

KUR熱中性子ラジオグラフィによる 沸騰二相流研究の展望

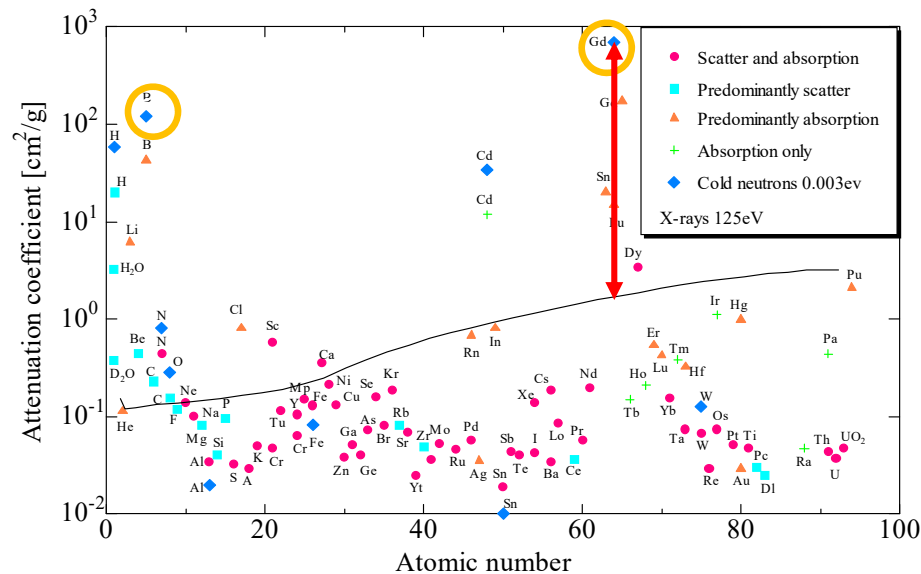
関西大学 梅川尚嗣

齋藤 啓・藤原 弘樹
阪井 幸広・中井 達也・折戸 敬一郎
川副 祥規・陰山 拓実
小畑 公作・柴田 滉平
網 健行

2018.12.27 中性子イメージング専門研究会
at 京都大学複合原子力科学研究所

工学での中性子ラジオグラフィ利用の利点

金属に対する減衰が低い
機械のレントゲン



X-ray $\Rightarrow$ Attenuation of Photon

Photoelectric effect

Compton effect

Pair production

Neutron-ray $\Rightarrow$ Attenuation of Neutron

Nuclear reaction

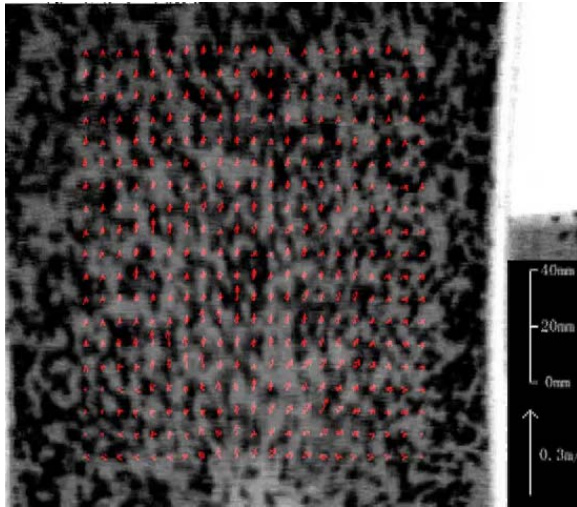
elastic or inelastic collision,
or capturing by core

流動層研究において (JRR-3)

硝酸ガドリニウムによる色付け

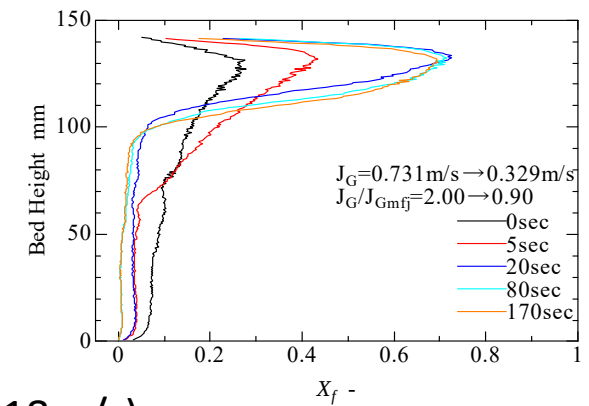
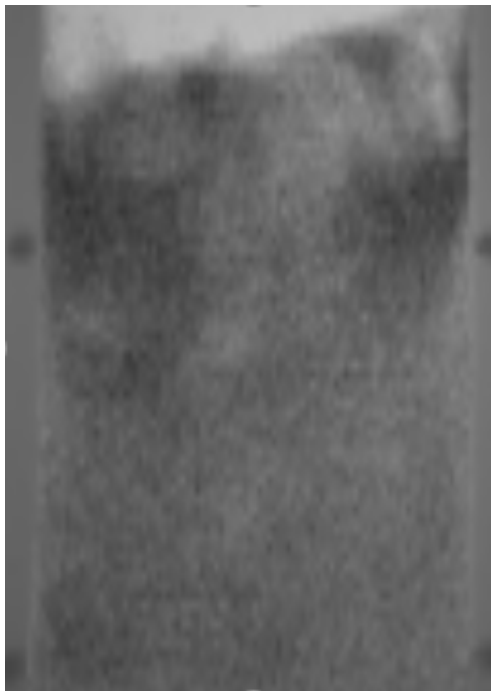
+ X線と大きく異なる減衰特性

炭化ホウ素によるトレーサ



B_4C +Crayによるトレーサ

NR & XR



F 粒子 : $143\mu m$ ($J_{gmf}=0.18m/s$)

硝酸ガドリニウム2%水溶液による着色

J 粒子 : $610\mu m$ ($J_{gmf}=0.365m/s$)

$J_g=0.731 \Rightarrow 0.329m/s$

B4ポートにおける沸騰二相流研究



電源設備 (DC20V 1200A)
冷却系
流量調整系



低中性子束

広い空間が使用可能
放射化が弱い

ビームサイズ
(1cm × 7.5cm)

昇降させることで長尺管
に対応可能

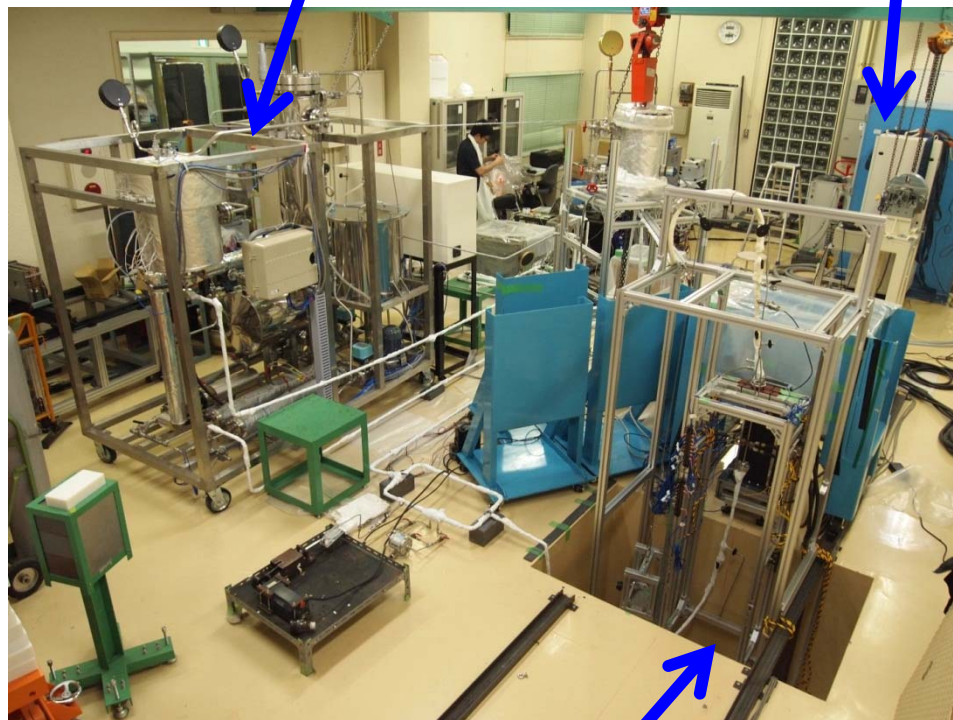
(近郊の施設である)



京都大学原子炉実験所 (B-4 port)

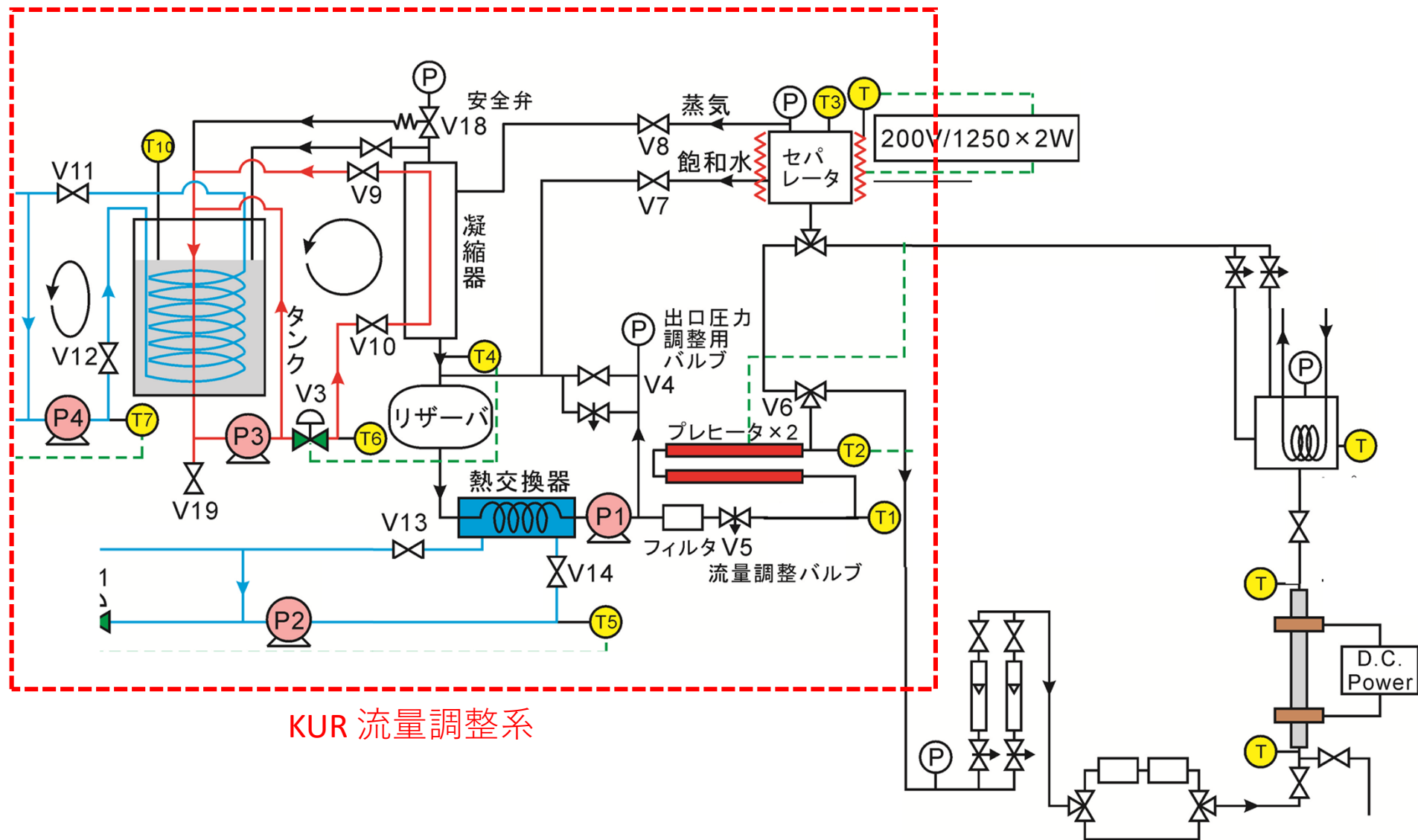
流量調整系・凝縮器

直流電源



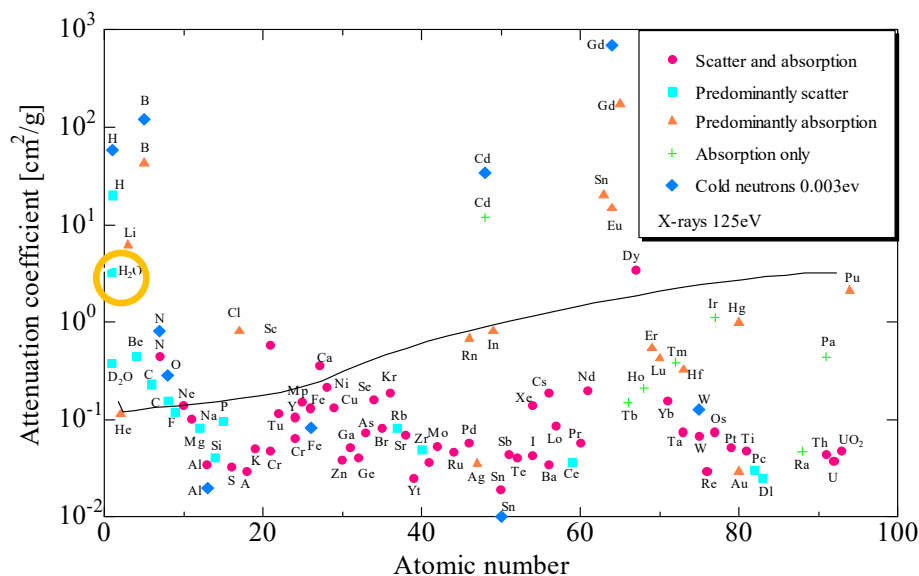
昇降システム設置用ピットホール

Experimental Apparatus



工学での中性子ラジオグラフィ利用の利点

沸騰二相流に特化した設備

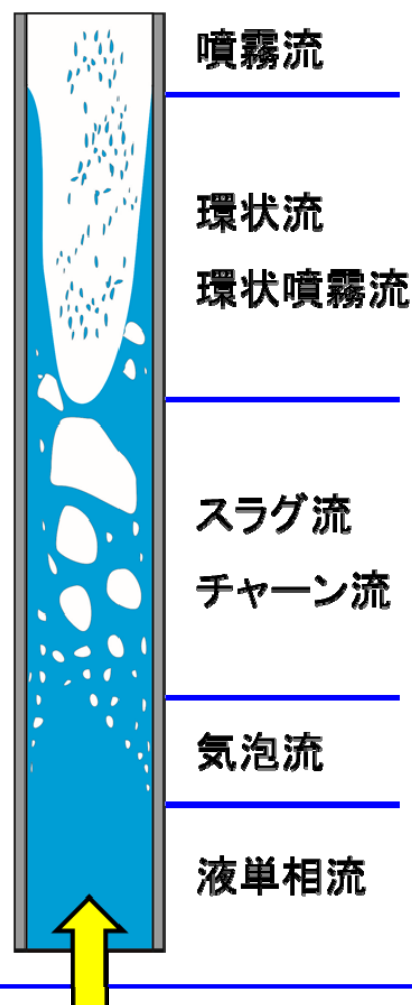


沸騰二相流への適用

金属に対する減衰が低い

通電加熱下でのボイド率計測

蒸発管内の流動様式



中性子ならではの色付け、
トレーサーが欲しい・・・

Imaging System

秩父富士製
設計：片桐（JAEA）
タイプ： $^6\text{LiFZnS}$
サイズ：100mm×100mm

品名	中性子用シンチレータ ZNSL-L100-AL1016
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.	



