



THINK × ACT
KANSAI
UNIVERSITY

2013/01/08-09

強制流動系における 中性子ラジオグラフィ適応事例の紹介

Seminar on neutron imaging @KURRI

- 中村 祥太 (関西大院) ○阪倉 一成 (関西大院) ○藤吉 翔太 (関西大院)
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)

1. Introduction

2. Experimental apparatus

3. Measurement error

4. Experimental results

- Upward flow
- Downward flow
- Oscillatory flow

5. Summary

Introduction

Boiling two-phase flow

沸騰二相流の挙動は、

- ・圧力損失
- ・限界熱流束
- ・原子炉の出力安定性

に大きな影響を及ぼす。

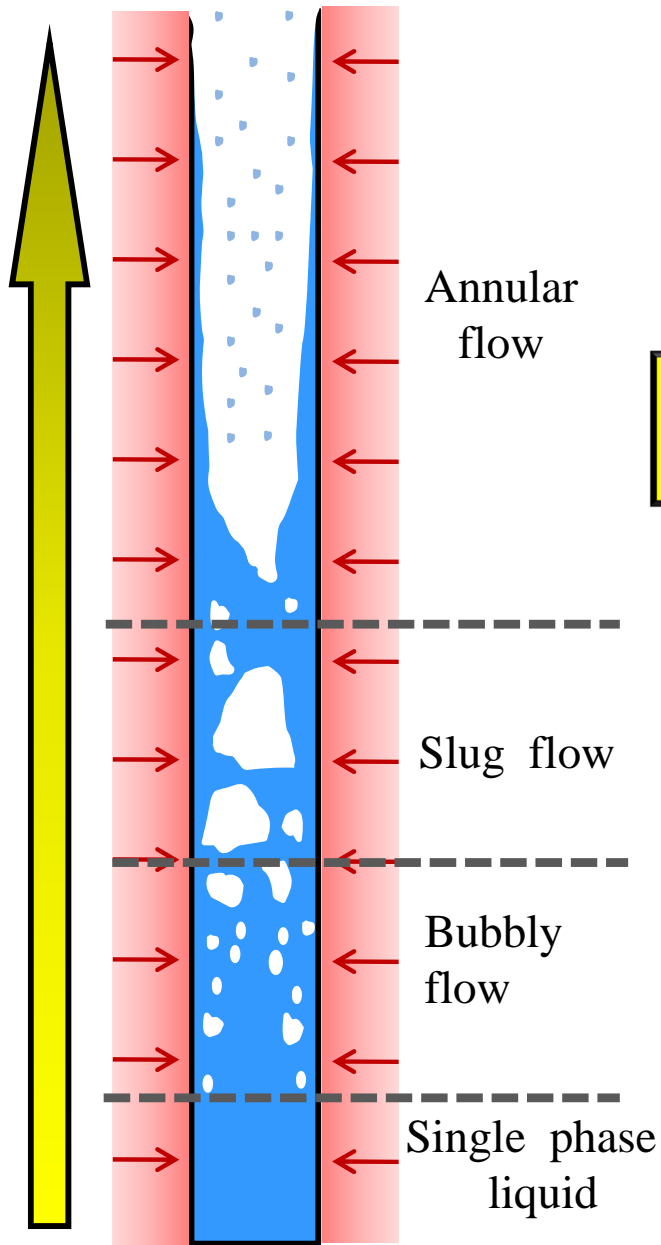
➡ 沸騰二相流の特性を知ることは必要である

ボイド率
(気相と液相の存在割合)

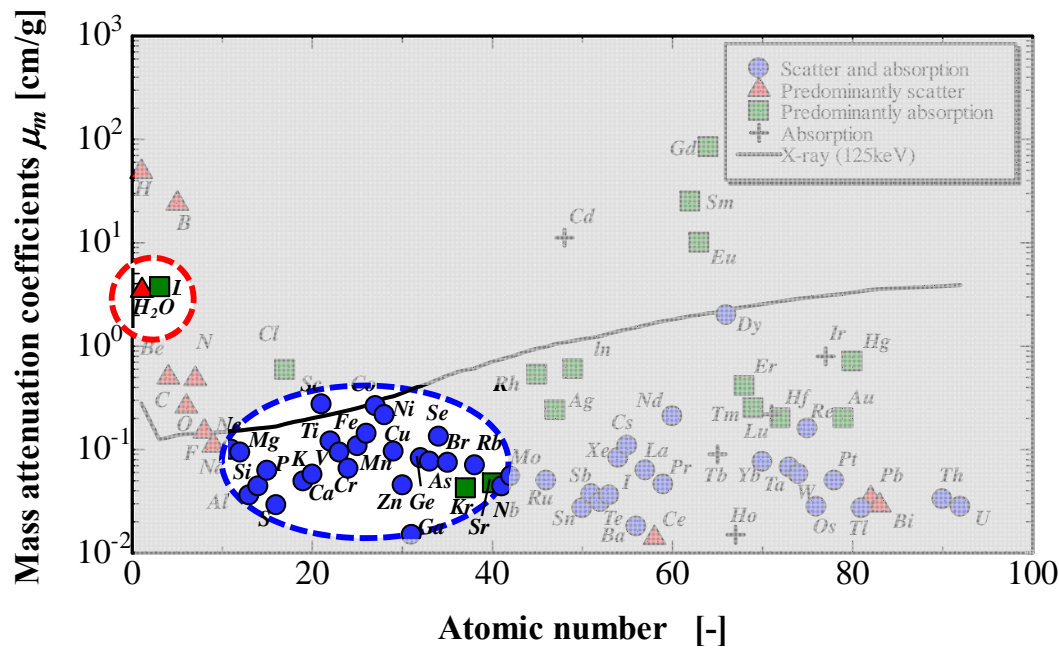
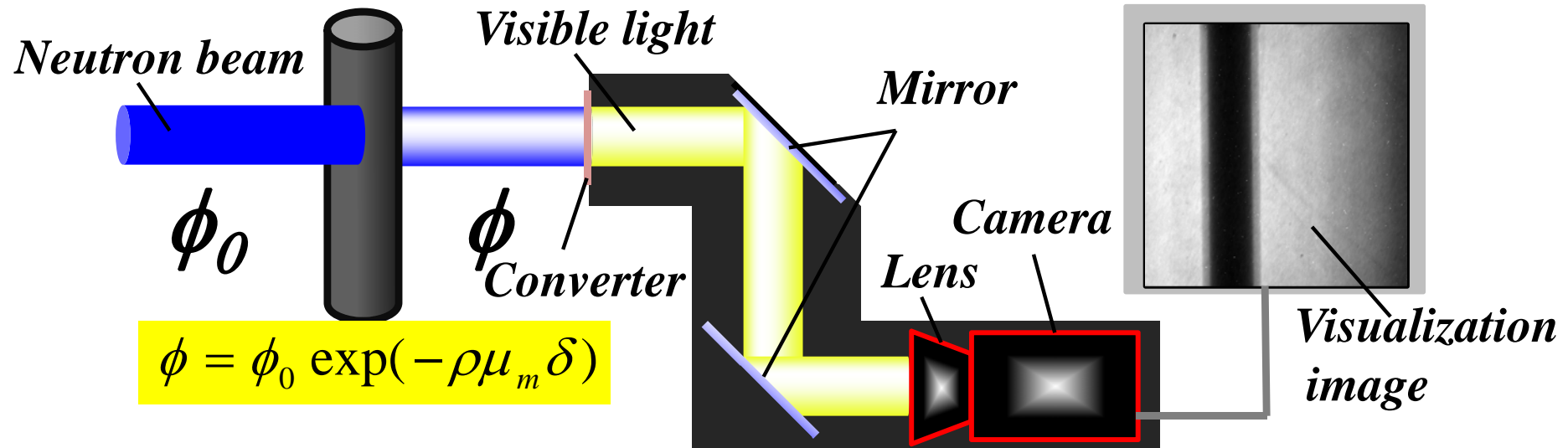
質量流束・圧力・管形状
加熱熱流束・流動方向

不安定流動

中性子ラジオグラフィ技術を
ボイド率測定に利用



中性子ラジオグラフィ



中性子

水: 強く減衰

金属: 透過しやすい



金属管内沸騰二相流の可視化に
有用な手段

Introduction

中性子ラジオグラフィ

静止画

◇定常流

上昇流・下降流

テストセクション全長にわたる詳細な軸方向のボイド率定量評価

・加熱熱流束 ・質量流束
・管内径

動画

◇不安定流動

流動脈動下におけるボイド率の定量評価

1. Introduction

2. Experimental apparatus

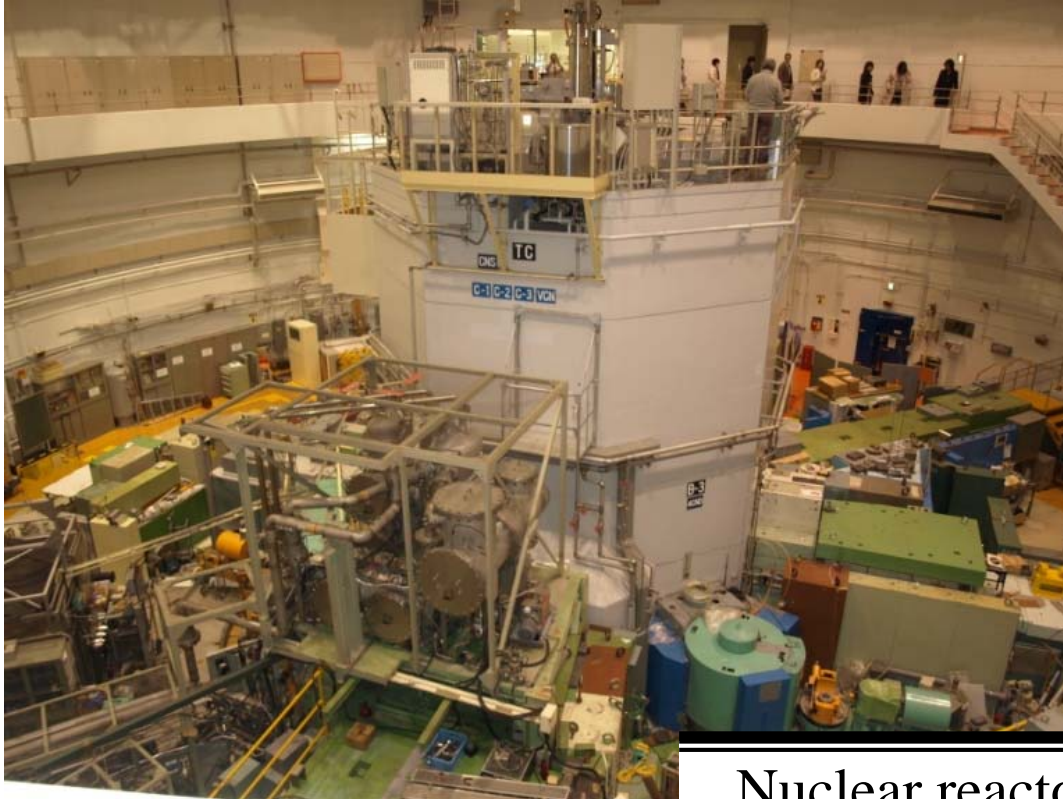
3. Measurement error

4. Experimental results

- Upward flow
- Downward flow
- Oscillatory flow

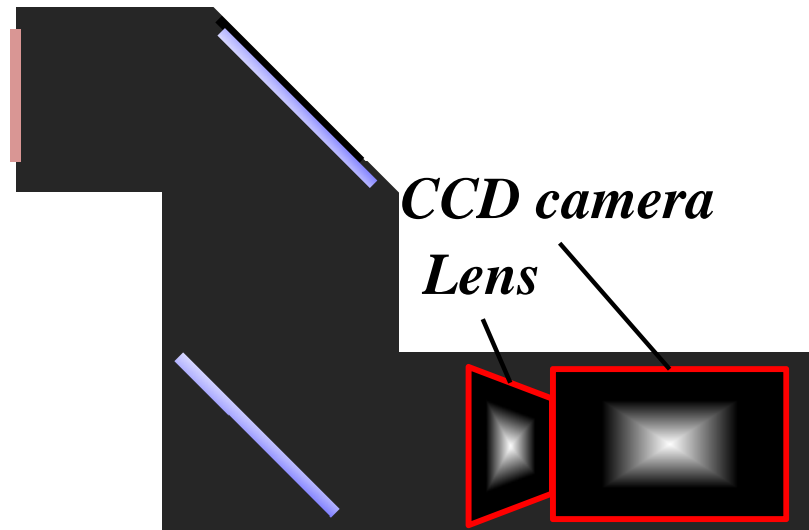
5. Summary

Nuclear Reactor



Nuclear reactor	KUR (B4 port)
Thermal output	1 MW(Max:5MW)
Neutron flux	1×10^7 n/cm ² s(Max: 5×10^7 n/cm ² s)
Typical spectrum	1.2 Å
Guide tube length	11.7 m
Guide tube cross section	10(D) × 75(D') mm

Imaging System



Converter

“ZNSL-L100-AL1016”
(CHICHIBU FUJI co., ltd.)

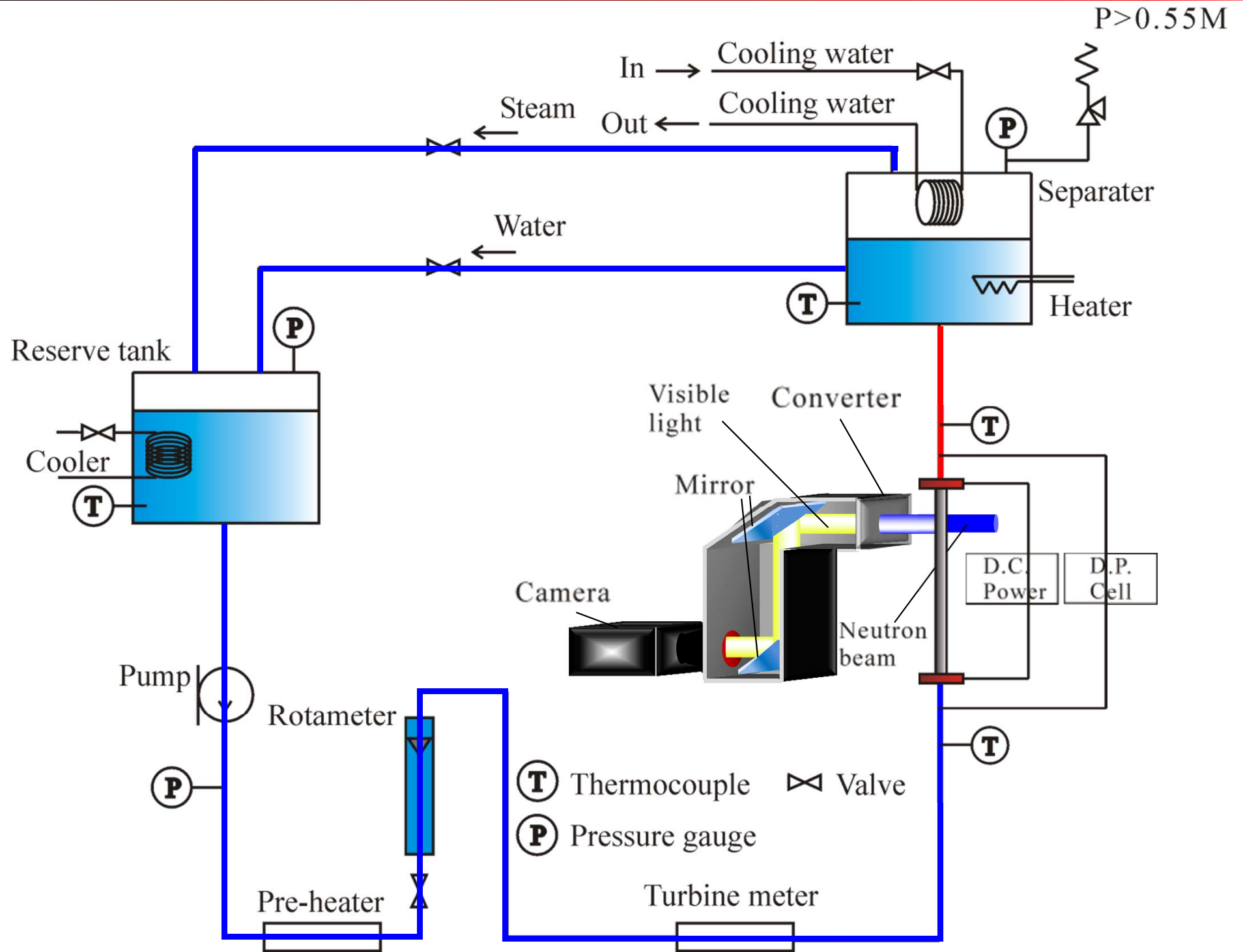
Lens

“APO MACRO 180mm F3.5”
(SIGMA corporation)

