

# J-PARC KOTO 実験

大阪大学大学院 理学研究科

塩見 公志

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

杉山 泰之

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

外川 学

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

山中 卓

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

京都大学大学院 理学研究科

南條 創

nanjo@scphys.kyoto-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

野村 正

nomurat@post.kek.jp

2013 年 (平成 25 年) 8 月 19 日

## 1 はじめに

J-PARC E14 KOTO 実験<sup>1</sup>の目的は、中性 K 中間子の稀崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を用いて標準理論を超える新しい物理を探ることである。この崩壊の特長は、1) CP<sup>-</sup> の  $K_L$  から CP<sup>+</sup> の終状態に移る、CP 対称性を破る崩壊であること、2) 標準理論による寄与が分岐比にして約  $3 \times 10^{-11}$  と小さいこと、3) そして標準理論では図 1 に示すような  $Z^0$  を介するペンギンダイアグラムによって崩壊が起きるため、理論的な誤差が約 2% と小さいことである。つまり、標準理論による「バックグラウンド」が小さくよく理解されているために、CP 対称性を破る新しい物理の効果が見やすい。

現在の崩壊の分岐比の上限値は、KEK E391a 実験に

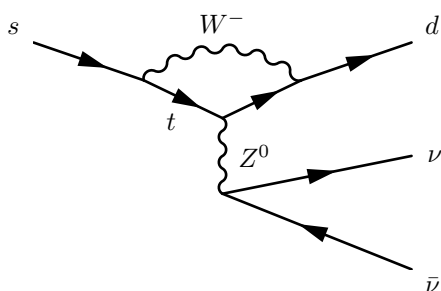


図 1:  $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$  のファインマンダイアグラム。

よって  $2.6 \times 10^{-8}$  (90% CL) と与えられている [1]。また、BNL 787/949 実験が荷電 K 中間子の  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  崩壊を 7 事象発見しており [2]、その分岐比を元にアイソスピン回転をして中性の  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の分岐比に対して  $1.5 \times 10^{-9}$  以下という上限値を与えている。この上限値は通称 Grossman-Nir Limit [3] と呼ばれる。

標準理論を超える物理のモデルとして、SUSY [4], lightest Higgs [5, 6], 4 世代モデル [7, 8] など様々なモデルが Grossman-Nir Limit 以下の広い範囲に予測を立てている。KOTO 実験はこの領域を順に探査していき、標準理論による予測分岐比相当で数イベントの  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊を観測する感度に至ることをゴールとしている。

実験は 2006 年にプロポーザルを提出し、2009 年 9 月に本採択 (Stage 2) を受けた。これまで精力的に検出器建設を行い、2013 年春にようやく物理データを収集できる段階になった。この記事では、検出器部分を中心に、収集した物理データの解析の触りを解説する。

## 2 実験装置

### 2.1 実験装置の概要

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の終状態の特徴は「 $\pi^0$  崩壊から来る 2 つの光子が存在すること」と「その他には検出される粒子がないこと」である。KOTO 実験では、光子のエ

<sup>1</sup>“K<sup>0</sup> at TOkai” を略して命名した。

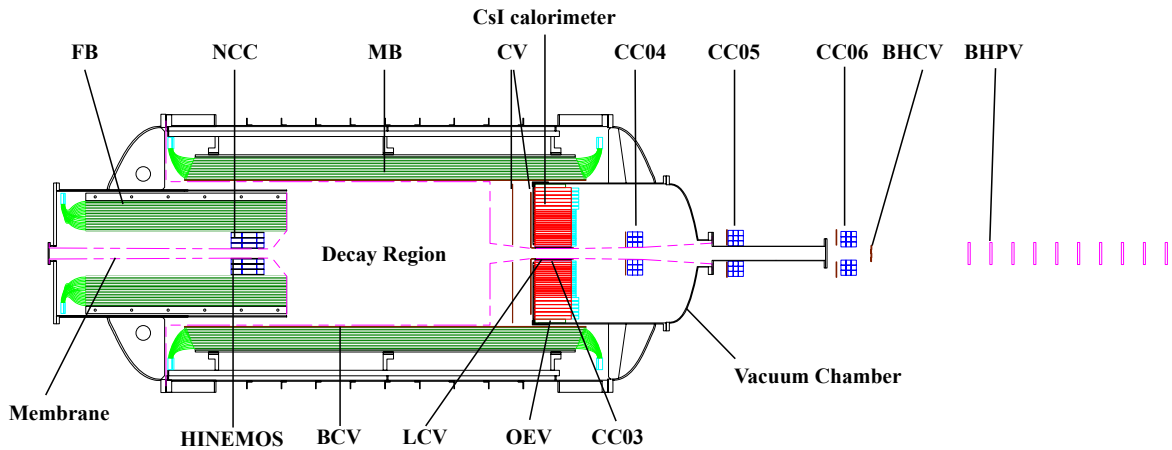


図 2: KOTO 実験装置図。ほとんどの検出器は円筒形の真空槽内に設置されていて、図は断面側面図を示している。中性ビームは図中左から入射され、真空槽の中央付近の中空部で起こる  $K_L$  の崩壊をとらえる。サイズの目安として、電磁カロリメータ (CsI calorimeter) の外周の直径が約 1.9 m、中央バレル部の veto 検出器 (MB) の長さが約 5.5 m である。ビーム領域と崩壊領域を囲むように描かれている破線は検出器領域と真空レベルを分ける筒状の薄い膜 (Membrane) を示している。なお、BHPV(Beam Hole Photon Veto の略称) は後半部を省略している。

エネルギーや位置を測定するために精度のよい電磁カロリメータを備え、他の粒子がないことを示すために検出効率の高い veto 検出器群で崩壊領域を覆うという基本思想をとっている。

KOTO 実験が行われるのは J-PARC ハドロン実験施設である。MR 加速器から取り出された 30 GeV 陽子ビームがハドロン実験施設の共通標的<sup>2</sup>に導かれる。6 秒毎に約 2 秒間かけてゆっくりビームを取り出す、いわゆる遅い取り出しである。KOTO 実験用の KL ビームラインはその二次粒子を 16 度方向に引き出している。内壁形状を最適化した 2 段の長尺コリメータ (長さ 4.5 m と 5 m) とその間に置かれた sweeping 磁石を用いて、鋭いエッジを持つ、ハロー領域へのもれ出しの少ない中性ビームを実現している。標的から実験エリアまでの距離は約 21 m で、電磁カロリメータが置かれている場所でのビームサイズはおよそ 10 cm 角である。ビームラインの詳細については文献 [9] を参照されたい。

