

北大における中性子・X線複合イメージング のための技術開発

原かおる¹, 佐藤博隆¹, 加美山隆¹, 篠原武尚²

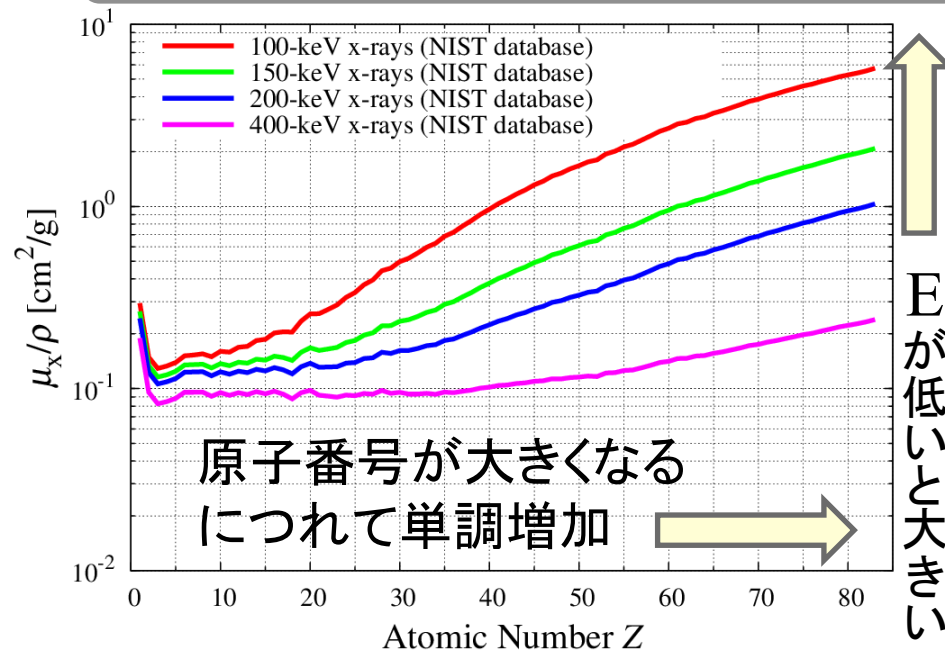
1. 北海道大学大学院工学研究院
2. 日本原子力研究開発機構

**本研究は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業、光・量子融合連携研究開発プログラムにおいて、国立大学法人北海道大学が実施した「加速器を利用した中性子分光イメージングとX線の複合利用技術の高度化」の成果である。

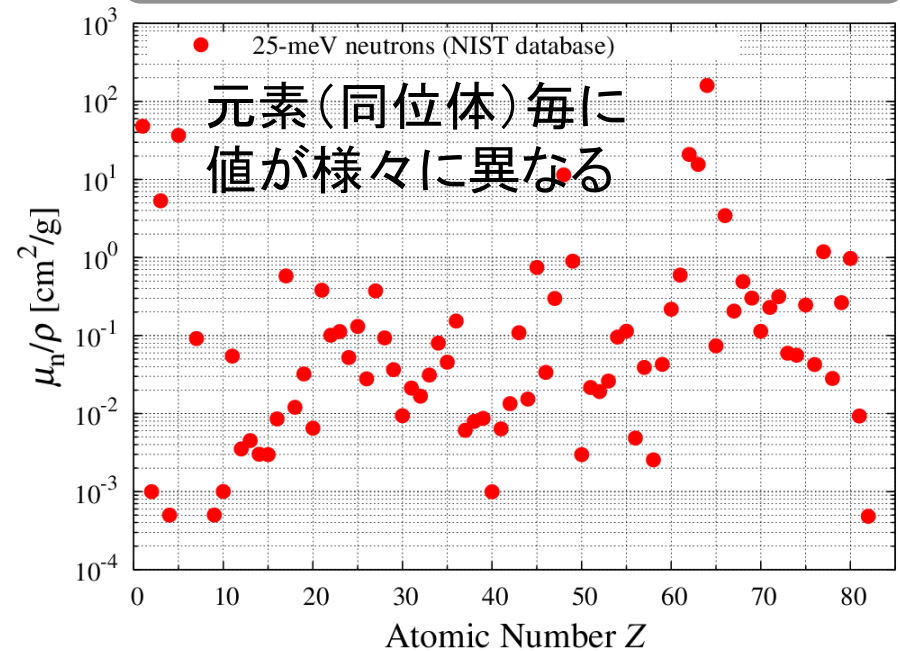
1. 研究目的

中性子とX線の物質に対する透過性の違いを相補的に利用して、測定対象の構造や材質(元素)を判別する**複合イメージング技術**の高度化を目的とする。

数百keV X線の質量減弱係数



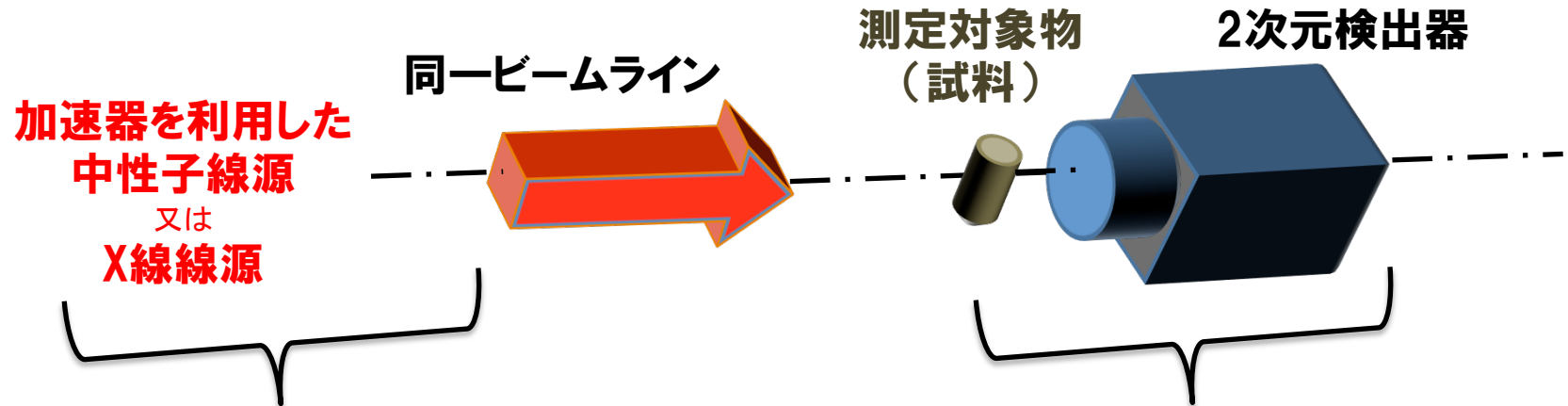
熱中性子の質量減弱係数



*) NIST database for X-ray <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>

