

# J-PARC KOTO 実験のために新たに組み込んだ 円筒形光子検出器：インナーバレル

大阪大学 大学院理学研究科

村山 理恵

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

大阪大学 大学院理学研究科

外川 学

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

大阪大学 大学院理学研究科

山中 卓

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

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

G. Y. Lim

gylim@post.kek.jp

2016 年 (平成 28 年) 11 月 22 日

## 1 はじめに

J-PARC E14 KOTO 実験は、中性  $K$  中間子の希崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を用いて標準理論を超える新物理を探ることを目的としている。この崩壊の特徴は、CP 対称性を破る崩壊であること、標準理論による崩壊分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  と非常に小さく [1]、理論的な誤差が 2% 程度と非常に小さいため、CP 対称性を破る新物理が見やすいことである。現在実験で得られている崩壊分岐比の上限値は  $2.6 \times 10^{-8}$  (90% C.L.) であり、KEK E391a 実験により与えられている [2]。KOTO 実験は測定感度を 3 桁上げ、標準理論が予測する分岐比ならば数イベント観測する感度を目指す。そのため、高輝度  $K_L$  ビームを作り出すことの可能な J-PARC ハドロンホールへ実験の場を移し、E391a 実験の検出器をベースとして、様々なアップグレードを行ってきた。詳細は過去の高エネルギーニュース記事 [3] や、同誌掲載の「J-PARC KOTO 実験：最初の物理ラン結果と現状」を参照されたい。

本稿では、特に大規模なアップグレード計画の一つであり、2016 年 4 月に完成した、インナーバレル検出器についてその目的から開発、建設、設置までを紹介する。

## 2 インナーバレル検出器

### 2.1 目的

KOTO 実験の検出器を図 1 に示す。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊事象は、崩壊粒子の内ニュートリノの観測ができないため、 $\pi^0$  からの崩壊粒子である  $2\gamma$  のみの観測となり、こ

れを保証することが実験の一つの胆となる。そのため実験装置は主に 2 つのパートからなる。一つは前方にある CsI カロリメータ (図 1 中、CsI と表記) で、2 つの光子を測定する。もう一つは崩壊領域を囲んだ検出器群 (まとめて Veto 検出器と呼称) であり、他に粒子の痕跡が無いことを要求する。

主な背景事象の一つが  $K_L \rightarrow 2\pi^0$  崩壊事象である。終状態は 4 つの光子になるが、その内 2 つが CsI 検出器、他の 2 つが Veto 検出器に当たり、Veto 検出器の不感率により 2 つとも観測されない場合、2 光子事象と同定され背景事象となる。特にビーム軸方向に対して横方向をカバーするメインバレル検出器 (図 1 中、MB と表記 [4]) は、厚みが  $13.5 X_0$  と十分でなく、光子の貫通をいくらか許してしまう。そうした検出器が広範囲を覆うため、標準理論分岐比の感度では背景事象の主な要因となる。

本稿で紹介するインナーバレル検出器 (図 1 中、IB と表記) はメインバレルの内側にさらに検出器を加え、放射長を増やして光子の検出効率を上げることにより  $K_L \rightarrow 2\pi^0$  由来の背景事象を抑えることを目的とする。

また、非常に希な  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊事象を捉えるためには大量の中性  $K$  中間子を必要とする。高いビーム強度ではカウントレートが高く、検出器の回復時間が遅いと崩壊時間の近い中性  $K$  中間子からの事象が同一の事象に見えてしまう。例えば、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊が起きた直後に他の中性  $K$  中間子が崩壊し、崩壊粒子が Veto 検出器を鳴らすと  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  事象をロスしてしまう (アクシデンタルロスと呼ぶ)。このような事象を抑えるためにも速い回復時間の検出器を製作し、各崩壊を分離する必要がある。

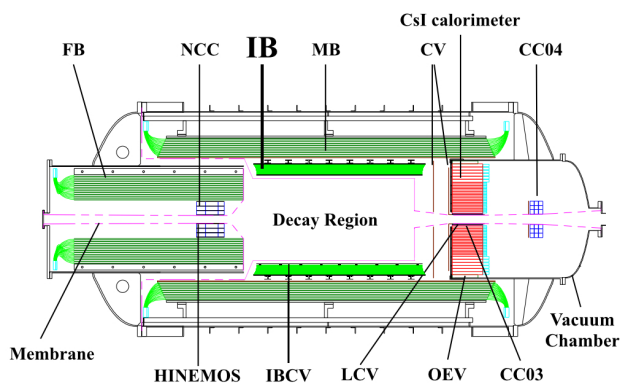


図 1: KOTO 実験検出器の断面図。向かって左から中性ビームを入射し, Decay region で崩壊する事象を観測する。さらに下流にある他の検出器は割愛している。

## 2.2 検出器構成の決定

KOTO 実験で測定される検出器のエネルギー領域は 1 MeV ~ 1 GeV であり, 検出器の不感率は主に, 貫通事象 (パンチスルー) と光核反事象で決まる。パンチスルーは短い放射長の検出器の場合, 測定器内で光子が反応せずに起こる事象である。光核反事象では, 中性子や陽子等が飛び出すうち陽子等の荷電粒子が微小のエネルギーしか落とさないと不感となる。

はじめにどの程度の放射長を加えれば, 背景事象が減少するかをシミュレーションにより見積もった。図 2 は  $K_L \rightarrow 2\pi^0$  背景事象の数と, 加えた放射長の関係を示す。3  $X_0$  程度まで急激に下がるのはパンチスルーの影響を主に削減している効果であり, その後ゆっくりと下がるのは光核反事象を削減していく効果である。この見積もりはフルアクティブな検出器を仮定しており, 光核反事象の荷電粒子が微小のエネルギーしか持たない場合にも検出しやすい。