Converter

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

Lens

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

CCD camera

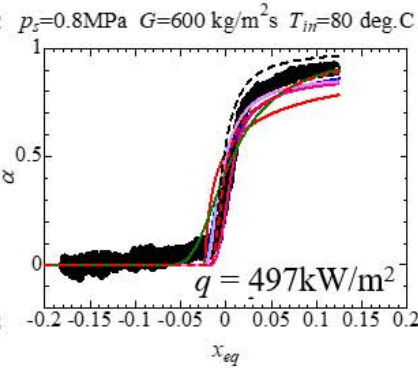
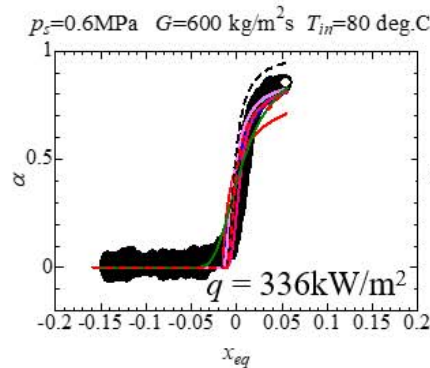
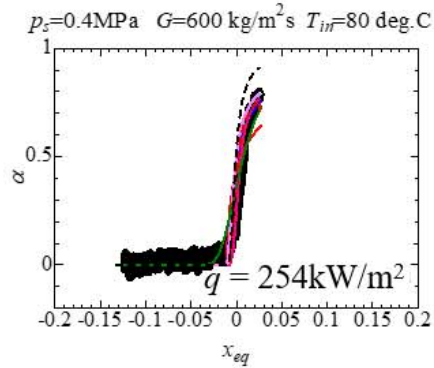
“PIXIS 1024B”
(Princeton Instruments)

Imaging array : 1024 × 1024 pixels

Void fraction (5mm)

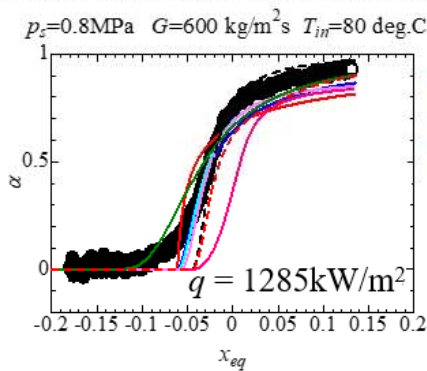
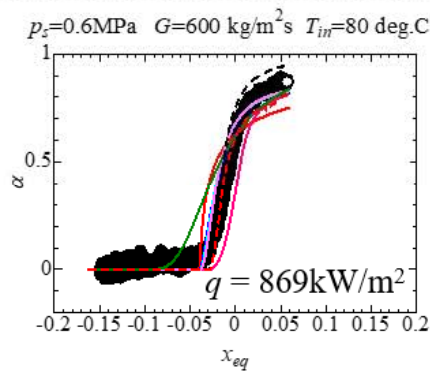
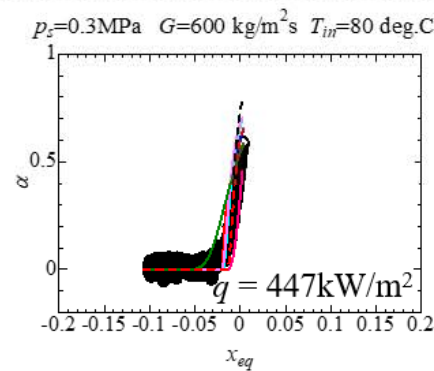
Thermal output : 1MW Exposure : 20s

$L=1000$ mm



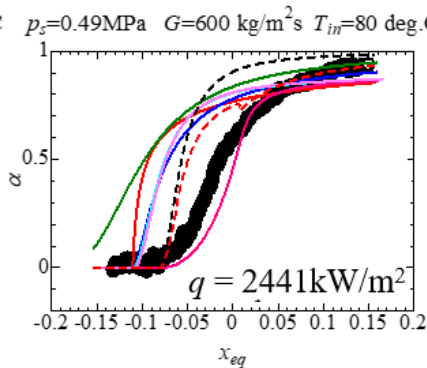
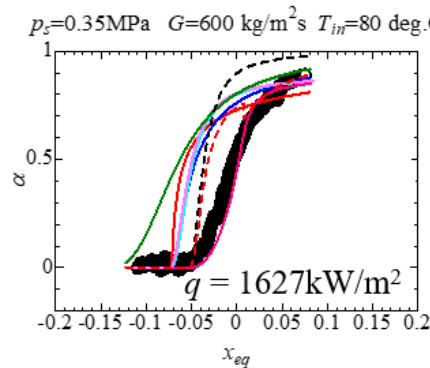
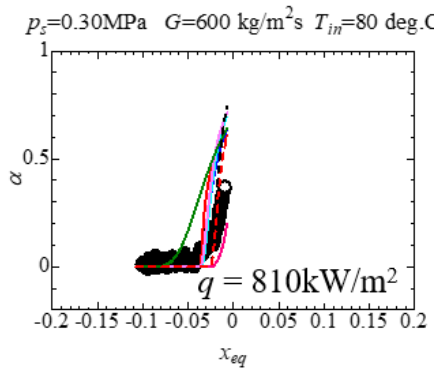
- Bowering(1962)
- Dix(1971)
- Kroeger-Zuber(1968)
- Lahey(1978)
- Levy(1967)
- Sekoguchi(1967)
- - - Homogeneous model
- - - Drift flux model

$L=400$ mm



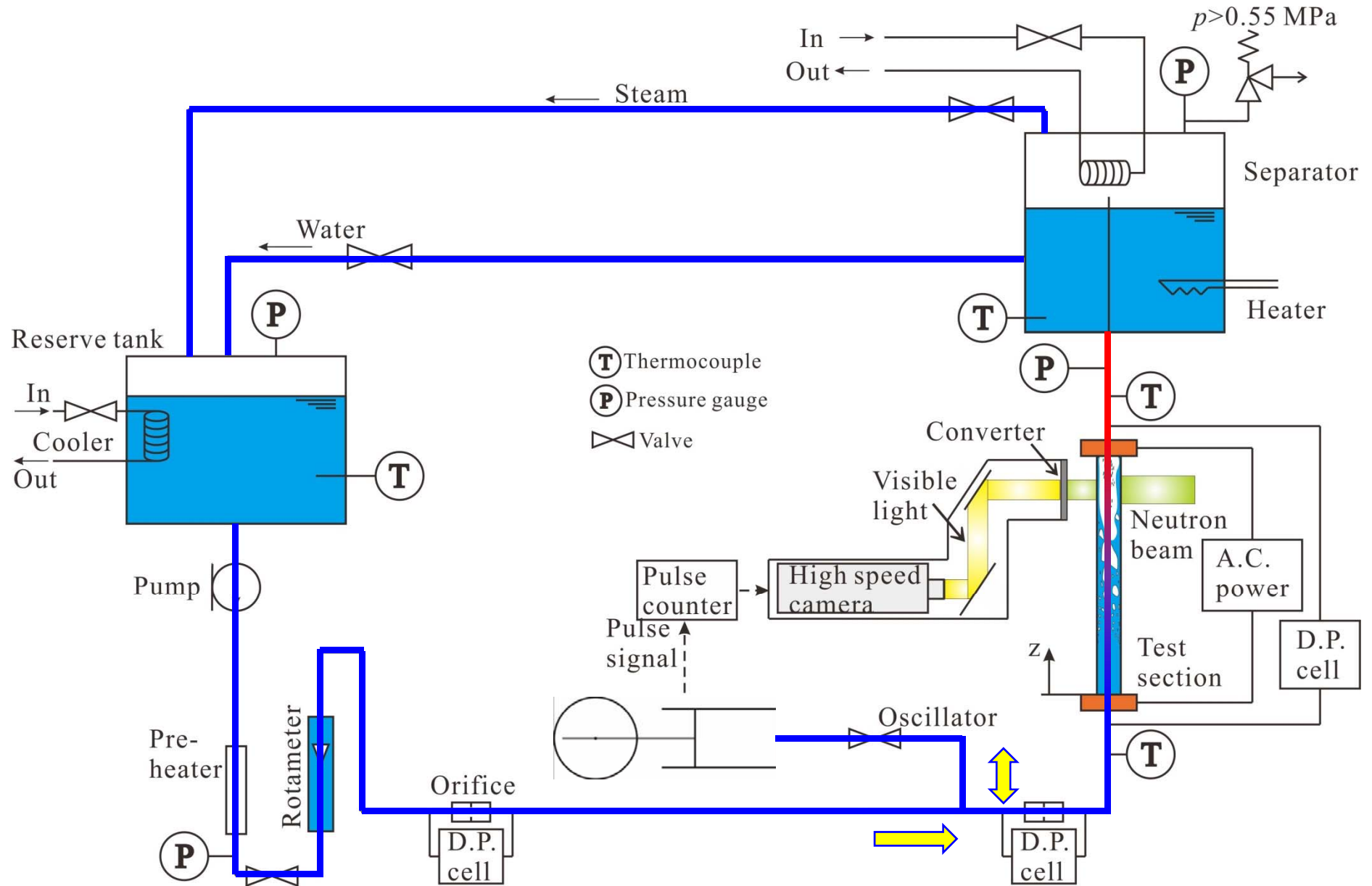
- Bowering(1962)
- Dix(1971)
- Kroeger-Zuber(1968)
- Lahey(1978)
- Levy(1967)
- Sekoguchi(1967)
- - - Homogeneous model
- - - Drift flux model

$L=200$ mm



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

強制流動沸騰ループ

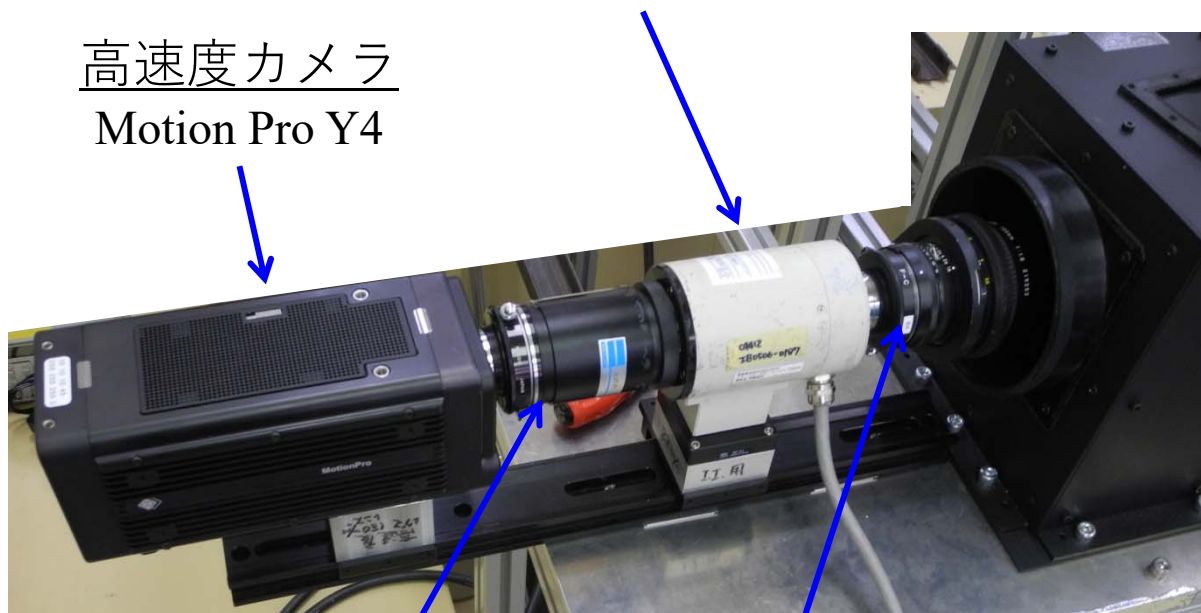


中性子ラジオグラフィ実験設備

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



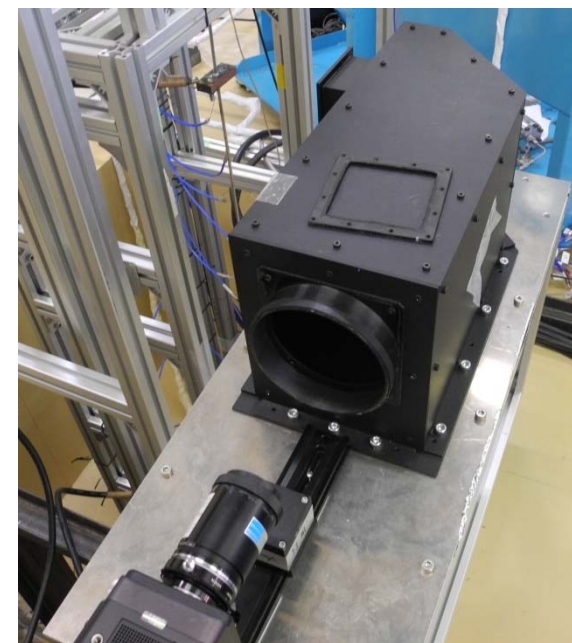
リレーレンズ

レンズ
105mm F1.8 Nikon

撮像条件

フレームレート

30 fps

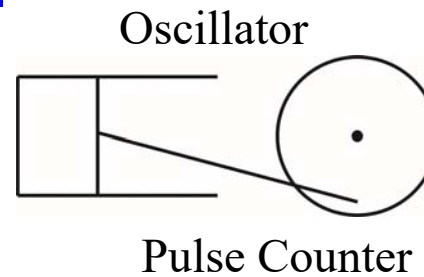
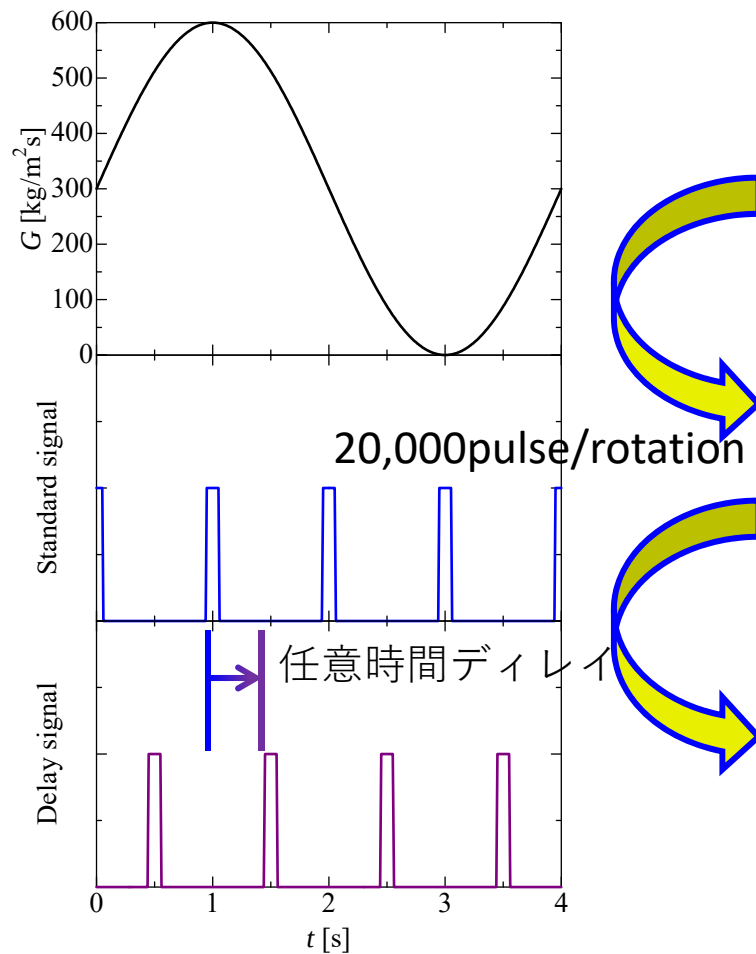