**) NIST database for neutron <https://www.ncnr.nist.gov/instruments/bt1/neutron.html>

2. 中性子とX線の複合利用方法



① 中性子 or X線の生成は、遠隔操作で切り替えるのみ

② 試料と検出器のセットアップ位置は変更しない

- 透過イメージ測定
中性子・X線の複合線源
両方のビームに使用できる検出器
- シミュレーション計算
ビームのエネルギー分布
透過率 Tr_n , Tr_x の計算 → 線減弱係数の比 R_{xn}

3. 中性子・X線複合線源システム

北大・45-MeV電子線形加速器施設の
のビームライン“CENTER”上に構築

電子ビームパラメータ

エネルギー: 9 (x) or 34 (n) MeV
 平均電流値: 7 (x) or 36 (n) μ A
 繰り返し率: 50 pps
 パルス幅: 3 μ s

電子線形加速器

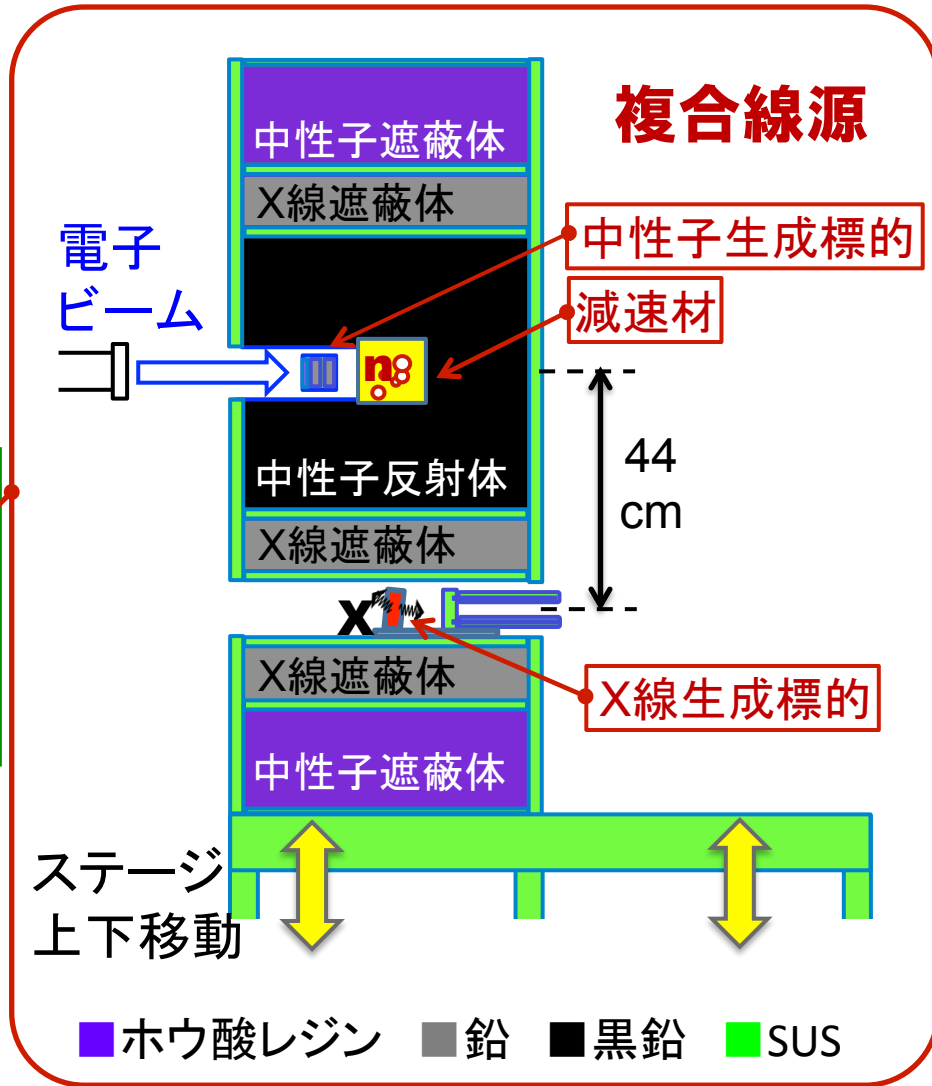
モジュレータ室

制御室

試料と
検出器

コンクリート壁

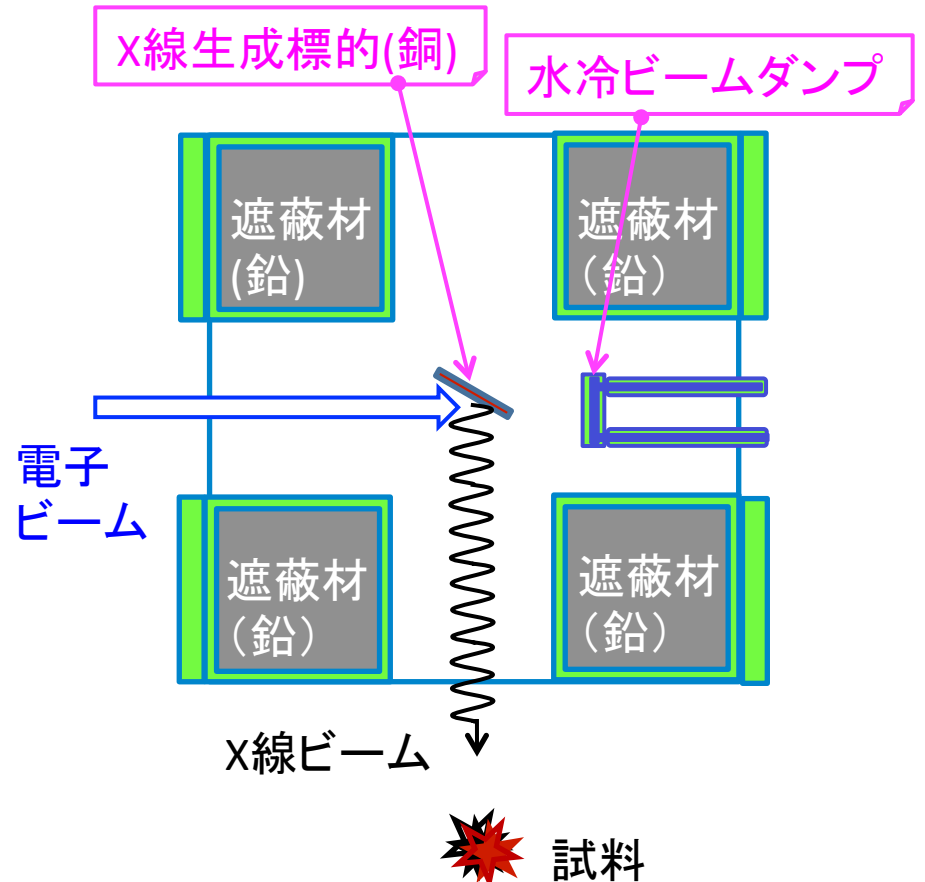
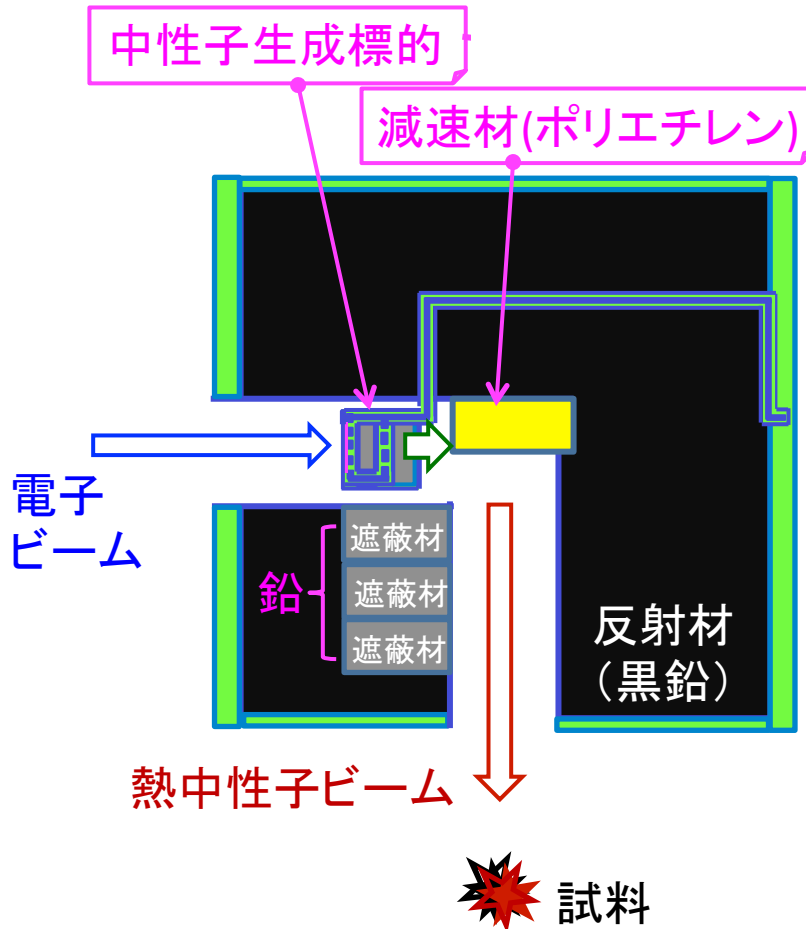
中性子実験室



