

J-PARCパルス中性子イメージング 装置RADENの現状について

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

世界最初のパルス中性子イメージング専用ビームラインとして2015年度より共用を開始

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

→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（ $<30\text{cm}^2$ ）から高空間分解能（ $\sim 10\mu\text{m}$ ）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技術の開発環境

パルス中性子位相イメージング

計数型2次元検出器開発

波長範囲

 $\lambda < 8.8 \text{ \AA}$ @L=18m, $\lambda < 6.9 \text{ \AA}$ @L=23m

波長分解能

 $\Delta\lambda/\lambda = 0.26\%$ @L=18m, $\Delta\lambda/\lambda = 0.20\%$ @L=23m

時間平均強度@L=18m, L/D=180

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

試料位置 L=18, 23m

L/D範囲 180~7500

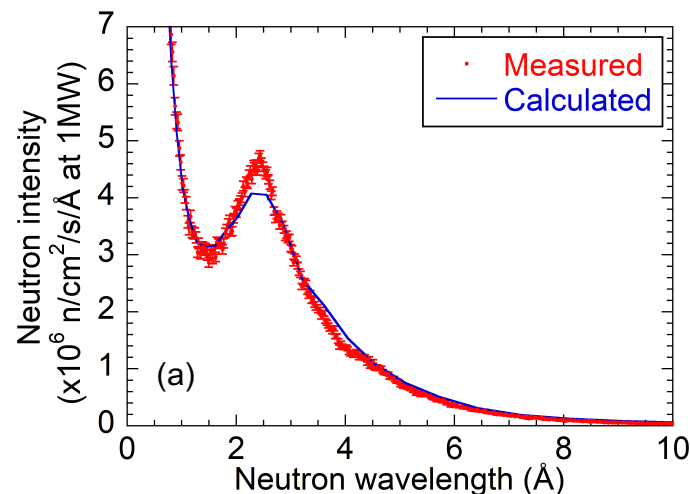
撮像視野

< 300 × 300mm² (カメラ型検出器)< 100 × 100mm² (計数型検出器)

空間分解能

> 10μm (カメラ型検出器)

> 100μm (計数型検出器)



検出器

カメラ型

カメラ : CCD, EM-CCD, CMOS

シンチレータ : ⁶LiF, GdOS, GAGG

計数型

μNID, nGEM, LiTA

試料環境

試料ステージ (大型、中型、小型)

