

KOTO 実験のカロリメータ増強—4次元カロリメータの開発—

大阪大学

小寺 克茂, 清水 信宏,

coter@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp, shimizu@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp,

南條 創

nanjo@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp

2020 年 (令和 2 年) 8 月 2 日

1 はじめに

本稿では J-PARC ハドロン実験施設で行われている KOTO 実験でのカロリメータ増強について説明する [1, 2, 3, 4]。ほとんどの結晶カロリメータでは、結晶を円筒面や平面に配列し、粒子の入射方向に対して下流側に光センサを取り付け、シンチレーション光を読み出す。そして入射面上の 2 次元位置とヒット時間の情報、エネルギー損失を測定する。我々が増強したカロリメータは、2 次元位置情報と時間に加えて奥行方向の位置情報 (+1 次元) を測定する “4 次元カロリメータ” である。これによって、中性子と γ の識別ができるし、KOTO 実験における中性子を起源とする背景事象を大幅に削減できる。本稿では、この 4 次元カロリメータの性能、要素技術に重点を置いて説明する。特に、原著論文には通常書かない開発の思想、複数の要素技術の候補から最終形に至る経緯、失敗談などを本稿に残すことで、今後の検出器開発の参考になれば幸いである。

2 KOTO 実験とカロリメータ

我々は J-PARC KOTO 実験で $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探索し、標準理論を超える新物理を発見しようとしている。この崩壊は、分岐比が標準理論では 3×10^{-11} [5] と強く抑制され、その理論的不定性が 2% と小さいので、新物理探索に適している。この崩壊はまだ発見されておらず、分岐比の上限値は KOTO 実験が 3×10^{-9} (90%CL) と与えている [6]。

KOTO 検出器 [7] の上流部を図 1 に示す。真空タンクの内部に検出器が配置されている。 K_L ビーム軸方向に Z 軸をとる。左から K_L 、中性子、 γ を含む中性ビームが入射する。検出器のさらに上流にあるカロリメータによりビームは細く絞られ、ビームの大きさは検出器入口で 8 cm 角である。このビーム周囲にカロリメータで絞られ

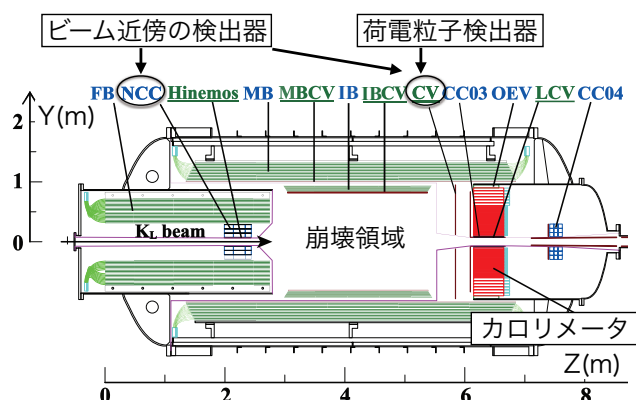


図 1: KOTO 検出器上流部。

なかったビームハロー中性子 (数 GeV/c) が僅かに存在し、背景事象に寄与する。 K_L の運動量分布のピークは 1.4 GeV/c である。図中の “崩壊領域” で崩壊する K_L を用いて $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探索する。中性子と空気の相互作用を避けるため、タンク内は真空中に引かれる。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の特徴は “ 2γ の他に何も無い” であり、カロリメータで 2γ を捉え、崩壊領域のほぼ全立体角を覆う検出器で “他に何も無い” を保証する。カロリメータに入射する荷電粒子は直上流の荷電粒子検出器を用いて veto する。

カロリメータは直径 1.9 m の領域に 50 cm 長の undoped CsI 結晶を積み上げてつくられている。中央の領域は 2.5 cm 角、外側は 5 cm 角の断面の結晶であり、合計 2716 本の結晶から構成される。下流側から PMT を用いてシンチレーション光を読み出す。信号事象の γ は 0.1 GeV から 2 GeV のエネルギーであり、入射面上の XY 位置座標とヒット時間、さらにエネルギーを測定する。例えばカロリメータの 2.5 cm 角結晶部でのエネルギー分解能は $\sigma_E/E = 0.66\% \oplus 1.81\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$, 位置分解能は $(1.99 \oplus 3.95/\sqrt{E(\text{GeV})})$ (mm) である [8, 9]。

KOTO 実験では、2 個のシャワークラスターの XY 位置とエネルギーを測定し、 π^0 の 4 元運動量を再構成す

る。時間情報も加えて、信号事象の検出と背景事象の削減を行う。このため、これらの測定性能を保ちつつ、カロリメータ増強を行う必要があった。

3 ハドロンクラスタ背景事象

2013 年に取得した KOTO 実験初の物理ランのデータ解析で、以下のようなハドロンクラスタ背景事象 (図 2 右) があることがわかった。ビームハロー中性子が直接カロリメータに入射し、ハドロンシャワーをおこし、1 個目のクラスタをつくる。そこで生成された中性子が横方向に飛んで別の場所にヒットし、2 個目のクラスタをつくる。カロリメータ XY 平面上でのクラスタ間の距離は、30 cm から 100 cm 程度まで広く分布する。

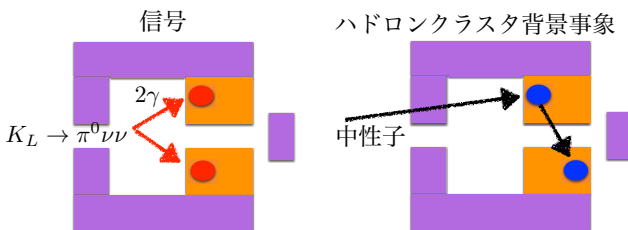


図 2: 信号 (左) とハドロンクラスタ背景事象 (右)。

2 クラスタから再構成した π^0 と、クラスタ形状を使った事象選択の後も、ハドロンクラスタ背景事象は主要な背景事象であった。表 1 を見ると、データ取得を重ね、探索感度 (SES¹) が向上すると共に、解析によるハドロンクラスタ背景事象の削減能力が向上していることがわかる。現状の削減性能を用いると、KOTO 実験の目標とする標準理論感度 ($SES = 3 \times 10^{-11}$) では、ハドロンクラスタ背景事象は 0.5 事象となるので、さらに 1/10 程度の改善が必要である。カロリメータのみが関与する背景事象であり、カロリメータ増強による背景事象削減が本稿の主題である。

表 1: KOTO 実験におけるハドロンクラスタ背景事象の評価 (*:preliminary)[6, 10, 11]。

データ取得年	実験感度 (SES)	背景事象見積り
2013	1.3×10^{-8}	0.18
2015	1.3×10^{-9}	0.24
2016-18	6.9×10^{-10} *	0.02*

