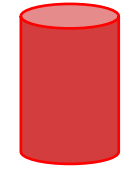


可搬型950keV/3.95MeV X線・中性子源による  
福島燃料デブリウラン濃度評価・仕分けと  
レギュラトリエンス

東京大学 高橋浩之

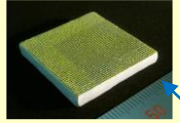
3. 格納容器内で  
200mmφユニット  
缶に収納



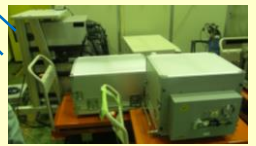
4. その場で燃料デブリの  
U/Pu濃度分析

互いで補足

**2色X線CT分析**  
(原子番号と重量の識別)  
Ce:GAGG 検出器



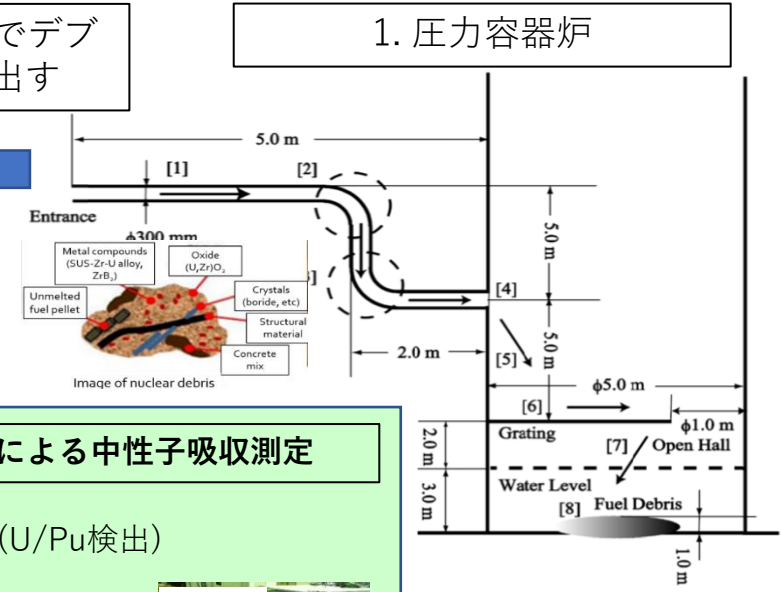
可搬型3.95MeV Xバンドライナック



X線

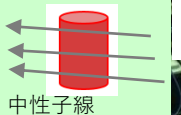
デブリサンプル

2. ロボットでデブリ  
を取り出す




**ToF法による中性子吸収測定**  
(U/Pu検出)

中性子検出器



中性子線

中性子ToT測定



中性子ターゲット

X線照射口

可搬型3.95MeV Xバンドライナック

**ユニット缶中  
にU/Puがあ  
るかなしかの  
判定**

# 研究の目的

近い将来の本格取り出しに備え、ユニット缶入り燃料デブリを格納容器直外のその場で、迅速にU濃度約5%以上か未満を判定し、以上であれば核物質、未満であれば放射性廃棄物と仕分けできる装置システムを実現する。装置は可搬型950keV/3.95MeV X線・中性子源（950keV:50kgx3箱）、および2色X線CT（空間分解能0.5mm）ステージ、1mTOF(高速)中性子共鳴透過分析(Neutron Resonance Transmission Analysis; NRTA)装置(1時間)、解析コンピュータよりなる。

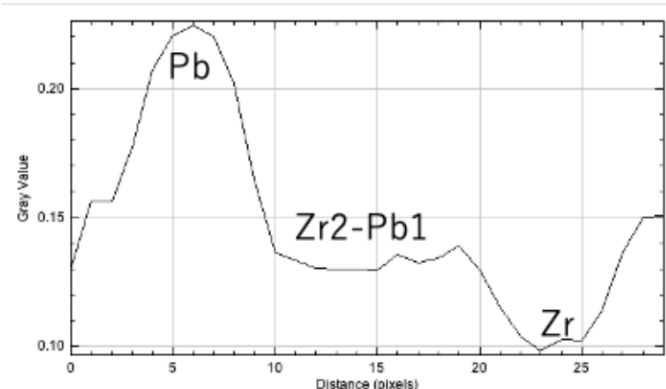
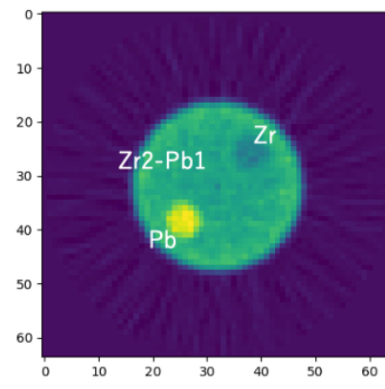
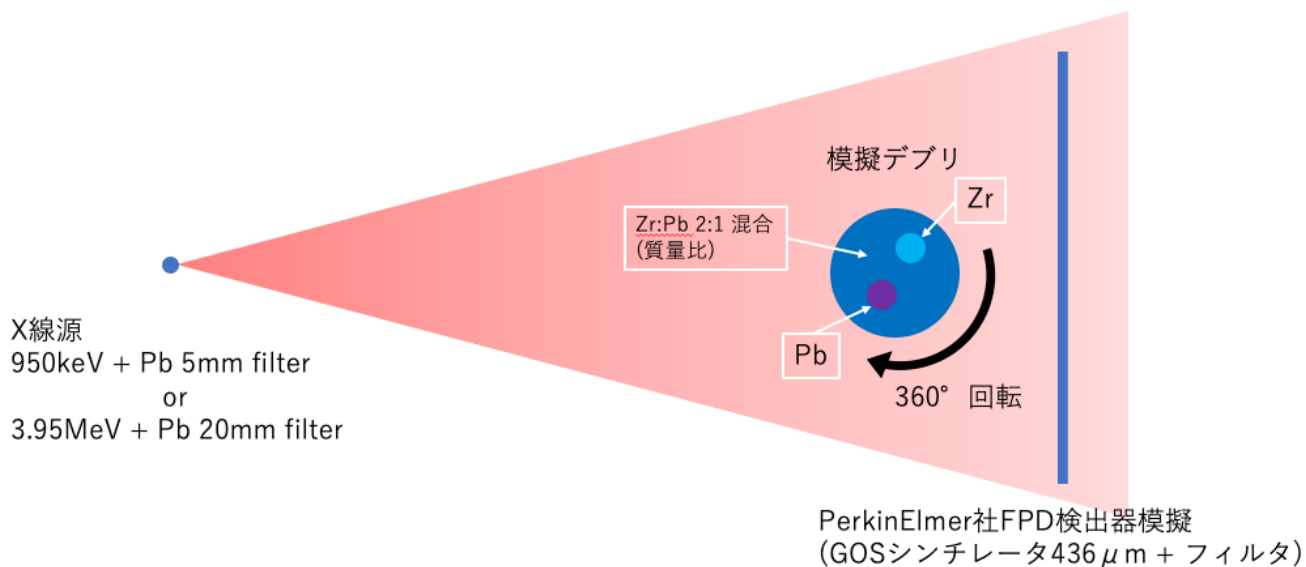
研究目標は以下である。

- ・ 950keV/3.95MeV同時2色3次元X線CTを、直径200mmユニット缶中の模擬燃料デブリ1つに関して5分以内実施し、溶融混合部含めた成分判定を10分以内に行う。
- ・ 3.95MeV中性子源によるNRTAシステムをU検出のみ最適化し、TOF距離1m程度にし、測定時間を数cmの燃料デブリ1時間以内にする。
- ・ 上記2色X線CT/NRTAを同時にユニット缶1つ当たり1時間以内で行い、Uの有無のその場判定して仕分けできるシステムの基本設計を行う。

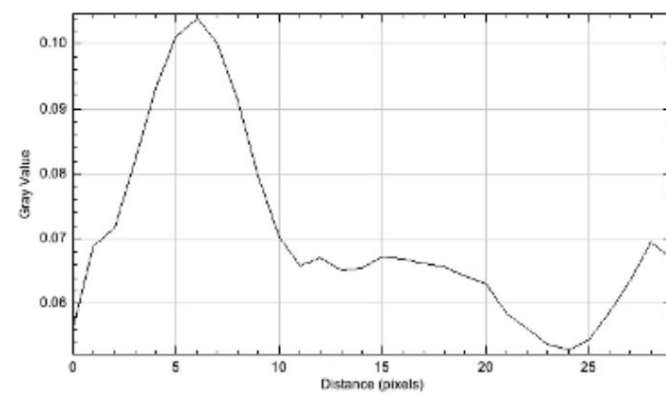
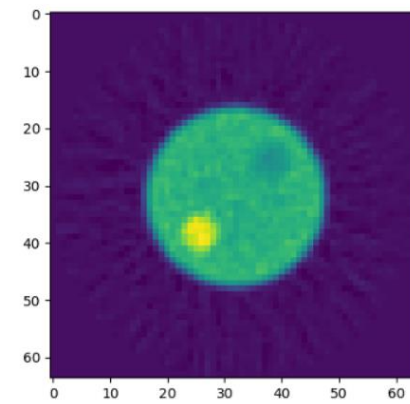
これらを可能にするため、可搬型3.95MeV X線・中性子源の1F施設内での使用における規制上の問題を検討する。

