

KUR イメージング設備の現状について

京都大学 複合原子力科学研究所 大平直也

odaira.naoya.4e@kyoto-u.ac.jp

京大炉(KUR)

- 熱出力 5,000 kW
- スイミングプールタンク型
- 実験孔(4本)、照射孔(4本)、熱中性子設備(重水、黒鉛)、圧気輸送管(3基)、水压輸送管、傾斜照射孔、貫通孔および精密制御照射管、長期照射設備

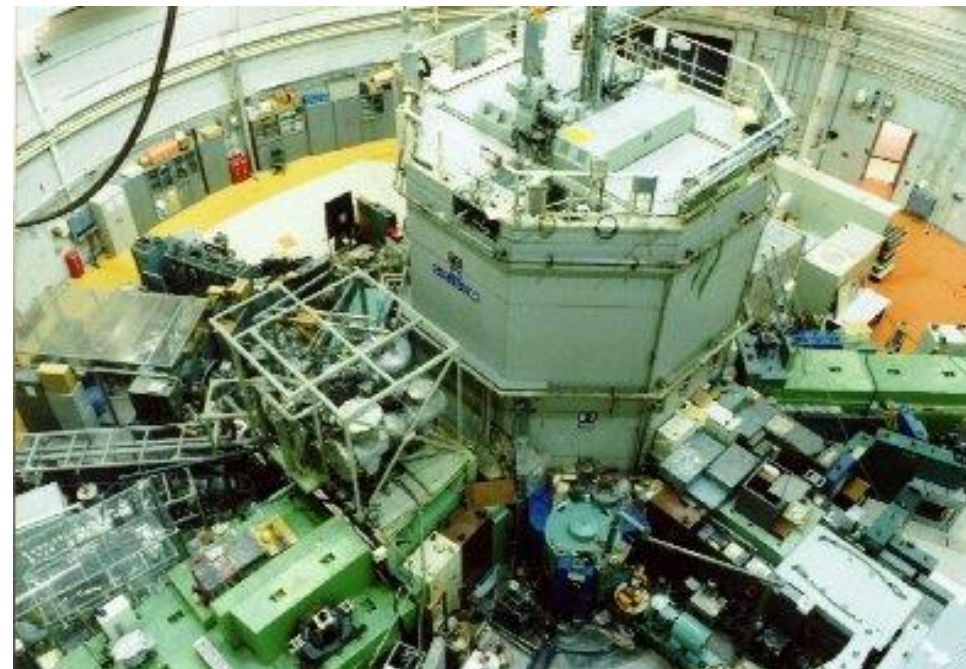
基本運転スケジュール:
火水木の運転(1 MW 47 h + 5 MW 6 h)

2021年度運転計画:

- ✓ 基本運転 19週
- ✓ 5 MW 29 h 2週

2022年度は**10月以降**の利用運転を予定

1964	初臨界
2004-07	燃料低濃縮化のため停止
2011.3.11	東電福島第一原子力発電所の事故
2014.5	新規制対応のため停止
2017.8	定検合格&共同利用運転再開
2026.5	燃料を返送するため停止予定



