

平成 20 年度 修士論文

J-Parc K_L ビームラインモニタ用 n/γ 検出器 Cerberus の
改良

山形大学大学院 理工学研究科 博士前期課程
クォーク核物理学研究グループ
上林 智亮

2009 年 2 月 10 日

abstract

E14 実験は、現在茨城県東海村で建設中の J-Parc で行われる予定の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験である。この崩壊モードは、CP 対称性を破っており、分岐比を測定することで CP 対称性の破れを特徴づける小林・益川行列の複素パラメータを精度良く決定することができる。この崩壊モードの分岐比は標準理論では 2.8×10^{-11} と予測されている。

E14 実験において、ビームライン中に存在する中性子は物質と相互作用して π^0 を生成し、バックグラウンド事象を引き起こす。そのため、ビームライン中の中性子の profile を正確に理解することは非常に重要な意味を持っている。

本研究のメインテーマである n/γ モニタ検出器 Cerberus は KEK で行われた $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験である E391a 実験のビームサーベイにおいてビーム中の γ 線と中性子の数とエネルギー分布を測定するために 2002 年に製作された。ビームライン中には多くの γ 線が存在するため、通常の中性子検出器では γ 線を中性子を区別することが困難である。鉛とシンチレータのサンドイッチ構造から成るモジュール 1 つと、鉄とシンチレータのサンドイッチ構造から成るモジュール 5 つ、合計 6 つのモジュールで構成された Cerberus では、最上流に設置された鉛のモジュールで γ 線はそのほとんどのエネルギーを落とすため、中性子の測定において γ 線を 99% 以上除去することが可能である。本研究の目的は、現在はエネルギー分布と数の測定及び n/γ の識別の機能しか持っていない Cerberus に、中性子の位置測定機能を持たせることができるかどうかを検証していくことにある。本研究ではシミュレーションソフト GEANT4 を使い、Cerberus のモジュール間に検出器に見立てた厚さ 5mm のプラスチックシンチレータを追加した。そのプラスチックシンチレータでの粒子の位置分布を計算した。この計算結果から、プラスチックシンチレータで検出可能な荷電粒子が入射中性子の進行方向 1mm 以内にピークをつくることが判った。中性子の位置測定の測定精度を上げるために、位置分布のピーク値におけるイベント数と、その付け根に当たるベースラインにおけるイベント数の比をとった P/B ratio を定義し、この値の改善を図った。この P/B ratio の値を増加させることができれば、中性子が入射位置に来るイベントの比率を増やすことができるため、より正確なビームの profile を測定することが可能になる。本研究では、位置分布を測定するプラスチックシンチレータの直前に設置されたモジュールでの deposit エネルギーが 0 から 3.7MeV の範囲にあるイベントのみを選別することによって、イベントを選別してない状態と比較して P/B ratio の値を約 2 倍増加させることに成功した。

abstract

A measurement of $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay branching ratio is one of the most important clues clarify the origin of CP violation in the particle interaction. The E391a experiment intends to measure this branching ratio at a sensitivity of 3×10^{-10} . The present experimental upper limit is 6.7×10^{-8} , which is far from the Standard Model prediction 3×10^{-11} . And by the E14 experiment in J-Parc, a goal of sensitivity is 3×10^{-13} .

In most simulations, there are difficult to reproduce hadronic interaction. Therefore the E14 beam survey experiment is one of important aims to measure the energy distribution and yield of the neutrons.

To measure the energy distribution and the yield of neutrons and gammas, n/ γ monitor detector "Cerberus" was constructed by a E391a beam survey experiment in 2002. Cerberus consists of 6 modules. The first module, which are called as "EM part", consists of 25-layers of lead and plastic scintillator plates sandwiched with each other. The radiation length and nuclear interaction length of EM part are $18X_0$ and 0.7λ respectively. For other 5 modules, which are called as "Hadron part", iron plates are used as a converter. In the case of the measurement of the neutron, the Cerberus can remove gamma more than 99%. Because the Cerberus can veto most gamma by the EM part.

A purpose of this thesis is to get the position information of the incident neutron on Cerberus. We run the neutron beam simulation with GEANT4 to add 5mm thick plastic scintillators between the modules of Cerberus. For this simulation, the position distribution of the secondary charged particles on the scintillators has a peak at the position of the incident neutrons. The peak width is less than 1mm. "P/B ratio" which is a ratio between event number of the peak and event number of the side of the peak. In order to enhance the P/B ratio, We searched the cut condition of the several parameters such as the deposit energy, the hit number of the scintillators. P/B ratio to add the cut condition that the visible energy of the hadron part module in front of the scintillator is 0 to 3.7MeV is two times larger than that of no cut.

目次

第 1 章	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験	1
1.1	実験概要	1
1.2	E391a 実験	4
1.2.1	加速器	4
1.2.2	E391a 検出器	8
1.3	J-Parc E14 実験	10
1.4	Step1	10
1.4.1	E391a 上流部検出器	10
1.4.2	E391a 中央部検出器	12
1.4.3	E391a 下流部検出器	12
1.4.4	E391a 真空容器外の下流部検出器	13
1.4.5	E391a CsI 検出器	14
1.5	検出器の改良点	16
1.5.1	カロリメータ	16
1.5.2	Barrel Photon Veto	16
1.5.3	Collar Counter	18
1.5.4	Beam Hole Veto	20
1.5.5	Charged Veto	20
1.6	Step2	22
第 2 章	E14 実験ビームライン	23
2.1	K_L ビームライン	23
2.1.1	ビームライン	23
2.1.2	コリメータ	24
2.1.3	K_L ビーム	26
2.2	バックグラウンド事象	29
2.2.1	K_L バックグラウンド	29
2.2.2	ハロー中性子バックグラウンド	30
2.3	ビームサーベイ実験	30
2.3.1	NCC like 検出器によるハロー中性子測定	30
2.3.2	$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 測定	32
2.3.3	Magnet による $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 測定	33
2.3.4	コア中性子、 γ の測定	35

第 3 章	Cerberus	36
3.1	研究目的	36
3.2	Cerberus	36
3.2.1	Cerberus の構造	36
3.2.2	Cerberus の測定原理	38
3.3	GEANT4 によるシミュレーション	38
3.3.1	セットアップ	39
3.3.2	deposit エネルギー分布	40
3.3.3	F/T ratio	42
3.3.4	検出効率	44
3.3.5	エネルギー分布	46
3.3.6	エネルギー分解能	47
3.4	位置測定のための改良	48
3.4.1	改良の方針	48
3.4.2	位置測定のためのセットアップ	48
3.4.3	位置分布	50
3.4.4	Track の数による Cut	57
3.4.5	MIP による Cut	61
3.5	300MeV の中性子による確認	67
第 4 章	結論と今後の課題	70
4.1	結論	70
4.2	今後の課題	71
	謝辞	72

目次

1.1	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow 2\gamma$ での P_t の比較	2
1.2	K_L 崩壊モード	3
1.3	東カウンターホールと K_0 ビームライン	5
1.4	主リングからの取り出した陽子ビームのサイズ	6
1.5	K_0 ビームライン	6
1.6	モンテカルロシミュレーションによる K_L の momentum 分布	7
1.7	E391a 検出器の全体像	8
1.8	E391a 検出器の断面図	9
1.9	上流部検出器	11
1.10	中央部検出器	12
1.11	下流部検出器	13
1.12	CsI モジュールの概念図	14
1.13	CsI カロリメータ	15
1.14	E14 実験検出器の全体図	16
1.15	E14 実験の CsI カロリメータの正面図	17
1.16	CsI カロリメータのビームホール付近の様子	18
1.17	E391a 実験で使用された CC02 のデザイン	19
1.18	NCC のデザイン	19
1.19	BHPV の概念図	20
1.20	CV の正面図	21
1.21	CV の側面図	21
1.22	J-Parc 施設の全体図	22
2.1	ハドロンホールと K_L ビームライン	23
2.2	カロリメータデザイン (X)	25
2.3	カロリメータデザイン (Y)	25
2.4	CsI 表面での K_L ビームの profile	26
2.5	コア中性子の運動量分布	27
2.6	コア γ の運動量分布	28
2.7	NCC like 検出器の側面図	31
2.8	粒子入射時の NCC like 検出器の模式図	31
2.9	カロリメータと Tracker のセットアップ	32
2.10	カロリメータと Tracker の位置関係	32
2.11	magnet と drift chamber のセットアップ	33
2.12	Ushiwaka magnet の概略図	34

2.13 Ushiwaka magnet の写真	34
3.1 n/γ モニタ検出器 Cerberus の概略図	37
3.2 Cerberus の写真	37
3.3 GEANT4 により中性子と γ をそれぞれ 1 イベント入射させたときの様子。	38
3.4 GEANT4 によるシミュレーションのセットアップ	39
3.5 中性子のモジュールごとの deposit エネルギー分布	40
3.6 γ のモジュールごとの deposit エネルギー分布	41
3.7 F/T ratio	43
3.8 gamma tagged event での検出効率	45
3.9 neutron tagged event での検出効率	45
3.10 γ 入射時の gamma tagged event でのエネルギー分布	46
3.11 中性子入射時の neutron tagged event でのエネルギー分布	46
3.12 エネルギー分解能	47
3.13 光電子増倍管とファイバーを追加したモジュール	48
3.14 位置測定シミュレーションのためのセットアップ	49
3.15 P/B ratio の概念図	51
3.16 粒子の位置分布	52
3.17 低エネルギー Track を排除した粒子の位置分布	53
3.18 位置分布と Track のエネルギー分布の相関図	55
3.19 $1 < \text{Track エネルギー} < 2\text{MeV}$ での位置分布	56
3.20 Track 数による Cut 時の y 座標の P/B ratio	58
3.21 Track 数による Cut 時の z 座標の P/B ratio	59
3.22 Track 数による Cut 時の検出効率	60
3.23 MIP による Cut の値とモジュールの位置関係	62
3.24 MIP による Cut 後の y 座標分布	63
3.25 MIP による Cut 後の z 座標分布	64
3.26 MIP による Cut 時の y 座標の P/B ratio	65
3.27 MIP による Cut 時の z 座標の P/B ratio	65
3.28 MIP による Cut 時の検出効率	66
3.29 300MeV 中性子入射時の y 座標分布	68
3.30 Cut5 による Cut 後の y 座標分布	69

表 目 次

2.1	K_L の主な崩壊モード	29
2.2	E391a Run-II におけるバックグラウンド事象	30
3.1	ピーク範囲内の Track 中の粒子数	50
3.2	ピーク範囲外の Track 中の粒子数	50
4.1	1000MeV 入射における代表的な Cut とその結果	70
4.2	300MeV 入射時の結果	71

第1章 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験

1.1 実験概要

CP 対称性の破れの解明は現在の素粒子物理学の主要なテーマの一つであり、この現象はクォーク世代間の混合を表す小林益川行列の複素移送に起因すると考えられている。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊モードは理論的不定性が小さいため、CP 対称性の破れを特徴付ける小林益川行列の複素パラメータを精度良く決定することができるが、標準模型により予測される $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比は 3×10^{-11} 程度とかなり小さい値となっている。E391a 実験グループは KEK(高エネルギー加速器研究機構) の 12GeV PS(Proton Synchrotron) において、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探る実験を 2004 年 2 月から 7 月の Run-ãĖã、2005 年 1 月から 4 月の Run-ãĖä、同年 11 月から 12 月の Run-ãĖĉ と行った。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊ではニュートリノの検出が難しいことから π^0 の崩壊のみが検出可能である。この時、検出可能な π^0 の崩壊モードには $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ と $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の二つの崩壊モードが考えられる。 $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ は荷電粒子を含んでいるため、荷電粒子のトラッキングを使った π^0 の再構成ができるという利点があるが、分岐比が 1.2% と $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の 98.8% よりも 1/80 も小さいので、標準理論で予測される 10^{-11} というとても小さな分岐比を測定するには適さない。そこで E391a 実験では「 π^0 からの 2γ 以外何も無い」をシグナルの条件とし、 π^0 からの 2γ を CsI カロリメータで検出し π^0 の崩壊位置を再構成する。また、それ以外に何も粒子が生成しないことを確認するために、崩壊領域の周りを veto 検出器で囲んでいる。このような検出器の配置をすることで K_L の崩壊粒子を全て捕らえることができる。これにより、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ や $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ など 1 つの π^0 以外の余分な粒子を含む崩壊過程をシグナルと見誤ることを防ぐことができる。また、唯一 2γ のみが計測される $K_L \rightarrow 2\gamma$ は二体崩壊であるため、終状態の 2γ の運動量の垂直成分 P_t が 0 となる。そこで再構成された π^0 が高い垂直方向の運動量 P_t を持つことを条件付ける。これにより、 $K_L \rightarrow 2\gamma$ によるバックグラウンド事象を抑えることができる。また、ビーム中の中性子が残留気体と相互作用し π^0 を生成するといった事象も重大なバックグラウンドになるので、崩壊領域を高真空にすることでこの事象を無視できるほどにしている。

このような実験を行い、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比は E391a の Run-ãĖä の解析により、 6.7×10^{-8} の上限が与えられている。

我々は茨城県東海村に建設中の J-Parc で E14 実験を計画しており、ここでは最終的に 3×10^{-13} の測定感度を達成することを目標としている。

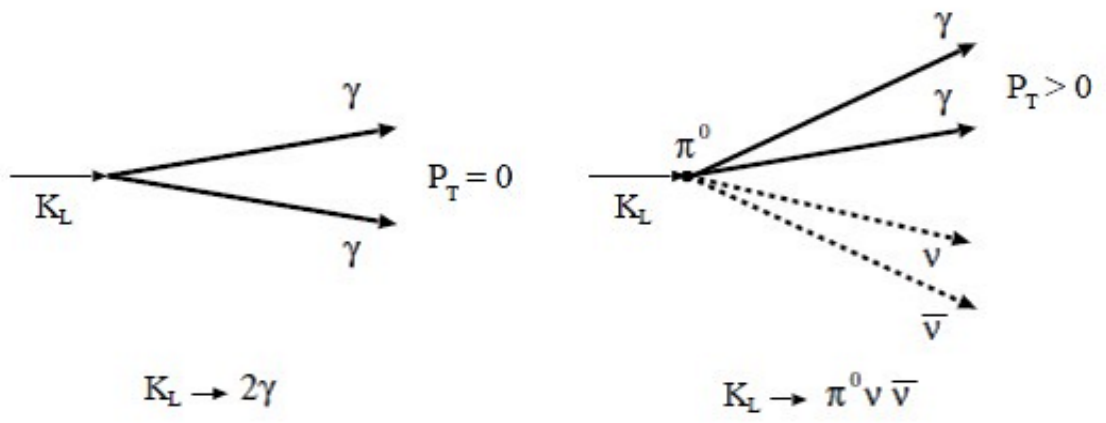


図 1.1: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow 2\gamma$ での P_t の比較

Decay mode	Branching ratio	Visible particle
$\pi^\pm e^\mp \nu$	$(38.81 \pm 0.27)\%$	2charged
$\pi^\pm \mu^\mp \nu$	$(27.19 \pm 0.25)\%$	2ch
$\pi^0 \pi^\pm e^\mp \nu$	$(5.18 \pm 0.29) \times 10^{-5}$	2ch, 2 γ
$3\pi^0$	$(21.05 \pm 0.23)\%$	6 γ
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$(12.59 \pm 0.19)\%$	2ch, 2 γ
$\pi^+ \pi^-$	$(2.090 \pm 0.025) \times 10^{-3}$	2ch
$\pi^0 \pi^0$	$(9.32 \pm 0.12) \times 10^{-4}$	4 γ
$\pi^\pm e^\mp \nu \gamma$	$(3.53 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	2ch, 1 γ
$\pi^0 \pi^0 \gamma$	$< 5.6 \times 10^{-6}$	5 γ
$\pi^+ \pi^- \gamma$	$(4.39 \pm 0.12) \times 10^{-5}$	2ch, 1 γ
$\pi^0 2\gamma$	$(1.41 \pm 0.12) \times 10^{-6}$	4 γ
2γ	$(5.90 \pm 0.07) \times 10^{-4}$	2 γ
$e^+ e^- \gamma$	$(10.0 \pm 0.5) \times 10^{-6}$	2ch, 1 γ
$\mu^+ \mu^- \gamma$	$(3.59 \pm 0.11) \times 10^{-7}$	2ch, 1 γ
$e^+ e^- \gamma \gamma$	$(5.95 \pm 0.33) \times 10^{-7}$	2ch, 2 γ
$\mu^+ \mu^-$	$(7.27 \pm 0.14) \times 10^{-9}$	2ch
$e^+ e^-$	$(9^{+5}_{-4}) \times 10^{-12}$	2ch
$\pi^+ \pi^- e^+ e^-$	$(3.11 \pm 0.19) \times 10^{-7}$	4ch
$\mu^+ \mu^- e^+ e^-$	$(2.69 \pm 0.27) \times 10^{-9}$	4ch
$e^+ e^- e^+ e^-$	$(3.75 \pm 0.27) \times 10^{-8}$	4ch
$\pi^0 \mu^+ \mu^-$	$< 3.8 \times 10^{-10} \text{ CL}=90\%$	2ch, 2 γ
$\pi^0 e^+ e^-$	$< 5.1 \times 10^{-10} \text{ CL}=90\%$	2ch, 2 γ
$\pi^0 \nu \bar{\nu}$	$< 5.9 \times 10^{-7} \text{ CL}=90\%$	2 γ
$e^\pm \mu^\mp$	$< 4.7 \times 10^{-12} \text{ CL}=90\%$	2ch
$e^\pm e^\pm \mu^\mp \mu^\mp$	$< 4.12 \times 10^{-11} \text{ CL}=90\%$	4ch

図 1.2: K_L 崩壊モード

1.2 E391a 実験

KEK E391a 実験は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索に特化した初めての実験であり、KEK の 12GeV の陽子シンクロトロン (PS) 東カウンターホールに位置する K^0 ビームラインを用いて行われた。

1.2.1 加速器

PS の主リングから取り出されたビームは東カウンターホールへ導かれる。このビームの Intensity は 2×10^{12} ppp (proton per pulse) 程度である。このときの陽子のビームサイズは図 1.4 のような縦 $\sigma = 1.1\text{mm}$ 、横 $\sigma = 3.3\text{mm}$ で楕円形を成し、プラチナのターゲット ($8\text{mm}\phi$ 、 10cm の円筒形) に 4° の角度で入射し、 K_L を発生させる。 K_L ビームは K_0 ビームライン (1.5) 上の C1~C6 のコリメータによって $\sim 6\text{cm}\phi$ に絞られて最大角 4mrad 検出器に入射する。 K^0 ビームライン上には荷電粒子を落とすための sweeping magnet、及び γ を減らすための Pb absorber を配置してある。また中性子を減らすための Be absorber も用意されている。 K_L ビームは長さ 10m からなり、実験エリアに到達するまでに寿命の短い粒子を排除するのに十分な長さがとられている。 K^0 実験エリア入り口での K_L ビームの momentum 分布はモンテカルロシミュレーションによって図 1.6 のように得られている。また、検出器に入射する K^0 は $2.1 \sim 2.4 \times 10^5 / 10^{12}$ ppp 程度である。

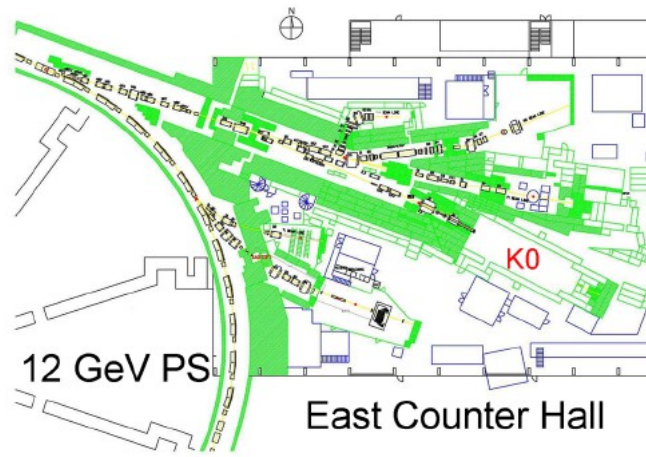


図 1.3: 東カウンターホールと K_0 ビームライン

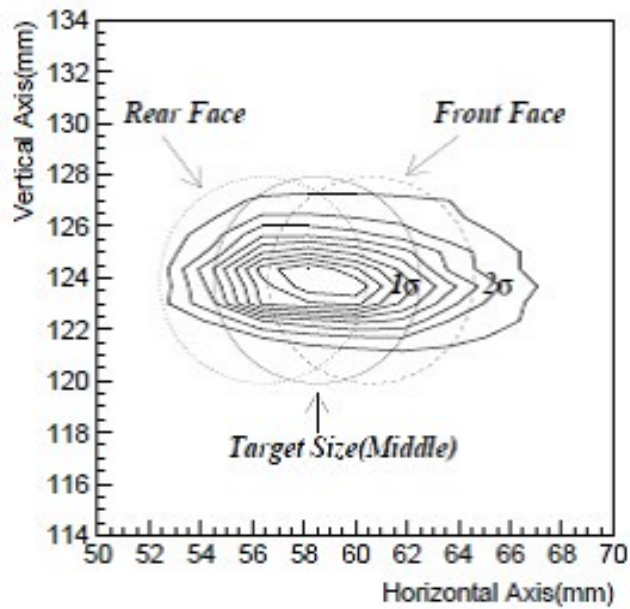


図 1.4: 主リングからの取り出した陽子ビームのサイズ。縦： $\sigma=1.1\text{mm}$ 、横 $\sigma=3.3\text{mm}$ である。図中の円はプラチナターゲットを示している。ビームはターゲットに対して 4° の角度で入射するので前面、背面及び中央の断面は図の位置になる。

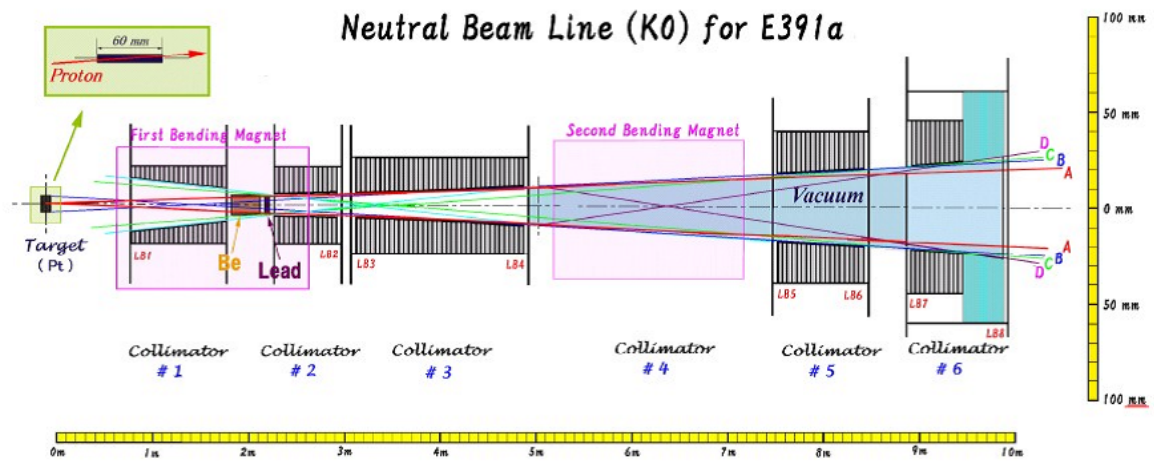


図 1.5: K_0 ビームライン。Collimator1~Collimator6 のコリメータ、ピンクで示す 2 台の偏向電磁石、Collimator1 と 2 の間に鉛・Be absorber を備えている。

