

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2011～2015

課題番号：23108002

研究課題名(和文)超低速ミュオン顕微鏡

研究課題名(英文)Ultra Slow Muon Microscope

研究代表者

三宅 康博(MIYAKE, Yasuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号：80209882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 333,510,000円

研究成果の概要(和文)：本研究班は、超低速ミュオンによる研究を本格的に開始する為、1)熱ミュオニウム発生装置並びに超低速ミュオン顕微鏡光学系を設計・製作し、2)理研班が構築する100 $\mu$ J/パルス/cm<sup>2</sup>を超える大強度パルス状ライマン レーザーシステムと組み合わせる。これにより、0.2 eVの超低速ミュオンを従来の10,000倍以上、毎秒10(6)個発生させることを最終目標にしている。現段階では、レーザーシステムの増幅結晶の開発上の課題が残っており、ライマン レーザー光の強度が1-数  $\mu$ J/パルス/cm<sup>2</sup>にとどまっており、毎秒数百個の収率に留まっている。現在、その条件下で、ナノ $\mu$ SR法のコミッショニングを進めている。

研究成果の概要(英文)：On Feb. 21, 2016, we have successfully observed ultra slow muons at the U-line. As many as 35 ultra slow muons per second by laser resonant ionization of muoniums evolved from hot tungsten (2000K) were experimentally detected by a MCP, which is higher than that developed by KEK and RAL (20 $\mu$ +/s) at the RIKEN/RAL. In addition to the highest intensity in the world, it is expected that with the improvement of quality of pulsed laser we can achieve ultra slow muon beam with narrower energy width which will promise to improve depth resolution in the sample. Although we still have not solved a problem in the fabrication of the amplification crystal for the Lyman-laser system, we are making efforts to perform  $\mu$ SR measurement by using several hundreds of ultra slow muons per second, in order to extend towards a variety of new nano-scientific fields.

研究分野：ミュオン科学

 キーワード：ミュオン 超低速ミュオン パルスレーザー ライマン レーザー 共鳴イオン化法 表面界面 水素  
マイクロビーム

1. 研究開始当初の背景

$\mu$ SR法は素粒子ミュオンを用いた超高感度の局所磁場観測手法である。試料に100%スピン偏極したミュオンを打ち込むため、あらゆる物質に適用可能で、磁性研究をはじめとして極めて広い分野で用いられている。他の実験手法では観測困難なMHz領域のダイナミクスの観測に威力を発揮し、広い時間窓で、実空間におけるスピンの動的、静的な状態を知ることができる。またミュオンを水素の軽い同位体トレーサーとして捉え、触媒反応の研究や物質中の水素拡散、化学反応等を調べる手段として、ますますその応用範囲は広がっている。最近では、界面を有する多層膜、ナノ構造を含む新機能性物質の微小な磁性プローブとして、 $\mu$ SR法はその電子状態の観測に重要な役割を果たす事が期待されている。さらに近年の物質材料科学では、超均一な微小試料や、結晶粒界などの微小領域における測定の重要性が高まっている。こうした系に $\mu$ SR法を適用するためには、表面から物質内部まで任意の位置にミュオンを止められ、且つ $\mu\text{m}$ オーダーの分解能で走査できるビームが求められている。これを実現ならしめるのが、KEKと理研が共同で開発してきた超低速ミュオンである。ちょうど、J-PARCでは、平成21年度末に世界最高のパルスミュオン強度が達成された。この大強度ビームの実現により、日本で誕生した超低速ミュオンを次世代基幹実験手法「超低速ミュオン顕微鏡」として実用化する環境が整い、機が熟した。

2. 研究の目的

顕微機能を有する高輝度超低速ミュオン実験装置、即ち超低速ミュオン顕微鏡を創成し、これを用いた科学研究を本格的に展開する事である。図1に示されるように超低速ミュオン顕微鏡は、(1)数nmの精度で打ち込み深さを連続的に制御でき、(2)数 $\mu\text{m}$ のビームサイズで走査できる、という特徴を有する。(2)の特徴によって、アクチノイド化合物のように極めて微小な試料の $\mu$ SR研究が新たに可能になる。さらに、多結晶試料の物性を決める粒界など、局所的な組成や構造ごとの

