

# 中性子ラジオグラフィにおける画像信号処理

東京都市大学

持木幸一、柏木千明、山下純征  
秋葉和宏、畑 亮介、寺下晃平

中性子イメージング専門研究会 平成25年1月8日(火)

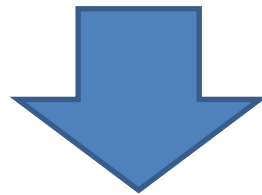
## 発表内容

- \* 輝点重心積算法
- \* パルス中性子透過分光撮影のための積算処理
- \* 実時間画像信号処理
- \* 3次元ダイナミックCT実時間処理

# 輝点重心積算法

## 低強度中性子源を用いた中性子ラジオグラフィ

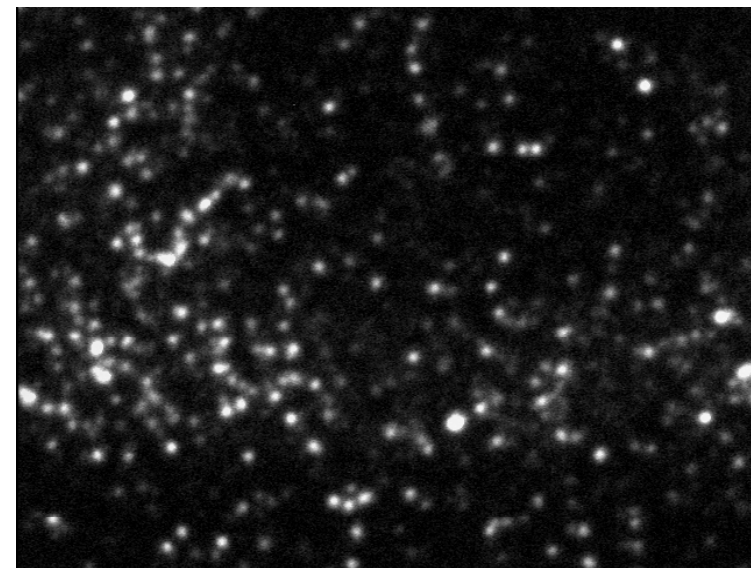
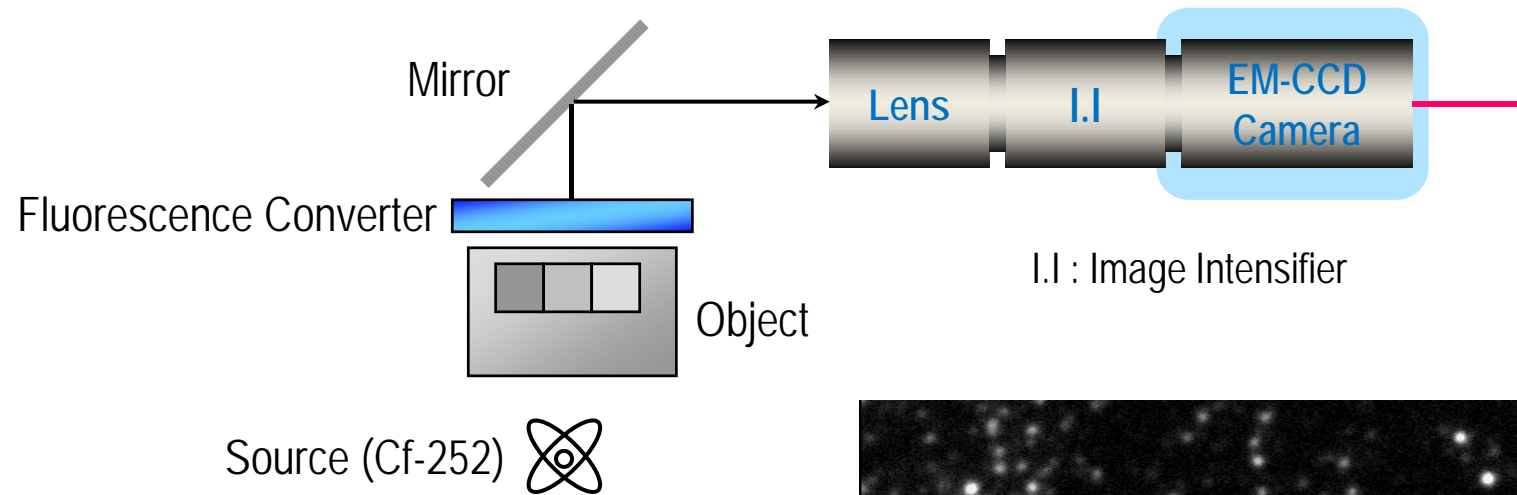
低強度中性子源: Cf、加速器、小型原子炉  
可搬型、火工品の検査が可能、低コスト



静止画:

フィルム: ダイナミックレンジ狭い、アナログ、画像処理困難、銀  
中性子用IP: フェーディング、製造中止、 $\Delta X > 50\mu\text{m}$   
電子撮像: デジタル、画像処理、高ダイナミックレンジ

# 輝点重心積算法のための撮像システム



CCDカメラで撮像した輝点 (1/30s)

# 輝点重心積算法

1st step :

高感度撮像系で個々の輝点を撮像



2nd step :

固定ノイズと暗電流ノイズ除去(通常画像)



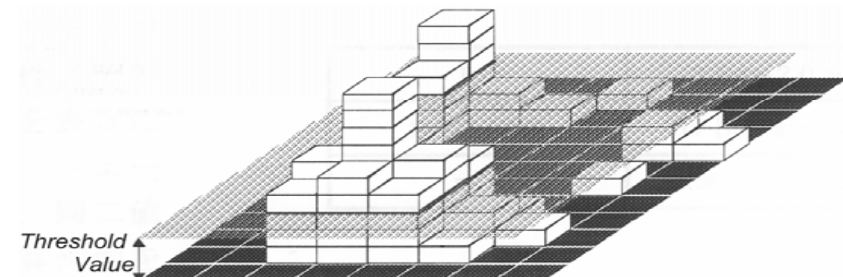
3rd step :

二値画像と重心画像の生成

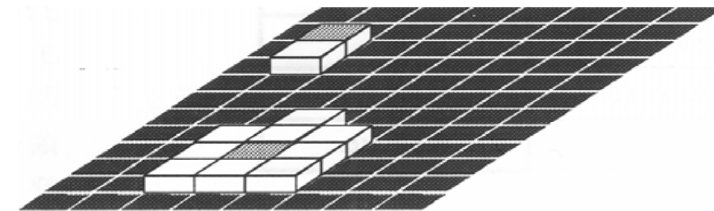


Final step :

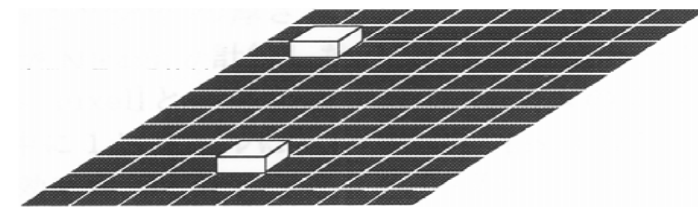
積算により濃淡のある透過画像を取得



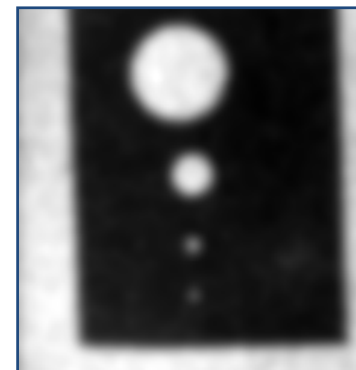
多値画像(通常画像)



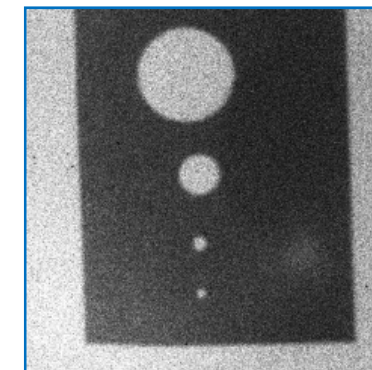
二値画像



重心画像



通常画像積算



重心画像積算

# 測定例

近畿大学原子炉(UTR-KINKI)

熱中性子束;  $1.2 \times 10^4$  [n/cm<sup>2</sup>/s @1W]

・Li F/ZnS(Ag) 80 $\mu$ mコンバーター使用時

計数率;  $1.4 \times 10^3$  [n/cm<sup>2</sup>/s]

・撮像視野:3.1[cm] × 3.1[cm]

EM-CCD画素数:1000[H] × 1000[V]

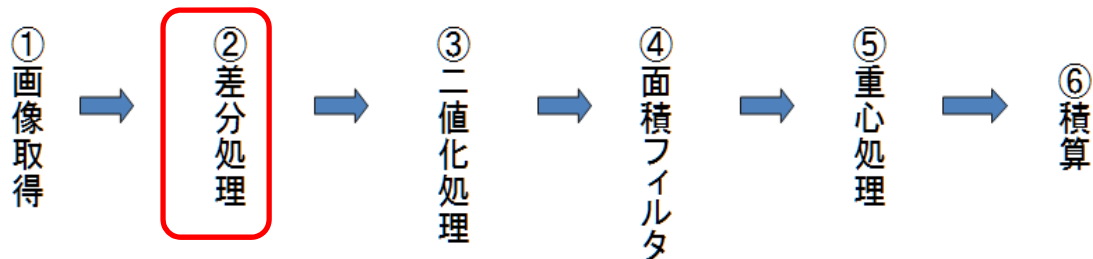


画素分解能:31[ $\mu$ m/pixel]

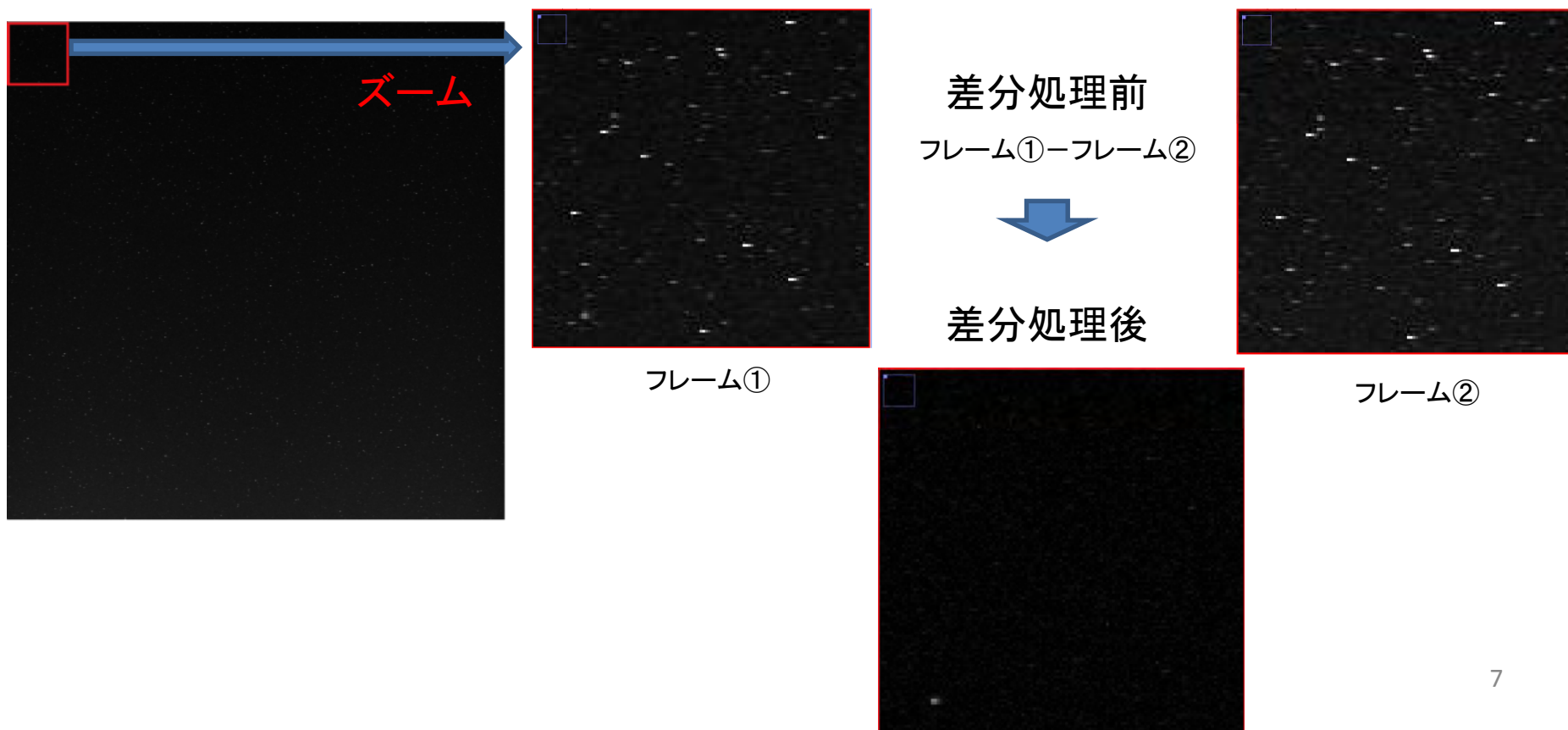


- ・浜松ホトニクス製
- ・EMゲイン(信号増倍): ~ **× 2000**
- ・フルフレーム:30[fps]
- ・階調:14[bit]