2色X線CT

# 模擬燃料デブリ撮像のシミュレーション計算

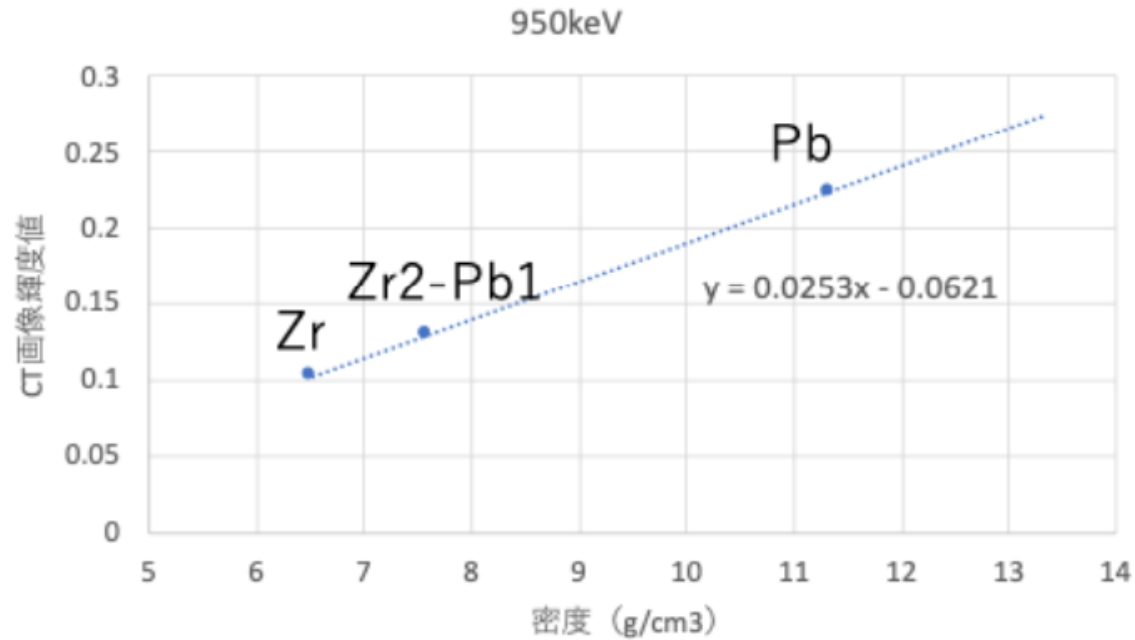


950 keV での CT 再構成結果、および輝度値プロファイル

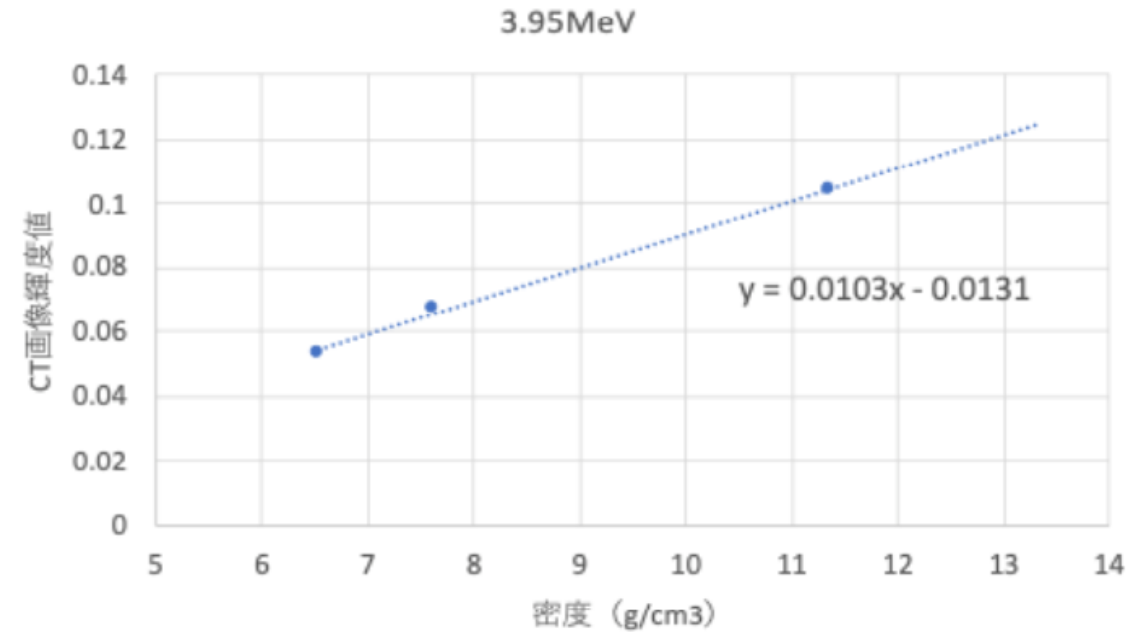


3.95 MeVでの CT 再構成結果、および輝度値プロファイル

# 密度とCT値の関係（シミュレーション計算）



950 keV での物質密度・CT 輝度値相関曲線



3.95 MeVでの物質密度・CT 輝度値相関曲線

# 製作した模擬燃料デブリ

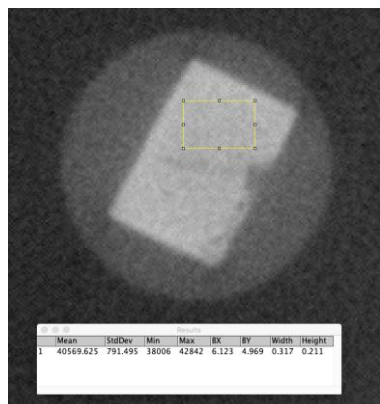


模擬燃料デブリ Pb/Fe/Zr 溶融試料

# 試料測定例(1) Fe-Zr 混合サンプル

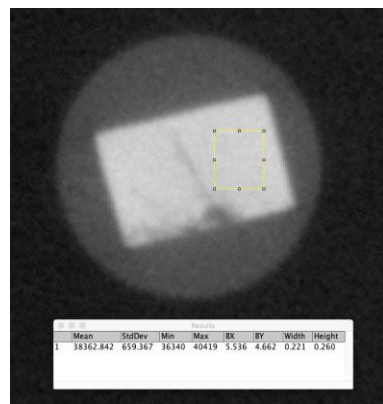
ROIとその輝度

950 keV

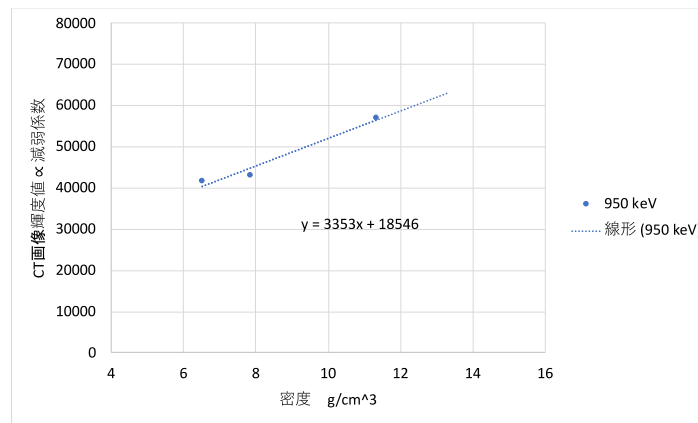


輝度値 40,569

3.95 MeV

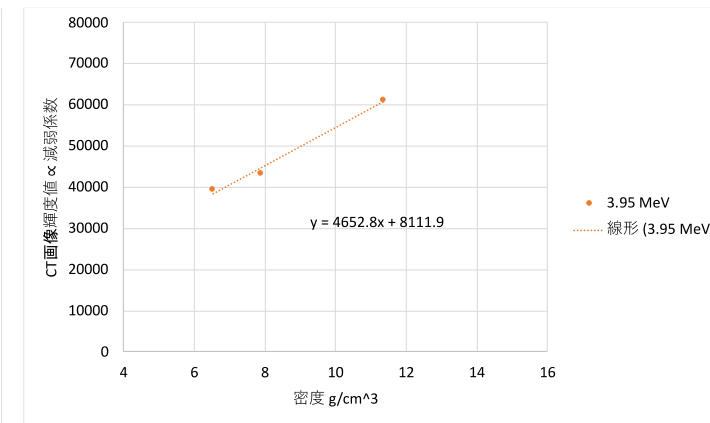


輝度値 38,362



$$y = 3353x + 18546$$

$$\rightarrow x = 6.56$$



$$y = 4652.8x + 8111.9$$

$$\rightarrow x = 6.50$$

Fe : Zr = 1 : 2 (平均密度 6.97 g/cm<sup>3</sup>) で混合している領域

- 950 keVでは、6.56 g/cm<sup>3</sup>と評価 → 近い値
- 3.95 MeVでは、6.50 g/cm<sup>3</sup>と評価 → 近い値

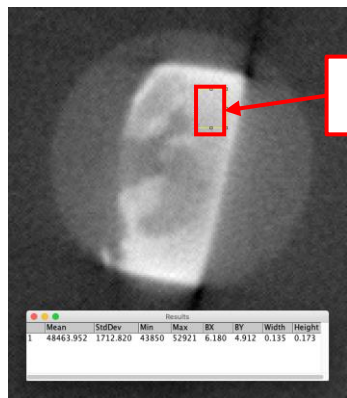


# 試料測定例(2) Fe-Pb 混合サンプル

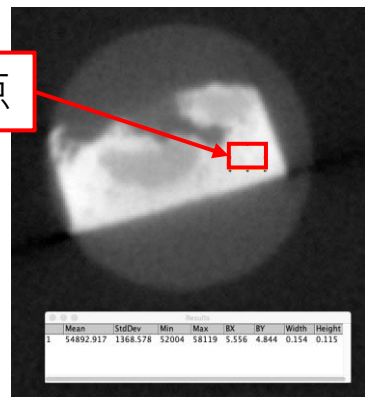
ROIとその輝度

950 keV

3.95 MeV

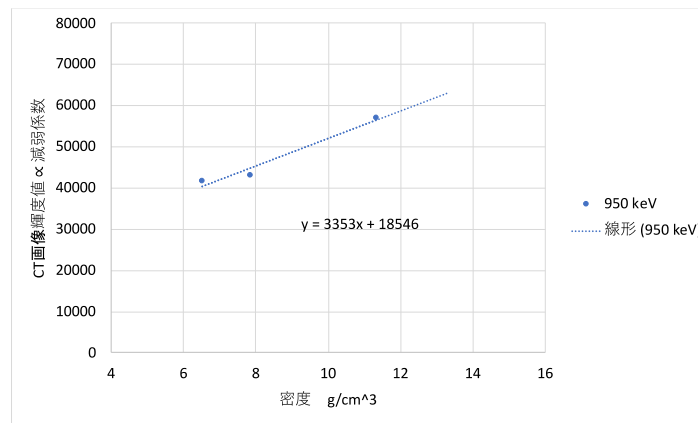


評価点



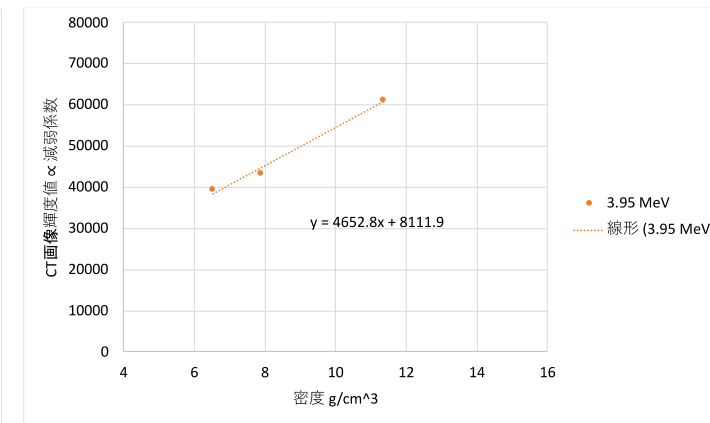
輝度値 48,463

輝度値 54,892



$$y = 3353x + 18546$$

$$\rightarrow x = 8.92$$



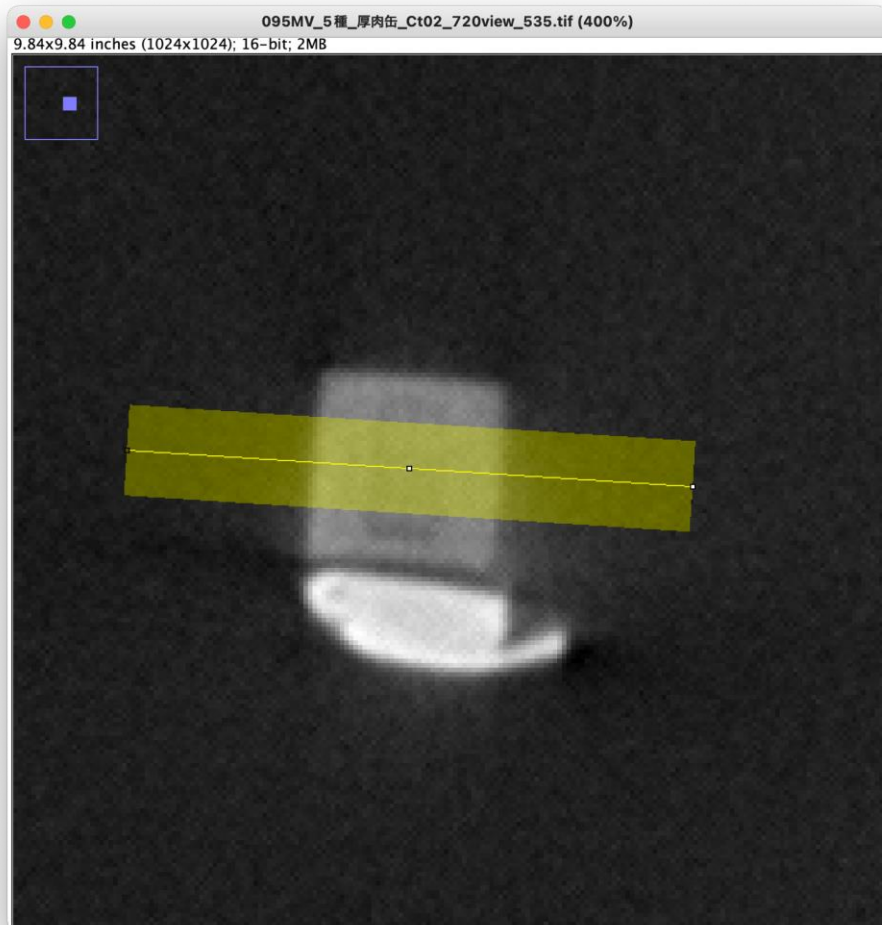
$$y = 4652.8x + 8111.9$$

$$\rightarrow x = 10.05$$

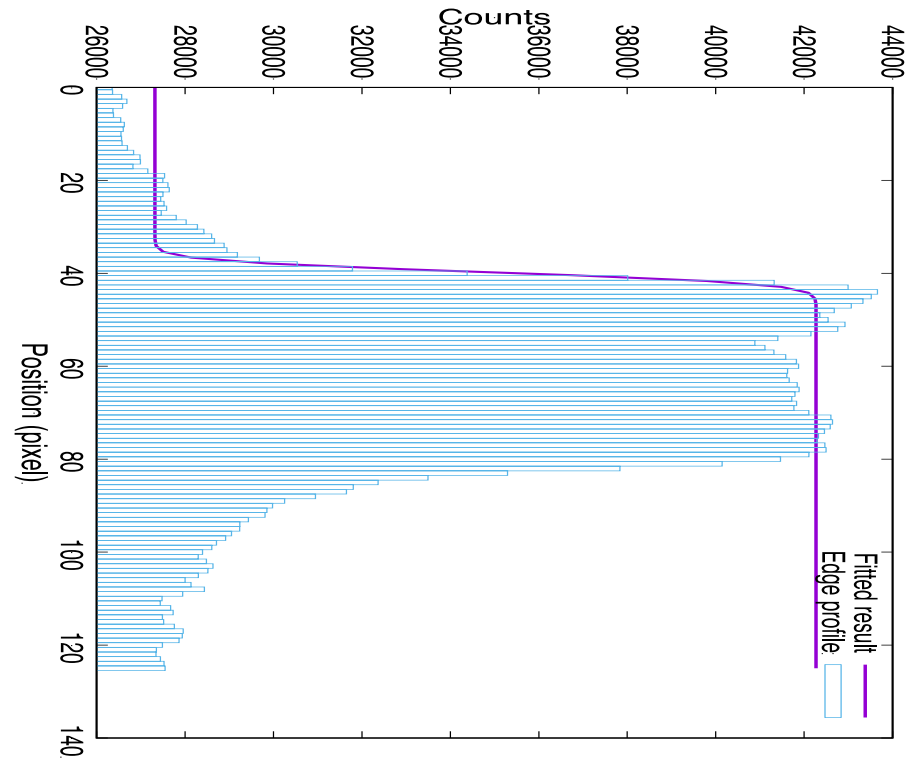
- 950 keV X線源では、輝度値から密度  $8.92 \text{ g/cm}^3$  程度と判定
- 3.95 MeV X線源では、輝度値から密度  $10.05 \text{ g/cm}^3$  程度と判定

→Pb単体の密度 ( $11.34 \text{ g/cm}^3$ ) と比較すると低い値のため、この箇所ではPbとFeが混合している可能性がある

# エッジプロファイルを用いたCT分解能評価



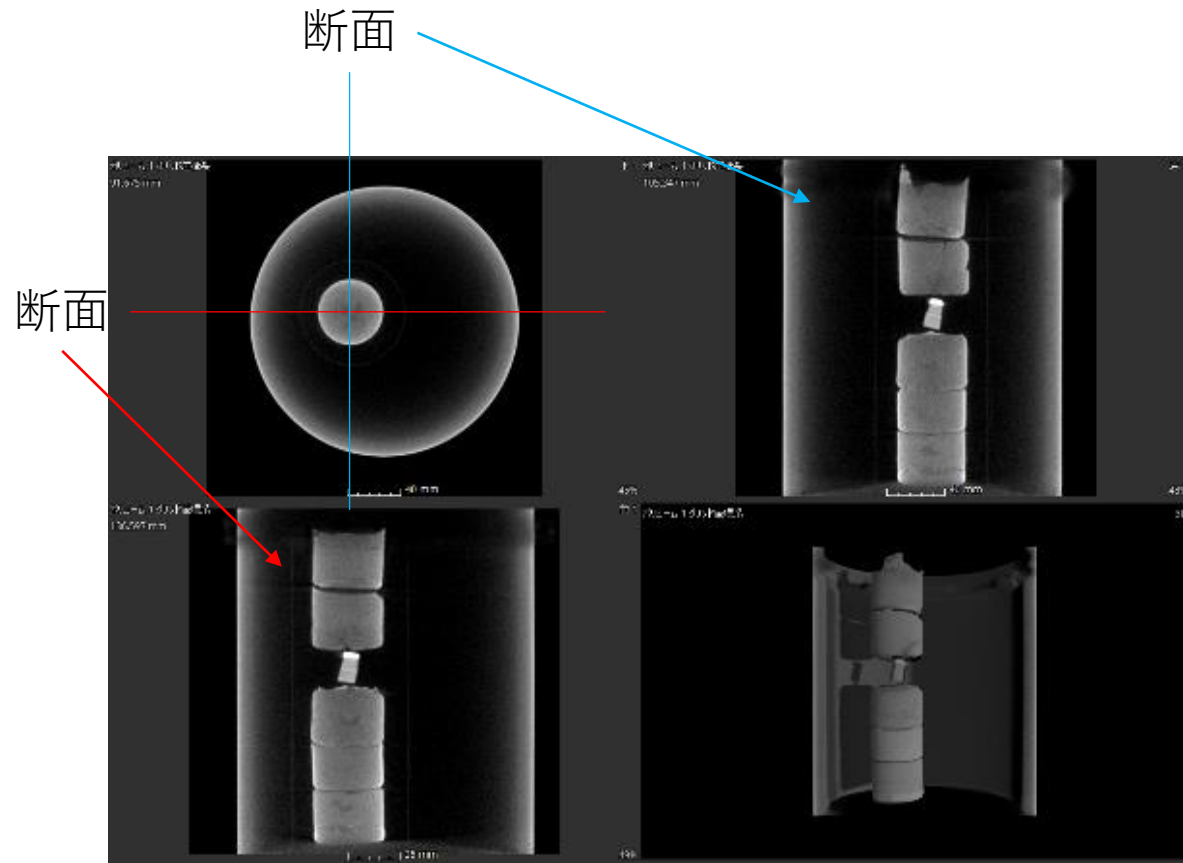
CT画像全体 1024 pixel = 9.84 inch  
1 pixel = 0.0096 inch = 0.244 mm



