

# Belle II 実験 TOP カウンターのインストール完了報告

名古屋大学 大学院理学研究科

鈴木 一仁

kazuhito@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学 大学院理学研究科

居波 賢二

kenji@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学 KMI 現象解析研究センター

松岡 広大

matsuoka@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

2016 年 (平成 28 年) 11 月 24 日

## 1 はじめに

Belle II 実験のバレル部粒子識別装置である TOP (Time-of-Propagation) カウンターのインストールが、2016 年 5 月に完了した。検出器の概念提案 [1] から 17 年、Belle II 実験の技術設計報告書 [2] に実機仕様がまとめられてから 6 年かかっている。検出器の本格運用に向けた課題はまだあるが、一つの節目として感慨深い。関係各所から様々なご協力を頂いてたどり着いた節目に、この場をお借りしてインストール完了の報告をさせて頂く。

## 2 TOP カウンター概要

### 2.1 検出器の特徴

TOP カウンター [1, 3] は、Belle II 実験において主にバレル部の  $K^\pm/\pi^\pm$  識別を担うリングイメージ型チェレンコフ (RICH) 検出器である。図 1 に示すように、外層側を Belle 実験から引き続き使用する電磁カロリメータ (ECL) に、内層側を中央飛跡検出器 (CDC) に挟まれた、動径方向約 12 cm のスペースに設置され、1.5 T の磁場中で運用される。このようなコンパクトなスペースへの設置は、図 2 に示した検出器の構成により可能となっており、チェレンコフ光の輻射体 (かつ伝播体) である合成石英板、その後端面に取り付けられた光検出器、それに続く信号読み出し回路から主に構成されている。

対応する検出器として Belle 実験で使われていたエアロジェルチェレンコフカウンター (ACC) と TOF (Time-of-Flight) カウンターの組み合わせと比べ、このサイズと構成は ECL 入射面近傍の大幅な物質質量低減と CDC 外径の拡大を可能にしている。また、閾値型チェレンコフ検出器である ACC よりチェレンコフ角の情報を有効に

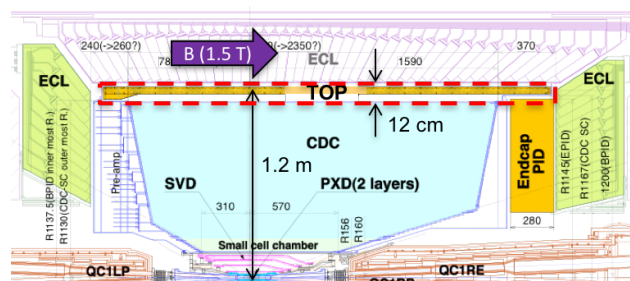


図 1: Belle II 検出器の片側断面図。破線 (赤線) で囲まれた領域が TOP カウンターの設置スペースを示す。

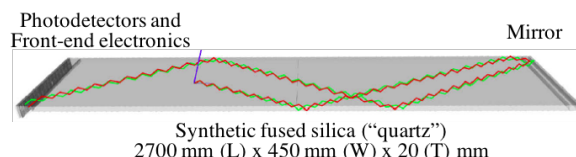


図 2: TOP カウンターの構成概念図。赤線と緑線は、それぞれ  $2 \text{ GeV}/c$  の  $K^\pm$  と  $\pi^\pm$  から出るチェレンコフ光の伝播例を示す。

使えるため、より高性能な粒子識別が期待される。Belle II 実験では Belle 実験より 20 倍高いバックグラウンドレベルを想定しており、これに合わせた放射線耐性やバックグラウンドヒット耐性も要求した開発が進められてきた。

### 2.2 動作原理

TOP カウンターの動作原理を図 3 に示す。輻射体内で全反射条件を満たしたチェレンコフ光は、全反射を繰り返しながらチェレンコフ角で決まった経路で伝播するため、その伝播時間と検出位置もチェレンコフ角を反映する。TOP カウンターは、チェレンコフ光の伝播時間を精密に測定し、その検出位置情報と荷電粒子の電子・陽

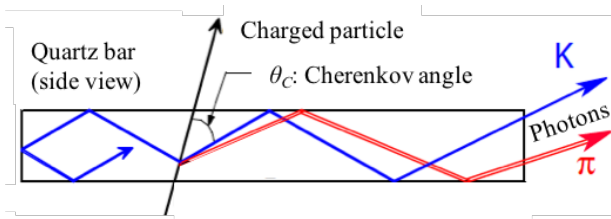


図 3: TOP カウンターの動作原理概念図。詳細は本文に記載。

電子衝突点から TOP カウンターまでの飛行時間情報もあわせて、荷電粒子を同定する。

従来の RICH 検出器 [4, 5] では、リング状に輻射されるチェレンコフ光の検出位置からそのリングイメージを再構成し、チェレンコフ角を測定する。精度良く測定するには、リングイメージを大きく投影できる検出器サイズや、大きな投影像をコンパクトに折りたたむ複雑な反射鏡機構が必要となる。TOP カウンターは、リングイメージを伝播時間と検出位置の二次元平面<sup>1</sup>に投影することにより、従来に比べて非常にコンパクトなサイズとシンプルな構造を実現した、新しいタイプの RICH 検出器である。

荷電粒子の同定には、異なる粒子仮定を識別して最も尤度の高い粒子仮定を選ぶ。仮定する二粒子に対する TOP カウンターの識別能力 ( $S$ ) は、二粒子の飛行時間差 ( $\Delta TOF$ ) とそれら誘起のチェレンコフ光の伝播時間差 ( $\Delta TOP$ ) を用いて、近似的に次式のように表される。

$$S = \frac{\Delta TOP + \Delta TOF}{\sqrt{\sigma_\lambda^2 + \sigma_t^2}} \sqrt{N_{det}}$$

ここで、 $\sigma_\lambda$  と  $\sigma_t$  はそれぞれ輻射体屈折率の波長依存性による伝播時間の広がり（波長分散効果）と検出器の時間分解能、 $N_{det}$  は検出光子数を表す。よって、波長分散効果の影響の緩和、高い時間分解能、伝播光子損失の抑制を実現することが、検出器に求められる。

## 2.3 主な構成要素

### 2.3.1 チェレンコフ輻射体

検出器モジュールの組立図を図 4 に示す。チェレンコフ輻射体は、2 枚の主輻射体、前方の集光ミラー、後方のプリズムから構成される。それぞれ表 1 に示す寸法仕様の合成石英であり、これらをエポキシ系光学接着剤 [6] で接着して、全長 2700 mm の輻射体を形成する。集光ミラーには、前方端面がアルミ蒸着された球面ミラー（曲率半径  $6500 \pm 100$  mm）を用いている。ミラーで反射されるチェレンコフ光は伝播距離が長いため、輻射体に