Synchronous signal

Oscillatory flow

テストセクション入口部にピストンとクランク機構からなる流動脈動発生装置を設置することで機械的に流動脈動を付加

オシレータ-CCDカメラ同期方法



Delay Timer



Exposure time	0.03 s
Accumulation number	34
Accumulated exposure time	1.0 s

CCDカメラ

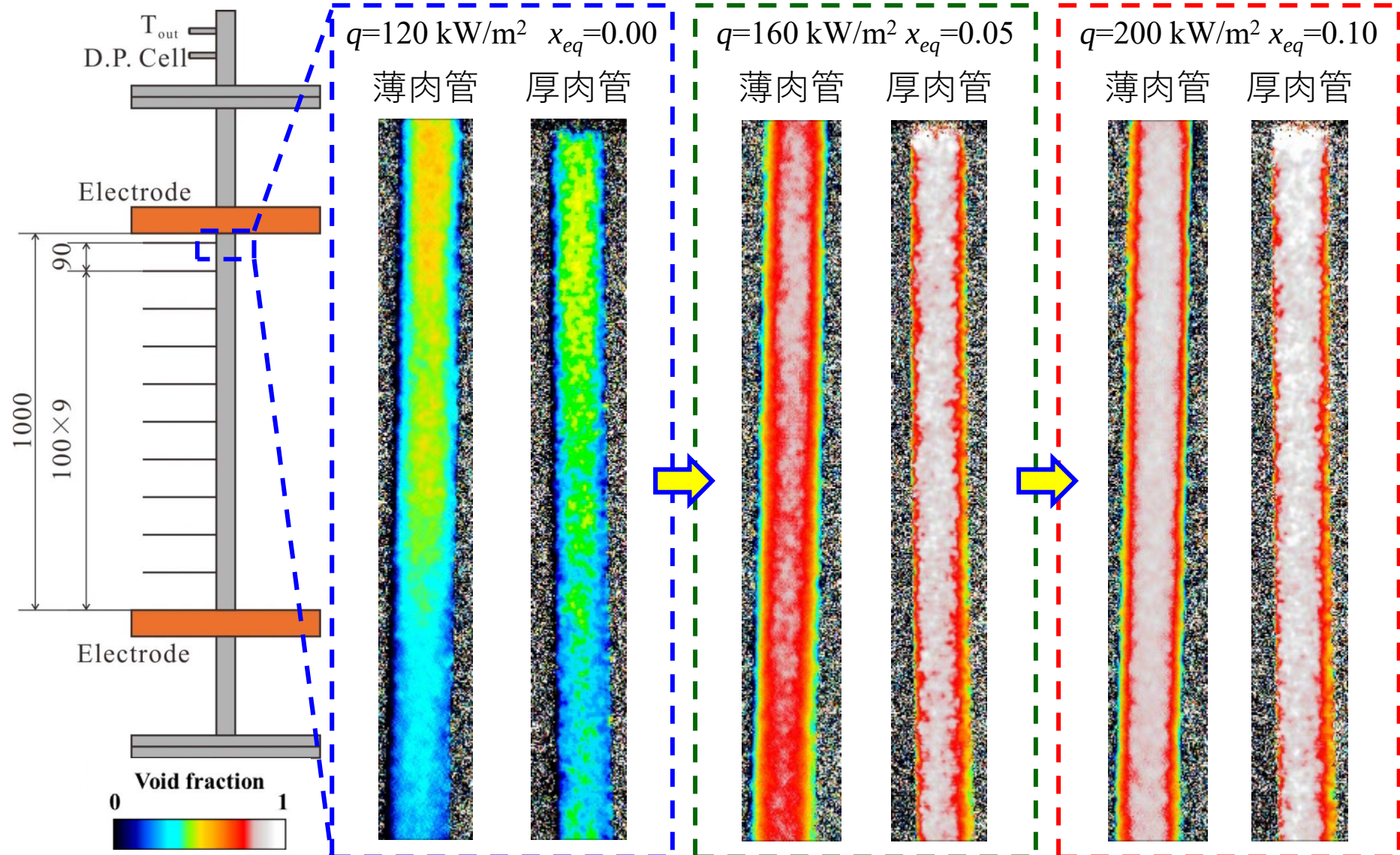


Pseudo-Dynamic Image

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

熱出力：5 MW フレームレート：30 fps

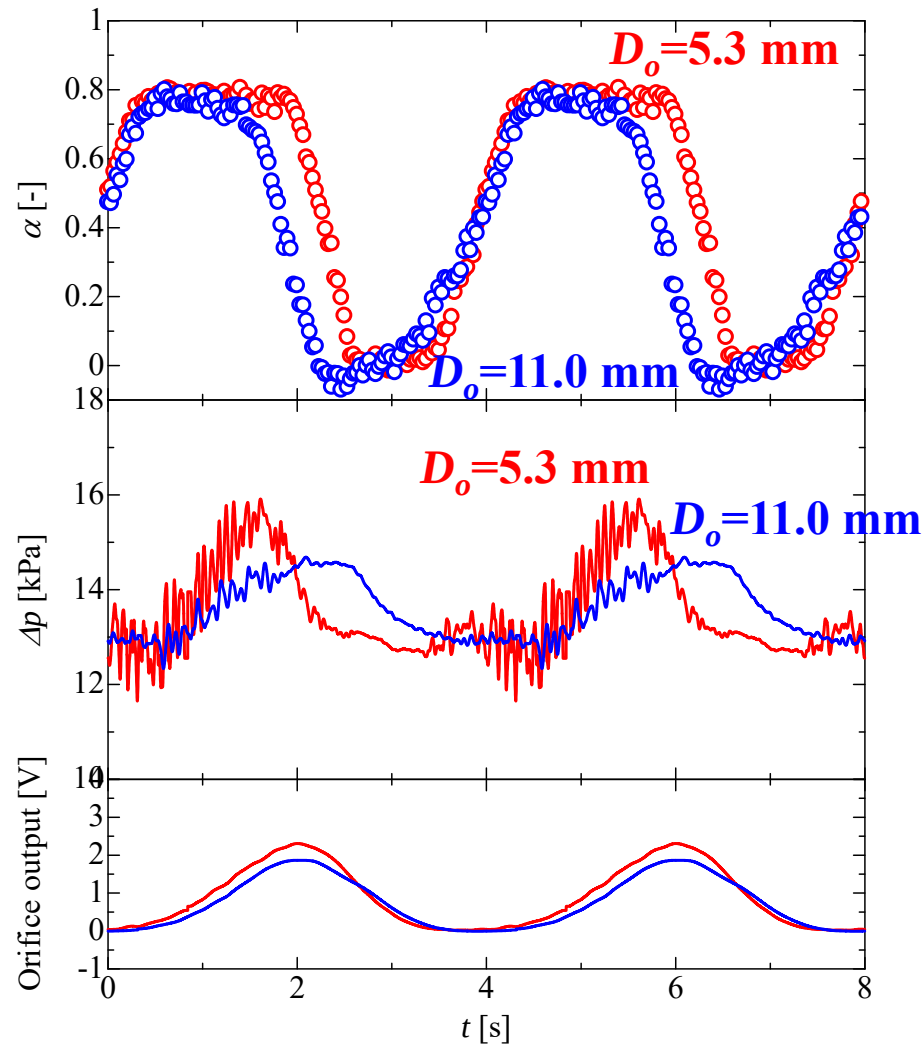
(露光時間 0.03s × 32枚)



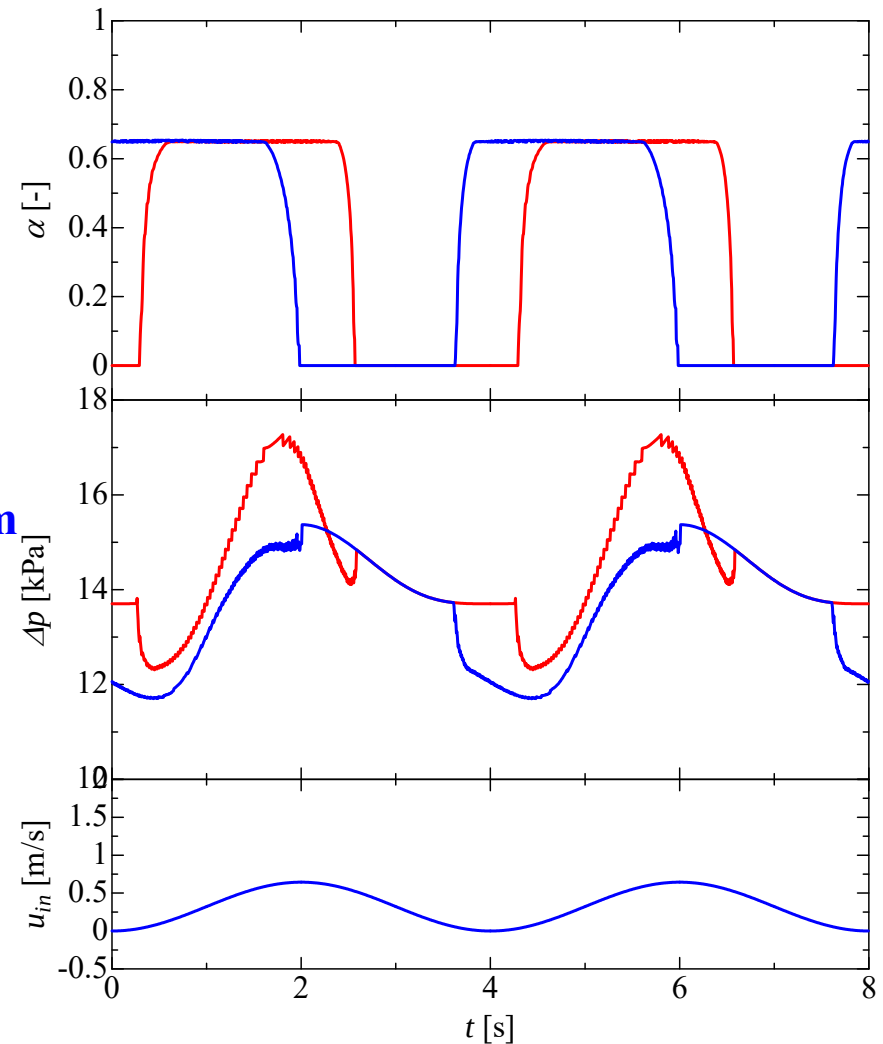
実験結果・数値計算結果

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

実験結果



計算結果

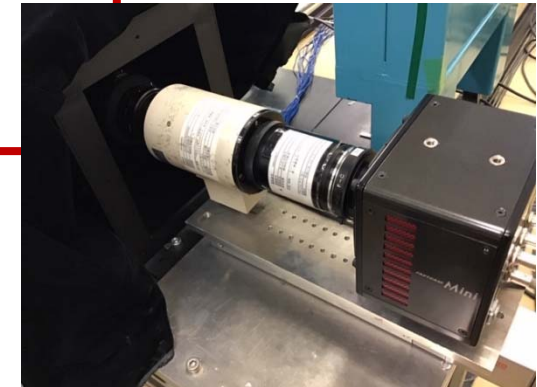
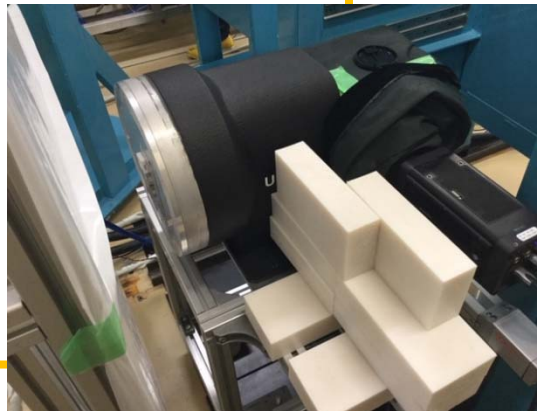


撮像系の性能向上

高速度カメラ：IDT Y-4 lite (ISO 6,000)
コンバーター：140 μ m 6LiF/ZnS
光学イメージンテンシファイア(MCP + booster)
撮影速度：200fps @ 5MW

高速度カメラ：high sensitivity, PhotronAX-50 (ISO 40,000)
コンバーター：6LiF/ZnS:Ag200 μ m (RC TRITEC)
光学レンズ ultra high sensitivity lens, 50mm F0.85

中性子I.I.