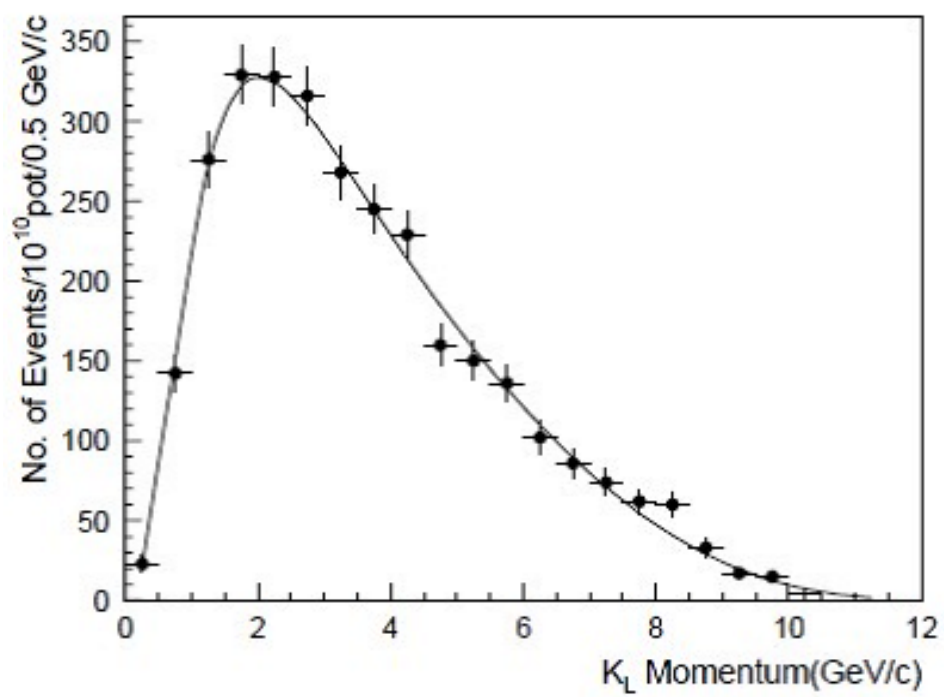


図 1.6: モンテカルロシミュレーションによる K^0 実験室入り口における K_L の momentum 分布。縦軸の pot は proton on target (target に当たる proton の数) の略

1.2.2 E391a 検出器

図 1.7 に E391a 実験の検出器を示す。検出器は真空内部に納まる上流部、中央部、下流部、及び真空容器外下流部からなる。E391a 実験の検出器の特徴は π^0 からの γ 線を検出するための電磁カロリメータ (図 1.7 中で赤く描かれている CsI カロリメータ) と、それを覆う veto 検出器である。これにより、1つの π^0 以外の粒子が何も無かったことを確認し、他の K_L の崩壊過程を信号と見誤ることを防止できる。また、ビーム中に存在する中性子と残留気体が相互作用によって生成する π^0 による事象を防ぐため、検出器は高真空中に設置されている。

電磁カロリメータの中心にはビームを通すための穴 (ビームホール) が開けてあるが、E391a 実験では小さく絞ったビームを使用することでビームホールの大きさをできるだけ小さくしている。こうすることでビームホールから検出器の外へ逃げる粒子の数を可能な限り抑えている。

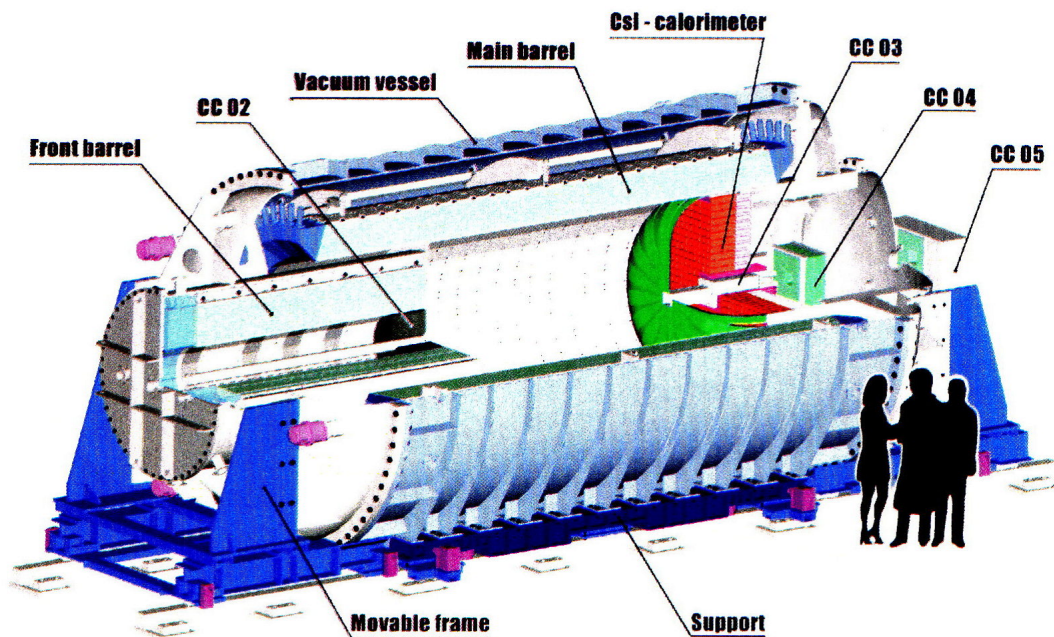


図 1.7: E391a 検出器の全体像

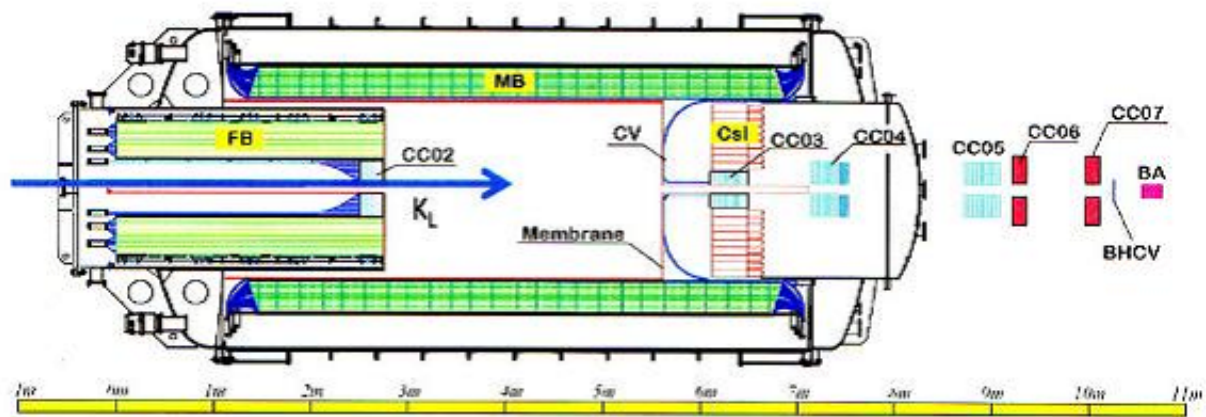


図 1.8: E391a 検出器の断面図

1.3 J-Parc E14 実験

E14 実験は現在茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設 (J-Parc) で 2011 年から行われる予定の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験である。J-Parc の陽子シンクロトロンは陽子の運動量を $30\text{GeV}/c$ として運転を開始し、その後 50GeV まで引き上げる予定である。ビーム強度はこのクラスの陽子加速器では世界最大強度であり、E391a 実験をおこなった KEK PS の約 100 倍の強度である。この J-Parc で行われる E14 実験は Step1、Step2 の 2 段階に分けて行うことを計画している。以下では Step1、Step2 それぞれについて説明する。

1.4 Step1

Step1 では世界初の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の信号発見を目標に行われ、検出感度は標準理論で予測される 3×10^{-11} を目指す。検出器は基本的に E391a 実験で使用されたものを使用するが、検出感度向上のため電磁カロリメータは E391a で使用されたもの ($7\text{cm} \times 7\text{cm} \times 30\text{cm}$) よりもサイズが小さく放射長の長いもの ($2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 50\text{cm}$ 及び $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 50\text{cm}$) を使用する。また、読み出しの方法もデッドタイムの無い読み出し方法にする予定である。以下に E391a 実験で使用された検出器の詳細を述べ、次に Step1 に向けた改良点を述べる。

1.4.1 E391a 上流部検出器

上流部に置かれる検出器は図 1.9 のような配置になっている。上流部に置かれた検出器は崩壊測定領域上流での K_L 崩壊によるバックグラウンドを除去するための Front Barrel (FB) 及び CC02 (Collar Counter の略) の 2 つの veto 検出器から構成されている。FB は鉛とプラスチックシンチレータの積層構造をした台形モジュールを 16 個円筒状に積み上げ、これを波長変換ファイバーを用いて上流側一方から読み出している。全長 2.75m 厚さは $16.5X_0$ (X_0 :放射長) である。CC02 は鉛板とプラスチックシンチレータを積層し、波長変換ファイバーを積層面に対し垂直に通して読み出す、Shashlik タイプと呼ばれる検出器である。

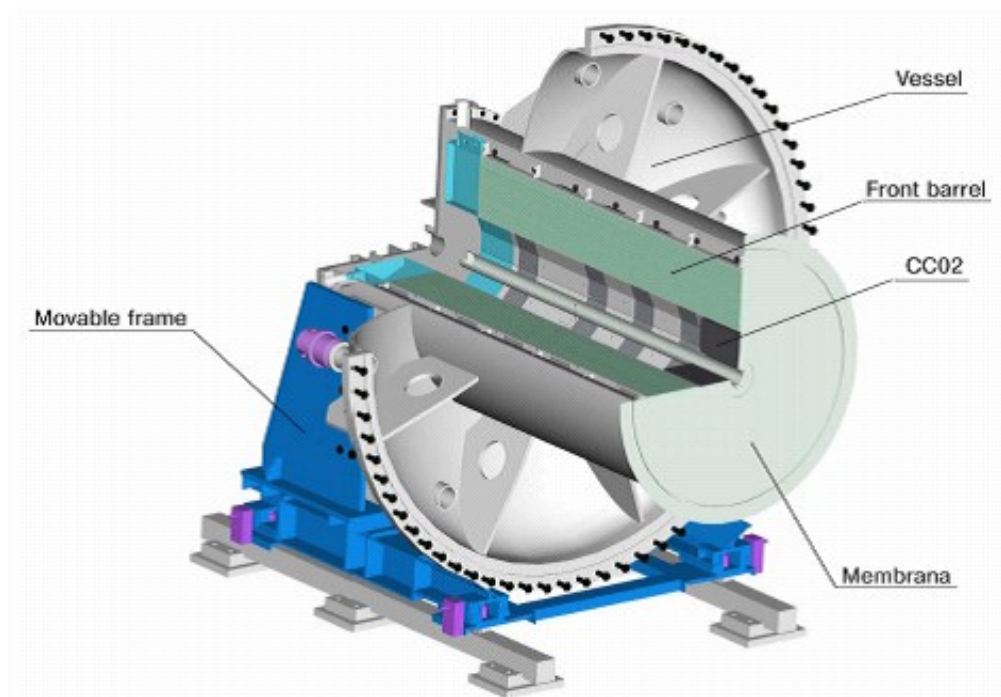


图 1.9: 上流部検出器

1.4.2 E391a 中央部検出器

中央部検出器の構造を図 1.10 に示す。中央部には Main Barrel(MB) 及び Barrel Charged Veto(BCV) とよばれる veto 検出器を設置している。MB は FB と同様に鉛とプラスチックシンチレータを積層した台形モジュール 32 個から構成され、円筒状に組み上げられている。測定方法も FB と同様だが、検出器の長さが長いので両側から読み出している。全長 5.5m、厚さ $14X_0$ である。BCV は MB と崩壊領域との間に位置する、荷電粒子に対する veto 検出器である。2 層のプラスチックシンチレータから構成され、両側から波長変換ファイバーを用いて読み出している。

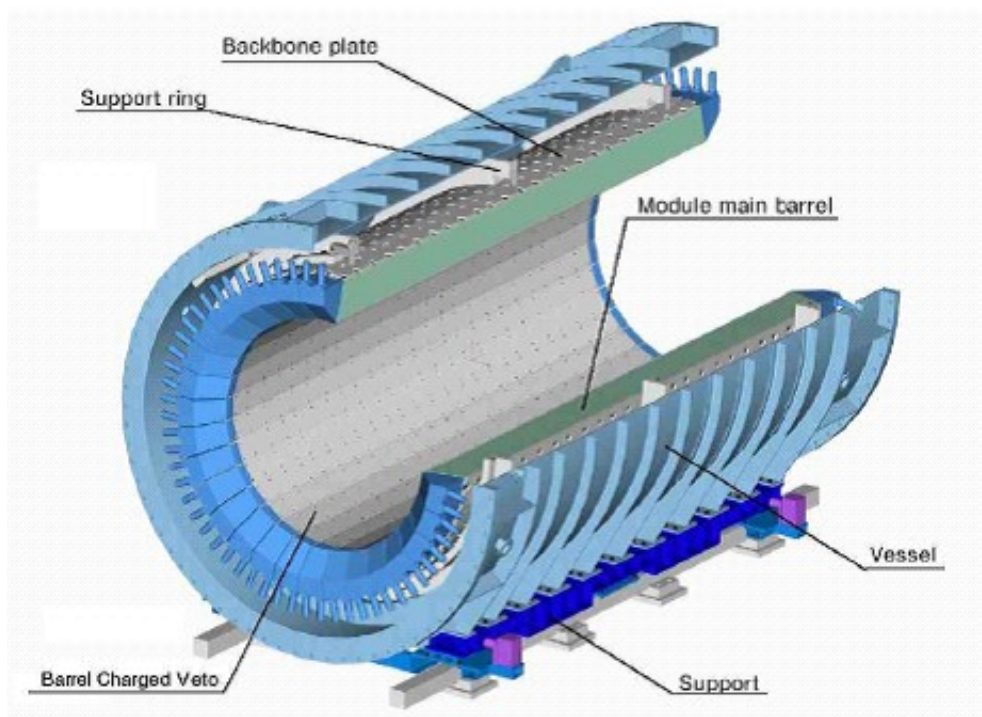


図 1.10: 中央部検出器

1.4.3 E391a 下流部検出器

下流部検出器の構造を図 1.11 に示す。メインの π^0 からの崩壊の γ 線を検出する CsI カロリメータを end cap とし、veto 検出器の CC03、CC04、Charged Veto(CV) さらに CsI 外周部の隙間を埋めるように配置されたサンドイッチカウンターから成る。CsI カロリメータの内側中心部に位置する CC03 は、タングステンとプラスチックシンチレータの積層構造を成し、CsI の beam hole 側へのシャワー漏れを捉える。Charged Veto はその名の通り CsI に入射する荷電粒子を veto するための検出器であり、CsI カロリメータの外側から半

球状に伸びる outer と CC03 の内側から伸びる inner で構成され、CsI を覆うように配置されている。サンドイッチカウンターは鉛とプラスチックの積層構造であり、外周部を埋めている。さらに CsI カロリメータ後方に、鉛・プラスチック積層の CC04 が配置されている。

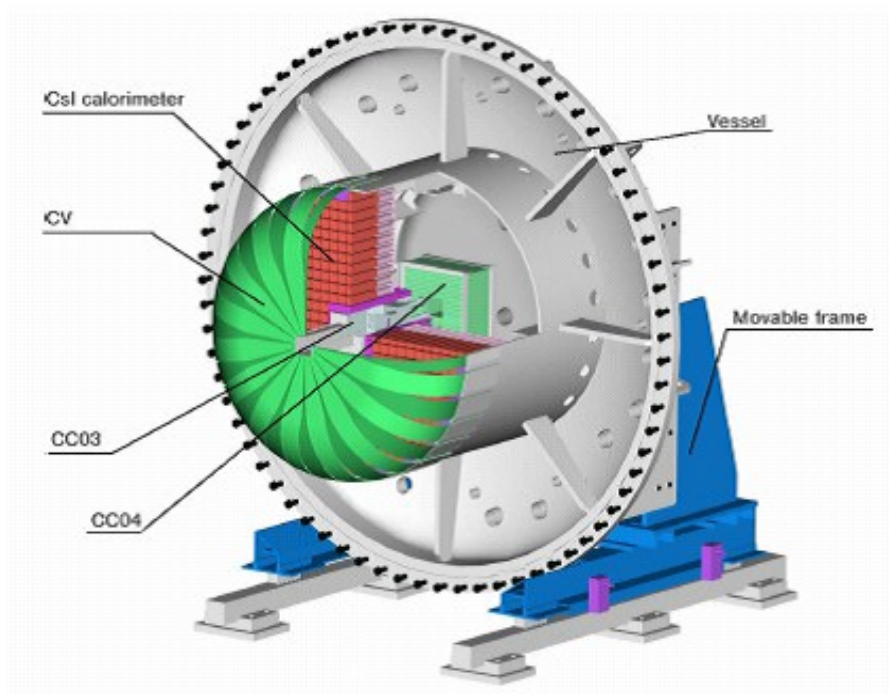


図 1.11: 下流部検出器

1.4.4 E391a 真空容器外の下流部検出器

真空容器外部の下流には、CC05、CC06、CC07、Beam hole Charged Veto(BHCV)、Back Anti(BA)を設置している。CC05 は CC04 とほぼ同形状の鉛とプラスチックの積層構造であり、真空容器の直後に配置している。CC06、CC07 は鉛ガラス検出器 10 個から成る veto 検出器であり、CC04、CC05 で veto しきれずに通過してくる粒子を veto する。図 1.8 に示すように、最下流部では BHCV、BA を beam に直接当たる形で配置し、 4π 方向の最後の穴を塞ぐ。厚さ 1mm のプラスチックシンチレータから成る BHCV は beam hole 中に逃げた荷電粒子を veto する。そして最後にプラスチックシンチレータとクォーツから成る BA によって γ を veto する。BHCV や BA のように、beam を直接受けるような場合には検出器から 2 次粒子が後方に放出される現象 (back splash) が起こり、これが CsI カロリメータに当たるとバックグラウンドになってしまう。真空容器外に置かれた collar counter にはこのようなイベントを veto する役割も与えられている。

1.4.5 E391a CsI 検出器

E391a 実験の検出器では、 γ 線 end cap にある CsI (pure) カロリメータで検出する。CsI カロリメータは図 1.13 で示すように 576 本の CsI で構成されている。576 本のうち中心部の 24 本は $50 \times 50 \times 500\text{mm}^3$ であり、 $27.0X_0$ に相当する。エネルギー分解能は 1GeV でおおよそ 2% である。この CsI は KTeV グループからの借用品のため KTeV クリスタルと呼んでいる。残りの 496 本は $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ ($16.2X_0$) であり、外周部の 56 本は支持円筒の形状に合うようコーナーを削ってある。それぞれの CsI の構造は図 1.12 に示した。pure CsI は他のシンチレータと比較して光の減衰時間が短く、さらに放射線に強い耐性があるため採用された。

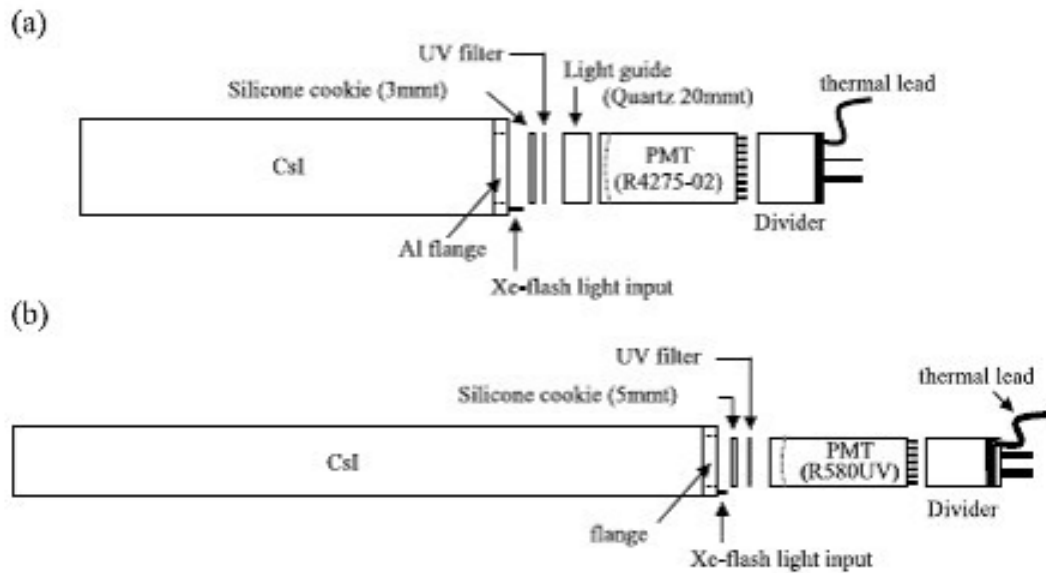


図 1.12: CsI モジュールの概念図。(a) E391a クリスタル ($70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$)、(b) KTeV クリスタル ($50 \times 50 \times 500\text{mm}^3$)

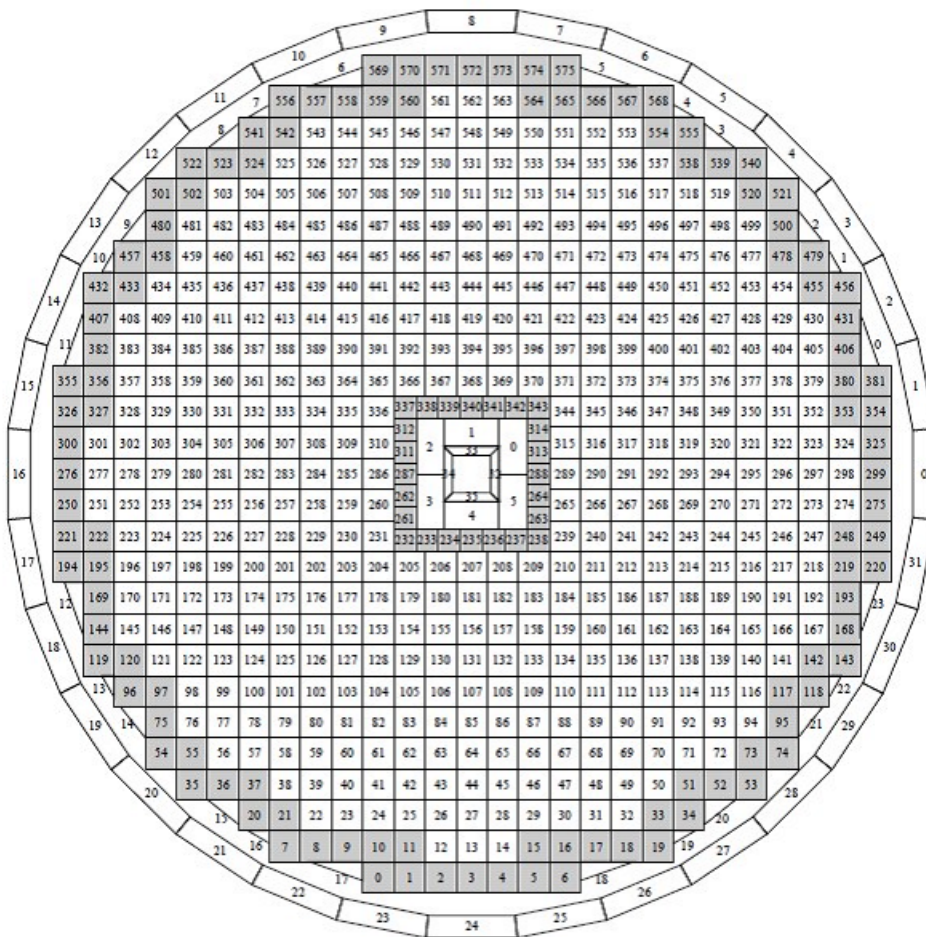


図 1.13: CsI カロリメータ

1.5 検出器の改良点

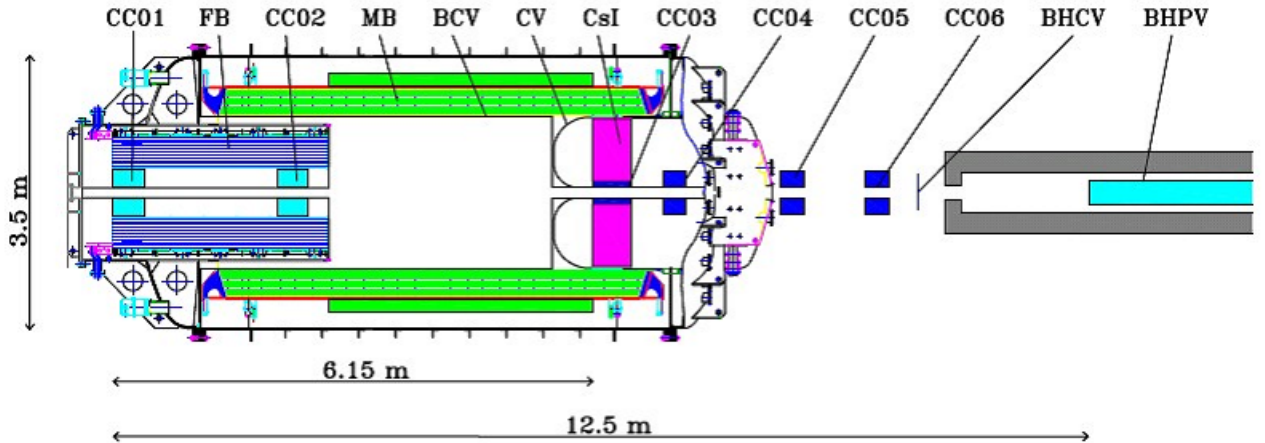


図 1.14: E14 実験検出器の全体図。各検出器の役割と置かれる場所によってカロリメータ、Barrel Photon Veto、Charged Veto、Collar Counter、Beam Hole Veto の5つに分けることができる。

