

## ■ 研究紹介

 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  実験 (KOTO 実験) 用ビームラインの建設

KEK 素粒子原子核研究所

渡辺 丈晃, GeiYoub Lim, 野村 正, 小松原 健

nabe@post.kek.jp, gyylim@post.kek.jp, tadashi.nomura@kek.jp, takeshi.komatsubara@kek.jp

2010年1月26日

KEK 12 GeV-陽子シンクロトロンが shutdown してから4年の準備期間を経て, J-PARC においても 30 GeV 陽子ビームの遅い取り出し調整が開始され, 二次ビームを使った実験への動きが本格化しつつある。本稿では, ハドロン実験ホールで準備が進められている J-PARC E14 KOTO 実験 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊の分岐比測定実験) について, KL ビームラインの完成を機に, その進捗状況を紹介したい。

## 1. 背景

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊[1]は, その分岐比が小林-益川行列の複素位相の二乗,  $\text{Im}(V_{td})^2 \propto \eta^2$ , すなわち quark sector における CP 非対称性のパラメータの二乗に比例しており, 理論的計算の不定性は1~2%と例外的に小さい[2]。従って, 分岐比を実験的に精度よく測定できれば CP 非対称性の大きさを不定性なく決定可能である。更に, 標準理論を越える物理に感度が大きく, 標準理論から数倍のずれを预言する理論も存在する[3]。同時に,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  や  $B$  中間子崩壊など他のモードの分岐比との相関を見ることで標準理論を超える物理を同定する上で重要なヒントを得ることができる[3]。このように理論的には極めて興味深い, 標準理論における分岐比の预言値は  $2.5 \times 10^{-11}$  [2]と小さく, また終状態の1個の  $\pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma)$  だけを測定することによって崩壊を同定する極めて難しい実験である。

KEK-PS E391a 実験グループは, KEK 12 GeV-陽子シンクロトロンにおいて, 世界で初めて  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊を目的とする実験を行い, 背景事象の系統的な研究と実験手法の確立を進めた。そこで得られた分岐比の上限値  $2.6 \times 10^{-8}$  (90% C.L.) は現在の world record となっている[4]。さらに3桁の感度の改善が必要であるが, 新しい KOTO 実験では J-PARC における大強度ビームを使い, E391a 測定器をアップグレードすることで  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊の初観測を目指している[5]。“KOTO”とは,  $K^0$  at Tokai の略であり, KOTO collaboration は KEK+国内5大学, 海外10大学から合計65人が参加する国際的な実験グループとなっている。

KEK-PS E391a 実験で得られた重要な知見の一つは, ビームに起因する背景事象(バックグラウンド)の理解である。すなわち, 細く絞られた中性ビームの周りにハローとして存在する中性子(ハロー中性子)が,  $K_L$  の有効崩壊領域近

傍で検出器などと反応し  $\pi^0$  や  $\eta$  を生成する事象が E391a 実験での背景事象の主要な成分であることが示された。従って, ハロー中性子を十分低減させるように新しいビームラインを設計し, それを実現することが KOTO 実験を遂行する上での必須の条件となっている。なお, E391a 実験や背景事象の解析内容については, 高エネルギーニュースの隅田氏や坂下氏の紹介記事[6]によくまとめられているので参照してほしい。

## 2. KL ビームライン

## 2.1 概要

J-PARC 加速器の Linac, RCS, Main Ring にて 30 GeV まで加速された陽子ビームは, 遅い取り出しにより DC ビームとしてハドロンビームラインへ引き出され, 取り出し点から 250m 下流にあるハドロン実験ホールの T1 ターゲットへ打ち込まれる。陽子のビームサイズは T1 ターゲット上で  $\sigma \sim 1\text{mm}$  の大きさに絞られている。T1 ターゲットは厚さ 56mm の純ニッケル製で, 3 割程度の陽子が粒子生成反応を起こす。なお, T1 ターゲットからは現在 K1.8/K1.8BR ビームライン, KL ビームラインが同時に二次ビームを取り出し可能である。

$K_L$  ビームは, 図1に示すように T1 ターゲットから  $16^\circ$  方向に取り出されるが, KL ビームラインと同じくホール南側に設置される K1.1BR ビームラインの上流部; D1, Q1, Q2, D2 電磁石と交叉するという複雑な取り合いとなっている。そのため KL 用のビームコリメータは T1 ターゲットから 6.5m 下流から始まっており, T1 から 21m 下流が KL ビームラインの終端となっている。K1.1BR ビームライン自体は 2010年3月から設置工事が開始される。

KL ビームラインの主要パラメータを表1に示す。KOTO 実験では, E391a と比べビーム強度以外にも二つの点で質的に異なっている。一次陽子ビームのエネルギーが 12 GeV から 30 GeV に上がったこと, および二次ビームの取り出し角度が 4 度から 16 度となったことである。

その結果, KOTO 実験における  $K_L$  粒子の運動量分布は図2に示す通り若干ソフトとなり, 測定器内での崩壊数が約2倍に増えるため運動学的なアクセプタンスは増加している。 $K_L$  粒子の収量としては, J-PARC の設計ビーム強度

