

中性子ラジオグラフィによる  
ミニチャネル熱交換器内蒸発二相流の  
熱流動特性に関する研究  
(ボイド率分布に及ぼす加熱方法の影響)

神戸大学

JAEA

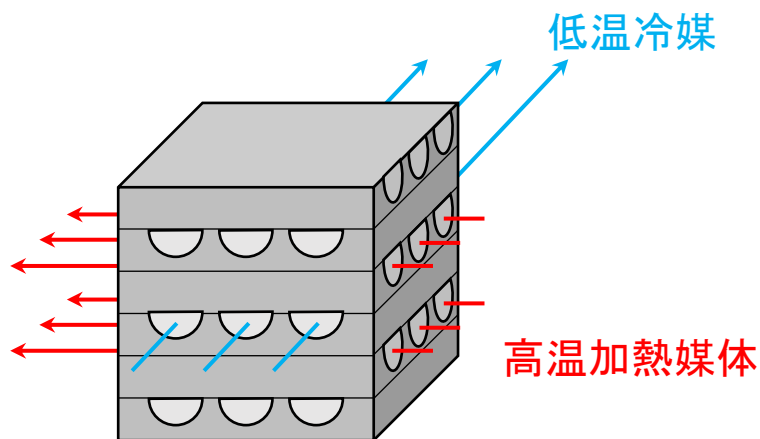
京都大学

清原圭太, 上野雄大  
杉本勝美, 村川英樹, 浅野等  
栗田圭輔, 飯倉寛  
伊藤大介, 齊藤泰司

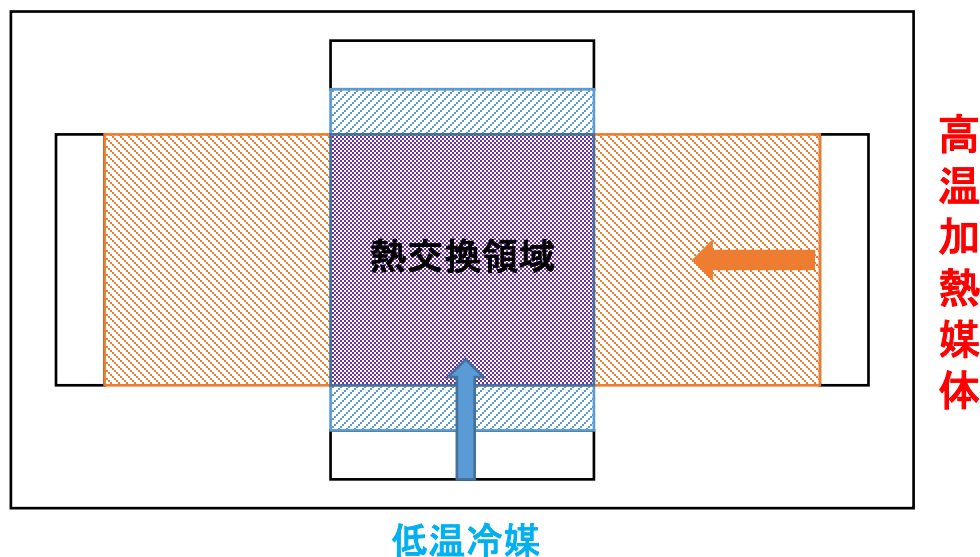
LNG気化器や水素ステーションで使用する熱交換器の高性能化,  
コンパクト化が求められている.

拡散接合熱交換器 . . . 積層した並列流路板を拡散接合で結合した熱交換器

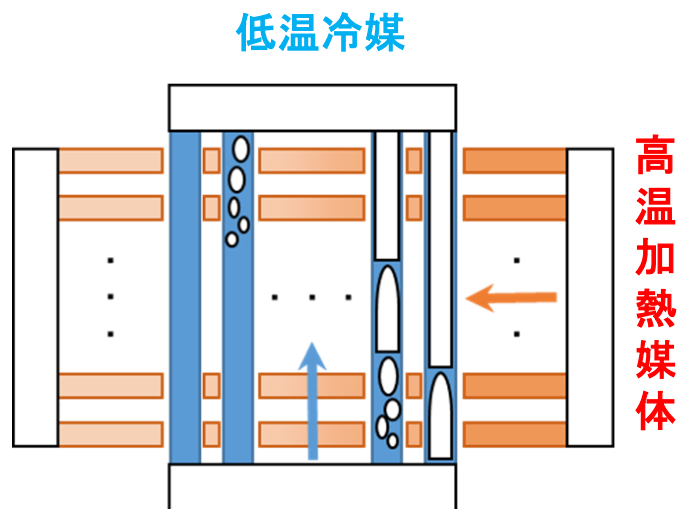
- ・ 接合部にろう剤を使用しないため、耐圧性に優れる
- ・ 伝熱面積密度が高く、放熱ロスが小さいため熱交換性能に優れる



多数の積層並列細径流路で構成  
低温冷媒と高温加熱媒体が直交



## 蒸発器として使用する場合



熱流束は加熱媒体の流動方向，温度分布に依存し，実用熱交換器では不均一になると予想される。



冷媒の相変化量に差が生じることで液が均等に流れない(偏流)が発生し，熱交換性能の劣化が懸念される

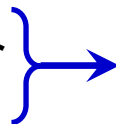


中性子ラジオグラフィにより内部流動を可視化  
冷媒流路形状が相分布に与える影響を評価する

冷媒流路と加熱媒体流路を直交配置とする場合の  
冷媒蒸発二相流の相分布

2017年度から2020年度  
2021年度

KUR B4ポート  
JRR-3 7R



ボイド率分布の計測  
リブ形状による偏流改善効果

# 流体加熱におけるボイド率分布

3

JRR-3での計測結果

冷媒質量流束 500 kg/(m<sup>2</sup>s)

加熱媒体質量流束 921 kg/(m<sup>2</sup>s)

