6th Jan. 2023

北海道大学

令和4年度中性子イメージング専門研究会 @ 京都大学複合原子力科学研究所

# 元素識別イメージングに向けた熱/熱外/高速中性子・X線同時ラジオグラフィ

○武多 実紀, 佐藤 博隆, 加美山 隆

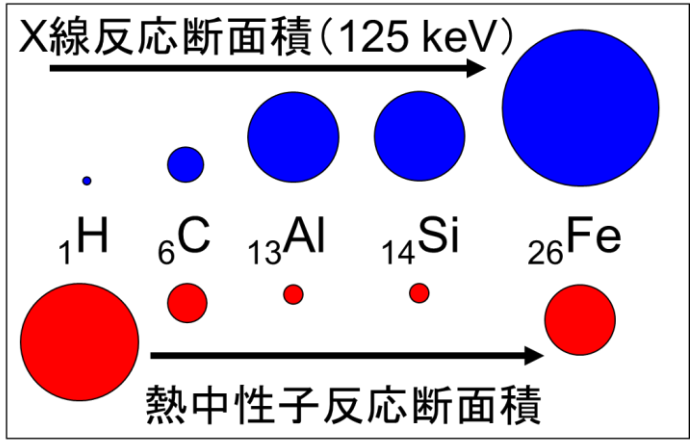
北海道大学 大学院工学院

# 放射線の断面積の比を利用した元素同定

## 放射線の透過率と断面積の関係

$$T = \exp(-nt\sigma)$$

($T$: 透過率, $n$: 原子数密度, $t$: 試料厚さ, $\sigma$: 断面積)




X線（X）と中性子（n）の各透過率の
自然対数の比

$$\frac{\ln T_{\mathrm{X}}}{\ln T_{\mathrm{n}}} = \frac{\sigma_{\mathrm{X}}}{\sigma_{\mathrm{n}}}$$

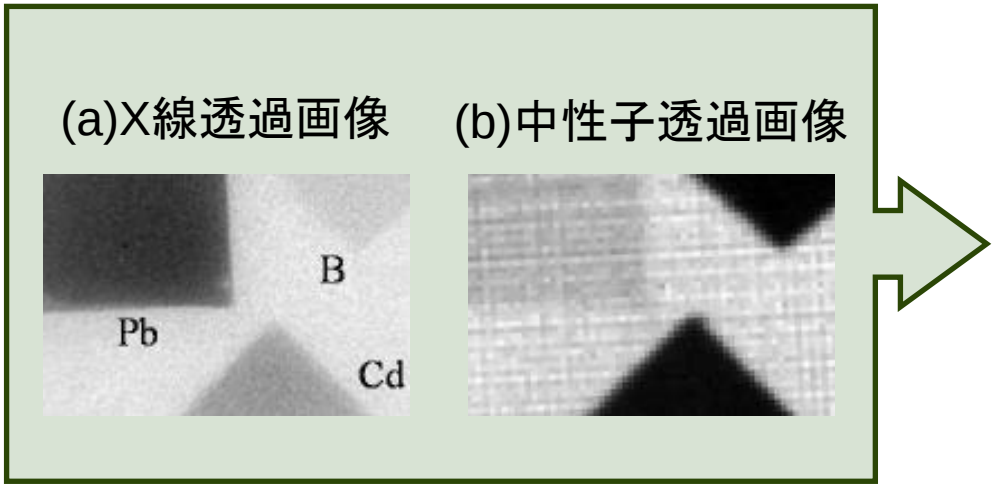
面密度に依存しない元素固有の
パラメータ

**元素同定型のイメージングが可能**

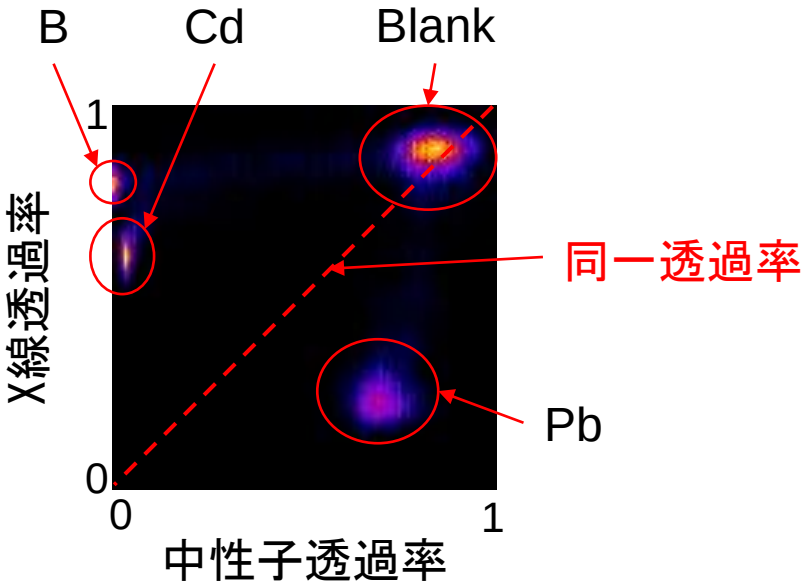
# 先行研究(1/2):
# 中性子・X線シナジーイメージングによる元素同定

中性子画像とX線画像から各画素における透過率のヒストグラムを作成したとき、物質によって現れるスポット位置が異なる。

⇒中性子とX線では元素ごとの断面積の大小が異なるため。




各画素における透過率のヒストグラム

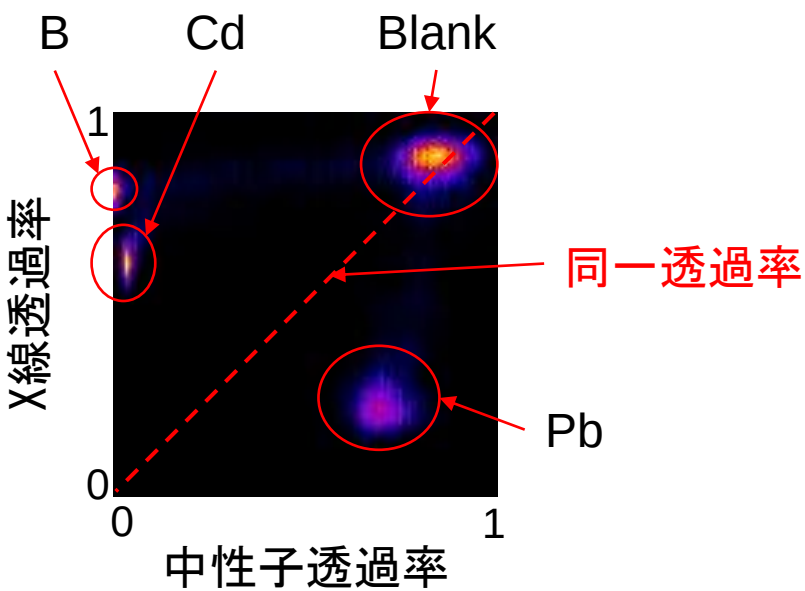



このヒストグラムと$\sigma_X/\sigma_n$の情報を利用することで、どの核種がどの位置に存在するかを求めることが可能。

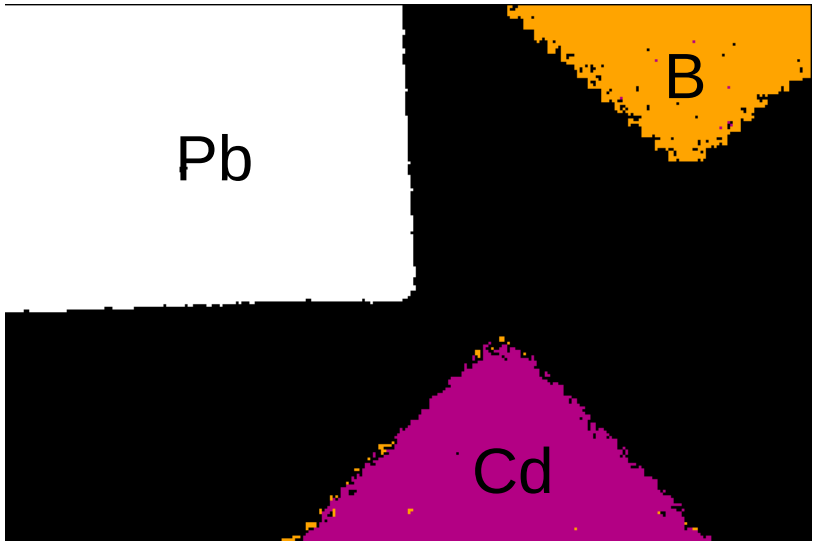
H. Hasemi *et al.*, IEEE Nuclear Science Symposium (2016).