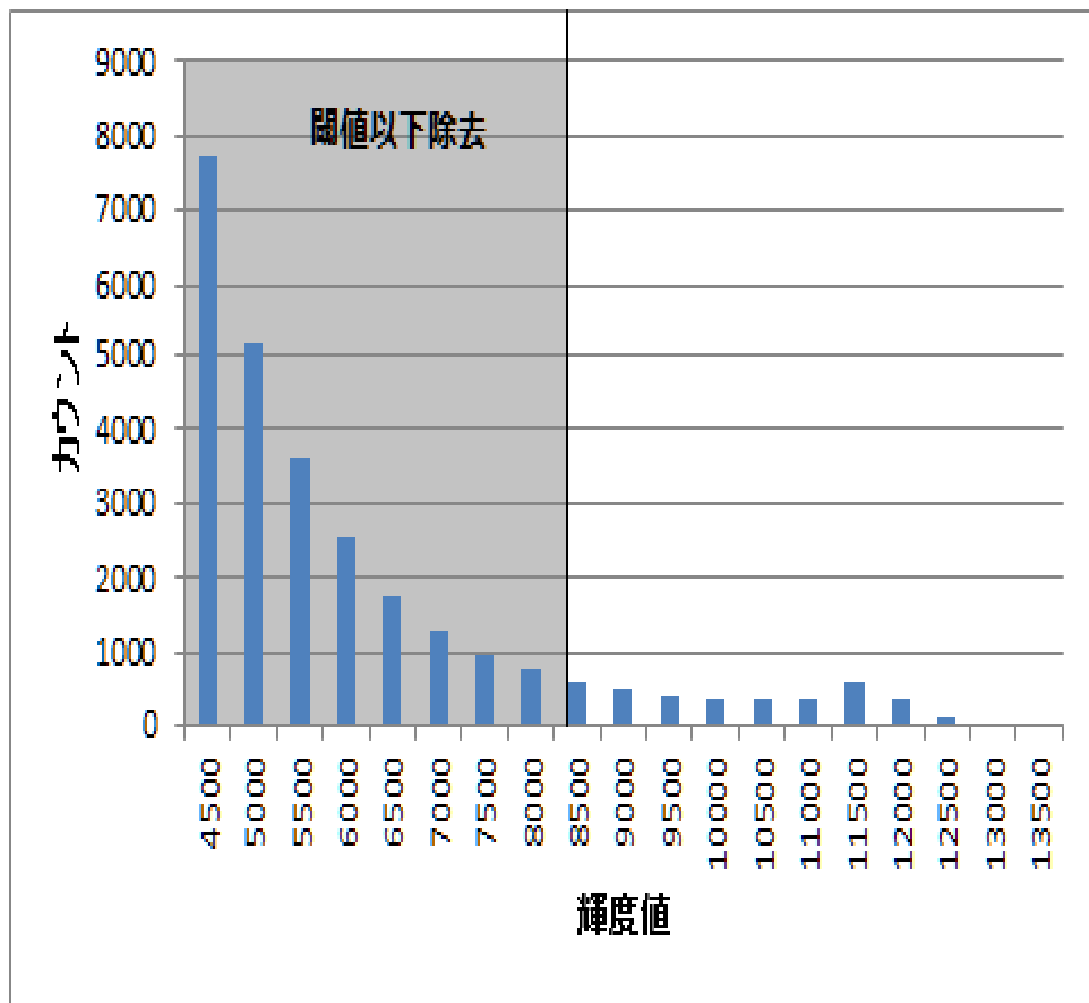
# 差分処理



- 暗電流ノイズ、固定パターンノイズの除去  
1フレームと一つ前のフレームを差し引くことで行う。



# 二値化処理



二値化処理前

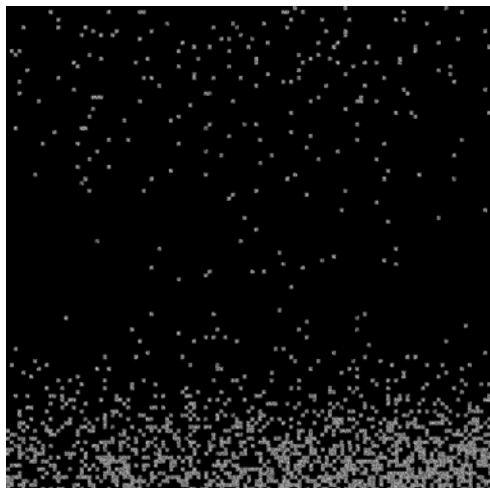
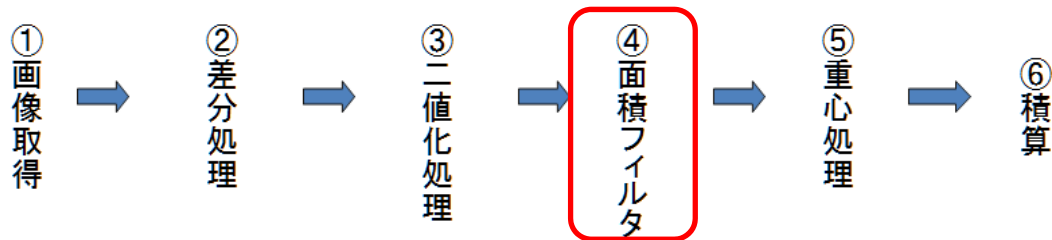


二値化処理後





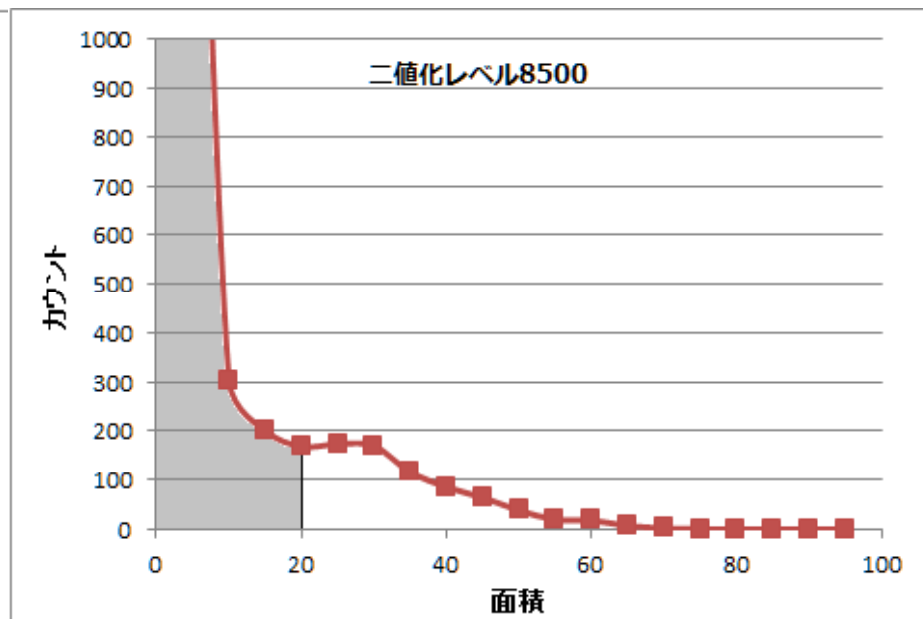
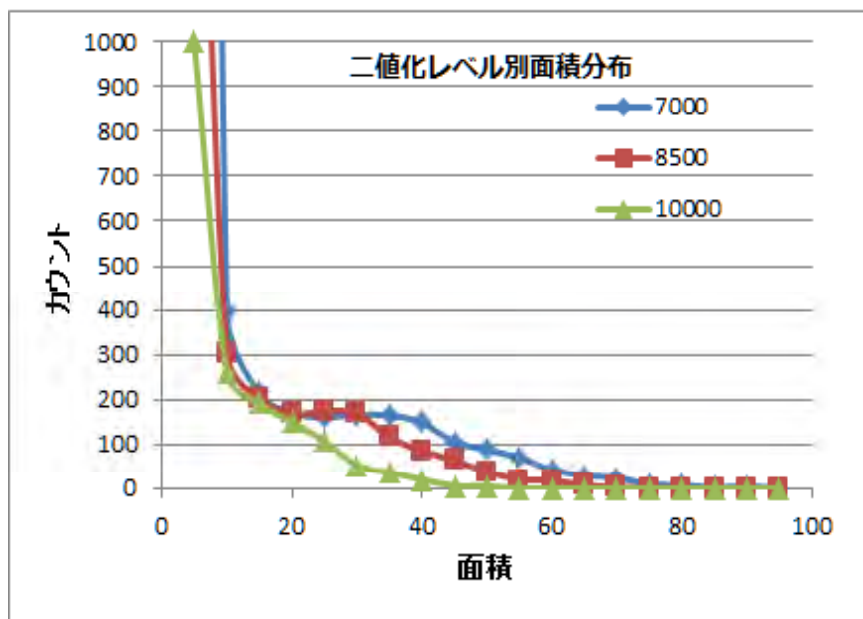
# 面積フィルタ



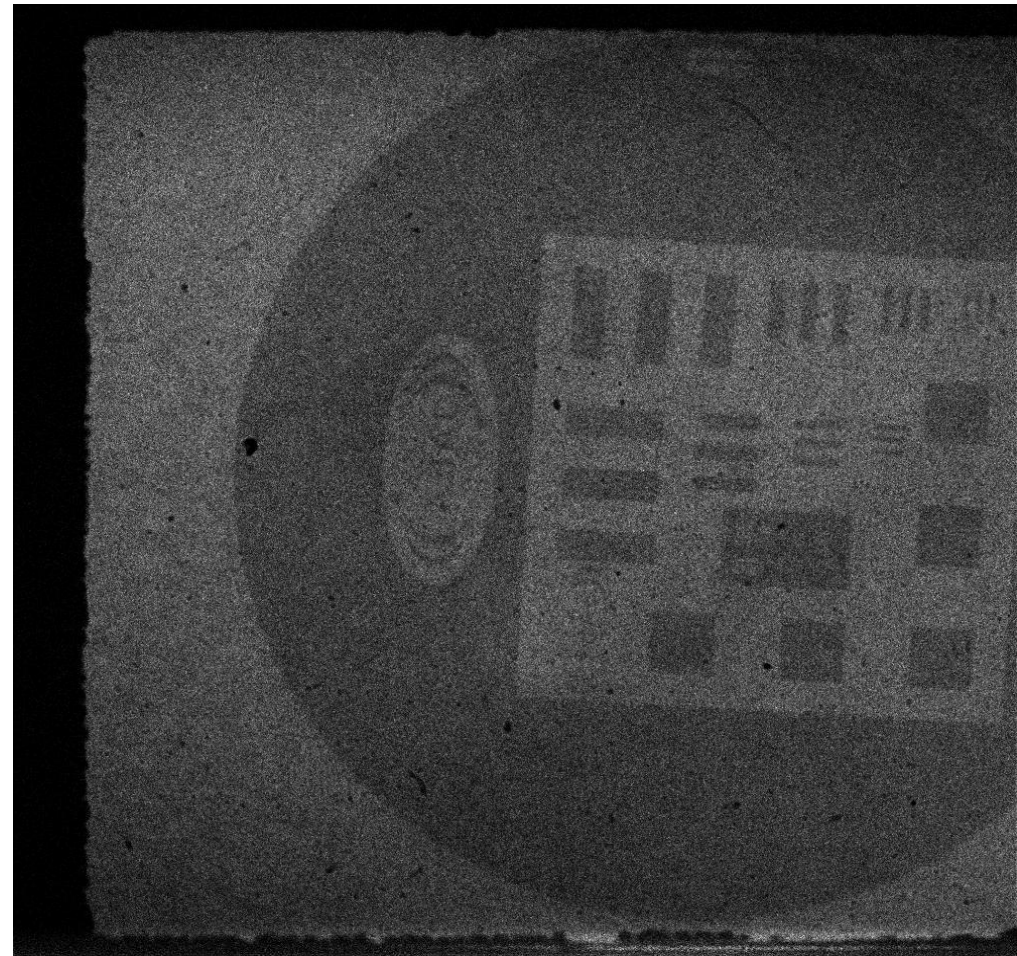
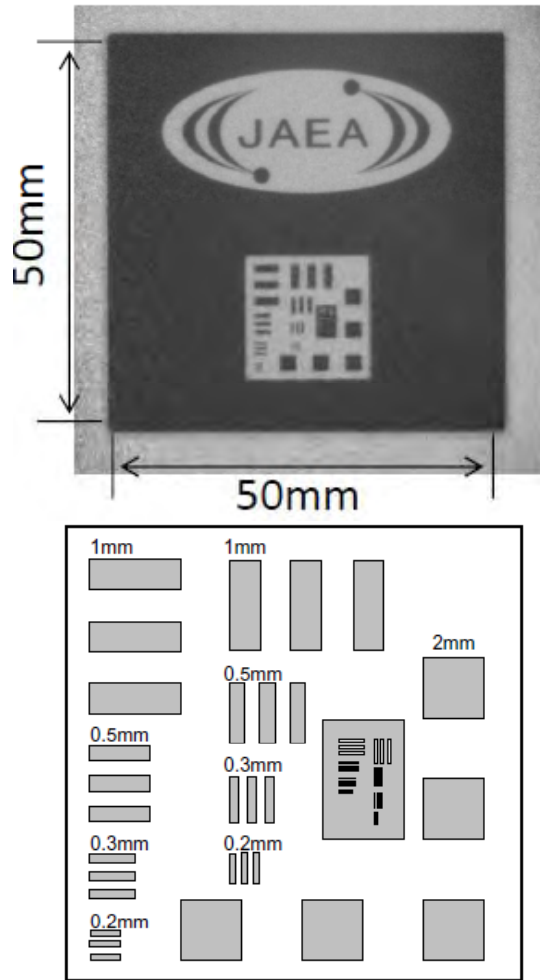
外部からの迷光除去、 $\gamma$ ノイズ除去

