

平成 18 年度 修士学位論文

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

野村 卓美

平成 19 年 2 月 9 日

概要

J-PARC(大強度陽子加速器施設)において平成 21 年に予定されている J-PARC E14 実験は以前に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて行われた $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比測定実験 (E391a 実験) を引き続き行うものであり、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を測定することで CP 対称性の大きさを表す η パラメータを精度よく決定することを目指している。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊実験が難しい理由のひとつは予想される分岐比が 3×10^{-11} という稀な崩壊であり、その中で π^0 中間子をひとつ検出しなければならない点である。そこでの大きな問題は π^0 中間子はビーム中に存在する中性子と物質の相互作用によって簡単に生成されてしまう点にある。特に K_L 崩壊の信号領域に近い検出器内での single π^0 事象は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験の背景事象となる可能性がある。J-PARC E14 実験では検出器の上流でビームを細く成形し、かつビームハローを低減させる全長約 8 m のタンゲステン合金製のコリメータを設置する予定である。E391a 実験での解析よりビーム全体におけるハロー中性子の比が 3.4×10^{-4} 程であれば背景事象になる確率が十分低いと見積もられている。

本研究では J-PARC における KL ビームラインのハロー/コアの比を低減させるべく GEANT4 を用いてモンテカルロシミュレーションを行いコリメータ形状の最適化を試みた。コリメータの形状変化により、J-PARC E14 実験提案書の初期設計においてハロー/コアの比が 1.25×10^{-3} というものから 1.91×10^{-4} まで低減させることに成功し目標値に到達した。またアブソーバーの効果としてアブソーバーの厚さとハロー数との関係性、また位置に対してのハロー数の依存性について調べた。約 90 通りの形状でのシミュレーションをしていく中で今後につながるハロー中性子を減らす方法をいくつか発見した。

目次

第1章	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定実験	6
1.1	実験概要	6
1.2	KEK-PS E391a 実験	9
1.2.1	加速器	9
1.2.2	検出器	14
1.2.3	上流部検出器	15
1.2.4	中央部検出器	15
1.2.5	下流部検出器	16
1.2.6	真空容器外下流検出器	16
1.2.7	Vacuum System	17
1.2.8	結果	17
1.3	J-PARC E14 実験	18
1.3.1	J-PARC 実験の概要	18
1.3.2	KL ビームラインの概要	19
1.3.3	実験予定	20
第2章	KEK-PS K0 ビームライン	22
2.1	設計概念	22
2.2	モンテカルロシミュレーションと結果	23
2.3	実験データとの比較	23
2.4	考察	28
第3章	J-PARC KL ビームライン	
	モンテカルロシミュレーション	29
3.1	実験上の要求	29
3.2	方法	31
3.3	基本設計	33
3.4	シミュレーション結果と考察	37
3.4.1	Collimator の最適化	37
3.4.2	ハドロン相互作用モデル	49
3.4.3	Absorber の効果	51

第 4 章	結論と課題	56
4.1	結論	56
4.2	今後の課題	57

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	7
1.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の Monte-Carlo シミュレーション	7
1.3	KEK 12GeV 陽子シンクロトロン	10
1.4	KEK 東カウンターホールと K0 ビームライン	10
1.5	KEK PS の動作パターン概念図	11
1.6	主リングからの取り出しビームのサイズ	12
1.7	K0 ビームライン	13
1.8	Monte-Carlo シミュレーションによる K_L ビームの momentum 分布	13
1.9	E391a 検出器全体構造	14
1.10	上流部検出器	15
1.11	中央部検出器	16
1.12	下流部検出器	17
1.13	J-PARC 概観	18
1.14	ハドロンホール KL ビームライン	19
1.15	T1 標的	20
1.16	E14 実験における提案書のビームライン略図	21
1.17	K 中間子 運動量分布	21
2.1	E391a ビームライン概念図	24
2.2	K0 ビームライン ビームプロファイルのシミュレーション結果	25
2.3	実験データとシミュレーションとの比較	26
2.4	信号領域での π^0 生成	27
2.5	多重散乱の一例	28
3.1	CC02 での π^0 生成の例	29
3.2	GEANT4 基本セットアップ	33
3.3	中性子運動量分布	35
3.4	シミュレーション全体図	36
3.5	設計 No 1	38
3.6	No 1 円状 ($r = 5 \text{ cm}$) ターゲットでのシミュレーション結果	41
3.7	設計 No 32	42
3.8	設計 No 33	44

3.9	設計 No 34	46
3.10	各ハドロンモデルの比較	49
3.11	ステンレス鋼 厚さ依存	52
3.12	ステンレス鋼 位置依存性	53
3.13	鉛 位置依存性	54
3.14	鉛 位置依存性 (ビーム入射断面積一定)	55

表 目 次

1.1	K_L 崩壊モード	8
3.1	Collimator 形状 No 1	39
3.2	Collimator 形状 No 32	43
3.3	Collimator 形状 No 33	45
3.4	Collimator 形状 No 34	47
3.5	設計 No による $R_{halo/core}$	48
3.6	各ハドロン相互作用の違い	50

第1章 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定実験

1.1 実験概要

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 E391a 実験を行った [1]。実験は 2004 年 2 月から 7 月の Run-I、2005 年 1 月から 4 月の Run-II、同年 11 月から 12 月の Run-III と三度行われた。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊で検出可能な粒子は π^0 崩壊からの 2γ のみである。 K_L の崩壊モードでは $K_L \rightarrow 2\gamma$ という例外を除き、必ず荷電粒子、あるいは 2γ より多くの γ を放出する (表 1.1[3])。そのため終状態で 2γ 以外が放出されていないことを保証する必要があり、 γ に対する高い検出効率をもつ veto 検出器、及び荷電粒子用 veto 検出器によりこれを行う。

最終的な $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の同定は終状態に放出される 2γ から π^0 の質量を仮定して求めた崩壊位置 (vertex) に対する制限、及び 2γ が P_T (運動量のビーム軸に対する垂直成分) を持つという条件によって行われる。終状態で 2γ のみ放出されるもう一つのモード、 $K_L \rightarrow 2\gamma$ は二体崩壊であるため、終状態の 2γ が $P_T = 0$ となる。従って 2γ の P_T を求めることにより両者の識別が可能となる (図 1.1)。Monte-Carlo シミュレーションによって求めた $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊における K_L の vertex と 2γ の P_T の分布を図 1.2 に示しておく。

標準模型で計算される $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比は 3×10^{-11} [4] とされ、現在までに直接的に測定されている感度の上限値はアメリカの Fermi Lab. で行なわれた KTeV 実験で測定されており 2.1×10^{-7} である [5]。E391a 実験グループでは最終的に J-PARC において 3×10^{-13} の測定感度を達成することを目指している。

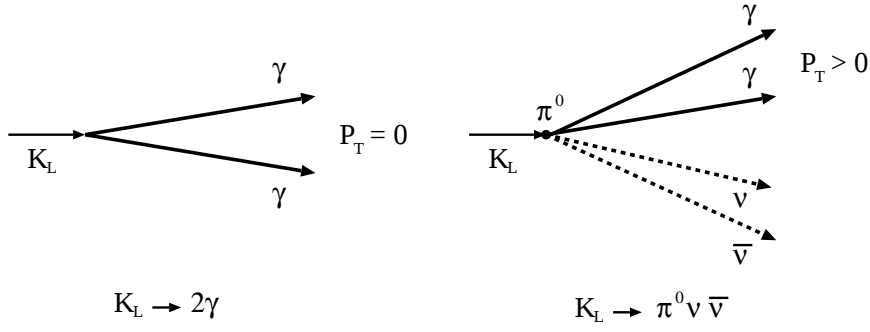


図 1.1: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow 2\gamma$ での P_T の比較

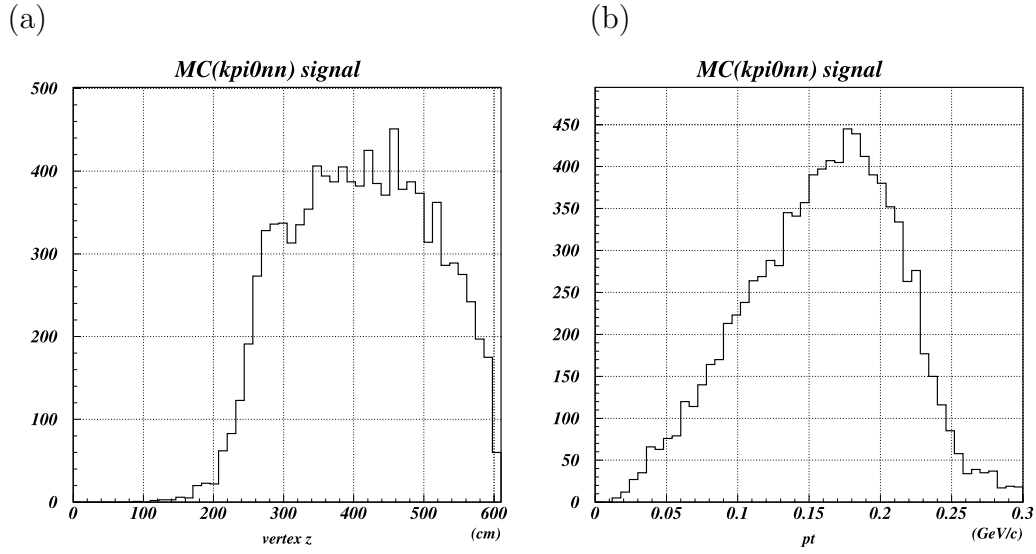


図 1.2: E391a 実験における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の Monte-Carlo シミュレーション (a) $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の vertex 分布 - $Z=0$ は Front Barrel(1.2.2 節参照) の上流側入口であり、測定する崩壊領域は 280 cm ~ 550 cm の範囲である。(b) $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊からの 2γ の P_T の分布

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, 2γ
$3\pi^0$	$(21.05 \pm 0.23)\%$	6γ
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$(12.59 \pm 0.19)\%$	2ch, 2γ
$\pi^+ \pi^-$	$(2.090 \pm 0.025) \times 10^{-3}$	2ch
$\pi^0 \pi^0$	$(9.32 \pm 0.12) \times 10^{-4}$	4γ
$\pi^\pm e^\mp \nu \gamma$	$(3.53 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	2ch, 1γ
$\pi^0 \pi^0 \gamma$	$< 5.6 \times 10^{-6}$	5γ
$\pi^+ \pi^- \gamma$	$(4.39 \pm 0.12) \times 10^{-5}$	2ch, 1γ
$\pi^0 2\gamma$	$(1.41 \pm 0.12) \times 10^{-6}$	4γ
2γ	$(5.90 \pm 0.07) \times 10^{-4}$	2γ
$e^+ e^- \gamma$	$(10.0 \pm 0.5) \times 10^{-6}$	2ch, 1γ
$\mu^+ \mu^- \gamma$	$(3.59 \pm 0.11) \times 10^{-7}$	2ch, 1γ
$e^+ e^- \gamma \gamma$	$(5.95 \pm 0.33) \times 10^{-7}$	2ch, 2γ
$\mu^+ \mu^-$	$(7.27 \pm 0.14) \times 10^{-9}$	2ch
$e^+ e^-$	$(9^{+6}_{-4}) \times 10^{-12}$	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, 2γ
$\pi^0 e^+ e^-$	$< 5.1 \times 10^{-10}_{\text{CL}=90\%}$	2ch, 2γ
$\pi^0 \nu \bar{\nu}$	$< 5.9 \times 10^{-7}_{\text{CL}=90\%}$	2γ
$e^\pm \mu^\mp$	$< 4.7 \times 10^{-12}_{\text{CL}=90\%}$	2ch
$e^\pm e^\pm \mu^\mp \mu^\mp$	$< 4.12 \times 10^{-11}_{\text{CL}=90\%}$	4ch

表 1.1: K_L 崩壊モード [3]

1.2 KEK-PS E391a 実験

E391a 実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeV 陽子シンクロトロン (PS) 東カウンターホール に位置する K0 ビームライン [6] を用いて行われた。

1.2.1 加速器

この節では加速器とビームに関することを述べていく。まず、PS 及び東カウンターホールを図 1.3 に示しておく。

この加速器施設は前段加速器、線形加速器、ブースター加速器、及び主リングにより構成される [7]。まず負水素イオンが Cockcroft-Walton 型の前段加速器によって 750 keV まで加速される。これを線形加速器に送り 40 MeV まで加速した後、ブースター加速器へ入射する。このとき、炭素の薄膜によって電子が剥ぎ取られて陽子になる。ブースターでは 500 MeV まで加速され主リングへ送られる。ブースターと主リングの平均半径はそれぞれ 6 m, 54 m で、その比が整数 9 になるように選ばれている。図 1.5 に spill の時間関係を示す。ブースターで加速されたビームが入射されている 0.5 秒間は主リングの磁場を一定値に保つ。ブースターから 9 回入射の後、磁場を上昇させて 0.65 秒後 12 GeV にまで加速される。これを遅い取り出しによって 2 秒の間実験室へと導く。このとき主リングの磁場は一定値に保たれている。この過程が 4 秒周期で繰り返される。

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 程度である。このときの陽子ビームサイズは図 1.6 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 target ($8\text{mm}\phi$, 10cm 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 K0 ビームライン (図 1.7) 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。K0 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 を落とすための Pb absorber を配してある。また、中性子を落とすための Be absorber も用意されている。K0 実験エリア入口での K_L ビームの momentum 分布は Monte-Carlo シミュレーションによって図 1.8 のように得られている。また、検出器に入射する K_L は $2.1 \sim 2.4 \times 10^5/10^{12}$ ppp (particle per pulse : 1 spill あたりに飛来する粒子数) 程度である。