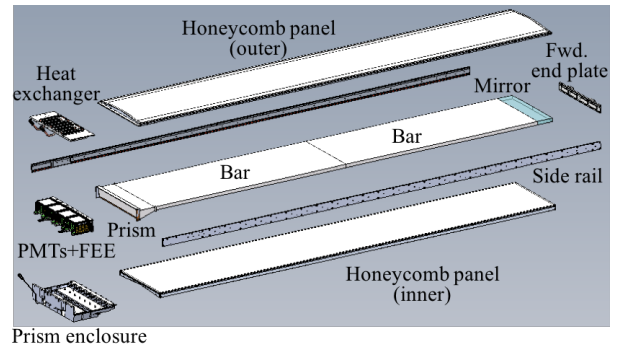


図 4: 検出器モジュールの組立図。詳細は本文に記載。

表 1: 輻射体構成品の寸法仕様

部位	長さ [mm]	幅 [mm]	厚さ [mm]
集光ミラー	$100 \pm 0.15$	$450 \pm 0.15$	$20 \pm 0.1$
主輻射体	$1250 \pm 0.50$	$450 \pm 0.15$	$20 \pm 0.1$
プリズム	$100^{+0.10}_{-0.25}$	$456 \pm 0.15$	$(20-51) \pm 0.1$

よる波長分散効果の影響も大きく、顕著な伝播時間の広がり時間が時間分解能を悪化させる。球面ミラーを用いることにより、反射の際に波長ごとに異なる検出位置に集光し、各検出位置での時間分解能の悪化を緩和する。プリズムは、チェレンコフ光のリングイメージを主輻射体断面から光検出器受光面に拡大し、解像度を向上する。

典型的なチェレンコフ光は 100-200 回の全反射を繰り返すため、輻射体には高い透過率と内部反射率が要求される。表 2 に示す仕様により、主輻射体では平均透過率 ( $99.55 \pm 0.07$ )%/m と、1 回の反射あたりの平均内部反射率 ( $99.984 \pm 0.008$ )% が得られている。また、4 つの輻射体構成品の精密なアライメントと確実な接着も、伝播光子数やチェレンコフ角の情報の損失を抑制するために重要となる。図 5 に示すアライメントテーブルと精巧な接着法を開発することにより、接着後で鉛直方向  $\pm 40$  秒角以内、水平方向  $\pm 20$  秒角以内のアライメントを達成している。

表 2: 主輻射体の硝材と研磨の仕様

項目	仕様
硝材: Corning HPFS 7980	
品質	Class 0, Grade F 以上
放射線耐性	$> 10$ kGy ( $\gamma$ 線)
	$> 10^{12}$ n/cm <sup>2</sup> (中性子)
研磨: Zygo Corporation	
面粗度, 平面度	$\leq 5 \text{ \AA}$ (rms), $\leq 6.3 \text{ }\mu\text{m}$ ( $10\lambda$ )
平行度, 垂直度	$\leq 4$ arcsec., $\leq 20$ arcsec.

<sup>1</sup> 検出位置 (x, y) は光検出器のアノードピクセル番号を用いて一次的に扱う。

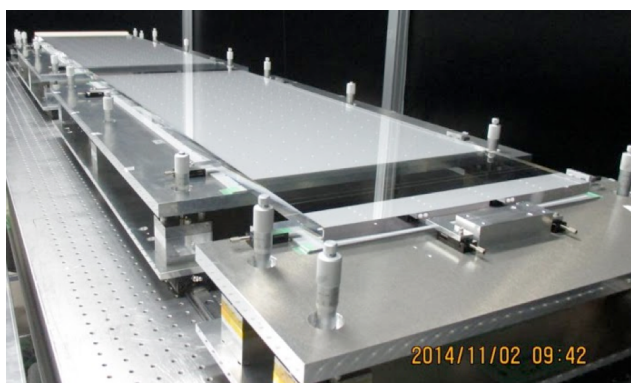


図 5: チェレンコフ輻射体とアライメントテーブル。

### 2.3.2 光検出器

プリズム後端面に装着される光検出器には、浜松ホトニクス社と名古屋大学で共同開発した、角形 MCP-PMT (Micro-Channel Plate Photomultiplier Tube) [7] (図 6 左) を用いている。表 3 に示すように、この MCP-PMT は一光子検出で 40 ps 以下の高時間分解能と、典型値で 28% の高い量子効率 ( $\lambda = 360$  nm) を持ち、検出器の時間分解能と検出光子数に大きく貢献している。チャンネル径 10  $\mu\text{m}$  の MCP を用いた電子増幅により 1.5 T の磁場中で動作可能であり、マルチアノード (4 × 4 ピクセル, 5.3 mm 幅) での電子検出によりチェレンコフ光の検出位置情報を提供する。このような仕様を満たす角形外形の MCP-PMT を世界に先駆けて開発し、検出器への搭載における不感領域を大幅に減少するとともに、大きな有効面積 (外形面積比 69%) も達成している。

この角形 MCP-PMT の開発では、電子増幅過程で MCP から生じたイオンフィードバックや中性ガスによる光電面の劣化が、長年に渡る大きな課題であった。近年、MCP に原子層堆積技術を応用することでこの問題を大幅に改善しており、Belle II 実験で予想される高バックグラウンド環境においても、10 年程度に渡る長期運用が期待される。一方、この改善策は量産途中で導入されており、使用する MCP-PMT の約半数については、運用開始から数年後の状況に応じた交換を予定している。よって、MCP-PMT の実装には容易に着脱できる方式が

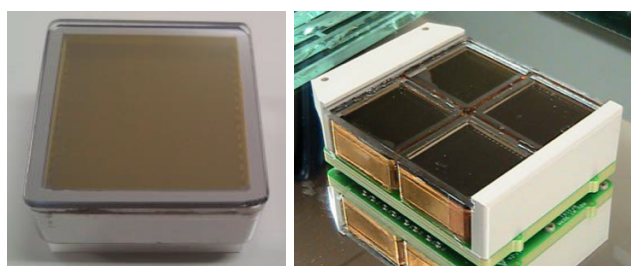


図 6: 浜松ホトニクス MCP-PMT R10754-07-M16 (左) と PMT モジュール (右) の概観。

表 3: 光検出器 (MCP-PMT) の仕様 <sup>a)</sup>

項目	仕様
外形, 寸法	角形, □27.6 mm × 13.1 mm <sup>b)</sup>
入射窓材	合成石英 (厚さ: 1.5 mm)
有感領域	□23 mm (外形面積比: 69%)
光電面種類	マルチアルカリ (NaKSbCs)
量子効率	28% (典型値, $\lambda = 360$ nm)
MCP 厚さ, 段数	400 $\mu\text{m}$ , 2 段 <sup>c)</sup>
MCP チャンネル	$\phi 10$ $\mu\text{m}$ (バイアス角: 13°)
増幅率	$2 \times 10^6$ (典型値, 推奨電圧印加時)
収集効率	60%
時間分解能	< 40 ps (電子走行時間分布)
ピクセル数	16 (= 4 × 4 行列)
ピクセルサイズ	□5.275 mm (0.3 mm 間隔)

a) 浜松ホトニクス MCP-PMT R10754-07-M16。表中の一部は TOP カウンター仕様であり、市販品と異なる。  
b) ピン長さを除く。c) 2 段目入射面にイオンフィードバック対策用アルミ保護膜有り。

必要となる。

MCP-PMT の実装は、PMT モジュール (図 6 右) ごとに行われる。MCP-PMT を高電圧分配回路基板に 2 × 2 配列でピン接続し、それらの入射面の位置と角度を精密に揃え、波長カットフィルターにシリコンゴム [8] で接着している。プリズム後端面には 8 個の PMT モジュールが、光学クッキー [8] (2 mm 厚) を介して実装される。シリコンゴムと光学クッキーの使用により、着脱可能な実装となっている。なお、波長カットフィルター (2.5 mm 厚) は、光の群速度が急激に変化する 340 nm 以下の波長成分をカットし、波長分散効果による時間分解能の悪化を緩和する。