さらにメインバレルと同じ構成である, 鉛とシンチレータのサンドイッチカロリメータで, 鉛 1 mm 厚, シンチレータ 5 mm 厚の構成にした場合, 5  $X_0$  相当分を加えばフルアクティブ 3  $X_0$  と同様なレベルになることがわかった。サンドイッチカロリメータの際には検出器不感の要因として, 上記 2 点以外に, 反応後の荷電粒子が鉛の層で止まってしまい, 入射したガンマ線が検出されない効果が追加されるが, それも含めての見積もりとなっている。

製作にかかるコストと検出器の取り扱いの観点から, 5  $X_0$  相当分のサンドイッチカロリメータを選び, 長いシンチレータを読み出すために波長変換 (WLS) ファイバーを用い, PMT による両端読み出しの構成とするこ

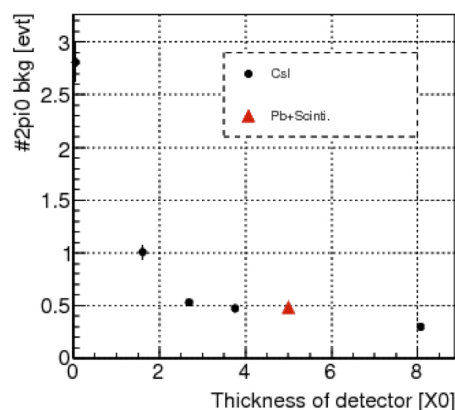


図 2:  $K_L \rightarrow 2\pi^0$  背景事象数を新たに加える検出器の放射長毎に示す。丸点はフルアクティブな検出器として CsI 結晶の場合の見積もりを示し, 三角点は鉛とシンチレータのサンドイッチカロリメータの場合の見積もりを示す。

とに決定した。PMT で測定する光量の目標値は, 検出効率の観点から, 各 PMT から一番距離のあるヒットに対して 5 *p.e.*/MeV 以上に決定した。

## 2.3 Monte-Carlo による性能評価

背景事象である  $K_L \rightarrow 2\pi^0$  事象をどの程度削減できるかは, 検出器を支える構造体 (3 章以降で詳しく述べる) や, 検出器のエネルギー分解能, 時間分解能を決定する光量, 読み出し回路等にも依存する。それらを評価し, 取り込んだ Monte-Carlo シミュレーションによると, 標準理論分岐比での  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を 3.4 イベント観測する統計量に対して,  $K_L \rightarrow 2\pi^0$  背景事象を  $2.1 \pm 0.2 \rightarrow 0.7 \pm 0.1$  に削減することが期待される<sup>1</sup>。

## 3 構成

インナーバレル検出器は, 円筒形のメインバレル検出器の中に挿入する。そのために図 3 のように台形のモジュールを 32 個製作し, 円筒形に組み上げる。全体の大きさは長さ約 3 m, 外径 1.9 m, 内径 1.5 m とした。この章では, モジュールの構成, 全体を円筒形に支える構造体について述べる。

### 3.1 モジュール

モジュールは, 5 mm 厚のシンチレータ 25 枚と 1 mm 厚の鉛板 24 枚のサンドイッチ構造で構成し, それを挟

<sup>1</sup>新検出器なしの背景事象数は, 図 2 の設計案時の見積もりで 2.8 であったが, Geant のパッケージの変更や, 実測された  $K_L$  ビームの運動量分布,  $x-y$  分布等, より現実に近い値を取り込んだ結果 2.1 となった。

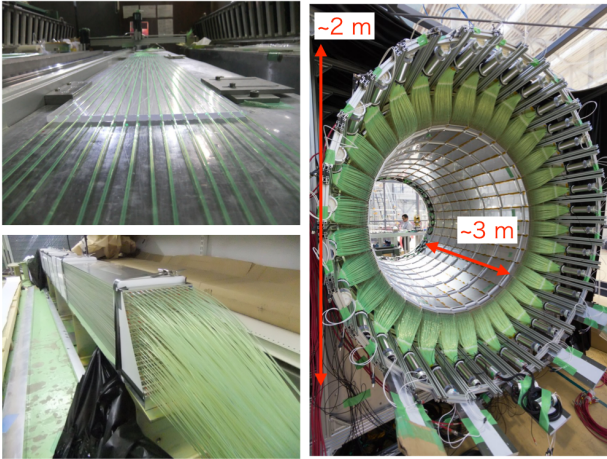


図 3: (左上) シンチレータにファイバーを貼った様子。(左下) 1 個のモジュール。(右) 32 個のモジュールを配置し円筒形として構成。

む様に内側に 3 mm 厚のステンレス板 (Front plate) と外側に 10 mm 厚のアルミ板 (Back plate) を配置する。Back plate には多数のボルト穴が加工してあり、これを用いて後述のサポート構造に取り付ける。

シンチレータ (MS レジン: メチルメタアクリルとスチレンの重合体) は押し出し成形で製作し、10 mm 間隔で溝を掘る。その溝に WLS ファイバーを埋め込み、光をその両端から PMT で読み出す。10 mm 間隔という数字は、光量、実際に使うファイバーの量を加味し決定した。WLS ファイバーは Saint-Gobain 社製 BCF92 ( $\phi 1.5$  mm, 時定数 2.7 ns) を使用しており、メインバレルで使用しているファイバーの Y11 ( $\phi 1$  mm, 時定数 8 ns) に比べて速い回復時間を持つ。ファイバーの貼付けには Norland 社製の紫外硬化樹脂 (NOA61)、もしくは、Saint-Gobain 社製のオプティカルメント (BC-600) を使用した。PMT は Hamamatsu 社製 R329-EGP (上流 32 本)、もしくは R7724-100 (下流 32 本) を使用している。検出器は 0.1 Pa レベルの真空で動作させるため、全ての PMT について真空中での動作試験を行い、放電が起きない個体を使用している。

