

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11922

研究課題名(和文) ミュオンを用いた新規の非接触化学状態分析法の開発

研究課題名(英文) Development of chemical state analysis method without contact using muon

研究代表者

二宮 和彦 (NINOMIYA, Kazuhiko)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：90512905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子ミュオンが原子に捕獲されると、ミュオン特性X線を放出する。本研究では、ミュオン特性X線の放出確率が、ミュオンを捕獲する原子の化学状態によりわずかに変化することに注目し、化学状態分析を行うことを目的に実施した。鉄のいくつかの化合物に対して、ミュオン照射を行い、化学形によるミュオン特性X線強度の違いを明らかにした。その違いを用いて砂鉄の化学形態を調べ、分析の精度について評価した。また、空気中における酸化反応をミュオン特性X線の測定から追跡できることを示した。本研究成果により、近年応用研究の進展が著しいミュオンによる非破壊分析において、化学形態の分析という新しい特性を付加することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非破壊の元素分析は、多くの研究分野において非常に有用な技術の一つであり、特に考古学など貴重資料を取り扱う分野においては唯一の分析手段となりうる。その中で物質内部の元素を分析できる、ミュオン元素分析法は有用であり非常に注目されている。本研究ではこれに化学状態分析を行うという、新たな付加価値を与えることに成功した。例えば考古物では、錆の状況、顔料などの詳しい化学形の分析など、化学形を知ることにより極めて重要な情報が得られる。本研究の成果は、これらのこれまで知ることのできなかつた情報に光を当てるものであり、広い量子ビーム応用研究の展開が期待されるものである。

研究成果の概要(英文)：When a muon is captured on muon atomic orbit and a muonic atom is formed, muonic X-rays are emitted. In recent years, elemental analysis method by muon has been developed and applied for many materials. In muonic atom formation process, chemical effect has been known that muonic X-ray emission probabilities are changed by the chemical environment of muon capturing atom. The purpose of this research project is development of non-destructive chemical state analysis using muon. The character of muonic X-ray emission probability of each chemical state has been examined in detail. Using this property, the chemical form (mixing ratio) of iron sand was determined non-destructively, and time development of oxidation reaction of metal iron powder was investigated. From this research, we successfully demonstrated chemical compound identification by muon, in other words, we added a new characteristic of chemical species identification on non-destructive muon elemental analysis method.

研究分野：放射化学

キーワード：ミュオン ミュオン特性X線 非破壊元素分析 ミュオン原子 化学状態分析

## 1. 研究開始当初の背景

負ミュオン（ミュー粒子、ミューオンともいう。本稿では、以下単にミュオンと書く）は電子のおよそ 200 倍の質量を持った素粒子である。1937 年に Anderson によって宇宙線より発見され、研究目的では多くの場合、高エネルギーの陽子加速器施設からの 2 次粒子として人工的に生成したビームを利用する。近年、日本国内では茨城県東海村大強度陽子実験施設のミュオン施設 (J-PARC/MUSE) や、大阪大学核物理研究センターのミュオン施設 (RCNP-MuSIC) といった大強度ミュオン利用施設が稼動し始めた。そして、QED の精密検証という素粒子物理学研究や、バルクな固体における局所場観察の手段である  $\mu$ SR 法による物性研究で広く利用が進んでいる。この中で、本研究では近年実用レベルにまで発展した、ミュオン原子からのミュオン特性 X 線を利用した非破壊元素分析法、ミュオン元素分析法 (MIXE: Muon Induced X-ray Emission) に注目する [1]。

ミュオンを物質中に打ち込むと、ミュオンの停止位置でミュオンが原子核の周りに原子軌道を作り、ミュオン原子を形成する。ミュオンは電子の 200 倍の質量を持つために、ミュオン原子が形成したあとに放出されるミュオン特性 X 線は、電子の特性 X 線の 200 倍のエネルギーを持っている。このような高エネルギーの特性 X 線は物質の透過能が非常に高い。

ミュオン元素分析法とは、このミュオン特性 X 線を元素分析に利用する方法である。この方法の特徴は、主には以下の 3 点である (図 1)。まず、ミュオン特性 X 線という非常に高いエネルギーの光子を利用できるために、非破壊で内部の炭素などの軽元素分析ができるという点 [2]、元素によって感度があまり変わらない点 [3]、そしてミュオンの物質への入射エネルギーを制御することで、分析深さを特定できる場所である [4]。すなわち、この方法は非破壊非接触であらゆる元素を分析することができる、優れた特徴を持っている。このほかにも同位体の分析の可能性も示されている [5]。

