

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800165

研究課題名(和文)次世代の大強度KLビームラインの設計

研究課題名(英文)Design of a new high-intensity KL beamline

研究代表者

渡辺 丈晃(WATANABE, Hiroaki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：00415043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCハドロン実験施設で計画されている拡張計画を想定し、高統計のK稀崩壊実験を実現するための新しい大強度KLビームラインの設計に関する研究を行った。特に設計の難しい真空窓に関する機械強度および放射線損傷等に関する研究や、KLビームコリメータの測定方法の検討、およびビームライン上の物質量が及ぼす影響等の評価を行った。それらを通じて、新しいKLビームラインについての概念設計案や試験要件等を取りまとめるに至った。

研究成果の概要(英文)：Design of a new high-intensity KL beam line in order to be realized a high-statistics rare KL decay experiment in the J-PARC Hadron Experimental Hall, which is planned to be extended, has been performed. Mechanical design and estimation of radiation damage for vacuum windows, which is one of most difficult part, has been proceeded. Also, alignment method of KL beam collimators and effects by material in the KL beam line have been evaluated. Based on these developments, conceptual design and testing requirements have been proposed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：K稀崩壊実験 J-PARCにおける素粒子実験

### 1. 研究開始当初の背景

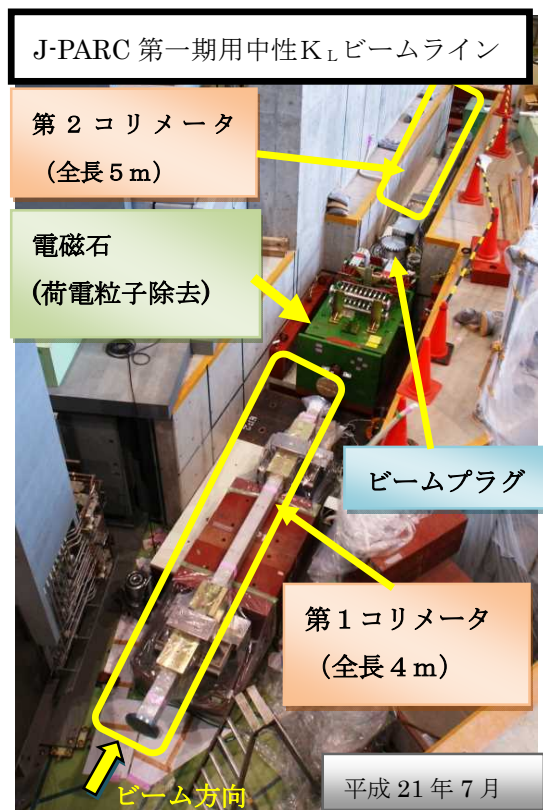
$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は粒子・反粒子の対称性 (CP対称性) を直接的に破る崩壊モードであり、その分岐比は小林-益川行列の位相の2乗、 $1/m(V_{td})^2 \propto \eta^2$ 、すなわちクォークセクターにおけるCP非対称性の大きさの2乗に比例している。特にこの崩壊は理論的誤差が約2%と例外的に小さいため、崩壊分岐比を精度良く測定できれば、CP対称性の破れの大きさを不定性なく決定することが可能である[1]。更に、この崩壊は標準模型を超える物理に感度が大きいことが指摘されており物理的には非常に興味深い[2][3][4]。しかしながら予想分岐比は約  $3 \times 10^{-11}$  という稀な過程であり、3体崩壊中2粒子がInvisibleという運動学的制限の少ない中で  $\pi^0$  粒子1個による同定を必要とする難しい実験である。測定方法としては、 $K_L$  粒子の崩壊領域を検出効率の高い検出器でほぼ全周をカバーして、 $\pi^0$  粒子が1個しかない崩壊であることを測定することが基本となる。それだけでは同定ができないため、さらに細く絞ったビームとしビーム方向と垂直方向 (transverse方向) の運動量に制限を付けることで崩壊点や横方向運動量の再構成を可能とし他の崩壊モードと識別が可能となる[5][6]。現在、J-PARC第一期において  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の“発見”を目指す実験J-PARC E14 KOTO実験が鋭意進行中である[6]。本研究では、E14実験の次のステップとなる、高精度測定に関する研究である。 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は稀な崩壊のための統計をかせぐためには大量の  $K_L$  粒子の生成が必要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、大強度の  $K_L$  ビームラインの実現に向けて、J-PARC 第2期で予定されているハドロン実験ホールの拡張を想定し、 $K_L$  ビームラインについて必要な要素開発を推進し、概念設計案を取りまとめることを目的とした。また、その際に、次のステップ (詳細設計レベル) で検討や開発が必要となる項目についてもとりまとめることが重要となる。