# 先行研究(2/2):
# 得られる元素イメージングとシナジーイメージングの課題

各画素における透過率のヒストグラム




元素イメージング画像



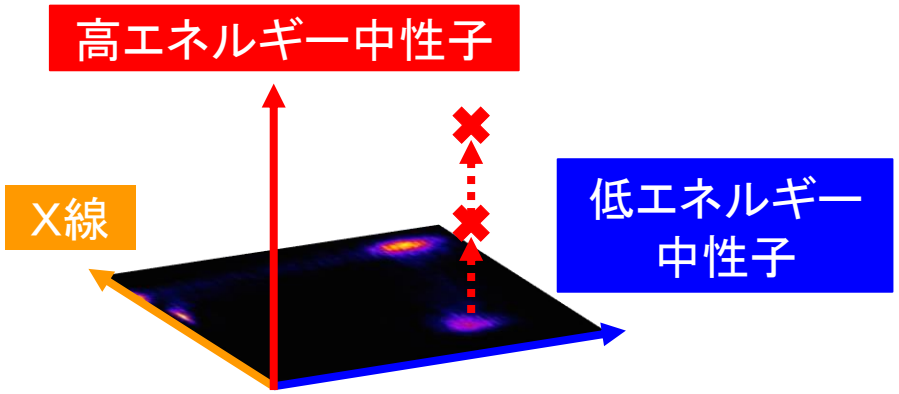

$\sigma_X/\sigma_n$(X線断面積/熱中性子断面積)がほぼ同じ元素については、
元素を一意に同定できない場合がある

# 解決方策の提案：中性子エネルギーのマルチ化

## 解決方策

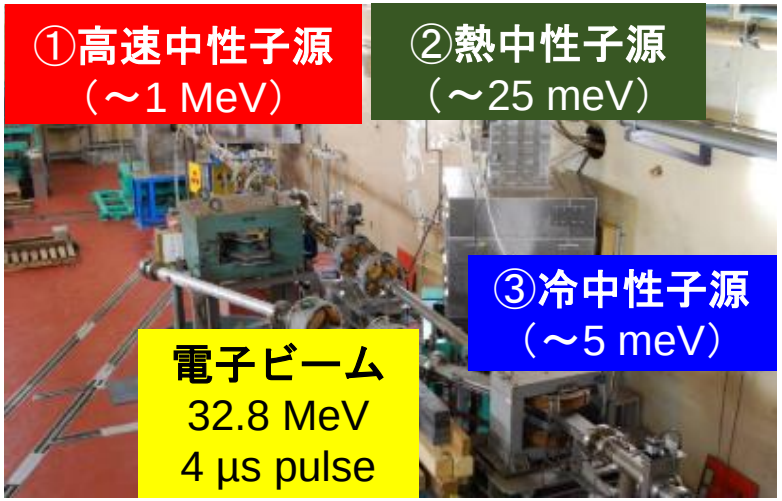
中性子のエネルギーをマルチ化することで複数断面積比の画像を取得

**元素識別能力を向上できるのでは？**




## 北海道大学電子加速器駆動パルス中性子源「HUNS」の利用

- 中性子発生源を変更することで**冷/熱/熱外/高速中性子**を供給できる。
- 電子加速器を利用しているため、**X線**の発生も可能。




**マルチエネルギー中性子・X線両用イメージングの場として有用**

# 研究の目的と内容

## 研究の目的

新たな元素識別イメージングを目指した
広エネルギー中性子・X線両用イメージングシステムの開発

## 研究の内容

- 放射化コンバータとX線IPを用いたHUNS用イメージングシステムの開発
- 熱外中性子を含めたエネルギー選択的中性子イメージング
- マルチエネルギー中性子・X線同時イメージングの試験

# 研究内容

① 放射化コンバータとX線IPを用いたHUNS用イメージングシステムの開発

② 熱外中性子を含めたエネルギー選択的中性子イメージング

③ マルチエネルギー中性子・X線同時イメージングの試験

# HUNSでのIPシステムの構築

## IPシステムの整備

北大の触媒科学研究所で使用されていたSAXS装置から移設し、HUNSの放射線管理区域近くで利用できるように整備した。

## 使用する機器の情報

◆使用するIP

BAS-SR（127 mm×127 mm）

◆IP読み取りスキャナー

株式会社リガク　RIGAKU DS3C R-AXIS

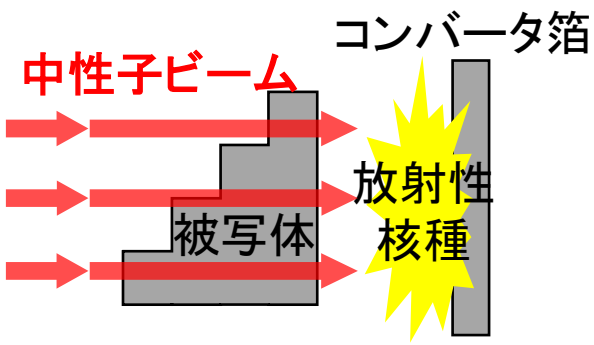
◆読み取り画像の仕様

16 bit, 125 mm / 450 pixels

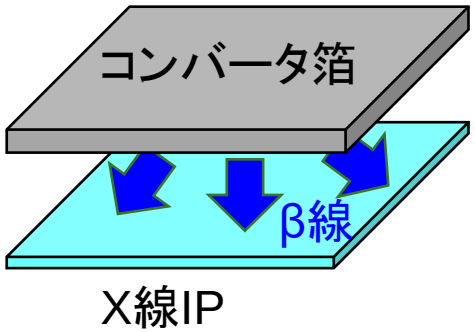
# 間接中性子イメージング法を利用したマルチエネルギー中性子・X線イメージングの方法

