

# パルス中性子透過分光イメージング のためのカメラ検出器の開発

持木 幸一、河原林 順、小出 純平、浦垣 俊幸  
( 東京都市大学 )

平成 2 8 年度 中性子イメージング専門研究会 平成 2 9 年 1 月 5 日

# パルス中性子イメージング関連技術の開発

- H U N S : 積算型高速度カメラ

基盤研究 (S) パルス中性子による物質材料および空間場の**組織構造・物理量イメージング**  
(北大 鬼柳)

- R A N S : 輝点処理

「国家課題対応型研究開発推進事業」光・量子融合連携研究開発プログラム  
「**ものづくり現場で先端利用可能**な小型高輝度中性子源システムの整備・高度化」(理研 大竹)

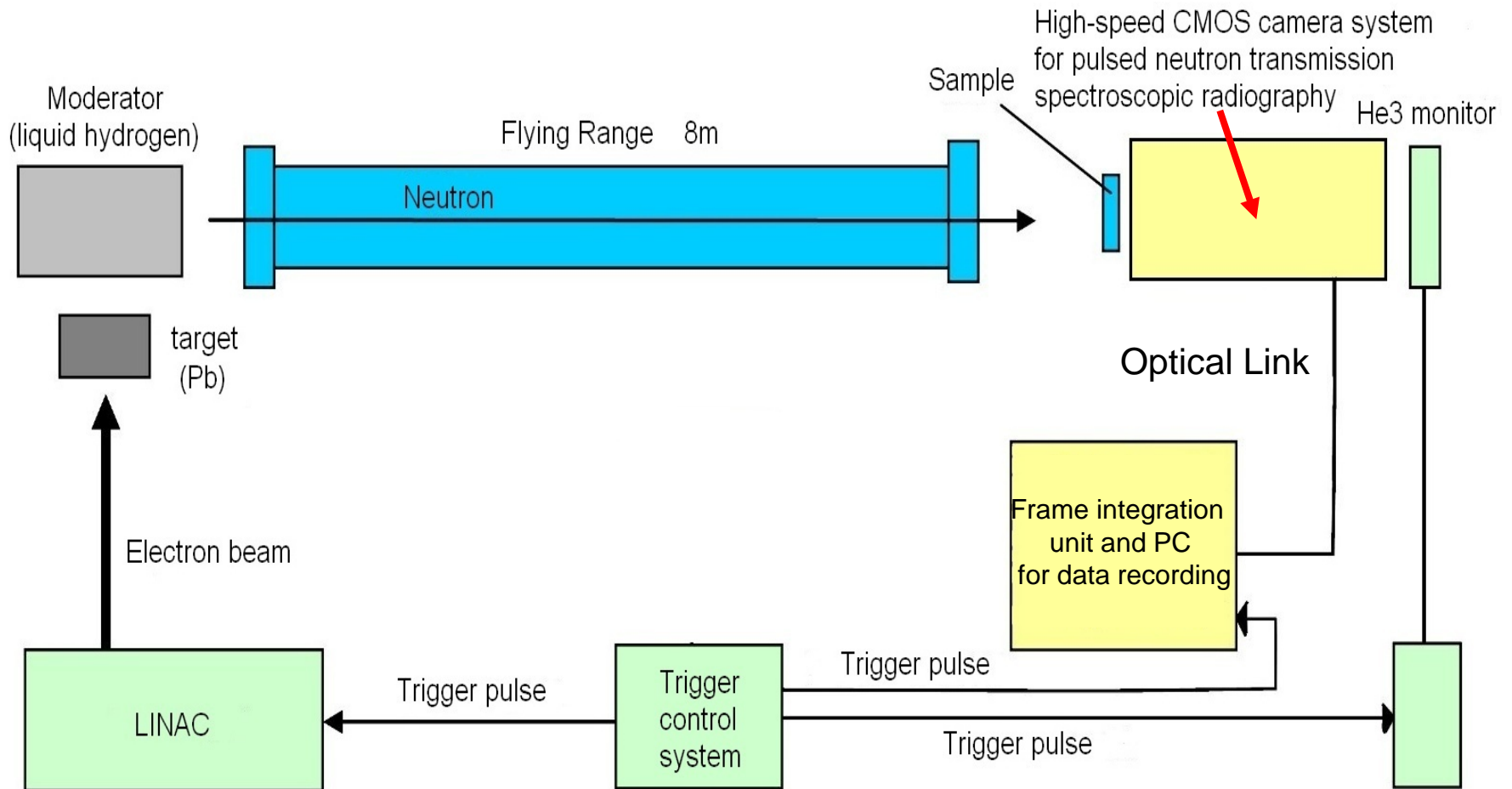
- R A D E N : 実時間輝点処理装置

「国家課題対応型研究開発推進事業」光・量子融合連携研究開発プログラム  
実用製品中の**熱、構造、磁気、元素の直接観察**による革新エネルギー機器の実現 (JAEA 篠原)

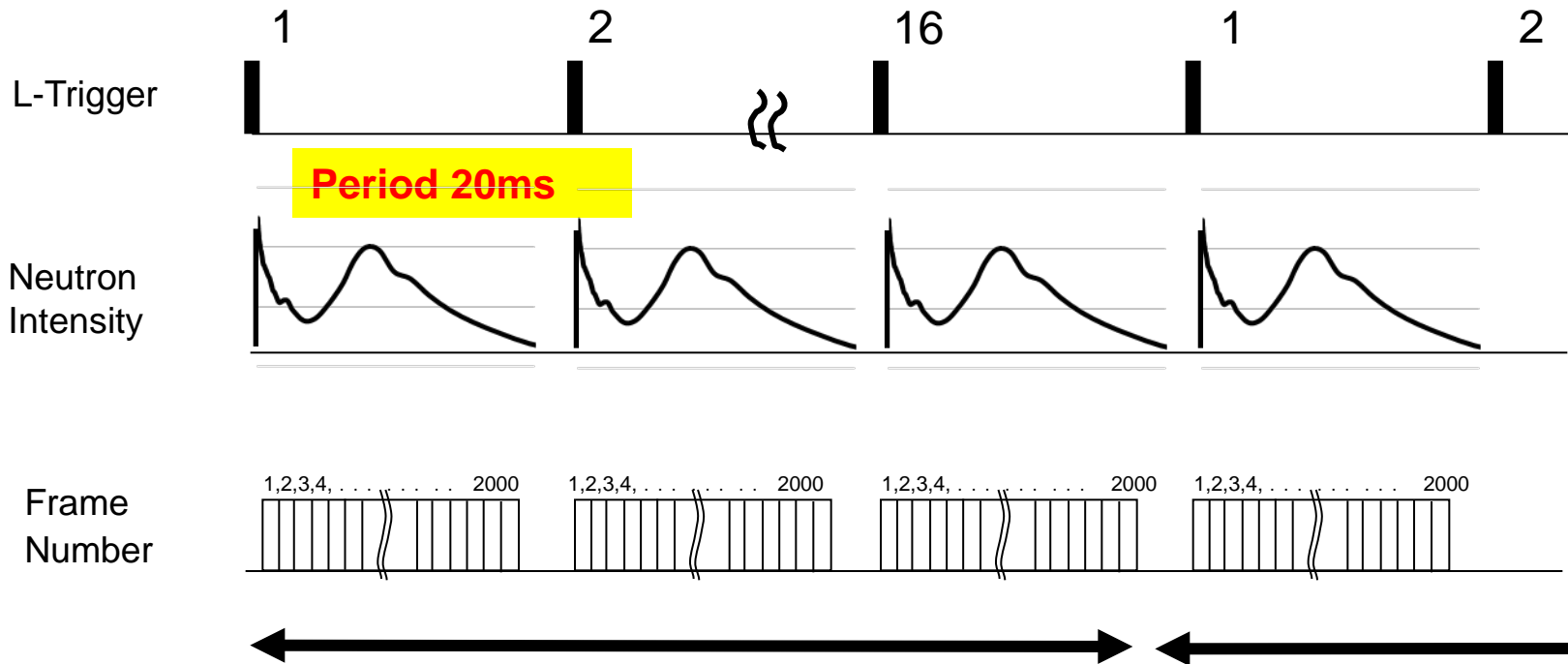
- K U R R - L I N A C : サブピクセルシフトによる高解像化

「国家課題対応型研究開発推進事業」原子カシステム研究開発事業 (安全基盤技術研究開発)  
**次世代原子炉燃料の健全性評価**のための非破壊分析技術の開発 (京大 中島)

# Pulsed Neutron Transmission Spectroscopic Radiography System at HUNS



# Seamless Accumulation Function



In case of 100 kfps (frame period  $10\mu\text{s}$ )

320 x240 pixel , 2,000 frames/pulse

Seamless  
Accumulation

Pulse Number of Accumulation :  $N_A=16, 64, 256, 1024, 4096$

Accumulated Data per each frame  $12\text{bit} \times N_A = 16\text{ bit} \sim 24\text{bit}$

Data File : 2000 frame x (16 bit  $\sim$  24 bit)

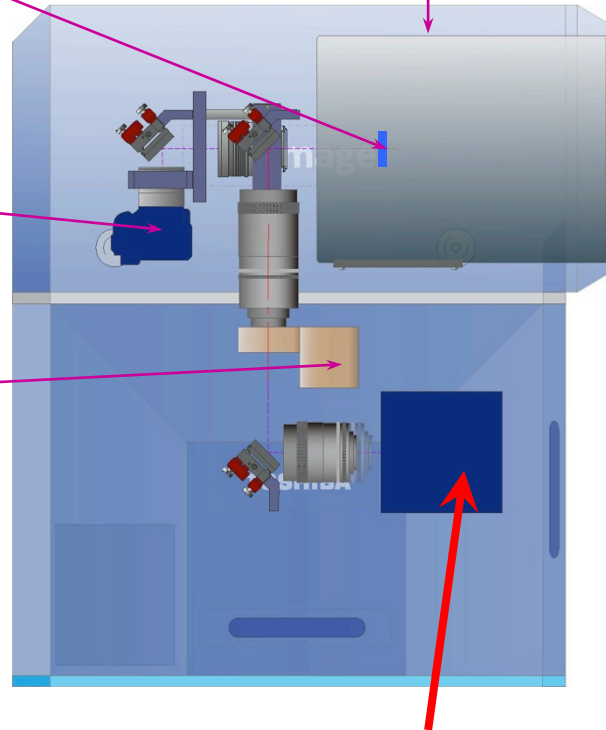
# 撮像部の構成

Neutron color image intensifier  
Ultimage TCN9100B nab  
(TOSHIBA)

Short afterglow  
phosphor  
( $Y_2SiO_5:Ce$ )

High resolution CMOS  
D800E (Nikon)  
max 7360x4912 pixels

High-speed gated image  
intensifier unit  
C9547-02 MOD  
Short afterglow  
phosphor P46  
(HAMAMATSU)

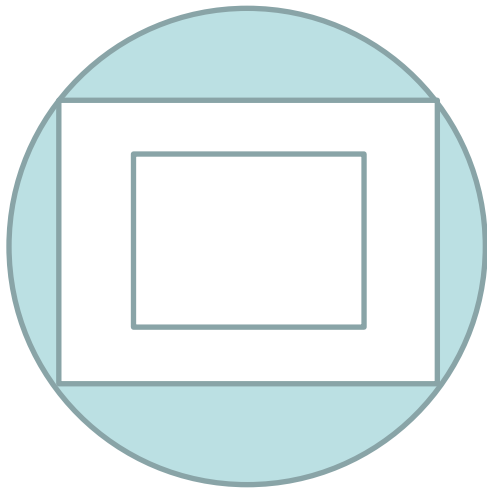


View field: 9, 7, 5.5  
inch  
Input:  $B_4C$   
B-10 >99.7%  
Output:  $Y_2SiO_5:Ce$   
Decay 5 $\mu$ s  
Gating function  
Spatial Resolution:  
< 30  $\mu$ m

High-frame-rate Camera MEMRECAM ST-821-HX  
(NAC Image Technology)

# 視野、画素数、解像度

100,000 fps  
(10 $\mu$ s)



320 x 240 pixel

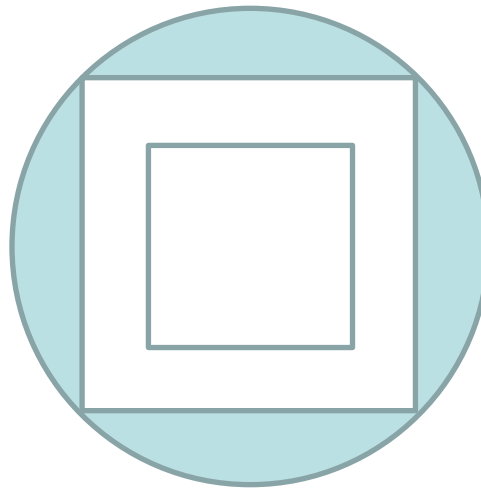
9"

183x 137 mm  
[572 $\mu$ m]

5.5"

112 x 84 mm  
[349 $\mu$ m]

30,000 fps  
(33.3 $\mu$ s)

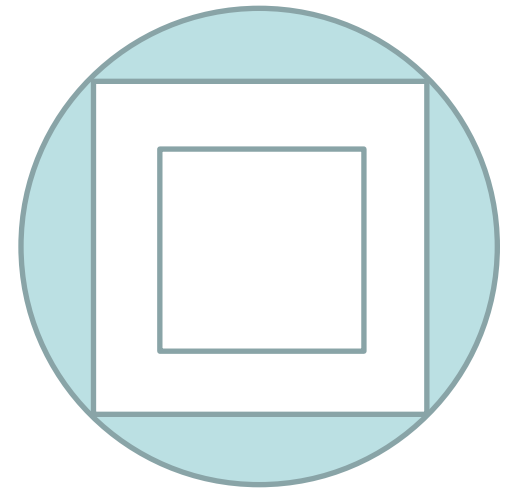


512 x 512 pixel

162 x 162 mm  
[316 $\mu$ m]

99 x 99 mm  
[193 $\mu$ m]

10,000 fps  
(100 $\mu$ s)



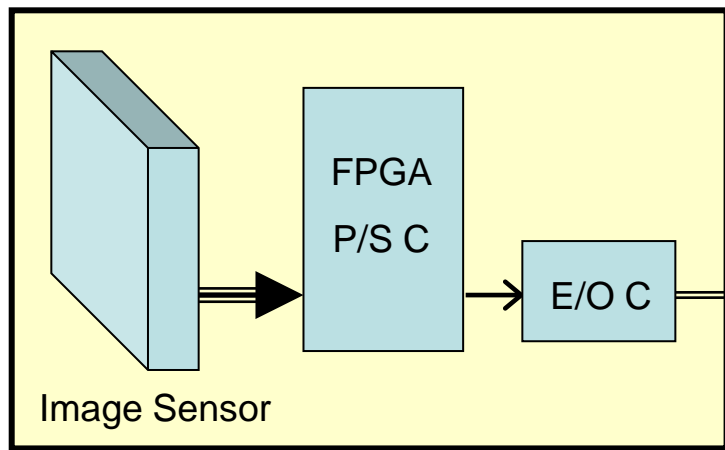
960 x 960 pixel

162 x 162 mm  
[169 $\mu$ m]

