

審査区分	申請資格	P D	受付番号	2 0 1 9 0 0 4 1 2
	書面合議・面接審査区分	数物系科学		
	書面審査区分	素粒子、原子核、宇宙物理学およびその関連分野		
	小区分名	素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験		
	小区分コード	1 5 0 2 0	専門分野	ハドロン物理

研究課題名	静止K中間子を用いた次世代時間反転対称性の破れ探索研究
-------	-----------------------------

大阪大学

(申請機関コード: 1 4 4 0 1)

1. 申請者情報等

氏 名	(フリガナ) 登録名	イトウ ヒロシ 伊藤 博士	性 別 男
	(フリガナ) 戸籍名	イトウ ヒロシ 伊藤 博士	
	ローマ字表記	ITO Hiroshi	
国 籍	日本		
生年月日	平成2(西暦1990)年9月2日 生 (平成31(西暦 2019)年4月1日現在28歳)		

学 歴 (学部・修士)	<ol style="list-style-type: none"> 2013年 3月 千葉大学 理学部 物理学科卒 2013年 4月 千葉大学大学院修士課程入学 (理学研究科 基盤理学専攻) 2015年 3月 千葉大学大学院修士課程修了 (理学研究科 基盤理学専攻)
博士の状況	<ol style="list-style-type: none"> 入学年月: 平成27(西暦2015)年4月 入・進学 編・転・再入学時の在学期間換算: 0年 大学院名: 千葉大学(12501) 研究科名: 理学(系)(0044) 研究科種別: 研究科 専攻名: 基盤理学 課程種別: 博士課程(3年制) 修了・退学等: 平成29(西暦2017)年9月 修了 学位: 平成29(西暦2017)年9月30日 博士取得 休学期間合計: 0年 平成31(西暦2019)年4月1日時点における博士在学期間累計(休学期間を除く): 2年6ヶ月
研究・職歴等	<ol style="list-style-type: none"> 2017年 10月 ~ 現在 神戸大学大学院理学研究科 学術研究員 日本学術振興会特別研究員採用歴 D C 無 P D 無 R P D 無
学歴、 博士の状況、 研究・職歴等別紙: 無	

申請者登録名 伊藤 博士

P D

大学院在学当時の所属機関と受入研究機関との関係		他大学等		
博士の特記事項の有無	該当しない			
	(博士の特記事項)			
出身大学院の研究指導者	(フリガナ)氏名	カワイ ヒデユキ 河合 秀幸	職名	准教授
	研究者番号	60214590		
	所属機関	千葉大学(12501)		
	部局	理学(系)(0044)	部局種別	研究科
現在の受入研究者	(フリガナ)氏名	タケウチ ヤスオ 竹内 康雄	職名	教授
	研究者番号	60272522		
	所属機関	神戸大学(14501)		
	部局	理学(系)(0044)	部局種別	研究科
採用後の受入研究者	(フリガナ)氏名	ミハラ モトツグ 三原 基嗣	職名	助教
	研究者番号	60294154		
	所属機関	大阪大学(14401)		
	部局	理学(系)(0044)	部局種別	研究科
	連絡先	mihara@phys.sci.osaka-u.ac.jp		
申請者受入部局正式名	理学研究科			
①評価書作成者1	(フリガナ)氏名	ミハラ モトツグ 三原 基嗣	職名	助教
	所属機関	大阪大学(14401)		
	部局	理学(系)(0044)	部局種別	研究科
	連絡先	mihara@phys.sci.osaka-u.ac.jp		
②評価書作成者2	(フリガナ)氏名	イマザト ジュン 今里 純	職名	名誉教授
	所属機関	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(82118)		
	部局	名誉教授(9999)	部局種別	名誉教授
	連絡先	imazato@post.kek.jp		

申請者登録名 伊藤 博士

P D

2. 【現在までの研究状況】(図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。様式の変更・追加は不可(以下同様))

- ① これまでの研究の背景、問題点、解決策、研究目的、研究方法、特色と独創的な点について当該分野の重要文献を挙げて記述してください。
- ② 申請者のこれまでの研究経過及び得られた結果について整理し、①で記載したことと関連づけて説明してください。その際、博士課程在学中の研究内容が分かるように記載してください。申請内容ファイルの「4. 【研究成果等】」欄に記載した論文、学会発表等を引用する場合には、同欄の番号を記載するとともに、申請者が担当した部分を明らかにして記述してください。

① 【背景・問題点】

素粒子標準模型(SM)は、様々な素粒子実験によって繰り返し検証されてきたが、未だ綻びは見えていない。その一方、宇宙の反粒子消滅問題、暗黒物質の存在などの SM では説明できない課題を残しており、SM を超えた新しい物理の存在を示唆している。そこで本研究は、荷電 K^+ 中間子の二つの崩壊 $K^+ \rightarrow e^+\nu(K_{e2})$ と $K^+ \rightarrow \mu^+\nu(K_{\mu2})$ 分岐比の比(R_K)を高精度で測定し、レプトン普遍性(LFU)の破れを探索することを目的とする。LFU は標準模型(SM)の根幹を構成する考え方で、観測した R_K と理論計算との差異は、SM を超えた新しい物理の存在を意味する。この研究の特徴は、 K^+ 崩壊におけるハドロン不定性がキャンセルされ、

$$R_K^{SM} = \frac{\Gamma(K_{e2}) + \Gamma(K_{e2\gamma}(IB))}{\Gamma(K_{\mu2}) + \Gamma(K_{\mu2\gamma}(IB))} = \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2}\right)^2$$

と質量のみで記述できるため、標準理論による精密な理論計算

($\delta R_K^{SM}/R_K^{SM} = 0.04\%$) [1] が可能なことにある。 R_K 測定値が SM の不確定を逸脱して得られた場合、SM を超える物理からの寄与を観測できる。 R_K 測定的重要性は古くから認識され、CERN (NA62)、Frascati (KLOE) など世界の主要な加速器施設で実験が行われてきた[2, 3]。最新かつ最も高精度の結果は NA62 ($\delta R_K/R_K = 0.5\%$) [2] だが、標準模型との有意な差異を見つけることは出来ていない。