また、この構成では最内層が Front plate となり、不感物質となる。組み立て後、更に 5 mm 厚のシンチレータ+WLS ファイバーを取付け、最内層を有感な検出器で覆っている (Charged veto と呼称。図 1 中、IBCV と表記)。

### 3.2 モジュールを円筒形に支える構造

モジュールを円筒状に組み上げるための課題は、いかにして総重量約 6 トンの測定器を最小限の物質で支え、全体のゆがみを数 mm 以下に抑えるかであった。そ

のためにシカゴ大のエンジニアの Ms. Elizabeth Pod と毎週議論を重ねて検討した結果、アルミ合金のリングを 8 個作って並べ、その内側にモジュールをボルトで固定する方法に至った。最終案の説明をする前に、参考のために、なぜこの方法に至ったかを説明する。

最初に考えたのは、ローマンアーチのように内側に向かってモジュールを押しえつける方法である。しかし、これはモジュールどうしを押し付けて局所的に大きな力をシンチレータの角などにかけるため、却下した。

そもそも、重たい円筒を支えるときに一番問題となるのは、図 4 に示すような、円筒を曲げようとする力のモーメントである。約 6 t の円筒を下 1 点で支えると、その点に 14 kNm の力のモーメントがかかる。

そこで、大きな力のモーメントに対抗するために、モジュールの内側の Front plate どうし、外側の Back plate どうしを連結し、レバーアームをかせぐことを考えた。この場合、モジュールの内側と外側の板の間にはそれらをずらせようとする剪断力が働く。後述するようにシンチレータと鉛の板はステンレスバンドで強く縛りつけているが、実験したところ層の間の摩擦力が足りず、かかる剪断力の 1/10 をかけただけでシンチレータの層がずれてしまった。そのため、この案も却下した。

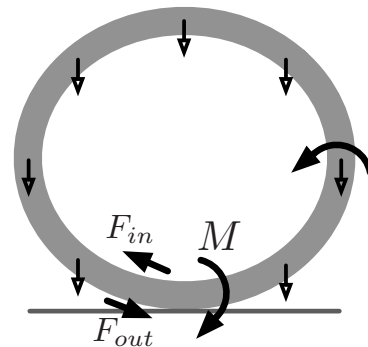


図 4: 自重でたわむリングにかかる力のモーメント  $M$  と、それによってリングの内側と外側にかかる力  $F$ 。

次に考えたのは、Back plate を図 5 のようにコの字型にしてレバーアームを確保し、Back plate どうしを連結することであった。しかし、連結する部分がビーム軸に平行に走って、ガンマ線に対して不感物質となる上に、コの字型が開かないようにする補強材も必要である。さらに、1 個ずつモジュールを連結する方法では、32 個のモジュールを正確に円筒形に組み上げるのが難しい。これらの理由により、この案も却下した。

上の案で、実際に円筒の形を保つ剛性を与えているのは、補強材である。補強材だけをつなぎ合わせるとリング状になるため、リングの内側にモジュールを取り付ける案に至った。この方法の利点はいくつかある。まず、リングの断面を図 6 に示すように I 字型にすることによって、最小の物質で最大の剛性を得ることができる。

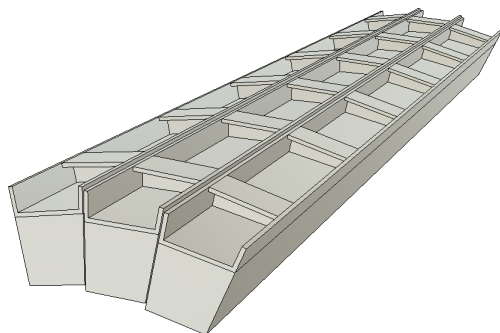


図 5: コの字型の Back plate を用いる案。不感物質の多さと組み上げ精度の問題から、却下。

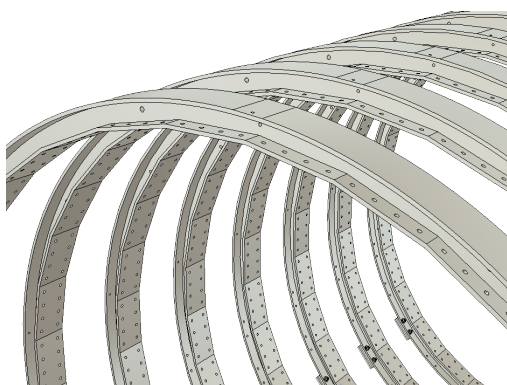


図 6: 採用した、断面が I 字型のリングの案。

また、リングを精密加工すれば、正しい位置に確実にモジュールを取り付けることができ、連結時の取り付け誤差が蓄積しない。

リングの材質としては、航空機などに使われるアルミ合金 AL-7075-T7352 を選んだ。一つのアルミ合金の塊に穴を開けて鍛造で粘土のように延ばしながら大きな輪の形にしたものを、大型の加工機械で、外側は外径 1980 mm の円、内側は向かい合う辺の距離が 1860 mm の 32 角形で断面が I 字型になるように切削し、取り付けのためのボルト穴を内側に掘った<sup>2</sup>。リング 1 個あたりの重量はわずか 40 kg であるにもかかわらず、6 トンの測定器を 8 個のリングの下端だけで支えたとしても、リングの直径の変化は 6 mm 以下に抑えられる。実際には斜め下からも支えるので、変形は 1 mm 以下と見積もった。