4. 中性子・X線ビームの生成方法

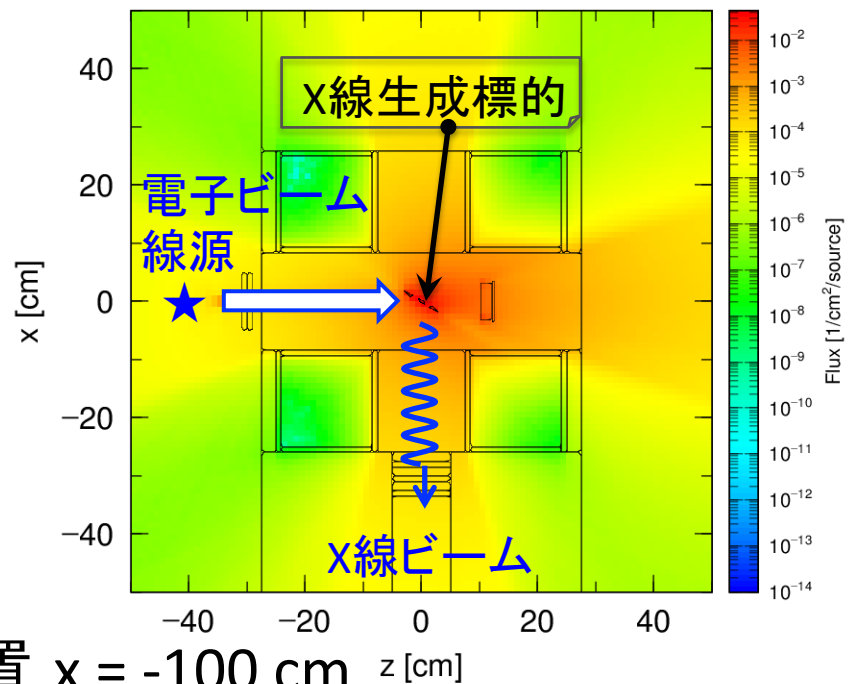
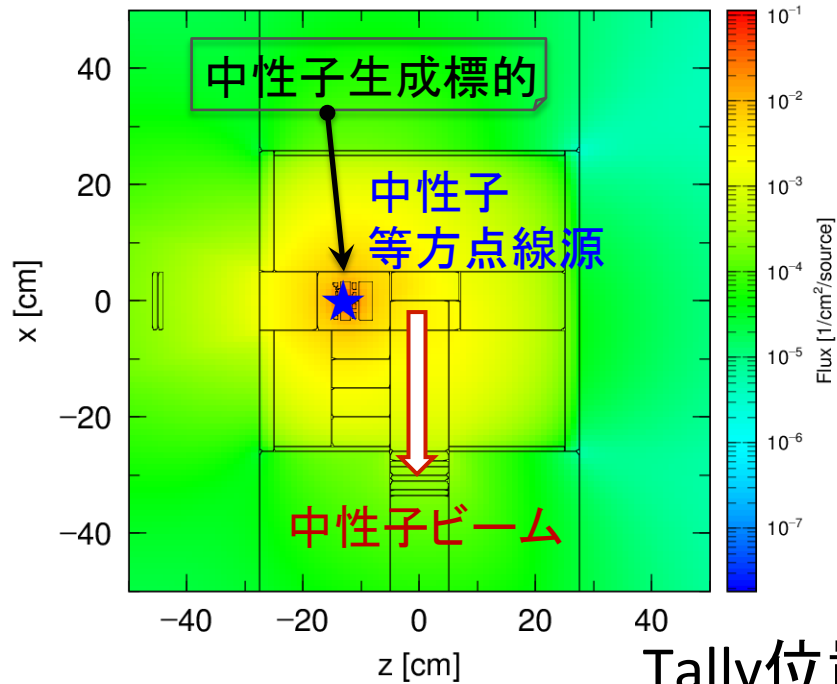
電子ビームを金属板に照射し制動放射線を発生 ⇒ Pb(γ ,n)反応で放出された高速中性子を減速 ⇒ 90°方向に輸送された熱中性子をビームとして利用

