

2023 年度 修士論文

---

J-PARC KOTO 実験のビーム中荷電粒子  
検出器に用いる光電子増倍管の高電圧供給  
基板部の開発

---

北川 歩

大阪大学理学研究科物理学専攻  
山中卓研究室 博士前期課程 2 年

2023 年 2 月 28 日

## 概要

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) を用いた KOTO 実験は、CP 対称性を破る稀崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索している。標準理論では、この崩壊の崩壊分岐比は  $3 \times 10^{-11}$  と予測されているが、これまで行われた実験では観測されていない。2016~2018 年に取得した物理データの解析の中で、荷電 K 中間子 ( $K^\pm$ ) が最大の背景事象源であった。我々は  $K^\pm$  の崩壊による背景事象を削減するため、KOTO 検出器上流部、ビームライン上の真空中に設置する荷電粒子検出器 UCV (Upstream Charged Veto) を開発した。UCV は、厚さ 0.2 mm、160 mm 角のプラスチックシンチレータを用いる。シンチレータ内部で全反射されず漏れ出したシンチレーション光を、厚さ 12  $\mu\text{m}$  のアルミ蒸着フィルムで反射集光し、ビーム外に置かれた 14 本の光電子増倍管 (PMT) で読み出す。本研究では、UCV に用いる PMT の電圧供給基板部を開発した。PMT の基板部には高電圧が印加されているため、真空中で放電や温度上昇を起こし、PMT の破損につながる恐れがある。そこで、放電や温度上昇を防ぎ、真空中で安定に使用できる基板部と冷却方法を開発した。0.8 MHz で粒子がヒットする通常の実験データ収集において、PMT の増倍率が 3% の範囲で安定であることを保証した。

## 目次

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | 序論  | 1  |
| 1.1   | $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊と KOTO 実験 | 1  |
| 1.2   | KOTO 実験の概要  | 1  |
| 1.2.1 | J-PARC  | 1  |
| 1.2.2 | KOTO ビームライン                                       | 2  |
| 1.2.3 | 信号事象の検出方法   | 2  |
| 1.2.4 | 2016–2018 年物理ランでの背景事象数                            | 4  |
| 1.3   | 荷電 K 中間子による背景事象                                   | 4  |
| 1.3.1 | ビームラインでの荷電 K 中間子の生成                               | 4  |
| 1.3.2 | Upstream Charged Veto (UCV)                       | 4  |
| 1.3.3 | 新型 UCV  | 6  |
| 1.4   | 本研究の目的  | 6  |
| 2     | 真空使用に向けた光電子増倍管の高電圧供給基板部の設計                        | 9  |
| 2.1   | 本研究の留意点   | 9  |
| 2.2   | UCV に用いる光電子増倍管に要求される性能                            | 10 |
| 2.2.1 | 大きさに対する要求   | 10 |
| 2.2.2 | 真空中での挙動に対する要求                                     | 11 |
| 2.2.3 | 出力に対する要求  | 12 |
| 2.2.4 | 検出波長範囲に対する要求                                      | 13 |
| 2.2.5 | レート耐性に対する要求                                       | 13 |
| 2.3   | 高電圧供給基板部の設計                                       | 14 |
| 2.3.1 | 使用する光電管   | 14 |
| 2.3.2 | 高電圧供給回路の設計  | 15 |
| 2.3.3 | 真空使用に向けた試作基板の設計                                   | 19 |
| 2.3.4 | 真空使用に向けた本番用基板部の設計                                 | 20 |
| 3     | 真空中での動作試験   | 27 |
| 3.1   | 放熱試験  | 27 |
| 3.2   | 放電試験  | 30 |

---

|     |                          |    |
|-----|--------------------------|----|
| 4   | レート耐性試験                  | 35 |
| 5   | 考察                       | 39 |
| 5.1 | 水冷試験についての考察 . . . . .    | 39 |
| 5.2 | 放電試験についての考察 . . . . .    | 39 |
| 5.3 | レート耐性試験についての考察 . . . . . | 40 |
| 5.4 | PMT の全数試験に向けて . . . . .  | 40 |
| 6   | 結論                       | 42 |

## 図目次

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | J-PARC の全景 [5] . . . . .   | 2  |
| 1.2  | KOTO ビームラインの概略図。T1 Target と KOTO 検出器の間が KOTO ビームラインに対応する [6]。 . . . . .                              | 3  |
| 1.3  | KOTO 検出器の概要図と $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊 . . . . .                                     | 4  |
| 1.4  | 荷電交換反応によってコリメータ上で $K^\pm$ が生成される様子 . . . . .   | 5  |
| 1.5  | UCV の位置 . . . . .  | 5  |
| 1.6  | UCV I の写真 . . . . .  | 5  |
| 1.7  | UCV の模式図 . . . . .   | 7  |
| 1.8  | UCV の写真。左側のみ PMT が挿入されている。 . . . . .   | 7  |
| 1.9  | X 軸方向から見た UCV の写真。PMT は紙面奥側にある PMT ホルダーに挿入され、固定されている。 . . . . .                                      | 7  |
| 2.1  | 光電管の動作概念図 [12]。 . . . . .  | 9  |
| 2.2  | 一般的な PMT のデバイダ回路。図は浜松ホトニクス社の H7415 のもの。 . . . . .  | 10 |
| 2.3  | 基板の例 [12]。基板上にデバイダ抵抗、コンデンサが見えている。 . . . . .  | 10 |
| 2.4  | 光入力のない時の動作 [12] . . . . .  | 11 |
| 2.5  | 光入力のある時の動作 [12] . . . . .  | 11 |
| 2.6  | Z 軸上流方向から見た UCV チェンバーの概要図 . . . . .  | 12 |
| 2.7  | 抵抗周囲温度と許容電圧の関係 [13]。図は RK73B シリーズのもので、型名ごとの直線が描かれている。 . . . . .                                      | 13 |
| 2.8  | R14095 の概要図 . . . . .  | 15 |
| 2.9  | R14095 を底面から見た時のダイノードピンの位置 . . . . .   | 15 |
| 2.10 | 1 段のダイノードを持つ PMT。 $E_0$ は光電面と第 1 ダイノード間にかかる電圧で、 $E_1$ は第 1 ダイノードとアノードの間にかかる電圧。点線はグラウンドを表す。 . . . . . | 17 |
| 2.11 | $n$ 段のダイノードを持つ PMT。第 $n$ ダイノードとアノード間を除いて等倍の分圧比になっている。点線はグラウンドを表す。 . . . . .                          | 18 |
| 2.12 | R14095 の分圧回路 . . . . .   | 19 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.13 | 試作基板の、デバイダ抵抗とケーブルがはんだ付けされている面の写真。試作基板は山中卓研究室の所持する基板加工機 Auto Lab を用いて作成した。 . . . . .        | 20 |
| 2.14 | 本番用基板の、デバイダ抵抗とケーブルがはんだ付けされている面の写真。 . . . . .   | 21 |
| 2.15 | 本番用基板の、コンデンサがはんだ付けされている面の写真。 . . . . .   | 21 |
| 2.16 | U.FL Receptacle の概要図 [15]。左図は U.FL コネクタを嵌合する側から見た図で、右図は側面から見た図。図中の数字の単位は mm である。 . . . . . | 22 |
| 2.17 | DRAKA CEH-50 ケーブルの概要図 [16]。 . . . . .  | 22 |
| 2.18 | SHV-P コネクタの概要図 [17]。図中の数字の単位は mm である。 . . . . .  | 22 |
| 2.19 | PMT、アルミニウム筒と接合された基板の、抵抗側の写真。同軸コネクタ部を除いてシリコンがポッティングされている。UCV に使用する際は全面にポッティングを施す。 . . . . . | 23 |
| 2.20 | PMT、アルミニウム筒と接合された基板の、コンデンサ側の写真。コンデンサとサーミスタがある部分のみシリコンがポッティングされている。 . . . . .               | 23 |
| 2.21 | 側面から見た Al 筒の概要図。下側が基板に接着される。黒色の丸が M3 径のネジ穴に対応する。 . . . . .                                 | 24 |
| 2.22 | 上から見た Al 筒の概要図。赤色で示した、4 ヶ所の対称な位置に M3 径のネジ穴がある。 . . . . .                                   | 24 |
| 2.23 | 基板の配線パターンを基準に、外周を 4 等分する。Al 筒の M3 タップが、図中の色付きの丸の真上に来るように配置する。 . . . . .                    | 24 |
| 2.24 | 放熱機構の概要図。左図はアルミニウム筒と銅網線の接合方法を示した図。右図は各 PMT のアルミニウム筒と水冷銅管か銅網線によって接続されている様子を示した図。 . . . . .  | 25 |
| 2.25 | 水冷銅管と銅網線の接続部分を横から見た図。 . . . . .  | 25 |
| 2.26 | 水冷銅管と銅網線の接続部分を上から見た図。UCV 実機ではよりコンパクトなボルト、ナットとより短いネジを用いる予定である。 . . . . .                    | 25 |
| 2.27 | 水冷銅管を含めた UCV の CAD 図。青色で示した部分が $\phi 1/4$ inch の水冷銅管に対応する。図は大阪大学の小寺克茂氏による [18]。 . . . . .  | 26 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | サーモカメラを用いた試作基板の温度上昇試験。写真は基板の抵抗が置かれている面を示す。 . . . . .  | 28 |
| 3.2 | 真空チェンバー内の放熱試験のセットアップを上から見た写真。PMTを冷やす部分の配管のみ真鍮で、それ以外の配管は樹脂からなる。真鍮管と樹脂配管は、真空用のチューブ継手で接合されている。PMTのみを冷やすために、真鍮管と継手はプラスチックの空箱の上に置き、床と熱的に絶縁している。写真ではプラスチック箱はブラックシートに覆われている。 . . . . . | 29 |
| 3.3 | 真空チェンバー内の放熱試験のセットアップを、PMTの近くから見た写真。この写真においては、2本の銅網線がAl筒に接続されている。 . . .  | 30 |
| 3.4 | 1本の銅網線を用いた水冷試験の結果。縦軸はサーミスタの温度、横軸は測定時間(分)を表す。 . . . . .  | 31 |
| 3.5 | UCVのCAD図。水冷銅管とPMTが青色で示してある。赤い点線は銅網線を表す [18]。 . . . . .  | 31 |
| 3.6 | PMTを側面から見た図。青の丸が水冷管に対応する。また、赤い点線は銅網線を表し、長さは28 mmである。 . . . . .  | 32 |
| 3.7 | 放電モニター回路 . . . . .  | 32 |
| 3.8 | 放電信号の波形 . . . . .   | 33 |
| 3.9 | 放電試験に用いたプロトタイプ基板。赤丸で囲った部分はHVケーブルをはんだ付けしている部分であり、黒く焦げていることがわかる。 . . .  | 33 |
| 4.1 | レート耐性試験のセットアップ . . . . .  | 36 |
| 4.2 | 取得した波形の例。1光電子の信号はランダムな位置にあり、100光電子の信号は常に同じ場所にある。 . . . . .  | 37 |
| 4.3 | 領域Aに入った信号の波高分布。 . . . . .   | 38 |
| 4.4 | UCV PMTが読み出す100光電子の波高の1光電子のレート依存性。UCV PMTの印加電圧は、1.1 kV (黒)、1.25 kV (赤)、1.4 kV (青)である。縦軸は100光電子の波高、横軸は1光電子のレートを示す。それぞれの印加電圧について2回測定した。 . . . . .                                 | 38 |
| 5.1 | 放電信号を足し合わせる回路。 . . . . .  | 41 |

# 1 序論

## 1.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊と KOTO 実験

初期の高温の宇宙では、粒子と反粒子が対生成により等量生成される。しかし、膨張して冷えた現在の宇宙にはほとんど反粒子は残っておらず、粒子と反粒子の対称性（CP 対称性）が破れている。標準理論にも CP 対称性の破れが組み込まれているが、物質優勢の宇宙を説明するには破れの大きさが小さいため [1]、標準理論を超えた機構（新物理）が必要である。

標準理論によると、中性で寿命の長い K 中間子  $K_L$  は稀に、CP 対称性を破るモード  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  で崩壊する。標準理論から予測されるこの崩壊の崩壊分岐比は  $3 \times 10^{-11}$  と抑制されており、予測精度も 2% と精密である [2]。  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の崩壊分岐比を測定し、標準理論から予測される分岐比から乖離があった場合、新物理が寄与していることの証拠になる。この崩壊はこれまで行われた実験ではまだ観測されていない。

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設（J-PARC）を用いた KOTO 実験は、この  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊を探索している。KOTO 実験グループは、2015 年に取得したデータの解析により、  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の崩壊分岐比に  $3 \times 10^{-9}$ （90% C.L.） [3] という上限値を与えている。

## 1.2 KOTO 実験の概要

### 1.2.1 J-PARC

図 1.1 に示すように、J-PARC の加速器は線形加速器（Linac）、シンクロトロンである Rapid Cycling Synchrotron（RCS）、Main Ring（MR）の 3 つの加速器から成る。MR で 30 GeV まで加速された陽子は、2 秒間でハドロン実験施設に取り出される（スピル）。

取り出された陽子のビームパワーは次のように求められる。

$$\text{Beam power} = E_{\text{proton}} \times N_{\text{spill}}^{\text{proton}} / s_{\text{spill}}$$

ここで  $E_{\text{proton}}$  は陽子のエネルギー、  $N_{\text{spill}}^{\text{proton}}$  はスピル中の陽子数、  $s_{\text{spill}}$  はスピルの周期である。2016–2018 年のデータ取得時には、  $N_{\text{spill}}^{\text{proton}}$  は  $(4\text{--}5) \times 10^{13}$ 、  $s_{\text{spill}}$  は 5.2–5.5 s であった。



### 1.2.2 KOTO ビームライン

図 1.2 に KOTO 実験のビームラインを示す。ハドロン実験施設に取り込まれた陽子は、金の標的 (T1 Target) と衝突し、 $K_L$  を含む 2 次粒子を生成する。KOTO ビームラインは標的から 1 次ビームライン (Primary beam line) に対して 16 度の方向に出た 2 次粒子を用いる。KOTO ビームライン上流部には 70 mm 厚の鉛 (Photon Absorber) があり、ビームに含まれる光子を削減する。また、2 つのコリメータによってビームを絞り、標的から 21.5 m 下流にある KOTO 検出器入口で 8 cm 角になるように成形する。コリメータ間には電磁石 (Sweeping Magnet) があり、ビーム中の荷電粒子を除去する。短寿命の粒子は KOTO 検出器に入る前に崩壊してしまう。以上により、ビームライン下流にある KOTO 検出器には、主に  $K_L$  や中性子、ガンマ線が入射する。