図 2 に KOTO 実験装置の断面図を示す。電磁カロリメータ (CsI calorimeter) を含むほとんどの検出器は円筒形の真空槽内に設置され、崩壊領域を覆う形になっている。FB, MB はバレル部分の光子 veto 検出器で、KOTO 実験の第一段階では KEK E391a 実験で使ったものをそのまま利用している<sup>3</sup>。名前に CV と付けられているものは荷電粒子 veto 検出器を示す。名前に CC と付けられているものは Collar Counter の略称で、ビームの“首回り”をカバーしている。検出器の最下流には、

名前の頭に BH(Beam Hole の略) とつけられた中性ビーム中をカバーする検出器が置かれている。真空槽内の崩壊領域は、中性ビームと残留ガスの反応によるバックグラウンドを抑えるため、 $10^{-5}$  Pa レベルの高真空になっている。検出器領域は薄い膜を隔てて分離されており、0.1 Pa レベルの真空度になっている。

幸いにして我々は KEK E391a 実験の経験を数多く活用することができ、バックグラウンド抑制にとって有効な測定器の増強課題はよくスタディされている。以下の節では、KEK E391a 実験から KOTO 実験へと進むにあたっての増強ポイント：

- 電磁カロリメータの放射長を十分長くし、また、シャワーの形をよりよく測れるよう小分割すること
- ハロー領域にもれ出してくるビーム中性子 (ハロー中性子) との反応を減らすこと (物質量を減らす、放射長が反応長に比べてより短い物質を使う、など)
- ハロー領域にもれ出してくるビーム中性子数をモニターできること
- 高計数率に対応できるように、全検出器の波形をデジタル化して記録すること

に沿って新設された部分をいくつかピックアップして説明していくことにする。

## 2.2 電磁カロリメータ

電磁カロリメータ<sup>4</sup>は、KOTO 実験において唯一、信号があることを要求する検出器である。(他の検出器は

<sup>4</sup>以下、単にカロリメータと呼ぶ。

<sup>2</sup>ハドロン実験施設では一つの共通標的 (T1 標的) からの二次粒子を各ビームラインに引き出して利用している。

<sup>3</sup>MB については、まず増強なしで物理ランを始め、実験感度向上に合わせて増強する計画としている。

すべて信号がないことを要求する。)  $K_L$  崩壊からくる 0.1–1 GeV 程度の光子について、エネルギーや位置、時間を測定することが第一目的となる。一方で、veto 検出器の一つとしての役割も果たす必要があり、下は 1 MeV 相当の信号の検知も要請される。

KOTO 実験のカロリメータは undoped CsI 結晶で構成されている。結晶は米国フェルミ国立研究所の KTeV 実験で使われたものを使用している。結晶サイズは 25 mm 角、50 mm 角の 2 種で、どちらも 500 mm の長さ ( $27X_0$ ) を持ち、KEK E391a 実験で使用した結晶、70 mm 角、長さ 300 mm ( $16X_0$ ) に比べ、近接した光子を分離でき、高いエネルギー分解能を持つ。光電子増倍管 (PMT) も同様に KTeV で使われたものを使用するが、高電圧を供給するベースは、真空使用に耐える低電力化の必要性から、Cockcroft-Walton 型のものを新たに開発した。また、1 MeV 相当の低出力信号まで検出する要請から、低ノイズプリアンプを開発し、光電子増倍管の出力直後に配置して読み出しを行っている。

まず、2008 年にフェルミ国立研究所から CsI 結晶を輸送した。KTeV カロリメータとして積み上げられていた 2700 本を越える結晶と PMT は、大学院生らの手により 1 本 1 本取り外され、足掛け 9 ヶ月かけて大阪大学に運ばれた。Cs 線源等で全数の応答を確認する一方、この内の 144 本の結晶を  $12 \times 12$  行列に積んだミニカロリメータを構築し、東北大学電子光理学研究センターの 100–800 MeV の陽電子ビームを用いて性能評価を行った。エネルギー分解能、時間分解能はそれぞれ、

$$\frac{\sigma_E}{E} (\%) = \frac{1.3}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.1}{E} \oplus 0.8 \quad (0^\circ \text{入射時}) \quad (1)$$

$$\sigma_t (\text{ns}) = \frac{0.12}{\sqrt{E}} \oplus 0.10 \quad (2)$$

が得られ ( $E$  の単位は GeV)、共に実験遂行に十分な性能であることを示した。

2010 年 5 月からは結晶を順次 J-PARC に運び入れ、設置した。結晶はエンドキャップと呼ばれる円筒形の検出器架台に設置した。まず台形状の鉛-シンチ積層型の検出器を周底部に設置して平面を作り、その上に CsI 結晶を積層した。CsI 結晶は柔らかく、隣接結晶とのずれによる角へのダメージや変形を防ぐため、隣同士の段差を  $200 \mu\text{m}$  以下に抑えながら積む必要があった。これには大変な労力を要したが、約半年かけて 2716 本すべてを積み終えた<sup>5</sup>(図 3)。

2011 年 2 月に積層を完了し、中性ビームを用いた性能評価に備えていたところで、東日本大震災に遭遇した。幸い、どの結晶にも損傷はなかったが、結晶は摩擦のみで固定されていたため、全体で 3–4 mm ほど上流側 (図 3 が上流側からの写真) に滑り出していた。これを受け、

<sup>5</sup>2010 年秋に 6 割方積んだ段階で部分ビームテストなどをはさんだので、実期間としては 9 ヶ月かかっている。

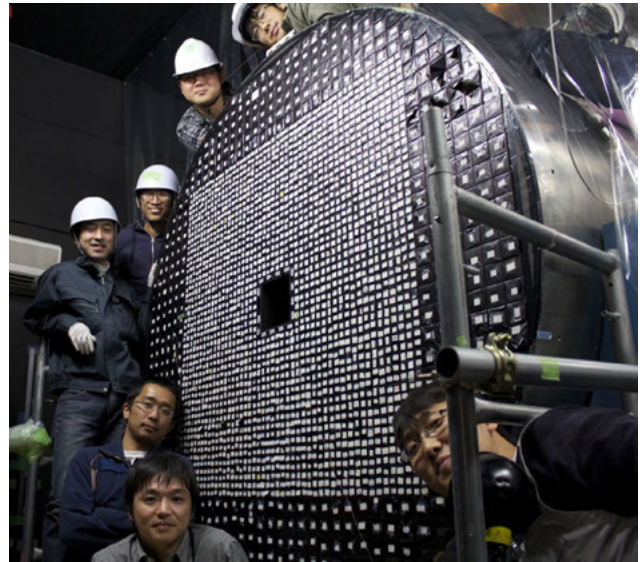


図 3: CsI 結晶設置完了時の写真。中央 1.2 m 角の領域に 25 mm 角、外側に 50 mm 角の結晶が配置されている。

同程度の地震により結晶が大きく滑る可能性を想定し、エンドキャップの上流側には CFRP とアルミハニカムで構成したふたを取り付けた。

震災からの復旧作業後、2012 年 2 月にほぼ全チャンネルの信号を読み出し、約 1 年遅れで中性ビームを用いた性能評価に進むことができた。カロリメータのエネルギー校正として、宇宙線の貫通イベントを用いる手法と、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  を用いる手法が挙げられる。図 4 に  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  候補のイベントディスプレイを示す。崩壊粒子が 6 つの光子となるので、対応する 6 つの島が観測される。これらのイベントを集め、不変質量を計算した