1.5.1 カロリメータ

Step1 のところでも述べた通り、E391a 実験では $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 300\text{mm}^3$ の CsI 結晶 (KEK CsI) を主に使用していたのに対し、E14 実験ではアメリカ・フェルミ国立研究所 (FNAL) で行われた KTeV 実験で使用された CsI 結晶 (KTeV CsI) を使用することになった。KTeV CsI のサイズは $25 \times 25 \times 500\text{mm}^3$ と $50 \times 50 \times 500\text{mm}^3$ の2種類があり、中心部に $25 \times 25 \times 500\text{mm}^3$ の CsI を 2240 個並べ、その外側に $50 \times 50 \times 500\text{mm}^3$ の CsI を 336 個並べる。図 1.15 に E14 実験における CsI カロリメータの正面図を示す。

1.5.2 Barrel Photon Veto

Barrel Photon Veto は K_L の崩壊により生成される γ を検出するために崩壊領域を囲っている。Barrel カウンターは鉛とシンチレータによる sampling calorimeter で、読み出しに波長変換ファイバーを使用している。また、Barrel Photon Veto は構造を Front Barrel (FB) と Main Barrel (MB) の2つに分けることで K_L の崩壊領域を上流部とシグナル領域に二分している。これらの検出器は E391a 実験で使用したものを E14 実験でも使用する予定であるが、MB については γ に対する検出効率を上げるため、MB にさらに鉛とシンチレータによる sampling カロリメータを足す計画である。

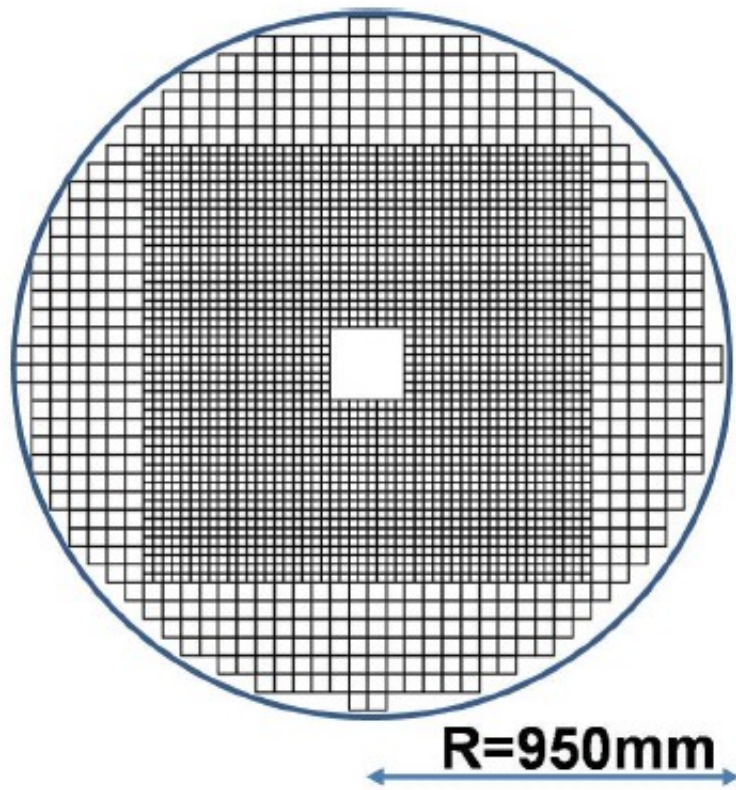


図 1.15: E14 実験の CsI カロリメータの正面図。内側の結晶が $25 \times 25 \times 500 \text{mm}^3$ のサイズの結晶。外側の結晶が $50 \times 50 \times 500 \text{mm}^3$ のサイズの結晶。ビーム軸を中心に $\pm 10 \text{cm}$ の正方形のビームホールが開けられている。

1.5.3 Collar Counter

E14 実験では CC03 と CsI カロリメータの関係は図 1.16 のようになっている。E14 実験では CC03 に PWO 結晶を使用する予定である。また、CC02 は FB の内側、最下流面付近に置かれる検出器で、崩壊領域から上流に行く γ を捕らえると同時に、上流で崩壊した K_L を排除する役割を持つ。

E391a 実験では図 1.17 に示すような鉛とシンチレータとの shashlyk 型の sampling カロリメータを使用していた。E14 実験では E391a 実験で使われた CC02 の代わりに Neutron Collar Counter(NCC) を設置する。NCC は CsI 結晶を使用し、図 1.18 のように読み出しを分割することでハロー中性子のフラックスを測定することができる。

E14 実験では CC04、CC05、CC06 の Collar Counter には KEK CsI を使用する予定である。また図 1.14 では FB の上端部に CC01 が設置されているが、研究の結果 CC01 を設置する利点が無かったため、現在は CC01 は設置しないと考えられている。

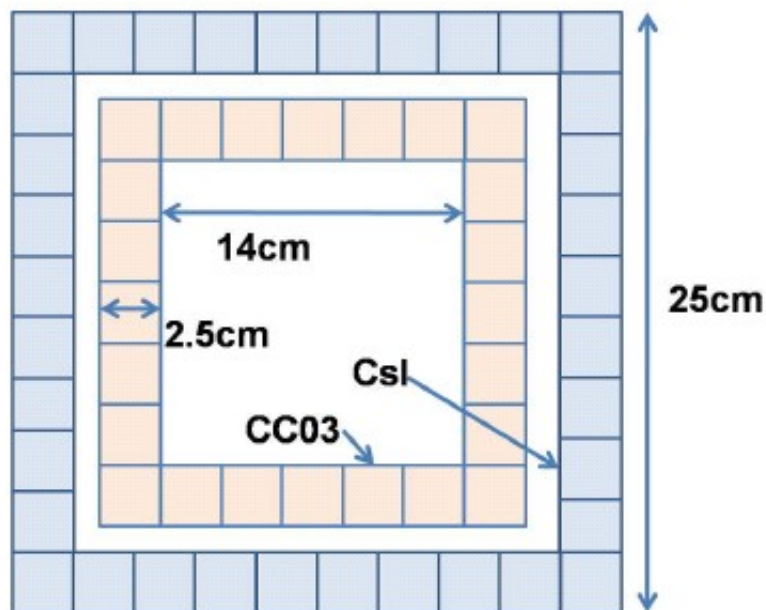


図 1.16: CsI カロリメータのビームホール付近の様子。

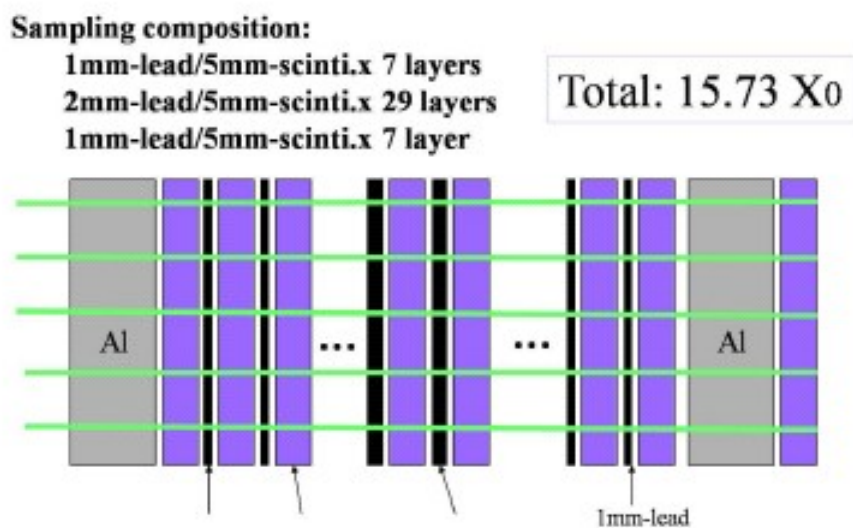


図 1.17: E391a 実験で使用された CC02 のデザイン。鉛とシンチレータに対して垂直方向に波長変換ファイバーを通し PMT を使用して信号を読み出す。

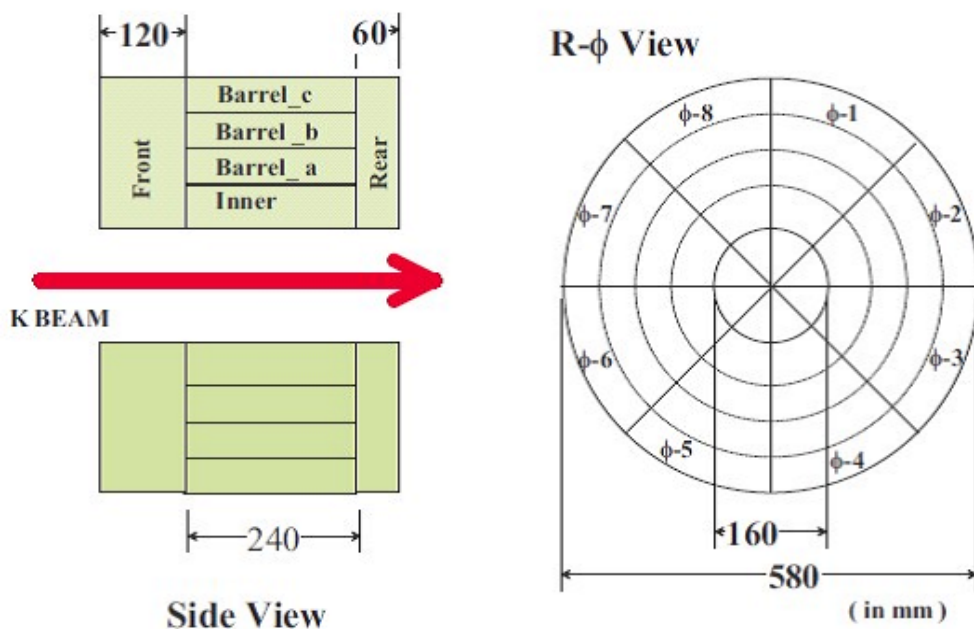


図 1.18: NCC のデザイン。barrel counter の周りを光子 veto 用カウンターで覆うことで中性子と γ を区別する。

1.5.4 Beam Hole Veto

Beam Hole Veto はビームホールから逃げる粒子を捕まえるためにビーム軸上に設置される検出器で高いレート耐性が要求される。Beam Hole Veto は荷電粒子検出器の Beam Hole Charged Veto (BHCV) と光子検出器の Beam Hole Photon Veto の2つの検出器から成る。BHCV はプラスチックシンチレータの使用が考えられているが、現在はBHCV用のガスシンチレーション比例計数管の研究も行われている。BHPVは図 1.19 のような鉛による鉛コンバータとチェレンコフ輻射体としてエアロジェルを組み合わせた検出器で、高い光子検出効率を保ちつつ非常に高い中性子不感率を実現している。

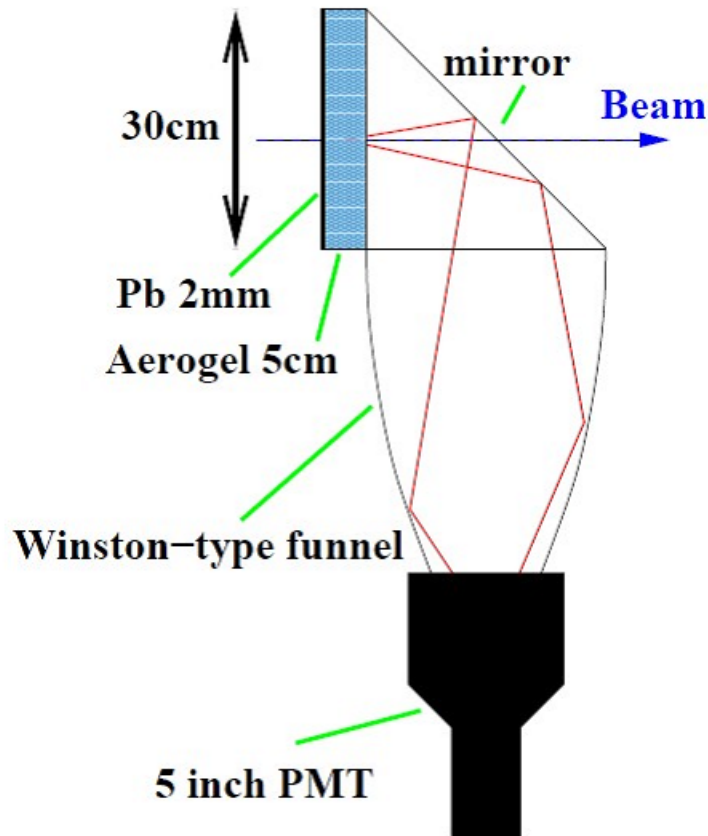


図 1.19: BHPV の概念図。鉛で γ を電子陽電子対にし、電子、陽電子がエアロジェルを通過する際に発するチェレンコフ光を Winston-cone で集光し PMT で読み出しを行う。

1.5.5 Charged Veto

Charged Veto (CV) は CsI の前面を覆うように設置される。CV は不感率 10^{-4} 以下の荷電粒子の検出が要求されている。図 1.20 に CV のビーム上流側から見た正面図を示す。有感領域は 8 角形になっており、中心にはビームホールが設けられている。シンチレータ部分の面積は $1.5m^2$ であり、厚さは $2.5\sim 5mm$ のものを使用する。CV は 2 つの面によ

て構成され、1面はCsIの直前に、もう1面はその25cm上流に設置される（図1.21）。読み出しは波長変換ファイバーによって行われる。また、光検出器としてMPPCが使用される。

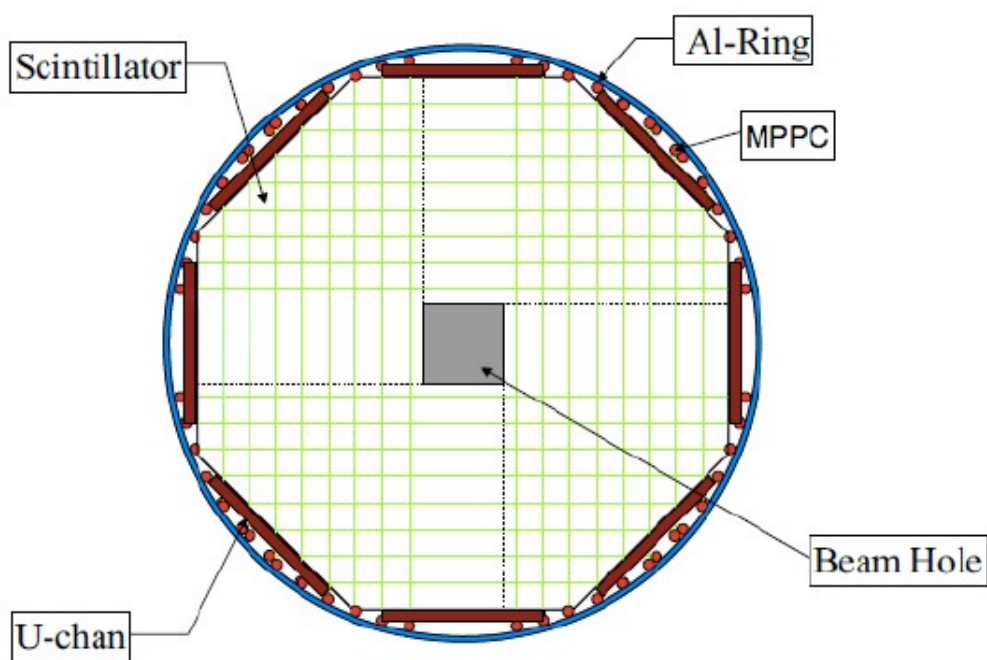


図 1.20: CV の正面図。

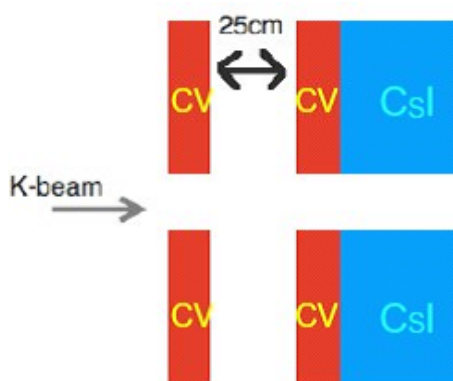


図 1.21: CV の側面図。



図 1.22: J-Parc 施設の全体図

1.6 Step2

Step2ではStep1までに得られた経験を活かし、検出器をアップグレードし、長さ15m、直径3mのものを建設する予定である。Step2では約100イベント程度の検出が期待されており、それによる標準理論の検証が最終目標である。

第2章 E14実験ビームライン

この章では E14 実験のビームラインについて述べる。

2.1 K_L ビームライン

2.1.1 ビームライン

E14 実験は図 2.1 のようなハドロンホールの K_L ビームラインを使用して行われる。30GeV でシンクロトロンから入射した陽子ビームはニッケル標的に入射し、2次粒子を発生させる。 K_L ビームラインのような中性のビームは荷電粒子のビームと異なり、マグネットによる磁場を利用した方向の制御や、ビームの収束をすることができず、運動量を選択することもできない。また、 K_L と混在する中性子や γ といった他の中性粒子とを区別することもできない。このことが実験全体の難しさの大きな原因となっている。

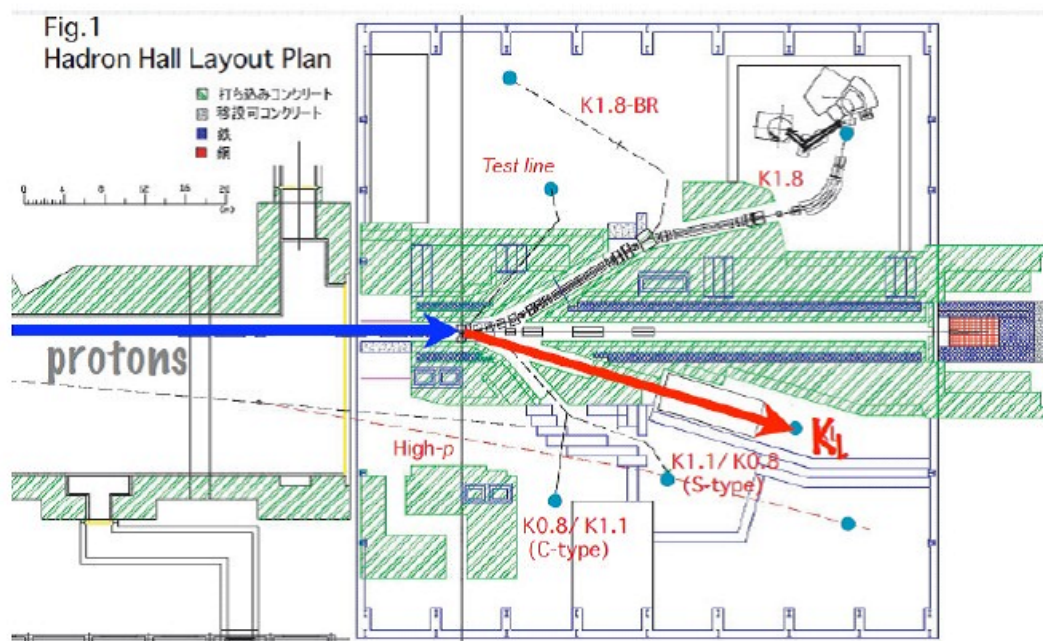


図 2.1: ハドロンホールと K_L ビームライン図中の青い矢印の先端はニッケル標的の位置を示している。

K_L ビームラインはビーム軸から 16 度の方向に引き出され、全長が 21m からなるビームラインの途中に設置された 2 つのコリメータによって形成される。

2.1.2 コリメータ

コリメータは以下の 2 つのコンセプトを基に、形状や配置の最適化に向けた研究が行われた。

- ペンシルビーム

ペンシルビームとはビーム軸に対して垂直な運動量成分 P_t が十分小さいビームのことである。このようなビームを使用するには 2 つの理由がある。1 つは再構成された π^0 の P_T の不定性を減らすためである。これは、再構成された π^0 の P_T は E14 実験において $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ バックグラウンドとシグナルを区別するのに重要だからである。 π^0 の P_T は π^0 の崩壊位置がビーム軸上にあることを仮定して再構成されるので、ビームのサイズが大きいと P_T の分解能が悪くなってしまう。もう 1 つの理由はビームホールを小さくすることで、ビームホールから逃げ出す粒子を減らすためである。

- ビームハローをできるだけ少なくする。

ビームの周りに存在するハロー中性子が検出器と相互作用を起こし、二次粒子を生成することでバックグラウンド事象となるハロー中性子バックグラウンドは、E14 実験の主なバックグラウンド事象の 1 つである。このバックグラウンドを減らすために、ハロー中性子と K_L の数の比ができるだけ少ないビームラインを設計する必要がある。E14 実験ではビームデザインの結果、ハロー中性子/ K_L の比が 0.77×10^{-3} となり、E391a 実験と比べて 66 分の 1 まで小さくなることがわかっている。

現在決定しているコリメータのデザインを図 2.2 及び 2.3 に示す。コリメータの座標はビームラインの中心を z 軸とし、ビームの下流に向かって $+z$ とする。 $z=0$ はニッケル標的の位置である。また、鉛直上向きを y 軸、右手系で水平方向を x 軸とする。コリメータは、 $z=650 \sim 1050$ cm の位置と $1500 \sim 2000$ cm の位置に設置されている。また図中の赤線はターゲットからコリメータの淵に当たる線であり、上流の青線は Cu コリメータ、ピンク色の線は γ 吸収用の鉛アブソーバー、2 つのコリメータの間に描かれている緑線は、荷電粒子除去用の sweeping magnet、下流側の水色の線は CC02、最下流の緑線は CsI 検出器をそれぞれ示している。

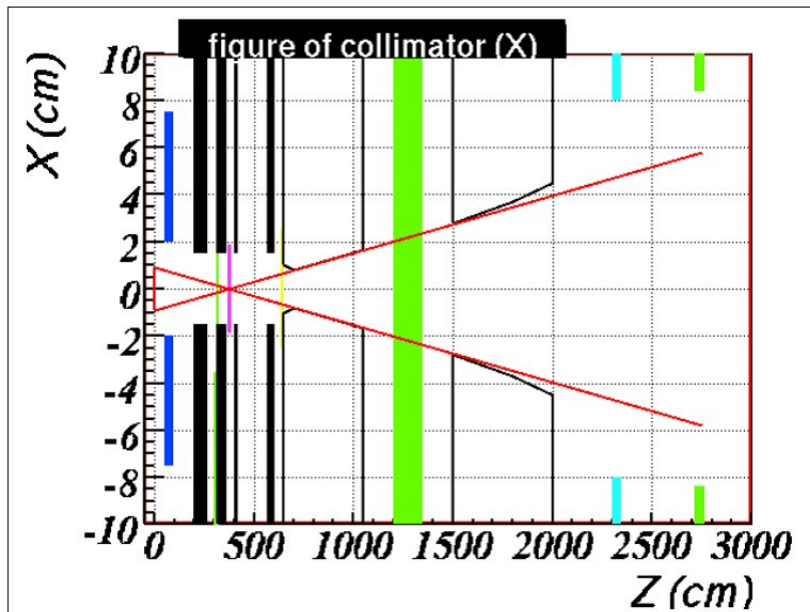


図 2.2: コリメータデザイン (X)

