

J-PARCのイメージング装置RADENの現状

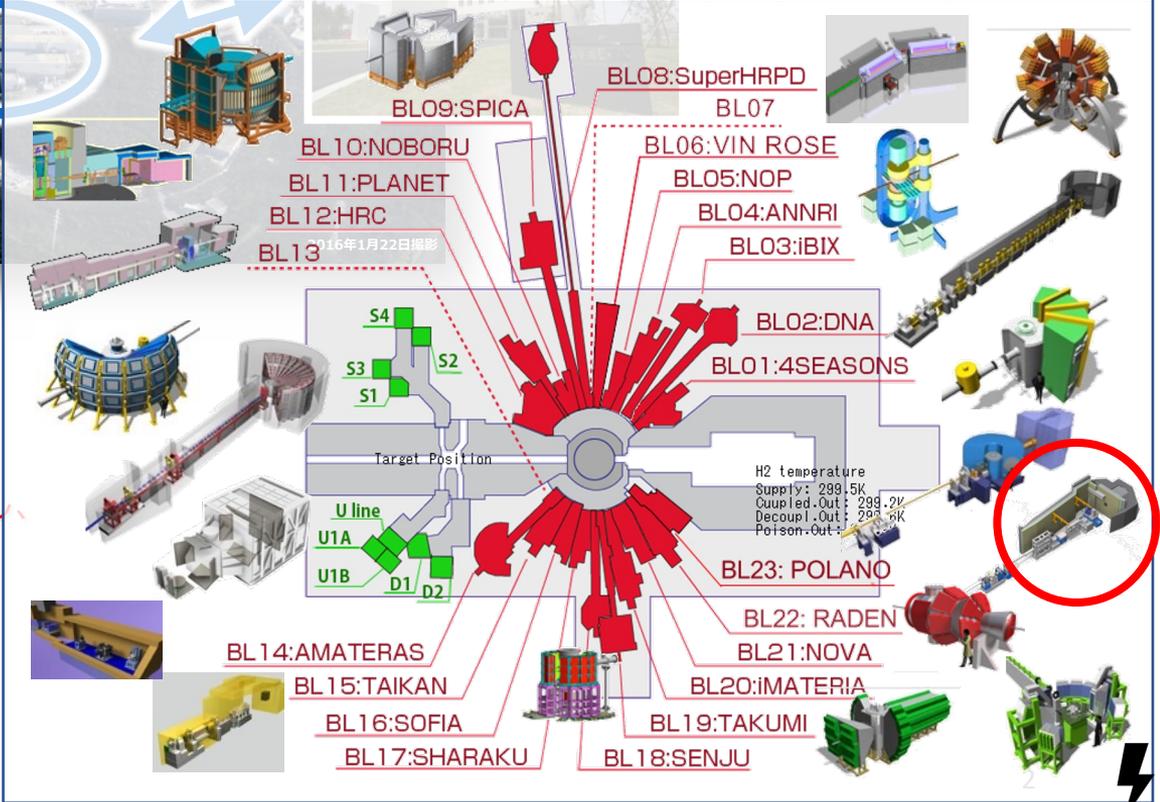
日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター
篠原 武尚

takenao.shinohara@j-parc.jp

中性子科学・ミュオン科学を支える国内最大規模の実験施設



30 May, '08: First Neutron Beam Operation
 beam power: 720kW
 (Designed beam power : 1MW)



J-PARC :
 3つの加速器と4つの研究施設からなる
 複合科学研究施設

物質・生命科学実験施設 (MLF) :
 3GeVの陽子ビームを水銀標的に入射し、
 核破砕反応により大強度パルス中性子
 を発生し、中性子科学研究に利用

23本の中性子ビームライン
 4本のミュオンビーム孔

パルス中性子イメージング専用ビームライン

エネルギー分析型中性子イメージング装置

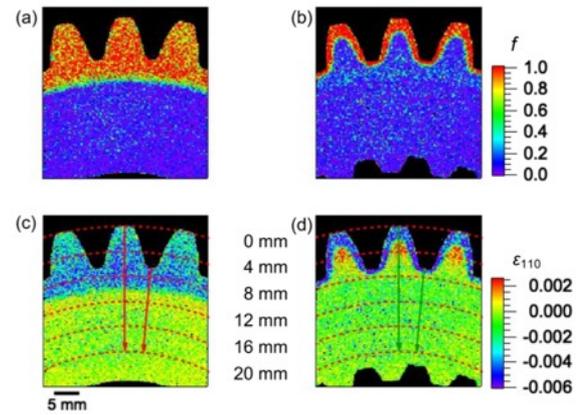
パルス中性子の特徴を活かした新しいイメージング技術の実用化
 → 原子核種情報・結晶組織情報・温度情報・磁場情報を可視化

高性能中性子ラジオグラフィ/トモグラフィ装置

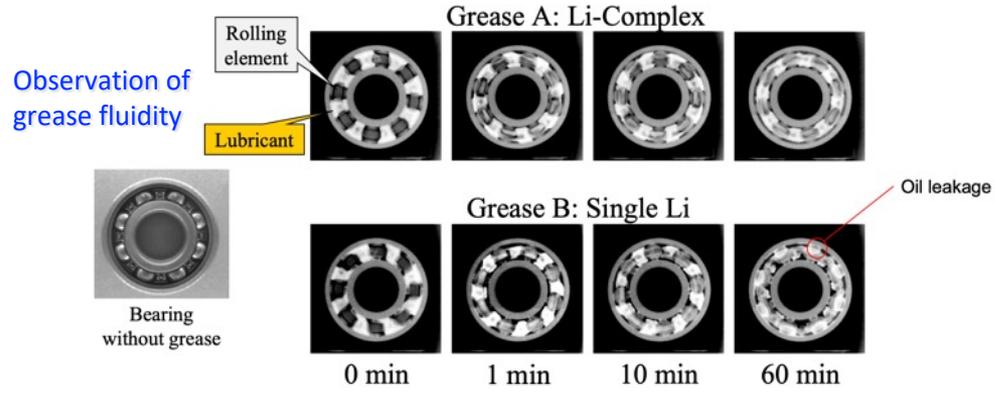
大画角 (<30cm²) から高空間分解能 (~10 μ m) 撮像まで、
 大型試料、特殊試料環境、その場観察の実験環境を提供

