

## 修士論文

# ニュートリノと水の反応の精密測定に向けた 水ベース液体シンチレータの開発

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理学第二教室高エネルギー物理学研究室  
浅野 有香

2023年2月27日

## 概要

2027年に大型水チェレンコフ検出器 Hyper-Kamiokande(HK)の稼働が予定されており、HKで行われる実験の1つに、ニュートリノ振動観測実験がある。HKを用いることで、ニュートリノにおけるCP対称性の破れを $5\sigma$ の信頼度で示すことを目指す。HKの導入によって統計誤差が削減されることに伴い、系統誤差の削減のため、ニュートリノと水の反応の精密測定を行う新前置検出器が検討されている。本研究は新前置検出器の開発を行った。新前置検出器では水ベース液体シンチレータ(WbLS)を標的として用い、反射材に構造を持たせることでWbLSが入る $1\text{ cm}^3$ のセルを光学的に分離させ、セル内のシンチレータ光を波長変換ファイバーとMPPCで読み出す。WbLSとは、界面活性剤を用いて水に液体シンチレータを溶かした液体であり、水の割合を高く保つことで水標的として用いることが可能である。開発の目標として、WbLSについては水の割合を高く維持した条件のもと、ファイバーによる読み出しでの光量が高く、かつ安定しているサンプルの実現を目指した。また反射材に関して、WbLSに不溶であり、セル構造を持つことができ、高い反射率をもつ容器の探索を行った。

WbLSの開発では、新たに製作したWbLSを用いて2種類の光量測定試験を行った。1つはWbLS自体の発光を確認するためのPMTを用いた宇宙線の光量測定試験であり、もう1つはファイバーとMPPCによる読み出しを行う小型容器を用いた光量測定試験である。PMTによるWbLS光量測定試験では、WbLSの液体シンチレータ及び界面活性剤の配合割合を増加させた場合にWbLSの光量が増加したことを確認した。またファイバー読み出しによる測定試験では、 $1 \times 1 \times 5\text{ cm}^3$ の小型容器内でのWbLSの発光を、波長変換ファイバーとMPPCで読み出すことができた。光量はシンチレーション光のみで5~10 p.e.となり、プラスチックシンチレータの光量の約10~20%の値となった。

さらに、新前置検出器により近いデザインである $4 \times 4$ セル検出器を新たに製作し、検出器の光量の位置依存性やセル内の光量一様性を確認するため、東北大学ELPHで陽電子のビーム測定試験を行った。ビームのヒット位置に合わせてWbLS検出器での読み出し光量に変化したことから、飛跡検出器として機能することが確認できた。ただし、Geant4による光学シミュレーションにより、セル内でWbLSが局所的に集中している可能性が示唆された。

最後に、ニュートリノと水の反応の精密測定に必要である陽子と $\pi$ 粒子を判別可能性を評価するため、Geant4による光学シミュレーションを行った。しかし、粒子の飛跡再構成に問題があり、陽子と $\pi$ 粒子を判別可能性を検証するには改善が必要である。

以上から、WbLS検出器はHKの新前置検出器の要件である飛跡検出器としての性能が確認できた。一方で、ニュートリノと水の精密測定のために必要である $p/\pi$ 判別可能性を検証するまで至らなかった。今後の開発では、 $p/\pi$ 判別能力を上げるため、WbLSの発光量を上げることやより高い反射材の探索、及び粒子飛跡の再構成手法の改善を行っていく方針である。

# 目次

1	序論	2
1.1	ニュートリノ	2
1.1.1	ニュートリノとは	2
1.1.2	ニュートリノ振動	2
1.1.3	ニュートリノと原子核の反応	4
1.2	T2K 実験	7
1.2.1	実験概要	7
1.2.2	ニュートリノビーム	8
1.2.3	Off-axis 法	9
1.2.4	前置検出器	9
1.2.5	Super-Kamiokande	10
1.2.6	T2K 実験のこれまでの結果	11
1.2.7	T2K 実験の将来計画	12
1.3	Hyper-Kamiokande	13
1.3.1	期待される性能と課題	13
2	HK に向けた新前置検出器	15
2.1	検出器概要	15
2.2	検出器デザイン案	15
2.2.1	水ベース液体シンチレータ (WbLS)	16
2.2.2	反射材	17
2.2.3	波長変換ファイバー	17
2.2.4	MPPC	18
2.3	期待される性能と課題	20
2.4	開発の流れ	20
3	水ベース液体シンチレータ (WbLS)	22
3.1	WbLS とは	22
3.2	発光原理	22
3.3	HK に向けた WbLS の開発	23
3.3.1	物質の選定	23
3.3.2	製作方法	25
3.3.3	期待される性能と課題	26
4	WbLS の光量測定試験	28
4.1	目的	28
4.2	PMT	28
4.3	セットアップ	29

4.4	測定結果	30
4.4.1	発光の確認	30
4.4.2	再現性	31
4.4.3	物質の配合割合の異なるサンプル	32
4.4.4	界面活性剤の異なるサンプル	35
4.5	まとめ	36
<b>5</b>	<b>波長変換ファイバーによる光量試験測定</b>	<b>38</b>
5.1	目的	38
5.2	小型容器	38
5.2.1	3D プリンタによる製作	38
5.2.2	板加工による製作	39
5.3	セットアップ	40
5.4	解析方法	41
5.5	測定結果	42
5.5.1	3D プリンタによる容器での光量測定	42
5.5.2	板加工の製作による小型容器での光量測定	44
5.5.3	板加工による容器との比較	46
5.5.4	物質の配合割合の異なる WbLS の光量比較	47
5.5.5	界面活性剤の異なる WbLS の光量比較	50
5.5.6	課題	52
5.6	光学シミュレーション	55
5.7	まとめ	59
<b>6</b>	<b>陽電子ビームテスト</b>	<b>61</b>
6.1	目的	61
6.2	ビームライン	61
6.3	実験方法	62
6.3.1	WbLS 検出器	62
6.3.2	ホドスコープ	66
6.3.3	セットアップ	66
6.3.4	検出器での散乱に関するシミュレーション	71
6.4	データ取得	74
6.5	解析方法	74
6.6	測定結果	77
6.6.1	検出器 2 での光量の位置依存性	77
6.6.2	セル内の光量一様性の確認	81
6.6.3	検出器 1 の光量の位置依存性	84
6.7	宇宙線による発光の確認	88
6.7.1	セットアップ	88

6.7.2	測定結果 . . . . .	88
6.8	光学シミュレーション . . . . .	93
6.8.1	シミュレーション設定 . . . . .	93
6.8.2	24ch 読み出し複数セル検出器に対するシミュレーション結果 . . . . .	95
6.8.3	WbLS の部分的な集中による影響 . . . . .	101
6.8.4	8ch 読み出し検出器の光量シミュレーション結果 . . . . .	103
6.9	まとめ及び考察 . . . . .	106
7	粒子識別評価のための光学シミュレーション . . . . .	107
7.1	目的 . . . . .	107
7.2	シミュレーション設定 . . . . .	107
7.3	シミュレーション結果 . . . . .	108
7.4	まとめ及び課題 . . . . .	110
8	結論 . . . . .	111
	参考文献 . . . . .	113

# 1 序論

## 1.1 ニュートリノ

### 1.1.1 ニュートリノとは

ニュートリノとは、弱い力と重力が作用する中性のレプトンである。1930年に $\beta$ 崩壊で放出された電子のエネルギースペクトルが広がった分布を持つことから、エネルギーを持ち出した粒子として、ニュートリノの存在が Wolfgang Ernst Pauli によって推測された [1]。1956年に Frederick Reines と Clyde Lovrain Cowan が原子炉から反電子ニュートリノ ( $\bar{\nu}_e$ ) を観測し [2]、ニュートリノは存在することが発見された。また 1962年に Leon Max Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger がミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) を発見し [3]、その後 2000年には DONUT 実験で直接タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) が観測された [4]。現在までにニュートリノには  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  の3つのフレーバーがあることが確認されている。

また、ニュートリノは標準理論では質量を持たない粒子として扱われている。一方 1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一は、ニュートリノが質量がもつ場合にはニュートリノが時間発展によってフレーバーを変えるニュートリノ振動と呼ばれる現象を提案した [5]。その後 1998年に Super-Kamiokande によって行われた大気ニュートリノの観測により、ニュートリノ振動が観測された [6]。現在では、ニュートリノ振動パラメータを測定する実験が広く行われている。

他に、右巻きニュートリノの未観測などの多くの問題が残っている。これらの問題から質量の起源の解明や新物理の探索など行うため、現在もニュートリノに関する多くの実験が行われている。

### 1.1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが質量を持つ場合にニュートリノのフレーバーが周期的に変化する現象のことである [5]。

ニュートリノのフレーバーの固有状態を  $|\nu_\alpha\rangle$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ )、質量固有状態を  $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ ) とする。この時、ニュートリノのフレーバー固有状態は質量固有状態を用いて式 1.1 のように書ける。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

U は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata matrix (PMNS 行列) という  $3 \times 3$  のユニタリ行列のことである。U は独立なパラメータ  $\theta_{ij}$ ,  $\delta_{CP}$  を用いて式 1.2 のように表せる。

$$\begin{aligned} U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \quad (1.2) \end{aligned}$$

ここで用いた  $c_{ij}$ ,  $s_{ij}$  はそれぞれ、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$   $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  のことであり、 $\theta_{ij}$  は混合角と呼ばれる。また、 $\delta_{CP}$  は複素位相であるが、 $\delta_{CP} \neq 0, \pi$  の場合に CP 対称性が破れるため、特に CP 位相と呼ばれる。

また、ニュートリノは真空中を距離  $L = ct$  だけ移動したとする。ニュートリノの質量固有状態の時間発展

は、エネルギー  $E_i$ 、運動量  $p_i$  を用いて

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \mathbf{p} \cdot \mathbf{x})} |\nu_i\rangle$$

と書ける。ここで、 $|\nu_i\rangle$  は時間  $t = 0$  の質量固有状態とした。式 1.1 より、フレーバー固有状態の時間発展は式 1.3 となる。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - \mathbf{p} \cdot \mathbf{x})} |\nu_i\rangle \quad (1.3)$$

一方、ニュートリノの質量は十分小さく、 $m_i \ll p$  として扱えるため、式 1.4 のような近似を行う。

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p \left( 1 + \frac{m_i^2}{2p^2} \right) \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.4)$$

以上より、 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$  への振動確率は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle x_\beta | x_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \left| \sum_{i,j} \langle \nu_j | U_{\beta j}^\dagger U_{\alpha i} e^{-i p x} \exp\left(-\frac{i m_i^2 t}{2E}\right) | x_i \rangle \right|^2 \\ &= \left| \sum_i U_{\alpha i} \exp\left(-\frac{i m_i^2 t}{2E}\right) U_{\beta i}^\dagger \right|^2 \\ &= \sum_{i,j} U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger \exp\left(-\frac{i(m_i^2 - m_j^2)t}{2E}\right) \\ &= \sum_{i,j} U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger \exp\left(-\frac{i \Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right) \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left( U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger \right) \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \text{Im} \left( U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger \right) \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \end{aligned}$$

途中で  $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$  とおき、 $\sum_i U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} = \delta_{\alpha\beta}$  としている。また、 $\Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{13}^2 = 0$  であることを用いた。ニュートリノの質量が0でない場合、ニュートリノのフレーバーは  $L/E$  によって周期的に振動することがわかる。

$E/L \gg \Delta m_{21}^2$  である場合、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  及び  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  への振動確率は式 1.5, 1.6 と表せる。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) \quad (1.5)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) \quad (1.6)$$

また式 1.7 のように、 $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の振動確率を引くと  $\delta_{\text{CP}}$  に関する項が残る。

$$\begin{aligned}
& P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \\
& \simeq 2 \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \cos \theta_{13} \sin \delta_{\text{CP}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E} \quad (1.7)
\end{aligned}$$

$\delta_{\text{CP}} = 0, \pi$ であれば $\nu$ と $\bar{\nu}$ の振動確率の差は0となってCP対称性は破れない。しかし差が0となる場合はCP対称性が破れている。つまり、 $\nu$ と $\bar{\nu}$ の振動の差をみることで、ニュートリノにおけるCP対称性の破れを探索することができる(図1.1)。

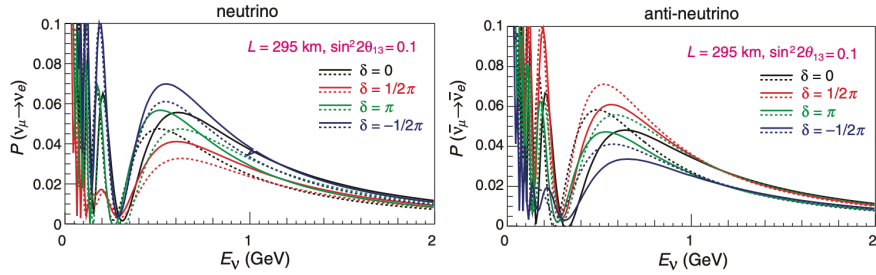


図 1.1: 飛行距離  $L = 295$  km での  $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の振動の違い

### 1.1.3 ニュートリノと原子核の反応

ニュートリノは弱い相互作用が働く粒子であり、ニュートリノのエネルギーによって支配的な反応が異なるため、観測するニュートリノのエネルギー領域を知っておく必要がある。それぞれの反応断面積は図1.2のようになっている。

以下、T2K実験での前置検出器及び後置検出器でのニュートリノビームエネルギーの領域である1 GeVの領域で重要な荷電カレント反応5種類の反応について説明する。これらの反応を識別し、ニュートリノのエネルギーを再構成することでニュートリノと原子核の反応断面積を求めることができる。

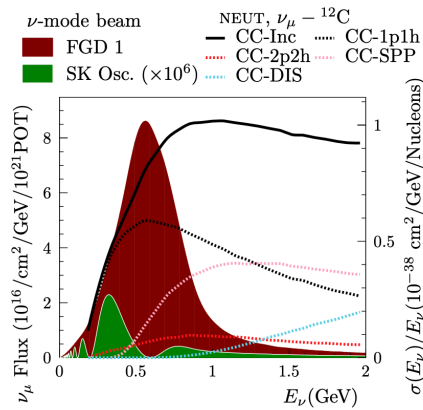


図 1.2: ニュートリノと原子核の反応断面積 [7]



### CCQE(Charged Current Quasi Elastic) 反応

CCQE 反応はニュートリノのエネルギーが 1 GeV 付近で最も反応断面積の大きな反応である。反応は式 1.8 のように表せ、ニュートリノが核子 N と準弾性散乱を起こす。

$$\nu_l + N \rightarrow l^- + N' \quad (1.8)$$

例えば  $\nu_\mu$  が核子に含まれる中性子と式 1.9 のように反応する。この場合のファインマンダイアグラムは図 1.3 となり、終状態に存在している  $\mu$  粒子と陽子が観測可能となる。

$$\begin{aligned} \nu_\mu + n &\rightarrow \mu^- + p \\ \bar{\nu}_\mu + p &\rightarrow \mu^+ + n \end{aligned} \quad (1.9)$$

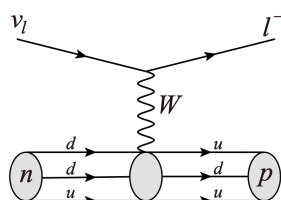


図 1.3: CCQE 反応のファインマンダイアグラムの例

始状態にあるニュートリノのエネルギーを  $E_\nu$  は二体反応の性質を用いて再構成することができ、核子の質量を  $m_N$ 、束縛エネルギーを  $E_b$ 、終状態の荷電レプトンの質量を  $m_l$ 、エネルギーを  $E_l$ 、運動量を  $p_l$ 、散乱角を  $\theta_l$  とおくと、式 1.10 のように求まる。

$$E_\nu = \frac{(m_N - E_b) E_l - m_l^2/2}{(m_N - E_b) - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (1.10)$$

### CCRES(Charged Current Resonance) 反応

CCRES 反応とは例えば式 1.11 及び図 1.4 のように、ニュートリノが核子と共鳴反応を起こし、荷電レプトンと  $\Delta^{++}$  などの粒子を生成し、その後生成粒子が  $\pi^+$  や  $\gamma$  などに崩壊する反応のことである。崩壊で放出される粒子を検出器で検出できないと、ニュートリノのエネルギーを再構成する際に CCQE 反応と誤って再構成し、ニュートリノのエネルギーを正しく得ることができないため、この反応の測定では崩壊由来の粒子を検出することが重要となる。ただし、原子核中に粒子が吸収されて検出できない場合もある。

$$\nu_\mu + p \rightarrow l^- + \Delta^{++} \rightarrow l^- + p + \pi^+ \quad (1.11)$$

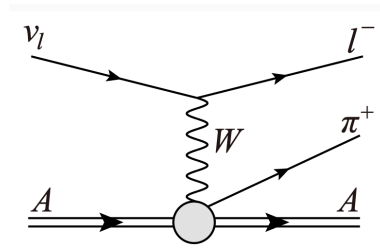


図 1.4: CCRES のファインマンダイアグラムの例

### CCCOH(Charged Current Coherent) 反応

CCCOH 反応では、図 1.5、式 1.12 で示したように、ニュートリノが原子核 A とコヒーレントに反応し、荷電レプトンと  $\pi$  を放出する。この反応では原子核へ移行する運動量が CCQE や CCRES と比べて少ないため、荷電レプトン及び  $\pi$  はニュートリノの運動量方向と同じ方向へ放出されやすい特徴がある。

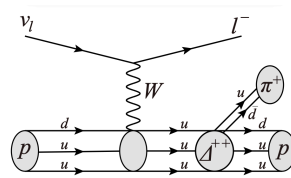


図 1.5: CCCOH 反応のファインマンダイアグラム



### CCDIS(Charged Current Deep Inelastic Scattering) 反応

CCDIS 反応は、ニュートリノのエネルギーが 1 GeV 以上の領域で反応断面積が大きくなる反応である。図 1.6 と式 1.13 に示したようにニュートリノが核子 N と反応するが、ニュートリノのエネルギーが大きいため核子の構造が見えるため、クォークと反応するような状況である。終状態には荷電レプトンと多くのハドロンが生成される。

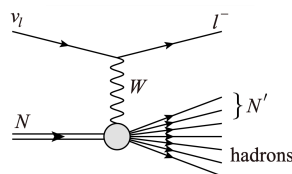


図 1.6: CCDIS 反応のファインマンダイアグラムの例



## 2p2h 反応

2p2h 反応はニュートリノと原子核内の2つの核子による散乱であり、散乱で放出された陽子は数百 MeV 程度の低い運動量となる。低運動量の陽子はプラスチックシンチレータで構成された飛跡検出器などでは数 cm 程度しか飛ばないため、飛跡を検出することが難しい特徴をもつ。

2p2h 反応は以前想定されていない反応であったが、2009 年に MiniBooNE 実験や NOMAD 実験によって従来のモデルと異なる  $\nu_\mu$  の CCQE の反応断面積の結果を示したことで注目された。図 1.7 に MiniBooNE 実験が示した CCQE の反横断面積である。モデルとの違いの原因として、当時想定されていなかった 2p2h 反応などの複数の核子との反応が考えられている。CCQE 反応のモデルを検証するためにも、低運動量の陽子の検出による 2p2h 反応のより精密な測定が求められている。

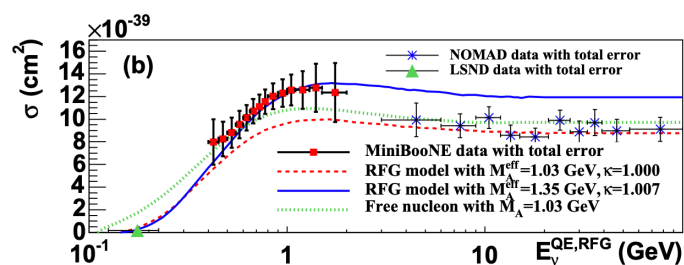


図 1.7: MiniBooNE 実験で測定された CCQE 反応断面積 [8]

## 1.2 T2K 実験

### 1.2.1 実験概要

T2K 実験とは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) で陽子から生成したニュートリノビームを 295 km 先にある岐阜県飛騨市神岡町にある Super-Kamiokande と呼ばれる大型水チェレンコフ検出器で観測を行う長基線ニュートリノ振動実験である (図 1.8)。



図 1.8: T2K 実験の概念図

T2K 実験ではニュートリノ振動のパラメータを測定し、 $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$  のニュートリノ振動の確率の差を求めらることで、ニュートリノにおける CP 対称性の破れを  $3\sigma$  の信頼度で示唆することを目的としている。

### 1.2.2 ニュートリノビーム

ニュートリノビームは陽子から生成する。H<sup>-</sup> イオンを Linac と呼ばれる全長 300 m の直線型加速器に通過させて 400 MeV に加速する。その後 H<sup>-</sup> イオンを陽子に変換させる。次に陽子を RCS と呼ばれる周長 300 m のシンクロトロンで 3 GeV に加速し、最後に MR と呼ばれる周長 1600 m のシンクロトロンで 30 GeV に加速する (図 1.9)。

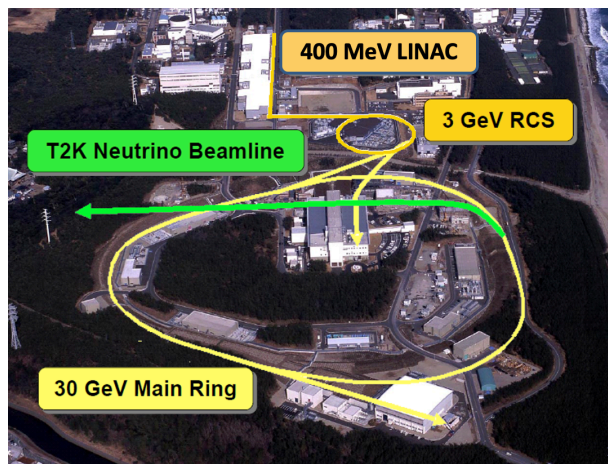


図 1.9: J-PARC の陽子加速器

その後、陽子は炭素ターゲットに衝突し、主に  $\pi$  粒子が放出される。 $\pi$  粒子は電磁ホーンによって飛行方向を絞られ、その後式 1.14 のように  $\mu$  粒子とニュートリノに崩壊する。崩壊で発生したニュートリノはビームとして放出される。



また電磁ホーンでは、印加する電圧を変更することで  $\pi^+$  と  $\pi^-$  を選択できる。 $\pi^+$  を選択した場合は  $\nu_\mu$ 、 $\pi^-$  を選択した場合は  $\bar{\nu}_\mu$  のビームが生成できる。この選択により、T2K 実験では  $\nu_\mu$ 、 $\bar{\nu}_\mu$  両方のニュートリノ振動の観測が可能となっている。

ビーム生成直後には、MUMON と呼ばれる検出器で  $\pi$  粒子の崩壊によって発生した  $\mu$  粒子をモニターすることで間接的にニュートリノビームのモニターを行なっている (図 1.10)。

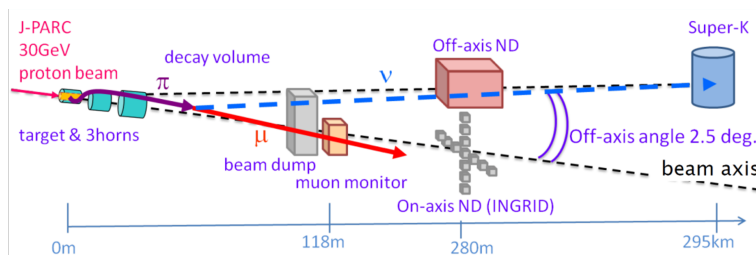


図 1.10: 生成されたニュートリノビームと検出器の位置。muon monitor は生成点からビーム軸上 118 m 先にある。

### 1.2.3 Off-axis 法

ビーム中心軸から離れた場所に検出器を置く手法は off-axis 法と呼ばれ、on-axis の場合と比較するとニュートリノのフラックスのエネルギーを小さくすることができる。off-axis 法によって、後置検出器 SK に対してよりニュートリノのエネルギーの揃ったビームを用いることを可能にしている。

ニュートリノ生成時の  $\pi$  粒子の崩壊において、 $\pi$  粒子の質量  $m_\pi$ 、運動量  $p_\pi$ 、エネルギー  $E_\pi$ 、 $\mu$  粒子の質量  $m_\mu$ 、運動量  $p_\mu$ 、 $\pi$  粒子とニュートリノの運動量方向のなす角  $\theta_\nu$  とおくと、崩壊は式 1.14 であり、ニュートリノのエネルギー  $E_\nu$  は式 1.15 と表せる。ニュートリノが  $\pi$  粒子と同じ方向、すなわち  $\theta = 0$  で放出された場合、ニュートリノのエネルギーは  $p_\mu$  の値の影響を受けやすく、エネルギーの幅が広がる。ここで、ニュートリノの方向を  $\theta = 0$  からずらすことで、 $p_\mu$  の値の影響を減らし、ニュートリノのエネルギーの幅を狭めることができる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{E_\pi - p_\pi \cos \theta_\mu} \quad (1.15)$$

また、ニュートリノ振動の確率はニュートリノのエネルギーによるため、後置検出器地点で  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  の振動確率が最大となるように off-axis 角を  $2.5^\circ$  と定めている (図 1.11)。

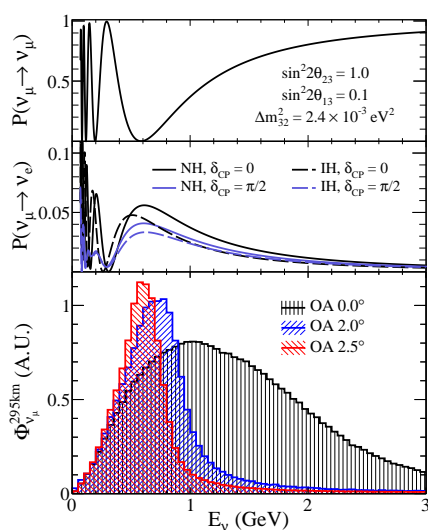


図 1.11: Off-axis 法によるニュートリノフラックス

### 1.2.4 前置検出器

前置検出器には、ビーム中心軸上に設置したビームモニターのための検出器 INGRID と、ビーム中心から  $2.5^\circ$  離れた場所に設置している前置検出器群 ND280 がある。ND280 では、主にニュートリノ振動前の状態の観測に加え、ニュートリノと原子核の反応測定を行なっている。

ND280 ND280 とは、J-PARC 内に設置している現行の前置検出器群のことで、ニュートリノ振動前の状態を測定する。また、ニュートリノと原子核の反応を測定することで、系統誤差を削減する役割を果たす。

ND280(図 1.12) は、プラスチックシンチレータ、プラスチック、水の層を交互に重ねた構造を持つ P0D( $\pi^0$  Detector) と FGD(Fine Grained Detector), ガス検出器である TPC(Time Projection Chamber), プラス

チックシンチレータを鉛シートで挟んだデザインをもつ ECAL(Electromagnetic Calorimeter), これらの周囲を覆うように設置した SMRD(Side Muon Range Detector) といった検出器から構成される。

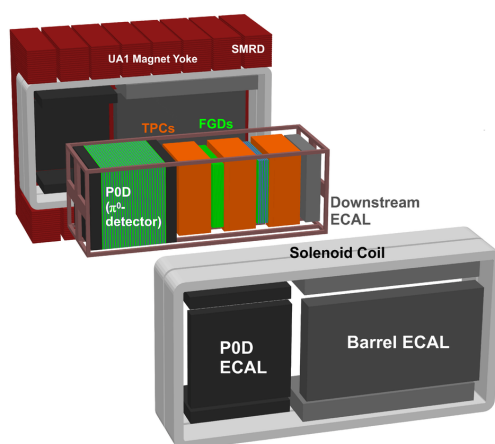


図 1.12: ND280

**SuperFGD** SuperFGD とは ND280 のアップグレードとして導入する新たな飛跡検出器であり、2023 年から稼働する予定である。検出器(図 1.13) は全長  $192 \times 182 \times 56 \text{ cm}^3$  であり、 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  のプラスチックシンチレータキューブ(図 1.14) を約 200 万個積層している。各プラスチックシンチレータキューブに対し、3方向から波長変換ファイバーを通し、ファイバーの先には光検出器 MPPC を設置することで、粒子が通過して発生した光信号を電気信号に変換している。従来の前置検出器 FGD と比較すると、短距離飛行の粒子に対しても感度があるだけでなく、全方位角に感度を持たせることでビームに対して垂直に飛来する発生粒子をも測定することができる。また、 $p/\pi$  の判別が可能であり、ニュートリノ反応後の終状態で発生する粒子を判別することで、原子核の反応の精密な測定を期待している。

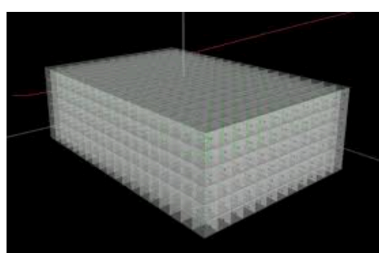


図 1.13: SuperFGD の全体像

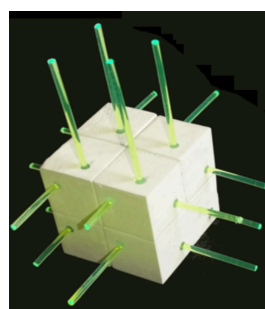


図 1.14: SuperFGD に積層されているプラスチックシンチレータキューブ

### 1.2.5 Super-Kamiokande

Super-Kamiokande(図 1.15) とは、岐阜県飛騨市神岡町の地下 1000 m にある大型水チェレンコフ光検出器であり、陽子崩壊探索、宇宙ニュートリノの検出の他、T2K 実験では後置検出器としてニュートリノビーム

を観測している。検出器は直径 39.3 m、高さ 41.4 m のタンクに約 5 万 t の超純水を蓄えており、有効体積は 22500 t である。また、直径 50 cm の光電子増倍管と呼ばれる光センサーを 11146 本備えている。

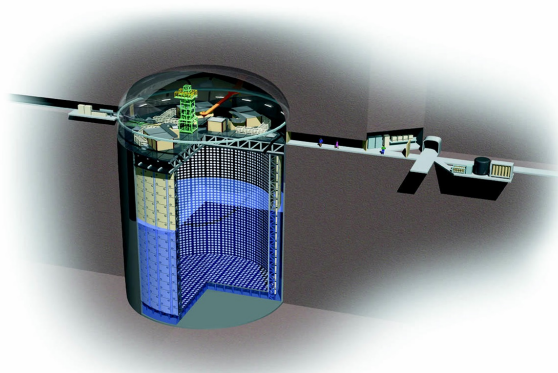


図 1.15: Super-Kamiokande の全体像

ニュートリノが水タンクを通過した際、水の原子核と反応し、電子あるいは  $\mu$  粒子を発生させる。発生した粒子が水中を移動した際、チェレンコフ光と呼ばれる光を放出する。この光を光電子増倍管で検出することで、間接的にニュートリノを観測することができる。電子は水中を飛行中に電磁シャワーを起こすため、 $\mu$  粒子と異なりチェレンコフ光のリングの形が崩れる。この性質を利用し、リングの形によって発生した粒子が電子か  $\mu$  粒子かを判別し、飛来したニュートリノが  $\nu_e$  か  $\nu_\mu$  か識別することができる。

また、現在は水に少量のガドリニウム (Gd) を加え、中性子の検出を行っている。ニュートリノと原子核が反応した際に中性子が放出される場合、中性子と Gd が反応し、 $\gamma$  線が発生する。この  $\gamma$  線を検出することで、 $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の識別の効率を向上させる。

T2K 実験では、ビームの飛来するタイミングに合わせて Super-Kamiokande でチェレンコフ光を検出することで、ニュートリノビームによるイベントを取得している。

### 1.2.6 T2K 実験のこれまでの結果

現在は 515 kW のビーム強度で運転し、 $3.6 \times 10^{21}$  protons on target (POT) に相当するデータを取得している (図 1.16)。このデータの  $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の照射量内訳は  $\nu: \bar{\nu} = 6: 5$  となっている。

また、T2K 実験での  $\delta_{CP}$  の尤度は図 1.17 のようになっている。図中の Normal ordering (正階層) と Interd ordering (逆階層) はニュートリノの質量の順序を示し、正階層ではニュートリノの質量を  $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$ 、逆階層では  $\nu_3 < \nu_1 < \nu_2$  となる。

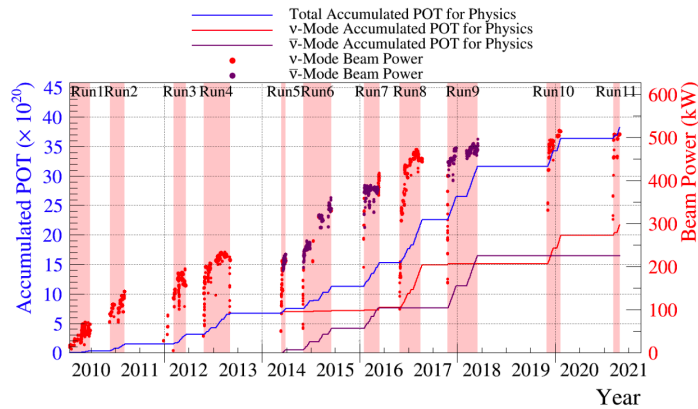


図 1.16: これまでの T2K 実験でのビーム強度と累積統計量

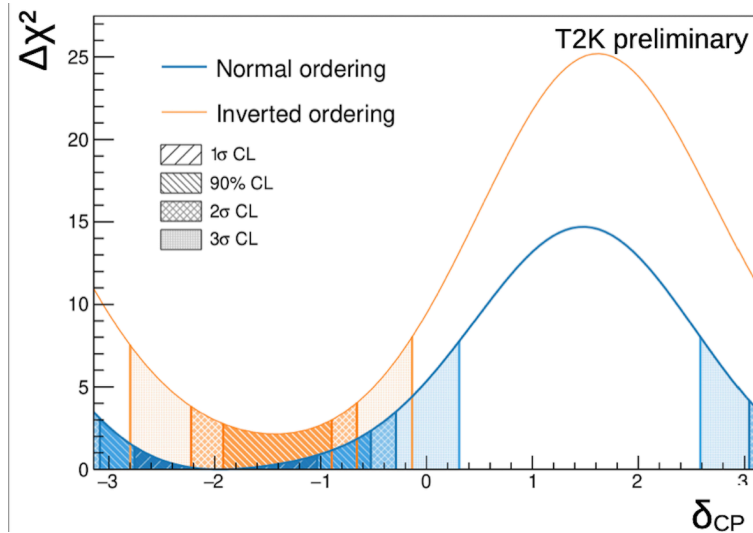


図 1.17: T2K 実験での現在の  $\delta_{CP}$  の尤度

### 1.2.7 T2K 実験の将来計画

CP 対称性の破れを  $3\sigma$  の信頼度で示唆するため、T2K 実験では統計誤差の削減と系統誤差の削減を行っている。前者に対しては統計量を増やすことを、後者に対しては現在系統誤差で大きな割合を占めるニュートリノと原子核反応のさらなる理解を進めることで対応している。2023 年には大幅なアップデートを行い、統計量の増加のためにビーム強度を増大させ、ND280 ではニュートリノと原子核反応の精密測定のために SuperFGD を導入する。ビーム強度については表 1.1 のように計画されており、2026 年にはビーム強度が 2.6 倍に増大させる目標である。一方 ND280 のアップグレードにより、ニュートリノと原子核の反応による系統誤差を 6% から 2026 年までに  $\sim 4\%$  に、Hyper-Kamiokande 稼働時には  $\sim 3\%$  まで減少させる目標である。



表 1.1: ビーム増強計画

	2018 年	2023 年以降	2026 年以降
ビーム強度	485 kW	750 kW	1.3 MW
ビームエネルギー	30 GeV	30 GeV	30 GeV
1 スピル当たりの陽子数	$2.5 \times 10^{14}$	$2.0 \times 10^{14}$	$3.2 \times 10^{14}$
スピル間隔	2.48 s	1.32 s	1.16 s

### 1.3 Hyper-Kamiokande

Hyper-Kamiokande(HK)とは、岐阜県飛騨市神岡町の地下 1000 m に Super-Kamiokande の近くの鉱山跡地に建設中である、2027 年に稼働予定の大型水チェレンコフ検出器 (図 1.18) である。水タンクの大きさは直径 68 m、高さ 71 m であり、水は約 26 万 t 備え、有効体積は 19 万 t であり、現行の Super-Kamiokande の約 8 倍の値となっている。また、直径 50 cm の光電子増倍管を約 4 万個備える予定である。Super-Kamiokande 同様、ニュートリノと水の原子核との反応で発生した粒子が放出するチェレンコフ光を検出する。

