

# ミュオンによる 非破壊分析 —物体内部の組成を非接触分析 する—

国際基督教大学教養学部

久保謙哉

日本放射化学会会長

前日本中間子科学会会長

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構シニアアドバイザー

ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

# ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

# ミュオンのニーズ

原子力分野（特にバックエンド）の課題

○原子力施設には

**高線量・遮蔽・アクセス不能な領域**が多数存在

バックエンド分野では、特に多様な性状、核種が混在

施設そのものや、大型の機器等も存在

➡ 内部が「見えない」



高線量



遮蔽



アクセス不可

➡ 意思決定が難しくなる

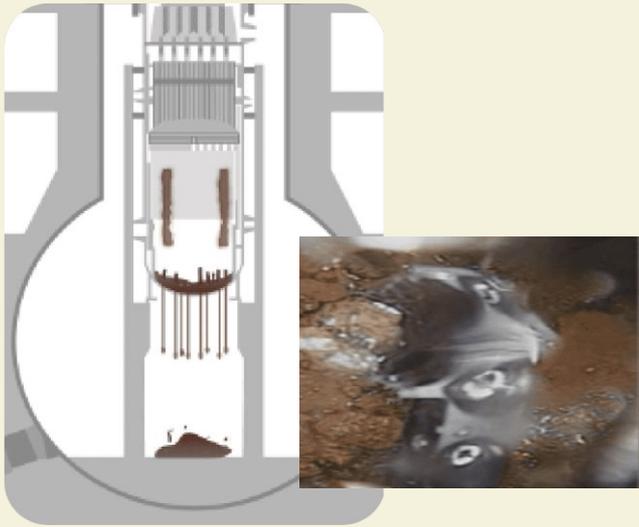
➡ 破壊分析は高コスト化（特に人件費）

**廃炉・保全・安全のボトルネック**



# ミュオンのニーズ

## 不可視領域の例

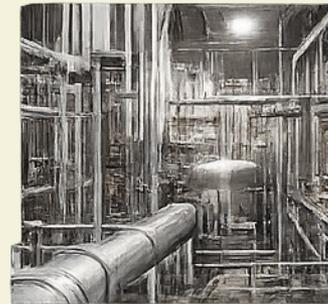


燃料デブリ

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.



放射性廃棄物



建屋内配管



地中内配管



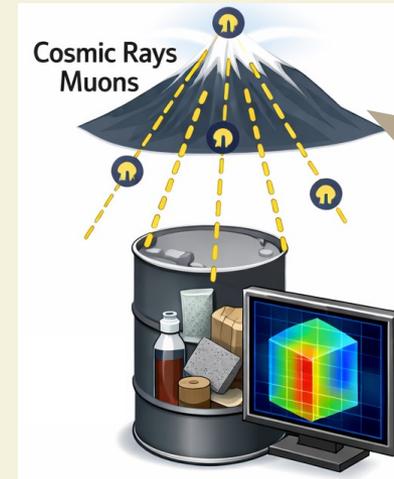
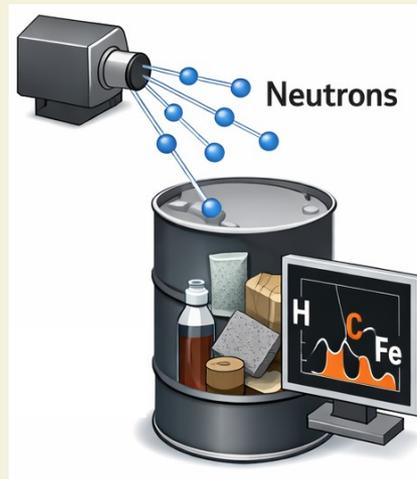
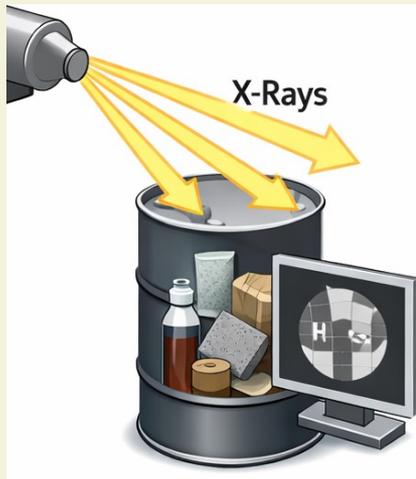
配管内堆積物

**非破壊・非接触で中の状態を知りたい**

# ミュオンのニーズ

## 既存の非破壊技術との比較

手法	特徴	課題
X線	<ul style="list-style-type: none"><li>・産業界で技術成熟済み</li><li>・高い空間分解能で密度分布(CT)を取得可能</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・大型構造物は苦手、高線量下ではノイズが増加</li><li>・遮蔽が厚いと密度のコントラストがぼやける</li><li>・厳密な元素・核種同定不可</li></ul>
中性子	<ul style="list-style-type: none"><li>・透過力が強く、全体を見るのが得意</li><li>・特に軽元素識別が得意</li><li>・共鳴現象により同位体識別が可能</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・中性子源が必要</li><li>・中性子照射後に対象物が放射化するおそれ</li></ul>
ミュオン	<ul style="list-style-type: none"><li>・宇宙線ミュオンを利用可</li><li>・元素同定、核種同定が可</li><li>・高線量下でも安定して測定</li><li>・特定の深さで止められる(荷電粒子)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・高精度・短時間化には人工ミュオンの利用(加速器が必要)が望ましい</li></ul>

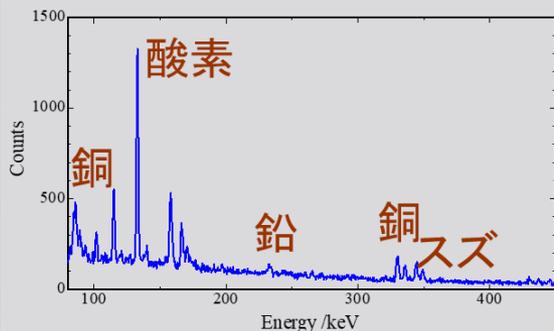


加速器ミュオンを利用すると、高精度化、短時間化が可能

# ミュオンのニーズ

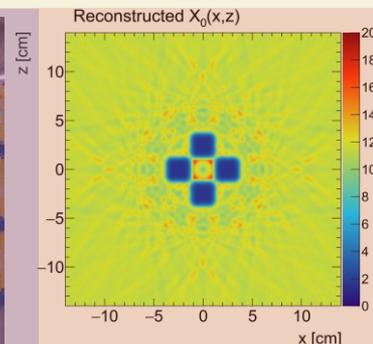
## ミュオンを使ってできること

分析対象に停止

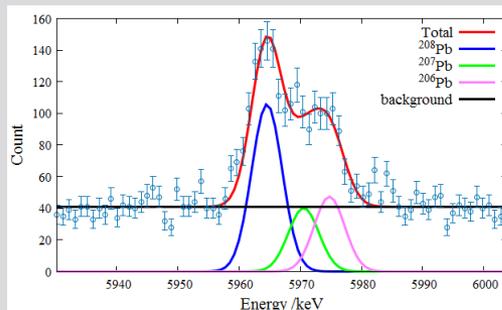
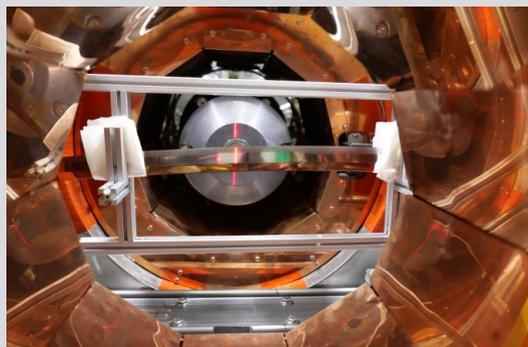


元素分析

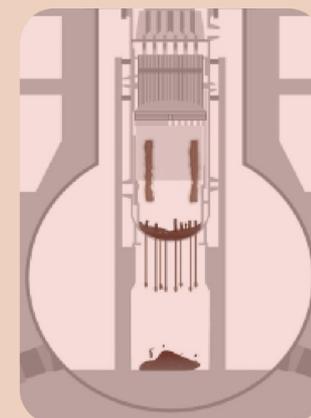
分析対象を透過



CT像解析



核種分析



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

**非破壊・非接触で高線量、遮蔽下の  
多種多様な性状、元素等を識別できる！**

ミュオンのニーズ

**ミュオンとは**

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$  線による分析

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

# ミュオン(μ粒子, ミューオン, muon)

## 素粒子の1つ

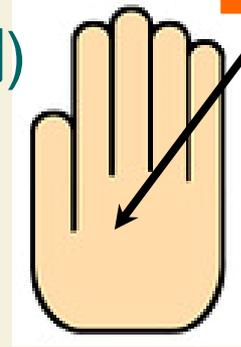
- $+e$  あるいは  $-e$  の電荷をもつ  
スピン:  $1/2$
- 寿命:  $2.2 \mu\text{s}$  45万分の1秒  
 $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_{\mu} + \bar{\nu}$   
 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_{\mu} + \nu$
- 強い相互作用はしない

質量  $106 \text{ MeV}/c^2$   
電子の約200倍  
陽子の約1/9



レプトン(電子の仲間)

e	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_{\mu}$	$\nu_{\tau}$



宇宙線

手のひらに  
毎分1個

物質中でのミュオン

$\mu^-$  : 重い電子

$\mu^+$  : 軽い陽子

ミュオンのニーズ

ミュオンとは

**ミュオン特性X線による元素分析**

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起 $\gamma$ 線による分析

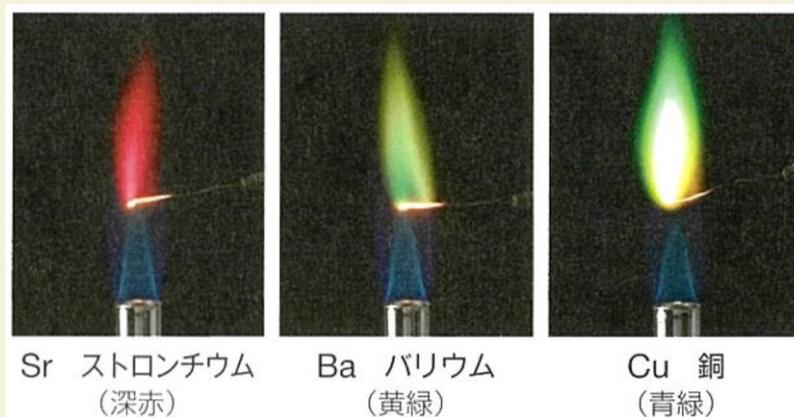
ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