このようなミュオン元素分析法の開発においては、ミュオン原子がどのようにできるのかを知ることは重要である。すなわち、ミュオン原子が形成したとき、ミュオンは原子核のどのようなミュオン原子軌道 (準位) に捕獲され、結果としてどのような X 線を放出するのかは重要な基礎データとなる。逆の言い方をすれば、捕獲されたミュオンの準位により、ミュオン 1s 原子軌道への遷移過程がわずかに変化し、例えば  $K_{\alpha}$  線を放出するか、 $K_{\beta}$  線を放出するかといった放出確率が異なるため、ミュオン特性 X 線を測定することによって捕獲されたミュオンの初期状態の情報を得ることができる。非常に興味深いことに、ミュオン特性 X 線の放出確率、すなわち捕獲の初期準位は、化学状態によってわずかに変化しており、これはミュオン捕獲における化学効果と呼ばれている [6]。

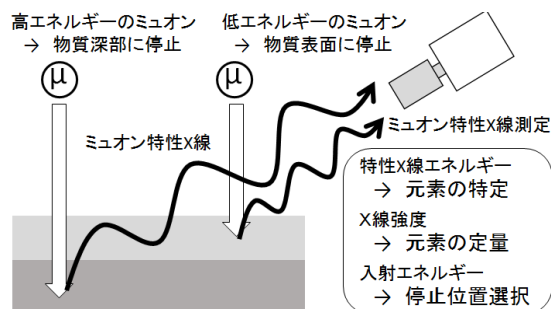


図 1 : ミュオン元素分析法の原理

申請者は、これまでミュオン捕獲における化学効果の研究で成果をあげてきた。本研究では、非破壊非接触であらゆる元素を分析可能なミュオン元素分析法に、化学効果の知見を組み合わせることで、「化学状態分析」という有用かつ重要な特性を付加することができるという考えに至り、本研究の提案を行った。

申請者が 2009 年度にミュオン元素分析法開発の研究活動を開始した時、世界的にも申請者ら唯一の研究グループであった。現在では本手法の有用性が認められ、世界各地のミュオン施設において同様の研究が始まっており、競争の激しい研究分野となっている。例えば英国の Rutherford-Appleton 研究所では、年間数十日のマシンタイムを元素分析のテーマに充当している。さらにスイス PSI 研究所でも元素分析の研究テーマが始まっている。さらに、カナダ TRIUMF 研究所においても同様の研究計画が立てられている。このように、ミュオンを用いた元素分析法は現在広く受け入れられており、多くの研究が行われてきている。このような中で、本研究の「化学状態分析法」開発は、これら後発の海外の研究に先んじた新しい発想の研究であり、日本で独自に開発された本手法をますます発展させる重要な基礎研究となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、非破壊非接触で物質内部を分析できるミュオン元素分析法において、さらに元素の化学状態の情報を得ることが可能であるかを実証することを目的とする。

化学状態を明らかにすることができる元素分析法として、赤外吸収法やメスバウアー分光法な

どが知られているが、非破壊で物質内部のあらゆる元素に適用することのできる手法は存在しない。それに対してすでに開発されているミュオンによる元素分析法は、大きな試料に対して非破壊の分析で、内部の特定位置を、軽元素を含めて分析可能である。これに化学状態分析という特性を付加することができれば、これまでにない新しいタイプの分析法として確立することができ、物質のあらゆる情報を明らかにする夢の分析法の開発ができることになる。

ミュオン原子形成における化学的な効果、すなわち化学状態によるミュオン特性X線の変化は、原理的にはあらゆる原子で現れる。その中で、本研究はまず、考古学、地球化学において最も重要な元素の一つであり、多くの化学状態を取ることができる鉄 (Fe) に注目した。そこで様々な鉄化合物に対してミュオン捕獲における化学効果を明らかとし、非破壊での化学状態分析を実証する。

本研究の成功は、非常に広範な分野でのミュオンという量子ビームの利用をもたらすと期待される。例えば貴重な考古学資料の内部の化学状態の調査から、鋳造や鍛造などの製法違いを見分けることができる。他にも隕石など地球外試料の内部に存在する有機物について、その化合物の特定が可能となる。さらには電池など、化学状態の変化を利用した産業試料について、各元素の化学状態の変化を可視化できるなど、分野の垣根を越えた応用、展開を期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究は、大阪大学核物理研究センターRCNP/MuSICにおいて実施した。さらに本計画研究の期間内で MuSIC が加速器のアップグレードで停止したため、一部の実験についてはスイスの PSI (ポールシェラー研究所) にて実施した。これらの施設において、鉄の化合物におけるミュオン捕獲の化学効果を明らかにするとともに、以下の3つの研究テーマを実施した。

