



# CdTe検出器を用いた負ミュオンによる 非破壊三次元イメージング法の開発

邱奕寰、武田 伸一郎<sup>A</sup>、桂川 美穂<sup>A</sup>、都丸 亮太<sup>A</sup>、藪 悟郎<sup>A</sup>、長澤 俊作<sup>A</sup>、  
南 喬博<sup>A</sup>、高橋 忠幸<sup>A</sup>、渡辺 伸<sup>B</sup>、梶野 芽都<sup>C</sup>、篠原 厚<sup>C</sup>、二宮 和彦

阪大IRS、Kavli IPMU<sup>A</sup>、JAXA<sup>B</sup>、阪大院理<sup>C</sup>

# 研究背景-ミュオンの研究

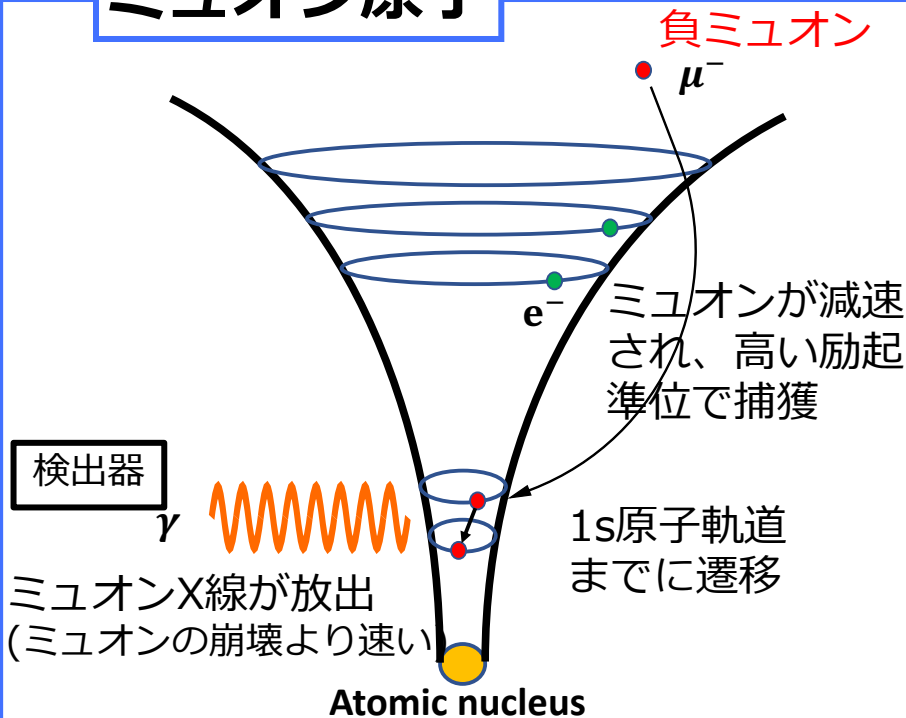
素粒子のミュオン(ミュオン, muon)は幅広い分野で活用されている。

→  $\mu$ SR : 試料に入射した $\mu^+$ のスピンの変化を観測し、物質の性質を判明

→ muon g-2実験 :  $\mu^+$ の磁気モーメントを測定し、量子電磁力学 (QED)を検証

→ 非破壊分析 :  $\mu^-$ による「ミュオン原子」の分析実験 (本発表内容)

## ミュオン原子



## ミュオン原子軌道の束縛エネルギー

$$E_n = -\frac{Z^2 m_\mu e^4}{8\epsilon_0 n^2 h^2}, \quad m_\mu : \text{ミュオン質量} \\ n : \text{主量子数}$$

e.g.  $n=4 \rightarrow n=3$  は  $\mu X (4-3)$  と書く

## ミュオン質量は電子の207倍

- ① 物質透過能力が高い  
→ 内部の元素を分析できる
- ② ミュオンX線は蛍光X線に比べ207倍のエネルギーを持つ  
→ 自己吸収が無視できる  
→ 軽元素の非破壊元素分析が可能

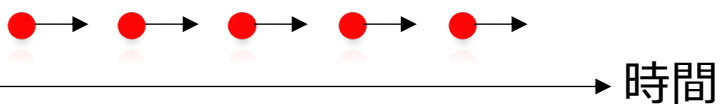
大量な負ミュオンが必要 → 加速器で人工的に生成

# 研究背景-世界のミュオン施設

## 負ミュオンビームの時間構造

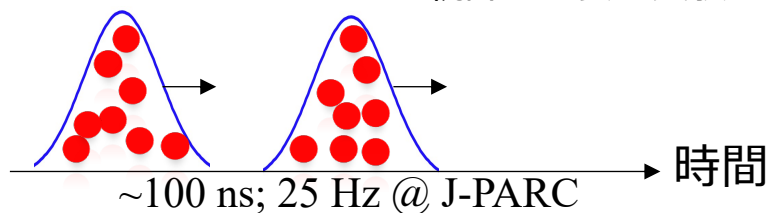
### 連続時間構造(DC)

検出器の時間分解能を引き上げ、  
各個ミュオンを識別することが可能



### パルス構造

パルス幅以上の時間での現象を注目  
高い統計が必要な実験



**現在、世界中に負ミュオンビームを利用できる施設は4つしかない。**

RAL (英国)

パルス



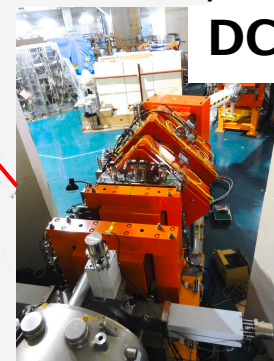
MUSE/J-PARC (日本)

パルス



MUSIC/RCNP (日本)

DC



PSI (スイス)

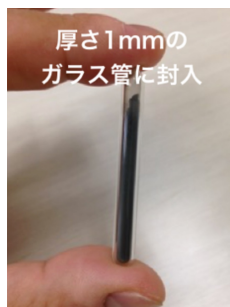
DC



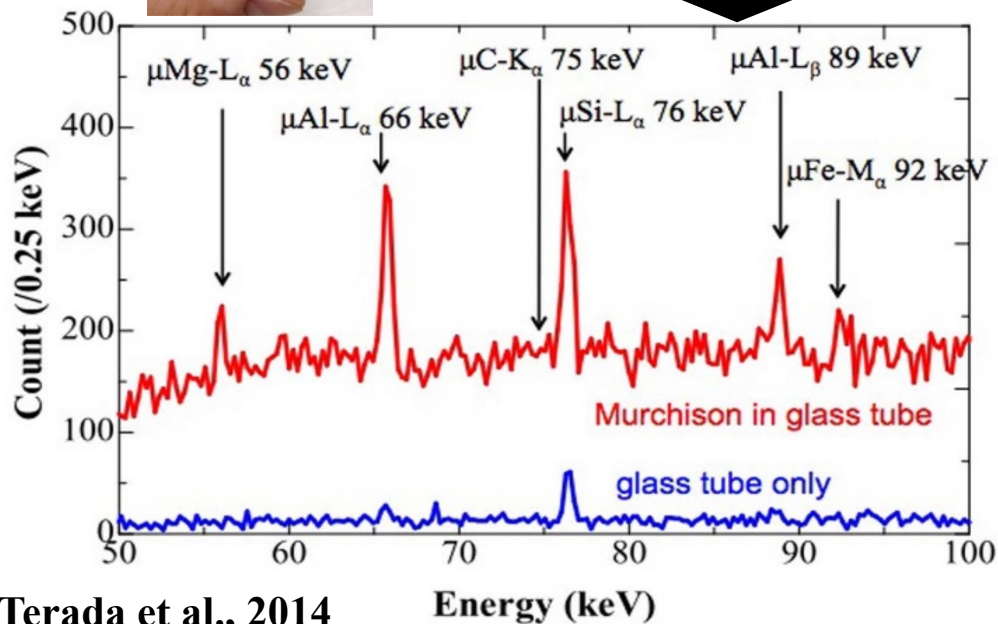
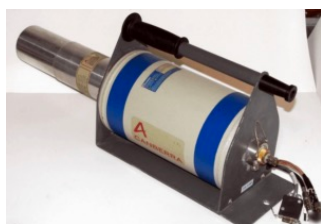
# 研究背景-ミュオンX線分析

## 様々な非破壊元素分析実験

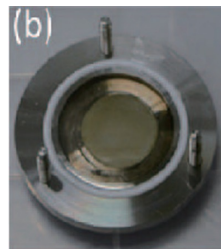
隕石



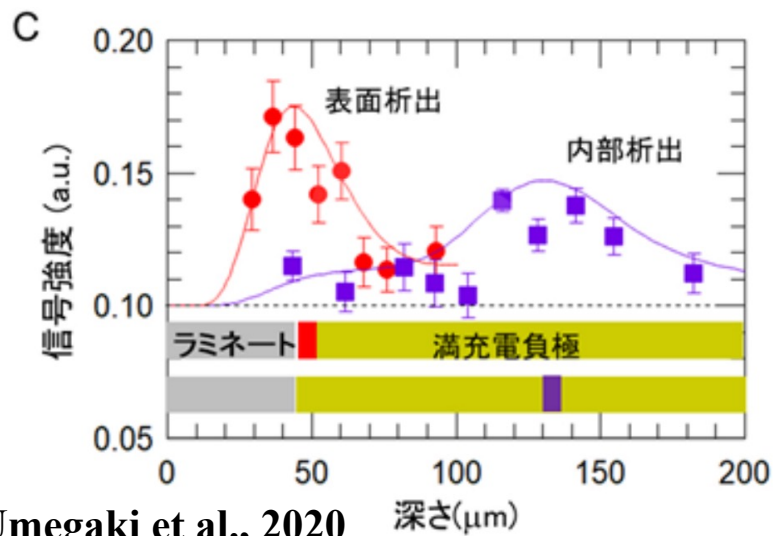
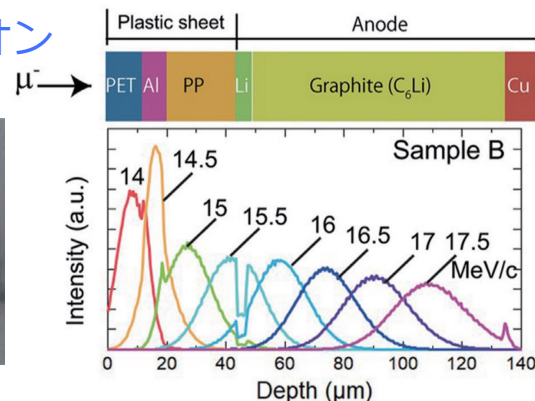
Ge検出器



リチウムイオン電池



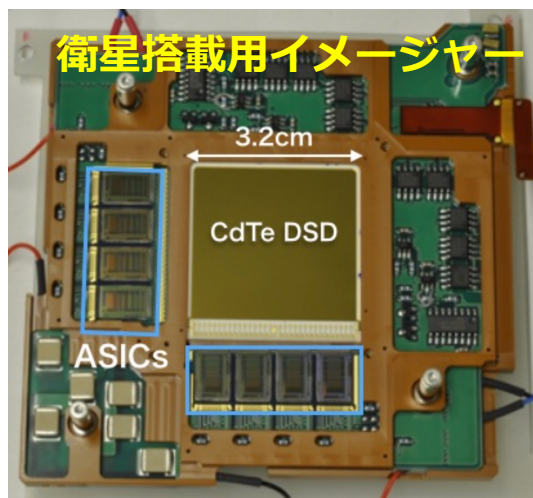
入射ミュオンの停止深度



元素分析だけではなく、元素分布のイメージング？

# 研究背景-CdTe検出器

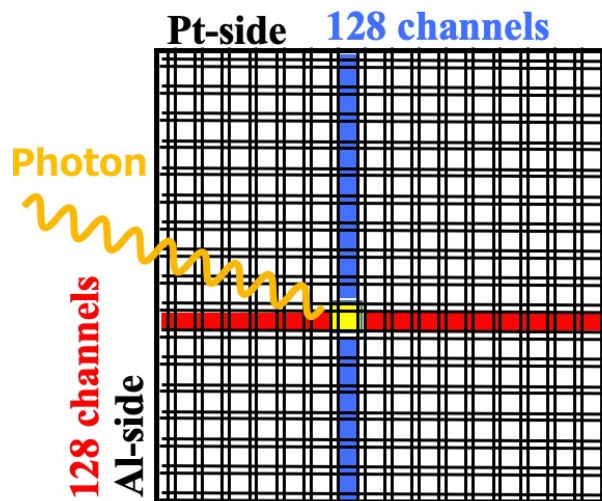
## ① CdTe検出器(CdTe-DSD)



