

ミュー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 -
2018年11月12日(月)～13日(火)

ミューオン非破壊分析の原理、 測定例と将来計画

大阪大学 大学院理学研究科

二宮 和彦

共同実験者

国際基督教大

久保謙哉 教授

歴史民俗博物館

齋藤努 教授

大阪大学

篠原厚 教授

寺田健太郎 教授

佐藤朗 博士

友野大 博士

川島祥孝 博士

稲垣誠 博士

南部明弘 さん

工藤拓人 さん

梶野芽都 さん

JAEA/J-PARC

坂元真一 博士

髭本亘 博士

伊藤孝 博士

KEK/J-PARC

三宅康博 教授

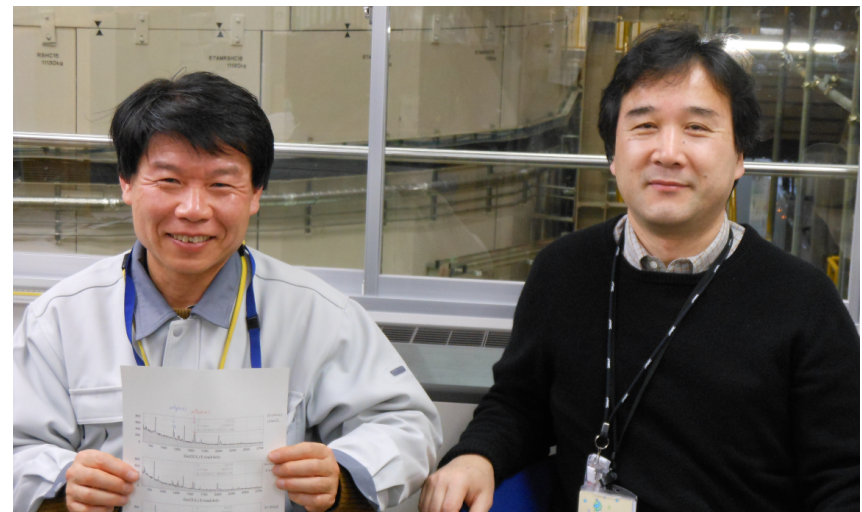
下村浩一郎 博士

Strasser Patrick 博士

河村成肇 博士

長友傑 博士

反保元伸 博士



Dr. Sakamoto

Prof. Kubo

目次

ミューオン原子とは

ミューオン特性X線元素分析の特徴

ミューオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

同位体分析の検討

ミューオン元素分析の将来計画

目次

ミューオン原子とは

ミューオン特性X線元素分析の特徴

ミューオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

同位体分析の検討

ミューオン元素分析の将来計画

ミュオン原子とは

負ミュオン(ミュー粒子、ミュオンとも) (μ^- , negative muon)

負電荷をもった粒子で、
物質中で**重い電子**と見なす
ことができる

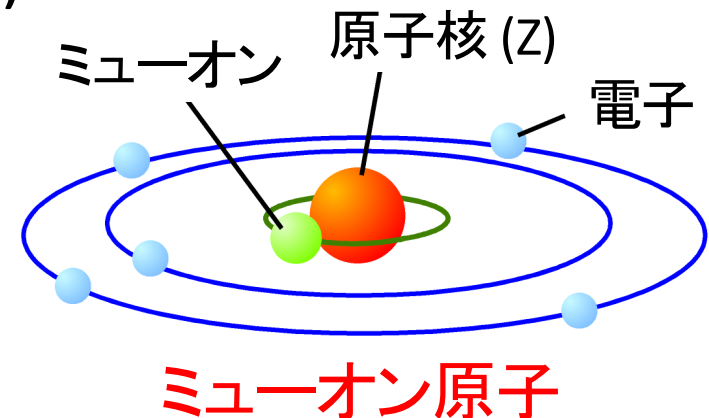
加速器で**大量**に生成できる
最もポピュラーな素粒子のひとつ

電荷	-1
寿命	2.2 μs
質量	106 MeV/c ² (207 m_e)

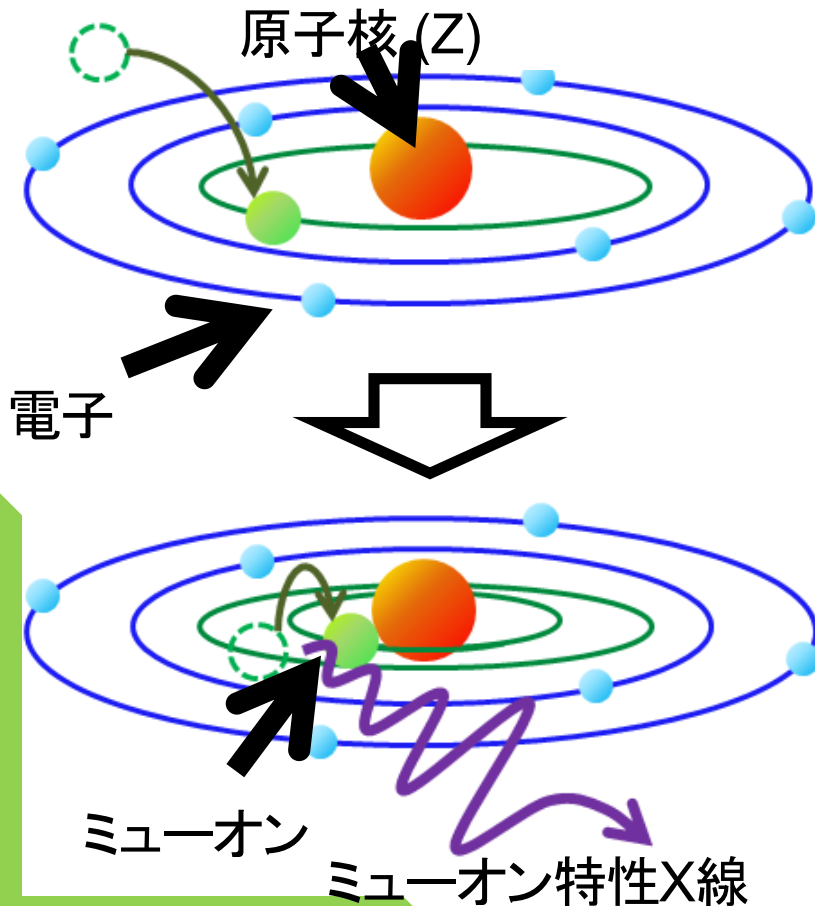
ミュオン原子 (μ^-Z , muonic atom)

ミュオンは電子と置き換わって
ミュオン原子を形成する

ミュオン原子はミュオンが物
質中に**止まるだけ**で形成される



ミュオン原子とは



物質中でミュオンがエネルギーを失って減速



ミュオンが**ミュオン原子軌道**へと捕獲(ミュオン原子生成)



ミュオンの脱励起

ミュオン特性X線の放出
(質量の関係から通常のX線の200倍高いエネルギー)



ミュオン1s軌道への到達

ミュオン特性X線で蛍光X線分析と同じことができるか？

目次

ミューオン原子とは

ミューオン特性X線元素分析の特徴

ミューオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

同位体分析の検討

ミューオン元素分析の将来計画

ミュオン特性X線元素分析の特徴

特性X線の利用

元素固有のX線エネルギーなので元素を特定できる

高エネルギーX線の利用

物質の内部で発生しても透過してきて検出できる

水素以外のあらゆる元素に感度

ミュオン原子の形成確率は元素に依らずほぼ同じ

位置選択性

入射エネルギー選択による停止位置(深さ)の選択

同位体分析

X線のエネルギーには同位体シフトがある

化学状態についての知見

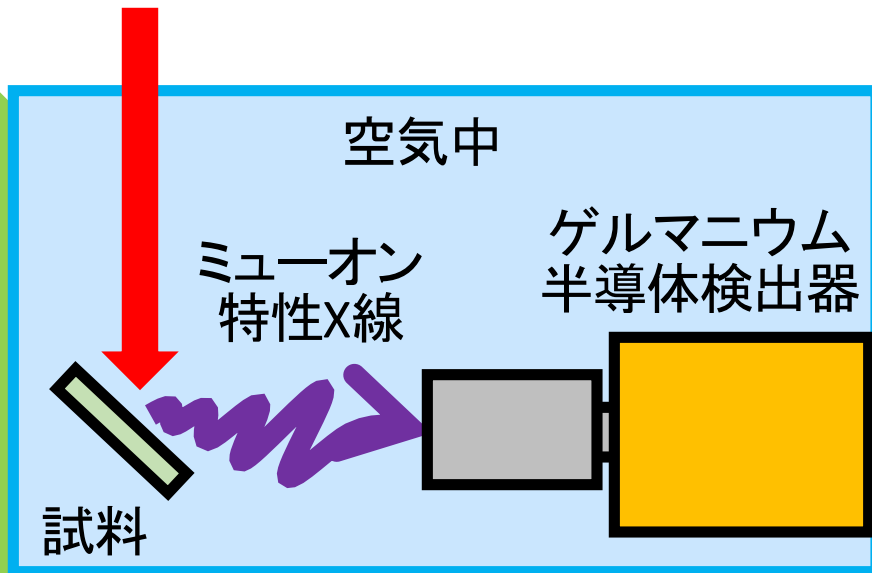
ミュオン捕獲現象は試料の化学状態の影響を受ける

ミュオン特性X線元素分析の特徴

ミュオン特性X線エネルギーは元素に固有で、keV~MeVの高いエネルギーを持つ

➡ **ゲルマニウム半導体検出器**により測定可能
試料や空気による**吸収を無視**できる

ミュオンビーム



実験の概念図

KαX線エネルギーの比較 (keV)

