



THINK × ACT
KANSAI
UNIVERSITY

2019年12月25-26日
中性子イメージング専門研究会

～沸騰流動系可視化定量評価の新展開～

- ・ 非均一加熱場におけるマイクロチャネル熱交換器内流動挙動
- ・ 急冷現象時の液沸騰挙動

- 阪井 広幸 ・ 折戸 敬一郎 ・ 船倉 陸
- 藤原 弘樹 ・ 鈴木 直翔
- 陰山 拓実
- 小畑 公作 ・ 柴田 滉平
- 梅川 尚嗣 教授 ・ 網 健行 准教授 (関西大)
- 齊藤 泰司 教授 ・ 伊藤 大介 助教 (京大炉)



THINK × ACT
KANSAI
UNIVERSITY

2019年12月25-26日
中性子イメージング専門研究会

～沸騰流動系可視化定量評価の新展開～

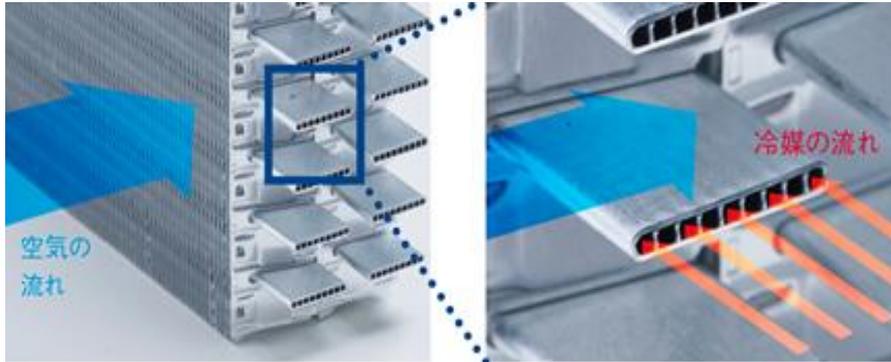
- ・ 非均一加熱場におけるマイクロチャネル熱交換器内流動挙動
- ・ 急冷現象時の液沸騰挙動

- 阪井 広幸 ・ 折戸 敬一郎 ・ 船倉 陸
- 藤原 弘樹 ・ 鈴木 直翔
- 陰山 拓実
- 小畑 公作 ・ 柴田 滉平
- 梅川 尚嗣 教授 ・ 網 健行 准教授 (関西大)
- 齊藤 泰司 教授 ・ 伊藤 大介 助教 (京大炉)

研究背景

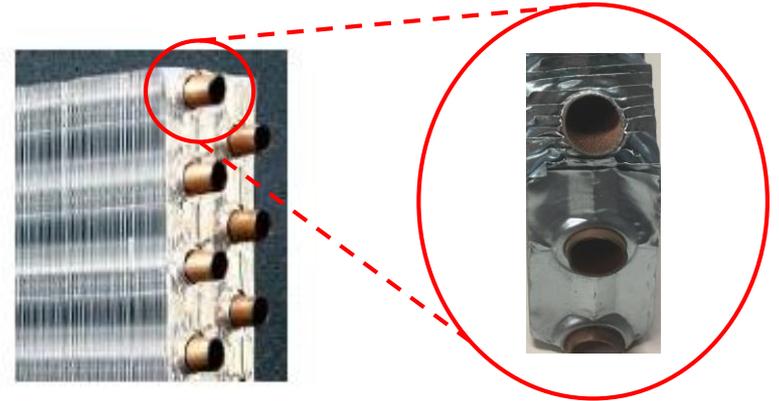
『マイクロチャネル熱交換器』

複数のマイクロチャネル(微細流路)を内部に有するプレートフィンを使用



マイクロチャネル熱交換器

(出典:ダイキン工業ホームページ)



従来の熱交換器 (フィン&チューブ)

メリット

1mm以下の微細構造

オールアルミ化

- 比表面積が増加する
(単位体積当たりの表面積)
- 表面張力支配領域になる
- 接触抵抗を低減できる
フィンと伝熱管部: 拡管 → ロウ付け
- 伝熱管が薄くなる
- 生産コストが削減できる
(銅: 759, アルミ: 261.4 [円/kg])
- 熱交換器を軽量化できる
- 電解腐食を低減できる

$$Q_{放} \propto \frac{1}{r} Q_{発}$$



高性能化

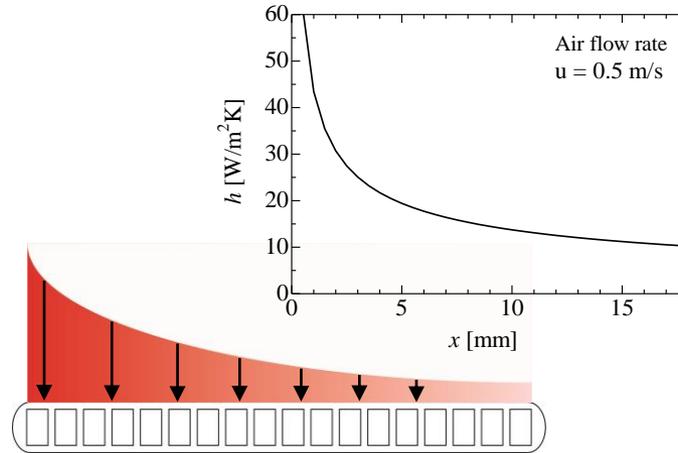
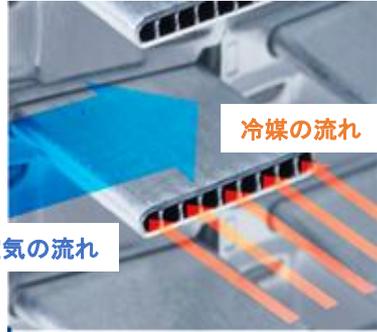
● 伝熱性能の向上

● 通風抵抗の減少

● 生産性向上

● 省冷媒化

研究背景



前後での熱流束差異

並列管構造



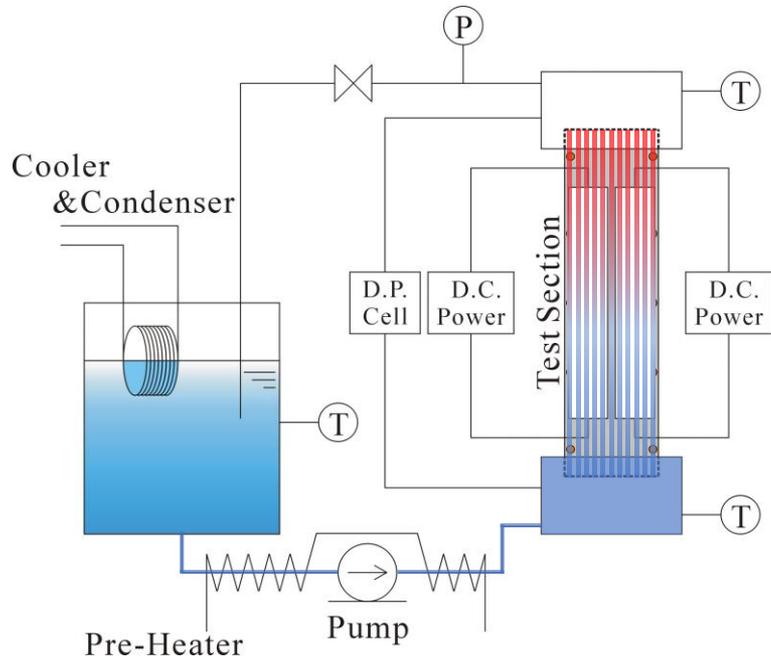
不安定流動

流量分配差異

～目的～

非均一加熱下におけるマイクロチャネル熱交換器
内部流動構造の可視化定量評価

実験装置～実験ループ～

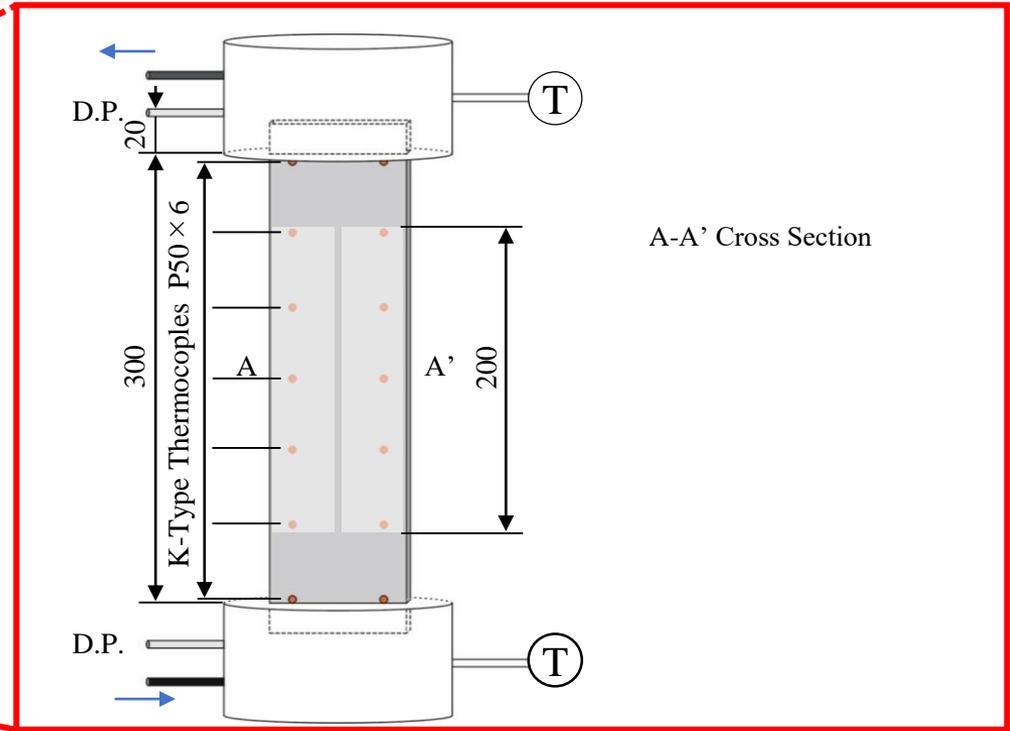
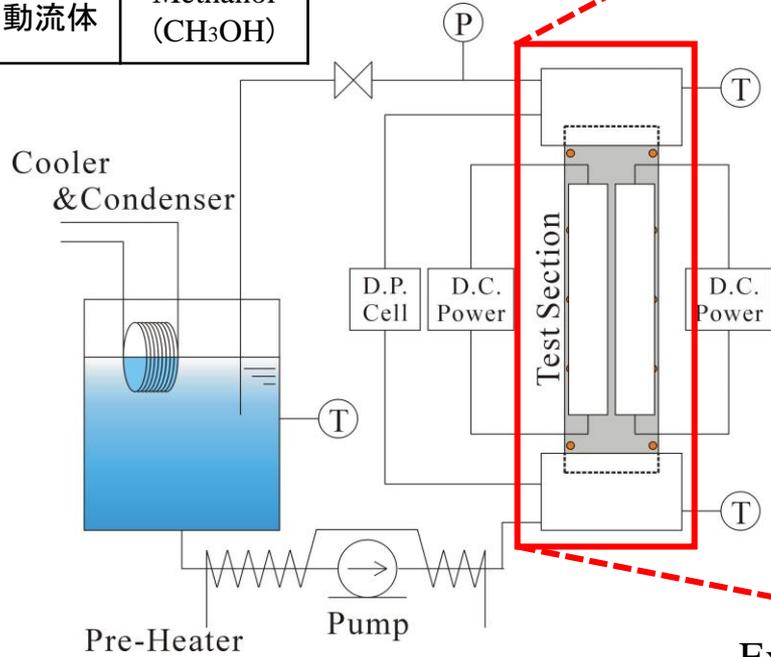


実験装置

実験条件

系圧 0.1MPa

作動流体 Methanol (CH₃OH)

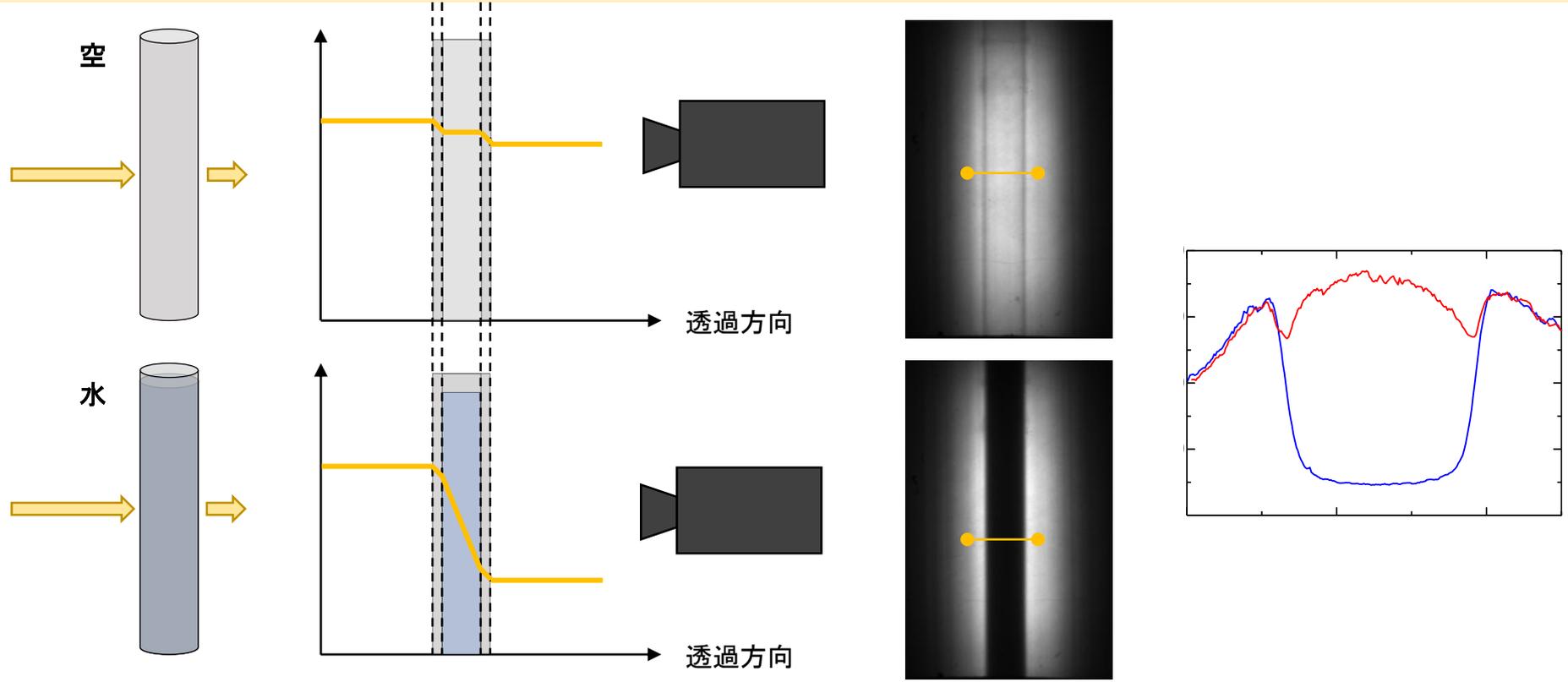
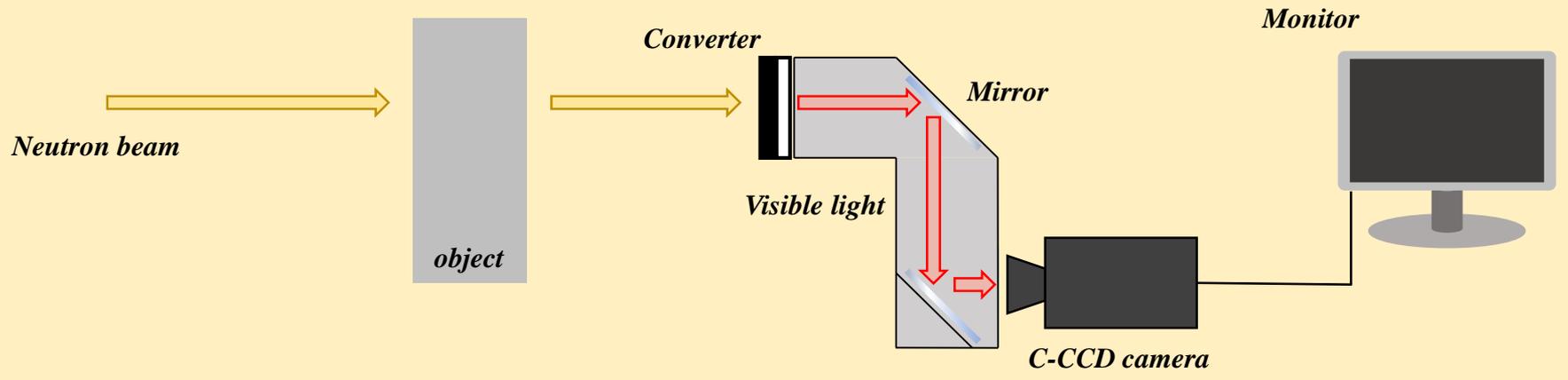