なお、上記の設計には、自重で変形する薄い円筒のモーメントや変位量を表す、解析的な式 [5] を用いた。山中が有限要素法のソフトを使えなかったことや、人に頼んだ有限要素法の計算が約 1 日かかったこともあるが、解析的な式だと、力のモーメントなどのパラメータ依存性が見えるので、物理的に本質が理解できて解決策を考えやすい。また力のモーメントなどをパラメータの関数としてプロットできるため、パラメータのスキャンや決定

<sup>2</sup>滑川軽鋼(株)を通じ、(株)UACJ 鋳鍛で鍛造、(株)エスケイメカニクスで加工。

が容易だった。地震で 1G の加速度がかかる場合に備え、水平方向に静的な力をかけた場合の応力も手計算した。また様々な変形に対する固有振動数も、変位量とその時に蓄えられるエネルギーから計算し、固有振動数が地震で危険な数 Hz より高くなるように、Back plate どうしを連結する設計とした。合意した案に従って、最終的な設計図面は Ms. Pod が引いた。

## 4 製作

### 4.1 モジュール製作

3 章で述べた様に検出器の構成を決め、製作にとりかかった。製作中、シンチレータに亀裂が発生するなどトラブル見られ、その対処に非常な苦勞を要した。

#### 4.1.1 ファイバーの貼り付け

2013 年にシンチレータの製作、ファイバーの購入を終え、秋にさしかかった頃にファイバーの貼り付けをはじめた。製作はメインバレル製作で使用した紫外光照射台のある KEK PS 第二収納庫で行った。手順は、約 5 m に切り出したファイバーを水平に張り、さらに重りを片端に吊るすことでピンと張った状態にしておく。約 3 m のシンチレータの溝に紫外硬化樹脂を x-y 稼働ステージに固定されたシリンジを用いて塗布する。その後ファイバーを溝に下ろし入れ、紫外光照射台にて 50 分間照射する (図 7)。

また、ファイバーの光量はバッチ依存性があり、最低光量の確保と光量の均一化の観点から、5 m に切り出したファイバー全て (16,000 本!) の光量をスペクトロメータで測定した。

全数 800 枚のシンチレータに貼り付けを行うため、主に大阪大学のスタッフ、学生 1~2 名と、企業の方 3~4 名でシフトをとり、約 4ヶ月かけて行った。ファイバーの切り出し、光量の測定には京都大学、山形大学、ミシガン大学のスタッフ、学生も動員し平行して行った。

#### 4.1.2 クラックの発生

ファイバーの張り付けが終わりに近づいた時に衝撃的な現象を発見した。貼りつけ後 1~2ヶ月程度経過したシンチレータに図 8 のような亀裂が入っていたのである。原因は、直接シンチレータに接触する紫外硬化樹脂が考えられ、何度かの試行実験の結果、未硬化の樹脂 (液体状態) がシンチレータを侵し亀裂をいれることがわかった。また、ファイバー貼り付け後のシンチレータを調べてみると、いくつかの領域でファイバー下部の樹脂が未

硬化のままであることも観測された。ファイバーと溝の幅にほとんど余裕が無く、紫外光が入り込めなくなったことが原因と考えている。実際、テスト用小型モジュールの製作時には問題が見られなかったが、大量生産用に溝加工機材を変更したので問題となったと考えている。

未硬化の樹脂を抜くために、シンチレータをひっくり返したり、再度最大3時間程度紫外光を照射してみたが、状況は完全には改善されず、大きく亀裂の入ったシンチレータに関しては作り直した。再製作時はBC-600を使用している。同じプラスチック素材で構成されるファイバー（外皮はPMMA）には亀裂も無く、光量、透過率の減衰が見られなかったのは幸いであった。

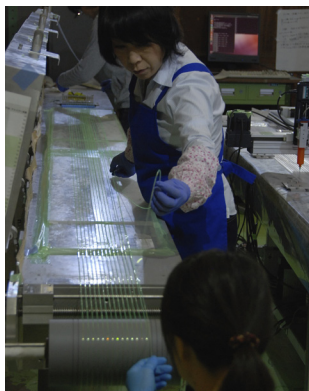


図 7: ファイバー貼りの様子。台の左に見える蓋の部分に紫外光ライトが取り付けられている。



図 8: ファイバー張り付け後、発生したクラック。貼り付けより2ヶ月程度経過したもの

#### 4.1.3 アニール処理

一般的にプラスチックは高温でアニール処理をすれば機械的、化学的耐性が向上することがわかっているため、クラック再現の試行実験の際にテストを行った。プラスチックの適切なアニール温度は、素材、製作行程で変わってくることで、一般的に行われる80℃で30分から12時間アニールしたサンプルでテストした結果、どの条件でも紫外硬化樹脂でヒビを発生しなくなることがわかった。

以上の結果より、ファイバーを貼り付けたシンチレータ全てをアニールすることにした。ファイバーを含め、全長約5mが入り80℃まで加熱できるオーブを図9のようにLECOFRAME<sup>3</sup>と断熱材で自作した。熱風発生器としては、八光電機のHAP2081Fを用い、熱風を循環させて温度を維持する。これらの構成で、風の取り入れ口と取り出し口の温度差を3℃程度に抑えられた。実際に行う際は25枚を一度に入れ、全体に600kgfの荷