## 放射化コンバータを用いた間接中性子イメージング

①ビーム照射




②転写




**利点**

◎ コンバータの種類を変えることで**エネルギー選択的に中性子イメージング**が可能。

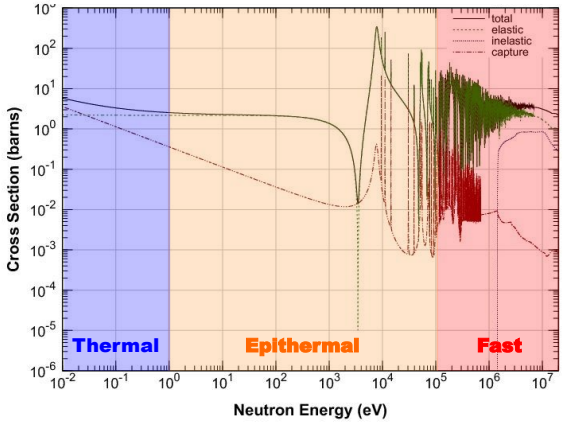
◎ IPをビームライン上に置くことで**X線直接イメージング**が可能。

## 各エネルギー帯で放射化に利用する中性子反応

JENDL-4.0

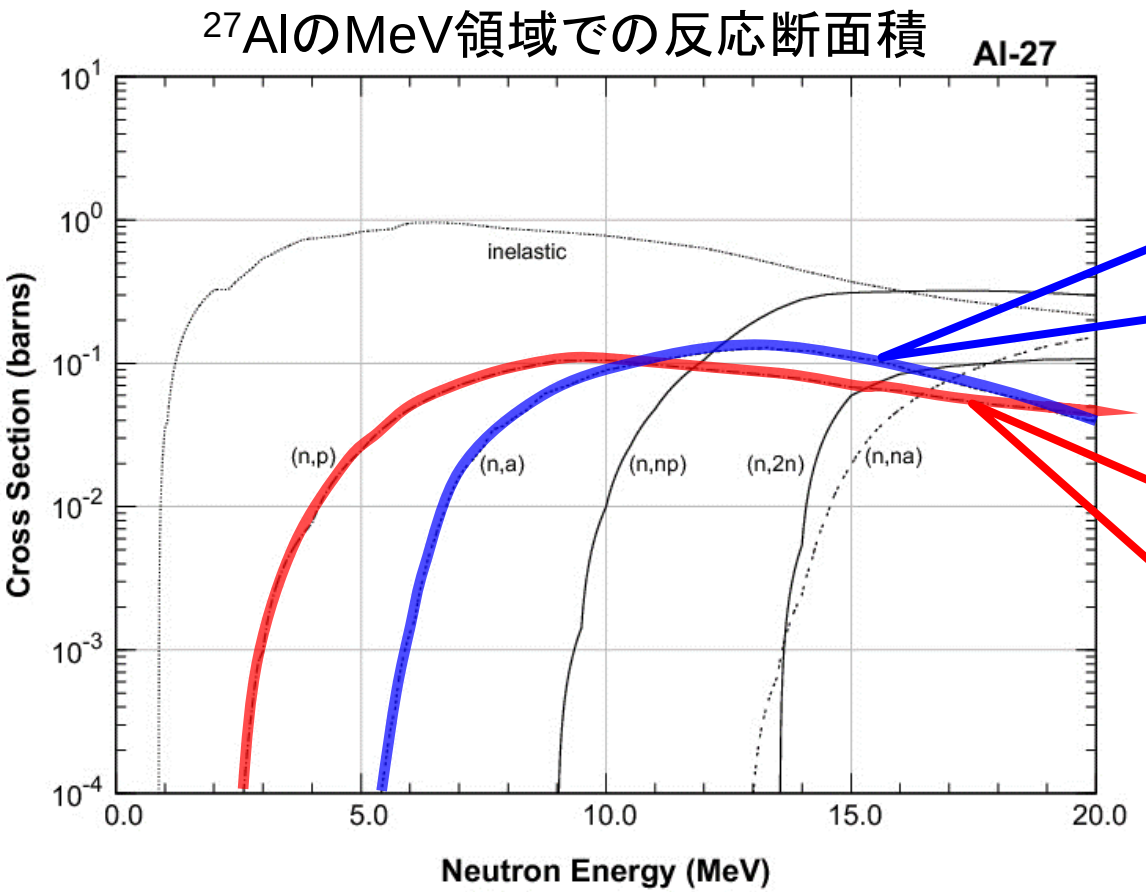
- ✓ 熱中性子 : 1/v吸収反応
- ✓ 熱外中性子 : 共鳴吸収反応
- ✓ 高速中性子 : 閾値核反応

$^{54}$Feの中性子反応断面積



# 高速中性子用コンバータとして利用したAlの閾値核反応

JENDL-4.0




(n,α)反応
- 生成核種: $^{24}$Na
- 半減期: 14.957時間
- β線最大エネルギー
  1.391 MeV(99.9%)

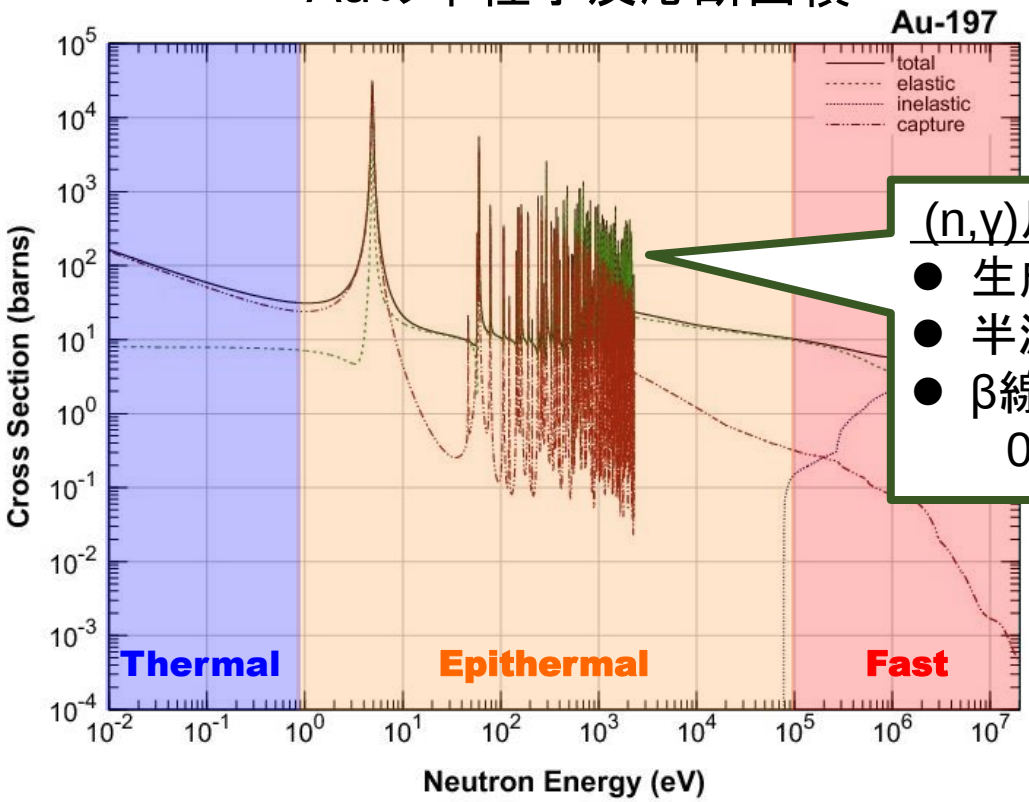
(n,p)反応
- 生成核種: $^{27}$Mg
- 半減期: 9.435分
- β線最大エネルギー
  1.596 MeV(29.0%)
  1.767 MeV(71.0%)

**0.5 mm厚さのAlコンバータを使用した**

# 熱/熱外中性子コンバータとして利用したAuの(n,γ)反応

JENDL-4.0

$^{197}$Auの中性子反応断面積




(n,γ)反応
- 生成核種: $^{198}$Au
- 半減期: 2.6941日
- β線最大エネルギー
  0.961 MeV (99.0%)