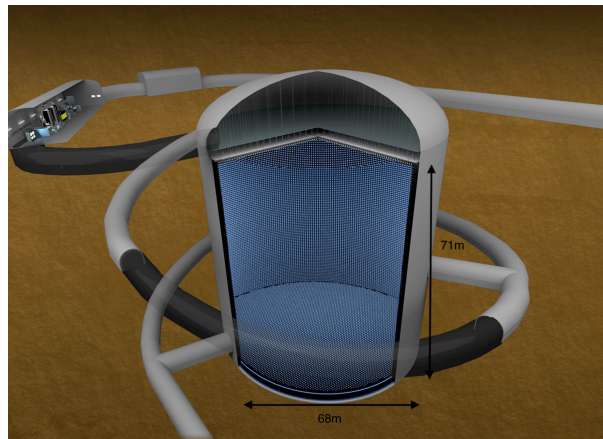


図 1.18: Hyper-Kamiokande の全体像

#### 1.3.1 期待される性能と課題

HK では SK 同様陽子崩壊の観測や大気ニュートリノ観測などを行い、前身である SK の約 8 倍の統計量によって大きく貢献することが期待されている。またニュートリノ振動の観測では、CP 対称性の破れを  $5\sigma$  の信頼度で示すことを目標としている (図 1.19)。

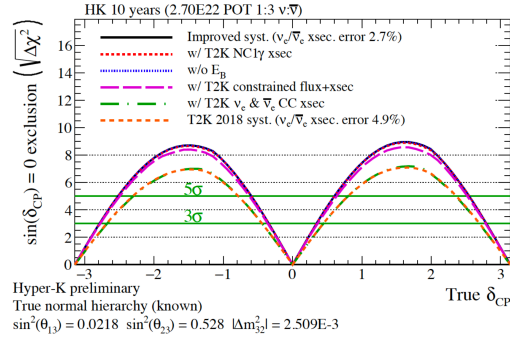


図 1.19: Hyper-Kamiokande を導入した場合の  $\delta_{CP}$

目標を達成するためには、現在 T2K 実験でも課題となっている系統誤差を削減する必要がある。SuperFGD では標的がプラスチックシンチレータであるため、ニュートリノと炭素-水素内の原子核との反応の精密測定が実現される。しかし、後置検出器である SK 及び HK は水標的であるため、後置検出器での系統誤差を削減するためにはニュートリノと水の原子核の反応の理解が必要となる。現在、水の原子核と炭素-水素内の原子核でニュートリノ反応による系統誤差の違いは数%程度と見積もられており、Hyper-Kamiokande が稼働した時には統計誤差が低減するため、相対的に前置検出器の標的の違いによるニュートリノと原子核反応の系統誤差が大きくなると予想される。そのため、HK 導入に伴い、水標的である新しい前置検出器を検討中である。

HK に向けた新前置検出器に関しては、2 章で詳しく述べる。

## 2 HK に向けた新前置検出器

### 2.1 検出器概要

Hyper-Kamiokande に向けた新前置検出器は、HK 稼働に際し、現行のままの前置検出器を使用した場合に系統誤差として削減できずに問題になるニュートリノと水の原子核の反応を精密に測定するために必要とされている。

1.1.3 節で紹介したように、ニュートリノと原子核の反応は複数種類あるが、終状態で存在している粒子を検出することで反応の種類を特定し、ニュートリノのエネルギーを再構成することで反応断面積の測定ができる。T2K 実験で用いるニュートリノビームのエネルギーは約 1 GeV であるために CCQE が主な反応となるが、放出された粒子を全て検出できない場合はニュートリノのエネルギーを正しく再構成できず、よって反応断面積が正しく求められない。そのため、特に反応後に発生する陽子、 $\pi$  粒子を短距離飛跡でも検出する性能が求められる。

また、検出器の大きさを  $2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$  以上に大型化できるものを計画しており、設置場所は ND280 内の中流あたりを検討している。

### 2.2 検出器デザイン案

本研究が検討している検出器について説明する。従来の T2K 実験でのニュートリノと水原子の反応測定では、水の層とシンチレータの層をビーム方向に対して交互に重ねた飛跡検出器が前置検出器として採用されている。この検出器では、後置検出器の標的と同じ純水とニュートリノの反応を測定することができるため、後置検出器との標的の違いがない。また、発光時間が数 ns 程度であり時間応答性も高く、約 2 万 p.e./mm 程度の高発光量をもつことができるプラスチックシンチレータを使用することで、飛跡の再構成によりシンチレータを通過した粒子識別がしやすい利点を持つ。欠点として、水とニュートリノの反応で放出した粒子が大角度で散乱した場合、シンチレータを通過しないために検出できない (図 2.1)。加えて、粒子の飛跡を再構成するためには水層とシンチレータ層を複数枚通過する必要があるため、短距離飛跡の粒子に対して感度を持たない。

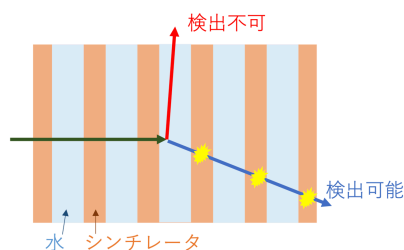


図 2.1: 水とシンチレータを交互に重ねた検出器の概念図

水標的であり、大角度の散乱粒子に対しても感度をもつように、新前置検出器として水ベース液体シンチレータを使用した検出器を検討している (図 2.2)。特徴として、SuperFGD と似た構造を持たせていることが挙げられる。SuperFGD は、炭素-水素標的ではあるが、 $1 \text{ cm}^3$  のプラスチックシンチレータによる細かい構造をもつため、飛跡の距離が短い粒子に対しても感度もち、大角度に散乱された粒子を検出できる。また、

シンチレータの光量が高く、 $p/\pi$  の判別も可能であるため、ニュートリノと原子核の反応で放出された粒子を検出して粒子の種類を判別することで、ニュートリノのエネルギーの再構成の精度を高めることができる。

この SuperFGD と同じ構造を持ちながら水標的である検出器を導入した場合、この検出器によって短距離飛跡の粒子や大角度に散乱された粒子を検出可能であり、光量を高めることで  $p/\pi$  の判別をできるため、図 2.2 のデザインをもつ新前置検出器が考案された。

本研究はこの検出器の HK 実験への導入を検討しており、実用化に向けて開発している。

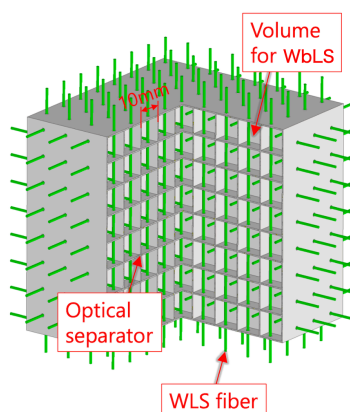


図 2.2: 本研究が検討している新前置検出器デザイン案

検出器の全体は大型容器の中に入れ、内部を水をベースとした液体シンチレータで満たす。その容器の中に  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  の小型セルに分割された反射材で製作された構造体を入れ、構造体の全てのセルを通過するように 3 方向から波長変換ファイバーを通す。ファイバーの端は容器の外側に出し、末端には MPPC と呼ばれる光センサーを取り付ける設計である。図 2.2 で示したデザイン像は、大型容器内に入れる構造体を示しており、反射材による構造体によって、セルを光学的に分離させている。

純水を使用する場合と異なり、粒子が通過した場合に自身がシンチレーション光を発生させることで、水標的でありながらデッドボリュームがない点で優れている。シンチレーション光を収集するために反射材が必要だが、構造体を反射材で製作することで検出器全体に含まれる水の割合を高めたデザインとなっている。

この検出器デザインのように、水ベース液体シンチレータでのファイバー読み出しによる飛跡検出器は今まで実用されていないため、新たな試みとなっている。そのため、検出器の構成要素を新たに探索及び開発する必要がある。

以下、構成要素について説明する。

### 2.2.1 水ベース液体シンチレータ (WbLS)

水ベース液体シンチレータ (WbLS) とは、界面活性剤を用いて水に液体シンチレータを溶かしたものである。水の割合を高くすることで、水標的でありながらシンチレータ光を発生できる。図 2.3 には実際の WbLS と水にブラックライトを照射させた様子であり、透明な液体であるが、配合物質を変えることで使用目的に合わせた性質を持たせることができる。本研究では新前置検出器の構造に合わせ、新たに水の割合が高く、ファイバーによる読み出しで高発光量をもつ WbLS の開発を行っている。

詳しくは 3.1 章で述べる。

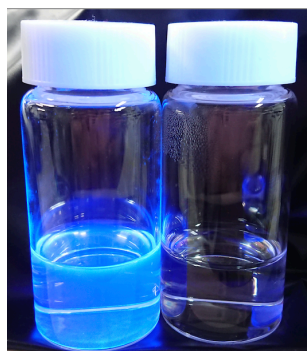


図 2.3: WbLS(左) と水(右) の入った瓶にブラックライトを照射した様子

### 2.2.2 反射材

反射材はシンチレーション光を反射する役割の他に、小型セルに分割する構造をもつことができる程度の強度が必要となる。さらに、WbLS には有機溶剤が含まれるため、それらの物質に溶けないことが求められる。また、反射材の構造にはファイバーを通すための直径 2 mm 程度の穴が必要であるため、製作方法としては細かな構造物の造形を得意とする 3D プリンタによる製作を検討している。

3D プリンタの造形方法には、熱溶融積層方式と光造形方式の 2 種類がある。熱溶融積層方式では材料を熱で溶かし、ノズルから材料を射出し層状に重ねていくことで造形を行う。光造形方式では専用の液体の有機剤(レジン)という紫外線によって固まる材料を用いることで、材料に紫外線を照射しながら層状に重ねていくことで造形を行う。積層ピッチは 3D プリンタの性能によるが、一般的には 0.2 ~ 0.05 mm である。ただし、造形した構造物の寸法精度は積層ピッチと必ずしも一致しない。これは、造形材料の熱膨張率によっては造形後の温度変化による反りなどの変形が起こるためである。

現在反射材としては 3D プリンタで造形可能な物質である白色のアクリル系樹脂を検討している。耐薬品性が比較的高く、WbLS に溶けにくいことと、白色にすることで反射材として機能することを期待している。

### 2.2.3 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーとは、物質の反射率の違いによって入射光を伝搬するファイバーのことである。

新前置検出器では 1 m 以上の大きさを検討しており、セル内で発光した WbLS によるシンチレーション光を減衰させることなく光センサーまで伝搬するため、波長変換ファイバーを使用する。また、ファイバーでシンチレーション光の波長を変換することで、光センサーで検出しやすくすることができる利点がある。ただし、ファイバーの材料によっては WbLS に溶解したり、開発した WbLS のシンチレーション光の波長がファイバーで伝搬しにくい領域であったりするため、ファイバーの材料を検討したり、ファイバーに合わせて WbLS を開発する必要がある。

ファイバーの形状は円筒状が一般的である。大部分はコア物質が占め、コアの周りをより反射率の低い物質(クラッド)でコーティングした構造となっており、ファイバーの種類によっては 2 種類のクラッドでコーティングするものがある。中心物質の反射率が  $n_0$ 、コーティング物質の反射率が  $n_1$ 、ファイバー外部の反射率  $n$  で  $n_0 > n_1 > n$  の場合、外部から角度  $\theta$  で光が入射すると  $\sin \theta \leq n_1/n$  の時にコア部分で全反射が起き、光を伝搬できる(図 2.4)。

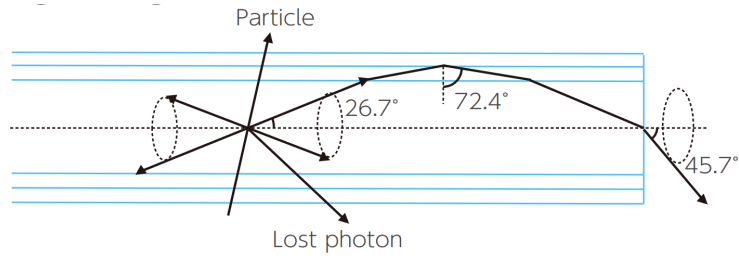


図 2.4: 波長変換ファイバー内での入射光の反射 (Kuraray 社 波長変換ファイバーカタログ [19] より抜粋)

現在使用検討中の波長変換ファイバーは kuraray 社のプラスチックシンチレーションファイバー Y-11(図 2.5) であり、性能を表 2.1 に示した。これは SuperFGD と同じ型番の波長変換ファイバーであり、直径 1.0 mm である。コア部分はポリスチレン、コア部分に近い第一クラッドは厚さ 0.02 mm の PMMA、一番外側の第二クラッドは厚さ 0.02 mm のフッ素樹脂で構成されており、クラッド全体の厚さはファイバー直径の 4% を占める。また、ファイバーの吸収光と放出光の波長スペクトルは図 2.6 であり、吸収のピークは 430 nm、発光のピークは 476 nm となっている。

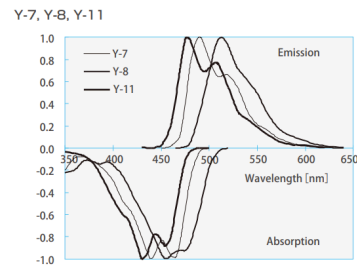
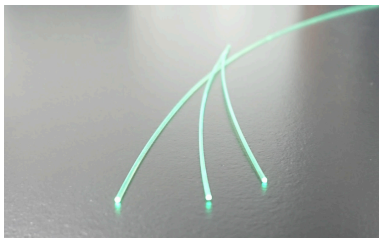


図 2.5: 使用検討中の波長変換ファイバー Y-11 図 2.6: Y-11 の吸収スペクトルと発光スペクトル (Kuraray 社の該当製品のカタログ [19] より引用)

表 2.1: 波長変換ファイバー Y-11 の性能 (Kuraray 社 HP[18] 及び該当製品カタログ [19] より引用)

項目	Y-11
コア反射率	1.59
第一クラッド反射率	1.49
第二クラッド反射率	1.42
発光波長ピーク値	476 nm
吸収波長ピーク値	430 nm
減衰長	> 3.5 m

## 2.2.4 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) とは、高いフォトンカウンティング能力を備えた半導体光検出器のことである。図 2.7 は、T2K 実験で用いられているセラミックパッケージの専用の MPPC であり、波長変

換ファイバーによる読み出しに適しており、本研究の測定ではこの MPPC を使用している。波長変換ファイバーから伝搬された光を検出し、シンチレーション光を電気信号に変換する役割を持つ。

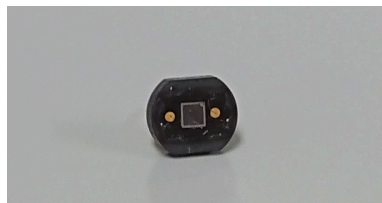


図 2.7: MPPC(S10362-13-050C)

MPPC の構造は図 2.8 のように、ガイガーモードの APD ピクセルとクエンチング抵抗を 1 ピクセルとし、複数のピクセルを平面状に設置し、並列に繋げている。

APD ピクセルは光子が入射した場合に電流を流す半導体センサーである。APD ピクセルに電圧を印加すると、pn 接合の間に空乏層が現れる。空乏層に光子が入射すると、空乏層の電子が励起され、電子-ホール対が生成される。電子とホールは空乏層にかけられた電場によって APD ピクセルの端へドリフトする。この時流れる電流を取り出すことで光子を検出している (図 2.9)。

電流は入射光子数と APD に印加する電圧によるが、ガイガーモードでは APD ピクセルに印加する電圧をブレイクダウン電圧以上にすることで、入射光子数に関わらず、光子が入射した時に決まった電流を流すことができる。これは、光子通過によって発生した電子あるいはホールがドリフトする際、電場が高いために 2 次的に電子-ホール対を生成する。この生成が雪崩のように繰り返し起こる。この性質を利用することで、MPPC では光子がヒットした APD ピクセル数をカウントできる。

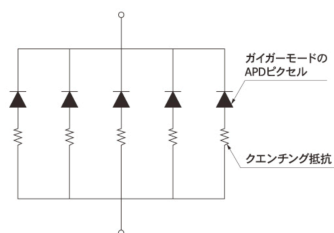


図 2.8: MPPC の構造  
(浜松ホトニクス HP[17] より引用)

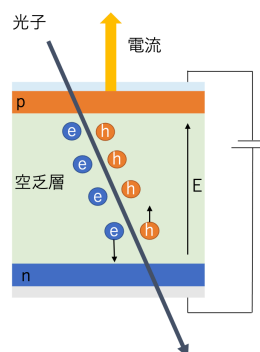


図 2.9: MPPC に内蔵されている APD ピクセルの概念図

MPPC では優れた時間分解能や低電圧での稼働ができる一方で、暗電流が発生しやすい。図 2.10 では MPPC の暗電流の生波形となっており、印加電圧を高くするとダークレートが高くなる。APD ピクセルの性質から発生する暗電流がある。主に熱による励起や、トンネル効果によるものである。この電子を起点に電子-ホール対が生成され、電流が流れることで MPPC では暗電流として現れる。また、MPPC ではピクセル間でクロストークが発生したり、光子通過から数 ns 後にあわられるアフターパルスと呼ばれる信号が発生することが知られている。暗電流の影響を減らすために、適切な電圧値を設定したり解析によってできる限り影

響を取り除くなど、ハードとソフトの面から改善する。

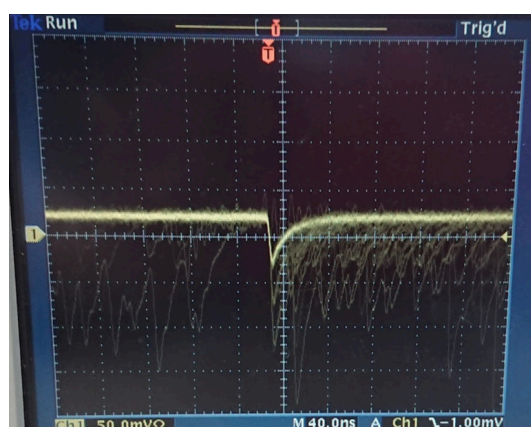


図 2.10: オシロスコープでの MPPC の暗電流の信号波形

## 2.3 期待される性能と課題

新前置検出器では、水とニュートリノの反応断面積を精密に測定する必要がある。1.1.3 章で述べたニュートリノと原子核の反応により発生した粒子が陽子か  $\pi$  粒子かを区別することが重要である。

期待されることとして、新前置検出器での水とニュートリノの反応の精密測定による、Hyper-Kamiokande でのニュートリノ反応の系統誤差の削減である。

課題として、要件を満たした WbLS の開発と反射材の探索、WbLS と反射材に合わせた波長変換ファイバーと MPPC の選定、検出器全体の長期安定性がある。組み立て作業中やその後の稼働によって反射材や WbLS の性質が変化せず、ニュートリノビーム稼働期間中に検出器が安定して稼働することが理想であり、検出器の構成要素は数年単位での安定性が求められる。

最大の課題として、水の割合を高く保つことで水標的でありながら、大角度散乱の粒子や短距離飛跡の粒子に対して感度をもち、 $p/\pi$  の粒子識別を行うことができるほど、細かい構造で高発光量をもつ WbLS を開発する必要がある。セル内での WbLS の発光をファイバーで伝搬させるためには、反射率が高くある程度強度を持った反射材を用意することも合わせて求められる。

## 2.4 開発の流れ

ここでは、本研究で行った WbLS 検出器の開発の流れを述べる。

まず、新前置検出器のために、物質の配合割合や種類を変えて新たに WbLS を開発する (3 章)。製作した WbLS は、WbLS 自体の光量を確認するために PMT を用いて測定を行う (4 章)。特に、物質の配合割合や種類を変えた場合の光量の変化をみる。PMT によって WbLS の光量を確認した後、小型容器を用いて波長変換ファイバーと MPPC を用いて再度光量測定を行う (5 章)。PMT による WbLS 光量測定と比較することで、ファイバー読み出しで高光量が期待できる物質の配合割合や光量に大きく影響を与える物質を特定する。

次に、高発光量であった WbLS を用いて複数セル検出器を製作し、陽電子ビームによる光量測定試験を行う (6 章)。開発した WbLS が飛跡検出器として実用可能かを確認するとともに、複数種類の WbLS を用いることで、どの WbLS サンプルが検出器としてふさわしいかを検証する。



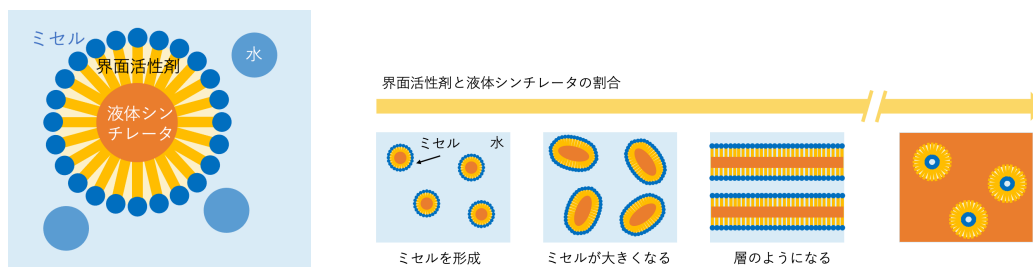
最後に、光学シミュレーションによって新前置検出器として求められる  $p/\pi$  判別が WbLS 検出器で可能かを確認する (7 章)。以上の結果より、WbLS 検出器が新前置検出器として満たした要件と今後の課題について述べる。

### 3 水ベース液体シンチレータ (WbLS)

#### 3.1 WbLS とは

水ベース液体シンチレータ (Water-based Liquid Scintillator, WbLS) とは、水に液体シンチレータを溶かしたものである。WbLS 検出器では液体の透明度が高い状態で、液体シンチレータ検出器のようにシンチレーション光を発光することができる。例えば、WbLS を用いた検出器では、チェレンコフ光とともに飛来した粒子からのシンチレーション光も検出するため、水検出器と比較すると粒子識別の精度を高めることが期待される。ただし、水と比較すると透明度が落ちるため、光子が検出器に到達する前に WbLS に吸収される欠点がある。また、液体シンチレータ検出器ではシンチレーション光が検出器に到達する前に液体シンチレータに吸収される影響が大きい。WbLS を用いた場合、吸収長を抑えることで検出器に到達する前に吸収される光を抑えることができる。また、液体シンチレータは引火性の高い物質である場合が多いため、WbLS を使用することで安全性を高めることができる。加えて水ベースであるため、安価に大型化できる利点がある。ただし、粒子通過によるシンチレーション光の発光は小さくなる。このように WbLS は水と液体シンチレータ両者の利点と欠点を持つため、目的に合わせて物質の割合や種類をデザインする必要がある。

液体シンチレータは複数の有機剤から成り、本来水に溶けない物質であるため、界面活性剤を用いて水に溶かす。し界面活性剤は親水基と疎水基を持っているため、親水基は水に、疎水基は液体シンチレータに溶けることで液体中にミセルを形成することができる (図 3.1)。ミセルの大きさや形状は液体に含まれる物質の割合により、水の割合が減るにつれてミセルの大きさが大きくなり、形状は球体から楕円状、層状に変化する。液体全体にも変化が現れ、粘性が高くなり、液体がゲル状に変わる。また液体シンチレータの割合の増加に伴って発光量が増え、吸収長が短くなる。



(a) WbLS 中での界面活性剤によるミセル形成の模式図 (b) 界面活性剤及び液体シンチレータの割合を増やした場合の WbLS の状態変化

図 3.1: WbLS 中での物質の状態

#### 3.2 発光原理

WbLS の発光原理は有機液体シンチレータと同じである。液体シンチレータには大きく分けて 3 つの役割を果たす物質で構成されており、それぞれ溶媒・蛍光体・波長変換剤と呼ばれる。

溶媒は液体シンチレータに一番多く含まれ、シンチレーション光の発光に大きく関係する。溶媒の化学構造にはベンゼン環が含まれており、粒子が溶媒にエネルギーを落とした際、ベンゼン環中に存在している  $\pi$  電子

が励起し、基底状態に戻ることで特定の波長の光を放出する (図 3.2)。この機構は数 ns 以内で完了し、物質の種類によって吸収スペクトル及び発光スペクトルが異なる。

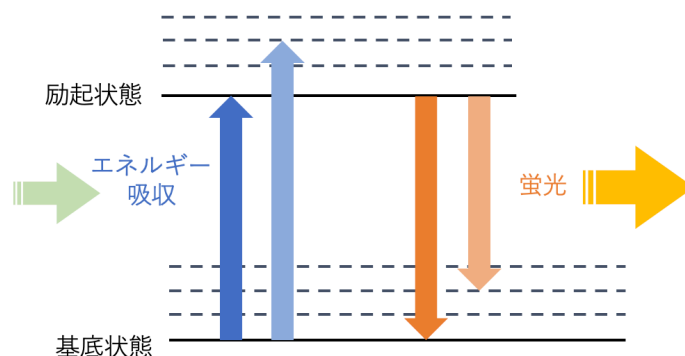


図 3.2: シンチレータ発光過程における溶媒分子でのエネルギー準位間での遷移の模式図 (放射線計測ハンドブック [20] 第 8 章 図 8.1 を参考に作成)

蛍光体は、溶媒から放出された光を吸収・再放出することで溶媒に吸収されにくい波長に変換する。蛍光体の化学構造にもベンゼン環が含まれ、溶媒と同様に、蛍光体中のベンゼン環に含まれる  $\pi$  電子が励起・脱励起することで新たに光を放出する。ただし、蛍光体の発光スペクトルは光検出器で検出できる光の波長スペクトルと異なる場合があり、その場合は検出効率を上げるために波長変換剤を用いる。

波長変換剤の構造にもベンゼン環が含まれており、蛍光体などから放出された光を吸収・再放出することで光の波長を変える。

このように、粒子が落としたエネルギーを溶媒、蛍光体、波長変換剤によって発光スペクトルを変えていくことで光検出器でシンチレーション光を検出することができる。実際の液体シンチレータでは物質間での光の吸収・放出が複雑に行われているが、構造による  $\pi$  電子が励起・脱励起にかかる時間が短いため、シンチレーション光の発光は数十 ns 以内に起こる。

WbLS 特有の性質として、含まれる界面活性剤の種類を変更することによって、シンチレーション光を増大させることができる。界面活性剤の中にはベンゼン環を持つものが多くあり、溶媒及び蛍光体の役割をもつことができる。このような界面活性剤を使用することで、水の割合を高く保ったまま発光量を増やすことができたり、溶媒の割合が低い状態でシンチレーション光を発光することができる。

### 3.3 HK に向けた WbLS の開発

#### 3.3.1 物質の選定

本研究で用いる WbLS の要件は以下の通りである。

1. 水の割合が高い
2. 飛跡検出器で使用できる発光量をもつ
3. 長期間安定している

まず、WbLS を水標的として用いるため、水の割合は 65 ~ 70% 以上に保つ。次に、飛跡検出器で使用する

際に陽子と  $\pi$  粒子を識別できる程度の光量を波長変換ファイバーと MPPC で測定できることを目標としている。そのために、WbLS の光量を現在の 2 倍以上上げることが求められる。ただし、光量を上げるために液体シンチレータ及び界面活性剤の割合を上げると、水の割合を高く保つことができない。そのため、水の割合を高く保った状態でいかに光量を上げられるかが開発の肝となる。

最後に、長期使用するために 10 年以上は物質として安定することを要求する。

以上のことから WbLS の物質として、液体シンチレータでの溶媒の役割を果たすプソイドクメン (Pseudocumene, PC)、蛍光体の 2,5-ジフェニルオキサゾール (2,5-Diphenyloxazole, PPO)、波長変換剤の 1,4-ビス(2-メチルstyril)ベンゼン (1,4-Bis(2-methylstyryl)benzene, Bis-MSB)、界面活性剤は溶媒としての役割を果たすようにベンゼン環を含んだ構造をもつ Triton を試した (図 3.3)。安定性を向上させるため、溶媒としての界面活性剤以外にもう 1 種類の界面活性剤 SDS を加えることで水と液体シンチレータが分離しにくくなることを目指した。

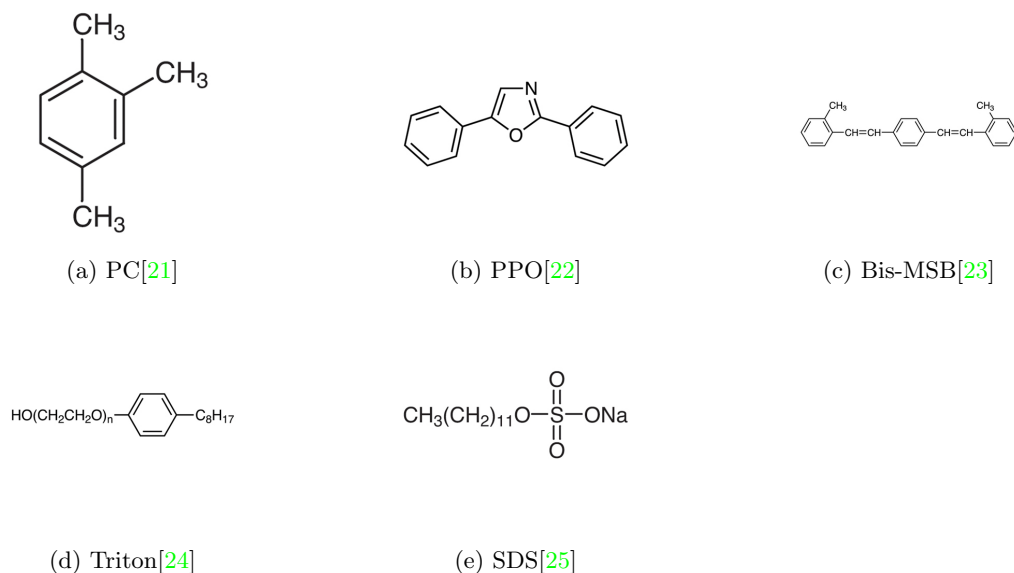


図 3.3: 使用した物質一覧 (東京化成工業ホームページ該当部分から引用)

また、界面活性剤は有機物を溶かすため、波長変換ファイバーと反射材を溶かさなない種類のものを選択する必要がある。波長変換ファイバーの表面はアクリル樹脂 (PMMA) でコーティングされており、界面活性剤に溶けにくい。また、反射材の候補としてアクリル系樹脂を検討しており、この材料を溶かさなない界面活性剤を選ぶ必要がある。用いる界面活性剤については、波長変換ファイバーの表面と反射材を溶かしにくいことを確認して使用した (図 3.4)。また、今回の開発測定実験では WbLS を封入するためにオプティカルセメントを使用するため、オプティカルセメントを溶かさなないことも確認した。



図 3.4: WbLS が反射材 (PMMA) を溶かさないう確認している様子

### 3.3.2 製作方法

製作方法は以下の通りである。

1. 各物質の質量を量ってバイアル瓶に加える

入れる順番は水、界面活性剤、PC、PPO、Bis-MSB とした。また、PPO は粉末状で混ざりにくいため、すり鉢であらかじめ細かく砕いた。Bis-MSB は結晶状で混ざりにくいがごく少量しか加えないため、ピンセットで簡単に砕いて加えた。また水を加えた段階で、スターラーで攪拌するために回転子と呼ばれるセラミックでコーティングされた磁石を入れた。

2. ホットスターラーを用いて攪拌する (図 3.5)

スターラーとは、磁力によってバイアル瓶中の回転子を動かすことで液体を攪拌させる機器である。ホットスターラーでは攪拌温度を設定できる。

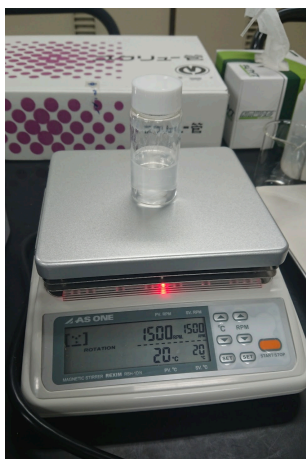


図 3.5: ホットスターラーで攪拌している様子



図 3.6: 超音波洗浄機を使用している様子

3. 超音波洗浄機を用いて粉末の塊を砕く (図 3.6)

PPO と Bis-MSB は塊として残っていることが多く、ホットスターラーの攪拌のみだと混ざるまでに時間がかかるため、超音波洗浄機によって塊を砕くことで混ざりやすくする。

#### 4. 完全に混ざるまで、2と3を繰り返す

全体が混ざったことを目視で確認し、ブラックライトを当てて発光を確認する (図 3.7)。



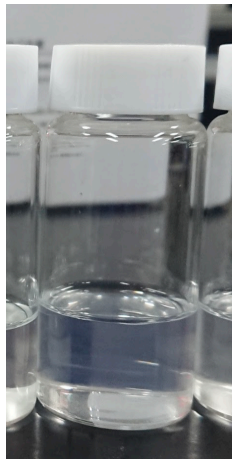
図 3.7: ブラックライトを照射した様子

### 3.3.3 期待される性能と課題

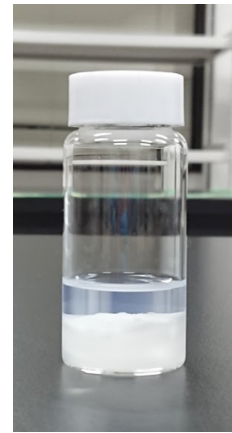
現在他研究で開発されている WbLS は大型タンク検出器での使用を目的にしているため、吸収を抑えることが課題となっている。本研究で目指している検出器のデザインは従来とは異なるため、波長変換ファイバーと MPPC による局所的な発光の読み出しに合わせ、吸収長の長さよりも局所的な発光量を高くすることが目標となる。よって、他研究で開発中の WbLS より局所的なシンチレーション光の増加が期待できる。

一方課題としては、WbLS の長期安定性を保つことがある。

製作したサンプルの中には、一度綺麗に混ざった場合でも、数日から数ヶ月後に水と液体シンチレータが分離することがある (図 3.8)。これは、ミセルがバイアル瓶の底に集中するなどして液体中でミセルの形状が層状に変化したことなどが原因だと考えられる。使用を検討している検出器の構造上、一度分離した場合に液体を後から攪拌させることが難しいため、数年間分離しないサンプルが必要となる。水の割合を高くしたり、界面活性剤の割合や種類を適切に選ぶことで改善が期待されるが、一方で発光量を高く保つことが課題となる。現在は目視によって安定性を確認しているが、ミセルが安定して一様に分布しているがを確認できないため、安定性を確認する方法も課題となっている。



(a) 透明な液体でよく混ざっていた  
(2022年1月16日撮影)



(b) 5ヶ月後に透明な液体の層と白い沈殿物に分離した  
(2022年6月13日撮影)

図 3.8: 分離した WbLS サンプルの様子

他の課題として、反射材や波長変換ファイバーを長期にわたって溶かさず、形を保つことなどがある。特に波長変換ファイバーのコア部分は界面活性剤によって非常に溶けやすく、ファイバー表面に細かな傷があると数週間程度で溶けてしまう(図 3.9)。よって波長変換ファイバーの表面のコーティングを保つことが求められる。

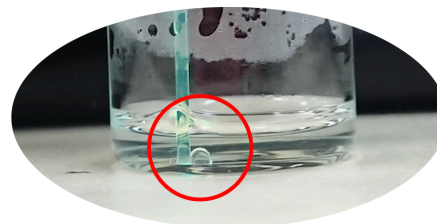
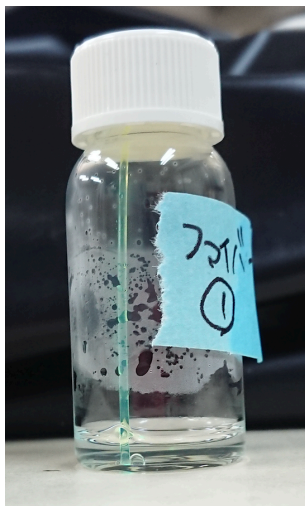


図 3.9: WbLS によって溶けた波長変換ファイバーのコア部分。左が全体図で右が拡大図である。拡大図の赤線内に溶けたコアが確認できる

## 4 WbLS の光量測定試験

### 4.1 目的

製作した WbLS の光量をサンプルごとに比較するため、宇宙線による WbLS の光量を PMT を用いて測定に行った。WbLS の開発ではシンチレーション光をファイバーで読みだすことを目標にしているが、この測定では開発した WbLS 自体の光量を調べる。特に、WbLS の物質の配合物質の種類と割合を変えた場合の光量変化の傾向を見る。

実際の開発では WbLS サンプルの製作と光量測定を並行して行っており、光量測定の結果から次に製作する WbLS サンプルで使用する物質や配合割合を決定した。サンプルの製作と光量測定を交互に行うことで、より高い光量をもつ WbLS の製作を目指した。

