2019年度中性子イメージング専門研究会

ミニチャネル直交型蒸発器内の冷媒流れの可視化とボイド率計測

Visualization and Void Fraction Measurement of Refrigerant Flow in Cross-Flow Type Mini-Channel Evaporator

◎守安 亮祐 杉本 勝美 村川 英樹 浅野 等

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

久保 洋平 山田 紗矢香 福谷和久

神戸製鋼所



低炭素社会の実現・システムの小型化に伴い

熱交換器の高性能化が必要 < ✓ 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)



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:神戸製鋼所





直交流路の熱交換器では局所での熱交換温度差 が異なるため熱流束分布が一様にならない

流路ごとの冷媒分配が不均一になると考えられる

流路形状の変更による流動分配の改善



流路間に隙間を設けることで, 流路 間での流体の移動が可能な形状 熱伝達率を向上させるため流路を 交互にずらして配置した形状

研究目的·内容

研究目的

リブ形状の変化によるミニチャネル直交型蒸発器内の 冷媒偏流改善

研究対象

実用と同じ材質の単層のSUS製ミニチャネル直交型蒸発器 加熱媒体の加熱による鉛直上昇沸騰熱伝達

評価項目

熱交換性能

沸騰二相流のボイド率分布 ー 中性子ラジオグラフィによる計測

実験装置および実験条件



冷媒 HFC-134a	質量流束	75, 150, 300 kg/(m²s)
	(レイノルズ数)	(385, 770, 1540)
	入口サブクール度	2 K
	出口圧力	0.607 MPa
	(飽和温度)	(22.0 °C)
加熱媒体 FC3283	質量流束	460, 920 kg/(m²s)
	(レイノルズ数)	(725~975, 1500~2000)
	入口温度	50.0, 70.0 °C



試験部概要





可視化区間(中性子線照射箇所)は切削 加工することで,薄くしている.



試験部詳細



試験部詳細

加熱媒体側流路

流動方向:水平方向





等価直径	1.47 mm	
流路断面積	45.2 mm ²	
伝熱面積	19546.3 mm ²	

中性子ラジオグラフィによる冷媒流動の可視化

中性子ラジオグラフィ...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

9



画像の輝度値 Sはビーム強度に比例

$\int S = G' \cdot I + O$	S:輝度
	G:ゲイン
$I = I_0 \exp(-\rho\mu_m \delta)$	<i>0</i> :オフセット

試験部内流路が液で満たされている場合



 $I = I_0 \exp(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w - \rho_L \mu_{mL} \delta_{Full}) + O$ $S_{Full} = G'I_0 \exp(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w - \rho_L \mu_{mL} \delta_{Full}) + O$

添え字 w:容器 L:液体

画像の輝度値 Sはビーム強度に比例

$\int S = G' \cdot I + O$	S:輝度
	G:ゲイン
$I = I_0 \exp(-\rho\mu_m \delta)$	<i>0</i> :オフセット

試験部内流路が蒸気で満たされている場合



$$I = I_{0} \exp(-\rho_{w}\mu_{mw}\delta_{w} - \rho_{L}\mu_{mL}\delta_{Full}) + O$$

$$S_{Full} = G'I_{0} \exp(-\rho_{w}\mu_{mw}\delta_{w} - \rho_{L}\mu_{mL}\delta_{Full}) + O$$

$$I = I_{0} \exp(-\rho_{w}\mu_{mw}\delta_{w} - \rho_{G}\mu_{mG}\delta_{G}) + O$$

$$\rho_{L} \gg \rho_{G} \downarrow \forall jik g \notin \# R$$

$$S_{Funty} = G'I_{0} \exp(-\rho_{w}\mu_{mw}\delta_{w}) + O$$

添え字 w:容器 G:蒸気 L:液体 G:蒸気

画像の輝度値 S はビーム強度に比例 $\begin{cases} S = G' \cdot I + O & S : 輝度 \\ G : \mathcal{F} / \mathcal{F} \\ I = I_0 \exp(-\rho\mu_m \delta) & O : \pi / \mathcal{F} / \mathcal{F} \end{pmatrix}$





$$S_{Empty} = G' I_0 \exp(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w) + O$$