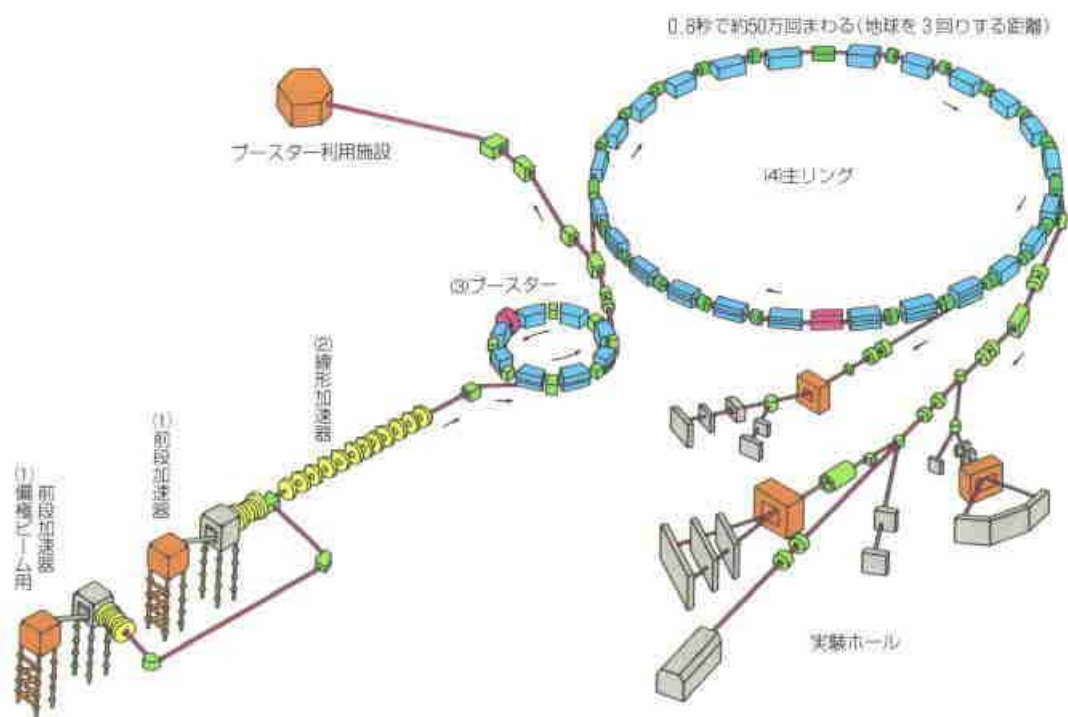


図 1.3: KEK 12GeV 陽子シンクロトロン

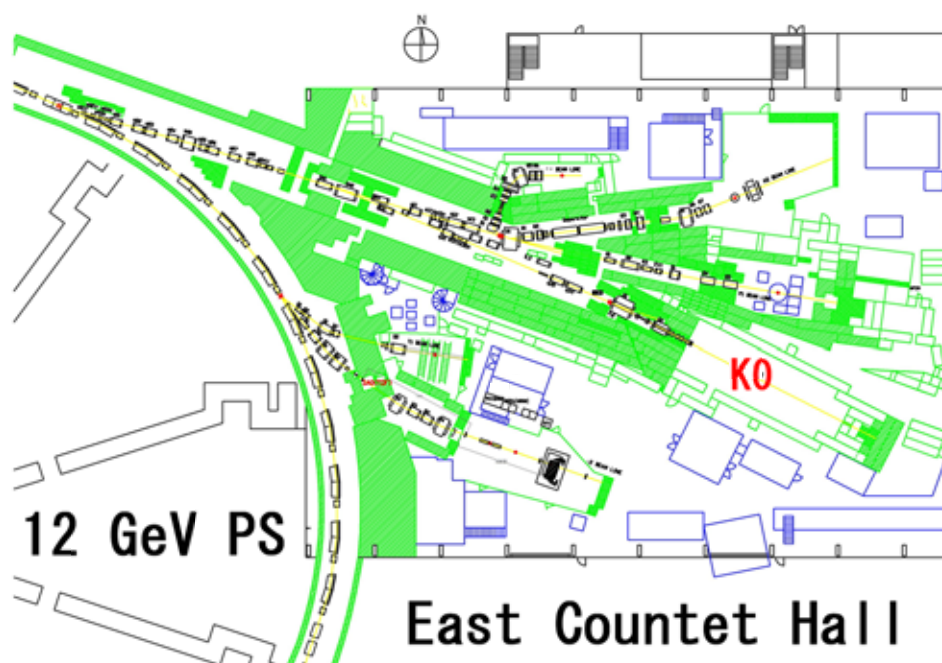


図 1.4: KEK 東カウンターホールと K0 ビームライン

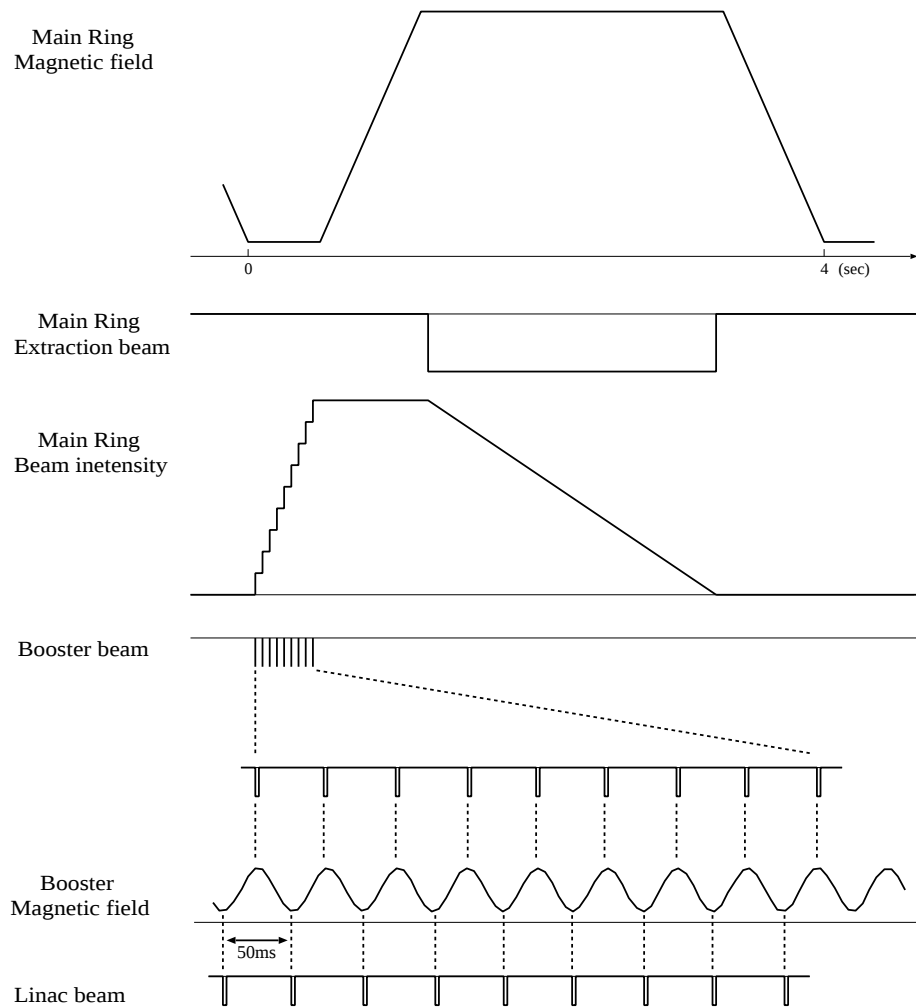


図 1.5: KEK PS の動作パターン概念図

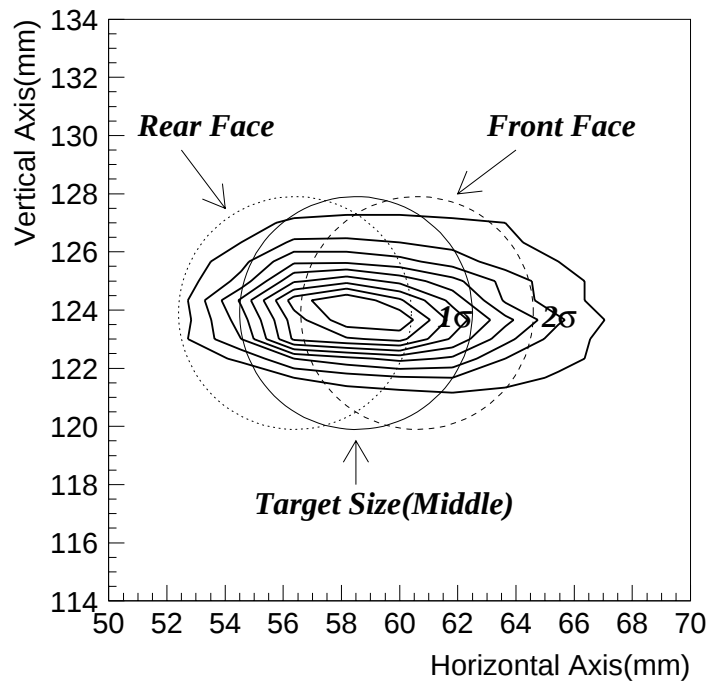


図 1.6: 主リングからの取り出しビームのサイズ 縦: $\sigma = 1.1\text{mm}$, 横: $\sigma = 3.3\text{mm}$
 図中の円はプラチナターゲットを示している。ビームはターゲットに対して 4° の角度で入射するので前面・背面・及び中央の断面は図のように示される。

1.2.2 検出器

E391a 検出器の全体構造を図 1.9 に示す。検出器は真空容器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 [2]。

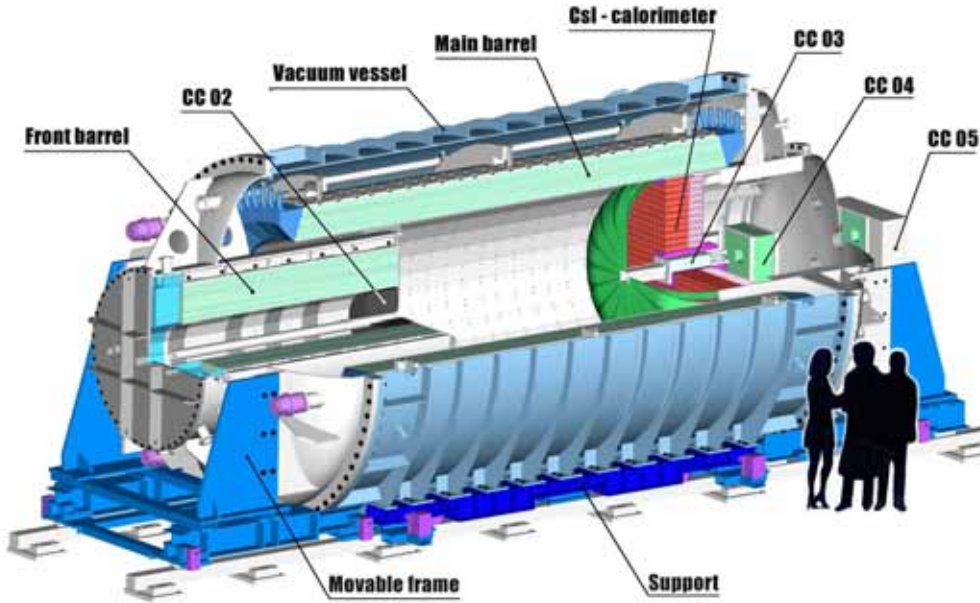


図 1.9: E391a 検出器全体構造

E391a 検出器は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊と膨大な background モードを区別するために、以下のような方針に基づいて設計されている。

- 終状態の π^0 からの 2γ の位置とエネルギーの検出には CsI カロリメータを使用する。
- 終状態に π^0 からの 2γ 以外の粒子が放出されていないことを保証するため、 K_L 崩壊領域の 4π 方向を覆う形で高い γ 検出効率を持つ veto 検出器を配する。
- 荷電粒子 veto 用に K_L 崩壊領域を囲むようにしてプラスチックシンチレータを配する。
- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 同様、終状態に 2γ のみ放出されるモードに $K_L \rightarrow 2\gamma$ が存在するが、これらは 2γ の P_T によって識別する。このために K_L ビームは直径 $\sim 6\text{cm}$ と細く絞ってある。
- K_L 崩壊領域を高真空 ($\sim 10^{-5} \text{ Pa}$) に保ち、ビーム中の中性子とビーム周りの物質との相互作用による新たな π^0 の生成を防ぐ。

1.2.3 上流部検出器

上流部に置かれる検出器は図 1.10 のような配置になっている。上流部に置かれる検出器は上流での K_L 崩壊による Background を除去するための Front Barrel (FB) 及び CC02 (CC は 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 個円筒状に組み上げ、これを波長変換ファイバーを用いて片側から読み出している。全長 2.75 m、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。

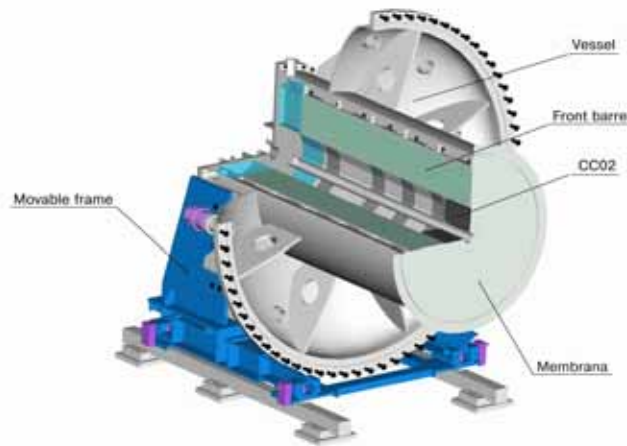


図 1.10: 上流部検出器

1.2.4 中央部検出器

中央部検出器の構造を図 1.11 に示す。中央部検出器は Main Barrel (MB) 及び Barrel Charged Veto (BCV) と呼ばれる veto 検出器から構成されている。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 個から成る円筒構造をしており、波長変換ファイバーを用いて両側から読み出している。全長 5.5 m、厚さ $14X_0$ である。BCV は 2 層のプラスチックシンチレータから構成され、やはり両側から波長変換ファイバーを用いて読み出していて K_L 崩壊で生成する荷電粒子の veto 検出器として用いている。

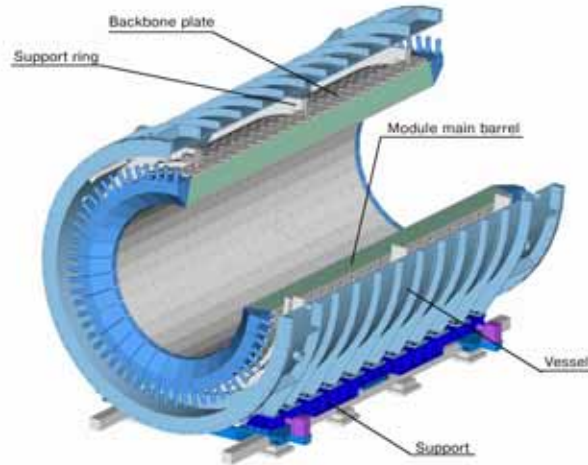


図 1.11: 中央部検出器

1.2.5 下流部検出器

下流部検出器は図 1.12 のような構造になっている。下流部検出器はメインの γ 検出器である 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 Sandwich Counter から成る。CsI カロリメータの内側中心部に位置する CC03 は、タンゲ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 側へのシャワー洩れを捉える。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 を内外から覆うように配置されている。Sandwich Counter は鉛とプラスチックシンチレータ積層型検出器であり、外周部を埋めている。さらに CsI カロリメータ後方に、鉛・プラスチックシンチレータ積層の CC04 が配置されている。

1.2.6 真空容器外下流検出器

真空容器外の下流には CC05, CC06, CC07, Beam Hole Charged Veto(BHCV), Back Anti(BA) がある。CC05 は CC04 とほぼ同形状の鉛・プラスチックシンチレータ積層型であり、真空容器外の直後に位置する。

CC06, CC07 はそれぞれ鉛ガラス検出器 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。最下流部では検出器を beam に直接当たる形で配置し 4π 方向の最後の穴を塞ぐ。1mm 厚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 し、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。このように beam を直接受けるような場合には

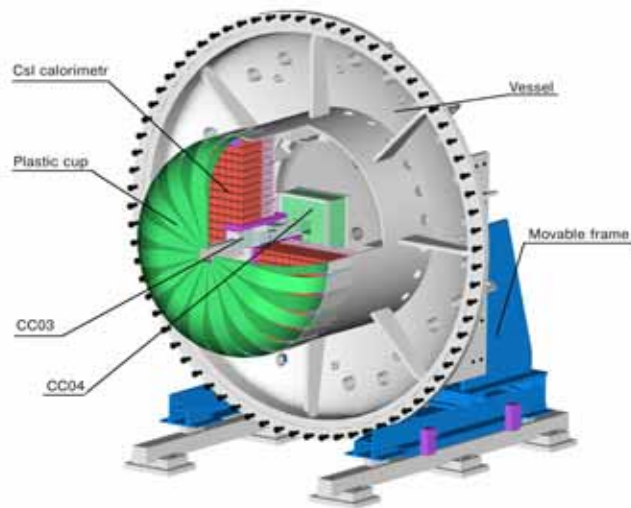


図 1.12: 下流部検出器

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 background になる。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。

1.2.7 Vacuum System

E391a では、 K_L が物質と相互作用する background を減らすために K_L 崩壊領域で 10^{-5} Pa 以下を目標として真空を保つと同時に K_L ビーム周りの物質量を可能な限り落とす必要がある。そこで検出器全体を真空中に置き、アウトガスの大きい低真空の検出器領域と高真空の K_L 崩壊領域を薄い膜で分離し、差動排気を行う方法を用いている。高真空領域と低真空領域での圧力差は小さいため、わずか $200\mu m$ 程度の薄膜でも数箇所を支えるだけで円筒形状を保つことができる。本実験において、低真空は 10^{-1} Pa 以下、高真空で、 1.2×10^{-5} Pa 程度を達成した。

1.2.8 結果

E391a 実験グループは三度にわたる実験において測定時間 1.3×10^6 spill (1 spill = 4 sec)、データ量 7.0 TByte、 K_L 崩壊を 8.4×10^8 イベント測定した。そして Run-I データの約 10 % を解析した結果 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の上限値 2.1×10^{-7} を得た。また引き続きすべてのデータについて解析中である。そして現在建設中の J-PARC (大強度陽子加速器施設) においても次節に後述するように $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験を行う予定である。

1.3 J-PARC E14 実験

1.3.1 J-PARC 実験の概要

J-PARC(大強度陽子加速器施設) は 400 MeV 常伝導リニアック、400 MeV ~ 600 MeV の超伝導リニアック、3 GeV-333 μA (1 MW) の陽子シンクロトロン、50 GeV-15 μA (0.75 MW) の陽子シンクロトロンからなる世界最高のビーム強度を持つ加速器施設である。2008 年の完成を目指し建設中である J-PARC は素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力工学の分野に置いて最先端の研究を行う。J-PARC E14 実験とは KEK-PS E391a 実験で確立された測定方法を用いて $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比を精密に測定することを目的としている。新施設をより効果的に利用するため、陽子ビームを他のビームラインと共用して行う第一段階 (step-1) では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の初検出を目指し、第二段階では専用ターゲットを用いての実験となり分岐比の精密測定へと展開する計画である [9]。本論文の目的は step-1 で使用するビームラインの設計をすることである。



図 1.13: J-PARC 概観

1.3.2 KL ビームラインの概要

J-PARC E14 実験は図 1.14 のようなハドロンホールの KL ビームラインを使用して行われる。

50 GeV シンクロトロンから入射したビームは図 1.15 のニッケル標的に入射し 2 次粒子を発生させる。KEK での Intensity は 2×10^{12} ppp 程度であったが J-PARC においての Intensity は 3×10^{14} ppp にもなる。そのため標的の熱収支の計算の結果、除熱には標的物質を回転させながら直接その表面から熱を取り去る方式を採用し吸熱物質として水を使う [8]。標的は直径 280 mm、物質質量全長 54 mm、分割数 5 枚、ギャップ 3 mm、厚さ (上流から) 21.7 mm、11.2 mm、8.3 mm、6.8 mm、5.9 mm、回転数 85 rpm、沈める水の深さは 65 mm である。KL ビームラインはビーム軸から 16° の角度の方向に引き出され、図 1.16 のように 21 m の長さになっている。主にタンゲステンからなる 2 つのコリメータによって beam halo は取り除かれる。コリメータの前には γ 線を減らすための鉛 7 cm 相当 ($12.5 X_0$) の absorber を設置し 2 つのコリメータの間には荷電粒子を排除するための sweeping magnet が置かれており、コリメータを通過した K_L は検出器に入射する。