Experimental apparatus

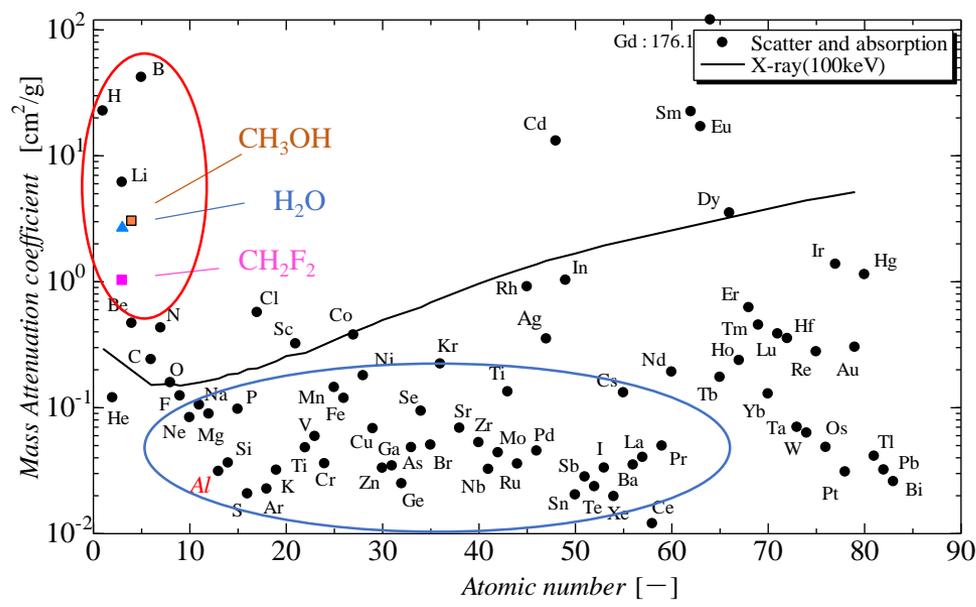
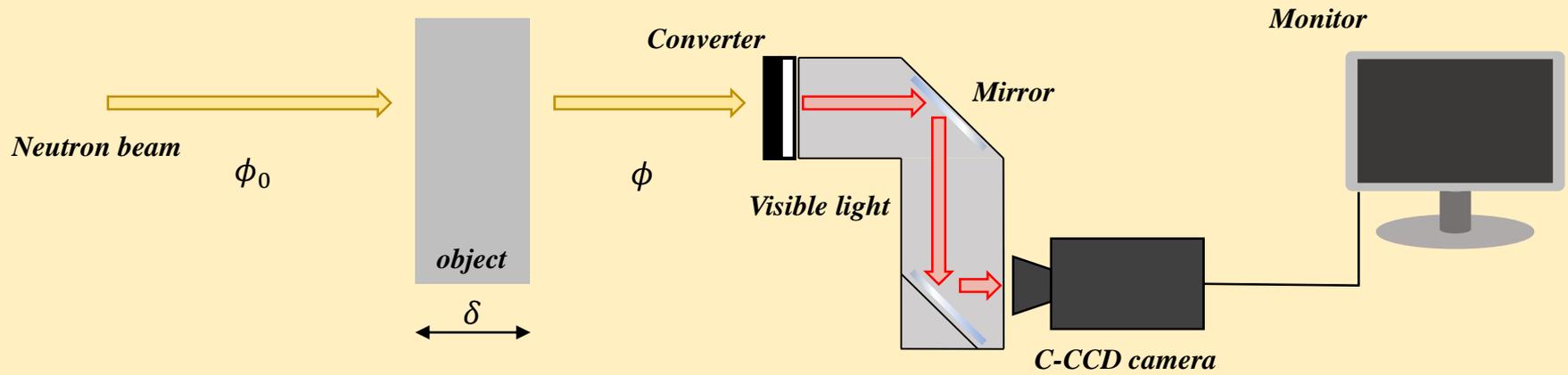
Physical properties

		T_{sat} [deg.C] ($P_{sat} = 0.1$ MPa)	P_{sat} [MPa]	σ [mN/m]	μ_L [mPa·s]	ρ_L / ρ_G [kg/m ³]	H_{lg} [kJ/kg]	μ_m [cm ² /g]
R32	CH ₂ F ₂	-52	1.47($T_{sat} = 20$ °C)	7.86	0.120	24.0	280.8	1.025
Water	H ₂ O	100	0.1	58.9	0.282	1602.2	2257	2.679
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	78.3	0.1	15.2	0.439	444.2	849.7	3.161
Methanol	CH₃OH	64.5	0.1	18.9	0.326	612.6	1101.7	3.025

中性子ラジオグラフィ ~原理・可視画像~



中性子ラジオグラフィ～質量減衰係数～

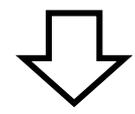


元素ごとの熱中性子における質量減衰係数

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

水素 : 強く減衰

金属 : 透過しやすい



金属管内沸騰二相流
の可視化に有効な手段

京都大学原子炉実験場 (B-4 port)

B-4 port

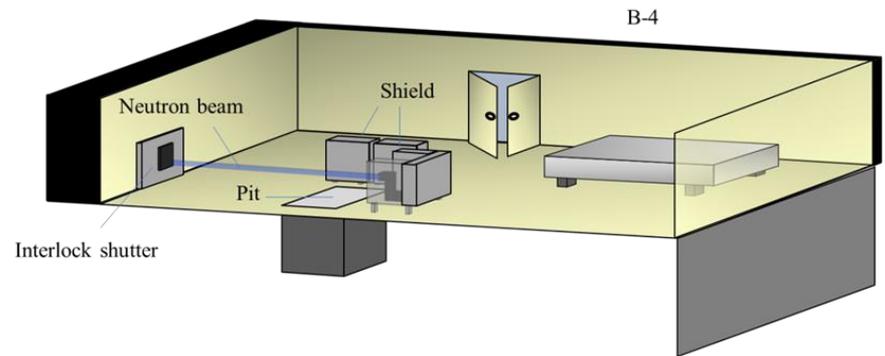
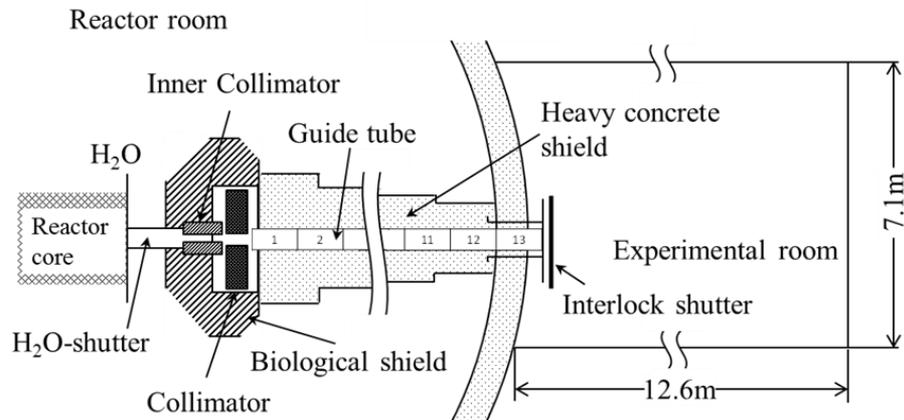
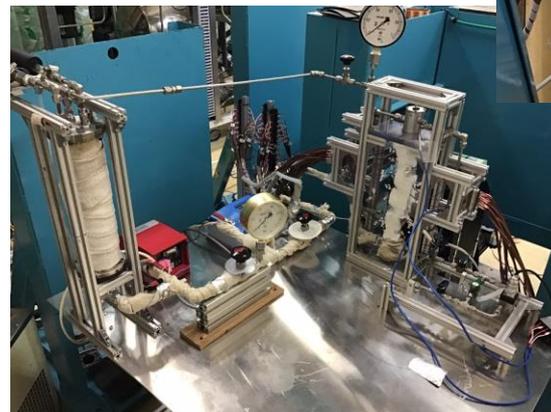
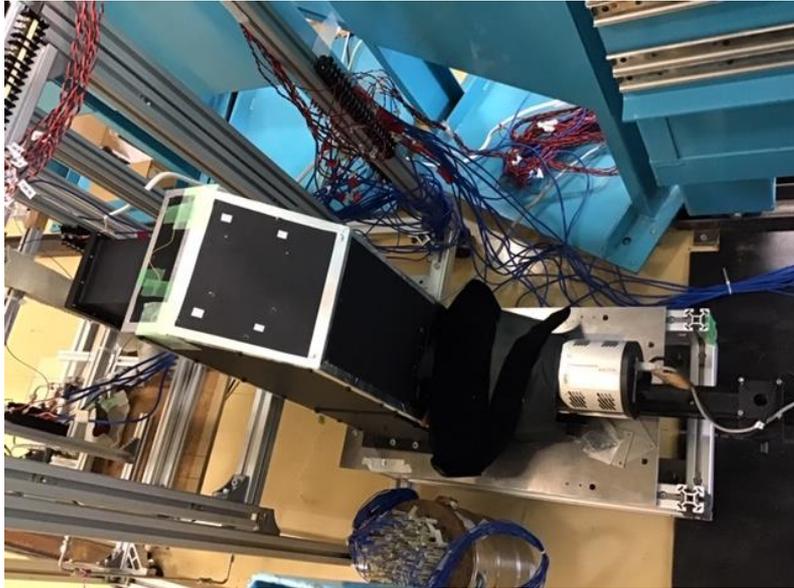


Table1-1 Spec of KUR (B-4port)

Nuclear reactor	KUR (B-4port)
Thermal output	1 MW (Max:5 MW)
Neutron flux	1×10^7 n/cm ² s
Typical spectrum	1.2 Å
Guide tube length	11.7 m
Guide tube cross section	10 (D _w) × 75 (D _h) mm



使用機器



カメラ 神戸大C-CCD
PIXIS1024B (Princeton Instruments)
1024 × 1024 pixels
16 bit

レンズ NIKKOR 105 mm F1.4

コンバータ ZNSL-L100-AL1010
(CHICHIBU FUJI Co.Ltd)
Gd/LiF 製 塗布厚 100 μm



品名	中性子用シンチレータ ZNSL-L100-AL1038
規格	100 × 100mm
塗布厚	100 μm
仕様	高空間解像度用



株式会社秩父富士
CHICHIBU FUJI CO.,LTD.

使用機器

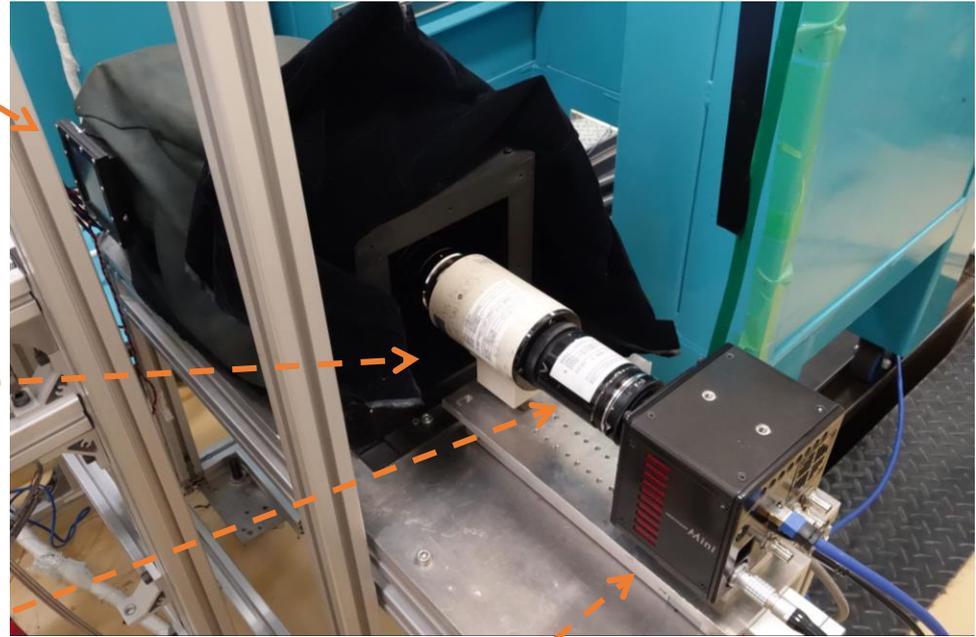
コンバータ:
PSI コンバータ

塗布厚 200 μm

Image Intensifier:
光 I.I. 接近型イメージンシファイヤ

(浜松ホトニクス)

レンズ:
85 mm リレーレンズ (VS Technology) F1.4



高速度カメラ:

FASTCOM Mini AX50 16GB model (Photron)

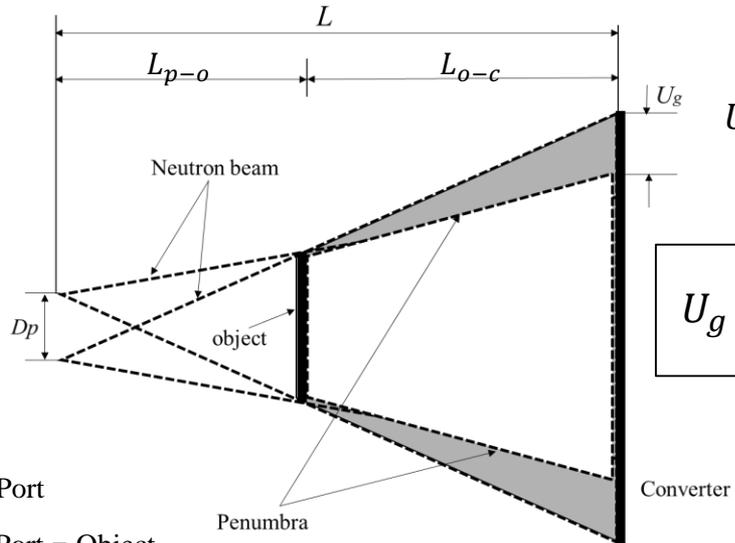
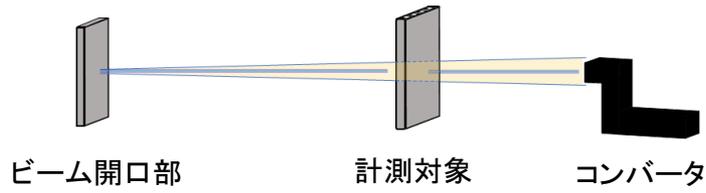
- ・画素数 1024 × 1024
- ・輝度 16 bit

撮像条件

フレームレート

250 fps

測定精度の評価～中性子線の非平行性～



U_g : ボケ

$$U_g = \frac{D_p}{L_{p-o}} L_{o-c}$$

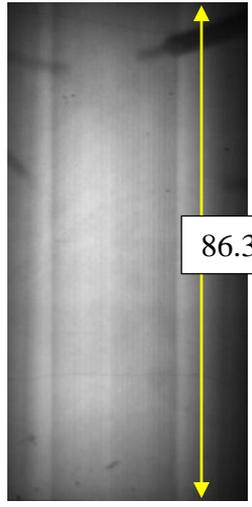
D_p : Port

L_{p-o} : Port - Object

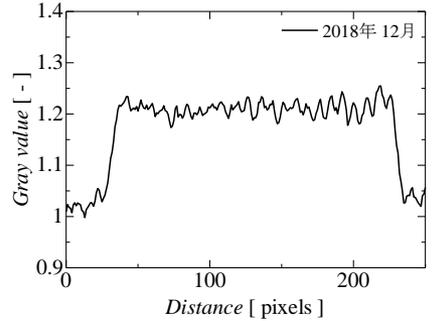
L_{o-c} : Object - Converter

(mm)

L_{o-c}	L_{p-o}	U_{gh}	U_{gw}	D_h	D_w	L
5	2495	0.15	0.02	75	10	2500
30	2470	0.91	0.12			
55	2445	1.68	0.22			
105	2395	3.28	0.43			
205	2295	6.69	0.89			
305	2195	10.42	1.39			



1M 5s
L 2300mm , L_{o-c} 165mm
105mmF1.8
Kobe Univ. Camera



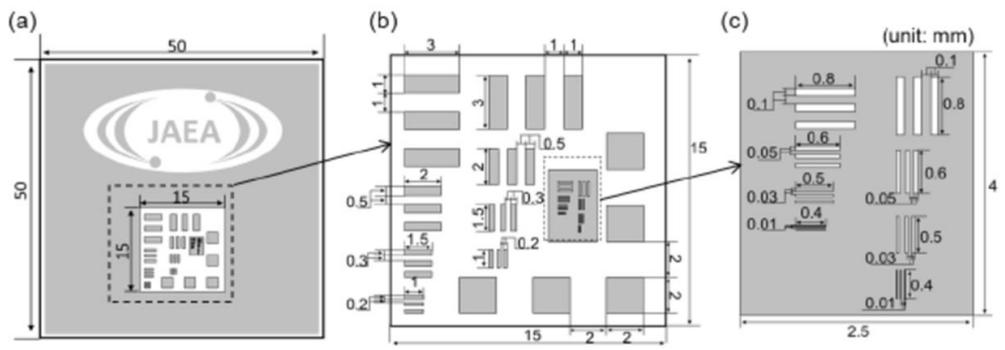
Object - Converterのキヨリ関係によるボケへの影響度を調べる必要がある！

$$L_{o-c} \leq R \frac{L}{D_p}$$

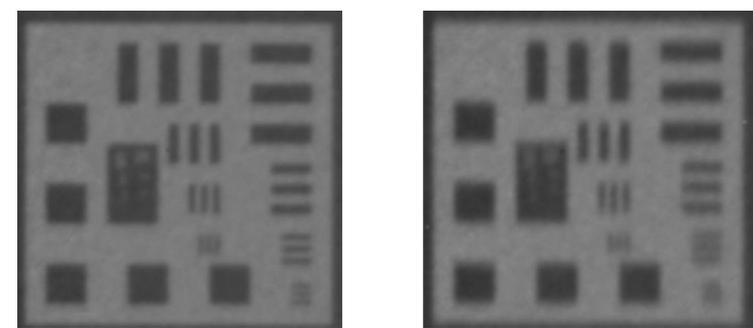
R : Pixel size

測定精度の評価～中性子線の非平行性～

Gd-indicator シリコン基板上にGd蒸着(5 μm)