### 2.3.3 信号読み出し回路

光検出器の後段には、ほぼ同じ断面積に信号読み出しモジュールが接続される。信号読み出し回路には、高速波形サンプリング ASIC (ハワイ大学開発) [9] を使った高密度集積回路 (図 7) を用いている。MCP-PMT からの信号波形は 2.8 GSamples/s のレートでサンプリングされ、32,768 サンプル保持可能なスイッチトキャパシタ配列メモリーで保持される。トリガー信号の受信により関心領域にあるデータのみデジタル化され、FPGA 上で抽出された時間情報と波高情報がデータ収集システムに送られる。1 つの ASIC チップあたり 8 つの入力チャンネルを持ち、TOP カウンターの全読み出しチャンネル数 8192 に 1024 の ASIC チップを使っている。

使用する信号読み出し回路には、テストベンチにおい

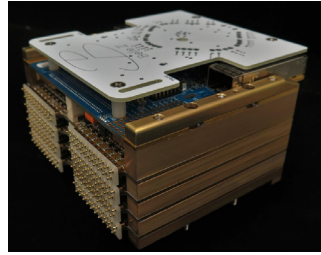


図 7: 高速波形サンプリング ASIC を搭載した信号読み出し基板 (左) とその積層モジュール (右)。

てテスト用 MCP-PMT (時間分解能 35 ps 程度) とレーザー光パルス照射を用いた一光子検出時間の測定を行っている。MCP-PMT と合わせて 48 – 100 ps の時間分解能を達成しており、TOP カウンターに要求される高時間分解能の実現に貢献している。

### 2.3.4 構造体

チェレンコフ輻射体をはじめとした検出器構成要素を安全に保持するため、構造体は高い剛性を要する。一方で、通過粒子との相互作用を抑制するべく、低物質量が望ましい。図 4 に示すように、荷電粒子の通過面には低物質量が軽量のアルミハニカムパネルを用いている。そのハニカムコアには曲面加工を施し、円筒断面の設置スペースを最大限に活用した構造体高さで、検出器モジュールの剛性に寄与している。側板 (Al, 2856 mm × 45.6 mm, 厚さ 6 mm) は検出器モジュール全長に渡る一体品であり、検出器モジュール全体の剛性を担っている。プリズム、光検出器、信号読み出し回路はアルミ材の削り出しで作られた強固な「プリズムエンクロージャ」に収納され、その外層側に搭載される水冷式熱交換器が、信号読み出し回路の排熱を行う。

構造体を組み付けた検出器モジュールを図 8 に示す。検出器モジュールに十分な剛性を確保するため、組み付



図 8: 構造体を組み付けた検出器モジュール。クリーンルーム (クラス 1000) 内の石定盤上で、トラス構造の支持構造体「ストロングバック」をインナーパネルに連結した状態で組み付ける。

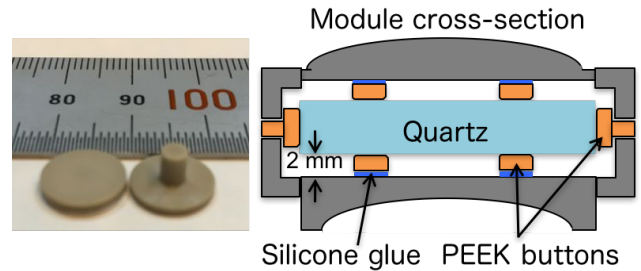


図 9: チェレンコフ輻射体支持用 PEEK ボタン (左) とその構造体内での断面配置図 (右)。

けからインストールまで、トラス構造を持つ支持構造体「ストロングバック」を内層側ハニカムパネル (「インナーパネル」) に連結して取り扱う。バレル部への据え付け後に全モジュールを連結して円筒を形成し、高い剛性を得て自立支持が可能になった検出器モジュールからストロングバックを取り外す。輻射体を外気の湿気などから守るべく、構造体部品の連結部にはシリコン接着剤 [10] を塗布してモジュールを密閉し、構造体内は高純度の  $N_2$  ガスでパージしている。この接着剤には硬化における発生ガスが少ないものを選んでおり、輻射体領域における構造体の様々な接着に使用している。

構造体内でのチェレンコフ輻射体の支持には、PEEK 製の円盤型ボタン ( $\phi 10$  mm, 厚さ 1.4 – 1.9 mm) と、プリズムの後端 5 mm の周囲に接着された PEEK 製のフレームを用いる。PEEK ボタンとその断面配置を図 9 に示す。ハニカムパネルに 14 (= 2 × 7) 個ずつ、側板には 5 個ずつ接着されている。輻射体に不要なストレスをかけないように、輻射体のアライメント測定に基づいて PEEK ボタンの高さを設定している。側板用ボタンは、その柄にリング状のシムをはめて高さを調節する。パネル用ボタンでは、ハニカムパネルの反りを考慮しながら、ボタンと接着剤の厚みで高さを調整する。接着剤の厚みは、専用の接着治具を使ったボタンの真空吸引によって、設定高さに固定したまま接着することで調整しており、接着後のボタン高さと設定高さの差は、0.02 mm 以内の標準偏差に収まっている。プリズムに接着された PEEK フレームは、その周辺の構造体にも接着され、輻射体後端を固定している。この接着は、構造体内の輻射体領域を密閉する仕切りでもあり、後端部の機器・ケーブル類から発生するガスの侵入を防いでいる。

プリズム、PMT モジュール、信号読み出しモジュールの光学的、電気的接触を機械的な接続で確保するには、プリズムエンクロージャ内での精密なアライメントを要して難しい。図 10 に示すように、機械的支持の相互依存性を取り除き、光学クッキーを介した光学的接触とプランジャー機能を持つ「ポゴピン」を使った電気的接触を導入して、弾性を利用した接触でアライメントの不完

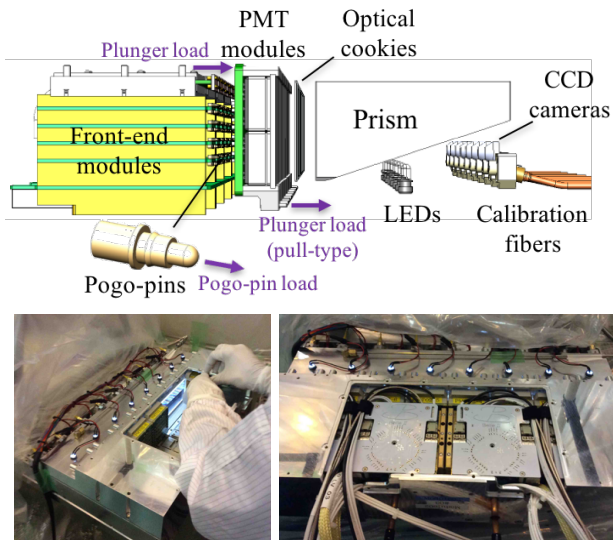


図 10: プリズムエンクロージャ内の検出器要素の構成図（上段）と、その PMT モジュール（下段左）と信号読み出しモジュール（下段右）の実装の様子。

全性を吸収している。これらの接触は、プリズムエンクロージャに装備されている LED と CCD カメラ、レーザー照射のための校正用光ファイバーを用いて、検出器モジュール組付け後に確認されている。