マイクロビーム $\mu$ SR研究が、世界で初めて可能になる。これは、物質科学に新たな展開をもたらすことを目的とする。

3. 研究の方法

超低速ミュオン生成は、J-PARCミュオン施設で得られる世界最高強度のパルス表面ミュオンを、熱ミュオニウム発生装置に打ち込む事から始まる。熱ミュオニウム発生標的として99.9999%のタングステン(W)箔を用いる。W箔近傍に発生したミュオニウム(正ミュオンと電子が結合した軽い水素状原子)は、A04班構築のレーザー照射により選択的に共鳴イオン化(解離)される。解離した熱エネルギーミュオンは、静電SOAレンズによって最大30keVにまで加速される。引き続き、静電四重極レンズ系、質量分離装置によって $\mu$ SR分光器に輸送される事で、バックグラウンドの小さい測定が可能となる。最大限のミュオニウム生成率を達成する為、50 $\mu\text{m}$ 厚のW箔に、定電流を流すことによって加熱する。これらの超低速ミュオン発生源としての熱ミュオニウム発生装置、ミュオン輸送光学系等から構成される超低速ミュオン顕微鏡の構築が本研究班の第1の目的である。超低速ミュオン顕微鏡を用いることにより、表面から内部に至る領域の深さ方向依存性をnmオーダーの分解能で測定することができ、更に、加速によるビーム収束を用いることで物質内部の微小領域を走査・観察する。これらの超低速ミュオン顕微鏡概念図を図1に示す。

$\mu$ SR分光器は、超低速ミュオンを利用した $\mu$ SR実験を行うための基幹装置となる。試料ステージは超低速ミュオン源となる高温W箔が設置される熱ミュオニウム発生装置と直結され、同じ超高真空中に置かれることになる。試料ステージは位置調整機能を有し、2K以下の低温が得られ、磁場を印加することができるなど様々な環境下での測定が可能な構造をもつ。また、試料交換を容易とするように、試料ローディング用のポートを有することが必要となる。これらには開発要素を含み、例えば微小なビームと試料の位置調整機構や、低温を実現するための高温W箔および周囲のチェンバーからの輻射熱の遮蔽等がある。この開発は、他班との整合性を満たすことが必要であり、各班との連携の下で行う。 $\mu$ SR測定器は検出器および付随した回路、補正電磁石、常伝導電磁石などからなる。大強度ミュオンビームによる $\mu$ SR実験用には、600系統に分割された陽電子測定系が必要である。現在、J-PARCにおいて、新しい測定系のテストが進行中であり、本分光器に最適な測定系によるシステムが構築される。

4. 研究成果

超低速ミュオン顕微鏡は、図2に示すように、(1)熱ミュオニウム発生装置、(2)レーザー輸送系、(3)偏向電磁石、(4)レーザーシステム(A04班担当)、(5)、(6)超低速ミュオン