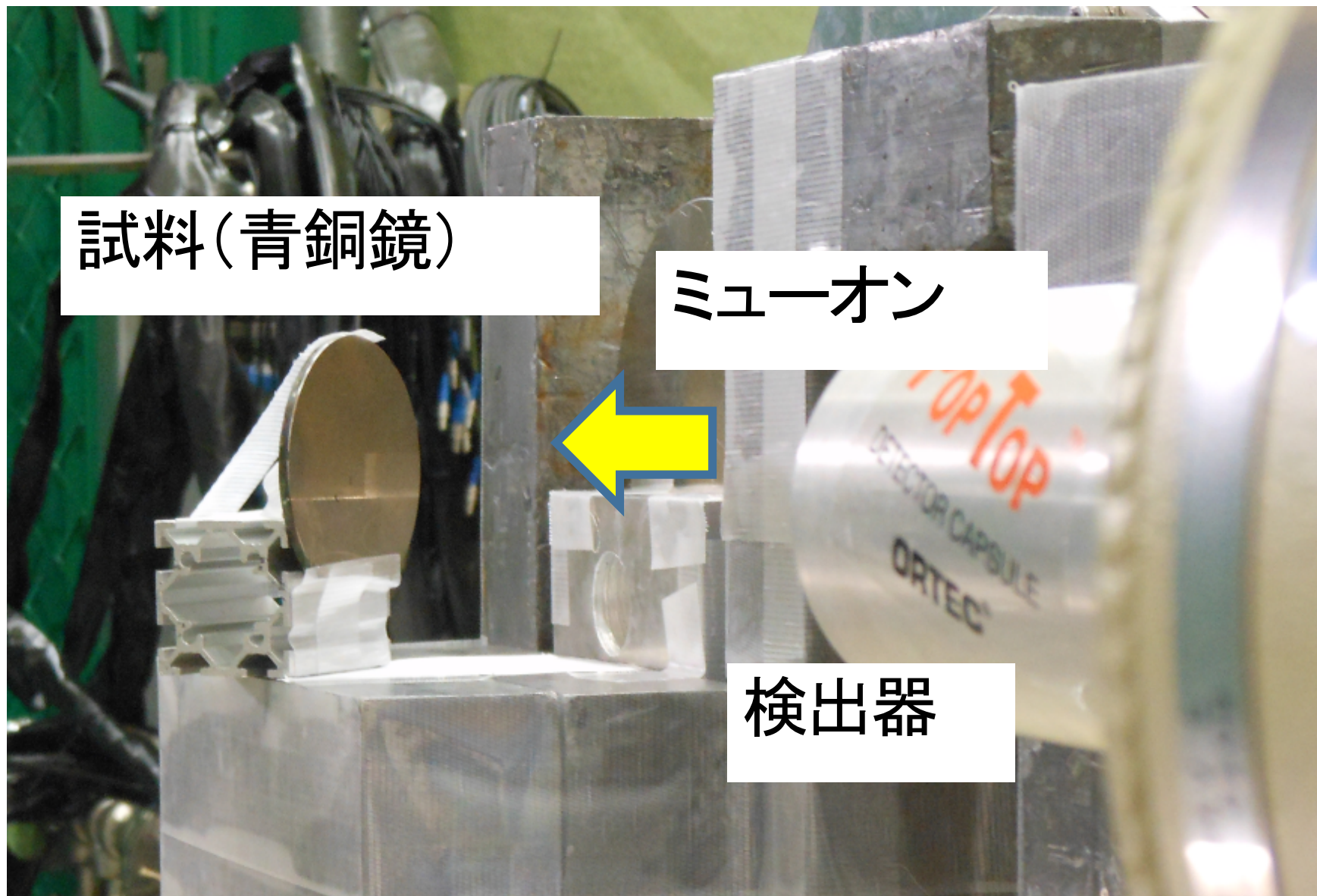
元素	ミュオン特性X線	電子特性X線
O	133	0.525
Si	400	1.74
Cu	1500	8.05
Sn	3400	25.3
Pb	5900	75.0

試料(青銅鏡)

ミュオン



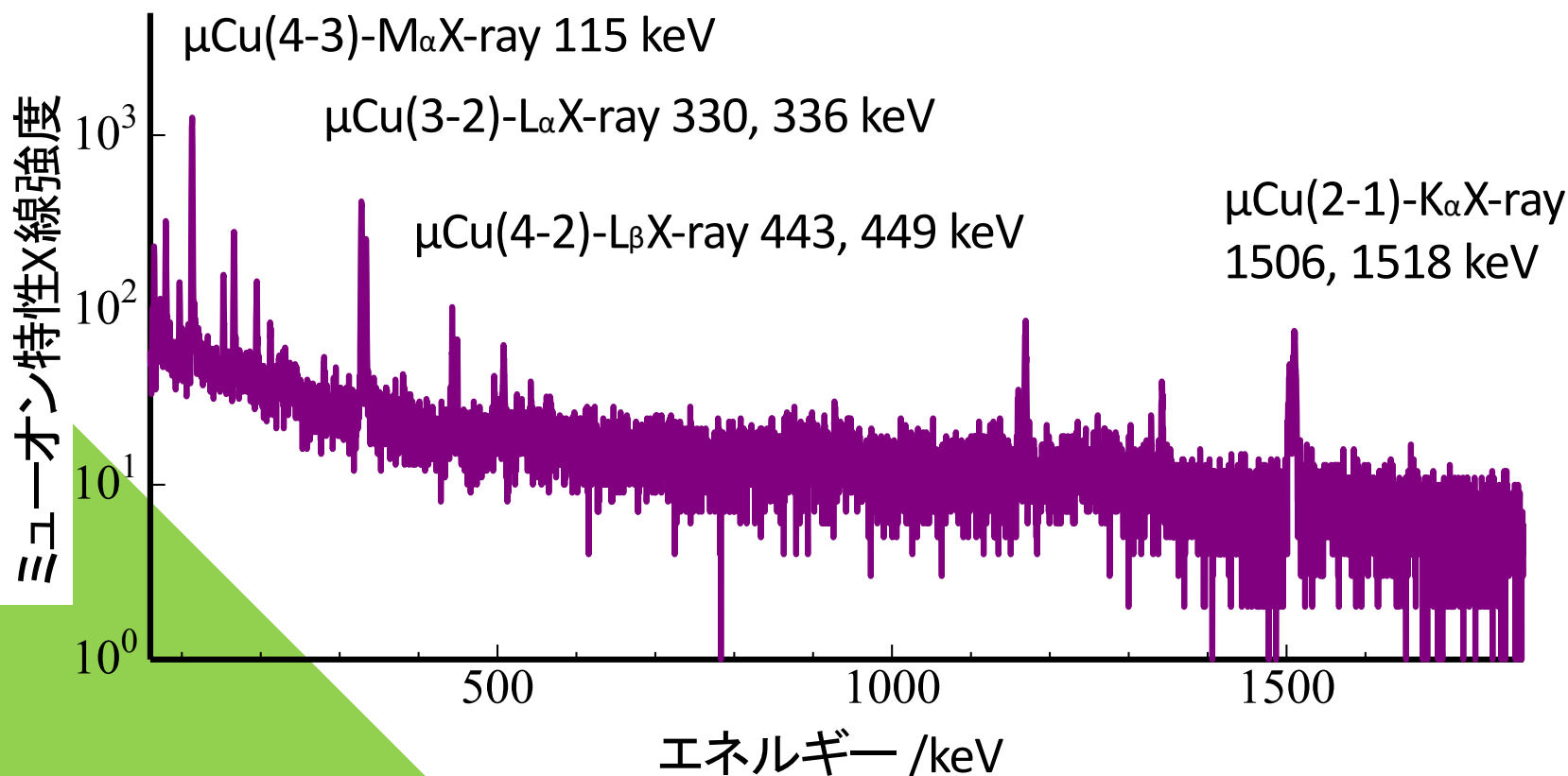
検出器



ミュオン特性X線元素分析の特徴

銅(Cu)のミュオン特性X線スペクトルの例

K α 線は1.5MeVと高エネルギー
 = 10 mmの銅板でも貫通可能



ミュオン特性X線元素分析の特徴

特性X線の利用

元素固有のX線エネルギーなので元素を特定できる

高エネルギーX線の利用

物質の内部で発生しても透過してきて検出できる

水素以外のあらゆる元素に感度

ミュオン原子の形成確率は元素に依らずほぼ同じ

位置選択性

入射エネルギー選択による停止位置(深さ)の選択

同位体分析

X線のエネルギーには同位体シフトがある

化学状態についての知見

ミュオン捕獲現象は試料の化学状態の影響を受ける

ミュオン特性X線元素分析の特徴

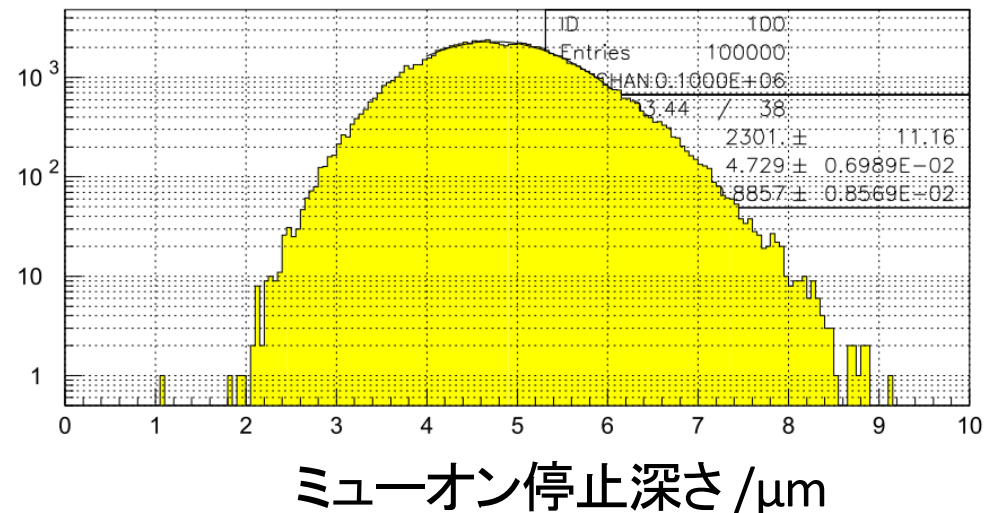
ミュオンは荷電粒子

- エネルギー(運動量)を電磁石で簡単に選別可能
- 物質中でブラッグピークを作り、入射エネルギーに応じて停止位置が決定



おおよそ止めようと思ってる深さに対して、10%の精度で停止させることができる

10 μm のとき $\pm 1 \mu\text{m}$
 1 mmのとき $\pm 0.1 \mu\text{m}$
 1 cmのとき $\pm 0.1 \text{ cm}$



目次

ミュオン原子とは

ミュオン特性X線元素分析の特徴

ミュオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

同位体分析の検討

ミュオン元素分析の将来計画

非破壊元素分析実験

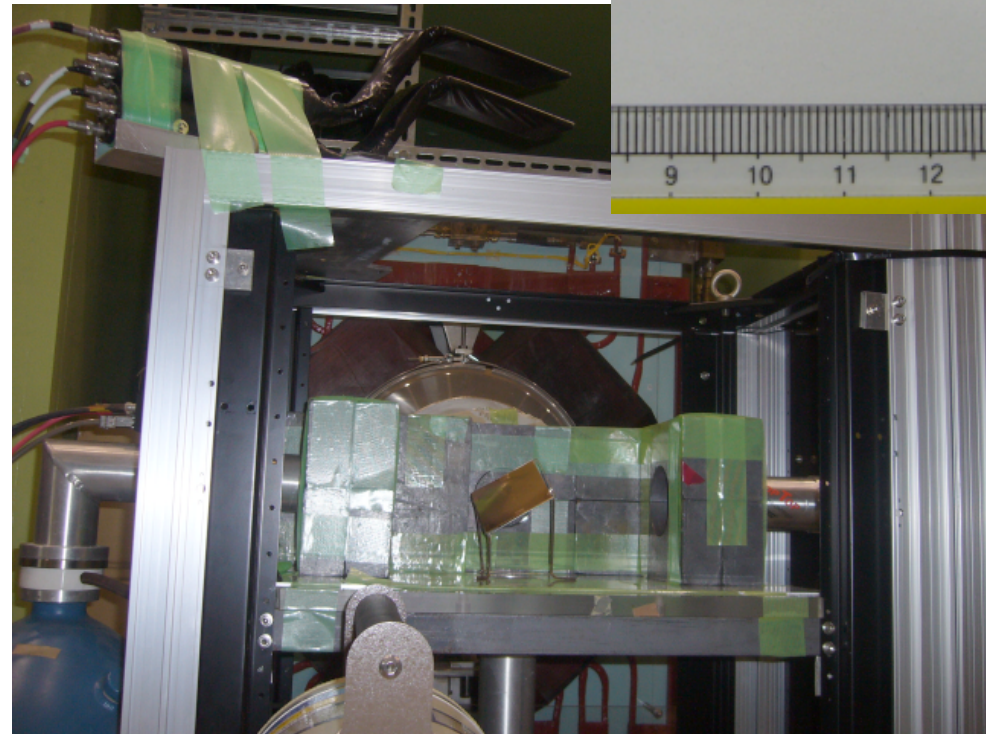
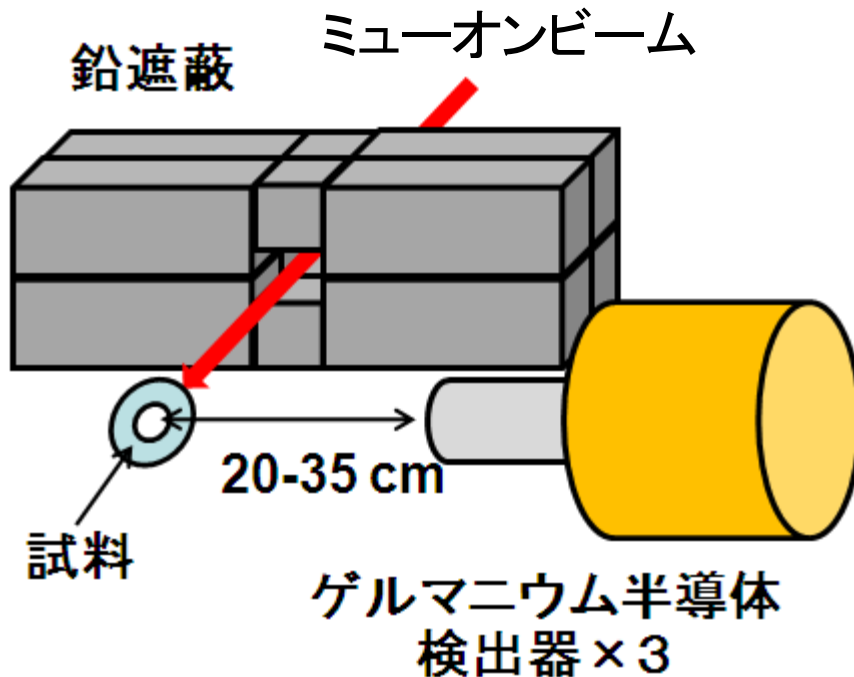
青銅の元素成分を特性X線強度で定量する

