

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 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：2018～2022

課題番号：18H05464

研究課題名(和文)最先端負ミュオンビーム開発

研究課題名(英文)Advanced negative muon beam development

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・研究員

研究者番号：80209882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 121,630,000円

研究成果の概要(和文)：加速器で得られる負ミュオンビームは、大強度だが、エネルギーが高く、収束することが難しい。本研究では、世界で初めての超低速負ミュオンビームと走査負ミュオン顕微鏡を実現する事を目的としていた。加速器から直接、得られる大強度負ミュオンをBe標的で減速し、摩擦冷却法を駆使して、3.5kV, 5kV, 7kVの超低速負ミュオンを同軸管による実験エリアに取り出す事に成功した。更に、厚さ20～30nmの窒化ケイ素の冷却薄膜をメッシュ電極に装着し、収束させることにも成功した。夢の超低速負ミュオン走査顕微鏡を実現するに当たって、最重要な基本原理検証ができたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数10ナノメートル径まで収束可能な超低速負ミュオンビームを開発し、収束負ミュオンビームの走査により、物質表面の元素分布・同位体分布や化学結合分布を、非破壊、極めて高い感度、3次元、かつ数10ナノメートルの分解能(深さ方向は数ナノメートル分解能)で可視化する革命的な分析顕微鏡となる走査負ミュオン顕微鏡が創出できる。生体の主要な構成要素である炭素・水素・窒素・酸素を高い感度で検出できれば、急速凍結した生物試料の表面を削りながら観察することにより、生体を構成する元素・同位体・化学結合の3次元分布を網羅的にナノ分解能で再構成でき、生物分野にまさに革命的な分析手段を提供できる。

研究成果の概要(英文)：Negative muon beams obtained by accelerators have high intensity but are difficult to converge. The focused negative muon beam enables us to obtain elemental and isotopic distributions and chemical bonding distributions on the surface of materials with nondestructive, extremely high sensitivity, 3D, with several 10 nm resolution. The challenge was to create a scanning negative muon microscope, a revolutionary analytical microscope that visualizes image of the elemental, isotopic distributions and chemical bonding distributions for the bio-materials. Finally, we succeeded in a proof-of-principle experiments extracting -5KV ultra-low-velocity negative muons generated by friction, and also in converging the ultra-low muons by using carbon nanotube thin films of 20 nm in thickness. Since the most important basic principle verification has been achieved that we will be able to realize our dream ultra-low-energy negative muon scanning microscope in the future, if the budget is available.

研究分野：ミュオン科学

キーワード：負ミュオン 冷却 非破壊検査 ミュオン触媒核融合 ラムザウアータウンゼント効果

1. 研究開始当初の背景

負ミュオンが物質中の原子に捕獲される過程で 100%の確率で放出されるミュオン特性 X 線は其々の原子に固有のスペクトラムを持ち、しかも検出の容易な高いエネルギーをもつ。負ミュオンを用いれば、水素やリチウムをはじめとした軽元素であっても極めて高い収率で検出できる。このため、負ミュオンビームは X 線蛍光分析をはるかに凌ぐ超高感度の元素分析手段として期待されながら、負ミュオンは従来のミュオン施設では十分な収量が得られず、負ミュオン元素分析の実用研究は J-PARC 以外のミュオン施設ではほとんど実施されてこなかった。一方、より高いエネルギーの 3GeV 陽子ビームを用いる J-PARC のミュオン実験施設 MUSE では、負ミュオンを得る為に必要な負パイオンの生成断面積がより大きく、他の施設と比べより大量の負ミュオンを生成できる。J-PARC での負パイオンの生成断面積は諸外国のミュオン施設 (500-800MeV) と比べ、np 核反応では 10 倍強、pp 核反応に至っては 200 倍にも及ぶ。更に、諸外国のミュオン施設では、20MeV/c 以下の負ミュオンを引き出すことが難しいが、J-PARC/MUSE では、負パイオンを負ミュオンに変換させる為の超伝導電磁石の断熱方式をウォームボア方式に変更し、ビーム輸送系で低運動量のミュオン損失の原因となる窓を取り除くことに成功した。結果、低運動量 3.5MeV/c (58keV) から高運動量 120MeV/c (54MeV) までの世界最高強度の負ミュオンが得られている。実質的に初めて J-PARC/MUSE において負ミュオン利用が実用化されると云って過言ではない。このような背景の下、J-PARC の世界最高強度の負ミュオンビームを物質中に打ち込み、任意の深さ (例えばグラファイト中で 500nm から 60mm の任意の深さ) に止める、負ミュオン特性 X 線分析の短時間測定や 3 次元の元素分布イメージング測定までもが可能となっている。以下はその開発系譜である。