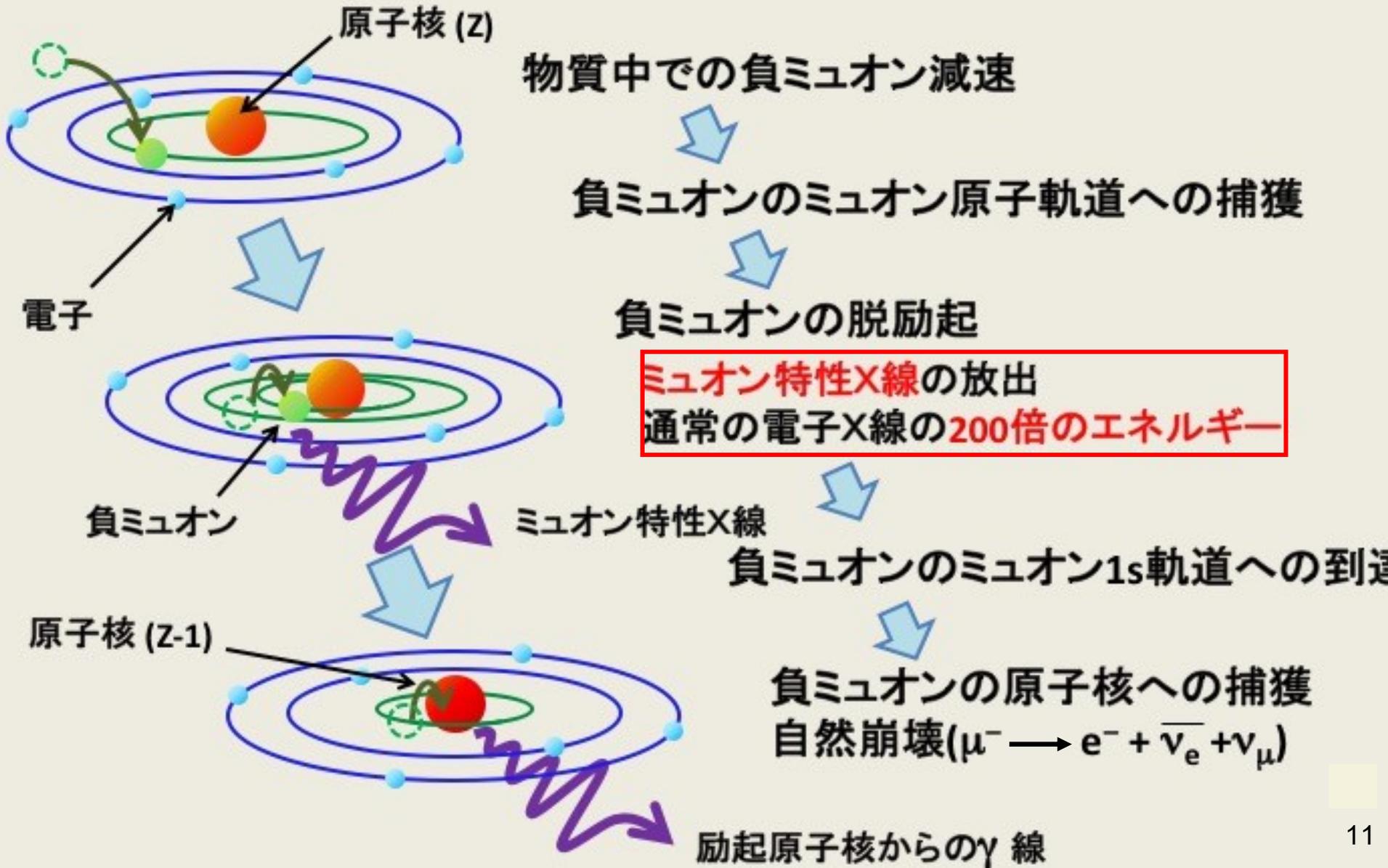
# 炎色反応 元素ごとに違うエネルギー

原子を光らせることで元素がわかる

電子が原子中で軌道を変えるときに出す光

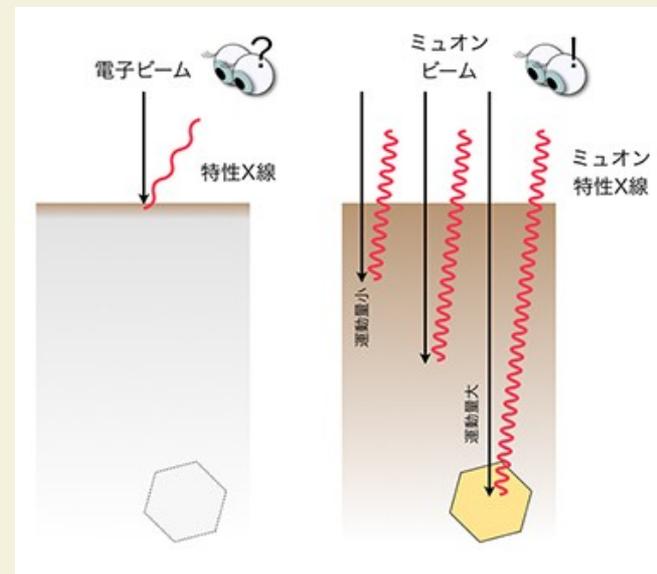


# ミュオン原子の形成、形成後の過程



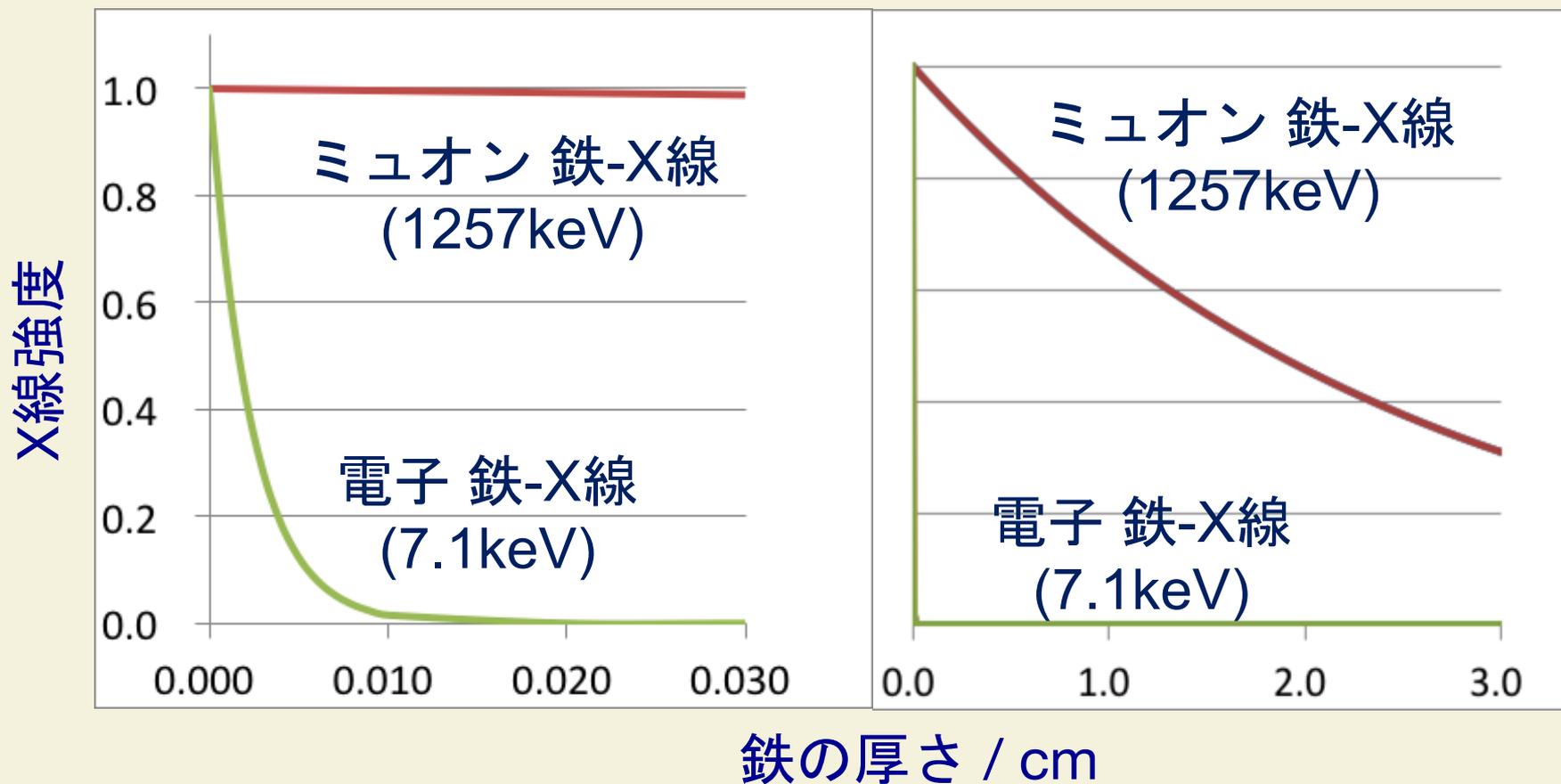
## ミュオンX線のエネルギー (keV単位)

元素	$K\alpha$	$K\beta$	$L\alpha$	$L\beta$
炭素	76	89	14	19
酸素	134	158	25	34
アルミニウム	347	422	66	89
鉄	1256	1704	264	357
銅	1513	2126	307	444
鉛	5966	8466	938	1372



**ミュオンX線は可視光(数eV)の数千倍から数百万倍のエネルギー  
大きな透過力を持つ 可視光はアルミ箔で遮られる**

# ミュオンX線と電子X線の減衰の比較



**ミュオンX線は数cmの鉄を透過する**

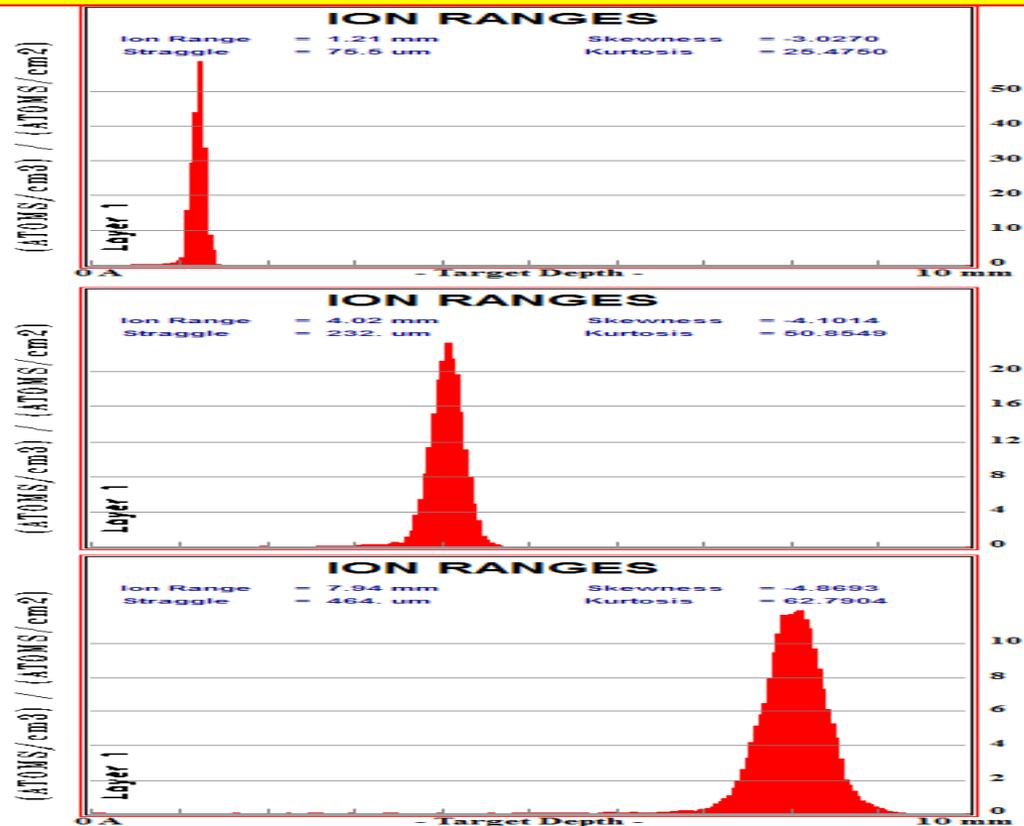
# ミュオンの物質中での停止位置

ビームの運動エネルギーを適切に選択することで  
任意の深さに止められる

低エネルギー



高エネルギー



表面

物体内部



# ミュオンX線による元素分析

- ・ 数10keVから数MeVの範囲
- ・ 試料内部で発生したミュオンX線が物体外部まで透過
- ・ 化学処理が不要
- ・ 試料の損傷がない
- ・ 放射化物の分析も可能
- ・ 空気中でも分析可能
- ・ 電子X線では困難な $Z = 10$ 以下の元素も可能
- ・ どの元素・同位体にもほぼ同じ感度
- ・ 1個の負ミュオンから1本以上のミュオンX線

**非破壊で物体内部  
多元素同時**

# 世界のミュオン施設

世界に5カ所 日本に2カ所



ミュオン $10^{7-8}$ 個/秒!

ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

**貴重試料**

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

# 錆びた青銅資料の内部に残っている金属部分の成分分析

「非破壊ではできない」 2022年の文化財科学会Working Groupの結論

青銅器・・・銅、スズ、鉛が主成分で、もともとは金属光沢があった。

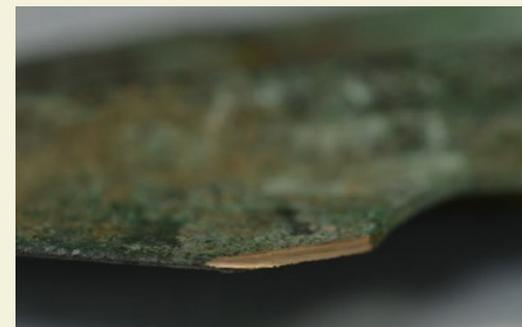
しかし、遺跡から出土する青銅器は錆びている。



復元複製(もともとの姿)



現状(錆びた姿)

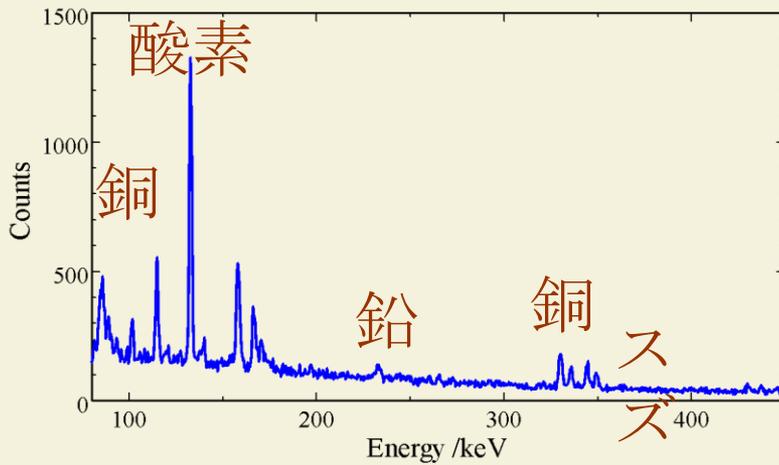


錆の下には金属層が残っていることも多い

## 銅鐸の分析例



J-PARC(茨城県東海村)における分析状況。  
負ミュオンの運動量を高くできるので、大気中で分析  
効率よく測るため、ミュオン特性X線を捉えるための  
検出器を4台置いた。

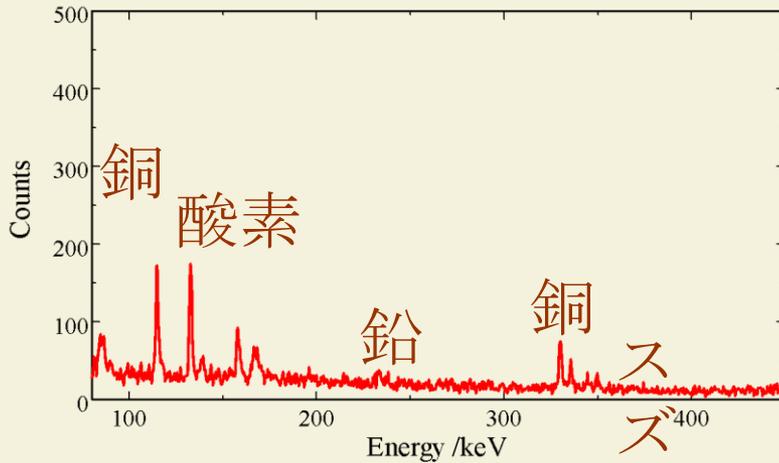


酸素が存在  
銅の濃度が低い



錆の層

深さ 0.04 mm  
(負ミュオン運動量 17 MeV/c)

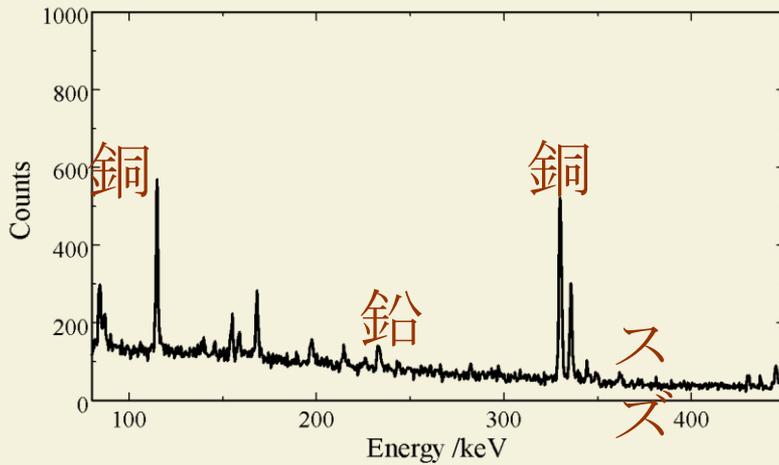


酸素が存在  
銅の濃度が低い



錆の層

深さ 0.10 mm  
(負ミュオン運動量 22 MeV/c)



酸素が存在しない  
銅の濃度が高い



金属層

深さ 0.69 mm  
(負ミュオン運動量 40 MeV/c)

## 銅鐸の分析例

青銅の標準試料で検量線を引き定量分析を行った

### 成分組成の分析結果(%)

表層からの深さ(mm)	Cu	Sn	Pb	O
0.04 (鍍層)	24.4	10.4	4.9	60.3
0.10 (鍍層)	49.6	8.1	6.6	35.7
0.69 (金属層)	<b>83.1</b>	<b>9.1</b>	<b>7.9</b>	不検出