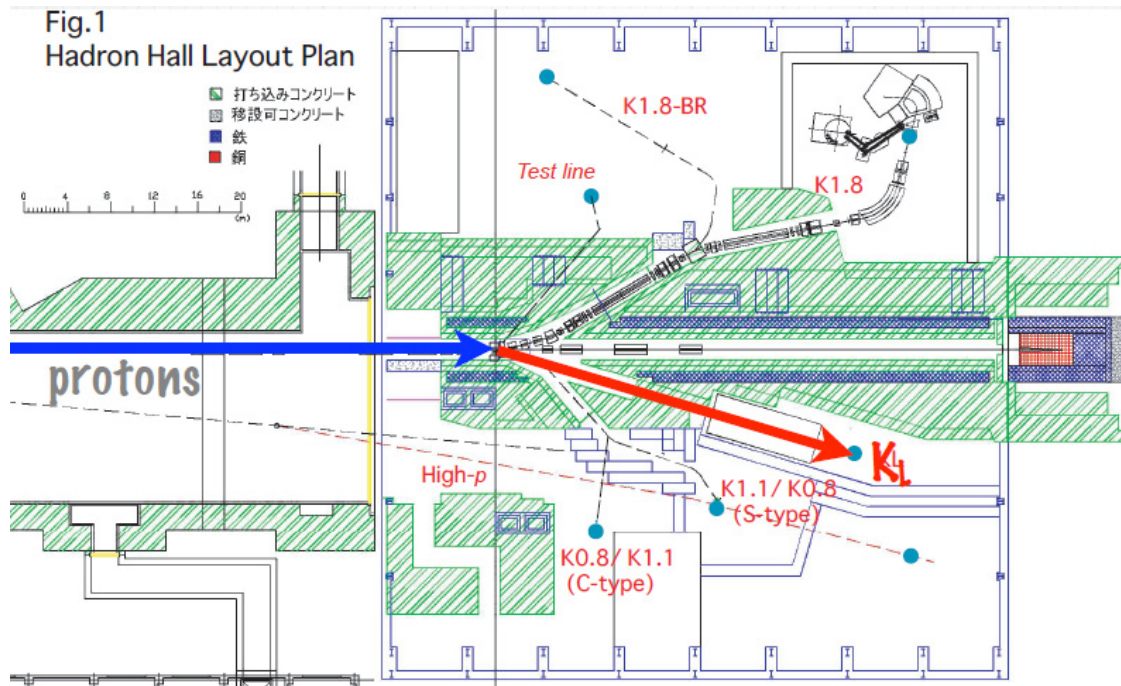


図 1.14: ハドロンホール KL ビームライン

Monte-Carlo Simulation で発生する K_L の運動量を Simulate したのが図 1.17 である K_L の momentum が E391a の実験と比べて大きく変わらないため、使用する検出器は E391a 実験で使用した検出器を upgrade して使う。

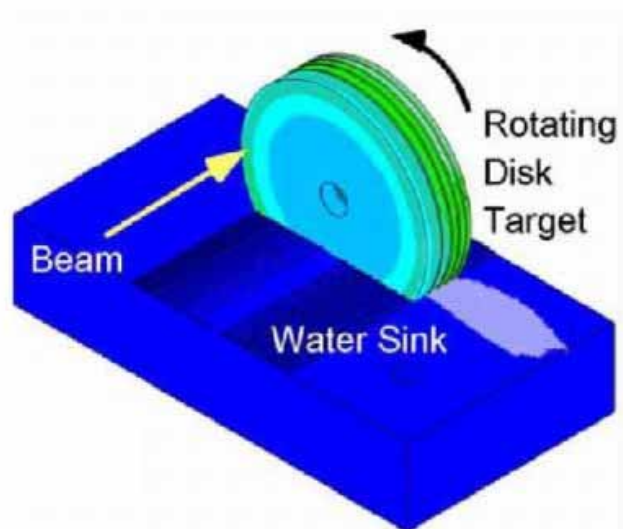


図 1.15: T1 標的

1.3.3 実験予定

J-PARC E14 実験は平成 20 年 12 月に最初のビームが取り出されビームラインの性能評価実験が行われる。そのときのビーム強度は設計ビームの $1/1000$ である 10^{11} ppp 程度が予想されており測定項目はビーム形状、ビームコア / ハローのエネルギー分布と Flux、および γ 線、ミューオンと熱中性子の Flux である。その実験データの解析を行い本実験のビームライン設計に反映させ平成 22 年から $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比測定実験を行う予定である。

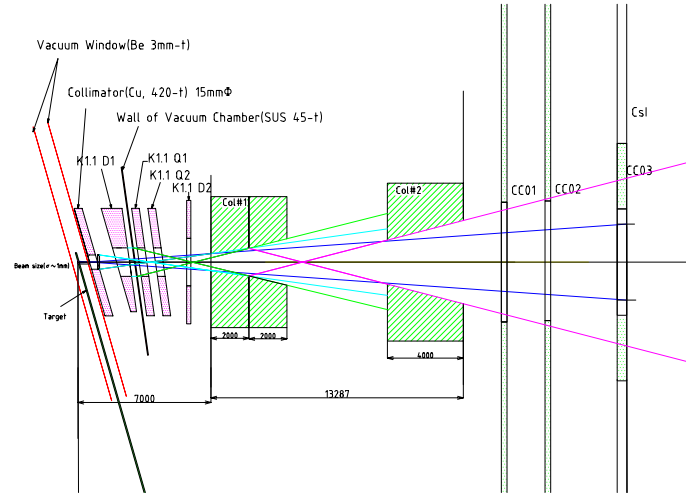


図 1.16: E14 実験における提案書のビームライン略図

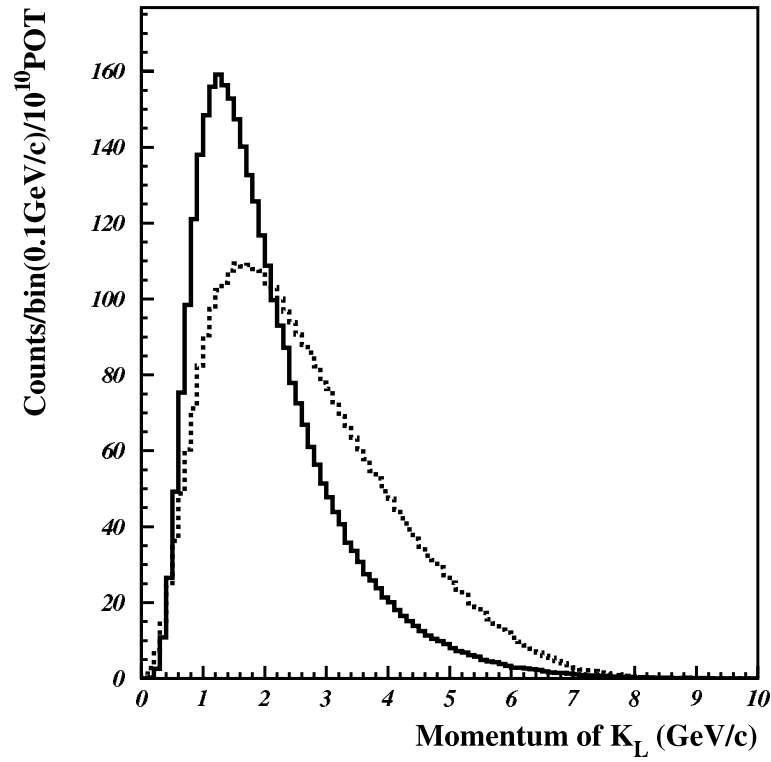


図 1.17: K 中間子 運動量分布:J-PARC E14 実験 (実線) と E391a 実験 (破線)

第2章 KEK-PS K0 ビームライン

この章ではKEK(高エネルギー加速器研究機構)の12GeV-PSにおいて行われたE391a実験で使用されたビームラインについて述べる。

2.1 設計概念

図2.1はK0ビームラインの概念図である。図2.1の下図のようにビームラインはC1からC6までの6つのコリメータから構成されていてC1、C2、C3、C5、C6はタングステン合金製のコリメータ、C4は酸化ガドリニウム入りプラスチックを使った熱中性子用アブソーバーである。各コリメータは厚さ5 cmのドーナツ状の円盤で構成され内径を ~ 0.5 mmずつ変えていき角度を作っている。下記にビーム形状を決定するためのA-lineからE-lineの説明を示す。

- A-line は標的の中心から 2mrad の角度で引かれた線で C2、C3 の内側の角度と同じである。
- B-line は標的の端である T^* から C3 の下端 P3 に引いた線である。またその線上にある C5 と C6 は B-line から 0.2 mm 外に設置されていて標的から生成された粒子が直接当たることはない。
- C-line は C2 の上端 $P2^*$ から C6 の下端 P6 に引いた線であり C1 と C2 の間にある Be absorber と Pb absorber からの最大角である。
- D-line は C3 の下端 PV^* から P6 に引いた線でこれはコリメータ上流で収束させたものから Vacuum window やその前の空気との 2 回散乱を覆う線である。
- E-line は C2 の上端 $P2^*$ から C3 の下端 P3 に引いた線でこれは C1 の内側の線である。そしてここで生成された粒子は C3 の上流部分に当たることになる。

D-line において主にハローとなる生成粒子の境界線が引かれる。ここで複数散乱や突き抜けがハローのソースとなる。

図2.1の上図はビームラインの構成要素である。コリメータの周囲はビームの遮蔽材である真鍮で覆われさらにそれを鉄、コンクリートで覆っている。C1とC2の半分を覆う領域とC4を覆う領域には荷電粒子を除去する1テスラのSweeping Magnetが置かれてい

る。C1 と C2 の間には γ 線や中性子の量を調節するアブソーバー、そして C6 の下流にはプラスチックシンチレータを挟み込んだアクティブコリメータが置かれている。また C3 の後端からは真空領域となっている。

2.2 モンテカルロシミュレーションと結果

E391a K0 ビームラインのモンテカルロシミュレーションには高エネルギー素粒子実験において良く用いられている GEANT3[10] を使って行われた。その際、ハドロン相互作用モデルは G-FLUKA モデル [10] を採用している。ビームラインシミュレーションは二段階構成になっている。第一段階として直径 8 mm 長さ 60 mm の円柱型の Pt に 12 GeV の陽子を衝突させ標的からの二次粒子発生を起こさせるターゲットシミュレーションを行う。そしてその二次粒子の情報を標的から 7 cm の位置で記録する。このとき GEANT3 ではエネルギーの閾値を 10 keV と設定している。ここで 10^8 proton on target (target に当たる陽子数:以下 pot) のイベントを発生させた。そして第二段階としてターゲットシミュレーションで得た粒子情報を使いコリメータシミュレーションを行う。ここでビームラインシミュレーションを行なうにあたって 10^8 pot のイベント数では不十分なので 10^8 pot イベントを 100 回繰り返して使い 10^{10} pot 相当にしている。またビームラインの構成においてコリメータの前にアブソーバーなし、ベリリウムアブソーバー、鉛アブソーバーの 3 通りについてもシミュレーションを行った。そしてビームラインシミュレーションの結果は図 2.2 のようになっており結果として非常にシャープなプロファイルを持つ中性ビームの生成が予想された。

2.3 実験データとの比較

E391a K0 ビームラインの性能評価実験はビームラインの後ろに 1 cm と 6 cm のプラスチックシンチレーター ($0.14 X_0$, $0.11 \lambda_T$)、そして 1 mm の鉛と 5 mm のシンチレーターのサンドイッチカロリメータが 15 層 ($2.85 X_0$, $0.28 \lambda_T$) を使ったセットアップで行われた。図 2.3 はビームラインに鉛アブソーバー入れたときとアブソーバーなしのシミュレーションでのビームプロファイルと実験データのビームプロファイルである。そしてこのシミュレーションは実験データを良く再現していることがわかる。

しかしながら $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊の本実験において得られたデータを解析していくなかで図 2.4 のように信号領域の上流 250 cm ~ 300 cm の範囲において比較的多くの single π^0 生成事象が観測された。single π^0 イベントは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ に対し直接背景事象となりうる。実際、現在の実験感度では最も大きな背景事象の原因の 1 つである。また、 K_L 崩壊領域は CC02 の下流より 30 ~ 50 cm 程度離して定義しているため下流のイベントについては直接の背景事象にはならない。