【解決策・研究目的】

これらの背景を受けて、J-PARC E36 グループは大強度陽子加速器施設を用いて R_K 精密測定を実施した(J-PARC E36 実験)。この研究では、 K^+ ビームを標的に止めその崩壊を観測する静止 K^+ 法の採用が、従来の方法とは大きく異なる。図 1 に E36 検出器の横断面の概略図を示す。実験手法は、2 体崩壊で発生した単色 247 MeV/c (e^+)と 236 MeV/c (μ^+)のピーク数を検出器のアクセプタンスで補正することで R_K を導く。本研究の最重要課題は γ 線を伴う $K^+ \rightarrow l^+\nu\gamma(K_{l2\gamma})$ 崩壊の取り扱いである。この崩壊過程は内部制動放射(IB)と構造依存崩壊(SD)に分類されるが、SD は上述の K_{l2} 由来ではないため R_K 決定からは取り除く必要がある。また、 $K_{e2\gamma}(SD)$ の崩壊分岐比は K_{e2} と同程度であるため、最も注意を要するバックグラウンドになる。放出された γ 線は K^+ 静止装置を取り囲む CsI(Tl)カロリメータで検出される。しかし、カロリメータには荷電粒子が通過する穴が必要であり、 γ がこの穴から抜けた $K_{e2\gamma}(SD)$ 事象は K_{e2} と原理的に区別することができず、 R_K の過大評価につながってしまう。図 2 にスペクトロメータで観測された e^+ とモンテカルロ(MC)数値計算で推定した K_{e2} 、 $K_{e2\gamma}(SD)$ 、 $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+\nu(K_{e3})$ の運動量分布を示す。運動量分布の再現のためには $K_{e2\gamma}(SD)$ 事象が必要であり、バックグラウンドとしての混入が認識される。

【研究方法と独創的な点】

そこで R_K 補正のために $K_{e2\gamma}(SD)$ 事象を詳しく理解する必要がある。これを実現するために、後の②研究経過に (A)CsI(Tl)出力波形信号のモデル関数決定、(B) $K_{\mu2}$ 崩壊を用いたエネルギー較正、(C) $K \rightarrow \pi^+\pi^0(K_{\pi2})$ 崩壊を用いた全体の性能評価、(D) $K_{e2\gamma}(SD)$ の形状因子決定、の順番でそれぞれ解析をまとめる。これら一連の研究によって $K_{e2\gamma}(SD)$ 量が正しく把握されることになる。

本研究の独創的な点は、K 静止系で全ての物理量を観測出来ることである。運動量分布や角度分布が様々な崩壊過程を解析する上で重要になるが、相対論ブーストせずに測定できる。すなわち、 K^+ の運動量測定をする必要が無いため、運動

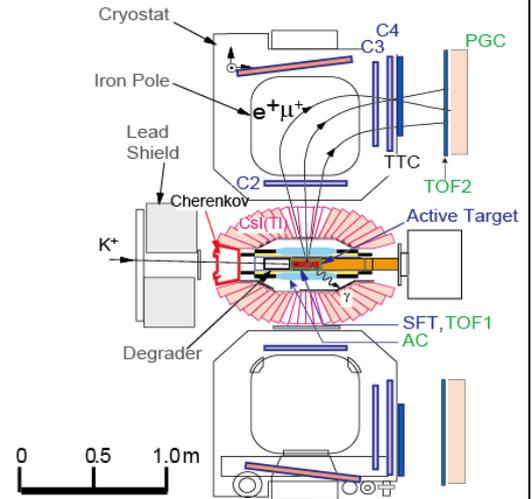


図 1. J-PARC E36 実験検出器の概略

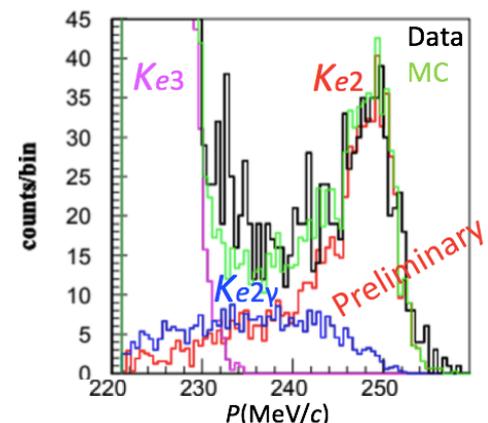


図 2. e^+ 運動量スペクトラム。

(現在までの研究状況の続き)

学的な測定分解能力が大きく向上することになる。

②【研究経過】

(A) CsI(Tl)出力波形信号のモデル関数決定

CsI(Tl)カロリメータは K^+ ビームに近い位置に設置されているため、ビームハローが作り出す雑音は測定精度を悪化する問題があった。この雑音を除去するために、flash ADC による波形データを収集し、その構造を細かく分析する手法を採用した。この解析で最も重要な CsI(Tl)カロリメータの測定波形を再現するモデルを開発し、図 3(a)に示すようなパイルアップ補正を成功させた。具体的には、図 3(b)に黒線をデータと単一波形フィット関数の差分 dh として示すが、 dh 最大値の時刻に 2nd 波形があるとして pileup fitting を施行する。

(B) $K_{\mu 2}$ 崩壊を用いたエネルギー較正と時間較正

個々の CsI(Tl)モジュールのエネルギー較正は、 $K_{\mu 2}$ 崩壊で発生したミュオンを利用した。ミュオンが結晶内で静止/崩壊することで e^+ が放射されると二重波形が観測される(μ - e chain)。すなわち上述のパイルアップ解析の応用によって μ - e chain を抜き出し、153 MeV の $K_{\mu 2}$ ピークの S/N 比を約 10 倍改善することに成功した。結果として、エネルギー分解能は 2.6% (σ)、時間分解能は 9 ns (σ)と評価された。また宇宙線ミュオンを用いた μ - e chain 観測で、53 MeV のエンドポイントを利用した新しい較正方法の開発に成功した。(業績 12, 20, 21)。

(C) $K \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ($K_{\pi 2}$)崩壊を用いた全体の性能評価

GEANT4 シミュレーションコードを整備し、実験結果の数値計算による再現性を検証した。図 4 に $K_{\pi 2}$ 崩壊事象における(a) CsI(Tl)カロリメータで検出された 2γ の角度分布、(b) エネルギー $E_{\gamma\gamma}$ 、(c) 2つの γ 線の普遍質量 M_{π^0} 分布、(d) π^0 と π^+ の角度分布を示す。これらの比較から MC は実験をよく再現していることを示せた(業績 19)。

(D) $K_{e 2\gamma}$ (SD)の形状因子決定

図 2 に示す $K_{e 2\gamma} + K_{e 2\gamma}$ 領域において γ が CsI(Tl)に記録された事象を抜き出し、角度領域 $\cos\theta_{e\gamma} < -0.5$ において明らかな $K_{e 2\gamma}$ (SD)崩壊事象の観測に成功した。現時点では解析の途中であるが、全データの 10% 程度の統計量で 171 ± 13 事象の $K_{e 2\gamma}$ (SD)が観測されている。図 5 に、(a) e^+ と γ の角度分布、(b) E_γ 分布、(c) K^+ から e^+ と γ の損失質量分布 $M_{e\gamma}^2$ を示す。形状因子パラメータ λ を変えて MC とデータを比較し、最もデータを再現する暫定値は $\lambda = 1.2^{+1.7}_{-1.2}$ になった。 $K_{e 2\gamma}$ (SD)の形状因子は KLOE グループ[3]が報告した $\lambda = 0.38 \pm 0.20$ に一致していて、今後の解析による更なるデータの精密化が極めて重要である。静止 K^+ を用いた $K_{e 2\gamma}$ の研究は E36 の R_K 決定に大きな寄与を与えるだけでなく、 K^+ 崩壊の中間過程から発生する輻射崩壊に関する新しい知見を与える。

[1] Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 231801. [2] Phys. Lett. B 719 (2013) 326. [3] Europ. Phys. J. C 64 (2009) 627.