- (1) MuSIC における砂鉄の組成分析
- (2) MuSIC における鉄の酸化反応の追跡
- (3) PSI における砂鉄の鉄化合物多元系分析

実験は、MuSIC と PSI という異なる2つの施設において行ったために、ミュオン照射実験のセットアップはそれぞれ異なっている。ただ、基本的には同じ構成のもとで実験を行っており、本報告書では、例として図2に MuSIC における実験セットアップのみを示す。実験セットアップは、ミュオン検出のためのプラスチックシンチレータ、ミュオン特性X線測定のための Ge 半導体検出器からなっている。ビームラインから供給されるミュオンを、試料上流に設置した2枚のプラスチックシンチレータを入射カウンター (本計画研究により整備) により検出し、ミュオンが試料に入射したタイミングを得た。このタイミングで Ge 半導体検出器の測定を有効にすることで、低バックグラウンドのミュオン特性X線スペクトルを取得した。

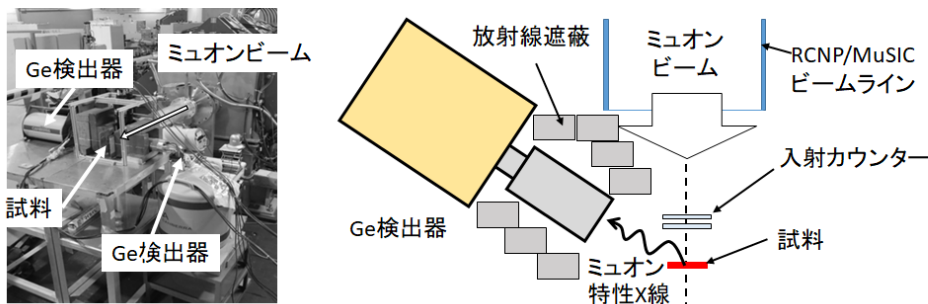


図2 : MuSIC におけるミュオン実験の様子と実験の概念図

分析試料として、代表的な鉄の化合物として酸化鉄を選定し、金属鉄 (Fe)、マグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、マグヘマイト ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )、ヘマタイト ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )、FeO を使用した。これらについてそれぞれ数

時間ずつ、ミュオンの照射を行い、ミュオン特性X線を測定した。さらに(1)および(3)の目的のために、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の混合物である砂鉄についてミュオン特性X線の測定を行った。混合比は、同じ試料についてメスbauer分析を行うことにより決定した。さらに(3)の実験においては、マグネタイトとマグヘマ

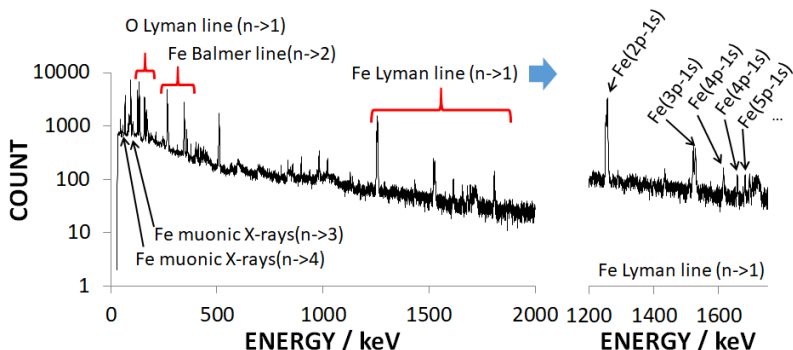


図3 :  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  試料で得られたミュオン特性X線スペクトル

イトを混合した、成分が既知の混合試料についても標準試料として分析した。また(2)の目的のために、金属鉄粉末についてミュオン照射を行った。金属鉄粉末は、空气中で酸化するため、空气中に設置し酸化させながら12時間のミュオン照射を行った。さらに24時間以上空气中で放置して十分に酸化が進んだものについても分析を行った。また、時間ごとの酸化状態を調べるために、(1)の実験と同様にメスバウアー分析についても実施した。