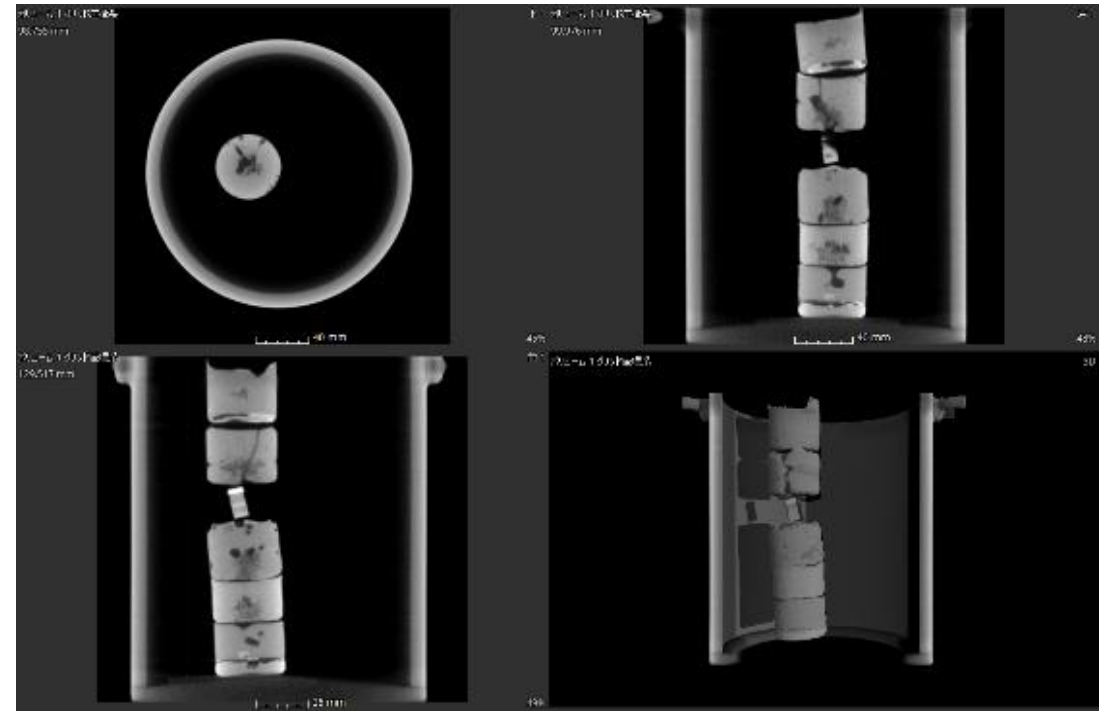
$\sigma = 1.96 \text{ pixel}$   
分解能 =  $1.96 \times 0.244 = 0.478 \text{ mm}$

**CT分解能 = 0.48 mm**

# 模擬燃料デブリ (Fe/Zr/Pb混合)

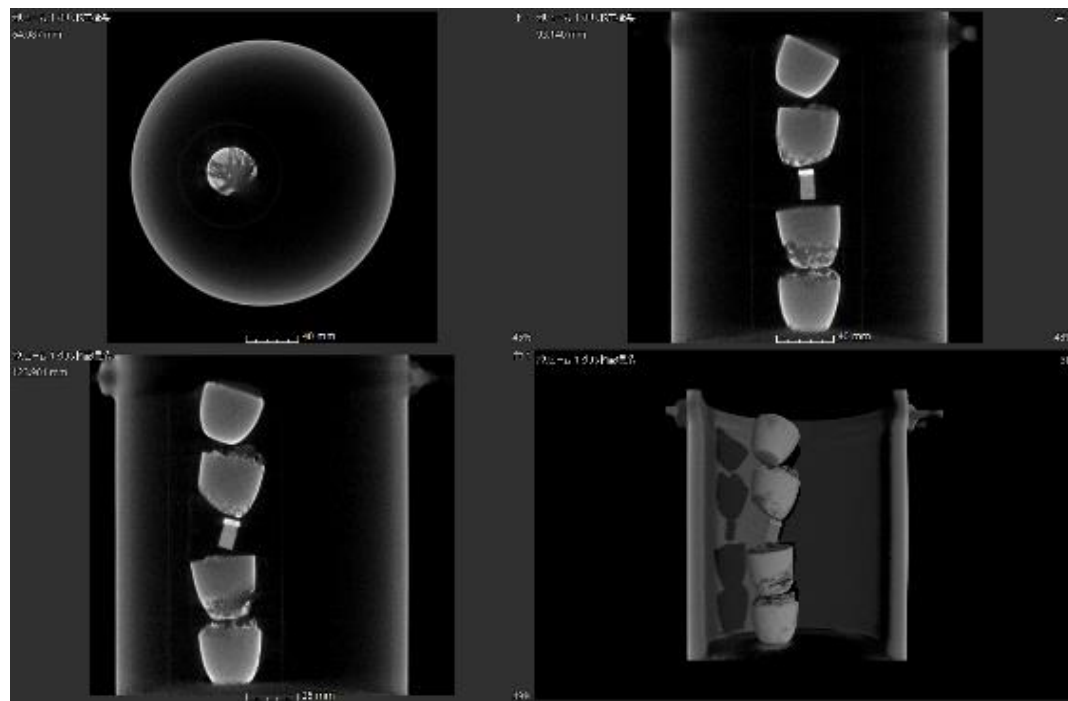


950 keV

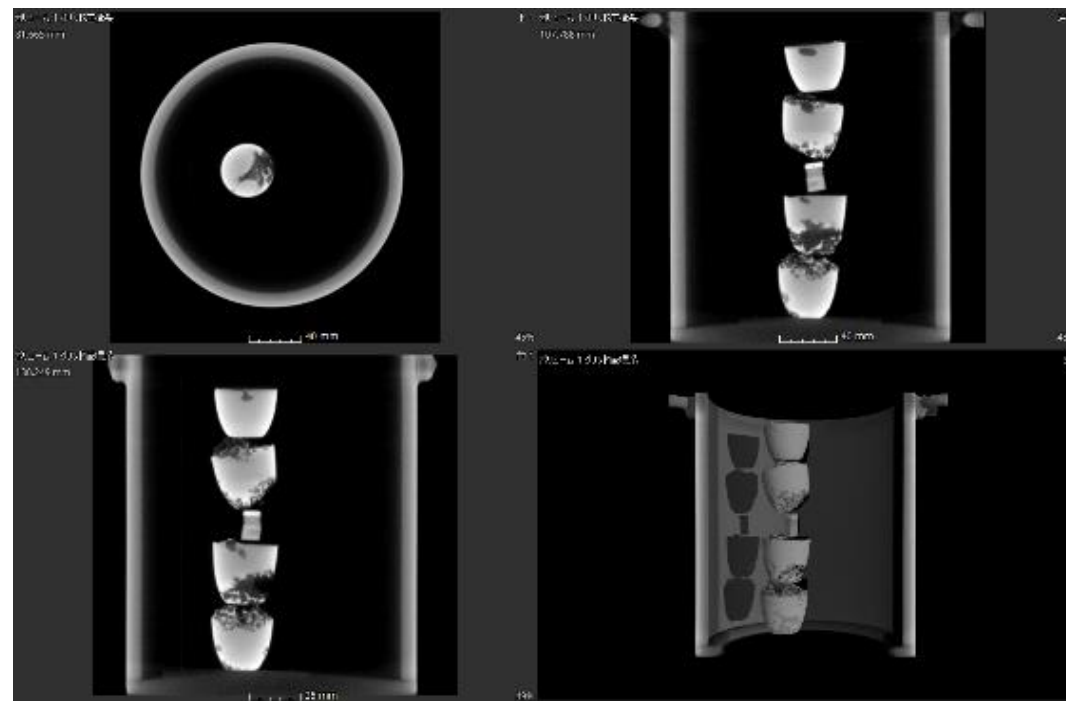


3.95 MeV

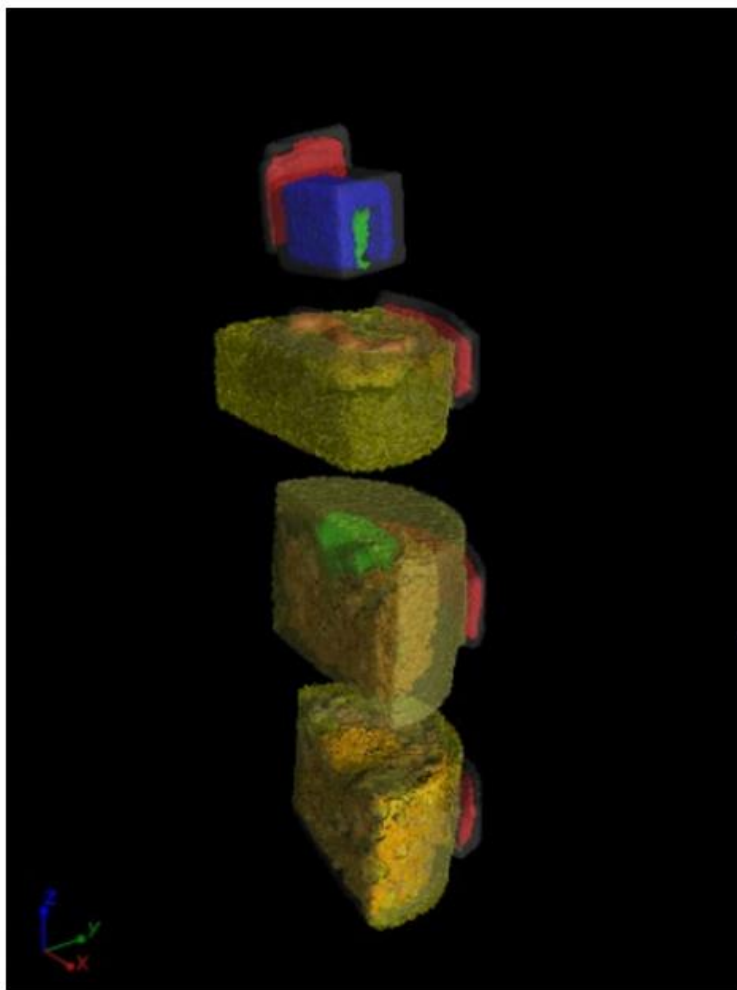
# 模擬燃料デブリ (MCCI模擬)



