

領域略称名：超低速ミュオン  
領域番号：2307

平成25年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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」

(領域設定期間)

平成23年度～平成27年度

平成25年 6月

領域代表者 (山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授・鳥養映子)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究の進展状況	7
4. 若手研究者の育成に関する取組状況	10
5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	11
6. 総括班評価者による評価	12
7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）	18
9. 今後の研究領域の推進方策	25
10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画	27

# 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

## 目指す新たな研究領域：

本計画の目的は、「超低速ミュオン顕微鏡」によるイメージング法(超低速ミュオン顕微法)を確立し、多様な物理・化学・生命現象の発現機構を、スピン時空相関という概念を導入して理解する新しい学術領域を開拓することにある。

スピン偏極した正ミュオンは、物質に止まり崩壊する際にスピン方向に対し、空間異方的陽電子を放出する。これにより、多くの臨界現象が起こるピコ秒からマイクロ秒までの広い時間域において、その微視的状態を高感度に検出するプローブとなる。核磁気共鳴(NMR)や中性子回折法では見えない時間域において、磁気秩序や電子状態を、温度・圧力・磁場などの外部条件に制約されずに測定できる。この大きな特徴により、世界各地の加速器施設において、物質科学研究に用いられている。超低速ミュオンは、熱エネルギー状態にある真空中のミュオニウム(正ミュオンと電子からなる水素状原子;  $\text{Mu}$ )からレーザー解離法で得られるものである。さらにこれを加速、収束させて3次元的な顕微プローブを創る。このようにして深さ方向にナノオーダーの局所性と走査性を創りだし、界面のスピン伝導や触媒反応、表面-バルク境界のヘテロ電子相関などの機構を微視的に解明する、新たな超低速ミュオン科学領域を拓く。

「超低速ミュオン顕微法」は、物質の表面近傍から内部にわたる現象の走査的な観測により、表面とバルクの関係性を明らかにし、また界面という境界条件自体が作り出す諸現象の微視的機構を解明するものである。一方、生命科学においても生体の空間イメージングなどの新たな可能性を拓く。加えて、さらなるビームの低温化・尖鋭化により、「標準理論」を越える素粒子/基礎物理のフロンティアを推進する。

図1-1に、超低速ミュオン顕微鏡の特徴的な観測の空間スケールを示す。

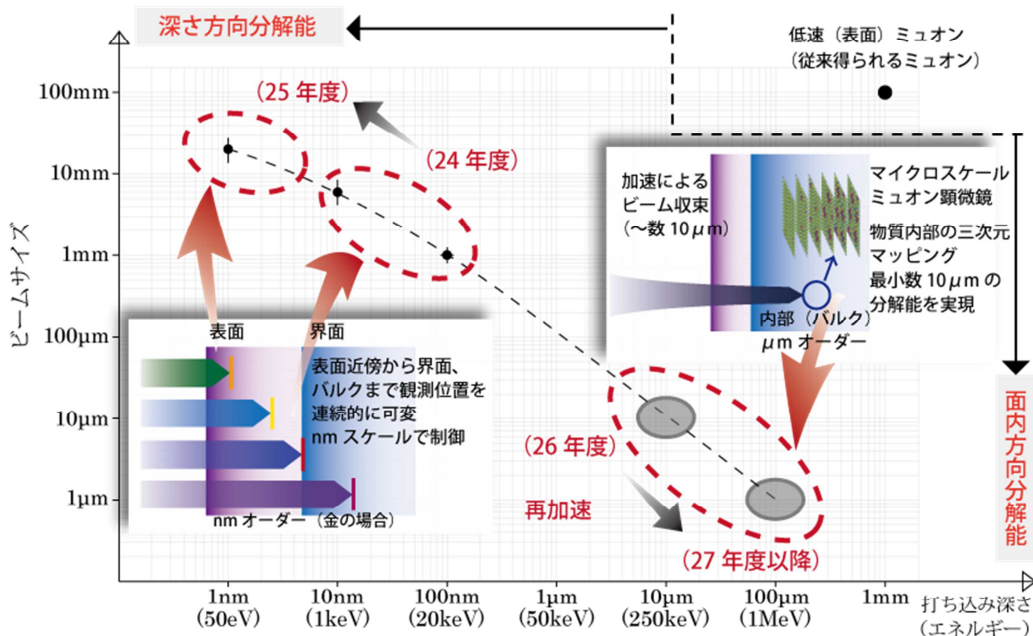


図1-1 超低速ミュオン顕微鏡で見える空間スケール

物質・生命の研究のプローブとして最も必要なのは、①物質表面から深さ方向にナノメートル (nm) の分解能での連続走査性能、②サブミクロン(μm)分解能での物質内部3次元走査性能、および、③マイクログラム (μg) 以下の試料に対する測定感度である。第一段階ではミュオンの超低速化により、表面近傍の打

ち込み深さ(図1-1 横軸)を連続的に変化させ、nm分解能での走査性能を実現する(超低速ミュオン分岐)。第二段階では超低速化技術に加えて加速によりビームを尖鋭化した超高密度マイクロビームを完成させて、 $\mu\text{g}$ オーダーの微量試料の観測や、物質深部をサブ $\mu\text{m}$ オーダーのビームサイズ(図1-1縦軸)で2次元マッピングする機能の完成を目指す(ミュオンマイクロビーム分岐)。世界の研究者が、これらの局所性を目標としながら、他の方法では原理的な壁を越えることができなかった。この2つの新しい量子ビームを用いた顕微法により、大強度陽子加速器施設(J-PARC)に物質・生命・素粒子基礎物理研究の世界的研究拠点を構築する。

新しい測定方法の導入による現象の多角的な理解は、それぞれの分野に飛躍的な発展をもたらす。超低速ミュオン顕微法の持つ潜在能力を十分活用し、異分野への展開を積極的に図ること、ミュオンが活躍する領域を拡げることが、我が国の学術の進展のために重要である。最高性能のミュオン顕微鏡を完成させるためには、物性、化学、生命科学はもとより、加速器科学、レーザー科学、素粒子原子核物理にわたる広範な分野からの最先端の知識と技術を結集する必要がある。

**学術的背景：**ミュオンスピン回転法( $\mu\text{SR}$ )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手法として発展してきた。零磁場ミュオンスピン緩和法(山崎他; PRL, 1978年)、高エネルギー物理学研究所(KEK: 現在は機構)における世界初のパルス状ミュオンビーム発生(永嶺他; Hyperfine Interactions, 1981年)、パルス状ビームの特徴を活かした新しい研究方法(鳥養、門野、下村、西山他; PRL, 1994年他)等を、本領域の研究者が主導する形で創出してきた。現在では、磁性、半導体、超伝導、化学反応、蛋白質の研究等の多彩な分野に拡がりを見せている。しかしながら従来得られてきたミュオンは、ビームサイズが数10mm $\phi$ 、打ち込み深さがmmオーダーで、 $\mu\text{SR}$ 法はバルクの性質を見るものであった。超低速ミュオンは、KEKで20年余り前に原理実証された(三宅、岩崎、下村、永嶺他; PRL, 1995年)。その後、KEKと理化学研究所(理研)の共同開発研究によって、強度は毎秒20個ながらも深さ分解能(nm)と時間分解能(ns)の画期的な性能が確認された。この優れたビームの実用化が世界の研究者から待望されている。

一方、物質の表面・界面では並進対称性の破れにより、バルクと異なる特有の性質を持つ低次元の新物質相が出現することが知られている。これらの発現機構の解明のためには構造のみならず、その性質の根源にあるスピン時空相関の理解が重要である。例えば、触媒反応や水素貯蔵物質における、表面及びその近傍(サブサーフェス)における水素電子状態とそのダイナミクスの解明は、クリーンエネルギーの実用化につながることからグリーンイノベーションのための緊急の課題である。超低速ミュオンは、これらに対する他の追従を許さない決定的なプローブとなるであろう。また走査型プローブ顕微鏡(SPM)技術の飛躍的な発展によって、物質の表面からバルクに至る性質の統一的な理解が重要であることが一層明らかとなってきた。表面、サブサーフェス、バルクと電子状態を連続的に走査検出できる超低速ミュオン顕微法は、まさにこの目的に相応しい微視的研究手段である。

**本領域の発展による学術水準の強化：**表面・界面・薄膜が関わる諸現象の微視的機構解明は、基礎研究においても、グリーンイノベーションにつながる応用研究においても、緊急の課題である。超低速ミュオン顕微法で得られる、電子状態とスピン状態の時空相関に関する局所的かつ俯瞰的な理解は、これらの解明に不可欠である。この新しい量子測定手法は、これまで本領域の研究者らによって開発された画期的な超低速ミュオン発生技術に加えて、KEKの旧ミュオン施設を3桁上回るJ-PARCの超強パルスミュオンビームをもって初めて実現できるものである。J-PARCが完成した今こそ、超低速ミュオン顕微鏡の夢を実現できる時である。この新しい測定法により、世界の物質・生命科学の進展に貢献したい。

## 2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域は、計画研究間の有機的な連携を図り研究を推進するとともに、領域全体を代表して窓口の役割を果たす総括班(X00)、および、以下の4班から構成される。

- A01 超低速ミュオン顕微鏡と極微 $\mu$ SR 法創成
- A02 界面のスピンの伝導と反応
- 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

また、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、A01、A02、A03 班において3名ずつの公募研究者が平成24年度より加わった。研究組織を以下に図2-1に示す。

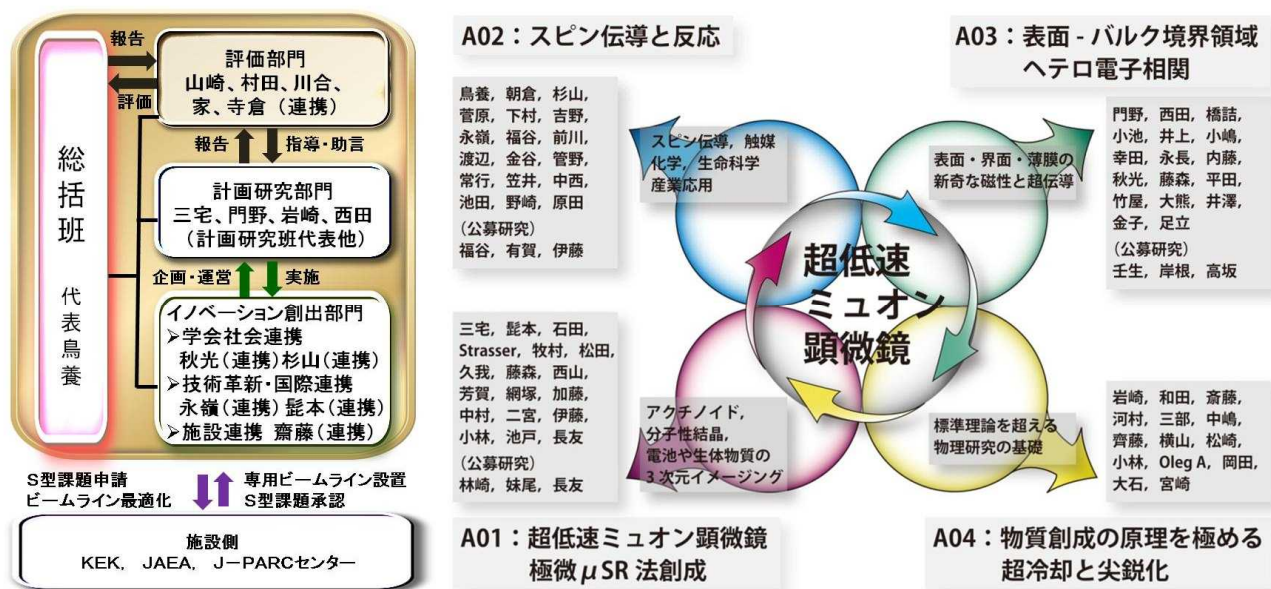


図2-1 研究組織全体図

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は、領域全体が一丸となって、従来の100倍の強度を持つミュオン源、超低速化装置、従来の100倍の強度を持つライマン $\alpha$ レーザー装置を研究期間の前半に開発する必要があった。具体的な研究組織間の連携状況を以下に記載する。

### ミュオンビームの最適化(A01、A02、A03、A04)

超低速ミュオンは、加熱したタングステン標的にミュオンを打ち込むことで生成される。この際に用いる4MeVミュオンビームは、超伝導電磁石を用いたビームライン(Uライン)より取り出されるが、タングステン標的やレーザーに合わせた形状が必要となる。このための実ビームを用いたビームチューニングは、全班の連携のもとで平成24年度に行われ、タングステン標的位置でのビームが最適化された。これには博士学生も参加して、ビーム発生技術を学んだ。その結果適した形状のミュオンビームをタングステン標的に入射することが可能となった(図2-2)。

