

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：13501

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：23108001

研究課題名(和文)超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア総括

研究課題名(英文)Frontier of Materials, Life and Elementary Particles Science explored by Ultra Slow Muon Microscope

研究代表者

鳥養 映子(TORIKAI, Eiko)

山梨大学・総合研究部・教授

研究者番号：20188832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 134,600,000円

研究成果の概要(和文)：超低速ミュオン顕微鏡は、表面・界面が関与する物理、化学、生命の諸現象の解明から、ミュオン異常磁気能率の精密測定までの広い分野において、研究を飛躍的に発展させる突破口となる。研究期間前半で共通基盤装置を開発し、後半でこれを用いた新たな学術領域の開拓をめざした。加速器施設の事故等による長期ビーム供給停止にもかかわらず、ビーム再開直後の平成28年2月に初の超低速ミュオン発生に成功した。海外実験施設等による予備実験により、磁性、超伝導、半導体、電池材料に加えて、触媒化学や生命科学などこれまで未開拓の分野においても基礎データを蓄積できた。さまざまな分野において、新量子ビームへの期待が高まっている。

研究成果の概要(英文)：Ultra Slow Muon can bring breakthroughs in a variety of new fields of science over the wide range from life and materials science to particle physics. We constructed a ultra slow muon microscope (USMM) in J-PARC in early 2013 and planned to apply it to study thin films, near surface and interfaces. In spite of long shutting down of muon beam due to troubles in J-PARC since May 2013, the first ultra slow muons were successfully generated in February 2018, the next day of restarting beam experiment. By preparation and preliminary studies using conventional muon sources and complementary experimental methods as well as theoretical works, we accumulated fundamental data which will strongly help future studies by using USMM. These achievements strongly suggest potential of USMM to promote a science not only in well-known fields such as magnetism, superconductivity, ion-conductivity of battery materials, but also a new academic field for muon in catalytic chemistry and biology.

研究分野：物性物理、ミュオン科学、量子工学

キーワード：超低速ミュオン スピン イメージング 情報発信 有機的連携 研究人材育成

1. 研究開始当初の背景

ミュオンスピン回転法 ( $\mu$ SR)による物質科学研究は、弱い相互作用の空間反転対称性の破れが発見された1957年に原理が提案され、その後、着実に物性研究の新技术として発展してきた。世界の4大実験施設で得られるミュオンは、ビームサイズが数10mm $\phi$ 、打ち込み深さがサブmmで、主としてバルク試料を研究対象としていた。これを低速化して、超薄膜や微小試料を研究したいという強い動機から、高エネルギー加速器研究所(現機構)の世界初のパルスミュオン源において、真空中の熱ミュオニウム発生とレーザー共鳴イオン化の原理を用いた超低速化の原理が実証された。その後、理化学研究所英国RALミュオン施設との共同開発研究によって、2007年に瞬間強度毎秒20個ながら、深さ分解能(nm)と時間分解能(ns)の画期的な性能が確認されたが実用強度には至らなかった。

ヨーロッパでは、ポールシェラー研究所(PSI, スイス)の高強度連続ミュオン源において、固体希ガスのモデレータで減速した低エネルギーミュオン施設が1999年頃から稼働し、磁性体や超伝導体薄膜の研究に威力を発揮していた。減速剤方式によるエネルギー広がりのため分解能に限界があり、パルスミュオンのみで実現可能な原子層レベルの分解能を持つ超低速ミュオンの実用化が、世界の研究者から待望されていた。

平成23年のシンポジウムで超低速ミュオンが拓く科学について議論したところ、表面近傍や物質内部の界面における反応や電子伝達の情報が本質的に重要な、触媒化学や生命科学分野の研究者からも強い関心が寄せられた。これらの分野では、バルク試料を必要とした従来のミュオン源では対象とならなかったものである。

さらに、素粒子基礎物理では、標準理論を超える新しい物理探索のために、ミュオン異常磁気能率や電気磁気モーメントなどの基礎物理定数の精密測定が世界的に要望されており、超低速ミュオンを再加速してえられるMeVオーダーの低エミッタンスミュオン開発が急務であった。再加速で得られるミュオンマイクロビームはこれまで世界になく、物性研究者にとっても微小試料や物質内部の3次元イメージングを可能にする夢のビームであった。