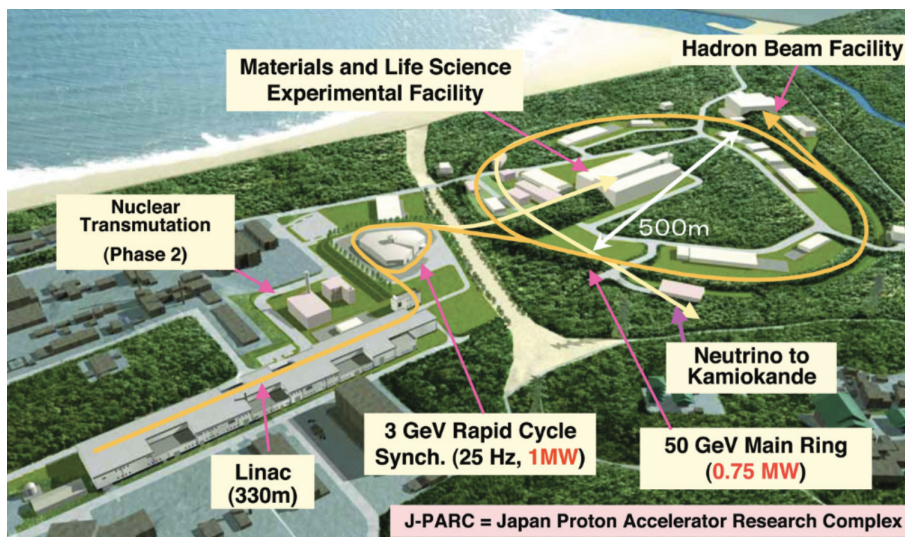


図 1.1 J-PARC の全景 [5]

### 1.2.3 信号事象の検出方法

次に信号事象の検出方法について述べる。KOTO 実験では  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を信号事象とする。

座標軸はビーム軸を Z 軸 (下流側が正)、鉛直方向を Y 軸 (上向きが正) として右手系を成すように定義する。真空容器内の検出器の上流端面<sup>\*1</sup>とビーム軸の交点を座標の原点

<sup>\*1</sup> 図 1.5 で Front Barrel (FB) の上流端面にあたる。

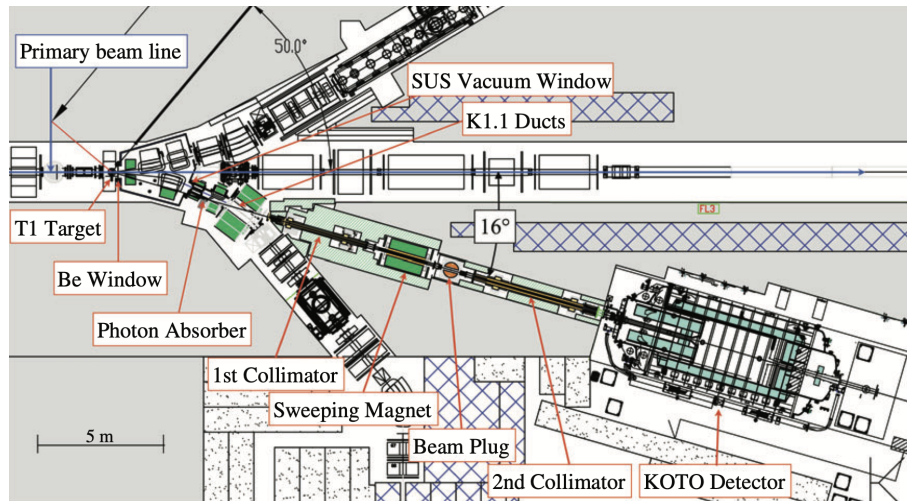


図 1.2 KOTO ビームラインの概略図。T1 Target と KOTO 検出器の間が KOTO ビームラインに対応する [6]。

とする。

図 1.3 に KOTO 検出器の概要図と  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の例を示す。 $\pi^0$  は寿命が  $\tau = 8.4 \times 10^{-17}$  秒と短く、ただちに 2 つのガンマ線に崩壊する。ニュートリノは検出されないため、これらのガンマ線のヒット位置とエネルギーを KOTO 検出器下流の電磁カロリメータで検出する。電磁カロリメータ以外の検出器を veto 検出器と呼び、電磁カロリメータで 2 個のガンマ線を検出した際に veto 検出器でそれ以外の粒子を検出した場合、その事象を排除する。

ビームに含まれる中性子が残留ガスと反応し、 $\pi^0$  を生成することを防ぐために、ビーム領域は真空に保たれている。さらに、ビーム領域を真空に保つための容器と、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊以外に由来するガンマ線が反応し、そのガンマ線を検出できずに背景事象となることを防ぐために、ほとんどの検出器も真空を保つ容器の内側に置かれている。

次に信号事象の再構成について述べる。コリメータで細いビームを作っているため、 $\pi^0$  はビーム軸上で崩壊したと仮定する。仮定した  $\pi^0$  の崩壊位置の Z 座標と、電磁カロリメータで測定した 2 つのガンマ線のエネルギーとヒット位置から、ガンマ線の運動量を求める。2 つのガンマ線の不変質量が  $\pi^0$  の不変質量と等しくなるように崩壊位置の Z 座標を決める。ニュートリノが  $K_L$  の運動量の一部を持ち去るため、 $\pi^0$  がビーム軸に対して垂直な方向の運動量成分（横方向運動量）を持つ。そこで、再構成された Z 座標と  $\pi^0$  の横方向運動量を用いてある領域を定義し、その中に入った事象を信号事象の候補とする。

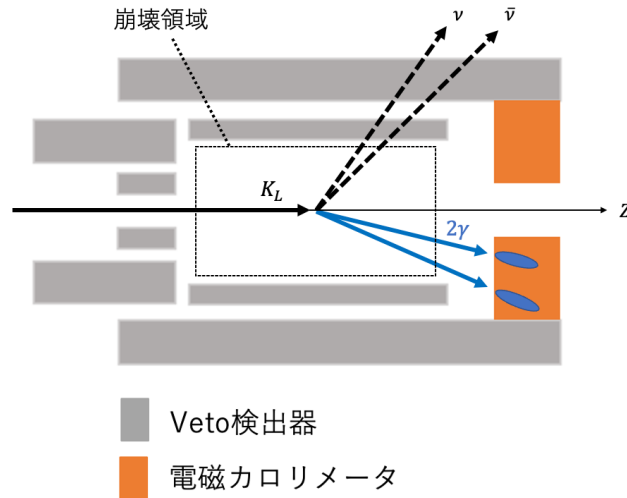


図 1.3 KOTO 検出器の概要図と  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊

#### 1.2.4 2016–2018 年物理ランでの背景事象数

2016 年から 2018 年にかけて取得した物理データにおける Single Event Sensitivity <sup>\*2</sup> (SES) は  $7.2 \times 10^{-10}$  と見積もられている。このデータにおける全背景事象数は 1.22 事象と見積もられており、このうち 1.3 節で説明する  $K^\pm$  由来の背景事象数は 0.87 事象で、最大の背景事象源であった [7]。

### 1.3 荷電 K 中間子による背景事象

#### 1.3.1 ビームラインでの荷電 K 中間子の生成

1.2.1 節で述べたように、ビームに含まれるほとんどの荷電粒子は電磁石によって排除される。しかし、図 1.4 に示すように、ビーム中の  $K_L$  がコリメータにヒットし荷電交換反応を起こして  $K^\pm$  となることがある。もしこの  $K^\pm$  が KOTO 検出器内で  $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu$  に崩壊し、崩壊で出た  $e^\pm$  が検出されなかった場合、この事象は背景事象となりうる。

#### 1.3.2 Upstream Charged Veto (UCV)

$K^\pm$  背景事象を排除する有効な方法は、KOTO 検出器に侵入する  $K^\pm$  を検出することである。そこで我々は荷電粒子検出器 Upstream Charged Veto (UCV) を開発し、2020

<sup>\*2</sup> 信号事象を探索する上での感度の指標。ある崩壊分岐比 Br を持つ事象に対し、特定の SES で予想される事象数  $N$  は  $N = \text{Br}/\text{SES}$  である。

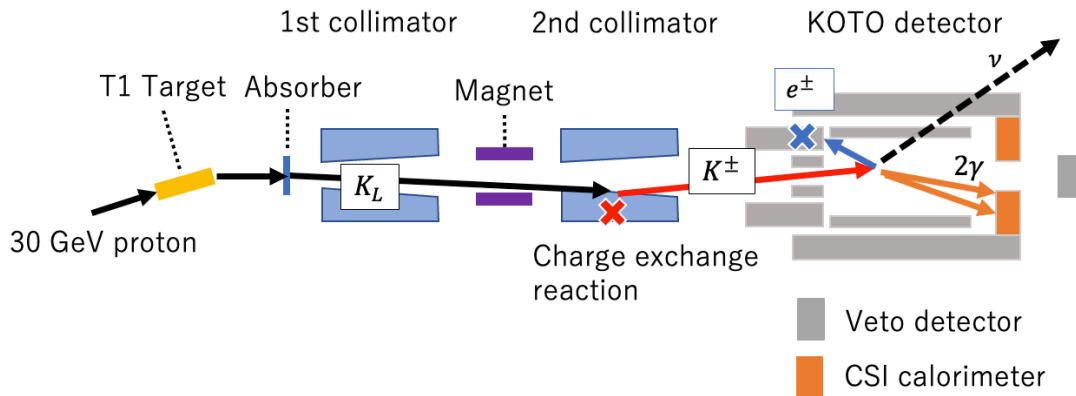


図 1.4 荷電交換反応によってコリメータ上で  $K^\pm$  が生成される様子

年に、図 1.5 に示すように、KOTO 検出器の上流のビームライン中に設置した。2020 年に設置した UCV (UCV I) は、図 1.6 に示すように、0.5 mm 厚のシンチレーションファイバーを並べて平面の検出領域を作り、ファイバー端からシンチレーション光を Multi Pixel Photon Counter (MPPC) を用いて読み出す構造になっている。

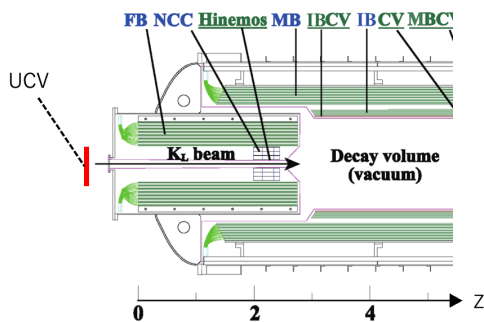


図 1.5 UCV の位置

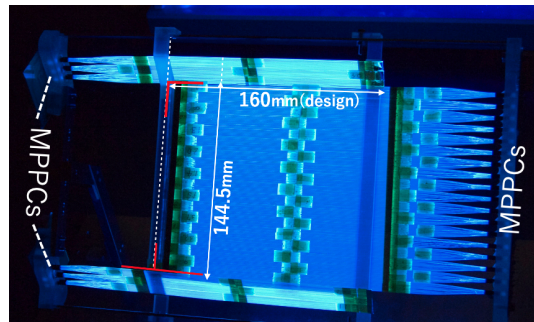


図 1.6 UCV I の写真

UCV I を用いた 2021 年の物理ランで取得したデータにおける SES は、2016–2018 年のデータと同程度の  $7.9 \times 10^{-10}$  と見積もられており、 $K^\pm$  背景事象数は、 $0.043^{+0.016}_{-0.022}$  事象であった [8]。

UCV I を導入したことで、2021 年のランでは 2016–2018 年のランに比べて  $K^\pm$  背景事象が大幅に削減されたものの、以下で説明するように、UCV I にはいくつかの改善すべき点がある。

1 つ目は検出効率である。我々は検出感度を上げるために、 $K^\pm$  背景事象をさらに 10 倍以上削減することを目指している。UCV I の検出効率は 92% と見積もられているため

[9]、99.2%以上の検出効率を目標とした新しい検出器が必要である。

また、UCVを導入したことによる信号事象のアクセプタンス<sup>\*3</sup>の低下も問題である。ビーム中に含まれる大量の $\gamma$ や中性子をUCVが検出し、電磁カロリメータの $2\gamma$ と偶発的に同期した場合、信号事象を排除してしまう。また、UCV自体によってビーム中の粒子が散乱され、他のveto検出器にヒットし、電磁カロリメータの $2\gamma$ と偶発的に同期した場合も信号事象を排除してしまう。

さらに、UCVで散乱された $K_L$ や中性子自体も背景事象源となりうる。

以上のことを踏まえて、UCV Iに比べてより低物質質量で、中性粒子との反応確率を下げつつも、荷電粒子に対してより高感度な新型UCVが必要である。

### 1.3.3 新型UCV

1.3.2節で述べたように、UCV Iにはいくつか改善すべき点があった。そこで今回、より低物質質量・高感度のUCV II（以下UCVと呼ぶ）を開発し、性能向上を図った。UCVは図1.7のような設計である。まず、160 mm角で、厚みをUCV Iの4割である0.2 mmにしたプラスチックシンチレータ（以降UCVシンチレータと呼ぶ）を用いる。UCVシンチレータは薄く、シンチレータ内部で反射される回数が多い。シンチレータ内部を伝搬するシンチレーション光は、反射のたびに小さくなるため、薄いUCVシンチレータでは内部を伝搬して端面に到達する光量は小さい。そこで、UCVでは、内部で全反射されずに外に漏れ出したシンチレーション光を、厚さ12  $\mu\text{m}$ のアルミ蒸着フィルムで反射集光し、ビーム外に置かれた光電子増倍管（PMT）で読み出す。図1.8、1.9に示すように、PMTはシンチレータの両側に7本ずつあり、六角形に並べられている。PMTは、PMTホルダーに挿入して固定する。

## 1.4 本研究の目的

UCVはビームライン中に置かれるため、UCVに使用するPMTは真空中で使用できる必要がある。第2章で述べるように、PMTの基板には高電圧が印加されているため、真空中で放電や温度上昇を起こし、PMTの破損につながる恐れがある。本研究の目的は、放電や温度上昇を防ぎ、真空中で安定に使用できる基板部と冷却方法を開発することである。また、0.8 MHzで粒子がヒットする物理ランにおいて、開発した基板部を用いたPMTの増倍率が安定であるか確認する。