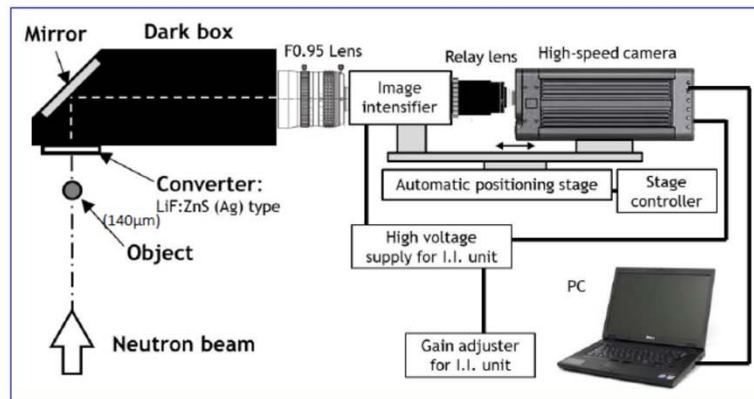


サブクール沸騰・急冷現象の動画定量評価

準定常流 $\Rightarrow$ 非定常流

高速度イメージングシステム

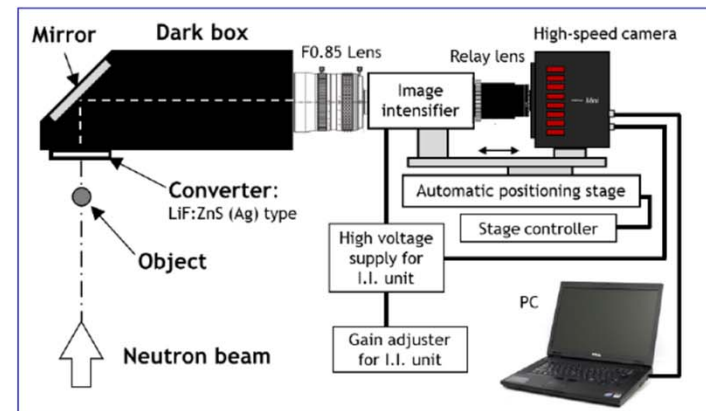
Previous system @ KUR



- ✓ KUR B-4 スーパーミラー中性子導管実験室
- ✓ 高速度カメラ: IDT Y-4 lite (ISO 6,000)
- ✓ コンバーター: 140μm 6LiF/ZnS
- ✓ 光学イメージンシファイア (MCP + booster)
- ✓ 撮影速度: 200fps @ 5MW

平成30年度 日本伝熱学会関西支部第3回講演討論会

システムの改良



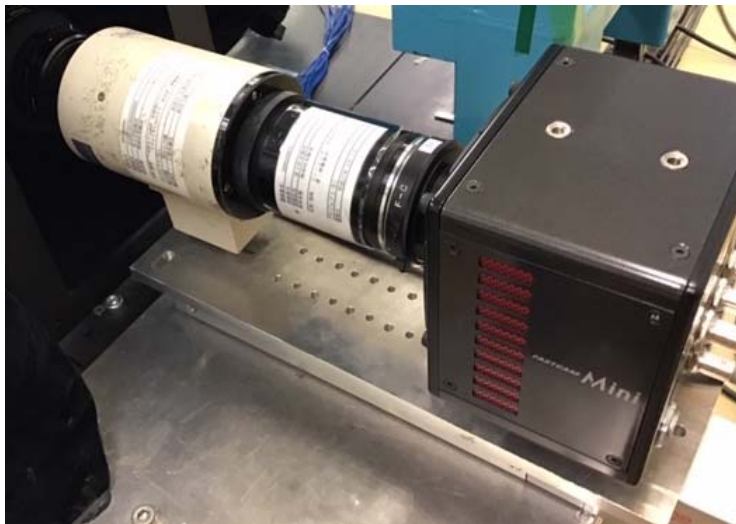
- コンバーター
6LiF/ZnS:Ag 200μm (RC TRITEC)
- 高速度カメラ
high sensitivity, Photron AX-50 (ISO 40,000)
- 光学レンズ
ultra high sensitivity lens, 50mm F0.85



10,000fpsでの
撮影@5MW

講演討論会

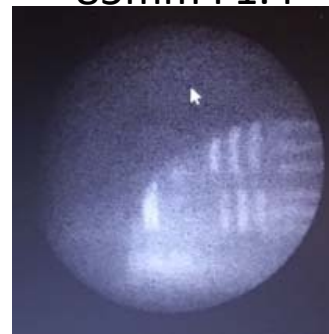
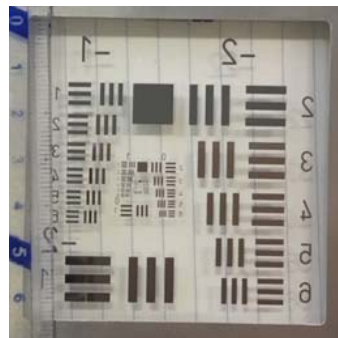
レンズによる撮像範囲



85mm F1.4



50mm F0.85



コンバーター： 6LiF/ZnS:Ag200 μ m (RC TRITEC)

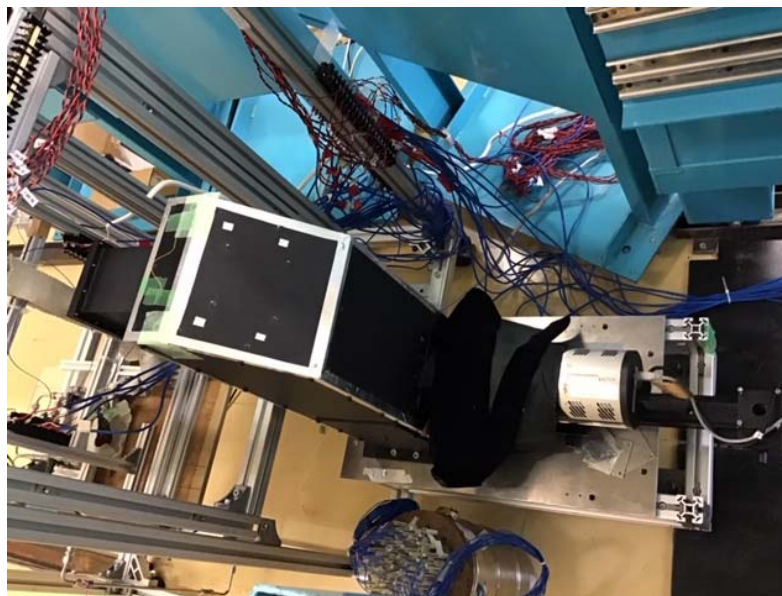
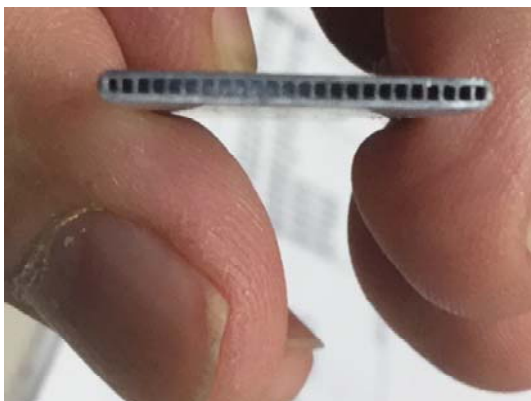
近接型I.I.： 浜松ホトニクス(V8070UMOD2)

リレーレンズ: A4539

F-Cコンバータ

高速度カメラ： high sensitivity, PhotronAX-50 (ISO 40,000)

光学レンズ 50mm F0.85 85mm F1.4



カメラ (神戸大C-CCD)

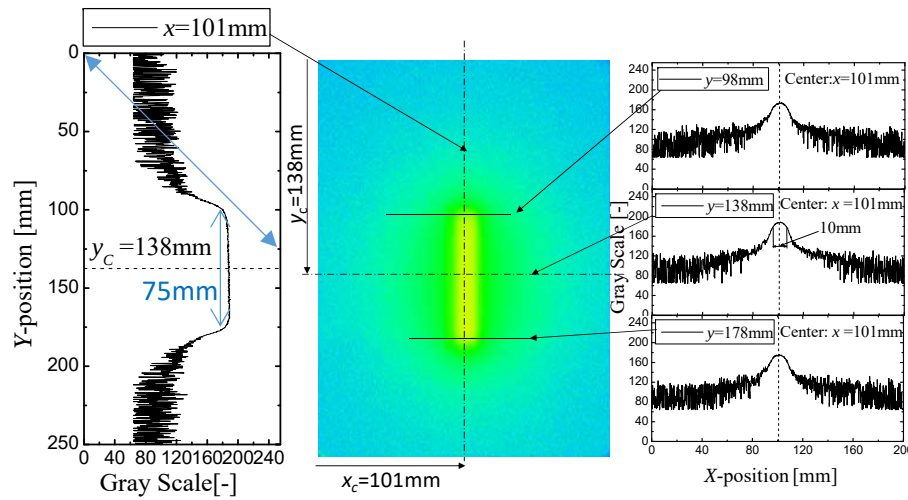
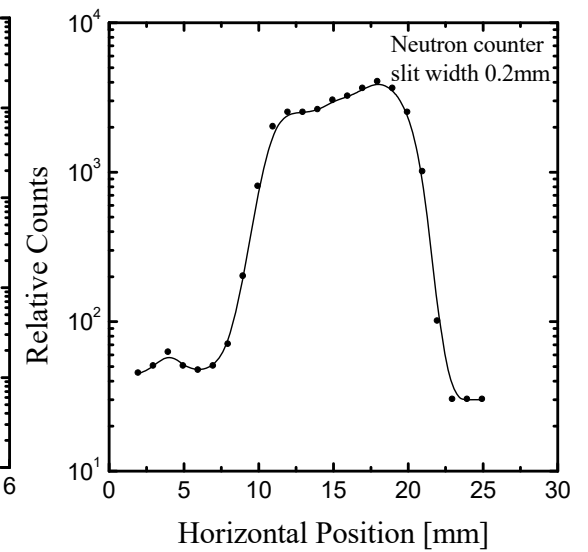
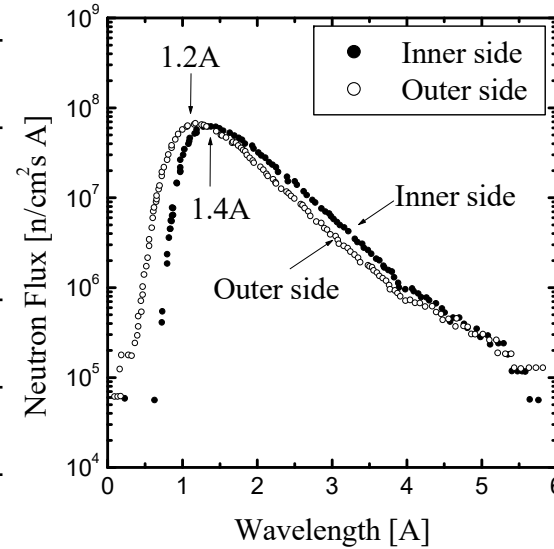
- ・ PIXIS1024B (Princeton Instruments)
- ・ 画素数 1024×1024
- ・ 輝度 16bit

レンズ ・ NIKKOR 105mm F1.8

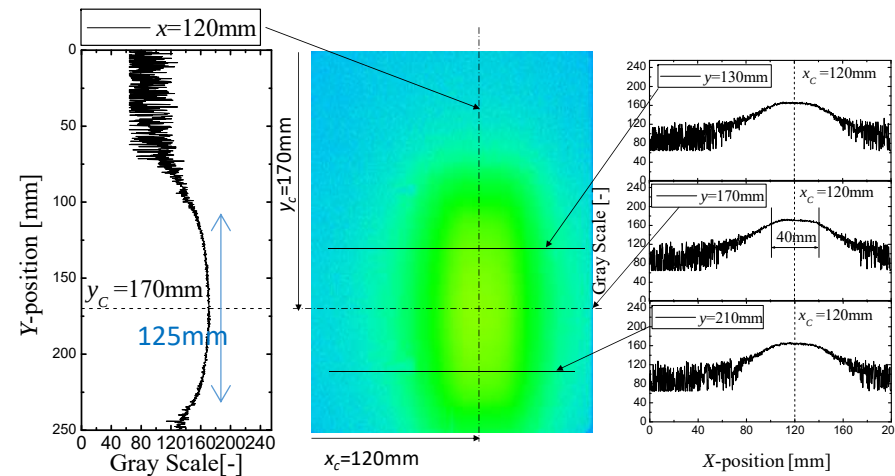


微小流路における沸騰二相流の可視化

Nuclear reactor	KUR (B4 port)
Thermal output	1 MW(Max:5MW)
Neutron flux	$a.1 \times 10^7$ n/cm ² s (8.5×10^7 n/cm ² s at exit 5.0×10^7 n/cm ² s at 1m)
Typical spectrum	1.2 Å
Guide tube length	11.7 m
Guide tube cross section	10(D) × 75(D') mm



at Beam Exit



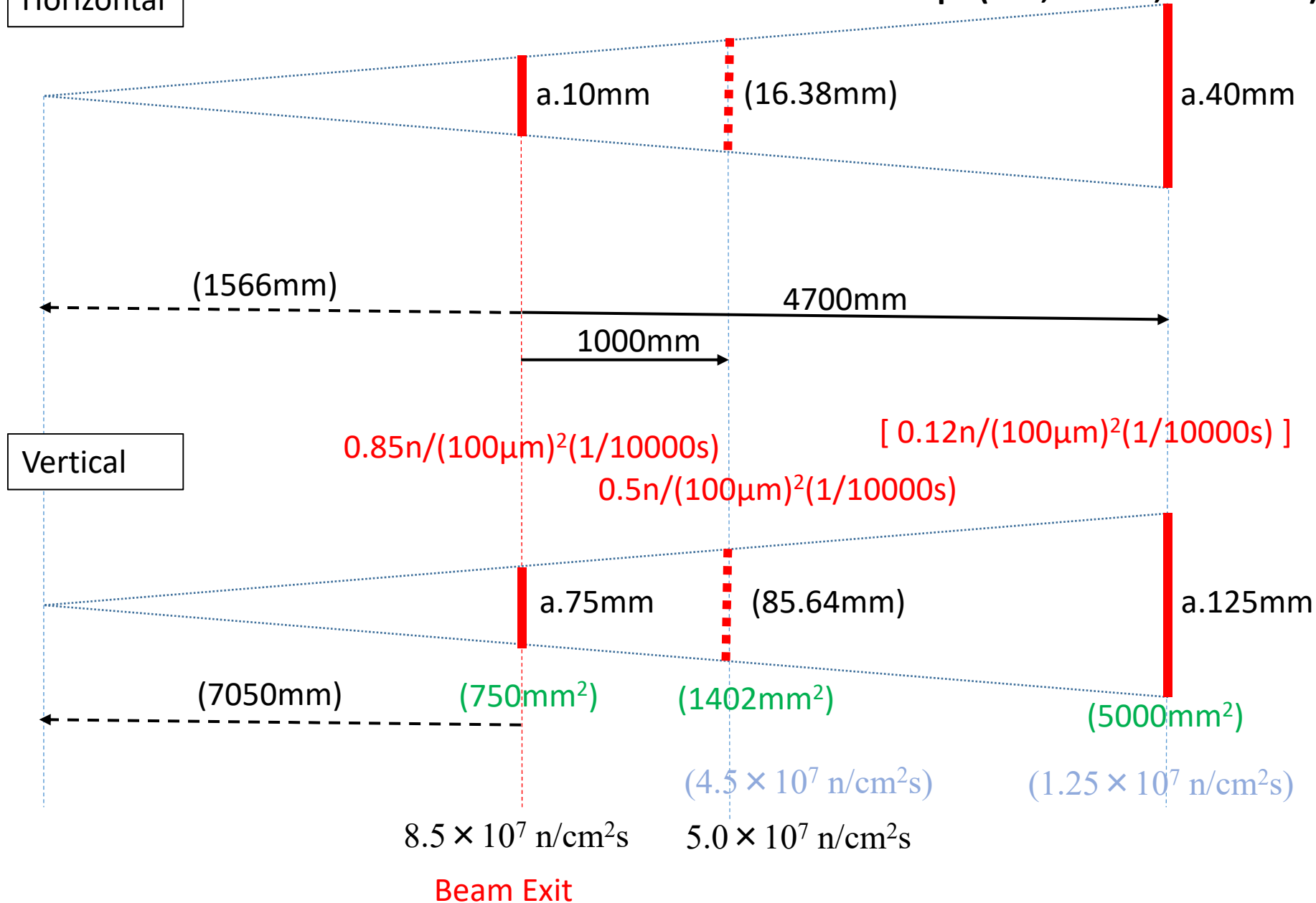
at 4.7mt

Rough Estimation of Beam Expand and Flux

Horizontal

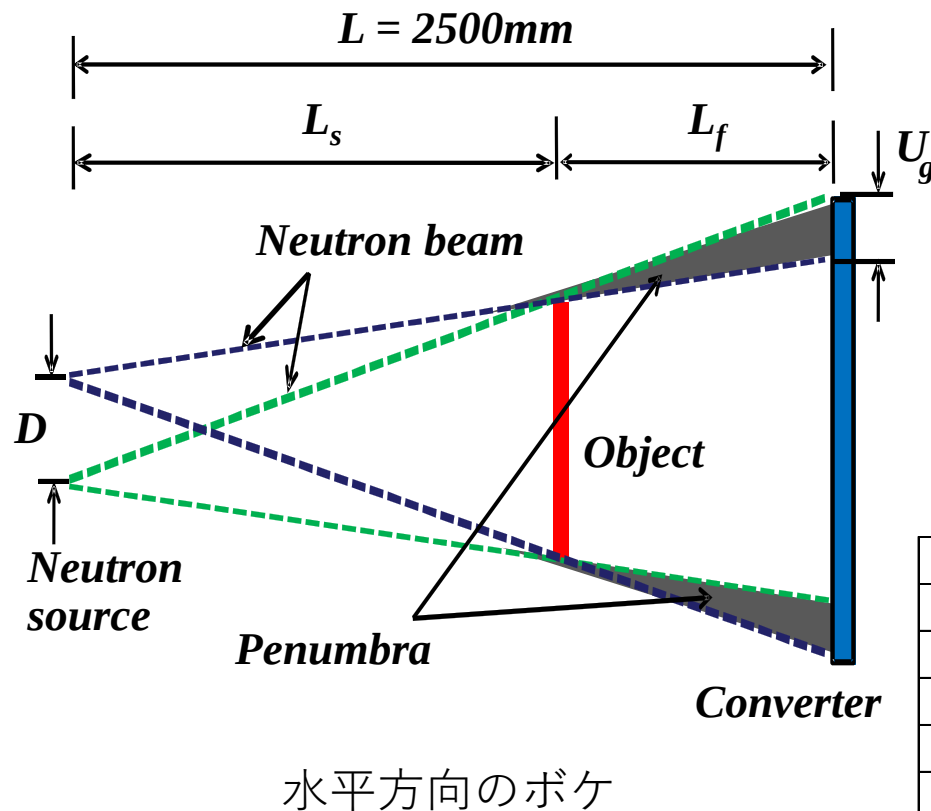
10% phosphor decay

10~1000μs (100,000~1,000 frame)



