

---

## Chapter 2

# KOTO Experiment

---

### 2.1 Identification of Signal

KOTO 실험은  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 를 검출할 때  $\pi^0$ 로부터의 2개의 광자를 검출하고 동시에 검출한 2개의 광자 외에 아무것도 없음을 확인한다.  $\pi^0$ 의 Dalitz decay의 경우 붕괴갈래비가 1.125%로 작기 때문에  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 의 검출에 고려하지 않는다. 그런데 중성 케이온의 붕괴 중  $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ 가 존재하여  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 의 검출조건을 만족한다. KOTO 실험은 정렬된 빔을 사용하여 검출기로 입사하는 중성 케이온의 직각방향의 운동량(Transverse Momentum)이 작기( $\sim 10\text{MeV}$ )때문에 2개 광자의 접선방향의 운동량의 합을 고려한다.  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 의 경우 두 개의 중성미자(Neutrino)가 직각방향의 운동량을 가지고 있다. 두 개의 중성미자가 가지는 직각방향의 운동량만큼  $\pi^0$ 도 직각방향의 운동량을 반대방향으로 가질 것이다. 한편  $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ 의 두 개의 광자는 원래 중성 케이온의 직각방향의 운동량을 그대로 보존한다. 이를 고려하여 두 개의 붕괴모드를 두 광자의 직각방향의 운동량으로 구별

할 수 있다. 한편 두 개의 광자 외에 아무것도 없음을 확인하기 위하여 중성 케이온의 붕괴지점 주변을 감싸는 배제 검출기들을 설치하였다. 중성미자를 무시하고 두 개의 광자 이외에 다른 입자가 생성되었을 때 배제 검출기를 이용하여 해당 입자를 찾아낸다.

### 2.1.1 $\pi^0$ Reconstruction

두 개의 광자가  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 에서 생성됨을 확인하기 위하여  $\pi^0$  재구성을 한다.  $\pi^0$  재구성을 하기 위하여 두 개의 광자의 에너지와 검출기의 표면에서의 입사위치를 측정한다. 두 개의 광자의 정확한 출발지점을 모르기 때문에  $\pi^0$ 의 구개각도(Opening Angle)을 알 수 없다. 구개각도를 계산하기 위하여 두 개 광자가  $\pi^0$ 에서 생성됨을 가정하여 중성 파이온의 정지질량을 이용한다. 중성 파이온의 정지질량을 이용하여 계산되는 구개각도는 다음과 같다(Fig2.1).

$$\begin{aligned} m_{\pi^0}^2 &= (e_1 + e_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\ &= 2e_1e_2(1 - \cos\theta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

중성 케이온 빔의 폭이 매우 얇기 때문에( $\pm \sim 5\text{cm}$ ) 두 광자의 출발지점의  $x, y$  방향을 0이라고 가정한다. 가정을 이용하여 광자의  $z$  출발지점만을 계산할 수 있게된다. 가정들을 이용하여 재구성된  $\pi^0$ 의 접선방향의 운동량과  $z$  출발지점을 이용하여  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  사건을 선택한다(Fig2.2).

### 2.1.2 Background

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  사건을 관찰하기 위하여 KOTO 검출기에 오직 두 개의 광자만이 있을것을 요구하기 때문에 실제  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  사건이 아니어도 다른 원인에 의해 배경사상이 생길 수 있다. 배경사상의 원인은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 배경사상은 중성 케이온의 여러 가지 붕괴모드이다. 두 번째 배경사상의 원인은 중성자와 검출기의 반응이다.

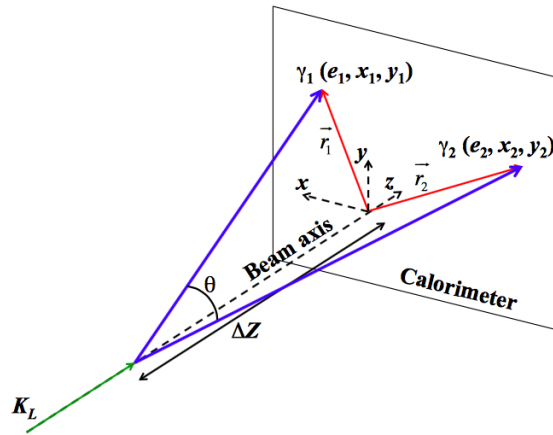


Figure 2.1: Reconstruction of Pi0.

중성 케이온의 여러 가지 붕괴모드로부터 배경사상이 생성될 수 있다. 배경사상이 생성되는 이유는 검출기 특성의 비능률(Inefficiency)때문에 여분의 입자를 발견하지 못하거나, 여분의 입자가 검출기가 아닌 물질과 반응하여 사라져버리기 때문이다. 대표적으로  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  사건의 경우 두 개의 중성 파이온으로부터 네 개의 광자가 나오게 되는데 두 개의 광자를 검출기가 검출하지 못하여 나머지 두 개의 광자만이 남게 되어 배경사상을 유발한다(Fig2.3). 다음으로  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  사건의 경우 전하를 가진 파이온( $\pi^+, \pi^-$ )이 KOTO 검출기 하류의 빔 파이프와 반응하여 사라져버려서 두 개의 광자만을 검출하게 된다(Fig2.4). 중성자는 두 가지 방법으로 배경사상을 유발할 수 있다. 첫 번째 방법은 중성자의  $\pi^0, \eta$  생성이다. 중성자가 KOTO 검출기와 반응하여  $\pi^0$ 나  $\eta$ 를 생성하여 생성된 입자가 검출되는 경우이다. 이 때 주로 검출된 두 개의 광자는 높은 접선방향의 운동량( $\sim 150\text{MeV}/c$ )을 가지게 된다. 이러한 반응은 KOTO 검출기 중 NCC에서 가장 주요하게 발생하고 있다(Fig2.5). 두 번째는 중성자의 CsI 열량계와의 반응이다. 중성자가 CsI 열량계와 반응할 때 에너지가 큰 딸입자를 생성하여 해당 딸입자가 중성자의 입사위치와 다른 곳에서 다시 반응을 일으켜 마

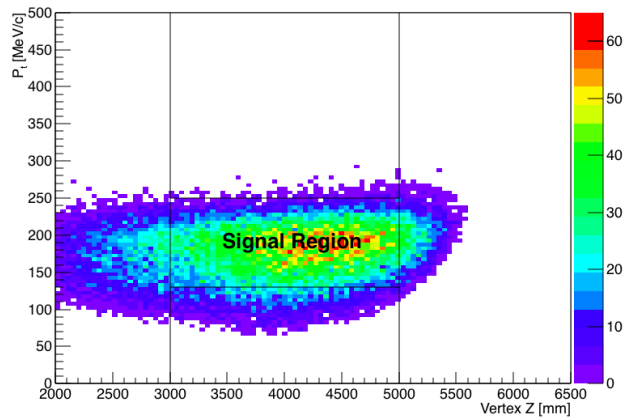


Figure 2.2: Distribution of Vertex Z versus Transverse momentum of reconstructed  $\pi^0$  from  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decays in GEANT4 M.C..

치 두 개의 광자가 입사한 것처럼 보이게 한다(Fig2.6). 이러한 사건을 이해하기 위하여 중성 케이온의 붕괴지점에 알루미늄 표적을 설치(2785mm)하여 중성자 생성 데이터를 취득한다.