新しいイメージング手法・デバイスの開発環境

イメージング用検出器開発・評価
 イメージング手法のテスト、デモンストレーション



Bragg edge imaging study of induction hardened gears Sci. Rep. 11, 4155 (2021)



Tribology Online, Vol. 16, No. 2 (2021) /147

RADENの変遷

- 2008年 -- J-PARC運転開始・初中性子ビーム BL10での技術開発装置設計
- 2010年 - 2011年 -- 東日本大震災
- 2012年- 2013年 -- ハドロン事故
- 2014年11月 中性子ビーム受け入れ
- 2015年4月 ユーザー利用開始
- 2020年9月 中間評価合格

追加機能・設備

- ✓ ToF 3次元偏極度解析装置
 - 磁場イメージング
- ✓ Talbot-Lau 干渉計 ☹️
 - 位相コントラストイメージング
 - 暗視野イメージング


 Large sample stage
(L=23m)

 Middle sample stage
(L=18m)

- ✓ 回折検出器・ガンマ線検出器
 - 中性子回折実験
 - 即発ガンマ線分析 (PGA)
- ✓ 燃料電池試験用機器 ☹️
 - 水素ガス供給用加温配管・希釈装置・凝縮トラップ

 Optical devices:
Choppers, Collimators,
Filters, Slit...

RADENの基本性能

ビームライン: BL22

減速材: 非結合型液体水素

波長範囲
 $\lambda < 8.8 \text{ \AA} @L=18\text{m}, \lambda < 6.9 \text{ \AA} @L=23\text{m}$
波長分解能
 $\Delta\lambda/\lambda = 0.26\% @L=18\text{m}, 0.20\% @L=23\text{m}$
時間平均強度 @L=18m, L/D=180

 $1.1 \times 10^8 \text{ n/sec/cm}^2 \text{ (E<1MeV)}$
 $1.7 \times 10^7 \text{ n/sec/cm}^2 \text{ (E<0.45eV)}$
検出器

カメラ型、計数型

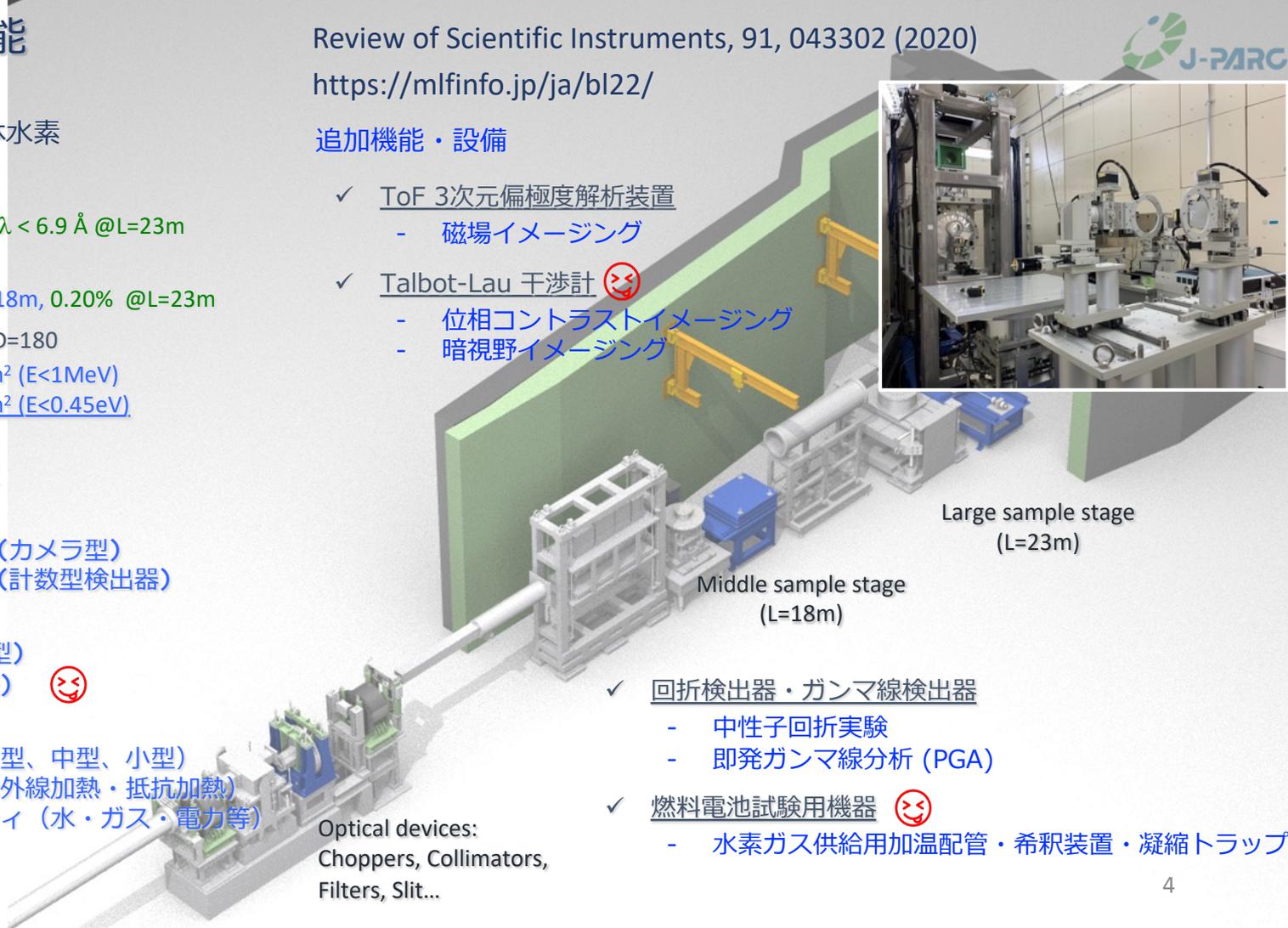
撮像視野
 $< 300 \times 300\text{mm}^2 \text{ (カメラ型)}$
 $< 100 \times 100\text{mm}^2 \text{ (計数型検出器)}$
空間分解能
 $> 10\mu\text{m} \text{ (カメラ型)}$
 $> 100\mu\text{m} \text{ (計数型)}$ ☹️

