

中性子ラジオグラフィによる エネルギー機器の診断

神戸大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

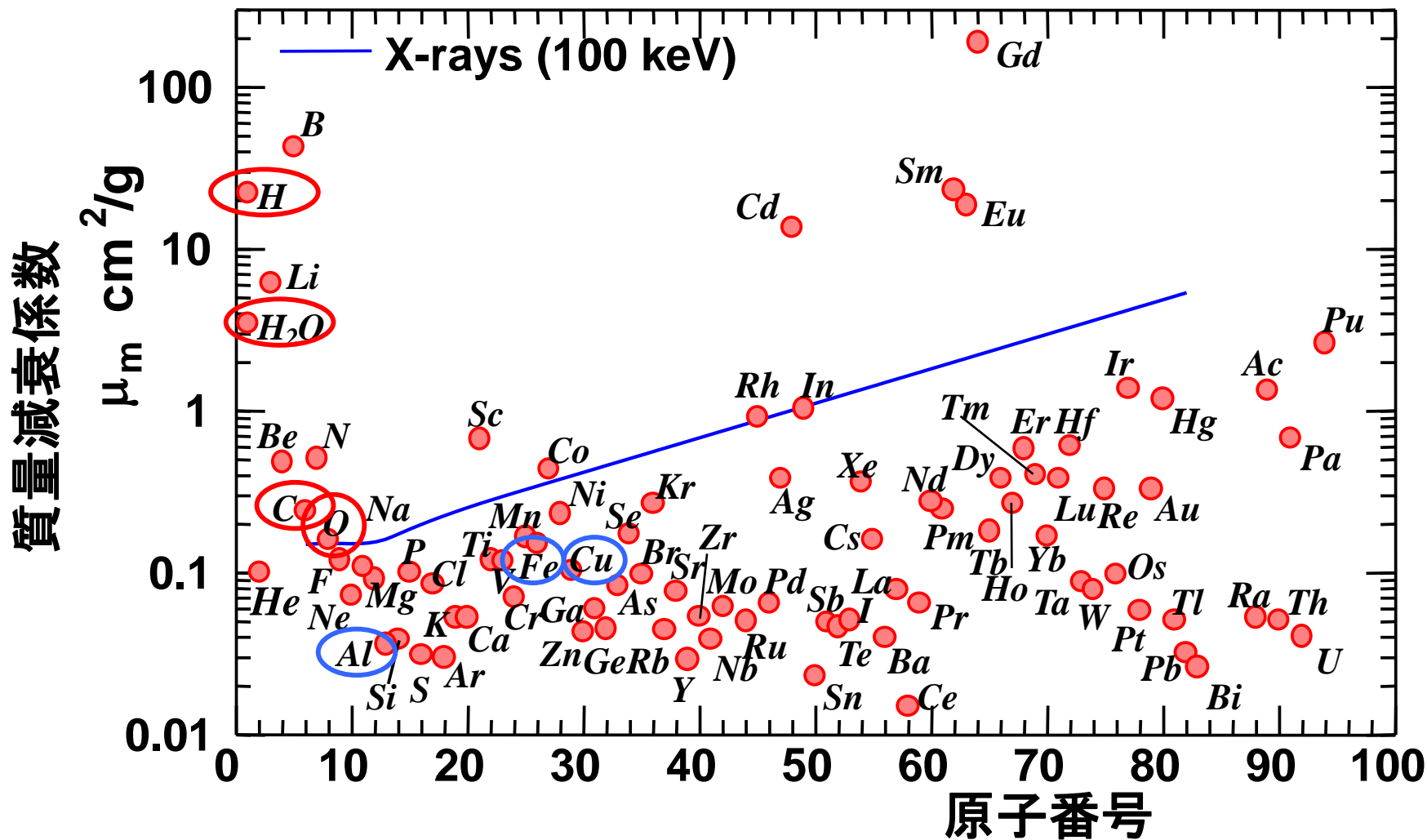
浅野 等, 村川 英樹, 杉本 勝美

中性子ラジオグラフィ

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot t) \quad \mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

ρ 密度 [g/cm³]
 μ 減衰係数 [1/cm]
 t 照射方向の物体の厚さ [cm]

● 熱中性子



エネルギー機器は金属で構成されている場合が多く、エネルギー輸送に流体が使用される場合、その性能は流動挙動、構造だけでなく構成素材の影響を強く受ける。

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

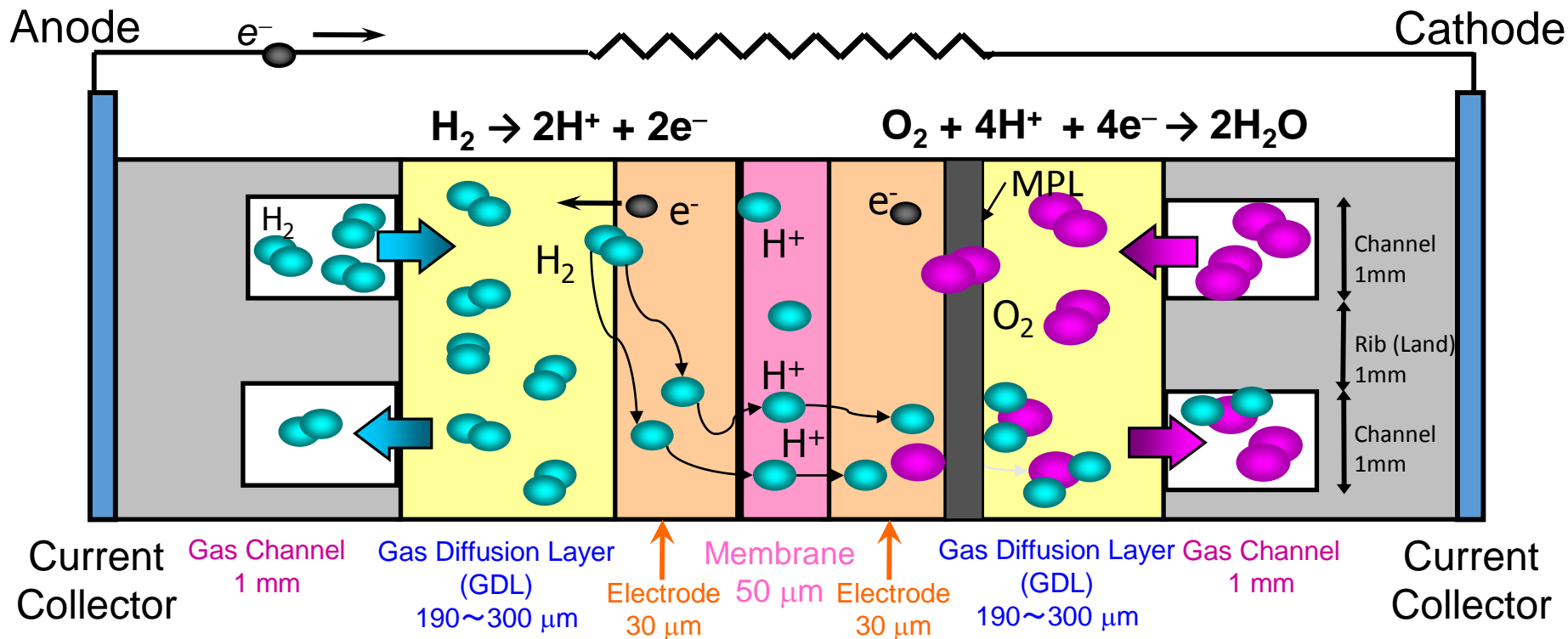
- ヒートパイプ –起動特性と動作原理, 不具合事象の解明
- 宇宙機器用コールドプレート –動作特性, 不具合事象の解明
- スパイラルチューブ –内部の流動構造, ボイド率分布

□ 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-水吸着器 –シリカゲル粒子層内湿分分布, 粒子層バインダーの影響
- 活性炭-エタノール吸着器 –活性炭層内吸着量分布, 粒子層内フィンの影響



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。

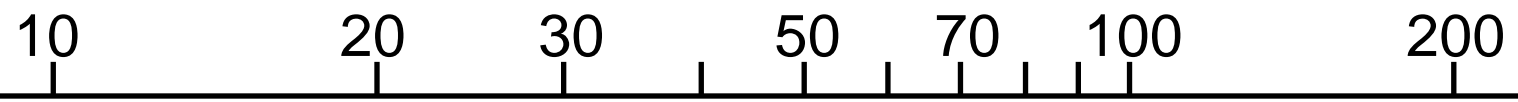
カソードでは電池反応でH₂Oが生成されるため過飽和となり、結露する。

→ **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]



小型電池

単セル

MEA内水輸送
過渡変化を計測
空間分解能
10 μm

MEA, GLD内
膜厚方向2次元,
3次元分布の計測
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