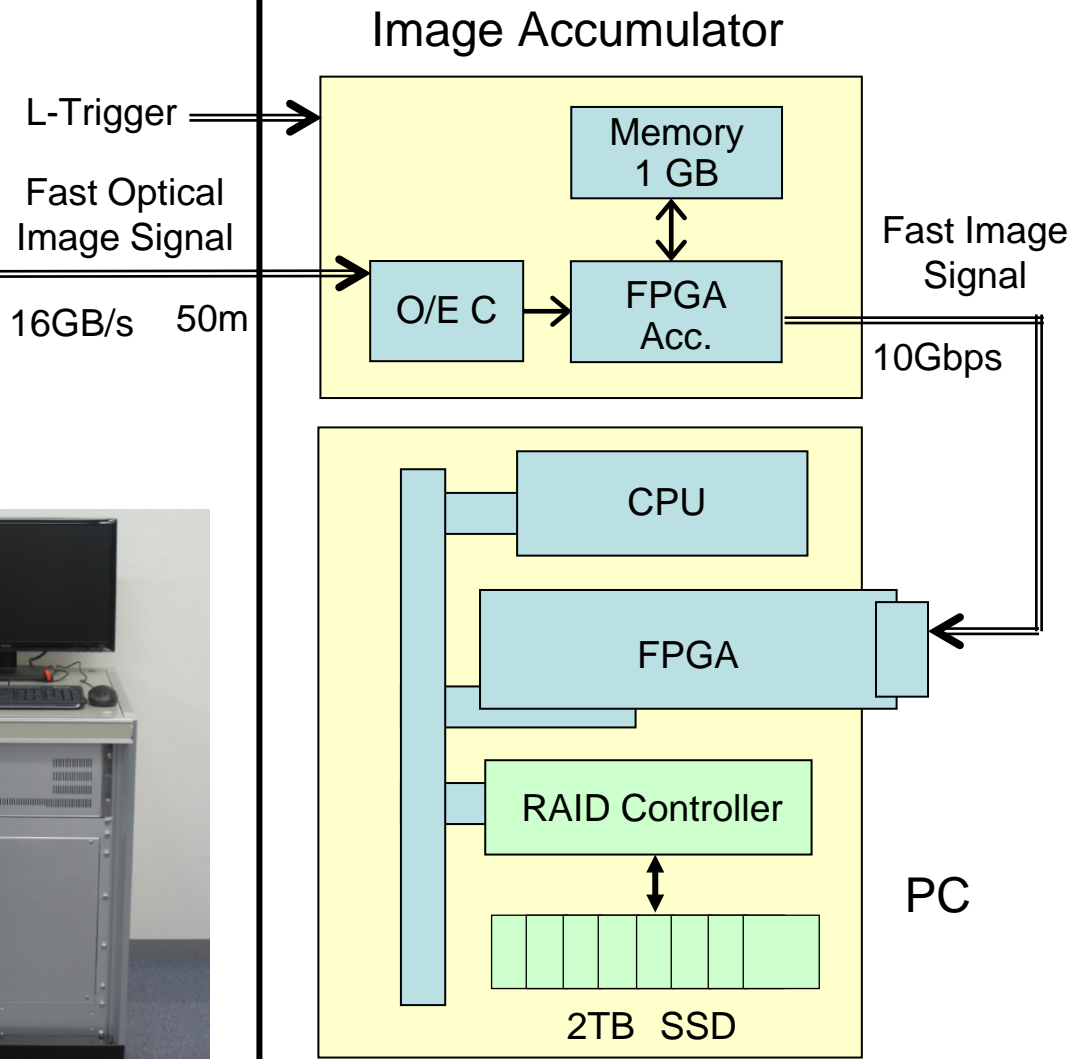
99 x 99 mm  
[103 $\mu$ m]

# 積算機能つき高速度カメラシステム

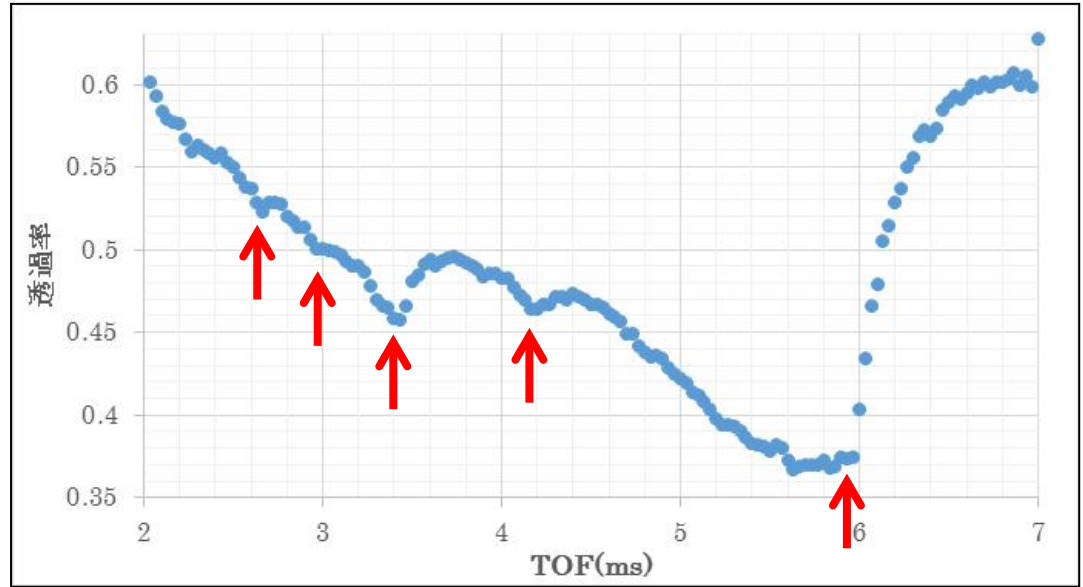
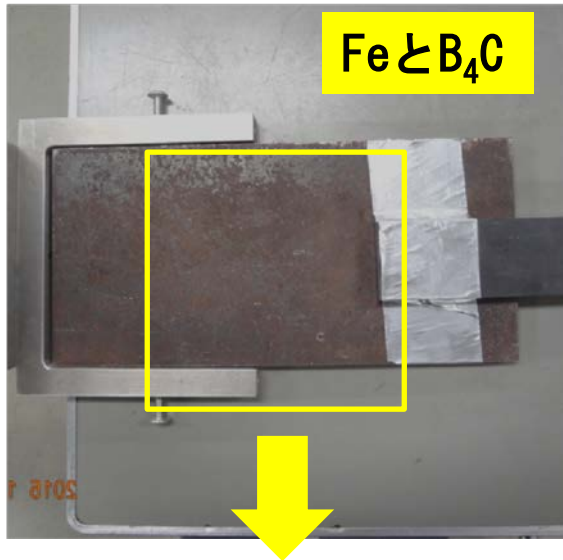
## Camera Head



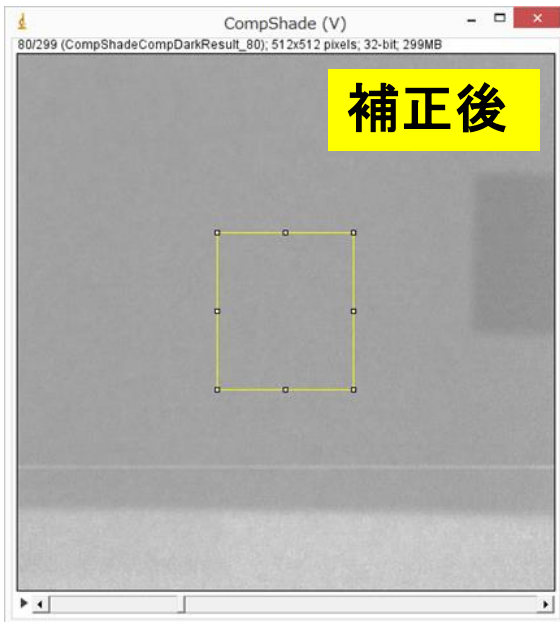
## Image Processing Unit



# 測定例 (Fe と B<sub>4</sub>C)



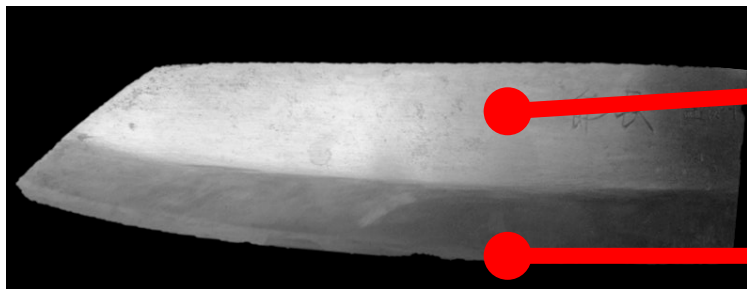
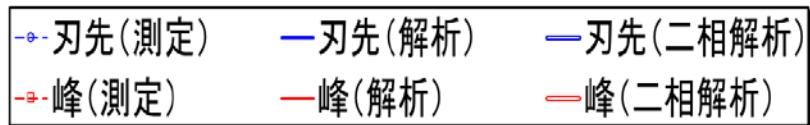
ROI内のスペクトル



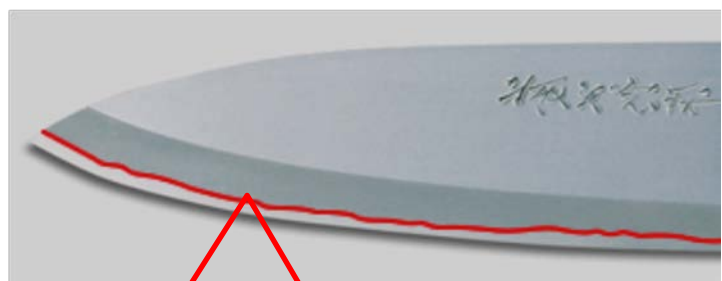
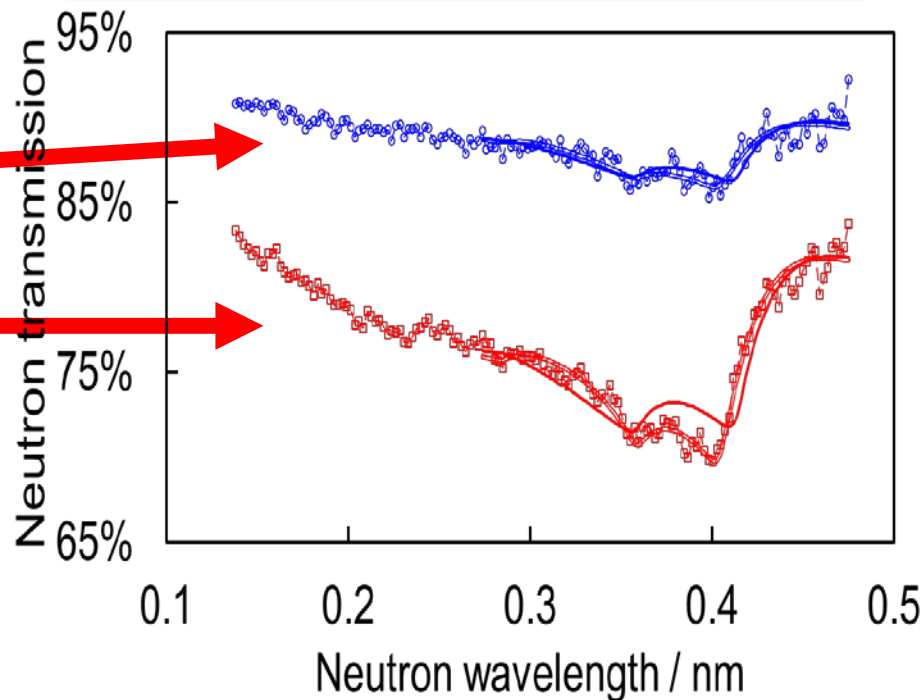
| 確認 | ブラッグエッジ[A] | TOF [μs] | 測定値 [μs] | 差   |
|----|------------|----------|----------|-----|
| ×  | 1.66       | 2380     | 2299     | -81 |
| ○  | 1.81       | 2600     | 2699     | 99  |
| ○  | 2.03       | 2910     | 2999     | 89  |
| ○  | 2.34       | 3360     | 3465     | 105 |
| ○  | 2.87       | 4110     | 4231     | 121 |
| ○  | 4.05       | 5820     | 5929     | 109 |



# 測定例 (和包丁)



関の孫六



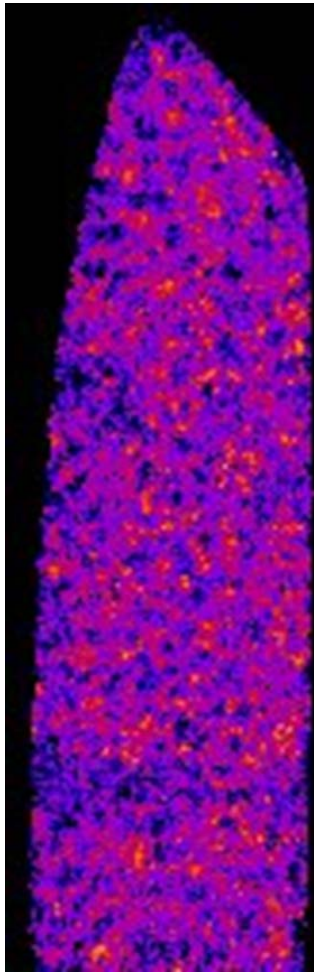
「刀境」: 刃の部分に現れるハガネと地金の境のこと

参考図 藤次郎株式会社のHPより

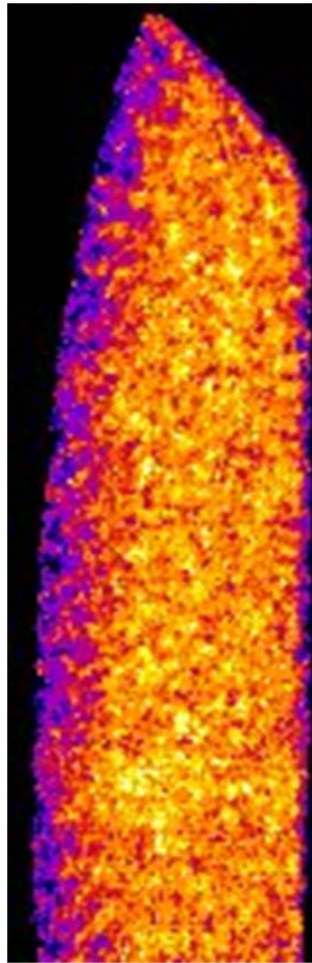
# 256 x 256 画素でRITSコードでの解析結果

面密度 ( $\times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ )