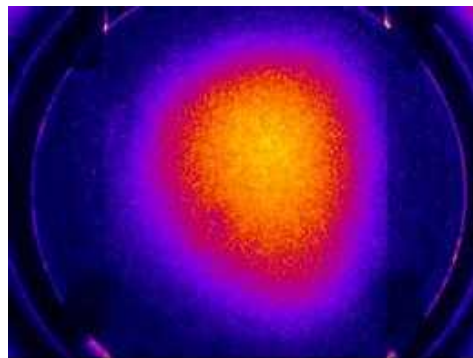


図2-2 最適化されたビーム像

### レーザーシステムの構築(A01、A04)

A04班によって開発されたレーザー装置をA01班のビームラインに設置するため、理研やJ-PARCで、隔週程度の定期的な担当者会議を開催し、班を越えたチームとして共同開発に取り組んだ。A04班によって準備されたクリプトンガスセル中では、二光子共鳴四波混合法によってライマン $\alpha$ 光が生成され、A01班のレーザー輸送系によってミュオニウム生成チェンバにまで輸送される。従って特にレーザー輸送系については、レーザー



図 2-3 レーザーシステム検討会の模様

のフォーカス方法などを踏まえた光学計算(光線分離・プロファイル整形)や真空系などがA04班とA01班の綿密な連携の下で検討され、仕様が決定された。他にも、機器配置の議論が行われ、A01班のレーザーキャビンレイアウト・レーザーテーブルサイズなどの仕様が決定された(図 2-3)。また、レーザーをミュオンビームパルスと同期させるため、A01班が加速器のタイミング信号の配線を行うとともに、その信号仕様がA04班に伝えられ、適切なモジュールが製作された。レーザーの必要電力・冷却水などもA04班からA01班に適切に連絡され、用意された。領域総括の主導により、平成24年6月から3月にかけてほぼ毎月レーザー検討会議を開催し、超低速ミュオン研究のパイオニア達も結集して支援体制を作った。

### 分光器の構築(A01、A02、A03)

A01班による分光器開発は、 $\mu$ SR測定を行なっていくA02、A03班の意見を取り入れながら進めた。これまでA02、A03班の関係者とともに、分光器開発に関する会議を2度開催すると共に、領域会議、班会議においても毎回報告と議論を行い、領域全体の意見を集約した。さらに個別の打ち合わせを行い、各班の実験の実態に即した装置の設計、製作を進めた。また陽電子計測用カウンターに関しては半導体素子を用いた新規なシステムを、A03班を中心として開発し、既存の分光器でのテストを繰り返した上で、実機の作製はA03班の連携のもとでA01班が行い、分光器へ組み込んだ。さらに試料輸送用ロードロックチェンバに関しては、A01班とA03班とで議論を行い、仕様決定の上でA03班が製作を行った。

### 班を越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、博士研究員4名、公募研究者9名、協力研究者3名、事務局3名、博士学生等が加わり、80名を超える大所帯となっている。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、班を越えた支援・指導体制を組んだ。このうち4人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するまでに至っている。また理論から転向した博士学生は、領域研究者の指導のもとでコミショニングチームの一員として活躍した。

### 他の新学術領域との連携

一方領域を超えた研究連携も活発になってきている。一例としては他の新学術領域研究「コンピュー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が進展している。また物性科学領域横断研究会を「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」領域と連携して毎年秋に共催し、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。さらに「トポロジカル量子現象」領域とは、相互に研究会や領域会議に参加するなど、領域の枠を越えた交流も深化している。

### 3. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究毎に整理する〕（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在どこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究毎に記述してください。

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測定といった基礎物理定数の精密測定まで、さまざまな分野において、従来の研究を飛躍的に発展させる突破口となる。対象となる広い分野の研究者との協力体制のもとにこれを用いた超低速ミュオン顕微法を確立し、様々な研究に適用することにより新たな融合領域を創生する。これを基盤にしてさらなる新分野の開拓をめざす。

研究期間前半（平成23-25年度前半）は、A01班とA04班を中心に計画班全体が連携して、本領域の共通基盤装置である超低速ミュオン顕微鏡の開発を集中的に行った。この結果、平成24年度に超低速ミュオン顕微鏡の基幹部を構成する、熱ミュオニウム発生装置、高強度ライマン $\alpha$ レーザー装置、光学系の開発を一通り完了することができ、平成25年度中の超低速ミュオン発生と実験開始に目途がついた。超低速ミュオンは、加熱したタングステン標的にミュオンを打ち込むことで生成される。この際に用いる4MeVミュオンビームは、超伝導電磁石を用いたビームライン(Uライン)より取り出される。Uラインにおいては、平成24年11月に現有のDラインの強度を10倍以上（英国RALの80倍）上回るミュオン発生が確認された。この強度は、すでにUラインの最終目標値にほぼ達しており、加速器の陽子ビームパワーが目標の1MWになった際には、目標値の4倍という未踏の強度となることが見込まれる。また、ライマン $\alpha$ レーザーのための高利得レーザー媒質として、本領域の計画時には育成困難とされた新規セラミクス（特許出願準備中）が、産業界との共同開発により成功したことも著しい成果である。

本領域は4つの計画研究と公募研究により研究を展開している。

A01 超低速ミュオン顕微鏡：超低速ミュオンビーム源と $\mu$ SR実験装置からなる超低速ミュオン顕微鏡の開発、製作、設置を先導して行い、ビームの最適化と高度化を図る。また微小領域を3次元的にマッピングする顕微法を確立し、極微試料での研究を可能にする。さらにエネルギーが揃ったミュオンの干渉性を用いて、物質内部を探る「回折ミュオン顕微鏡」の基盤を創る。

A02 界面のスピントロニクス伝導と反応：正ミュオンの物質中での電子の捕獲・放出を伴う素過程を利用することにより、磁性を持たない物質の性質を超高感度で探ることができる。スピントロニクス材料界面における伝導電子のスピントロニクス寿命、高分子膜・生体中の電子伝達や、2次電池の電極反応におけるイオン伝導の経路同定に焦点をあて、伝導現象の本質に迫る。さらに界面水素、細胞中の酸素、金属触媒や光触媒などが関わる表面・界面反応の機構を解明する。

A03 表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関：超低速ミュオン顕微法を用いて、表面近傍からバルクへの境界領域における、様々な長さスケール(1~10<sup>3</sup>nm)で生起する協同現象(界面の電子状態、空間的制限下での異方的超伝導の秩序変数と渦糸状態、金属表面を持つトポロジカル絶縁体の準表面電子状態等)を観察し、通常の電子相関(<nm)とこれらが絡み合う複合的(ヘテロ)電子相関の物理を明らかにする。

A04 物質創成の原理を極める超冷却と尖鋭化：超低速ミュオン基幹技術として高強度ライマン $\alpha$ レーザーを開発する。さらに生成される超低速ミュオンのエネルギーを室温以下にまで冷却することにより、エミッタンスの良い偏極ミュオンビームを実現し、ミュオン異常磁気能率(g-2)測定実験など、標準理論を超える素粒子物理研究に貢献する。ここで実現されるビームの冷却と短バンチ化技術は、物性研究のさらなる拡大に不可欠な極限性能を実現するための基幹技術としても重要である。

以下に各班の進展を述べる。

**A01 班:** J-PARC 物質生命科学実験施設のミュオンエリア U ラインにおいて超低速ミュオン顕微鏡の建設を進めた。超低速ミュオン顕微鏡の基幹部である熱ミュオニウム発生装置および超低速ミュオンビーム光学系は、(1)ミュオニウム生成チェンバ、(2)タングステン標的、(3)大強度表面ミュオンビームライン、(4)レーザースystem、(5)レーザー導入系、(6)ビーム輸送系及び(7) $\mu$ SR 実験用分光器、から構成され(番号は図 3-1 に対応)、これらの開発と製作を平成 24 年度までに完了した。先に述べた通り、U ラインでは平成 24 年 11 月に(陽子ビーム強度 200kW 運転時)パルス当たり 250 万個の表面ミュオン発生が確認された。陽子ビームのパワーが計画の 1MW に達する平成 27 年には、U ラインではパルス当たり 1200 万個という当初の目標値を大きく超えた強度となり、それを元に作られる超低速ミュオンも目標を上回る数が期待できる。またタングステン標的に関しては、ミュオニウム発生効率を目的値まで上げるため、新たな高純度化の手法を確立するとともに、標的材料の最適化を進めた。

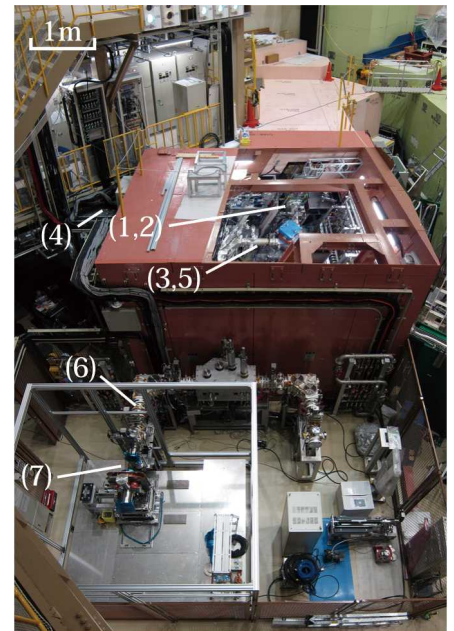


図3-1 Uラインに設置された超低速ミュオン顕微鏡の基幹部

**A04 班:** 平成 25 年 2 月に、理化学研究所で開発中の全固体高強度パルスレーザー光発生装置において、初のライマン $\alpha$ 光発生を確認した(図 3-2)。また高利得レーザー媒質として、Nd:YAG セラミックスの産業界との共同開発に成功した(特許出願準備中)。今後この媒質を導入することにより、平成 25 年度中に、212.556 nm、820.649 nm の各波長において 50 mJ を実現し、目標の 1 パルス当たり 100  $\mu$ J のライマン $\alpha$ 共鳴放射を達成できる見通しを得た。さらにミュオンビームのエミッタンスを向上させるため、常温ミュオニウム生成標的については、エアロジェル他の候補で生成試験を進めている。シミュレーションに基づいた表面形状の加工により、生成効率を 5 倍程度上げることを目指している。

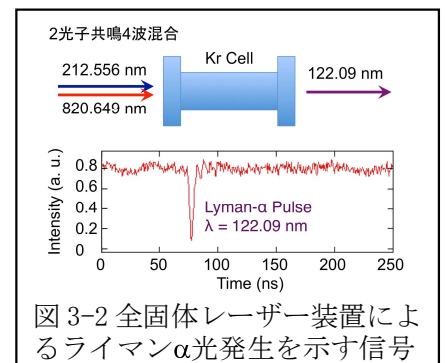


図 3-2 全固体レーザー装置によるライマン $\alpha$ 光発生を示す信号

一方、A02 班、A03 班は、これまでミュオンの応用が進んでいなかった分野、特に触媒化学、生命科学分野との共同研究を積極的に進めている。

**A02 班:** 次の4つのモデルシステムについて、超低速ミュオンを応用するための準備研究が計画通り進んでいる。さらに、触媒化学、生命科学、スピントロニクス研究会により、隣接分野からの関心も高まった。

1. 界面近傍におけるスピン伝導：伝導電子のミュオンによる散乱がスピンに依存することを原理的に実証したGaAsの円偏光光励起実験では、負ミュオニウムの荷電揺動に基づくスピン依存散乱の理論を前川らが解明、半導体中のスピン伝導測定のための理論的根拠を確立した。実用材料開発では、(Ga,Mn)As 超薄膜の磁性及び磁気輸送特性の強い膜厚依存性を発見、その機構と電子構造を解明、注入用電極としての高性能化に成功した。
2. 触媒化学反応：光触媒の量子効率を左右する格子欠陥、特に酸素欠陥の構造とその動的性質をミュオンで直接観測できることを、欠陥を制御したアナトース粉末結晶におけるミュオン緩和率の粒径(表面



積/体積比)依存性及びルチル単結晶の還元処理効果の実験によって検証した。

3. 電気化学を担うイオン伝導：液体溶媒に迫る固体溶媒中のイオン伝導の測定に成功した。各種電池材料(正極・電解質・負極)について、 $\mu$ SR法によりLi及びNaの拡散挙動と係数を求め、他の手段と比較してキャリア濃度と電極の反応面積を導く手法を示した(図3-3)。また磁石材料の内部磁気構造、水素貯蔵材料の水素脱離挙動の解明に $\mu$ SR法を適用する道を拓いた。
4. 生命反応を司る電子伝達：電子伝達系を担う蛋白質の1つであるシトクロムcについて、水和水による分子間電子伝達の促進効果を見出した。また、アルブミン蛋白質を含む緩衝溶液において、ミュオニウムのスピン緩和が純水中と同様に酸素の混入により敏感に変化することを示し、血液中の酸素濃度の解析への道を拓いた。

