

## ミュオンビームで歴史を探る

SATテクノロジー・ショーケース2021

### ■ はじめに

ミュオンという言葉聞くのは初めてだ、という方もおられるかもしれません。まずは一度、手の掌を空に向けてみてください。信じられないかもしれませんが、私達の掌に、1秒に1個程度の頻度で、宇宙からミュオンが降り注ぎ続けています。地表に辿り着く宇宙線のおよそ7割程度をミュオンが占めるほどです。宇宙線ミュオンは皆さんに身近なところで密かに活躍しています。例えば山のレントゲン写真を撮って、噴火予知に役立てる研究や、エジプトのクフ王のピラミッドに隠された空間を見つけたり、福島の原子炉で溶け落ちた核燃料デブリを観察することにも使われています。

宇宙線ミュオンと比べて、百万倍以上の強度で人工的にミュオンを加速器を用いて作り出すことができます。その最先端の施設が東海村に建設されたJ-PARCミュオン施設(愛称; MUSE)です。MUSEは、“Muon Science Establishment”の略で、“学問、芸術をつかさどる女神”という意味も込められています。MUSEで得られるパルスミュオンの強度が平成21年11月には、世界最高強度に達成することができました。本稿では、MUSE施設、並びにMUSEで展開されている科学研究、特に、負ミュオンを用いた文理融合研究のを中心にして紹介します。

### ■ 活動内容

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所(KEK-IMSS)では、ユニークな特徴を有するJ-PARC MLF(MUSE)の世界最高強度の負ミュオンビームの有意性を生かして、文化財をはじめとする人文科学資料の研究にも活用できる可能性を秘めた新たな非破壊分析法を開発してきました。一方、これまで、X線、放射光や中性子などを用いて様々な文化財研究がこれまでも行われてきました。そこで、放射光、中性子、ミュオンなどの量子ビームを利用する文化財研究者の方々が一堂に会して、これまでの考古学研究、並びに関連研究、分析技術を紹介し、文理融合研究の可能性を探るシンポジウムを開催しました。第1回は国立科学博物館で、第2回は大阪大学中之島センターで開催し、第3回は昨今のCOVID19の状況を鑑み、オンライン開催としました。第4回も、2021年1月28-29日にオンライン開催されます。

#### 1. 負ミュオンを用いた分析法の原理

負ミュオンが物質中の原子に捕獲される過程で100%の確



図1 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-2019年7月27日~28日@国立科学博物館日本館講堂で開催。100名を超える文系、理系の研究者のみならず、一般の聴衆が上野の科学博物館に集結し、活発な議論を行う機会を持つことができた。

率で放出されるミュオン特性X線は其々の原子に固有です。しかも電子に比べて200倍重いこともあって、検出の容易な高いエネルギー(電子X線の200倍)を持っています。それ故に、負ミュオンを用いれば、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が可能です。原理的には、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考える事ができます。これまで負ミュオンによる分析法は、非破壊分析法としてあまり使われていませんでした。多分に、従来のミュオン施設では十分な負ミュオン収量が得られなかったからです。

#### 2. 負ミュオン元素分析法の特徴

負ミュオン元素分析法の特徴を、以下に示します。

- 1) 高効率: ミュオン1個に対して、1個以上のX,  $\gamma$ 線が放出されます。電子由来の特性X線のおよそ100倍以上高い効率です。但し、得られるミュオンの個数は、限られていますので、測定時間はかかります
- 2) 軽元素の元素感度: 蛍光X線法では、観測が難しい、Naより軽い元素も、分析できます。加えて、重い元素も同時分析可能です。
- 3) 非破壊的: 試料を損わなうことがありません。放射化も

代表発表者  
所属

三宅 康博(みやけ やすひろ)  
大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構(KEK)  
物質構造科学研究所

問合せ先

〒319-1106 茨城県那珂郡東海村大字白方 203-1  
TEL: 029-284-4624 FAX: 029-864-4899  
yasuhiro.miyake@kek.jp

■キーワード: (1) 負ミュオン  
(2) 冷却  
(3) 非破壊検査

■共同研究者: 反保元伸(KEK 物構研)  
竹下聡史(KEK 物構研)  
永谷幸則(KEK 物構研)  
下村浩一郎(KEK 物構研)  
齋藤努(国立歴史民族博物館)  
杓名貴彦(国立科学博物館)  
久保謙哉(国際基督教大学)  
二宮和彦(大阪大学)