添え字 w:容器 G:蒸気 L:液体 n:二相流

画像の輝度値 S はビーム強度に比例 $\begin{cases} S = G' \cdot I + O & S : 輝度 \\ G : \mathcal{F} \cdot \mathcal{I} \\ I = I_0 \exp(-\rho\mu_m \delta) & O : \pi \tau \tau \nu \end{pmatrix}$





添え字 w:容器 G:蒸気 L:液体 n:二相流

✓ 気液二相流の場合

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

容器での減衰 液での減衰
 $\rho_L \gg \rho_G ふり蒸気での減衰を無視$
✓ 液で満たされている場合
 $S_{Full}(x,y) = Gexp(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x,y) - \rho_L \mu_{mL} \delta_{Full}(x,y)) + O(x,y)$
流路の厚さ
添路の厚さ

✓ 蒸気で満たされている場合
$$S_{Empty}(x,y) = Gexp(-\rho_w \mu_{mw} \delta_w(x,y)) + O(x,y)$$

ロ ボイド率

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

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 µm/pixel
- 輝度階調:16 bit (65536)
- 露光時間:30 秒

熱交換器の大きさ(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



試験部

コンバータ

可視化画像



黄色部分の輝度のプロファイル



輝度値の補正













熱交換量結果



Reynolds number of the heating medium (FC3283) [-]

試験部	質量流束 R134a [kg/(m²・s)]	入口温度[℃]	
		50	70
ストレート	300	0	
	150	Δ	
	75		
穴あき	300	0	
	150	Δ	
	75		
	300	0	
オフセット	150	\triangle	

75

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{m}_{FC} \cdot \boldsymbol{c}_{FC} \cdot \left(\boldsymbol{T}_{FC,in} - \boldsymbol{T}_{FC,out} \right)$$

- 熱交換量は加熱媒体のレイノル ズ数の上昇および入口温度の上 昇とともに増大
- 冷媒の質量流束の増大に対して は熱交換量は変化しなかった。

熱交換量は加熱媒体側の熱抵抗に 律速だったため、冷媒側の流量の 影響を受けなかった。



熱交換量結果



Reynolds number of the heating medium (FC3283) [-]

試験部	質量流束 R134a [kg/(m²・s)]	入口温度[℃]	
		50	70
ストレート	300	0	
	150	Δ	
	75		
穴あき	300	0	
	150	\bigtriangleup	
	75		
オフセット	300	0	
	150	Δ	
	75		

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

- 熱交換量は加熱媒体のレイノル ズ数の上昇および入口温度の上 昇とともに増大
- 冷媒の質量流束の増大に対して は熱交換量は変化しなかった。

熱交換量は加熱媒体側の熱抵抗に 律速だったため、冷媒側の流量の 影響を受けなかった。



ボイド率分布計測結果(加熱側入口温度の影響) 可視化画像の各画素に対する中性子照射方向の平均ボイド率

実験条件 質量流束(冷媒,加熱媒体):150,921 kg/(m²·s)



ボイド率分布計測結果(冷媒流量の影響)

可視化画像の各画素に対する中性子照射方向の平均ボイド率

実験条件 質量流束(加熱媒体): 460 kg/(m²·s), 加熱媒体入口温度50℃



ボイド率分布計測結果



リブ形状変化の効果



偏流の改善効果はオフセット流路に比べて、穴あき流路のほうが大きかった

隙間部分での沸騰核の形成



サブクール液状態に対して は沸騰核生成を促進させる ことが流動均一化に有効 ミニチャネル直交型蒸発器内沸騰二相流に対し, 中性子ラジオグラフィによるボイド率分布計測結果に基づき 流路形状(ストレート, 穴あき, オフセット)の影響を評価した.

● 流路形状の違いによる流動均一化の効果はオフセット流路に 比べ, 穴あき流路のほうが高かった

穴あき流路では、隙間部分が死水域になっており、リブ後端で沸騰核が形成されたためと考えられる。

偏流改善には沸騰核形成が重要

● 熱交換量への冷媒流動状態の影響はほぼ見られなかった

✓ 加熱媒体側の熱抵抗律速であり、冷媒側熱伝達率の影響は小さかった.