実験結果(中性子ビームの非平行性)

5MW 運転時



ボケ U_g は

$$U_g = \frac{D_p}{L_s} L_f$$

$L=2500$ [mm]

$D_p=10$ [mm] より

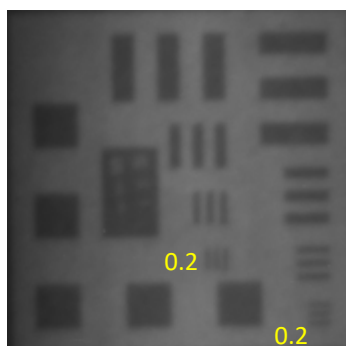
単位：mm

L_f	L_s	$U_g(H)$	$U_g(V)$	W	H	L
5	2,495	0.020	0.150	10	75	2500
20	2,480	0.081	0.605			
50	2,450	0.204	1.531			
100	2,400	0.417	3.125			
150	2,350	0.638	4.787			

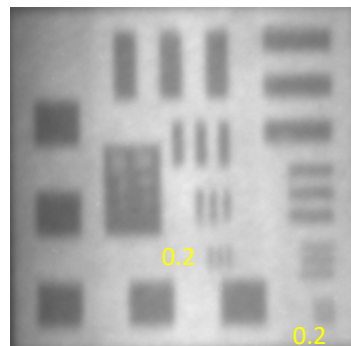
画像のボケを光学系の空間分解能($R=0.089\text{mm/pixel}$)以下にしようとする

$$0.5 \leq L_f \leq \frac{RL}{D}$$

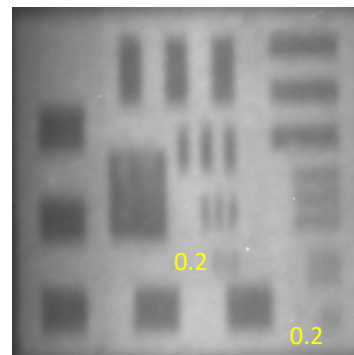
L' を固定して考えると、 $0.5 \leq L_f \leq 22.5$ にする必要あり



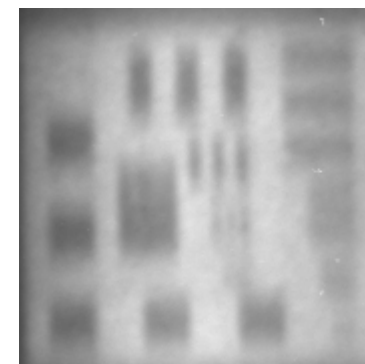
C – O 5mm(0.02/0.15)



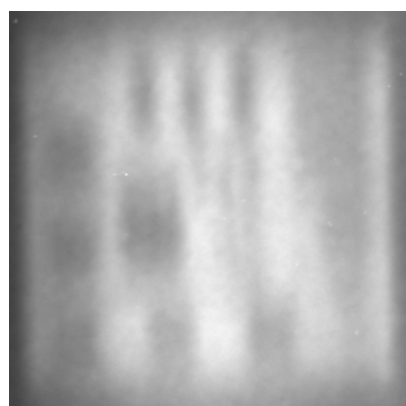
30mm(0.12/0.9)



55mm(0.22/1.69)

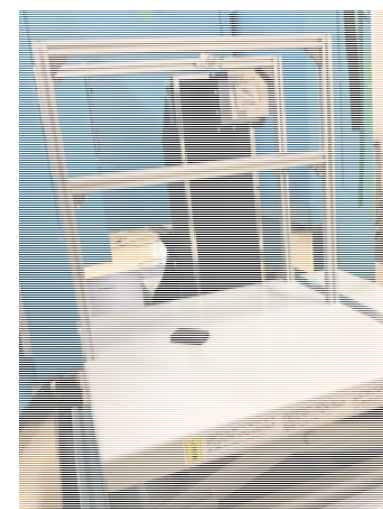


105mm(0.44/3.3)

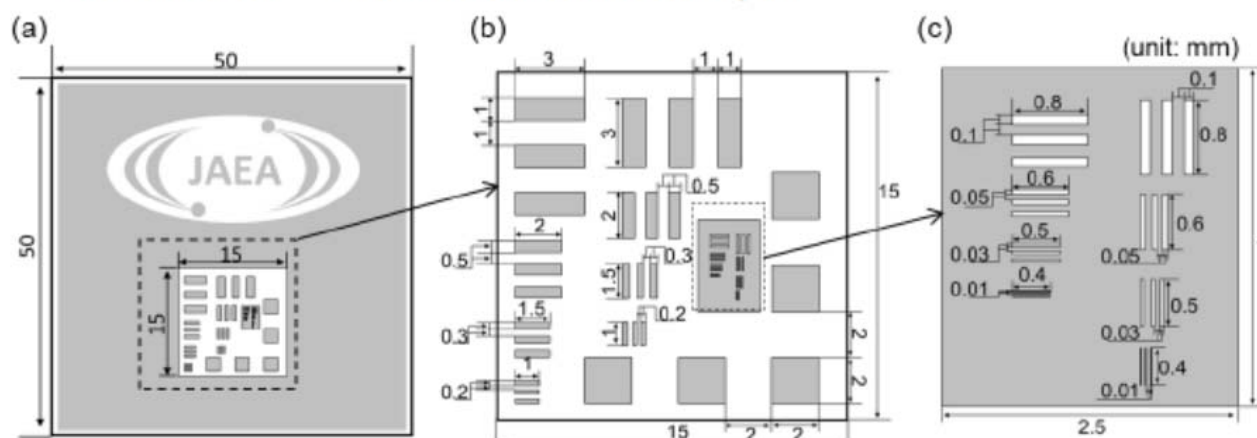


205mm(0.89/6.7)

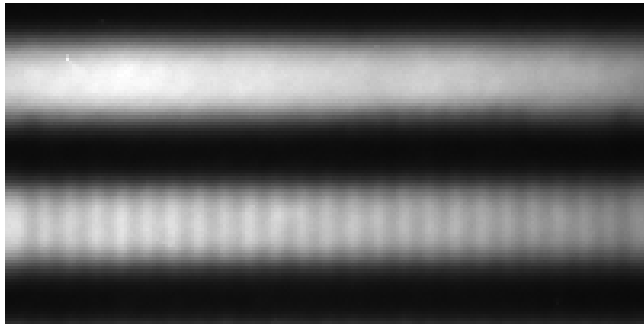
Lf	Ls	Ug(H)	Ug(V)	W	H	L
5	2,495	0.020	0.150	10	75	2500
30	2,470	0.121	0.911			
55	2,445	0.225	1.687			
105	2,395	0.438	3.288			
205	2,295	0.893	6.699			



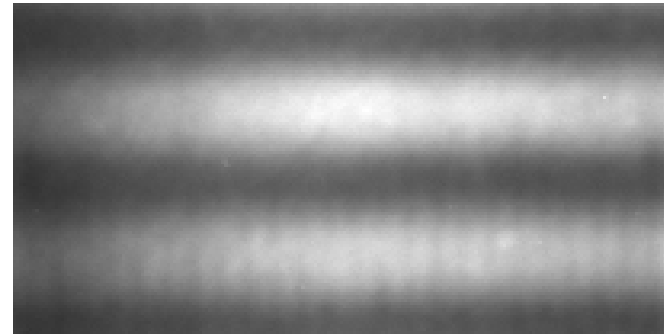
• Gd-indicator シリコン基板上にGd蒸着 (5 μm)



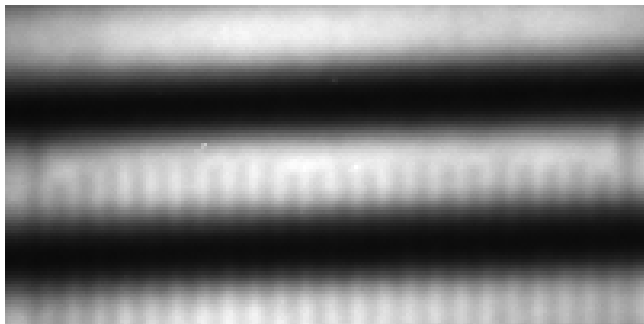
5M 5s
105mmF1.8
Kobe Univ. Camera
C-P 2500mm
(0.2mm/pixel at5mm)



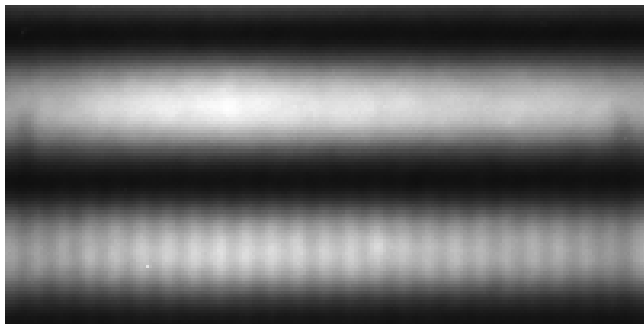
5mm



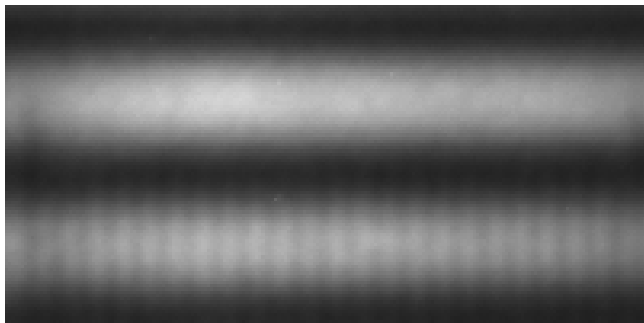
150mm



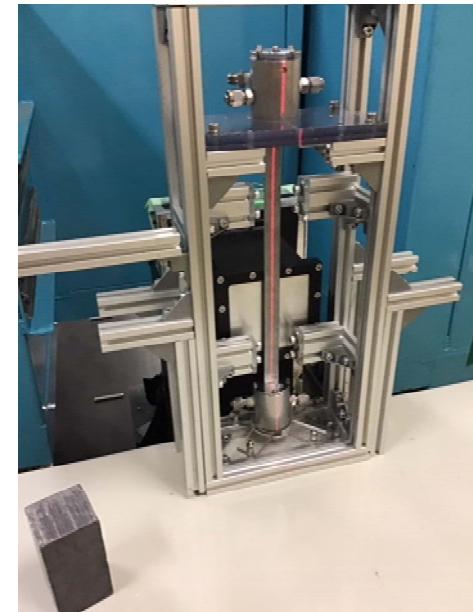
20mm



50mm

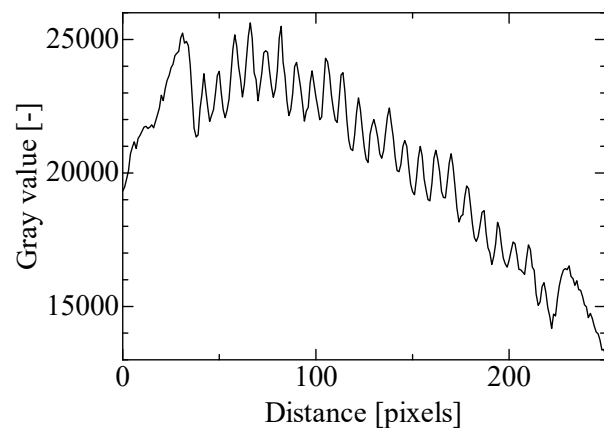
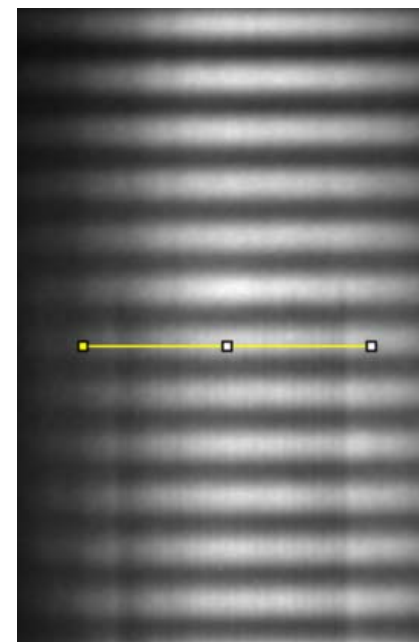
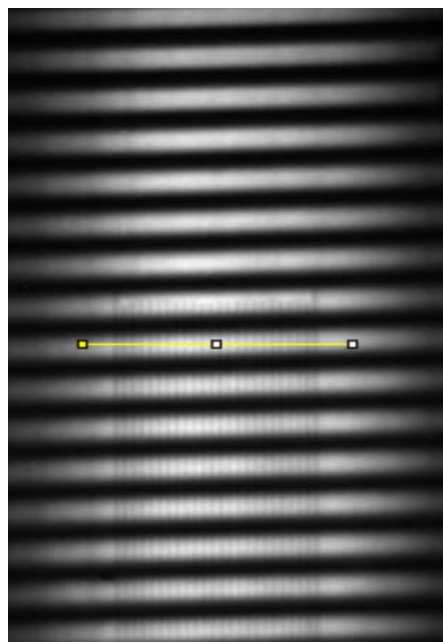
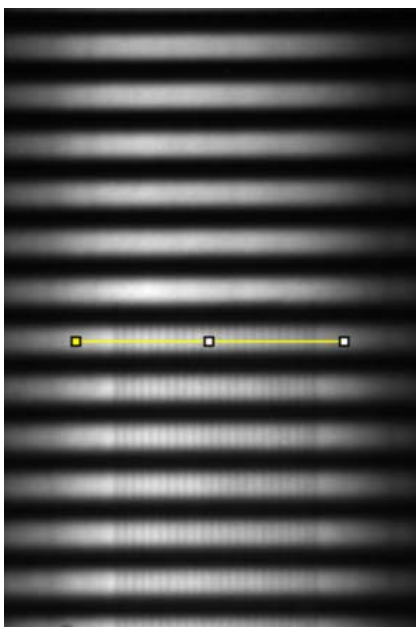