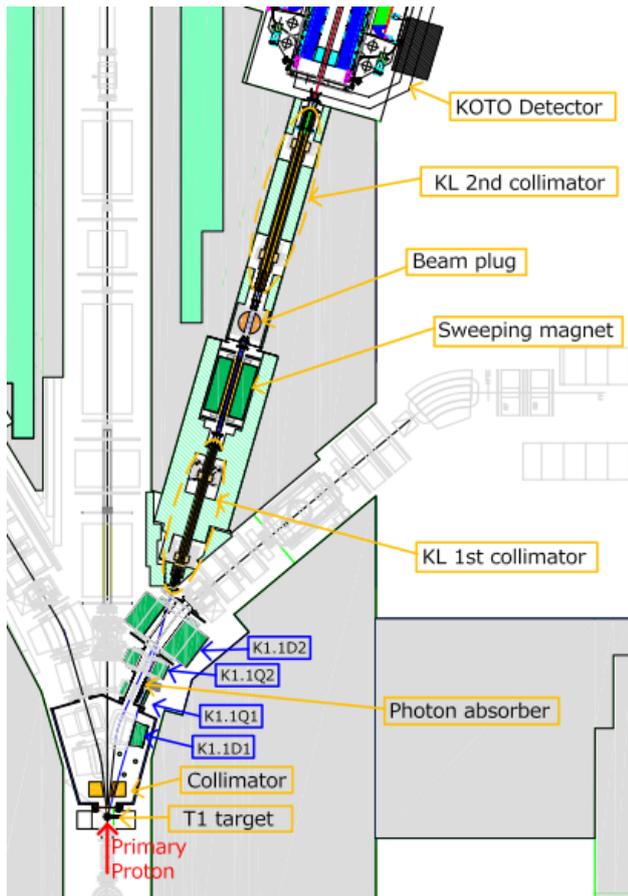


図1 KL ビームラインレイアウト

表1 KL ビームラインの主要パラメータ(設計値)

	KOTO (J-PARC)	E391a (KEK-PS)
一次陽子のエネルギー	30 GeV	12 GeV
一次陽子のビーム強度(/spill)	$2.0 \times 10^{14}$	$2.5 \times 10^{12}$
スピル長/繰り返し周期	0.7 秒/3.64 秒	2 秒/4 秒
取り出し角度	16°	4°
$K_L$ 収量(/spill)	$1.5 \times 10^7$	$3.3 \times 10^5$
$K_L$ 平均運動量	2.1 GeV/c	2.6 GeV/c
中性子数 (>1 GeV)/ $K_L$ 数	6.5	45
立体角	7.8 $\mu$ Sr	12.6 $\mu$ Sr

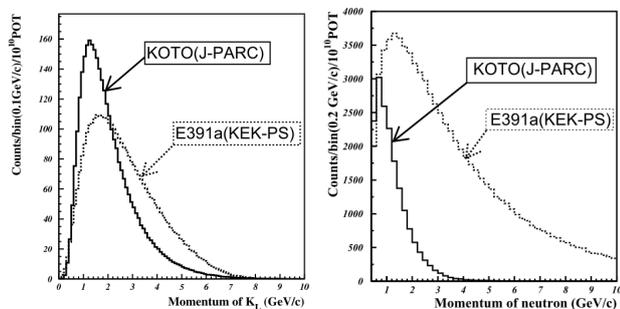


図2  $K_L$  (左図)と中性子(右図)の運動量分布

( $2 \times 10^{14}$  protons/spill) では測定器への入射数が約  $1.5 \times 10^7$   $K_L$ /s/spill と計算されている。ただし、ハドロン相互作用のため計算の不定性が大きく、使用するシミュレー

ションコードによって3倍程度の差異がある。従って、 $K_L$  粒子の収量を実験的に確かめることは非常に重要であり、後述するビームサーベイ実験の最優先課題の一つとなっている。

中性子については、取り出し角変更による影響が大きく、エネルギー分布は大幅にソフトとなるとともにビームラインへ入射する中性子数が  $K_L$  数に対して相対的に減り、中性子/ $K_L$  数の比が45から6.5へと大幅に改善される。

KOTO 測定器へ入射する粒子としては、 $K_L$  粒子、中性子の他にガンマ線がある。 $\Lambda$  粒子は  $K_L$  粒子と同程度の数が生成され、 $\Lambda \rightarrow n\pi^0$  崩壊(分岐比36%)は運動学的には  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\nu$  崩壊の背景事象となり得る。しかし、 $c\tau \sim 8$  cm に対しビームラインが21mと長く、 $\Lambda$  のエネルギーも低いため背景事象としての寄与はまったく無視できる。荷電粒子としては  $K_L$  粒子が崩壊して生成される荷電パイオン、電子、ミュオンが主要で、それ以外にも上流から遮蔽を貫通してくるミュオン (punch-through muon) が存在する。