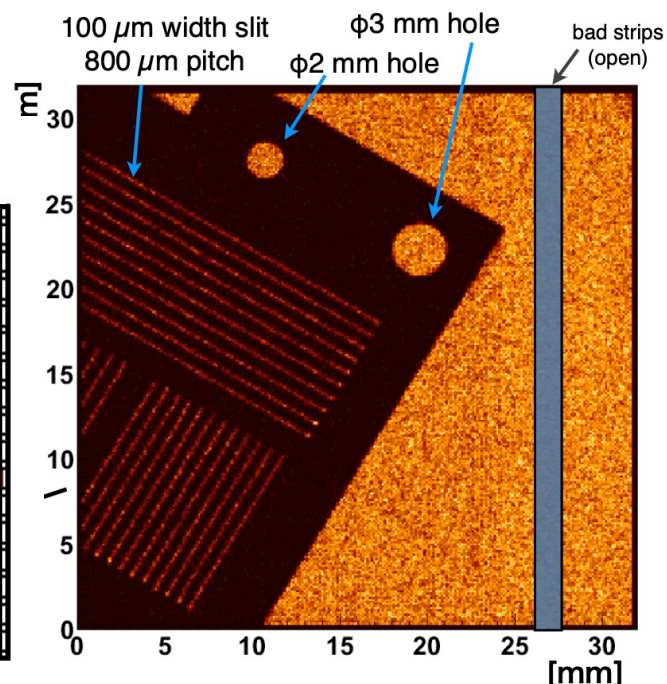
Watanabe et al., 2011  
with ACORAD

## ② 両面ストリップ構造

CdTe素子  
面積：32x32 mm<sup>2</sup>  
厚さ：0.75 mm



## ③ Shadow イメージ

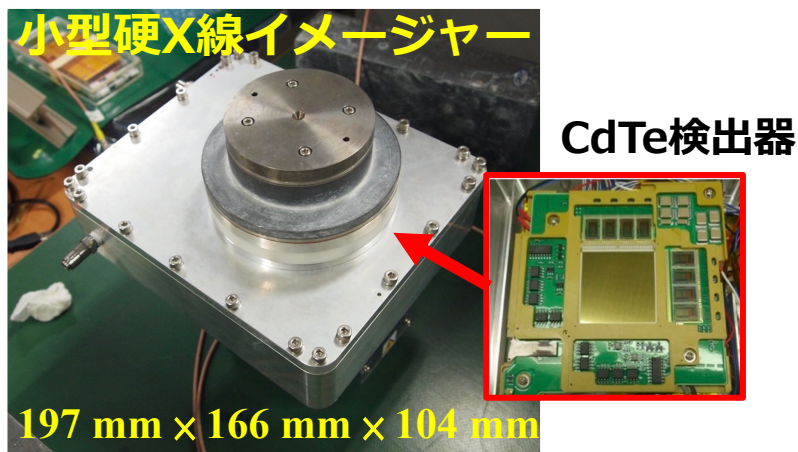


- ① 天体観測用に高分解能、大面積のCdTe-DSDイメージング検出器が開発された
- ② 両面(Pt-sideとAl-side)に128チャンネルのストリップ構造を持ち、信号がASICで読み出し、光子の反応位置でイメージを再構成
- ③ CdTe-DSDの位置分解能は数百 $\mu\text{m}$

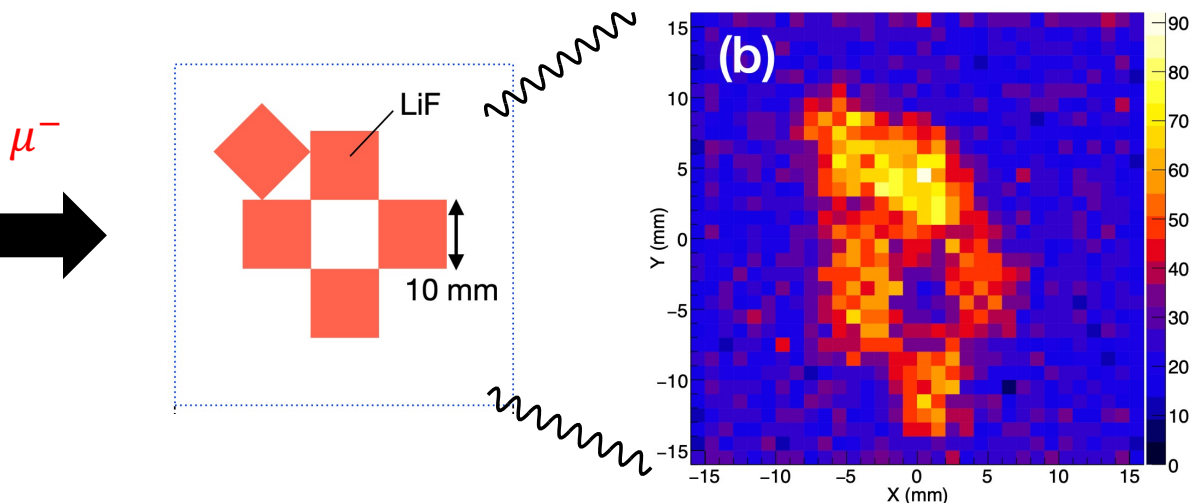
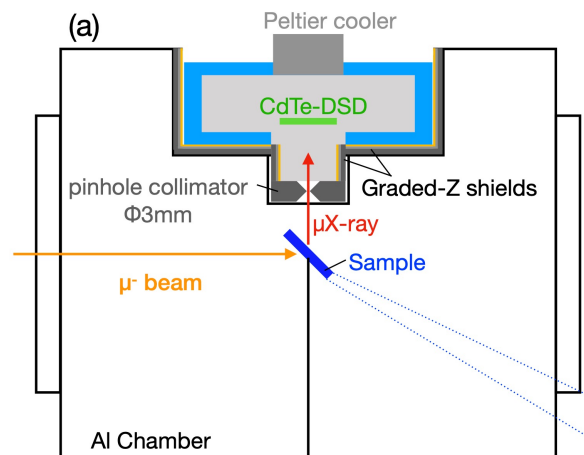
# 研究背景-イメージング実験

ピンホールコリメーターを組み合わせ、加速器実験用の専用イメージング検出器が開発された。

実験セットアップ@J-PARC



Katsurakawa et al. 2016



Li 由来のミュオンX線 (31.5 keV)

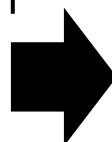
軽元素の分布をミュオンX線  
によるイメージで再現

# 研究目的と内容

## 研究目的：

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。  
(科研費 新学術領域、番号 6007、代表者 高橋 忠幸)

ミュオンX線による非破壊元素分析



**ミュオンによる非破壊分析  
3次元元素イメージング法**

天体観測用のイメージング検出器

新たな分析ツールを提供 → 様々な応用研究に繋げ → 社会への貢献

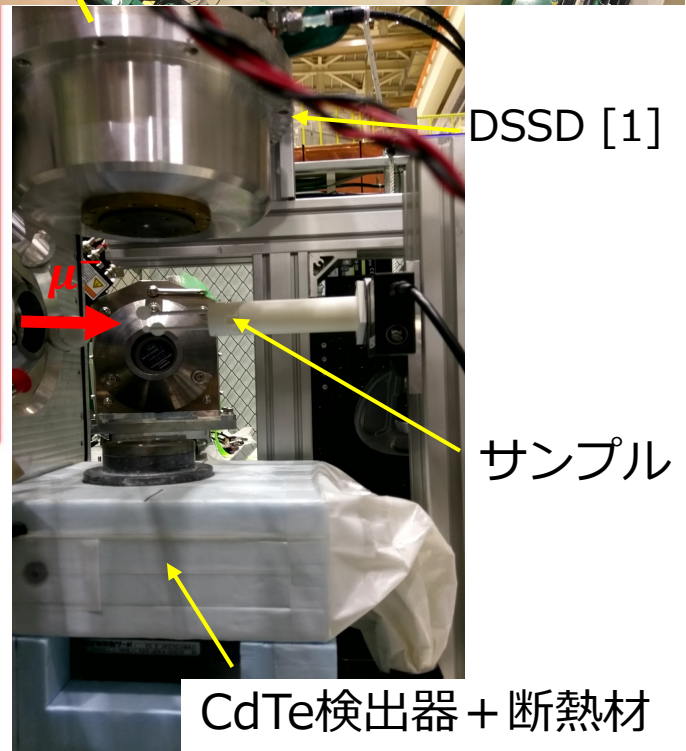
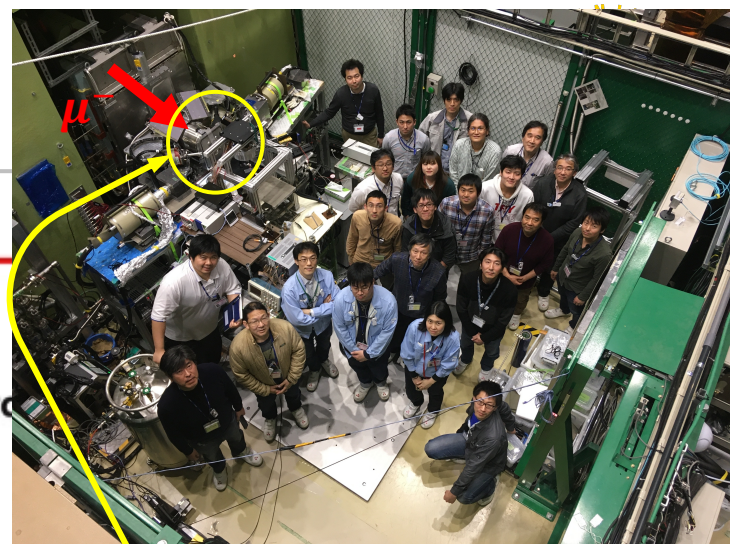
例：考古資料などに錆や表面塗膜が覆われているため、非破壊で内部の分析には、ミュオンX線による3次元元素イメージング法が唯一

## 本発表の内容：

- J-PARCにおける実験 ~セットアップ、サンプル~
- データ解析 ~エネルギースペクトル、2D/3Dイメージング~
- 実験結果の議論と検証
- 今やっていることと今後の発展

# 実験-J-PARCでの実験

Proton beam power ~ 500 kW



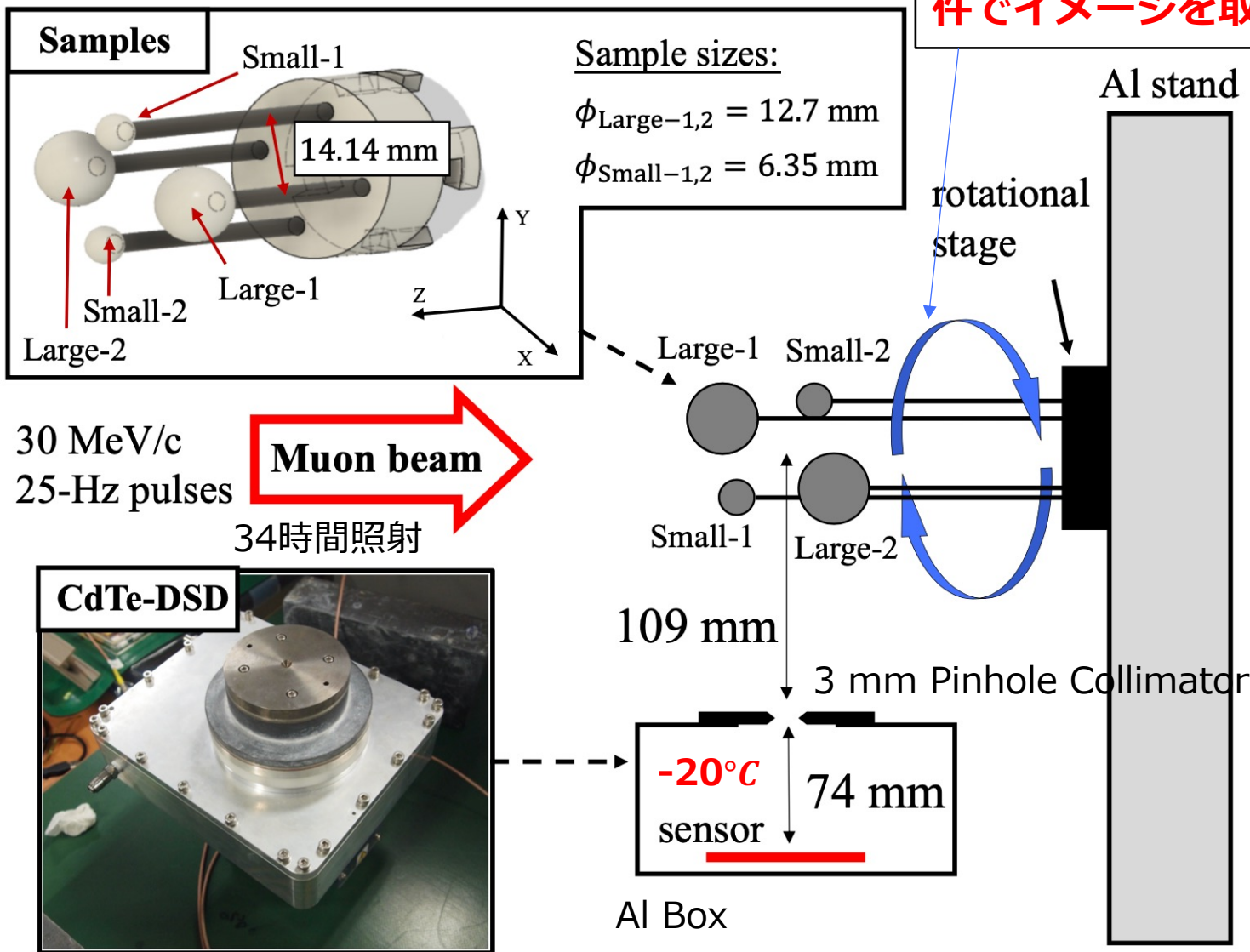
- J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)のD2ライン (世界最強のパルス状ミュオンビームが供給)
- 25 Hzで30 MeV/cのダブルパルスのミュオンビームを提供 ( $10^5 \sim 10^6$  muons/sec.)

