

エネルギー機器の可視化

神戸大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

浅野 等, 村川 英樹, 杉本 勝美, 竹中 信幸

西崎 柁峻, 馬場 美咲, 宮崎 猛, 弘中 茂夫

(卒業生)村田 健太, 中村 俊裕, 澤田 将貴, 古野 正晃, 北村 信樹

実機と同じ素材, 同じ構造内の作動流体の機器動作時の状態を
可視化・計測できる唯一の技術

機械のレントゲン

- 動作診断
- 動作メカニズムの解明

作動流体の存在量の定量計測

- 気液二相流のボイド率
- 吸着量
- 湿分分布

現象のモデリング
数値解析のベンチマーク

X線ラジオグラフィ

金属容器の可視化は困難

比較的大きな系での低ボイド率気液二相流の可視化

□ 原子力

- ロッドバンドル内気液二相流 –ボイド率分布, CT計測

□ 内燃機関(ディーゼルエンジン)

- 内部機構およびオイルポンプの可視化 –オイルの流動挙動
- 燃料噴霧ノズル –ノズル内キャビテーション

□ 固体高分子形燃料電池(PEFC)

- JARIセル(単セル, 3セルスタック)の可視化 –液水分布
- 膜厚方向分布の可視化 –高空間分解能での液水分布計測

□ 冷凍・ヒートポンプサイクル内冷媒流れ

- コンプレッサー, アクキュムレータ –起動時の液冷媒およびオイル挙動
- キャピラリーチューブ –ボイド率分布, 沸騰開始点
- 冷媒分流器 –内部の流動構造, ボイド率分布

□ 電子機器冷却システム

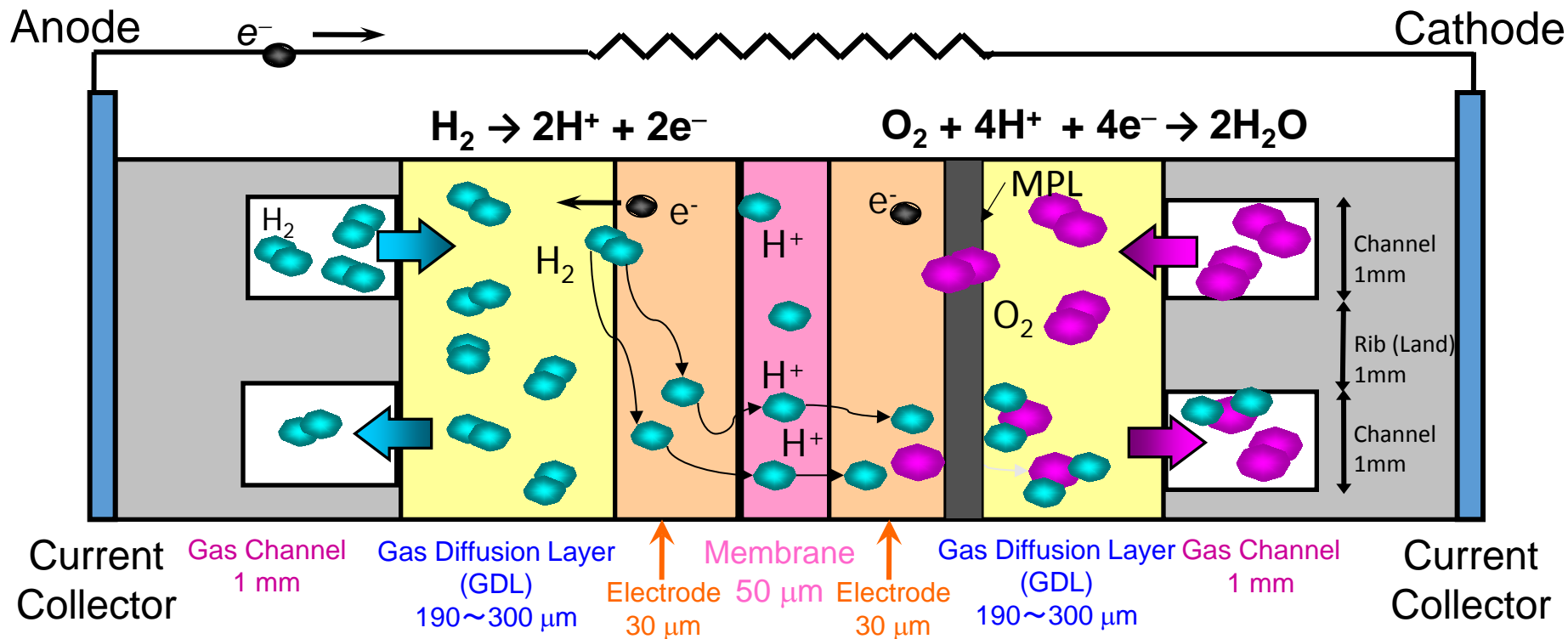
- ヒートパイプ –起動特性と動作原理, 不具合事象の解明
- 宇宙機器用コールドプレート –動作特性, 不具合事象の解明
- スパイラルチューブ –内部の流動構造, ボイド率分布

□ 熱交換器内熱流動特性

- プレート熱交換器 –ボイド率分布, 冷媒偏流
- ワイヤークoilを有する伝熱促進管内気液二相流 –ボイド率分布, CT計測

□ 吸着式冷凍機

- シリカゲル吸着器 –シリカゲル粒子層内湿分分布, 粒子層バインダーの影響



固体高分子膜は H^+ 輸送のため湿らせておく必要があるため、カソードには酸化剤として湿り空気が供給される。

カソードでは電池反応で H_2O が生成されるため過飽和となり、結露する。

→ **発電時の液水分布の過渡変化の同時計測**

Micro Porous Layer (MPL) の利用

電極近傍での液水の生成・滞留を防ぐことを目的とする。

可視化領域 [mm]

10

20

30

50

70

100

200

小型電池

単セル

MEA内水輸送
過渡変化を計測

目標空間分解能
5 μm

MEA, GLD内
膜厚方向2次元,
3次元分布の計測

目標空間分解能
30 μm 以下
マイクロCT

JARI標準

単セル スタック

起動、凍結時の
水分布計測

2次元定量計測

ダイナミックCT

GLD内, 並列流路内
3次元分布の可視化
3次元連続計測

実機
(A4サイズ)