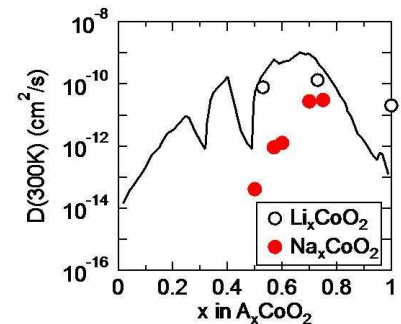


図3-3  $\mu$ SR法により求めた電池材料のイオン拡散係数

**A03 班**：表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関の解明を目的とし、超低速ビームを用いて初めて観測可能となる薄膜およびその表面研究に携わる研究者を連携研究者として加えることで、超低速ビーム実験に向けた研究を展開している。

### 1. 薄膜・表面研究者との研究連携による進展

電子ドープ系銅酸化物 T相 La214 薄膜の超伝導の研究では、超低速ビーム利用への準備としてポール・シェラー研究所(スイス)の低エネルギーミュオンビームを用いた $\mu$ SR(深さ分解能 $\sim 20$ nm)測定を行い、非ドープ母物質薄膜の超伝導について重要な知見が得られつつある。界面に現れる磁性の研究では、電子デバイス応用を目指した工学分野の研究者との連携により、遷移金属酸化物複合構造の成膜条件等の最適化が進展した。

### 2. 他のプローブとの連携による超伝導と磁性の空間的に不均一な描像の理解

ホールドープ系銅酸化物(La214系、Bi2201系、Bi2212系、Y123系)や鉄系超伝導体( $\text{FeSe}_{1-x}\text{Tex}$ )の研究が進展し、とくにSTM/STS測定により超伝導エネルギーギャップの実空間での不均一さについての理解が進んだ。またSTS測定によって磁束格子のダイナミクスを調べる新手法を開発した。

### 3. カイラル磁性体におけるカイラルソリトン格子の研究

カイラル磁性体  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$  単結晶について、ローレンツ電子顕微鏡を用いてカイラルソリトン格子発生の観測に成功した。この新奇な磁気状態の解明にむけて、新たな不斉合成手法の開発とともに、さまざまなカイラル磁性体におけるカイラルソリトン格子の研究が進んだ。

平成25年2月までに超低速ミュオン顕微鏡の主要装置がUラインに設置された。3月22日にはレーザー装置をJ-PARCに搬入し、平成25年前半における超低速ミュオン発生を目標に着々と準備を進めてきた。レーザーの安全検査に合格し、5月27日には法定の放射線に関する施設検査が予定されていた。しかし5月23日に、J-PARCハドロン実験施設における放射能汚染事故が発生し、J-PARCは事故原因究明と安全対策の見直しのために現在完全停止となっている。本来のスケジュールでは、7月まで超低速ミュオンビームのコミッショニングと性能実証実験を行う予定であった。その後8月から翌年1月まではJ-PARCの加速器性能改良のための停止期間であり、その間にレーザー増強を図る計画であった。しかしながら超低速ミュオン発生実験は来年1月以降に持ち越さざるを得なくなった。超低速ミュオン発生のための基幹装置の準備は完了しており、J-PARCが再開され次第、基礎データを蓄積して本領域研究の後半の実験計画に反映させる。

#### 4. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

領域内の若手研究者の育成について、将来の本分野の発展を見据え、以下に記載する様な積極的な取り組みを行ってきた。

**1. 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ており、若手研究者や学生への幅広い分野の紹介、異分野間の交流を行うと共に、会議運営の経験を通して、若手研究者の自主性の育成と意欲喚起に勤めている。これらの取り組みにより領域研究全体の今後の展開を速やかに進めていける体制が整いつつある。

**2. 超低速ミュオン顕微法の研究手法に習熟するための教育と支援：**本領域では、「超低速ミュオン顕微法」によりこれまで研究対象にすることが出来なかった広い分野の研究者が加わっているため、物質研究を担当している若手研究者には、ミュオン実験の経験が無いものも参加している。そこで、これらの若手研究者に対しては、主に A02、A03 班のサポートのもとで、従来型のビームを用いた試料測定を体験してもらい、測定技術の浸透を図った。また、平成 24 年 12 月中旬に新規ユーザー開拓を目指した J-PARC MLF スクールが開催され、演習課題「ミュオンスピン回転/緩和/共鳴」を実施した。本領域研究に参加している研究グループの若手研究者の多くがこれに参加し、ミュオン実験の講義と演習を受講した。既に研究テーマを持っている若手研究者であるので、演習結果の解析とそこから導きだされる解釈の質に非常に高いものがあつた。これにより超低速ミュオン発生後、速やかに実験を進めていける体制が整いつつある。

**3. 将来の大型プロジェクトリーダーの育成：**シミュレーション、計算物理やシステム工学等の多彩な総合技術科学である加速器プロジェクトに初めて接する A01 班の若手に対しては、毎週行われるミーティングでの発表・意見交換を通じて、総合的な視野を養う機会を設けている。若手の育成に留まらず、プロジェクト全体の情報共有と連携の強化につながっている。A04 班では、2 名の博士研究員が各々 212.556 nm 光源、820.65 nm 光源の開発の主担当として活躍している。全固体レーザーを中心とした最先端のレーザー光源の設計、調整、および出力特性の評価を通じて、新規レーザー開発の基礎技術を習得した。ライマン  $\alpha$  共鳴線の発生にも成功するとともに、A01 班の協力を得て、レーザーの J-PARC への移動・設置・調整は博士研究員主体で行い、加速器科学への応用についても習熟する為の検討会議を隔週で行った。

**4. 自立した研究活動を促すエフォート 15%分の裁量研究の保証：**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%分の裁量研究を推奨している。長友傑氏（A01）は、新たな熱ミュオニウム発生機構を提案し、本領域の公募研究として採用された（物理学会 3 件、領域会議 1 件）。池戸豊氏（A01）は、表面ミュオンビームライン湾曲ソレノイドに関する成果をまとめ、国際会議 2 件、物理学会 3 件、領域会議 1 件で発表した。大石裕氏（A04）は、空間光変調器の原理を応用した新しい高速現象の空間画像撮影システムを提案し、超短パルスレーザーを用いた原理実証実験を実施した。（第一著者として国際会議発表 2 件、レーザー学会 3 件、応物学会 1 件、領域会議 1 件）、宮崎洸治氏（A04）は、キャビティリングダウン分光法を基礎とした新しい環境分析法の原理設計を提案し、理研内の競争的資金に採択された。（第一著者として国際会議発表 2 件、レーザー学会 1 件、領域会議 1 件）

**5. KEK 主催のサマーチャレンジとの連携と指導：**KEK では、学部学生（主に 3 年生）を対象にした 9 日間のサマースクールを毎夏開催している。平成 23 年より、「宇宙線を用いたミュオンスピン回転」という実験演習において、領域の院生や若手が、ティーチングアシスタントとして参加し、課題指導を行ってきた。平成 23 年度は 3 名、24 年度は 5 名の学生参加者を受け入れた。 $\mu$ SR 法の原理を計測回路の組み上げから体験し、今後の若手育成につながっている。

## 5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

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とにより、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。これまでの主要支出は、博士研究員（4名）の person 費（23,000 千円）である。総括班として4名を採用し、A01 班、A04 班の研究活動に2名ずつが参加し活躍している。その他、毎年開催している領域会議・公開シンポジウムと関連した旅費（2年間合計 4,000 千円）、「領域ニュースレター」の編集・発行（年1回）を行い、領域メンバー全体で研究の進展状況を共有するとともに、関係各方面に配布することで研究成果の周知に努めた。

また、各計画研究において、これまでの主要支出とその有効活用状況を以下に記載する。

A01 班では、主要備品として、以下の機器備品の購入を行った。いずれも本領域の共通基盤装置である超低速ミュオン顕微鏡の開発に関わるものである。ミュオニウム発生チェンバ系（30,000 千円）では、大強度表面ミュオンを受け入れ、熱ミュオニウムを有効に発生、加速するシステムの設計・製作、および熱ミュオニウム生成標的である高純度タングステン箔の開発を行った。また、超低速ミュオン輸送系（78,000 千円）は、超低速ミュオンビームを  $\mu$ SR 実験エリアまで輸送し、ノイズ源である陽電子などの二次粒子を除去する部分に対応する。この中には放射線管理区域に入域に関わるインターロックや遮蔽体、タングステンを加熱するヒータ電源や超低速ミュオンの加速・輸送に関わる装置が含まれている。また、超低速ミュオンの加速距離のばらつきを抑えるため、最大 2kV の電圧をナノ秒以下で立ち下げられるパルス高圧電源の開発・製造を行った。その他に、超低速ミュオンを用いた  $\mu$ SR 実験を行うための陽電子計測系、電磁石、冷凍機等を備えた分光器（30,000 千円）、レーザー光をミュオニウム生成チェンバに導入する「レーザー輸送系」の超高真空チェンバ類（16,000 千円）で、すでに真空仕様・動作仕様の確認を済ませている。

A02 班では、備品としては、四重極質量分析計（2,000 千円）、湿度供給装置（2,000 千円）等を購入し、ミュオン測定に先立つ構造研究、試料準備等に活用している。また、効果的に実験を遂行するためには、J-PARC における既存のミュオンビームと共に、J-PARC 以外の海外施設の利用が必須であり、海外施設における実験のための旅費、試料代、消耗品などに使用している。

A03 班では、表面分析用チェンバ（10,000 千円）およびこれと一体として用いる表面分析システム（10,000 千円）を製作した。これらを超低速ビームによるミュオンスピン回転実験用の分光器に隣接して設置することにより、大学等の研究室で作製された薄膜試料を「表面分析システム」により超低速ミュオン実験に先立って試料表面状態を分析することができ、また試料ステージにより隣接する超低速ミュオン用分光器への試料移送を中継することが可能になった。

A04 班では、ミュオニウム共鳴イオン化用新規レーザーシステム開発のための装置を製作した。中でもライマン  $\alpha$  共鳴コヒーレント光発生用全固体パワーアンプ（63,000 千円）、ライマン  $\alpha$  共鳴コヒーレント光発生用 820/845 nm コヒーレント光源（42,000 千円）は、大強度パルス状ライマン  $\alpha$  レーザーの構成要素である 212.556 および 820.649 nm コヒーレント光を構成する主要装置である。100  $\mu$ J のライマン  $\alpha$  共鳴放射を得ることで大強度の超低速ミュオン源が実現するので超低速ミュオン顕微鏡を運用していくために必須の装置である。その他の装置類としては、大強度パルス状ライマン  $\alpha$  レーザーを構成するセラミックレーザー媒質（Nd:YAG セラミックス（2 種 計 12 本）（7,000 千円）、高調波結晶オープン（3,000 千円））、およびレーザーの性能診断、保守のための装置、（パルス波長計（2,000 千円）、ターボ分子ポンプ排気ユニット（2,000 千円）等）を購入した。いずれも、領域研究における活用頻度は非常に高い。

## 6. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 【評価者：家泰弘、川合眞紀、寺倉清之、村田好正、山崎敏光】

本領域のこれまでの活動は、実験および理論の両面において順調に進展していると評価できる。本領域は、素粒子物理学から生体関連物質の研究まで非常に広範囲の分野の研究者で構成されているが、相互のコミュニケーションは良好で、超低速ミュオンの実現とその幅広い応用という、目標に向けて一丸となって活動している様子がうかがえる。領域運営における、領域代表をはじめとするコアメンバーの努力を高く評価する。以下、項目ごとにコメントを記す。

#### 1. 超低速ミュオン発生に関わる研究

A01班とA04班が主導している超低速ミュオン顕微鏡の基幹部である熱ミュオニウム発生装置の製作および設置は平成24年度までに完了した。平成24年11月には陽子ビームパルス当たり250万個のミュオン発生が確認された。J-PARCの出力が200kWと最終目標の1MWの1/5に留まっている現段階で既にこの値を達成していることは、最終的に当初の目標を大きく上回るミュオンビーム強度の実現を予感させるものである。このミュオンから超低速ミュオンを効率よく発生するために、入射ミュオンビームの形状を加熱タングステン標的に対して最適化するなどの地道な作業が進んでいる。超低速ミュオン発生に向けたこれらの準備が整い、原子力規制庁による施設検査を4日後に控えた平成25年5月23日にJ-PARCハドロン実験施設において放射能汚染事故が発生し、それ以降、事故原因究明と安全対策のためにJ-PARCは完全停止状態になっている。待望の超低速ミュオン発生試験が来年以降に持ち越されることになったのは大変残念である。