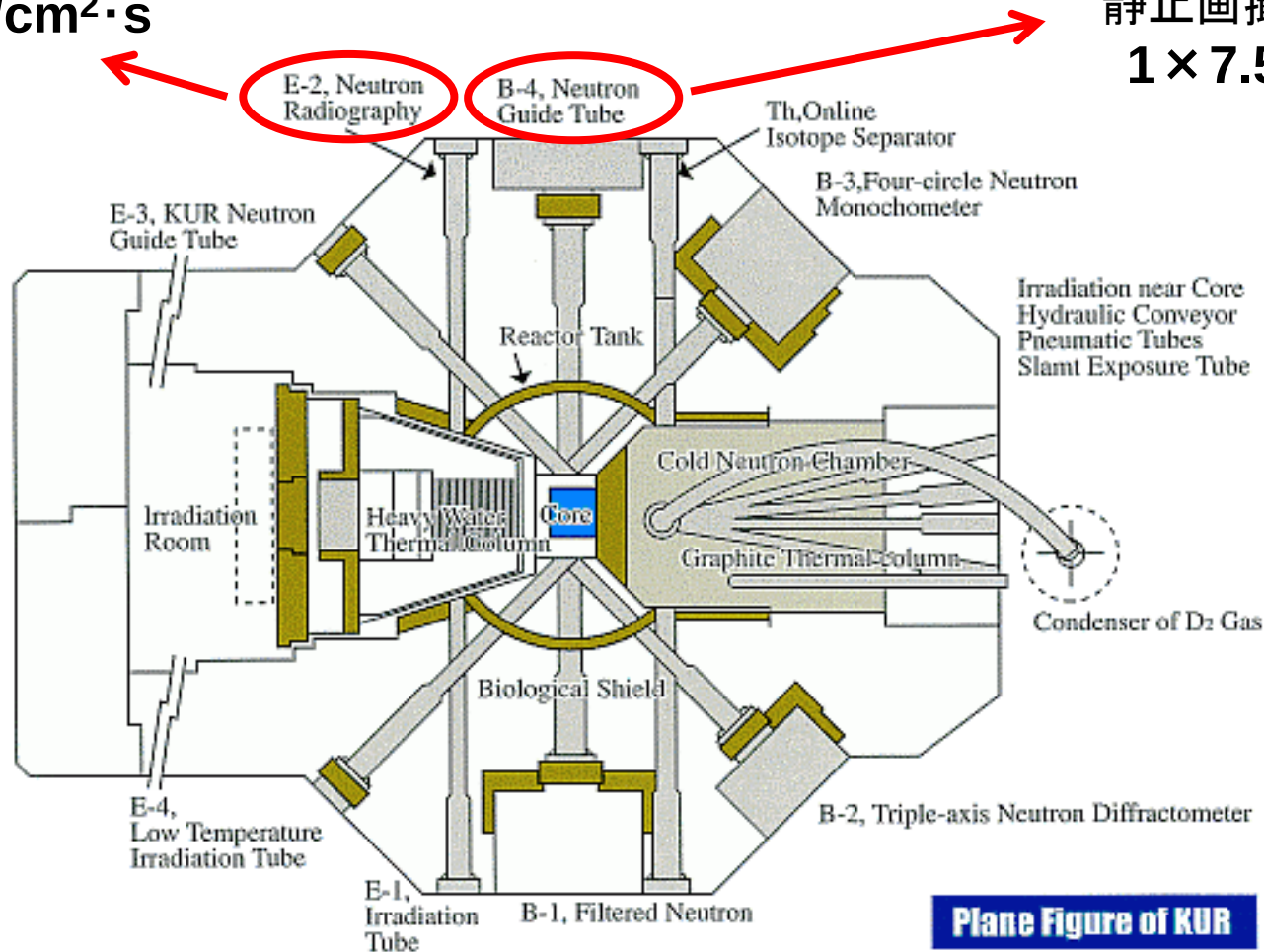
京大炉中性子イメージング用ポート

炉室内のポート
静止画撮影およびCT撮影
 $\Phi 15\text{cm}$, appx. $10^5\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$

E-2

主な用途

1. 静止画像の撮像
(5MW) 30 s程度
(1MW) 2 min程度
2. CT 撮像
(5MW) 4 h 程度
(1MW) 8 h 以上



スーパーミラー中性子導管
炉室外の実験室
静止画撮影および動画撮影
 $1 \times 7.5\text{cm}^2$, $10^7\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$

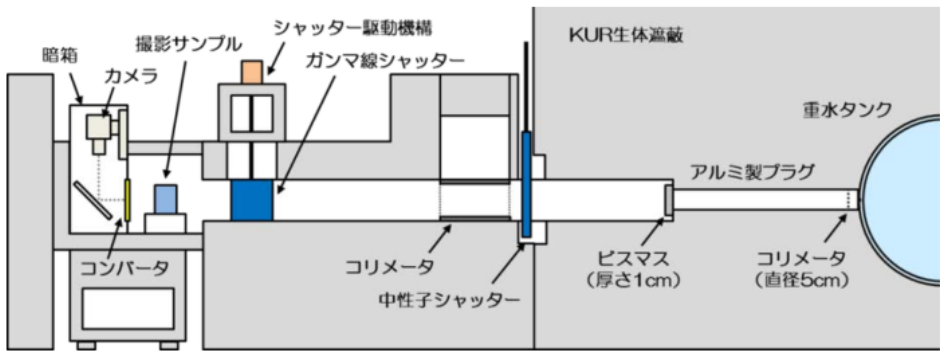
B-4

主な用途

1. 静止画像の撮像
数秒～
2. 動画の撮像
数100～10,000 fps

E-2 ポートの概要

E-2 ポートの概要



E-2 ポートの概要

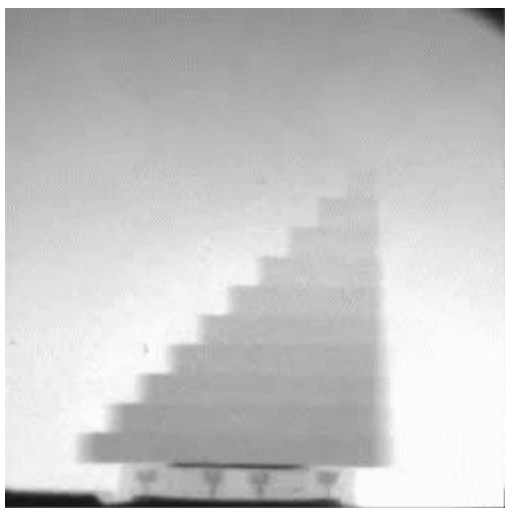
E-2ポートのビーム特性	
中性子束	3.2 x 10 ⁵ n/cm ² s
ビームサイズ	Φ 15 cm
L/D	100
カメラ	BITRAN BU53-LN
コンバータ	LiF/ZnS 200μm

撮像時間は 1 枚 1 - 2 min 程度



E-2 ポートの様子

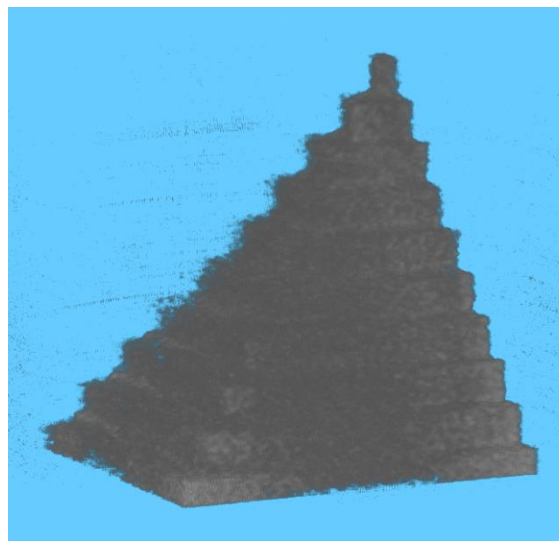
E-2 ポートでの中性子CT



撮影画像



変換、
再構成



アルミウェッジ再構成結果

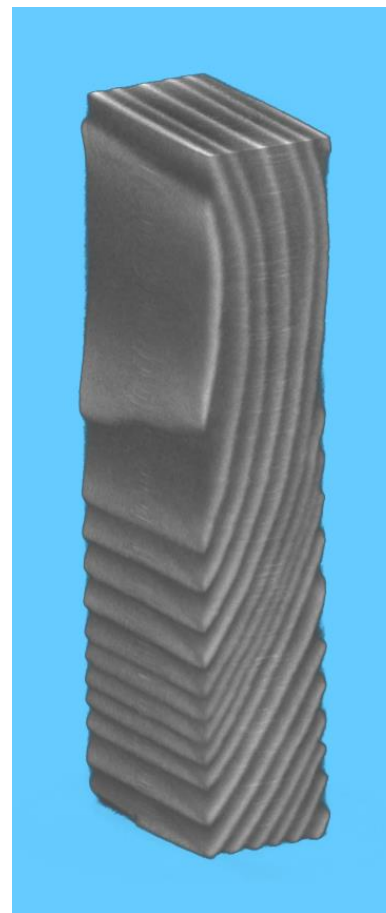
所要時間は 8 時間以上 (1 MW 運転時)

