

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02904

研究課題名(和文) 超低速ミュオニウムの高効率・高密度生成

研究課題名(英文) Efficient production of ultra-slow muonium

研究代表者

三部 勉 (Mibe, Tsutomu)

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：80536938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオニウムは正ミュオンと電子から構成されるレプトン2体束縛状態である。熱エネルギーのミュオニウム(超低速ミュオニウム)の電子を剥ぎ取り加速することで超低エミッタンスミュオンビームが実現できる。これは新しいミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の精密測定を可能とするが、ボトルネックは低い生成効率である。ミュオニウム生成物質として用いるシリカエアロゲルにレーザーアブレーション法で穴加工・溝加工を施し、真空中の熱ミュオニウムの生成収量を測定した。従来の懸念事項であった再現性と長期安定性、スピン偏極度の保持を確かめた。また、ミュオンビームの運動量分布の違いと収量の関係を定量的に理解した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

純粋なレプトン2体系であるミュオニウムは、理論的な不定性が少なく、素粒子標準理論を超える物理法則の研究に適しているだけでなく、ミュオンビームを一旦熱エネルギーまで減速して生成する過程を経るので、ミュオンビームを冷却する手法としても注目されている。後者は、新しい手法によるミュオン $g-2$ ・EDMの精密測定を可能とするだけでなく、透過型ミュオン顕微鏡や大規模構造のラジオグラフィなどにも応用可能な技術である。本研究で確立した室温エネルギーでのミュオニウムの生成技術は、これらに転用可能な技術である。

研究成果の概要(英文)：Muonium is a two-body leptonic bound state consisting of a positive muon and an electron. A very low emittance muon beam can be realized by eliminating an electron from an ultra slow muonium at thermal energy, followed by acceleration. This enables a new methodology for precise measurements of anomalous magnetic moment and electric dipole moment of muon. The current bottleneck is low production efficiency of thermal energy muonium. In this research, we produced muonium emitting material made of silica aerogel with holes or grooves on its surface by laser ablation. We confirmed reproducibility, long-term stability of muonium production, and spin polarization of muonium. We have reached a quantitative understanding of relation between muonium yield and incident muon momentum distribution.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ミュオン ミュオニウム 熱化 冷却 対称性  $g-2$  EDM

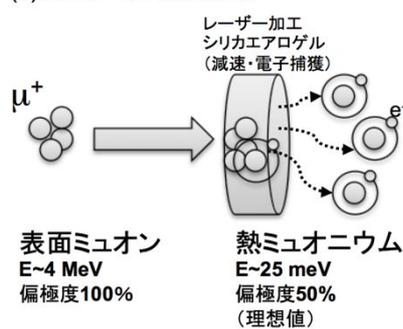
様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

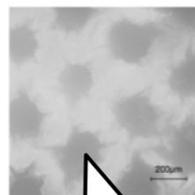
ミュオニウムは純粋にレプトン( $\mu^+e$ )から構成されるシンプルな量子系である。それゆえ、これまで精密分光による未知粒子探索、荷電レプトンフレーバーの破れの探索などに用いられている。また、ミュオニウムを用いるとエミッタンスが小さいミュオンビームを実現することができる。熱エネルギーのミュオニウム(超低速ミュオニウム)をレーザー共鳴イオン化することにより熱エネルギー程度に冷えたミュオン源が得られる。これを加速することにより極低エミッタンスミュオンビームが得られ、ミュオン g-2 や EDM を従来とは全く異なる方法で精密測定することができる。これらの研究において、超低速ミュオニウムを効率良く高密度で生成できれば、実験感度が飛躍的に向上する。さらに、これによって、稀崩壊過程による未知粒子の探索、反粒子の重力研究やボーズアインシュタイン凝縮の実現など、新しい研究への道が開ける。