単セル

面方向
2次元分布の計測
流路部, リブ部の差異
過渡変化可視化

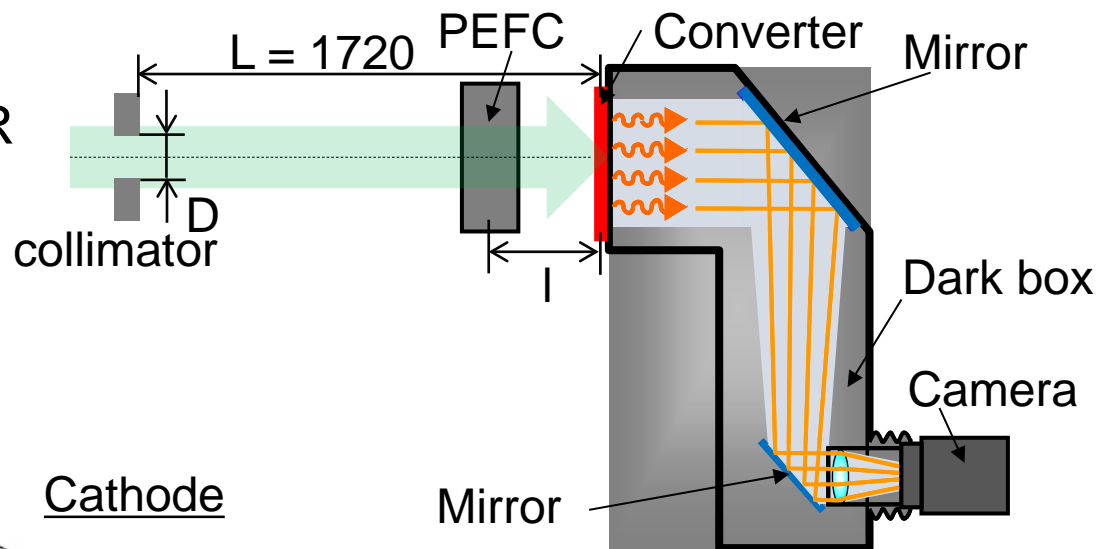
2次元定量計測

発電特性, 圧力損失

水輸送のモデリング

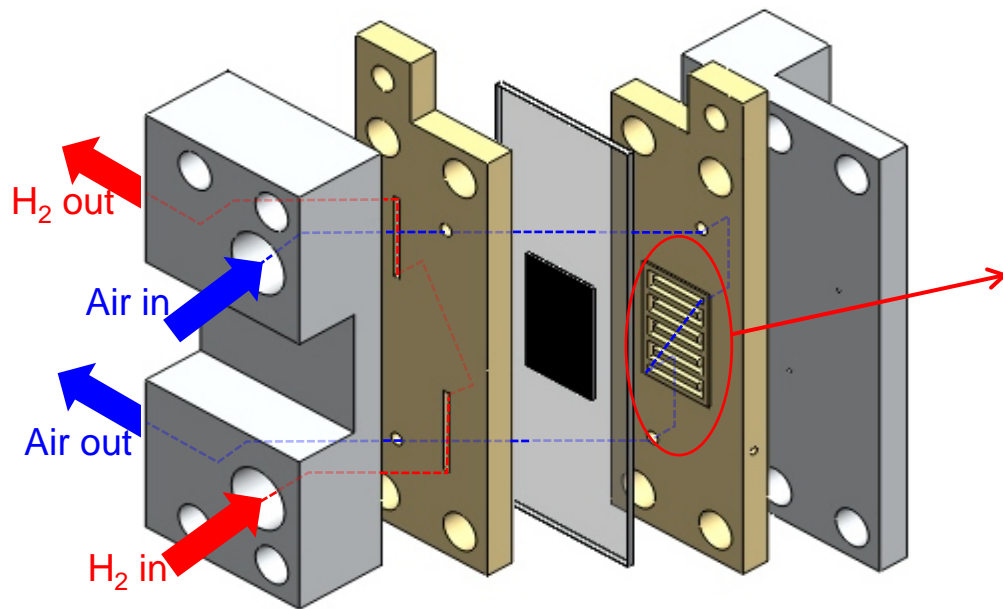
気流分布の解析
膜圧方向分布

Neutron source : B4-port in KUR
Exposure time : 60 sec
Pixel size : 8.8 μm



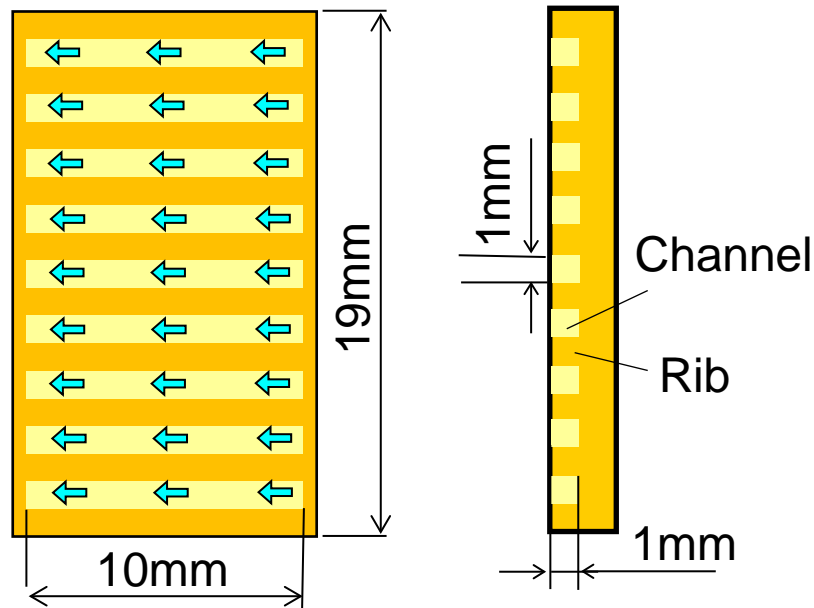
Anode

Cathode

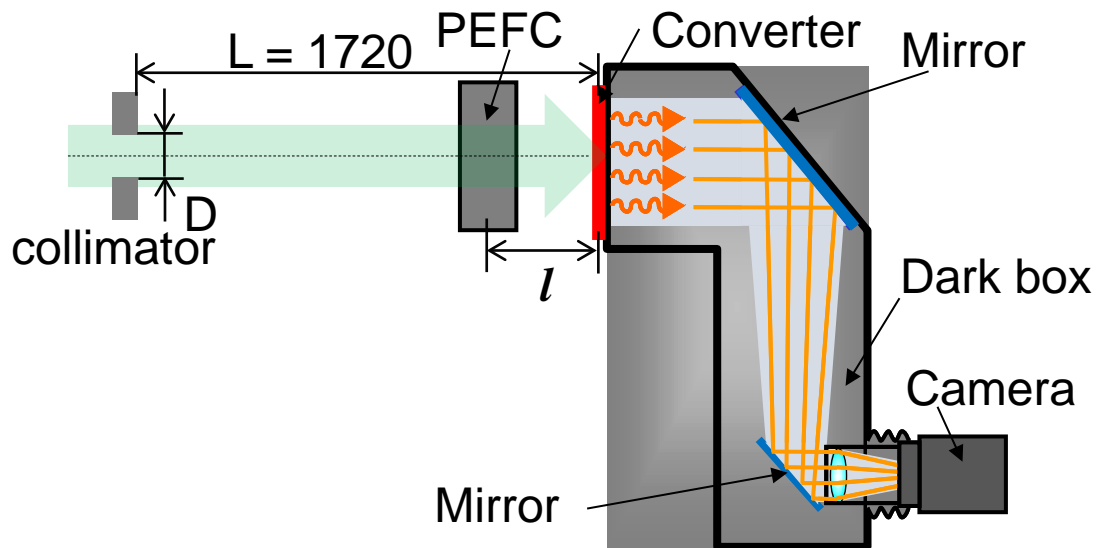


PEFC

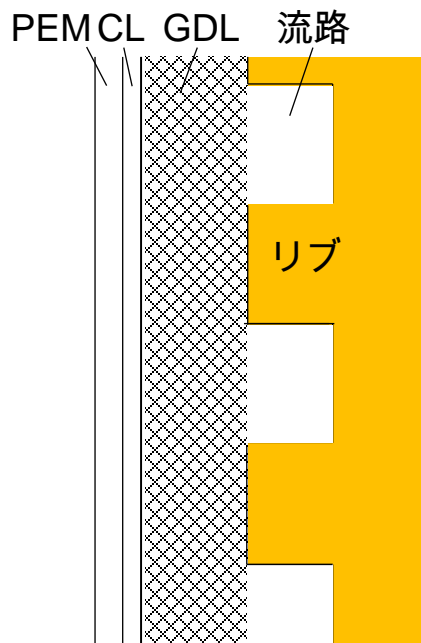
9-parallel channel



中性子源: B4-port in KUR
露光時間: 60 sec
画素寸法: 8.8 μm

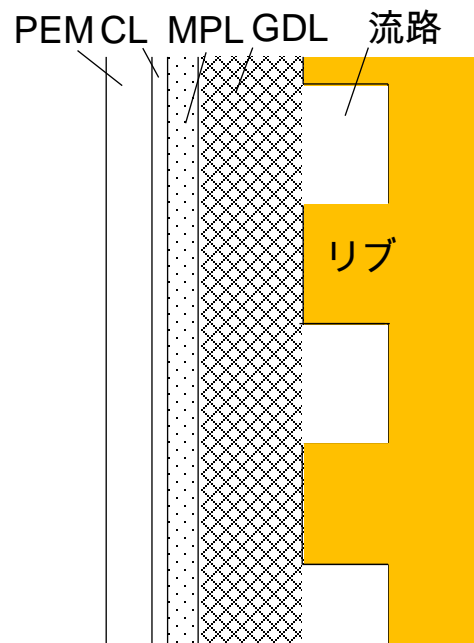


Without MPL



厚さ
PEM + CL : 90 μm
GDL : 190 μm

With MPL



厚さ
PEM + CL : 90 μm
MPL : 約 50 μm
GDL : 190 μm

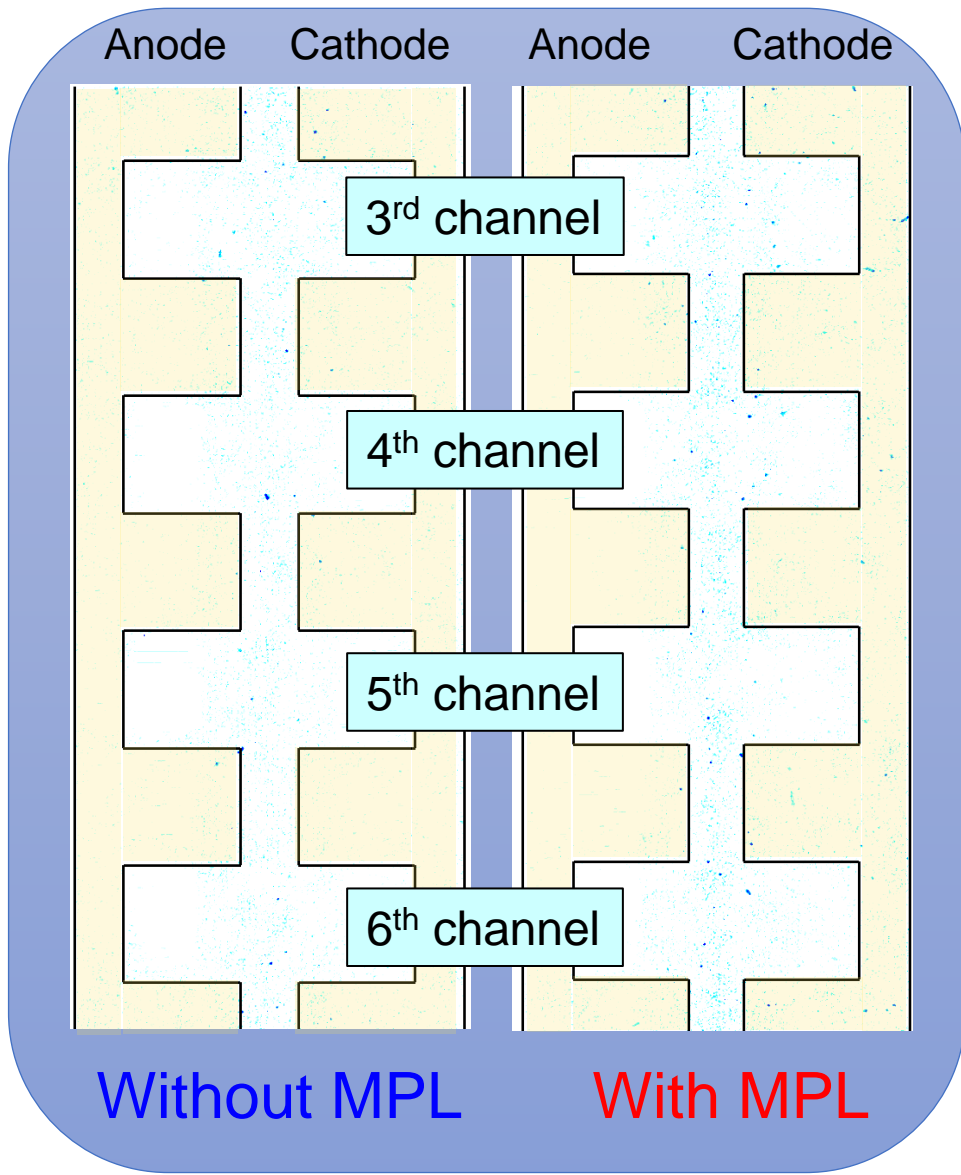
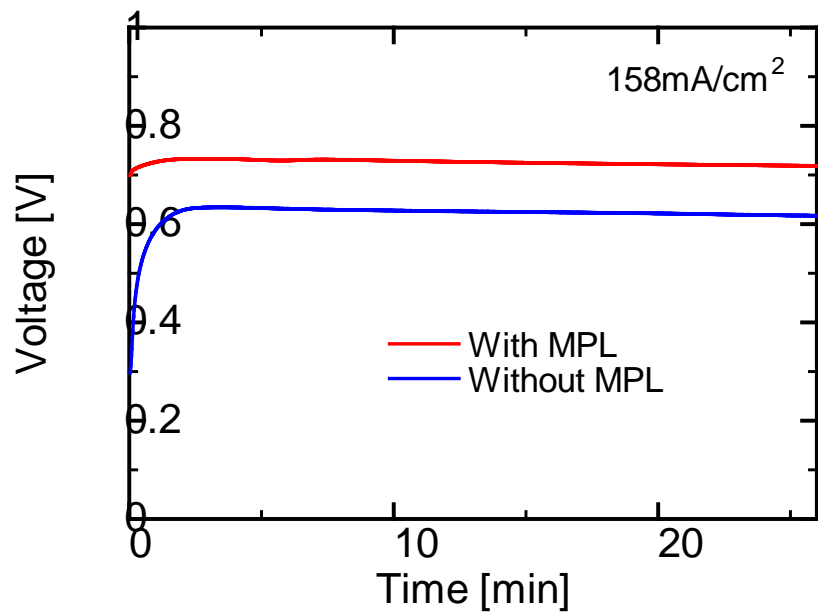
実験条件

セル温度 : 30~35 °C

② 電流密度 : 158 mA/cm²

H₂ 流量 : 28 Ncc/min

Air 流量 : 66 Ncc/min



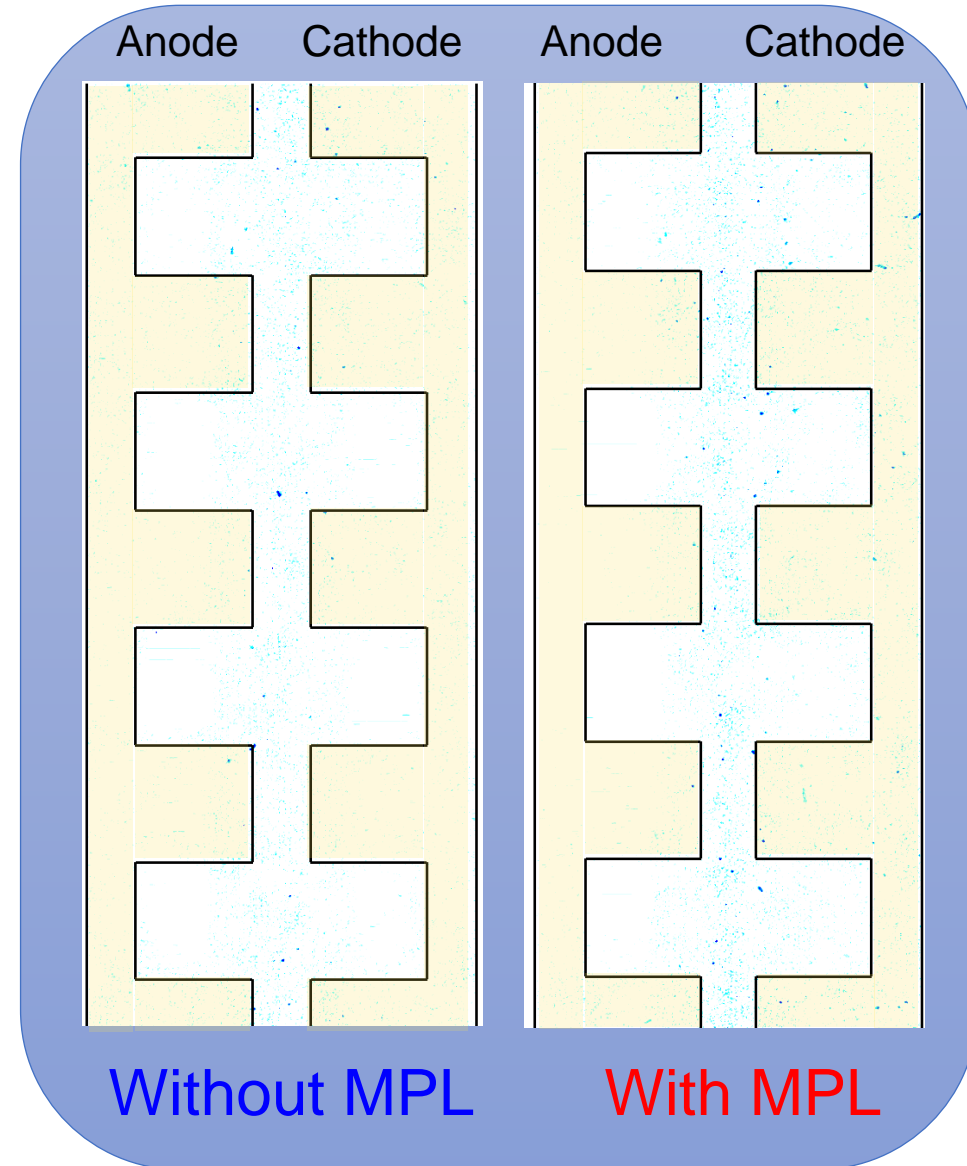
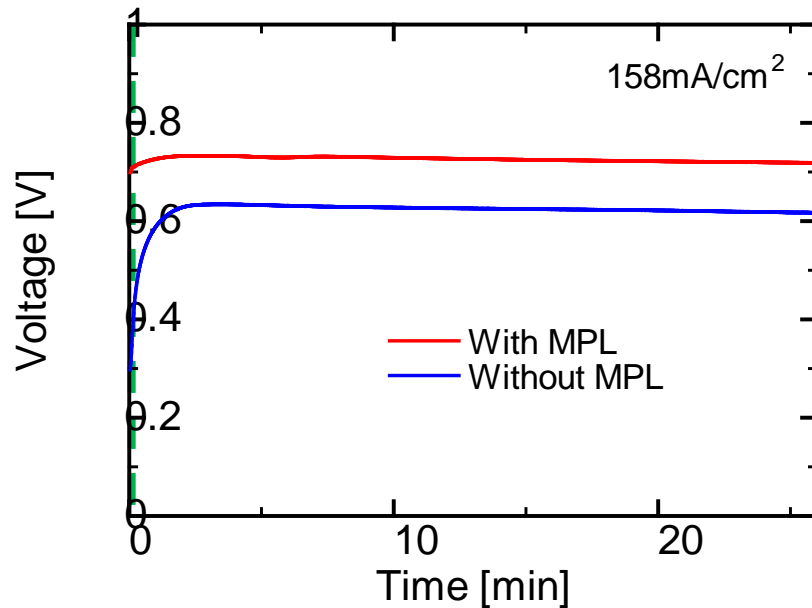
実験条件

セル温度 : 30~35 °C

◎ 電流密度 : 158 mA/cm²

H₂ 流量 : 28 Ncc/min

Air 流量 : 66 Ncc/min



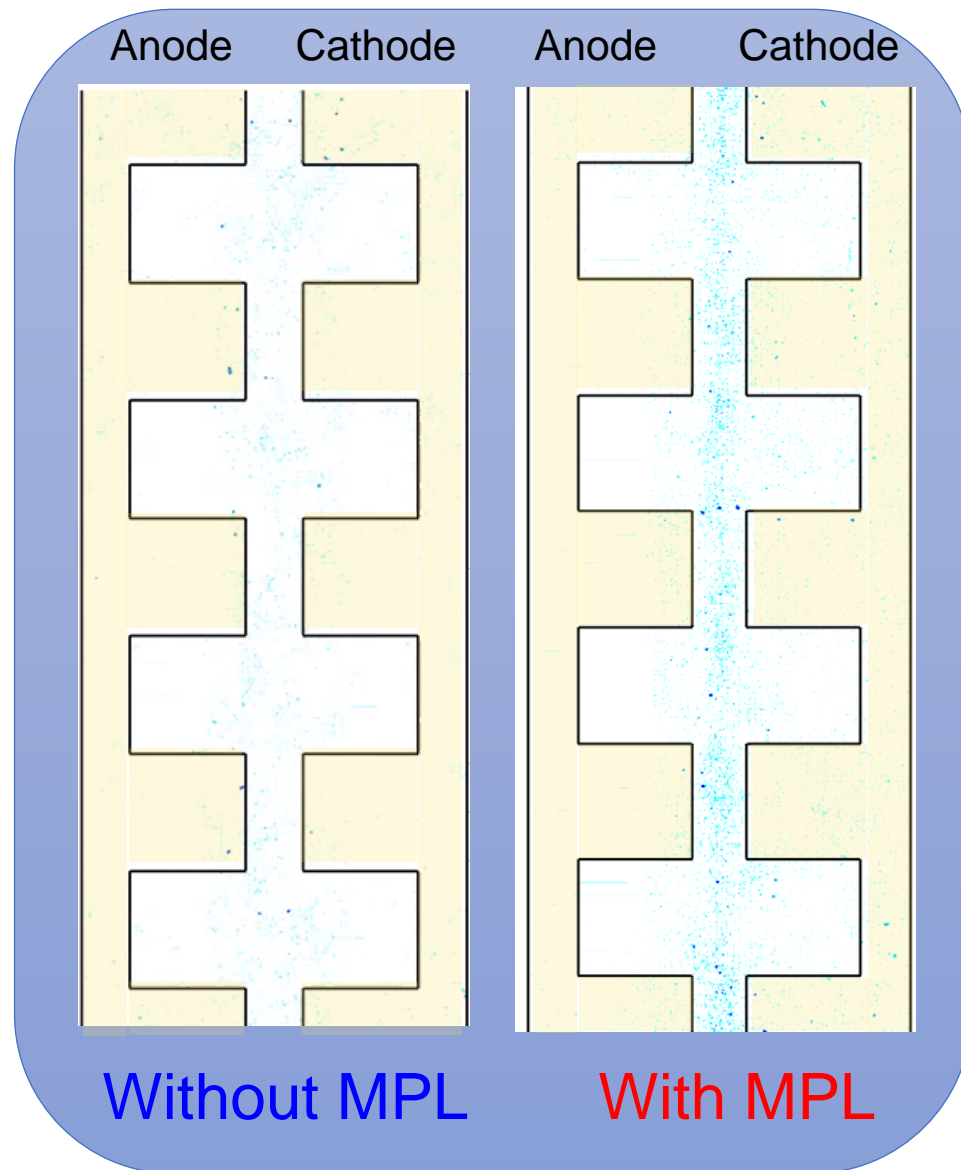
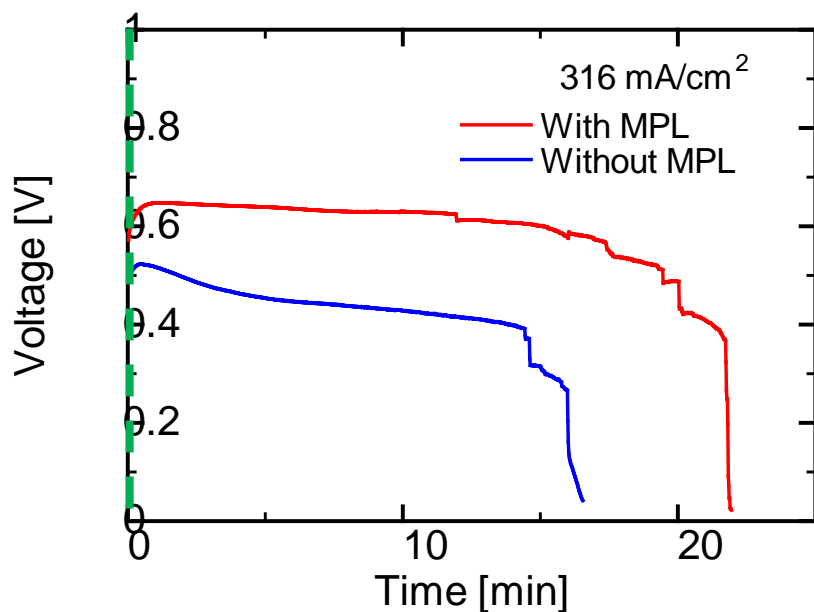
実験条件