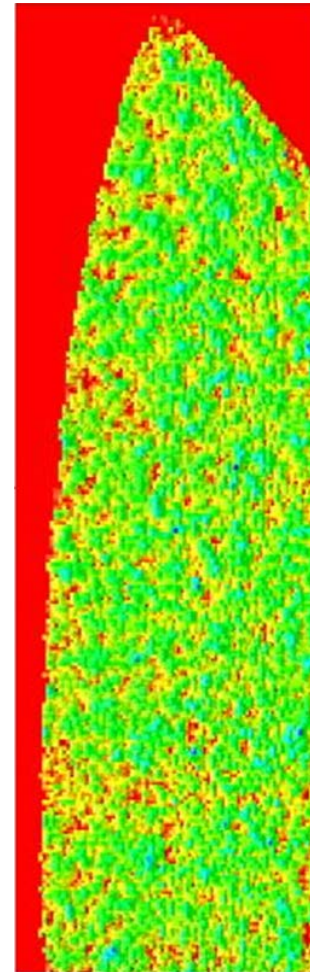
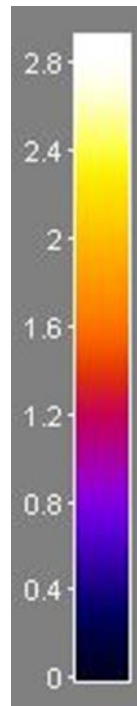
2種類の疑似カラーで表示



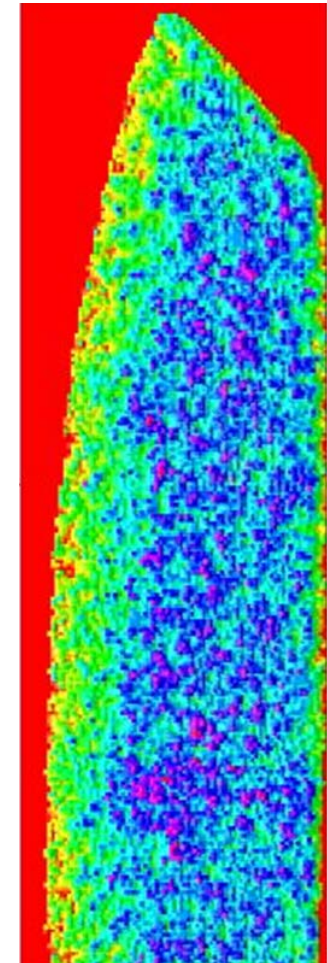
FCC相



BCC相



FCC相

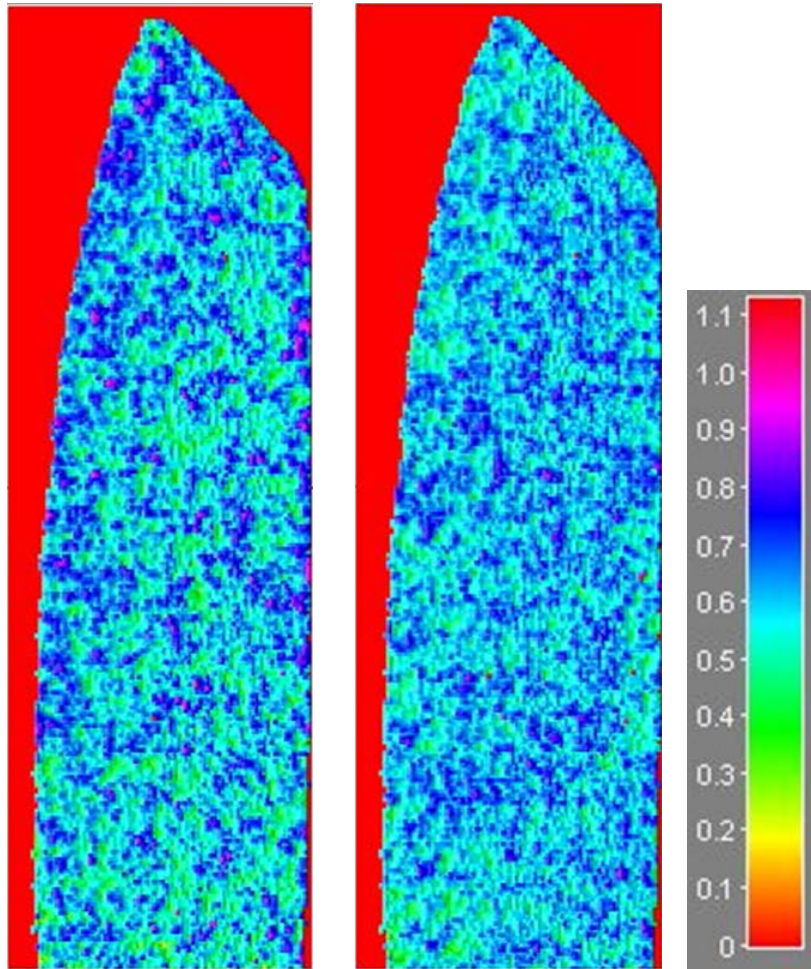


BCC相



# 256 x 256 画素でRITSコードでの解析結果

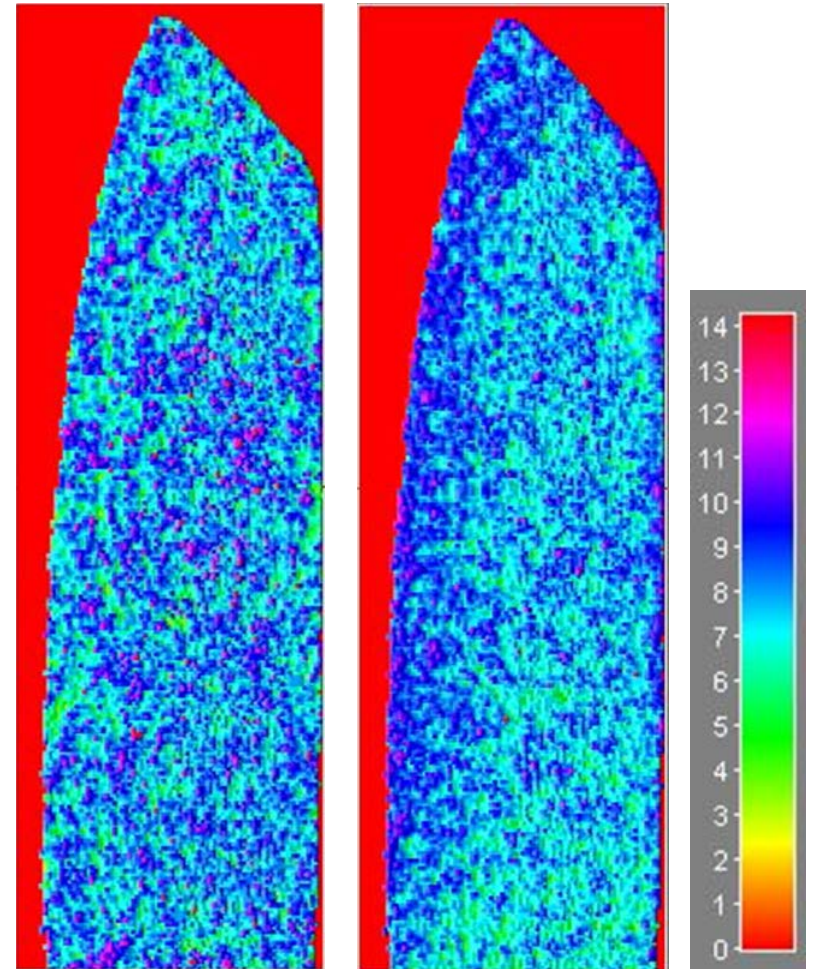
集合組織発達度



FCC相

BCC相

結晶子サイズ ( $\mu\text{m}$ )

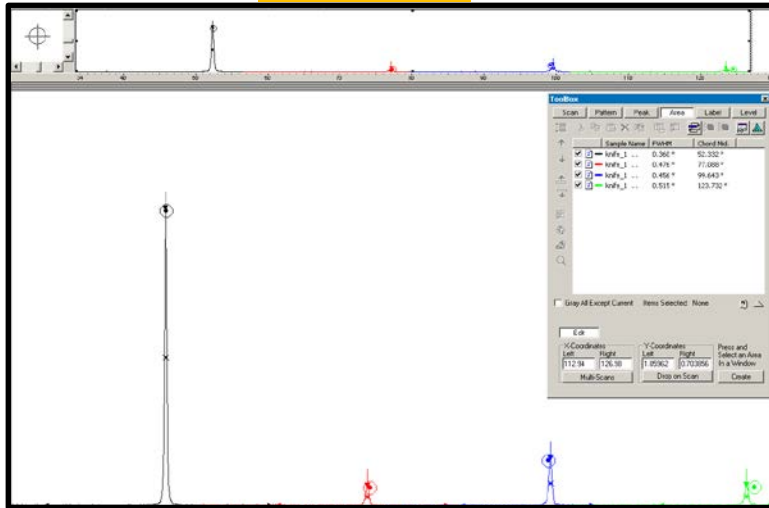


FCC相

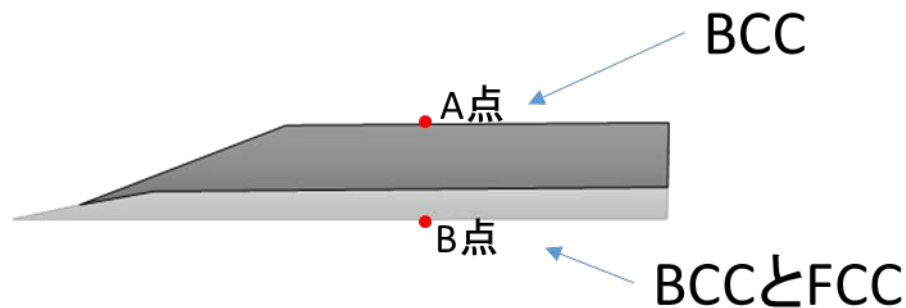
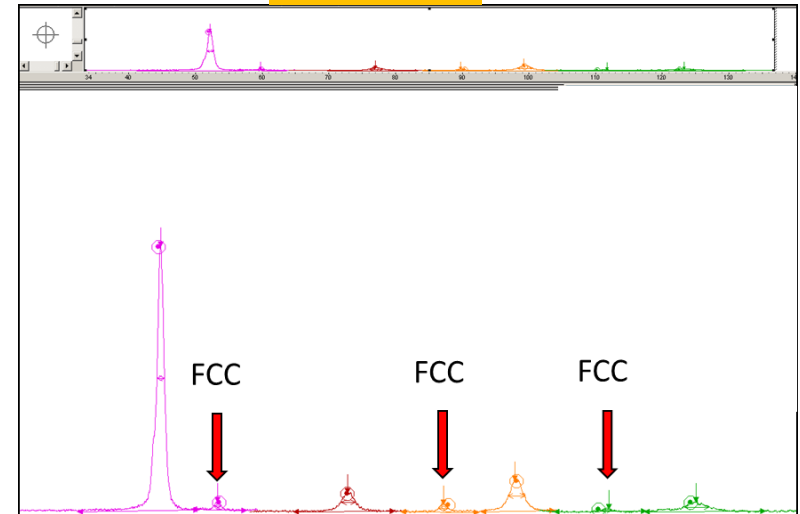
BCC相

# X線回折の結果

A点



B点



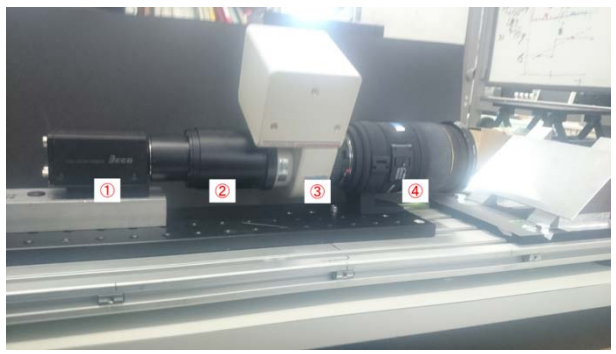
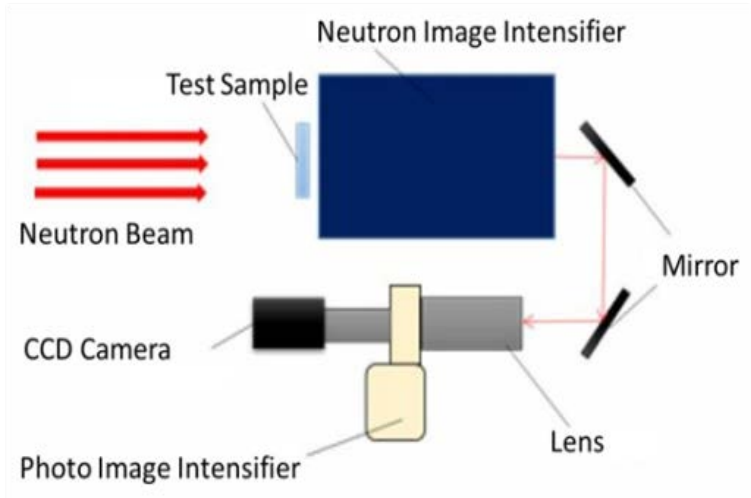
X線回折試験により、A点はBCC (Fe) 構造、B点はBCCとFCC(SUS304)の混相状態である事がわかった。