試料:

半両(紀元前3世紀: 中国秦代)

ミュオン運動量(停止深さ):

30 MeV/c (**~200 μm**)

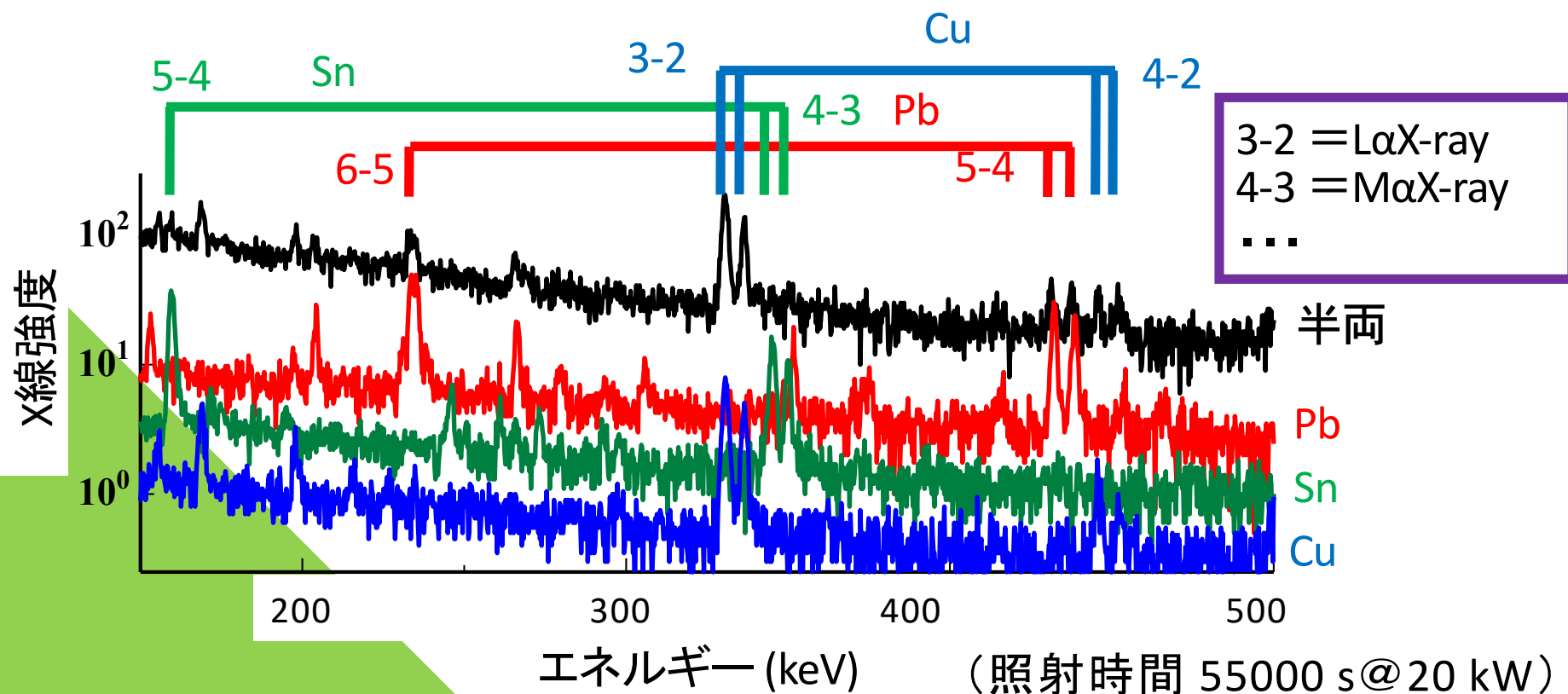


J-PARC, MUSE D2-port

非破壊元素分析実験

ミュオンを試料に当てることで、ミュオン特性X線スペクトルが得られた。

半両のピークはすべて銅、錫、鉛の金属由来であると同定した
 = 半両は銅、錫、鉛を主成分とする合金である



非破壊元素分析実験

特性X線の強度から分析値を得るために、成分が既知の青銅標準試料についてミューオンを照射し、特性X線強度比と元素成分比の関係を導出(検量線)



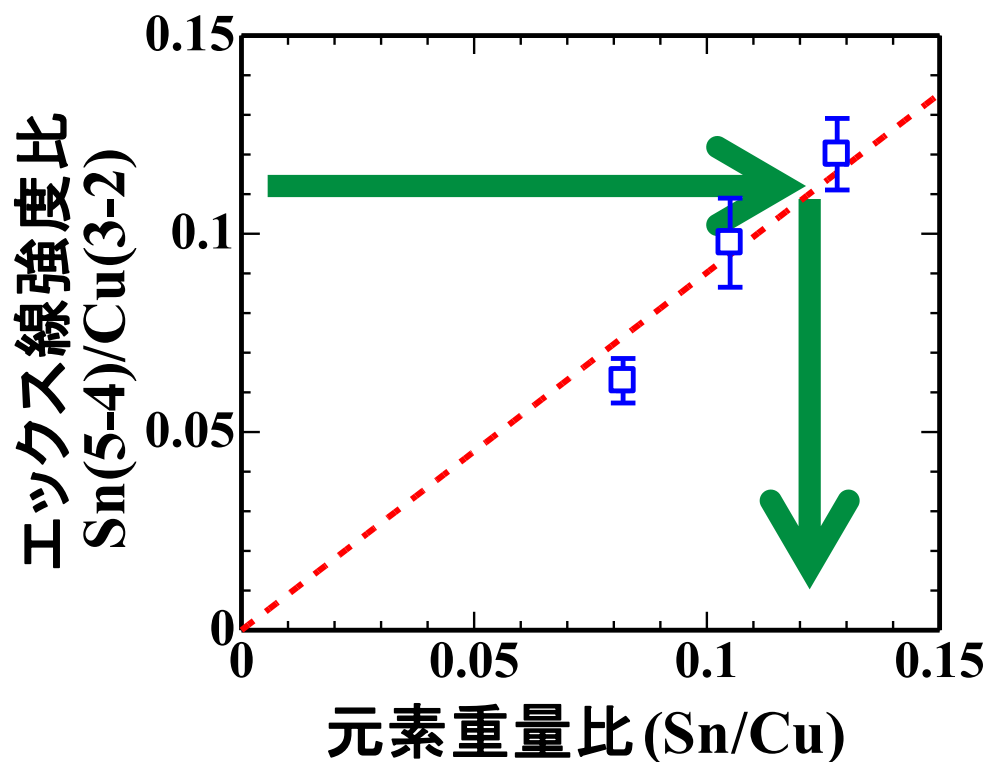
半両の成分(重量比)

銅: $69.8 \pm 2.6 \%$

錫: $10.0 \pm 1.7 \%$

鉛: $20.3 \pm 2.2 \%$

試料を破壊することなく、
内部の複数元素の成分
比を定量的に決定

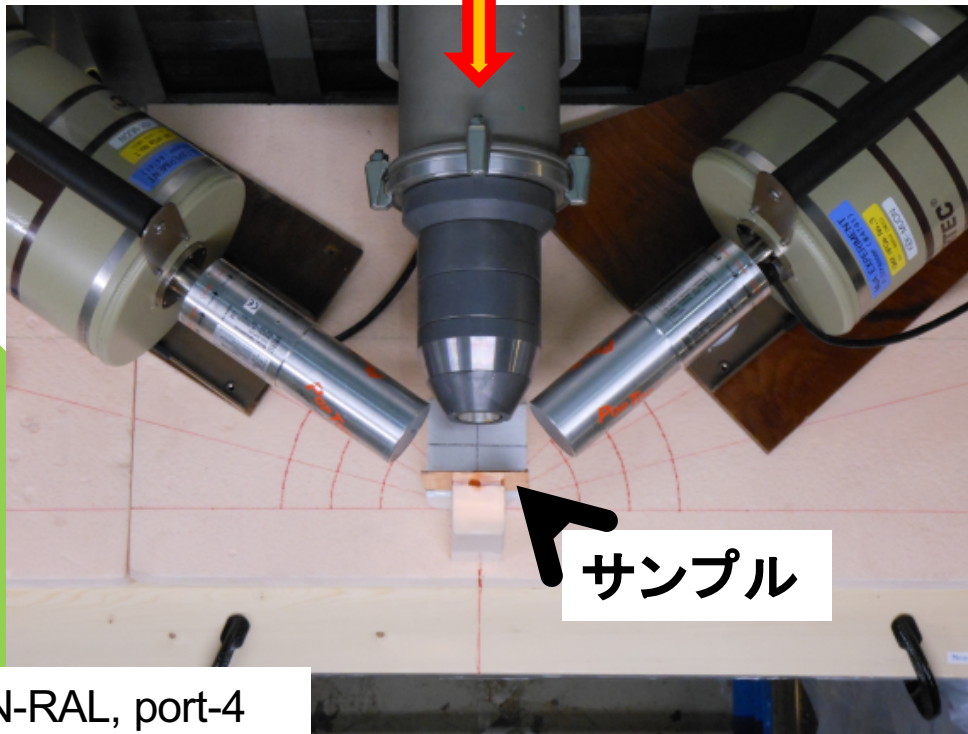


検出限界の検討

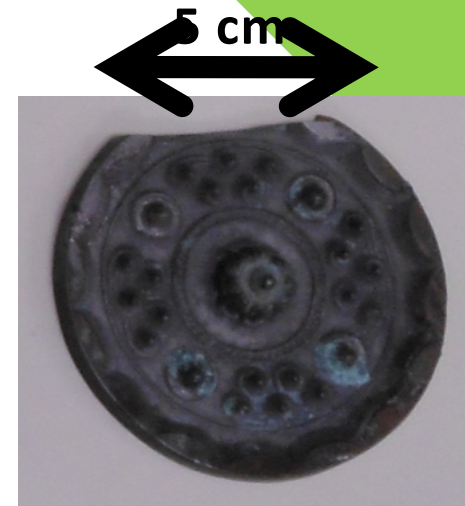
ミュオン特性X線による元素分析の**検出限界を検討**

青銅貨と同様に、**X線強度と成分比の検量線**
より星雲鏡の成分を定量

ミュオンビーム



RIKEN-RAL, port-4



星雲鏡(前漢)