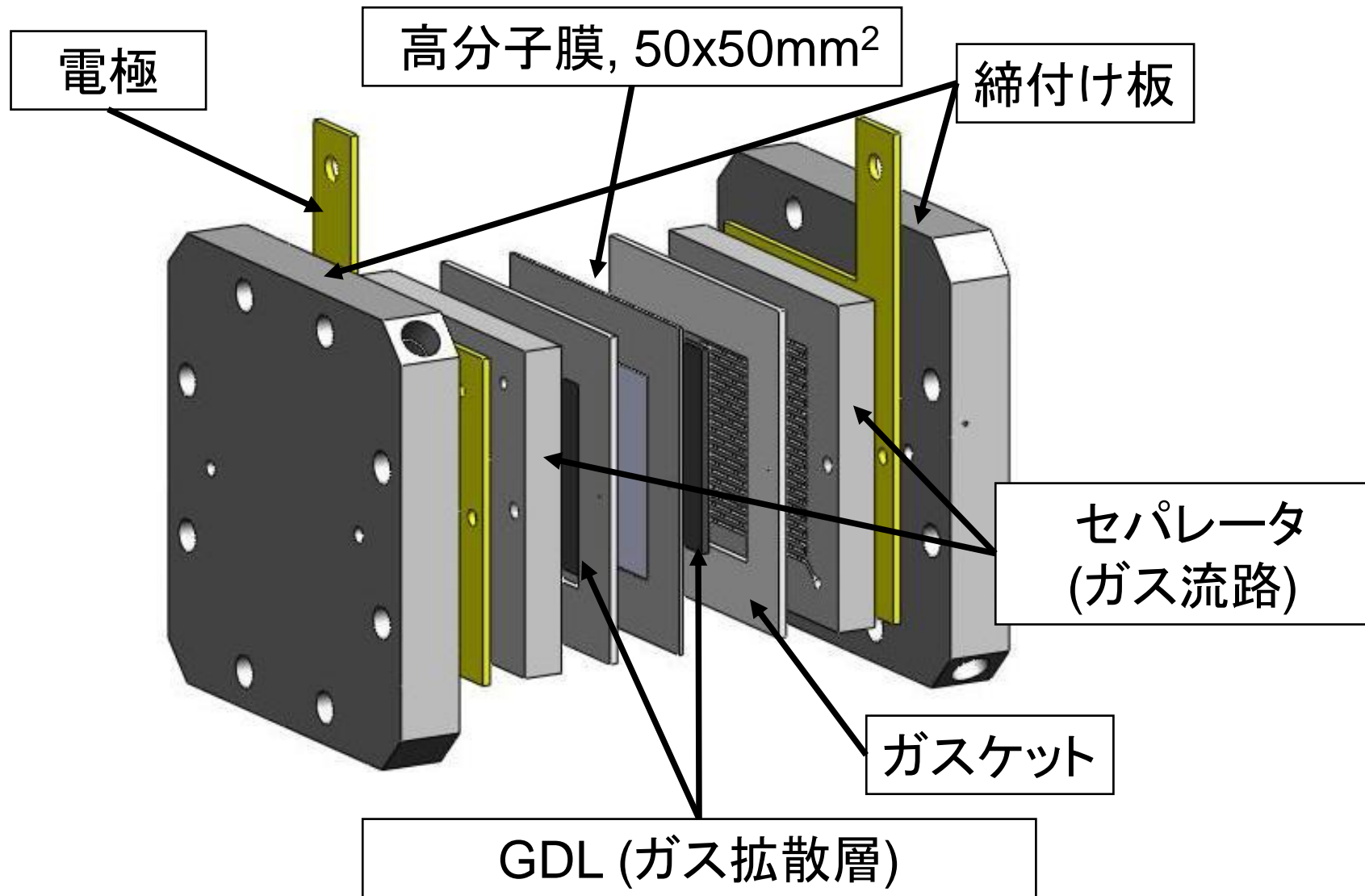
実機
(A4サイズ)

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



JAEA, 東京都市大学との共同研究

中性子源

日本原子力研究開発機構
研究用原子炉JRR-3

可視化用3セルスタック電池

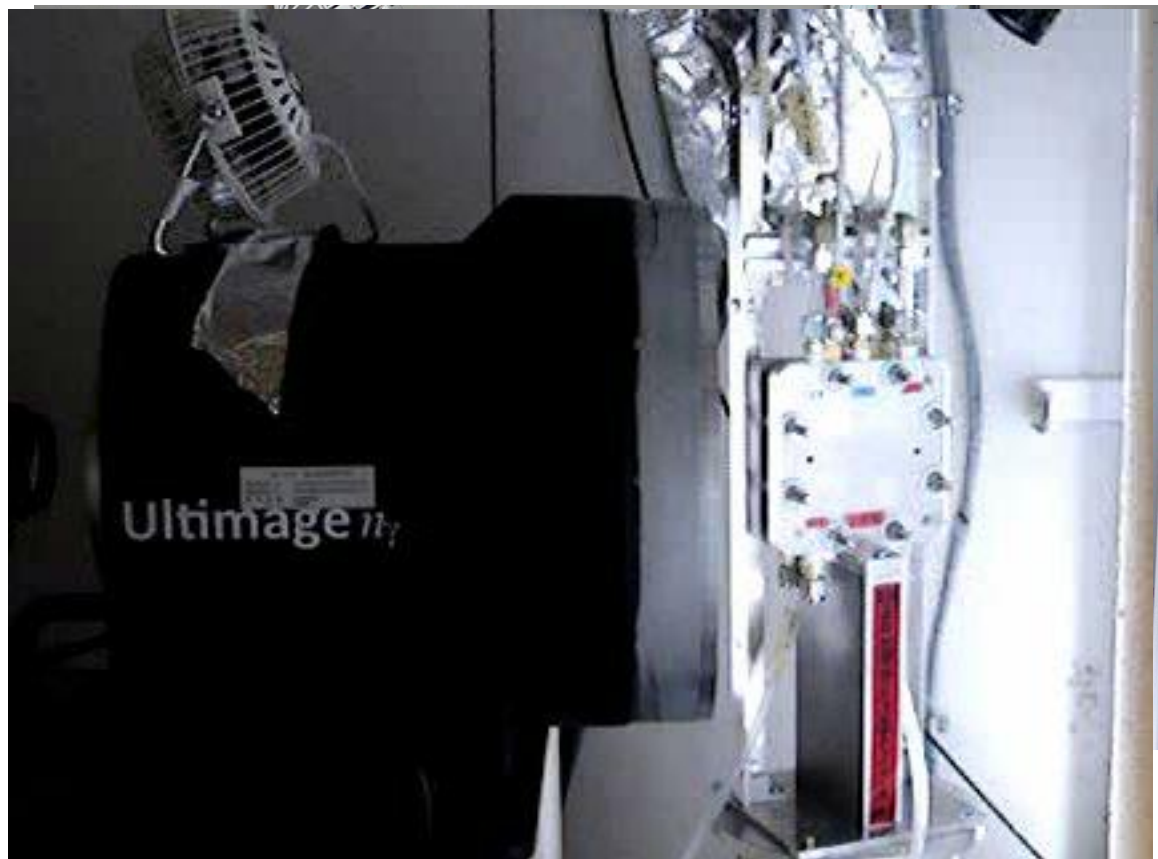
JARI(日本自動車研究所)
標準スタックに準拠

高速度カメラ

センサタイプ:C-MOS
画素数:1280×1024
輝度諧調:8 bit

高速データ転送システム

データ転送速度
:262 MB/ sec



- ・1秒間に1回のCT計測を実現
- ・2.6秒毎に1時間以上の連続計測が可能
(1秒/CT, 100 fpsの場合)

村川英樹 他, 日本機械学会論文集 B編、77巻、784号、pp. 2255-2262(2011)

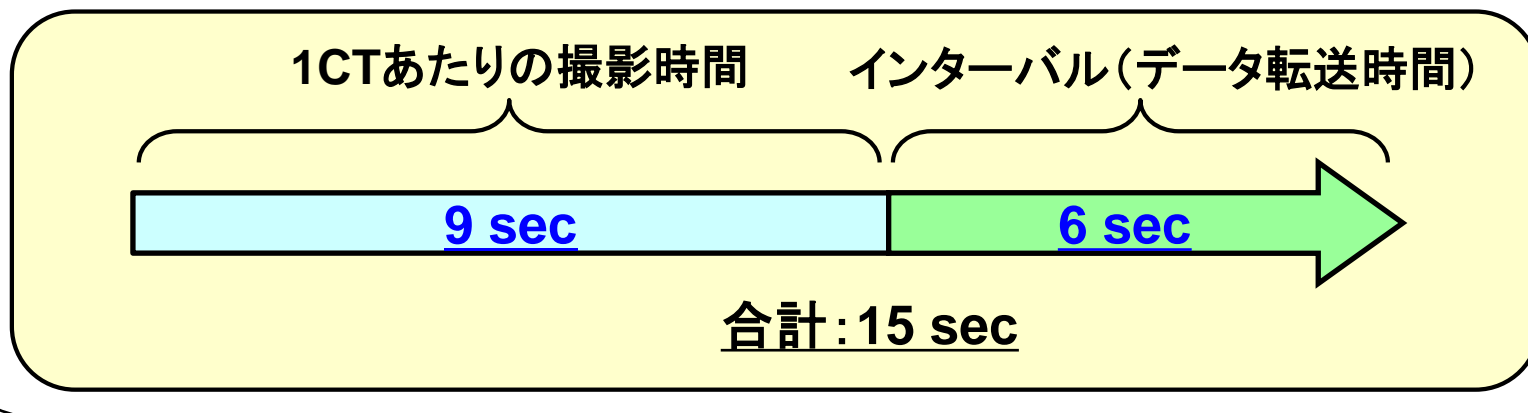
N. Takenaka, et al., Nuclear Instruments. and Methods in Physics Research A, Vol. 651, No. 1-21,
pp. 277-281 (2011)

