
流動脈動下における流動沸騰現象の評価

Evaluation of Convective Boiling in Oscillatory flow

○藤吉 翔太(関西大院) 中野 竜雅(関西大) 原田 貴之(関西大)
山科 剛是(関西大院) 網 健行(関西大) 梅川 尚嗣(関西大)
伊藤 大介(京大炉) 齊藤 泰司(京大炉)



2013年度共同利用研究(7/2~7/4)

過渡応答時におけるボイド率挙動の動的評価に関する研究

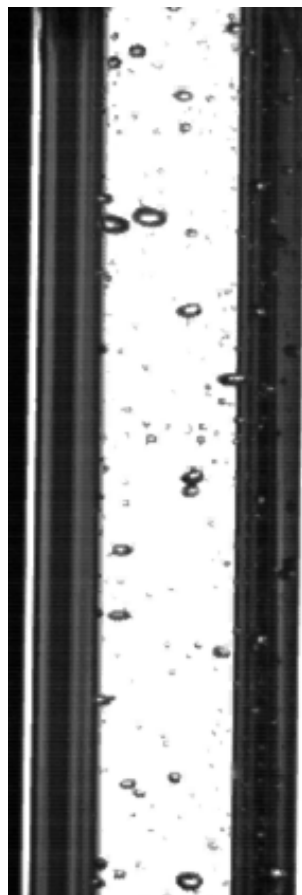
- 7/2, 3 熱出力:1 MW

下降流における時間平均ボイド率の計測

- 7/4 熱出力:5 MW

流動脈動下におけるボイド率の擬似動画の計測

沸騰二相流(定常流)