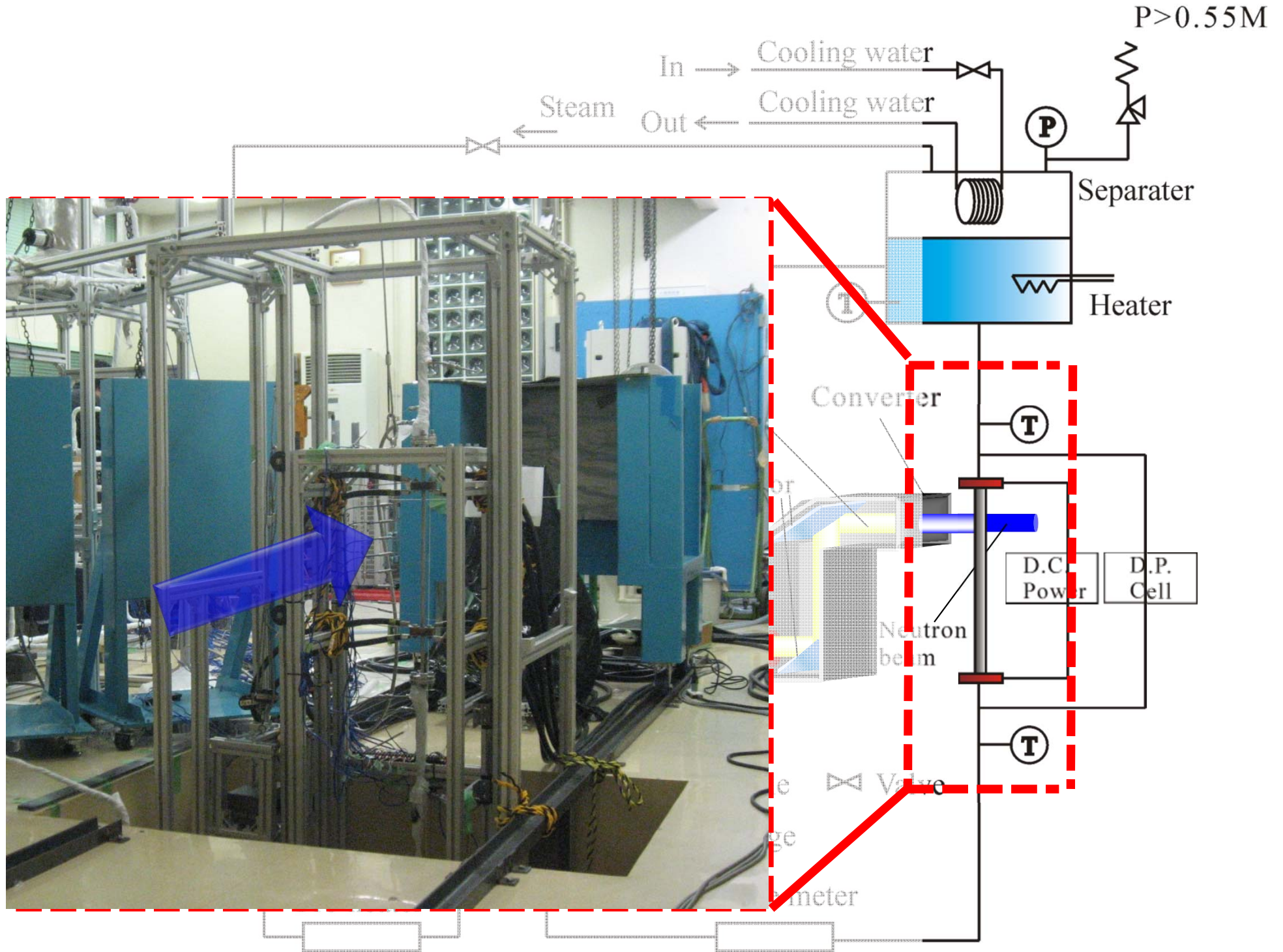
CCD camera

“PIXIS 1024B”
(Princeton Instruments)
Imaging array : 1024 × 1024 pixels

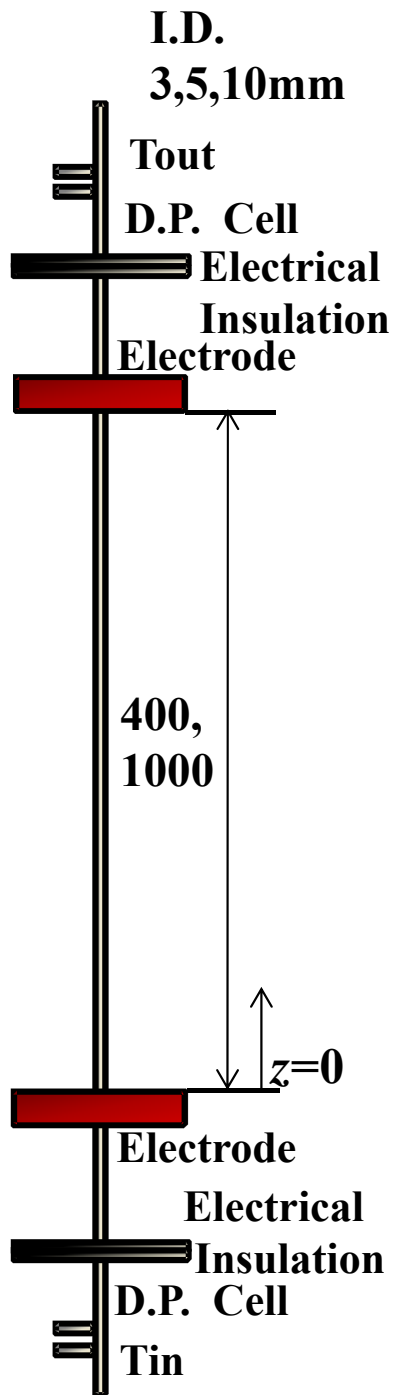
Experimental Apparatus



Experimental Apparatus



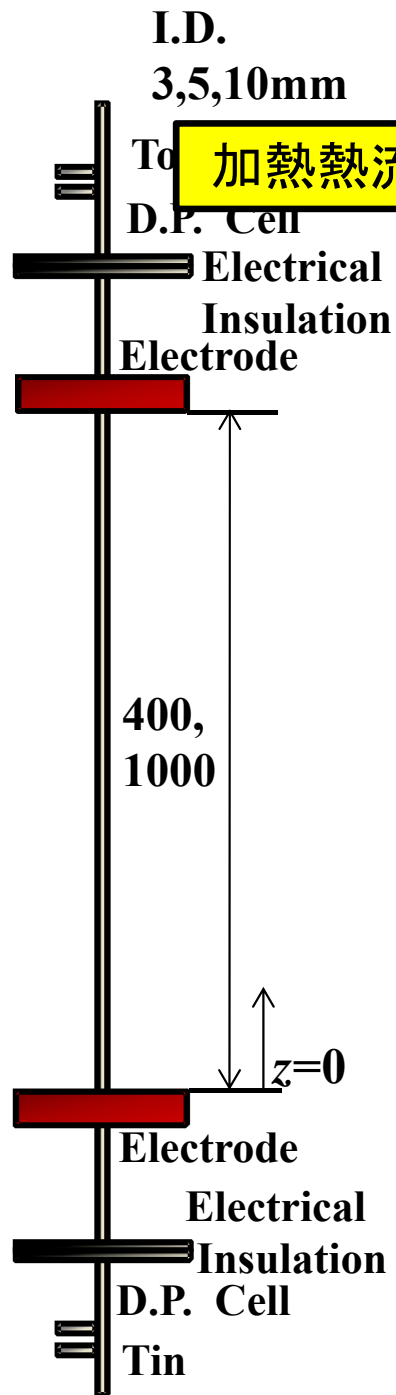
Experimental Apparatus



	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 1000\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 1000\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$
p_s [MPa]	0.3	0.3~0.8	0.30~0.4	0.3~0.8
G [kg/m ² s]	300	600	300	450
q [kW/m ²]	78~242	168~497	198~604	296~905
T_{in} [deg.C]	80	80	80	80
x_{eq_ex}	0.00~0.18	0.00~0.12	-0.01~0.165	-0.01~0.16

Condition 5	Condition 6	Condition 7	Condition 8	Condition 9
$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 200\text{mm}$	$D_i = 3\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 10\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$
0.3~0.6	0.3~0.7	0.3~0.5	0.3~0.6	0.3~1.1
600	1000	600	1000	300
419~1224	680~1700	810~2441	461~1249	421~1233
80	80	80	80	80
-0.01~0.13	-0.01~0.08	-0.01~0.15	0.00~0.14	0.00~0.09

Experimental Apparatus

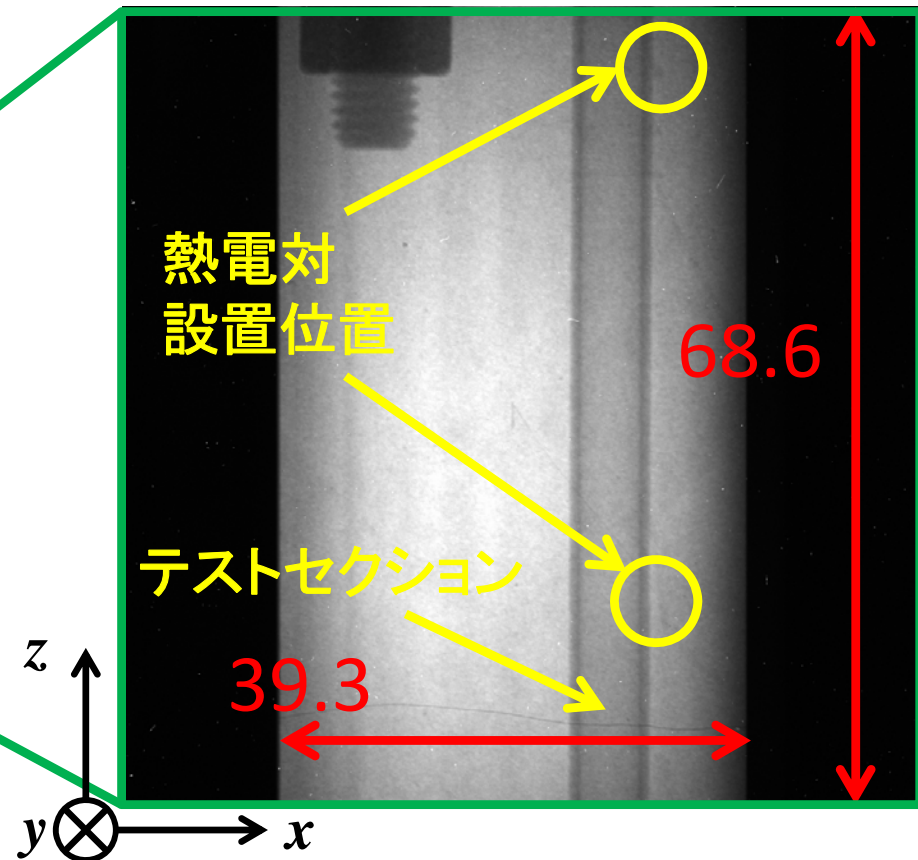
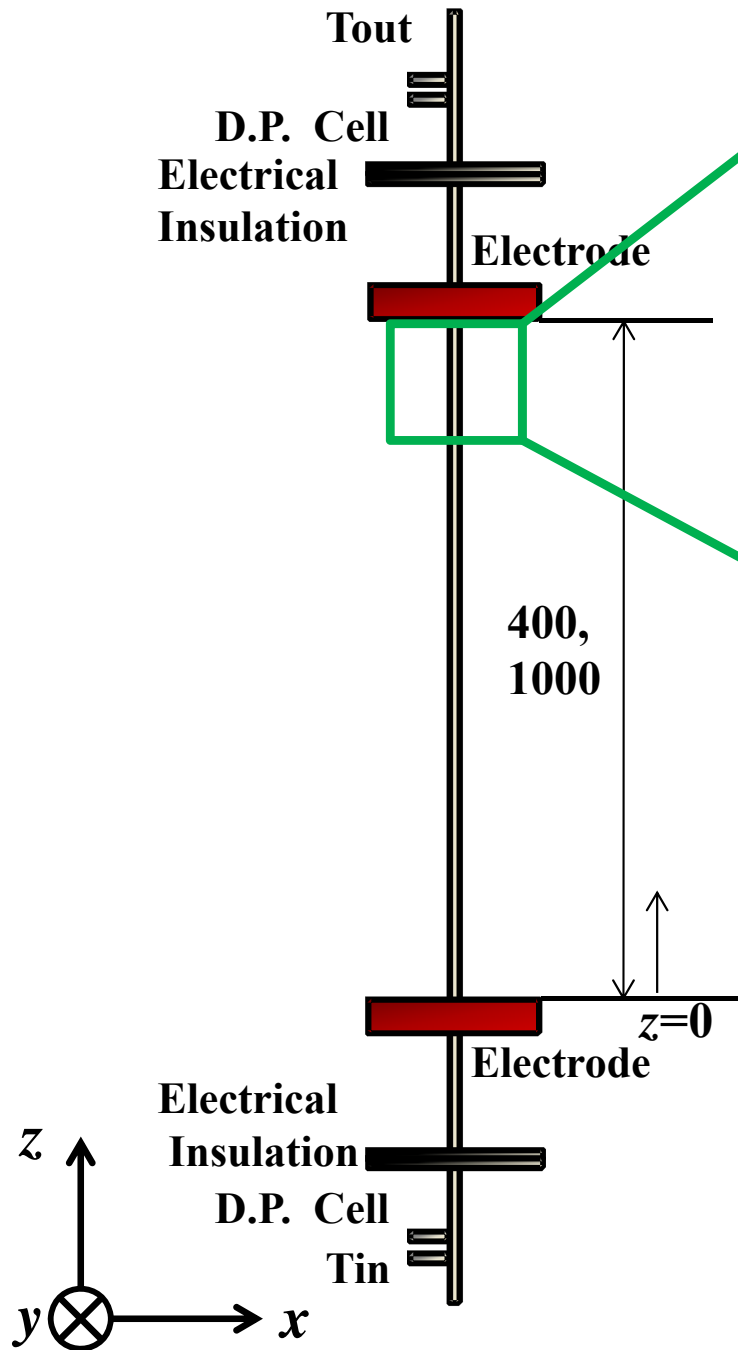


加熱熱流束の影響

	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
$D_i = 5\text{mm}$ $L = 1000\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 1000\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 1000\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$
p_s [MPa]	0.3	0.3~0.8	0.30~0.4	0.3~0.8
G [kg/m ² s]	300	600	300	450
q [kW/m ²]	78~242	168~497	198~604	296~905
T_{in} [deg.C]	80	80	80	80
x_{eq_ex}	0.00~0.18	0.00~0.12	-0.01~0.165	-0.01~0.16

Condition 5	Condition 6	Condition 7	Condition 8	Condition 9
$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 5\text{mm}$ $L = 200\text{mm}$	$D_i = 3\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$	$D_i = 10\text{mm}$ $L = 400\text{mm}$
0.3~0.6	0.3~0.7	0.3~0.5	0.3~0.6	0.3~1.1
600	1000	600	1000	300
419~1224	680~1700	810~2441	461~1249	421~1233
80	80	80	80	80
-0.01~0.13	-0.01~0.08	-0.01~0.15	0.00~0.14	0.00~0.09

Visible region

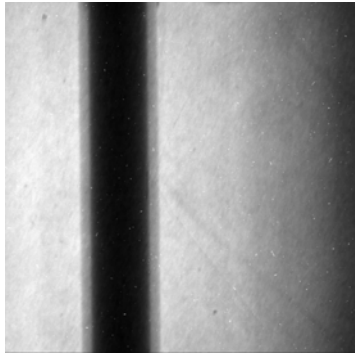


Flame size 1024×1024
pixel \times pixel

Spatial resolution 0.067mm/pixel

Exposure time 20s (3mm, 5mm)
30s (10mm)

Radiography



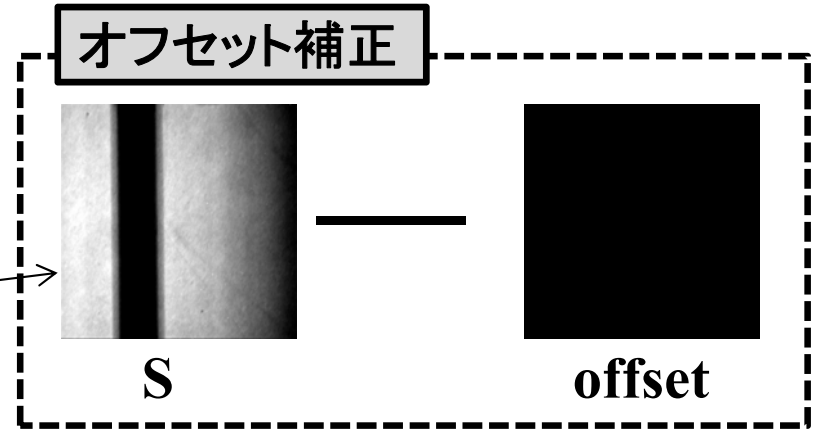
透過中性子の強度

$$\phi = \phi_0 \exp(-\rho\mu_m \delta)$$

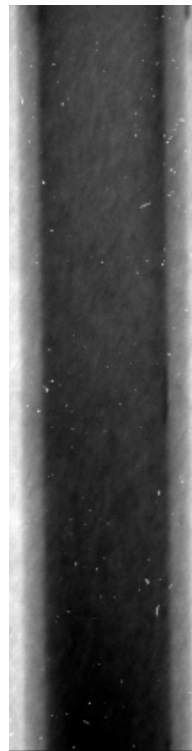
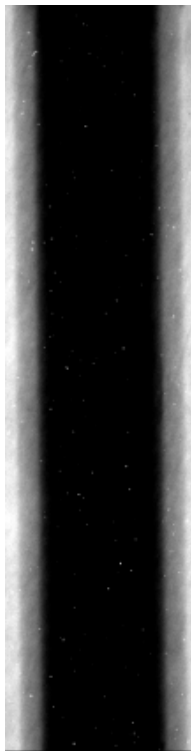
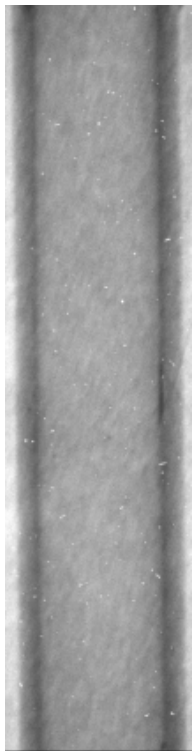
取得画像の輝度値

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

G :ゲイン O :撮像系の暗電流値



two-phase
air only liquid only flow offset



S_G

S_L

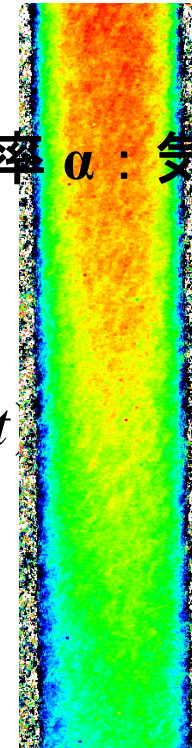
S_{TP}

O

Void fraction distribution

ボイド率 α : 気相と液相の存在比

$$\alpha(x, y, t) = \frac{S_{TP}(x, y, t) - O(x, y)}{S_L(x, y) - O(x, y)} \left(\frac{S_G(x, y) - O(x, y)}{S_L(x, y) - O(x, y)} \right)$$