セル温度 : 30~35 °C

③ 電流密度 : 316 mA/cm²

H₂ 流量 : 28 Ncc/min

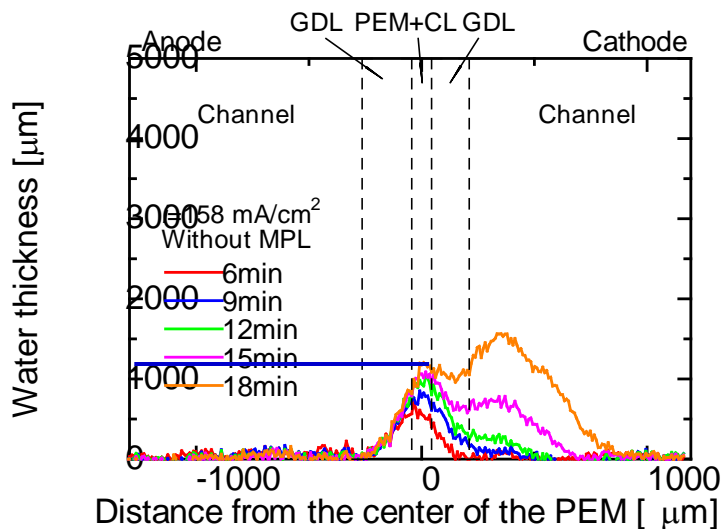
Air 流量 : 66 Ncc/min



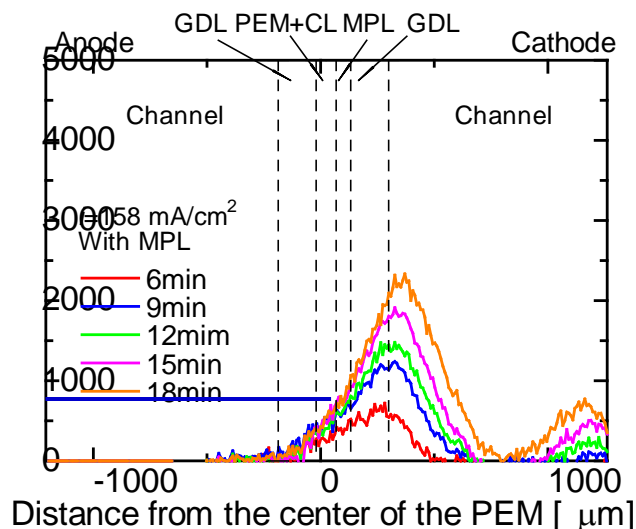
Without MPL

With MPL

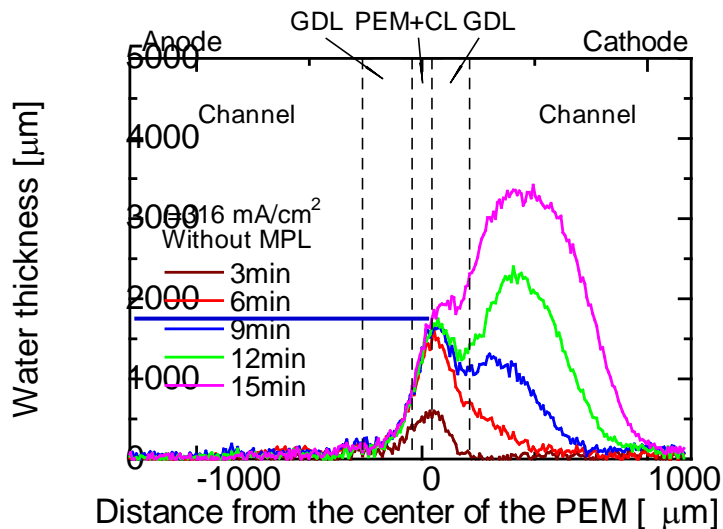
158
mA/cm²



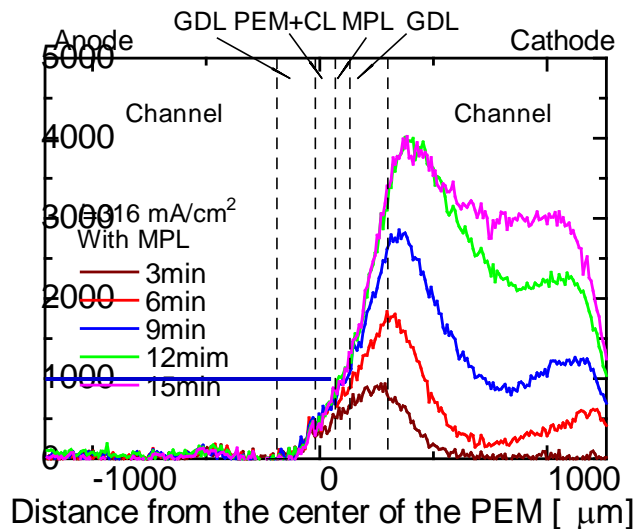
Water thickness [μm]



316
mA/cm²



Water thickness [μm]

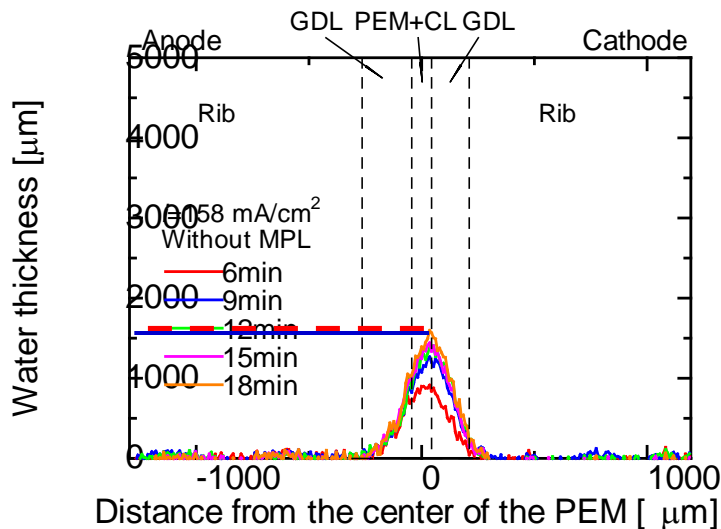


Distance from the center of the PEM [μm]

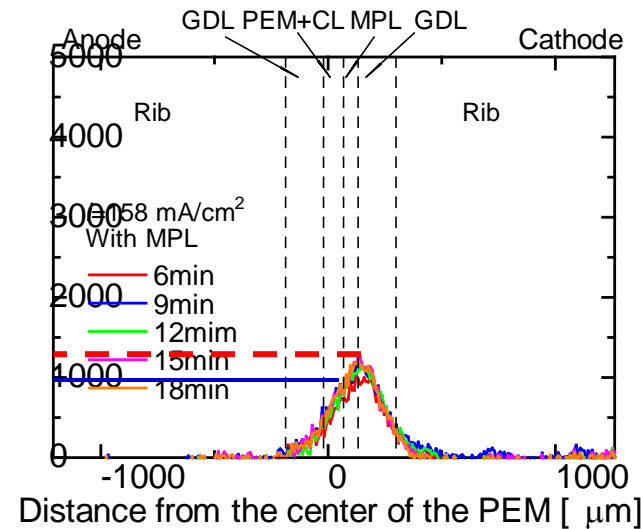
Without MPL

With MPL

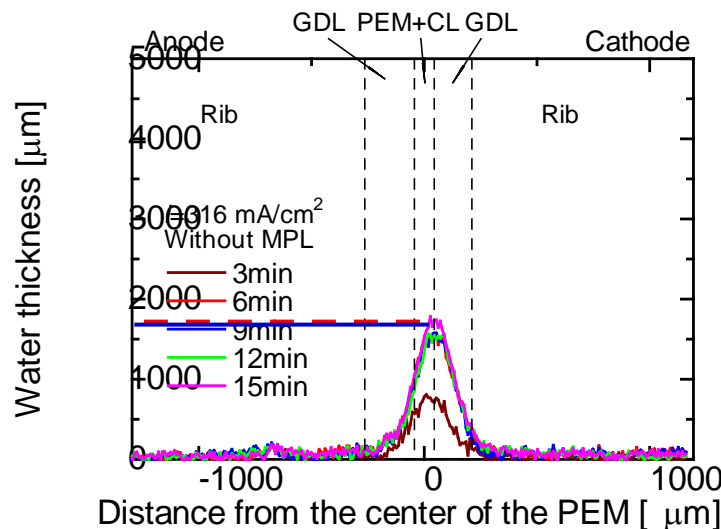
158
mA/cm²



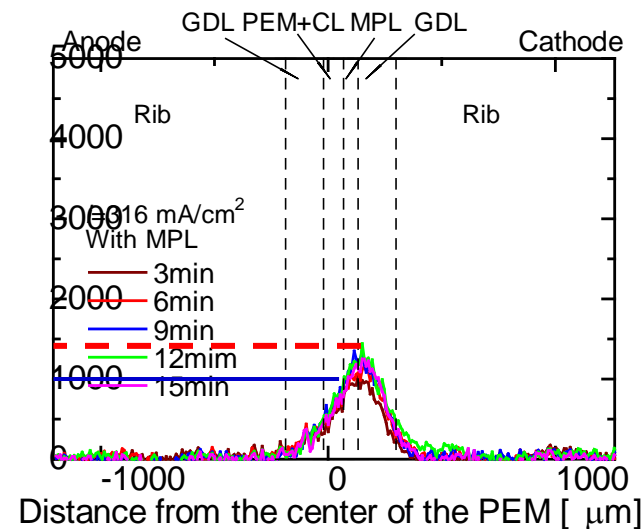
Water thickness [μm]



316
mA/cm²



Water thickness [μm]



Distance from the center of the PEM [μm]

熱伝達特性, 圧力損失特性

冷媒が気液二相流として流動する場合には,
その界面構造が熱流動特性に強く影響を及ぼす.

ボイド率 = 蒸気の体積割合

- 質量流束, 乾き度(蒸気の質量割合)が既知であれば,
各相の平均流速を計算できる.
- 沸騰開始点の計測
- ドライアウトの計測

□ シェル・チューブ熱交換器

□ 積層型熱交換器

(プレート型, プレートフィン型, マイクロチャネル熱交換器)

シェル-チューブ式熱交換器

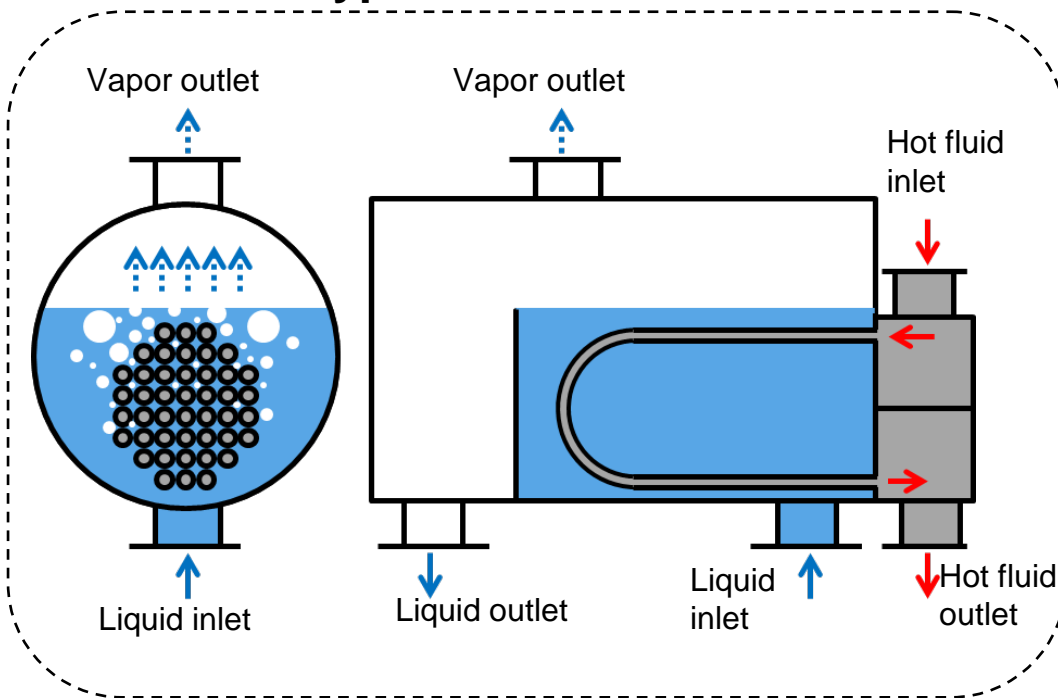
- ✓ 化学プラントや地熱バイナリ発電の蒸発器として利用
- ✓ 胴側一水平管群内プール沸騰

管群内ボイド率

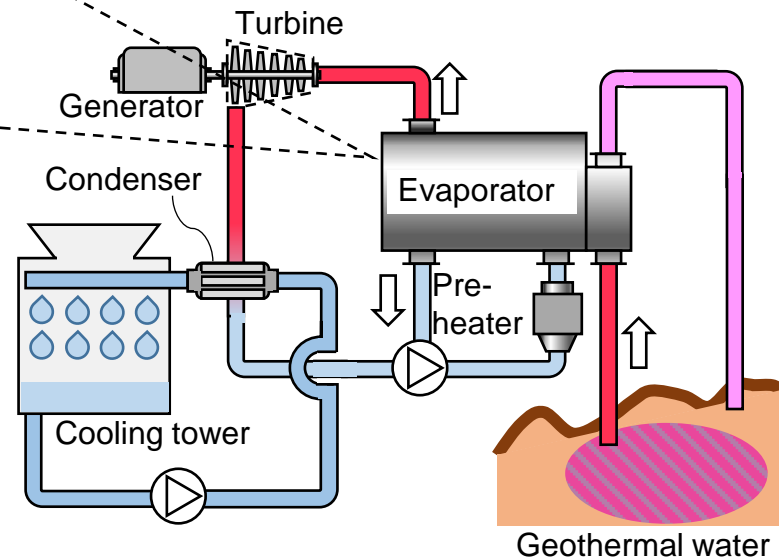
- 気泡攪拌による伝熱促進
- 循環流の強度

⇒ 管配列の影響

Typical kettle reboiler



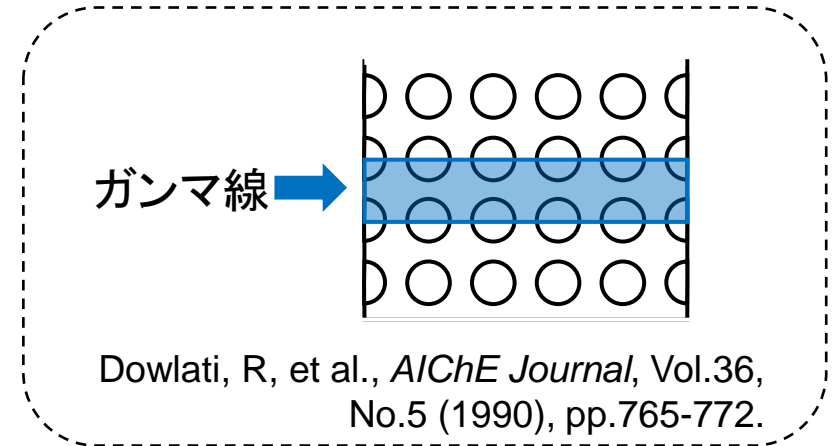
Geothermal binary power generation



従来の研究

- 空間平均ボイド率計測
- 平均熱伝達率計測

局所の評価結果が少ない



研究目的

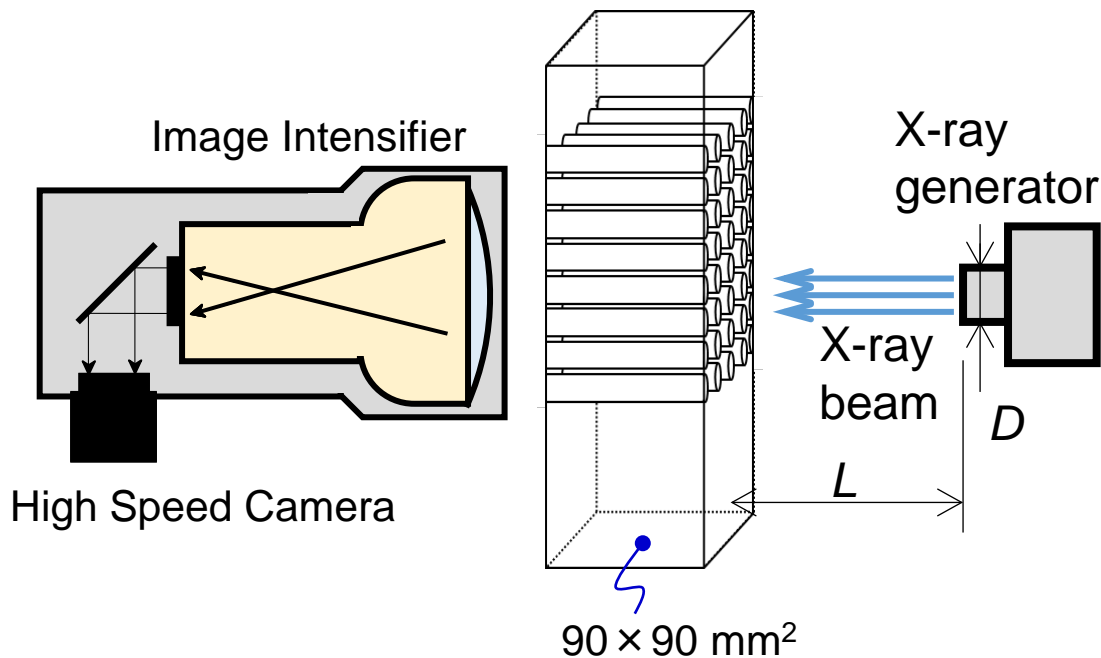
伝熱管周りのボイド率分布と熱伝達率分布の相関評価

- 気泡攪拌による伝熱促進 ⇒ 管配列の影響

研究対象

水平管群試験部 (奥行き 90 mm)
空気-水二相流
低ボイド率 (気泡流, 間欠流)