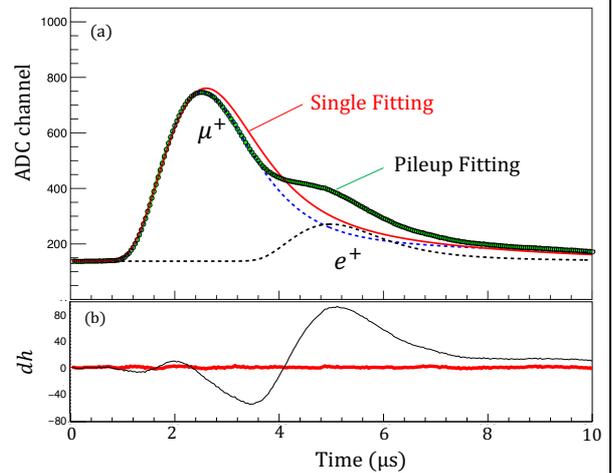


図 3. CsI(Tl)カロリメータにおけるパイルアップ波形データとフィット結果

Calorimeter cluster profile in $K_{\pi 2}$ event

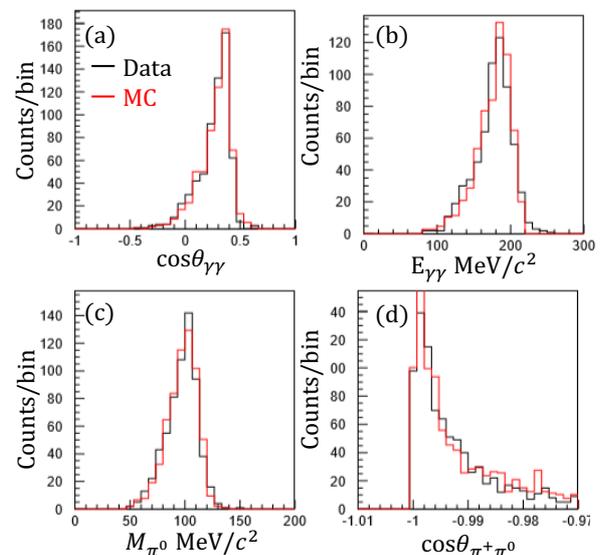


図 4. $K_{\pi 2}$ 事象における実験データと MC の比較

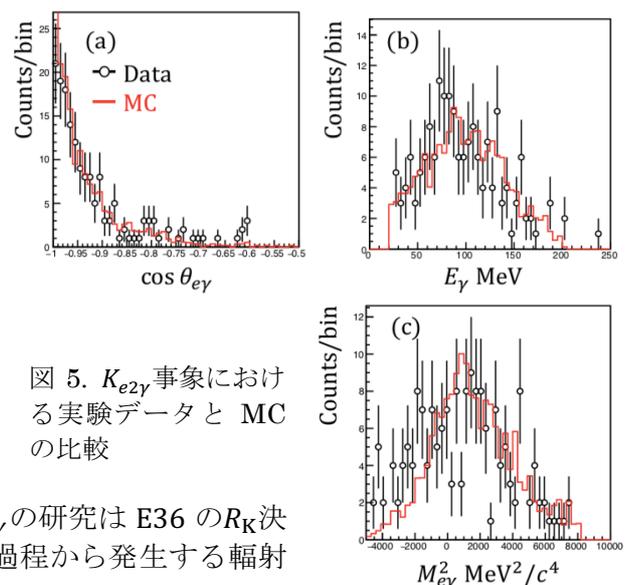


図 5. $K_{e 2\gamma}$ 事象における実験データと MC の比較

3. 【これからの研究計画】

(1) 研究の背景

2. で述べた研究状況を踏まえ、これからの研究計画の背景、問題点、解決すべき点、着想に至った経緯等について参考文献を挙げて記入してください。

背景 宇宙全体における粒子と反粒子の非対称性は、SM における CP 非対称性だけでは説明がつかず、あるエネルギー領域において、人類が知り得ていない巨大な CP 非対称性の存在が示唆されている。この背景の下、本研究では CP 非対称性と同値な時間反転対称性の破れ (T非保存) を K^+ 崩壊を用いて探索する。実験は、 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊($K_{\mu 3}$)で生成するミュオン(μ^+)の崩壊面に垂直なスピン偏極成分(横偏極、 P_T)を $\Delta P_T \sim 10^{-4}$ の精度で測定する(図 6)。 P_T はベクトル3重積で記述され、有限な P_T の存在はT非保存を意味する。SM は $P_T \sim 10^{-7}$ であるが、multi-Higgs 二重項模型、レプトクォーク、超対称性粒子などのSM を超える物理では $P_T \sim 10^{-4}$ から 10^{-3} と予想されている[4, 5]。

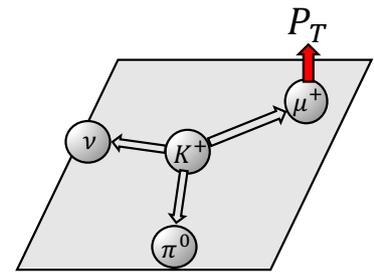


図 6. $K_{\mu 3}$ での崩壊面と P_T の向き

問題点 世界記録は KEK-E246 実験が報告した $P_T = (-1.7 \pm 2.3 \pm 1.1) \times 10^{-3}$ である[6]。従来の測定方法では荷電粒子とガンマ線を別々の検出器系で測定するため、原理的に検出効率を大きくすることが不可能であった。

解決すべき点・着想に至った経緯 本研究では μ^+ の運動量、 μ^+ の偏極度、 π^0 の運動量を同一の電磁カロリメータで測定することで検出効率を飛躍的に向上させる。その一方で、 μ^+ の偏極度を保持するカロリメータ物質の開発が必要不可欠となる。研究のアイデアは、J-PARC E36 実験において、CsI(Tl)結晶中に静止した μ^+ と μ^+ 崩壊で発生した陽電子を波形解析したことで、 μ^+ の偏極度を測定できることの着想に至った。

[4] Phys. Rev. 109 (1958) 980. [5] Phys. Rev. D 44 (1991) 2038. [6] Phys. Rev. D 93 (2004) 131601.