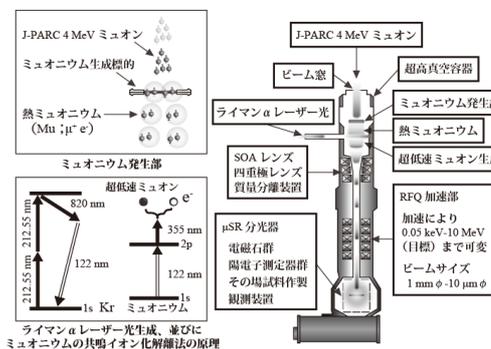


図1.超低速ミュオン顕微鏡全体概念図

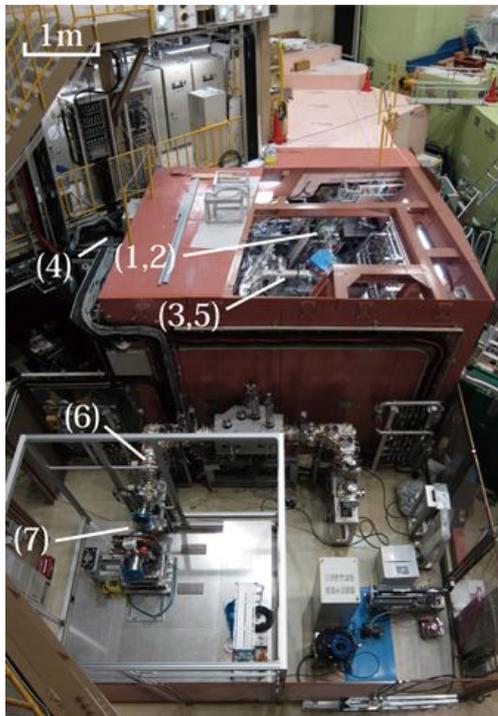


図 2.超低速ミュオンビームライン

ビーム輸送系、(7)超低速 $\mu$ SR分光器から構成されている(番号は図に対応)。A01班では、これらを設計・製作し、J-PARCに設置した。これらすべての設置が完了し、タングステン標的に存在する微量リシウムイオンを用いて、ビームラインのコミッショニングを行ってきた。また、レーザーシステム担当のA04班と協力し、共鳴イオン化法により超低速ミュオンビームを発生すべく研究を進めてきた。火事や、2度に亘る中性子源のトラブルで1年程度、ビーム運転がとまっていたが、平成28年2月のユーザー運転開始直後、超低速ミュオンの発生に成功することができた。当初は、10分に1イベント程度であったが、最適化が進み、毎秒35個以上の超低速ミュオンを安定に引き出すことができた(図3)。この収量は、理研RALで達成した瞬間最大強度20個/秒を上回る世界最高強度の収量である。レーザーの増幅結晶が準備できれば、1,000倍以上の強度になる

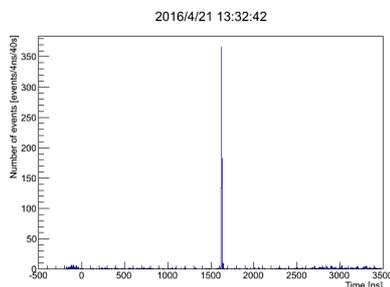


図 3 .2016年2月のビーム復旧直後、超低速ミュオンの発生に成功。

ことが期待される。超低速ミュオンビームを得るためには、第1ステップとして、生成標的から引き出された大強度低速(表面)ミュオンを、高温に熱したタングステン箔に打ち込む。第2ステップでは、熱エネルギーの $\mu$ を、タングステン表面から真空中に蒸発させる。第3ステップでは、 $\mu$ から電子をはぎとるのに、パルス状レーザーを用いた共鳴イオン化(1s-2p-非束縛状態)法を用いる。図4は、真空中に漂い出てきた $\mu$ をイオン化するレーザーのタイミングを変えながら、超低速ミュオンの収率をプロットした実験結果である。タングステン箔からのレーザーが横切る位置までの距離を変えることで、レーザーの遅延時間に対する超低速ミュオン収率の最適値が変わることをみてとれる。また、A01班では、超低速ミュオンビームラインの最終端には、U1AエリアにKalliope検出器から構成されるnm- $\mu$ SRスペクトロメータを設置した。Kalliope検出器は512chのプラスチックシンチレータとMPPCで構成され、試料中に止まった、ミュオンが崩壊して生成する陽電子の崩壊方向を検出することができる。本スペクトロメータを用いて、超低速ミュオンの時間測定を図5に示す。統計は少ないが、2.2マイクロ秒のミュオンの寿命を見て取れる。本スペクトロメータは、TRIUMFの $\mu$ -NMRの実験装置を参考に、絶縁されたプラットフォームの上に設置されており、プラットフォーム全体を $\pm 30$ kVまでバイアスする事が可能な設計がなされている。本システムを用いることにより、実験条件を変更することなく、30 keVに加速された超低速ミュオンを減速し、試料に対する打ち込む深さを調整することができる。但し、高圧に人が直接触れないように、安全上、写真に示すようにメッシュ付きの安全板で囲われている。打ち込み深さをコントロールできるだけでなく、様々な摂動条件が付加し易い実験の応用性を考慮した仕様となっている。

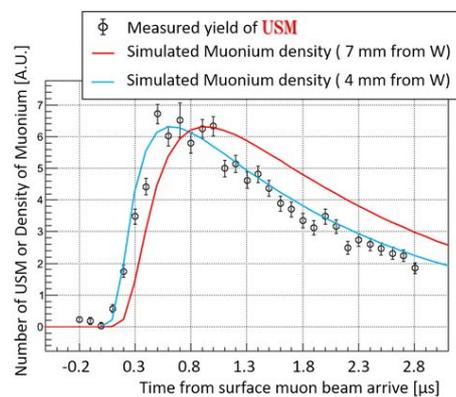


図 4 .真空中に漂い出てきた $\mu$ をイオン化するレーザーのタイミングを変えながら、超低速ミュオンの収率をプロットした実験結果。超低速ミュオン発生には、最適化したタイミングでレーザーが導入される。