### 3 インストール

#### 3.1 インストール手順の概要

検出器モジュールは、その両端を ECL 容器に既設のフランジ（「ECL フランジ」）にボルトで固定して据付ける。全長約 2.8 m、ストロングバックを含めて約 100 kg になる検出器モジュールを 1 台ずつ据付けるには、名古屋大学で開発・製作した専用の「インストール治具」を用いる。その概要を図 11 に示す。Belle II 検出器バレル部内に長さ 8 m の「ガイドパイプ」を通し、その両端を「XY ステージ」に固定する。XY ステージはガイドパイプの鉛直、水平、回転操作ができる。ガイドパイプには車輪で接触した「スライダ」が 2 つ搭載されており、これらにストロングバックを取り付けて、検出器モジュールをバレル部内に移動する。最終的にガイド

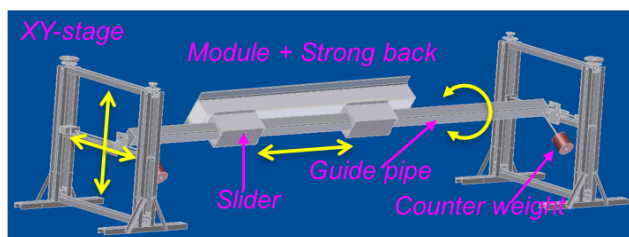


図 11: インストール治具の概念図。詳細は本文に記載。

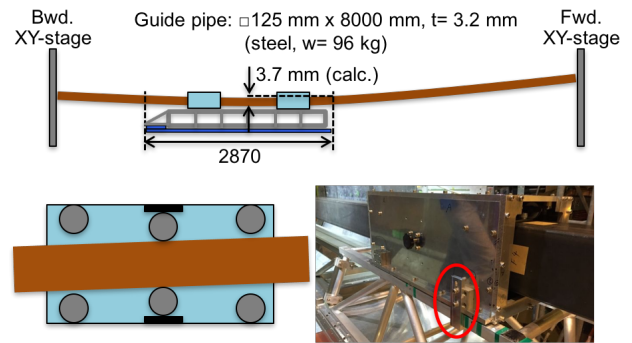


図 12: 検出器モジュール搭載時のガイドパイプのたわみ（上段）と、それを制御するためのスライダでの車輪支持の様子（下段左）とストロングバックとの補助接続ブラケット（下段右、赤丸部）。

パイプを数百  $\mu\text{m}$  単位で操作して、検出器モジュールを所定のスロットに配置する。全モジュールを据え付けた後、隣接モジュールを連結して円筒を形成し、ストロングバックを取り外して完了する。

#### 3.2 手順の策定で注意を要した点

手順の策定において注意を要した点の一つは、ガイドパイプのたわみである。図 12 上段に示すように、検出器モジュール搭載領域でのガイドパイプのたわみは、3.7 mm 程度になる。検出器モジュールがこのたわみと独立に平坦な姿勢を維持できるように、スライダの車輪をガイドパイプに一箇所で接触させ（図 12 下段左）、たわんでいるガイドパイプ上の二点を結んだ直線となるように支持している。

検出器モジュールを ECL フランジに固定した後は、スライダをストロングバックから取り外す。この際、ガイドパイプは荷重の移動により重力方向のたわみを解放しようとするが、スライダとストロングバックを動径方向に接続するボルトがそれを阻止する。接続ボルトの取り外しが困難になる他、その破損や取り外し途中でガイドパイプの急なスプリングバックが生じ、モジュールに不要な力や衝撃が加わる恐れがある。これらを回避すべく、図 12 下段右に示す長穴を擁したブラケットによる補助接続を追加した。補助接続でガイドパイプの姿勢を固定したまま接続ボルトを取り外し、ブラケットのボルトを徐々に緩めて長穴をスライドさせ、ガイドパイプのたわみを徐々に解放する。

もう一つの注意を要した点は、タイトなクリアランスである。図 13 左に示すように、ECL 容器への最近接距離は約 3 mm、隣接する検出器モジュールへの最近接距離は約 2 mm となっている。図中の赤丸部での干渉があるため、据え付けの際にプリズムエンクロージャを動径方向に動かすことはできない。隣接モジュールが据え

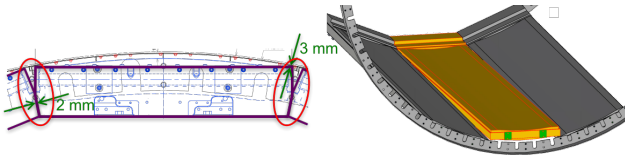


図 13: プリズムエンクロージャ周りのクリアランスの様子(左)とそれを考慮した傾斜据え付けの概念図(右)。左図は、ECL フランジに据え付けられた検出器モジュールを後方側から見ており、ECL 容器内壁、ECL フランジ、プリズムエンクロージャ後端面を重ねている。太線(紫色)はプリズムエンクロージャの外形を示し、矢印(緑色)はECL 容器内壁と隣接モジュールに対する最近接箇所を示す。詳細は本文に記載。

付けられていない状態でも、検出器モジュールの両端から出ている水冷とパージガス用のパイプを据え付けの際にECL フランジの所定の切り欠き部に通す必要がある。よって、図 13 右に示すように、検出器モジュールを傾斜させて前方のECL フランジをかわしながら、所定のスロット内で前方からスライドさせて据え付ける。据え付けの際も、ECL フランジに既設の貫通穴( $\phi 10$  mm)にM6の固定用ボルトを用いるため、貫通穴とボルトの間隔をブッシュで埋めて $\pm 0.25$  mm程度の精度で位置決めをし、クリアランスと適度なアライメントを確保している。

上述の点をはじめ、策定したインストール手順はプロトタイプモジュールを用いて繰り返し検証し、問題なくインストールできることを確認している。その様子を図 14 に示す。両隣スロットにモジュールを据え付け、クリアランスの制限が最も厳しい状況で手順を確認している(上段)。クリアランスがタイトなところでは、ECL 容器や隣接モジュールとの間に隙間ゲージとして0.2 mmのマイラーシートを入れ、シートが抵抗なく動くことを確認しながら据え付けを行っている。検出器モジュールの剛性に対する隣接モジュールの連結とストロングバックの取り外しの影響についても、ECL フランジを擁したモックアップフレームとプロトタイプモジュールを用いて検証している(下段)。それぞれの手順に対するプロトタイプモジュールのたわみの変化は0.1 mm程度であり、期待通りの挙動であった。

### 3.3 検出器モジュールのたわみの制御

チェレンコフ放射体の機械的安全性を考慮し、検出器モジュールの許容たわみは保守的に0.5 mmと設定した。ガイドパイプに搭載された検出器モジュールは、インストール前での取り扱いと同様に、自重たわみを最小化する「ベッセル点」で二点支持される。ECL フランジに据え付け後は両端支持となり、たわみは増大する。そ



図 14: プロトタイプモジュールを用いたインストール手順の確認の様子。上段左は、モジュールを前方からスロットに引き入れている様子を Belle II 検出器バレル部の後方側から見ており、クリアランスが最もタイトになったときの後端部の様子が上段右に示されている。下段は、ECL フランジを擁するモックアップフレームにプロトタイプモジュールを据え付けて、隣接モジュールの連結とストロングバックの取り外しによるモジュールのたわみや姿勢の変化を確認している様子。