- (1) 純アルミチャンバー、Ge 検出器の多素子化、測定システムの開発を行い、元素分析を高 S/N 化、
- (2) 電磁石チューニングにより、ミュオンビームの運動量幅を狭小化、
- (3) リチウム電池に負ミュオンを打ち込み、電池内部のリチウム濃度の深さ方向分布を高分解能で観測、充放電におけるリチウムの移動を in-situ で捉えることに成功、
- (4) JAXA の高橋 (領域代表、C01 代表、現在 Kavli-IPMU) との共同研究で、位置検出型 CdTe 検出器を負ミュオン捕獲 X 線計測に用いて、世界ではじめて、3 次元元素イメージングに成功。

以上のように、様々な物質科学や素粒子原子核実験を展開可能な測定・実験の環境と理論・計算の基盤の双方が整った世界で唯一の環境が J-PARC に構築されている。

しかしながら、加速器から直接に得られる負ミュオンは、大きな空間的な広がり、大きなエネルギー分散をもち、高々ミリメートル程度までしか収束させることしかできないのが現状である。ミュオン特性 X 線による元素分析のナノスケール高分解能化や 3 次元高分解能化のためにも、空間コヒーレンスに優れた (=エミッタンスの小さな) 負ミュオンビームの生成により微小な点への負ミュオン収束や、時間コヒーレンスに優れた (=エネルギー分散の小さな) 負ミュオンビームの生成による打ち込み深さの精密化が強く望まれている。また、ミュオン特性 X 線は元素情報に加え、同位体や化学結合の情報をも含んでおり、物質中のこれらの分布も同時に 3 次元ナノスケールで明らかにできる。従来の計測法 (例えば電子線や X 線を用いる X 線蛍光分析 EDX や EDS) にはない全く新しいものであり、材料科学や生命科学に対して革命的な計測手段を提供する事ができる。

従って、J-PARC における負ミュオンビームを用いた新世代量子ビーム科学、ミュオン科学構築の機が熟し、本計画研究の申請に至った。

2. 研究の目的

数 10 ナノメートル径まで収束可能な超低速負ミュオンビームを開発し、収束負ミュオンビームの走査 (偏向器による XY 走査、およびエネルギー走査による打ち込み深さの走査) により、物質表面の元素分布・同位体分布や化学結合分布を、非破壊、極めて高い感度、3 次元、かつ数 10 ナノメートルの分解能 (深さ方向は数ナノメートル分解能) で可視化する革命的な分析顕微鏡となる走査負ミュオン顕微鏡の創出を目的としている。負ミュオンが物質中の原子に捕獲される際には、ミュオン特性 X 線を 100%の確率で放出し、しかもそのエネルギーは電子の特性 X 線に比べ 200 倍も高く検出が容易である。水素やリチウムのような軽元素、あるいは生体の主要な構成要素である炭素・水素・窒素・酸素を高い感度で検出できる。例えば、急速凍結した生物試料の表面を削りながら観察することにより、生体を構成する元素・同位体・化学結合の 3 次元分布を網羅的にナノ分解能で再構成でき、生物分野にまさに革命的な分析手段を提供できる。

加速器で直接、得られる負ミュオンビームは、大強度だが、収束に難がある。ミュオン触媒核融合反応をビームの冷却手段として利用し、ナノスケール径まで収束可能な超低速負ミュオンビームを開発する。より微小な点に絞り込む事が可能な「高い空間コヒーレンス (=小さいエミッタンス)」の負ミュオンビームを実現できる。ミュオン触媒核融合反応により高エネルギーの

負ミュオンを数 keV 程度まで冷却、再加速し、色収差補正光学系を用いてビームを収束する。さらに、エネルギー分散の補正装置の開発により、エネルギーと運動量が揃った「高い時間コヒーレンス」を備える負ミュオンビームを開発する。これら、高輝度かつ時間および空間コヒーレントに優れた負ミュオンビームを用いて走査負ミュオン顕微鏡を開発し、3次元元素分析実験を行う。最終的には、世界で初めての超低速負ミュオンビームと走査負ミュオン顕微鏡を実現する。

3. 研究の方法

負ミュオンビームの空間コヒーレンス(エミッタンス)を、ミュオン触媒核融合反応、摩擦冷却と色補正収束光学系からなる負ミュオン冷却により改善し、超低速負ミュオン生成の、原理実証を行い、究極の分解能を得ることに注力する。

負ミュオンビームのエミッタンスは、ミュオン触媒核融合反応、摩擦冷却と色補正収束光学系からなる負ミュオン冷却により改善する(図1)。負ミュオンを核融合燃料に入射すると、ミュオン触媒核融合反応の結果として、入射エネルギーに関わらず keV オーダーまで減速された負ミュオンが放出される。この輸送も含む一連の反応は、ミュオンの寿命(2 マイクロ秒)に比べ2桁以上の早い速度で進む事が知られており、これを主たる冷却手段として用いる。