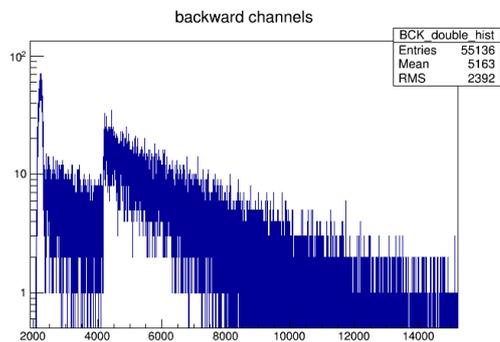


図5.Kalliope で検出した崩壊陽電子の時間スペクトル。横軸の単位は ns。

A01 班としては、レーザーの増幅結晶が準備できれば、超低速ミュオンの収率を容易に1,000 倍以上の強度とする準備が整った。

A01 班では、超低速ミュオンを再加速することで、波動性を有する、よりエミッタンスの良いビームを得ることを目指した開発を行っている。この再加速ミュオンの可干渉性により、波動性を用いたミュオン回折実験を行う予定である。ミュオンの波動性を直接観測した例はなく、世界的に見ても大いに注目される実験といえる。低エネルギーミュオン加速器の先行研究は世界的にも皆無である。そのために、粒子速度によらずに、加速電圧を可変にできるインダクション加速を採用し、開発を進めている。通常の半導体駆動のインダクション加速ではミュオンの寿命に対して加速時間が遅過ぎるため、超高速・高電圧の光伝導スイッチを使用する事で、ファインメットの特性を最大限発揮する電圧となるような回路を製作した。ミュオン加速の準備がほぼ整い、性能試験として、電子加速での加速試験の評価を行っている。現在、これを厳しいことに定評のある J-PARC/JAEA の安全審査基準を満たすように整備している。

## 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 61 件 )

“ Chemical Environmental Effects on Muon Transfer Process in Low Pressure Mixture Gases;  $H_2+CO$  and  $H_2+CO_2$  ”, G. Yoshida, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 10 名, 7 番目 ), RADIOISOTOPES, 65, (2016)113-11, 査読有, DOI: 10.3769/radioisotopes.65.113

“ Negative muon induced elemental analysis by muonic X-ray and prompt gamma-ray measurements ”, K.Ninomiya, ..., Y.Miyake ..., ( 計 12 名, 9 番目 ), J Radioanal Nucl Chem (2016) 309(65-69), 査読有, DOI: 10.1007/s10967-016-4772-y

“ High-Precision Microwave Spectroscopy of Muonium for Determination of Muonic Magnetic Moment ”, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 39 名, 17 番目 ), Spin Physics (SPIN2014) International Journal of Modern Physics:Conference Series Vol.40 (2016)1660076(6pages), 査読有, DOI:10.1142/S2010194516600764

“ Muonic Atom Formation by Muon Transfer Process in  $C_6H_6$  or  $C_6H_{12}$  and  $CCl_4$  Mixtures ”, M.Inagaki, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 12 名 10 番目 ) JPS Conf.Proc.8(2015) 033004 ( 1-6 ) , 査読有 , DOI:10.7566/JSPSC.8.033004

“ Elemental Analysis System with Negative-Muon Beam ”, T.Osawa, ..., Y.Miyake ( 以上 7 名, 7 番目 ), JPS Conf. Proc., 8(2015) 025003(1-6), 査読有, DOI:10.7566/JSPSC.8.025003

“ Elemental Analysis of Bronze Artifacts by Muonic X-ray Spectroscopy ”, K.Ninomiya, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 13 名, 10 番目 ), JPS Conf. Proc., 8(2015)033005(1-6), 査読有, DOI:10.7566/JSPSC.8.033005

“ Tuning of Ultra-Slow Muon Transport System ”, T.Adachi, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 17 名, 16 番目 ), JPS Conf. Proc. 8 (2015) 036017(1-4), 査読有, DOI:10.7566/JSPSC.8.036017