1フレームごとにすべての輝点の面積を調べ、  
指定面積以下の輝点を削除

迷光ノイズ

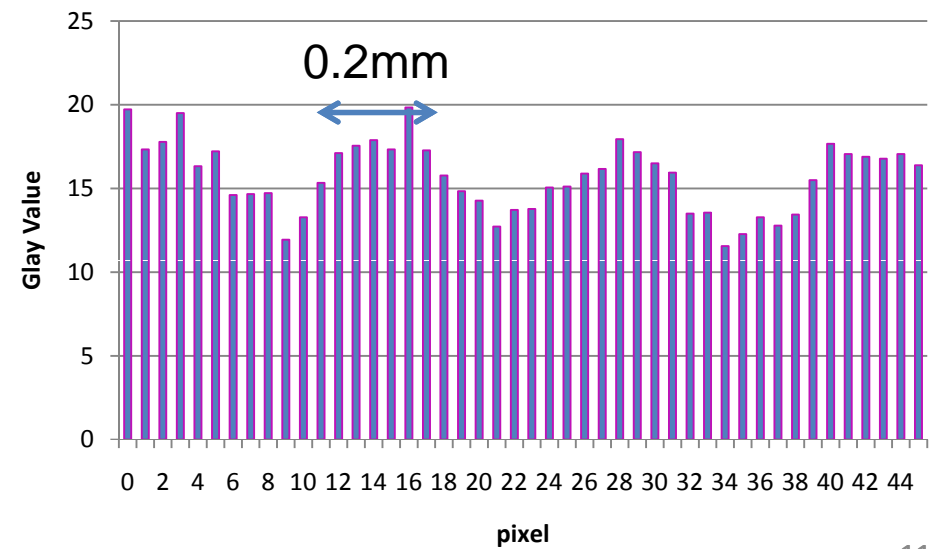
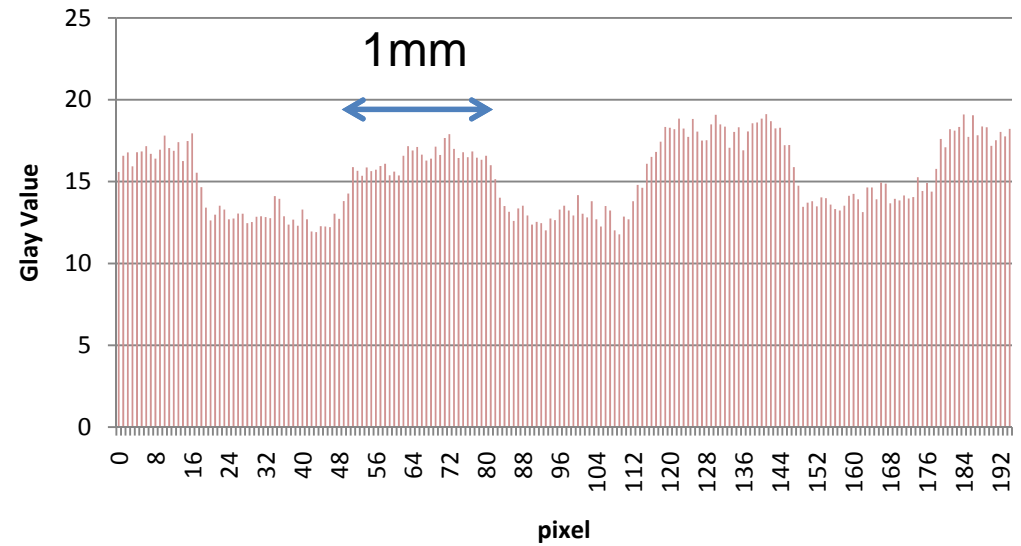
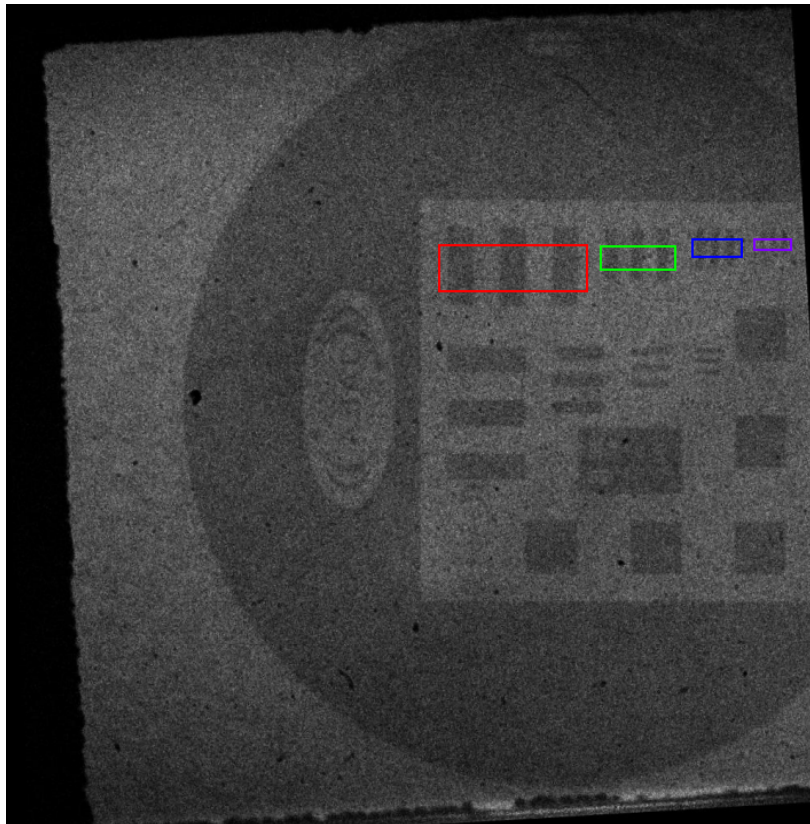


# LiF/ZnS(Ag) 80 $\mu$ m 処理結果



230000枚積算

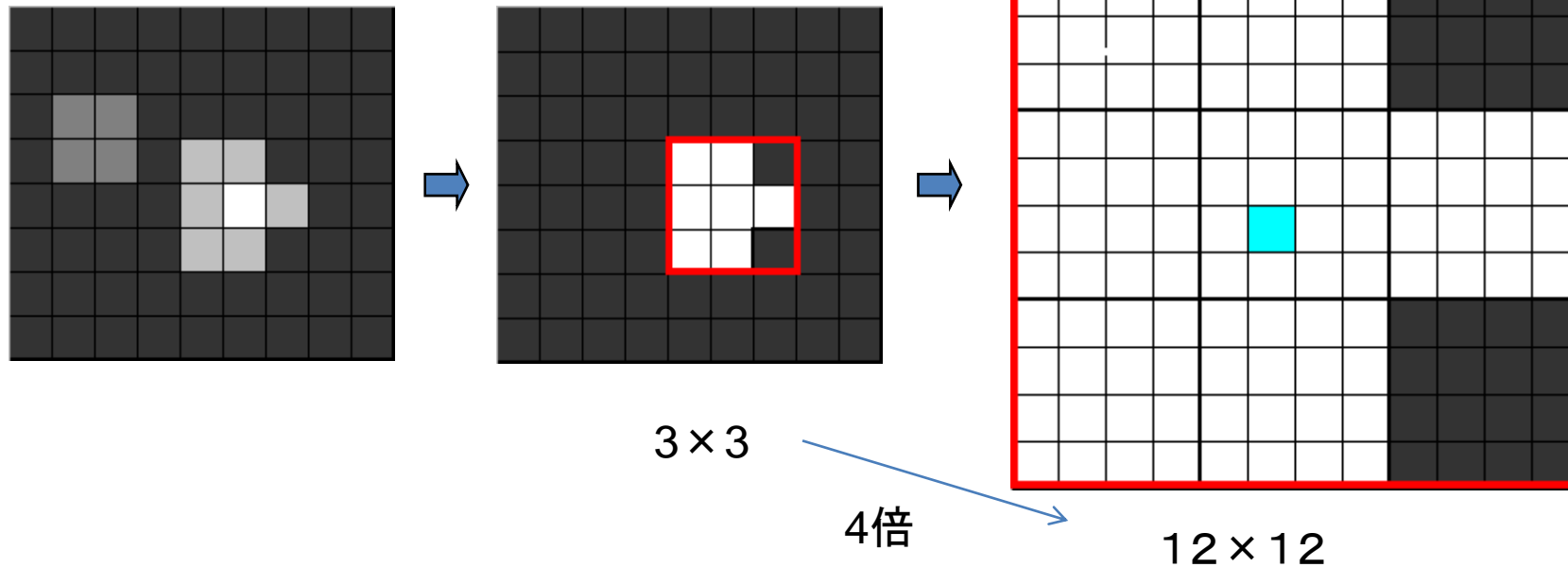
# ラインプロファイル



# 超解像技術

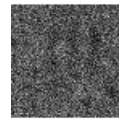
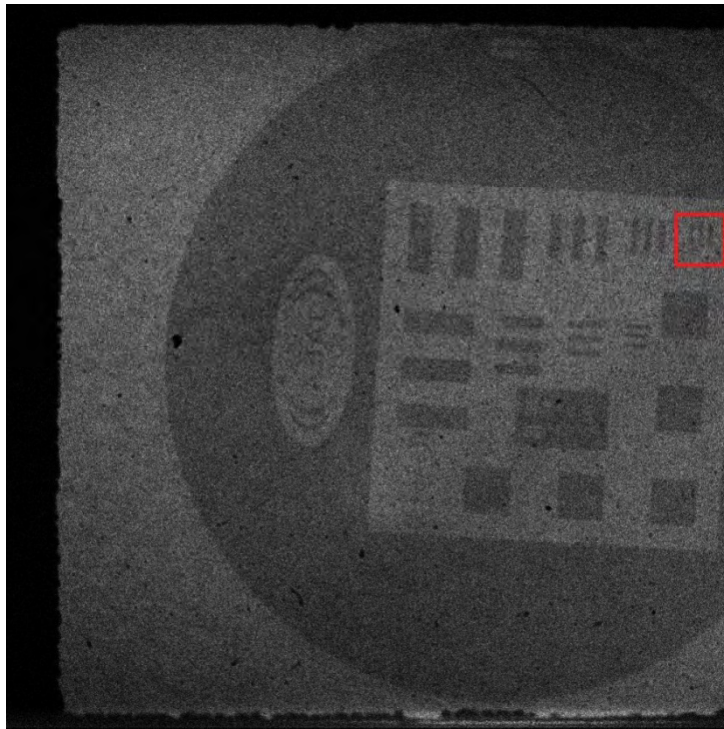
画素数の少ない低解像度画像から、画素数の多い高解像度な画像を生成する技術

差分処理 → 二値化处理  
輝点抽出 → 重心処理 + 超解像処理 → 積算

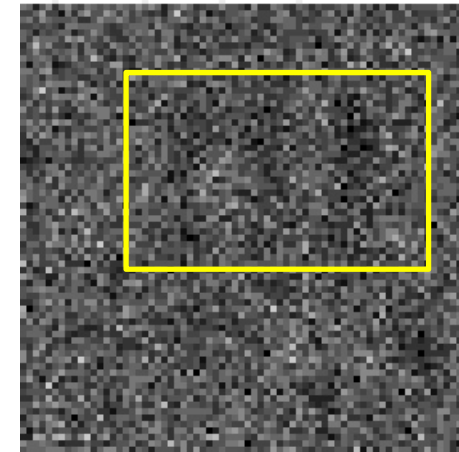


# 超解像処理

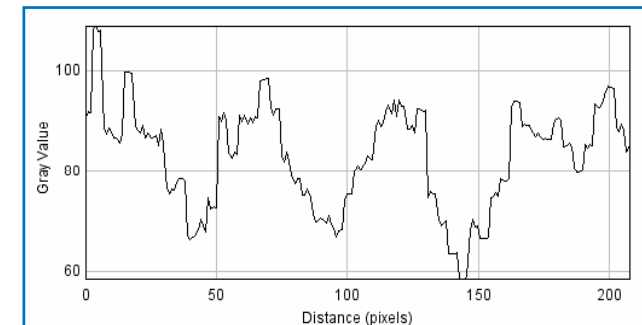
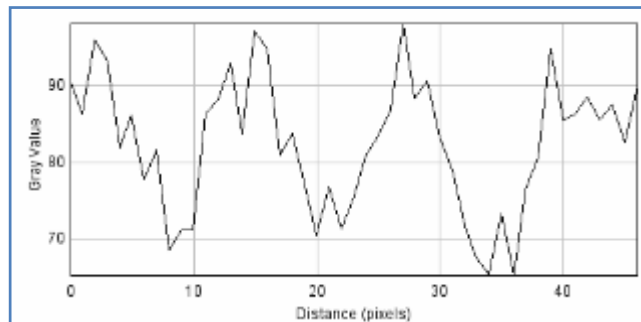
4 × 4倍の超解像処理を行い、70 × 70[pixel]の画像から、  
280 × 280[pixel]の画像を生成



重心処理画像: 70 × 70[pixel]

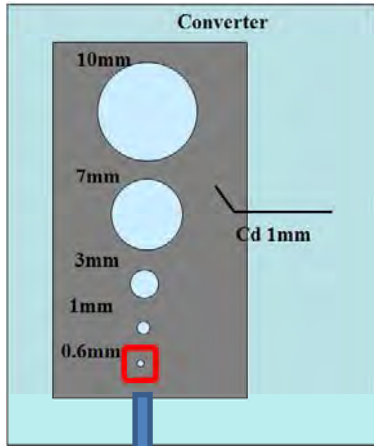


超解像処理像: 280 × 280[pixel]