---

<sup>\*3</sup> ある事象が1回起きた時、それを観測できる割合

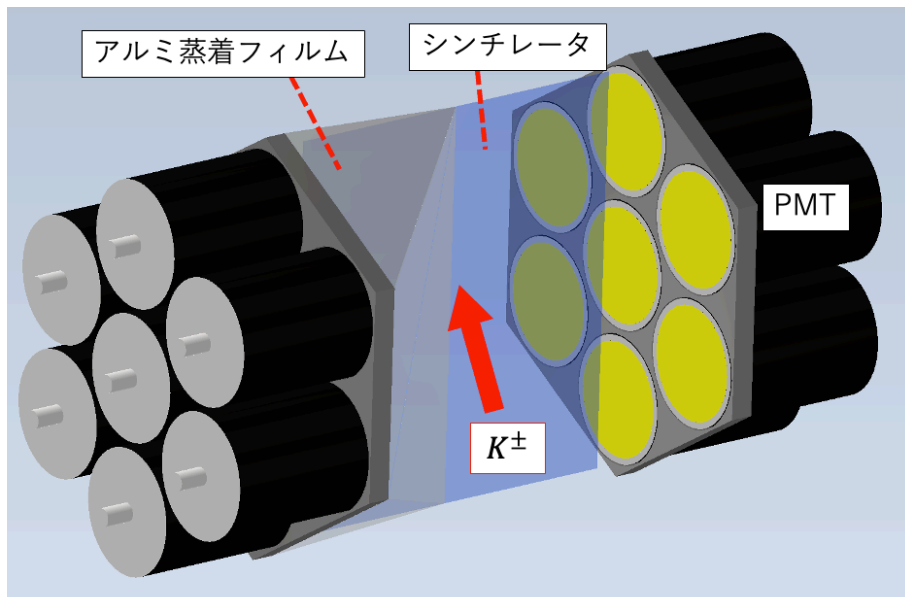


図 1.7 UCV の模式図

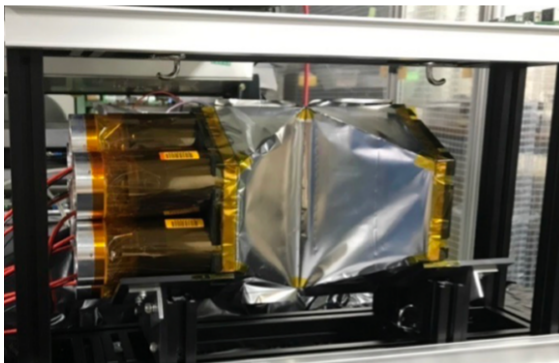


図 1.8 UCV の写真。左側のみに PMT が挿入されている。



図 1.9 X 軸方向から見た UCV の写真。PMT は紙面奥側にある PMT ホルダーに挿入され、固定されている。

---

以下、第2章ではUCVに用いるPMTに要求される性能と、それらを満たすための基板の設計について述べる。また、基板を真空中で使用するための、基板の周辺機構の設計についても説明する。第3章で、設計した基板と周辺機構を用いたPMTの、真空中での動作試験について述べる。第4章で設計した基板を用いたPMTが、高レートの光電子を読み出すときの増倍率（ゲイン）の安定性について述べる。第5章では、第3章と第4章の結果について考察する。第6章で本研究の結論を述べる。

## 2 真空使用に向けた光電子増倍管の高電圧供給基板部の設計

### 2.1 本研究の留意点

PMT は一般的に、図 2.1 に示すような電子を増幅する光電管と、図 2.2、図 2.3 に示すような、光電管に電圧を印加するデバイダ基板（以降単に基板と呼ぶ）からなる。光電管では、光電面に入射した光を光電子に変換し、ダイノードで増幅する。そのために、基板上の分圧回路（デバイダ回路）を用いて光電面とアノードの間に高電圧を印加し、各ダイノード間を直列の抵抗（デバイダ回路）で分圧する。

通常デバイダ回路には狭い領域で 500~3000 V の高電圧が印加されるため、基板は真空中で放電を起こしやすい。放電は加速された電子が気体分子と衝突し、気体分子を電離させることによって起こる。大気圧から真空度が上がると、電子の平均自由行程が大きくなり、気体分子を電離させられるエネルギーまで電子が加速されるため、放電が起きやすくなる。しかし、さらに真空度が上がると、気体分子と衝突する確率が下がるため、放電は起きにくくなる。PMT が破損することを避けるために、放電を防ぐ必要がある。

また、デバイダ回路では通常、数百 mW~数 W の熱が発生する。真空中では空気の対流による放熱が期待できないため、放熱が不十分であると基板の温度が上昇する。基板の破損を避けるため、温度上昇を最小限に抑える必要がある。

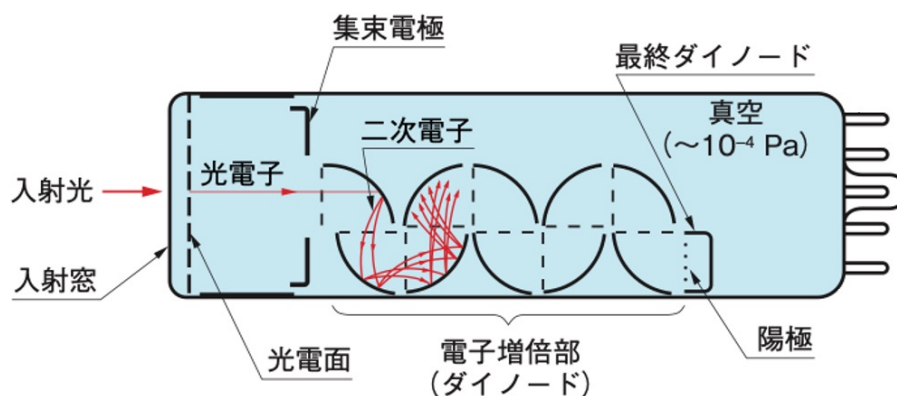


図 2.1 光電管の動作概念図 [12]。

次に入射光量に対するゲインの安定性について述べる。図 2.4、2.5 に示すように、入射光があるとき、デバイダ回路を流れる電流（デバイダ電流）が変化し、ダイノード間の電圧比を変化させる。入射光量を大きくしていくと、光電管内を流れる信号電流が各ダイ



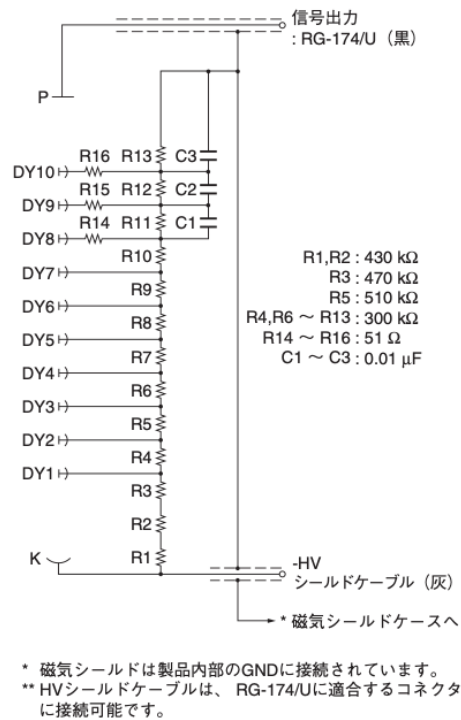


図 2.2 一般的な PMT のデバイダ回路。図は浜松ホトニクス社の H7415 のもの。

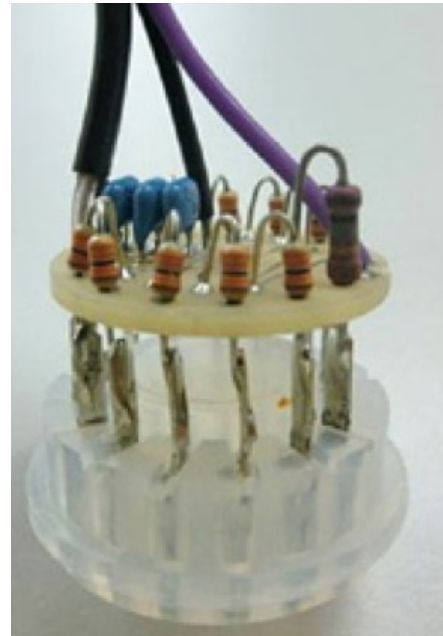


図 2.3 基板の例 [12]。基板上にデバイダ抵抗、コンデンサが見えている。

ノードからデバイダ回路に流入するため、デバイダ電流がカソードに近いほど大きくなり、ダイノード初段部にかかる電圧が大きくなる。このとき、全体の電圧は外部電源で固定されているため、ダイノード後段部の電圧比が小さくなり、ゲインが減少する。[11]。このゲイン変動を防ぐには、デバイダ回路の抵抗値を小さくして、デバイダ電流を大きくし、デバイダ回路に流入する電流の影響を相対的に小さくすればよい。しかしデバイダ電流を大きくすると、デバイダ抵抗での発熱が大きくなる。

## 2.2 UCV に用いる光電子増倍管に要求される性能

### 2.2.1 大きさに対する要求

図 2.6 に UCV が置かれる真空チェンバー (UCV チェンバー) の概要を示す。UCV チェンバー内の空間の、X 方向の長さは 520 mm であり、このうちシンチレータが 160 mm を占めている。PMT は、UCV チェンバーの中心にあるシンチレータの両側に置かれるため、ケーブル等も含め、長さは 180 mm 以下でなければならない。

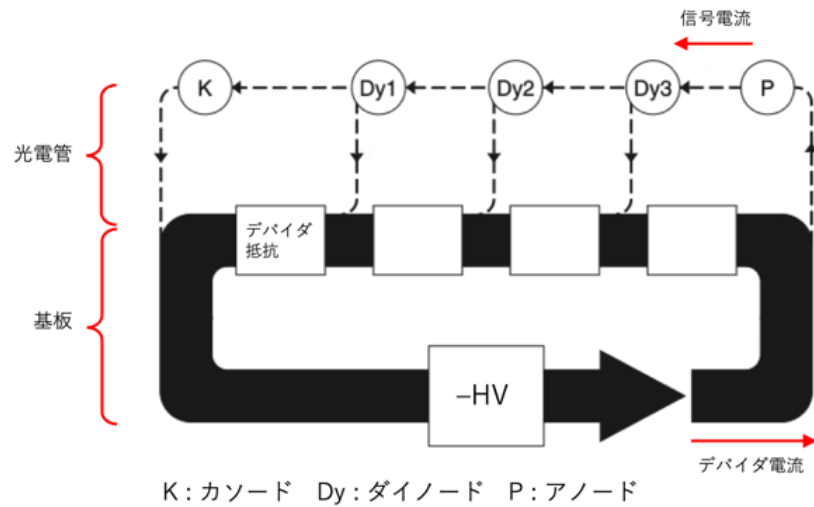


図 2.4 光入力のない時の動作 [12]

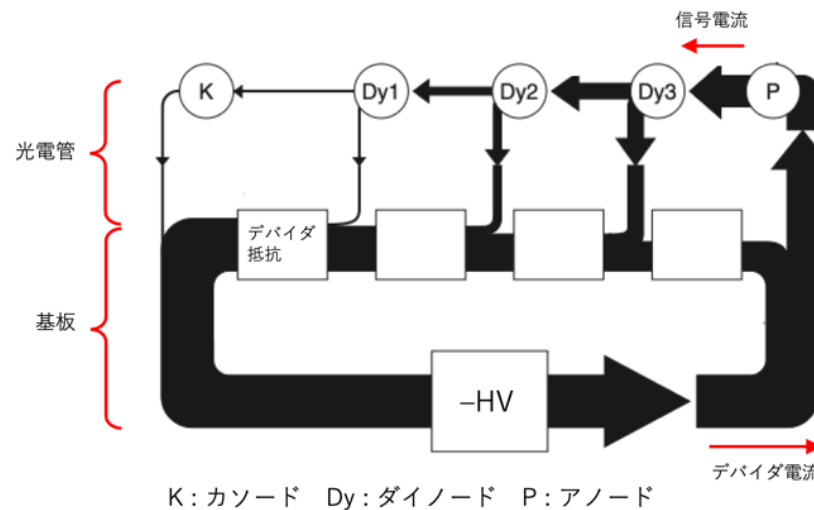


図 2.5 光入力のある時の動作 [12]

### 2.2.2 真空中での挙動に対する要求

UCV はビームライン上、気圧  $P < 0.1 \text{ Pa}$  の真空中に置かれる。そのため UCV に使用する PMT も真空中で使用できる必要がある。2.1 節で述べたように、真空中では放電が起きる可能性がある。放電が起きると PMT が破損するため、この可能性を排除する必要がある。

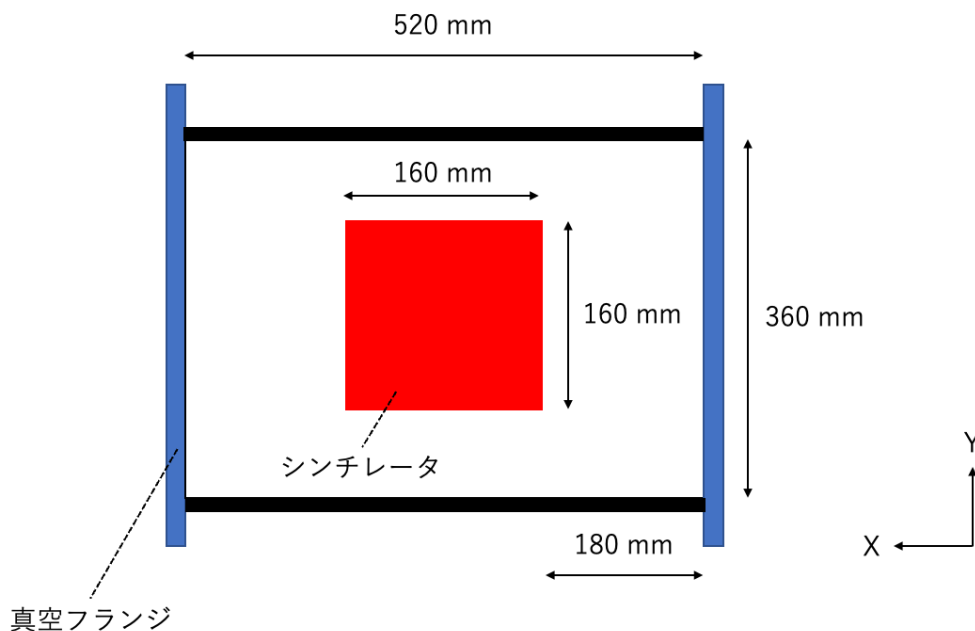


図 2.6 Z 軸上流方向から見た UCV チェンバーの概要図

また、真空中では空気の対流による放熱がないため、基板上のデバイス抵抗で発生した熱を外に逃しにくくなる。図 2.7 に、2.3.3 節で述べる基板に使用するデバイス抵抗の、抵抗周囲温度と許容電圧の関係を示す。図にあるように、70 °C を超えると抵抗の許容電圧が下がっていくため、PMT に印加することができる電圧も下がる。また、温度が高い状態のまま使用すると、デバイス抵抗や基板が破損する恐れがある。そのため、温度上昇を最小限に抑え、抵抗の温度を 70 °C 以下に保つ必要がある。

### 2.2.3 出力に対する要求

UCV の開発を始めた段階でのシミュレーションによると、1 つの荷電粒子が通過した際に 14 本の PMT が読み出す光電子数は合計 20 光電子であった [10]。シンチレーション光が 14 本の PMT に均等に入射するとすると、各 PMT では 1-2 光電子が観測される。よって、UCV には 1 光電子が読み出せるような、低 noise、高ゲインの PMT が必要である。