4 ここのはじまり

2012 年 8 月 (2013 年の KOTO 実験初の物理ランの 1 年弱前) に増田孝彦氏 (当時京都大学, 現岡山大学) か

¹Single Event Sensitivity: この分岐比の崩壊を、事象選択の後 1 事象観測することが期待される。

ら、シミュレーションによると、“ハロー中性子が直接カロリメータに当たり、2 つクラスタをつくる背景事象がある” というレポートがあった²。2 個目のクラスタが結晶下流で出来やすいことから、今回の増強と同様の案を含め、いくつかの対策が検討されたが、2013 年からの最初の物理ランも近く、他にも別の問題が潜んでいるかもしれない、まずデータで確認しよう、という方針をとった。実際に 2013 年の物理ランを実施し、データを解析した結果ハドロンクラスタ背景事象の存在が明らかになった。その後は解析によりハドロンクラスタ背景事象の削減能力を向上させ、当面はこの背景事象に対処できる方向性を見出しつつ、データ取得と他の検出器の増強を行っていた。一方で 2015 年に入ってくると、当時は J-PARC の加速器増強のための長期休止期間が 2018 年に予定され、そのタイミングが大規模な検出器増強を行う良い機会なので、そろそろ将来に備えてカロリメータ増強を考えないとな、という状況でもあった。そのような中、J-PARC から関西に戻る常磐線特急の中で、山中卓氏と南條でそろそろやるか、という話をして、結晶上流に光センサを設置することを議論した。これを契機に本格的な検討がはじまり、2018 年のインストールに向けて計画がスタートした。性能のみを追求すると際限なく時間がかかるし、トリッキーなデザインになると失敗のリスクと、それを回復するためのさらなる時間とコストがかかることがある。物理からの要求を明確にすることが重要で、我々のスローガンは“検出器で 1/10 に削減”とした。2018 年にインストールできることを強く意識して、ベストな性能と、要求を満たす堅牢さとの狭間で、カロリメータ増強の設計と計画を検討していくこととなった。

5 結晶両読みによる背景事象削減

図 2 左のように、信号事象の γ の場合、放射長が 1.9 cm なので、主に結晶上流部で相互作用をしてエネルギーを落とす。図 2 右のように、ハドロンクラスタ背景事象の 2 個目のクラスタは、結晶の下流側にヒットする傾向にある。この結晶奥行き方向のヒット位置を得ると、背景事象を効果的に削減できる。結晶の下流端からの PMT 読み出しに加えて、上流端に低物質量の半導体光センサ MPPC を接着し、両側からシンチレーション光を読み出す (図 3)。この時間差 $\Delta T = T_{MPPC} - T_{PMT}$ と定義すると、シンチレーション光の伝播速度 v 、結晶上流端からの位置 Z 、結晶の長さ L を用いて ΔT は以

²KOTO 実験の前身の KEK E391a 実験では、この背景事象はリストされずノーマークだった。E391a 実験では結晶の奥行き長さが 30 cm であり、短い 2 個目のクラスタをつくるような中性子が結晶と反応しにくく、背景事象の寄与が相対的に少なかった。

下のように書ける。

$$\Delta T = \frac{Z}{v} - \frac{L-Z}{v} = \frac{Z-L/2}{v/2}. \quad (1)$$

時間差 ΔT から Z の情報を得る。これが実現すると XY 座標，時間に加えて Z 座標測定が可能となり，4 次元カロリメータとなる。この結晶による 4 次元カロリメータの手法は，我々の知る限り世界で初めてである。

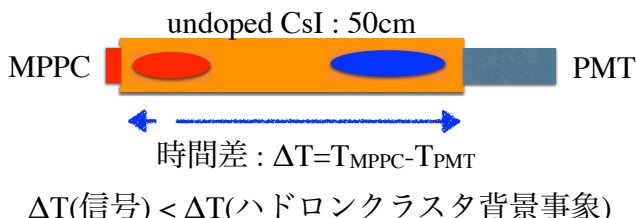


図 3: 両読みによる奥行き位置の抽出。

6 カロリメータ増強の概要

PMT 読み出しの情報から構築したクラスタに対して，MPPC 読み出しを使って，両端の時間差を測定できればよい。このため， γ のシャワーの横方向の広がり程度（モリエール半径 3.5 cm）の 10 cm 角の領域をまとめて読み出すことにして，読み出しチャンネル数を 256 チャンネルに抑制した。カロリメータ増強の概要を図 4 に示す。6 mm 角 MPPC を 2.5 cm 角結晶に 1 個，5 cm 角結晶に 4 個接着する（合計 4080 個の MPPC）。それぞれの MPPC を回路基板（受動素子のみ）にはんだづけする。バイアス電圧印加と信号出力は MPPC4 個分³を一まとめにする（1024 個の出力）。このまとまりに対して，1.1 mm ϕ の細い同軸ケーブル（ヒロセ電機社 U.FL コネクタを使うことより U.FL ケーブルと呼称）を接続する（1024 本）。このシールド銅網線側からバイアス電

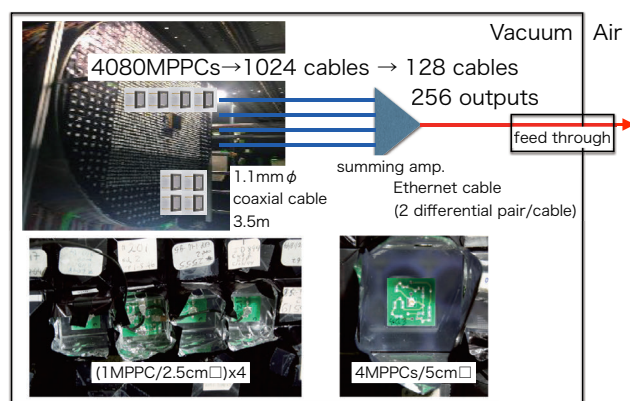


図 4: カロリメータ増強の概要。

³一部 3 個分をまとめた。

圧を供給し，芯線側から信号を出力する。このケーブルをカロリメータ周辺部まで導く（ケーブル長 3.5 m）。そこにバイアス供給回路と信号用アンプを設置し，U.FL ケーブル 4 本分の信号を足し合わせて出力する（256 出力）。このアンプ出力には Ethernet ケーブル⁴（128 本）を用い，2 個の差動ペアを 1 つのケーブルで伝送する。これをフィードスルーを介して真空チェンバの外へ出し，さらに Ethernet ケーブルを介して波形記録 ADC まで導く。

7 性能評価

7.1 奥行き位置と両読みの時間差の評価

結晶の両読みの基礎特性試験のために，5 cm 角 50 cm 長 CsI 結晶の片端に PMT を取り付け，反対端に MPPC を取り付けた。奥行き方向の Z 位置毎にトリガーカウンタを配置して，宇宙線による時間差 $\Delta T = T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}}$ の分布を得た。ある特定の Z 位置での ΔT 分布を図 5 左に示す。宇宙線による 5 cm 貫通でのエネルギー損失 28 MeV に対して， ΔT の分解能は 1.1 ns であった。 Z 位置毎にこのピークをプロットしたのが図 5 右である（ Z - ΔT 相関）。50 cm に対応する ΔT は 7.4 ns なので，この時の Z 位置に対する分解能は $1.1/7.4 \times 50 = 7.4$ cm 程度とわかる。式 1 の $1/v$ に対応する伝播時間は，7.4 ns/m と，光速による伝播の 2 倍強となり，屈折率 2 の結晶中の光伝播でほぼ説明できる⁵。

