

■ 研究紹介

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験 (KEK PS-E391a) の測定器建設

KEK E391a 実験グループ

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

稲垣 隆雄、イム ケ ヨブ、奥野 英城

takao.inagaki@kek.jp, gyylim@post.kek.jp, hideki.okuno@kek.jp

2004年5月20日

1. はじめに

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は、CP を直接破る過程で、分岐比予測の理論的な不定性が小さく(約2%)、小林・益川のクォーク混合行列要素を決める上できわめて重要であり、 K 崩壊で残された最大の実験対象であるといわれている。標準模型で計算される分岐比は 3×10^{-11} で、一方現在までの実験上限値は 5.9×10^{-7} (KTeV[1]) である。このギャップをどうやって埋めるかが、実験家にとっての魅力的で挑戦的な課題となっている。

われわれの E391a 実験では、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比を、まず KEK-PS のビーム強度で実現可能な 3×10^{-10} の感度で測定し、この経験を踏まえて将来の J-PARC では 3×10^{-13} レベルにまで到達することを狙っている。E391a 実験は 2001 年 7 月の PAC で本採択され、2002 年秋のエンジニアリング・ランを経て 2004 年 2 月から本実験 (300 シフト) を開始した。ここでは、その測定器建設の概要について報告する。

2. 測定器の概念設計

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊を、他の主要な K_L^0 崩壊モードや中性子ビームに付随するバックグラウンドから分離して測定することはそう容易ではない。E391a では、次のような基本方針をとることにした[2]。

1. 終状態の π^0 測定には純 CsI 結晶カロリメータを使用し、 2γ のエネルギーと位置を測定する。
2. 終状態に π^0 以外の粒子がまったく放出されていないことを保証するため、 K_L^0 崩壊領域を完全に囲む高感度の γ 線・荷電粒子検出器 (“veto 検出器” と呼ぶ) を置く。また、 K_L^0 崩壊領域の上流部、下流部にはカラー・カウンター、ビーム・アンタイ・カウンターを配置し、穴を最小化する。

3. 終状態に 2γ だけが放出される崩壊モードは、 $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (分岐比 5.69×10^{-4}) で、これは、 2γ の P_t および acoplanarity 角度で区別する。そのために、 K_L^0 ビームは極細 (ペンシル・ビーム、直径は測定器の入り口で 6cm) にする。
4. ビームライン上流での K_L^0 崩壊からの π^0 の混入を防ぐため、上流部にも veto 検出器で囲まれた空間を配置する。
5. 中性子ビームライン中の中性子や γ と物質との相互作用による π^0 生成をなくすため、ビーム領域を高真空 ($\sim 10^{-5}$ Pa) にする。

これらをすべて理想的に実現することは、技術的にも予算的にも困難であるが、できるだけ理想に近づけるように設計したのが以下の測定器である。最大の特徴は、高真空が必要な K_L^0 崩壊領域と検出器領域の間の物質量をできるだけ少なくするため、 K_L^0 崩壊領域を囲む検出器をすべて真空中に配置したことである。約 100 トンのカロリメータと 870 本の光電子増倍管が、直径 3.8m、長さ 8.7m の真空容器に収納された。

3. 全体構造

真空容器、支持構造体を含む測定器の全体構造図を図 1 に示す。これらの構造体の概念設計は KEK で行われ、詳細設計は、2 年間にわたる ISTC (International Science and Technology Center) プロジェクト (#2118) のもとで、ロシアの ENTEK 社 (Moscow) が行った。ISTC プロジェクトは、旧ソ連邦の研究者が軍事目的でなく平和目的の研究に従事できるよう国際的に支援するプログラムで、ENTEK 社は ISTC を通じて LHC 測定器の建設にもかかわっている。E391a 測定器の設計のために ENTEK 社では約 10 名の技術者を用意し、構造体の設計、強度計算、カロリメータ組み立ての具体的提案などをおこなった。測定器の実際の製作は日本の会社で行われたので、標準部品の違い、利用できる技術の違い、設計に対する考え方の違いなど

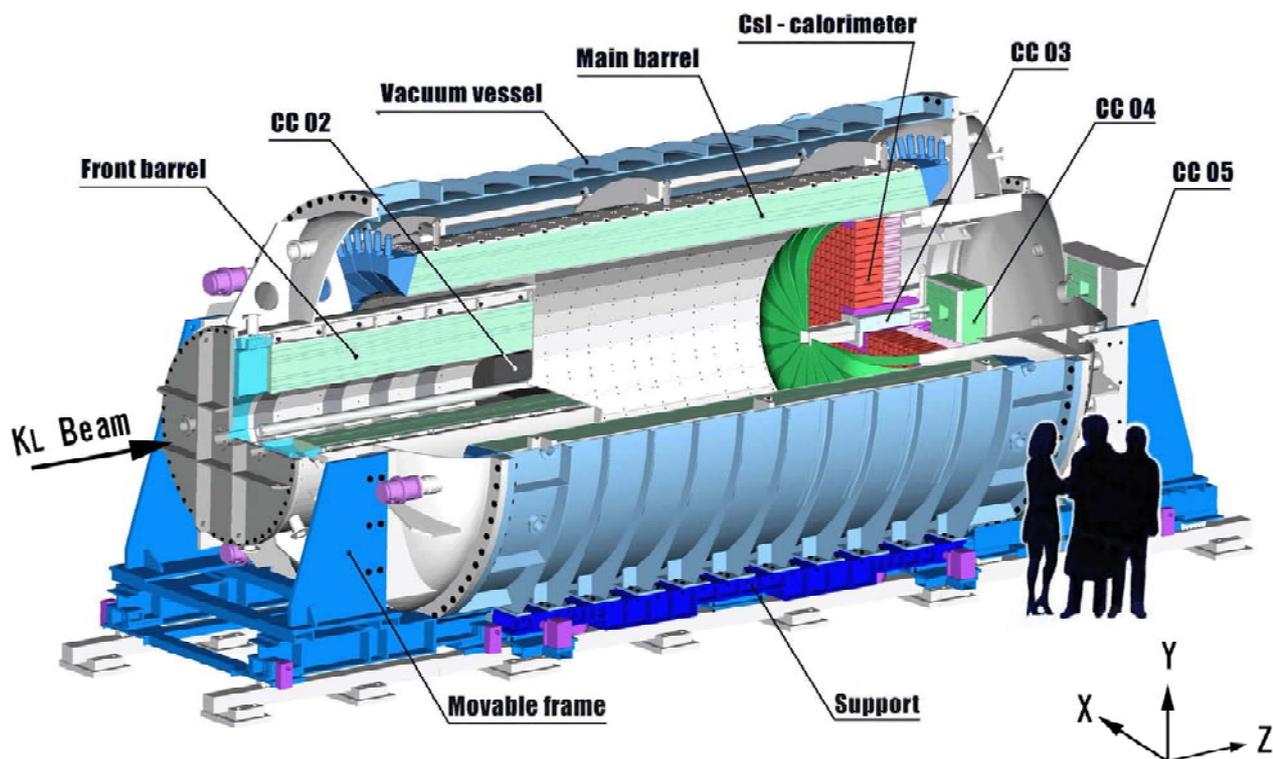


図 1 : E391a 測定器

色々と困難はあったが、KEK 研究者と ENTEK 技術者の相互訪問により、何度も図面を描き替え、お互いの要求を十分理解し、協力し合って完成にこぎつくることができた。