### 3. 研究の方法

ビームラインの概念設計を進めるために、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験に最適な条件を元に全体配置 (取り合い) の検討から始めて、電磁石、ビームコリメータ、真空、放射線遮蔽、メンテナンスシナリオと言った、多くのビームライン要素についての個々の設計 (基本的な仕様策定) を行うと共に、各機器間の整合性がとれるかといった検討を進める。特にコリメータのアライメントシステムは、 $K_L$  のような中性ビームラインにおいてはビーム性能を決める極めて重要な部分である。各要素の開発においては、その一部については、すでに



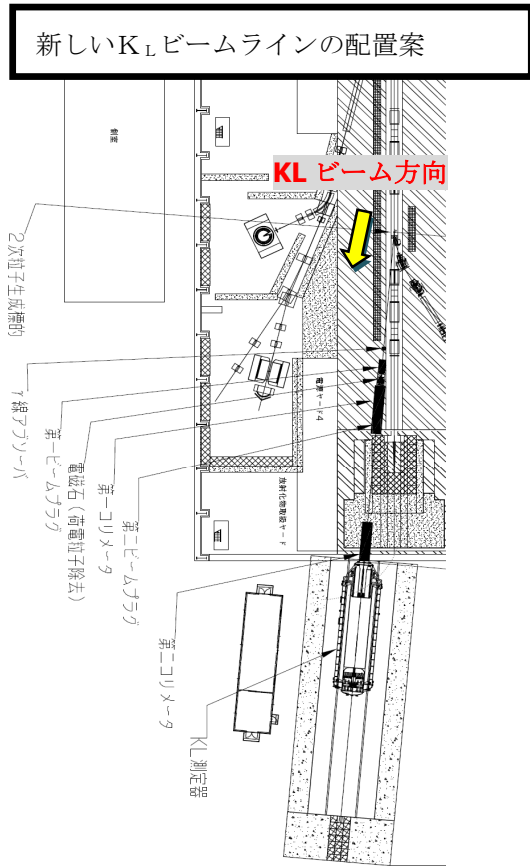
運用を開始している J-PARC 第一期用の中性ビームライン (上写真) [7][8]があり、その設計/運用経験や、実際のビームを使って評価を行った。

### 4. 研究成果

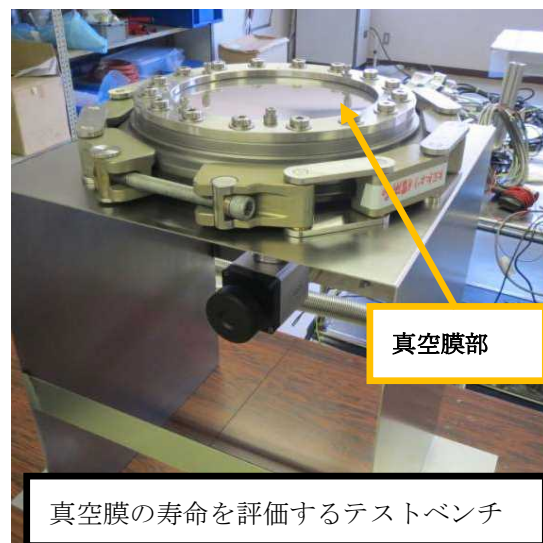
全体配置については、次ページ平面図の通り、ほぼ整合性がとれる形で必要な要素 (コリメータ2台、電磁石1台、ガンマ線アブソーバ1台、ビームプラグ2台など) を取り入れることが可能であることがわかった。次の段階である詳細設計レベルにおいては、1次ビームラインとの空気隔壁をどこで設定するか、また空気隔壁自体の詳細設計について今後さらなる検討が必要である。空気隔壁の詳細設計には  $K_L$  ビームラインのメンテナンス方法および遮蔽体構造の設計も合わせて行うことが重要である。

各要素についての共通仕様として、耐放射線性、耐環境性 (腐蝕) およびメンテナンスのための遠隔着脱機構などが基本要件として必要となる。耐放射線性や耐環境性の観点からはオールメタル仕様、防蝕処理 (メッキ等)、および絶縁材としては極力無機材料 (セラミック) を利用することが必要となる。メンテナンスの観点から、残留放射線レベルが高いことが予想されることから遠隔から着脱するためのガイド機構および遠隔吊られ金具などを備えることが重要となる。 $K_L$  ビームラインとしては、 $K_L$  測定器へ到達する中性子を低減させることが重要である。そのためコリメータシステムの設計が重要となる。現在運用されている  $K_L$  ビームラインでは横方向と上下方向の二軸でコリメータのアライ