気泡流



スラグ流



チャーン流



環状流

小  大
加熱熱流束

沸騰関連機器

- 限界熱流束の理解・予測
- 流動脈動を伴う不安定流動の恐れ

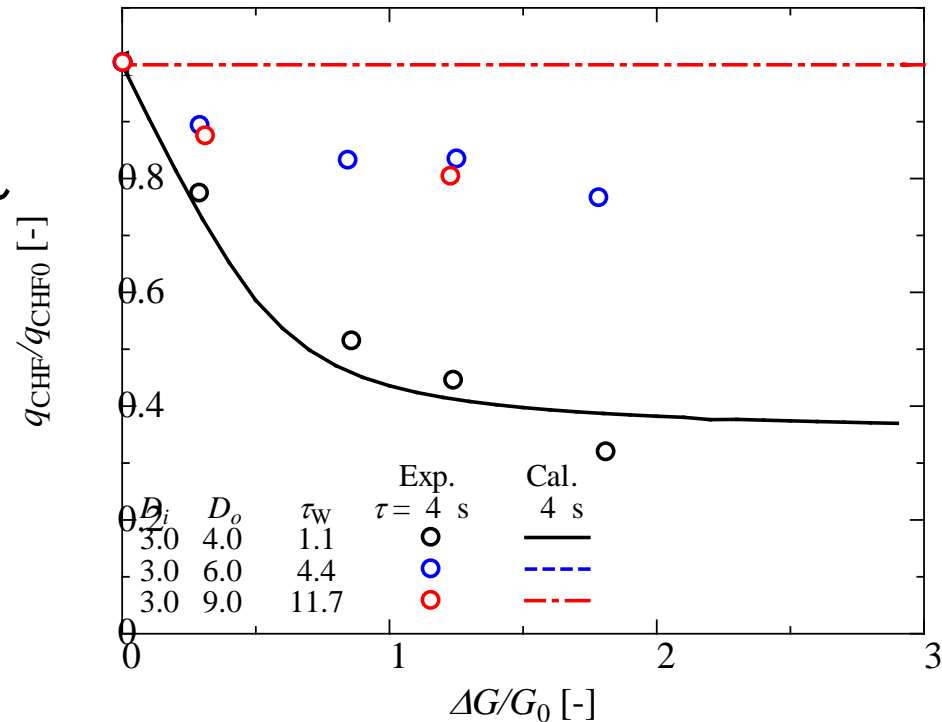
流動脈動下の限界熱流束特性

◇ 脈動周期 ◇ 脈動振幅 ◇ 熱容量

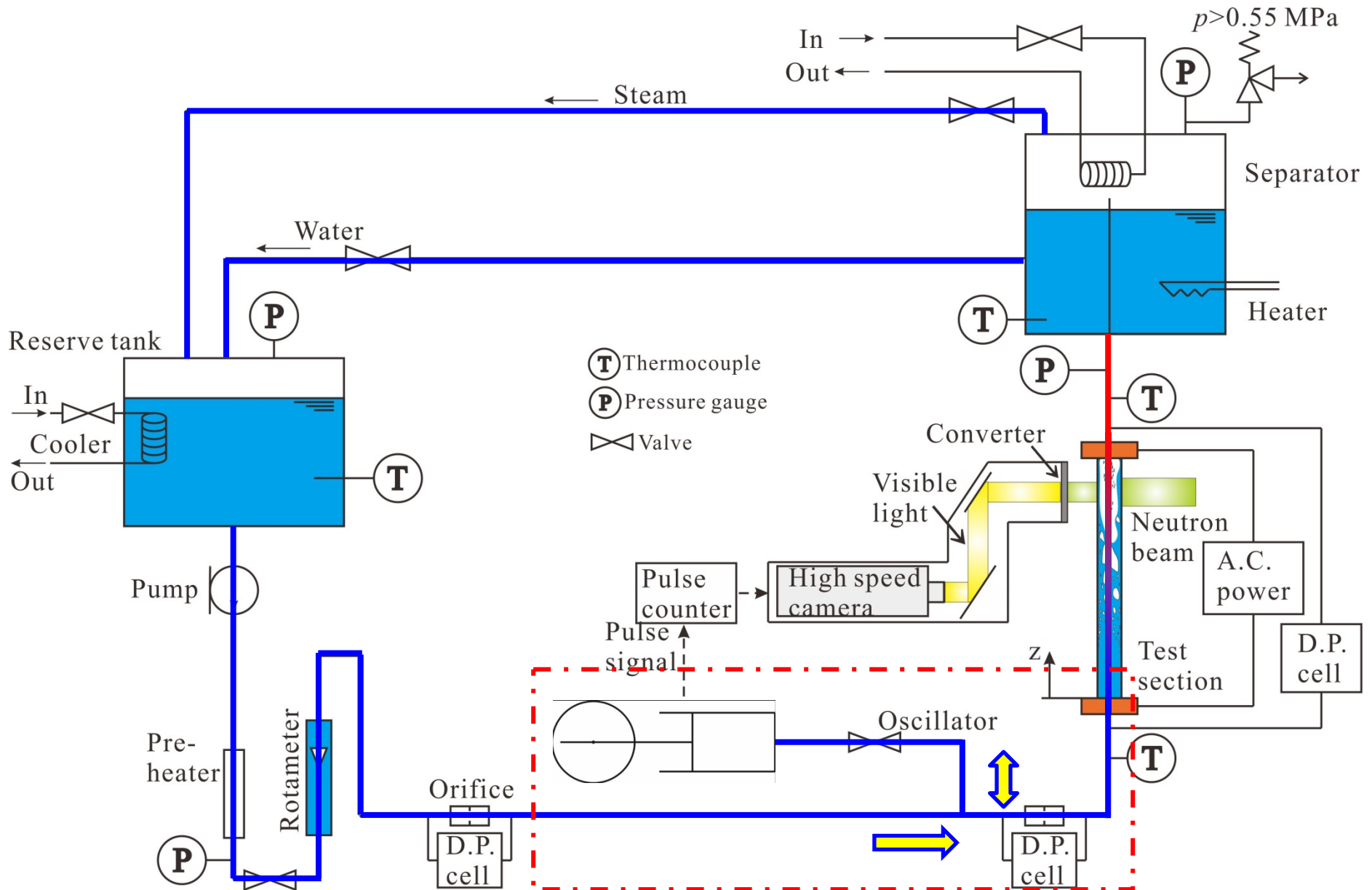
流動脈動下における

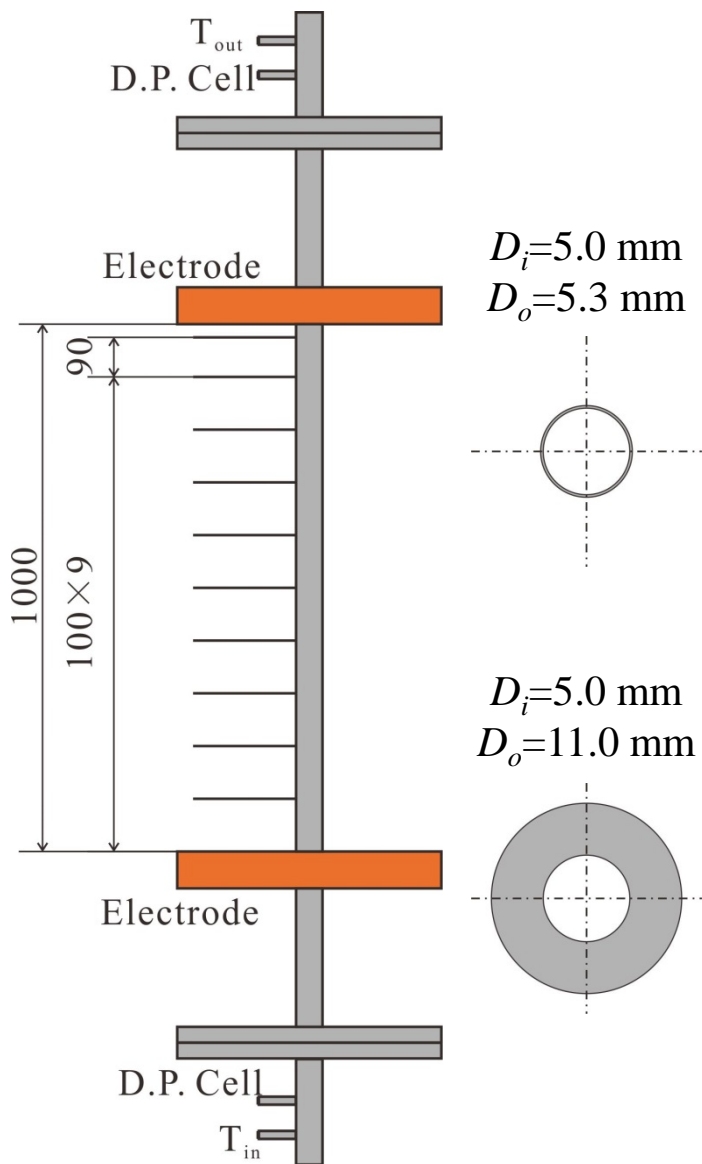
- 伝熱特性
 - 圧力損失特性
 - ボイド率変動特性
- ⇒ 沸騰伝熱実験
- ⇒ 中性子ラジオグラフィによる可視化実験

以上の特性評価が必要である。



強制流動沸騰ループ





テストセクション概要

材質	SUS304	
加熱長さ L	1000 mm	
管内径 D_i	5.0 mm	
管外径 D_o	5.3 mm (薄肉管)	11.0 mm (厚肉管)
時定数 τ_w	0.4 s	13.2 s
熱浸透深さ δ_κ	2.3 mm	

実験条件

系圧力 p_s	0.3 MPa
テストセクション入口温度 T_{in}	60 °C
定常質量流束 G_0	300 kg/m ² s
脈動周期 τ	4 s
脈動振幅比 $\Delta G/G_0$	1.0
限界熱流束判定温度 T_{CHF}	233.5 °C (薄肉管) 600 °C (厚肉管)

中性子ラジオグラフィ実験設備

京都大学原子炉実験所 (B-4 port)