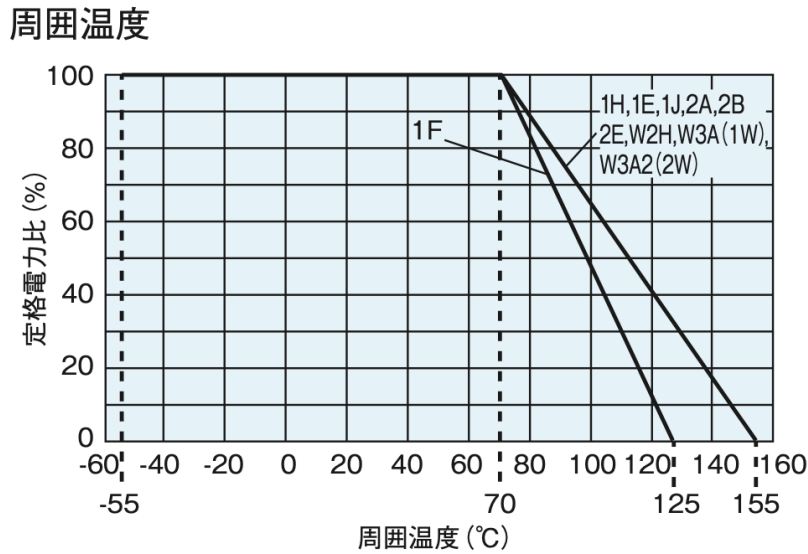


図 2.7 抵抗周囲温度と許容電圧の関係 [13]。図は RK73B シリーズのもので、型名ごとの直線が描かれている。

#### 2.2.4 検出波長範囲に対する要求

UCV には、サンゴバン社の BC400 相当<sup>\*4</sup>の 0.2 mm 厚シンチレータを用いる。このシンチレータのピーク発光波長は 423 nm である [14]。PMT はこの波長の光を検出できる必要がある。

#### 2.2.5 レート耐性に対する要求

2.1 節で述べたように、PMT への入射光量が上がるとゲインが変化する。モンテカルロシミュレーションにより見積もった、現在のビームパワーにおけるスピル中の UCV の平均ヒットレートは、物理ラン<sup>\*5</sup>の時 0.8 MHz であり、D1 off ラン<sup>\*6</sup>の時 30 MHz である [10]。2.2.3 節で述べたように、1 つの荷電粒子が UCV を通過した際、各 PMT は 1–2 光電子を読み出す。2 光電子を読み出すと仮定すると、1 光電子のレートは物理ランの時  $0.8 \text{ MHz} \times 2 = 1.6 \text{ MHz}$ 、D1 off ランの時  $30 \text{ MHz} \times 2 = 60 \text{ MHz}$  となる。また、将来的に陽子のビームパワーは 100 kW に上がる。現在のビームパワーが 65 kW であるか

<sup>\*4</sup> 株式会社プラケンがサンゴバン社と協力して BC400 相当の薄いシンチレータを開発した。

<sup>\*5</sup>  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  事象を取得するためのラン。

<sup>\*6</sup>  $K^\pm$  背景事象を調べるため、KOTO ビームライン上の電磁石の電源を切り、 $K^\pm$  をわざと KOTO 検出器に入射させるラン。

ら、この影響によって平均レートは現在の  $100/65 = 1.5$  倍になる。以上をまとめると、将来的に、各 PMT が読み出す 1 光電子のレートは、物理ランの時  $1.6 \text{ MHz} \times 1.5 = 2.4 \text{ MHz}$ 、D1 off ランの時  $60 \text{ MHz} \times 1.5 = 90 \text{ MHz}$  である。このような高レートでは、スピンル中で PMT のゲインが変化し、UCV の検出効率が低下してしまう可能性がある。このことを防ぐために、PMT は高レートの 1 光電子をゲインの変化なく読み出せる必要がある。

## 2.3 高電圧供給基板部の設計

### 2.3.1 使用する光電管

UCV に使用するための PMT の光電管として、浜松ホトニクス社の R14095 を選択した。R14095 の概要を図 2.8 に、仕様を表 2.1 に示す。R14095 は基板が付属しておらず、光電管のみである。図 2.8 に示すように、光電管底面から伸びるダイノードピンに基板を接続し、各ダイノードに電圧を印加する。図 2.9 に、R14095 を底面から見た時の各ダイノードピンの位置を示す。

R14095 は、長さが 90 mm とコンパクトであり、2.2.1 節で述べた大きさに対する要求を満たす。また、最大感度波長は 420 nm であり、波長感度領域は 300~650 nm である。よって UCV シンチレータからの光の波長である 423 nm に感度をもつ。また、暗電流も 10 nA とノイズが小さく、1 光電子検出に適している。さらに、価格も 1 万円程度と安価である。以上の理由から、UCV に使用する光電管として R14095 を選択した。

表 2.1 浜松ホトニクスの datasheet による R14095 の仕様

|          |                      |
|----------|----------------------|
| 管径       | $\phi 52 \text{ mm}$ |
| 受光面サイズ   | $\phi 46 \text{ mm}$ |
| 光電面材質    | バイアルカリ               |
| 窓材質      | 珪酸塩ガラス               |
| 感度波長範囲   | 300~650 nm           |
| 最大感度波長   | 420 nm               |
| 最大許容電圧   | -1500 V              |
| ダイノード数   | 10                   |
| ゲイン (定格) | $3 \times 10^6$      |
| 暗電流      | 10 nA                |

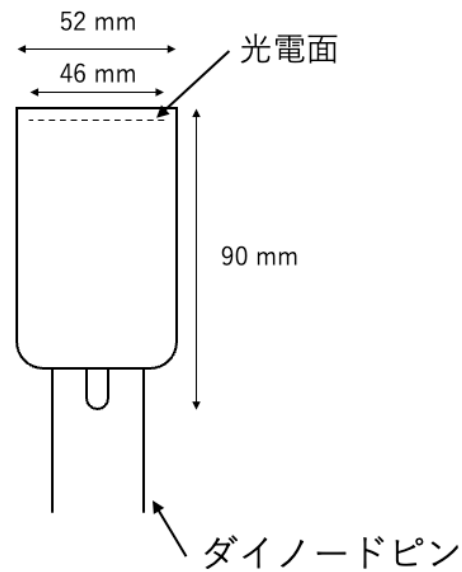


図 2.8 R14095 の概要図

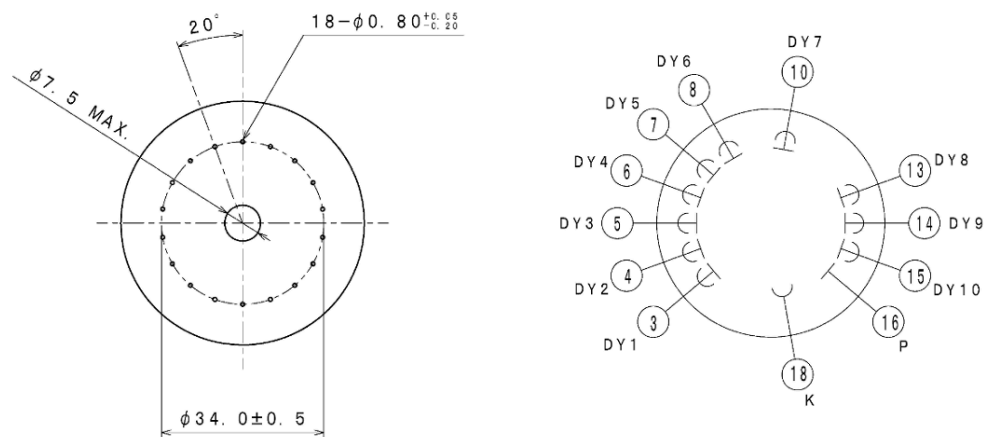


図 2.9 R14095 を底面から見た時のダイノードピンの位置

### 2.3.2 高電圧供給回路の設計

2.2.3 節で述べたように、UCV の PMT は 1 光電子を読み出せる必要がある。そのため、ゲインを大きくするようなデバイダ回路が必要である。いま、 $n$  をダイノードの数、 $\alpha$  を定数とした時、ゲイン  $\mu$  は次の式で表される [12]。

$$\mu = \alpha \cdot \delta_0 \cdot \delta_1 \cdots \delta_n$$

ここで、 $\delta_i$  は第  $i$  ダイノードにおける 2 次電子放出比であり、次の式で表される。

$$\delta_i = a \cdot E_i^k$$

ここで  $a$  は定数である。 $E_0$  は光電面と第 1 ダイノード間にかかる電圧で、 $E_i$  は第  $i$  ダイノードと第  $i+1$  ダイノード間 ( $0 < i < n$ ) にかかる電圧、 $E_n$  は第  $n$  ダイノードとアノード間にかかる電圧である。 $k$  は電極の材質・構造で決まる定数であり、一般的に 0.7 ~ 0.8 の値を取る。

いま  $a = 1$ 、 $\alpha = 1$  とし、図 2.10 のように  $n = 1$  段のダイノードを持つ PMT を考える。外部から電圧  $V$  を与えた時、ゲイン  $\mu$  は次の式で表される。

$$\begin{aligned} \mu &= E_0^k \cdot E_1^k \\ &= (Vf)^k [V(1-f)]^k \end{aligned}$$

ここで、 $f$  は外部電圧  $V$  に対して、光電面と第 1 ダイノード間にかかる電圧の割合である。ゲインが最大となるのは、

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{df} &= kV^{2k}(f - f^2)^{k-1}(1 - 2f) \\ &= 0 \end{aligned}$$

となる時である。これをみたすのは、

$$f = \frac{1}{2}$$

となる時である。

同様に  $n$  段のダイノードを持つ PMT について考える。図 2.11 に示すように、最初の  $n-1$  段のダイノード間にかかる電圧が等分割で、この部分でゲインが最大になっているとすると、ゲインは合計で、

$$\begin{aligned} \mu &= E_0^k \cdot E_1^k \cdots E_n^k \\ &= (Vf)^{kn} [(1-nf)V]^k \end{aligned}$$

となる。ここで、 $f$  は外部電圧  $V$  に対して、最初の  $n-1$  段のダイノード間にかかる電圧の割合である。このゲインが最大になるのは、

$$\begin{aligned}\frac{d\mu}{df} &= \frac{d}{df} \left\{ V^{k(n+1)} [f^{kn}(1-nf)^k] \right\} \\ &= knV^{k(n+1)} f^{kn-1}(1-nf)^{k-1} [1-(n+1)f] \\ &= 0\end{aligned}$$

の時である。これを満たすのは、

$$f = \frac{1}{n+1}$$

となる時であり、全てのダイノード間で電圧比が等分割の時である。よって、帰納的に、 $n$  段のダイノードを持つデバイダ回路において、全てのダイノード間の電圧比が等分割のとき、ゲインが最大となる。よって等分割回路を採用した。ただし、光電面で発生した光電子を第1ダイノードの有効部分に効率よく入射させるために、初段の分圧比のみ大きくした。

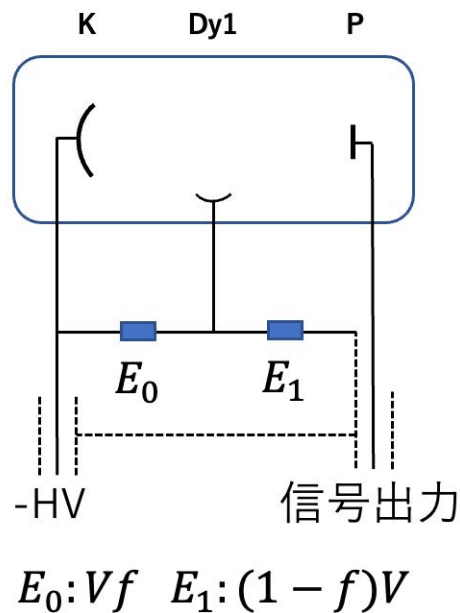


図 2.10 1 段のダイノードを持つ PMT。  $E_0$  は光電面と第1ダイノード間にかかる電圧で、  $E_1$  は第1ダイノードとアノードの間にかかる電圧。点線はグラウンドを表す。



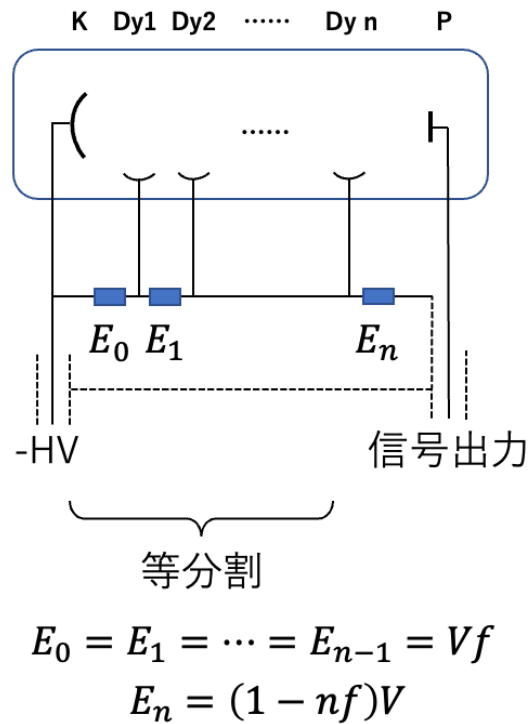


図 2.11  $n$  段のダイノードを持つ PMT。第  $n$  ダイノードとアノード間を除いて等倍の分圧比になっている。点線はグラウンドを表す。

次に、使用する抵抗値について述べる。2.2.5 節で述べたように、UCV の各 PMT が読み出す 1 光電子のレートは、最大で 90 MHz である。このとき、PMT のアノード電流の値は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{電流値} &= \text{素電荷} \times \text{レート} \times \text{ゲイン} \\ &= (1.6 \times 10^{-19}) [\text{C}] \times (9 \times 10^7) [\text{Hz}] \times (3 \times 10^6) \\ &= 0.038 [\text{mA}] \end{aligned}$$

ここでゲインは R14095 の data sheet の定格の値を用いた。2.1 節で述べたように、入射光量が大きいとゲインが減少する。これを防ぐためには、デバイダ回路を流れる電流をアノード電流の 20 倍以上にすれば良い [11]。一方で、デバイダ電流を増やすと発熱が大きくなる。これらのことを踏まえて、デバイダ電流が 0.038 mA の 20 倍である 0.76 mA になるべく近くなるように、合計の抵抗値を 1.3 M $\Omega$  に決定した。この時、抵抗分割比は初段から順に同じ抵抗値の抵抗 3、1、1、 $\dots$ 、1 個で実現する。そうすると、1 つの抵抗の

抵抗値は  $100\text{ k}\Omega$  である。デバイダ回路に最大  $1.5\text{ kV}$  を印加した時、デバイダ電流は  $1.2\text{ mA}$  になる。また、この時デバイダ回路で  $1.7\text{ W}$  発熱する。

また、PMT への入射光はパルスであるため、陽極電流は大きなピークをもつ。瞬間的な大電流による、デバイダ回路の分圧比の変動を防ぐために、ダイノード終段側に、並列にコンデンサ（図 2.12 中の  $0.01\text{ }\mu\text{F}$  のコンデンサ）を置いた。このコンデンサによってダイノード間の電圧を固定する。また、同様に、出力信号の波形が乱れることを防ぐ目的で後段側に抵抗（図 2.12 中の  $51\text{ }\Omega$  の抵抗）を置いた。以上を踏まえてデバイダ回路を図 2.12 のように設計した。