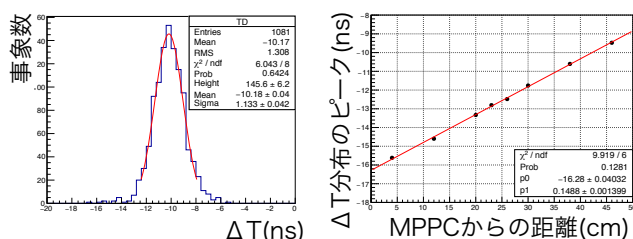


図 5: 宇宙線による ΔT 分布 (左) と Z - ΔT 相関 (右)[12]。

7.2 結晶の個性と Z - ΔT 相関

KOTO 実験で用いている 50 cm 長 CsI 結晶は FNAL の KTeV 実験のカロリメータで用いた結晶を再利用している。その 8 割は，25 cm 長のブロックを接着して継ぎ合わせている。接着結晶については継ぎ目に対して，図 6 のような Z - ΔT 相関に不連続がある傾向がある。この原因として，図 6 右のような継ぎ目通過の際の光量減衰が検討された。PMT 読み出しでは，直接 PMT

⁴カテゴリ 6 の Shielded with Foiled Twisted Pairs のケーブル

⁵CsI 結晶の屈折率は 310 nm 付近では 2.0。500 nm 付近では 1.8。

に到達する光と、上流端で反射されて遅れて到達する反射光がある。上流部発光と下流部発光で、継ぎ目通過回数が異なり、反射光の相対的な減衰が変わり、波形の差となって現れる。MPPC 読み出しでも同様の効果があり⁶、波形からヒット時間を求める際のバイアスが生じ、継ぎ目での不連続の原因となり得る [12]。

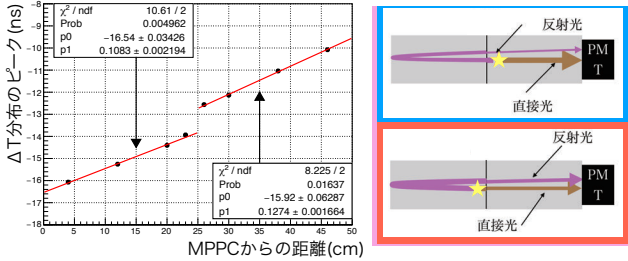


図 6: Z - ΔT 相関での不連続 (左) とそのモデル (右) [12]。

7.3 γ と中性子ビームを用いた性能評価

カロリメータ増強に先立ち、中性子と γ の識別性能を評価した。大阪大学核物理研究センター (RCNP) では、サイクロトロンのパルス陽子からの ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応による準単色中性子を利用できる。同時に γ も生成され、この γ と中性子の飛行時間差 (TOF) を用いて両者の識別が可能である。我々は 392 MeV 陽子ビームを用い、 $O(100)$ MeV の中性子と γ による試験を行った⁷。50 cm 長 CsI 結晶を積んで 15 cm 角の断面とした。それぞれの結晶について、下流は PMT、上流は MPPC で読み出した。図 7 左は加速器のビームパルスのタイミングを基準に測定した CsI のヒット時間分布であり、 γ と中性子の TOF の差に対応する。これを用いて両者を識別した。結晶のエネルギー損失が 100-300 MeV の事象を解析に用いた。図 7 右に中性子と γ の ΔT 分布を示す。複数の結晶にヒットがある場合は、各結晶の ΔT のヒットエネルギーによる荷重平均を用いた。 ΔT 分布は奥行方向のヒット位置分布とみなせ、予想通り γ のヒットは上流に位置する。中性子は相互作用長が 38 cm と長いので幅広く分布する。分布の中央部が凹む原因は、7.2 節で述べた 25 cm 長ブロックを継ぎ合わせた結晶での、 Z - ΔT 相関の不連続にある。 γ を 90% 得られるカット位置を用いると、中性子の事象数は 32% になった。 $O(100)$ MeV のエネルギー領域で 1 クラスタに対しては、 γ の選択効率 90% で、中性子をほぼ 1/3 に削減できる。

⁶MPPC 側では PMT 側の端面での反射光が寄与する。こちらでは PMT を使うので、端面に対し受光面が占める割合が比較的大きく、反射光の寄与は小さい。このため MPPC 側での継ぎ目の効果は相対的に小さい。

⁷このエネルギーの γ の由来は、中性子が標的中で相互作用し π^0 を生成することから説明できる。

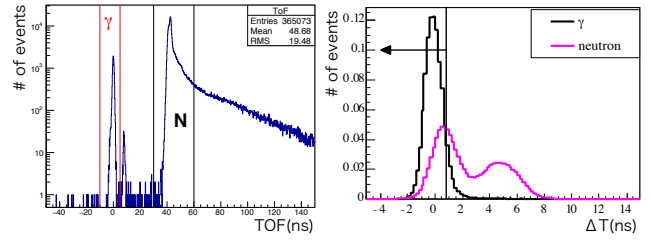


図 7: CsI 結晶のヒット時間分布 (左) と中性子と γ の ΔT 分布 (右)[12]。

7.4 増強後のカロリメータを用いた性能評価

カロリメータ増強の後、2019 年 2 月から 4 月に KOTO 実験でデータ取得を行った。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を模擬する 2 クラスタサンプル (信号用サンプル) には $K_L \rightarrow 3\pi^0$ 崩壊からの $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ を用いた。図 8 左に各 γ エネルギー毎の ΔT の分解能を示す。6 クラスタの平均時間を基準として、PMT 側、MPPC 側のみでの時間分解能も示す。MPPC 側の分解能が主要な寄与である。

ハドロンクラスタ背景事象用サンプルは、検出器より上流の中性ビーム中にアルミ板を挿入し、ビーム中性子を故意に散乱させることで (アルミ標的ラン)、効率的に取得した。背景事象用サンプルはほぼ中性子によるものであり、 γ の混入は 0.04% である。

この背景事象用サンプルと信号事象用サンプルについて、2 クラスタに対して得られた ΔT のうち、値が大きい側を用いてつくった ΔT 分布を図 8 右に示した⁸。信号を 90% 選択しつつ、背景事象の量を $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ まで削減できた⁹。

ΔT を用いた事象選択と、既存の波形、クラスタ形状を用いた事象選択の間の背景事象削減の相関についても調べた。波形を用いたものと ΔT の事象選択の間には相関があり、波形による事象選択を施した後は、 ΔT による背景事象削減は $(4.0 \pm 0.6) \times 10^{-2}$ となる。クラスタ

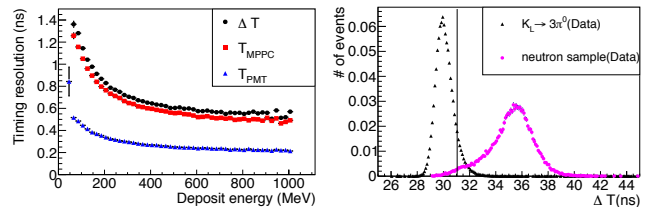


図 8: 信号用サンプルの ΔT 分解能 (左) と信号サンプルとハドロンクラスタ 背景事象サンプルの ΔT 分布 (右)[13]。

⁸ ΔT の値の大きい側が背景事象では 2 個目のクラスタに相当することが多く、背景事象の削減に主たる寄与をする。

⁹ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊に比べ、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$ 崩壊では γ のエネルギーが低めなので背景事象の削減性能は保守的な値である。

形状と ΔT を用いた事象選択の間には有意な相関は観測されなかった。以上より、 ΔT を用いると標準理論感度でのハドロクラスタ背景事象は $0.5 \times (4 \times 10^{-2}) = 0.02$ と抑制でき、無視できる。