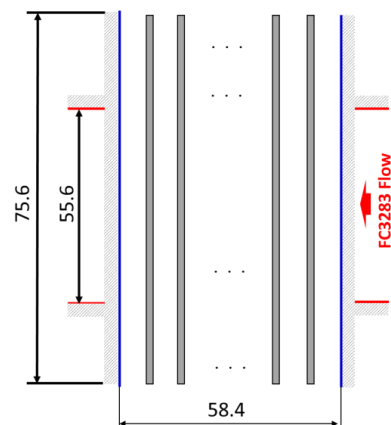
入口温度 70℃

ストレート型

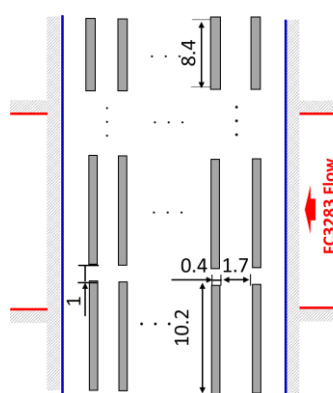
パーフォレート型A

パーフォレート型B

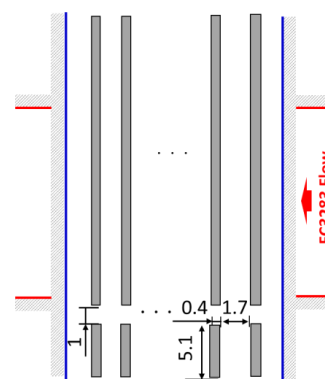
オフセット型



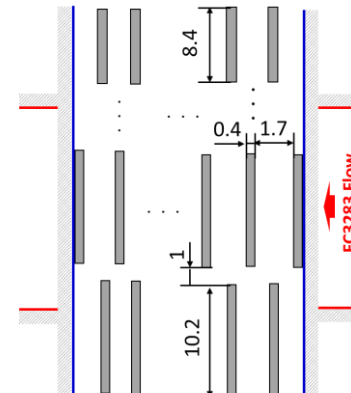
$$x_{out} = 0.044$$



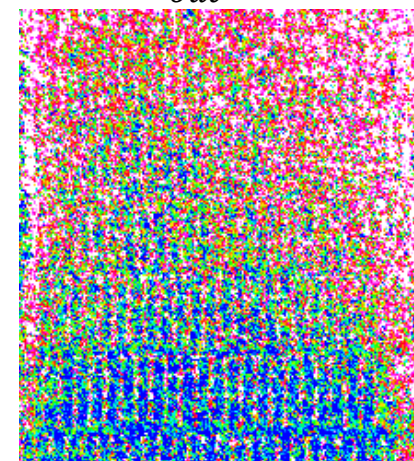
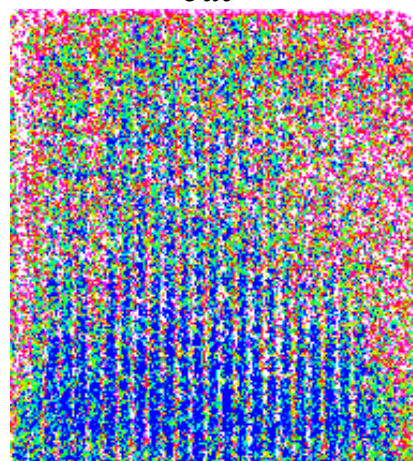
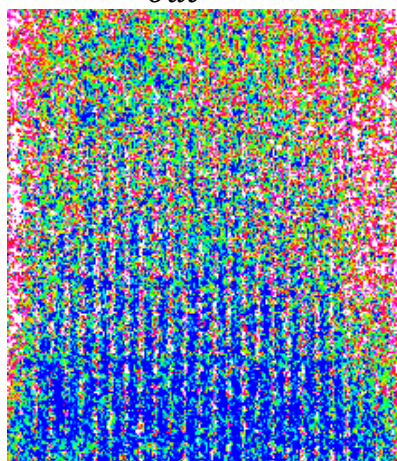
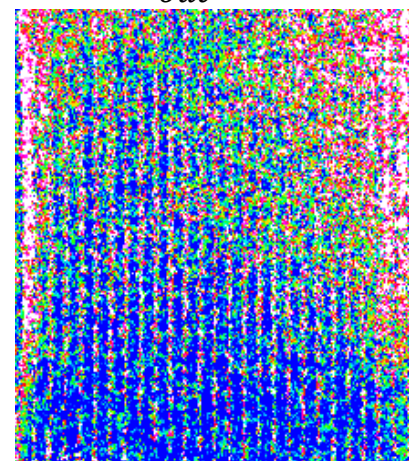
$$x_{out} = 0.05$$



$$x_{out} = 0.05$$



$$x_{out} = 0.05$$

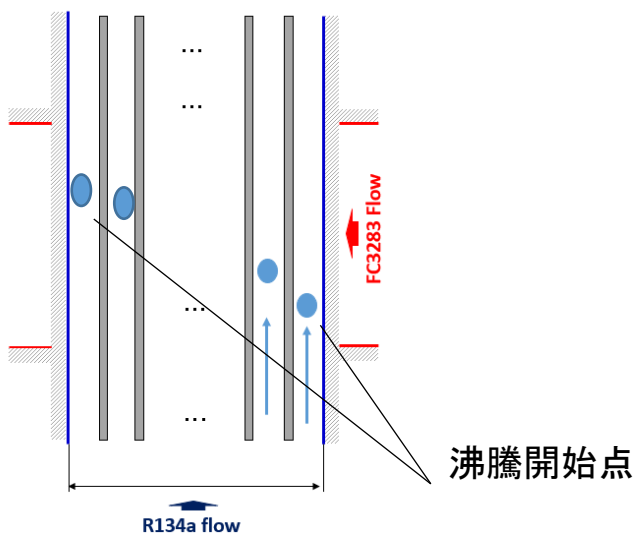


Void fraction  
1.0  
0

入口サブクール度 2K

# リブ形状が与える偏流改善効果

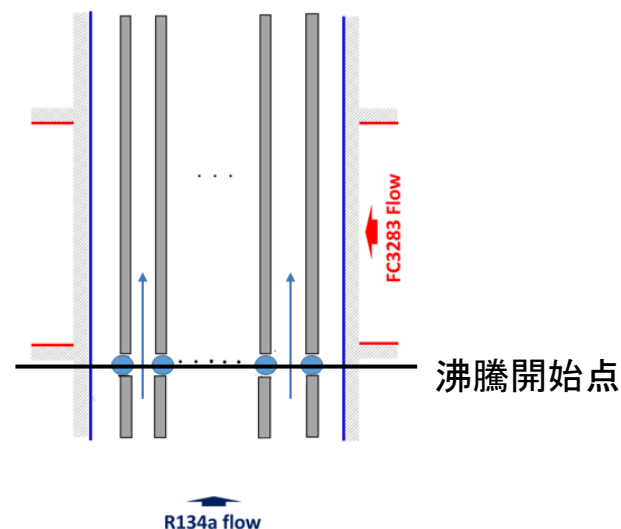
4



ストレート型

不均一な熱流束分布により冷媒流路内で  
沸騰遅れが発生し、沸騰開始点が**不均一**  
になる

➡ 偏流発生の原因



パーフォレート型B

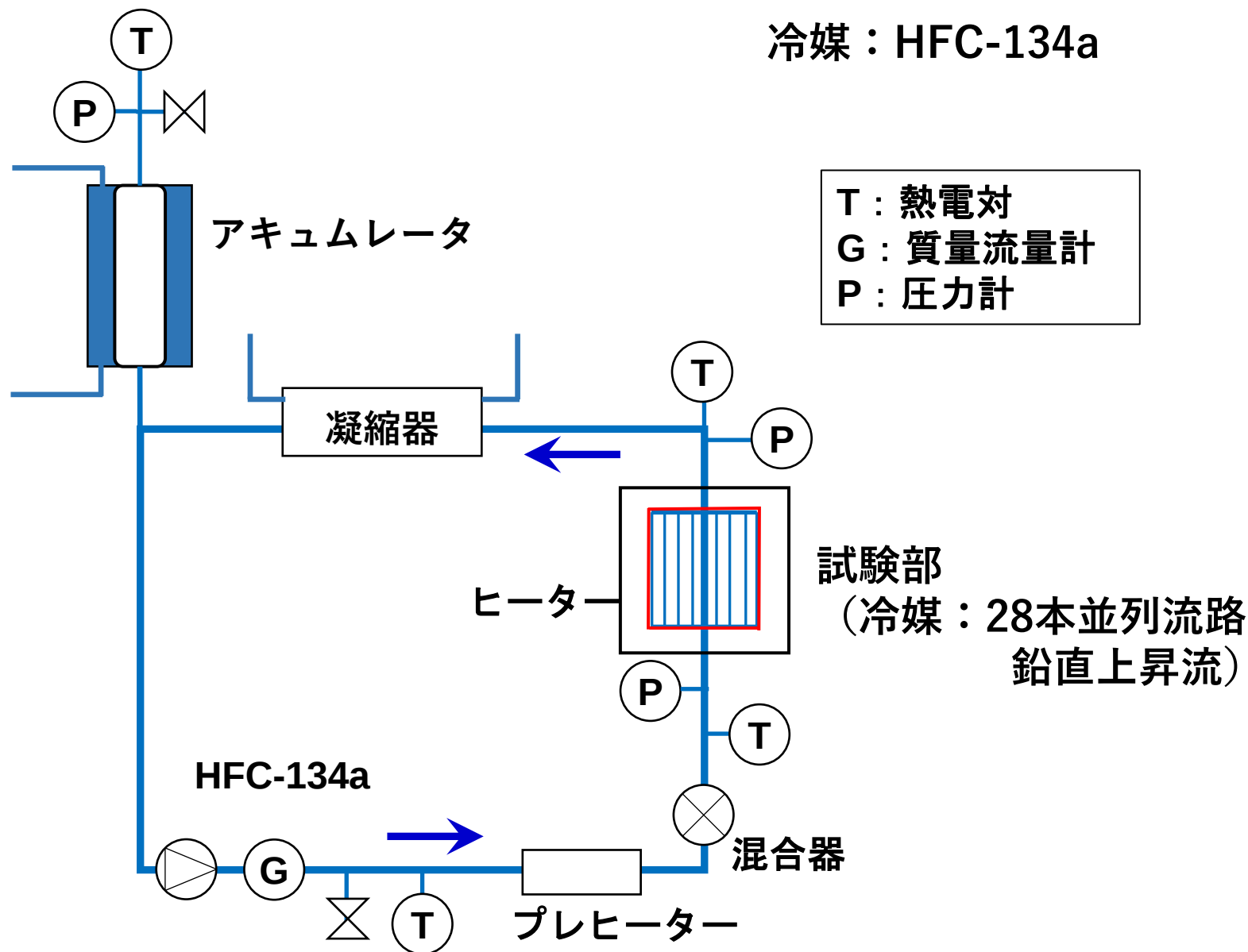
リブ分断部で液がよどみ、沸騰核生成が  
促進されると期待される。  
沸騰開始点が揃う