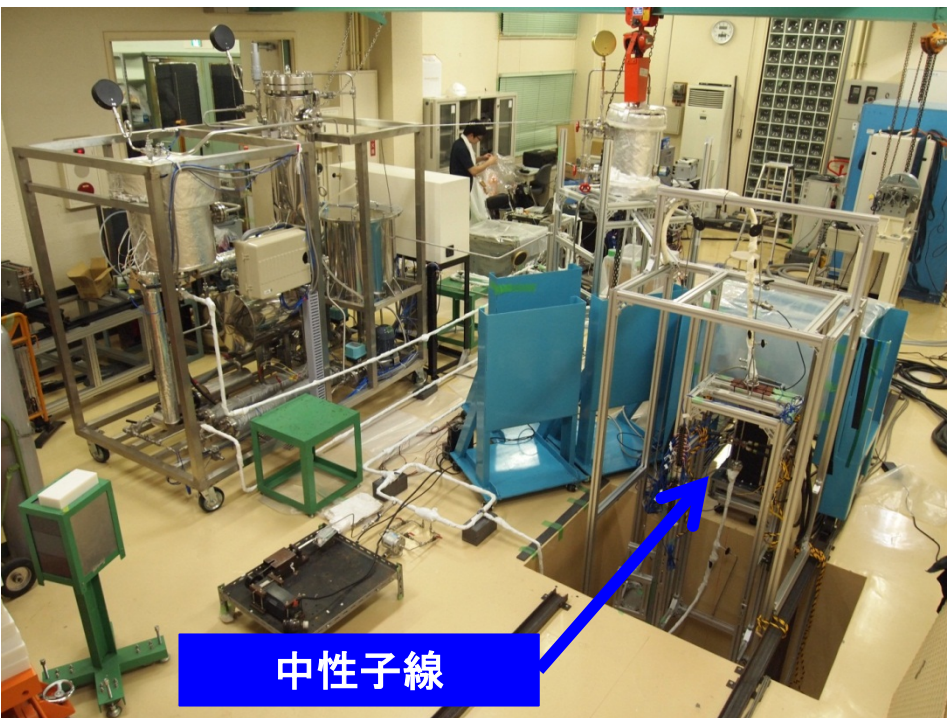
京都大学研究用原子炉

熱出力

5 MW

中性子束

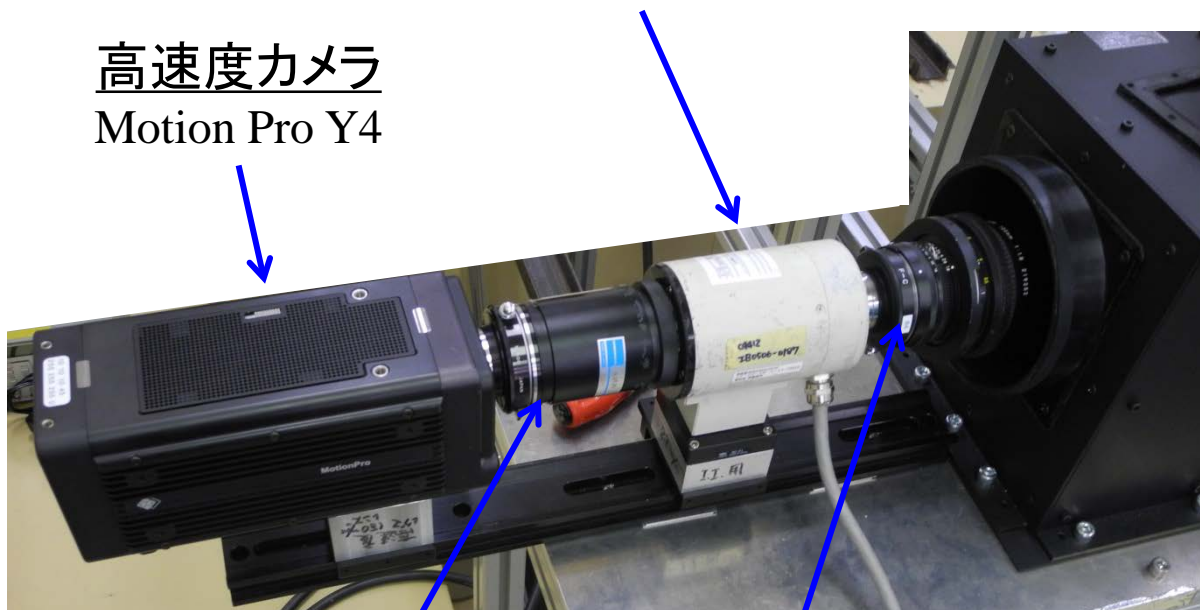
5×10^7 n/cm²s



撮像系

イメージ・インテンシファイア
浜松ホトニクスV8070UMOD2

高速度カメラ
Motion Pro Y4



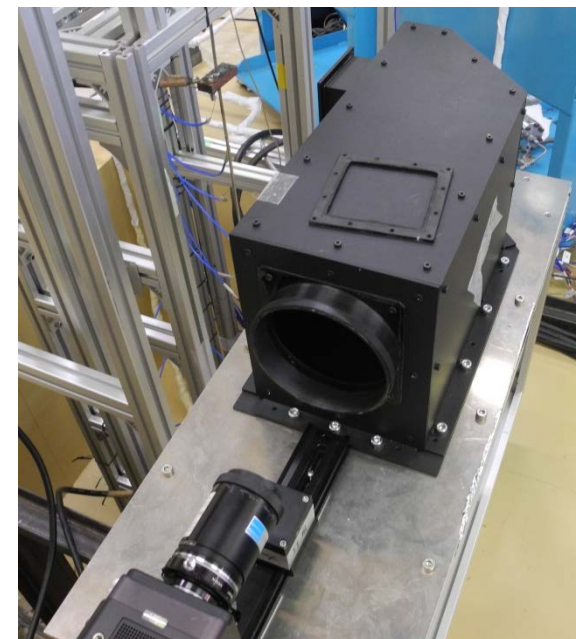
リレーレンズ

レンズ
105mm Nikon

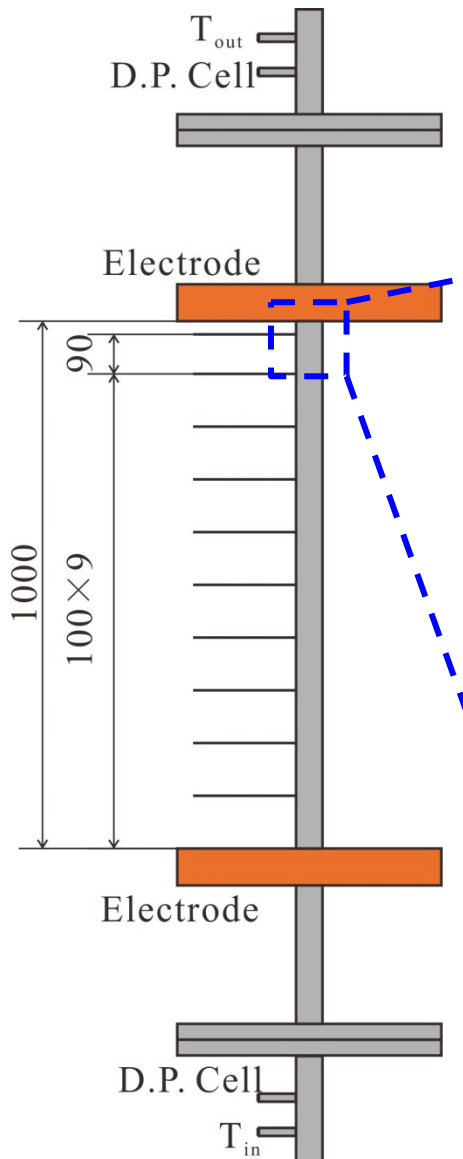
撮像条件

フレームレート

30 fps



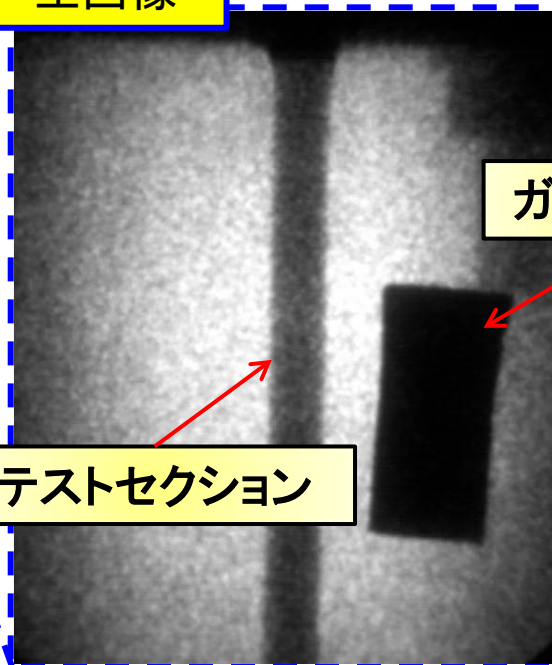
取得画像



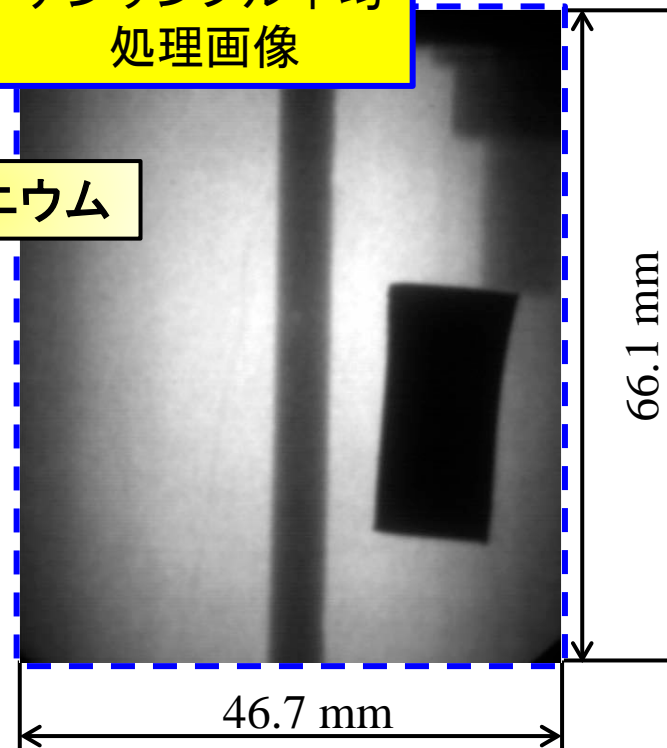
アンサンブル平均処理画像

画像積算枚数	30
空間分解能	0.081 mm/pixel

生画像



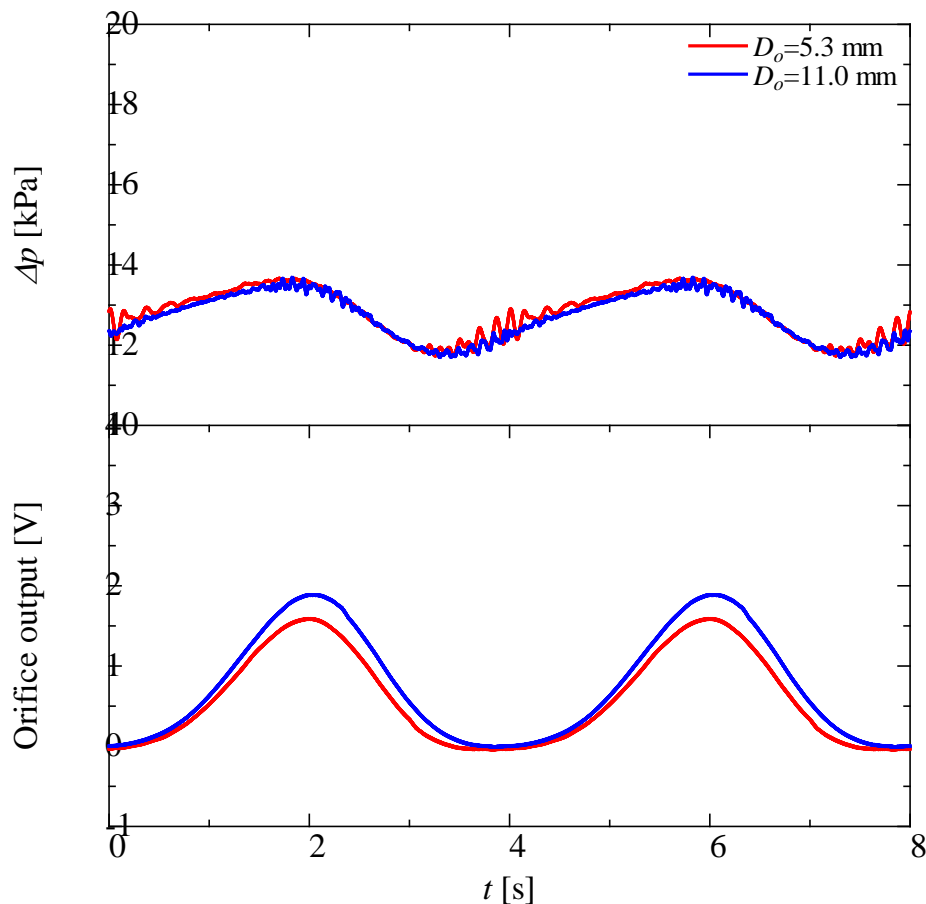
アンサンブル平均