Auは熱中性子との反応・共鳴吸収が共に大きい。

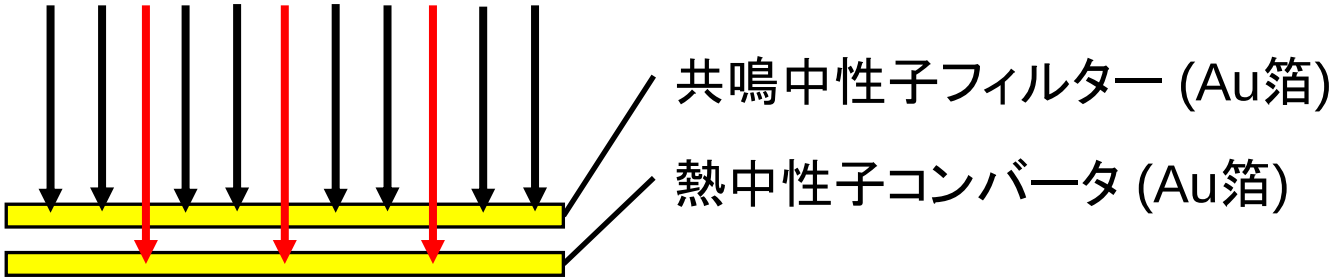
**0.02 mm厚さのAuコンバータを使用した**

# 共鳴中性子フィルターを利用した熱中性子コンバータの提案

Auは共鳴吸収が大きく、熱中性子以上に共鳴中性子を捉えてしまう

↓

**熱中性子コンバータと同一核種を**
**共鳴中性子のフィルターにすることで**
**共鳴中性子を除去した熱中性子成分のみのイメージング**




**ビーム上流コンバータ⇒熱外中性子イメージング**
**ビーム下流コンバータ⇒熱中性子イメージング**

# 研究内容

① 放射化コンバータとX線IPを用いたHUNS用イメージングシステムの開発

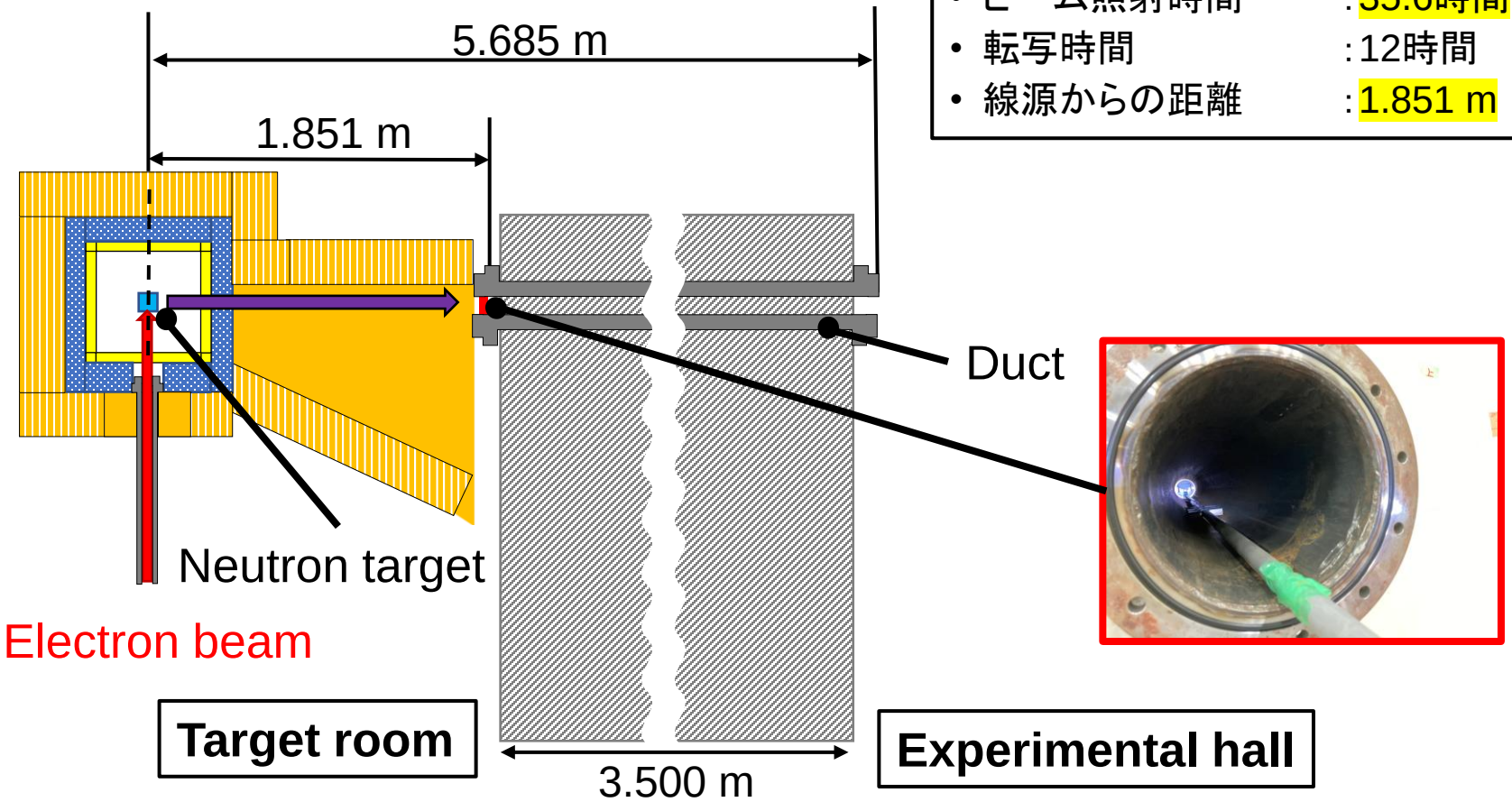
② 熱外中性子を含めたエネルギー選択的中性子イメージング

③ マルチエネルギー中性子・X線同時イメージングの試験

# 高速中性子イメージング

# 高速中性子イメージング実験の概要

高速中性子イメージング実験体系の概略図

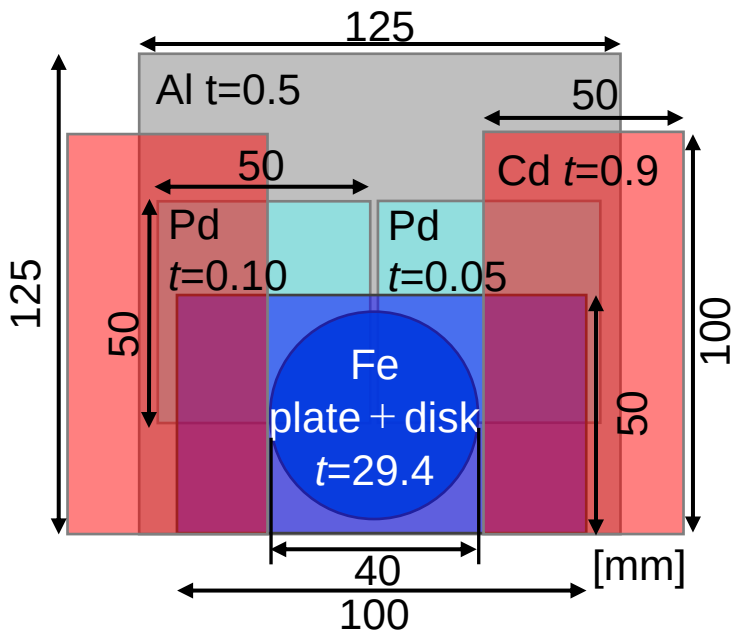



**実験条件**

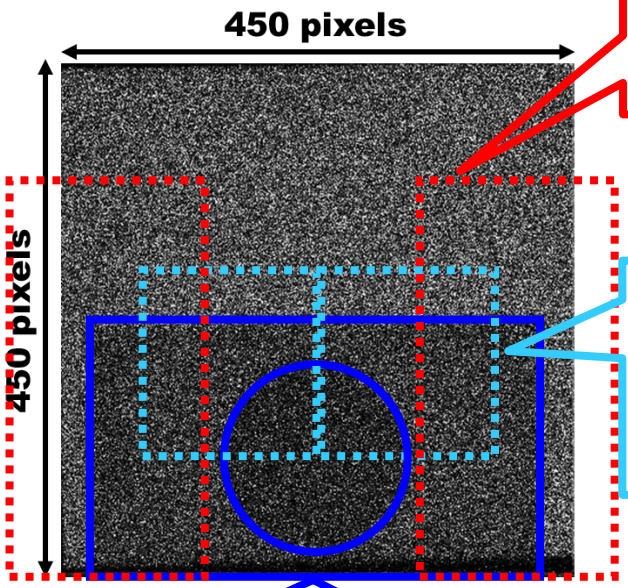
- 中性子源 :高速中性子源
- 加速器電流値 :70 μA
- ビーム照射時間 :35.6時間
- 転写時間 :12時間
- 線源からの距離 :1.851 m