試料環境

試料ステージ (大型、中型、小型)

試料加熱装置 (赤外線加熱・抵抗加熱)

各種ユーティリティ (水・ガス・電力等)

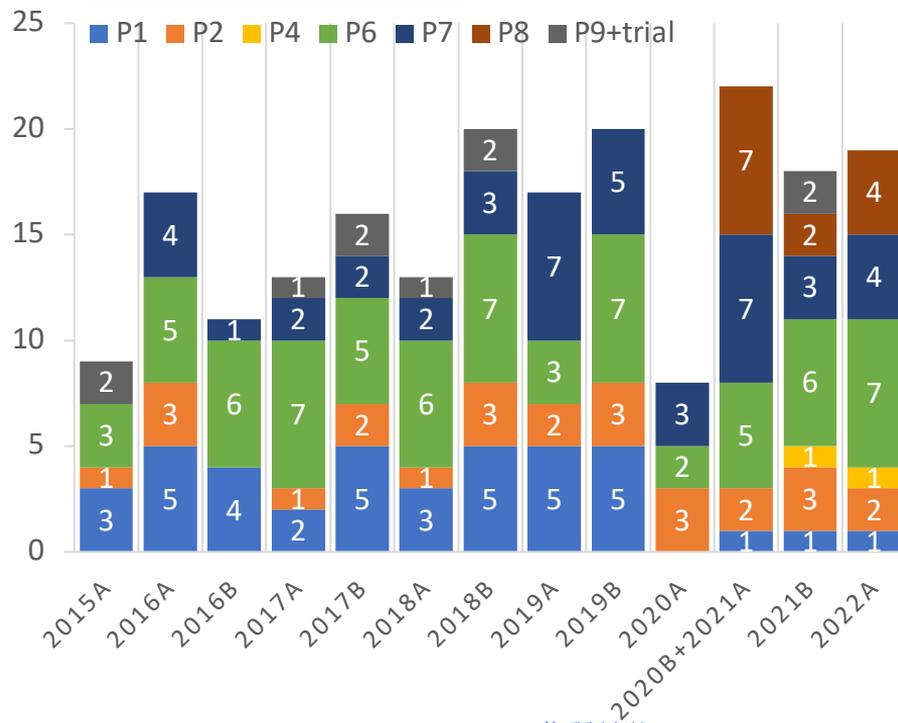
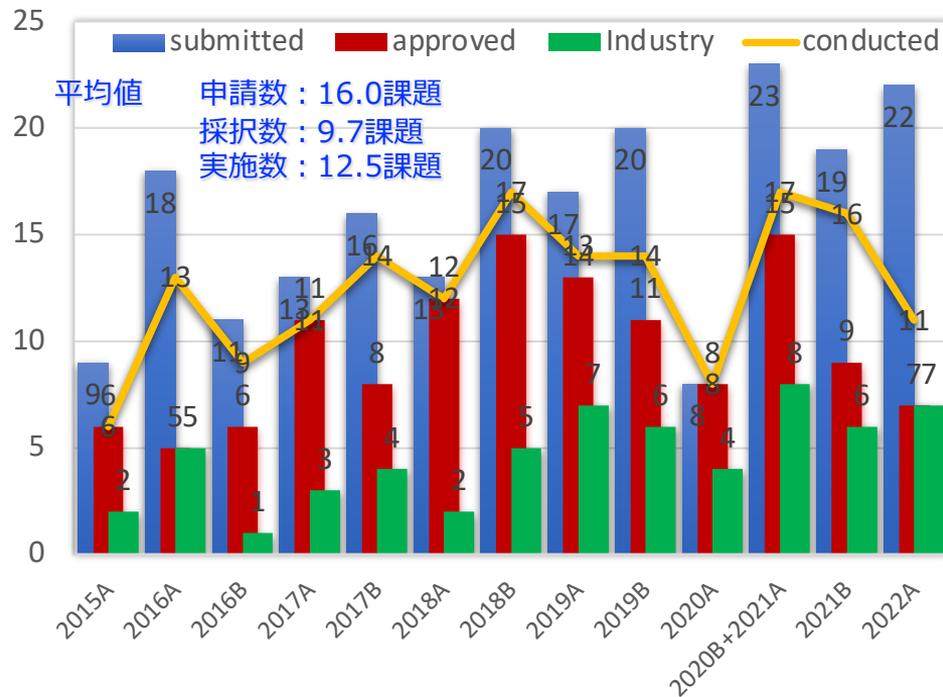