## 2.2 Experimental Apparatus

### 2.2.1 J-PARC Accelerator

J-PARC 연구소는 LINAC(Linear Accelerator), RCS(Rapid Cycling Synchrotron) 그리고 MR(Main Ring)으로 구성되어 30 GeV 에너지의 세기가 강한 양성자 빔을 제공한다(Fig2.7). LINAC에서  $H^-$ 를 가속한  $H^-$ 를  $H^+$ 로 변환한다. 변환된  $H^+$ 는 RCS에서 3 GeV 까지 가속된다. 가속된  $H^+$ 는 MR으로 입사하여 MR에서 30 GeV까지 가속된다.



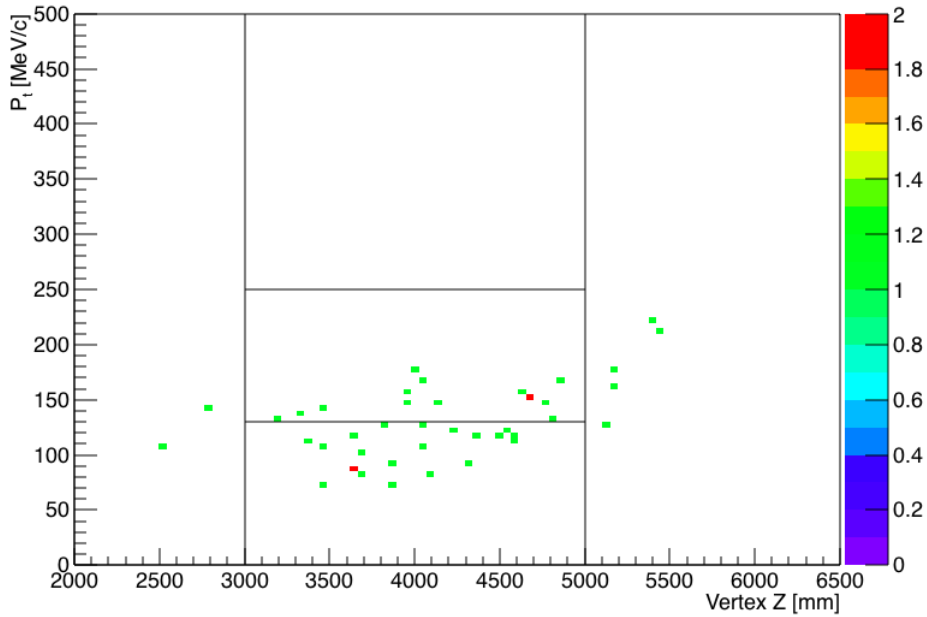


Figure 2.3: Distribution of  $P_t$  versus VertexZ from M.C. generation of  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  events. Normalized background number is 0.02. Missing two gammas induced background.

### 2.2.2 Hadron Beam Facility(HBF)

충분히 가속된 양성자는 일정한 주기를 가지고 HBF로 일정한 세기로 입사한다(Slow Extraction). 입사하는 시간은 약 2초이며 양성자가 다시 가속되는 시간은 4초이다. 양성자 빔은 총 6초의 주기를 가지고 일정한 세기의 양성자를 제공한다. 이러한 주기를 Spill이라고 표현한다. 양성자의 세기는 POT(Proton On Target)으로 표현할 수 있는데 2015년 10월의 경우 한 주기의 POT의 크기는 약  $\sim 10^{13}$ 이다. 가속된 양성자들은 HBF에 도착하여 "T1 Target" 표적과 일부 반응한다. T1 Target은 HBF의 상류에 위치하여 양성자와 표적의 반응으로 여러 가지의 딸입자들이 생성한다. 상류에서 생성된 딸입자들은 각 빔 라인으로 진행한다. 빔 라인 중 KOTO 실험은 KL 빔 라인에 위치한다. KL 빔라인은 양성자의 입사방향과 16도의 각도를 이룬

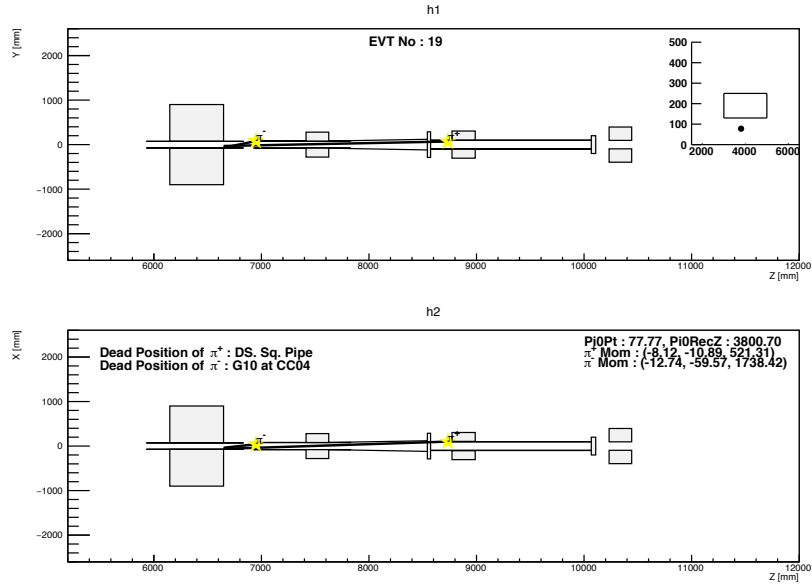


Figure 2.4: Event display about how backgrounds come from  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  decay. Figures show the dead points of charged pions. Because charged pions are missing at beam pipe materials, only two gammas are detected.

다(Fig2.8). 이는 양성자와 표적의 반응으로부터 생성된 중성자와 중성 케 이온의 각도에 따른 갯수를 고려한 것이다. KL 빔라인에는 광자를 흡수하 는 정렬블록과 하전입자를 걸러내는 전자석이 설치되어 있다(Fig2.10).

### 2.2.3 KOTO Detector

KOTO 검출기는 광자의 에너지와 위치를 관찰하기 위한 CsI 열량계와 중성 케 이온의 붕괴지점을 감싸고 있는 배제 검출기들로 구성되어 있다. 배제 검출기의 경우 광자를 배제하기 위한 검출기와 하전입자를 배제하 기 위한 검출기가 있다. 광자를 배제하기 위한 검출기는 NCC, CC03, CC04, CC05, CC06, OEV, FBAR, BHPV, BHGC 가 있고 하전입자를 배제하기 위한 검 출기는 CV, BCV, BPCV, LCV, newBHCV가 있다.

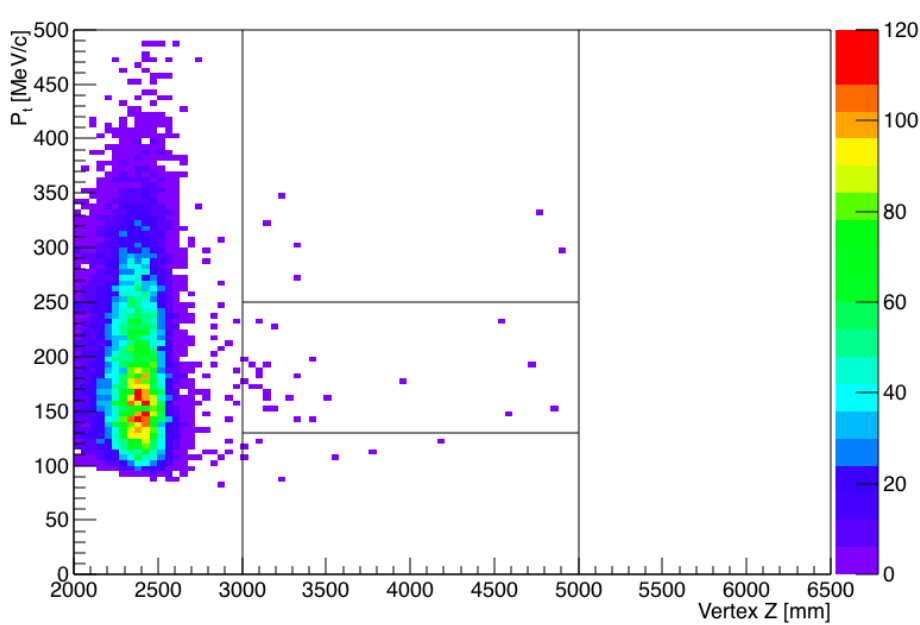


Figure 2.5: Distribution of  $P_t$  versus VertexZ from M.C. generation of  $\pi^0$  production from neutron. Neutrons are injected to NCC and  $\pi^0$ s are generated at NCC. Many backgrounds which is outside signal box are made.

