

H30中性子イメージング専門研究会

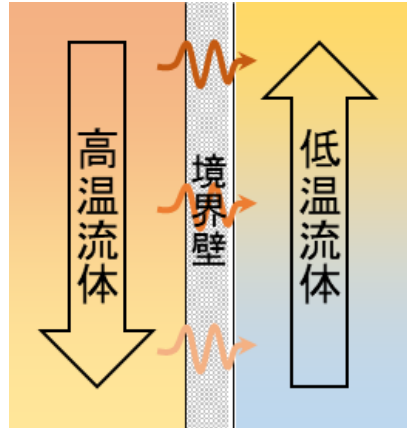
ミニチャネル熱交換器内の 沸騰二相流の可視化とボイド率分布

Visualization and Distribution of Void Fraction
of Boiling Two-Phase Flow in Mini-Channel Exchanger

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻
守安 亮祐, 浅野 等, 杉本 勝美, 村川 英樹

神戸製鋼所
久保 洋平, 福谷和久

熱交換器



産業用: ボイラー
一般用: 電子機器,
エアコン,
ラジエータ

様々な分野で使用

要求項目

- ✓ コンパクト化
- ✓ 熱交換温度差の縮小
- ✓ 熱交換量の増大

伝熱面積密度の増大(単位体積あたりの伝熱面積の増大)



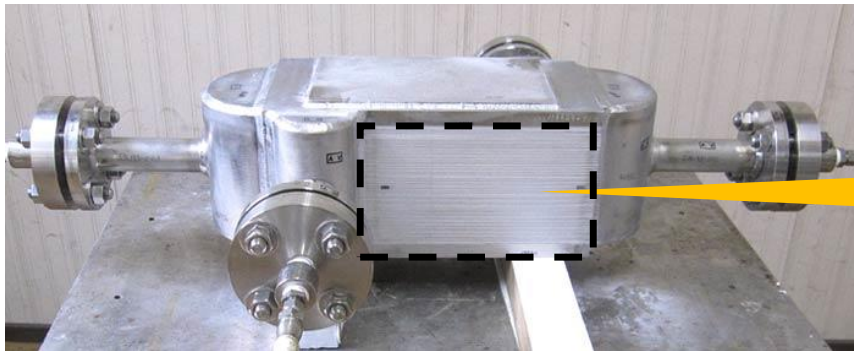
流路の細径化が有効



圧力損失の増大に繋がるため、流路長さを短くし、
多数の並行流路で構成する必要がある

マイクロチャネル熱交換器

拡散接合マイクロチャネル熱交換器



参考:
<http://www.kobelco.co.jp/products/ecmachinery/dche/overview.html>

- ✓ 高耐圧性
 - ✓ コンパクト性
- 水素ステーションの冷却器に利用されている

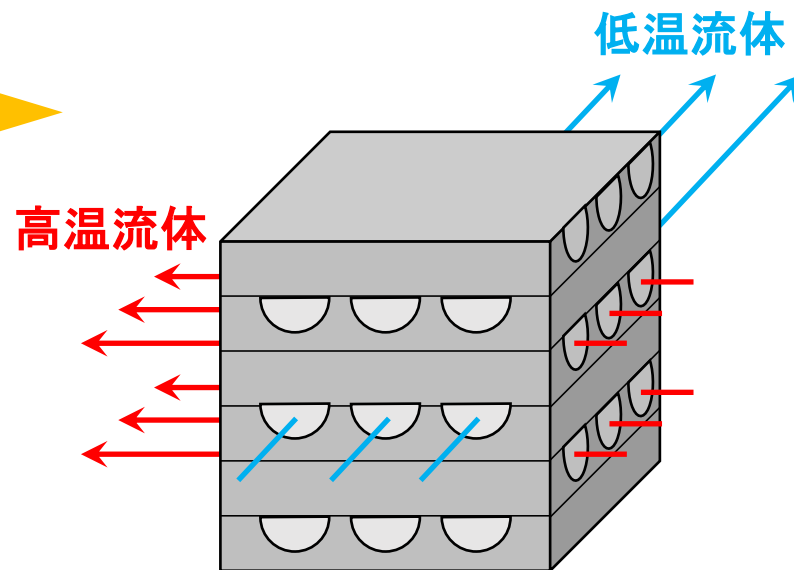
多数の並行流路で構成されるため、
流路分配が問題となる



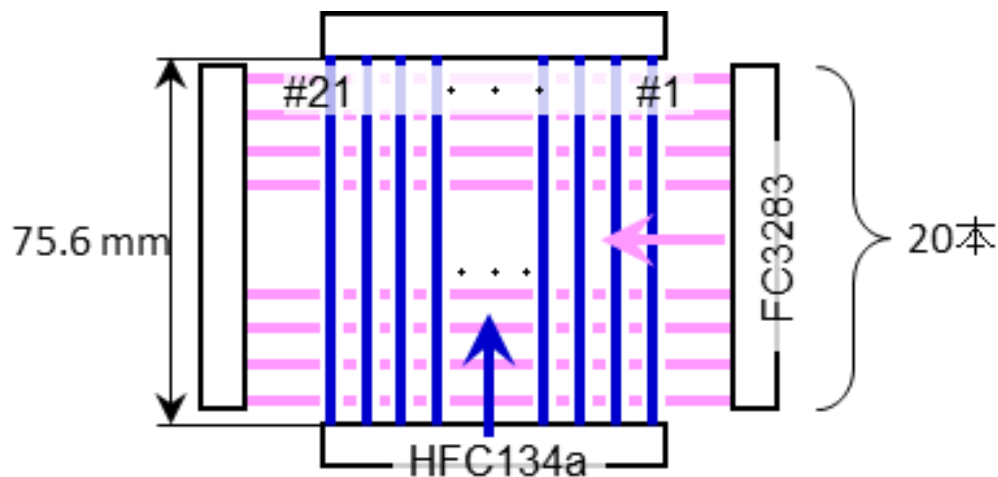
蒸発器では、冷媒の相変化によって流動形態が大きく変化するので、冷媒の不均一分配が発生しやすく、大きな性能劣化をもたらす恐れがある。