加速器で生成された高エネルギー(～50MeV)・高分散かつ向きがランダムに入射する負ミュオンを、三重水素 T_2 を微量ドーブした固体水素の厚膜(数 mm)により捕獲する。固体水素中では、ラムザウア・タウンゼント効果により p-ミュオンの複合体は比較的自由(数 mm レンジ)に動き回り、より安定な T-ミュオンに変換され、また自由に動き回る。固体水素の表面に重水素 D_2 と T_2 の薄膜(～1 μm)を形成しておけば、到達した T-ミュオンとミュオン触媒核融合反応を起こし、開放された負ミュオンは keV のエネルギーでランダムな向きに放出される。放出されたミュオンが再び T_2/D_2 表面に到達すればミュオン触媒核融合反応を起こし、再び放出されるが、固体水素に図のような電位勾配を設けておけば、ミュオンは確率的により中心に引き寄せられ、最終的には中央の T_2/D_2 核融合燃料薄膜に到達する。

核融合燃料薄膜から放出される keV の負ミュオンを再加速すれば、keV エネルギーの広がりのあるビームとなるが、カーボン薄膜(～1 μm)への入射と電位再加速($V \sim 1.4kV$)を交互に 10～20 回ほど行なう摩擦冷却により、エネルギー広がりを 100eV 程度まで縮小させる。これら2段階の冷却により、負ミュオンビームは色補正収束光学系により収束可能なエネルギー広がり(100eV)となり、この光学系を用いて収束させる。

この負ミュオン冷却のプロセスによりミュオンのエミッタンスは2～3桁以上と著しく改善され、

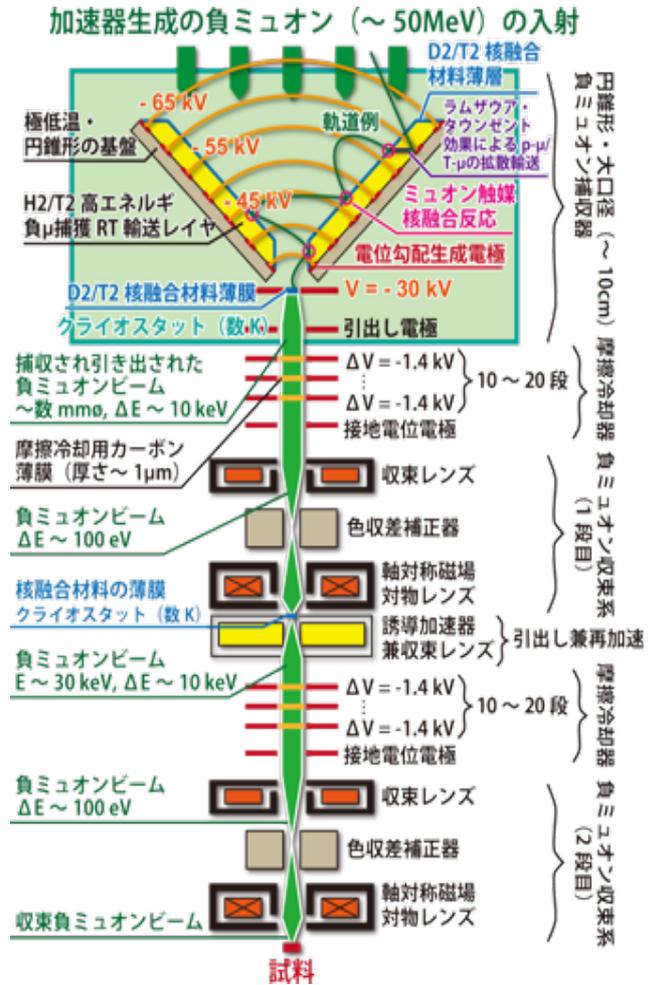


図1 負ミュオン冷却システムの構成図。捕獲のプロセスと、冷却、再加速、収束のプロセスより構成。

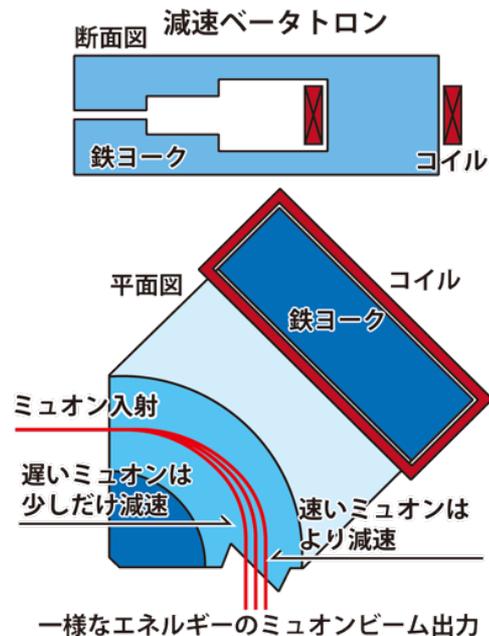


図2 エネルギー分散の補正装置。エネルギー分散をベータトロン減速を用いて位置の分散に変換する。

さらにはこの負ミュオン冷却・ミュオン再加速・再収束ならびに再入射のプロセスを複数回繰り返すことで、最終的にはナノメートル直径までビームを収束させることができる。

また、空間コヒーレンスが改善されたビームに対しては、100eV のエネルギー広がりをスペクトロメーターと誘導加速との組み合わせによりエネルギー分散を eV オーダーまで下げることが可能となり、空間コヒーレンスおよび時間コヒーレンスの両方に優れた負ミュオンビームが得られる (図 2)。