超低速ミュオニウムは静止パイオン崩壊で生じる表面ミュオンビームを物質中に静止させることにより生成する(右図(a))。シリカエアロゲル中で生成したミュオニウムは間隙を拡散し、寿命(2.2~ $\mu$ s)を迎える前に境界へ達したもののみ、真空中へ放出される。これまで申請者らはシリカエアロゲルにレーザー加工を施すことにより超低速ミュオニウムを従来よりも約 10 倍高い効率で生成する方法を開発した(右図 1(b),(c))。これは表面ミュオンに対して、1.4 %程度の効率で真空中へ放出されることに対応する。

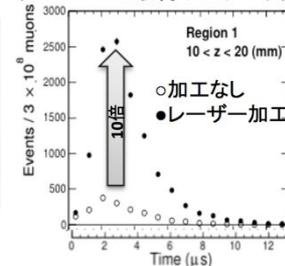
(a)ミュオニウム生成過程



(b)レーザー加工シリカエアロゲル



(c)ミュオニウム生成量の比較 (TRIUMFで取得したデータ)



新しく開発した方法

レーザー加工したシリカエアロゲルを用いることでミュオニウムの生成率が約10倍増加

2. 研究の目的

本研究では、カナダ TRIUMF 研究所の連続ミュオンビームを用いて、新しい方法でレーザー加工されたシリカエアロゲルを用いて高生成率かつ高密度の超低速ミュオニウムの生成方法を開発する。

レーザー加工を施すアイデアは、穴加工を施さない場合のミュオニウムの拡散距離(ミュオン寿命までに動く平均距離)が数 10  $\mu$ m であることに着目して、拡散距離と同程度の穴をあけ、有効的な表面積を増やすことが着眼点である。これまでの研究により、この方針が正しいことが示された。本研究では、系統的に穴形状やパターンの最適化を行うことで、どのような条件においてミュオニウムの生成収量が最大になるかを調べる。また、生成したミュオニウムのスピン偏極度の測定を行い、偏極度の減少が起きていないか調べる。

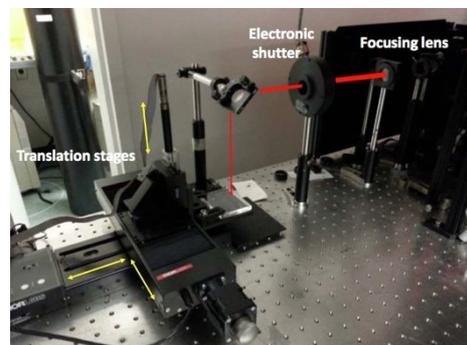
3. 研究の方法

本研究では、ミュオンビームから真空中に効率よく超低速ミュオニウムを生成する方法を開発する。シリカエアロゲルにパルスレーザーを照射して数十  $\mu$ m 程度の穴パターンを形成することで有効的な表面積の増加と超低速ミュオニウムに指向性を持たせることを試みる。

カナダ・TRIUMF の連続ミュオンビームを用いて、穴形状・パターンと生成量・密度の関係を系統的に調査する。シリカエアロゲルのレーザー加工は、同じキャンパス内にあるブリティッシュコロンビア大学のレーザー加工施設(LASIR)にて行う。データ取得とサンプル加工を同時進行で進めることにより効率化する。また、J-PARC ミュオン実験施設の運動量幅が広いパルスミュオンビームでもミュオニウム生成収量を測定し、運動量幅と収量の関係が予想通りかどうか調べる。

日本から持ち込んだ疎水性シリカエアロゲル試料(30 mg/cc, 110 mm 角, 8mm 厚)を LASIR に設置されているパルスレーザー(右上図)に組み込んで加工を実施する。先行研究では、理化学研究所でレーザー加工を行い、TRIUMF で試験していた。本研究では、レーザー加工・試験を全てカナダで実施する。また、先行研究では穴径 300  $\mu$ m 付近での加工のみであったが、本研究では穴径・ピッチ・深さをパラメータとして様々な条件で加工を行う点が新しい。

これまでの研究や予備実験により、レーザーパワー密度が 2 J/cm<sup>2</sup> 以上になるとプラズマが生じ、アブレーションによるシリカエアロゲル試料への加工が可能となる。レーザーは波長 800nm、