内部構造

高温側と低温側の流路が直交



熱交換器内流路構造



加熱媒体は熱交換により温度低下

冷媒が飽和温度一定とすると、加熱媒体の温度低下により、局所熱流束は低下。

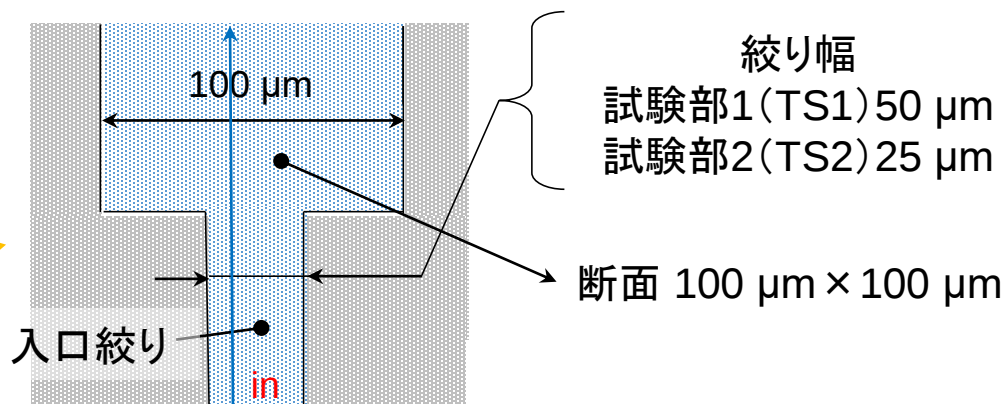
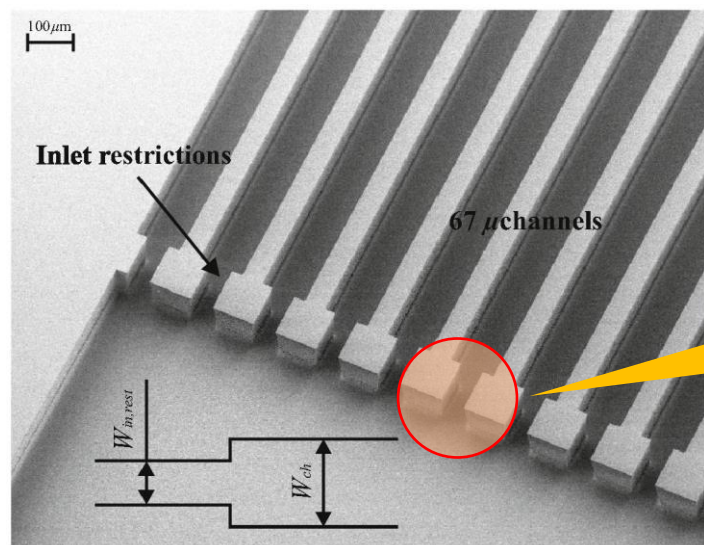
熱流束の変化により、二相流の流動挙動が変化し、不均一分配を助長させる恐れがある。

流路入口への絞りの効果 (Huang and Thome)

4

多数のマイクロチャネルをもつコールドプレートにおいて**等熱流束加熱**による沸騰熱伝達実験を行い、冷媒の種類と圧力損失との関係进行评估

作動流体でR236faを用いた実験では、入口に絞りを設けた流路を2種類使用し、圧力損失に対する絞り幅の影響进行评估している



流路本数: 67 本

流路長さ: 10 mm

熱流束: 20 ~ 60 W/cm²

H. Huang and J. R. Thome, "An experimental study on flow boiling pressure drop in multi-microchannel evaporators with different refrigerants", Experimental Thermal and Fluid Science, . 80 (2017), pp.391-407

研究目的

ミニチャネル直交型蒸発器内の熱流動特性の把握

研究内容

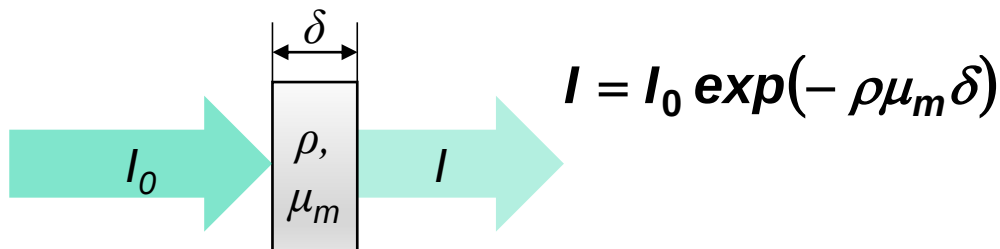
- 単層のミニチャネル直交型蒸発器を対象とし、
冷媒沸騰流を中性子ラジオグラフィで可視化
⇒ ボイド率計測
- 冷媒および加熱媒体の流動条件，冷媒流路形状の
ボイド率分布に及ぼす影響を評価

中性子ラジオグラフィによる冷媒流動の可視化

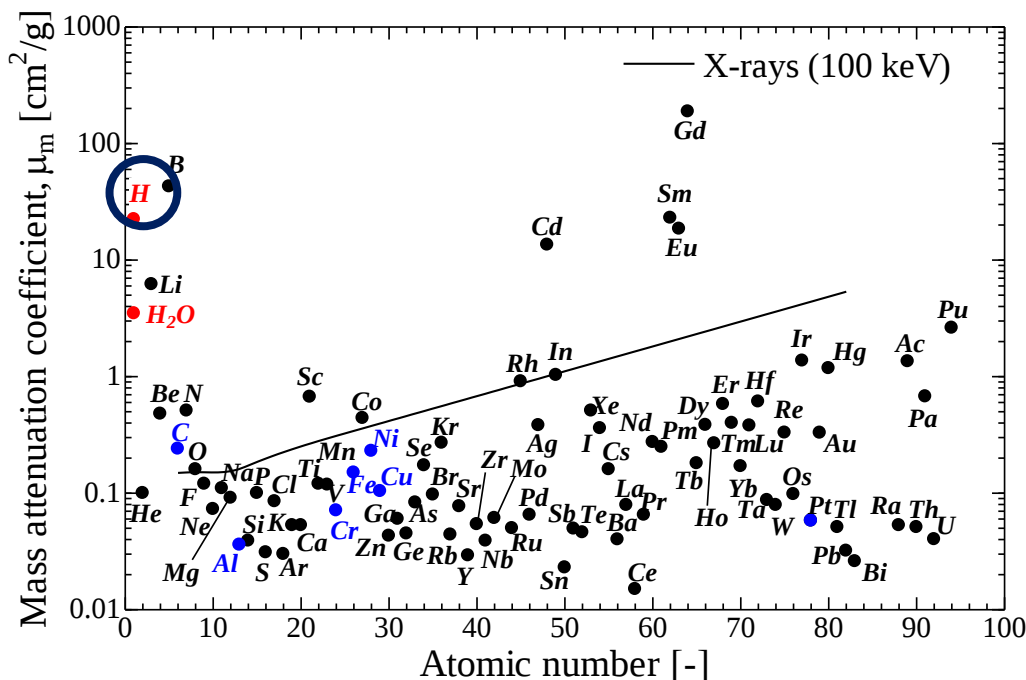
6

中性子ラジオグラフィは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である。

物体(厚さ δ)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
 δ : 物体の厚さ
 ρ : 密度
 μ_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
流体の可視化に適している