実験プランの例:

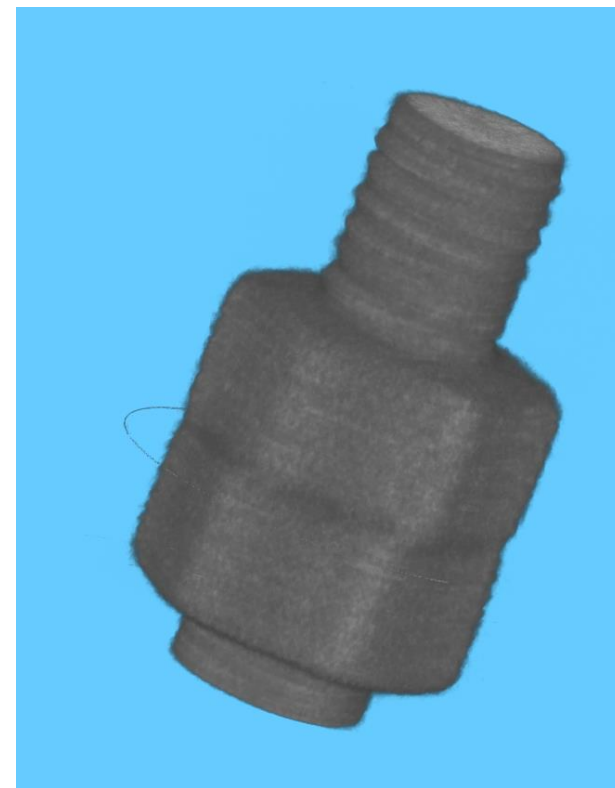
露光時間 150 s、 0.6° 刻みで 300 枚

$300 \times (150 \text{ s} + 7 \text{ s}) = 13.1 \text{ h}$

露光時間が長いほど良い画像が得られる



木材の CT 再構成結果



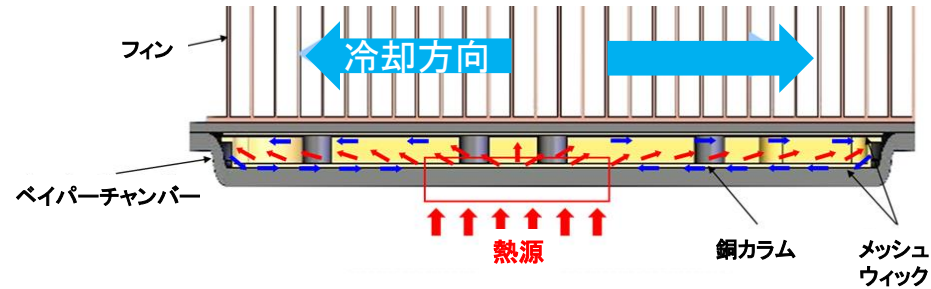
ボルト・ナットの CT 再構成結果

露光時間 150 s
1MW

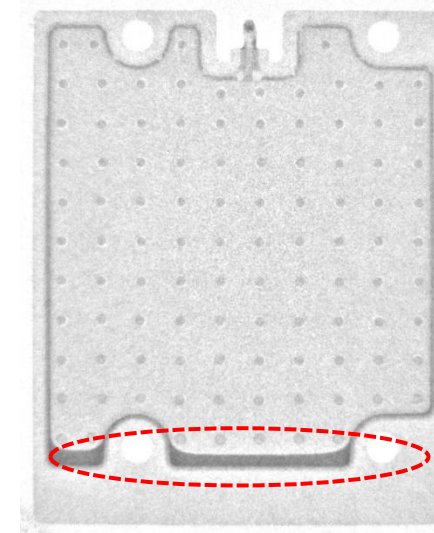
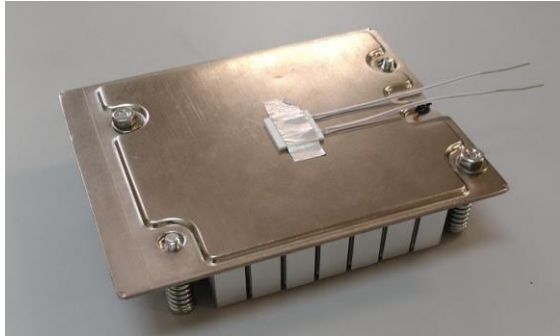
露光時間 60 s
運転時

E-2 ポートでの利用① ベイパーチャンバー

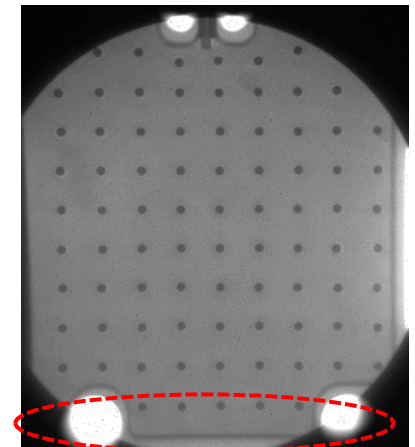
容器内の作動液が蒸発と凝縮を繰り返して、熱を水平及び垂直方向に拡散させる平板状ヒートパイプの一種
CPUの冷却等に利用