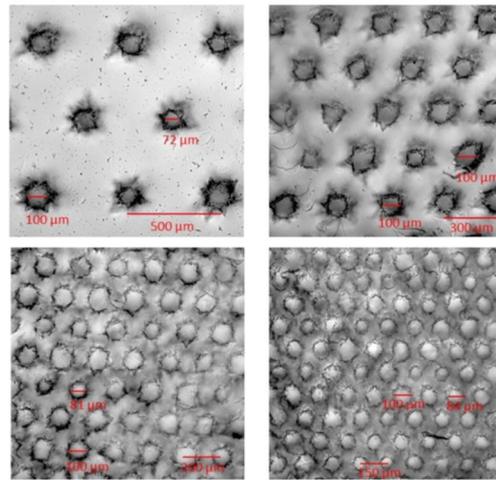


パルス幅 140 fs のものをパワー 50–300 mW の領域で使用する。収束レンズの開口数(NA)を調整することにより、プラズマの生成領域の範囲とパワー密度をコントロールする。シリカエアロゲル中に照射されたレーザーパルスによって局所的に高温となり、アブレーションによって局所的に構造を破壊し、穴を形成する。

#### 4. 研究成果

##### (1) ミュオニウム生成標的の製作

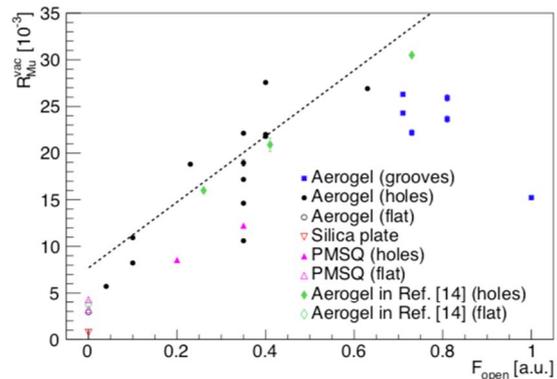
ブリティッシュコロンビア大学先端分光イメージング研究室(LASIR)において、ミュオニウム生成物質として用いるシリカエアロゲルにレーザーアブレーション法で穴加工・溝加工を施し、加工条件を系統的に変化させたサンプルの生成に成功した。右図に加工で生成された穴の光学顕微鏡写真の例を示す。シリカエアロゲル内の密度や構造の不均一性やレーザーパルスのゆらぎなどの影響で、穴の形状は隕石のクレーターのように細かい凹凸をもつ形となる。また、条件によっては局所的なクラックが生じることもある。これらは、機械構造的な観点では、構造の脆弱性をもたらすネガティブ要因であるが、一方、ミュオニウムが拡散する際の有効面積を大きくしている点においてはポジティブな要因と考えることができる。



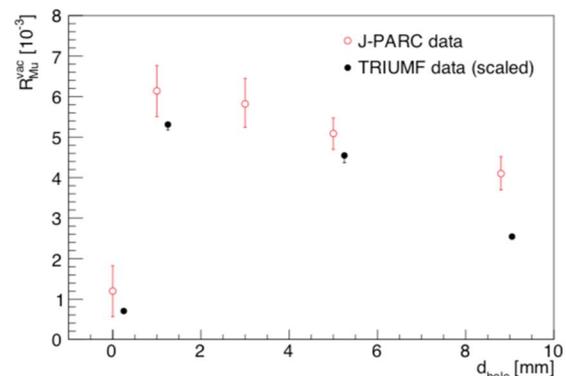
これまでの研究課題であったシリカエアロゲルのレーザー加工時に生じる歪みの問題を、両面からレーザーを打ち込むことにより応力の偏りを平均化し、歪みを抑制することに成功し、良い平面度をもつ生成標的の製作に成功した。