研究開始当時、茨城県東海村に大強度陽子加速器施設(J-PARC)が建設され、物質・生命科学実験施設(MLF)において、世界最強パルスミュオン源を平成24年度中に開発する計画が動き始めていた。さらに、理化学研究所において、全固体LED励起ファイバー方式のVUVレーザー開発が始まろうとしていた。入射ミュオン強度、共鳴励起用ライマンレーザー

強度をそれぞれ100倍を目指すことにより、実用強度の夢の量子ビームを開発する絶好の条件が整っていた。

2. 研究の目的

本領域は、超低速ミュオン顕微鏡(USMM)によるイメージング法を確立し、スピンの時間空間相関という概念により、多様な物理、化学、生命現象を統一的に理解する新しい学術領域の開拓を目指す。総括班は、計画研究代表者と有識者から構成され、(1)各計画班および公募研究の有機的な連携促進と研究支援、(2)領域の運営と研究遂行に関する一元的な窓口、(3)共同研究、研究人材育成の組織的推進、(4)評価と助言・指導、(5)成果の情報発信、の機能を果たす。これにより、本領域の円滑な推進を図り、確実な成果に結びつけることを目的としている。

本領域の成果はニュースレター発行、領域ウェブページ公開、公開成果報告会開催、国際ワークショップ開催、国際シンポジウム開催で国内外に発信するとともに、トライアルユースを通じた他の学術分野および産業界への普及、若手スクールなど、人材教育にも力を入れていくことで領域の将来にわたる発展を図る。

3. 研究の方法

物質・生命・素粒子科学からビーム・レーザー・デバイス工学、産業応用まで、広範な分野の専門家が、共通基盤装置超低速ミュオン顕微鏡をJ-PARC/MLFに共同で建設し、これを用いた実験研究と理論研究を推進する。

目的実現のため、総括班には、計画研究部門、イノベーション創出部門、評価部門の3部門を設置し、全体を領域代表がとりまとめる。各部門間、および、関連施設等との関係を図3-1に示す。

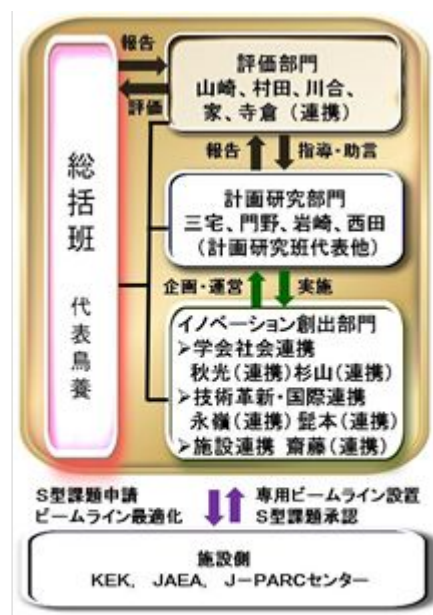


図3-1 総括班の構成と役割

(1) 計画研究部門は、以下の4つの計画班の班長で構成され、異分野からなる研究者間の有機的な連携を促進すると共に、全体会議の定期開催により計画研究班全員の情報共有を図る。A01：超低速ミュオン顕微鏡と極微 $\mu$ SR法創成、A02：界面のスピント伝導と反応、A03：表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関、A04：物質の究極を極める超冷却と尖鋭化。各班の進捗状況に応じた効率的、効果的な領域運営のために、博士研究員と公募研究の募集と審査を一括して行う。ニュースレターおよび領域ウェブページを通じて成果を社会に発信し、公開研究会と国際会議を開催して、広報普及に努める。

(2) イノベーション創出部門は、物性、原子核、素粒子科学分野を代表する連携研究者で構成され、計画研究部門と協力して、学会・社会連携、産業界・国際連携、施設連携を推進する。ミュオンを新規に利用する研究者のために、施設側と協力してトライアルユース等の研究支援を行い、本領域の対象範囲を広げる。また若手スクールの開催による教育活動や、サイエンスカフェの開催等を通じて「国民との科学・技術対話」を行う。