## 2.2 KL ビームラインの設計

### 2.2.1 構成

KL ビームラインは中性ビームラインのため、電磁石は荷電粒子を掃き出すための dipole 型1台のみで、ビーム形状は金属製のコリメータにより決まる。その他の要素として、ビームコアガンマ線を減らすための鉛製のアブソーバ、ビーム停止のためのビームプラグ、および真空系から構成される。これらのビームライン要素の周囲は、放射線遮蔽のため鉄ブロックやコンクリートブロックにより可能な限り埋め尽くされている。

これらのビームライン要素については、K1.1BR ビームラインとの取り合いから、T1 ターゲットから6.5mより下流にのみ機器の設置が可能となっており、次節での光学設計のベースラインとなる。ただし、ガンマ線アブソーバのみ、下流に設置するとそこでの中性子散乱による影響が大きいため、K1.1BR の Q1 と Q2 の間に設置される。

### 2.2.2 光学設計

$K_L$  ビームの性能は、本質的にコリメータ設計が決めている。実験上は、必要な大きさや形状のビームを構成しつつ、ハロー中性子を十分に低減させることが要求される。

ビームの大きさについては、 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\nu$  実験に特有の理由により非常に細く絞ったペンシルビームを使用する。

$K_L \rightarrow \pi^0\nu\nu$  崩壊では粒子はすべて中性で、三体崩壊のなかで測定できるのは  $\pi^0(\rightarrow \gamma\gamma)$  のみのため、運動学的制限が存在しない。そこで、 $K_L$  ビームを細く絞ることでビーム軸線上での  $K_L$  崩壊を仮定することが可能となり、そこから  $\pi^0$  粒子の崩壊点(vertex)と横方向運動量(transverse momentum)

を再構成することで、背景事象の選別が可能になる。最終的には $K_L$ 粒子の収量と背景事象のS/N比により、 $7.8\mu\text{Sr}$ の角形ビームと決定した。

ハロー中性子が発生する主な過程をシミュレーションでスタディすると、上流部で散乱された中性子が、さらに下流のコリメータで散乱されてハローとなっている。それを取り除くよう光学線(コリメーションライン)とコリメータの物質量を調整しながら、シミュレーションを繰り返して最適化を行い、図3に示すような光学を採用した[7]。

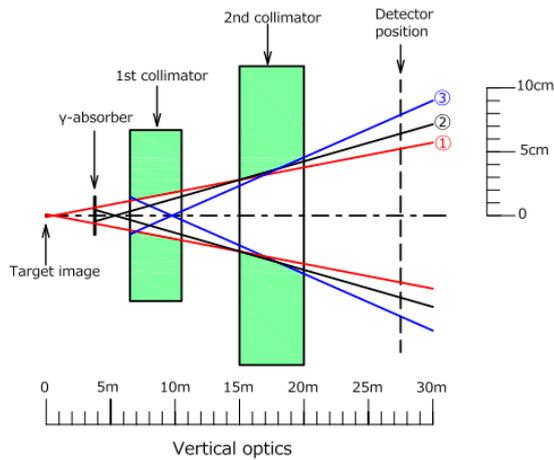


図3 KL ビームラインの光学(鉛直)

やや詳細ではあるが、KL ビームラインの肝心な部分であるため、主要なポイントを下記にまとめておく。

- (1) 第一コリメータは、ビームコアを形成するよう形状を決める。すなわちターゲットにおける有効ビーム幅の端を起点とし、ビームライン下流の測定系で欲しいビーム幅の端を終点として、コリメーションラインを決定する(図3 line ①)。
- (2) 第一コリメータ最上流部は、中性子がもっとも多く散乱される場所なので、そこでの散乱事象の低減はハロー中性子の抑制にもっとも効果的である。そこで、鉄4m長のさらに上流部に、下流からは表面が直接見えないような逆テーパライン(図3 line ②)をもった、厚さ50cmのタングステン合金ブロックを追加する。タングステン合金の密度は $18\text{g/cm}^3$ で鉄の約2.3倍である。
- (3) 第二コリメータ下流側2m分は、(2)で追加した第一コリメータ最上流50cmで散乱された中性子が再度散乱されることがないように、最上流50cmが見えないように線(図3 line ③)を決めている。また各検出器の配置も、そのラインをもとに決定されている。
- (4) コリメータより上流部のビーム中心にビームコアのガンマ線を吸収させるための鉛製のアブソーバが設置されており、ここも散乱源となっている。そこで、アブソーバで散乱された中性子が第二コリメータ上流部3mで再度散乱されないように図3 line②を設定する。

- (5) 第二コリメータの上流端は、第一コリメータやアブソーバなどで散乱された中性子が当たる事象が多く、第三の散乱源となる。そこもタングステン合金ブロックにすることでハロー中性子を低減させている。
- (6) 第二コリメータ下流端は、そこで中性子の散乱や貫通がおきると測定器へのアクセプタンスが大きい。ここもタングステン合金とすることで、ハロー中性子の生成を抑制している。
- (7) コリメータの長さは、ハロー中性子の数が充分低減するよう決定する。シミュレーションの結果、第一コリメータは4.5m、第二コリメータは5m必要となる。タングステン合金の部分以外は密度 $7\text{g/cm}^3$ 以上の金属が必要で、次節で記述するように鉄を採用した。