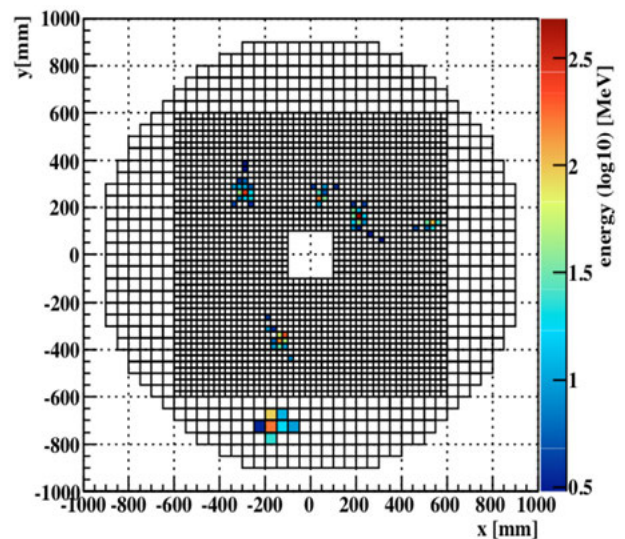


図 4:  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  候補のイベントディスプレイ。



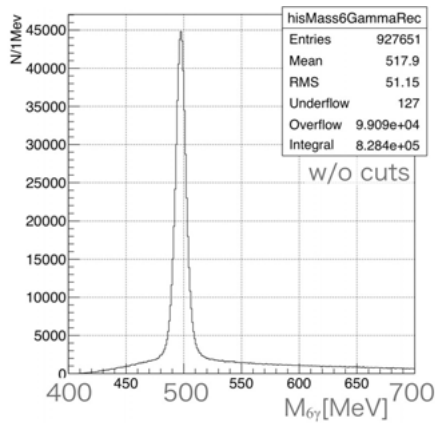


図 5:  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  候補の不変質量分布。

プロットが図 5 である。 $K_L$  質量の  $498 \text{ MeV}/c^2$  付近にピークがある。このデータサンプルを用いて、不変質量を組む際に、本来の質量の値に近づけるように各結晶の測定値に補正をかけていくと、結晶間の相対的なエネルギー校正が改善できる。宇宙線による校正と組み合わせると、1% レベルまでエネルギー校正が可能である。

また、この実験時、カロリメータの上流側に電磁石とドリフトチェンバー群を置き、 $K_L$  崩壊からくる荷電粒子の運動量測定も行った<sup>6</sup>。図 6 に荷電粒子の運動量とカロリメータで測定されたエネルギーとの比の分布を示す。1 付近にあるピークは電子・陽電子の候補であり、

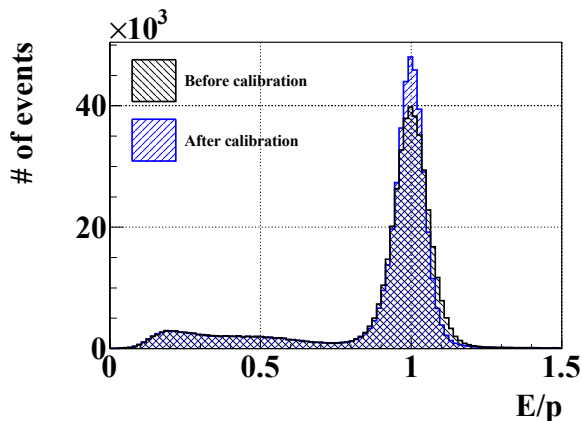


図 6: 荷電粒子の運動量とカロリメータで測定されたエネルギーとの比。 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  を用いたエネルギー校正後にピークがシャープになっている様子が見える。

$K_L \rightarrow 3\pi^0$  を用いて各結晶のエネルギー再校正を行うと、ピークがシャープになる。入射エネルギーのわかった電子を用いたこの測定とクロスチェックすることにより、本番実験で行う、宇宙線と  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  を用いた校

<sup>6</sup>2012 年前半までは、KOTO 検出器の内、カロリメータを含むエンドキャップ部分のみが設置されていた段階で、上流に各種の試験用検出器を備えられた。

正手法の妥当性を確認した。

## 2.3 荷電粒子検出器

カロリメータ上流に置かれる荷電粒子検出器 CV (Charged Veto) は、カロリメータに入射する荷電粒子を検出し、その事象を排除する。薄いプラスチックシンチレータを用い、大面積、低物質質量、高感度荷電粒子検出を追求したものとなっている。

荷電  $\pi^-$  が CV 表層で荷電交換反応 ( $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  など) を起こして中性  $\pi^0$  になったり、陽電子が対消滅したりすることによる不感を十分減らすために、これらの反応を起こす前のエネルギー損失を十分低い閾値で検出する必要がある。そのため、CV では  $100 \text{ keV}$  のエネルギー閾値を課すことが要求となっている。このような低いエネルギー閾値では特に、光量が少ないと光子数統計の揺らぎの影響を強く受ける。この観点から、 $100 \text{ keV}$  のエネルギー損失あたり  $10 \text{ photo-electron (p.e.)}$  以上という条件が課せられている。

また、KEK E391a 実験では、ハロー中性子が CV 中で  $\pi^0$  生成反応をして信号を模す事象が主要バックグラウンドの一つとなっていた。これを減らすために、KOTO 実験の CV では徹底的に物質質量を削減した。