さらなる削減性能の向上の可能性も検討した。図 9 左にハドロクラスタ背景事象において PMT が光を検出する様子を示した。1 個目のクラスタは、結晶の上流で反応し、シンチレーション光は下流の PMT まで長めの距離を伝播する。1 個目のクラスタから生成した別の中性子が結晶中を 30-100 cm 程度飛行した後に結晶の下流にヒットし、2 個目のクラスタをつくり、そこから PMT まで短い距離の光伝播となる。このように 2 個目のクラスタをつくるまでの飛行時間を、1 個目のクラスタの光伝播時間でキャンセルするので、 T_{PMT} の 2 クラスタ間の時間差は少ない。一方、以下のように T_{inv} を定義すると

$$T_{inv} = \frac{T_{MPPC} + T_{PMT}}{2}, \quad (2)$$

T_{inv} は奥行方向のヒット位置によらず、2 クラスタ間の T_{inv} の差 ΔT_{inv} は、クラスタ間の距離に対応する中性子の飛行時間のみを反映する。図 9 右に信号用及び背景事象用サンプルに対する ΔT_{inv} の分布を示す。信号事象に比べ背景事象では、飛行時間の分時間差が生じていることがわかる。 ΔT と ΔT_{inv} を両方用いると性能が向上する。なお、 T_{inv} のアイデアは KOTO 実験についての修士論文の審査委員をつとめた中野貴志氏の提案がきっかけとなっている [14, 13]。

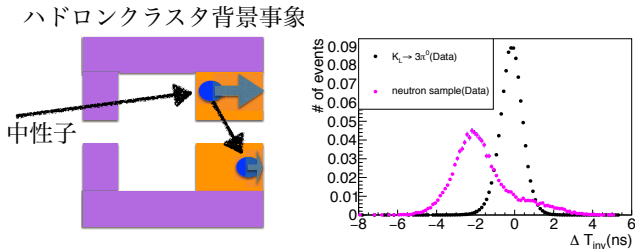


図 9: 中性子の TOF と結晶中の光の伝播 (左), ΔT_{inv} 分布 (右) [13]。

8 要素技術

8.1 光センサ

我々は結晶の上流端の光センサに図 10 に示す浜松ホトニクス社¹⁰ 製 MPPC S13360-6050CS を用いた。センサのサイズが 6 mm 角、ピクセルサイズが 50 μm 角、センサ保護の表面コートがシリコンである。この選定理

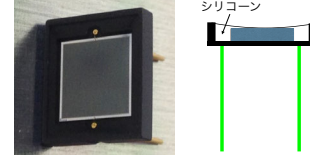


図 10: 浜松ホトニクス社製 MPPC S13360-6050CS の写真 (左) と断面イメージ (右)。

由は以下のとおりである。1) 紫外線検出感度: シリコンは紫外線透過性が良く、undoped CsI 結晶のピーク発光波長の 310nm に対しても、24%の光検出効率が期待できる。2) 光量: 上流端の光センサでは 10 cm 角領域に対し 50 MeV 以上を検出できればよい。選んだ MPPC は 6 mm 角と比較的広い受光面積であり、50 MeV のエネルギー損失に対しても 300 p.e. 程度の発光量を確保できる。3) 増幅率: 1.7×10^6 のゲインがありフロントエンド回路の設計が容易。4) 薄いこと: 既存のシステムへの増強であったので、結晶上流部に許されたスペースは 23 mm しかなかった¹¹。MPPC は厚さ 2.3 mm とコンパクトである。5) 低物質質量: 粒子が入射する上流部に設置するため、低物質質量であることが必須であった。今回の増強では後述の基板やケーブルなどを含めても 0.004 放射長分であり、カロリメータの γ 測定には影響がない。6) コスト: 4000 個程度の大量の光センサが必要となるので、安価であることは実現可能性の観点で重要である。以上のようなメリットから使用する MPPC を選定したが、放射線耐久性や結晶に取り付ける方法などの懸念があった。それぞれ 8.3, 8.7 節で説明する。

8.2 MPPC バイアス回路

MPPC のバイアス回路の段階で、四つの MPPC をまとめる手法に関しては、三つの方法を検討した。図 11 にその回路図を示す。当初は、直列接続の採用を検討して開発を行っていた。この回路の特徴は、短い波形とシンプルさにある。MPPC は交流的に見ればコンデンサ

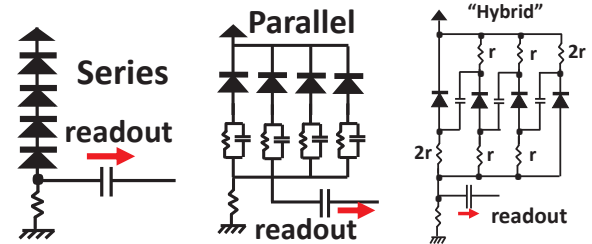


図 11: 検討した MPPC のバイアス回路。直列接続 (左), 並列接続 (中), ハイブリッド接続 (右)。

¹¹ カロリメータ上流部は、まず東日本大震災の影響で結晶が個別に Z 軸方向上流に動いている。これ以上飛び出すことがないように CFRP アルミハニカムプレートで作った耐震用結晶カバーがあり、その上流に荷電粒子検出器がある。実際は耐震用結晶カバーを作り直し、荷電粒子検出器を 2mm 上流に動かし必要なスペースを確保した。

¹⁰ 浜松ホトニクス株式会社; 静岡県浜松市中区砂山町 325-6

と等価であるため、信号源の MPPC から見れば回路の等価容量は通常の四分の一になったように振る舞う。したがって、MPPC の波形は時定数が四倍小さくなった RC 放電回路と同等なものとなり、高いレートに伴うパイルアップへの耐性や、時間分解能が向上する。これに対しては、2017 年秋の日本物理学会の講演において、東京大学の大谷航氏から次の重要な指摘を受けた。それは、MPPC の放射線損傷の程度が位置によって異なるために、MPPC にかかる印加電圧のバランスが崩れる可能性であった。放射線損傷によって暗電流が増加することは、等価な抵抗値の減少を意味するため、直列の接続では、実際にかかる電圧が四つの MPPC の間で変化することになる。後に行ったビームラインの中性子フラックスシミュレーションによれば、ビーム中心付近に設置された MPPC は、一つの直列回路の中で 10% 程度もゲインが変わる可能性があることがわかった。

そこで次に検討したのが並列接続である。直列接続と同様、コンデンサによって時定数を小さくし、同時に各 MPPC にかかる電圧を常に一定に保つことができる方法である。コンデンサに並列に接続された抵抗は、MPPC の暗電流を開放する役割を担う。実際にこの回路で時定数を小さくすることができたものの、宇宙線を用いた試験では、時間分解能が直列接続より 30% ほど悪いことがわかった。

結果的に採用することになったのは、MEG II 実験で使われている「ハイブリッド」接続である。これは、上述の 2 つの回路の長所を組み合わせた回路となっている。交流的には直列、直流的には並列、を実現した回路である。時間分解能も直列接続と同等であった。唯一の懸念は、部品点数が増えることに伴う現場作業の複雑さである。2.5 cm 角結晶四つという細かい領域において、クロストークを十分に小さく保ったまま、これだけの受動部品を複雑に組み込むことは難しく思えた。しかし、少しでも性能を良くしたいという強い思いから、この手法を採用することに決めた。結果的に四つの結晶のうち一つにハイブリッド接続に必要な部品をまとめた基板を置き（その役割からヒエラルキー基板と名付けた）、残りの三つに分配する形とした。図 4 左下にもその接続をみることができる。