れらの支持によるプロトタイプモジュールのたわみを図 15 に示す。ベッセル点支持での最大たわみは0.02 mm程度で、平坦な基準姿勢とみなせる。両端支持においても最大たわみは0.4 mm程度であり、ストロングバックの剛性により、ECL フランジへの据え付け後も検出器モジュールのたわみは許容範囲に抑えられる。

インストール中は、図 16 に示す3種類のゲージを用いて、検出器モジュールのたわみをリアルタイムでモニターしながら作業を進めた。ひずみゲージはアルミ角棒( $10$  mm  $\times$  300 mm)に接着し、そのアルミ角棒を側板の中央付近にボルト止めして用いた。出力電圧の較正は、ハイトゲージを用いた石定盤上でのプロトタイプモジュールのたわみ測定と比較して行っている。アルミパ

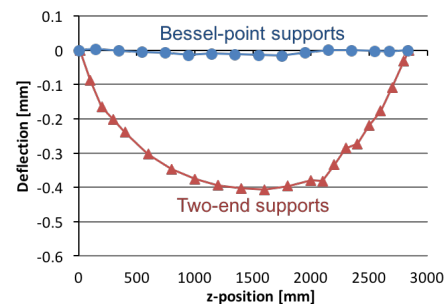


図 15: ベッセル点支持と両端支持におけるプロトタイプモジュールのたわみ。横軸はプロトタイプモジュールの長手方向の位置を、前方端面を基準にして表している。



図 16: インストールで用いた 3 種類のたわみ測定ゲージ。上段は、据え付け前の検出器モジュールに取り付けられたひずみゲージと携帯型パイプゲージを示している。下段は、ECL フランジに据え付けられた検出器モジュールのたわみを測定する携帯型と固定型のパイプゲージを示しており、Belle II 検出器バレル部の方位角 90° 付近を前方側から見ている。詳細は本文に記載。

イブ ( $\phi 35 \text{ mm} \times 2800 \text{ mm}$ , 肉厚 1 mm) に 4 つの小型ダイヤルゲージをクランプ接続した「携帯型パイプゲージ」は、インナーパネルの側板付近でベッセル点支持し、前方端付近 (F)、中央部付近 (M)、プリズムエンクロージャとの接続部付近 (J)、後方端付近 (B) にダイヤルゲージを配置して、インナーパネルの動径方向の位置を測定している。作業前後の測定値の差は相対的な姿勢変動を示し、前方端と後方端を水平基準とした換算により、中央部と接続部における相対たわみを示す。アルミパイプは、インナーパネルにボルト止めた支持ベースに近似的に点接触させ、検出器モジュールとは独立に姿勢を維持できるようにしている。検出器モジュールの ECL フランジへの据え付け後は、同様なパイプゲージをバレル部の方位角 90°, 180°, 270° の位置で、その両端を ECL フランジに固定して使用している。この「固定型パイプゲージ」には 3 つのダイヤルゲージが取り付けられ、それぞれ前方端付近 (F)、中央部付近 (M)、後方部付近 (B) でインナーパネルの動径方向の位置を測定している。全てのゲージは、 $\pm 0.1 \text{ mm}$  程度の精度でたわみを測定できる。

### 3.4 ECL フランジへの据え付け

据え付けスロットの配置と据え付け手順の詳細を図 17 に示す。据え付けはスロット #15 から時計回りに行い、手順の各段階で検出器モジュールのたわみを確認しながら

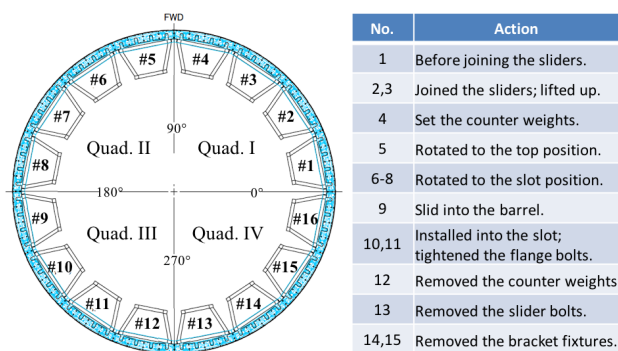


図 17: Belle II 検出器バレル部を前方から見た際の据え付けスロットの配置 (左) と据え付け手順の詳細 (右)。



図 18: 実機 1 機目の据え付けの様子。詳細は本文に記載。

ら作業を進めた。2月10日に行われた実機 1 機目の据え付けの様子を図 18 に示す。検出器モジュールを Belle II 検出器前方の架台にクレーンで移動し (上段左)、スライダーに取り付ける (上段右)。据え付けるスロットの角度に合わせて回転させ (中段左)、スライダーを使ってバレル部に送り込む (中段右)。ガイドパイプを細かく操作しながら所定のスロットに挿入し (下段左)、ECL フランジにボルトで固定した後、スライダーをストロングバックから取り外す (下段右)。人員確保などの都合により、残りの実機の据え付けは 4, 5 月の 3 週間で行っている。同じ手順を繰り返して、1 日あたり 2 機程度のペースで据え付けを行い、全 16 機の据え付けを 5 月 11 日に完了した (図 19)。

据え付け中の検出器モジュールのたわみについて、ひずみゲージで測定した結果を図 20 に示す。全てのモジュールで許容範囲のたわみに制御されており、多くのモジュール

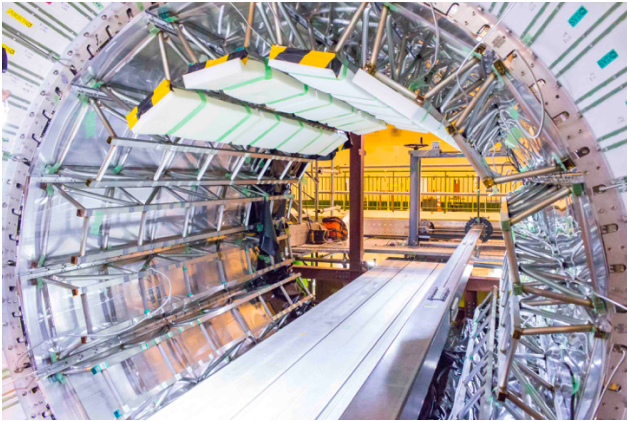


図 19: ECL フランジへの据え付け完了後の TOP カウンターの様子。

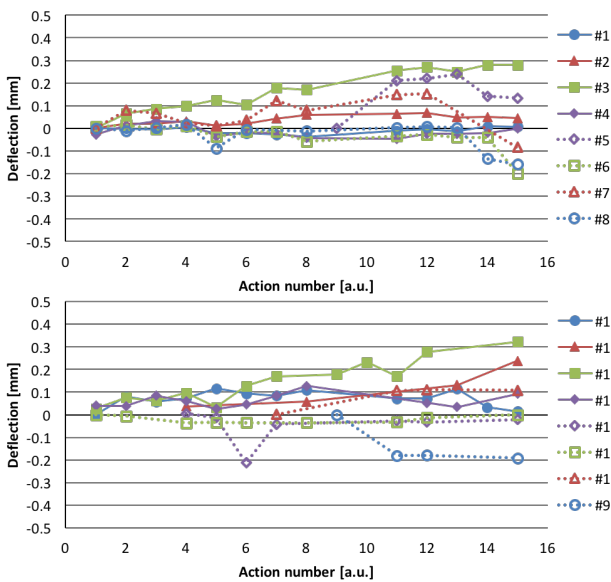


図 20: ひずみゲージで測定した、据え付け中の検出器モジュールのたわみ。上段はスロット #1 - #8 の、下段はスロット #9 - #16 の結果を示す。縦軸の符号は、プラスが外層側への、マイナスが内層側へのたわみを表し、横軸は図 17 右に示した手順番号を表す。