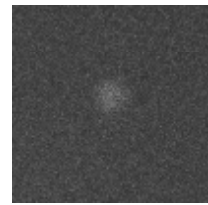


# 超解像処理結果

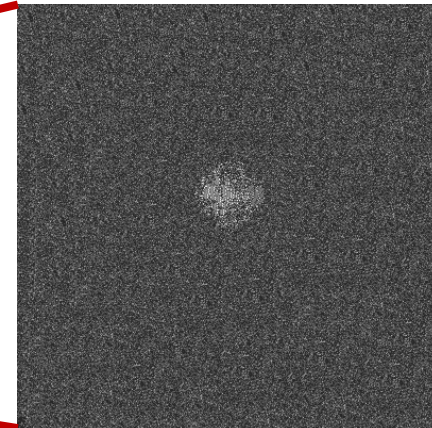
4 × 4倍の超解像処理を行い、100 × 100[pixel]の画像から、  
400 × 400[pixel]の画像を生成



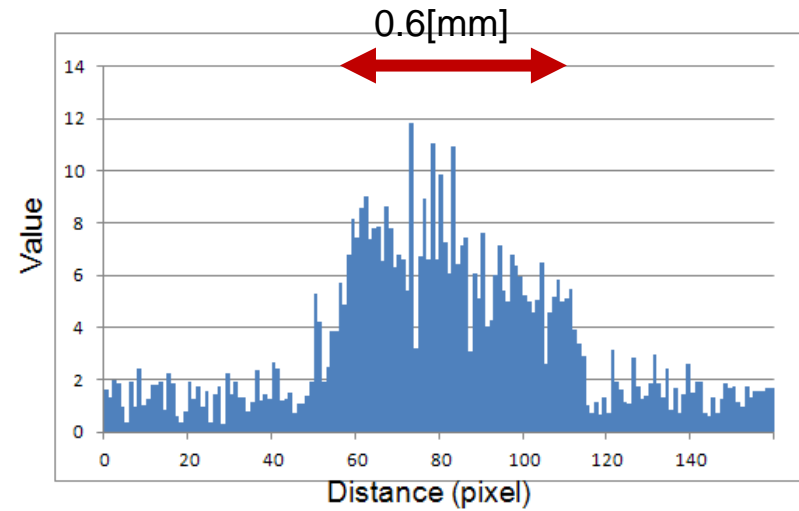
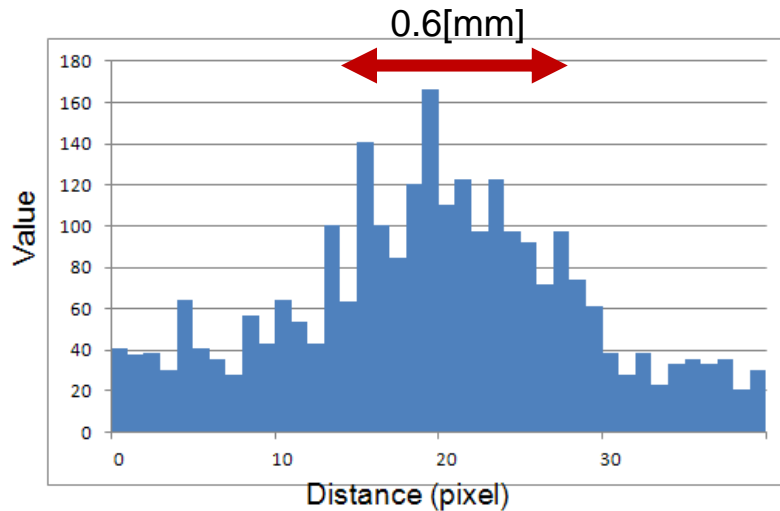
100 × 100 [pixel]



重心処理画像: 100 × 100[pixel]  
(100万フレーム)



超解像処理画像: 400 × 400[pixel]  
(100万フレーム)



# まとめ

計数率  $1.4 \times 10^3$  [n/cm<sup>2</sup>/s]  
フレームレート 19 [fps]  
輝度点数 75 / frame (1M pixel)

## FPGAでの実時間処理の場合

高速度カメラ出力 16GB/s  
> 1.3 Gpixel /s ( if 12bit / pixel)  
> 20800 fps ( if 250x250 pixel / frame)

計数率は  $75 \text{ n / frame} \times 20800 \text{ fps} = 1.56 \text{ M n / s}$   
その時、超解像処理で画素数は **1000 x 1000 pixel**

# パルス中性子透過分光撮影のための 積算処理



# 中性子イメージ・インテンシファイアの仕様

1段目視野 9インチ、7インチ、5.5インチ

2段目視野増倍率 1.5倍、1倍

蛍光体の減衰時間  $1\mu\text{s}$

空間分解能  $30\mu\text{m}$ 程度

# 高速度カメラ撮像の仕様

100,000 fps (10 $\mu$ s) 視野 384 x 208 画素

| 1段目<br>直径<br>[inch] | 2段目<br>倍率 | X<br>[mm] | Y<br>[mm] | 画素分解能<br>[mm] |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 9                   | 1         | 201.0     | 108.9     | 0.523         |
| 9                   | 1.5       | 134.0     | 72.6      | 0.349         |
| 7                   | 1         | 156.3     | 84.7      | 0.407         |
| 7                   | 1.5       | 104.2     | 56.5      | 0.271         |
| 5.5                 | 1         | 122.8     | 66.5      | 0.320         |
| 5.5                 | 1.5       | 81.9      | 44.4      | 0.213         |

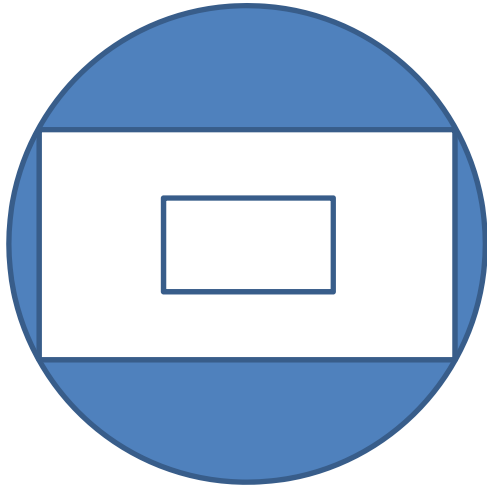
# 高速度カメラ撮像の仕様

10,000 fps (100 $\mu$ s) 視野 1280 x 720 画素

| 1段目<br>直径<br>[inch] | 2段目<br>倍率  | X<br>[mm]   | Y<br>[mm]   | 画素分解能<br>[mm] |
|---------------------|------------|-------------|-------------|---------------|
| 9                   | 1          | 199.2       | 112.1       | 0.156         |
| 9                   | 1.5        | 132.8       | 74.7        | 0.104         |
| 7                   | 1          | 155.0       | 87.2        | 0.121         |
| 7                   | 1.5        | 103.3       | 58.1        | 0.081         |
| 5.5                 | 1          | 121.8       | 68.5        | 0.095         |
| <b>5.5</b>          | <b>1.5</b> | <b>81.2</b> | <b>45.7</b> | <b>0.063</b>  |

# 高速度カメラ撮像の仕様

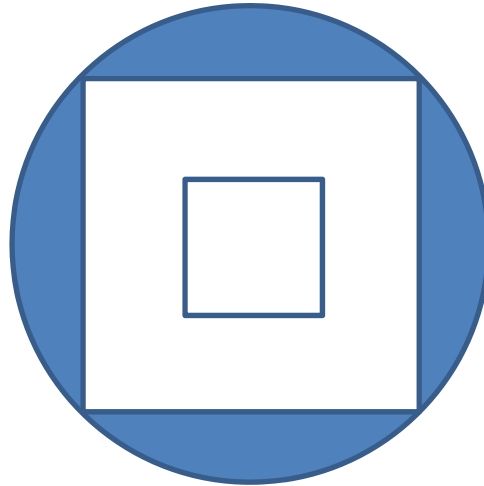
100,000 fps  
(10 $\mu$ s)



210 x 109 mm  
82 x 44 mm

384 x 208 画素  
213 ~ 512  $\mu$ m

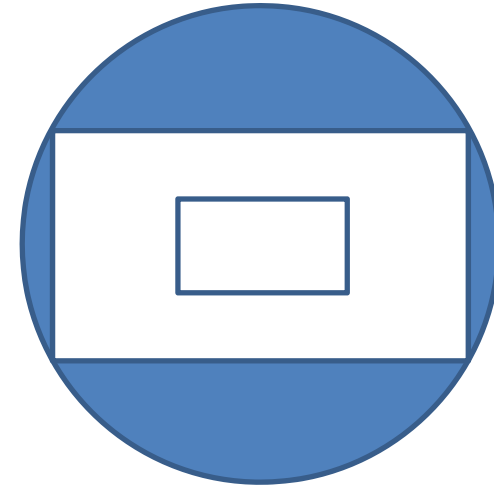
30,000 fps  
(33 $\mu$ s)