100mm

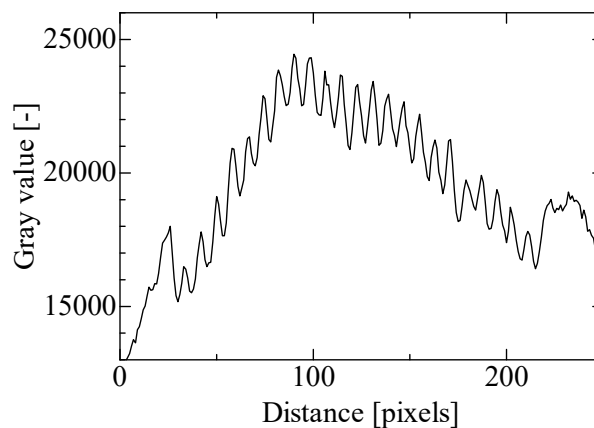


5M 5s
105mmF1.8
Kobe Univ. Camera
C-P 2500mm

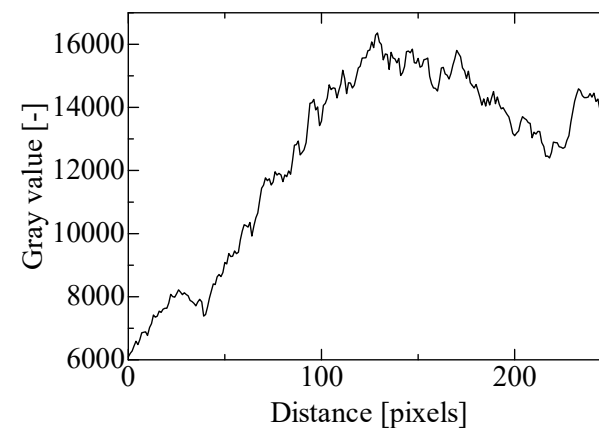
実験結果(中性子ビームの非平行性)



$Lf=5$



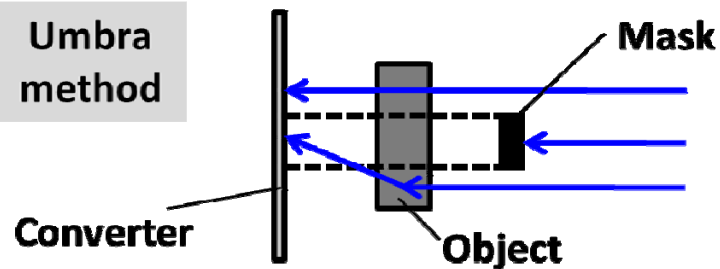
$Lf=20$



$Lf=150$

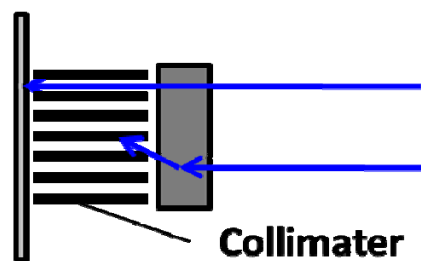
Quantitative measurement

Umbra
method



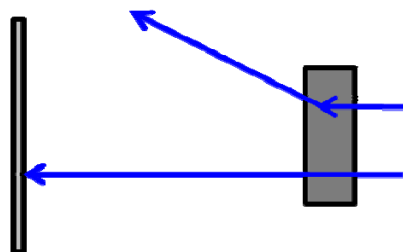
真影部からオフセット項を推定
する方法

Collimator
method

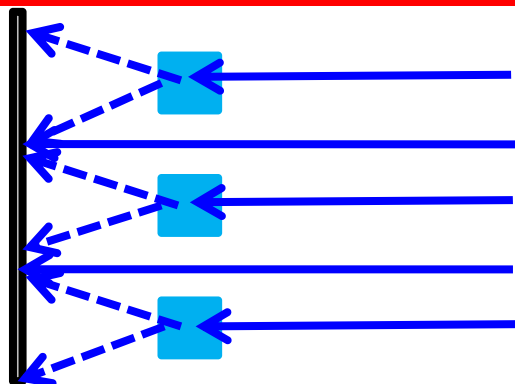


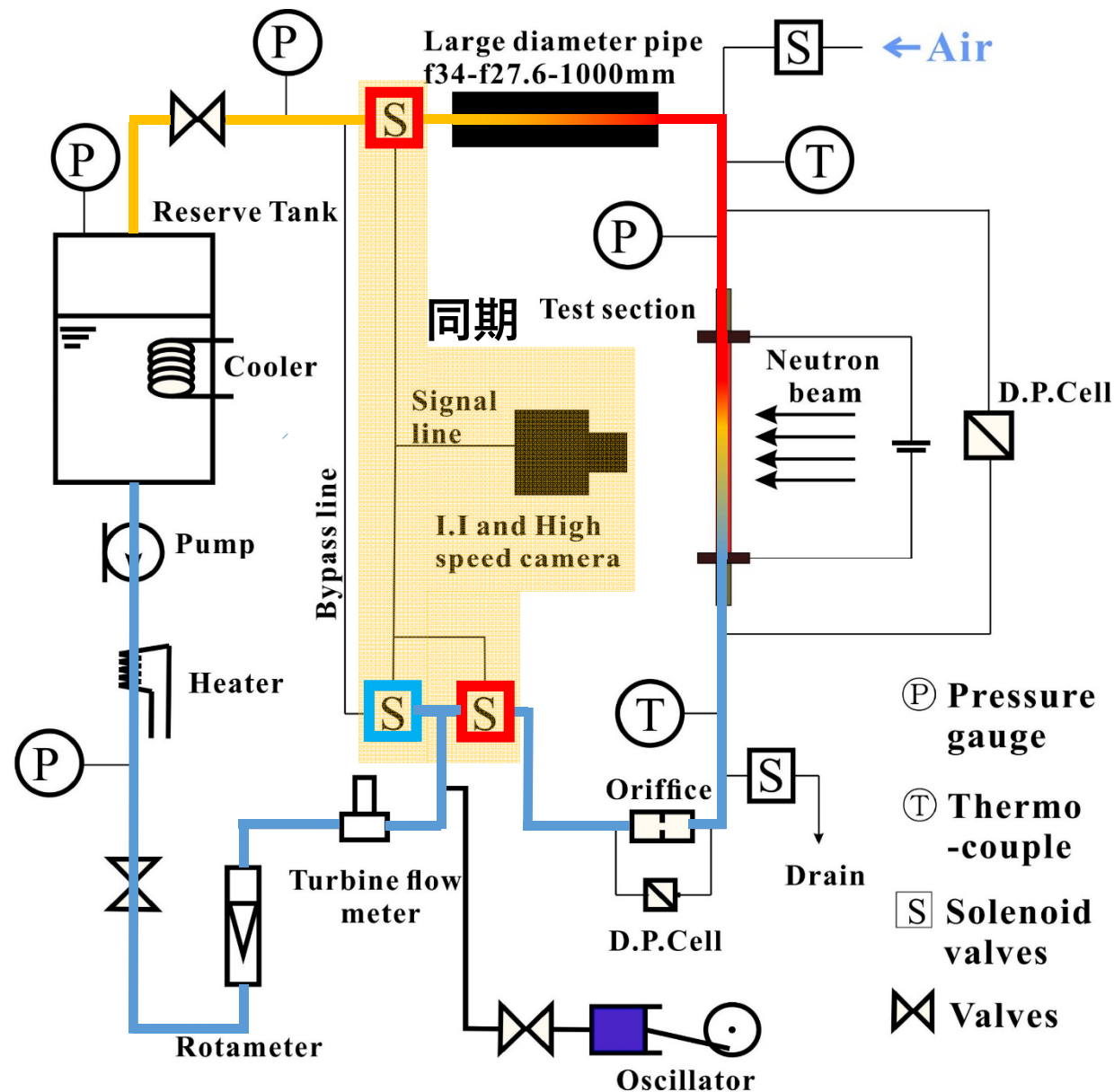
設置した吸収体より
散乱中性子を除去

Greodel
method



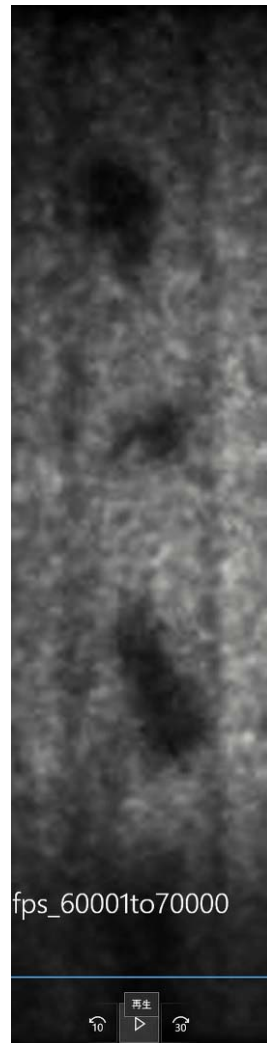
散乱中性子の空間分布を一様
にする





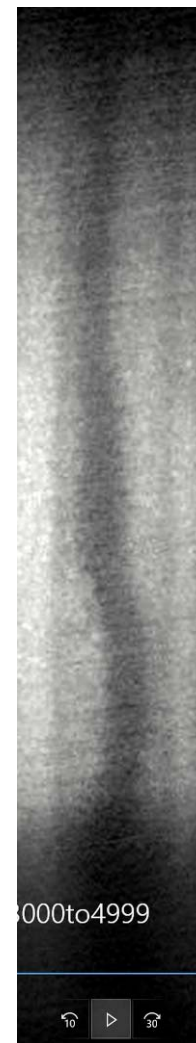
系圧力 P_{ex} [MPa]	0.1
作動流体	イオン 交換水
液流速 u_0 [m/s]	0.02, 0.06, 0.1 0.14, 0.18
脈動振幅比	0.4, 0.8
脈動周期 τ [s]	2, 6
入口サブクール度 ΔT_{sub} [K]	70
加熱部	SUS304
長さ L [mm]	400
内径 D_{in} [mm]	10
外径 D_{out} [mm]	12
初期管壁面温度 $T_{w,0}$ [deg.C]	800
初期体積発熱量 [MW/m ³]	83

Optical I.I.
+ PhotronAX-50 (ISO 40,000)



10,000frame/s
 $u=0.14\text{m/s}$

Neutron I.I.
+IDT Y-4 lite (ISO 6,000)



200frame/s
 $u=0.1\text{m/s}$

$u_0=0.1[\text{m/s}]$, 体積発熱量83[MW/m³]

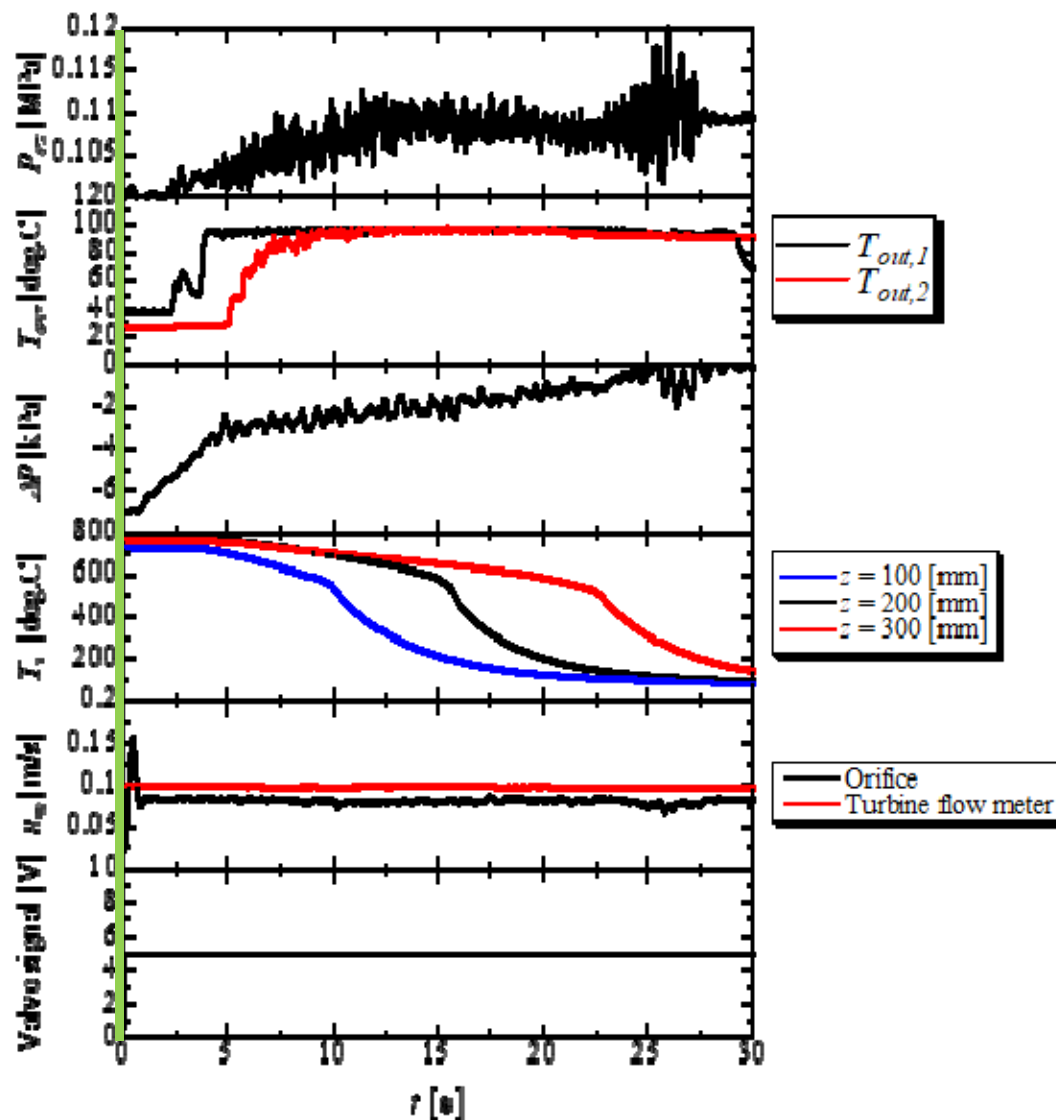
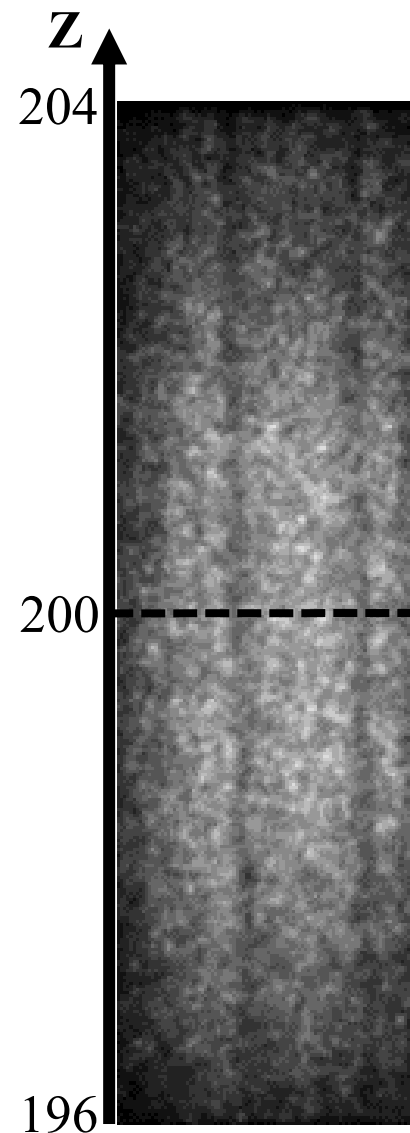