### 4.2 PMT

PMT(光電子増倍管, photomultiplier tube) とは、入射光子を電子に変換し、増倍させることで微弱な光を検出する検出器である。

PMT の内部は図 4.1 のようになっている。光が受光面に入射した時、光電面で光電効果を起こし、光電子に変換される。その後光電子は加速しながらダイノードに衝突する。適切な電圧をかけることで電子の数をダイノード衝突後に増やし、最終ダイノード通過後、パルスとして取り出す際は  $10^6 \sim 10^7$  個の電子に増幅することができる。

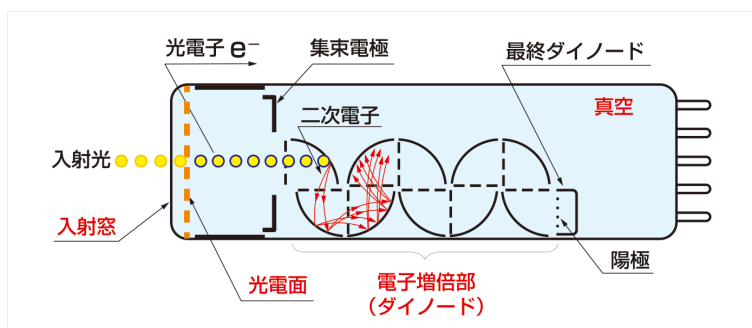


図 4.1: PMT の光検出の仕組み (浜松ホトニクスホームページ [26] より引用)

今回の測定で使用した光電子増倍管アセンブリ H6410(図 4.2) は、光電子増倍管 R329-02 を内蔵している。R329-02 の性能は表 4.1 のようになっており、光電面の有効面積の直径が 46 mm であり、WbLS サンプルを製作時に入れたバイアル瓶の底の直径が 35 mm であるため、バイアル瓶に WbLS サンプルを封入したまま光量を測定し、光量比較することが可能となっている。また、感度波長は 300 ~ 650 nm で、420 nm にピークをもち、波長変換ファイバーの吸収スペクトル(図 4.3)に近い感度をもつものを選んだ。





図 4.2: 使用した光電子増倍管アセンブリ H6410

Figure 1: Typical spectral response

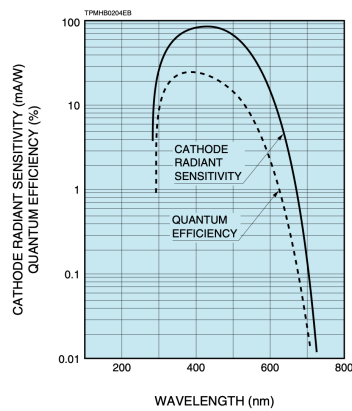


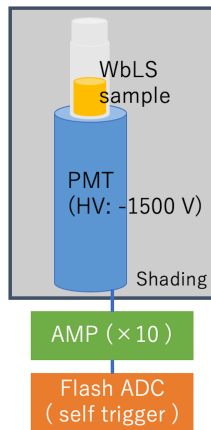
図 4.3: 使用した光電子増倍管 R329-02 の量子効率 (浜松ホトニクス該当ページ [27] より引用)

表 4.1: 光電子増倍管 R329-02 の性能 (浜松ホトニクスの該当製品カタログ [27] より引用)

項目	R329-02
種類	ヘッドオン型
受光面形状	円形
受光面サイズ	$\phi$ 46 mm
感度波長範囲	300 ~ 650 nm
感度波長ピーク	420 nm
陽極 - 陰極間 印加電圧	1500 V

### 4.3 セットアップ

PMT 測定試験のセットアップは図 4.4 のように、WbLS の入ったバイアル瓶を PMT の受光面の上におき、PMT で検出した WbLS の宇宙線によるシンチレーション光の信号を ADC を用いて波形を記録した。



(a) 模式図



(b) PMT の上にサンプルの入ったバイアル瓶を置いた様子

図 4.4: PMT 測定試験のセットアップ

ADC は CAEN DT5740 で、1 event に対し 16 ns ごとの信号の波高を約 16  $\mu$ s 間記録する。トリガーはセルフトリガーを使用した。

また、PMT 及び WbLS の入ったバイアル瓶は全体を遮光シートで覆い、セットアップ全体を暗箱に入れることで室内光が入らないようにした。

## 4.4 測定結果

### 4.4.1 発光の確認

まず、WbLS サンプルの宇宙線による発光を確認した。水と WbLS サンプルで PMT 測定を行ったところ、光量分布は異なる結果となった (図 4.5)。測定に用いたサンプルの配合は表 4.2 に載せた。また、宇宙線が落とすエネルギー分布がランダウ分布であることから、光量分布をランダウ分布を用いてフィッティングさせて求めた値を表中に載せている。なお、カッコ内の数値はフィッティングによる誤差  $\sigma$  を表す。水の光量分布は ADC 値約 800 にピークを持っており、これは宇宙線によるチェレンコフ光による分布であると考えている。

一方 WbLS サンプルの光量分布は、高発光領域に ADC 値 2100 にピークをもっている。水にはない発光であるため、宇宙線による WbLS のシンチレーション光による分布であると考えられる。以下、高発光領域でのピーク値を宇宙線による WbLS の光量とする。

また、低発光側に ADC 値 1500 あたりまで分布が見られるが、これらは宇宙線が WbLS を掠めたようなイベントだと考えている。

以上より、製作した WbLS サンプルで宇宙線によるシンチレーション光の測定が可能であることが確認された。

表 4.2: WbLS サンプルの詳細

サンプル	総量 [g]	水 [%]	SDS[%]	Triton[%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [ADC 値]
water	15.46	100	-	-	-	-	-	813 (80)
WbLS1	18.01	66.6	-	20.9	11.2	1.3	<0.01	2161 (336)
WbLS2	19.28	67.8	2.3	20.6	8.3	1.4	<0.01	2115 (344)

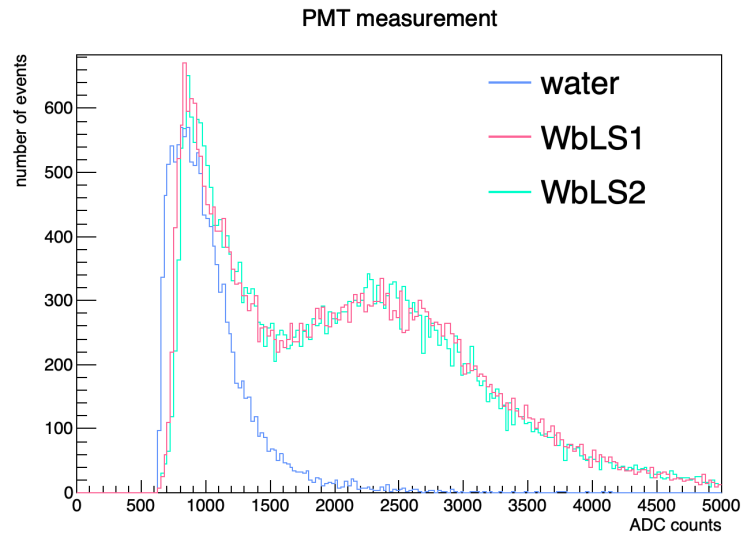


図 4.5: WbLS サンプルの PMT 測定における光量分布

#### 4.4.2 再現性

本測定の再現性について確認するため、同割合で混合した WbLS のサンプルを 5 個用意し (表 4.3)、PMT 測定を行った。これらのサンプルは製作時間や攪拌温度、総量などが異なっているが、全て透明な液体である。測定結果は図 4.6 となり、光量は ADC 値約 1800 であった。以上から光量値の測定誤差は ADC 値約 200 で、測定に再現性があることが確認できた。

表 4.3: 配合物質の割合の等しいの WbLS サンプルの詳細

サンプル	総量 [g]	水 [%]	SDS[%]	Triton[%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [ADC 値]
No.1	16.13	68.6	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	1805 (222)
No.2	17.23	68.5	2.0	17.9	10.4	1.3	<0.01	1805 (232)
No.3	14.03	68.9	2.0	17.5	10.3	1.3	<0.01	1845 (256)
No.4	17.80	68.7	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	1888 (281)
No.5	14.27	68.4	2.0	18.2	10.0	1.3	<0.01	1810 (247)

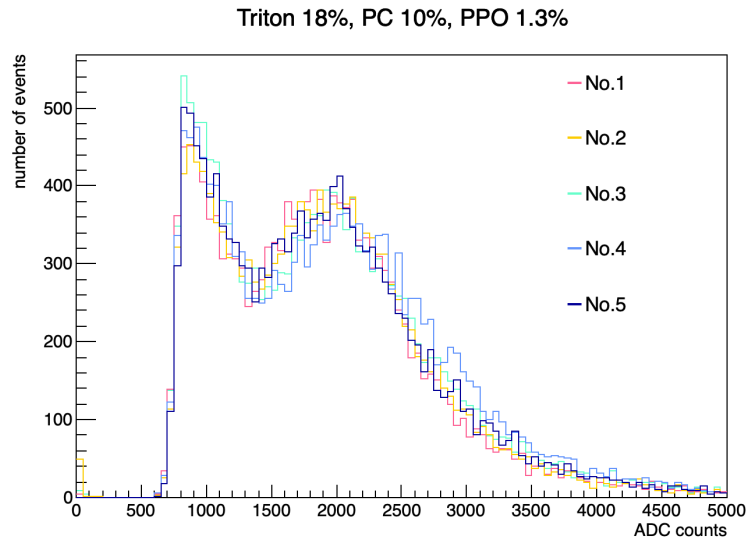


図 4.6: 配合物質の割合の等しい WbLS の PMT 測定における光量分布

#### 4.4.3 物質の配合割合の異なるサンプル

WbLS に含まれる各物質の割合増加による光量分布の変化を確認する。

まず、液体シンチレータの溶媒を増やすことで WbLS の光量が増加するかを確認した。

液体シンチレータの溶媒である PC の割合が異なり、界面活性剤である Triton と SDS 及びシンチレータの蛍光体である PPO の割合が同じである 4 つのサンプル (表 4.4) に対し、測定を行った。得られた光量分布は

図 4.7 のようになり、PC 6 %、8 %、10 % のサンプルに対する光量分布には大きな違いはないが、PC の割合を増加させると光量がわずかに増える傾向が見られた。特に PC12 % のサンプルが最も高い光量をもち、値は ADC 値で約 2000 であった。

PC の増加による発光量の増加は、液体シンチレータの溶媒を増加させると光量が増えるという予想通りとなり、PC6 % の増加に対し、光量値は ADC 値約 500 ほど高い値となった。この結果から、PC6 ~ 12% に増加させることで光量は増え、増加率は PC の割合が高いほど大きくなることがわかった。

表 4.4: PC の割合の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	総量 [g]	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [ADC 値]
PC 6 %	17.06	72.7	2.0	18.0	6.1	1.3	<0.01	1583 (210)
PC 8 %	15.96	71.0	2.0	17.7	8.0	1.3	<0.01	1530 (183)
PC 10 %	16.13	68.6	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	1758 (232)
PC 12 %	17.94	67.0	2.0	17.4	12.3	1.3	<0.01	2068 (326)

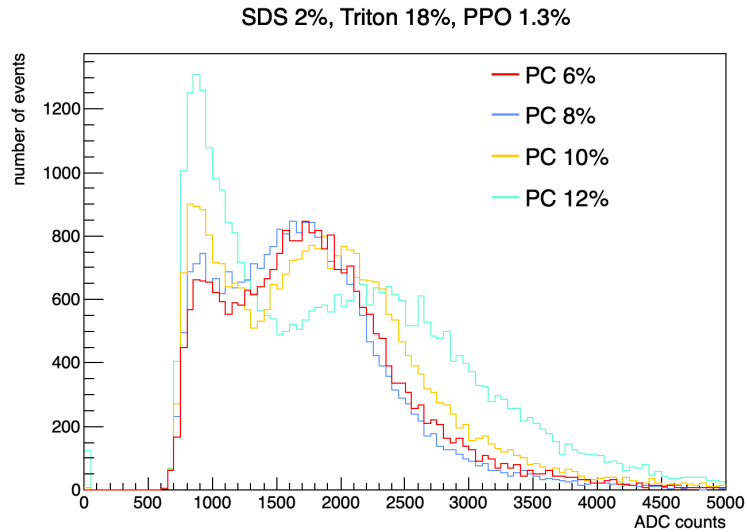


図 4.7: PC の割合の異なる WbLS の PMT 測定における光量分布

次に、界面活性剤の Triton が液体シンチレータの溶媒の役割を果たしているかを確認した。Triton が溶媒として機能する場合、Triton の割合を増加させることで光量が増加すると予想できる。

この測定では、Triton の割合が異なり、SDS・PC・PPO が同割合であるサンプルを使用した (表 4.5)。測定結果を図 4.8 に示した。光量分布を比較すると、Triton の割合が増加すると光量も増える傾向が見られ、増加率は一定ではないが Triton6 % の増加に対して光量値は ADC 値約 400 ほど高くなることがわかった。

この増加から Triton も溶媒として機能することが確認でき、増加率は PC より低い値となった。ただし、Triton22 % のサンプルはゲル状に固まっており、低発光側に見られるノイズも多い分布となった。そのため、Triton22% のサンプルは検出器として用いるには不向きであることが予想される。

表 4.5: Triton の割合の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	総量 [g]	水 [%]	SDS[%]	Triton[%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [ADC 値]
Triton 16 %	11.12	73.0	2.0	16.1	8.4	0.6	<0.01	1178 (206)
Triton 18 %	10.33	71.2	2.0	17.8	8.4	0.6	<0.01	1402 (193)
Triton 20 %	11.86	69.0	1.9	20.0	8.4	0.6	<0.01	1463 (201)
Triton 22 %	10.38	67.0	1.9	22.2	8.4	0.6	<0.01	1601 (257)

SDS 2%, PC 8.4%, PPO 0.6%

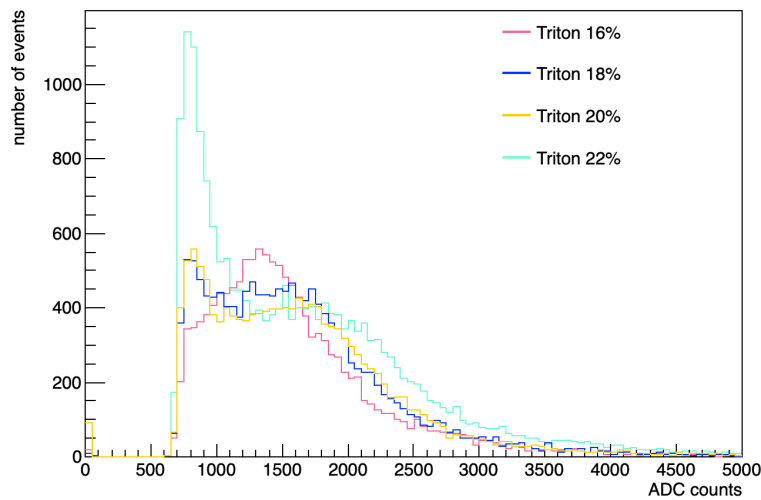


図 4.8: Triton の割合の異なる WbLS の PMT 測定における光量分布

続いて、液体シンチレータの蛍光体である PPO の割合を変化させたサンプルについても測定を行った (図 4.9)。使用したサンプルは表 4.6 にある通りである。蛍光体の増加によって溶媒からの発光を集めやすくなり、光量が増加することを期待した。溶媒の割合の少ないサンプルとして、Triton16 %、SDS2 %、PC8 % であり、PPO の割合が 0.6 %、1.3 % と異なる 2 サンプルを比較したところ、光量値はどちらも ADC 値で約 1200 となったが、僅かに PPO1.3% のサンプルが高い光量となった。また溶媒の割合を増やし、Triton18 %、PC10 %、PPO0.6 % と 1.3 % のサンプルの光量分布を比較した。先程同様にサンプル間に大きな違いは現れなかったが、0.6 % より 1.3 % の光量が ADC 値でおよそ 100 ほど高い値となった。

以上から、PPO0.6 % のサンプルでも溶媒からの発光を全て蛍光している状態であるか、蛍光体自身の光吸収・再発光によってある程度光量増加が抑えられている状態であることがわかった。また測定誤差の範囲内ではあるが、PPO を増加させると光量が増加する傾向がわずかながら確認された。ただし、PPO を 1 % 程度増加させるとサンプルの物質が混ざりにくくなり、均一に混ぜた場合でも白い沈殿物として液体中にあわられたり液体とならずにゲル状に固まるため、製作が難しく、不安定なサンプルとなることがある。

以上から、PPO の割合を高くすることで光量を増やすことが期待できるが、割合を 1.2% 以上にする場合はサンプルとして不安定となることが多いため、検出器に用いることが難しいことが予想される。

表 4.6: PPO の割合の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	総量 [g]	水 [%]	SDS[%]	Triton[%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [ADC 値]
Triton16% PPO 0.6%	11.12	72.9	2.0	16.1	8.4	0.6	<0.01	1178 (206)
Triton16% PPO 1.3%	11.64	72.5	2.0	15.8	8.4	1.3	<0.01	1236 (228)
Triton 18% PPO 0.6%	15.20	69.4	2.0	18.0	9.9	0.6	<0.01	1571 (247)
Triton 18% PPO 1.3%	15.11	68.6	2.0	18.1	10.0	1.3	<0.01	1714 (251)

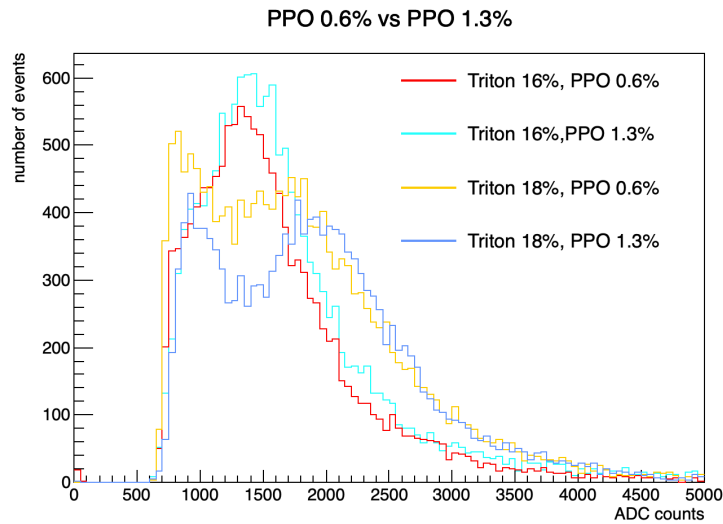


図 4.9: PPO の割合の異なる WbLS の PMT 測定における光量分布

#### 4.4.4 界面活性剤の異なるサンプル

使用する界面活性剤の種類を変更することで、Triton 以外に溶媒として機能する界面活性剤を探索した。界面活性剤は全てベンゼン環を持つ構造であり、Triton と同様に溶媒としても機能することを期待した。また、塩化ベンゼトニウムは陽イオン界面活性剤であるが、SDS も含めた他の界面活性剤は陰イオン界面活性剤である。今回の光量測定のため、ベンゼン環をもつ界面活性剤を 16 % ととなるようにサンプルを製作した (表 4.7)。測定した光量分布を比較すると (図 4.10)、TERGITOL のサンプルが最も高い光量となり、光量値は ADC 値で 1800 であった。次に光量の高い順から LAS が ADC 値 1500、Triton が ADC 値 1300、塩化ベンゼトニウムが最も低い光量で ADC 値 900 となった。

ただし、TERGITOL は 16 % 以上割合を高くするとゲル状になりやすく、製作が難しくなっていくため、より高い光量のサンプルの製作には不向きであることが予想される。

以上から、液体シンチレータの溶媒として機能する界面活性剤の割合を 16% と固定すると、TERGITOL を用いることでより高発光量のサンプルを得ることができる。界面活性剤の種類を変えることで、界面活性剤

の割合を増やしたときのサンプルの製作の難易度や安定性が異なるが、界面活性剤の割合が低い場合は種類を変えることで高い光量のサンプルが得られることが予想される。

表 4.7: 界面活性剤の種類異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	総量 [g]	水 [%]	SDS[%]	界面活性剤 [%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [ADC 値]
Triton	12.10	70.0	5.0	16.0	8.4	0.6	<0.01	1329 (168)
TERGITOL	13.46	70.0	5.0	16.0	8.4	0.6	<0.01	1784 (263)
塩化ベンゼ トニウム	11.30	74.7	-	16.3	8.4	0.6	<0.01	939 (110)
LAS	13.69	69.8	5.0	16.0	8.8	0.6	<0.01	1506 (206)

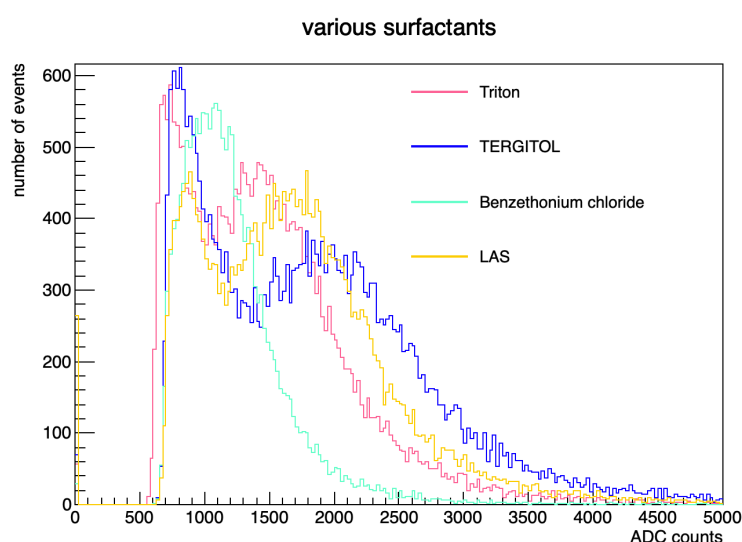


図 4.10: 界面活性剤の種類異なる WbLS の PMT 測定における光量分布

#### 4.5 まとめ

新たに製作した WbLS について PMT による光量測定を行った結果、界面活性剤である Triton、液体シンチレータの溶媒である PC、蛍光体 PPO の割合を増加されることで WbLS 自体の光量が増加することが確認できた。

それぞれ光量は、PC の 6% の増加に対して ADC 値は約 500、Triton6% の増加に対して約 400、PPO の 0.6% の増加に対して約 100 の増加となった。ただし、割合を高くすると WbLS が不安定になる傾向が見られ、Triton の割合が 22% 以上であったり、PPO1.2% 以上であるサンプルは、ゲル状で不安定となりやすく、液体シンチレータと水の分離が生じやすい。そのため、これらの物質を増加させたサンプルは検出器での採用が難しいことが予想される。

また、界面活性剤の種類を変えたサンプルでは、光量に違いが現れ、界面活性剤の割合 16% の場合は光量が高い方から TERGITOL,LAS,Triton, 塩化ベンゼトニウムの順になった。ただし、TERGITOL は 16% よ



り高い割合では不安定なサンプルとなりやすい。

以上から、WbLS 自体の光量を上げるためには、界面活性剤と液体シンチレータの割合を増加させる必要がある。ただし、WbLS の安定性を保つため、増加できる割合には限界がある。

今回製作したサンプルでは、表 4.2 にある、WbLS1 及び WbLS2 が比較的高い光量を持つ。ただし、WbLS1 は 20 °C で安定しているが、WbLS2 はやや不安定であったため、PMT 測定では WbLS 1 が安定性があり、最も高発光量なサンプルとなった。

## 5 波長変換ファイバーによる光量試験測定

### 5.1 目的

PMT を用いた WbLS の光量測定では、WbLS 自体の発光を確認するために行った。しかし、PMT は波長変換ファイバーと吸収波長が異なるため、ファイバーで読み出した場合の光量を測定する必要がある。そのため、新前置検出器での読み出しと同じように、波長変換ファイバーによる読み出しを用い、宇宙線による光量測定試験を行った。ただし、この測定は課題が多く (5.5.6 節に後述)、光量測定が難しいため、PMT による WbLS の光量測定結果をもとに比較的高光量が見込まれるサンプルを選び、波長変換ファイバーによる試験で用いることとした。

WbLS を封入する小型容器は本測定のために新たに製作したものであり、1本の波長変換ファイバーを通した構造である。小型容器の材料は WbLS に溶けにくい PMMA とアクリル系樹脂を採用し、反射率を高めるために白色のものを使用した。また小型容器の製作方法として、3Dプリンタによる製作と板加工による製作の2種類の方法を試した。ただし、新前置検出器では構造が複雑であるため、板加工による製作では工夫が必要となる。今回の測定では製作方法の違いによる容器の反射率の変化を確認するため、3Dプリンタと板加工による容器を製作し、容器に封入したサンプルの光量を比較した。

### 5.2 小型容器

#### 5.2.1 3Dプリンタによる製作

小型容器 (図 5.1) は外形  $10 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$  の長方体で、中は  $8 \times 8 \times 48 \text{ mm}^3$  の空洞が空いており、容器の厚さは  $1 \text{ mm}$  で一定となっている。ファイバーは長軸方向に通すため、直径  $2 \text{ mm}$  の穴が  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  の両面の中心に空いている。

WbLS を容器に封入するため、容器上部は  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  の穴が空いており、追加に  $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$  の蓋を用意した。ただし、WbLS によっては粘性の高いものがあり、容器に封入しやすくするため、容器上部の穴と蓋の大きさを  $10 \times 50 \text{ mm}^2$  にした容器を製作した (図 5.2)。

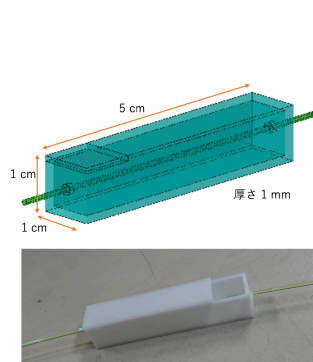


図 5.1: 小型容器のデザイン (上) と実際に製作した容器 (下)

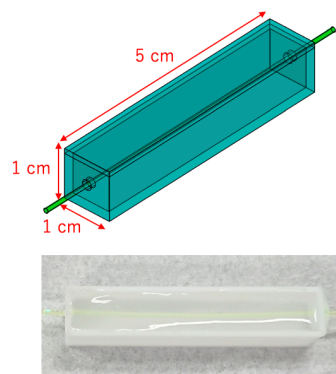


図 5.2: 蓋の大きな小型容器のデザイン (上) と実際に製作した容器 (下)

今回製作に使用した3DプリンタはFLASHFORGE社のGuider2である。熱溶融積層法で造形を行い、積層ピッチは0.05～0.4 mm になっている。使用したフィラメントはPMMAで、白色のものである。

3Dプリンタで製作した小型容器(図5.3)は測定のために波長変換ファイバーを通し、光学セメントで固定した。光学セメントが固まったことを確認した後、WbLSをスポイトで封入し、蓋を閉めて使用した。光学セメントはファイバーと蓋の固定以外に、容器上部の厚さが薄い部分に使用した。これは、3Dプリンタの造形で最後に上部を覆うようにフィラメントを押し出すことで、上部のみ厚さ一定で造形できない。上部の厚さが薄いことでWbLSは蒸発しやすくなったり、漏れてしまうことを防ぐ目的で、容器上部の厚さが薄くなっている部分のみ光学セメントを塗った。

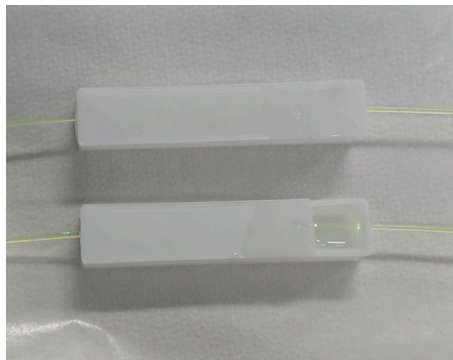


図 5.3: 3D プリンタによる小型容器に WbLS サンプルを入れた様子 (下) と蓋を閉めた様子 (上)

### 5.2.2 板加工による製作

容器のデザインは3Dプリンタと同じものを採用し、板加工による製作をG-tech社に依頼した。容器材料は白色のPMMAである。また、容器の厚さが与える白色PMMAの反射率の変化を確認するため、厚さ1 mmのデザイン他に、外形 $11 \times 11 \times 51 \text{ mm}^3$ で厚さ1.5 mmの容器と、外形 $12 \times 12 \times 52 \text{ mm}^3$ で厚さ2 mmの容器の製作を依頼した。実際に製作した容器が図5.4である。ファイバーを容器に通すため、全て容器の中心を通るように直径2 mmの穴をあけるデザインに統一した。ファイバー及びカバーの固定、WbLSの封入については3Dプリンタで製作した容器と同じ手順を採用した(図5.5)。

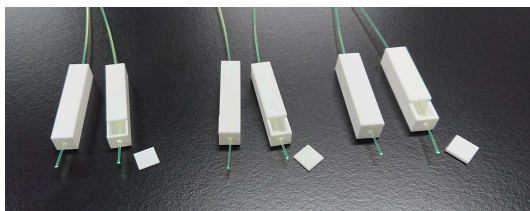


図 5.4: 厚さの異なる板加工による小型容器。  
左から厚さ 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm である。

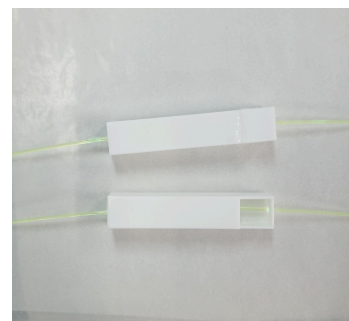


図 5.5: 板加工による容器に WbLS サンプルを入れた様子 (下) と蓋を閉めた様子 (上)

### 5.3 セットアップ

セットアップ (図 5.6) は、小型容器の上下に Super-FGD に使用されている  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  のプラスチックシンチレータキューブ 5 個を置き、それぞれ波長変換ファイバーと MPPC で読み出した。

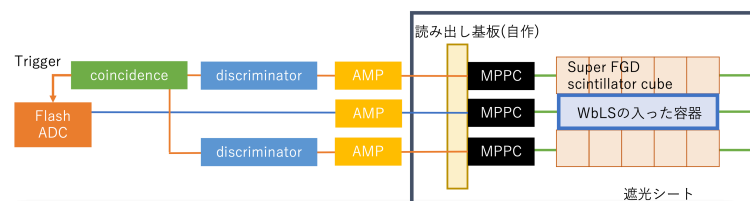
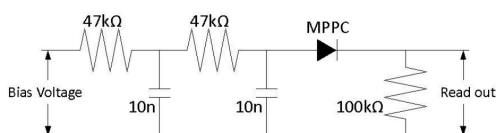
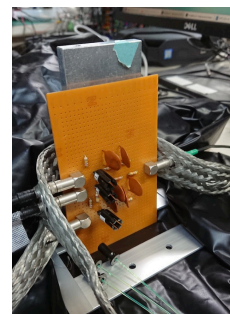


図 5.6: ファイバーと MPPC による測定でのセットアップ

波長変換ファイバーの先端と MPPC には T2K 実験で使用されている専用の光学コネクタをつけた。コネクタを取り付けることで、波長変換ファイバーの端が MPPC の受光面の位置に配置できるようになり、ファイバーと MPPC の間での光量ロスによる影響を減らす。MPPC の読み出し回路は高圧電源からの高周波ノイズを低減するためにローパスフィルタを用い、読み出し基板を自作した (図 5.7)。各 MPPC からの信号は AMP で 100 倍させた後、Flash ADC (CAEN DT5740) で波形を記録した。また、上下のシンチレータでおよそ 4 ~ 5 p.e. 以上の発光をイベントとし、上下のシンチレータのイベントでコインシデンスをとり、トリガーとして使用した。



(a) MPPC 読み出し基板の回路 [29]



(b) 実際に製作した基板

図 5.7: MPPC 読み出し基板

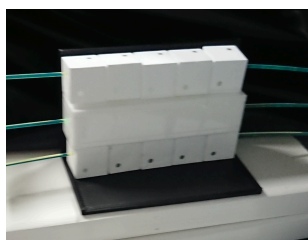
また、使用した MPPC(S10362-13-050C) は T2K 実験で専用開発されたものであり、性能を表 5.1 に載せた。

表 5.1: MPPC S10362-13-050C の性能 [28]

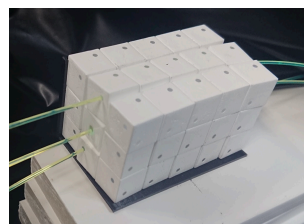
項目	値
受光領域	$1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$
ピクセルサイズ	$50 \times 50 \text{ } \mu\text{m}^2$
ピクセル数	667

小型容器に使用した材料は反射材としての役割を確認できていない。容器の反射率が低い場合はシンチレーション光が容器を通過するため、ファイバーで読み出す光量が減少する。よって容器の反射率の確認のため、容器の外側に反射率の高い物質で覆った状態で光量測定を行い、反射率の高い物質で覆わなかった状態の光量と比較し、容器の反射率を検証する。

今回の測定では容器の周りに反射材の代わりとして、プラスチックシンチレータキューブを置いて測定を行った (図 5.8)。



(a) 小型容器の周りに反射材を置かない状態



(b) 小型容器の周りに反射材を置いた状態

図 5.8: 追加の反射材の有無

## 5.4 解析方法

Flash ADC では、1 event に対し約  $16 \mu\text{s}$  間、 $16\text{ns}$  ごとに波形を記録する。実際の波形は図 5.9 のようであり、トリガーのかかった時間は図中の中心  $500 \times 16 \text{ ns}$  の地点であり、比較的波高の高い信号が確認できる。これが、上下のプラスチックシンチレータのトリガーによる信号である。他の時間領域でも信号が見られるが、これらは上下のシンチレータを通過しなかった宇宙線のイベントや、MPPC の暗電流による発光である。上下のシンチレータを通過した宇宙線イベントによる発光のみを見るため、波形を  $320 \text{ ns}$  毎に分割し、見たいイベントによる発光が含まれる領域を取り出した。また 1 event 毎に波形のベースラインを求め、領域毎に波形を積分し、ADC 値を求めた。

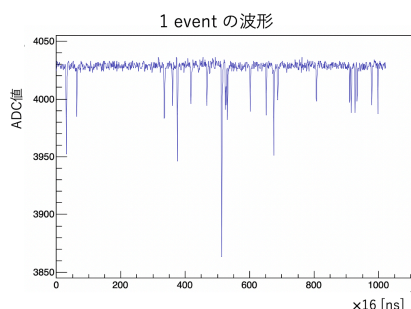


図 5.9: Flash ADC で記録した波形

上下のプラスチックシンチレータのトリガーによる信号が含まれない領域での光量の ADC 値分布を用いて、ADC 値を光電子数 (p.e.) に変換する calibration を行った。信号領域外の光量分布は図 5.10 のようになり、 $0 \text{ p.e.}$  と  $1 \text{ p.e.}$  のピークが確認できる。ガウシアンフィッティングによりピーク値を求め、このピーク

ク値から、以下の式 5.1 を用いて ADC 値を光電子数に変換した。

$$(\text{光電子数}) = \frac{(\text{ADC 値}) - (0 \text{ p.e. の peak 値})}{(1 \text{ p.e. の peak 値}) - (0 \text{ p.e. の peak 値})} \quad (5.1)$$

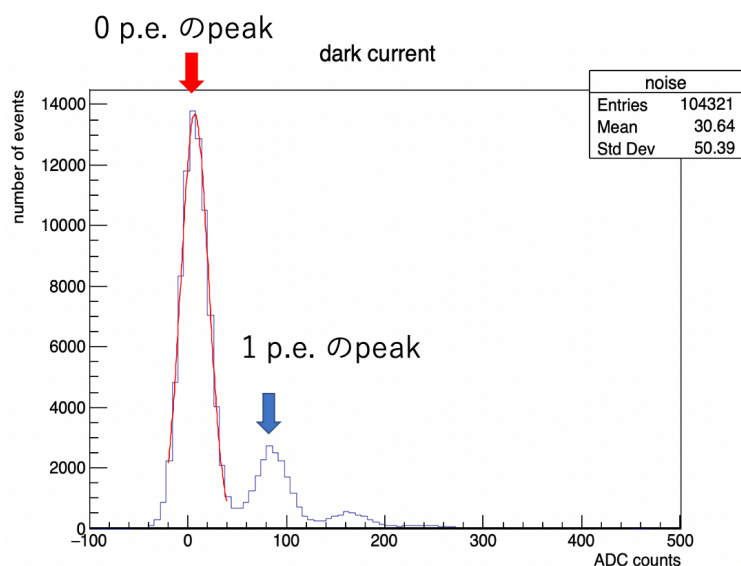


図 5.10: 0 p.e. のピークをガウシアンでフィッティングしている様子

## 5.5 測定結果

### 5.5.1 3Dプリンタによる容器での光量測定

まず、WbLS の発光の読み出しができているかを確認した。小型容器に製作した WbLS を入れた光量分布は図 5.11 のようになり、小型容器に水を入れた場合と比較すると、高い光量分布を持っている。宇宙線による発光分布はランダウ分布に近い形であることが知られているため、光量値をランダウ分布によるフィッティングによって求め、各サンプルの配合割合とともにフィッティングにより求めた光量値を表 5.2 に示した。表中の光量値にあるカッコ内の値はフィッティングによる誤差  $\sigma$  を表す。