中性子ラジオグラフィによるボイド率計測

7

□ 中性子線の減衰 $I = I_0 \exp(-\rho\mu_m\delta)$

□ 画像輝度

$$S(x, y) = G'(x, y) \cdot I(x, y) + O(x, y)$$

✓ 気液二相流の場合

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

容器での減衰

液での減衰

$\rho_L \gg \rho_G$ より蒸気での減衰を無視

✓ 液で満たされている場合

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

流路の厚さ

✓ 蒸気で満たされている場合

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

□ ボイド率

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

S : 輝度

G : ゲイン

O : オフセット

添え字

w : 容器

n : 二相流

L : 液相

Full : 満液

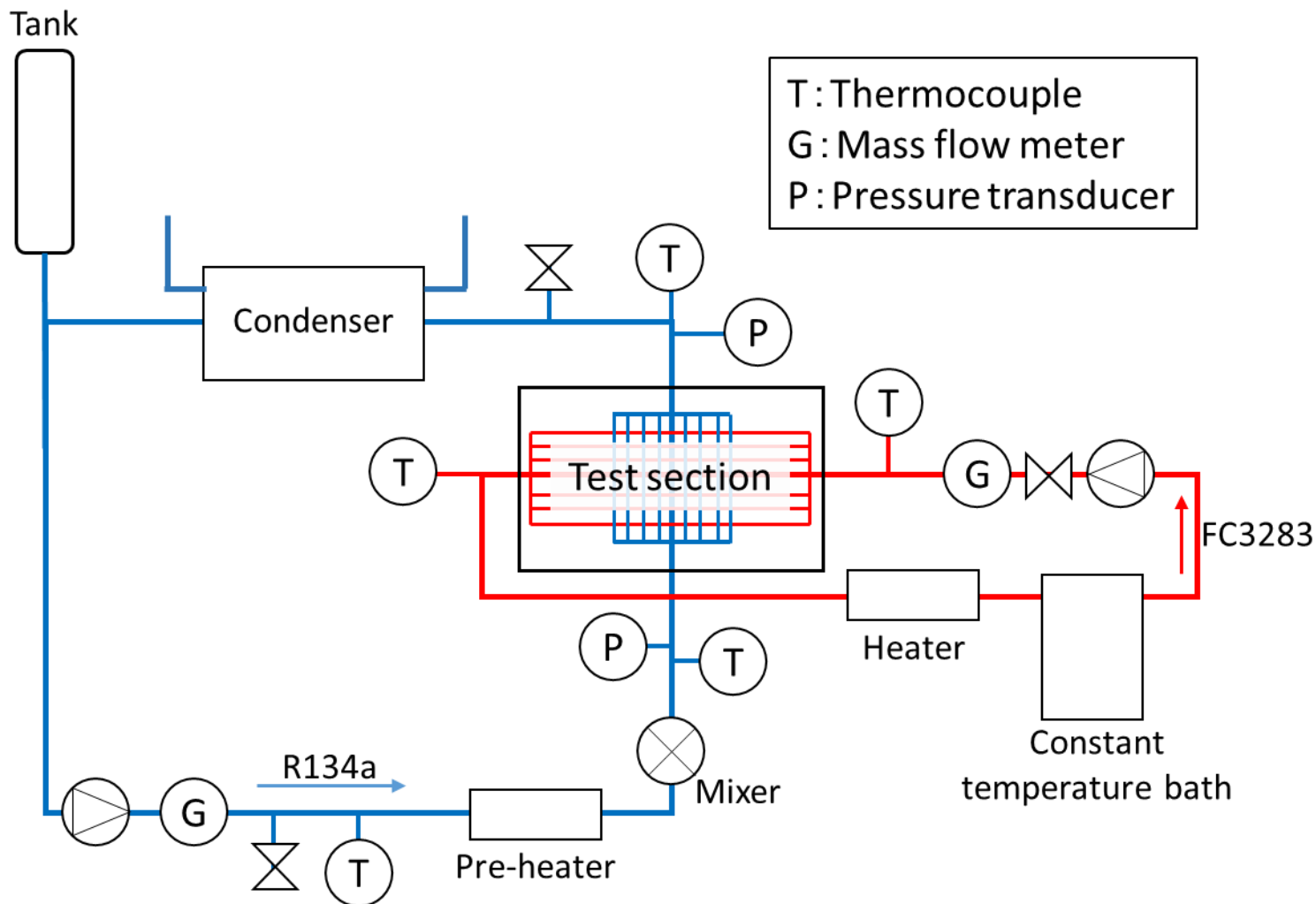
Empty : 気相

冷媒：HFC-134a (CH_2FCF_3)