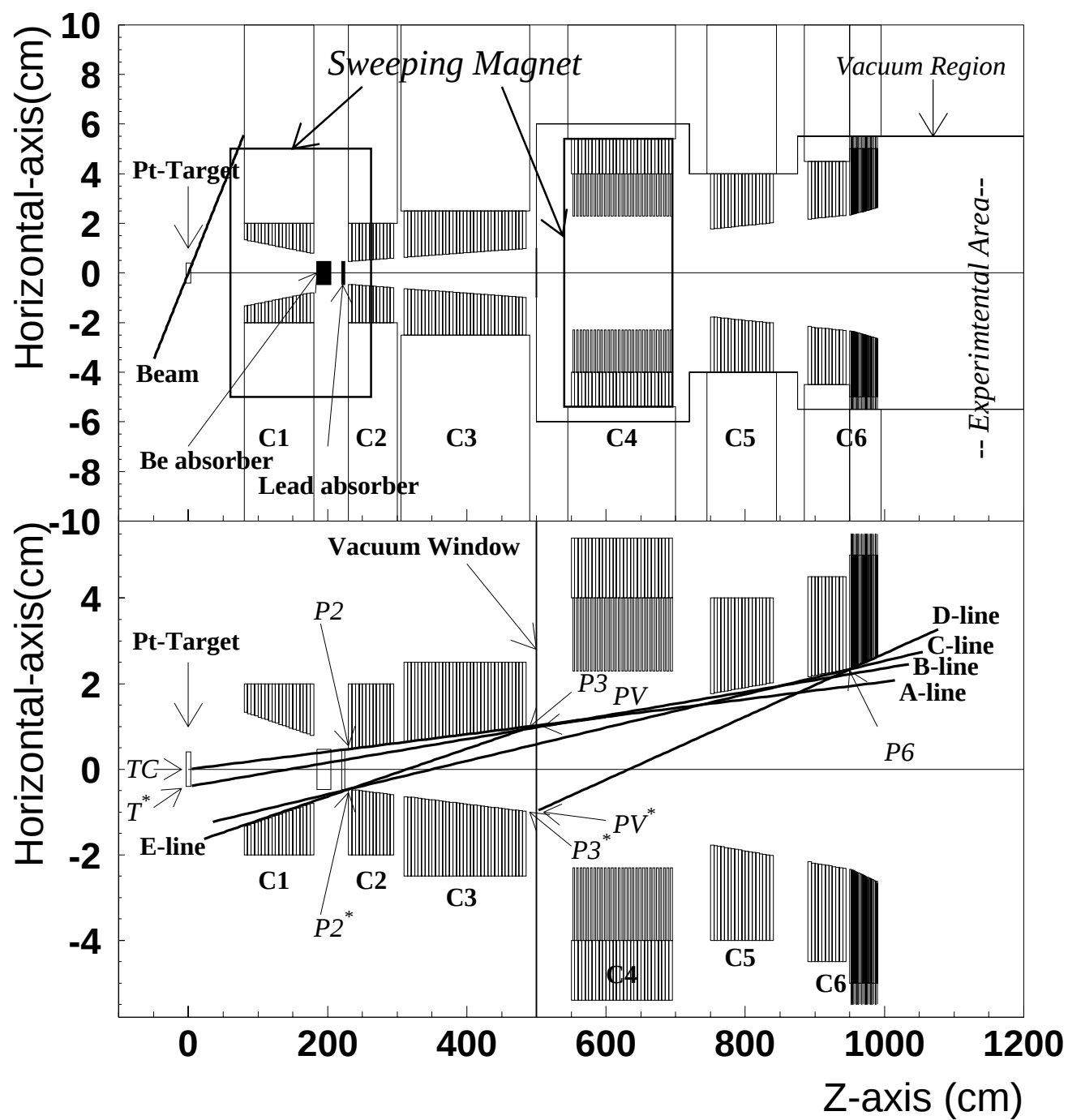


図 2.1: E391a ビームライン概念図:上の図がビームラインの構成、下の図はビームラインの形状である。

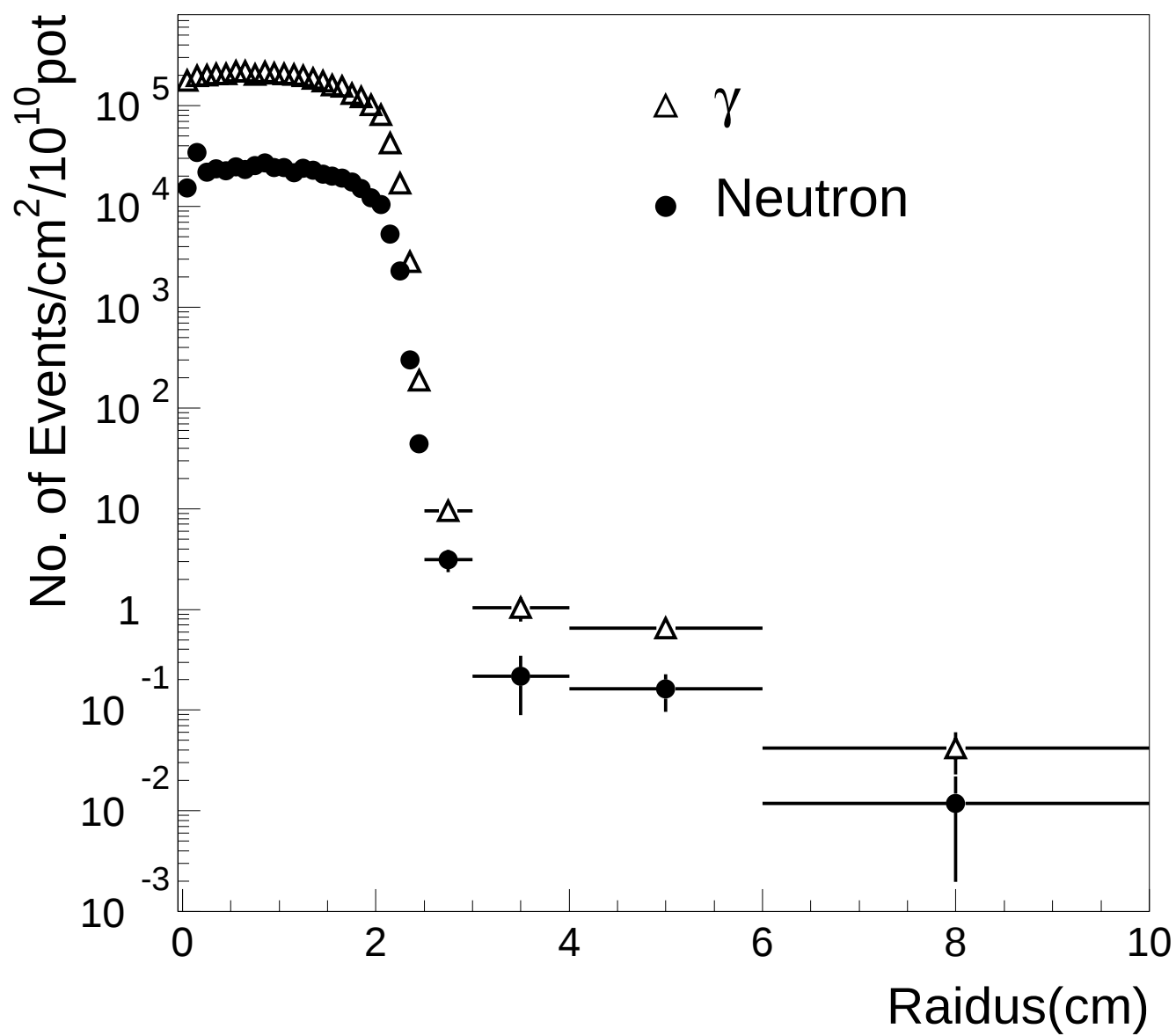


図 2.2: K0 ビームライン ビームプロファイルのシミュレーション結果:横軸がビーム軸からの距離、縦軸がイベント数である。

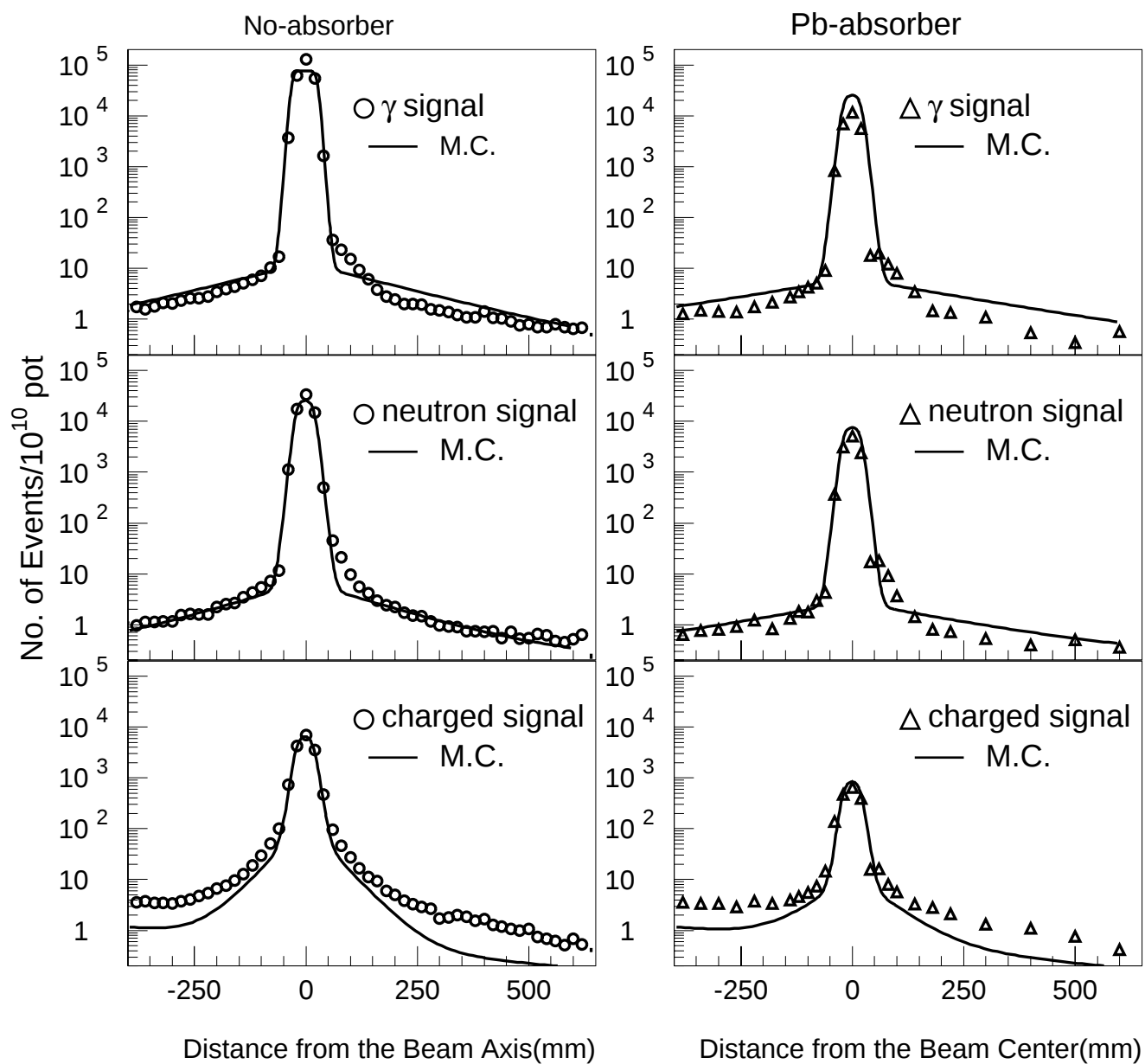


図 2.3: 実験データとシミュレーションとの比較:実線がシミュレーション結果、点が実験データである。

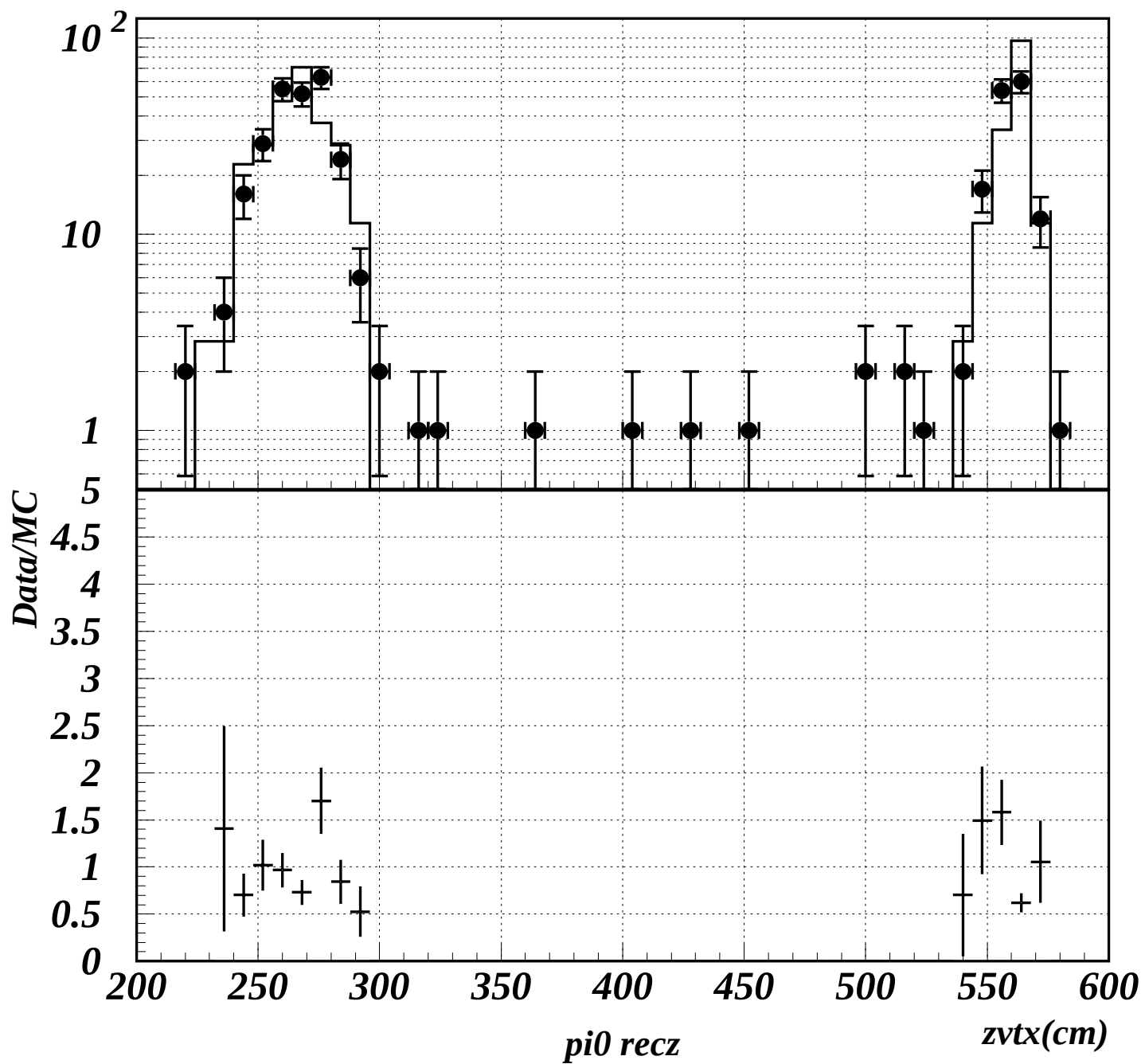


図 2.4: 信号領域での π^0 生成: 実線がシミュレーション結果、点が実験データ、横軸がビームライン軸、縦軸が生成された π^0 の数である

2.4 考察

図 2.4 のような事象について解析した結果、ハロー中性子が検出器中の物質と反応し π^0 中間子が生成されていることが判明した。ビームラインの設計にあたっては標的に当たって生成された高エネルギーの中性子が直接検出器に当たらないようにコリメータを調節している。ビームラインシミュレーションで得られたハロー中性子を使った検証の結果、図 2.5 のように標的で生成された高エネルギーの中性子がコリメータの内側で数回弾性散乱するという稀な過程を経て元のエネルギーをほとんど失わずに検出器へ入射していたことが明らかとなった。現在の測定感度では問題になっていないが 10^{-12} の測定感度を目標とする J-PARC E14 実験においては深刻な背景事象になる可能性がある。

E391a の実験の解析を受けて J-PARC E14 実験で改良すべき点は以下の通りである。

- コリメータの内面の表面積を減らす。ただし中性子の全エネルギーを吸収できる十分な厚さは必要である。
- 下流のコリメータの内面から上流のコリメータの内面が見えないように配置する。

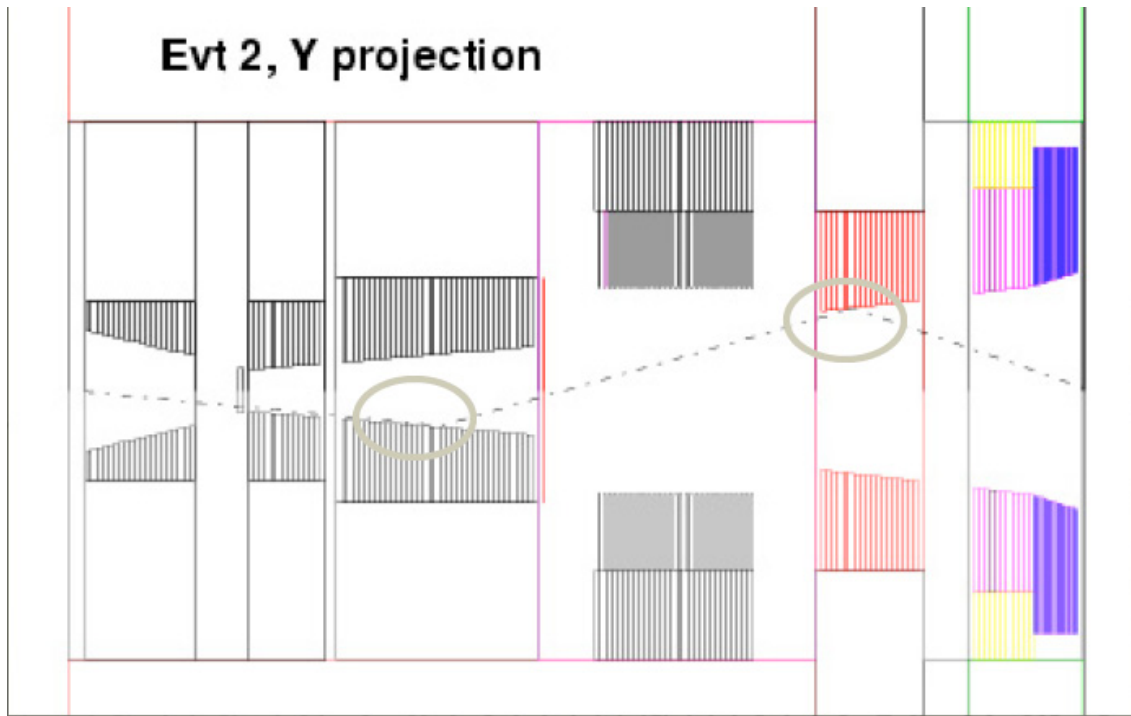


図 2.5: 多重散乱の一例

第3章 J-PARC KL ビームライン モンテカルロシミュレーション

この章では前章で述べた考察を考慮し J-PARC E14 実験に際してどのようなビームラインが必要されていて、目標達成のためにはどのような改善が必要であるかそのシミュレーションの方法や結果を述べていく。

3.1 実験上の要求

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比測定実験が難しい理由の1つは崩壊分岐比が 3×10^{-11} という稀な崩壊であるということである。さらに関与する全ての粒子が中性で追跡が困難であり、3体崩壊で2粒子が測定不能な ν であるため運動学的制限も少ない中で π^0 中間子の1つを検出しなければならない。ここで大きな問題は π^0 中間子はビーム中に大量に存在する中性子と物質の相互作用により簡単に生成されてしまう点にある。

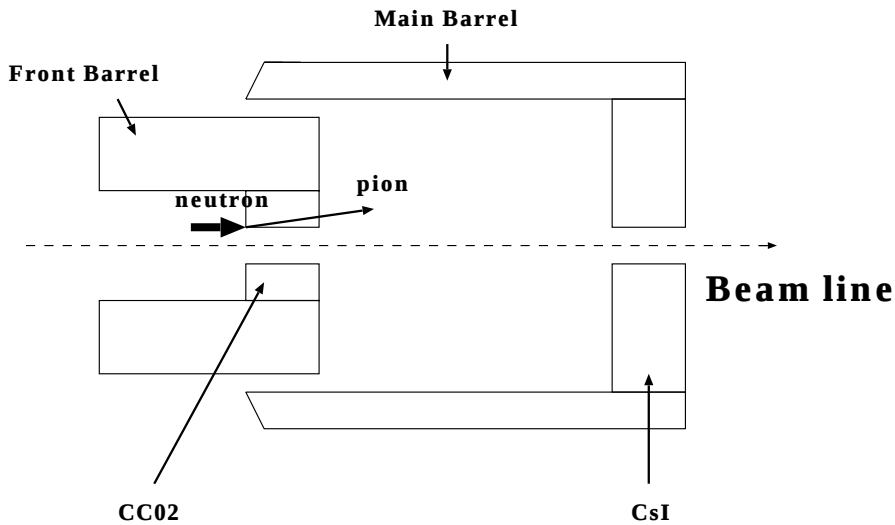


図 3.1: CC02 での π^0 生成の例

図 3.1 のように検出器内の CC02 の端にハロー中性子が衝突することによって single π^0 が発生し $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の背景事象となる可能性がある。E391a 実験では CC02 の内径は

