

平成28年度中性子イメージング専門研究会

日時:平成29年1月6日(金)

場所:京都大学原子炉実験所事務棟大会議室

X線ラジオグラフィを用いた霜層構造の計測

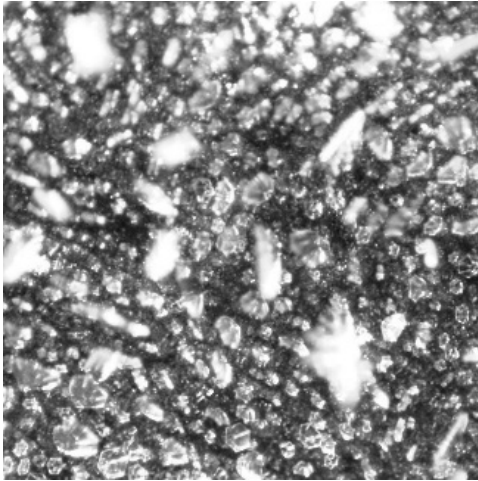
松本亮介(関西大学)

影林和磨(関西大学大学院), 上地拓摩(関西大学大学院)

長澤佳輝(関西大学4年生), 塩川貴大(関西大学3年生)

伊藤大介(京都大学原子炉実験所), 齊藤泰司(京都大学原子炉実験所)

背景



10min



20min

霜の上面からの写真(写真幅1.4mm)

四元博之, 石原勲, 谷尾健一, 松本亮介: 霜層厚さ評価の提案, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.25, No.2 (2008), pp.107-113



フィン先端での霜の成長の観察

作動冷媒が 0°C 以下で動作する熱交換器では, 伝熱面において着霜が生じ, 熱機器(冷蔵庫, ヒートポンプなど)の性能を低下させる.

- ✓ 熱交換器の熱抵抗と流動抵抗を増加させ, 伝熱性能を低下させる.
- ✓ 家庭用冷蔵庫では1日に1度, 除霜運転(冷蔵庫の場合, 電気ヒータで加熱)を実施.
- ✓ 着霜モデルには, 霜層の構造, 霜層の熱物性(等価熱伝導率, 霜密度)が必要.
- ✓ 着霜量の測定においてでさえ, 掻き取るほかに方法がない.
- ✓ 着霜抑制・防止を目指すも, 霜層の微細構造の計測がなされていない.
- ✓ デフロスト時の融解, ドレン水排出の挙動の観察が困難.

中性子・X線ラジオグラフィの霜計測への利用

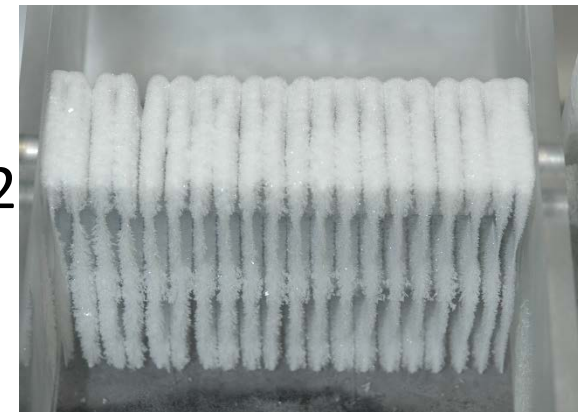
熱交換器への着霜量分布 (cmスケール)

霜層厚さ方向の霜密度 (mmスケール)

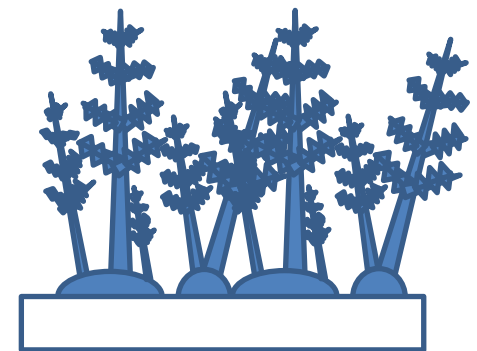
霜結晶の微細構造 (μm スケール)

での着霜現象の評価

1. 熱交換器フィン面上の2次元着霜量分布計測
(KUR B4, E2 中性子ラジオグラフィ) 2011-2012
2. 霜層厚み方向の霜密度分布計測
(KUR X線ラジオグラフィ) 2015
3. 霜層の3次元微細構造の計測
(SPring-8 BL20B2 X線 μCT) 2016
4. 熱交換器の3次元着霜量分布計測
(KUR X線ラジオグラフィ CT計測) 2016-2017



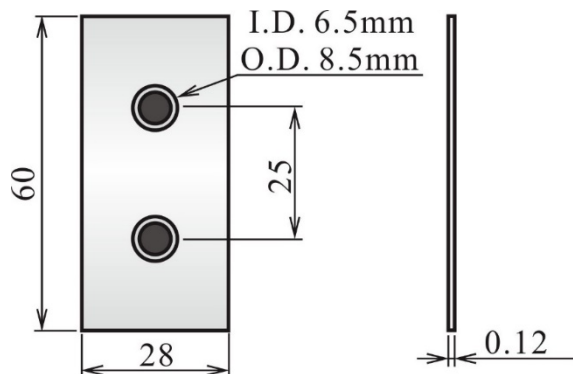
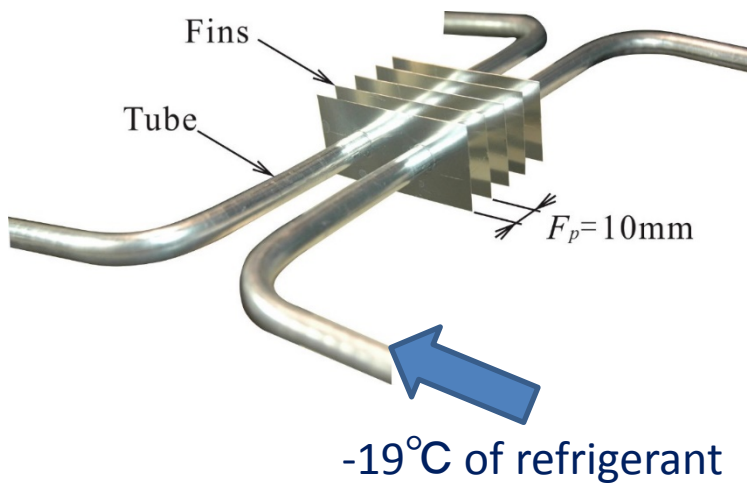
プレートフィンチューブ熱交換器への着霜