ファイバー読み出しでの WbLS サンプルの光量を求めたところ、値は約 15 ~ 17 p.e. となった。一方、水の光量が約 7 p.e. であり、この発光は容器の上下に設置したプラスチックシンチレータからのクロストークとチェレンコフ光によるものであると考えている。そのため、WbLS サンプルのシンチレーション光は少なくとも 8 ~ 10 p.e. 程度となり、プラスチックシンチレータの光量 41 p.e. の約 20% 以上の光量をもつことがわかった。

以上より、WbLS サンプルの発光がファイバーによって読み出し可能であることが確認できた。また WbLS の発光をファイバーと MPPC で読み出した前例はないため、本研究は初めてファイバーによる WbLS のシンチレーション光の観測に成功した。

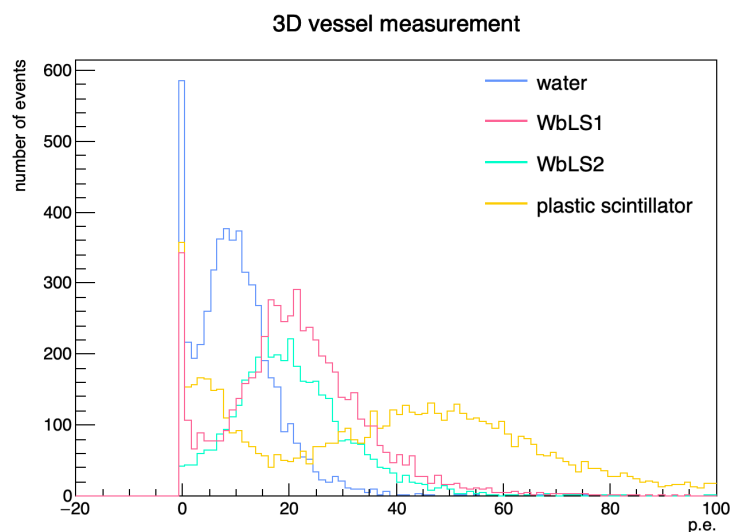


図 5.11: 3D プリンタで製作した小型容器での光量分布

表 5.2: 3 D プリンタで製作した小型容器での測定でを使用したサンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
水	100	-	-	-	-	-	6.9 (2.0)
WbLS1	67.6	2.6	20.7	7.8	1.3	<0.01	17.1 (3.6)
WbLS2	67.3	-	19.8	11.5	1.4	<0.01	14.9 (3.3)
プラスチック							
シンチレータ	-	-	-	-	-	-	40.7 (10.3)

ファイバー読み出しによる小型容器での測定の再現性を確認するため、PMT による WbLS の光量測定の再現性で使用した WbLS サンプルを容器に入れ、測定を行った。光量分布は図 5.12 と得られ、用いたサンプルは表 5.3 の通りである。5 サンプルとも光量は約 11 p.e. であることから再現性を確認することができた。

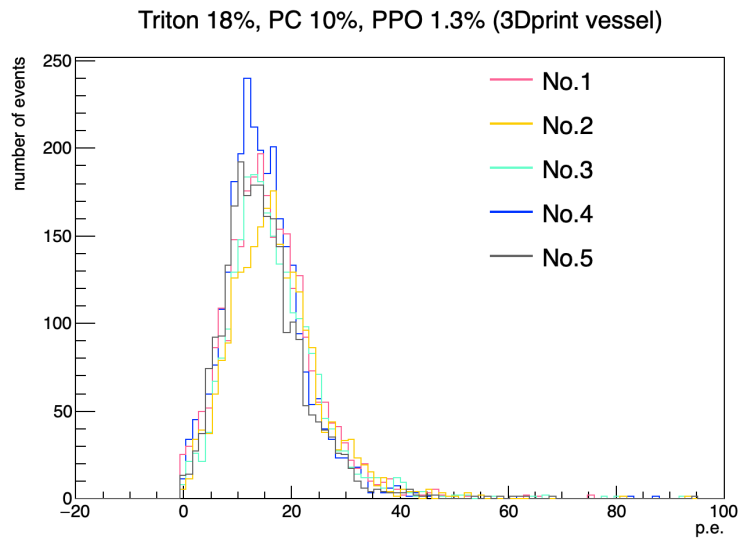


図 5.12: 3D プリンタの小型容器での同じ物質割合の WbLS サンプルの光量分布

表 5.3: 3 D プリンタの小型容器での測定で使用した同割合の WbLS サンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
No.1	68.6	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	11.8 (2.5)
No.2	68.5	2.0	17.9	10.4	1.3	<0.01	11.9 (2.7)
No.3	68.9	2.0	17.5	10.3	1.3	<0.01	11.9 (2.5)
No.4	68.7	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	11.2 (2.1)
No.5	68.4	2.0	18.2	10.0	1.3	<0.01	10.7 (2.3)

### 5.5.2 板加工の製作による小型容器での光量測定

板加工による小型容器について、厚さの異なる容器に対し、容器材料の反射に関する特徴が見られないか確認した。光量分布は図 5.13 となり、用いたサンプルについては表 5.4 に示した。最も発光量が高い分布を持つ容器は、WbLS サンプル、水ともに厚さ 1.5 mm のものであった。厚さを 1 mm から 1.5 mm にした場合、容器を通過する光が減り、上下のシンチレータからのクロストークが減ることが予想される。一方、容器の反射率が増加してファイバーで光を収集しやすくなったことで、光量が増加したと考えている。しかし、厚さ 2 mm にすると、容器の壁で吸収される光が増加して光量が減少したと考えられる。

また、厚さによる光量の変化は水の方が大きく現れており、厚さが 0.5 mm 異なると、WbLS サンプルでは約 1 p.e. 程度の違いが見られた。一方水は約 1.5 p.e. 以上変化している。これは、水と WbLS サンプルの吸収長の違いによるものだと考えている。サンプルを通過するシンチレーション光やクロストークは、光が容器の壁で反射を繰り返すことでファイバーに収集される。吸収長が長いと容器での反射の回数が増えるため、容器の壁の状態の影響を受けやすくなる。このため、水が WbLS サンプルより容器の厚さの変更によって光量に差が現れたと考えている。



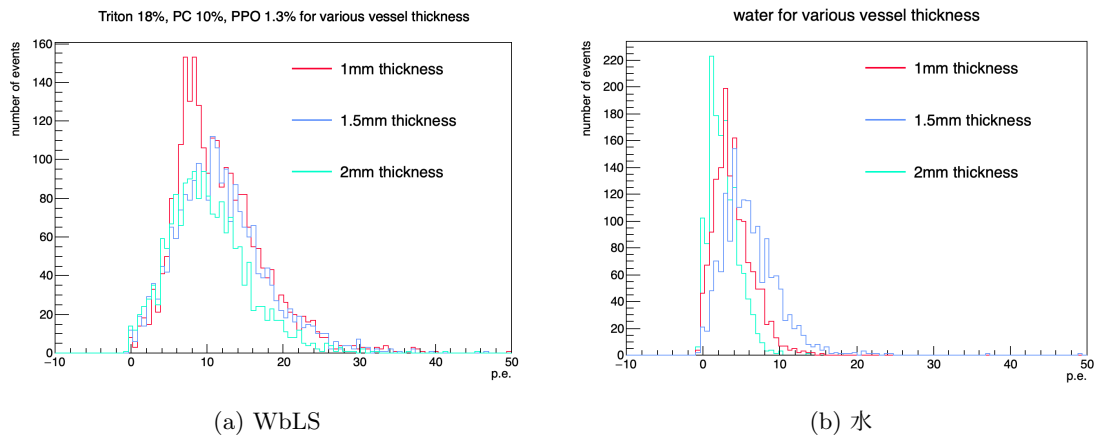


図 5.13: 厚さの異なる小型容器に封入したサンプルの光量分布

表 5.4: 厚さの異なる小型容器に封入したサンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	容器の厚さ	光量 [p.e.]
WbLS	70.4	5.0	15.7	8.3	0.6	<0.01	1.0 mm	8.0 (1.8)
							1.5 mm	8.3 (2.1)
							2.0 mm	7.1 (1.8)
水	100.0	-	-	-	-	-	1.0 mm	2.3 (0.9)
							1.5 mm	3.7 (1.1)
							2.0 mm	1.5 (0.6)

次に、厚さ 1 mm の容器を用い、周りに反射材としてプラスチックシンチレータキューブを増やした場合で光量に変化があるかを確認した。水及び WbLS サンプルを入れた容器をプラスチックシンチレータキューブで囲ったセットアップと囲わないセットアップで測定を行い、光量分布を得た (図 5.14)。また、サンプルの詳細および光量値については表 5.5 に示した。比較すると、水と WbLS どちらの場合も容器をプラスチックシンチレータキューブで囲ったセットアップで測定した光量が約 1.5 p.e. 増加した。プラスチックシンチレータキューブで囲わない状態では、追加した場合の光量の約 60 ~ 70% であった。以上のことから、板加工による容器であっても厚さ 1 mm では完全に光を反射することができないため、より良い反射率をもつ他の反射材を探索することや、反射材の厚さを 1.5 mm などに変更し、最適化することが必要であることがわかった。

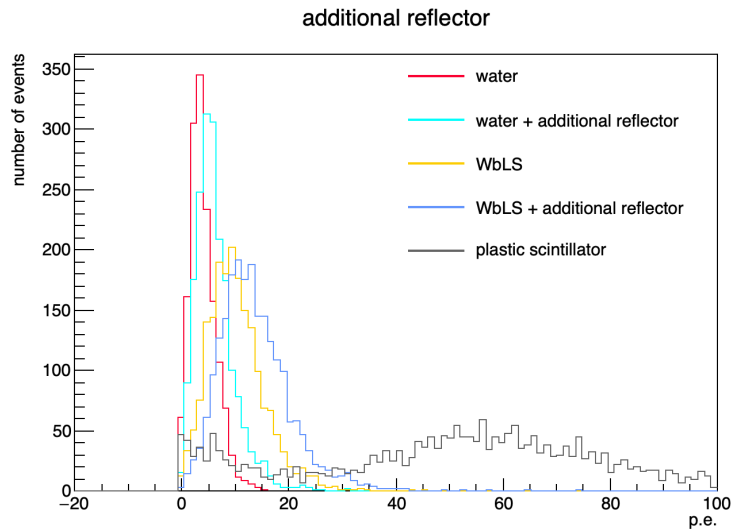


図 5.14: 板加工の製作による小型容器での周りの反射材を増やした場合の光量分布

表 5.5: 容器の周りの反射材を増やした状態での測定で使用したサンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS[%]	Triton[%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	反射材	光量 [p.e.]
water	100	-	-	-	-	-	無	2.3 (0.8)
							有	4.0 (1.1)
WbLS	68.6	1.9	18.3	9.8	1.3	<0.01	無	6.8 (1.7)
							有	9.6 (2.2)
プラスチック シンチレータ	-	-	-	-	-	-	無	51.9 (1.3)

### 5.5.3 板加工による容器との比較

3D プリンタで製作した容器と板加工製作による容器で光量分布に違いが現れるかを確認した。それぞれの容器に水と、同じ物質の配合割合を持つ WbLS サンプル (表 5.6) を封入し、各容器の周りは反射材の代わりであるシンチレータを囲って測定した。2つの容器での光量分布は図 5.15 のようになり、3D プリンタの容器の方が水の場合は約 3 p.e.、WbLS サンプルでは約 1 p.e. ほど高い光量であった。3D プリンタによる容器の方が密度が低く、容器の壁で吸収される光が少ないため、3D プリンタによる容器に上下のシンチレータからのクロストークを通過させやすく、高発光量になる傾向となった。ただし、板加工製作の容器の厚さを変えた場合の測定と同じように、WbLS サンプルでは水より吸収長が短いため容器の壁の影響を水より受けにくくなり、2種類の容器間の光量の差が小さくなったと考えられる。

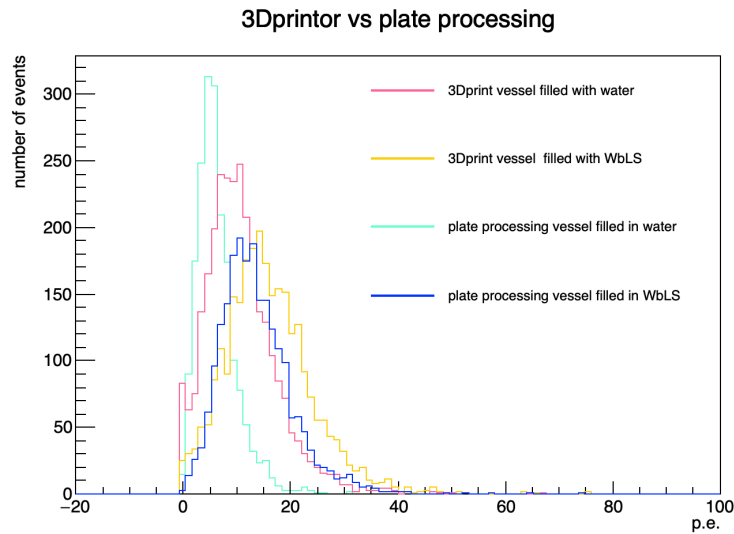


図 5.15: 各小型容器でのサンプルの光量分布

表 5.6: 各小型容器での測定で使用したサンプルの詳細

サンプル	容器の製作	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
水	3D プリンタ	100	-	-	-	-	-	7.0 (2.1)
WbLS	3D プリンタ	68.6	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	11.2 (2.5)
水	板加工	100	-	-	-	-	-	4.0 (1.1)
WbLS	板加工	68.6	1.9	18.3	9.8	1.3	<0.01	9.8 (2.2)

#### 5.5.4 物質の配合割合の異なる WbLS の光量比較

まず、液体シンチレータの溶媒である PC の割合が異なるサンプルを用いて、PMT による WbLS 光量測定で見られたように、PC の割合を増加させることで宇宙線による発光量が増加するかを確認した。測定で使った容器は 3D プリンタ製作の容器で、容器の周りには反射材代わりにシンチレータをおき、容器を囲った。用いたサンプルは PC 8%、10%、12% の割合のもの (表 5.7) である。光量分布は図 5.16 となった。PMT 測定の結果とは異なり、PC の割合増加に対する光量増加は確認できなかった。ランダウ分布のフィッティングによって求めた光量の値は PC 8%、10%、12% でそれぞれ約 11 p.e., 12 p.e., 10 p.e. であり、誤差に対して有意な差は見られなかった。原因として、3つのサンプルは Triton の量が 0.6%ほど異なっているため、PC の変化以上に Triton の割合の影響が大きく現れた可能性がある。

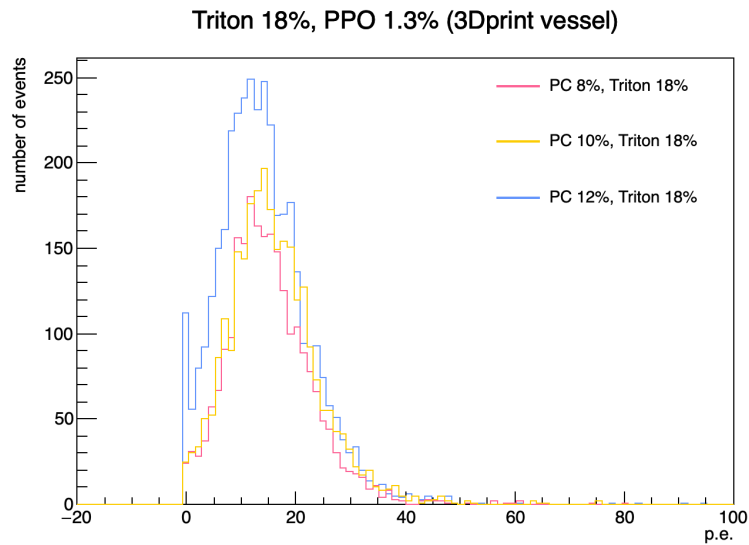


図 5.16: PC の割合の異なる WbLS サンプルの小型容器測定の光量分布

表 5.7: PC の割合の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	容器の製作	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
PC 8 %	3D プリンタ	71.0	2.0	17.7	8.0	1.3	<0.01	11.2 (2.4)
PC 10 %	3D プリンタ	68.6	2.0	18.0	10.1	1.3	<0.01	11.9 (2.5)
PC 12 %	3D プリンタ	67.0	2.0	17.4	12.3	1.3	<0.01	9.6 (2.5)

次に、WbLS サンプルの Triton の割合を増加させた場合、PMT 測定と同様に光量が増加するかを確認した。使用した WbLS サンプルは Triton 16%, 18%, 20%, 22% であり (表 5.8)、板加工製作による容器に封入し、周りに反射材は設置せずに測定を行った。これらのサンプルの光量分布は図 5.17 のようになった。Triton の 4 % の増加に対して光量分布が増加傾向が見られた。フィッティングで求めた光量の値は Triton 16%, 18%, 20%, 22% でそれぞれ約 10 p.e., 13 p.e., 14 p.e., 14 p.e. となり、Triton 4% の増加によって光量値が約 4 p.e. 増加した。よって、Triton を増加させることが WbLS サンプルの光量増加につながるということがわかった。また、Triton 20% と 22% で光量に変化がないことから、Triton の割合 20% の方が水の割合を高く保った状態で比較的高い光量となるサンプルを得ることが期待できる。

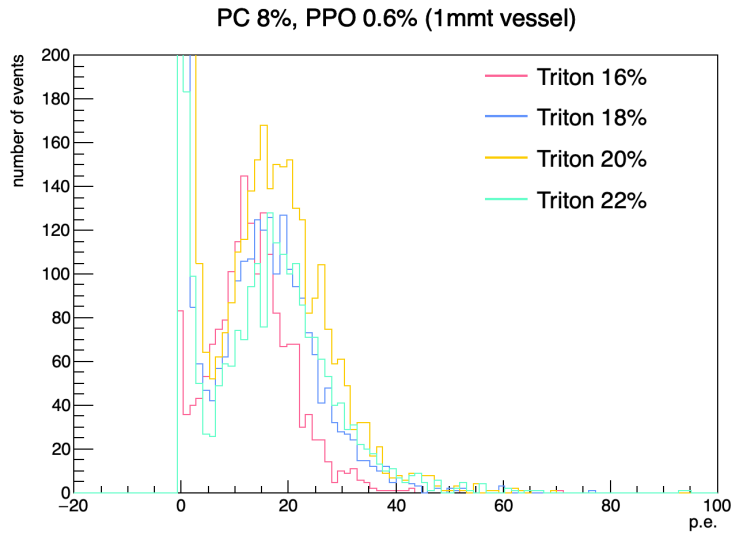


図 5.17: Triton の割合の異なる WbLS サンプルの小型容器測定の光量分布

表 5.8: Triton の割合の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	容器の製作	水 [%]	SDS[%]	Triton[%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [p.e.]
Triton 16 %	板加工	73.0	2.0	16.1	8.4	0.6	<0.01	10.0 (2.3)
Triton 18 %	板加工	71.2	2.0	17.8	8.4	0.6	<0.01	12.8 (3.0)
Triton 20 %	板加工	69.0	1.9	20.0	8.4	0.6	<0.01	13.9 (2.9)
Triton 22 %	板加工	67.0	1.9	22.2	8.4	0.6	<0.01	14.2 (3.4)

また、PPO の割合の異なるサンプルの光量分布を比較した。比較するサンプルは表 5.9 に示したように、SDS 2 %、Triton 18 %、PC 8.4 %であり、PPO の割合が 0.6 %と 1.3 %のものである。光量分布は図 5.18 のようになり、PPO 0.6 %の分布が高い方にピークを持つが、高発光量側のテール部分に違いは現れなかった。光量の値を見ると、PPO0.6 %のサンプルで約 13 p.e.、PPO1.3 %で約 11 p.e. であり、PPO0.6 %のサンプルが約 1.5 p.e. ほど高い値となった。小型容器での測定は PMT 測定とは異なり、PPO0.6 %のサンプルの光量が僅かながら高い。よって、ファイバー読み出しで水の割合を高く保ったまま高い光量をもつ WbLS サンプルを得るためには、PPO の割合は 1.3% より 0.6% の方が良いことが予想される。

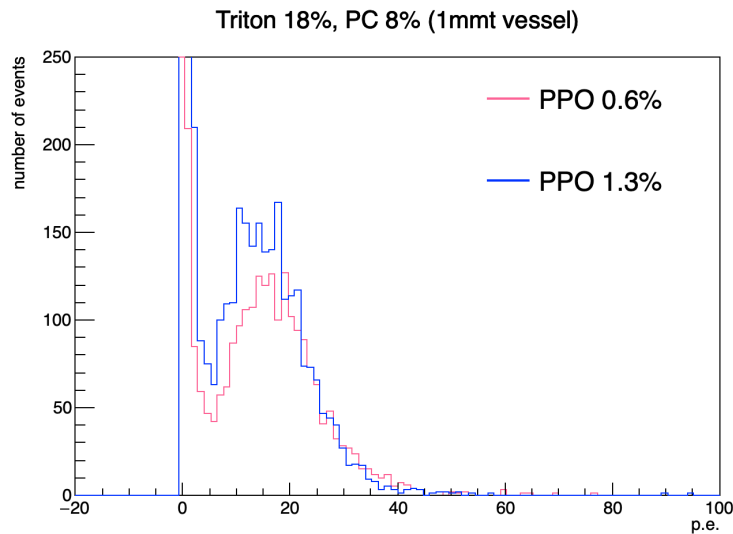


図 5.18: PPO の割合の異なる WbLS サンプルの小型容器測定的光量分布

表 5.9: PPO の割合の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	容器の製作	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
PPO 0.6 %	板加工	71.2	2.0	17.8	8.4	0.6	<0.01	12.9 (3.0)
PPO 1.3 %	板加工	70.2	2.0	18.1	8.3	1.3	<0.01	11.4 (2.5)

### 5.5.5 界面活性剤の異なる WbLS の光量比較

界面活性剤の種類を変えた場合に、ファイバー読み出し測定で PMT による WbLS 光量測定と同様に光量分布に違いが現れるかを確認した。使用したサンプルの配合は表 5.10 の通りである。研究室温度の 30 °C での測定結果は図 5.19 となった。PMT での測定による結果と異なり、光量分布に差がなく、全てのサンプルで約 8 p.e. のピークをもつことが確認できた。PMT による光量測定と異なる結果となった原因として、PMT とファイバーでは吸収スペクトルが異なることが影響したのだと考えている。また、PMT による WbLS 光量測定で高発光量であった TERGITOL のサンプルについてはゲル状であったため、容器に封入するにあたってサンプル内に変化が起きたのではないかと考えている。ゲル状のサンプルは、振動などによって一部液体になるなど不安定なサンプルであることが多く、TERGITOL も不安定であった可能性が高い。

以上から、界面活性剤の種類を変更しても、サンプル間の光量に大きな差がないことがわかった。

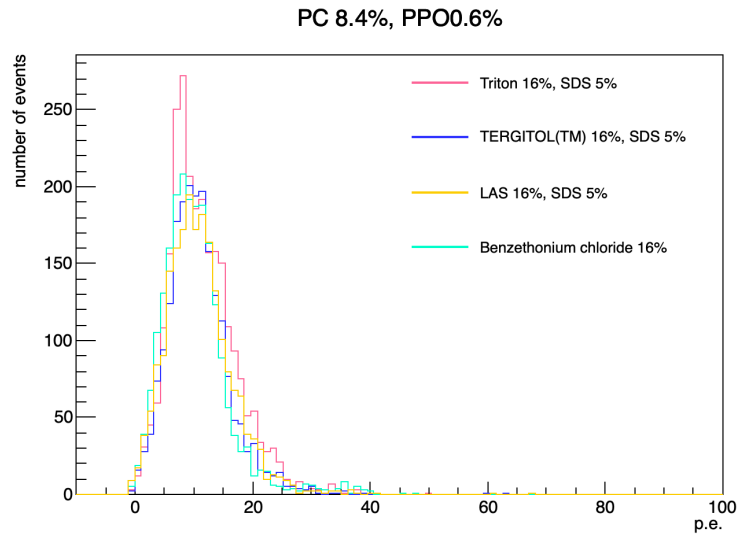


図 5.19: 室温 30 °Cでの界面活性剤の異なる WbLS サンプルの小型容器測定の光量分布

表 5.10: 界面活性剤の異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS[%]	界面活性剤 [%]	PC[%]	PPO[%]	Bis-MSB[%]	光量 [p.e.]
Triton	70.4	5.0	15.7	8.3	0.6	<0.01	8.0 (1.7)
LAS	70.0	5.0	16.0	8.5	0.6	<0.01	7.7 (1.6)
塩化ベンゼトニウム	74.8	-	15.9	8.6	0.6	<0.01	6.8 (1.7)
TERGITOL™	70.0	5.1	16.1	8.2	0.6	<0.01	8.1 (1.6)

次に、セットアップ全体を恒温槽の中に入れ、温度 20 °Cで測定を行ったところ、各界面活性剤の光量分布に違いが現れず、約 14 p.e. あたりにピークをもつ分布となった(図 5.20)。温度 30 °Cと 20 °Cを比較すると、20 °Cでの光量分布が全体的に高発光であり、ピーク値を比較すると 20 °Cでの光量が約 6 p.e. ほど大きな値となった(表 5.11)。

原因は不明であるが、今回のセットアップは温度変化によって光量値が変化することがわかった。サンプル間の比較測定を行う際、日にちを空けずに測定を行なっているため、この変化に対して対策を行っていない。以上から、今回の測定では温度変化に対して脆弱であったため、異なる試験に対して単純に光量分布の比較を行うことができないことがわかった。ただし、新前置検出器の設置場所は温度が 20 °Cであるため、これまでの測定した光量値より高い値が測定される可能性がある。

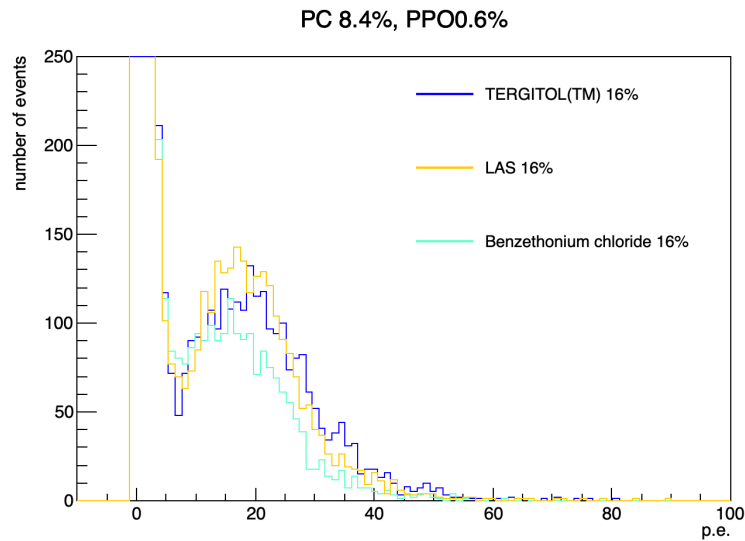


図 5.20: 20 °C の WbLS サンプルの小型容器測定的光量分布の比較

表 5.11: 温度 20 °C の界面活性剤の異なる WbLS サンプルの詳細

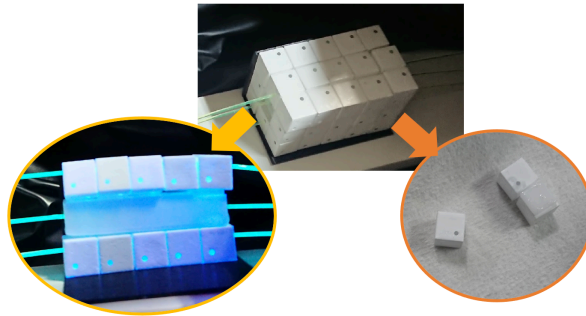
サンプル	水 [%]	SDS [%]	界面活性剤 [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
LAS	70.0	5.0	16.0	8.5	0.6	<0.01	14.5 (2.8)
塩化ベンゼトニウム	74.8	-	15.9	8.6	0.6	<0.01	12.4 (2.9)
TERGITOL™	70.0	5.1	16.1	8.2	0.6	<0.01	14.3 (3.4)

### 5.5.6 課題

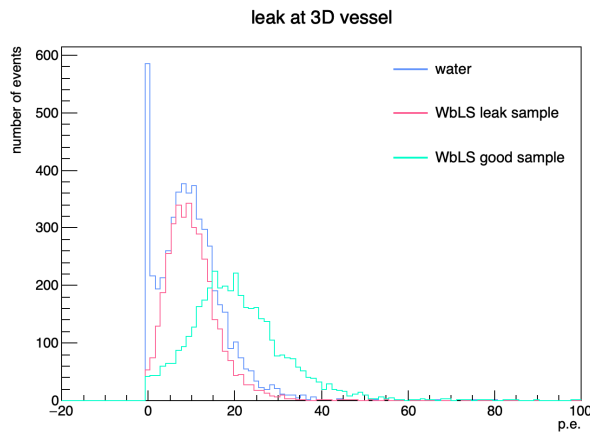
主な課題として、小型容器からの WbLS サンプルの漏洩と、ファイバーの溶解による WbLS の光量減少がある。

まず、小型容器からのサンプルの漏洩についてだが、容器の底面及び側面から染み出す場合と容器と蓋の隙間から漏洩する場合の 2 ケースが見られた。実際には容器からの染み出しとして図 5.21 のような例がある。測定後にセットアップを確認した際に漏洩を確認したが、光量分布にも漏洩による影響が見られ、表 5.12 より、WbLS が漏洩した場合は光量の減少し、水と同じ光量であることからシンチレーション光による発光を読み出していないことがわかる。





(a) WbLS サンプルが漏洩した小型容器での測定のセットアップの様子 (中央) と容器にブラックライトを照射した様子 (左下) とサンプルが染み出したために一部溶解したプラスチックシンチレータ (右下)



(b) 漏洩した場合 (赤線) と漏洩していない場合 (水色線) のサンプルの光量分布比較

図 5.21: WbLS サンプルが漏洩した小型容器

表 5.12: 3D プリンタで製作した小型容器から漏洩したサンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
water	100	-	-	-	-	-	6.9 (2.0)
leak サンプル	67.0	-	20.4	11.2	1.4	<0.01	6.5 (1.8)
good サンプル	67.3	-	19.8	11.5	1.4	<0.01	14.9 (3.2)

詳しく原因を見ていくと、容器の底面及び側面からの漏洩は、容器の種類によって漏洩の仕方が異なることがわかった。

3D プリンタによる小型容器では、容器に封入してから 1 週間から数ヶ月ほど時間が経つと容器から染み出すケースが見られた。これは容器の製作方法として、熱によって溶かした容器材料を層状に重ねていく際に隙間ができたためだと考えている。3D プリンタの造形時の温度などの設定を変更し、改善を試みたが漏洩を防ぐことができなかった。

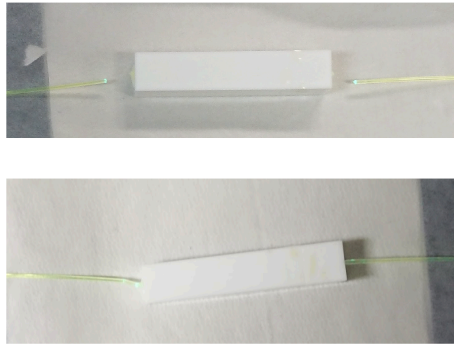
一方板加工製作による容器では、板を接着してる隙間から染み出すケースが見られた。全ての容器から

WbLS が漏洩していないので、サンプルによっては接着剤を溶かしやすいものがある可能性がある。こちらは原因を調査中である。

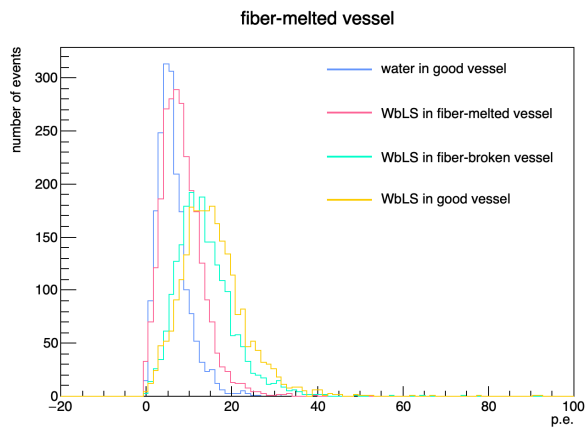
また蓋との隙間からサンプルの漏洩では、隙間からサンプルが染み出し、プラスチックシンチレータを溶かすケースが見られた。原因としては、容器と蓋の隙間を埋めるためのオプティカルセメントがサンプルを封入していないことだと考えている。オプティカルセメントは、耐薬品性の高いエポキシ樹脂に硬化剤と呼ばれる有機溶剤の一種を混ぜ、化学反応で両者が結合することで物体を接着することができる。WbLS サンプルに含まれる界面活性剤などがエポキシ樹脂と硬化剤の混合物に溶けるため、オプティカルセメントが固まる前にサンプルが触れた場合、サンプル自体の汚染が起こる他、セメントが固まりにくくなることや、オプティカルセメントに完全に溶解することで容器の外に漏洩する。よって対策として、WbLS サンプルを容器の容量限界まで封入せず、容器の内部以外に WbLS が付着した場合は拭き取ることで、オプティカルセメントが固まるまでサンプルを触れさせないようにした。ただし隙間を完全に塞ぐと容器材料が水分を含むことで膨張して変形する可能性がある。そのため、完全に隙間を埋めることはせず、WbLS サンプルが漏洩しないように容器を大きく傾けたり揺らさないようにしたが、漏洩を完全に防ぐことができなかった。

次に、ファイバーの溶解による WbLS の光量減少についてだが、測定した光量分布では、同割合のサンプルより光量が減少しているケースや、前回の測定から 1 ヶ月経った結果と比較した場合に著しく光量が減っているケースが見られ、これらの容器は 1,2 ヶ月経つとファイバーが折れた。原因として、ファイバー表面の傷から WbLS が染み出し、ファイバーのコア部分が溶解したと考えている。実際にファイバーが折れた容器と光量分布を図 5.22 に、封入したサンプルの物質の割合と光量値を表 5.13 に示した。同じ物質の配合割合であるサンプルを使用しているが、ファイバーに異常がある場合、問題のない場合と比較すると光量が低いことがわかる。ファイバーが溶解した場合で最も光量が低く、約 50% の減少となった。また、ファイバーが折れた場合でも 1 p.e. の減少が見られた。

長期間安定してファイバーでの読み出しを行う場合は、ファイバーの表面に傷がつかないようにする必要がある。そのため、事前に傷がないか確認することや、クラッドの厚いファイバーの使用の検討が求められる。



(a) 容器の端付近でファイバーが切れた様子 (上) と容器の端付近でファイバーが大きく曲がっている様子 (下)



(b) 後にファイバーに問題が発見された容器と問題のない容器の光量分布比較

図 5.22: ファイバーに問題が見られた小型容器の様子

表 5.13: 測定で使用したサンプルの詳細

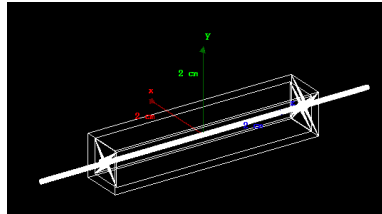
サンプル	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]	光量 [p.e.]
water	100	-	-	-	-	-	4.0 (1.1)
melted	68.5	2.0	18.1	10.1	1.3	<0.01	5.4 (1.5)
broken	68.6	1.9	18.3	9.8	1.3	<0.01	9.6 (2.2)
good	68.6	2.0	18.2	9.9	1.3	<0.01	11.4 (2.4)

## 5.6 光学シミュレーション

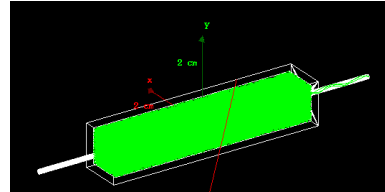
用いた WbLS サンプルの単位エネルギーあたりの光量と吸収長、反射材の反射率を見積もるため、ファイバーと MPPC による小型検出器での測定の Geant4 による光学シミュレーションを行った。

測定では上下に配置したシンチレータによって容器の鉛直方向を通過した宇宙線による光量をみた。シミュ

レーションでは宇宙線の代わりに容器の上方から  $\mu^-$  粒子を発生させ、容器通過時のシンチレーション光をファイバーで読み出すことを想定した (図 5.23)。