#### 4. 研究成果

得られたミュオン特性 X 線スペクトルについて、 $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  試料で得られたものを図3に示す。試料を構成する鉄及び酸素に由来するミュオン特性 X 線が明瞭に観測された。特に鉄のミュオン特性 X 線については、(2p-1s)から、(10p-1s)に至る高次のミュオン特性 X 線を定量した。それぞれの試料から得られたミュオン特性 X 線スペクトルを解析し、各ピークの強度を決定した。さらにチェックソースの測定に基づいて検出効率を決定し、ミュオン特性 X 線の入射ミュオンあたりの放出確率を決定した。

ミュオン特性 X 線の放出確率は、化学状態により明確に異なることが分かった。例として、図4にFeと $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ のミュオン特性 X 線の強度比を比較したものを示す。特に(3p-1s)と(>10p-1s)の X 線強度比において大きな差がみられた。これにより、ミュオンによる化学形状分析が原理的に可能であることを実証した。これらの強度比の違いをもとに、実試料について化学状態分析を実施することにした。

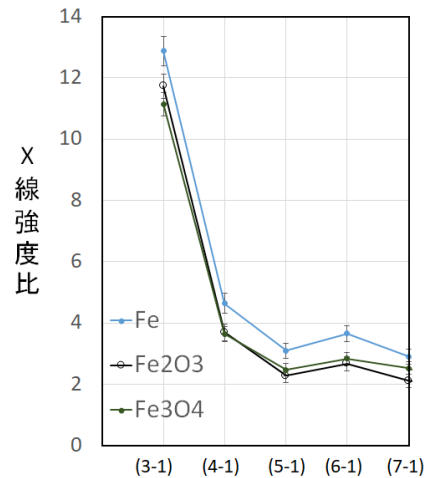


図4： $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ のミュオン特性 X 線の(2p-1s)に対する強度比

##### (1) MuSIC における砂鉄の組成分析

$\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の混合物である砂鉄の化学状態を調べるために、砂鉄のミュオン特性 X 線測定を実施した。得られたミュオン特性 X 線の強度比について、図5に示す。砂鉄のミュオン特性 X 線の強度比は、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ のミュオン特性 X 線の強度比のちょうど間の値をとることが分かった。これは当初予想していたように、ミュオン特性 X 線の測定からも砂鉄が $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の混合物であることを意味している。

$\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ のミュオン特性 X 線の強度比をある割合で組み合わせることで、図5に示すように砂鉄の強度比を再現した。この割合が、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の混合比に相当し、この砂鉄は $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を $25 \pm 12\%$ 含むと見積もられた。

同じ試料について、メスバウアー分析により混合比を求めたところ、21%が得られ、ミュオン特性 X 線の強度比による方法は誤差が大きいものの整合する結果が得られた。

この実験により、ミュオンにより化学状態を非破壊で調べることが可能であることを実証した。

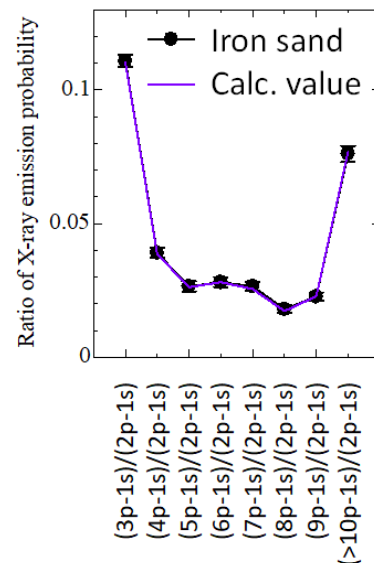


図5：砂鉄のミュオン特性 X 線強度比と $\text{Fe}_3\text{O}_4$ と $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の混合物として得た計算値との比較

##### (2) MuSIC における鉄の酸化反応の追跡

次に、ミュオン特性 X 線測定により化学反応の追跡ができることを実証するために、空气中で鉄粉を酸化させながらミュオンを照射し、ミュオン特性 X 線の強度の時間変化を調べた。鉄粉は、事前に酸化による温度変化を調べておき、空气中に接触後12時間で常温に戻る、すなわち酸化反応が完結することを確認したうえで使用した。

鉄粉から得られたミュオン特性 X 線強度、特に(2p-1s)の強度について、その時間依存を調べたところ、時間の進展、すなわち酸化反応の進展に応じて強度が上昇していることが分かった。そこで、鉄粉の実験においても(1)の実験と同様に、金属鉄と開封後24時間以上経過して反応終了後の試料の2元素としてスペクトルの解析を行い、酸化反応の進行度の時間依存を調べた。結果を図6に示す。酸化反応は試料の開封後急速に進み、およそ5時間程度でほとんどすべての反応が完結していることが明らかになった。