検出器を収納する真空容器は、上流部、中央部、下流部の三つの部分から構成され、直径 3.8m のフランジで接続されている。それぞれの部分は検出器を収納して 2 本のレール上を独立に移動できる構造となっている。したがって、各検出器の真空容器への組み込みは個別に行われ、最後に、レール上で三部分を合体させた。真空容器、支持構造体、検出器を含む全重量は、上流部約 25 トン、中央部約 75 トン、下流部約 18 トンである。真空容器は、予算と組み立てスケジュールの関係で、2001 年度に下流部を、2002 年度に上流部を、2003 年度に中央部を製作した。真空容器は上流部と下流部が SUS 製で、veto カロリメータを収納する中央部は SS 鋼材を使用し、アウトガスを減少させるため内面にエポキシ塗装を施した。各部分に組み込んだ検出器は次の通りである。

上流部

- フロント・バレル (FB、鉛・シンチ積層円筒型カロリメータ、モジュール数 16、PMT 数 32)
- カラー・カウンター CC02 (鉛・シンチ積層シャシユリック型、PMT 数 8)

中央部

- メインバレル (MB、鉛・シンチ積層円筒型カロリメータ、モジュール数 32、PMT 数 128)
- バレル荷電粒子 veto (BCV、シンチ 2 層、モジュール数 32、PMT 数 64)

下流部

- CsI 結晶 (KEK-E162 より 552 個を使用、FNAL-KTeV より 25 個を借用)
- カラー・カウンター CC03 (タングステン・シンチ積層型、PMT 数 8)
- カラー・カウンター CC04 (鉛・シンチ積層型、PMT 数 8)
- 荷電粒子 veto (CV、シンチレータ、PMT 数 36)

真空容器の外側下流には、さらにカラー・カウンター (CC05, CC06, CC07) と、ビーム・アンタイ (BA) が設置され、ビームが通る穴も含めて検出器が完全に K_L^0 崩壊領域を覆うようにしている。

下流部に組み込まれた CsI カロリメータなどの検出器は、2002 年 10 月のエンジニアリング・ランでその性能が徹底的に調べられた[3]。また、その後、真空中での宇宙線による動作テストも行われた。以下に、主要な検出器の構造とその建設について報告する。

4. CsI 結晶カロリメータ（下流部）

4-1 基本構造

図 2 に CsI 結晶カロリメータの配置図を示す。

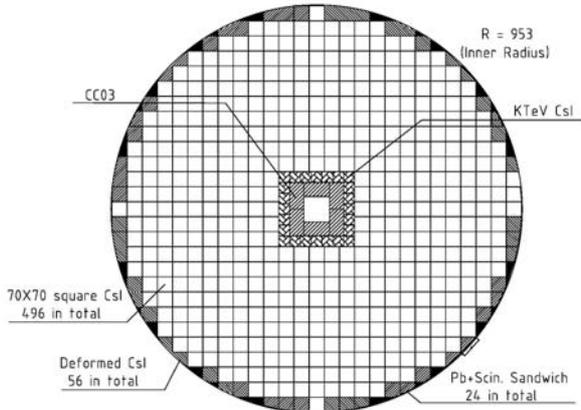


図 2 : CsI 結晶カロリメータの配置図

純 CsI 結晶は、その大部分の 496 個が PMT も含めて E162 実験のリサイクルで、結晶サイズは $70 \times 70 \times 300 \text{mm}^3$ である。円筒周辺部に配置される 56 個は、支持円筒の形状に合うようにコーナーを加工した。中心部に配置された 25 個 ($50 \times 50 \times 500 \text{mm}^3$) は KTeV グループより借用したものである。さらに内側にはタングステン・シンチ積層型検出器 CC03 を置き、また、周辺部の支持円筒とのわずかな隙間にも 24 個の鉛・シンチ積層型検出器を配置し、不感領域をなくした。

本実験ではこれらを真空中で動作させるので、PMT の放電とダイオードの発熱による CsI 結晶温度の時間変化に注意を払った。まず PMT の高圧ダイオードを改造して電流を減らし、発熱量を従前の 1/3 にした。これに伴う高い計数率でのゲイン低下については、あらかじめ K0 実験エリアで問題がないことを確認した。また、各ダイオードからの発熱を吸収し、しかも放電を抑えるため、ダイオードには耐電圧・導熱性接着剤を充填した。抵抗発熱体からの熱は外側につけたアルミ・リングに、リングからは銅網線で CsI カロリメータの背面に配置された冷却水配管に伝達している。

CsI 結晶を下流部に組み込む前に、実際に使用するカロリメータで放電電圧の真空圧力依存性を調べた。図 3 にその結果を示す。

1Pa 以下の真空度では問題がないことを確かめた。また、事前にすべてのモジュールを真空下で宇宙線を使ってテストした。25 モジュールを 5×5 のマトリックスに組み、1 ユニットの測定に 2-3 日を要したが、これらのデータは組み込み後の宇宙線テストの役に立った。