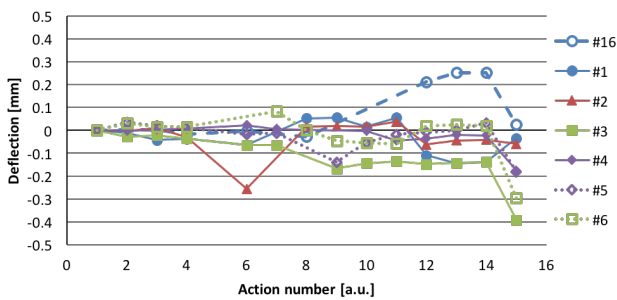


図 21: 携帯型パイプゲージで測定した、据え付け中の検出器モジュールのたわみ。スロット #1 - #6, #16 のみ測定している。縦軸の符号は、プラスが鉛直上向き、マイナスが鉛直下向きのたわみを表し、横軸は図 17 右に示した手順番号を表す。

ルでは  $\pm 0.1$  mm の間でほぼ一定である。手順の進行とともにたわみの単調増加が見られるものについては、ひずみゲージの出力電圧ベースラインが作業現場の環境に影響されたと考えている。

約半数の検出器モジュールについては、携帯型パイプゲージを用いて同じ測定を行っている。その結果を図 21 に示す。この測定においても、測定された全てのモジュールで許容範囲のたわみに制御されていることがわかる。多くのモジュールのたわみは、大部分の手順において  $-0.2$  mm から  $+0.1$  mm の間に収まっているが、最終手順で急激な変化が見られる。これは、ストロングバックがスライダーから取り外されたことにより、ガイドパイプ上でのベッセル点支持から ECL フランジによる両端支持になったためと考えられ、図 15 に示したプロトタイプでのたわみ測定と無矛盾である。携帯型パイプゲージは、このたわみの変化への感度がひずみゲージより高かった。

### 3.5 隣接モジュールの連結

検出器モジュールの剛性を高めてストロングバックを取り外すため、据え付け完了の翌日に隣接モジュールを連結した。隣接モジュールは、それらの側板底面に山形断面の連結板 (Al, 長さ 2650 mm, 厚さ 3 mm) をボルトで固定して連結する。連結板の設置箇所と連結の様子を図 22 に示す。

隣接モジュールの連結は、図 23 上段に示すように、上部から下部に向かって左右交互に行った。その際に固定型パイプゲージを用いて測定した、3 箇所連結部における検出器モジュールの姿勢変動を図 23 下段に示す。連結前の姿勢を基準として、それぞれの測定箇所での連結では  $0.1 - 0.2$  mm の姿勢変動が、その近隣箇所の連結では  $0.05$  mm 程度の姿勢変動が見られる。これらは、

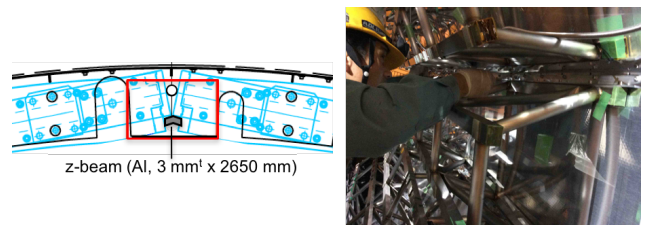


図 22: 検出器モジュール連結板の設置箇所 (左) とモジュール連結の様子 (右)。左図は、ECL フランジに据え付けられた二つの検出器モジュールの境界付近を前方側から見ており、ECL 容器の内壁、ECL フランジ、検出器モジュールの前端面 (水色) を重ねている。連結板は矩形 (赤色) の枠内に山形断面 (灰色) で示されており、隣接モジュールの側板底面にボルトで固定して連結する。



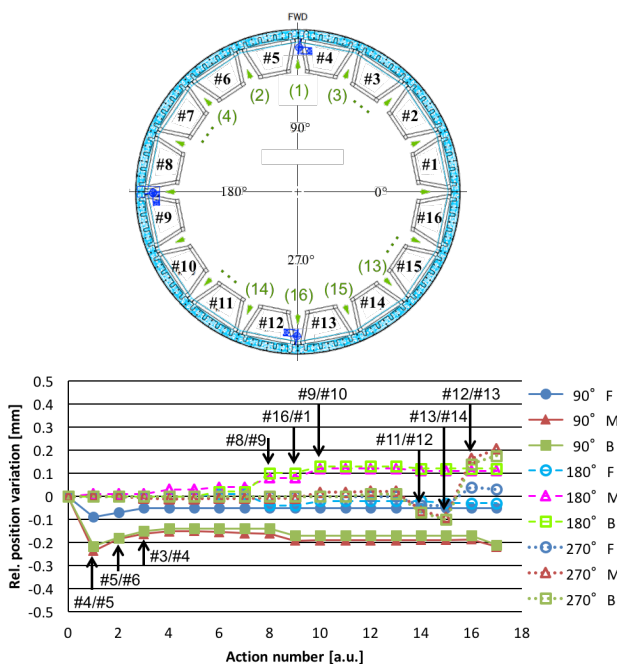


図 23: 検出器モジュールの連結順序（上段）と固定型パイプゲージで測定したスロット#4 (90°), #9 (180°), #12 (270°)におけるモジュールの姿勢変動（下段）。上段は、バレル部を前方から見た際の連結順序（括弧内の数字）と固定型パイプゲージ（濃青色）の位置を示している。下段は連結前の姿勢を基準としたF, M, Bの相対変動を連結順序に対して示しており、横軸の0と17はそれぞれ「連結前」と「全モジュール連結後14時間経過時」を表す。縦軸の符号は、プラスが外層側への、マイナスが内層側への姿勢変動を表す。

連結によって隣接モジュールの姿勢がお互いの中間位置に平均化されたと考える。この姿勢変動は連結した箇所とその近隣に限定的であり、離れた箇所での連結の影響は見られない。また、一つの連結部でも前方端とそれ以外の場所は独立に姿勢変動している。中央部と後方は距離が近く、同じ姿勢変動を示している。他の検出器モジュールにおいても同様に、連結によって0.1–0.2 mmの姿勢の平均化がなされたと考えられる。

### 3.6 ストロングバックの取り外し

連結による円筒形成で自立支持が可能となった検出器モジュールから、ストロングバックを取り外した。連結翌日から開始したストロングバックの取り外しの様子を図24に示す。ストロングバックを再びスライダに取り付け、ストロングバックとインナーパネルの接続ボルトを外し（図24左）、ガイドパイプとスライダを使ってバレル部の外に引き出す（図24右）。同じ手順を繰り返して、1日あたり4機程度のペースで取り外しを行い、全16機のストロングバックの取り外しを5月20日