処理画像



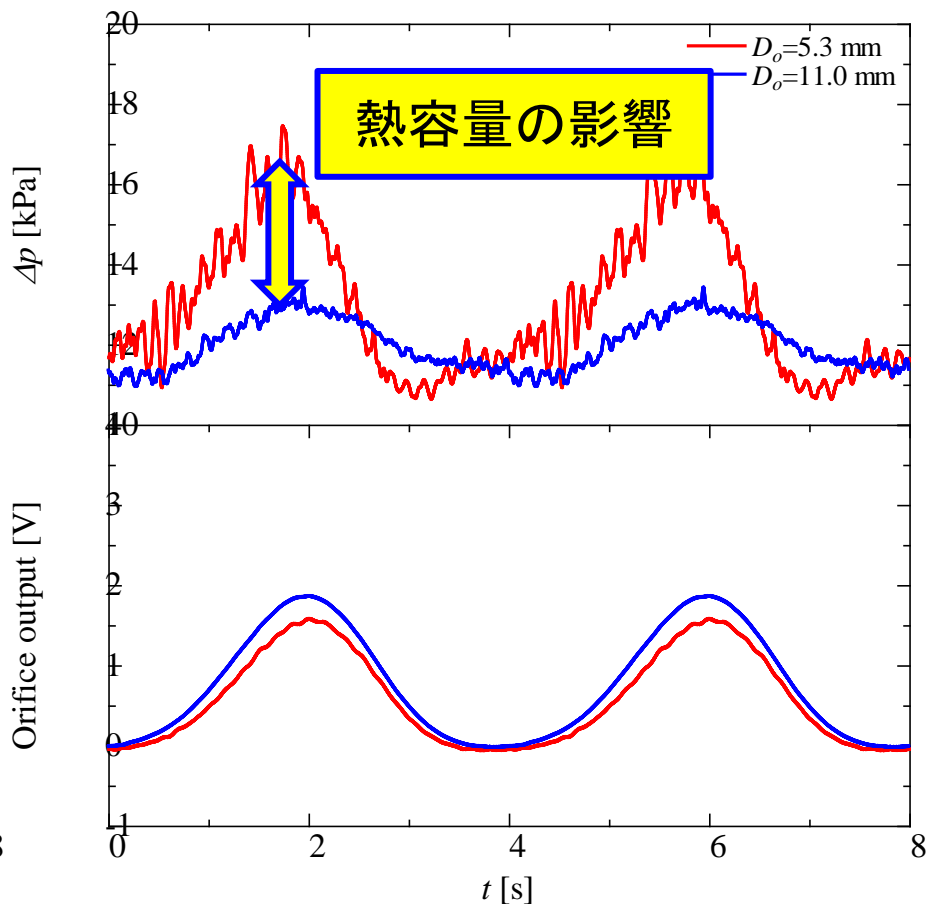
圧力損失特性

$D_i=5.0$ mm $L=1000$ mm
 $p_s=0.3$ MPa $G_0=300$ kg/m²s $T_{in}=60$ deg.C
 $\tau=4$ s $\Delta G/G_0=1.0$

$q=40$ kW/m² ($x_{eq}=-0.10$)



$q=120$ kW/m² ($x_{eq}=0.00$)



実験結果 (中性子ラジオグラフィによる可視化実験)

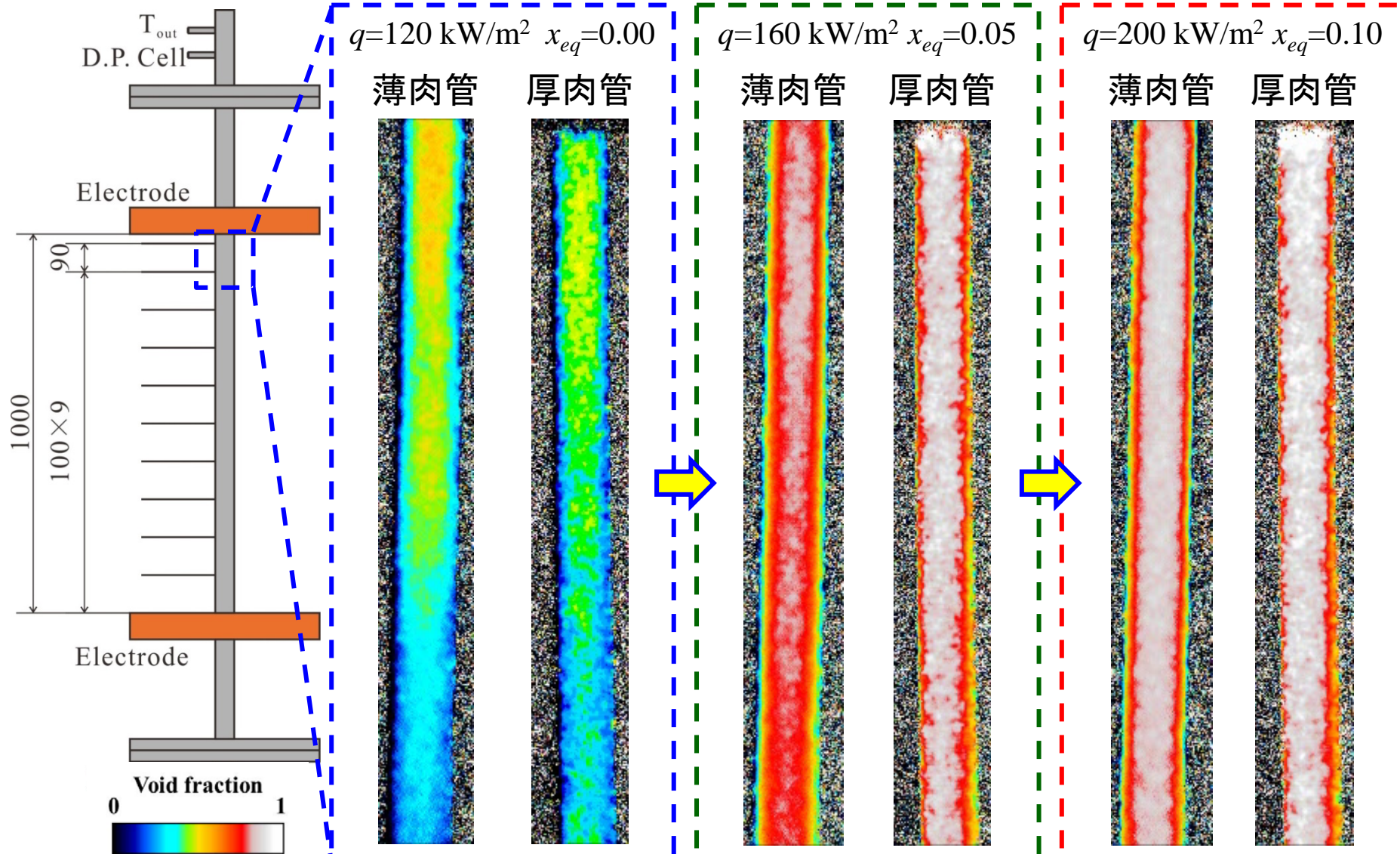


管内ボイド率挙動

$D_i=5.0$ mm $L=1000$ mm

$p_s=0.3$ MPa $G_0=300$ kg/m²s $T_{in}=60$ deg.C $\tau=4$ s $\Delta G/G_0=1.0$

熱出力: 5 MW フレームレート: 30 fps

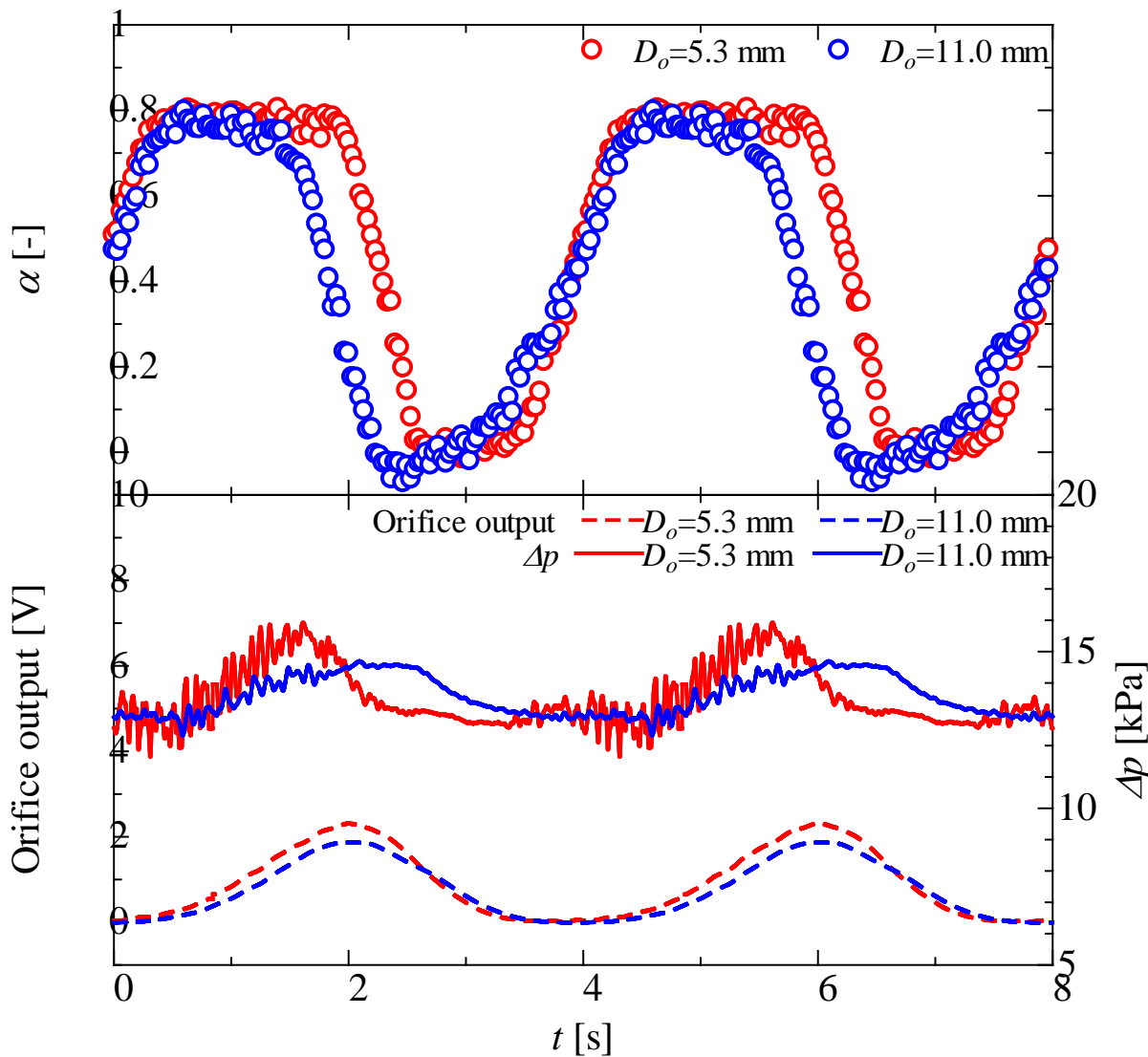


実験結果 (中性子ラジオグラフィによる可視化実験)