容器内の作動液の初期分布や相変化が性能を決定する
→ 内部の作動液の様子を中性子で可視化



中性子透過画像



X線透過画像

中性子画像において封入されている水の存在を確認可能
加熱した場合の挙動も見ていく予定

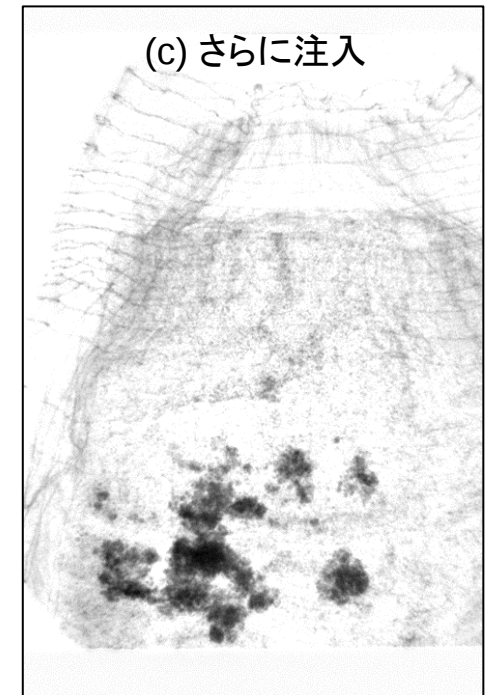
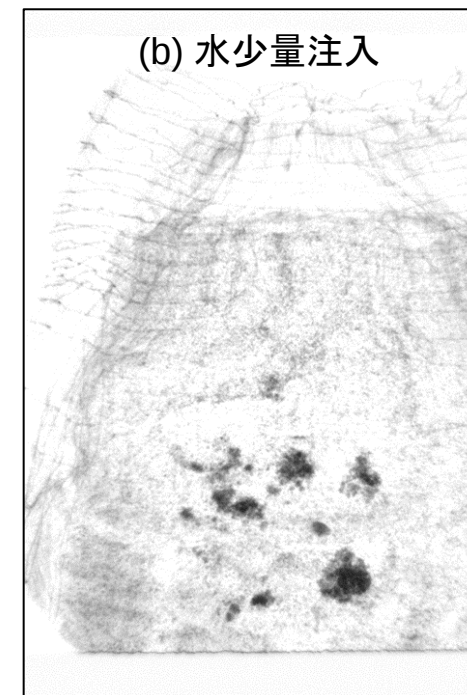
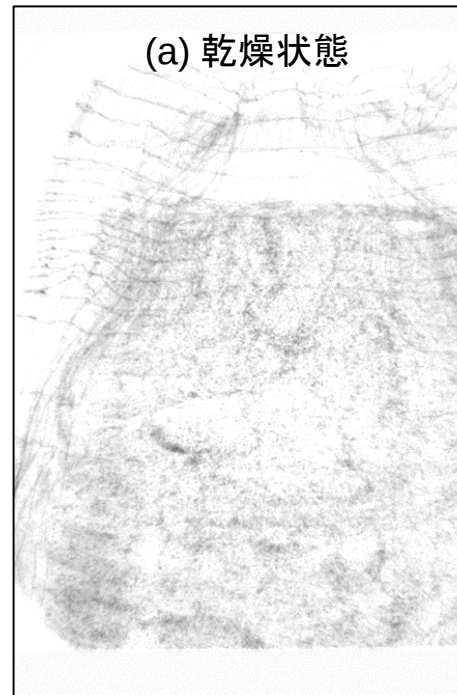
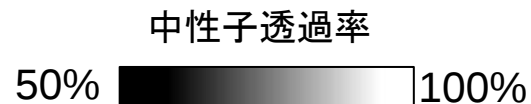
E-2 ポートでの利用② 紙おむつの吸水性



撮影時の様子

乳児用紙おむつの吸水特性調査のための予備実験
シンチレータ前面にSサイズおむつを設置

中性子は水に敏感なので、
水の分布が明瞭に見える

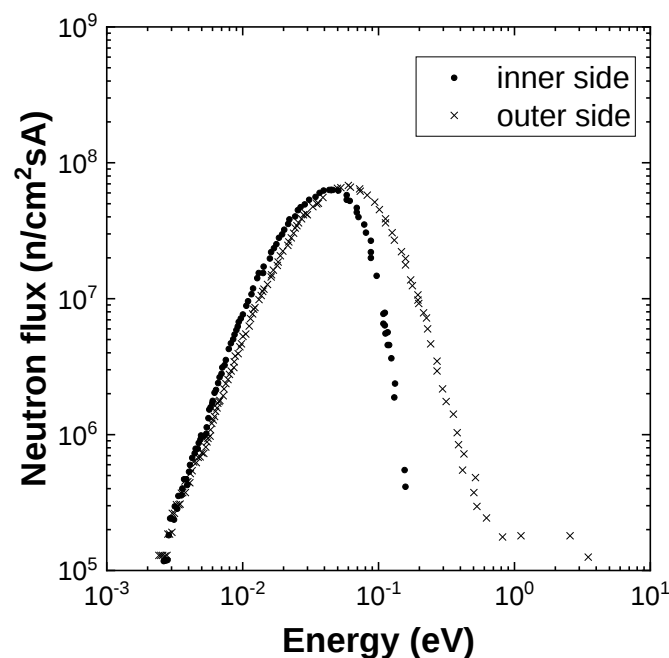


紙おむつの中性子透過画像(透過率に換算)