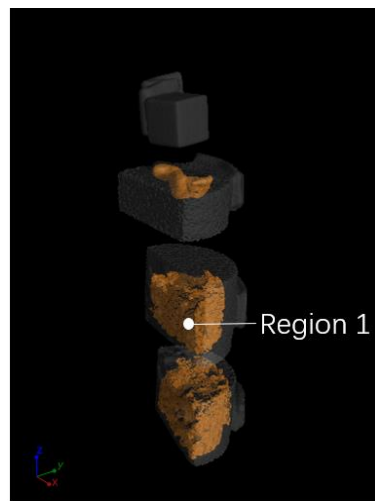
950 keV



3.95 MeV



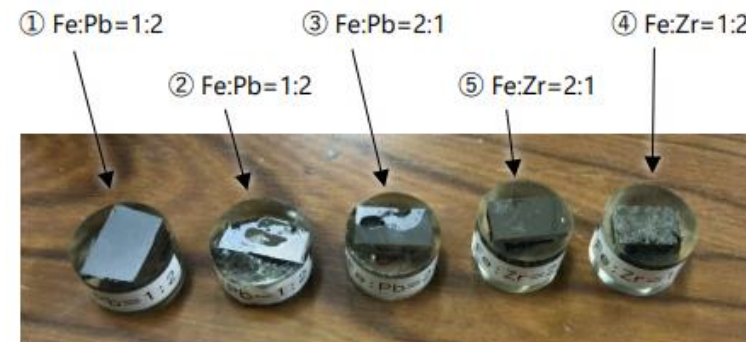
色分けして部分を表示した例



コンクリート部分

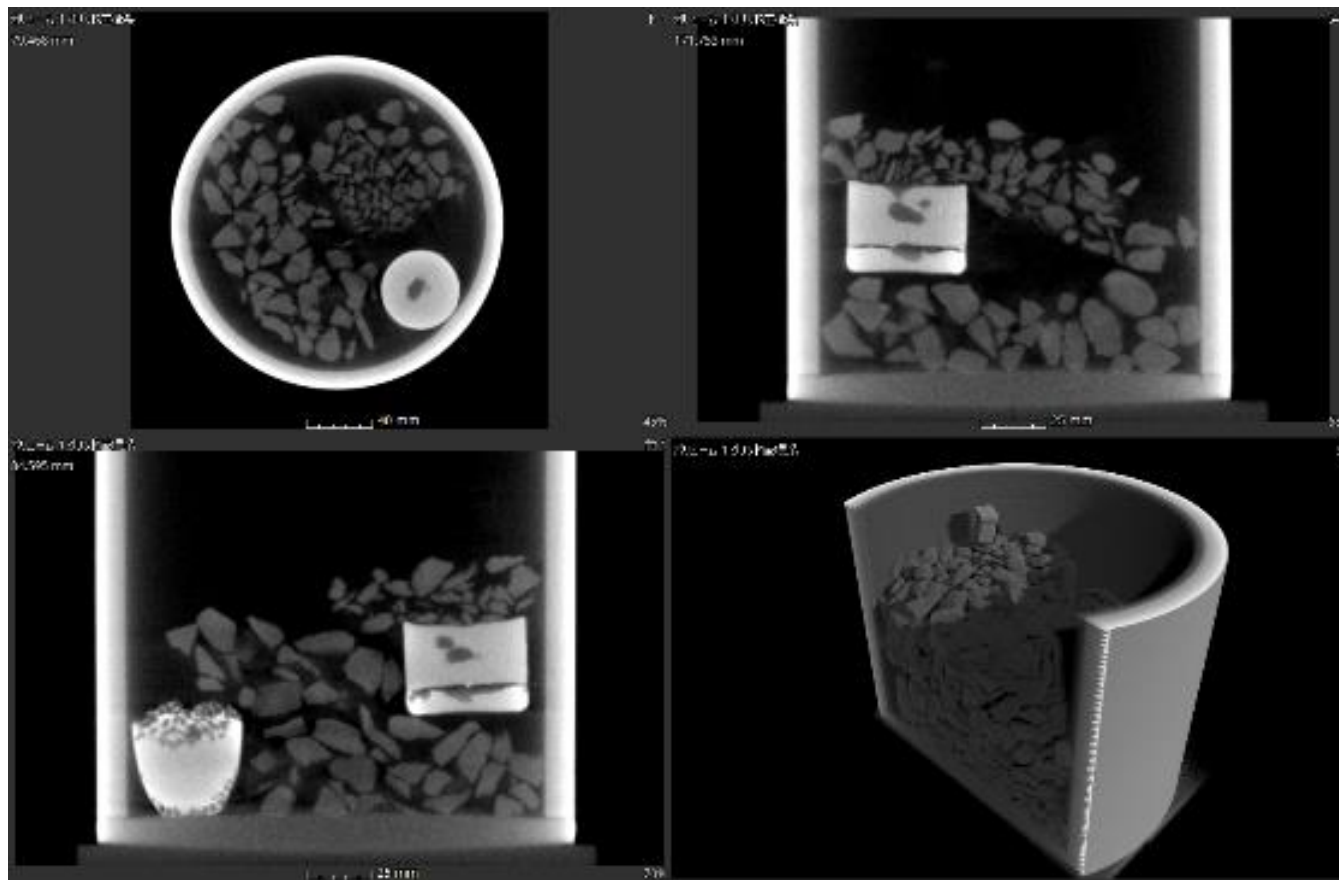
Region 1における950keV/3.95MeVの比

Average grey value (950keV)	19439.6
Average grey value (3.95MeV)	18457.8
Grey value ratio	1.0531



Region	値	物質	Color
1	0.8373	Zr	緑
2	0.8663	Pb	赤
3	1.2020	樹脂	黄
4	0.9730	酸化物	紫
5	1.0531	コンクリート	茶青
6	0.7756	Fe(SUS)	青