→ X線ラジオグラフィによる
可視化・計測



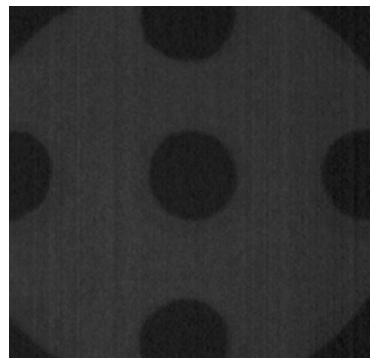
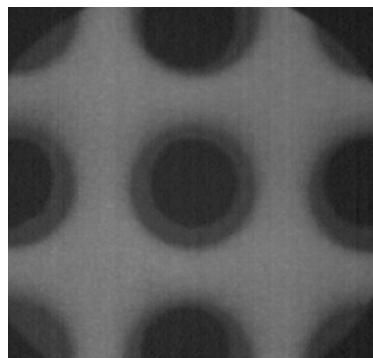
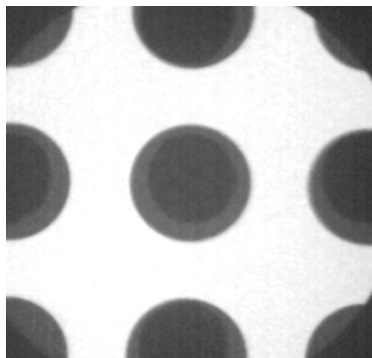
フレームレート	30 fps
X線印加	80 kV 0.5 mA
平行度	$L / D = 225$

輝度分布

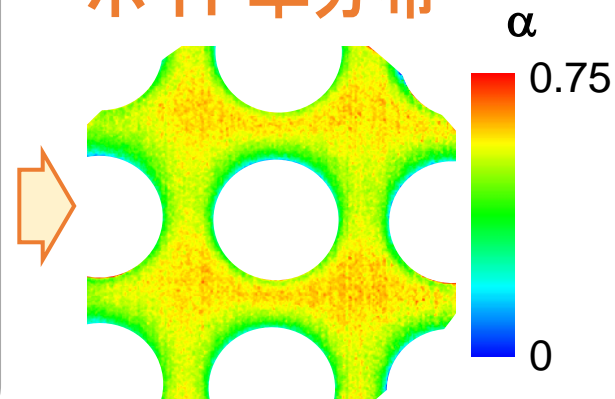
空状態

二相流状態

満水状態



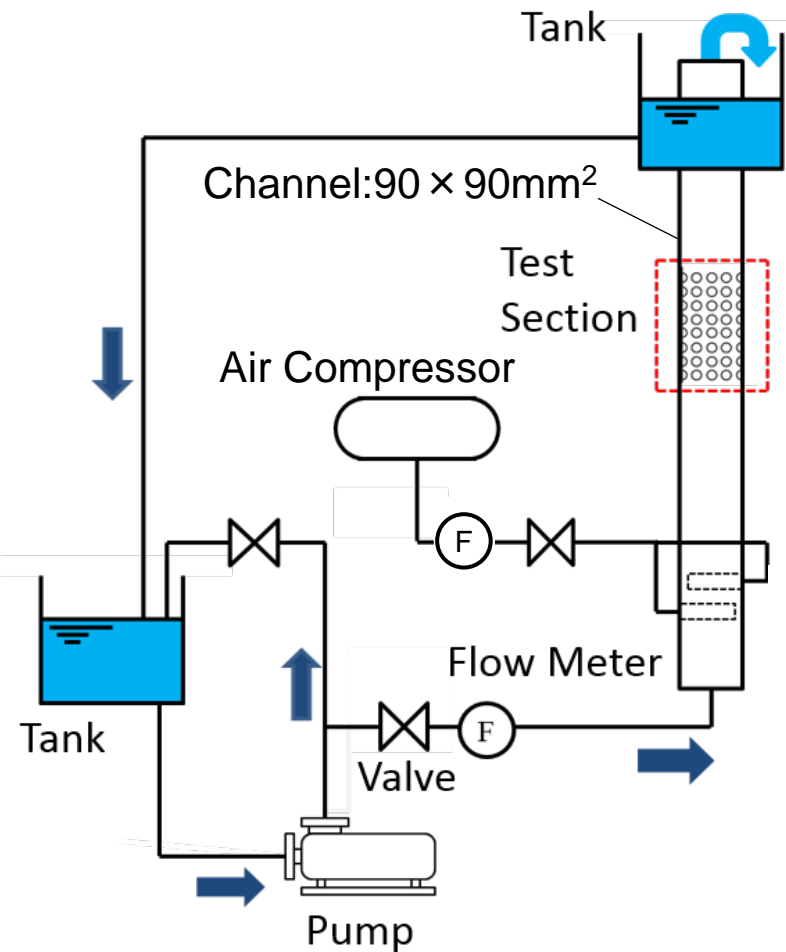
二次元ボイド率分布



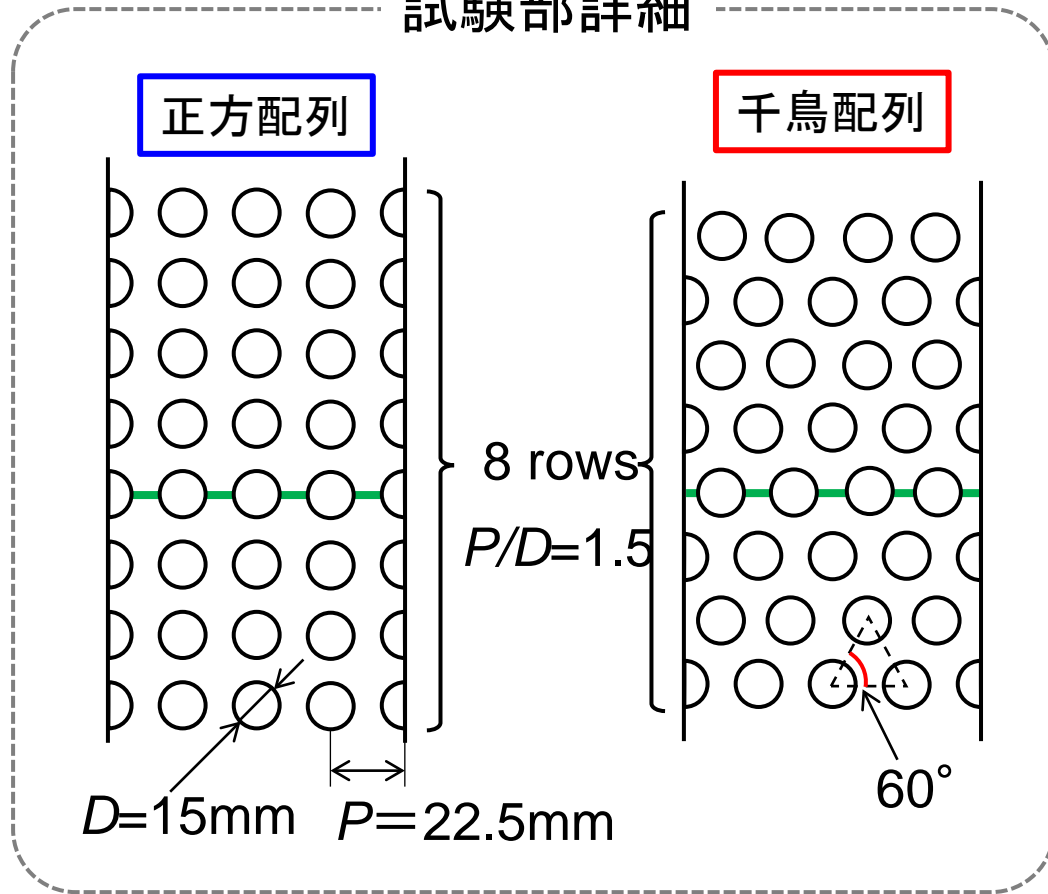
作動流体 : 水-空気

圧力 : 大気圧

水温 : 20~25°C

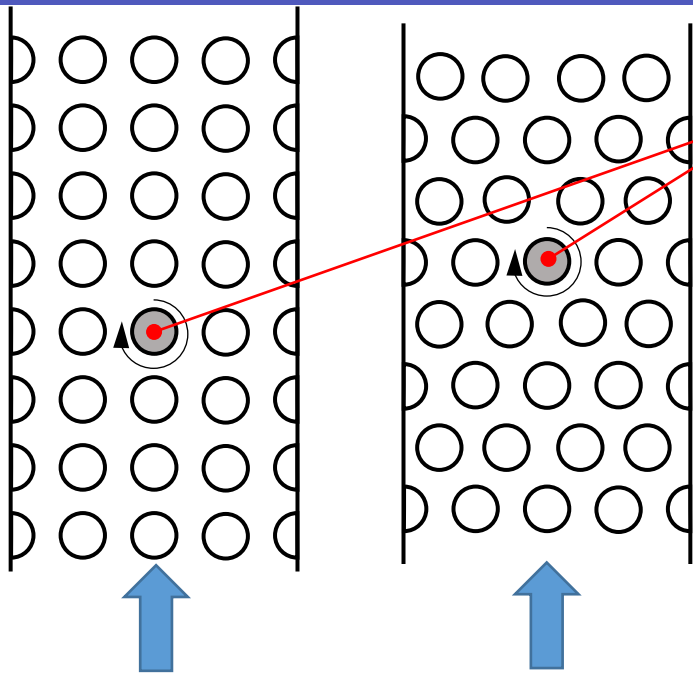


試験部詳細



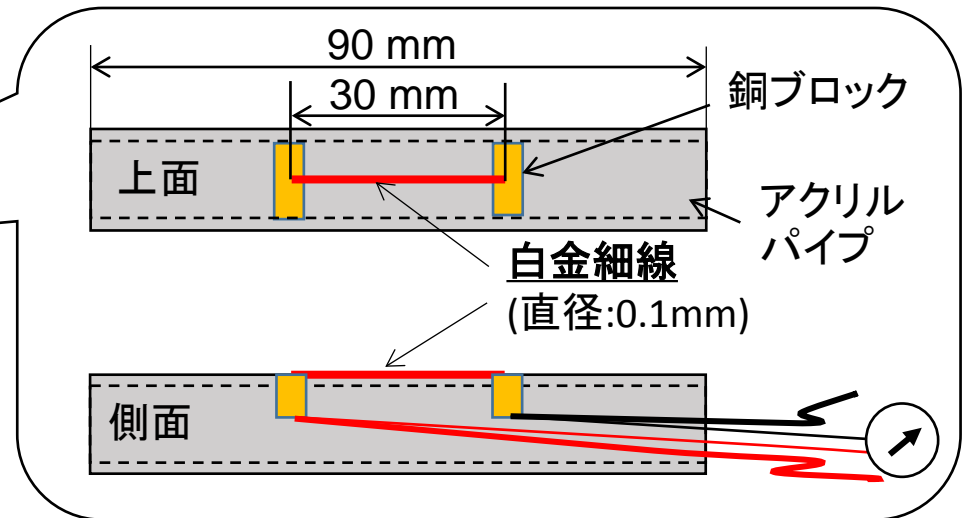
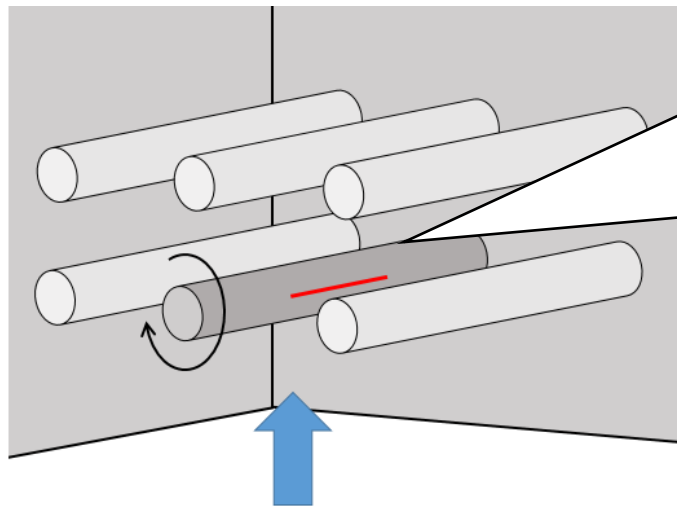
液相見かけ速度: J_L	0.1~0.3 m/s
気相見かけ速度: J_G	0.08~0.89 m/s