メントができるシステムを使用している。これに対し、新しい KL ビームラインではビーム軸方向にもコリメータをアライメントできる三軸の調整機構を採用するよう概念設計案としている。これは、イメージとしては焦点距離を調整するためのもので、KL ビームを生成する標的など KL ビームラインより上流部が設計時と異なる可能性や実際のビーム運転時に想定と異なる 1 次陽子ビームの軌道やビームサイズ、または KL 測定器のビーム軸位置変更などに柔軟に対応するために必要であるとの結論に至った。また、中性子低減のためにコリメータのアライメントが重要である。この点について当初ビームラインと平行に遮蔽体を開けた穴を使って屈折光学を使った測量方式の検討を行った。しかし、KL 実験エリアからビーム穴とは別に測量用の穴を貫通させるのは放射線遮蔽や空気遮断の観点から困難であるとの結論に至り、ビーム穴を直接観測する方式が有望であるとの結論に至った。この場合コリメータの各部に中心部を示す測量用標的装置を組み込み、必要に応じてビームライン上から出し入れすることで、コリメータの位置の計測を精度良く可能となる。測量用標的装置はすでに現状の KL ビームラインに試験的 1 台組み込み、実際に測量が可能であることを実証した。新しい KL ビームラインでは、放射線防護上、人間が直接目視で測量することはできないが、最新の三次元測量機には組み込みカメラが内蔵されるようになり、LAN 経由で遠隔から測量することが可能であると予想している。



真空窓は、KL ビームラインを真空状態にする気密容器の一部を構成するものであるが、KL ビームや中性子の散乱の観点から、なるべく物質量を低減させておく必要がある。しかし、十分な強度や耐久性（金属疲労）も必要であることから設計が難しい部分である。本研究では、ビーム窓を重点項目に 1 つとして検討、評価を行った。放射線損傷の観点からは、材質としてステンレス、アルミ、ベリリウム、チタン合金、炭化珪素などを simulation (PHITS-code や MARS-code) で評価を行った。また、材料強度や製作性（接合性、加工性、入手性）および価格などを総合的に勘案し、第一候補としてオーステナイト系ステンレス (SUS316L) とし、0.1mm 厚さの窓材について実際に試作を行い、その引張試験により機械特性評価を行った。0.1mm 厚の板材の寿命についてのテストベンチ（写真）を構築し、1000 回の真空-大気繰り返し動作テストを行った。これらの研究により、実機設計の見通しが付き、実機製作時の試験要件をまとめることが可能となった。試験要件としては厚さ 0.1mm の高強度材の引張試験は当初材料のクランプ（固定）が難しいと考えていたが、既存の樹脂用引張試験機のクランプがそのまま適用できることがわかった。



本研究では、遮蔽構造の詳細については範疇外としているが、ハドロンホール拡張計画では、1 次ビームラインのビームダンプ後方に KL 実験エリアが設定されている。Simulation (MARS code) を行った結果、現状のビームダンプの設計では貫通する高エネルギーミュオンが無視できないレベルで存在することがわかった。ミュオンは偽の Veto 信号を KL 測定器に発生させ、測定 of dead time を増やすため極力低減させておく必要がある。そこで、ビームラインの下流のコンクリート遮蔽を鉄遮蔽体へ入れ替える必要性があることを今の段階（コスト評価前）に示すことができたのは重要な知見とい



える。さらに、熱中性子のストリーミングも抑えるよう鉄遮蔽の迷路構造や、ポリエチレン、パラフィンまたは水タンク等の中性子遮蔽を最下流に積む必要がある。

本研究開始時には予見していなかったこととしてビームパイプを含むビームライン側の物質量が原因で、 $KL^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊測定背景事象となる可能性が指摘されてことである。具体的には、ビームコア成分から充分離れている真空容器（ビームパイプ）についても  $KL$  崩壊で荷電粒子を放出する崩壊モードについて、その荷電粒子がビームパイプにて吸収または散乱され測定器で検出されないことが原因で背景事象となり得ることが Monte-Carlo simulation で示された。そこで、当初ステンレス製のビームパイプだったものを、物質質量約 1/3 のアルミ合金製ビームパイプへ変更したものを製作し、その後、物理データ収集を行った（下写真）。アルミ合金製ビームパイプは、平板からプレス曲げと TIG 溶接により角型に成型したものであるが、全体の曲がりやねじれを抑えるよう条件出しを行ってから実機製作をおこなうことで必要な寸法公差内に抑えることができた。ビームパイプ周辺に取り付けた荷電粒子 Veto 用カウンターとあわせて、背景事象へつながるイベントは相当低減できることがわかった。この知見から、次の段階としては、ビームパイプ内側にも荷電粒子 Veto カウンターを入れるなどの工夫をすると一層効果があがるものと予想される。ただし、超高真空領域のためアウトガスについて事前検証が必要である。



