット数分布 [15]

## 3.2 新型シンチレーション検出器のコンセプト

シンチレーション検出器を開発するにあたり、高い光検出効率と受光面積の大幅な拡大によって  $0\nu 2\beta$  イベントにより生じるシンチレーション光を確実に検出したうえで、検出光量によってアクシデンタルな混入成分を識別できることが要求される。 $0\nu 2\beta$  探索を行う神岡坑内でのバックグラウンドレートを図 3.4 に示す [17]。図から分かるように、低エネルギー成分が大きいいため、シンチレーションの検出光量を増やすことで  $0\nu 2\beta$  由来のシンチレーションと区別できると期待される。仮に 2000 keV までのイベントを  $0\nu 2\beta$  と区別することを考えると、2458 keV イベントに対するシンチレーション検出光量を 25 程度としなければならない。

新型シンチレーション検出器には、シンチレーション検出効率の高さに加え、高圧環境下での長期間の安定運用が可能であることや、データ取得の観点から読み出しチャンネル数をなるべく削減すること、製作の容易さ・低コスト化によって量産性を確保することが求められる。これは AXEL 検出器の将来的な大型化を見据えるにあたり、必須条件である。

上記の要件をすべて満たすようなシンチレーション検出器開発にあたり、着目したのが光子の波長変換および捕獲である。これは X-ARAPUCA より着想を得たものである。

### 3.2.1 X-ARAPUCA

X-ARAPUCA[18][19] は、液体アルゴンシンチレーション光を検出するための新技術で、アメリカで建設が進められている加速器ニュートリノ振動実験 DUNE の後段検出器であ

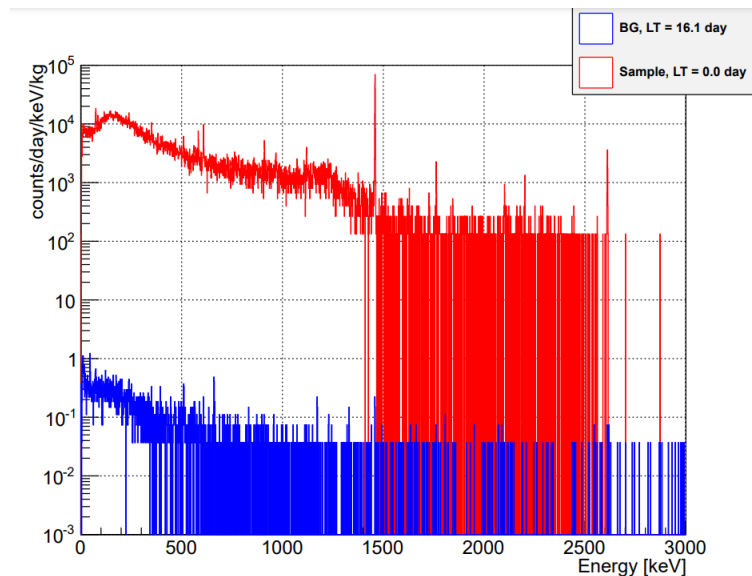


図 3.4 Ge 検出器で測定した神岡坑内でのバックグラウンドレート [17]。  
 赤は Ge 検出器の下に鉛 20 cm を置き、周囲を 1 cm 厚の銅で遮蔽した場合である。  
 青は Ge 検出器を 20 cm 厚の鉛で覆い、さらに 2.5 cm 厚の低バックグラウンド鉛と 6 cm 厚の銅で遮蔽した場合である。

る、液体アルゴン TPC のために開発されたものである。

前述の通り、液体アルゴンのシンチレーション光は、一般的な感光素子が感度を持たない真空紫外領域で、128 nm 波長帯で放出される。ARAPUCA は、液体アルゴンシンチレーション光の波長を、感光素子の感度がある波長帯に変換したうえで高反射率の内面を持つ箱の内部で閉じこめ、検出効率の向上を図っており、X-ARAPUCA は ARAPUCA のコンセプトをそのままに、箱内部に波長変換スラブを追加し、より検出効率をあげるため考案されたものである。

### 3.2.2 X-ARAPUCA の構造

X-ARAPUCA のセットアップは図 3.5 で示すようにいくつかの層からなる。上から順に、波長変換材であるパラテルフェニル (pTP)、Dichroic Filter、液体アルゴン (LAr)、アクリルスラブ、LAr であり、上面を除き側面と底面は光検出器である SiPM もしくは反射材が覆っている。

pTP 層にて、入射した波長 127 nm 帯の LAr シンチレーション光を 350 nm 帯の波長に変換する。さらに、アクリルスラブ中に埋め込まれた波長変換材により 430 nm 帯の波長に再変換される。Dichroic Filter は 400 nm cutoff フィルターであり、入射窓の内側に蒸着されている。これにより 350 nm 帯の波長の光子を透過するが、アクリルスラブで放出される 430 nm 帯の光子は反射され、アクリルスラブ内に捕獲される仕組みになっている。

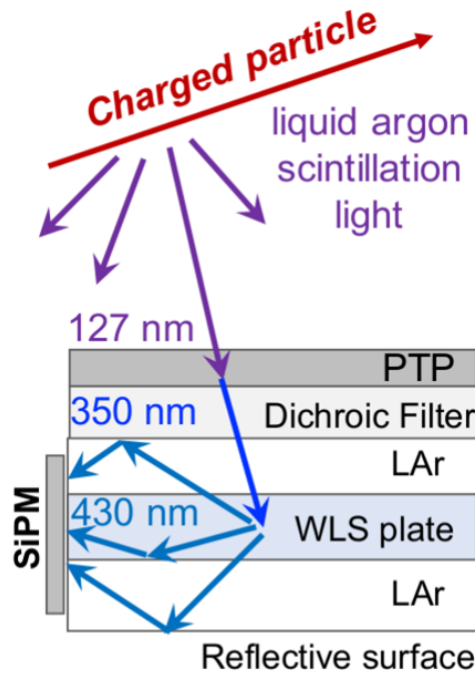


図 3.5 X-ARAPUCA の構造 [19]

### 3.3 新型シンチレーション検出器の開発

#### 3.3.1 構成材質の選定

X-ARAPUCA のコンセプトをもとに、より量産性を確保しつつ、コストを削減する試みを行った。初期は X-ARAPUCA のデザインを踏襲し、Dichroic Filter の使用を考慮した。しかし、AXEL 実験では屈折率の小さいキセノンガスを用いているため、全反射により Dichroic Filter を用いずに、屈折率の違いによって効率良くシンチレーション光を捕獲できる見込みを立てることができた。Dichroic Filter を使用する場合には入射窓となる基板の上面と下面にそれぞれ pTP と Dichroic Filter を蒸着する必要がある、難しい技術であることが判明した。さらに、Dichroic Filter を用いる場合には二種類の波長変換材を要し、シンチレーション光検出器製作が煩雑となる。そこで、Dichroic Filter を導入せずに高い検出効率を達成する検出器の実現を目標とした。

新型シンチレーション検出器の基本構造は、可視光に対して透明な基板の表面に真空紫外光を可視光に変換する波長変換材をコートし、側面及び底面に反射フィルムと光検出器をつけるというものである。その構成要素として、入手や加工の容易さ、性能とコスト等の観点から、それらの選定を行った。

### 3.3.2 1,1,4,4-Tetraphenyl-1,3-butadiene (TPB)

TPB は高い量子効率と堅牢さ、短い発光時定数と青色発光スペクトルを備える波長変換材であり、主に液体アルゴン検出器やキセノン検出器において用いられている [30]。TPB は図 3.6 に示すように紫外光を吸収し、430 nm 帯の波長の光に波長変換したうえで等方に放出する [20]。TPB の青色発光スペクトルは、MPPC や PMT の応答波長とよく一致する。また、TPB の主要な発光時定数は約 1.7 ns と短く [21]、シンチレーション光を用いた  $t_0$  の決定に悪影響を及ぼさない点においても優れている。TPB 粉末は紫外線に当てる

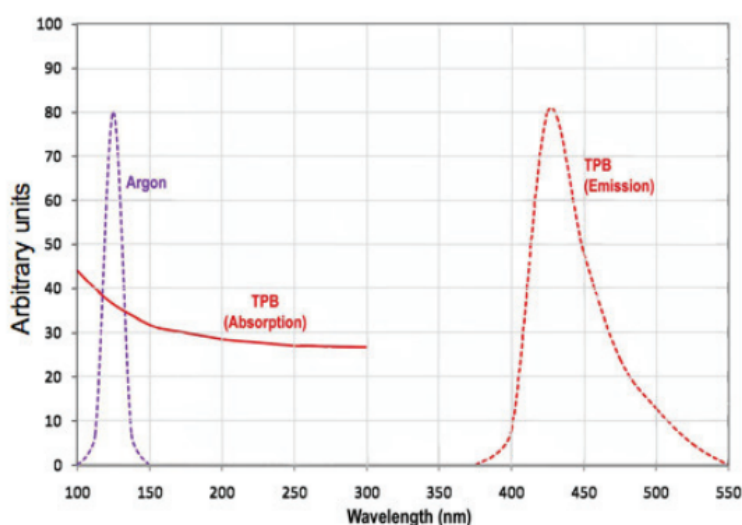


図 3.6 TPB の吸収・放出波長スペクトル [20]

とベンゾフェノンに分解され、光変換効率が低下する [22]。そのため、TPB は冷暗所で保管する必要がある。

#### 基板

変換された光を捕獲する基板の材質として、候補となったのが、Polymethyl methacrylate (PMMA、アクリル) と合成石英である。

アクリルの利点として、安価で入手と加工が容易であることと、優れた可視光域波長の透過性と電気絶縁性が挙げられる。しかし、吸湿性があることからアウトガスの発生に留意する必要がある。

合成石英は、紫外光から赤外光までの優れた透過性をもち、化学的安定性に優れている。また、高い電気絶縁性も兼ね備えている。ただし、衝撃や急激な温度変化にはもろく、加工の難しさとコストの高さがネックである。

430 nm 帯の光の透過率はアクリルと合成石英でほとんど差がないことと、扱いの容易さ、コストの観点から基板の材質にアクリルを採用することにした。

本研究では、紫外線透過アクリルである三菱ケミカル株式会社製アクリライト<sup>TM</sup> 000を表面鏡面仕上げ 50 mm 角 3 mm 厚サイズに加工した板を使用した。屈折率は 1.49、全光線透過率は 93 % である [23]。図 3.7 に透過率の波長依存性を示す。ただし、アウトガスの発生量次第では合成石英を採用することになるため、アウトガス測定を行う。

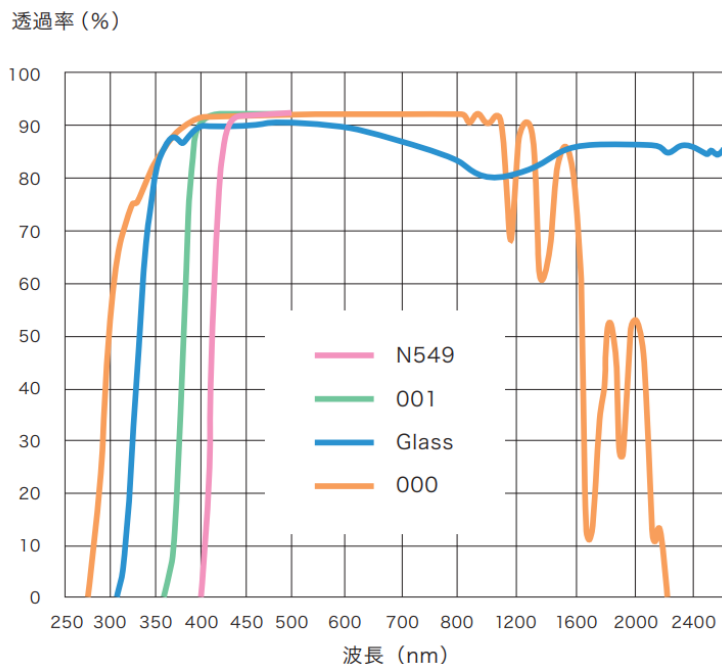


図 3.7 アクリライト<sup>TM</sup> 000 の透過率 [23]

### 反射フィルム

3 M<sup>TM</sup> の鏡面反射フィルム DF2000MA を使用する。これは高分子材料の多層構造からなる非金属・非導電性フィルムであり、可視広域の光を効率的に反射する。また、非常に薄く加工も容易である [24]。図 3.8 に DF2000MA の反射率スペクトルを示す。

裏面には接着剤が付いているため固定が容易ではあるが、接着剤由来のアウトガスが発生する可能性を考慮し、アウトガス測定を行うこととした。

### 光検出器

波長変換された 430 nm 帯のシンチレーション光を検出するための光検出器として、浜松ホトニクス社の MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) の S13360-6075PE を用いることにした。その理由として、入手の容易さと検出効率の高さが挙げられる。S13360-6075PE は有効受光面サイズ 6.0 mm × 6.0 mm、ピクセルピッチ 75 μm の MPPC である。ピクセル数は 6400 であり、これはシンチレーション光のような数 photo 程度の小光量検出には十分な数である。検出効率は 430 nm で約 50 % である [25]。S13360-6075PE の検出効率の波長依存性を図 3.9 に示す。

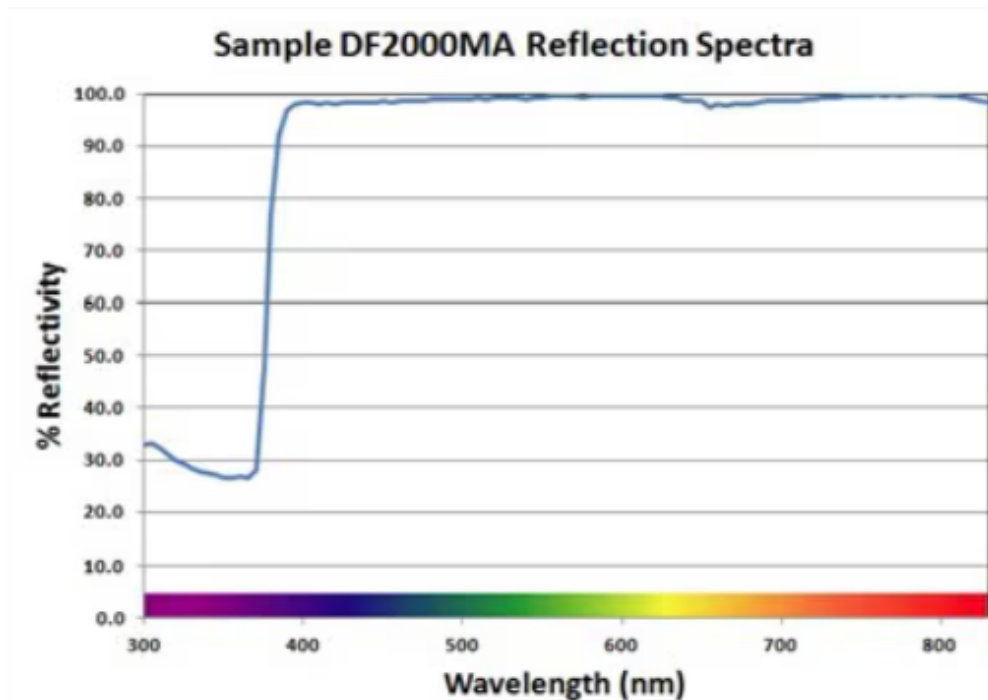


図 3.8 DF2000MA の反射率スペクトル

MPPC を用いる場合には、ダークパルスに注意する必要がある。ダークパルスとは、実際には光子が入射していないのにも関わらず、熱的に発生した暗電流のキャリアが増倍されて発生するパルスのことである。S13360-6075PE の場合、ダークパルスの 1 秒当たりの数が 2000 kcps 程度であり [25]、シンチレーション光検出から EL 光検出までの数十  $\mu\text{s}$  の間にダークパルスを検出する確率が極めて高いため、シンチレーション光候補判定の閾値は 1 光子より大きくする必要がある。

本研究でのシンチレーション光検出器試作・性能評価段階においては、S13360-6075PE ではなく、直ぐに利用可能であった S13360-6050CS を用いている。S13360-6050CS は有効受光面サイズ 6.0 mm  $\times$  6.0 mm、ピクセルピッチ 50  $\mu\text{m}$  の MPPC であり、検出効率は 430 nm で約 40 % である [25]。

### 光学セメント

MPPC とアクリル基板を接着するために、ELJEN TECHNOLOGY 社の EJ-500 を用いた。EJ-500 は無色のエポキシセメントであり、アクリルやガラス等を光学的に接着するために用いられる。屈折率は 1.57 である [26]。図 3.10 に EJ-500 の透過率スペクトルを示す。

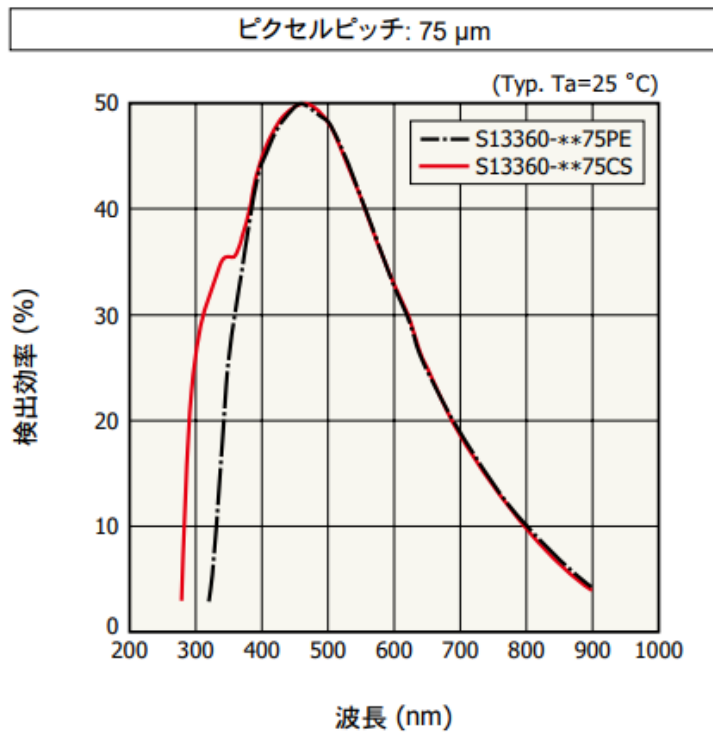


図 3.9 S13360-6075PE の検出効率の波長依存性 [25]