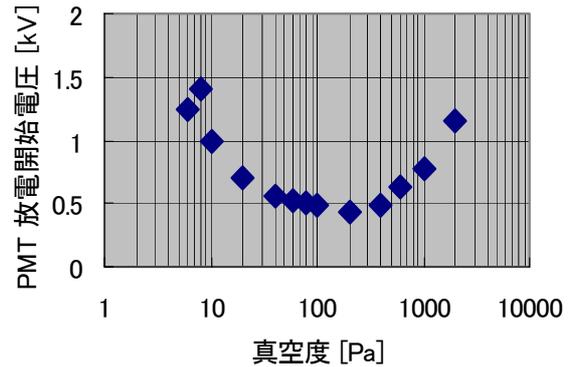


図 3 : 放電電圧の圧力依存性

4-2 下流部への組み込み

（CsI、荷電粒子 veto、CC03、CC04）

下流部の直径 1.7m の SUS 円筒の中への検出器組み込みは、2002 年夏に行われた。その際、モジュールを置くごとに、上と左右から圧力をかけてモジュール間の隙間を最小にしたが、以下のような工夫もした。まず同段に並べる結晶の数+2 個の結晶をランダムに選び、定盤に置き指でなぞって高さの順に並べる。円筒内に設置する時には、端の 2 個（最大と最小）を除外して左から順に並べる。次の段も同様に順序づけたモジュールを今度は右から順に並べる、という方法である。もちろん望遠鏡を使ってモジュール位置のチェックも行った。図 4 に組み立ての様子を示す。

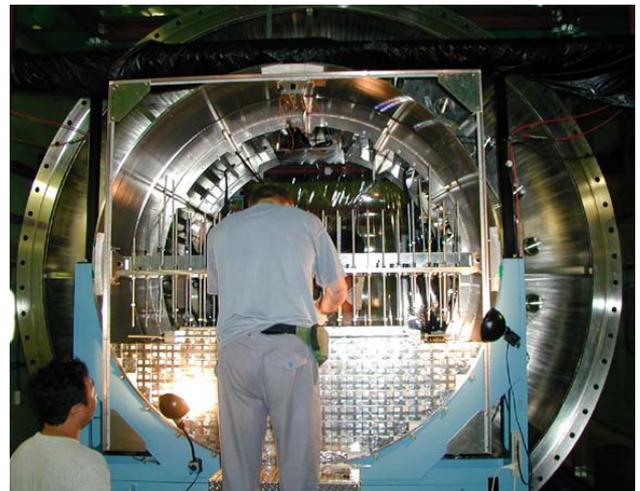


図 4 : 下流部への CsI 組み込み

CC03 は CsI と同時に組み込んだが、荷電粒子 veto は CsI を組み込んだ後に、CC04 は上流部、中流部、下流部の合体を終えてから取り付けた。PMT 冷却用配管は、エンジニアリング・ランの後に取り付け、真空中で冷却テストを行った。

4-3 測定器の較正とエンジニアリング・ラン

E391a では、基本的には上から降ってくる宇宙線ミューオンとビームに付随し水平にシールドを突き抜けてくるミューオンを使って測定器の較正を行った。 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ からの 6γ を使った微調整、ビーム軸上に Al 板を置いて生成する π^0 からの 2γ を使った絶対較正も重要なクロスチェックである。 CsI については現在 3% 以下の精度でエネルギー較正を行なっている。2002 年のエンジニアリング・ランでは、特に実験上重要課題の一つである CsI カロリメータのエネルギー較正を行った。これについては Ref. 4 に詳しく報告している。エンジニアリング・ランで前記の較正方法の有効性が確かめられたので、その他の測定器のエネルギー較正、タイミング較正についても、同じ方法をとっている。

5. 鉛・シンチレータ積層型 photon veto 検出器（上流部、中央部）

5-1 基本構造

Veto 検出器の役割は、終状態に π^0 以外の粒子がまったく放出されていないことを保証することである。そのため veto 検出器は幾何学的に完璧に、かつ γ に対する非常に高い検出効率をもって K_L^0 崩壊領域を囲まなければならない。Veto 検出器の配置を図 5 に示す。上流部に置かれるのがフロント・バレル (FB) で、中央部がメイン・バレル (MB) である。FB は 16 個の台形モジュール、MB は 32 個の台形モジュールから構成されている。それらの台形は図 6 に示すような不等辺台形で、円筒状に組み上げられた後にはモジュール間の隙間がビーム軸上から見えなくなる。