同じ鉄粉について、同じ条件である空气中で酸化させてメスバウアー分析を行ったところ、金属鉄が水酸化鉄に酸化していく様子が確認できた。その時間発展を調べたところ、図6に示す結果

が得られた。

図6に、ミュオン特性 X 線測定による方法と、メスバウアー分析による方法の2つの結果を比較したものを示している。このように2つの方法で、鉄の酸化反応の進展はよく似ていることが分かった。以上のことからミュオン特性 X 線測定により、化学反応の追跡が可能であることを示した。

### (3) PSIにおける砂鉄の鉄化合物多元系分析

PSIにおける大強度ミュオンビームを用いて、金属鉄および酸化鉄に対してミュオンの照射を行い、ミュオン特性 X 線の強度比を精度よく決定した。さらに砂鉄と砂鉄を模擬した  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の混合物についてもミュオン特性 X 線の測定を行った。

金属鉄、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  を成分として、(1)の実験と同じように、砂鉄の組成を得られたミュオン特性 X 線の強度比から決定した。そして(1)と同じ砂鉄の成分として金属鉄 2.4%、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  が 83%、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  が 16%、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  が 4%、 $\text{FeO}$  が 2.4% が得られた。金属鉄、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  の存在量は低く、この砂鉄は、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の混合物であることが明らかとなった。そしてこれはすでに述べたメスバウアー分析による結果ともよく整合した。さらに  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、およびその混合物の分析結果から、この鉄酸化物による2元系について、ミュオン特性 X 線強度比から混合比を求める検量線を作成したところ、良好な直線関係を得ることができた。この検量線を用いて砂鉄の成分を求めたところ、 $21 \pm 3\%$  が得られ、これは(1)の実験より4倍高い精度の値であった。

このように、ミュオン特性 X 線の測定により、鉄と酸素のシグナルしか検出されていない、すなわち鉄と酸素の化合物であると考えた場合でも、その成分について正確に見積もることができた。さらに検量線を用いることで、高精度の分析も可能であることを示した。

本研究では、ミュオン捕獲に伴い放出されるミュオン特性 X 線の化学状態によるわずかな違いを利用し、化学状態分析を行うことを目的に実施した。そして鉄の化合物に対して、化学形によるミュオン特性 X 線強度の違いを明らかにし、それを用いて砂鉄の化学状態(混合比)を決定した。さらにその分析の精度についても評価した。また、空気中における酸化反応をミュオン特性 X 線の測定から追跡できることを示した。本研究成果により、近年応用研究の進展が著しいミュオンによる非破壊分析において、化学状態の分析という新しい特性を付加することができた。

### 【参考文献】

- [1] 二宮和彦、化学、Vol. 70, No. 10, 49-52 (2015)
- [2] K. Terada, K. Ninomiya et. al., Sci. Rep., **4**(2014)5072
- [3] K. Ninomiya et. al., Bull. Chem. Soc. Japan **85** (2012) 228.
- [4] K. Ninomiya et. al., Anal. Chem., **87** (2015) 4597-4600
- [5] K. Ninomiya et. al., J. Radioanal. Nucl. Chem., **320** (2019)801-805
- [6] G. Yoshida, K. Ninomiya et. al., J. Radioanal. Nucl. Chem., **303** (2015)1277-1281