[1] I. Chiu et al. *Int. J. Phys. Math. Sci.* 16, 6-10 (2022)



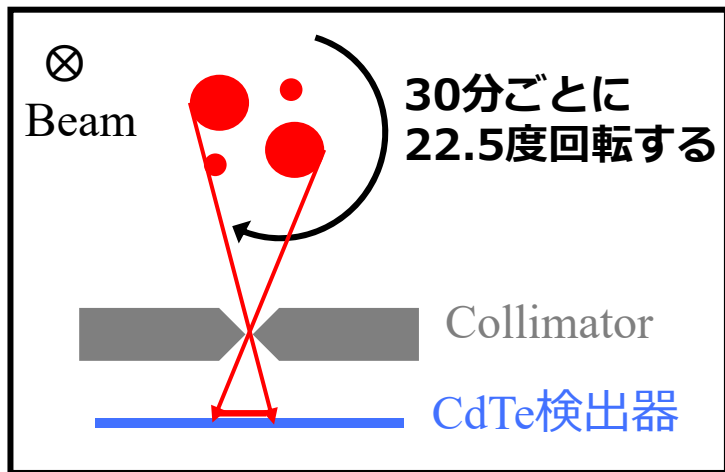
# 実験-セットアップ

サンプルを30分ごとに22.5度ずつ、16回回転し、16条件でイメージを取得した。

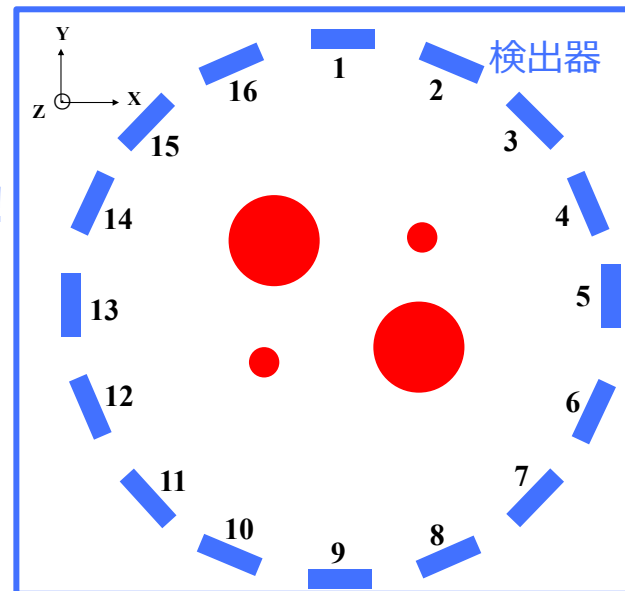


# 実験-実験方法の着想

## 何故サンプルを回転する？

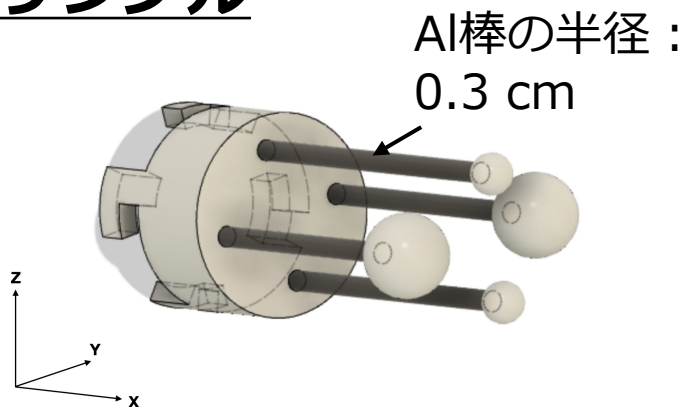


断層撮影と同じ概念！



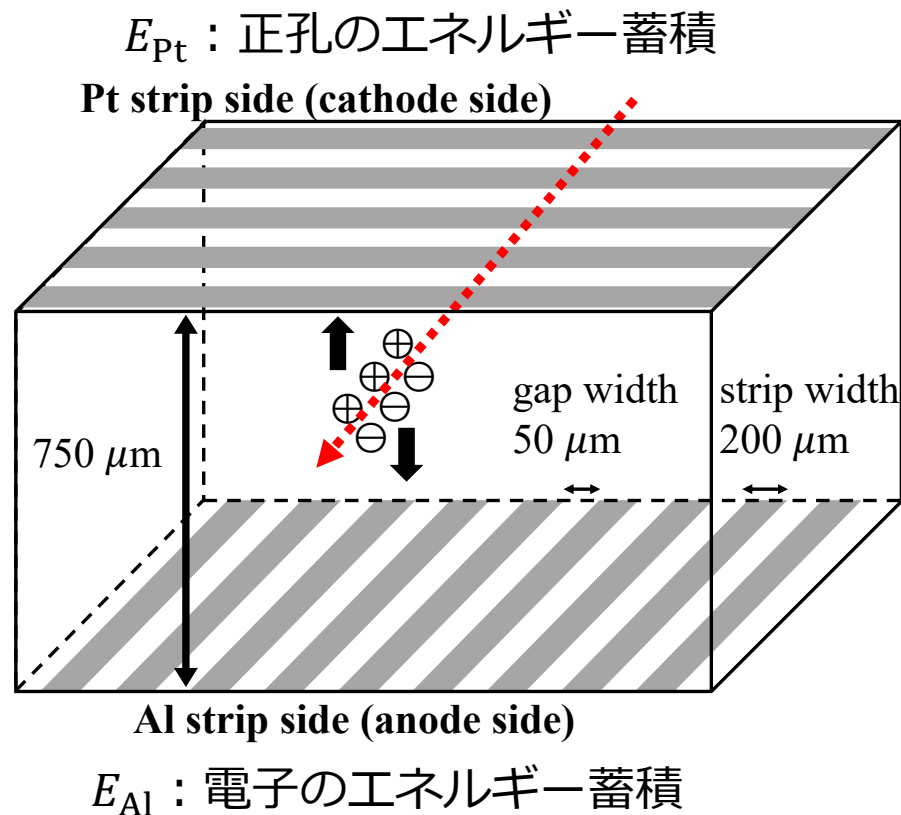
各角度の2Dイメージからコンピュータ断層撮影の技術 (CT) で3Dイメージを再現する。

## サンプル

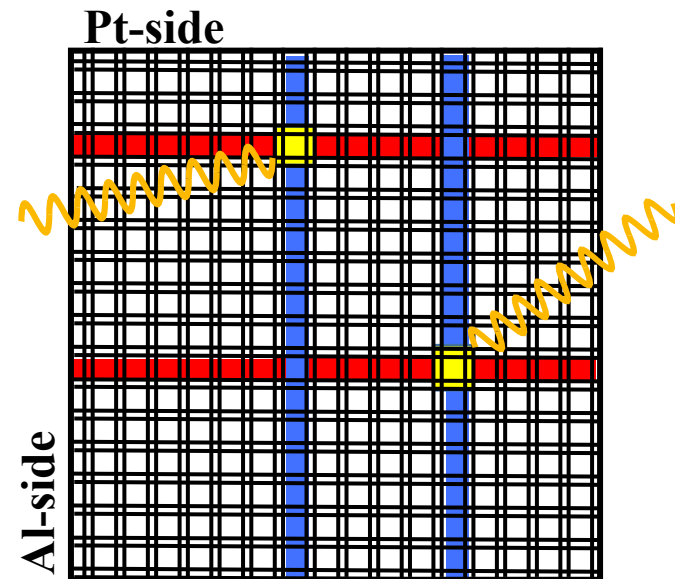


1. サンプルは樹脂ボール → PP ;  $(C_3H_6)_n$
2. ミュオンがボールに停止した深度  $\sim 1\text{mm}$
3. ボールの由来のミュオン特性X線は
  - 水素Hの信号 ( $\sim 2\text{keV}$ ) が見えない
  - 炭素Cの信号が一番重要

# 解析-イメージング原理



複数X線が入射する場合？



例：同時に二つ光子が入った  
→ 片面で2つ信号  
→ 4つの交点

光子の入射位置は、単純に直交する場所  
で決定することができない

## Matching :

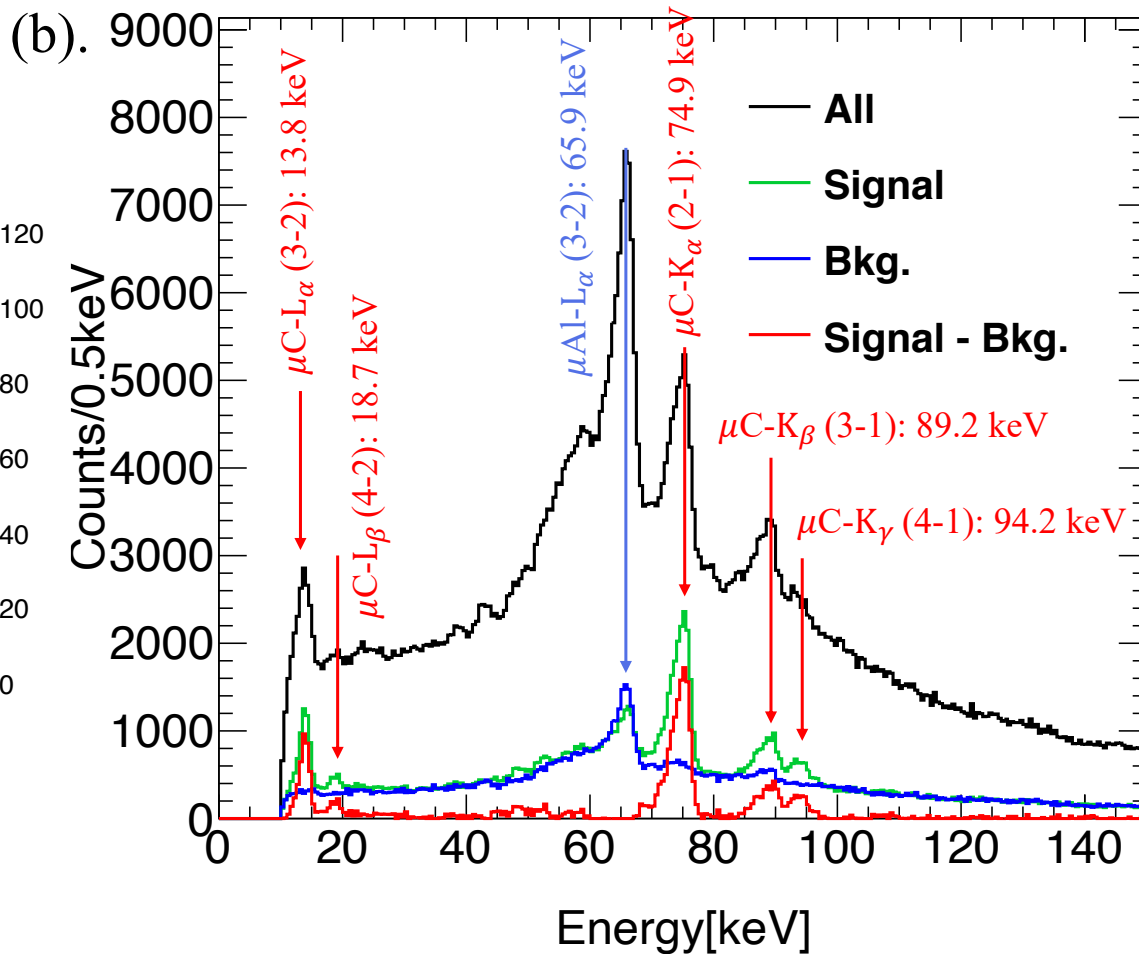
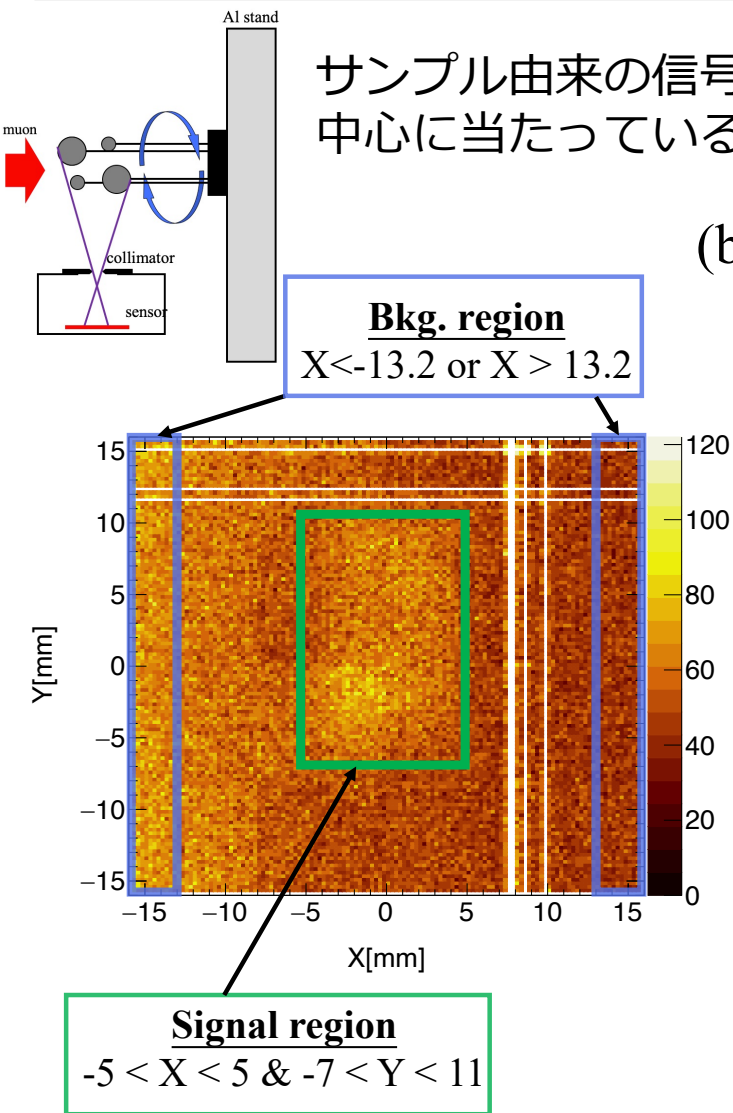
同一光子由来であれば、電子と正孔の信号強度は同じ