これまでのRADENの利用状況

一般短期課題数の変遷

課題の申請数・採択数・実施数

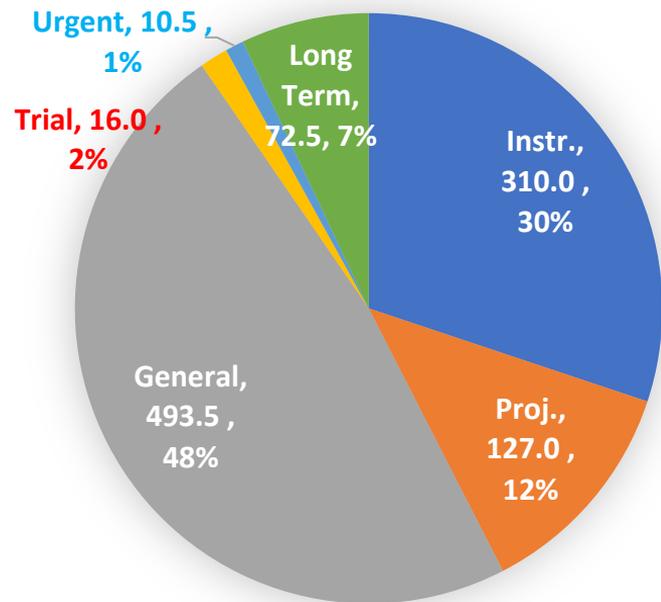
審査分野による分類



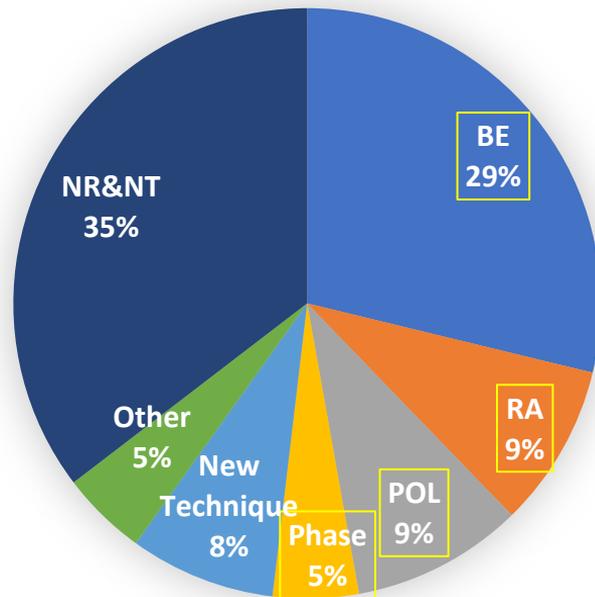
- 年間40件程度の課題を実施
- 産業利用課題は年間10件程度

- 材料研究への利用が多い (P1, P8分科会)
→ ブラッグエッジイメージングの活用
- 産業利用 (P7) 課題の増加傾向が顕著
- P6分科会は幅広い分野からの申請
(手法開発、農学、文化財、土木、照射、etc)

- P1: 物質科学
- P2: エネルギー関連材料
- P4: 磁性関連
- P6: 物理・デバイス/手法開発等
- P7: 産業利用
- P8: 鉄鋼関係
- P9: 新規利用者支援制度



ビームタイム使用割合 (days)



利用手法で分類した課題数の割合

BE: ブラッグエッジ
 RA: 共鳴吸収
 POL: 偏極
 Phase: 位相
 NR&NT: ラジオグラフィ・
 トモグラフィ

- 一般課題 (短期+長期) が約60%を使用
- 成果占有課題の申請数が増加中

その他の特徴

- 持込み機器の割合が高い
- その場観察/稼働状態での実験が増加中 (特に産業利用)

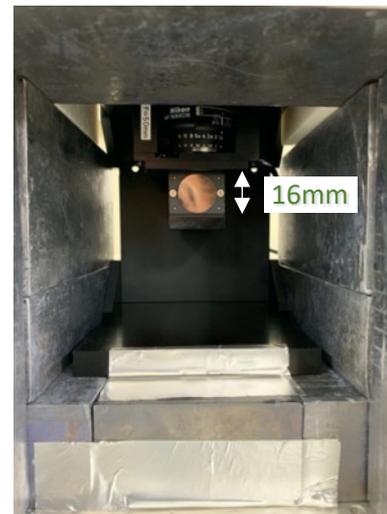
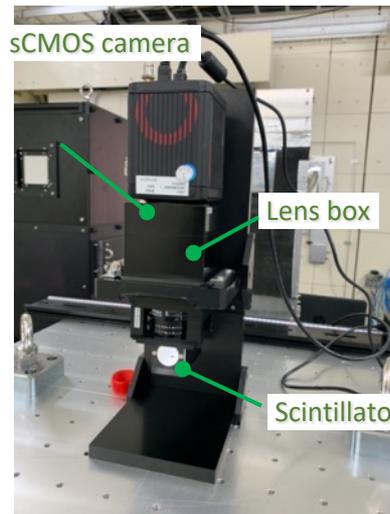
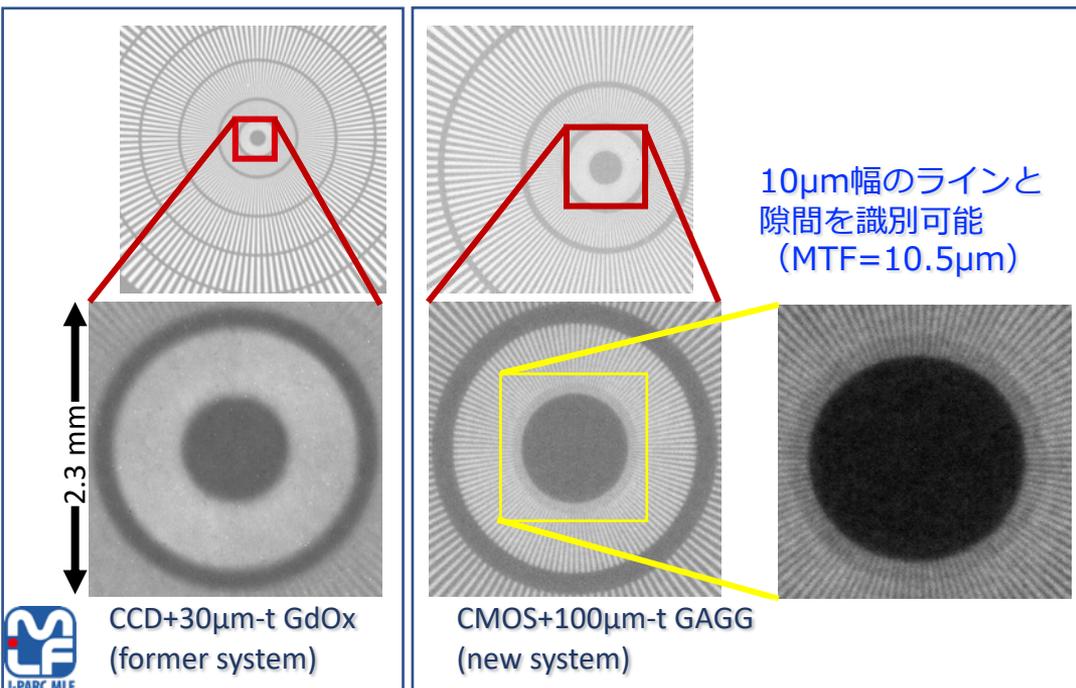
- 6割程度の課題がエネルギー分析型イメージングを利用
 - 割合としては減少傾向
 - ブラッグエッジが多い
- NR&NTの割合が増加中 → 産業利用の増加による