(2) 研究目的・内容 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください)

- ① 研究目的、研究方法、研究内容について記述してください。
- ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、具体的に記入してください。
- ③ 共同研究の場合には、申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ④ 研究計画の期間中に異なった研究機関(外国の研究機関等を含む)において研究に従事することを予定している場合はその旨を記載してください。

① 【研究目的・研究方法・研究内容】

本研究の目的は世界最高感度 $\delta P_T \sim 10^{-4}$ の精度測定による新物理検証である。そのために、申請者は新型電磁カロリメータを実装した静止 K^+ 法による次世代の時間反転対称性の破れ探索を計画している。従来の実験ではカロリメータに穴を作り、そこから抜け出てくる荷電粒子を磁気分析する手法が採用されたが、これでは検出効率が小さくなる。本研究では、ミュオンの運動量と偏極度と π^0 を同一のカロリメータで測定することが最大の特徴である。これにより、装置のアクセプタンスを1000倍に増大する。その一方で、ミュオン・スピン偏極を保持し、かつ良いエネルギー分解能と時間分解能が両立するカロリメータを開発する必要がある(性能要請は後の②(B)で記述する)。

検出器の概念図を図7に示す。ビーム実験はJ-PARCハドロン施設K1.8BRビームラインで実施する。上流にはフィッチ・チェレンコフ検出器を配置し K^+ と π^+ を識別する。標的(Target)はプラスチック・シンチレーション・ファイバーを束にして構成されているため、静止した K^+ とミュオンの飛跡がビーム軸射影として観測される。さらに、シンチレータ標的の外側を覆うスパイラル・ファイバー・トラッカー(SFT)によって、 K^+ 静止位置のビーム軸座標が決定される。さらに外側に配置された薄型シンチレーション検出器(TOF)によって荷電レプトンを検出し、データ取得のトリガーとして用いられる。更にシリカエアロゲル・チェレンコフ検出器(AC)を用いて e^+ と μ^+ を識別する。

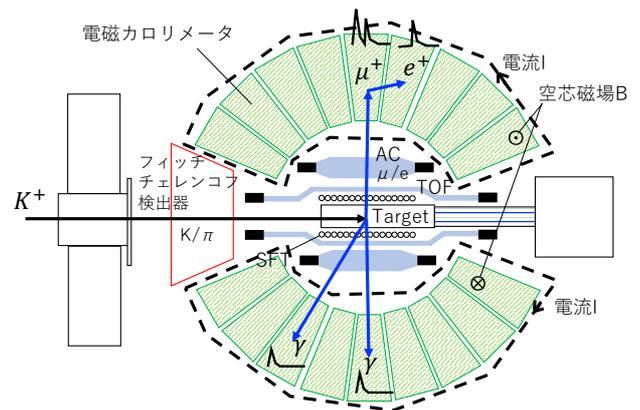


図 7. TREK 検出器の横断面概念図

申請者登録名 伊藤 博士

(研究目的・内容の続き)

π^0 の運動量ベクトルは $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊で放出される γ 線のエネルギーと方向をカロリメータで測定することで求める。同時に $K_{\mu 3}$ における μ^+ の運動エネルギーも測定されるが、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ で発生する e^+ の遅延信号があるかどうかによって γ 信号と区別することができる。さらに、遅延信号と同期したその周りのモジュールから e^+ のエネルギーと放出方向を求める(図7)。

π^0 が前方と後方に放出されるイベントで分けると P_T の向きは時計回り(N_{cw})と反時計回り(N_{ccw})に定義されることになる。すなわち、この方向へ放出される陽電子の有限な非対称度 $A = (N_{cw} - N_{ccw}) / (N_{cw} + N_{ccw})$ から P_T が導かれる。図8に示すように、ある右側の陽電子検出器は隣のモジュールから見ると左側の検出器として働く。よって、すべての検出器データを足し合わせると右回りと左回り陽電子の検出効率が等しくなる。更に π^0 が前向きと後ろ向きのイベントを選ぶことで、同一の偏極測定装置を用いて P_T の効果のみを反転させることが出来る(以下に二重比方法と記述する)。以上の方法から P_T に生じる検出効率の系統的な不確定性を大幅に減少する。またトロイダル空芯電磁石によって形成された磁場によって P_T 成分が保持される(図8)。これは、地磁気や実験室で使用されている磁性体からの磁場による減偏極を無害化するためである。

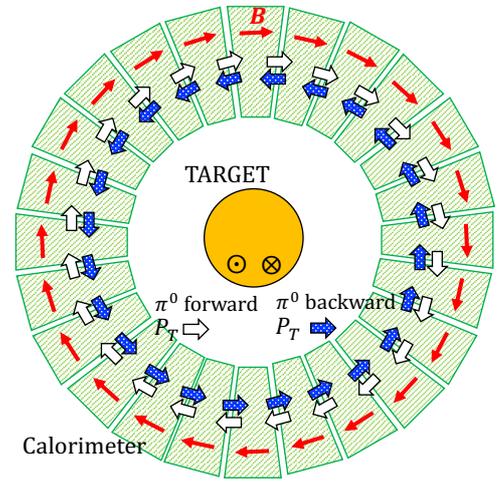


図8. π^0 向きによる P_T 反転と二重比測定法の前断面概念図。

②【どのような計画で、何をどこまで明らかにするのか】

本研究では P_T 精密測定による新物理検証のために基礎研究、試作器開発、検出器建設・性能評価、物理測定を計画している。具体的な実施項目を(A)~(C)に分けて述べる。

(A) ミュオン偏極保持する電磁カロリメータの開発

ミュオン・スピン回転(μ SR)法を用いてシンチレータ結晶のミュオン・スピン偏極保持力を調べる。セットアップは図9に示す。偏極ミュオンを結晶サンプルで静止させ、 μ^+ 崩壊後、FrontwardとBackwardの検出器にヒットした e^+ の数の差と和の比の絶対値から非対称性を評価する。1958年、Physical ReviewにてCsIは14%、 MgF_2 は59%のミュオン・スピン偏極保持が報告された[7]。一方で、アルカリフッ化物などのフッ素を含む物質内中では、 μ^+ は水素結合に似た複合体 $F:\mu^+:F$ を形成されることが知られており、 ^{19}F の核磁気モーメントによる μ SRも観測されている[8]。これらの先行研究はフッ素を含むシンチレータ結晶がミュオン・スピン偏極を高く保持する可能性を示している。そのため、申請者は CaF_2 、 BaF_2 シンチレータを中心に μ SR測定を実施する。他に候補として、 $LaBr_3$ 、 BGO 、 GSO 、 NaI 、 $LYSO$ 、 $CdWO_4$ 、 $GAGG$ 、 $La-GPS$ 、 SrI_2 なども測定する。高い偏極保持力をもつ結晶候補を絞り、光学特性を評価する。総合的に高く評価された結晶を用いてカロリメータを試作する。

試作機は図10に示す形状の1チャンネルを開発する。一つの結晶はCsI(Tl)換算で奥行10~15cm、上底面 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 、下底面 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の四角錐台に設計する。磁場中で使用するためアバランシェ・フォトダイオード(APD)を用いてシンチレーション光を読み出す。Preamplifierなどの読み出し回路を開発し、オシロスコープを用いてCRボード時定数などを適正化する。結晶表面には反射材・乱反射材を収集される光子数の位置依存性が最も小さくなるように貼り付ける。ガンマ線源、宇宙線ミュオン、 e^+ ビームテストを用いてキャリブレーションを実施し、エネルギー・時間分解能を評価して、最適化されたモジュールを開発する。

[7] Phys. Rev. 112 (1958) 580. [8] Phys. Rev. B 33, 11 (1986).