→ 両面の信号のエネルギー値の差 $\Delta E(Pt, Al) < 5\text{keV}$ の条件で、検出位置を決定

# 解析-エネルギースペクトル

サンプル由来の信号は  
中心に当たっている

五つのピークは炭素由来のミュオンX  
線と示す



# 解析-2Dイメージの結果

- 炭素由来のイベントを選択
- 16個測定条件により、再構成したイメージを分離
- ミュオンは1 mm深度で停止
- ピンコリメータの効果により、投影図は半円

二つ大きなポールと回転運動を確認できた

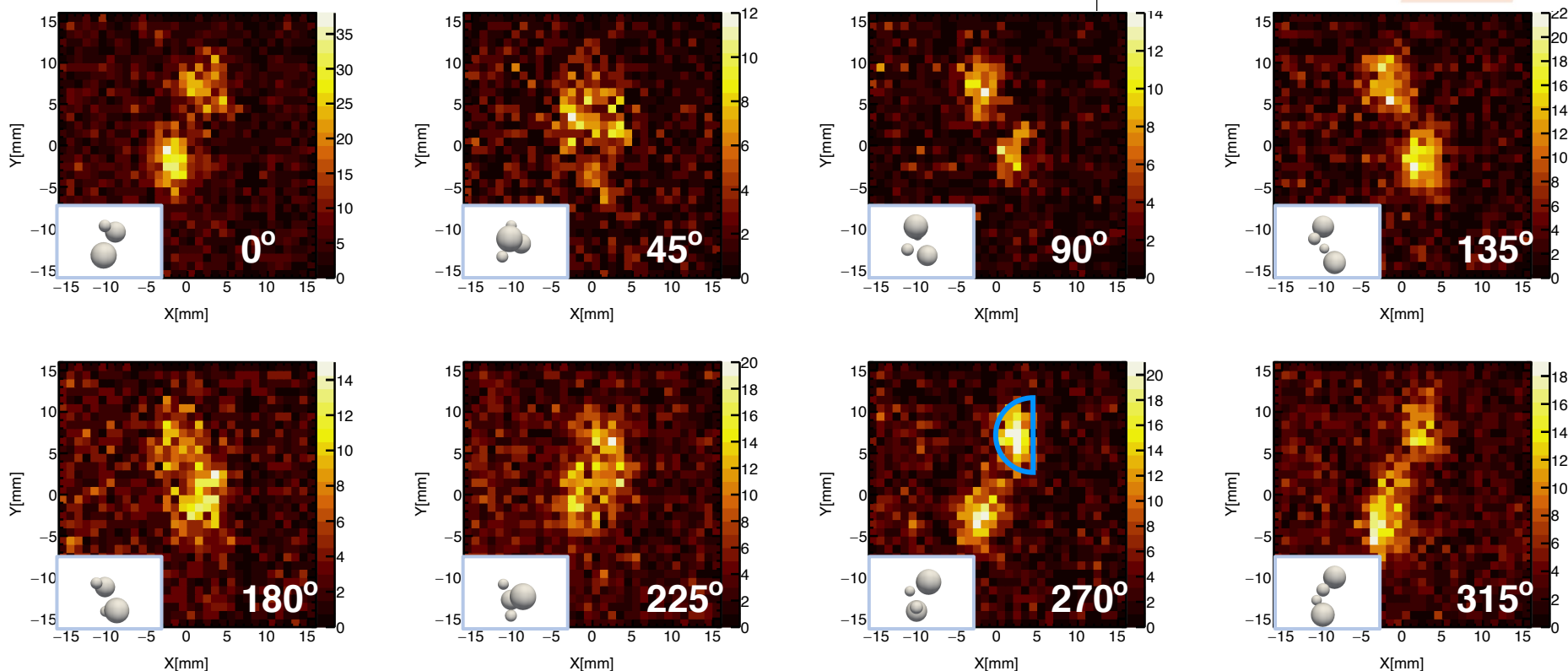
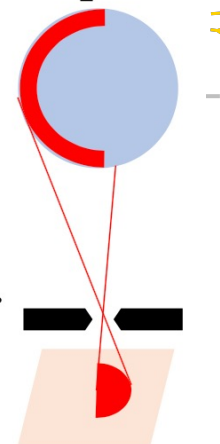
Projection



Sample-1

pinhole  
collimator

CdTe



# 解析-3Dイメージングの原理

## Maximum Likelihood Estimation Method (MLEM)

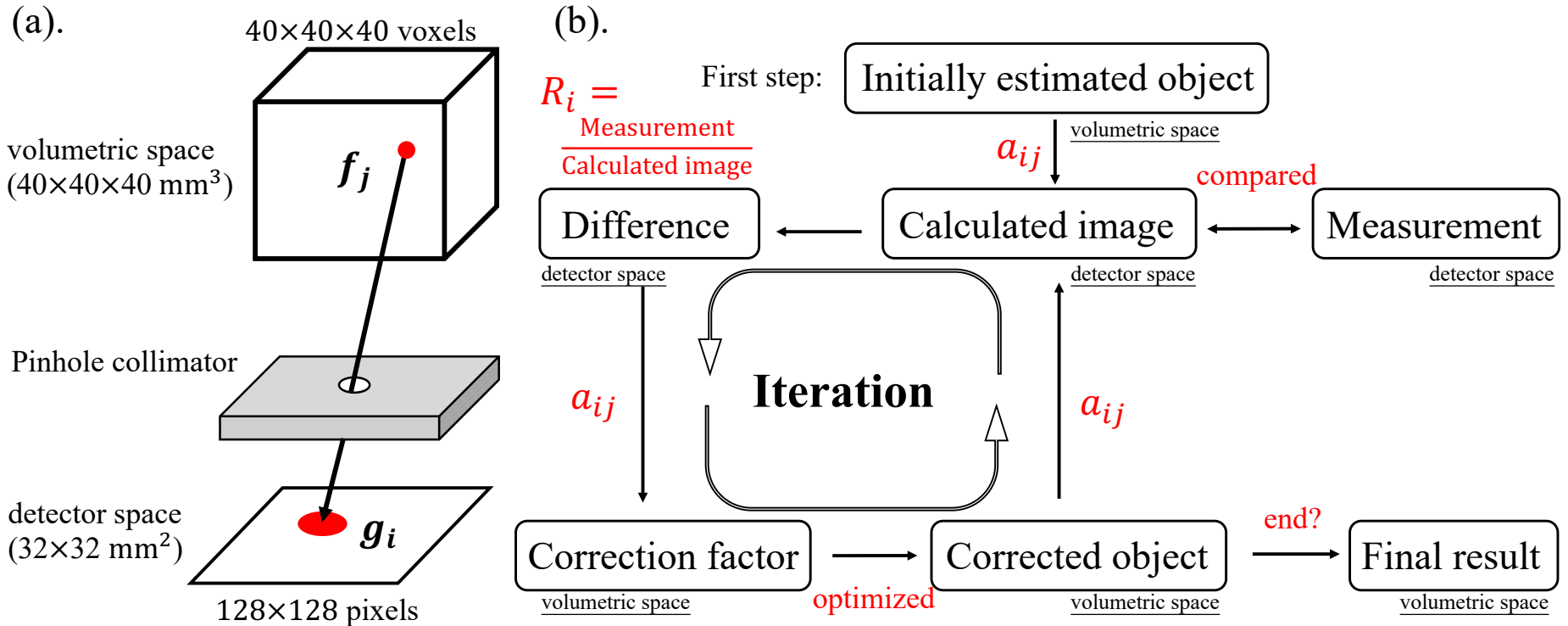
観測データにより、自己キャリブレーションを行い、パラメータを最尤推定

$$g_i = \sum_j a_{ij} \cdot f_j$$

$$f_j^{n+1} = f_j^n \cdot \frac{1}{\sum_i a_{ij}} \cdot \sum_i a_{ij} \cdot R_i$$

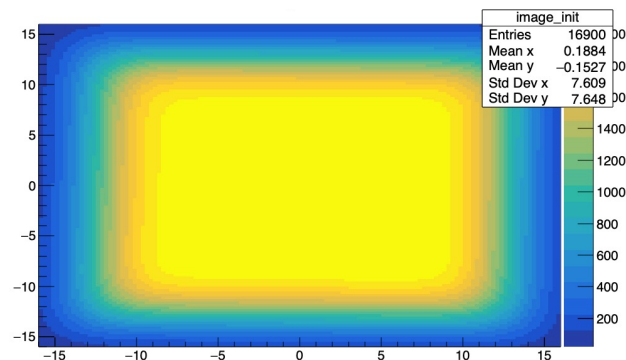
$a_{ij}$ は検出器システムのレスポンス  
(point spread function)