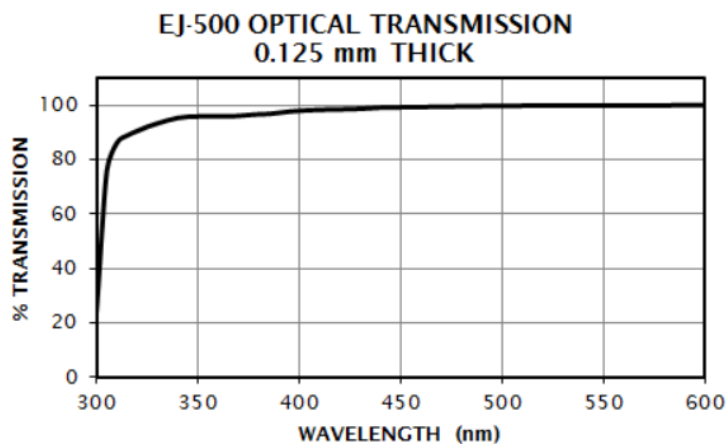


図 3.10 EJ-500 の透過率スペクトル [26]

### 3.3.3 新型シンチレーション検出器の構造

Dichroic Filter を用いず、シンチレーション光の捕獲を行うため、基板表面に 430 nm 帯の光に対して十分滑らかかつ均一な TPB コーティングが可能であると仮定して設計を行った。一つの基板のサイズは、5.2.1 節で述べる性能評価用チェンバー内に導入することを鑑み、50 mm 角とした。



シンチレーション光検出器にキセノンガスシンチレーション光が入射した際、はじめに基板表面の TPB コーティング層内にて、波長変換されて等方に放出される。放出された光は、キセノンガスと TPB コーティング層の屈折率の違いからある割合で基板内に捕獲される。430 nm 波長に対するキセノンガスの屈折率を 1.0、TPB コーティング層の屈折率を 1.62 [27] とすると、臨界角は約  $38^\circ$  である。基板側面は反射フィルムで覆い、基板側面から光が逃げないようにすることで、理想的には全反射によって波長変換後のシンチレーション光のうち 79 % 程度をシンチレーション検出器内で捕獲することができる。

基板底面は鏡面仕上げとすることで、TPB コーティング層と同じく全反射による光の捕獲をする。ただし、セットアップ固定用治具と基板底面が直接接触していると、全反射条件を満たさないため、若干隙間をあけてキセノンガス層を設ける。さらに、全反射条件を満たさなくともフレネル反射によって一部が反射され、検出されることを狙って固定用治具表面にも反射フィルムを設置することとした。反射フィルムではなく、乱反射をする PTFE などを設置することも考え、図 3.11 と図 3.12 の二通りのパターンを試す。

捕獲された光子は表面での全反射や部分反射、反射フィルムによりセットアップ内部で反射を繰り返し、光検出器である MPPC に入射・検出される仕組みである。MPPC は TPC カソード電位からの保護と検出効率の観点から側面ではなく底面、すなわち TPB コーティング層の反対の面に接着することにした。カソード電極と MPPC の間に電気絶縁性をもつ基板が挟まれることで、MPPC を保護する。これにより、現在 PMT 前面にある保護メッシュを取り外すことができ、入射するシンチレーション光を 1.5 倍程度増やすことができる。

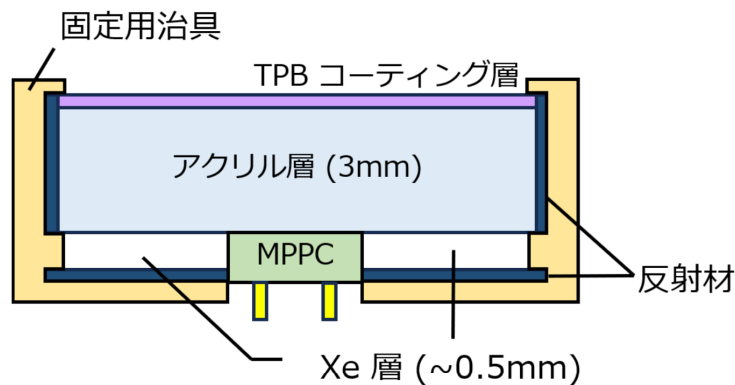


図 3.11 底面側反射フィルム有の場合のシンチレーション検出器の構造

### 3.4 光学シミュレーターによる性能推定

#### 3.4.1 光学シミュレーターの機能の追加実装

新型シンチレーション検出器の設計のために光学シミュレーターを使用した [28]。図 3.13 にシミュレーターに組み込まれている機能を示す。medium は通常の誘電体、converter

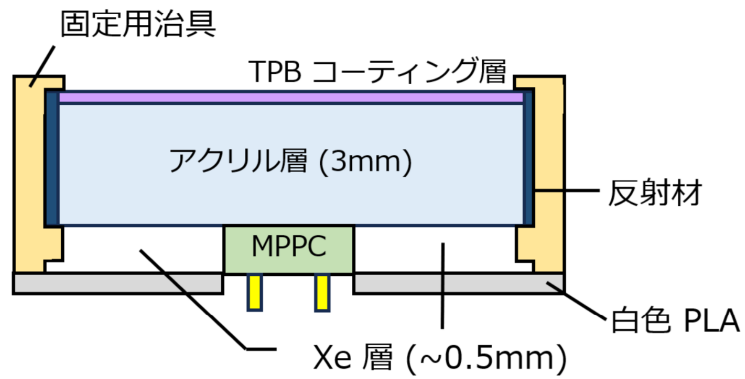


図 3.12 底面側反射フィルム無の場合のシンチレーション検出器の構造

は入射した光を等方に放出する機能をもつ。absorber は入射した光子を吸収し、detector は光子の検出を行う。mirror は通常の反射材の機能をもつが、diffuser は乱反射を行う。モデル内の構成要素すべてに屈折率や減衰長を設定でき、mirror や detector などといった機能の付与をおこなうことで、検出器に光子が入射した際の光子一つ一つの挙動や、検出光子数などを求めることができる。シミュレーター内の構成要素の形状は 3D CAD の stl 形式で指定することができる。本研究では Autodesk 社の Inventor professional を用いてモデルを作成した。

図 3.14 にシミュレーションの出力結果の例を示す。

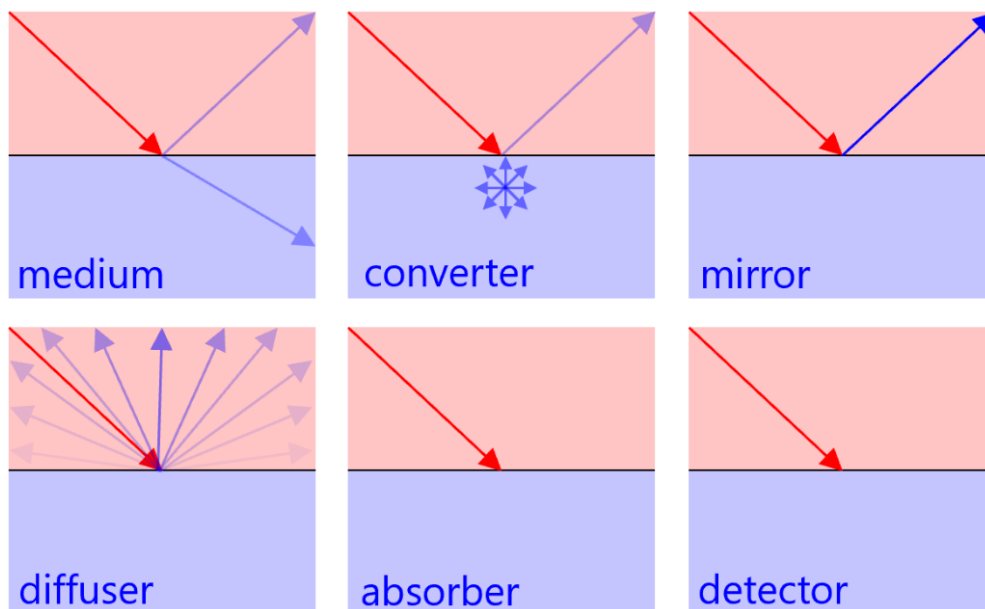


図 3.13 シミュレーター [28] に組み込まれている機能

本研究でこのシミュレーターを使用するにあたり、以下の機能を追加実装した。

```
Go out of world volume : 98683
Exceed limit of reflections: 0
Absorbed in normal medium : 812
Absorbed by absorber : 0
Detected by detector : 505
CPU time: 130.9 sec.
All finished. \(^o^)/
```

図 3.14 シミュレーションの出力結果の例

## 波長

波長変換材の波長依存性を再現するため、各光子に波長の情報を追加した。光子の初期波長は、キセノンガスシンチレーション光に対応する 175 nm とした。

## 波長変換材

本研究で用いる、波長変換材である TPB の挙動を再現するものである。キセノンガスシンチレーション光に相当する 175 nm 帯の波長の光が入射した場合に、波長を 430 nm 帯に変換して等方に放出する converter と同様の挙動をする。430 nm 帯の波長の光が入射した場合の光の挙動は medium と同様にフレネルの法則に従う。

## 反射率

DF2000MA や PTFE などの反射特性を再現するにあたり、mirror と diffuser の機能に反射率を実装した。

mirror の反射率は図 3.8 で示される DF2000MA の反射スペクトルから、98 % に設定した。

Diffuser は性能を実測する際に用いる PTFE や 3D プリンタの材料である白色 Poly-Lactic Acid (PLA) の反射特性にあわせ、その反射率を 70 % に設定した [10]。

### 3.4.2 設計した検出器の性能推定

図 3.11 と図 3.12 で示したシンチレーション光検出器のジオメトリを光学シミュレーターに組み込み、入射光子の検出効率を推定した。

条件として、3.3.1 節から MPPC の検出効率を 50 % と設定した。TPB コーティング層での光変換係数は、複数の先行研究で異なる値が得られているため [27][29][30]、各文献値にオーダーで一致する 1 としている。入射角は、実際の測定下を想定して 0 - 45° のランダムとした。TPB コーティング層の屈折率は先行研究 [27] から 1.62 に設定し、表面は十分に滑らかだと仮定している。各材質の屈折率や減衰長の設定条件は表 3.1 に示す。上記の条件のもと、シミュレーションで得られた検出効率は 18.0 % であった。この結果をもとに 180 L 試作機に導入した際に期待される検出光子数を計算する。

キセノンガスシンチレーション光発生 of W 値は 72 eV なので [16]、 $0\nu2\beta$  イベントの

表 3.1 各材質の屈折率と減衰長の設定条件

	屈折率	減衰長 (mm)
キセノン	1.00	0
TPB コーティング	1.62	380
アクリル	1.49	5000
EJ-500	1.57	0

Q 値 2458 keV で生成される光子数は 34,000 程度である。シンチレーション検出器までの平均距離を 34.5 cm、受光面サイズは 5 cm 角、入射光子検出効率を 18%、陽極メッシュの開口率が 71%であることを考慮すると、シンチレーション検出器 1 つあたりの検出光子数は約 7.3 と見積もることができる。この検出器を複数設置すれば、各検出器のヒット判定の閾値を 2 p.e. 以上に設定した場合、 $0\nu 2\beta$  イベントにより生じるシンチレーション光の検出確率  $\epsilon = 1$  を十分達成できる値であり、 $z$  位置のミスリコンストラクション確率を十分に小さくすることができる。

検出光子数  $N$  がポアソン分布に従うと仮定すると、検出光子数の揺らぎは  $\sqrt{N}$  となり、エネルギー分解能は  $\sqrt{N}/N$  で与えられる。そのため、仮にこの性能の新型シンチレーション検出器を 180 L 試作機に 14 個設置した場合には、 $0\nu 2\beta$  イベントによる検出光子数はおよそ 100 と見積もられ、シンチレーション光検出のみで約 10% のエネルギー分解能が見込まれる。 $0\nu 2\beta$  の Q 値は 2458 keV であることから、図 3.4 で示されているようにバックグラウンドの多くを占める 2000 keV 以下のイベントであれば十分除去することが可能となる。

ただし、この結果は TPB コーティング面が 430 nm 波長に対して十分に滑らかであることを前提にしている。図 3.15 は臨界角以上の光の反射を表している。図左のような滑らかなコーティング面の場合には全反射が起こるが、図右のように凹凸があるコーティング面の場合には光が散乱し、検出器内部で捕獲できる光子の割合が減って検出効率が悪化する。そこで、実際にシミュレーションに近い性能を得られるかを検証するため、TPB コートアクリル板を作成し、反射率の測定を行い表面の状態を確認した上でシンチレーション光検出器の試作・ミニチェンバーを用いた性能評価を行った。新型シンチレーション検出器の製作については第 4 章、ミニチェンバーでの性能評価については第 5 章、180 L 試作機での性能評価は第 6 章で述べる。

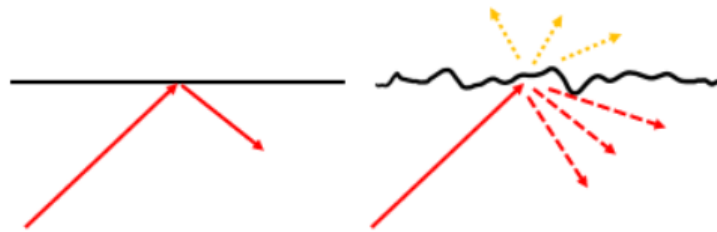


図 3.15 臨界角以上の光の反射。左図は表面が滑らかなコーティングの場合で、右図は表面が粗いコーティングの場合。

## 第 4 章

# 新型シンチレーション検出器の製作

本章では 3.4 節で設計した新型シンチレーション検出器の製作にあたり、はじめに TPB コートアクリル板の作成について述べる。その次に、アウトガスの観点からシンチレーション検出器が高圧キセノンガス環境下で運用可能か評価する。最後に、作成した TPB コート板を用いて新型シンチレーション検出器の製作を行った。

### 4.1 波長変換材コーティング手法の比較検討

3.4.2 節で述べた通り、シンチレーション光検出器の性能は、波長変換材である 1,1,4,4-Tetraphenyl-1,3-butadiene (TPB) のアクリル板表面へのコーティング品質に決定的に依存する。均一かつ滑らかで長期間安定なコーティングを安定して行う方法を確立する必要がある。

#### 4.1.1 真空蒸着法

TPB のコーティング手法として、よく用いられるのが真空蒸着法である。真空蒸着法は真空環境下でるつぼに入れた蒸着物質を加熱昇華させ、るつぼから数十 cm 離れた位置の基板表面に付着させる薄膜形成手法である。特にガラスやアクリルに対しては均一なコーティングを安定して行うことができることが分かっている [30]。しかし、真空蒸着により形成される TPB の結晶構造は可視光の散乱を引き起こし、その平均散乱長は 2-3  $\mu\text{m}$  の範囲であると測定されている [30]。本研究では 430 nm 帯波長をコーティング面の全反射により捕獲することを目指しているため、真空蒸着は適さない可能性がある。

#### 4.1.2 ディップコーティング

TPB とポリスチレン (PS) をトルエンにドープした溶液に、アクリル板を浸漬した後にゆっくり引き上げるディップコーティングと呼ばれる手法を試した。ディップコーティングで得られたコーティングの一例を図 4.1 に示す。図の通り、コーティングには線上のム

ラがあることが分かる。さらにアクリル板全体を浸漬することから側面や裏面にコーティング液が付着しないよう、広範囲でのマスキングが必要となる等の問題がある。

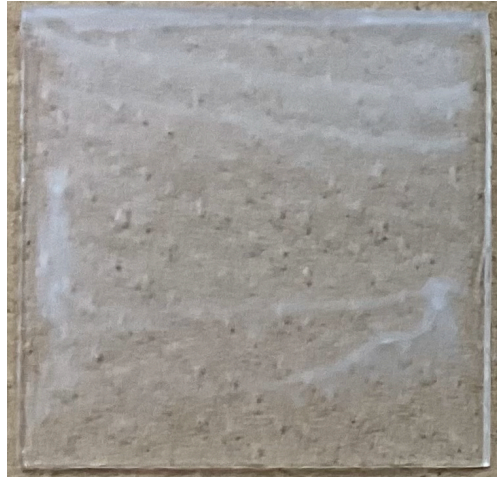


図 4.1 ディップコーティングにより得られたコーティング

#### 4.1.3 スピンコーティング

先行研究では円盤状のアクリル基板表面に対して、ポリスチレンと TPB をドープしたトルエン溶液をスピンコーティングにより塗布することで均一なコーティング面を得ることに成功している [27]。

本研究で用いている角型基板でもスピンコーティングが可能であるかは、実験により確認する。図 4.2 にスピンコーティングの概念図を示す。



図 4.2 スピンコーティングの概念図。基板中心部に溶液 (図中の赤部) を滴下し、基板を数百 round/min (rpm) と高速で回転させることで溶液を全面に広げる。

#### 4.1.4 コーティング手法の決定

コーティングにおいて重要なのが、滑らかかつ均一なコーティングを得られるか、長期間の使用に耐えうるか、量産性に優れているかの三点である。

ディップコーティングは均一なコーティングが難しいことと、溶液が多く必要なこと、マスキングの手間がかかり量産性の確保が困難なため、本研究では採用しないことにした。

図 4.3 で示されているのは、TPB/PS 質量比 0.8 でのスピコーティングと、真空蒸着コーティングの変換係数の変化である。紫外光を遮断したうえで大気に 100 日間暴露すると、真空蒸着では変換係数が約 1/3 になったのに対し、スピコーティングでは変換係数にほとんど差が見られないことが分かる [27]。

先に述べた通り、真空蒸着では光の散乱が起こると報告されている点も含め、真空蒸着法は本研究で適さないと判断し、スピコーティング法を採用することにした。

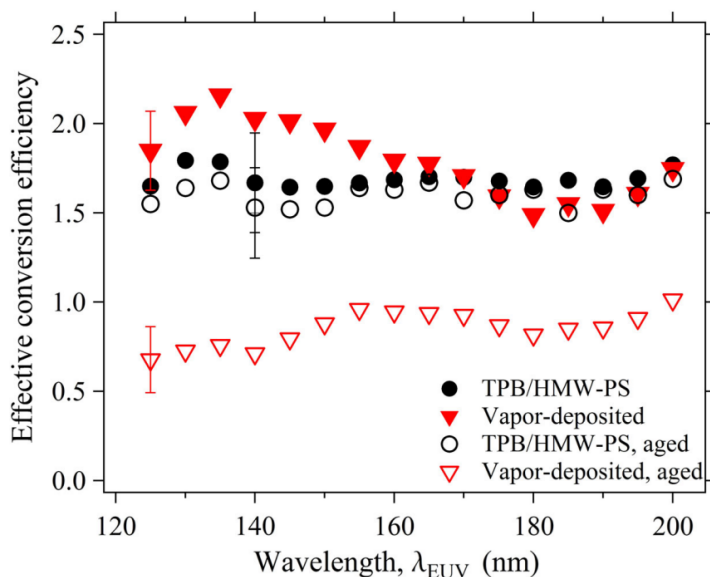


図 4.3 スピコーティングと真空蒸着コーティングの変換係数の比較。コーティング直後と、紫外光を遮断したうえで 100 日間大気に暴露した後のデータが示されている [27]。