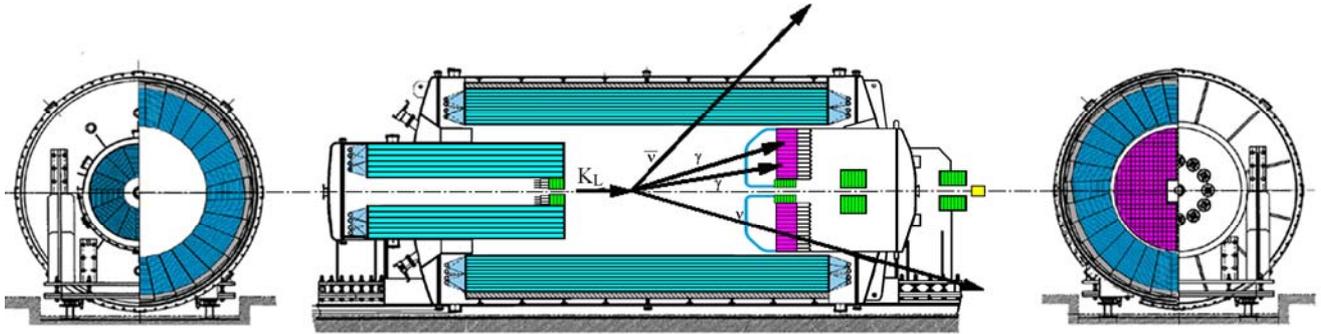


図 5 : Photon veto 検出器の配置

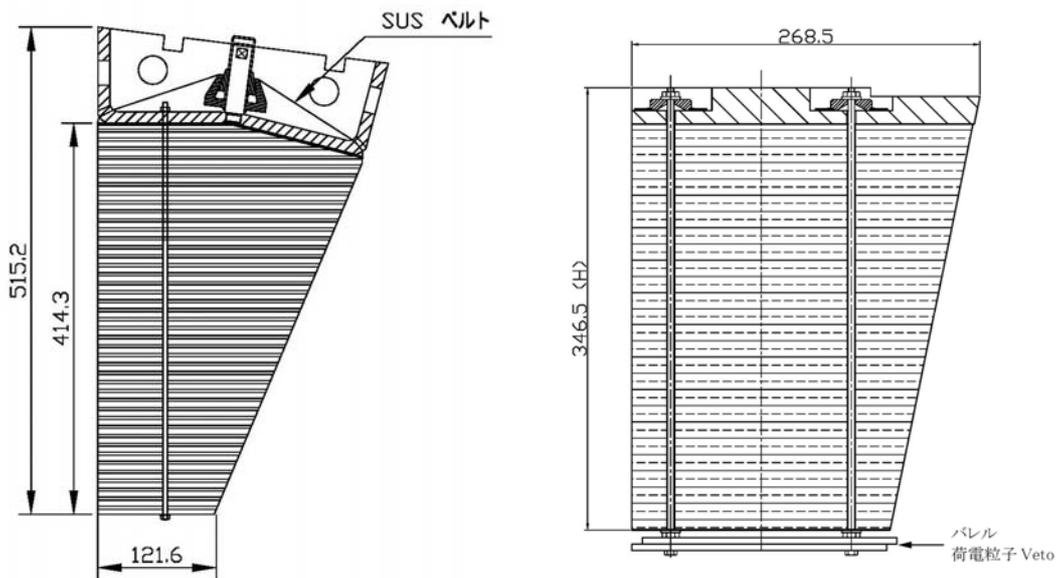


図 6 : 鉛・シンチレータ積層型 photon veto 検出器の断面図

左 : フロント・バレル

右 : メイン・バレル

FBは1.5mm厚の鉛と5mm厚のシンチレータの積層(60層)で、全厚さが $16.5X_0$ 、長さが2.75mである。MBは内側が1mm厚の鉛15層、外側が2mm厚の鉛30層で、全厚さが $14X_0$ 、長さが5.5mである。両モジュールとも、積層鉛とシンチは、最外層に置かれた背板に固定した。FBの背板は12mm厚の鋼板をU字形に曲げたもので、これにSUS薄板ベルト(100 μ m厚)と積層を貫通するスタッド・ボルトで積層を固定した。一方、MBの背板は28.6mm厚のSUS板で、積層を52本のスタッド・ボルト(5mm ϕ)で固定した。各ボルトには約300kgの圧縮力がかかるように板バネを使用し、モジュール前面には約15トンの圧縮力がかかっている。この圧縮力で、モジュールがどの方位に置かれても所定の形状を保つようにしている。

5-2 シンチレータと波長変換ファイバー

長さ5.5m、幅30-40cmのシンチレータを大量に、かつ安価に製作するため押し出し成型法を利用した。また、積層モジュールの機械的強度を上げるため、シンチレータ基材としてMS樹脂を使用した。スチレン・ベースに比較して発光量が20%減るが、強度が増し、機械加工が容易になる。光の読み出しには、クラレの波長変換ファイバー(YS11、1mm ϕ)を使用し、左右両端からPMTで読み出した。このPMTは新しく開発した、波長領域450-600nmに高感度を持ち(extended-green)、プリズム形状のフォトカソード

のタイプで、WLSファイバーでの読み出しで通常のR329に比べて1.8倍の光電子変換効率が得られた[5]。

シンチレータの片面に機械加工で10mm間隔の溝を掘り、溝の中にファイバーを置き、接着剤で固定した。溝加工では、この歯を10mmピッチで多数並べて、一枚のシンチレータを一工程で加工して効率化を図った。接着剤は紫外線硬化タイプで、30分間の紫外線露光で硬化する。これは、ファイバー張りの能率を格段に向上させるもので、MB用約1,500枚のシンチに約4万本のファイバーを張る作業を約8ヶ月で終了させるためには不可欠の方法であった。この接着作業は2003年2月から9月までかかった(図7)。

5-3 積層モジュールの製作

FBとMBの積層構造は類似しているので、まずFBの積層作業で十分な経験を積んでから、約4倍の容積のMBを一週当たり1台のペースで作業を進めた。5.5mの長さのシンチと約1.4mの長さの4枚の鉛板を、光反射用白紙を挟みながら積層する作業には、約10名の作業員を必要とした。これは、傾斜した積層台にシンチと鉛板をスタッド・ボルトで位置決めしつつ交互に重ねていく作業で、ファイバーを張った後の5mm厚の長いシンチを運ぶには4名を必要とした。鉛版を運ぶ作業には力持ちが必要であった。グループのメンバーがシフトを組み、この作業を行った(図8)。



図7：ファイバーの接着作業風景

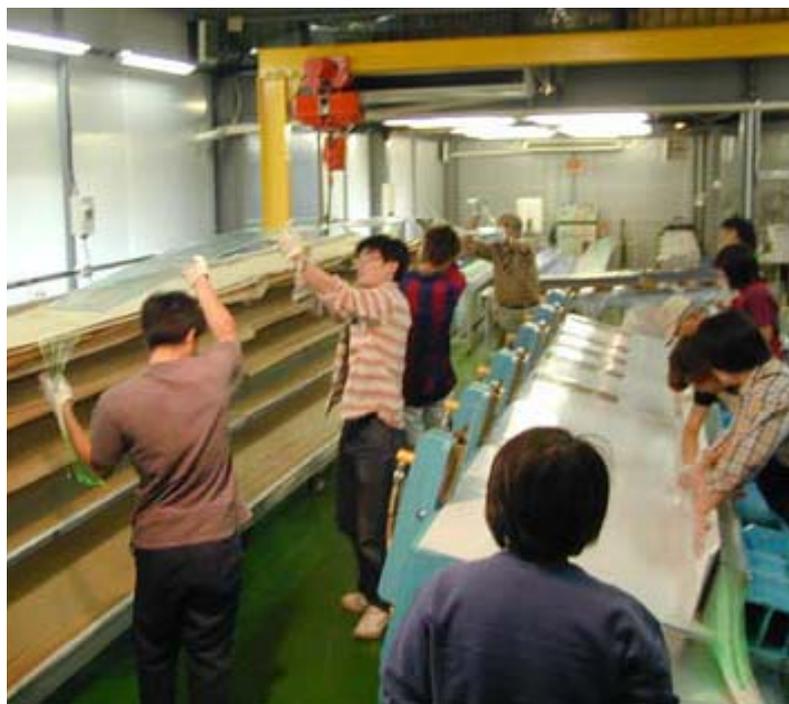


図8：Photon veto 検出器の積層風景

積層作業が終わると、最後に背板を置き、52本のボルトを通し、プレスで積層を圧縮した。圧力は全体で15トンである。最低12時間圧力をかけ、鉛板が平らになり収縮が止まり安定した状態で、板バネでボルトに各300kgの圧力をかけ、プレスを開放した。1台のモジュールの積層作業に、積層台からのモジュール取り外し、モジュール寸法の測定も含めて2日を要した。