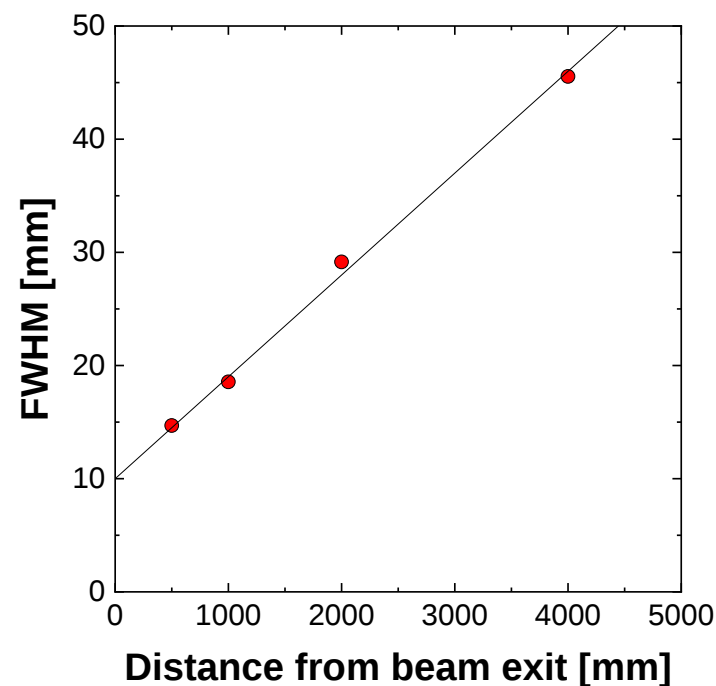
B-4 ポートの概要

B-4 ポートの中性子特性

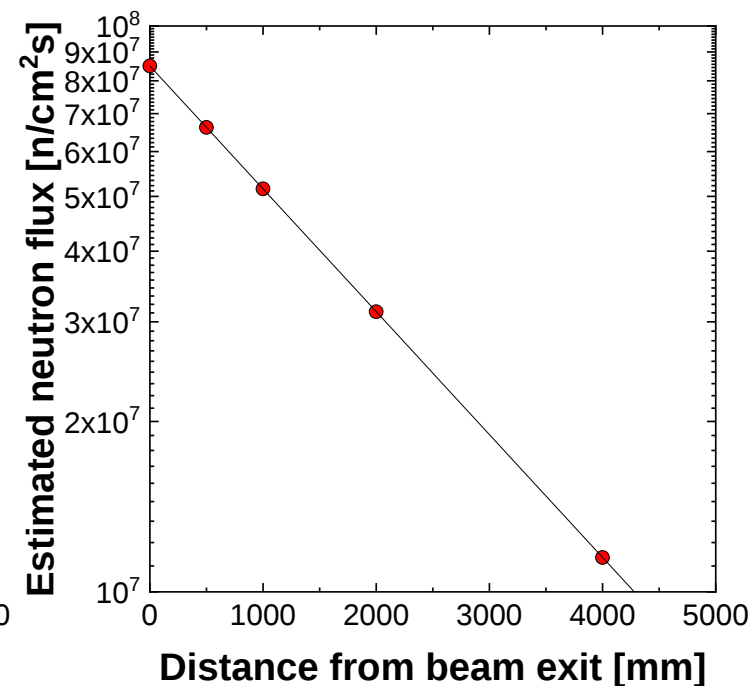
B-4 ポートのビーム特性	
中性子束 (5MW)	$8.5 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
ビームサイズ	W10mm, H75mm



中性子エネルギー分布

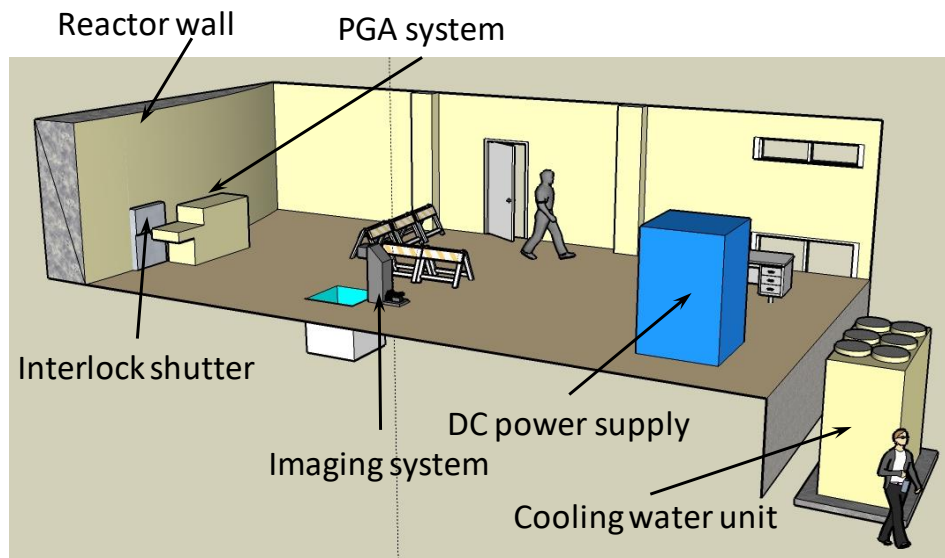


輝度値半値幅の変化



距離に応じた推定中性子束(5MW)

B-4 ポートの概要



B-4 ポート実験室

B-4 ポートの利用可能装置

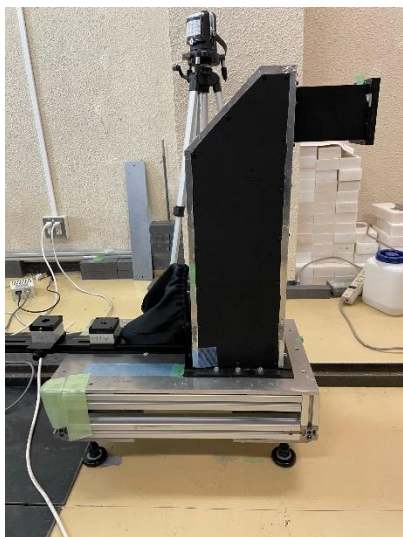
- ・ 直流電源 20 V、1200 A
- ・ 冷却水循環装置
- ・ X線・中性子イメージング装置 (静止画、動画、CT)

他の設備でできないような特徴的な研究に利用

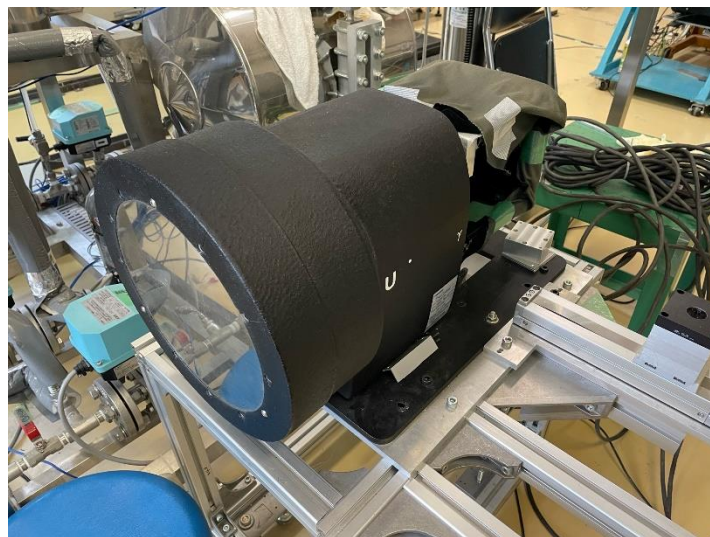
- ・ 火気 → コンクリートの爆裂実験
- ・ 大電流 → 通電加熱沸騰実験
- ・ 高温高圧 → 超臨界水、溶融ガラス