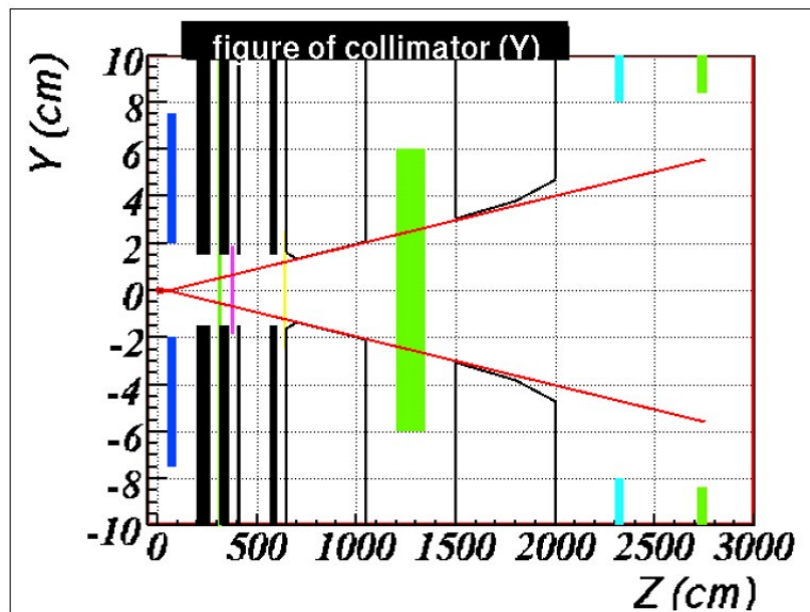


図 2.3: コリメータデザイン (Y)

2.1.3 K_L ビーム

モンテカルロシミュレーションによると、前述のコリメータを使用した際に崩壊領域に到達する K_L の個数は 1spill あたり 1.46×10^7 個であり、ビームのサイズはおよそ $x = 10\text{cm}$ 、 $y = 10\text{cm}$ となる (図 2.4)。また中性子及び γ の運動量分布をそれぞれ図 2.5 と図 2.6 に示す。

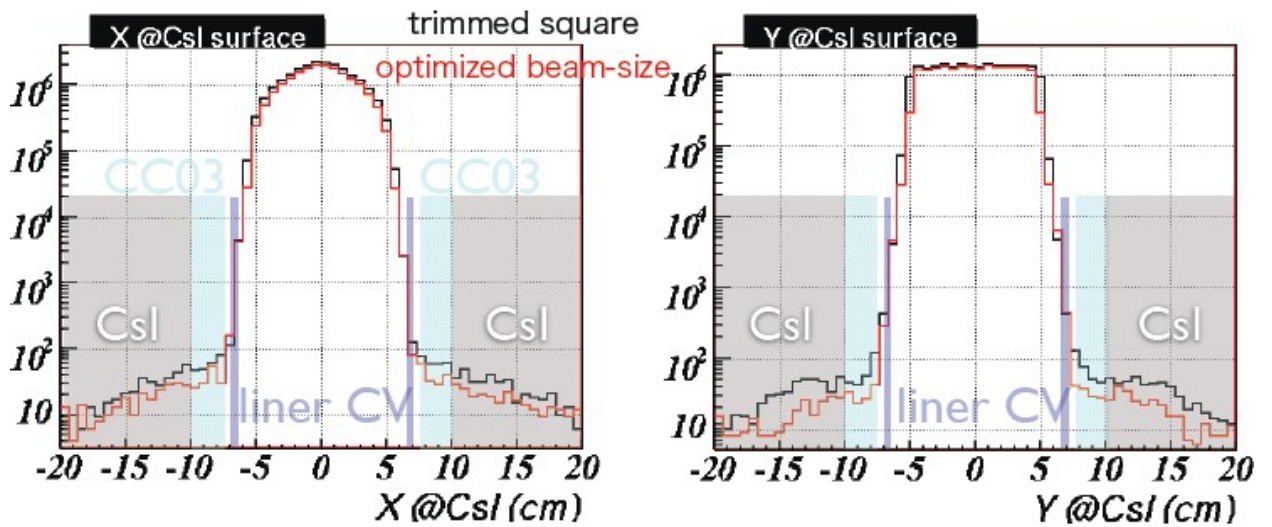


図 2.4: CsI 表面での K_L ビームの profile。現在決定しているコリメータデザインによる plot (赤線) とそれ以前のデザインによる plot (黒線) の比較

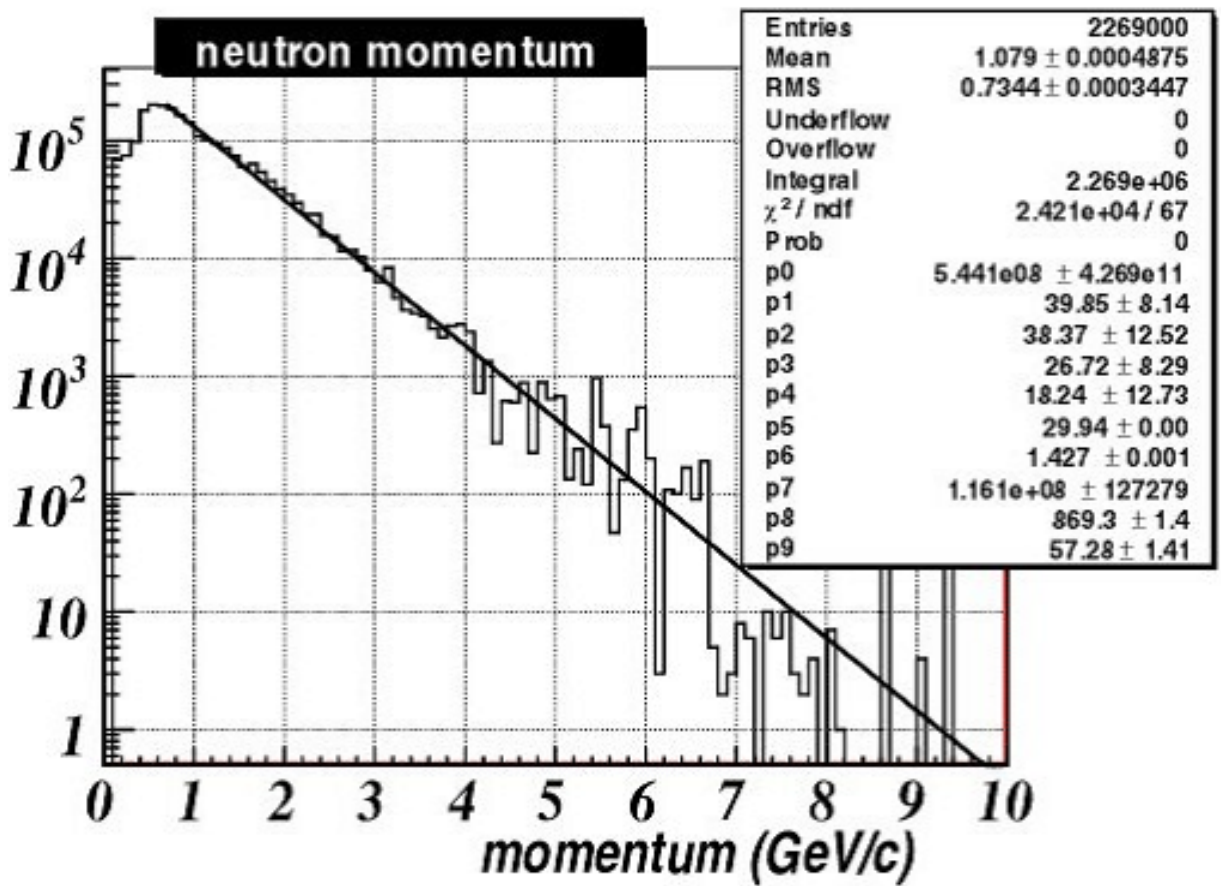


図 2.5: コア中性子の運動量分布

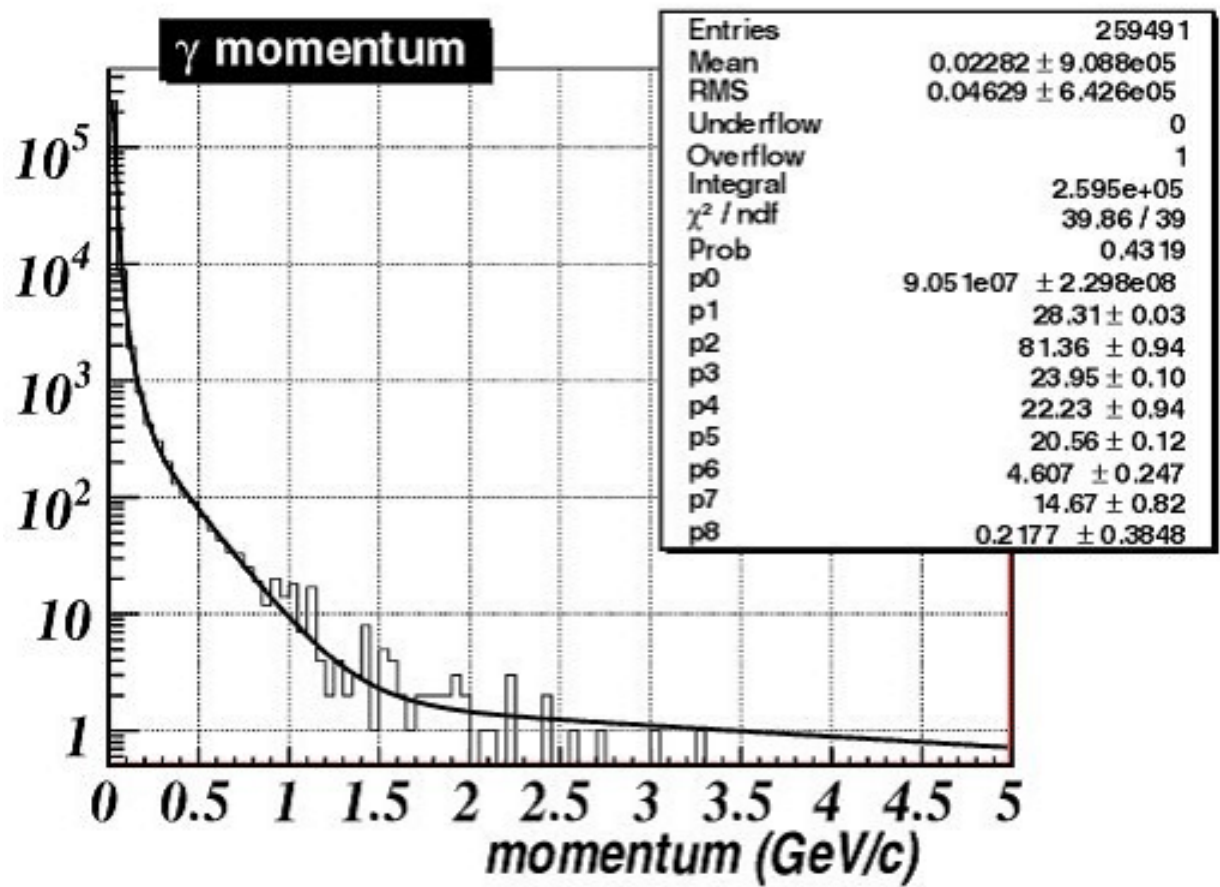


図 2.6: コア γ の運動量分布

2.2 バックグラウンド事象

E14 実験のバックグラウンド事象は次の2つに分類することができる。1つは K_L の崩壊によって生成された粒子による K_L バックグラウンド、もう1つはビームの周りに多数存在するハロー中性子が検出器と相互作用を起こすことで生成される粒子が基となるハロー中性子バックグラウンドである。ここではこれらのバックグラウンドについて簡単にまとめておく。

2.2.1 K_L バックグラウンド

表 2.1 に K_L の主な崩壊モードと分岐比を示す。これらは K 中間子バックグラウンドの基になりえる。以下、各モードについて簡単にまとめておく。

崩壊モード	分岐比
$K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu$	$(40.53 \pm 0.15)\%$
$K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu$	$(27.02 \pm 0.07)\%$
$K_L \rightarrow 3\pi^0$	$(19.56 \pm 0.14)\%$
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$(12.56 \pm 0.05)\%$
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$(1.97 \pm 0.008) \times 10^{-3}$
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$(8.69 \pm 0.04) \times 10^{-4}$
$K_L \rightarrow \gamma\gamma$	$(5.48 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$(2.8 \pm 0.4) \times 10^{-11}$

表 2.1: K_L の主な崩壊モード。参考のために $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の理論的予測値も示している。

- $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 、 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$

これらの崩壊モードは終状態に π^0 を含むため、残りの余分な粒子が検出されなかった場合はバックグラウンド事象になってしまう。ただし、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ は分岐比が大きい余分な粒子をたくさん持っているため、バックグラウンド事象としては無視できるほど小さくなる。また、 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ も分岐比は大きい余剰粒子が荷電粒子であるため比較的検出が容易である。また、終状態で π^0 の持ちうる運動量が小さいため信号と区別しやすい。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ は上記の2つに比べ分岐比は2桁小さいが、余剰粒子が π^0 1つだけなので E14 実験の主なバックグラウンド事象になっている。

- $K_L \rightarrow \gamma\gamma$

$K_L \rightarrow \gamma\gamma$ は終状態が 2γ のみとシグナル事象と同じであるが、2体崩壊のため横運動量 $P_t = 0$ となる。再構成された π^0 の P_t に高い運動量を条件付けることで排除することができる。

- $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \mu$

この崩壊モードは終状態に γ を含んでいないが、 π^- の荷電変換反応と e^+ の対消滅により計4つの γ を終状態に持つことができる。そして、4つのうち2つの γ が検出できなかった場合バックグラウンド事象となる。

2.2.2 ハロー中性子バックグラウンド

ハロー中性子バックグラウンドはハロー中性子が検出器と相互作用を起こし、二次粒子を生成することで発生する。現在わかっているハロー中性子バックグラウンドは、発生する検出器とバックグラウンドの基となる粒子ごとに分類された CC02 バックグラウンド、CV- η バックグラウンド、CV- π^0 バックグラウンドと呼ばれている3つがある。この中で CC02 バックグラウンド、CV- η バックグラウンドは E391a 実験の Run-II の主なバックグラウンド事象であった。表 2.2 に E391a 実験における各バックグラウンド数を示す。

Background source	Estimated number of BG
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$	0.01 ± 0.09
CC02	0.16 ± 0.05
CV- π^0	0.08 ± 0.04
CV- η	0.06 ± 0.02
total	0.41 ± 0.11

表 2.2: E391a Run-II におけるバックグラウンド事象

2.3 ビームサーベイ実験

前述の通り E14 実験には様々なバックグラウンド事象が存在する。そのため、ビームサーベイ実験によってビーム及び、バックグラウンド粒子の profile を測定し、事前のシミュレーション結果と比較検討することは非常に大きな意味を持っている。

2.3.1 NCC like 検出器によるハロー中性子測定

NCC like 検出器は E391a 実験の CC02 と置き換える NCC(Neutron Collar Counter) の試作型である。これをビームのハロー部分に設置することによりハロー中性子のエネルギー分布と位置分布を測定する。図 2.7 に NCC like 検出器の側面及び正面図を示す。inner PWO 検出器の上に、ビーム上流側から順番に Front CsI、Middle CsI、RearCsI と設置されている。また NCC like 検出器の前部と下部には鉛のコンバータが設置されている。図 2.8 に NCC like 検出器に中性子及び γ が入射した模式図を示す。Front CsI、RearCsI 及び inner PWO は γ を排除するための veto に用いられる。

なお、 γ を排除する Cut は以下通りである。

- Front CsI での deposit energy が 0

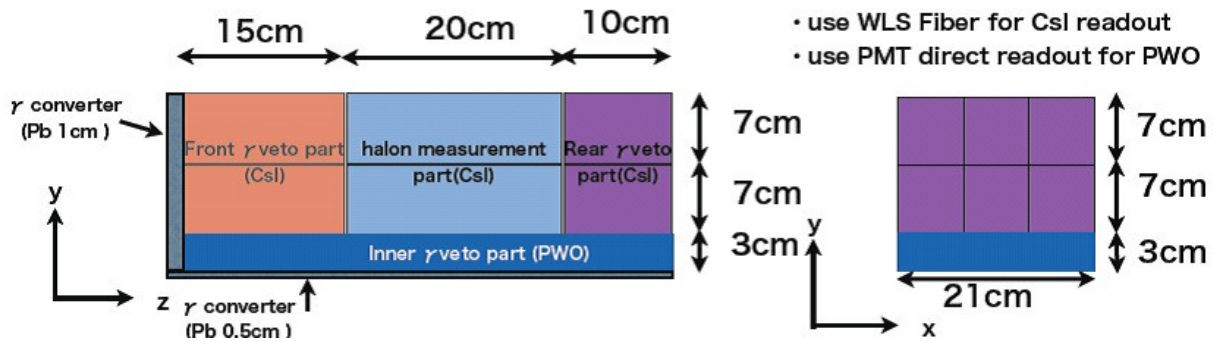


図 2.7: NCC like 検出器の側面図 (左) と正面図 (右)

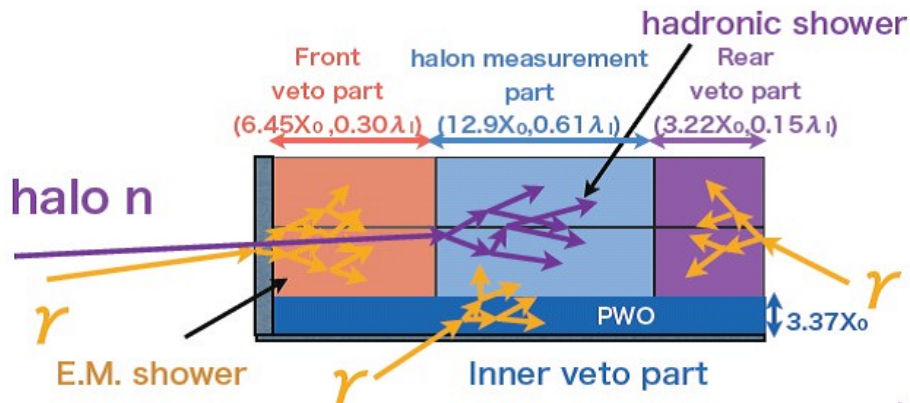


図 2.8: 中性子及び γ が入射した際の NCC like 検出器の模式図

- Inner PWO での deposit energy が NCC like 全体の deposit energy の 5%以下
- Middle CsI での deposit energy が 50MeV 以上
- Rear CsI での deposit energy が全体の deposit energy の 10%より大きく、Middle CsI での deposit energy が 300MeV 以下

2.3.2 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 測定

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 崩壊モードを測定して K_L の数を測定する実験では、Tracker（シンチレータ+波長変換ファイバー、1mm pitch、全 400 チャンネル）とカロリメータ（E391a CsI×25×2 ブロック）を使用する。図 2.9 にこれらのセットアップを示す。

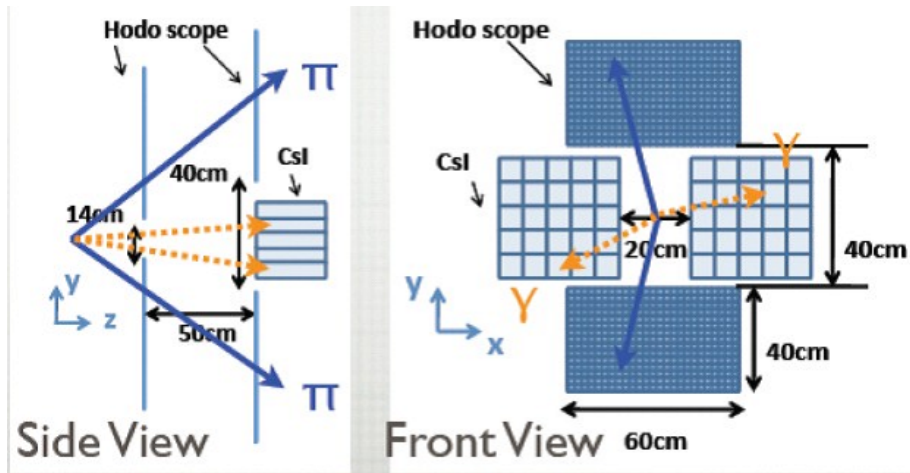


図 2.9: カロリメータと Tracker のセットアップ

このセットアップはビームが中心を通るように設置される。ビームの進行方向を+z軸方向としたときの位置関係を図 2.10 に示す。なお、 $z=0$ は Front Barrel の前面である。

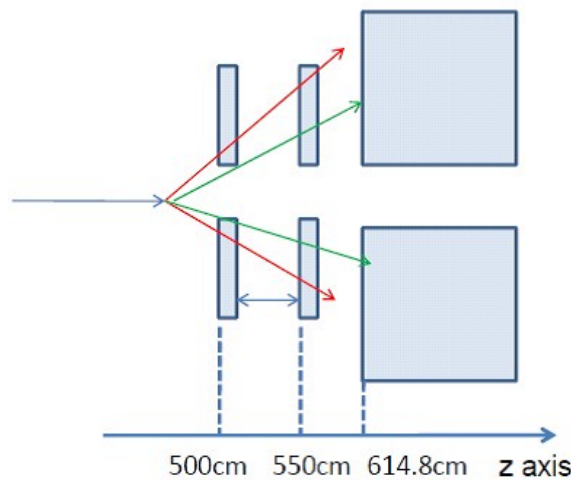


図 2.10: カロリメータと Tracker の位置関係。赤線は荷電粒子、緑線は γ を示す。

このセットアップにより、カロリメータによって測定された 2γ のエネルギーと位置から π^0 のビーム上での崩壊の位置を算出することができる。また、 π^+ の運動量を P_1 、 π^- の運動量を P_2 とし、Tracker により測定した π^+ 、 π^- のビームとなす角度を θ_1 、 ϕ_1 、 θ_2 、 ϕ_2 とすると、ビームは垂直方向の運動量 $P_t = 0$ のペンシルビームであるので、

$$P1\sin\theta_1\cos\phi_1 + P2\sin\theta_2\cos\phi_2 + P_x = 0$$

$$P1\sin\theta_1\sin\phi_1 + P2\sin\theta_2\sin\phi_2 + P_y = 0$$

の式が成り立つ。この連立方程式を解くことで π^+ の運動量と π^- の運動量を求めることができる。これにより、3つの π 中間子の運動量が求まったので、 K_L を再構成することができ、 K_L の個数、運動量を測定することができる。

2.3.3 Magnet による $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ 測定

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ の測定には Ushiwaka magnet (図 2.13、2.12) と drift chamber を使用する。セットアップを図 2.11 に示す。上流の2枚の drift chamber はサイズが 620mm×315mm で、上流の end guard 内に設置される。下流の2枚はサイズが 900mm×900mm である。

magnet 内を通過する荷電粒子は磁場によって進路が曲げられる。進路の曲がり具合は粒子の運動量に依存するため、drift chamber によって測定されたビーム軸とのなす角によって、その粒子の運動量を算出することができる。 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊で発生する粒子は全て荷電粒子であるため、前節と同様に K_L の質量から $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ のイベントを選別することができる。