“ Tuning of the ultra slow muon beam line by utilizing ionized hydrogen ”, T.Adachi, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 13 名, 9 番目 ) PoS NuFACT2014, (2015) 097(1-4), 査読有 , [https://pos.sissa.it/archive/conferences/226/097/NUFACT2014\\_097.pdf](https://pos.sissa.it/archive/conferences/226/097/NUFACT2014_097.pdf)

“ Present Status of the Materials & Life Science Experimental Facility of J-PARC ”, M. Arai, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 21 名, 6 番目 ) JPS Conf.Proc.8, (2015)036021(1-10), 査読有, DOI:/10.7566/JSPSC.8. 036021

“ The Development of a Non- Destructive Analysis System with Negative Muon Beam for Industrial Devices at J-PARC MUSE ”, M.Tampo, ..., Y.Miyake, ( 以上 11 名, 11 番目 ) JPS Conf. Proc.8, (2015)036016 ( 1-6 ) , 査読有 , DOI:/10.7566/JSPSC.8.036016

“ Studies on Muonium Production from Silica Aerogel with Substructure for the Muon g-2/EDM Experiment ”, R.Kitamura, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 26 名, 6 番目 ), JPS Conf. Proc. 8, (2015)025016 ( 1-6 ) , 査読有 , DOI:/10.7566/JSPSC.8.025016

“ Silicon Carbide Target for a Muon-Electron Conversion Search at J-PARC MLF ”, Y.Nakatsugawa, ..., Y.Miyake, ..., ( 計 33 名, 15 番目 ), JPS Conf. Proc.8, (2015) 025013 ( 1-5 ) , 査読有, DOI:/10.7566/JSPSC.8.025013

“ Precision Measurement of Muonium Hyperfine Splitting at J-PARC and Integrated Detector System for High-intensity Pulsed Muon Beam Experiment ”, S. Kanda..., Y.Miyake, ..., (計 39 名, 19 番目) JPS Conf. Proc. 8, (2015)025006, 査読有, DOI: /10.7566/JSPSC.8.025006

“ Present Status of Muon Production Target at J-PARC/MUSE ”, S.Makimura, ..., Y.Miyake, (以上 19 名, 19 番目) JPS Conf. Proc. 8, (2015)051002, 査読有, DOI: /10.7566 / JSPSC.8.051002

“ 日本のミュオン実験施設; J-PARC MUSE ”, 三宅康博, RADIOISOTOPES 64(10), (2015) 639-646, 査読有, DOI: /10.3769/ radioisotopes.64.639

“ Nondestructive Elemental Depth-Profiling Analysis by Muonic X-ray Measurement ”, K.Ninomiya..., Y.Miyake, ..., (計 14 名 9 番目), Anal. Chem. 87, (2015)4597-4600, 査読有, DOI: 10.1021/acs.analchem.5b01169

“ Muon capture probability of carbon and oxygen for CO, CO<sub>2</sub>, and COS under low-pressure gas conditions ”, G. Yoshida... Y. Miyake... (計 12 名 9 番目), J Radioanal Nucl Chem 303, (2015)1277-1281, 査読有, DOI: /10.1007/s10967-014-3602-3

“ Development of muon rotating target at J-PARC/MUSE ”, S.Makimura, ..., Y.Miyake, (以上 19 名 19 番目), J Radioanal Nucl Chem 305, (2015)811-815, 査読有, DOI: 10.1007/s10967-015-3949-0

[学会発表] (計 81 件)

(招待講演) “ J-PARC Muon Facility, MUSE ” Y.Miyake, OIST Mini Symposium "Radiation sensors and emerging applications in medical imaging, space science and materials science", 2017 年 1 月 16-18 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県国頭郡)

(招待講演) “ J-PARC Muon Facility, MUSE ”, Y.Miyake, The International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University, Mito campus of Ibaraki Univ. (Ibaraki・Mito) 18 Nov. -20 Nov. 2016

(招待講演) “ J-PARC Muon Facility, MUSE ”, Y.Miyake, The 6th Yamada workshop on Muonic X and Gamma ray Spectroscopy 2016 (MXG16), Osaka Univ. (Osaka・Suita), Sep. 26-28, 2016

“ J-PARCにおける超低速ミュオンビームラインのコミッショニング状況 ” 足立泰平, 日本物理学会第71回年次大会, 2016.3.19-22, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