# 理研RANS での中性子輝点重心処理によるイメージング

実験条件：プロトン：7.5 MeVで40 Hz,  
パルス：150μsec, 平均電流：30 μA



**中性子 I. I.  
東芝製、ボロンタイプ**



光 I. I.  
C9100-02 短残光  
高感度カラー CCDカメラ  
東芝： IK-TF2  
インターレース

# 撮像体系

## 動画用カメラで中性子輝点検出

撮像システム

**中性子 I. I.**

東芝製、ボロタイプ

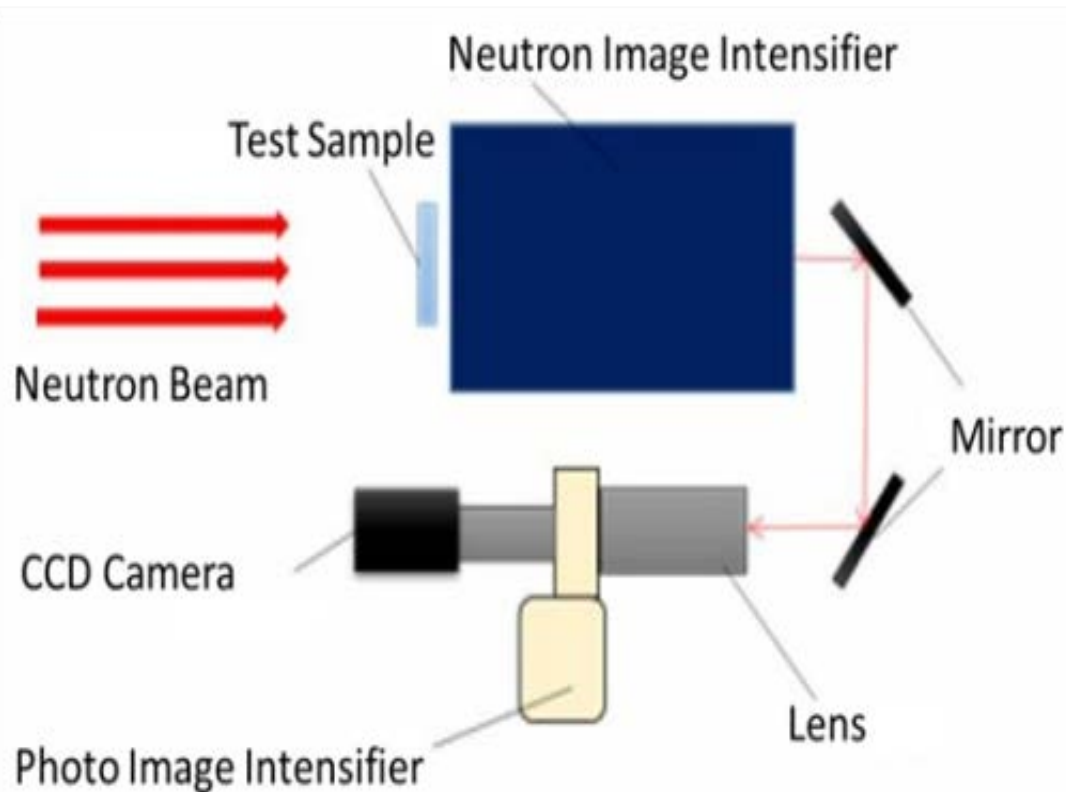
光 I. I.

C9100-02 短残光

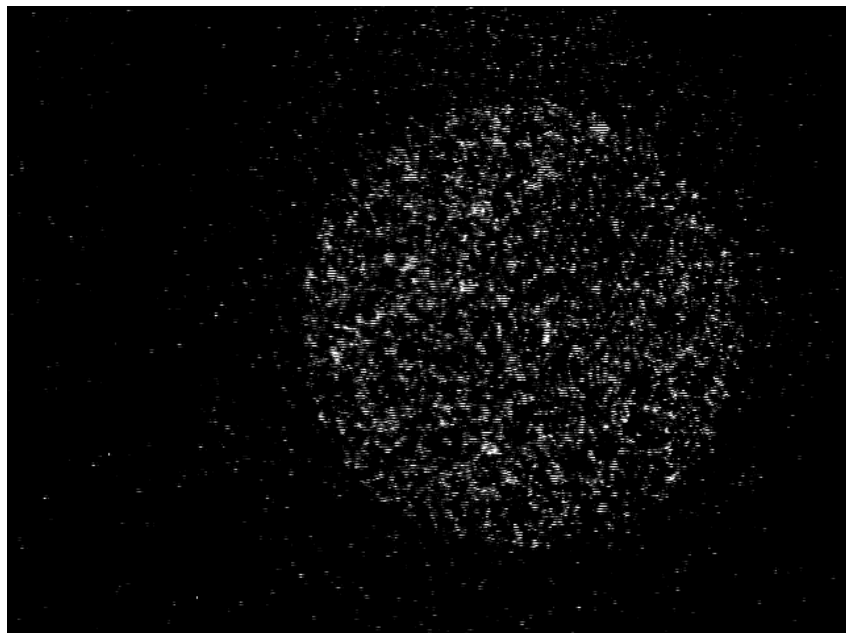
高感度カラー CCDカメラ

東芝： IK-TF2

インターレース

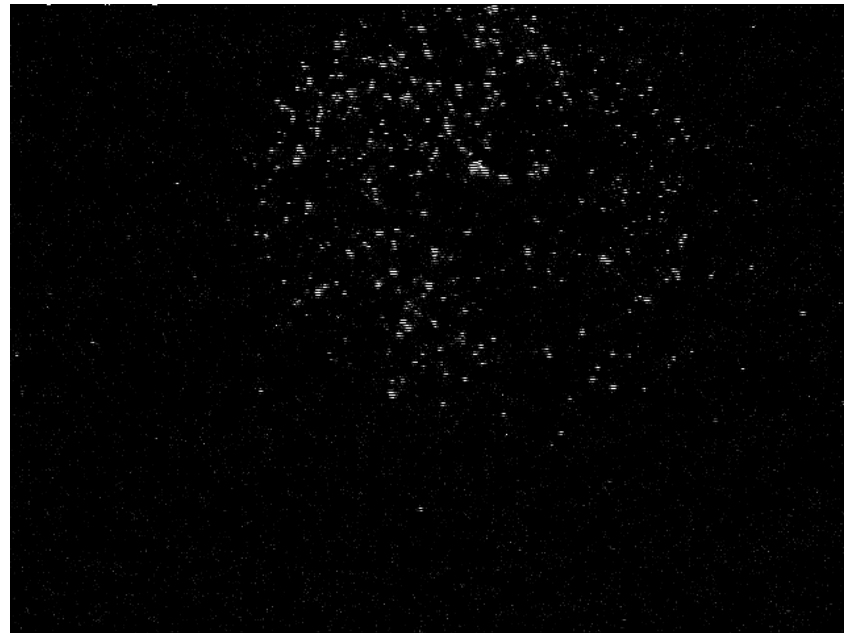


# 取得動画



ビーム電流 **50.0  $\mu\text{A}$**   
光 I.I ゲイン 840  
3000枚 (50 sec)

中性子数過剰

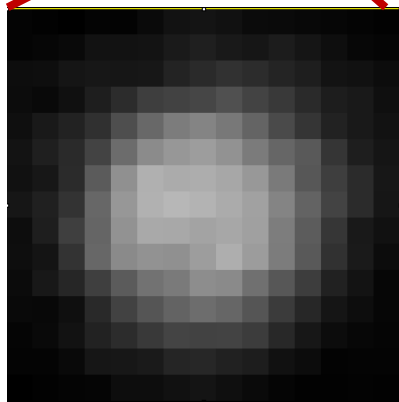
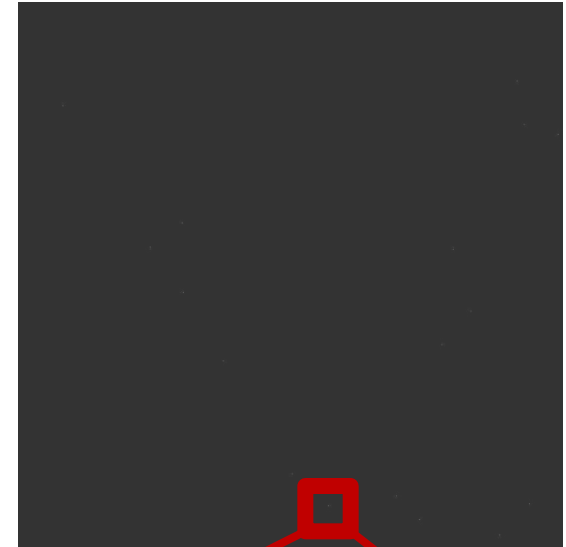
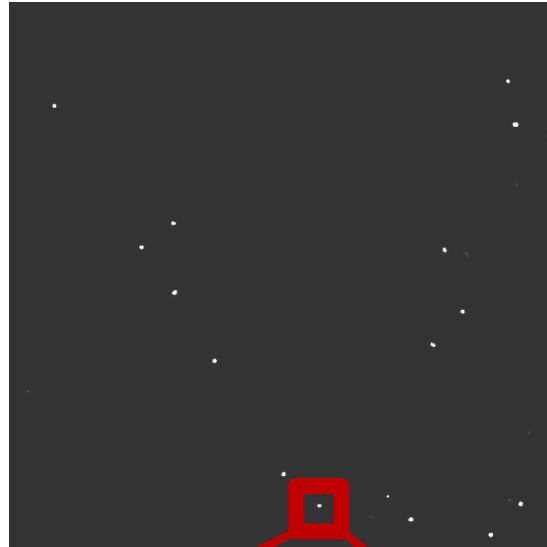
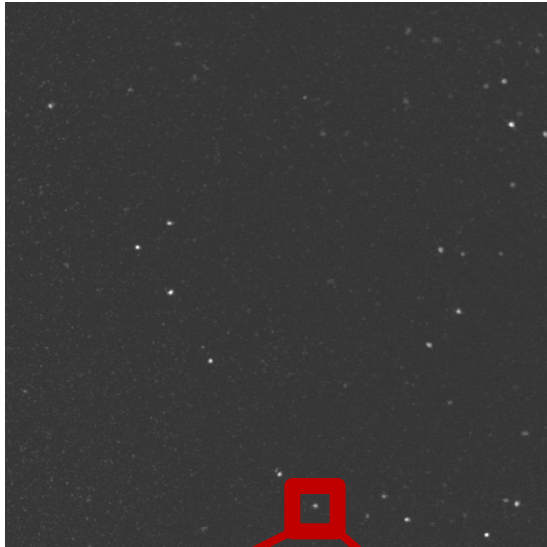


ビーム電流 **5.3  $\mu\text{A}$**   
光 I.I ゲイン 840  
3000枚 (50 sec)

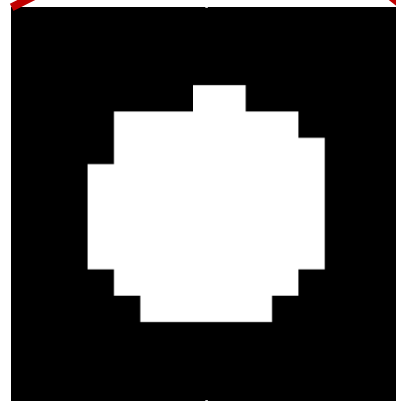
適度は強度 (輝点が重複しない)

# 中性子輝点重心処理法

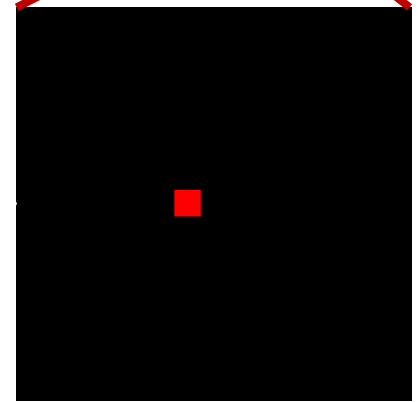
蛍光コンバータ上の輝点の重心座標を算出し、積算するので、I.I.で発生する分解能劣化を改善できる



25×25[pixel]  
多値画像



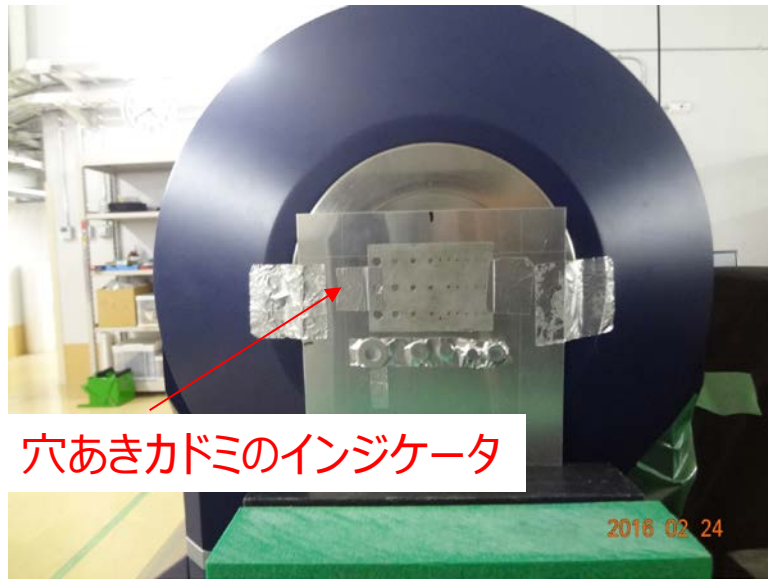
25×25[pixel]  
二値画像



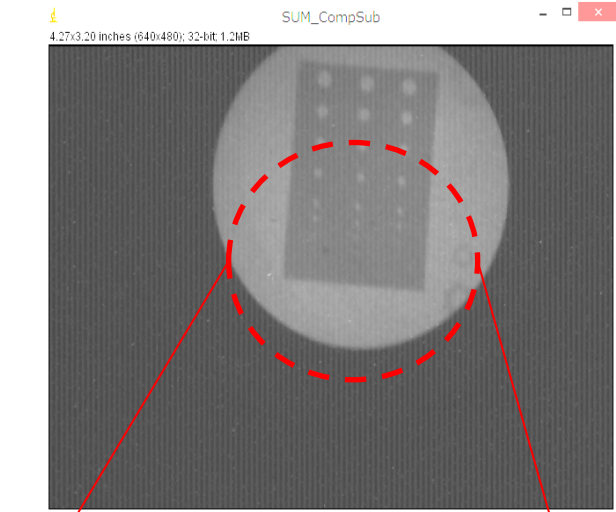
25×25[pixel]  
重心画像



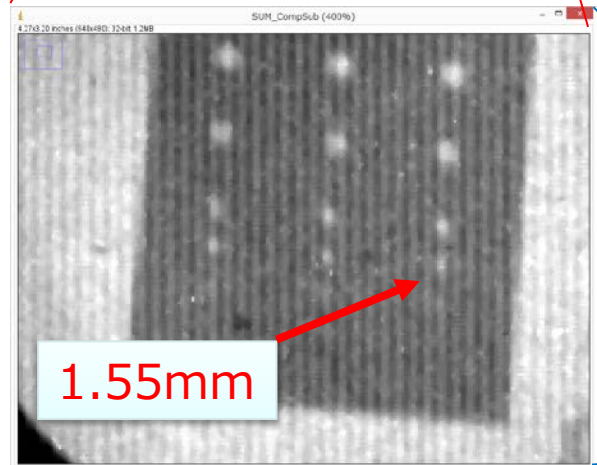
# 穴あきカドミ板による分解能測定



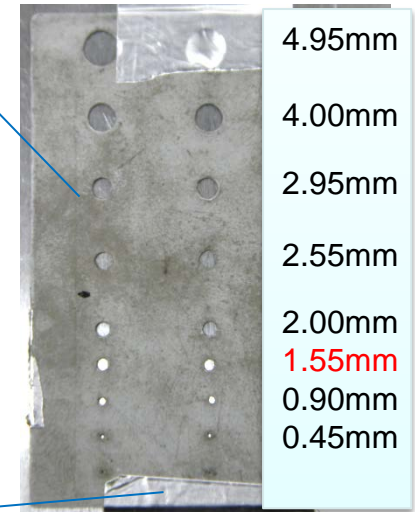
測定体系



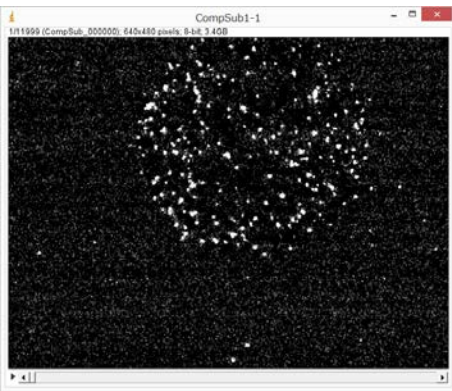
穴あきカドミ板のインジケータ(12000枚積算)