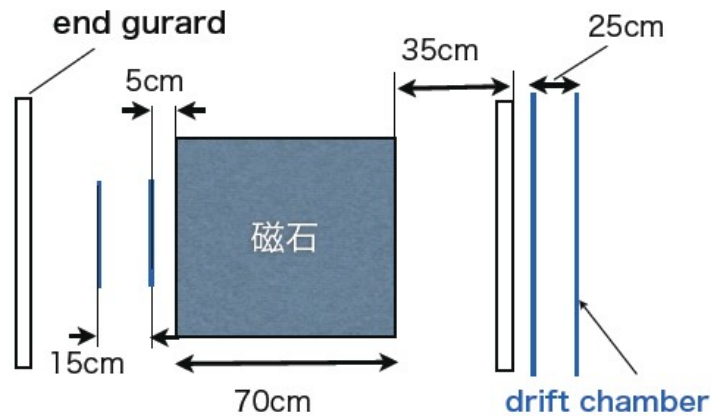


図 2.11: magnet と drift chamber のセットアップ。

牛若電磁石

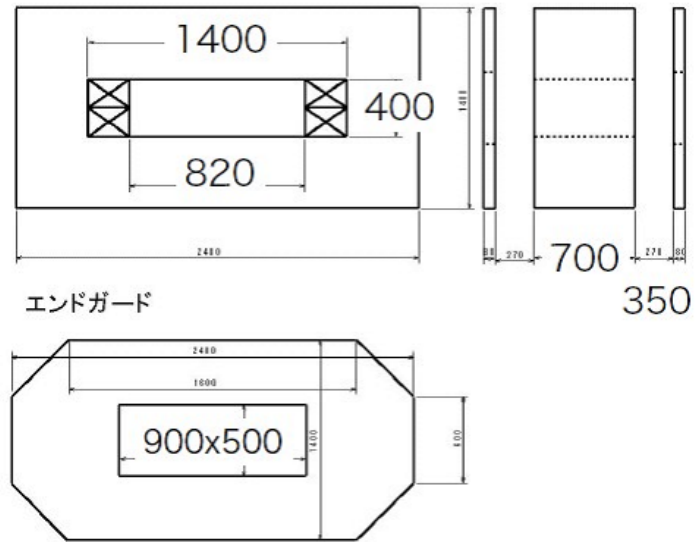


図 2.12: Ushiwaka magnet の概略図。図中の単位は mm。磁場は 1T。



図 2.13: Ushiwaka magnet の写真

2.3.4 コア中性子、 γ の測定

中性子及び γ の個数と profile の測定には本研究のメインテーマである n/γ モニタ検出器 Cerberus を使用する。Cerberus に関しては次章で詳しく説明する。

第3章 Cerberus

この章では本研究のテーマである n/γ モニタ検出器 Cerberus について説明する。

3.1 研究目的

2章で述べてきたように、ビームライン中の中性子は物質と相互作用し π^0 を生成するため、重大なバックグラウンド事象を引き起こす。このため中性子の profile をビームサーベイにより正確に理解することは E14 実験においても非常に重要な意味を持っている。

n/γ モニタ検出器 Cerberus は E391a 実験のビームサーベイにおいて、 γ と中性子の数とエネルギー分布を測定するために製作された。このエネルギー分布測定と中性子/ γ 識別のための機能しか持っていない既存の Cerberus を改良することによって中性子の位置測定機能を持たせることができるかどうかを検証していくことが本研究の目的である。

3.2 Cerberus

3.2.1 Cerberus の構造

Cerberus は図 3.1 のように 6 つのモジュールから構成されている。有感領域は $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ である。ビームが来る方向から見て一番前に設置されるモジュールは鉛 4mm /プラスチックシンチレータ $3.7\text{mm} \times 25$ 層のサンドイッチカロリメータ ($18X_0, 0.7\lambda_t$) になっており、このモジュールを EM(Electric Magnetic) part と呼ぶ。EM part の後ろに設置される残り 5 つのモジュールは鉄 4mm /プラスチックシンチレータ $3.7\text{mm} \times 25$ 層のサンドイッチカロリメータになっており、これらを Hadron part と呼ぶ。Cerberus 全体での相互作用長は $4.27\lambda_t$ となっている。また、各モジュールには上方に 4 本、下方に 4 本、合計 8 本の 3inch 光電子増倍管が取り付けられている。

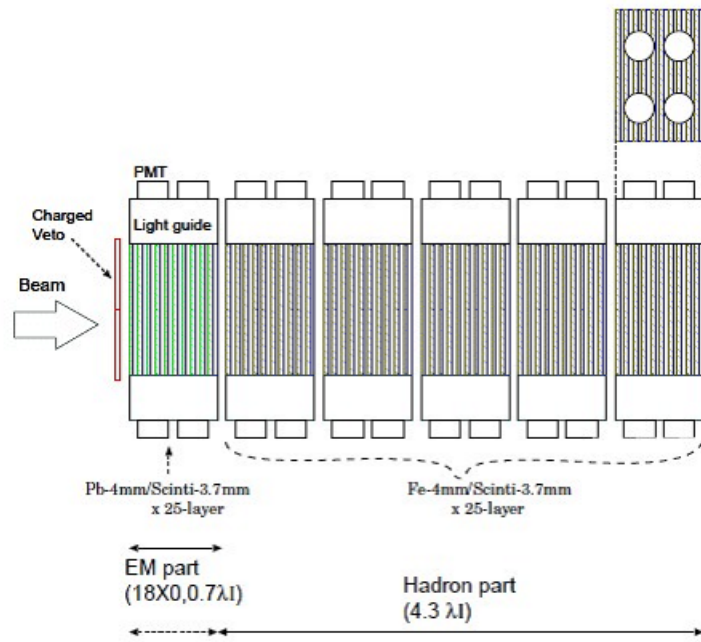


図 3.1: n/γ モニタ検出器 Cerberus の概略図



図 3.2: Cerberus の写真

3.2.2 Cerberus の測定原理

ビームライン中には多数の γ 線が存在しているため、通常の中性子検出器では γ 線の中性子と見誤ってしまい、使用することができない。図 3.3 は GEANT4 によるシミュレーションで Cerberus に γ 線と中性子をそれぞれ 1 イベントだけ入射させた様子である。 γ 線は EM part で相互作用し、中性子は Hadron part で相互作用している。このように、 γ 線はほとんどのエネルギーを EM part で落とし、中性子の場合、何割かは EM part を通過し、Hadron part で相互作用をする。Cerberus はこの 2 種類の粒子の相互作用の仕方の違いを利用することで、 γ 線と中子を識別し、エネルギー分布を測定することができる。

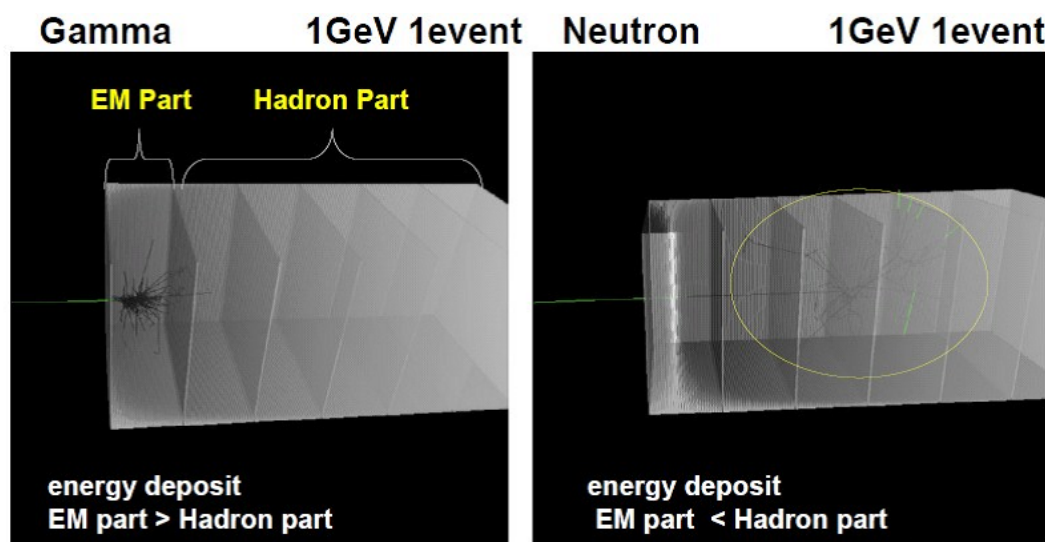


図 3.3: GEANT4 により中子と γ をそれぞれ 1 イベント入射させたときの様子。

3.3 GEANT4 によるシミュレーション

本研究のシミュレーションには GEANT4 というソフトウェアを使用する。GEANT4 は CERN を中心に開発された高エネルギー実験計測シミュレーターであり、粒子と物質の相互作用に関して現在得られている理論的、実験的知見を集大成して作られた。一般に電磁相互作用は厳密に理論的解を得られるため、GEANT4 による再現性は極めて高い。ハドロン相互作用としては数種類のハドロンモデルの中から QBBC モデルを使用している。QBBC モデルは Binary Cascade Model で主に中子や陽子、 π 中間子を入射するシミュレーションで利用される。

本研究では位置測定の検証をする前に、Cerberus の基本的な性能を確認するため、エネルギー分布、検出効率、及びエネルギー分解能のシミュレーションを行った。

3.3.1 セットアップ

図 3.4 にシミュレーションにおけるセットアップを示す。ビームが入射する方向から順番に $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 4\text{mm}$ の鉛/ $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 3.7\text{mm}$ のプラスチックの層を 25 層設置し、その後ろに $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 4\text{mm}$ の鉄/ $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 3.7\text{mm}$ のプラスチックの層を 125 層設置した。なお、本研究におけるシミュレーションではプラスチックはポリビニルトルエン ($2 - \text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{CH} = \text{CH}_2$) に設定した。座標はビームの進行方向を $+x$ 軸方向とし、 x 軸に対して鉛直上向きを y 軸、右手系で水平方向を z 軸とする。モジュールの中心に中性子または γ のビームを入射させる。ビームのエネルギーは 0.1、0.2、0.5、1、5、10GeV で、イベント数は 10^4 イベントでシミュレーションを行った。

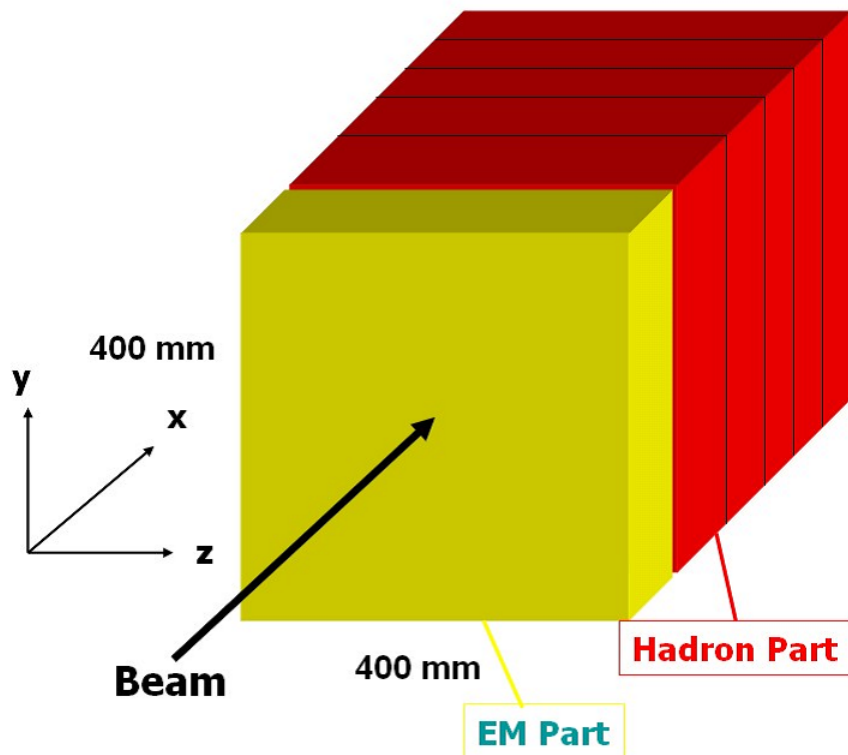


図 3.4: GEANT4 によるシミュレーションのセットアップ。黄色の部分が EM part、赤色の部分が Hadron part を示している。

3.3.2 deposit エネルギー分布

中性子と γ をそれぞれ 1000MeV で 10^4 イベントずつ入射した際の各モジュールのプラスチック部分に deposit されたエネルギーの分布を図 3.5 及び 3.6 に示す。中性子は各モジュールにほぼ均等エネルギーを deposit しているが、 γ は前半のモジュールでほとんどエネルギーを落としきっているのが判る。

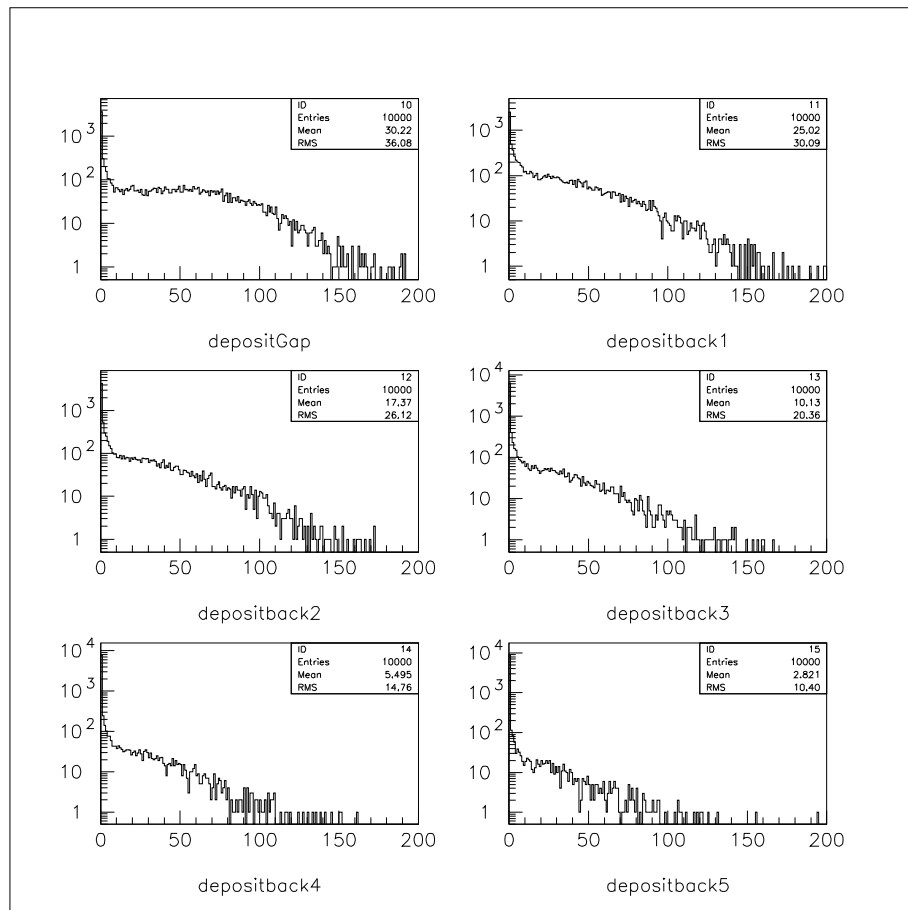


図 3.5: 中性子のモジュールごとの deposit エネルギー分布。EM part (上段左)、Hadron part1 (上段右)、Hadron part2 (中段左)、Hadron part3 (中段右)、Hadron part4 (下段左)、Hadron part5 (下段右)。どのモジュールにもほぼ均等にエネルギーを deposit している。

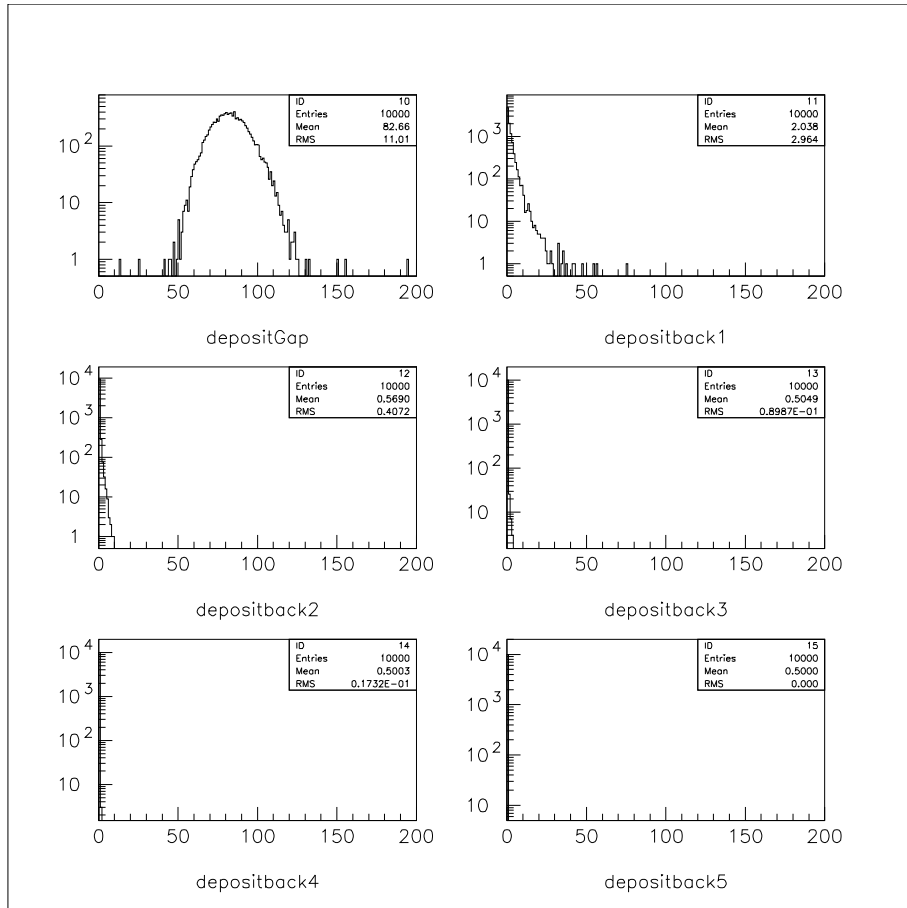


図 3.6: γ のモジュールごとの deposit エネルギー分布。EM part (上段左)、Hadron part1 (上段右)、Hadron part2 (中段左)、Hadron part3 (中段右)、Hadron part4 (下段左)、Hadron part5 (下段右)。前半のモジュールに deposit が集中している。

3.3.3 F/T ratio

3.2.2 で述べたように、Cerberus では粒子による EM part と Hadron part での相互作用の差異を利用して中性子と γ を分離する。ここで、中性子と γ を区別するためのパラメータとして F/T ratio を定義する。F/T ratio は EM part のプラスチック部分に deposit されたエネルギーを Cerberus 全体のプラスチック部分に deposit されたエネルギーで割った値とする。 γ の多くが EM part でほとんどのエネルギーを deposit するのに対し、中性子は EM part を通過し Hadron part で相互作用する可能性があるため、この F/T ratio で threshold をかけることによって中性子と γ をある程度選別することが可能になる。図 3.7 に今回のシミュレーションで得られた各エネルギー毎の F/T ratio を示す。赤で描かれた γ の F/T ratio はピークが入射エネルギーによらず常に 1 付近にあるのに対し、黒で描かれた中性子の F/T ratio は 0 から 1 の間に広く分布しており、また中性子の入射エネルギーが大きくなると F/T ratio が小さくなる傾向が見て取れる。この中性子と γ それぞれの F/T ratio の傾向をふまえて、F/T ratio が 0.5 以下になるイベントを neutron tagged event、F/T ratio が 0.85 以上になるイベントを gamma tagged event と定義した。

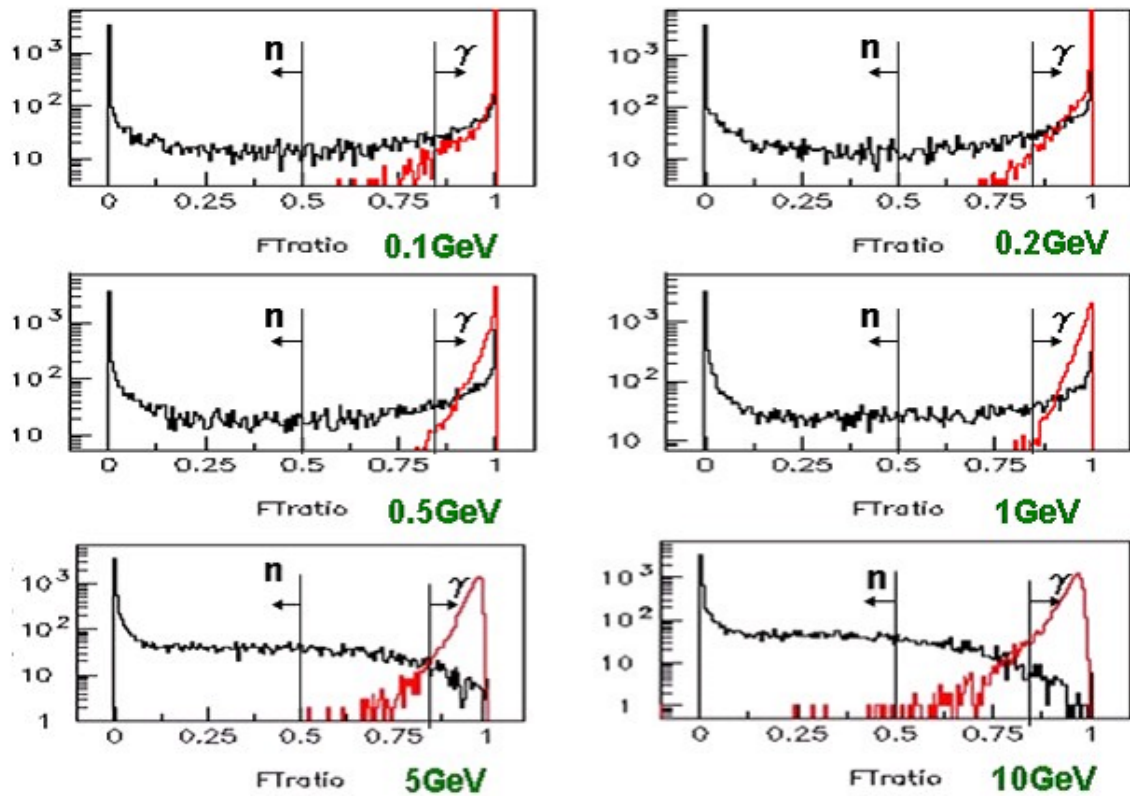


図 3.7: F/T ratio。赤線で描かれてものが γ 、黒線で描かれているものが中性子の F/T ratio を示している。図中に引かれた線が示すように、F/T ratio が 0.5 より小さくなるイベント neutron tagged event、F/T ratio が 0.85 以上になるイベントを gamma tagged event と定義した。

3.3.4 検出効率

Cerberus に中性子及び γ をそれぞれ 10^4 イベントずつ入射し、各粒子ごとに gamma tagged event (F/T ratio > 0.85 のイベント) として検出されるイベント数と neutron tagged event (F/T ratio < 0.5 のイベント) として検出されるイベント数から検出効率を求めた。gamma tagged event、neutron tagged event における、 γ と中性子それぞれの検出効率は図 3.8、図 3.9 のようになった。

γ 入射時の gamma tagged event の検出効率は入射エネルギーによらず 96% 以上と、とても高い値を示している。一方で中性子入射時の gamma tagged event は $< 40\%$ 程度検出されている。これは $< 40\%$ の中性子が γ に miss ID されることを意味しているが、前述の通り γ 入射時の gamma tagged event がとても高い検出効率をもっているので、 γ の profile 測定における中性子の miss ID の影響は最小限に抑えられると思われる。特に高エネルギー領域では、その影響はほとんど無視することができる。

中性子入射時の neutron tagged event は 50% 以上で、入射エネルギーが高いほど上がる傾向がある。 γ 入射時の neutron tagged event は入射エネルギーによらず、ほとんど検出されなかった。本研究の主な目的は中性子の profile を測定することなので、neutron tagged event において中性子の検出率が 50% 以上であるのに際し、 γ を中性子と見誤るイベントが無視できるほど少ないというのは非常に重要な結果である。

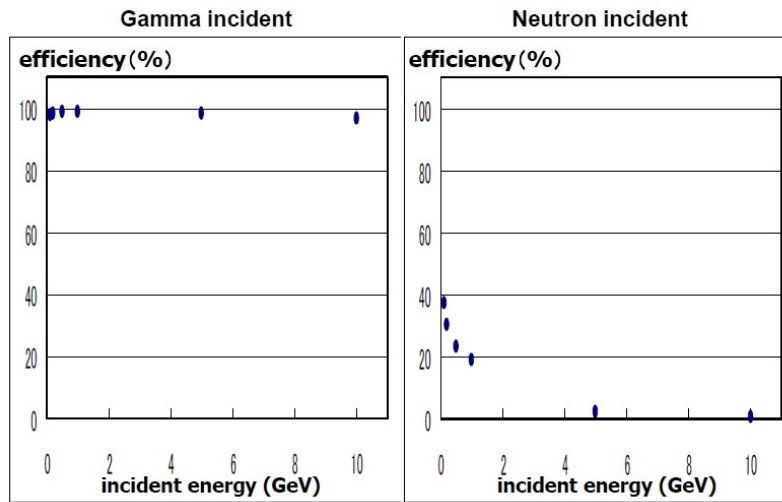


図 3.8: gamma tagged event ($F/Tratio > 0.85$) での検出効率。 γ 入射時 (左) と中性子入射時 (右) の比較。 γ の検出効率は 96%以上。<40%の中性子が γ に miss ID される。