B-4 ポート カメラシステムの概要①

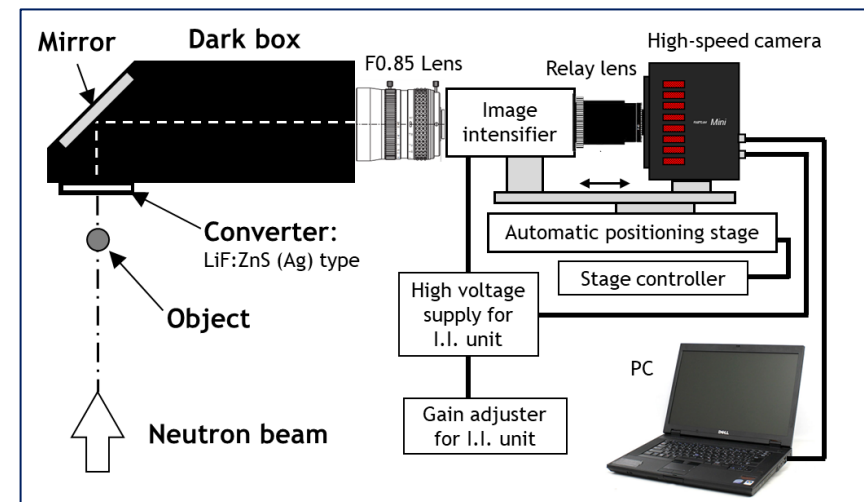
	露光時間	空間分解能
CCDシステム	1 ~ 1000 s	~ 100 μm
中性子 I.I. (静止画)	0.1 ~ 100 s	~ 100 μm
中性子 I.I. (動画)	10 ~ 100 ms	2 ~ 500 μm
高速度カメラシステム	0.1 ~ 1 ms	0.5 ~ 1 mm



CCDシステム



中性子I.I.



高速度カメラシステム

B-4 ポート カメラシステムの概要②

シンチレータ

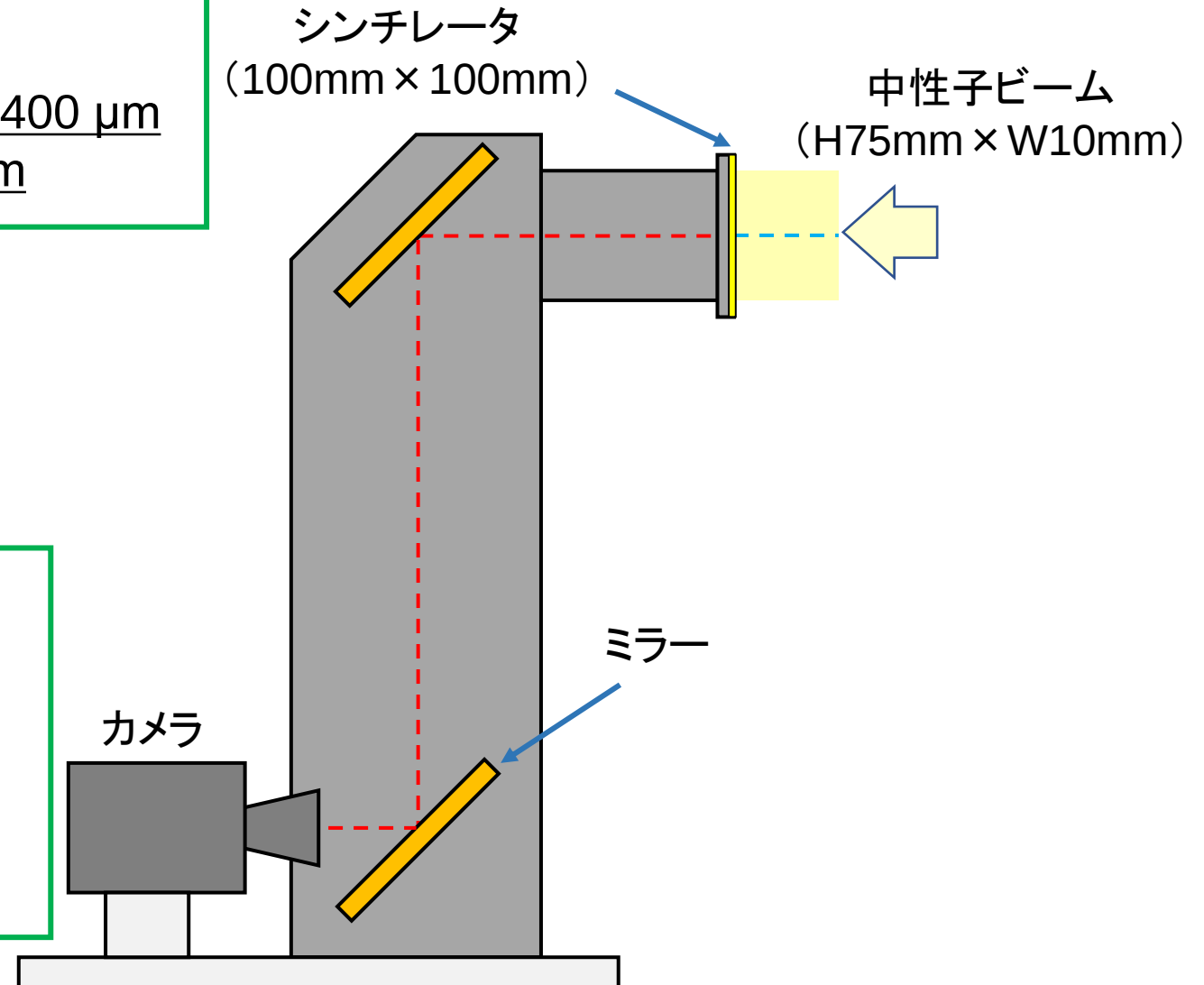
- TRITEC LiF/ZnS 50 ~ 400 μm
- TRITEC LiF/Gd₂O₂S 20 μm