透明単結晶シンチレータによる高空間分解能化

10 μm 以下の分解能の実現に向けて
高分解能X線イメージング用撮像系を導入

- ・ CMOSカメラ+拡大光学系
- ・ Gd基透明単結晶シンチレータGAGG

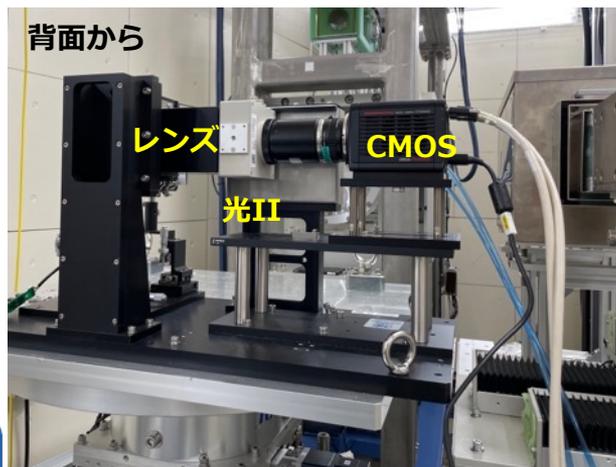
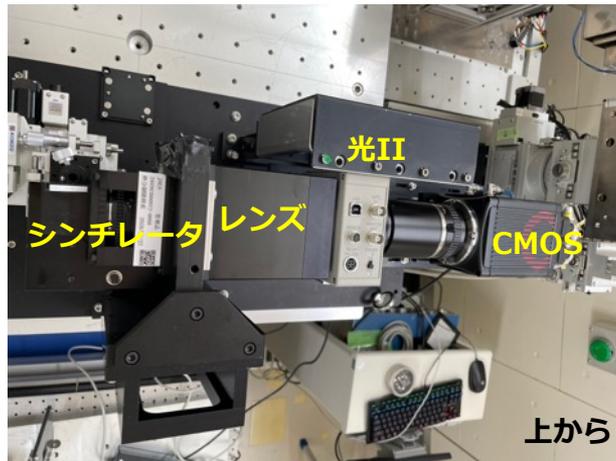
PSI製シーメンススターパターンを用いた空間分解能評価



sCMOS camera + optical magnification by two lenses

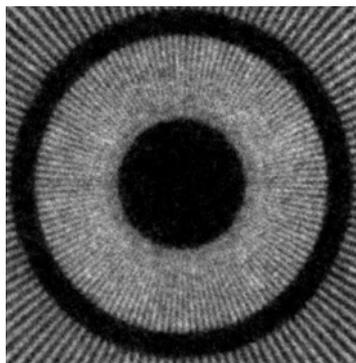
空間分解能の向上には高検出効率・高発光効率のシンチレータが必要

→ 中性子イメージングに適した新しい透明単結晶シンチレータの開発を実施中



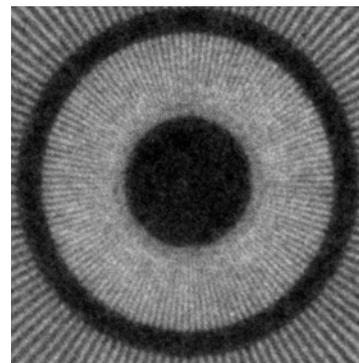
撮像系：単結晶シンチレータ+光II+CMOSカメラ
（2段の光学レンズで2倍に像を拡大）
→ 厚さの異なるシンチレータ（GAGG）を用いて分解能を評価

露光時間10sec×20回



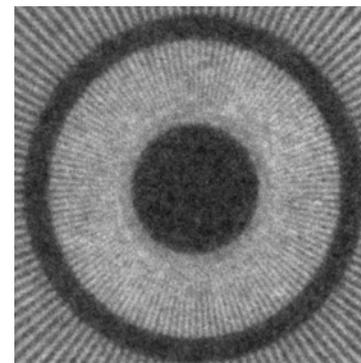
10 μ m-t

平均透過率0.68



50 μ m-t

平均透過率0.72



100 μ m-t

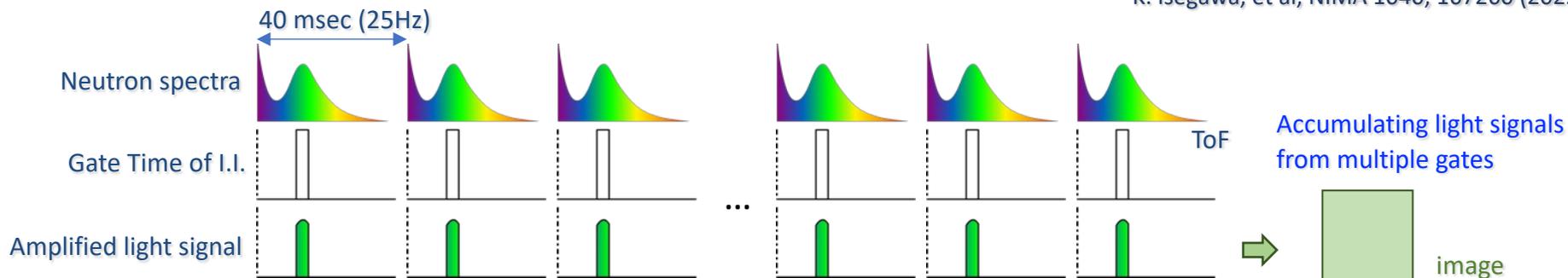
平均透過率0.75

分解能は約15 μ mでほとんど違いが見られなかった
20 μ m程度の分解能での実験であれば1分以下の撮像ができそう

パルス中性子のエネルギー選択型イメージング

光イメージンシファイアの高速ゲート機能を利用して中性子エネルギーを選択

K. Isegawa, et al, NIMA 1040, 167260 (2022)



- あるToFの中性子をゲート機能で選択して、カメラで露光
→ 単色中性子イメージングをカメラで実施
- 中性子エネルギーと分解能はゲートのタイミングと幅で簡単に調整・変更できる
→ チョッパーやモノクロメータを用いるよりも高速かつ簡便に実施可能