逐次近似法で3D画像を再構成

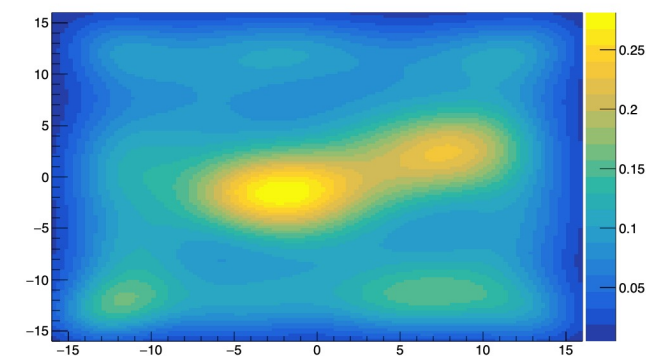


# 解析-MLEMの例

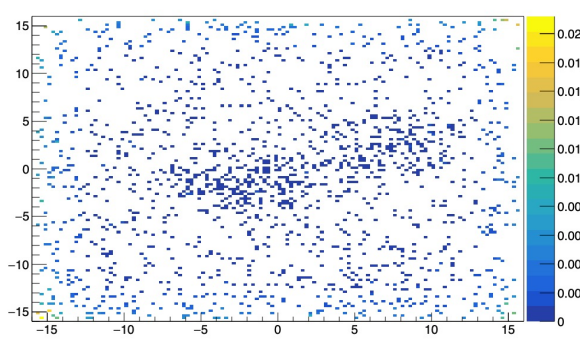
## 1.最初のguess



## 4.補正したイメージ



## 2.実データと比較 ( $R_i$ )



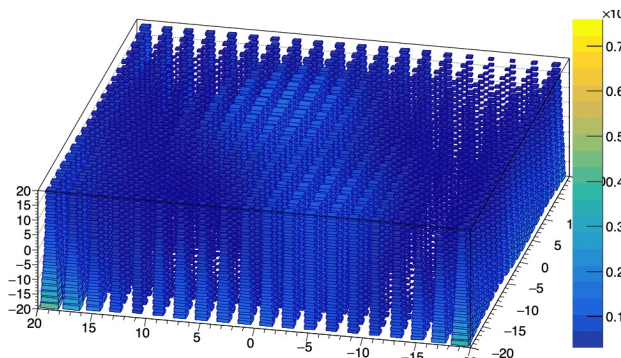
← データと比較

$a_{ij}$

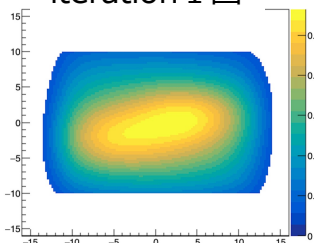
Iteration

$a_{ij}$

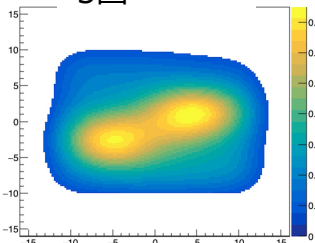
## 3.レスポンスで計算した補正関数



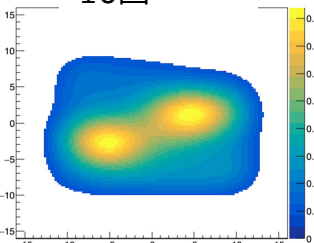
### iteration 1回



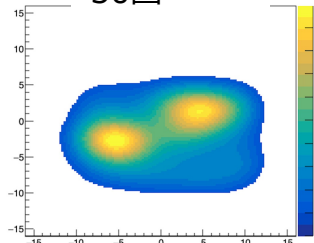
### 5回



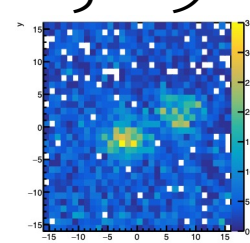
### 10回



### 30回

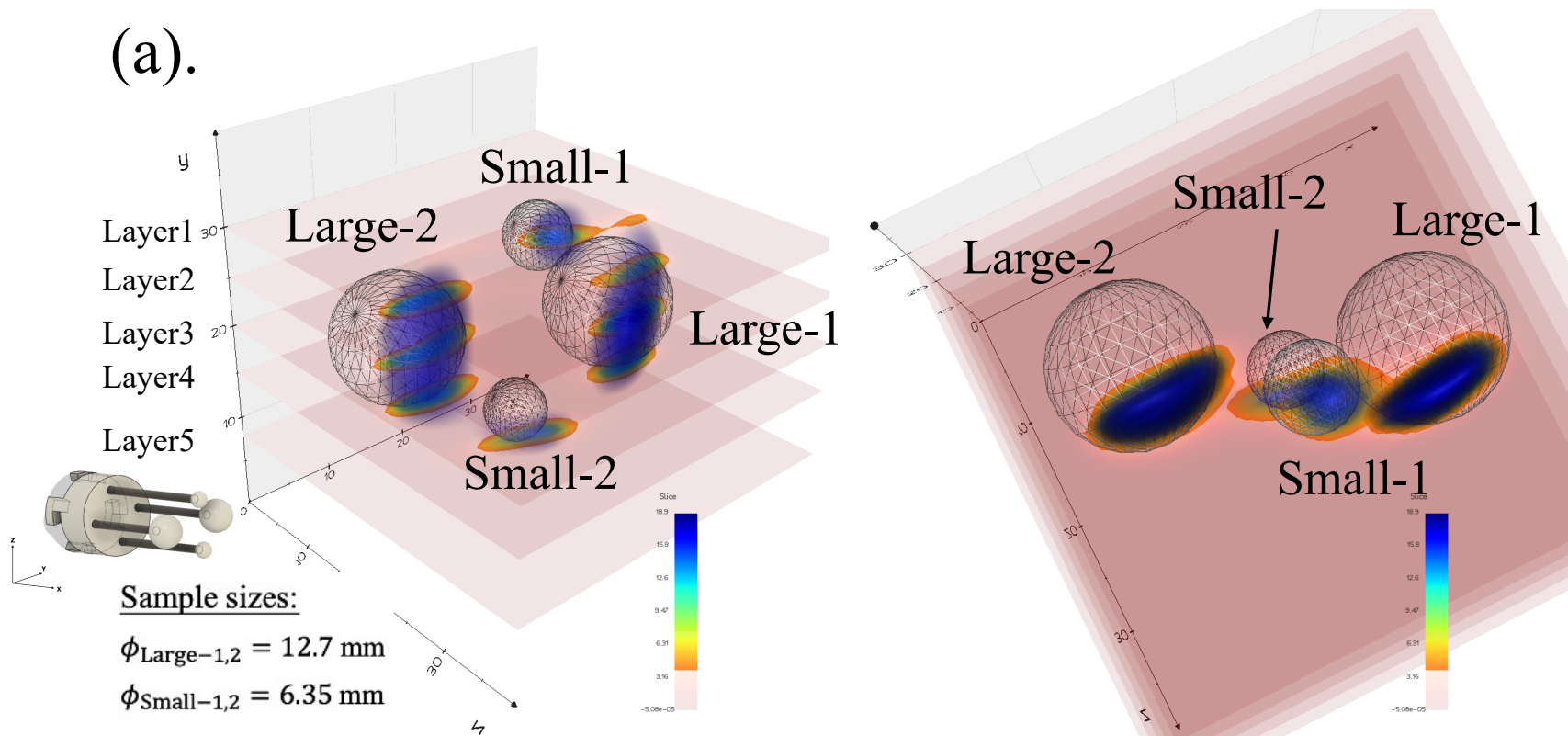


### データ

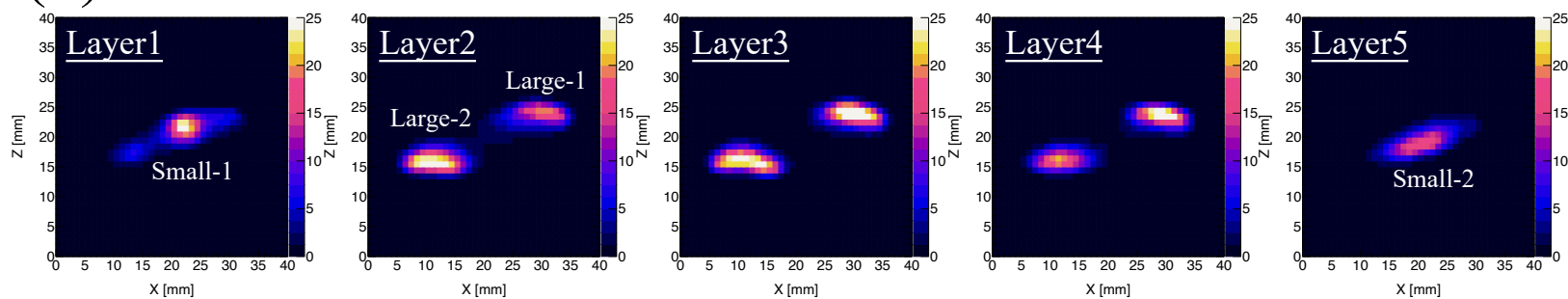


# 結果-CT画像

(a).



(b).

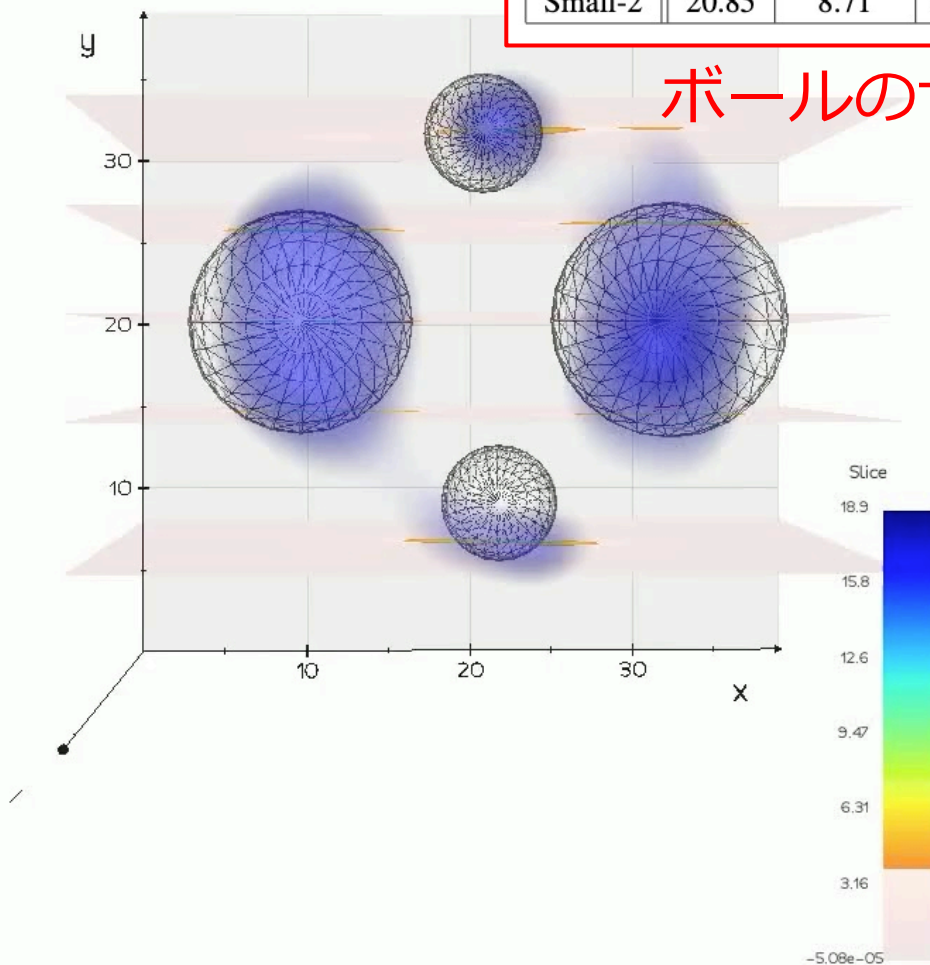




# 結果-3Dイメージング

MLEMで再構成した3Dイメージ

	x direction [mm]		y direction [mm]		z direction [mm]	
Name	mean	FWHM	mean	FWHM	mean	FWHM
Large-1	29.38	7.98	20.98	10.52	23.80	3.29
Large-2	12.01	8.54	19.20	12.29	16.07	3.13
Small-1	22.31	6.61	9.97	4.91	21.72	3.96
Small-2	20.85	8.71	30.97	5.31	19.18	4.12

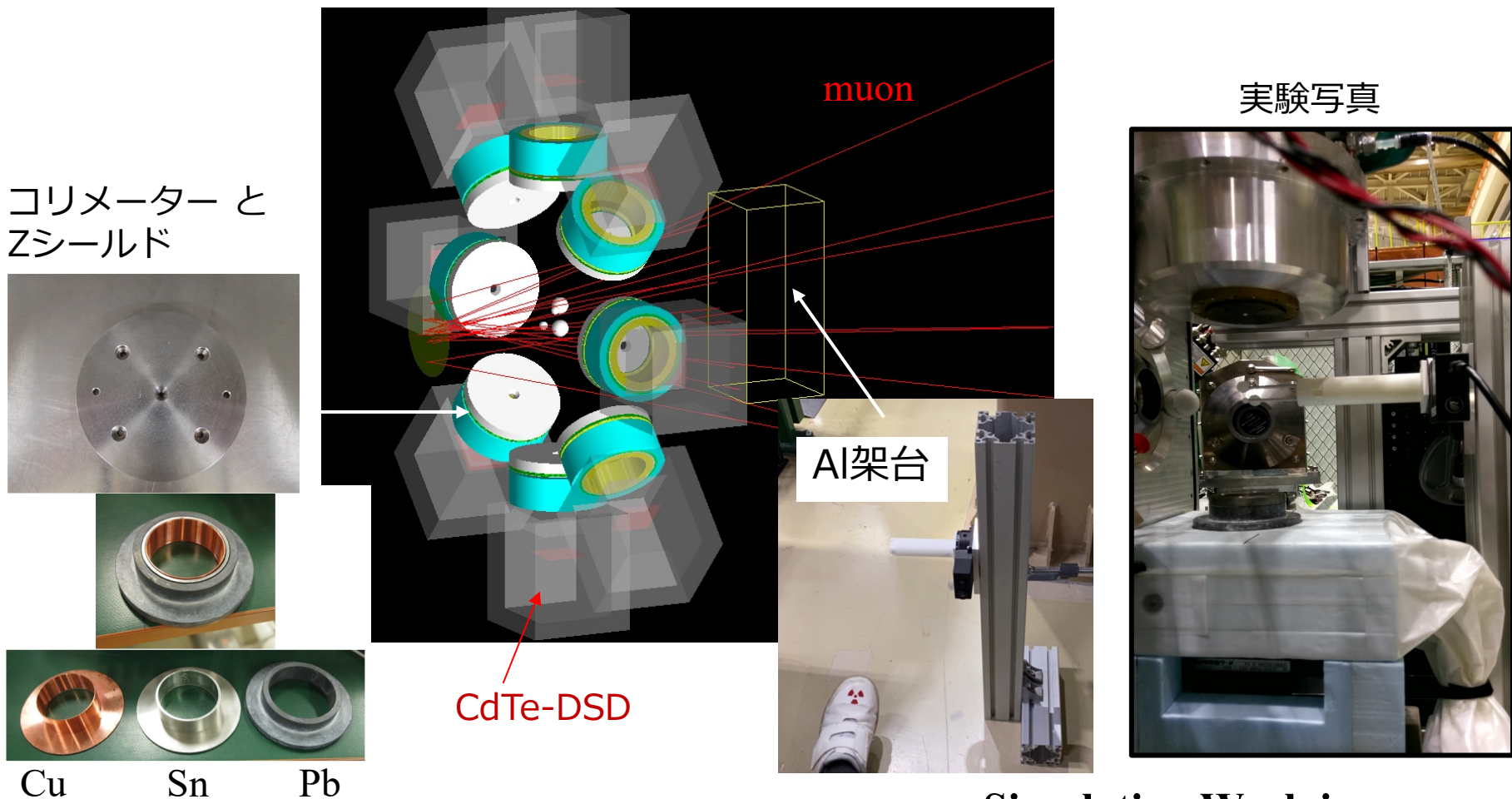


ボールのサイズと相関位置

これまでの成果の論文化 → Scientific Reports (under review)

# 検証-Geant4によるシミュレーション

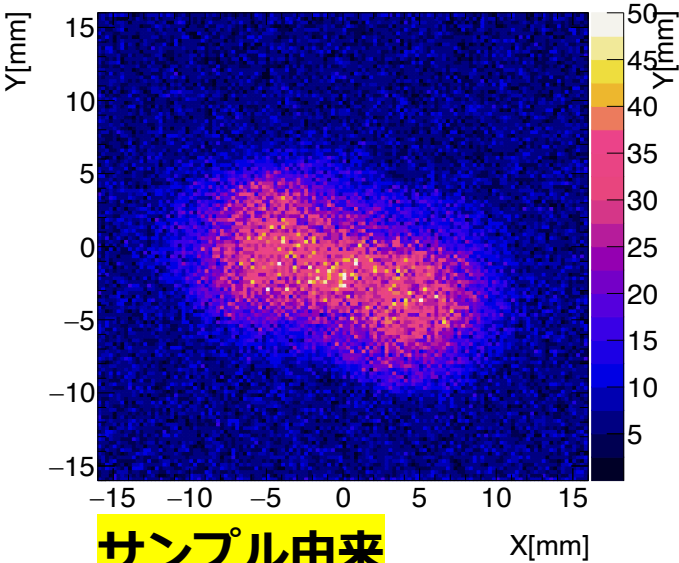
- 結果の検証は、モンテカルロ法 (MC) を用いたGeant4を利用
- 実験セットアップにより、Geant4のジオメトリを定義し、3Dイメージを再現