カメラ

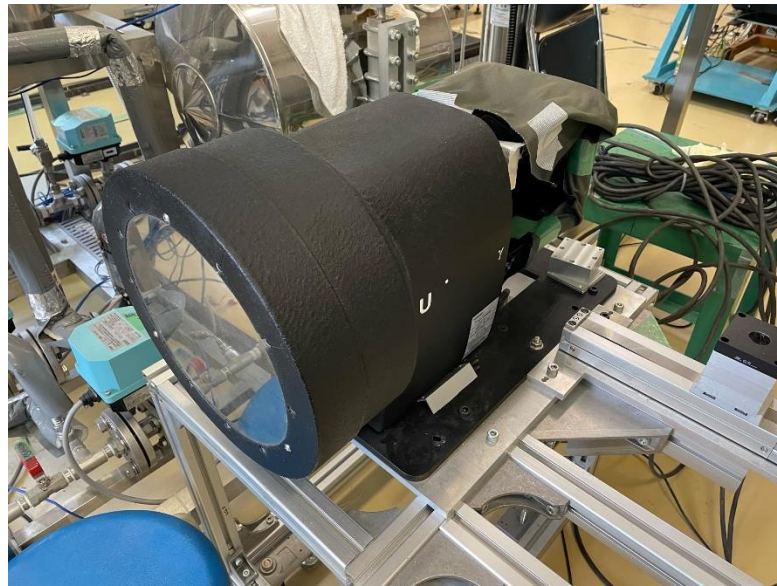
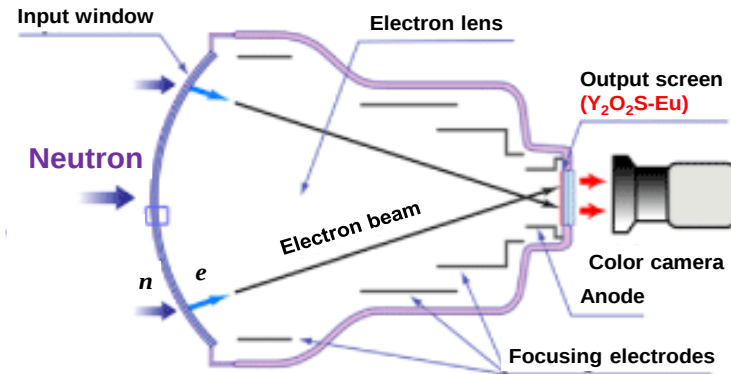
- Princeton Instruments 冷却CCD × 2
- BITRAN 冷却CCD & 冷却CMOS

レンズ

- 50、85、105、180 mm 単焦点レンズ
- テレコン、接写リング、クローズアップ



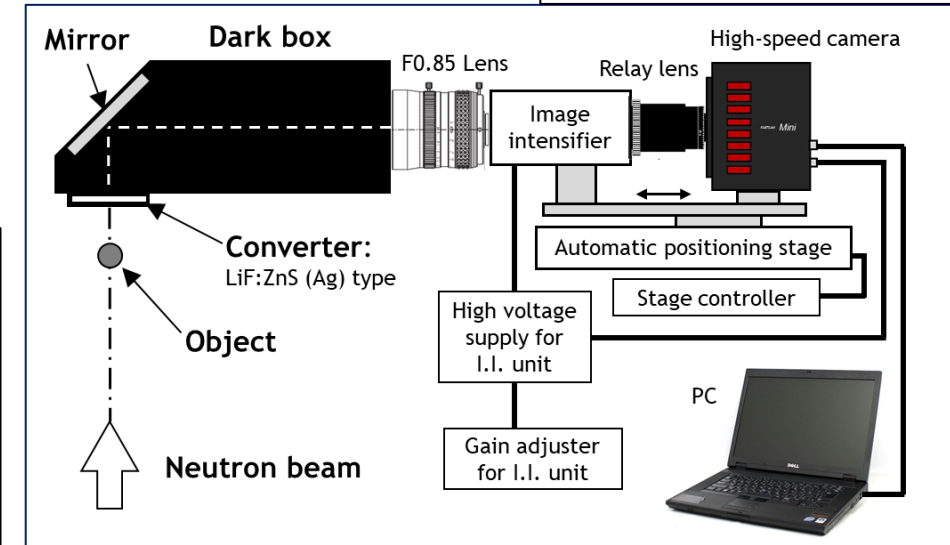
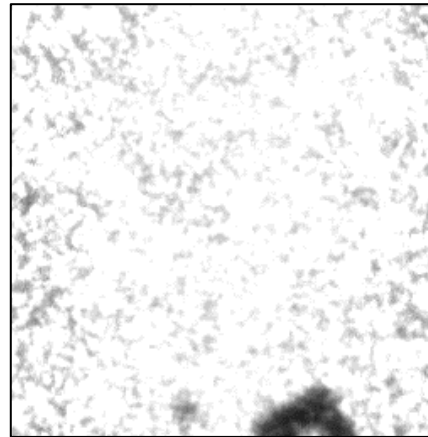
B-4 ポート カメラシステムの概要③



- 中性子I.I. (東芝製)

定常炉の特徴でもある
高速度撮像技術を高度化

回転Gd片
250fps
0.4m/s程度



Max 10,000fps

- コンバータ + 光イメージインテンシファイア
(浜ホト)(1 MCP & buster)
- 高速度カメラ: AX-50 (フォトロン)
- 高感度レンズ: 50mm f0.85, 85mm f1.4, 105mm f1.4