161 x 161 mm  
66 x 66 mm

512 x 512 画素  
129 ~ 316  $\mu$ m

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

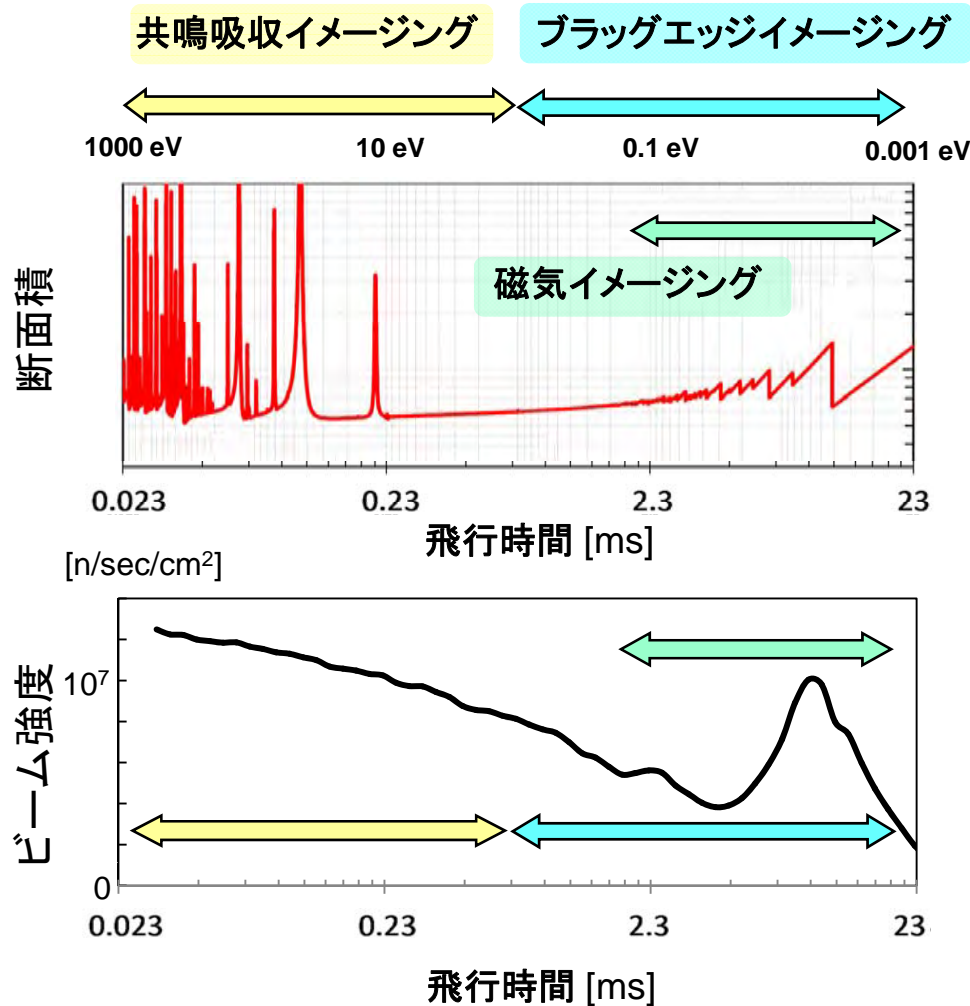


199 x 112 mm  
81 x 46 mm

1280 x 720 画素  
63 ~ 156  $\mu$ m

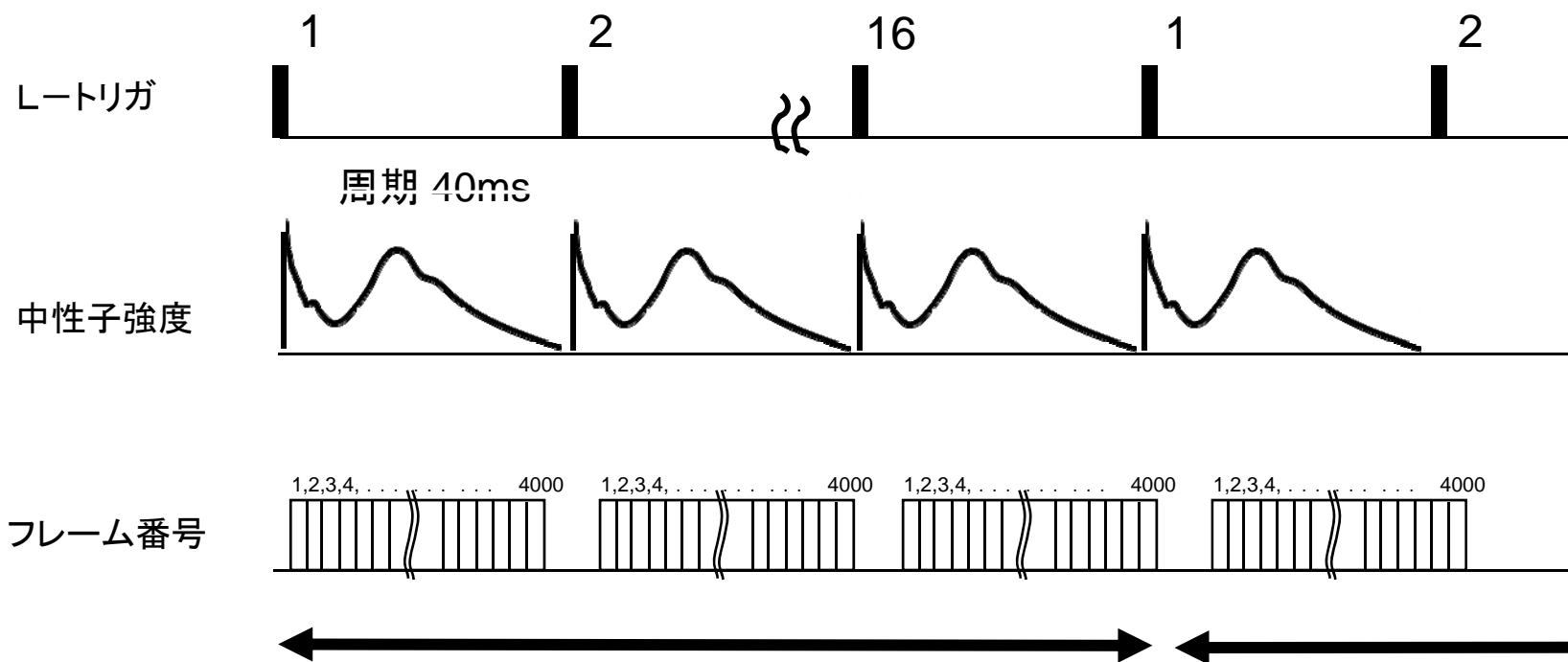
# 高速度カメラ撮像の仕様

## J-PARC の場合



| 領域         | 共鳴吸収イメージング                 | ブラッグエッジイメージング              | 磁気イメージング                  |
|------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| エネルギー領域    | 高<br>1keV-1eV              | 低<br><1eV                  | 低<br><0.1eV               |
| $\Delta T$ | 10 $\mu s$                 | 33 $\mu s$                 | 100 $\mu s$               |
| 視野 [mm]    | 201 × 109<br>82 × 44       | 161 × 161<br>66 × 66       | 199 × 112<br>81 × 46      |
| $\Delta X$ | 512 $\mu m$<br>213 $\mu m$ | 316 $\mu m$<br>129 $\mu m$ | 156 $\mu m$<br>63 $\mu m$ |

## J-PARCでの実験仕様



384 x 208画素で100,000 fps (周期10 $\mu$ s)とする。

パルス毎に最大4,000 フレーム記録可能

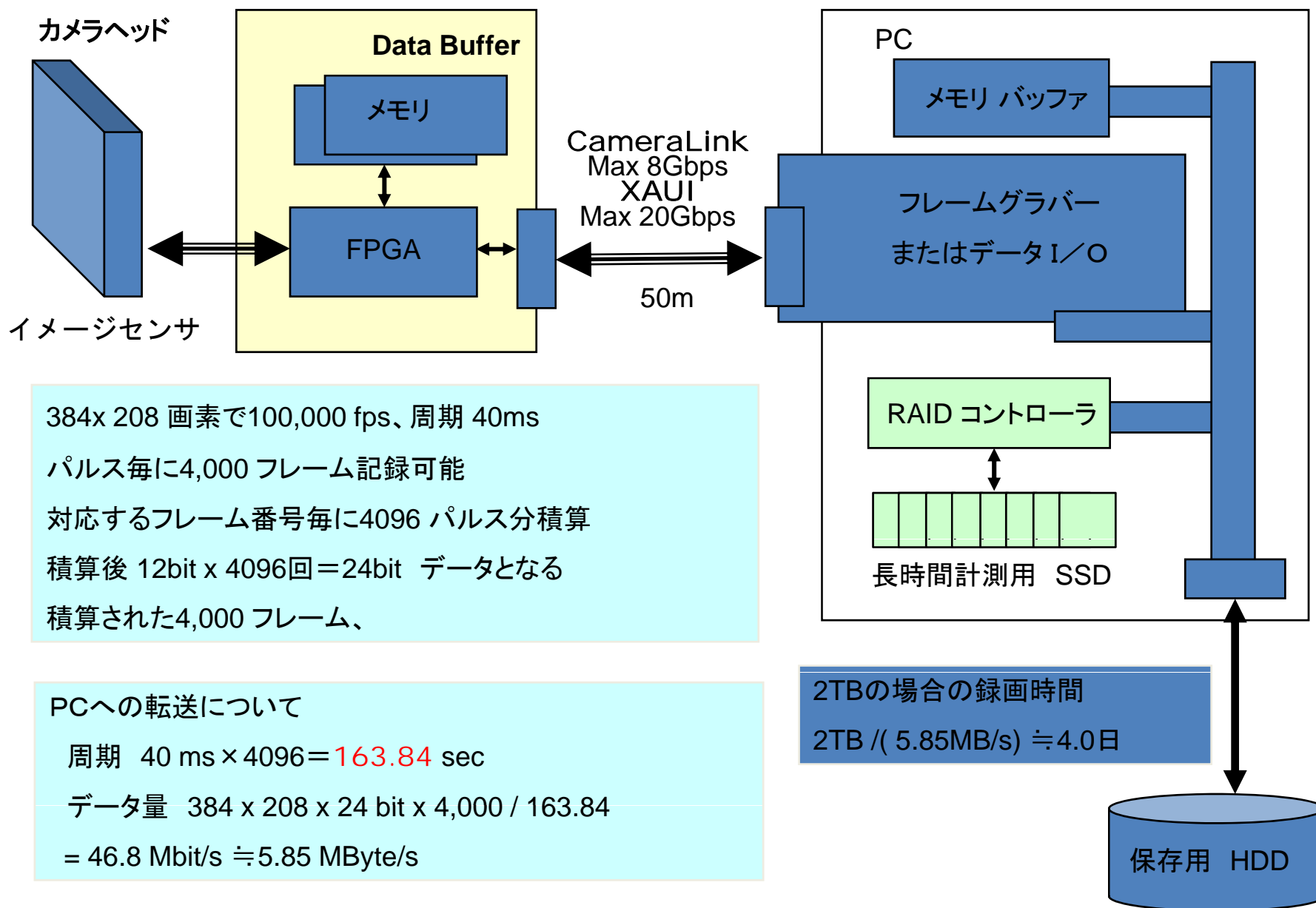
対応するフレーム番号毎に4096パルス分積算

積算後 12bit x 4096 回 = 24bit データとなる

積算された4,000 フレームはI/Oを介してPCに転送される。その転送中も次の積算処理が開始されている。

間断なく、次の  
積算を開始

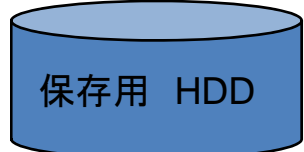
# 高速度カメラ撮像システムの構成



384x 208 画素で100,000 fps、周期 40ms  
パルス毎に4,000 フレーム記録可能  
対応するフレーム番号毎に4096 パルス分積算  
積算後 12bit x 4096回 = 24bit データとなる  
積算された4,000 フレーム、

PCへの転送について  
周期 40 ms x 4096 = 163.84 sec  
データ量 384 x 208 x 24 bit x 4,000 / 163.84  
= 46.8 Mbit/s ≒ 5.85 MByte/s

2TBの場合の録画時間  
2TB / ( 5.85MB/s ) ≒ 4.0日



# 積算回数と録画時間

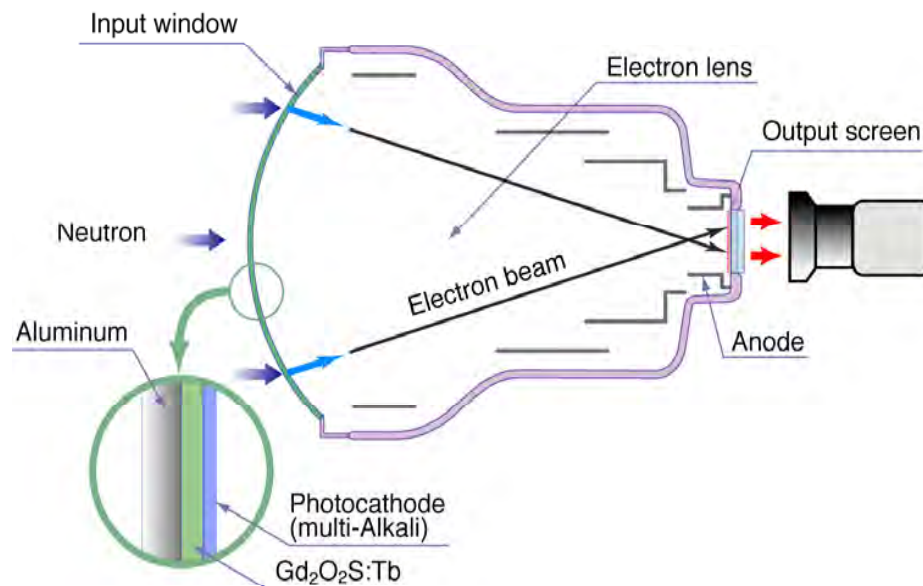
| 積算回数        | データ長  | 積算周期        |             | 384x208 画素、100,000 fps<br>(10us), 4000frame/pulse |                |             |              |               | 特徴                 |
|-------------|-------|-------------|-------------|---|----------------|-------------|--------------|---------------|--------------------|
|             |       |             |             | ファイル容量  | データ転送レート       |             | 2TByteの録画時間  |               |                    |
| [回]         | [bit] | [s]         | [min]       | [Gbit]  | [Mbit/s]       | [MByte/s]   | [min]        | [hr]          |                    |
| <b>16</b>   | 16    | <b>0.64</b> | 0.01        | 4.76  | <b>7617.19</b> | 952.15      | <b>36.71</b> | 0.61          | 0.64の時間分解能で動態の測定可能 |
| 64          | 18    | 2.56        | 0.04        | 5.36  | 2142.33        | 267.79      | 130.52       | 2.18          |                    |
| 256         | 20    | 10.24       | 0.17        | 5.95  | 595.09         | 74.39       | 469.88       | 7.83          |                    |
| 1024        | 22    | 40.96       | 0.68        | 6.55  | 163.65         | 20.46       | 1708.64      | 28.48         |                    |
| <b>4096</b> | 24    | 163.84      | <b>2.73</b> | 7.14  | 44.63          | <b>5.58</b> | 6265.02      | <b>104.42</b> | 4日間の連続測定可能         |



# 実時間画像信号処理

# 中性子イメージンテンシファイア(中性子I.I.)

研究背景

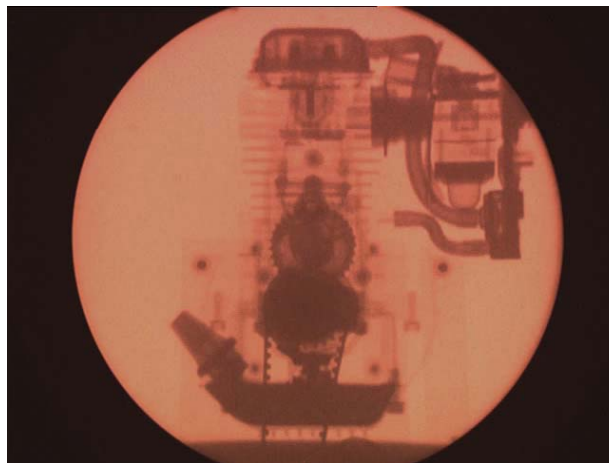


## 特徴

中性子線を可視光に変換する装置

高感度、高精細な中性子像を得られる

RGBで異なった強度で発光する



**高精細な動画像を取得できるようになった**

## 中性子ラジオグラフィ特有の画像処理

- RGB発光の特性を活かしたい
- I.I.の出力蛍光面の感度にムラがある
- 放射線によるノイズの影響 ...etc



- ラチチュード拡大処理
- 暗電流補正、シェーディング補正
- メディアンフィルタ ...etc

## 実験目的に応じた画像処理

- 暗い画像を見やすくしたい
- 変化した部分だけ見たい
- ランダムノイズを抑えたい ...etc



- 擬似カラー処理
- 積算処理、リカーシブフィルタ
- コントラストストレッチング
- 差分処理
- 軌跡表示処理
- 3x3フィルタ
- 二値化 ...etc