これが本来の成分組成

# Hayabusa2持ち帰りRyugu試料の分析

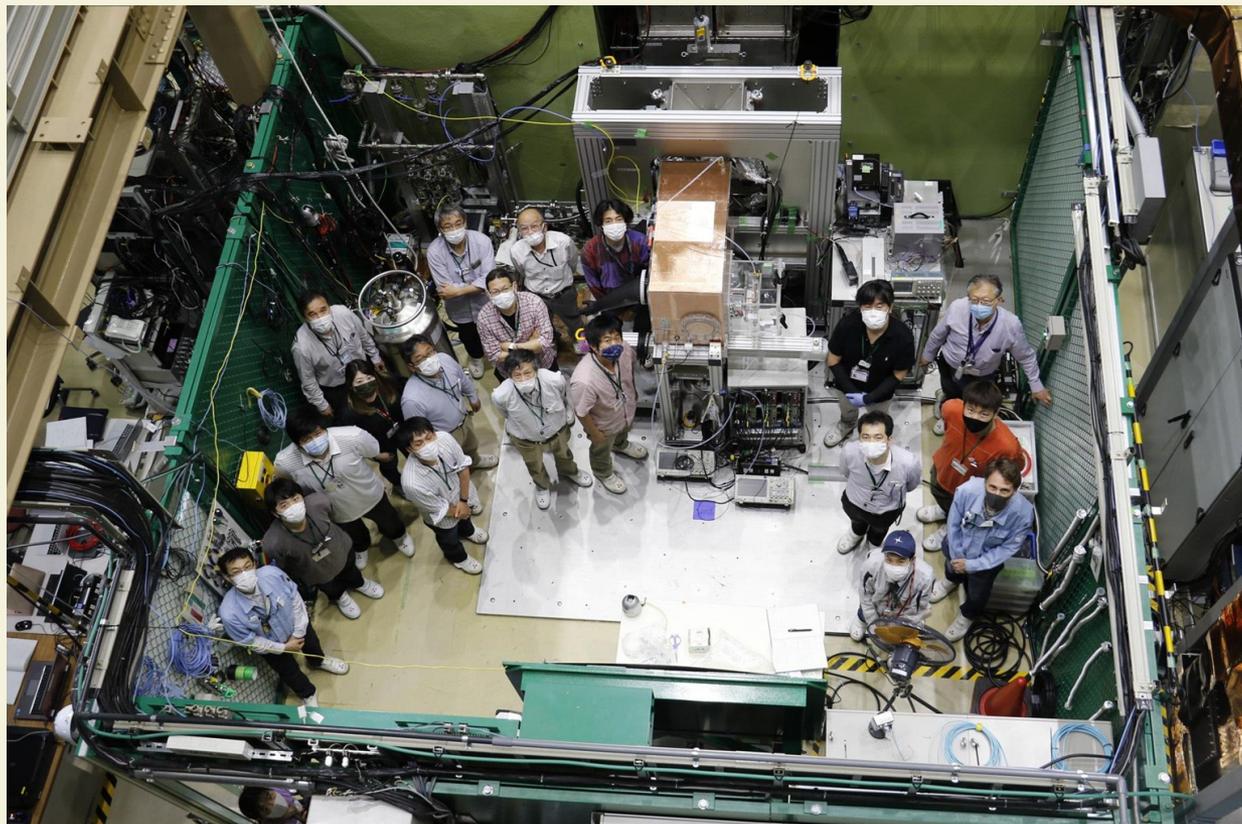
小惑星探査機 はやぶさ2

試料分析グループから共同研究の提案

(2014年打上, 1999JU3(Ryugu)から2020年試料持帰り)

**炭素, 窒素, 酸素等の含有量の非破壊分析**

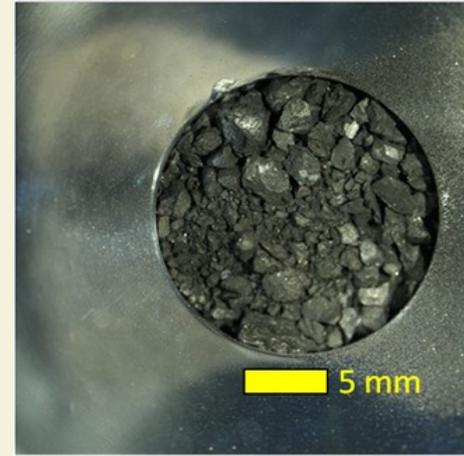
2021年6月~7月



# -Extra-terrestrial sample- Ryugu sample

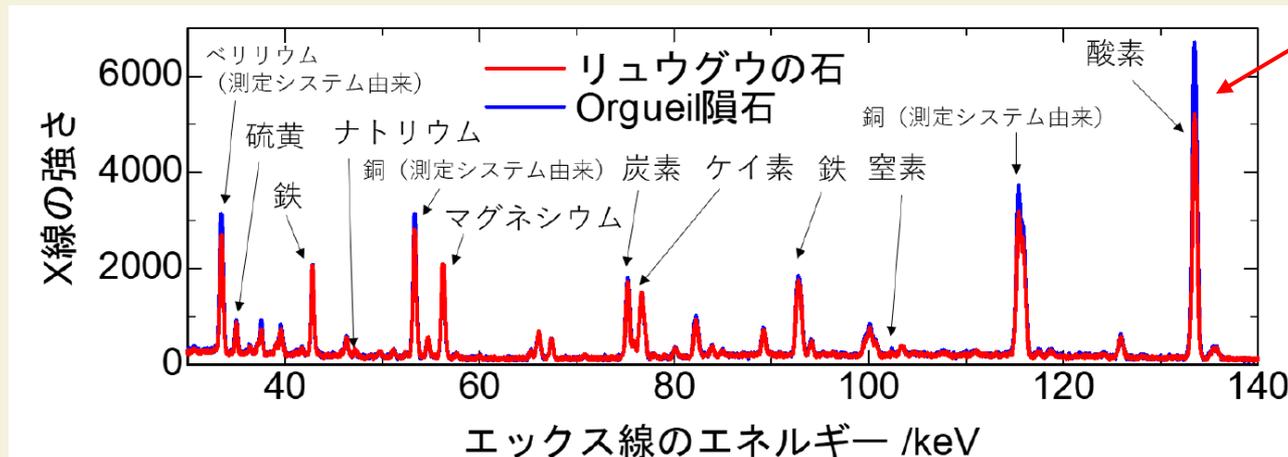


JAXA



JAXA

酸素が直接  
測定できる



ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

**密封容器の内容物**

放射性物質の分析

同位体分析

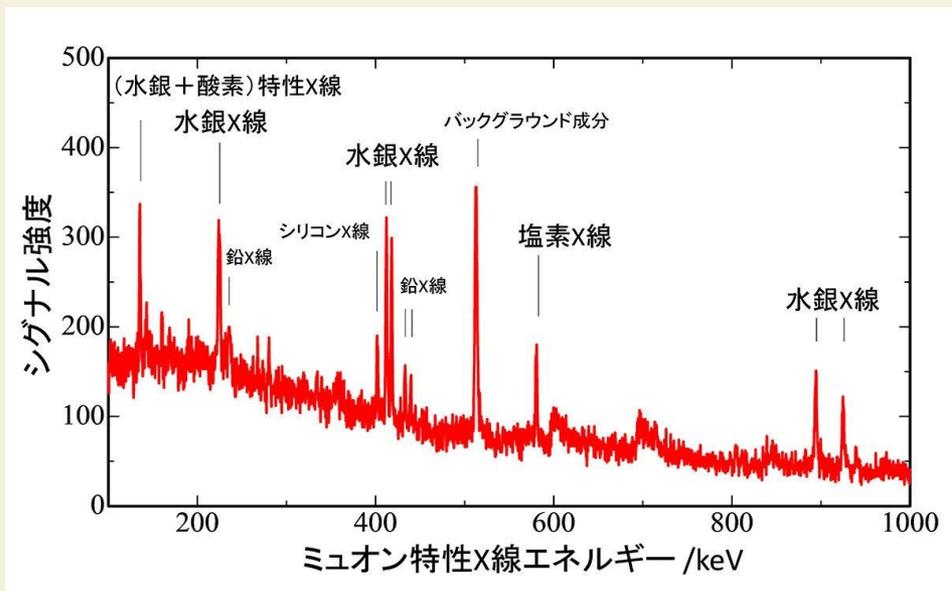
ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

# ミュオンX線による元素分析

## 緒方洪庵の薬瓶



ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

**放射性物質の分析**

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

ミュオンスピン分光法

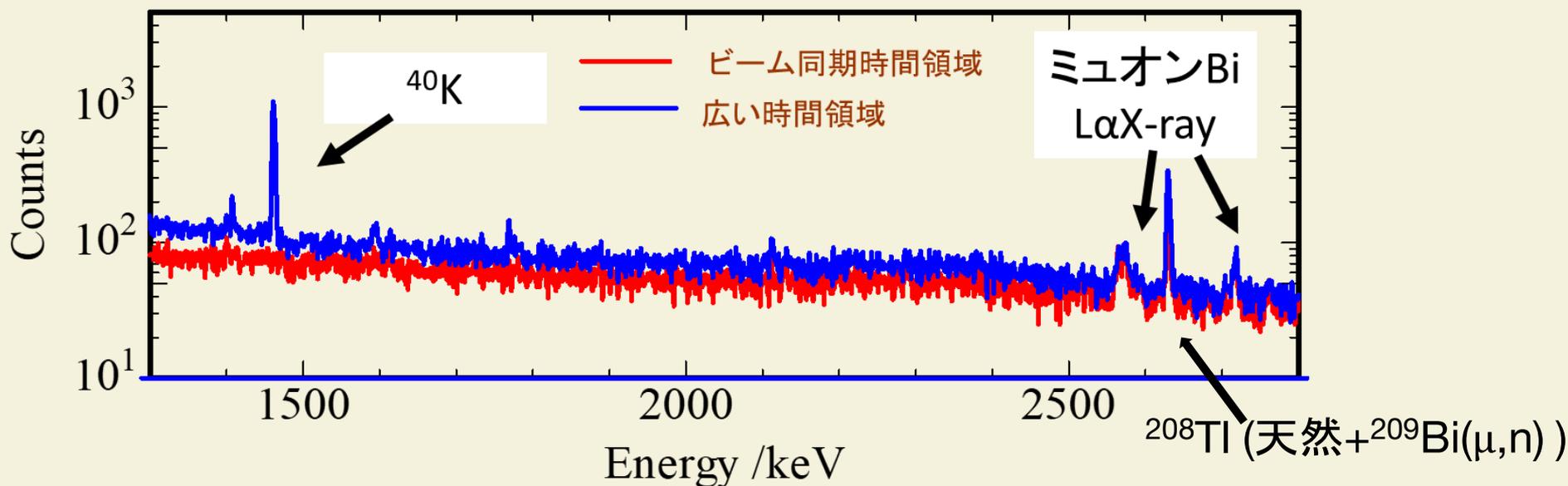
人工高エネルギーミュオン散乱法

# ミュオンX線による元素分析

アルミニウム箱に入ったビスマス塊



ビーム同期による環境放射線の著しい低減  
封入した放射性物質を含む物体の非破壊元素分析の可能性  
安定同位体も同じ感度で同時分析



38

ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

**同位体分析**

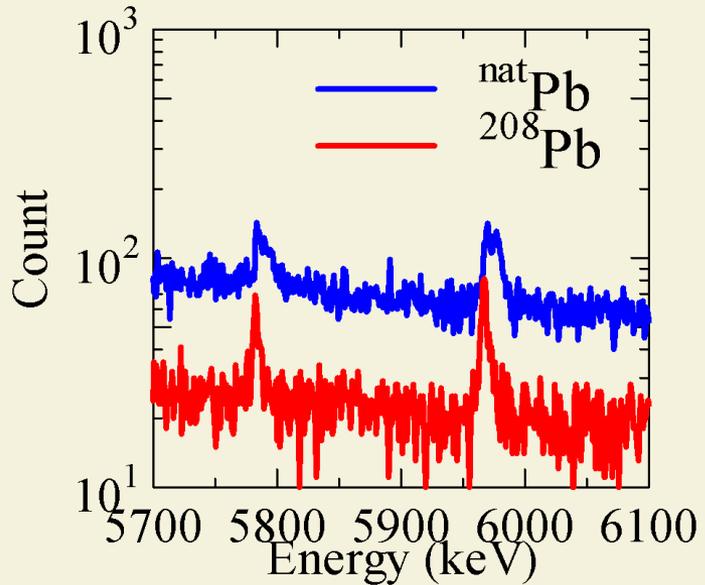
ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

ミュオンスピン分光法

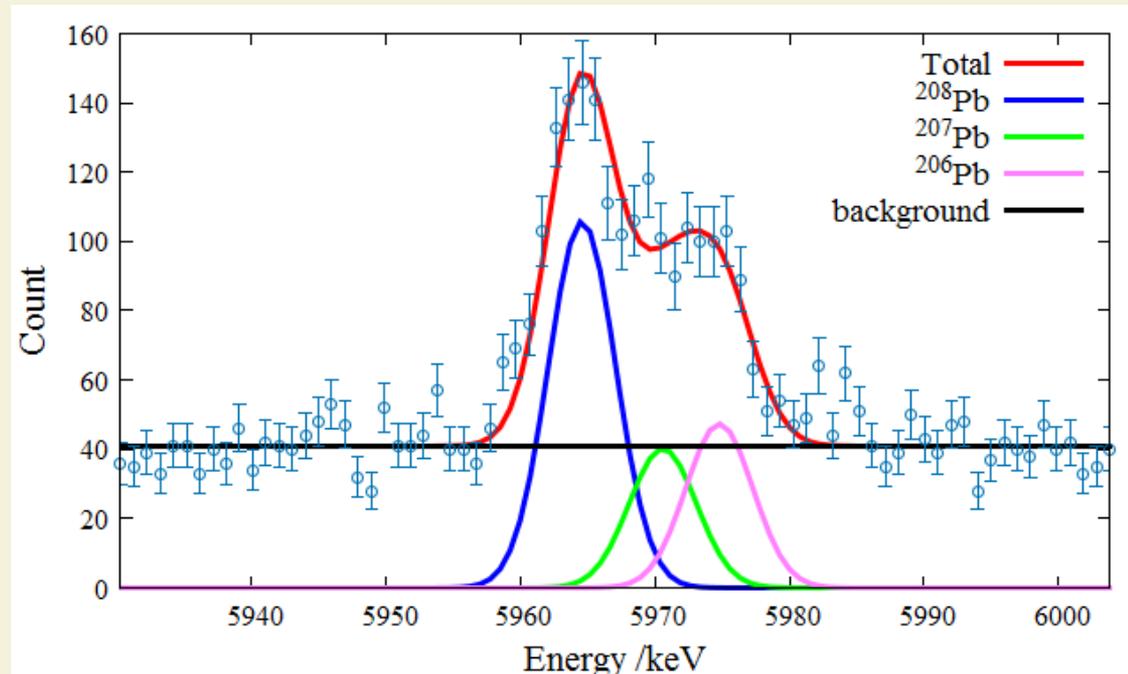
人工高エネルギーミュオン散乱法

# 非破壊同位体分析

## 同位体分別定量



天然同位体組成の鉛 (<sup>204</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb) と <sup>208</sup>Pb だけのミュオンX線スペクトル