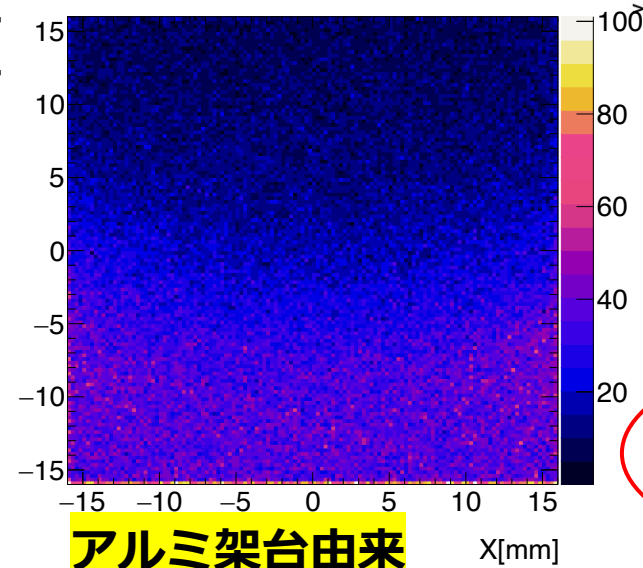
Simulation Work in progress

# 検証—イメージとエネルギーースペクトル

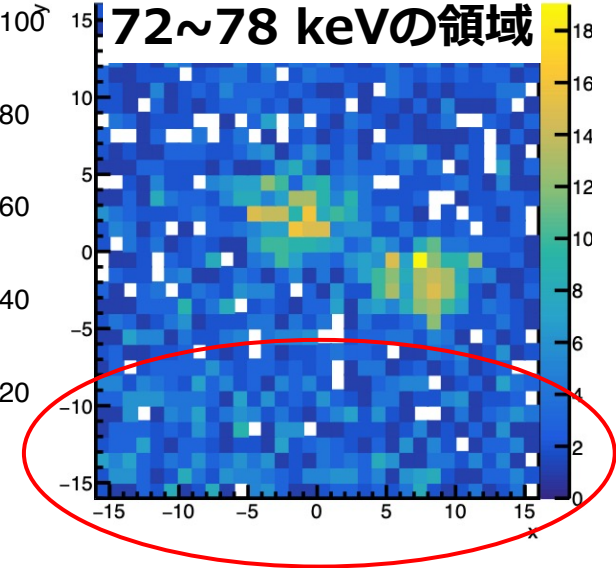
### MCのイメージ



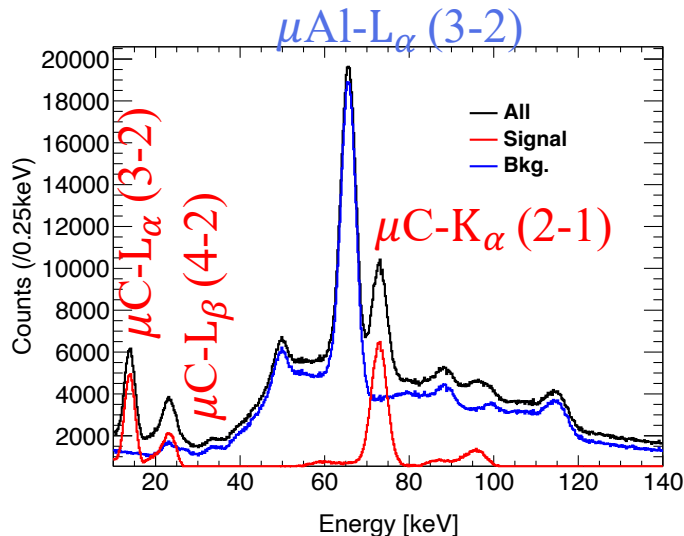
### MCのイメージ



### Dataのイメージ



バックグラウンドはアルミ架台由来



### 結果考察：

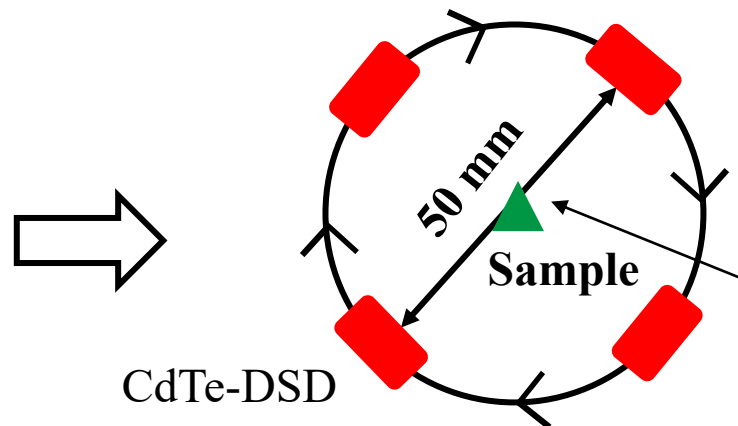
- サンプルと架台由来のイメージをMCで再現
- 信号とバックグラウンドの由来を確認
- 連続成分のバックグラウンドを検討

Simulation Work in progress

# 現在やっていること

## 1. 回転できないサンプルに対して、新たなイメージングシステムを開発

貴重な文化財への応用

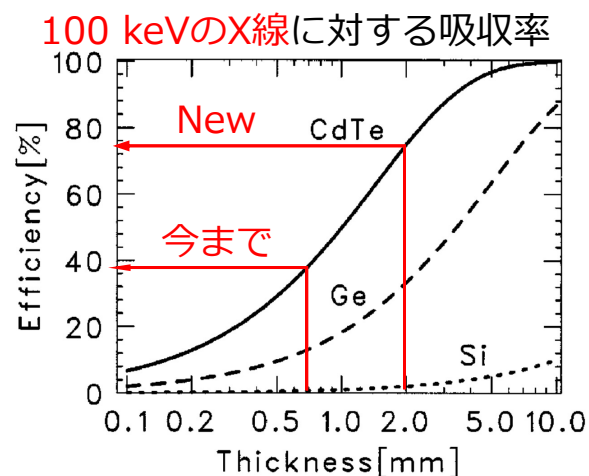


CdTe-DSD

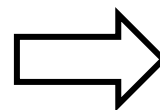
特点:

- サンプルは中心に固定され、回転する必要がない
- 高い統計が得られるため、より優れた画像が生成できる

## 2. 軽元素だけではなく、多く元素に適用するには、より厚いCdTe素子が必要

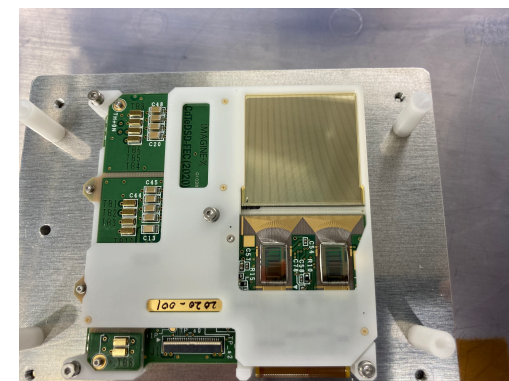


Takahashi et al. 2001



吸収率@100 keV は、  
2 mm CdTeが0.75 mmの2倍  
→ 厚いCdTeはより効率的に

2mm厚CdTeを開発

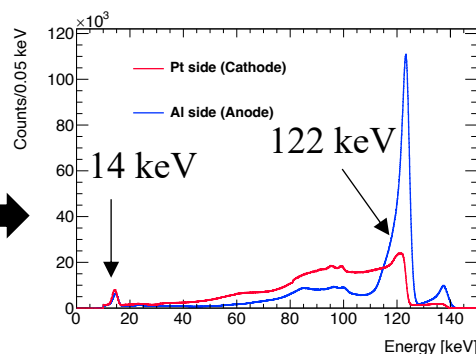
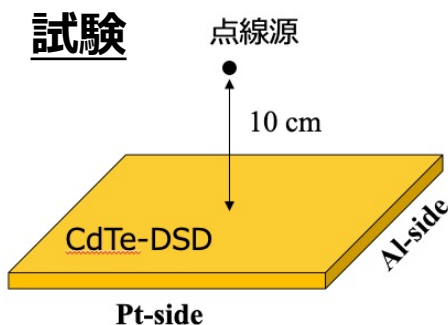
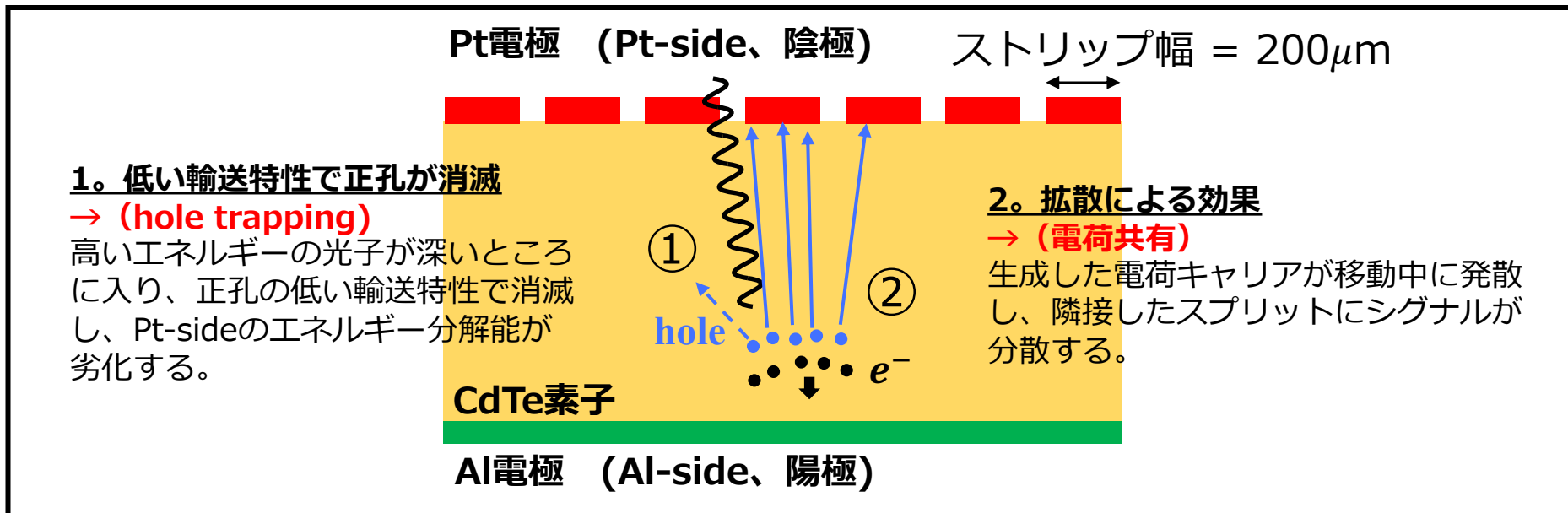


iMAGINE-X社と共同開発

# 厚いCdTe結晶の問題

2mm CdTe-DSD開発における問題点

- ①. 電荷キャリアの輸送特性の効果により、エネルギー分解能が劣化
- ②. 厚いCdTe素子なので、電荷の拡散効果による問題が深刻になる

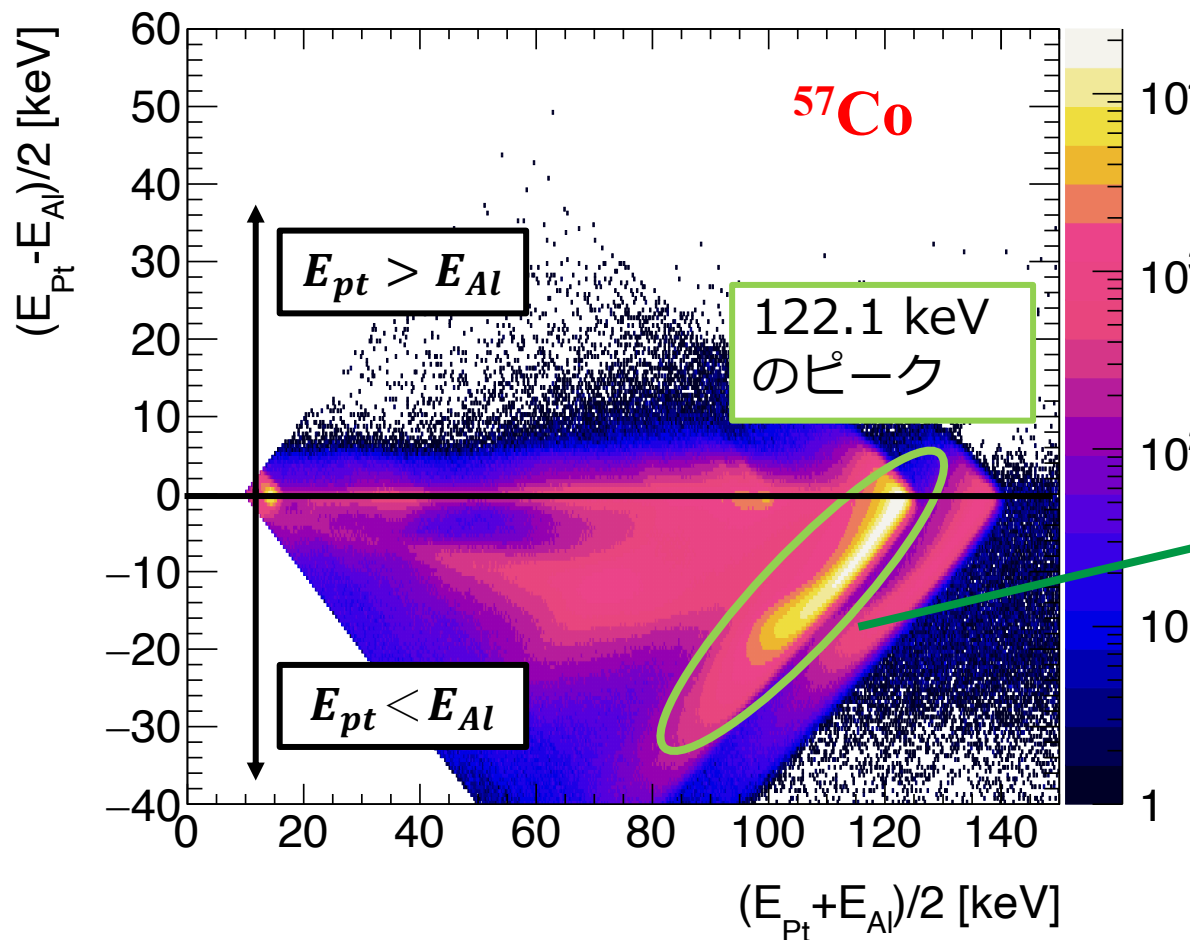


Pt-sideとAl-sideのエネルギー  
スペクトルも同じくなるべき

→ 高いエネルギー領域で正孔  
が消滅した問題①が顕著

# $E_{Pt}$ と $E_{Al}$ の関係図

両側の差 (縦軸) vs. 平均 (横軸) の2D図



高いエネルギーの光子では、正孔-電子対の発生場所が深くなり、正孔の電荷が効率よくPt電極に誘導されなかった。

→  $E_{Pt}$ が低下した

$E_{Pt}$ が低下するため、 $E_{Pt} < E_{Al}$ のイベントに対して、再構成したエネルギーがshiftした。  
(横軸、PtとAlの平均 < 122.1 keV)