# 高速中性子イメージング結果

被写体のセットアップ




イメージング結果




Cd…熱中性子に非常に強い吸収

写らなかった

Pd…熱外中性子に非常に強い吸収（共鳴吸収）

写らなかった

Fe…高速中性子に対して強い散乱

写った

**高速中性子成分のイメージングに成功**

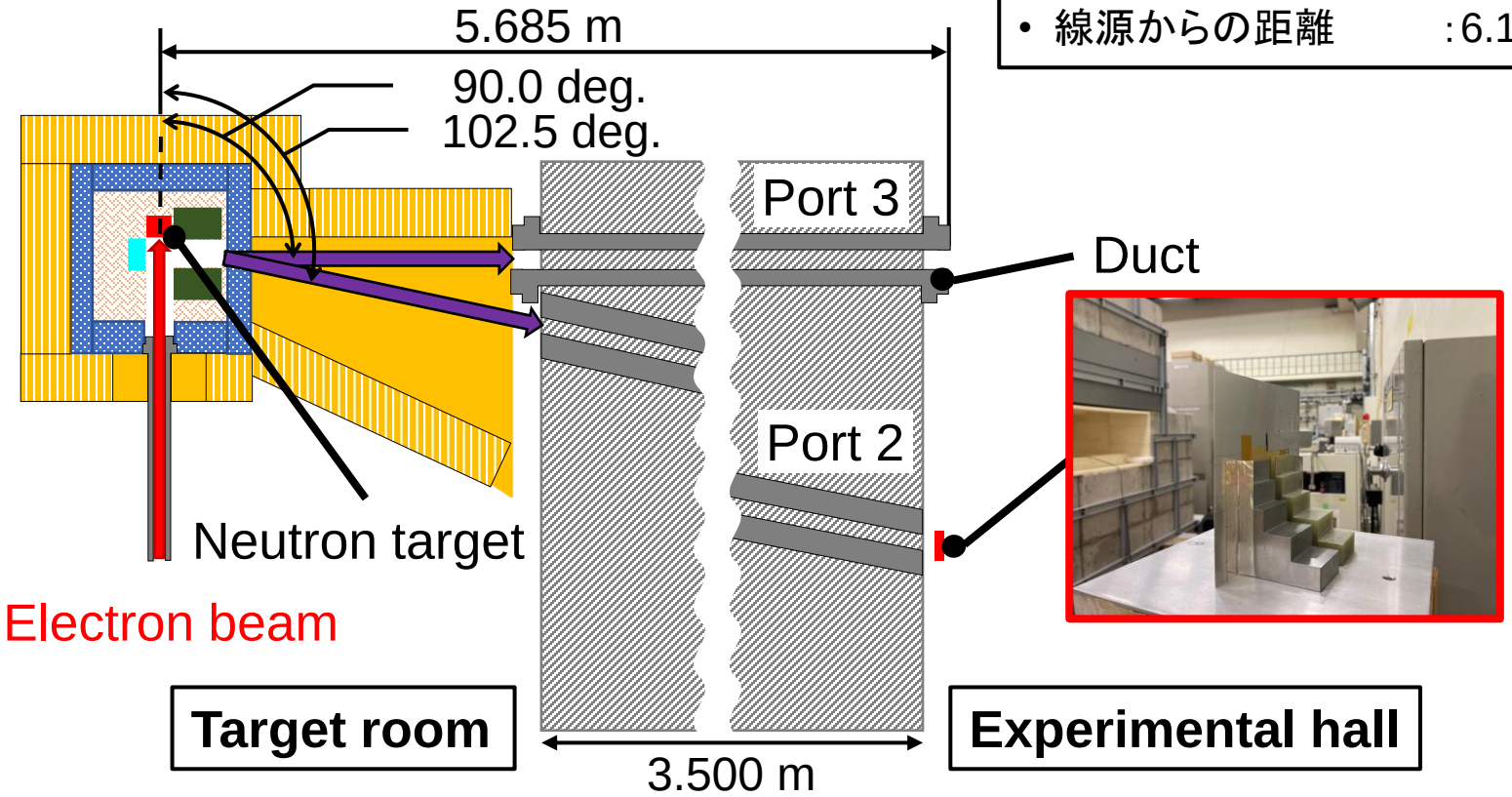
# 熱外中性子イメージング

# 熱外中性子イメージング実験の概要

**実験条件**

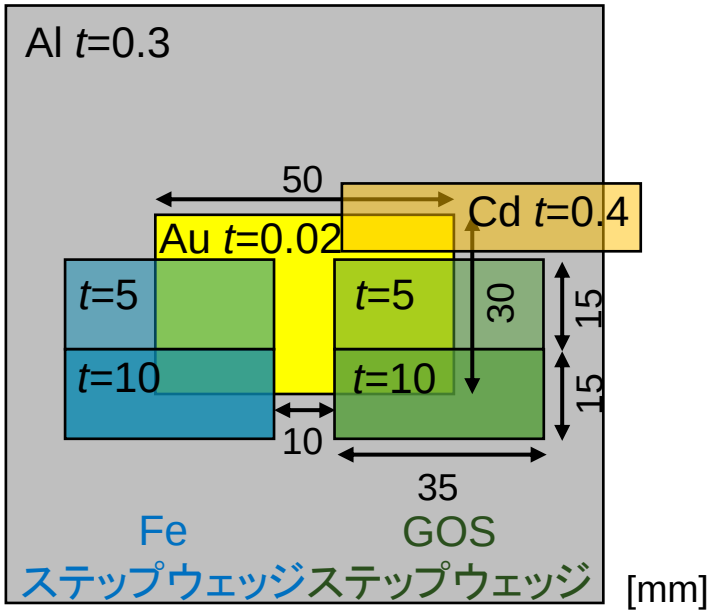
- 中性子源 :熱中性子源
- 加速器電流値 :5~100 μA
- ビーム照射時間 :計3時間
- 転写時間 :2.7日
- 線源からの距離 :6.10 m

熱外中性子イメージング実験体系の概略図

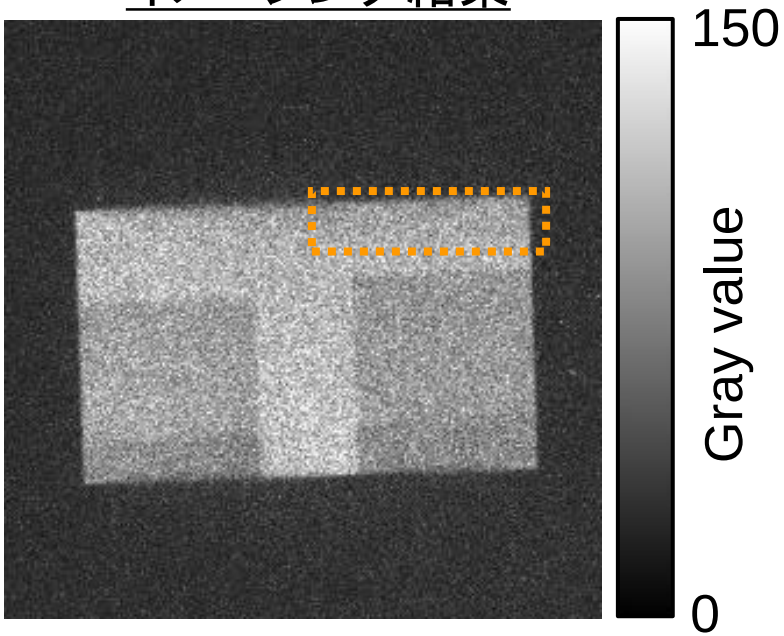


# 熱外中性子イメージング結果とその考察

被写体のセットアップ




イメージング結果



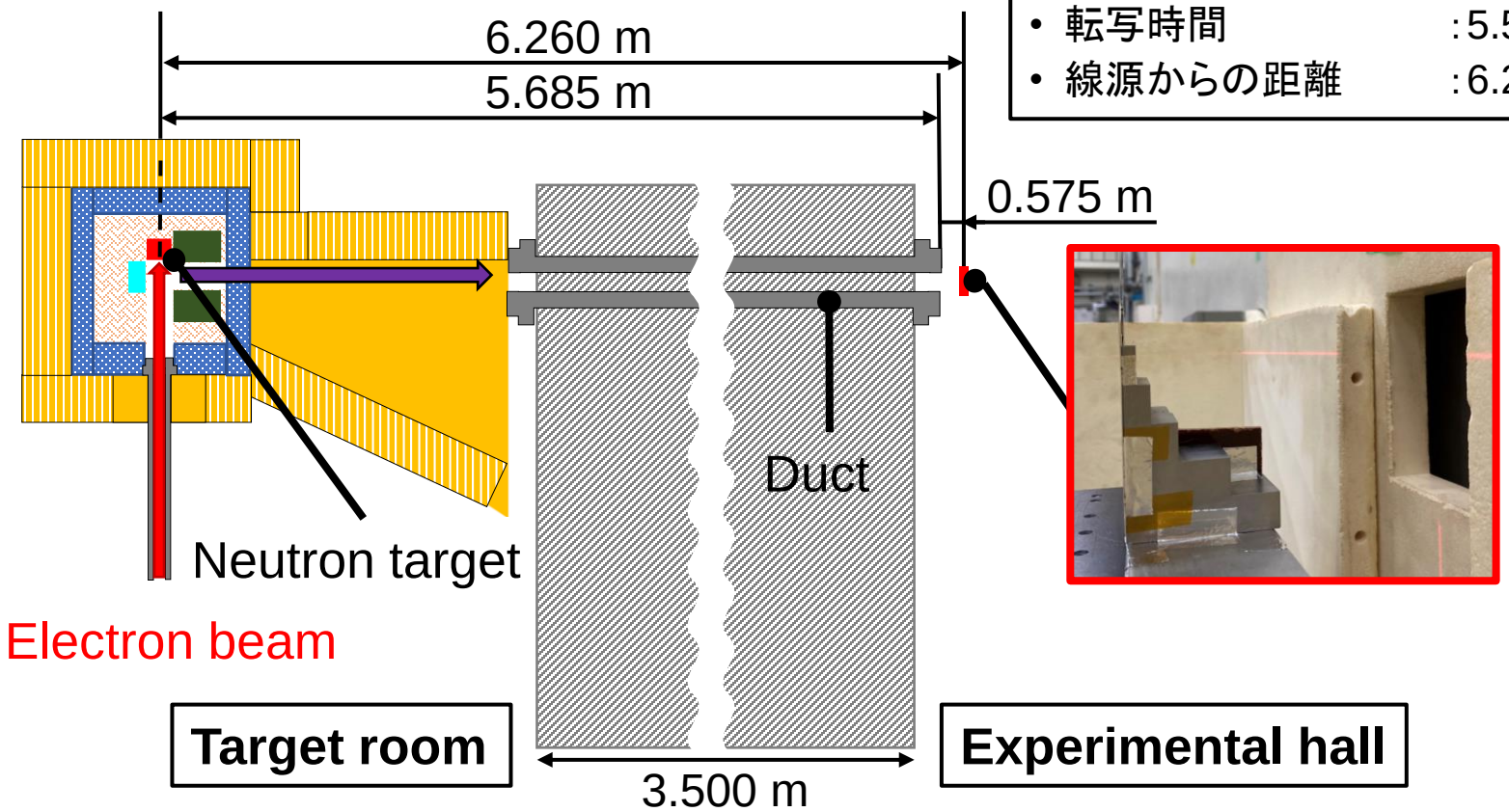

- 熱中性子を非常に強く吸収するCdが写らなかった。
  ⇒共鳴吸収が強く効いた。
- $^{197}$Auの閾値エネルギーは8.1 MeVで、HUNSの線源から供給される高速中性子の主なエネルギーよりかなり大きい。
  ⇒高速中性子で得られた画像ではない。

