

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月22日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03987

研究課題名(和文)異常磁気能率精密測定のためのミュオン加速実証研究

研究課題名(英文) Muon acceleration for measurement of anomalous magnetic moment

研究代表者

近藤 恭弘 (Kondo, Yasuhiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・副主任研究員

研究者番号：40354740

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ミュオン異常磁気モーメント(ミュオン $g-2$ )及び電気双極子モーメント精密測定実験のためのミュオンリニアックのうち、最も重要な初段加速器である高周波四重極加速空洞(RFQ)によるミュオン加速を実証した。この成果は、世界初のRF加速器によるミュオン加速である。また、高い時間分解能をもつマイクロチャンネルプレートによる加速されたミュオンの時間構造の測定に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果のミュオン加速の実証は、低エミッタンスミュオンビーム実現への第一歩であり、この開発をさらに進めていくことでミュオン異常磁気モーメントの精密測定を実現し、標準理論を超えた新たな物理の探索を通して素粒子物理学にブレークスルーをもたらすことが期待される。また、本研究の成果は、電子以外のフレーバーのレプトンが高周波加速される世界初の事例であり、本研究は、軽い陽子からウランのような重い元素、不安定核や反陽子にまで応用範囲を広げてきたRFQの歴史に、ミュオン加速という新たな1項を加えるという大きなインパクトを与えた。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated the world first muon acceleration using a radio frequency linac. We are planning to measure the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment, and the used RFQ linac is the frontend of this muon linac. We also succeeded in measuring the time structure of the accelerated muon beam using a high time-resolution micro channel plate.

研究分野：加速器科学

キーワード：RFQ 超低速ミュオン 加速 ミュオン異常磁気モーメント リニアック 負ミュオンウム生成 高周波 MCP 低エミッタンスミュオンビーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) でのミュオン異常磁気能率 (g-2) 測定により、標準理論の予言と 3.4 の差異があることが示され、新しい物理を示唆するものとして注目されている (図1)。