0

1

1. Introduction

2. Experimental apparatus

3. Measurement error

4. Experimental results

- Upward flow
- Downward flow
- Oscillatory flow

5. Summary

Measurement Error

測定精度に関連する項目

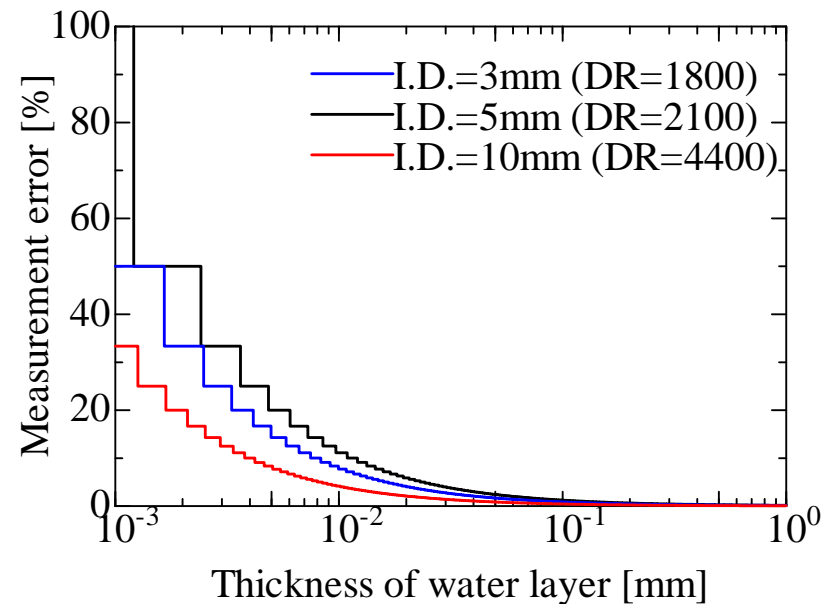
- ・ダイナミックレンジ(DR)
- ・即発 γ 線
- ・中性子ビームの非平行性
- ・散乱中性子
- ・暗電流

Measurement Error

測定精度に関連する項目

- ・ダイナミックレンジ(DR)
- ・即発 γ 線
- ・中性子ビームの非平行性
- ・散乱中性子
- ・暗電流

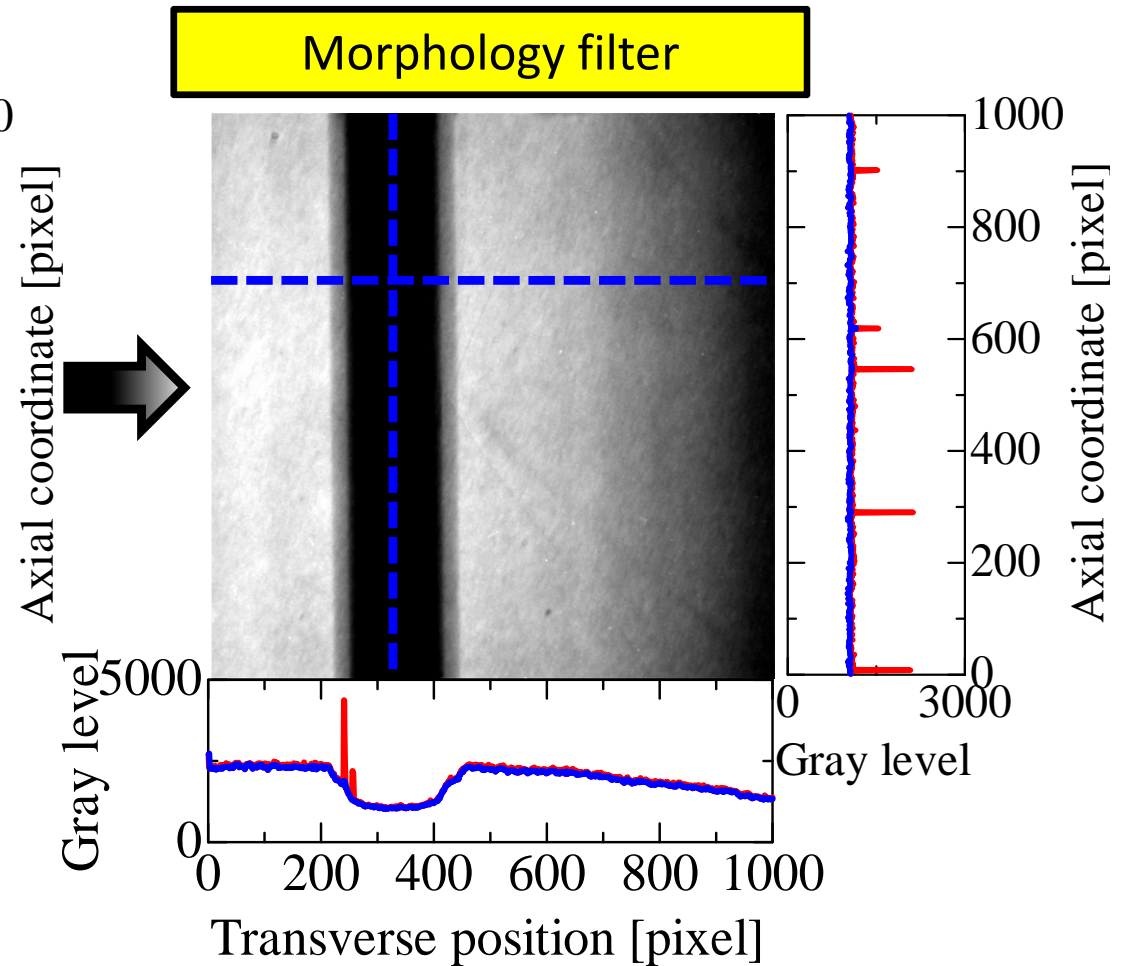
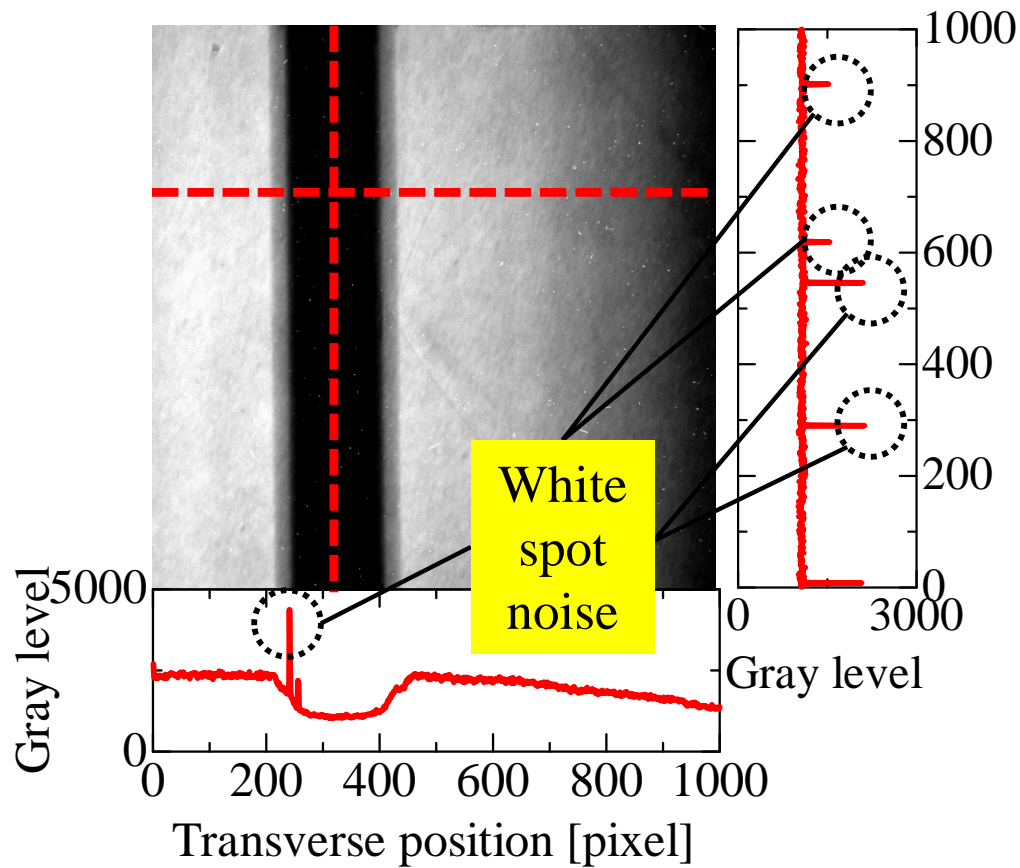
取得データの輝度値はデジタル値であるため、デジタル誤差の評価が必要
▶ダイナミックレンジ(気相単相と液相単相の輝度値の差)から
液相透過厚さの計測誤差率を評価



Measurement Error

測定精度に関連する項目

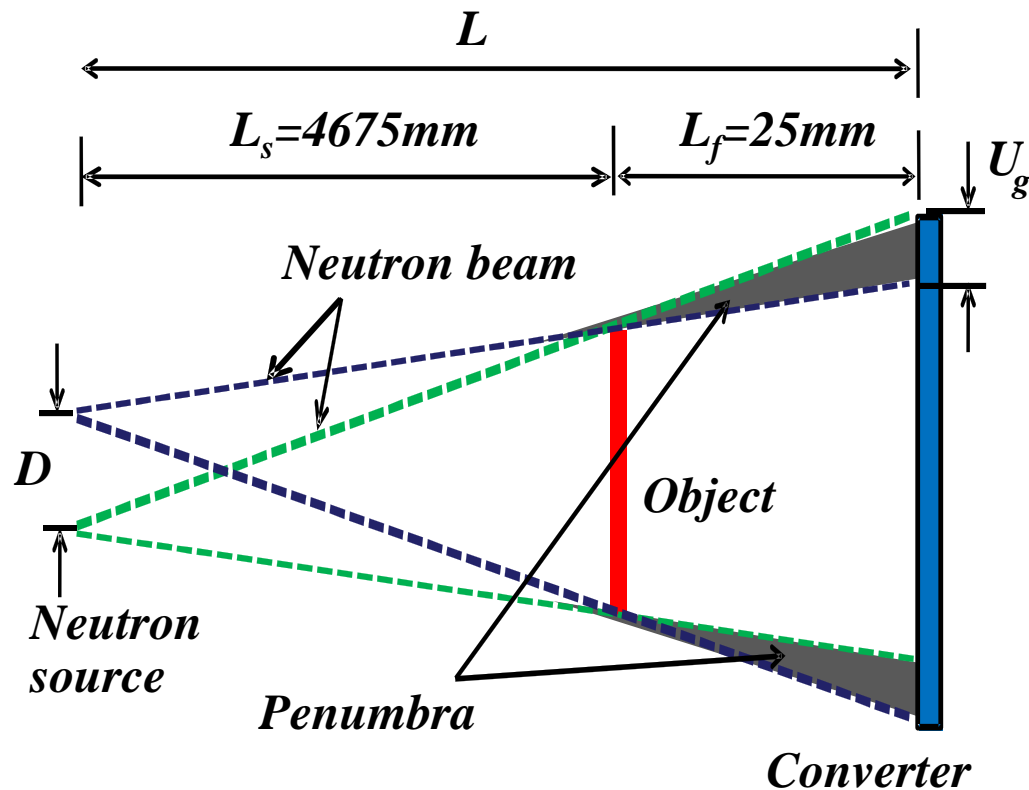
- ・ダイナミックレンジ(DR)
- ・即発 γ 線
- ・中性子ビームの非平行性
- ・散乱中性子
- ・暗電流



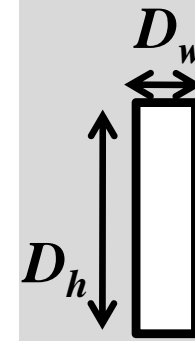
Measurement Error

測定精度に関連する項目

- ・ダイナミックレンジ(DR)
- ・即発 γ 線
- ・中性子ビームの非平行性
- ・散乱中性子
- ・暗電流



$$U_g = \frac{D}{L} L_f$$



$$D_w = 10\text{mm}$$
$$D_h = 75\text{mm}$$

$$U_{gw} = 0.11\text{mm} (2\text{pixel})$$

$$U_{gh} = 0.8\text{mm} (14\text{pixel})$$

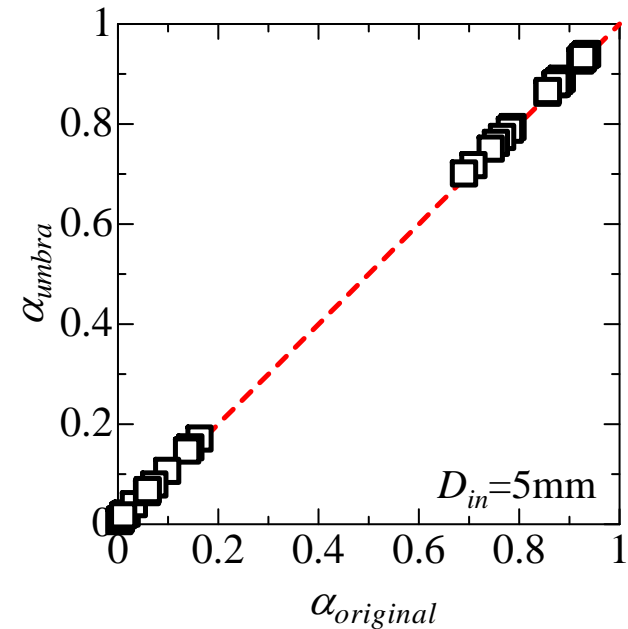
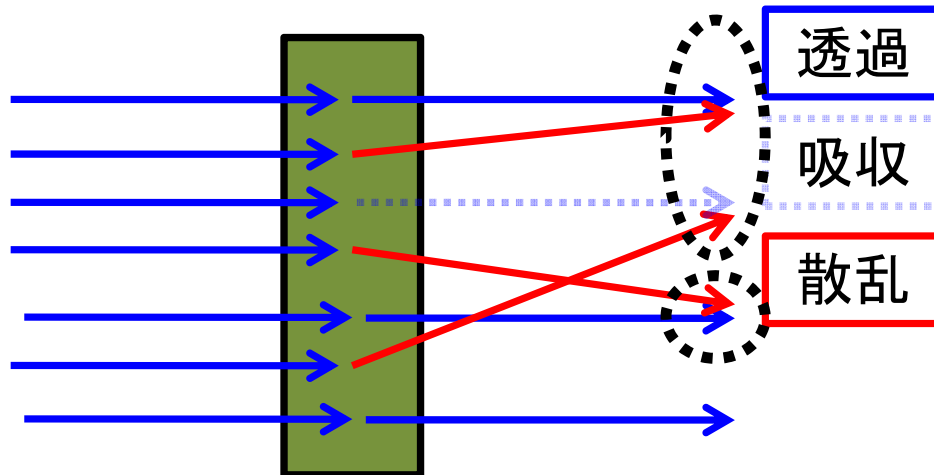
Measurement Error

測定精度に関連する項目

- ・ダイナミックレンジ(DR)
- ・即発 γ 線
- ・中性子ビームの非平行性
- ・散乱中性子
- ・暗電流

・散乱成分が主となる場合、透過画像に対して散乱中性子がオフセット的に重畳する

真影法



1. Introduction

2. Experimental apparatus

3. Measurement error

4. Experimental results

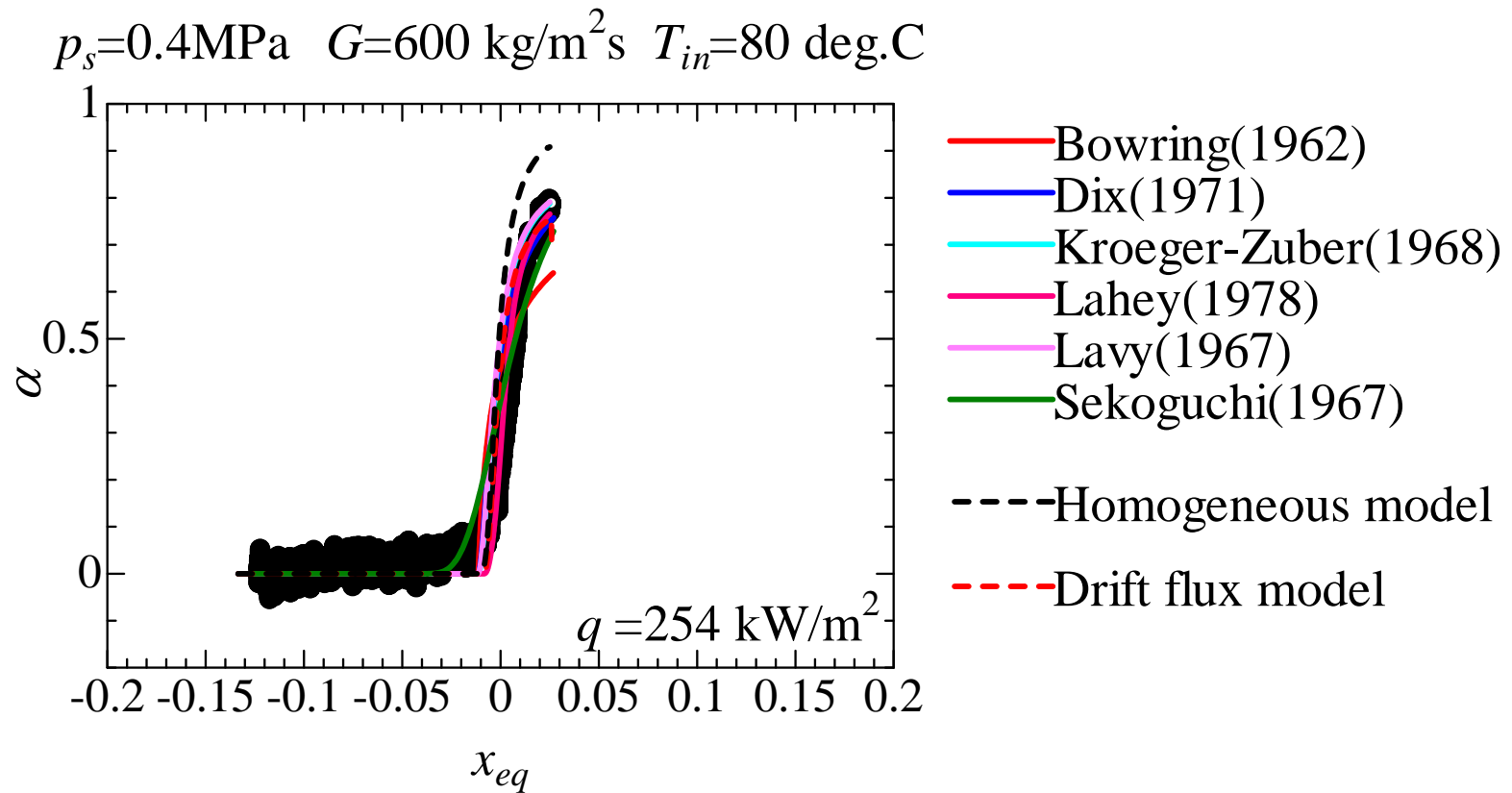
- **Upward flow**
- Downward flow
- Oscillatory flow

5. Summary

Void fraction (5mm)