63.5 mm であるため CC02 の位置において CC02 の内径より広がった中性子をハロー中性子と定義する。

本研究の目的は J-PARC E14 実験において背景事象の 1 つである CC02 における π^0 生成事象を減らすためビームラインコリメータの最適化を進めてビーム全体におけるハロー中性子/コア中性子の割合を低減させることである。

では具体的にハロー中性子をどの程度まで減らす必要があるのか検討する。KEK にて行われた E391a 実験の Run-II の実験データ解析の結果をもとに計算を進めていく。Run-II では 4.8×10^{17} pot のデータを収集した。そして現在のモンテカルロシミュレーションの結果ハロー中性子生成の割合は $438 \text{ n}/10^{10} \text{ pot}$ 程度である。つまり、Run-II すべてのデータには

$$4.8 \times 10^{17} \text{ pot} \times 438 \text{ n}/10^{10} \text{ pot} \approx 2.1 \times 10^{10} \text{ n} \quad (3.1)$$

のハロー中性子があることになる。その内 CC02 へ入射するのは全体の 7.1 %程度なので

$$2.1 \times 10^{10} \text{ n} \times 0.071 \approx 1.49 \times 10^9 \text{ n} \quad (3.2)$$

の数だけ CC02 でのハロー中性子があることになる。しかし、CC02 でのすべてのハロー中性子が必ずしも背景事象になるとは限らない。E391a 実験において背景事象とされているのは 2γ のみが CsI で検出されるイベントである。ハロー中性子が CC02 へ入射後 2γ イベントになる確率は 1.5×10^{-5} 程度であり、またオフライン解析での崩壊点以外の Event Selection によるアクセプタンスは 6.7×10^{-3} なので背景事象となる確率は次のようになる。

$$1.5 \times 10^{-5} \times 6.7 \times 10^{-3} \approx 1.0 \times 10^{-7} \quad (3.3)$$

さらに、 K_L 崩壊領域は CC02 の下流より 30 ~ 50 cm 程度離して定義しているため [11] 崩壊点のカットにより残るのは 3.7×10^{-5} 程度である。また J-PARC における K_L momentum は E391a 実験よりソフトになっているため、さらにその 13 %までカットすることができハロー中性子に起因する背景事象を以下の割合で排除できる。

$$1.0 \times 10^{-7} \times 3.7 \times 10^{-5} \times 1.3 \times 10^{-1} \approx 4.8 \times 10^{-13} \quad (3.4)$$

J-PARC E14 実験では 1.8×10^{21} pot のデータを取る予定である。また、ターゲットシミュレーションにより 1.8×10^{21} pot に対し発生する中性子は $6.2 \times 10^{14} \text{ n}$ と見積もられている。

先程述べたように CC02 におけるハローイベントは 4.8×10^{-13} の確率で排除することが可能である。よって E14 実験のすべてのデータの中で背景事象が問題とならない (0.1 event 以下) ようなビームラインで必要となるハロー/コアを $R_{halo/core}$ とすると以下のようになる。

$$6.2 \times 10^{14} n \times 4.8 \times 10^{-18} \times R_{halo/core} < 0.1 \text{ event} \quad (3.5)$$

$$R_{halo/core} < 3.4 \times 10^{-4} \quad (3.6)$$

以上によりこの実験にはハロー/コアの比が 3.4×10^{-4} となる必要がある。

3.2 方法

本研究のシミュレーションには GEANT4[12] 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 C++ 言語を用いた高エネルギー実験計測器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が得られるため 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基本的に QGSP モデル (Quark Gluon String model)[12] を使用している。GEANT4 では粒子発生から Step が始まり全ての粒子が消えるまで Step をふむことになる。ここで粒子が消えるというのは GEANT4 で定義した領域から粒子が出た場合と粒子のエネルギーが設定する閾値以下になった場合のことを意味する。そしてその閾値を設定するため以下の計算をした。

前節で述べたように本研究では single π^0 を生成するようなハロー中性子について調べている。よってハロー中性子の相互作用によって single π^0 が生成される最低エネルギーについて議論する。今、ハロー中性子が CC02 で相互作用を起こし single π^0 を生成する代表的な過程の 1 つは次のような反応である。

$$n + n \rightarrow \pi^0 + n + n \quad (3.7)$$

ここで 2 つの粒子から 3 つ目の粒子が発生するには

$$E_A + E_B > m_A + m_B + m_C \quad (3.8)$$

という条件が必要である。ここで始状態の 2 つの粒子のエネルギーを E_A 、 E_B 終状態の 3 つの粒子の質量を m_A 、 m_B 、 m_C とした。

またその 3 つ目の粒子が発生するための最低エネルギー閾値を E_{th} とする。

$$E_{th} = E_A + E_B \quad (3.9)$$

そして一般的にその閾値の値は始状態の2つの粒子を E_A 、 E_B とすると

$$E_{th} \geq \frac{1}{2(M_A + M_B)} \{(m_A + m_B + m_C)^2 - M_A^2 - M_B^2\} \quad (3.10)$$

で表される。今回の場合、 $M_A = M_B = m_A = m_B = M_n$ 、 $M_C = M_{\pi^0}$ なので

$$E_{th} \geq \frac{1}{2M_n} \{(2M_n + M_{\pi^0})^2 - 2M_n^2\} \quad (3.11)$$

の反応となり、また中性子、 π^0 の静止質量は以下の通りなので

$$M_n = 939 \text{ MeV}/c^2 \quad (3.12)$$

$$M_{\pi^0} = 135 \text{ MeV}/c^2 \quad (3.13)$$

π^0 を生成するエネルギー閾値は

$$E_{th} \approx 1219 \text{ MeV} \quad (3.14)$$

となる。

ここでの閾値は中性子自体の静止質量も含まれるので運動エネルギーとして

$$E_{kin.} = E_{th} - M_n c^2 \quad (3.15)$$

$$E_{kin.} \approx 280 \text{ MeV} \quad (3.16)$$

となる。衝突される粒子のフェルミ運動まで考慮すると概ね 200 MeV 以下の閾値があればよい。また $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定実験において使用する CsI カロリメータの 2γ を検出するクラスターに対するトリガーレベルの閾値はおおよそ 60 MeV 以上である [11]。ここではハロー中性子が直接 CsI で反応し γ -like な偽クラスターを作る可能性を考慮し、またシミュレーションにおける CPU の計算時間とのバランスを考え閾値の値は 10 MeV とした。今後のシミュレーションで統計を増やす必要があるときは閾値を 50 MeV とすることとする。

3.3 基本設計

GEANT4 で Simulation をする際、基本的なセットアップを図 3.2 に示す。今回のビームラインシミュレーションは標的からコリメータまでのフルシミュレーションではなくコリメータの最適化を優先的に行った。

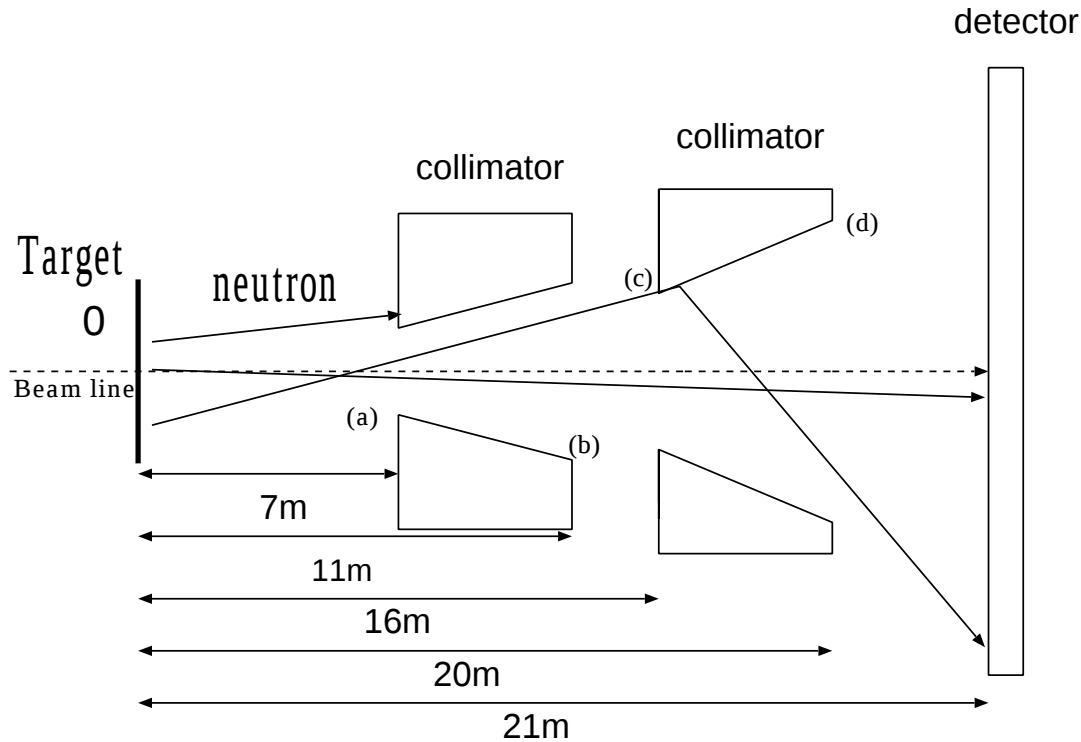


図 3.2: GEANT4 基本セットアップ

- 粒子発生条件
 - 粒子は target の位置で発生させる。
 - 粒子発生点の拡がり直径 10 cm の円と 18.2 mm × 2 mm の長方形という 2 つの方式で行った。
 - 発生した粒子の方向はビーム発生点から Beam line に対し -10 ~ 10 mrad の範囲で均一に分布させた。発生させたビームはコリメータの直前でビーム軸の中心から半径 2 cm 以内の粒子を用いた。この範囲外のビームからはコリメータを通過しないということと計算時間の短縮のためにこの条件を設定した。これにより約 40 % の計算時間をカットできた。
 - 入射させるビームは中性子である。それは本研究で考える背景事象は中性子により生成されるためである。また、その運動量分布はターゲットのシミュレーションによって図 3.3[9] のようになっている。そのビームに近い分布をプログラムで生成さ

せ今回のシミュレーションでは図 3.3 下のような運動量分布の中性子ビームを使った。発生させた中性子は 10^7 イベントである。また 10^7 イベントのシミュレーションに要する計算時間は約 $3 \times 10^3 \sim 10^4$ sec である。

- Collimator

- セットされるコリメータは前段 (以下 C1) のものは外径 5 cm でありターゲットから 7 m から 11 m に置かれ、後段 (以下 C2) のものは外径 7.5 cm でありターゲットから 16 m から 20 m に置かれている。それぞれのコリメータは厚さ 5 cm のドーナツ状の円盤 80 個から構成される。

- 図 3.2(a)(b)(c)(d) の内径を変えることによつての違いを調べる。

- コリメータの周囲は遮蔽材である鉄で覆われている。

- 二つのコリメータの間の 12 m 地点には荷電粒子を曲げるため長さ 1.5 m 断面積 $30 \times 20 \text{ cm}^2$ の領域に 2 テスラの磁場をかけている。

- Detector

- ターゲットから 21 m の位置に検出器を定義してコリメータを通過した粒子や入射粒子がコリメータに当たって発生した粒子の情報を見る。またこの検出器の大きさはコリメータからの粒子をすべて見られるように内径より十分な大きさにとつてある。

また図 3.4 に GEANT4 のイベントディスプレイにおけるビームラインシミュレーションの全容とそのビーム軸付近の拡大図を示す。

前節 2.4 で述べたような多重散乱を避ける最も単純な方法は C1 のコリメータ表面を C2 のコリメータ表面からは見えないように段数と共に拡がりを持たせラッパ形状のコリメーションラインに配置するという方法である。つまり C2 コリメータの拡がりの角度を大きくとり C1 で一回散乱しそこから出てきた粒子は C2 コリメータの内側には当たらないようにするというやり方である。しかしこの方法ではビーム領域の定義に対応する最終段の接線方向の角度がどんどん大きくなる。それは多重散乱によるハローは落とせるがビームサイズが大きくなるということになる。また逆にビームサイズを小さくする方法は C2 に C1 からのコリメーションラインより狭くなるような飛び出し部を設けるやり方である。そこにビームの端を当てそれを削るという方法だがこの方法は C2 での散乱の確率が上がる。例えビームの当たる場所が飛び出し部分の前面であってもタングステン合金の平均自由行程はそれほど短くないのでそこでの散乱や突き抜けがハローとなるということが起こる。最終的にコリメーションラインと飛び出し部分とのバランスが重要になってくる。

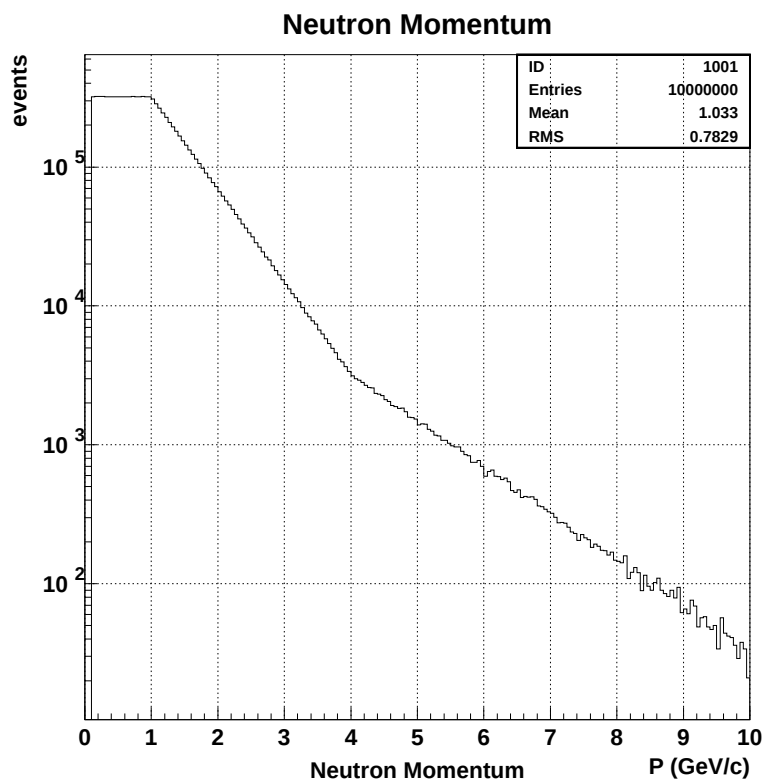
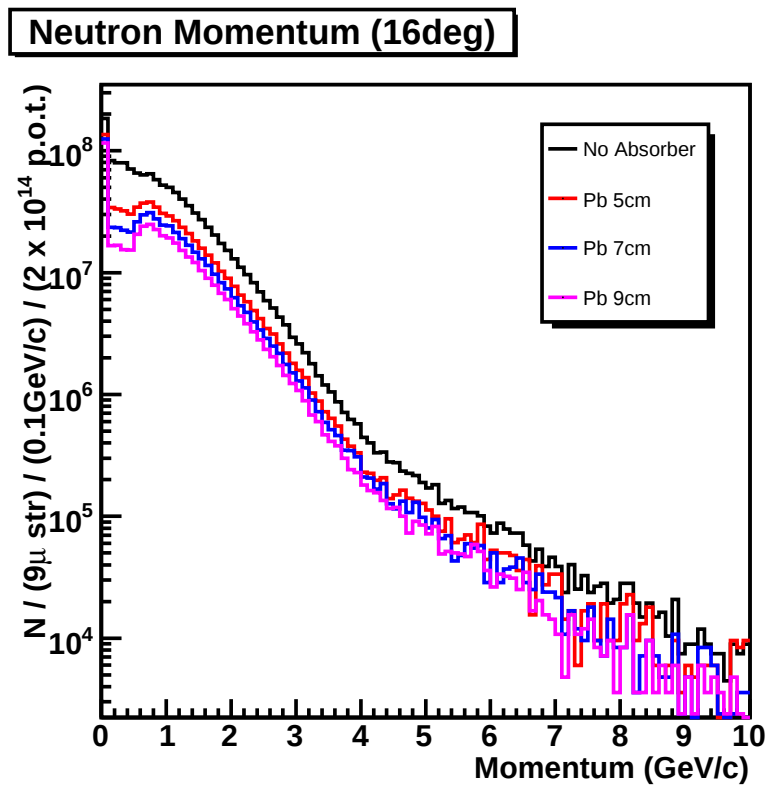


図 3.3: 中性子運動量分布:上図はターゲットシミュレーションによる中性子運動量分布、
下図は発生中性子の運動量分布で縦軸がイベント数、横軸が中性子の運動量である。