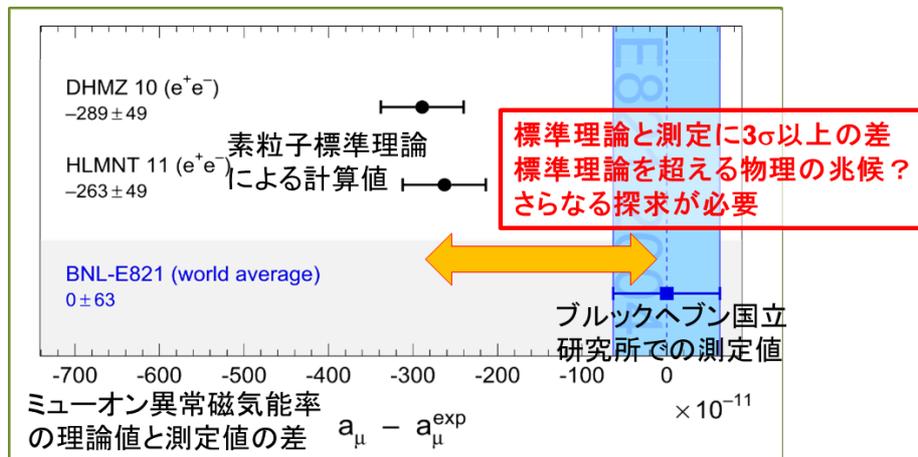


図1. BNL での実験で示されたミュオン異常磁気モーメントの標準理論との差異

これをさらに探究するため、これまでとはまったく異なる実験手法での、測定精度を上げた実験が切望されており、我々は大強度陽子加速器施設 J-PARC のミュオン施設に於いて新たな実験 (E34) を計画している [雑誌論文]。従来の実験では、パイオン崩壊で生成したエミッタンスの大きいミュオンビームを利用していたため、測定系に収束電場が必須であり、これが系統誤差の一つの大きな要因であった。また、この電場の測定値への影響を相殺するため、特定の運動量 (魔法運動量) での測定が必要であり、大きな蓄積リングを必要とした。これに対し、新しい実験では横方向運動量の極端に小さいビームを用いて、系統誤差の要因である収束電場を排除し、魔法運動量の束縛から解放する。これにより、コンパクトで精密な測定装置が可能となる。このような改善により、BNL での g-2 の測定精度 0.54 ppm から 0.1 ppm に改善することを目標としている。収束無しで、測定に必要な時間測定系内にビームを留めておくため、横方向運動量がビーム進行方向の  $10^{-5}$  以下であることが要求される。これを実現するため我々は、極冷ミュオン (3 keV/c) をリニアックによって、横方向運動量は極力元の値を保ちつつ (=エミッタンス増大を抑制して) 300 MeV/c まで加速する方法を採る。ミュオンリニアックは、陽子リニアック同様に が 1 に近づくまで最適な加速構造が変わって行くため、図 2 に示すように、複雑で大規模なものとなる。

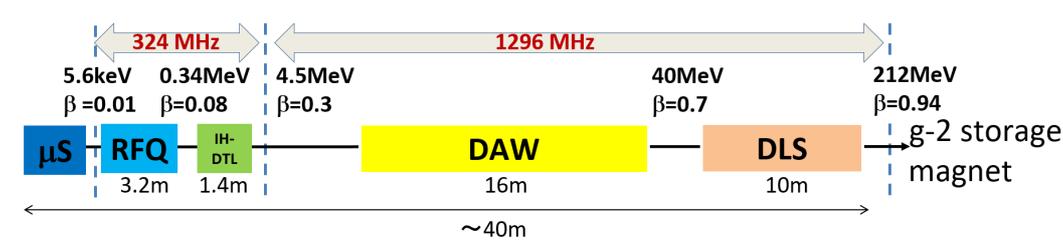


図2. ミュオンリニアック概要

このようなりニアックでは、ビーム電流やエミッタンス等ビームの基本的な性質が初段加速までの時点でほぼ決まってしまうため、まず初段部のビーム加速試験を行い性能を検証することは計画の遂行上不可欠なステップである。陽子リニアックにおいて初段加速部が鍵となる理由は、高い透過率とエミッタンス増大の抑制を高度に両立したビームのバンチング・加速が必要だからであり、我々のミュオンリニアックにおいても同様である。現代の陽子リニアックにおいては、高効率バンチングを行うために高周波四重極リニアック (RFQ) が用いられる。ミュオンリニアック実現のためには、この RFQ を用いたミュオン加速の実証が不可欠であった。私はこれまでに、J-PARC 加速器の大強度化に必要な RFQ を設計・製作し、その性能をビーム試験で実証した。この研究開発の一環として、製作方法を確立するための R&D 機を開発したが、この RFQ を使うことで、ミュオンリニアック実現に不可欠な、世界初となるミュオン加速を最小限のコストで速やかに行えることに着目した。ミュオン加速実証に成功すれば、標準理論を超える物理の探索に必要なミュオンリニアックの実現に向け大きく前進出来ることになる。