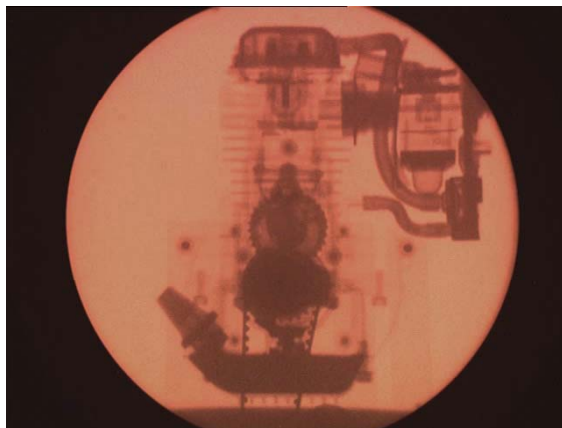
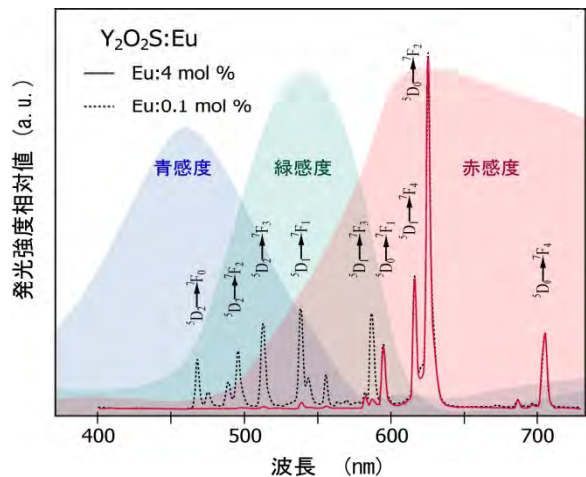


これらの画像処理を一通り実装する

# 画像処理の例(1)

研究背景

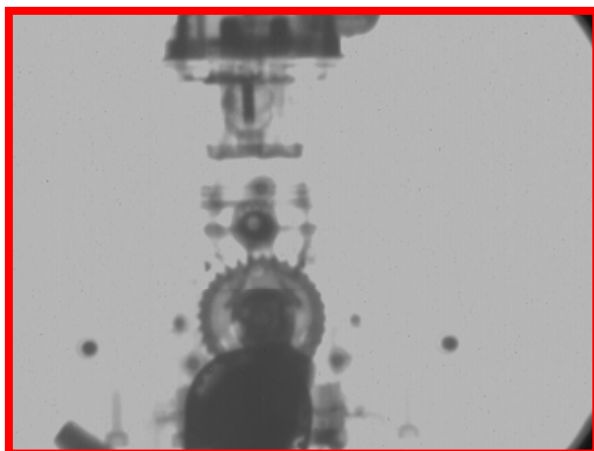
## ラチチュード拡大処理



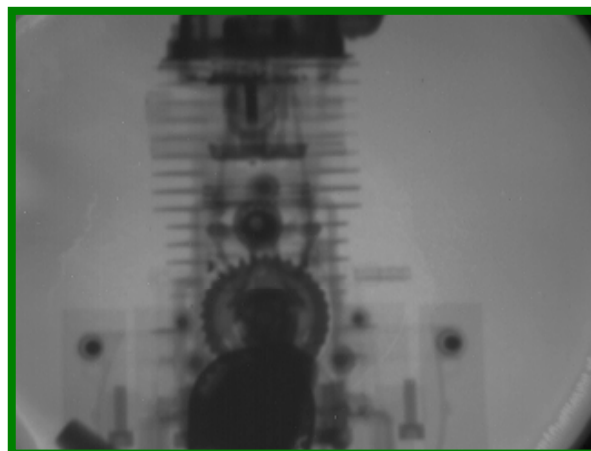
R画像では明る過ぎて  
画像が飽和してしまってる



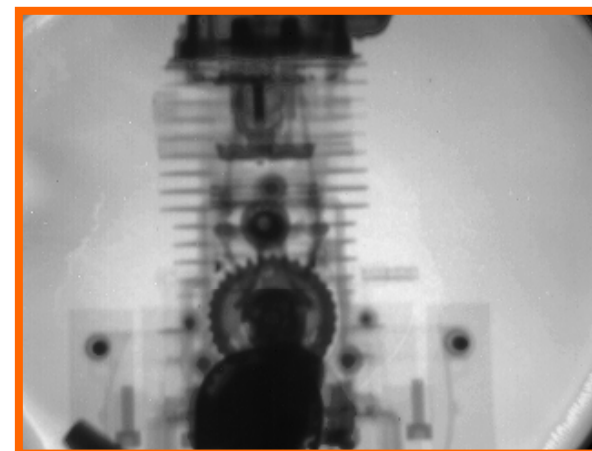
飽和部分をG画像で  
画像情報を補完する



R画像



G画像

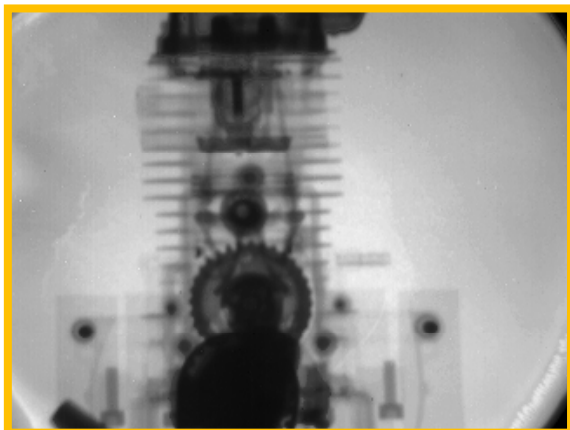


RG合成

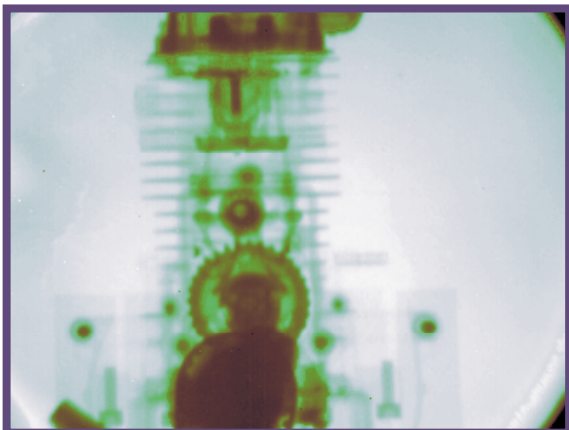
**RGの発光強度の差を利用して、階調拡大することができる**

# 画像処理の例(2)

## 擬似カラー処理



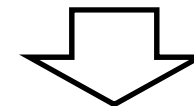
濃淡画像



HSI型擬似カラー画像

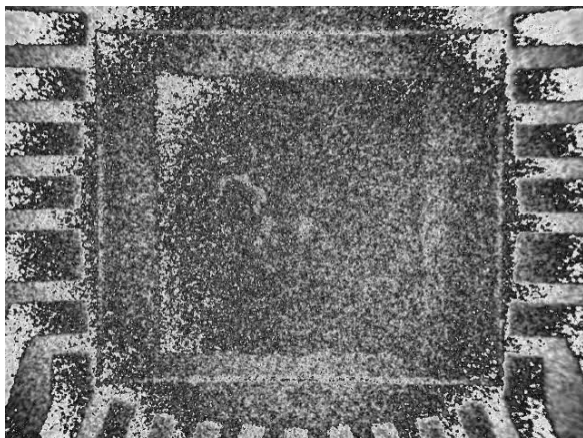


人間が知覚できる濃淡の範囲は限られている

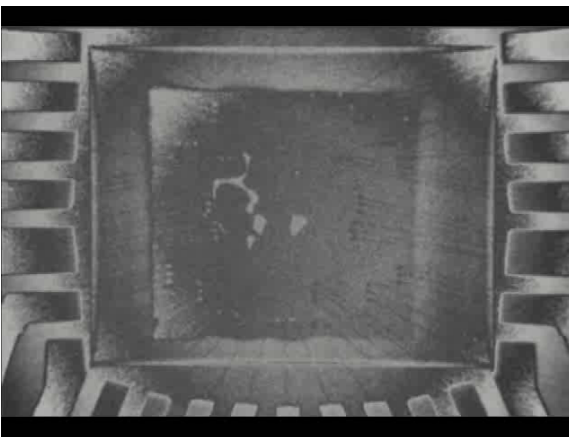


濃淡画像に擬似的に色を付けることにより、画像を見やすくする

## リカーシブフィルタ



元画像



リカーシブフィルタ結果

重み付き加算平均することで、ランダムノイズの影響を少なくする

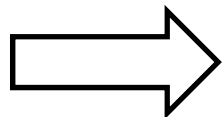
# 実時間画像処理の必要性

中性子線を照射実験できる施設は限られている

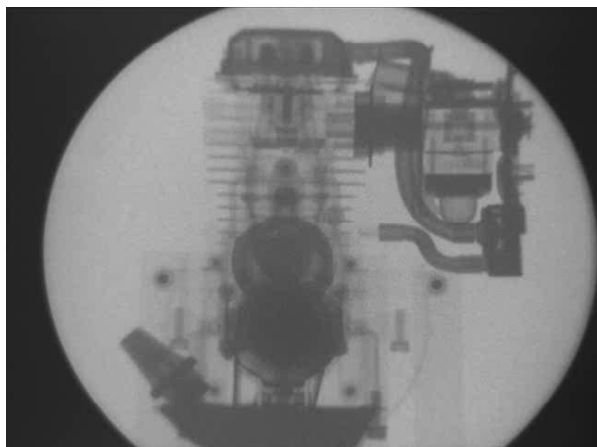


日本原子力研究開発機構(JAEA)の研究用原子炉JRR-3M

- ◆ マシントイムが限られている為、実験中に処理結果を確認したい
- ◆ 計測機器として使用するので、情報量を減らさずに処理したい



画像処理をハードウェアに実装することを前提とする



ラジオグラフィ



燃料電池の水の分布(CT)

ラジオグラフィで得られる情報は二次元であり奥行き情報は失われてしまう



三次元CTを行う方法がある



並列に処理しても、一回の三次元断層像を得るのに3時間はかかる



ハードウェア実装で実時間CTを試みる

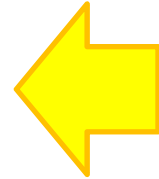
三次元像を表示できる間隔は5秒程度が限界



立体視で簡易的に奥行き情報を得る

## 目的

- ・中性子I.I.用の実時間画像処理システムを開発する
  - 画像処理をハードウェア実装し、実時間処理を実現する
  - 操作性向上の為、ソフトウェアで、グラフィカルなUIを開発する
  - PCI-ExpressでPCと繋ぎ、高速データ転送できる仕組みを構築する
- ・実時間画像処理を応用し、立体透視システムを完成させる
  - 3Dテレビを用いて、立体表示できるよう信号処理をする
  - 画像補正を行う画像処理を実装する
- ・実時間画像処理を応用し、実時間CTの見積もりを立てる
  - 最も時間のかかる逆投影処理をハードに実装する