B-4 ポート実験室内のX線設備



X 線発生装置本体



操作盤

- モデル: TRI-X-150WE-OC
- 管電圧: 30 kV – 150 kV
- 管電流: 0.5 mA – 7.0 mA (管電圧、焦点サイズに依存)
- 焦点寸法: 0.3 mm (Small)、0.6 mm (Large)



CCD システム

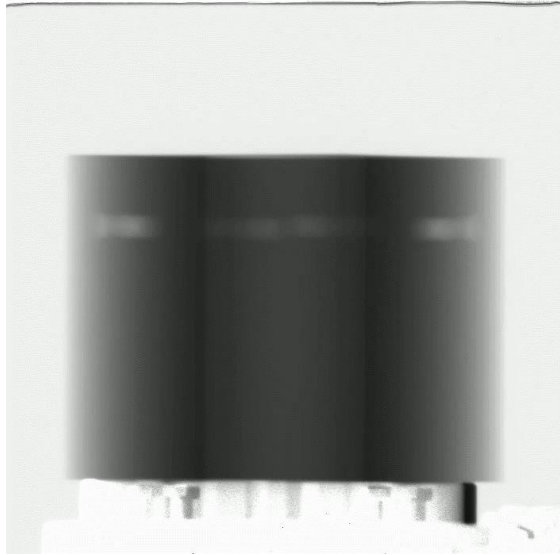


X 線 I.I.

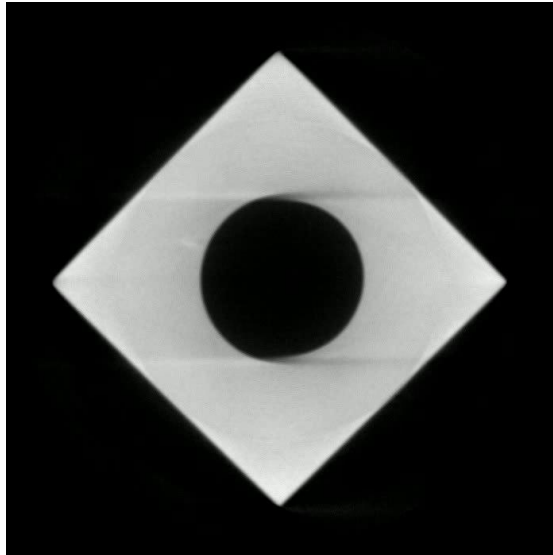
撮像には CCD システム、X 線 I.I. (浜ホト) の2種類
CCD システムでは X 線シンチレータ (東芝マテリアル) を
取り付けて撮像。(サイズは 100 mm x 100 mm)
X 線 I.I. の視野は Φ 4 inch、 Φ 2 inch のいずれか

X線との併用は最近利用が増えている。コンクリート、着霜、植物の研究など

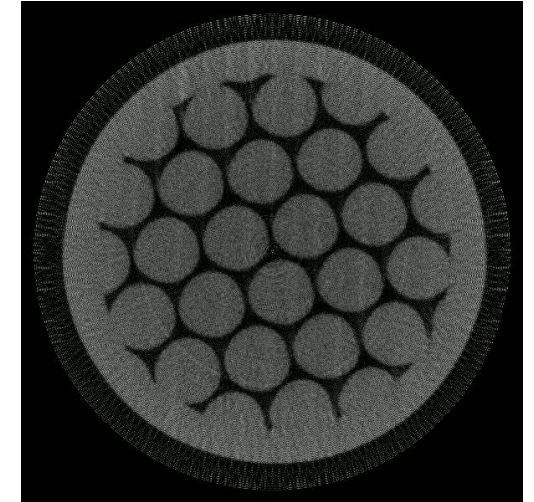
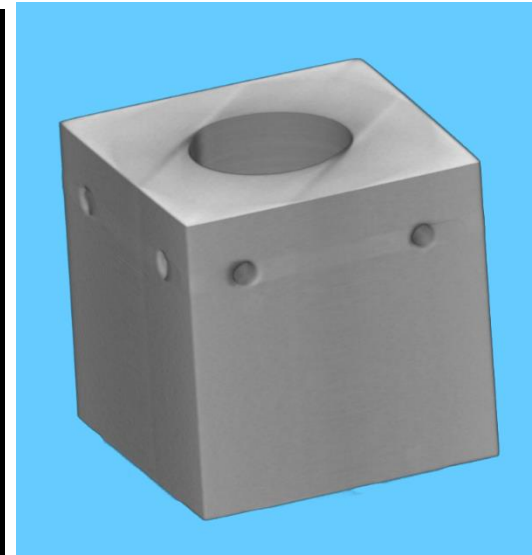
X線CT



撮像結果



再構成の結果



3Dプリンターで作成した充填層への応用

露光時間は数秒(中性子と比べて段違いに短い)

所要時間: 30分~1時間

高画質なCT再構成画像を得られる。

X線・中性子CT



<https://tomopy.readthedocs.io/en/latest/>

処理の流れ

1. 透過率の画像に処理
データを回転軸に対して垂直に
スライスしていく
2. Tomopyで再構成
3. 輝度調整した上で断面画像を作成

X線・中性子 CT の再構成には **TomoPy** を使用

TomoPy は Python のパッケージで、オープンソースなので誰でも無料で手に入れられる。

機能

- ・ Sinogram から CT 再構成
- ・ 三次元方向のフィルター
- ・ リングアーティファクト、ストライプ型のノイズ等の除去

再構成アルゴリズム:

Filtered back-projection (FBP) をはじめ、14個から選択可能
大平は Fourier grid reconstruction アルゴリズムを使用

まとめ

- KUR B-4 と E-2 の設備について主に紹介

- E-2 の特徴 → 静止画と中性子CT

- B-4 の特徴 → 露光時間が短い撮像と動画の撮像

X線との併用は非常に有用。最近利用増。(コンクリート、着霜、植物の研究など)

- B-4 の今後:

撮像システム高度化、画像処理手法開発を進めていく。(特に高速度撮像)

- E-2 の今後:

照射室を拡張して、より使いやすくする。大きなものを撮像できるようにする。