上記のような最適化の結果、 $K_L$ 粒子1個に対するハロー中性子数の比は0.07%と見積もられ、実験上の要求値 $<0.13\%$ を満たす。3.7万個のビームコア中性子に対し1個のハロー中性子が発生するという極めてクリーンなビームラインである。さらに測定器側の最適化と合わせて、ハロー中性子による $\pi^0$ や $\eta$ の生成事象については、KEK-PS E391a 実験より大幅に低減すると予想しており、信号/背景事象(中性子起因)比で7程度になる見込みである。また、測定器上で得られるビーム形状(中性子)は図4のようになると計算される。水平と鉛直方向のビーム形状の違いは、16度での取り出しのためターゲットにおける粒子発生点が水平方向は幅2cm程度に広がって見えるのに対し、鉛直方向はほぼ点光源(0.2cm程度)であることを反映している。

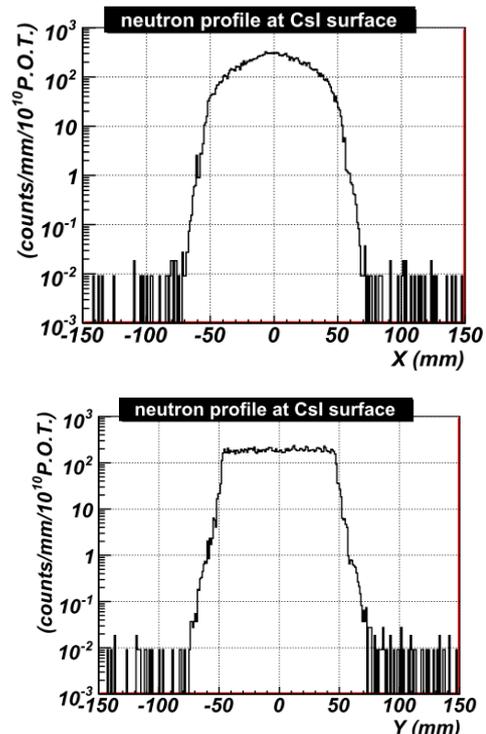


図4 測定器位置での中性子のビーム形状(シミュレーション) 上が水平、下が鉛直方向の形状を示す。

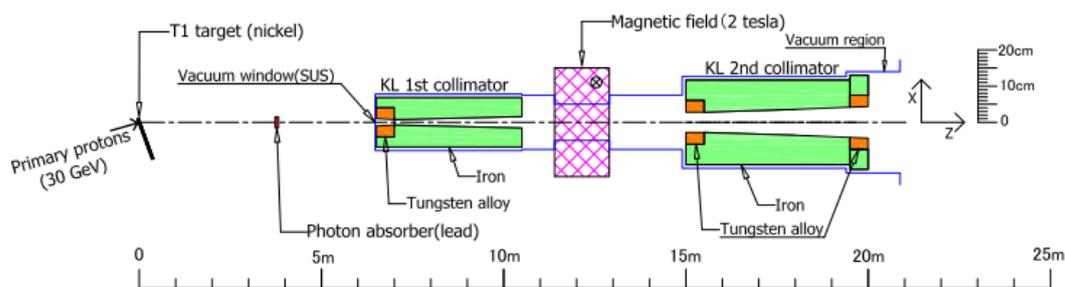


図5 KL ビームライン概念図

## 2.3 コリメータの製作

光学的に決定されたビームライン構成の模式図を図5に示す。前述の通りハロー中性子を十分に抑制できるビームライン設計が得られたが、現実的には長さ4m以上という長尺の金属製コリメータが2台必要で、光学を生かすためには真直度(曲がり)公差は全長で0.3mm以下と厳しく、またビーム経路は高真空にする必要がある。これは工学的には challenging な要求である。また、コリメータのアライメントを調整するための位置調整を遠隔で行うため、放射線環境で動作するXY 架台を備える必要があり、同時にビーム軸方向への隙間がまったくない放射線遮蔽構造を取る必要がある。詳しい検討内容は文献[8]に譲るが、これらの条件を満たすためにコリメータ本体は下記のような概念設計となっている。

- (1) コリメータ本体は、鉄(SS400)製の上下二分割構造で、第一コリメータは134mm角、第二コリメータは234mm角となっている。ステンレスではなく鉄を採用したのは、主に被削性と加工歪みを勘案してのことである。鉄には真空中で使用実績のある防錆メッキを加工後に施した。
- (2) タングステン合金は(1)の鉄ブロックの中に、位置調整ボルトや位置決めピンを介して置かれている。
- (3) 真空槽はステンレス製の角形管で、その中にコリメータ本体がほぼ隙間のない状態で固定されている。
- (4) 遠隔で操作可能なXY 移動架台2台で真空槽を支持しており、コリメータの移動は真空槽ごと行う。真空のつなぎには、軸直角に大きな変位をとれるベローズダクトを使用している。また、コリメータ移動時には2台のXY 架台は独立で動くよう設計する。