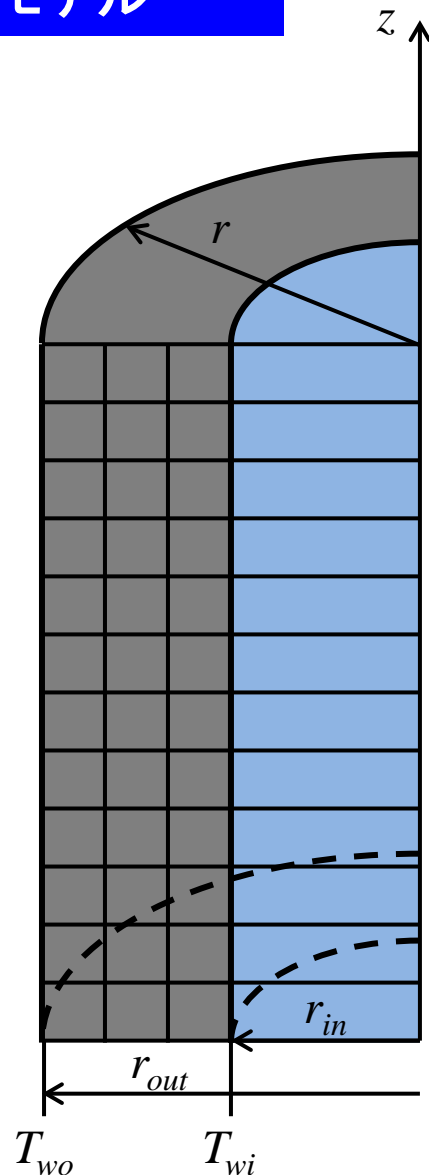


管内ボイド率挙動
($q=120 \text{ kW/m}^2$ $x_{eq}=0.00$)

$D_i=5.0 \text{ mm}$ $L=1000 \text{ mm}$
 $p_s=0.3 \text{ MPa}$ $G_0=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{in}=60 \text{ deg.C}$
 $\tau=4 \text{ s}$ $\Delta G/G_0=1.0$



計算モデル



- 流れ場: 非定常1次元 (z 方向)

ボイド伝播式 (気相の質量保存式)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha u_G) = q_B$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho i) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u i) = q_s'$$

q_B : 単位体積当たり蒸発量

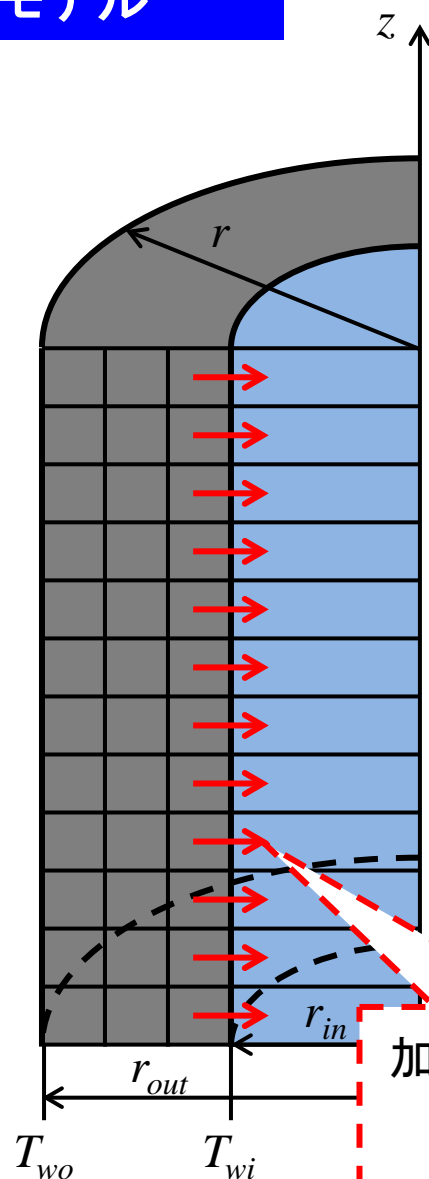
q_s' : 単位体積当たり伝熱量

- 伝熱管: 非定常1次元 (r 方向)

熱伝導方程式

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho_{SUS} c_{pSUS}}$$

計算モデル



- 流れ場: 非定常1次元 (z 方向)

ボイド伝播式 (気相の質量保存式)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha u_G) = q_B$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho i) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u i) = q_s'$$

q_B : 単位体積当たり蒸発量

q_s' : 単位体積当たり伝熱量

- 伝熱管: 非定常1次元 (r 方向)

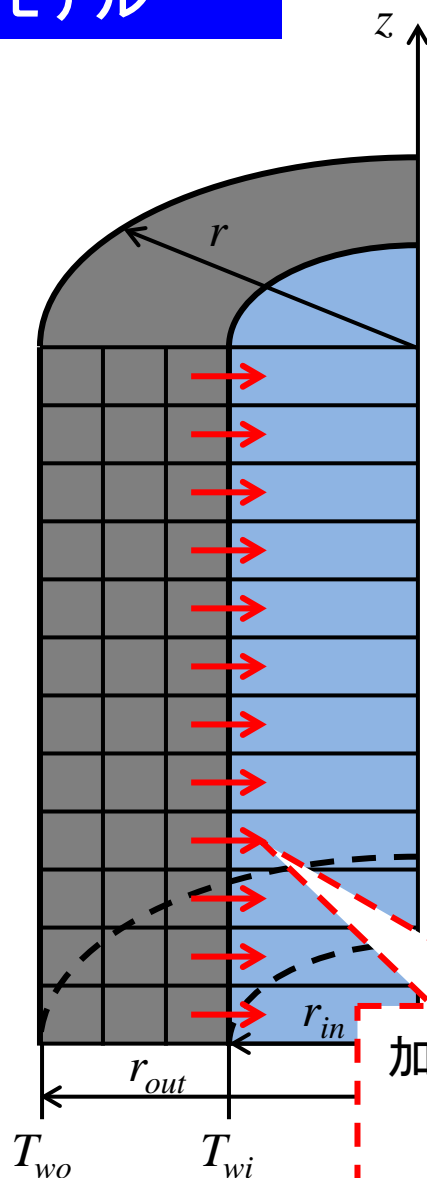
熱伝導方程式

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho_{SUS} c_{pSUS}}$$

加熱熱流束

$$q_s = h(T_{wi} - T_{lb})$$

計算モデル



■ 流れ場: 非定常1次元 (z 方向)

ボイド伝播式 (気相の質量保存式)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha u_G) = q_B$$

計算条件

加熱長さ L	1000 mm	
管内径 D_i	5.0 mm	
管外径 D_o	5.3 mm (薄肉管)	11.0 mm (厚肉管)
時間刻み Δt	0.01 ms	
管軸方向セル長さ Δz	10 mm	
半径方向セル長さ Δr	0.010 mm	