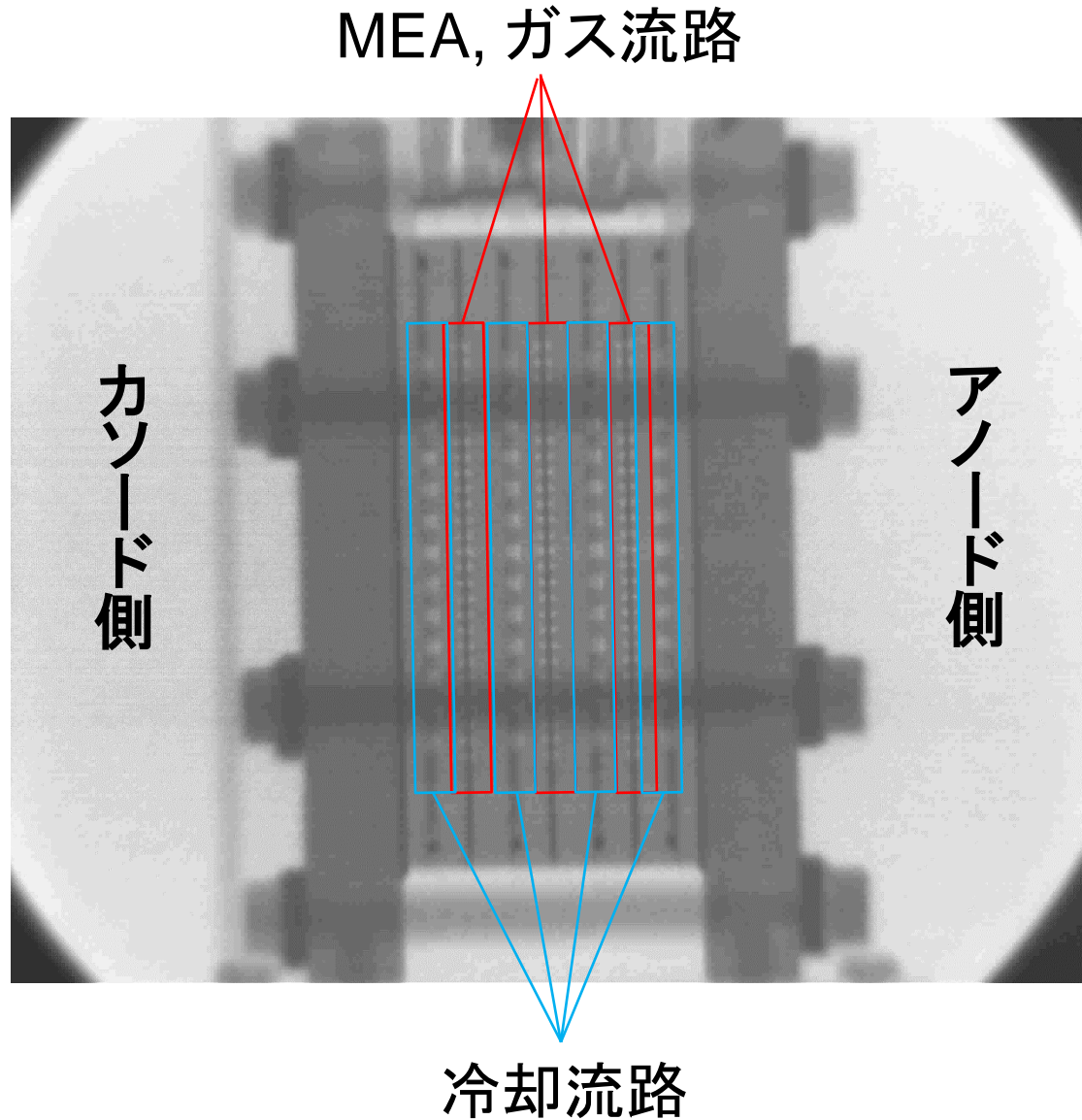
発電条件

- ・ 可視化用3セルスタック
- ・ 流路形状: 単一蛇行流路
- ・ 水素流量 : 209 cc/min
- ・ 空気流量 : 622 cc/min
- ・ 電池温度 : 常温