(3) 評価部門は、関係する分野の経験豊富な有識者5名で構成し、計画研究班代表らから研究の進捗報告を受け、指導・助言を行うとともに、年1回評価報告と提言を行う。

研究期間の前半で、計画研究A01班、A04班が中心となり、超低速ミュオン対象となる広い分野の研究者との協力体制のもとに、物質内部の新しい機能イメージング法を確立し、後半でこれを用いた新たな学術領域の開拓をめざした。

#### 4. 研究成果

最大のハイライトは、平成28年2月21日に初の超低速ミュオン発生に成功したことである。ビーム強度は毎秒35個と、目標とする毎秒1万~10万個の実用強度に向けて増強途上にあるが、エネルギー分解能(エミッタンス)は、PSIの低エネルギーミュオンの公称値400eVより1桁以上優れた30eVが確認された。物質・生命科学研究所のプロープとして最も必要とされる、表面から深さ方向にnmの分解能での連続走査性能実現に大きく前進した。

##### (1) 計画研究部門

超低速ミュオン顕微鏡は、図4-1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)および(6)超低速ミュオンビーム輸送系、(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。A04班と協力し、超低速ミュオンビームの生成実験を行った。

超低速ミュオン生成は、A01班の世界最強パルスミュオン生成技術と、A04班の世界最強

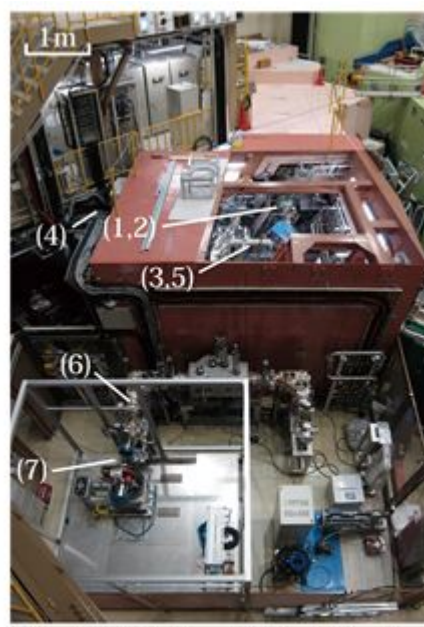


図 4-1 超低速ミュオンビームライン

全固体ライマン $\alpha$ レーザーシステム技術の2つの基盤技術によって支えられており、これらの技術開発の大部分は、前半に当初目的を達成した。

後半(実験装置本体完成後の3年間)は、加速器施設の事故や不具合による再三の長期運転停止が続き、装置へのビーム供給は90日間(予定では約600日)にとどまった。この間、A02班、A03班の実験研究者の多くは、班を超えた支援体制のもとに、海外ミュオン実験施設・相補的な研究手段による予備実験や試料準備等を進め、磁性、超伝導、半導体、電池材料に加えて、触媒化学や生命科学などこれまで未開拓の分野においても、超低速ミュオンによる実験に向けた基礎データを蓄積することができた。これらの実績を踏まえ、国際的にもさまざまな分野において、期待が高まっている。

計画班の有機的連携:領域全体の共通装置となるミュオン顕微鏡を完成させるために、A01班及びA03班の主導で領域全体が一丸となって、超低速化装置、従来の100倍の強度を持つライマンレーザー装置開発を最優先で進めた。最終年度は設備備品購入を予定していなかったが、国際レーザー諮問委員会の助言を受けて、総括班の主導により共同でフラッシュランプ励起の高強度Nd:YAGレーザーを導入し、超低速ミュオンの早期発生成功をもたらした。これにより、強度と性能の極限を追求する全固体ライマンレーザーシステムを徐々に増強するゆとりが生まれた。A01班による分光器開発は、超低速 $\mu$ SR測定を実際実施するA02、A03班の意見を取り入れて製作された。超低速 $\mu$ SR分光器、常伝導電磁石電源、試料を冷却するクライオスタット、A03班が製作した試料の分析・準備等を行い、測定位置にセットするロードロックチャンバやデータ取得システム用の19