### CsI Calorimeter

KOTO 실험은 도핑되지 않는(Undoped) CsI 열량계를 광자의 에너지와 위치의 검출을 위하여 사용한다. CsI 열량계의 모양은 두 가지가 있다. CsI 열량계 중 큰 것은 단면적이  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 이다. 작은 CsI 열량계의 단면적은  $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 이다. 두께는 모두 500 mm이다. 이 두께는 27 방사길이(Radiation Length,  $X_0$ )와 동일하다. 작은 CsI 열량계는 2240 개이고 큰 CsI 열량계는 476 개이다. 각 CsI 열량계는 953 mm 반지름의 원통형 스테인리스 지지대 안에 쌓여있다. CsI 결정은 원래 KTeV 실험에서 사용하던 것이다. 광전자 증배관과 CsI 결정 사이의 공기 틈을 없애기 위하여 실리콘 재질의 투명한 고무(Silicon Cookie)를 삽입하였다. 또한 CsI 결정으로부터 UV빛을 차단하

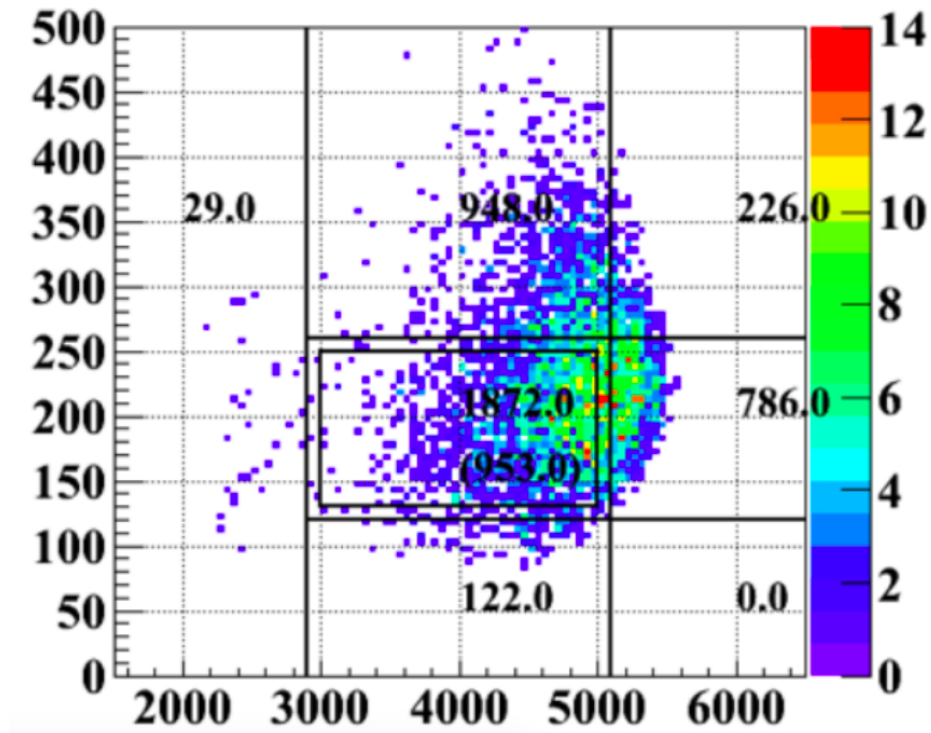


Figure 2.6: Distribution of  $P_t$  versus VertexZ from M.C. generation of neutron projection to CsI calorimeter. Many backgrounds which is inside signal box are made.

기 위해 UV filter를 삽입하였다. KOTO 실험은 진공상태에서 이루어지기 때문에 CsI 열량계의 광전자증배관이 낮은 전압에서 작동할 수 있도록 KOTO 실험에서 자체적으로 전압 공급 시스템을 개발하였다. 한편, 데이터 수집 동안 광전자증배관의 Gain을 측정하기 위하여 LASER 시스템을 이용하였다.

### Front Barrel (FB) and Main Barrel (MB)

FB와 MB는 중성 케이온의 붕괴지점을 주요하게 둘러싸고 있다. 중성 케이온의 붕괴로부터 생성된 광자를 검출한다. FB와 MB는 납-섬광체의 표본형 열량계로 제작되어 효율적으로 방사길이를 늘렸다. 섬광체의 섬광을 읽기

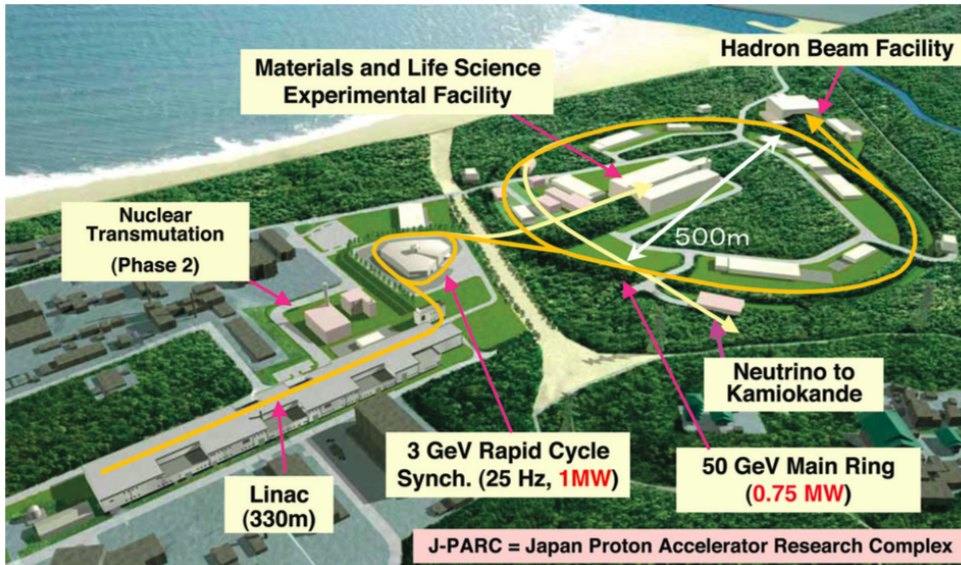


Figure 2.7: Penorama of J-PARC laboratory

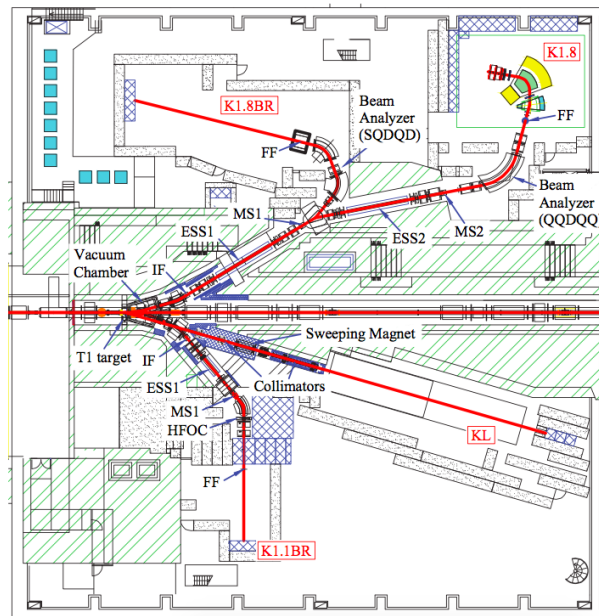


Figure 2.8: Mimetic diagram of Hadron Beam Facility.