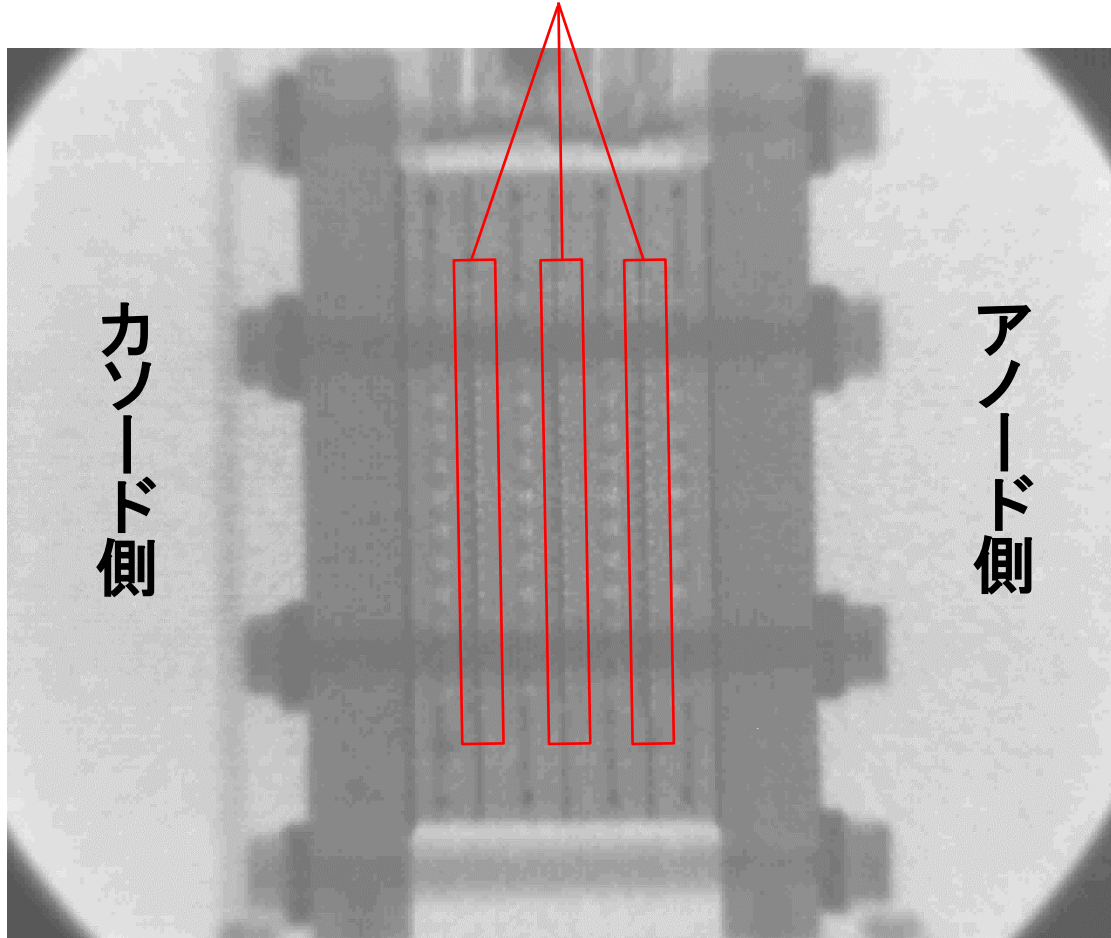
CT撮影条件

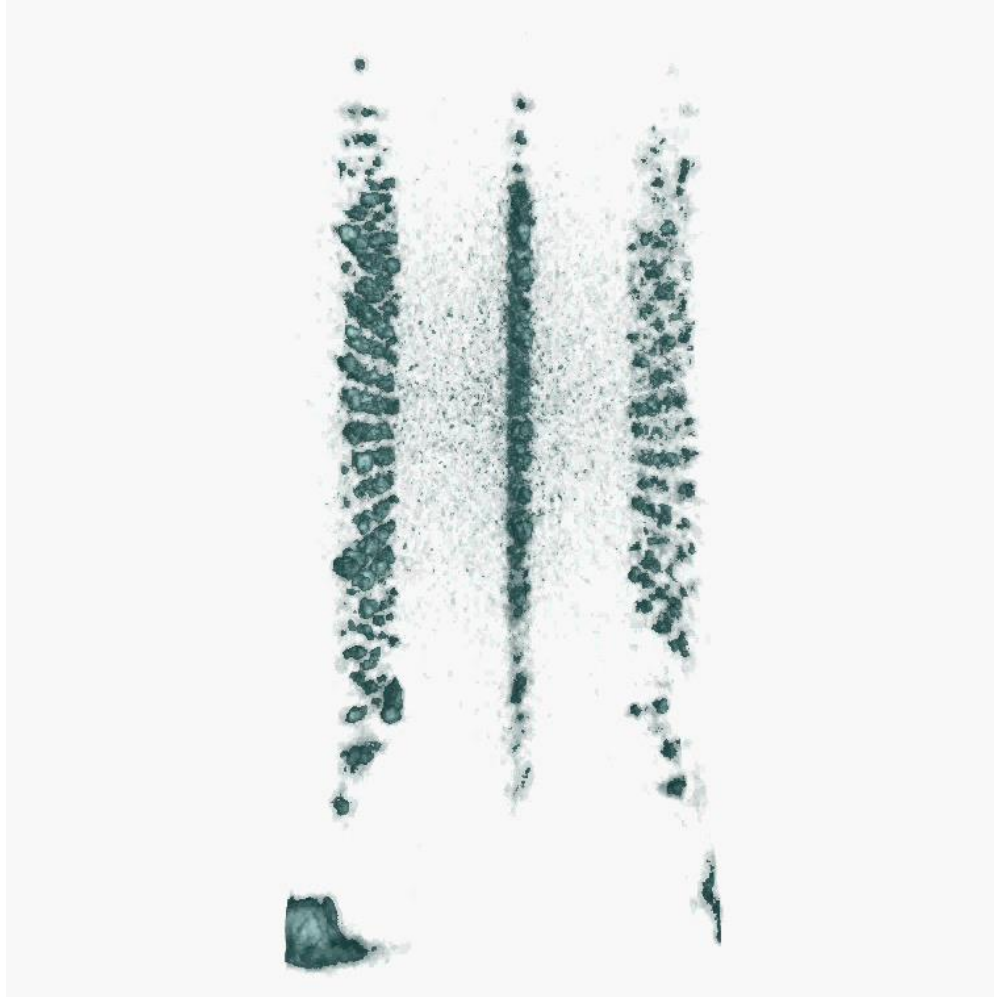
- ・ 1CTあたりの撮影時間 : 9 sec
 - ・ フレームレート : 50 fps
 - ・ 画素寸法 : 107 μm
- ※15 秒間隔で連続CT撮影

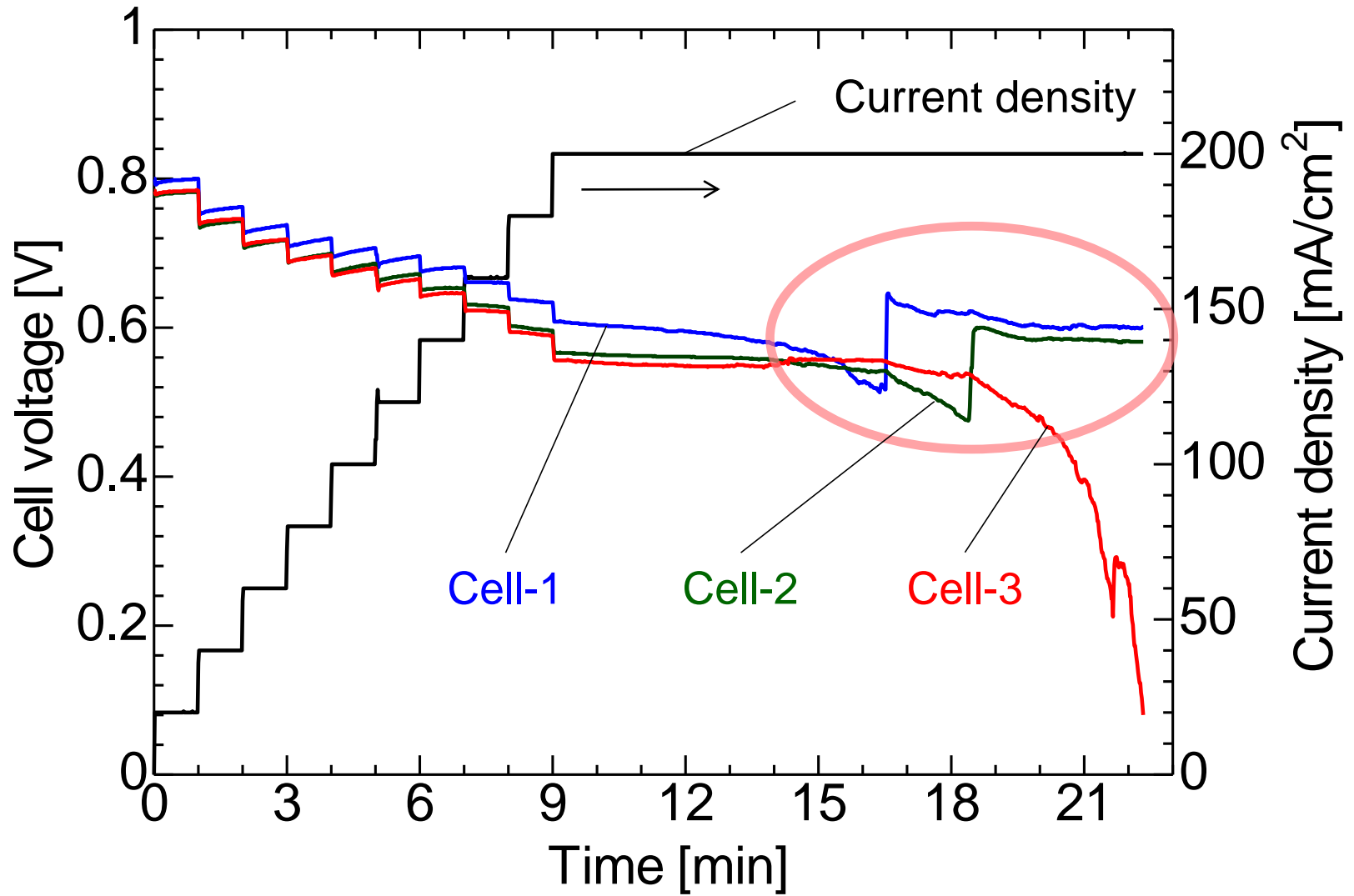


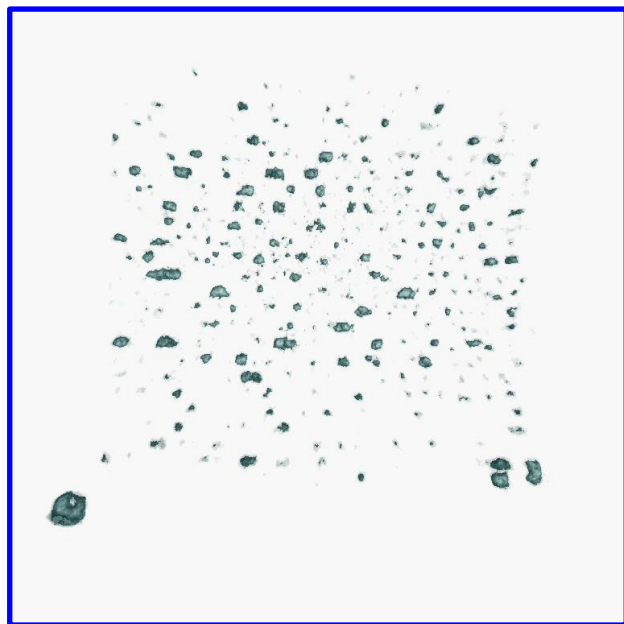
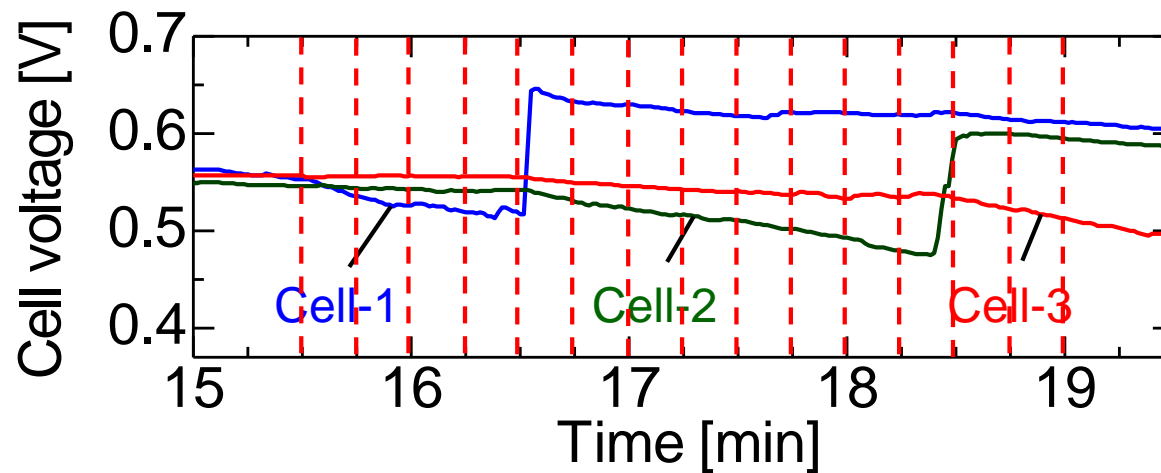