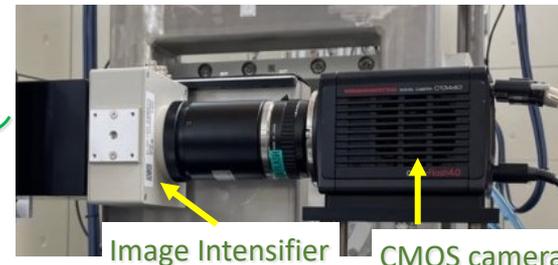
計数型検出器との比較



- 空間分解能が高い ($\Delta > 60\mu\text{m}$)
- 測定時間が短い
- オフライン解析が不要



- 波長分解能が粗い ($\Delta\lambda/\lambda > 1\%$)
- スペクトル取得にはゲートのスキャンが必要
- 定量性の評価は要検討



電池関係

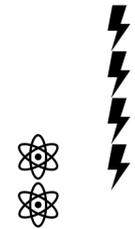
Liイオン電池 (BE, NR, in-operando)
 燃料電池 (ESI, NR, in-operando)



NEDOプロジェクト「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」
 プラットフォーム材料の解析及び解析技術の高度化の技術開発
 → 燃料電池評価技術の開発 (R02年度～)
 共同研究 「自動車用電池・パワーコントロールユニット等を対象とした可視化研究」
 → 燃料電池・リチウムイオン2次電池

材料関係

銅の結晶粒成長 (BE)
 鉄鋼材料 (構造・組織・ひずみ) (BE)
 PbBi 凝固過程 (BE)
 付加製造技術 (3Dプリンティング材料) (BE, GI)
 ベアリンググリース (NR, NT)



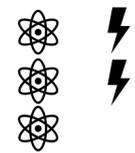
文化財・考古学研究

日本刀研究 (BE, NT)
 隕石 (NT, High-Reso)



その他

原子力関連
 植物・農学
 実験技術
 埋設技術、核種分析 (NR, NT, RA)
 梨の果実 (NR, GI)
 超臨界水の反応過程 (NR)



定常中性子源向き
 パルス中性子源向き

作動中車載燃料電池内部の凝縮水挙動の可視化

Supported by NEDO FC-Platform



FC-Platform



新型MIRAIに搭載された燃料電池を用いて、
作動中の車載燃料電池内部に生成する水の分布と挙動を直接観察する

中性子イメージング実験配置



FCEV TOYOTA MIRAI

Fuel Cell of MIRAI (single sheet)



燃料電池条件:

2nd generation MIRAI Cell (単セル)
セル温度 55°C (冷却水 (D₂O) により制御)

負荷応答試験:

電流密度 = 2.2~0.1 A/cm² (600.1A~27.3A)

撮像条件:

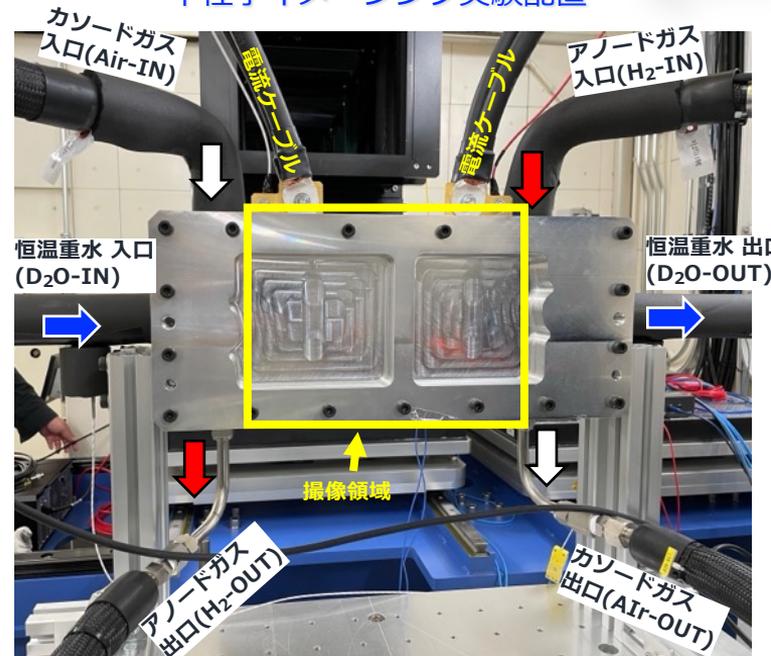
撮像系: CMOSカメラ (Hamamatsu ORCA Flash 4.0V3)
Image intensifier (Hamamatsu C14245)

シンチレータ: ZnO/⁶LiF, t=0.3mm

視野サイズ: 300mm x 300mm, 空間分解能: ~0.4mm

露光時間: 1sec x 300 rep.