# 土砂中\*に模擬デブリを配置した体系の3次元CT



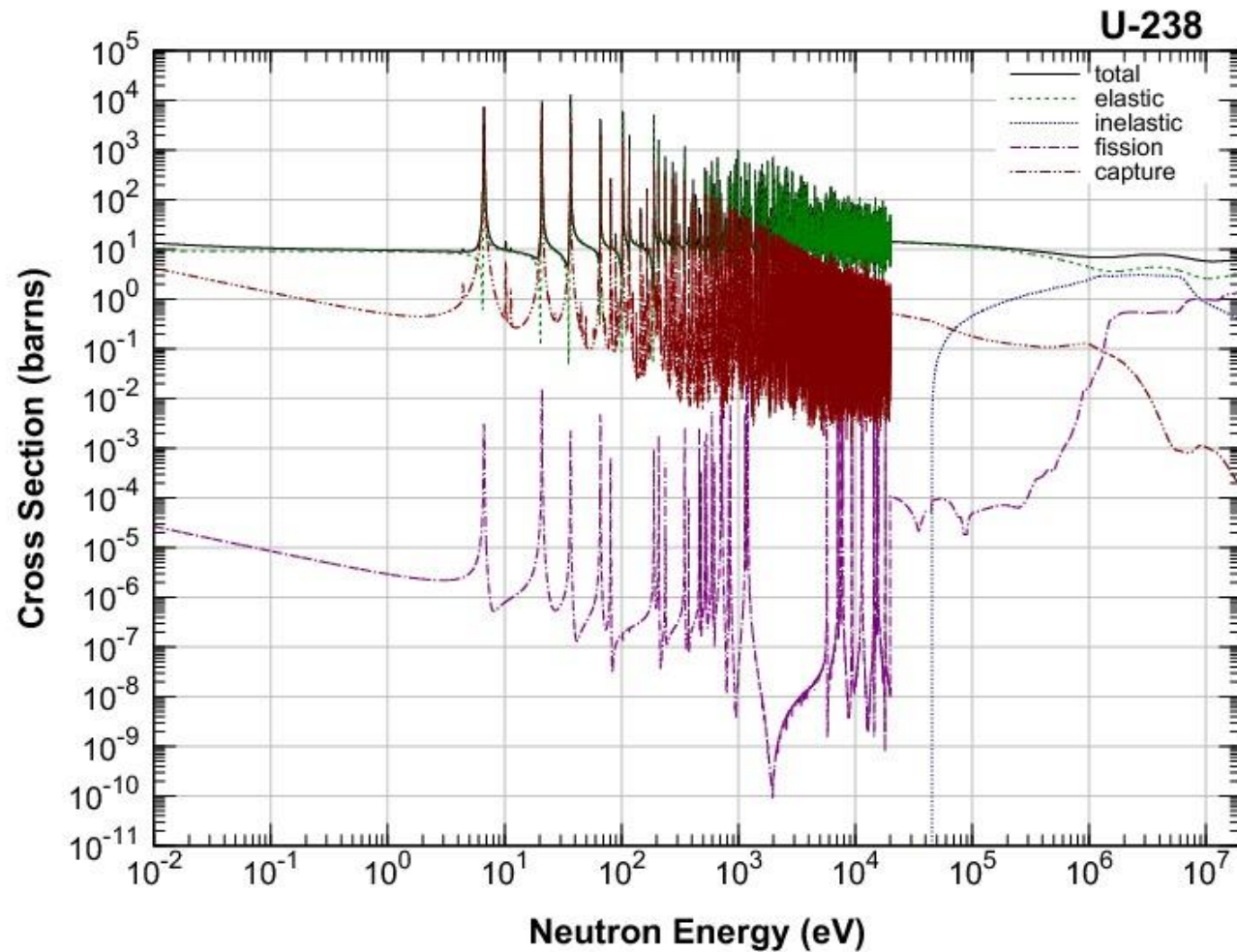
3.95 MeV

\*コンクリートの代わりに密度が近い土砂を利用

# 中性子共鳴透過分析 (NRTA)



# U-238



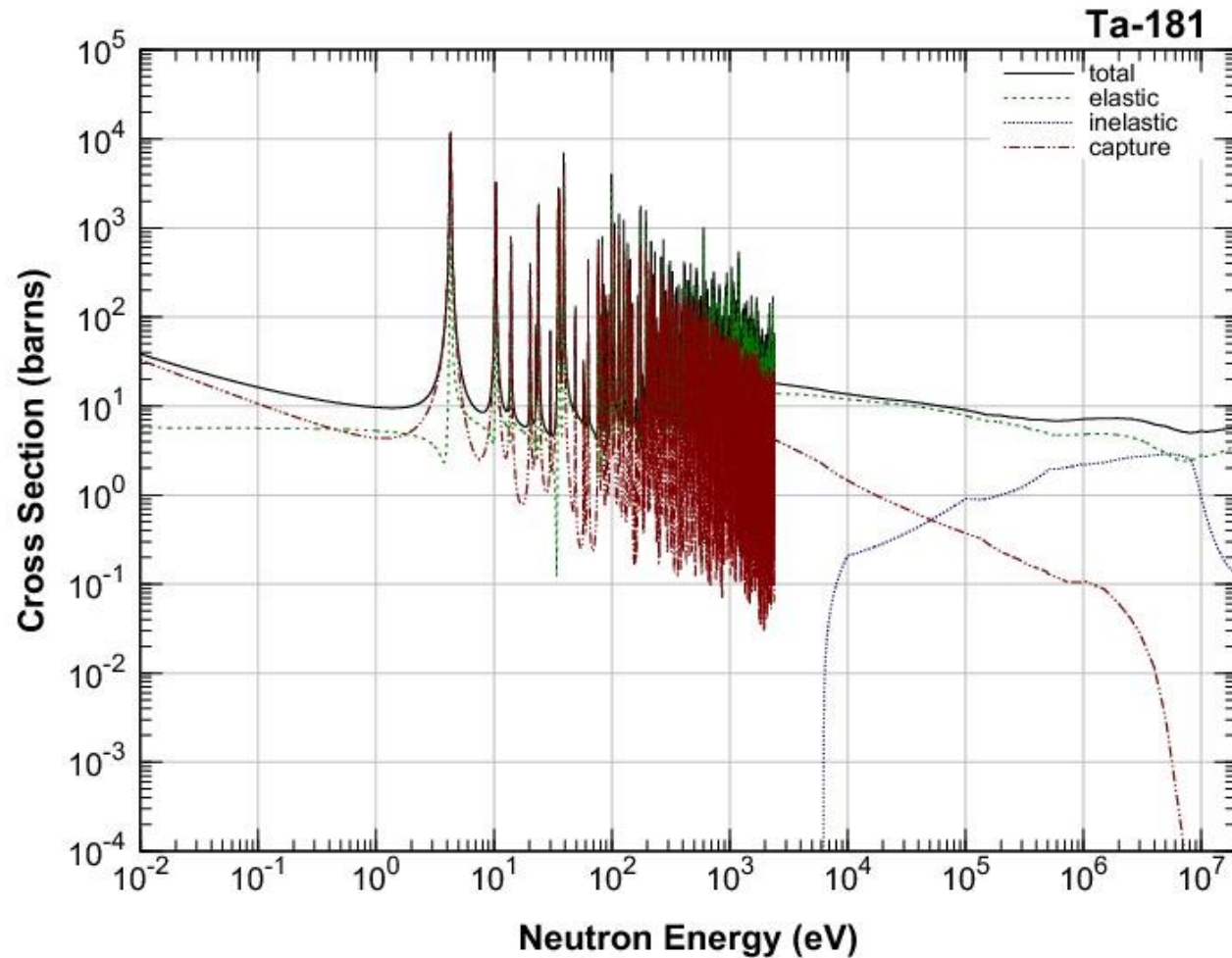
## U-238

- 燃料中の95%
- 6-7 eVに $10^4$  barns弱の吸収ピーク

Puの1eVの吸収を使うのがよい。



# タンタル

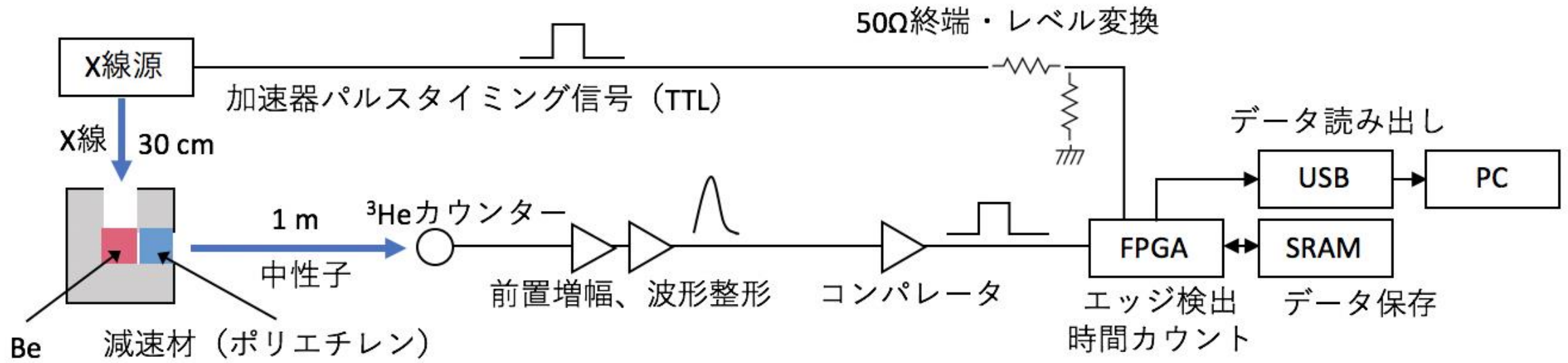


## Ta-181

- 天然存在比 99.9 %
- 吸収ピーク 4 eV
- 断面積  $\sim 10^4$  barns

→ 模擬デブリ中の  
U-238のシミュレート材料になりうる

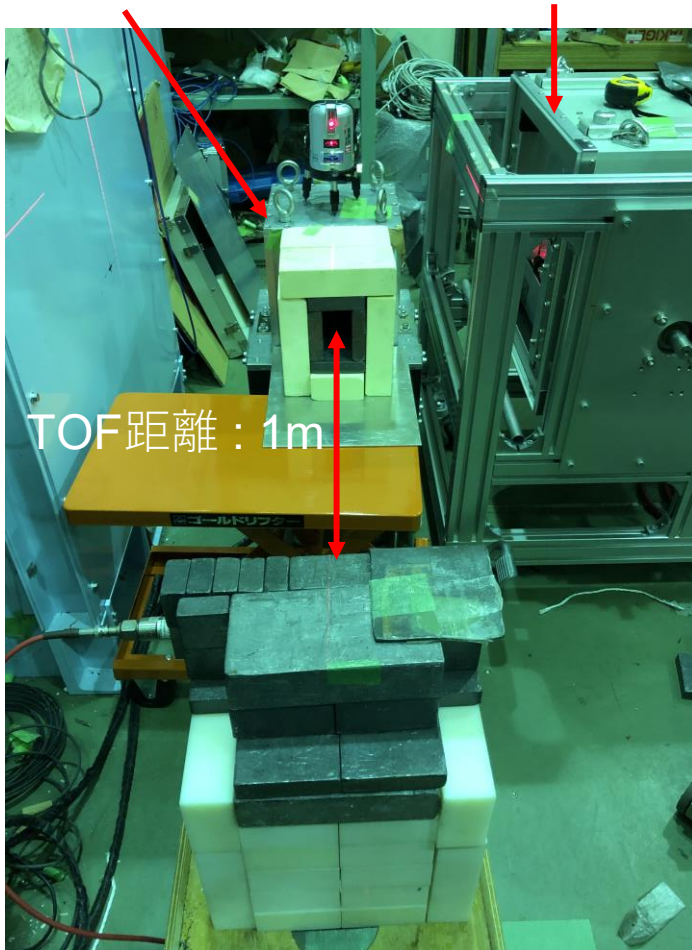
# 1m 中性子TOF 測定系



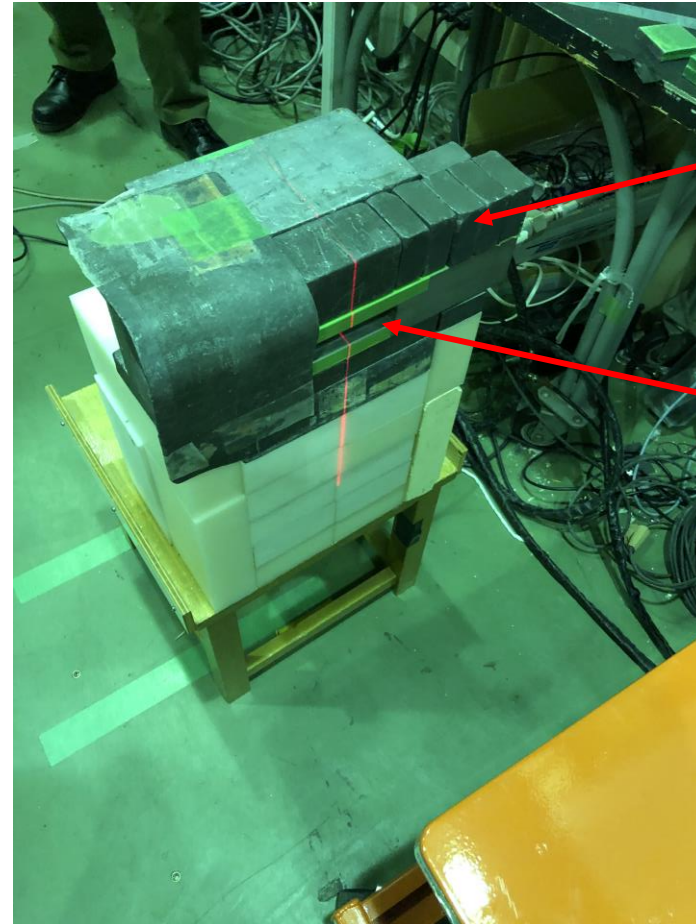
# 1m 中性子TOF 測定系

Beターゲット

3.95 MeV X線源



中性子線源

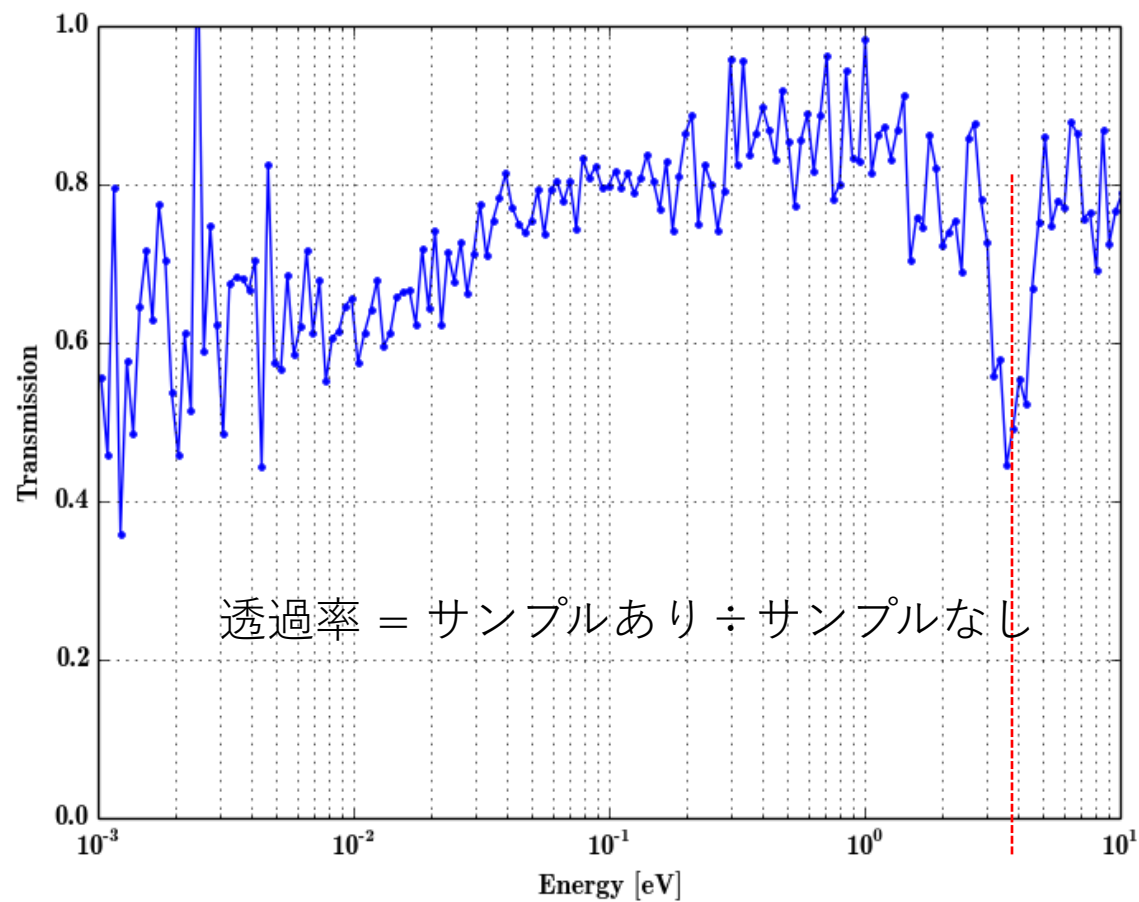
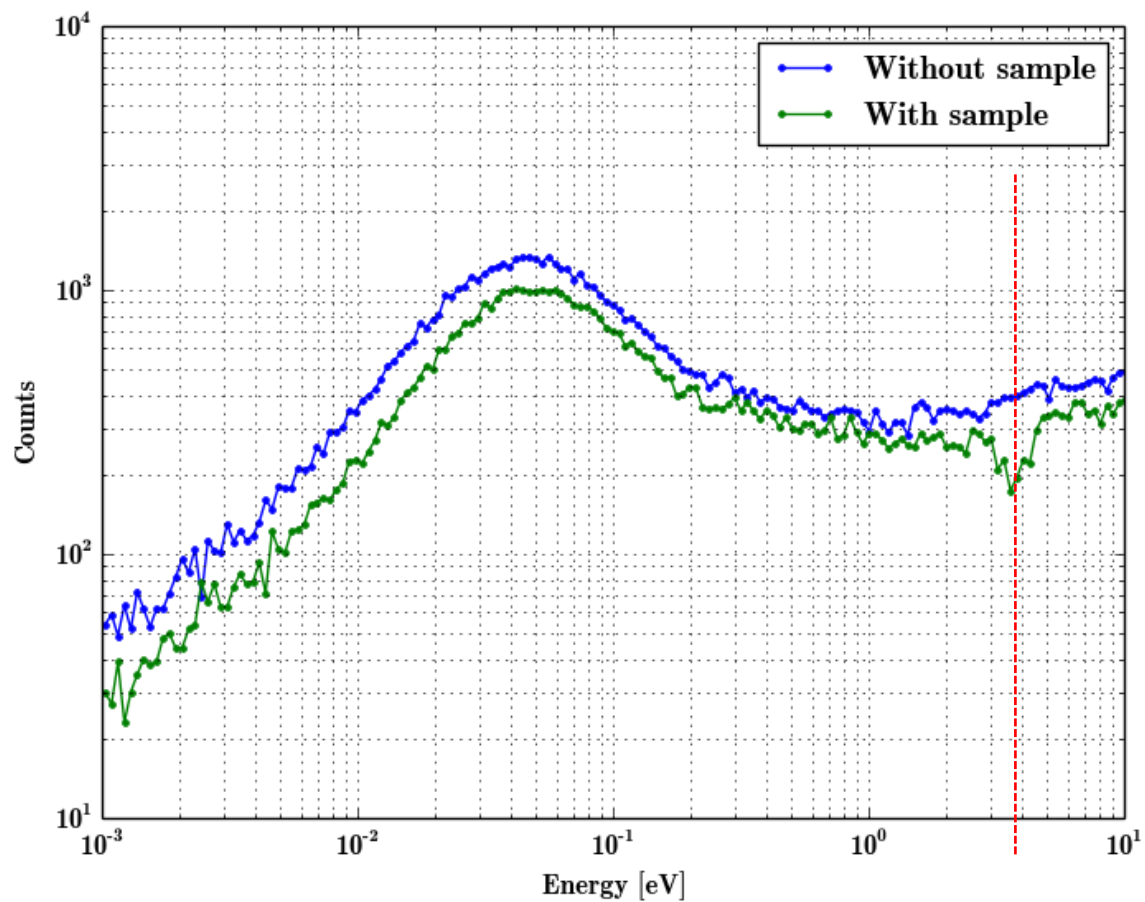


鉛遮蔽  
(X線バースト抑制)

He-3中性子検出器  
+B<sub>4</sub>Cカバー

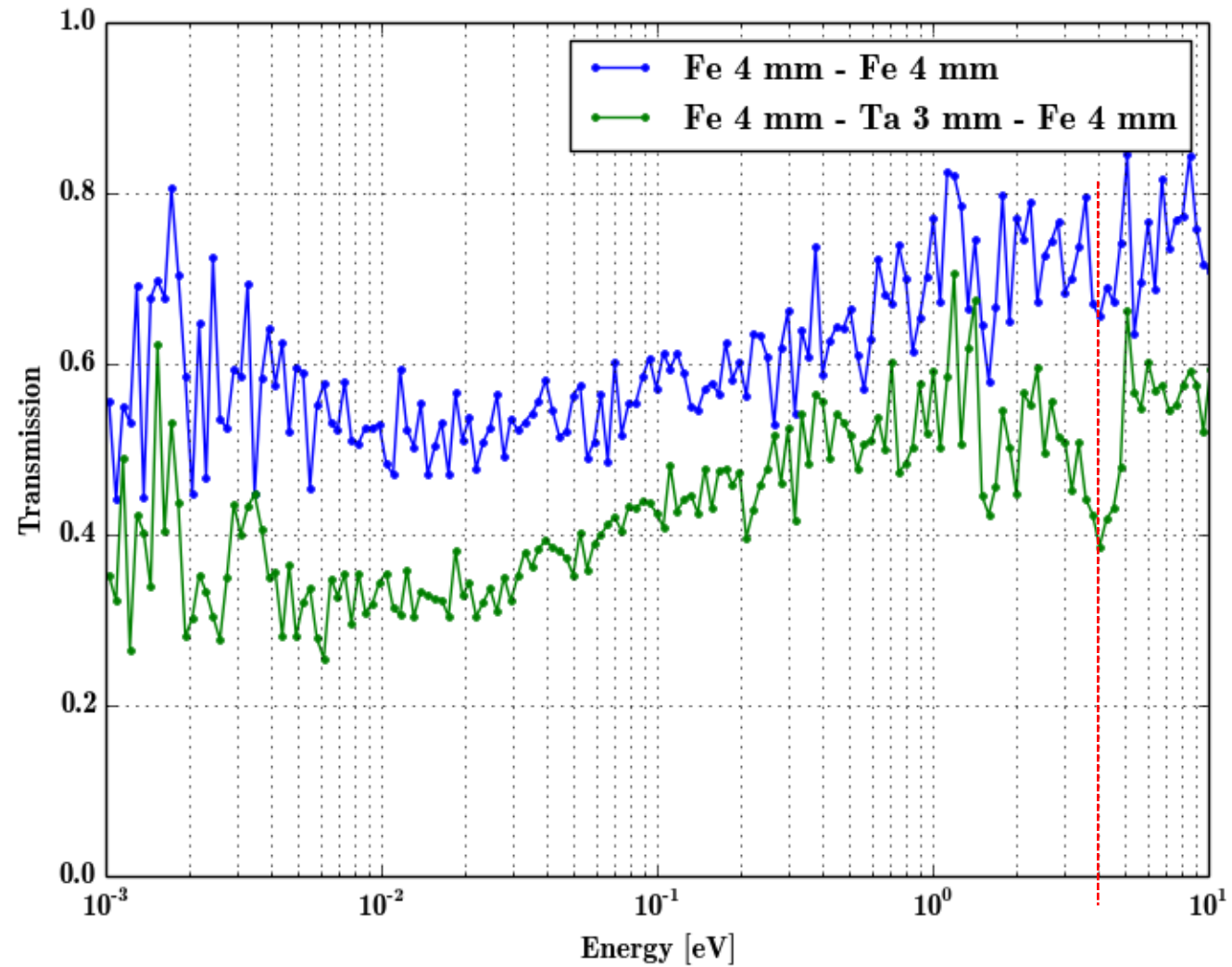
検出器

# 試料：Ta, 厚さ 3 mm



測定時間 60 分

# Feで挟んだTa試料



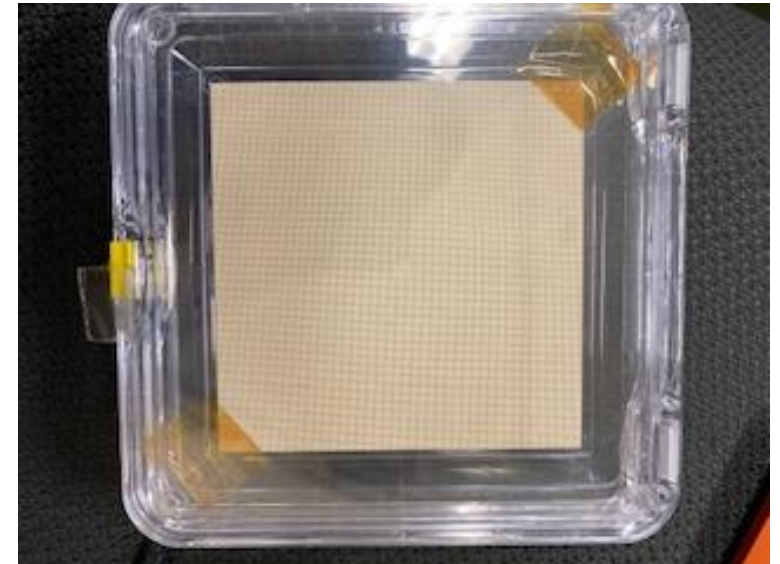
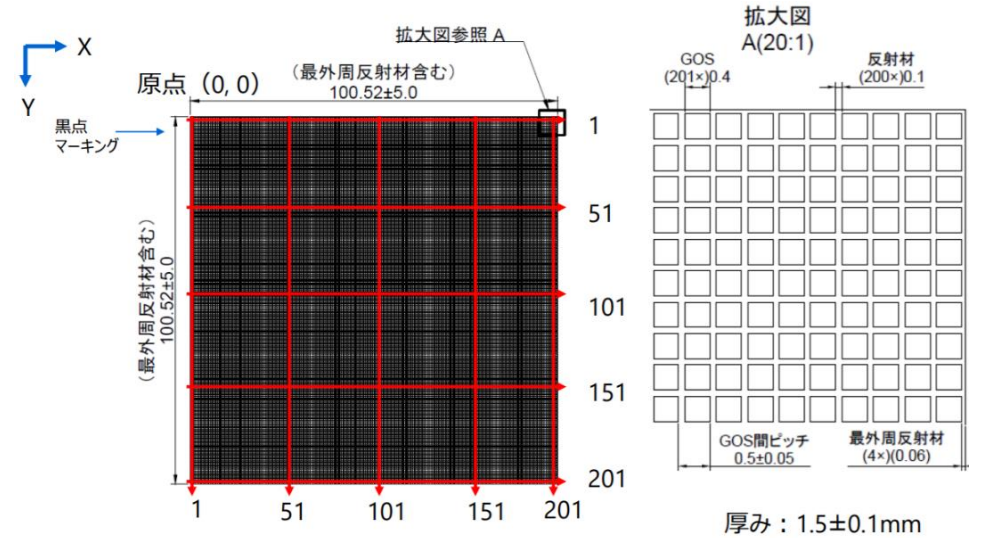
透過率 = サンプルあり ÷ サンプルなし