MEA, ガス流路

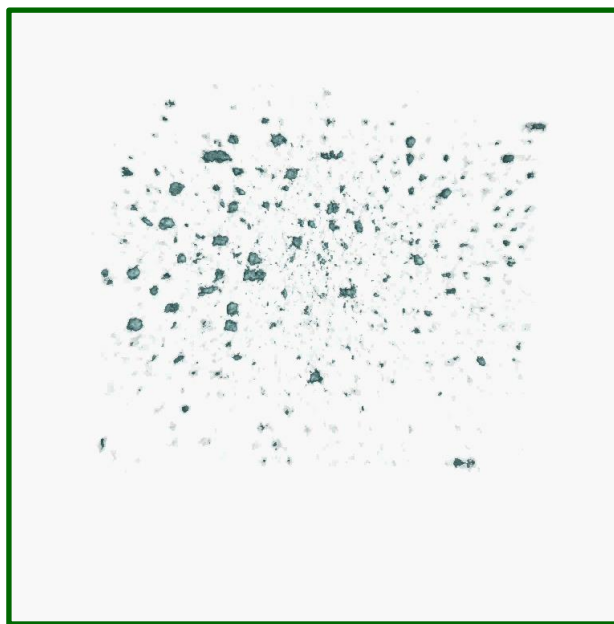




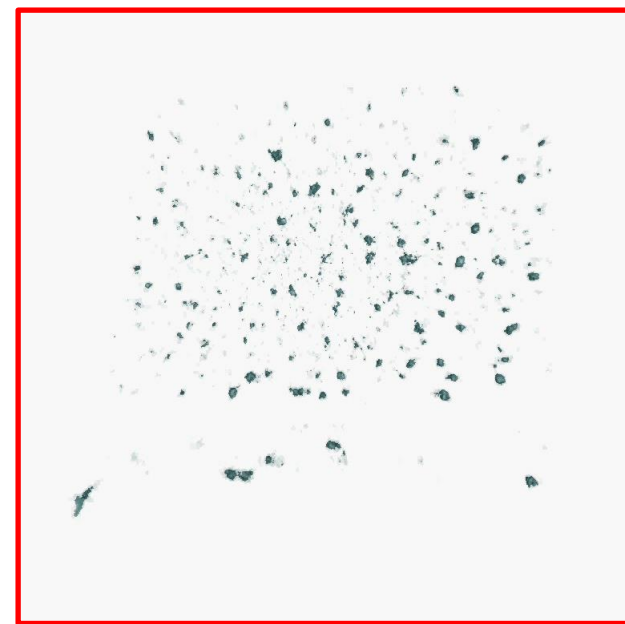




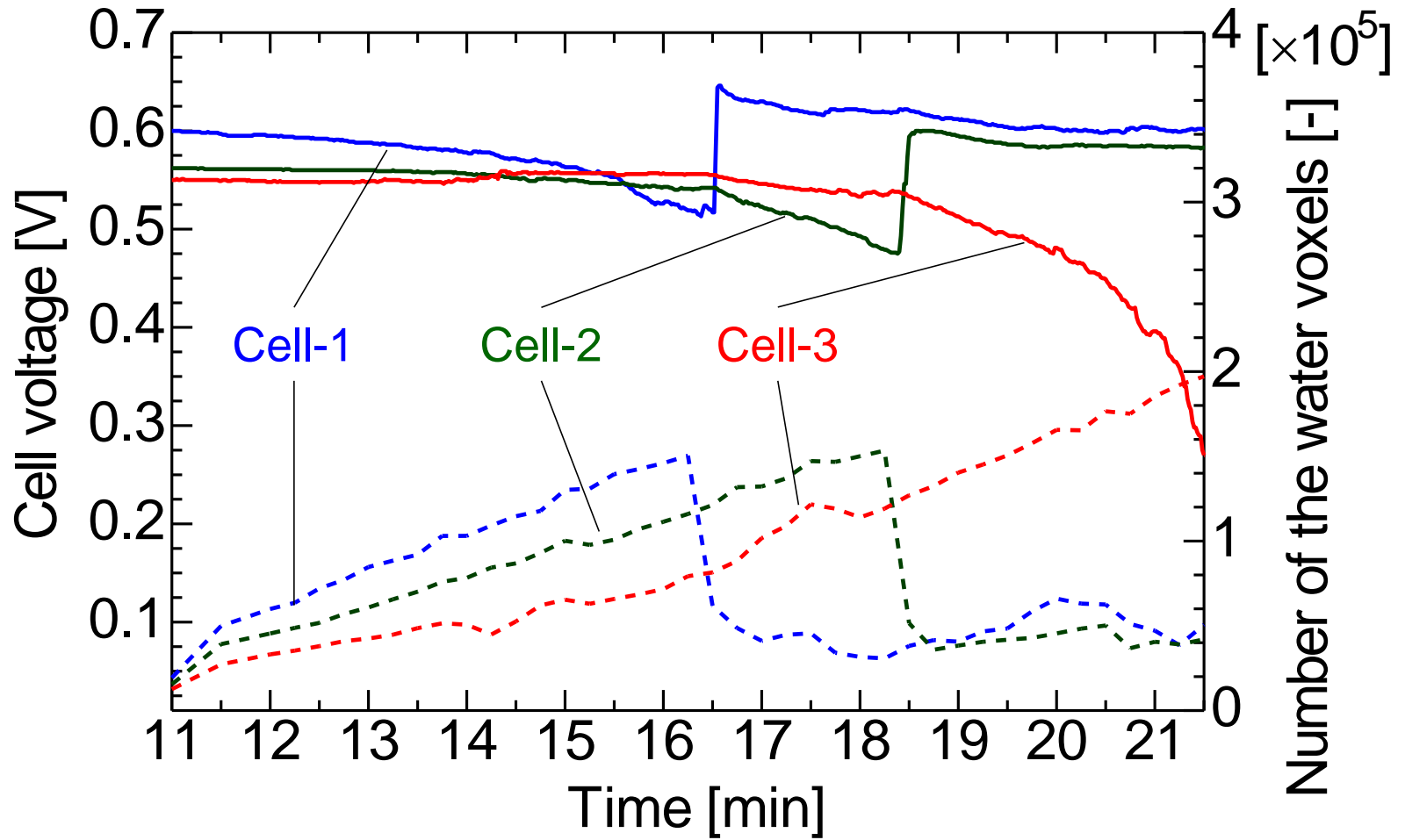
Cell-1



Cell-2

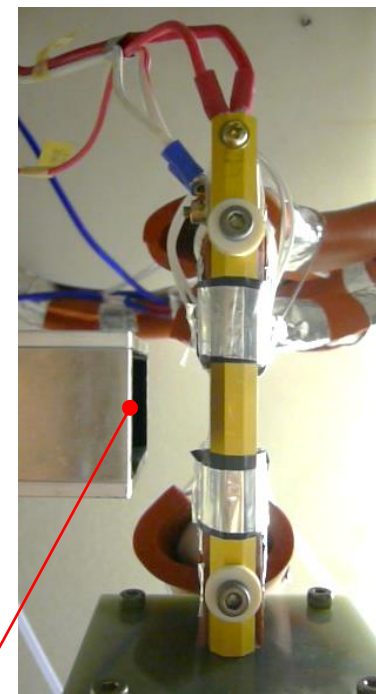
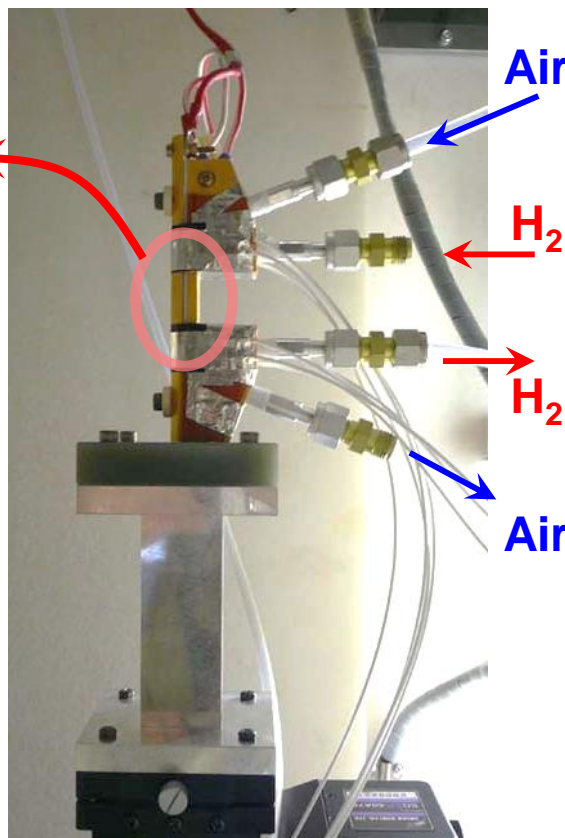
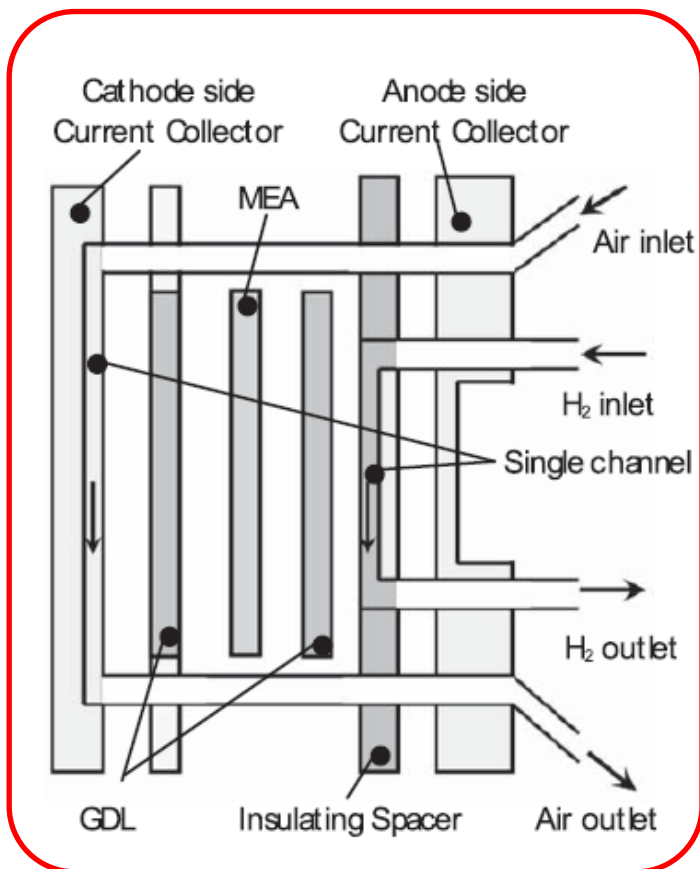


Cell-3



垂直単流路周りの液水分布の可視化

JAEA, 自動車部品総合研究所(現 SOKEN)との共同研究



Scintillation converter

中性子源

- JAEA JRR-3

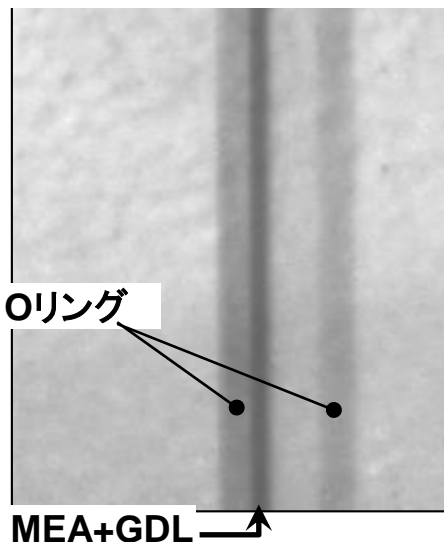