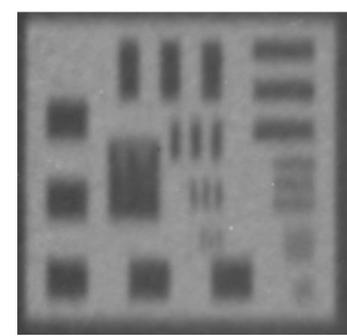


5M 5s
L 2500mm
105mmF1.8 Kobe Univ. Camera

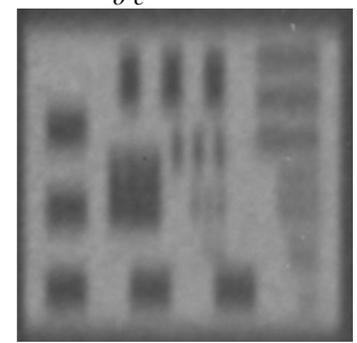


$L_{o-c} = 5 \text{ mm}$

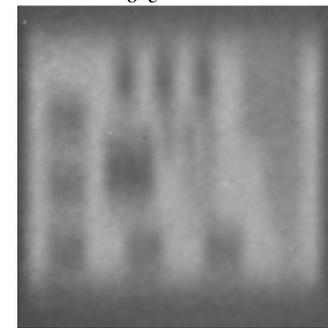
$L_{o-c} = 30 \text{ mm}$



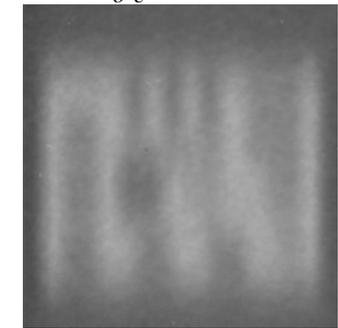
$L_{o-c} = 55 \text{ mm}$



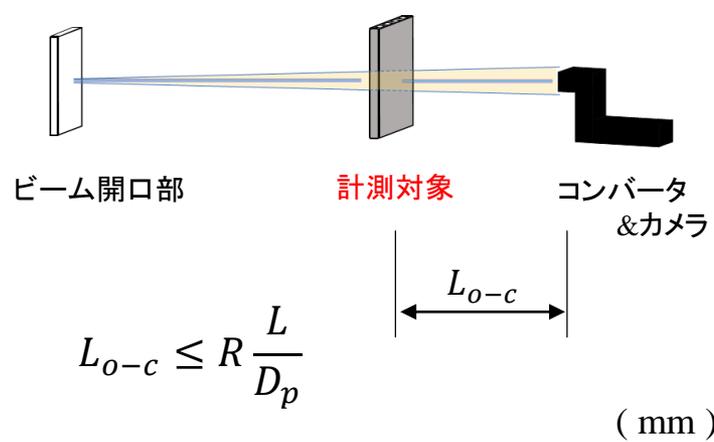
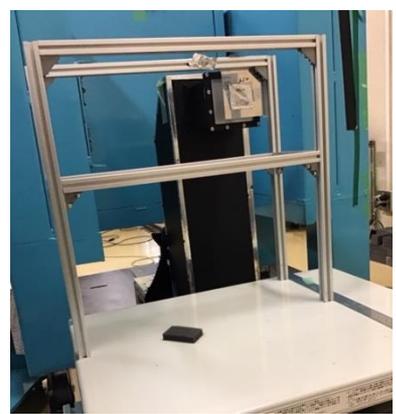
$L_{o-c} = 105 \text{ mm}$



$L_{o-c} = 205 \text{ mm}$

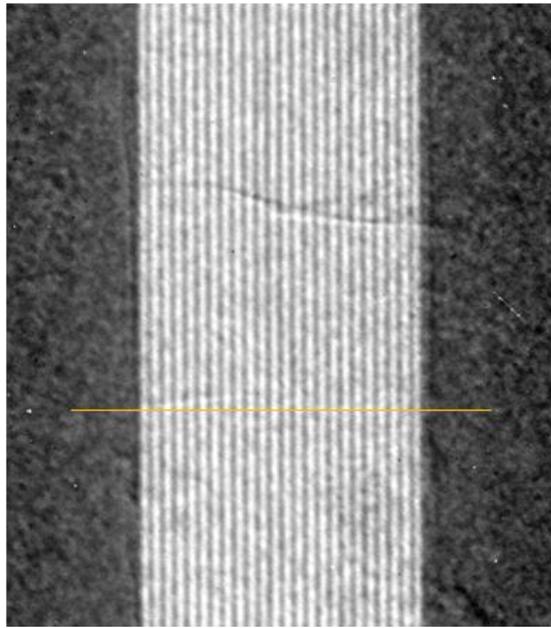
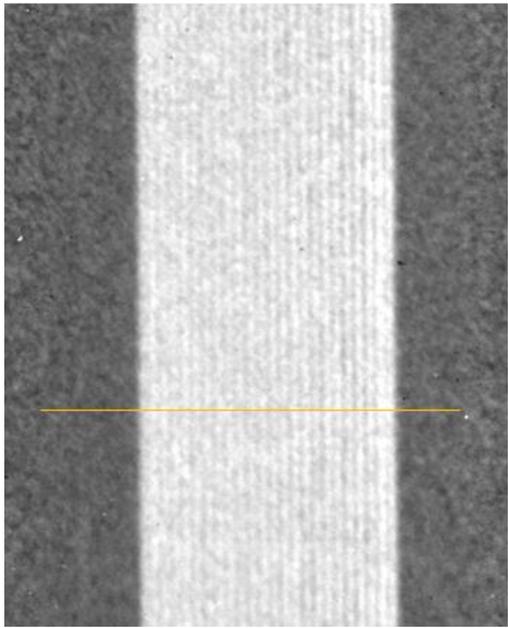


$L_{o-c} = 305 \text{ mm}$

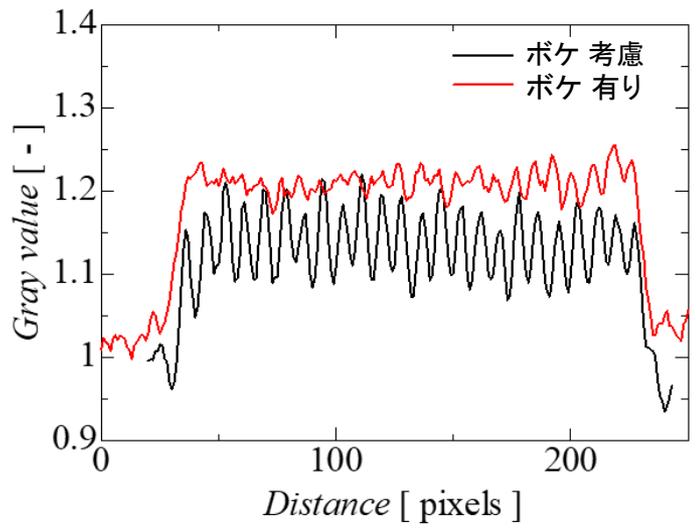


L_{o-c}	L_{p-o}	U_{gh}	U_{gw}	D_h	D_w	L
5	2495	0.15	0.02	75	10	2500
30	2470	0.91	0.12			
55	2445	1.68	0.22			
105	2395	3.28	0.43			
205	2295	6.69	0.89			
305	2195	10.42	1.39			

測定精度の評価～中性子線の非平行性～



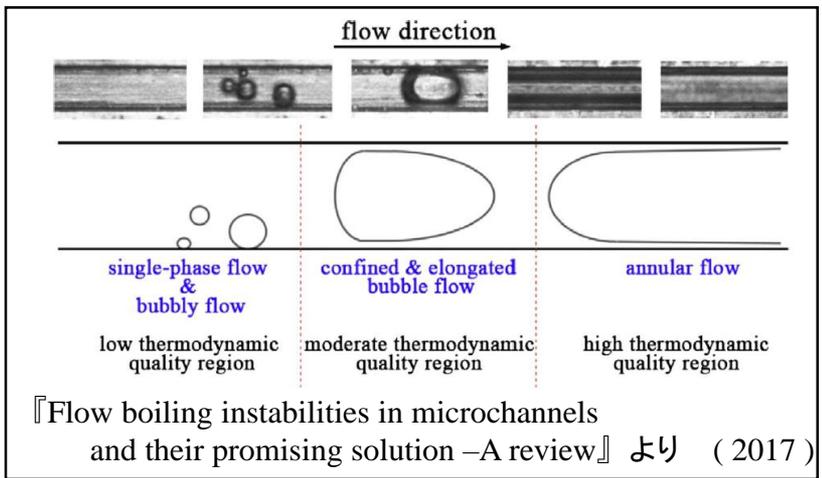
105mmF1.8 Kobe Univ. Camera



1M 30s L 2300 mm
 L_{o-c} 165 mm

1M 20s L 1300 mm
 L_{o-c} 30 mm

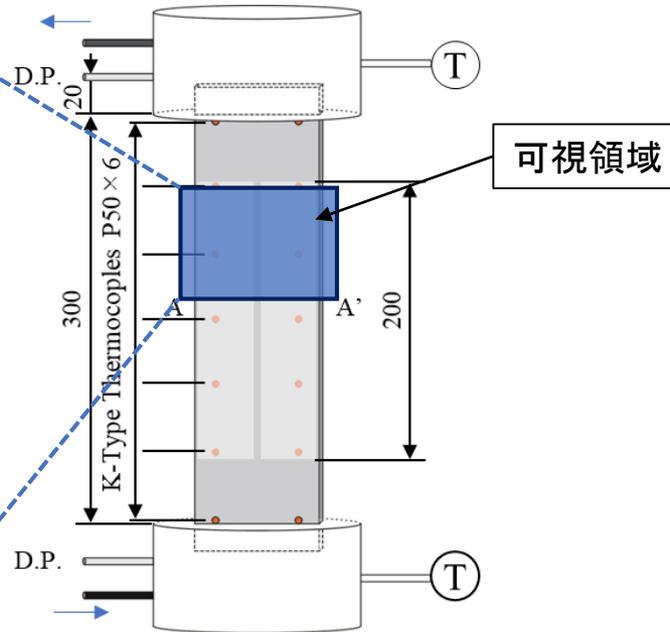
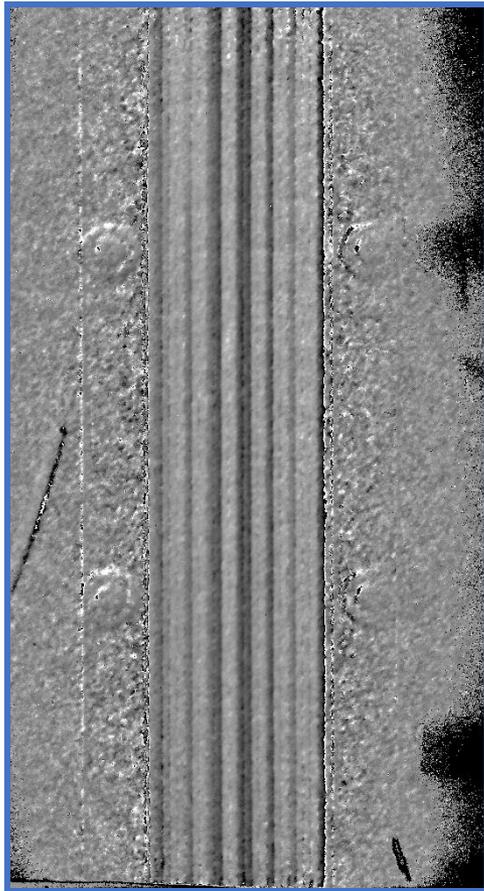
Date	2018 / 12 / 3-7	2019 / 8 / 26-30
Thermal output	1 MW	1 MW
Neutron flux at exit	1.7×10^7 n/cm ² s	1.7×10^7 n/cm ² s
Exposure time	30 s (× 1)	5 s (× 4), 1 s (× 20)
L	2300 mm	1300 mm
L_{o-c}	Experiment	165 mm
	Theory	≤69 mm
L_{o-c}	Experiment	30 mm
	Theory	≤39 mm
Pixel size	0.3 mm/pixel	0.3 mm/pixel
U_{gw}	0.77 mm	0.24 mm
流路の判別	△	○



実験結果

< 均一加熱 $G = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 38 \text{ kW/m}^2$, $x_{eq} = 0.1$ > 露光時間 $1\text{s} \times 20$

ボイド率まで画像処理したうえで
20枚の画像を合成

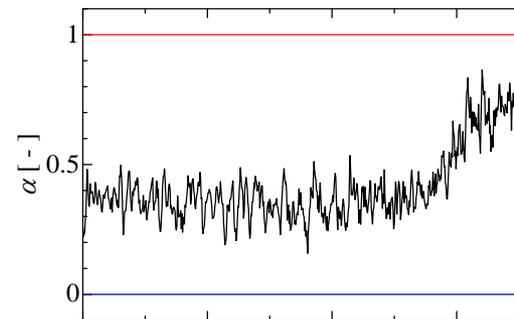
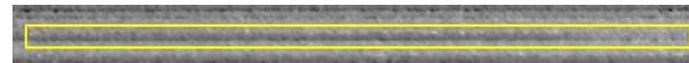
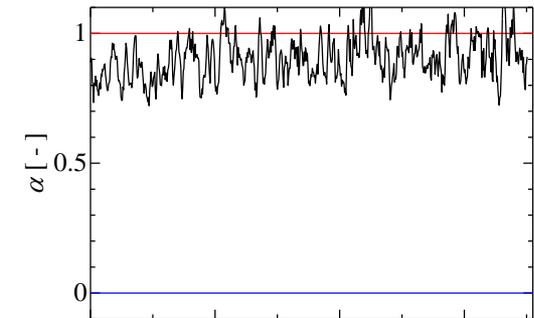
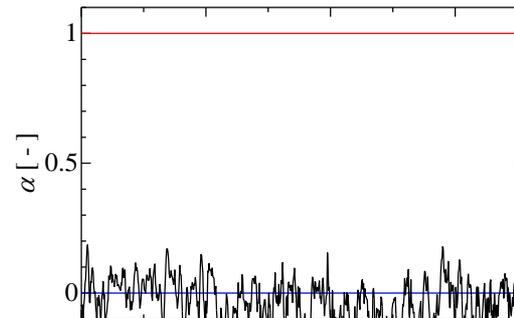
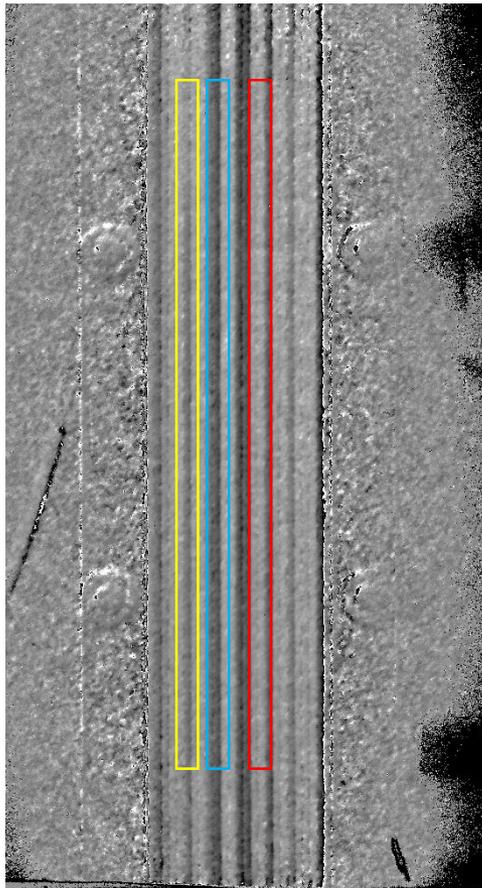


α	
0	暗
1	明

実験結果

< 均一加熱 $G = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 38 \text{ kW/m}^2$, $x_{eq} = 0.1$ > 露光時間 $1\text{s} \times 20$

ボイド率まで画像処理したうえで
20枚の画像を合成



α	
0	暗
1	明

実験結果～均一・非均一加熱時のT.S.内の流動変動～

総投入熱量 一定

$G = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $x_{eq} = 0.1$ (出口クオリティ)