制動放射線をX線ビームとして利用

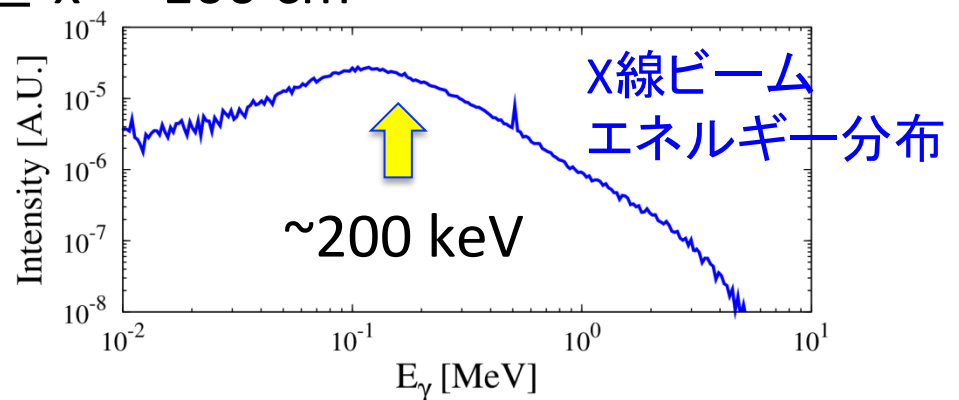
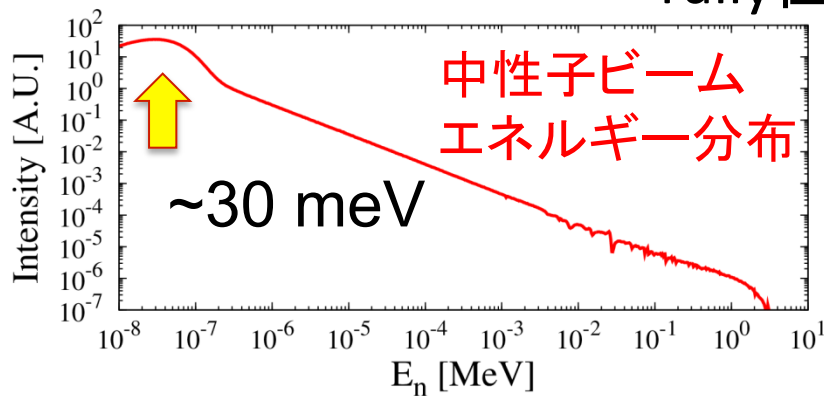


5. 中性子・X線ビームのエネルギー分布のシミュレーション

粒子・イオン輸送計算コードシステムPHITSを用いた計算結果



Tally位置 $x = -100 \text{ cm}$



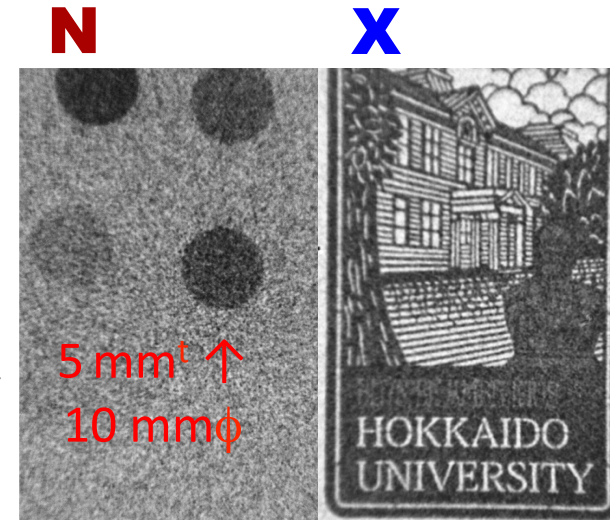
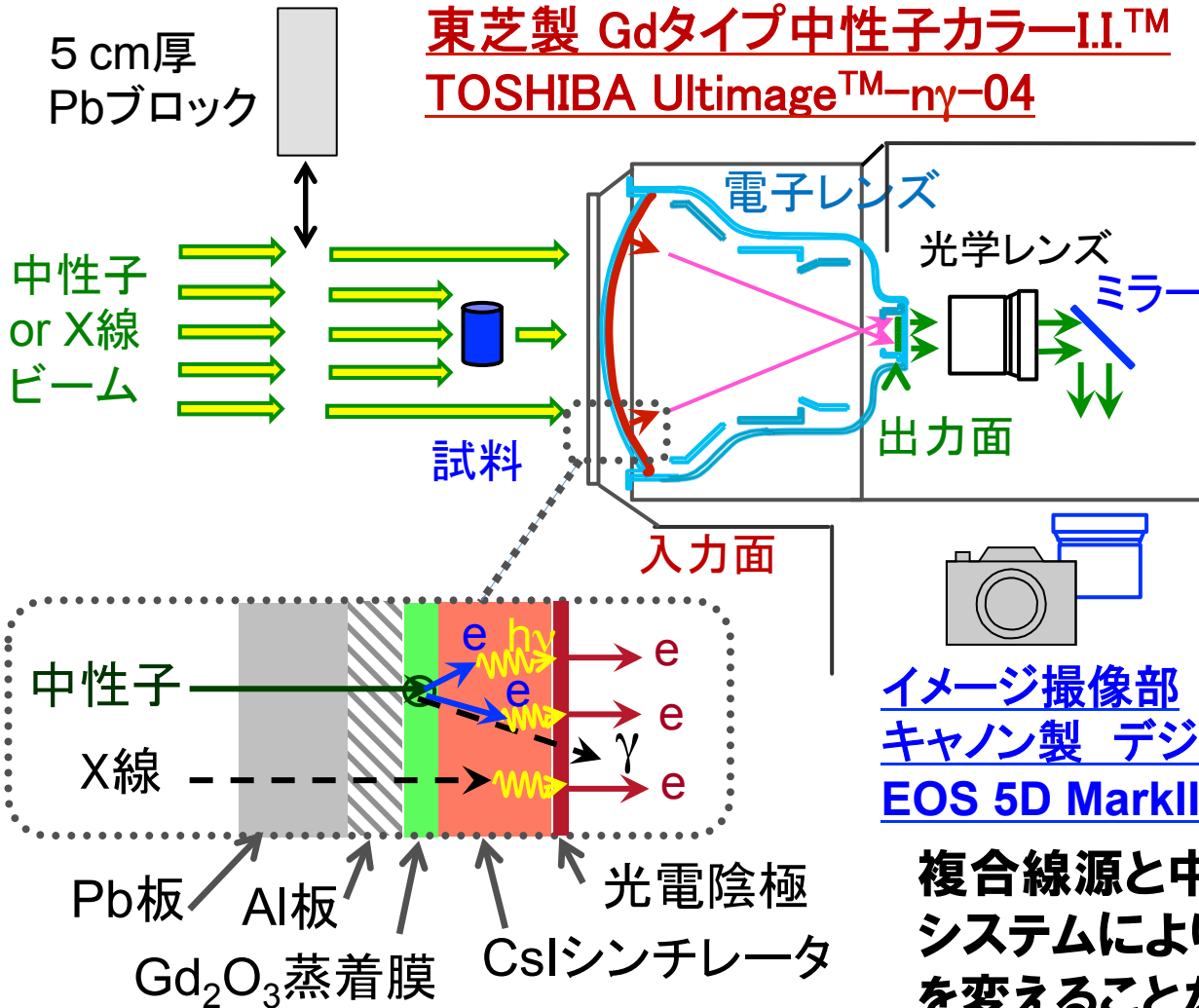
6. 測定：中性子とX線の透過イメージ