8.3 MPPC の放射線耐久性

MPPC が放射線によって損傷を受けると、暗電流が増加し、S/N、時間分解能が低下する。特に、ビームラインに含まれる中性子が引き起こす損傷について、本プロジェクトの初期に検討した。放射線損傷の影響を加味した中性子の流量（フルエンス）は 1 MeV-n/cm^2 という単位であらわされる。これは、単位面積あたりを通過

した中性子を、その運動エネルギーに応じたダメージ量で重みづけし、 1 MeV の運動エネルギーを持った中性子数に換算した量である。事前のシミュレーションでは、ビームに最も近い MPPC が KOTO 実験の 3 年のビームタイム（350 日の連続運転に相当）で受けるフルエンスは、 $8 \times 10^8 \text{ 1 MeV-n/cm}^2$ と見積もっていた。これは、6 mm 角 MPPC の暗電流が、もとの $0.5 \mu\text{A}$ 程度から 50 倍程度まで増大する量である。

MPPC をインストールし、2019 年の J-PARC における運用を開始してから、我々は肝を冷やす思いをすることになった。実際にビームを受けている際の電流値の上昇速度は、当初の見積りの 20 倍にも及んだのである！しかも、その分布はシミュレーションが予測しているものよりもずっと広く、ビーム中心から遠い MPPC までも放射線損傷が速く進むことが判明した。ビームタイムの後、神戸大学のタンデム加速器を用いた中性子照射試験を行い、今ではこの 20 倍の速度の放射線損傷に対しても、KOTO 実験の想定するデータ取得期間では満足する時間分解能を維持できることがわかっている。しかしながら、ハドロン相互作用を伴うシミュレーションがいかに難しいかを認識するとともに、シミュレーションを過剰に信頼をしてはいけないという大きな教訓を得た。

8.4 フロントエンド回路

我々のフロントエンド回路は図 12 のようになっている [15, 16]。MPPC を 4 つ束ねた出力が 4 本、合計 16 個の MPPC の出力をこの回路で取り扱う。MPPC への光入射に伴う電流パルスは $0.1 \mu\text{F}$ のコンデンサ側に伝播する（高周波ではコンデンサのインピーダンスは小さい）。暗電流の直流成分は $1 \text{ k}\Omega$ 抵抗側に逃す。

8.4.1 50 Ω 信号受信部

3.5 m の同軸ケーブルを介して MPPC から信号を受信するので、反射を防ぐため 50Ω で終端する必要がある

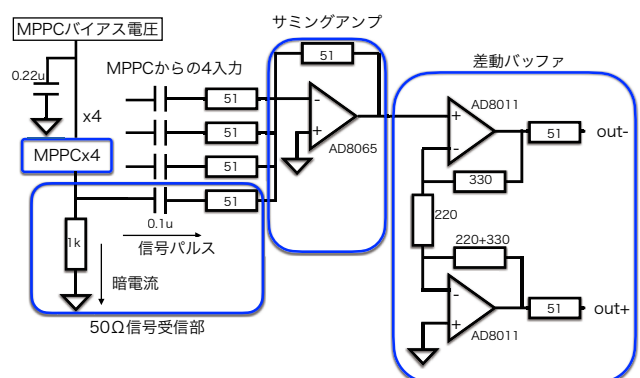


図 12: フロントエンド回路。

る。オペアンプ AD8065 の - 入力端子は、仮想短絡により 0V に保たれる。このため、入力部の $0.1\ \mu\text{F}$ と $51\ \Omega$ はグラウンドに接続されているように見える。これと近い距離で同一基板上に $1\ \text{k}\Omega$ の抵抗が並列に配置されている。これらは MPPC 出力パルスの帯域では一体にみえて、全体として $50\ \Omega$ のインピーダンスにみえる。

8.4.2 サミングアンプ (summing amplifier)

4 本の MPPC 入力からの電流パルスが、 $0.1\ \mu\text{F}$ を介してオペアンプ AD8065 の - 端子近くで合流する。このオペアンプの端子は絶縁性が高く、それぞれの電流パルス ($I_i (i = 0 \cdots 3)$) の和がオペアンプの帰還側の $50\ \Omega$ 抵抗を流れ、 $V = -50\ \Omega \times (\sum_i I_i)$ という電圧出力となる。こうして 4 入力の和に比例する出力が得られるので、このようなオペアンプの構成はサミングアンプと呼ばれる。

オペアンプには入力部が FET で絶縁性の高い AD8065 を選択した。145 MHz の帯域 (ゲイン 1) まで応答する。真空中で冷却可能な 64 mW の消費電力である。サミングアンプの帰還抵抗を大きくすることで、より大きな電圧ゲインを得ることができるが、我々の用途ではすでにゲインが十分であるので、敢えて大きなゲインにはしていない。

8.4.3 差動出力バッファ

2 段目は差動出力用のバッファで、15 m の Ethernet ケーブルを介して波形取得 ADC へ至る信号をドライブする。オペアンプは AD8011 を採用した。こちらは電流帰還型という種類のオペアンプ (電流帰還のため - 入力端子の絶縁性は悪い) で、広周波数帯域 (300 MHz) ながら、低消費電力 (10 mW) を実現している。

下側の AD8011 の - 入力端子が仮想短絡していることに気をつけて、上側をみると非反転増幅回路になっており、下側は反転増幅回路になっている。こうして、差動出力を実現する。ゲインは $(220 + 300)/220 = 2.5$ 倍と計算できる。出力部の $51\ \Omega$ 抵抗でどこかで反射があった場合もこちらで吸収する。差動出力それぞれについて、ADC 側の $50\ \Omega$ 終端と、アンプ出力の $51\ \Omega$ との抵抗分割で、最終的には信号が $1/2$ になり差出力で 2.5 倍のゲインである。ゲインは CsI 結晶の相対光量のばらつきを考慮して、波形取得 ADC のダイナミックレンジに収まるように決定した。

8.4.4 統合性能

性能としては、全体として 40 MHz の周波数帯域、84 mW の消費電力、KOTO 実験の使用する入力レン

ジに対して、 $S/N > 20$ (Noise は MPPC のダークパルスの寄与が主) で非線形性 1% 以下という十分な性能であった。

8.5 アンプ出力波形の歪み

初段のサミングアンプには当初は帯域が 80 MHz (ゲイン 1) までとやや狭い別のオペアンプ (AD8034) を検討していた。この周波数帯域は、MPPC 出力波形の Fourier 解析をして、MPPC 出力の周波数帯域のほとんどをカバーすることから決定した。ところが、出力波形に図 13 左に示す、次のような歪みが観測された。出力波形の最初に逆極性の出力があり、ピーク付近の立上り方も歪んでいる。逆極性の出力は、主となる出力に先行するように見え、当初謎であったが、- 入力端子の仮想短絡が維持出来ていないことが原因とわかった。ピーク付近の立上り方の歪みは、入力波高によって異なる応答をして、波形が変化してしまっている。これは、波形から時間情報を引き出す際のバイアスとなる。以上のことから、高周波応答が問題となっていると考え、周波数帯域が 145 MHz とやや高い AD8065 を選択した。この結果図 13 右のように出力波形の歪みが改善した。