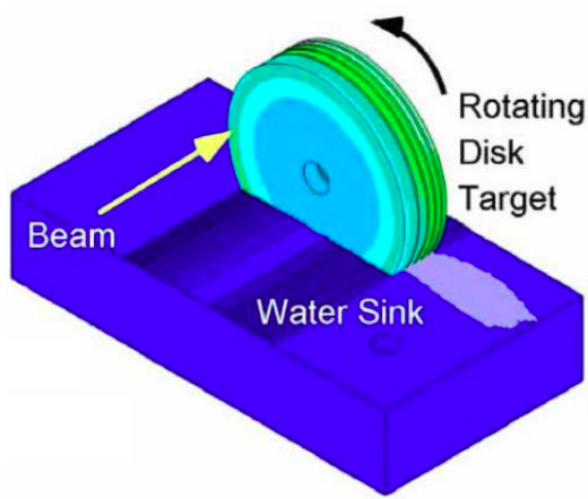


Figure 2.9: Schematic view of T1 Target system

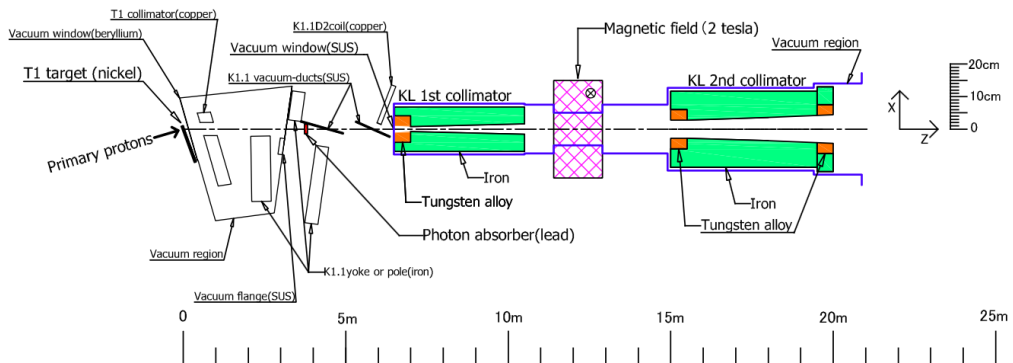


Figure 2.10: Drawing of KL Beam Line

위해 광전자증배관을 사용하였는데 초록색 섬광을 더욱 높은 효율로 검출하기 위하여 R329-EGPX 광전자증배관을 사용하였다. FB는 16개의 모듈로 나누어져 있고 MB는 32개의 모듈로 나누어져 있다. MB는 양쪽 끝에서 신호를 읽는 반면, FB는 한쪽 끝에서만 신호를 읽는다.

**Barrel Charged Veto (BCV)**

MB로 들어오는 하전입자를 검출하기 위하여 MB의 안쪽부분에 10 mm 두

	Front Barrel	Main Barrel
Length (m)	2.75	5.5
Number of scintillator layers	59	45
Number of lead layers	59(1.5 mm)	15(1.0 mm) + 30(2.0 mm)
Thickness ( $X_0$ )	16.5	13.5

Table 2.1: Specification of Front Barrel and Main Barrel.

계의 섬광체를 설치하였다. BCV는 MB와 같은 길이(5.5 mm)이며 모듈의 갯수도 MB와 같이 32개이다. MB와 마찬가지로 양쪽 끝에서 신호를 읽는다.

#### Neutron Collar Counter (NCC)

NCC는 FB안에 설치된 CsI 결정형 검출기이다. NCC는 상류에서 붕괴한 중성 케이온에서 나온 광자를 검출한다. 또한 NCC는 중성 케이온과 함께 날아오는 중성자를 검출한다. 중성자가 NCC 부분에서  $\pi^0$ 를 만들어 배경사상을 유발하기 때문에 이를 검출하는 것은 배경사상의 제거에 중요하다. 하나의 NCC는 단면적이  $66 \times 66 \text{ mm}^2$ 이고 두께는 146 mm이다. CsI 결정에서 발생한 섬광체를 40개의 과장이동 광섬유를 이용하여 섬광을 모은다. 하나의 NCC 모듈 당 총 40개의 과장이동 광섬유를 사용하였다. NCC를 세 부분으로 나뉘어 각 부분에서 개별적인(Individual) 세 개의 신호와 세 부분의 신호의 합(Common)을 읽는다. 이 때 개별적인 신호를 읽기 위하여 광섬유 40개 중 각 4개 씩 총 12개를 사용하였고 세 부분의 신호의 합을 읽기 위하여 28개의 광섬유를 사용하였다.

#### Charged Veto (CV)

CV는 CsI 열량계앞에서 CsI 열량계로 들어오는 하전입자를 검출한다. CV는 3 mm 두께와 7 cm 폭의 섬광체와 7개의 1 mm 지름의 과장이동 광섬유로

이루어져 있다. 각 CV 모듈에서 나오는 신호를 양쪽 끝에서 읽는다. 이 때 항상 과장이동 광섬유와 가까운 쪽과 과장이동 광섬유와 먼 쪽이 있다. 광섬유의 감쇠길이가 길기 때문에( $\sim 5m$ ) 많은 광량을 얻을 수 있다. CV는 2개의 층으로 구성되어 있는데 상류쪽에 있는 층을 Front CV, 하류쪽에 있는 층을 Rear CV라 한다. Front CV의 경우 48개의 모듈로 이루어져 있고 Rear CV의 경우 44개의 모듈로 이루어져 있다. 모듈들을 합쳐서 16각형을 이루게 하여 CsI 열량계 앞쪽에 위치하게 된다.

Scintillator	BC404 (Saint-Gobain)
Wavelength Shifting Fiber	Y-11(350)MSJ (Kuraray) 1 mm in diameter
Glue	EJ500 (Eljen)

Table 2.2: Specification of CV

### Outer Edge Veto(OEV)

OEV는 CsI 열량계와 CsI 열량계를 지지해주는 원통형 구조물 사이에 위치하여 CsI 열량계에서 새어나오는 전자기다발을 검출한다. OEV는 납-섬광체 표본형 검출기이며 이 때 납의 두께는 1.5 mm 섬광체의 두께는 5.0 mm이다. OEV는 한쪽 끝에서만 신호를 읽으며 총 44개의 모듈로 구성되어 있다. CsI 열량계 지지대와 CsI 열량계 사이의 압력을 견디기 위하여 검출기의 가장자리에 스테인리스를 넣었다.