## 4.2 スピコーティング用溶剤

本研究では、文献 [27] を参考にして、TPB コーティング溶液を TPB とトルエン、ポリスチレンで作成した。

### 4.2.1 トルエン

TPB とポリスチレンの溶媒としてトルエンを用いた。常温で揮発性があり、その性質から塗料や接着剤の溶剤としてよく用いられる。毒性と引火性を有するため、取り扱いの際には換気や火気に注意する [31]。

### 4.2.2 ポリスチレン

ポリマーマトリックスを波長変換材とあわせてコーティングをすることで、波長変換材の劣化を防ぐことができる [30]。特にポリスチレンは波長変換材の分子間のエネルギー移



動を仲介することができるため、波長変換材での光変換を妨げることがない。図 4.4 にポリスチレンの化学構造を示す。

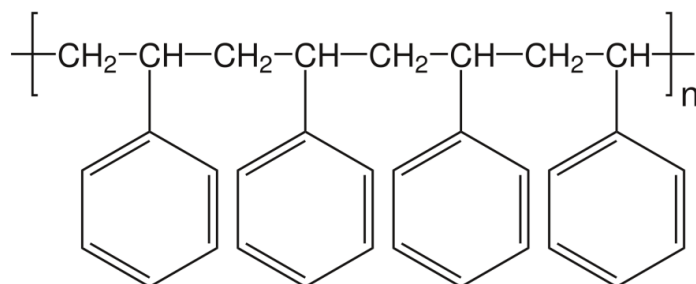


図 4.4 ポリスチレンの化学構造

## 4.3 スピンコーティングに用いる機材

### 4.3.1 スピンコーター

本研究では図 4.5 に示すミカサ社のスピンコーター MS-A150 を使用してスピンコーティングを行った。基板サイズ直径 150 mm まで対応している。ただし、基板は真空吸着により固定するため、基板の質量が大きい場合や厚みが薄くしなる場合、回転速度が極端に大きい場合には、回転中に基板が脱落する可能性がある。

本研究で実際にスピンコーティングで使用する基板より十分大きい 100 mm 角 6 mm 厚サイズの亚克力板を 600 rpm で回転させて脱落しないことを確認してから使用した。

### 4.3.2 プラズマ装置

プラズマ装置は、表面改質や濡れ性の向上を非接触で行うことができる装置である。反応ガスに酸素を用い、酸素原子が基板表面の有機化合物と化学反応させることで、基板表面に親水基を形成する。さらに表面粗さをわずかに増加させることにより、液体との親和性が高まり、濡れ性が向上する [32]。

図 4.6 に本研究で使用したヤマト科学社のプラズマアッシャー V1000-TS を示す。

## 4.4 コーティングの評価

次節のスピンコーティング実験で得られたコーティング面について、目視による評価と反射光強度測定による評価を行った。



図 4.5 本研究で使用したスピナー。東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設で借用した。



図 4.6 本研究で使用したプラズマアッシャー。東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設で借用した。

#### 4.4.1 目視による評価

シンチレーション検出器の製作に用いるための TPB コート板を選別するにあたり、はじめに目視による確認を行った。本研究では、波長変換されたキセノンガスシンチレーション光 (430 nm 帯) に対してコーティング面が十分滑らかであるかという点が極めて重要である。430 nm 帯の光は可視光域にあたるため、目視でコーティングにムラが確認できた場合には、その時点でシンチレーション検出器に用いる上で不適と判断する。

ムラが認められなかったコーティング板には図 4.7 に示すように紫外光を照射し、その際の波長変換による発光のムラの有無を確認した。以上の二段階の目視確認を行い、ムラが認められなかったコーティング板について、反射光強度測定により表面状態の確認を行った。

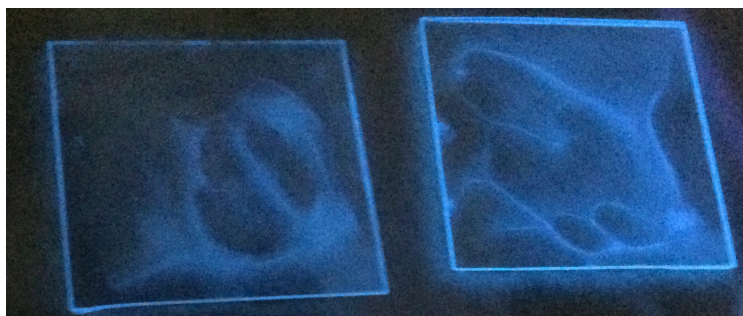


図 4.7 紫外線照射時の発光ムラ確認の様子

#### 4.4.2 反射光強度測定による評価法

目視での選別をクリアしたコート板について、レーザー光とフォトダイオードを用いた反射光強度測定による表面滑らかさの評価をした。

レーザー光源として THORLABS 社の CPS405 を用いた。CPS405 は TPB の放出波長帯に近い、可視光域である波長 405 nm 帯の青色光を照射するレーザ光源である [33]。CPS405 のレーザー波長スペクトルを図 4.8 に示す。

フォトダイオードとして、S13360-8BQ を用いた。受光面サイズは 5.8 mm × 5.8 mm である。フォトダイオードの応答信号の大きさが入射光強度と比例する。フォトダイオードの分光感度特性を図 4.9 に示す。

反射光強度測定セットアップの概略図を図 4.10 に、測定セットアップの画像を図 4.11 に示す。アクリル板のコート面側の各測定点にレーザー光を入射角 45° で照射し、反射した光の強度をフォトダイオードで測定する。コーティングを施していない鏡面仕上げのアクリル板の反射信号強度を基準に、TPB コート板の反射信号強度の大きさの比を求める。TPB コート板の測定点の表面が十分滑らかであれば、信号強度比は 1 に近くなる。逆に表面滑らかさが不十分である場合には光が散乱するため、信号強度比の値が小さくなる。

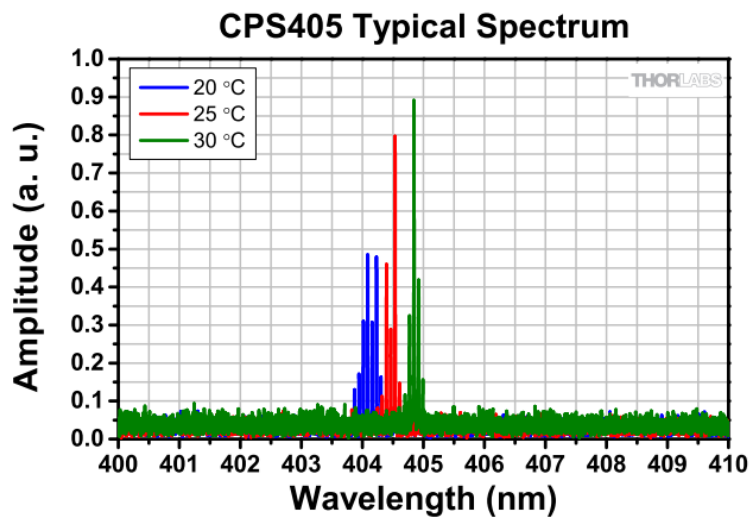


図 4.8 CPS405 のレーザー波長スペクトル [33]

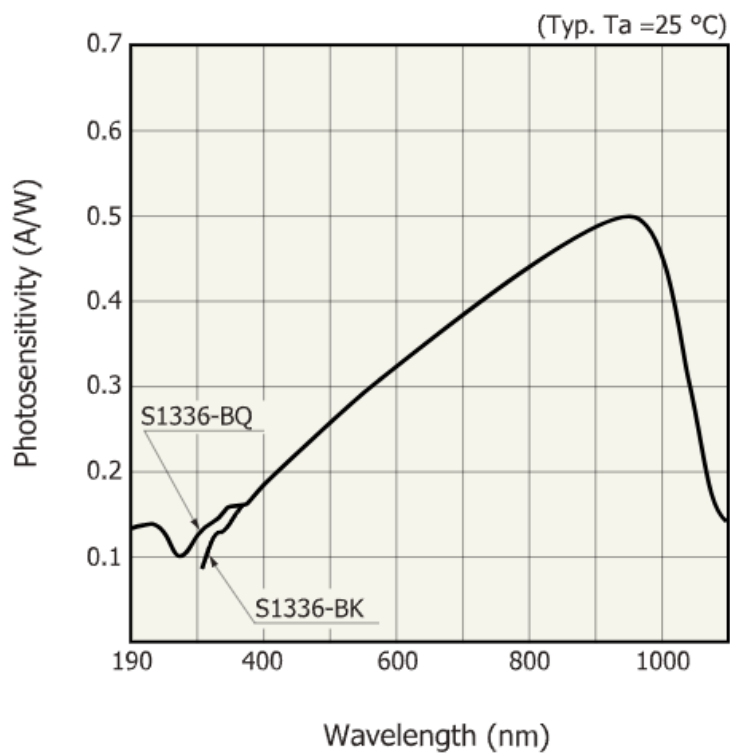


図 4.9 フォトダイオードの分光感度特性 [34]

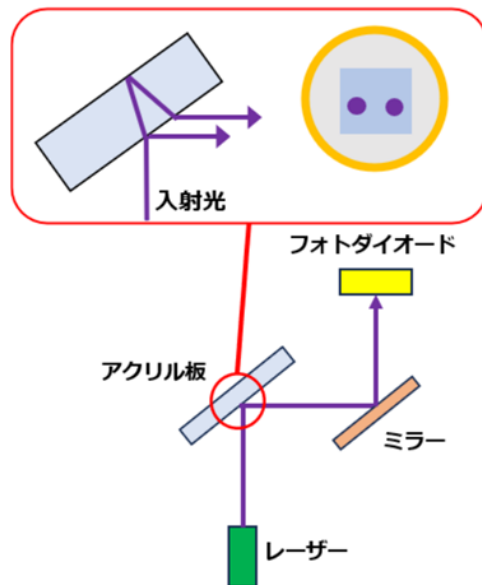


図 4.10 反射光強度測定セットアップの概略図。アクリルに入射したレーザー光は二点に分かれる。この二点を同時にフォトダイオードで検出する。

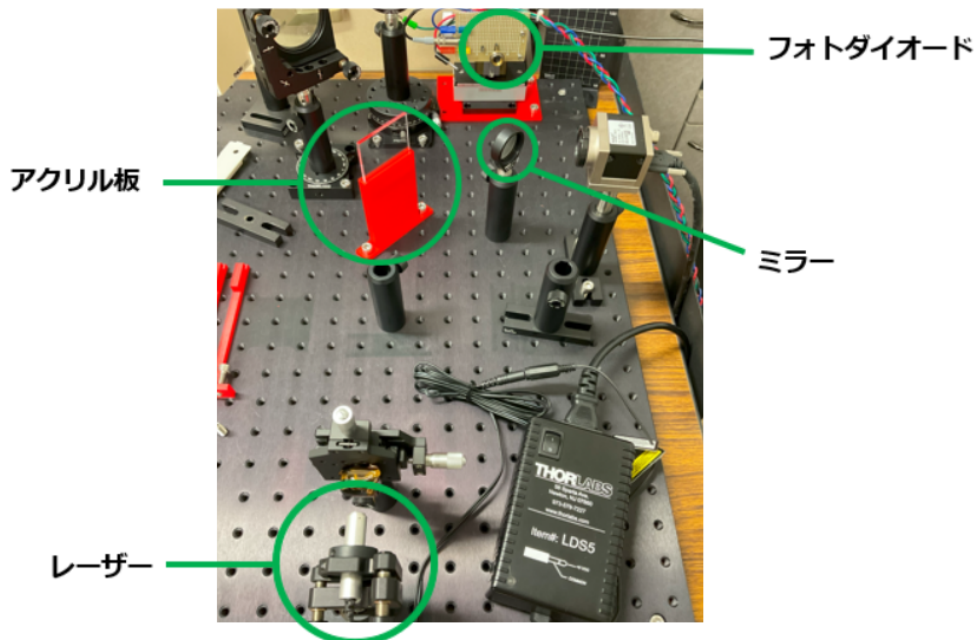


図 4.11 反射光強度の測定セットアップの画像

測定点は基板中心を原点とする xy 座標 (単位は mm) で  $O(0,0)$ ,  $A(0,12.5)$ ,  $B(-12.5,0)$ ,  $C(12.5,0)$ ,  $D(0,-12.5)$  の五点である。図 4.12 は基板と測定点の対応を示す。

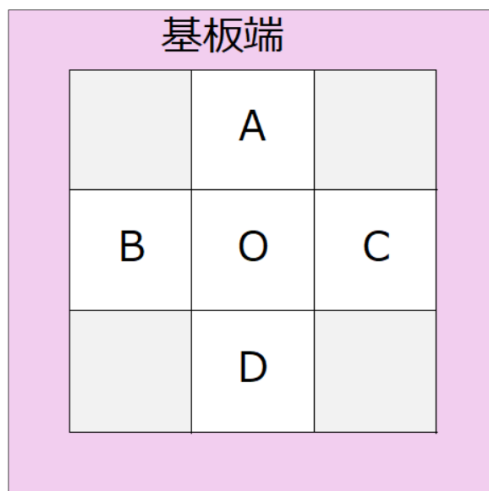


図 4.12 基板と測定点の対応

## 4.5 スピンコーティング実験

スピンコーティング実験は主に 3 段階に分けて行った。実験 1 ではスピンコーティングを試験的に行い、得られた結果をもとにコーティングに適した条件を探った。実験 2 は均一かつ滑らかなコーティングをするためのスピンと溶液量の条件探しを行った。実験 3 では、失敗したコーティング基板の再活用手法の模索をした。

スピンコーティング実験は東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設にて行った。図 4.13 に実験環境を示す。実験ではトルエンを用いるため、ドラフト内で溶液を作成・スピンコーティングを行った。

### 4.5.1 コーティング溶液

コーティング溶液は溶媒であるトルエンと、波長変換材である TPB、コーティング劣化を抑制するためのポリスチレン (PS) からなる。図 4.14 は先行研究による TPB/PS の比と光変換効率の関係を示している。キセノンガスシンチレーション光の波長 175 nm において、TPB/PS 質量比で 0.800 程度のとき最適な光変換効率を得られることが分かる [27]。

以上を踏まえ、TPB/PS 質量比を 0.8 とし、TPB の質量濃度は 2% とした。なお、TPB と PS を完全に溶解させるため、ホットプレート付マグネットスターラーを用いて攪拌しながら 60 °C 程度まで加熱をし溶液を作成した。



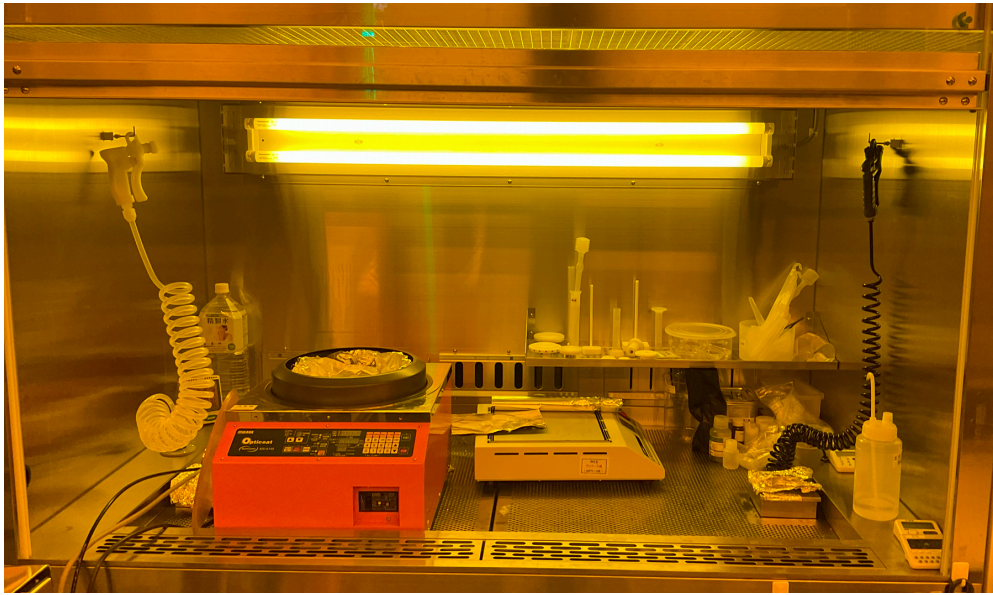


図 4.13 スピンコーティング実験環境

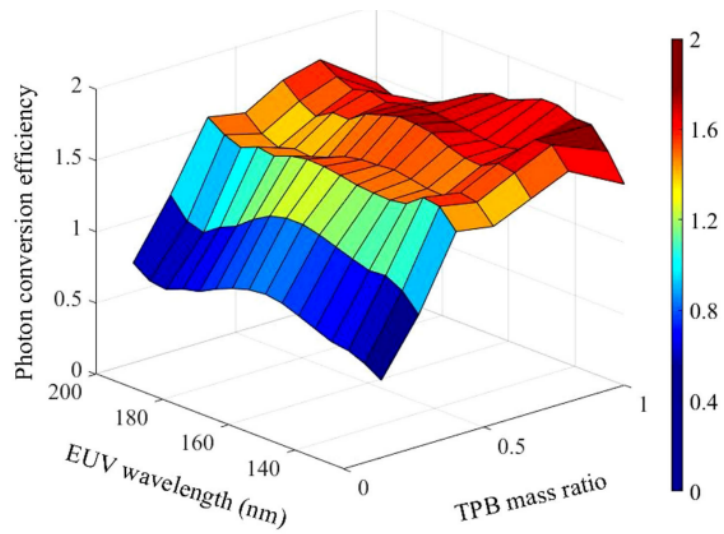


図 4.14 TPB/PS 比と光変換効率の関係。TPB/PS 比を 0.133 から 0.800 まで変化させている [27]。

## 4.5.2 実験 1

### 目的

実験 1 では試験的にスピンコーティング実験を行った。得られたコーティング面の状態をもとに、滑らかかつ均一なコーティングをするための条件を確認することを目的に実験を行った。

## 実験方法

アクリル基板の側面を耐薬品性をもつカプトンテープでマスキングし、スピンコーターに設置後に溶液を中心部に約 5 mL 滴下して 500 rpm で 60 秒回転させた。アクリル板の温度は室温程度であった。

## 結果

図 4.15 に得られたコーティングを示す。基板が滴下した溶液をはじいている様子が目視で確認された。得られたコーティング面を確認すると、溶液が付着した痕跡のない部分が視認でき、コーティングにムラがあることが分かる。コーティングされた部分についても白濁している様子が見て取れる。