霜層微細構造

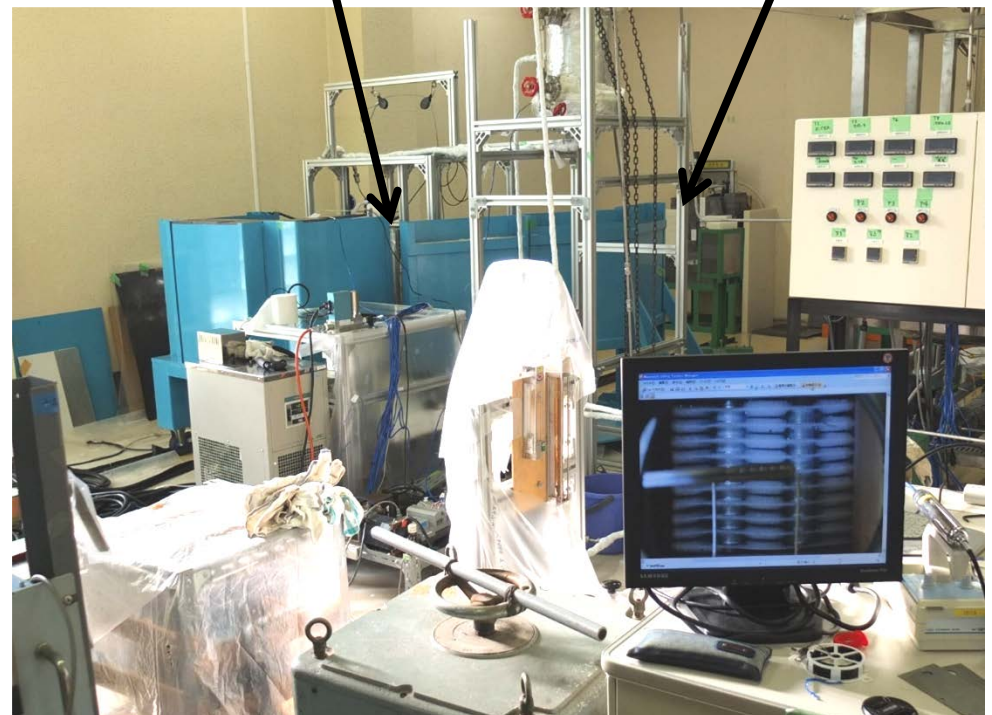
1. 熱交換器フィン面上の着霜量分布計測

- ・ 京都大学原子炉実験所 B4ポート 中性子ラジオグラフィ
- ・ アルミニウム製フィンチューブ熱交換器



Experimental apparatus

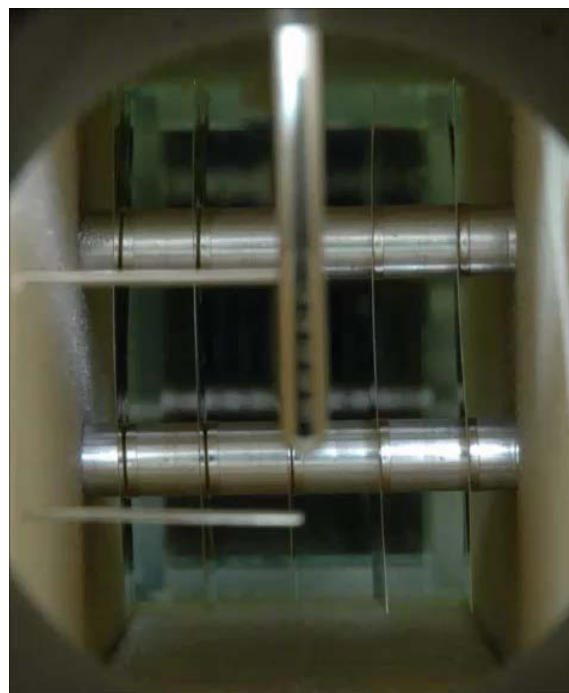
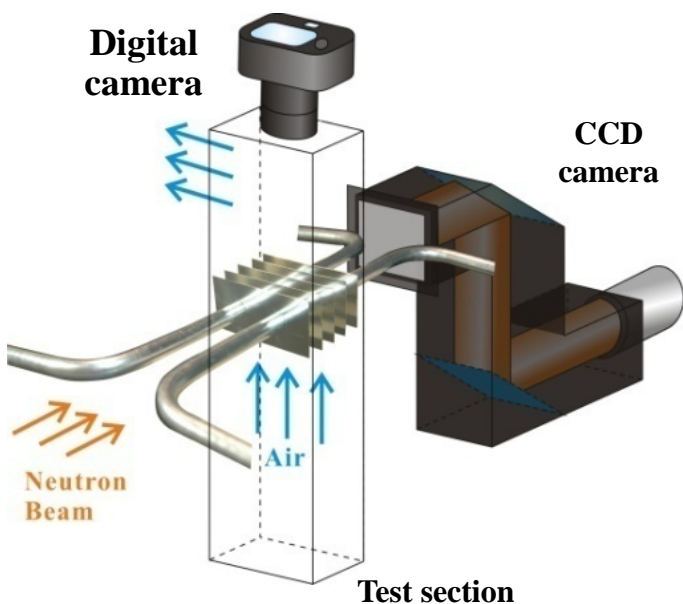
Beam port



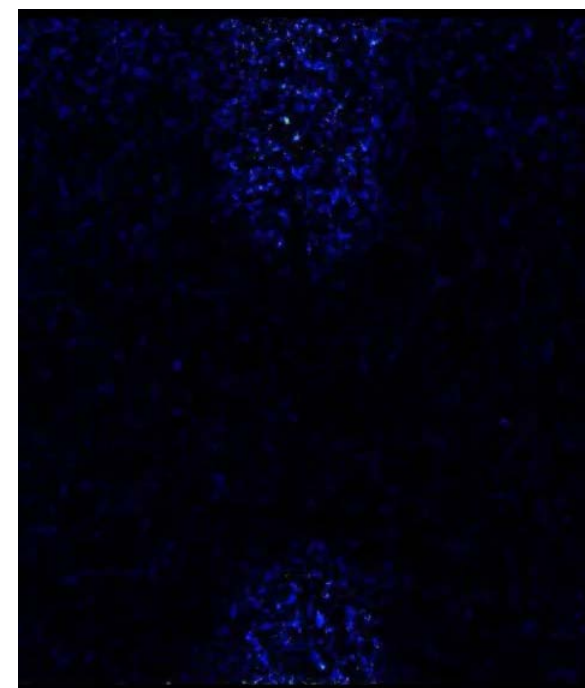
中性子ラジオグラフィによる着霜量分布計測 $F_p=10\text{mm}$



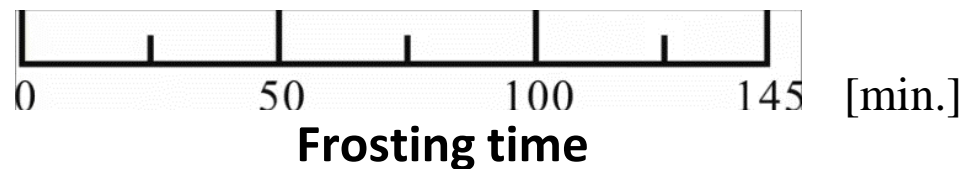
● Flow direction



Digital Camera image



Frost accumulation



2. 霜層厚み方向の霜密度分布計測(2015年度)

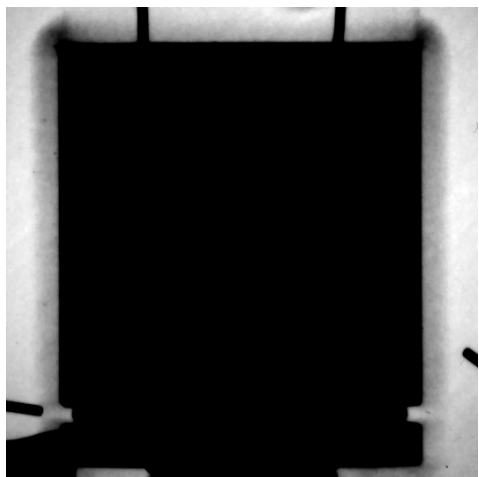
- ・ 京都大学原子炉実験所 B4照射室 X線ラジオグラフィ
X線発生装置 80 kV, 5 mA , 露光時間 60sec
- ・ 逆アーベル変換による半径方向霜密度分布評価