撮像系

- 冷却型CCDカメラ
- 画素数: 1024 × 1024
- 輝度諧調: 16 bit
- 画素寸法: 12 μm
- 露光時間: 15 秒

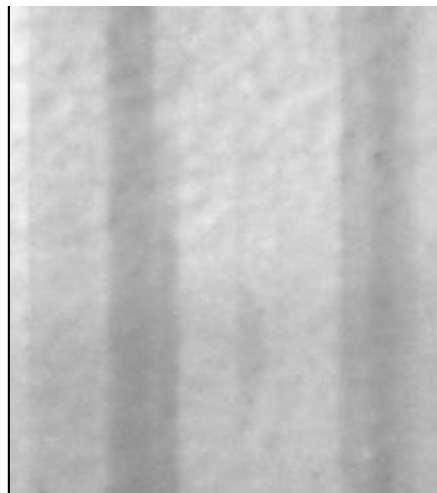
発電条件

- 水素流量: 20 cc/min
- 空気流量: 30 cc/min
- 電流密度: 245 mA/cm³

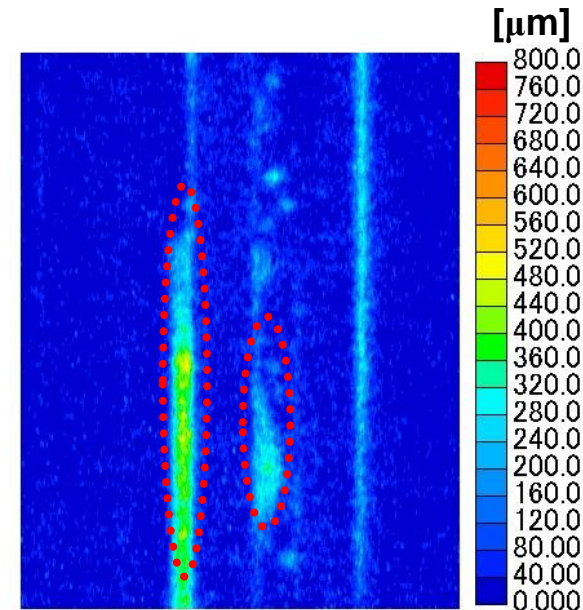
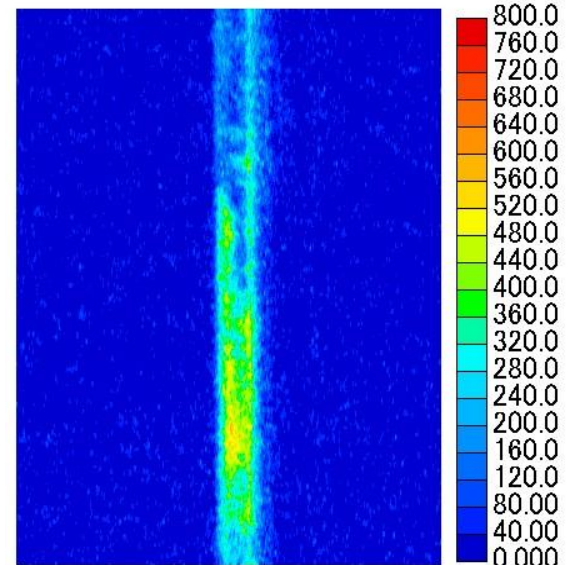
原画像
MEAに水平方向に照射

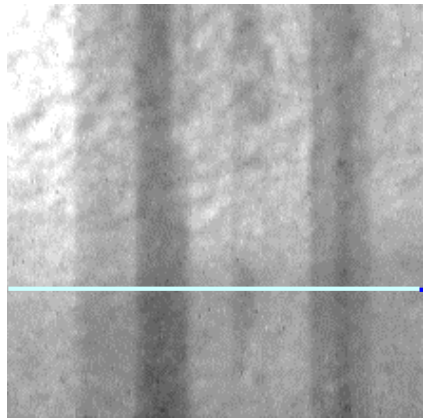


MEAに水平方向に照射



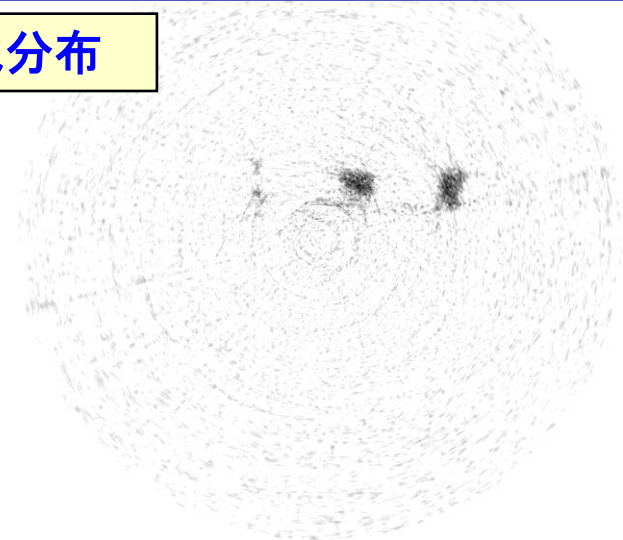
液水厚さ [μm]