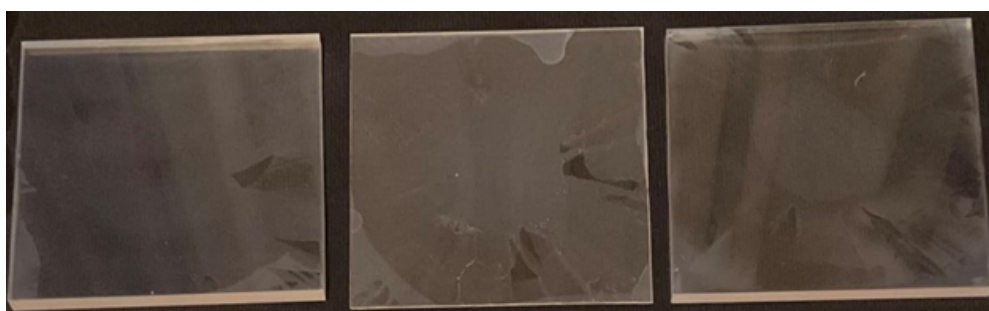


図 4.15 得られたコーティング面。白濁しており、コーティングにムラがあることが分かる。

## 考察

コーティングにムラができた理由として、アクリルの疎水性と表面の鏡面加工による撥水効果が挙げられる。アクリルはトルエンに対し溶解性をもつが、基板中心への溶液滴下からスピンまでの間隔は数秒程度と短い。そのため溶液が基板表面に広がりきらず、表面の溶解による凹凸の生成とそれによる濡れが起こる前に、回転により振り切られてしまうことがコーティングのムラが生じた原因だと考えられる。

その解決のため、4.2.4 節で述べたプラズマアッシャーを用いたプラズマ処理を導入した。基板に対してイオンを照射することで、目視では判別できない程度に表面粗さを増加させ、さらに表面に親水基の官能基を形成することができる。これにより溶液が基板表面に広がりやすくなり、濡れ性が向上する。

コーティングの白濁については、溶液と基板の温度管理により解決を試みることにした。溶液は 60 °C 以上だったのに対し、基板は室温程度であった。スピンコーター内雰囲気も室温だったために、溶液滴下時や基板の回転時に急激な析出が起こったことが白濁の原因だと考えられる。それを防ぐため、アクリル基板はホットプレートを用いて、溶液温度と同程度の約 60 °C 以上になるように加熱した。



### 4.5.3 実験 2-1

#### 目的

実験 2-1 では、溶液と基板の温度管理を徹底することで、実験 1 で課題となったコーティング面の白濁が解決できるかを検証する。基板表面のプラズマ処理については、その有効性を確かめるため、処理有と処理無の場合で比較をする。

また、スピンコーティング時の回転速度の決定も課題である。回転が速すぎると、基板に十分な量の TPB が残らずに光変換効率が悪くなる可能性がある。逆に回転速度が遅すぎると、表面張力により余剰な量の溶液が基板にとどまってしまう、コーティング面が不均一になる可能性がある。

コーティング回数については、1 回と 2 回でコーティングの品質に差があるかを確認する。コーティング時の回転速度と回数については、先行研究 [29] を参考にしたが、1000 rpm での回転は基板の脱落のリスクがあることから、回転速度を落とし、回転時間を伸ばした。

#### 実験方法

実験 1 と同じく、基板の側面はカプトンテープでマスキングした。基板は約 80 °C、溶液は約 70 °C に加熱した。溶液滴下用のピペットも同様に約 80 °C 程度に加熱した。

コーティング条件はアクリル板表面に対するプラズマ処理の有無で二通り、コーティング回数が 1 回か 2 回かの二通りの計四通りを試した。

コーティング回数が 1 回の場合は溶液を約 5 mL 滴下した後、600 rpm で 60 秒回転させる。2 回の場合は溶液を約 3 mL 滴下した後、600 rpm で 30 秒回転させる。その後、再び溶液を約 2 mL 滴下し、500 rpm で 30 秒回転させる。回転後は、60 秒間スピンコーター内で安置した。

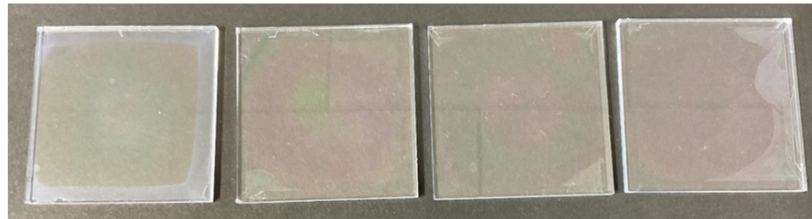
#### 結果

得られたコーティングについて、コーティング条件ごとの代表的な四枚の結果を図 4.16 に示す。目視において、最も良いコーティングのように見える ② に加え、中心部が比較的きれいにコーティングされている ① と ③ について、4.3 節で述べた反射光強度測定による表面状態の確認を行った。結果を図 4.17 に示す。

反射光強度比測定の結果、全体的に ② が最も良い結果であった。目視での評価と反射光強度比での評価にはある程度の相関があることが分かった。

総合的な評価をすると、四通りのコーティング条件の中で、表面プラズマ処理有・コーティング回数 2 回の条件で得られたコーティングが、最も良い結果となった。

温度管理により、コーティング面の白濁を大幅に抑えられた一方、裏面に溶液が付着し、白濁したコーティングがいくつか見られた。図 4.16 の ① の基板端全体の白濁や ② の右上の白濁は裏面に付着した溶液によるものである。これはマスキングが一因であると思わ



	①	②	③	④
TPB濃度	2%	2%	2%	2%
TPB/PS比	0.8	0.8	0.8	0.8
表面処理	有	有	無	無
回転数,秒数 (rpm,s)	600,60	500,30 600,30	600,60	500,30 600,30
コーティング前 後の質量差	-0.0046g	-0.0040g	-0.0014g	+0.0005g
コーティング ムラ (目視)	△	無	有 針状結晶	有 針状結晶 (少)

図 4.16 各コーティング条件ごとに得られたコート板の代表例

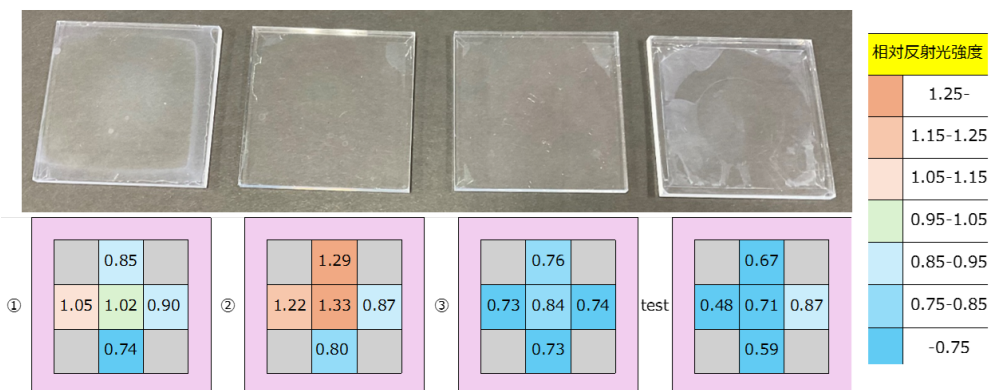


図 4.17 実験 2-1 で得られたコーティングの反射光強度比測定結果。図右の test は反射光強度比の測定の確からしさを担保するため、白濁し光が散乱すると考えられるコーティングの測定を行ったものである。

れる。また、白い針状結晶がみられたコーティングが複数存在した。

### 考察

実験 2-1 において、基板と溶液の温度管理の重要性と、表面プラズマ処理の有用性の確認ができた。また、良い品質のコーティング面を得るためのスピンドコーティングの条件の大きな決定を行うことができた。

裏面への溶液の付着については、テープによるマスキングが側面のみを覆っていたこと

が原因と思われる。そのため、裏面側にテープを 1 mm 程度出すようにすることで、裏面に溶液が垂れないようにする工夫を行うことにした。

また、主に表面プラズマ処理を行わずコーティングをした場合に、針状結晶が見られたコーティング板が複数枚確認できた。原因として考えられるのが、基板が高温であったことである。回転により溶液を基板全面に広げた後、徐々に乾燥させることで良いコーティングを得られることが先行研究から分かっている [29]。基板の温度が高く、トルエンが急速に揮発した場合には、TPB 結晶が析出される可能性がある。表面プラズマ処理をしなかったコーティング板で多く針状結晶が確認されたのは、濡れ性がなく溶液の付着量が少なかったために、トルエンの揮発の影響が顕著に出たためだと考えられる。基板の温度については、次の実験 2-2 では変更しないものの、高温になりすぎないように注意することにした。

最後に、コーティング前後の質量差がマイナスになったことの検証実験を行った。プラズマ処理前後の質量差と、トルエンのみを滴下したスピンコーティング前後の質量差をそれぞれ測定したところ、プラズマ処理時とスピンコーティング時にアクリル板の質量がわずかながら減少することが分かった。このため、コーティング前後の質量差から、コーティング膜の単位面積あたりの TPB 質量を求めることができないことが判明した。

#### 4.5.4 実験 2-2

##### 目的

実験 2-1 で得られた結果をもとに、シンチレーション検出器試作に使えるコーティング基板を作成することを目的にした。

##### 実験方法

表面プラズマ処理有・コーティング回数 2 回をコーティング条件として採用し、マスクング方法を改良した。その他の条件は実験 2-1 と同様である。

##### 結果

得られたコーティングの例を図 4.18 に示す。全体的に綺麗なコーティングが得られていることが分かる。一部白濁した部分は裏面に付着した溶液によるものであり、イソプロピルアルコールを含ませたキムワイプで多少拭うことができる。

目視では特に [2] が良い結果であった。反射光強度測定の結果を図 4.19 に示す。[1] と [2] で良いコーティング面が得られていることが分かった。この二枚のうち、コーティングが全体的にきれいな [2] を用いてシンチレーション検出器の試作を行うことにした。

##### 考察

全体的にきれいなコーティングが得られ、シンチレーション検出器の試作に使うための TPB コート板を作成することができた。基板の全面で均一かつ滑らかなコーティングに



	①	②	③	④
TPB濃度	2%	2%	2%	2%
TPB/PS比	0.8	0.8	0.8	0.8
表面処理	有	有	有	有
回転数,秒数 (rpm,s)	500,30 600,30	500,30 600,30	500,30 600,30	500,30 600,30
溶液温度	70.3℃	71.5℃	70.3℃	71.2℃
コーティング前 後の質量差	+0.0033g	+0.0022g	+0.0023g	+0.0019g

図 4.18 実験 2-2 で得られたコート板の例

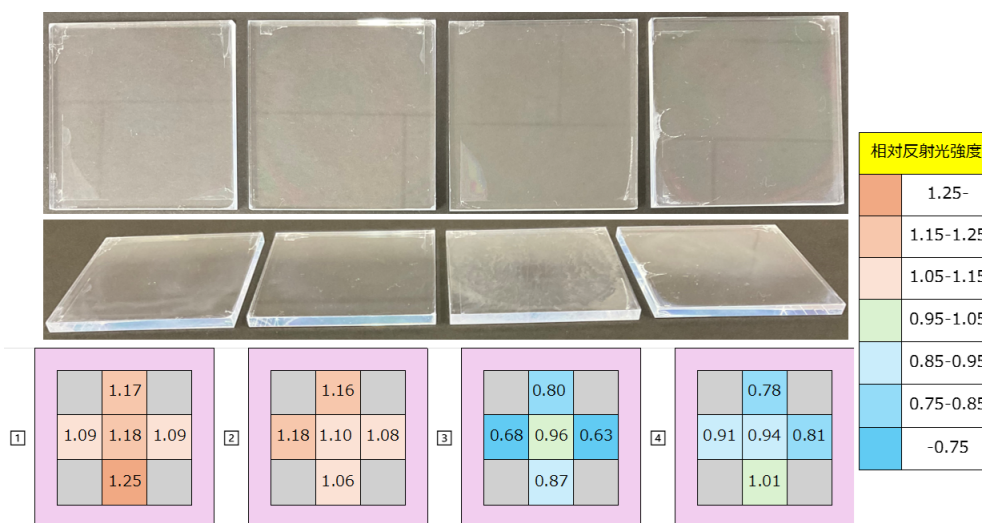


図 4.19 実験 2-2 で得られたコーティングの反射光強度比測定結果

成功したのはコーティングを行った基板のうち二割程であった。

今後シンチレーション検出器を量産するにあたり、より安定して均一かつ滑らかなコーティングをするための手法を模索していく。

一方、実験 2-1 の結果を踏まえ、マスキング方法を改良したが、裏面への溶液の付着を完全に抑えることができなかった。裏面マスキングは吸着ヘッダーとの干渉から難しく、マスキング方法の確立が課題として残った。

### 4.5.5 実験 3

#### 目的

実験 2-1 や 2-2 の表面プラズマ処理をしたコーティング板のうち、明らかにコーティングムラがあったり、白濁しているコーティング基板について、再利用をして綺麗なコーティング板を作成することが可能であるかを実験的に確かめることが目的である。

実験 2-1 と 2-2 では問題とならなかったが、スピンのコーター内雰囲気は溶液や基板と比べ低温である場合には、スピンのコーティング時に溶液と基板が急激に冷えてしまい、析出による白濁が起こる可能性がある。そのため、スピンのコーターの蓋にヒーターを取り付け、温度調整システムと組み合わせる改良を行い、スピンのコーター内雰囲気を約 60 °C に保つことを可能にした。以降のスピンのコーティング実験ではこの蓋を用いて実験を行う。図 4.20 に改良したスピンのコーター蓋を示す。

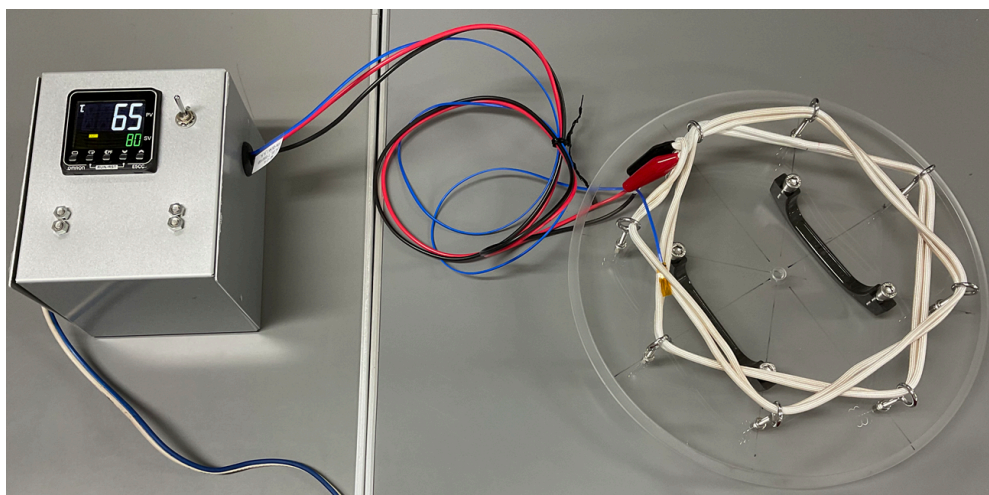


図 4.20 改良したスピンのコーター蓋

#### 実験方法

失敗したコート板を約 60 °C まで加熱し、約 60 °C の溶液を基板全面に滴下する。滴下 10 秒後、500 rpm で 10 秒回転させ、その後 60 rpm で 60 秒回転させる。回転後、1 分程度安置する。この処理を以下、再コーティングと呼ぶ。

#### 結果

再コーティング前後のコーティング面の違いの一例を図 4.21 に示す。

再コーティングを数枚の基板に行ったところ、目視の上ではきれいなコーティング面を得ることができた。今後得られた再コート板について反射光強度測定を行う予定である。



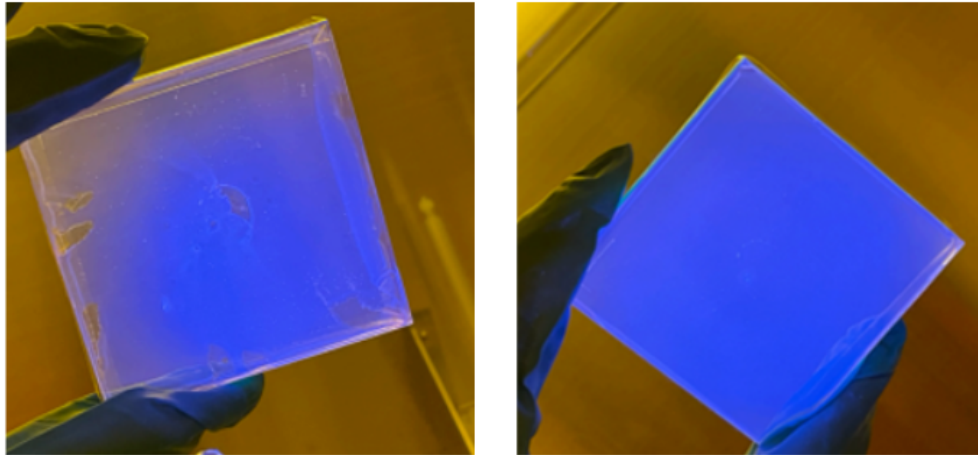


図 4.21 再コーティング前後のコート面の違い。  
左が再コーティング前、右が再コーティング後である。

#### 考察

再コート板の反射光強度測定結果が良好であれば、シンチレーション検出器製作に用いることが可能であると考えられる。ただしコーティング手法が実験 2-2 と異なるため、光変換効率や TPB コーティング膜厚などの違いからシンチレーション光検出器の性能に差異が生じる可能性も考慮しなければならない。今後、再コート板を組み込んだシンチレーション検出器を数個製作し、性能を確認・比較することで、再コート板をの使用の可否を決定する。

#### 4.6 アウトガス評価と対策

シンチレーション検出器を高圧キセノンガス中で運用するにあたり、アウトガスによってキセノンガス純度を著しく損なわないことが要求される。そのため、シンチレーション検出器を構成する各材質についてそれぞれのアウトガス発生量の測定を真空試験により実施し、検出器内部へ実装しても問題ないことの確認をおこなった。アウトガス発生量を測定した材質は、本研究で使用することを想定している TPB コートアクリル板・反射フィルム (DF2000MA) ・ Poly-Lactic Acid (PLA) の 3 種である。

アウトガス測定の際には、測定容器内にアウトガスを測定したいものを入れたうえでターボ分子ポンプにより圧力が下げ止まるまで真空引きをする。その後に真空ポンプと測定容器を遮断してから 0.5 Pa まで到達するまでの時間を測定することでアウトガス・リーク量を評価した。アウトガス・リーク量の計算式は以下の通りである。

$$[\text{アウトガス・リーク量}] = \frac{\Delta P}{\Delta s} \times V \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec)} \quad (4.1)$$

0.5 Pa までの圧力の上り幅  $\Delta P$  を、圧力上昇にかかった時間  $\Delta s$  で割って測定容器の体積

V を掛けている。測定容器が空の状態での典型的なリーク量は  $2 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  程度である。この値と比べて有意に大きくないかを確認することで、サンプルのアウトガス発生量の評価をおこなった。