2次元イメージ検出器

東芝製 Gdタイプ中性子カラーI.I.TM

TOSHIBA UltimageTM-ny-04

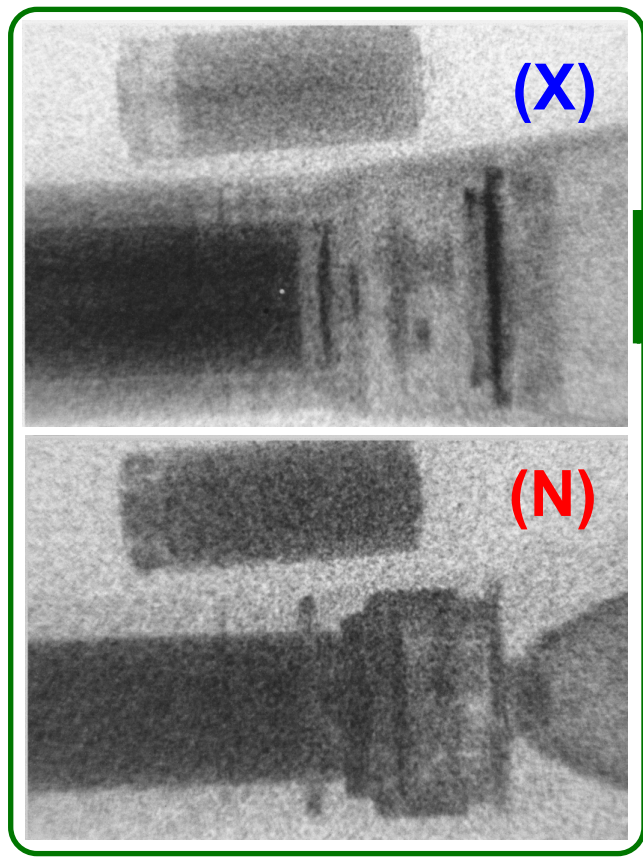
Radiography



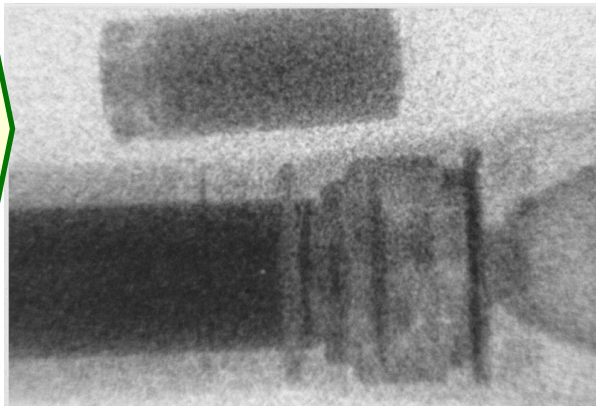
イメージ撮像部
 キヤノン製 デジタルカメラ
 EOS 5D MarkII

複合線源と中性子・X線両用検出器システムにより、試料と検出器の位置を変えることなく測定が可能。

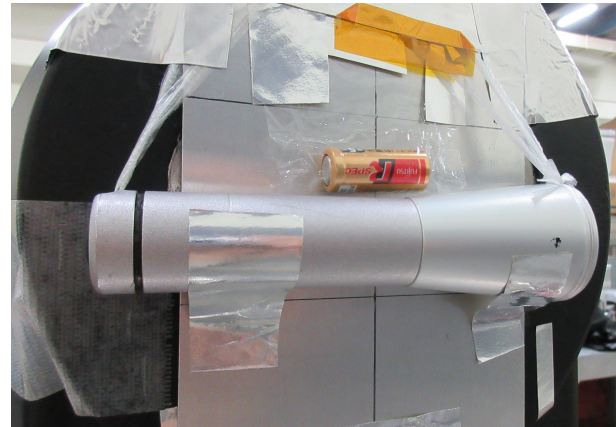
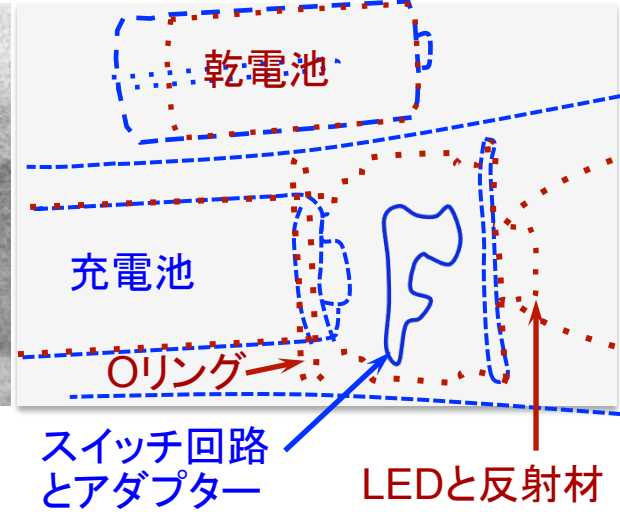
7. 測定結果例：X線と中性子の透過イメージ



(X)+(N) 直接比較!!



アルカリ乾電池
+LED懐中電灯



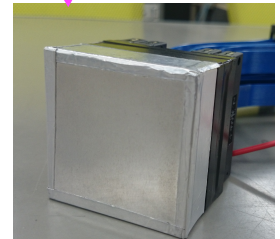
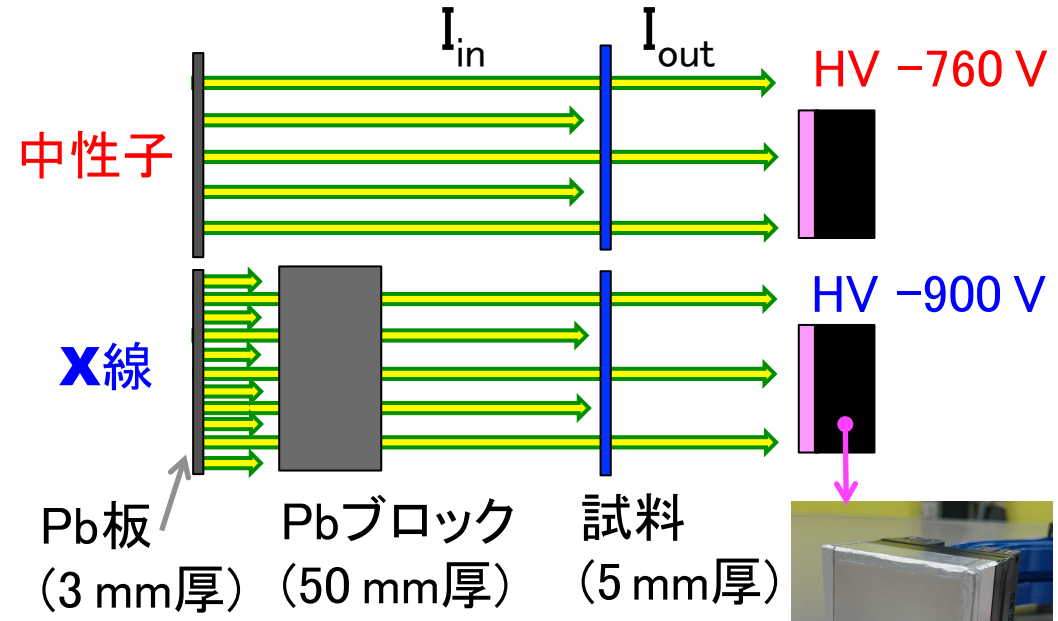
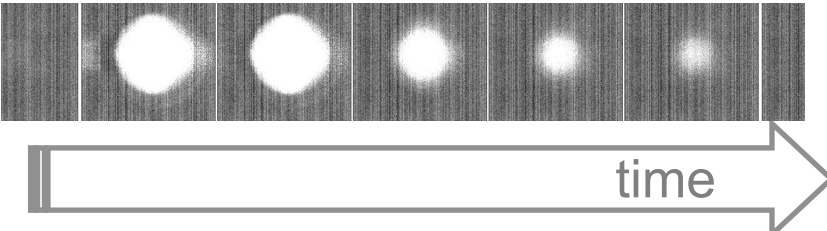
どちらも内部構造が視覚化されているが、
コントラストは異なり、取得できる情報が違う。