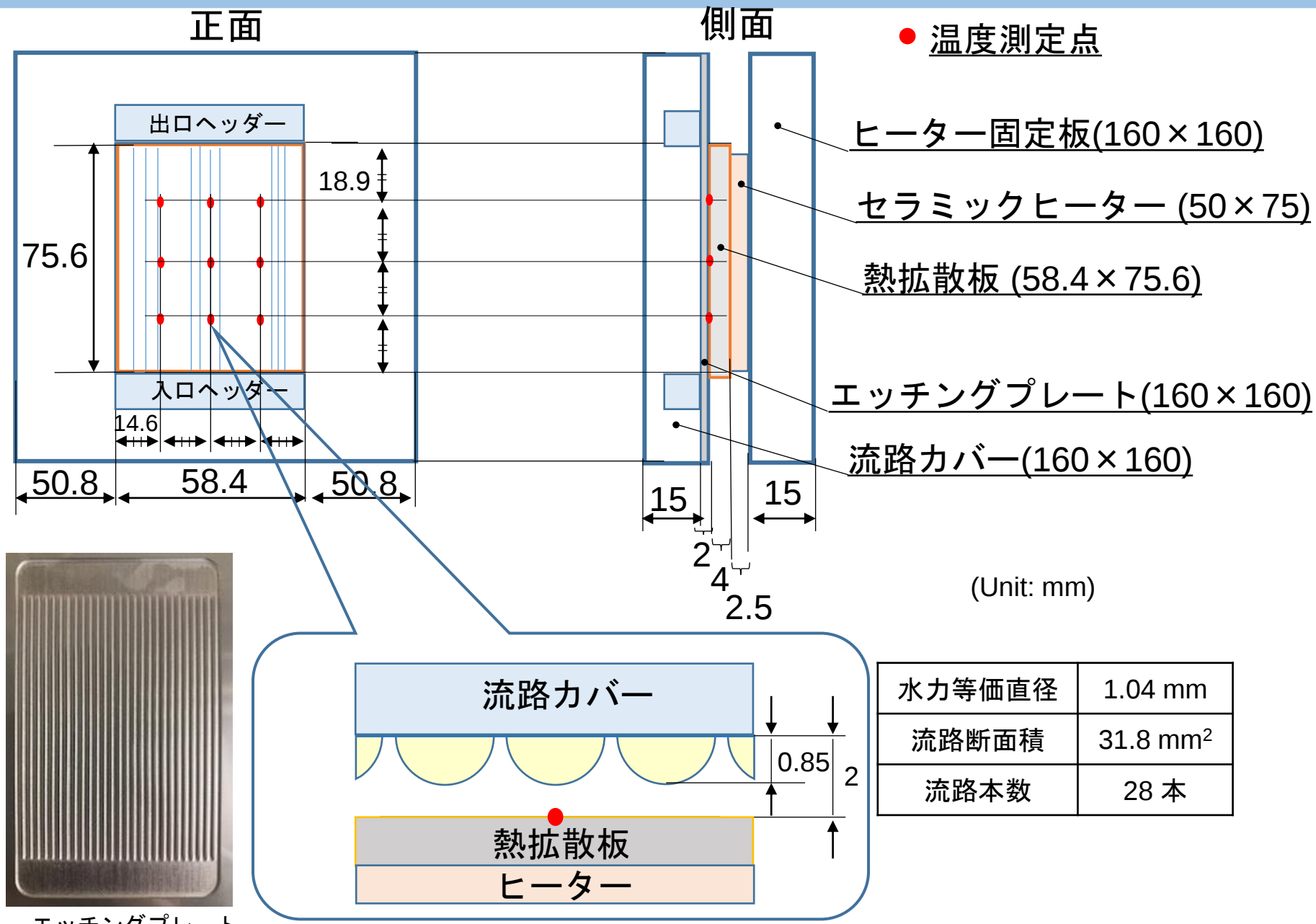
➡ 偏流の改善

沸騰開始の条件は、壁温および加熱熱流束に強く依存

ヒーターによる均一熱流束加熱で評価

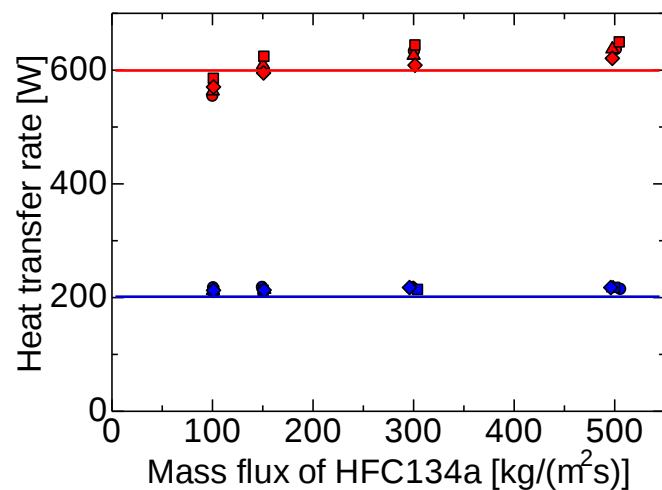
冷媒：HFC-134a





エッチングプレート

流体加熱実験の熱交換量よりヒーターの加熱量を決定



|          | FC3283質量流束 [kg/m <sup>2</sup> ·s] |      |
|----------|-----------------------------------|------|
|          | 921                               | 2947 |
| ストレート    | ●                                 | ●    |
| パーフォレートA | ▲                                 | ▲    |
| パーフォレートB | ◆                                 | ◆    |
| オフセット    | ■                                 | ■    |

流体加熱とヒーター加熱の実験条件

|      |          | 流体加熱                                            | ヒーター加熱                                     |
|------|----------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 冷媒条件 | 質量流束     | 100, 150, 300, 500 kg/(m <sup>2</sup> s)        |                                            |
|      | 入口サブクール度 | 2 K                                             |                                            |
|      | 飽和温度(圧力) | 20 °C (0.58 MPa)                                |                                            |
| 加熱条件 |          | FC3283(70°C)<br>921, 2947 kg/(m <sup>2</sup> s) | 200, 600 W<br>(45, 134 kW/m <sup>2</sup> ) |

## 撮影条件

流体加熱実験 (JRR-3, 2021)

高速度カメラ

画素数 1024 × 1024 pixel

画素寸法 161 μm

輝度階調 12 bit

フレームレート 125 fps

露光時間 1/125 s

ヒーター加熱実験 (JRR-3, 2022)