<sup>3</sup>ユキ技研(株)製のアルミフレーム。少ないボルトで速く正確に組み上げられるため、KOTOでは多用している。

重をかけた状態で、80℃で3時間アニールした。アニール後にシンチレータ、ファイバーを合わせた光量に変化が無いことは<sup>90</sup>Sr線源を用いて確かめた。

また、結果としてアニール処理はシンチレータのならしに対しても有用であった。シンチレータへの溝加工や切断により発生した反りを、荷重をかけたアニールによって、取り除くことが出来た。

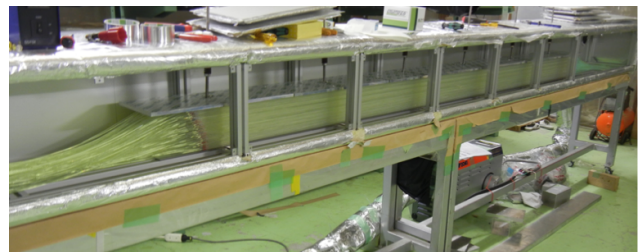


図 9: アニールの様子。25枚のシンチレータを入れて、パネの力で100kgfの荷重を6点にかける(合計600kgf)。下に見えるのが熱発生装置。

#### 4.1.4 真空引き

本検出器は低真空(0.1 Paレベル)中に入れられる。未硬化の樹脂が液体状で残っていると真空度を悪化させることが考えられ、特にPMTの動作に放電等の支障をきたすことが懸念される。そこで、モジュール製作を行う前に真空引きを行い、可能な限りアウトガスを排出することをを行った。図10の様に、全長約5mを取める真空容器を内径30cm、長さ5mのアルミ管を用いて2本製作し、1モジュール分25枚を一度に入れ、ドライポンプにて3日間引き続けた。

サンプルテストによるアウトガス量は、当初インナーバレル全体にスケールして400(Pa·L/s)であったのを、この真空引きを行うことにより40(Pa·L/s)まで削減できた。これは2013年の実験後に測定したKOTO実験全体のアウトガス量に相当するので、許容できる量と判断した。



図 10: 真空引きのためのアルミ容器。内径30cm、長さ5m。それぞれに25枚のシンチレータが入る。

#### 4.1.5 モジュールの製作

これらの対処を施して、2015年にモジュールの製作を開始した。図11左に示す様に Front plate, シンチレータ, 鉛板を積層し, 最後に Back plate を置き, 450 kgf の荷重をかけて半日以上置く。その後, 反射材を側面につけた状態で長手方向に9点, ステンレスバンドで締め付け, 一つのモジュールに組み上げる。モジュールの長手方向に対するズレやねじれの精度は1 mm 以下であることを要求し, セオドライトを用いて確認した。その後, 両端のファイバーをPMTで読むために一つに束ね, 樹脂で硬化させた後ハンドソーで切り出し, 紙ヤスリで鏡面状態に磨いた(図11右)。組み立て後は宇宙線を用いて光量測定を行い, 両端それぞれのPMTから一番遠い位置での光量で5 *p.e.*/MeV 以上であることを確認している。

モジュール製作は大阪大学, コリヨ大学のスタッフ, 学生でシフトを組み, 2~3名で行った。実際は組み立てだけではなく, 前述のアニーリング処理, 真空引き, 光量測定を平行して行い, 問題が無ければ2日で1モジュールのペースで製作した。



図11: 左) モジュール製作の様子。シンチレータ, 鉛板, サポート構造用のアルミ板を積層し, ステンレスバンドで9点縛る。右) ファイバーをまとめて樹脂で硬化後, 切り出して紙ヤスリにて磨いた状態。

#### 4.2 測定器の組み上げ

上記のようにして作った32個のモジュールはKEKのERL開発棟(旧東カウンターホール)で円筒形に組み上げ, そのままJ-PARCに輸送することにした。これは, J-PARCハドロンホールで使える空間とクレーンの時間が限られていたためである。総重量6トンの測定器を変形しないように支え, クレーンでつり上げるための構造を, 図12に示すように, 半円形に切り取ったアルミ板, それを支えるLECOFRAME, 鉄のCチャンネルで作った。半円形に切り取ったアルミ板の間には, 測定器全体をMBの中に滑らせて入れるためのテフロン製のレール(後述)を5本渡し, その上に8個のアルミのリングを並べた。

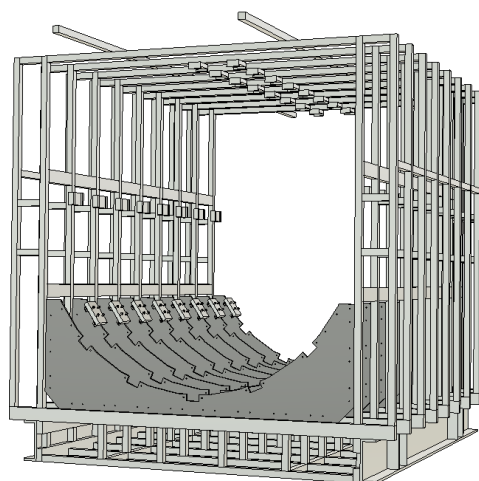


図12: 測定器全体を変形しないように支える構造。

モジュールはM8のボルトでリングに固定するが, このために8個のリングは $\pm 0.1$  mmの精度で並べる必要があった。これは, M8のボルトのネジ部の直径7.9 mmに対してリング側のボルト穴の直径が8.5 mmしかなく, 余裕が $\pm 0.3$  mmしかなかったためである。