Thermal output : 1MW Exposure : 20s

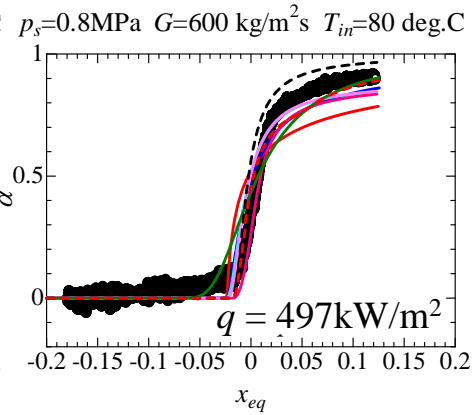
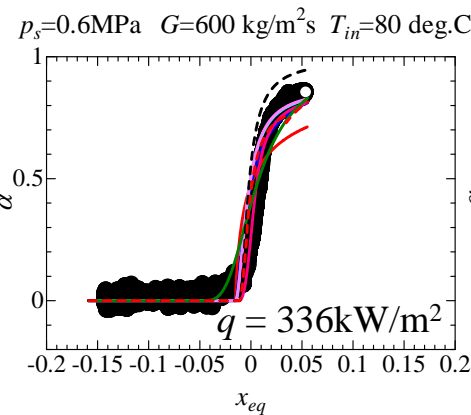
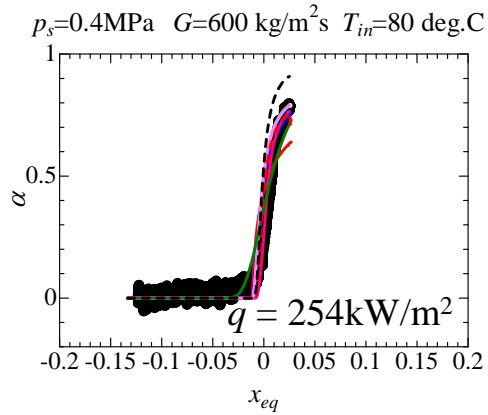
I.D.=5mm
L=1000mm
G=600kg/m²s



Void fraction (5mm)

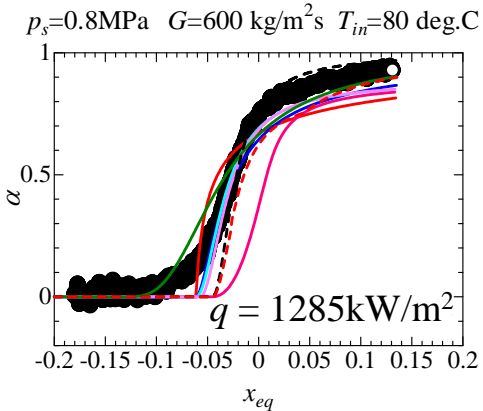
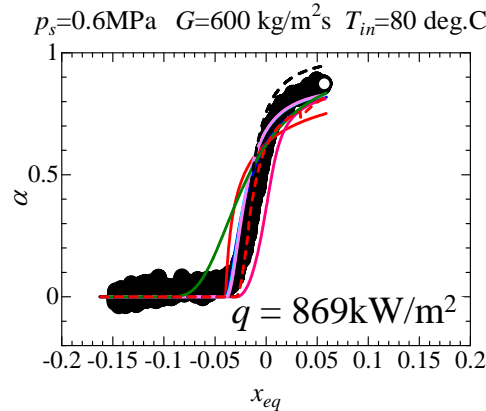
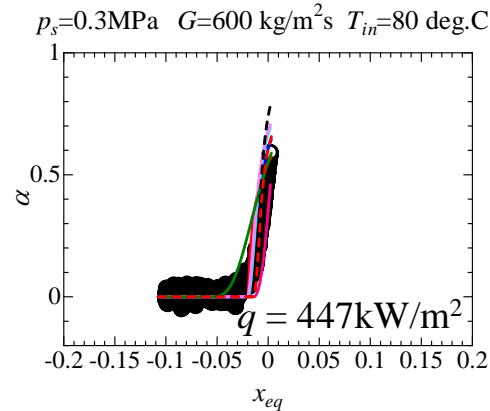
Thermal output : 1MW Exposure : 20s

$L=1000$ mm



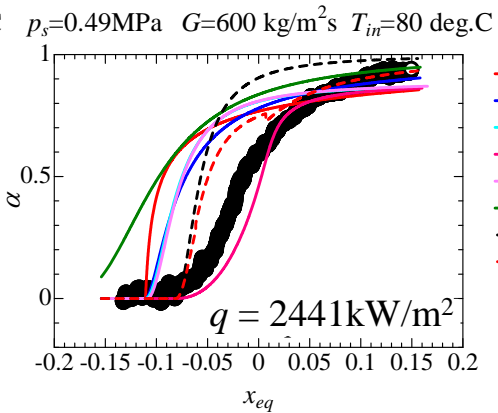
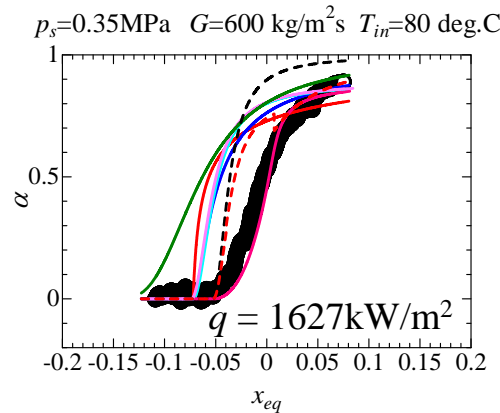
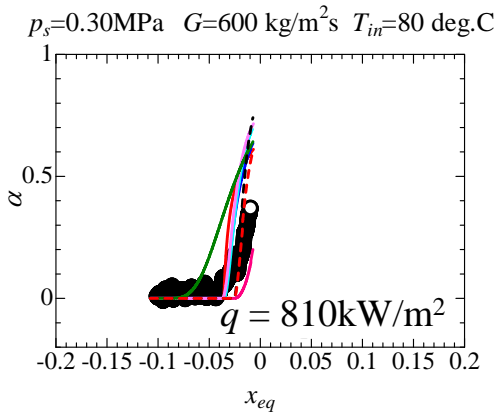
- Bowring(1962)
- Dix(1971)
- Kroeger-Zuber(1968)
- Lahey(1978)
- Levy(1967)
- Sekoguchi(1967)
- - - Homogeneous model
- - - Drift flux model

$L=400$ mm



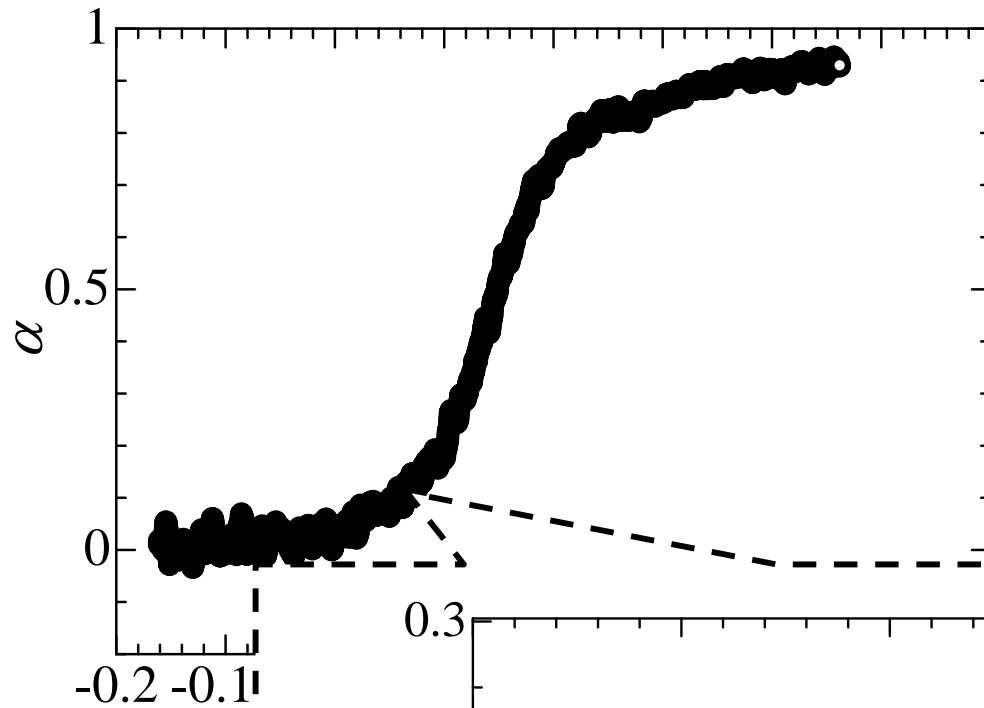
- Bowring(1962)
- Dix(1971)
- Kroeger-Zuber(1968)
- Lahey(1978)
- Levy(1967)
- Sekoguchi(1967)
- - - Homogeneous model
- - - Drift flux model

$L=200$ mm



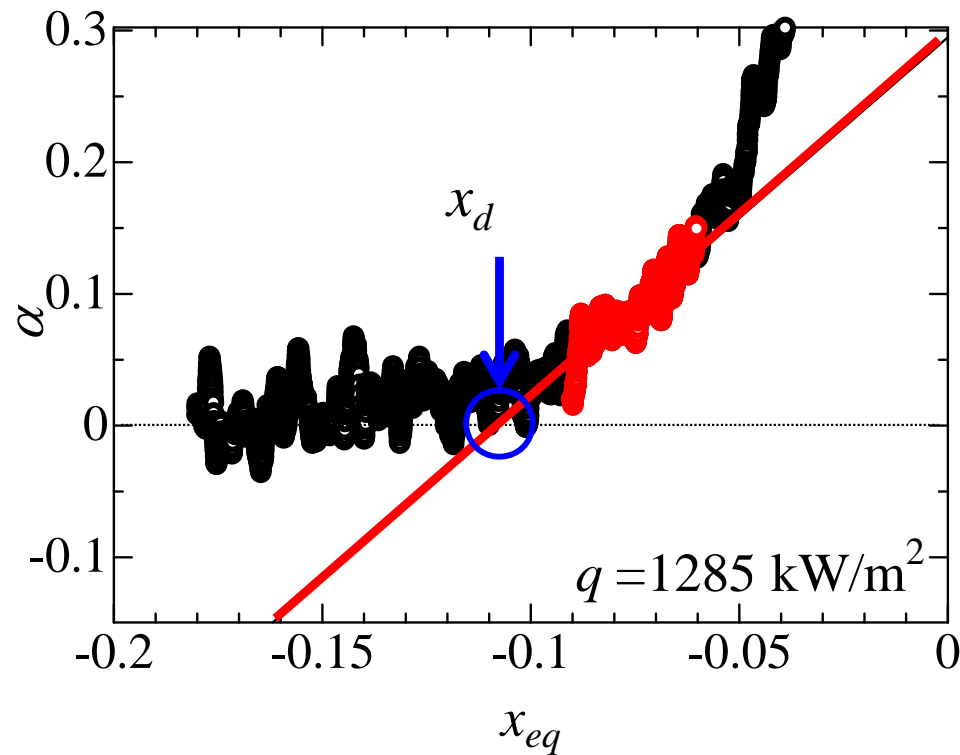
- Bowring(1962)
- Dix(1971)
- Kroeger-Zuber(1968)
- Lahey(1978)
- Levy(1967)
- Sekoguchi(1967)
- - - Homogeneous model
- - - Drift flux model

Point of net vapor generation



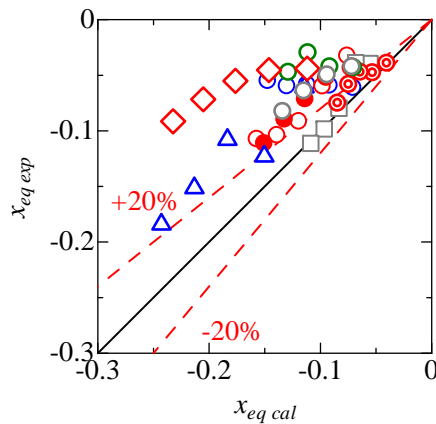
沸騰開始点の定義方法

沸騰開始直後のほぼ直線的に上昇するデータを用いて、
一次の最小二乗法により、沸騰開始点を決定

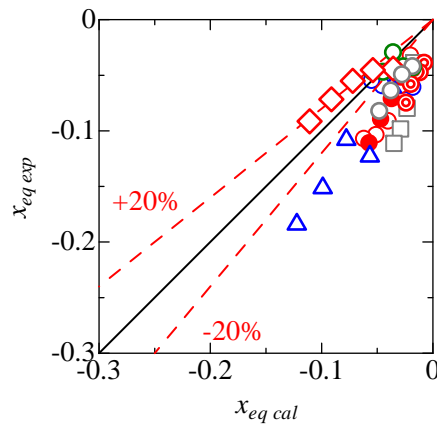


Point of net vapor generation

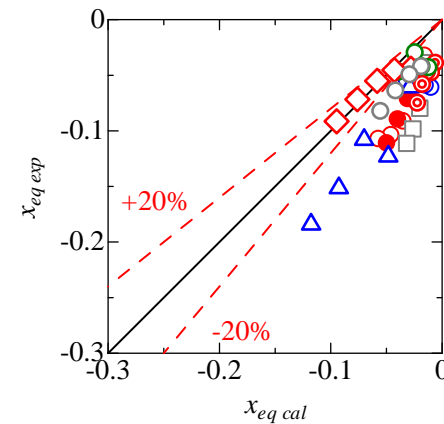
- | | | | | | |
|---|------------------|-------------------------------|---|-------------------|-------------------------------|
| ○ | I.D.=5mm L=400mm | $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ | □ | I.D.=3mm L=400mm | $G=1000\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| ○ | I.D.=5mm L=400mm | $G=450\text{kg/m}^2\text{s}$ | △ | I.D.=10mm L=400mm | $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| ○ | I.D.=5mm L=400mm | $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$ | ⊙ | I.D.=5mm L=1000mm | $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| ● | I.D.=5mm L=400mm | $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$ | ◇ | I.D.=5mm L=200mm | $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| ○ | I.D.=5mm L=400mm | $G=1000\text{kg/m}^2\text{s}$ | | | |



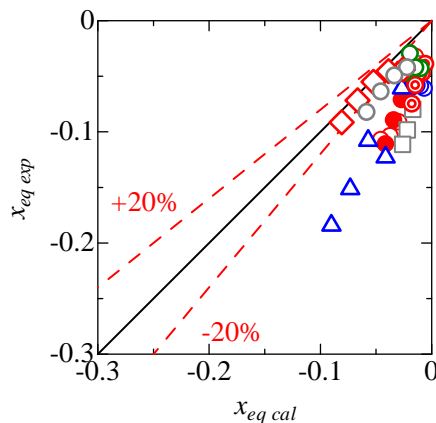
(a) Sekoguchi



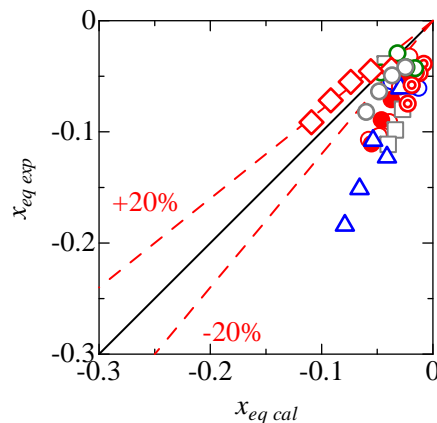
(b) Bowring



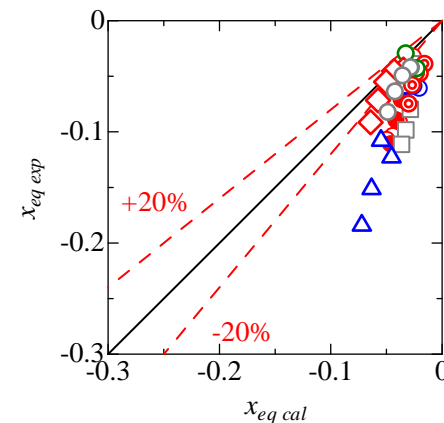
(c) Ahamd



(d) Saha-Zuber



(e) Levy



(f) Sun

→全条件を通して、定量的に良い一致を示す相関式はない

1. Introduction

2. Experimental apparatus

3. Measurement error

4. Experimental results

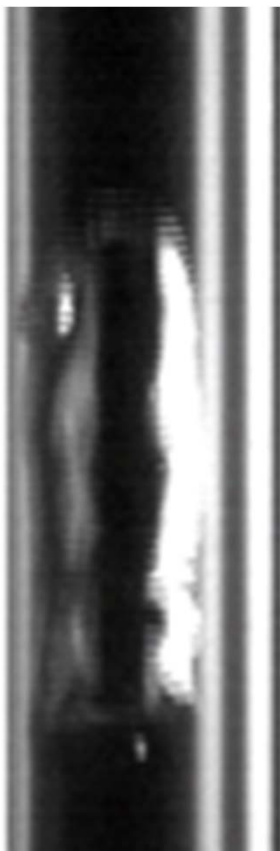
- Upward flow
- **Downward flow**
- Oscillatory flow

5. Summary

Downward flow (5mm)