**熱外中性子（共鳴吸収）が強く効いたイメージング画像**

# 共鳴フィルター付き熱中性子イメージング実験

# 共鳴フィルター付き熱中性子イメージング実験の概要

共鳴フィルター付きイメージング実験体系の概略図

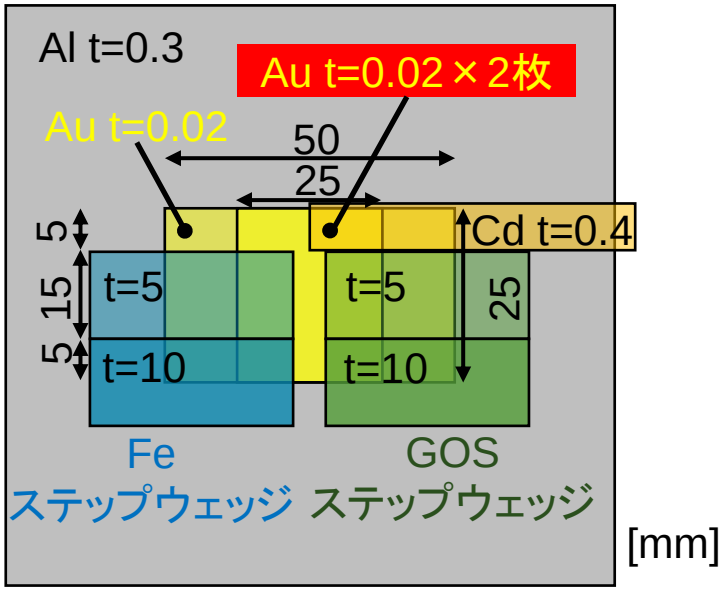



**実験条件**

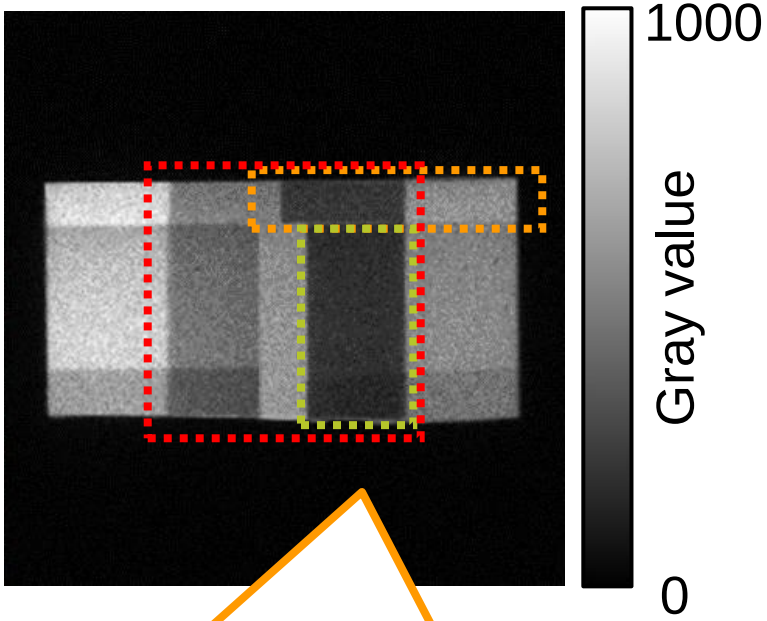
- 中性子源 :熱中性子源
- 加速器電流値 :70 μA
- ビーム照射時間 :8時間
- 転写時間 :5.54日
- 線源からの距離 :6.260 m