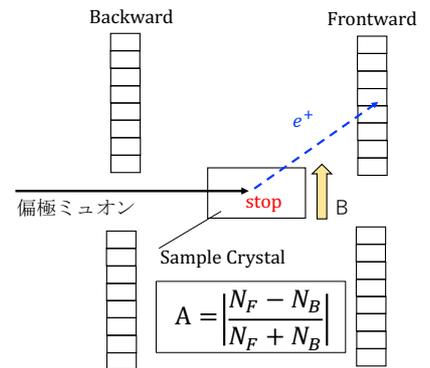


図9. μ SRによるミュオン偏極保持力測定セットアップ

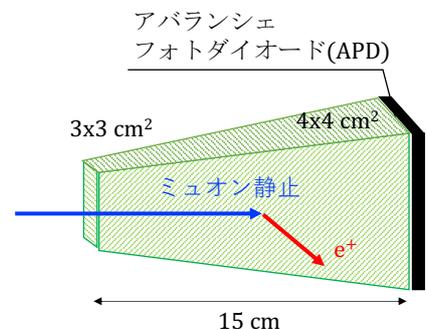


図10. 試作機モジュール形状

(B) カロリメータ+検出器群建設と性能評価

最適化されたモジュール 960 チャンネルの電磁カロリメータを作成する。全チャンネル読み出し Flash ADC による波形データ収集回路を開発する。カロリメータで静止した宇宙線ミュオンを使って、崩壊後に放射された e^+ を観測して性能評価測定を実施する。従来の CsI(Tl)カロリメータのエネルギー分解能は 153 MeV で 2~3%(σ)、時間分解能 9 ns だったが、**新たなカロリメータは 53 MeV で 1%(σ)、153 MeV で 0.5%(σ)、時間分解能 1 ns (σ)を目指す**。同時並行で空芯磁石をこのカロリメータのサイズに合わせて開発する。電磁石はシミュレーション計算で設計して、図 7 に示すようなビーム進行方向右巻きに磁場を形成する。中心部の検出器であるシンチレータ標的、TOF 検出器、SFT、AC を作成し、それぞれ宇宙線とビームで性能試験を行う。検出器全体のデータ収集回路・アルゴリズムを開発し、オンライン監視システムを実装する。検出器群は最大でも全長 1.5m、直径 1m の樽型で設計され、大阪大学で組立てる。その後、J-PARC ビームラインに検出器を移し、 K^+ ビームを用いて検出器の性能評価を実施する。

(C) 物理測定・解析 μ^+ と π^+ はどちらも遅延 e^+ 信号を生成するが、 K^+ の普遍質量法(invariant mass)によって $K_{\mu 3}$ のバックグラウンドである $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ ($K_{\pi 2}$)を識別することが可能である。静止 K^+ の 2 体崩壊事象を用いてシミュレーションにおける検出器応答を実験値と一致させる。特にカロリメータのクラスタ分布、検出効率は系統誤差に関わる重要な比較である。 P_T 決定前に $K_{\mu 3}$ 崩壊事象の形状因子パラメータ、崩壊分岐比を精密に決定する。バックグラウンドとなる $K_{\pi 2}$ 、 $K^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu\gamma$ 、 π ビームハローの影響を見積もる。検出器由来、解析カット条件、シミュレーションモデルから起因する系統誤差を見積もる。申請者は、ミュオン横偏極 P_T を世界最高精度の 10^{-4} 以下で測定し、新物理予言を検証する。

③ 【申請者の担当】

申請者は本実験の検出器開発、運転、測定実施、解析に至るまで、全ての項目で中心的に担当する。

④ 【研究機関】 結晶サンプル、試作モジュールはカナダ TRIUMF でビーム試験を実施する。J-PARC の K^+ ビームラインを使用するため、物理測定の間は茨城県東海で研究を行う。受入れ研究者の三原氏が μ SR 技術の専門家であるためカロリメータ開発は大阪大学で行う。

(3) 研究の特色・独創的な点

次の項目について記載してください。

- ① これまでの先行研究等があれば、それらと比較して、本研究の特色、着眼点、独創的な点
- ② 国内外の関連する研究の中での当該研究の位置づけ、意義
- ③ 本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

① 【特色・着眼点・独創的な点】

この検出器の特徴は内部でミュオン・スピン偏極が保持する電磁カロリメータを使用している点である。全長 1.5m、直径 1m 程度の小規模で比較的単純なジオメトリを持つ検出器設計なので、ビームラインへの装置移設・実装には時間がかからない。二重比測定法により極限まで系統的な不確定性を打ち消すことができる。 μ SR 試験による結晶選択が本研究の核となる。本研究課題は J-PARC E36 実験で培った技術の応用、そして経験から十分実現可能な計画であると考えている。

② 【位置づけ・意義】

世界で行われている P_T 測定はブルックヘブン研究所の AGS 実験と KEK の E246 実験が主に先行している。AGS は 1979 年に $K_L \rightarrow \pi^-\mu^+\nu_\mu$ ($K_{\mu 3}^0$)崩壊過程で $P_T = (1.7 \pm 5.6) \times 10^{-3}$ [9]を、1983 年に $K^+ \rightarrow \pi^0\mu^+\nu_\mu$ ($K_{\mu 3}^+$)崩壊過程で $(-3.1 \pm 5.3) \times 10^{-3}$ [10]を報告した。E246 は 2004 年に $K^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu\gamma$ ($K_{\mu 2\gamma}$)過程で $(-0.62 \pm 1.85 \pm 0.10) \times 10^{-2}$ [11]を、2004 年に $K_{\mu 3}^+$ 過程で $(-1.7 \pm 2.3 \pm 1.1) \times 10^{-3}$ [6]を報告し、現在の世界記録をマークした。 K^+ ビーム強度の遥かに高い J-PARC に移設する提案を 2006 年に行ったが(J-PARC E06)、J-PARC の将来方針と折り合いがつかず実現しなかった。E246 終了後、E06 実験の他には世界的にも P_T 実験の計画はない。本研究の目標測定精度 $\delta P_T \sim 10^{-4}$ は時間反転対称性による新物理検証できる水準である。

③ 【インパクト・将来の見通し】

近年フレーバー物理のアノマリが注目されている。B 中間子のセミレプトニック崩壊の分岐比 $R(D^{(*)})$ の平均が SM から 4σ 逸脱して観測された。このアノマリは単純な多重 Higgs 模型では説明できず、レプトクォーク模型($m_{LQ} \sim 10 \text{ TeV}/c^2$)でこれを説明する理論も研究されている。この模型では $P_T \sim 10^{-3}$ が得られると予想されている。 $\delta P_T \sim 10^{-4}$ の精度はフレーバー物理アノマリを解決する可能性を秘めている。将来この検出器をベースにさらなる改良を施し測定精度 $\delta P_T < 10^{-5}$ を目指す。

[9] Phys. Rev. D 21 (1980) 1750. [10] Phys. Rev. D 27 (1983) 1056. [11] Phys. Lett. B 562 (2003) 166.