#### 4.6.1 TPB コートアクリル板

測定容器の大きさの都合上、実際に検出器内に導入する予定のサイズより小さい、 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  サイズのアクリル板に TPB コーティングを施したものを測定に用いた。

アウトガス発生量は  $1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  程度であり、微量ながらアウトガスの発生が認められた。

#### 4.6.2 反射フィルム

測定に用いたのは、 $50 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  DF2000MA 4 枚である。

アウトガス発生量は  $6.9 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  であり、測定容器が空の状態での値を下回った。この結果からアウトガス発生量は計測不能であり、極めて少ないことが分かった。

#### 4.6.3 PLA

PLA は 3D プリンタで一般的に用いられるフィラメントの材質であり、ミニチェンバーでの性能評価用セットアップ治具の一部に使うことを想定して測定を行った。測定に用いたのは  $1 \text{ cm}$  角、充填率 100 % として 3D プリンタで出力した立方体である。

アウトガス発生量は  $2.0 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  程度と、測定容器が空の状態との差は見られなかった。

#### 4.6.4 アウトガス評価のまとめ

以上の結果を踏まえ、PLA と反射フィルムについては問題なく検出器内に導入できると判断した。アクリルについては吸湿性があることから [23]、アウトガスの主な成分は水であると考えられる。キセノンガス中への水の混入は、シンチレーション光の減衰を引き起こすため特に注意が必要である。

ただし、ミニチェンバーの典型的なアウトガス・リーク量は  $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  程度、180L 試作機では  $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  程度であり、アクリルによるアウトガス発生量はそれらと比較すると小さい。また、実際の測定環境下では水を除去する能力を持つモレキュラーシーブを通してキセノンガスを純化する。そのため、デシケーター内に設置した除湿ケースの中でアクリル板を保管した。極めて低い湿度の環境下で管理することによりアウトガスの対策をおこなった上で、アクリルを使用することにした。

## 4.7 新型シンチレーション検出器製作

光学シミュレーションにおいて十分な結果が得られ、アウトガスについても問題がなかったため、シンチレーション検出器の試作を行った。3.3.1 節で述べた通り、TPB コート板と反射フィルムである DF2000MA、MPPC (S13360-6050CS) と光学セメント EJ-500 を用いてシンチレーション検出器の製作をした。

MPPC は基板底面の中心に、受光面と基板の間に気泡が入らないよう留意しながら光学セメントを用いて接着した。基板底面と固定用治具に貼り付けた反射フィルムは、直接触れることのないよう 0.5 mm 程度間隔をあけ、ガスキセノン層を設ける。側面の反射材は固定用治具側面に貼り付けてあり、横から押し当てる形となる。

図 4.22 に製作したシンチレーション検出器を示す。

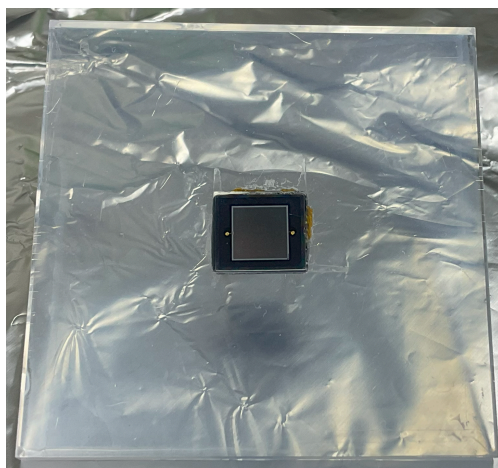


図 4.22 製作したシンチレーション検出器

## 4.8 本章のまとめ

アクリル板表面に対して波長変換材を滑らかかつ均一にコーティングするために、スピンコーティングと呼ばれる手法を試した。表面の滑らかさと均一さの評価を、目視により塗りムラの有無の判断と、紫外線を当てた際の発光のムラの有無、レーザーを用いた表面反射光強度の測定によって行った。結果として、コーティングの滑らかさ・均一さともに要求される水準に達していると判断し、アウトガス測定を行った後、波長変換材コーティングを施したアクリル板を使用して新型シンチレーション検出器を試作した。

今後の課題として、表面滑らかさの測定方法の改善が挙げられる。現在はレーザー光による光学測定を用いて表面状態を評価しているが、光学セットアップが大きいために、評価する TPB コート板や測定点を変える前後で測定条件を一定に保つことも難しく、測定には相応の時間と手間を要している。また表面全体ではなく、定点において測定を行って



いる。今後シンチレーション検出器の量産を視野に入れる上で、作成した TPB コート板の表面滑らかさの評価は迅速かつ安定した方法で行うことが望ましい。

本研究ではアクリル板表面の複数の測定点に対しレーザーを照射、その反射光強度を測定することで表面滑らかさと均一さの間接的評価を行った。今後は非接触型表面粗さ計を用いた、表面粗さの直接的評価を行えるかの確認をする予定である。また、TPB 濃度を最適化することも必要となる。本研究では、先行研究に近い質量濃度である TPB 2% 溶液を用いてコーティングを行った。今後数種類の TPB 濃度コーティングを行い、シンチレーション検出器を製作する。それらを実際にキセノンガス中で運用し、データ取得と解析を行う。得られたシンチレーション検出効率の比較をすることで、実験的に最適な TPB 濃度を同定する予定である。

## 第 5 章

# ミニチェンバーでの性能評価

### 5.1 測定目的

新型シンチレーション検出器によるキセノンガス中での  $\alpha$  線由来のシンチレーション光検出効率を測定し、TPB コート板、反射フィルムや MPPC の配置などの評価を行う。また、光学シミュレーションの結果と比較することで、十分な性能であるかを確認する。

### 5.2 測定セットアップ

#### 5.2.1 ミニチェンバー

AXEL 実験ではキセノンガスのシンチレーション光を使って MPPC や PMT を評価するために、3 L のミニチェンバーを用いている。本研究では、ミニチェンバー内に新型シンチレーション検出器と PMT を設置してキセノンガスを導入、 $\alpha$  線源由来のシンチレーション検出により性能評価を行った。図 5.1 にミニチェンバーの画像を示す。

#### 5.2.2 ミニチェンバー内のセットアップ

図 5.2 はセットアップの概略図、図 5.3 はセットアップの画像である。チェンバー内の構造物は PTFE 円筒部と PEEK の土台部からなる。円筒中心の壁内部に 5.4 MeV  $\alpha$  線源である  $^{241}\text{Am}$  が設置してあり、1 mm 径の穴を通じて円筒内部に  $\alpha$  線が放出される。円筒内部で  $\alpha$  線が失ったエネルギーの一部がシンチレーション光として放出され、上下対称な位置に設置された新型シンチレーション検出器と PMT で検出される。PMT は 180 L 試作機で使用されているものと同じ、26 mm 角の R8520-406-001 である。PMT で検出される割合は、PMT の検出性能は分かっているため、測定においては PMT での検出光子数をシンチレーション検出器の性能評価の基準とする。

光学シミュレーターを用いてシンチレーション検出器で期待される検出光量を算出し、PMT での検出光量との比を取ることで、予想される検出光量比を求めることができる。これと、実測定により得られた検出光量比を比較することによって、ミニチェンバー内に

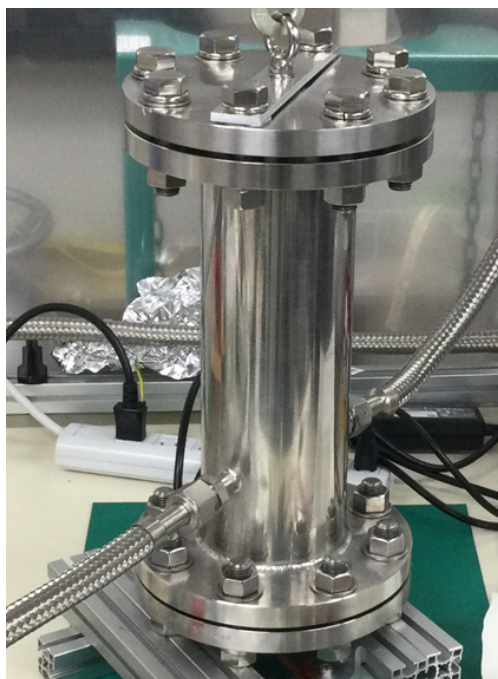


図 5.1 本研究で使用したミニチェンバー

実装したシンチレーション検出器の性能の評価を行った。

### 5.2.3 データ取得系

データ取得は CAEN 社製の ADC (Analog to Digital Converter) DT5725 を用いて行った。DT5725 のサンプリングレートは 250 MS/s、ダイナミックレンジは 2 V、分解能は 14 bit であり、約 0.122 mV を 1 カウントとして波形を記録する。

シンチレーション検出器の MPPC のバイアス電圧印加回路を図 5.4 に示す。電圧供給部の二段のローパスフィルターにより、電源由来の高周波ノイズを除去する。

データ取得系の模式図を図 5.5 に示す。MPPC への印加電圧は 54.6 V、PMT への印加電圧は -800 V とした。シンチレーション検出器の信号はアンプモジュール 1 段で 10 倍増幅をした後に ADC に入力をした。

### 5.2.4 ガス系統

測定時のガス循環系の概略図は図 5.6 の通りである。本研究では、キセノンガスの純度を保ちシンチレーション光の減衰を防ぐために、ミニチェンバー内のキセノンガスを循環してモレキュラーシーブに通し純化しながら測定を行った。モレキュラーシーブは主に水や炭化水素を除去する役割を担っている。モレキュラーシーブは細孔吸着により、不純物を除去するが、吸着物の蓄積により吸着性能が低下する。そのため、吸着した不純物の除去による性能回復を目的とした加熱真空引きを適宜行った。

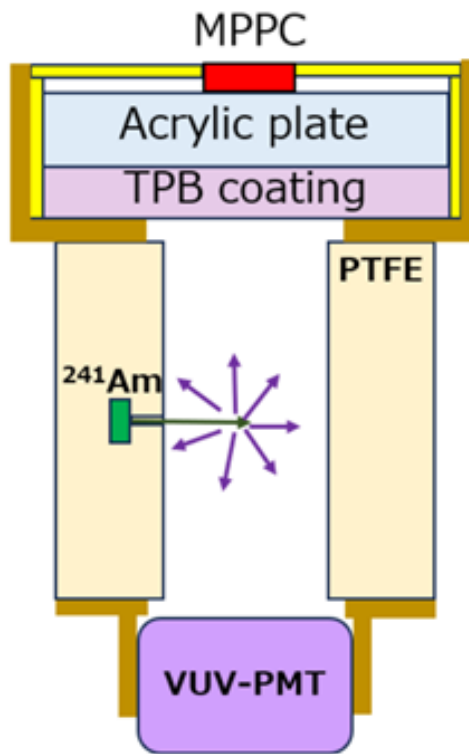


図 5.2 ミニチェンバー内に実装した測定セットアップの概略図



図 5.3 セットアップの画像。白い PTFE 円筒部の中心の壁内部に  $\alpha$  線源である  $^{241}\text{Am}$  が設置してある。

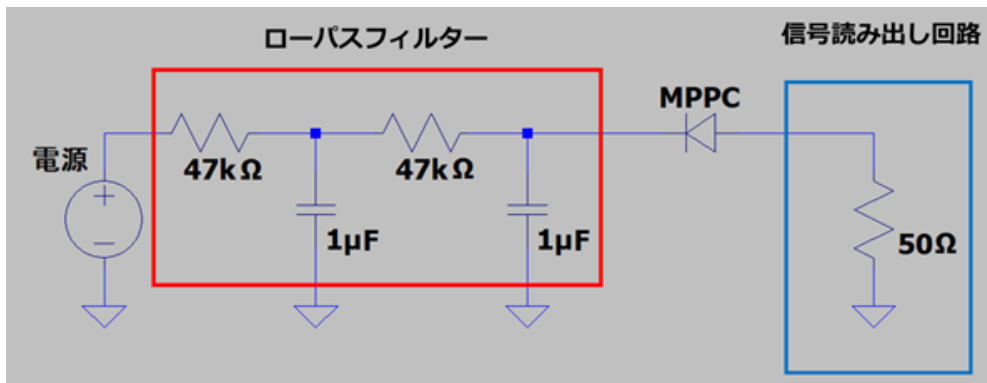


図 5.4 MPPC のバイアス電圧印加回路

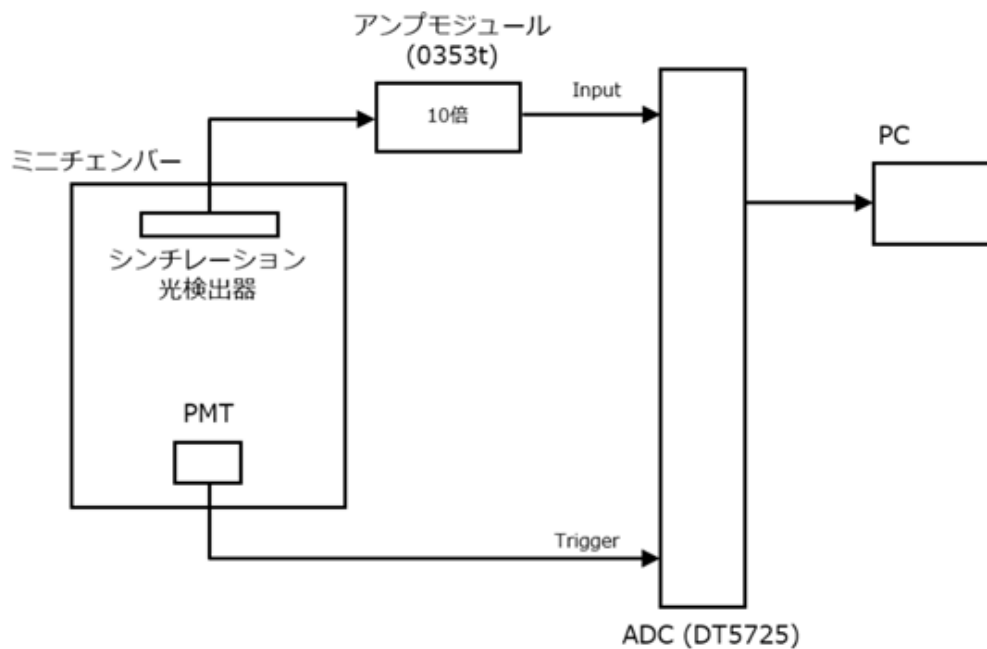


図 5.5 データ取得系の模式図

また本研究では、液化回収部の温度表示・管理システムの取付工事を行った。液化回収部はチェンバーを開けて作業をする際に循環経路内のキセノン回収し、再利用するために必要である。図 5.7 のように液化回収瓶の口部に 250 W のシースヒーターを取り付け、温度調節器である OMRON 社 E5CC-TRX3ASM-006 を組み合わせて温度調節システムを製作・導入した。これにより液化回収瓶の口部の温度を  $-100^{\circ}\text{C}$  以上に保つことで瓶口でのキセノンの固化を防ぐことができ、液化回収瓶の圧力上昇による破裂のリスクをなくし、安全性を担保した。

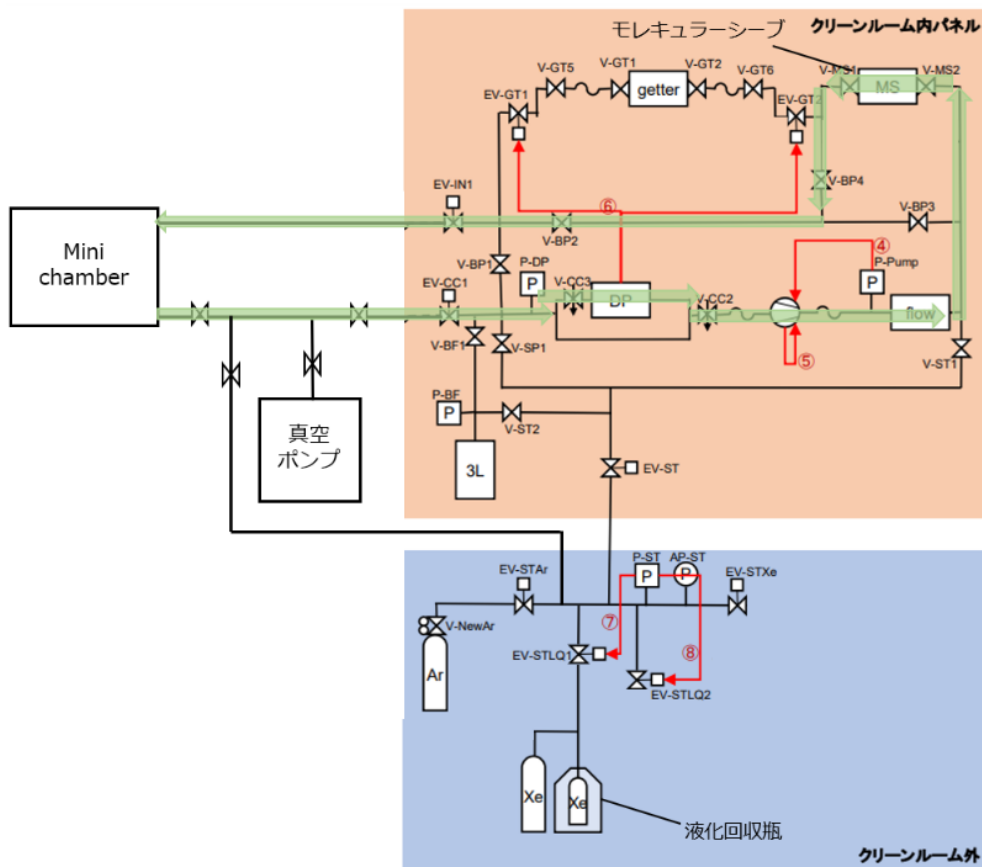


図 5.6 ミニチェンバーのキセノンガス循環系。緑の矢印は循環路を表している。

## 5.3 MPPC と PMT のゲインの測定

$\alpha$  線イベントにおけるシンチレーション検出器と PMT の検出光子数の比較をするにあたって、使用する MPPC と PMT の 1 photon-equivalent (p.e.) ゲインを知る必要がある。特に MPPC の降伏電圧には温度依存性があり、バイアス電圧が一定であっても測定環境の温度の違いにより 1 p.e. ゲインには変動が生じる [25]。そのため、事前に MPPC の降伏電圧  $V_{br}$  および 1 p.e. ゲインの温度依存性を測定し、 $\alpha$  線イベント測定ごとに 1 p.e. ゲインの補正を行うためのデータを取得しておく。

### 5.3.1 MPPC の用 1 p.e. ゲインの測定

MPPC の 1 p.e. ゲイン補正データを取得するために、ダークパルスの測定を行った。使用する S13360-6050CS のダークパルスは毎秒平均 200 万カウントで時間的にランダムに発生するため、トリガーとしてクロックジェネレーターで周期的に生成した NIM 信号を入力し、ゲート幅は  $4 \mu\text{s}$  として波形を記録した。ダークパルスの信号は非常に小さいため、