Isotope	abundance(%)
<sup>204</sup> Pb	1.4(6)
<sup>206</sup> Pb	24.1(30)
<sup>207</sup> Pb	22.1(50)
<sup>208</sup> Pb	52.4(70)

ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

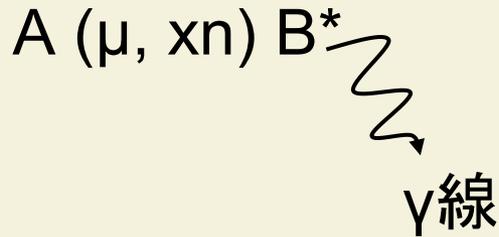
**ミュオン誘起  $\gamma$  線による分析**

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

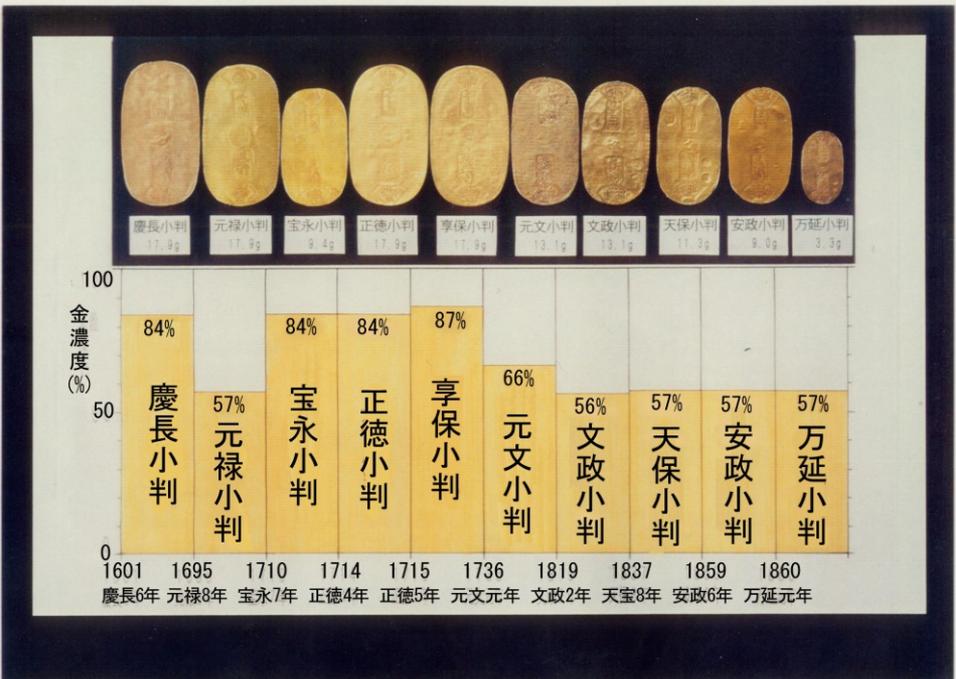
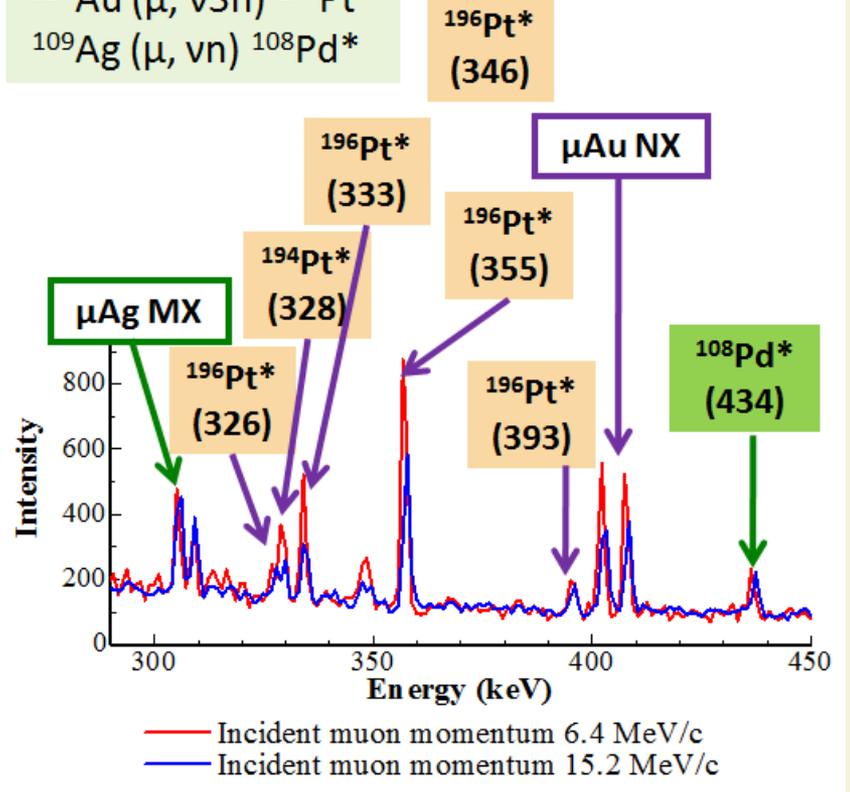
# ミュオン核吸収後の $\gamma$ 線による元素分析

核吸収後に0~数個の中性子放出とMeV領域の $\gamma$ 線放出



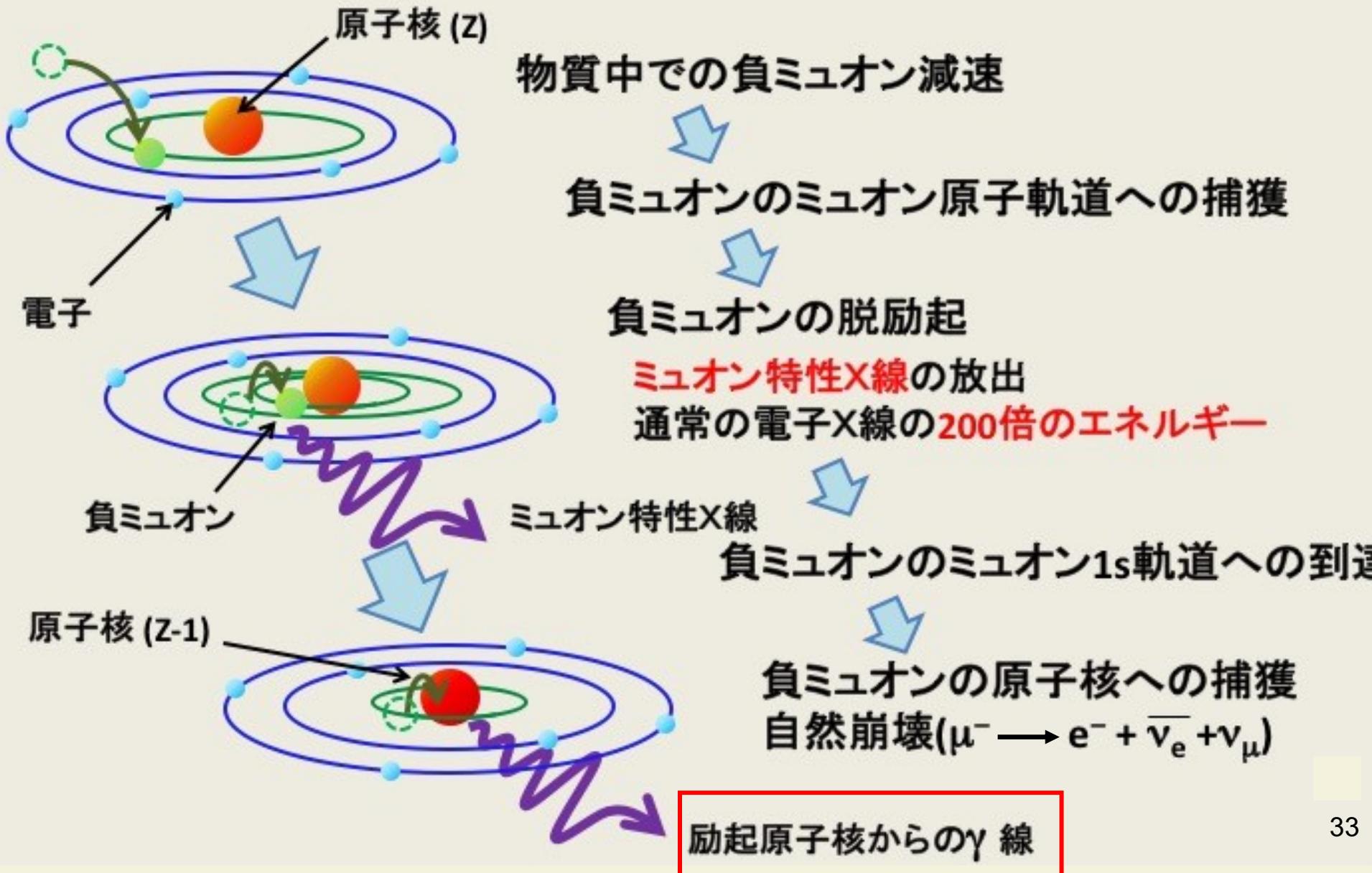
透過力が高い  
まだ網羅的に調査されていない

$^{197}\text{Au}(\mu, \nu n) ^{196}\text{Pt}^*$   
 $^{197}\text{Au}(\mu, \nu 3n) ^{194}\text{Pt}^*$   
 $^{109}\text{Ag}(\mu, \nu n) ^{108}\text{Pd}^*$



江戸時代の小判(金銀合金)

# ミュオン原子の形成、形成後の過程



ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$ 線による分析

**ミュオンスピン分光法**

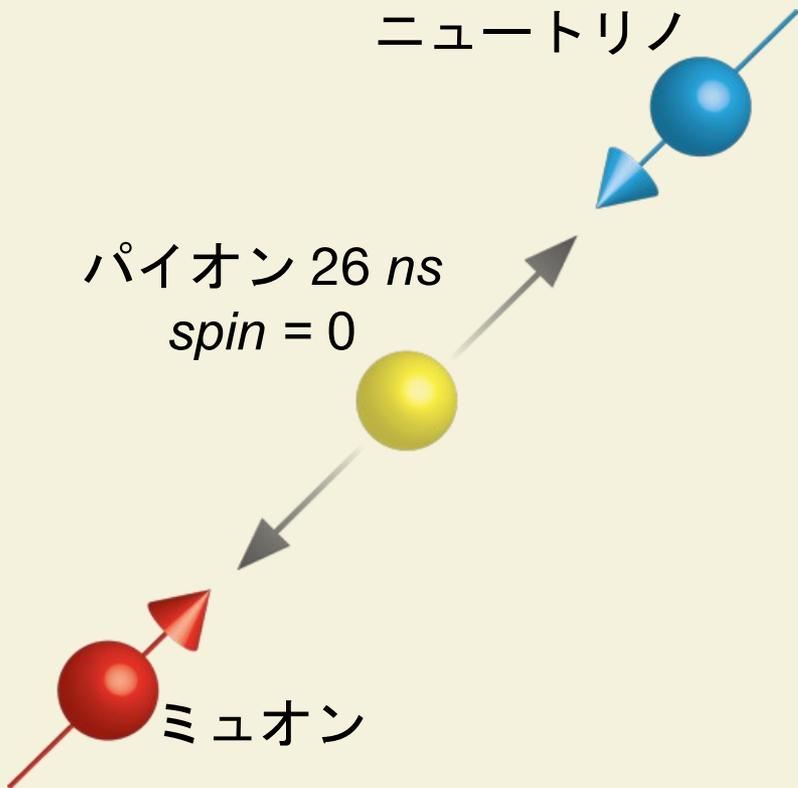
人工高エネルギーミュオン散乱法

# ミュオンはスピン偏極して生成 スピン方向に電子を発生

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} + (\bar{\nu}_{\mu}^{-})$$

ニュートリノ

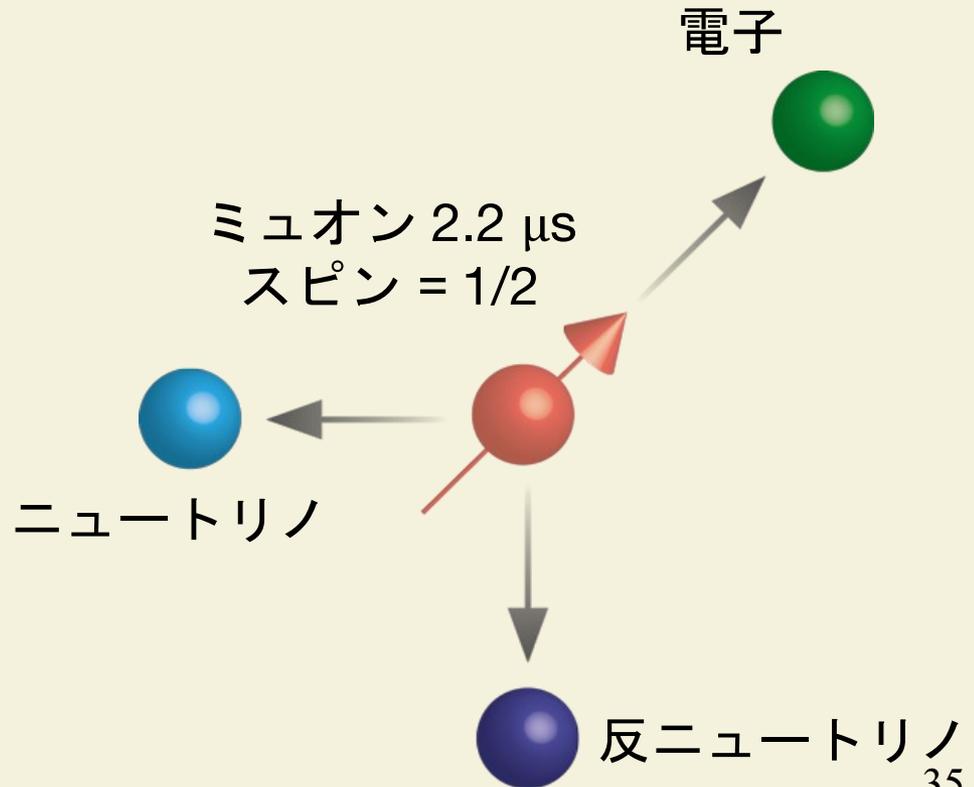
パイオン 26 ns  
 $spin = 0$



$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_{e,\mu} + \bar{\nu}_{e,\mu}$$