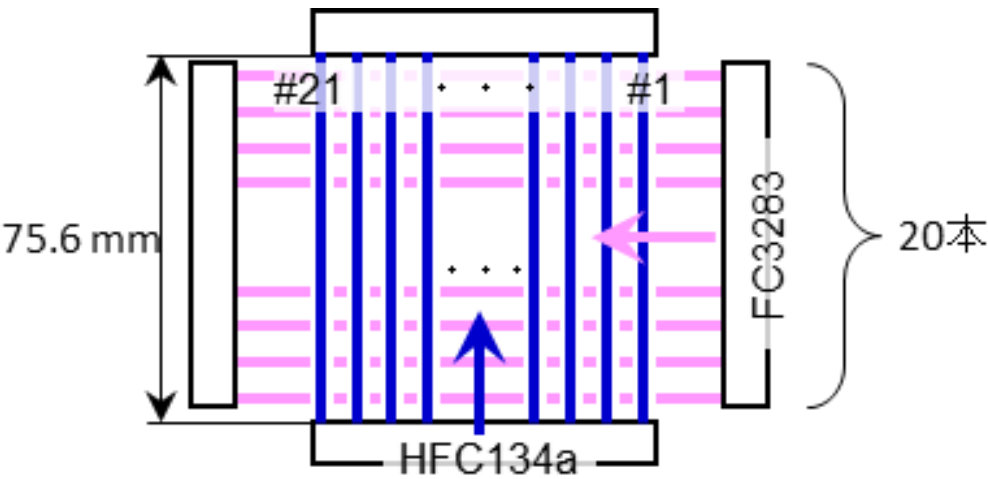
加熱媒体：FC3283

中性子線の減衰特性

HFC-134a $\gg$ FC3283



流動方向
冷媒：鉛直上向き
加熱媒体：水平方向



	加熱媒体 (FC3283)	冷媒(HFC-134a)		
		Type III	Type I	Type II
断面図				
入口絞り	—	—		—

	試験部の種類	Type III (流路幅小)	Type I (絞りあり)	Type II (絞りなし)
冷媒 HFC-134a	質量流量 [g/min] (質量流束 [kg/(m ² s)])	143.0, 286 (100, 200)	142.5, 285 (50, 100)	
	入口サブクール度 [K]	2.6 ~ 4.1	3.1 ~ 4.7	0.6 ~ 2.9
	入口圧力 [MPa] (飽和温度)	0.627 ~ 0.658 (23.0 ~ 24.6)	0.632 ~ 0.659 (23.3 ~ 24.7)	0.570 ~ 0.619 (19.9 ~ 22.6)
加熱媒体 FC3283	質量流量 [kg/min] (質量流束 [kg/(m ² s)])	1.25, 2.5 (460, 920)		
	入口温度 [°C]	29.1 ~ 29.5, 47.3 ~ 48.5, 65.2 ~ 67.4	29.1 ~ 29.4, 47.3 ~ 48.5, 65.1 ~ 67.2	29.0 ~ 29.4, 47.1 ~ 48.5, 64.7 ~ 67.2

中性子ラジオグラフィでの可視化計測

11

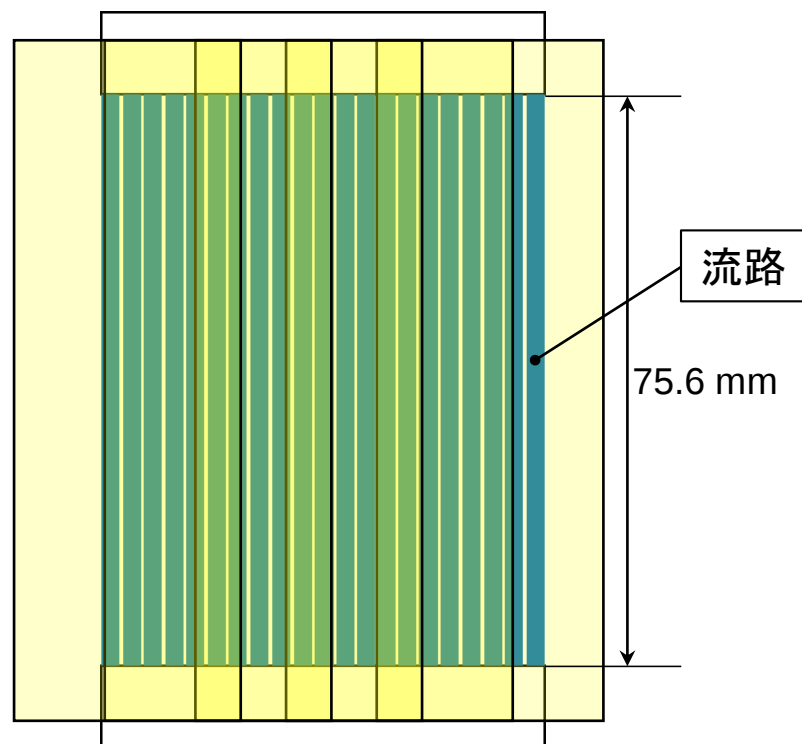
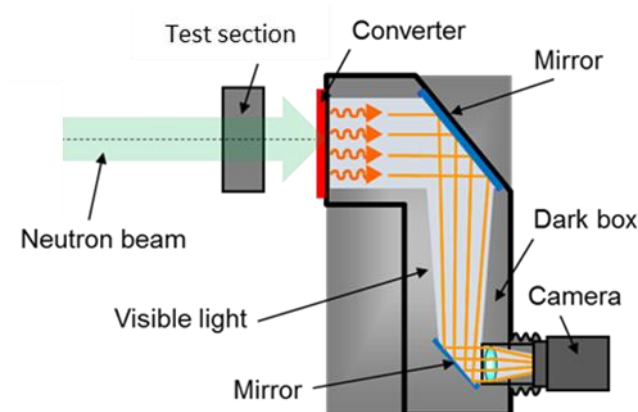
実験は京都大学原子炉実験所のB4ポートを使用

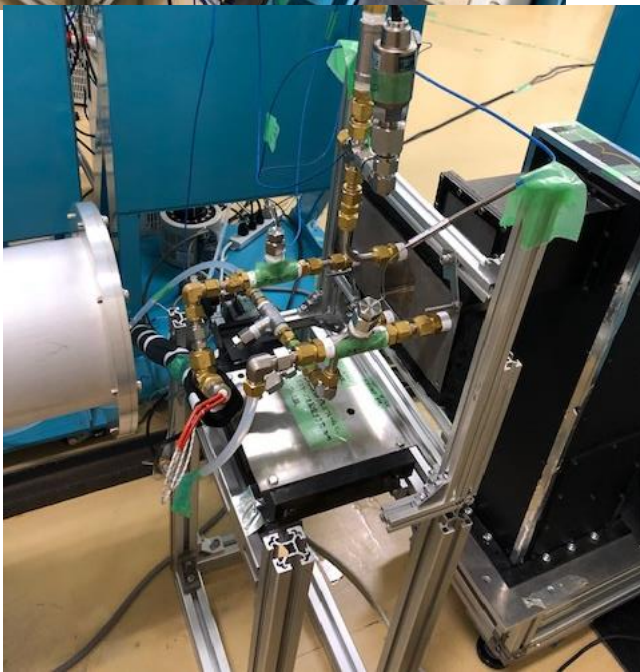
- ・ 原子炉出力: 1 MW
- ・ ビームサイズ: 30×90 mm

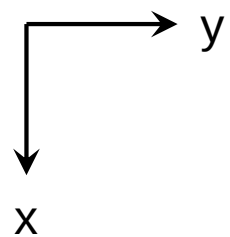
冷却型CCDカメラ

- ・ 画像サイズ: 1024×1024 pixel (□90 mm)
- ・ 画素寸法: $88 \mu\text{m}/\text{pixel}$
- ・ 輝度階調: 16 bit (65536)
- ・ 露光時間: 30 秒