8. 中性子TOF法を適用するための 中性子・X線両用検出器の試験

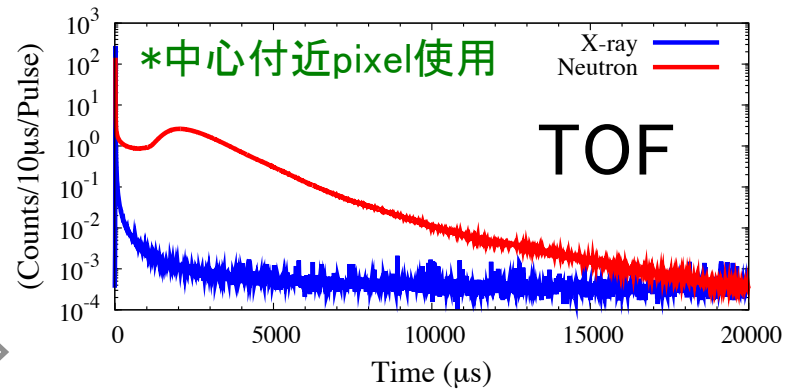


イメージ撮像部

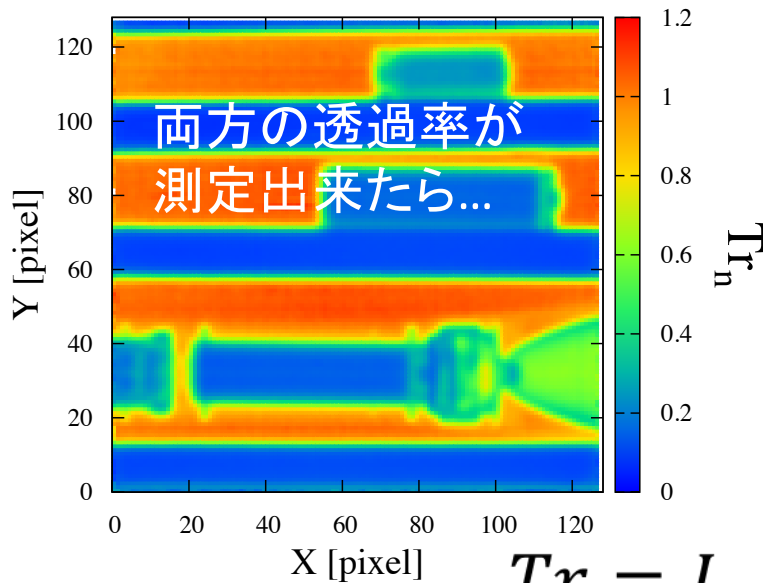
TOF method



⁶Liガラス検出器 (256 pixels)



9. X線・中性子の透過率から物質を推定する手法の検討



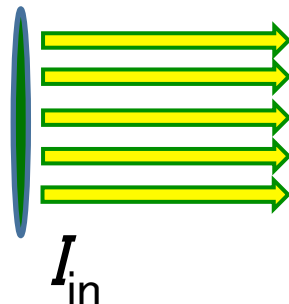
同一試料に対して測定した X線・中性子の透過率 Tr を用いると、線減弱係数 μ の比を求めることが出来る。

$$R_{xn} = \frac{\ln(Tr_x)}{\ln(Tr_n)} = \frac{\mu_x}{\mu_n}$$

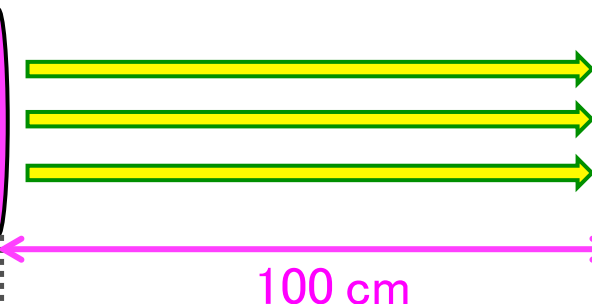
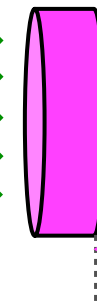
$Tr = I_{out}/I_{in} = \exp(-\mu t)$ lnの比を求めることで厚さtの項を相殺

