

# Construction of a neutral KL beamline for the J-PARC KOTO experiment

Hiroaki Watanabe<sup>1,A)</sup>, for the KOTO collaboration and for the Hadron-beamline group

<sup>A)</sup> Hadron beamline group,

HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION, KEK

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

A dedicated  $K_L$  beamline for the rare kaon decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  is constructed in the Hadron experimental hall at J-PARC. The beamline consists of a 4 m-long 1<sup>st</sup> collimator, a sweeping magnet, a beam plug, a 4.5 m-long 2<sup>nd</sup> collimator and an additional 0.5 m-long collimator. Since the beam is composed of neutral particles, beamline performance is determined by the collimators. Therefore, the collimators are requested to be excellent straightness to a tolerance of 0.3mm. In this report, engineering design and fabrication of the collimators are presented.

## KOTO実験のための中性KLビームラインの建設

### 1. Introduction

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は、その分岐比が小林—益川行列の位相の2乗、 $\text{Im}(V_{td})^2 = \eta^2$ 、すなわちquark sectorにおけるCP非対称性の大きさの2乗に比例しており、また理論的不定性が1~2%と例外的に小さい<sup>[1][2]</sup>。従って、実験的に精度良く測定できればCP非対称性の大きさを不定性なく測定可能である。更に、標準理論を超えるNew Physics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<sup>[3]</sup>。同時に、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ やB中間子崩壊など異なるモードの相関を見ることでNew Physicsを同定する上で重要なヒントを得ることができる<sup>[3]</sup>。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 $2.5 \times 10^{-11}$ <sup>[2]</sup>と小さく、また終状態の1個の $\pi^0 (\rightarrow 2\gamma)$ 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。

PS-E391a実験グループは、KEK 12GeV-synchrotronにおいて、世界で初めて $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 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ている。またE391a実験で得られた分岐比の上限値 $6.7 \times 10^{-8}$ は現在のworld recordである<sup>[4]</sup>。

なお3桁以上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検出器をupgradeしてfirst measurementを目指している<sup>[5]</sup>。特にE391a実験での解析から、ビームハローに存在する中性子が、 $K_L$ の崩壊領域近傍で検出器等と反応し $\pi^0$ 、もしくは $\eta$ を生成することによる背景事象を抑制することが重要と考えられている。従って、ビームラインによりハロー中性子を十分低減させることが実験を遂行する上での重要な条件の一つとなっている。

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捨てるためのdipole型一台で、ビーム形状はコリメータにより決まる。詳細なシミュレーションの結果、図1に示すように2段のコリメータで光学系を構成すれば、要求を満たすビームが得られると予想されている<sup>[6]</sup>。しかし、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、真直度（曲がり）公差は全長で0.3mm以下と厳しく、またビーム経路は真空にする必要があるという工学的にはchallengingな要求であった。