コリメータ製作の実際を図6写真に示す。組み立て、および、真空槽への組み込みを終えて実際の設置状態と同じ支持状態にした時の真直度は全長で $\pm 0.1\text{mm}$ 未満となり、極めて歪みの少ないコリメータが完成できた。

コリメータ本体やXY 架台を含むビームラインを構成する各機器の製作は、2008年度中にほぼ完了した。Dipole 磁石とその電源は、KEK-PS のものを再利用している。コストはタングステン合金:コリメータ本体:XY 架台が1:2:4の比率であった。

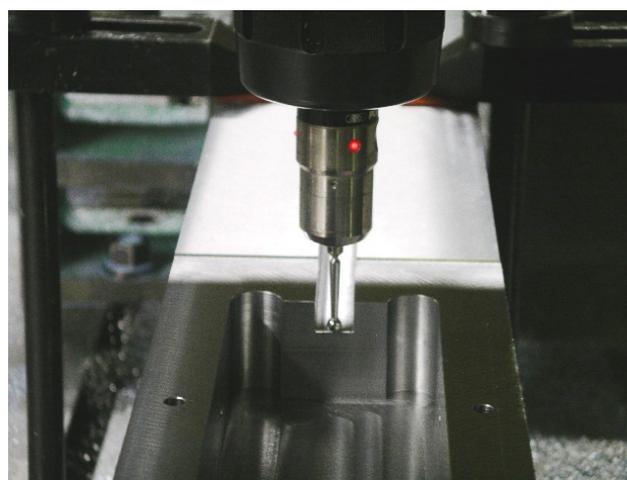


図6 コリメータの加工, 寸法検査, 組み立ての様子

## 2.4 ビームライン建設

2009年2月にハドロン実験ホールへ初めてビーム取り出しを行った[9]後、KLビームラインの建設のためにT1ターゲット周りの遮蔽体をいったん取り除いた。KLビームラインの建設は2009年4月から開始し9月までの約半年間で行った。その内容を下記に示す。

(1) 測量、ケガキ作業(4月)。

施設完成直後時(2007年)の測量結果と比較して、ターゲットとKLビームラインでは1mm以上のレベルのずれが発生していた。これは遮蔽体重量による不等沈下が原因である。

(2) ベース兼遮蔽となる鉄ブロックの輸送,加工,設置(4~6月)。

(3) ビームライン要素の設置,アライメント(4~7月):

第一第二コリメータ(XY架台, 本体)  
電磁石(本体, 冷却水, 電気配線, 電源準備)  
ビームプラグ  
ガンマ線アブソーバ  
真空接続  
電力, 制御系配線

図7にビームライン要素設置完了時の写真を示す。

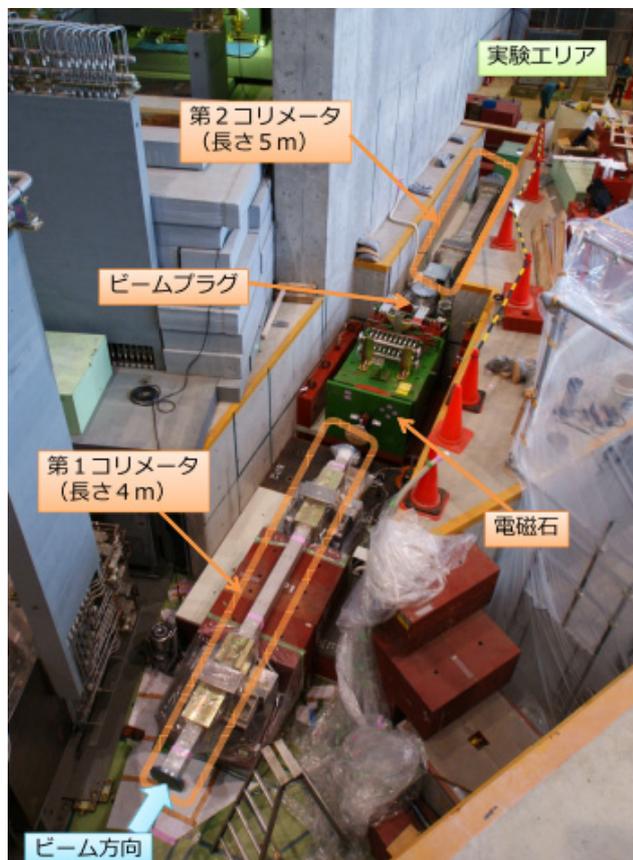


図7 ビームライン建設中の写真

(4) 遮蔽のための鉄ブロックやコンクリートブロックの輸送,設置(7~9月)