最終的には、得られた時空間コヒーレンスに優れた負ミュオンビームをナノスケールに収束し、試料表面を偏向器を用いて XY スキャン、およびエネルギー走査により Z スキャンし、特性 X 線をスペクトラム計測することにより、試料内部の元素分布、同位体分布および化学結合の分布を 3 次元で可視化する走査負ミュオン顕微鏡を、従来の走査型電子顕微鏡の技術を用いて開発する。この際には、C01 班で開発した CdTe 検出器を用いることにより、最高感度かつ最高精度の特性 X 線のペクトラム計測が可能となる。

4. 研究成果

上記の研究方法にある様に、トリチウムを添加した極低温の固体重水素ターゲットを用いミュオン触媒核融合反応を利用して負ミュオンビームを捕獲・冷却する装置の開発を進めた。その第 1 段階の原理検証として、トリチウムを使用せず極低温の固体重水素のみを使用したミュオン触媒核融合実験装置を開発し実験を実施した。その結果、中性子等の観測により実際にミュオン触媒核融合反応が生じていることを確認した上で、超低速化されたミュオンの引出し・輸送と検出にも成功した。この実験のために、多数のノイズとなる粒子が存在しているミュオン触媒反応が生じている固体重水素標的から低速化された負ミュオンのみを取り出し、メートル単位で静かな環境に輸送し、負ミュオンが標的に当たって生じる特性 X 線の検出により負のミュオンを検出するための、荷電粒子の同軸輸送管 (図 3) を開発した。このアイデアは負ミュオンのみならず荷電粒子一般に適用可能で、簡単に粒子を任意の距離だけ輸送する装置となったため、KEK と東北大より特許出願を行った。

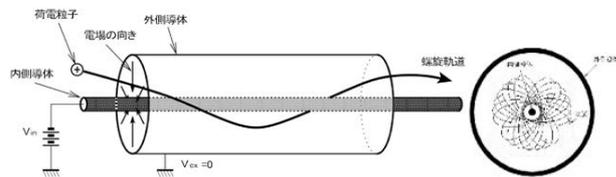


図 3 同軸粒子輸送管の原理

次段階として、トリチウムを用いる装置の開発を行った。富山大学水素同位体科学研究センターとの共同により、安全にトリチウムをハンドリングする手法の開発に成功した。具体的には、水素の吸蔵と放出の容易な NEG ゲッター型の吸着ポンプ (SAES 製) を用い、富山大でトリチウムを吸着剤に充填、J-PARC で吸着剤からトリチウムを実験装置に輸送し実験を行い、再びトリチウムを富山大学に持ち帰る手法を確立した。また、並行して、J-PARC におけるトリチウム使用の許可を得るため、J-PARC 内の安全検討会を 2 年に渡り実施し、指摘された問題点の個別クリアにより、実施可能な実験計画に概ねたどり着いた。しかしながら、他の実験の放射線の許可申請に支障を来すとの理由により J-PARC においてはトリチウム使用の許可申請を今後 5 年間は実施しないと裁定が下された。このため、当初のトリチウムを使用した計画が大きく進んだ段階で、トリチウムの使用が出来ない事態となり、計画の大幅変更を余儀なくされた。

トリチウムが使用できないという事態をうけ、当初計画の後半で用いる薄膜を用いて負ミュオンビームを摩擦冷却する方法を主題とする方向に大きく舵を切った。従来の平面薄膜を用いる方法では、ビーム冷却はエネルギー分布の縮小のみが得られるものであったが、この冷却過程をよく検討することにより、曲面形状の薄膜群を用いれば空間分布も同時に縮小でき、3 次元のビーム冷却が可能であると

の知見に到達した (図 4)。この発見を活用するため、ビームを 10keV 程度まで減速する装置、10keV 程度の粒子を輸送する装置、曲面薄膜群を用いて 10keV 程度の粒子を 1keV 未満までビーム冷却し、微小点へと収束する装置の、3 段階からなる方式の開発を進めた。