上昇流

下降流



	上昇流	下降流
流動方向	↑	↓
浮力(気泡)	↑	↑

➔ 沸騰下降二相流における流動構造の違いがボイド率に与える影響を評価する必要がある

Air-Water Two-Phase Flow

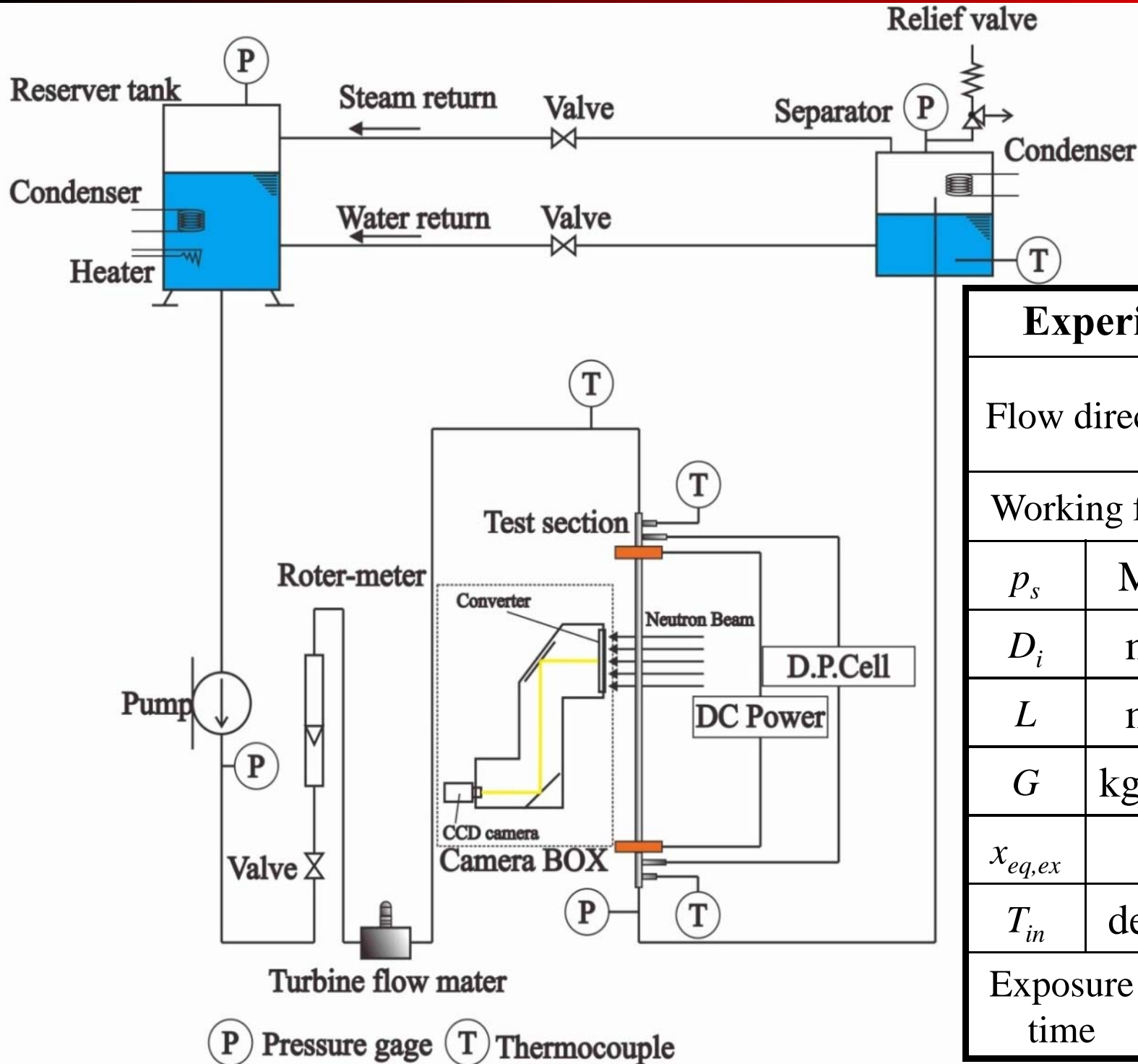
$D_i = 5 \text{ mm}$

$j_G = 0.19 \text{ m/s}$ $j_L = 1.06 \text{ m/s}$

✓ 沸騰開始点

✓ ボイド率分布

Experimental Apparatus -Downward flow-



Experimental condition		
Flow direction	Upward Downward	
Working fluid	Water	
p_s	MPa	0.3
D_i	mm	10
L	mm	400
G	$\text{kg/m}^2\text{s}$	50, 100
$x_{eq,ex}$	-	0.00, 0.05, 0.10
T_{in}	deg.C	80
Exposure time	s	30

Void fraction (10mm)

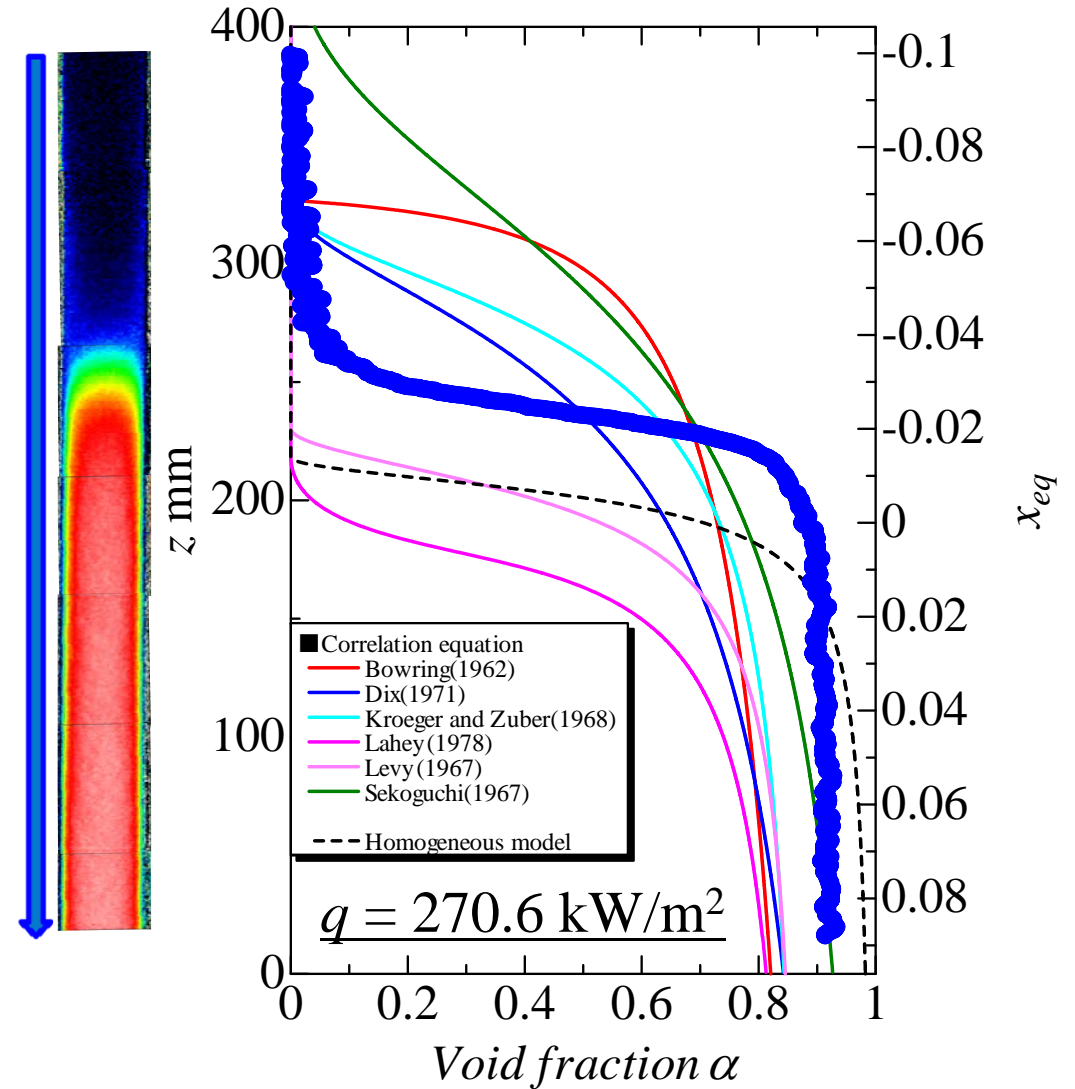
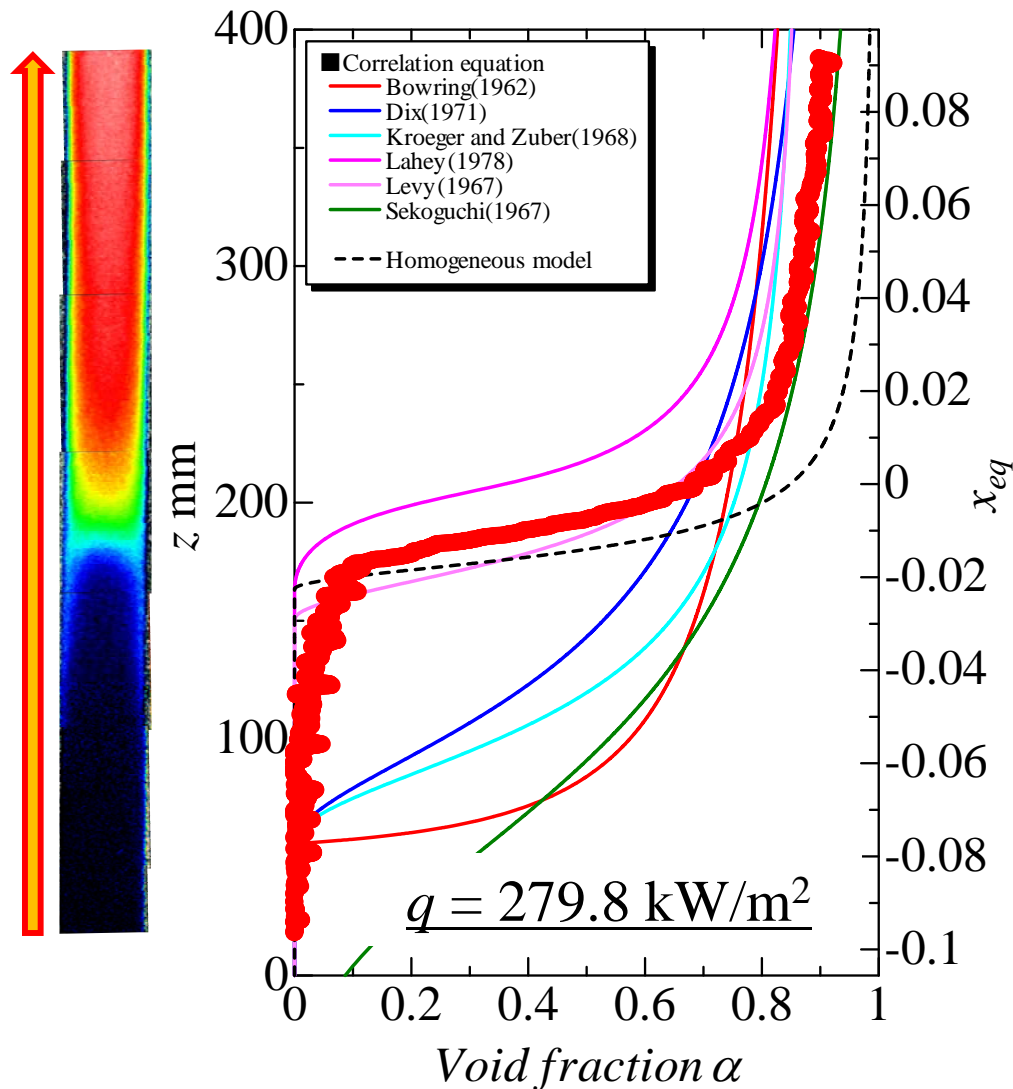
Thermal output : 1MW Exposure : 30s

$D_i = 10 \text{ mm}$ $L = 400 \text{ mm}$ $p_s = 0.3 \text{ MPa}$
 $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $x_{eq,ex} = 0.10$



上昇流

下降流



Void fraction (10mm)

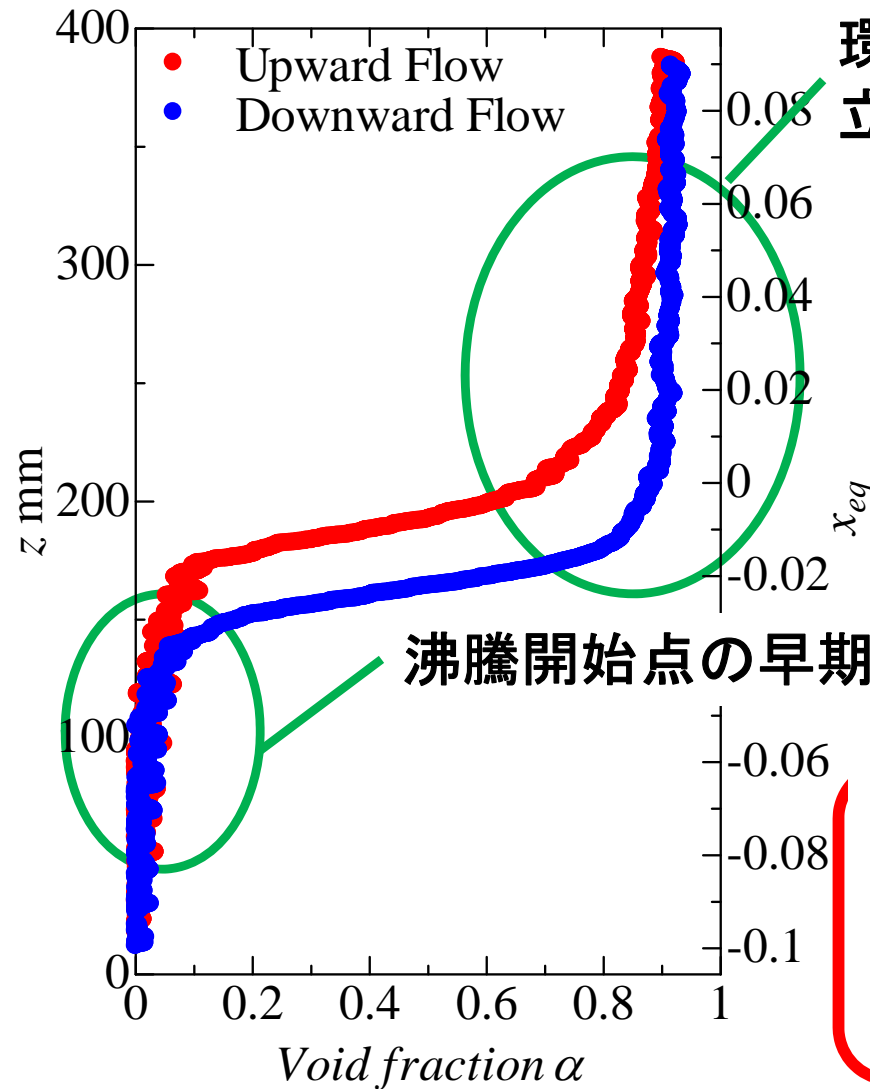
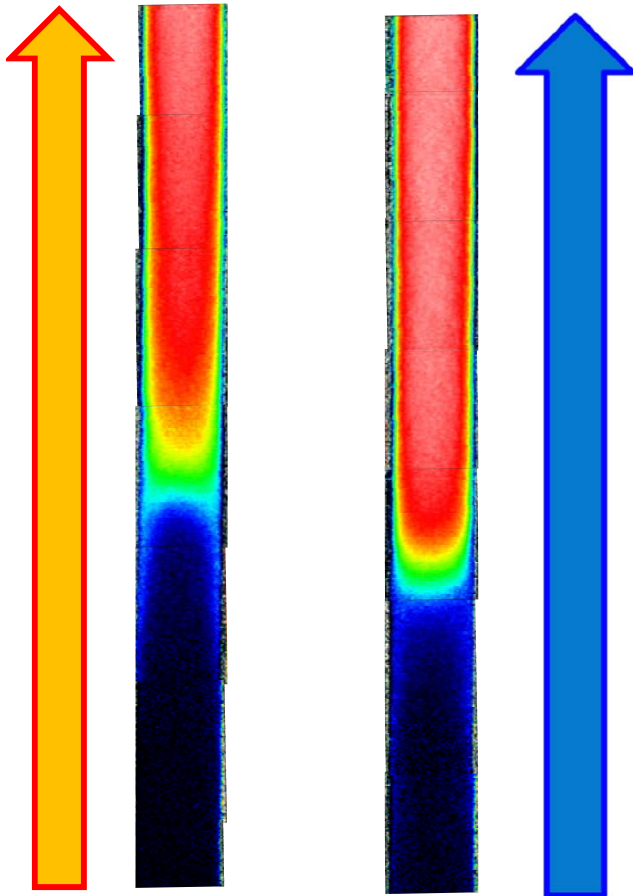
Thermal output : 1MW Exposure : 30s

$D_i = 10 \text{ mm}$ $L = 400 \text{ mm}$ $p_s = 0.3 \text{ MPa}$
 $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $x_{eq,ex} = 0.10$



上昇流

下降流



環状流域への
立ち上がりが異なる

沸騰開始点の早期化

スラグ気泡の上昇速度

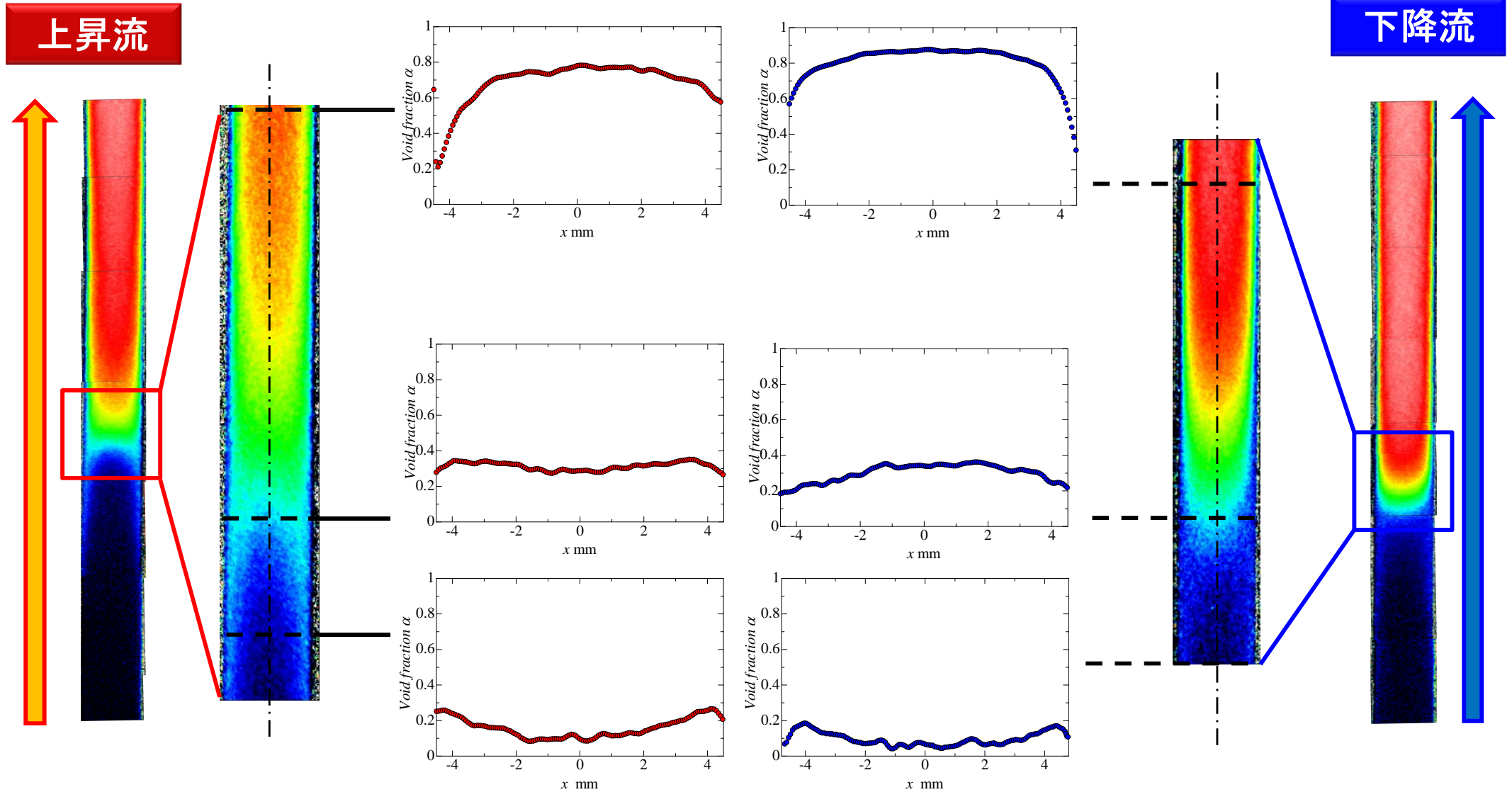
$$u = 0.35\sqrt{gD}$$

$$G = 102 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Void fraction (10mm)