Fig. Various value transition under energized state
(Di-03. $u_0 = 0.1 [\text{m/s}]$)

生画像
フレームレート500[fps]
露光時間1/2000[s]



$u_0=0.1$ [m/s],体積発熱量83[MW/m³],脈動周期 $\tau=6$ [s],振幅比0.8

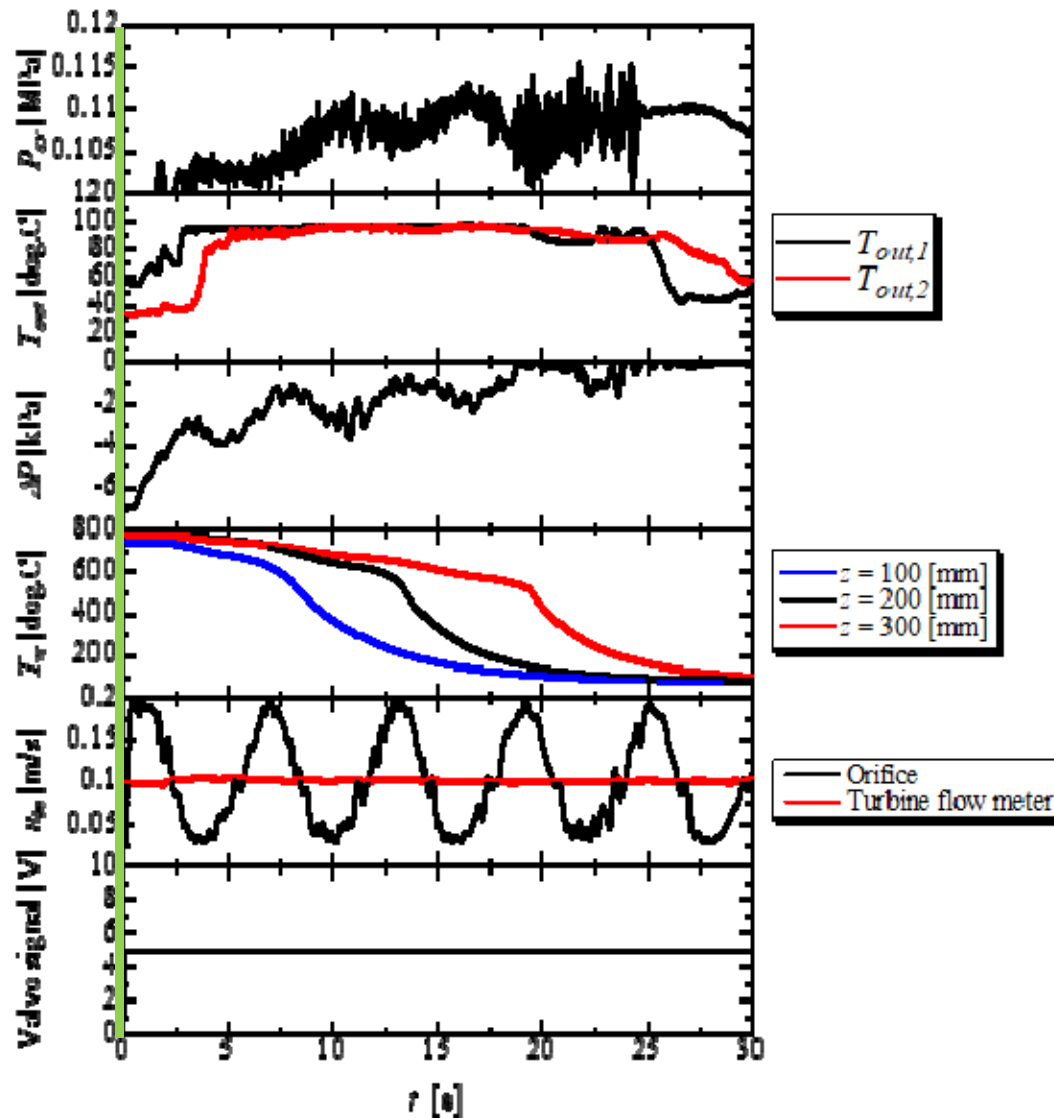
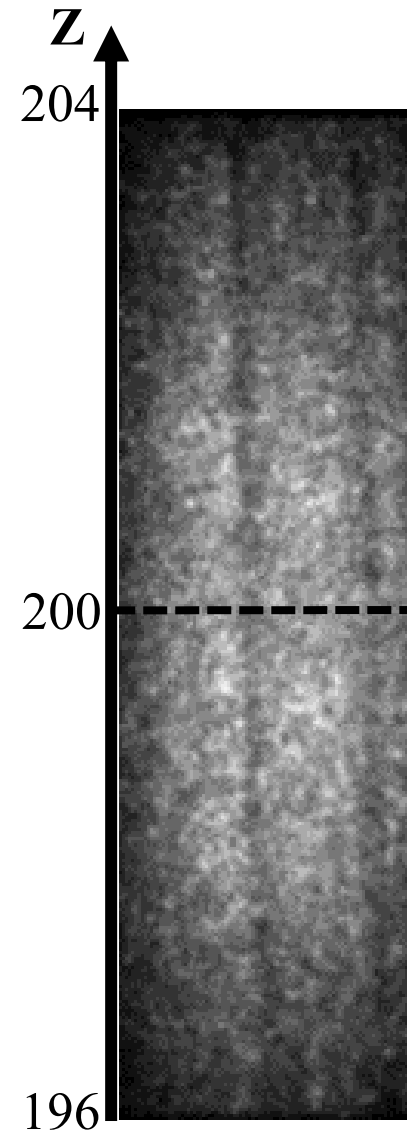
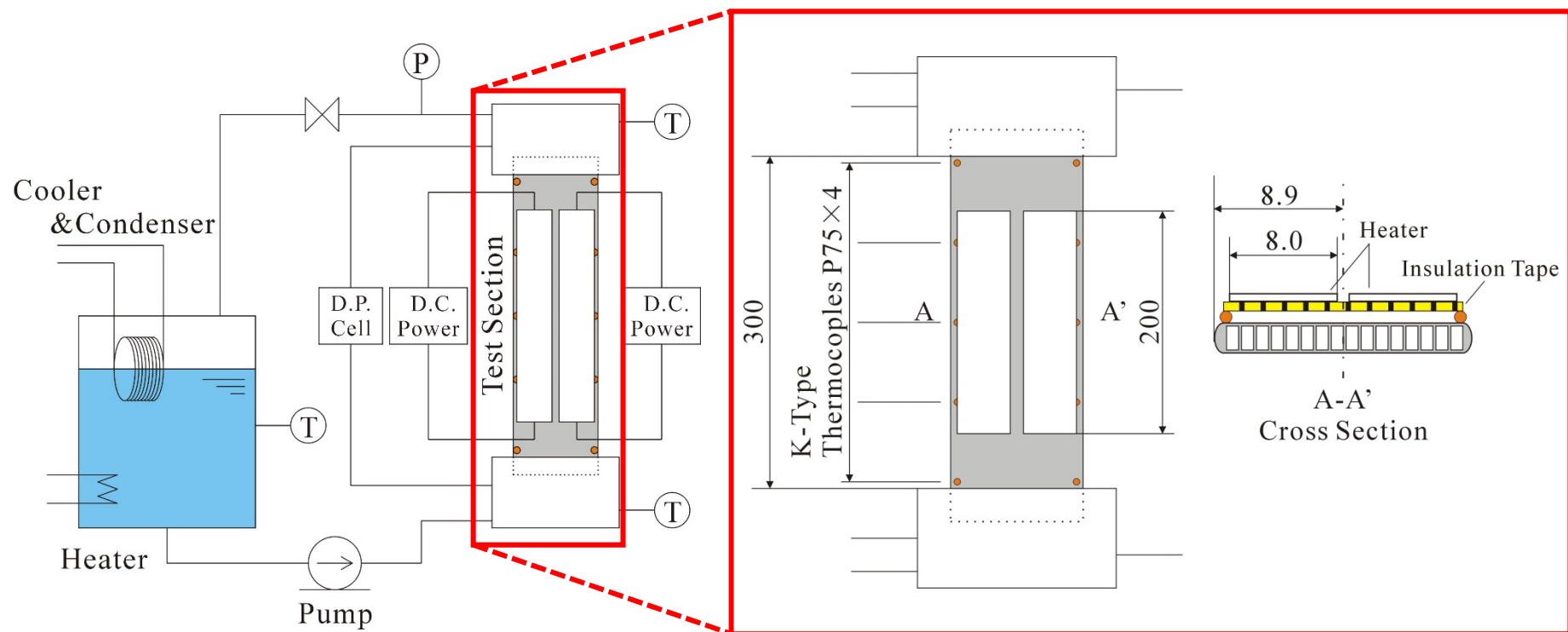


Fig. Various value transition under energized state
(Di-15, $u_0 = 0.1$ [m/s], $\tau = 6$ [s], ΔH_{in} $u_0 = 0.8$)

生画像
フレームレート500[fps]
露光時間1/2000[s]



実験装置及び作動流体



実験装置図

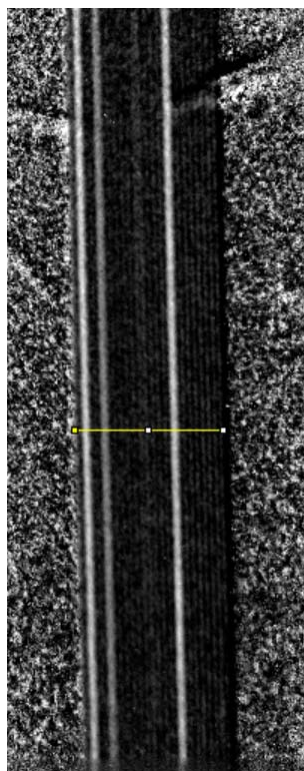
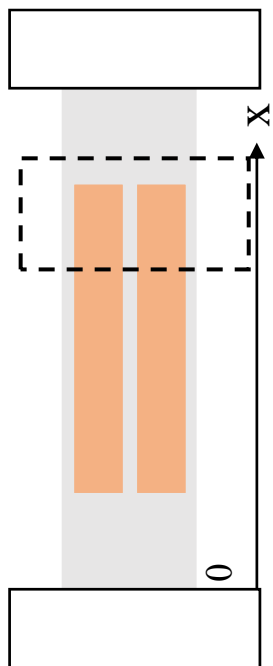
流体物性値比較

		T_{sat} [deg.C]	σ [mN/m]	μ [mPa·s]	μ_m [cm ² /g]
水	H ₂ O	100	58.9	0.2817	2.679
R32	CH ₂ F ₂	-52	16.5	0.2117	1.025
メタノール	CH ₃ OH	64.5	18.6	0.323	2.267

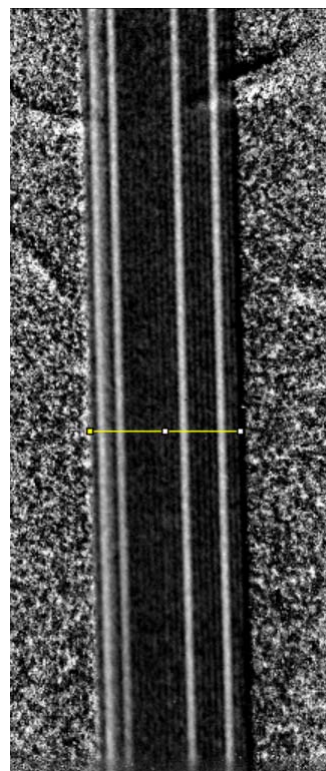
実験結果

1MW 運転時 1024 × 1024 30s 1枚

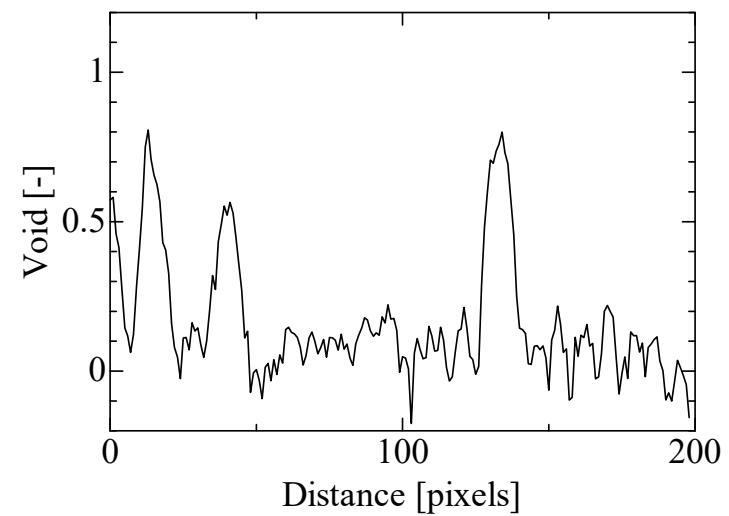
均一加熱



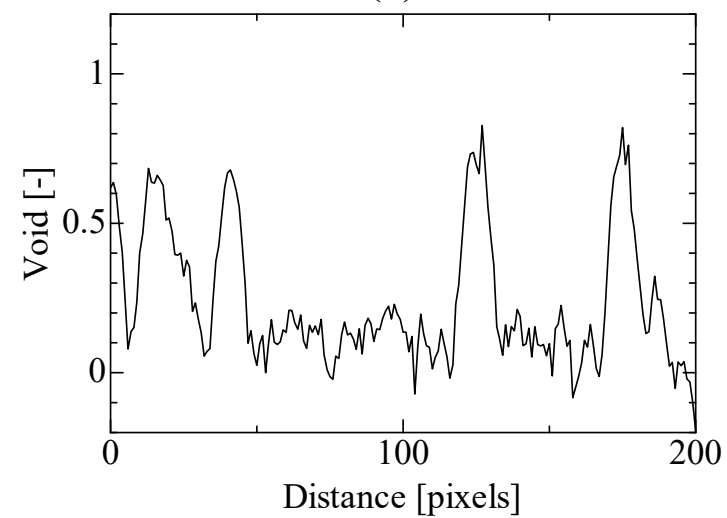
(a) 11kW/m²



(b) 13kW/m²



(a)