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho_{SUS} c_{pSUS}}$$

加熱熱流束

$$q_s = h(T_{wi} - T_{lb})$$

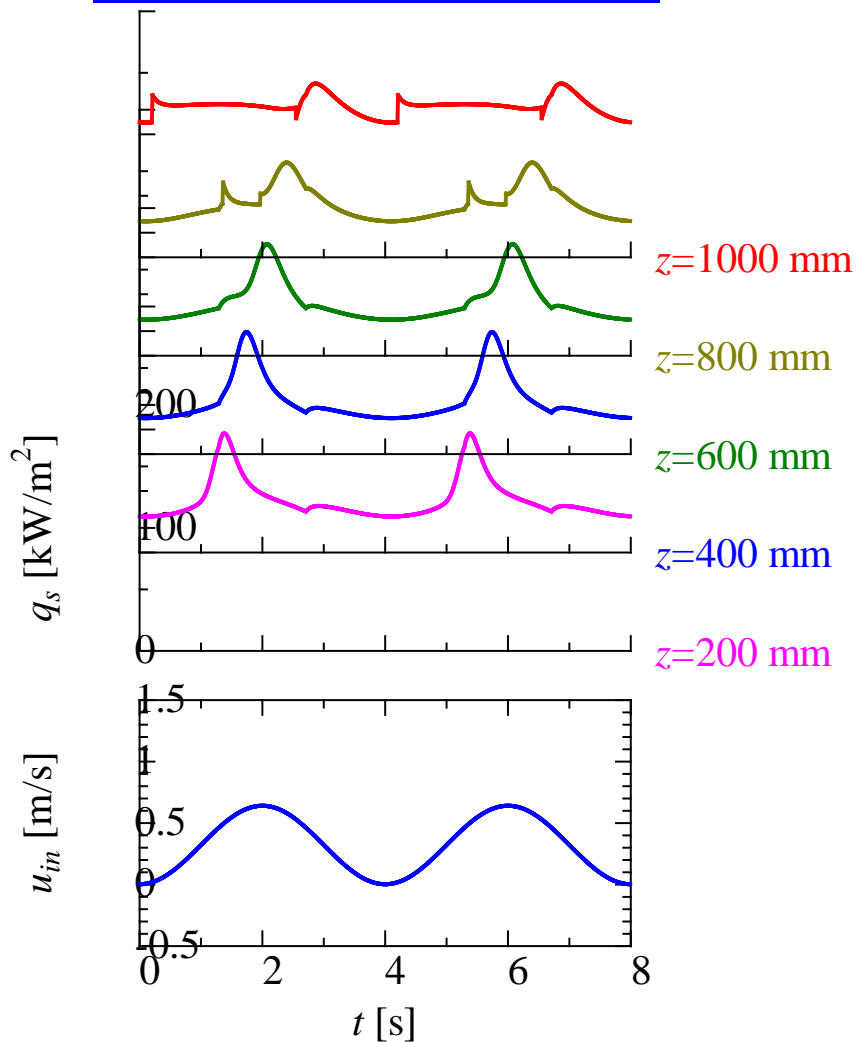
流動脈動沸騰二相流シミュレーション

加熱熱流束特性

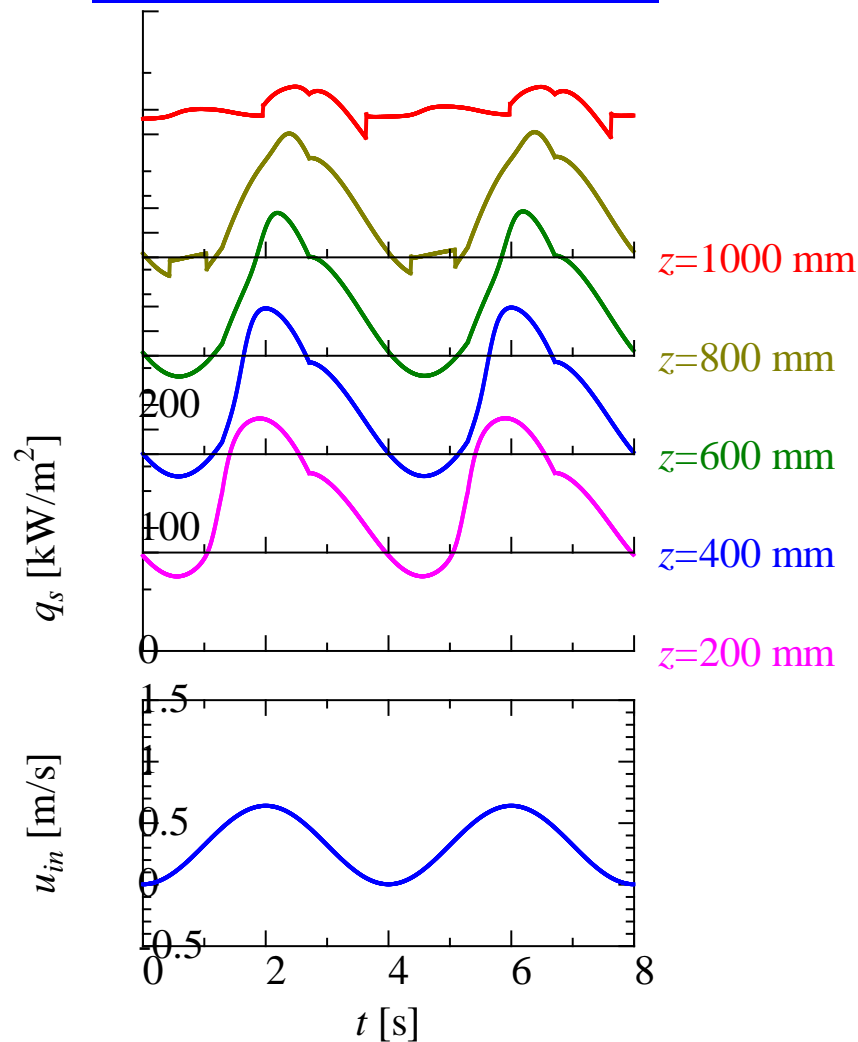
($q=120 \text{ kW/m}^2$ $x_{eq}=0.00$)

$D_i=5.0 \text{ mm}$ $L=1000 \text{ mm}$
 $p_s=0.3 \text{ MPa}$ $G_0=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{in}=60 \text{ deg.C}$
 $\tau=4 \text{ s}$ $\Delta G/G_0=1.0$

薄肉管 ($D_o=5.3 \text{ mm}$)



厚肉管 ($D_o=11.0 \text{ mm}$)



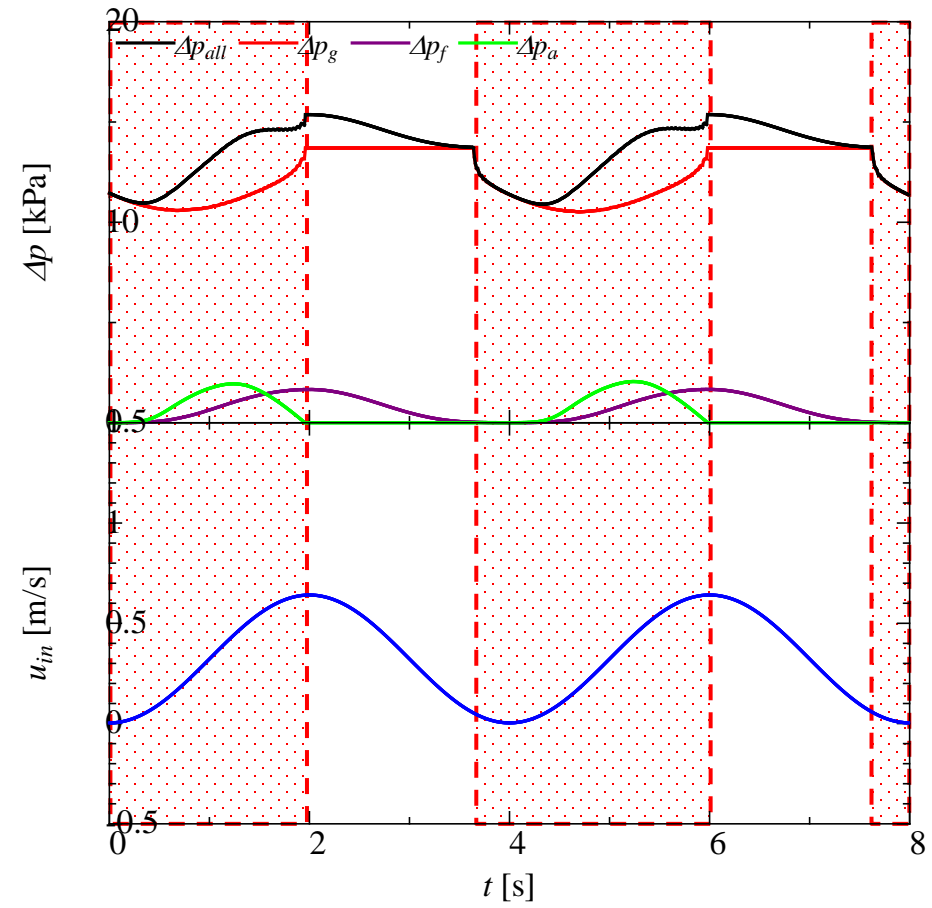
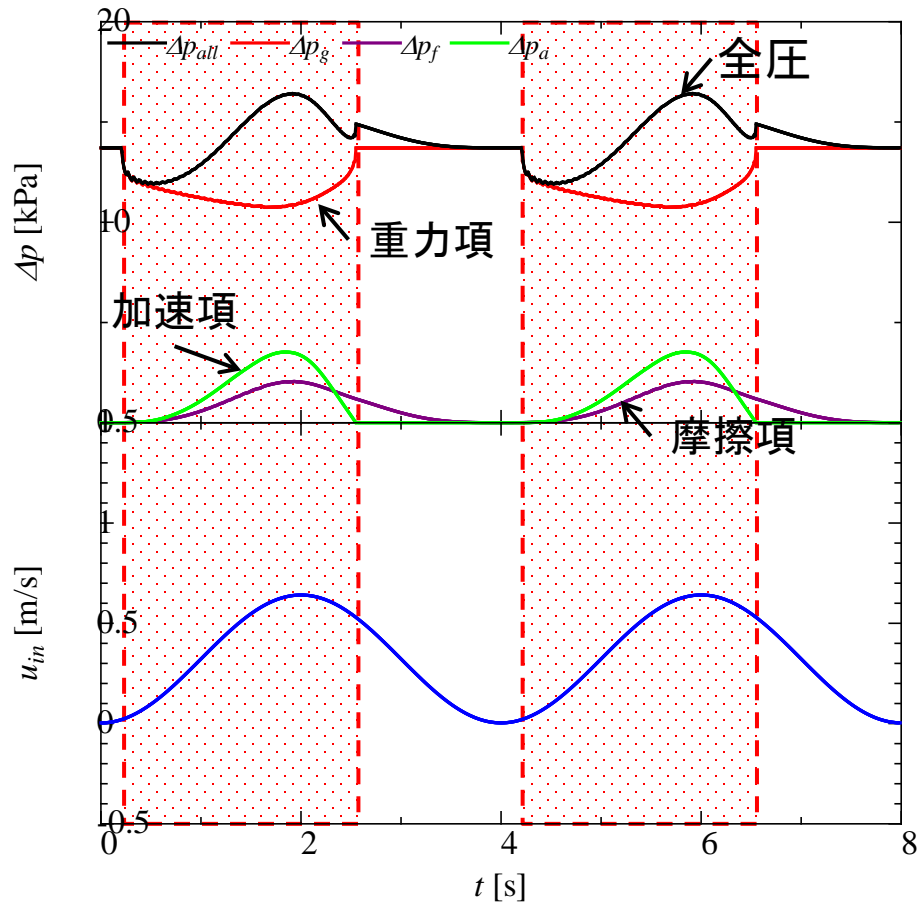
流動脈動沸騰二相流シミュレーション