# フラットパネル検出器の開発



# フラットパネル検出器の開発

- ・ GOS( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Pr}$ )シンチレータ
  - 100.52 mm角、1.5 mm厚
  - 高エネルギーX線用として厚さが必要、  
普段のGOS(粉末状)ではあまり厚くできない  
⇒ **セラミックス**のピクセル状に作製
    - 高感度かつ短残光(3  $\mu\text{s}$ )
    - 低アフターグロー(3 ms後 < 0.1 %)
    - **半透明**
    - **高密度(7.34 g/cm<sup>3</sup>)**
    - 潮解性なし(耐湿性)
  - 通常の3倍以上の厚さ
    - 高エネルギーX線の検出効率↑期待
- ・ FPGはIGZOを利用



# フラットパネル検出器の開発

## 【セラミックスGOSシンチレータFPD】

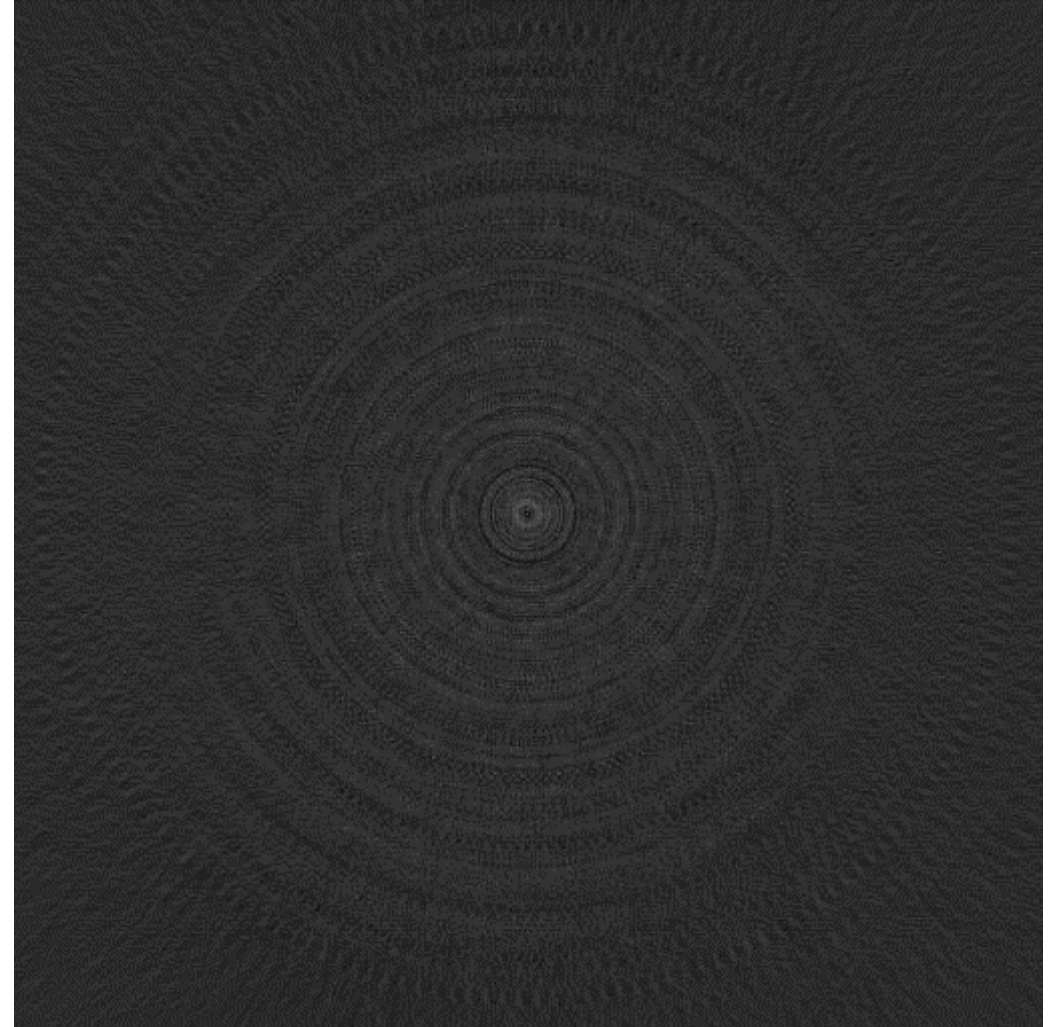
### ・ 模擬デブリサンプル撮像

- サンプルの断面の形や物質の種類によるCT値の変化を確認
- サンプルが写っているスライスの再構成は成功



模擬デブリサンプル  
(Zr:Pb = 2:1 (Zr: 336 g、Pb: 174 g)  
の比率でインゴット状に作製)

- ⇒ 以上の再構成結果のCT値のプロファイルから、平均コントラスト比  $\sim 500:1$
- ⇒ 比較用LNIよりGOSシンチレータを用いた撮像が平均コントラスト比が約10倍優れている
- ⇒ シンチレータ厚(LNI 435  $\mu\text{m}$ 、GOS 1.5 mm)と密度(LNI 3.6 g/cm<sup>3</sup>、GOS 7.34 g/cm<sup>3</sup>)に起因すると考えられる。

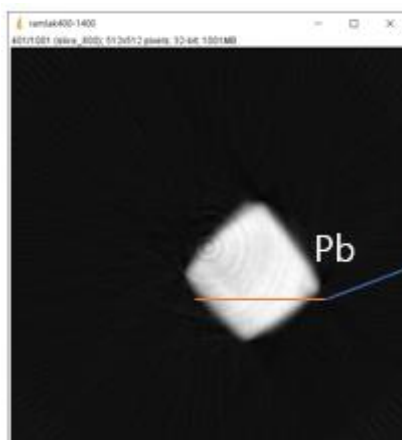




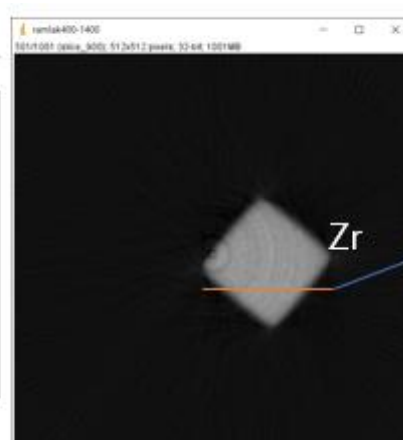
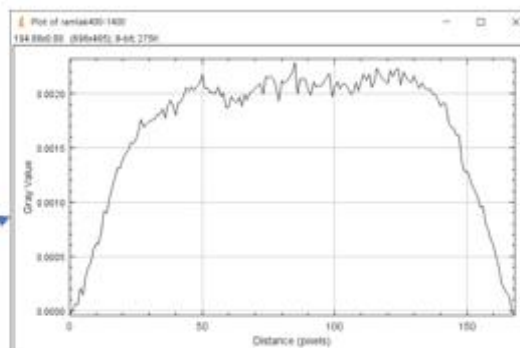
# セラミックスGOS- FPD

・ 3.95MeV X線によるキャリブレーションサンプル撮像

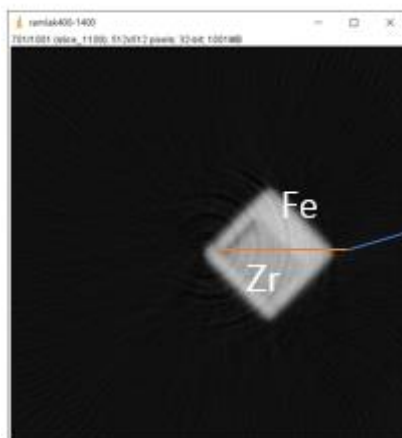
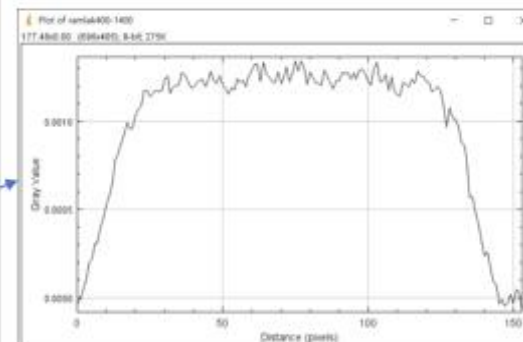
➔ 密度が高い順にCT値  
Pb :  $\sim 0.002$   
Fe :  $\sim 0.0015$   
Zr :  $\sim 0.0012$   
弁別可能



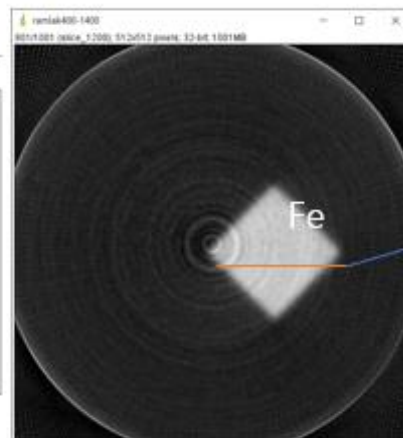
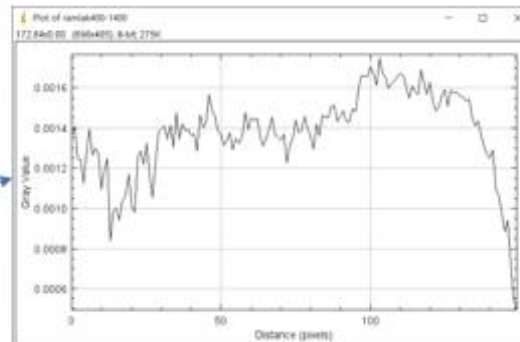
slice no. 800



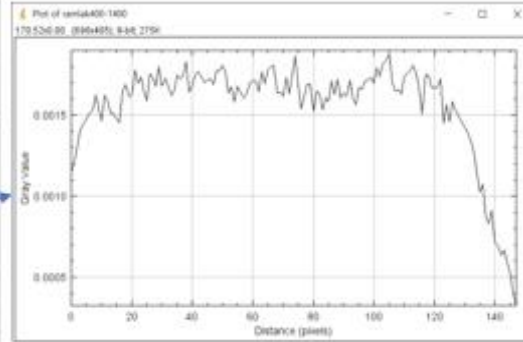
slice no. 900



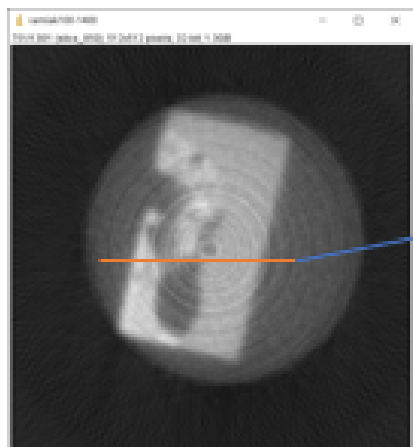
slice no. 1100



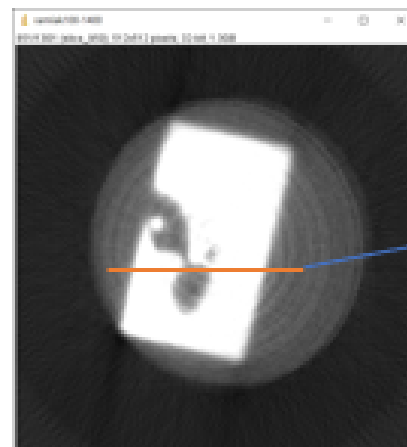
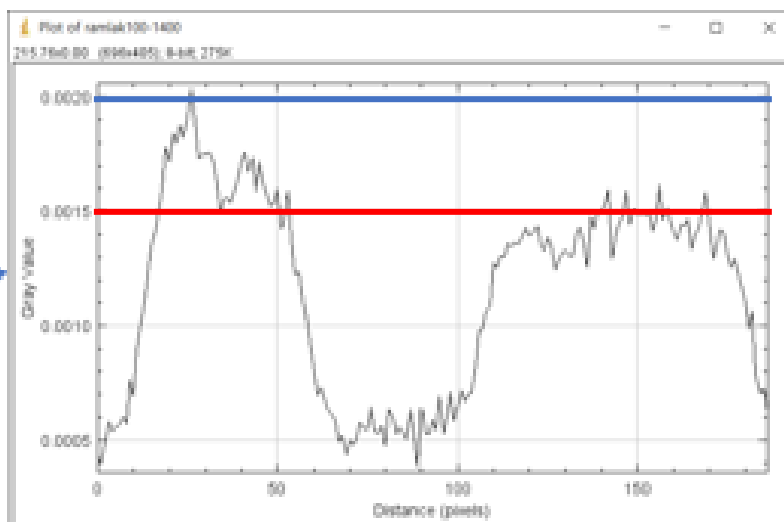
slice no. 1200