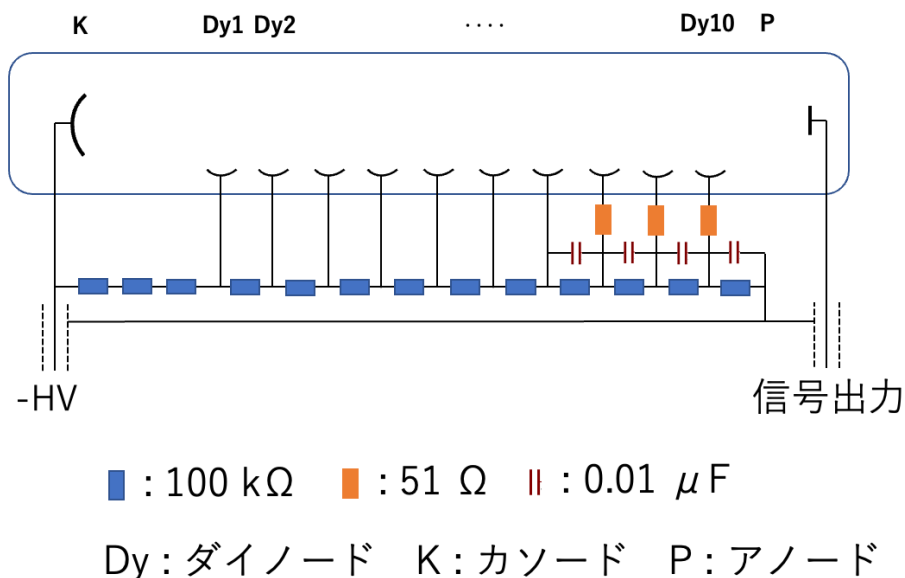


図 2.12 R14095 の分圧回路

### 2.3.3 真空使用に向けた試作基板の設計

2.3.2 節で述べたデバイダ回路を元に、以下で説明する部分を工夫しながら、試作基板を図 2.13 のように作成した。温度が上昇しすぎることを防ぐため、また放電が起きることを防ぐためには、電位差を持つ部品間の距離をできるだけ離せば良い。そのために、抵抗を基板の外縁部の円周上に、等間隔に配置した。また、コンデンサは抵抗がある面の裏側に配置し、ビアを用いて抵抗側の銅線と電氣的に接続した。コンデンサのある面が PMT の方を向くように PMT に接続する。これらの抵抗やコンデンサに関して、アキシャル型やラジアル型等の、リード線を用いてはんだ付けをする種類のものを用いると、リード線

の足が飛び出ている部分で放電が起こる可能性があるため、表面実装型を用いた。また、デバイダ回路以外の部分の銅は取り除き、基板上の金属の量を最小限にするようにした。3章で述べるように、この試作基板を用いて真空試験を行い、放熱機構と放電を防ぐ機構が必要であると判断した。以下の節でそれらの機構と、本番用に改善した基板のデザインについて述べる。以降では、開発した基板、放熱機構、放電を防ぐ機構をまとめて基板部と呼ぶ。

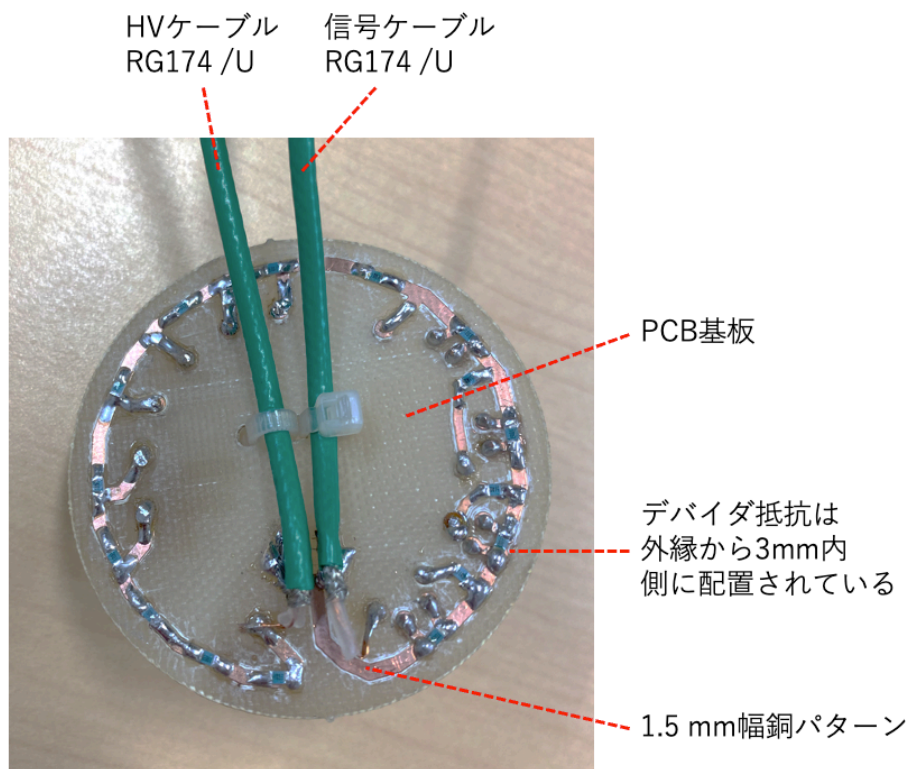


図 2.13 試作基板の、デバイダ抵抗とケーブルがはんだ付けされている面の写真。試作基板は山中卓研究室の所持する基板加工機 Auto Lab を用いて作成した。

### 2.3.4 真空使用に向けた本番用基板部の設計

試作基板からいくつかの点を改善してデザインした本番用基板を図 2.14、2.15 に示す。改善点について説明する。まず、3.1 節で述べる温度上昇試験を踏まえて、基板上で最も高温になる部分にサーミスタ<sup>\*7</sup>を配置した。

<sup>\*7</sup> 温度変化に対し抵抗値が変化する半導体。村田製作所の NXRT15WF104FA1B040 を用いた。

また、試作基板では HV ケーブル（高電圧印加ケーブル）、信号ケーブルともに、同軸ケーブルの先端を内部導体と外部導体に分け、デバイダ回路の銅線にはんだ付けしていた。しかし 3.2 節の放電試験で述べるように、この部分で放電が起こりやすい。そのため、本番基板の信号読み出しとして、ヒロセ電機の U.FL ケーブルを採用した。図 2.16 に示す、表面実装の小型の同軸コネクタを基板上に配置し、 $\phi 1.1$  mm の細い同軸ケーブルで読み出す。サーミスタの読み出しケーブルについても同じものを使用する。また、デバイダ回路には最大 1.5 kV が印加されるため、高耐電圧の HV ケーブルと HV コネクタが必要である。また UCV 全体では 14 本の HV ケーブルを取り扱う必要があることから、できるだけ細い HV ケーブル、HV コネクタが必要である。以上を踏まえて、DRAKA CEH-50 ケーブルに SHV コネクタをアセンブリした HV ケーブルを採用した。図 2.17 に示す、DRAKA CEH-50 ケーブルは外径 3.2 mm、DC 耐圧 5 kV である。また、図 2.18 に示す、SHV コネクタの DC 耐圧は 3.5 kV であり、外径は最も大きい部分で 14.5 mm、長さは 40.5 mm である。

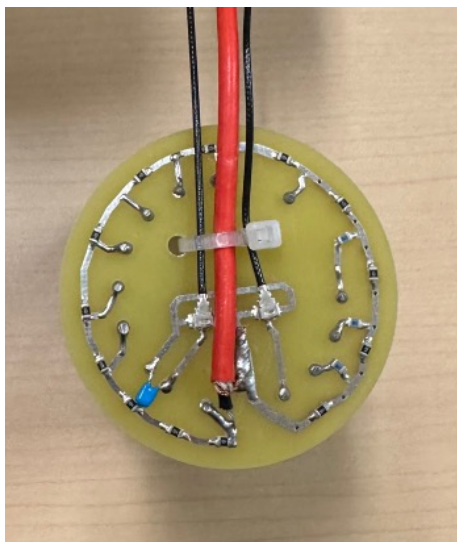


図 2.14 本番用基板の、デバイダ抵抗とケーブルがはんだ付けされている面の写真。

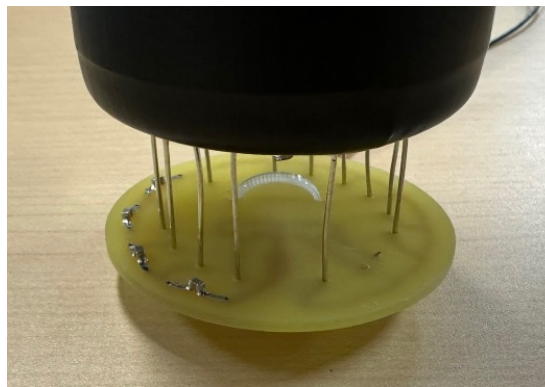


図 2.15 本番用基板の、コンデンサがはんだ付けされている面の写真。

次に基板の放熱機構について述べる。図 2.19、2.20 にあるように、基板と同じ外径を持つ、1 mm 厚のアルミニウムの筒（以降 Al 筒と呼ぶ）を基板の外周に置く。この Al 筒の詳細を図 2.21、2.22 に示す。Al 筒には M3 径のねじ穴が円周上の対称な位置に合計 4ヶ所あり、図 2.23 に示すように、これらの穴と、基板上の配線パターンを揃えた位置

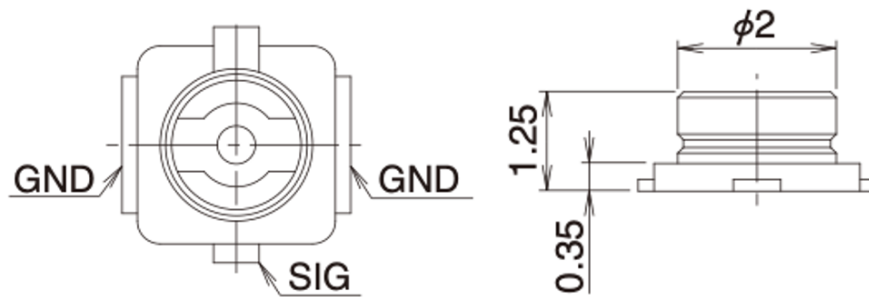


図 2.16 U.FL Receptacle の概要図 [15]。左図は U.FL コネクタを嵌合する側から見た図で、右図は側面から見た図。図中の数字の単位は mm である。

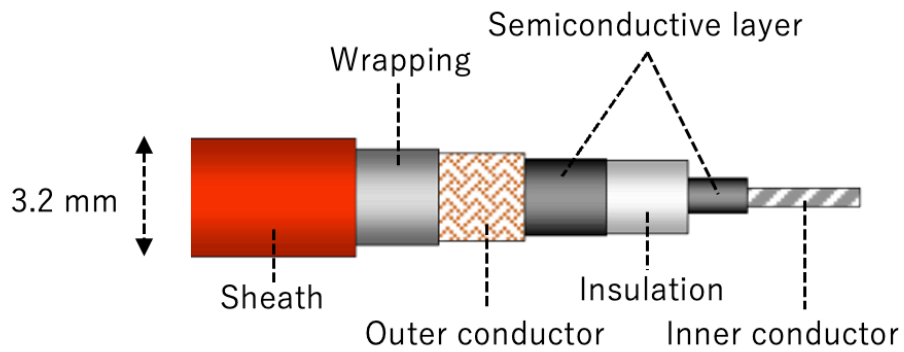


図 2.17 DRAKA CEH-50 ケーブルの概要図 [16]。

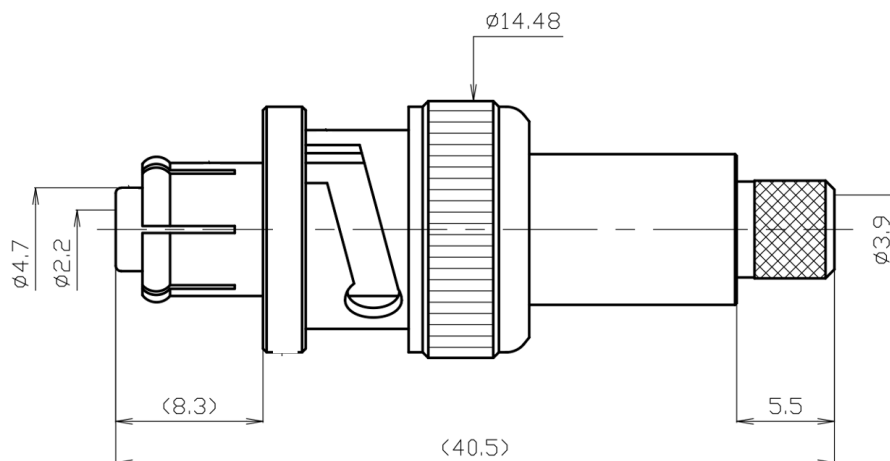


図 2.18 SHV-P コネクタの概要図 [17]。図中の数字の単位は mm である。

に置く。Al 筒は熱伝導率の高いシリコン\*<sup>8</sup>を用いて基板に接着する。図 2.24 にあるように、Al 筒上のねじ穴を用いて銅網線に接続する。銅網線の、PMT 側と逆側の先端を  $\phi 1/4$  inch の水冷銅管に接続し、放熱する。銅網線は図 2.25、図 2.26 に示すように、水冷銅管に巻きつけた上からクリップで固定する。図 2.27 に水冷銅管を含めた UCV の CAD 図を示す。水冷銅管は熱絶縁しつつ UCV のフレームに固定し、PMT のみを冷やすようにしている。また、水冷銅管は Al 筒に接触させ、PMT が PMT ホルダーから外れることを防ぐ。UCV 実機では、基板上的サーミスタを用いて、14 本の全ての温度を常にモニターする。

また、基板上的シリコンは放電を防ぐ役割もある。抵抗側には基板全面に 2 mm 厚でポッティングし、HV ケーブルがはんだ付けされている部分のみ厚塗りしている。コンデンサ側は、コンデンサとサーミスタがある部分のみ 2 mm 厚でポッティングする。



図 2.19 PMT、アルミニウム筒と接合された基板の、抵抗側の写真。同軸コネクタ部を除いてシリコンがポッティングされている。UCV に使用する際は全面にポッティングを施す。