180min images

Digital
Camera
image



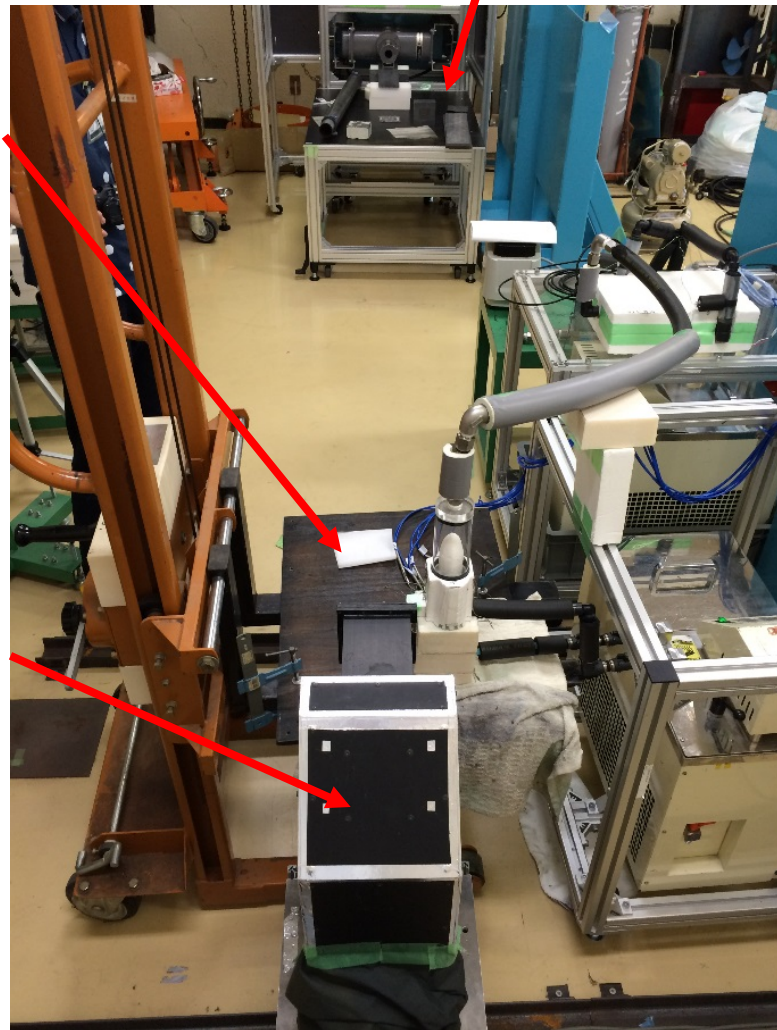
X-ray
image



テスト
セクション

カメラ
ボックス

X線発生装置



逆アーベル変換による霜層密度の評価

✓ 計算方法

アーベル逆変換による
半径方向の霜密度分布評価

Beer's law

$$I = I_0 \exp(-\rho \mu_m \delta)$$

$$I(y) = I_0 \exp(-\rho(r) \mu_m \delta)$$

$$\rightarrow J(y) = \ln \frac{I(y)}{I_0} = -2 \int_y^R \frac{\rho(r) \mu_m r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}}$$

$$\rightarrow \rho(r) = -\frac{1}{\pi \mu_m} \int_r^R \frac{dJ(y)}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}}$$