↪ 最小断面積で定義



熱伝達計測箇所
3列で流れは発達

直接通電による熱流束と白金の温度
から熱伝達率を計測



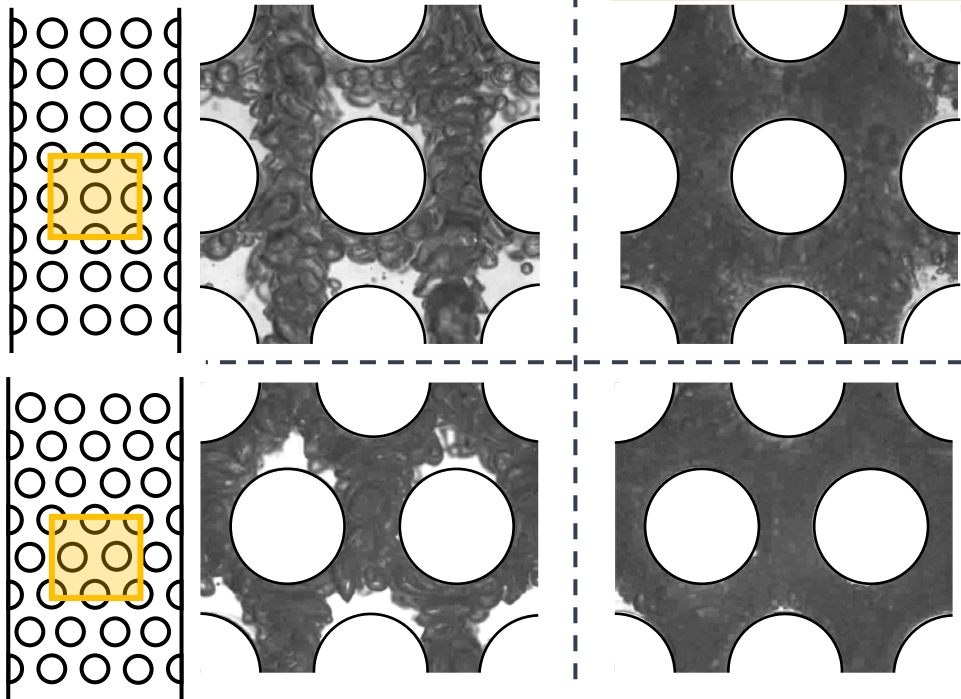
$J_L = 0.2 \text{ m/s}$

気泡流

$J_G = 0.16 \text{ m/s}$

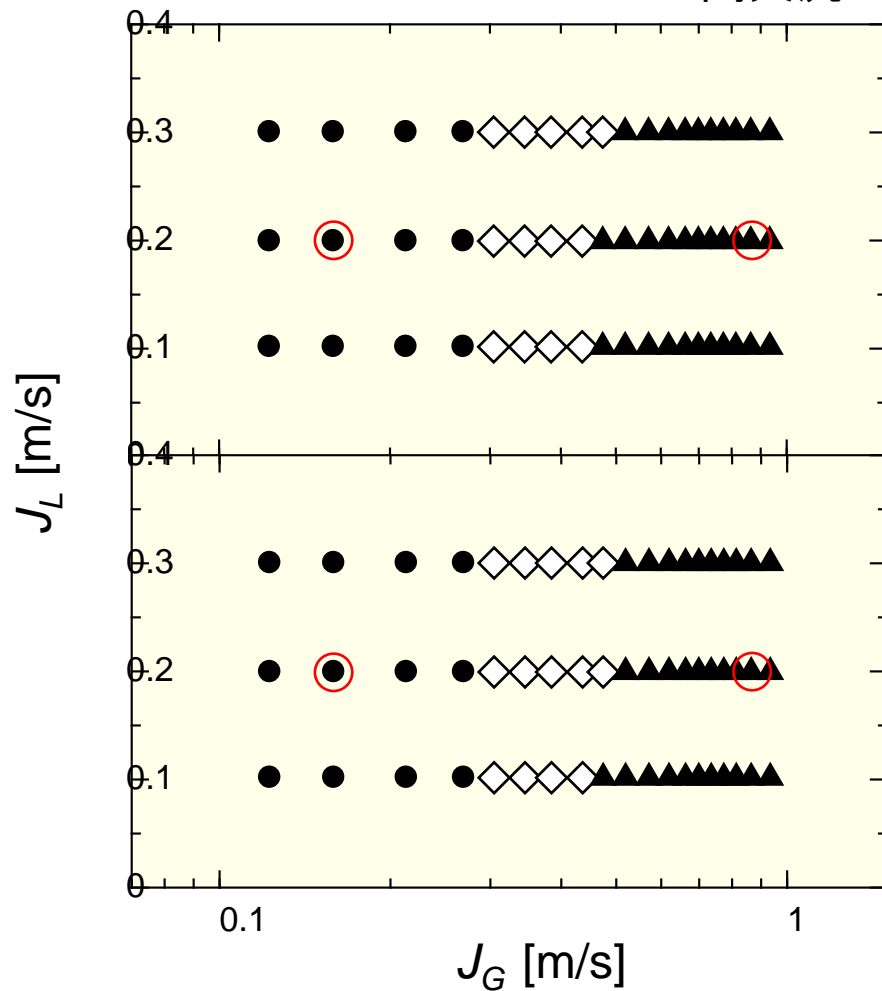
間欠流

$J_G = 0.89 \text{ m/s}$



フレームレート	1000 fps
再生レート	30 fps

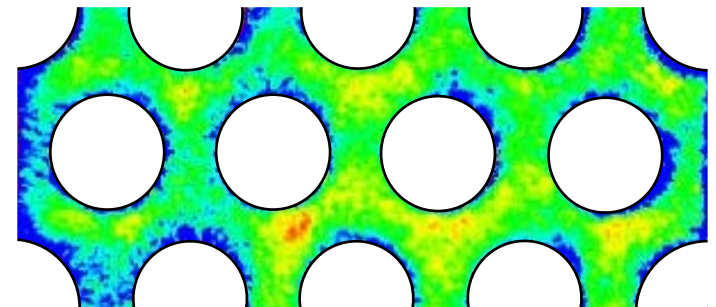
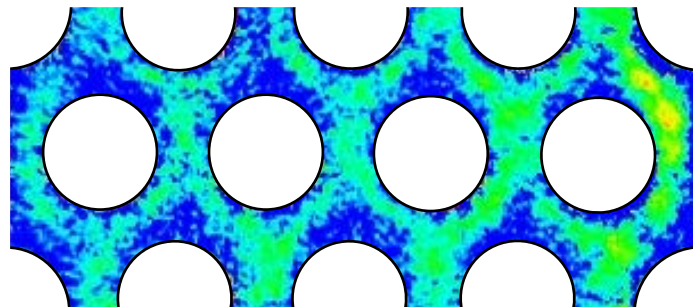
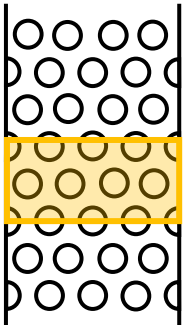
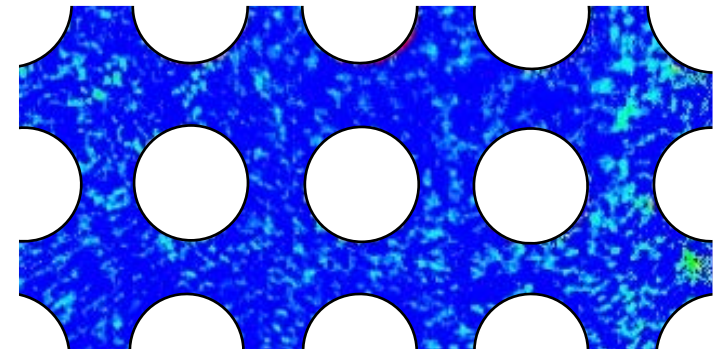
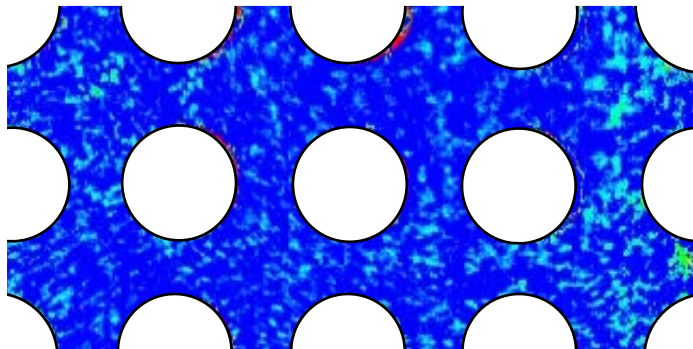
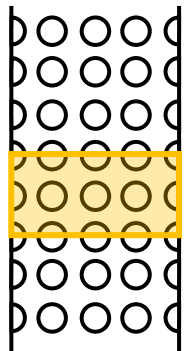
- 気泡流
- ◇ 遷移域
- ▲ 間欠流



フレームレート	30 fps
再生レート	10 fps

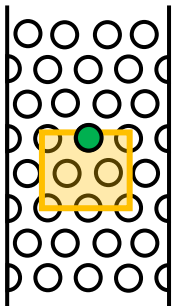
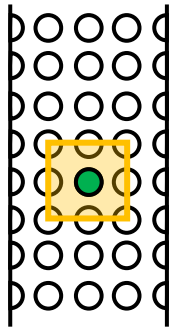


気泡流 $J_G = 0.16 \text{ m/s}$	$J_L = 0.2 \text{ m/s}$	間欠流 $J_G = 0.89 \text{ m/s}$
--	-------------------------	--

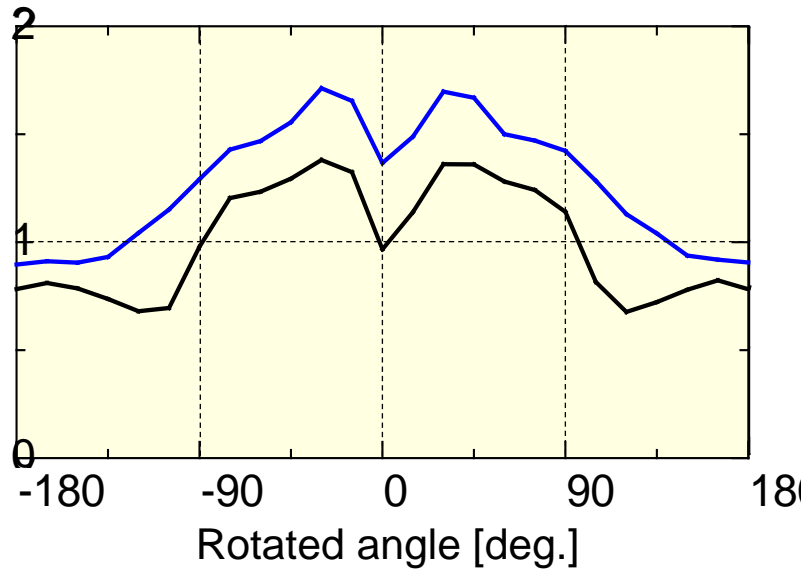
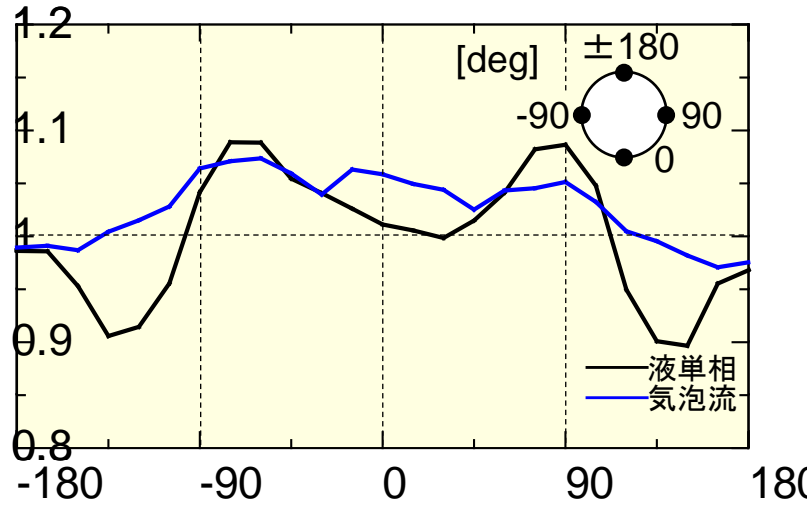


気泡流

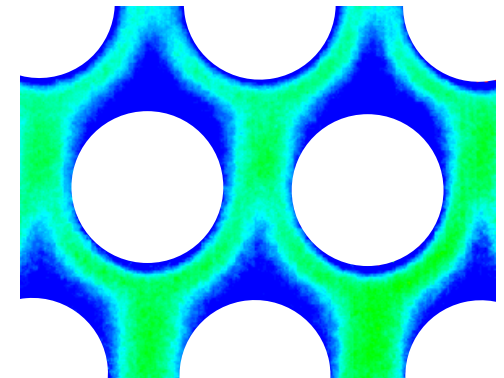
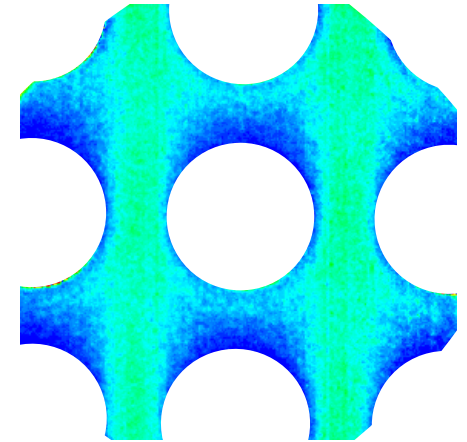
$J_G = 0.16 \text{ m/s}$



$h / h_{ave,L} [-]$

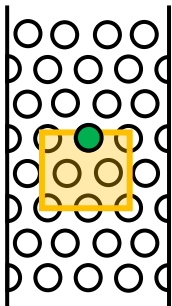
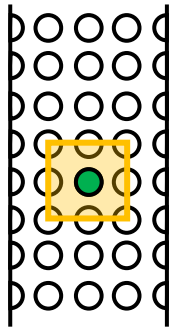


ボイド率 [-]
0 0.75

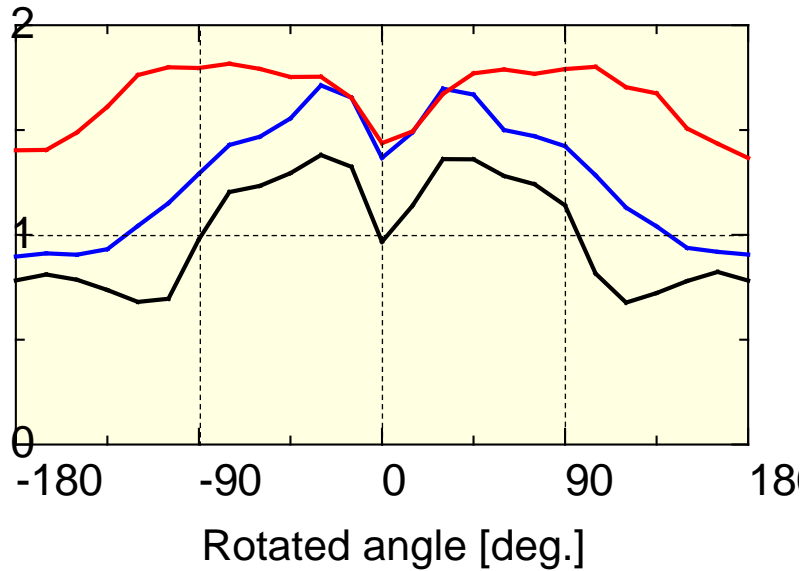
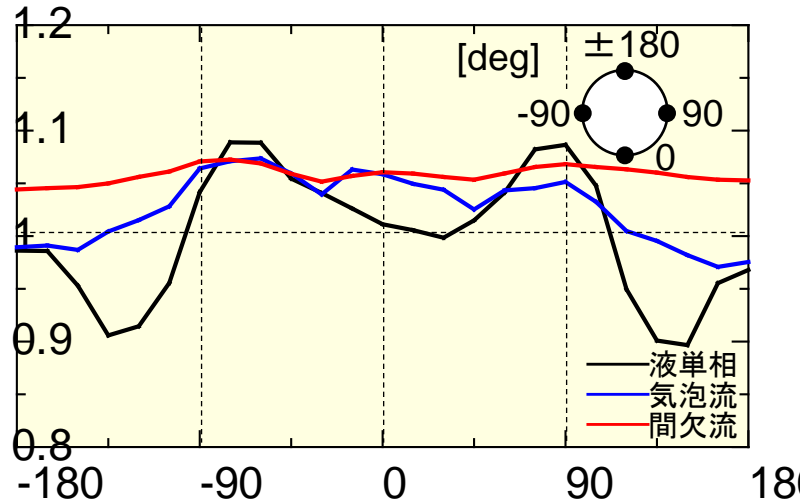


間欠流

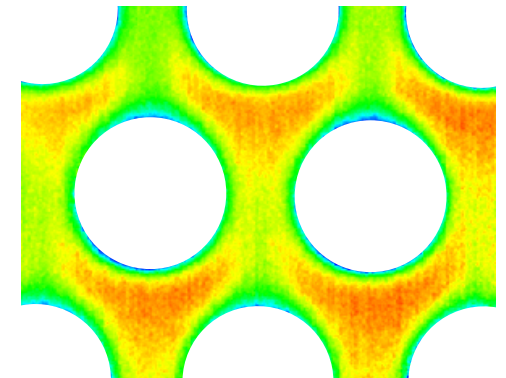
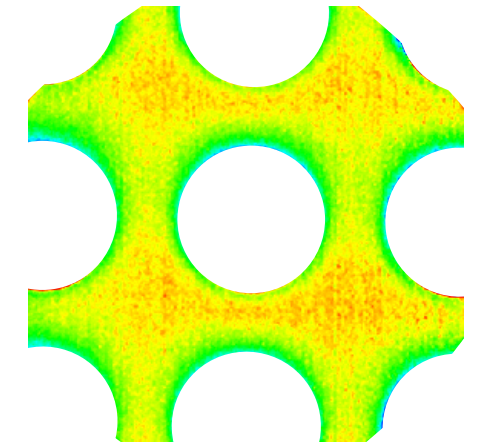
$J_G = 0.89 \text{ m/s}$

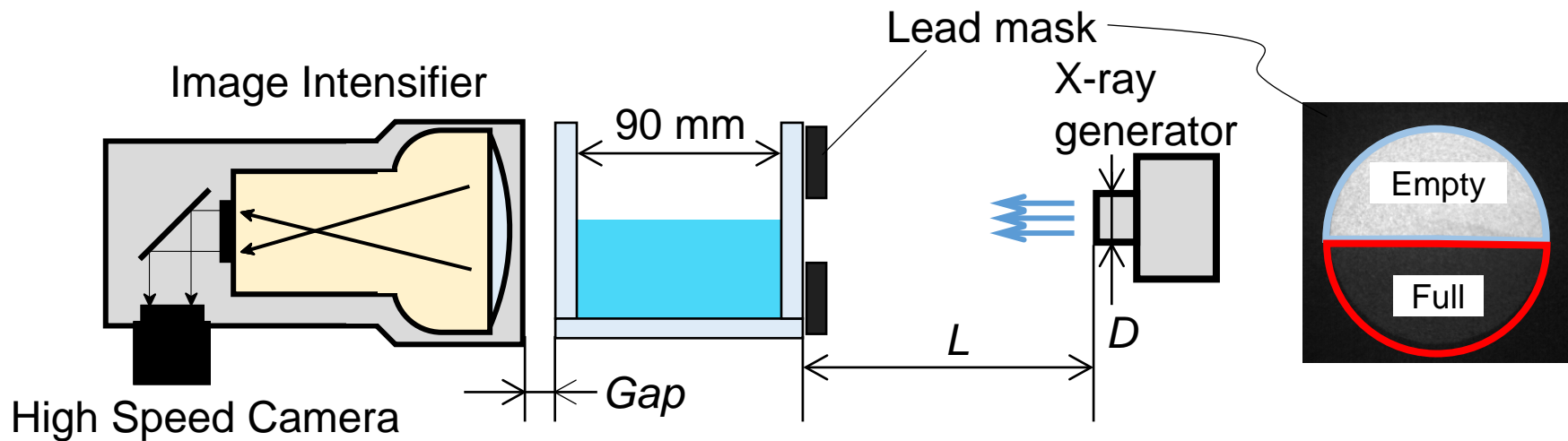


$h / h_{ave,L} [-]$

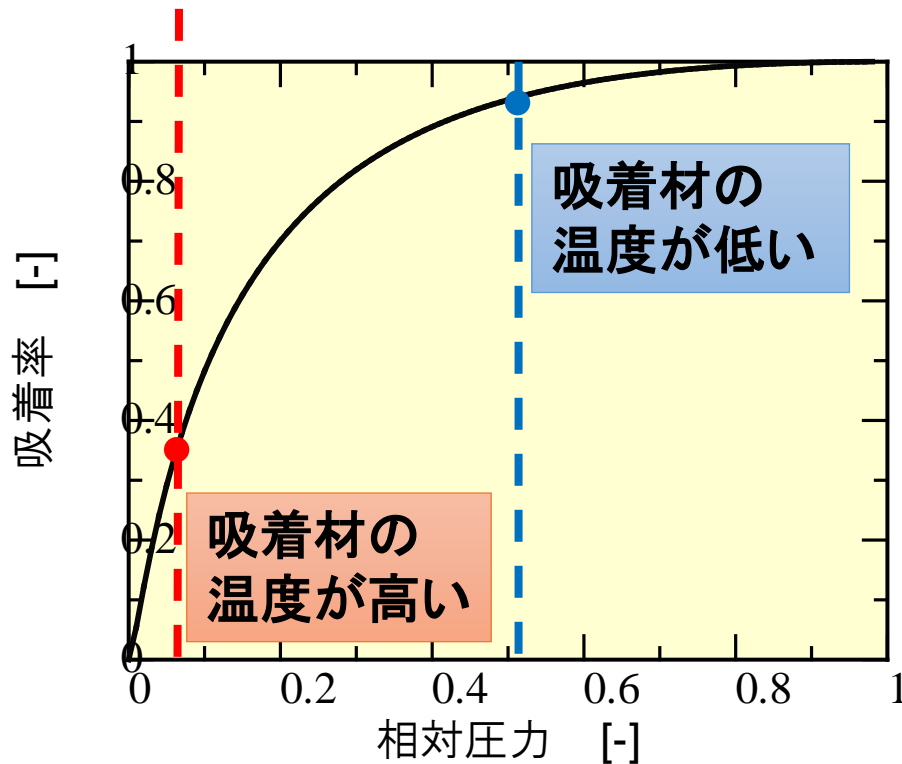


ボイド率 [-]
0 0.75





	Flame rate [fps]	Applied condition		Brightness		Dynamic range
		Voltage [kV]	Current [mA]	Empty	Full	
新X線源 + X線I.I. (4 inch)	30	100	3.5	634	145	490
	60	100	3.5	298	50	248
旧X線源 + X線I.I. (4 inch)	30	80	5	525	103	422
旧X線源 + 中性子I.I. (9 inch)	30	80	5	307	43	265