##### (2) ミュオニウム生成データの収集

生成した生成標的は、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学にある実験施設TRIUMFにてミュオンビームに照射し、真空中の熱ミュオニウムの生成収量を測定した。測定と同時にサンプル製作を行うことにより、測定結果を踏まえた加工パターンの決定が可能となり、効率的な測定ができた。3週間の実験で、合計25サンプルについてミュオニウムの生成データを取得することができた(右上図:横軸は相対加工表面積、縦軸はミュオニウム収量)。今回製作した新しいサンプルについてもこれまでと同程度の収量が得られることがわかり、懸念されていたサンプル作成の再現性・安定性(50時間)を確かめた。さらに、生成し真空中へ放出されるまでミュオニウムの偏極度は保たれていることを確かめた。



また、同じサンプルをJ-PARCのより広い運動量分布を持つパルスミュオンビームに照射し、ミュオニウム収量の測定を行った。TRIUMFでの実験結果と比較し、生成標的中のミュオン静止分布の違いを考量するとJ-PARCの結果はTRIUMFと無矛盾であることを確かめた(右下図:横軸は加工穴の深さ)。ここでは、深い穴を開けることにより、生成標的のより内部で生成したミュオニウムも真空中に放出されることを期待したが、結果は逆に収量が低くなった。これはレーザー加工穴の中でミュオニウムがシリカエアロゲル壁に衝突する際の反射率が低い可能性があり、新しい知見が得られた。



上記(1)・(2)の結果をまとめて2020年6月に論文として発表した(arXiv:2006.01947、現在査読結果待ち)。

##### (3) ミューオン加速を見据えた検討

上記データに基づき、ミュオンビームからのミュオニウム生成と拡散をモデル化し、シミュレーションを行った。本研究のアプローチと比較するため、スイス・PSIで開発されているミュオン冷却方法についてシミュレーションを用いた比較を行った。PSIで用いられている低温希ガスでミュオンを減速させる方法では、ミュオンビームを効率的に加速空洞に入射できないことがわかった。一方、本研究で得られたミュオニウムをレーザーイオン化する方法では、崩壊によるロスを除けばほぼ100%の効率で加速器に入れられることがわかった。