ライマン $\alpha$ レーザー装置の開発も順調に進み、平成25年3月にはレーザー装置がJ-PARCに搬入されている。また、Nd:YAGセラミックレーザー媒質の開発・導入はレーザー装置の安定した運転に大きく資するものである。

本領域の研究期間の前半は、予算の大部分を熱ミュオニウム発生装置およびライマン $\alpha$ レーザー装置の製作に投入してきたわけであるが、その成果は十分に挙がっているものと認められる。

#### 2. 超低速ミュオン利用を見据えた研究

超低速ミュオン発生への準備が着々と進む一方、近い将来の超低速ミュオン利用実験を見据えた準備研究も進展している。A03班では高温超伝導体や磁性体など応用的にも注目されている物質群について、ミュオンプローブの特徴を生かした研究が進められている。A02班では「動的過程」「スピン選択」をキーワードとしてミュオンプローブの新たな適用対象を開拓する試みが精力的に行われている。半導体中のキャリアのスピン偏極、触媒化学反応、イオン伝導、生体関連物質など、極めて広範囲の研究分野にミュオン利用実験の有用性を浸透させる努力がなされている。

Siに注入された伝導電子スピン偏極については、ミュオン緩和率の電子スピン依存性が確認され、そのミクロなメカニズムの理論的解釈も進められている。これは、スピントロニクスにおける挑戦的課題であり、より明確な成果に結実することを期待したい。また、光触媒に関しては、TiO<sub>2</sub>における酸素欠陥の役割が重要と思われているが、従来の研究では酸素欠陥の正体を実験的に明らかにすることが困難であった。したがって、ミュオンにより直接観測ができることが示された意義な大きい。この実験に対する理論的な解釈もスタートして、酸素欠陥ではミュオンがミュオニウムとして存在することが予測された。ただし、酸素欠損という単純そうな対象が、理論計算にとって意外に困難な課題であり、計算結果の妥当性の判断は慎重を要する。更に、ミュオンは軽いので、その量子効果の取り入れが理論としての今後の課題である。

Li イオン二次電池における Li イオンの拡散係数の測定も興味深い。その他、磁石材料の内部磁場構造や水素貯蔵材料の水素離脱の測定などが行われており、これらもまた、今後の理論解析の興味深い対象である。その他、生体関連ではシトクロム *c* での電子伝達の研究、銅系超伝導体や鉄系超伝導体の研究、カイラル磁性体の研究などにおいても新しい知見が得られつつある。

超低速ミュオン顕微鏡の実現により、表面近傍における触媒化学等の反応場の研究が可能になり、新分野に発展することに期待している。触媒現象は様々な要素が絡み合うため、なかなかその本質を捕まえることは難しいが、たとえば光触媒で重要な酸素欠陥の電子状態の測定には強力な手法となるであろう。研究を進めるにあたってはこれまでのミュオンを用いた研究手法の長所を生かし、触媒研究者のこれまでの知見を大事にしつつも、計画研究者が主体的に研究テーマを選択し、実験結果を解釈することが重要である。

触媒化学へのミュオンの応用が進展していることは喜ばしい。光触媒物質チタニア( $\text{TiO}_2$ )のバルク内の酸素欠陥の電子構造等は 80 年代に ESR 等で精力的な研究がなされているが、表面近傍の研究は端緒にすぎたばかりである。最近では東大グループが切断面の電子顕微鏡を用いてバルクから表面近傍の酸素欠陥の観察に成功している。しかしながらその機能については、これを調べる手法がなく深さ方向の分解能を持つ超低速ミュオン顕微鏡で、その電子構造、あるいは高温下での拡散の様子などの理解が進むことに大いに期待している。この分野は様々な手法で研究がなされているので、それらの研究をサーベイし、全体像をよくつかんでから、実験結果の解釈をすることが特に重要である。このため、これまで以上にこの分野の様々な研究者との研究会等を通じて連携を図ることを勧めたい。

ミュオンによる物性研究を本質的にしっかりした足場の上に進めるためには、実験研究と理論研究の密接な連携が必須である。ミュオンの存在状態（位置および荷電状態）を理論的に明らかにできれば、実験結果が非常に生きてくる。今後の一層の実験と理論の連携促進を期待したい。

### 3. 超低速ミュオン発生 of 新しい試み

現行計画の主幹である加熱タングステン標的による熱ミュオニウム発生方式を推進する一方、それに代わる新しい試みもなされている。タングステンに代わる標的物質の可能性としてイリジウムからの熱ミュオニウム蒸発特性が調べられている。また、ミュオンの基礎物理実験等を念頭においた常温ミュオニウム源の開発ではシリカエアロジェルからのミュオニウム放出について TRIUMF 施設での共同研究が進められている。

一方、酸化物減速材を用いて大強度の低速ミュオンの発生が大気中でも可能である。この方法は時間分解能は低いですが、超低速ミュオン実験の前の探索的研究のために準備することを勧める。

超低速ミュオンは優れたパルス時間分解能を有している。この時間分解能を最大限に生かした研究の進展に期待する。

### 4. 人材育成、アウトリーチ活動

広範囲の分野の研究者が結集している本領域において相互理解を促進するためのプレスクールの開催は有効に機能している。また、本領域予算で雇用されている若手研究者に対して、自立した研究活動を促すエフォート 15%分の裁量研究を保証していることは、若手研究者の自主性の涵養やキャリア形成にとって意義の深い仕組みであり、高く評価できる。

ミュオンという一般にはあまり馴染のない素粒子とその利用研究の知識普及に関して、本領域メンバーが KEK のイベントなどに積極的に関与してアウトリーチ活動を展開している。この方向はさらに積極的に進めるべきである。

## 7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理する〕

（3 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

### 計画研究A01：

#### (1)超低速ミュオン発生装置の開発・整備と微小ビーム実現に向けた開発の推進：

A01 班では超低速ミュオン発生源、輸送ビームライン、分光器等、超低速ミュオン顕微鏡基幹部の製作を行った。これらは既に完成し、設置されており、J-PARC の再稼働を待っている状態である。ビーム輸送系に関しては綿密なシミュレーションに基づいた設計がなされ、性能確認のために Li イオンを用いた加速と輸送試験を行った。図 7-1 に示したように分析電磁石により  ${}^6\text{Li}$  と  ${}^7\text{Li}$  を十分な分解能で分離できることが確認された。また、超低速ミュオンを設置する U ラインの表面ミュオンビームの最適化は平成 24 年度に完了し、現在 U ラインの表面ミュオンビームは世界最高の強度をもつことを確認している。

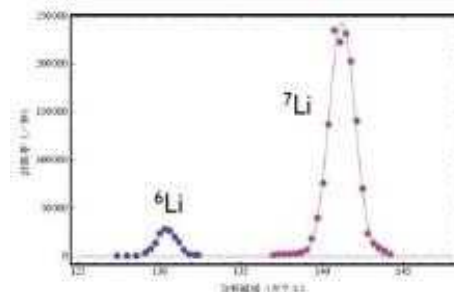


図 7-1 Li イオンを用いたビームライン輸送試験

大強度の熱ミュオニウムを発生させるために必要な高純度タングステン箔に関しては、現状、生産メーカーがなくなってしまったため、製作技術の開発を行った。新たに高純度バルク材よりタングステン箔を製作する方法として、機械研磨によって製作する手法を確立し、99.9999%のタングステン箔の製作に成功した。

またビーム収束性能の向上のため、公募研究者の福谷らと連携し、細く絞ったガラス管内壁の帯電による静電的な散乱を応用し、最終焦点位置でのビーム径を数 mm 以下にする「キャピラリー法」の R&D を行っている。現在、筑波大のタンデトロン実験室でテストベンチの構築が進展している。

#### (2)微小ビームによるマイクロ $\mu\text{SR}$ 実験に向けての物性解明：

平成26年度より、超低速ビームの加速によりビーム径を数  $\mu\text{m}$  にまでに収束させたマイクロミュオンビーム生成に向けた装置の製作を行なう。このビームにより実現する「マイクロビーム $\mu\text{SR}$ 法」に向けて、測定対象となる試料の予備的研究が進展している。例えば $\beta'$ -Pd(dmit) $_2$ 塩の誘電異常の周波数および温度依存性は、リラクサー誘電体に見られる誘電分散と良く似ており、分極がそろった領域が不均一に生じていることを明らかにした。またカゴ状構造を持つPrIr $_2$ Zn $_{20}$ やPrRh $_2$ Zn $_{20}$ における相転移が磁気的な変化を伴わないことを $\mu\text{SR}$ 法により見出し、四極子転移を強く支持する結果を得るなどの研究を行った。

### A01 公募研究

#### 【林崎規託】超低速ミュオン線形加速器の開発

ビーム尖鋭化の基盤技術として、超低速ミュオンを 1MeV 以上に再加速するための高周波四重極型線形加速器 (RFQ) とインターディジタル-H 型線形加速器 (IH-DTL) の開発をおこない、新たな構造をもつ、運転周波数 324 MHz の超低速ミュオン加速用 IH-DTL 原理実証機のデザインを完了した。

#### 【妹尾仁嗣】分子性導体における低次元揺らぎの織り成す多様なスピン状態の理論的研究

分子系  $[\text{M}(\text{tmdt})_2]$  ( $\text{M} = \text{Ni}, \text{Au}, \text{Cu}$ ) の電子状態を理論的に調べ、三つの化合物に共通の多軌道モデルを構築し、第一原理計算から強束縛パラメータを見積もり、電子構造の系統的理解を得た。また  $\beta'$ -X[Pd(dmit) $_2$ ] $_2$  の電子状態を系統的に調べ、スピン間の交換相互作用が 1 次元異方性を持つことが分かった。

#### 【長友傑】物質表面から真空中への熱ミュオニウムの蒸発過程の系統的な研究

大強度熱ミュオニウム源として最適な物質を探索するため、イリジウム金属箔表面からの熱ミュオニウム

の蒸発過程を調べた。600°C-1600°Cの測定で、1000°C以上で熱ミュオニウム Mu の発生を確認できた。

## 計画研究 A02 :

「動的過程を伴う相互作用のスピンの選択性」という概念で理解することにより、以下の4つの現象を統一的に説明することを目指して研究を展開している。

(1) 界面近傍におけるスピン伝導 : GaAs中の負ミュオニウムスピン緩和の伝導電子スピン偏極依存性に関し、負ミュオニウムの荷電揺動に基づく理論的解釈を提案した(図7-2)。このミュオン実験手法をSiなど他の半導体へ展開する可能性を示した。また、普遍的スピン注入法の確立のための偏極加速電子銃の開発を進めた。さらに、スピントロニクスでは、磁性体/絶縁体・半導体界面のスピン状態の理解と制御が必須である。膜厚が10 nm以下の(Ga,Mn)As薄膜において磁性、及び磁気輸送特性が強い膜厚依存性を示すことを見出し、その機構を理解することにより電子構造の理解の深化をとともに、スピン注入用電極としての高性能化を進めた。一方、界面のスピン構造の解明に資するためSTM観測技術を発展させ、スピン偏極伝導電子放出顕微鏡(SP-BEEM)の開発を進めた。

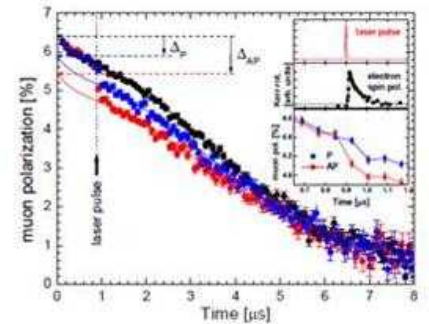


図 7-2 n-GaAs 中に円偏光励起電子による $\mu$ SR 信号の偏光依存性。スピン計測原理が理論的に説明された。

(2) 触媒化学反応 : 酸化物には欠陥構造が多数存在し、その電子物性や触媒物性を決定している。ミュオンにより酸素欠陥を直接観測できる方法を確立し、酸素欠陥の光触媒活性への寄与を解明することを目的として、現在までに単結晶のミュオンスペクトルの温度依存性が、酸素欠陥が多く存在する場合、特異な挙動を示すことを見出した。すなわち、ミュオンにより酸素欠陥を直接観測できることが分かった。東大常行グループによる第1原理計算によっても、ミュオンはミュオニウムとして酸素欠陥に存在することが予測された。