インチャックは、A01 班が設計・製作を行った高電圧ステージ上に効率よくかつ使いやすく設置するためのレイアウトを共同で考え、設置を行った。

領域会議、班会議、グループ討論の開催：領域会議(平成 24 年 1 月春日居)、領域会議・公開シンポジウム(平成 24 年 8 月札幌、平成 26 年 9 月仙台)において、計画研究者と公募研究者の密接な討論による連携を図った。また、公開シンポジウムは、平成 24 年度北大触媒化学研究センター、平成 26 年度東北大学 WIP 研究センターとの共催で開催し、それぞれ触媒化学、スピントロニクス材料分野の研究者への広報と交流を行った。各班ごとの班会議の他に、新規にミュオン分野に参入した研究者を支援するための班を超えた小規模なグループ討論を重ねた。

国際会議：平成 25 年 9 月(松江)、参加者 130 名(うち海外 20 名)、平成 28 年 1 月(東京)、参加者 173 名(うち海外 13 名)により、成果を国内外に発信した。平成 25 年の国際会議は、超低速ミュオンが拓く科学と題して、素粒子基礎物理から産業利用まで広い分野の最先端の研究者が単一セッションで議論し、異分野交流を推進したことが大きな特徴である。このような会議は前例がない。また、平成 27 年度は、スーパーコンピュータ京及び次世代スーパーコンピュータプロジェクトの強相関物性理論研究グループ(代表：今田正俊氏)と国際会議を共催し、異なる実験手法を専門とする研究者間、あるいは理論と実験の交流を深め、新しい共同研究を生み出す場を提供した。

公募研究者：本学術領域を充実させるとともに、より広い分野への積極的な展開を図ることを目的として、この新しい量子計測法を利用して、それぞれの分野を飛躍的に発展させる創造的な実験課題と、新しい計測方法や実験結果を解釈するための理論課題を公募研究として募集し、平成 24 - 25 年度公募研究者として A01、A02、A03 班において 3 名ずつ、平成 26 - 27 年度公募研究者として A01 班 6 名、A02 班 8 名、A03 班 4 名の公募研究者が加わった。平成 24 - 25 年度公募研究者は、研究期間終了後は連携研究者として活動し、総計 94 名(A01:28 名、A02:30 名、A03:24 名、A04:12 名)評価委員 5 名の大所帯となった。

博士研究員：総括班では、各年 4 名、計 8 名の博士研究員を A01 班と A04 班に配して、超低速ミュオン顕微鏡装置開発と、全固体ライマン レーザー装置開発を推進した。将来本領域をさらに発展させる若手研究者の自由な発想による自立した研究活動を促すため、所属機関の協力を得てエフォート 15%分の裁量研究を奨励した。裁量研究時間を活用して科研費に採択されたり、研究機関内競争的資金に採択されたり、着任以前の業績をまとめて国際会議発表や論文にまとめたりすることにより、独立した研究者への道を歩み始めた。博士研究員 8 名中 6 名は研究機関の

任期なし、またはそれに準ずる常勤の研究職・技術職として活躍し、次世代の量子ビーム科学を担う人材として期待されている。

若手研究者開催のプレスクール：領域会議、国際会議と連動して、若手研究者企画によるプレスクールを開催し、若手研究者や学生への幅広い分野の紹介、異分野理解、会議運営経験を通じた自主性の育成と意欲喚起を行った。

計画研究と公募研究の調和：領域会議及び各班の班会議や研究会において、計画研究と公募研究のグルーピングのための意見交換の場を設けた。さらに A01 班では、ミュオンマイクロビーム開発のための再加速技術開発を、計画班と 4 人の公募研究者の密接な共同研究によって進めてきた。そのために毎週定例 TV 会議を開催している。A02 班では、ミュオン実験を行う公募研究者に対して計画研究者らが必ず支援を行うとともに、触媒化学、生命科学、スピントロニクスなどの小グループの研究会を頻繁に行い、実験研究と理論研究、計画研究と公募研究の緊密な関係を築いた。A03 班では毎年の班会議において計画研究と公募研究の連携を深め、共同実験を開始している。

班を超えたミュオン実験体験の指導体制：研究グループは、研究開始時の 58 名から、100 名近い大所帯となった。ミュオン利用経験のない研究者、若手研究者、博士学生等に対しては、班を超えた支援・指導体制を組んだ。このうち 4 名はトライアルユース等を経て、自ら実験課題申請書を作成し、新たに参入した公募研究者の指導・助言を行うまでに至っている。また博士学生の一人は、A01、A02 班の研究者の集団指導体制のもとで実験及び計算機シミュレーションに取組み、博士学位取得後、施設の博士研究員として超低速ミュオン開発に活躍している。班を超えた協力体制による実験体験は、超低速ミュオン実験開始を待つ間のモチベーションの向上に役立っている。