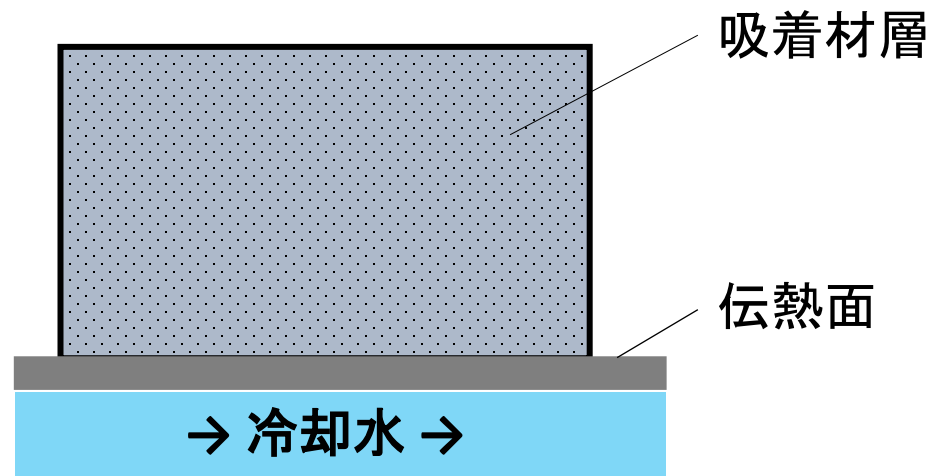
吸着時に発生する吸着熱によって
吸着量の低下



吸着時における
吸着材層の熱拡散が課題

$$\text{吸着率} = \frac{\text{吸着量}}{\text{吸着材の質量}}$$

$$\text{相対圧力} = \frac{\text{吸着材まわりの圧力}}{\text{吸着材温度に対する冷媒の飽和圧力}}$$



問題

吸着材は粒子層であるので、熱伝導が悪い

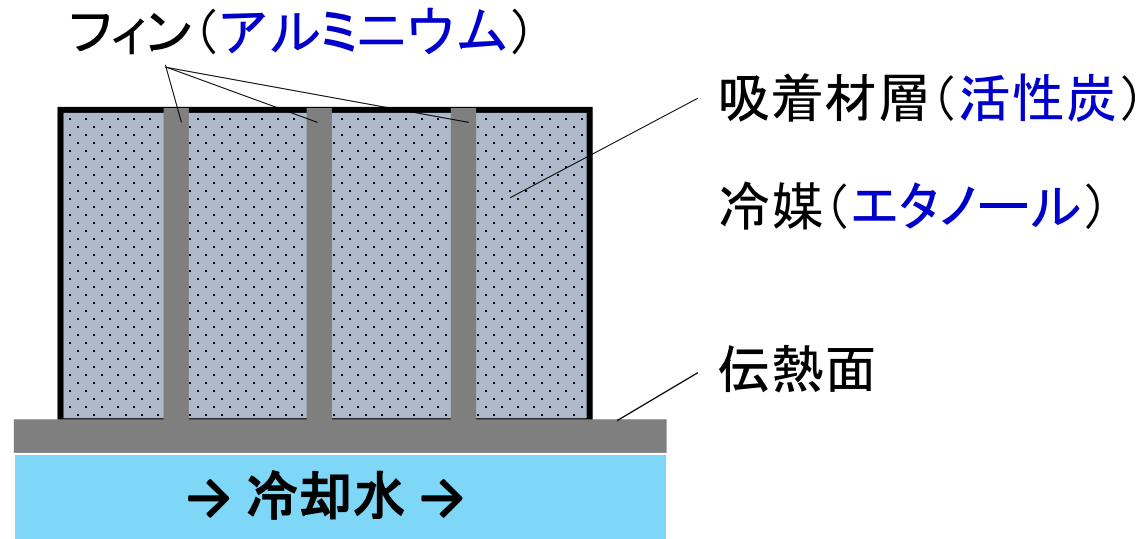


フィンを設置することで、吸着材層の熱拡散向上



バッチ運転時に、吸着材+フィンの熱容量がロス

過渡変化時の吸着量分布を評価したフィン配置の設計が必要



問題

吸着材は粒子層であるので、熱伝導が悪い



フィンを設置することで、吸着材層の熱拡散向上



バッチ運転時に、吸着材+フィンの熱容量がロス

過渡変化時の吸着量分布を評価したフィン配置の設計が必要



中性子ラジオグラフィで可視化・計測

物質を構成する元素の中性子線の透過率の差異を利用した可視化・計測手法

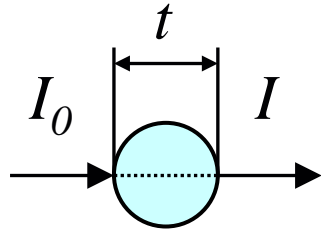
中性子線の減衰特性

$$I = I_0 \exp(-\rho \mu_m t)$$

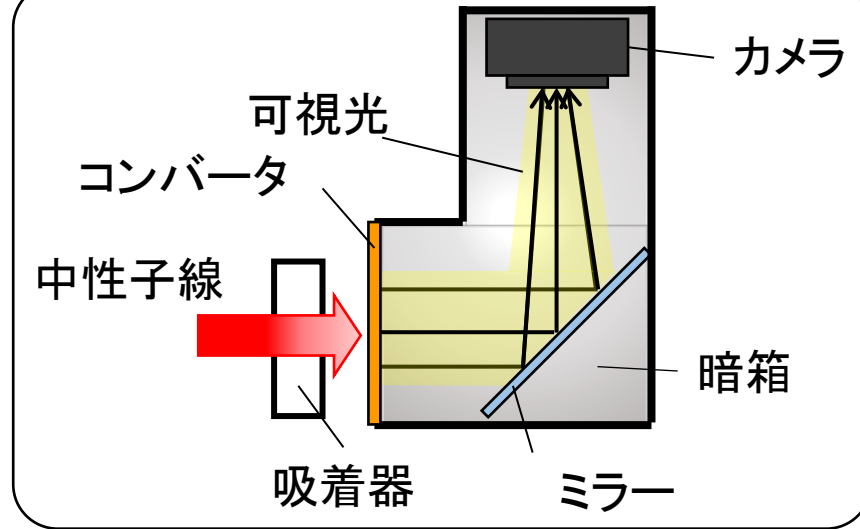
ρ : 密度 [g/cm³]

μ_m : 質量減衰係数 [cm²/g]

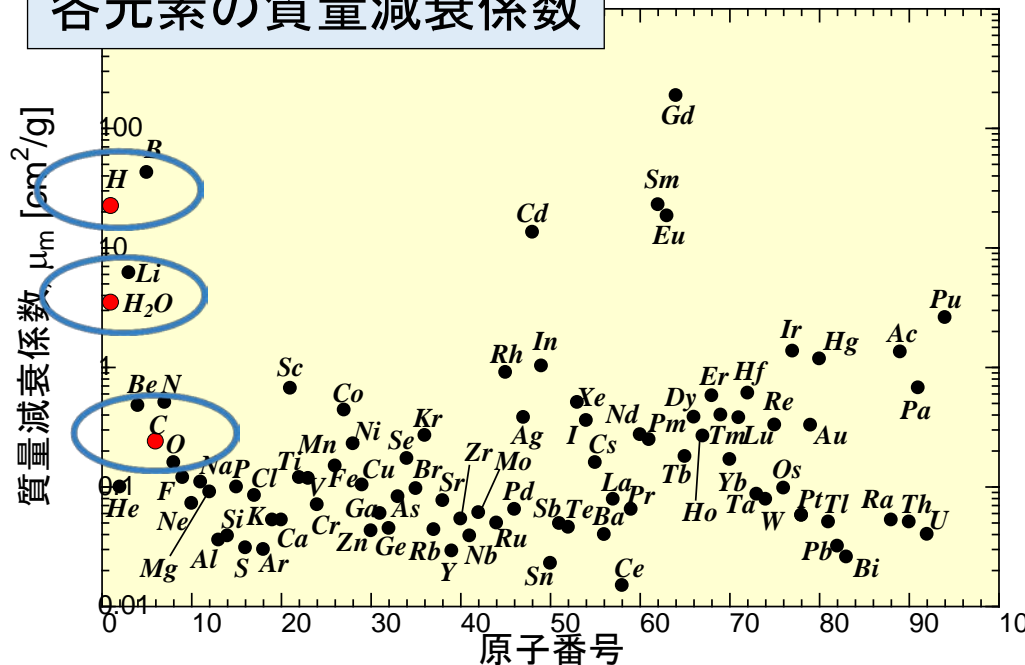
t : 厚さ [cm]



中性子ラジオグラフィシステム



各元素の質量減衰係数



実験場所：京都大学研究用原子炉
E-2 port

吸着時の可視化画像の輝度

$$S = GI_0 \exp(-\underbrace{\rho_w \mu_{m,w} t_w}_{\text{容器}} - \underbrace{\rho_{\text{ads}} \mu_{m,\text{ads}} t_{\text{ads}}}_{\text{吸着材(活性炭)}} - \underbrace{\rho_r \mu_{m,r} t_r}_{\text{冷媒(エタノール)}}) + O$$

乾燥時の可視化画像の輝度

$$S_{\text{dry}} = GI_0 \exp(-\underbrace{\rho_w \mu_{m,w} t_w}_{\text{容器}} - \underbrace{\rho_{\text{ads}} \mu_{m,\text{ads}} t_{\text{ads}}}_{\text{吸着材(活性炭)}}) + O_{\text{dry}}$$

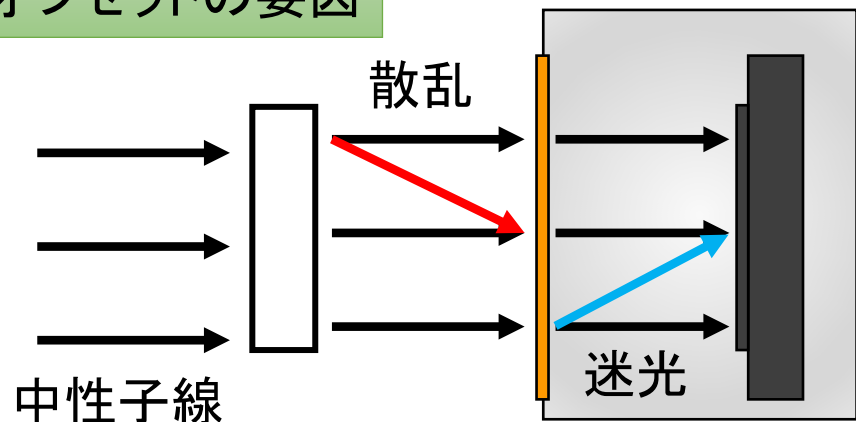
S : 輝度, G : 撮像装置のゲイン, O : オフセット

w : 容器, ads : 吸着材(活性炭), r : 冷媒(エタノール), dry : 乾燥状態

画像処理で得られる吸着量

$$\rho_r t_r(x, y) = \frac{1}{\mu_{m,r}} \cdot \ln \left[\frac{S_{\text{dry}}(x, y) - O_{\text{dry}}(x, y)}{S(x, y) - O(x, y)} \right]$$

オフセットの要因



吸着器 コンバータ カメラ

吸着時の可視化画像の輝度

$$S = GI_0 \exp(-\underbrace{\rho_w \mu_{m,w} t_w}_{\text{容器}} - \underbrace{\rho_{\text{ads}} \mu_{m,\text{ads}} t_{\text{ads}}}_{\text{吸着材(活性炭)}} - \underbrace{\rho_r \mu_{m,r} t_r}_{\text{冷媒(エタノール)}}) + O$$

乾燥時の可視化画像の輝度

$$S_{\text{dry}} = GI_0 \exp(-\underbrace{\rho_w \mu_{m,w} t_w}_{\text{容器}} - \underbrace{\rho_{\text{ads}} \mu_{m,\text{ads}} t_{\text{ads}}}_{\text{吸着材(活性炭)}}) + O_{\text{dry}}$$

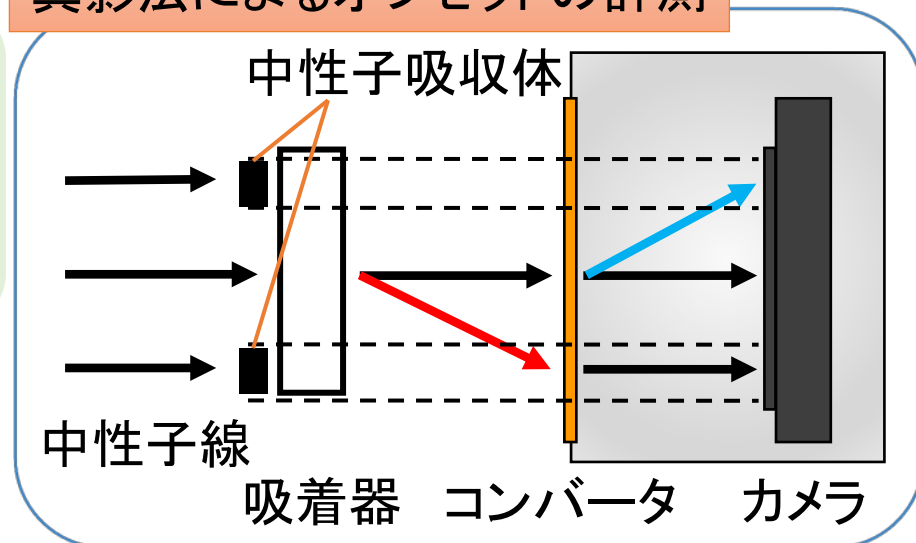
S : 輝度, G : 撮像装置のゲイン, O : オフセット

w : 容器, ads : 吸着材(活性炭), r : 冷媒(エタノール), dry : 乾燥状態

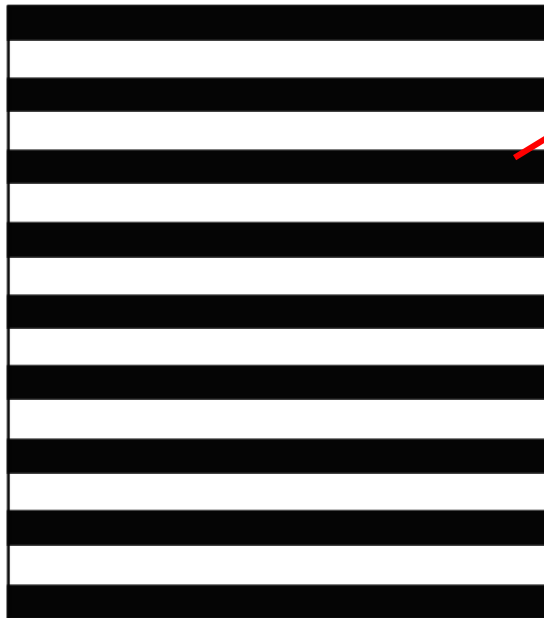
画像処理で得られる吸着量

$$\rho_r t_r(x, y) = \frac{1}{\mu_{m,r}} \cdot \ln \left[\frac{S_{\text{dry}}(x, y) - O_{\text{dry}}(x, y)}{S(x, y) - O(x, y)} \right]$$