そこで本論文では、主に工学的観点から、真空槽一体型の金属製長尺ビームコリメータの概念設計お

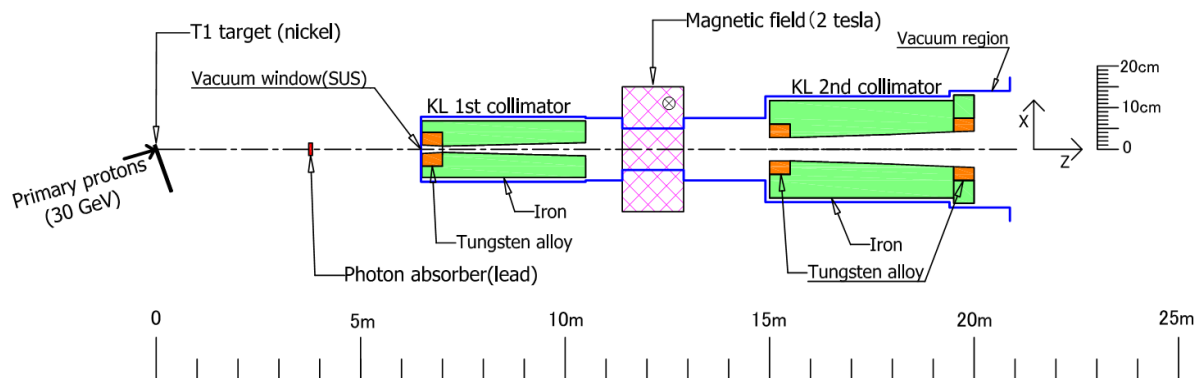


図1：KLビームライン概要図

<sup>1</sup> E-mail: nabe@post.kek.jp

よび製造結果について報告するとともに、KLビームラインの建設状況についても簡単に触れておく。

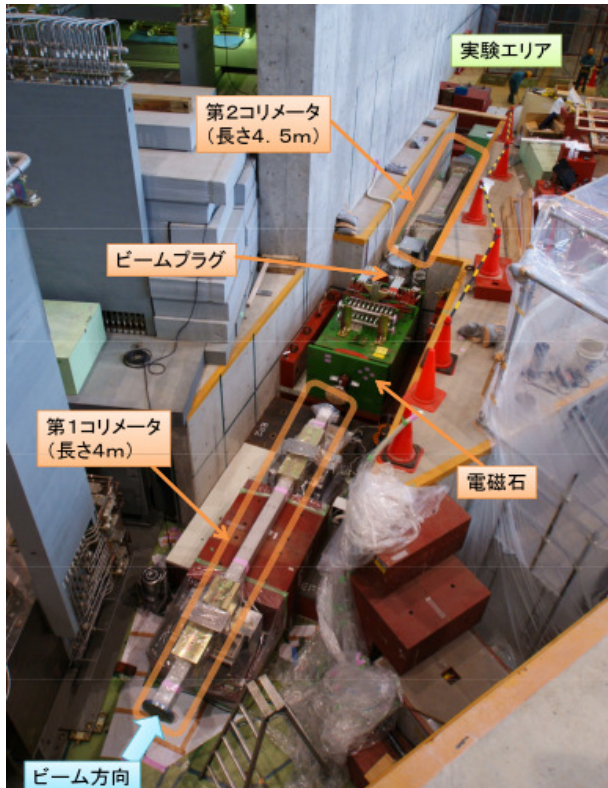


図2：KLビームライン建設状況

## 2. KLビームライン

KLビームラインの概念図を図1に示す。加速器の30GeVの陽子ビームはハドロンビームラインへ遅い取り出しされた後、ニッケル製のT1ターゲットへ打ち込まれる。そこで生成された $K_L$ ビームは、図1に示すビームコリメータにより約 $9\mu$  Srの角形に成形されて、20m下流の実験エリアへ導かれる。ビームラインの主要な要素としては、2段の金属製長尺コリメータ、1台のdipole型電磁石およびビームプラグで構成される。各コリメータは $\pm 30$ mmの範囲で位置を調整できる移動架台上に固定されており、0.1mm以内の精度でアライメント調整が可能となっている。上記ビームライン要素の周辺の空間については、ビームレベルから $\pm 1$ mは、コリメータの可動領域および電磁石の電気、水を供給するユーティリティスペースを除き、すべて鉄で埋め尽くされ、それ以外はコンクリートにより遮蔽される。また、熱中性子を吸収するためのボロン入りシリコンゴムを電磁石近傍に設置している。その他にターゲットで生成された高エネルギーガンマ線を吸収させるための鉛製のガンマ線アブソーバが $K_L$ ビームラインの上流部に設置されている。

図2に、2009年7月11日時点でのKLビームラインの写真を示す。現状ではすべての主要なコンポーネントのインストールは完了しており、引き続き遮蔽体の積み込みを進めている。

## 3. ビームコリメータ

### 3.1 コリメータの概念設計

シミュレーションにより得られたビームコリメータへの要求事項を下記にまとめる。

1. 第一コリメータが4m長、第二が4.5m。  
(第二は分離式0.5m長と合わせ総長5mとなる)
2. 上流50cmはタングステン合金ブロックを組み込む、残りは鉄以上の密度の金属とすること。
3. ビーム経路は真空とする( $\sim 0.1$ Pa)。
4. ビーム穴形状は長方形で、水平、鉛直で異なるダブルテーパ形状であること。
5. ビーム穴の真直度公差は全長で0.3mm以下。

この中で最も苦慮したのは、全長に対する真直度公差が非常に厳しい点である。

基本的な構造としては、ビーム穴が長方形のため、コリメータは上下半割の2分割で製造し、組み合わせて一体とすることとした。分割については、中心分割でなく、もっとビーム中心から離れた場所という案もあったが、ビーム溝は幅が狭い割に深かったことから加工精度を考慮して半割とした。これは後述する別メリットを生むことになる。なお、断面の大きさは、第一コリメータが134mm角、第二が234mm角であり、第二コリメータが第一コリメータの稼働範囲の隙間をカバーする大きさとなっている。

次に、材質はビーム性能的には密度のみが重要であり、タングステン合金以外の場所については鉄、ステンレスおよび黄銅を検討した。黄銅は予算および納期の両問題で見送られた。ステンレスは、焼鈍して残留応力を除去したとしても、加工歪みで曲げ公差を満たさない可能性があるため、結局、鉄を選択した。鉄は加工後に真空中で使用実績のある黒色クロムメッキを施している。

最後の検討項目は、いかにしてビーム経路を真空気密とするかである。そこで主に3つの案について検討を行った。まずは、コスト的にも安く構造的にも簡単な“直接溶接”方式である。つまり、鉄コリメータ外面の合わせ面で直接真空シール溶接を行う方法で、鉄コリメータ自身を真空槽としてしまう方式である。ただしコリメータに直接熱負荷を入力するため、溶接歪みがでてしまい、検討の結果、たとえ焼鈍した鉄を使ったとしても、真直度公差やねじれ公差が許容範囲に収まる見通しがつかなかった。また溶接後の矯正も困難である。