異分野の有機的連携を推進するための異分野理解の取組み：領域会議、国際会議は異分野理解の重要な場として、全分野合同のシングルセッションで運営した。特に、平成 24-26 年度の領域会議及び国際会議においては、若手研究者主催によるプレスクールを開催し、各研究課題の背景と導入部のみを 1 時間かけてじっくり紹介しあった。プレスクールには、毎回、若手研究者、大学院生に加えてシニアの研究者も含む平均 50 名が参加し、本領域のカバーする広い分野の基礎を互いに理解することに努めた。これらの異分野交流は班を超えた有機的連携に非常に有効であった。

他の新学術領域・大型研究計画との連携：領域を超えた研究連携も活発に行った。一例としては、新学術領域「コンピュティクスによる物質デザイン：複合相関と非平衡ダイナミクス」の研究者等との連携により、ミュ

オンの静止位置・荷電状態・電子状態についての理論的理解を著しく進展させた。また新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」、「分子自由度が拓く新物質科学」、「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」、「コンピューティクスによる物質デザイン」、「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」、「分子アーキテクトニクス：単一分子の組織化と新機能創成」、「ナノスピン変換工学」、「3D 活性サイト科学」、「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」、「J-Physics：多極子伝導系の物理」領域と連携して毎年秋に物性科学領域横断研究会を共催し、領域研究者が発表して超低速ミュオンの可能性を伝えるとともに、他領域の研究者との共同研究の芽を育んだ。

ニュースレター：毎年度末に専門分野外を対象としたニュースレターを発行し、成果を広く社会に発信した。

#### (2) イノベーション創出部門

国際連携：計画究部門と協力して国際会議を開催した。また、英国ラザフォードアップルトン研究所、カナダ TRIUMF 研究所等において、国際的なサイエンスカフェにおいて超低速ミュオンを広報した。

学会連携：日本物理学会、応用物理学会、日本顕微鏡学会、日本金属学会、学振 169 委員会等のシンポジウム講演を通じ、隣接分野への広報を行った結果、平成 26 年度の公募研究には触媒化学、電気化学、生命科学分野からの応募が増加し、これらミュオン科学の未開拓分野への展開が進んだ。

産業・社会連携：トヨタ自動車工業の経営陣に対する講演を行った他、計 45 回のアウトリーチ活動を推進した。

#### (3) 評価部門

評価委員会：平成 24 年 3 月、平成 25 年 5 月、平成 26 年 9 月、平成 28 年 3 月に評価委員会を開催し、計画班代表者らから進捗状況を報告し、領域研究への指導・助言を頂いた。

国際ライマン レーザー諮問委員会：平成 27 年 3 月には、VUV レーザー、パルスレーザー、セラミックレーザー媒質、超低速ミュオン発生技術等の専門家からなる臨時委員（海外 3 名、国内 3 名）を招聘し、全固体ライマン レーザーシステムの妥当性、先進性、将来性を確認するとともに、加速器の長期停止により限られたビームタイムで直近の成果を出すための対策について助言を受けた。

#### 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 65 件)

High-Efficiency Generation of Pulsed Lyman- $\alpha$  Radiation by Resonant Laser Wave Mixing in Low Pressure Kr-Ar Mixture", N. Saito, Y. Oishi, K. Miyazaki, K. Okamura, J. Nakamura, O. A. Louchev, M. Iwasaki, S. Wada,

Optics Express 査読有 24, 7566-7573 (2016), DOI: 10.1364/OE.24.007566

"Tuning of Ultra-Slow Muon Transport System", T. Adachi, Y. Ikedo, K. Nishiyama, A. Yabuuchi, T. Nagatomo, P. Strasser, T. U. Ito, W. Higemoto, K. M. Kojima, S. Makimura, J. Nakamura, K. Shimomura, N. Kawamura, Y. Kobayashi, R. Kadono, Y. Miyake, and E. Torikai, JPS Conference Proceedings 査読有 8 (2015) 036017(1-4), DOI:10.7566/JPSCP.8.033005