(3) 電気化学を担うイオン伝導 : 積層固体電池の超低速ミュオン顕微鏡による観察で、界面層でのイオン拡散やイオン濃度変化を明らかにし、固体電池の性能を支配すると言われる「界面層」に関する新知見を得ることを目的とし、積層固体電池におけるイオン拡散を調べている。正極材料の $\mu$ SR測定結果と電気化学測定結果を比較することにより、電解液中での反応面積と充電深度との関係を世界で初めて明らかにした。また $\mu$ SR法により固体電解質材料のLi拡散係数を求め、イオン伝導度と比較してキャリア濃度を見積もり、イオン伝導を支配する要因を明らかにした。さらにLi以外にもNaの固体内拡散を検出できることを明らかにした(図7-2)。

(4) 生命反応を司る電子伝達 : 生命系の電子伝達において、理論計算により水と水が電子伝達を媒介するという提案がなされている。そこで、シトクロム c について含水量を制御した $\mu$ SRスペクトル測定を行い、含水量の増加が電子の3次元拡散を促進すること、ガラス転移温度の上下で電子伝達の振る舞いに差異があることを明らかにした。これにより、生命系における光合成や呼吸鎖反応のコアとなっている電子伝達の解析に $\mu$ SR実験の有効性が明らかになった。また、水溶液中の溶存酸素の検出に、ミュオニウムのスピン緩和の測定が極めて有効なことを明らかになり、 $\mu$ SRが低酸素症など医療診断に役立つことが示唆された。

## A02 公募研究

### 【福谷克之】表面水素の分極・荷電状態

表面、界面に存在する水素の電子状態の解析を進め、アモルファス氷については、水素の核スピン転換時間が $\sim 300$ sであることを明らかにし、電場誘起モデルを提案などの成果を得た。また、現有のイオン加速器に、キャピラリー透過特性評価用真空槽、測定系を新たに設計して取り付け、キャピラリーによるミュオンビーム収束のための予備実験を進めている。

**【有賀寛子】金属ナノ粒子の水素化触媒反応特性の原子レベル解明**

SnO<sub>2</sub>はガスセンサーとして、広く利用されている。Ptの添加効果をミュオンで解明することを目的として、メタンの酸化反応とPtの担持量の関係および構造との関係を調べ、Pt存在形態を明らかにした。

**【伊藤孝】絶縁体スピンドット素子におけるスピンドット生成の微視的検証と界面スピンドット状態の解明**

スピントロニクス薄膜試料の超低速ミュオン測定に必要となるヘリウムフロックライオスタットの設計・製作を行うと共に温度調整機構の整備を行なった。超高真空中における試料の着脱機構の開発および電流・電圧を印加した状態における超低速ミュオン測定を可能とした。

**計画研究 A03 :**

(1) 超低速ビーム実験に向けた準備研究として、電子ドープ系高温超伝導母物質 T'相銅酸化物 La214 系について研究を行った。内藤・山本（連携）らは、T'相銅酸化物母物質でキャリアドープせず超伝導が発現することを分子線エピタキシー法による薄膜試料で見出した。この超伝導が本質的なものかどうかを見極めるために、超伝導を示す T'相 La<sub>1.9</sub>Y<sub>0.1</sub>CuO<sub>4</sub> (LYCO) 薄膜試料(厚さ~300nm)について、ポール・シェラー研究所の低エネルギーミュオンビームを用いた  $\mu$ SR (深さ分解能~20nm) により、試料の膜内部深さ方向磁場分布を測定した。図 7-3 に示すように内部磁場は試料表面からおおよそ 100nm までの深さに渡ってマイスナー効果により単調に減少することが見いだされ、T'相銅酸化物母物質でバルクに超伝導が発現していることを初めて微視的に検証する結果となった。これは、超低速ミュオンよりも一桁劣るものの、深さ分解能を持つ  $\mu$ SR が有効であることを実証するとともに、電子ドープ系においては「モット絶縁体にキャリアをドープして現れる超伝導」という銅酸化物の基本的な理解について再考を促す重要な結果である。

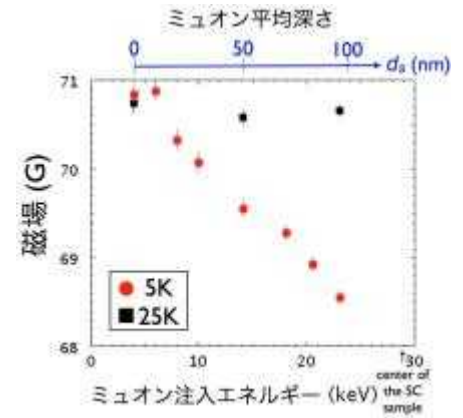


図 7-3 : 低エネルギーミュオンによる  $\mu$ SR で得られた LYCO 薄膜の磁場中における内部磁場分布。(外部磁場 (~71G) は膜面に平行に印加。)

(2) 磁場中第 2 種超伝導体の渦糸の運動の研究は、超伝導体に電気抵抗ゼロで電流を流すために応用上重要である。この超伝導渦糸の運動は、走査トンネル分光顕微鏡法 (STM/STS) を用いて 10T 以上の高磁場において実空間で直接測定することができる。従来の STM 探針を高速で動かして渦糸運動を観測する手法には限界があり、より速い渦糸運動を測定するために、超伝導体表面のある一点に STM 探針を固定し、針の下を渦糸芯が通り過ぎるとトンネル電流が変化することを利用して渦糸運動を測定した。xy 方向ドリフトを 0.1nm/日程度に安定化させることで、以前の手法より 3 桁ほど速い渦糸速度でも測定可能とした。

**A03 公募研究**

**【岸根順一郎】超低速ミュオンをプローブとするカイラル磁性結晶のダイナミクス探索**

カイラルらせん磁気秩序構造に磁場を印加すると、磁場によってらせんの捻じれが周期的にほどけたカイラルソリトン格子 (CSL) 構造が安定化する(図 7-4)。該当年度の主要な成果として、CSL のコヒーレント集団運動の機構を明らかにし、スピン起電力の巨大化現象を提案した。

**【壬生攻】ミュオンと核プローブの相補利用による磁性積層膜の深さプロファイル探査**

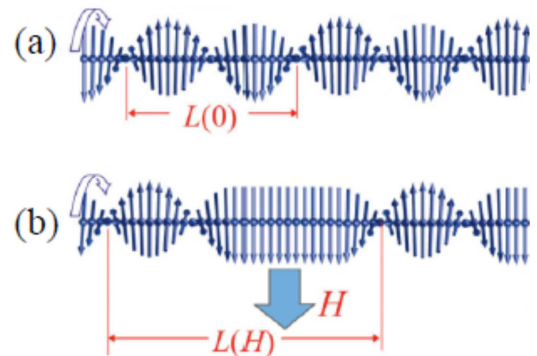


図 7-4 (a) ゼロ磁場におけるカイラルらせん磁気秩序。(b) 磁場印加によって実現するカイラルソリトン格子(CSL)。



メスbauer分光法と超低速ミュオンの相補利用研究に向けて、ホイスラー合金系積層膜および酸化鉄系積層膜に重点を置き、高品質化および最適化、界面磁性や磁氣的性質の深さプロファイルの測定を推進した。また放射光メスbauer分光法を用いた非平衡電子スピン分極を検出する試験を行った。

**【高阪勇輔】結晶と磁性のカイラリティ結合の実空間マッピング**

(1) カイラル磁性体  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$  の単結晶について、ローレンツ電子顕微鏡により磁場下で CSL の観測に成功した。(2) その他、カイラル磁性体の新規不斉合成手法の開発を行い、CSL の研究を行った。

**計画研究 A04 :**

**(1) 大強度ライマンαレーザーのための結晶作成**

Kr ガス中での 2 光子共鳴 4 波混合法を利用して、大強度のライマン α 共鳴光を発生させるためには、コヒーレントな 212.556 nm 光波が必要であり、この光波を高出力で得るためには、1062.78 nm のレーザー媒質が必要である。1 μm 帯で高出力発振の得られる Nd:YAG レーザーは、商業用のレーザーとしては、完成度が非常に高いが、発振波長が 1064.2 nm であるため、本研究には利用できない。そこで、能動的にレーザーの発振線を 1062.78 nm にシフトさせるため、Nd:YAG のホスト結晶である YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) に Ga、Sc を添加した Nd: $\text{Y}_3\text{Ga}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$  (Nd:YGAG)、Nd: $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$  (Nd:YSAG) をレーザー媒質として導入した (図 7-5)。効率等の出力特性についての基礎研究を行い、特に Nd:YGAG が本研究において、有用な特性を有することを突き止めた。この結晶を導入することにより目標の 1 パルス当たり 100 μJ のライマン α 共鳴放射を 25 年度中に達成する見通しを得た。[Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Europe 2013) CD-P.13 TUE にて報告]

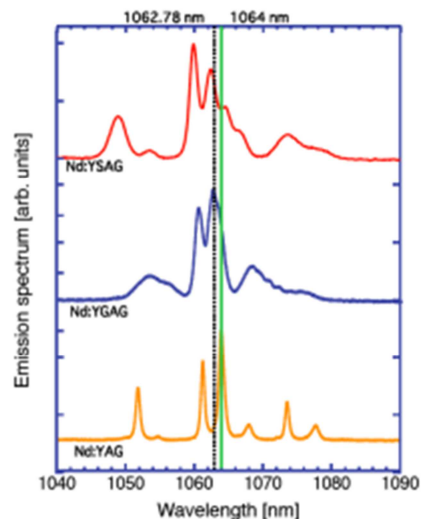


図 7-5. Nd:YAG、Nd:YGAG、および Nd:YSAG の蛍光スペクトル。1062.78 位置を点線で示す。

**(2) 常温ミュオニウム源の開発**

種々の常温ミュオニウム源(ミュオン標的)候補の中から最適物質を選択する為には、ミュオン標的から真空中に熱的に空間発展するミュオニウムを計測する必要がある。この測定により適した DC 状ミュオンビームを用いて、TRIUMF 研究所で測定装置開発を含め共同研究を行なった。標的候補のシリカアエロジェルからのミュオニウム生成率・時間空間分布を測定し、論文として投稿した。図 7-6 に示すように、時間の経過につれシリカアエロジェル標的表面からミュオニウムの滲み出している様子が分かる。この結果をもとにミュオニウム生成率を最適化するようにデザインされた表面構造を持つアエロジェルを製作中であり、25 年秋にビーム試験を目指している。[P. Bakule et al., “Measurement of muonium emission from silica aerogel”, <http://arxiv.org/abs/1306.3810>, Prog. Theor. Exp. Phys. に投稿]

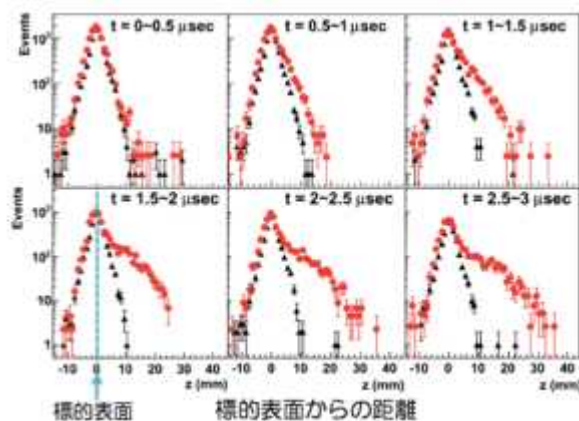


図 7-6 ミュオニウム崩壊点分布のミュオンビーム入射時刻からの時間変化。データ点は●はシリカアエロジェル標的、▲はバックグラウンド(ガラス板)を示す。時間と共に、真空中ミュオニウム分布が標的の表面から遠ざかってゆく。