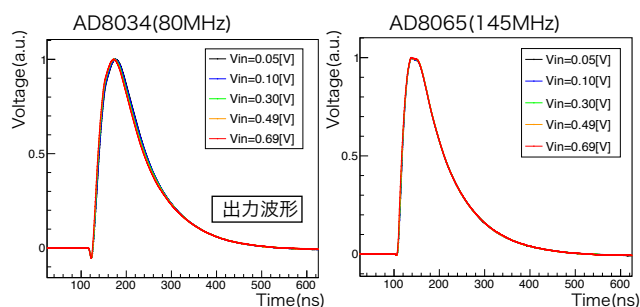


図 13: サミングアンプ出力に見られた波形の歪み (左:AD8034, 右:AD8065)。入力パルスの波高を変化させた時のアンプ出力を出力波高のピークで規格化している [16]。

8.6 MPPC の制御

ハイブリッド接続された 4 個の MPPC が 1024 組あり、ハイブリッド接続毎に MPPC バイアス電圧の On/Off、バイアス電圧のモニタ、MPPC 暗電流のモニタを行う。その他、アンプなどに用いる低電圧電源電圧、基板温度のモニタも行う。図 14 のように、真空側に Mother 基板を 4 枚、各 Mother 基板に Daughter 基板を 8 枚、そこからハイブリッド接続が 32 個接続され、合計 $4 \times 8 \times 32 = 1024$ 個の MPPC ハイブリッド接続を制御する [16]。こういった階層構造を設けることで、各 Mother 基板当たり、外部

からは6本の制御信号¹²で、すべてのMPPCハイブリッド接続の制御を行うことができる。図15にDaughter基板を示す。この基板に1.1 mmφ同軸ケーブル(U.FLケーブル)32本を接続され、シールド導体からMPPCにバイアス電圧を供給する。MPPCからのパルス信号は、この同軸ケーブルの芯線を通してDaughter基板に入る。Daughter基板では、この信号を増幅し、Ethernetケーブルへ出力する。

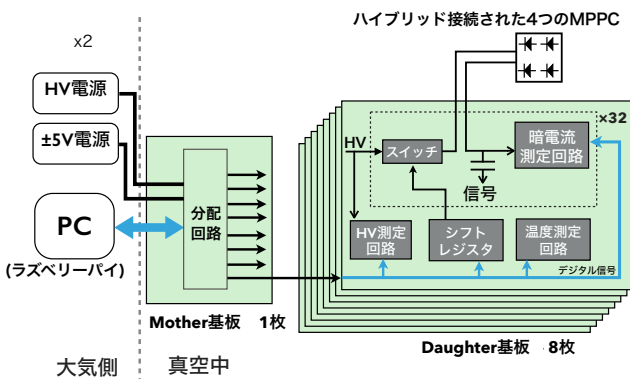


図14: MPPCの制御概要 [16]。

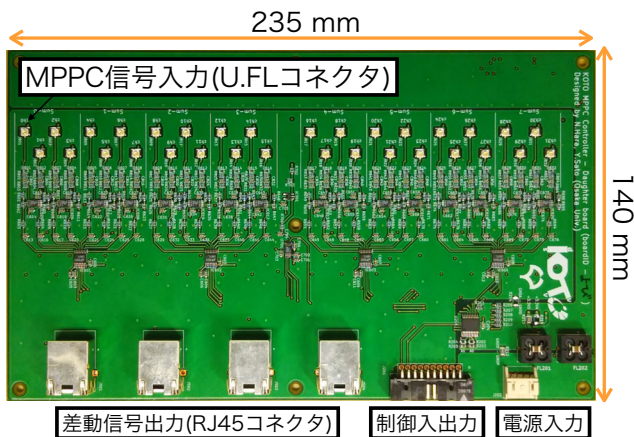


図15: Daughter基板 [16]。

MPPCの制御用には、上述の6本に加え、テストパルス入力などの3本を加え、Mother基板あたり9本である。その真空フィードスルーは図16左で、Mother基板と対応する4枚の基板で、大気側と真空側を接続し、真空封止をした¹³。大気側からはRaspberry Pi一台で4本のフィードスルーへの導入を制御する。信号用の真空フィードスルー(図16右)は基板にEthernetケーブルコネクタを搭載したものとなっている。この基板2枚で今回のカロリメータ増強の信号全数を賄う。信号用基板はシカゴ大学のYau Wah氏が用意し、コネクタのは

¹²SPI通信を用いており、これに必要な制御信号数は、クロック、チップ選択、通信(双方への通信で2本)の合計4本である。今回は別のチップ選択信号と、そのチップ用のクロックを含め、合計6本の制御信号となっている。

¹³スズノ技研株式会社; 茨城県つくば市松塚 453

んだづけはKEKの野村正氏が行った。

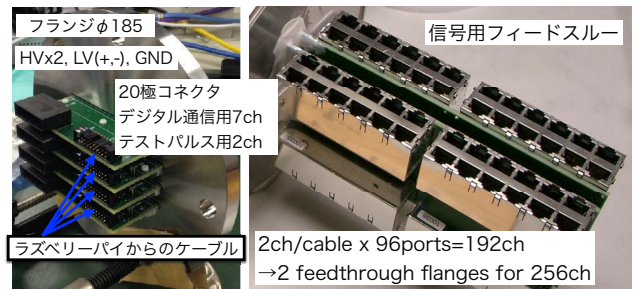


図16: MPPCの制御用(左)及び信号用(右)の真空フィードスルー。

8.7 結晶へのMPPC接着

MPPCの結晶への接着も例に漏れず試行錯誤の連続であった。MPPCをCsI結晶の上流面に取り付けるにあたって、以下が要求された。1) 空気層を含まない接着。空気層があるとCsI結晶からの光が全反射しやすく光量が減る。2) 接着強度が4 N以上あること。要求値にはMPPC基板に使うU.FLコネクタの引張荷重の許容値を用いた。3) 物質量をできるだけ増やさない。4) カロリメータを解体することなく、現地で作業する(鉛直面への接着作業となる)。5) 真空(0.1 Pa)にしても剥れず、アウトガスが問題とならない。特にPMTと結晶の間のシリコンパッドにアウトガスが吸着し、シンチレーション光(310 nmをピークとする紫外光)の透過性が落ちることを危惧した。過去にケーブルの可塑剤が問題となったからである。6) 放射線耐性。これらの要求に対し我々の方策の肝は以下の2点であった。接着剤には、アウトガスと放射線耐久性の実績のあるものを用い、かつ我々が事前に特性試験を行い問題がないことを確認した。MPPCの受光面が図10右のように凹んでいるので、予め石英板を取り付け平面を用意し、結晶との接着に必要な接着剤の量を最小限にした。

接着工程の概要は以下の通りである。まず、MPPCを0.5 mm厚の石英板¹⁴に貼り付け、その後に8.2節で説明した基板にはんだづけした¹⁵。完成品を図17に示す。これらを大阪大学であらかじめ作成し、韓国Jeonbuk大学で全MPPCの性能検査を行い、さらにJ-PARCでの取り付け直前にLEDを用いた光感度試験を再度行なった。CsI結晶は潮解性が高いので、J-PARCでの作業は実験エリア内に乾燥小屋を設置し、カロリメータをその中に置いて行った。CsI結晶は薄いマイラの反射材で覆われ、上流面でテープで封じられている。経年劣化でカビカビになったテープを一つ一つ開封し、結晶上流

