

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月7日現在

機関番号：82118
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22340065
 研究課題名（和文） 大強度パルス化ミューオンビームの開発によるレプトンフレーバー物理の新展開
 研究課題名（英文） Promotion of Lepton Flavor Physics by developing an intense pulsed muon beam
 研究代表者
 三原 智 (MIHARA SATOSHI)
 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：80292837

研究成果の概要（和文）：2008年度より供用運転が開始された大強度陽子加速器施設（J-PARC）において、高純度大強度パルス化ミューオン源の開発を推進し、素粒子物理学の新たな領域を開拓するための基礎研究を推進した。本研究で行ったパルス化ミューオン源の開発にあたっては、隣り合う2つのパルス間にビーム粒子の漏れ出しがないことが重要である。このため、本研究では独創的な方法によるパルス形成方法の開拓とビーム診断方法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：We have promoted a development of high intensity pulsed muon beam with high purity at J-PARC, where user operation has been started in 2008. This has contributed to opening up a new research area in elementary particle physics. In this research there should be no beam particle leakage in between consecutive beam pulses. In order to address this issue we developed a new method to form a beam pulse and a method to diagnose the produced beam.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	5,700,000	1,710,000	7,410,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初はJ-PARC供用運転が開始された直後であり、ビーム利用方法に関して様々な研究内容が提案されている時期であった。研究代表者らは、J-PARCの高性能ビームを利用して高純度大強度パルス化ミューオンビームを生成することにより荷電レプトンフレーバの破れを探索する実験（ μ -e 転換事象探索実験）を行うこと提案しており、これにより素粒子の標準模型を超える新物理に

対する手がかりを得ようとしていた。この実験では、パルス化ミューオンビームの性能が実験の感度を定める重要な要因であるため、高性能ビームを実現することが重要な開発課題となっていた。

荷電レプトンフレーバの破れを探索する実験はスイス・ポールシェラー研究所にて進められているMEG実験が世界最高感度での探索を行いつつあった。J-PARCで計画されている μ -e転換事象探索実験は、これを上回る

感度で実験を行おうとするものであり、米国フェルミ国立研究所の mu2e 実験と並んで、次世代の荷電レプトンフレーバの破れを探索する実験として高い注目を集めている。

本研究が終了した現在、J-PARC での実験は大きく進展し、2013 年度からは実験施設の建設も開始されようとしている。

2. 研究の目的

J-PARC における μ -e 転換事象探索実験の早期実現をはかるため、必要なパルス化ビーム生成手法、ならびにその診断方法の開発を行い、ビーム純度向上のために必要な機器の設計を進める。パルス化ビーム生成手法と診断手法の開発にあたっては J-PARC 加速器グループとの密な関係を保ちながらこれを遂行する。また純銅向上のために必要な機器の設計を行うにあたっては、ビームライン機器の専門家の意見を取り入れながら実施する。

3. 研究の方法

パルス化ビームの生成手法、ならびにその診断方法の開発を行うにあたっては、本研究で行った実測データに加えて J-PARC 加速器グループから過去の運転で得られたデータの供給を受け、従来の手法を改善することで必要な手法を確立するというアプローチを取った。この中で、特に 3GeV ブースターからメインリングへの入射方法を改善することで高純度の一次パルス陽子ビームが得られることが判明したため、2種類の入射方法を考案し、それらを実際に試みることで、新しい手法の優位性の検証を行った。このようにして得られたパルス化ビームを本研究中に開発したビーム診断装置により診断することで、ビーム純度の評価を行った。

ビーム純度向上のために必要な機器の設計に関しては、一次パルス陽子ビームの性能を見極めた上でその仕様を決定づけるというアプローチを取った。幸いなことに、加速器から得られる陽子ビームが十分高い純度をもっていることが研究期間中に判明したため、かなり条件を緩めて設計作業を行うことができた。

4. 研究成果

プラスチックシンチレータと光電子増倍管を用いて2種類のビーム診断装置を開発した。

一方は加速器中に配置できるように高真空対応の部品を選定して製作し、広いダイナミックレンジに対応できるように高電子増倍

管とプラスチックシンチレータの間に複数の減光フィルターを配置したものである。もう一方は細分化されたプラスチックシンチレータを配置し、高いレートの二次ビームを計測することによりビーム純度を計測するためのものである。また、このような高いレートの二次ビームを計測するために、研究グループでは数秒間にわたって検出器からの信号の到達時間を計測できる TDC および FPGA による多段階スケーラーを開発し計測に備えた。前者は一次陽子ビームを直接計測できるという利点があり、後者は計測に時間がかかりながらも、加速器からの取り出しの影響も含めて診断できるという利点を持っている。

この2種類の診断装置を駆使することにより、本研究ではビーム純度向上の手法を研究した。まずは通常行われている J-PARC メインリングからの 30GeV での遅い取り出しにおいて、通常は取り出し中にはオフにされる RF 加速空洞の電圧を印加したまま保つことにより、メインリングから陽子ビームをパルス状に取り出せることを確認した。この際、細分化プラスチックシンチレータモニターによりビーム純度を測定したところ、この段階で、 10^{-7} オーダーの純度が得られていることが判明した。また、これにより、本研究で開発した診断装置が十分な性能を持っていることも証明できた。

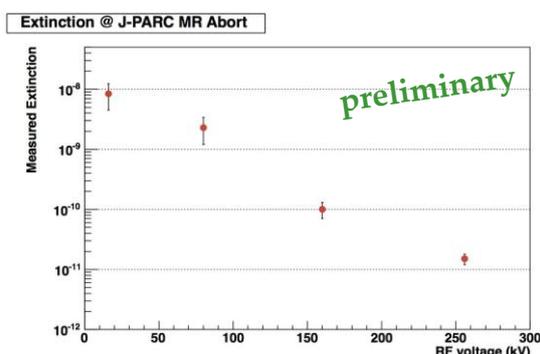
ここで、ビーム純度がこのオーダーであることの原因として、メインリングへの陽子ビーム入射時にビーム中に既に残留している漏れ陽子が原因であることが、他の計測により判明していた。このため、研究の重点を入射方法の最適化により純度向上を測ることに移し、その後の研究を継続した。