冷却型CCDカメラ

画素数 2048 × 2048 pixel

画素寸法 56 μm

輝度階調 16 bit

露光時間 8 s

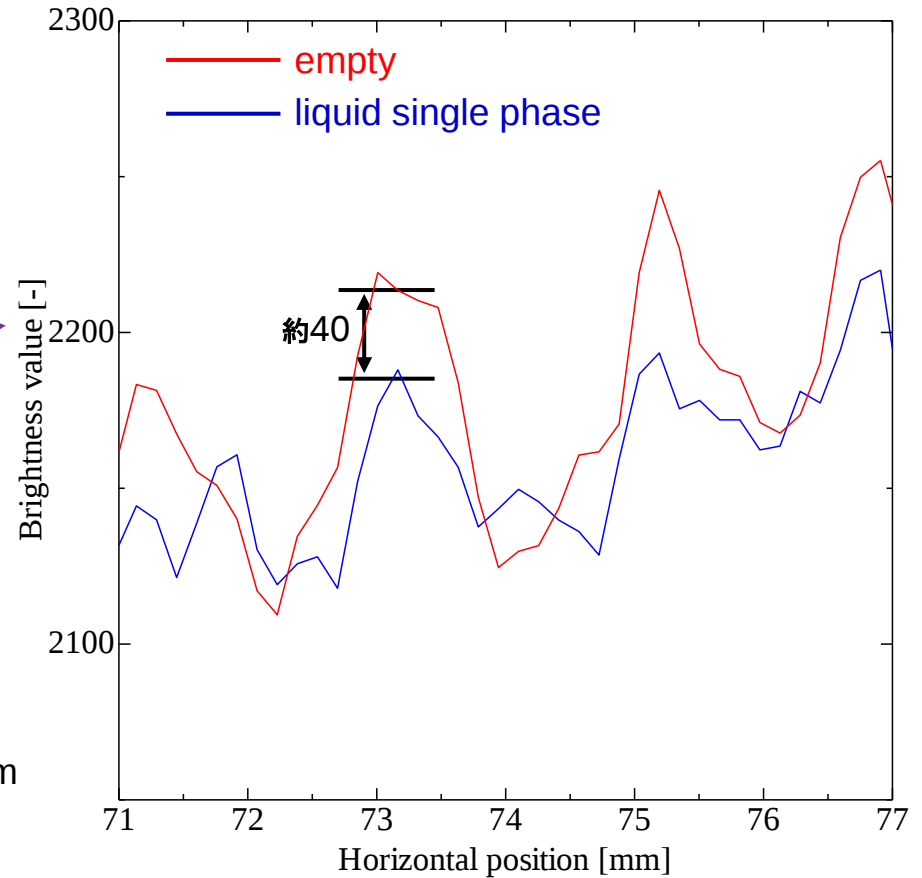
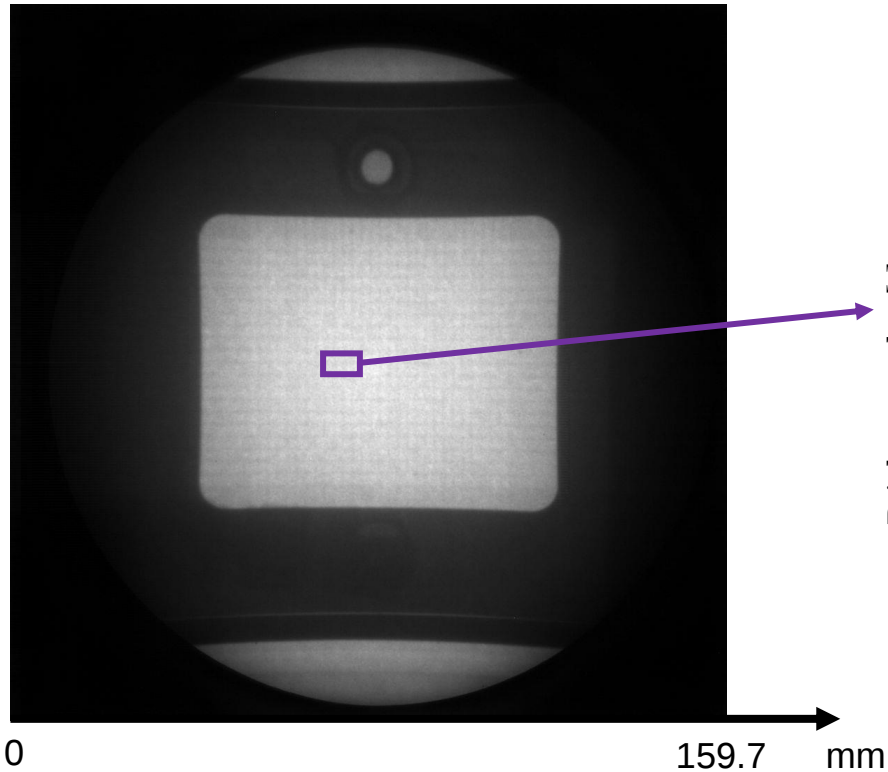
## □ 中性子線照射方向のボイド率

各画素の輝度値から、以下の式でボイド率を演算し、カラープロットすることで、ボイド率分布画像を取得

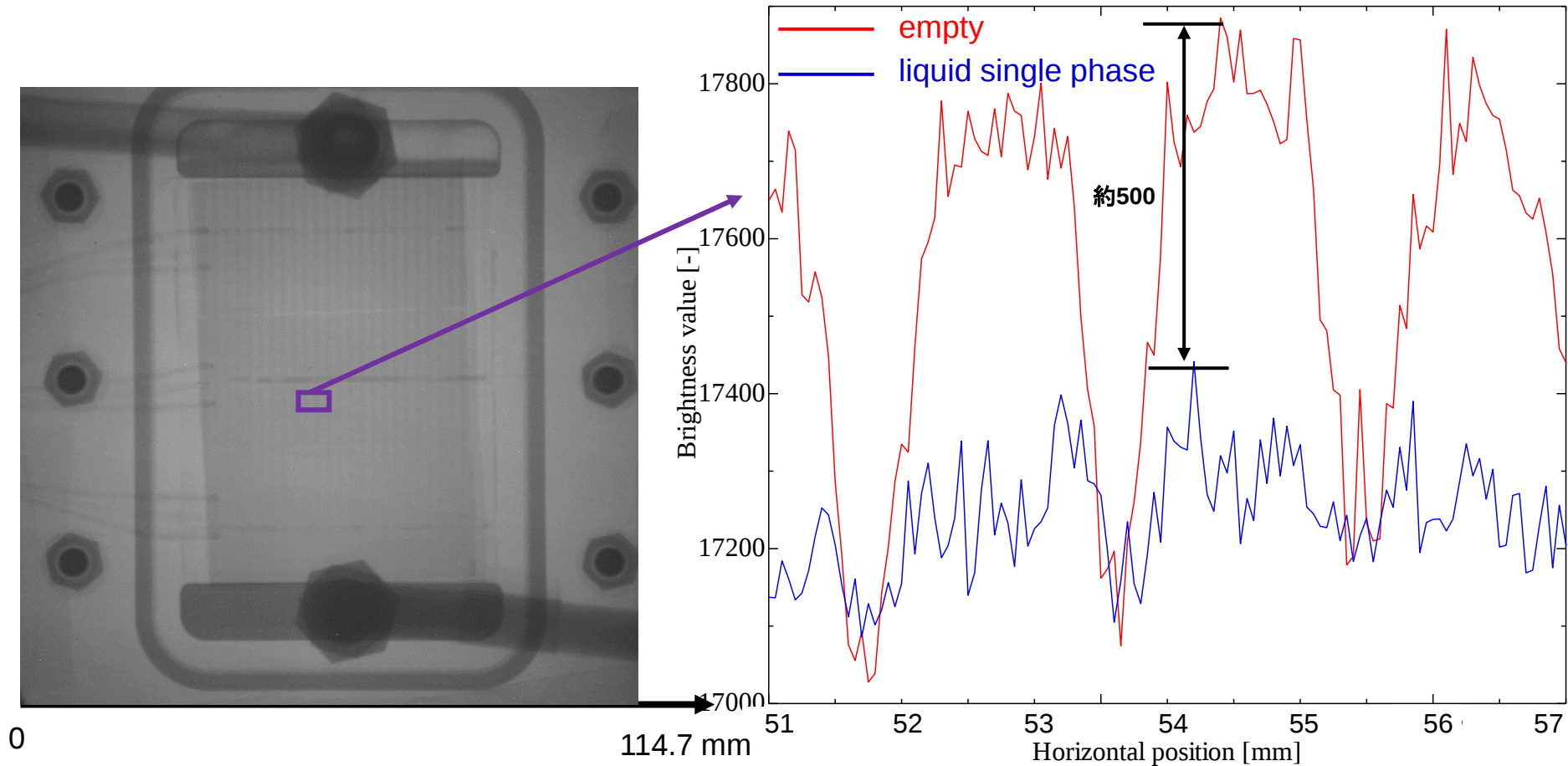
$$\alpha(x, y) = 1 - \frac{\delta_L(x, y)}{\delta_{full}(x, y)} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - 0}{S_n(x, y) - 0}\right)}{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - 0}{S_{full}(x, y) - 0}\right)}$$

$\delta$  : 物体の厚さ  
 $S$  : 輝度値

流路部分の輝度分布  
(100枚平均画像)