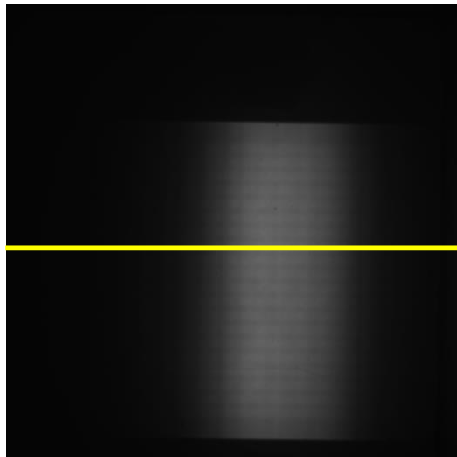
熱交換器の冷媒流路の大きさ(58.4×75.6 mm)に対してビームサイズが小さいため、試験部を移動し5枚に分けて撮影



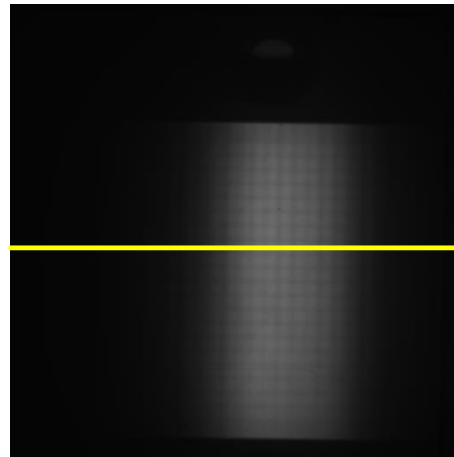




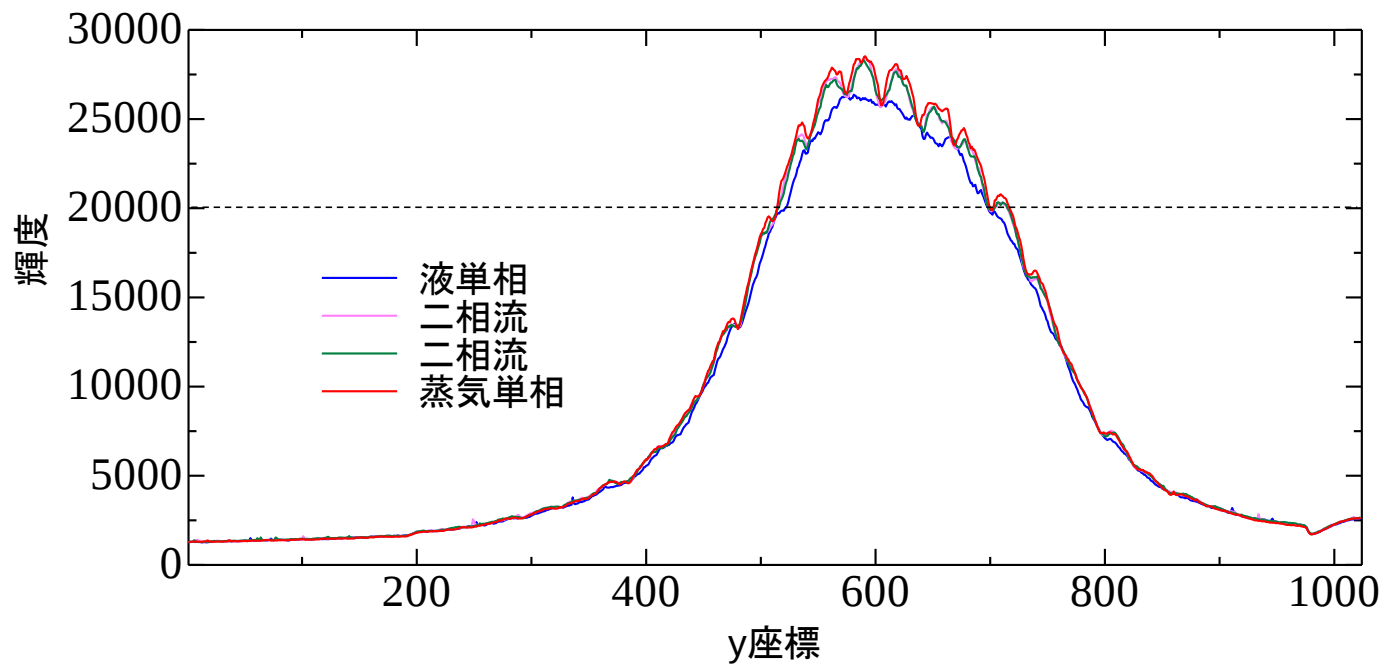
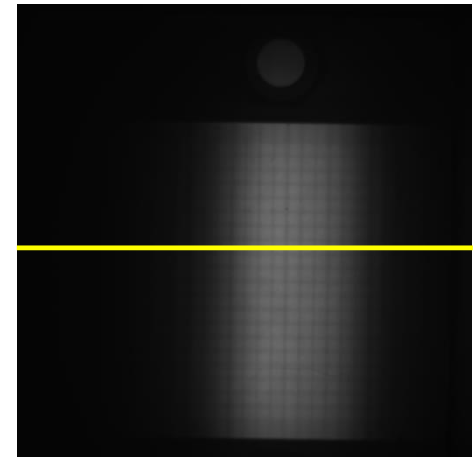
液単相