# 共鳴フィルター付き熱中性子イメージング結果

被写体のセットアップ



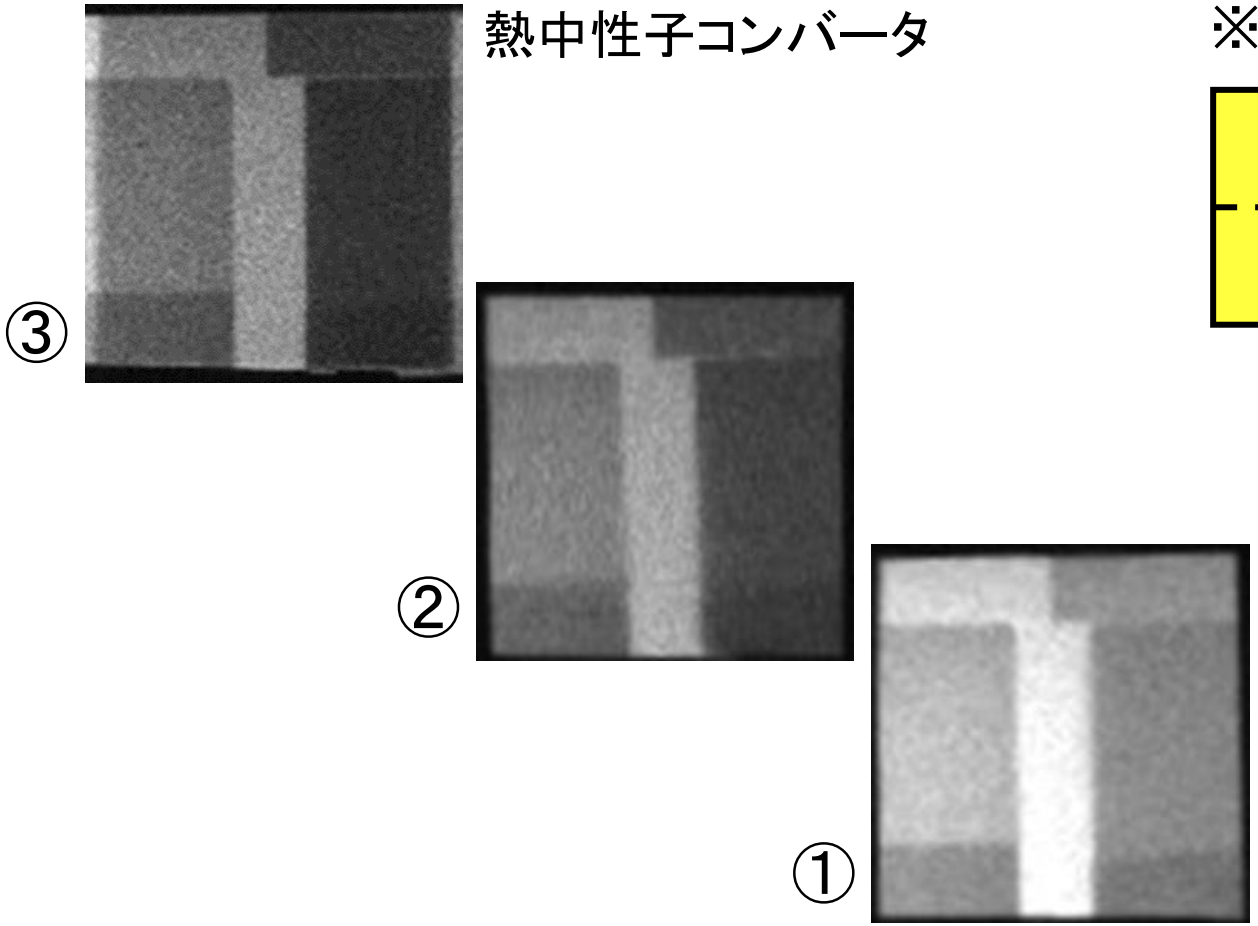

イメージング結果

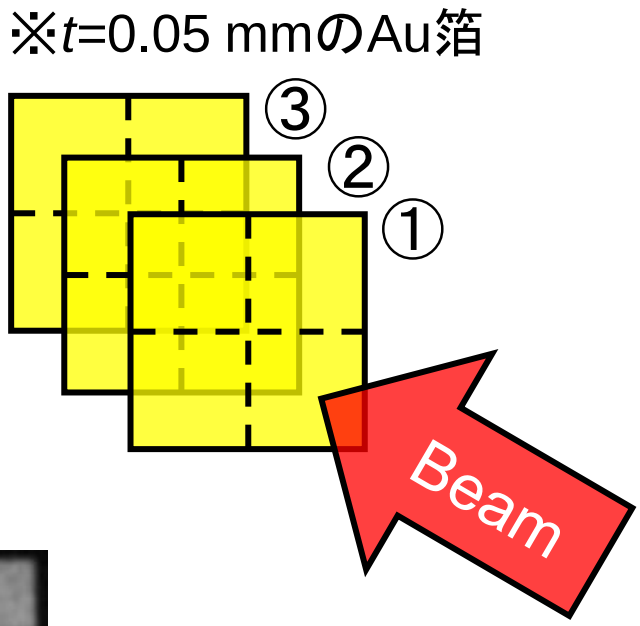



熱中性子を非常に強く吸収するCdとGOS（Gd）がはっきりと写った

**熱中性子成分によるイメージング画像が得られた**

# 共鳴中性子フィルターの空間分解能向上への寄与




**共鳴中性子フィルターが画像の空間分解能の向上に寄与**

# 研究内容

① 放射化コンバータとX線IPを用いたHUNS用イメージングシステムの開発

② 熱外中性子を含めたエネルギー選択的中性子イメージング

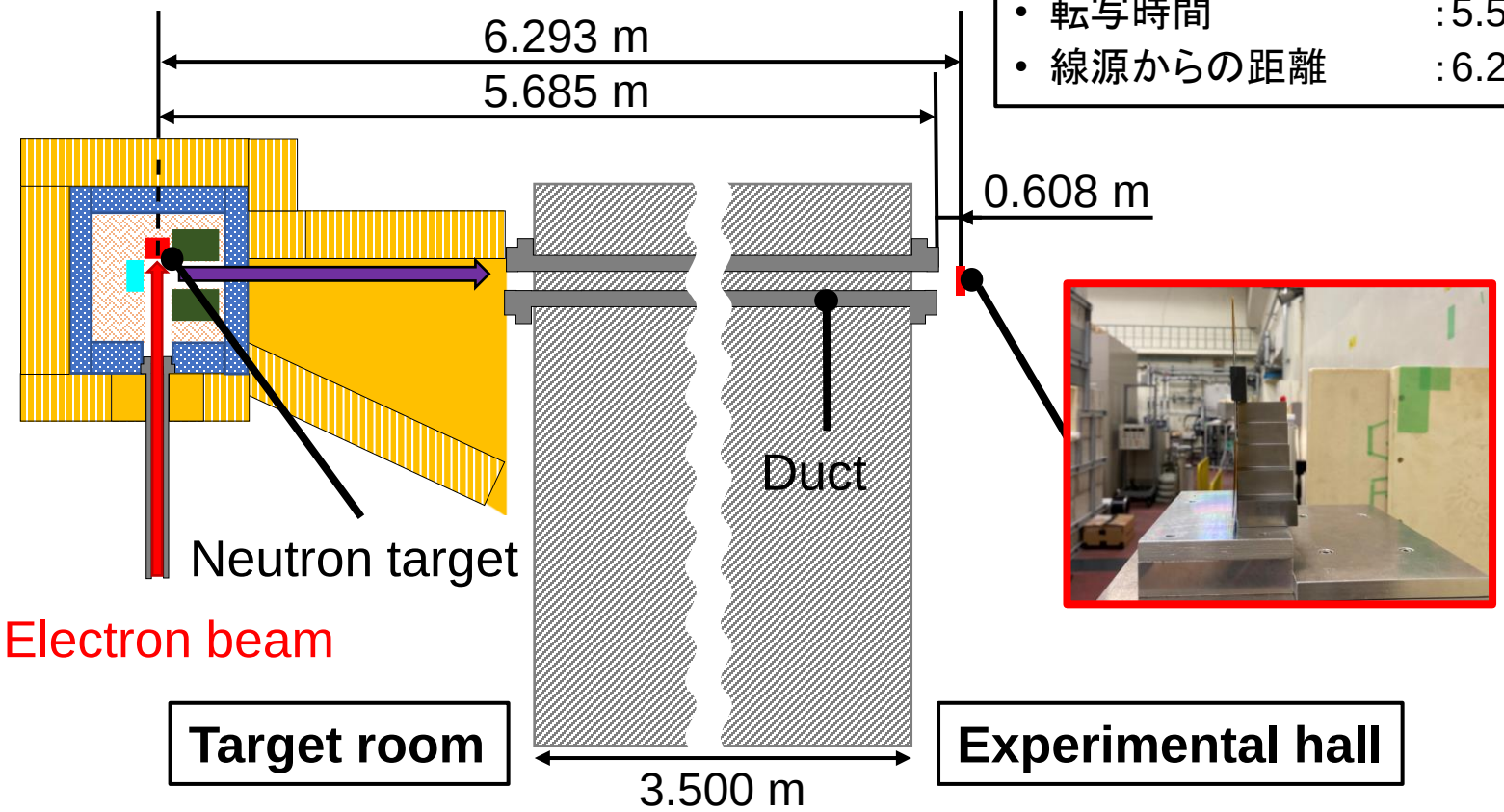
③ マルチエネルギー中性子・X線同時イメージングの試験

# X線・熱/熱外/高速中性子同時イメージング実験の概要

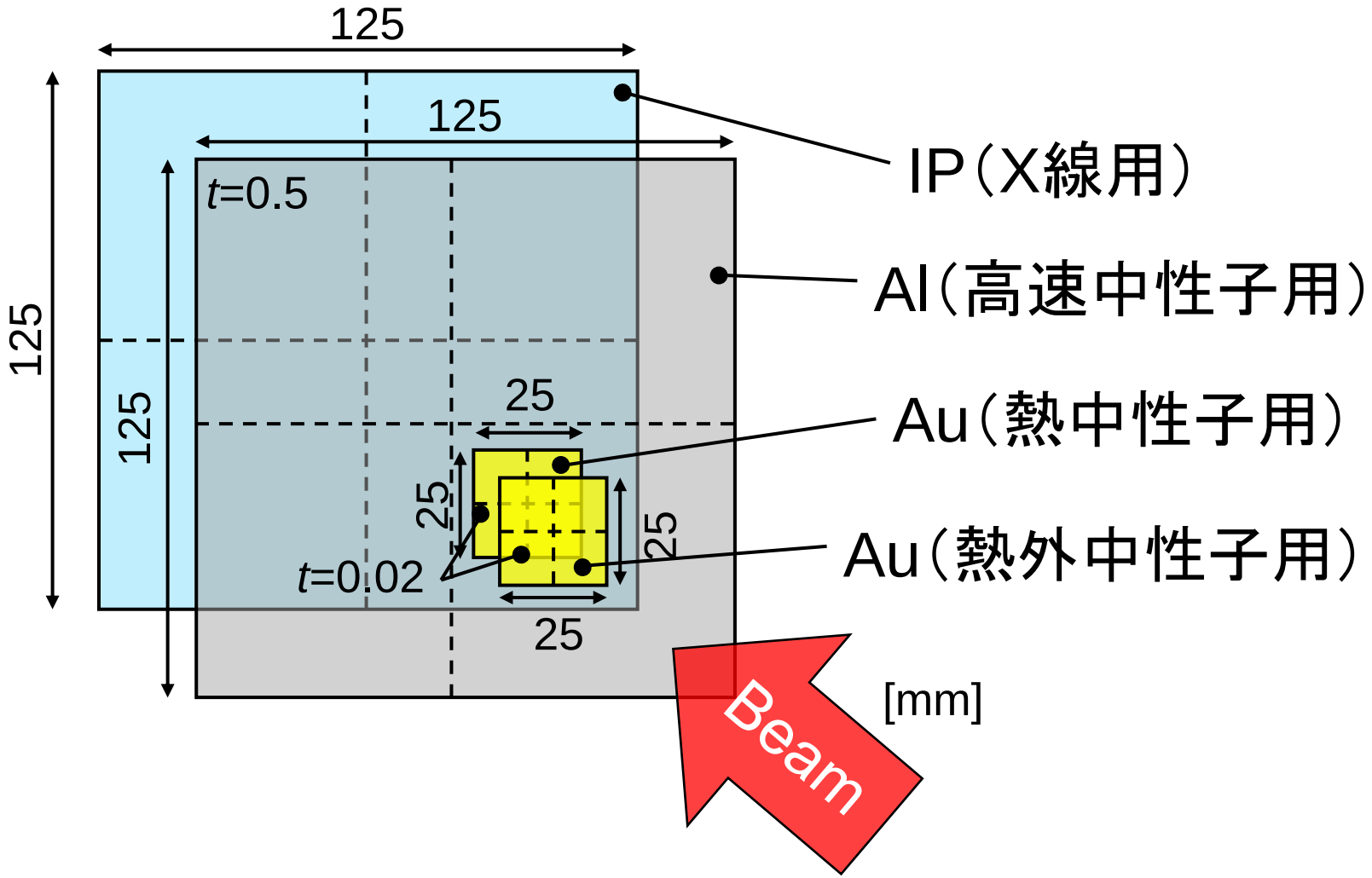
**実験条件**

- 中性子源 :熱中性子源
- 加速器電流値 :70 μA
- ビーム照射時間 :8時間
- 転写時間 :5.54日
- 線源からの距離 :6.293 m

実験体系の概略図

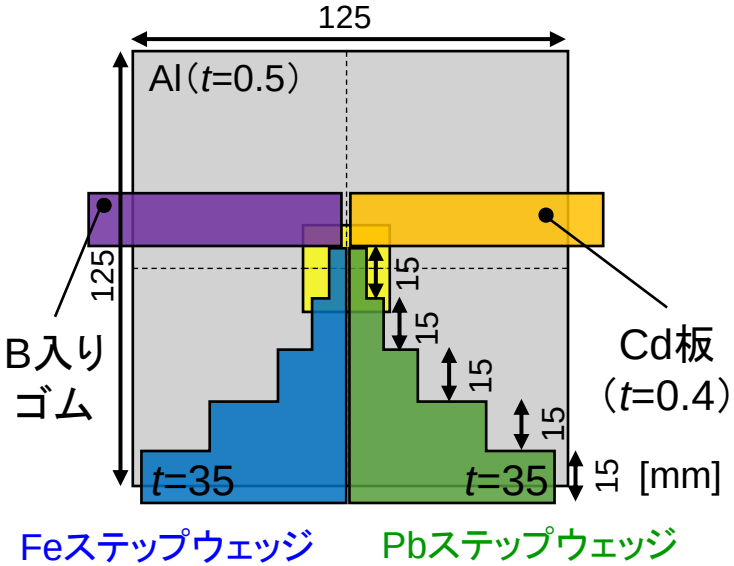


# IPとコンバータ箔のセットアップ



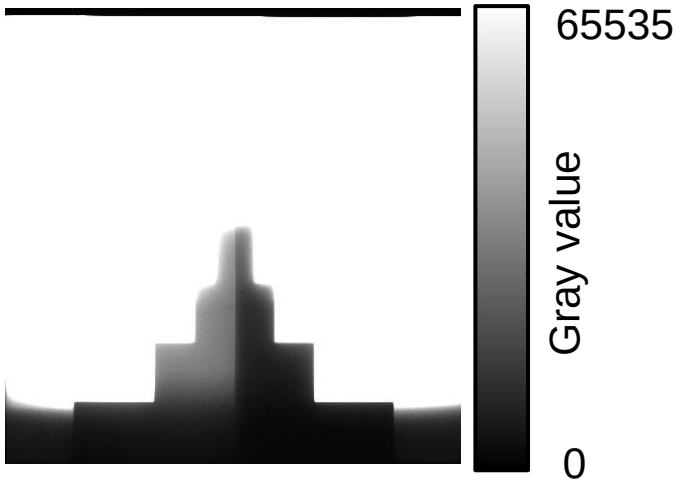
# MeVオーダーのX線直接イメージングの結果と課題

## 被写体のセットアップ




B：軽元素、Pb：重金属
Fe：広エネルギー中性子で強い散乱
Cd：熱中性子に対して大きな吸収