(4) 年次計画

申請時点から採用までの準備状況を踏まえ、1～3年目について年次毎に記載してください。元の枠に収まっていれば、年次毎の配分は変更して構いません。

(申請時点から採用までの準備)

使用する結晶の選定を採用前から始める。μSR法によるサンプル試験をTRIUMFビームラインで実施し候補を絞る。ここで測定サンプルはCaF₂, BaF₂をはじめとして数種類の1cm角結晶を予定している。

(1年目)

事前に調べておいた結晶の中で、有力な候補について5cm角のサイズで詳細な偏極保持力をTRIUMFビームラインで調べる。優れた保持力を持つ結晶については光学特性も検査する。単位エネルギーあたりの発生光子数、立上り・減衰時間を光電子増倍管によって評価する。これらの検査で総合的に優れた結晶を電磁カロリメータの素材として採用し、試作にとりかかる。結晶は長さ10~15cmの四角錐台に加工し、光検出器は有効面積4cm四方のAPDを接続する。反射材・乱反射材を組合せて読み出し光子数の入射位置一様性を1%未満に抑える。性能評価ベンチテストを実施し、いくつか良い反射材の組み合わせ候補を決定する。バンクーバでのハドロン・ビームラインで試作器の性能試験を実施する。

一方、J-PARC E36実験で使用していた解析ツールとMCシミュレータを申請課題実験に向けて改良する。特に結晶におけるミュオン・スピン回転(μSR)のモデルを追加実装する。荷電K崩壊チャンネルの形状因子などパラメータはE36実験をはじめ最新のデータを用いる。検出器の応答をシミュレーションに組み込み、申請課題実験で得られる分解能、不確定性を見積もる。

(2年目)

採用された設計に基づいて960チャンネルのカロリメータを製作し、線源と宇宙線ミュオンを用いてチャンネル毎に性能評価を実施する。完成したカロリメータに合わせて空芯電磁石を開発する。ビーム方向右巻きに磁場が生成されるように設計する。AC, Target, TOF1, SFTを製作し宇宙線・ビームで性能試験を行う。960チャンネルの波形データ収集回路および検出器群全体のDAQを開発する。本実験では数MHzレベルの事象レートに耐えうる回路設計が要求される。ビームラインを想定した建設治具設計と製造、配線の確保、遠隔イベントモニター開発、MCシミュレータの改良を進める。大阪大学でカロリメータを含めた検出器群を組み立てて、宇宙線ミュオンによる性能試験を実施する。

(3年目)

J-PARCハドロン施設K1.8BRビームラインに検出器を移設する。細いKビームで検出器性能測定を実施しK静止位置の微調整、静電セパレータによるKビームの純度適正、タイミング調整、各検出器のキャリブレーションを行う。その後、 $K_{\mu 2}$, $K_{\pi 2}$, $K_{e 3}$ 崩壊事象の検出器応答データがMC計算と一致しているか検証し、検出効率を見積もる。 2γ , μ -e chainを観測して正常に $K_{\mu 3}$ 事象を測定できていることを実証する。

Kビームの強度を上げて物理測定を開始する。検出器のアクセプタンスが改善されることで、結晶の偏極保持力が100%なら1週間のビームタイムで(50%なら1ヶ月で)必要な統計量を達成できる。空芯電磁石の電流反転を繰り返し操作することでさらに系統的な不確定性を抑制できる。 $K_{\mu 3}$ と $K_{\mu 2}$ の検出事象数と検出器のアクセプタンス、検出効率から $K_{\mu 3}$ の崩壊分岐比と形状因子パラメータを決定する。事象数 10^8 を超える $K_{\mu 3}$ 崩壊を観測するため世界最高統計精度を達成できる。 $K_{\mu 3}$ 崩壊事象の遅延 e^+ のクラスタを検出して右回り・左回りの非対称度から P_T を決定する。本申請研究ではブラインド解析を採用する。この手法は1%程度に間引いたデータサンプルで決定した P_T は見ることを許すが、全事象データで決定した値は最終結論まで見ない。二重比測定法で抑制された検出効率の不確定性を評価する。他の系統誤差として、 $K_{\pi 2}$, $K_{\mu 2}$, $K_{\mu 2\gamma}$ の損失質量(missing mass)分布の浸み込み、ビームハローによるバックグラウンド、ミュオンの結晶ヒット位置依存性、解析カット条件、シミュレーションモデルから起因する不確定性を調査し見積もる。申請課題では P_T 統計精度 10^{-4} を目指す。将来的には精度 10^{-5} への向上を目指し、長期測定を実施する。

2019年

基礎研究

- ・ μSRを用いた結晶選択
- ・ 試作器開発
- ・ 性能評価
- ・ MC simulation改良：
モデルにμSRを実装
- ・ P_T 精度見積り

2020年

検出器建設

- ・ 電磁カロリメータ建設
960 ch
- ・ 空芯電磁石の開発
- ・ 検出器の建設
- ・ 高レート耐性DAQ開発
- ・ 宇宙線による性能評価

2021年

物理測定・解析

- ・ ビームラインに検出器移設
- ・ Kビームによるキャリブレーション
- ・ 物理測定(1週間~1ヶ月)
- ・ MCとの比較
- ・ 系統誤差評価
- ・ $K_{\mu 3}$ 分岐比・形状因子決定
- ・ P_T を $\sim 10^{-4}$ レベルで決定

2022年~

将来

- ・ P_T 測定の継続
 $\delta P_T \sim 10^{-5}$ を目指す

(5) 受入研究室の選定理由

採用後の受入研究室を選定した理由について、次の項目を含めて記載してください。

① 受入研究室を知ることとなったきっかけ、及び、採用後の研究実施についての打合せ状況

② 申請の研究課題を遂行するうえで、当該受入研究室で研究することのメリット、新たな発展・展開

※ 個人的に行う研究で、指導的研究者を中心とするグループが想定されない分野では、「研究室」を「研究者」と読み替えて記載してください。

研究機関移動の要件について、実質的な研究機関移動と認められるか否かは採否の重要な判断基準となります。「実質的な研究機関移動」に該当しない研究室を選定したと判断される可能性が見込まれる場合（特に以下の(ア)～(エ)に該当する場合）には、博士課程での研究の単なる継続ではなく、研究環境を変えて、新たな研究課題に挑戦するための実質的な研究機関移動であることを研究室の選定理由と関連づけて説明してください。