## 8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

（論文、書籍の場合）

### ● A01 班：[計画研究]

- [1] \*Y. Miyake, Y. Ikedo, K. Shimomura, P. Strasser, N. Kawamura, K. Nishiyama, A. Koda, H. Fujimori, S. Makimura, J. Nakamura, T. Nagatomo, R. Kadono, E. Torikai, M. Iwasaki, S. Wada, N. Saito, K. Okamura, K. Yokoyama, T. Ito, and W. Higemoto, “Ultra slow muon microscopy by laser resonant ionization at J-PARC, MUSE”, *Hyperfine Interactions* 216, 79-83 (2013).
- [2] \*Y. Ikedo, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Strasser, K. Nishiyama, N. Kawamura, H. Fujimori, S. Makimura, A. Koda, T. Ogitsu, Y. Makida, T. Adachi, K. Nakahara, M. Yoshida, A. Yamamoto, T. Nakamoto, K. Sasaki, K. Tanaka, N. Kimura, W. Higemoto, Y. Ajima, K. Ishida, Y. Matsuda, and A. Sato, “Status of the Superomega Muon Beam Line at J-PARC”, *Physics Procedia* 30, 34-37 (2012).
- [3] \*Y. Miyake, K. Shimomura, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, S. Makimura, H. Fujimori, Y. Ikedo, K. Nakahara, S. Takeshita, M. Kato, K. Kojima, Y. Kobayashi, K. Nishiyama, R. Kadono, W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, K. Kubo, and K. Nagamine, “J-PARC Muon Facility, MUSE”, *Physics Procedia* 30, 46-49 (2012).
- [4] \*Y. Makida, Y. Ikedo, T. Ogitsu, T. Adachi, K. Shimomura, Y. Miyake, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, K. Nakahara, T. Nakamoto, T. Okamura, K. Sasaki, and M. Yoshida, “Conceptual Design of a Superconducting Solenoid System for the Super Omega Muon Beam Line at J-PARC”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, 1725-1729 (2011).
- [5] \*Y. Ikedo, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Strasser, K. Nishiyama, N. Kawamura, H. Fujimori, S. Makimura, A. Koda, K. Nakahara, T. Ogitsu, Y. Makida, T. Adachi, M. Yoshida, A. Yamamoto, T. Nakamoto, K. Sasaki, K. Tanaka, N. Kimura, W. Higemoto, Y. Ajima, K. Ishida, Y. Matsuda, and A. Sato, “The Status of the Superomega Muon Beamline”, *AIP Conference Proceedings* 1382, 220-222 (2011).
- [6] \*Y. Miyake, K. Shimomura, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, H. Fujimori, S. Makimura, K. Nakahara, M. Kato, S. Takeshita, K. Nishiyama, Y. Kobayashi, K. M. Kojima, R. Kadono, W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, M. Hiraishi, M. Miyazaki, and M. K. Kubo, “Strongest Pulsed Muon Source at J-PARC MUSE”, *AIP Conference Proceedings* 1382, 217-219 (2011).
- [7] \*Y. Miyake, N. Nishida, J. Yoshino, W. Higemoto, E. Torikai, K. Shimomura, Y. Ikedo, N. Kawamura, P. Strasser, S. Makimura, H. Fujimori, K. Nakahara, A. Koda, Y. Kobayashi, K. Nishiyama, R. Kadono, T. Ogitsu, Y. Makida, K. Sasaki, T. Adachi, and K. Nagamine, “Ultra Slow Muon Microscopy for Nano-science”, *Journal of Physics: Conference Series* 302, 12038-1-6 (2011).
- [8] \*W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, R.H. Heffner, K. Shimomura, K. Nishiyama, and Y. Miyake, “Muon Beam Slicer at J-PARC MUSE”, *Physics Procedia* 30, 30-33 (2012).
- [9] \*W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, T. Onimaru, K. T. Matsumoto, and T. Takabatake, “Multipole and superconducting state in PrIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> probed by muon spin relaxation”, *Physical Review B* 85, 235152 (2012).

[公募研究]

- [10] \*T. Tsumuraya, H. Seo, M. Tsuchizu, R. Kato, and T. Miyazaki, “Cation Dependence of the Electronic States in Molecular Triangular Lattice System beta'-X[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>: A First-principles study”, *Journal of the Physical Society of Japan* 82, 033709 (2013).
- [11] \*H. Seo, S. Ishibashi, Y. Otsuka, H. Fukuyama, and K. Terakura, “Electronic States of Single-Component Molecular Conductors [M(tmtd)<sub>2</sub>]", *Journal of the Physical Society of Japan* 82, 054711 (2013).

- [12] \*N. Hayashizaki, K. Saito, M. Yoshida, “Study on Linear Accelerator for Low Energy Muon”, Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 68, 164 (2013).
- [13] \*H. Yoshioka, Y. Otsuka, and H. Seo, “Theories on quasi-one-dimensional molecular conductors”, Crystals 2, 996-1016 (2012).
- [14] \*Y. Otsuka, H. Seo, K. Yoshimi, and T. Kato, “Finite temperature neutral-ionic transition and lattice dimerization in charge-transfer complexes: QMCstudy”, Physica B 407, 1793-1795 (2012).
- [15] \*K. Yoshimi, H. Seo, S. Ishibashi, and S. E. Brown, “Spin frustration, charge ordering, and enhanced antiferromagnetism in  $\text{TMTTF}_2\text{SbF}_6$ ”, Physica B 407, 1783-178 (2012).

● A02 班 : [計画研究]

- [1] P. Bakule, \*D. G. Fleming, O. Sukhorukov, K. Ishida, F. Pratt, T. Momose, E. Torikai, S. L. Mielke, B. C. Garrett, K. A. Peterson, G. C. Schatz, and D. G. Truhlar, “State-Selected Reaction of Muonium with Vibrationally Excited  $\text{H}_2$ ”, The Journal of Physical Chemistry Letters 3(19), 2755–2760 (2012).
- [2] \*X. Liu, H. Ito, E. Torikai, “A numerical study of spin-dependent organization of alkali-metal atomic clusters using density-functional method”, Journal of Nanoparticle Research 14, 8(1-15) (2012).
- [3] K. Yokoyama, K. Nagamine, K. Shimomura, H.W.K. Tom, R. Kawakami, P. Bakule, Y. Matsuda, K. Ishida, K. Ohishi, F.L. Pratt, I. Shiraki, \*E. Torikai, “Detection of Conduction Electron Spin Polarization in n-GaAs by Negative Muonium”, Physics Procedia 30, 231-234 (2012).
- [4] \*W.-J. Chun, K. Miyazaki, N. Watanabe, Y. Koike, S. Takakusagi, K. Fujikawa, M. Nomura, Y. Iwasawa, and K. Asakura, “Au Clusters on  $\text{TiO}_2(110)$  ( $1 \times 1$ ) and ( $1 \times 2$ ) Surfaces Examined by Polarization-Dependent Total Reflection Fluorescence XAFS”, The Journal of Physical Chemistry C 117, 252-257 (2013).
- [5] \*W.-J. Chun, K. Miyazaki, N. Watanabe, Y. Koike, S. Takakusagi, K. Fujikawa, M. Nomura, and K. Asakura, “Angle resolved total reflection fluorescence XAFS and its application to Au clusters on  $\text{TiO}_2(110)$  ( $1 \times 1$ )”, Journal of the Ceramic Society of Japan 119, 890-893 (2011).
- [6] \*K. K. Bando, T. Wada, T. Miyamoto, K. Miyazaki, S. Takakusagi, Y. Koike, Y. Inadad, M. Nomura, A. Yamaguchi, T. Gott, S. T. Oyama, and K. Asakura, “Combined in situ QXAFS and FTIR analysis of a Ni phosphide catalyst under hydrodesulfurization conditions”, Journal of Catalysis 286, 165-171 (2011).
- [7] F. Liu, K. Asakura, \*H. He, W. Shan, X. Shi, and C. Zhang, “Influence of sulfation on iron titanate catalyst for the selective catalytic reduction of  $\text{NO}_x$  with  $\text{NH}_3$ ”, Applied Catalysis 103, 369-377 (2011).
- [8] \*J. Sugiyama, K. Mukai, H. Nozaki, M. Harada, M. Månsson, K. Kamazawa, D. Andreica, A. Amato, and A. D. Hillier, “Antiferromagnetic spin structure and Li-ion diffusion in  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  probed by  $\mu^+\text{SR}$ ”, Physical Review B 87, 024409-1-11 (2013).
- [9] \*J. Sugiyama, H. Nozaki, M. Månsson, K. Prsa, D. Andreica, A. Amato, M. Isobe, and Y. Ueda, “ $\mu^+\text{SR}$  study on ferromagnetic hollandite,  $\text{K}_2\text{Cr}_8\text{O}_{16}$  and  $\text{Rb}_2\text{Cr}_8\text{O}_{16}$ ”, Physical Review B 85, 214407-1-8 (2012).
- [10] \*J. Sugiyama, H. Nozaki, M. Harada, K. Kamazawa, Y. Ikedo, Y. Miyake, O. Ofer, M. Månsson, E. J. Ansaldo, K. H. Chow, G. Kobayashi, and R. Kanno, “Diffusive behavior in  $\text{LiMPO}_4$  with  $M = \text{Fe, Co, Ni}$  probed by muon-spin relaxation” Physical Review B 85, 054111-1-9 (2012).
- [11] \*J. Sugiyama, M. Månsson, K. Kamazawa, M. Harada, O. Ofer, D. Andreica, A. Amato, J. H. Brewer, E. J. Ansaldo, H. Ohta, C. Michioka, and K. Yoshimura, “Successive magnetic transitions and static magnetic order in  $R\text{CoAsO}$  ( $R = \text{La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd}$ ) confirmed by muon-spin rotation and relaxation”, Physical Review B 84, 184421-1-10 (2011).
- [12] \*J. Sugiyama, “Ion diffusion in solids probed by muon-spin spectroscopy” Journal of Physical Society of Japan, Supplement (2013) (in press).
- [13] \*H. Nozaki, S. Ohta, T. Asaoka, M. Harada, M. Månsson, T. Ishigaki, and J. Sugiyama, “Diffusive behavior of Li ions in garnet  $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3\text{Zr}_{2-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ ”, Journal of Physical Society of Japan, Supplement (2013) (in press).
- [14] \*J. Sugiyama, K. Mukai, M. Harada, H. Nozaki, K. Miwa, T. Shiotsuki, Y. Shindo, S. R. Giblin, and J. S. Lord, “Reactive surface area of  $\text{Li}_x(\text{Co}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  electrode determined by  $\mu^+\text{SR}$  and electrochemical measurements”, Physical Chemistry Chemical Physics, 15, 10402-10412 (2013).

- [15] \*T. Kiyotani and \*Y. Sugawara, “L-Leucylglycine 0.67-hydrate and [(4S)-2,2-dimethyl-4-(2-methylpropyl)-5-oxoimidazolidin-3-ium-1-yl]acetate”, *Acta Crystallographica Section C* 68, o498–o501(2012).
- [16] \*M. Ootaki, Y. Nawa, T. Hiroi, H. Matsui, and Y. Sugawara, “L-Leucylglycylglycine”, *Acta Crystallographica Section E* 69, o660(2013).
- [17] R. Inoue and \*T. Kanaya, “Heterogeneous Dynamics of Polymer Thin Films as Studied by Neutron Scattering”, *Advances in Polymer Science* 252, 107-140 (2013).
- [18] R. Inoue, K. Kawashima, K. Matsui, M. Nakamura, K. Nishida, \*T. Kanaya, and N. L. Yamada, “Interfacial properties of polystyrene thin films as revealed by neutron reflectivity”, *Physical Review E* 84, 031802-1-7 (2011).  
[公募研究]
- [19] \*S. Ogura, M. Okada, and K. Fukutani, “Near-surface accumulation of hydrogen and CO blocking effects on a Pd-Au alloy”, *The Journal of Physical Chemistry C* 117, 9366 (2013).
- [20] \*A. Ikeda, M. Matsumoto, S. Ogura, T. Okano, and K. Fukutani, “Knudsen layer in laser induced thermal desorption”, *Journal of Chemical Physics* 138, 124705 (2013).
- [21] \*A. Ikeda, M. Matsumoto, S. Ogura, T. Okano, and K. Fukutani, “Knudsen layer in laser induced thermal desorption”, *Journal of Chemical Physics* 138, 124705 (2013).
- [22] T. Kawauchi, S. Kishimoto, and \*K. Fukutani, “Hydrogen redistribution and performance improvement of silicon avalanche photodiode by low-temperature annealing”, *IEEE Electron Device Letters* 33, 1162 (2012).
- [23] S.-K. Lee, S. Iwata, S. Ogura, Y. Sato, K. Tohji, and \*K. Fukutani, “Nitrogen physisorption and site blocking on single-walled carbon nanotubes”, *Surface Science* 606, 293 (2012).
- [24] C. Zhang, F. Liu, Y. Zhai, H. Ariga, N. Yi, Y. Liu, K. Asakura, M. Flytzani-Stephanopoulos, H. He, “Alkali-Metal-Promoted Pt/TiO<sub>2</sub> Opens a More Efficient Pathway to Formaldehyde Oxidation at Ambient Temperatures”, *Angewandte Chemie International Edition* 51, 9628-9632 (2012).
- [25] Y. Kazama, T. Sugimoto, M. Matsumoto, T. Okano, and \*K. Fukutani, “Low-temperature surface phase and phase transition of physisorbed oxygen on the Ag(111) surface”, *Physical Review B* 84, 064128 (2011).
- [26] \*T. Kawauchi, K. Fukutani, M. Matsumoto, K. Oda, T. Okano, X.-W. Zhang, and Y. Yoda, “Surface magnetic canting of iron films”, *Physical Review B* 84, 020415(R) (2011).
- [27] S. Ogura, K. Takeyasu, and \*K. Fukutani, “Design of a Hexapole Magnet for a Spin-Polarized Atomic Hydrogen Source”, *Journal of the Vacuum Society of Japan* 54, 192 (2011).
- [28] K. Niki, M. Fujiwara, Y. Motoshima, T. Kawauchi, and \*K. Fukutani, “Laser-induced fluorescence of hydrogen via the E,F $\Sigma$ →B $\Sigma$  transition : rotational-state-dependent collisional quenching”, *Chemical Physics Letters* 504, 136-141(2011).
- [29] T. Sugimoto and \*K. Fukutani, “Electric field-induced nuclear spin flips mediated by enhanced spin-orbit couplings”, *Nature Physics* 7, 307-310 (2011).
- [30] \*T. U. Ito, W. Higemoto, T. D. Matsuda, A. Koda, and K. Shimomura, “Shallow Donor Level Associated with Hydrogen Impurities in Undoped BaTiO<sub>3</sub>”, *Applied Physics Letters*, to be published. (accepted on 2013/06/12)
- A03 班 : [計画研究]
- [1] \*Y. Koike and T. Adachi, “Impurity and magnetic field effects on the stripes in cuprates”, *Physics C* 481, 115-124 (2012).
- [2] K. M. Suzuki, \*T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, Y. Koike, Risdiana, Y. Ishii, T. Suzuki, and I. Watanabe, “Distinct Fe-induced magnetic states in the underdoped and overdoped regimes of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>Cu<sub>1-y</sub>Fe<sub>y</sub>O<sub>4</sub> revealed by muon spin relaxation”, *Physical Review B* 86, 014522-1-9 (2012).
- [3] \*Risdiana, T. Adachi, I. Watanabe, and Y. Koike, “Cu-spin fluctuations in hole- and electron-doped high-T<sub>c</sub> superconducting cuprates relating to stripe pinning”, *AIP Conference Proceedings* 1454, 275-278 (2012).