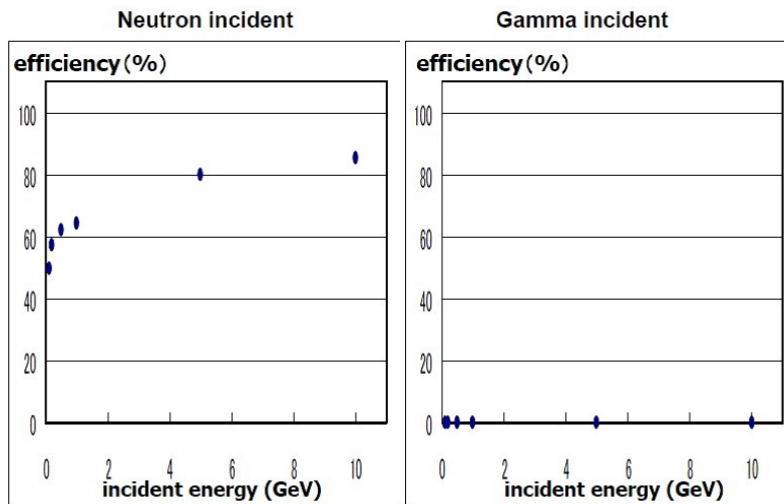


図 3.9: neutron tagged event ($F/Tratio < 0.5$) での検出効率。中性子入射時 (左) と γ 入射時 (右) の比較。中性子の検出率は 50%以上。 γ が中性子に miss ID されるイベントは無視できる。

3.3.5 エネルギー分布

今回のシミュレーションで得られた、Cerberus全体のシンチレータ部分に deposit されたエネルギー分布のヒストグラムを図 3.10 及び図 3.11 に示す。neutron tagged event でも低エネルギー領域にテールが残るものの入射エネルギーに対して約 10% のピークが見えている。

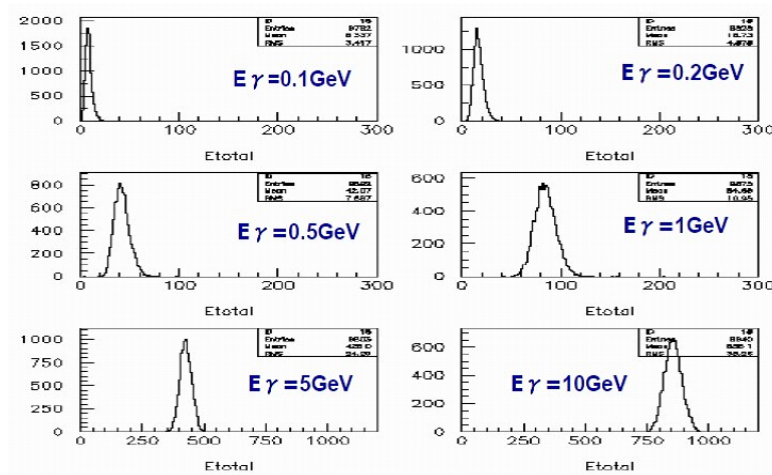


図 3.10: γ 入射時の gamma tagged event ($F/Tratio > 0.85$) でのエネルギー分布。横軸が Cerberus のプラスチック部分での deposit エネルギー (MeV) で、縦軸がイベント数。

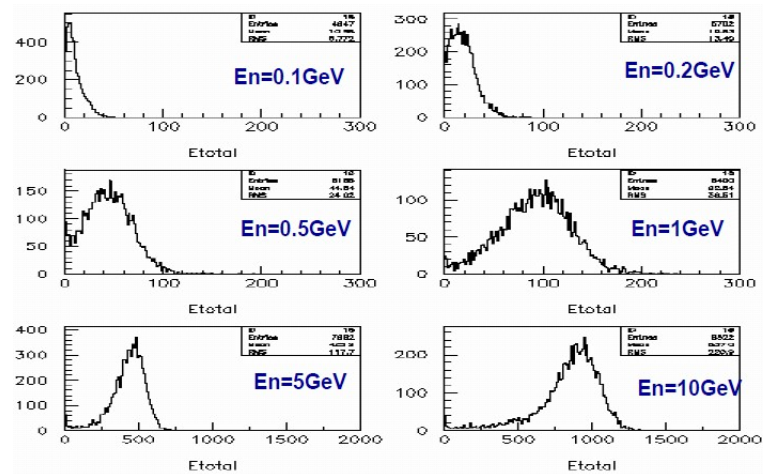


図 3.11: 中性子入射時の neutron tagged event ($F/Tratio < 0.5$) でのエネルギー分布。

3.3.6 エネルギー分解能

3.3.4 のエネルギー分布から算出したエネルギー分解能を図 3.12 に示す。エネルギー分解能 $\frac{\sigma}{\langle E \rangle}$ は

$$\left(\frac{\sigma}{\langle E \rangle}\right)^2 = \left(\frac{P_0}{\sqrt{E}}\right)^2 + P_1^2$$

により fitting を行った。neutron tagged event での中性子の deposit エネルギー分解能は入射エネルギーが 1GeV で 0.4、gamma tagged event では入射エネルギー 1GeV で γ の deposit エネルギー分解能は 0.12 であった。

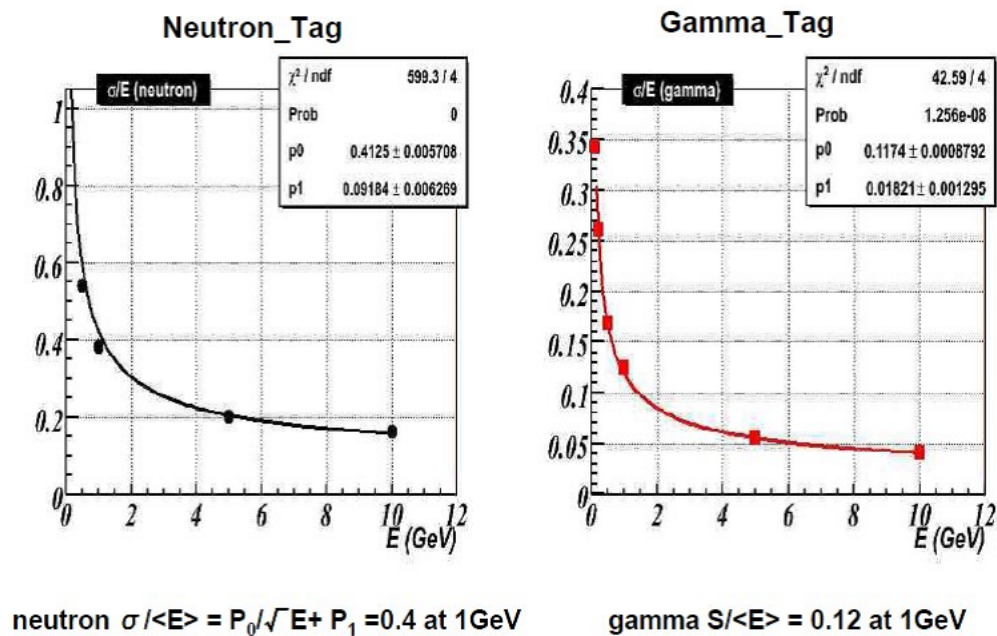


図 3.12: neutron tagged event でのエネルギー分解能 (左) と gamma tagged event でのエネルギー分解能 (右)。

3.4 位置測定のための改良

3.4.1 改良の方針

粒子の位置測定を行うための改良として考えられるのが、図 3.13 のようにモジュールをファイバー読み出しにし、横方向にもマルチアノード光電子増倍管を設置し、計測するといったものである。しかしながら、既存のモジュールを全て分解し構築しなおす作業は容易ではなく、費用もかかる。できるだけ簡易な改良が望ましいため、今回のシミュレーションでは、各モジュールの前後に検出器に見立てたプラスチックシンチレータを設置し、このシンチレータから読み出したデータを解析することによって粒子の位置分布を測定する。さらに Cut の条件を変化させることによって、位置分解能の向上を図ることができるかどうかを検証する。

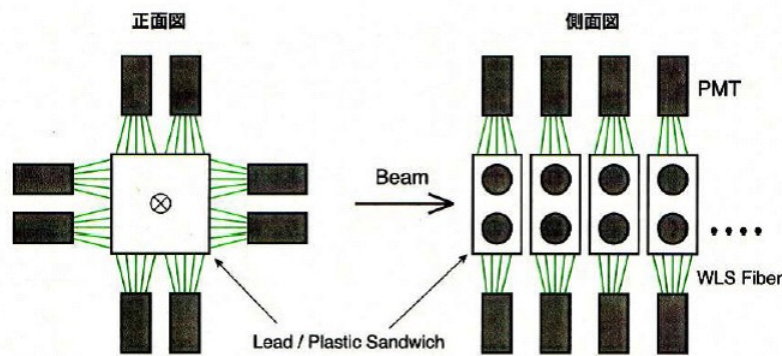


図 3.13: 光電子増倍管とファイバーを追加したモジュール

3.4.2 位置測定のためのセットアップ

図 3.14 に位置測定のためのセットアップを示す。基本的な配置は図 3.4 と同様だが、各モジュールの前後に厚さ 5mm のプラスチックシンチレータを設置した。入射粒子は中性子で、入射エネルギーは 1000MeV、イベント数は 10^6 イベントでシミュレーションを行った。

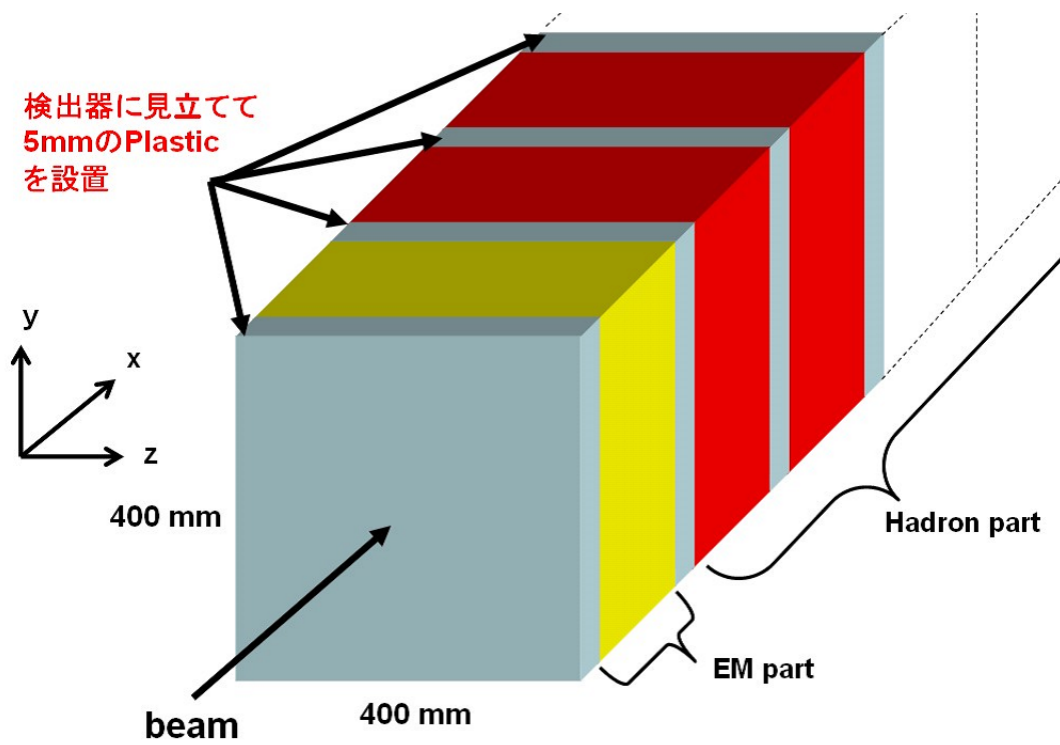


図 3.14: 位置測定シミュレーションのためのセットアップ。各モジュールの前後に厚さ 5mm のプラスチックを追加。

3.4.3 位置分布

1000MeV の中性子を 10^6 イベント入射し得られた粒子のプラスチックシンチレータにおける位置分布を図 3.16 に示す。この位置分布は 5 つある Hadron part のうち一番前に置かれるものの直後に設置したプラスチックシンチレータでの位置分布である。また、「F/T ratio < 0.5」で、「このプラスチックシンチレータでの deposit が 0 より大きい」という Cut 条件を満たしたイベント中の Track の位置分布の平均値を plot している。中心には 1mm 以下の範囲にピークがあり、このことから、シミュレーション上では 1mm 以下の分解能を持つ検出器を作製することが可能であると言える。また、ピークの範囲内 ($-0.5\text{mm} < y < 0.5\text{mm}$) とピークの範囲外での Track 中の粒子の種類と個数をそれぞれ表 3.1、3.2 に示す。このことから、主に入射中性子との衝突によって生じた反跳陽子がピークの形成に寄与していることがわかる。

Particle name	Number of particle
proton	3570
electron	3412
π^-	618

表 3.1: ピーク範囲内の Track 中の粒子数。陽子が最も多く、電子が次いで多い。

Particle name	Number of particle
electron	497699
proton	169253
π^-	29875

表 3.2: ピーク範囲外の Track 中の粒子数。反対に電子が最も多く、陽子が次いで多い。

ここで、中性子の位置測定の測定精度を上げるため、ピークとテールの比を表すパラメータとして P/B ratio を定義する。P/B ratio はピークでのイベント数を、テール部分とピークの付け根の位置（以下ベースライン）でのイベント数で割った値とする。この P/B ratio の値を増加させることができれば、中性子が入射位置に来るイベントの比率を増やすことができるため、より正確なビームの profile を測定することが可能になる。図 3.15 に P/B ratio の概念図を示す。この Cut での P/B ratio は y 座標分布で 1.51 であり、z 座標分布で 1.56 であった。また、検出効率は 30.6% であった。

Cut の条件を変えることによってテールを減らし、この P/B ratio を改善することができるかどうかを検証する。

まず最初に考えられるのが低エネルギーの Track の Cut である。実験において検出器で測定できないほど小さなエネルギーを排除することによってバックグラウンドになるイベントを減らし、P/B ratio の向上を図る。図 3.16 からプラスチックシンチレータでの deposit エネルギーが 0.5MeV 以下の Track を排除した位置分布を図 3.17 に示す。この Cut 後の P/B ratio は y 座標分布が 1.61、z 座標分布が 1.7 であり特に大きな改善は見られなかった。このときの検出効率は 21% であった。

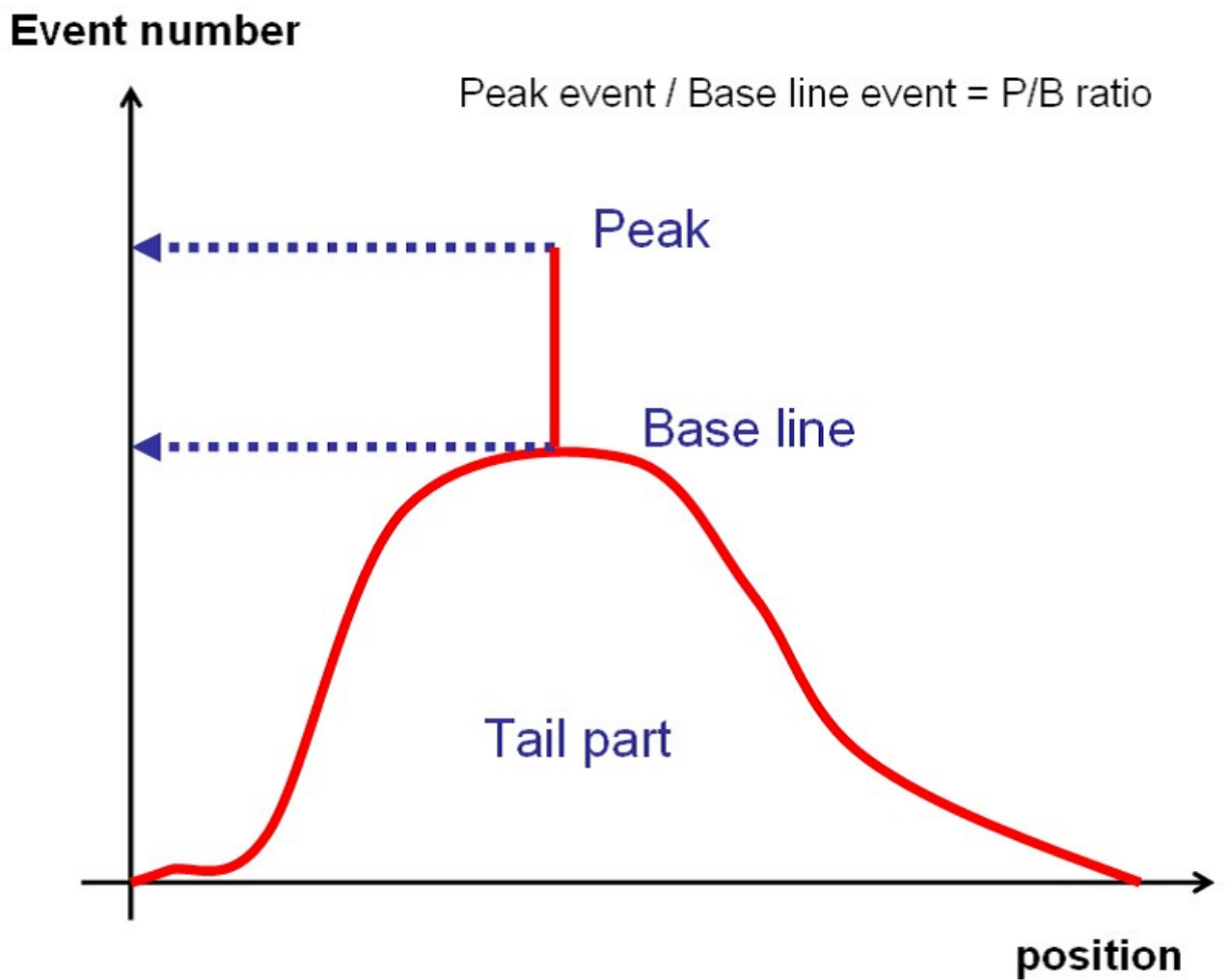


図 3.15: P/B ratio の概念図。赤い線が位置分布のプロットを示しており、図のようにピークとテール部分の付け根をベースラインにとる。

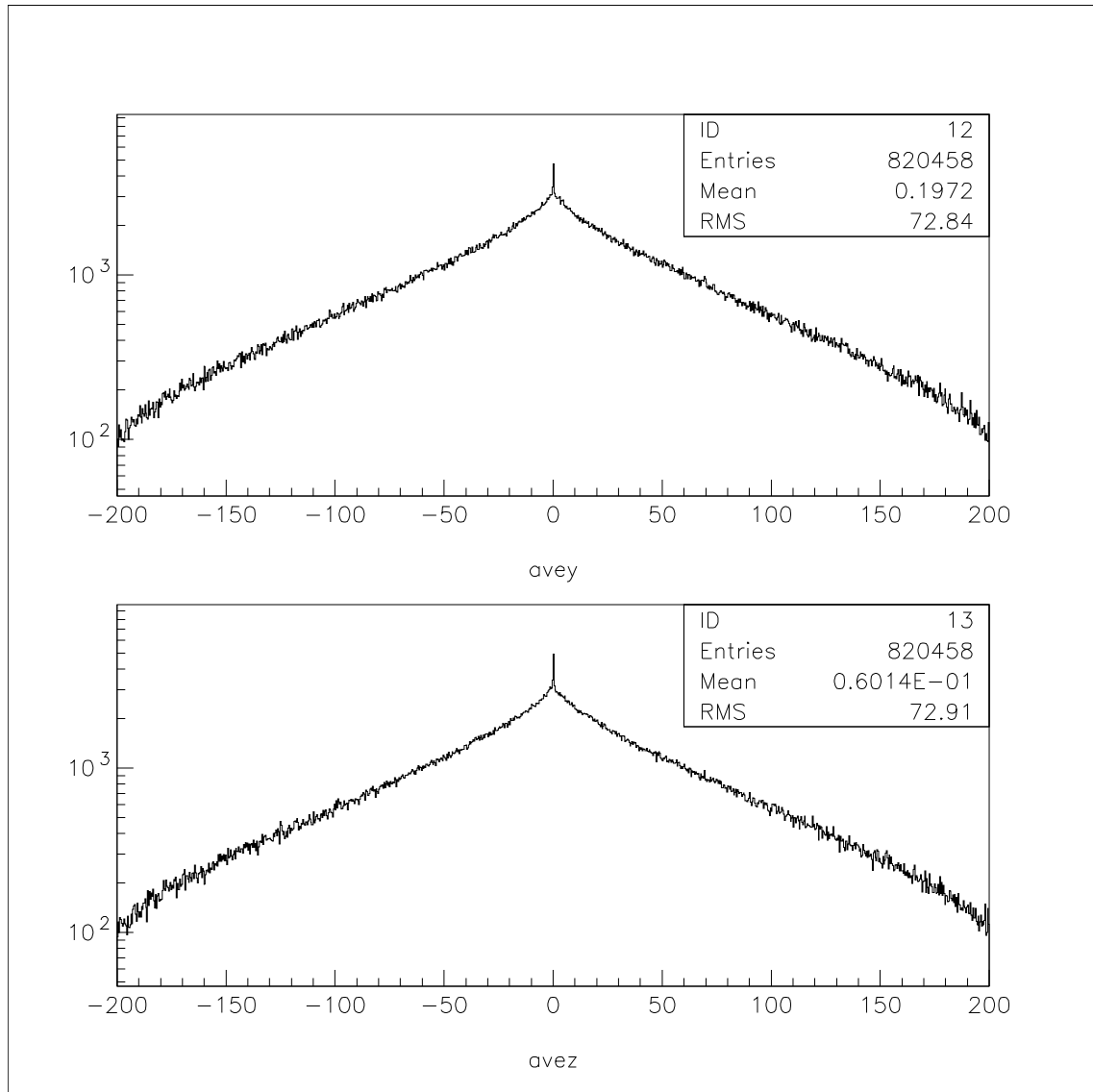


図 3.16: 粒子の位置分布。y 座標 (上) と z 座標 (下)。横軸が位置 mm で、縦軸がイベント数。

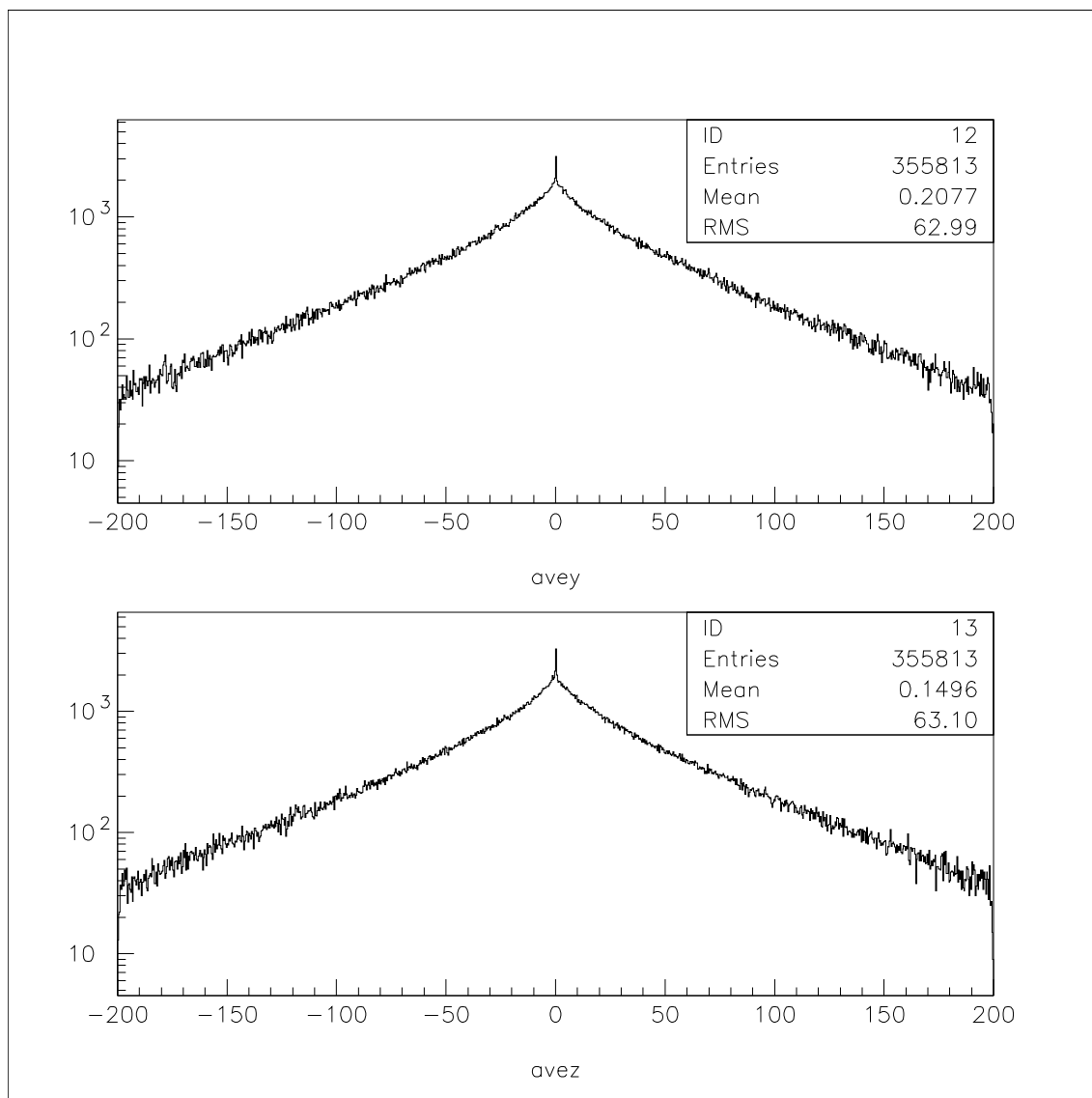


図 3.17: 低エネルギー Track ($<0.5\text{MeV}$) を排除した粒子の位置分布。y 座標 (上) と z 座標 (下)。横軸が位置 mm で、縦軸がイベント数。