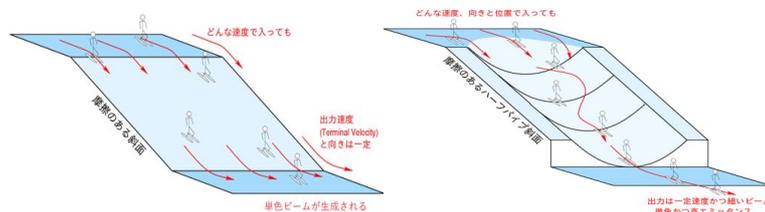


図 4 従来の平面薄膜の原理 (左) と、本研究で開発された曲面薄膜によるビーム冷却の原理 (右) の説明図

第 1 段階として、0.5mm 厚の Be 板を減速材標的として使用し、負ミュオンの入射運動量として 27.5MeV/c を選択、カプトン薄膜群で負ミュオンを減速・捕獲し、第 2 段階として生じた低速負ミュオンを 1.6m の同軸管で輸送し、銀の標的に当て、銀の標的から発生するミュオン誘起の特性 X 線により負ミュオンを検出する実験を行った (図 5, 図 6)。この実験では、薄膜と同軸輸送管に印加する電圧に比例した収量の低速負ミュオンを検出することができ、原理検証に成功した。

また、減速標的として同軸管内に設置した 0.5mm 厚さのシリコン標的で生じる低速化された

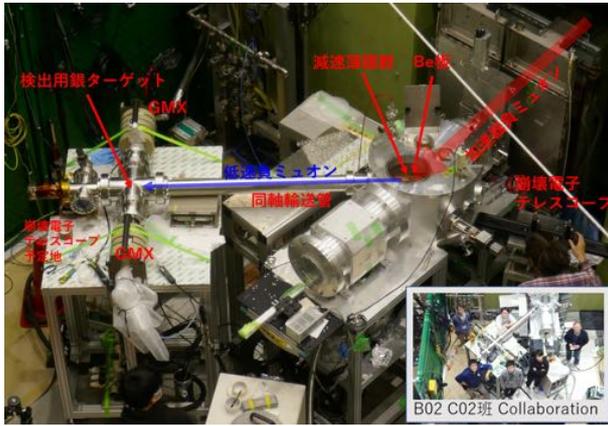
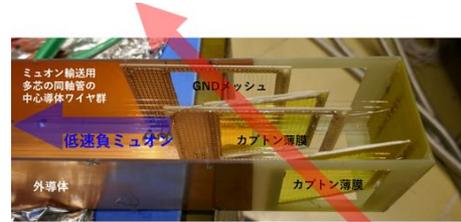
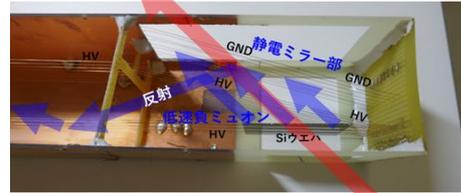


図5 実験装置の全景

負ミュオンを静電反射ミラーを用いて効率的に同軸管に導入する方法(図7)も開発し、この方法では1 kV という極めて低い電圧でも負ミュオンを効率的に捕獲・輸送することに成功し、低速負ミュオンの利用という新しい分野が拓かれた。



・ 中心電極にHV印加
・ カプトン薄膜には0~HVの勾配電位を印可
・ HV=7kV, 5kV, 3.5kVで測定
Be減速負ミュオン
図6 薄膜減速器の写真



・ 低速負ミュオンを検出し、実験に成功。
・ Siによる超低速負ミュオンの吸収が少し見えている様だが解析中。
30MeV/c負ミュオン
図7 標的的内蔵型減速器と静電ミラー

最終段階となる曲面薄膜を用いたビーム冷却装置の開発を進めた。曲面薄膜によるビーム冷却装置の原理は、導電性の曲面薄膜が作り出す収束電場の分布による摩擦をうけながらのビーム再加速と収束の組み合わせである。このため、分布電極による収束電場の生成と、平面の絶縁体薄膜群の組み合わせでも同じ効果が得られる。どちらを選択するにせよ、30nm 未満の薄膜を真空中で自立させる事が必要であり、強度的に選択可能な材料としては、導電性の炭素薄膜か、絶縁性の窒化ケイ素薄膜の2者択一となった。

まず平面の自立窒化ケイ素薄膜の製作を試みた。60nm 厚さ程度までは製造実績があったが、30nm 以下となると格子状の支えが必要となり、シリコン微細加工技術での製作を試みたが、シリコン単結晶の電気絶縁度は高くない為、外部電極で印加された収束電位分布を格子状の支えの電気伝導度が邪魔をしてしまう事が判明した。このため、金属メッシュで開口比が90%以上の曲面を形成し、そこに炭素薄膜を水面転写する方法を試みた。この方法に成功し、半径 16mm、半径 30mm、半径 50mm の3枚の同心球面に配置した曲面炭素薄膜ビーム冷却装置(図8)を作成した。