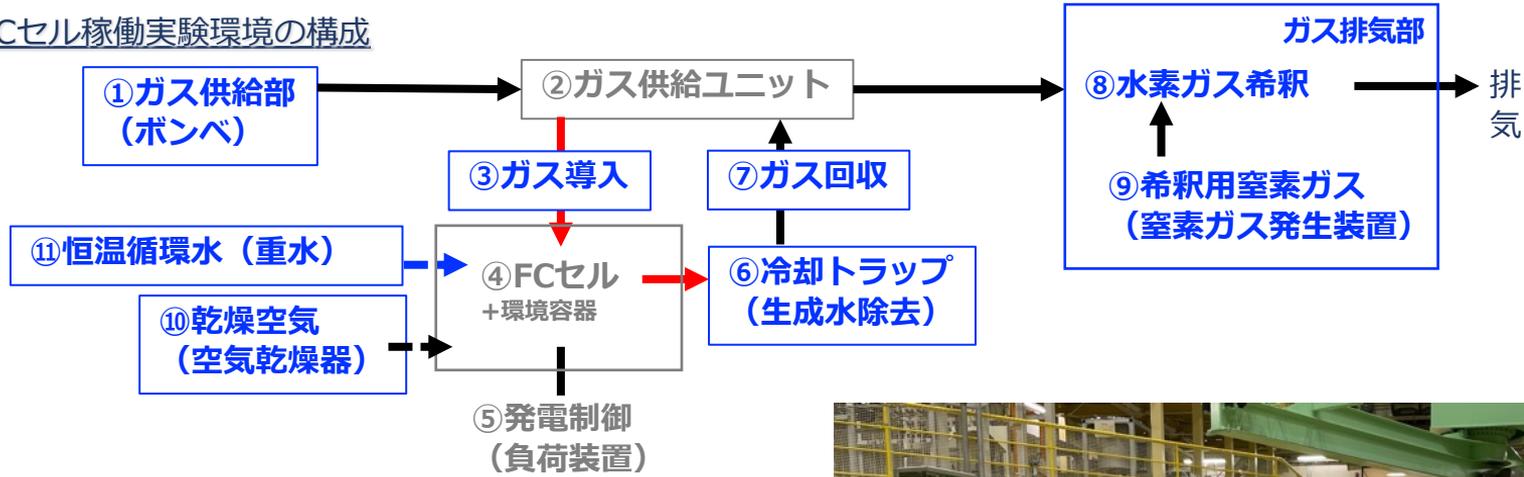
波長範囲: 2.3~8.8Å



セルは4cm厚のアルミ合金製エンドプレートで拘束
(総厚10.33cm)

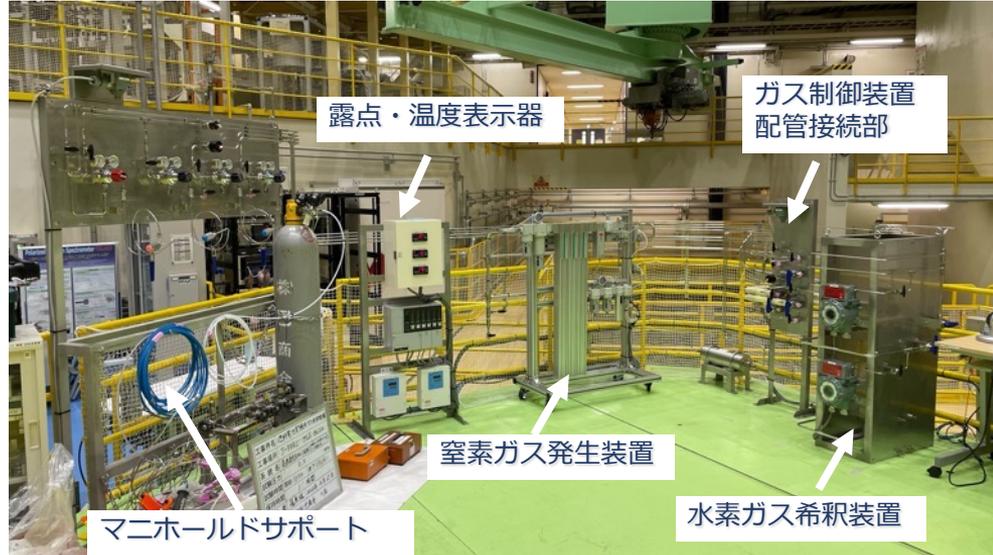
フルサイズ燃料電池セル稼働のための環境整備

FCセル稼働実験環境の構成

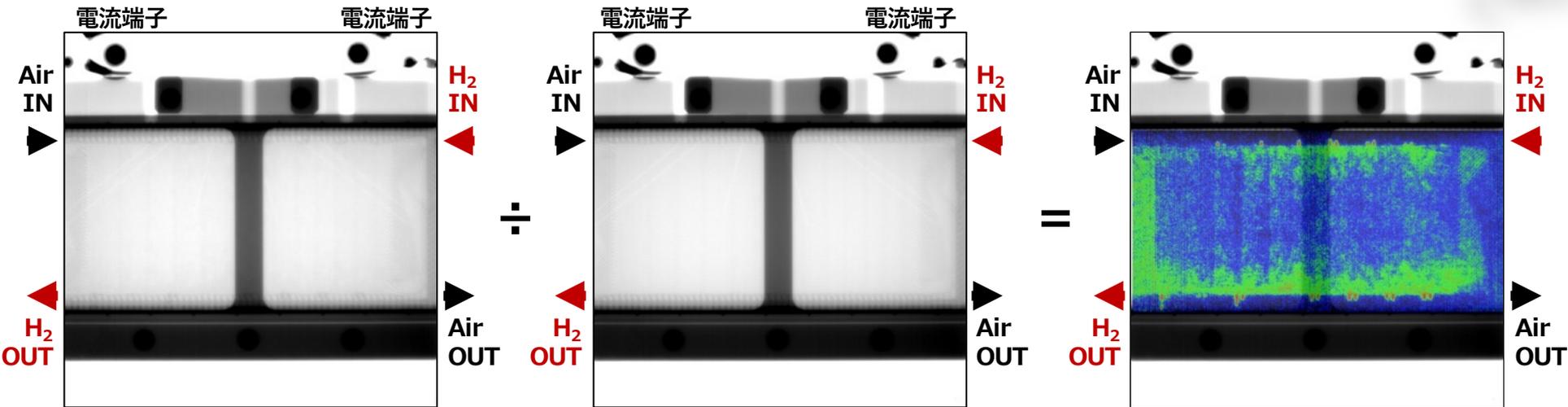


FC 評価キットと負荷装置

TOYOTA CENTRAL R&D LABS



画像処理



①中性子透過率像 (55°C 発電中)

$$T_{op} = \exp(-(\mu_{water}t_{water} + \sigma_{dry}))$$

②中性子透過率像 (55°C 乾燥後)