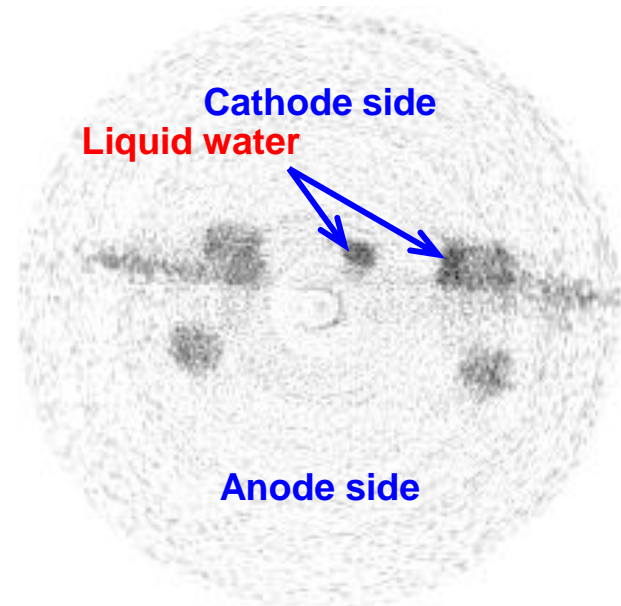
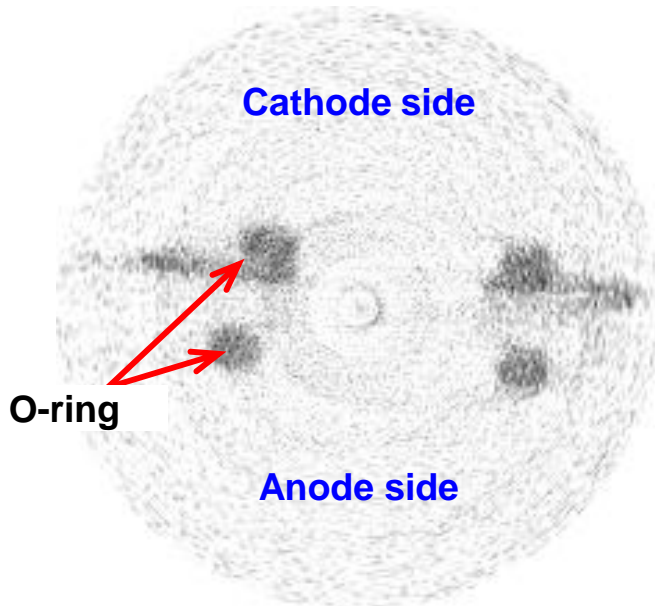
→CT再構成