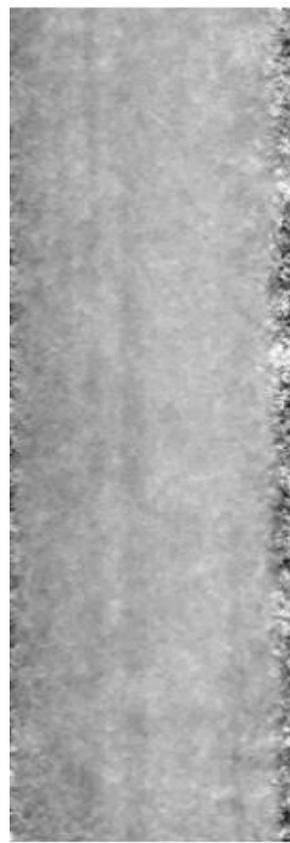
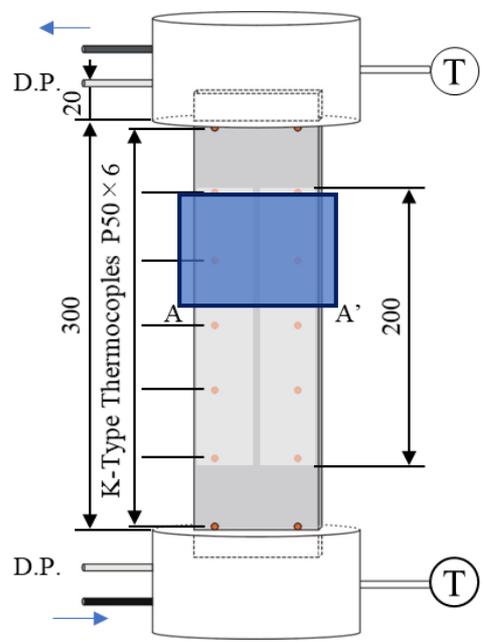
250fps 1/400sec 30s

→ ボイド率まで画像処理を行い、25枚の時間移動平均を掛けている

均一加熱
 $q = 40 \text{ kW/m}^2$

非均一加熱 ($q_H/q_L = 2$)
 $q_L = 26.5 \text{ kW/m}^2$

非均一加熱 ($q_H/q_L = 4$)
 $q_L = 16 \text{ kW/m}^2$



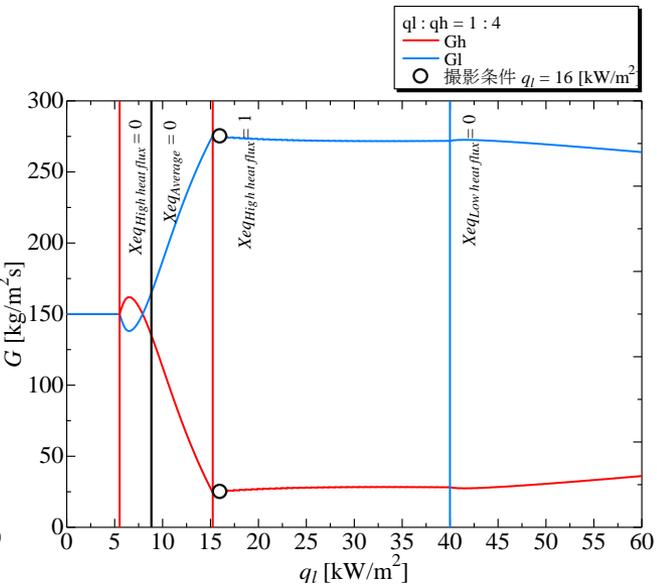
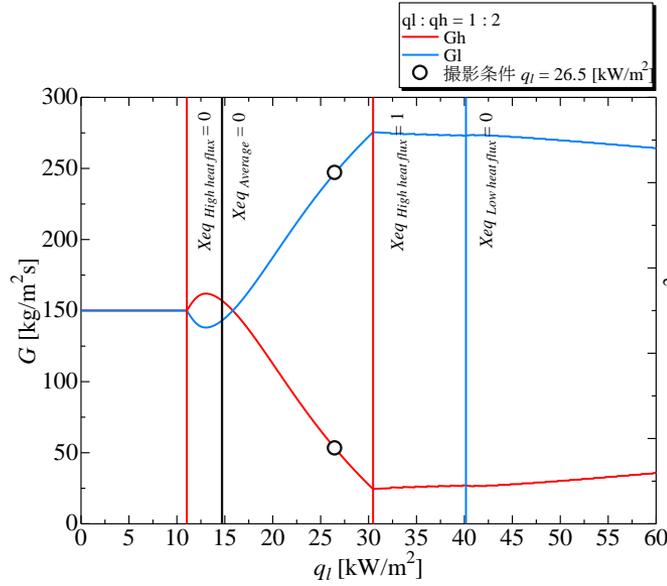
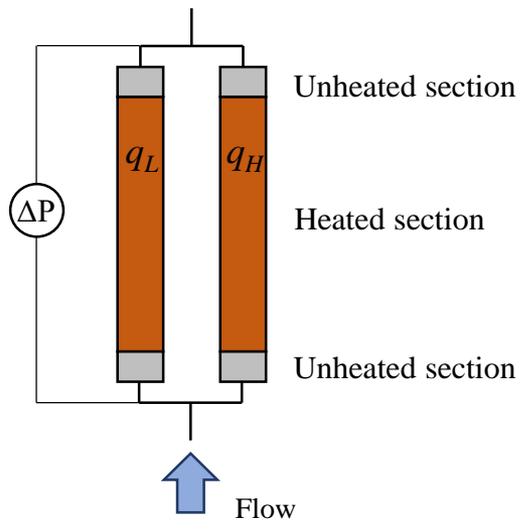
q_L q_H



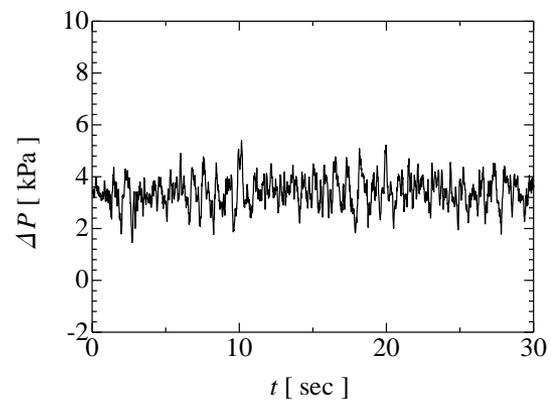
q_L q_H

実験結果～均一・非均一の差圧の違い～

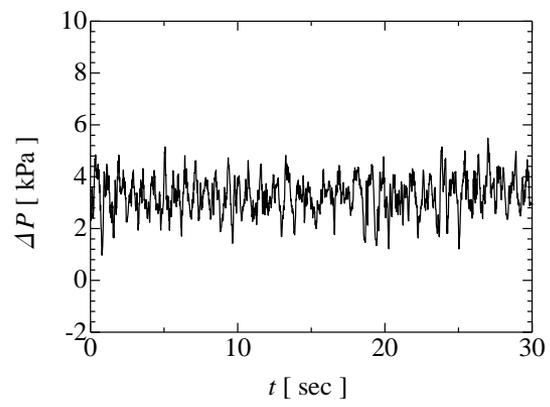
2本並列管を用いたモデル



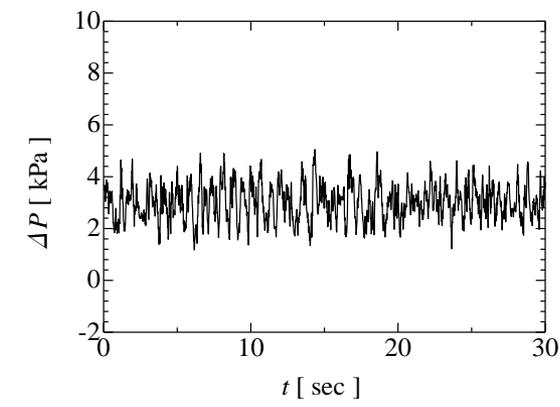
$G = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $x_{eq} = 0.1$



(a) *Uniform*
($q_L = q_R = 40 \text{ kW/m}^2$)



(b) *Ununiform* ($q_H/q_L = 2$)
($q_L = 26.5 \text{ kW/m}^2$
 $q_R = 54 \text{ kW/m}^2$)



(c) *Ununiform* ($q_H/q_L = 4$)
($q_L = 16 \text{ kW/m}^2$
 $q_R = 64 \text{ kW/m}^2$)



THINK × ACT
KANSAI
UNIVERSITY

2019年12月25-26日
中性子イメージング専門研究会

～沸騰流動系可視化定量評価の新展開～

- ・ 非均一加熱場におけるマイクロチャネル熱交換器内流動挙動
- ・ 急冷現象時の液沸騰挙動

- 阪井 広幸・折戸 敬一郎・船倉 陸
- 藤原 弘樹・鈴木 直翔
- 陰山 拓実
- 小畑 公作・柴田 滉平
- 梅川 尚嗣 教授・網 健行 准教授 (関西大)
- 齊藤 泰司 教授・伊藤 大介 助教 (京大炉)

研究背景

再冠水過程 (クエンチ現象)

原子炉のLOCA時や鉄鋼の焼入れ時に発生

逆環状流

熱輸送の比率が不明

〔 潜熱
顕熱

加熱部分

コア部分

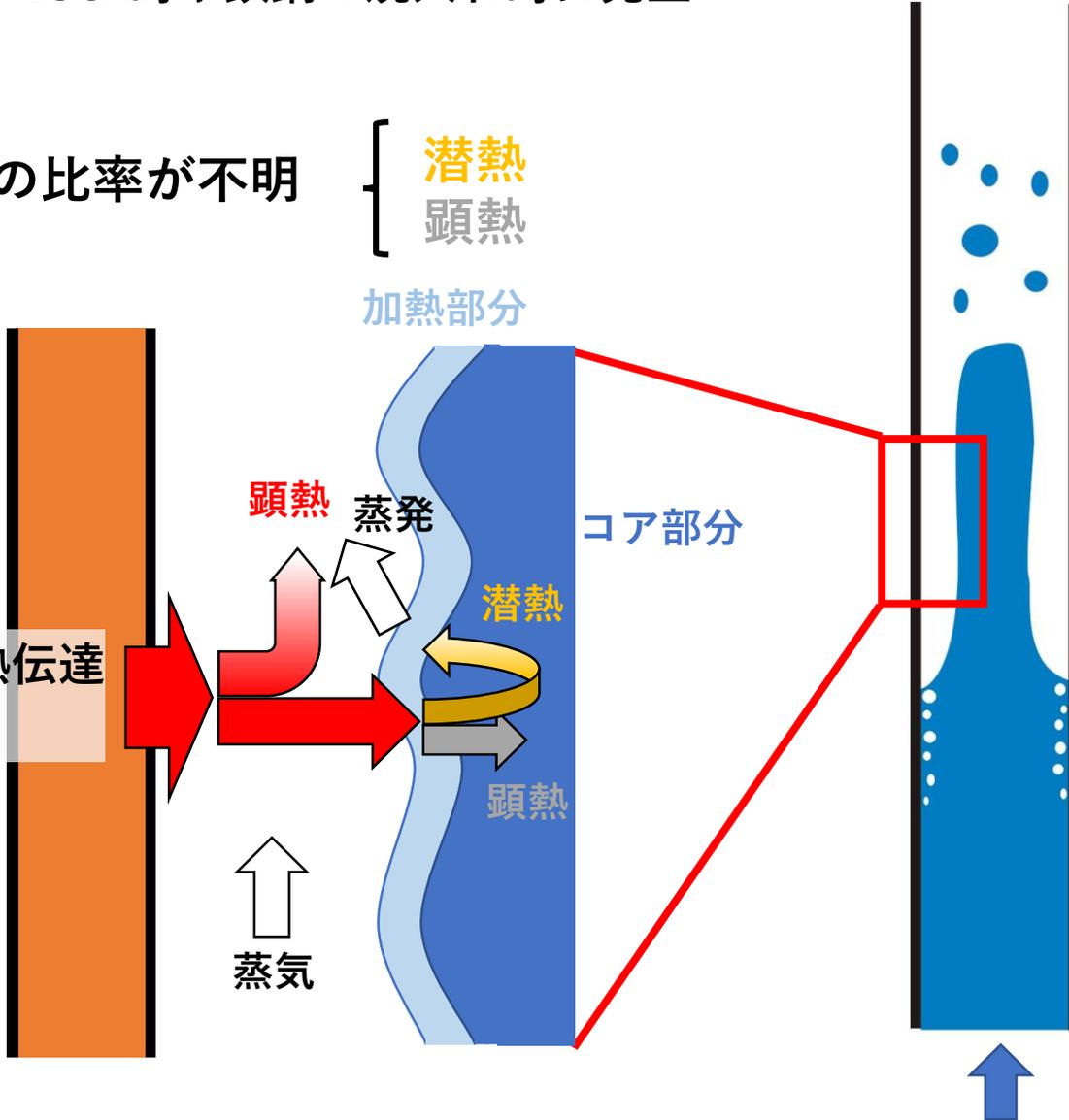
顕熱 蒸発

潜熱

顕熱

蒸気

- ・ 強制対流熱伝達
- ・ 輻射



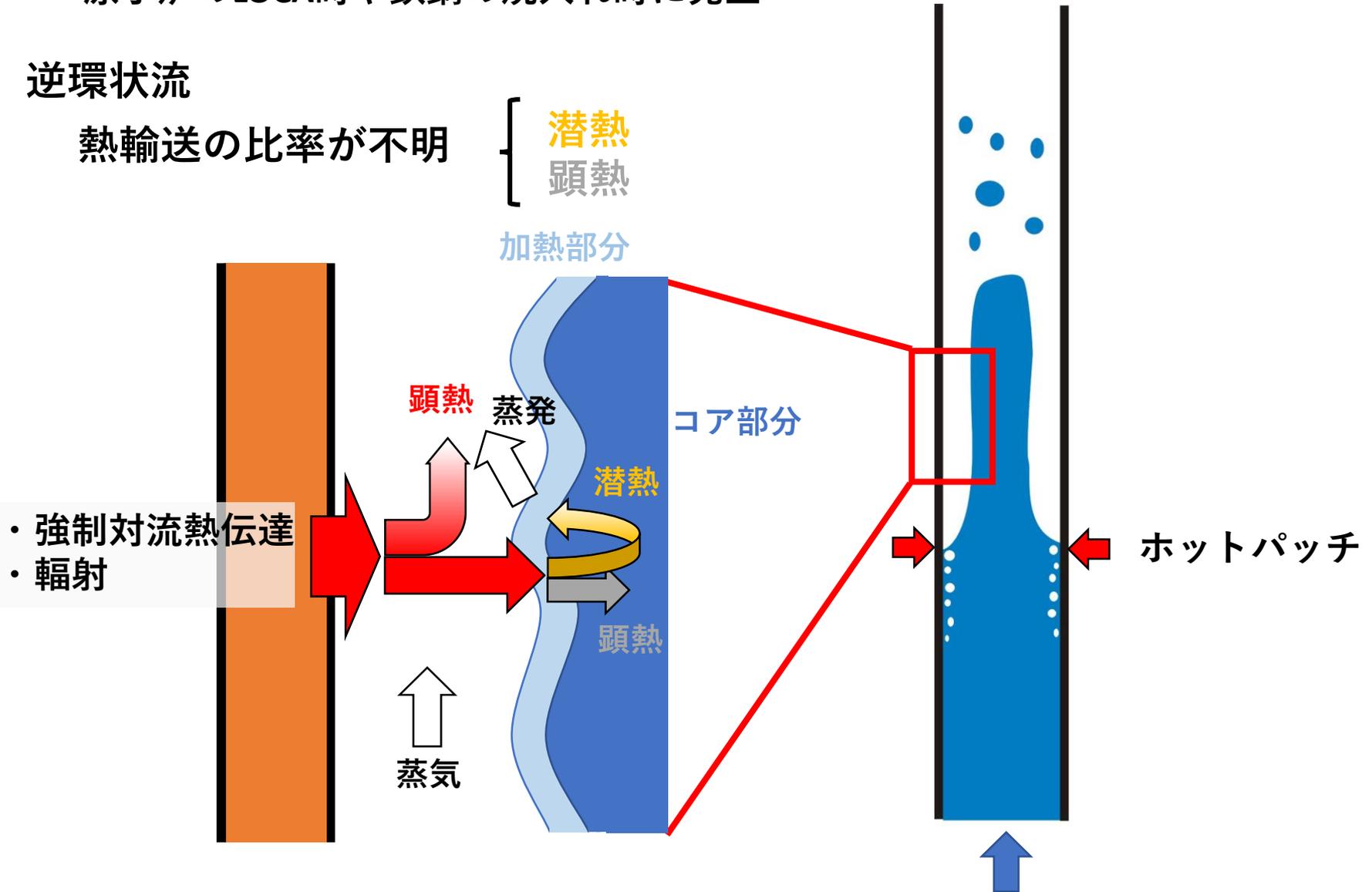
研究背景

再冠水過程 (クエンチ現象)