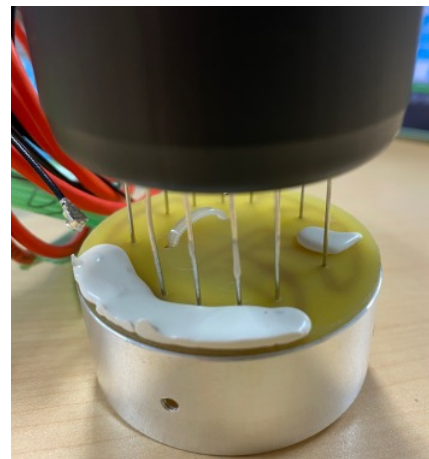


図 2.20 PMT、アルミニウム筒と接合された基板の、コンデンサ側の写真。コンデンサとサーミスタがある部分のみシリコンがポッティングされている。

\*<sup>8</sup> 信越シリコン社の KE3466。熱伝導率は 1.9 [W/m · K]。

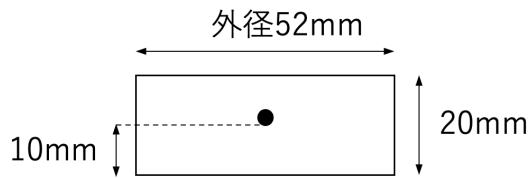


図 2.21 側面から見た Al 筒の概要図。下側が基板に接着される。黒色の丸が M3 径のネジ穴に対応する。

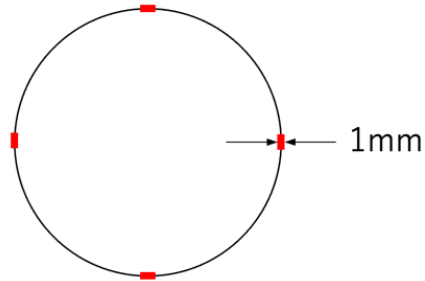


図 2.22 上から見た Al 筒の概要図。赤色で示した、4ヶ所の対称な位置に M3 径のネジ穴がある。

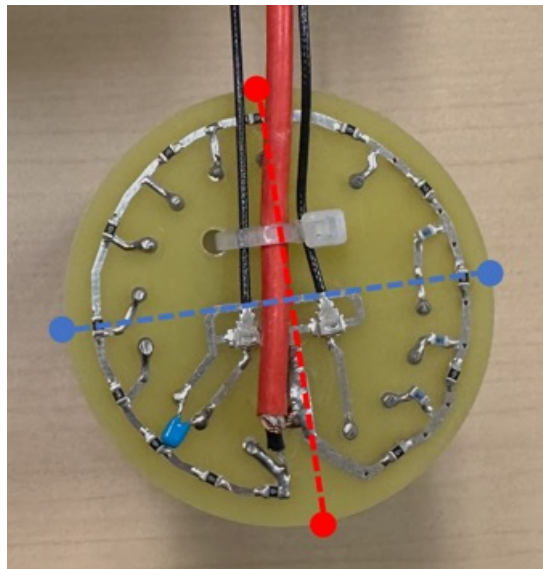


図 2.23 基板の配線パターンを基準に、外周を 4 等分する。Al 筒の M3 タップが、図中の色付きの丸の真上に来るように配置する。

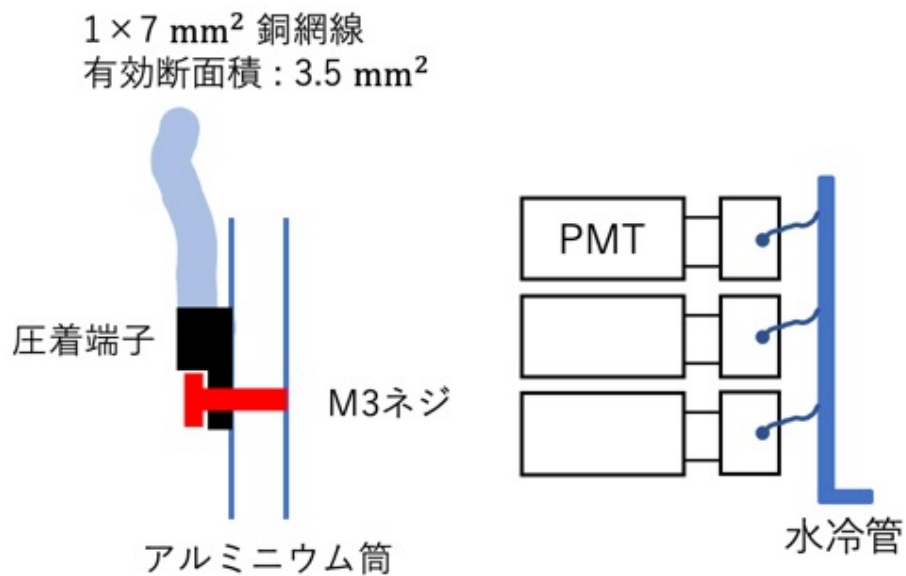


図 2.24 放熱機構の概要図。左図はアルミニウム筒と銅網線の接合方法を示した図。右図は各 PMT のアルミニウム筒と水冷銅管が銅網線によって接続されている様子を  
示した図。



図 2.25 水冷銅管と銅網線の接続部分を横から見た図。



図 2.26 水冷銅管と銅網線の接続部分を上から見た図。UCV 実機ではよりコンパクトなボルト、ナットとより短いネジを用いる予定である。



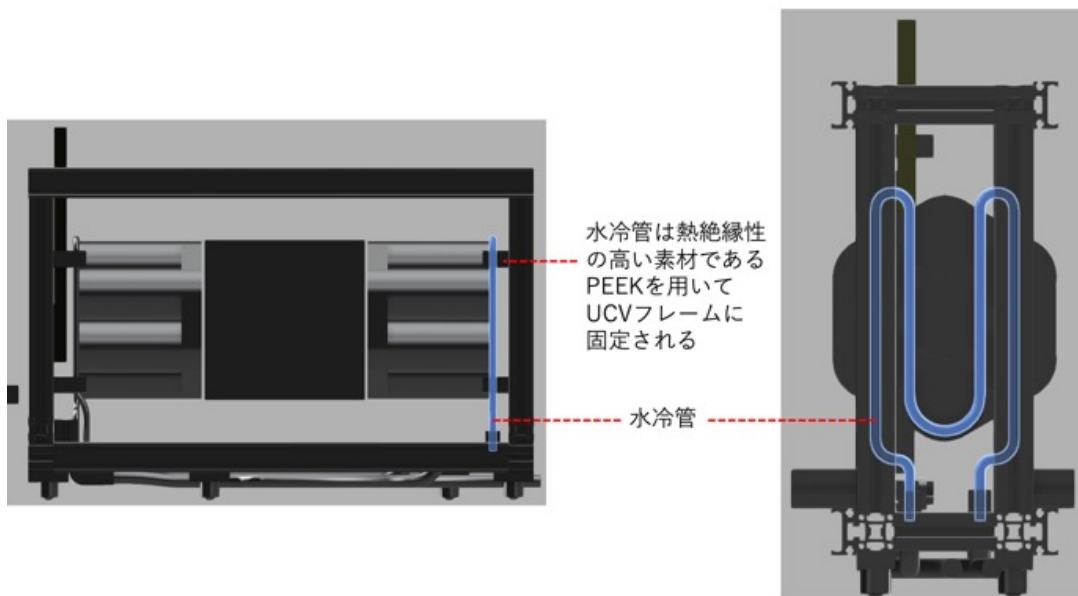


図 2.27 水冷銅管を含めた UCV の CAD 図。青色で示した部分が  $\phi 1/4$  inch の水冷銅管に対応する。図は大阪大学の小寺克茂氏による [18]。

### 3 真空中での動作試験

この章では、開発した基板部を用いて真空中で放電、温度上昇を防げるか試験する。

#### 3.1 放熱試験

この節では、設計した基板を用いた放熱試験について述べる。デバイダ回路の抵抗値は  $1.3 \text{ M}\Omega$  であるから、R14095 の最大許容電圧である  $1.5 \text{ kV}$  を印加すると  $1.7 \text{ W}$  発熱する。また、2.3.3 節で述べたように、基本的にデバイダ抵抗は基板上の外周部に等間隔に置かれている。しかし、ダイノードピンの位置との兼ね合いから、初段の4つのデバイダ抵抗間の間隔のみ、他の抵抗間の間隔と比較して数 mm ほど狭く置かれている。この影響で初段部の温度上昇が最も大きくなるはずである。

まず、試作基板に  $1.5 \text{ kV}$  を印加し、 $23 \text{ }^\circ\text{C}$  の空气中で温度上昇試験を行った。温度はサーモカメラで測定した。その結果、図 3.1 に示すように、初段部のデバイダ抵抗が、最も高い部分で  $88 \text{ }^\circ\text{C}$  まで上昇した。本番用基板では、最も高い部分の温度を読み出すために、この部分のデバイダ抵抗に接触させる形でサーミスタを置いた。接触させているため、サーミスタとこのデバイダ抵抗の温度は等しいと考える。

真空中では空気の流れによる放熱が期待できないため、さらに高温になると考える。高温では、基板に用いる抵抗が定格で使用できないだけでなく、ケーブルや光電管が破損する恐れがある。そのため、真空中で使用するために、2.3.4 節で述べたような放熱機構を開発した。

以下では、本番用 PMT を用いて行った、真空中での放熱試験について述べる。

まず、放熱試験の詳しいセットアップを説明する。セットアップを図 3.2、3.3 に示す。UCV 実機では水冷管として  $1/4 \text{ inch}$  の銅管を用いるが、本試験では  $6 \text{ mm}$  の真鍮管を用いた。また、水冷管と銅網線は UCV 実機に使用するクリップでなく、市販のダブルクリップで固定した。用いる銅網線は長さ  $50 \text{ mm}$ 、断面積は  $1 \times 7 \text{ mm}^2$  で、そのうち銅が占める断面積は  $3.5 \text{ mm}^2$  である。銅網線は図 2.23 における、青色で示した右側の丸の真上にある M3 タップに固定した。また、PMT には最大で  $1.5 \text{ kV}$  が印加されるが、本試験では  $1 \text{ kV}$  を印加した。基板上のサーミスタの抵抗値をテスターで読み取り、温度を測定した。本試験において、真空度は  $P = 0.3 \text{ Pa}$  であった。また、水の流量は  $1 \text{ L/min}$  とした。これは UCV 実機で使用される流量に相当する<sup>\*9</sup>。また水の温度は  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  であっ

<sup>\*9</sup> UCV に使用する冷却水循環装置の流量は  $5 \sim 10 \text{ L/min}$  である。他の測定器への流量を少しずつ減ら

た。また、電圧を印加し始める前に、基板を十分な時間水冷し、サーミスタの温度と水の温度が等しくなっていることを確認した。

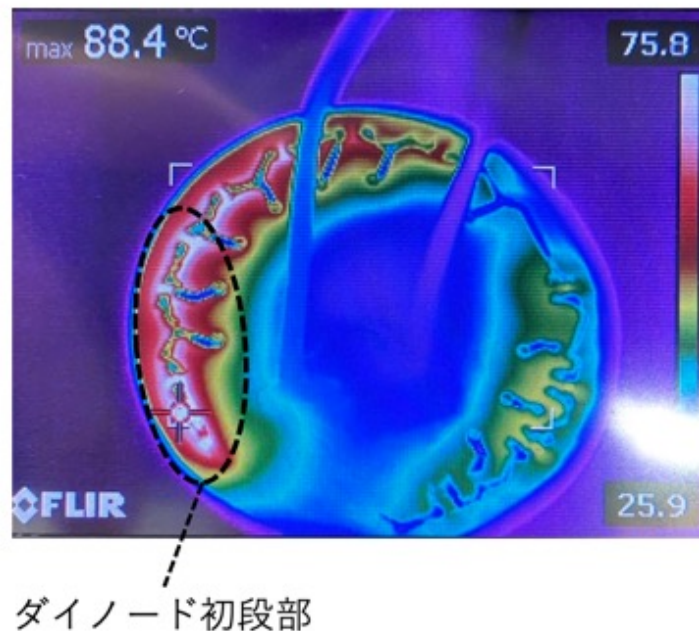


図 3.1 サーモカメラを用いた試作基板の温度上昇試験。写真は基板の抵抗が置かれている面を示す。

本試験の結果を図 3.4 に示す。60 分の計測でサーミスタは 21 °C 上昇した。この値から、デバイダ回路に、R14095 の最大許容電圧である 1.5 kV の電圧を印加した時の温度上昇値を求めるために、次の熱伝導の式を用いる。

$$\Delta T = lW/\lambda S \quad (3.1)$$

ここで  $\Delta T$  はデバイダ抵抗と水冷管の温度差、 $l$  は熱が伝わる経路（放熱経路）の長さ、 $S$  は放熱経路の断面積、 $W$  はデバイダ回路での発熱量、 $\lambda$  は放熱経路をなす物質の熱伝導率である。デバイダ回路に 1.5 kV の電圧を印加すると発熱量は  $(1.5/1)^2 \simeq 2.3$  倍になり、式からわかるように、温度上昇値も 2.3 倍になる。このときサーミスタは  $21^\circ\text{C} \times 2.3 = 48^\circ\text{C}$  温度が上昇する。

図 3.5 に示すように、UCV 実機環境では、中心の列の PMT に接触させている水冷銅管は、PMT の断面の円周上の近くを通るように配置されている。しかし、左列と右列の

---

し、その分を UCV に配分するため、UCV への流量は可変である。



図 3.2 真空チェンバー内の放熱試験のセットアップを上から見た写真。PMT を冷やす部分の配管のみ真鍮で、それ以外の配管は樹脂からなる。真鍮管と樹脂配管は、真空用のチューブ継手で接合されている。PMT のみを冷やすために、真鍮管と継手はプラスチックの空箱の上に置き、床と熱的に絶縁している。写真ではプラスチック箱はブラックシートに覆われている。

PMT に接触させている水冷銅管は、PMT の断面の中心を通るように配置されている。図 3.6 に示すように、Al 筒から銅網線を Y 軸に対して垂直に伸ばし、水冷配管に接続するとすると、銅網線の長さは最大で 28 mm である。式 3.1 からわかるように、銅網線の長さが 50 mm から 28 mm になると、温度上昇は 28/50 倍になる。よって、UCV 実機環境でサーミスタの温度上昇は  $48\text{ }^{\circ}\text{C} \times 28/50 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  になる。本試験では最も温度上昇が大きい部分から最も遠い M3 タップに銅網線を接続し、放熱しているため、基板上のすべてのデバイス抵抗はサーミスタの温度より低くなる。15 °C の水冷管を用いた場合、全てのデバイス抵抗の温度は 42 °C 以下になり、デバイス抵抗を定格で使用するための要求を満たす。本試験の結果をもとに、実機環境で全ての PMT を十分放熱できるかは 5.1 章で述べる。



図 3.3 真空チェンバー内の放熱試験のセットアップを、PMT の近くから見た写真。  
この写真においては、2本の銅網線が Al 筒に接続されている。

## 3.2 放電試験

次に、真空中での基板の放電試験について述べる。図 3.7 に示す放電モニター回路を用いてオシロスコープで放電信号を取得する。放電による大電流でオシロスコープが破損することを防ぐために、一定以上の放電電流はオシロスコープに流れないようにしている。オシロスコープの入力は AC カップリングを用いたため、回路に流れる直流電流はオシロスコープでは見えない。まず、2.3.3 節で述べた、試作基板のみを用いて放電試験を行った。 $P = 0.2 \text{ Pa}$  の真空中で、R14095 の最大許容電圧である  $-1.5 \text{ kV}$  を印加したところ、図 3.8 のような放電信号が得られた。また、コンデンサ、抵抗、ダイノードピ