図 24: ストロングバックの取り外しの様子。詳細は本文に記載。

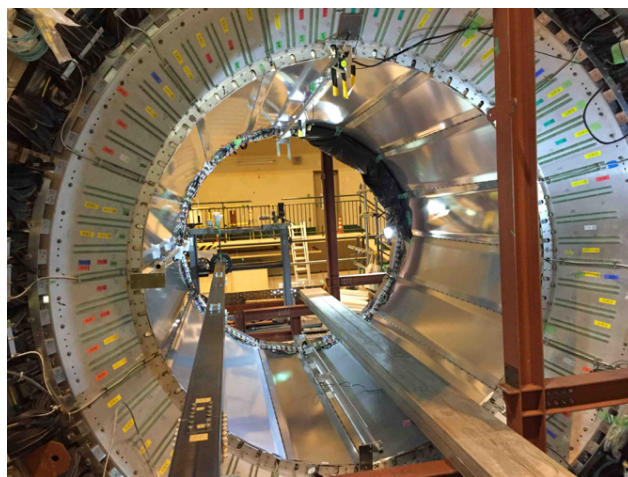


図 25: ストロングバックの取り外しを終え、インストーラが完了したTOPカウンターの様子。

に完了した（図25）。

ストロングバックの取り外しは、図26上段に示した順序で上部から下部に向かって行った。その際に固定型パイプゲージを用いて測定した、90°における検出器モジュールの姿勢変動を図26下段に示す。スロット#5のストロングバックの取り外しでは、まだ両隣のストロングバックの剛性が寄与しており、測定箇所での姿勢変動は見られない。さらにストロングバックを取り外していくと、中央部と後方に0.05 mm程度の変動が見られる。前方端に変動が見られないのは、ECLフランジへの固定箇所に近いと考えるが、スロット#4のストロングバックを取り外すと、変動が見え始める。近隣のストロングバックの取り外しによる姿勢の変動は±0.1 mm程度であり、下部のスロットからの取り外しによる影響はほぼ見られない。

ストロングバックの取り外しの際の各検出器モジュールの姿勢変動については、携帯型パイプゲージを用いて測定している。図27にその結果を示す。全モジュールにおいて、各ダイヤルゲージが示す相対位置変動は−0.10 mmから+0.15 mmの間に収まっている。上部のスロットの方が下部のものよりも変動が大きく、スロット位置に相関した構造も見える。携帯型パイプゲージは、ダイヤルゲージの測定子の向きが重力方向と逆になる上部スロットの測定において、下部スロットでの測定より

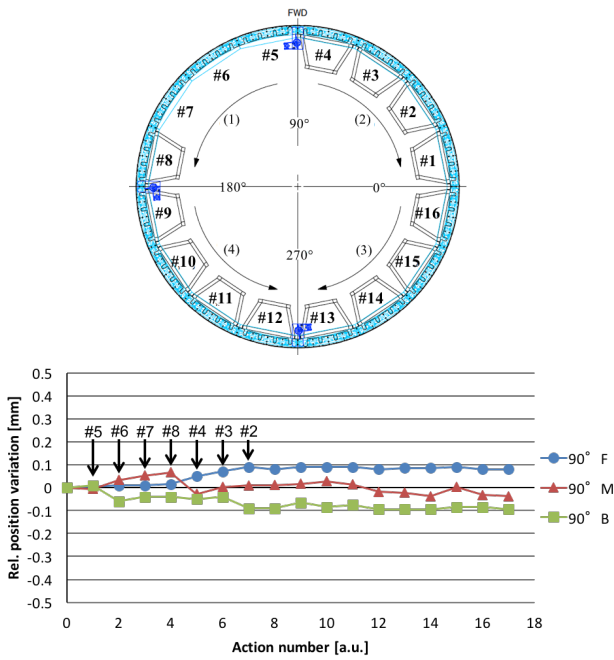


図 26: ストロンバックの取り外し順序 (上段) と固定型パイプゲージで測定したスロット #4, #5 (90°) におけるモジュールの姿勢変動 (下段)。上段, 下段ともに図 23 と同様に示している。ただし, 固定型パイプゲージは, はじめはスロット #4 のモジュールを測定し, #5 のストロンバックを取り外し後から #5 のモジュールを測定している。下段の横軸における 0 と 17 はそれぞれ「取り外し前」と「全モジュール取り外し後 1 時間経過時」を表す。

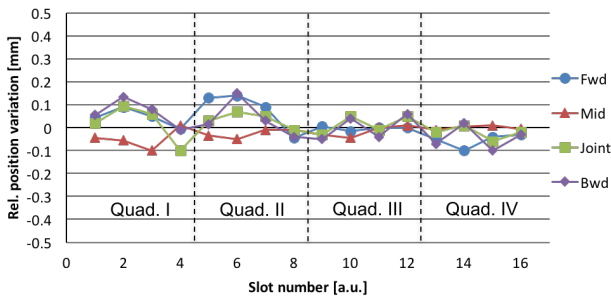


図 27: 携帯型パイプゲージで測定した, ストロンバックの取り外しの際の各スロットにおけるモジュールの姿勢変動。取り外し前の姿勢を基準とした F, M, J, B の相対変動を, スロット番号に対して示している。縦軸の符号は, プラスが鉛直上向き, マイナスが鉛直下向きのたわみを表す。

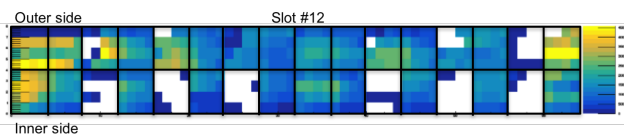


図 28: 磁場中で MCP-PMT が回転した際の, プリズムへのレーザー光パルス照射におけるヒットマップの例。詳細は本文に記載。

0.1 mm 程度大きい変動を示すことがわかっており, 上部スロットでの変動と構造は系統誤差によるものと考えている。

図 26 下段と図 27 の結果から, ストロンバックの取り外しによる検出器モジュールの姿勢変動は,  $\pm 0.1$  mm 程度であったと考えている。

### 3.7 検出器モジュールのたわみ測定のみ

これまでに示した検出器モジュールのたわみと姿勢変動から, 各インストール手順におけるたわみは十分に制御されており, それらの累積でも保守的な許容たわみと同程度と考えている。プロトタイプモジュールを用いた検証結果とも無矛盾であり, 検出器モジュールのインストールを計画通りに, 事故や損傷もなく完了することができた。

## 4 インストール後の状況

### 4.1 磁場中での光検出器の回転

インストール完了後は, 検出器モジュールに損傷がないことを確認するべく, テストパルス, レーザー光, 宇宙線を用いた動作検証を行い, 無磁場では重大な問題は見られていない。6 月からは Belle II 検出器内の磁場分布測定が行われたため, 1.5 T の磁場中における動作検証も行った。プリズムへのレーザー光パルス照射における光検出器のヒットマップを確認したところ, 図 28 に示すようなアノードピクセルの「欠け」が見られた。図は検出器モジュールを後方から見た際の MCP-PMT の配置を示しており, 上段が外層側, 下段が内層側になっている。黒枠で囲まれた領域が 1 つの MCP-PMT に相当し, 黒枠内のセルは  $4 \times 4$  のアノードピクセルに相当する。調査の結果, PMT モジュールが磁場方向にわずかに回転し, ポゴピンや光学クッキーとの接触が失われていたことがわかった。プリズムエンクロージャに装備の CCD カメラで撮影した光学クッキーの剥がれを, 図 29 に示す。剥がれの部位には空気が混入し, 白みがかっている。