2D図から補正関数を作成

参考資料: Furukawa, K. et al. (2020)

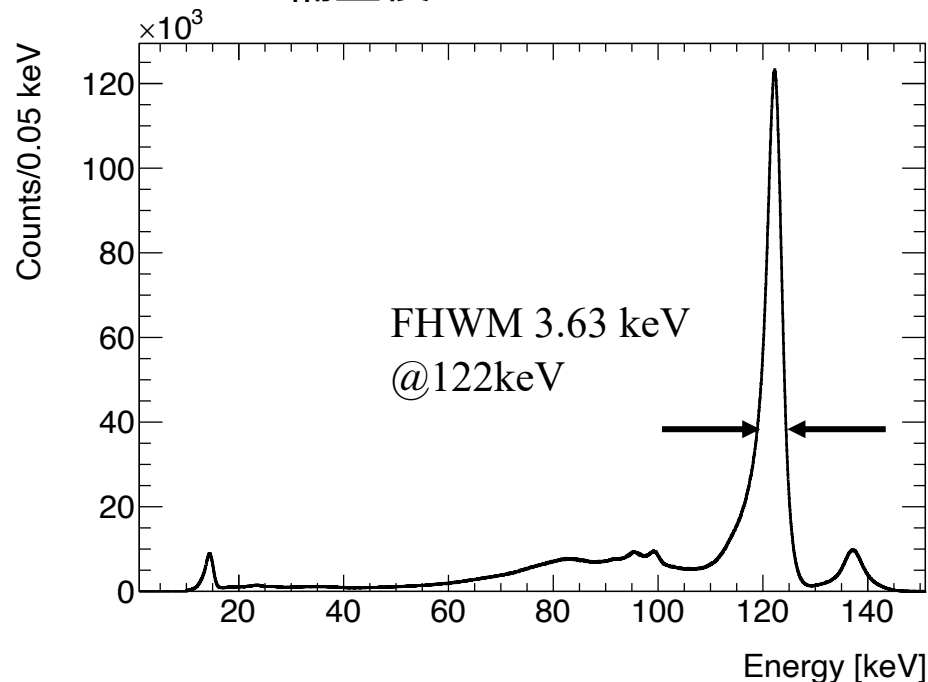
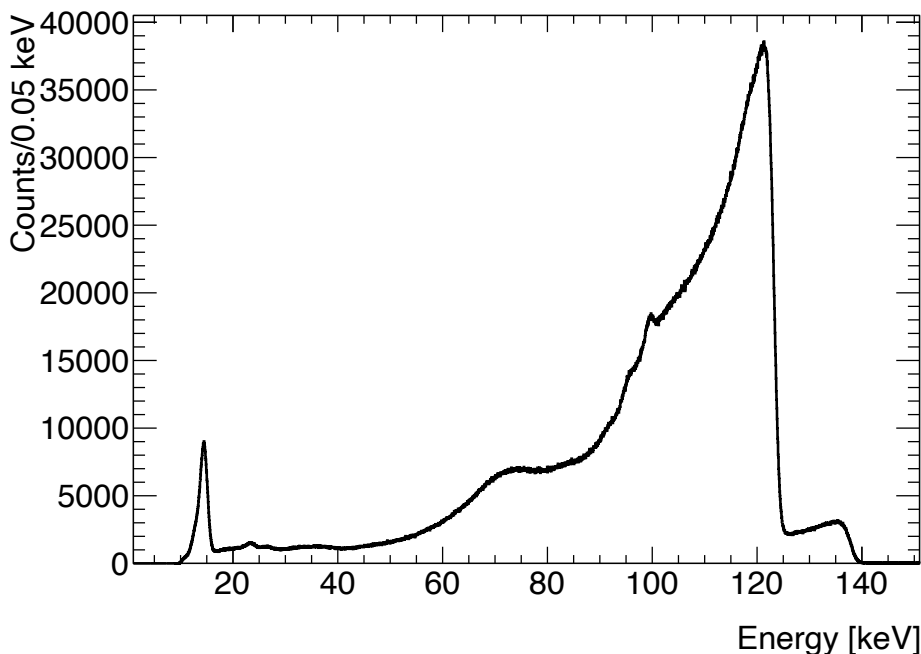
*Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, 978, 21

# 補正方法の導入

複雑な解析ので、補正関数の詳細を省略...

補正前： $(E_{Pt} + E_{Al})/2$

補正後：Corrected E

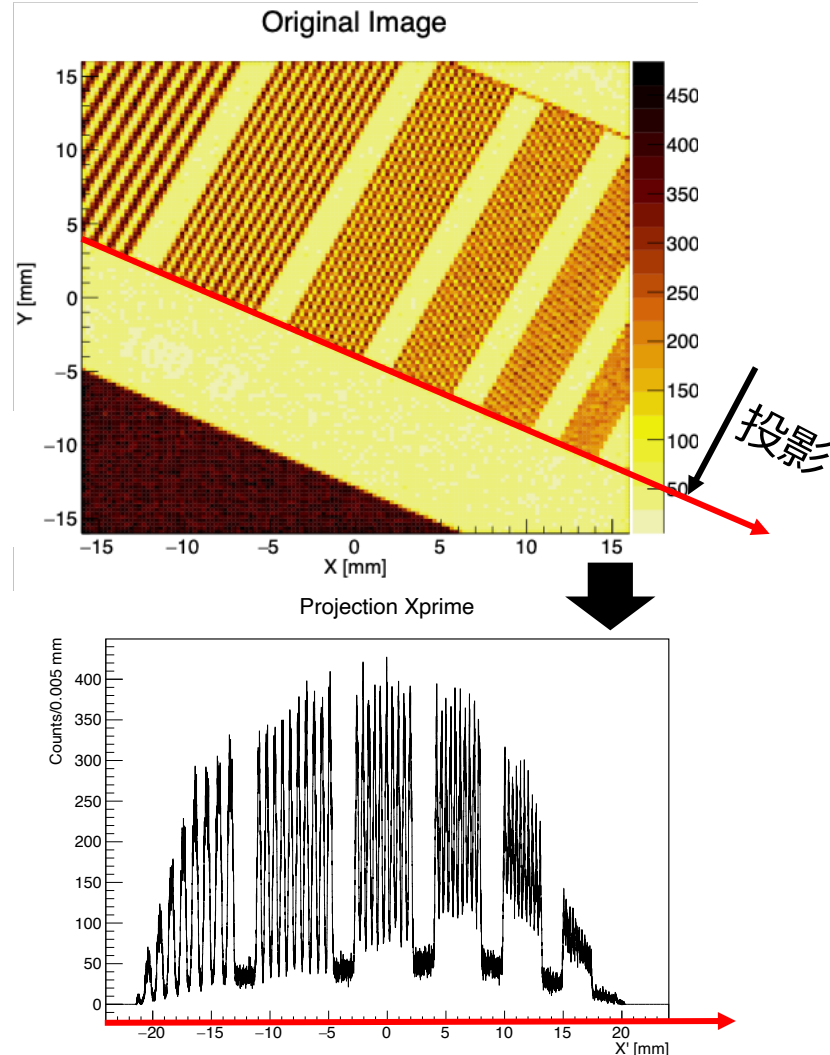
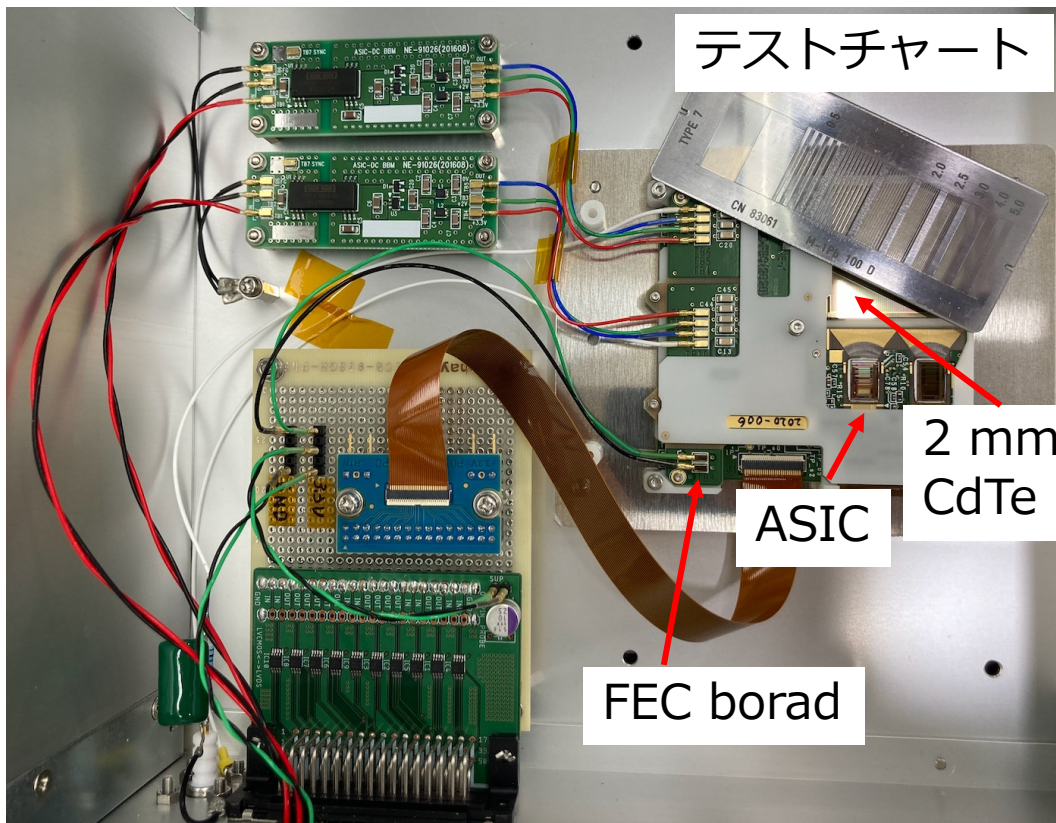


**122 keVのエネルギー分解能は2.99% (3.63 keV@122 keV)までに改善した。**

このエネルギー補正方法は、CdTe半導体検出器だけではなく、電子と正孔の輸送特性が異なる半導体にも、両面ストリップ型検出器であれば応用できる。

邱 奕寰 ほか, 放射化学 (2022, 掲載予定)

# 位置分解能の計算



- ✓ テストチャートの線幅とFWHMから、検出器の位置分解能を導出
- ✓ 2mm CdTe-DSDの位置分解能は  $164 \sim 216 \mu\text{m}$



## これまでの成果：

- MUSE/J-PARCにおける負ミュオンビームの照射実験を行い、CdTeイメージング検出器で測定
- ミュオンX線による三次元元素イメージング法が成功
- 多く元素に適用するため、2 mm CdTe-DSDを開発
- 2 mm CdTe-DSDのエネルギー分解能を改善し、位置分解能も考察