液水分布

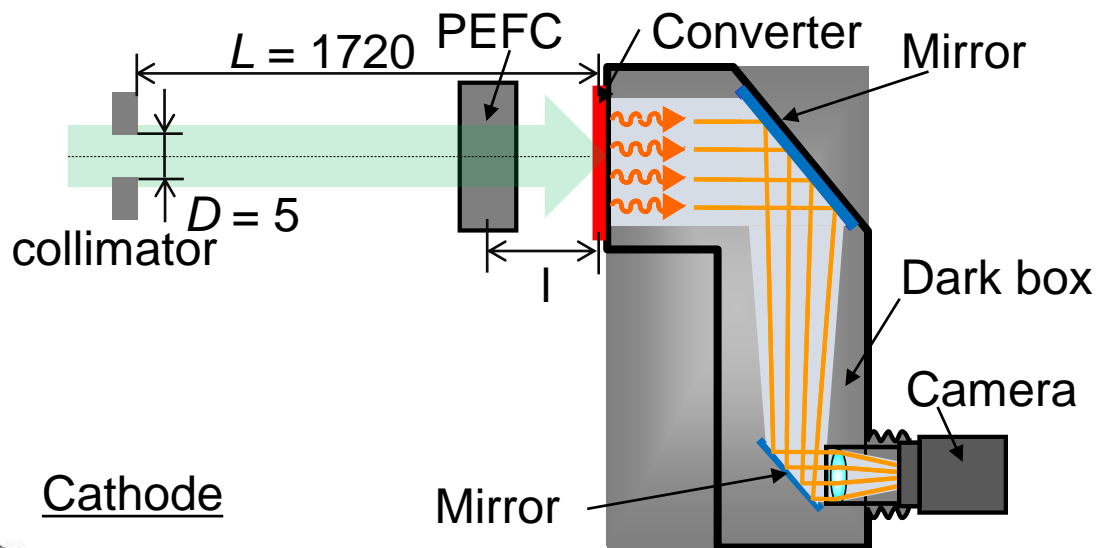


発電運転前

発電運転後

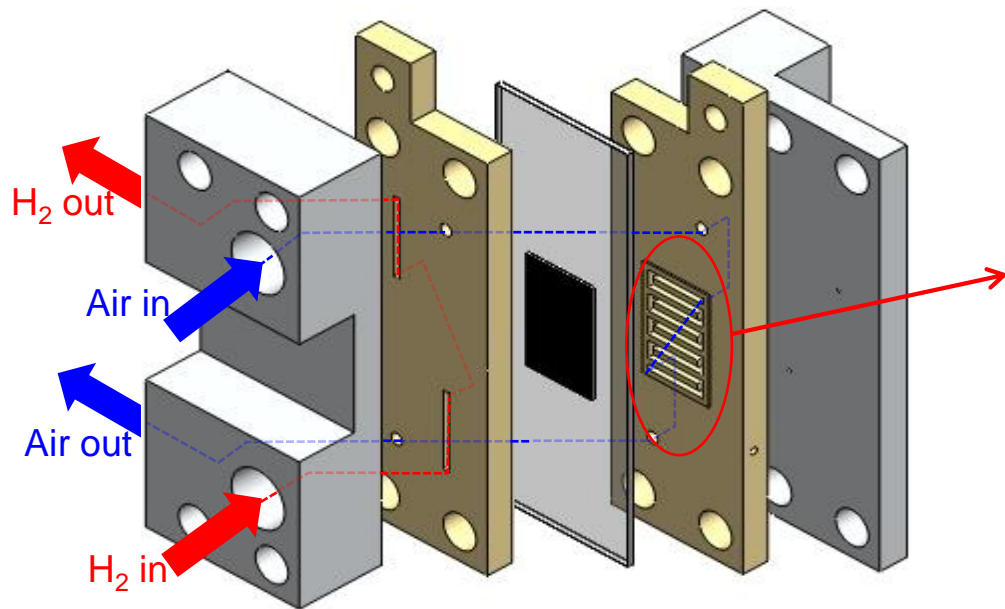


中性子源: B4-port in KUR
露光時間: 60 sec
画素寸法: $8.8 \mu\text{m}$
 $L/D = 344$



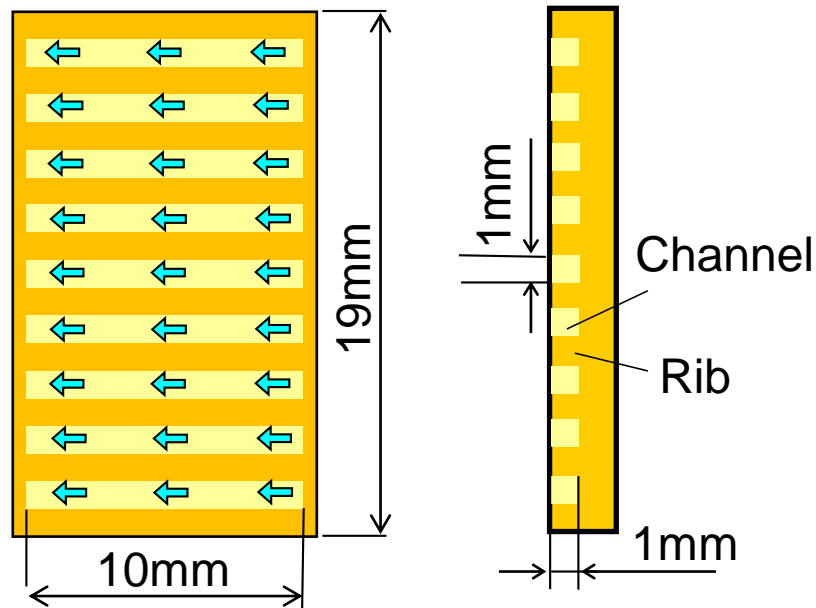
Anode

Cathode

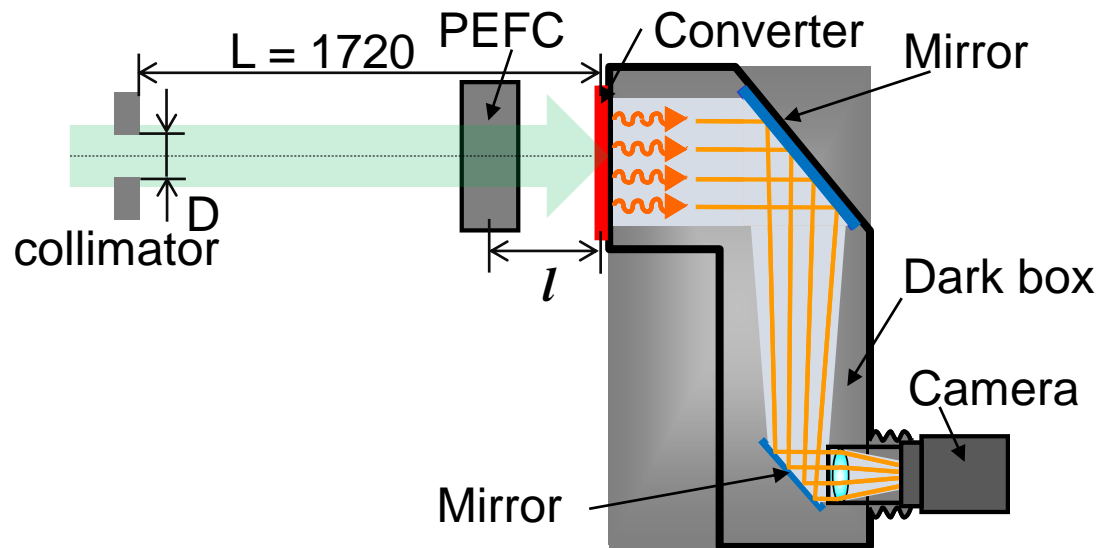


PEFC

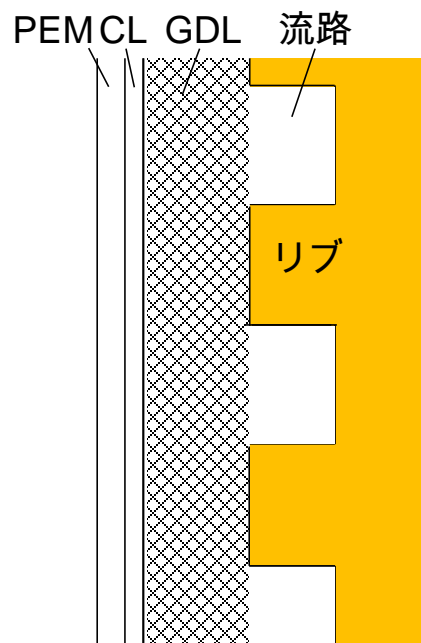
9-parallel channel



中性子源: B4-port in KUR
露光時間: 60 sec
画素寸法: $8.8 \mu\text{m}$

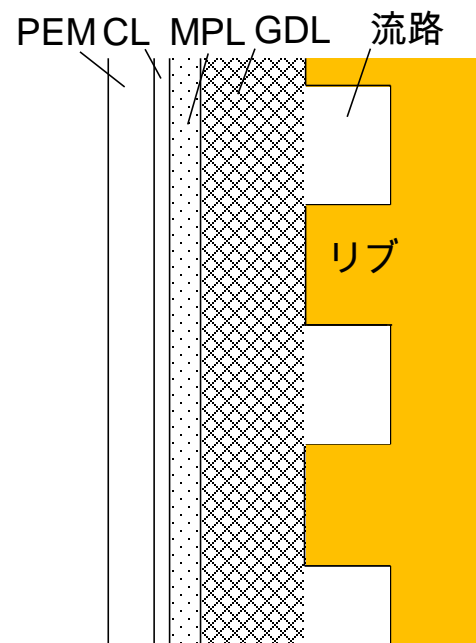


Without MPL



厚さ
PEM + CL : $90 \mu\text{m}$
GDL : $190 \mu\text{m}$

With MPL



厚さ
PEM + CL : $90 \mu\text{m}$
MPL : 約 $50 \mu\text{m}$
GDL : $190 \mu\text{m}$

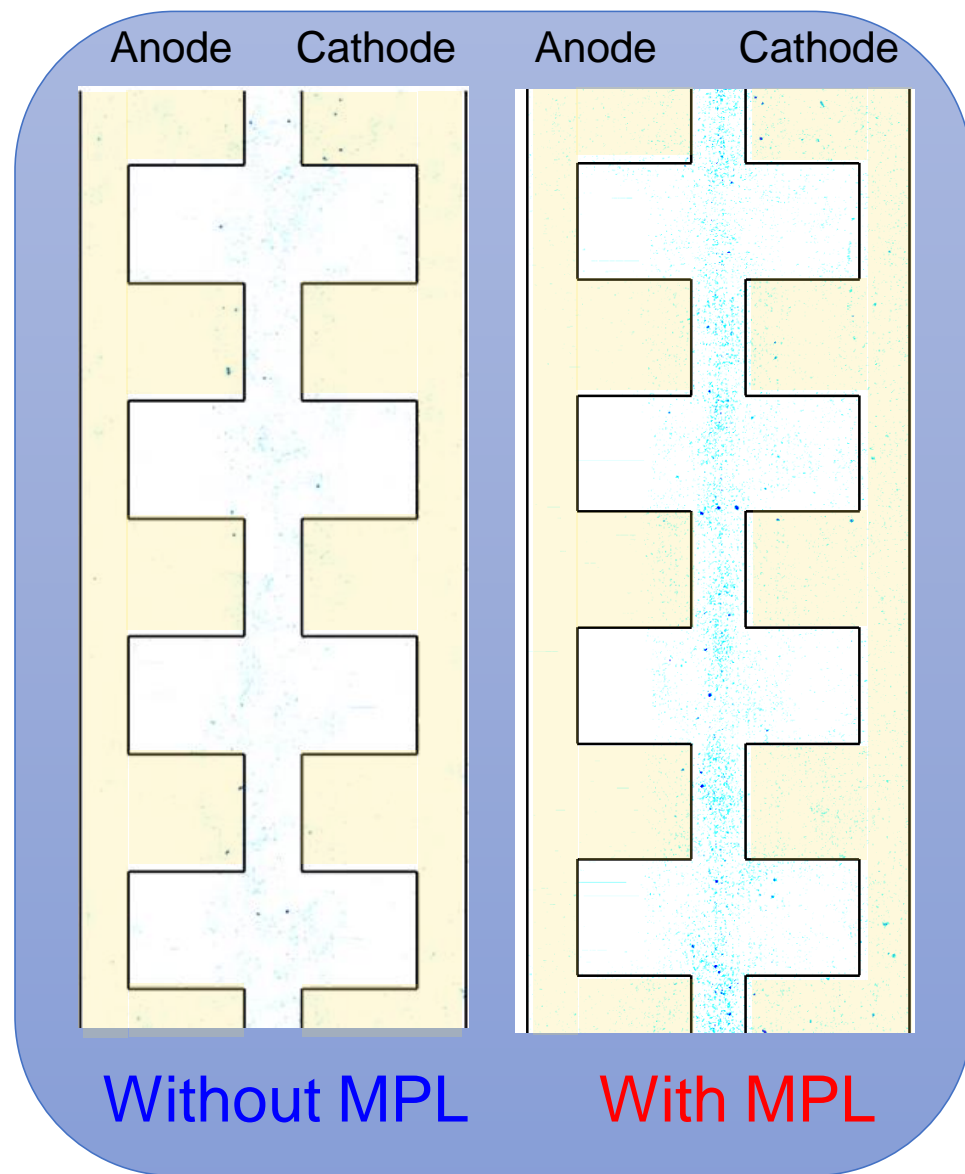
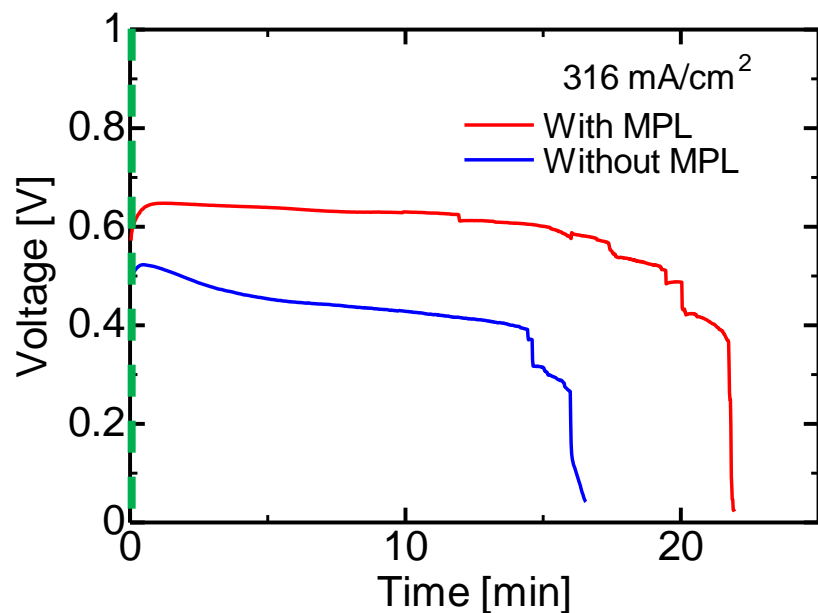
実験条件

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



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