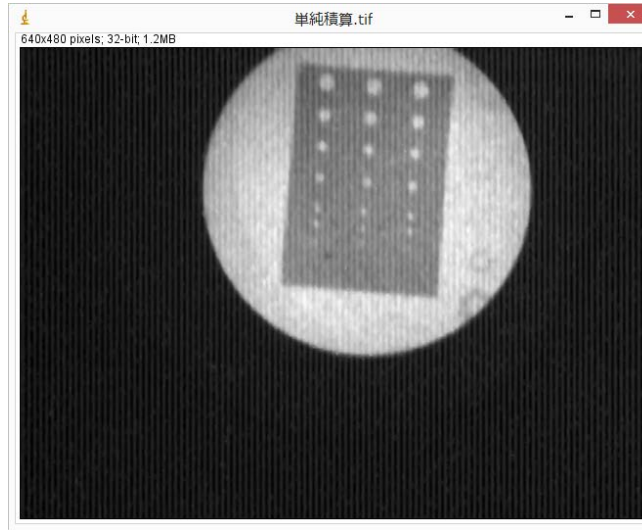
穴あきカドミ板のインジケータ(拡大・コントラスト調整)



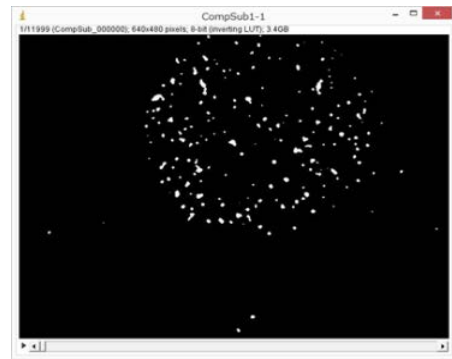
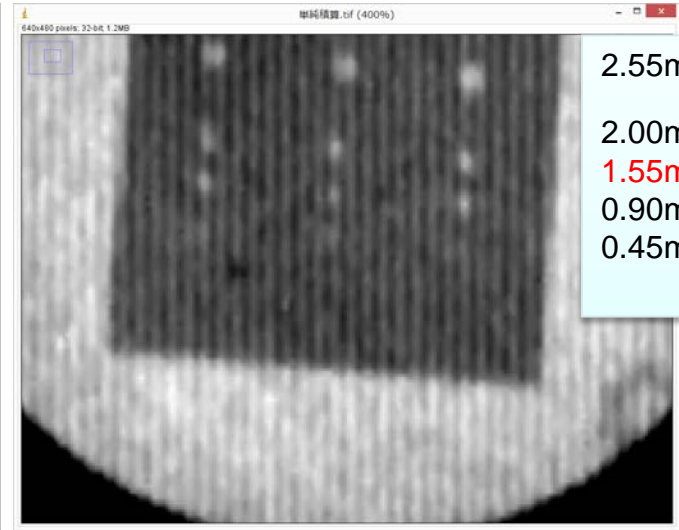
# 穴あきカドミ板による分解能測定



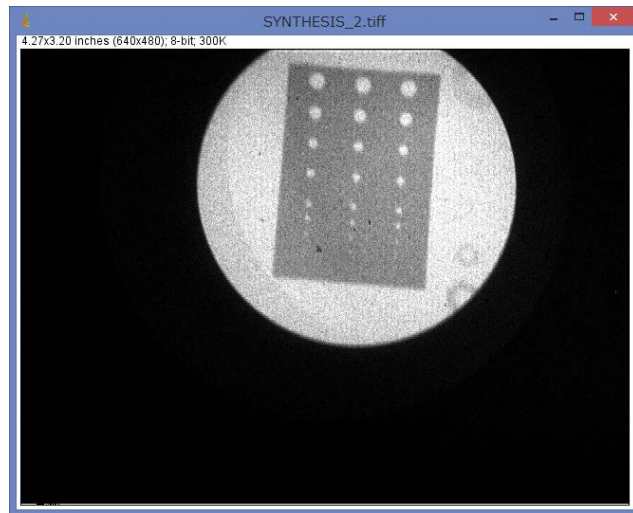
原画像



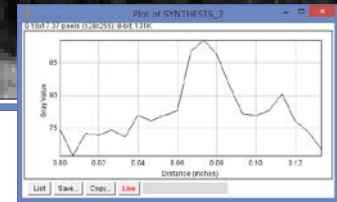
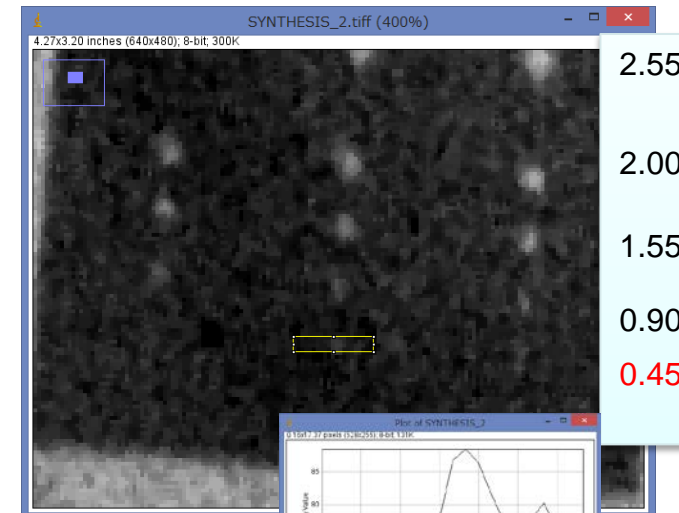
単純積算



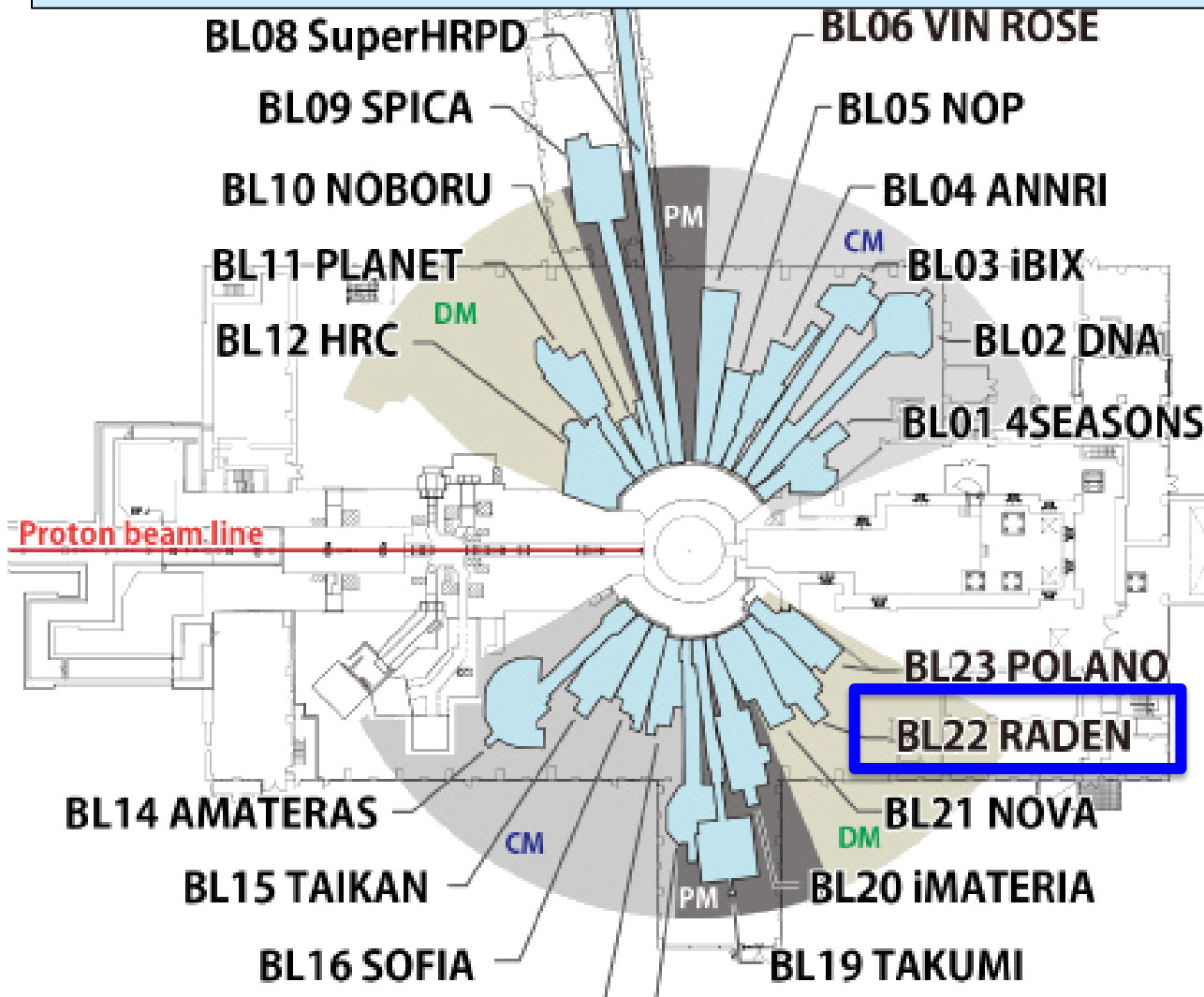
2値化処理後



重心積算



# RADENにおける実時間処理装置の開発



## J-PARC MLFの実験装置

CM Coupled moderator DM Decoupled moderator PM Poisoned moderator

# 積算型高速度カメラシステムの高性能化

## 空間分解能の改善

### 現状

N-I.I.の現状 200 $\mu$ m  
カメラ 5.5in 100kfps  
320x240画素 350 $\mu$ m

### カメラシステムのぼけの原因

- 光I.I. (MCPタイプ)による光の拡がり
- レンズ系で生じるぼやけ

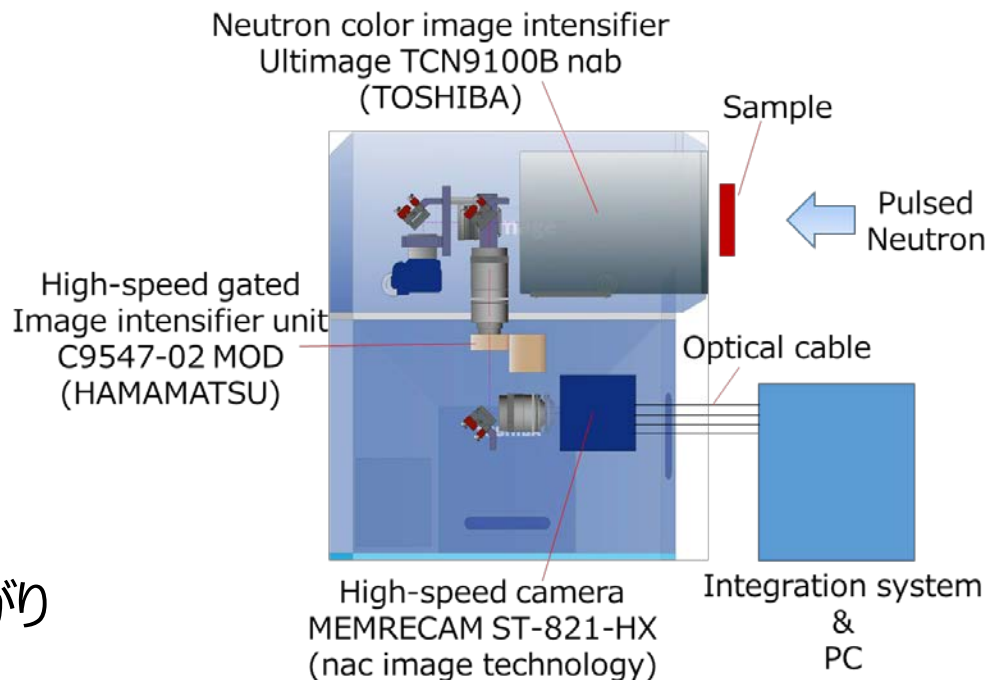


### 輝点の画像処理で改善

重心処理 > 350  $\mu$ m  
超解像処理 > 80 $\mu$ m,  
1280x960画素



実時間処理で高計数率化



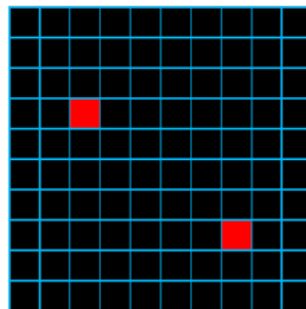
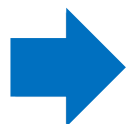
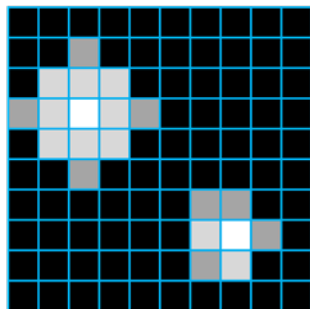
# 重心処理と超解像処理

## 重心処理

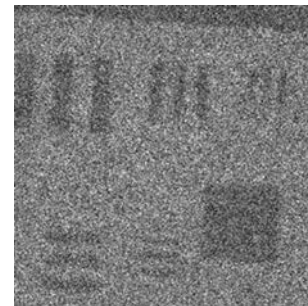
重心計算の際に小数点以下は切り捨て、または四捨五入



輝点画像  
(高速撮影した生データ)