次に検討されたのが、外面を0.1~1mm程度の薄いステンレス板で覆い、薄板の合わせ面で真空シール溶接を行う“薄膜方式”である。薄膜の内部には構造的に強度のある鉄コリメータがあるため、外側の膜は薄くても大気圧を支えられる。また、コリメータには当て物を介せば熱入力が少ない施工が可能のためコリメータ本体への溶接歪みは少ないと予想された。しかし、実際の図面を検討してみると、溶接

箇所が多く、溶接歪みに対して全体の整合性を取るのには難しい。また、実際の運用では、コリメータは二点で支えられるため、支え点での応力集中による薄膜の破断の危険性を回避しきれないと判断し、この方式は見送られた。

最終的に採用されたのは、真空槽とコリメータを分けて作る分離方式である。ここでは、市販の5~6mm厚の角パイプを利用することでコスト的なメリットも得られた。角パイプとコリメータ間の支えには多数のボルトを利用しており、ボルトによるアライメント後に真空シール溶接をする方式とした。真空槽とコリメータ間に生じる若干の隙間が懸念されたが、スペーサにより問題ないレベルまで埋めることができ、また下流に設置される遮蔽体で十分カバーできる設計となっている。こうして、すべての点で概念設計が固まってから、製作に入ることになった。



図3：第2コリメータ加工時の様子  
(コミヤマエレクトロン社提供)

### 3.2 製造結果

コリメータの製造は、材料取り、焼鈍、加工（図3）、メッキ、組み立て、真空シール溶接および各種試験という工程で行われた。

加工や組み立ての各工程にて機上や定盤上での寸法確認を何度か行っている。結果から言えば、図4（誤差棒付●マーク）に示すとおり要求公差を満たすことができた。ただし、コリメータの半割りの加工終了段階では、反りが0.4mm/4.5mと出てしまい、要求公差をわずかに超えてしまった。結局のところ、ビーム溝加工を入れる時点で加工が上下面で非対称となり、焼鈍により低減はしているものの、加工歪みによる反りが出てしまうのである。しかし、ここで上下を対称に製作したメリットが発揮される。つまり、上下ブロックは反対方向に反りができるため、ボルト締結した時点で反りがキャンセルする方向に働くのである。更に、実際の設置と同じく2点支持にすると重力により0.1mm程度コリメータ中央がたわむことと合わさって、すべての施工完了時点で、

要求された公差より十分に小さい±0.1mm/4.5m未満という真直度を得ることができた。また、その他の要求公差もすべて満たしていることを付記しておく。

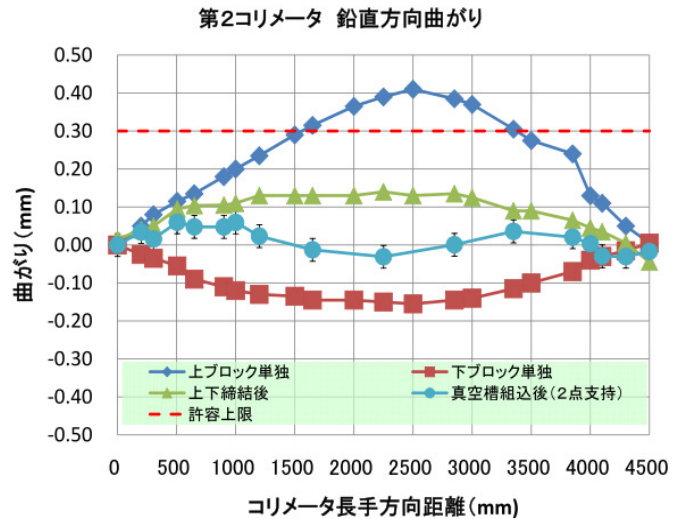


図4：第2コリメータ真直度測定結果

## 4. まとめ

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊の測定を行うKOTO実験専用のKLビームラインの建設が進められている。特にその中でもビーム性能を決めるコリメータについては、±0.1 mm/全長(4m, 4.5m)という極めて歪みの少ないコリメータの製作に成功した。

KLビームラインは2009年9月中には完成する予定である。早ければ2009年10月中に初めてのビームが取り出され、早速KOTO実験グループがビームライン性能の測定に取りかかる予定である。

## 5. Acknowledgments

コミヤマエレクトロン社には、多くの技術的助言や協力をしていただき大変お世話になりました。ここに深く感謝致します。KLビームライン機器開発の一部は、文部科学省-科学技術研究費の支援のもと進められています。

## 6. 参考文献

- [1] L. S. Littenberg, Phys. Rev. D39, 3322 (1989).
- [2] F. Mescia and C. Smith, Phys. Rev. D 76, 034017 (2007).
- [3] D. Bryman et al., Int. J. Mod. Phys. 21, 487 (2006).
- [4] J. K. Ahn et al., Phys. Rev. Lett. 100, 201802 (2008).
- [5] J. Comfort et al. (J-PARC E14 Collab.),  
“Proposal for  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  Experiment at J-PARC”, (2006).
- [6] T. Shimogawa, et al., in the Proceedings of TIPP09, to appear in Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.