(ア) 申請者の出身研究室に同時期にいた研究者を受入研究者とすること。

(イ) 研究指導の委託先で研究を続けること。

(ウ) 大学院在学当時の指導者が転出し、その後継者を受入研究者とすること。

(エ) 申請書の「4. 【研究成果等】」欄に記載のある論文の共著者を新たな受入研究者としている場合において、申請書の研究計画が博士課程での研究の単なる延長と見られる恐れがあるもの。

① きっかけ、打合せ状況

申請者が参加している E36 実験の打ち合わせで大阪大学に訪問した際に受入れ研究室を知った。カロリメータ結晶の μSR 技術は本実験を遂行する上で核となる技術なので、ミュオン・スピントロニクスの専門家である三原基嗣氏に受入れ研究者を依頼した。三原氏は μSR 、不安定核の核磁気共鳴をはじめ、偏極核子ビームによる中性子電気双極子能率(EDM)の精密測定における時間反転対称性の破れ探索にも精通している。打合せについては、メールと直接会ってやりとりを行っており、本研究にも興味をもち、そして核となる新しい電磁カロリメータの開発研究に取り組んでほしいという返事を受けている。

② メリット、新たな発展・展開

本実験を成功させるためには結晶内のミュオン・スピン偏極保持が必須である。同研究室にはスピン偏極した原子核生成技術の第一人者である三原氏が所属しており、静止したミュオンのスピン偏極を保持させる結晶探索において大きなヒントが得られると期待している。さらに KEK/J-PARC や TRIUMF と繋がりが強く、素核実験を行う際の支援が充実している点も本研究を進めるうえで有利である。本実験を見据えて、J-PARC E36 実験のデータを用いた CsI(Tl)カロリメータによる 2γ と μ -e chain の観測はすでに実証している。三原氏の下で得た μSR 技術を本研究に組み込むことで時間反転対称性の破れ探索実験の技術的なブレークスルーが見込める。

(6) 人権の保護及び法令等の遵守への対応

本欄には、研究計画を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続きが必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続きが必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続きの状況も具体的に記述してください。

なお、該当しない場合には、その旨記述してください。

個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、国内外の文化遺産の調査、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験などは行わない。

申請者登録名 伊藤 博士

4. 【研究成果等】(下記の項目について申請者が中心的な役割を果たしたもののみ項目に区分して記載してください。その際、通し番号を付すこととし、該当がない項目は「なし」と記載してください。申請者にアンダーラインを付してください。論文数・学会発表等の回数が多くて記載しきれない場合には、主要なものを抜粋し、各項目の最後に「他〇報」等と記載してください。〔査読中・投稿中のものは除く〕

(1) 学術雑誌等(紀要・論文集等も含む)に発表した論文、著書(査読の有無を区分して記載してください。査読のある場合、印刷済及び採録決定済のものに限ります。)

著者(申請者を含む全員の氏名(最大20名程度)を、論文と同一の順番で記載してください)、題名、掲載誌名、発行所、巻号、pp 開始頁-最終頁、発行年をこの順で記入してください。

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説

(3) 国際会議における発表(口頭・ポスターの別、査読の有無を区分して記載してください)

著者(申請者を含む全員の氏名(最大20名程度)を、論文等と同一の順番で記載してください)、題名、発表した学会名、論文等の番号、場所、月・年を記載してください。発表者に〇印を付してください。(発表予定のものは除く。ただし、発表申し込みが受理されたものは記載しても構いません。)

(4) 国内学会・シンポジウム等における発表

(3)と同様に記載してください。

(5) 特許等(申請中、公開中、取得を明記してください。ただし、申請中のもので詳細を記述できない場合は概要のみの記述で構いません。)

(6) その他(受賞歴等)

(1) 学術雑誌等

(査読あり)

- [1] O. Mineev, S. Bianchin, M.D. Hasinoff, K. Horie, Y. Igarashi, J. Imazato, **H. Ito**, H. Kawai, S. Kodama, M. Kohl, Yu. Kudenko, S. Shimizu, M. Tabata, A. Toyoda, N. Yershov, "The design and basic performance of a Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 experiment experiment", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 847 pp. 136-141, 2017.
- [2] **Hiroshi Ito**, Soorim Han, Atsushi Kobayashi, Naomi Kaneko, Hideyuki Kawai and Makoto Tabata, "Identification of $^{90}\text{Sr}/^{40}\text{K}$ based on Cherenkov Detector for Recovery from the Fukushima Nuclear Accident", JPS Conference Proceedings, vol. 11, 070002, 2016.
- [3] Oleg Mineev, Yury Kudenko, Nikolay Yershov, Sebastien Bianchin, Michael Hasinoff, Keito Horie, Suguru Shimizu, Youichi Igarashi, Jun Imazato, Akihisa Toyoda, **Hiroshi Ito**, Hideyuki Kawai, Satoshi Kodama, Makoto Tabata, "A Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 experiment", Proceedings of Science, PoS (PhotoDet2015) 069, 2015.
- [4] **H. ITO**, S. Han, S. Iijima, H. Kawai, S. Kodama, D. Kumogoshi, K. Mase, M. Tabata, "Development of Multipurpose Aerogel Cherenkov Counter", Proceedings of Science, Pos (TIPP2014) 325, 2014.
- [5] **H. ITO**, S. Han, S. Iijima, H. Kawai, S. Kodama, D. Kumogoshi, K. Mase, M. Tabata, "Development of real time ^{90}Sr counter applying Cherenkov light detection", Proceedings of Science, Pos (TIPP2014) 242, 2014.
- [6] Makoto Tabata, Sebastien Bianchin, Michael D. Hasinoff, Robert S. Henderson, Keito Horie, Youichi Igarashi, Jun Imazato, **Hiroshi Ito**, Alexander Ivashkin, Hideyuki Kawai, Yury Kudenko, Oleg Mineev, Suguru Shimizu, Akihisa Toyoda, Hirohito Yamazaki, "Assembly and bench testing of a spiral fiber tracker for the J-PARC TREK/E36 experiment", JPS Conference Proceedings, vol. 8, 024001, 2014.
- [7] Makoto Tabata, Keito Horie, Youichi Igarashi, Jun Imazato, **Hiroshi Ito**, Alexander Ivashkin, Hideyuki Kawai, Yury Kudenko, Oleg Mineev, Suguru Shimizu, Akihisa Toyoda, Hirohito Yamazaki, "Progress in developing a spiral fiber tracker for the J-PARC E36 experiment", Proceedings of Science, Pos (TIPP2014) 328, 2014.