原子炉のLOCA時や鉄鋼の焼入れ時に発生

逆環状流

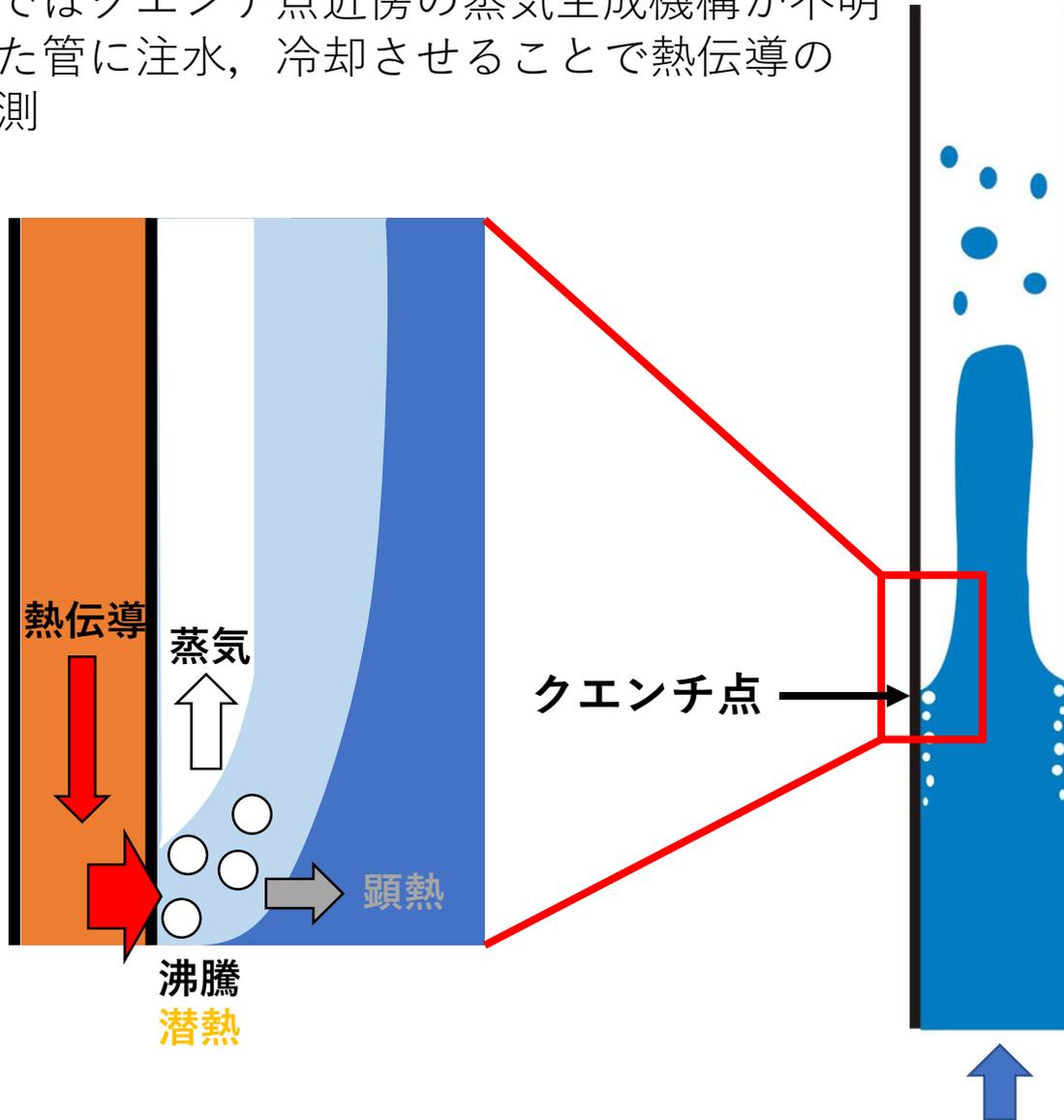
熱輸送の比率が不明



研究背景

クエンチ点近傍の熱輸送

従来の方法ではクエンチ点近傍の蒸気生成機構が不明
⇒ 過熱させた管に注水，冷却させることで熱伝導の影響を観測

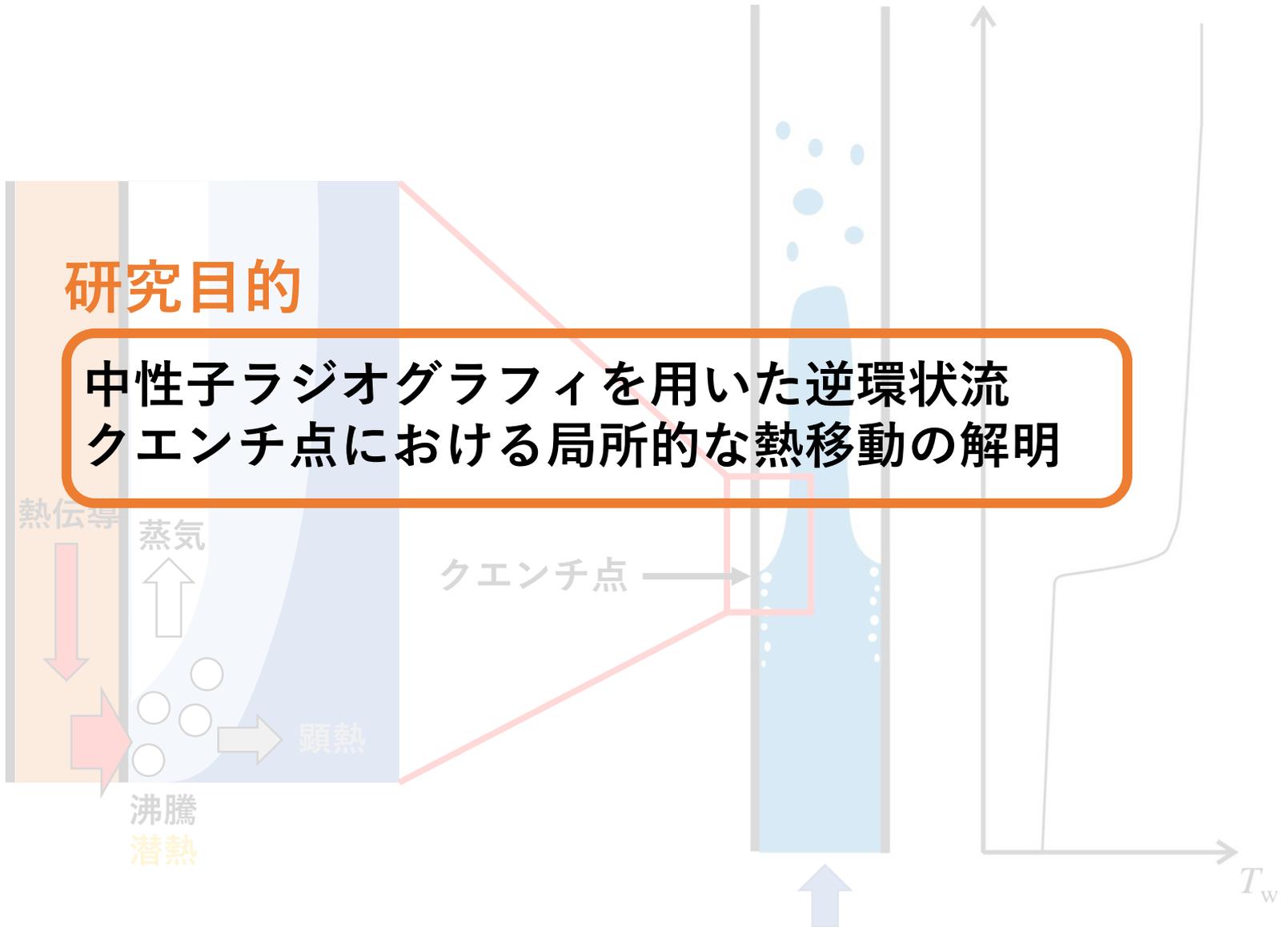


研究背景

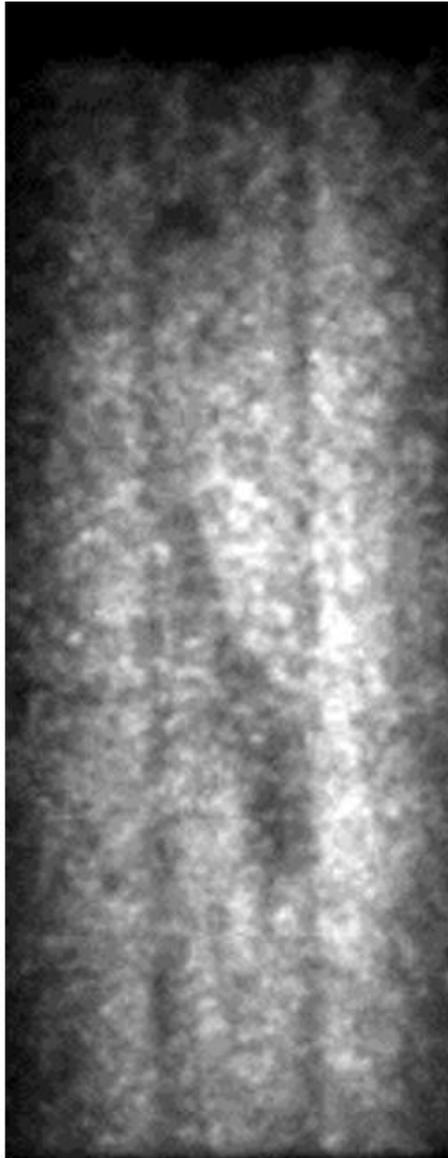
クエンチ点近傍の熱輸送

研究目的

中性子ラジオグラフィを用いた逆環状流
クエンチ点における局所的な熱移動の解明



時間分解能について (10,000fps)



$u=0.14$ [m/s]

使用機材
増感装置
光I.I

Hamamatsu C4412
MCP1段 V8070

カメラ
PhotoronAX-50(ISO40,000)

コンバータ
PSI 6LiF/ZnSAg 200 μ m

撮影条件
フレームレート
10,000[fps]

空間分解能
0.255mm/pixel

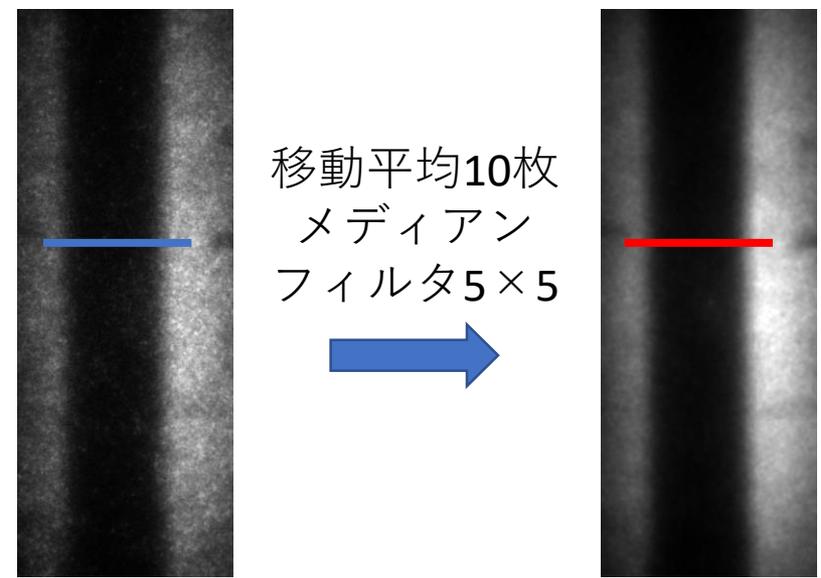
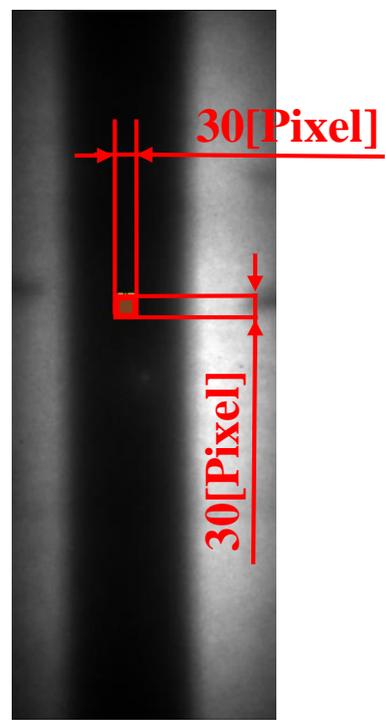
露光時間
1/10,000[s](フルオープン)

40分の1倍速で再生

時間分解能について

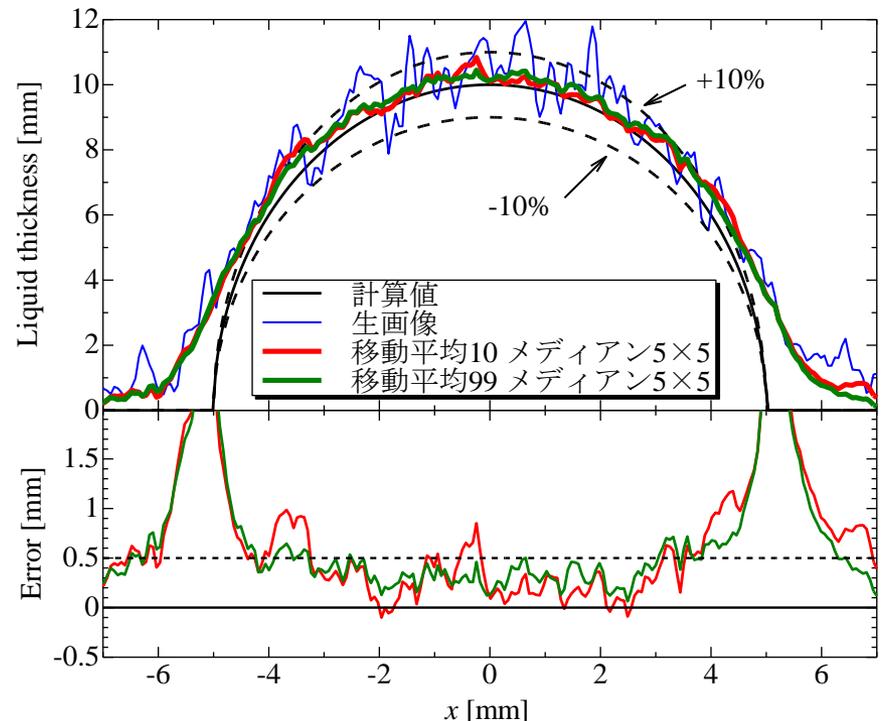
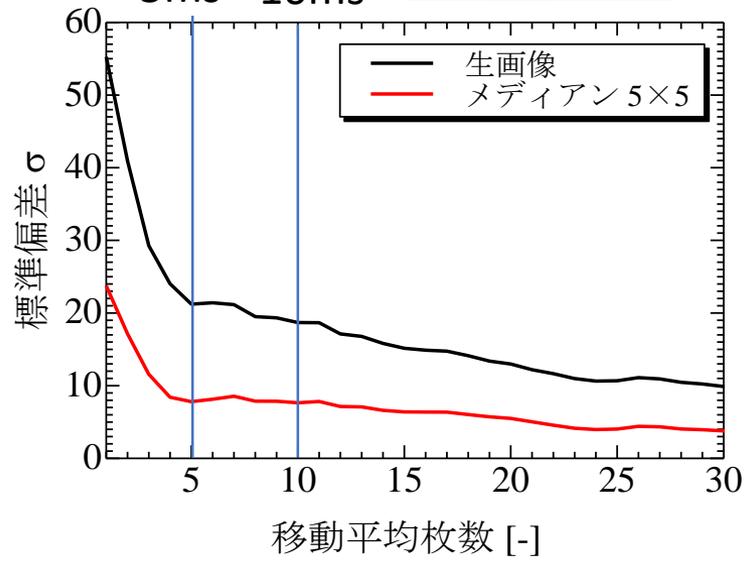
フレームレート
1000[fps]

露光時間
1/2000[s]