## 流路部分の輝度分布

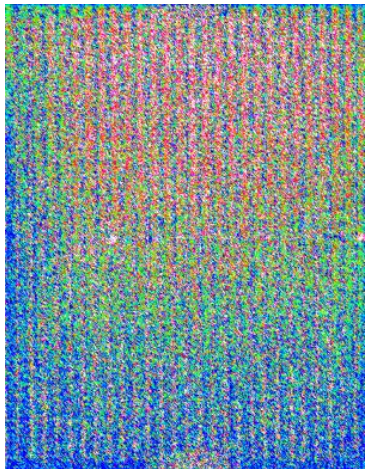


# ボイド率分布（流体加熱とヒーター加熱実験の比較）

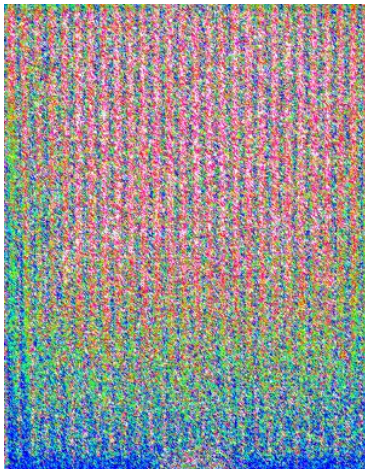
リブ形状：ストレート

冷媒質量流束 500 kg/(m<sup>2</sup>s)

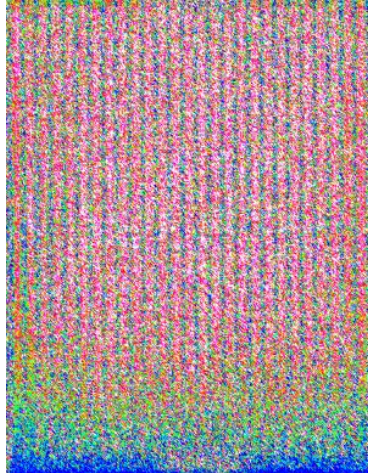
ヒーター加熱量：200W



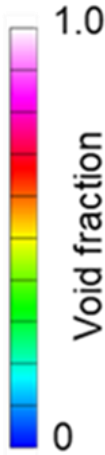
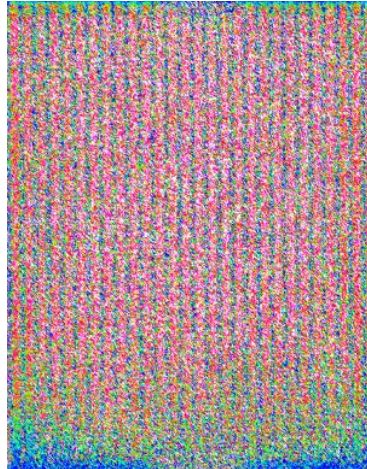
300 kg/(m<sup>2</sup>s)



150 kg/(m<sup>2</sup>s)

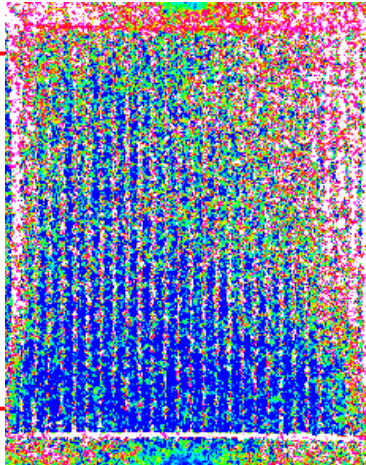


100 kg/(m<sup>2</sup>s)

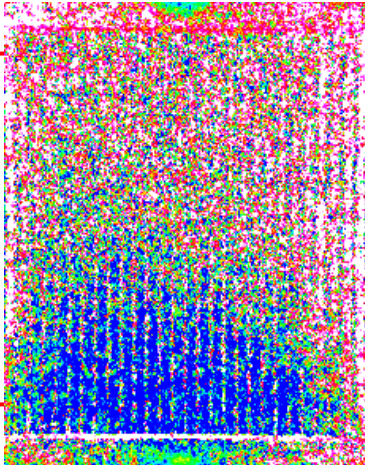


FC3283 : 921 kg/(m<sup>2</sup>s)