## これからの展望：

- 2mm CdTe-DSDの実用化 (2022年3月@J-PARC)
- 回転できないサンプルへの利用するため、新たなイメージングシステムの開発が進んでいる

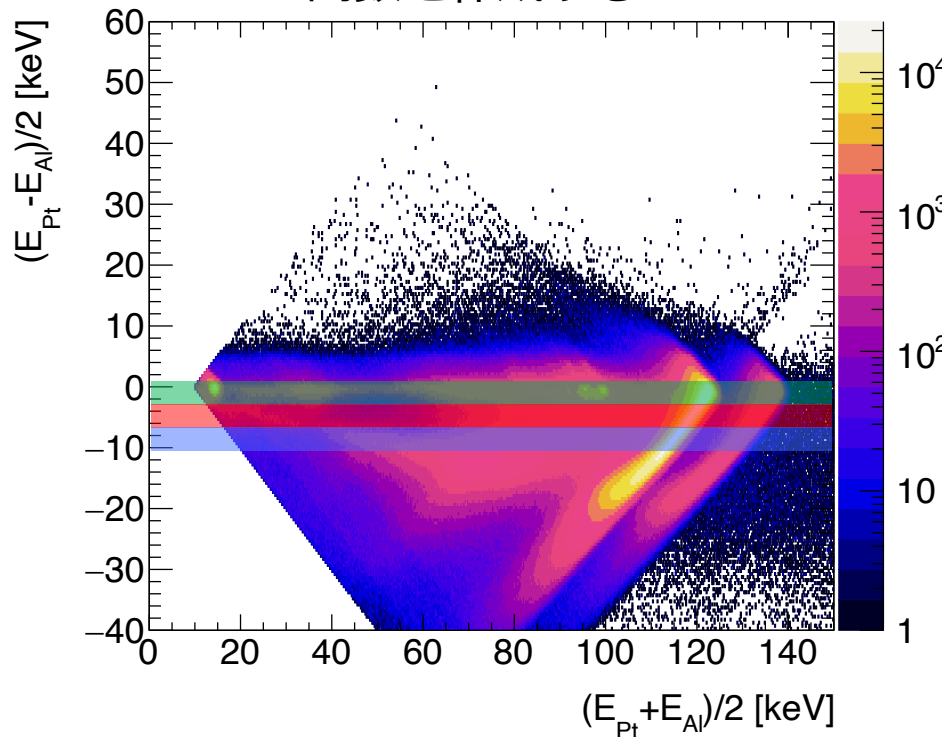
# Backup

# Backup-2D関係図から補正方法

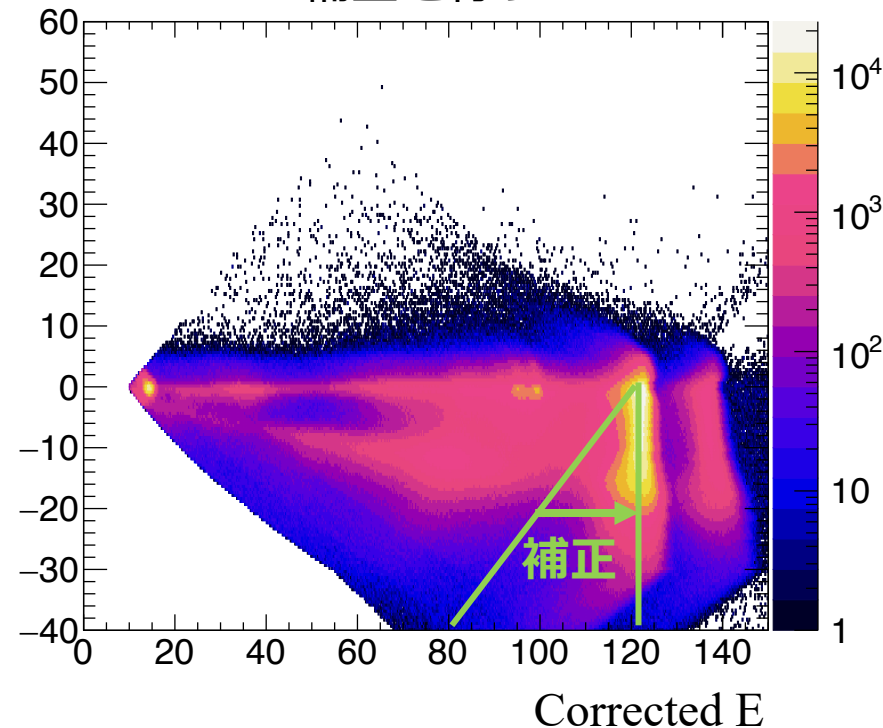
## 補正の流れ：

1. 縦軸 (PtとAlの差) の範囲を区切り、再構成したエネルギーがshiftされた値を出す。
2. それぞれ範囲でのピークにFitを行い、中心値を予測値(122.1keV)に補正する。
3. 内挿法で全領域に対応できる補正関数を作る。

関数を作成する



補正を行う

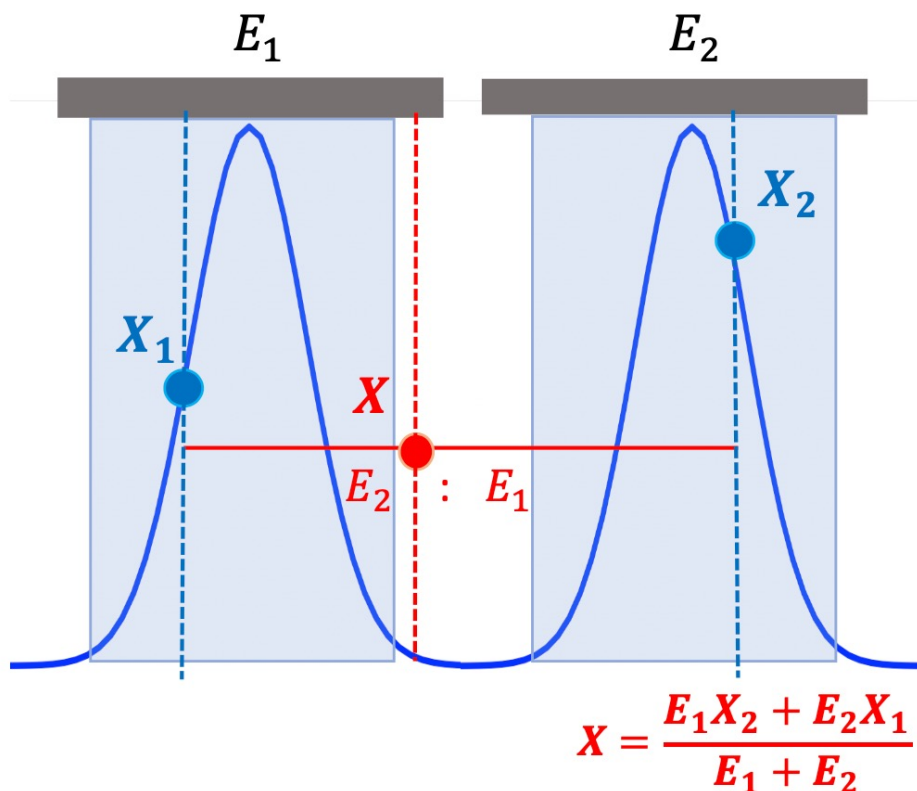


Pt電極に誘導されなかった電荷は補正された。

# Backup-位置計算方法

電荷共有がない場合（一つスプリットしか信号が出ない）：  
光子の反応位置は、信号があるスプリットの範囲でガウス関数の分布である。

## 電荷共有が発生したら、位置の計算に要注意

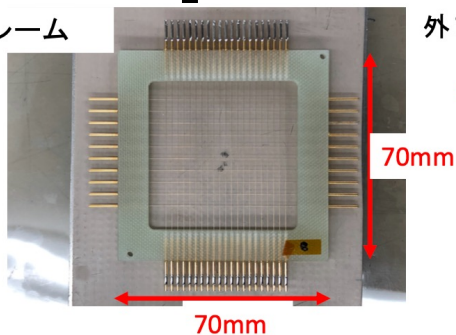


1. 電荷が共有した二つスプリットにガウス関数を取ってそれぞれの位置を計算する。  
→  $X_1, X_2$
2. 光子が二つスプリットに分配したエネルギーを計算する。  
→  $E_1, E_2$
3. 光子の反応位置を再構成する。  
→  $X = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{E_1 + E_2}$

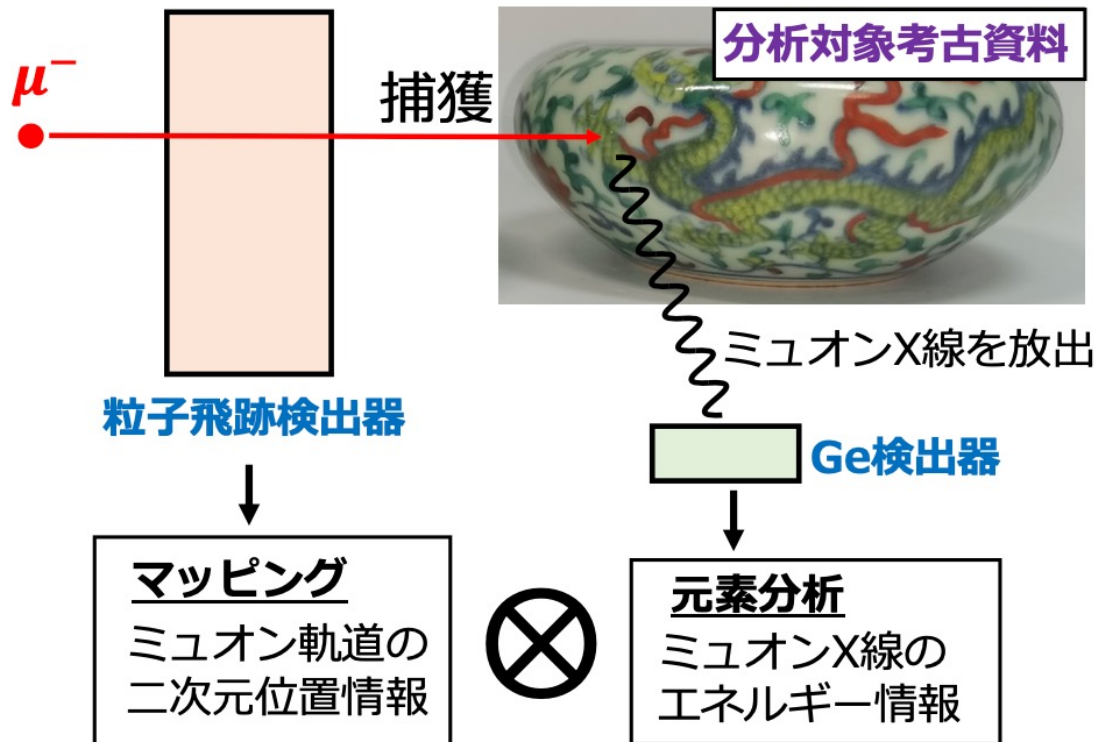
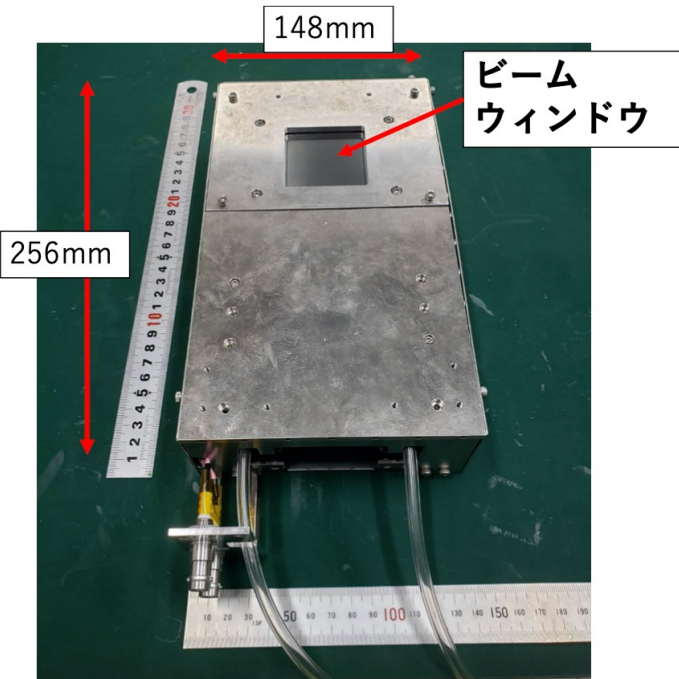
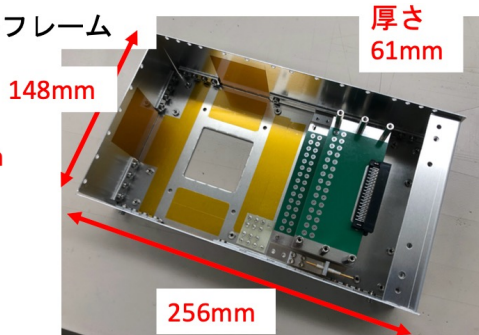
つまり、反応位置の計算にエネルギーでウェイトニングを行う。

# Backup-DCビームの利用

ワイヤーフレーム



外フレーム



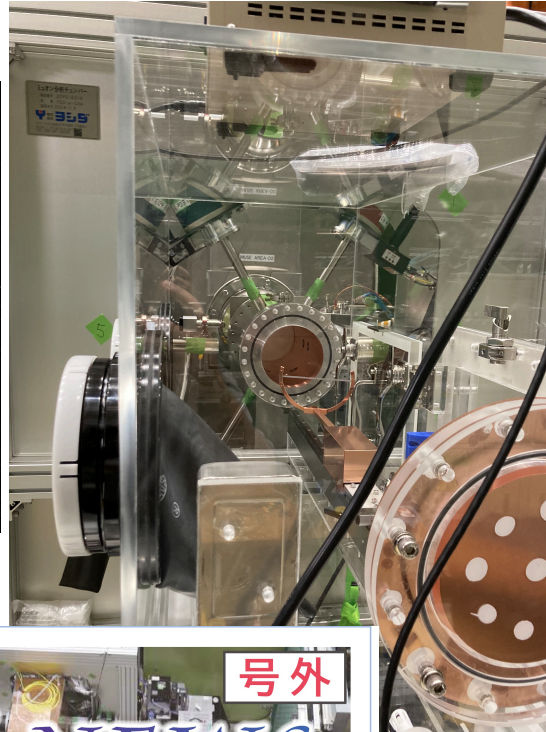
**三次元元素イメージング法の確立**

# Backup-Ryugu隕石分析への応用



JAXA/はやぶさ2

池下章裕氏提供



**J-PARC NEWS**  
Japan Proton Accelerator Research Complex 大強度陽子加速器施設

号外

J-PARCホームページ ▶▶ <http://j-parc.jp> 発行元：日本原子力研究開発機構 (JAEA) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) J-PARCセンター  
2021年(令和3年)7月15日発行 〒319-1195 茨城県東海村大字白方2-4 TEL: 029-284-4578

小惑星リュウグウのサンプル J-PARCで分析開始  
—命のふるさとをミュオンで見つめる—

J-PARC News 号外:  
<https://j-parc.jp/c/topics/2021/07/15000718.html>