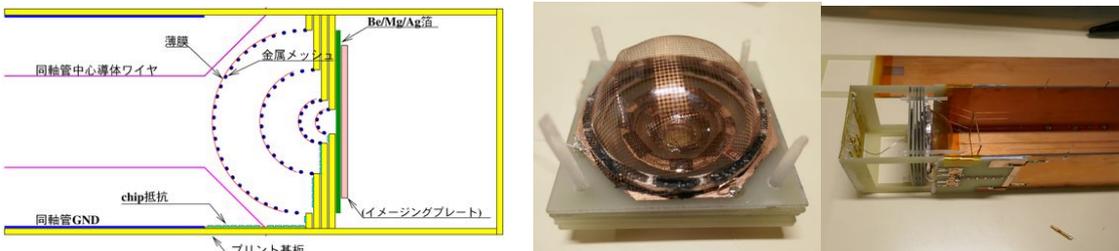


図8 同心球面薄膜群によるビーム冷却装置の構成図(左)と作成した薄膜群の写真(右)。同軸輸送管によって運ばれた低エネルギー負ミュオンが同心球面の焦点に収束する。同心球面の金属メッシュは4層からなり、そのうち外側の3層に厚さ 20nm の炭素薄膜が貼り付けられ、数 kV の電圧印加に対しても安定して自立できている。収束点には Mg 板が配置されている。

実験では、第1段階として上記のシリコン板と静電ミラー、第2段階として同軸輸送管、第3段階として作成した同心球面ビーム冷却装置が配置され、収束したビームの検出には、マグネシウム板の負ミュオンによる放射化分布の画像分析をイメージングプレート(IP)を用いて実施した。シリコン板と同軸管には7.5kVを印加、薄膜電極間には各1.6kV差を印加した。マグネシウム板の負ミュオンの放射化の寿命の3倍程度となる36時間程度のビーム照射を行った。実験後にマグネシウム板を取り出し、IPを密着させ24時間ほど転写し、現像したところ、直径5mm程度に収束された負ミュオンビームの検出に成功し、わずか3枚のみの曲面薄膜によるものではあるが、ビーム冷却の原理検証実験に成功した(図9)。

最重要の基本原理解証ができたので、今後、予算があれば、夢の走査型負ミュオン顕微鏡を実現できるものと考えられる。

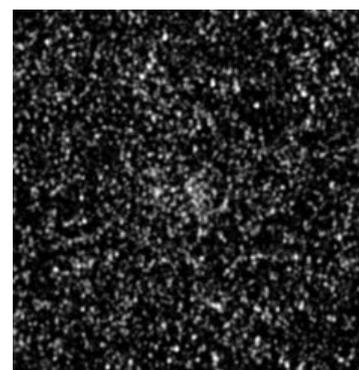


図9 負ミュオン収束の放射化イメージング分析の結果。収束径は5mm程度。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計60件（うち査読付論文 58件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 53件）

1. 著者名 三宅康博	4. 巻 794
2. 論文標題 負ミュオンが織りなす文理融合研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 月刊考古学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 31-34
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 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 -

1. 著者名 Tampo Motonobu, Miyake Yasuhiro, Saito Tsutomu, Kutsuna Takahiko, Tsumura Makiko, Umegaki Izumi, Takeshita Soshi, Doiuchi Shogo, Ishikake Yuta, Hashimoto Akiko, Shimomura Koichiro	4. 巻 245
2. 論文標題 Developments on muonic X-Ray measurement system for historical-cultural heritage samples in Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Interactions	6. 最初と最後の頁 39(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-024-01885-2	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 -

1. 著者名 Takeshita Soshi, Umegaki Izumi, Tampo Motonobu, Strasser Patrick, Ikedo Yutaka, Koda Akihiro, Higemoto Wataru, Yuasa Takahiro, Kawamura Naritoshi, Miyake Yasuhiro, Shimomura Koichiro	4. 巻 245
2. 論文標題 Negative muon beam status at the D-line of MUSE, J-PARC	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Interactions	6. 最初と最後の頁 38(1-15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-024-01877-2	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 -

1. 著者名 T. Nakamura, M. Matsumoto, K. Amano, Y. Enokido, ... Y. Miyake, ... M. Abe, S. Watanabe, Y. Tsuda, et al.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 eabn8671(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abn8671	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 Miyake Y., Tampo M., Takeshita S., Umegaki I., Strasser P., Doiuchi S., Hashimoto A., Shimomura K., Kutsuna T., Saito T., Kubo K., Ninomiya K.	4. 巻 2462
2. 論文標題 Integration of arts and sciences using negative muon non-destructive analysis at J-PARC MUSE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012005(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2462/1/012005	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 -