- [4] K. Suzuki, \*T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, Risdiana, Y. Ishii, T. Suzuki, I. Watanabe, and Y. Koike, “Fe-substitution effects on the Cu-spin correlation in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  studied by muon spin relaxation”, *Physics Procedia* 30, 275-278 (2012).
- [5] \*T. Adachi, Y. Tanabe, K. Suzuki, Y. Koike, T. Suzuki, T. Kawamata, and I. Watanabe, “Development of Cu-spin correlation in  $\text{Bi}_{1.74}\text{Pb}_{0.38}\text{Sr}_{1.88}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{6+6}$  high-temperature superconductors observed by muon spin relaxation”, *Physical Review B* 83, 184522-1-6 (2011).
- [6] Y. Tanabe, \*T. Adachi, K. Suzuki, T. Kawamata, Risdiana, T. Suzuki, I. Watanabe, and Y. Koike, “Similarity between Ni and Zn impurity effects on the superconductivity and Cu-spin correlation in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$  high- $T_c$  cuprates: A comparison based on the hole trapping by Ni”, *Physical Review B* 83, 144521/1-6 (2011).
- [7] \*S. Okuma, Y. Kawamura, and A. Motohashi, “Scaling analysis on plastic depinning of vortex matter at low temperature in an amorphous  $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$  film”, *Superconductor Science and Technology* 26, 025013-1-6 (2013).
- [8] \*S. Okuma, Y. Kawamura, and Y. Tsugawa, “Irreversibility and Dislocation in Periodically Sheared Vortex Matter”, *Journal of the Physical Society of Japan* 81, 114718-1-6 (2012).
- [9] \*S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, “Velocity-induced reorientation of fast driven Abrikosov lattice”, *Physical Review B* 85, 064508-1-5 (2012).
- [10] \*S. Okuma, H. Imaizumi, D. Shimamoto, and N. Kokubo, “Quantum melting and lattice orientation of driven vortex matter”, *Physical Review B* 83, 064520-1-7 (2011).
- [11] \*S. Okuma, Y. Tsugawa, and A. Motohashi, “Transition from reversible to irreversible flow: Absorbing and depinning transitions in a sheared-vortex system”, *Physical Review B* 83, 012503-1-4 (2011).
- [公募研究]
- [12] \*K. Mibu, M. Seto, T. Mitsui, Y. Yoda, R. Masuda, S. Kitao, Y. Kobayashi, E. Suharyadi, M. A. Tanaka, M. Tsunoda, H. Yanagihara, and E. Kita, “Studies on Spintronics-Related Thin Films Using Synchrotron-Radiation-Based Mössbauer Spectroscopy”, *Hyperfine Interactions* 217, 127-135(2013) (The 8th International Symposium on the Industrial Applications of the Mössbauer Effect, invited)
- [13] Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A. Ovchinnikov, and \*J. Kishine, “Chiral Magnetic Soliton Lattice on a Chiral Helimagnet”, *Physical Review Letters*, 108, 107202 (2012).
- [14] \*J. Kishine, I. G. Bostrem, A. S. Ovchinnikov, and V. E. Sinitsyn, “Coherent sliding dynamics and spin motive force driven by crossed magnetic fields in chiral helimagnet”, *Physical Review B* 86, 214426 (2012).
- [15] \*M. Mito, K. Iriguchi, H. Deguchi, J. Kishine, Y. Yoshida, K. Inoue, “Magnetic diagnostics using the third-harmonic magnetic response for a molecule-based magnet networked by a single chiral ligand”, *Journal of Applied Physics* 111, 103914 (2012).
- [16] 高阪勇輔, \*秋光純, 「非共鳴 X 線散乱による  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の多極子秩序の検出」 *固体物理* 47, 673 (2012).
- [17] \*K. Tomiyasu, T. Yokobori, Y. Kousaka, R. I. Bewley, T. Guidi, T. Watanabe, J. Akimitsu, and K. Yamada, “Emergence of Highly Degenerate Excited States in the Frustrated Magnet  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ”, *Physical Review Letters* 110, 077205 (2013).
- [18] T. Koyama, S. Yano, Y. Togawa, Y. Kousaka, S. Mori, K. Inoue, J. Kishine, and \*J. Akimitsu, “Unconventional Magnetic Domain Structure in the Ferromagnetic Phase of MnP Single Crystals”, *Journal of the Physical Society of Japan* 81, 043701 (2012).
- [19] Y. Kousaka, K. Tomiyasu, T. Yokobori, K. Horigane, H. Hiraka, K. Yamada, and \*J. Akimitsu, “Stability of hexamer-type spin excitations in the frustrated spinel  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cr}_2\text{O}_{4-x}$ ” *Journal of Physics: Conference Series* 320, 012040 (2011).
- [20] T. Yokobori, K. Tomiyasu, Y. Kousaka, H. Matsui, H. Hiraka, K. Iwasa, K. Yamada, and \*J. Akimitsu, “Neutron scattering study of spiral-type spin correlations in the frustrated spinel  $\text{Mn}_{0.07}\text{Mg}_{0.93}\text{Cr}_2\text{O}_4$ ” *Journal of Physics: Conference Series* 320, 012039 (2011)

- [21] Y. Kawamura and S. Okuma, “Dynamics of Superconducting Vortices Driven by Periodic Shear in the Plastic-Flow and Flux-Flow Regimes”, Journal of the Physical Society of Japan (2013), (in press).
- [22] \*A. S. Ovchinnikov, V. E. Sinitsyn, I. G. Bostrem, J. Kishine, “Generation of spin-motive force in the soliton lattice”, Journal of Experimental and Theoretical Physics, Accepted for publication (in press).
- A04 班 : [計画研究]
- [1] L. Deng and \*T. Nakajima, “Generation of vacuum-ultraviolet pulses with a Doppler-broadened gas utilizing high atomic coherence”, Optics Express 20, 17566 (2012).
- [2] \*斎藤徳人, 和田智之, 岡村幸太郎, 岩崎雅彦, “超低速ミュオン発生のための高出力ミュオン・ライマン  $\alpha$  レーザーの開発”, レーザー学会第 427 回研究会報告高機能固体レーザーとその応用 RTM-12-15, 49-54(2012).
- [3] \*斎藤徳人, 宮崎洸治, Oleg A. Louchev, 和田智之, 岡村幸太郎, 大石裕, 横山幸司, 石田勝彦, 岩崎雅彦, “超低速ミュオン源実現のための新レーザー開発現状”, 日本中間子科学会誌めそん 36 巻, 43-49 (2012).
- [4] \*大石裕, 岡村幸太郎, 宮崎洸治, 斎藤徳人, 岩崎雅彦, 和田智之, “超低速ミュオン励起用 Lyman- $\alpha$  光源”, レーザー学会第 436 回研究会報告短波長量子ビーム発生と応用 RTM-12-58, 13-18 (2012).
- [5] \*三部勉, 石田勝彦, 佐々木憲一” ミュオン  $g-2$ /EDM 実験”, 高エネルギーニュース 第31巻, 3号(2012).
- [6] \*T. Mibe, “Measurement of muon  $g-2$  and EDM with an ultra-cold muon beam at J-PARC”, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 218, 242-246 (2011).
- [7] \*O. A. Louchev, P. Bakule, N. Saito, S. Wada, K. Yokoyama, K. Ishida, and M. Iwasaki, “Mechanism and computational model for Lyman- $\alpha$  radiation generation by high-intensity-laser four-wave mixing in Kr-Ar gas”, Physical Review A 84, 003842-1-9 (2011).
- [8] \*K. Ishida, “Low emittance, slow muon source for new  $g-2$  experiment”, AIP Conference Proceedings 1382, 223-225 (2011).

(ホームページ)

● 領域全体

\*E. Torikai, 領域ホームページ「超低速ミュオン顕微鏡」 <http://slowmuon.jp/index.html>

● A01 班

\*Y. Miyake, ホームページ「超低速ミュオン顕微鏡と極微 $\mu$ SR 法創成」 <http://slowmuon.kek.jp>

● A03 班

\*R. Kadono, ホームページ「表面—バルク境界領域のヘテロ電子相関」 <http://msl.kek.jp/a03/>

● A04 班

\*M. Iwasaki, 理研岩崎先端中間子研究室ホームページ  $g-2$

<http://meson.riken.jp/ja/research/nphysics/g-2-experiment.html>

(主催シンポジウム)

● 総括班

[1] 新学術領域「超低速ミュオン顕微鏡」領域キックオフミーティング

日時 2011年8月8日, 場所 高エネルギー加速器研究機構 参加人数 40名

[2] 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第1回領域会議

日時 2012年1月7日～1月9日, 場所 ホテル春日井(山梨県笛吹市) 参加人数 55名

[3] 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第2回領域会議

日時 2012年8月30日～9月1日, 場所 北海道大学理学部5号館5-203号室 参加人数 116名

[4] 国際シンポジウム International symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013)