破壊分析:

銅: 75 %

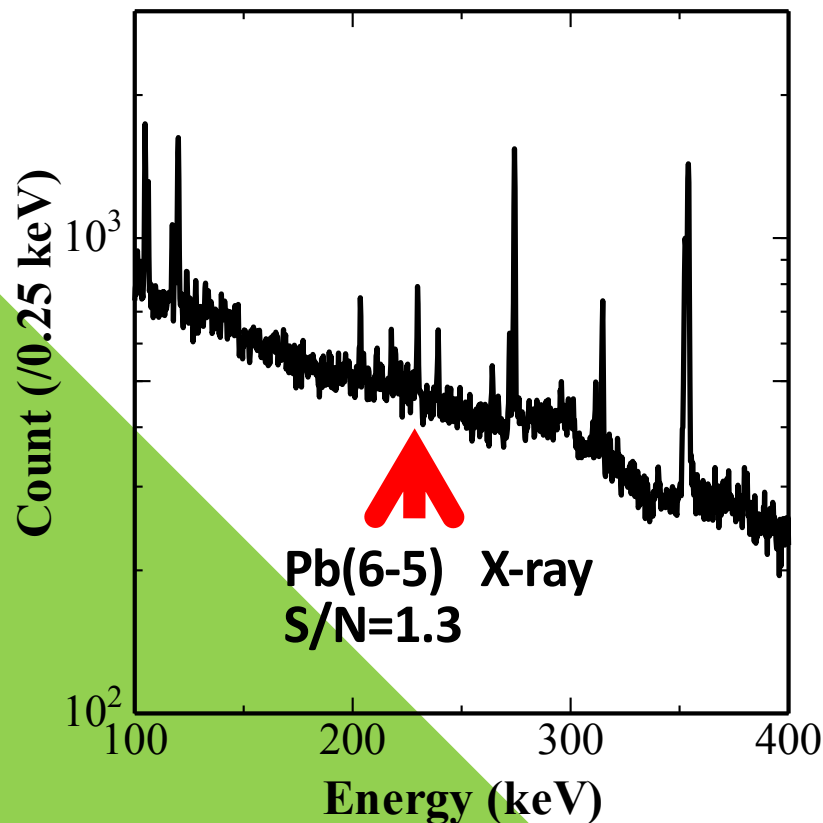
錫: 20 %

鉛: 5 %

検出限界の検討

ミュオン特性X線による元素分析の**検出限界を検討**

青銅貨と同様に、**X線強度と成分比の検量線**
より星雲鏡の成分を定量



測定時間
~ 100000 秒

分析値:

銅: $73.0 \pm 2.1 \%$

錫: $22.3 \pm 1.9 \%$

鉛: $4.7 \pm 0.5 \%$

検出限界
~ 0.8 wt%



星雲鏡(前漢)

破壊分析:

銅: 75 %

錫: 20 %

鉛: 5 %

目次

ミューオン原子とは

ミューオン特性X線元素分析の特徴

ミューオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

同位体分析の検討

ミューオン元素分析の将来計画

非破壊深度分布測定

江戸末期の小判の**内部の金の含有量は低い**
ミュオンによる分析で**金含有量の深度分布**を取得する

天保小判の元素成分比 **金: 56.8 %**, **銀: 42.9 %**

「**色揚げ**」により**表面数 μm のみ金が多く**、
深部は銀が多い

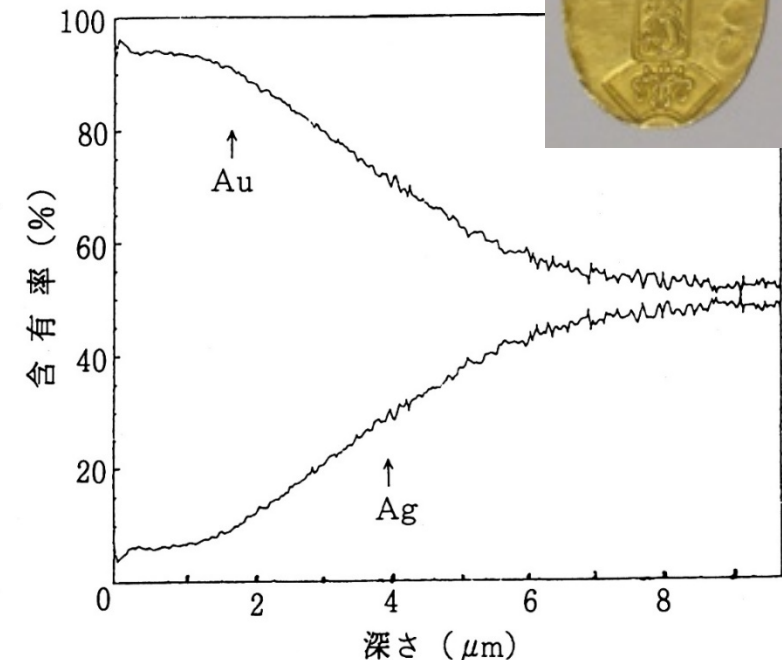


色揚げ前(右)と後(左)の小判(複製)

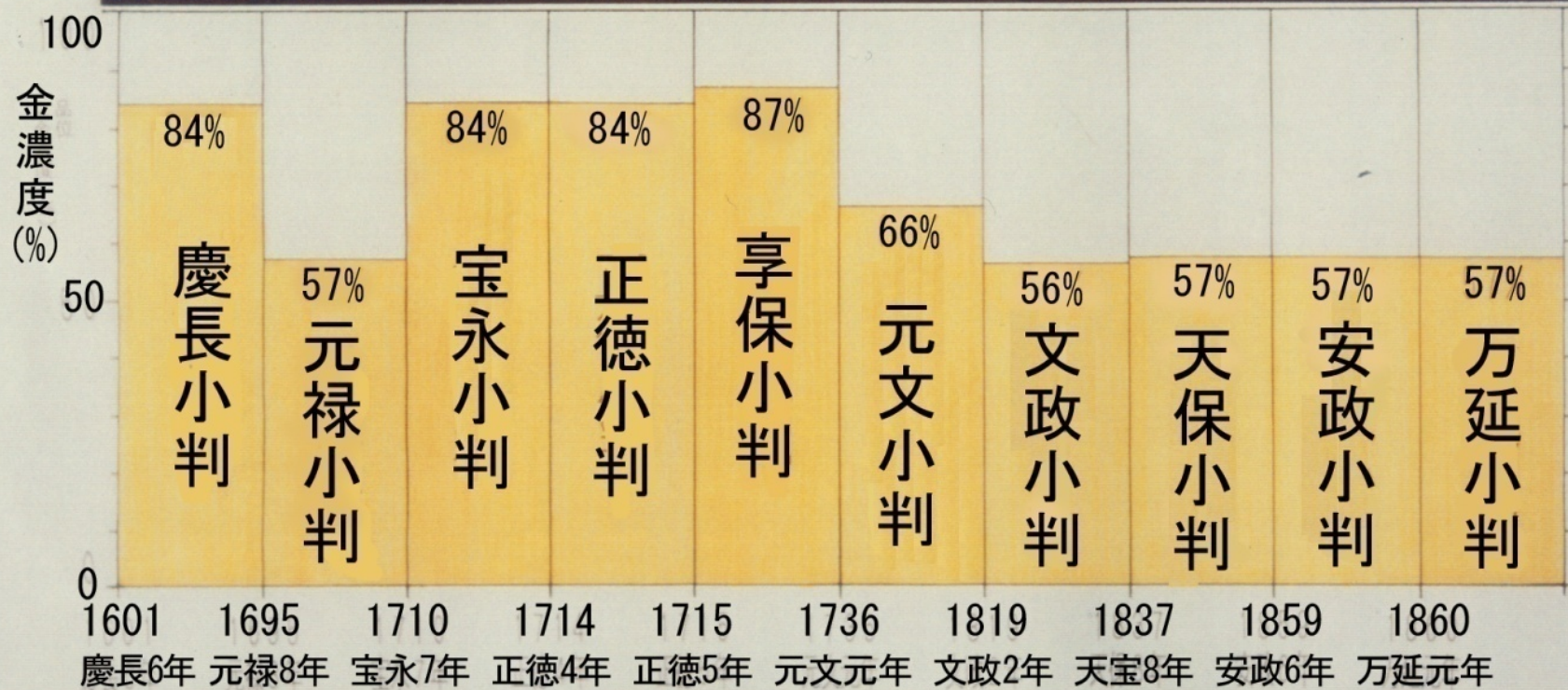
色揚げの効果



小判の製造工程—色揚げ(小判所絵図)



破壊分析による元素成分の深度分布



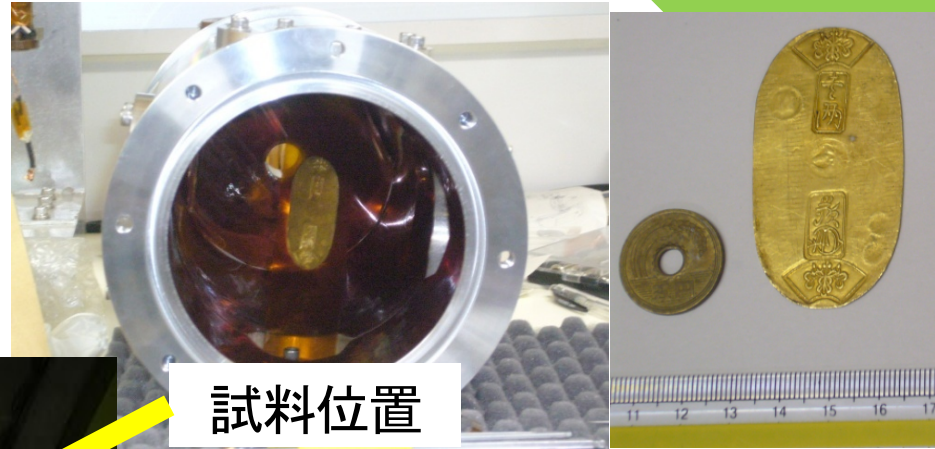
非破壊深度分布測定

試料:

天保小判 (19世紀: 日本)

ミュオン運動量:

6.4 ~ 15.2, 35 MeV/c



試料位置

ミュオンビーム

低エネルギーのミュオン
を利用し、1 μm から 300 μm の深さにミュオンを
停止させた

ミュオン特性X線スペク
トルの入射運動量変化を
測定

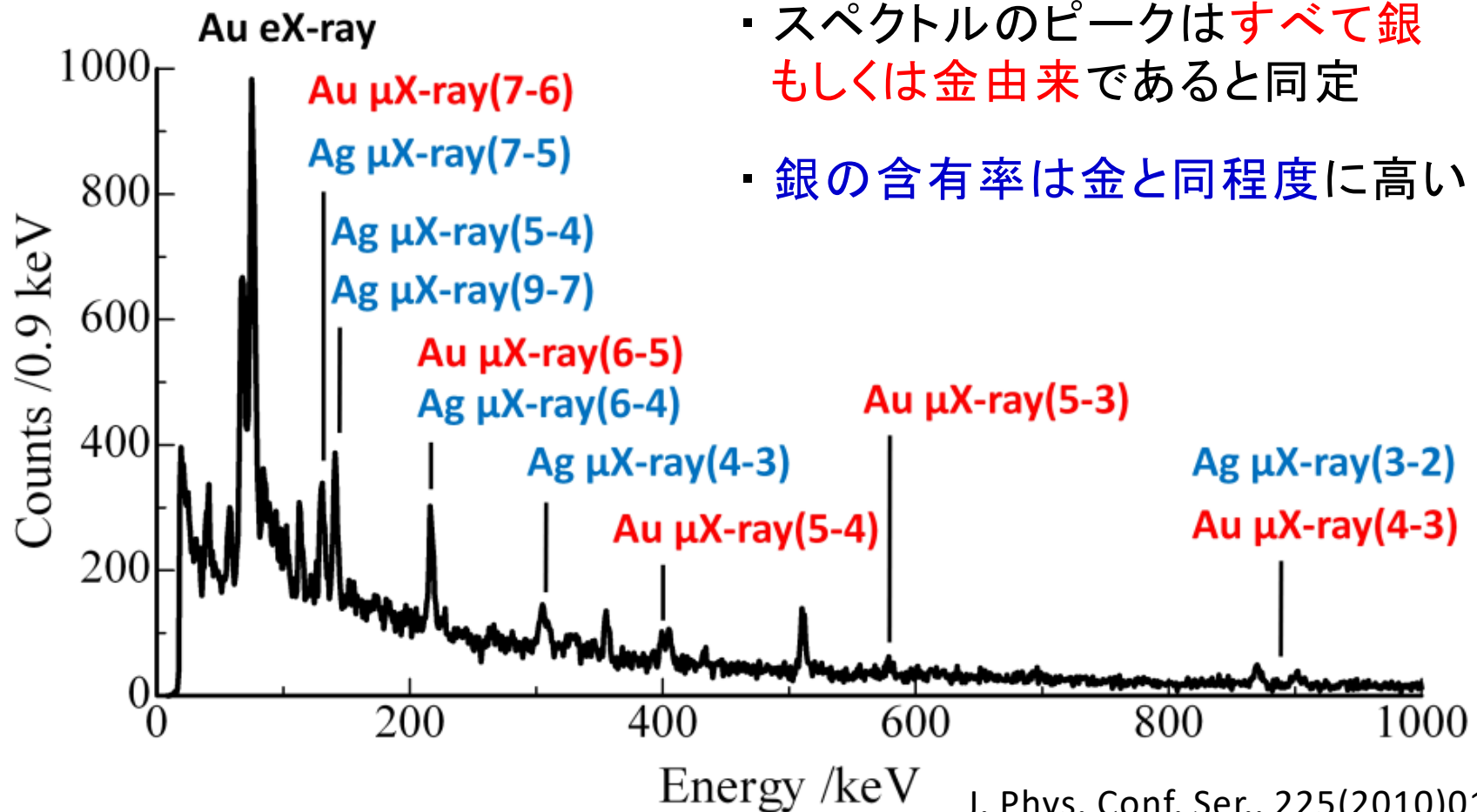
J-PARC MUSE, D2 port

ゲルマニウム
半導体検出器

非破壊深度分布測定

入射運動量: 35 MeV/c (ミュオン停止深さ $300\ \mu\text{m}$)

照射時間: 14000 s @ 20 kW



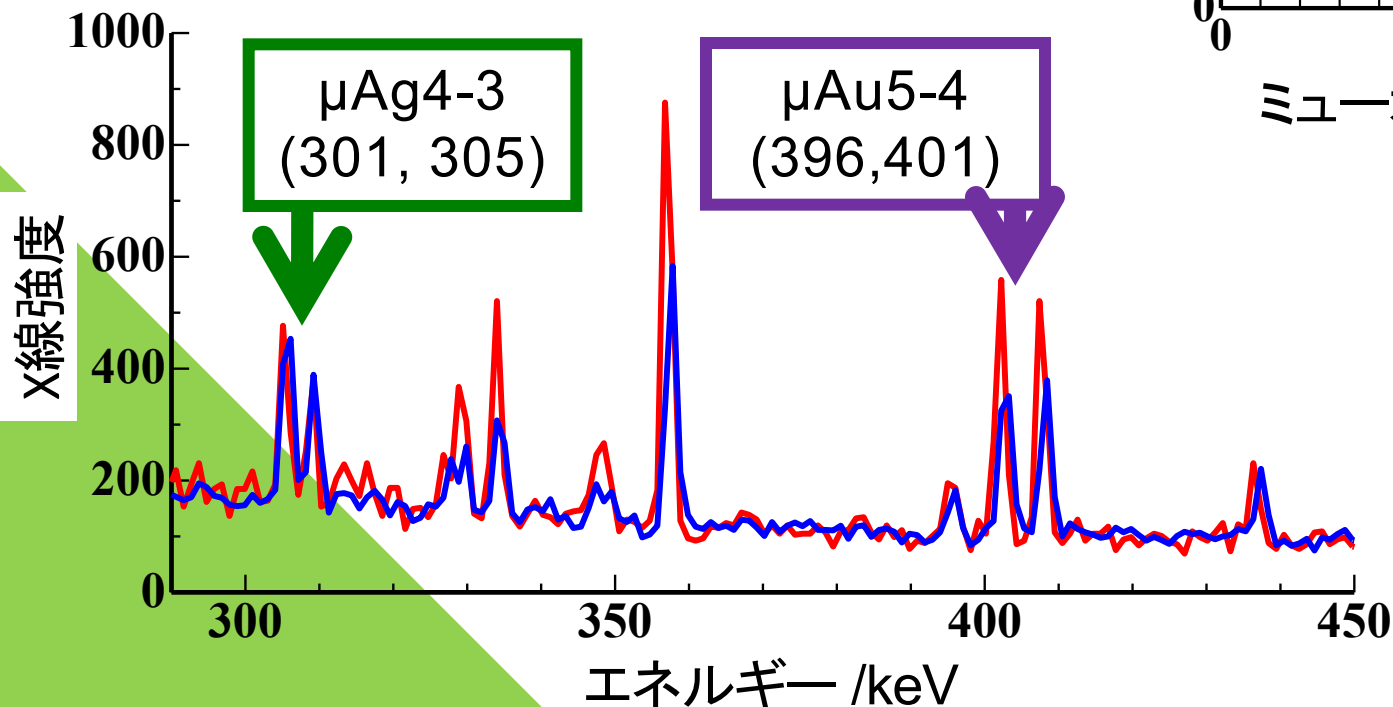
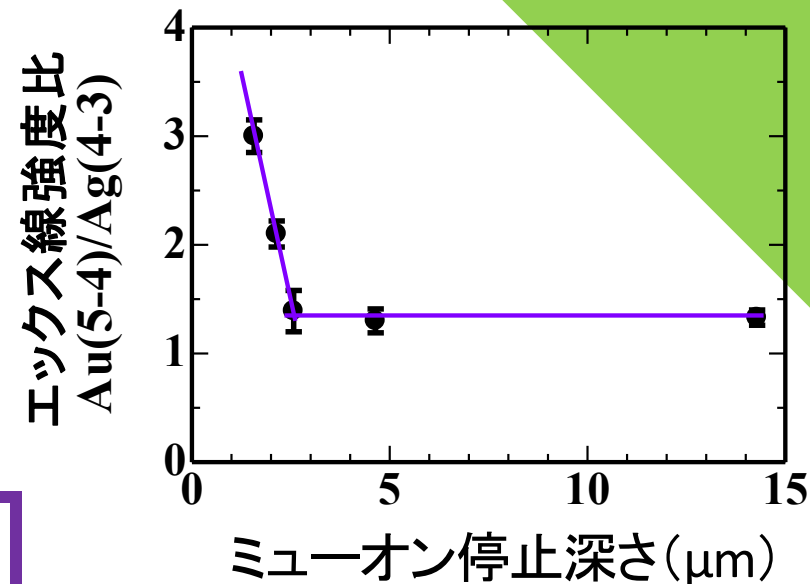
- ・ スペクトルのピークはすべて銀もしくは金由来であると同定
- ・ 銀の含有率は金と同程度に高い

非破壊深度分布測定

入射エネルギーによって異なる
特性X線スペクトル

($\mu\text{Ag4-3}$ で規格化)