$I(y)$: 透過輝度

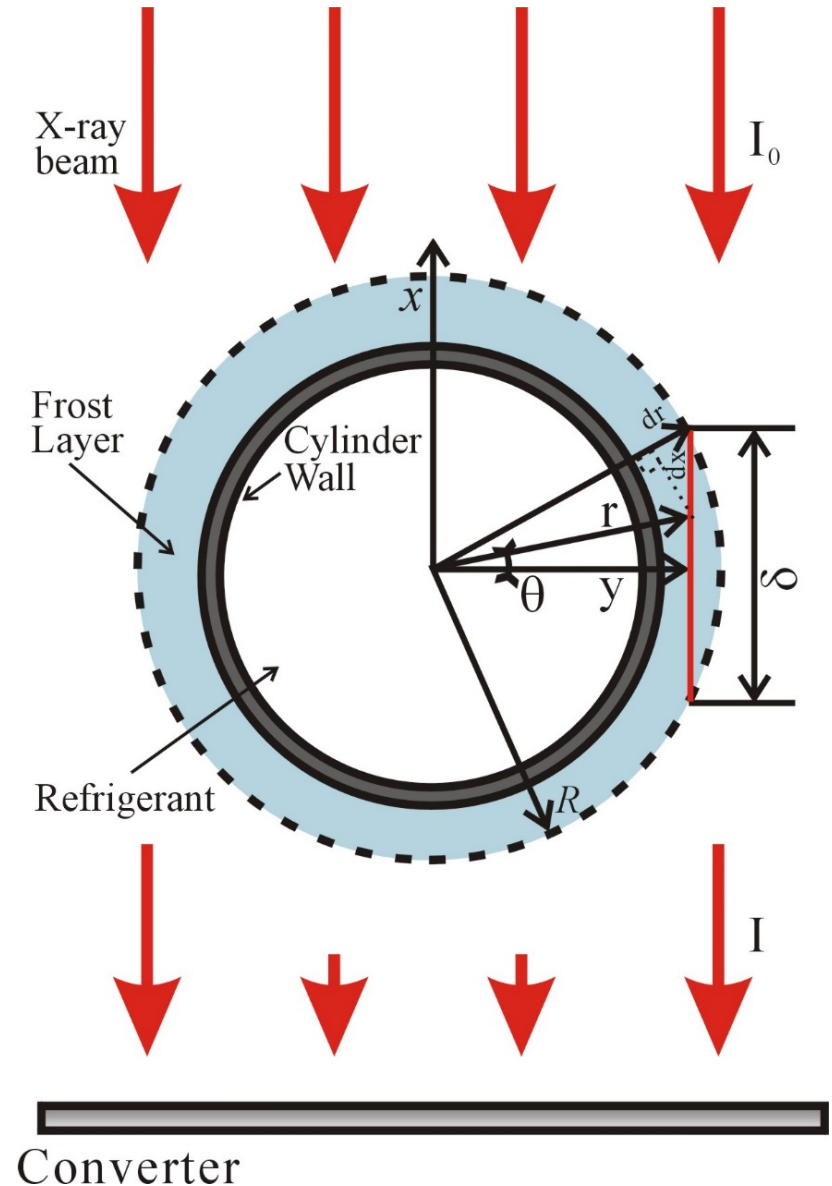
I_0 : 入射輝度

$\rho(r)$: 霜密度

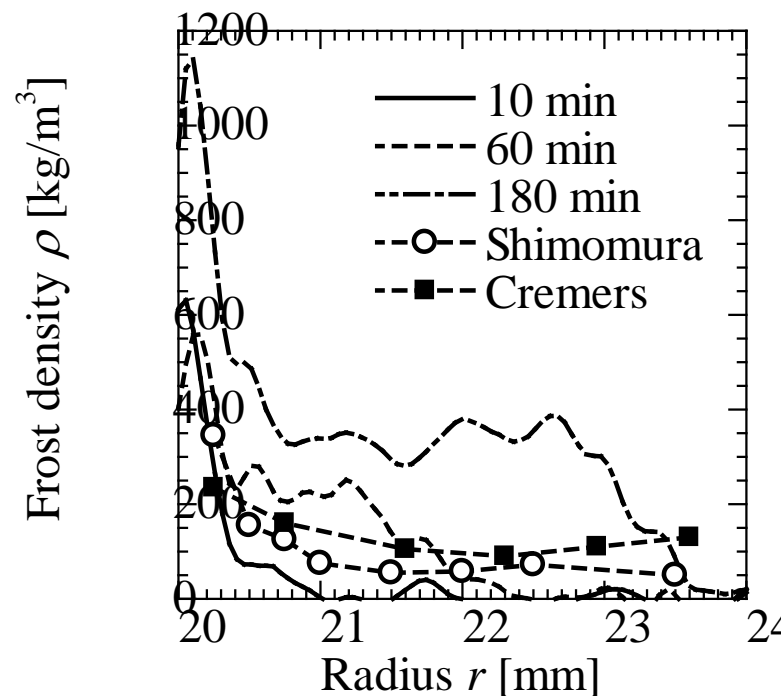
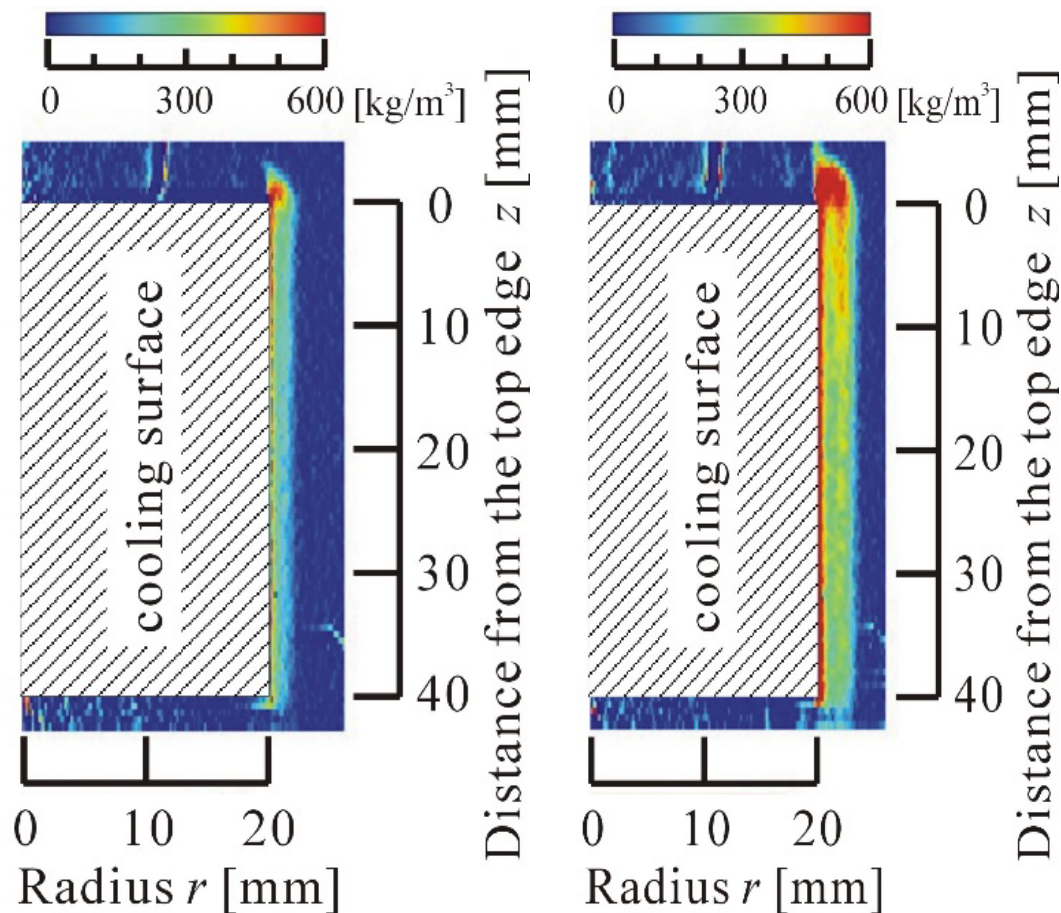
μ_m : 質量減衰係数

δ : 透過厚さ

R : 霜層外径



霜層厚み方向の霜密度分布

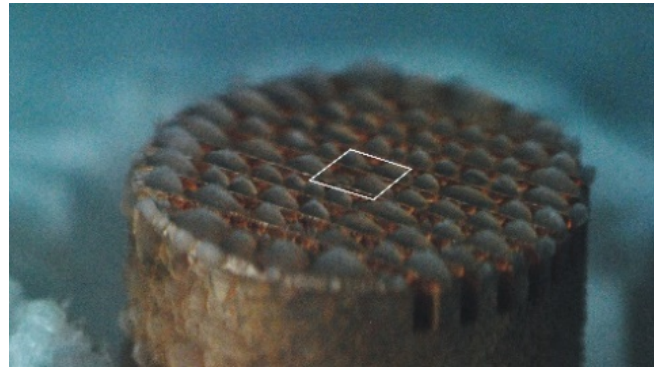


Density distribution
of the frost layer

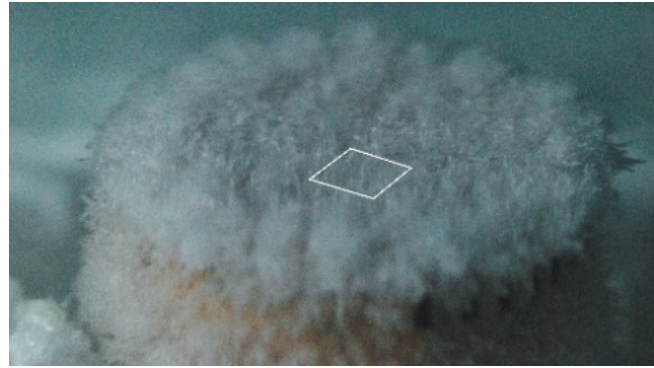
3. 霜層の3次元微細構造の計測(2016年度)

- SPring-8 BL20B2 X線μCT装置による3次元霜層微細構造の計測
- 直径6mmの平滑面, もしくは微細溝付き(0.25mm幅溝)面での着霜

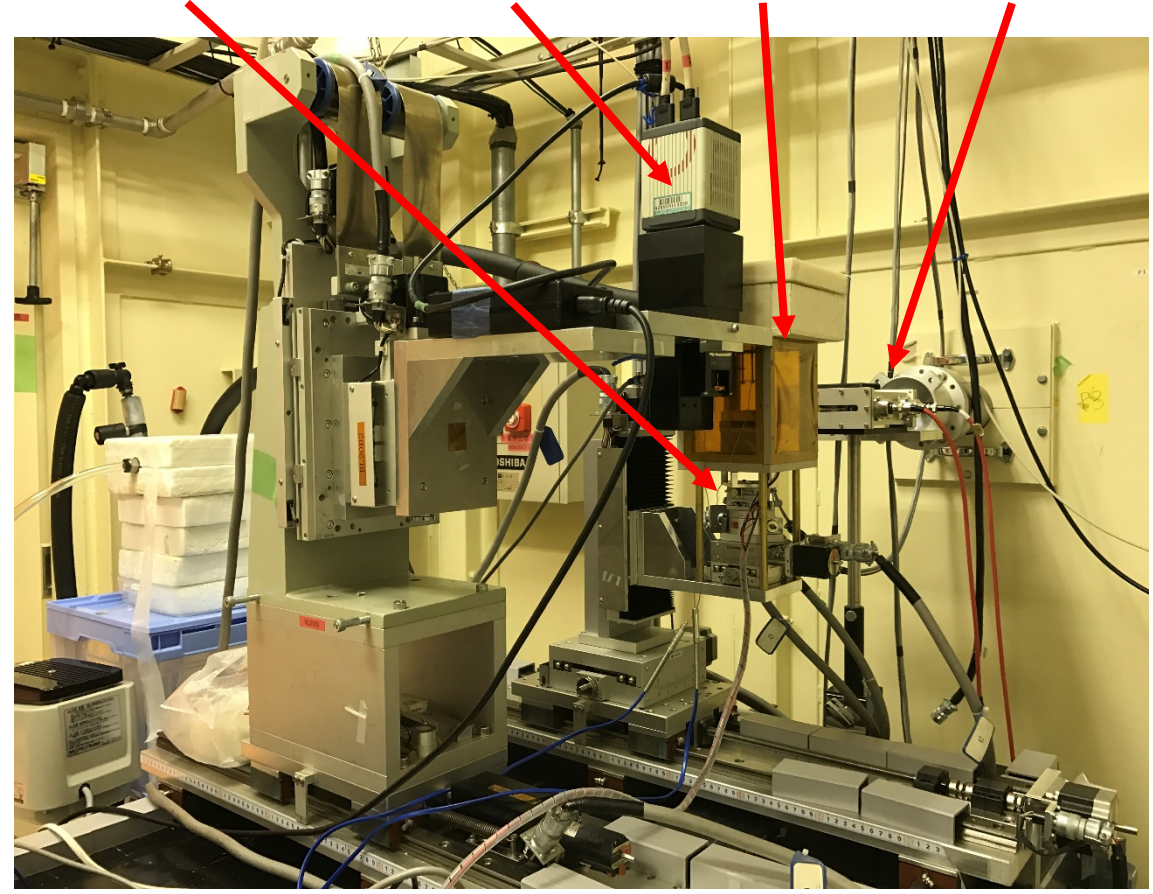
各種トラバース台 CMOS 試料 X線ビー
回転ステージ カメラ ステージ ムポート