日時: 2013年8月9日～12日 場所 松江コンベンションビューロー 参加予定人数 150名

● A01 班

[1] 第5回 Muon 科学と加速器研究

日時 2013年1月6日～1月8日, 場所 KEK(つくば)研究本館小林ホール 参加人数 60名

● A02 班

[1] 光触媒・酸化物のミュオン測定と計算結果のディスカッション

日時 2012年3月8日, 場所 日本原子力研究機構先端基礎研究センター参加人数 7名

- [2] ミュオンスピントロニクス研究会  
日時 2012年12月12日, 場所 東京大学本郷キャンパス理学部1号館 参加人数 6名
- [3] 超低速ミュオンの生命科学への応用研究会  
日時 2013年3月8日, 場所 東京大学本郷キャンパス理学部1号館 参加人数 7名
- [4] ミュオン顕微鏡が拓く光触媒研究の新展開(A01,A02 班合同会議)  
日時 2013年5月2日, 場所 北海道大学触媒科学研究センター 参加人数 9名
- A03 班
- [1] 第1回班会議 日時 2012年6月22日~6月23日 場所 KEK 東海1号館324号室 参加人数 20名
- [2] 第2回班会議 日時 2013年2月1日~2月2日 場所 東工大田町CIC 参加人数 20名
- A04 班
- [1] 第5回ミュオン g-2/EDM 共同研究会議 日時 2012年6月28~30日 場所 KEK つくばキャンパス  
参加人数 30名
- [2] 第6回ミュオン g-2/EDM 共同研究会議 日時 2012年11月1~3日  
場所 KEK つくばキャンパス・東海キャンパス 参加人数 40名
- [3] 2nd Workshop on Muon g-2 and EDM in the LHC Era 日時 2012年5月25日 場所 パリ第6大学  
参加人数 30名
- [4] J-PARC/MUSEH ラインで切り開くミュオン基礎物理 日時 2012年5月18日 場所 東京大学  
参加人数 30名
- (アウトリーチ活動)
- 総括班
- [1] 領域ニュースレター no.1、2012年3月、no.2、2013年3月
- [2] 第2回領域会議プレスクール 異分野理解を深めるために  
日時 2012年8月29日, 場所 北海道大学理学部5号館5-203号室 参加人数 55名
- [3] 国際シンポジウムプレスクール  
日時: 2013年8月8日, 場所 松江コンベンションビューロー 参加予定人数 70名
- A01 班
- [1] 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-”  
日時 2011年7月19日, 場所 アルカディア市ヶ谷
- [2] 髭本亘 集中講義 “素粒子ミュオンを用いた物質研究” 東京工業大学 2012年7月 参加人数 30名
- A02 班
- [1] 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”  
日時 2012年8月1日, 場所 山梨県立甲府昭和高校 参加人数 45名
- [2] 鳥養映子 日本学術振興会第169委員会第42回研究会 “超低速ミュオン顕微法の開発: 生体物質の機能イメージングに向けて”  
日時 2013年2月21日, 場所 品川区西五反田ゆうぼうと 参加人数 50名
- [3] 鳥養映子 金属学会・鉄鋼協会中四国支部研究会 “超低速ミュオン顕微鏡の開発・界面ナノメータ深さイメージングをめざして”  
日時 2012年9月28日, 場所 島根大学, 参加人数 30名
- [4] 鳥養映子 応用物理学会シンポジウム招待講演 “超低速ミュオン顕微鏡の開発と界面研究への展望”  
日時 2013年3月27日, 場所 神奈川工科大学 参加人数 90名
- [5] 鳥養映子 理研光量子工学研究領域セミナー “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” 日時 2013年5月10日, 場所 理化学研究所 参加人数 50名
- [6] 永嶺謙忠 科学宅配塾講座 “素粒子が実現する革新的レントゲン写真”  
日時 2012年3月22日, 場所 三鷹ネットワーク大学 参加人数 50名
- [7] 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”  
日時 2012年3月23日, 場所 神戸メリケンパークオリエンタルホテル 参加人数 50名
- [8] 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”  
日時 2012年9月8日, 場所 キリスト友会東京月会会堂 参加人数 30名

- [9] 永嶺謙忠 日本学術振興会第 169 委員会第 42 回研究会“素粒子ミュオンの生命科学への応用；生体高分子中電子伝達の観測”  
日時 2013 年 2 月 21 日, 場所 品川区西五反田ゆうぽうと 参加人数 50 名
- [10] 下村浩一郎 応用物理学会シンポジウム招待講演 “ミュオン科学における超伝導技術の応用とその成果”  
日時 2013 年 3 月 27 日, 場所 神奈川工科大学 参加人数 90 名
- A03 班
- [1] 井上克也, “Selected as APS's very best papers and APS Spotlighting Exceptional Research on March 5, 2012”, 日経産業新聞 2012 年 2 月 28 日, 朝刊, 9 面



## 9. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募班での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

当初の方針に従い、4つの計画研究班、「超低速ミュオン顕微鏡」班(A01)、「界面のスピン伝導と反応」班(A02)、「表面・バルク境界領域のヘテロ電子相関」班(A03)および「物質創成の原理を極める超冷却と尖鋭化」班(A04)の連携のもと、領域研究を推進する。

すでに述べたように、超低速ミュオン顕微鏡の基幹部開発を完了し、6月から超低速ミュオン発生試験を行う予定であったが、J-PARCでの事故により平成26年1月以降に持ち越すこととなった。予期せぬ外的な遅れであり、本領域研究にとって影響は決して小さくないが、安全対策は本領域にとっても最優先事項である。力を合わせてこの難局に立ち向かい、期間内の目標達成に全力を注ぐ。予定されていた長期停止後に再開されれば、事故によって生じた2か月の遅れは実験課題の効率的な組み合わせにより吸収できる。ビーム再開がさらに延びた場合には、総括班のリーダーシップのもとに研究目的の近い実験課題を整理統合し、計画研究と公募研究の全課題を期間内に展開したい。

平成25年度はビーム再開後に早期に大強度超低速ミュオンが得られるよう、顕微鏡装置およびレーザーの調整を進めるとともに、顕微鏡の試料測定部、ビームをさらに高性能化する諸設備の製作試験を進めてゆく。一方それぞれの研究分野のニーズに応じて、超高真空、極低温、「その場」における清浄表面・触媒反応試料・薄膜の作製等、種々の実験条件の整備を行う予定であり、これらは主として平成25、26年度に導入される。

A01班では、平成26年度以降には、超低速ミュオンビームを分岐し、 $\sim 1\mu\text{m}\phi$ までのビーム径の極小化を図るため加速装置を設置する。さらに、ミュオンマイクロビームの位置検出及び試料走査のための試料位置調整機構等から構成される位置敏感型 $\mu\text{SR}$ 分光器を整備する。これらを平成26年度末までに構築し、ミュオンマイクロビームを用いた微小試料、微小領域、および深さ方向の走査と合わせた三次元走査 $\mu\text{SR}$ 実験を遂行していく。ミュオン顕微鏡において、超低速ミュオンは静電加速により30keVまで初期加速されるが、加速装置により、このミュオンビームをさらに加速し、収束及び透過力を向上させる。この加速装置では加速電圧を可変とし、かつ大口径の加速器となることから、インダクション加速による150 keVまでの加速を検討中である。平成26年度後半には、150 keVのミュオンエネルギーを電源の改良によって300 keVまで到達させる予定である。

A02班では、(1) 界面近傍におけるスピン伝導：半導体中のスピン偏極電子のミュオニウムによる直接観測の研究、スピントロニクス研究、(2) 触媒化学反応：酸素欠陥の $\text{TiO}_2$ 内での空間分布を明らかにし、光触媒活性や物性との相関を明らかにする、(3) 電気化学を担うイオン伝導：高分子電解質形燃料電池の性能を調べる為に、組成の変動によるプロトンダイナミクスの変化に関する知見を得る、(4) 生命反応を司る電子伝達：ミュオンラベル電子法を用いて、生体膜上での電子伝達をターゲットとした実験や、単結晶を用いた電子伝達の異方性の解析を展開する、などの研究計画を実施する。これらの実験研究を遂行するために、平成26年度に以下の装置を整備する予定である。

(i) 表面励起レーザー装置：半導体中への伝導電子スピン偏極(CEP)導入のために、Nd:YAG レーザー励起の広波長域可変なOPO レーザーシステムを導入する。EO モデューラータを利用したパルス毎の偏光切り替え装置を加えることで、系統誤差の小さな測定を行うことが可能となる。

(ii) 電気化学反応実験装置： $\text{LiCoO}_2$ 薄膜試料等中のLi イオン濃度を、電気化学反応によりその場で調整しながら超低速 $\mu\text{SR}$ 測定を実施するための主要装置である。同時に複素インピーダンス測定も行い、電気

化学パラメータと界面層物性とを対比できるようにする。

A03 班では、(1) 薄膜等で現れる銅酸化物の新しい超伝導相の解明：界面近傍の磁性を超低速ミュオンにより詳しく観察する、(2) 金属酸化物界面における二次元電子系の起源の解明：界面での磁性が理論的に予言されている  $\text{MgB}_2/\text{AlN}$  ヘテロ界面における磁性の観測とその起源解明を目指す研究、(3) 分子カイラル磁性体におけるメゾスコピックな新奇秩序の解明：カイラル磁性体について実際の局所磁場の観測、未知のスピンダイナミクス観測・解明を目指す研究、(4) 異方的超伝導の表面効果、およびトポロジカル絶縁体表面金属状態の新奇物性、および(5) 超伝導薄膜における量子渦糸の動的秩序の解明：STS 測定により、ピンング中心の渦糸に対するポテンシャル、渦糸格子の転位等の測定、臨界電流近傍の  $0.1\text{nm/s}$  の遅い運動と速い運動がどのようにつながるかを調べる研究に取り組む。平成 26 年度以降には以下の実験装置の導入を予定している。

(i) 超低速ビーム  $\mu\text{SR}$  実験用に 6 K 以下の低温環境を整備する。また平成 27 年度には、超低速ミュオンの再加速により薄膜、微小試料の実験が可能となるので、超伝導渦糸状態、特にその運動を  $1\text{m/s}$  の速い速度領域で測定可能とする。

(ii) 高磁場用超伝導磁石および電源： $\mu\text{SR}$  分光器 (A01 班で用意) において、試料に対して垂直に高い磁場 (=5 T) を印加して  $\mu\text{SR}$  測定を行うための超伝導磁石を製作・導入する。これにより、超低速ビームでの強磁場縦緩和測定、ミュオンナイトシフト測定、準位交差共鳴測定などの実験が可能になり、界面超伝導・磁性、カイラルソリトンや渦糸のダイナミクス研究が可能になる。

(iii) 高時間分解陽電子検出器:(ii)と組み合わせる陽電子検出装置であり、特にナイトシフトなど高い横磁場中のスピン回転信号を高時間分解能で測定するために不可欠である。

A04 班では、平成 26 年度以降は、レーザー位置掃引、中心波長変調、偏光などの機能を付加し、極限ビーム実現のためのさらなる高度化を進める開発を行う。具体的には、パルス形成周波数に能動的に群速度分散を与えてチャープパルスを形成するために、第 2 レーザーに周波数変調機能を導入する。これにより、各時間で決まった横運動量のものだけ選んでイオン化することができ、RF と組み合わせた横運動量冷却が可能となる。またレーザー照射位置の時間掃引を行うことにより、イオン化位置の広がったものを単純に一樣電場で加速することに起因する時間広がりや補正した短バンチ化が可能となる。短バンチ化は、ミュオンビームをさらに線形加速器で加速するために必須であり、物性研究では時間分解能の向上に極めて有効である。

超低速ミュオン顕微法は、計画研究に取り込まれた研究分野に留まらず、さらに幅広い分野への展開の可能性を秘めている。この新手法を普及し、幅広く活用するために、すでに平成24-25年度に計9件の公募研究を採択した。さらに平成26-27年度には実験と理論研究を各9件程度の公募を行う。

この領域研究の成果を国内外に発信するため、これまで年度ごとの成果報告会を開催し、ニュースレター・Web 等による広報を行ってきた。今後はビームを直接利用した研究成果が増大するため、これらを利用し、より強力的に広報活動を行う。また平成27年度の成果報告会は国際シンポジウムとして実施する予定である。さらに、プレスクール開催などでの若手研究者の育成をJ-PARCなどと協力して進める。加えて、J-PARC ミュオン施設側との連携をもとに、学会、企業、近隣諸国の研究者向けの研究支援事業を実施し、イノベーションの創出に今後とも寄与して行く。

**10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画（研究代表者の変更は真にやむを得ない場合に限る）（2～5ページ程度）【非公開】※本欄に記載の計画研究については、全て3年度目の審査の対象となります。**

領域内の計画研究の研究代表者の交替や組織体制に大幅な変更がある場合(新しく計画研究を追加する場合や既存の計画研究を廃止する場合、領域全体の交付予定額の範囲内で各計画研究の研究経費を変更する場合（計画研究に係る経費を減額し、公募研究に係る経費を増額する場合等）には必ず記入してください。その際、以下の点を含めてください。

- ・ 計画研究を追加する場合は、追加の必要性、その計画研究が領域内で果たす役割、他の計画研究への影響等
- ・ 計画研究を廃止する場合は、廃止の理由、当該計画研究を廃止しても領域として支障がないことの説明等
- ・ 研究代表者の交替の場合は、交替の必要性、新旧の研究組織の異なる点（組織構成、領域内で果たす役割等）、新たに研究代表者になろうとする者が、旧研究代表者に替わって研究を実施できることの根拠、妥当性及びその者の研究業績等
- ・ 計画研究に係る経費と公募研究に係る経費の額の変更については、その必要性、1回目の公募研究の応募・採択状況等（公募研究に係る経費を減額して計画研究に係る経費を増額する変更は真にやむを得ない場合に限る。また、公募研究の規模に係る最低基準を下回らないこと。）
- ・ 以上の各変更に伴う他の計画研究の研究経費の変更及びその妥当性等

該当しない。