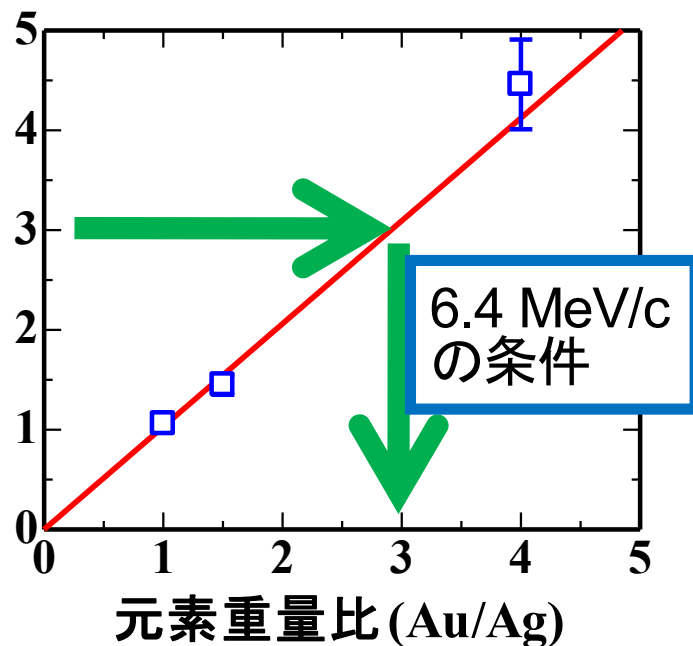
➡ 停止深さで異なる
元素成分



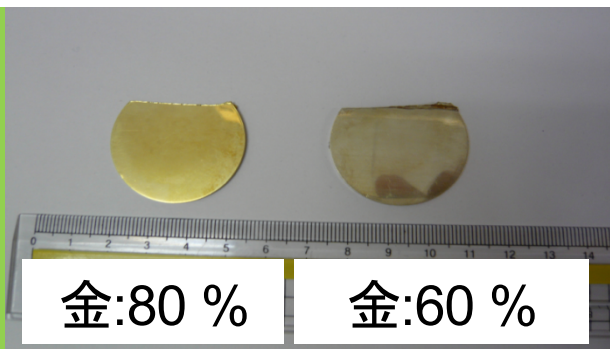
— 入射運動量
6.4 MeV/c
— 入射運動量
15.2 MeV/c

非破壊深度分布測定

エックス線強度比
 $\text{Au}(5-4)/\text{Ag}(4-3)$

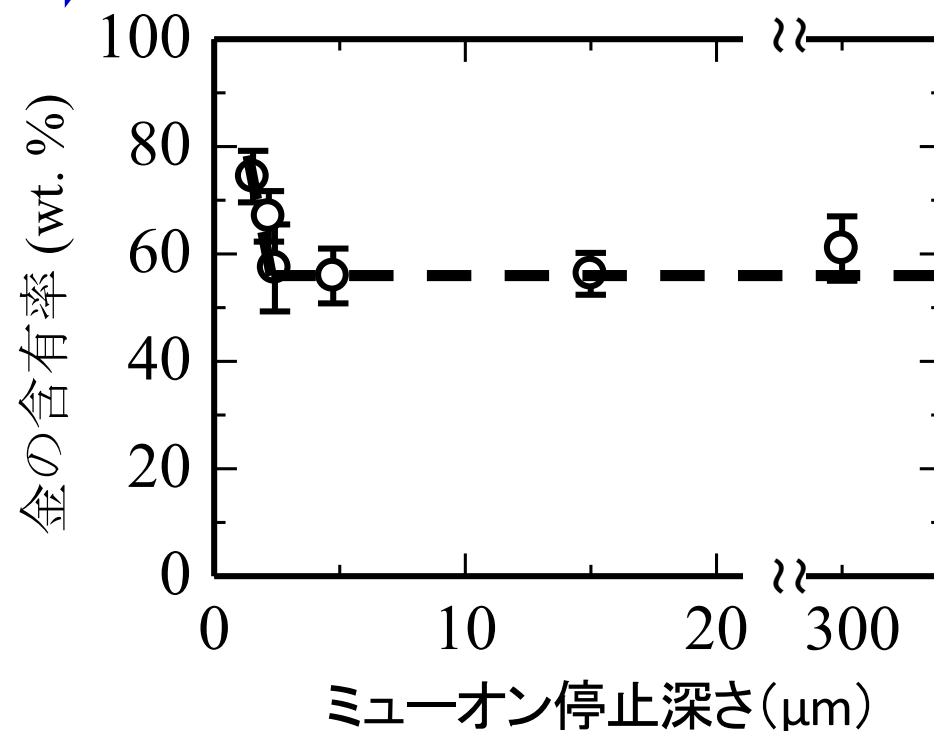


金銀標準合金試料による検量線



金/銀のX線強度比と重量比の検量線から元素成分比を決定

➡ 破壊分析による分析値と一致



非破壊で元素深度分布を決定

非破壊深度分布測定

ミュオンは最終的には原子核に捕獲されて、別の原子核($Z-1$ の原子核)を生成する

$^{197}\text{Au} (\mu, \nu n) ^{196}\text{Pt}^*$

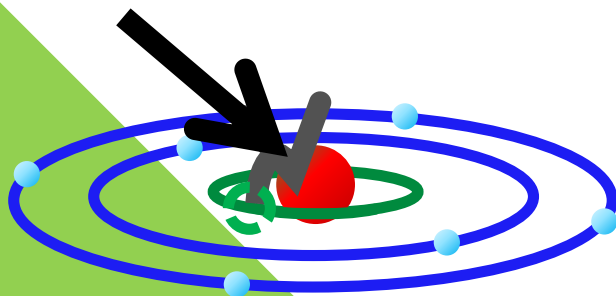
$^{197}\text{Au} (\mu, \nu 3n) ^{194}\text{Pt}^*$

$^{109}\text{Ag} (\mu, \nu n) ^{108}\text{Pd}^*$

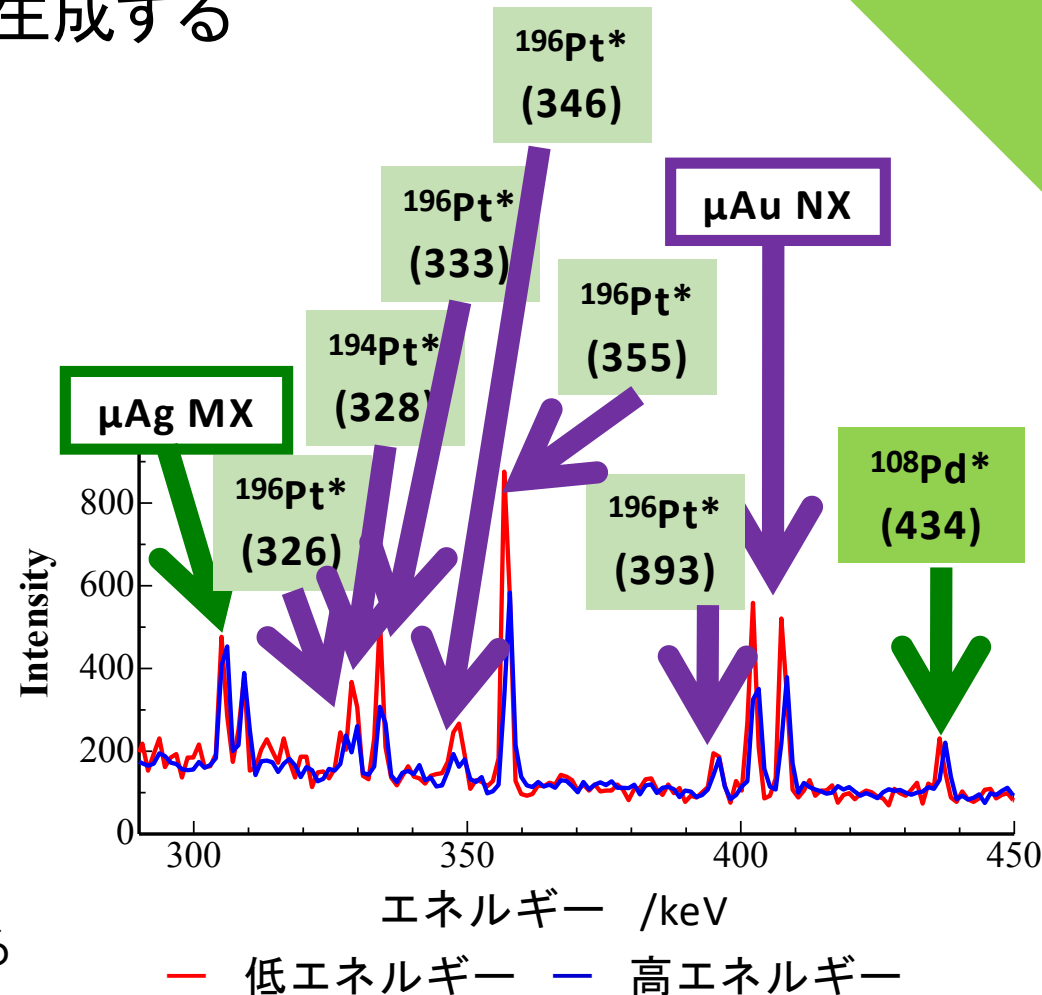
ガンマ線強度にもミュオン停止深さ依存がある

$356 \text{ keV} (^{196}\text{Pt}^*) / 434 \text{ keV} (^{196}\text{Pt}^*)$

原子核 ($Z-1$)



Z の原子核にミュオン(-1)が捕獲されるので、 $Z-1$ 原子ができる

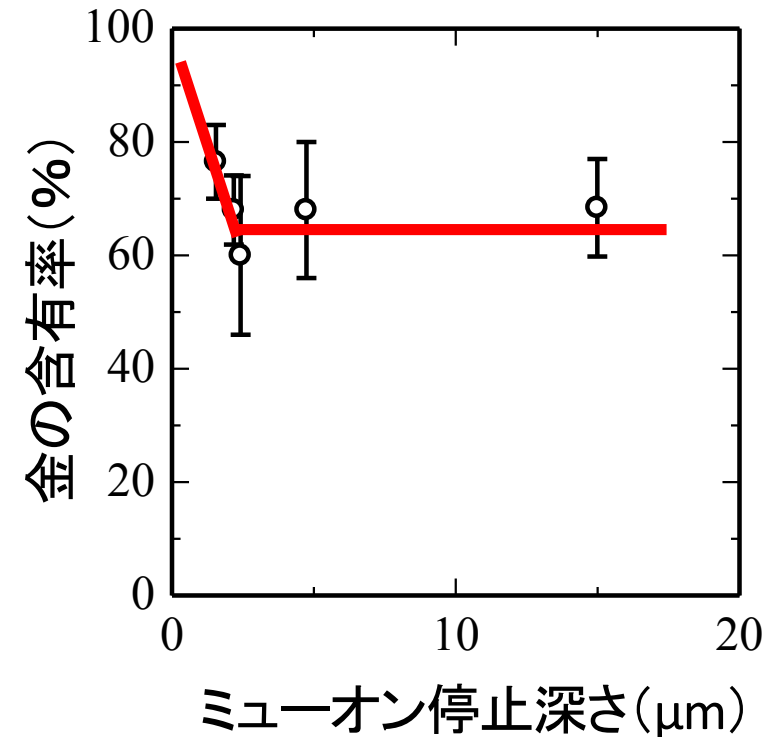


非破壊深度分布測定

ガンマ線分析を使っても元素の深度プロファイルを決定
 深度分布は、**ミュオン特性X線の結果および破壊分析の結果ともよく一致**

どちらが精度が良いかは対象により変化するので、二つの選択肢がある

ミュオン 運動量 (MeV/c)	ミュオン停止 深さ(μm)	$\mu\text{X-ray}$ Au: mass %	$\gamma\text{-ray}$ Au: mass %
6.4	2.2	74.4 ± 4.8	76.5 ± 6.5
7.5	3.0	67.0 ± 4.7	68.0 ± 6.1
8.0	3.6	57.4 ± 8.1	60 ± 14
10.2	6.5	55.9 ± 5.1	68 ± 12
15.2	20	56.3 ± 3.9	68.4 ± 8.6



目次

ミュオン原子とは

ミュオン特性X線元素分析の特徴

ミュオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

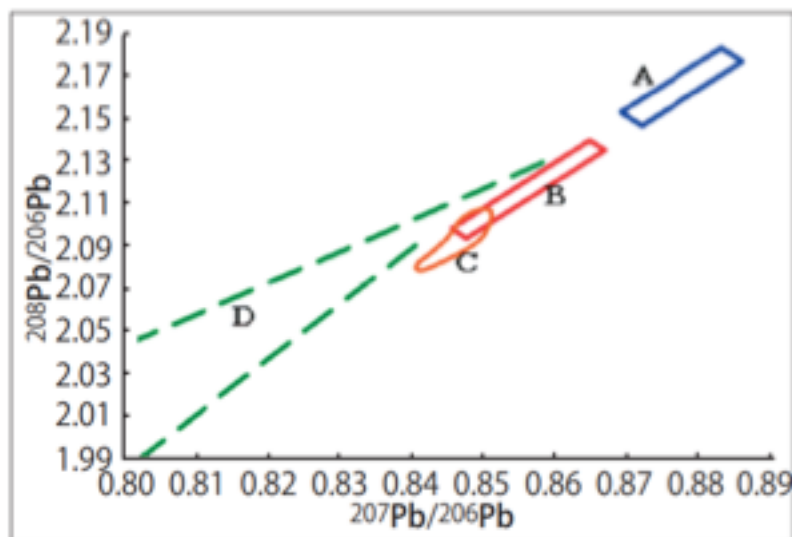
同位体分析の検討

ミュオン元素分析の将来計画

同位体分析の検討

ミュオン特性X線は、**同位体によってほんのわずかにエネルギーが変化する**

このためミュオンで**非破壊の同位体分析**ができる可能性がある



東アジアの鉛同位体比分布図 (a 式図)