電子

ミュオン 2.2  $\mu s$   
スピン = 1/2



# 正ミュオンによる物質内部磁場非接触測定

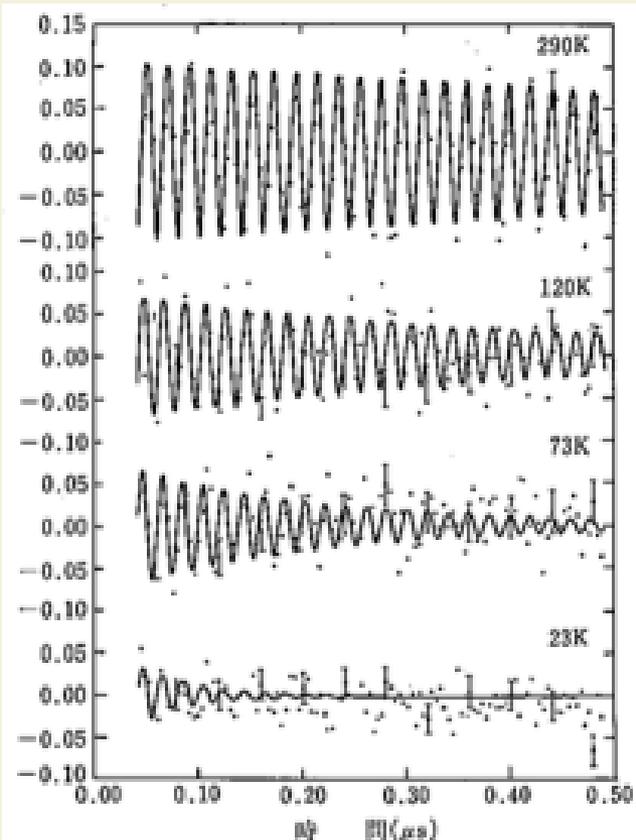


図 6-11 零磁場での鉄単結晶中の  $\mu$ SR スペクトルの温度依存性<sup>1)</sup>

低温で  $\mu^+$  スピンの緩和が速くなるのは、 $\mu^+$  の拡散が速くなるためである。

磁場の大きさや磁場の一様性  
を知ることができる。

鉄と酸化鉄を識別できる

塗装の下の鉄の状態分析  
鉄容器の内側の鉄錆を検出

ミュオンのニーズ

ミュオンとは

ミュオン特性 X線による元素分析

貴重試料

密封容器の内容物

放射性物質の分析

同位体分析

ミュオン誘起  $\gamma$  線による分析

ミュオンスピン分光法

人工高エネルギーミュオン散乱法

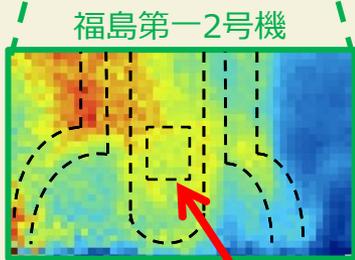
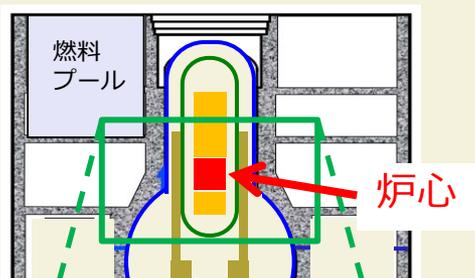
# 高エネルギー宇宙線ミュオン透過法による構造物探査

名古屋大学 森島邦博 准教授ら

## 福島第一原発2号機

(2015年)

炉心溶融を可視化!



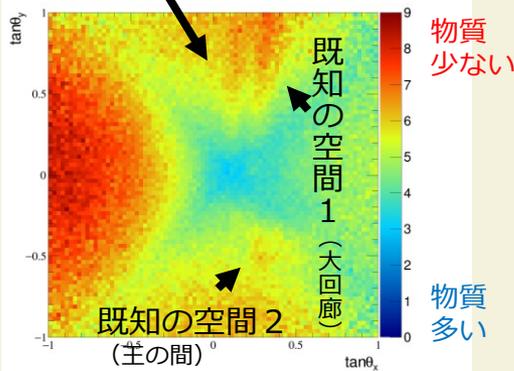
炉心部に水と燃料は残っていない

物質少ない  物質多い

## エジプト・クフ王ピラミッド

(2017年)

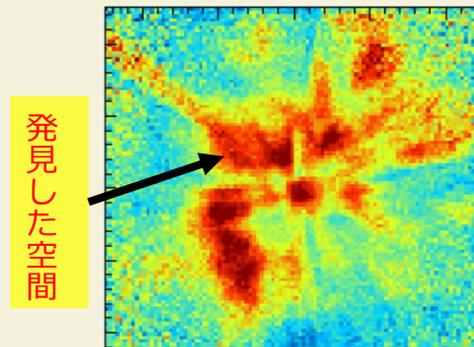
未知の巨大空間を発見!



## イタリア・ナポリ市街地

(2023年)

地中に未知の埋葬室を発見!

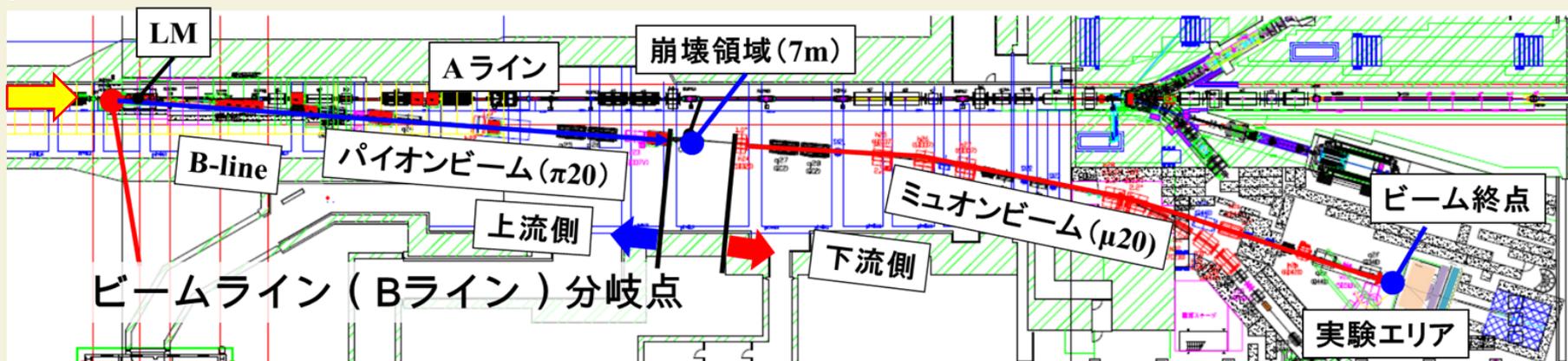


地中の構造を精細に可視化!

地中パイプラインも可視化

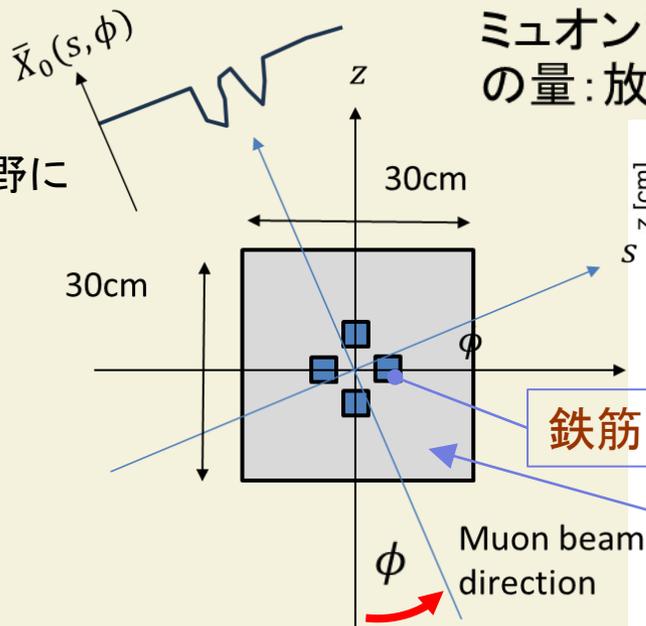
# J-PARCハドロン実験施設： 高エネルギーミュオンビーム

30 GeV  
陽子ビーム

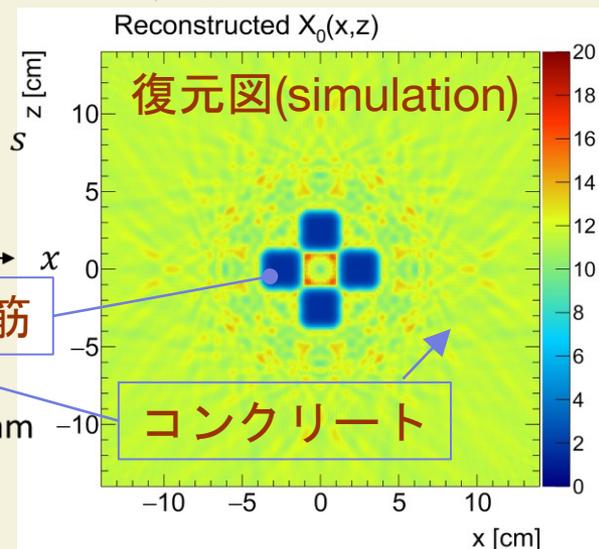


## エネルギーの揃った、透過力の高いミュオンビームによる 大型構造体のイメージング：ミュオントモグラフィー(μCT)

- 強度:  $\sim 10^3/s$  (6 GeV)
  - 宇宙線フラックスの千倍
  - 将来は10倍、100倍も視野に
- 純度:  $\sim 99\%$  (6 GeV)
- ビームプロファイル
  - 空間分布  $\sim 10\text{cm}$ 程度
  - 傾き  $\sim \text{mrad}$ 程度 (rms)
  - エネルギー範囲
  - 1  $\sim$  20 GeVで調整可
  - 運動量分散:  $\sim 10\%$



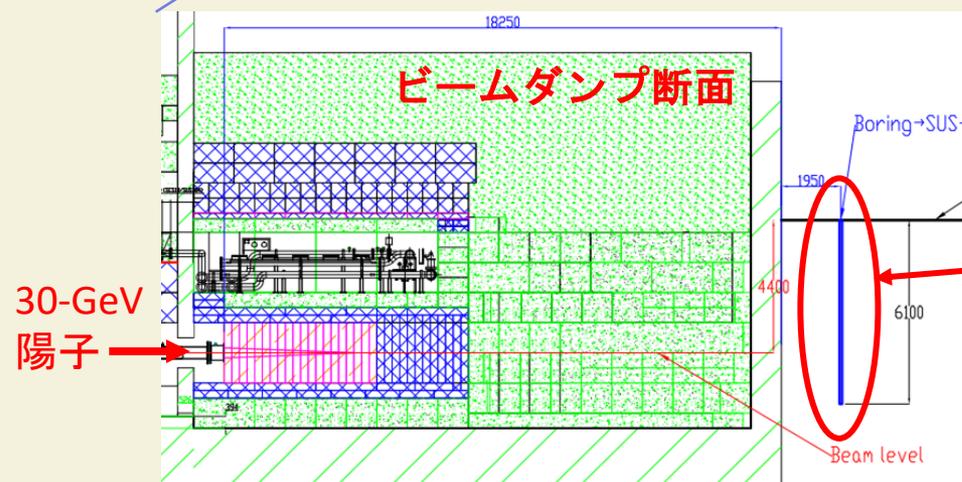
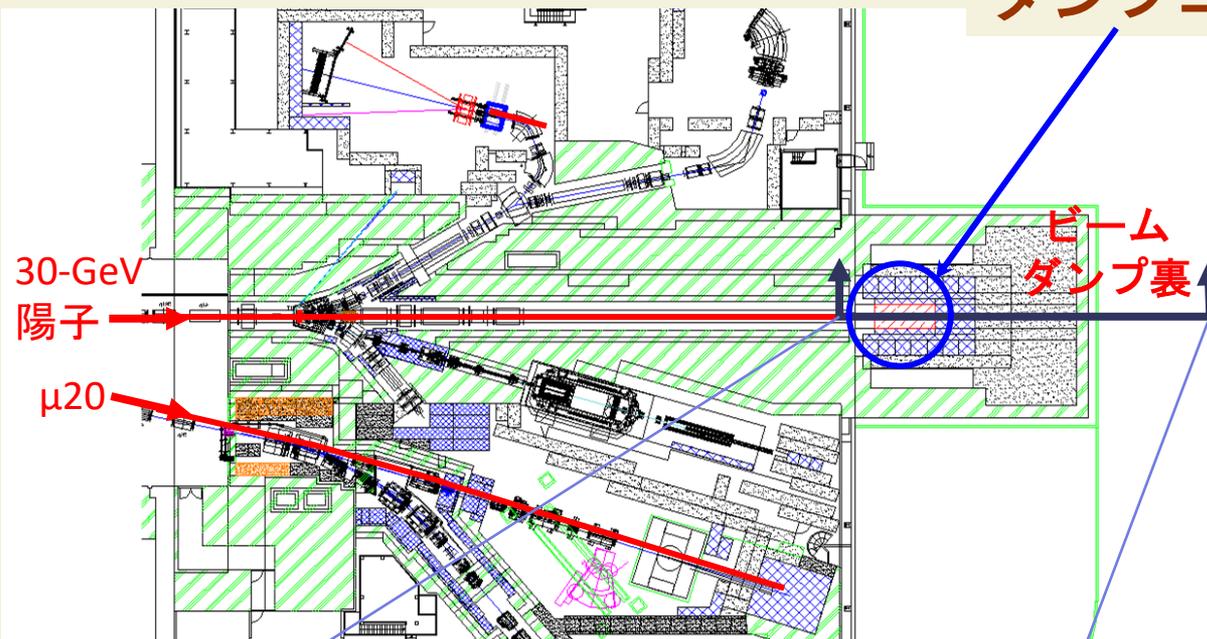
ミュオン散乱を特徴づける物質固有の量: 放射長( $X_0$ )の分布を復元



# J-PARCハドロン実験施設：もうひとつの高エネルギーミュオン源

**ダンプコア** (無酸素銅、 $2\text{m}\times 2\text{m}\times 5\text{m}$ )

※下半分の写真 (建設時)