ビームレベルを中心に±1mは鉄ブロックで遮蔽(図8)。鉄ブロックはほとんどがKEK-PSのブロックの再利用で,合計で約200トン程度が使われている。

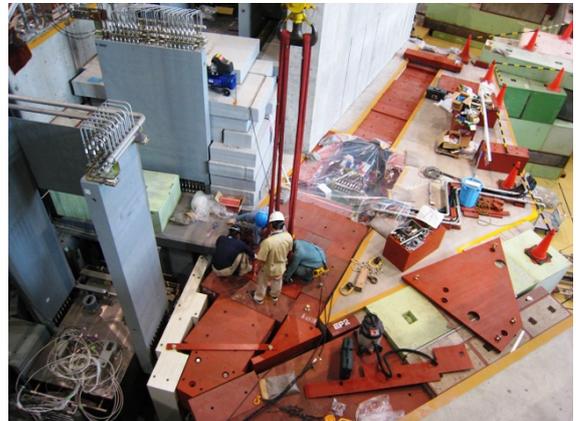


図8 鉄遮蔽体設置の最終段階

ビームレベル+1~+5mまではコンクリートブロックを設置。

(5) 上記ビームライン作業と並行して,下記作業を行った。

実験エリア,ビームダンプ構築(遮蔽体構築)。

実験エリア整備(電気,水,ガス)。

安全系インターロック構築。

タイミング系の配線工事。

$K_L$ 運動量分析用電磁石(鞍馬)の改造,輸送,設置。

仮設のカウンティングハット構築。

(6) 最後に,ビーム性能を測定するための測定器群の設置を行った(10~11月)。

建設全体をいま振り返ると,工程的には十分な余裕を見込んでいたが,終わってみるとぎりぎりの日程で完成した。その一因としては,ホール北側のK1.8ビームライン下流部の建設と同時進行であったため,平均して週二日しか(ホールに一台しかない)クレーンを使用できなかったことが大きい。その他は,打ち込みコンクリートと接する部分の多くについては現場合わせによる位置調整が必要で,想定より多くの時間が必要であった。元々複雑な取り合いの上に,コンクリートのひずみや,精度の悪い遮蔽体(再利用鉄)の積み重ねにより,数mm隙間が足りずに遮蔽体が収まらないという煮え湯を何度も飲まされた。また,実験ホール内は夏期の結露がひどく,機器へのダメージを減らすための対策に悩まされた。他にも,第二コリメータ用XY架台は,現場設置後にトラブルが発生し対応に時間を要したが,これは工程上の都合で試運転が不十分であったことが遠因で,事前の試験の重要性を再認識させられた。

最終的には予定していた作業をすべて期限内に完了することができた。ハドロンビームライングループをはじめとする各方面の支援のおかげである。

### 3. ビームライン性能評価

2009年10月から2010年2月末までの間、J-PARC Main Ring からハドロンビームラインへの遅いビーム取り出しを行っている。この期間はおもに Main Ring のビーム調整期間であるが、月に数日程度は(おもに深夜から早朝にかけて)連続ビームが供給される日がある。その日を利用してKOTO実験グループでは、ビーム性能を評価するために、各大学が工夫を凝らした検出器をもちよって各種測定を進めている。ただし、文献[10]で説明されているように、リップルノイズに同期したビーム取り出しとなっているため、まだDCビームとは呼べるようなビームではない。これも、加速器グループの努力により徐々に改善されつつある。

#### 3.1 基礎的測定

まず基本的な情報として、 $\text{PbWO}_4$ 結晶、純 CsI 結晶やシンチレーティングファイバーを用いてビーム形状の測定を進めている。その結果は、図9に示す通り非常にシャープな形状が得られており、また測定器のレスポンスをいれたシミュレーションによりデータはよく再現されている。ほぼ想定通りのビーム成形ができていると考えておりコリメータシステムについては大きな問題はないと考えている。