MCP-PMT の側管やベースプレートなどには, ガラスと近い熱膨張率を持つコバルト (29Ni-16Co-Fe) が使われている。コバルトは外部磁場下で磁化するが, 使用する MCP-PMT に行ってきた磁場中での性能試験では, 適正な保持を乱すほどの動きは見られなかった。電磁石を用いたベンチテストで PMT モジュールの挙動を観察したところ, MCP-PMT のベースプレート面が磁場に対して傾いている場合に顕著な回転が見られた。Belle II 検出器内では, TOP カウンターの姿勢や磁場分布のひ

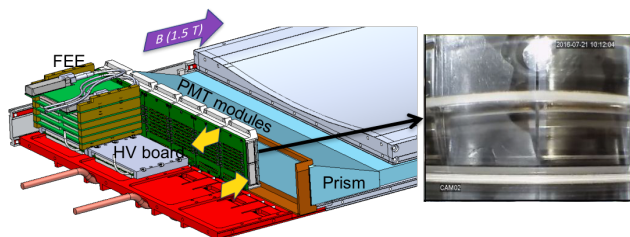


図 29: 磁場中で MCP-PMT が回転した際の、PMT モジュールの光学的接触の様子。写真左側の白みがかった領域には、光学クッキーと PMT モジュールの間に空気が混入している。写真上部中央の白色領域は、照明用 LED が映ったものである。プリズムエンクロージャに装備の CCD カメラでプリズム斜面を撮影しており、実像は 180° 回転され、反射像も映り込んでいる。

ずみにより MCP-PMT に対して磁場が傾き、トルクを生じたと考えている。

PMT モジュールは、プランジャーとポゴピンにより、6 kgf 程度のバネ荷重で光学クッキーに密着されているが、MCP-PMT に生じたトルクはこれらを伸縮・変形させるほど大きかった。図 30 に示すように、プランジャー荷重部にある PMT モジュールとプリズムエンクロージャの隙間 (1.4 mm 程度) にポリアセタール製のシムを挿入し、構造体の利用とそれによるプランジャー荷重の増加で PMT モジュールの回転を阻止した。この対策により、磁場中における PMT モジュールの回転は見られなくなった。

一方、この対策後に PMT モジュール内で回転して波長カットフィルターから剥がれた疑いのある MCP-PMT が 5% 程度見つかっている。TOP カウンターの性能への影響は大きくないが、長期運用を見据えた対策案の検証を進めており、2018 年春頃の実装を予定している。

## 4.2 コミッショニングに向けた準備

検出器モジュールの動作検証と並行して、コミッショニングに向けたハードウェアの較正とソフトウェアの整

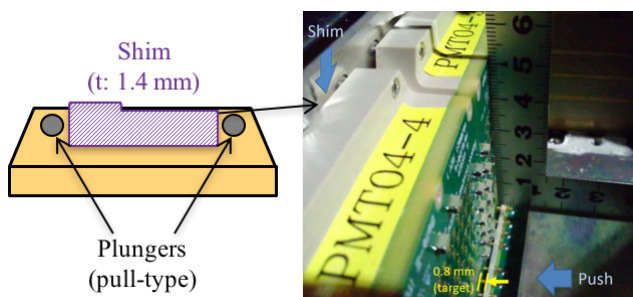


図 30: 磁場中での PMT モジュールの回転を阻止するためのシムの概念図とその挿入箇所の様子。

備を進めている。とりわけ、信号読み出し回路のファームウェアの整備が喫緊の課題となっている。ASIC の入力チャンネルあたり 2.8 GSamples/s で記録される波形データから関心領域にあるデータのみを取り出し、波形データの特徴 (時間情報と波高情報) を抽出する機能の実装である。これらの機能により、Belle II 実験で要求される 30 kHz のデータ収集速度と 5  $\mu$ s のトリガー待機時間が実現され、Belle II 検出器全体でのデータ収集に参加できるとともに、ハードウェアの較正や検出器モジュールのアライメント、それらに関するソフトウェアの整備が進められる。Belle II 検出器にインストールされた検出器群による宇宙線を用いた統合的データ収集が 2017 年 1 月から予定されており、ファームウェアの整備もこれに向けて進められている。

## 5 まとめ

Belle II 実験 TOP カウンターのインストールを 2016 年 5 月に完了した。インストールにおける検出器モジュールのたわみは許容範囲内に制御できており、インストール後の無磁場での動作検証でも大きな問題は見られていない。磁場中で 5% 程度の光検出器に不十分な光学的接触の疑いがあるが、長期運用を見据えた対策案の検証を進めており、物理データ収集前の実装を予定している。

TOP カウンターは新しいタイプの RICH 検出器として、コンパクトな検出器サイズを実現し、高い粒子識別能力や高バックグラウンド耐性も期待される。一方で、高性能な検出器要素の開発とそれらの検出器への実装は容易ではなく、新しい検出器の開発に様々な課題の克服を要している。運用に向けた課題も同様に克服するべく、動作検証とコミッショニングに向けた準備を進めている。

## 6 謝辞

TOP カウンターのインストール全般において、KEK 素粒子原子核研究所の高力孝氏には多大なるご協力を頂いた。高力氏の綿密な設計、計画、準備、指揮により、非常に円滑に、重大な事故や損傷もなくインストールを完了できており、コラボレーション内からも高い評価を得ている。インストール治具の設計、製作、運用については、立花健二氏をはじめとする名古屋大学全学技術センターの皆様にご尽力頂いた。インストール治具は作業全般において要の道具であり、その優れた設計、操作性、安全性なくしては円滑かつ安全なインストールは成し得なかった。上記の方々に、この場をお借りして心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] M. Akatsu *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **440**, 124 (2000).
- [2] Z. Doležal and S. Uno ed., KEK Report **2010-1**, 1 (2010); arXiv:1011.0352.
- [3] T. Ohshima, Nucl. Instr. Meth. A **453**, 331 (2000); M. Hirose *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **460**, 326 (2001); S. Matsui *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **463**, 220 (2001); Y. Enari *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **494**, 430 (2002); T. Hokuue *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **494**, 436 (2002); Y. Enari *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **547**, 490 (2005); K. nami *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **560**, 303 (2006).
- [4] I. Adam *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **538**, 281 (2005).
- [5] A.A. Alves Jr. *et al.*, J. Instrum. **3**, S08005 (2008); M. Adinolfi *et al.*, Eur. Phys. J. C **73**, 2431 (2013).
- [6] Epoxy Technology, Inc., EPO-TEK 301-2.
- [7] M. Akatsu *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **528**, 763 (2004); K. Matsuoka, Nucl. Instr. Meth. A **766**, 148 (2014).
- [8] Momentive Performance Materials Inc., TSE3032.
- [9] M. Andrew, PoS TIPP2014, 171 (2014); G. Varner, “Waveform-sampling electronics for Cherenkov detectors”, presented in the 9th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, (2016) .
- [10] Master Bond Inc., MasterSil 153.