5-4 宇宙線によるモジュール・テスト

モジュールの積層が終了すると、PMT取り付けのためファイバーの端部を処理した。MBでは内側15層と外側30層を分けて、それぞれ両端から読み出している。ファイバーの本数は内側350本、外側700本である。ファイバー束をプラスチック・リングに通し、接着剤で固定した後、ダイヤモンド・カッターでリングごと切断した。切断面は手作業で丁寧に研磨した。PMTを取り付け、宇宙線を使ってモジュールの基本性能を測定した。図9に長手方向の光量の変化を示す。片方のPMTで読み出した場合、両端からの光量の比は約3倍である。また、中央部を通る粒子に対して、片方のPMTで得られる光電子数は平均12個/MeVであった。また、両端からの読み出しによって得られる時間分解能は、宇宙線に対し0.5–0.7nsであった。これらの基本性能は、veto検出器として満足のできるものである。

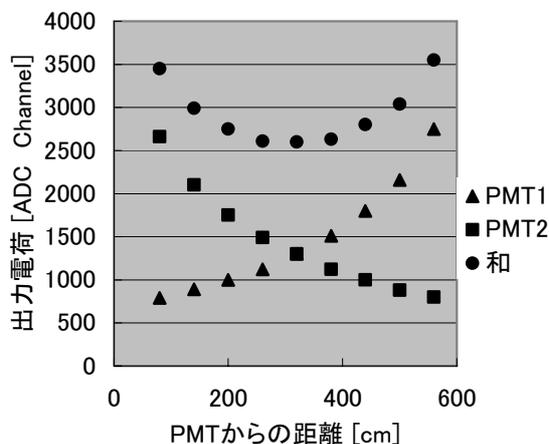


図9：MBの出力の長手方向位置依存性

6. 検出器の真空容器への組み込み

6-1 円筒形状をつくる二つの設計概念

FBとMBでは、実はどうやって円筒形状をつくるかの機械的設計概念が異なっている。FBでは、鉛・シンチ積層を背板に固定しているのが5枚のSUSベルトと6本のM5ボルトで、全圧縮力が1トン程度である。この背板への固

定力は、モジュールがいろいろな向きに置かれたとき、積層形状を長期間保持するには十分ではない。したがって、モジュール間に隙間が生じないように、隣り合うモジュールを互いに接触させながら組み立てていく。全モジュールが円筒状に組み上がった後に、少し幅狭につくられた背板を相互にボルトで締め、外側からのフープ張力で円筒形状を形成することになる。こうするとモジュール間の隙間なしに円筒の組み上げが可能になる。

一方、MBにはバネつき高張力鋼のボルト52本が挿入され、メートル当たり約3トンの一定の圧縮力が加えられている。したがって、どんな向きに回転しても積層間の摩擦力によりその形状は崩れない。ただし、積層の圧縮力が一定なので、モジュールの厚み寸法には±2mm程度のばらつきがでる。これは、主に鉛の厚さのばらつきに起因する。MBを円筒状に組み上げるには、3個の鋼製支持リングを用意し、各モジュールをリングに固定する方式をとった。この方式は力学的計算ができる確実な方法であるが、モジュール間に1mm程度のクリアランス、すなわち隙間を設ける必要がある。

今回は、いずれの方法もうまくいったので、二つの方法の経験を積んだことになる。いずれの方式をとるかは、円筒形状の大きさ、重量などを勘案して決めることになる。これらの経験は次の機会に生かすことができる。

6-2 上流部 (FB, CC02)

上流部には円筒状FBとCC02を組み込む。図10に組立模式図を示す。

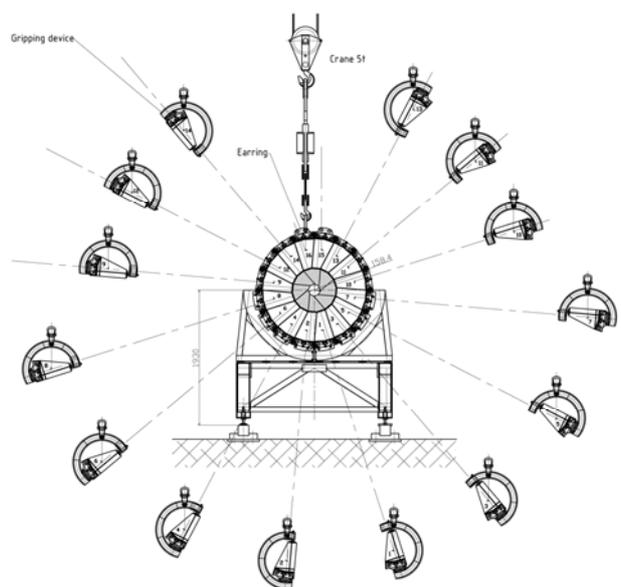


図10：上流部フロント・バレルの組み立て要領

支持架台上で、16 個の FB 台形モジュールを下の方から組み込んでいった。その際、モジュールの内面が隣のモジュールの内面と一致するように位置決めをした。各モジュールの重量は 850kg あるので、クレーンを用い、モジュールの角度を自由に変えられる回転吊り具を使用した。モジュールは外周にある U 型背板を相互にボルト締めすることにより接続された。下半分が接続された状態で CC02 を設置し、その後上半分を積み上げた。最後のモジュールには両側に 5mm 程度の隙間が生じた。その後、外周部背板を締め付けると、モジュール間および CC02 との隙間は埋まった。円筒としての剛性も保たれ、いわゆるローマン・アーチ構造が完璧に実現された。上流部支持円筒（内径 1720mm、肉厚 20mm）の中に FB を滑り込ませるためには、下半分のモジュール背板に 19mm 肉厚の鋼板を溶接し、これを滑らせて引き入れた。円筒への組み上げに 1 週間、円筒引き込みに 2 日間を要した。図 11 はモジュール組み込みの様子を示す。

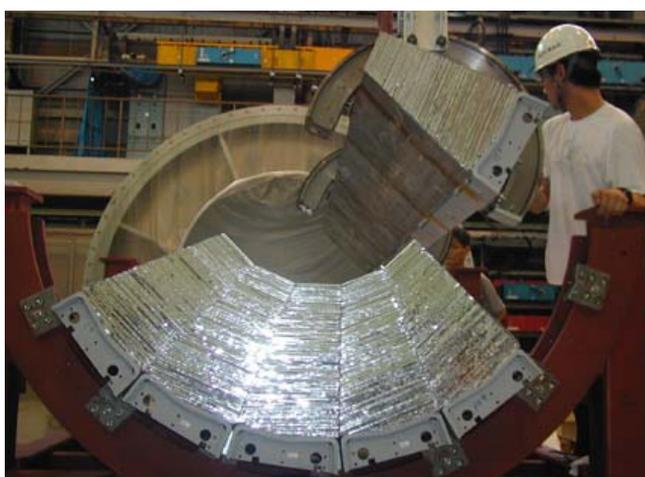


図 11：上流部バレルの組みあげ風景

検出器の組み込みが終了した後、PMT の取り付けを行い、真空用カバーをして、宇宙線により真空中での検出器の動作テストを行った。

6-3 中央部（MB、バレル荷電粒子 veto、真空分離膜）

中央部の 32 個の MB モジュールは、真空容器内に設置された 3 個の支持リングに、M36 のボルトで固定した。図 12 に中央部のメイン・バレル組み立て要領を示す。