μ -e 転換事象探索実験を行うためには、一次陽子ビームの時間構造を原子核中に捕獲されたミューオンの寿命程度にする必要がある。このため J-PARC では9つある加速バケツの全てに陽子を詰めることはせずに、1つおきにつめることでこれを実現する。ただし、この際問題となるのが、陽子が詰められていない加速バケツ（空バケツ）に陽子が漏れ込んだ場合、直ちにビーム純度が悪化する点にあり、このような漏れ出しを最小化する必要がある。

これを行うため、本研究では加速器グループの協力により2種類の入射方法を試みた。一方は一度入射したビームの周回後に空バケツ部分のみキッカー磁石により軌道を変更してその後加速されないようにするもの、他方は入射時のキッカー磁石の励磁のタイミ

ングをずらすことにより、空バケツ内に陽子が残存していてもメインリング内に入射されないようにするものである。

これら2つの方法を試み、早い取り出し法により陽子ビームをアポートラインに取り出し、その時間構造をアポートビームライン内に配置したビーム診断装置により計測したところ、いずれの方法も十分なビーム純度が達成できていることが判明した。ただし、入射方法としては後者のタイミングをずらして行う手法の方が単純であるため、こちらを採用してさらなる最適化を行った。特に加速が終了した後、ビームが周回している時点でのRF加速空洞の電圧とビーム純度との関係を調べたところ、電圧を周回中に250kV以上に保っておけば周回ビームのビーム純度として 2×10^{-11} 以下が達成できていることが判明した(下図)。



本研究では、この入射方法により加速したビームの取り出し後のビーム純度の計測までを行う時間的余裕はなかった。しかしながら、シミュレーションによれば、取り出し時にビーム純度を悪化させる要因はないことが判明している。この検証を行うための計測は2013年度に行うことを予定しているが、本研究で得られた結果を元に既に μ -e転換事象探索のためのビーム輸送機器の基本設計は完了しており、早期に μ -e転換事象探索実験を開始するための陽子ビームを開発するという本研究の目的は達成されたものといえるであろう。

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)

[雑誌論文] (計2件)

- ① K. Yoshimura, Y. Hori, Y. Sato, M. Shimamoto, Y. Takeda, M. Uota (KEK, Ibaraki), Y. Hashimoto (J-PARC, KEK & JAEA, Ibaraki-ken), Y. Igarashi, S. Mihara, H. Nishiguchi (KEK, Tsukuba), M.

Aoki, S. Hikida, H. Nakai (Osaka University, Osaka), New measurements of proton beam extinction at J-PARC, Proceedings of IPAC2011, p1242, 2011 (査読無し)

- ② K. Yoshimura, Y. Hashimoto, Y. Hori, Y. Sato, M. Shimamoto, Y. Takeda, M. Uota, Y. Igarashi, H. Nishiguchi, S. Mihara, Measurement of proton beam extinction at J-PARC, Proceedings of IPAC2010, p984, 2010 (査読無し)

[学会発表] (計8件)

- ① 三原智 Lepton Flavor Violation Experiments at J-PARC KEK Flavor Factory Workshop 2013年3月

- ② 三原智 MEG and COMET 韓国物理学会 2012年10月

- ③ 三原智 大強度パルス陽子ビームを用いた μ -e転換事象探索計画 日本物理学会 2012年9月

- ④ K. Yoshimura, Y. Hori, Y. Sato, M. Shimamoto, Y. Takeda, M. Uota (KEK, Ibaraki), Y. Hashimoto (J-PARC, KEK & JAEA, Ibaraki-ken), Y. Igarashi, S. Mihara, H. Nishiguchi (KEK, Tsukuba), M. Aoki, S. Hikida, H. Nakai (Osaka University, Osaka), New measurements of proton beam extinction at J-PARC, IPAC2011, September 2011, San Sebastian Spain

- ⑤ 吉村浩司, 橋本義徳, 堀洋一郎, 嶋本眞幸, 三原智, 佐藤吉博, 武田泰弘, 魚田雅彦, 西口創, 五十嵐洋一, 仲井裕紀, 青木正治, COMET実験のためのJ-PARC 50 GeV PSにおけるビームエクステンションの測定、日本物理学会 2011年3月

- ⑥ 仲井裕紀, 西口創, 三原智, 吉村浩司, 青木正治, 久野良孝, 佐藤朗, 富澤正人, 他 COMET実験のためのパルス陽子ビームの研究、日本物理学会 2011年3月

- ⑦ S. Mihara, Muon Physics Program at J-PARC, PSI2010, October 2010, PSI Switzerland

- ⑧ K. Yoshimura, Y. Hashimoto, Y. Hori, Y. Sato, M. Shimamoto, Y. Takeda, M. Uota, Y.

Igarashi, H. Nishiguchi, S. Mihara,
Measurement of proton beam extinction
at J-PARC, IPAC2010, May 2010 Kyoto
Japan

[その他]

ホームページ等

<http://comet.kek.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三原 智 (MIHARA SATOSHI)

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：80292837

(2) 研究分担者

西口 創 (NISHIGUCHI HAJIME)

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・助教
研究者番号：10534810

(3) 連携研究者

青木 正治 (AOKI MASAHARU)

大阪大学・理学研究科・教授
研究者番号：80290849

吉村 浩司 (YOSHIMURA KOJI)

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：50272464