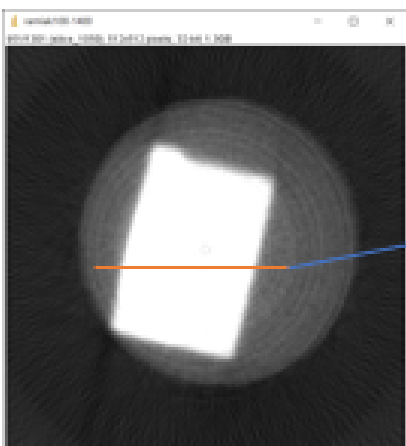
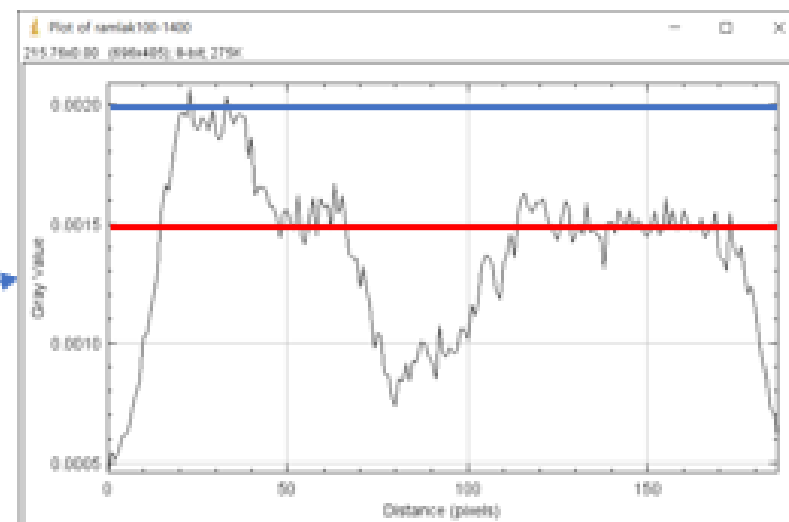
# Fe:Pb=2.1のサンプルの3.95MeV X線による撮像結果



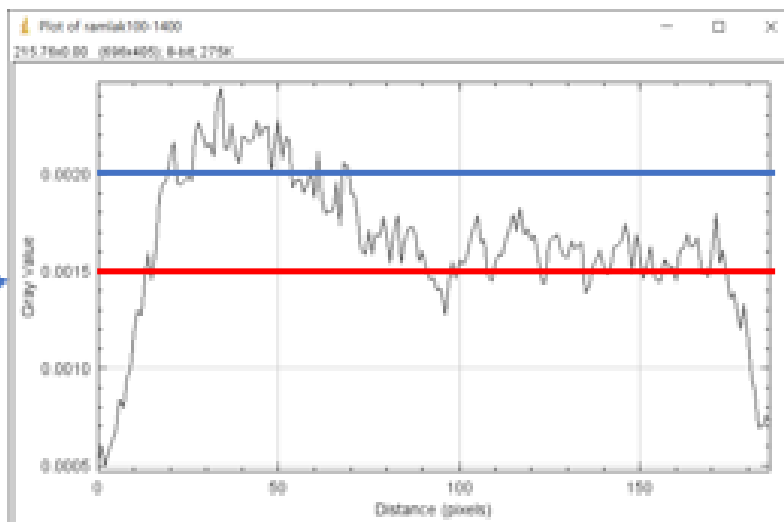
slice no. 850



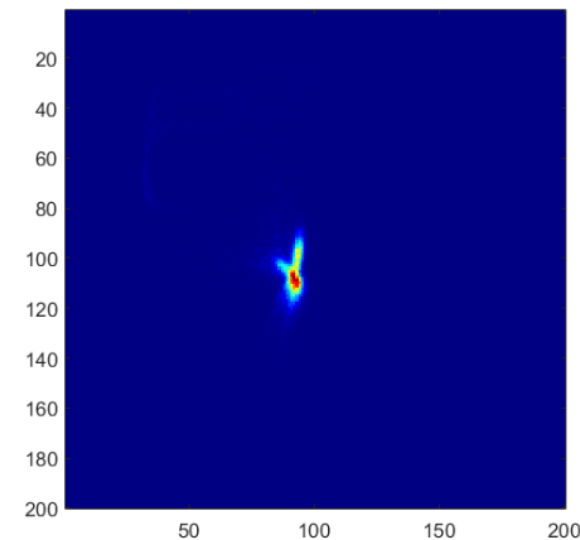
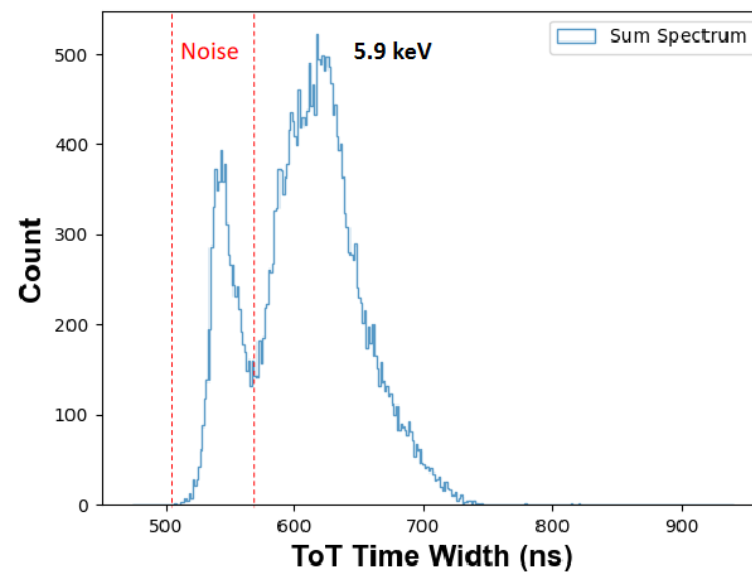
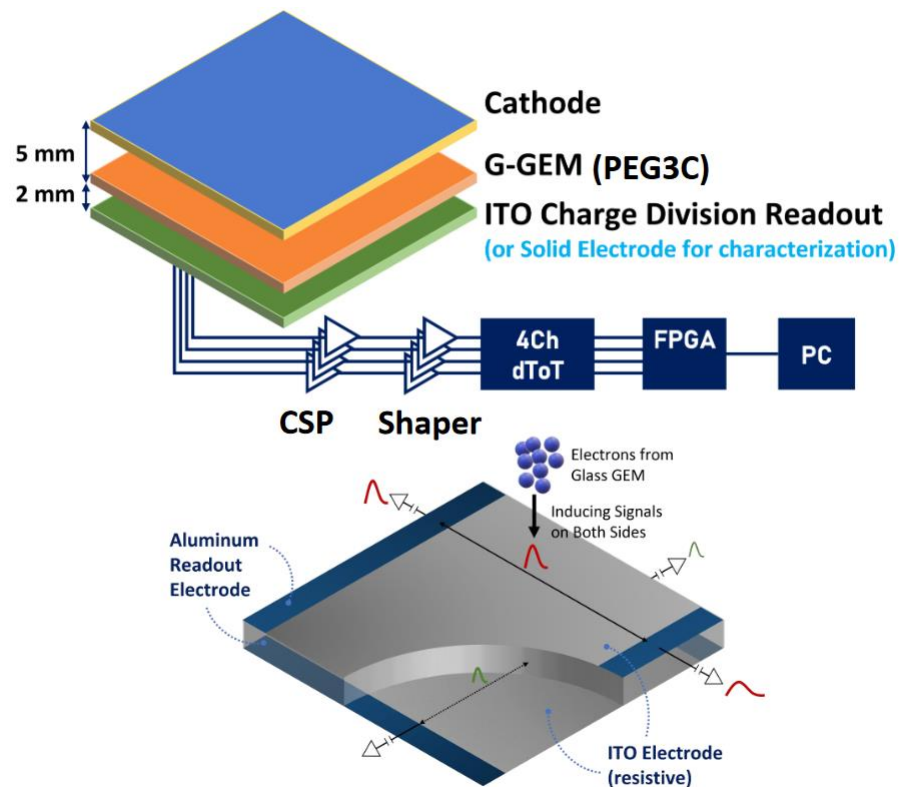
slice no. 950



slice no. 1050



# 位置情報をもつ気体検出器

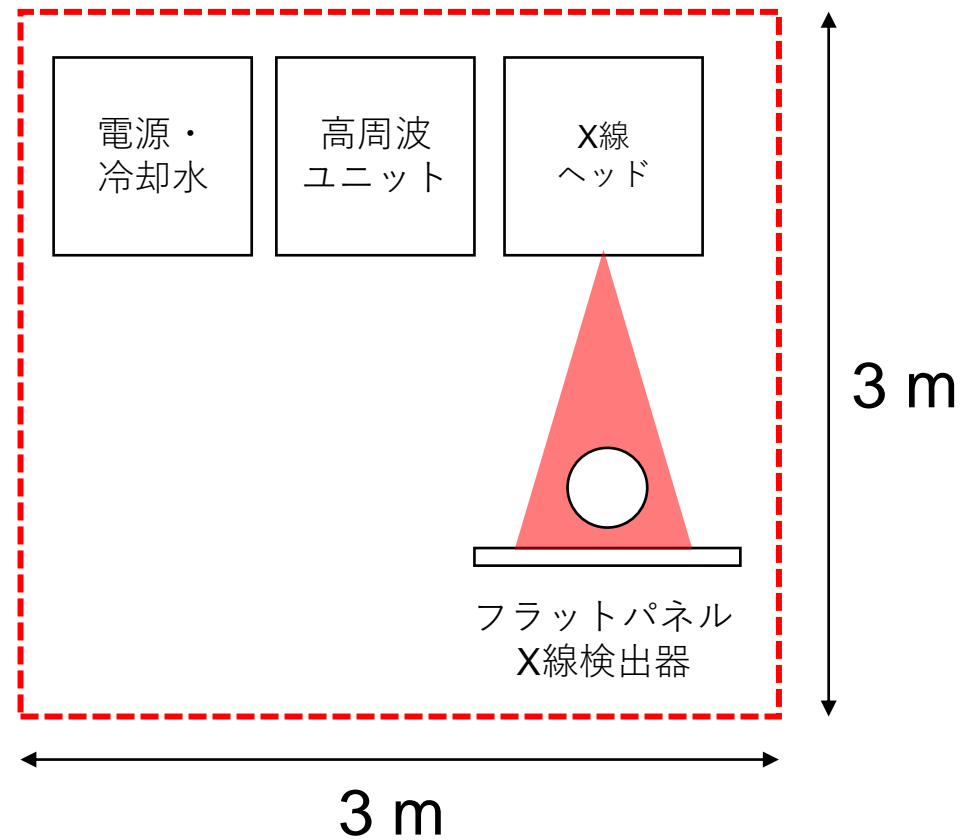
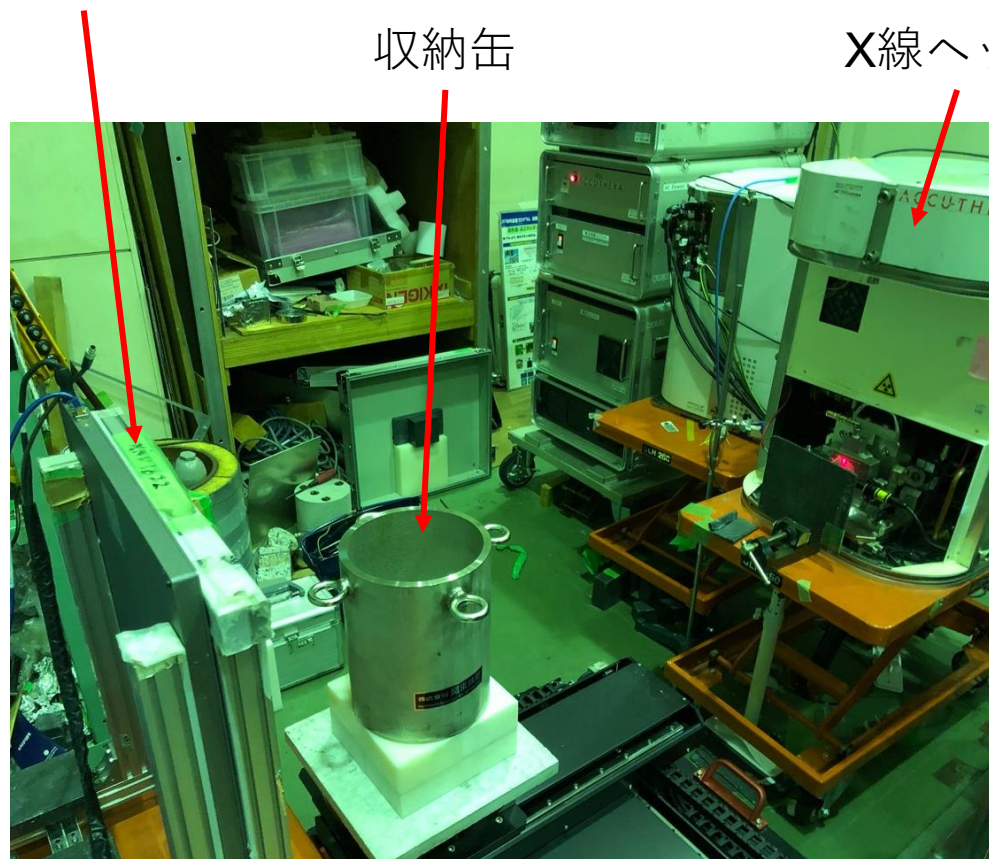


# 実機システムの設計

# 950-keV機システム

## 2次元X線検出器

(フラットパネル検出器)