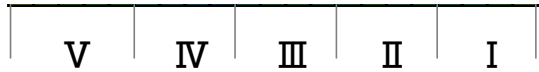
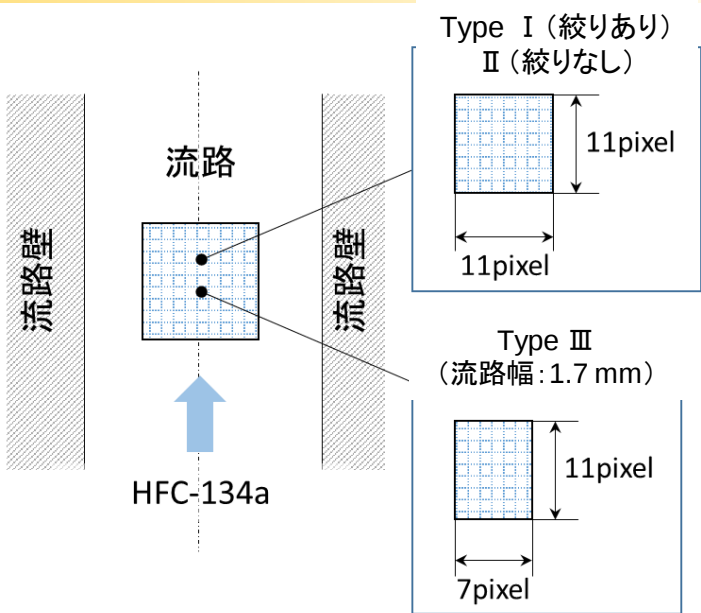
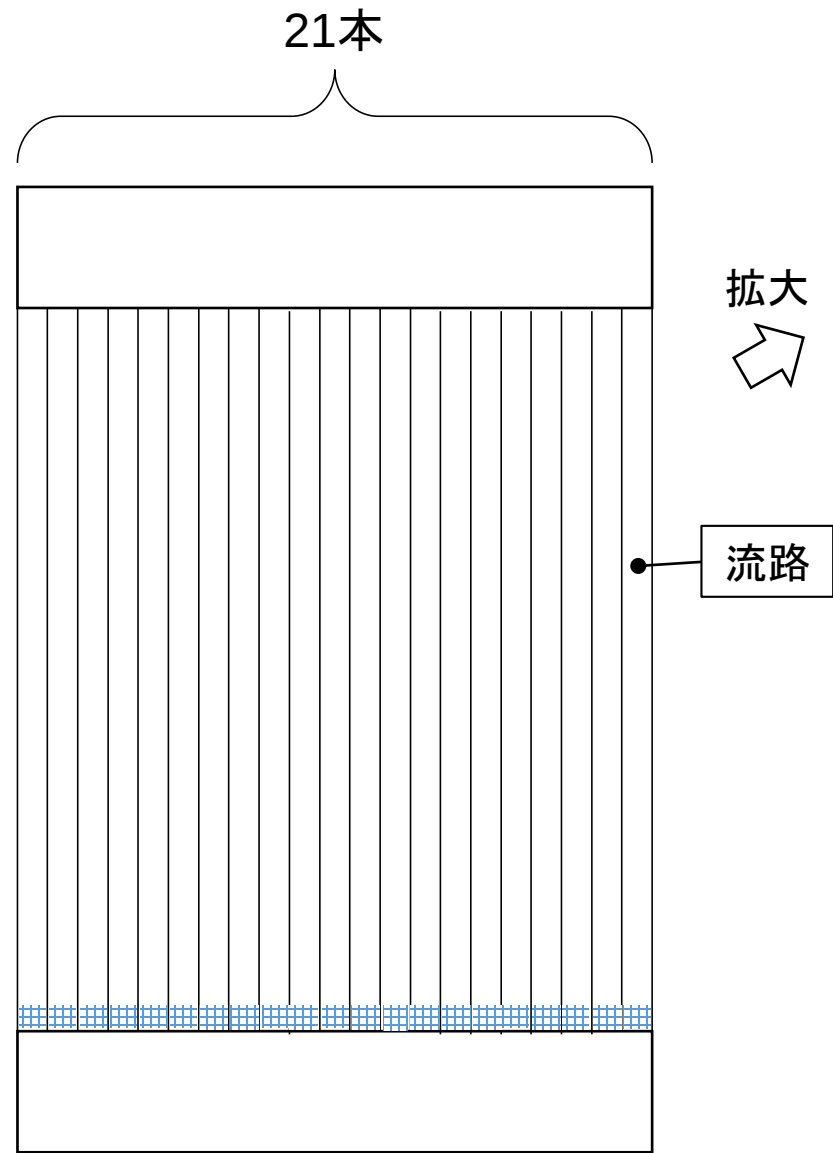
二相流

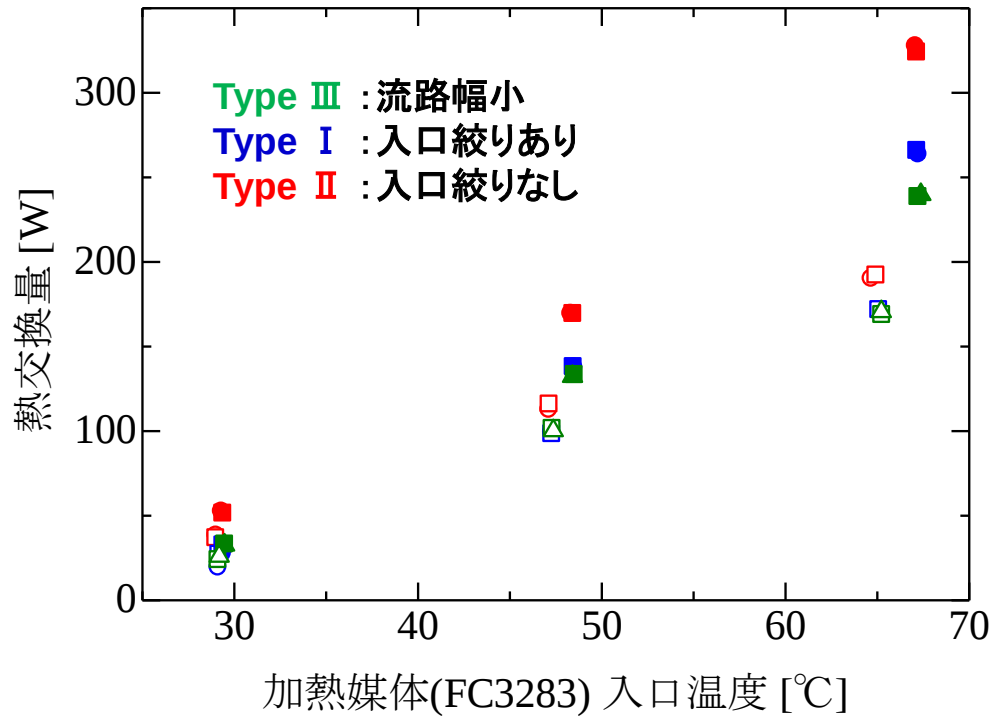


蒸気単相



ダイナミックレンジ
最大 : 5000





$$Q = m_{FC} \cdot c_{FC} \cdot (T_{FC,in} - T_{FC,out})$$

試験部	冷媒 (HFC-134a) 質量流束	加熱媒体 (FC3283) 質量流束	
		460 kg/(m ² s)	920 kg/(m ² s)
Type III	100 kg/(m ² s)	□	■
	200 kg/(m ² s)	△	▲
Type I	50 kg/(m ² s)	○	●
	100 kg/(m ² s)	□	■
Type II	50 kg/(m ² s)	○	●
	100 kg/(m ² s)	□	■