# FPGAの選定

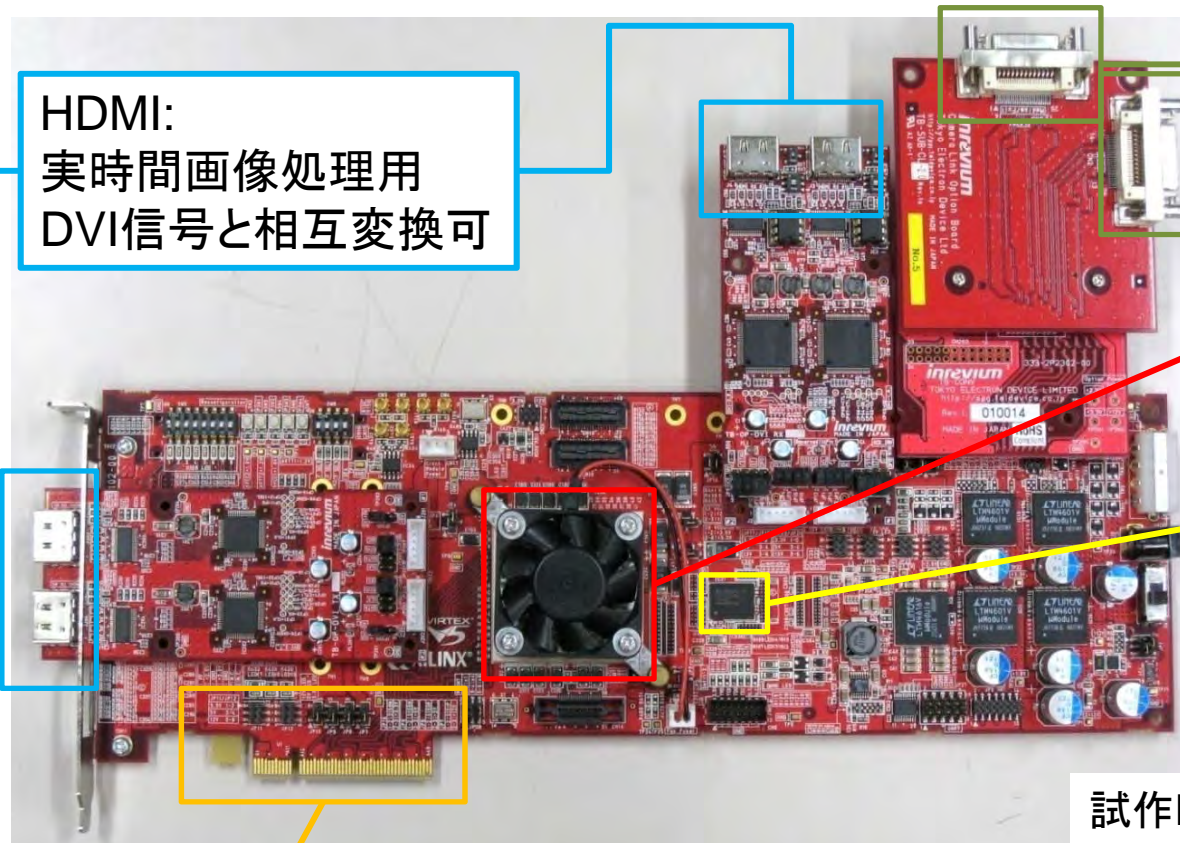
東京エレクトロンデバイス社製「TB-5V-SX240T-PCIE-EX」

HDMI:  
実時間画像処理用  
DVI信号と相互変換可

Cameralink  
Full-Configuration:  
実時間CT用  
高速度カメラ信号

Virtex-5 SX240T:  
大容量FPGA

DDR2-SDRAM  
•付属メモリ64MB  
•拡張メモリ2GB



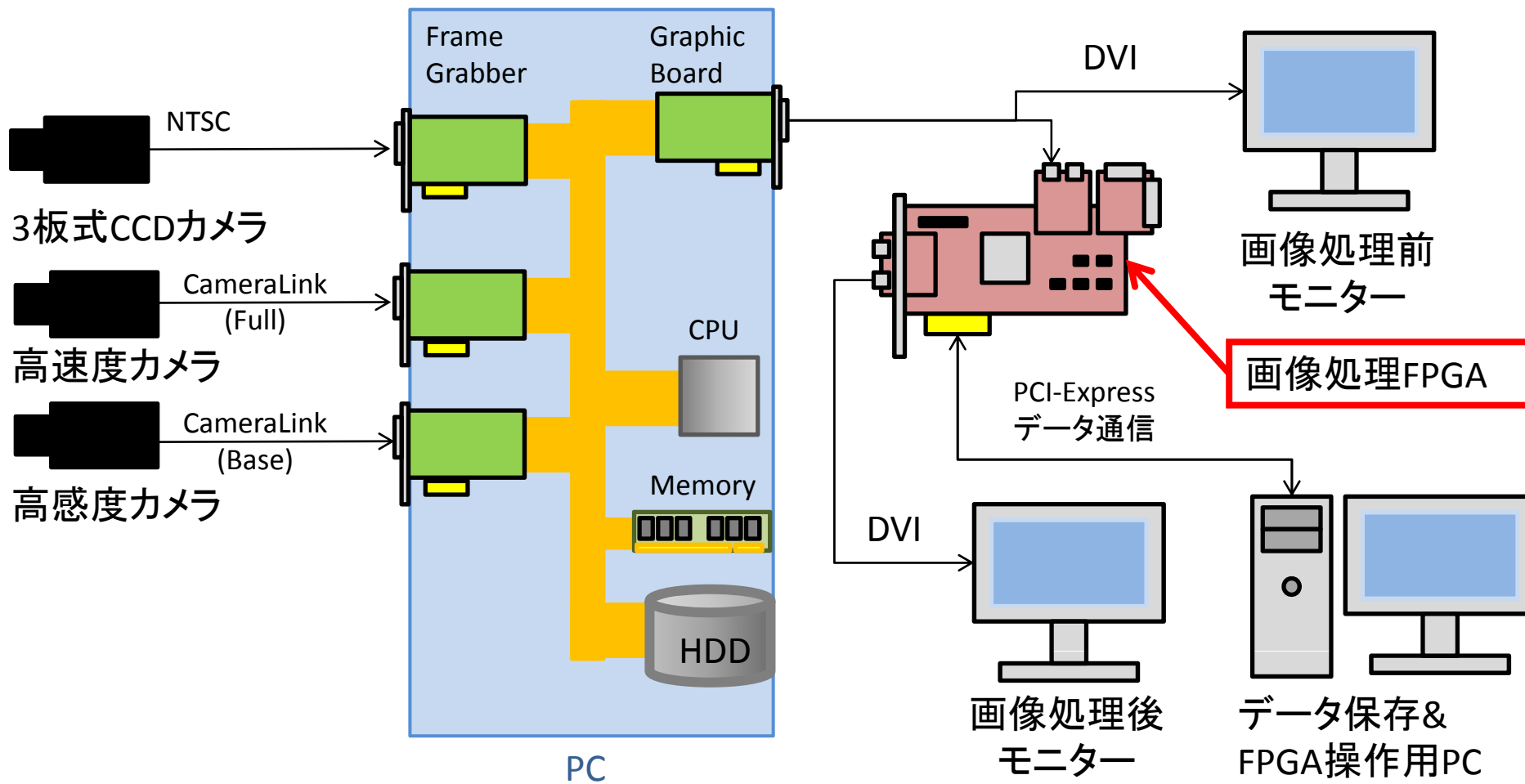
PCI-Express x8:  
PCと接続し、高速データ転送用  
転送速度4GB/s

試作FPGAとの比較

|          | Virtex-4(LX25) | Virtex-5(SX240T) |
|----------|----------------|------------------|
| CLB      | 24,192         | 239,616          |
| ブロックRAM  | 72             | 18,576           |
| DSP(乗算器) | 48             | 1,056            |

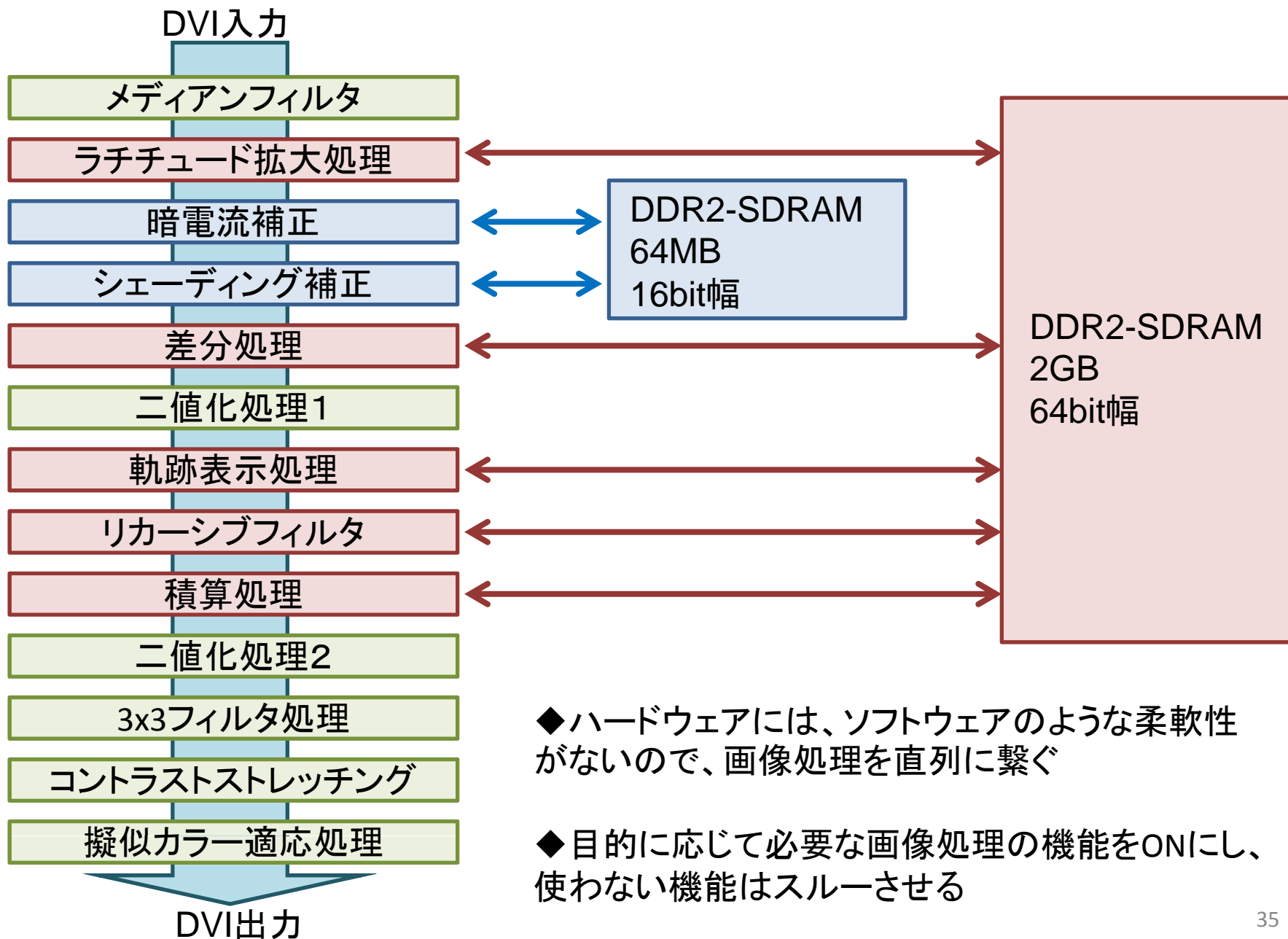
# 実時間画像処理システムの構成

研究方法

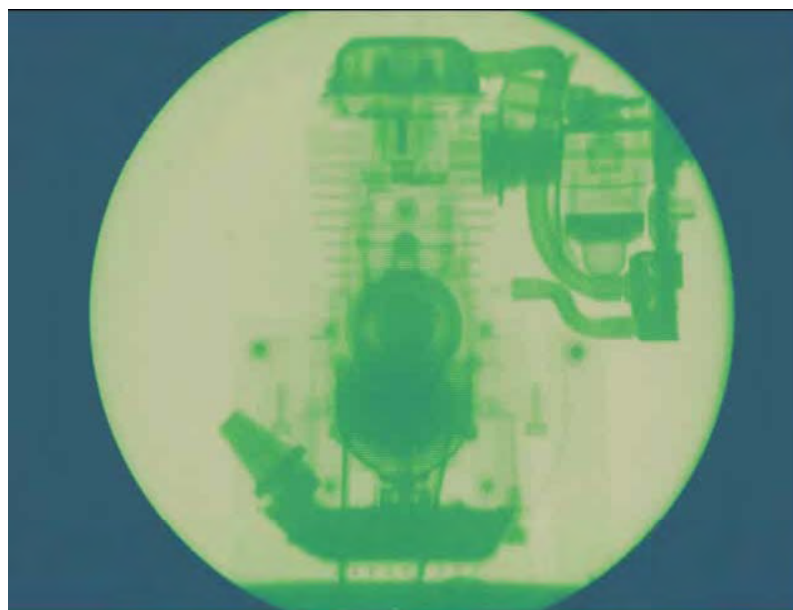
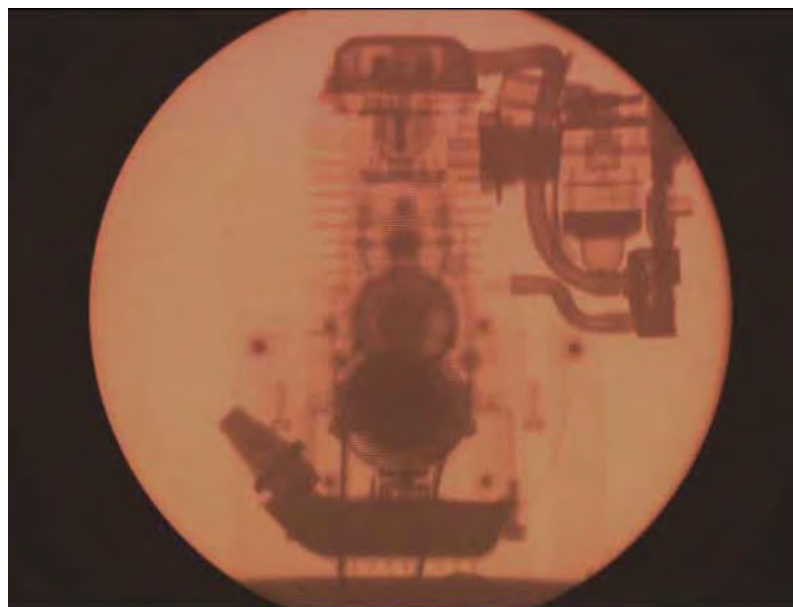


- ・どのカメラを使うことになっても、フレームグラバーで取り込む手順は変わらない
- ・カメラのライブ映像か、保存された動画を再生する
- ・DVI信号を、HDMI変換ケーブルを使い、FPGAに信号を入力する

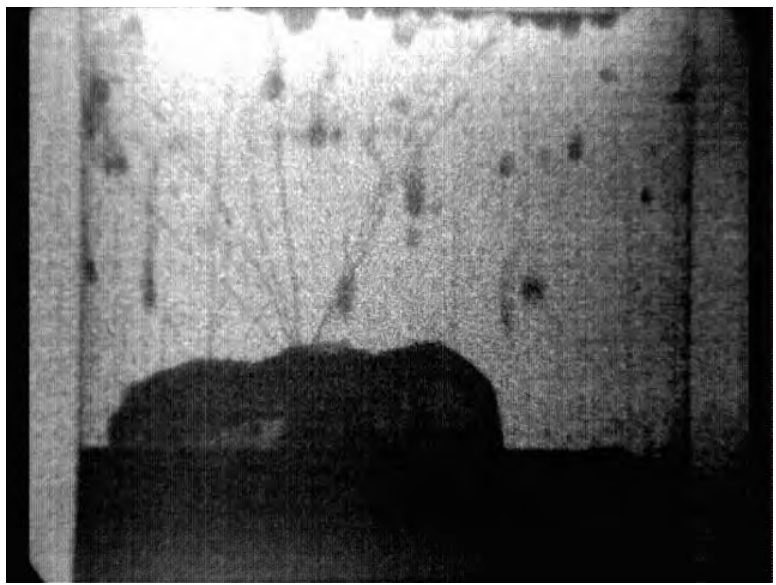
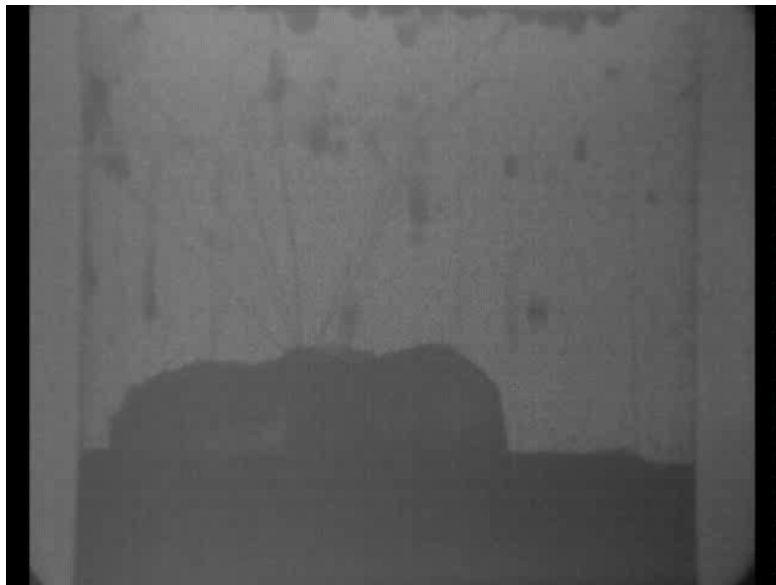
# 画像処理の構成