圧力損失特性
($q=120 \text{ kW/m}^2$ $x_{eq}=0.00$)

$D_i=5.0 \text{ mm}$ $L=1000 \text{ mm}$
 $p_s=0.3 \text{ MPa}$ $G_0=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{in}=60 \text{ deg.C}$
 $\tau=4 \text{ s}$ $\Delta G/G_0=1.0$

薄肉管 ($D_o=5.3 \text{ mm}$)

厚肉管 ($D_o=11.0 \text{ mm}$)

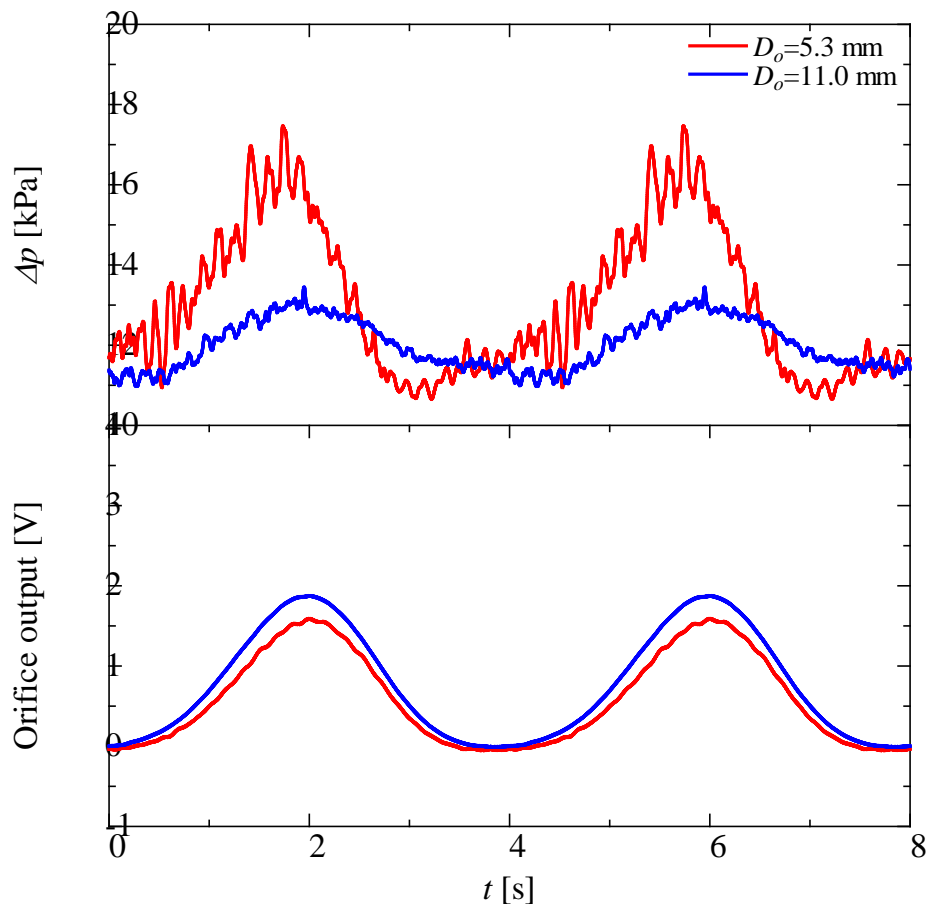


流動脈動沸騰二相流シミュレーション

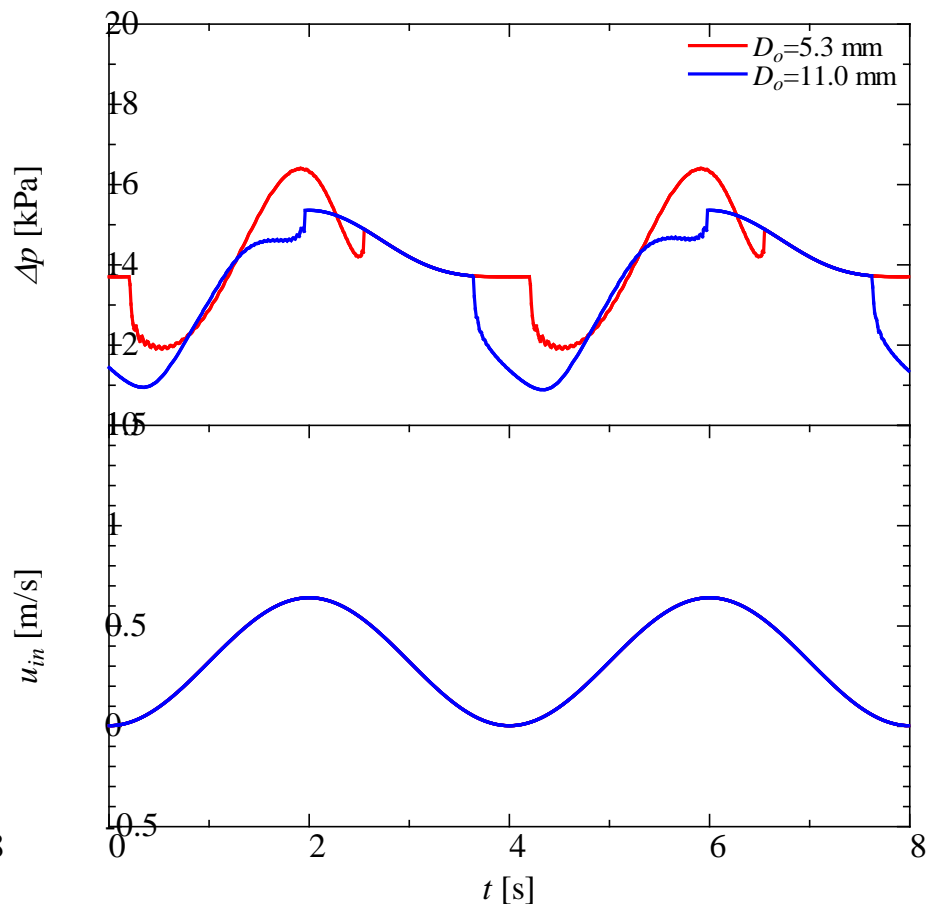
圧力損失特性
($q=120 \text{ kW/m}^2$ $x_{eq}=0.00$)

$D_i=5.0 \text{ mm}$ $L=1000 \text{ mm}$
 $p_s=0.3 \text{ MPa}$ $G_0=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{in}=60 \text{ deg.C}$
 $\tau=4 \text{ s}$ $\Delta G/G_0=1.0$

実験結果



計算結果



2013年度共同利用研究(7/2~7/4)