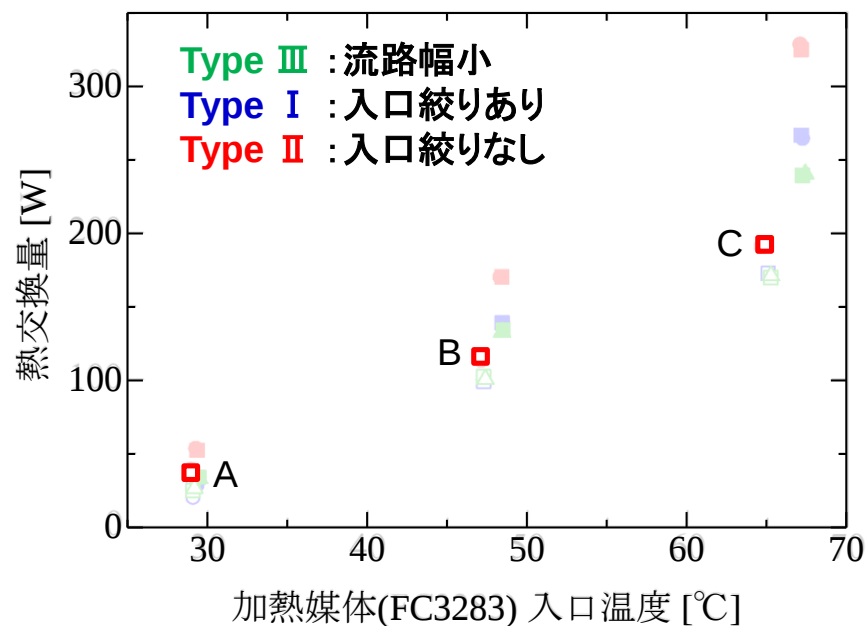
熱交換量の増大は，冷媒の質量流束より，加熱媒体の質量流束の増大に依存

試験部間で比較すると，

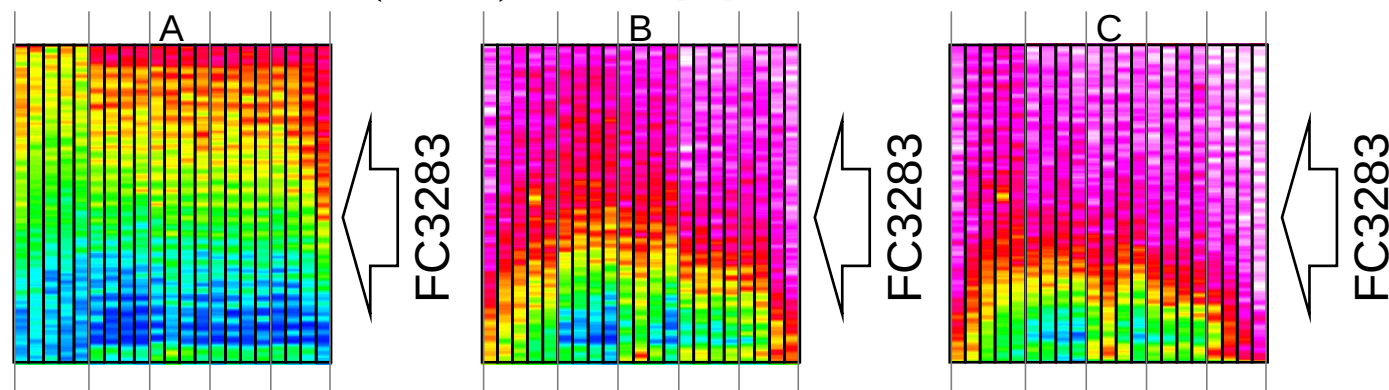
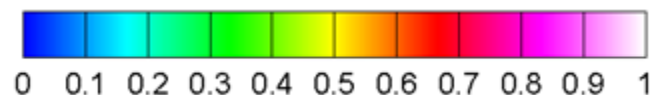
Type II の熱交換量が最も大きく，次いで Type I , Type III となっている

入口温度とボイド率分布

19



試験部	冷媒 (HFC-134a) 質量流束	加熱媒体 (FC3283) 質量流束	
		460 kg/(m ² s)	920 kg/(m ² s)
Type III	100 kg/(m ² s)		
	200 kg/(m ² s)		
Type I	50 kg/(m ² s)		
	100 kg/(m ² s)		
Type II	50 kg/(m ² s)		
	100 kg/(m ² s)		

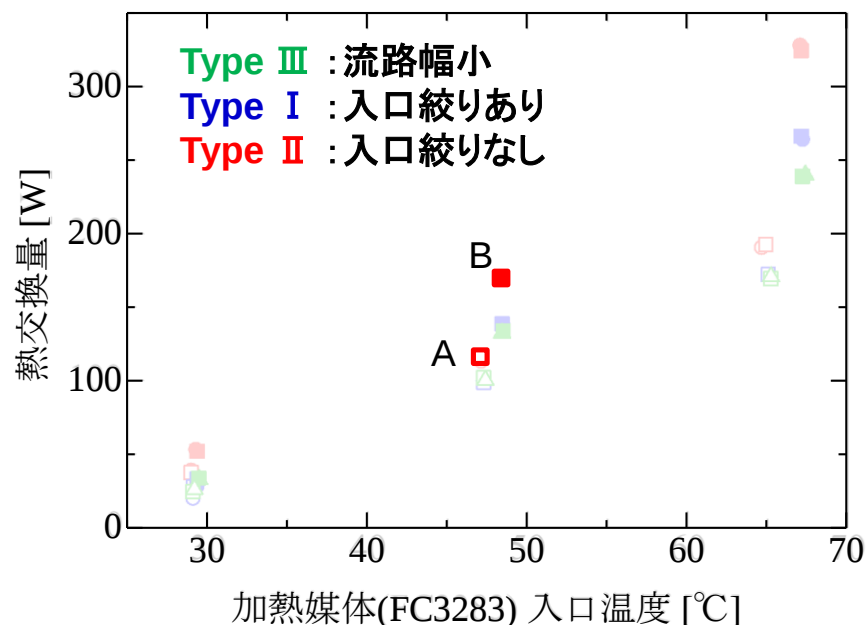


	A	B	C
加熱媒体入口温度 [°C]	29.0	47.2	65.0
入口サブクール度 [K]	0.7	1.3	1.8

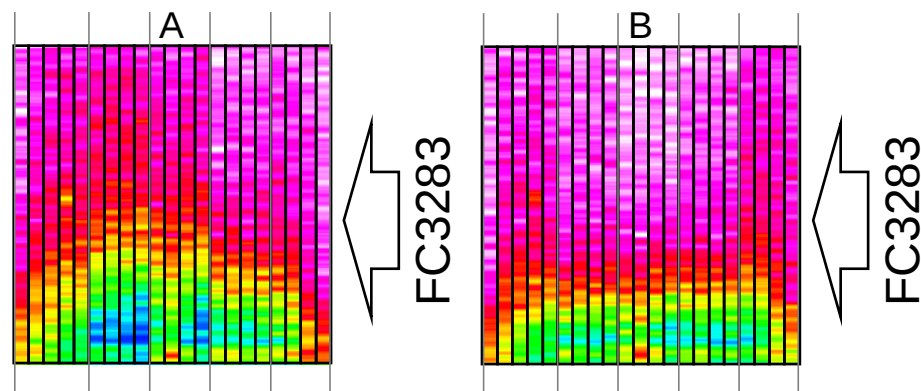
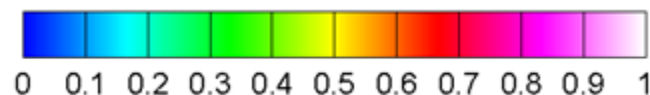
入口温度の上昇によって
ボイド率も上昇