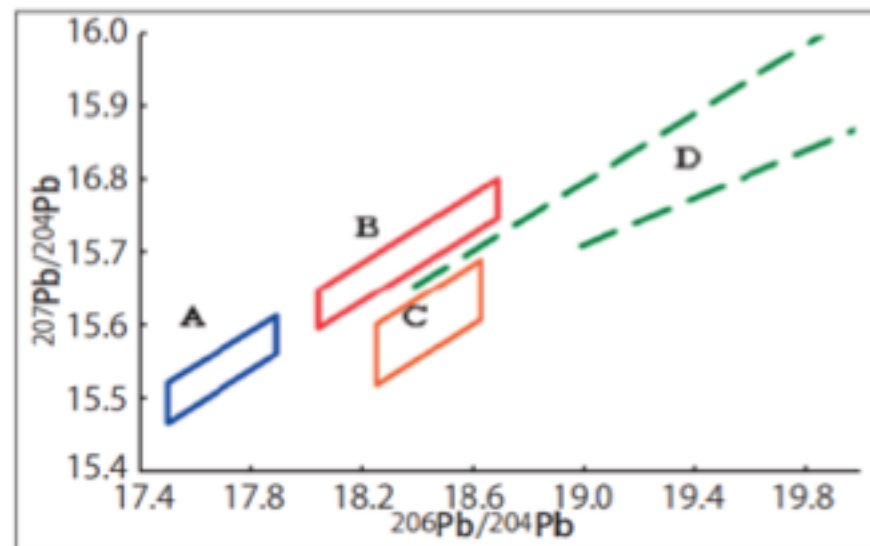


図 4 東アジアの鉛同位体比分布図 (b 式図)

A : 中国前漢鏡の領域	B : 中国後漢・三国鏡の領域
C : 日本産鉛の領域	D : 朝鮮半島系遺物ライン

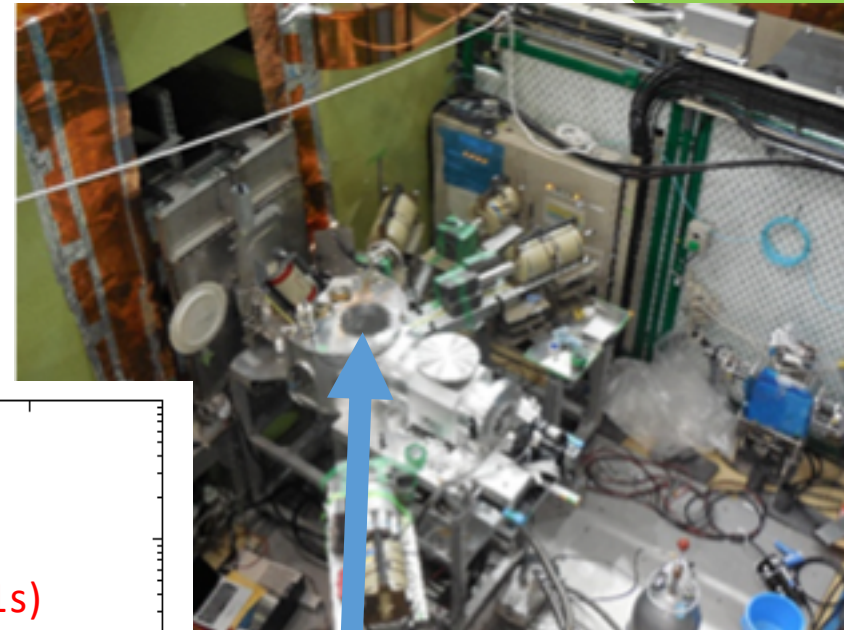
同位体分析の検討

2種類の同位体比を持つ金属鉛にミュオンを照射し、
ミュオン特性X線を測定

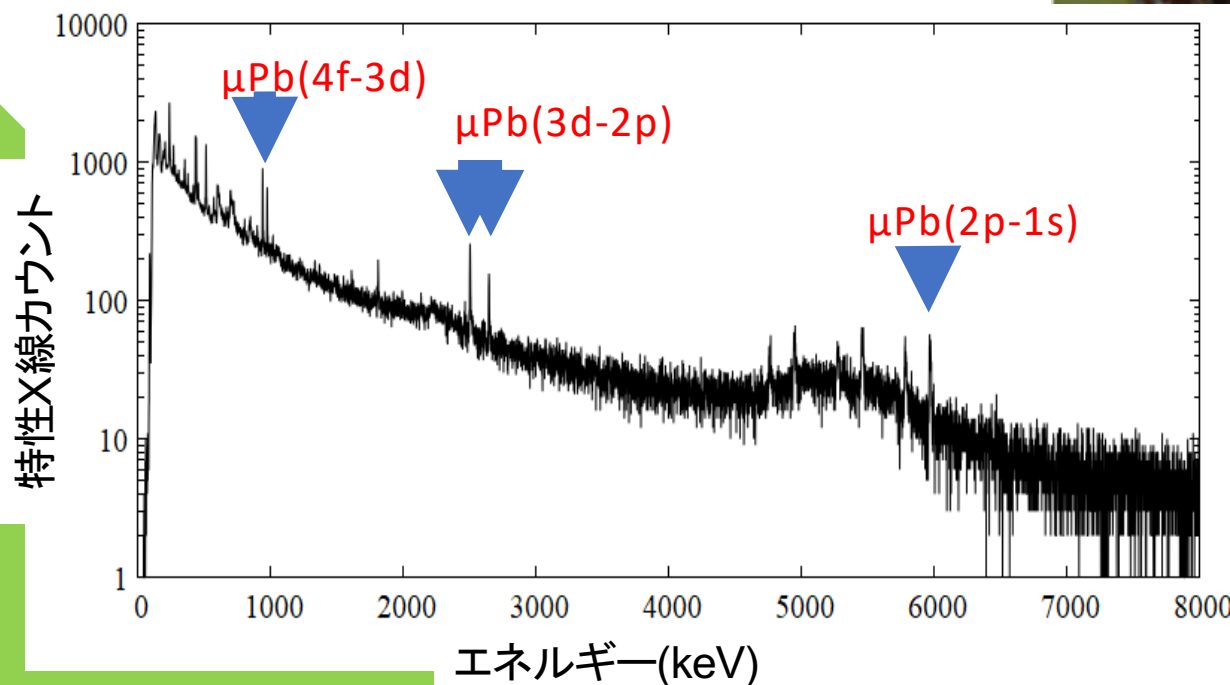
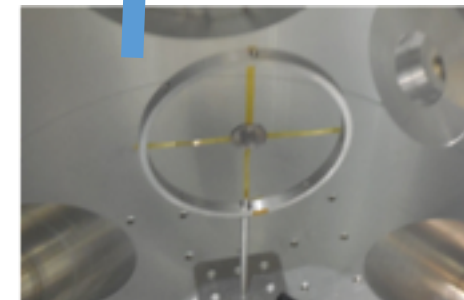
^{208}Pb [%] ^{207}Pb [%] ^{206}Pb [%] ^{204}Pb [%]

^{208}Pb 99.57 0.35 0.01 0.07

natPb 51.5 22.3 24.7 1.4



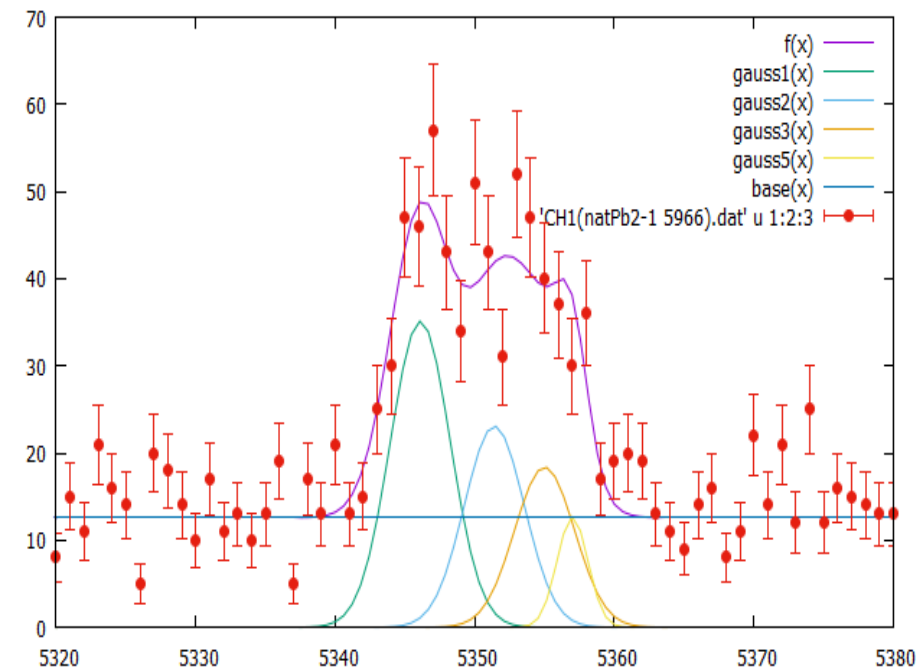
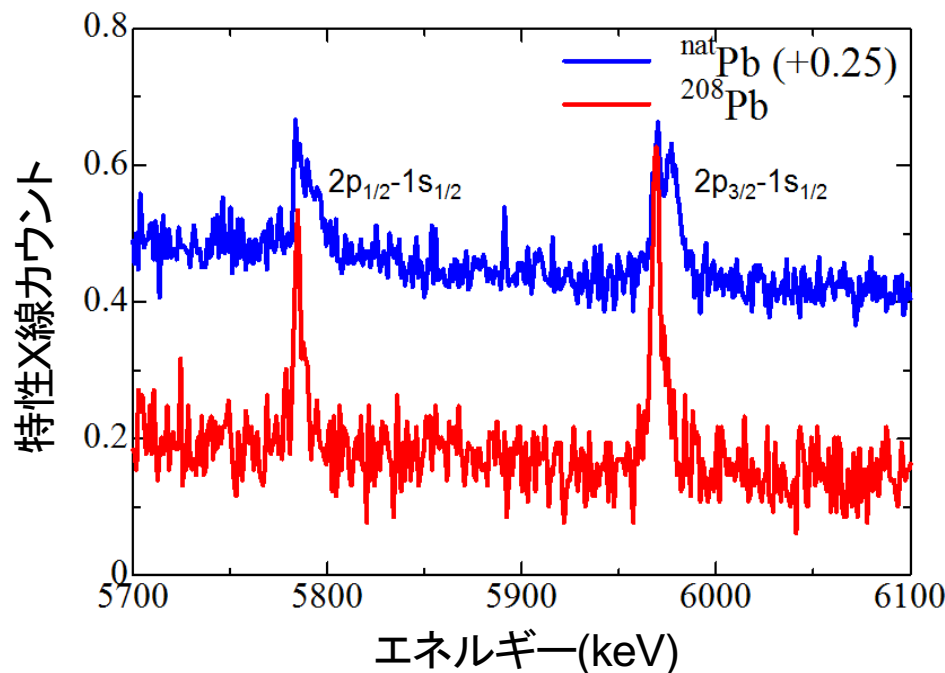
J-PARC MUSE, D2 port