## 2. 研究の目的

本研究では、図3に示すように、世界初の、RFQによるミュオン加速を実証することを目的とする。

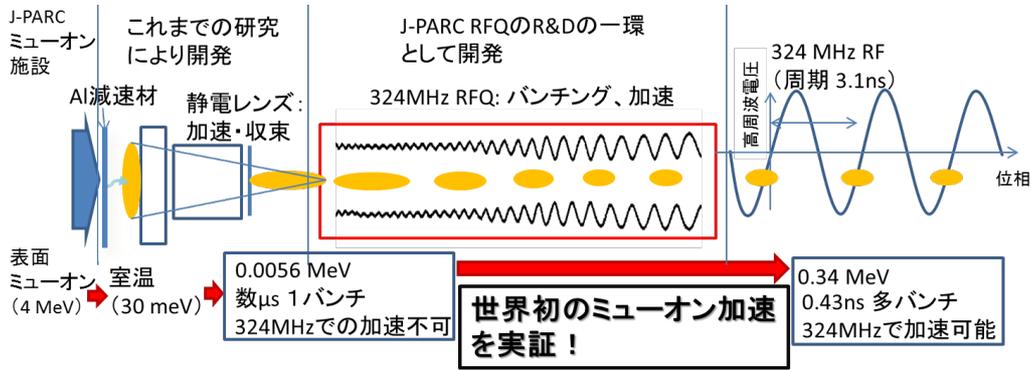


図3. 本研究で実証するミュオン加速

E34の特色は、低エミッタンスのミュオンリニアックを用いることで、ミュオン g-2 の測定から、従来不可避とされていた魔法運動量の束縛を排除し、高い測定精度を達成可能にする点である。このようなミュオンリニアックは、世界最高のパルスミュオン強度を誇るJ-PARC ミュオン施設をもって初めて可能となる。我々の開発した、負水素イオン用として世界最大強度のRFQは、その大強度を最上流端で支える重要な技術要素であり、その技術を直接応用し、自らの手で開発に貢献した加速器を最下流での実験装置として用いることにより素粒子物理学を進展させようとしている点が本研究の特色の一つである。また、これまでの研究成果による試験用ミュオン源と、既存のRFQを組み合わせるため、加速実験に必要な費用が非常に少なく済むにもかかわらず、世界初のミュオン加速というインパクト絶大な成果が期待され、費用対効果の非常に高い研究であると言える。

## 3. 研究の方法

図4に、本研究で行ったミュオン加速実験のセットアップを示す。

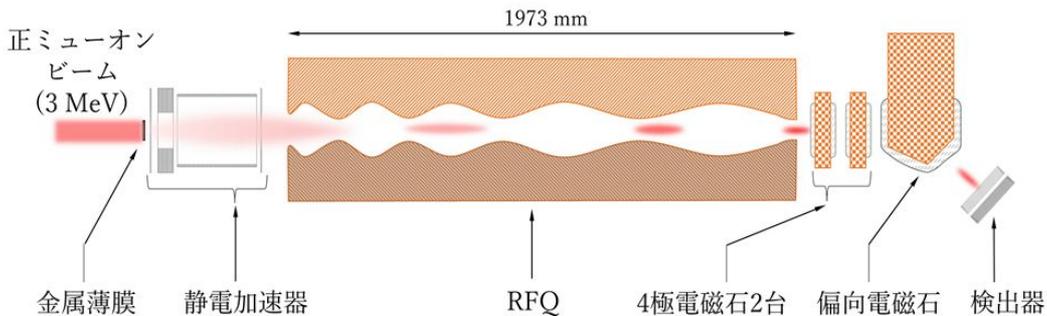


図4. ミュオン加速実験のセットアップ

J-PARC ミュオン施設からの3 MeV正ミュオンビームを金属薄膜中に停止させることで、負ミュオニウム ( $\text{Mu}^-$ ) と呼ばれる、正ミュオンに電子が2つ束縛されたイオンが得られる。ここで負ミュオニウムを加速実験に用いるのは、電子を捕獲する過程の反応断面積が、正ミュオンのエネルギーが低いほど高いため、ゼロエネルギーにピークを持つ収量分布が得られるからである。これを静電加速器で、RFQの入射エネルギーである5.6 keVで加速することで、RFQで効率よく捕獲出来るようになる。また、入射の正ミュオンから加速された負ミュオニウムだけを変更電磁石で容易に分離できるためでもある。静電加速器で5.6 keVまで加速して取り出した  $\text{Mu}^-$  をRFQに入射してさらに89 keVまで加速する。最終的には四極電磁石2台と偏向電磁石によって検出器まで輸送し、標的からの飛行時間を計測する。本試験で用いたRFQは本来H<sup>-</sup>用に設計されており、このRFQでミュオンを加速するには入射の粒子の速度を合わせて投入電力を粒子の質量の2乗でスケールすればよい。ミュオンを加速するのに必要な投入電力は2.3 kWで、最大出力5 kWの半導体アンプからの電力を同軸ケーブルを通して供給した。

## 4. 研究成果

我々のセットアップで予想される加速されたミュオンの収量は、1秒あたり  $10^{-3}$  個程度と非常に小さいため、通常の加速器のようにビームを用いた機器の最終調整は不可能であり、J-PARC ミュオン施設に持ち込む前にオフラインでビームラインを調整する必要があった。当