図 5.7 液化回収瓶と温度調整システム付きヒーター。  
 上のモニターは瓶口の温度、下のモニターは瓶底の温度を表示している。

アンプモジュール 2 段で 100 倍増幅をした後に ADC に入力をした。

$\alpha$  線イベント測定では、信号が大きいため MPPC の印加電圧  $V_{op}$  は 54.6 V に設定しているが、この電圧ではダークパルス信号として小さすぎて測定することができなかった。そのため、ダークパルス測定はバイアス電圧を 56.1 V から 57.6 V まで 0.5 V 刻みで設定して行った。温度は 30 °C に固定した。図 5.8 に MPPC のダークパルス測定の実験系を示す。

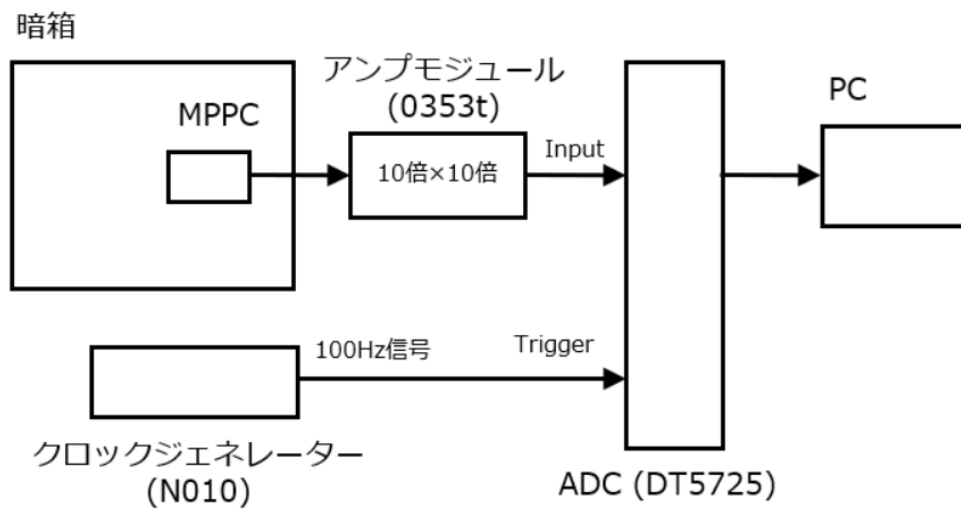


図 5.8 MPPC のダークパルス測定の実験系の模式図



取得した波形データを解析し、1 p.e. ゲインを求めるために先行研究に倣いハイブリッド法を用いた [35]。ハイブリッド法では図 5.9 のように、取得した波形に一定の時間幅を持つウィンドウを開き、各ウィンドウ内の波形を積分する。このとき、ウィンドウ内に設定した閾値を超えた波形がある場合には、そのウィンドウ内にパルスがあると判定する。ハイブリッド法では、ウィンドウの時間幅をアフターパルスの発生時定数より十分長く取ることで、アフターパルスの効果を評価することができる。本解析では 1 p.e. パルスの時間幅が約 100 ns であるため、ウィンドウの時間幅を 250 ns とした。

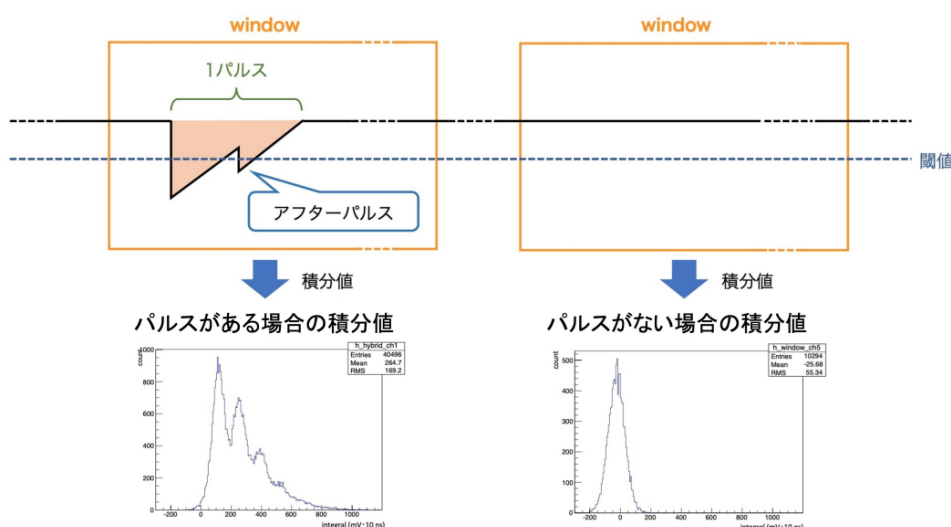


図 5.9 ハイブリッド法概念図。下の二つのヒストグラムは実際に得られた分布の例である。[35]

図 5.10 に得られた 1 p.e. ゲインの印加電圧依存性を示す。MPPC への印加電圧と 1 p.e. ゲインの線形関係の傾きは温度に依らない。そのため異なる温度下での測定であっても、その時のある印加電圧における 1 p.e. ゲインを取得できれば、 $\alpha$  線イベント測定時  $V_{op} = 54.6$  V における 1 p.e. ゲインを逆算することができる。

### 5.3.2 PMT の 1 p.e. ゲインの測定

PMT の 1 p.e. ゲインは LED を微弱に光らせた際の検出信号を測定することで求めた。ファンクションジェネレーターにより LED を小光量で発光させる。ファンクションジェネレーターの信号をトリガーとして、時間幅 400 ns で PMT の波形を取得する。PMT の信号は非常に小さいため、アンプモジュール 2 段で 100 倍増幅をした後、ADC に入力した。図 5.11 に PMT ゲイン測定の様式図を示す。

波形データのベースラインは 1 イベントごとに、最頻値上位 10 カウントの重みつき平均とし、1 イベントごとに、各ビンの PMT 信号波高とベースラインの差の総和を取ることによって PMT 信号の積分電荷量を求めた。図 5.12 は得られた PMT 信号の積分電荷量分布である。



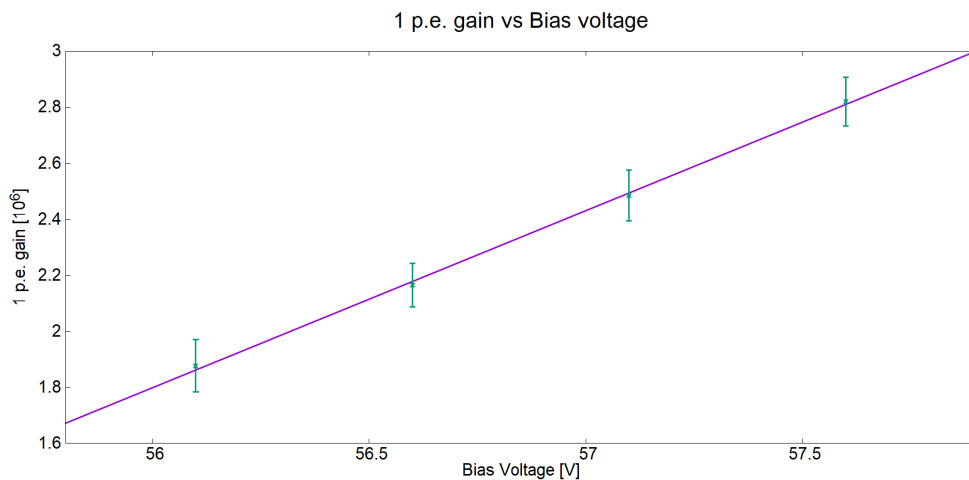


図 5.10 30 °C における MPPC の印加電圧と 1 p.e. ゲインの関係

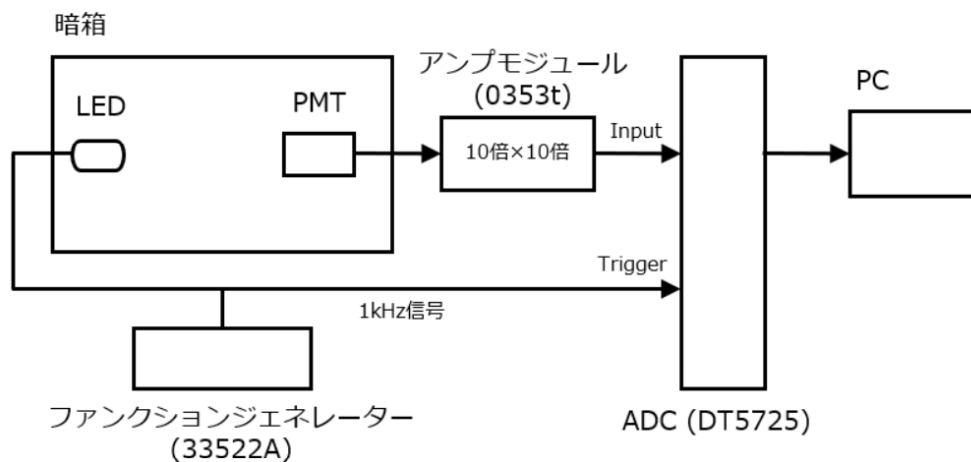


図 5.11 PMT ゲイン測定の模式図

PMT の検出光子数が平均  $\mu$  のポアソン分布に従うと仮定すると、検出光子数が 0 である確率  $P(0)$  は以下の式で表すことができる。

$$P(0) = e^{-\mu} \quad (5.1)$$

したがって、 $P(0)$  を求めることができれば式 (5.1) を変形することで、 $\mu$  を計算できる。

$$\mu = -\ln(P(0)) \quad (5.2)$$

図 5.12 で示された分布の左端のピークがベデスタル (0 p.e.) であり、このピークに対しガウシアンフィットを行うことで  $P(0)$  を算出した。

取得した全イベントの平均電荷量を  $\mu$  で割ることで、1 p.e の電荷量を求めることができる。図 5.12 から  $P(0) = 0.109$ 、 $\mu = 2.22$  という値が得られた。全イベントの平均積分

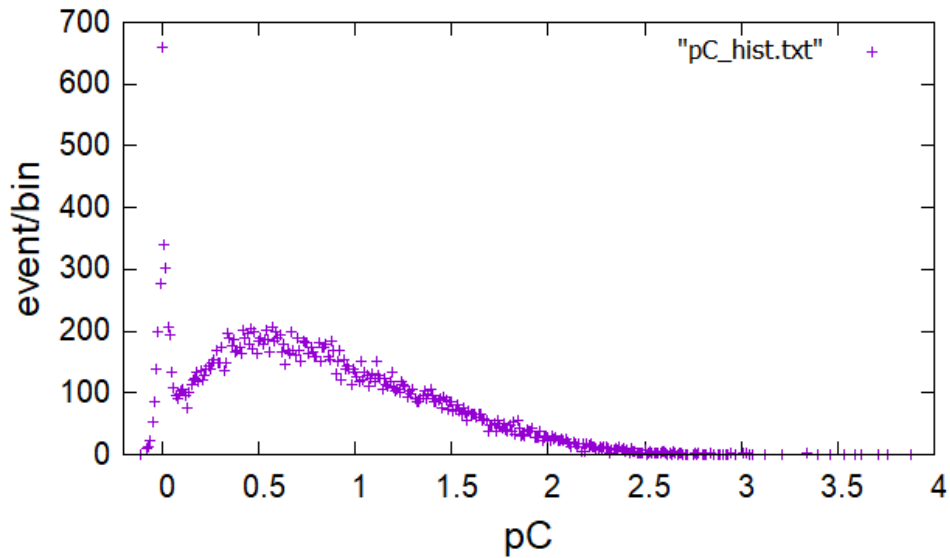


図 5.12 LED 点灯時の PMT 信号の積分電荷の分布。左端のピークはペDESTAL である。

電荷量は  $0.798$  [pC] であり、これにより 1 p.e. の電荷量は  $0.360$  [pC]、1 p.e. ゲインは  $2.25 \times 10^6$  であることが分かった。

## 5.4 $\alpha$ 線由来イベントのデータ取得

図 5.13 に  $\alpha$  線由来のイベントでの典型的な同期信号を示す。PMT がシンチレーション光を検出した際の信号波高はおおよそ  $600$  mV 以上である。PMT の検出光量に対する新型シンチレーション検出器の検出光量の比を測定するため、DT5725 において PMT の信号をトリガーとし、時間幅  $1 \mu\text{s}$  での波形を取得する。トリガーの閾値は  $4000$  カウント (約  $500$  mV) とした。測定は各セットアップごとに 1 - 2 日程度行った。データ取得前と、データ取得後に MPPC バイアス電圧  $57.6$  V におけるダークパルス測定を行い 1 p.e. ゲインを取得した。得られた 1 p.e. ゲインと 5.4.1 節で取得したデータをもとに、データ取得時のバイアス電圧である  $54.6$  V における 1 p.e. ゲインを算出した。

本測定では、シンチレーション検出器の底面側に反射フィルムが有る場合 (setup 1) と無い場合 (setup 2) の二通りのデータ取得を行った。setup 1 の構造は図 3.11 で、setup 2 の構造は図 3.12 で示した通りである。setup 2 では TPB コート板底面から抜けた光は白色 PLA により乱反射する。

### 5.4.1 解析

取得した新型シンチレーション検出器と PMT の波形データそれぞれについて、ベースラインを最頻値上位 10 カウントの重みつき平均とし、各ビンの信号波高とベースライン

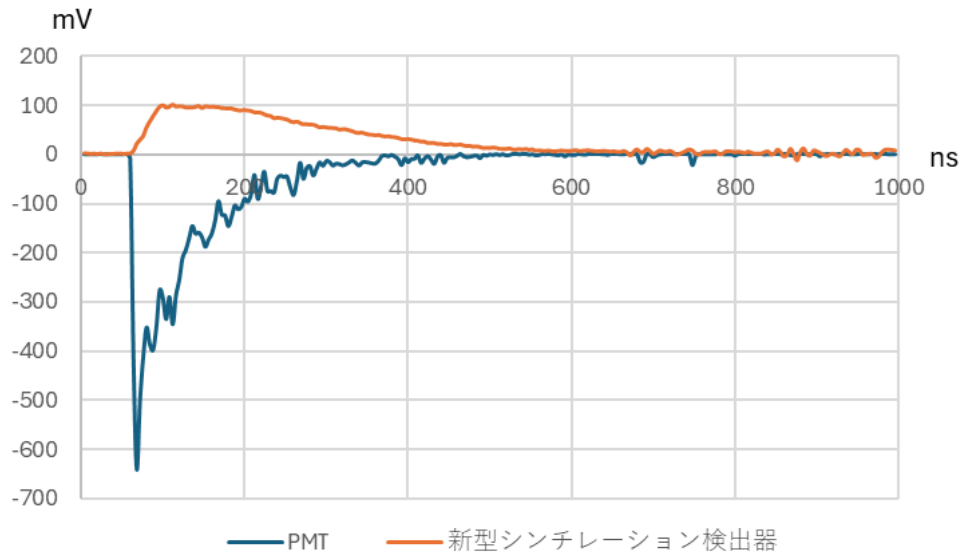


図 5.13  $\alpha$  線由来のイベントでの典型的な同期信号。青色が PMT の信号、黄色が新型シンチレーション検出器の MPPC の信号 (10 倍増幅) である。

の差の総和を取ることで、各イベントの積分電荷量を求めた。この積分電荷量を 1 p.e. ゲインで割ることで検出光子数を得る。なお偶発的に入射した、 $\alpha$  線によらないイベントを除去するため、PMT の検出光子数分布に対しガウシアンフィットを行い、得られたピーク中心から  $\pm 2\sigma$  の範囲を  $\alpha$  線イベント由来と見なし、その他の範囲をカットした。

図 5.14 , 5.15 に setup 1 の PMT とシンチレーション検出器の検出光子数分布を、図 5.16 , 5.17 に setup 2 の PMT とシンチレーション検出器の検出光子数分布を示す。PMT の検出光子数によるカットによって  $\alpha$  線イベントを抽出し、各イベントごとにシンチレーション光検出器の検出光子数と PMT の検出光子数の比 (= 検出光量比) を求めた。

## 5.4.2 結果

### setup 1 (底面反射フィルム有)

$\alpha$  線イベントで生じたシンチレーション光の平均検出光子数は、新型シンチレーション検出器で 324.1、PMT で 2268.5 であった。イベントごとの検出光量比の分布を図 5.18 に示す。検出光量比のピークに対し、ガウシアンフィッティングを行い、得られたピーク位置は 0.141 であった。

光学シミュレーションによるシンチレーション光検出割合は、PMT で 2.20 %、新型シンチレーション検出器で 0.202 % であり、予想検出光量比は 0.0917 である。PMT は波長変換された光の一部も検出するため、新型シンチレーション検出器があることにより、PMT の検出効率も上がっている。

測定で得られた検出光量比の値は光学シミュレーションで予想された値より約 1.54 倍

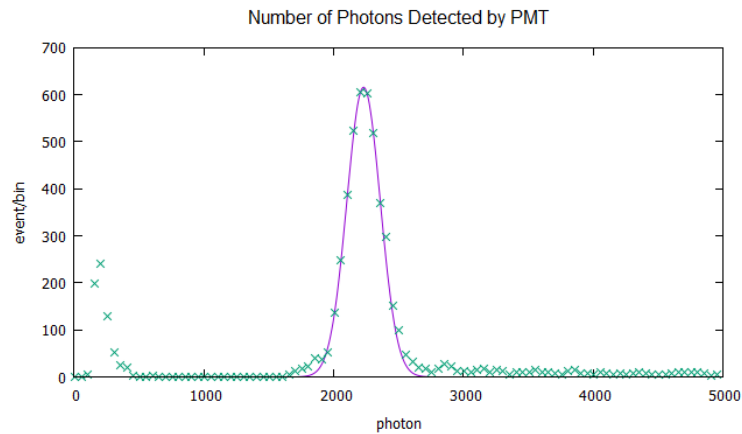


図 5.14 setup 1 の PMT の検出光子数分布。  
 横軸 2250 付近のピークが  $\alpha$  線イベントに対応する。実線部はガウシアンフィットの結果である。