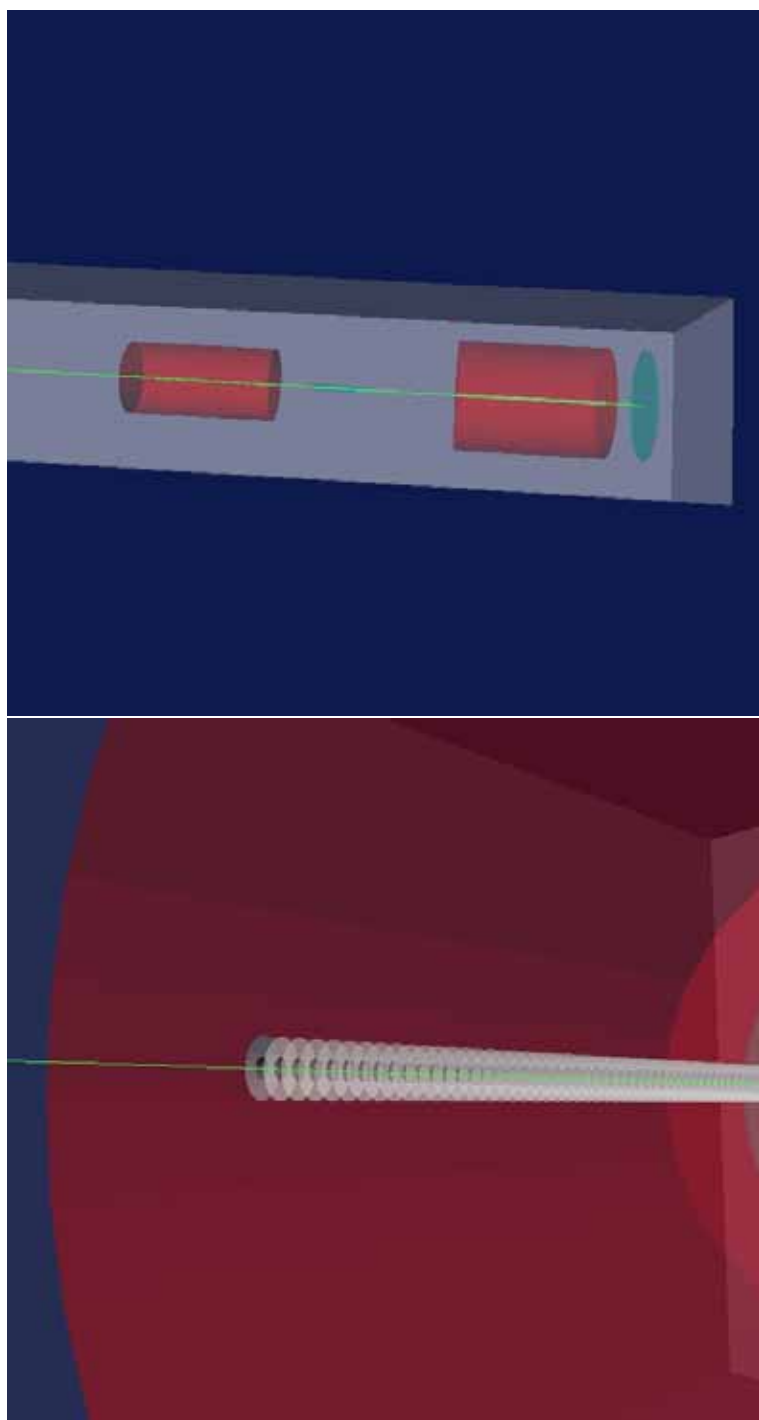


図 3.4: シミュレーション全体図:上図左がビーム上流、緑の線が中性子ビーム、赤い領域が前段・後段コリメータとそれを覆う鉄、右の青の円盤上の物体がコリメータを通過した粒子情報を見る検出器、下図は鉄と内部にあるコリメータを拡大した図である。

3.4 シミュレーション結果と考察

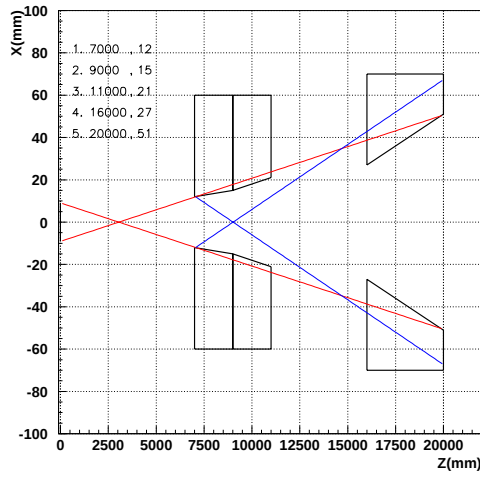
3.4.1 Collimator の最適化

ここではシミュレーションをした中で典型的な結果について述べていく。

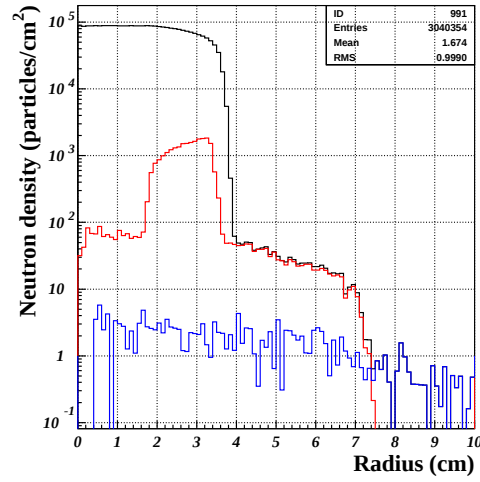
Collimator No.1

図 3.5 は J-PARC E14 実験においての提案書初期の形状 No 1 とその結果である。No 1 の形状はターゲットの大きさを無視してターゲットの中心から $9 \mu\text{str}$ の立体角を持つビームラインになっている。

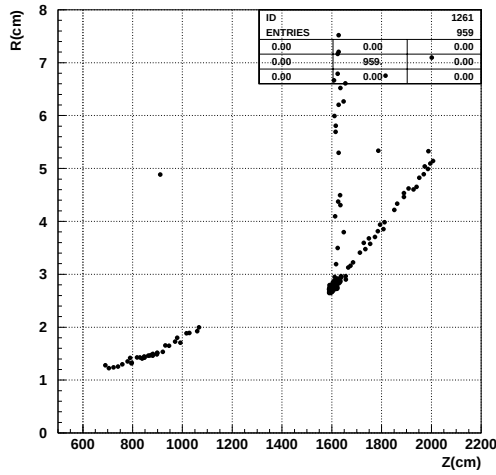
(a)



(b)



(c)



(d)

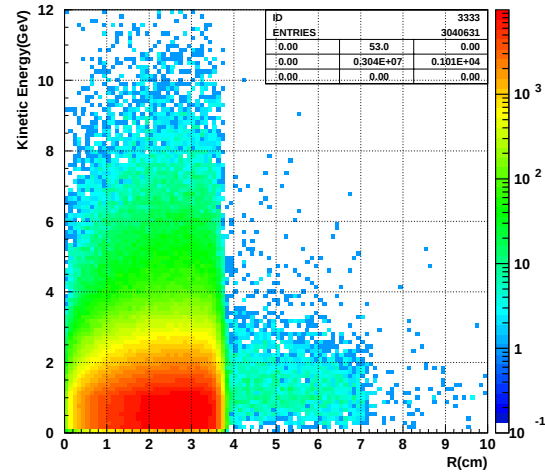


図 3.5: 設計 No 1 : (a) は No 1 のコリメータの形状であり、縦軸がビーム軸からの距離、横軸がビーム方向の距離である。赤の線はターゲットからコリメータの淵に当たる線であり、青の線は C1 のコリメータに当たった場所から飛び出し部分に当たるような線 (b) はターゲットから 21 m の場所での中性子の分布であり、縦軸が中性子の密度、横軸がビーム軸からの距離である。黒の分布は検出器に入ったすべての中性子である。(赤は C1 コリメータで散乱した粒子の分布、青は C2 コリメータからの分布である。)(c) はハローとなった粒子が最後に散乱した位置であり横軸がビーム軸方向、縦軸がビーム軸からの距離である。(d) は検出器で見た粒子の運動エネルギー分布であり横軸がビーム軸からの距離、縦軸が運動エネルギーである。

この設計は基準となるものなのでここからコリメータの最適化を行っていく。
No 1 の構成は次のようになっている。

- Target
18.2 mm × 2 mm

このビームサイズは 2 mm の陽子が T1target に入射して二次粒子を発生させたときビームラインから 16 ° 角度で見た像である [9]。

- Collimator
各コリメータは上流端から下流端まで一定の角度となっている。
C1 コリメータ
-C1 コリメータは 2 つにわかれていて C1 それぞれを C1a、C1b とする。
C2 コリメータ

No 1	全長 (cm)	上流端内径 (cm)	下流端内径 (cm)
C1a	200	1.2	1.5
C1b	200	1.5	2.1
C2	400	2.7	5.1

表 3.1: Collimator 形状 No 1

No 1 はターゲットサイズを考慮せずにターゲットの中心から $9 \mu\text{str}$ の立体角をもつラインとして設計された。そのためターゲットサイズからのビームの最大角よりアベックスラインが小さいのでコリメータ内面に当たるビームが多くあり、その結果図 3.5(b) でわかるようにビームからの距離が 5 cm 付近の中性子の分布はほとんどが C1 コリメータからの散乱により発生している。また逆にビーム軸から遠い距離にある中性子の分布はそのほとんどが C2 コリメータでの散乱によるものであることがわかる。

ビーム発生点の拡がりによる効果

また図 3.6 は No 1 と同じ設計でビームサイズを直径 10 cm の円形にしシミュレーションした結果である。

図 3.6 からわかるように確かにターゲットにおいて中心から外側にあるものの方が CC02 において広く分布している。だが粒子発生を広く取ることは大角度の入射粒子を多く見積もることとなる。ターゲットの大きさが結果に影響するので実際のビームに近い 18.2 mm × 2 mm の長方形にして行う。

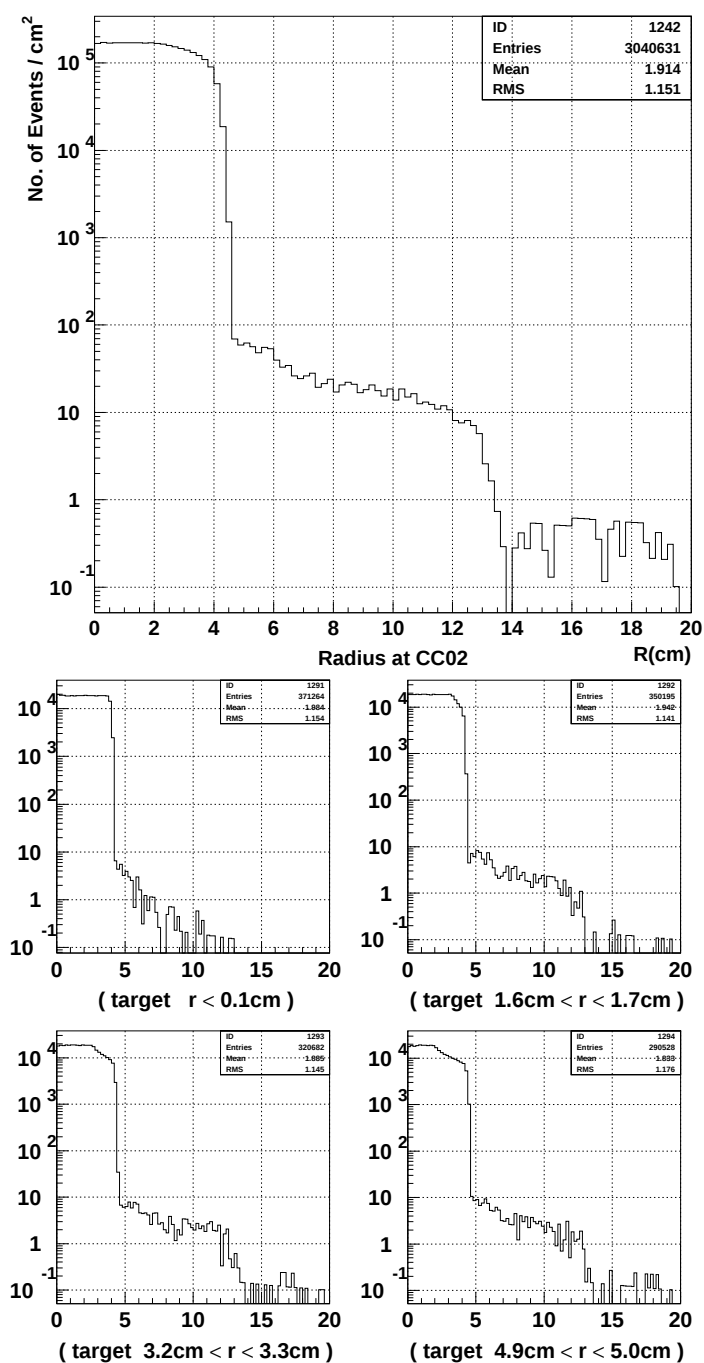
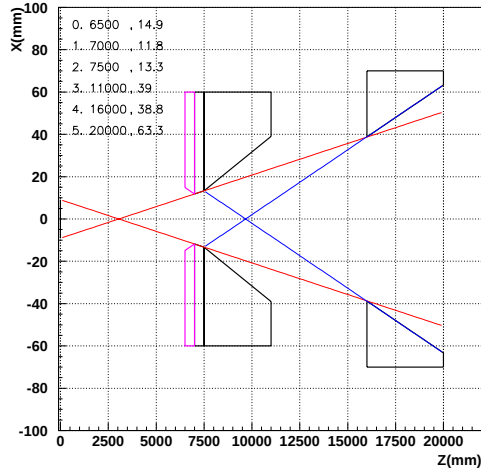


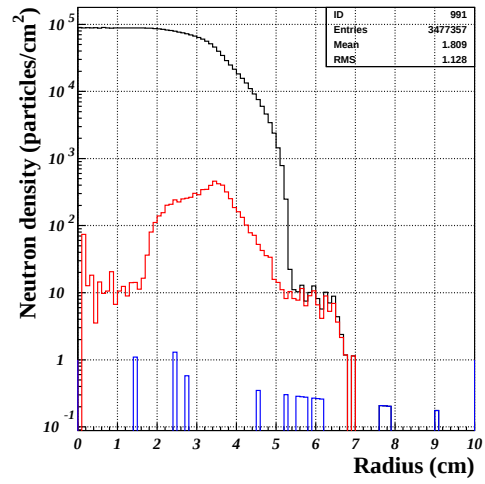
図 3.6: No 1 円状 ($r = 5$ cm) ターゲットでのシミュレーション結果:上の図は CC02 においての中性子の分布であり縦軸がイベント数、横軸がビーム軸からの距離である。下の図はそのターゲットの場所による中性子の分布である。

Collimator No.32

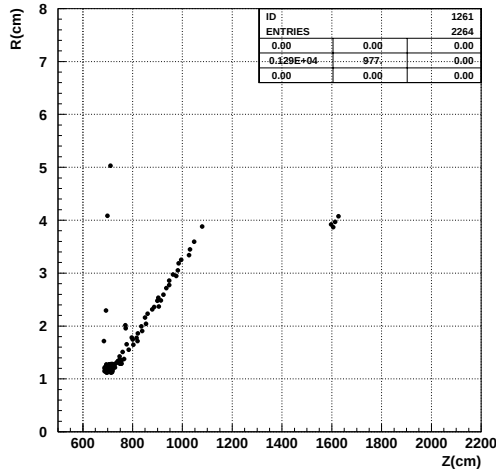
(a)



(b)



(c)



(d)

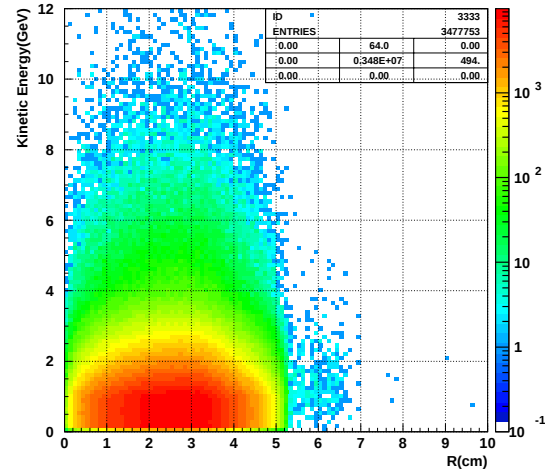


図 3.7: 設計 No 32 : (a) は No 32 のコリメータの設定 (b) はターゲットから 21 m の場所での中性子の分布である。(a)(b) 共に各軸は図 3.5 と同義である。(c) はハローとなった粒子の位置であり横軸がビーム軸方向、縦軸がビーム軸からの距離である。(d) は検出器で見た粒子の運動エネルギー分布であり横軸がビーム軸からの距離、縦軸が運動エネルギーである。