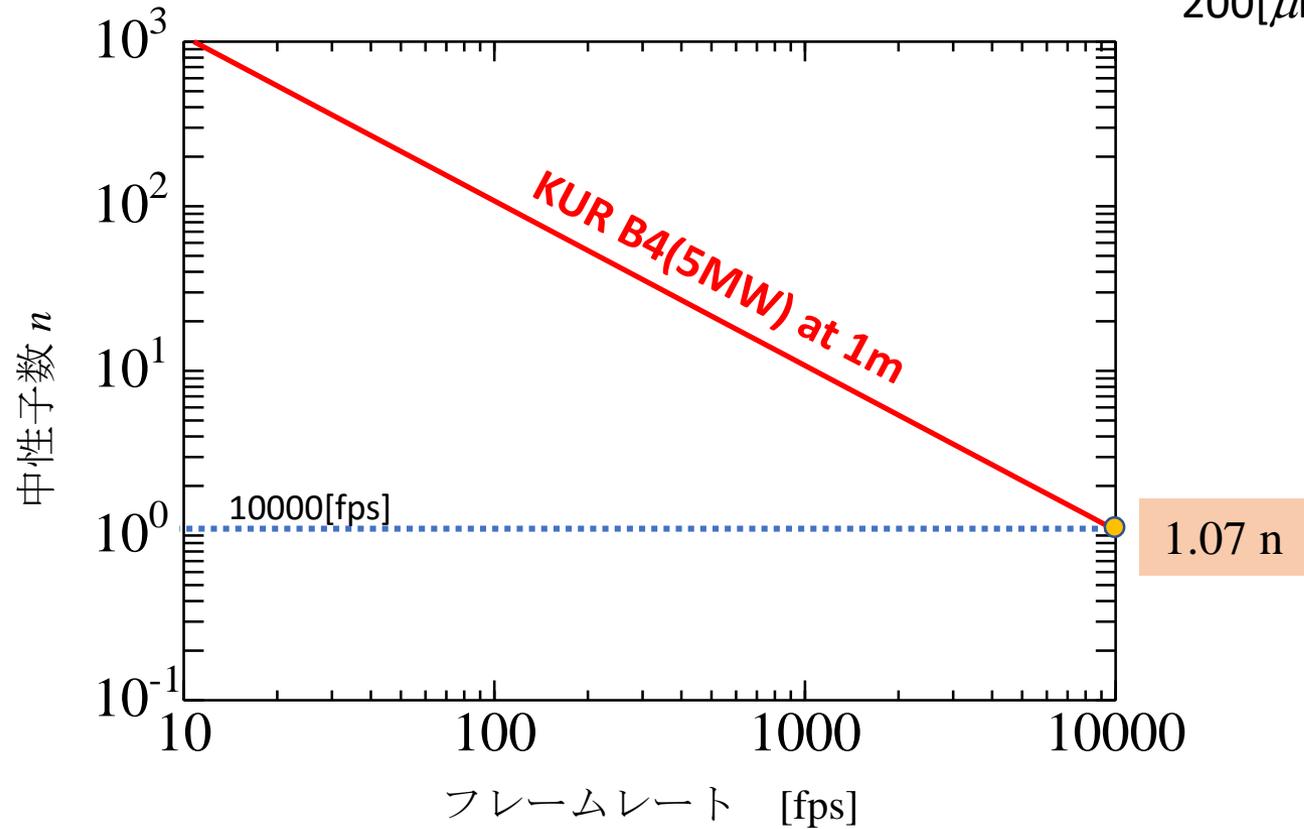
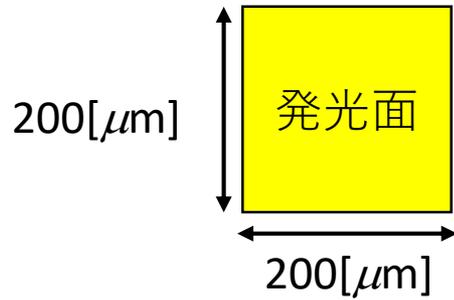
移動平均10枚
メディアン
フィルタ5×5

露光時間
5ms 10ms



時間分解能について

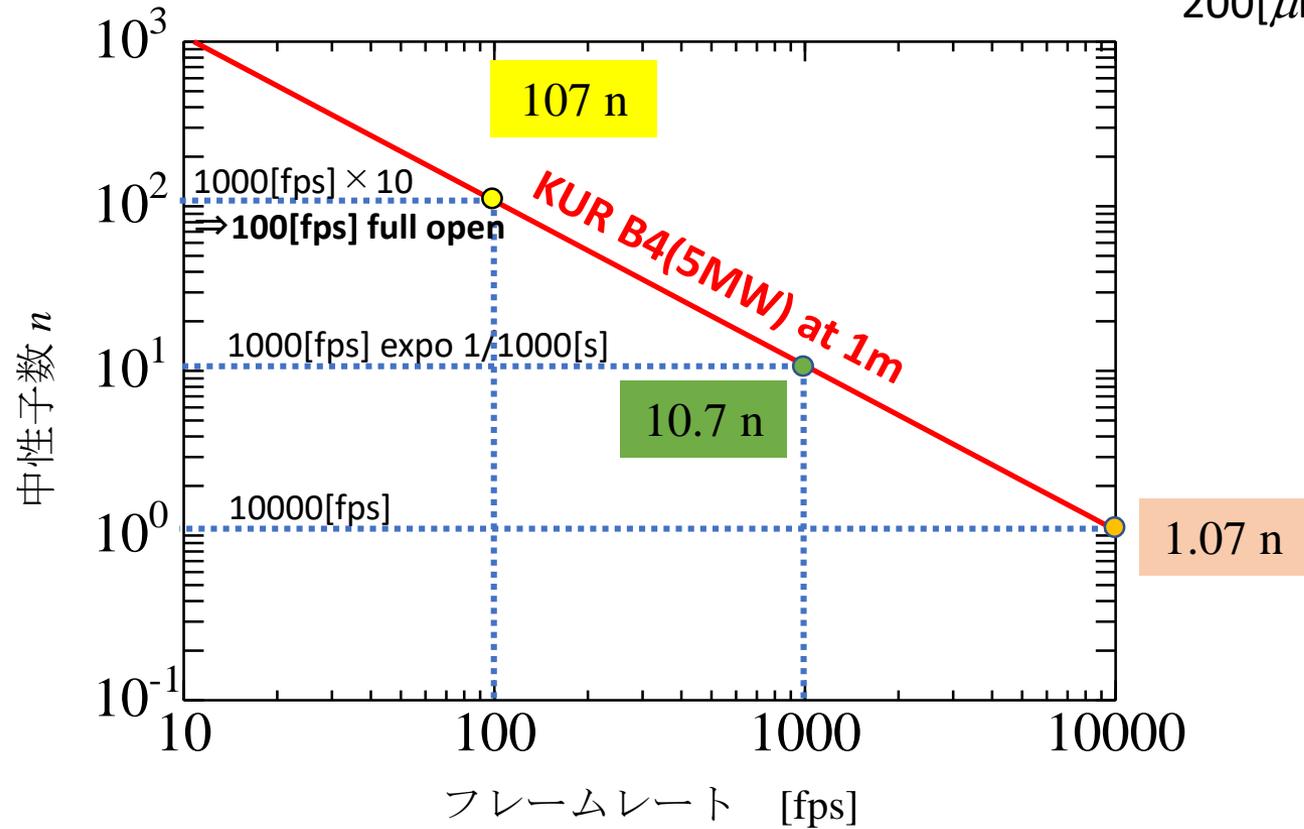
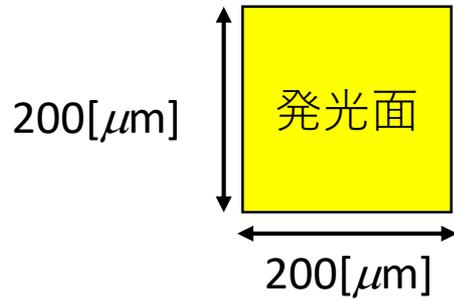
コンバータ厚さ : 200[μm]
コンバータ分解能 : 200[μm]
⇒最小発光面積 : $200 \times 200 = 0.0400[\text{mm}^2]$



7R : $1.2 \times 10^8 \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
B4 at 1m : $4.5 \times 10^7 \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

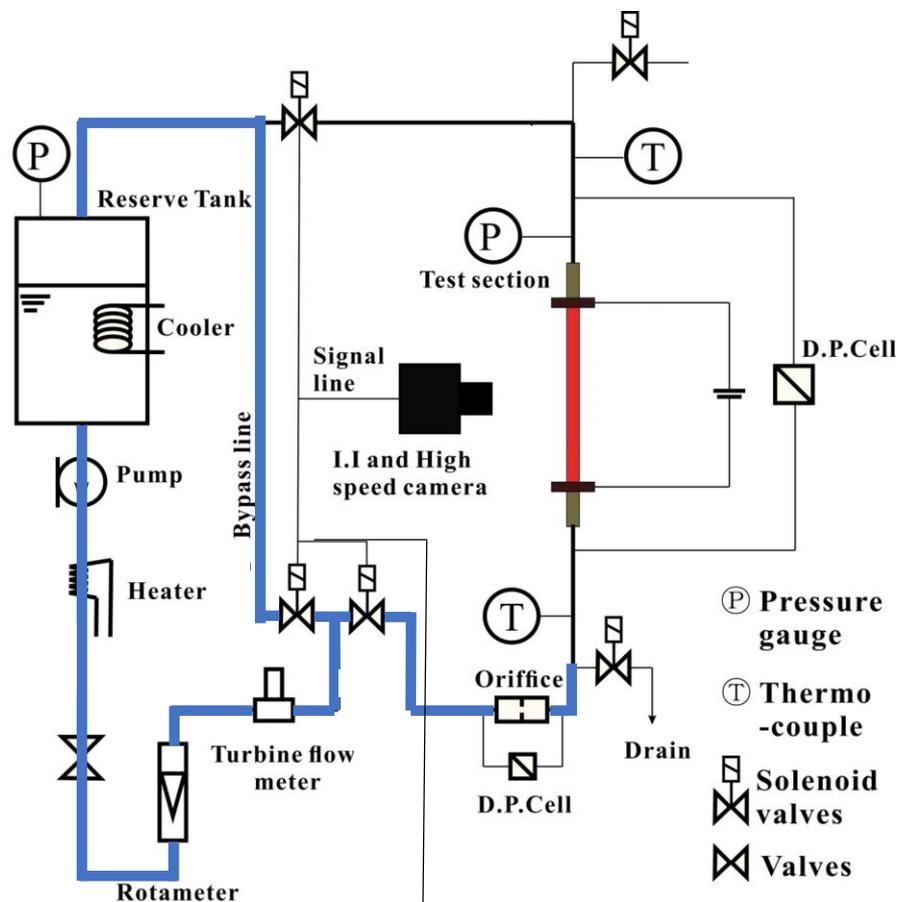
時間分解能について

コンバータ厚さ : 200[μm]
 コンバータ分解能 : 200[μm]
 ⇒最小発光面積 : $200 \times 200 = 0.0400[\text{mm}^2]$



7R : $1.2 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 B4 at 1m : $4.5 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

実験装置

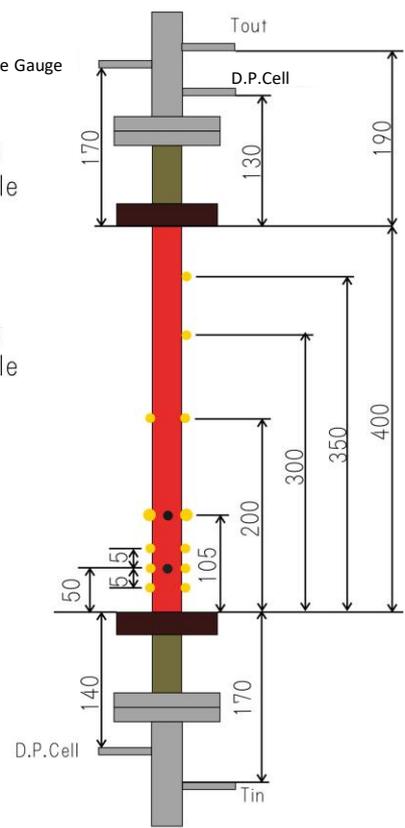
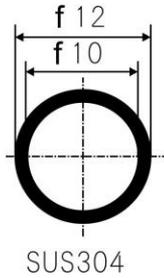


Digital Recorder

- ← Temp.
- ← D.P. & Pressure
- ← Flow Rate.

- Ⓟ Pressure gauge
- Ⓣ Thermo-couple
- ⊗ Solenoid valves
- ⊗ Valves

- f0.10 K-type thermo-couple
- f0.25 K-type thermo-couple (sheath)

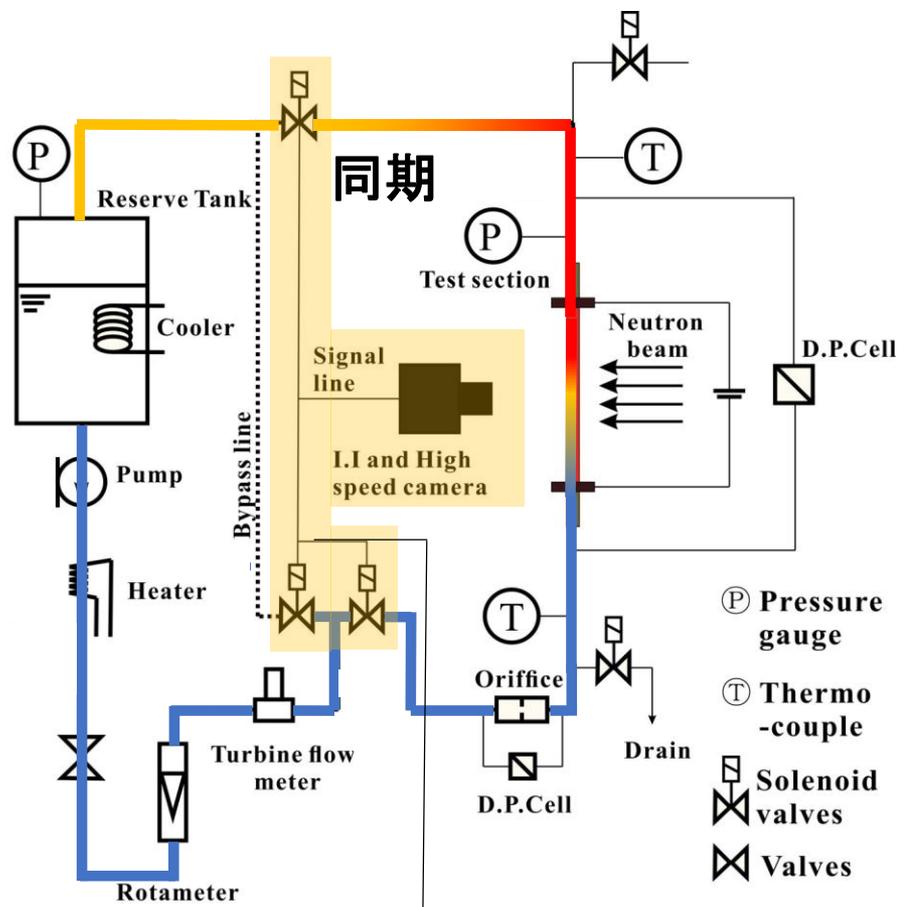


実験条件

初期壁面温度	[deg.C]	800
初期液流速	u_0 [m/s]	0.02 ~ 0.18
流体温度	T_{in} [deg.C]	30 ± 1
系圧	P_{ex} [MPa]	0.1

材質	SUS304
加熱長さ L [mm]	400
内径 D_i [mm]	10
外径 D_o [mm]	12
作動流体	イオン交換水

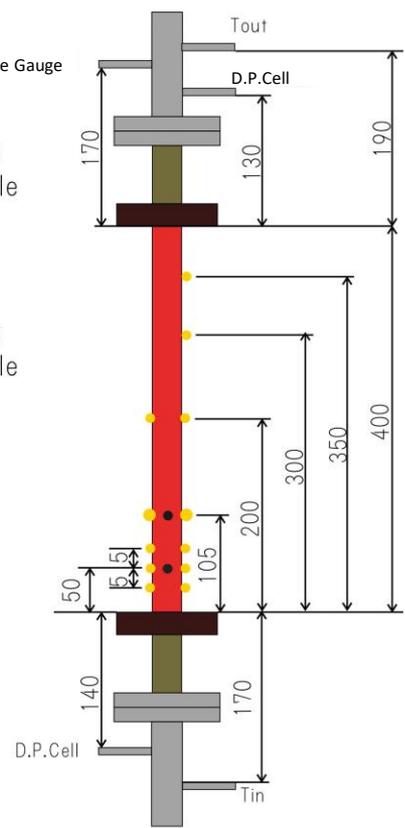
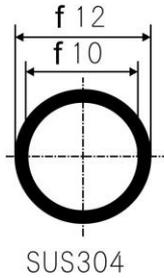
実験装置



Digital Recorder

- ← Temp.
- ← D.P. & Pressure
- ← Flow Rate.