Thermal output : 1MW Exposure : 30s

$D_i = 10 \text{ mm}$ $L = 400 \text{ mm}$ $p_s = 0.3 \text{ MPa}$
 $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $x_{eq,ex} = 0.10$



Void fraction (10mm)

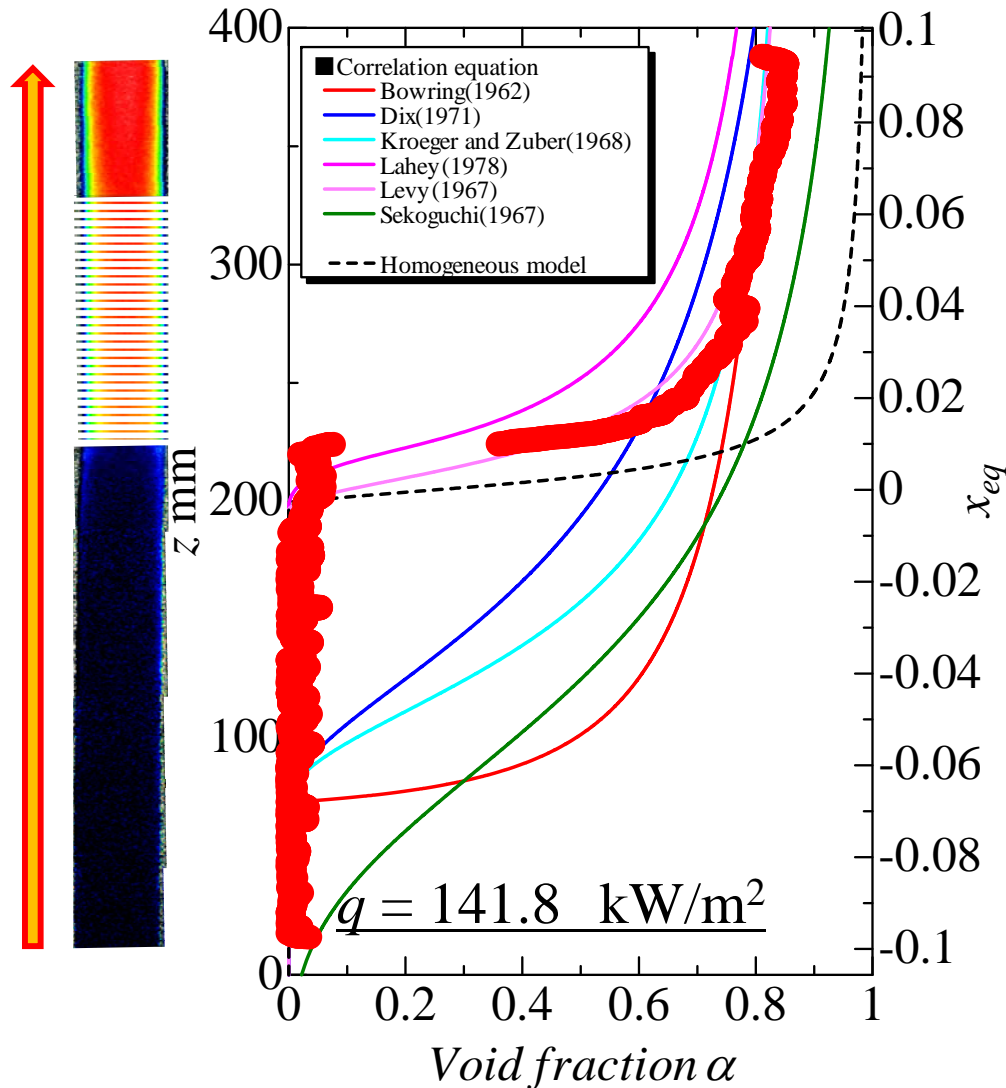
Thermal output : 1MW Exposure : 30s

$D_i = 10 \text{ mm}$ $L = 400 \text{ mm}$ $p_s = 0.3 \text{ MPa}$

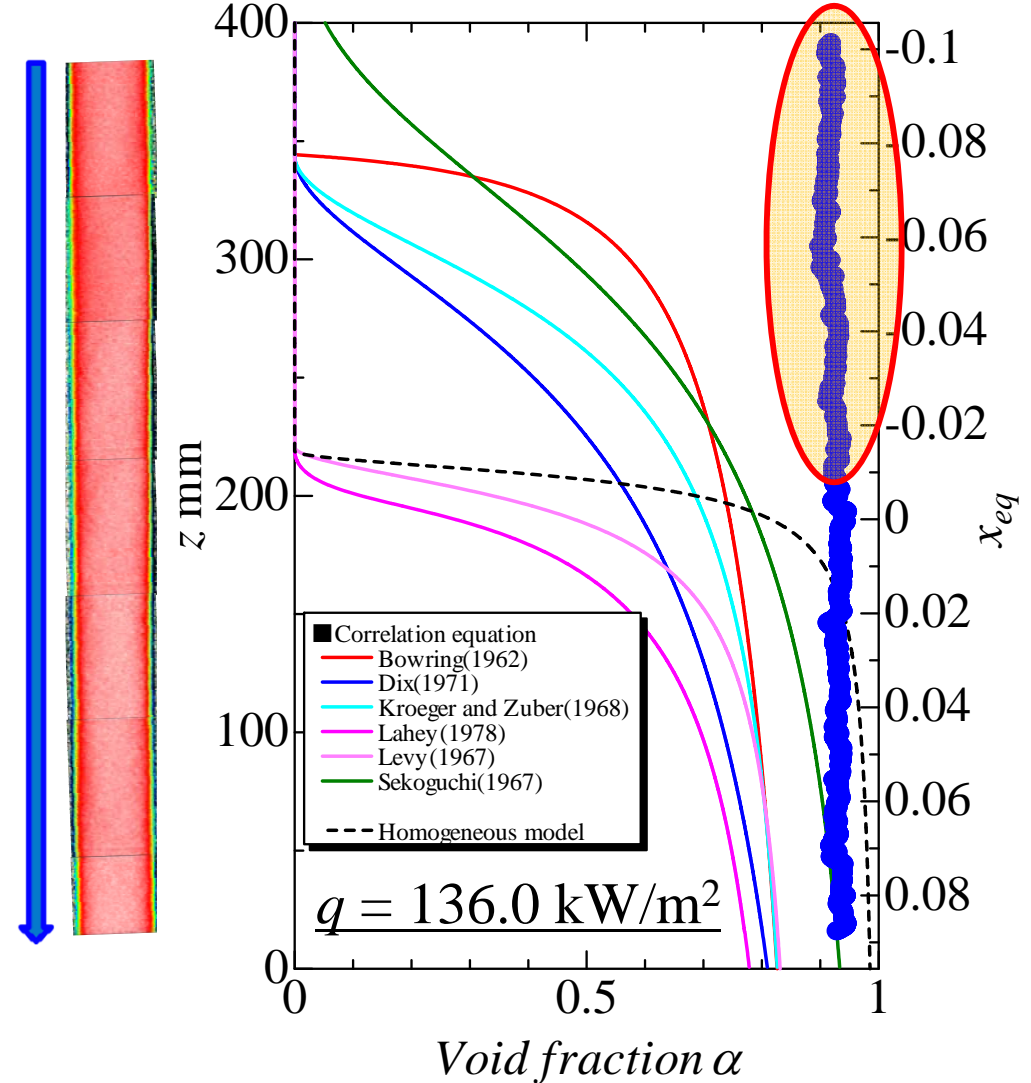
$G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $x_{eq,ex} = 0.10$



上昇流



下降流



1. Introduction

2. Experimental apparatus

3. Measurement error

4. Experimental results

- Upward flow
- Downward flow
- **Oscillatory flow**

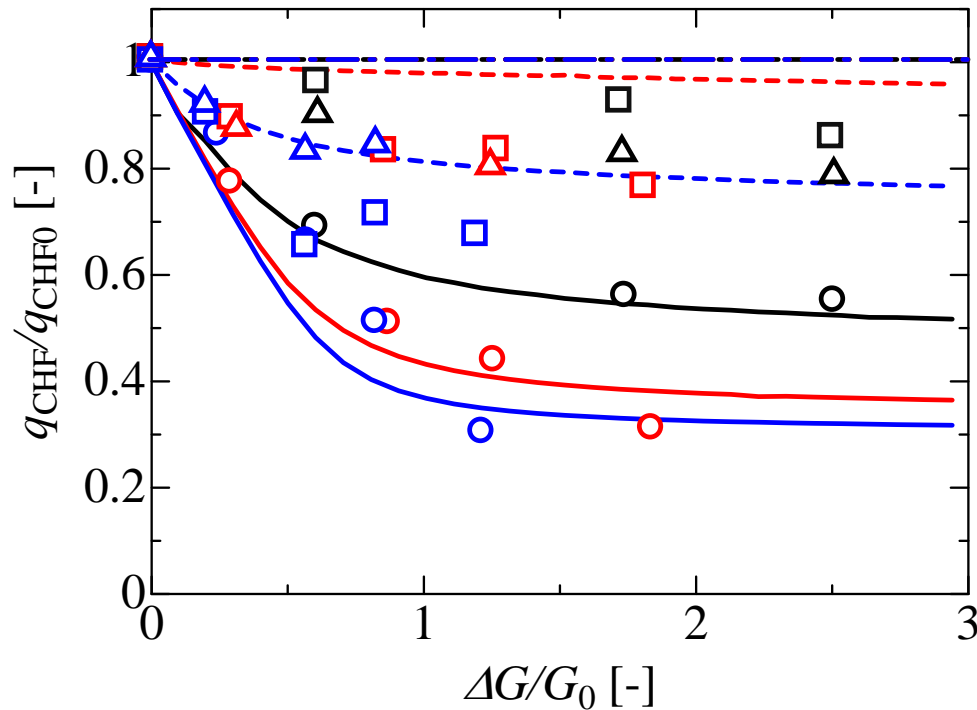
5. Summary

Introduction (Oscillatory flow)

沸騰関連機器(ボイラ etc.)



- 限界熱流束の理解・予測が重要
- 不安定流動が発生する恐れ



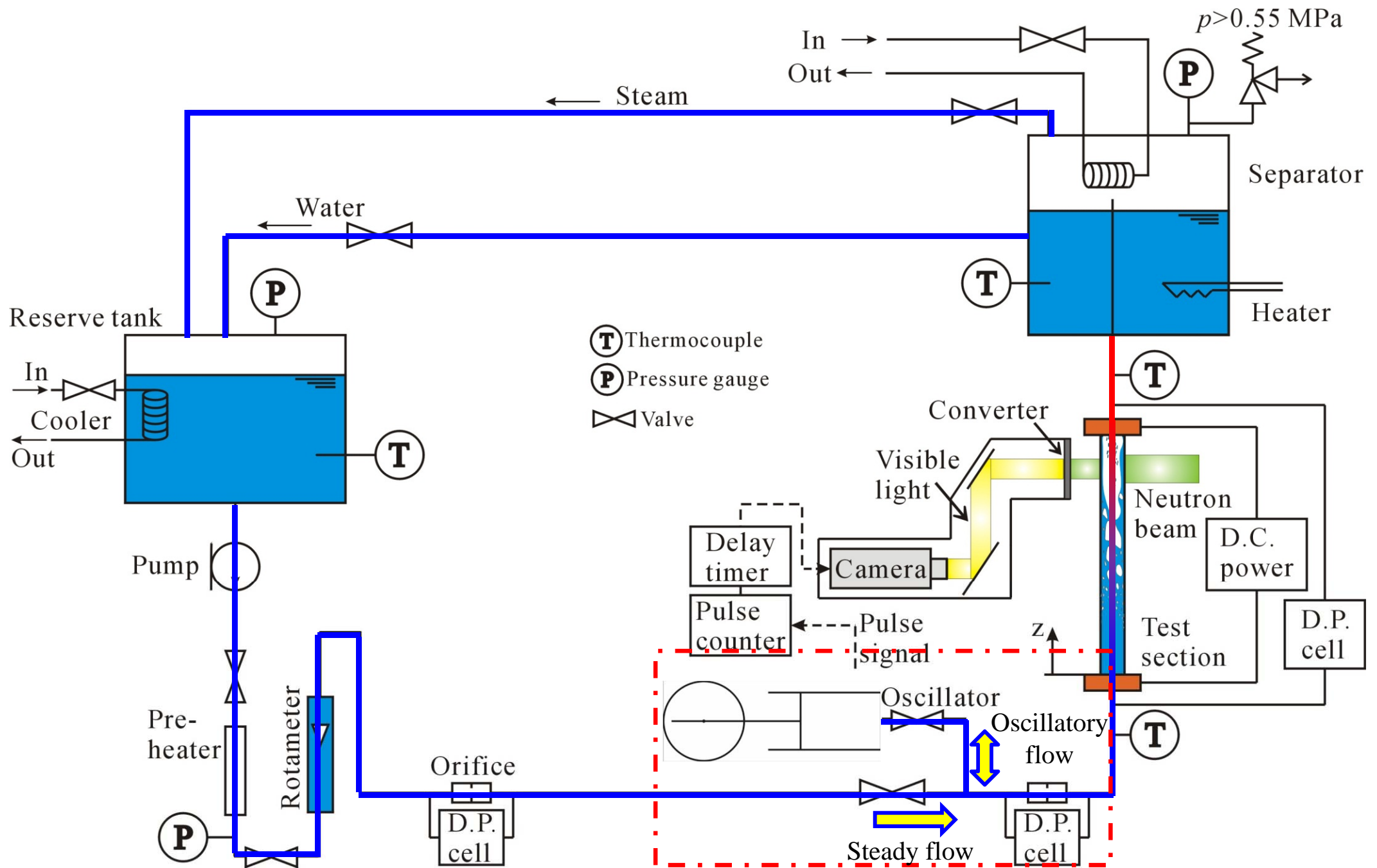
- 脈動振幅比の増加に従って、限界熱流束が低下する。
- 管の熱容量の相違により、限界熱流束特性が異なる。
- 熱容量が大きい場合、管から流体へのフィードバックの影響が大きい。



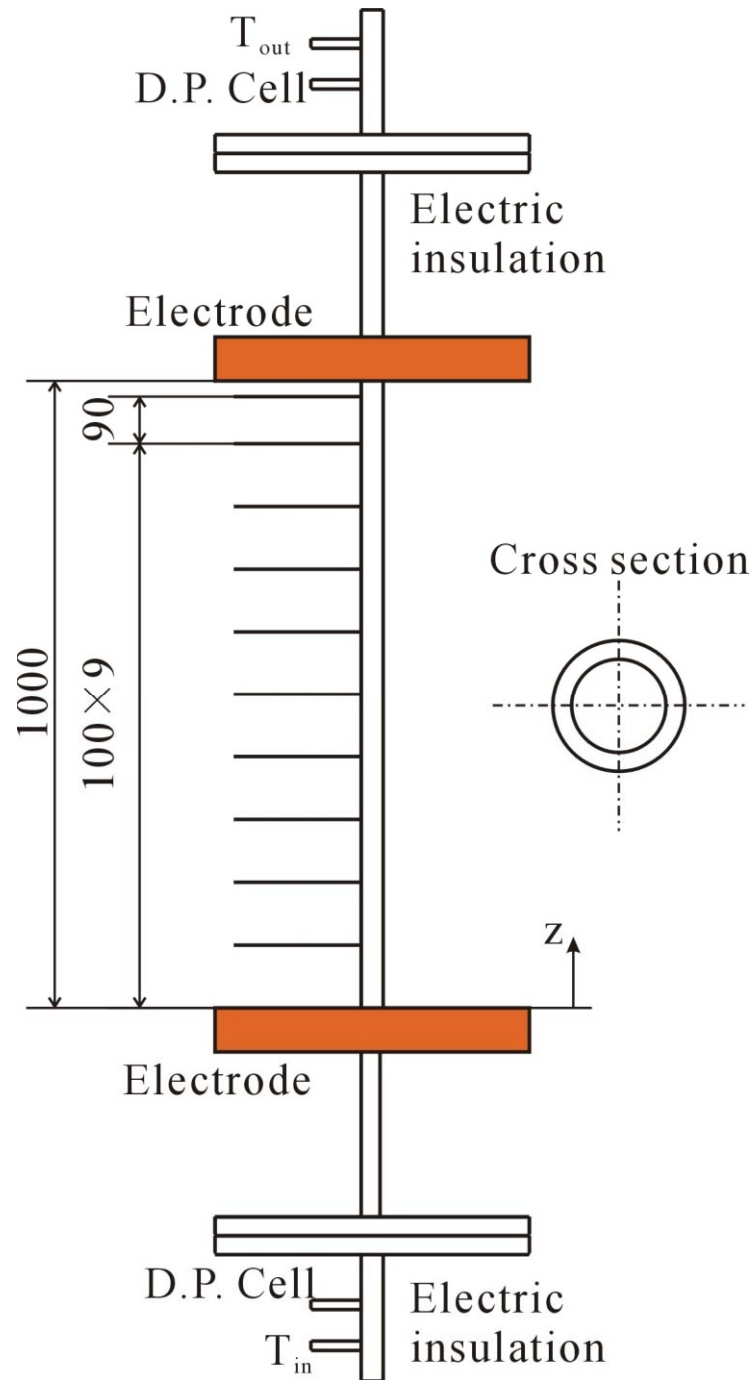
		Experiment			Simulation			
I.D.	O.D.	τ_w	$\tau = 2$	4	6 sec	2	4	6 sec
3.0	4.0	1.1	○	○	○	—	—	—
3.0	6.0	4.4	□	□	□	- - -	- - -	- - -
3.0	9.0	11.7	△	△	△	- · -	- · -	- · -