$$T_{dry} = \exp(-\sigma_{dry})$$

①/② = 凝縮水による中性子透過率像

$$T_{water} = \exp(-(\mu_{water}t_{water}))$$

凝縮水による中性子透過率像

$$\ln(T_{water}) = -(\mu_{water}t_{water})$$



既知の厚さの水の中性子透過率で規格化

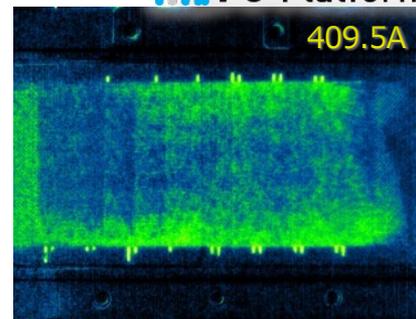
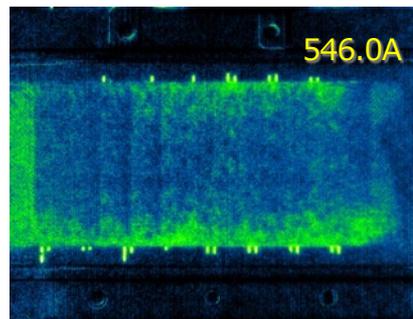
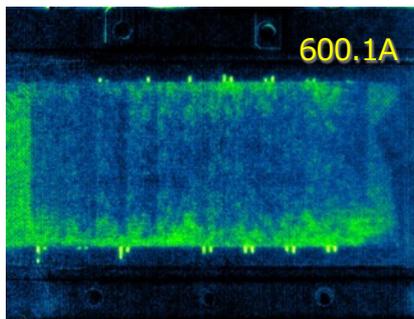
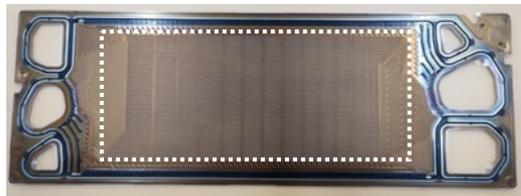
$$\ln(T_{water}) / \ln(T_0) = (-\mu_{water}t_{water}) / (-\mu_{water}t_0)$$



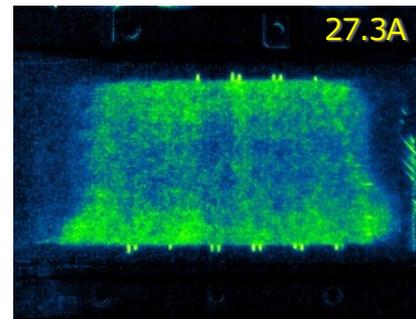
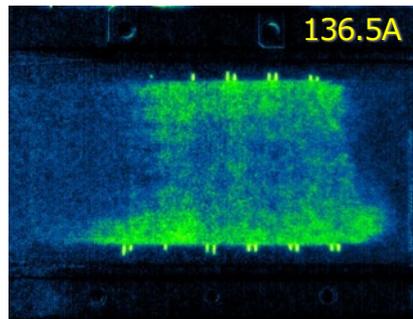
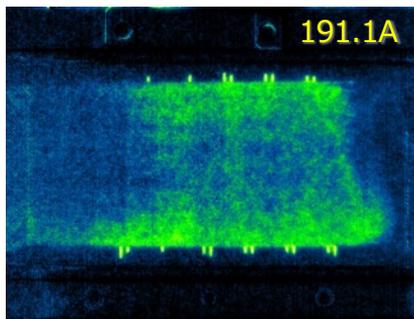
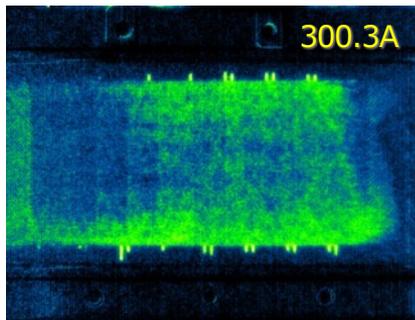
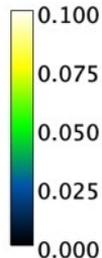
水分量分布画像

$$t_{water}$$

負荷応答試験結果



Water thickness [mm]



- ✓ 生成水の分布は流路形状を反映していない → 非常に効果的に水が排出されている
- ✓ 発電部位全体に水が存在。観測された凝縮水の厚さは20~40 μ m程度 → GDL中に存在する微量な水を可視化
- ✓ セル内に残留する凝縮水の量 → 電流密度に対して単調な変化ではない
- ✓ ガスの流れる方向（水平方向）だけでなく、垂直方向にも分布がある
… 発電量が小さいほど全面に渡って水が存在

- J-PARCのRADENにおいて大強度短パルス中性子ビームを用いたエネルギー分析型／選択型イメージングを実用化、ユーザー利用を実施

 - 様々な情報を中性子透過率から解析し、その空間分布を可視化する技術
 - 結晶構造情報・元素・温度・磁場・干渉
 - 多彩な撮像条件での中性子ラジオグラフィ／トモグラフィ環境を提供
 - その場観察、高空間分解能撮像、エネルギー選択
 - 燃料電池実験用の環境の構築（推進中）
- 撮像技術の高度化・新しいイメージング手法の開発を継続

 - 抽出情報量／種類の拡大・低バックグラウンド化・定量性・信頼性
 - 検出器の高性能化（高計数率化・高分解能化・短時間撮像・etc…）
- パルス中性子の特徴を活かした応用研究の推進

 - 定常中性子源施設との差別化・得手／不得手を意識して効果的な活用を進める

RADENの詳細: <https://mlfinfo.jp/ja/bl22/>
 連絡先: mail2raden@ml.j-parc.jp

※RI協会 中性子応用専門委員会から、**中性子イメージングカタログ/中性子施設ハンドブック**が
 発行されました。イメージングの原理、測定例、施設が紹介されています。
<https://www.jrias.or.jp/report/cat1/218.html>