図 3.18 に 0.5MeV で Cut した際の位置分布と Track の相関を描いたヒストグラムを示す。このヒストグラムは縦軸に位置分布、横軸に Track のエネルギー分布をとっている。このヒストグラムから位置分布のピークはおよそ 1MeV から 2MeV の範囲に存在していることがわかる。よって、「Track のエネルギーが 1MeV から 2MeV の範囲にある」という Cut を新たに追加する。この Cut を追加した位置分布を図 3.19 に示す。しかしながら、P/B ratio は y 座標分布で 1.39、z 座標分布で 1.54 と大きな変化は見られなかった。

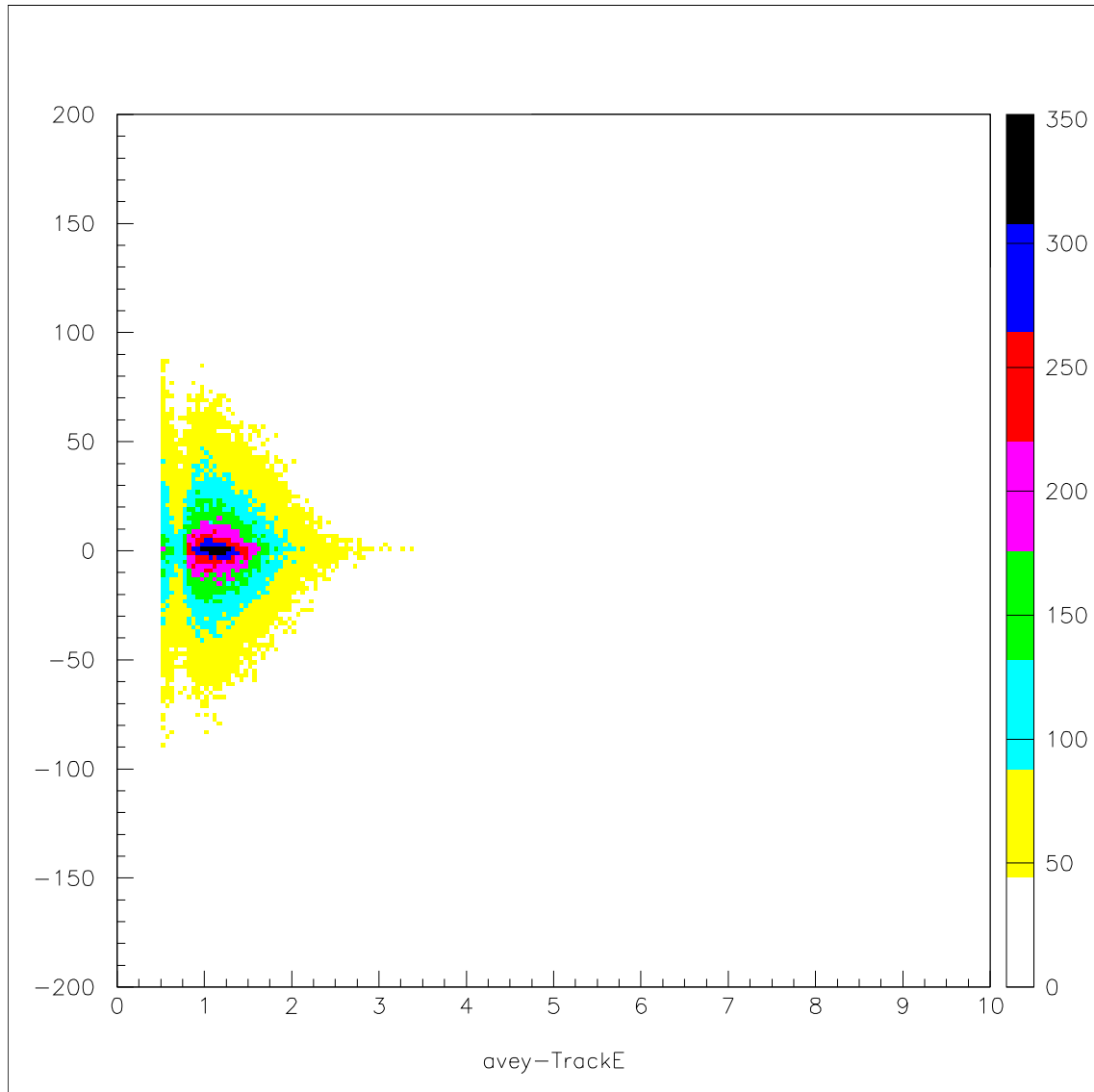


図 3.18: 位置分布と Track のエネルギー相関図。縦軸が位置分布 mm で、横軸が Track のエネルギー。

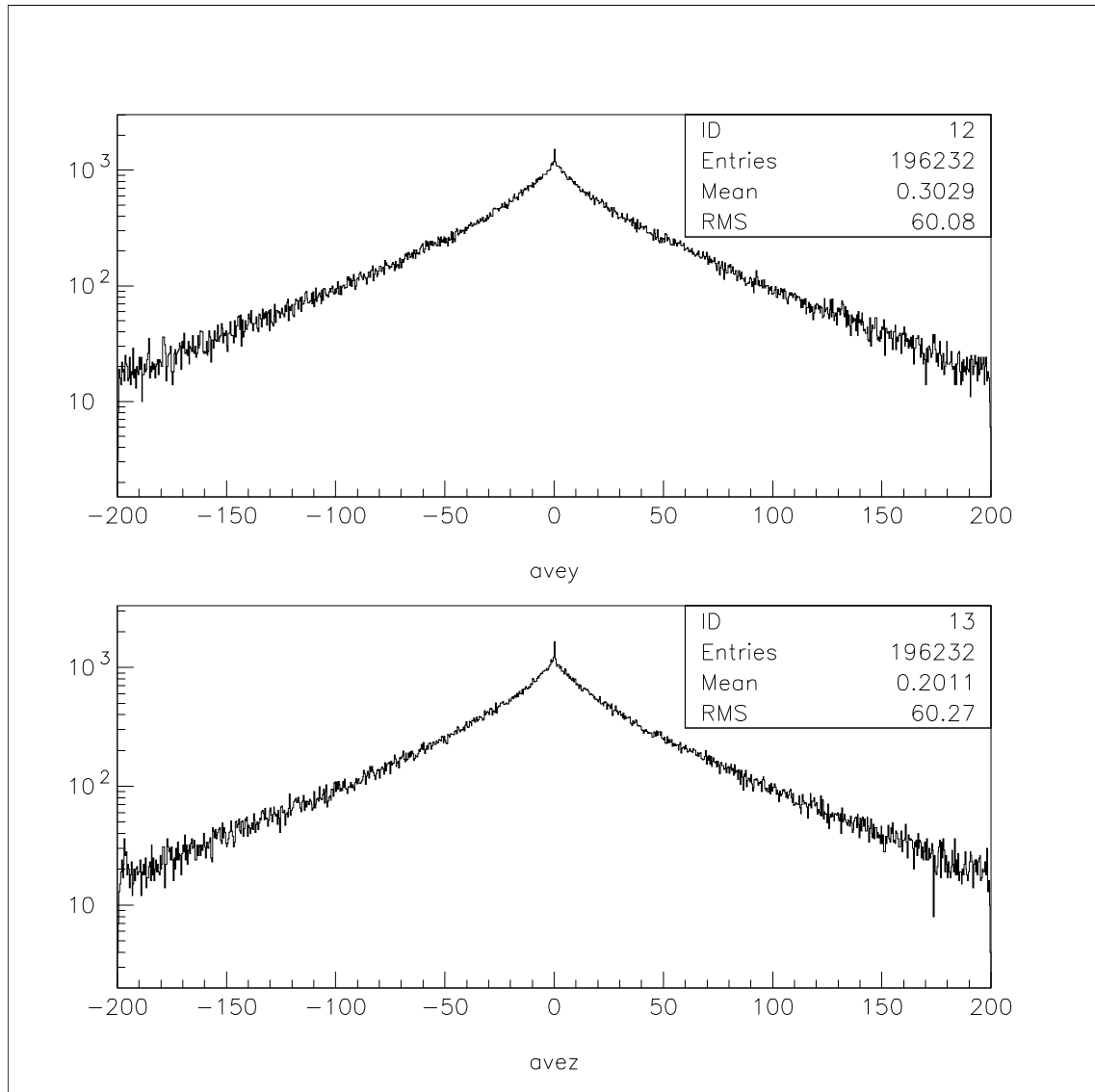


図 3.19: $1 < \text{Track エネルギー} < 2 \text{MeV}$ を追加した位置分布。y 座標 (上) と z 座標 (下)。横軸が位置 mm で、縦軸がイベント数。

3.4.4 Track の数による Cut

これまで設定されてきた Cut の条件を満たしているイベントは必ず一つ以上の Track を持っている。イベントが持つ Track の個数で Cut をかけることにより、P/B ratio の改善を図ることができるかどうかを検証した。Track 数 1 のイベントから始め、順に Track 数 12 のイベントまでの P/B ratio を算出した。各トラック数における P/B ratio を図 3.20 に及び図 3.21 に示す。各 Track 毎の P/B ratio には特に高い値は見られなかった。また、このときの検出効率を図 3.22 に示す。Track 数の多いイベントほど検出率が下がることがわかった。

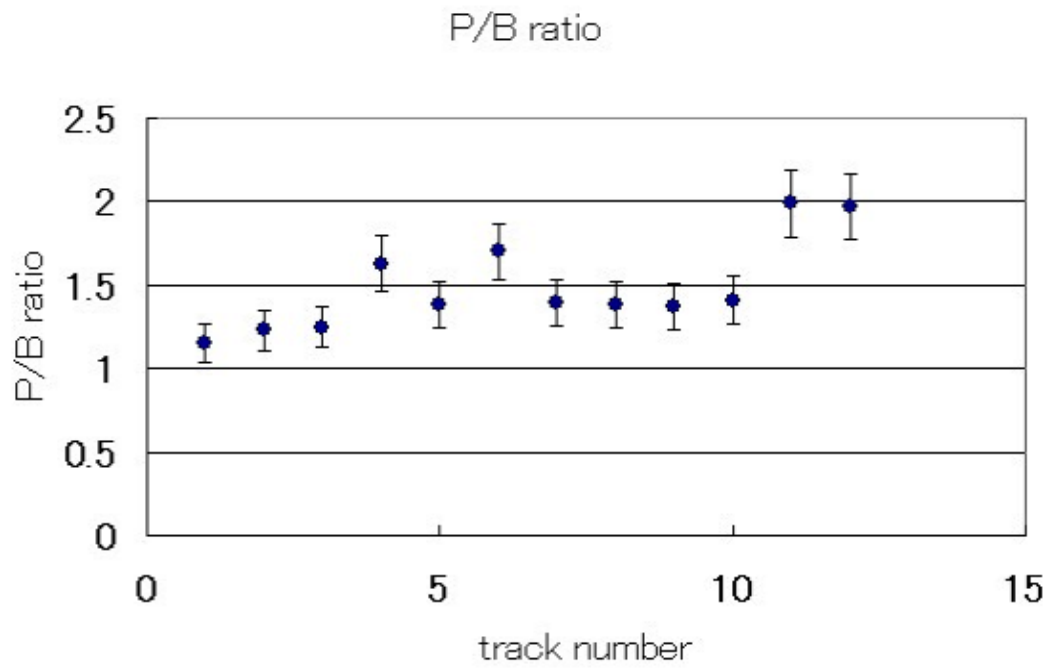


図 3.20: Track 数による Cut 時の y 座標の P/B ratio。縦軸が P/B ratio で横軸が 1 イベント中の Track 数。

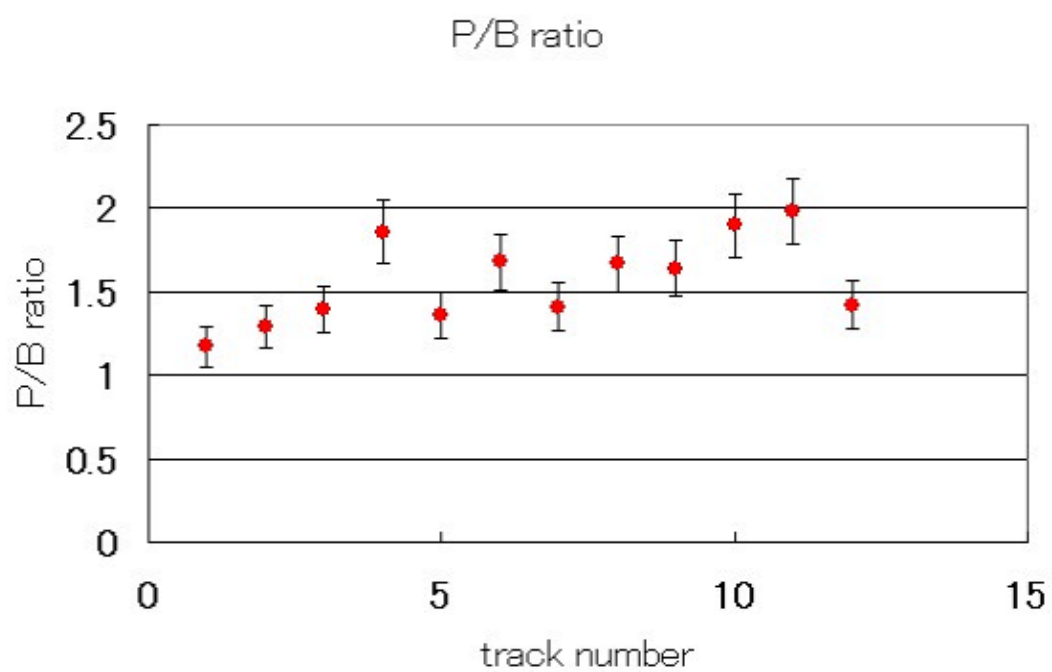


図 3.21: Track 数による Cut 時の z 座標の P/B ratio。縦軸が P/B ratio で横軸が 1 イベント中の Track 数。

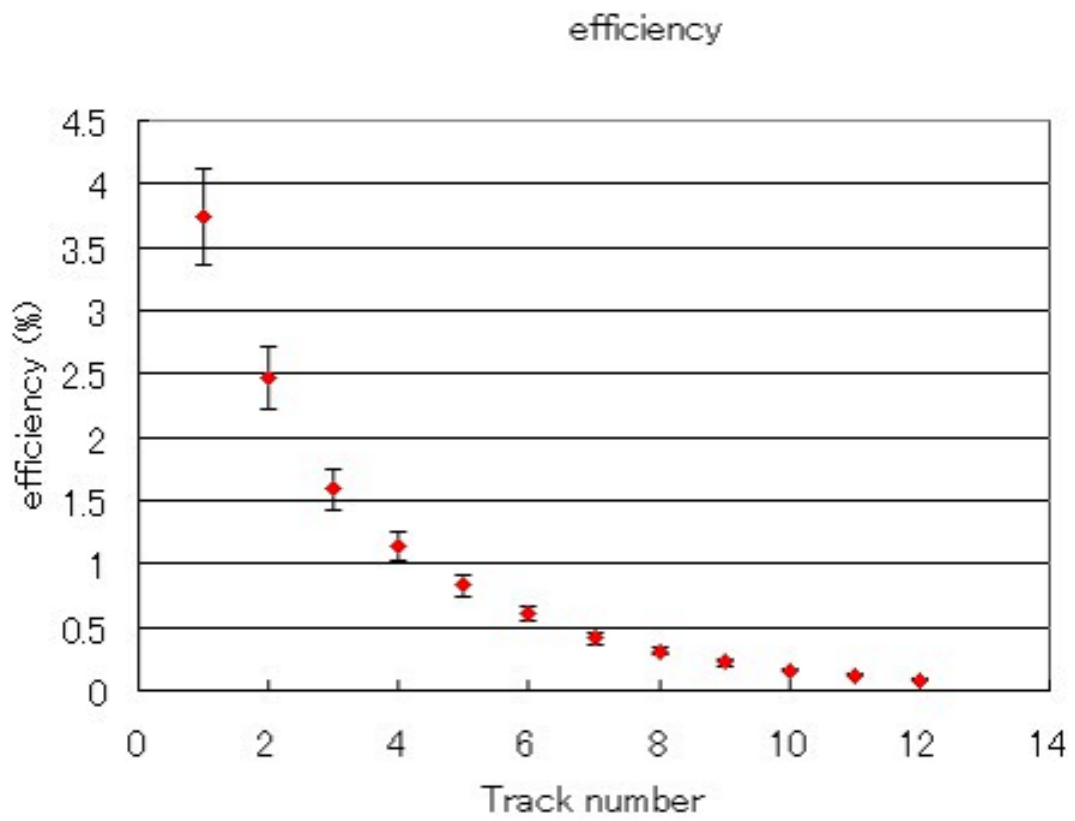


図 3.22: Track 数による Cut 時の検出効率。縦軸が検出効率 % で、横軸が 1 イベント中の Track 数

3.4.5 MIP による Cut

粒子が Cerberus 中を進行してゆくに従い、その粒子は検出器中の物質と次々と相互作用をしてゆくので、Track の位置分布に広がりが生じてしまう。つまり、プラスチックシンチレータの直前でのみ相互作用しているイベントを選別すれば P/B ratio の向上を図れる可能性が高い。そこで MIP (Minimum Ionizing Particles) による Cut を導入する。MIP によると粒子は大まかな見積もりで、プラスチックシンチレータの厚さ 1cm につき約 2MeV のエネルギーを deposit する。Cerberus の 1 モジュール中のプラスチックシンチレータは 3.7mm×25 層なので、MIP から計算すると 1 モジュールあたり約 18.5MeV のエネルギーが deposit されることになる。この値を 5 分割し、5 層ごとに予想される deposit エネルギーを見積もった。最もプラスチックシンチレータに近い、モジュールの後ろ 5 層でのみ相互作用しているイベントの deposit エネルギーは 0~3.7MeV 程度になるはずである (図 3.23)。また、これ以降は上流側から順番に以下のように分類する。

- Cut1 : 第 1 層から第 5 層 (18.5~14.8MeV)
- Cut2 : 第 6 層から第 10 層 (14.8~11.1MeV)
- Cut3 : 第 11 層から第 15 層 (11.1~7.4MeV)
- Cut4 : 第 16 層から第 20 層 (7.4~3.7MeV)
- Cut5 : 第 21 層から第 25 層 (3.7~0MeV)



位置分布を測定するプラスチックプレート

図 3.23: MIP による Cut の値とモジュールの位置関係。5 層ごとに 3.7MeV 刻みで Cut の値を変化させる。

「F/T ratio < 0.5」、「プラスチックシンチレータ」での deposit エネルギーが 0 より大きい、「Track のエネルギーが 1MeV から 2MeV の範囲にある」という従来までの Cut に前述の Cut を加えた位置分布を図 3.24 及び 3.25 に示す。これらの位置分布から算出された P/B ratio を図 3.26 及び図 3.27 に示す。Cut5 による位置分布が本研究における P/B ratio の最大値を示しており、y 座標で 3.05、z 座標で 3.38 となった。この値は「F/T ratio < 0.5」、「プラスチックシンチレータでの deposit エネルギーが 0 より大きい」の 2 つの Cut のみであった一番最初 P/B ratio の約 2 倍の大きさを持っている。この結果は当初の、プラスチックシンチレータの直前でのみ相互作用しているイベントのみを選択することによって P/B ratio の改善が図れるという予測と合致している。また、このときの各 Cut の検出効率を図 3.28 に示す。どの Cut においてもほぼ同様の検出効率で、これらの Cut を加える前と比較すると 2 桁近く検出効率は減少している。

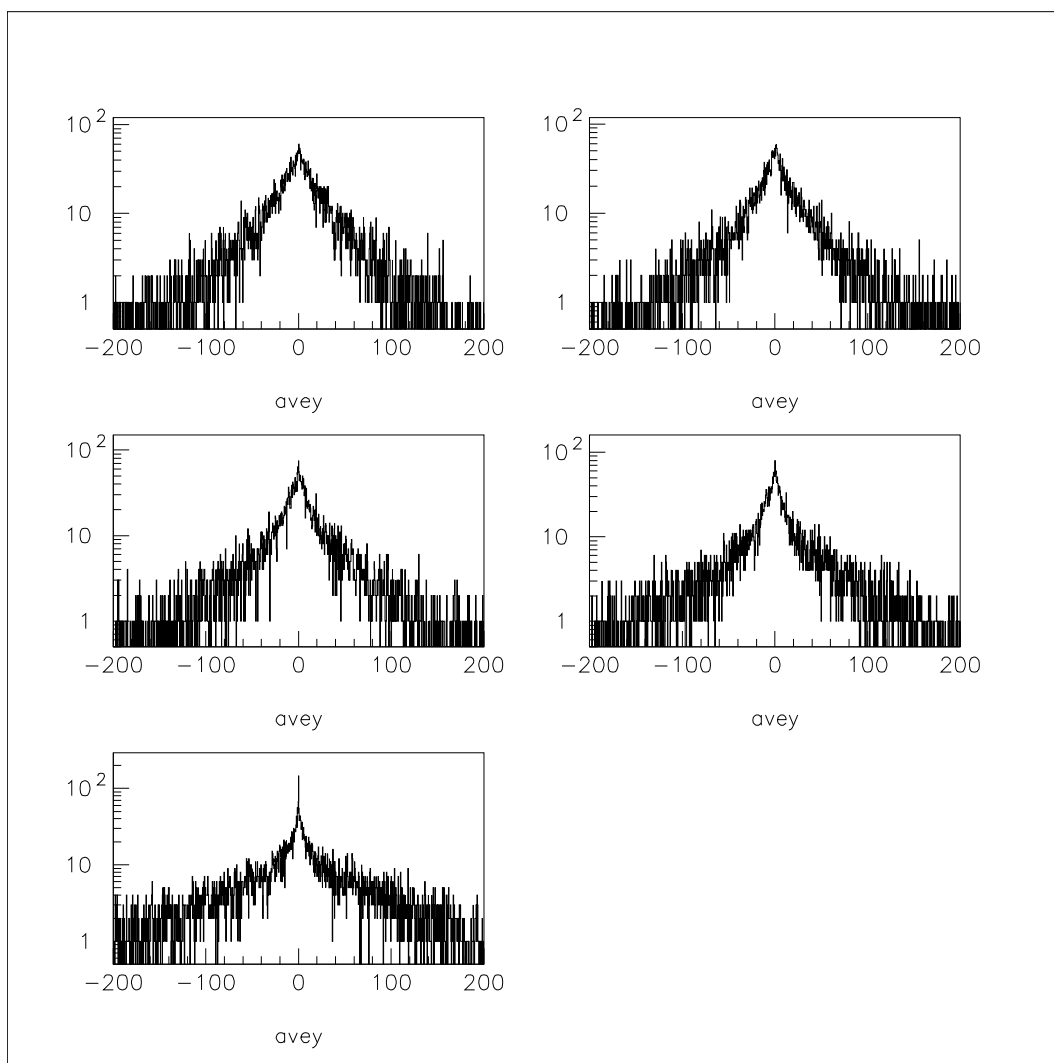


図 3.24: MIP による Cut 後のプラスチックシンチレータにおける位置分布 (y 座標)。Cut1 による Cut (上段左)、Cut2 (上段右)、Cut3 (中段左)、Cut4 (中段右)、Cut5 (下段)。