管内流動状態の評価

Experimental Apparatus (Oscillatory flow)



Experimental Apparatus (Oscillatory flow)



Specification of Test Section

Material	SUS304
Inner diameter D_i	5.0 mm
Outer diameter D_o	5.3 mm
Heated length L	1000 mm
Time constant τ_w	0.42 s

Experimental Conditions

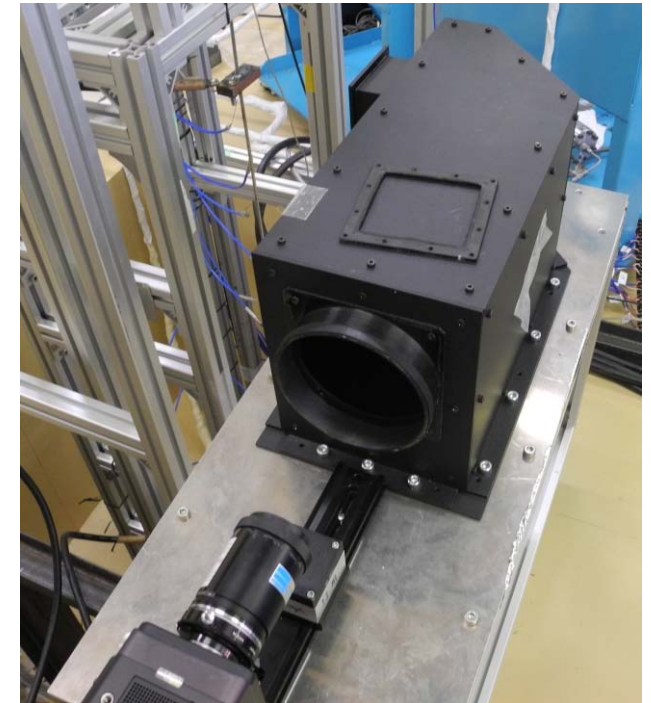
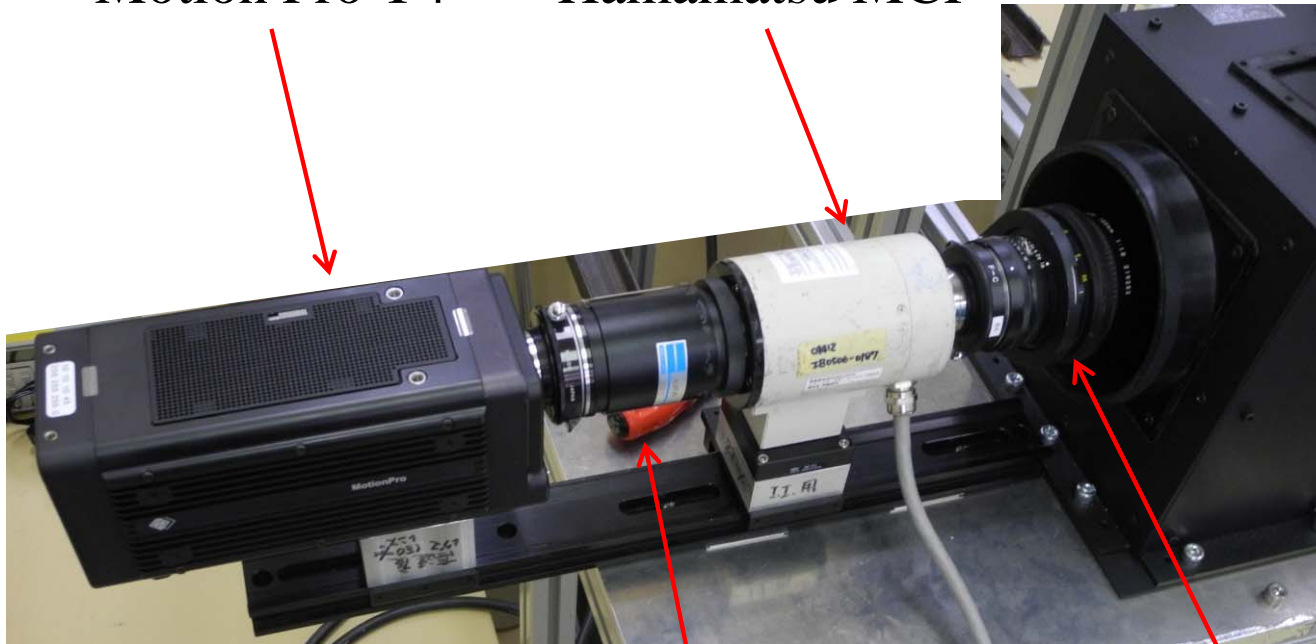
System pressure p_{ex}	0.3 MPa		
Inlet temperature T_{in}	60 deg.C		
Steady mass flux G_0	300 kg/m ² s		
Oscillation period τ	2 s	4 s	6 s
Relative oscillation amplitude $\Delta G/G_0$	1.0	0.75 1.0 1.5	1.0
CHF temperature T_{CHF}	233.5 deg.C		

Imaging Devices (Oscillatory flow)

High speed camera
Motion Pro Y4

Image intensifier
Hamamatsu MCP

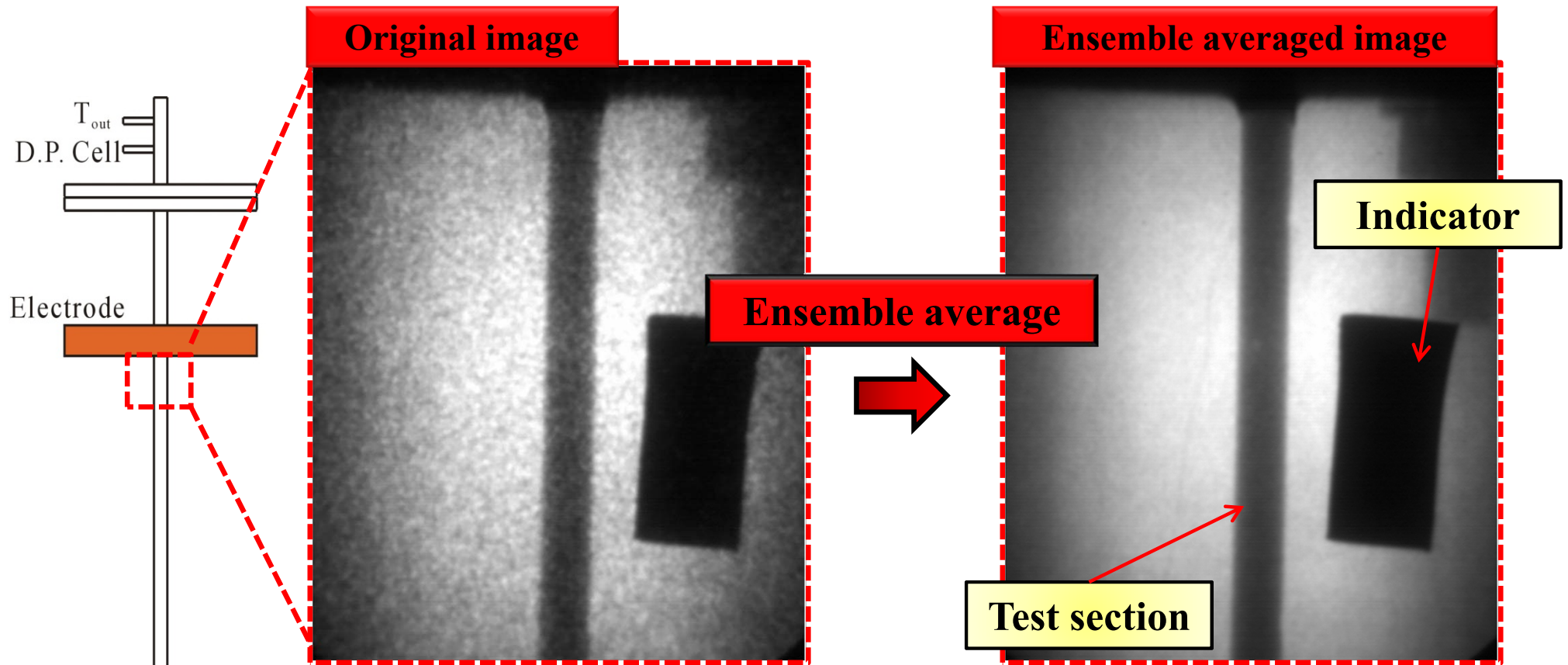
Dark box (Single mirror)



Relay lens
Hamamatsu A4539

Telephotographic lens
105mm Nikon
Micro-Nikkor

Radiography Image (Oscillatory flow)



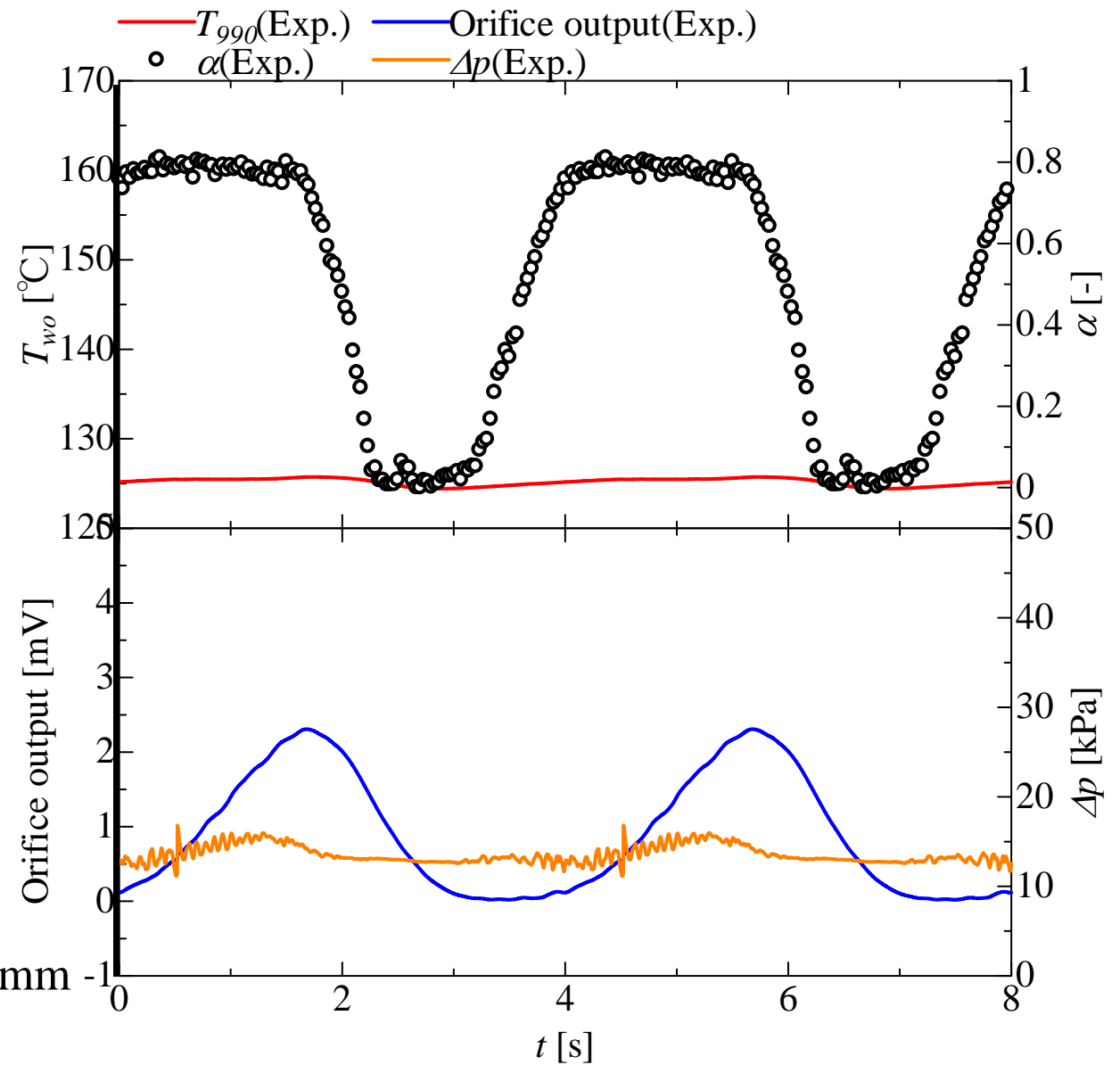
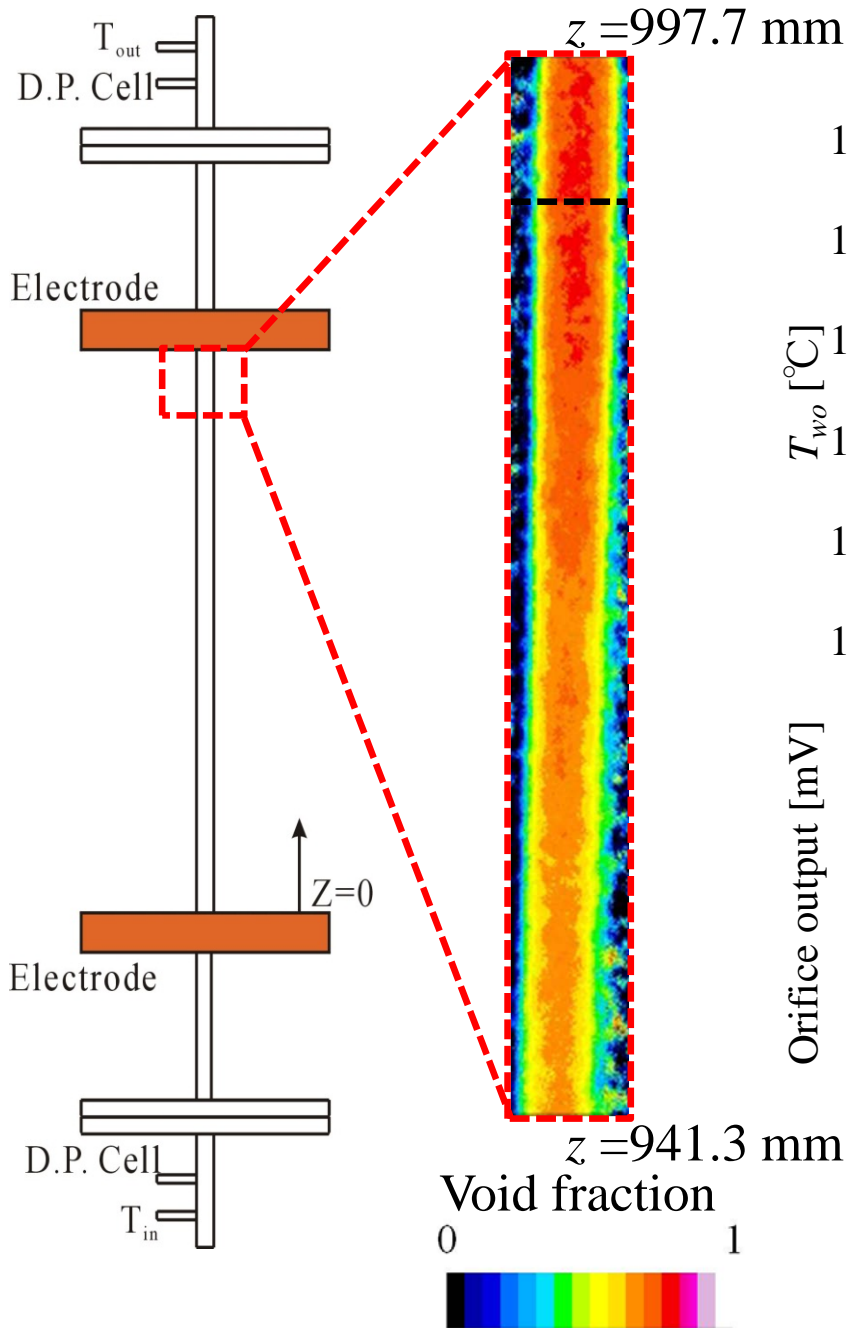
- ・SN比が小さい
- ・ダイナミックレンジが不十分

Specification of Images

Spatial resolution	0.081 mm/pixel
Exposure time	33 ms
Number of integrated images	30
Flame rate	30 fps