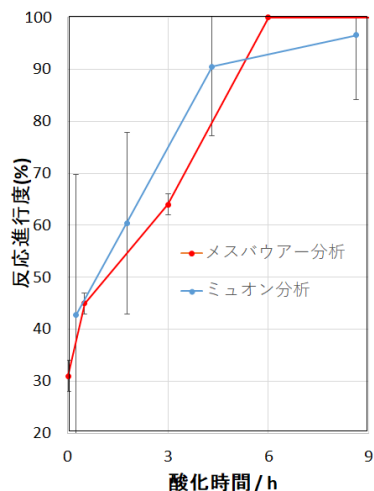


図6：ミュオンおよびメスバウアー分析により見積もった鉄粉の酸化反応の時間発展

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kazuhiko Ninomiya, Takuto Kudo, Patrick Strasser, Kentaro Terada, Yosuke Kawai, Motonobu Tampo, Yasuhiro Miyake, Atsushi Shinohara, Kenya M. Kubo	4. 巻 320
2. 論文標題 Development of non-destructive isotopic analysis methods using muon beams and their application to the analysis of lead	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Radioanal Nucl Chem	6. 最初と最後の頁 801-805
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-019-06506-9	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 Takuto Kudo, Kazuhiko Ninomiya, Patrick Strasser, Kentaro Terada, Yosuke Kawai, Motonobu Tampo, Yasuhiro Miyake, Atsushi Shinohara, Kenya M. Kubo	4. 巻 322
2. 論文標題 Development of a non-destructive isotopic analysis method by gamma-ray emission measurement after negative muon irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Radioanal Nucl Chem	6. 最初と最後の頁 1299-1303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-019-06682-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoshiyuki Hirano, Kazuhiko Ninomiya, Seiichi Yamamoto	4. 巻 94
2. 論文標題 Estimation of dose and light distributions in water during irradiation of muon beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 125804
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1402-4896/ab3acb	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 Kazuhiko Ninomiya	4. 巻 19
2. 論文標題 Non-destructive, position-selective, and multi-elemental analysis method involving negative muons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences	6. 最初と最後の頁 8-13
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 Kazuhiko Ninomiya, Meito Kajino, Makoto Inagaki, Kentaro Terada. Akira Sato, Dai Tomono, Yoshitaka Kawashima, Atsushi Shinohara	4. 巻 324
2. 論文標題 Per atom muon capture ratios and effects of molecular structure on muon capture by $^{56}\text{Fe}$ and $^{57}\text{Fe}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 403-408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-020-07065-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 二宮 和彦, 新倉 潤, 佐藤 朗, 寺田 健太郎, 齋藤 岳志, 松崎 禎一郎, 友野 大, 川島 祥孝, 篠原 厚, 久保 謙哉, 齋藤 努	4. 巻 69
2. 論文標題 連続ミュオン源 RCNP-MuSIC を用いた非接触での物体内部の元素濃度分析実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radioisotopes	6. 最初と最後の頁 13-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3769/radioisotopes.69.13	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 Kazuhiko Ninomiya/Takashi U. Ito/Wataru Higemoto/Naritoshi Kawamura/Patrick Strasser/Takashi Nagatomo/Koichiro Shimomura/Yasuhiro Miyake/Makoto Kita/Atsushi Shinohara/Kenya M. Kubo/Taichi Miura	4. 巻 319
2. 論文標題 Negative Muon Capture Ratios for Nitrogen Oxide Molecules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Radioanal Nucl Chem	6. 最初と最後の頁 767-773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-018-6366-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kazuhiko Ninomiya, Takuto Kudo, Michihiro Kitanaka, Motonobu Tampo, Yasuhiro Miyake, Atsushi Shinohara, Michael K. Kubo	4. 巻 25
2. 論文標題 Chemical Environmental Effect on Muon Capture Processes for Iron Compounds Initial quantum levels of captured muons in CO, CO <sub>2</sub> , and COS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.25.011010	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 Kazuhiko Ninomiya	4. 巻 2018-6
2. 論文標題 Development of elemental analysis method using negative muon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 KEK Proceedings	6. 最初と最後の頁 9-15
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 Jun Sugiyama, Izumi Umegaki, Hiroshi Nozaki, Wataru Higemoto, Koji Hamada, Soshi Takeshita, Akihiro Koda, Koichiro Shimomura, Kazuhiko Ninomiya, and M. Kenya Kubo	4. 巻 121
2. 論文標題 Nuclear Magnetic Field in Solids Detected with Negative-Muon Spin Rotation and Relaxation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 87202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.087202	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 Hirano Yoshiyuki, Yamamoto Seiichi, Kawamura Naritoshi, Ninomiya Kazuhiko	4. 巻 96