加熱側流量による影響

21



試験部	冷媒 (HFC-134a) 質量流束	加熱媒体 (FC3283) 質量流束	
		460 kg/(m ² s)	920 kg/(m ² s)
Type III	100 kg/(m ² s)	□	■
	200 kg/(m ² s)	△	▲
Type I	50 kg/(m ² s)	○	●
	100 kg/(m ² s)	□	■
Type II	50 kg/(m ² s)	○	●
	100 kg/(m ² s)	□	■

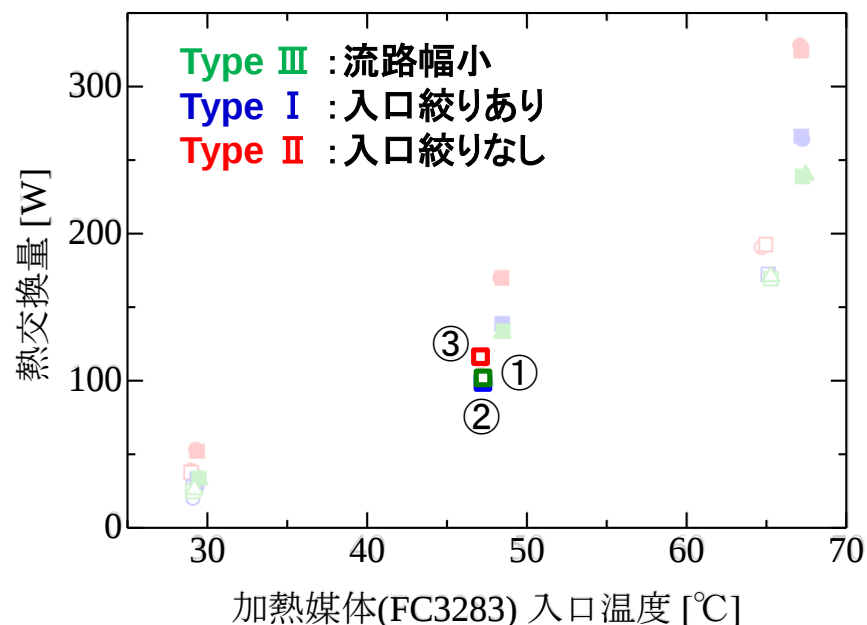


加熱媒体の流量の増大によって、加熱媒体側の出入口温度差が小さくなったため、ボイド率分布は平坦化

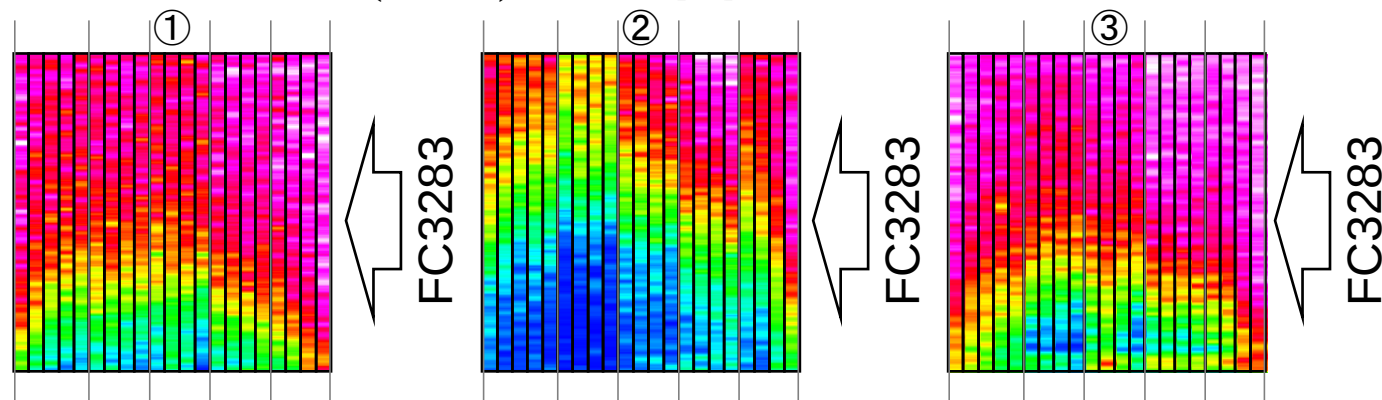
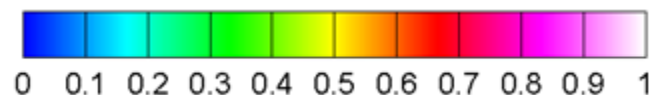
	A	B
加熱媒体質量流束 [kg/(m ² ·s)]	460	920
入口サブクール度 [K]	1.3	1.6

試験部間での比較

23



試験部	冷媒 (HFC-134a) 質量流束	加熱媒体 (FC3283) 質量流束	
		460 kg/(m ² s)	920 kg/(m ² s)
Type III	100 kg/(m ² s)	□	■
	200 kg/(m ² s)	△	▲
Type I	50 kg/(m ² s)	○	●
	100 kg/(m ² s)	□	■
Type II	50 kg/(m ² s)	○	●
	100 kg/(m ² s)	□	■



試験部	①	②	③
加熱媒体入口温度 [°C]	47.3	47.3	47.2
入口サブクール度 [K]	2.6	3.5	1.3

中央流路においてボイド率が低い。
左右の流路では右側流路のボイド
率が高い。

ミニチャネル直交型蒸発器を対象とし、3種類の試験部に対して沸騰熱伝達実験を行い、冷媒流れを中性子ラジオグラフィで可視化し、ボイド率分布に及ぼす流路形状、加熱媒体温度分布の影響を評価した。

- 加熱媒体の流量の増大によって熱交換量は増大した。
→ 熱伝達率向上、温度差拡大による
- 中央流路でのボイド率が低かった。
→ 中央流路での流量が大きいいため
- 加熱媒体入口に近い右側流路でのボイド率が左側流路よりも高い傾向が確認された。
→ 加熱媒体入口では流体間温度差が大きく、熱流束が大きいため
- 入口絞りの効果は見られなかった。