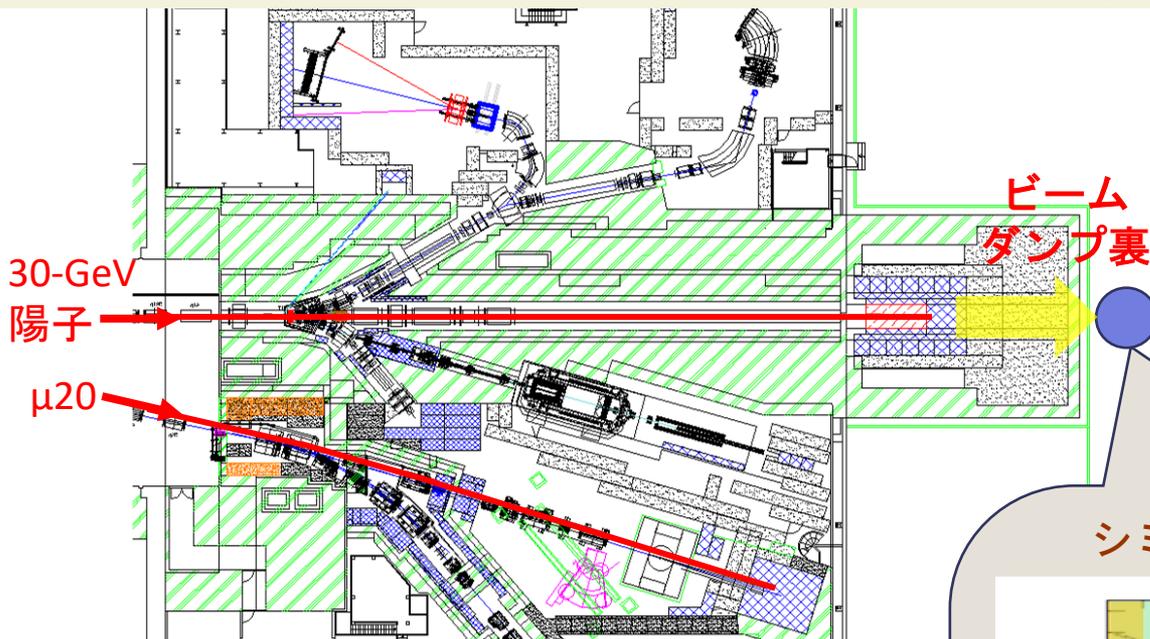
埋設SUSパイプの  
トップフランジ  
@地上レベル

ダンプ裏地下6.1mまで埋設したパイプを利用し良質の白色ミュオン場(※)を観測  
※0~10 GeV超に及ぶ広帯域ミュオン場

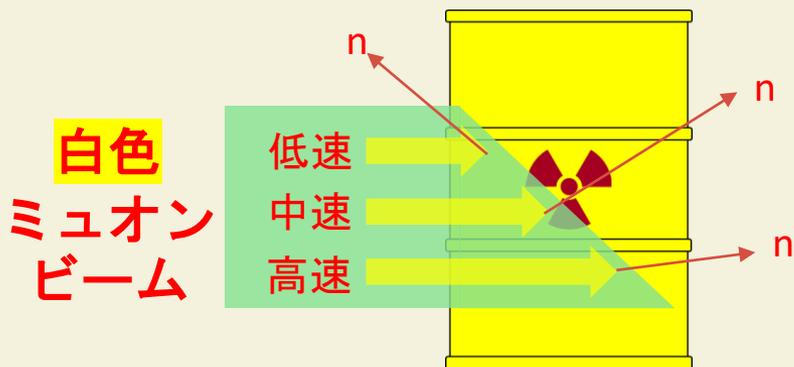
# J-PARCハドロン実験施設：もうひとつの高エネルギーミュオン源

## ミュオン実測値

- ピーク強度:  $\sim 2.6 \times 10^3 / \text{cm}^2 / \text{s}$ 
  - 宇宙線フラックスの**26万倍**
  - 現在すでにほぼ倍の強度に
- 空間分布:  $\sim 1\text{m}$ (FWHM)
- 純度:  $> 99\%$ 
  - 中性子混入率1%以下

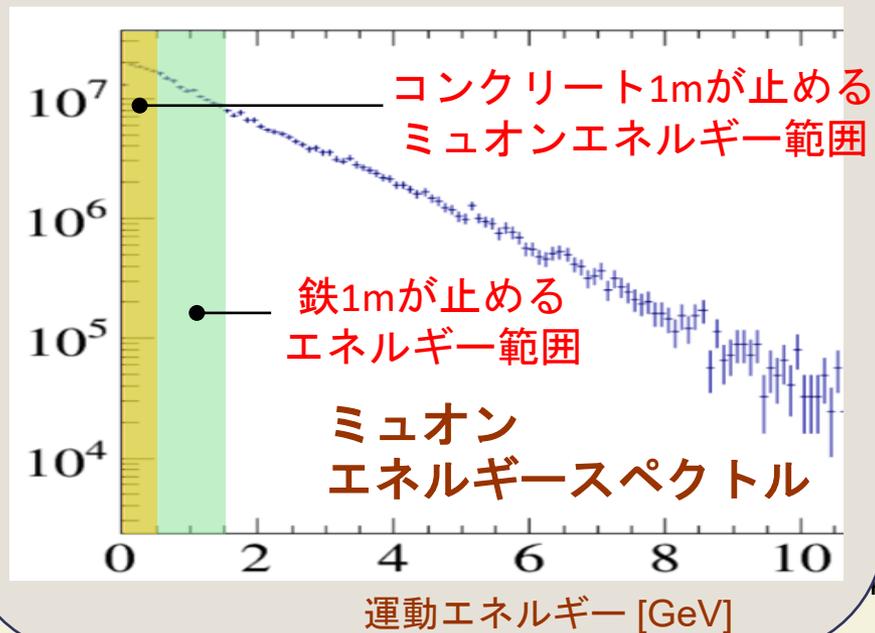


※ミュオン捕獲法による肉厚構造体内の元素分析として有望



物体表面から芯部まで侵入して原子核に捕獲

## シミュレーション



# 人工小型ミュオン源開発 (K-pro)

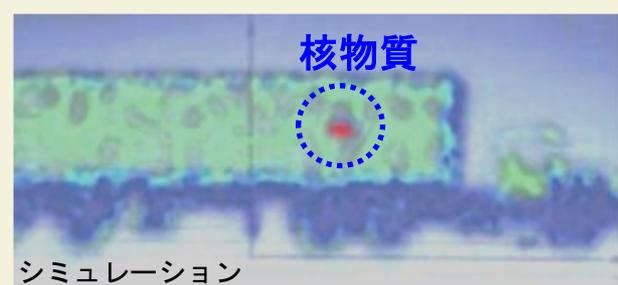
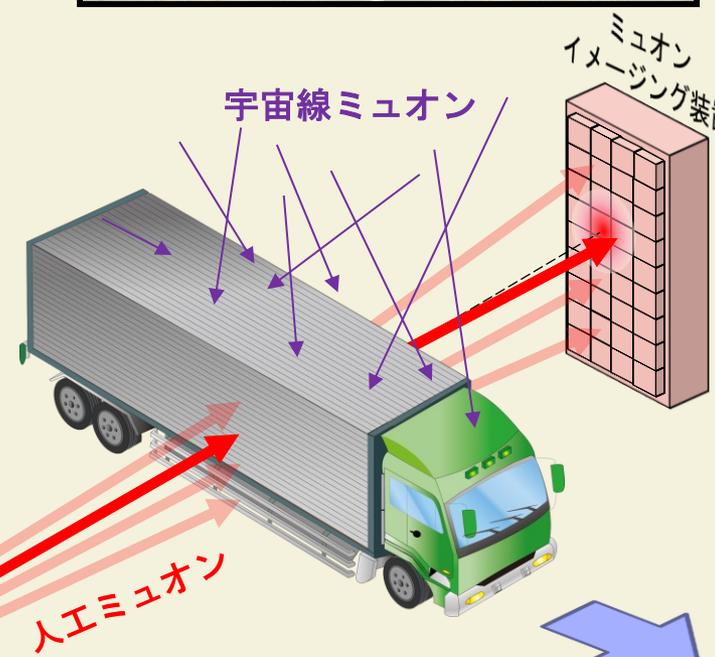
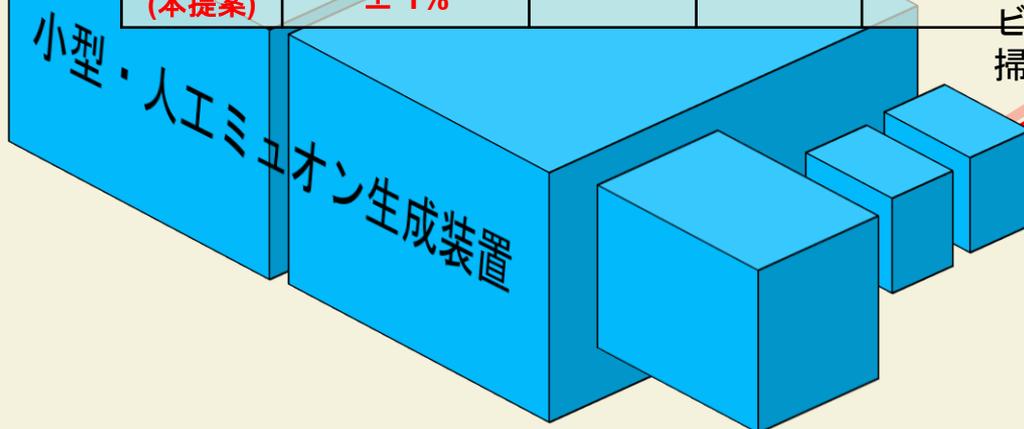


研究開発構想のアウトプット目標

「インフラ構造物やコンテナ等のイメージング技術の革新的発展に向けた、人工的にミュオンを生成する可搬システムの開発」を達成

ミュオンイメージングによるドライブスルーコンテナ検査

技術	エネルギー	粒子数 (個/cm <sup>2</sup> /s)	測定分解能	コンテナ検査時間
宇宙線ミュオン	0~1,000 GeV 連続	10 <sup>-2</sup>	5-10 cm	10分
人工ミュオン (本提案)	2 GeV ± 1%	10 <sup>4</sup>	1 cm	数十秒



# 人材育成

多くの学生や若手が参入し始めている  
研究機関や大学のポスト(特に常勤)が不足



MUSE成果報告会  
中間子科学の将来検討会  
2024年7月@ラフォーレ那須

MUSE成果報告会  
ミュオンスクール  
中間子科学会研究会  
2025年9月@ラフォーレ那須



2026年度発足内定 学術変革領域研究(A)「負ミュオン科学の新地平:物質・宇宙・人類をつなぐ知の融合」  
領域代表 下村浩一郎(高エネルギー研) などで研究資金獲得

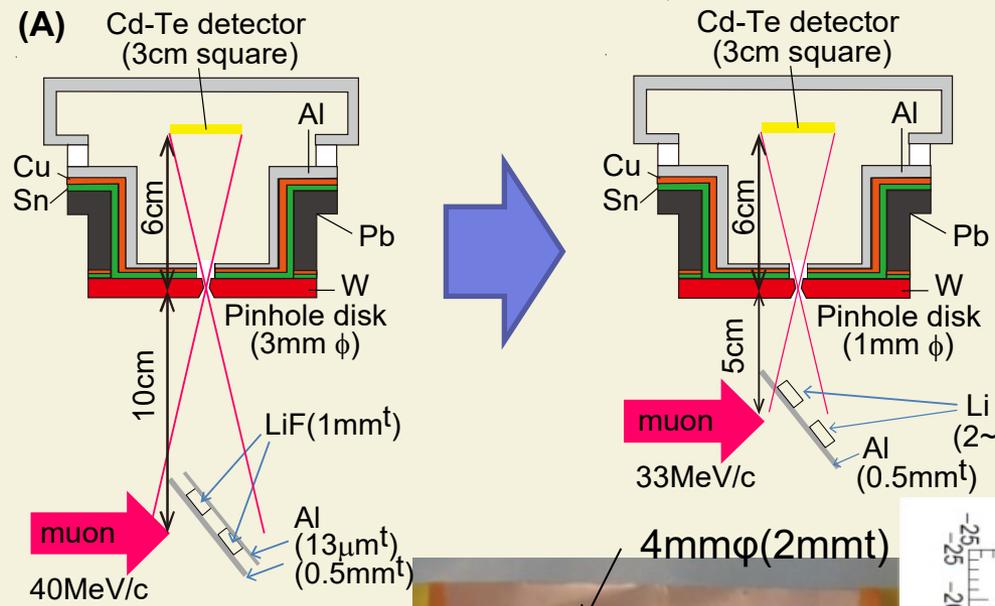
# まとめ

- ミュオンを用いる非接触・非破壊分析は他の方法に無い特徴を持ち，近年急速に進展している。
- デブリ分析やバックエンドへの応用が考えられる。
- 分析対象の拡大と分析手法の洗練，さらにミュオン源の小型化・可搬化へと向かう。

予備

# ミュオンX線による2次元元素mapping

## Li金属のイメージングに成功

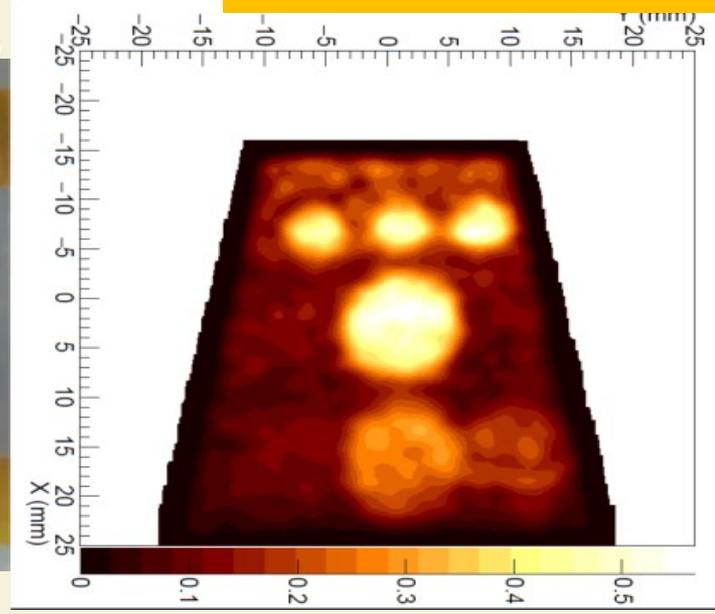


分解能 : 5mm  
→ 2mm

Coded Mask

立体角 : 50%

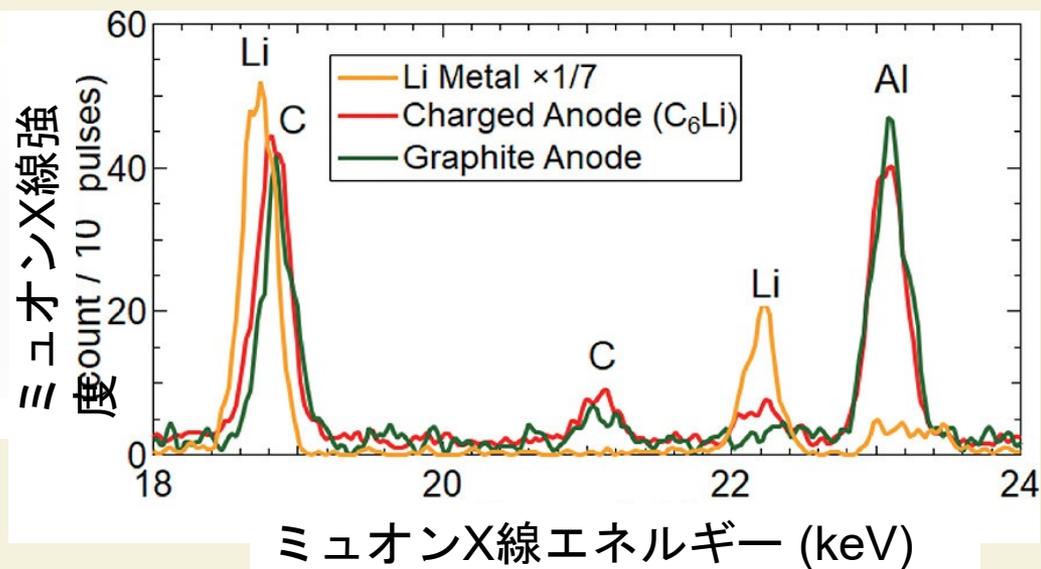
8mmφ  
(2mmt)