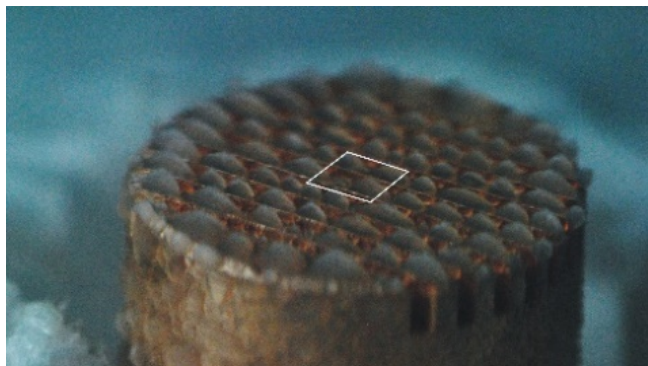
直径6mmの冷却面
4min



10min



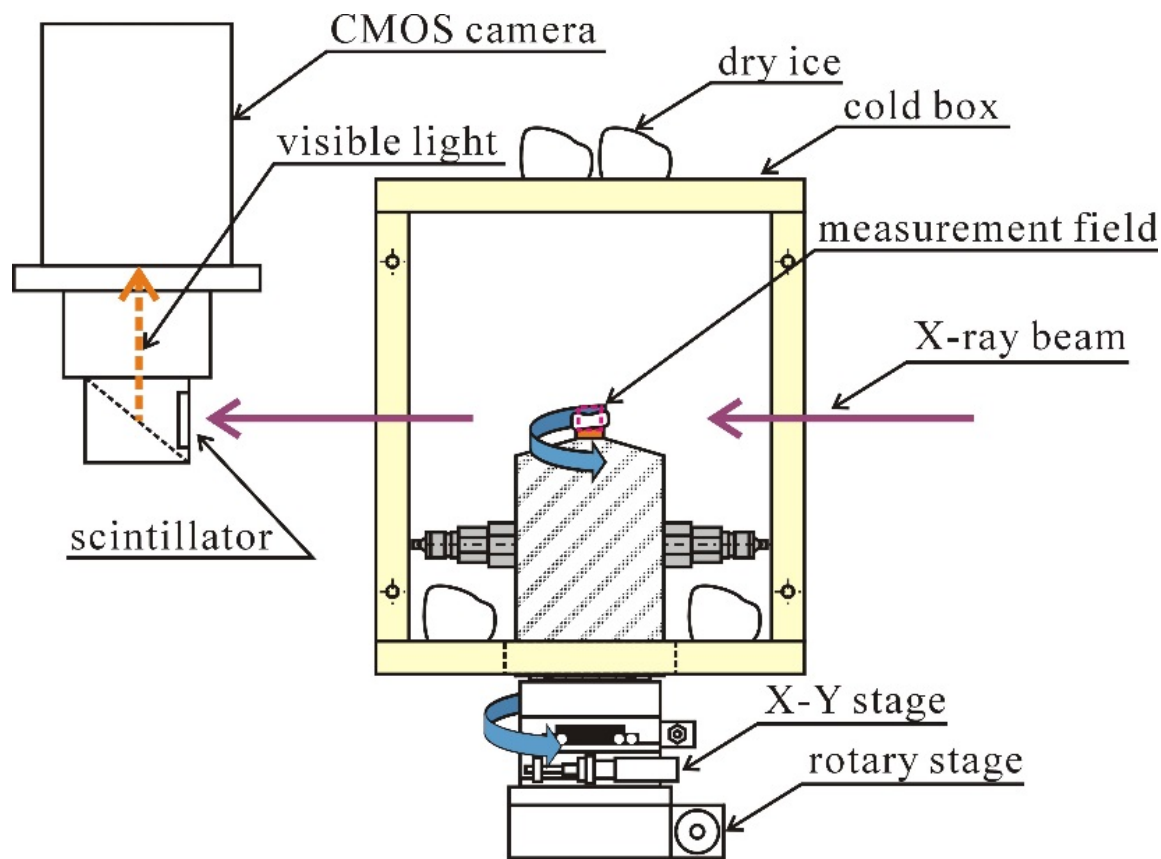
直径6mmの冷却面に着霜後,
回転ステージにセット
45secで 0.3° ごとの600断面を撮影