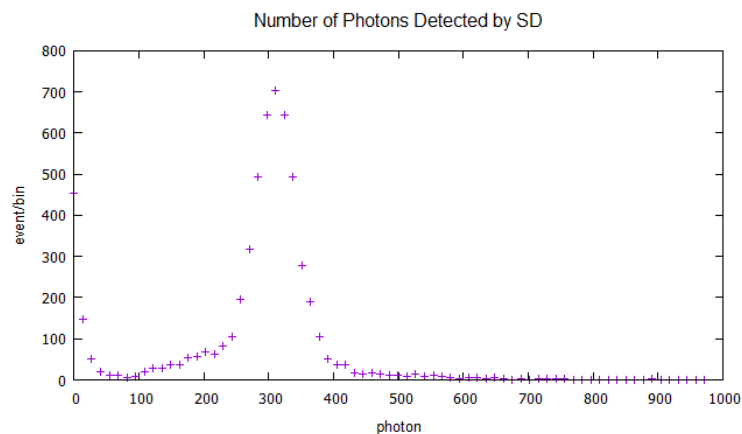


図 5.15 setup 1 のシンチレーション検出器の検出光子数分布。  
 横軸 300 付近のピークが  $\alpha$  線イベントに対応する。

良い結果であった。

#### setup 2 (底面反射フィルム無)

平均検出光量は、新型シンチレーション検出器で 348.9、PMT で 2324.2 であった。イベントごとの検出光量比の分布を図 5.19 に示す。検出光量比のピークに対し、ガウシアンフィッティングを行い、得られたピーク位置は 0.145 であった。

光学シミュレーションによるシンチレーション検出効率は、PMT で 2.28 %、シンチレーション光検出器で 0.205 % であり、予想検出光量比は 0.0898 である。

測定で得られた検出光量比の値は光学シミュレーションで予想された値より約 1.61 倍良い結果であった。

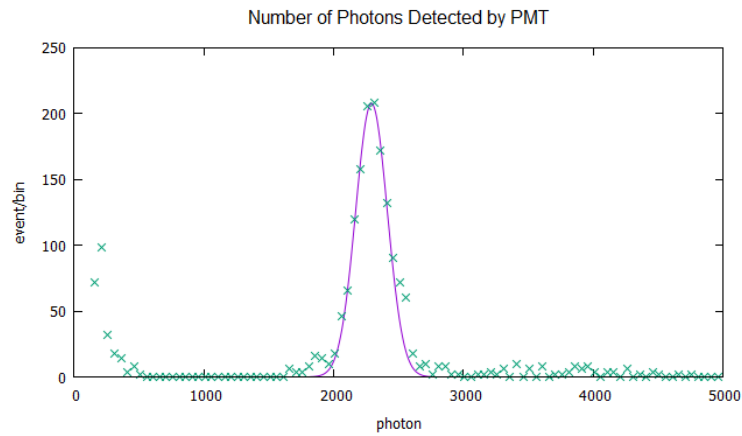


図 5.16 setup 2 の PMT の検出光子数分布。  
 横軸 2300 付近のピークが  $\alpha$  線イベントに対応する。実線部はガウシアンフィットの結果である。

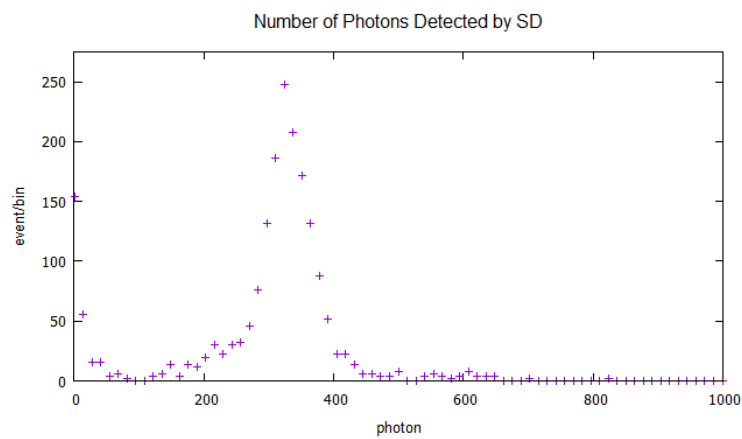


図 5.17 setup 2 のシンチレーション検出器の検出光子数分布。  
 横軸 300 付近のピークが  $\alpha$  線イベントに対応する。

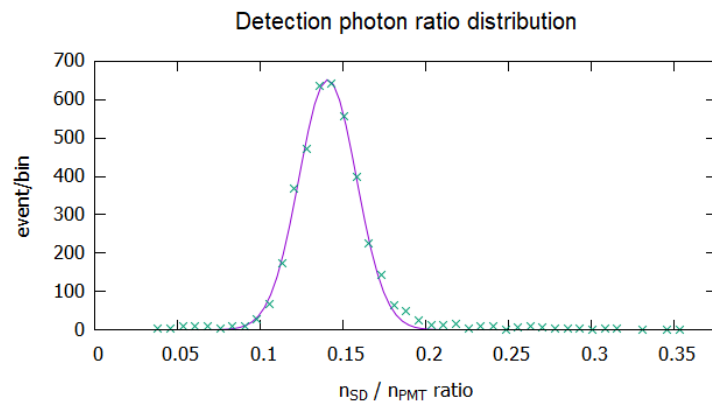


図 5.18 PMT に対する新型シンチレーション検出器の検出光量比分布

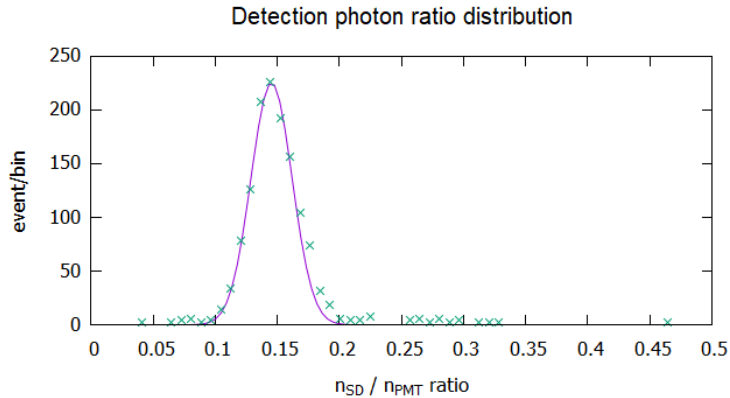


図 5.19 PMT に対する新型シンチレーション検出器の検出光量比分布

## 5.5 考察

測定により得られた検出光量比は二つのセットアップともに、光学シミュレーションで予想された検出光量比の 1.5 倍以上となった。その理由として、TPB コート面での光変換係数が考えられる。光学シミュレーションではキセノンガスシンチレーション光の光変換係数を 1 としていたが、実際にはそれ以上の光変換係数をもつ TPB コート面が得られていたと考えられる。これは先行研究 [27] の 1.75 程度と矛盾しない。光検出係数を仮に 1.75 とした際には検出光量比はシミュレーションによると 0.16 程度になる。測定で得られた値は 0.14 より大きく、9 割程度の値となっている。このことから、TPB コート面は 430 nm 帯波長に対し、十分均一かつ滑らかであり、ほとんど散乱を起こすことなくシンチレーション光を捕獲できていると考えることができる。

ここからはシンチレーション検出器としての評価に移る。先の検出光量比の議論から、側面の反射フィルムが機能していることや、光学セメントを用いた MPPC の接着は問題ないことがうかがえる。得られた結果が極めて良好であることから、実際の  $0\nu 2\beta$  探索の環境下に近い 180 L 試作機にシンチレーション検出器を導入し、性能評価を行っていく。

また、本測定では底面側の反射フィルム有 (setup 1) と 底面側反射フィルム無 (setup 2) の二つのセットアップについて、検出光量比の比較を行った。光学シミュレーションの結果では setup 1 の方が良い値だったが、実際の測定では setup 2 の方が良い値が得られた。しかしながら、二つのセットアップの検出光量比は、光学シミュレーション・実際の測定ともにわずかな差であった。3.4.2 節で述べた通り、実際の  $0\nu 2\beta$  探索の環境下を想定したシミュレーション結果においても検出効率に差がほとんど見られなかったことから、つづく 180 L 試作機での新型シンチレーション検出器の性能評価では二つのセットアップを同時に実装して行うのが妥当であると考えられる。

## 第 6 章

# AXEL 180 L 試作機での性能評価

AXEL 180 L 試作機を用いて、PMT と新型シンチレーション検出器でのシンチレーション検出効率を比較することによる性能評価を行う。

### 6.1 測定セットアップ

図 6.1 は新型シンチレーション検出器を取り付けた様子を示している。図 2.9 に示した PMT 7 本のうち、2 本を取り外して二種類の新型シンチレーション検出器に置き換えた。新型シンチレーション検出器は 5.4 節で述べた通り、底面反射フィルム有と無の二種を一つずつ実装した。

データ取得には PMT からの信号読み出しに使っている CAEN 社製の ADC V1720 を用いた。V1720 のサンプリングレートは 250 MS/s、ダイナミックレンジは 2 V、分解能は 12 bit であり、約 0.488 mV を 1 カウントとして波形の記録が可能である。

MPPC バイアス電圧印加回路を図 6.2 に示す。

PMT への印加電圧は  $-760\text{ V}$ 、MPPC への印加電圧は setup 1 では  $-54.77\text{ V}$ 、setup 2 では  $-54.81\text{ V}$  とした。MPPC の印加電圧の値は  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  における推奨運用電圧から決定した。検出されるシンチレーション光子数は数個程度で、信号は非常に小さい。そのため、PMT とシンチレーション検出器ともに信号をアンプモジュール 2 段で 100 倍増幅した後、ADC に入力した。180 L 試作機でのデータ取得系の模式図を図 6.3 に示す。

データ取得の際のガス循環路は図 2.4 で示した通りである。

#### 6.1.1 測定準備

取付完了後に、二つのシンチレーション検出器のダークパルス確認と LED を微弱に発光させた際の信号の確認を行った後、ELCC の MPPC の動作確認・Anode への電圧印加・CW 回路の昇圧試験を行い、各部機構が正常に機能していることを確認し、チェンバーを封止した。

その後、再度シンチレーション検出器の MPPC のダークパルスの確認を行った。信号



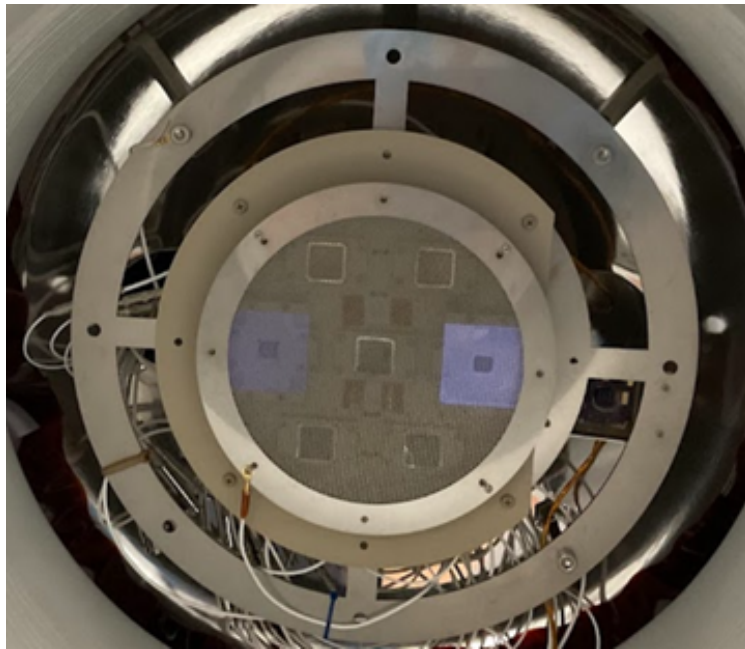


図 6.1 180L 試作機に実装した新型シンチレーション検出器。青く光っている図右が底面側反射フィルム有 (setup1、図 3.11 参照)、図左が底面側反射フィルム無 (setup2、図 3.12 参照) である。前面に見えているメッシュは、カソード電圧を遮へいするためのグラウンド電極。

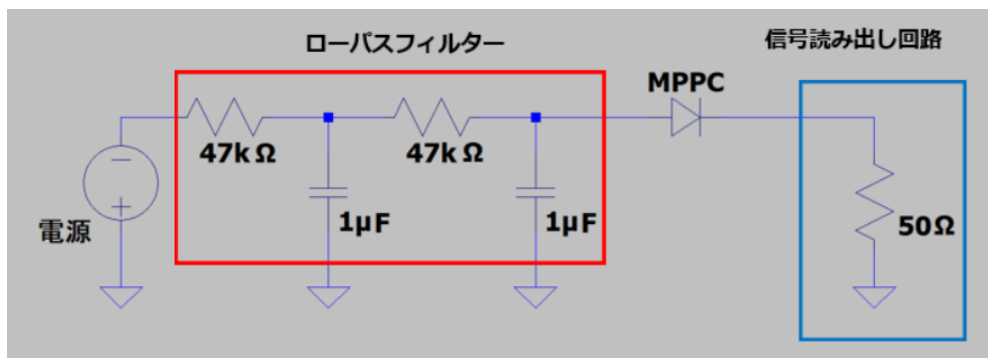


図 6.2 MPPC のバイアス電圧印加回路

を確認し、また CW 回路での生成電圧が 37.5 kV まで到達することを確認し、真空引きを開始した。真空引きを一週間程度行った後、6.6 気圧のキセノンガスを導入した。

キセノンガス導入後、シンチレーション検出器の信号確認作業を行ったところ、setup 1 のダークパルスが確認できなかった。setup 2 のダークパルスは確認でき、アノード電圧印加時に生じる EL 光の PMT との同期信号も確認できたため、setup 2 のみの性能評価を行うこととした。setup 1 の信号が見えなくなった原因は、今後チェンバーを開けて調査する必要がある。

180 L 試作機のフィールドケージの長さは現在 40 cm である。そのため、当初カソード-アノード間の電圧差は、ドリフト電場が 100 V/cm/bar となる 27.1 kV を目標とした。ア

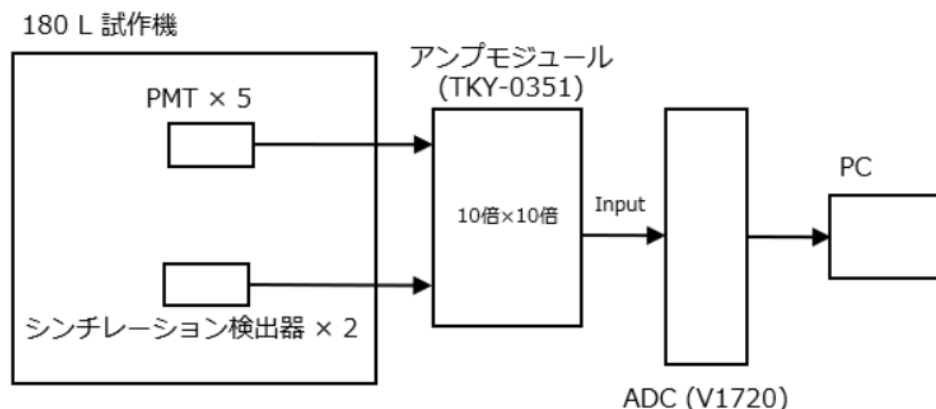


図 6.3 180 L 試作機でのデータ取得系の模式図

ノードには ELCC 電場が  $3 \text{ kV/cm/bar}$  となる  $9.9 \text{ kV}$  を印加することを考えると、カソードには  $37.0 \text{ kV}$  の電圧を印加することになる。

しかし、カソード電圧が  $16.2 \text{ kV}$  を超えたあたりで、放電モニターが今までの実験で得られている典型値を上回りはじめた。放電モニターは図 6.1 の中央の PMT からの  $0.4 \text{ V}$  を超えるパルスレートであり、典型値は  $10 \text{ Hz}$  程度である。

さらにカソード電圧が  $17.5 \text{ kV}$  を超えると、ELCC の MPPC のカレントにも異常値が見られるようになった。

以上のことを踏まえ、本測定ではカソード電圧を、安定してデータ取得が可能だと考えられる  $16 \text{ kV}$  とした。この時、ドリフト速度があまりに遅くなると、EL 光とシンチレーション光検出時間差の拡大によりデータ取得に問題が生じる。ドリフト電場はカソード電圧とアノード電圧との差で決定されるため、アノード電圧をなるべく小さくすることでドリフト電場を確保することとした。アノード電圧は EL 過程を生じさせるには十分な値にした上で、ドリフト速度は  $100 \text{ V/cm/bar}$  のときと同オーダーとなるように計算・調整を行った。図 6.4 はドリフト電場とドリフト速度の関係である。

最終的に、アノード電圧は  $7 \text{ kV}$  に設定し、ドリフト電場は  $34.3 \text{ V/cm/bar}$ 、ELCC 電場は  $2.12 \text{ kV/cm/bar}$  の環境下で測定を行った。放電の原因については 6.4 節で議論する。

## 6.2 データ解析

取得したデータで、PMT の波形データを確認すると、図 6.5 のように、多くノイズが存在するイベントが多数確認された。図 6.5 を見ると、横軸  $40,000$  と  $82,000$  付近でトリガーが発行されている。PMT の波形を見ると、波形取得範囲全体にわたってノイズが多く存在することが分かる。トリガーが発行された横軸  $40,000$  付近には確かに EL 光のような信号が確認できる。しかし、横軸  $82,000$  付近には EL 光のような信号が確認できない。このことから、放電によりトリガーが誤って発行されている可能性もある。ch 6 は PMT の中

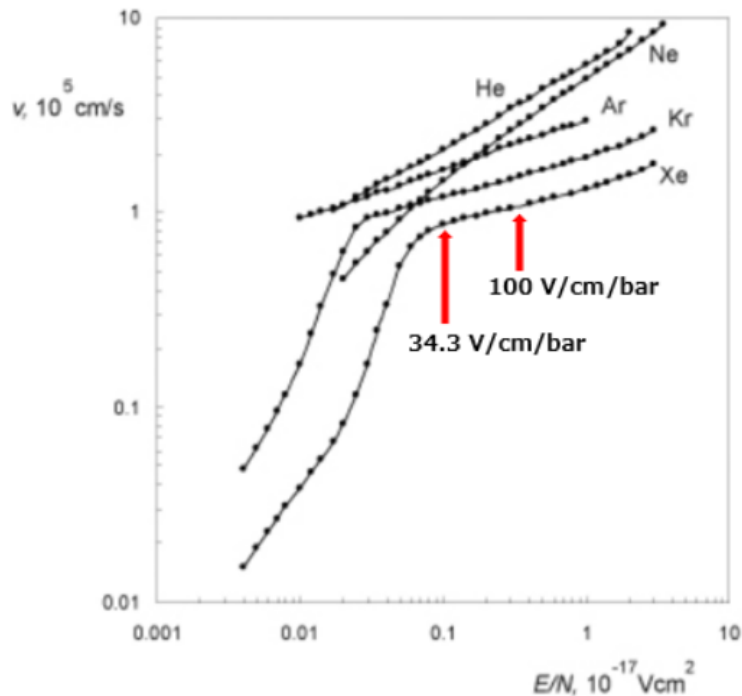


図 6.4 ドリフト電場とドリフト速度の関係 [10]。100 V/cm/bar と本測定での 34.3 V/cm/bar のドリフト速度を示す。

でも特にノイズが多く、横軸 82,000 付近に大きな信号が確認できる。

この結果から、本測定で得られたデータはシンチレーション検出効率の評価に用いることができないと判断し、今後再測定を行うこととした。

### 6.3 測定後のセットアップの確認

キセノンガス回収後、チェンバーを開けて中を確認したところ、PMT 固定部周辺の金属ネジが一本脱落していた。脱落はインパクトドライバーを用いてチェンバー封止した際の振動によると考えられる。チェンバー内部のカメラで撮影した放電時の発光箇所は金属ネジ脱落箇所と一致していたことから、脱落した金属ネジが原因でカソード電圧が 20 kV 以下と小さい状態でも放電を繰り返しており、放電モニター値の高さや ELCC の MPPC の異常なカレント値に繋がっていたものと考えられる。PMT のシンチレーション判定範囲に複数のシンチレーション光のような信号も、放電に起因するノイズが原因だと考えられる。測定では放電モニター値が 10 Hz 程度となるカソード電圧で測定を行ったが、実際には放電モニターのパルス判定の閾値を上回らない範囲で、PMT の信号にノイズがのるような放電が高い頻度で起きていた可能性がある。ch 6 の PMT は金属ネジ脱落箇所から最も近い位置にあったため、特に放電の影響を強く受けてノイズがひどくなっていたものと考えられる。