- f0.10 K-type thermo-couple
- f0.25 K-type thermo-couple (sheath)

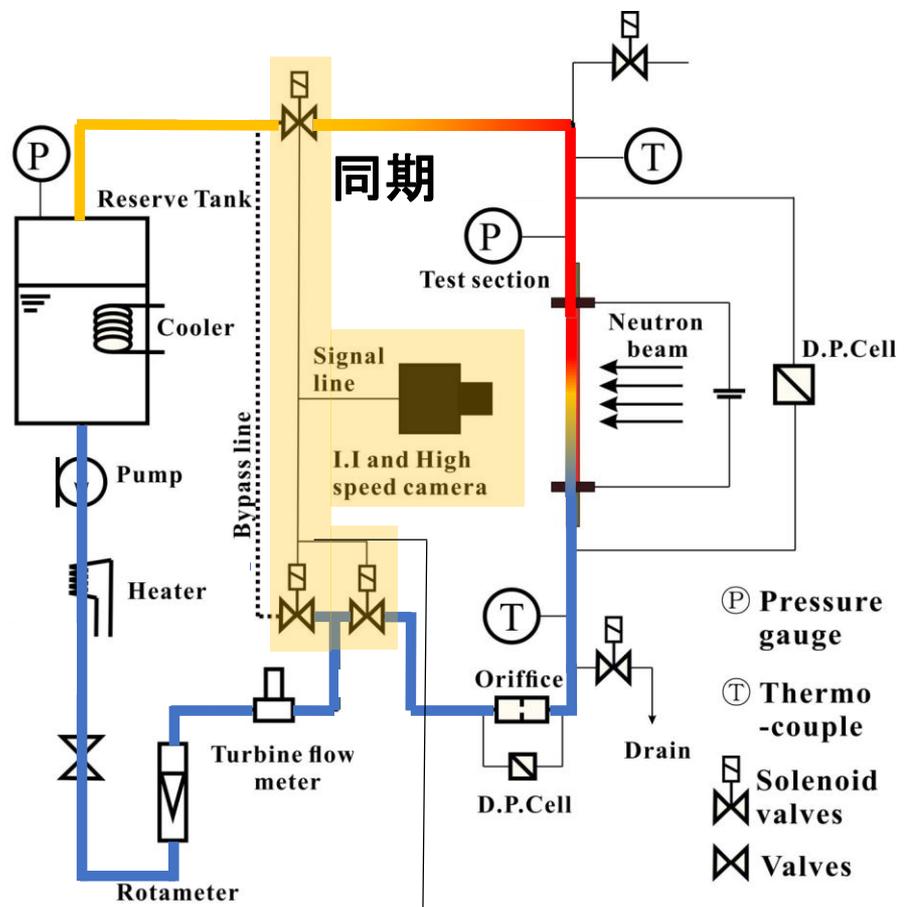


実験条件

初期壁面温度	[deg.C]	800
初期液流速	u_0 [m/s]	0.02 ~ 0.18
流体温度	T_{in} [deg.C]	30 ± 1
系圧	P_{ex} [MPa]	0.1

材質	SUS304
加熱長さ L [mm]	400
内径 D_i [mm]	10
外径 D_o [mm]	12
作動流体	イオン交換水

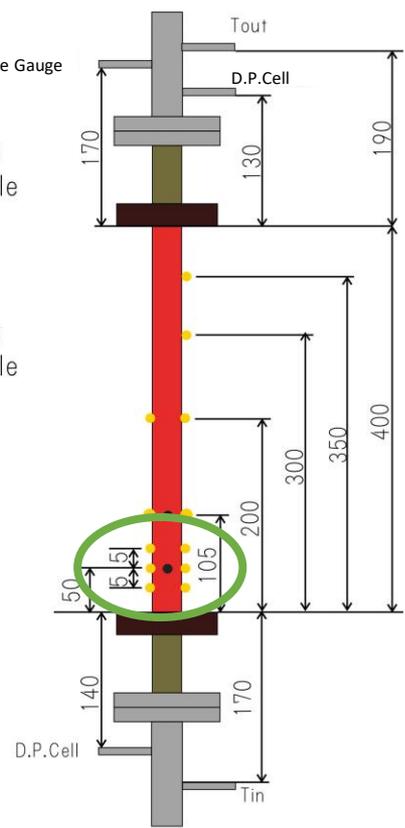
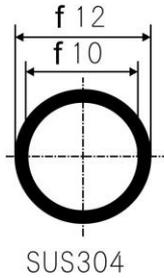
実験装置 (2019年11月実験)



Digital Recorder

- ← Temp.
- ← D.P. & Pressure
- ← Flow Rate.

- f0.10 K-type thermo-couple
- f0.25 K-type thermo-couple (sheath)

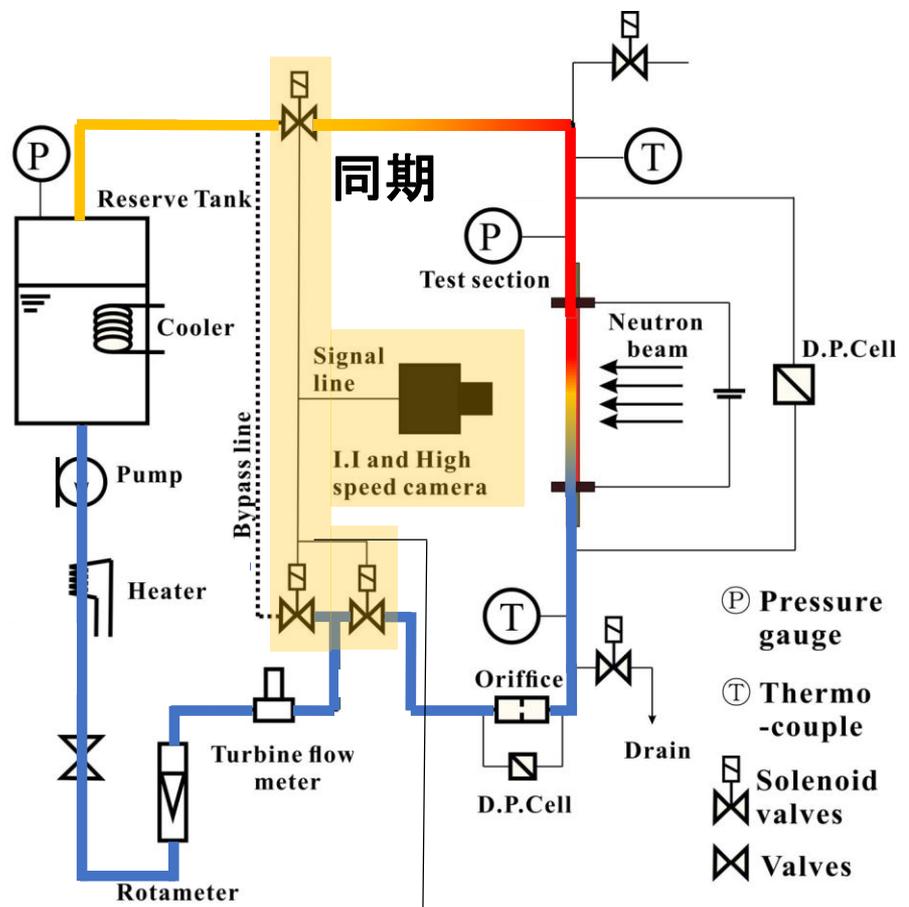


実験条件

初期壁面温度	[deg.C]	800
初期液流速	u_0 [m/s]	0.02 ~ 0.18
流体温度	T_{in} [deg.C]	30 ± 1
系圧	P_{ex} [MPa]	0.1

材質	SUS304
加熱長さ L [mm]	400
内径 D_i [mm]	10
外径 D_o [mm]	12
作動流体	イオン交換水

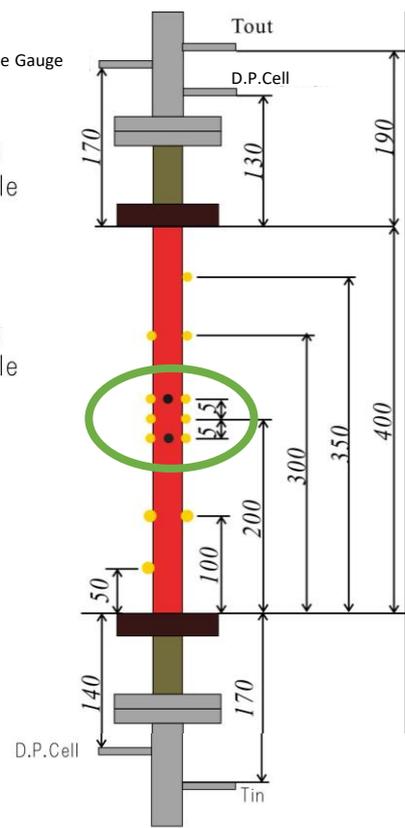
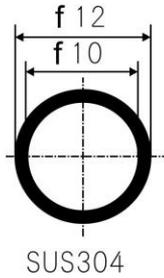
実験装置 (2019年 8月実験)



Digital Recorder

- ← Temp.
- ← D.P. & Pressure
- ← Flow Rate.

- f0.10 K-type thermo-couple
- f0.25 K-type thermo-couple (sheath)



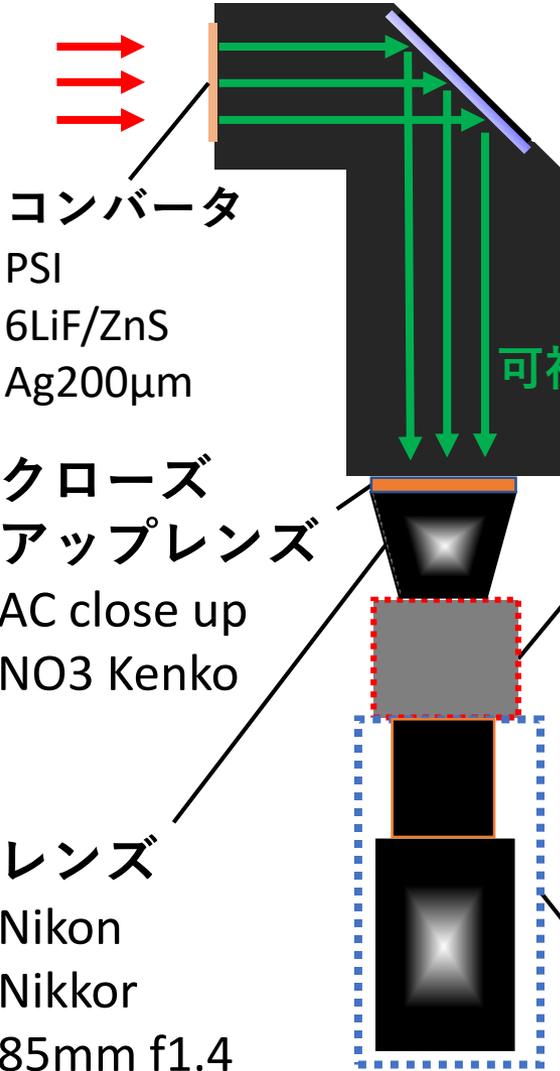
実験条件

初期壁面温度	[deg.C]	800
初期液流速	u_0 [m/s]	0.02 ~ 0.18
流体温度	T_{in} [deg.C]	30 ± 1
系圧	P_{ex} [MPa]	0.1

材質	SUS304
加熱長さ L [mm]	400
内径 D_i [mm]	10
外径 D_o [mm]	12
作動流体	イオン交換水

撮影装置

B4ポート 5MW
中性子線



	2019/8	2019/11
フレームレート [fps]	1000	1000
露光時間 [s]	1/1000	1/2000



光 I.I (増感装置)
Hamamatsu C10880



Hamamatsu C4412
MCP1段 V8070

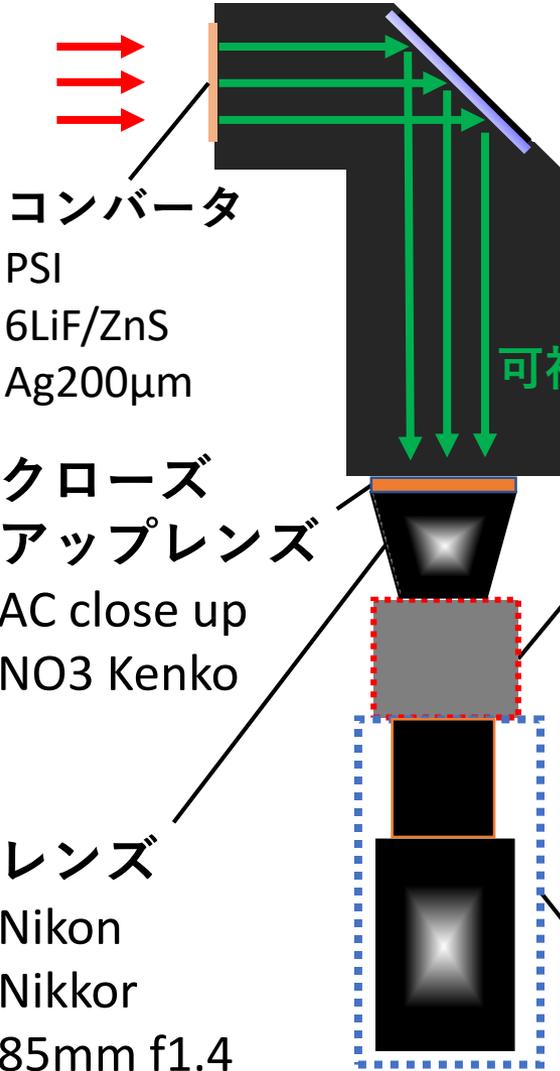


ハイスピードカメラ
Photron FastCamAX-50
12bit (ISO 40,000)

リレーレンズ
Hamamatsu A11703

撮影装置

B4ポート 5MW
中性子線



	2019/8	2019/11
フレームレート [fps]	1000	1000
露光時間 [s]	1/1000	1/2000



光 I.I (増感装置)
Hamamatsu C10880



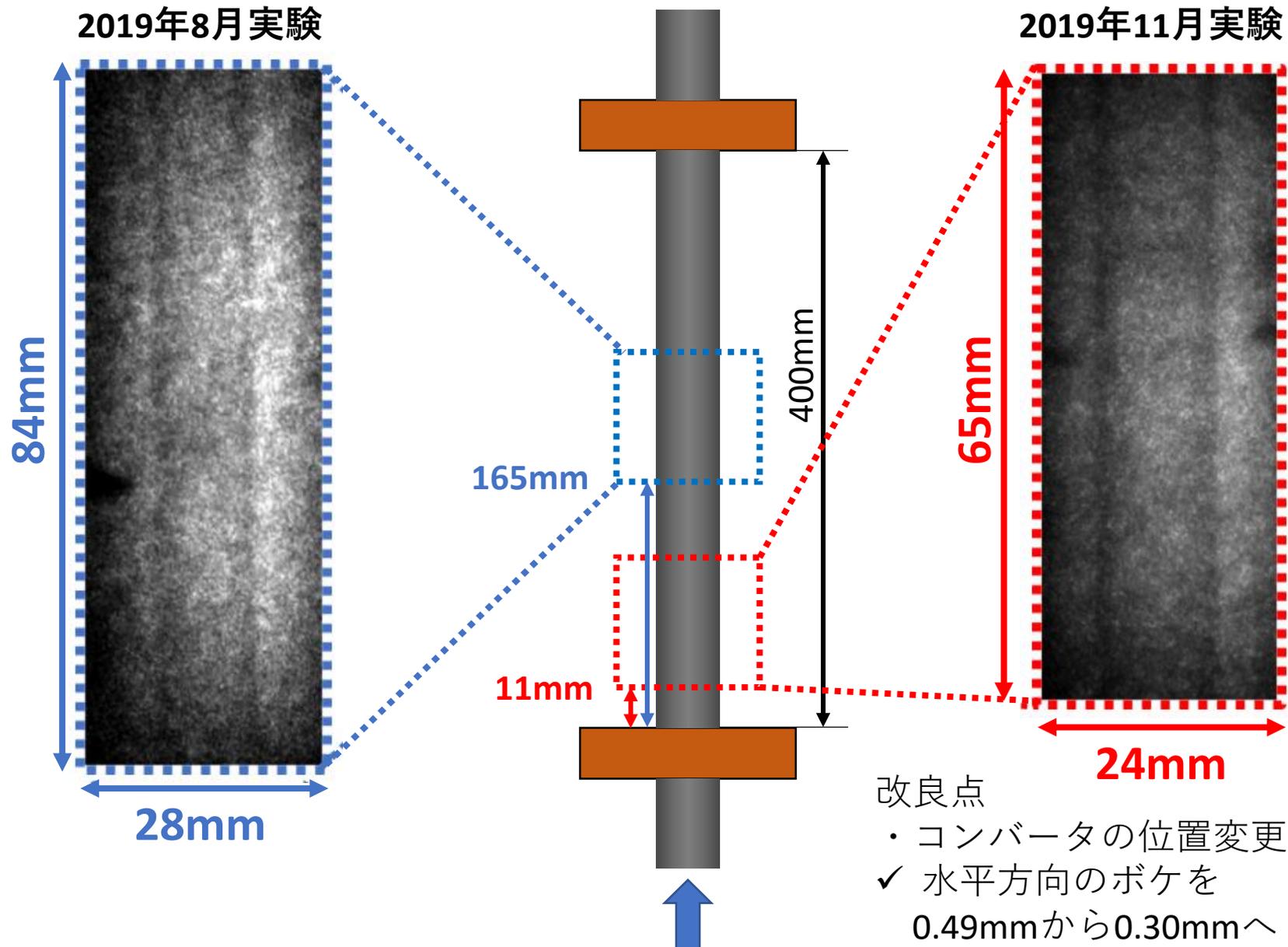
Hamamatsu C4412
MCP1段 V8070



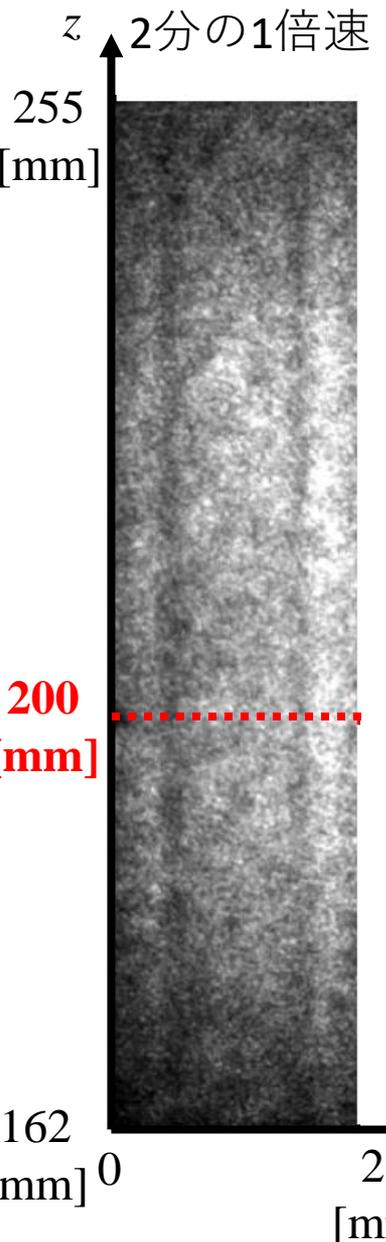
ハイスピードカメラ
Photron FastCamAX-50
12bit (ISO 40,000)