### Collar Counter 03(CC03) and Linear Charged Veto(LCV)

CC03는 빔 파이프 외벽과 CsI 열량계 사이에 위치하여 빔 파이프 주변에 발생하는 입자들을 검출한다. CC03는 CsI 결정으로 구성되어  $45.5 \times 18$



mm<sup>2</sup>의 단면적과 500 mm<sup>2</sup>의 두께를 가진다. 한편 LCV는 빔 파이프 내벽에 위치하여 빔 파이프와 반응하기 전에 LCV와 먼저 반응하게 하여 입자들이 검출기가 아닌 물질에 반응하여 없어지지 않게 한다. LCV는 3 mm 두께의 섬광체에 15개의 파장이동 광섬유를 사용하여 섬광을 모은다. 섬광체와 파장이동 광섬유는 CV와 같은 것을 사용하였다.

#### Collar Counters(CC04, CC05 and CC06)

중성 케이온의 붕괴로 생성된 입자가 빔 파이프 안쪽으로 들어갔을 때 해당 입자를 검출하기 위하여 빔 파이프 주변에 검출기를 설치하였다. 이러한 검출기를 CC0X라고 한다. 설치된 검출기들은 각각 CC04, CC05 그리고 CC06 가 있다. 검출기는 CsI 결정으로 이루어져 있다.

Contents	CC04	CC05	CC06
Number of Modules	42(E391) + 16(KTeV) + 4(Scintillator)	54(E391) + 4(Scintillator)	54(E391) + 4(Scintillator)
Central Z Position [mm]	7415	8793	10338

Table 2.3: Information of CC0X

#### Beam Pipe Charged Veto(BPCV)

빔 파이프는 검출기가 아니므로 중성 케이온에서 생성된 입자가 빔 파이프와 반응하면 해당 입자를 잃어버릴 수 있다. 이러한 경우를 방지하기 위하여 빔 파이프와 붙어있는 검출기를 설치하였다. BPCV는 1000 mm의 길이와 200 mm의 폭 5 mm의 두께의 섬광체며 CC05와 CC06 사이에 위치하여 빔 파이프의 바깥쪽을 둘러싸고 있다. 4개의 모듈로 구성되어 있으며 스테인리스 밴드로 빔 파이프와 부착되어 있다. 섬광체에서 나온 빛을 10개의 파장이동 광섬유로 한쪽 끝에서 읽는다.

**Beam Hole Charged Veto(BHCV)**

중성 케이온에서 생성된 하전입자가 매우 낮은 접산방향의 운동량을 가지고 빔 파이프 안쪽을 지나게 되면 CCOX나 BPCV가 하전입자를 검출할 수 없게 된다. 이 때 빔 중심에 BHCV를 두어 하전입자를 검출한다. 빔 중심에는 여러 가지 중성입자가 많이 지나가므로(광자, 중성자, 중성 케이온) 최대한 하전입자만 반응하도록 Gas 검출기로 제작되었다. 하전입자가 Gas를 지나가면서 Gas의 전자를 들뜨게 한다. 한편 BHCV 내부에 설치된 전선에 전압 차이를 걸어줌으로써 들뜨게 된 전자가 전선을 타고 흘러 전류를 만든다. 이 전류의 신호를 이용하여 하전입자를 검출한다.

**Beam Hole Photon Veto(BHPV)**

BHPV는 CC06 검출기보다 하류에 위치하여 가장 하류까지 진행한 광자를 검출한다. BHPV는 빔의 중심에 위치하여 중성 케이온과 함께 입사하는 많은 중성자가 BHPV를 지나가게 된다. 이 때 중성자와 반응하지 않으면서 광자와의 반응만을 유도하기 위하여 납-에어로젤(aerogel) 구조로 검출기를 제작하였다. 광자가 BHPV로 입사하여 납에서 쌍생성(Pair-Creation)을 일으킨다. BHPV는 생성된 전자-양전자가 에어로젤에서 만드는 체렌코프(Cherenkov) 빛을 검출한다. 검출기 제작에 사용한 에어로젤의 굴절율은  $n = 1.03$ 이며, 에어로젤의 단면적은  $320 \times 320 \text{ mm}^2$ 이고, 두께는 58 mm 이다. 에어로젤 앞에 쌍생성을 일으키기 위한 납의 두께는 위치에 따라 1.5 mm 혹은 3.0 mm 를 사용하였다. 생성된 체렌코프 빛을 첫 번째로 거울로 반사시킨 다음 곡면에서의 반사를 이용하여 양쪽 끝에서 읽었다. 이 때 반사되는 곡면은 Winston Cone 모양으로 제작되었다.

**Beam Hole Guard Counter(BHGC)**

콘크리트 벽의 설치로 인하여 BHPV의 위치가 변경된 후에 광자의 진행 가능한 입체각을 BHPV가 충분히 덮고 있지 못하기 때문에 이를 보완하기 위

해 BHPV의 가장 하류부분에 BHGC를 설치하였다.

## 2.3 Data Acquisition System

### 2.3.1 Waveform

KOTO 실험에서는 모든 검출기의 데이터를 시간에 따른 ADC의 크기로 취득한다. 취득한 데이터를 시간에 따른 ADC의 크기로 그리게 되면 파형의 시간에 따른 모습을 볼 수 있다. FADC를 이용하여 이러한 방식의 데이터 수집을 수행할 수 있다. 대부분의 검출기에서 사용하는 FADC는 125-MHz FADC로 8 ns마다 ADC의 높이를 기록한다. 예외의 검출기들이 있는데 newBHCV, BHPV, BHGC 그리고 BPCV의 경우 500-MHz FADC를 사용한다. 125-MHz FADC의 경우 CsI 열량계의 데이터 취득을 위해 직접 KOTO 실험에서 제작된 것이다. 125-MHz로 파형을 기록하면 파형의 모습을 이해하기 힘들어서 125-MHz의 경우 Gaussian Shaper 도입하였다. Gaussian Shaper가 파형을 Gaussian 분포로 퍼뜨려서 파형을 알아보기 쉽게해준다. 이 때 Gaussian의 표준편차는  $\sigma = 27$  ns이다. 20 MeV 이상의 신호에 대하여 Gaussian Shaper가 시간 분해능을 1 ns 이상 흐트리지 않는 점을 고려할 때 Gaussian Shaper가 파형의 분석에 큰 도움을 준다고 할 수 있다. 500-MHz FADC의 경우 Gaussian Shaper를 사용하지 않는다. 일부 검출기의 경우 아날로그의 미분신호를 사용한다. 미분된 신호를 사용함으로써 신호의 잡음을 줄일 수 있다. 미분된 신호를 읽는 검출기는 CsI 열량계와 CV이다.

### 2.3.2 Triggering

KOTO 실험에서  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  사건을 관찰하기 위하여 CsI 열량계에 충분한 신호가 있음을 확인하고 동시에 다른 배제검출기에 아무 신호도 없음을 확인한다. 이러한 역동시(Anticoincidence)를 확인하는 단계를 "L1 Trigger"라고 한다. 신호가 있거나 없음을 확인하기 위하여 해당하는 검출기의 모든 모듈의 신호의 합을 이용한다. 모든 모듈의 신호의 합이 문턱값보다 클 때 신호가 있다고 판단하고, 신호의 합이 문턱값보다 작을 때 신호가 없다고 판단한다. CsI 열량계에 신호가 있으면서 동시에 다른 배제 검출기의 신호가 없다고 판단하였을 때 "L2 Trigger"단계로 넘어간다. "L2 Trigger" 단계에서는 CsI 열량계의 신호-크기-중심, Center of Energy(COE)를 계산한다.  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  사건이 일어날 때  $\pi^0$ 의 접산방향의 운동량의 크기를 고려하여 COE의 값이 165 mm 보다 클 것을 요구한다("Physics Trigger"). COE가 문턱값을 넘는다면 "L3 Trigger"로 넘어가서 데이터를 저장한다. J-PARC에 저장된 데이터는 KEK로 다시 전송된다.