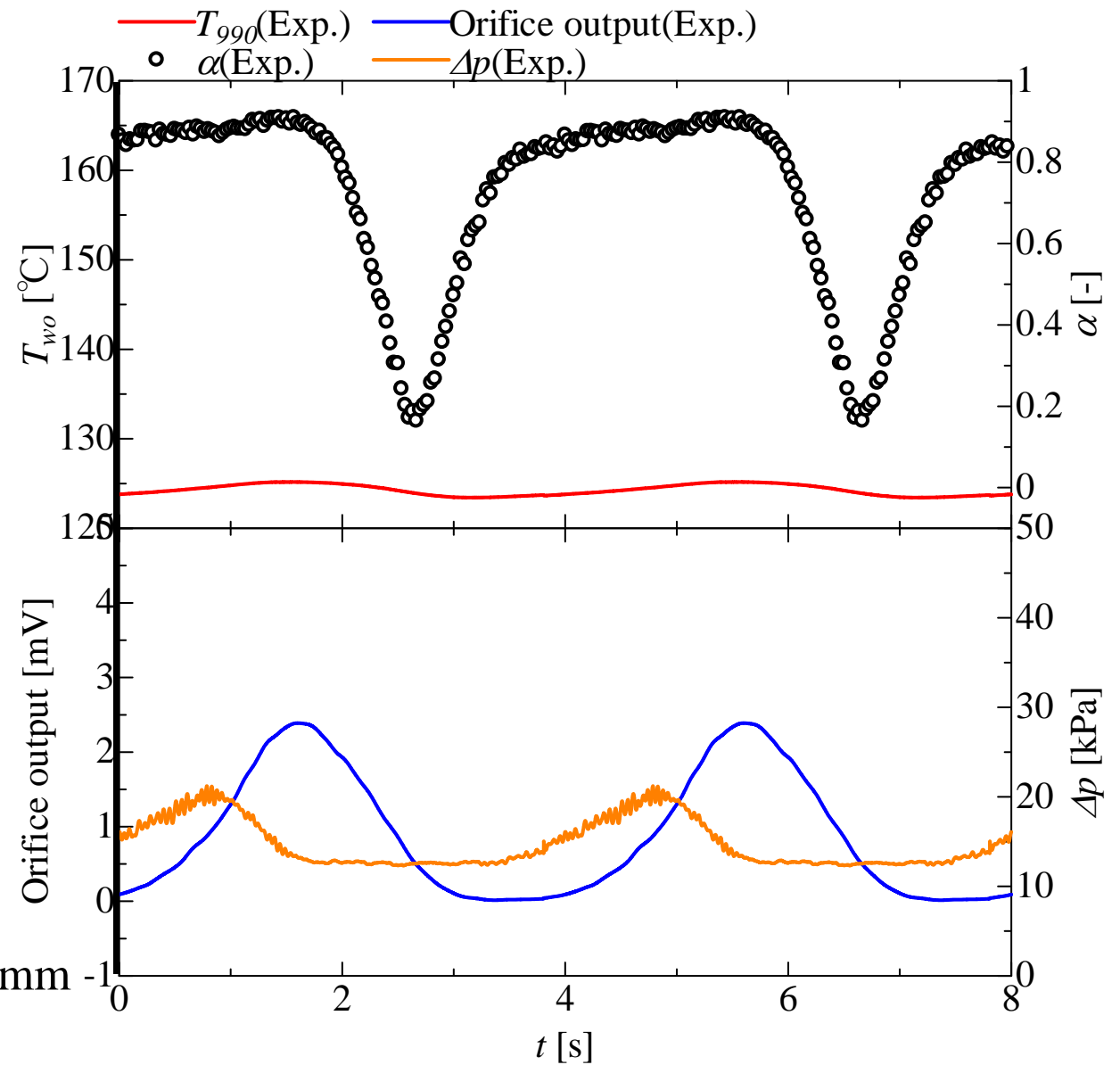
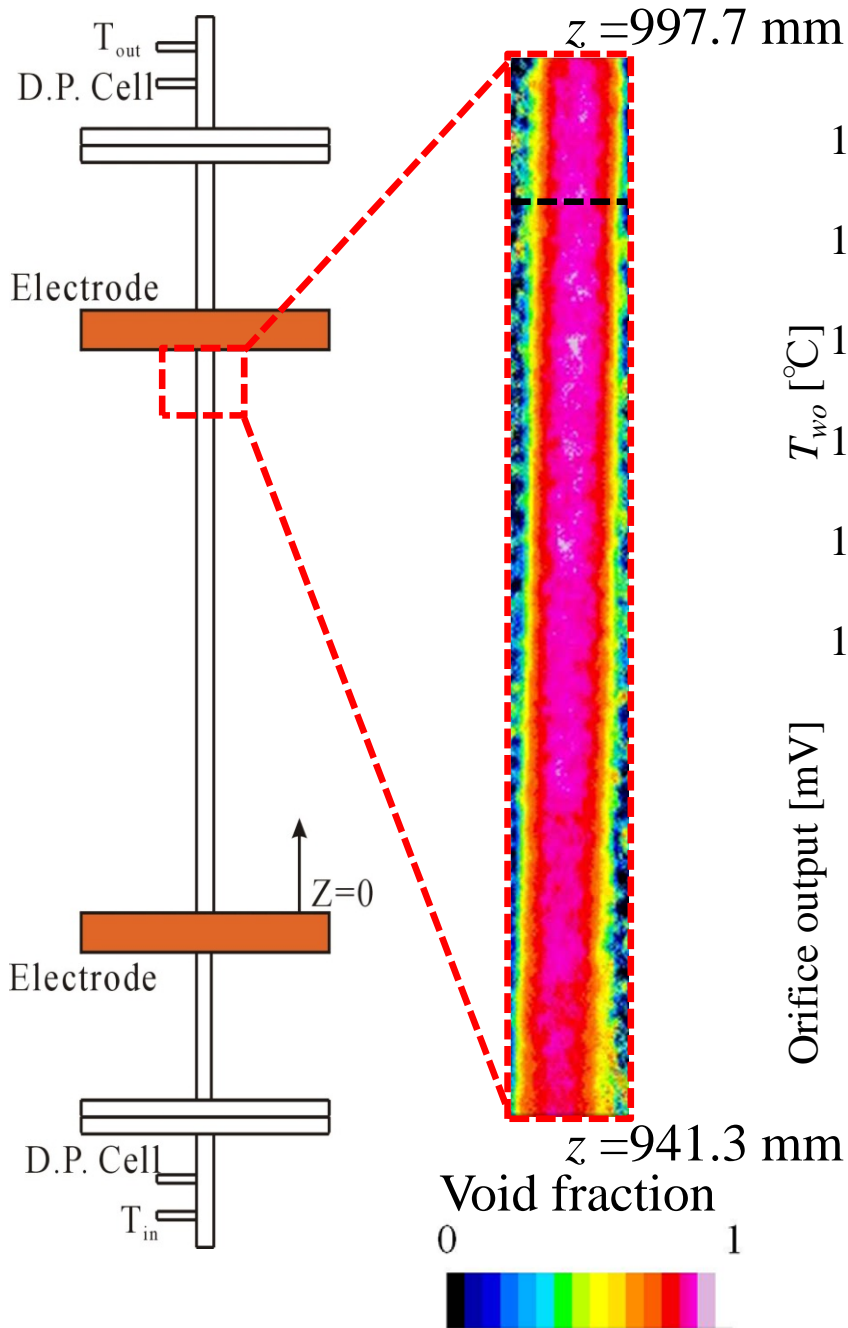
Experimental Results (Oscillatory flow)

$$p_{ex}=0.3 \text{ MPa} \quad G_0=300 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad T_{in}=60 \text{ deg.C}$$
$$\tau=4 \text{ s} \quad \Delta G/G_0=1.0 \quad q=116.2 \text{ kW/m}^2 \quad x_{eq}=-0.001$$



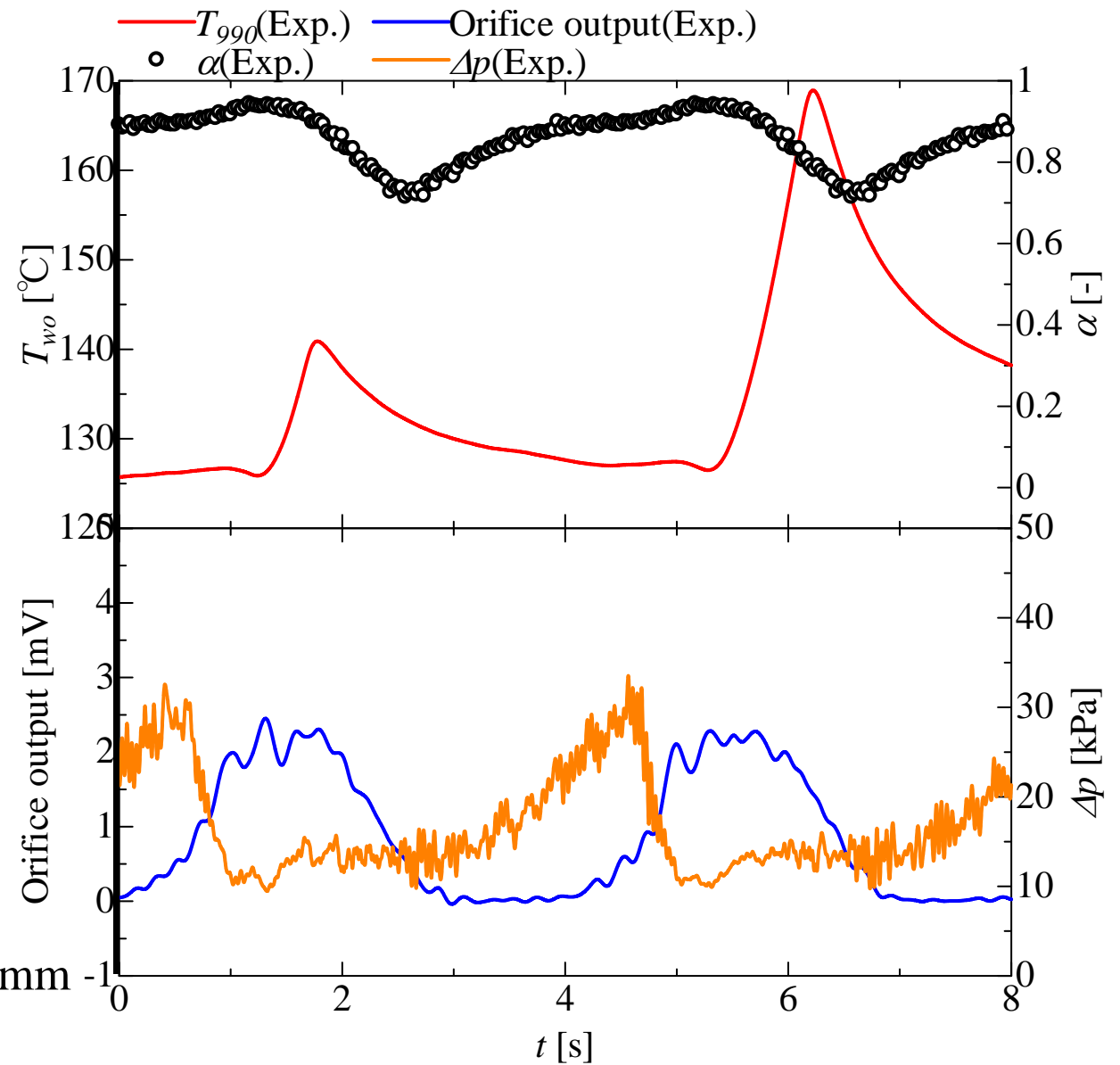
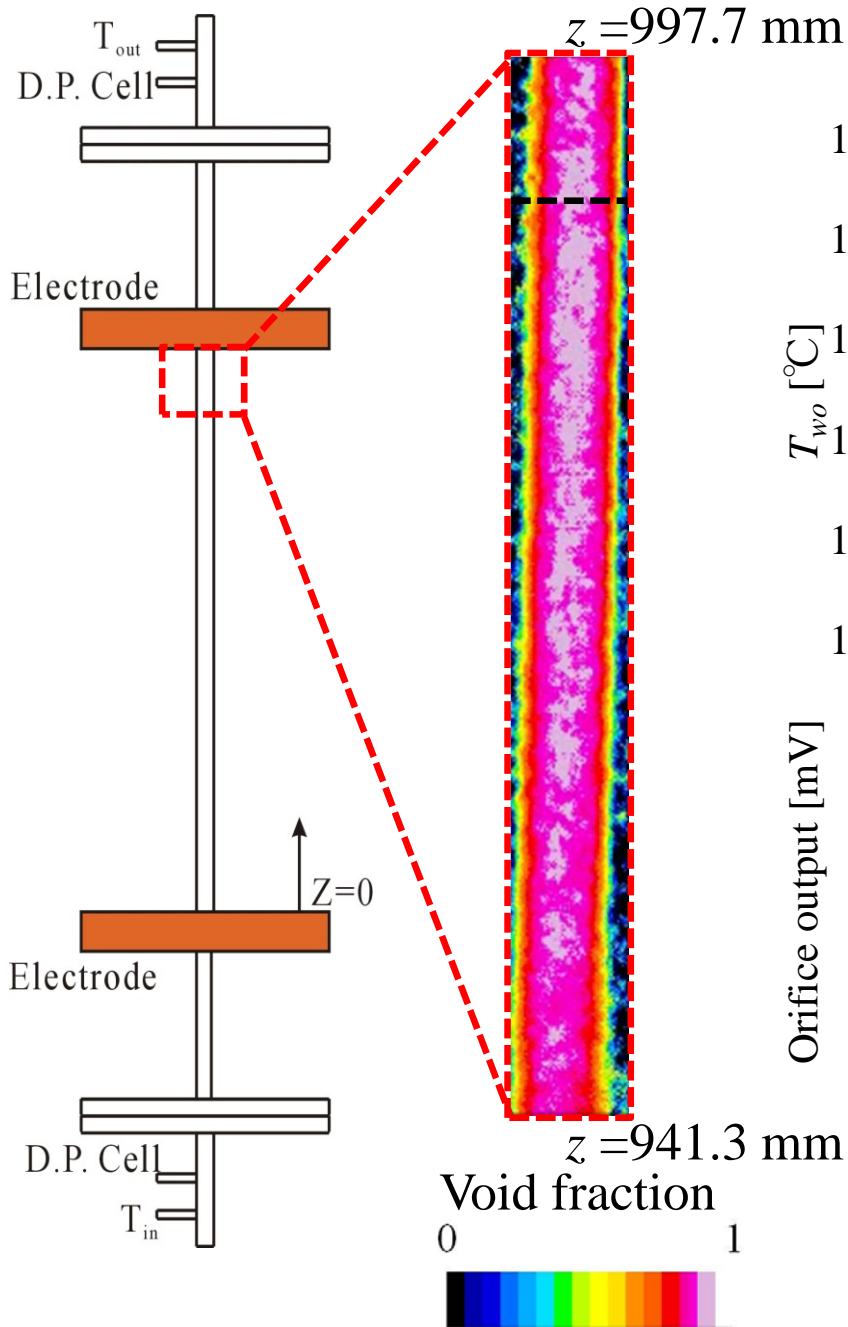
Experimental Results (Oscillatory flow)

$$p_{ex}=0.3 \text{ MPa} \quad G_0=300 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad T_{in}=60 \text{ deg.C}$$
$$\tau=4 \text{ s} \quad \Delta G/G_0=1.0 \quad q=157.2 \text{ kW/m}^2 \quad x_{eq}=0.054$$



Experimental Results (Oscillatory flow)

$p_{ex}=0.3$ MPa $G_0=300$ kg/m² s $T_{in}=60$ deg.C
 $\tau=4$ s $\Delta G/G_0=1.0$ $q=197.6$ kW/m² $x_{eq}=0.114$



Summary

強制流動沸騰系に中性子ラジオグラフィを適用し、以下の結論を得た。

◇定常流

- ・テストセクションを垂直方向にトラバースさせることにより、テストセクション全長に渡る沸騰二相流の軸方向ボイド率分布の取得が可能であることを示した

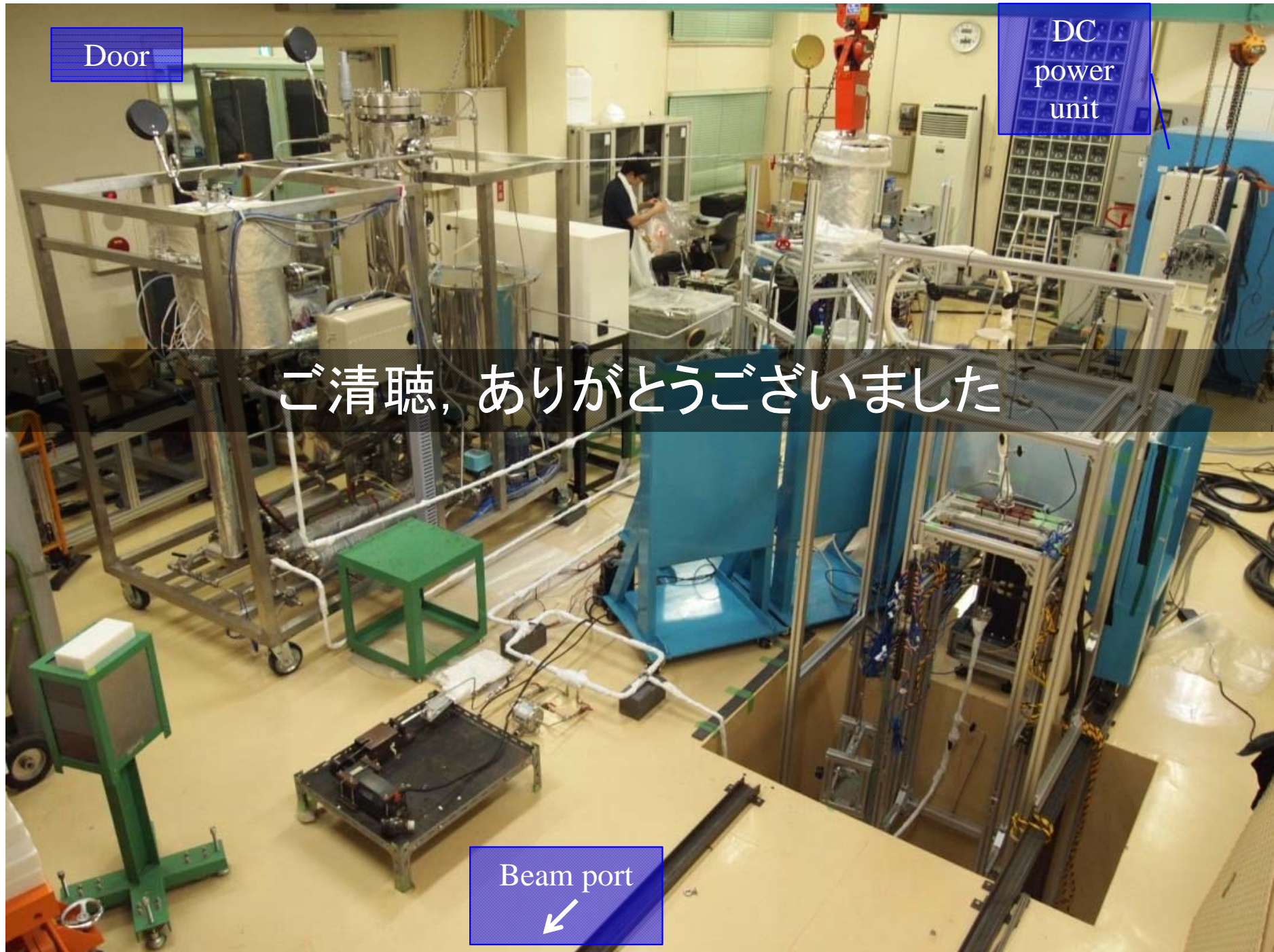
上昇流：全条件を通して、定量的に良い一致を示す相関式は存在しないことを示した

下降流：下降流における流動構造が流束条件によって上昇流と異なることを沸騰開始点、ボイド率分布から示した。

◇脈動流

- ・加振器と高速度カメラを同期させ、任意の位相における画像を取得し、積算により画像の再構築を行うことで、流動脈動下におけるボイド率の評価が可能であることを示した

Nuclear Reactor



Door

DC
power
unit

ご清聴, ありがとうございます

Beam port