直径2 mの8個のリングを2.3 mの間に( $330 \pm 0.1$ ) mmの間隔で設置するためには, リングの位置をその精度で測定できる測量システムが必要である。そこで, 3 mの長さにもわたって測量用のセオドライトを横に滑らせ, 4 m先でも0.1 mmの精度で位置を測定できるように, ガイドレール付きの高い平面度と剛性を持つテーブルをアルミ板とLECOFRAMEで2台作り, L字型に設置した。この精度を得るためには, レールの直線度が $25 \mu\text{rad}$ 以下である必要がある。長さ3 mのレールが中央部で $9 \mu\text{m}$ たわんでも両端の角度は $25 \mu\text{rad}$ ずれ, より局所的なたわみの場合, 直線からのズレに対する制約はさらに厳しくなる。そこで厚み25 mm, 長さ3 mのアルミ板にまっすぐな溝を掘り<sup>4</sup>, その溝の壁にTHK(株)社のLMガイドレールを押さえつけてボルトで締めた。次にレールと平行な方向にレーザー光を出したセオドライトをレールに沿って滑らせ, 遠くに貼ったグラフ用紙に当たるレーザーのスポットのぶれを見ながら, レールの位置を微調整し, 必要な2.3 mの区間に渡って目標の直線度を達成した。また, テーブルにはリングの設置間隔で穴を開け, 位置決めピンを用いてセオドライトを毎回同じ位置に固定できるようにした。

図13に示すように, この測量システムを用いてリングのボルト穴の位置を測量し, テフロンのレールの上に8個のリングを $\pm 0.1$  mmの精度で並べた。リングの上下左右の4点を見ながら少しずつ手で動かして, アルミの枠に固定していったのだが, 固定時にリングが動いて

<sup>4</sup>欲しい精度を求めるとかなり高額になったので, 仕様は通常の機械精度を指定し, それでもできるだけまっすぐに加工してもらった。

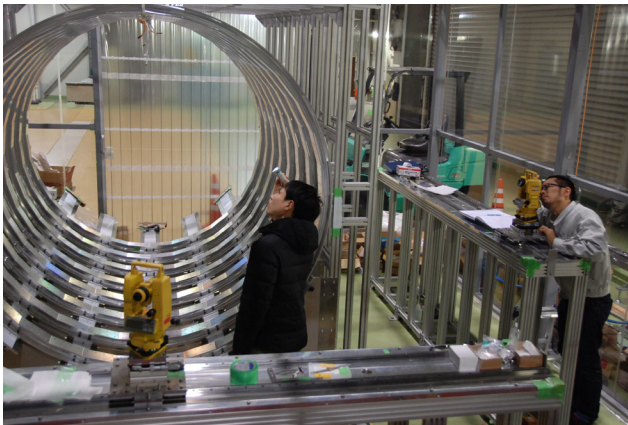


図 13: 測量システムを用いてリングの位置を測量。

しまうなど、かなり苦勞し、時間を費やした。ここは、リングの位置を微調整できるメカニズムを作り込んでおくべきだった。

リングを精密に設置した後、リングが互いにずれないように、8個のリングの内側にモジュールの Back plate と同じ位置に穴を開けたダミーの板を 32 枚、ボルトとナットで取り付けた。その際、各リングの直径 8.5 mm の穴に直径 8.3 mm の位置決めピンを差込み、8×32 本のピンが全て手で抜き差しできるように、リングの位置をさらに微調整した。これにより、8個のリングが本当に  $\pm 0.1$  mm の精度でアライメントされたことを保証した。

モジュールは、1個ずつ下側からリングの内側に取り付けていった。まず、長いローラーコンベアをリングの中に差し込み、その上にモジュールをくわえこむ機構のついたモジュールを置いて滑らせて入れた。次にクレーンでモジュールを両端でつり上げ、チェーンブロックでモジュールを回転させて、作業員の職人技でリングの内側の所定の位置に合わせ、ボルトで取り付けていった(図 14 参照)。この際、目的の位置とそのとなりの位置のダミーの板を取り外してモジュールで置き換えた。モジュールを取り付けた後、空いている場所にはまたダミーの板を戻し、位置決めピンを刺した後、ボルトで締め付けた。これは、モジュールを取り付けてリングがたわんでも、モジュールを取り付けるボルトが入ることを保証し続けるためである。これはかなり手間であったが、1回少しさぼった時を除き、最後のモジュールまで、問題なくボルトを差し込んで締め付けていくことができた。最後のモジュールは直方体の形をしており、まっすぐ上に引き上げて入れたが、それでもファイバーの束が隣のモジュールと干渉するために、先に片方の端を差し込んでからずらせる、というアクロバットの的な方法で無事取り付けることができた。最終的に用いた M8 ボルトは計 3840 本、サポート構造のおかげで8個のリングの高さの変化はわずか 0.3~0.6 mm であった。

実際にかかった期間は、測量システムを作り上げるの

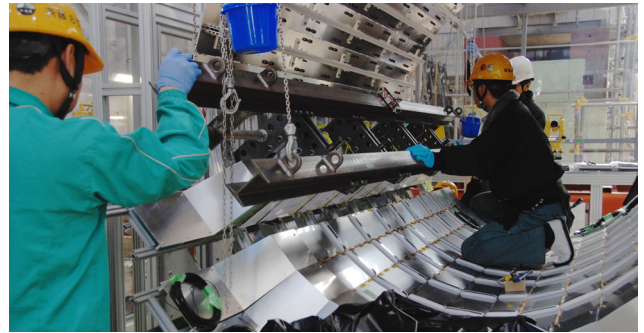


図 14: モジュールをリングの内側に取り付ける様子。

に3週間、リングのアライメントに5週間、モジュールの取り付けに4週間であった。準備に計8週間費やしてしまったが、ダミーの板やモジュールを取り付けたときの経験から言っても、 $\pm 0.1$  mm のアライメントなくしては、これほどスムーズには組み上げられなかった。