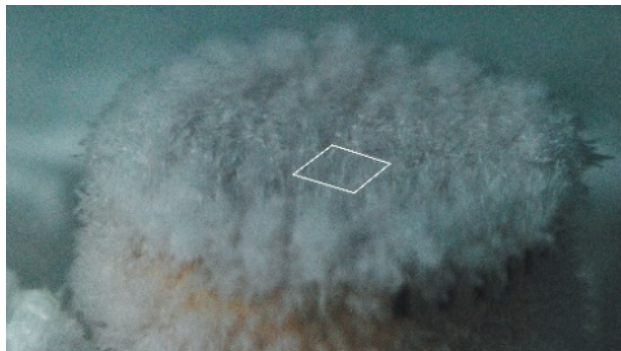
直径6mmの冷却面
4min



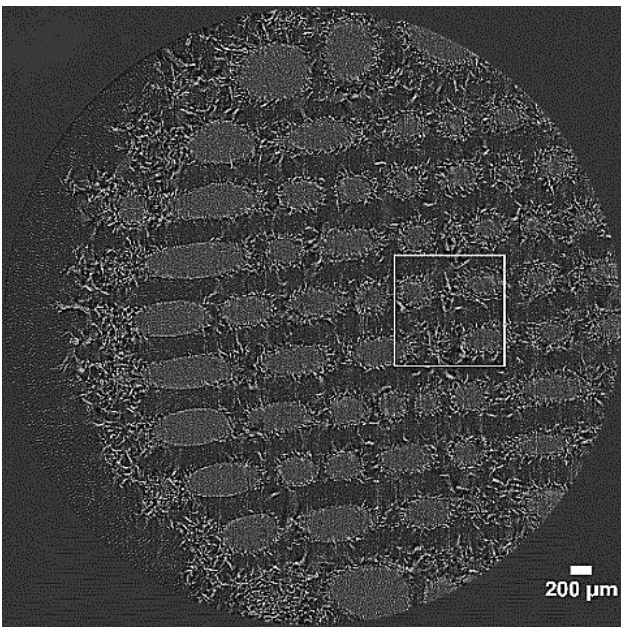
10min



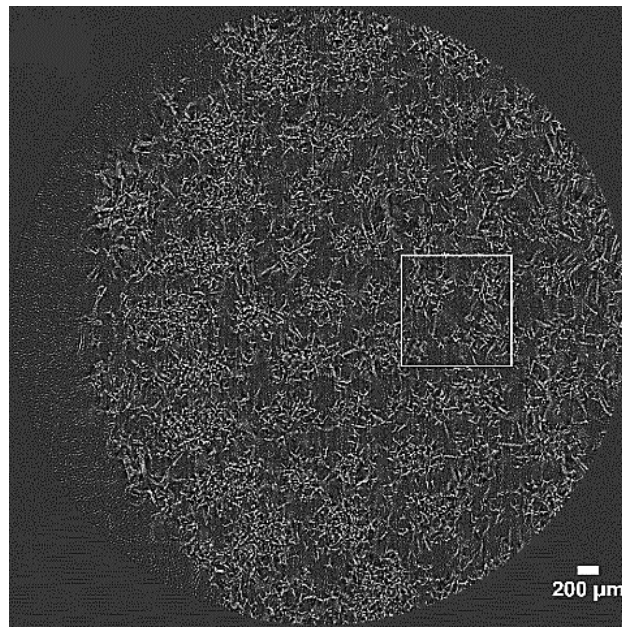
霜層断層画像



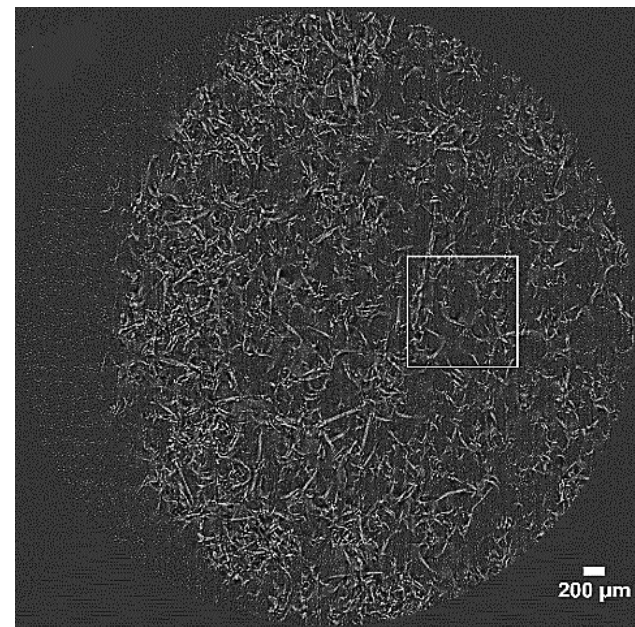
着霜 10min後



(a) $z = 100 \mu\text{m}$

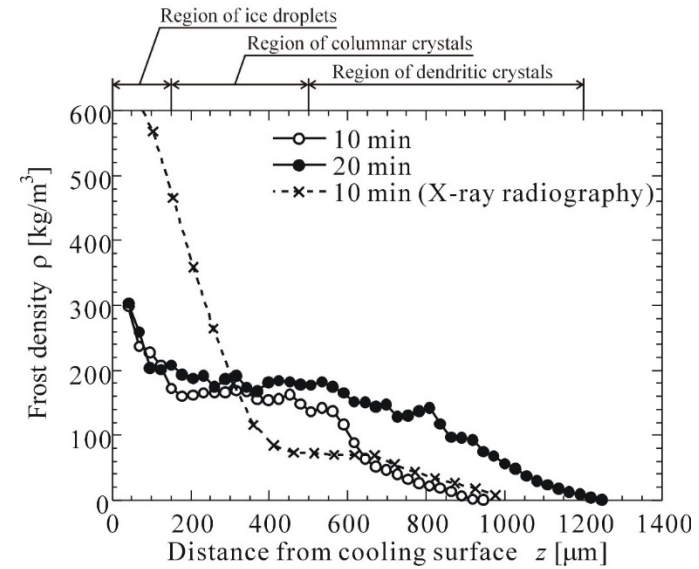
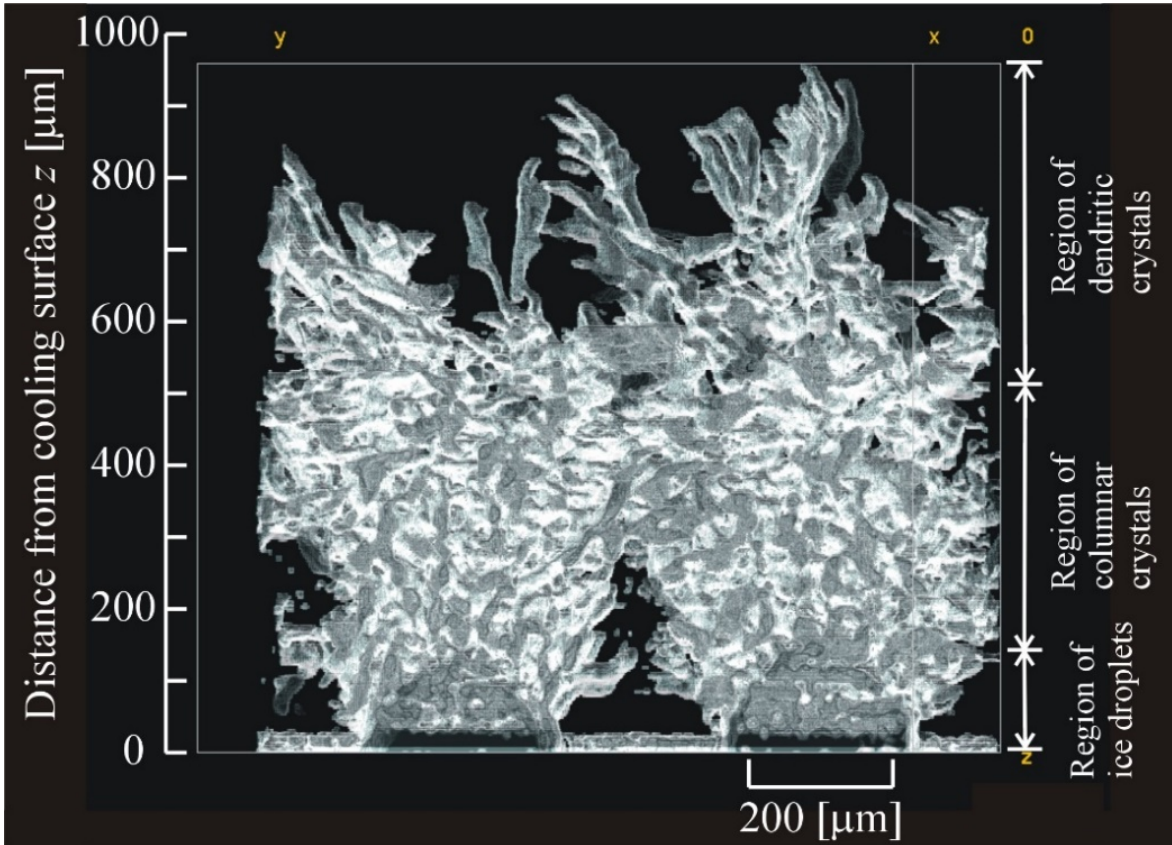