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説

なし

(3) 国際会議における発表

(口頭・査読あり)

- [8] **Hiroshi Ito**, Soorim Han, Atsushi Kobayashi, Naomi Kaneko, Hideyuki Kawai, Makoto Tabata, "Identification of $^{90}\text{Sr}/^{40}\text{K}$ based on Cherenkov Detector for Recovery from the Fukushima Nuclear Accident", iSRD2016, O9, KEK Kobayashi hall, 18-21 January 2016.
- [9] **H. Ito**, S. Han, S. Iijima, H. Kawai, S. Kodama, D. Kumogoshi, K. Mase, M. Tabata, "Development of Real time ^{90}Sr counter applying Cherenkov light detection", 3rd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2014), #242, Amsterdam, Netherlands, 2-6 June 2014.

(ポスター・査読あり)

- [10] **H. Ito**, Y. Emoto, K. Fujihara, H. Kawai, S. Kimura, T. Mizuno, "Measuring Radioactivity of ^{90}Sr based on Cherenkov Radiation in Real Time", ANIMMA 2017, No. 63, Liege, Belgium, 21 June, 2017.

申請者登録名 伊藤 博士

(研究成果等の続き)

- [11] **○H. Ito**, Y. Emoto, K. Fujihara, H. Kawai, S. Kimura, T. Mizuno, "Study and Search for Main Reason of Lung Cancers Based on Cherenkov Radiation in Environmental Radiation", ANIMMA 2017, No. 64, Liege, Belgium, 20 June, 2017.
- [12] **○H. Ito**, K. Horie, S. Kodama, H. Kawai, S. Shimizu, for E36 TREK collaboration, "Development of Versatile Calibration Method for Electro-Magnetic Calorimeters Using a Stopped Cosmic-Ray Beam", 2016 IEEE NSS MIC, N24-8, Strasbourg, France, 29 Oct. - 5 Nov., 2016.
- [13] **○H. Ito**, A. Kobayashi, H. Kawai, S. Kodama, T. Mizuno and M. Tabata, "Identification of ^{90}Sr and ^{40}K based on Cherenkov Radiation at Lower Background Suppressed Cosmic Rays", 2016 IEEE NSS MIC, N08-22, Strasbourg, France, 29 Oct. - 5 Nov., 2016.
- [14] **○Hiroshi ITO**, Soorim Han, Naomi Kaneko, Hideyuki Kawai, Satoshi Kodama, Atsushi Kobayashi, Makoto Tabata, Real-time ^{90}Sr Counter, Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications 2015, #222, Lisbon Congress Center, 20-24 April 2015.
- [15] **○H. ITO**, S. Han, S. Iijima, H. Kawai, S. Kodama, D. Kumogoshi, "Development of 3D-PET detector with Wavelength shifting fiber", IEEE NSS MIC, M11-16m, Washington State Convention Center · Seattle, WA USA, 8-15 November, 2014.
- [16] **○H. ITO**, S. Han, S. Iijima, H. Kawai, S. Kodama, D. Kumogoshi, K. Mase, M. Tabata, "Development of Multipurpose Aerogel Cherenkov Counter", 3rd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2014), #325, Amsterdam, Netherlands, 2-6 June 2014.
- [17] **○H. ITO**, S. Han, S. Iijima, H. Kawai, S. Kodama, D. Kumogoshi, K. Mase, M. Tabata, "Production and Performance Measurement of Multipurpose Silica Aerogel Cherenkov Counter", IEEE NSS MIC, NPO01-94, Seoul Korea, 29 November, 2013.

他 26 報

(4) 国内学会・シンポジウム等における発表

(口頭、査読なし)

- [18] **○伊藤博士**, 竹内康雄, 中野佑樹, 田阪茂樹, 関谷洋之, 竹田敦, 伏見賢一, "神岡地下実験で用いられる低放射能部材に関する放射能データベースの開発(3)", 第 73 回日本物理学会年次大会, 25pK401-9, 東京大学, 2018 年 3 月 25 日.
- [19] **○伊藤博士**, 堀江圭都, 五十嵐洋一, 今里純, 河合秀幸, 清水俊, for E36 TREK collaboration, "J-PARC E36 実験のための背景事象 $K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ の研究", 日本物理学会 2017 年秋季大会, 12aU11-3, 2017 年 9 月 12 日.
- [20] **○伊藤博士**, 堀江圭都, 五十嵐洋一, 今里純, 河合秀幸, 児玉諭士, 清水俊, for E36 TREK collaboration, "J-PARC E36 実験: $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu_e) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験のガンマ線測定最適化の研究", 日本物理学会 第 72 回年次大会, 19PK34-7, 2017 年 3 月 19 日.
- [21] **○伊藤博士**, 堀江圭都, 五十嵐洋一, 今里純, 河合秀幸, 児玉諭士, 清水俊, 田沼良介, for E36 Collaboration, "J-PARC E36 実験用 CsI(Tl) カロリメータのエネルギー較正", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 22aSF-3, 宮崎大学, 2016 年 9 月 22 日.
- [22] **○H. Ito**, S. Kodama, H. Kawai, A. Kobayashi, T. Mizuno, and M. Tabata, "Search for Reasons of Lung Cancers by Measurement of Environmental Radiation based on Cherenkov Detection", 第 113 回日本医学物理学会学術大会, O-093, パシフィコ横浜, 2017 年 4 月 13 日.
- [23] **○伊藤博士**, 兼子奈緒見, 河合秀幸, 小林篤史, 児玉諭士, 水野貴裕, 田端誠, "リアルタイムストロンチウム 90 カウンターの低雑音化研究", 第 112 回日本医学物理学会学術大会, O-052, 沖縄コンベンションセンター, 2016 年 9 月 9 日.
- [24] **○伊藤博士**, 兼子奈緒見, 河合秀幸, 児玉諭士, 小林篤史, 田端誠, "データ収集段階における汎用性の高い粒子識別装置エアロゲルチェレンコフカウンターの開発", 第 70 回日本物理学会年次大会, 23pDL-8, 早稲田大学, 2015 年 3 月 23 日.

他 23 報

(5) 特許等

なし

(6) その他

受賞歴

- [25] **H. Ito**, Y. Emoto, K. Fujihara, H. Kawai, S. Kimura, T. Mizuno, Best Poster Award, International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) 2017, "Measuring Radioactivity of ^{90}Sr based on Cherenkov Radiation in Real Time", 30 June, 2017.
- [26] **伊藤博士**, 独立行政法人日本学生支援機構 特に優れた業績による返還免除 認定, 2015 年 6 月 30 日

申請者登録名 伊藤 博士