(a) 粒子を発生させる前



(b) 粒子を発生させた後。シンチレーション発光により生成された光学フォトンが緑色の線で示されている

図 5.23: Geant4 での小型容器によるシミュレーションの様子

WbLS 小型容器は 3D プリンタで製作したデザインと同じように、大きさ  $10 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$ 、厚さ 1 mm の容器に、ファイバーを通すための直径 2 mm の穴を開けた反射材の構造を想定した。ただし、実際にはファイバーの穴を光学セメントで埋めたが、シミュレーション上では埋めていない。

WbLS や容器の設定は表 5.14 に示した。プラスチックシンチレータの単位エネルギーあたりの光量が約  $\sim 20000 \text{ p.e./MeV}$  であることや、WbLS の界面活性剤および液体シンチレータの配合割合が 30% であることから、WbLS の単位エネルギーあたりの光量は  $1200 \sim 6000 \text{ p.e./MeV}$  の範囲で値を変更した。また吸収長について、水の吸収長が 1 m 以上であることから WbLS の吸収長は  $30 \sim 80 \text{ cm}$  の範囲で値を変えた。容器の反射率は測定結果から 100% 未満であることがわかっているが、シミュレーションでは 50 ~ 100% の範囲で値を変更した。

表 5.14: 小型容器測定シミュレーションの設定

	項目	設定値
WbLS	反射率	1.34
	単位エネルギーあたりの光量	$1200 \sim 6000 \text{ p.e./MeV}$
	吸収長	$30 \sim 80 \text{ cm}$
容器	物質	PMMA (密度 $1.19 \text{ g/cm}^3$ )
	反射率	50 ~ 100%
波長変換ファイバー	コア反射率	1.59
	第一クラッド反射率	1.49
	第二クラッド反射率	1.42

また、シミュレーションではファイバーの端に到達した光学フォトンの個数を数え、得られた光子数に対して  $\sigma \sim 0.1 \text{ p.e.}$  の正規分布による広がりを持たせ、宇宙線による WbLS の発光量とした。

500 MeV の  $\mu^-$  を容器上面から y 方向から立体角  $\theta \leq \pi/3$  で打ち込んだ場合の結果が図 5.24 である。また、得られた光量分布からランダムフィッティングを行い、求めた光量値が表 5.15 である。

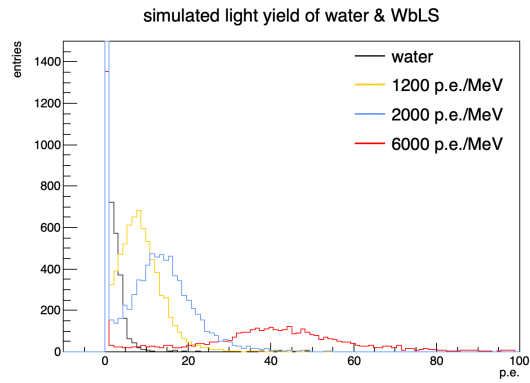
まず、水のシミュレーションでの光量値は、容器の反射率が 100% の場合に 0.3 p.e. であったことから、小型容器でのチェレンコフ光の発光は微弱であり、測定での水の  $\sim 5 \text{ p.e.}$  の発光は主に周囲のプラスチックシン

チレータからのクロストークによる発光であることがわかった。測定では、WbLS は水に比べて～10 p.e. の光量であったことから、容器の反射率が100%、WbLS の吸収長50 cm であれば、WbLS の単位エネルギーあたりの光量は2000 p.e./MeV 程度だと予測できる。

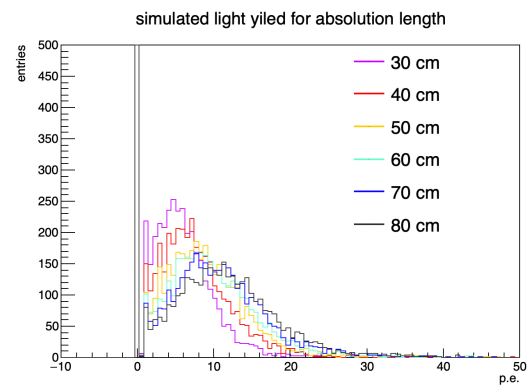
次に、WbLS の吸収長を10 cm 変化させると、シミュレーション光量値は1 p.e. 程度変化した。つまり、WbLS の単位エネルギーあたりの光量を増加させても、吸収長が短くなった場合、宇宙線による光量としては差があわられない場合がある。

最後に、容器表面での反射率を変更させた場合だが、容器の反射率100% のシミュレーション光量値と比較すると、反射率90% では0.40 倍、反射率80% では0.23 倍になる。容器の反射率10% の減少に対し、シミュレーション光量値は～50% 減少する。

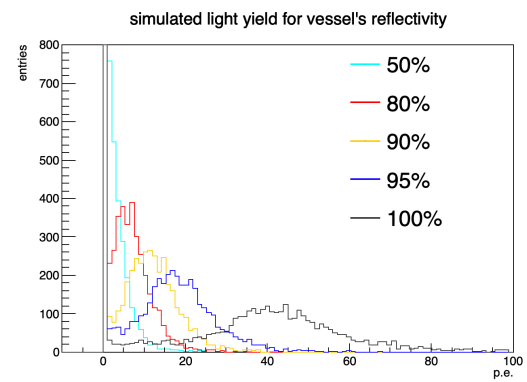
以上から、容器の反射率によってシミュレーション光量値が大きく変化することが確認された。WbLS の吸収長が50 cm として、反射率100% であれば2000 p.e./MeV、反射率90% であれば6000 p.e./MeV 程度の単位エネルギーあたりの光量を持つと推測できる。容器の反射率は測定では周りを反射材で囲った際に60～70% であったことと、反射材を囲っても空気の間隙が空いており、反射材を囲った場合でも100% 未満であると推測できる。よって反射率容器の反射率は90%、WbLS は～6000 p.e./MeV 程度の単位エネルギーあたりの光量を持つことを想定し、今後のシミュレーションではこの値を主に用いている。



(a) WbLS の単位エネルギーあたりの光量を変えた場合



(b) WbLS の吸収長を変えた場合



(c) 容器の反射率を変えた場合

図 5.24: 小型検出器の宇宙線測定での光量分布のシミュレーション結果

表 5.15: 各設定でのシミュレーション光量値。カッコ内にフィッティングの誤差  $\sigma$  を示した。

	WbLS		容器	シミュレーション
	光量 [p.e./MeV]	WbLS 吸収長 [cm]	反射率	光量値 [p.e.]
(a)	(water)	-	100	0.3 (0.1)
	1200	50	100	5.4 (1.4)
	2000	50	100	10.6 (2.1)
	6000	50	100	37.2 (6.1)
(b)	1200	30	100	3.5 (1.2)
	1200	40	100	4.4 (1.5)
	1200	50	100	5.3 (1.8)
	1200	60	100	6.4 (1.8)
	1200	70	100	7.2 (2.0)
	1200	80	100	7.7 (2.3)
(c)	6000	50	50	0.0 (0.4)
	6000	50	80	4.3 (1.4)
	6000	50	90	8.5 (1.9)
	6000	50	95	14.7 (2.7)
	6000	50	100	37.2 (6.1)

## 5.7 まとめ

波長変換ファイバーによる光量測定試験では、製作した WbLS を小型容器に封入し、波長変換ファイバーと MPPC によって読み出しを行って宇宙線の光量を測定した。

まず、開発した WbLS はファイバーと MPPC による読み出しで可能であることが確認できた。

次に、3D プリンタで製作した容器と板加工の製作による容器を使用し、光量を比較したところ、3D プリンタによる容器で光量が大きな値となった。水のサンプルでも 3 p.e. ほど光量が高くなったことから、3D プリンタの容器では周りに配置したプラスチックシンチレータからの光をよく通しており、反射率が低いことがわかった。また、板加工による容器で、容器の厚さを 1.0, 1.5, 2.0 mm と変えた場合、厚さ 1.5 mm で高発光量となった。よって、容器の厚さを最適化することで反射率を上げることができる。

また、WbLS の物質の配合割合や種類を変更して測定を行った。PC の割合を 4% 変化させたが、測定誤差に対して有意な差は現れなかった。また、Triton の割合を 4% 増加させた場合、光量は 4 p.e. ほど増加した。一方 PPO の割合が 0.6% と 1.3% のサンプルで比較したところ、わずかながら 0.6% のサンプルが高い光量となった。この結果は PMT による WbLS の光量測定とは異なり、ファイバーと MPPC による読み出しで光量を増加させるには界面活性剤の割合を高くすることが良いことがわかった。また、界面活性剤の種類を変更しても光量に差がなかったことから、高発光量の WbLS を製作するには界面活性剤の割合を高くした場合でも安定して存在する種類を選択した方が良い。

一方、本測定での光量値は温度依存が大きく、温度が低いと光量値が高くなることが確認された。

以上を踏まえ、光量が高いサンプルは Triton 20% 前後のサンプルである。比較的高い光量をもつサンプル

は表 5.2 で示した WbLS1, WbLS 2 であり、クロストークを除くとプラスチックシンチレータに対してそれぞれ約 25%, 12% の光量であった。他に高い光量だったサンプルは、表 5.8 の Triton22%、20% のサンプルであり、プラスチックシンチレータに対して約 20% の光量値となった。ただし、WbLS 1 と Triton22% のサンプルはゲル状で不安定になりやすいことから、検出器に用いるには WbLS2 あるいは Triton20% のサンプルが良い。

課題として、容器からの WbLS 漏洩やファイバーのコア部分の溶解がある。

また、光学シミュレーションにより、容器の反射率 90%、WbLS の単位エネルギーあたりの光量は 6000 p.e./MeV と見積もった。この場合、ファイバーでの読み出し光量は吸収長 50 cm で 8.5 p.e. 程度となる。



## 6 陽電子ビームテスト

### 6.1 目的

WbLS が HK の新前置検出器と使用できるか検討するため、新前置検出器と同じ構造をもつ WbLS 小型試作機を新たに製作し、陽電子ビームテストを行った。

小型試作機として 2 つの WbLS 検出器を使用しており、主に界面活性剤 Triton の割合の異なるサンプルと、界面活性剤の異なるサンプルを封入している。どちらの WbLS 検出器も、 $4 \times 4$  セルの構造を持った複数の容器に開発した異なる種類の WbLS を封入させ、ファイバーと MPPC によって読み出しを行うデザインとなっている。

主な目的は、光量の位置一様性を確認することと、複数の WbLS サンプルの光量値を比較することで新前置検出器に適したサンプルを探すことである。

これまで開発した WbLS について、サンプルの一部に水と液体シンチレータの層に分離する現象が見られている。うまく混ざっている WbLS サンプルに対しても、液体シンチレータと界面活性剤が液体中に均一に存在していない可能性がある。その場合、セル構造の WbLS 検出器では、セルの位置によって液体シンチレータの濃度によって光量に変化が現れる。検出器全体の WbLS の均一性を確認するため、各セルの中心位置での光量を比較する。加えて、セル内での WbLS の均一性を確認するため、1 セル内での WbLS の光量一様性を見る。

また、複数種類の WbLS サンプルを使用し、サンプルごとの光量値を比較する。特に、ファイバーと MPPC による宇宙船の光量測定では Triton の割合を増加させることで光量が増加する傾向が見られたが、複数セル構造を持つ検出器でも界面活性剤の割合などによって光量に変化するかを確認する。

### 6.2 ビームライン

今回の測定は、東北大学電子光理学研究センター (Research Center for Electron Photon Science, ELPH) で行った。

ELPH でのビームラインは図 6.1 のようになっており、今回は GeV ガンマ照射室で測定を行った。

電子が 100MeV の電子線形加速器によって加速され、その後電子円形加速器であるブースター・ストレージリング (BST リング) でおよそ 1.3GeV まで加速される。電子ビームの制動放射によって発生した  $\gamma$  線を用い、ターゲットに照射させて電子と陽電子を生成する。この粒子を電磁石によって曲げることで 500 MeV の陽電子を取り出し、ビームを得る。

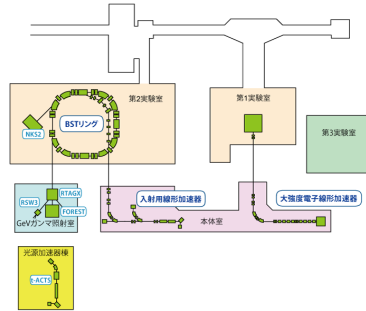


図 6.1: ELPH でのビームライン (ELPH ホームページ [30] より引用)

GeV ガンマ照射室では  $30^\circ$  と  $23^\circ$  のビームラインがあるが、ビームの広がりを抑えるために  $23^\circ$  ビームを使用した。

また、使用したビームの設定は表 6.1 の通りである。

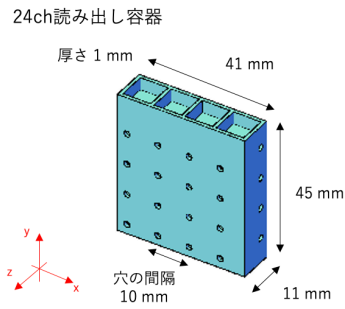
表 6.1: ビームの設定

項目	設定
粒子	陽電子
エネルギー	500MeV
ビームの広がり	$\sigma \sim 7.5 \text{ mm}$
レート	$\sim 500 \text{ kHz}$
電磁石電流値	300.1 A

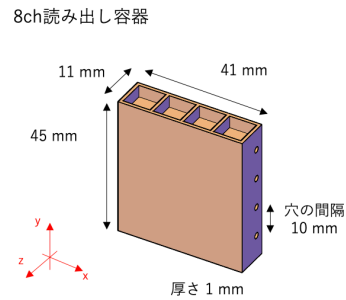
## 6.3 実験方法

### 6.3.1 WbLS 検出器

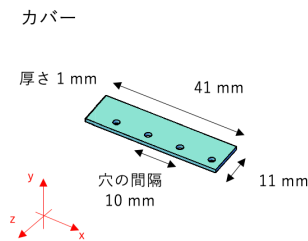
WbLS 検出器はビームテスト用に新たに製作した。容器のデザイン (図 6.2) はカバーを外した容器のみの状態で大きさ  $41 \times 45 \times 11 \text{ mm}^3$  となり、大きさ  $41 \times 1 \times 11 \text{ mm}^3$  であるカバーを付けると外形  $42 \times 46 \times 11 \text{ mm}^3$  となる。容器は内部に  $9 \times 9 \times 9 \times \text{mm}^3$  の空洞のセルを 16 個持つ。容器の上部には WbLS を封入しやすくするための  $9 \times 9 \times 4 \text{ mm}^3$  の空洞 4 個を持ち、セル間の壁は厚さ 1 mm で一定である。壁には読み出しの波長変換ファイバーと通す直径 2 mm の穴が空いており、x,y,z 方向から読み出しを行う 24ch 検出器と x,y 方向から読み出しを行う 8ch 検出器の 2 種類のデザインを採用した。これは、1 回のビームランに対し、24ch 読み出し検出器 1 つと 8ch 読み出し検出器 4 つを並べて使用するために製作した。また、材料は白色のアクリル系樹脂であり、光造形方式の 3D プリンタ (ピッチ 0.018 mm) で G-tech 社に製作を依頼して用意した。ファイバーとカバーを容器に固定する際にはオプティカルセメントを使用し、ファイバーの先は容器の壁に合うようにした。



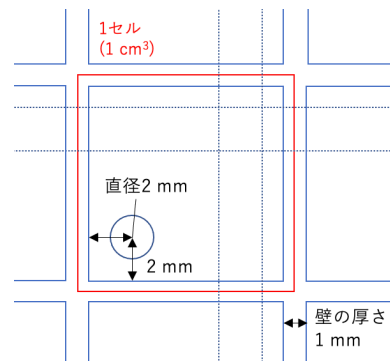
(a) 24ch 読み出し容器のデザイン



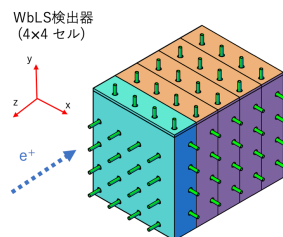
(b) 8ch 読み出し容器のデザイン



(c) 容器のカバーのデザイン



(d) 1セルのデザイン



(e) WbLS 検出器のデザイン。24ch 読み出し容器と 4つの 8ch 読み出し容器を並べた構造を持つ。

図 6.2: ビームテストで使用した WbLS 検出器のデザイン

測定では WbLS サンプルを 8 種類使い、各種類を 1 つの容器に入れ、容器を 5 つ並べることで WbLS 検出器を 2 つ用意し、WbLS 検出器 1、WbLS 検出器 2 とした。封入した WbLS サンプルは表 6.2, 6.3 である。ファイバーと MPPC の読み出しによる小型容器を用いた宇宙線の光量測定で高発光量であったサンプル 2 種類 WbLS1、WbLS2(表 5.2) をもとに、新たに WbLS1 と WbLS2 のサンプルを製作し、測定に用いた。特に安定性を高めるため、WbLS 2 では SDS0.8% を追加している。WbLS 検出器 1 では、24ch 読み出し容器に WbLS1 のサンプルを入れた。8ch 読み出し容器にはビーム上流側から、界面活性剤の種類異なるサンプル 3 種類を Triton16、TERGITOL16、LAS16 の順に封入しており、ビーム最下流側にはプラスチックシンチレータキューブを  $4 \times 4$  個配置した。WbLS 検出器 2 では主に Triton の割合異なるサンプルを封入した容

器を用いており、24ch 読み出し容器は Triton22 を封入し、8ch 読み出し容器はビーム上流側から Triton20, Triton18, Triton16, WbLS2 のサンプルを封入している。Triton16 のみ SDS の割合が 5% となっているが、SDS の割合を変更しても光量値に影響はないため、WbLS 検出器 1 と同じものを用いた。また、搬入過程で容器から漏れてしまったサンプルが 3 種類あり、これらの検出器は測定に使用しなかった。

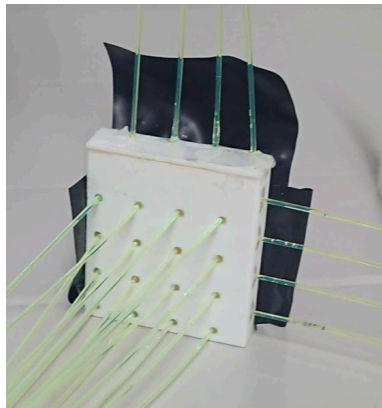
表 6.2: WbLS 検出器 1 に封入した界面活性剤の種類異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS [%]	界面活性剤 [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
WbLS1	68.1	2.7	20.4	7.6	1.2	<0.01
Triton16	70.0	5.0	16.0	8.5	0.6	<0.01
TERGITOL16	70.0	5.0	16.0	8.4	0.6	<0.01
LAS16	70.0	5.0	16.1	8.3	0.6	<0.01

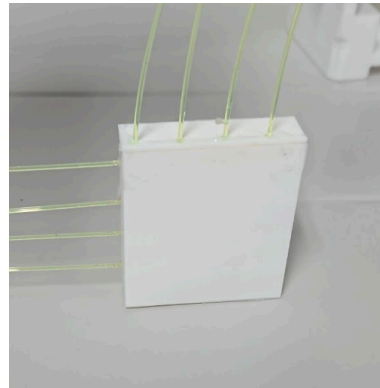
表 6.3: WbLS 検出器 2 に封入した Triton の割合異なる WbLS サンプルの詳細

サンプル	水 [%]	SDS [%]	Triton [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
Triton22	67.0	2.0	22.0	8.3	0.6	<0.01
Triton20	69.2	2.0	19.8	8.4	0.6	<0.01
Triton18	70.9	2.0	18.2	8.4	0.6	<0.01
Triton16	70.0	5.0	16.0	8.5	0.6	<0.01
WbLS2	67.0	0.8	20.0	11.0	1.2	<0.01

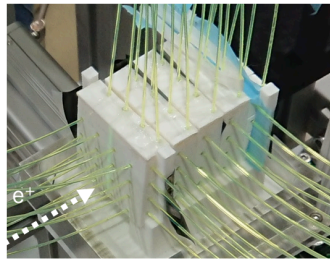
実際にサンプルを封入した容器及び WbLS 検出器が図 6.3 である。各容器の間に遮光テープ及び遮光シートを挟むことで、容器間でのクロストークを防いだ。また容器同士はテープで簡単に固定し、主に固定台に挟むことで配置を安定させた。



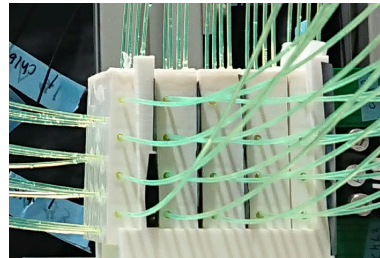
(a) 24ch 読み出し容器



(b) 8ch 読み出し容器



(c) WbLS 検出器 1。24ch 読み出し容器と3つの8ch 読み出し容器とプラスチックシンチレータキューブ16個が並んだデザインとなっている。



(d) WbLS 検出器 2。24ch 読み出し容器と4つの8ch 読み出し容器が並んだデザインである

図 6.3: ビームテストで使用した WbLS 検出器

WbLS 検出器の読み出しとセルについては、図 6.4 のように定めた。z 方向の読み出し ch 番号はセル番号に対応しており、x 方向に通したファイバーでの読み出しを x 方向読み出し、y 方向に通したファイバーでの読み出しを y 方向読み出しとしている。また、ビームヒット位置を表す時、特に断りがない限り、検出器の  $4 \times 4$  セルの中心を xy 平面の中心とし、水平にファイバーの読み出す方向を x 方向、鉛直にファイバーを読み出す方向を y 方向、ビーム方向にファイバーを読み出す方向を z 方向としている。ビームは z 方向正から負方向へ照射する。また、 $z = 0$  mm の位置は 24ch 読み出し検出器の中心とする。

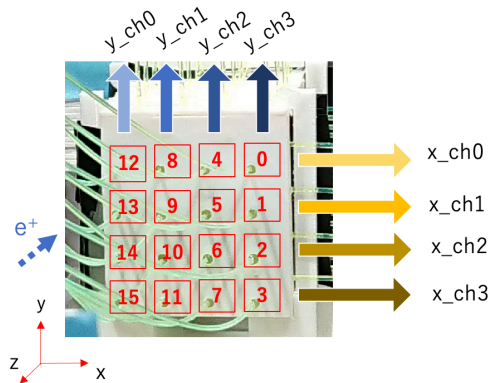


図 6.4: WbLS 検出器の読み出し ch の位置

### 6.3.2 ホドスコープ

WbLS 検出器でのビームのヒット位置を測定するため、WbLS 検出器の上流と下流にホドスコープ (図 6.5) を配置した。ホドスコープは幅 1.7 mm のプラスチックシンチレータファイバーで構成されており、水平方向と垂直方向各 16 本並べ、各ファイバーの発光を MPPC で読み出す。

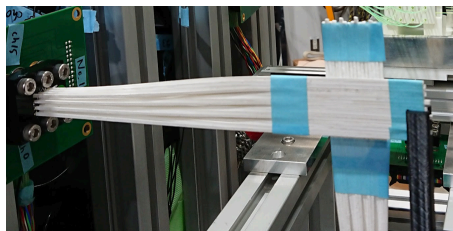


図 6.5: 上流ホドスコープ

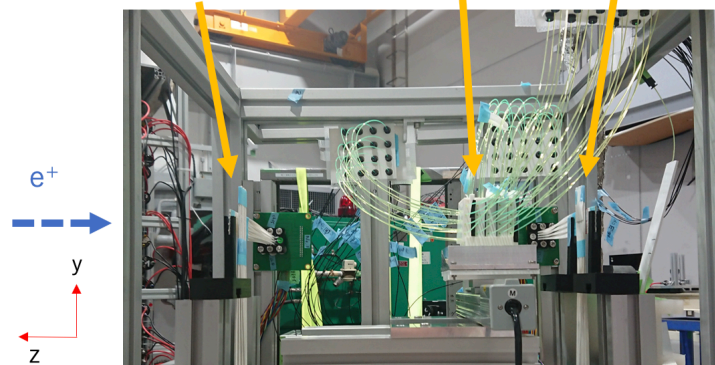
ホドスコープを構成しているファイバーのうち、ヒットしたファイバーを x,y 方向から 1 本ずつ選択することで、ビームヒット位置を特定することができる。詳しくは 6.5 節で述べる。

また、上流ホドスコープはトリガーとしても使用し、上流ホドスコープの x,y 方向の全ファイバーのうち 2ch 以上で発光が見られた場合にデータを取得した。

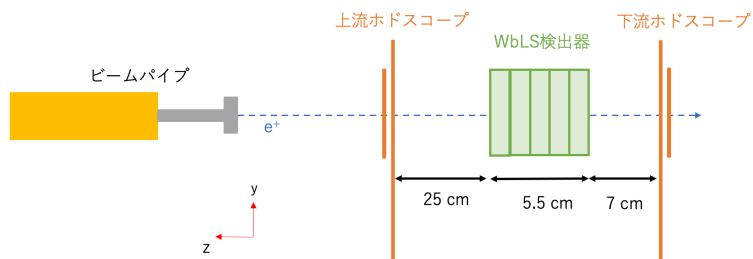
### 6.3.3 セットアップ

セットアップは図 6.6 の通りである。上流ホドスコープから 25 cm 下流に WbLS 検出器の前面を配置し、WbLS 検出器の背面から 7 cm 下流に下流ホドスコープを配置した。各検出器の位置を決める際、Geant4 によって検出器での散乱のシミュレーションを行い、今回のセットアップで散乱イベントが少ないことを確認して配置を決めた。検出器の散乱についてのシミュレーションは 6.3.4 節で詳しく述べる。

上流ホドスコープ    WbLS 検出器    下流ホドスコープ



(a) セットアップを横から見た様子



(b) 各検出器の位置関係

図 6.6: WbLS ビームテストのセットアップ

セットアップ全体は  $x, y$  方向に移動するステージに載せた (図 6.7)。このステージは実験室の外から遠隔で操作することができるため、ステージの  $x, y$  方向を動かすことでビーム照射の中心位置を変更した。

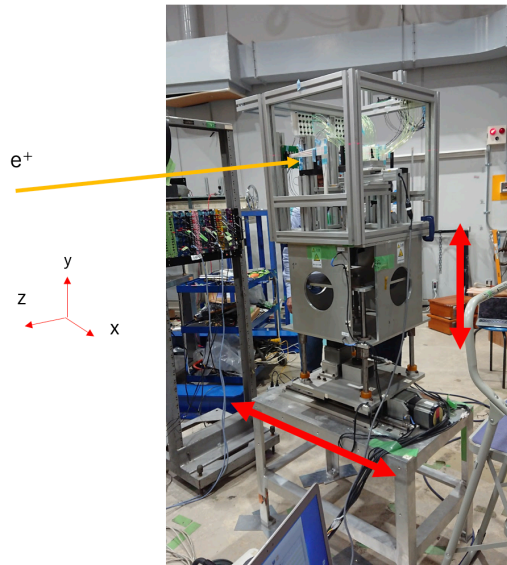


図 6.7: 検出器を載せたステージ。図中の赤矢印の方向にステージを移動することができる。

WbLS 検出器は 24ch 読み出し容器 1 つと 8ch 読み出し容器 4 つを並べているが、それぞれの容器を接着剤などで固定することはせず、3D プリンタで製作した固定台に設置し、遮光テープなどで固定台と容器を固定した。固定台は WbLS の液漏れ対策のためのアルミの受け皿に固定されている。容器同士の相対位置を動かさずに WbLS 検出器を動かすことが難しく、WbLS 検出器のみをうごかすために、x 方向に移動できる電動アクチュエータ (XA-35L-150) を使用し、受け皿ごと WbLS 検出器をアクチュエータのステージに固定した (図 6.8)。アクチュエータによって WbLS 検出器のみを動かす主な目的としては、ホドスコープの WbLS 検出器に対する検出面積を広げることである。ホドスコープの x,y 方向のファイバーによってビームのヒット位置を検出可能な領域は、ホドスコープの中心の  $27.2 \times 27.2 \text{ mm}^2$  の領域であり、WbLS 検出器とホドスコープの中心を合わせた場合、WbLS 検出器のセルを全て覆っていないデザインとなっている。ホドスコープで検出できるビームのヒット位置を広げるために、今回のセットアップではアクチュエータを導入し、WbLS 検出器での x 方向のビームのヒット領域を広げることにした。



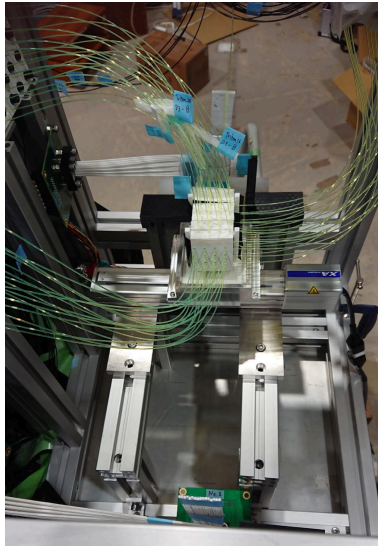


図 6.8: WbLS 検出器の配置の様子

WbLS 検出器のファイバーの端はファイバー読み出しによる小型容器検出器と同様にコネクタを取り付けており、MPPC 側のコネクタに固定した。MPPC には図 6.9 の PCB コネクタを取り付け、ヒロセ電機の本軸ケーブル (U.FL-2LP-088K1T-A) で 32ch 読み出し基板に接続し、32ch 読み出し基板は変換ケーブルで EASIROC モジュールに接続した。



図 6.9: MPPC に取り付けられた PCB コネクタ。写真では同軸ケーブルを繋いでいる。

読み出し回路は図 6.10 に示したように、WbLS 検出器及びホドスコープは EASIROC モジュールを用いて信号を読み出した。EASIROC モジュールでは、トリガーのかかった時刻での信号の波高を記録する。トリガーは、上流ホドスコープの 32ch の読み出しのうち、2 ch 以上のヒットとした。

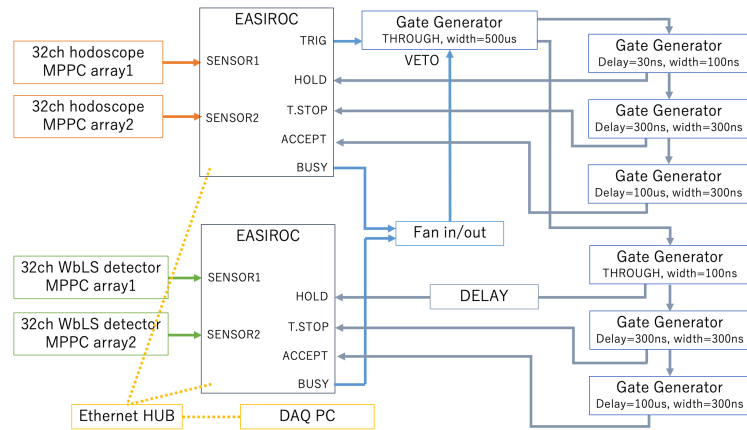


図 6.10: WbLS ビームテストの読み出し回路

最後に各検出器の中心位置を合わせるため、レーザー墨出し機を用いて調整した (図 6.11)。ただし、水平方向のビーム中心位置を検出器群の中心に合わせる際、使用したレーザーの精度が 3 mm 程度であることがわかったため、WbLS 検出器 2 の測定途中から上流ホドスコープのヒット分布から中心を合わせた (図 6.12)。この分布から、上流ホドスコープでヒットしたビームの広がり x 方向で 13 mm、y 方向で 18 mm 程度であることがわかった。

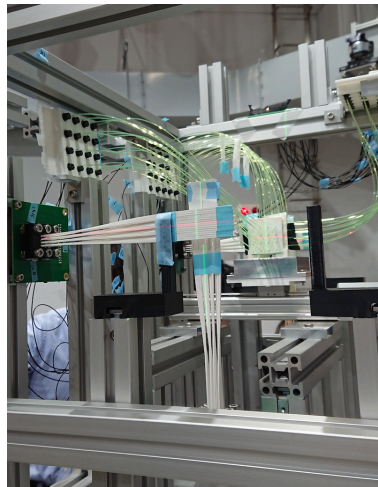
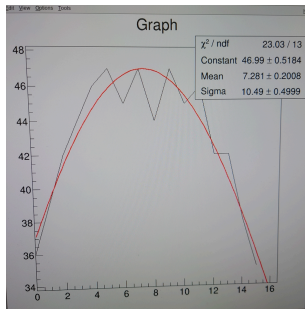
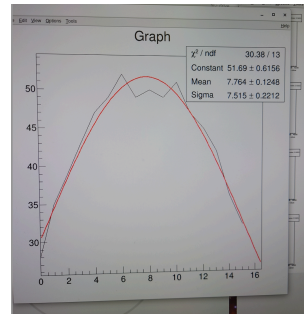


図 6.11: ビーム中心調整の様子。赤いレーザーの線と黄緑のレーザーの線の交わる点がビームの中心であり、上流ホドスコープの中心と一致するように調整している。



(a) x 方向 (縦方向はヒットエントリー数、横方向はファイバー番号)



(b) y 方向 (縦方向はヒットエントリー数、横方向はファイバー番号)

図 6.12: 上流ホドスコープでのヒット分布

### 6.3.4 検出器での散乱に関するシミュレーション

セットアップでの検出器の位置を決定するために、Geant4 によってシミュレーションを行い、ビームのヒット位置及び落とすエネルギーを見積った。シミュレーションでは WbLS 容器でヒットするイベント数を求め、実際のセットアップで検出器内での散乱による影響が少ないことを確認した。

シミュレーションのセットアップは図 6.13 に示した。陽電子ビームは図の左下にあるホドスコープから右上にある WbLS 検出器、下流ホドスコープを通過する。ただし、図中の x 方向と z 方向は今回の測定と反対方向を向いているため、解析によって測定と同じ方向に変換した。また、各検出器の位置は実際のセットアップ (図 6.6) と同じ配置であり、上流ホドスコープから 25 cm 下流に WbLS 検出器の端を設置し、WbLS 検出器の背面から 7 cm の地点に下流ホドスコープを配置した。

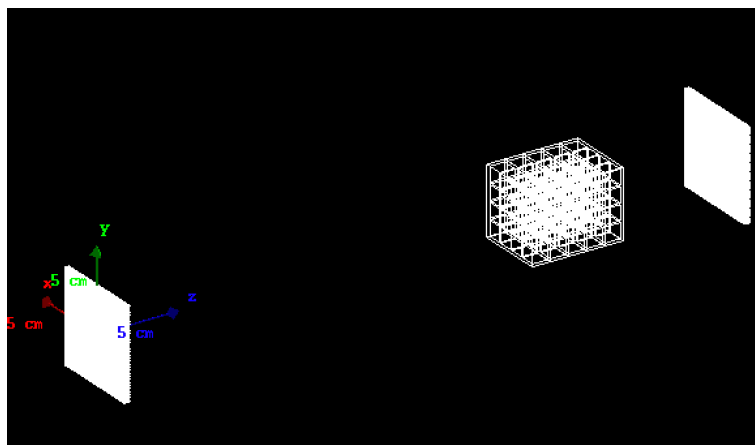


図 6.13: WbLS ビームテストの Geant4 によるシミュレーションでのセットアップ

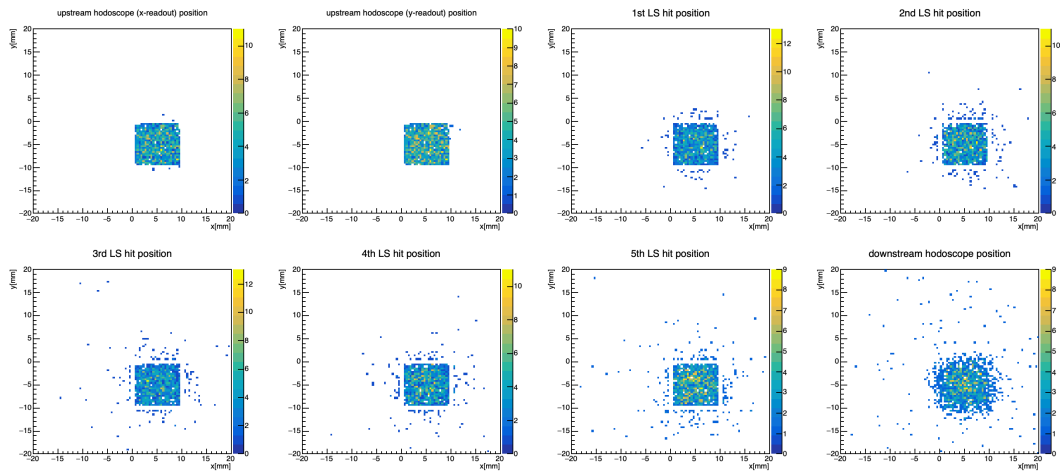
ホドスコープ及び WbLS 検出器、ビームの設定を表 6.4 に載せた。ホドスコープは x 方向読み出しファイバー群と y 方向読み出しファイバー群で分けてビームのヒット位置及びビームの落としたエネルギーを求めた。WbLS 検出器は 5 つの容器を想定し、上流側から容器の名前を LS1, LS2, LS3, LS4, LS5 とし、それぞれの容器でビームのヒット位置及びビームの落としたエネルギーを求めた。また、WbLS 検出器には波長変