KOTO 실험에서  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 의 붕괴갈래비를 계산하려면  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  사건의 갯수와 전체 중성 케이온의 갯수도 필요하게 된다. 전체 중성 케이온의 갯수를 알기 위하여 중성 케이온의 다른 붕괴모드의 데이터도 취득한다. 이 때 취득하는 붕괴모드는  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ ,  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  그리고  $K_L \rightarrow \gamma \gamma$ 이다. 이와 같은 붕괴모드를 취득할 때에는 COE의 값을 신경쓰지 않는다("Normalization Trigger").

한편 배제 검출기의 성능을 확인하기 위하여 배제 검출기의 신호의 여부를 무시하고 데이터를 취득한다. 이렇게 취득한 데이터를 분석하여 분석 결과를 Normalization Trigger와 비교한다. 비교를 통하여 특정 배제 검출기가 이상이 없는지 확인할 수 있다("Minimum Bias Trigger").

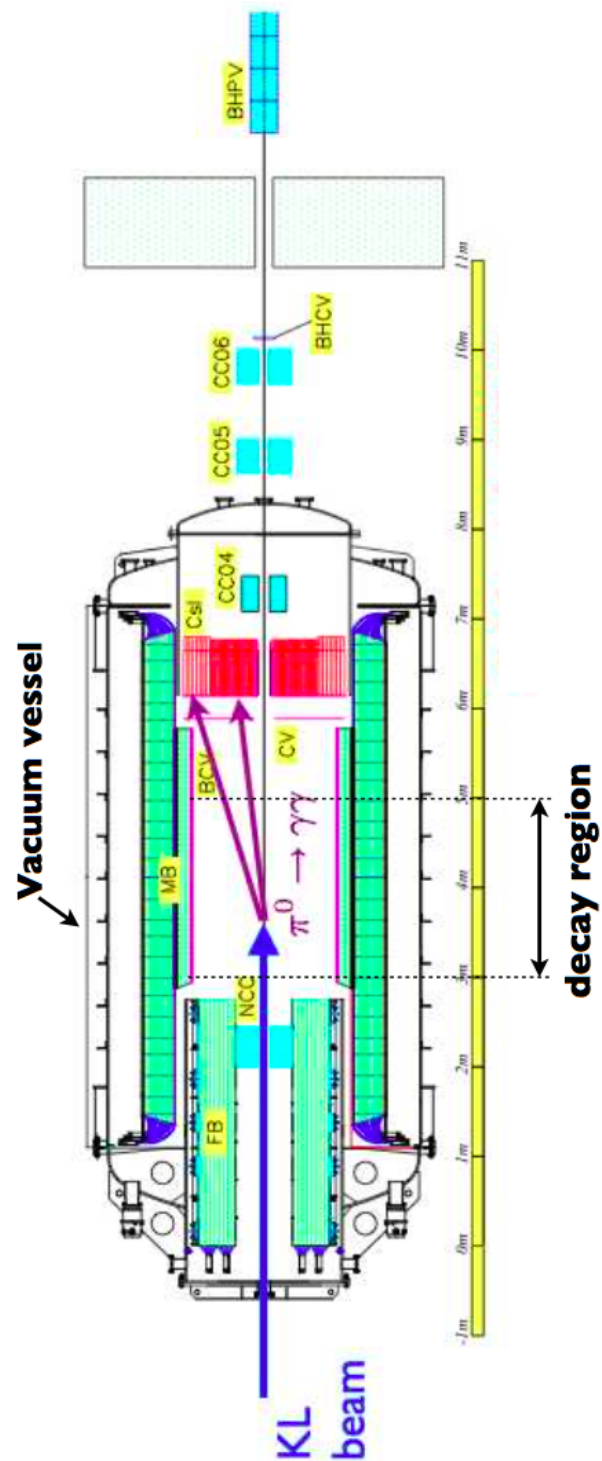


Figure 2.11: KOTO Detector in 2015.

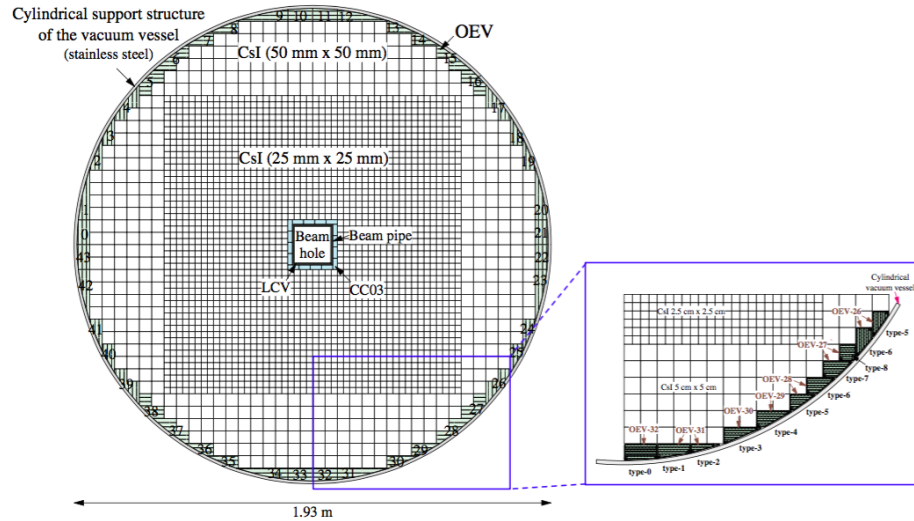


Figure 2.12: Front view of CsI Calorimeter

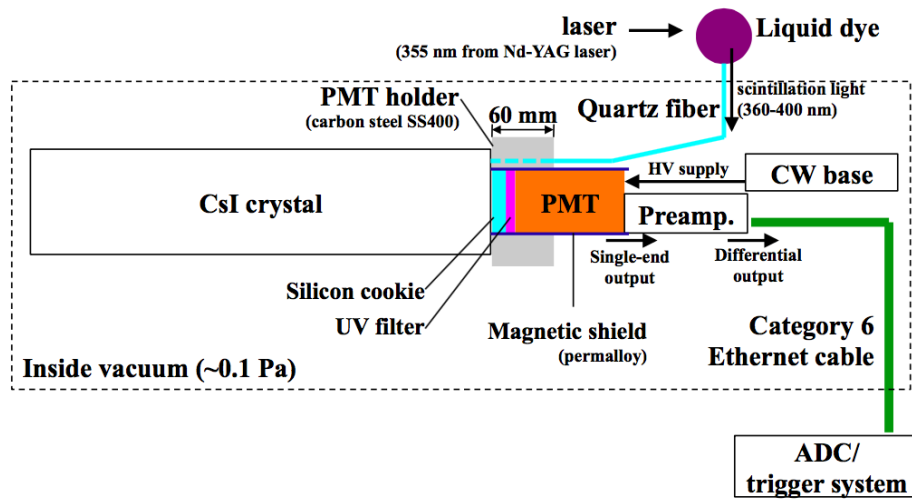


Figure 2.13: Readout system of CsI Calorimeter.