また、研究開始当時は現実験 (J-PARC E14 実験) の  $KL$  ビームラインと  $KL$  測定器の間は、厚さ  $125 \mu\text{m}$  のポリイミド製真空仕切り膜を使って、真空区画を分けていた。これが、ビーム中の中性子やガンマ線の散乱源となっている可能性が指摘された。そこで、厚さを 1/10 に減らした極薄の真空仕切り膜を試作して交換し、データ収集を行ったが、外乱要因が大きく現状では有意な差は見つかっていない。しかし、次の実験では測定感度が

10 倍～100 倍よくなることを勘案し、新しい  $KL$  ビームラインの設計では測定器と真空区画を分けない設計をベースラインとする。それに共ない、ビームライン側も測定器側の崩壊領域と同じ、超高真空仕様とする。コリメータの洗浄などの表面処理やベーキングによるアウトガス低減などが必須処理となる。また、事前にビームライン装置から発生するアウトガスが測定器に影響を及ぼさないことを確認する必要がある。

もう一点、本研究開始後 (平成 25 年 5 月) にハドロン実験施設では、加速器機器の誤動作により標的が破損し、標的中の放射線物質が実験施設内外へ拡散するといった放射能漏洩事故が発生した [9]。それに伴い、ビームライン機器の仕様の見直しも含めた安全規則の改定と、実験施設の改修が行われた。その影響で、本研究での新しい  $KL$  ビームラインについても仕様を大幅に見直す必要性が発生した。特に 1 次ビームラインと実験エリアの間に 2 重の空気隔壁を設ける指針の影響が大きい。空気隔壁自体も難しいものであるが、空気隔壁によりコリメータアライメント方式として当初検討していたビームラインと平行に遮蔽中に開けた穴を通しての光学アライメントが事実上不可能となったことを意味した。そこで、前ページ記載の通りコリメータ中のビームホールそのものを使う内面方式に変更を行った。

以上の研究により、J-PARC 第 2 期で予定されているハドロン実験ホールの拡張を想定したビームラインについて、ほぼ必要な概念設計案をまとめるに至った。また、概念設計を元に、初期段階としてはあるがビームライン建設にかかるコスト評価を行った。

今後は、工学的な観点に立った詳細設計を行う必要がある。その中には、遮蔽体構造、空気隔壁構造、その隔壁部を貫通する制御線や動力線の構造設計やコリメータ自体の設計、コリメータ駆動機構の設計など、多岐にわたる詳細設計が必要となる。特に、遮蔽体構造は測定器における余計な中性子、ミュオンやガンマ線などの background 事象の低減や、放射線防護の観点、および機器のメンテナンスの観点でも重要であると考えられる。

<引用文献>

- [1] A.J.Buras *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 261805 (2005).
- [2] D.Bryman *et al*, *Int. J. Mod. Phys.* **21**, 487 (2006).
- [3] A.J.Buras *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 101804 (2004).
- [4] A.J.Buras *et al*, hep-ph/0809.1073

(2008).

- [5] T.Inagaki *et al*, *KEK Internal* **96-13**,  
Nov (1996).
- [6] T.Yamanaka *et al*, *J-PARC Proposal* **E14**,  
(2006).
- [7] H.Watanabe *et al.*, 加速器学会 2009 年  
度年会 Proceedings , WPAPA02 ,(2009).
- [8] 渡邊 丈晃 (他 3 名) 高エネルギーニュー  
ス、Vol.28, No.4, P262 (2010).
- [9] J-PARC ハドロン実験施設における放射  
性物質漏えい事故関連情報  
[http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccide  
nt-j.html](http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html).

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に  
は下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 発表者：渡邊 丈晃  
    標題：ハドロンビームラインにおけるビ  
        ーム窓の現状  
    学会名等： SiC ワークショップ  
    発表年月日：2015 年 9 月 29 日  
    発表場所：J-PARC 研究棟  
                (茨城県那珂郡東海村)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡邊 丈晃 (WATANABE, Hiroaki)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・准教授  
研究者番号： 00415043