¹⁴株式会社大興製作所; 京都市南区久世中久町 676

¹⁵シナノカメラ工業株式会社; 長野県松本市寿北 3-7-24

面を露出させた。基板にはんだづけされ、石英板をつけた MPPC ユニットの、結晶に接着していった。以下に各工程の詳細を記す。

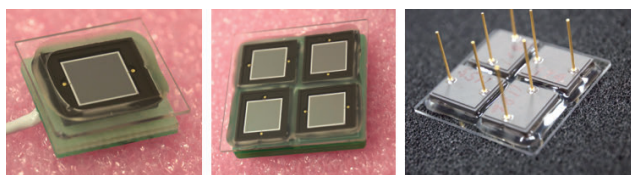


図 17: MPPC ユニット (左) $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ 結晶用, (中) $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 結晶用, (右) 基板をつける前の裏面。

8.7.1 MPPC を石英板に接着

あらかじめ石英板に MPPC を接着しておく方法を選んだ理由は、鉛直面に MPPC を接着する J-PARC での作業をできるだけ容易にし、実現性を高めるためであった。図 10 に見られるように、我々が選択した MPPC はその受光面が $100 \mu\text{m}$ ほど窪んでおり、CsI 結晶面に空気を入れずに接着することが難しい。このため事前に石英板により平面を出しておき、最小限の接着剤で作業できるようにした。結晶面に歪みがなく平坦であるかを危惧したが、実際には全結晶の表面状態はよく、接着剤なしでも結晶と石英板が吸い付くようであった。石英板は硬度が高く傷つきにくく、UV 透過性に優れることから採用した。当初は安価なカバーガラスも考えたが 0.1 mm 厚にしても UV の透過性が足りなかった。MPPC と石英板の接着には、結晶と PMT の光学接続に使っているシリコンパッドと同じシリコン (信越シリコン社 TSE3032, 以降 TSE) を接着剤として使った。UV 透過性、透過性の放射線耐性が保証されているからである。当初は硬質で接着の信頼性も高いエポキシ系 UV 透過接着剤 EPO-TEK305 (以降 EPOTEK) を検討していたが、硬化後に温度変化による MPPC のシリコン面との乖離が見られた。そこで、MPPC の表面コートと同じシリコンで弾力性もある TSE を試みた。一度はいけると考えたこの方法でも、さらに温度が下がった時には、シリコン面と石英板の間に乖離が見つかった。寒冷地でみられる窓霜のような外見であった (図 18)。この原因はシリコンと石英の熱膨張率の

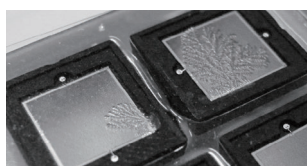


図 18: 温度が下がったときにできた空隙。

違いであると見抜いた。固化した TSE (弾力がある) を加圧して内圧を残した状態で固定することにより、冷却

時のシリコンの収縮を防ぐことを考案した。図 19 にその様子を示す。図 19 の 3) のジグ上に MPPC を載せ TSE を滴下し、図 19 の 3)f の段差部分に石英板を載せると¹⁶、石英板と MPPC の間の距離 $200 \mu\text{m}$ が保証され、この間に TSE が充填されるように設計した。TSE が固化した後で石英板を押し付け内圧を作ったまま、別の接着剤 (アラルダイト 2011) で MPPC 外縁部を固定した。この方法で作った MPPC 石英板ユニットは -15°C から $+45^\circ\text{C}$ の温度変化に耐えた。また、 0.1 Pa の耐真空性も確認した。

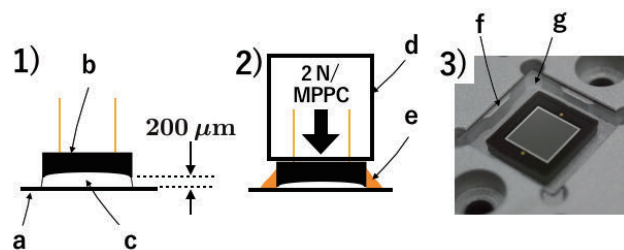


図 19: MPPC と石英板との間に内圧を残すしくみ。a. 石英板, b. MPPC, c. TSE3032, d. 内圧を与える重り, e. アラルダイト 2011, f. 石英板がかかるエッジ, g. 石英板。1) MPPC と石英の間に $200 \mu\text{m}$ 厚めのシリコン層を作る。2) 2 N/MPPC の内圧を加える。3) ギャップを実現するジグ。

8.7.2 MPPC ユニットの CsI 結晶に接着

石英板と CsI 結晶の接着には、結晶上で常温で固化することと¹⁷、我々の CsI 結晶同士の接着でも使用実績があることから、EPOTEK を採用した。鉛直な結晶面に対し、石英板に接着剤を塗布し、石英板を垂直に起こして接着作業を行った。まず、1MPPC 用石英板には $12 \mu\text{l}$ 、4MPPC 用石英板には $24 \mu\text{l}$ の EPOTEK を定量して滴下した¹⁸。塗布後時間をおき流動性を抑えることで、作業中に石英板に載せた EPOTEK が垂れ落ちないことを保証した。結晶に押し当てた際に石英板の 4 隅からわずかに EPOTEK が滲み出ること、接着の品質を保証した。硬化が始まる前に作業が終了するように後述のような手順とした。完全硬化までには 16 時間以上をあたえた。ビームタイムに間に合うよう、60 列ある結晶について 1 日 2 列分の接着作業を計画した。

接着と調整作業を行い、硬化までの時間 MPPC ユニットの CsI に押し付け続けるジグと、それを支えるフレームを図 20 に示した。フレームは CsI カロリメータを保持するステンレスシリンダーに取り付けた。1 日 2 列の

¹⁶MPPC 受光面上から TSE を定量塗布し、石英板を重ねる際に小さな気泡がよくできたが、石英板側にあらかじめ一滴の TSE をつけておくことで、完全に気泡を解消できた。

¹⁷TSE は CsI 結晶上では常温では固化しなかった。

¹⁸分注器: トミタエンジニアリング株式会社; 東大阪市長田中 2-2-26

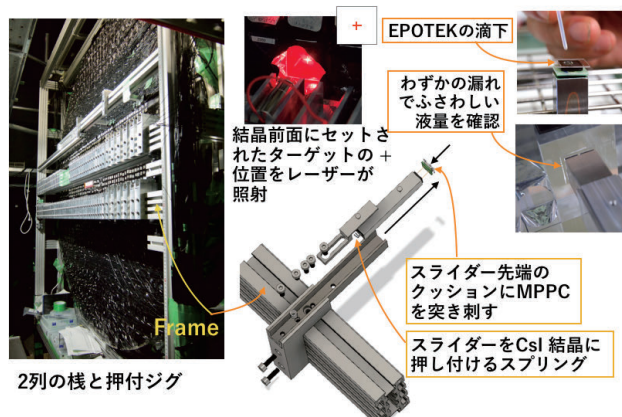


図 20: MPPC ユニートを CsI 結晶に接着するフレームとジグ。

接着を行うため、上下に可動する横棧を2本取り付けた。銃の形をしたジグは、棧に取り付けた後にXYZの3方向の位置を微調できる。この微調整は、ジグにレーザーポインタに設置し、結晶側につけたターゲットにレーザーをポイントすることで行った。次にレーザーポインタに代えて、ジグの上にMPPCユニットを保持するスライダー（図20）を載せ、約3Nの力でCsI結晶に押し付けた。MPPCユニットは以下のようにスライダーで保持した。MPPCの2本の電極は基板にはんだづけした後も切断せずに残しておき、スライダー先端のスポンジに位置決めして差し込んだ。こうすることで接着の際にさらに石英板側に首振りの自由度を残し、石英板が結晶に密着することを可能とした。また、接着後にスライダーを後ろに下げると、容易にMPPCユニットから外すことができる。接着後にMPPCの電極は切断した。MPPCで覆われていない結晶面には端面反射材¹⁹を取り付けた。さらに3.5mの長さのU.FLケーブルをMPPC回路基板に取り付けた。結晶全体を包む反射材のアルミ蒸着面によるMPPC回路基板の短絡をさける目的で、プラスチックカバーを取り付けた。開いてあった結晶全体を包む反射材を閉じブラックテープで固定した。このようにして完成した増強後のカロリメータの上流からの全景が図21である。2018年に予定通り増強を完了し、2019年2月よりビームを受け入れた。全MPPC、全読み出しチャンネルともに健全である。