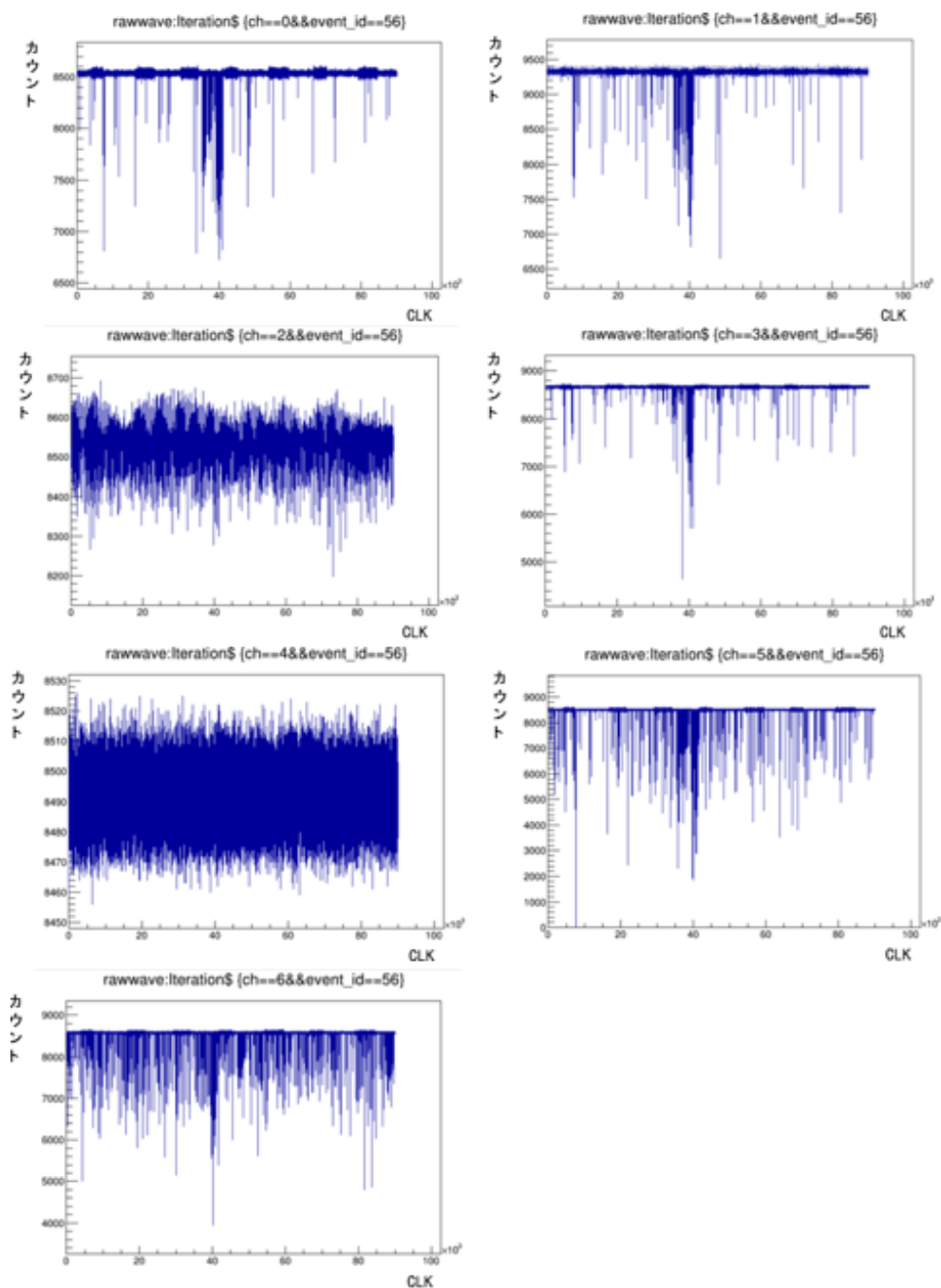


図 6.5 PMT とシンチレーション検出器の波形の例。横軸は CLK で 1 CLK が 4 ns に対応する。ch 0, 1, 3, 5, 6 が PMT 信号、ch 2 は setup 2 の信号である。ch 4 は setup 1 の信号であるが、本測定では機能していない。ch 7 は信号取得のトリガーであり、ELCC で光検出された際に発行される。

## 6.4 今後の予定

本測定では、二つ導入した新型シンチレーション検出器のうち一つの信号が見えず機能しなかったことと、放電に起因すると考えられる PMT の信号のノイズが問題となった。放電はカソードやアノードではなく、チェンバー封止時の振動が原因と思われるネジの脱落が原因だった。今後は検出器内の電極の接触や部品の脱落に細心の注意を払うことで放電対策を行う。

シンチレーション検出器の信号がキセノンガス導入後に見えなくなった原因は現状不明である。真空引きやキセノンガス導入時の圧力変化で MPPC のピンの接触が悪くなった可能性や、データ取得系の不良の可能性を踏まえて原因を解明してから再度 180 L 試作機でのデータ取得を行う予定である。

## 第7章

# まとめと今後の展望

現在までに標準理論は、観測された物理現象の説明として大いに成功している。しかしながら、宇宙創成時に同数存在したはずの粒子反粒子の対称性が破れ、物質のみの宇宙が形成された理由を標準理論では説明できない。また、ニュートリノに質量があること、そしてその質量が不自然に軽いことについて、標準理論では説明することができない。これらの問題はニュートリノのマヨラナ性の実証により解決できる可能性がある。ニュートリノのマヨラナ性を検証するための最も有力な手法として、ニュートリノレスダブルベータ崩壊 ( $0\nu 2\beta$ ) の探索が挙げられる。

AXEL 実験では、高圧キセノンガス・タイムプロジェクションチェンバー (TPC) を用いて  $0\nu 2\beta$  の探索を行っている。非常に稀な現象である  $0\nu 2\beta$  観測に必要な検出器の要件として、低背景事象、高エネルギー分解能が挙げられる。AXEL 実験では、二重ベータ崩壊核である  $^{136}\text{Xe}$  を検出器に高圧で封入している。イベントに伴い生じた電離電子は ELCC (Electroluminescence Light Collection Cell) と呼ばれる AXEL 実験独自の検出機構を用いて、EL 光として検出している。ELCC は高エネルギー分解能と優れた飛跡再構築能力を有しており、これにより  $0\nu 2\beta$  と背景事象を識別することが可能である。ELCC の性能を最大限発揮するためには、イベント発生点の ELCC からの垂直距離 (=  $z$  位置情報) を取得し、電離電子再結合などの  $z$  位置依存の補正を行う必要がある。

しかし AXEL 実験においては、検出できるシンチレーション光量が少ないために、誤った  $z$  位置情報を得てしまうミスリコンストラクション確率が高い状況にあり、 $z$  補正を通してエネルギー分解能に与える悪影響は約 0.13 % となっている。将来的に検出器を大型化し、世界最高感度での  $0\nu 2\beta$  探索を見据えるにあたり、ミスリコンストラクションをなくすことによるエネルギー分解能の向上は不可欠である。使用するキセノンをはじめ、貴ガスのシンチレーション光波長は真空紫外光であるため、直接検出には特殊な光検出器が必要とされる。正しい  $z$  補正を行うための十分な光量を検出し、かつ検出光量のみで低エネルギーバックグラウンドの除去を可能とするため、効果的にシンチレーション光を収集することが求められる。そこで、X-ARAPUCA と呼ばれる液体アルゴン TPC におけるシンチレーション光検出技術に着想を得て、貴ガス検出器のシンチレーション検出機構を独自に研究開発をした。これは光子の波長変換と捕獲の組み合わせにより、受光面積を大幅に

拡大したうえで安価な光検出器で効率的にシンチレーション光を検出する仕組みである。

設計した新型シンチレーション検出器の性能を光学シミュレーターを用いて推定し、目標とするシンチレーション検出光量を達成するという結果が得られたため、実際に製作し性能評価を行った。新型シンチレーション検出器の要となる TPB コート板はスピンコーティングにより作成し、現在は高品質のコート面を量産するための手法の模索を行っている。

作成した TPB コート板を用いて新型シンチレーション検出器を試作し、ミニチェンバーでのキセノンガスシンチレーション検出による性能評価を行った。その結果、シミュレーションでの推定を約 1.5 倍上回るシンチレーション検出効率であることが分かった。この結果は、目標とする表面滑らかさと均一さを達成し、かつ高い光変換係数をもつ TPB コート面を作成できたことを示唆するものである。現在、新型シンチレーション検出器を 180 L 試作機に導入し、データ取得段階にある。

将来的には新型シンチレーション検出器を、AXEL TPC 検出器内にて運用し、世界最高感度での  $0\nu 2\beta$  探索を行うことを目指している。



# 謝辞

修士課程において、私を支えてくださった皆様に心より感謝いたします。

市川温子教授には、研究においてあらゆる面からのご指導をいただきました。研究遂行に必要な知識や技術、心構えなどを的確にお伝えいただき、右も左も分からない状態の私を導いてくださいました。研究者とはかくあるべきという姿を今後も学ばしていただきたく思います。

中村輝石助教からは、学生に近い目線から接していただきました。研究では、特に技術的な側面から支えていただきました。作業を共同で行ったり、お手伝いいただいたりする中で、一から工作や治具設計などの技能を身につけることができました。

AXEL メンバーにもたくさんのお力添えをいただきました。秋山さんには、研究の最初から最後まで本当にお世話になりました。ミーティングやゼミにおけるコメント、技術面からのサポートなど書き出すときりがないほどお助けいただきました。疋田さんには貴ガス検出器を扱うための基礎知識やデータ取得・解析の手法など丁寧に解説していただきました。修士論文も添削をしていただきました。秋山さん、疋田さんには頭が上がりません。小林君、初見君、京都大学の佐々木君には研究のお手伝いをしていただきました。吉田さん、菅島さんにはさまざまなアドバイスをいただきました。

京都大学の木河助教とは直接お話する機会はありませんでしたが、研究の基幹となる光学シミュレータを使用させていただきました。

スタッフの方々やすでに卒業されている先輩方も含め、研究室の皆様にも大変助けられました。大変な時でも挫けず修士論文を書きあげることができたのは、ひとえに研究室の温かい空気があったからだと思います。特に同期のはるかさん、矢野君とは研究室内外を問わず、非常に仲良くお付き合いさせていただきました。研究の面でも私生活の面でも大きく支えられました。

友人たちにも感謝を。LINE グループ「物理芸人」の皆様とは鍋会や卓球をし、気分転換をすることができました。陰キャ TG 部をはじめとする西大和学園同期たちからは、いろいろな意味で励まされました。強く生きてください。

最後に、早く社会に出て稼げと言いつつもなんだかんだ大学院生活をサポートしてくれた家族の皆様にも最大限の感謝をささげたいと思います。これからもよろしく願いいたします。

## 参考文献

- [1] W. Pauli: Letter of 4 December to L.Meitner et al. (1930).
- [2] F. Reines, C. L. Cowan, F. B. Harrison, A. D. McGuire and H. W. Kruse: “Detection of the Free Antineutrino” , Phys. Rev., 117, pp. 159–173 (1960).
- [3] Tsutomu Yanagida. Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos. Progress of Theoretical Physics, Vol.64, No.3, pp.1103 – 1105, 1980.
- [4] M. Fukugita and T. Yanagida: “Baryogenesis Without Grand Unification” , Phys. Lett. B, 174, pp. 45–47 (1986).
- [5] S. Abe, et al.: “Search for the majorana nature of neutrinos in the inverted mass ordering region with kamland-zen” , Phys. Rev. Lett., 130, p. 051801 (2023).
- [6] ] J. Renner, et al.: “Energy calibration of the NEXT-White detector with 1% resolution near  $Q_{\beta\beta}$  of  $^{136}\text{Xe}$ ” , JHEP, 10, p. 230 (2019).
- [7] P. Novella, et al.: “Demonstration of neutrinoless double beta decay searches in gaseous xenon with NEXT” , JHEP, 09, p. 190 (2023).
- [8] K. E. Navarro, et al.: “A compact dication source for  $\text{Ba}^{2+}$  tagging and heavy metal ion sensor development” , JINST, 18, 07, p. P07044 (2023).
- [9] S. R. Soleti: “Towards a fiber barrel detector for next-generation high-pressure gaseous xenon TPCs” , Light Detection In Noble Elements (2023).
- [10] E. Aprile, A. Bolotnikov, A. Bolozdynya and T. Doke: “Noble Gas Detectors” , Wiley-VCH (2006)
- [11] D. Anderson, T. Hamilton, W.-M. Ku and R. Novick: “A large area, gas scintillation proportional counter” , Nucl. Instrum. Meth., 163, 1, pp. 125–134 (1980).
- [12] S. P. Ahlen: “Theoretical and experimental aspects of the energy loss of relativistic heavily ionizing particles” , Rev. Mod. Phys., 52, pp. 121–173 (1980).
- [13] C. Monteiro, et al.: “Electroluminescence yield in xenon gas detectors” , Revista do DETUA, 4, 7, pp. 849–852 (2007).
- [14] PHOTOMULTIPLIER TUBE R8520-406-001 技術資料: [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/R8520-406-001\\_TPMH1342E.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R8520-406-001_TPMH1342E.pdf)
- [15] M. Yoshida, et al.: “High-pressure xenon gas time projection chamber with scalable

- design and its performance at around the Q value of  $^{136}\text{Xe}$  double-beta decay”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, p. ptad146 (2023).
- [16] Fernandes, Freitas, Ball, Gómez-Cadenas, Monteiro, Yahlali, Nygren, & Dos Santos. (2010). Primary and secondary scintillation measurements in a xenon gas proportional scintillation counter. *Journal of Instrumentation*, 5(9). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/09/P09006>
- [17] Koichi Ichimura : private communication
- [18] Machado, A.A., Segreto, E., Warner, D., Fauth, A., Gelli, B., Máximo, R., and, ...: 2018, *Journal of Instrumentation* **13**, C04026. doi:10.1088/1748-0221/13/04/C04026.
- [19] Brizzolari, C. & Brovelli, S. & Bruni, F. & Carniti, Paolo & Cattadori, C. & Falcone, Andrea & Gotti, C. & Machado, A. & Meinardi, Francesco & Pessina, Gianluigi & Segreto, Ettore & Souza, Henrique & Spanu, Maura & Terranova, Flaviana & Torti, Marta. (2021). Enhancement of the X-Arapuca photon detection device for the DUNE experiment. 10.48550/arXiv.2104.07548.
- [20] Bugel, L., Conrad, J.M., Ignarra, C., Jones, B.J.P., Katori, T., Smidt, T., and, ...: 2011, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **640**, 69. doi:10.1016/j.nima.2011.03.003.
- [21] Flournoy, J.; Berلمان, I.; Rickborn, B.; Harrison, R. Substituted tetraphenylbutadienes as fast scintillator solutes. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 1994, 351, 349 – 358. doi:10.1016/0168-9002(94)91363-3.
- [22] Jones, B.J.P., VanGemert, J.K., Conrad, J.M., and Pla-Dalmau, A.: 2013, *Journal of Instrumentation* **8**, P01013. doi:10.1088/1748-0221/8/01/P01013.
- [23] 三菱ケミカル株式会社 アクリライト : [https://files.microcms-assets.io/assets/d835d02ad1634824a59c27643f5ba1f4/67f4452fd8f54b67bcb55b08921574fe/sogo\\_brochures\(2024.7.24\)%20.pdf](https://files.microcms-assets.io/assets/d835d02ad1634824a59c27643f5ba1f4/67f4452fd8f54b67bcb55b08921574fe/sogo_brochures(2024.7.24)%20.pdf)
- [24] 3M<sup>TM</sup> Specular Film DF2000MA : <https://multimedia.3m.com/mws/media/9824490/3mtm-specular-film-df2000ma-technical-data-sheet.pdf>
- [25] 浜松ホトニクス MPPC 技術資料 : [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052j.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf)
- [26] ELJENTECHNOLOGY 社 OPTICALCEMENT EJ-500 : <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-500>
- [27] Joshua R. Graybill, Chandra B. Shahi, Michael A. Coplan, Alan K. Thompson, Robert E. Vest, and Charles W. Clark, ”Extreme ultraviolet photon conversion efficiency of tetraphenyl butadiene,” *Appl. Opt.* 59, 1217-1224 (2020)
- [28] Quick optical simulator : <https://github.com/tkikawa/optsim>
- [29] Yang, H., Xu, Z.-F., Tang, J., and Zhang, Y.: 2020, *Nuclear Science and Techniques* **31**, 28. doi:10.1007/s41365-020-0737-5.

- [30] Kuźniak, M. and Szelc, A.M.: 2020, *arXiv e-prints*, arXiv:2012.15626. doi:10.48550/arXiv.2012.15626.
- [31] 厚生労働省 製品安全データシート：<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/0045.html>
- [32] ヤマトマテリアル株式会社 プラズマ装置：[https://www.yamato-material.co.jp/lineup/list/pro\\_electronics/electronics\\_whatisplasma](https://www.yamato-material.co.jp/lineup/list/pro_electronics/electronics_whatisplasma)
- [33] THORLABS 社 CPS405 スペックシート：<https://www.thorlabs.co.jp/drawings/66ca71e81e30fc1c-A90F7D1F-E9F9-DE0C-29F7FAE770123EE9/CPS405-SpecSheet.pdf>
- [34] 浜松ホトニクス Si フォトダイオード S1336 シリーズ 技術資料：[https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s1336\\_series\\_kspd1022j.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s1336_series_kspd1022j.pdf)
- [35] 中村和広：“二重ベータ崩壊探索実験 AXEL のための MPPC のキャリブレーションシステムの開発”，Master’ s thesis, 京都大学理学研究科 (2018).