組み立て後の中央部重量は 75 トンを超え、天井クレーンで移動させることは出来ないため、K0 エリアのレール上で組み立てた。まず支持リングを装着した真空容器をレール上に設置し、モジュール挿入装置を図 13 のように設置した。

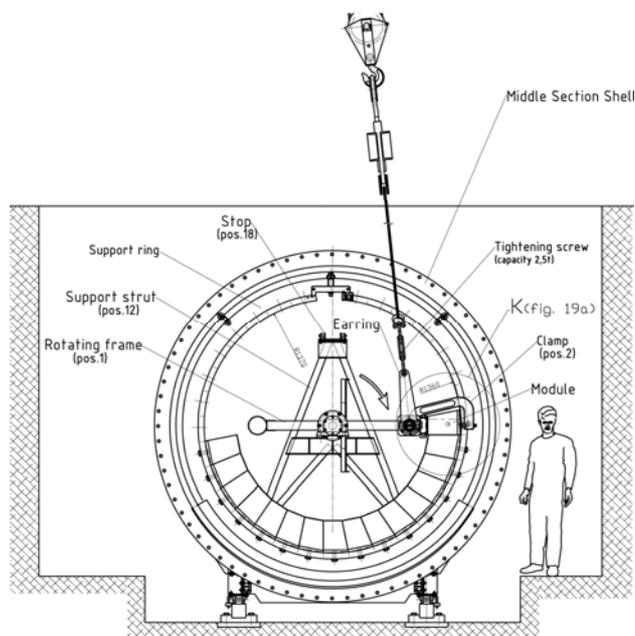


図 12：中央部メイン・バレル組み立て要領



図 13：中央部にメイン・バレルを組み込む風景

モジュール一個の重量は 1.5 トンあるので、これを任意の円周位置に設置していくのは容易ではない。モジュールを真空容器円筒内に設置された回転可能な支持フレームに滑り込ませ、円筒内でクレーンの助けを借りて図 12 のように回転させ、所定の位置に固定した。このモジュール挿入に準備も含めて約 1 ヶ月を要した。作業初期の段階で、モジュール回転時に、モジュールを両端で吊るための鋼ビームが曲がってモジュールが急回転し、作業員が回転部に触れて大腿に切り傷を負った。この事故では、関係部門の皆様が大変なご迷惑とご心配をおかけした。原因は、回転に対する I ビームの剛性不足という初歩的な設計ミスであった。これを改善し、さらに回転時の安全性を確保するためチェーンブロックで回転を制御するようにして、以後スムーズに積み上げることができた。最後のモジュールがうま

く挿入できるか不安であったが、モジュールの寸法精度がよく、所定の位置に問題なく収めることができた。

MB 組み込み後、32 個のバレル荷電粒子 veto (BCV) を内側から設置し、読み出しファイバーに PMT を取り付けた。この作業は 2003 年暮れから正月返上で続けられた。

6-4 三構造体の合体

それぞれの検出器を収納した上流部、中央部、下流部の構造体をレール上で合体する作業を 1 月 19 日より行った。各部はレール上でチルトタンクにより Z 方向に移動できる。また、三つの真空フランジをびたりと連結するには、各部の姿勢を制御する必要があり、そのため、水平、垂直の位置を調整する機構がついている。レールは精度よく水平に置かれているので、合体させる両構造体の姿勢を正しくしておき、軽い方を Z 方向に移動して合体させた。

まず、中央部を最上流に移動・固定し、下流部を仮置き場所から天井クレーンでレール上に運び込み、姿勢を整えて滑り込ませた (図 14)。

中央部内径と下流部外径の設計クリアランスが 20mm で、しかも両面が柔らかいプラスチック・シンチレータであるので、両者が接触しないよう常に CCD カメラで境界を監視しながら挿入した。次に、結合した中央部・下流部をレール上で最下流に移動し、上流部を天井クレーンでレール上に運び込み、同じように連結した。連結された測定器 (総重量約 120 トン) を K0 エリア最上流の所定の位置に移動し固定した。この合体には 4 日間を要した。

7. 真空システム

7-1 高真空・低真空分離シート

K_L^0 崩壊領域を 10^{-5} Pa 以下の高真空に保つと同時に、検出器前の物質量を可能な限り少なくするため、 K_L^0 崩壊領域を囲むすべての検出器を真空中に置き、アウトガスの大きい検出器領域と K_L^0 崩壊領域を薄い膜で分離して差動排気を行った。空気の透過が少なく強靱な膜材を探した結果、飛行船やヘリウム・バッグのメーカーとして経験豊富なスカイピア社の積層膜を選択した。これは、レトルト食品の包装などに多量に使用されているクラレのアルミナイズド EVAL フィルム ($15\mu\text{m}$) を使用し、強度をもたせるためにポリウレタン・フィルム ($30\mu\text{m}$) を貼り付け、さらにその両面にポリエチレン・フィルム ($80\mu\text{m}$) 層を積ねたもので、全体の厚さは $205\mu\text{m}$ である。外側のポリエチレンは熱着が可能なので加工性に優れている。

図 15 に、検出器が入る領域 1 と K_L^0 が崩壊する領域 2 を分離する膜の設置作業の様子を示す。

領域 1 と 2 の容積はそれぞれ 100m^3 と 10m^3 である。また膜の表面積は 40m^2 である。大気圧差があると膜には 400 トンの力がかかるが、領域 1 の圧力が 1Pa のときには、膜全体にかかる力は 4kg になる。したがって、膜を袋の形につくり、円筒内側から薄いアルミパイプのリングで 4 ヶ所支えることにより円筒形状を保持できる。ただし、真空度が定常状態になるまでに領域 1 と領域 2 の圧力にアンバラン