## イメージング結果



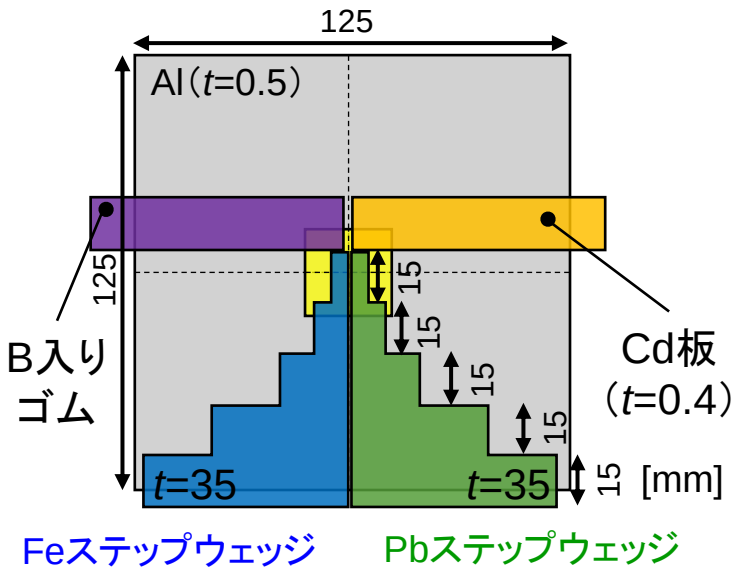

✓ 高フラックスなビーム照射によりIPが飽和状態になった

- 原子番号が小さいBや薄いCdが写らなかった。
- 原子番号の大きいPbや厚いFeが写った。

**高エネルギーX線イメージング画像が得られた**

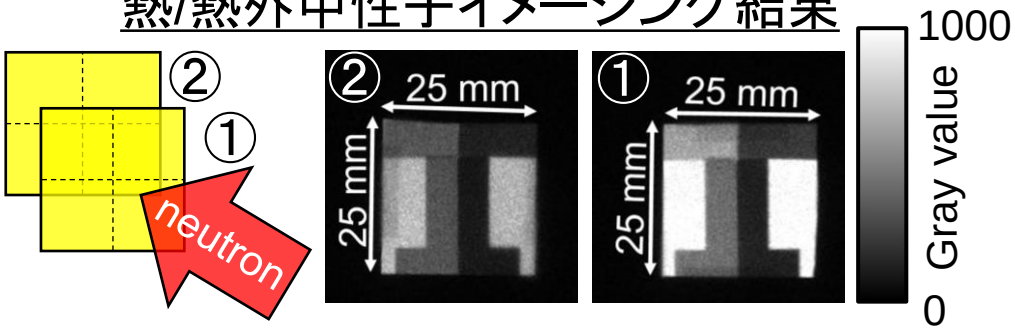
# マルチエネルギー中性子・X線同時イメージングの課題

## 被写体のセットアップ

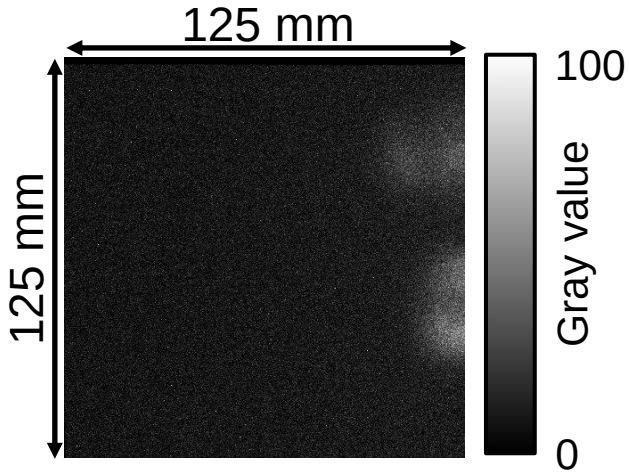



B：軽元素、Pb：重金属
Fe：広エネルギー中性子で強い散乱
Cd：熱中性子に対して大きな吸収

## 熱/熱外中性子イメージング結果




## 高速中性子イメージング結果




●Alコンバータは、8時間の照射では十分に放射化されなかった。
●ターゲットからの距離が遠かった。

各量子ビームイメージングの照射時間と照射距離のバランス調整

# まとめ

新たな元素識別イメージングを目指した
**広エネルギー中性子・X線両用イメージングシステム**の開発

**① 放射化コンバータとX線IPを用いたイメージングシステムの開発**

**② 熱外中性子を含めたエネルギー選択的中性子イメージング**

- MeV領域中性子の閾値核反応を利用した**高速中性子**イメージング
- 同一核種の共鳴中性子フィルターを用いた**熱/熱外中性子**イメージング
- 共鳴中性子フィルターの利用による**空間分解能の向上**

**③ マルチエネルギー中性子・X線の同時イメージングの試験**

- X線と熱/熱外中性子を捉えることに成功したが、高速中性子は捉えられなかった
- 照射時間と照射距離のバランス調整に課題