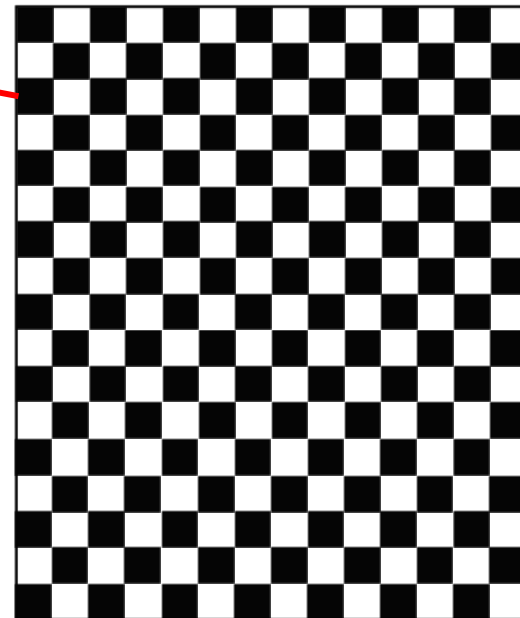
真影法によるオフセットの計測



1次元計測の場合



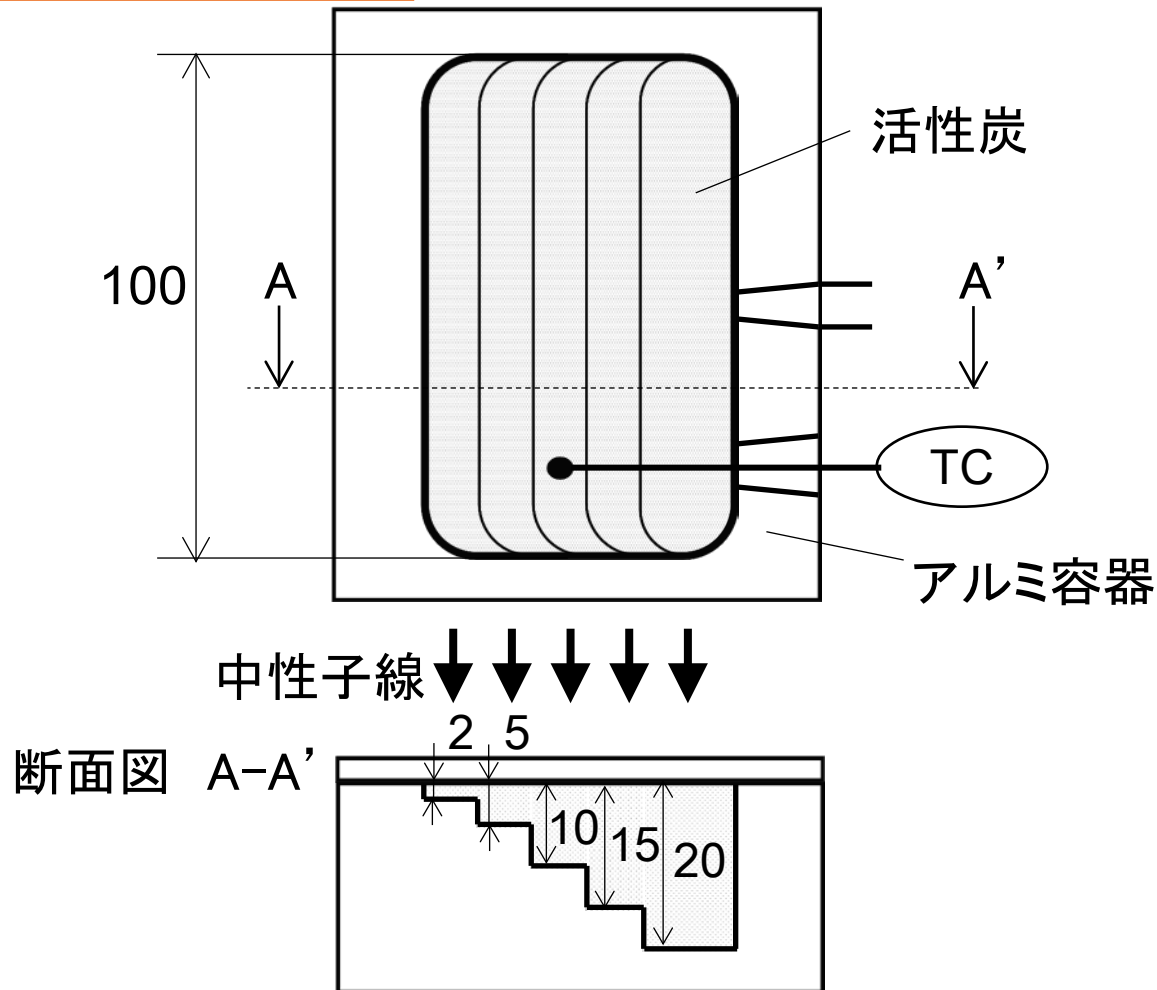
2次元計測の場合



中性子
吸収体

目的：可視化画像による平衡吸着量の計測結果の検証
(従来の研究での計測値との比較)

吸着材層ステップ



活性炭
(株)関西熱化学
高性能多孔質カーボン
(マックスソープ®)



物性値

比表面積	3170 m ² /g
平均粒子径	86 μm

中性子線の減衰

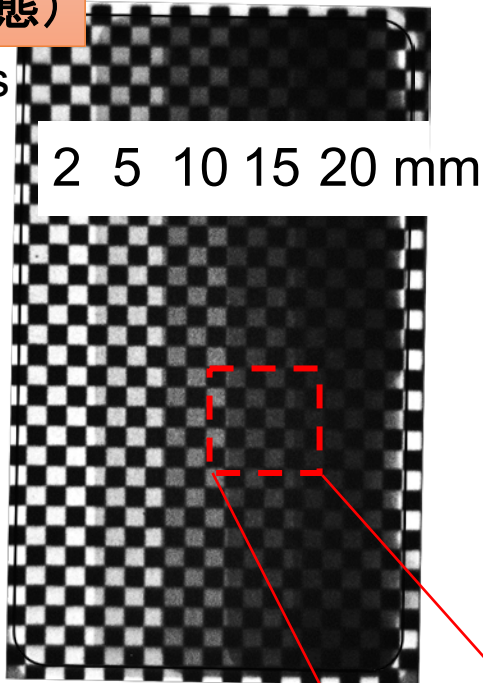
$$\rho_r \mu_{m,r} t_r(x, y) = \ln \left[\frac{S_{\text{dry}}(x, y) - O_{\text{dry}}(x, y)}{S_{\text{adseq}}(x, y) - O_{\text{adseq}}(x, y)} \right]$$

dry: 乾燥状態
adseq: 平衡吸着状態

可視化画像 (平衡吸着状態)

□: 50×50 pixel

露光時間: 40s



中性子吸収体
計測領域
オフセット計測領域

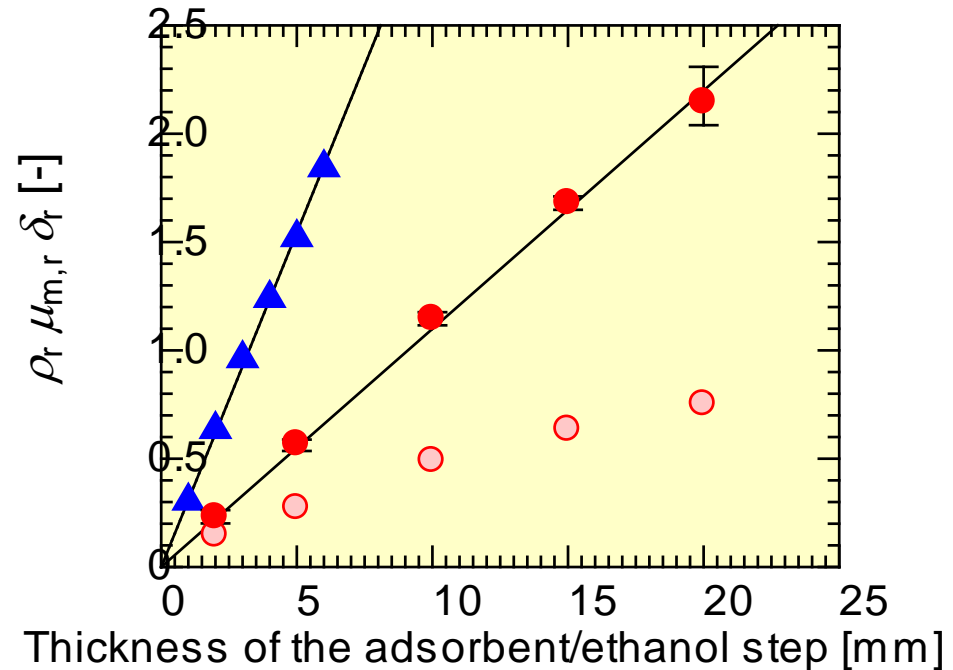
With the compensation by the umbra method

▲ Liquid ethanol

● Adsorbed ethanol

Without the compensation

○ Adsorbed ethanol



I.I. El-Sharkawyらによる吸着等温線※

$$W_0 \exp\left\{-\left[RT \ln\left(\frac{P_s}{P}\right)/E\right]^n\right\} = \frac{\rho_r t_r \times A_{\text{ads}}}{\rho_{\text{ads}} V_{\text{ads}}}$$

W_0 :最大吸着量

R :ガス定数

T :吸着材温度

P_s : T における飽和蒸気圧

P :雰囲気気圧力

E :吸着特性エネルギー

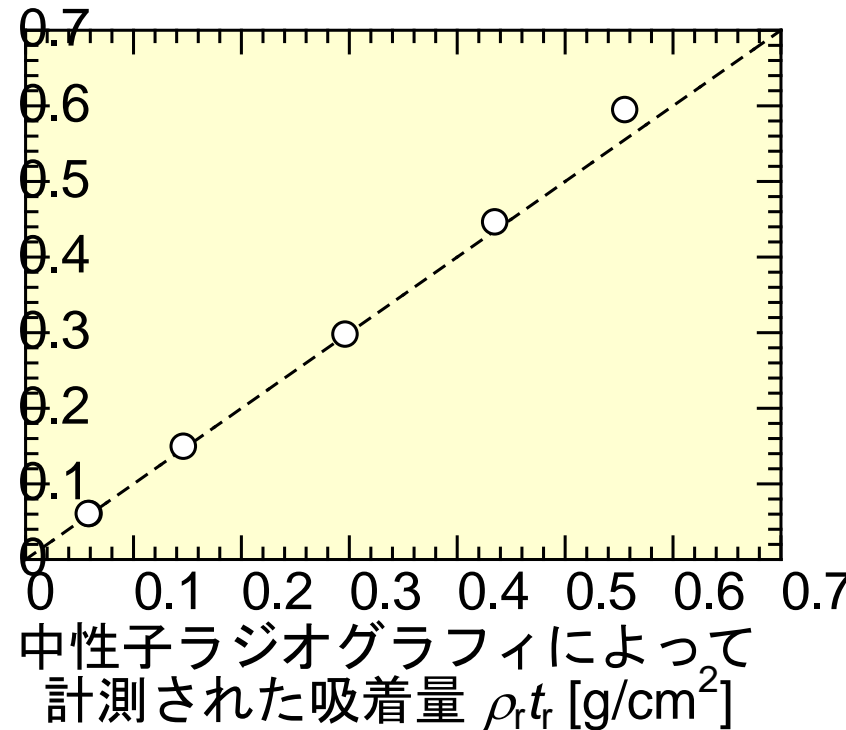
吸着等温線のパラメーター

吸着特性エネルギー: E	5538
最大吸着量: W_0	1.2
吸着等温線の指数: n	1.75

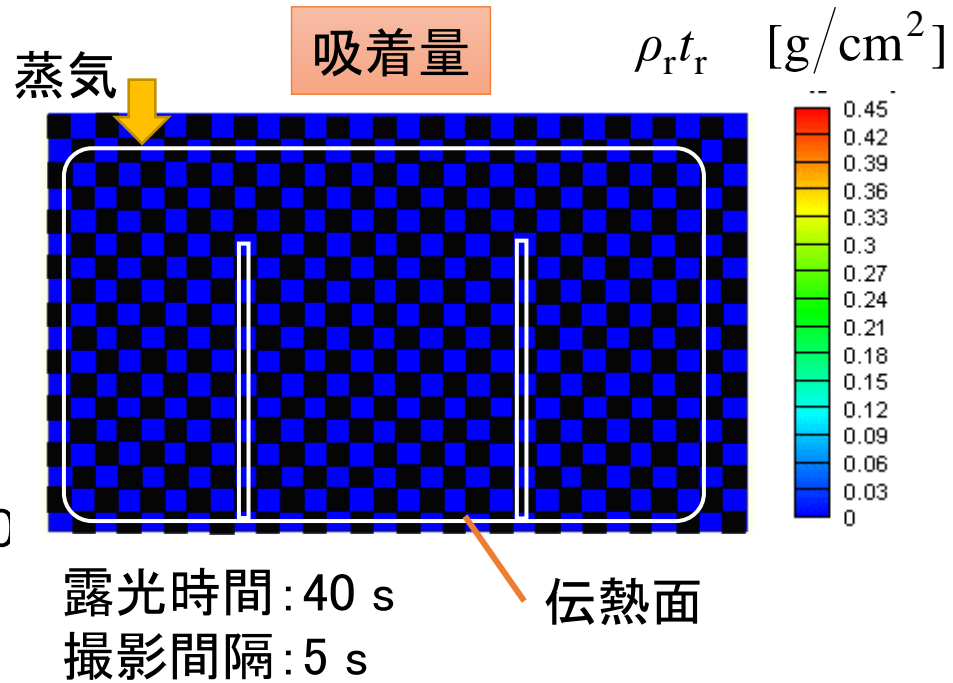
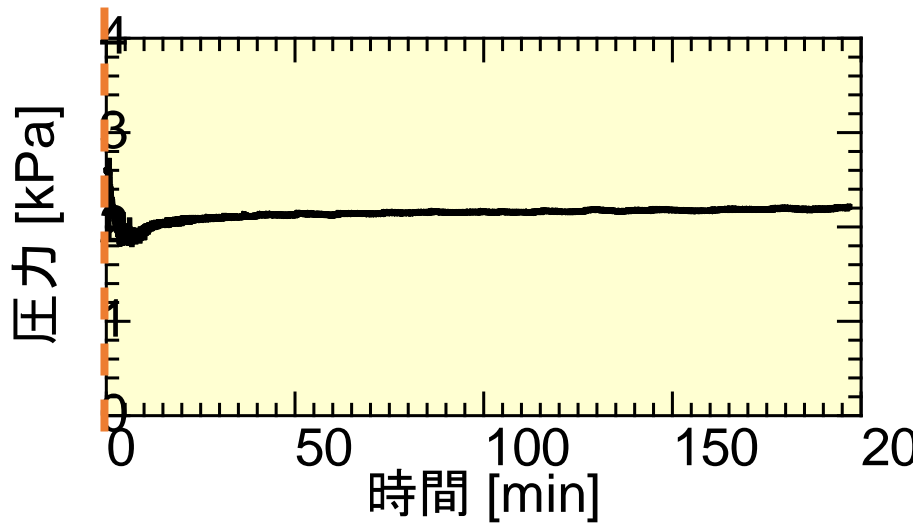
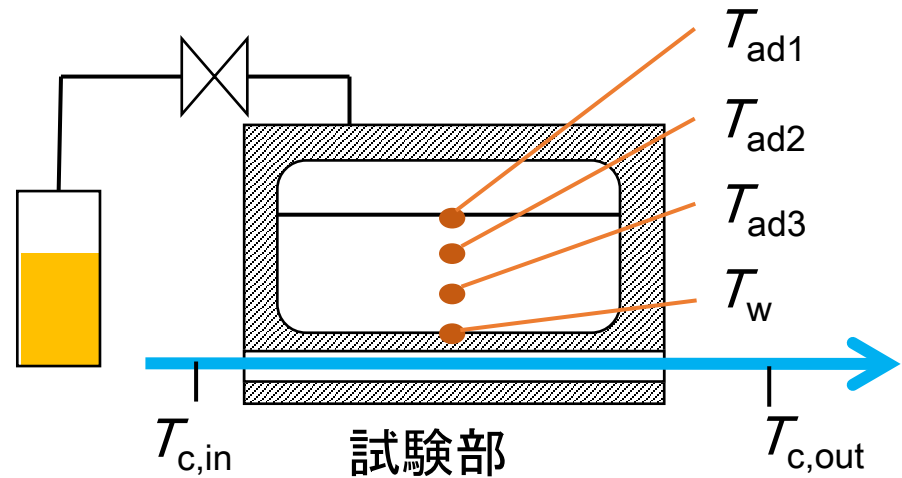
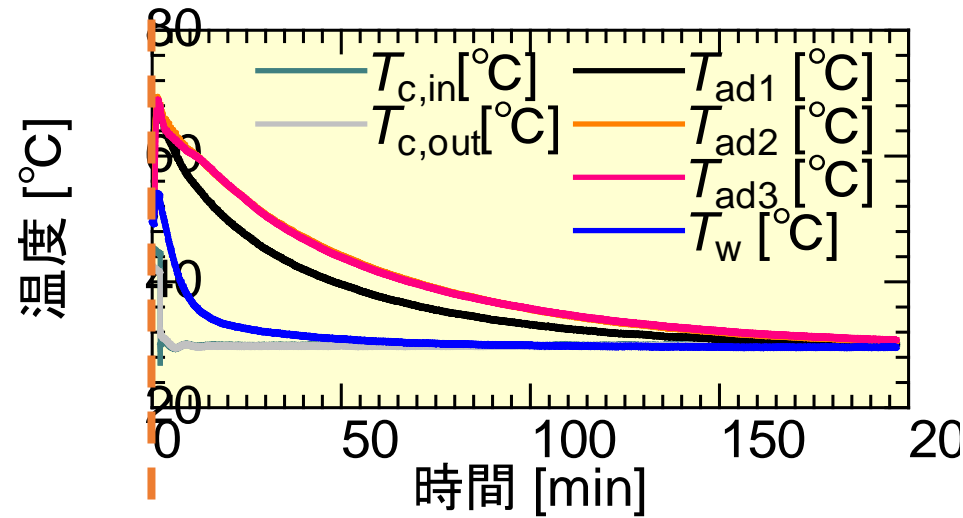
実験条件