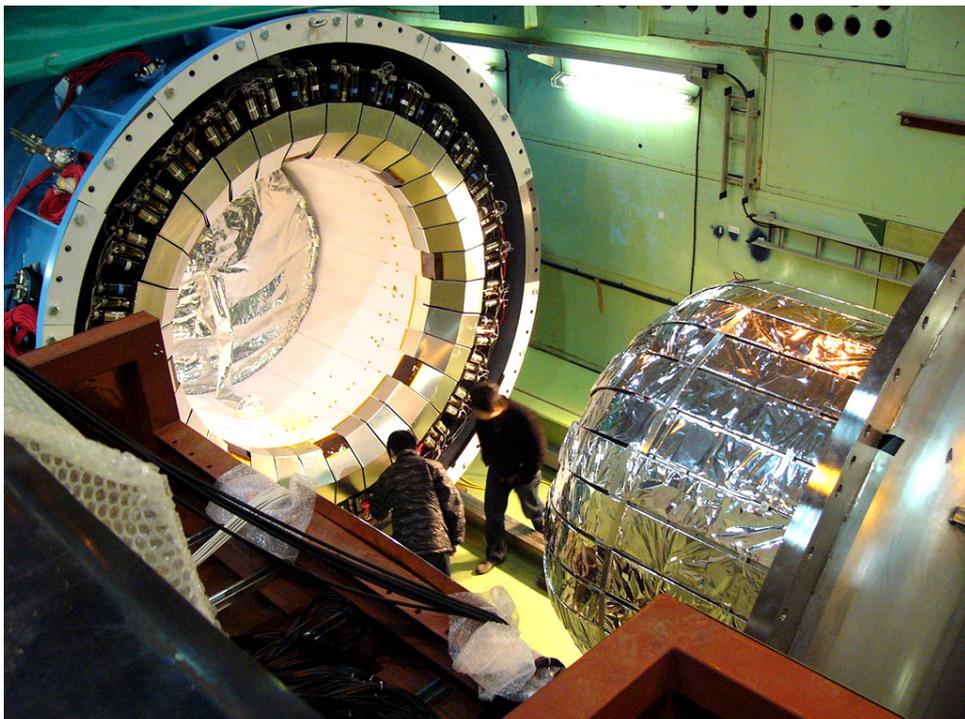


図 14：中央部と下流部の合体風景



図 15：真空分離膜の設置

スが生じると、過大な圧力が膜にかかり、膜を破損する危険がある。領域 1 に組み込んだ CCD カメラで膜の動きをモニターしながらゆっくりと真空引きを行った。

7-2 真空排気システム

図 16 に真空排気システムの構成を示す。

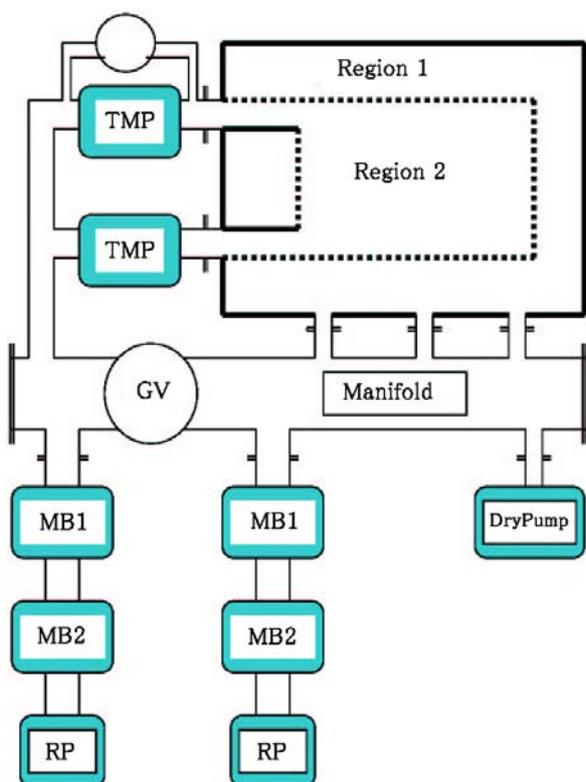


図 16：真空排気システムの模式図

到達真空度は、排気する真空領域のアウトガス量と排気ポンプの能力の比で決まる。領域 1 には鉛・シンチ積層カ

ロリメータが大量に設置されているので多量のアウトガスが予測される。ただし、要求される真空度は 1Pa 以下である。一方、領域 2 のアウトガスは、膜表面からのみであるが、 10^{-5} Pa の真空度が要求される。したがって本システムでは、領域 1 を排気するのに 2 台のメカニカル・ブースター MB (各 $100\text{m}^3/\text{h}$) を用意し、領域 2 を排気するのに 4 台のターボ分子ポンプ TMP (各 800l/s) を用意した。TMP の背圧側および TMP のバイパスは、全長 9m のマニフォールドを介して外側真空 (領域 1) につながっている。

7-3 到達真空度

最初に、真空容器内の水分を減少させるため、 50°C に暖めた乾燥空気を毎分 150l の速度で 24 時間流した。その後、ロータリーポンプで粗排気を始め、kPa に到達した時点で MB を作動させた。10Pa で TMP を作動させ、バイパスを閉じた。立ち上げ初期には、新しく製作した配管のリーク、フィード・スルーのリーク、MB の故障などのトラブルに見舞われたが、丹念なリークチェックや補修の結果、安定状態を早期に実現できた。5 月 7 日時点での到達真空度は、領域 1：0.1Pa 以下、領域 2： 1.2×10^{-5} Pa である。

8. 測定器動作状況

2 月 17 日に東カウンターホールへの遅い取り出しビームの供給が始まり、突き抜けミュオンによる測定器較正とトリガーの調整を行った。その後の通常の物理ランでは、ヒットした CsI クラスターの数 N が 2 以上の条件でトリガーしている。このトリガー条件で測定される $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ ($\text{Br}=0.21$) をモニターとして用いている。図 17 は 6γ イベントのオンライン・ディスプレイである。

6γ の invariant mass 分布は K_L^0 mass にピークを示し、その幅は 6MeV である。また、重心法によって K_L^0 崩壊点の XY 平面での分布、Z 軸での分布も求められるので、これらを使って、ビーム軸と CsI 検出器の軸が一致していることを常時モニターしている。 K_L^0 生成標的に入射する陽子の数が $2.3 \times 10^{12}/\text{spill}$ のとき、オンライン・モニターで再構成される $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 崩壊の数は約 35 個/spill である。

オフラインでの解析も進んでいる。 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ (分岐比 0.21)、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ (分岐比 9×10^{-4}) の preliminary な invariant mass 分布を図 18 に示す。それぞれ左側の分布は GEANT で発生させたモンテカルロ・イベントを解析したものである。