#### (4) ミュオニウムのイオン化とミュオニウム精密分光実験への応用

本研究で開発したレーザー微細穴加工を施したシリカエアロゲルをJ-PARCミュオン実験施設で稼働中のミュオンビームラインに設置し、熱ミュオニウム生成とそれを1S-2P遷移を利用してレーザーイオン化する試験を計画した。シリカエアロゲルは、カナダTRIUMFですでに評価を終えた最適化された加工パターンで製作したものを用いた。表面ミュオンビームを照射して下流側に生成したミュオニウムを波長122nm, 355nmの2種類のパルスレーザーを用いてイオン化した。ミュオニウムをレーザーイオン化し、室温エネルギーを持つミュオンを生成することを実証した。現時点では定量評価が可能なデータの取得には至っていないが、今後、本格的な評価を行うための準備が整った。これと並行して、岡山大学の研究グループと共同で1S-2Sの2光子遷移を用いてイオン化する実証試験を着想し、実証試験を計画した。この方法が実現すれば、1S-2P遷移に比べて格段に良い空間分解能でミュオニウムの分布を測定することが可能となる。その試験の最初の段階として水素原子をイオン化する試験を行い、イオン化後の水素イオンを電場で取り出し、MCPで測定することに成功した。さらに、これをミュオニウム1S-1S遷移の精密分光へ応用する研究の検討を行った。実現すればミュオン-電子質量比を世界最高精度で決定できる可能性がある。これはミュオン $g-2$ やミュオニウム超微細構造定数の理論計算の高精度化につながる研究テーマである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 J. Beare, K. Suzuki, T. Mibe, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of muonium emission from laser-ablated silica aerogel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv (Prog. Theo. Experiment. Phys.に投稿)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Aoyagi, Y. Honda, Y. Sato, T. Yamanaka, T. Mibe, et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Performance evaluation of a silicon strip detector for positrons/electrons from a pulsed a muon beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/04/p04027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 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	4. 巻 937
2. 論文標題 Beam commissioning of muon beamline using negative hydrogen ions generated by ultraviolet light	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Meth. A	6. 最初と最後の頁 164-167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.05.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M Abe, T. Mibe, T. Yoshioka, et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Theo. Exper. Phys.	6. 最初と最後の頁 053C02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Bae, R. Kitamura, Y. Kondo, M. Otani, T. Mibe, et al.	4. 巻 21
2. 論文標題 First muon acceleration using a radio-frequency accelerator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Accel. Beams	6. 最初と最後の頁 50101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.050101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 B. Kim, S. Bae, T. Mibe, et al.	4. 巻 899
2. 論文標題 Development of a microchannel plate based beam profile monitor for a re-accelerated muon beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 22-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.05.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Muon g-2 experiments
3. 学会等名 KEK-PH 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Muon (g-2)/EDM at J-PARC
3. 学会等名 第10回Muon科学と加速器研究 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Status of muon EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 Kick-off workshop for the search of a muon EDM using the frozen spin technique at PSI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Muon g-2/EDM measurement at J-PARC
3. 学会等名 2nd IBS Conference on Dark World (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Experiment update J-PARC
3. 学会等名 INT Workshop INT-19-74W, Hadronic contributions to $(g-2)\mu$ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Muon g-2 experiments
3. 学会等名 FFK-2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Muon dipole moments
3. 学会等名 International school on charged lepton flavor violation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三部 勉
2. 発表標題 Muon g-2/EDM measurement at J-PARC
3. 学会等名 Seminar at Peking university (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Mibe
2. 発表標題 Measurement of muon's g-2 and EDM with a reaccelerated thermal muon beam
3. 学会等名 Workshop on muonium and related physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Suzuki
2. 発表標題 Development of the muonium production target for the J-PARC g-2/EDM experiment
3. 学会等名 Workshop on muonium and related physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Mibe
2. 発表標題 Muon g-2/EDM measurement at J-PARC
3. 学会等名 The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Mibe
2. 発表標題 Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC
3. 学会等名 Hadronic Light-by-Light Working Group Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sirui Li, T. Mibe, et al.
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM experiment: 2017 experiment result of muonium emission from laser-ablated silica aerogel
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Suzuki, T. Mibe, et al.
2. 発表標題 Studies on muonium emission from laser-ablated silica aerogel targets for the polarized, ultra-cold muon source of the muon g-2/EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sirui Li, T. Mibe, et al.
2. 発表標題 Optimization of thermal muonium yield from silica aerogel with laser-ablated holes for muon g-2/EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Glen Marshall
2. 発表標題 Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC
3. 学会等名 Workshop on Flavour Changing and Conserving Processes (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsutomu Mibe
2. 発表標題 Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC
3. 学会等名 18th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsutomu Mibe
2. 発表標題 Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC
3. 学会等名 International Workshop on e+e- collisions from Phi to Psi 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsutomu Mibe
2. 発表標題 Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC
3. 学会等名 First Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ウェブページ J-PARC Muon g-2/EDM実験 <a href="http://g-2.kek.jp/">http://g-2.kek.jp/</a></p> <p>国際会議・国際スクールの開催 国際スクール「International school on muon dipole moments and hadronic effects」, ロシア・ブトカ原子核研究所、2019年9月17-22日、参加者55名 URL: <a href="https://indico.inp.nsk.su/event/14/">https://indico.inp.nsk.su/event/14/</a></p> <p>国際研究会「Physics of muonium and related topics」 大阪大学豊中キャンパス、2018年12月10-11日、参加者 48名 URL: <a href="http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/muonium2018/">http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/muonium2018/</a></p> <p>国際研究会「Workshop on hadronic vacuum polarization contributions to muon g-2」 KEKつくばキャンパス、2018年2月12-14日、参加者 70名 URL: <a href="http://www-conf.kek.jp/muonHVPws/index.html">http://www-conf.kek.jp/muonHVPws/index.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	石田 克彦  (Katsuhiko Ishida)		
研究協力者	鈴木 一仁  (Kazuhito Suzuki)		
研究協力者	カマル サイド  (Kamal Saeid)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	マーシャル グレン  (Marshall Glen)		