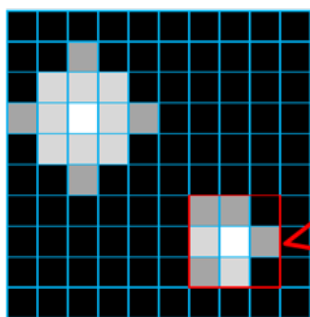
積算



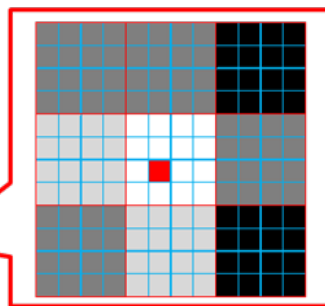
透過像

## 超解像処理

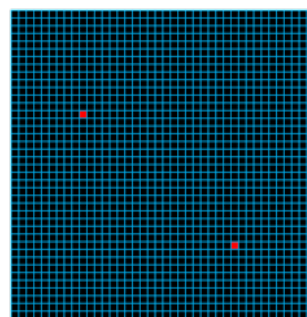
重心計算の際に二進数小数点2桁まで使用



$3 \times 3$   
 $10 \times 10$

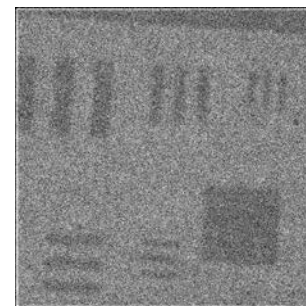


$12 \times 12$



$40 \times 40$

積算

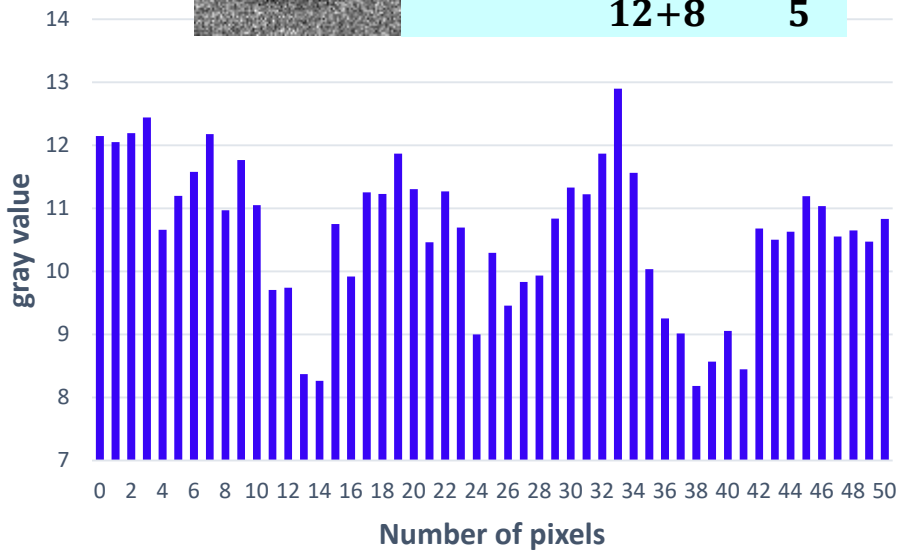
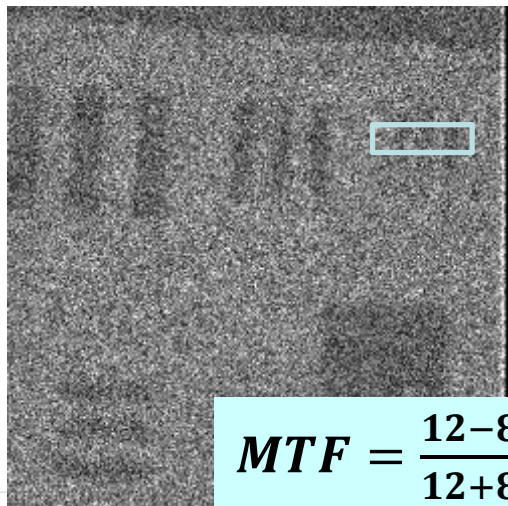


透過像

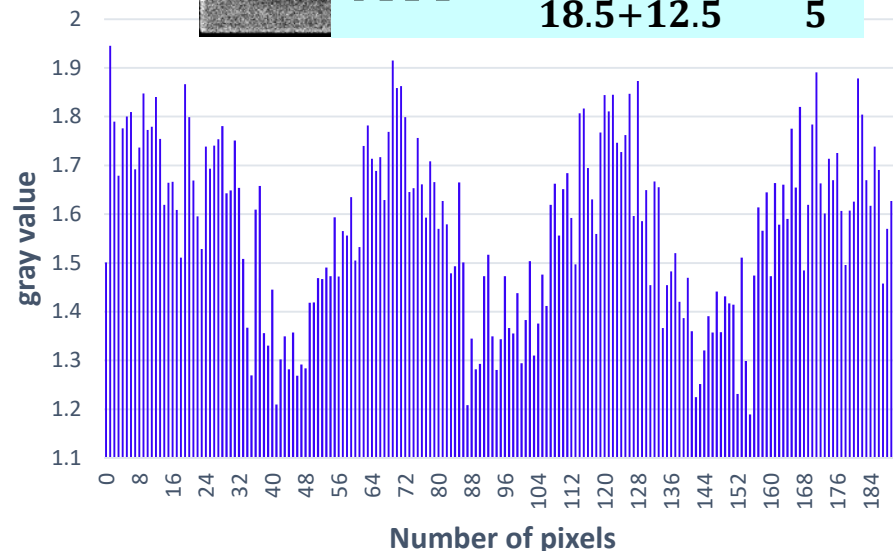
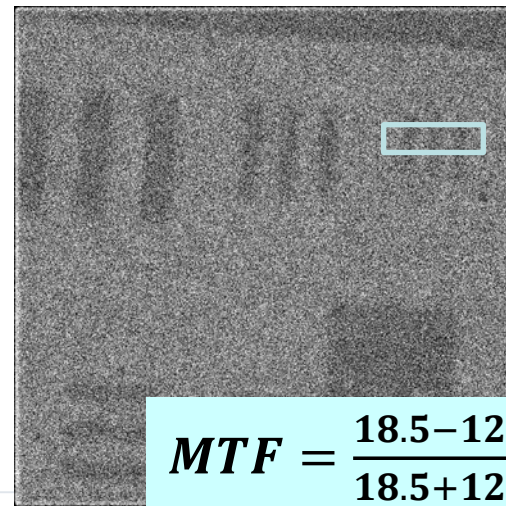
画素数が縦横4倍に増加

# 重心処理と超解像処理

## 重心処理

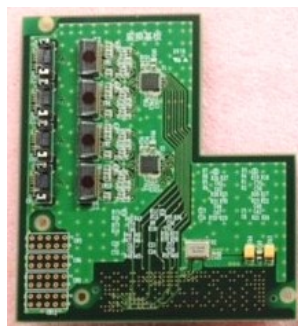
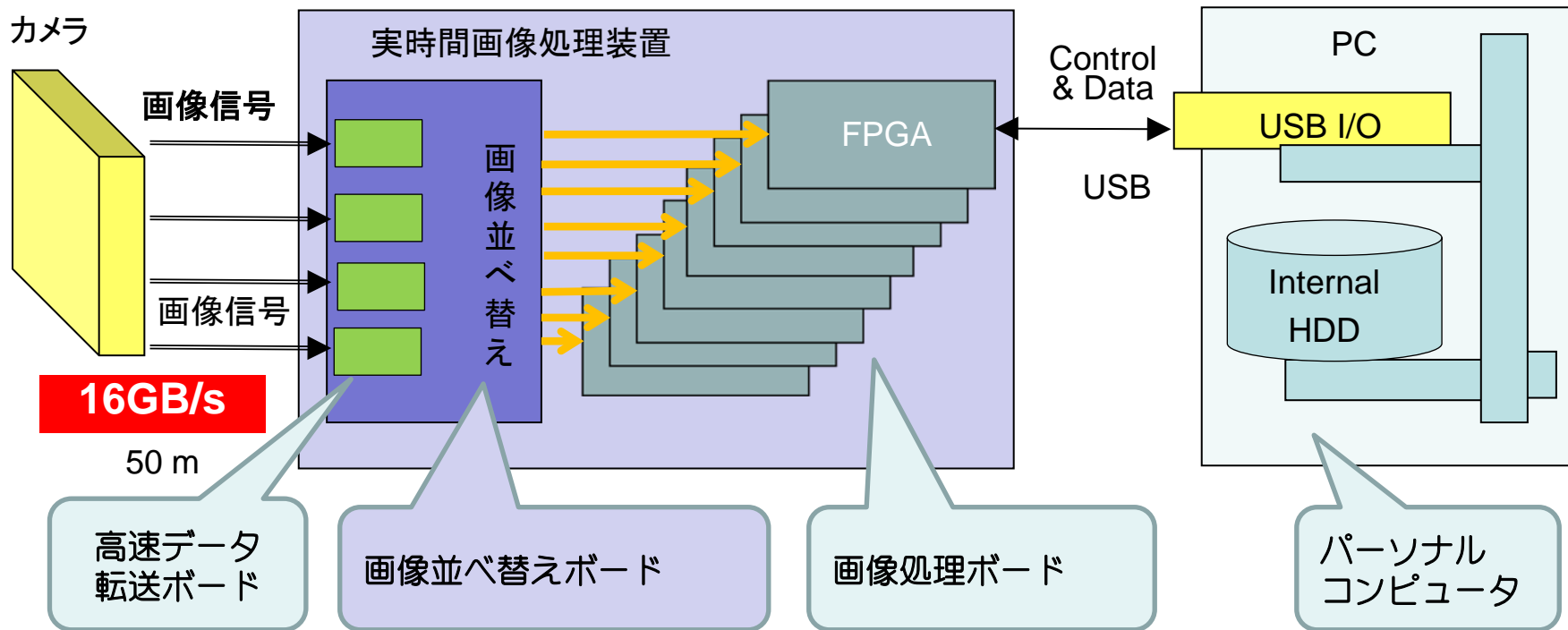


## 超解像処理



スリット幅：左上0.5mm、中央上0.3mm、右上0.2mm

# ハードウェアによる実時間画像処理システム



# 実時間重心処理と $\mu$ NID の比較

$\mu$ NID: マイクロピクセルチェンバー( $\mu$ -PIC)  
中性子イメージング検出器( $^3\text{He}$ ガス使用)  
検出視野: 100 x 100 mm  
空間分解能:  $\sim 0.1$  mm  
最大計数率:  $\sim 1$  MHz