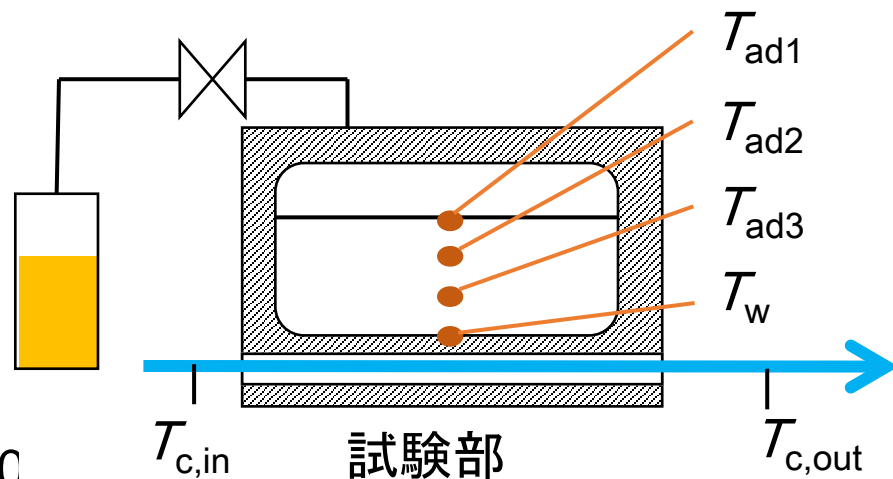
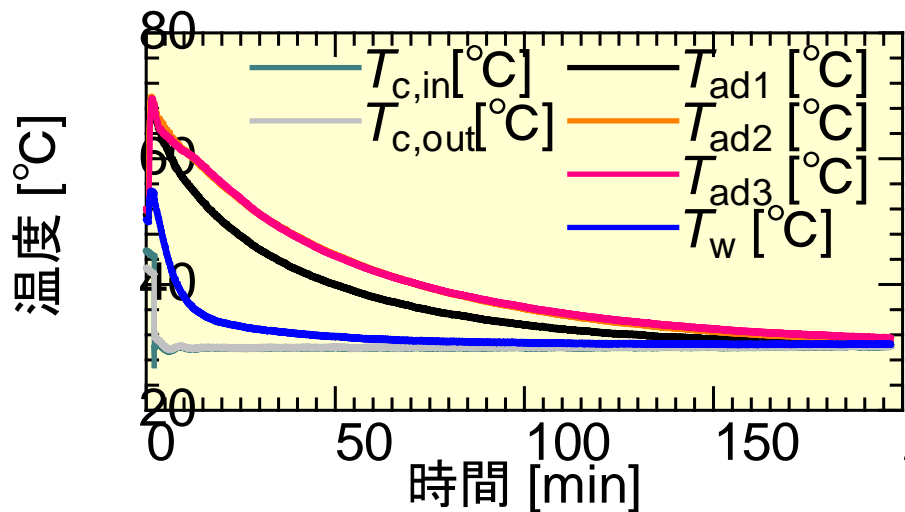
吸着材温度: T	21.47 °C
雰囲気気圧力: P	4.095 kPa
吸着材かさ密度: ρ_{ads}	260 kg/m ³

過去の文献での
平衡吸着量 $\rho_r t_r$ [g/cm²]

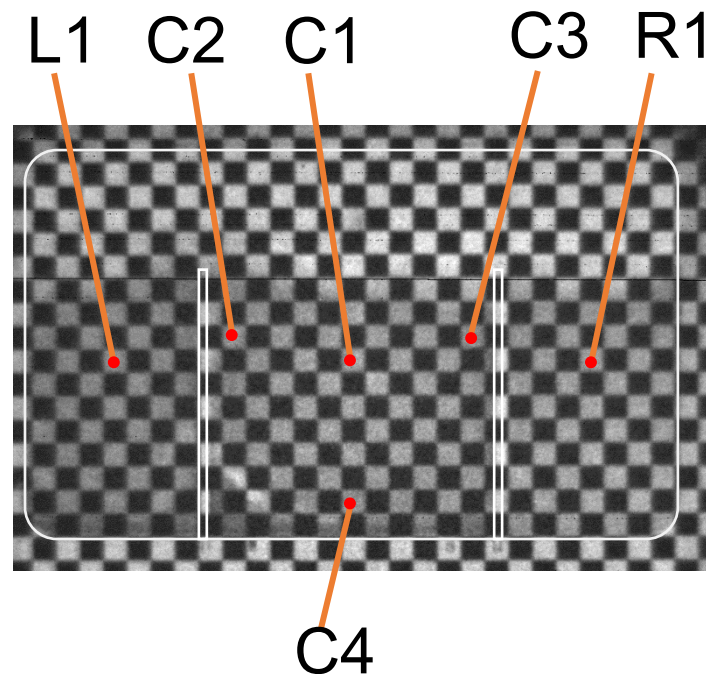
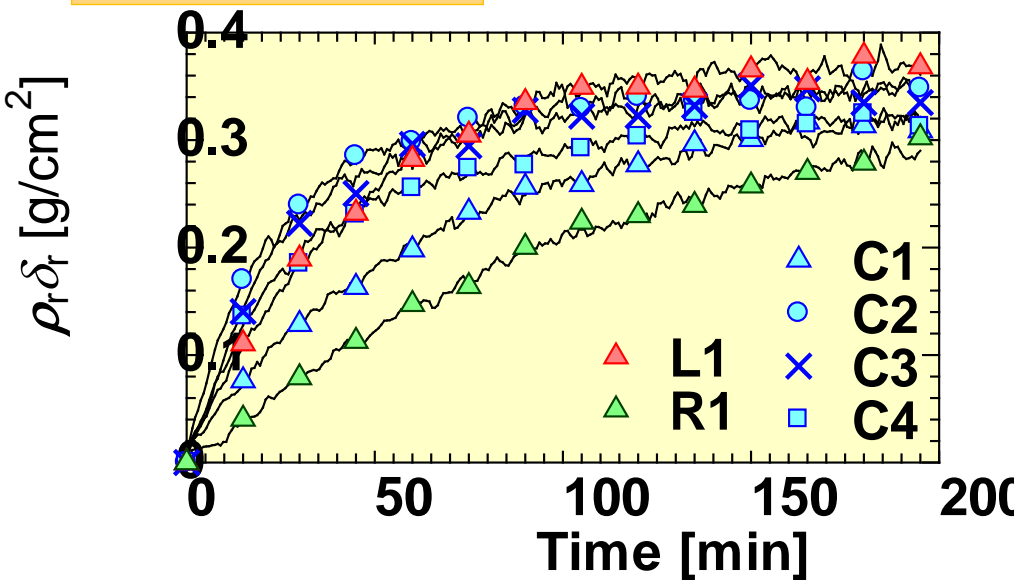


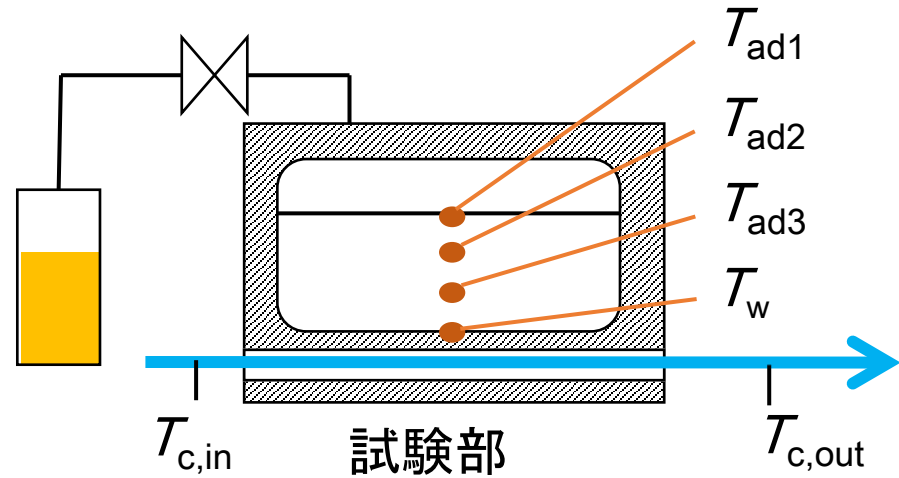
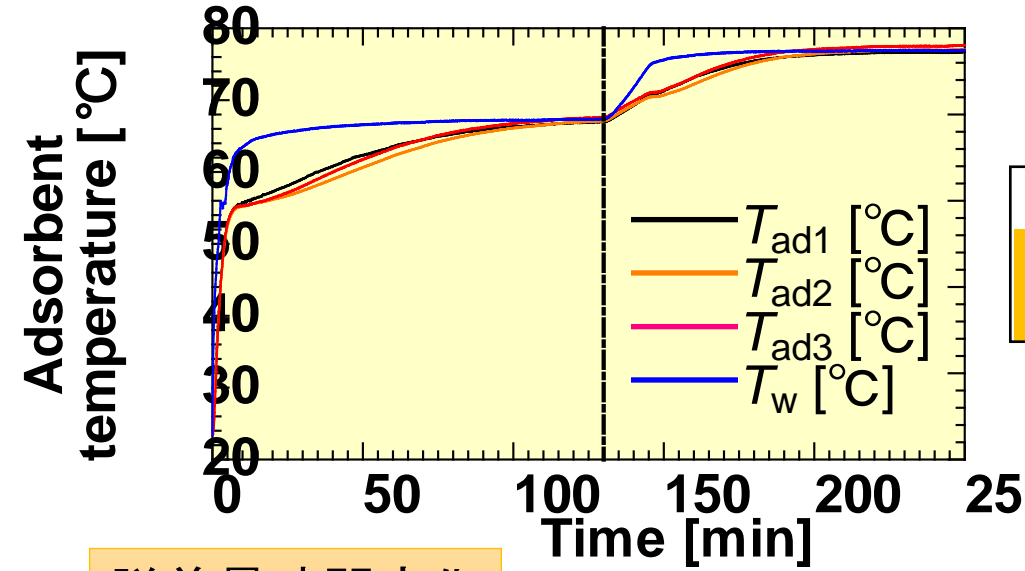
※I.I. El-Sharkawy et al. , Experimental investigation on activated carbon-ethanol pair for solar powered adsorption cooling applications, International Journal of Refrigeration, 31(8), pp.1407-1413 (2008)



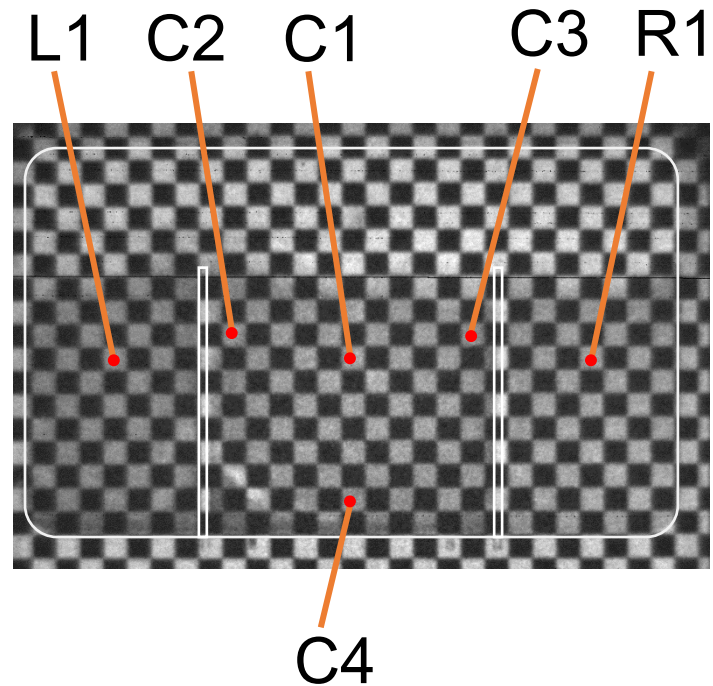
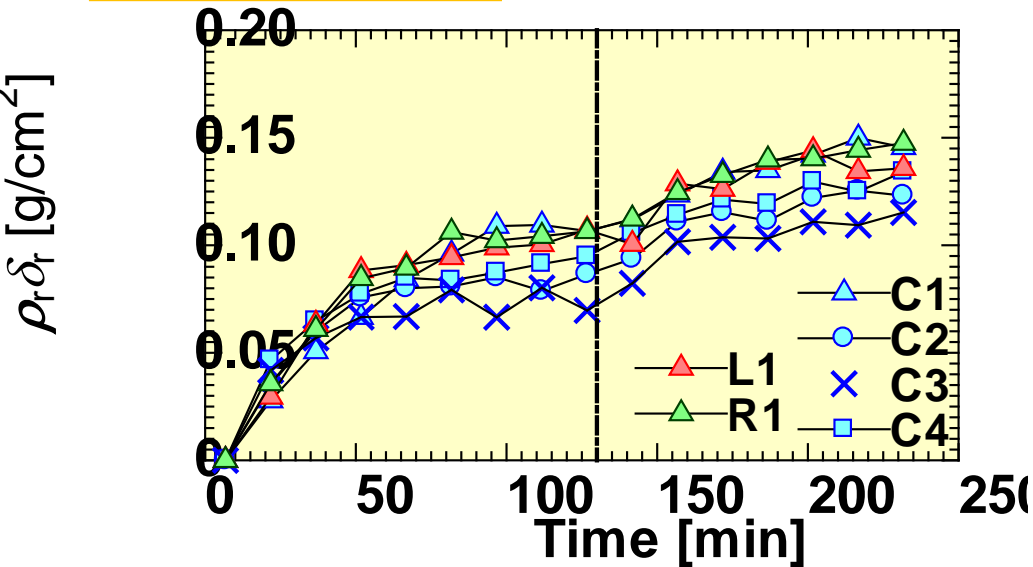


吸着量時間変化





脱着量時間変化



中性子ラジオグラフィ

実機と同じ素材, 同じ構造内の作動流体の機器動作時の状態を
可視化・計測 できる唯一の技術

機械のレントゲン

- 動作診断
 機器構造の機能, 冷媒偏流,
 PEFC のGDL, MCPの構造
- 動作メカニズムの解明
 自励振動ヒートパイプの液の動き

作動流体の存在量の定量計測

- 気液二相流のボイド率
- 吸着量
- 湿分分布



現象のモデリング
 数値解析のベンチマーク

中性子線源
 撮像システム(視野, カメラ)
 照射室環境

時間分解能
 空間分解能
 ダイナミックレンジ

可視化対象の設定
 大きさ, 素材
 評価項目