同位体分析の検討

同位体が混じった試料($^{\text{nat}}\text{Pb}$)からは、**複数の成分に割れたミュオン特性X線が得られた。**

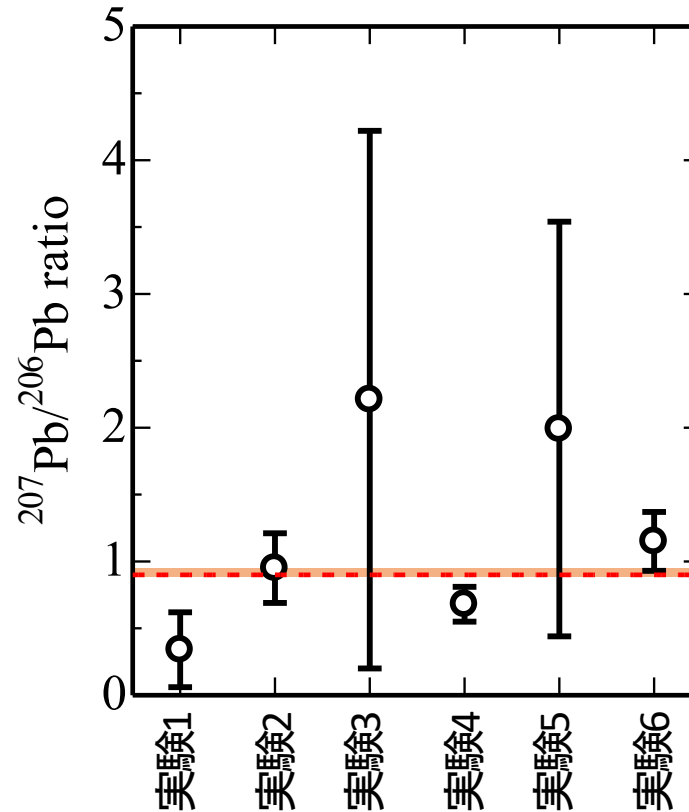
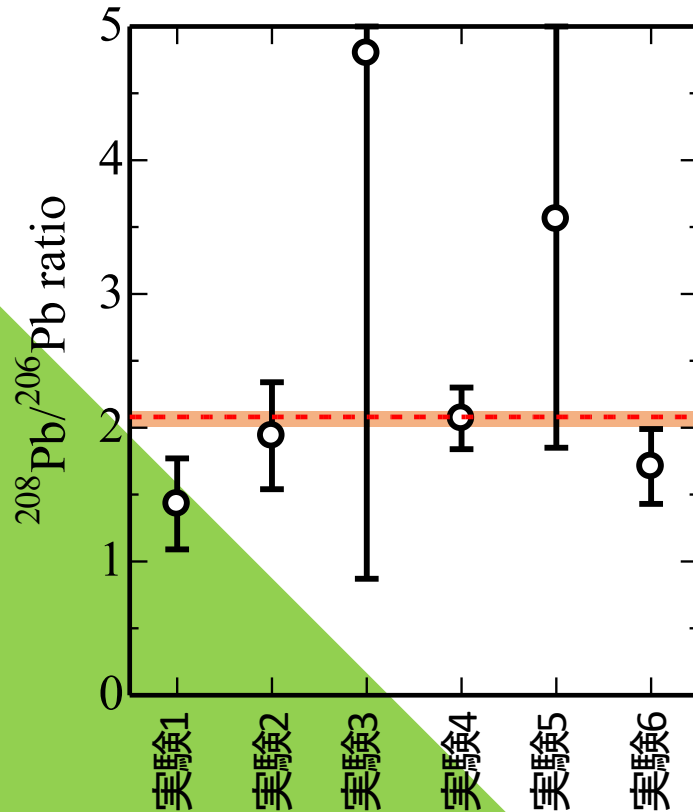
これを解析することで、ミュオンによる非破壊の同位体分析を実施



同位体分析の検討

ミューオン特性X線測定による分析値は、質量分析による分析値を再現

➡ 統計をあげることで考古学資料の産地分析へ適用



目次

ミューオン原子とは

ミューオン特性X線元素分析の特徴

ミューオン元素分析の具体例

非破壊元素分析実験

検出限界の検討

非破壊深度分布測定

同位体分析の検討

ミューオン元素分析の将来計画

ミュオン元素分析の将来計画

今年度から科研費新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用の架け橋。」が採択され、ミュオンを用いた新たな研究が展開中である

文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究 (2018-2022)

宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。

Toward new frontiers : Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beams

| 内部専用 |

ENGLISH

HOME

本領域について

組織・総括班

計画研究

公募研究募集



本領域について

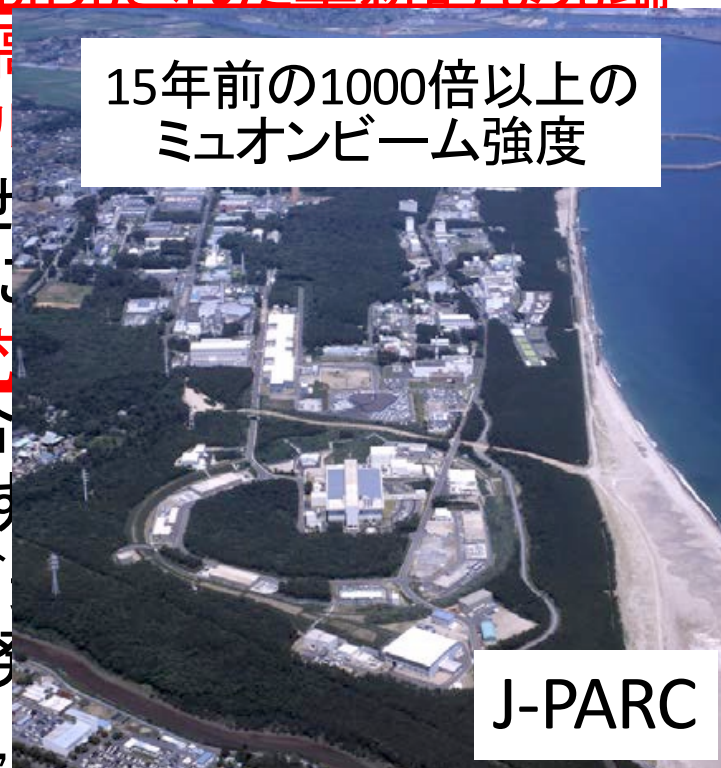
ミュオン元素分析の将来計画

研究提案の経緯

本領域は、硬X線・ガンマ線イメージング技術、超高分解能X線分光技術など宇宙観測を目的に開発された革新的な先端検出器を、近年、めざましい勢いで高エネルギーニュートリノビーム、偏極RIビーム、高エネルギー



Hitomi 衛星



15年前の1000倍以上の
ミュオンビーム強度

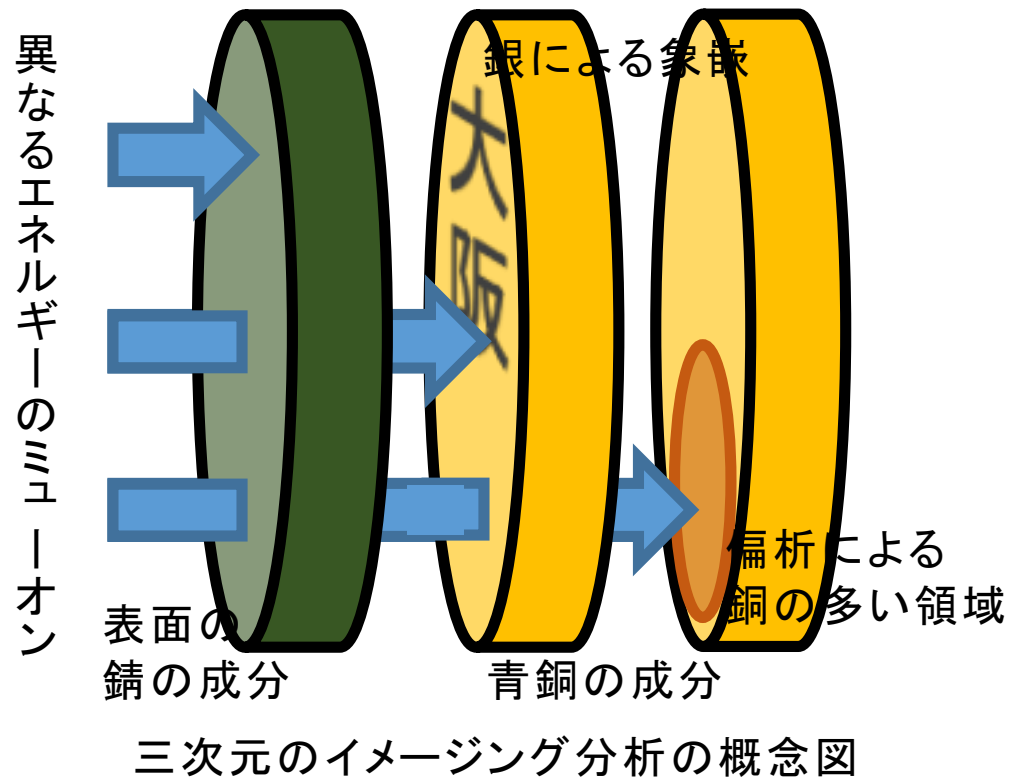
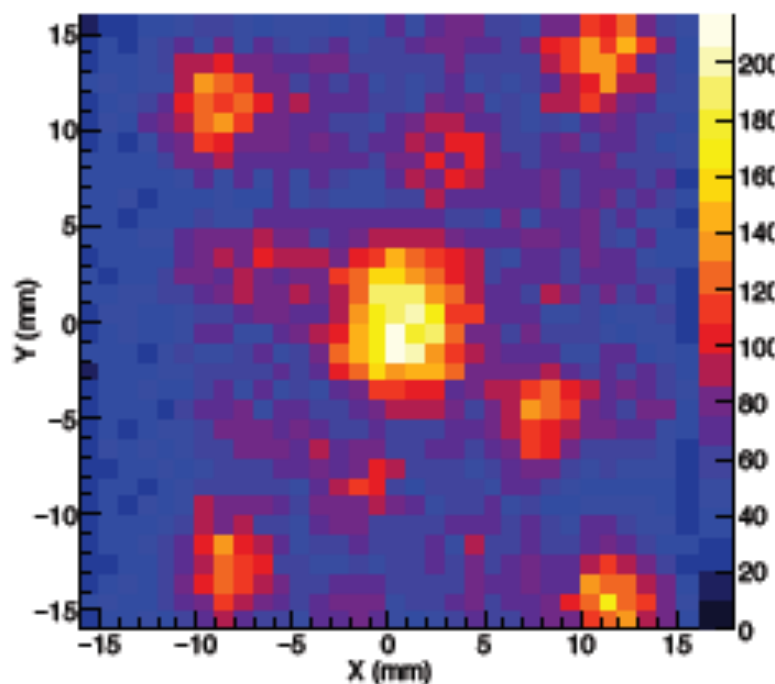
J-PARC

ミュオン元素分析の将来計画

イメージング検出器による新たな研究展開

負ミュオンによる元素分析は、**非破壊での深度分布解明**に成功している。

本研究では、イメージング検出器を用いることで、三次元の元素分析を目指す。



ミュオン元素分析の将来計画

宇宙地球試料分析

生命誕生の謎に迫る



太陽系形成とその発達
過程の解明
生命材料有機物の探索

考古学試料分析

人類史の謎に迫る



古代技術の再構築
古代の文化伝播、物
流の解明

C01: 検出器開発
C02: ビーム開発

A01: 原子過程
B02: 理論研究

測定システム開発

非破壊での分析を達成

0.1% 精度での同位体分析
0.05% までの分析精度
0.1 mm の三次元分析

サンプル

イメージング検出器

ミュオン

生物試料分析

生命、地球環境の多様性を追う



過去、現在、未来の
環境変動解明
生体イメージング

産業試料分析

あらゆる産業製品を透視



リチウムイオン
バッテリー

脱化石燃料に向けた
電池材料開発

まとめ

我々は、これまで負ミュオンを用いた新しい元素分析手法を開発してきた

この手法は非破壊で、試料の深さごとに多元素同時分析が可能である。さらに同位体分析やイメージング分析などの基礎研究が進行中である

考古学資料をはじめとする破壊できない試料、内部を選択的に分析したい試料など、分析手法の特性を生かした展開を行い、日本が開発をリードしてきたこの手法を様々な分野へ応用していきたい