初の予定では  $\text{Mu}^-$  生成標的に紫外光を照射して得られる光電子を静電加速で取り出して調整する予定だったが、飛行時間の測定から負水素イオン ( $\text{H}^-$ ) も生成されていることが分かった。これは標的表面に付着した水分などに由来した水素分子と光電子が反応して  $\text{H}^-$  が生成されていると考えられる。高々数 keV 程度の電子を数 m のビームラインに通そうと思った場合、地磁気の影響が無視できずビームラインの調整を行うのが難しい。  $\text{H}^-$  を用いることで電磁石の調整を事前に容易に行うことが出来るようになり [雑誌論文]、加速実験の成功に大きく貢献した。

このような入念な事前準備の後、平成 29 年度に、10 月 24 日から 6 日間にわたって初めてのミュオン加速実験を行った。J-PARC ミュオン施設からの 25 Hz のビームに同期してマイクロチャンネルプレート (MCP) 検出器の波形データを取得し、イベント波高を用いて崩壊陽電子バックグラウンドを除去した。加速データ取得の前に、 $\text{H}^-$  によるビームラインの調整に加えて、ビームミュオンでセットアップの較正を行った。金属薄膜に入射したビームミュオンの大部分は減速されて下流まで到達する。その中でも RFQ の加速エネルギーと等しいミュオンは電磁石の極性を反転させることで検出器まで輸送される。この突き抜けミュオンを測定し、偏向電磁石の設定値及び飛行時間分布が予想通りであることを確認した。突き抜けミュオンでセットアップの設定を確認した後、電磁石極性を反転して  $\text{Mu}^-$  の加速データを取得した。図 5 に結果を示す。

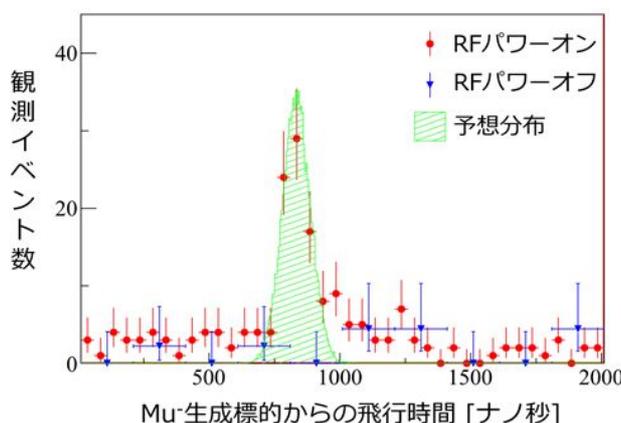


図 5 . ミュオン加速実験結果

図 5 の丸点が RFQ に RF パワーを印加した時、三角点が印加していない時の飛行時間分布である。2 つのデータを比較すると、RF パワーを印加した場合は飛行時間 830 ナノ秒で多数のイベントが観測されていることが分かる。これは RFQ で加速された  $\text{Mu}^-$  の飛行時間をシミュレーションで見積もったものと統計誤差の範囲内で一致している。観測されたイベントレート (入射ミュオンあたり  $0.5 \times 10^{-3}$ ) に関しても、シミュレーションから予想されるレートと無矛盾であった。これらのことから、世界初となる RF 加速器によるミュオン加速が成功したと結論付けられた。この結果は Physical Review Accelerator and Beams 誌に掲載され [雑誌論文]、加速器分野で世界最大の国際会議である IPAC2018 において招待講演を行った [雑誌論文]。また、素粒子実験分野で世界最大の国際会議である ICHEP2018 でも報告した [学会発表]。平成 29 年度にはもう一度ビームタイムがあり、加速されたミュオンビームの MCP プロファイルモニターを用いて横方向プロファイルを測定した [雑誌論文]。さらに、平成 30 年度には、高時間分解能 MCP 検出器を用いて、時間方向のビームプロファイルの測定にも成功した [学会発表]。これにより、ミュオンリニアック低エネルギー部におけるビーム測定手法が全て確立出来たことになる。