PHITSによる計算の体系

直径1 cmの
面線源
200 keV X線
25 meV 中性子



厚さ t 、密度 ρ 、
直径1 cmの試料



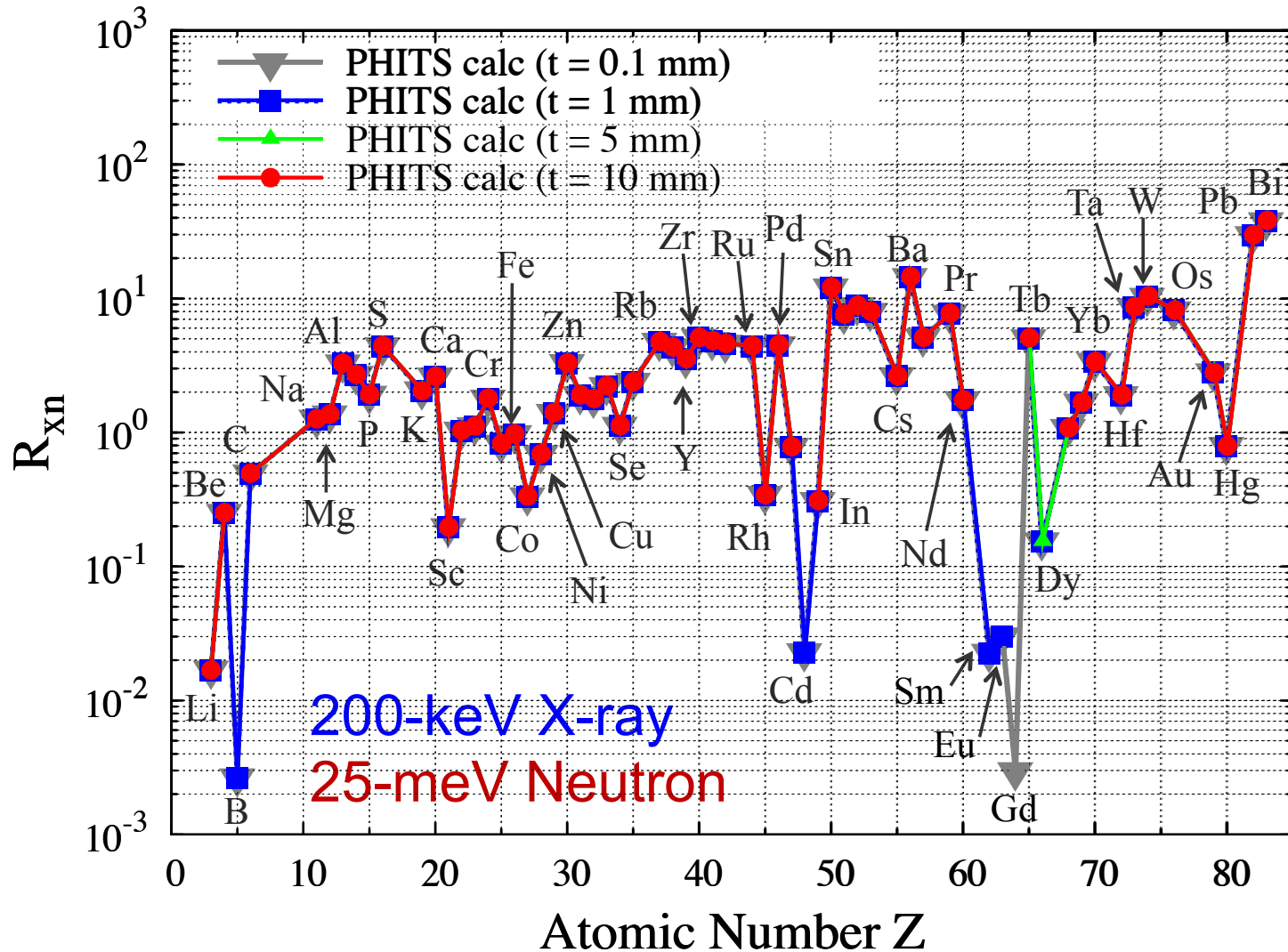
$$Tr = I_{out}/I_{in}$$

直径1 cmの
Tally

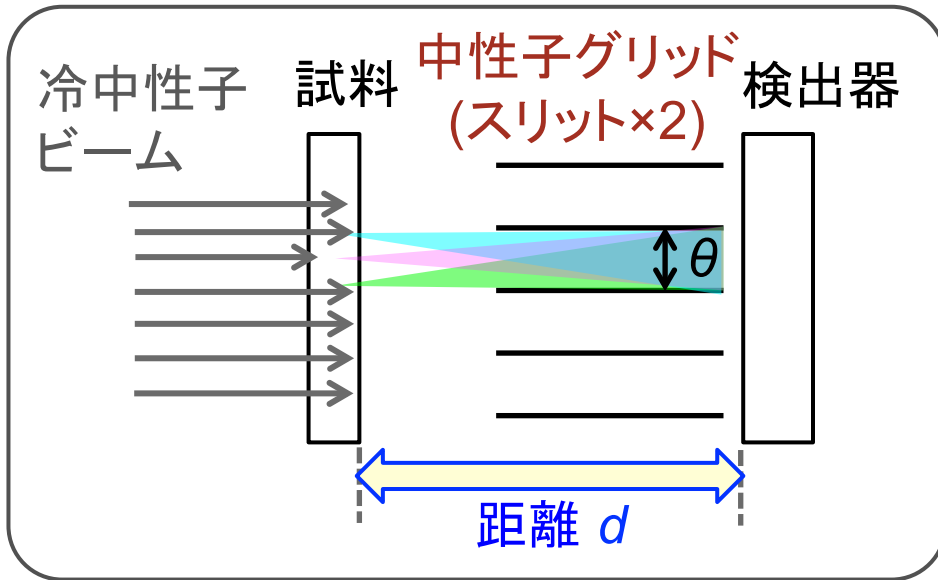
10. 色々な元素の線減弱係数の比 $R_{xn} = \ln(Tr_x)/\ln(Tr_n)$

厚さ1 mmのGd試料の透過率はゼロであったためプロットしていない。

μ_x / μ_n

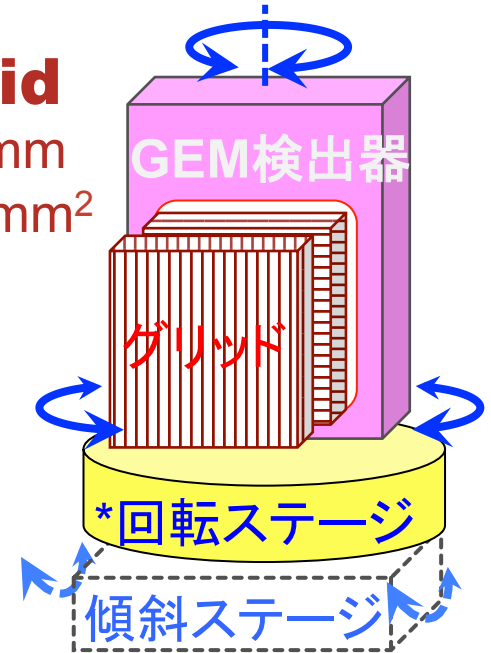


11. Gdタイプグリッドによる散乱中性子低減効果

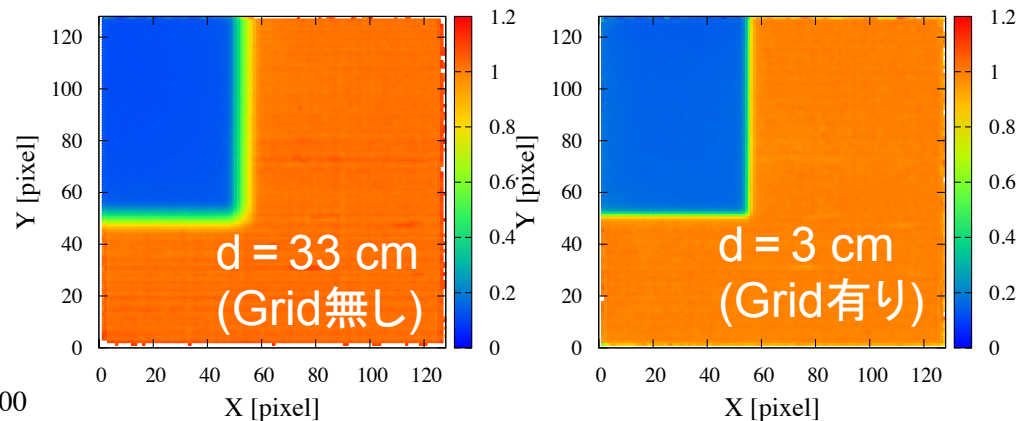
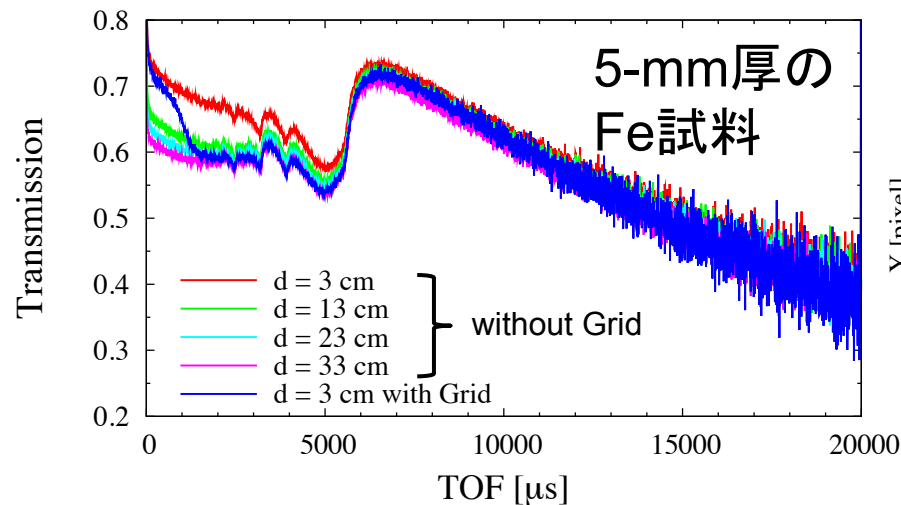