## 5 KOTO 実験装置内への設置

前章で述べたモジュール製作、組み立ては全て KEK で行い、その後トラックで J-PARC に運び、クレーンでハドロンホールに吊るし入れた。図 15 はメインバレルに入れる直前の写真である。メインバレル内部へは、テフロンプレート上を滑らせ、チェーンブロックで引き込んだ。図 16 のように、12 mm 厚の Al 板に 1 mm 厚のテフロンプレートを貼り付けたレールをメインバレルの内部および、図 12 の構造との間に取り付けた。レールと接するインナーバレル側には各リングに5点ずつテフロンプレートを取り付け、テフロンプレートと Al 板の貼り付けには、瞬間接着剤 ALTECO 88 とプライマー PR960 を用いた。インストール前にこのレールの位置と高さ合わせを数日かけて慎重に行い、引き込みは1日かけて行った。設置位置に移動後は、12 mm 厚の Al 板に対してボルト締めで固定した。図 17 はインストール後に記念撮影をした写真である。

検出器のインストール後、内側に Charged veto 検出器を取付け、PMT の配置、配線をして完成した。図 18 に下流側の配線図を示す。発熱する PMT のベースは、真空中で冷却が必要となるので、メインバレルの PMT を冷やすための水冷配管の近くに設置する必要がある。設計当初は、WLS ファイバーを伸ばし、PMT、ベース共に設置する予定だった。しかし、元々メインバレルと CsI 検出器の入っている円筒形構造体の間隔が狭い上に、ここにも Charged veto が必要であることが分かったので、多数本のファイバーを通すことが不可能となった。そこで PMT とベース間を配線で延長する PMT エクステンダを設計し、設置場所を分けることにした(図 18 左下)。エクステンダのケーブルは厚み 10 mm 以下に抑えられ

るので、狭い間隔でも通せる上、ファイバーへのダメージを考慮しなくて良い利点がある。また、PMTを検出器に近づけられたため、光量も25%程度増やすことも出来た。エクステンダの長さは2 mで、周波数特性の悪化、反射等の影響が見られたが、ベースの最終段にある補助電源供給用のコンデンサをPMT側にもつけて解決している。

また、Charged veto用のPMTはベース共に水冷配管近くに設置されており、ファイバーを伸ばす設計になっている。こちらは本数が少ないので引き回すことが可能であったが、配線時のダメージを考え、シンチレータ以降すぐに直径9 mmのPolymer Light Guide (PLG)に変換して取り回した(図18右下)。PLGはアクリル系、メタアクリル系の合成樹脂で柔らかく、外皮、コア共に衝撃に強い。また、WLSファイバーと光学接続した場合でも同様のアテネーションを示し、価格も安価である。PMTエクステンダ、PLGを採用したため、インストール時のWLSファイバーへのダメージをほとんど気にしなくて良くなった。



図15: メインバレルへの挿入直前の状態。

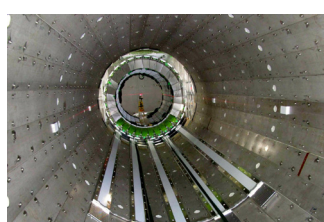


図16: メインバレルの内部から覗いた状態。挿入の際重要なテフロン板を貼ったレールが見える。



図17: インストール完成直後の記念撮影。

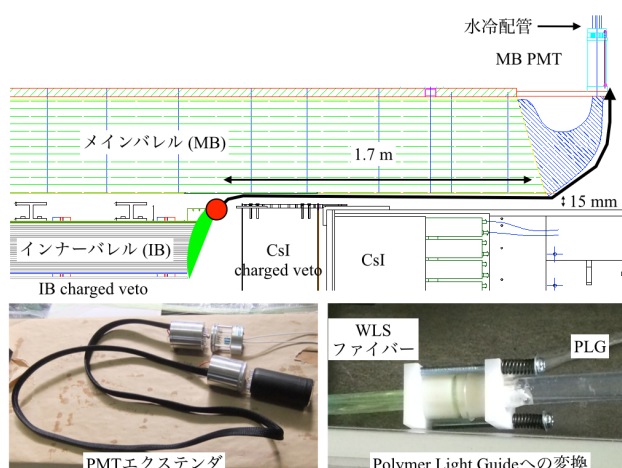


図18: (上): インナーバレルの配線図。WLSファイバーは検出器近くでまとめあげ、丸で示した部分でPMTエクステンダ(左下)、もしくはPLG(右下)を用いた配線に変換し、発熱するPMTベース部を水冷配管付近に配置した。

## 6 物理データを用いた性能評価

インナーバレル設置後、宇宙線を用いて性能を評価した。図19はファイバー内の光量の減衰を調べるため、各PMTで観測される宇宙線の貫通ピークのADC値を、 $z$ 位置毎にプロットしたものである。 $z$ 位置の情報は外側のメインバレルから得られる(位置の決定精度は10 cm程度)。ファイバー本来の光量の減衰が見えており、建設、KEKからJ-PARCへの移動、インストールを経ても、検出器に大きな問題が無いことを示している。