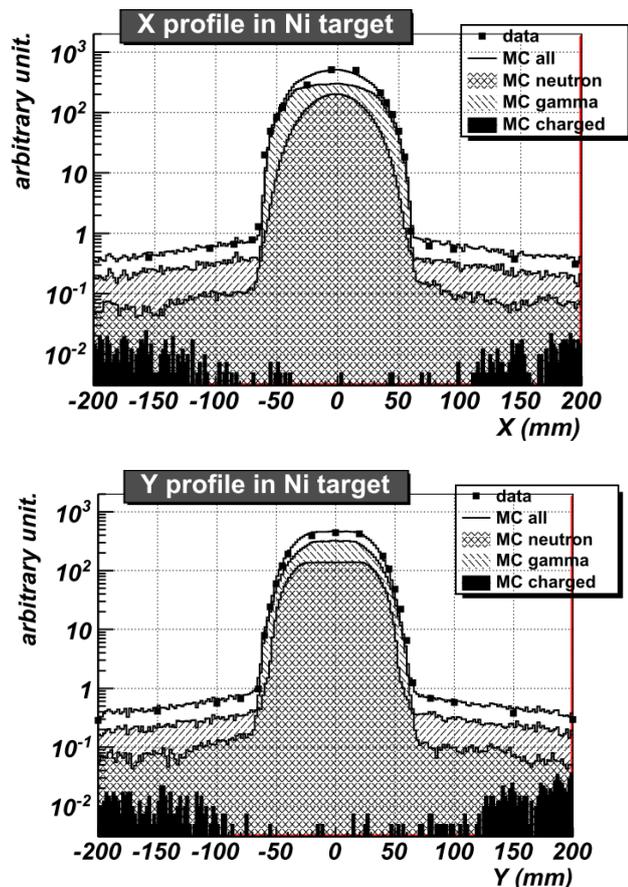


図9 ビーム形状の測定データ

上図が horizontal, 下図が vertical. 四角点がデータで、線とハッチングはシミュレーション結果を示す。

そのほかにも下記のような多岐にわたる測定が進められている：

- ✓ ハドロンカロリメータによるビームコア中性子とガンマ線のエネルギー分布/flux 測定。
- ✓  $np$  散乱を使ったビームコア中性子のエネルギー測定。
- ✓ エアロジェルによるビームコアガンマ線の flux 測定。ガンマ線アブソーバによる flux 変化の確認。
- ✓ 細分化された純 CsI 結晶によるビームハロー中性子の flux 測定。この測定器は、中性子とガンマ線を識別可能である。
- ✓ シンチレータ-ホドスコープによる punch-through muon の測定
- ✓  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$  結晶による熱中性子 flux の測定。

このうち、エアロジェルカウンターとハロー中性子を測定する測定器の二つは、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊測定の本実験で使用する測定器のプロトタイプで、その性能評価もかねている。

#### 3.2 $K_L$ 粒子収量測定

2.1節で触れた通り、 $K_L$  粒子の収量についてはシミュレーションコードの種類により最大3倍程度の差異を示すので、実測による評価は極めて重要である。そこで、KOTO実験グループでは、二つの独立した測定を行っている。図10に実験エリアに設置された2系統の測定器の写真を示す。



図10  $K_L$  粒子収量測定系の写真

一つは、図11に示すセットアップで、崩壊分岐比13%の  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  ( $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ ) 崩壊を測定するものである。シンチレータ-ホドスコープを使った tracker により  $\pi^+ \pi^-$  の方向を測り、純 CsI カロリメータにより  $\pi^0$  から  $2\gamma$  の位置とエネルギーを各々測定する。解析は、まず  $\pi^+ \pi^-$  の方向から崩壊点を再構成し、 $\pi^0$  の運動量を計算する。次に、 $\pi^+ \pi^- \pi^0$  の横方向運動量の合計が0であることを要求し、鉛直と水平方向の二つの連立方程式を解くことによって  $\pi^+ \pi^-$  の各運

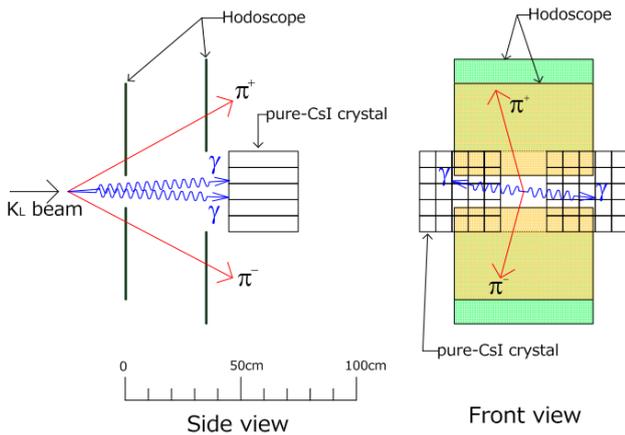


図 11  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 (\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$  崩壊測定の設定アップ

動量を求める。これはペンシルビームのため元の  $K_L$  粒子の横方向運動量が 0 で近似できることを利用している。最後に、 $\pi^+\pi^-\pi^0$  の各運動量から  $K_L$  粒子の不変質量分布を求めることができる。この方法のメリットは、ほぼバックグラウンドフリーであり、測定装置も解析も比較的シンプルのため確実に  $K_L$  を測定できることで、初めての、それも短期間のビームタイムでの  $K_L$  測定には心強い。

$K_L$  粒子の運動量分解能としては 13% 程度と見積もっている。まだデータ収集は進行中であるが、図 12 に正味 2 時間程度の測定結果を示す。 $K_L$  粒子のピークは  $500 \text{ MeV}/c^2$  付近にはっきりと再構成されおり、KL ビームラインとしての第一歩を踏み出したと言える。

もう一つは、電磁石+ドリフトチェンバーを使ったスペクトロメータによるもので、具体的には  $K_L$  粒子の indirect CP-violating mode である  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$  崩壊 (分岐比  $\sim 2 \times 10^{-3}$ ) を測定するものである。この方式は、アクセプタンスが大きく統計が稼ぎやすい上に、運動量を 2% 程度の分解能で測り、崩壊点の分布も精度よく測ることができる。ただし、チャンバーや電磁石に関するハードウェアの調整やトラッキングの解析などに時間が必要である。現在も鋭意解析を進めている。