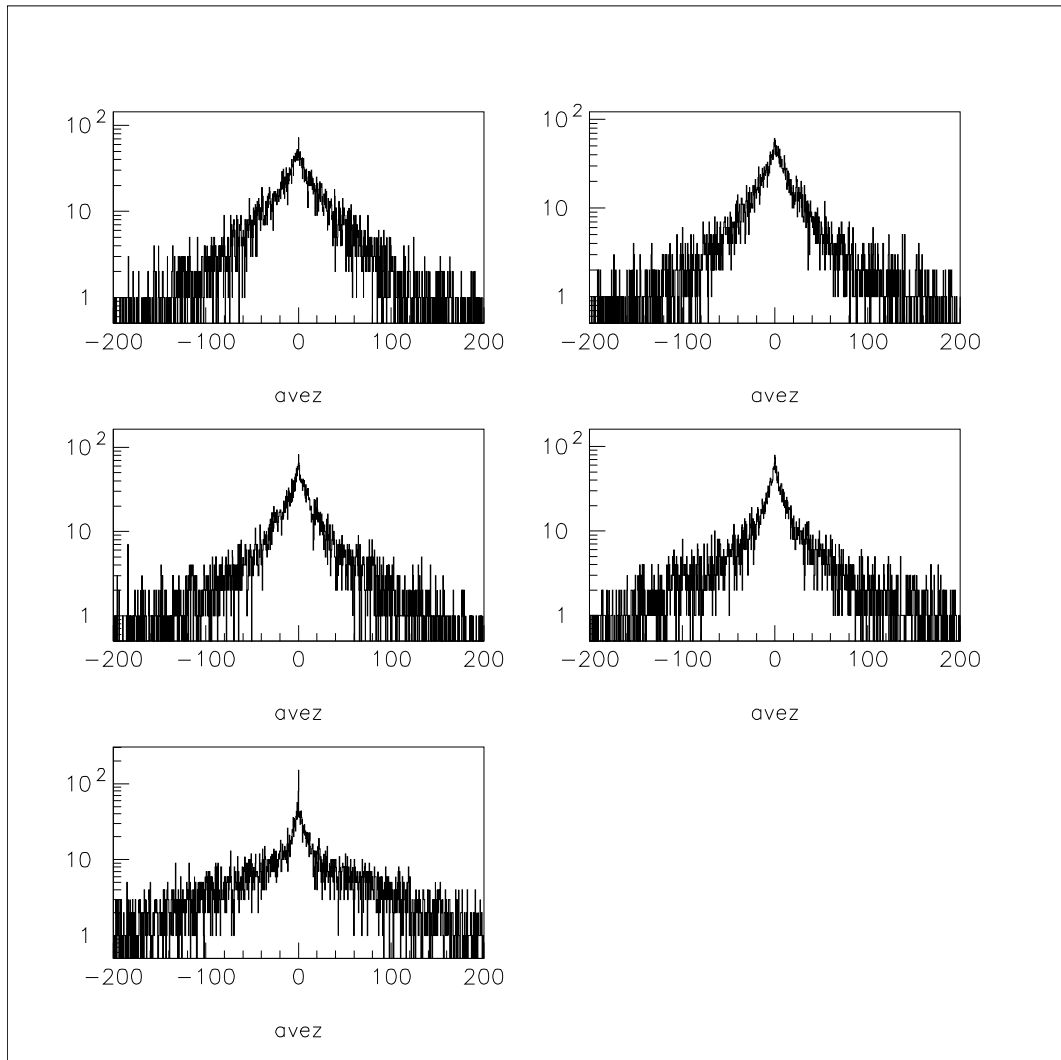


図 3.25: MIP による Cut 後のプラスチックシンチレータにおける位置分布 (z 座標)。Cut1 による Cut (上段左)、Cut2 (上段右)、Cut3 (中段左)、Cut4 (中段右)、Cut5 (下段)。

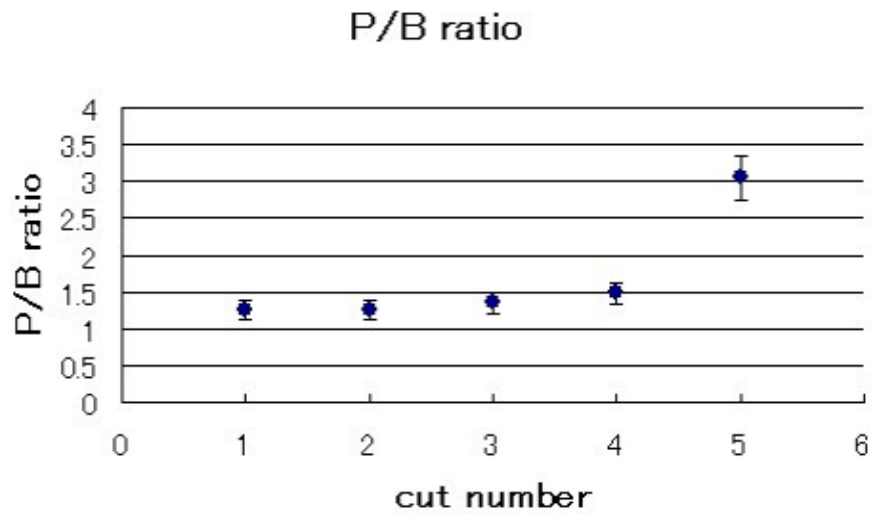


図 3.26: MIP による Cut 時の y 座標の P/B ratio。縦軸が P/B ratio で横軸が Cut 番号。

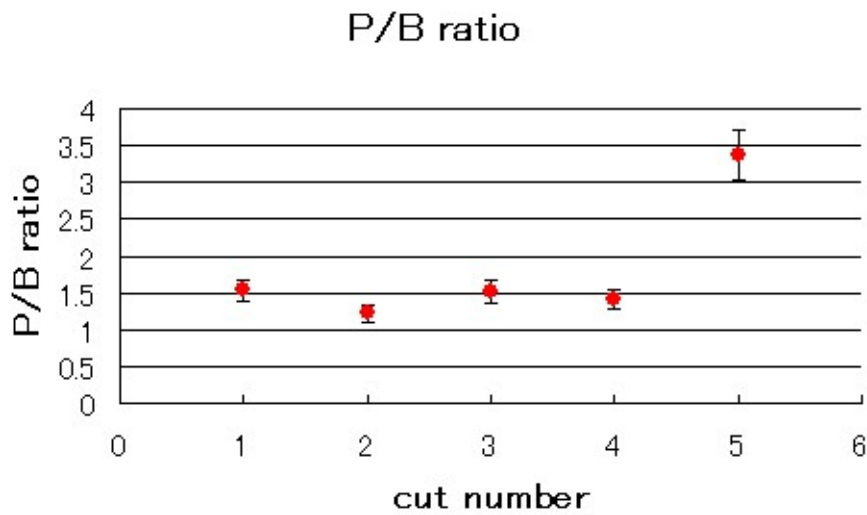


図 3.27: MIP による Cut 時の z 座標の P/B ratio。縦軸が P/B ratio で横軸が Cut 番号。

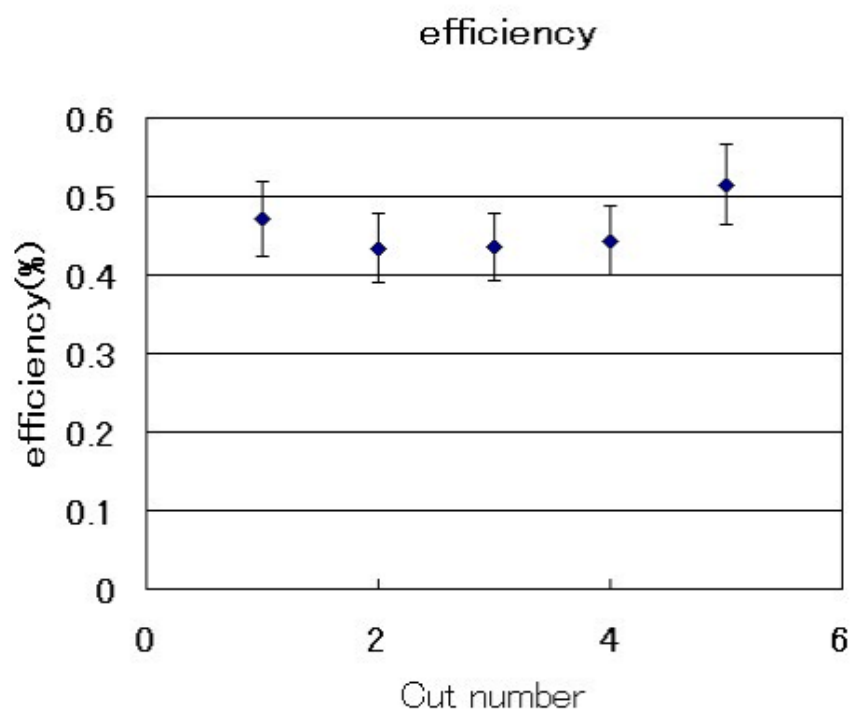


図 3.28: MIP による Cut 後の検出効率。縦軸が検出効率%、横軸が Cut 番号を示している。どの Cut においてもほぼ同程度の検出効率である。

3.5 300MeV の中性子による確認

ビームライン中の中性子のエネルギー分布は前章の図 2.5 示した通り、1GeV 以下の領域にピークが存在する。そこで、低エネルギー領域における Cut の有効性を確認のため、300MeV の中性子によるシミュレーションを行った。図 3.14 と同様のセットアップで、300MeV の中性子を 10^6 イベント入射させた。また、最も高い P/B ratio を得た MIP による Cut を 1000MeV のときと同様に行った。図 3.29 に「F/T ratio < 0.5」、「プラスチックシンチレータでの deposit エネルギーが 0 より大きい」の Cut のみをかけた位置分布を示す。このときの P/B ratio は y 座標分布で 3.1、z 座標分布で 3.0 と 1000MeV と比較すると 2 倍程高い値を持っていた。また検出効率は 12.9% であった。

次に「Track のエネルギーが 1MeV から 2MeV の範囲にある」という Cut と Cut5 を加えた後の位置分布を 3.30 に示す。これらの Cut を加えた際の P/B ratio は y 座標分布で 7.5、z 座標分布で 6.6 となっており、これらの Cut を加える前と比較すると P/B ratio は 2 倍以上に増加している。Cut5 の導入による P/B ratio の増加の割合は 300MeV と 1000MeV でほぼ同じであった。このことから、Cut5 は低エネルギー領域においても有効であると判断できる。また、このときの検出効率は 0.47% と、これらの Cut を加える前と比較すると 30 分の 1 程度に減少している。

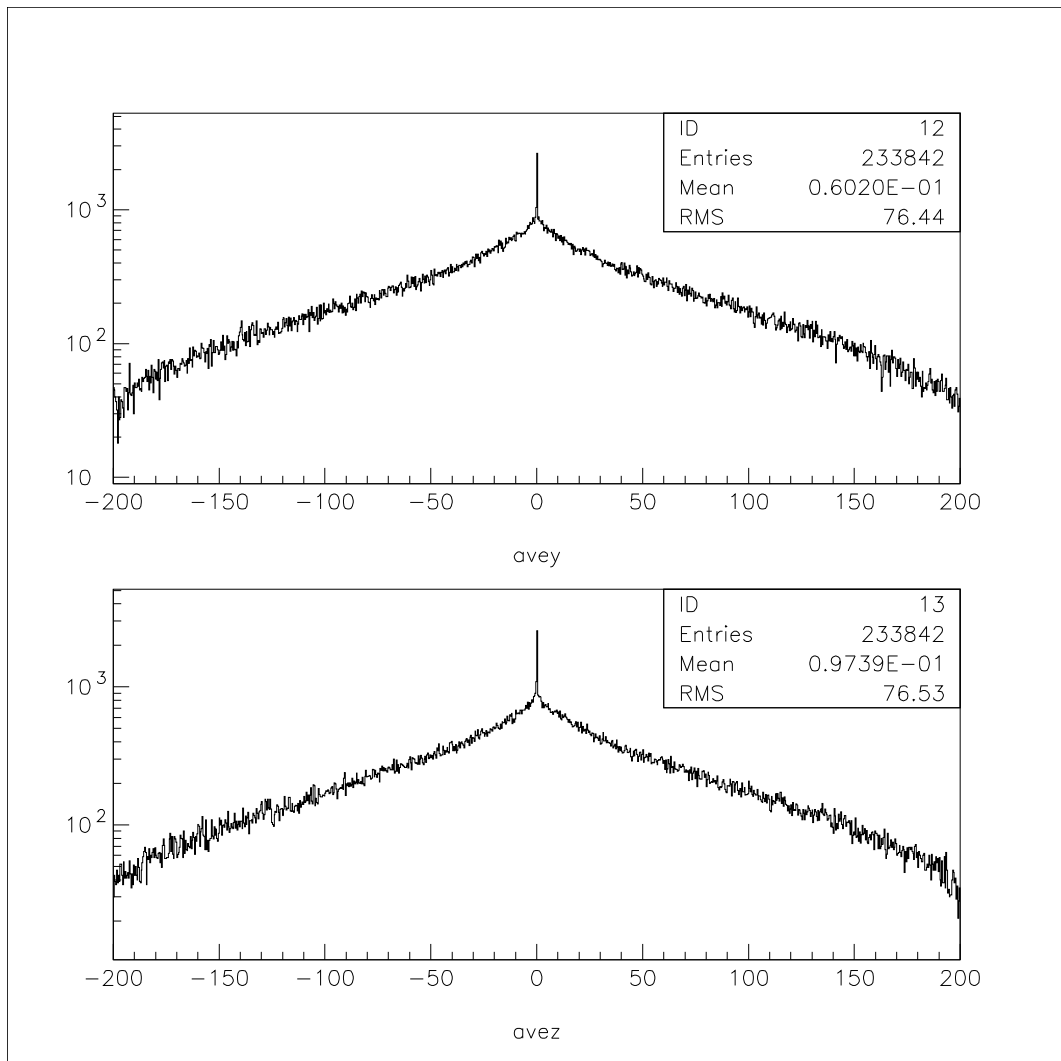


図 3.29: 300MeV 中性子入射時のプラスチックシンチレータにおける位置分布 (y 座標)。P/B ratio は 1000MeV 入射の 2 倍程の値を示している。

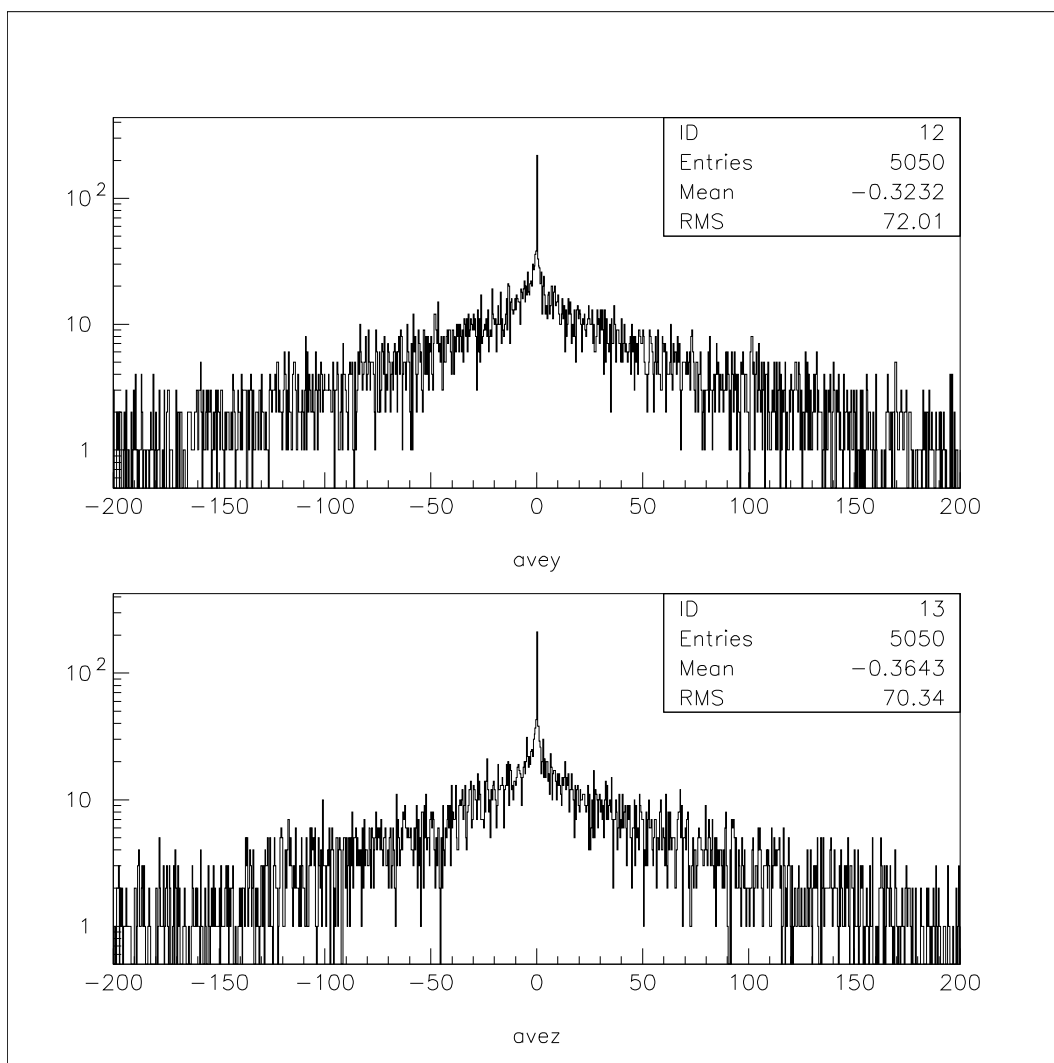


図 3.30: Cut5 追加後のプラスチックシンチレータにおける位置分布 (y 座標)。P/B ratio は 2 倍以上に増加している。

第4章 結論と今後の課題

4.1 結論

本研究では J-Parc E14 実験のビームサーベイで使用される予定の n/γ モニタ検出器 Cerberus による中性子の位置測定、及びその改良について調べた。その結果を以下にまとめる。

- Cerberus による中性子の位置分布の測定の可否を検証するため、シミュレーションソフト GEANT4 を使い、Cerberus のモジュール間に検出器に見立てた厚さ 5mm のプラスチックシンチレータを追加した。このプラスチックシンチレータにおける粒子の位置分布を計算した結果、プラスチックシンチレータで検出可能な荷電粒子が入射中性子の進行方向 1mm 以内の範囲にピークをつくることが判った。このことから、シミュレーション上では 1mm 以下の分解能を持つ検出器を作製することが可能であると言える。また、中性子の位置測定の測定精度を上げるために、位置分布のピーク値におけるイベント数と、その付け根に当たるベースラインにおけるイベント数の比をとった P/B ratio を定義し、この値の改善を図った。この P/B ratio の値を増加させることができれば、中性子が入射位置に来るイベントの比率を増やすことができるため、より正確なビームの profile を測定することが可能になる。
- プラスチックシンチレータの直前に設置されているモジュールで予測される deposit エネルギーを MIP から計算し、プラスチックシンチレータの直前 5 層での deposit エネルギーの範囲を見積もった ($0 < \text{deposit エネルギー} < 3.7\text{MeV}$)。この範囲を Cut5 とし、Cut5 内のエネルギーをモジュールに deposit するイベントのみを選択することによって、中性子の入射エネルギー 1000MeV のシミュレーションにおいて、P/B ratio を約 2 倍の値に増加させることができた。その際、検出効率は初期の Cut 時と比較して 60 分の 1 程度まで下がってしまう。また入射エネルギーを 300MeV まで下げ、同様に Cut5 を使用した結果、1000MeV 入射時と同様に P/B ratio を約 2 倍に増加させることができた。このことから、Cut5 は低い入射エネルギーでも有効であると判断できる。表 4.1 及び 4.2 に本研究で得られた結果をまとめた。

	F/T ratio<0.5,deposit>0	1MeV<TrackE<2MeV 追加	Cut5 追加
efficiency	30.6	11.9	0.51
P/B ratio	y:1.51, z:1.56	y:1.39, z:1.54	y:3.05, z:3.38

表 4.1: 1000MeV 入射における代表的な Cut とその結果。Cut5 追加後には P/B ratio が約 2 倍になった。

	F/T ratio<0.5,deposit>0	Cut5 追加
efficiency	12.9	0.47
P/B ratio	y:3.1, z:3.0	y:7.5, z:6.6

表 4.2: 300MeV 入射時の結果。1000MeV のときと同様に Cut5 追加後は P/B ratio がに 2 倍になった。

4.2 今後の課題

本研究では入射中性子のエネルギーを 1000MeV と 300MeV のみでシミュレーションを行った。しかしながら、前章で述べたように中性子のエネルギーは 1000MeV 以下の領域にピークが存在するため、入射エネルギーを変え、そのピーク値付近での Cut の有効性を検証する必要がある。また、本研究では 1 つのモジュールに絞ってシミュレーションを行ったが、残りのモジュールについても位置分布と Cut の値を検証してみる必要がある。さらに、実験のビームサイズ等を想定したシミュレーションや実際の測定結果との比較検討も行う必要がある。また、具体的改良に向け、モジュール間に設置するシンチレータの幅や厚さも議論しなければならない。

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々にお世話になりました。ご指導していただいた皆様に感謝いたします。

山形大学の先生方、加藤静吾先生、岩田高広先生、吉田浩司先生には授業やゼミを通して物理や英語をご教授頂きました。本当にありがとうございます。吉田先生にはスライド作成や発表会などではいつも貴重なアドバイスをしていただきました。本当にありがとうございました。田島靖久先生には学内のみならず、出張先などでも物理の基礎的なことから研究に至るまで徹底して指導していただきました。本当にありがとうございます。覚えの悪い私に夜中まで付き合っ、スライド作成や研究の指導をしていただいたご恩は忘れません。

E391a、E14 実験の皆様、皆様のおかげで楽しく、時に厳しい大学院生活を送ることができました。本当にありがとうございます。

研究室におきましては、同じ M2 の植松秀章君には 3 年間本当にお世話になりました。日ごろの研究や本論文作成に関するサポートはもとより、プライベートでも大変お世話になりました。一緒に就職活動を乗り越えたり、お酒を飲んだり、こんなにも充実した研究室生活を送れたのは植松君のお陰です。本当にありがとうございました。また、B4 の岡島学君、大津亜樹さん、武蔵晃君、久保田尚也君、高橋和典君、渡邊亮君、酒井琢君皆様のお陰で楽しい大学生活を送ることができました。本当にありがとうございます。

井上陽介さん、解析プログラム作成の際に多大なお力添えを頂き大変感謝しております。本当にありがとうございます。

最後に本論文作成についてご指導して下さった方々、今までお世話になった全ての人へ心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Proposal for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at J-Parc. 2006.
- [2] Report to FIFC, part-1. the neutral beamline for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$. J-PARC E14 Collaboration. 2007
- [3] 塩見公志. 修士論文. E14 実験におけるバックグラウンド事象についての研究. 京都大学. 2008.
- [4] 野村卓美. 修士論文. J-PARC における高性能中性 K 中間子ビームラインの設計. 山形大学. 2006
- [5] Hiroki Watanabe. K_L^0 beam line for the study of the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay. Saga Univ., 2002