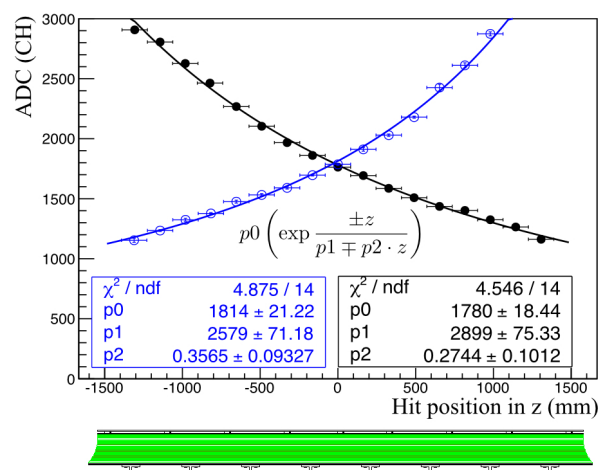


図19: 宇宙線データを用いたインナーバレルのファイバー内の減衰測定。上流、下流からの読み出した宇宙線のADCピーク値を $z$ 位置の関数として示す。



図 20 に時間分解能の測定結果を示す。宇宙線がメインバレルとインナーバレルを貫通した事象を選択し、それらの時間差をとり、それぞれの時間分解能を得ている。得られた時間分解能は、ファイバーの時定数, 光量, 読み出しに用いる 500 MHz FADC のサンプリングで理解できる量である。

また, 2016 年 5~6 月にかけて, インナーバレルが設置された状態での初の物理ランが行われた。図 21 に CsI 検出器で観測された  $4\gamma$  を用いた  $K_L$  の不変質量分布を示す。この時, メインバレル, インナーバレルにヒットが無いことを要求している。 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  ピークの他に主に分布する  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  からの背景事象を, インナーバレルを組込んだシミュレーションにより良く再現しており, これは検出器の構造, 反応を良く理解していることを示す。

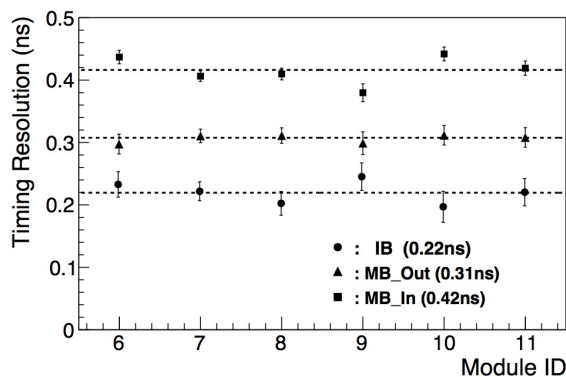


図 20: 宇宙線データで見積もった各モジュール毎の時間分解能。時間分解能はメインバレル (Inner と Outer module が別々に読み出される) との三通りの時間差分布から算出した。

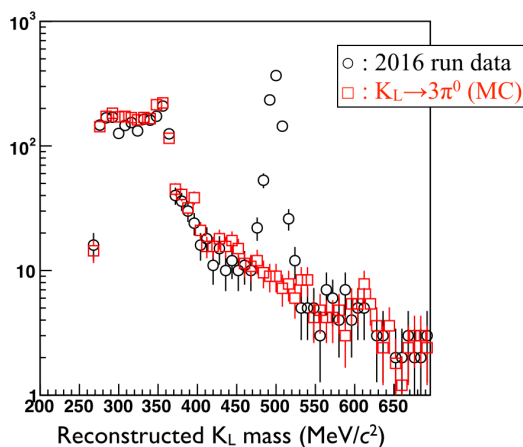


図 21: CsI 検出器で観測された  $4\gamma$  を用いた  $K_L$  の不変質量分布。メインバレル, インナーバレルにヒットが無いことを要求している。

## 7 おわりに

J-PARC E14 KOTO 実験の感度をさらに高めるべく新しくインストールしたインナーバレル検出器について紹介した。検出器製作時にシンチレータにヒビを見つけた時は, その枚数の多さから絶望感を覚えたが, 原因の発見と対処法を確立し, なんとか建設の段階まで持つていく事ができた。平行して, 総重量 6 トンを円筒形に支える可能な限り物質量の小さいサポート構造体の設計とアライメントなど, 本当に様々なアイデアが必要な検出器であった。それ故, インストールを終え, データ取得システムで全チャンネルの信号を確認した時には大きな達成感があり, 感無量であった。このような大きな検出器を設計からインストールまで, 本当に自分達の手で行えるのは KOTO の様な実験ならではの。一緒にやってみませんか?

## 謝辞

インナーバレル検出器の開発, 建設, 設置にはたくさんの方々からご支援とご協力を頂きました。KEK 機械工学センターのスタッフの皆様には, 検出器設計時の助言, 組み立て時のパーツの製作など, 様々にご支援頂きました。KEK ERL 開発グループには建設の場所を提供して頂き, 建設に必要なインフラの準備, クレーン利用のアレンジ等ご協力頂きました。双葉工業の方々には, 建設, インストレーションを共に行ってもらいました。2016 年の物理ランに間に合わせる為, 大変難しいスケジュールでしたが, 皆様のご協力で無事作業を完了することができました。この場をお借りし, 心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] A.J. Buras, D. Buttazzo, J. Girrbach-Noe, R. Knegjens J. High Energy Phys. **1511**, 033 (2015).
- [2] J.K. Ahn *et al.* [KEK E391a Collab.], Phys. Rev. D **81**, 072004 (2010).
- [3] 高エネルギーニュース Vol. 32, No. 2 「J-PARC KOTO 実験」.
- [4] Y. Tajima *et al.*, [KEK E391a Collab.], Nucl. Inst. Meth. A **592**, 261-272 (2008).
- [5] W.C. Young, R.G. Budynas, and A.M. Sadegh, “Roark’s Formulas for Stress and Strain, 8th Ed.”, McGraw Hill Book Co. (2011).