1. 著者名 Umegaki I., Kondo Y., Tampo M., Nishimura S., Takeshita S., Higuchi Y., Kondo H., Sasaki T., Shimomura K., Miyake Y	4. 巻 2462
2. 論文標題 Non-destructive operando measurements of muonic x-rays on Li-ion battery	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012018 ~ 012018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2462/1/012018	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 -

1. 著者名 三宅康博	4. 巻 33
2. 論文標題 負ミュオンビームを用いた歴史研究－文理融合研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 原子カシステムニュース	6. 最初と最後の頁 6-10
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 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 -

1. 著者名 Kato Takashi, Tampo Motonobu, Takeshita Soshi, Tanaka Hiroki, Matsuyama Hideya, Hashimoto Masanori, Miyake Yasuhiro	4. 巻 68
2. 論文標題 Muon-Induced Single-Event Upsets in 20-nm SRAMs: Comparative Characterization With Neutrons and Alpha Particles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1436 ~ 1444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2021.3082559	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 -

1. 著者名 MIYAKE Yasuhiro	4. 巻 19
2. 論文標題 J-PARC Muon Facility, MUSE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computer Chemistry, Japan	6. 最初と最後の頁 A12 ~ A18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2477/jccj.2020-0016	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 -

1. 著者名 Shimada-Takaura Kayoko, Ninomiya Kazuhiko, Sato Akira, Ueda Naomi, Tampo Motonobu, Takeshita Soshi, Umegaki Izumi, Miyake Yasuhiro, Takahashi Kyoko	4. 巻 -
2. 論文標題 A novel challenge of nondestructive analysis on OGATA Koan 's sealed medicine by muonic X-ray analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Natural Medicines	6. 最初と最後の頁 01487(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11418-021-01487-0	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 -

1. 著者名 三宅康博	4. 巻 91,3
2. 論文標題 文化財への応用が期待される量子ビームを用いた非破壊分析技術「J-PARCミュオン施設の紹介とミュオン分析の特徴や開発状況」	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 235-242
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 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 -

1. 著者名 Y. Miyake, K. Shimomura, N. Kawamura, A. Koda, P. Strasser, K. M. Kojima, H. Fujimori, S. Makimura, Y. Ikedo, Y. Kobayashi, J. Nakamura, Y. Oishi, S. Takeshita, T. Adachi, A. D. Pant, H. Okabe, S. Matoba, M. Tampo, M. Hiraishi, K. Hamada, S. Doiuchi, W. Higemoto, T. U. Ito, R. Kadono,	4. 巻 21
2. 論文標題 J-PARC Muon Facility, MUSE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011054(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.21.011054	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 -

1. 著者名 Strasser P., Abe M., Aoki M., Choi S., Fukao Y., Higashi Y., Higuchi T., Iinuma H., Ikedo Y., Ishida K., Ito T., Ito T. U., Iwasaki M., Kadono R., Kamigaito O., Kanda S., Kawagoe K., Kawai D., Kawamura N., Kitaguchi M., Koda A., Kojima K. M., Kubo K., Matama M., Matsuda Y., Matsudate Y., Mibe T., Miyake Y., 他28名	4. 巻 198
2. 論文標題 New precise measurements of muonium hyperfine structure at J-PARC MUSE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 00003(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201919800003	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 -