殆ど無視できます。

- 4) 同位体分析: 同位体により、脱励起で放出されるX線エネルギーが異なります。Ge検出器の分解能に依存しますが、重い元素ほど、分離分析が容易です。
- 5) 化学状態を弁別: 脱励起の過程で放出されるX線の遷移確率が、化学状態、電子密度に依存することから判別できます。
- 6) 位置選択性: ビーム位置・入射エネルギー調整による。J-PARCでは、数百nmから数cmの任意の深さでの情報が得られます。
- 7) 3D元素イメージング: CdTeピンホールカメラ、 $\gamma$ 線カメラによる3D元素イメージングが可能です。
- 8) 容易さ: 真空中でも、空気中でも測定可能です。但し、数 $\mu\text{m}$ より浅い表面を観測するには、低運動量のミュオンを用いる必要がありますので、真空での測定が必要となります。

図2に示したようにユニークな負ミュオン分析法の特徴を生かした研究として、地中での錆化や経年劣化、表面処理などの影響によって、表層部と深奥部では化学組成に大きな違いがあるような、銅鐸や、天保小判などの貴重な遺物の非破壊元素分析が盛んに行われています。

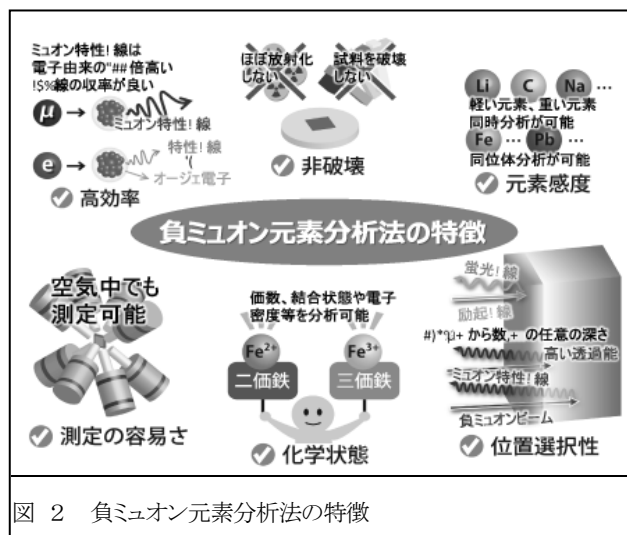


図 2 負ミュオン元素分析法の特徴

### ■ MUSE施設の特徴

J-PARC/MUSEでは、以下に示す2つの特徴を生かして、負ミュオン利用の実用化を図っています。

第1の特徴は、MUSEでは、世界最高強度の大強度パルス負ミュオンが得られることです。3GeV陽子の負パイオンの生成断面積は800MeV陽子と比べ、“np核反応”では10倍強、“pp核反応”に至っては200倍にも及ぶからです。世界の他のミュオン工場では、負ミュオンのビーム強度は、正ミュオンと比べて1桁程度小さい収量しかない現状を鑑みるに、大強度の負ミュオン研究が初めてMUSEにおいて実用化されると云って過言ではないかもしれません。MUSEの第2の特徴は、20MeV/c以下の低運動量の負ミュオンを取り出す事ができるというものです。負ミュオンは、長尺の超伝導ソレノイドの中を負パイオンを飛行させ、飛行しながら崩壊して生まれる負ミュオンを効率良く捕獲し、運動量を選択して実験室に輸送し、実験に供しています。2014年、高運動量ミュオン用の超伝導ソレノイド電磁石をKEKから移設した、長尺の超伝導電磁石を更新し、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改造を行いました。その結果、低運動量2.6 MeV/c (32 keV) (最大120 MeV/c (54 MeV)) のエネルギー可変の負ミュオンを得られるようになりました。従って、MUSEでは、負ミュオンビームを物質中に打ち込み、任意の深さ(例えばグラフィイト中で200 nmから60 mmの任意の深さ)に止めることができます。

### ■ 今後の展望

今後の展望として、3D元素分析高度化を目指した超低速負ミュオンを開発しています。元素情報に加え、同位体や化学結合の情報を3次元ナノスケールで明らかにすることができます。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研究手段の誕生です。材料科学や生命科学に対して革命的な役割を果たすかもしれません。