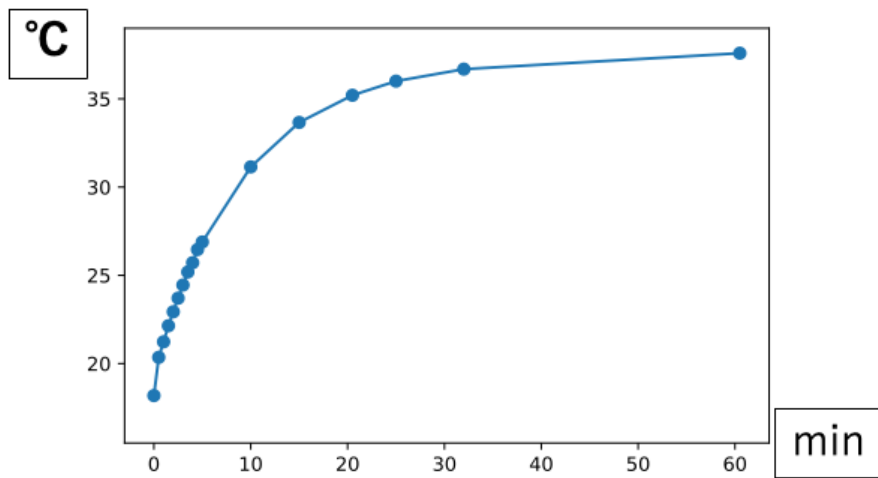


図 3.4 1 本の銅網線を用いた水冷試験の結果。縦軸はサーミスタの温度、横軸は測定時間（分）を表す。

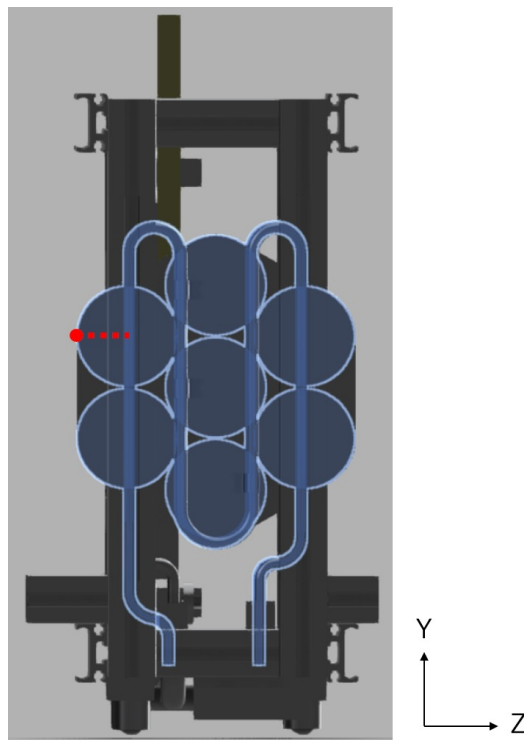


図 3.5 UCV の CAD 図。水冷銅管と PMT が青色で示してある。赤い点線は銅網線を表す [18]。

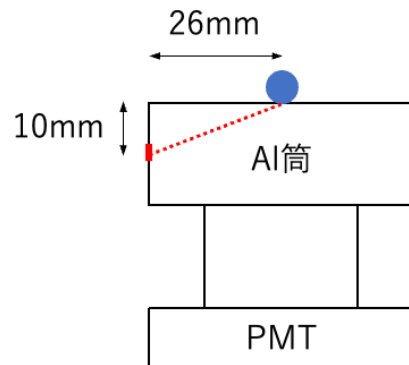


図 3.6 PMT を側面から見た図。青の丸が水冷管に対応する。また、赤い点線は銅網線を表し、長さは 28 mm である。

ン、HV ケーブルがはんだ付けされている部分等で放電で光っていることを目視でも観測した。さらに、図 3.9 に示すように、これらの部分が焦げていることを放電試験後に確認した。よって、PMT が破損することを防ぐために、2.3.4 節で示した、真空中で放電を防ぐ機構を開発した。

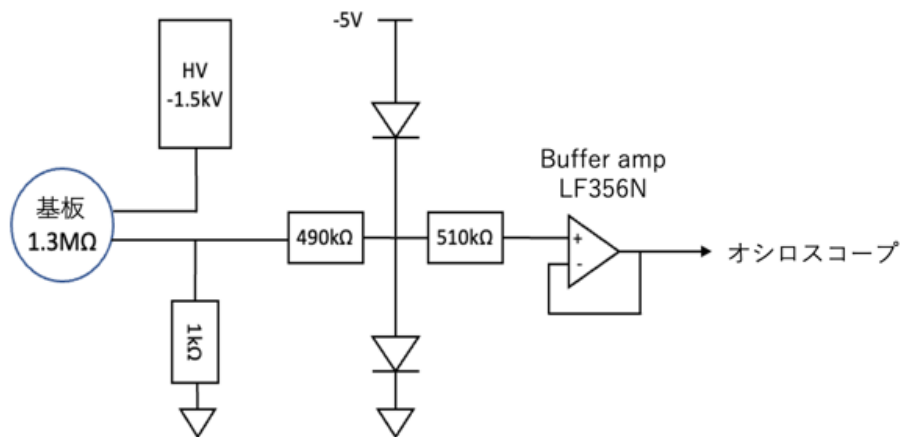


図 3.7 放電モニター回路

次に、図 2.19 にあるように、R14095 に本番用基板を接合し、基板上にシリコンをポッティングした PMT を作成した。ここで、信号ケーブルとサーミスタ読み出しのケーブルが破損しても交換できるように、これらの U.FL コネクタ上にはポッティングしなかった。この PMT を用いて、0.2 Pa の真空中で放電試験を行った。この時、R14095 の

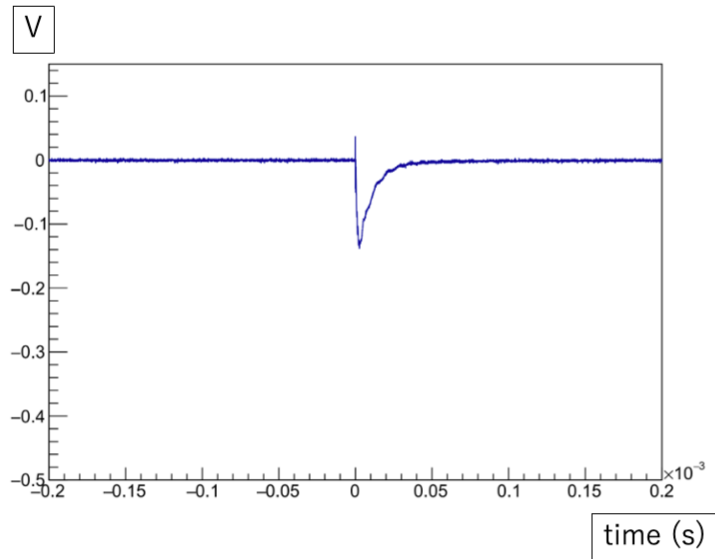


図 3.8 放電信号の波形

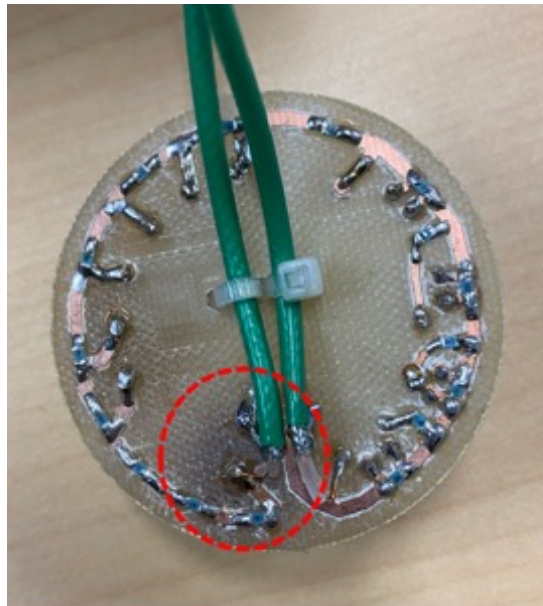


図 3.9 放電試験に用いたプロトタイプ基板。赤丸で囲った部分は HV ケーブルをはんだ付けしている部分であり、黒く焦げていることがわかる。



最大許容電圧を印加することを避け、それより少し低い 1.45 kV を印加した。また、図 3.2 に示す、温度上昇試験で使用したのと同じ機構を用いて、水冷しながら試験を行った。この試験の際、放電信号は正しく取得できていなかったが、6 時間真空中で電圧を印加した後の基板の U.FL コネクタ上に煤を確認したため、放電があったと判断した。高電位になっている HV ケーブルの芯線と、グラウンド電位になっている U.FL コネクタとの間で放電したと考えた。そのため、U.FL コネクタを含めて基板上の全面にポッティングを施した基板を作り、再度放電試験を行った。2 週間連続的に高電圧を印加し続けたところ、最初の 1 日で 2 回放電があったが、その後は放電は見られなかった。また、2 週間のデータ取得後、1.45 kV の電圧を印加したまま、真空を引くバルブを閉じ、15 分かけて徐々に真空度を下げていったところ、 $P = 10$  Pa で高圧電源の出力が停止した。これは、放電による大電流で、デバイダ回路に流れる電流値が高圧電源のカレントリミットを超えたためだと考える。よって、開発した基板について、 $P = 0.2$  Pa 以下で放電は起こらず、 $P = 10$  Pa 以上で放電が起きると結論付けた。

## 4 レート耐性試験

この章では、開発した基板を用いた PMT (UCV PMT) が高レートの 1 光電子を読み出す時のゲインの安定性について述べる。図 4.1 に本試験のセットアップを示す。まず LED を 2 つ用意する。1 つ目は UCV PMT のゲインの安定性をモニターするための LED で、もう 1 つは UCV PMT に高レートの 1 光電子を読みださせるための LED である。1 つ目の LED (LED1) にはファンクションジェネレータを用いてパルス電圧を入力する。もう 1 つの LED (LED2) には直流電源を用いてある一定の電圧を印加する。UCV PMT は LED1 からの光による、約 100 光電子 (以下 100 光電子と呼ぶ) の、時間幅 40 ns の細いパルス状の信号を読み出す。また LED2 からの光によるランダムな 1 光電子を読み出す。LED2 に印加する電圧を徐々に上げることで、UCV PMT が読み出す 1 光電子のレートを上げる。1 光電子のレートを上げながら、100 光電子の波高をモニターし、1 光電子のレートに対するゲインの変化を調べる。ここで、図における Ref. PMT は LED2 の光量をモニターするための PMT である。Ref. PMT を用いて LED2 の光量のみをモニターするために、Ref. PMT の入射窓をカバーで覆い遮光し、そこにファイバーを通し、LED2 に接続する。Ref. PMT には浜松ホトニクス製の H7415 を使用した。UCV PMT には LED1、LED2 両方からの光が入射する。データ取得には、KOTO 実験で使用する、波形取得用のサンプリング周波数 500 MHz の ADC を用いた。また、LED1 に入力するパルス信号と同期した信号をトリガーとして用いた。図 4.2 に得られた波形の例を示す。

次に、UCV PMT が読み出す 1 光電子のレートの計算方法について述べる。取得した波形の左端 5 点、右端 5 点のうち、それぞれの 5 点の分散が小さい方の平均値をペDESTAL とする。また、取得した波形において、100 光電子のパルスは常に同じタイミングにあるため、100 光電子のパルスを除いた時間領域 (領域 A とする) を定義できる。この領域に入った点のうち、最大の ADC 値からペDESTAL の値を引いた値を波高とする。この波高分布から 1 光電子のレートを次の方法で求める。まず、領域 A 内で PMT が光電子を  $k$  個検出する事象数  $N_k$  は、以下のポアソン分布に従う。

$$N_k = N_{\text{all}} \frac{e^{-\mu} \mu^k}{k!}$$

$N_{\text{all}}$  は全事象数、 $\mu$  は領域 A 内で観測した平均光電子数である。領域 A の時間幅を狭くしていくと、領域 A 内で 1 光電子を観測する確率が減り、 $\mu$  が小さくなる。例として、

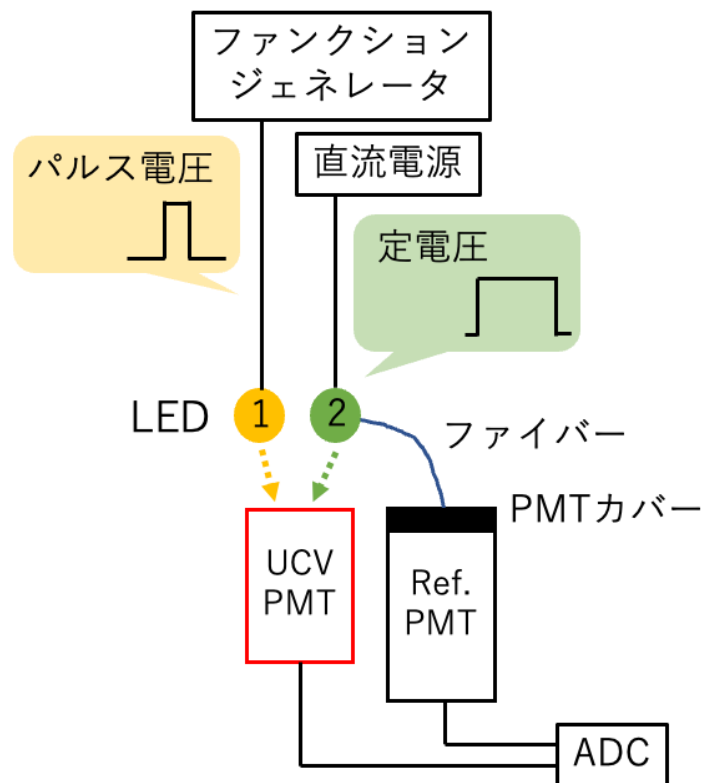


図 4.1 レート耐性試験のセットアップ

$\mu = 0.1$  の時、1 光電子事象を観測する確率は 9% であり、2 光電子事象を観測する確率は 0.5% である。領域 A の時間幅を十分小さく設定した上で、信号の波高分布を求め、波高 0 の位置と別にピークが見えていれば、それは 1 光電子に由来するものである。各レートごとに、 $\mu = 0.1$  以下になるように領域 A の時間幅を調節しながら、実際に取得した波高分布の例を図 4.3 に示す。 $\mu = 0.1$  以下にしているため、2 光電子以上は波高分布に寄与しないものとする。波高 0 付近のピークをガウス関数でフィットし、フィットで得られた平均値から  $3\sigma$  以上離れた領域を 1 光電子とし、1 光電子の事象数を  $N_1$ 、全事象数を  $N_{\text{all}}$  とし、それぞれの事象数を数え、次のようにレートを計算した。

$$\text{rate} = \frac{N_1}{N_{\text{all}} \times \tau}$$

ここで  $\tau$  は領域 A の時間幅である。100 光電子の波高のレート依存性を 3 種類の PMT の印加電圧について調べた。計算したレートに対する 100 光電子の波高を図 4.4 に示す。図において、1 本の線で示すデータの取得時間は 5 分以下であったため、PMT のゲイン