100 kfps、320x240 画素、視野 112 x 84 mm<sup>2</sup>、1画素 350  $\mu$ m角

1フレームで処理できる輝点数

仮定: 平均の輝点の面積を25画素とし、総画素数の1%が輝点であると  
すると(平均 50 x 50 画素中に 5 x 5 の輝点)、輝点数  $n$  は

$$n = (320 \times 240) \times 0.01 / 25 \doteq 31$$

100kfps であるので、1秒間に処理できる平均輝点数  $N$  は、

$$N = 10^5 \times 31 = \mathbf{3.1 \text{ Mcps}}$$

4倍の超解像処理ができるとして、

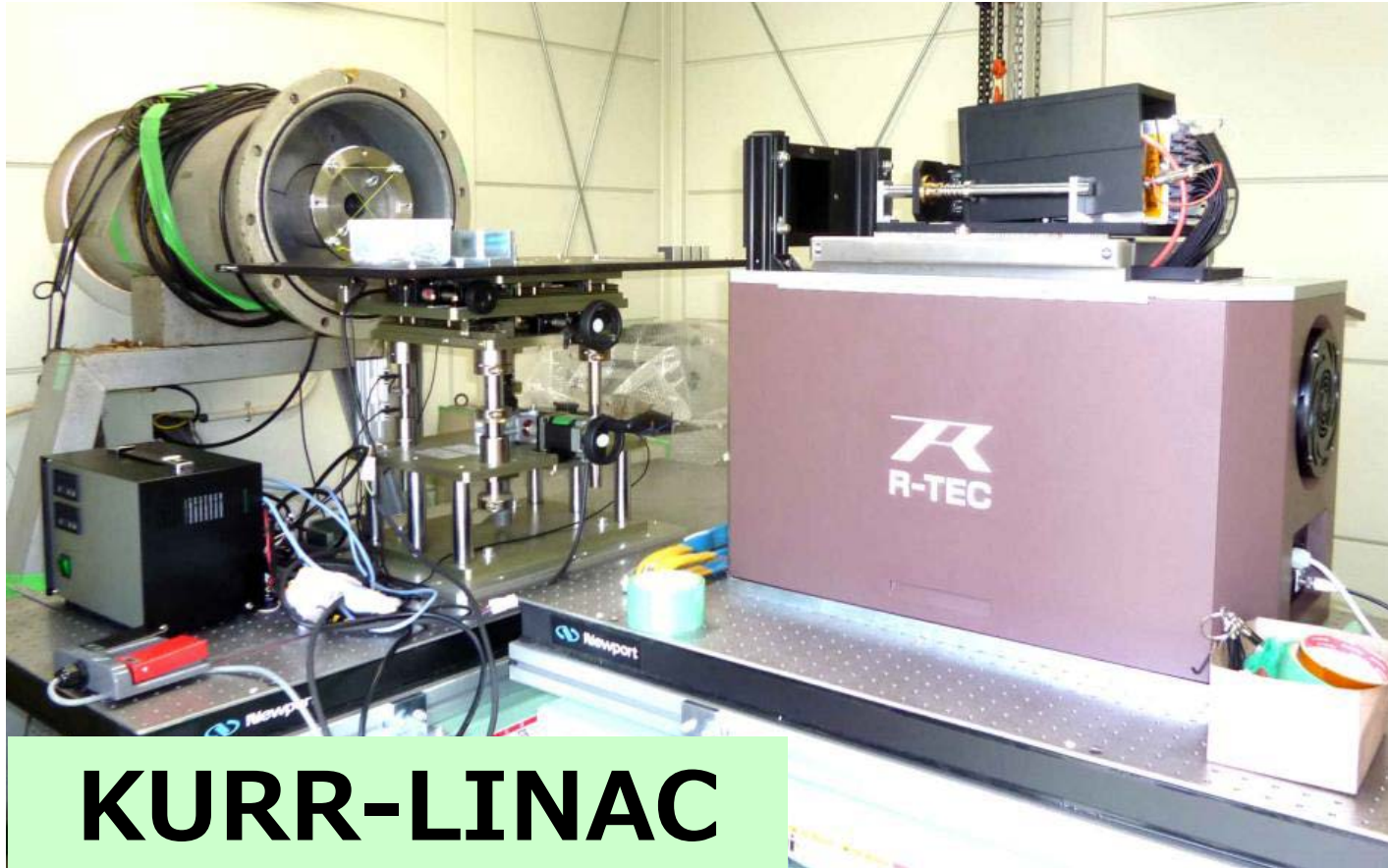
画素数は **1280 x 960 画素**

空間分解能は 1/4 に改善されるとして、**88  $\mu$ m** となる。





# サブピクセルシフトによる高解像化



Energy  $\sim 30$  MeV

Width: 100 ns, Frequency: 250 Hz, Current:  $\sim 80\mu\text{A}$

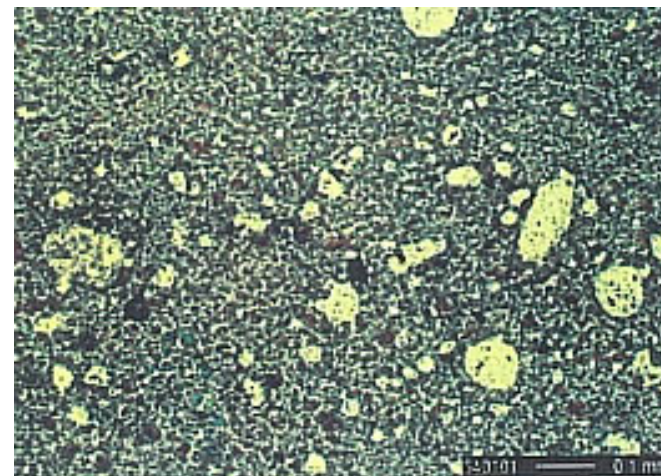
# 次世代原子炉燃料の健全性評価のための 非破壊分析技術の開発

## プルトニウムスポット

Pu燃料製造時のUとPuの混合過程で、Puが均一に混ざらずにPu濃度が局所的に高くなってしまった部分

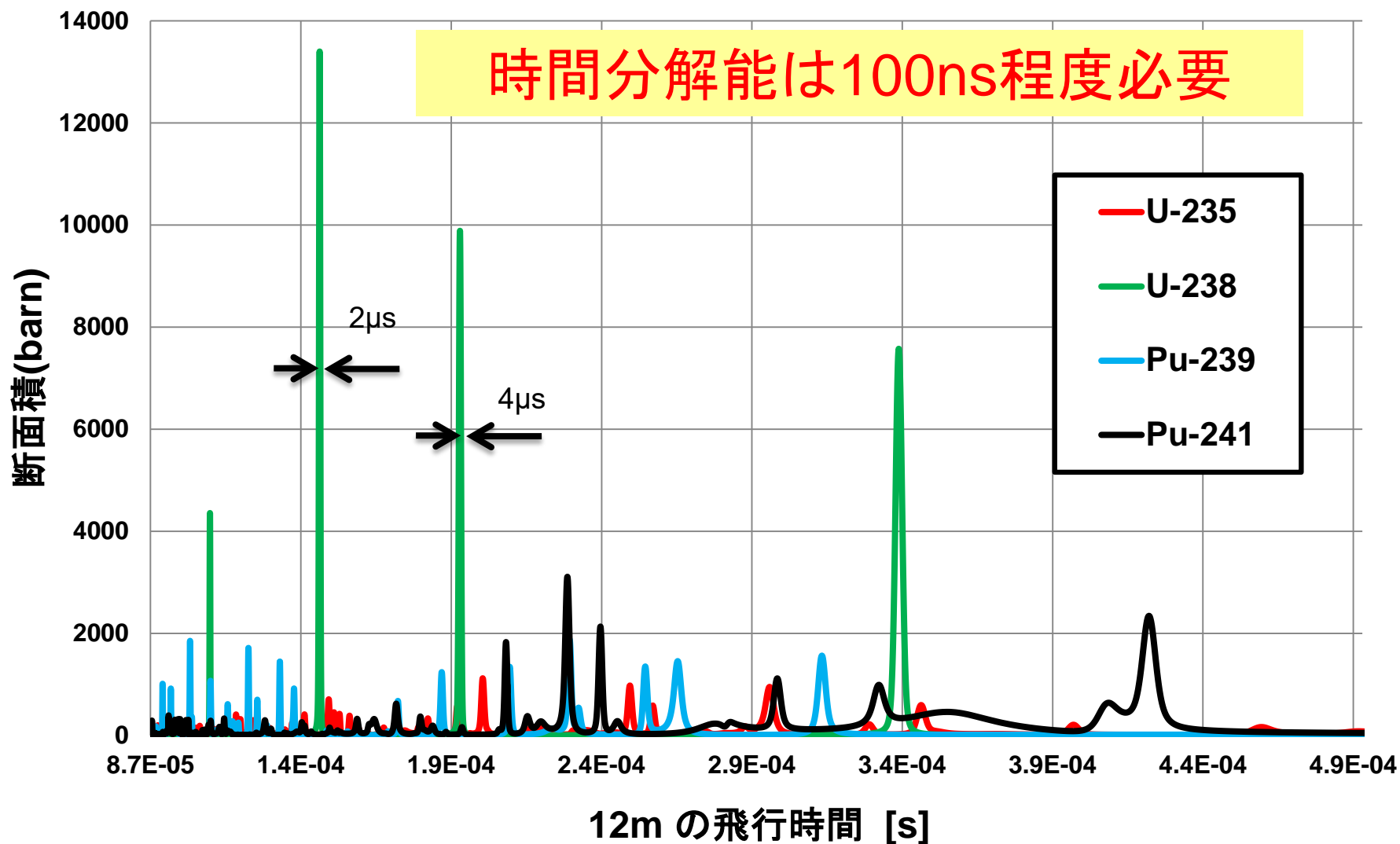
熱的、FPガス放出量増大、  
燃料健全性評価の重要な要素

従来技術:  $\alpha$ 線オートラジオグラフィ  
 $\alpha$ 放射体MA含有のTRU燃料では検知が困難



高精細な濃度分布のイメージング化  
→ 目標: 空間分解能 400  $\mu\text{m}$

# 中性子共鳴吸収反応で元素分析

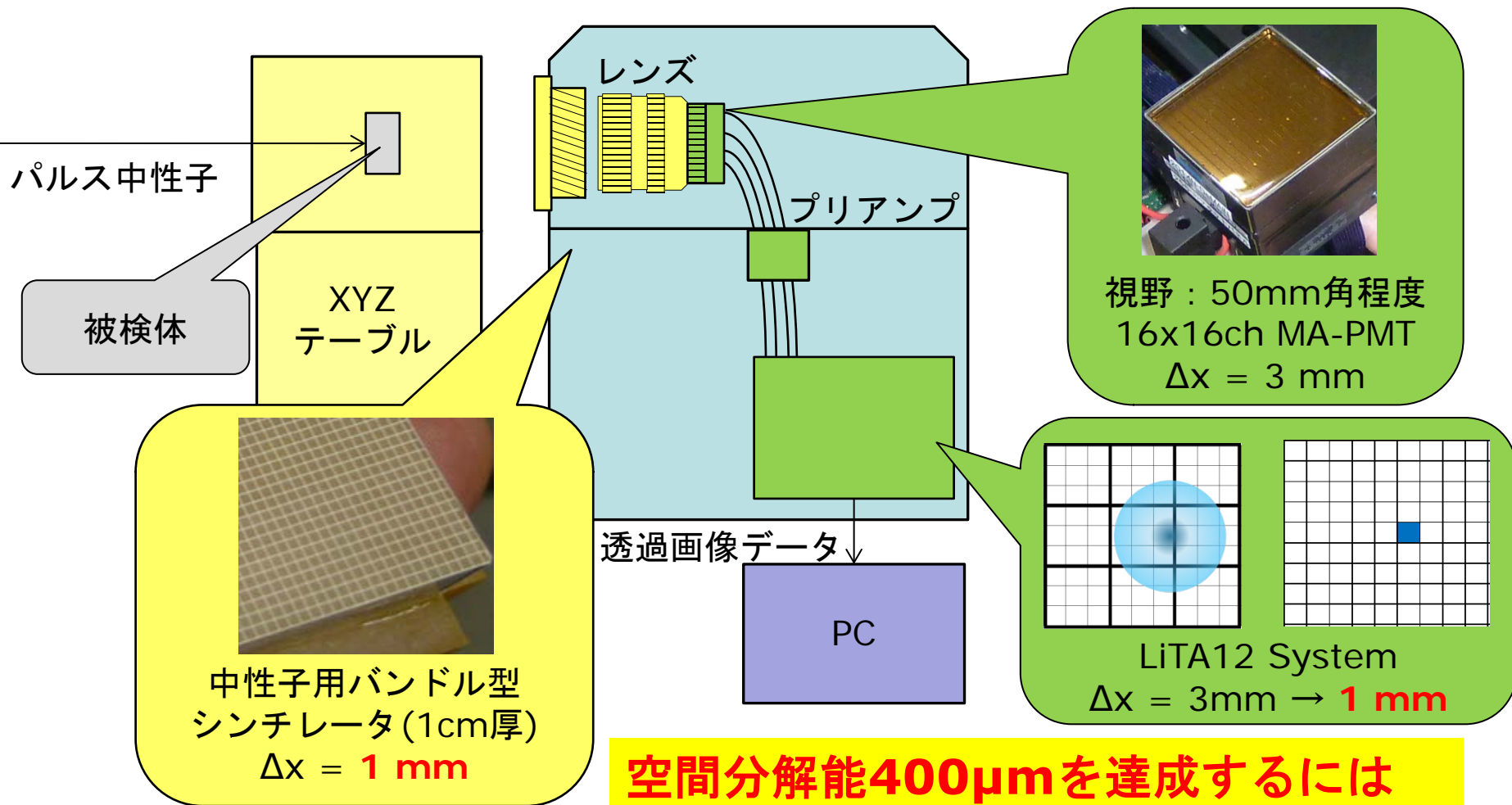


# 現状の検出器システムと課題

N-DeMAIN

$\Delta t$ 優先 : mA-PMT を使用 > 画素数不十分

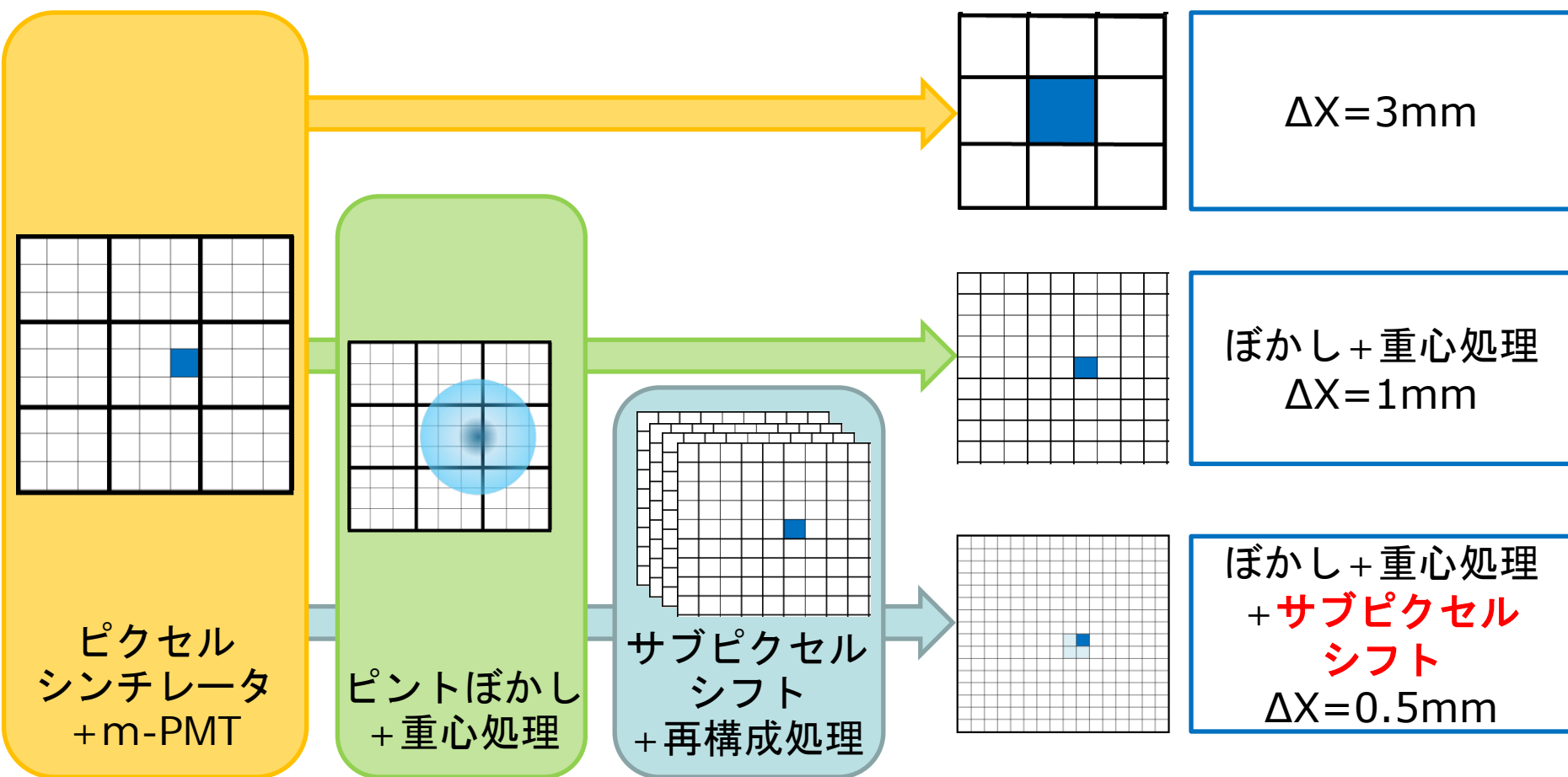
高E中性子に対して高検出効率 : 柱状の厚いシンチ >  $\Delta x$  不十分