図 7 に CV の写真を示す。ビーム方向に  $25 \text{ cm}$  間隔で置かれた 2 面で構成されている。各面は、図 8 に示すよ

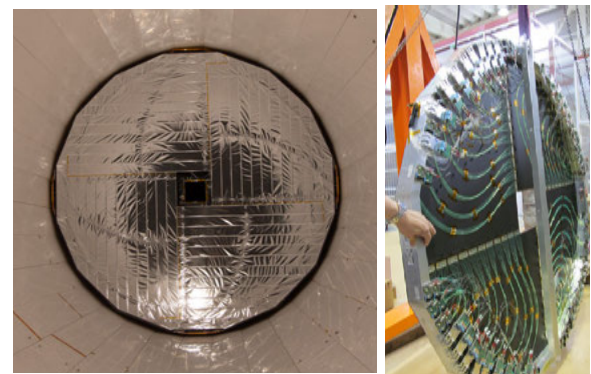


図 7: (左) インストールされた CV。上流、バレル部の中から覗く。カロリメータをカバーしている。(右) 裏面の様子。波長変換ファイバーが走っている。

うに、アルミ製の正 16 角形の外枠に  $0.8 \text{ mm}$  厚のカーボンファイバー (CFRP) 板を張り、その上に  $3 \text{ mm}$  厚のプラスチックシンチレータ (BC408) を敷き詰め、低物質質量 (わずか  $0.4 \text{ g}/\text{cm}^2$ ) かつ不感物質のほとんどない構造となっている。図 8 右の断面拡大図のように、シンチレータ側面を  $60^\circ$  に加工し、隣同士の隙間が正面から見えないようにしている。 $70 \text{ mm}$  幅の各シンチレータストリップには  $10 \text{ mm}$  ピッチで  $1 \text{ mm}$  径の波長変換ファイバー (Y11(350)) が埋設されている。配置を 4 回

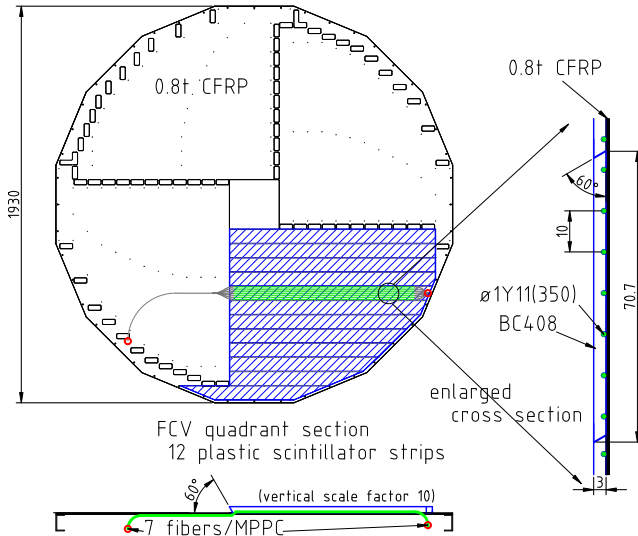


図 8: CV を取り付ける CFRP 図面。波長変換ファイバーを裏面へと回す角穴が開けられている。右下象限にはシンチレータストリップを敷き詰める様子が、その内の 1 ストリップには波長変換ファイバーの取り回しが描かれている。右図はストリップ断面の拡大図。

対称にし、図 7 右写真のように波長変換ファイバーを裏面を通してビームホールを避け、全ストリップの両読みを実現している。両端の出力を足すことによって検出光量の一様性を、平均時間をとることによって優れた時間分解能を得ることができる。光出力については、7 本のファイバーを束ねて 3 mm 角 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) で読み出し、光検出効率を通常のバイアルカリ光電面 PMT に比べて 3 倍程度稼いでいる。この MPPC はベルチェ冷却器付きで、浜松フォトニクスと共同開発したものである。これにより、MPPC を一定の低温に保ち、ダークカウントレートを低減し、ゲインなどの変動を抑えている。実際、 $10^{\circ}\text{C}$  に温度コントロールすることによって、暗電流による 1 p.e. のレートは 200 kHz 程度に抑えられている。MPPC のゲインは  $8 \times 10^5$  程度で使用しており、50 倍の差動出力のプリアンプを開発実装して 1 p.e. パルスを十分検出可能にしている。

CV は 2012 年 6 月にインストールされ、まず、2.2 節で触れた電磁石とドリフトチェンバーを備えたセットアップでテストを行った。チェンバーでトラッキングして荷電粒子の入射場所を指定した際の両読みを足した光量の分布を図 9 に示す。カロリメータの有効領域である半径 850 mm 以内の領域に対して、100 keV エネルギー損失あたり 13–23 p.e.、全ストリップ平均で 19 p.e. (3 mm 貫通時の MIP ピークで 90 p.e.) と、十分優れた性能を得た。その後、ベルチェの冷却を含め、真空下でも問題なく動作していることを確認した。

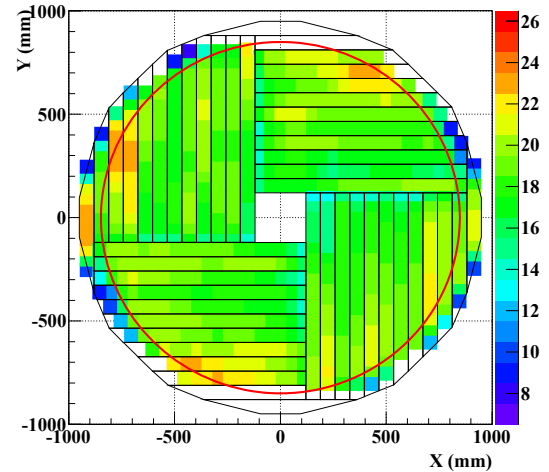


図 9: 100 keV エネルギー損失当たりの光量の位置依存性。光量は両読みの和 (p.e. 単位)。

## 2.4 ガンマ線・中性子検出器

ガンマ線・中性子検出器 NCC (Neutron Collar Counter) は、崩壊領域の入口を絞り、上流からの  $K_L$  崩壊事象を抑制する役割を持つ。上流コリメータ中で  $K_L$  が崩壊すると、崩壊粒子の一部がコリメータ内部で止められ、2 個の光子のみが下流に飛来することがある。もし NCC が無いと、これらが直接カロリメータに入射して膨大なバックグラウンドとなる。もちろん、崩壊領域を囲う光子 veto 検出器の一つとしての役割も果たす。

NCC の設置位置はビームに近く、ハロー中性子と相互作用して  $\pi^0$  を生成するとバックグラウンドの源となる。この位置に鉛-シンチ積層型カウンターを用いていた KEK E391a 実験では、この過程が主要バックグラウンドであった。KOTO 実験では、相互作用長 (38 cm) と放射長 (1.9 cm) の比が比較的大きい undoped CsI 結晶を用い、光子阻止能力を保ちつつ、中性子反応率を下げている。 $\pi^0$  が生成されたとしても、その崩壊光子に対する阻止能力が高く、カロリメータに到達させない。加えて、全体がアクティブな結晶シンチレータを用いることによって、ハロー中性子による  $\pi^0$  生成反応で同時に作られる粒子のエネルギー損失を 1 MeV の低エネルギーまで検出し、事象を排除する。