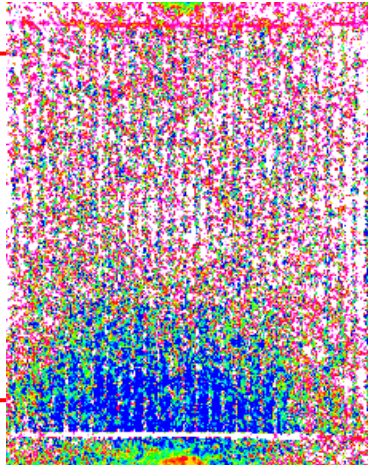
熱交換量 214W



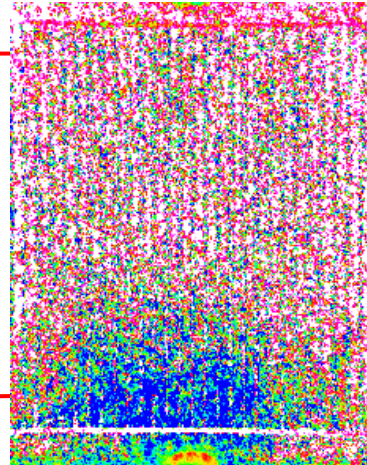
217W



217W



217W



FC3283

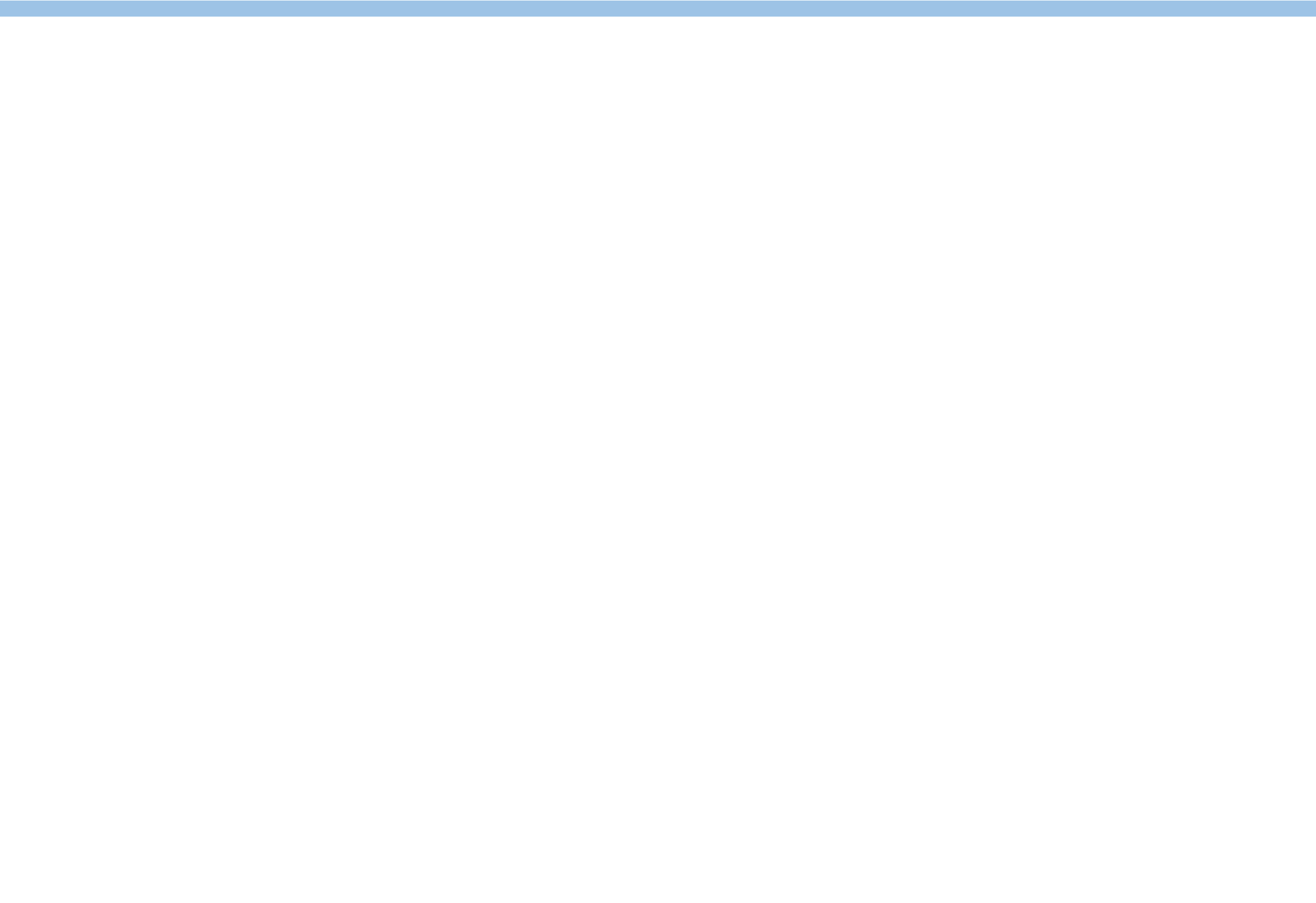
ヒーター加熱実験と流体加熱実験の結果から直交型流路が偏流に及ぼす影響を評価した

- ・ ヒーター加熱実験（等熱流束）ではボイド率分布の偏りが発生しない

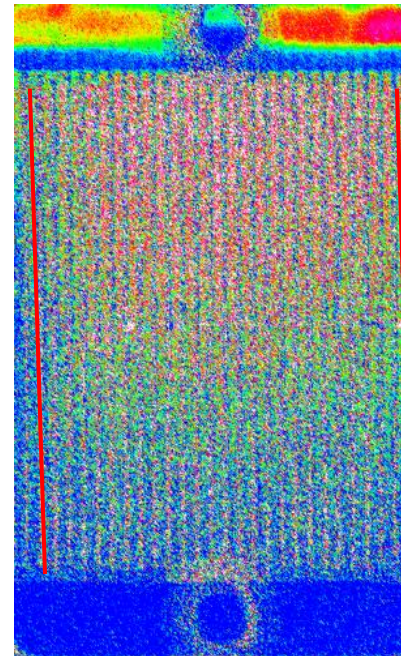
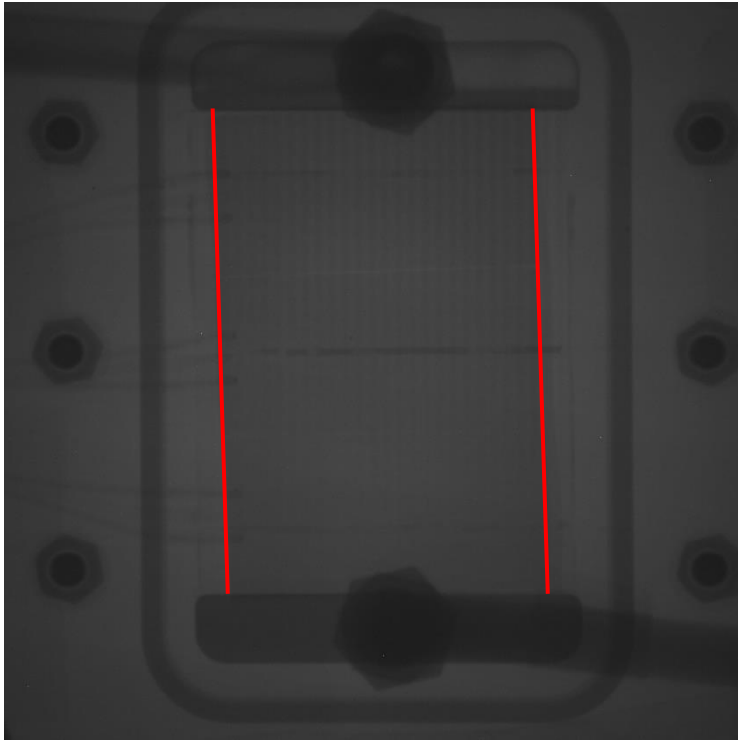
→ 沸騰開始点が同じであるため偏流が発生しない