換ファイバーを通しておらず、穴を開けていない。加えて WbLS 検出器の容器は全て、Triton18%, PC10%, SDS2%, PPO 1.3% のサンプルを封入した場合を想定している。実際の WbLS 検出器の細かな構造や、用いたサンプルの物質の配合割合を反映させていないが、今回のシミュレーションでは簡単に散乱の影響を確認するため、省略した。

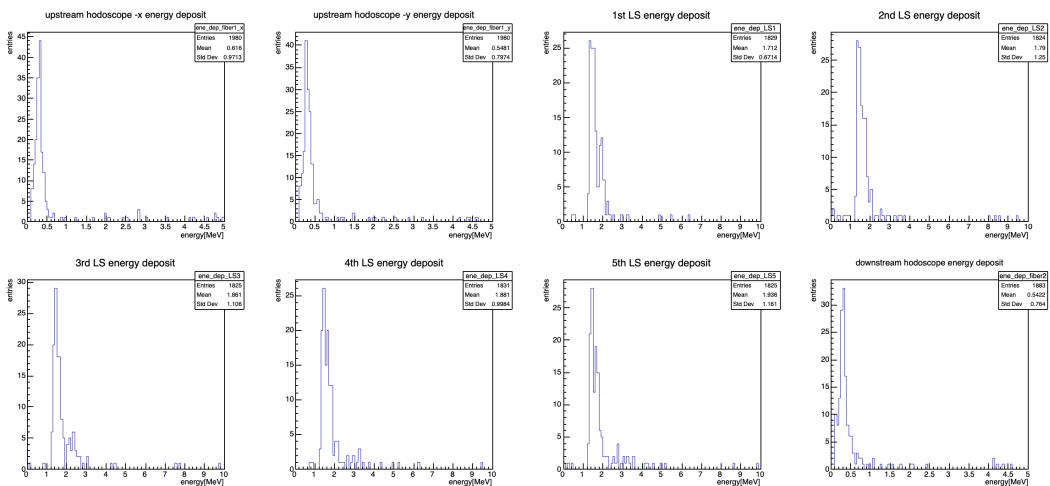
表 6.4: 小型容器測定 of シミュレーションの設定

項目	設定値	
ビーム	粒子の種類	陽電子
	エネルギー	500 MeV ( $\sigma \sim 10$ MeV)
	運動量方向	ビーム方向 $0^\circ$
	発生位置の中心	(-5, 5, -50) [mm]
ホドスコープ	物質	ポリスチレン (密度 1.2 g/cm <sup>3</sup> )
	ファイバーの形状	1.7 × 1.7 × 27.2 mm の棒状
	ファイバーの本数	x,y 方向に 16 本
WbLS 検出器	物質	水 68.7% Triton 18% SDS 2% PC 10% PPO 1.3% (密度 1.0 g/cm <sup>3</sup> )
	容器の数	5
	容器の物質	PMMA(密度 1.19 g/cm <sup>3</sup> )
	容器の大きさ	41.0 × 41.0 × 11.0 mm <sup>3</sup>
	ファイバーの有無	無し
	1 セルの大きさ	10 × 10 × 10 mm <sup>3</sup>
	1 セルに含まれる WbLS のサイズ	9 × 9 × 9 mm <sup>3</sup>

シミュレーションでは 1 万 event のデータを得た。このデータのうち、上流ホドスコープの x, y 方向読み出しファイバー群でそれぞれ 100 keV より大きなエネルギーを落としたイベントをヒットイベントとした。ヒットイベントのうち、上流ホドスコープで 1 セルの領域に含まれるイベントを取得すると 1980 event となり、全イベント数の約 20% であることがわかった。これらのイベントの各検出器でのヒット分布及び粒子の落としたエネルギー分布は図 6.14 のようになった。下流に位置する容器ほど散乱していることがわかる。



(a) 各検出器でビームがヒットした真の位置分布



(b) 各検出器でビームが通過時に落とした真のエネルギー分布

図 6.14: WbLS ビームテストの Geant4 によるシミュレーションの結果。左上から順に、上流ホドスコープ x 方向読み出しファイバー群、y 方向読み出しファイバー群、WbLS 検出器 LS1, LS2, 続いて左下から LS3, LS4, LS5, 下流ホドスコープ x 方向読み出しファイバー群のプロットとなっている。

また、WbLS 検出器の容器とホドスコープでの 1 セル内に含まれるイベント数を求め、表 6.5 にまとめた。WbLS 検出器では、各容器での 1 セル領域に含まれるイベント数は下流に位置するほど減少している。これは、粒子が大角度に散乱されたり、吸収されることで、下流の容器が粒子を検出できなくなったためである。しかし、LS1 と LS5 では差が 126 event であり、ヒットイベント 1980 event に対して約 6% の減少であった。このことから、今回の測定では容器の散乱による影響は少ないとし、容器を 5 つ並べて測定することに決めた。

また、下流ホドスコープでは上流ホドスコープと比較して、1 セル内にヒットするイベントが約 30% ほど減少する。散乱による減少を減らすため、現在の下流ホドスコープの位置はできる限り WbLS 検出器に近づけたが、1 セル内にヒットするイベントは WbLS 検出器と比較しても大きな減少であることがわかった。また以下の解析では、下流ホドスコープのデータを用いていない。これは、上流ホドスコープでヒットしたイベ

ントを選択した場合で WbLS 検出器での最下流での容器で散乱の影響が少ないこと、及び下流ホドスコープのファイバーの位置が上流ホドスコープの位置とずれている場合があったことから、下流ホドスコープを通過したイベントを選択することをしなかった。今後のより詳細な解析では、下流ホドスコープのデータを用いる予定である。

表 6.5: 各検出器での 1 セル内領域でのヒットイベント数

検出器	1 セル領域に含まれるヒットイベント数
上流ホドスコープ x 方向読み出しファイバー群	1980
y 方向読み出しファイバー群	1980
WbLS 検出器 LS1	1761
LS2	1710
LS3	1700
LS4	1691
LS5	1635
下流ホドスコープ x 方向読み出しファイバー群	1393

## 6.4 データ取得

今回の測定は 2022 年 10 月 27 日から 10 月 29 日にかけて行った。

1 日目の内容は、WbLS 検出器 1 と上流および下流ホドスコープの位置の調整や、ノイズの除去、及びデータが同期しているかの確認を行った。

2 日目は、検出器の位置の調整やノイズの除去作業を行ったあと、WbLS 検出器 1 を用いて検出器の光量の位置依存性を確認するため、ビームの中心を WbLS 検出器のセルに合わせて照射した約 8 分間のランを取得した。また今回の解析では報告できなかったが、検出器の角度依存性を確認するため、ビームに対して WbLS 検出器を 0 度から 45 度まで回転させた状態で光量測定を行った。

3 日目は、WbLS 検出器 2 に変更して、再度検出器の位置の調整やノイズの除去作業を行った。その後 2 日目と同様に WbLS 検出器 2 に対して光量の位置依存性の確認の測定を行った。また、1 セル内の光量一様性の測定のため、73 分間の長時間ランの測定を行った。

今回の解析で用いたデータは、2 日目の位置依存性の確認のために取得した 4 ラン分のデータと、3 日目の WbLS 検出器 2 の 1 セル内の光量一様性の測定のための 73 分間の長時間ランのデータである。

## 6.5 解析方法

まず、上流ホドスコープのヒット情報を用いて、ビームのヒット位置を選択した。

上流ホドスコープを構成しているファイバーのうち、ヒットしたファイバーを x, y 方向から 1 本ずつ選択する。この際、他の上流ホドスコープのファイバーにはヒットしない条件を課す。また、ファイバーのヒットイベントとは、trigger threthold を超える波高があったイベントとしている。

ファイバー選択により、WbLS 検出器でビームがヒットした  $1.7 \times 1.7 \text{ mm}^2$  の領域を粒子が通過したイベントを見ることができる (図 6.15)。以降、上流ホドスコープでの x, y 方向のファイバーのヒットの選択に

よって得られたビーム照射領域の中心を、ビームのヒット位置として扱う。

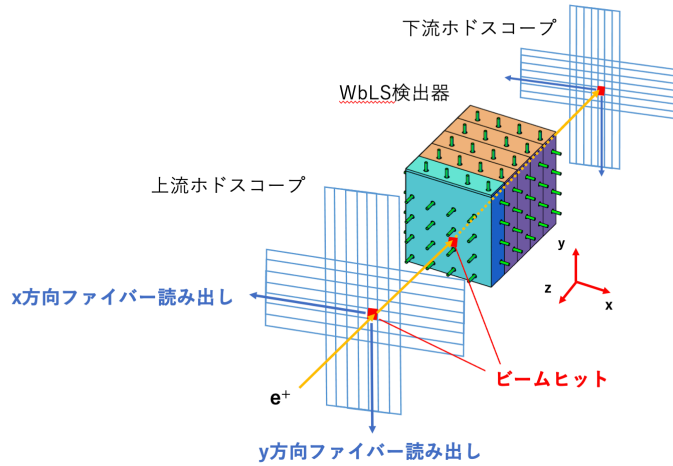


図 6.15: ホドスコープによるビームヒット位置の選定方法

ただし、今回は上流ホドスコープのヒット情報のみを使用した。そのため、ファイバー選択によるイベントの中には、WbLS 検出器をビームが通過したイベント以外に、WbLS 検出器内での散乱イベントや宇宙線イベントなど、WbLS 検出器に対してビームが  $z$  方向に沿って通過しなかったイベントも含まれる。今回の目的は WbLS 検出器の光量の位置依存性を確認することであるため、これらのイベントを背景事象イベントとし、WbLS 検出器の情報を用いてこれらの影響を除く作業を行う。

以下、WbLS 検出器のデータに対して解析を行う。

まず、上流ホドスコープのファイバー選択を行う前のあるランの全てのデータを用い、データで得られた ADC 値を光電子数 (p.e.) に変換する calibration を行った。WbLS 検出器の ADC 値の分布から、0 p.e. と 1 p.e. のピーク値をガウシアンフィッティングから求めた (図 6.16)。得られた各ピーク値を用い、式 5.1 を用いて ADC 値から光電子数に変換した。

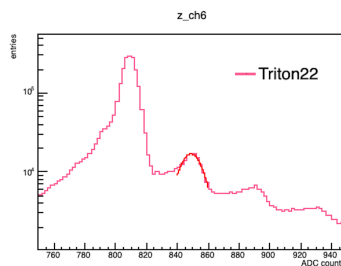


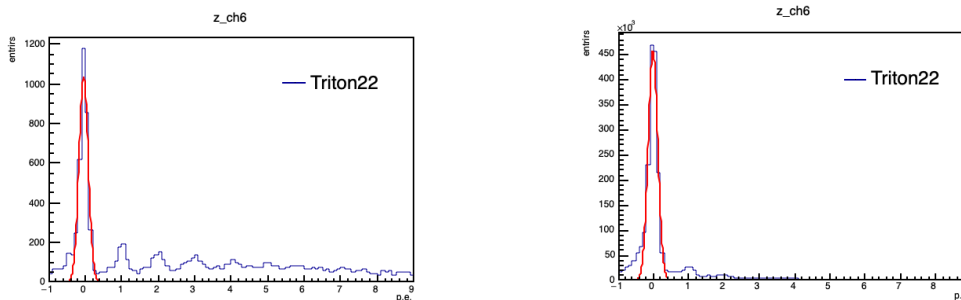
図 6.16: calibration で 1 p.e. のピーク値をガウシアンフィッティングによって求めている様子

次に、上流ホドスコープでのファイバー選択によって特定のビームヒット位置を選択し、ビームヒット位置に対する WbLS 検出器の各読み出し ch の光量分布を得る。このファイバー選択のみの分布に含まれている背景事象イベントを取り除くため、選択した上流ホドスコープのファイバーにヒットしていないイベントを求め

る。このイベントの分布を背景事象分布とした。

ファイバー選択のみの分布から背景事象分布を取り除くため、2つの分布の0 p.e. のピークの高さを用いて背景事象分布を見積る。WbLS 検出器のファイバー選択のみの光量分布と背景事象分布に対し、それぞれ0 p.e. のピーク付近で式 6.1 を用いてガウシアンをフィッティングを行い、エントリー数の高さに対応する定数  $A_{Hit}$ ,  $A_{BG}$  を求めた (図 6.17)。

$$\begin{aligned}
 (\text{ファイバー選択のみの分布の } 0 \text{ p.e. ピーク付近}) &= A_{Hit} \times \exp\left(-\frac{(\text{光量値} - (0 \text{ p.e. のピーク}))^2}{2\sigma^2}\right) + const \\
 (\text{背景事象分布の } 0 \text{ p.e. ピーク付近}) &= A_{BG} \times \exp\left(-\frac{(\text{光量値} - (0 \text{ p.e. のピーク}))^2}{2\sigma^2}\right) + const
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$



(a) ファイバー選択のみのイベントによる z 方向読み出し ch6 の光量分布

(b) z 方向読み出し ch6 の背景事象分布

図 6.17: z 方向読み出し ch6 の光量分布の 0 p.e. のピークに対してガウシアンでフィッティングしている様子

$A_{Hit}$ ,  $A_{BG}$  を用い、光量分布から  $A_{Hit}/A_{BG}$  倍した背景事象分布を引き、特定のビームヒット位置に対する光量分布を得た (図 6.18)。

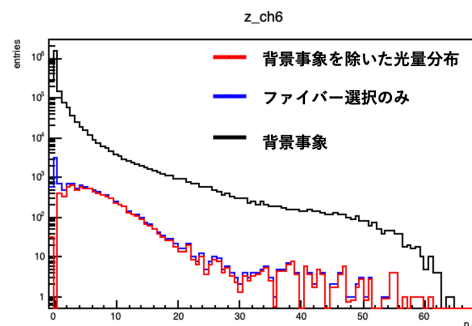


図 6.18: ある z 方向読み出し ch でのファイバー選択のみの光量分布 (青線)、背景事象分布 (黒線)、ファイバー選択のみの分布から背景事象を除いた光量分布 (赤線)



ヒット分布で1つの読み出し ch に対してエントリー数が 50 以上の場合、ランダウ分布を用いてフィッティングを行い、 $e^+$  の MIP に対する WbLS 検出器の光量を求めた。

## 6.6 測定結果

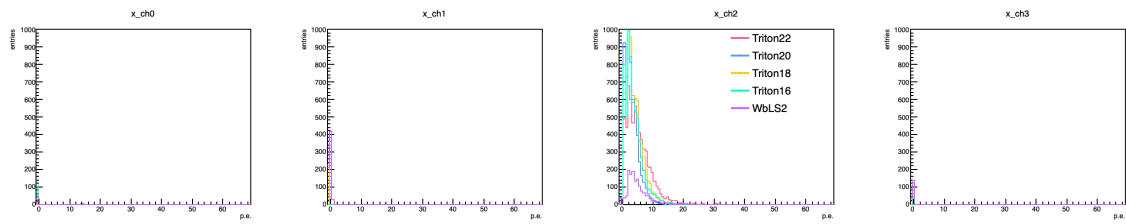
### 6.6.1 検出器 2 での光量の位置依存性

以下の WbLS 検出器 2 の測定結果は、データ取得時間が 73 分間であり、WbLS 検出器 2 のセル 6 の中心に照射したデータを用いた。WbLS 検出器のセル 6 の中心位置は、検出器中心から  $(x, y) = (5 \text{ mm}, -5 \text{ mm})$  の位置である。

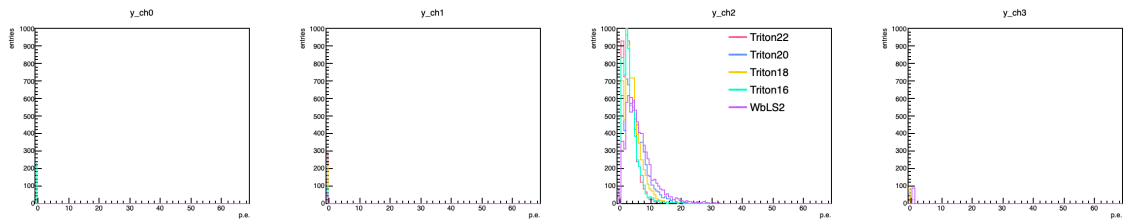
まず、ビームヒット位置がビームの照射中心である場合の光量分布をみる。

ファイバー選択のみの分布から背景事象分布を除いて得た光量分布が図 6.19 である。図中の凡例の位置は、ビームが通過するセルの x, y, z 方向読み出し ch に対応させている。

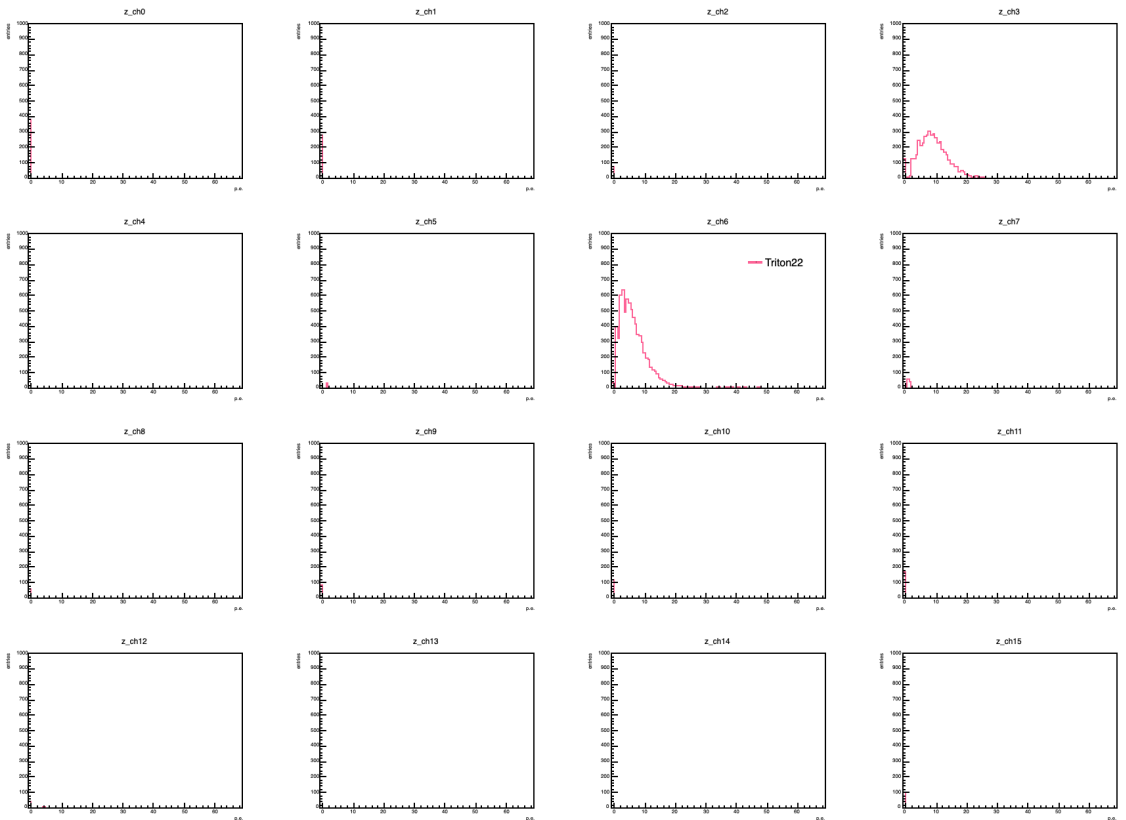
各方向読み出し ch で、ビームがヒットした位置に対応した ch で光量が高くなっている。x,y 方向の読み出し光量分布から WbLS サンプル間の光量を比較すると、大きな違いは見られなかった。また z 方向読み出しでもセル 6 での読み出し ch で 5 p.e. あたりにピークをもつが、30 ~ 60 p.e. あたりに数イベント存在している分布となった。ただし、z 方向読み出しでセル 6 の斜めに位置するセルで大きなクロストークが見られた。



(a) x 方向読み出し



(b) y 方向読み出し



(c) z 方向読み出し

図 6.19: 背景事象分布を引いた後の WbLS 検出器 2 でビームヒット位置がセル 6 の中心である光量分布

各 ch の光量分布をランダウ分布でフィッティングし、光量値を求め、他のセル 5, 9, 10 の中心にビームがヒットした場合と比較する。4つのビームヒット位置に対する全読み出し ch での光量値を図 6.20, 6.21, 6.22, 6.23 に示した。x 軸と y 軸は検出器群の中心を  $(x, y) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  としたときの読み出し ch の読み出すセル

の位置を表し、図中のセル内左に光量値、右下にフィッティングによる誤差  $\sigma$  を表す。つまり、x 方向読み出しのプロットでは図の左からビーム最上流の Triton22 の容器の 4 つの読み出し ch での光量値となり、図の右がビーム最下流の WbLS2 の読み出し光量値となる。y 方向では図の下がビーム最上流となり、図の上がビーム最下流となる。また、赤線で囲った部分がビームが通過した位置に対応している。

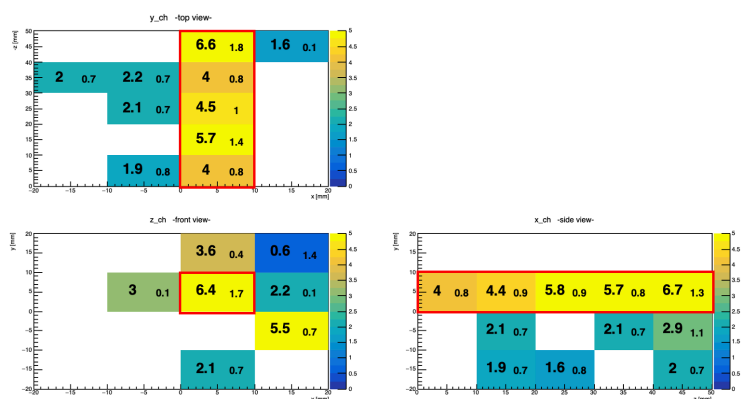


図 6.20: ビームヒット位置がセル5の中心である場合の各読み出し ch での光量

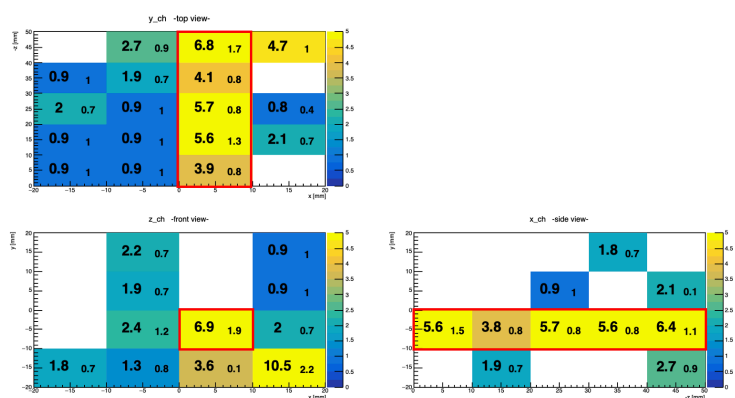


図 6.21: ビームヒット位置がセル6の中心である場合の各読み出し ch での光量

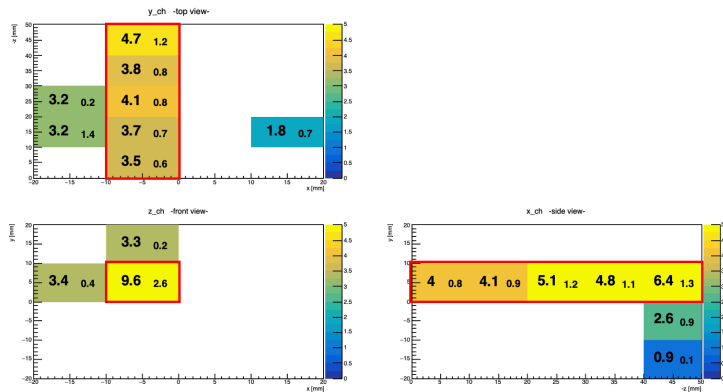


図 6.22: ビームヒット位置がセル 9 の中心である場合の各読み出し ch での光量

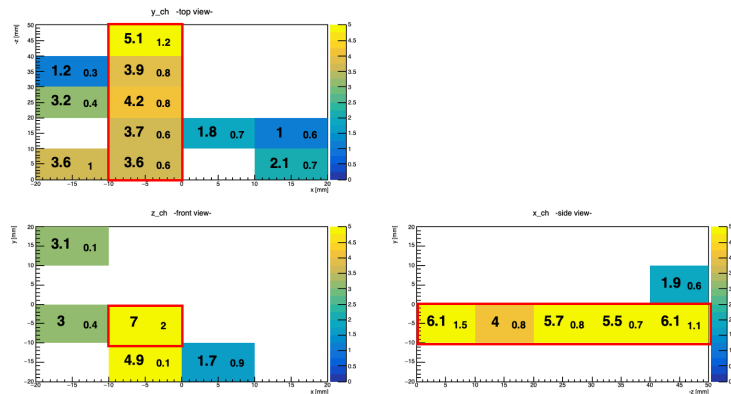


図 6.23: ビームヒット位置がセル 10 の中心である場合の各読み出し ch での光量

各高発光量値を見ると、読み出し ch がヒット位置に対応して移動しており、x 方向読み出しでは 5 ~ 6 p.e.、y 方向では 4 ~ 5 p.e.、z 方向ではおよそ 7 p.e. であり、WbLS 検出器が粒子の飛跡を検出していることがわかる。

ビームヒット位置を変更した場合、ビームヒット位置での各読み出し ch の光量値は  $1\sigma \sim 2\sigma$  の範囲内で一致している。特に、8ch 読み出し容器では、 $\sigma$  の範囲内で一致している。このことから、セル間の光量値に大きな差がなく、およそ均一に WbLS が存在しており、WbLS 検出器は飛跡検出器として機能することがわかった。

一方 z 方向読み出しで大きなクロストークがみられた。セル 6 の中心をヒット位置とした場合の z 方向読み出しでは、ヒット位置の読み出し ch での光量より高いクロストークとなっている。クロストークの原因としては WbLS や容器の壁との散乱による発光が考えられる。ただし z 方向読み出しでは容器鉛直下にあるセルでクロストークが大きいため、WbLS の液体シンチレータ及び界面活性剤が容器の底に集中して存在しているといった、WbLS の局所的な集中による発光の可能性がある。容器でのビームの散乱と WbLS の局所的な集中による影響は光学シミュレーションを用いて検証しており、第 6.8 節で後述する。

また、x, y 方向での読み出しによる光量値を見ると、Triton の異なるサンプル間の差は小さく、ビーム最下

流にある WbLS 2 が他のサンプルと比較して  $\sim 2$  p.e. ほど高い光量値となった。この結果は、ファイバー読み出しによる小型容器を用いた測定結果と大きく変わらない。5 種類のサンプルの中では WbLS2 のサンプルが高発光量である一方で、界面活性剤の割合を 16 ~ 22% 変えたサンプル間では、Triton16% のサンプルが光量を維持しながら水の割合を高く保つことができるため、WbLS 検出器により適していると考えられる。

また、y 方向での高発光量値は x 方向より 1 ~ 2 p.e. ほど少ない傾向が見られた。24ch 読み出しでは、z 方向読み出しがあるために 8ch 読み出し容器より x,y 方向 ch で少ない光量となることを予想したが、大きな差は見られなかった。以上から、8ch 読み出し容器に封入したサンプルを用いて 3 方向読み出しを行った場合でも、各方向の光量は今回の測定値と変わらないことが予想される。この予想を確認するため、6.8.2, 6.8.4 節で 24ch 読み出し検出器と 8ch 読み出し検出器で光学シミュレーションを行い、光量値を比較する。

### 6.6.2 セル内の光量一様性の確認

続いて、先ほどと同じ WbLS 検出器 2 のランデータを用い、セル 6 でのセル内の光量一様性を確認した。

上流ホドスコープの x, y 方向のファイバーを 1 本ずつ変えて選択することでビームヒット位置をセル領域内で変更し、セル 6 を通過する x, y, z 方向読み出し ch の光量値を求めた。光量値を求めるフィッティングに関し、z 方向読み出し ch で光量を求める際、z 方向読み出しファイバーの近くにビームヒット位置を選んだ場合の光量分布において、図 6.24 のように高発光領域でピークが見られた場合、高い光量ピークから光量値を求めている。

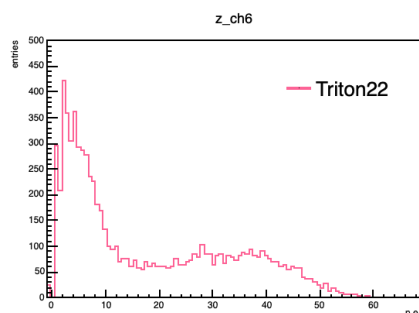


図 6.24: ファイバー付近にビームヒット位置を選択した場合の z 方向読み出し ch の光量分布

ビームヒット位置に対する x, y, z 方向読み出しでの光量値は WbLS サンプルごとにプロットし、Triton22, 20, 18, 16, WbLS2 の結果を図 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29 に示した。これらの図中の縦軸及び横軸は WbLS 検出器及びホドスコープの中心を  $(x, y) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  としたときのビームのヒット位置を表す。各ヒット位置での光量値を大字、フィッティングの誤差を光量値の下の小字で示した。また、図中の赤線は容器の壁及びファイバーを表している。

全てのサンプルの各読み出し ch において、ファイバーが通過している付近にビームヒット位置を選択した場合、光量が高くなる傾向が見られた。また、Triton の割合の異なるサンプル間では、Triton の割合が高いほど、ビームヒット位置がファイバー付近での光量値と他の領域での光量値の差が大きくなり、セル内での y 方向読み出し光量値の差を見ると、Triton16 では  $\sim 4$  p.e.、Triton20 では  $\sim 6$  p.e. となっている。このことから、Triton の割合の増加によって、吸収長の短いシンチレーション光が増加したとみられる。また、WbLS2 のセル内領域での xy 方向読み出し光量値は他のサンプルと比較すると全体的に高く、特に WbLS2 と同じ Triton の割合をもつ Triton20 の結果と比較すると、 $\sim 2$  p.e. ほど高い値となっている。これらの結果から、

セル内の光量一様性を高める場合は Triton の割合を下げるのが有効であり、セル内全体の光量を増加させる場合は液体シンチレータの割合を増加させるのが有効であることが予想される。ただし、6.3.4 節で確認したように、ビーム下流に位置するサンプルほど WbLS 検出器内で散乱したイベント数が数 % 変化する。この影響は小さいと考えていたが、ビームヒット位置と実際に容器を通過したビームの位置に変化を与えるため、Triton の割合の異なるサンプル間の光量一様性の違いの原因となった可能性がある。下流ホドスコープのヒット情報を用いることで散乱の影響を減らすことができるため、サンプル間の光量一様性の違いについては今後詳しい解析が必要である。

また、Triton22 の  $z$  方向読み出しでの光量分布では、ファイバー付近の高い光量の外に、容器の壁で高い光量となった。この原因として、壁とビームの散乱による高発光イベントか、あるいは WbLS の局所的な集中による高発光が考えられる。この測定結果のみでは特定できなかったため、後述の光学シミュレーションを行うことで原因について検証した。シミュレーション結果については後の 6.8 節で述べる。

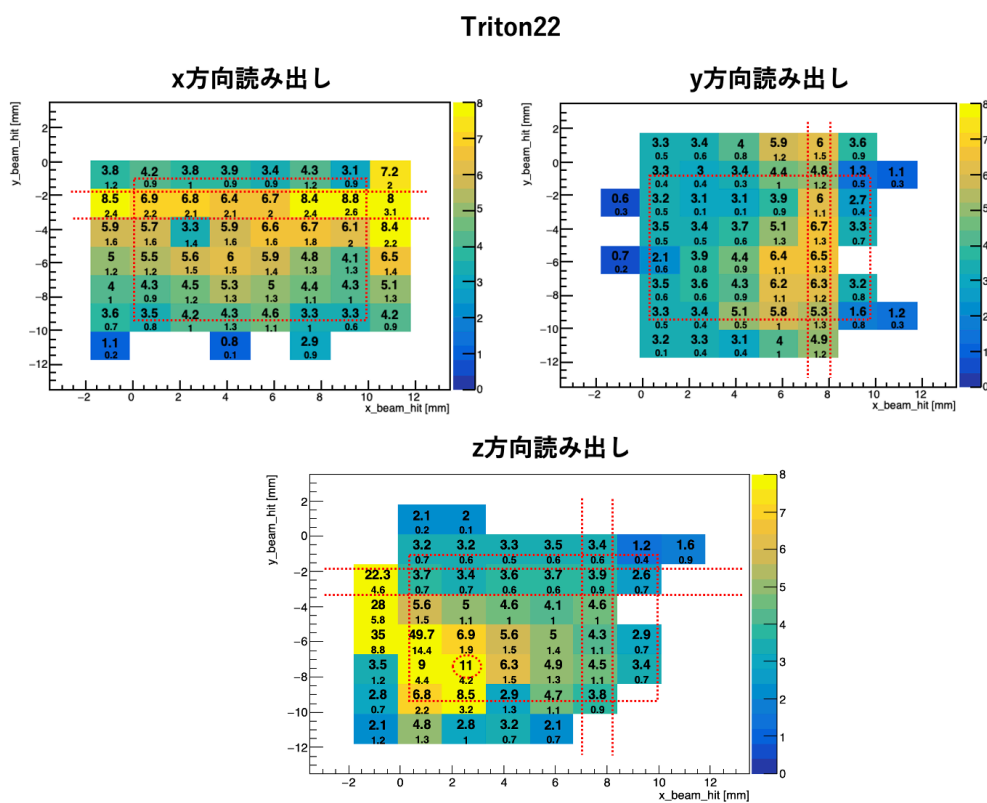


図 6.25: 各ビームヒット位置に対する Triton22 を封入した容器での  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向読み出し光量値。図中の赤色の点線は容器の壁とファイバーを示す。



## WbLS2

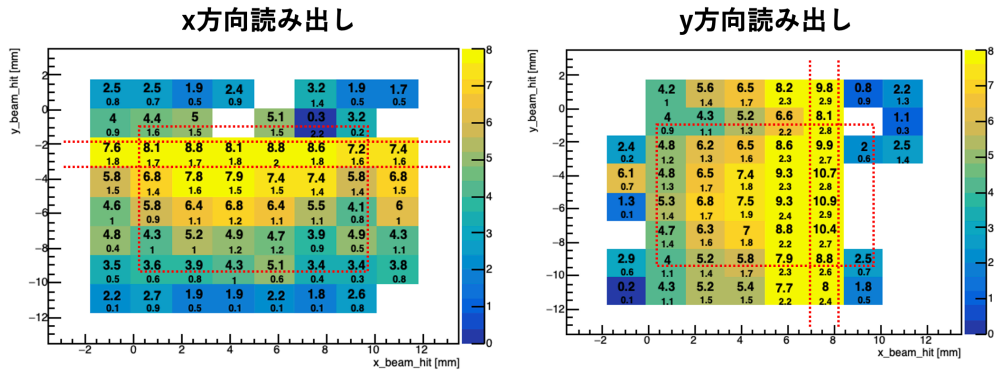


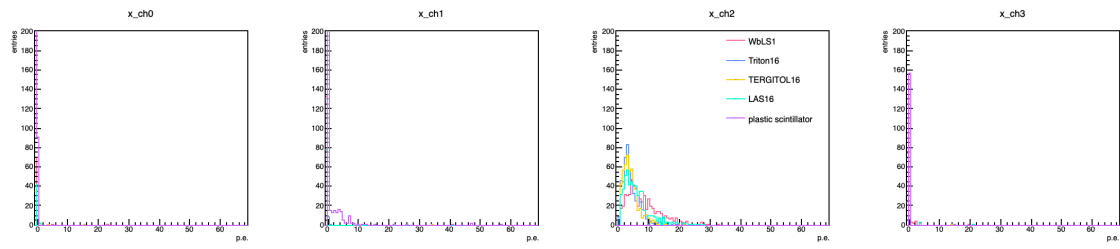
図 6.29: 各ビームヒット位置に対する WbLS2 を封入した容器での  $x$ ,  $y$  方向読み出し光量値