図 3.7 は No 32 のコリメータ形状と結果である。

No 32 の構成は次のようになっている。

- Target
18.2 mm× 2 mm
- Collimator
C0 コリメータ
-C1 コリメータの前に新たなコリメータである。
C1 コリメータ
-No.1 との違いは C1a を短く、C1b を長くしさらにアベックスラインをビームの角度より広くとった点である。
C2 コリメータ
-No.1 との違いはアベックスラインをビームの角度より広くとった点である。

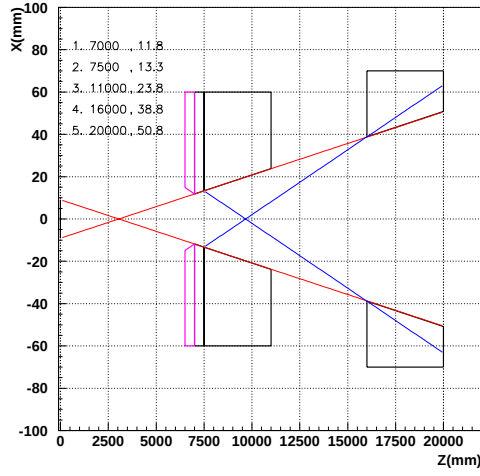
No 32	全長 (cm)	上流端内径 (cm)	下流端内径 (cm)
C0	50	1.49	1.18
C1a	50	1.18	1.33
C1b	350	1.33	3.90
C2	400	3.88	6.33

表 3.2: Collimator 形状 No 32

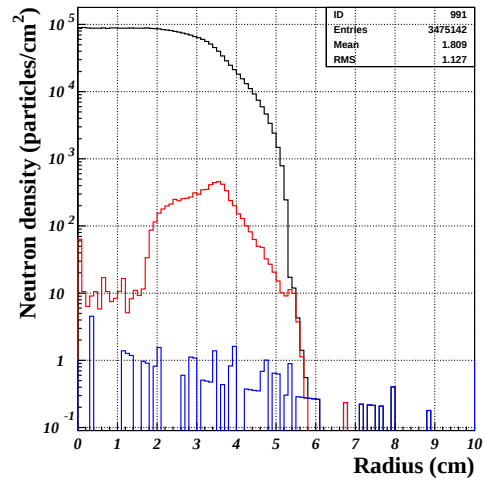
No 32 の設計で特徴的なのは全長 4 m だった C1 コリメータの前にさらにもう 1 つの C0 コリメータを置いたことである。その C0 コリメータの全長は 50 cm であり C1、C2 とは形状が異なる。C1、C2 がビーム下流に進むにつれ広がっていくのに対して C0 は逆に下流に進むにつれ狭まっていき C1 の最上流のところで最大となる。そしてこの C0 コリメータによって確実にハロー中性子を減らすという結果が出ており、C0 コリメータを設置するのが大変有効であることがわかった。その減少は約 17% である。また中性子の分布は C1 コリメータからの散乱が多いのでそれを減らす設計が別途必要である。

Collimator No.33

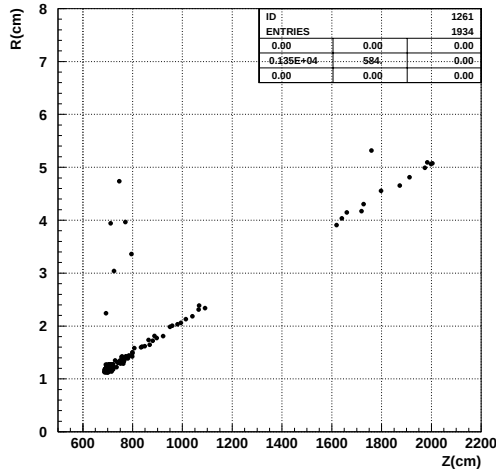
(a)



(b)



(c)



(d)

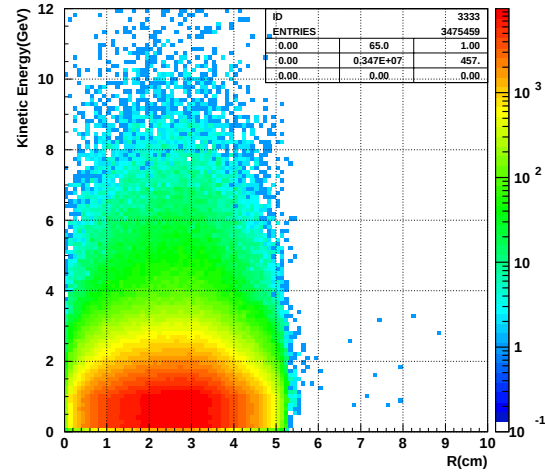


図 3.8: 設計 No 33 : (a) は No 33 のコリメータの設定 (b) はターゲットから 21 m の場所での中性子の分布である。(a)(b) 共に各軸は図 3.5 と同義である。(c) はハローとなった粒子の位置のであり横軸がビーム軸方向、縦軸がビーム軸からの距離である。(d) は検出器で見た粒子の運動エネルギー分布であり横軸がビーム軸からの距離、縦軸が運動エネルギーである。

図 3.8 は No 33 のコリメータ形状と結果である。

No 33 の構成は次のようになっている。

- Target
18.2 mm× 2 mm
- Collimator
C0 コリメータ
-No.32 と同様なものである。
C1 コリメータ
-No.32 との違いはアベックスラインを C1a、C2b 共に狭くしビームの角度と同じにした点である。
C2 コリメータ
-No.32 との違いはアベックスラインを狭くしビームの角度と同じにした点である。

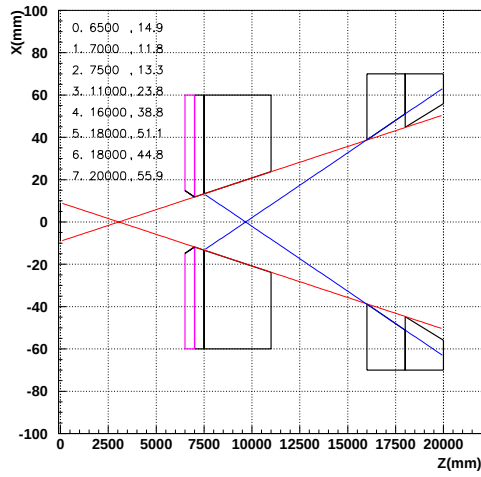
No 33	全長 (cm)	上流端内径 (cm)	下流端内径 (cm)
C0	50	1.49	1.18
C1a	50	1.18	1.33
C1b	350	1.33	2.38
C2	400	3.88	5.08

表 3.3: Collimator 形状 No 33

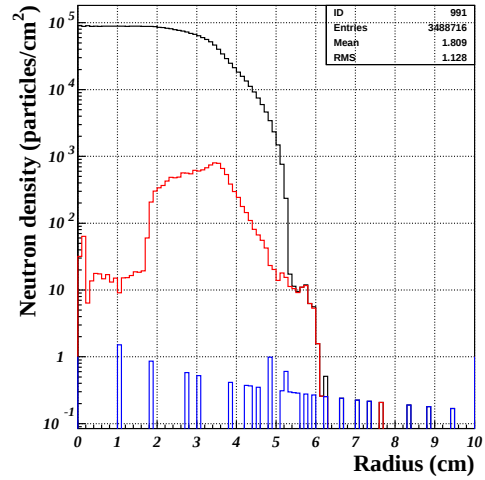
No 33 の設計では赤い線、つまりターゲットから最大角で C1 コリメータの内側に当たる線上にコリメーションラインを設定した。結果、No 32 であった C1 コリメータからの散乱が減り今まであったビームの段がなくなり図 3.8(b) のようにすべての中性子の分布の線に近いものになった。これは No 32 では C1 で散乱された中性子が C2 の内面で消滅するからだと考えられる。

Collimator No.34

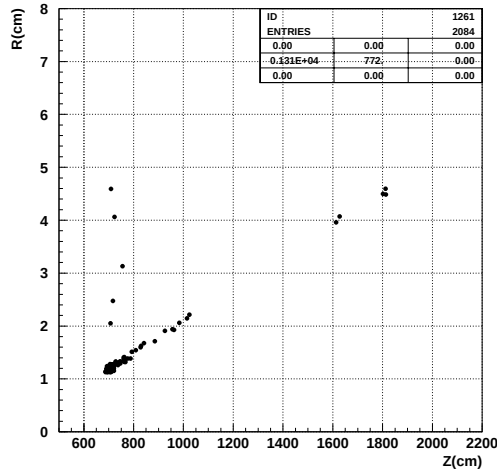
(a)



(b)



(c)



(d)

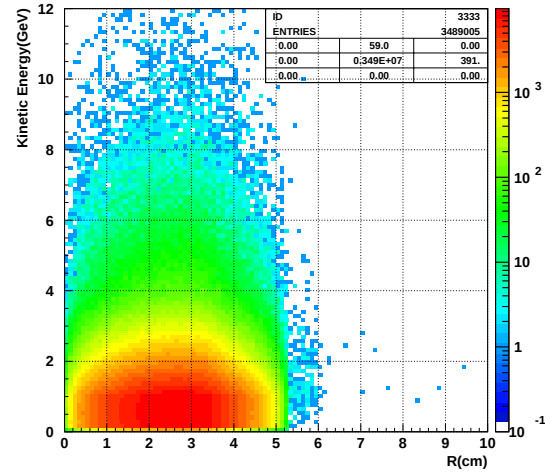


図 3.9: 設計 No 34 : (a) は No 32 のコリメータの設定 (b) はターゲットから 21 m の場所での中性子の分布である。(a)(b) 共に各軸は図 3.5 と同義である。(c) はハローとなった粒子の位置であり横軸がビーム軸方向、縦軸がビーム軸からの距離である。(d) は検出器で見た粒子の運動エネルギー分布であり横軸がビーム軸からの距離、縦軸が運動エネルギーである。

図 3.9 は No 34 のコリメータ形状と結果である。

No 34 の構成は次のようになっている。

- Target
18.2 mm× 2 mm
- Collimator
C0 コリメータ
-No.32 と同様である。
C1 コリメータ
-No.33 と同様である。
C2 コリメータ
-C2 コリメータは 2 つにわかれていて C2 をそれぞれを C2a、C2b とする。
-No.33 との違いは C2a、C2b それぞれのアベックスラインを広くとした点である。

No 34	全長 (cm)	上流端内径 (cm)	下流端内径 (cm)
C0	50	1.49	1.18
C1a	50	1.18	1.33
C1b	350	1.33	2.38
C2a	200	3.88	5.11
C2b	200	4.48	5.59

表 3.4: Collimator 形状 No 34

No 34 の設計ではビームに対しての飛び出し部分はハロー中性子を減らすことが可能かどうかを調べるために行なった。設計では No 32 の C2 コリメータを 2 つにわけ C2a を青の線上に設定し C2b にポケットのような飛び出し部分を設けた。その結果、図 3.9(b) のような No 33 でなくなった段が現れ C1 コリメータからの散乱が増えてしまった。

Collimator Simulation 結果の比較

表 3.5 に今まで述べたもののハロー中性子とコアとの比をまとめた。結果としてアペックスラインをビームの角度と同じに設計した No.33 が最良の値であった。

	$R_{halo/core}$
No 1	1.25×10^{-3}
No 32	2.95×10^{-4}
No 33	1.91×10^{-4}
No 34	2.11×10^{-4}

表 3.5: 設計 No による $R_{halo/core}$

3.4.2 ハドロン相互作用モデル

GEANT4 で使用しているハドロン相互作用モデルの違いでシミュレーションに影響があるか調べた。これまでハドロン相互作用モデルはQGSP モデルを使ってきたがその他のモデルとの比較を行なう。GEANT4 の QGSP モデルとは別の QGSP_BERT、QGSP_BIC、FTFC、FTFP の各モデルについてシミュレーションをした結果を図 3.10 に示した。ハドロン相互作用のモデルによる違いを比較してみたが明確な違いは見られなかった。また各モデルに対しての $R_{halo/core}$ とエネルギーの領域に対するハドロン相互作用モデルの違いを表 3.6 に示した。

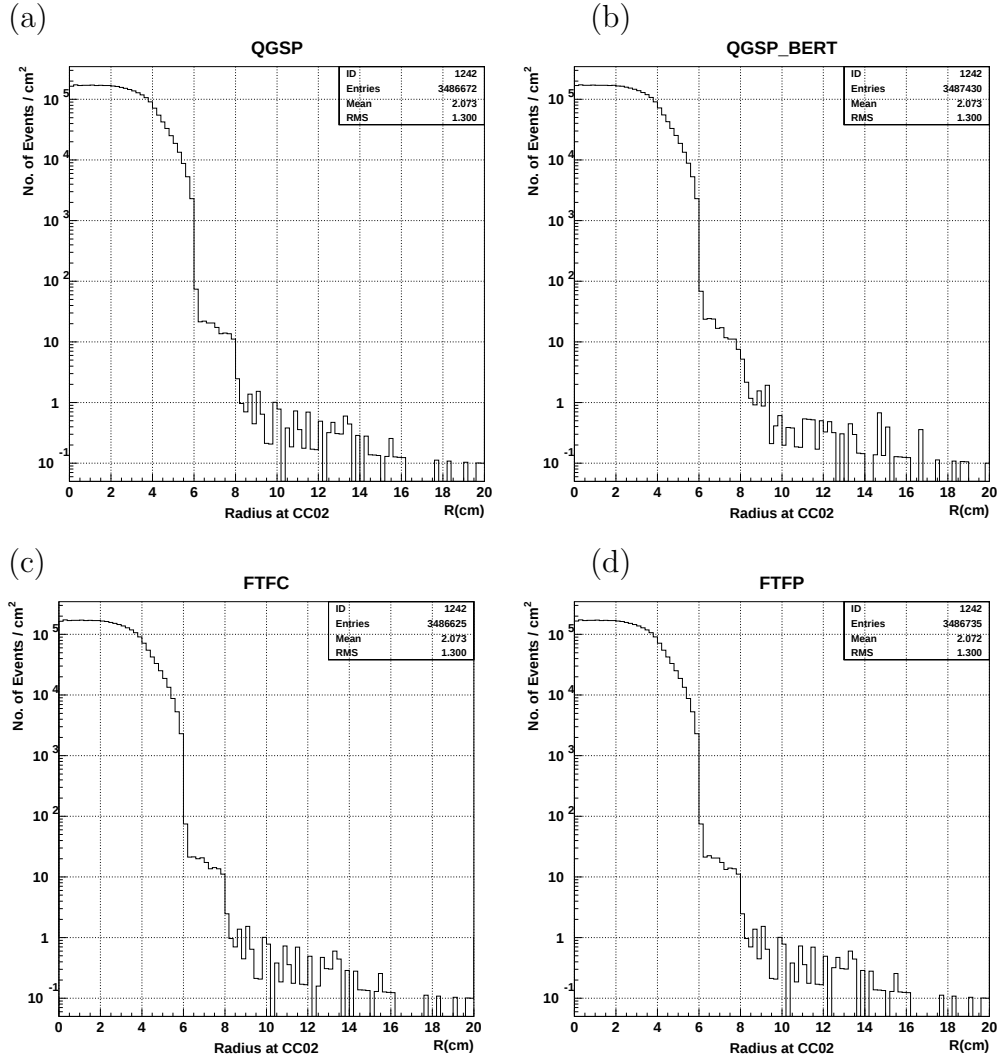


図 3.10: 各ハドロンモデルの比較: グラフは CC02 においての中性子の分布であり、縦軸が密度、横軸がビーム軸からの距離である。設計は No 21 のものである。(a) は QGSP (b) は QGSP_BERT (c) は FTFC (d) は FTFP である。

	$R_{halo/core}$	hadron physics model	package
No 21	3.05×10^{-4}	QGSP	E < 25 GeV GHEISHA, E > 25 GeV quark-gluon string model
No 25	3.40×10^{-4}	QGSP_BERT	E < 3 GeV Bertini cascade 3 < E GHEISHA, E > 25 GeV quark-gluon string model
No 26	core dump	QGSP_BIC	E < 3 GeV Binary cascade 3 < E < 25 GeV GHEISHA, E > 25 GeV quark-gluon string model
No 27	3.05×10^{-4}	FTFC	E < 25 GeV GHEISHA E > 25 GeV quark-gluon string model with CHIPS
No 28	3.05×10^{-4}	FTFP	E < 25 GeV GHEISHA E > 25 GeV quark-gluon string model with fragmentation ala FRITJOF

表 3.6: 各ハドロン相互作用においての $R_{halo/core}$ とエネルギー領域によって使用しているパッケージの違い

3.4.3 Absorber の効果

中性ビームラインのビームの中には γ 線や中性子が多く存在する。実験では 4π veto のためビームラインにも測定器として BHPV を置くにあたり BHPV での counting rate を減らすためにアブソーバーを置く必要がある。しかしアブソーバーは新たな scattering source となるのでその効果を調べる必要がある。さらにターゲットは真空 chamber で囲まれていて真空 chamber の壁はアブソーバーと同じ影響を与える。アブソーバー材質として Pb、Be があるがアブソーバーに関する調査の第一段階として真空 chamber の材料になるステンレス鋼を用いて基本的な特性を調べ、次に鉛アブソーバーについて調べた。