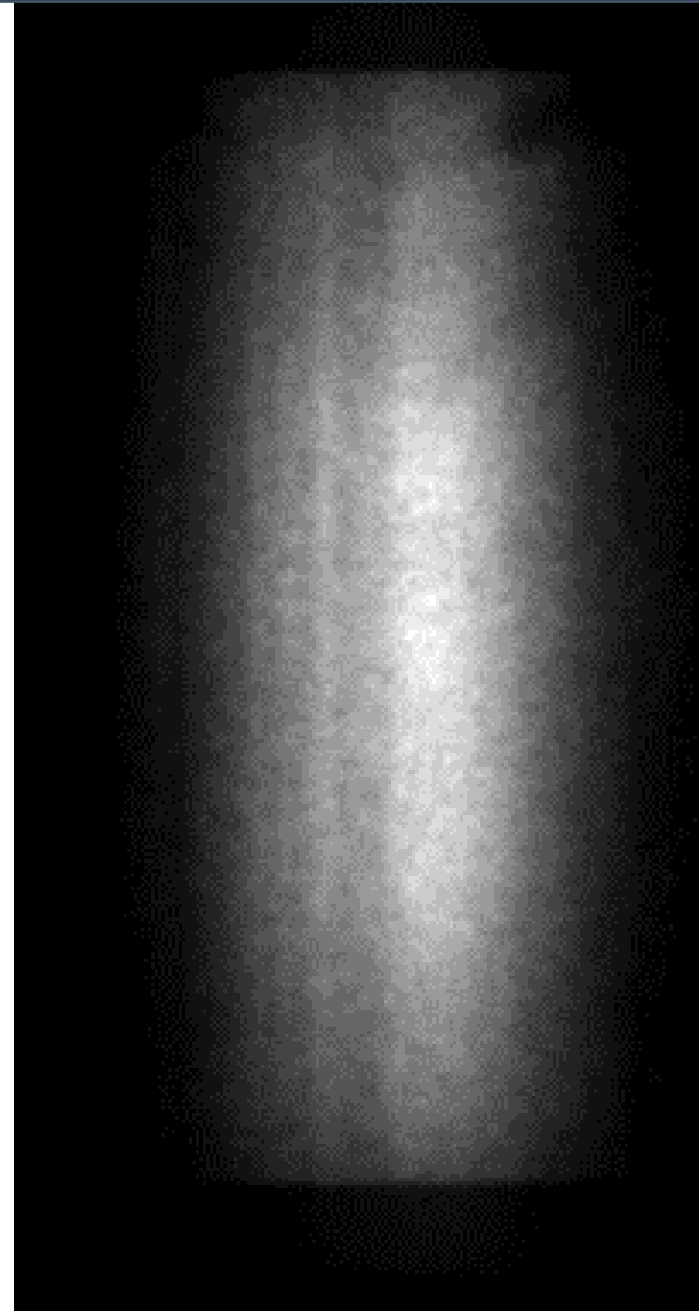
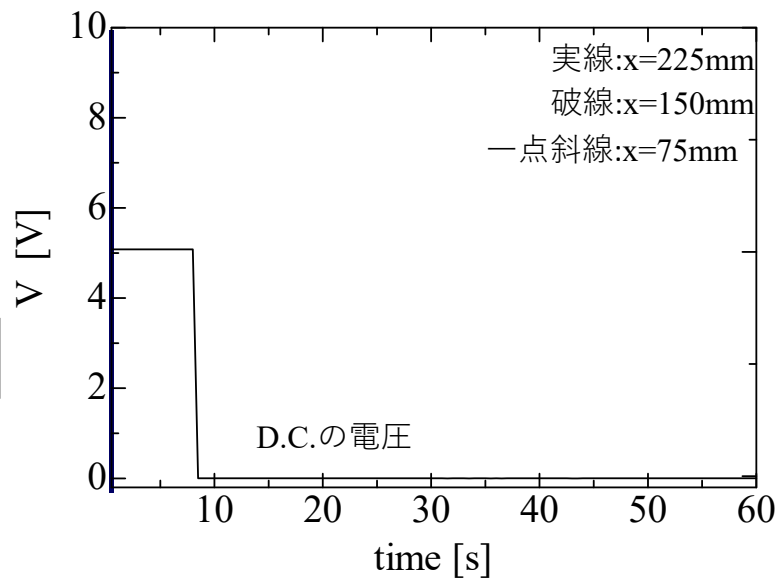
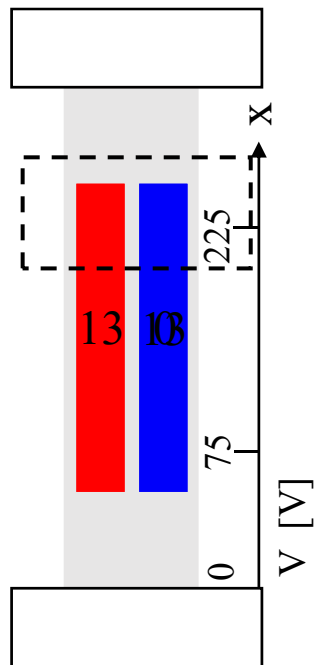


(b)

実験結果

1MW 運転時 384×384 500fps $1/500\text{sec}$ 30s

均一加熱 → 非均一加熱へ

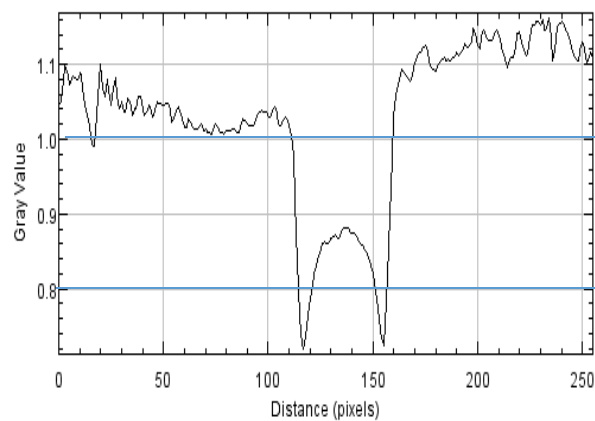
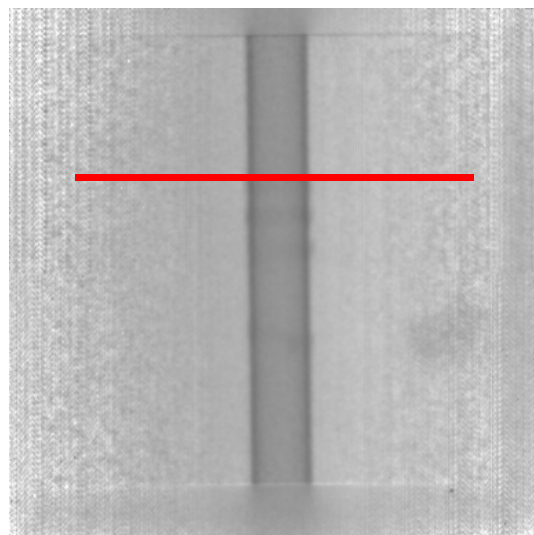


Histogram Gas / Direct (2018.12)

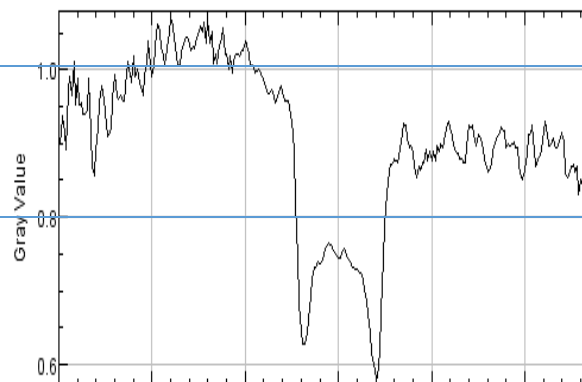
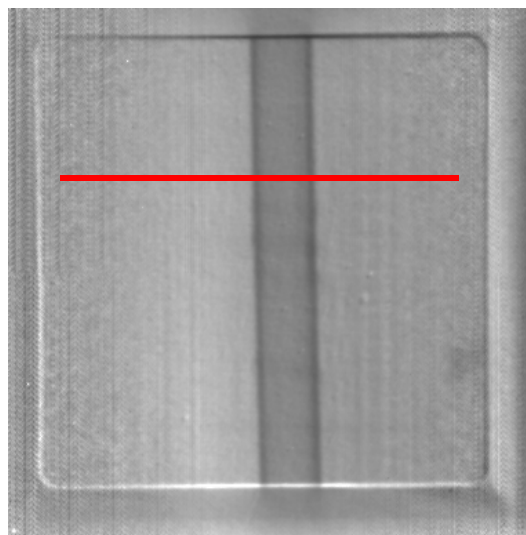
➤ビーム画像でシェーディング処理した気相単相画像のヒストグラム

※いずれも5000枚平均した画像で処理

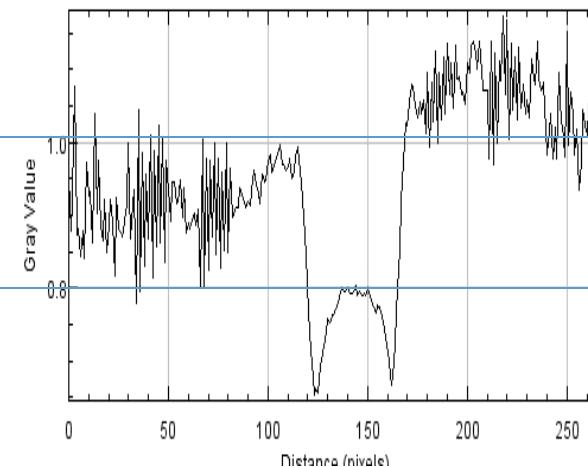
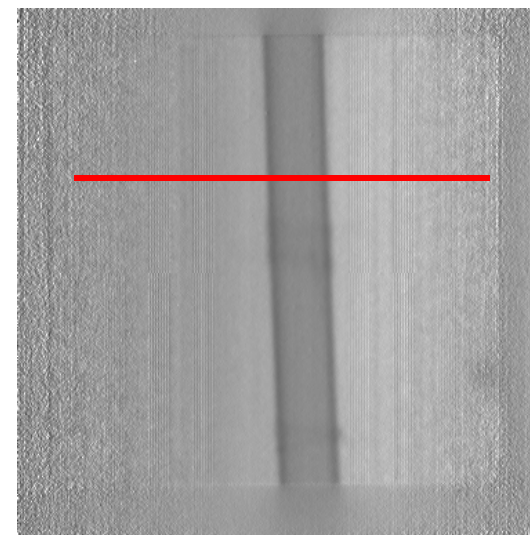
非加熱実験1開始直後



加熱実験開始直後



非加熱実験2開始直後



Histogram Gas / Direct (2018.12)

- ・ガス単相画像(再冠水前)500枚平均算出

↓

- ・局所平均値算 (30pixel × 30pixel)

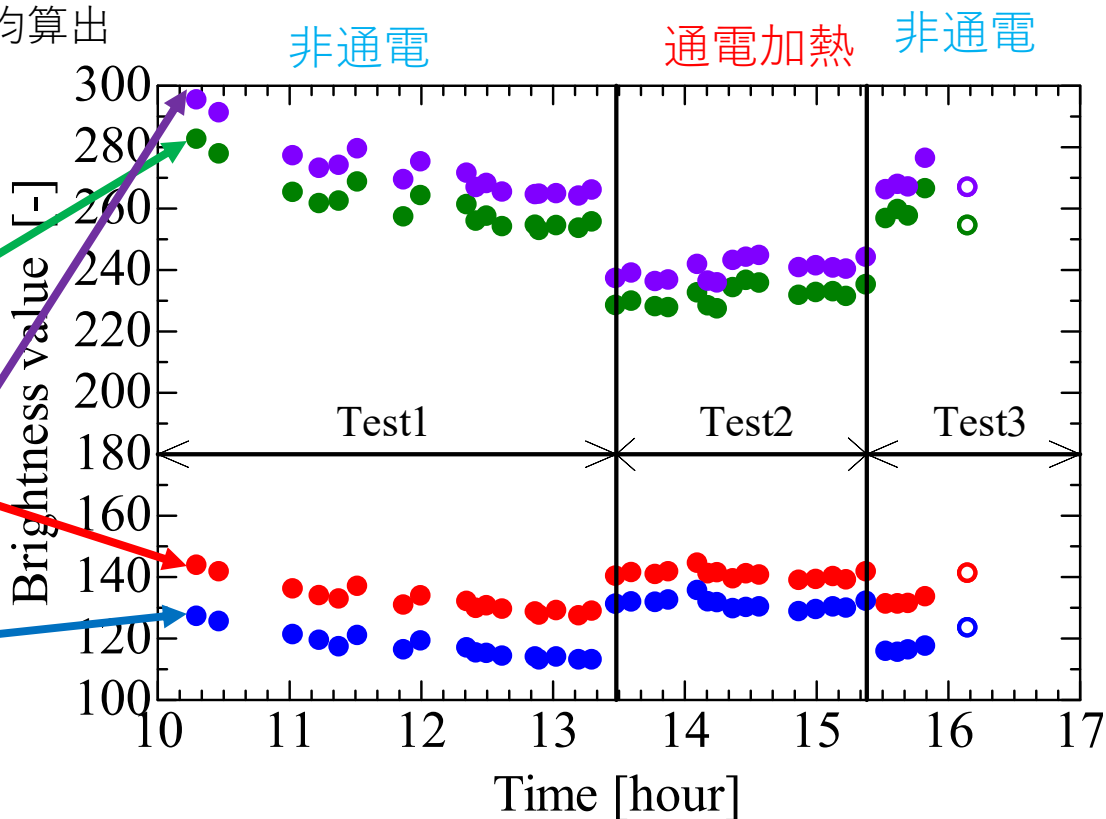
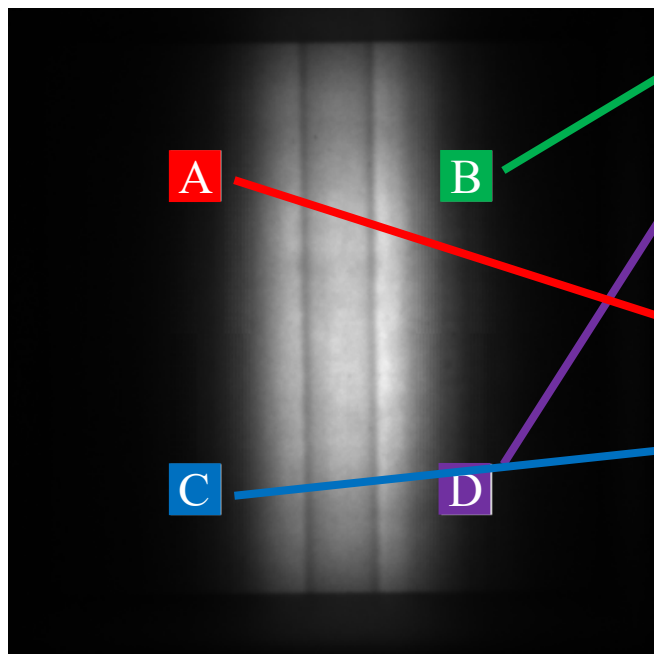


Fig. Gas phase (before reflooding)

Fig. Time transition of local spatial average brightness value (before reflooding)

⇒加熱時にビームの分布が異なる ⇒ 原因は不明

⇒テストセクション位置ずれ補正の際にビーム画像でシェーディング処理での対応は困難

⇒加熱管水平方向の位置ズレは1~2pixel程度であることから, 再冠水時の気相単相画像でシェーディング処理した方が良い(ビームの分布が異なる点に関しては対策が必要)

KUR熱中性子で現在実施中の、高速度撮影ならびにマイクロチャンネルの撮像状況の紹介を行った

以下アドバイスいただければ幸い
水への着色
通電の中性子分布への影響 光I.I.?

ユーザーとして希望する情報
撮像系(カメラ・I.I.・コンバータの情報)