Gd-type grid

Slit width 0.15 mm
Area 100×100 mm²
Depth 4 mm



* 今回は一軸のみ調整



5-mm厚のポリエチレン試料

12. Bタイプグリッドによる散乱中性子低減効果

➤ Bタイプグリッド

スリット幅 0.38 mm

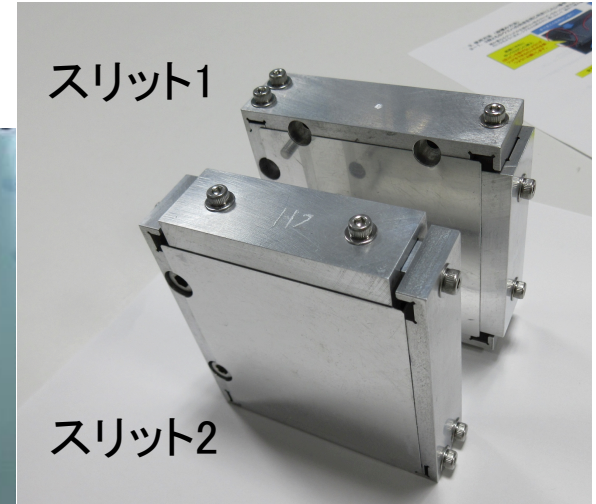
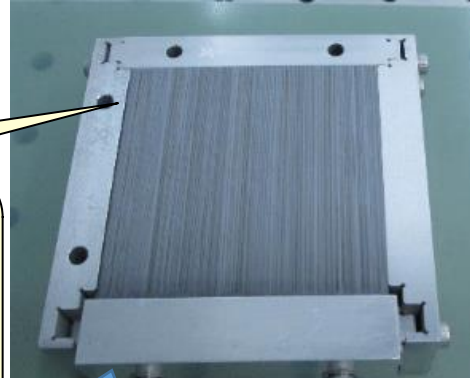
有効面積 $60 \times 60 \text{ mm}^2$

奥行き 22 mm

金属ボロンを蒸着したシリコン
基板を積層、Al枠で固定

Si: 0.38 mm厚

B: 0.001 mm厚



試料-検出器間

➤ グリッド無し

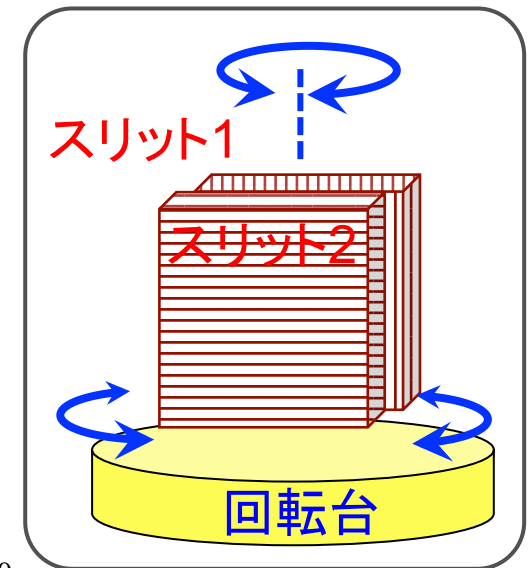
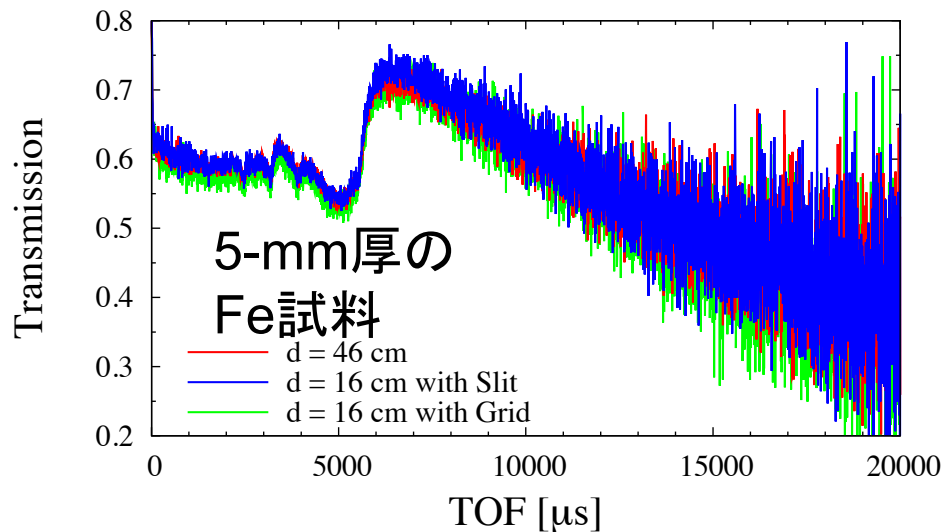
$d = 46 \text{ cm}$

➤ スリット1有り

$d = 16 \text{ cm}$

➤ グリッド有り

$d = 16 \text{ cm}$



* 今回は一軸のみ 13

まとめ

- 北大・電子線形加速器施設に構築した中性子・X線複合線源システムと、中性子・X線両用検出器を利用することにより、試料や検出器のセットアップを変更することなく、同一試料の中性子・X線両方の透過イメージを撮像可能である。
- PHITSを用いて、色々な試料に対する中性子・X線の透過率 Tr_n 、 Tr_x (→線減弱係数の比 R_{xn}) をシミュレーション計算した結果、 R_{xn} は試料の厚さには依存せず元素毎に特有の値であった。
- 中性子グリッド(GdとBタイプ)を用いて鉄の透過率を測定する試験を行い、試料によって散乱する中性子が原因のバックグラウンドを低減する効果があることを確認した。