(c) $z = 400 \mu\text{m}$



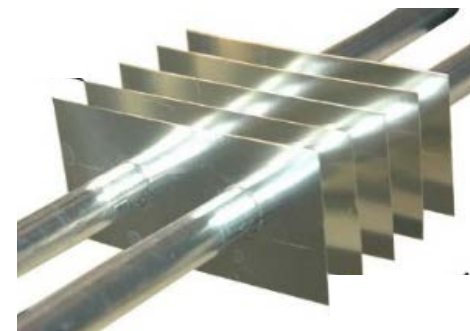
(d) $z = 600 \mu\text{m}$

霜層断面図と霜層密度分布

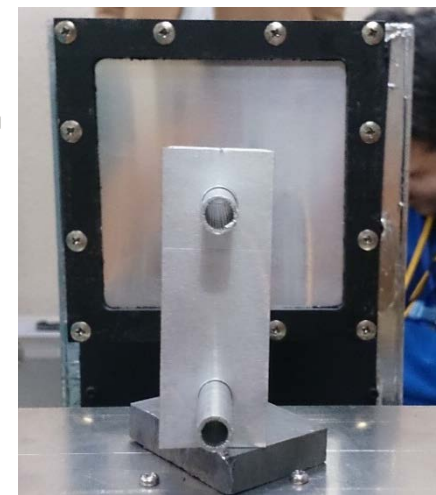
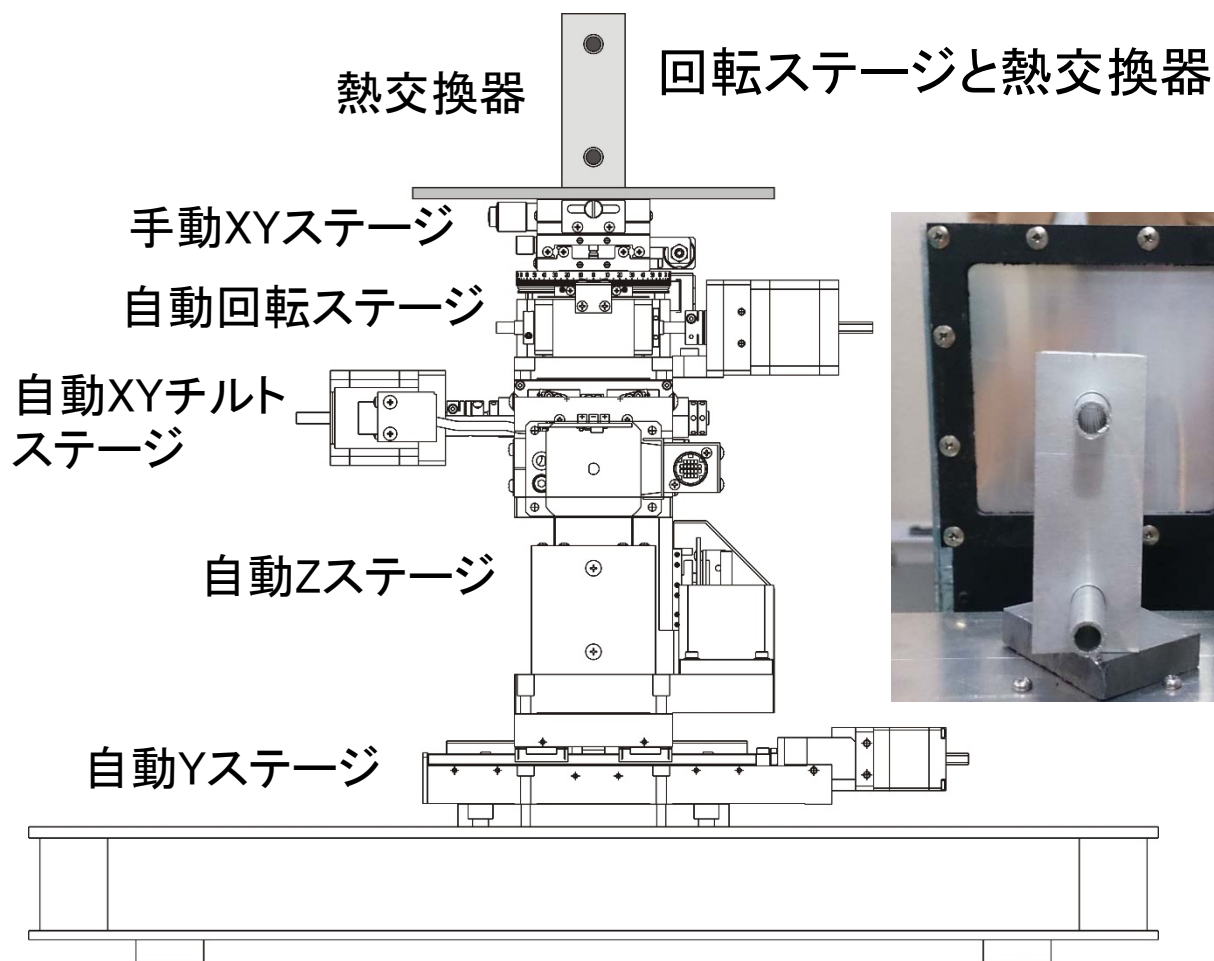


4. 熱交換器の3次元着霜量分布計測

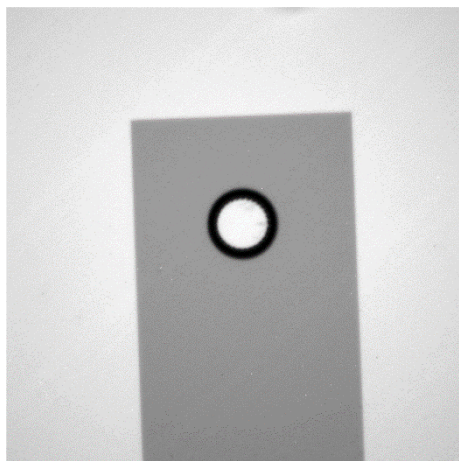
- ・ 京都大学原子炉実験所 B4照射室 新型X線照射装置
 - ・ 2016年12月16日 無着霜時の熱交換器のCT撮影
 - ・ 2017年1月24日 着霜時の熱交換器のCT撮影(予定)
- プレートフィンチューブ熱交換器での着霜分布と霜密度分布



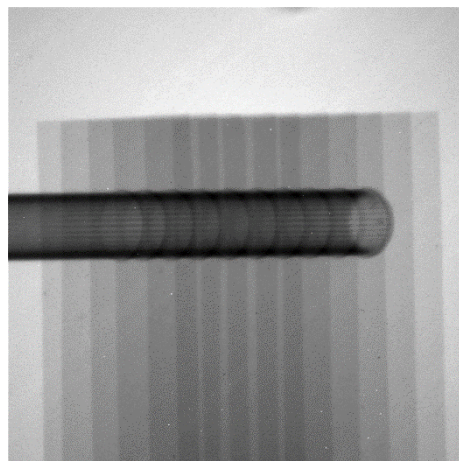
新型X線発生装置



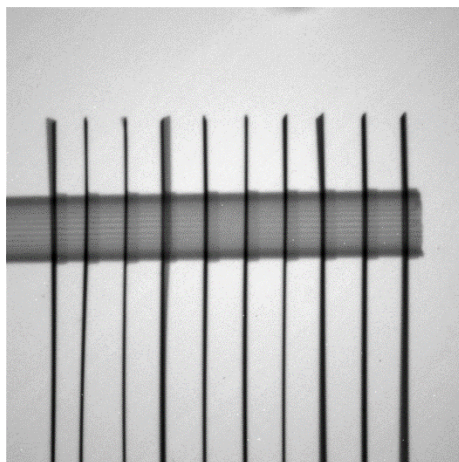
無着霜時の熱交換器のX線透過画像(0.3° 毎 600断面)と再構成
(150kV, 2.3mA, 露光時間 2.0sec)
神戸大学のCCDカメラを借用
2秒 × 600断面 = 1200秒 = 20分
⇒ X線I.I.の利用を検討