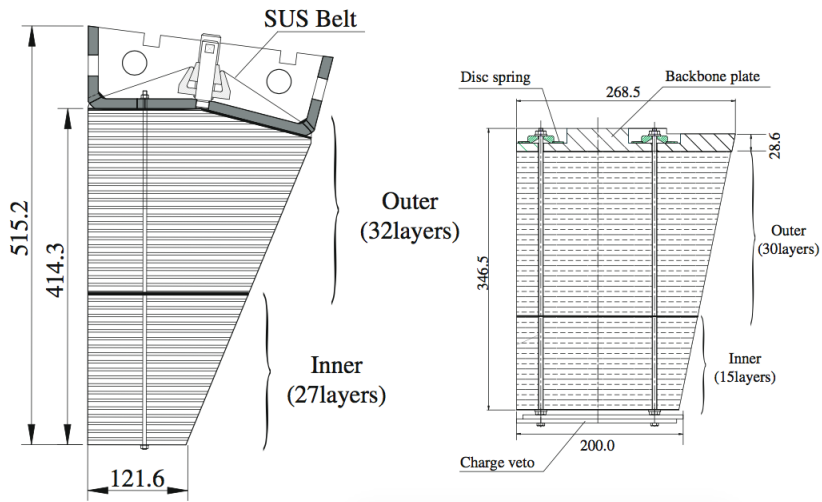


Figure 2.14: Side view of one module of Main Barrel.

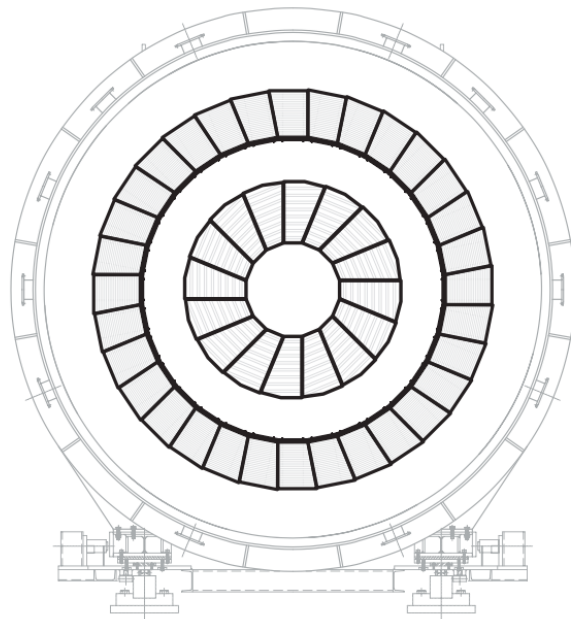


Figure 2.15: Front view of Front Barrel and Main Barrel. Inner circle means FB and outer circle means MB.

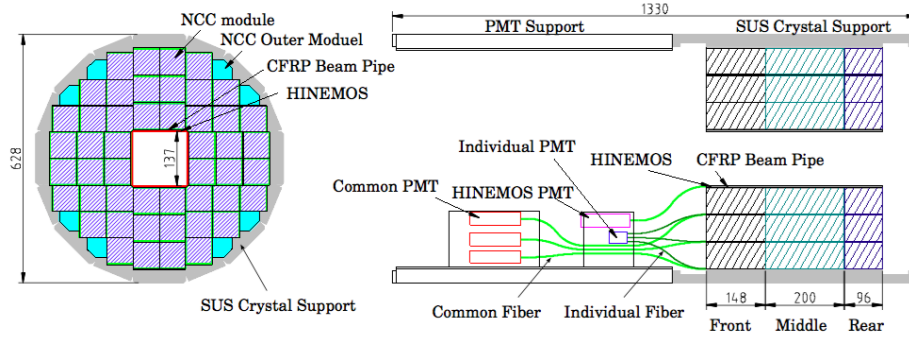


Figure 2.16: Front and side view of NCC and HINEMOS.

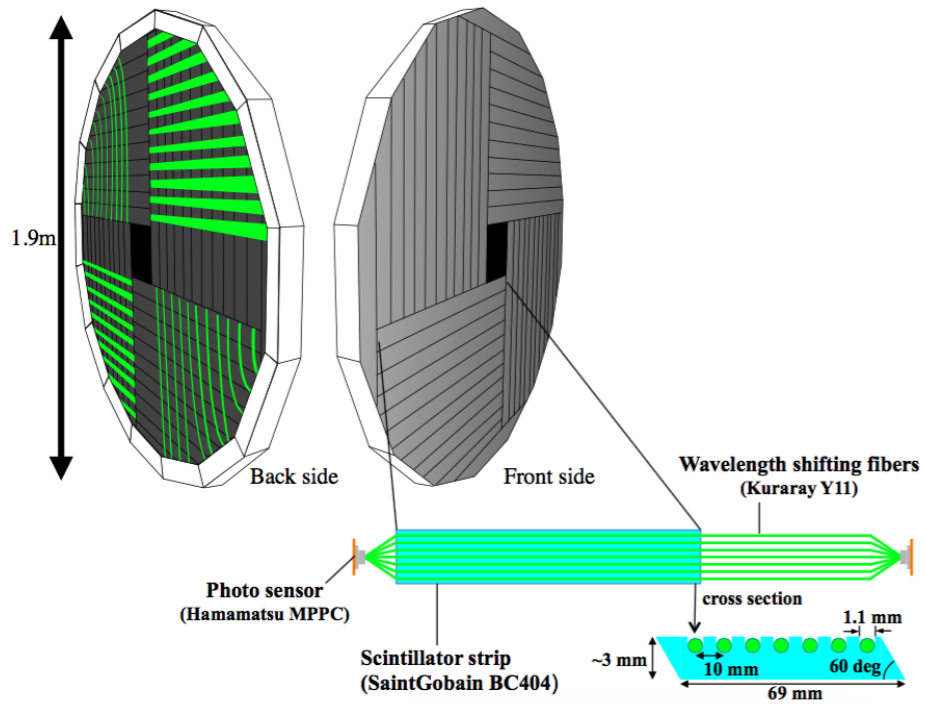


Figure 2.17: Configuration of CV.



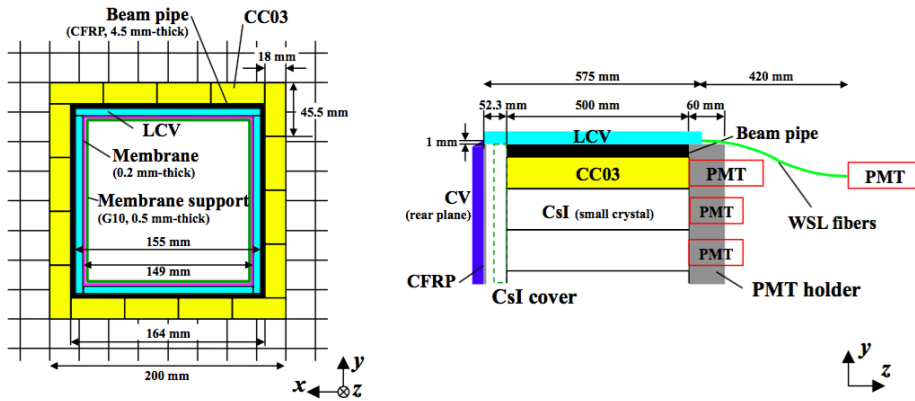


Figure 2.18: Schematic view of CC03 and LCV.