# ミュオンX線によるリチウム分析

## リチウムイオン電池

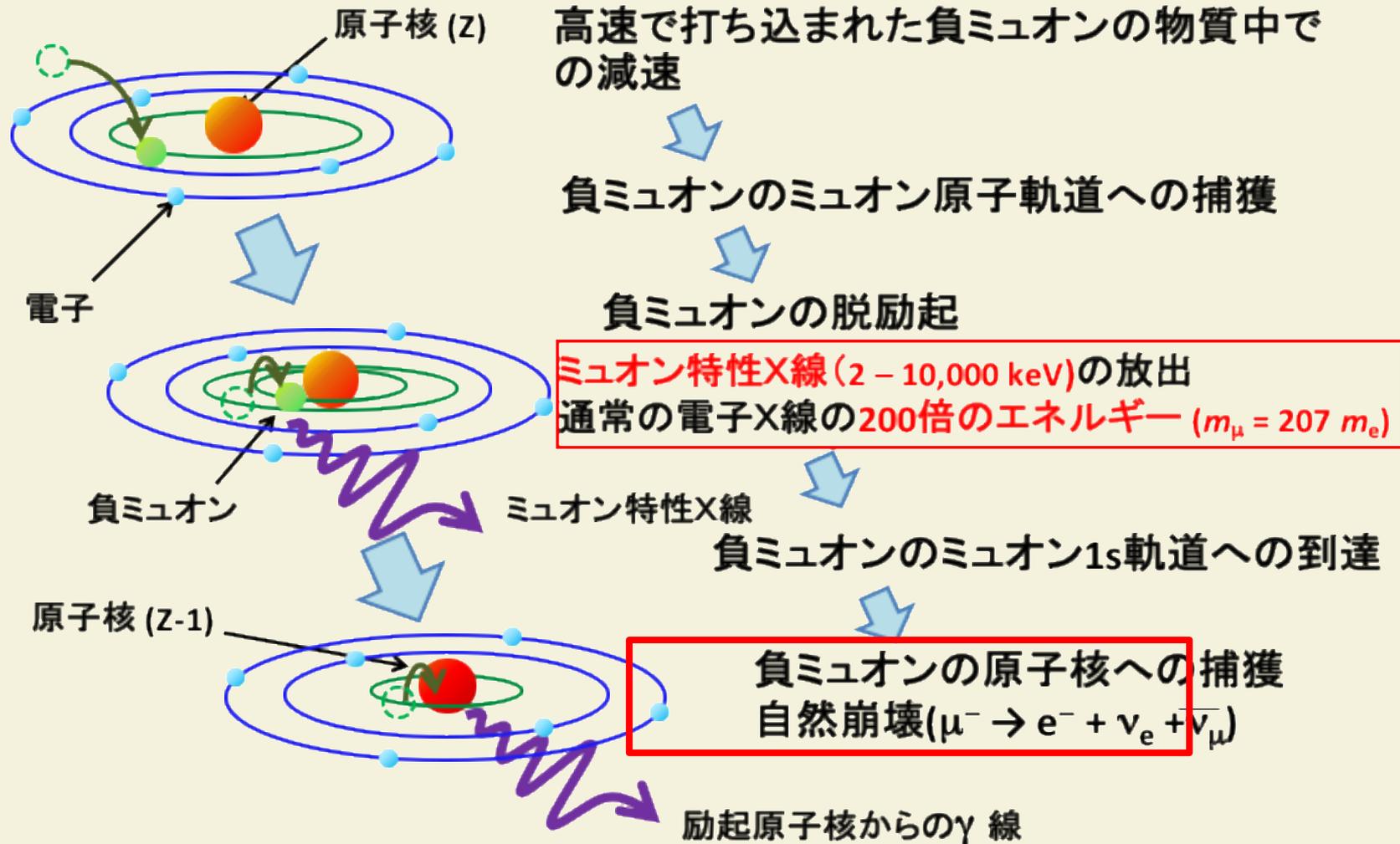
豊田中央研究所の研究者からの提案  
開封せずにリチウム量の非破壊分析



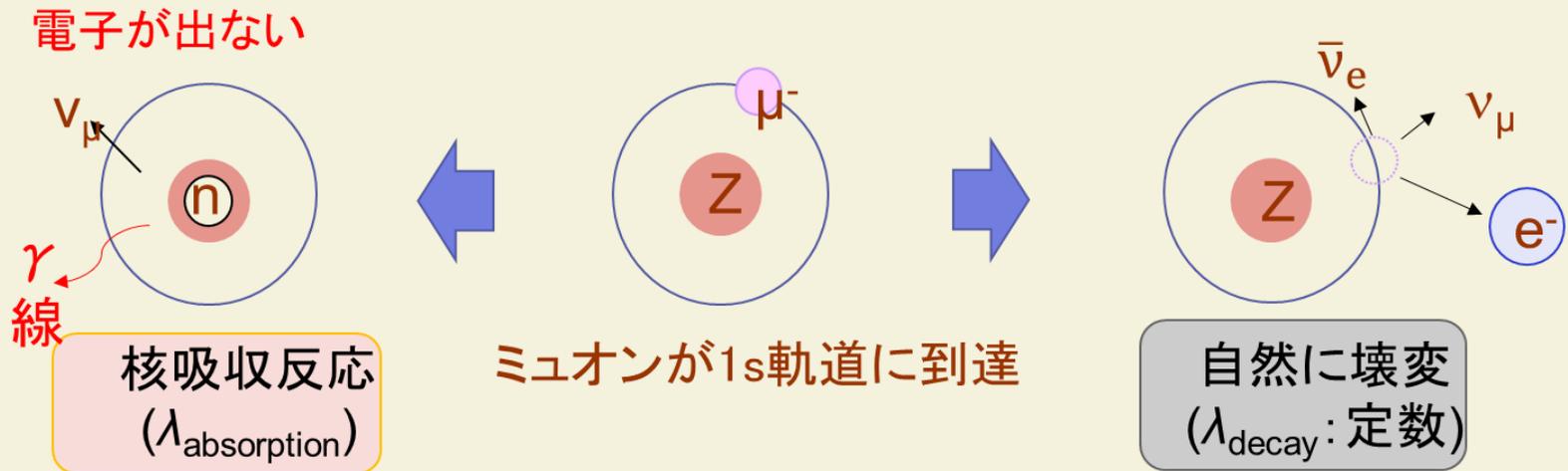
*Anal. Chem.* 2020, 92, 12, 8194-8200 より

# 寿命法による元素分析

## ミュオン原子の形成、形成後の過程



# ミュオンX線を出したあとのミュオン原子中の1s軌道の負ミュオンの運命



ミュオン自然壊変と核吸収反応は競合し、Zが大きいほど核吸収が速く  
ミュオンの消滅が、自然寿命の2.2  $\mu\text{s}$ より短くなる

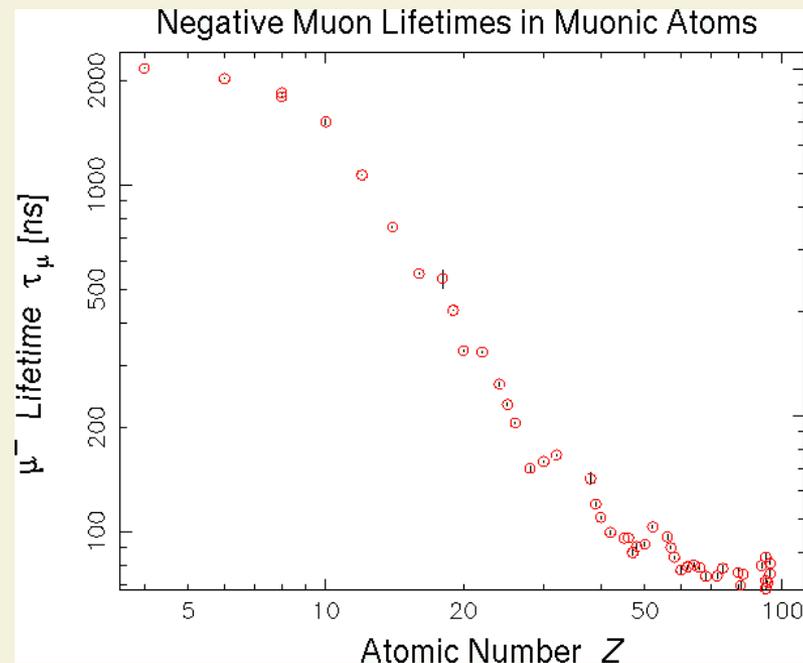
$$\tau = \frac{1}{\lambda_{\text{decay}} + \lambda_{\text{absorption}}} < \frac{1}{\lambda_{\text{decay}}} (= 2.2 \mu\text{s})$$

$\tau$ : 原子中でのミュオンの寿命  $\lambda_{\text{decay}}$ : 速度  $\lambda_{\text{absorption}}$ : 核吸収速度

重い原子ほどミュオンが核に吸収される確率が高くなる  
→ 原子番号が大きい原子と小さい原子を寿命の差から分別可能

## ミュオン原子中の負ミュオンの寿命

元素	寿命 (ns)
$\mu^+$	2197.03 (4)
$^1\text{H}$	2194.90 (7)
$^2\text{H}$	2194.53 (11)
$^3\text{He}$	2186.70 (10)
$^4\text{He}$	2195.31 (5)
$^6\text{Li}$	2175.3 (4)
$^7\text{Li}$	2186.8 (4)
$^9\text{Be}$	2168 (3)
$^{10}\text{B}$	2072 (3)
$^{11}\text{B}$	2089 (3)
$^{12}\text{C}$	2028 (2)
$^{13}\text{C}$	2037 (8)
$^{14}\text{N}$	1919 (15)
$^{16}\text{O}$	1796 (3)
$^{18}\text{O}$	1844 (5)
$^{19}\text{F}$	1463 (5)
$^{27}\text{Al}$	864 (2)
$^{28}\text{Si}$	758 (2)
Ca	334 (2)
Zr	110.4 (10)
Pb	74.8 (4)
Bi	73.4 (4)
Th	77.3 (3)
U	77.0 (4)

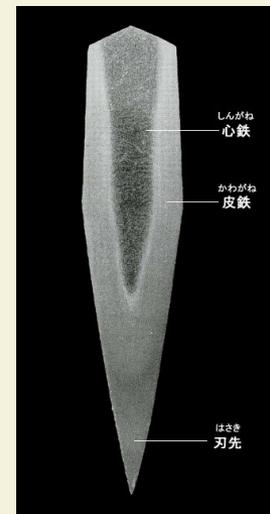
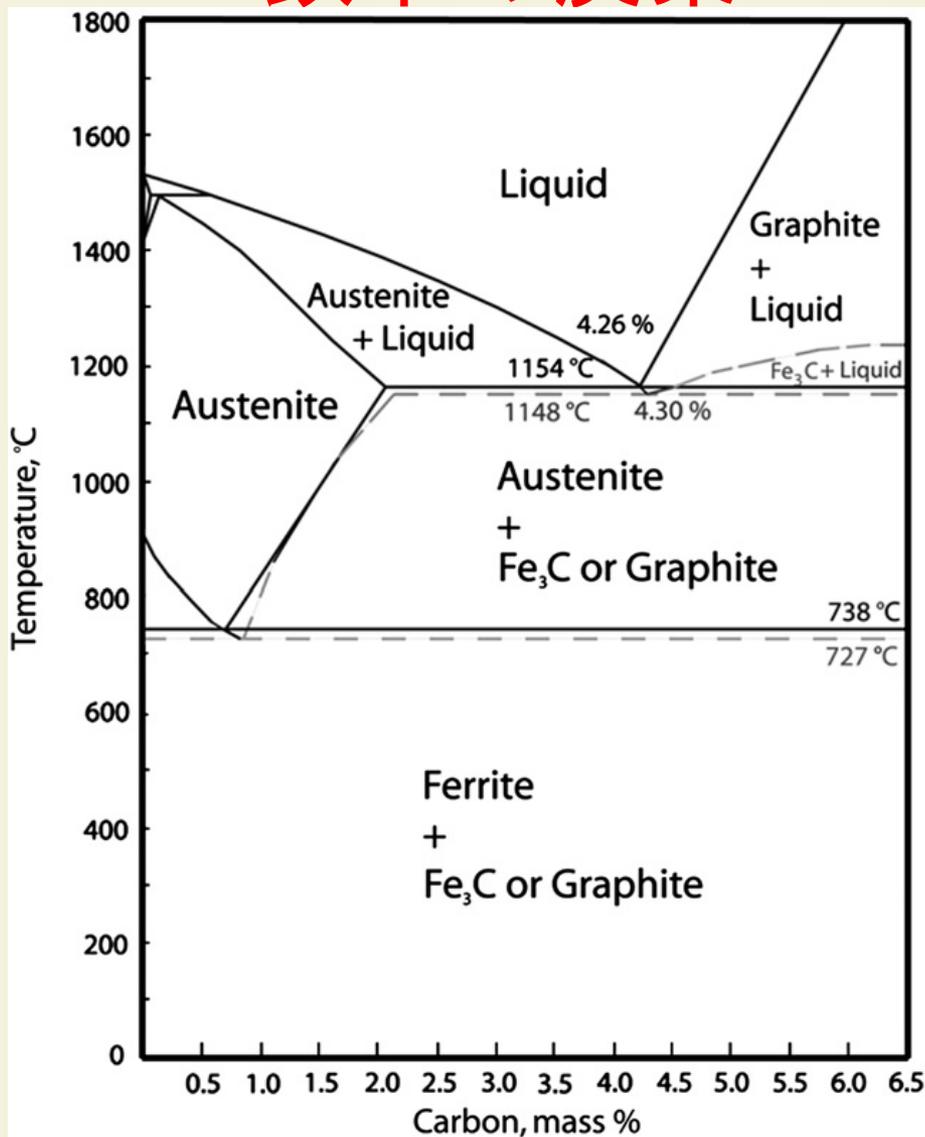