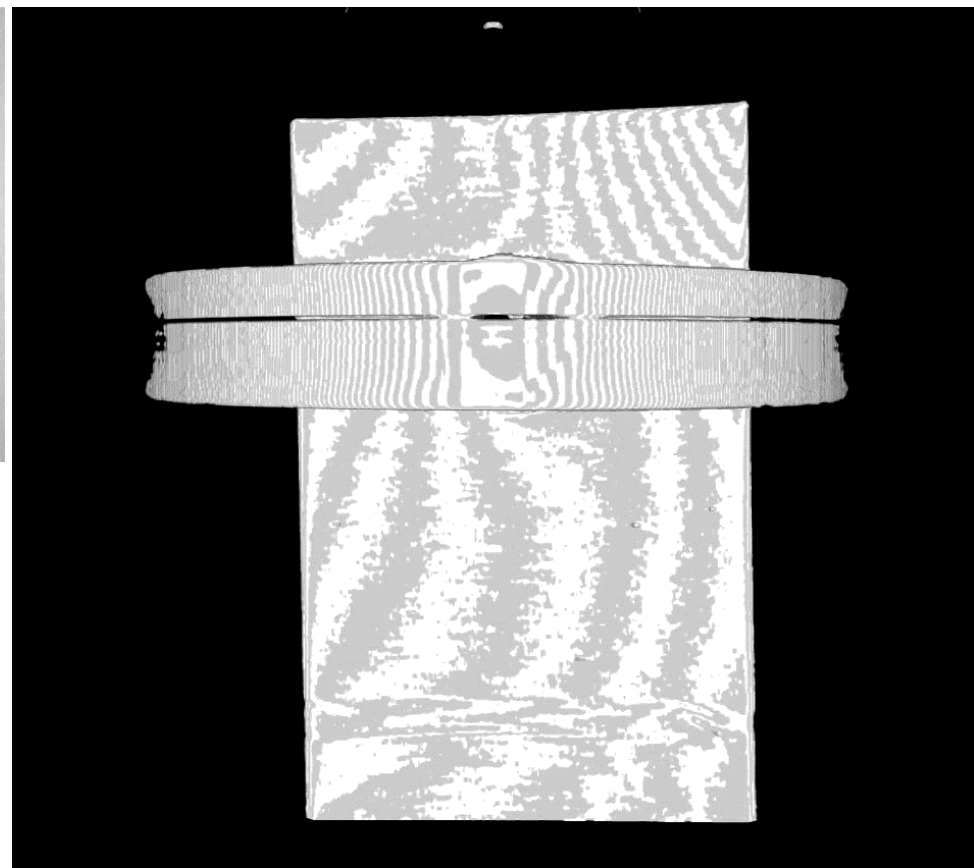
0°



45°

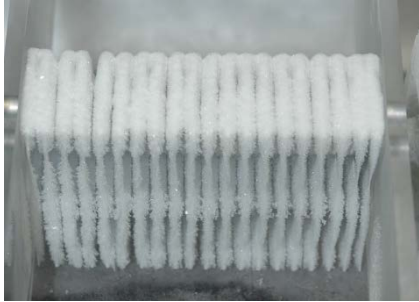


90°



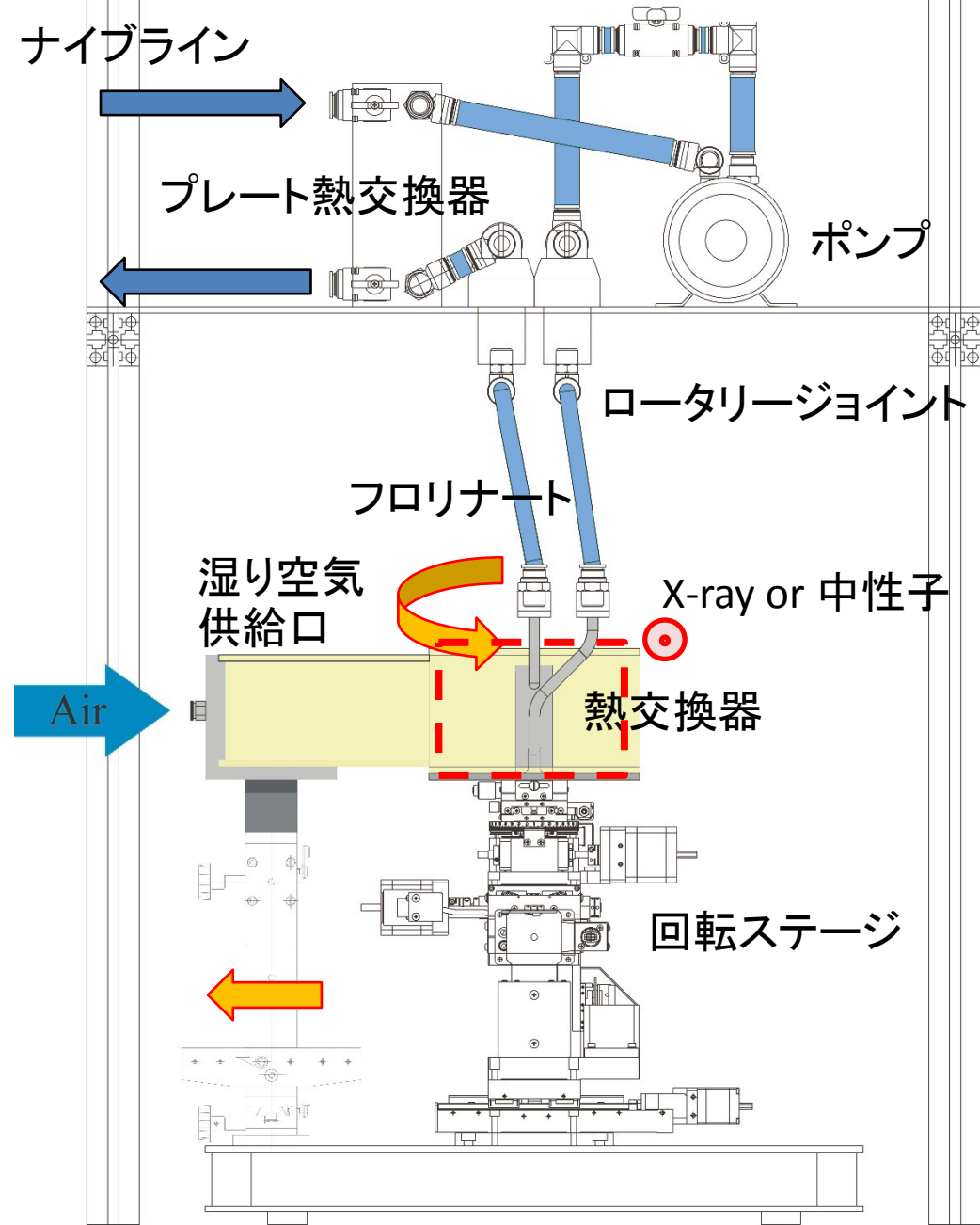
熱交換器着霜CT撮影装置

- ・着霜量分布
- ・霜層密度分布



課題

- ・600断面の撮影時間 ~2分以内
⇒ X線I.I.+ハイスピードカメラ
- ・アルミの熱交換器と霜層の透過.
ダイナミックレンジの確保.
⇒ 確認済み
- ・実験環境の低温維持
⇒ 冬場のB4照射室



まとめ

京都大学原子炉実験所にて、X線、中性子ラジオグラフィを用いて、冷却面への着霜量分布の評価、霜層の密度分布の評価を行った。

また、SPring-8 BL20B2にてX線 μ CTにより、霜層の微細構造の計測を実施した。

2016-17年度にプレートフィンチューブ熱交換器でのX線ラジオグラフィ、中性子ラジオグラフィでの3次元計測を行い、着霜分布および霜密度分布の評価を行う。