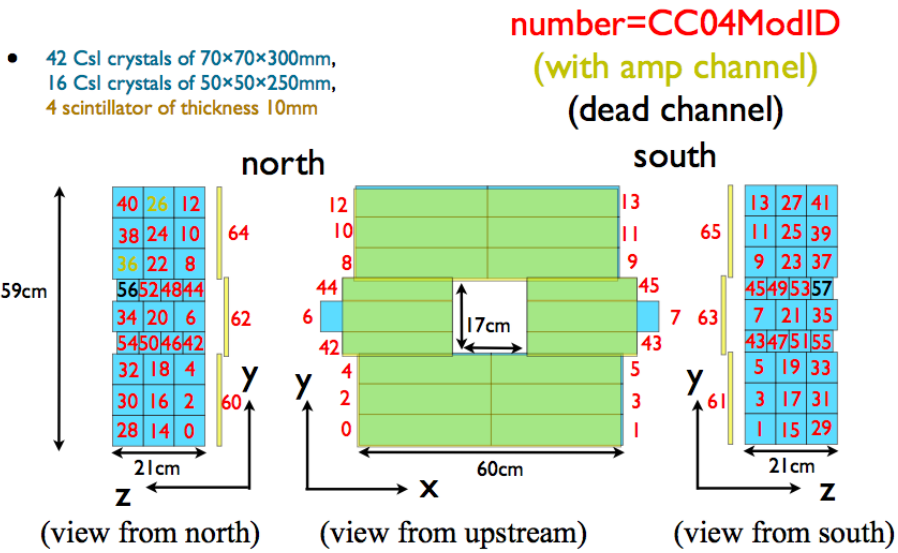


Figure 2.19: Configuration of CC04.

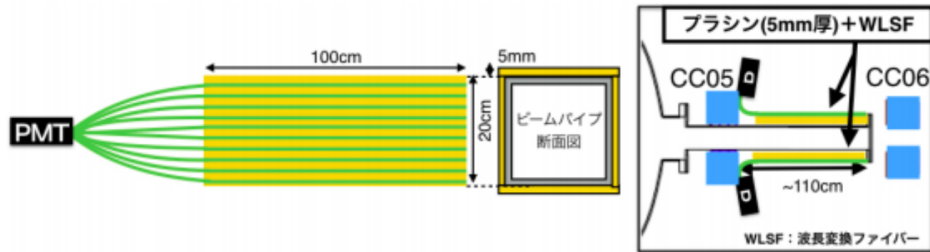


Figure 2.20: Configuration of BPCV.

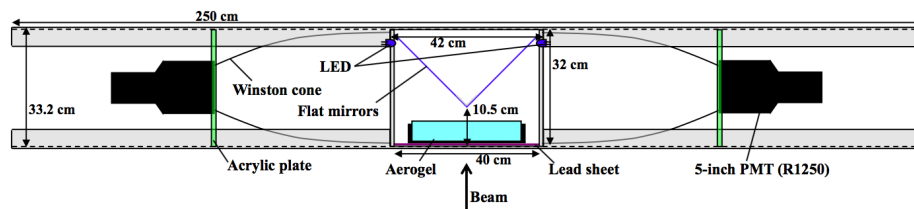


Figure 2.21: Schematic view of BHPV from above.

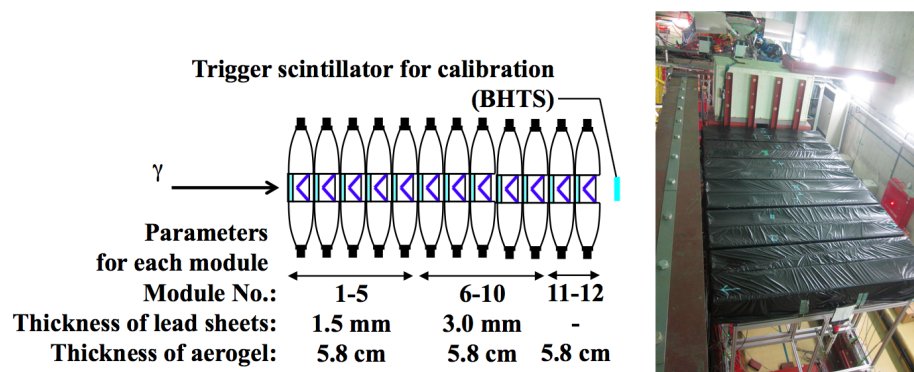


Figure 2.22: Configuration of BHPV.

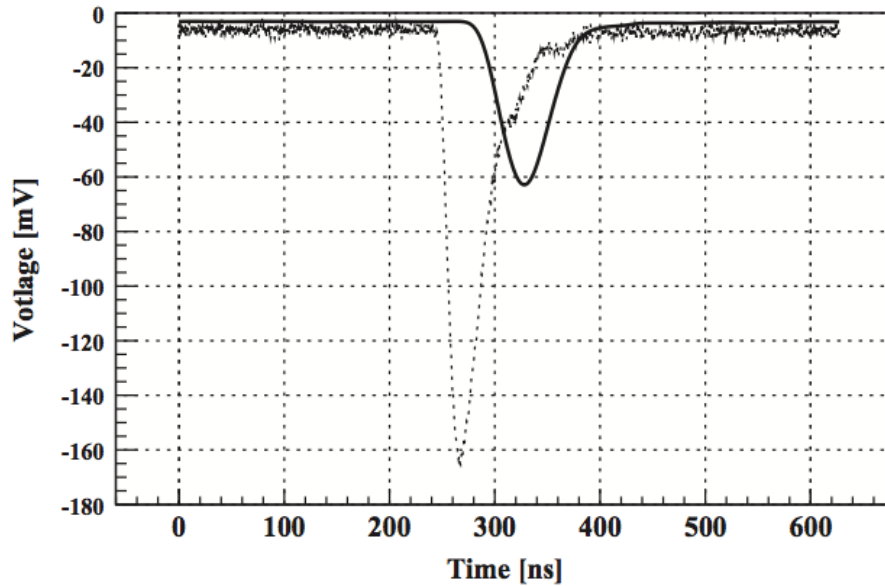


Figure 2.23: Pulse shape before Gaussian Shaping(dots) and after Gaussian Shaping(line).

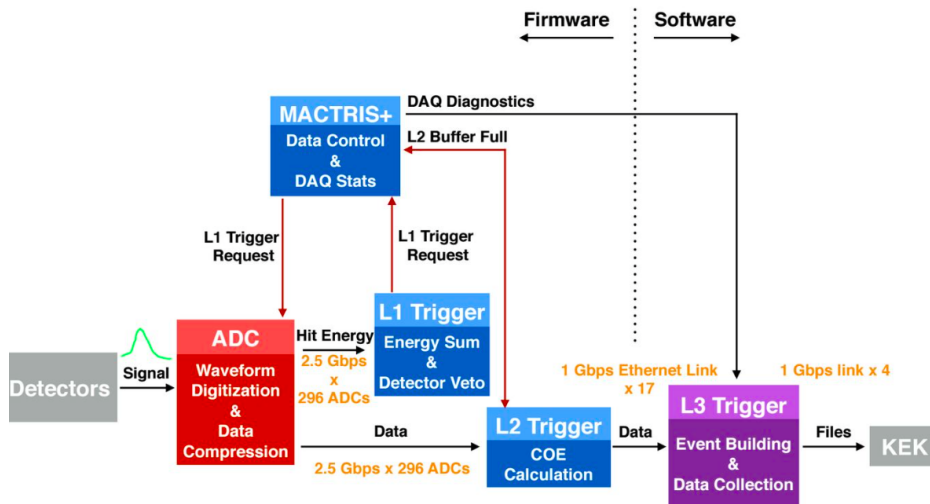


Figure 2.24: Block diagram of trigger system.