NCC には、ハロー中性子フラックスを直接測定し、バックグラウンド数の定量評価を確実にする役割もある。このためには膨大な  $K_L$  崩壊起源の光子とハロー中性子を弁別することが必要である。NCC では、ビーム軸方向に分割した CsI 結晶を波長変換ファイバーを用いて個別に読み出す方式を実現し (世界初)、光子と中性子のシャワー発展の差を検出して弁別する。

図 10 に NCC の構成を示す。48 個の  $6.6 \text{ cm} \times 6.8 \text{ cm}$

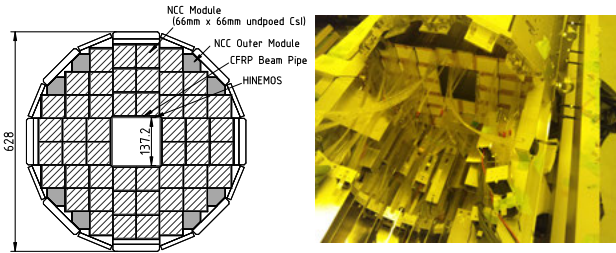


図 10: NCC の正面図(左) と上流から見た写真(右)。

のモジュールを積み上げ、外周部には8個の5角形に整形された45 cm長のCsI結晶(PMTによる直接読み出し)が配置されている<sup>7</sup>。NCCモジュールは、6.6 cm角の結晶3個を、間に1 mm厚のアルミミラーを挟んで光学的に隔離して接着し、長さ45 cmの一単位を形成している(図11)。この上に1 mm径の波長変換ファイバーを40本設置し、これを通して結晶の発光を読み出す。中心部の28本については、3結晶を共通に読み出す(光子 veto 検出器としての役割用)。外側12本については、4本ずつで3結晶それぞれの光を別々に読み出す(ハロー中性子測定用)。

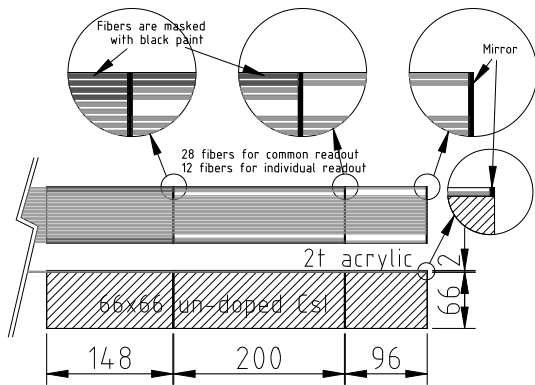


図 11: NCC モジュール。

波長変換ファイバーで読み出す場合、1 MeV 相当の出力を検出できる十分な光量が得られるかが最大のポイントとなる。これを克服するために、図12にあるように、CsI結晶の紫外発光を、紫外吸収青色発光の波長変換ファイバー(PMP 5000ppm)と組み合わせ、青色発光を通常のバイアルカリ光電面のPMTの感度の高い領域ともマッチさせることによって、高い光量の読み出しをデザインした。製作した48モジュール全数について宇宙線によるテストを行った結果、共通読み出しに対して4.5 p.e./MeV以上の光量を得られ、予定のバックグラウンド削減能力を担保した。また、入射位置によるばらつきは最大で30%に抑えられていた。個別読み出しについては、10 MeVの検出感度が条件であるが、全チャ

<sup>7</sup>主モジュール、周辺モジュールの結晶は、各々、KEK E391a, KTeV 実験でカロリメータとして使われていた結晶を加工して再利用している。

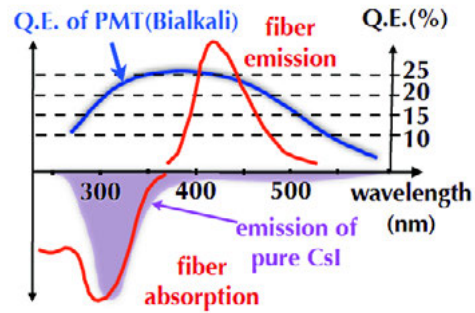


図 12: NCC で使われている波長変換ファイバー(PMP5000)の発光吸収スペクトル。CsI結晶の発光やPMT感度とよくマッチしていることがわかる。

ネルにわたり0.45 p.e./MeV以上の結果となり、こちらも十分な光量を得た。光学隔離している他の結晶に光が漏洩するクロストークの量は1%以下である。

2012年12月にJ-PARCにてインストールを行い、その後、真空環境でも問題なく動かすことができた。宇宙線によるエネルギー校正の後、ハロー中性子測定を試み、現在解析中である。図13にハロー中性子候補事例の例を挙げる。上流部の検出エネルギーが小さく(上流

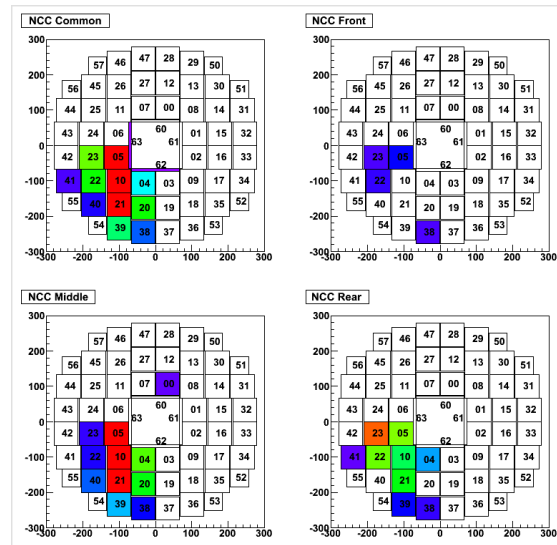


図 13: ハロー中性子事象の候補。読み出しチャンネル毎に、5 MeV以上のエネルギー損失について、0-100 MeVを青から赤(100 MeV以上を含む)の色分けで示す。左上が共通読み出し、右上が上流部、左下が中央部、右下が下流部の個別読み出し。

からの $K_L$ 崩壊由来の光子ではない)、ビームホールから入射する光子と比べて径方向、奥行き方向ともにクラスターサイズが大きい、という中性子事象の特徴がよく現れている。今後解析を進め、ハロー中性子のフラックス、エネルギー分布などを引き出すことを目指す。



## 2.5 データ収集システム

大強度ビームを用いる場合、検出器の計数率が高くなり、二つの異なるイベントの信号が重なってしまうことも起こりうる。重なった信号からでも正しいエネルギーや時間の情報を得るため、KOTO 実験ではすべての検出器の信号を波形として記録する。また、高い計数率から来る高頻度のトリガー要求に対応するため、データ収集システムをパイプライン化し、デッドタイムを抑制している。