### 6.6.3 検出器 1 の光量の位置依存性

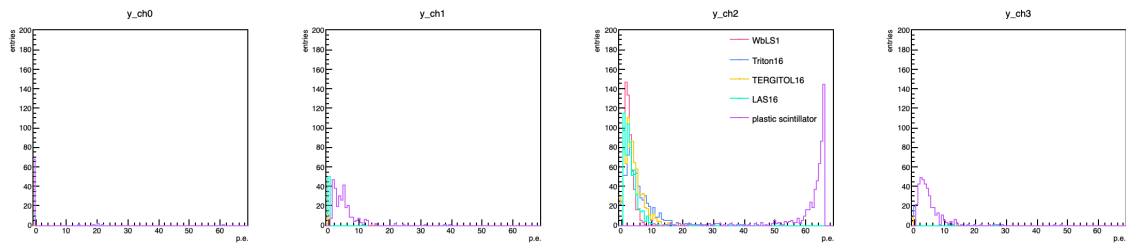
WbLS 検出器 1 を使用して取得したデータのうち、セル 5, 6, 9, 10 の中心にビームの中心を設定した 8 分間の 4 データを用い、検出器 1 のセル間の光量の違いを確認した。

まず、ビームヒット位置をセル 6 の中心に選んだ場合の背景事象を除いた量分布は図 6.30 のようになった。図中の凡例の位置は、ビームが通過する位置に対応させている。各方向の読み出しの光量分布を見ると、ビームヒット位置での読み出し  $ch$  で高発光となっている。このことから、WbLS 検出器 1 でも粒子の飛跡を検出できることがわかった。また WbLS 検出器 1 では WbLS 検出器 2 とは異なり、ビーム最下流ではプラスチックシンチレータによる発光を読み出しているが、プラスチックシンチレータの光量が高く、光量値のピークが測定領域外にある。また、WbLS 検出器 2 では  $z$  方向読み出しで大きなクロストークが確認されたが、この測定結果では大きなクロストークは見られない。

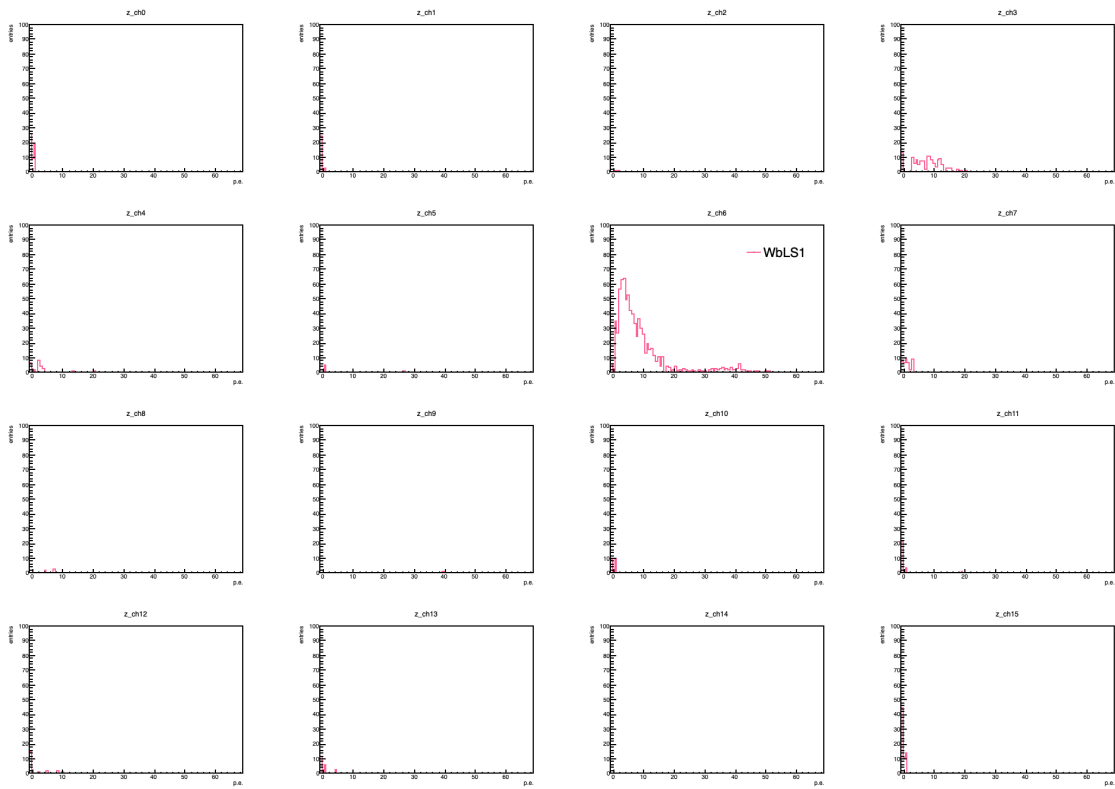




(a) x 方向読み出し



(b) y 方向読み出し



(c) z 方向読み出し

図 6.30: 背景事象分布を除いた WbLS 検出器 1 でビームヒット位置がセル 6 の中心である光量分布

続いて、各セルの中心にビームの中心を設定した場合のデータのうち、WbLS 検出器にヒットした位置も各セルの中心である場合の光量分布を求めた。セル 5, 6, 9, 10 での光量分布は図 6.31, 6.32, 6.33, 6.34 のよう

に得られた。x 軸と y 軸は検出器群の中心を  $(x, y) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  としたときの読み出し ch の読み出すセルの位置を表し、図中のセル内左に光量値、右下にフィッティングによる誤差  $\sigma$  を表す。赤線で囲った部分はビームのヒット位置に対応している。

まず、ビームのヒット位置に合わせて WbLS 検出器 1 の最高光量の読み出し ch が移動しており、光量値がおよそ  $\sigma$  内で一致している。セル間での光量の違いがないことから、WbLS 検出器 2 と同様、飛跡検出器として機能することが確認できた。ただし課題としては WbLS 検出器 2 と同様に、光量が低いことや、図 6.33 のように z 方向読み出しでの大きなクロストークなどがある。

また、Triton16, TERGITOL16, LAS16 を封入した容器間で光量値に大きな違いがなかったことから、界面活性剤の種類を変えても検出器の性能として大きな違いが見られず、ヒット位置での x, y 方向読み出し ch の光量はおよそ 5.5 p.e. 前後であった。検出器 2 と同じ Triton16 の容器を用いていることから、検出器 1、2 を通して、24ch 読み出し容器に封入した WbLS1 と Triton22, 8ch 読み出し容器に封入した WbLS2 を除くサンプルで光量値に大きな違いがないことがわかる。これは、小型容器を用いたファイバーと MPPC 読み出しによる宇宙線測定の結果と矛盾がない。

ただし、界面活性剤によって 1 セル内の光量一様性が異なる可能性がある。また、界面活性剤の割合を増加させることで Triton と同様にセル内の光量一様性に変化が見られるか、今回の測定では明らかにできない。そのため、最適な界面活性剤を選択するために、これから他の種類の界面活性剤を使用した WbLS サンプルについて調べる必要がある。

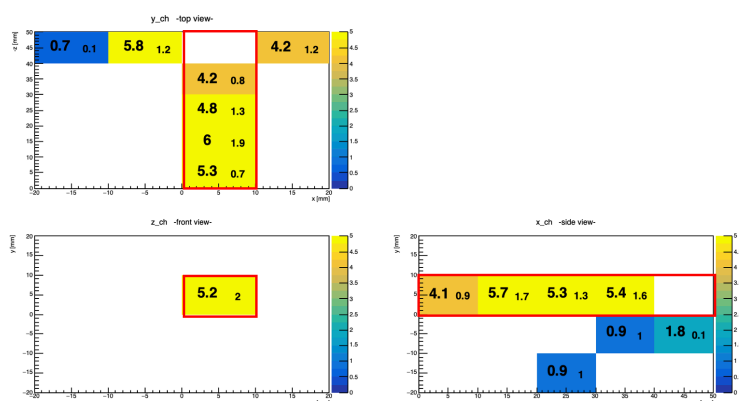


図 6.31: ビームヒット位置がセル 5 の中心である場合の各読み出し ch での光量

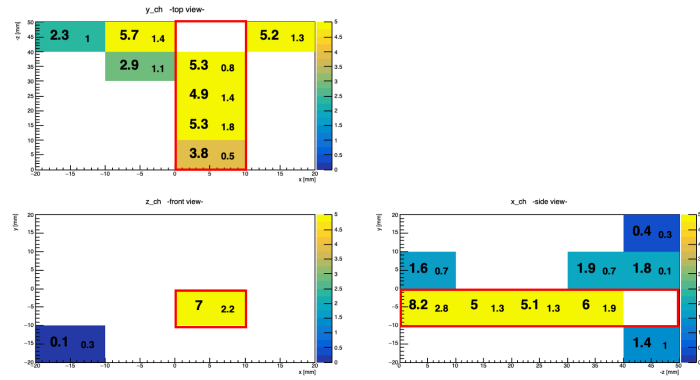


図 6.32: ビームヒット位置がセル6の中心である場合の各読み出しchでの光量

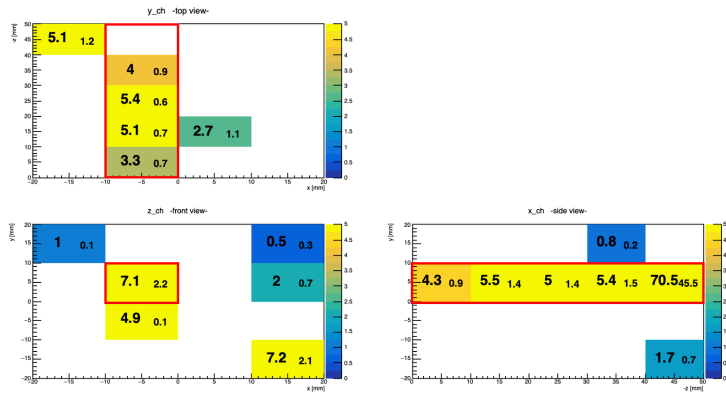


図 6.33: ビームヒット位置がセル9の中心である場合の各読み出しchでの光量

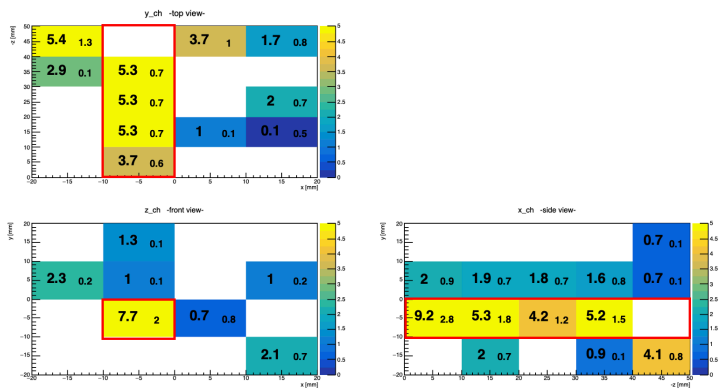


図 6.34: ビームヒット位置がセル10の中心である場合の各読み出しchでの光量

## 6.7 宇宙線による発光の確認

WbLS 検出器がビーム測定後も安定して粒子の飛跡を検出できるかを確認するため、ビームテスト後に新たに宇宙線による光量測定を行い、WbLS が宇宙線によって発光するか確認した。

### 6.7.1 セットアップ

セットアップは図 6.35 のように、WbLS 検出器を固定台及び受け皿に設置し、受け皿の真下に  $5 \times 20 \times 1 \text{ cm}^3$  のプラスチックシンチレータ板を配置した。また、WbLS 検出器の 20 cm 鉛直上方向に  $5 \times 20 \times 1 \text{ cm}^3$  のプラスチックシンチレータ板を配置した。この上下 2 枚のプラスチックシンチレータには WbLS 検出器と同じ型の波長変換ファイバーを通し、端にコネクタをつけ、MPPC で読み出しを行った。各読み出し ch とセルの対応はビームテストと同じ対応 (図 6.4) をさせた。

MPPC での読み出し及び基板などは、ビームテストで使用したのと同じものを用い、EASIROC モジュールで読み出しを行った。

ただし、ビームテストとは異なり、トリガーはプラスチックシンチレータも含めた全ての読み出し ch のうち、2ch 以上のヒットとした。



図 6.35: WbLS 検出器の宇宙線測定のセットアップ

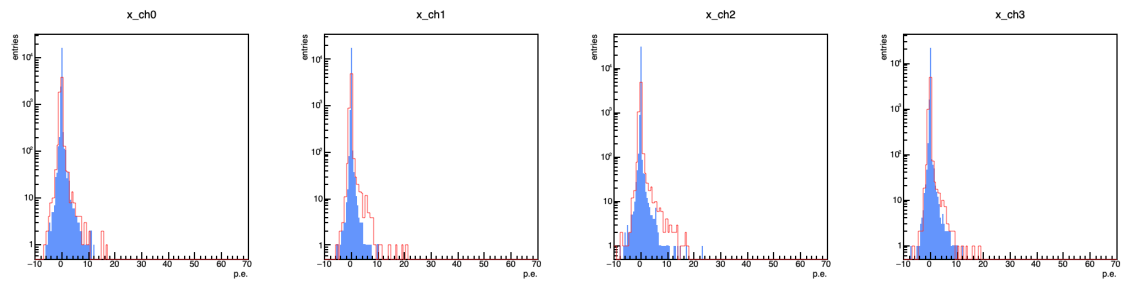
### 6.7.2 測定結果

ビーム測定日から 1 ヶ月後に、検出器 1 の 24ch 読み出し検出器を使用して測定を行った。データ取得期間は 22 時間で、全てのデータから上下のプラスチックシンチレータに 1200ADC 値以上の発光があったイベントのみを宇宙線イベントとした。

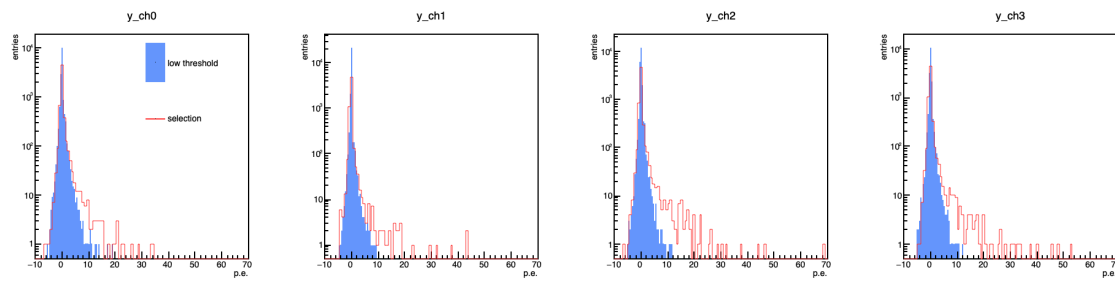
calibration は全データの ADC 光量分布を用いてビームテスト同様に行い、ADC 値から光電子数に変換した。

得られた宇宙線による光量分布は図 6.36 である。比較のため、同じセットアップでトリガーの threshold

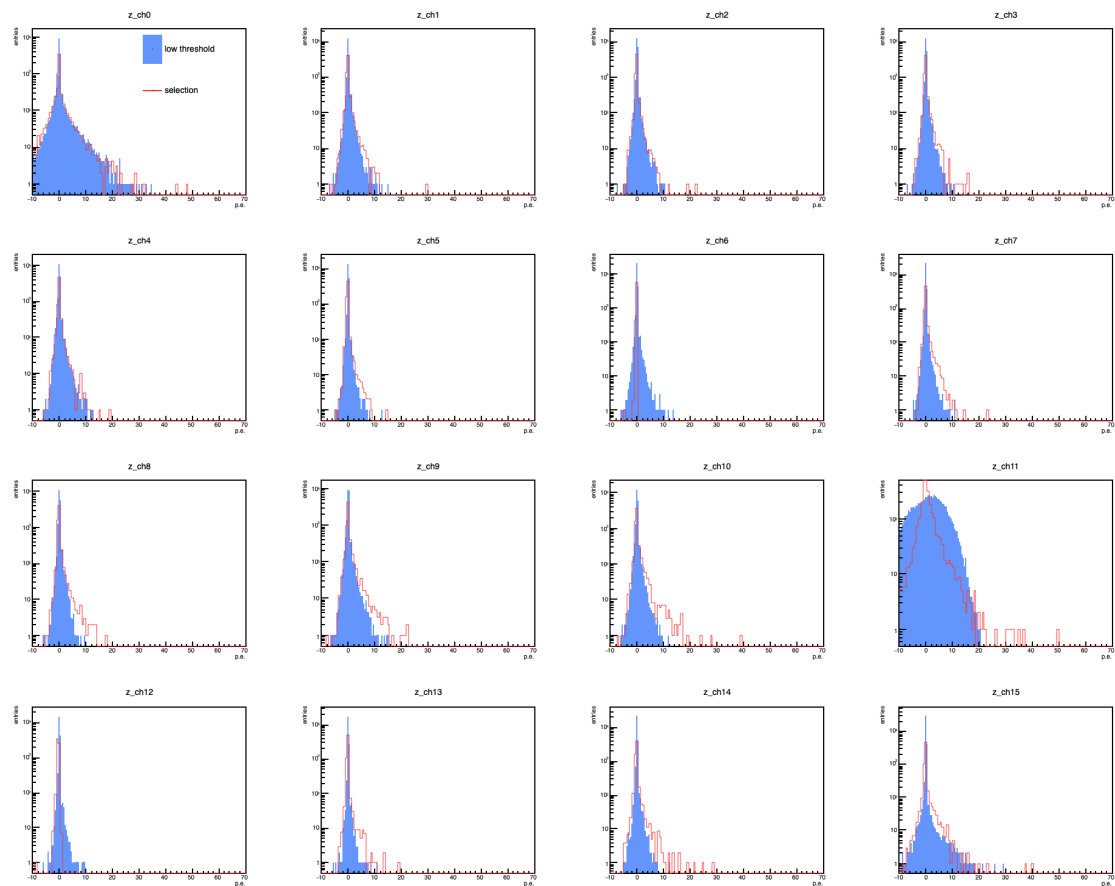
を下げたデータを別に取得し、青いヒストグラムで示した。このデータにはあらゆる方向から通過した宇宙線や MPPC の暗電流によるイベントが含まれるが、この分布と比較すると、一部の z 方向読み出し ch と全ての y 方向読み出し ch で高発光量イベントが確認できた。WbLS 検出器の上下に配置したシンチレータでヒットがあったイベントのみをプロットしているため、宇宙線は y 方向に通過する。y 方向読み出し ch の波長変換ファイバーは宇宙線通過方向と同じ方向であるため、WbLS 検出器が宇宙線によって発光する場合、他の ch に比べて光量が大きくなる。測定結果では、予想していた y 方向に宇宙線が通過した場合に発光していることがわかった。



(a) x 方向読み出し



(b) y 方向読み出し

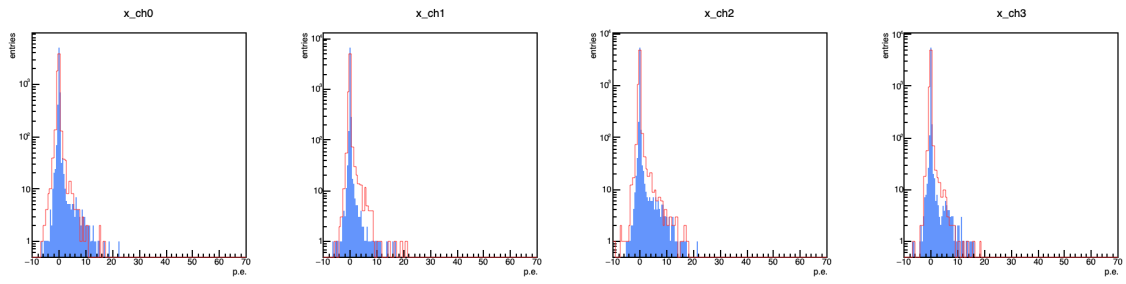


(c) z 方向読み出し

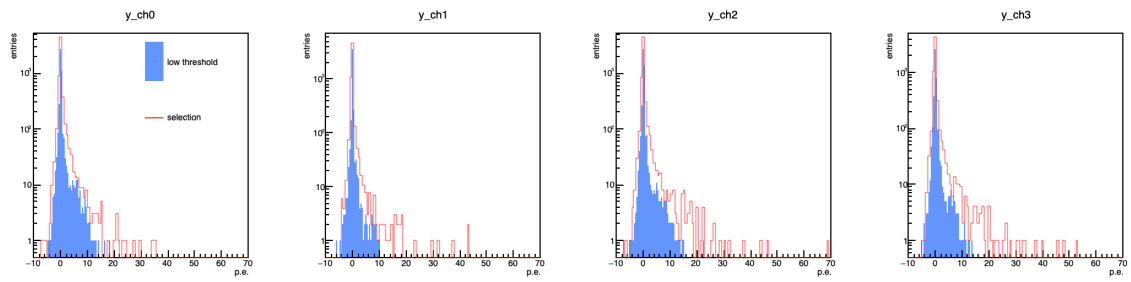
図 6.36: WbLS 検出器 1 の宇宙線による光量分布。各読み出し ch の位置はビームテストと同じである。

また、ビーム測定日から2ヶ月後に検出器2の24chのWbLS検出器を用いて同様に測定を行った。宇宙線による光量分布は図6.37となり、検出器1の24ch読み出し検出器の結果と同様、y方向読み出しchで宇宙線による発光が確認できた。

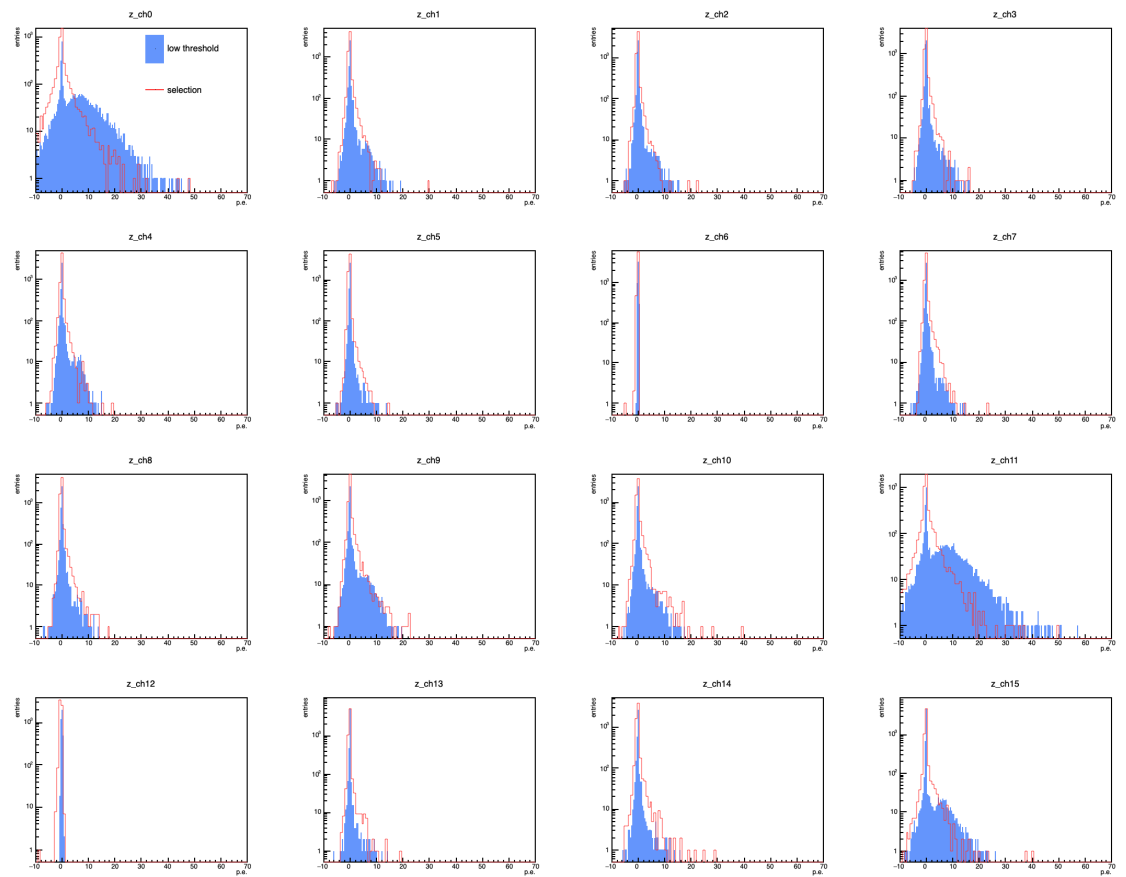
以上の測定結果から、製作から2ヶ月経ってもWbLS検出器は飛跡検出器として機能することがわかった。



(a) x 方向読み出し



(b) y 方向読み出し



(c) z 方向読み出し

図 6.37: WbLS 検出器 2 の宇宙線による光量分布



## 6.8 光学シミュレーション

この光学シミュレーションでは、測定結果だけでは特定できなかった WbLS の局所的集中の影響や読み出し ch 数の違いによる光量の変化を確認する。

まず、WbLS 検出器の基本的な性能を確認するため、ファイバー読み出しによる小型容器の測定のシミュレーションをもとに、封入した WbLS や容器の反射率を変更した場合の 1 セル内の光量分布を確認する。

次に、図 6.25 で見られた容器の壁付近にビームがヒット場合の高光量イベントについて、容器の散乱由来のものか、WbLS の局所的な集中の影響かを特定するために検証する。特に、WbLS の局所的な集中として考えられる、水と液体シンチレータが分離した場合を想定して光量を見積もり、測定結果と比較する。

また、測定結果では 8ch 読み出し容器と 24ch 読み出しで同程度の光量であったが、測定では同じサンプルを封入していないため、読み出し ch の数によって光量に変化するかが確認できなかった。そのため、光学シミュレーションによって 8ch と 24ch 読み出しで同じサンプルを封入した場合、光量に違いが現れないかを確認する。

### 6.8.1 シミュレーション設定

ビームテストで使用した WbLS 検出器と似た複数セル検出器を想定し、Geant4 の光学シミュレーションを行った。シミュレーション設定は波長変換ファイバーと MPPC による小型容器での測定の光学シミュレーションを参考にしており、今回のビームテストの結果を再現できるかを確認する。

まず WbLS 検出器について、測定で用いた WbLS 検出器には  $4 \times 4$  セルの他に、上部に WbLS を封入しやすくするための 1 セル半の体積を持ったセルを持っているが、今回のシミュレーションでは  $4 \times 4$  セルのみの構造を持たせた。1 セルの構造として、厚さ 0.5 mm の外形  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  の容器に WbLS を入れ、容器の 6 つの側面に直径 2 mm の穴が開いており、直径 1 mm ファイバーを 3 方向から通すようにした。実際の検出器では容器の外側にある穴とファイバーの隙間をオプティカルセメントで埋めたが、シミュレーションでの複数セル検出器では埋めていない。このセルを xy 平面に  $4 \times 4$  個並べ、24ch 読み出し複数セル検出器とした (図 6.38)。

シミュレーションで得たパラメータは、ビームの発生位置  $(x, y)$  と、各読み出し ch での光量である。この光量とは、検出器を通過するファイバーの端に到達した光学フォトン数をカウントし、この光子数に対して 1 p.e. の正規分布を確率としてかけた値である。

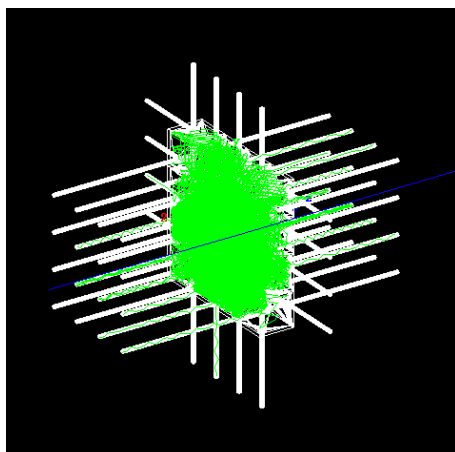


図 6.38: Grant4 での複数セルによるシミュレーションの様子。緑色の線は WbLS 内で発生した光学フォトンを示す。

ビーム、WbLS 及び検出器容器の設定は表 6.6 に示した。小型容器のシミュレーションを受け、単位エネルギーあたりの光量 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 100% あるいは 90% の容器に入れた場合と、単位エネルギーあたりの光量 6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 90% の容器に入れた場合で比較を行った。また、容器の中心を  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  としている。

表 6.6: ビーム測定シミュレーションの設定

	項目	設定値
ビーム	粒子の種類	陽電子
	エネルギー	500 MeV ( $\sigma \sim 10$ MeV)
	運動量方向	ビーム方向 $0^\circ$
	発生位置の中心	$(-5, 5, -50)$ [mm] (セル 6 の中心)
	ビームの広がり	$\sigma \sim 7.5$ mm
WbLS サンプル A	屈折率	1.34
	MeV あたり光量	2000 p.e./MeV
	吸収長	50 cm
WbLS サンプル B	屈折率	1.34
	MeV あたり光量	6000 p.e./MeV
	吸収長	30 cm
容器	物質	PMMA (密度 1.19 g/cm <sup>3</sup> )
	反射率	90% or 100%
波長変換ファイバー	コア反射率	1.59
	第一クラッド反射率	1.49
	第二クラッド反射率	1.42

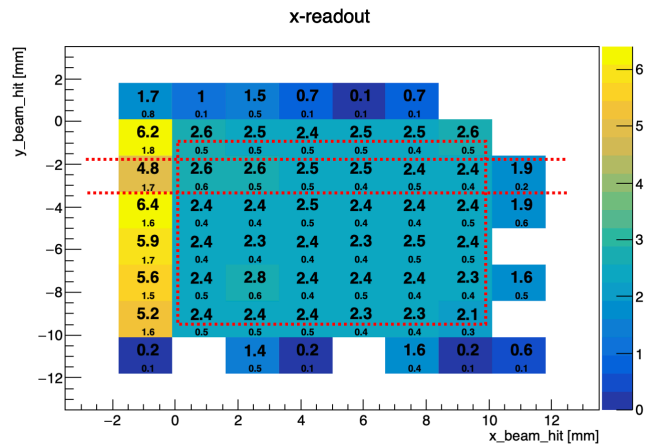
### 6.8.2 24ch 読み出し複数セル検出器に対するシミュレーション結果

各ファイバーの端でのカウントから得た光量に対して、以下の手順で1セル内での光量一様性を確認した。

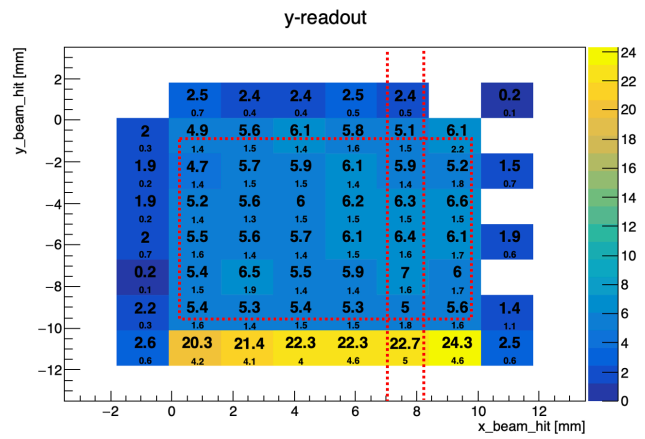
まず、測定ではビームヒット位置を上流ホドスコープのファイバー選択から特定していたことから、ビームの発生位置の情報から、 $1.7 \times 1.7 \text{ mm}^2$  の領域に分割し、各領域に含まれるイベントの光量分布を求めた。次に、光量分布をランダウ分布でフィッティングを行って光量値を得た。ただし、実際のビーム測定と同じように、光量分布に2つのピークが見られた場合は高光量領域にあるピークを光量値としている。最後に各ビーム発生位置での光量値をプロットし、1セル内の光量一様性を見る。

2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 100% の容器による複数セル検出器において、ビーム中心にある1セル内での各照射位置での光量値は図 6.39 となった。図の x 軸、y 軸はビーム中心を  $(x, y) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  としたときの各イベントでの陽電子の発生位置を示す。各位置での光量値を大字、フィッティングの誤差を光量値の下の小字で示した。また、図中の赤線は容器の壁及びファイバーを表している。プロットのない位置は光量の低さなどが原因で、フィッティングが上手くできなかった点である。

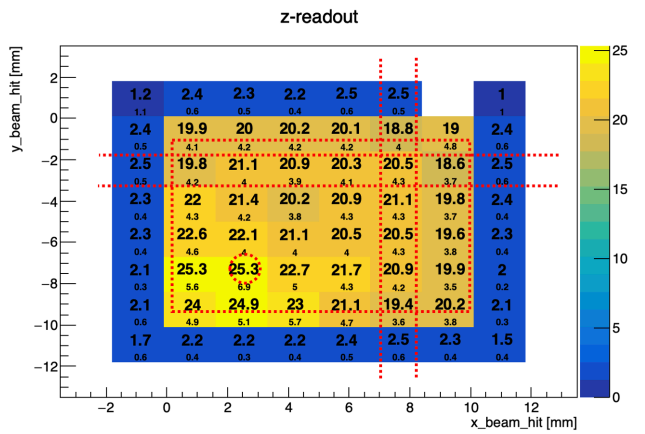
シミュレーションによる光量分布をみると、WbLS の封入領域では、x 方向読み出し ch の光量が約 2.5 p.e. となり、y 方向読み出しより 2 p.e. ほど低い値となった。z 方向読み出しは 20 p.e. 以上の光量となり、測定結果より高い値となった。セル内の光量一様性を見ると、y,z 方向ではファイバー付近と他の位置での光量差が見られる。以上から、反射率 100% の容器であっても、セル内の光量はファイバー付近で高くなることが確認できた。また、容器の壁にビームが照射した場合、x,y 方向で高発光となった。これは、陽電子が容器との散乱によるイベントであると考えている。



(a) x 方向



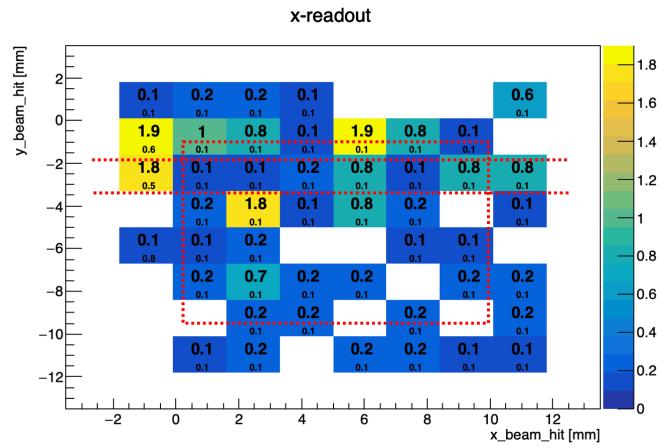
(b) y 方向



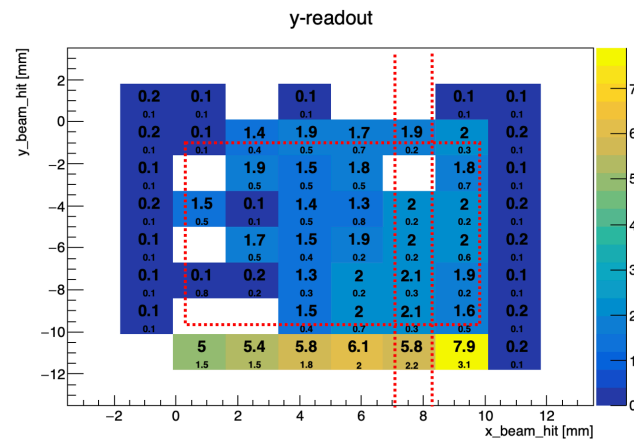
(c) z 方向

図 6.39: 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 100% の容器による複数セル検出器の光量分布のシミュレーション結果。赤点線は容器の壁及びファイバーを示す。

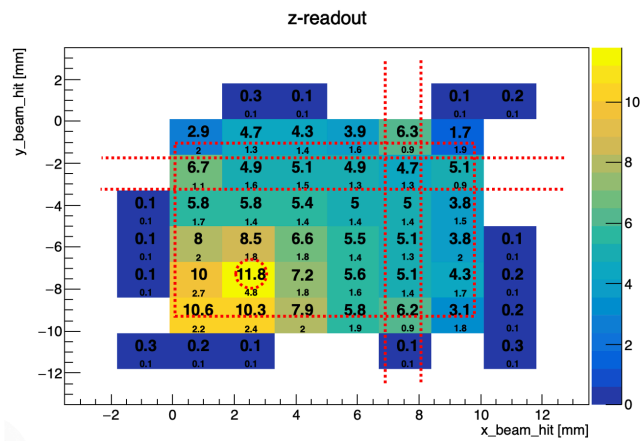
続いて、2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 90% の複数セル検出器に入れた場合を想定した。各照射位置での光量値は図 6.40 となり、反射率 100% の場合と比較すると ~ 30% 程度の光量であった。また、ファイバー付近で比較的高い光量となった点や、容器の壁で高発光となった点は反射率 100% の場合と同じであった。以上から、容器の反射率が下がると光量値が低い値となり、セル内の光量一様性の特徴に変わった点は現れなかった。