本研究の成果としてのミュオン加速の実証は、低エミッタンスミュオンリニアック実現への第一歩である。我々は既に後段の加速空洞の開発を進めており、本研究でのミュオン加速を実証出来たことにより、この後段の加速器に繋がる。このようにミュオンリニアックの開発を進めていくことでミュオン異常磁気モーメントの精密測定を実現し、標準理論を超えた新たな物理の探索を通して素粒子物理学にブレークスルーをもたらすことが期待される。また、本研究の成果は、電子以外のフレーバーのレプトンが高周波加速される世界初の事例であり、また、RFQ によるミュオン加速自体、世界で初であり、他に類を見ない。本研究は、軽い陽子からウランのような重い元素、不安定核や反陽子 (減速だが) にまで応用範囲を広げてきた RFQ の歴史に、ミュオン加速という新たな 1 項を加えるという大きなインパクトを与えた。ミュオン加速は、将来のミュオンコライダーやニュートリノファクトリー実現のための基盤技術となり得る。さらに、ミュオンはその透過力の高さから、様々な物性現象を探るプローブとして使用されている。ミュオン加速により、そのエネルギーを自由に制御出来ることになり、さらに応用範囲が広がることが期待される。本研究の成果は、様々な物理研究における基盤技術となり得るミュオン加速器の実現に向けた一里塚になったという重要な意義がある。

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 26 件)

M. Abe, S. Bae, G. Beer, G. Bunce, H. Choi, S. Choi, M. Chung, W. da Silva, S. Eidelman, M. Finger, Y. Fukao, T. Fukuyama, S. Haciomeroglu, K. Hasegawa, K. Hayasaka, N. Hayashizaki, H. Hisamatsu, T. Iijima, H. Iinuma, K. Inami, H. Ikeda, M. Ikeno, K. Ishida, T. Itahashi, M. Iwasaki, Y. Iwashita, Y. Iwata, R. Kadono, S. Kamal, T. Kamitani, S. Kanda, F. Kapusta, K. Kawagoe, N. Kawamura, R. Kitamura, B. Kim, Y. Kim, T. Kishishita, H. Ko, T. Kohriki, Y. Kondo, T. Kume, M. J. Lee, S. Lee, W. Lee, G. M. Marshall, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, T. Murakami, K. Nagamine, H. Nakayama, S. Nishimura, D. Nomura, T. Ogitsu, S. Ohsawa, K. Oide, Y. Oishi, S. Okada, A. Olin, Z. Omarov, M. Otani, G. Razuvaev, A. Rehman, N. Saito, N. F. Saito, K. Sasaki, O. Sasaki, N. Sato, Y. Sato, Y. K. Semertzidis, H. Sendai, Y. Shatunov, K. Shimomura, M. Shoji, B. Shwartz, P. Strasser, Y. Sue, T. Suehara, C. Sung, K. Suzuki, T. Takatomi, M. Tanaka, J. Tojo, Y. Tsutsumi, T. Uchida, K. Ueno, S. Wada, E. Won, H. Yamaguchi, T. Yamanaka, A. Yamamoto, T. Yamazaki, H. Yasuda, M. Yoshida, T. Yoshioka, “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2019, 2019, p053C02.

10.1093/ptep/ptz030

Y. Nakazawa, S. Bae, H. Choi, S. Choi, T. Iijima, H. Iinuma, N. Kawamura, R. Kitamura, B. Kim, H. S. Ko, Y. Kondo, T. Mibe, M. Otani, G. P. Razuvaev, N. Saito, Y. Sue, E. Won, T. Yamazaki, H. Yasuda, “Beam commissioning of muon beam line using negative hydrogen ions generated by ultraviolet light”, Nucl. Instr. and Meth. A, 査読有, 937, 2019, p164.

DOI:10.1016/j.nima.2019.05.043

S. Bae, H. Choi, S. Choi, Y. Fukao, K. Futatsukawa, K. Hasegawa, T. Iijima, H. Iinuma, K. Ishida, N. Kawamura, B. Kim, R. Kitamura, H. S. Ko, Y. Kondo, S. Li, T. Mibe, Y. Miyake, T. Morishita, Y. Nakazawa, M. Otani, G. P. Razuvaev, N. Saito, K. Shimomura, Y. Sue, E. Won, T. Yamazaki, “First muon acceleration using a radio-frequency accelerator”, Physical Review Accelerator and Beams, 査読有, 21, 2018, p050101.