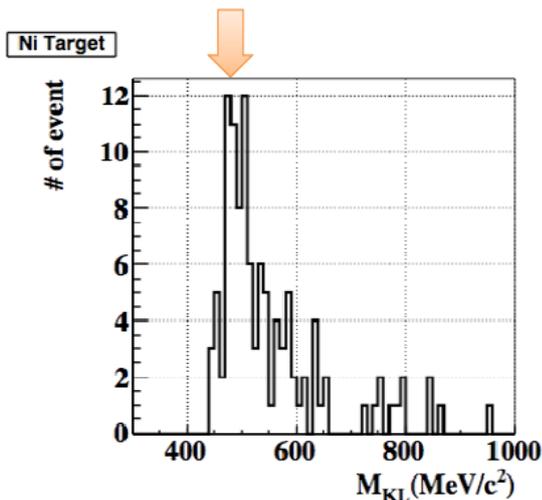


図 12  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  崩壊より再構成された不変質量分布

### 4. 展望

執筆時はまだビームタイム中であり、詳細な解析や検討が残っている。しかしビームラインとしては、ほぼ必要とするスペックに応じており、本質的な問題はないと考えている。

2010 年度はいよいよ KOTO 測定器の建設が始まる。それに先立ち、2010 年 1 月には東北大電子光学研究センターにて電子ビームを使った純 CsI カロリメータや読み出し系の試験が進められている。2010 年春にエンドキャップカロリメータの建設が始まり、フェルミラボから借りた長さ 50cm の KTeV-CsI 結晶約 3000 本のカロリメータを積み上げていく作業に入る。並行して読み出し系を構築して、秋のビームタイムにはエンジニアリングランを予定している。その際にも、実験エリアの再構築や測定器棟の整備を同時作業で進めていくことになる。ただし、K1.1BR ビームライン建設と同時進行のため、厳しい工程になると予想している。

エンドキャップに引き続き、2011 年度にかけて上流部、中央バレル部、下流部の測定器群の建設を次々と進め、2011 年中には最初の物理データ収集を行いたいと考えている。

物理データとしては、最初に乗り越えたい壁は、Grossman-Nir リミット[11]と呼ばれる間接的な分岐比の上限値  $1.5 \times 10^{-9}$  である。これは、 $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$  崩壊分岐比の実験値からアイソスピン対称性を使って得られる一般的な制限であり、これを超えた先に標準理論を超えた物理探索への道が開けている。しかし、そのためには KOTO 実験グループの準備だけでなく、J-PARC 加速器による取り出しビームの DC 化や、ビーム強度の増強が必須である。その進捗にも大いに期待をしたいところである。

### 5. まとめ

2009 年度、J-PARC E14 KOTO 実験 ( $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  崩壊測定実験) 専用の KL ビームラインの建設は無事完了し、ビーム性能評価も着々を進められている。本実験への一つの大きなステップを踏んだといえよう。

KL ビームラインは、その設計から性能評価に至るまで、多くの大学院生の研究活動により支えられている。光学設計は佐賀大と山形大の院生が主体となって進め、ビーム性能評価は阪大、京大、佐賀大、釜山大、山形大のスタッフや院生が各々創意工夫を凝らした装置をもちより、計測にあたっている。

## 6. 謝辞

ビームライン建設, 電磁石整備, 実験エリアやインターロックの構築, およびビーム運転にあたっては, ハドロンビームライングループの全面的支援の上に成り立っています。特に運動量分析に使用した電磁石(鞍馬)については, KL 測定用に急遽移設をして同時に gap 高さを 50 cm から 80 cm へ広げる改造に対応していただきました。また, 遅い取り出しの連続運転は J-PARC 加速器チームの協力と配慮で実現が可能となりました。この場を借りて深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] L. S. Littenberg, Phys. Rev. D **39**, 3322 (1989).
- [2] F. Mescia and C. Smith, Phys. Rev. D **76**, 034017 (2007).
- [3] A. J. Buras *et al.*, Int. J. Mod. Phys. **21**, 487 (2006).
- [4] J. K. Ahn *et al.*, arXiv:0911.4789v1 [hep-ex], submitted for publication.; J. K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 201802 (2008).; J. K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. D **74**, 051105(R) (2006).
- [5] J. Comfort *et al.* (J-PARC-E14 Collaboration), “Proposal for  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  Experiment at J-PARC”.
- [6] 隅田土詞, 高エネルギーニュース **28-3**, 151 (2009); 坂下健, 高エネルギーニュース **25-3**, 121 (2006).
- [7] T. Shimogawa *et al.*, in the Proceedings of TIPPO9, to appear in Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect.A.
- [8] 渡辺丈晃, 日本加速器学会年会 2009, <http://beta.pasj.jp/MaKaC/contributionDisplay.py?contribId=251&sessionId=23&confId=0>
- [9] Y. Sato *et al.*, Proceedings of 7th JCNP, to appear in the online AIP Conference Proceedings (2010).
- [10] 吉岡正和, 高エネルギーニュース **28-1**, 26 (2009).
- [11] Y. Grossman and Y. Nir, Phys. Lett. B **398**, 163 (1997).