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

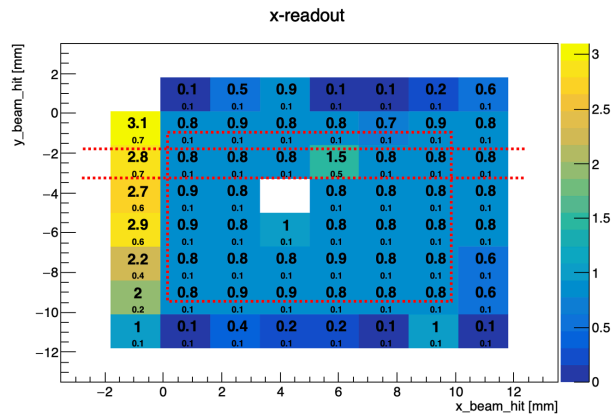
図 6.40: 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 90% の容器による複数セル検出器の光量分布のシミュレーション結果。赤点線は容器の壁及びファイバーを示す。

6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 90% の容器による複数セル検出器では、図 6.41 のようになった。

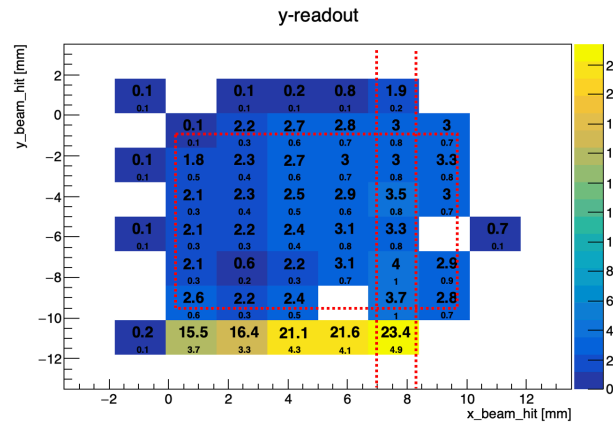
WbLS サンプル A を封入した場合と比較すると、x,y 方向読み出しでは大きな違いはなく、z 方向でおよそ 3 倍の光量となった。反射率が低いため、シンチレーション光をうまくファイバーで集めることができず、x,y 方向読み出しの光量に差が現れなかったと考えられる。もし測定で使用した容器の反射率が低い場合、WbLS サンプルを変更しても 8ch 読み出し容器では光量値に差が現れない可能性がある。実際の測定結果では、封入したサンプルの異なる 8ch 読み出し容器で  $\sim 2$  p.e. の光量差が見られたため、反射率は 90% 以上あるのではないかと推定している。

また先ほど同様、ビームが容器の壁に照射した場合に高発光となっている。

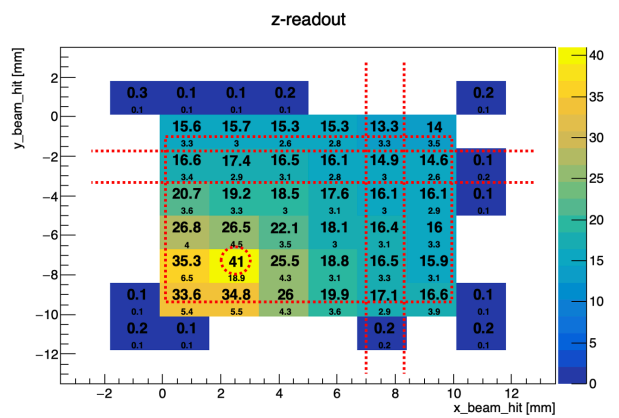
ただし、測定結果よりも x,y 方向読み出しでの光量が全体的に少なく、z 方向で容器の壁の照射による高発光が確認できず、測定結果をうまく再現できなかった。しかし、ファイバー付近での高い光量など、光量の特徴を確認することができたため、WbLS の吸収長や容器の反射率の値などのパラメータを変えることで、測定結果に近づけることができるのではないかと考えている。



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

図 6.41: 6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 90% の容器による複数セル検出器の光量分布のシミュレーション結果。



### 6.8.3 WbLS の部分的な集中による影響

次に、測定での WbLS 検出器では WbLS の濃度が一様でないことによる影響を見積もった。今回の検出器の設定は、6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 100% の容器による複数セル検出器を用いて、各セルの中心に  $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$  の水を入れたデザイン (図 6.42) に変更し、容器の反射率と水の追加以外の他の設定を変えずに光量を求めた。

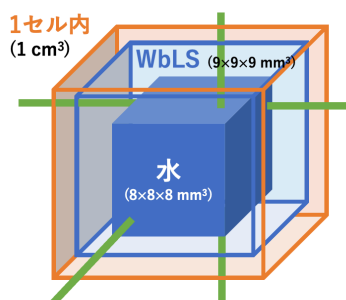


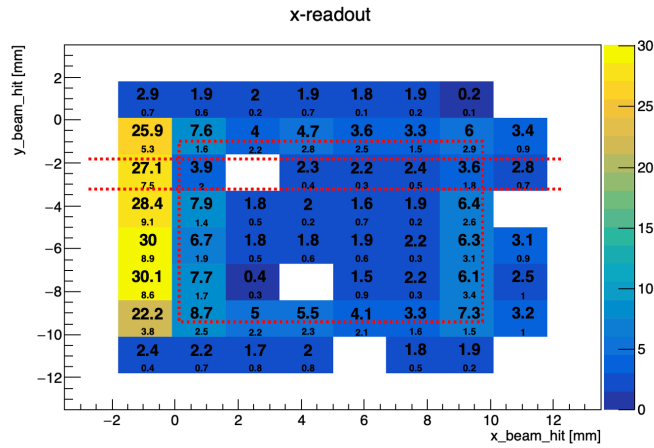
図 6.42: セルの内部に水を入れたデザインの模式図

各ビーム照射位置での光量が図 6.43 となった。WbLS が存在している領域では 3 方向とも高発光であることが確認でき、光量は 20 ~ 80 p.e. となった。

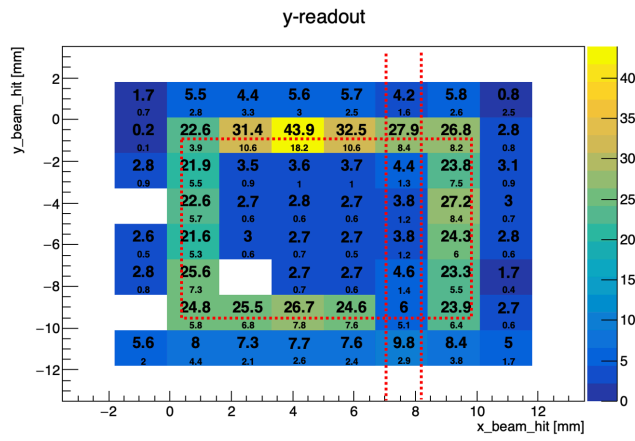
このことから、WbLS が水と液体シンチレータに完全に分離はしていない場合でも、単位エネルギーあたりの光量など、WbLS の性質が局所的に異なる部分が存在すると、光量値に大きな差が生じることが予想される。容器でビームが照射した際の光量がおよそ 25 p.e. であることから、光量値のみの情報で、高発光イベントが壁での散乱による発光か、WbLS の局所的な集中による発光かを区別することができない。

以上より、ビーム測定で用いた WbLS 検出器内で WbLS が一様濃度で分布しているか、光量値によって判断することができないことがわかった。

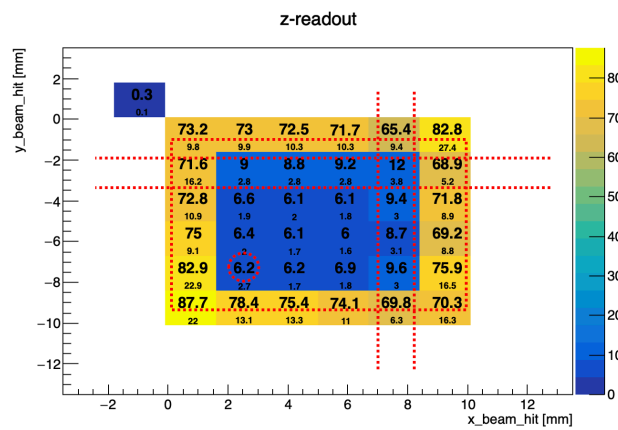
またこのシミュレーション結果から、WbLS 内で水が局所的に集中している場合、光量が大幅に減少することがわかる。今回の想定とは異なる形で水と液体シンチレータが分離し、ビームが水の領域のみを通過するイベントが存在していた場合、解析の過程で背景事象イベントとして水領域の通過イベントを扱い、光量分布に影響されない。そのため、今回の測定結果だけでは水の局所的な集中についても議論できないことがわかった。



(a) x 方向



(b) y 方向



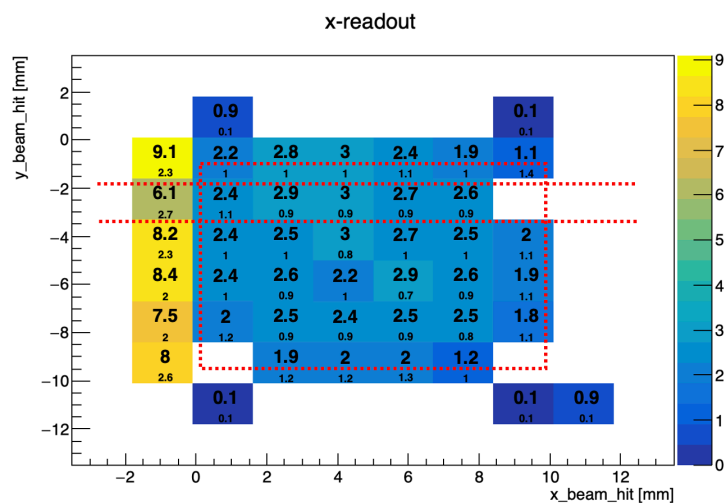
(c) z 方向

図 6.43: 6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 100% の容器に封入し、セル内部に水が存在している場合の複数セル検出器の光量分布のシミュレーション結果

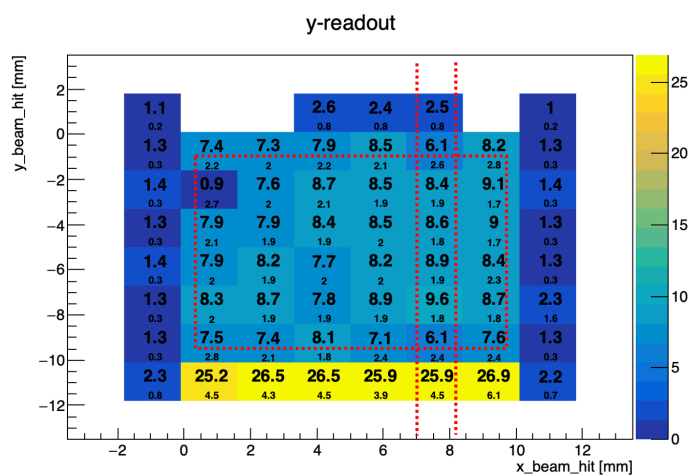
#### 6.8.4 8ch 読み出し検出器の光量シミュレーション結果

最後に、8 ch 読み出し検出器に対してシミュレーションを行った。設定は 24ch 読み出しの場合と同様の設定 (表 6.6) を用いており、単位エネルギーあたりの光量 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 100% の容器に入れた場合と、単位エネルギーあたりの光量 6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 90% の容器に入れた場合で比較を行った。複数セルの構造は 24ch 読み出し容器での z 方向読み出しのためのファイバーや容器の穴などが無いデザインであり、ファイバーなどは同じ設定となっている。

単位エネルギーあたりの光量 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 100% の容器に入れた場合の結果は図 6.44 となった。WbLS サンプル A が封入している領域での光量を 24ch 読み出しの場合 (図 6.39) と比較すると、x 方向読み出しではエラーを超える差がみられないが、y 方向読み出しでは約 2 p.e. 大きな値となっている。24ch 読み出しの場合は z 方向読み出しでの光量が 20 p.e. であり、z 方向読み出しがない分 8ch 読み出しでは光量が増加したことがわかる。ただし、シンチレーション光がファイバーに収集される前に WbLS に吸収される影響を受けるため、24ch と 8ch の x,y 方向読み出しで約 2 p.e. 程度の差となっている。



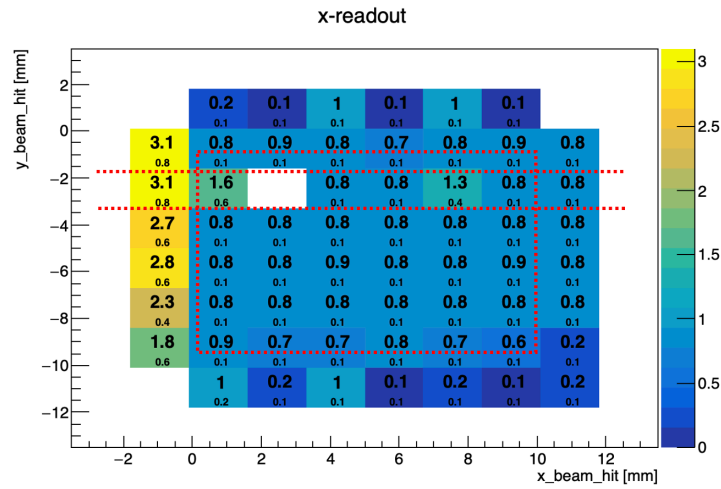
(a) x 方向



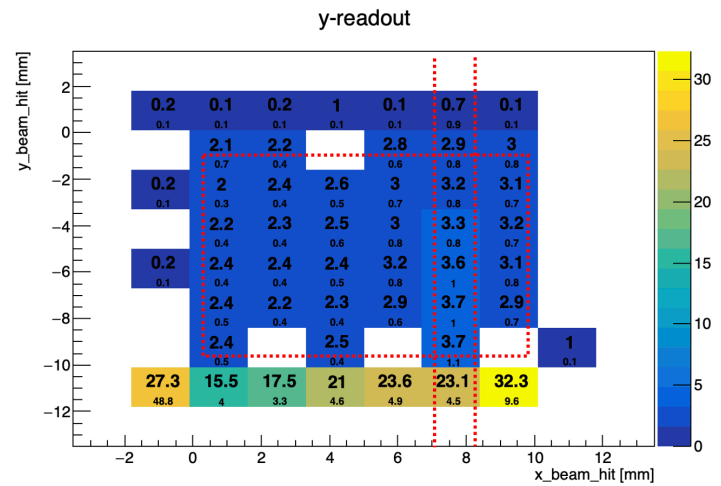
(b) y 方向

図 6.44: 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A を反射率 100% の容器による 8ch 読み出し複数セル検出器の光量分布のシミュレーション結果

また、単位エネルギーあたりの光量 6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 90% の容器に入れた場合の結果は図 6.45 となった。WbLS が封入されている領域にビームが照射した場合、同じサンプルと容器での 24ch 読み出しの xy 方向読み出し (図 6.41) と同じ光量であることが確認できた。これは、単位エネルギーあたりの光量 2000 p.e./MeV、吸収長 50 cm の WbLS サンプル A よりも WbLS サンプル B の方が吸収長が短いため、シンチレーション光がファイバーに収集される前に WbLS に吸収される頻度が高くなり、24ch と 8ch の x,y 読み出しでの光量値の差が小さくなった。



(a) x 方向



(b) y 方向

図 6.45: 6000 p.e./MeV、吸収長 30 cm の WbLS サンプル B を反射率 90% の容器による 8ch 読み出し複数セル検出器の光量分布のシミュレーション結果

以上から、24ch 読み出し検出器と 8ch 読み出し検出器の x,y 方向読み出しの光量値を比較すると、差は 2 p.e. 程度となることがわかった。ただし、WbLS の吸収長が短いと差が小さくなる。

今回の測定では WbLS 検出器 2 で Triton の割合の異なるサンプルを 24ch 読み出し容器と 8ch 読み出し容器に入れたが、ビームヒット位置をセルの中心とした場合、x,y 方向読み出し光量に大きな差がなかった。小型容器による宇宙線による光量試験測定でも Triton の割合の異なるサンプル間で大きな差がなかったことから、WbLS の吸収長は短いことが予想される。よって、8ch 読み出し容器で測定を行ったサンプルを 24ch 読み出し容器に封入した場合、サンプルの吸収長が 30 cm 場合を想定すると、xy 方向読み出しが 8ch 読み出しの光量値とフィッティングの誤差内で変わらないことが予想される。

よって、Triton の割合の異なるサンプルの光量を比較する場合、z 方向の読み出しの有無に関わらず、x,y 方向読み出しの光量を比較できる。

## 6.9 まとめ及び考察

今回のビームテストで用いた全ての WbLS 検出器で、粒子の飛跡を検出することに成功した。また、ビームのヒット位置を異なるセルの中心に変更した場合、ビームが通過した  $x, y, z$  方向全ての読み出し ch で同じ光量値となったことから、複数セル内で WbLS がおよそ均一に存在していることがわかった。ただし、大きなクロストークが見られ、原因は特定できなかった。

続いて1セル内の光量一様性を確認したところ、ファイバー付近にビームが通過した場合に高い光量となった。ただし、Triton の割合を低くすることで光量一様性を改善できる可能性がある。また、液体シンチレータの割合を増加させることで、セル内の光量を全体的に増加させることが期待できる。

一方、容器の壁付近をビームが通過した際、 $z$  方向読み出しで高い光量が確認された。原因として、容器と粒子の散乱による影響、あるいは WbLS の局所的な集中による高発光を考え、Geant4 による光学シミュレーションによって WbLS の局所的な集中の影響を確認した。今回の検証では、光量値からの原因の特定はできないことがわかった。

また、8 ch 読み出し容器と 24ch 読み出し容器で  $x, y$  方向の読み出し光量に違いが現れるかを確認した。WbLS の吸収長が短いと、光量差は小さくなることがわかった。

これからの WbLS 検出器の課題として、まず光量が低いことがある。改善のためには WbLS の液体シンチレータの割合を増やすことや容器の反射率を高いものに変更することがある。

その他の課題として、容器の壁での散乱の影響を減らすため、容器のデザインやより強度の高い材料及び容器製作方法の改善がある。

また、大きなクロストークの原因を解明することや、粒子の検出効率を求めることなどがある。

## 7 粒子識別評価のための光学シミュレーション

### 7.1 目的

新前置検出器では、ニュートリノと水の反応の精密測定を行うために、反応から放出される陽子と  $\pi$  粒子を判別することが求められる。

そのため、開発した WbLS を用いた検出器での  $p/\pi$  判別能力を Geant4 の光学シミュレーションを用いて確認した。

ただし、ビームテストでの光学シミュレーションの結果は測定結果を完全に再現することができなかった。そのため、今回のシミュレーション結果のみをもとに  $p/\pi$  判別能力を検討することはできないが、今後の開発の方向を決める際に参考にするために行った。

### 7.2 シミュレーション設定

WbLS 検出器のデザインは多数のセルを持った構造が考えられているが、今回のシミュレーションでは  $3 \times 3 \times 3$  セル検出器 (図 7.1) での 3 方向からのシンチレーション光の読み出しを設定した。1 セルの構造はビーム測定で用いた  $4 \times 4$  セル検出器と同じであり、大きさは  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  であり、容器の厚さは  $0.5 \text{ mm}$  とした。容器に 3 方向からファイバーを通すため、直径  $2 \text{ mm}$  の穴が空いている。

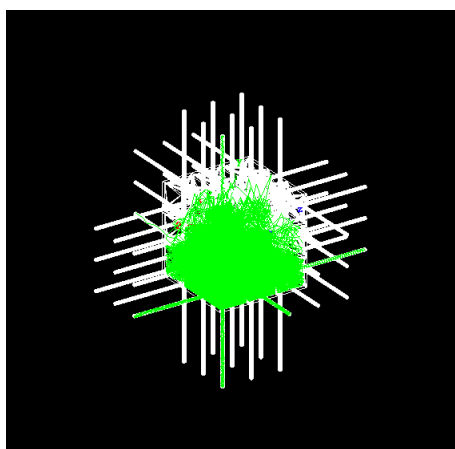


図 7.1: Geant4 での  $3 \times 3 \times 3$  セル検出器によるシミュレーションの様子。セル内部から放出された陽子によって発生したシンチレーション光が緑色の線で示されている

各検出器要素の設定は表 7.1 のようにした。粒子の発生位置は 27 セル検出器の端に位置する 1 つのセルの中心とした。粒子の運動量は  $500 \text{ MeV}$ 、運動量方向は発生点の位置するセルから他のセルを通過するよう、立体角  $\pi/4$  方向に一様とした。また、WbLS の単位エネルギーあたりの光量  $2000 \text{ p.e./MeV}$ 、吸収長  $50 \text{ cm}$ 、容器の反射率は  $95\%$  とした。製作した WbLS サンプルの中で安定して製作できるサンプルを想定しているため、単位エネルギーあたりの光量は低く設定している。そのため、製作した高発光量の WbLS サンプルはより高い光量値となることが予想される。

表 7.1: 3 × 3 × 3 セル検出器のシミュレーションの設定

	項目	設定値
ビーム	粒子の種類	陽子 or $\pi^+$
	発生位置	検出器の端に位置するセルの中心
	運動量	500 MeV
	運動量方向	立体角 $\pi/4$ 方向一様
WbLS	屈折率	1.34
	MeV あたり光量	2000 p.e./MeV
	吸収長	50 cm
容器	物質	PMMA (密度 1.19 g/cm <sup>3</sup> )
	反射率	95%
波長変換ファイバー	コア反射率	1.59
	第一クラッド反射率	1.49
	第二クラッド反射率	1.42

以下、飛跡の再構成の方法について説明する。まず、発生した粒子が最後に通過したセルを特定する。検出器の外側にあるセルのうち、粒子の発生したセルから離れたセルのうち、x,y,z 読み出し方向で 5 p.e. 以上の光量があり、3 方向読み出しの光量の総量が最も高いセルを求め、粒子が最後に通過したセルとした。次に、粒子の発生したセルの中心と、粒子が最後に通過したセルの中心の距離を求め、再構成した粒子の飛跡を得た (図 7.2)。

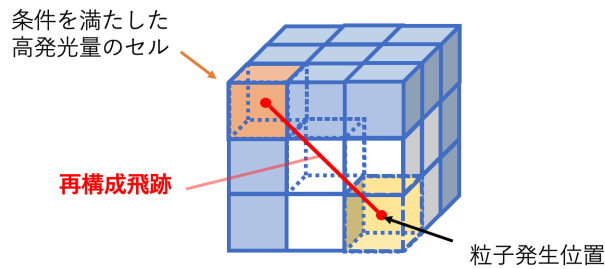


図 7.2: 再構成飛跡の模式図。発生した粒子が最後に通過するセルを特定するため、外側にあるセル (青色) の中から条件を満たしたセル (オレンジ色) を求め、発生したセルとの距離を再構成飛跡とした。

また、最後に全ての読み出し ch の光量を合計した値を再構成した飛跡の距離で割ることで、単位長さあたりの光量を求めた。

### 7.3 シミュレーション結果

陽子と  $\pi$  粒子に対する光量のシミュレーション結果は図 7.3 のようになった。粒子は 5000 event 発生させており、図中の分布に含まれるイベント数は  $\pi$  粒子で 4999 event 陽子で 5000 event となっている。今回の解析では飛跡を再構成する際、粒子が通過したセルの選択では各方向での読み出しが 5 p.e. 以上の光量がある



条件を課したため、セルでの発光が少ないイベントを分布から除いている。

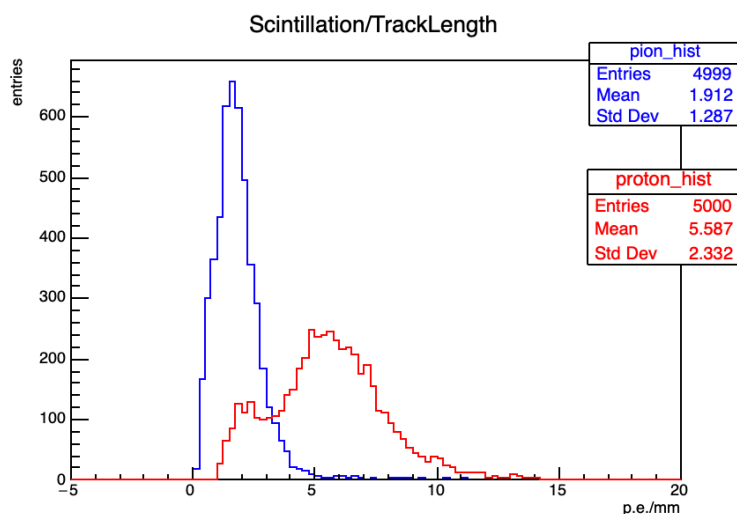


図 7.3:  $3 \times 3 \times 3$  セル検出器のシミュレーション結果

また、陽子の光量分布の領域の外で、陽子と  $\pi^+$  のイベント数を確認することで、 $p/\pi^+$  判別能力をみる。飛跡が再構成できたイベントのうち、 $\pi^+$  のイベント数が高発光領域におよそ 97.5% が含まれる光量値を決めた。その光量値未満の陽子及び  $\pi^+$  のイベント数から、再構成できたイベントに対する割合を求めた (表 7.2)。

表 7.2:  $3 \times 3 \times 3$  セル検出器の  $p/\pi^+$  イベント数

項目	$\pi^+$	陽子
再構成できた数	4999	5000
再構成イベント分布の 97.5% のイベントが含まれる光量値	4.5 p.e.	-
4.5 p.e. 未満のイベント数	4873	1544
再構成イベントに対する 4.5 p.e. 未満のイベントの割合	97.5%	30.9%

陽子のイベント数が高発光領域におよそ 97.5% が含まれる光量値でカットをかけた場合、再構成イベントに対するカット値未満の陽子のイベント割合は約 31% と高い値となった。ただし、この再構成方法では粒子が最後に通過したセルのみから再構成飛跡を求めており、全ての読み出し ch での光量の総和を使用しているため、陽子と  $\pi^+$  の混合割合が高くなっている。今後、粒子が通過した全てのセルを特定し、それらのセルでの読み出し光量から単位長さあたりの光量を求めるなど、飛跡の再構成に改善が必要である。

また、このシミュレーションの設定ではビーム測定の再現性が完全でないため、光学シミュレーション自体の改善が必要である。

加えて、実際には陽子が検出器内で停止する場合、落としたエネルギー分布はブラックピークを持つようになるため、低運動量の陽子の識別に関してより正確に行うことができると考えている。また、セルの数を増やした検出器では、粒子の飛跡によってヒットするセルが増え、より正確な再構成の飛跡の長さを求められると考えている。以上より、WbLS 検出器の実用に向けて、飛跡検出器のトラックの再構成の方法を検討することで  $p/\pi$  の判別の性能が上がることを期待している。

また、今回の解析では飛跡を再構成する条件として、粒子が通過したセルの選択では各方向での読み出しが 5 p.e. 以上の光量としたが、実際の検出器では MPPC による暗電流などが発生するため、ヒットを判断するための光量値を低くするとノイズによるイベントと混合しやすい。つまり WbLS の光量が少ないと、陽子と  $\pi$  の検出効率が低く、粒子が通過したセルを正しく選択できない。そのため、WbLS の光量を上げ、反射率の高い容器を用いることでファイバーでの読み出し光量を増やすことが重要となる。

#### 7.4 まとめ及び課題

Geant4 による光学シミュレーションによって、新前置検出器として必要な要件である WbLS 検出器の  $p/\pi$  の判別能力を検証した。しかし、飛跡再構成方法や光学シミュレーションの再現性などに問題があり、今後改善が必要であることがわかった。

ただし、飛跡の再構成をする場合に、WbLS 検出器がファイバーの読み出しでノイズとの区別が可能な光量をもつ必要がある。そのため、開発の方針として、引き続き WbLS の光量を上げることや反射率の高い容器を探索していくことが必要である。

## 8 結論

本研究では、HK での新前置検出器の開発として、新たに WbLS を製作し、光量測定試験を行った。求められる WbLS の性能は高発光量であり、安定性の高いサンプルであったため、物質の配合割合や種類を変えて製作した。

WbLS の光量測定では、PC の割合の 6% の増加に対し、ADC 値でおよそ 500 ほど増加した。また、Triton6% の増加に対しては ADC 値は 400, PPO の 0.6% の割合増加に対しては ADC 値が 100 ほど増加した。製作したサンプルのうち、Triton21%, PC11%, PPO1.3% のサンプルなどが高い光量となった。また、界面活性剤を Triton 以外に LAS、TERGITOL、塩化ベンゼトニウムを用いたサンプルでは、TERGITOL のサンプルが高光量となった。一方、界面活性剤や PPO の割合を高くすると、光量が高くなるが不安定になりやすい傾向が見られた。

波長変換ファイバーと MPPC の読み出しによる小型容器での光量測定では、WbLS の光量測定で高発光量だったサンプルの光量を測定し、WbLS のファイバー読み出し可能性を確認した。水と WbLS サンプルの測定結果より、WbLS サンプルの発光を初めてファイバーと MPPC による読み出しで測定することに成功した。

容器の製作方法による光量の比較を行ったところ、3D プリンタと板加工による容器では、周りで反射材を置いた状態で光量が 3D プリンタで高い値となり、3D プリンタ容器では光が通過していることがわかった。

また、WbLS の光量測定の結果と比較すると、PC、PPO の配合割合を増加したり、界面活性剤の種類を変更しても光量に違いが現れなかったが、Triton の割合を 4% 増加した場合、光量が 4 p.e. 増加することが確認できた。ファイバーと MPPC の読み出しによる光量が比較的高い WbLS サンプルは、Triton20%, PC11%, PPO1.4% のサンプルなどとなった。

ただし、容器からの WbLS の漏洩やファイバーのコアの溶解の問題が残った。

次に、WbLS を封入したファイバー読み出しによる 4×4 セル検出器を用いてビーム測定試験を行った。ビームのヒット位置を変更した場合、セルの読み出し光量はヒット位置に合わせて変化した。特に、ヒット位置がセルの中心であった場合、ビームの照射するセルを変更してもヒット位置のセルの読み出し光量が同じ値であった。以上のことから、WbLS 検出器は粒子の飛跡が検出可能である。

Triton の割合を変えたサンプル及び界面活性剤の種類を変えたサンプルでは、光量に大きな違いが現れなかった。しかし、セル内の光量一様性を向上させるためには Triton の割合を下げることで、セル内の光量を全体的に増加させるためには液体シンチレータの割合を増加させたり容器の反射率を上げることが有効であることが示唆された。

また、今回の測定結果だけでは WbLS の局所的な集中の有無を判断できなかった。課題としては低い光量や大きなクロストークなどがあり、界面活性剤の異なるサンプルに対してもこれから調べる必要がある。

最後に、WbLS を用いた新前置検出器で、ニュートリノと水の反応の精密測定に必要な要件である、陽子と  $p_i$  粒子の判別可能性を光学シミュレーションを用いて確認した。粒子の飛跡再構成の方法や光学シミュレーションの再現性などに課題があり、改善する必要があることがわかった。これらを踏まえ、今後も WbLS 検出器の  $p/\pi$  判別の可能性を引き続き検証していく。

ただし、セルのヒットを判断する際に WbLS の光量が低い場合、MPPC の暗電流によるノイズを粒子による発光として扱うことで粒子の再構成の飛跡を誤る。そのため、今後の開発でも引き続き高い光量をもつ WbLS の開発や、反射率の高い材料の探索を行う。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、協力して下さった方々にこの場を借りて感謝申し上げます。

中家剛教授は見落としていた問題の指摘など、いつもの確な助言をくださり、大変お世話になりました。また、いつも温かい言葉をかけてくださり、前向きに現状と向き合うことができました。

木河達也助教授は、機器の使い方などのささやかな相談でもいつも真摯に耳を傾けてくださり、さまざまな提案をしていただきました。WbLS の開発では慣れない作業が多く、研究の方針で迷うこともありましたが、木河さんのおかげでここまで研究が進めることができました。

筑波大学の飯田崇助教授には、WbLS について知識や製作方法を丁寧に教えていただきました。WbLS の製作にあたり、さまざまなヒントをもらうことができました。重ねて感謝申し上げます。

また、WbLS のビーム測定試験では準備期間から連日夜遅くまで作業を行った恩田さんと若林くんは、測定が上手くいかない時でも積極的に問題解決のために活動している姿を見て、とても励まされました。また測定期間中でも明るく作業を進めることができ、貴重な経験を積むことができました。

皆様ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] W. Pauli, "Dear radioactive ladies and gentlemen", Phys. Today 31N9, 27 (1978)
- [2] F. Reines, C. L. Cowan et al., "Detection of the free antineutrino" Phys. Rev. 117 (1960)
- [3] G. Danby et al., "Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos", Phys. Rev. Lett. 9, 36 (1962)
- [4] M.L.Perl et al., "Evidence for Anomalous Lepton Production in  $e^+ - e^-$  Annihilation", Phys. Rev. Lett. 35, 1489 (1975)
- [5] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, "Remarks on the Unified Model of Elementary Particles", Prog. Theor. Phys., 28, 870 (1962)
- [6] Y. Fukuda et al., "Measurement of the Flux and Zenith-Angle Distribution of Upward Throughgoing Muons by Super-Kamiokande", Phys. Rev. Lett. 82, 2644 (1998)
- [7] K. Abe, et al., Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with  $3.13 \times 10^{21}$  protons on target, Phys. Rev. D 103, 112008 (2021)  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.03779>
- [8] A. Aguilar et al. [MiniBooNE Collaboration], "First Measurement of the Muon Neutrino Charged Current Quasielastic Double Differential Cross Section", Phys. Rev. D 81, 092005 (2010)  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1002.2680>
- [9] S. Assylbekov, et al., The T2K ND280 Off-Axis Pi-Zero Detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 686 (2012)
- [10] P.A. Amaudruz, The T2K Fine-Grained Detectors, Nucl.Instrum.Meth.A 696 (2012)
- [11] N. Abgrall, et al., Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors, arXiv:1012.0865v1 [physics.ins-det] 3 Dec 2010
- [12] D. Allan, The Electromagnetic Calorimeter for the T2K Near Detector ND280, arXiv:1308.3445v2 [physics.ins-det] 18 Sep 2013
- [13] S. Aoki, The T2K Side Muon Range Detector, arXiv:1206.3553v2 [physics.ins-det] 25 Jun 2012
- [14] Lukas Berns (for the T2K collaboration), Recent Results from T2K, Proc. of the 55th Rencontres de Moriond, Electroweak (2021)
- [15] K. Abe, et al., J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report, arXiv:1908.05141v1 [physics.ins-det] 14 August 2019
- [16] K. Abe, et al. [T2K Collaboration], T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report, arXiv:1901.03750v2 [physics.ins-det] 14 Oct 2020
- [17] MPPC, 浜松ホトニクスホームページ [https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what\\_is\\_mppc.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html)
- [18] 波長変換ファイバー, 株式会社 Kuraray ホームページ <https://www.kuraray.co.jp/products/psf>
- [19] 波長変換ファイバー, 株式会社 Kuraray 製品カタログ [https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf)
- [20] Glenn F. Klnoll, 放射線計測ハントブック (第4版), オーム社, 2013年
- [21] PC, 東京化成工業ホームページ <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/T0469>

- [22] PPO, 東京化成工業ホームページ <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/D0902>
- [23] Bis-MSB, 東京化成工業ホームページ <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/B1024>
- [24] Triotn, 東京化成工業ホームページ <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/P1775>
- [25] SDS, 東京化成工業ホームページ <https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/D1403>
- [26] PMT, 浜松ホトニクスホームページ [https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/about\\_pmts.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/about_pmts.html)
- [27] 光電子増倍管 R329-02, 浜松ホトニクスホームページ [https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/pmt\\_tube-alone/head-on-type/R329-02.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/pmt_tube-alone/head-on-type/R329-02.html)
- [28] M. Yokoyama, et al., Mass production test of Hamamatsu MPPC for T2K neutrino oscillation experiment, Nucl. Instrum. Meth. A610 362-365, (2009)
- [29] 五味 慎一, 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築, 京都大学大学院, 平成 20 年 1 月 31 日 [https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/gomi\\_mt.pdf](https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/gomi_mt.pdf)
- [30] 研究施設概要, 東北大学電子光物理学研究センター ホームページ <https://www.lns.tohoku.ac.jp/>