真空中でのミュオンの寿命 2.197  $\mu\text{s}$

炭素 2.03  $\mu\text{s}$

鉄 0.206  $\mu\text{s}$

# 鉄中の炭素



日本刀の断面  
<https://www.kyohaku.go.jp/jp/learn/home/dictio/kinkou/82nihon/>

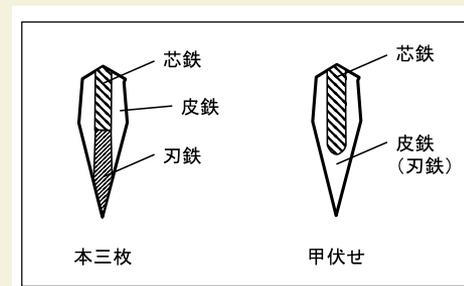


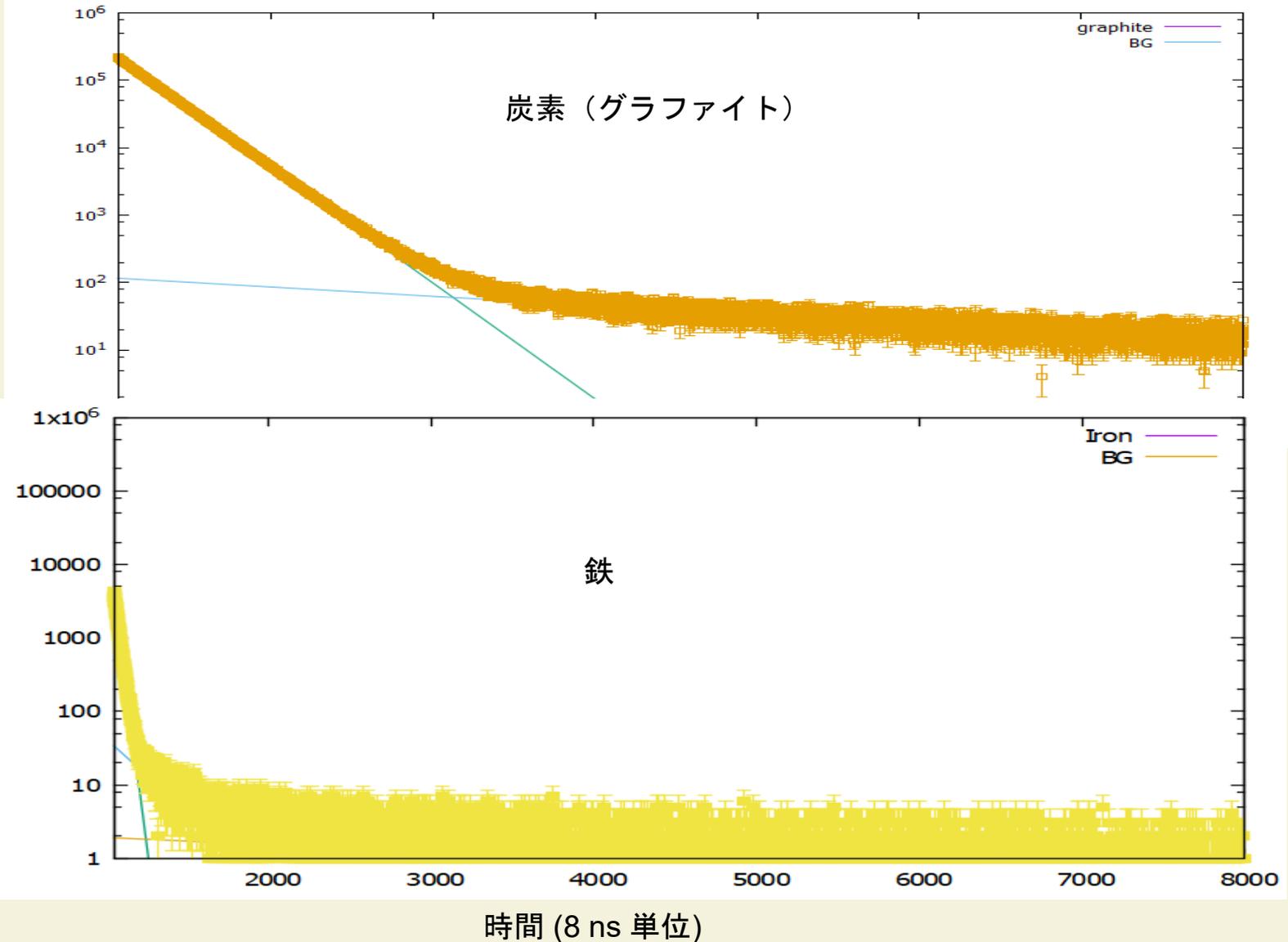
図1 日本刀の造り込み<sup>\*)</sup>の例  
 外側に硬い皮鉄、内側に軟らかい芯鉄を組み合わせる。刃先の部分は、本三枚は刃鉄という素材を入れ、甲伏せは皮鉄のまま、焼き入れをしてさらに硬くする。

齋藤努 化学と教育, 66 (2018) 376

低炭素濃度 軟い

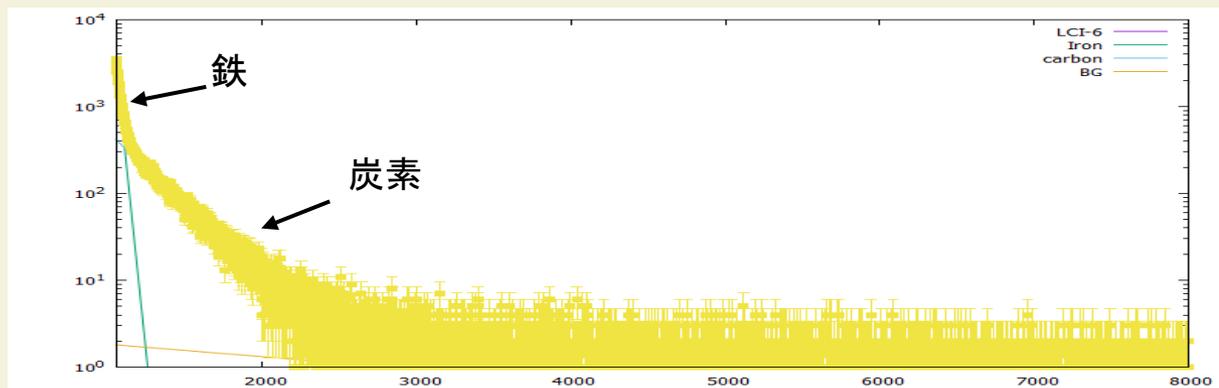
高炭素濃度 硬い

# 寿命法による元素分析

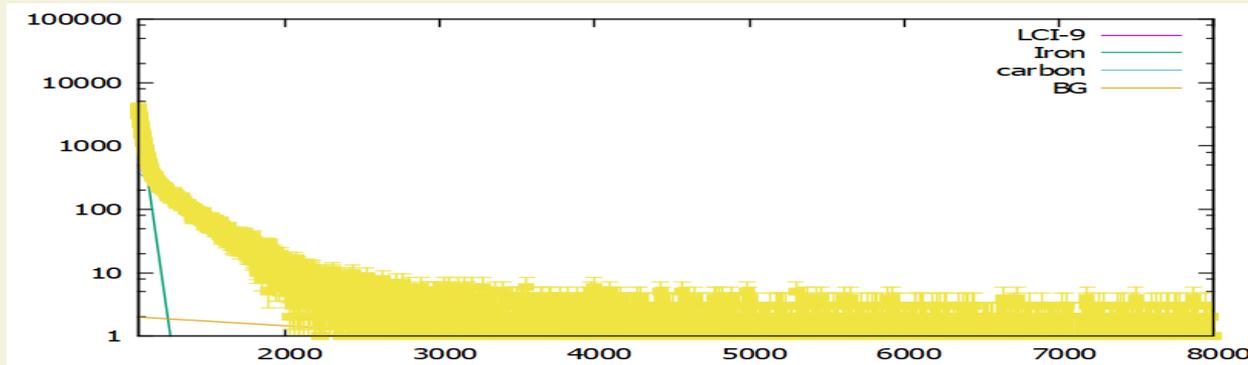


# 標準試料の測定結果(炭素濃度既知)

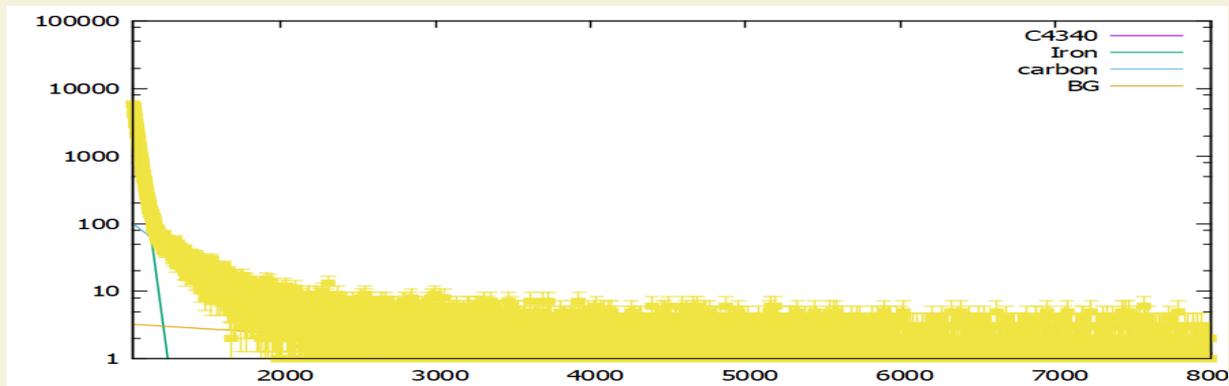
炭素 4.46%



炭素 3.22%



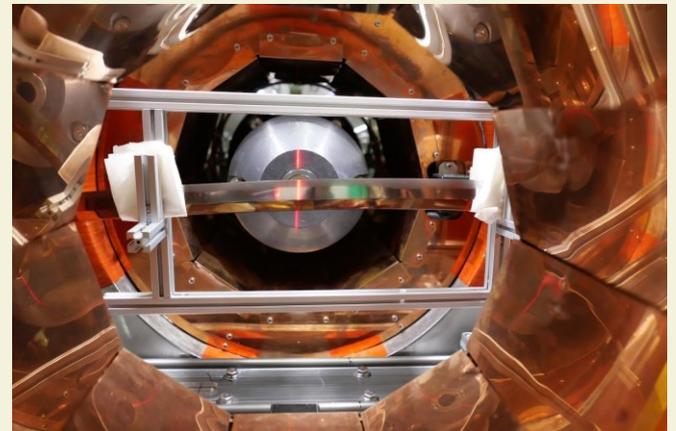
炭素 0.42%



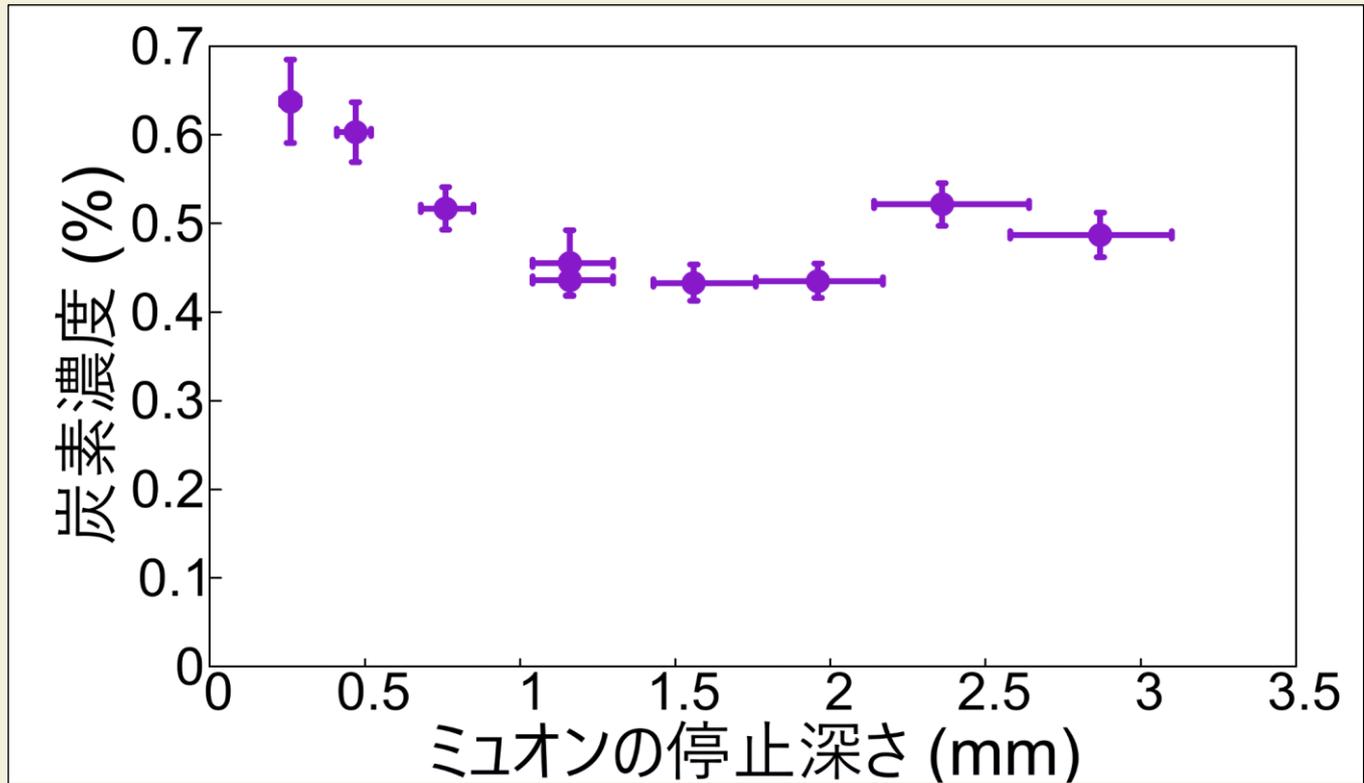
# 刀剣分析実験



脇差  
長さ 51.8 cm  
銘文 九州 肥後 同田貫 兵部



脇差 長さ 51.8 cm 銘文 九州 肥後 同田貫 兵部



ビームサイズ  
5 x 20 mm<sup>2</sup>