アブソーバーの入れてのシミュレーションは $R_{halo/core}$ が最も良かった設計 No 33 を使いアブソーバーの材質としては、まずステンレス鋼で行った。図 3.11 は No 33 のビームラインにおいてターゲットから 3 m のところに異なる厚さのステンレス鋼を入れてシミュレーションした結果である。図 3.11 からステンレス鋼の厚みを増やすことはハローイベント数を増やすことになるということがわかる。

また図 3.12 は 45 mm のステンレス鋼を異なる場所ごとに置いてシミュレーションした結果である。コリメータに近付くとハローが増えるがコリメータ直前になるとハローが減っている。

次の図 3.13 ではアブソーバーを鉛 7 cm ($12.5 X_0$) にして行なった。ステンレス鋼の場合とハローの数こそ異なるが同じ様な分布をしている。この振る舞いはビームがアブソーバーに当たる断面積の違いが原因となっていると考え各位置での鉛アブソーバーの大きさをビームの拡がりと同じに設定しシミュレーションしたのが図 3.14 である。しかし結果はほとんど変わらずに図 3.13 と同じ振る舞いを示した。

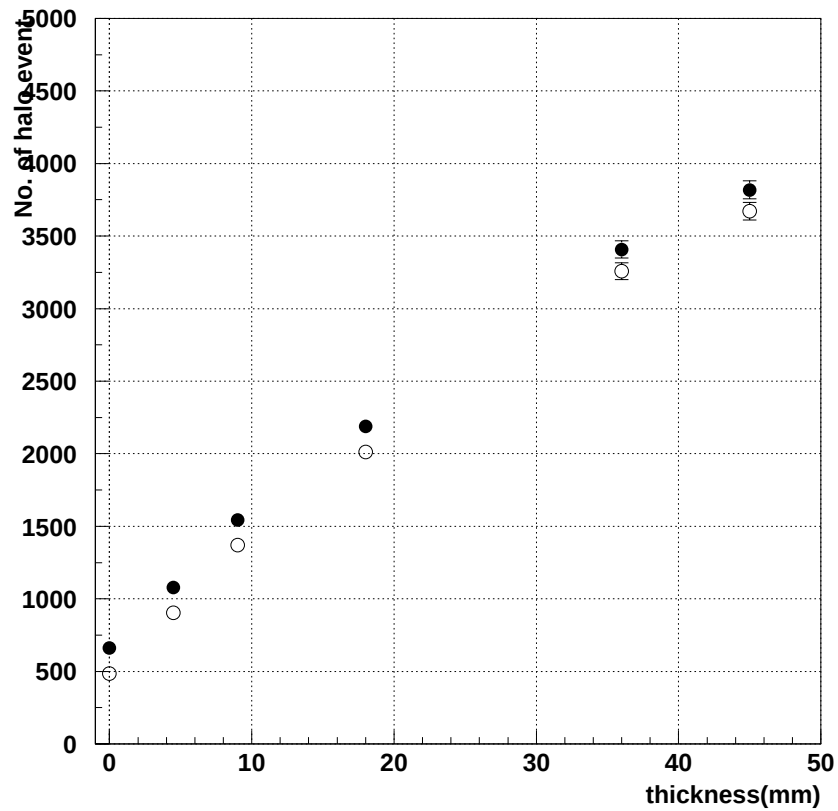


図 3.11: ステンレス鋼 厚さ依存:横軸がステンレス鋼の厚さ、縦軸がそのときのハローイベント数である。黒点がハローを CC02 においてビーム軸から 63.5 mm 以上としたとき、白点がハローを CC02 において 80.0 mm 以上としたときである。

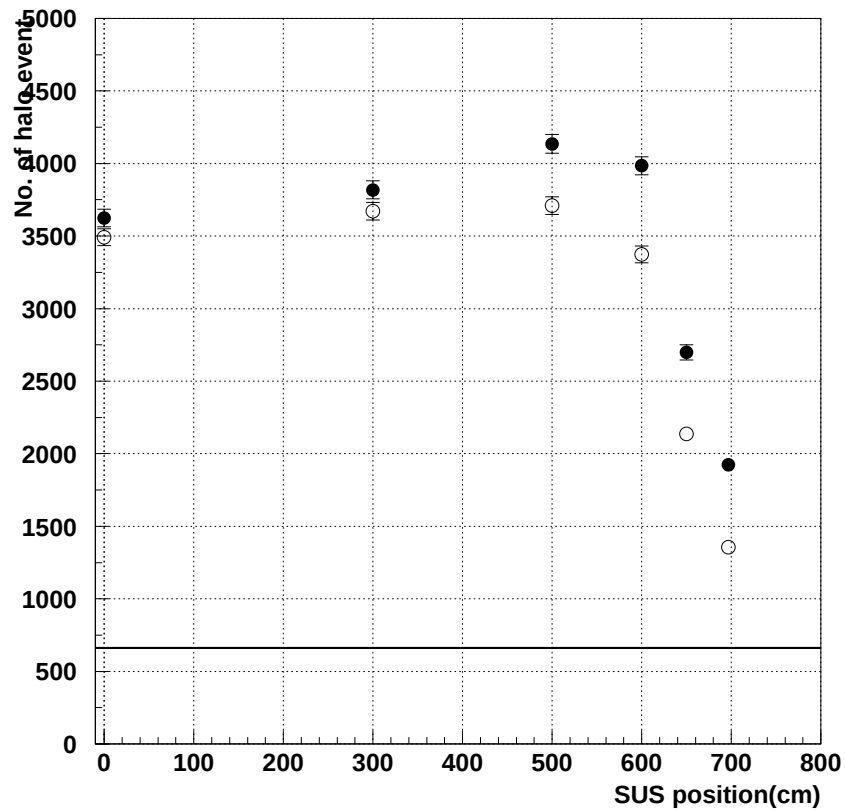


図 3.12: ステンレス鋼 位置依存性 (厚さ 45mm):横軸がステンレス鋼を置いたターゲットからの距離、縦軸がハローイベント数である。黒点、白点は図 3.11 と同様である。下の線はアップソーバーなしの場合である。

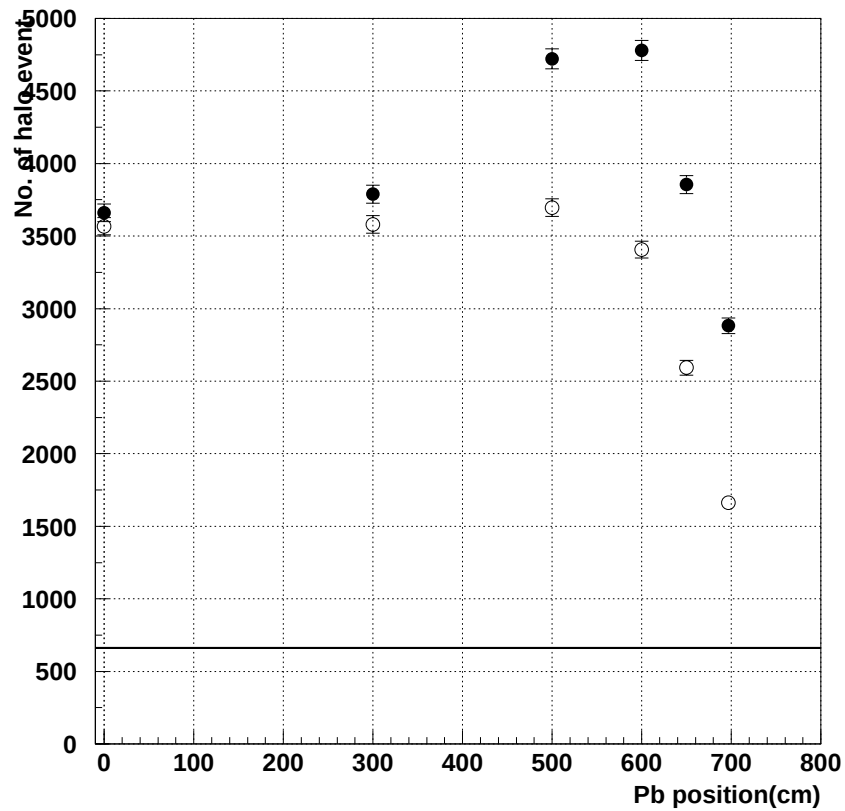


図 3.13: 鉛 位置依存性 (厚さ 70mm):横軸が鉛を置いたターゲットからの距離、縦軸がハローイベント数である。黒点、白点は図 3.11 と同様である。下の線はアブソーバーなしの場合である。

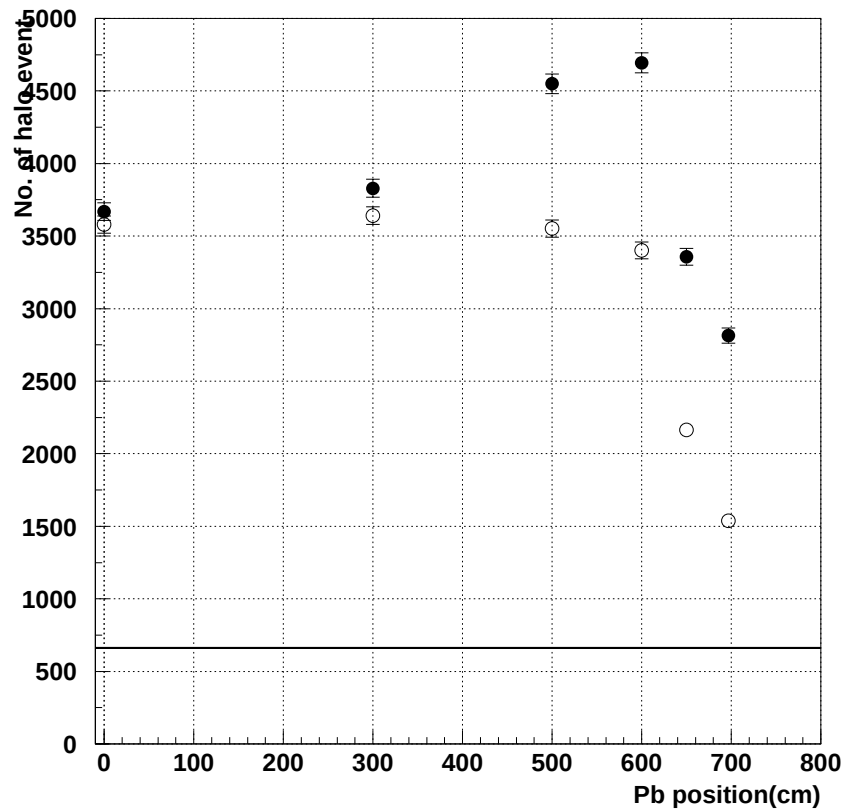


図 3.14: 鉛 位置依存性 (厚さ 70mm):横軸が鉛を置いたターゲットからの距離、縦軸がハローイベント数である。黒点、白点は図 3.11 と同様である。下の線はアブソーバーなしの場合である。

第4章 結論と課題

4.1 結論

本研究では J-PARC E14 実験において使用されるビームラインの設計を GEANT4 を用いて行い、コリメータの最適化、アブソーバーの最適化について調べた。その結果を以下にまとめる。

- シミュレーションソフト GEANT4 を用いて KL ビームラインを設計し中性子ビームを入射させ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比測定実験の検出器の位置でのハロー中性子を最小にさせるようなシミュレーションを行った。
- 初期の設計 (No 1) と最良の設計 (No 33) を比較してみるとアブソーバーなしの場合 $R_{halo/core}$ が $1.25 \times 10^{-3} \rightarrow 1.91 \times 10^{-4}$ となり約 1 桁のハロー中性子を減少させた。
- シミュレーションの中で No 32 で取り入れた C0 コリメータは確実にハロー中性子を減らすことがわかった。
- コリメータの前にアブソーバーを入れてその効果を調べた。その結果としてアブソーバーの厚みが増すほどハロー中性子が増えていくのがわかった。またアブソーバーの位置に対する効果としてコリメータの直前に置くことによってハロー中性子が減少する傾向がある。

4.2 今後の課題

現在のところ $R_{halo/core}$ は No 33 の 1.91×10^{-4} という値が最良であり目標となる 3.4×10^{-4} の値に到達した。しかしこの結果はアブソーバーなしの設計によるものである。アブソーバーを入れることによってハロー中性子の増加が予想されるのでアブソーバーを入れてのビームラインの最適化が必要である。

今回のシミュレーションにおいて C0 コリメータの存在はハロー中性子を減らす効果があることがわかった。これはコリメータの淵の厚みが足りない可能性があるかと予想され、それを改善することによってハロー中性子を減少させることが期待できる。そのためコリメータの淵の厚みを増やしシミュレーションをし、さらにコリメータについての最適化が必要不可欠である。

本研究ではハロー中性子を E391a 実験での CC02 の内径 63.5 mm 以上として定義しているが J-PARC E14 実験において CC02 の内径は変更可能であり、それによりさらにハローを減少させることは可能である。またアブソーバーの効果による位置依存性についてはまだ研究中である。その効果が理解されることによりハローを減少させることが考えられ、また設置についての簡易化が期待できる。アブソーバーの材質もステンレス鋼と鉛でしか行っておらず、今後アブソーバーの材質を変えてシミュレーションを行いつつアブソーバーの位置依存性についての確かな原因を調べる必要がある。そして最終的にはターゲットシミュレーションの結果を使い KL ビームラインのフルシミュレーションを行ない $R_{halo/core}$ を目標の値にすることが最大の課題である。

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。ご指導して頂いた皆様に感謝致します。

KEK の E391a グループの方々には大変お世話になりました。稲垣隆雄さん、佐藤任弘さん、Lim Gei Youb さん、小松原健さん、渡辺丈晃さんには日頃から多くのご指摘、ご提案をして頂きました。本当にありがとうございます。特に Lim Gei Youb さん、渡辺丈晃さんには大変感謝しています。Lim Gei Youb さんには研究の方針から解析に至るまで様々な質問について丁寧に答えて頂き理解することができました。本当にありがとうございました。渡辺丈晃さんには GEANT4 の使い方、PAW の解析方法、研究についての考え方など何から何まで初歩から丁寧に教えて頂きました。何度感謝しても足りないくらいです。本当にありがとうございました。

京都大学の隅田土詞さん森井秀樹さんには解析方法についていろいろとご指導していただきました。ありがとうございます。また研究以外の面でも坂下さん、谷口さん、Lee Hyo Sang さん、KEK のみなさまのおかげで KEK では楽しく貴重な時間を過ごせました。ありがとうございました。

山形大学の先生方、加藤静吾先生、岩田高広先生、吉田浩司先生にはゼミを通していろいろな物理をご教授いただきました。また岩田高広先生には M1 の時に偏極ターゲットについてのご指導もしていただきました、本当にありがとうございます。吉田浩司先生には本論文への貴重な助言をいただきました。その内容は研究についての核心をついているものがほとんどで大変勉強になりました。発表の内容についても多くの助言をいただき本当にありがとうございました。田島靖久先生には解析の方法から研究についてのアドバイス、レクチャー、また何度も KEK に足を運んでいただいたり、本当に日頃から大変お世話になりました。ありがとうございました。

研究室におきましては上野寛海君、穴戸智浩君、学部生の時から 6 年間ありがとうございました。M1 の加藤泉さん、田中昂君、外山幸太君、B4 の植松秀章君、大泉智君、上林智亮君、佐藤邦彦君、塩津雄人君、滝口耕平君のみなさまのおかげで学生生活を楽しく過ごすことができました。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くださった方々、今までお世話になった全ての人へ心から感謝致します。

参考文献

- [1] E391a proposal, KEK Internal, 96-13
- [2] T. Inagaki, G. Y. Lim, H.Okuno, HIGH ENERGY NEWS **23-1**, 13 (2004)
- [3] S. Eidelman *et al.* [Particle Data Group], *Phys. Lett.* **B592**, 1 (2004).
- [4] G.Buchalla and A.J. Buras. *Nucl. Phys.* **B548**, 309 (1999)
- [5] A. Alavi-Harati *et al.*, *Phys. Rev.* **D61**, 072006 (2000)13 (April/May/June 2004)
- [6] H.Watanabe *et al.*, “Neutral beam line to study $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay at the KEK 12-GeV proton synchrotron“, *Nucl. Instrum. Meth.*(2005), in printing
- [7] 亀井亨, 木原元央, “加速器科学“, 丸善
- [8] 田中万博 他, “J-PARC 大強度陽子加速器施設 原子核素粒子実験施設グループ ハドロンビームラインサブグループ 第2次中間報告書“, KEK Reports (2004)
- [9] Taku Yamanaka, 2006, Proposal for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at J-Parc
- [10] CERN Application Software Group, GEANT-Detector Description and Simulation Tool, W5013,CERN,1993.
- [11] Ken Sakashita, Doctor thesis, Osaka University, 2005, Search for the decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
- [12] CERN GEANT4 <http://wwwasd.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html>