2. 論文標題 Position distribution calculation of annihilation radiations and bremsstrahlung x rays in water during irradiation of positive muons: a Monte Carlo simulation study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 025302 ~ 025302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1402-4896/abcf65	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 Yamamoto Seiichi, Ninomiya Kazuhiko, Kawamura Naritoshi, Hirano Yoshiyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Optical imaging of muons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-76652-8	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 Ninomiya Kazuhiko	4. 巻 69
2. 論文標題 Chemistry of Negative Muon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RADIOISOTOPES	6. 最初と最後の頁 277 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3769/radioisotopes.69.277	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 Umegaki Izumi, Higuchi Yuki, Kondo Yasuhito, Ninomiya Kazuhiko, Takeshita Soshi, Tampo Motonobu, Nakano Hiroyuki, Oka Hideaki, Sugiyama Jun, Kubo Michael K., Miyake Yasuhiro	4. 巻 92
2. 論文標題 Nondestructive High-Sensitivity Detections of Metallic Lithium Deposited on a Battery Anode Using Muonic X-rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Analytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 8194 ~ 8200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.analchem.0c00370	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 Mahara Takumi, Manabe Seiya, Watanabe Yukinobu, Liao Wang, Hashimoto Masanori, Saito Takeshi Y., Niikura Megumi, Ninomiya Kazuhiko, Tomono Dai, Sato Akira	4. 巻 67
2. 論文標題 Irradiation Test of 65-nm Bulk SRAMs With DC Muon Beam at RCNP-MuSIC Facility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1555 ~ 1559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2020.2972022	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 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Takuto KUDO, Kazuhiko NINOMIYA, M. Kenya KUBO, Patrick STRASSER, Motonobu TAMPO, Yasuhiro MIYAKE, Atsushi SHINOHARA
2. 発表標題 Development of non-destructive isotopic analysis method using negative muon
3. 学会等名 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiko Ninomiya, Akihiro Nanbu, Makoto Inagaki, Takuto Kudo, Kentaro Terada, Akira Sato, Dai Tomono, Yoshitaka Kawashima, Atsushi Shinohara
2. 発表標題 Chemical environmental effect on muon capture processes for iron compounds
3. 学会等名 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ninomiya, T. Kudo, A. Shinohara, M. Tampo, Y. Miyake, M. K. Kubo
2. 発表標題 Muonic X-ray identification of nuclear materials sealed in a box
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 K. Ninomiya, M. Kajino, A. Nanbu, M. Inagaki, T. Kudo, K. Terada, A. Sato, D. Tomono, Y. Kawashima, Y. Sakai, T. Takayama, A. Shinohara
2. 発表標題 Chemical environmental effects on muon capture for iron compounds and their application to nondestructive identification of chemical species
3. 学会等名 15th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiko Ninomiya
2. 発表標題 Non-destructive identification of carbon content in iron product by muon lifetime measurement
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第179回春季講演大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二宮 和彦, 南部 明弘, 稲垣 誠, 工藤 拓人, 寺田 健太郎, 佐藤 朗, 友野 大, 川島 祥孝, 篠原 厚
2. 発表標題 鉄原子へのミュオン捕獲における化学状態の影響
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶野芽都, 二宮和彦, 工藤拓人, 寺田健太郎, 稲垣誠, 佐藤朗, 友野大, 川島祥孝, 酒井陽一, 高山努, 篠原厚
2. 発表標題 ミュオン特性 X 線測定による非破壊での化学状態分析法の開発
3. 学会等名 日本放射化学会第63回討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤 拓人, 千徳 佐和子, 二宮 和彦, 竹下 聡史, 髭本 亘, 篠原 厚, 下村 浩一郎, 河村 成肇, パトリック ストラッサー, 三宅 康博, 齋藤 努, 久保 謙哉
2. 発表標題 ミュオン崩壊電子寿命測定による非破壊元素分析法の開発
3. 学会等名 日本放射化学会第63回討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦、工藤拓人、パトリック・ストラッサー、寺田健太郎、河井洋輔、反保元伸、三宅康博、篠原厚、久保謙哉