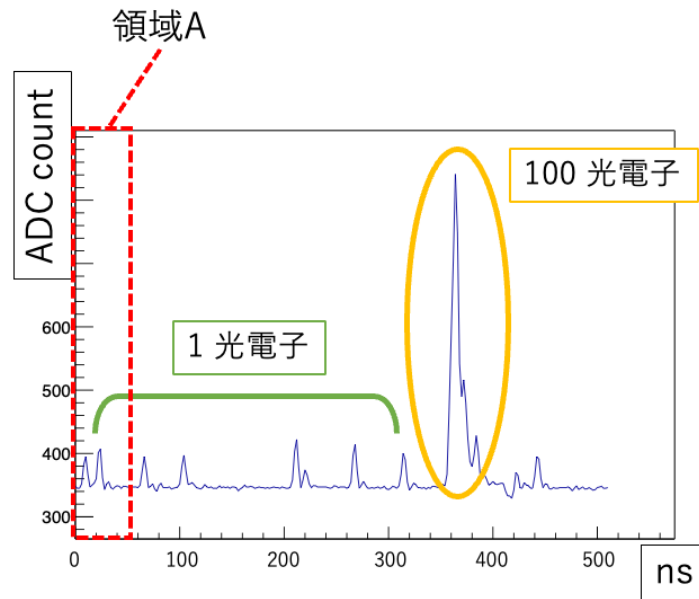


図 4.2 取得した波形の例。1 光電子の信号はランダムな位置にあり、100 光電子の信号は常に同じ場所にある。

を変化させ得る要因はレートのみとする。図 4.4 において、UCV PMT の印加電圧が 1.1 kV の場合、1 光電子のレートが 3.4 MHz 以下で、また印加電圧が 1.25 kV の場合 4.2 MHz 以下で、また印加電圧が 1.4 kV の場合 4.6 MHz 以下で測定した。それぞれの印加電圧を用いた、1 本の直線で示す測定において、測定したレートの範囲内ではゲインの変動は 3% 以下であった。

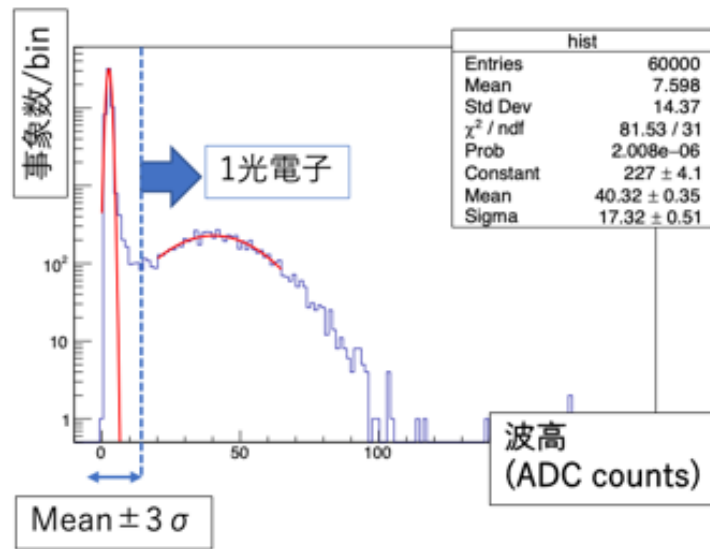


図 4.3 領域 A に入った信号の波高分布。

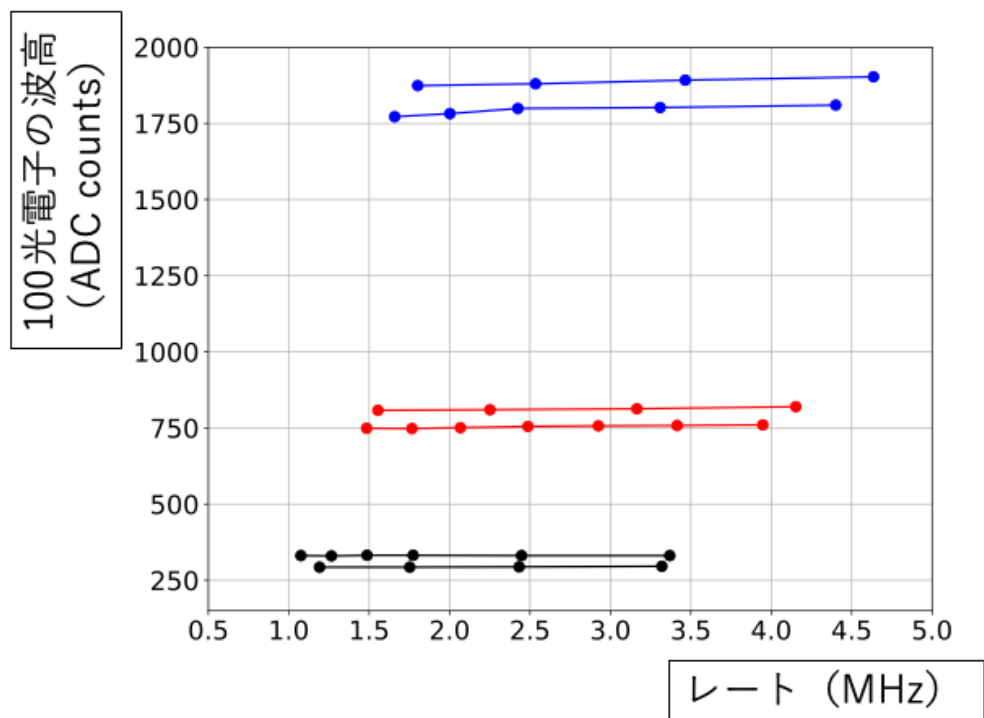


図 4.4 UCV PMT が読み出す 100 光電子の波高の 1 光電子のレート依存性。UCV PMT の印加電圧は、1.1 kV (黒)、1.25 kV (赤)、1.4 kV (青) である。縦軸は 100 光電子の波高、横軸は 1 光電子のレートを示す。それぞれの印加電圧について 2 回測定した。

## 5 考察

### 5.1 水冷試験についての考察

まず、3.1 節における試験の結果をもとに、実機環境で十分放熱できるか考察する。3.1 節では、水冷管として  $\phi 6$  mm の真鍮管を用いたが、実機環境では 1/4 inch の銅管を用いる。そのため、本試験に比べて銅網線が水冷管に接する面積が増える上に、水冷管の熱伝導率が増える。したがって、実機環境では本試験に比べて温度上昇は小さくなる。また、本試験では銅網線と水冷管の固定具としてダブルクリップを用いたが、本番環境ではこれより小さい固定具を用いる。本試験と本番環境で固定具の熱容量は変わるが、平衡温度には影響しない。以上から、開発した放熱機構と 1 本の銅網線を用いて 1 台の PMT に関して、真空中で温度上昇は  $27^{\circ}\text{C}$  以下になる。 $15^{\circ}\text{C}$  の水冷管を用いると、基板の温度は  $42^{\circ}\text{C}$  以下になる。

また、開発した放熱機構を用いて、全数の基板を放熱できるかどうかについて考察する。いま、1 台の PMT のデバイダ抵抗で発生した熱が全て水に伝わるとすると、水の温度上昇値  $\Delta T$  は次のようになる。

$$\Delta T = Q \Delta t \frac{1}{C} \frac{1}{\rho v \Delta t}$$

ここで、 $Q$  はデバイダ抵抗で発生する熱量で、 $1.5\text{ W}$  とする。 $\Delta t$  は単位時間、 $C$  は水の比熱で  $4182\text{ J/kgK}$ 、 $\rho$  は水の密度である。 $v$  は水の流量で、 $1\text{ L/min}$  とする。この時、 $\Delta T = 2.1 \times 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}$  となるため、13 台の基板を水冷した後の水の温度上昇値は、 $2.1 \times 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C} \times 13 = 0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$  となり、14 台目の PMT を冷やす水の温度も十分低いいため、開発した水冷機構を用いて全数の PMT を水冷できる。

### 5.2 放電試験についての考察

J-PARC ではビームタイム中、週に 1 日の点検日を除いて連続的にビームが出ており、KOTO 実験はこの間常にデータを取得する。

3.2 節では、 $P < 0.2\text{ Pa}$  で放電が起こらないと結論付けた。しかし、現在の UCV チェンバーの真空引きシステムの能力では、 $P < 0.2\text{ Pa}$  にするためには 1 週間程度を要する。もし点検日に、UCV の点検等のために UCV チェンバーの圧力を大気圧に戻した場

合、再び真空度を  $P < 0.2 \text{ Pa}$  に戻すために 1 週間程度を要し、その間は UCV の PMT に電圧を印加することができず、ビームタイム中にも関わらずデータを取得できなくなる。そのため、 $0.2 \text{ Pa} < P < 10 \text{ Pa}$  で放電が起きるかをさらに調べる必要がある。もし  $P > 0.2 \text{ Pa}$  で放電が起きるようであれば、UCV チェンバーの真空引きシステムの増強を行う。

### 5.3 レート耐性試験についての考察

4 章の測定において、物理ランのレート以下でゲインが 3% の範囲で安定であることを示した。1 つの印加電圧を用いた測定において、測定時間は 5 分以内であったため、レート以外の要因はゲイン変動を起こさないとした。しかし、一般的に PMT に電圧を印加し続けるとゲインが変化するとされている [12]。物理ランの 1 度のデータ取得に 5 分以上要する場合、データ取得中でゲインが安定であるかはわからないため、ゲインの長期的な振る舞いを調べる必要がある。また、本試験では物理ランのレートに関してゲインの安定性を調べたが、D1 off ランのレートである 90 MHz でゲインの安定性を調べる必要がある。さらに、PMT のゲインが 3% 変動した場合、UCV の検出効率が 99.2% 以上を達成できるかどうか調べる必要がある。

### 5.4 PMT の全数試験に向けて

本研究では 1 台の PMT について、開発した基板部を用いて真空中での挙動を確認した。UCV に使用するために、残り 13 台の PMT についても放電が起きないことと、水冷できることを確認する必要がある。実機の UCV フレームは、山中卓研究室の所持する真空チェンバーに入らないため、実機からシンチレータとアルミ蒸着フィルムからなる集光機構を置く空間をなくした、X 方向に短い UCV フレームを用いて真空テストを行う。集光機構を置かない以外は実機の UCV と同じである。このとき、実機に使用するものと同じシステムを用いて複数の基板の温度をモニターする。Raspberry Pi を用いて SPI 通信で温度を取得する [19]。

また、複数 PMT の放電モニターに関しては、3.2 節で使用した放電モニター回路を用いる。この時、図 5.1 に示す回路を用いることで、複数基板からの信号を足し合わせ、オシロスコプのトリガーとして入力する。これにより、1 台のオシロスコプを用いて複数台の PMT の放電試験を行うことができる。

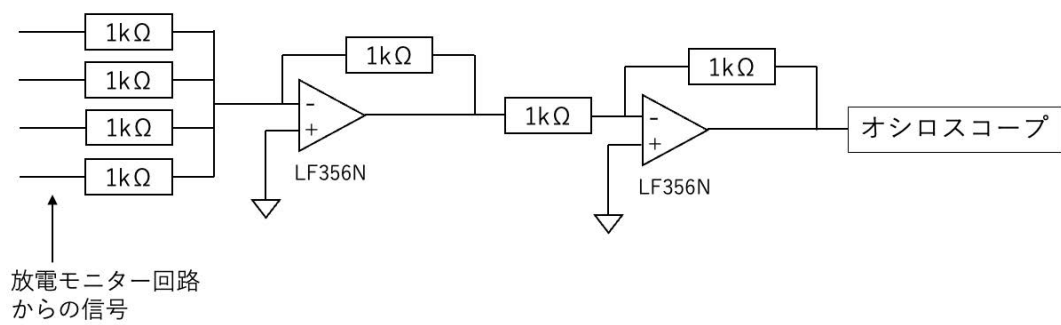


図 5.1 放電信号を足し合わせる回路。



## 6 結論

KOTO 実験は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊を探索している実験である。2016–2018 年に取得したデータの中で最大の背景事象源であった  $K^\pm$  を排除するために、Upstream Charged Veto (UCV) を開発した。UCV は真空中で用いる検出器である。

UCV には薄いシンチレータを用い、そのシンチレーション光を複数の PMT で読み出す。本研究では UCV に使用する PMT を真空中で安定に使用するための PMT の基板部と冷却方法を開発した。

1 台の PMT を用いて水冷試験を行った結果、基板の温度上昇を  $27^\circ\text{C}$  以下に抑えた。

また  $P = 0.2 \text{ Pa}$  以下の真空中で放電が放電が起きないことを保証した。

また、物理ランにおいてゲインが 3% の範囲で安定であることを保証した。

## 参考文献

- [1] P. Heut and E. Sather, Phys. Rev. D **51** 379-394 (1995).
- [2] Andrzej J. Buras, Dario Buttazzo, Jennifer Girrbach-Noe, and Robert Knecht, JHEP **2015** 33 (2015).
- [3] J. K. Ann. *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122** 021802 (2019).
- [4] Satoshi Shinohara, Study of the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  Decay at the J-PARC KOTO experiment, Ph.D. thesis, Kyoto University, (2021).
- [5] J-PARC, <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [6] T. Masuda, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016** 013C03 (2016).
- [7] J. K. Ann. *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126** 121801 (2021).
- [8] K. Shiomi, Proc. Int. Conf. on Kaon Physics 2022 (2022).
- [9] R. Shiraishi, Proc. Int. Conf. on Kaon Physics 2022 (2022).
- [10] 小野啓太, 薄膜プラスチックシンチレータを用いた KOTO 実験用荷電粒子検出器の開発, Master's Thesis, Osaka University, (2023).
- [11] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管と関連製品  
URL [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photronics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/PMT\\_TPMZ0002J.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photronics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_TPMZ0002J.pdf)
- [12] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管 その基礎と応用  
URL [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photronics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/PMT\\_handbook\\_v4J.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photronics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf)
- [13] RK73B Datasheet  
URL <https://docs.rs-online.com/b696/0900766b814fde67.pdf>
- [14] Saint-Gobain, Specifications for BC400  
URL <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators/bc400-bc404-bc408-bc412-bc416>
- [15] ヒロセ電機, Specifications for U.FL Series  
URL [https://www.hirose.com/en/product/document?clcode=&productname=&series=U.FL&documenttype=Catalog&lang=en&documentid=D31697\\_en](https://www.hirose.com/en/product/document?clcode=&productname=&series=U.FL&documenttype=Catalog&lang=en&documentid=D31697_en)
- [16] Draka, Specifications for DRAKA CEH-50

URL [https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business\\_markets/markets/downloads/datasheets/hf41e\\_1.pdf](https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/hf41e_1.pdf)

[17] 株式会社トーコネ

URL <https://www.to-conne.co.jp>

[18] K. Kotera, Presentation in KOTO weekly meeting (2023).

[19] T. Shibata, Presentation in KOTO weekly meeting (2023).