8.8 乾燥環境

CsI結晶は潮解性があるので、相対湿度を20%以下にする必要がある。大阪大学での試験や、遠隔地でのビーム試験のために、持ち運び可能な乾燥空気環境を

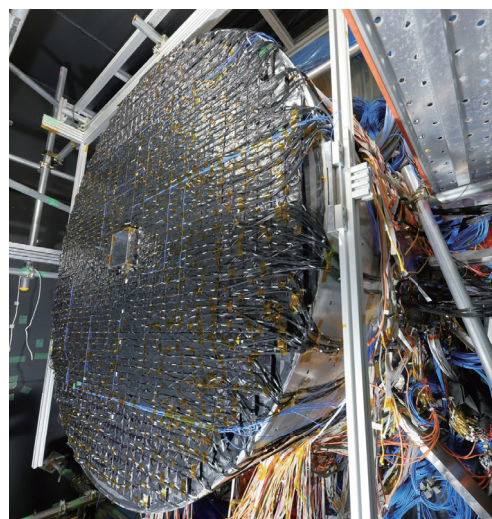


図 21: MPPC 装着後のカロリメータ。

実現するシステムを作った。コンプレッサ（アネスト岩田 SLP22-EFD-M6）と高分子分離膜式ドライユニット（CKD SU302D-05-W-C2）により乾燥空気を生成し、これをビニール小屋に導入し、小屋全体を乾燥させる方針をとった。小屋の大きさは1.5m×2m×2m（図22左）で、ドライユニットからは100ℓ/minの流量で相対湿度1%の乾燥空気を供給した。無人の小屋内部の湿度は4%に到達し、外からの空気の流入を加味して、到達するであろう予想通りの値であった。一方で、人が小屋の中でしばらく作業をすると湿度が上昇し20%を越えてしまう。呼吸と皮膚から数ℓ/minの水蒸気放出を考慮しても相対湿度20%には収まると予想していたが、現実には厳しいものだった。服や作業時の人間からの水分放出が大きいという教訓にもなった。この時、山中卓氏が一計を案じて、マスクにホースを取り付けて、呼吸をテント外へ出す仕組みを作って導入した（図22右）。また、結晶側から外に向かうように乾燥空気の流れをつくるなどして、作業時間を延長することができた。J-PARCでのKOTOカロリメータ結晶へのMPPCインストール作業では、J-PARC据置きの大規模な乾燥装置を用いて、相対湿度20%以下の環境を実現した。



図 22: 乾燥小屋（左）、呼吸放出マスクをつけての作業（右）。

¹⁹結晶全体を包む反射材とは別に端面専用のアルミ蒸着したフィルムを用意した。

9 おわりに

今回のカロリメータ増強は、大阪大学のスタッフと学生が中心となり推進した。短期間でこの増強が成功したことは、4世代の修士の学生6名、著者でもあるポスドク2名の力に負うところが大きい。現場のインストール作業はほぼポスドク2名と学生3名で行った。KOTO実験グループ全体からのサポートなしにはこの増強はできなかった。この増強を行うには、KOTO実験下流部の検出器の撤去、真空タンクの分離と移動、それに伴うケーブル外し、カロリメータ直上流の荷電粒子検出器の取り外しなどKOTO検出器全体での多くの作業が必要であった。韓国の Jeonbuk 大学のコラボレータが MPPC の全数試験を引き受け、ミシガン大学の学生が J-PARC に滞在し MPPC 接着に用いる資材の準備を担当した。そういった多くの努力により KOTO 実験はこのカロリメータ増強に成功し、ハドロクラスタ背景事象を無視できるところまで削減できた。これは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索感度の点で重要であるが、その他の背景事象を研究する際にも重要である。特に未知の背景事象がある場合、既知のハドロクラスタ背景事象を完全に排除して検討できることが重要である。

KOTO 実験は3桁近い $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索感度の向上を目指してスタートしている。まずは背景事象を抑えた実験の設計が大事なのは無論であるが、稀な事象の探索なので、探索感度を上げるといってもよらない未知の背景事象が出現することもある。いかに背景事象のメカニズムを理解し、削減方法をみつけるかという自然との知恵比べであり、我々の物理に対する洞察、想像力、アイデアの勝負となる。そして新たな解析や実験を提案して、積極的に仮説を検証し、背景事象を克服していくことになる。これまでもこの戦いに勝利してきたし、今後も背景事象との戦いは続いていくであろう。現在も新たに K_L ビームとカロリメータ内壁の反応で生成される荷電 K 中間子の崩壊からの背景事象を見つけて、これを削減する検出器を準備中である。こういった過程の先に驚くべき物理の発見が待っているのであろう。この過程には驚きや楽しさもあるし、人間の力に感動することもある。こういったダイナミックでエキサイティングな KOTO 実験と一緒にやってみませんか？

謝辞

電車中での会話や、物理学会、修士論文発表会での議論を通じて、重要な示唆を頂いたことも多い。実験の枠を越えて忌憚のない議論ができる文化は有り難いし、今後も大切にしていきたい。脚注にあるように多くの企業の方々にも支えて頂いた。またこのカロリメータ増強

は JSPS 科研費 (16H06343, 16H02184) の助成をうけている。様々にサポートして頂いた皆様にこの場を借りて感謝したい。

参考文献

- [1] H. Nanjo, J. Phys. Conf. Ser. **1526**, no.1, 012025 (2020)
- [2] K. Kotera, J. Phys. Conf. Ser. **1526**, no.1, 012036 (2020)
- [3] M. Osugi, J. Phys. Conf. Ser. **1526**, no.1, 012037 (2020)
- [4] M. Osugi, JINST **15**, no.05, C05067 (2020)
- [5] A. J. Buras, D. Buttazzo, J. Girrbach-Noe and R. Knegjens, JHEP **11**, 033 (2015)
- [6] J. K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, no.2, 021802 (2019).
- [7] 塩見公志, 杉山泰之, 外川学, 山中卓, 南條創, 野村正, 高エネルギーニュース **13-2**, 83 (2013).
- [8] K. Sato *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A in press <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164527>
- [9] K. Sato, PhD thesis, Osaka University, 2015.
- [10] J. K. Ahn *et al.*, PTEP **2017**, no.2, 021C01 (2017).
- [11] S. Shinohara, J. Phys. Conf. Ser. **1526**, no.1, 012002 (2020).
- [12] 西宮隼人, 修士論文, 大阪大学, 2018.
- [13] 大杉真優, 修士論文, 大阪大学, 2020.
- [14] 真利共生, 修士論文, 大阪大学, 2019.
- [15] 佐藤友太, 修士論文, 大阪大学, 2018.
- [16] 原宣広, 修士論文, 大阪大学, 2019.