2. 発表標題 ミュオン照射後に放出されるガンマ線測定による非破壊同位体分析
3. 学会等名 日本放射化学会第63回討論会(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazihiko Ninomiya, M. Kenya Kubo, Yasuhiro Miyake, Atsushi Shinohara, Tsutomu Saito
2. 発表標題 Development of non-destructive elemental analysis method by muonic X-ray measurement
3. 学会等名 日本化学会 第100春季年会 (2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 ミュオン特性X線を用いた非破壊同位体分析法の開発
3. 学会等名 第1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~ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤拓人、二宮和彦、パトリック・ストラッサー、寺田健太郎、河井洋輔、反保元伸、三宅康博、篠原厚、久保謙哉
2. 発表標題 考古学資料の産地分析に向けたミュオン特性X線による非破壊鉛同位体分析法の開発
3. 学会等名 第1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~
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶野芽都 二宮和彦 篠原厚 寺田健太郎 佐藤朗 友野大 川島祥孝 酒井陽一 高山努
2. 発表標題 ミュオンを用いた鉄の非破壊化学状態分析
3. 学会等名 第1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~
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 負ミュオンビームによる考古学試料等の分析
3. 学会等名 第2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～（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 邱奕寰、二宮和彦、武田伸一郎、桂川美穂、高橋忠幸
2. 発表標題 二次元検出器を用いたミュオンによる文化財の3次元 元素イメージング法の開発
3. 学会等名 第2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～
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤拓人、二宮和彦、パトリック・ストラッサー、寺田健太郎、河井洋輔、反保元伸、三宅康博、篠原厚、久保謙哉
2. 発表標題 文化財の産地分析に向けたミュオン特性X線による非破壊同位体分析法の開発
3. 学会等名 第2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～
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶野芽都、二宮和彦、工藤拓人、寺田健太郎、稲垣誠、佐藤朗、友野大、川島祥孝、酒井陽一、高山努、篠原厚
2. 発表標題 ミュオン特性X線測定による文化財の酸化状態特定の可能性検討
3. 学会等名 第2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～
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 青銅内部の非破壊元素分析と非破壊同位体分析の試み
3. 学会等名 令和元年度非破壊検査・可視化・分析技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiko Ninomiya
2. 発表標題 Development of non-destructive, position- selective and multi-elemental analysis method with negative muons
3. 学会等名 3rd International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤拓人、二宮和彦、篠原厚、久保謙哉、反保元伸、三宅康博
2. 発表標題 ミュオン特性X線を用いた非破壊同位体分析法の開発
3. 学会等名 2018日本放射化学会年会・第62回放射化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤拓人、二宮和彦、篠原厚、久保謙哉、反保元伸、三宅康博
2. 発表標題 密封容器中の放射性物質に対する負ミュオンを用いた非開封元素分析法の開発
3. 学会等名 2018日本放射化学会年会・第62回放射化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣誠、二宮和彦、工藤拓人、寺田健太郎、佐藤朗、川島祥孝、友野大、篠原厚
2. 発表標題 ベンゼンおよびシクロヘキサンにおけるミュオン転移過程への分子構造の影響
3. 学会等名 2018日本放射化学会年会・第62回放射化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 負ミュオンを用いた新しい非破壊元素分析法の開発
3. 学会等名 第33回「放射線検出器とその応用」研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦、工藤拓人、篠原厚、久保謙哉、反保元伸、三宅康博
2. 発表標題 ミュオンを用いた非破壊同位体分析法の開発
3. 学会等名 専門研究会「放射化分析及び中性子を用いた地球化学的研究-2-」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦、工藤拓人、篠原厚、久保謙哉、反保元伸、三宅康博
2. 発表標題 ミュオン非破壊分析の原理、測定例と将来計画
3. 学会等名 ミュオンによる非破壊分析の可能性 - 考古学・文化財への応用を考える -
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮 和彦, 寺田 健太郎, 佐藤 朗, 三宅 康博, 久保 謙哉
2. 発表標題 ミュオン特性X線測定による非破壊内部元素分析法Non-destructive elemental analysis method for interior of a material by muonic X-ray measurement
3. 学会等名 量子ビームを用いた次世代非破壊分析技術とその応用 惑星物質科学との可能性
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮 和彦, 南部 明弘, 稲垣 誠, 工藤 拓人, 寺田 健太郎, 佐藤 朗, 友野 大, 川島 祥孝, 篠原 厚
2. 発表標題 鉄化合物のミュオン捕獲比と特性X線構造
3. 学会等名 第9回Muon科学と加速器研究
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣誠、二宮和彦、南部明弘、工藤拓人、梶野芽都、寺田健太郎、佐藤朗、川島祥孝、友野大、篠原厚
2. 発表標題 ベンゼンおよびシクロヘキサンにおけるミュオン転移過程に対する分子構造の影響
3. 学会等名 第9回Muon科学と加速器研究
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤拓人、二宮和彦、篠原厚、久保謙哉、反保元伸、三宅康博
2. 発表標題 ミュオン特性X線を用いた非破壊同位体分析法の開発
3. 学会等名 第9回Muon科学と加速器研究
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 ミュオンを用いた非破壊分析技術の青銅文化財分析への応用 ミュオン非破壊分析の原理、測定例
3. 学会等名 日本鉄鋼協会「鉄文化財にみる日本の独自技術の学際的研究フォーラム」専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 負ミュオンビームを用いた非破壊分析法の開発
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶野芽都、二宮和彦、工藤拓人、寺田健太郎、稲垣誠、佐藤朗、友野大、川島祥孝、酒井陽一、高山努、篠原厚
2. 発表標題 ミュオン特性 X 線測定による鉄の酸化反応の追跡
3. 学会等名 日本放射化学会第 64回討論会(2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------