10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101

Y. Kondo, K. Hasegawa, T. Morishita, M. Otani, Y. Fukao, K. Futatsukawa, N. Kawamura, T. Mibe, Y. Miyake, K. Shimomura, T. Yamazaki, M. Yoshida, R. Kitamura, S. Li, Y. Nakazawa, H. Iinuma, Y. Sue, T. Iijima, K. Ishida, RIKEN, N. Hayashizaki, Y. Iwashita, Y. Iwata, N. Saito, S. Bae, H. Choi, S. Choi, B. Kim, H. S. Ko, E. Won, G. P. Razuvaev, “RE-ACCELERATION OF ULTRA COLD MUON IN J-PARC MUON FACILITY”, Proc. IPAC2018, 査読無, 2018, p5041-5046.

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2018/papers/frxgbf1.pdf#search=%20domain%3Daccelconf%2Eweb%2Ecern%2Ech%20%20%2Bauthor%3A%22Y%2E%20Kondo%22%20%20url%3Aaccelconf%2Fipac2018%20FileExtension%3Dpdf%20%2Dur%3Aabstract%20%2Dur%3Aaccelconf%2Fjacobcow>

M. Otani, Y. Sue, Y. Fukao, K. Futatsukawa, N. Kawamura, T. Mibe, Y. Miyake, K. Shimomura, T. Yamazaki, T. Iijima, S. Bae, H. Choi, S. Choi, B. Kim, H. S. Ko, K. Hasegawa, Y. Kondo, T. Morishita, H. Iinuma, Y. Nakazawa, K. Ishida, R. Kitamura, S. Li, G. P. Razuvaev, N. Saito, E. Won, “Muon Profile Measurement After Acceleration with a Radio-Frequency Quadrupole Linac”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 1067, 2018, 052012.

10.1088/1742-6596/1067/5/052012

Y. Kondo, K. Hasegawa, M. Otani, T. Mibe, Y. Yoshida, R. Kitamura, “Beam dynamics design of the muon linac high-beta section”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 874, 2017, p012054.

10.1088/1742-6596/874/1/012054

R. Kitamura, M. Otani, Y. Fukao, N. Kawamura, T. Mibe, Y. Miyake, K. Shimomura, Y. Kondo, K. Hasegawa, S. Bae, B. Kim, G. Razuvaev, H. Iinuma, K. Ishida, N. Saito, “First trial of the muon acceleration for J-PARC muon g-2/EDM experiment”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 874, 2017, p012055.

10.1088/1742-6596/874/1/012055

### [学会発表](計 11 件)

Y. Sue, T. Iijima, M. Otani, N. Kawamura, R. Kitamura, Y. Kondo, N. Naito, Y. Nakazawa, K. Hasegawa, K. Futatsukawa, T. Mibe, T. Morishita, H. Yasuda, T. Yamazaki, K. Inami, M. Yotsuzuka, “A bunch structure measurement of muons accelerated by RFQ using a longitudinal beam-profile monitor with high time Resolution”, The 4th KMI International Symposium (KMI2019), 2019.

M. Otani, Y. Kondo, R. Kitamura, Y. Nakazawa, Y. Sue, S. Bae, H. Choi, S. Choi, K.

Futatsugawa, K. Hasegawa, T. Iijima, H. Inuma, N. Kawamura, B. Kim, H.S. Ko, Sirui Li, T. Mibe, Y. Miyake, T. Morishita, G.P. Razuvaev, N. Saito, K. Shimomura, E. Won, T. Yamazaki, "First Muon RF Acceleration for the Muon g-2 Experiment at J-PARC", XXXIX International Conference on High Energy Physics (ICHEP2018), 2018.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP047.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP047.pdf)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：大谷将士

ローマ字氏名：Masashi Otani

所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

部局名：加速器研究施設

職名：助教

研究者番号（8桁）：90636416

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。