図 14 に KOTO 実験のデータ収集システムの概略を示す。KOTO 実験のデータ収集システムは、検出器の波形をデジタル化する ADC と、その波形情報を用いたトリガーシステムから構成されている [10, 11]。

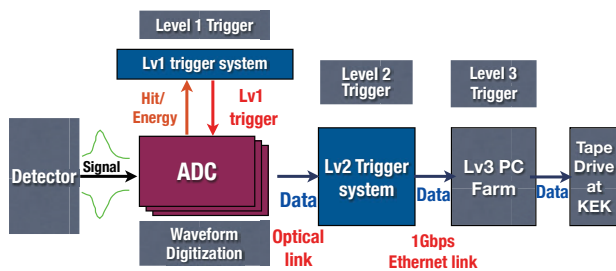


図 14: KOTO 実験のデータ収集システムの流れ。

各検出器のアナログ信号は、環境ノイズの影響を抑制するため差動信号に変換したのち Category 6 Ethernet ケーブルを介して ADC モジュールに送られる。デジタル化された波形情報は光ファイバーを通じてトリガーシステムへと読み出され、トリガー情報、およびイベントのデータとして用いられる。トリガーシステムは Lv1-3 の 3 段階で構成され、順次、イベントの取捨判断などを行っている。

### 2.5.1 ADC

KOTO 実験では、分解能 14 bit でサンプリング周波数 125 MHz のタイプと、12 bit で 500 MHz のタイプの 2 種類の ADC モジュールを用いる。いずれもシカゴ大学によって KOTO 実験のために開発されたものである [12, 13]。カロリメータを含むほとんどの検出器に対しては 125 MHz ADC モジュールを用い、ビーム中に置かれる検出器 (BHCV, BHPV) に対しては、高い計数率が予想されるために 500 MHz ADC モジュールを用いている。125 MHz ADC モジュールでは、デジタル化を行う前にベッセルフィルタと呼ばれるアナログフィルタを通して信号の幅を広げている。これにより、CsI 結晶の信号のような立ち上がりの速い信号に対しても十分なデータ点数を確保することができる (図 15)。

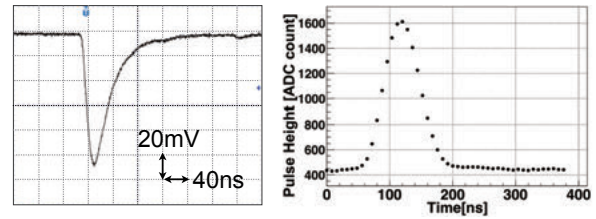


図 15: オシロスコープで取得した CsI カロリメータの PMT から得られた信号 (左図) と 10 極ベッセルフィルタを通して ADC で記録された波形データ (右図)。

デジタル化した波形信号は、イベント情報用のデータとトリガー情報作成用のデータに分けられる。イベント情報用のデータはパイプラインバッファに送られトリガーを待つ。一方、トリガー情報用のデータからは検出器のヒット情報やエネルギー和情報が 8 ns (=125 MHz の 1 クロック) 毎に計算され、トリガーシステムに送られる。

トリガーシステムからイベントをアクセプトする判断信号を受けると、ADC はパイプラインバッファからイベント用のデータを切り出し、そこから計算したエネルギー重心情報と共に、Lv2 トリガーシステムへと送信する。物理データ収集時には、記録する波形データの時間点数を 64 クロック分 (512 ns に相当) としている。

### 2.5.2 トリガーシステム

トリガーシステムはミシガン大学が開発したモジュールを用い、波形情報を使った 3 段階のトリガー判断を行っている。トリガーシステムと ADC の間は光ファイバーで接続され、光通信による高速データ転送を行う。

Lv1 トリガーシステムは ADC でデジタル化した波形情報を元に 8 ns 毎にトリガー判断を行う。ADC で計算された各チャンネルのエネルギー情報やヒット情報を光通信を用いて集約し、各検出器の総エネルギー情報やヒット情報を計算する。例えば物理データ用のトリガーでは、カロリメータ全チャンネルのエネルギー和 (主信号)、CV や MB, NCC などの各エネルギー和 (veto 信号) を Lv1 判断に用い、カロリメータにある程度大きな粒子が入ったイベントを選び出した後、荷電粒子を含む  $K_L$  崩壊は CV で、余分な光子を含む崩壊は MB で、上流での崩壊は NCC で、それぞれ veto する論理を作っている。後述する 2013 年 5 月の物理ランでは、Lv1 トリガーレートは 28k events/spill (約 14 kHz) であった<sup>8</sup>。

Lv2 トリガーシステムにおいては、ADC で記録されたデータに対して、1 イベント毎の処理を行う。現在はカ

<sup>8</sup>6 秒毎に約 2 秒間のビーム取り出しが行われる 1 サイクルを spill と呼ぶ。

ロリメータの情報のみを判断に使用している。ADCの各チャンネルにマッピングされたカロリメータ上の位置情報とイベントの波形から計算されたエネルギー情報からカロリメータのエネルギー重心を計算し、それを用いてLv2トリガー判断を行う。エネルギー重心を見分けることで、大きな missing エネルギーを持つ  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  信号は残すが、中心付近に重心が来がちな  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊を取り除くことができる。Lv2トリガー判断を通ったイベントは、Lv2トリガーモジュール上のメモリに一旦蓄積された後、1 Gbps Ethernet を介してLv3 PCファームへと送信される。2013年5月の物理データ収集時のLv2トリガーレートは8k events/spill (約4 kHz)であった。

Lv3トリガーシステムを構成するPCファームはLv2トリガーモジュールから送られてきたイベントの断片をまとめて、1つのイベントのデータとして再構成し、そのデータに対してトリガー判断を行う。今のところ、Lv3トリガーシステムでのトリガー判断は行わず、データの可逆圧縮のみを行っている。各チャンネルの波形データは、波高に応じて使用ビット幅を制限することで圧縮され、1イベントあたりのデータサイズを元のおよそ3分の1にしている。圧縮後のデータサイズは、1イベントあたりおよそ130 KBである。これは1時間あたり600 GBのデータ量に相当する。

データは、1ランの終了後(物理データ収集時は1ランおよそ1時間としていた)、KEKつくばの共通計算機(KEKCC)にあるデータストレージへと転送され、保存される。転送速度は、定常的に2.7 Gbpsを実現し、データが蓄積される速度を十分上回っている。

### 3 物理ランまでの道のり

図16にKOTO検出器建設に着手して以降の遅い取り出しのビームタイム履歴を示す。KOTO検出器の建設は2010年5月にカロリメータの結晶積み込み作業から始まった。そして、2012年夏までの3回のビームタイムで、エンドキャップ部分の検出器の試験、すなわち、電磁カロリメータの試験(光子に対する応答の詳細スタディやスペクトロメータを使用した性能評価)やCVの試験(荷電粒子に対する光量や検出効率の測定)を行った。