“ J-PARC・MUSE・超低速ミュオン生成用コヒーレント真空紫外光の強度測定状況3 ” 中村惇平, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016.3.19-22, 東北学院大学(宮城県・仙

台市)

“ 綿毛状ナノ構造体層を形成したタングステン箔からのミュオニウム放出 ” 藪内敦, 日本物理学会第71回年次大会, 2016.3.19-22, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

“ Status of Ultra Slow Muon Microscopy (A01) ”, 三宅康博, International USMM & CMSI Workshop, 2016.1.5-9, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

“ The commissioning status of the Ultra Slow Muon Beamline at the J-PARC ”, 足立泰平, International USMM & CMSI Workshop, 2016.1.5-9, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

“ Ultra-slow  $\mu$ SR spectrometer at J-PARC ”, 髙本亘, International USMM & CMSI Workshop, 2016.1.5-9, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

“ Coherent vacuum ultraviolet generation from Krypton gas with injection of coherent 212.55-nm radiation ” 中村惇平, International USMM & CMSI Workshop, 2016.1.5-9, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

“ First-principles study of muon and muonium in cytochrome c ”, A.D.Pant, International USMM & CMSI Workshop, 2016.1.5-9, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

“ Negative muon capture processes for low pressure gaseous molecules ”, K. Ninomiya, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (PACIFICHEM), Dec. 15-20, 2015, Honolulu, (Hawaii, USA)

“ Sign change of spin Hall effect in Cu alloys by electrons correlation ”, M. Mori, 2015 Gordon Godfrey Workshop on Spins and Strong Correlations Sydney, Nov. 2-6, 2015, Sydney (Australia)

“ J-PARC における超低速ミュオンビームラインのチューニング状況 ”, 足立泰平, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日-19, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)

“ J-PARC・MUSE・超低速ミュオン生成用コヒーレント真空紫外光の強度測定状況2 ”, 中村惇平, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日-19, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)

“ イジング反強磁性体 SmPt<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> の  $\mu$ SR 測定 ”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 伊藤孝, 2015 年 9 月 16 日-19, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)

“ クリプトンガスにコヒーレント 212.55nm 放射を入射した時のコヒーレント真空紫外放射の発生 ” 中村惇平, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015.9.13-16, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

〔その他〕

ホームページ等

超低速ミュオン顕微鏡と極微 $\mu$ SR法創成

<http://slowmuon.kek.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三宅 康博 (MIYAKE, Yasuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

研究者番号：80209882

### (2) 研究分担者

パトリック ストラッサー

(PATRICK, Strasser)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師

研究者番号：20342834

石田 勝彦 (ISHIDA, Katsuhiko)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・副主任研究員

研究者番号：70176189

髭本 亘 (HIGEMOTO, Wataru)

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・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：90291103

### (3) 連携研究者

牧村 俊助 (MAKIMURA, Shunsuke)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師

研究者番号：10391715

松田 恭幸 (MATSUDA, Yasuyuki)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：70321817

久我 隆弘 (KUGA, Takahiro)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60195419

藤森 寛 (FUJIMORI, Hiroshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・前任技師

研究者番号：60391786

西山 樟生 (NISHIYAMA, Kusuo)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：50164611

芳賀 芳範 (HAGA, Yoshinori)

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・先端基礎研究セ

ンター・研究主幹

研究者番号：90354901

網塚 浩 (AMITSUKA, Hiroshi)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40212576

加藤 礼三 (KATO, Reizo)

国立研究開発法人理化学研究所・加藤分子物性研究室・主任研究員

研究者番号：80169531

中村 惇平 (NAKAMURA, Jumpei)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准技師

研究者番号：30621982

二宮 和彦 (NINOMIYA, Kazuhiko)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：90512905

伊藤 孝 (ITO, Takashi)

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・先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：10455280

小林 庸男 (KOBAYASHI, Yasuo)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師

研究者番号：80623917

池戸 豊 (IKEDO, Yutaka)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師

研究者番号：90415050

妹尾 仁嗣 (SEO, Hitoshi)

国立研究開発法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・専任研究員

研究者番号：30415054

藪内 敦 (YABUCHI, Atsushi)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：90551367

山内 一宏 (YAMAUCHI, Ichihiro)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60444395

足立 泰平 (ADACHI, Taihei)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・博士研究員

研究者番号：10729700