このペースでデータを取り続けると、6 月末までに目標の 3×10^{-10} 近くの感度が得られる。久しぶりの遅い取り出しビームの実験ということで加速器やビームチャネルのトラブルもあったが、おおむね順調なランを続けている。

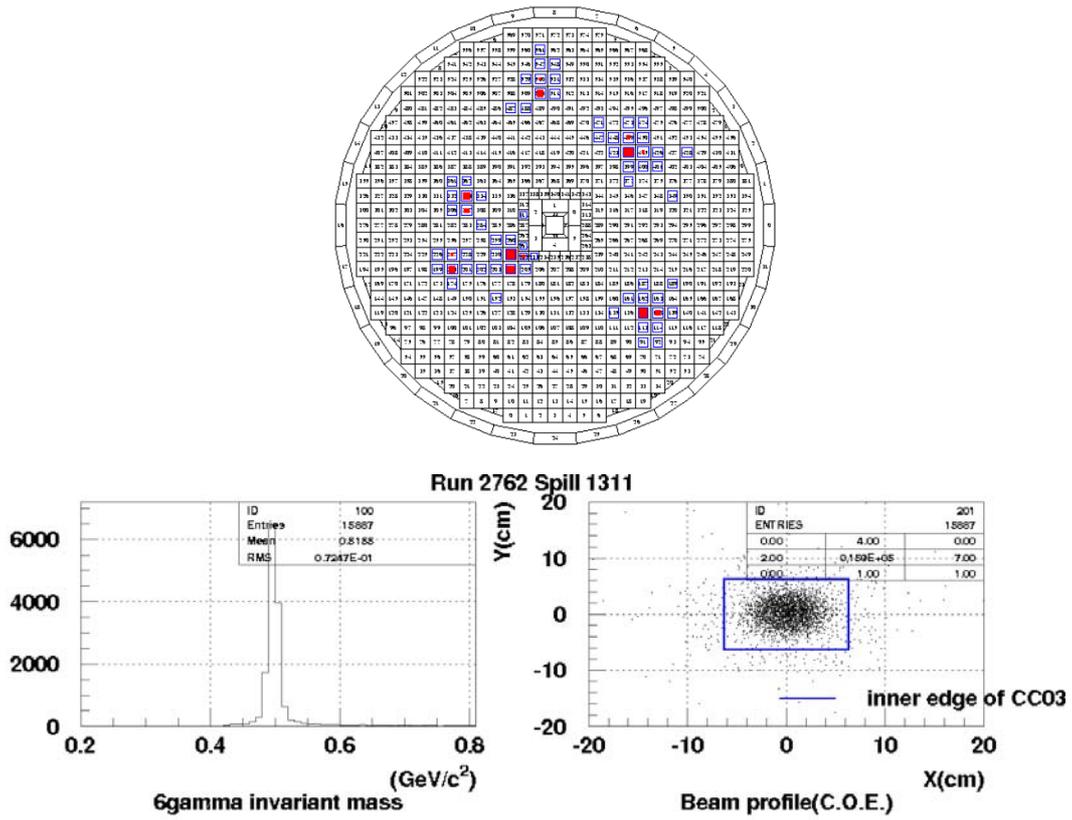


図 17: 6 γ オンライン・イベント・ディスプレイ 上: イベント 下左: Invariant mass 下右: 崩壊点の分布

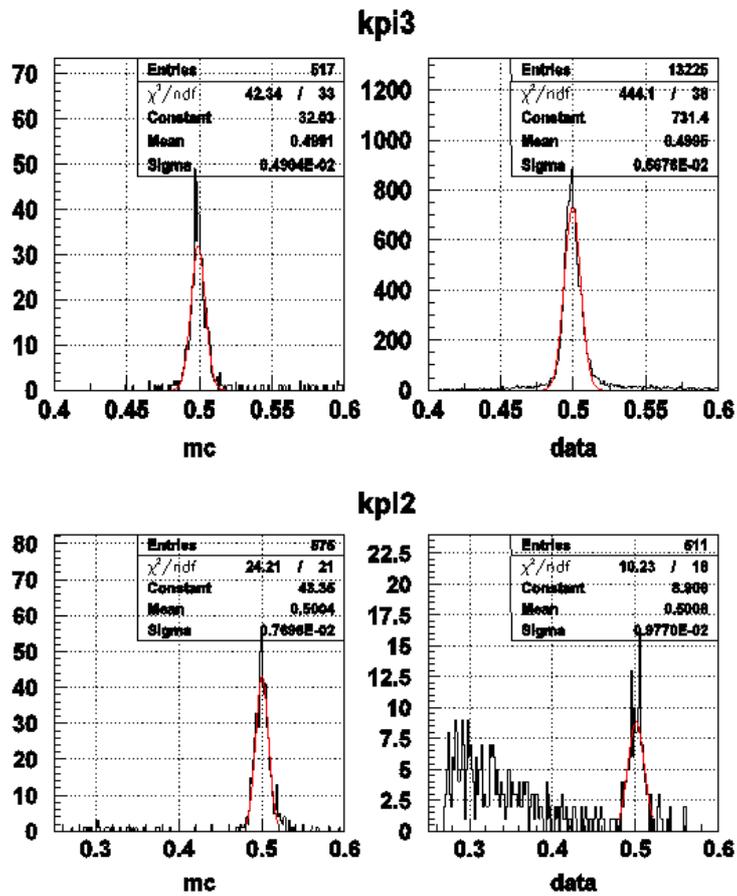


図 18: 再構成されたイベント 上: $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 下: $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$

おわりに

E391a 測定器は、2001 年 7 月の PS-PAC での承認後、約三年半という短期間で建設された。重量 100 トンを超え、光電子増倍管数 1,000 本のカロリメータを中心とする検出器を真空容器の中に収納し、一個の検出器の落ちこぼれもなく、すべてを安定に動作させる作業には多くの困難、試行錯誤を伴った。実験グループのメンバーの努力と、KEK 内外の多くの方々の協力により、予定どおり完成させることができた。ここにあらためて深く感謝したい。

References

1. Alavi-Harati, A., *et al.*, Phys. Rev. **D61** 072006(2000).
2. Inagaki, T., *et al.*, *Measurement of the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$* , Proposal of an experiment at the KEK 12 GeV proton synchrotron, KEK Internal **96-13**, Nov. 1996.
3. 稲垣隆雄、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 実験 (KEK E391a) の現状 エンジニアリング・ラン速報、高エネルギーニュース **21-3** (2003).
4. Itaya, A., *et al.*, NIM **A522** (2004) pp. 477-486.