〔学会発表〕 計108件 (うち招待講演 25件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Yasuhiro Miyake
2. 発表標題 Development of Muon Imaging By Accelerator Muons
3. 学会等名 2023 Optica Imaging Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 負ミュオンビームを用いた歴史研究-ミュオンで見る 歴史資料-
3. 学会等名 原子力システム研究懇話会・第317回定例懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M.Tampo, Y.Miyake, T. Kutsuna, T.Saito, S.Takeshita, I.Umegaki, S.Doichi, Y. Ishikake, A. Hashimoto, K.Shimomura
2. 発表標題 Developments on muonic X-ray measurement system for historical-cultural heritage samples in Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)
3. 学会等名 The 15th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance (μ SR2020) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 I.Umegaki, M.Tampo, Y. Kondo, Y.Higuchi, H.Kondo, S.Nishimura, S.Takeshita, Y. Miyake, K.Shimomura
2. 発表標題 Non-destructive operando measurements of muonic x-rays on Li-ion battery
3. 学会等名 The 15th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance (μ SR2020) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 ミュオン顕微鏡イメージングに向けて
3. 学会等名 物質科学研究討論会：基礎と応用の新展開（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 ミュオン粒子を用いた顕微鏡の実現に向けて-自然科学と人文科学-
3. 学会等名 第58回アイソトープ・放射線研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 J-PARC Muon Facility, MUSE
3. 学会等名 錯体化学会 第70回討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y.Nagatani
2. 発表標題 Scanning negative muon microscopy by muon-catalyzed fusion using tritium
3. 学会等名 3rd Asia Pacific Symposium on Tritium Science (APSOT-3) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 ミュオンで物質内部を見る
3. 学会等名 第63回放射線化学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y.Miyake
2. 発表標題 Integration of arts and sciences by using negative muon non-destructive analysis at J-PARC MUSE
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会国際セッション (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 ミュオンによる産業利用の可能性
3. 学会等名 第4回J-PARC MLF産業利用報告会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Miyake
2. 発表標題 Ultra Slow Muon and Low Energy Muon
3. 学会等名 THE 21ST INTERNATIONAL WORKSHOP ON NEUTRINOS FROM ACCELERATORS (NUFACT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Natori
2. 発表標題 Development of very slow negative muon beam in J-PARC
3. 学会等名 THE 21ST INTERNATIONAL WORKSHOP ON NEUTRINOS FROM ACCELERATORS (NUFACT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 Ultra Slow Muon Generation and Its Application for Transmission Muon Microscopy at J-PARC Muon Facility, MUSE
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Takeshita, H. Okabe, A. Koda, M. Hiraishi, K.M. Kojima, R. Kadono, H. Seto, T. Masui, and N. Wakabayashi
2. 発表標題 Effective Shielding for radiation derived from negative muon
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Natori, Y. Miyake, N. Nagatani, P. Strasser, K. Shimomura, T. Yamazaki, T. Adachi
2. 発表標題 Ultra-slow negative muon beam development in J-PARC
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 身近な素粒子ミュオンを用いた研究～文理融合の試み～
3. 学会等名 量子放射線利用普及連絡協議会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 J-PARCにおける最近の負ミュオン研究
3. 学会等名 第2回ハイドロジェノミクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅 康博
2. 発表標題 J-PARC Muon Facility, MUSE
3. 学会等名 University of Science and Technology of China 2nd muon source workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 身近な素粒子ミュオンとその応用
3. 学会等名 旭化成(株)基盤技術研究所セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 ミュオンの産業利用の可能性
3. 学会等名 クラレ(株)における中性子産業応用セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 J-PARC Muon Facility, MUSE -Status and Recent Activity-
3. 学会等名 Physics of muonium and related topics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 永宮正治, 民井淳, 小沢恭一郎, 前川藤夫, 羽場宏光, 吉田敦, 阿部知子, 郡司卓, 後田裕, 中村哲, 柴山光宏, 三宅康博, ...他	4. 発行年 2023年
2. 出版社 日本原子力産業協会 原子力システム研究懇話会	5. 総ページ数 196
3. 書名 NSA/COMMENTARIES 量子ビーム科学の基礎と応用	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 荷電粒子輸送装置	発明者 永谷幸則, 名取寛 顕, P. Strasser, 三宅 康博他5名	権利者 東北大学、高工 ネ研
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-136608	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>最先端負ミューオンビーム開発 https://www2.kek.jp/imss/msl/MuonScience-G/Research/SlowMuon-.html 第8回文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平- https://www2.kek.jp/imss/msl/2023/09/8.html 第7回文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平- https://www2.kek.jp/imss/msl/2022/10/7.html 第6回 文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平- https://www2.kek.jp/imss/msl/2021/12/6.html 第5回文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平- https://www2.kek.jp/imss/news/2021/topics/1215BunRi5/ 第4回 文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平- https://www2.kek.jp/imss/msl/2020/12/4.html 第3回 文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平- https://www2.kek.jp/imss/msl/2020/07/3.html 第2回文理融合シンポジウム https://www2.kek.jp/imss/news/2020/topics/1225BunRi2/ 第1回文理融合シンポジウム https://www2.kek.jp/imss/news/2019/topics/0727BunRi/</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
研究分担者	永谷 幸則 (Nagatani Yukinori) (00393421)	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・特別准教授 (82118)	
研究分担者	Patrick Strasser (Patrick Strasser) (20342834)	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・講師 (82118)	
研究分担者	嶋 達志 (Shima Tatsushi) (10222035)	大阪大学・核物理研究センター・准教授 (14401)	
研究分担者	原 正憲 (Hara Masanori) (00334714)	富山大学・学術研究部理学系・准教授 (13201)	
研究分担者	波多野 雄治 (Hatano Yuji) (80218487)	富山大学・学術研究部理学系・教授 (13201)	

6. 研究組織（つづき）

	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	下村 浩一郎 (Shimomura Koichiro)		
研究協力者	河村 成肇 (Kawamura Naritoshi)		
研究協力者	山崎 高幸 (Yamazaki Takayuki)		
研究協力者	竹下 聡史 (Takeshita Soshi)		
研究協力者	反保 元伸 (Tampo Motonobu)		
研究協力者	名取 寛顕 (Natori Hiroaki)		
研究協力者	PANT Amba Datt (Pant Amba Datt)		
研究協力者	梅垣 いづみ (Umegaki Izumi)		

6. 研究組織（つづき）

	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 勝彦 (Ishida Katsuhiko)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関