"Ionization efficiencies of Doppler-broadened atoms by transform-limited and broadband nanosecond pulses: one-photon resonant two-photon ionization of muoniums", Rakesh Mohan Das, Souvik Chatterjee, Masahiko Iwasaki, and Takashi Nakajima, J. Opt. Soc. Am. B 査読有 32,1237-1244 (2015), DOI:10.1364/JOSAB.32.001237

〔学会発表〕(計 85 件)

E.Torikai, "Prospects of Laser-Driven Muon Microscopy for bioimaging", Vth Int. Symp. Topical Problems of Biophotonics 2015, 2015.7.20 - 24, Nizhny Novgorod (Russia) (invited)

E.Torikai, Y.Miyake, R. Kadono, M.Iwasaki, "Ultra Slow Muon Microscopy - a New Method to Study Function across Interfaces in Materials and Life Science-", The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, 2015.12.15-2015.12.20 Honolulu(USA) (invited)

Y.Miyake, "J-PARC MUSE", NuFACT2014, 2014.8.25-8.30, Glasgow (Scotland)

K. Nagamine, "Ultra-Slow Muon Microscope Project and Application to Advanced Materials Characterization", BIT's 3rd Annual World Congress and EXPO of Advanced Materials-2014, 2014.6.6-9, Chongqing (China) (invited).

〔その他〕

ホームページ等

文部科学省 新学術領域研究

「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」

<https://slowmuon.jp/>

A01 班 超低速ミュオン Ultra Slow Muon 領域番号 2307

<http://slowmuon.kek.jp/>

計画研究 03 班表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関

<http://msl.kek.jp/a03/>  
岩崎先端中間子科学研究室  
<http://meson.riken.jp/>  
MSL ミュオン科学研究所系  
[http://www2.kek.jp/imss/msl/MSL\\_index.html](http://www2.kek.jp/imss/msl/MSL_index.html)

#### 報道関連情報 (計 39 件)

日刊電気通信 注目記事 (2013 年 7 月 24 日号)  
原子力産業新聞朝刊 4 面 (2013 年 8 月 1 日付)  
科学新聞 4 面 (2013 年 8 月 26 日付)  
石田勝彦, 三部勉, 西川賞受賞  
「極冷ミュオンビーム実現のためのミュオニウム標的開発」科学新聞 (2016 年 2 月 26 日)

#### アウトリーチ活動情報 (計 45 件)

三宅康博, 第 20 回技術部会「先端加速器とミュオン科学-素粒子ミュオンが拓く多彩な応用-」場所 アルカディア市ヶ谷 (2011 年 7 月 19 日)  
永嶺謙忠, 超低速ミュオン顕微鏡サイエンスカフェ「素粒子ミュオンは観る、そして創る」神戸メリケンパークオリエンタルホテル 参加人数 50 名 (2012 年 3 月 23 日)  
鳥養映子, 出前授業「超低速ミュオンが拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」場所: 山梨県立甲府昭和高校 参加人数 45 名 (2012 年 8 月 1 日)  
永嶺謙忠, サイエンスカフェ・イン・高輪「環境放射線を正しく知り、守り、役立てる」場所: キリスト友会東京月会会堂 参加人数 30 名 (2012 年 9 月 8 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鳥養 映子 (TORIKAI, Eiko)  
山梨大学・総合研究部・教授  
研究者番号: 20188832

### (2) 研究分担者

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

門野 良典 (KADONO, Ryosuke)  
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: 10194870

岩崎 雅彦 (IWASAKI, Masahiko)  
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・主任研究員

研究者番号: 60183745

### (3) 連携研究者

西田 信彦 (NISHIDA, Nobuhiko)  
公益財団法人豊田理化学研究所・その他部等・フェロー  
研究者番号: 50126140

秋光 純 (AKIMITSU, Jun)  
岡山大学・特任教授  
研究者番号: 80013522

杉山 純 (SUGIYAMA, Jun)  
豊田中央研究所・分析部・主監  
研究者番号: 40374087

永嶺 謙忠 (NAGAMINE, Kanetada)  
独立行政法人理化学研究所・主任研究員研究室等・客員研究員  
研究者番号: 50010947

齋藤 直人 (SAITO, Naoto)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・J-PARC センター・教授  
研究者番号: 20321763