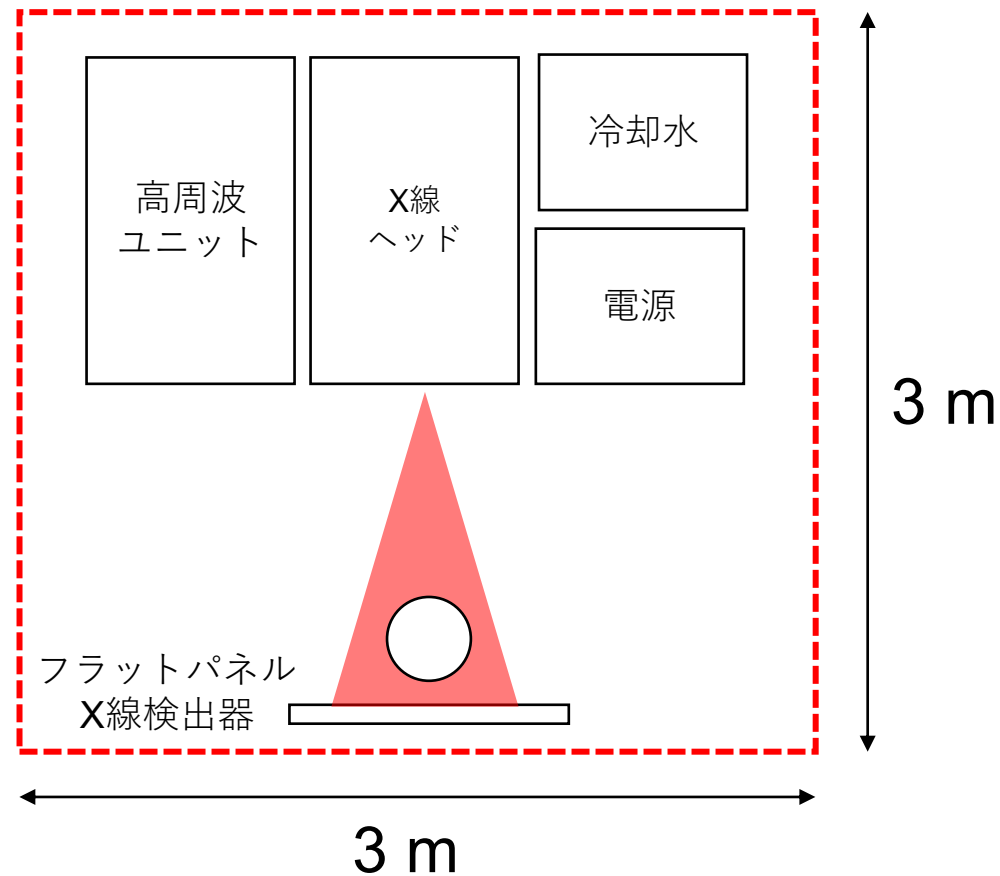
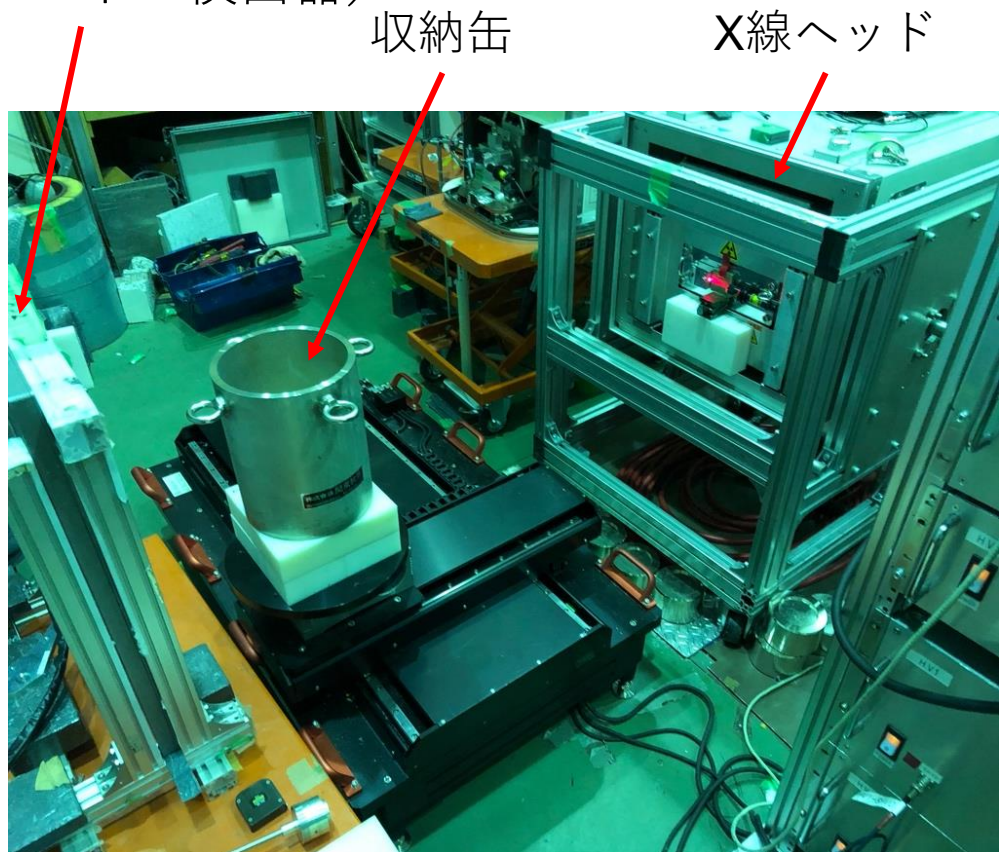


3次元CT測定に要する時間  
最速 (180投影) 5分、  
高SN測定 (720投影) 17分

# 3.95-MeV機システム

## 2次元X線検出器

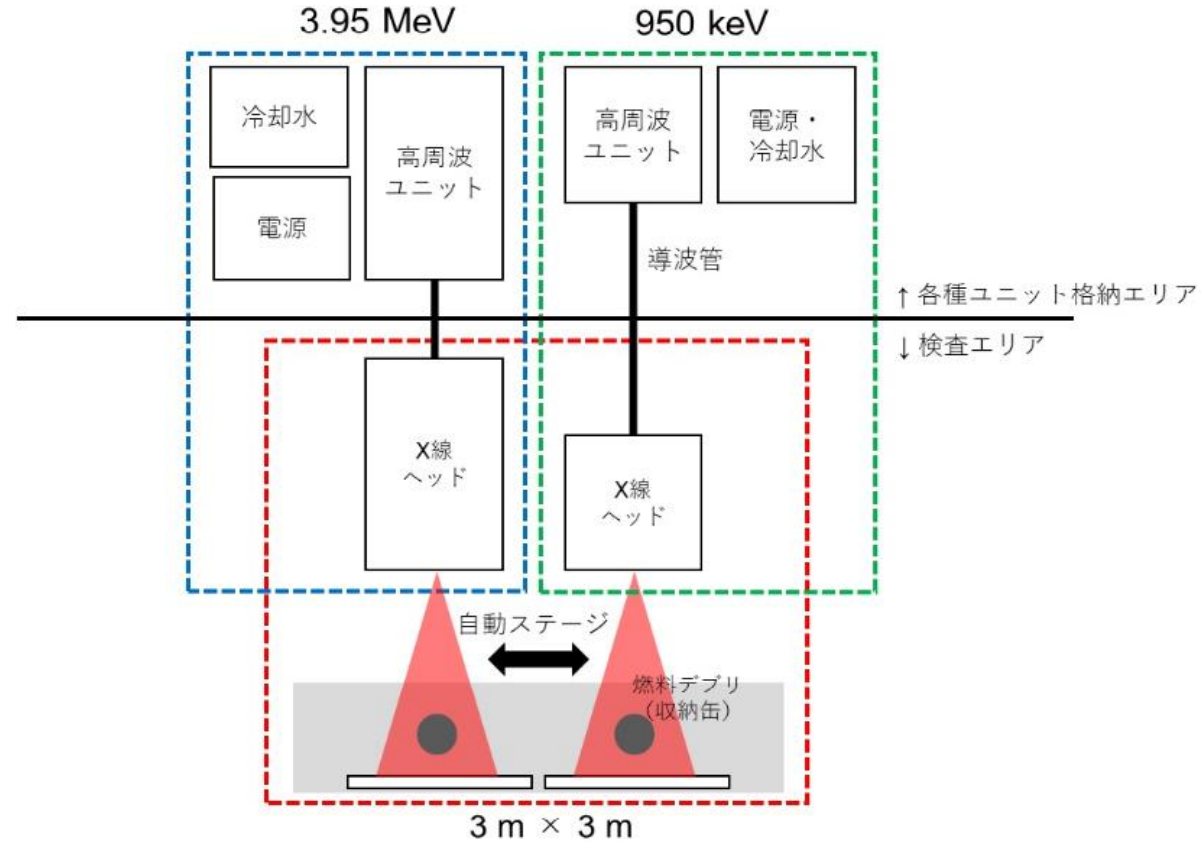
(フラットパネル検出器)



3次元CT測定に要する時間  
最速 (180投影) 5分、  
高SN測定 (720投影) 17分



# 2色X線CTシステムの設計



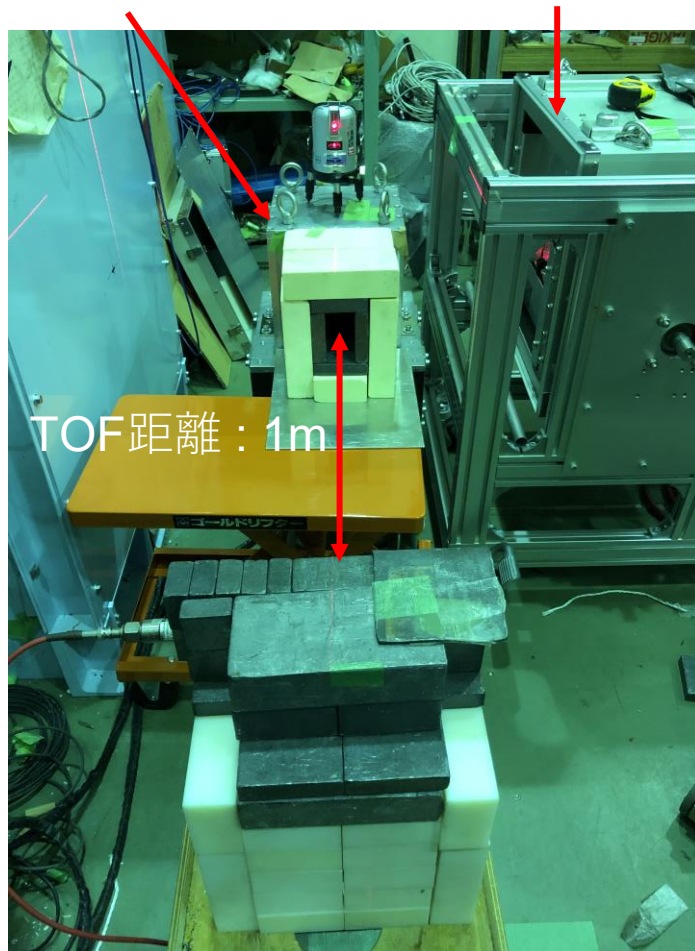
2色X線CTによって期待される成果：

- 異なるスペクトルのX線でのCT結果を利用した詳細な元素同定。  
特に、異なるスペクトルでのCT輝度値を特徴量に用いた、  
機械学習手法による元素クラスタリング

# 中性子分析システム

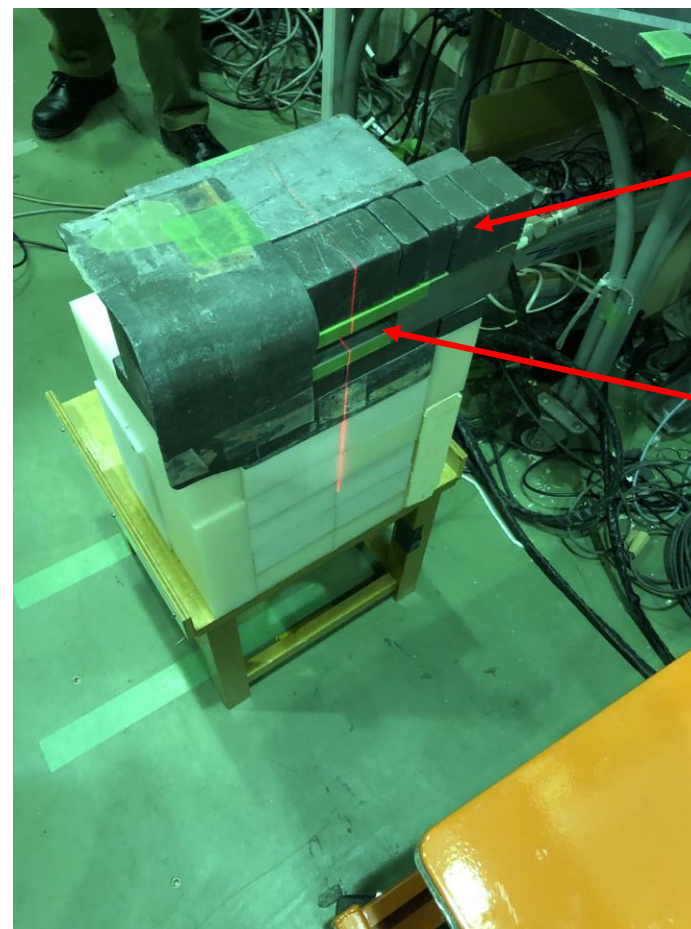
Beターゲット

3.95 MeV X線源



TOF距離：1m

Beでの光核反応による中性子発生



鉛遮蔽  
(X線バースト抑制)

He-3中性子検出器  
+B<sub>4</sub>Cカバー

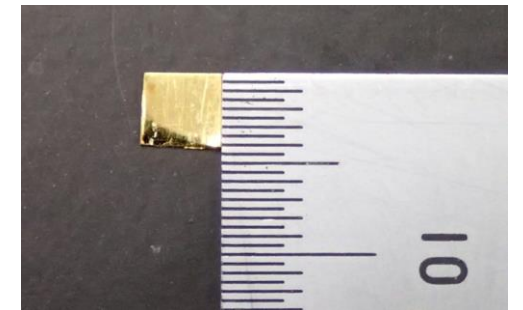
検出器



# 放射化の評価

- **3.95MeV**加速器を用いた中性子ビーム測定系において、**Au**箔を設置して、照射、**Ge**検出器による放射能測定を行った。
- 現在の体系では**8時間**の照射において、**26Bq**の放射能となった。

0番サンプル金片質量 [g] (測定値)	金比重	金体積 [cc]	PHITS計算比放射能 [Bq/cc]	加速器 ビーム強度比	放射能計算値 [Bq]
0.0694	19.3	0.003596	1.23E+04	5.00E-01	22.2
Geでの412keV カウントレート [cps] (測定値)	Ge検出効率 @411keV[cps/ $\gamma$ ]	$\gamma$ (412keV)	412keV放出割合 [ $\gamma$ /Bq]		金サンプル放射能 [Bq]
0.6353	0.022952733	27.67862	0.947		26.2



# まとめ

本研究では、福島第一原子力発電所の現場での燃料デブリ分析を目的として**2色X線CT**および**NRTA**のシステム開発およびその実証を行った。

- 可搬型小型加速器**X線源**に基づいた**2色X線CT**、および同加速器に基づく小型中性子源による**NRTA**を実施した。
- **CT**では模擬デブリを収納缶に格納した状態での測定を行**CT**の結果の分析を行い、**U**模擬物質の定量評価を行った。。
- 現場試験においてはスペースが限られるため、**3 m**四方の領域内にシステムを配置するような基本設計を実施した。これを用いて**X線CT**の実験を実施した。