リレーレンズ
Hamamatsu A11703

可視化領域 流速 $u=0.18$ [m/s] 等倍速

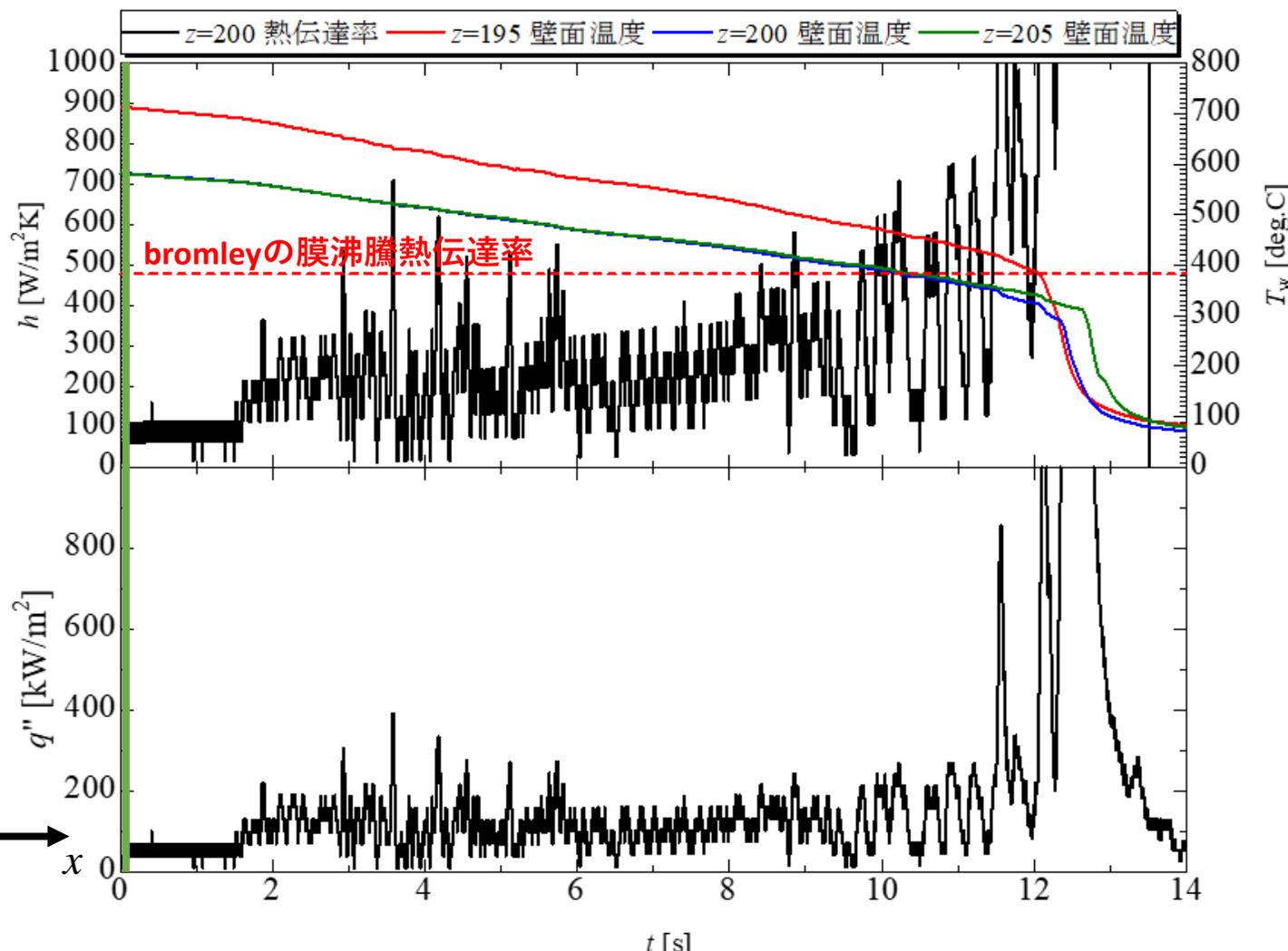


管中央部 実験結果 流速 $u = 0.10 \text{ m/s}$ テストセクション到達後

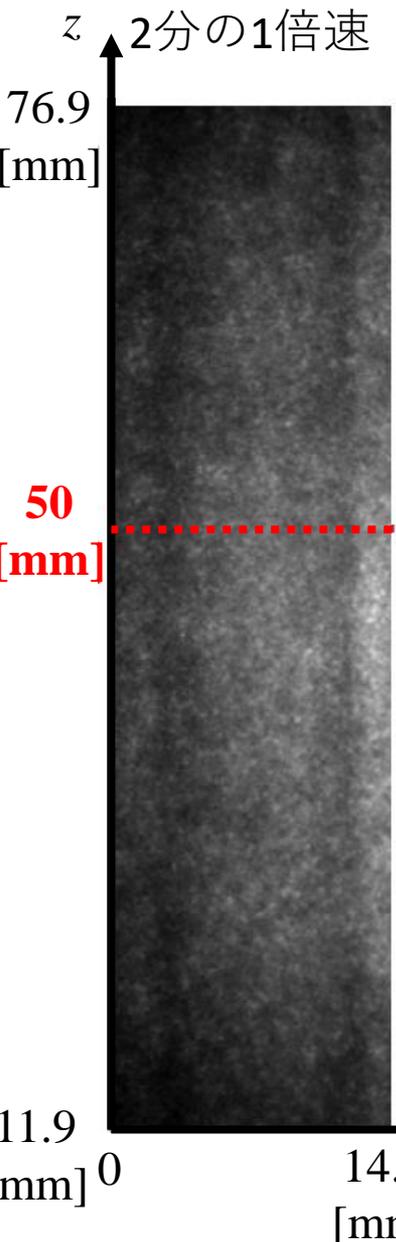


$$h = 0.62 \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)\rho_g k_g^3 i'_{fg}}{D\mu_g \Delta T} \right]^{0.25} + 0.75h_{rad} \text{ 仮定}$$

蒸気膜は層流
水平円柱

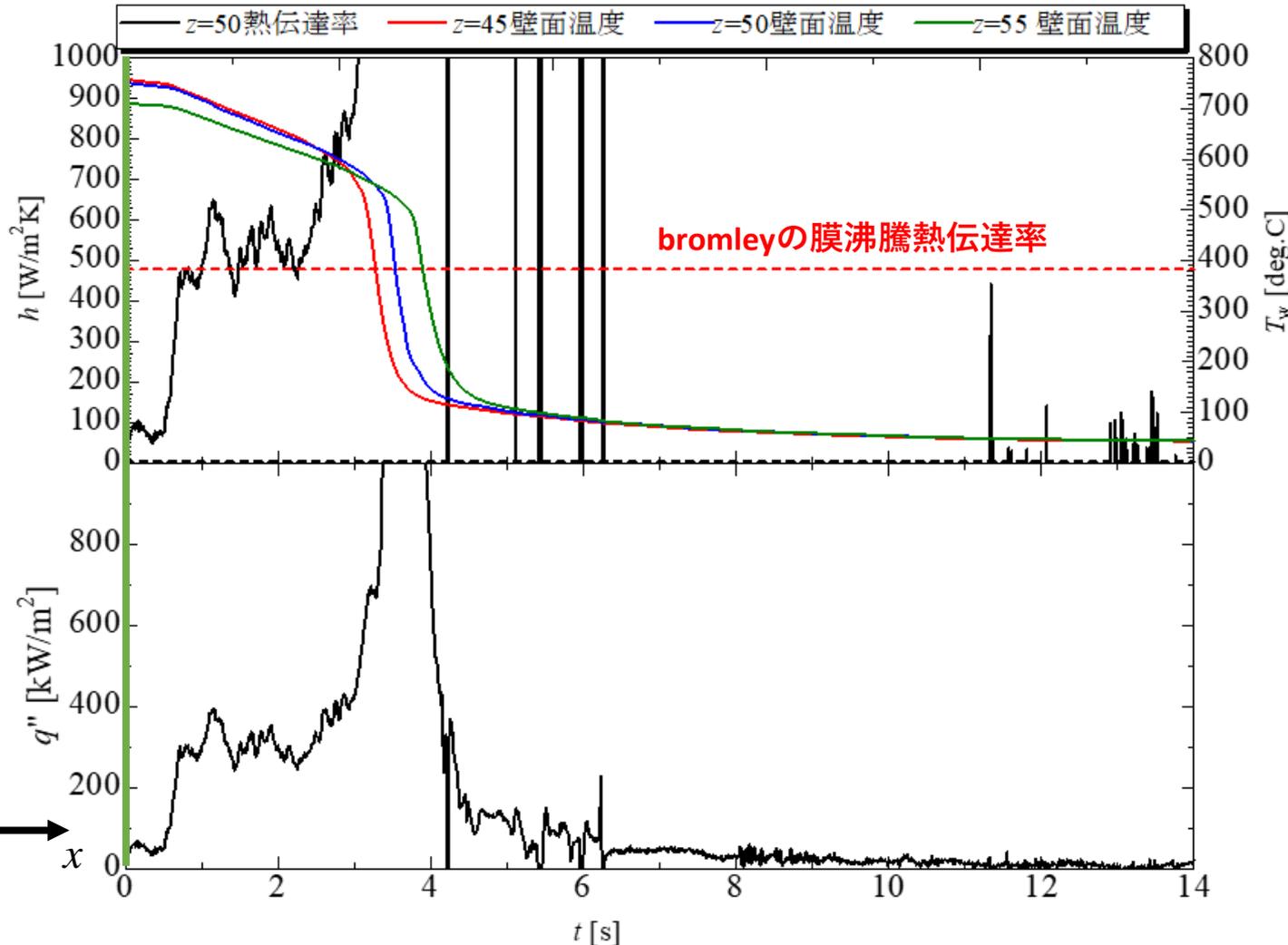


管上流部 実験結果 流速 $u = 0.10 \text{ m/s}$ テストセクション到達後



$$h = 0.62 \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)\rho_g k_g^3 i'_{fg}}{D\mu_g \Delta T} \right]^{0.25} + 0.75h_{rad} \text{ 仮定}$$

蒸気膜は層流 水平円柱



流速 $u=0.18$ クエンチ対注水実験

共通の情報

クエンチ実験

注水実験

フレームレート

1000fps

露光時間

1/2000[s]

再生速度

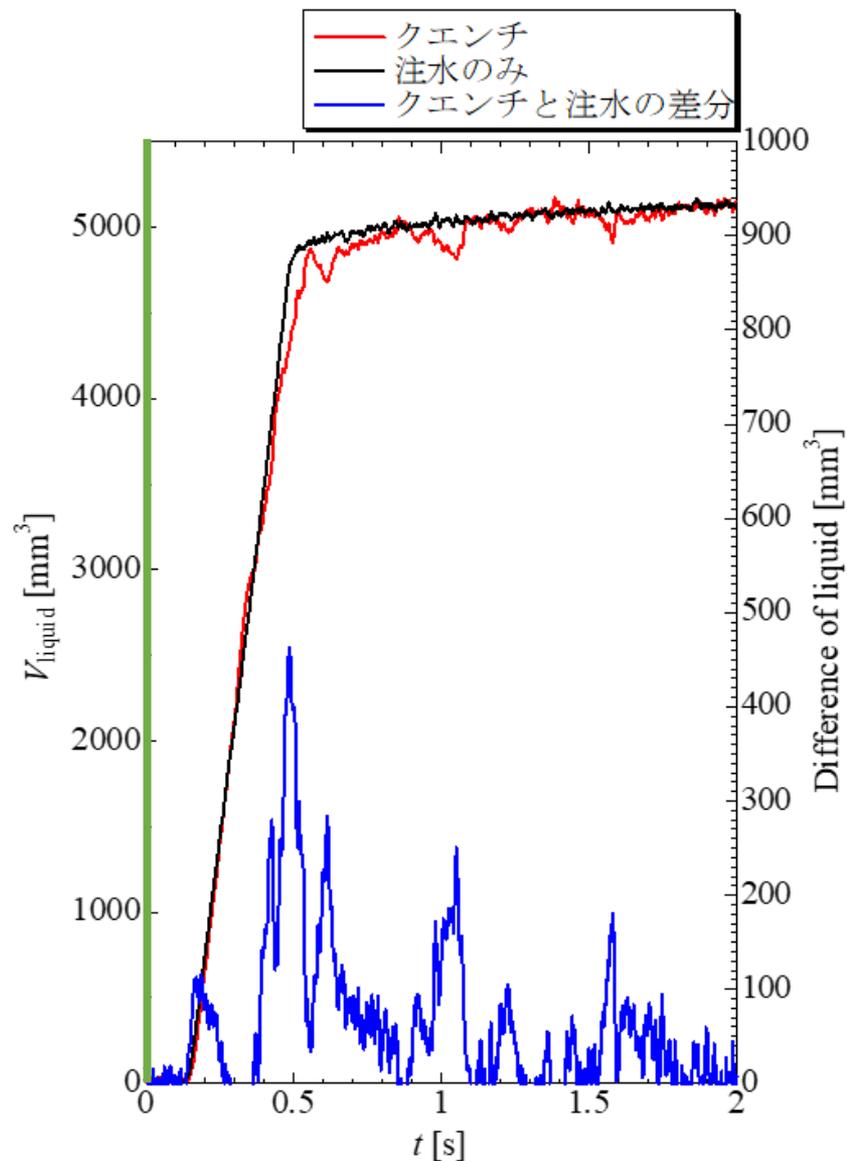
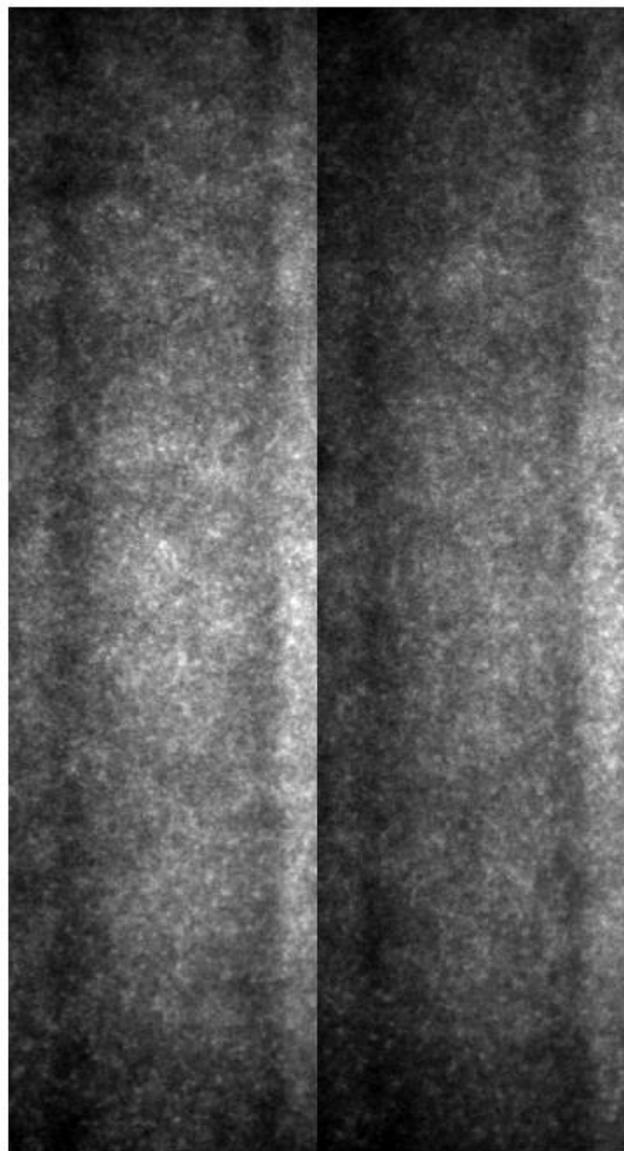
20分の1倍速

流速

0.18m/s

入口部到達後から

2秒間



結言

逆環状流を中性子ラジオグラフィを用いて可視化することで以下の知見が得られた

- ・ 定量評価を行うには $1/100$ [s]程度の露光時間が必要となる
- ・ 上流側と中流部側では急冷に至るプロセスが異なる