- ・ 流体加熱実験では低クオリティ条件で偏流が発生した

→ 沸騰開始点のばらつきが原因で偏流が発生

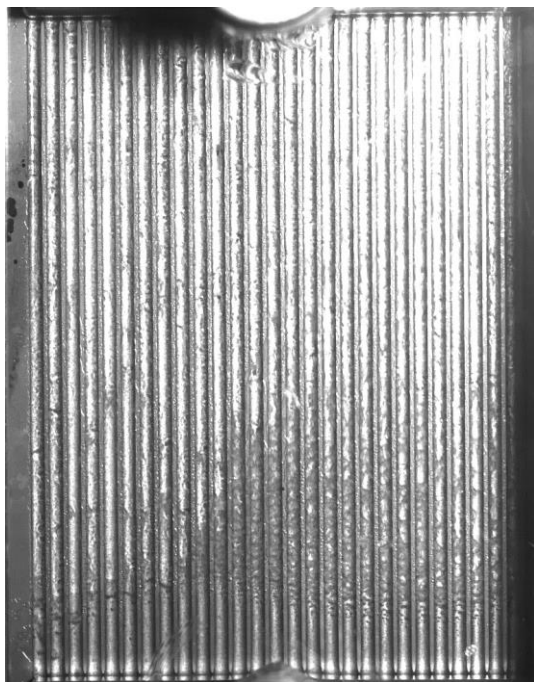


ヒーター加熱は流路左側を除きボイド率分布が均一

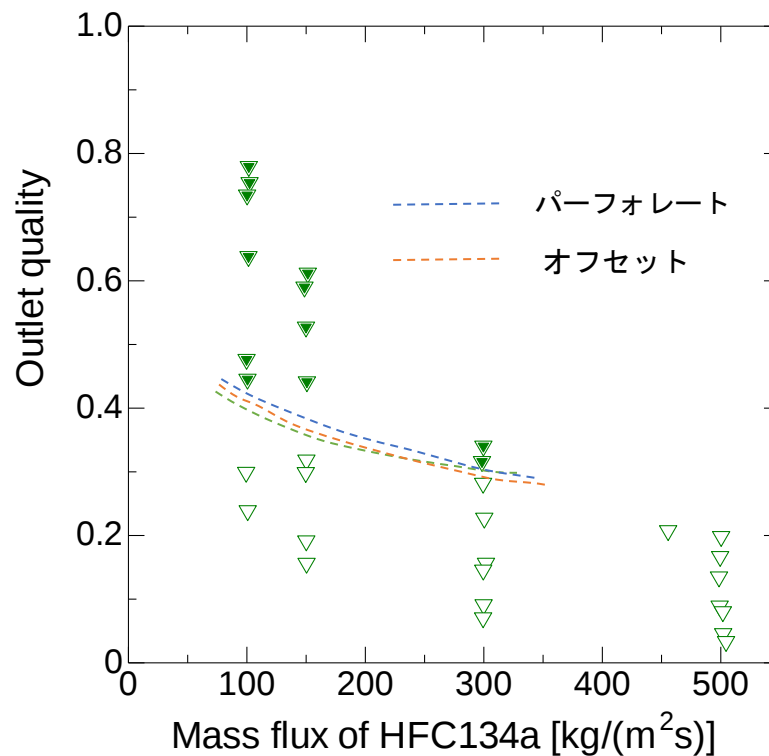


- ☑アルミ板による熱拡散が十分でなかった
- ☑ヒーターのずれがボイド率分布左側の液状態に影響がみられる

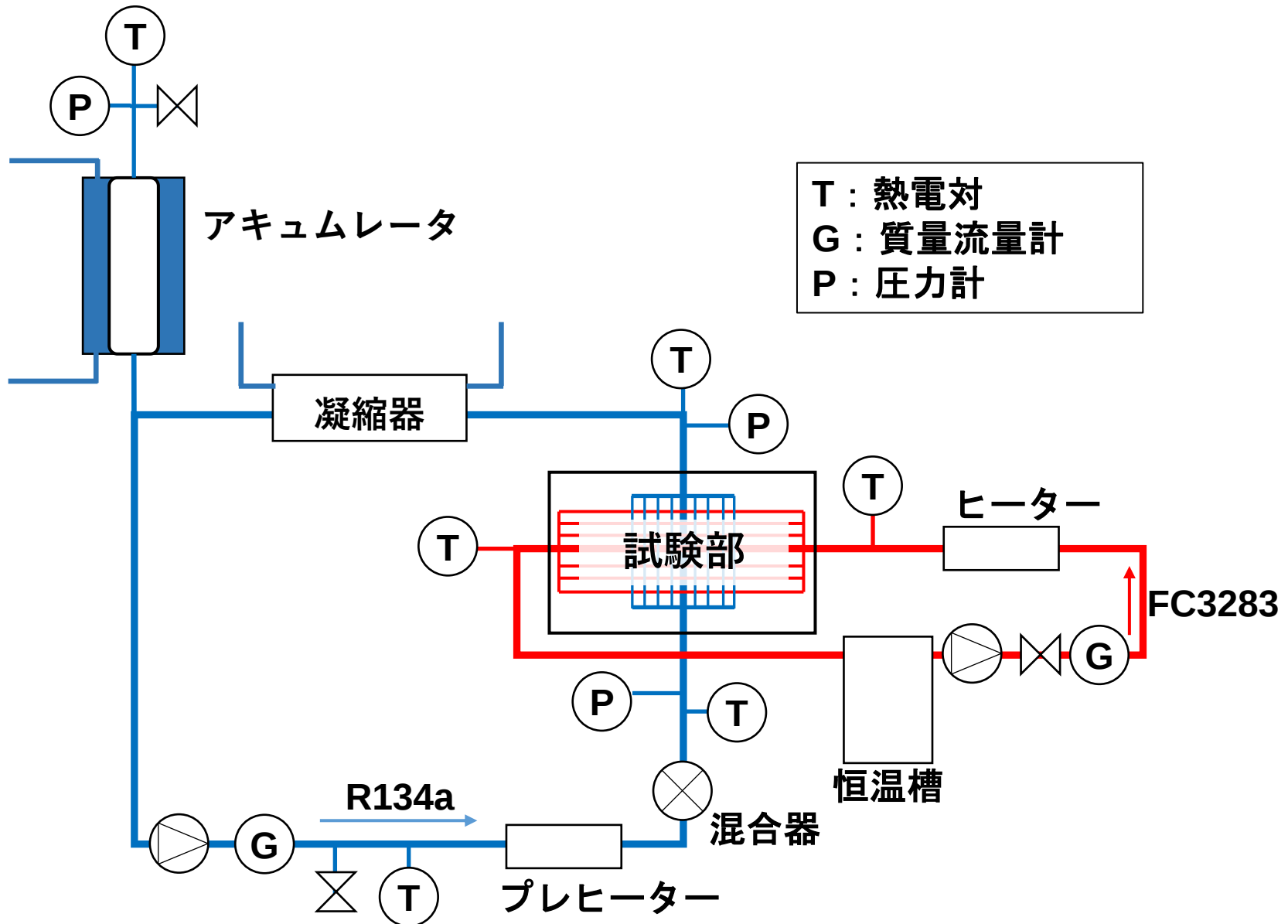
実験条件  $x_{out} = 0.780$   
加熱媒体質量流束 :  $7420 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$   
冷媒質量流束 :  $100 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

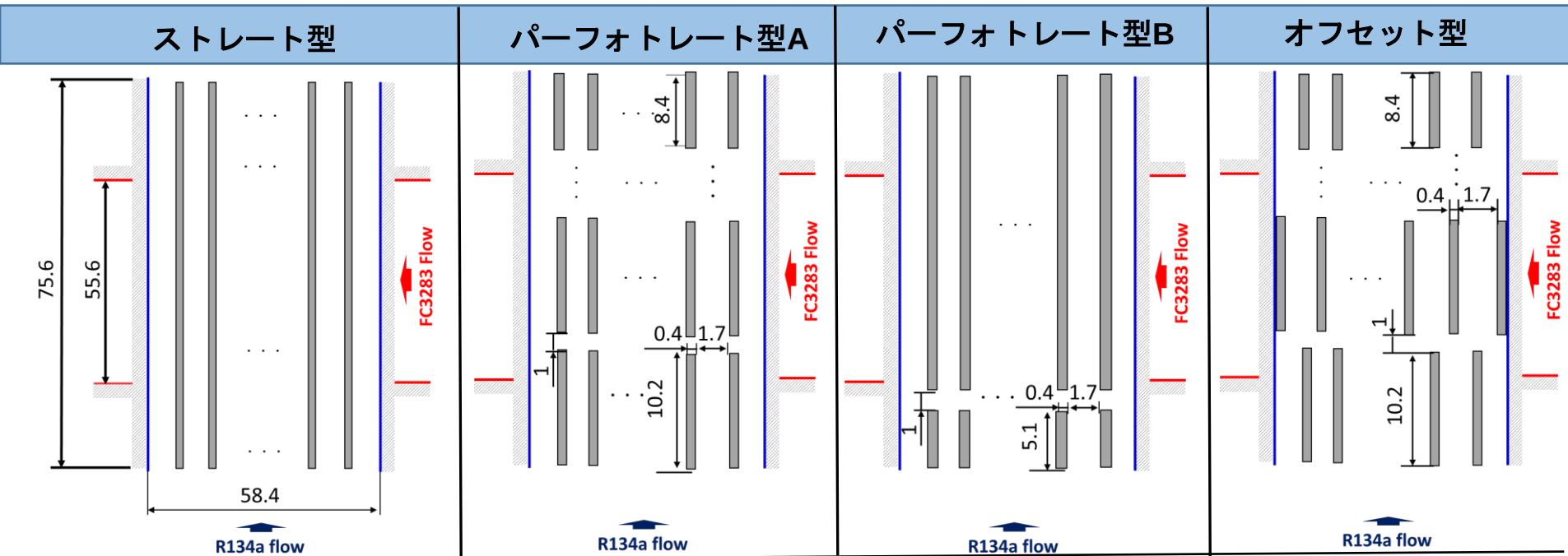


## 脈動の発生条件



脈動により高クォリティ条件では  
ボイド率分布に偏りが発生しない





冷媒流路形状が与える熱流動特性の影響の評価のため  
4パターンの冷媒流路形状を用いた

外観

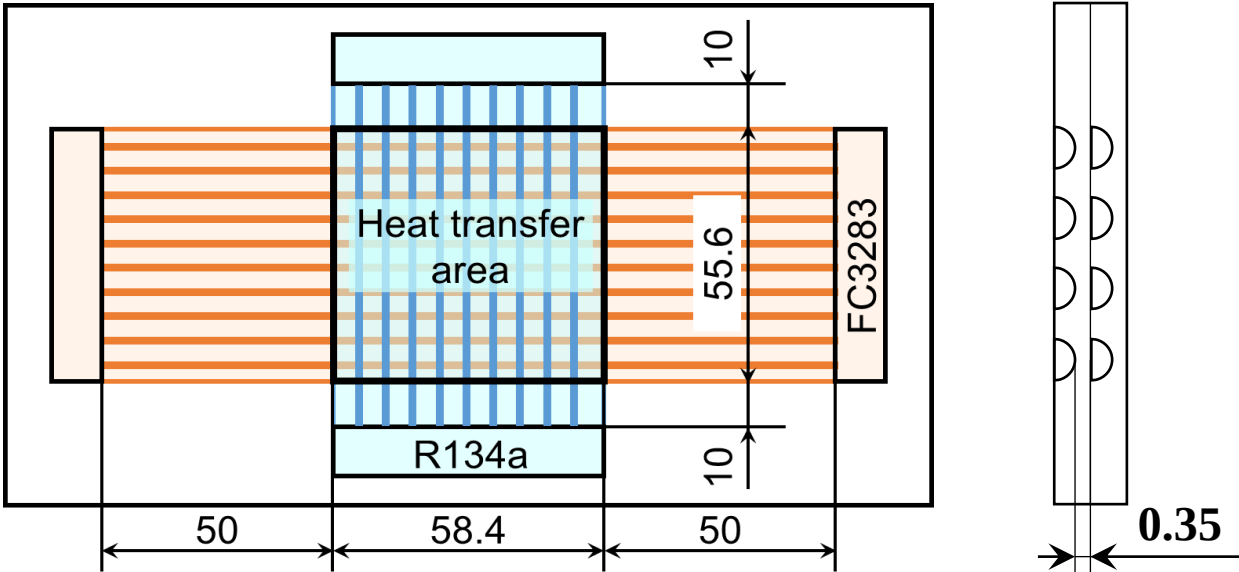


拡散接合で構成された直交流路



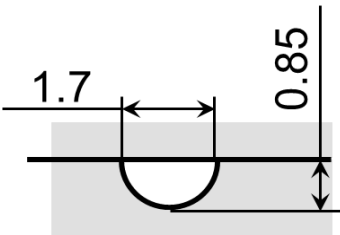
中性子照射部に切削  
(中性子線の減衰を最小限)

模式図

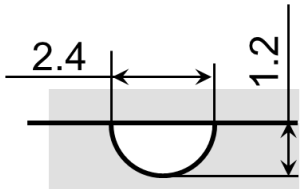


(Unit : mm)