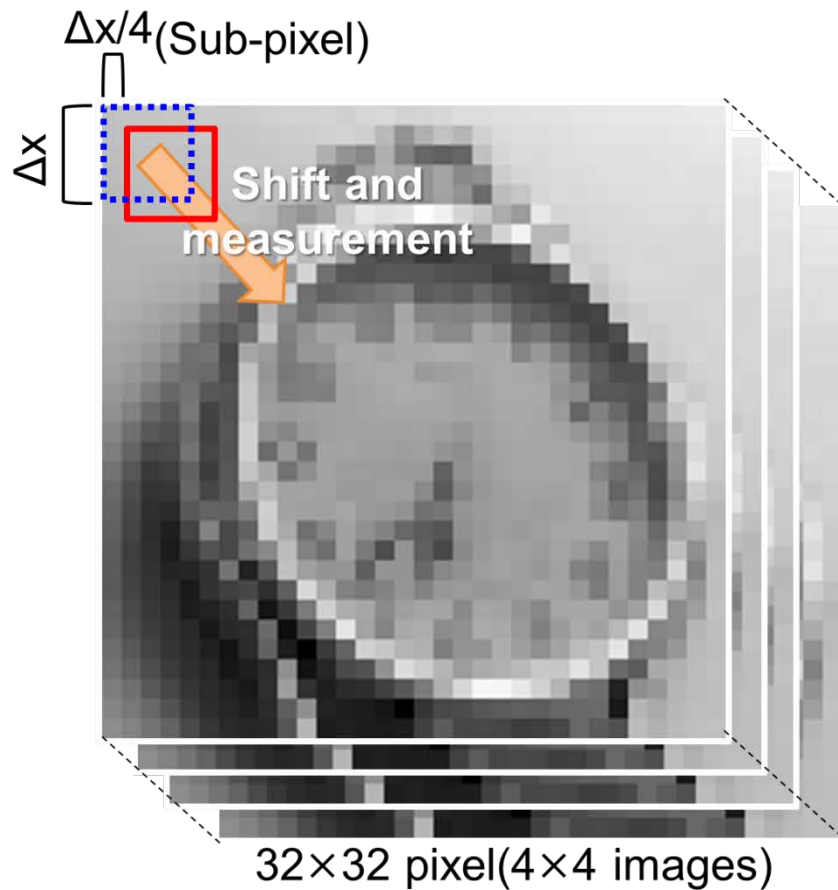
空間分解能 $400\mu\text{m}$ を達成するには  
重心処理だけでは不十分

# ソフトウェア処理による空間分解能の改善

N-DeMAIN



16枚撮像で最大250  $\mu\text{m}$ まで空間分解能改善が期待

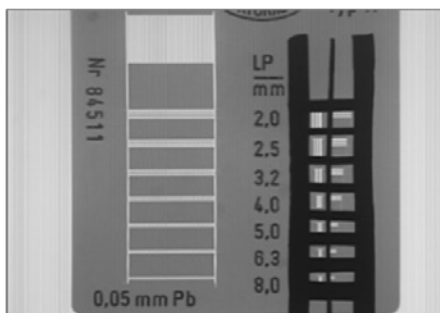


Reconstruction  
calculation



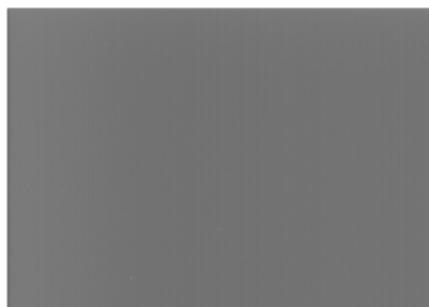
128x128 pixel

### 1. Dark Correction



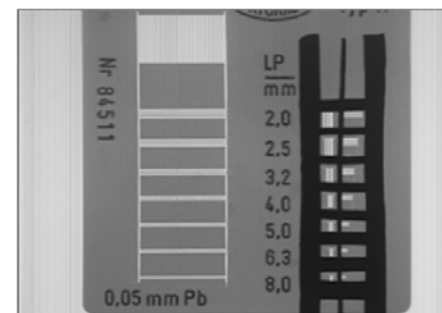
Test Object / Shading Image

−



Dark Current

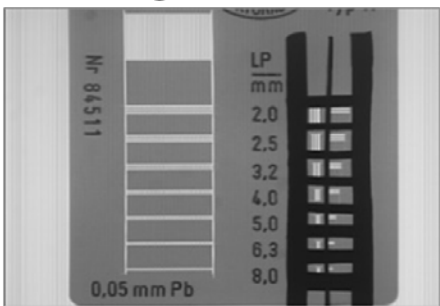
=



### 2. ML-EM Method Reconstruction for getting Super resolution

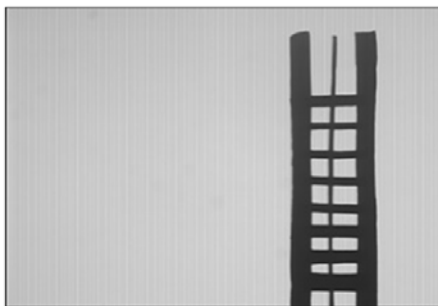
$$x_j^{k+1} = x_j^k \frac{1}{\sum_{i=0}^{M-1} C_{ij}} \sum_{i=0}^{M-1} \frac{C_{ij} y_i}{\sum_{m=0}^{M-1} C_{im} x_m^k}$$

### 3. Shading Correction



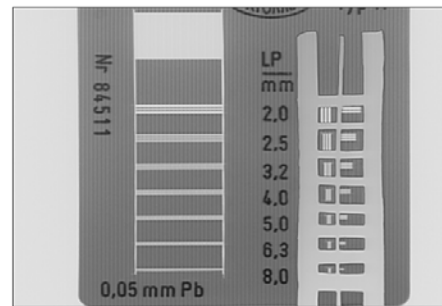
Test Object Image

÷



Shading Image

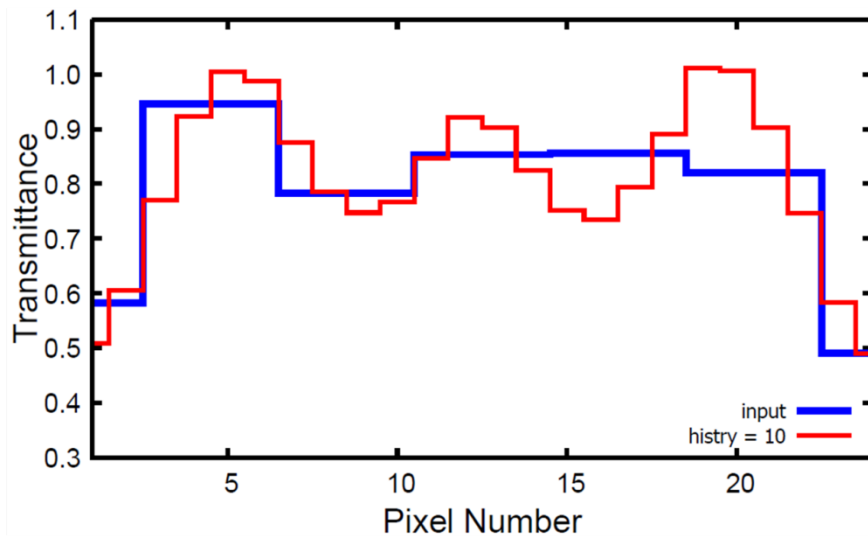
=



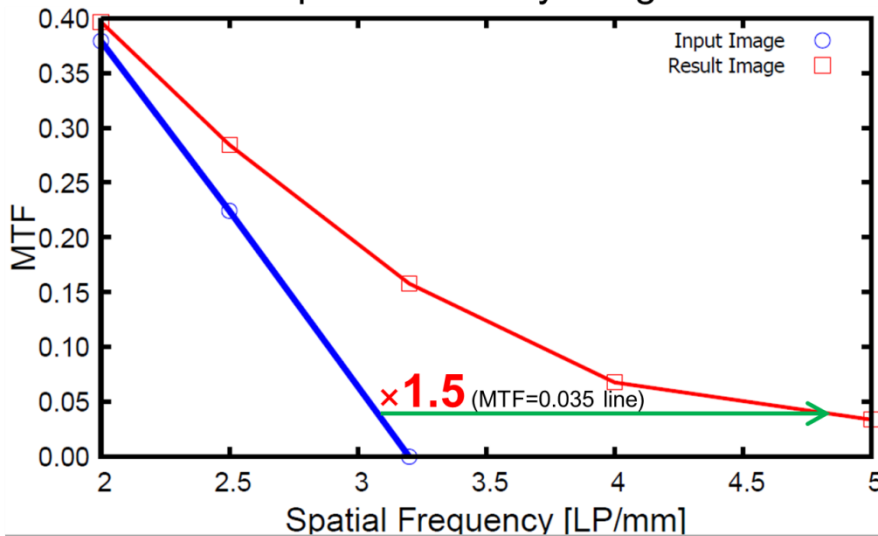
(Theoretical value)

# サブピクセルシフト X線透過像 CCDカメラ

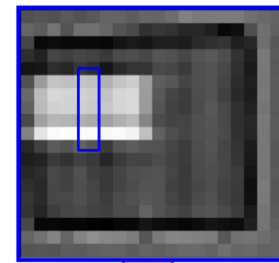
N-DeMAIN



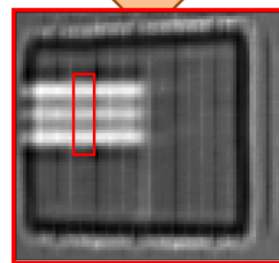
Line profile of X-ray images



MTF of Line Pair that 3 lines has was confirmed

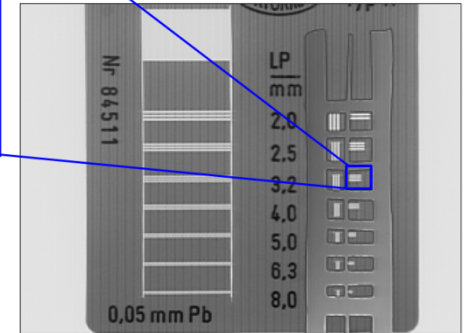


Detected Image



Result Image

Detector : CCD Camera (480×320 pixel)



Line Pair Chart for X-ray, and Pb shield

Sorce: RIX-59 (focal dimension: 100 μm)

Result image had reconstructed by 16 images (157 μm/pixel → 38 μm/pixel).

Spatial resolution of reconstructed image had improved to 0.67 times. (MTF = 0.035 line)

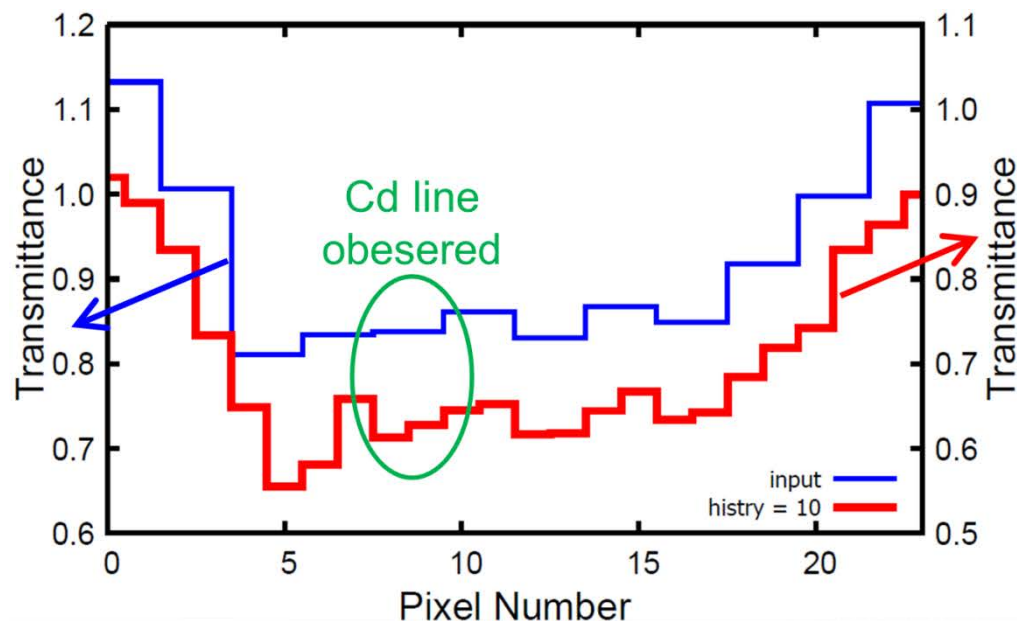


**This method is expected to improve spatial resolution**

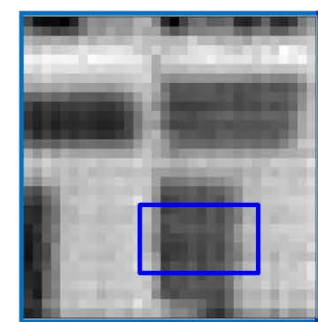


# サブピクセルシフト 中性子透過像 GEM

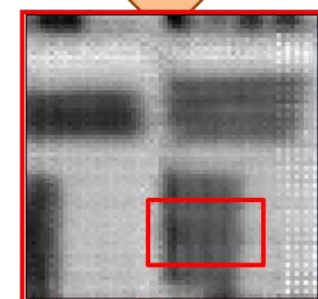
N-DeMAIN



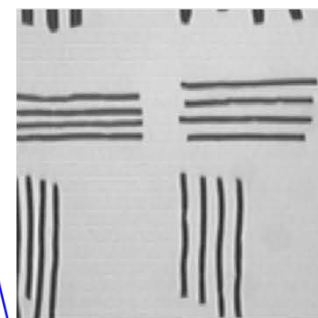
Line profile of neutron images



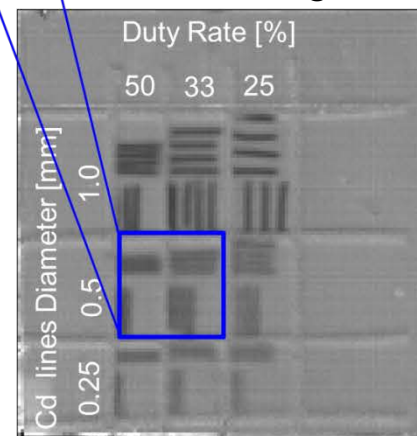
Detected Image



Result Image



Neutron Image



Cd Line Pair Chart  
using thermal neutrons

GEM 検出器の  
 $\Delta x : 0.8 \text{ mm}$

Result image reconstructed by 4 images  
( $0.8 \text{ mm/pixel} \rightarrow 0.4 \text{ mm/pixel}$ )

サブピクセルシフト法  
を適用

➡ 3 lines became 4 lines by reconstruction result  
in the  $\Phi 0.5 \text{ mm}$  Cd Line pairs(duty ratio : 33%)

# まとめ

## パルス中性子イメージング関連技術の開発

- **HUN S** : 積算型高速度カメラ

出刃包丁の解析で、R I T Sコードは有効に機能しており、約0.54mm の分解能でブラッグエッジ解析による結晶組織構造イメージングがなされた。

- **RAN S** : 輝点処理

中性子I.I.を用いて、初めて輝点画像の取得に成功し、重心処理画像が得られた。

- **RADEN** : 実時間輝点処理装置

ハードウェアが完成した。

- **KURR-LINAC** : サブピクセルシフトによる高解像化

GEM検出器で得られた画像について再構成し、有効性が実証された。