過渡応答時におけるボイド率挙動の動的評価に関する研究

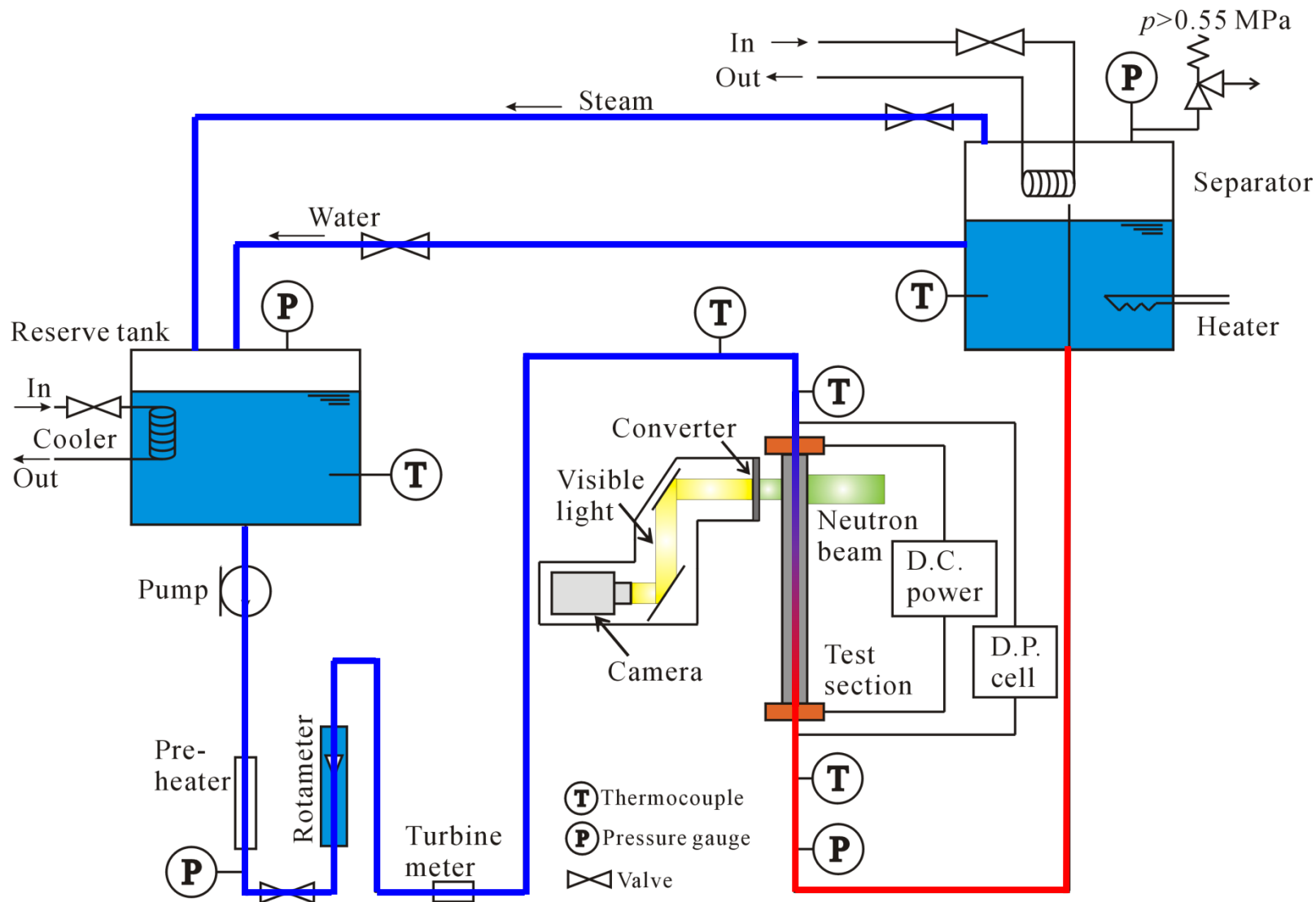
- 7/2, 3 熱出力:1 MW

下降流における時間平均ボイド率の計測

- 7/4 熱出力:5 MW

流動脈動下におけるボイド率の擬似動画の計測

実験装置(下降流におけるラジオグラフィ実験)



実験結果 (下降流におけるラジオグラフィ実験)

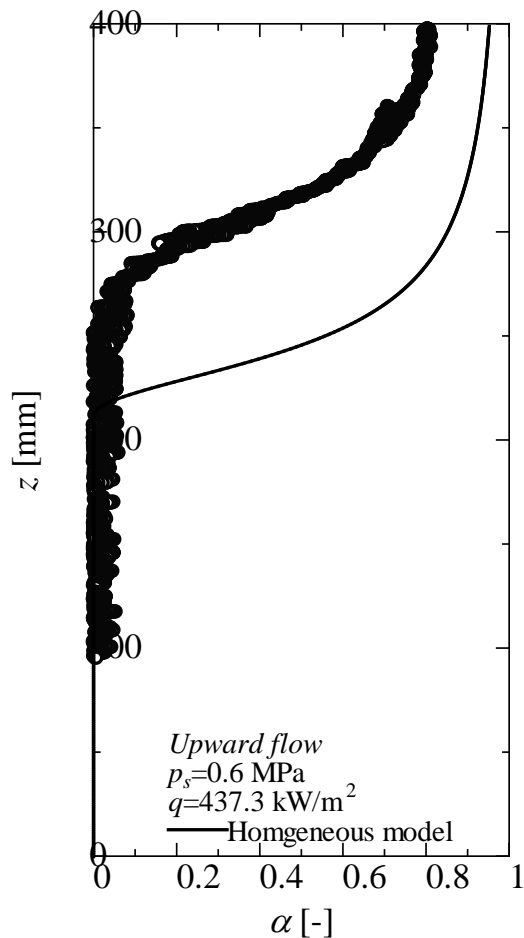
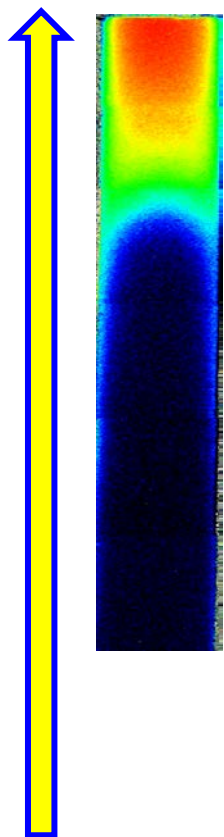
軸方向ボイド率分布 ($x_{eq}=0.1$)

$D_i=15.0$ mm $D_o=17.0$ mm $L=400$ mm

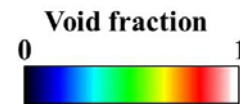
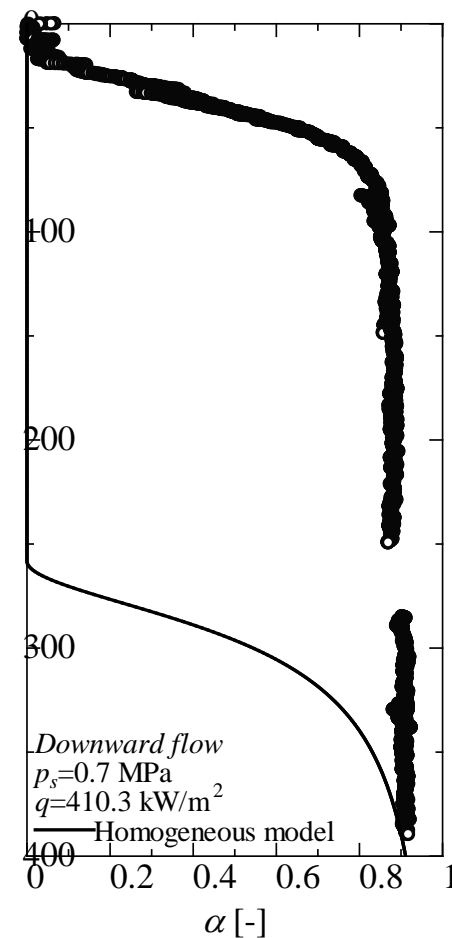
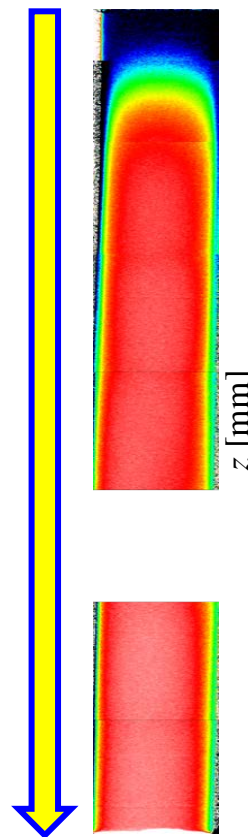
$G=100$ kg/m²s $T_{in}=80$ deg.C

熱出力: 1 MW 露光時間: 30 s

上昇流



下降流



管内径が同じで管外径の異なる管に対して、流動脈動下における伝熱実験を行い、あわせて熱中性子ラジオグラフィを適用し、管内ボイド率計測を行い、以下の結論を得た。

- 加振器と高速度カメラを同期させ、流動脈動下における管内ボイド率の擬似動画の計測を行い、管内ボイド率の時間変動を示した。
- 圧力損失特性、ボイド率特性より、薄肉管のほうが蒸気の生成が盛んであり、管内流体への入熱量が大きいと考えられる。また、この局所・瞬間における入熱量を考慮した数値計算は実験結果と定性的に良い一致を示した。

定常流下における上昇流、下降流に対して、中性子ラジオグラフィを適用し、以下の結論を得た。

- 下降流では蒸気の逆流に伴い、上昇流に比べて沸騰開始点は上流側へと大幅に移行し、上流部においてボイド率の急激な増加を示した。