その後、2012年の秋から冬にかけてKOTO検出器のインストール作業を急ピッチで進めた。前述した電磁カロリメータの耐震ふた、バレル部検出器(MB,FB)やNCCなど、真空槽内に設置されるほぼすべての検出器をこの時期に集中して設置した。KOTO検出器の真空槽は上流部、中流部、下流部からなり、3つの構造体を合体させて一つの大きな真空タンクとなる。この合体作業はKOTO検出器建設のハイライトであり、2012年

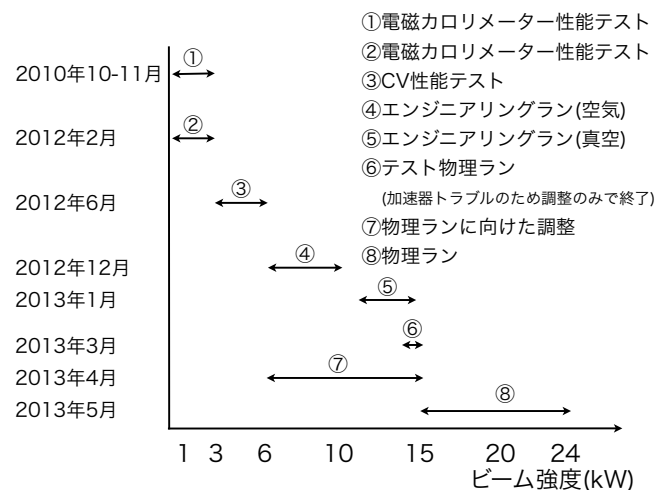


図16: これまでの遅い取り出しのビームタイムとビーム強度の履歴。右上に各ビームタイムにおけるビームの主な使用方法を示す。

12月に行われた(図17)。中流部バレル検出器の内径と下流部シリンダ部分の外周は真円同士ではなく、また配置のずれや配線などの突起があるため、10 mmを切る余裕しかない箇所もあり、合体はかなり慎重に行う必要があった。そのため、この作業が無事に終わった時は皆ほっと胸を撫で下ろすとともに、やっとここまで来たんだなと感慨深いものがあった。その後すぐに、上流部と中流部を合体した。そして、真空槽を実験エリアの所定の位置に配置し、1度目のエンジニアリングランを2012年12月に行った。

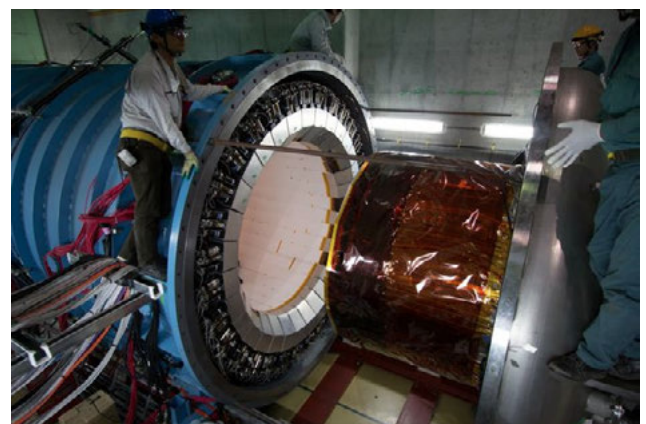


図17: 真空タンクの中流部と下流部の構造体を合体させる様子。

我々はまず、真空引きを行わず、空気中でのランを行った。そして、各検出器のエネルギー校正、時間校正の方法の確立を行った。そして、2013年1月には2度目のエンジニアリングランを真空を引いた状態で行った。

1月のビームタイム終了後は、エンジニアリングラン



でわかった不具合のある検出器に対しての補修作業を行うことから始まった。幸いにも、真空タンクの最下流のふたを開けて作業できるものだけにとどまり、上流/中流/下流部を分離しなくてはならないような大掛かりな作業を行わずに済んだ。信号が確認できなかった電磁カロリメータのチャンネルは、真空槽内の信号ケーブルを新たに引き直すことで動作が確認できた。そして、すべてのチャンネルの信号の読み出しに成功した。実のところ、カロリメータ全チャンネルの信号を一度にきちんと確認できたのはこれが建設以来初めてであり、KOTO実験にとっては大きな一歩であった。

その後、我々は真空タンクより下流部に設置される検出器のインストール作業を行った。そして、ほぼすべての検出器の準備を整えた上で2013年3月のビームタイムを迎えた。当初の予定では3月のビームタイムでKEK E391a実験と同等の感度の達成を目標とした物理ランのテストを行う予定であった。しかし、加速器トラブルがあり<sup>9</sup>、物理トリガーの調整途中でビームタイムが終了してしまった。

このトラブルを受け、急遽、4月の終わりに遅い取り出し運転の機会が設けられた。3月にやり残していた物理ラン用のトリガー調整を行い、基本的には物理ランに向けたすべての調整を終えることができた。

こうして満を持して、5月のビームタイムは迎えられた。もちろん5月のビームタイムの目標は物理ランを行い、Grossman-Nir limitを超える感度での物理結果を出すことであった。物理ランに向けた最終的なトリガー調整を行ったあと、5月17日について物理データの取得を開始した。

この時のビーム強度は20 kWであったが、5月18日にはビーム強度は23.8 kWとさらに増えた。我々はトリガー作成時の veto 条件を少し強化し、全体のトリガーレートを抑えることでビーム強度の増強に対応した。ここで、ビーム強度について一言述べる。23.8 kWの陽子ビームでの時間当たりの  $K_L$  数 (KLビームライン出口での値) はKEK E391a実験に比べて12倍も多い。まだデザイン強度の10分の1程度にしか到達していないとはいえ、J-PARCの大強度ビームの恩恵がいかに大きいかがわかる。

物理データ取得開始後は順調にデータ収集を行っていたが、残念ながら5月23日にハドロン実験施設で起こった事故<sup>10</sup>により、ビームタイムは終了してしまった。図18に物理ランでの積算 POT (Protons On Target の略) の分布を示す。800 × 10<sup>16</sup> POT 集める事が当初の目標であった。しかし、実際に得られたのは160 × 10<sup>16</sup> POT