冷媒流路

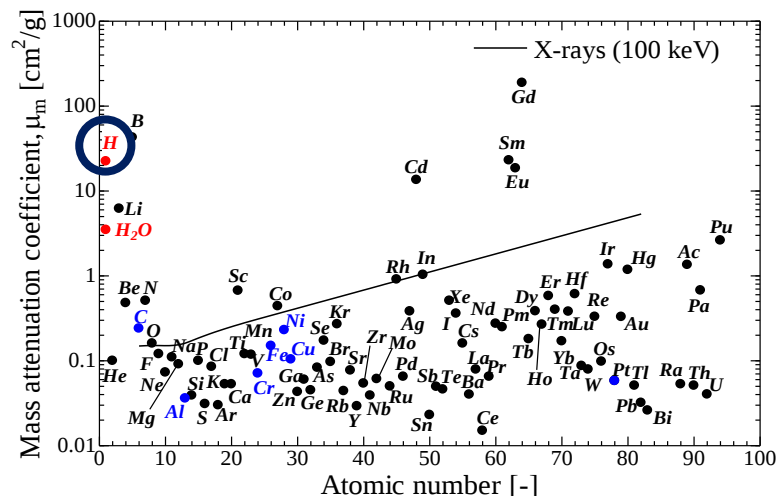


加熱媒体流路



|       |                      |       |                      |
|-------|----------------------|-------|----------------------|
| 等価直径  | 1.04 mm              | 等価直径  | 1.47 mm              |
| 流路断面積 | 31.8 mm <sup>2</sup> | 流路断面積 | 45.2 mm <sup>2</sup> |
| 流路本数  | 28 本                 | 流路本数  | 20 本                 |

中性子線の各原子への減衰率の違いから物体内部の状態を観察する手法



中性子線の質量減衰係数

水素原子 > 金属

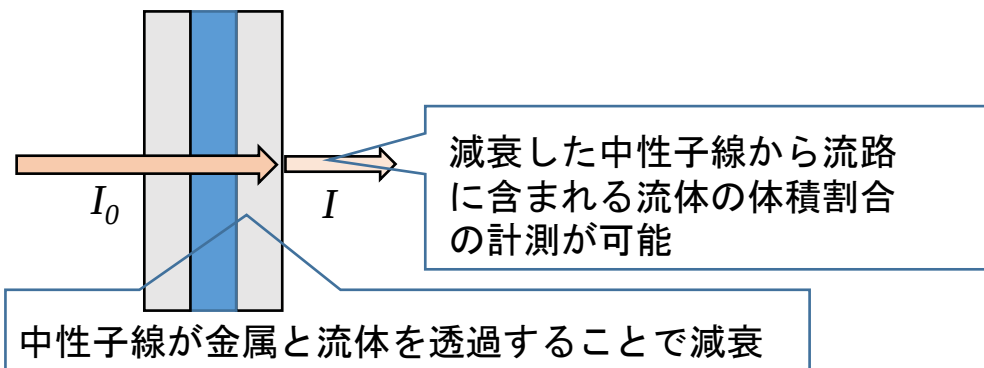
中性子線の減衰式

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

$\delta$  : 物体の厚さ

$\rho$  : 密度

$\mu_m$  : 質量減衰係数



$$S(x, y) = G \exp(-\rho \mu_m \delta) + O(x, y)$$

$\delta$  : 物体の厚さ  
 $\rho$  : 密度  
 $\mu_m$  : 質量減衰係数

✓ 液で満たされている場合

$$S_{full}(x, y) = G \exp\left(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y) - \rho_L \mu_{mL} \delta_{full}(x, y)\right) + O(x, y)$$

✓ 蒸気で満たされている場合

$$S_{empty}(x, y) = G \exp\left(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y)\right) + O(x, y)$$

✓ 気液二相流の場合

$$S_n(x, y) = G \exp\left(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x, y) - \rho_L \mu_{mL} \delta_L(x, y)\right) + O(x, y)$$

$\rho_L \gg \rho_G$  より減衰を無視

$$\delta_{full}(x, y) = \frac{1}{\rho_L \mu_{mL}}$$

$$\delta_L(x, y) = \frac{1}{\rho_L \mu_{mL}}$$

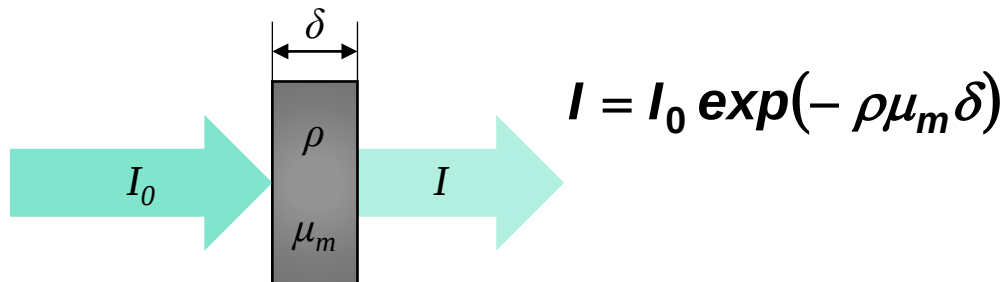
□ 中性子線照射方向のボイド率

$$\alpha(x, y) = 1 - \frac{\delta_L(x, y)}{\delta_{full}(x, y)} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_n(x, y) - O}\right)}{\ln\left(\frac{S_{empty}(x, y) - O}{S_{full}(x, y) - O}\right)}$$

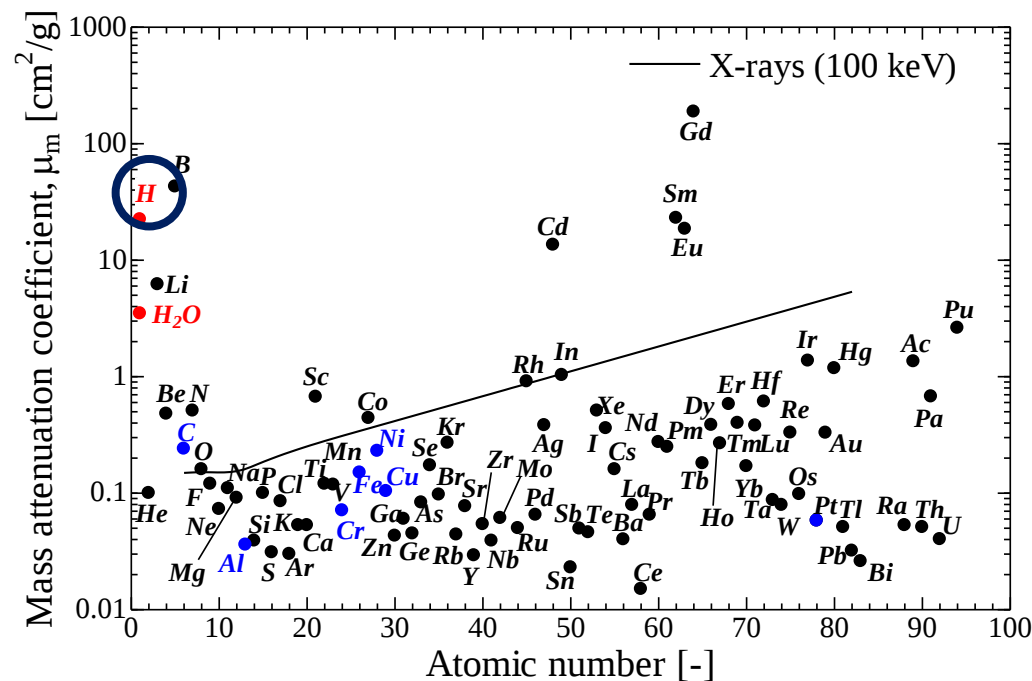
各画素の輝度値から，この方法でボイド率を演算し，  
カラープロットすることで，ボイド率分布画像を取得

中性子線の各原子への減衰率の違いから物体内部の状態を観察する手法

物体（厚さ  $\delta$ ）を透過する中性子線の減衰



$I$  : 物体を透過した線量  
 $I_0$  : 物体に入射した線量  
 $\delta$  : 物体の厚さ  
 $\rho$  : 密度  
 $\mu_m$  : 質量減衰係数



中性子線の質量減衰係数

水素原子 > 金属

金属容器内の水素原子を含む流体の可視化が可能