# 画像処理実装結果(1)

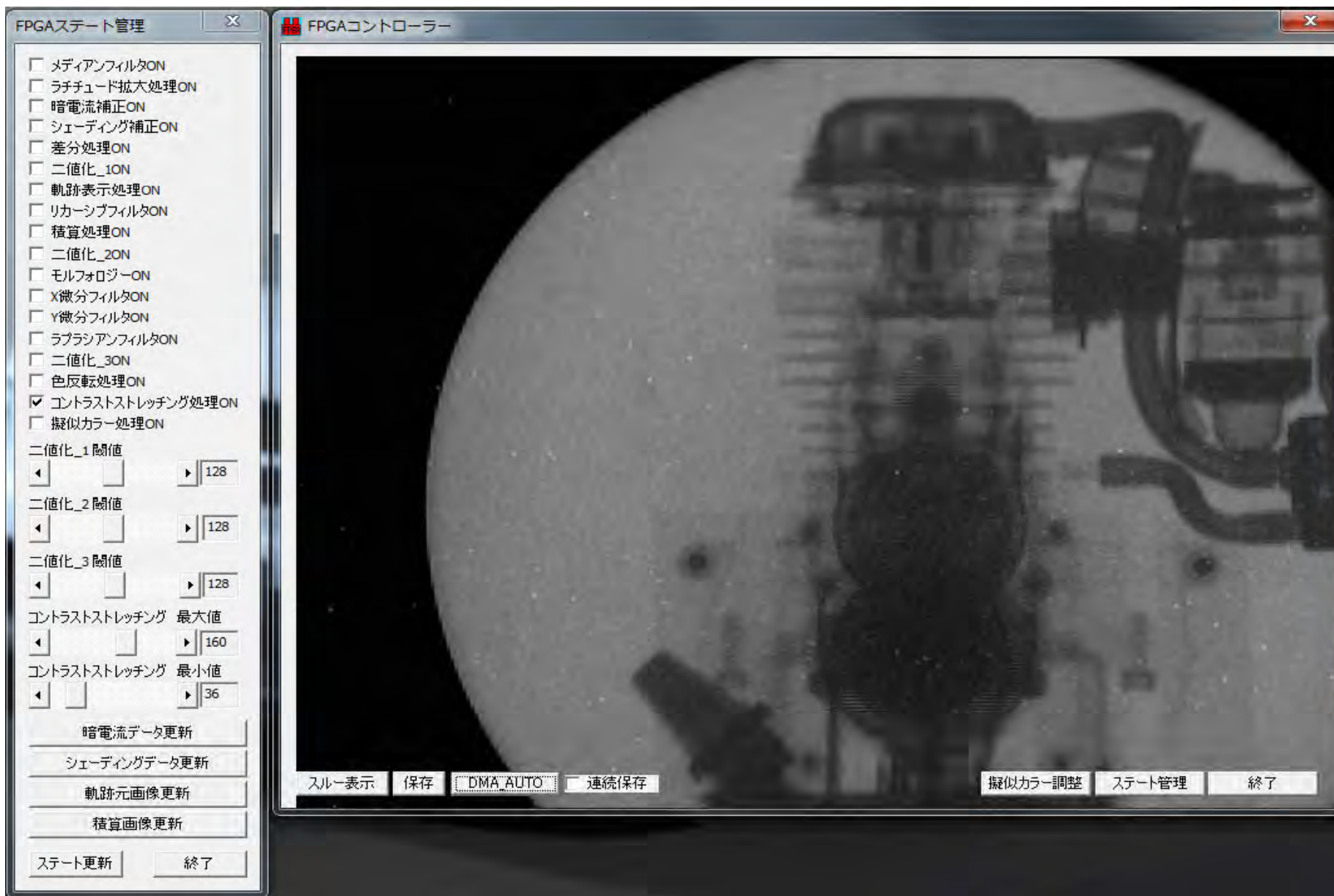


# 画像処理実装結果(2)



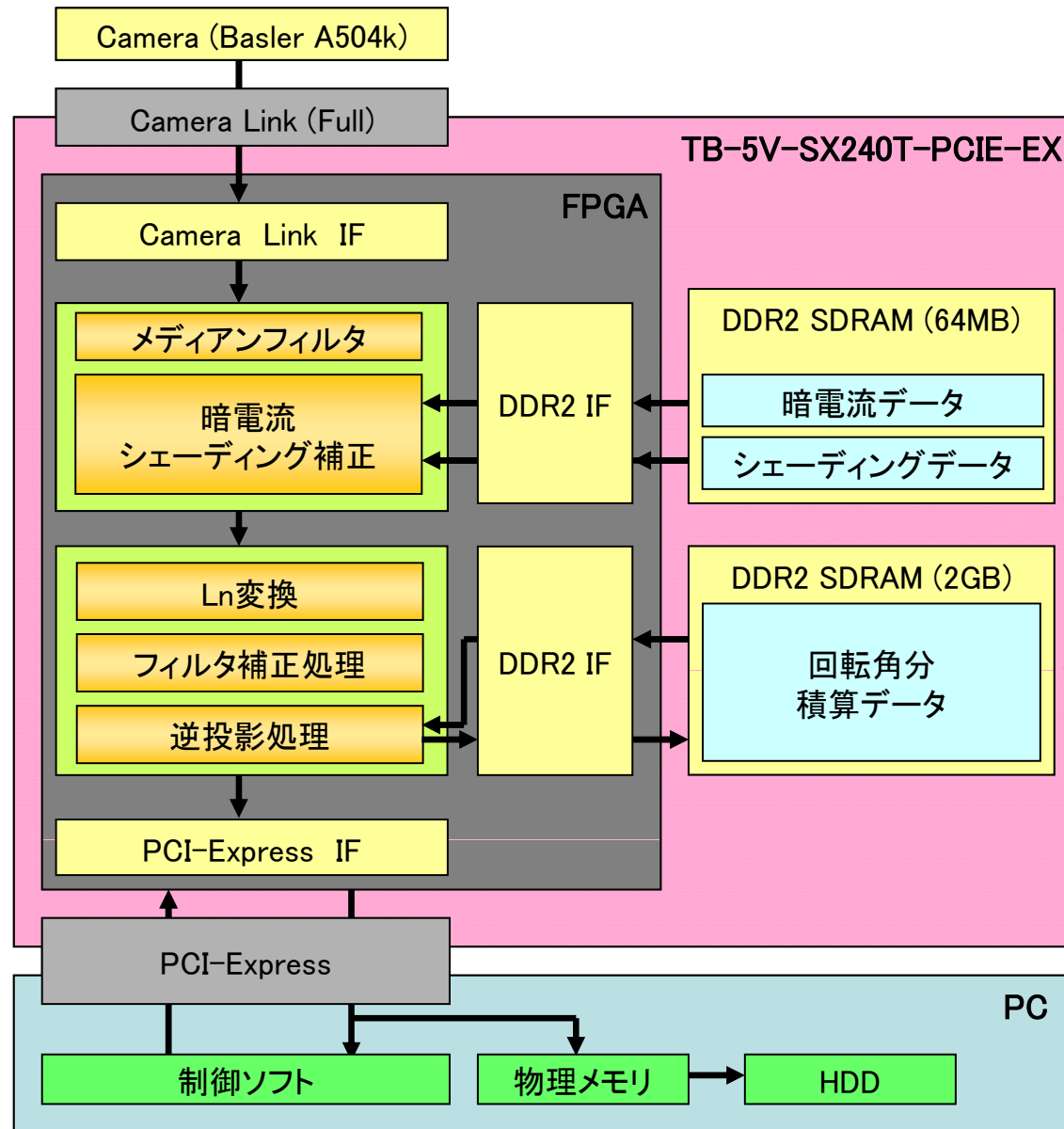
# 開発したシステムインターフェース

研究結果



# ダイナミックCT用実時間処理

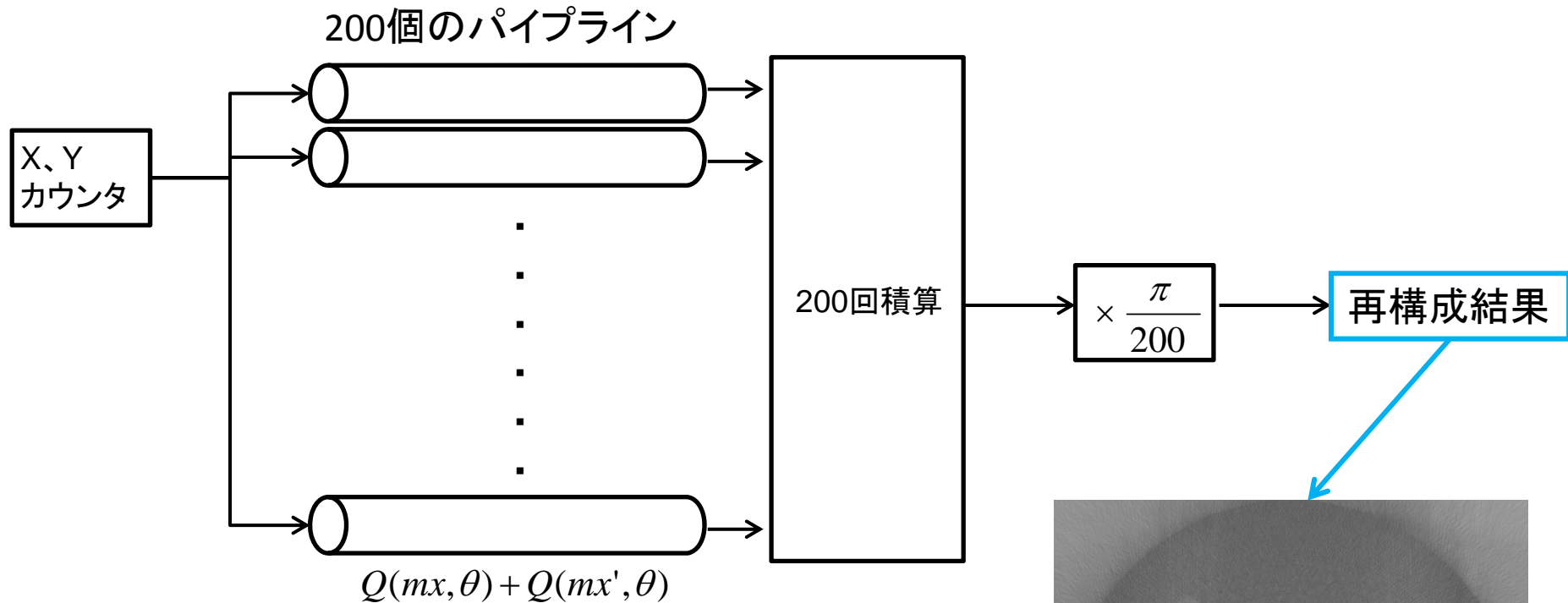
# ダイナミックCT画像処理構成





# 実時間CTシステムの開発

研究結果



- ・最も時間のかかる**逆投影処理**を実装
- ・1断層分の前処理済みのテスト投影データを用意
- ・200並列DSP計800個使用して、**5.24ms**で1断層像計算
- ・1024枚計算するのに、**5.37s**で計算できる見積もり

# 結論

## 実時間画像処理

- ・必要とされる基本的な画像処理を一通りハードウェアに実装できた
- ・PCI-Expressを使ったGUI操作ソフトウェアの開発に成功した
- ・DMA転送による高速画像転送に成功した

## 立体透視システム

- ・3Dテレビを用いた立体透視システムが完成した
- ・システムを実用レベルまで改良できた

## 実時間CT

- ・200並列、計800個のDSPを使い、1断層像5.24msで処理できた
- ・試作プログラムでも、転送時間を含めても18msで処理できる
- ・前処理の為に、残り256個のDSPを残しており、実装する余地が残っている

## 協力者

- \* 輝点重心積算法

野瀬裕之((株)IHI)、安田良(JAEA)、若林源一郎(近畿大学)

- \* パルス中性子透過分光撮影のための積算処理

鬼柳善明(北海道大学)

- \* 実時間画像信号処理

竹中信幸(神戸大学)

- \* 3次元ダイナミックCT実時間処理

竹中信幸(神戸大学)