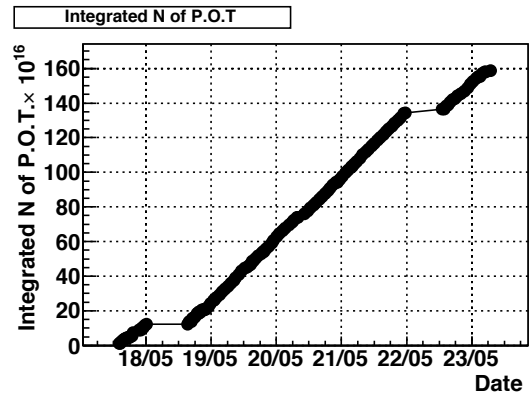


図 18: 物理ランにおける積算 POT 数の時間変化。

であり、目標の約5分の1の量であった。

## 4 解析の状況

現在はまとまったデータがとれている1月と5月のビームデータの解析を行っている。

1月のビームタイムでは  $K_L \rightarrow 3\pi^0$ ,  $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ ,  $K_L \rightarrow 2\gamma$  といった崩壊モードの事象を集めることに特化したトリガーを使用してデータを取得した。我々はこれらのデータを使用して、検出器の応答の理解を深めるとともに  $K_L$  の生成数及び運動量分布の精密な測定を行っている。1月のビームデータについては検出器のエネルギーや時間の校正が終わっていて、上に挙げた3つのモードを使用した詳細な解析を進めている。一例として、図19に  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊事象解析において再構成された、6つの  $\gamma$  線の不変質量、および、 $K_L$  運動量の分布を示す。全領域にわたってデータとシミュレーションはよく一致しており、カロリメータの応答を正しく理解

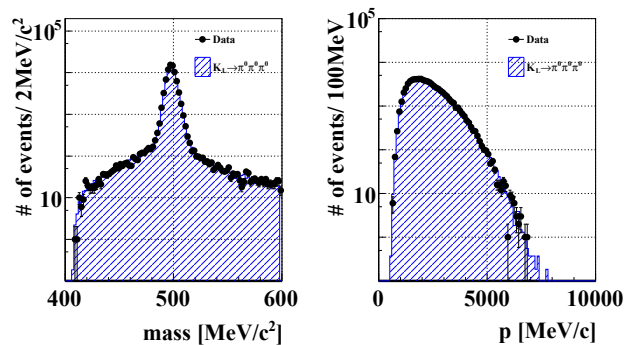


図 19:  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  候補事象について再構成された6 $\gamma$ の不変質量(左)、および、 $K_L$ 運動量(右)の分布。黒の点がデータを、ヒストグラムがシミュレーションの結果を示す。

<sup>9</sup>MR 加速器から遅い取り出しを行うためのセプタム磁石の電極の故障があり、遅い取り出し運転ができなくなった。

<sup>10</sup>事故の詳細は <http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html> を参照されたい。

できていることがわかる。また現状の解析では、上記3つの崩壊モードからそれぞれ独立に求めた  $K_L$  の生成数は数%の範囲内で一致していることも得られており、現在は系統誤差の評価を始めている。

並行して、5月の物理データ解析も精力的に進めている。物理ランのデータ収集は Grossman-Nir limit を超えるという当初の目標には及ばない段階で停止となった。しかし、KEK E391a 実験の上限値を更新できるポテンシャルは十分にある。KOTO 実験では2節に述べたように背景事象を抑えるための様々な工夫を各検出器にしている。その結果、KEK E391a 実験に比べ、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  事象のアクセプタンスを向上できる。しかし、これはカロリメータをはじめ、すべての veto 検出器の性能が目標を達成できるかにかかっている。このため、まずは各検出器の応答をさらに詳細に理解することが重要となる。そこで、現在は各検出器のエネルギーや時間の校正、検出器の動作の安定性の確認を慎重に行っている。そして、何か不安定な箇所がありはしないかと、検出器、データ収集の両面からの洗い出しを行っている。

## 5 まとめと展望

KOTO 実験は物理データを収集する段階までたどり着き、2013年5月の数日のランで KEK E391a 実験を凌駕するデータ量を集められた。物理結果を出すまでのステップはまだ多いが、自分たちで設計し作り上げてきた検出器たちの動作をデータを通して理解し、最大限の実験感度につなげていくことは楽しみでもある。

上記のデータ解析と平行して、崩壊領域を覆うガンマ線検出器を増強するための測定器<sup>11</sup>の製作を行っており、2014年にはその測定器を組込む予定である。

ハドロン実験施設での実験が再開された後は、まず当初の Grossman-Nir Limit を越えるためのデータを取る。その後は、遅い取り出しのビーム強度増強が不可欠で、50 kW, 100 kW, …と上がっていくと期待している。KOTO 実験は毎年データ収集を行い、並行してデータ解析によってバックグラウンドの理解や抑制、アクセプタンスの向上を進め、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の標準理論予測分岐比レベル、 $O(10^{-11})$ 、に至る領域を順次探索していく。

## 参考文献

- [1] J.K. Ahn *et al.* [KEK E391a Collab.], Phys. Rev. D **81**, 072004 (2010).

- [2] A.V. Artamonov *et al.* [BNL 949 Collab.], Phys. Rev. Lett. **101**, 191802 (2008), A. V. Artamonov *et al.* [BNL 949 Collab.], Phys. Rev. D **79**, 092004 (2009).
- [3] Y. Grossman and Y. Nir, Phys. Lett. B **398**, 163 (1997).
- [4] D. Bryman, A.J. Buras, G. Isidori, and L.S. Lit-tenberg, *hep-ph/0505171*, Int. J. Mod. Phys. **A21**, 487 (2006) and references therein.
- [5] M. Blanke *et al.*, JHEP **01**, 066 (2007).
- [6] T. Goto, Y. Okada, and Y. Yamamoto, Phys. Lett. B **670**, 378 (2009).
- [7] W.S. Hou *et al.*, Phys. Rev. D **72**, 115007 (2005).
- [8] A.J. Buras *et al.*, JHEP **09**, 106 (2010).
- [9] 渡辺丈晃, 他, 「 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  実験 (KOTO 実験) 用ビームラインの建設」, 高エネルギーニュース **28-4**, 262 (2010).
- [10] M. Tecchio *et al.*, The Data Acquisition System for the KOTO Detector, Physics Procedia, Volume 37, 2012, pp. 1940–1947.
- [11] M. Bogdan *et al.*, Data Acquisition System for a KL Experiment at J-Parc, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, Naxos, Greece, 15–19 Sep 2008, pp. 483–485.
- [12] M. Bogdan, J. Ma, H. Sanders, Y. Wah, 2007 IEEE NSS-MIC Conference Record, N08-6, 2007, pp. 133–134.
- [13] M. Bogdan, J.F. Genat, Y. Wah, Real Time Conference, RT'09, 16th IEEE-NPSS, 2009, pp. 443–445.

<sup>11</sup>MB の内側に設置するもので、Inner MB と呼んでいる。