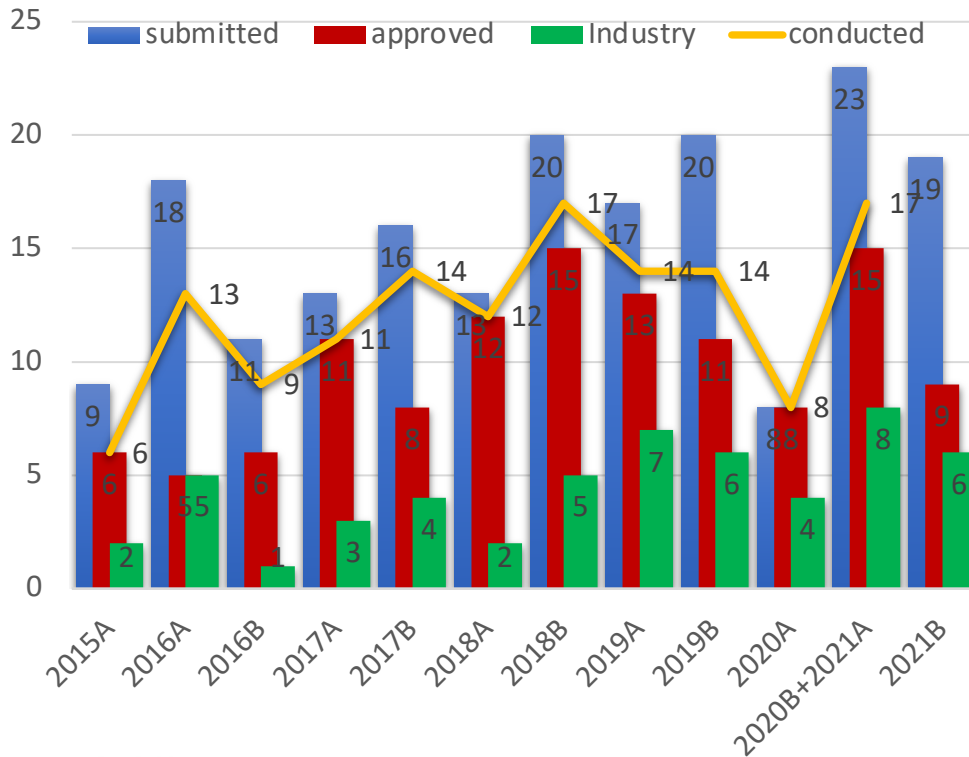
偏極度解析装置

試料加熱装置

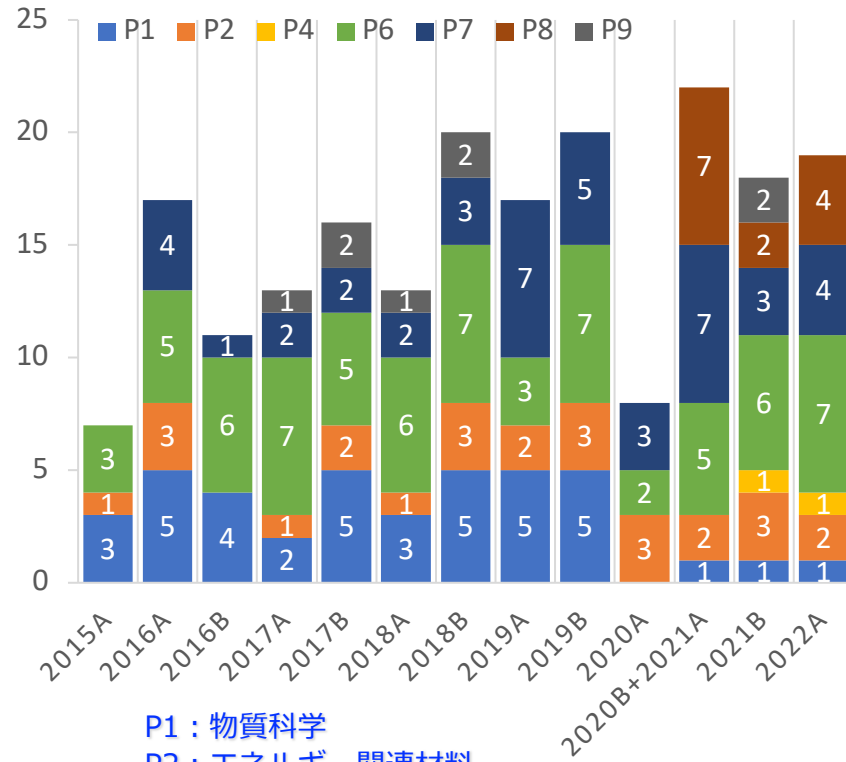
これまでのRADENの利用状況

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



申請数：15～25

採択数：15程度

実施数：15～20程度

- 年間40件程度の課題を実施
- 産業利用課題が約3割
- 全体として微増傾向（おおむね飽和状態？）

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

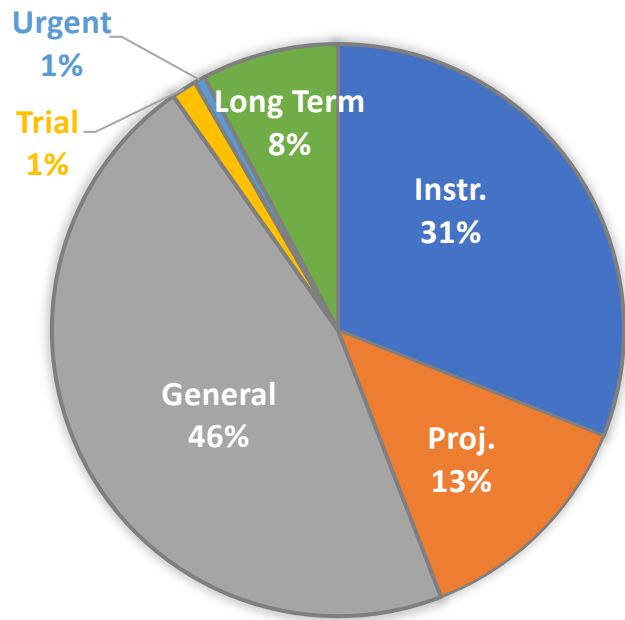
P7：産業利用

P8：鉄鋼関係 P9：新規利用者支援制度

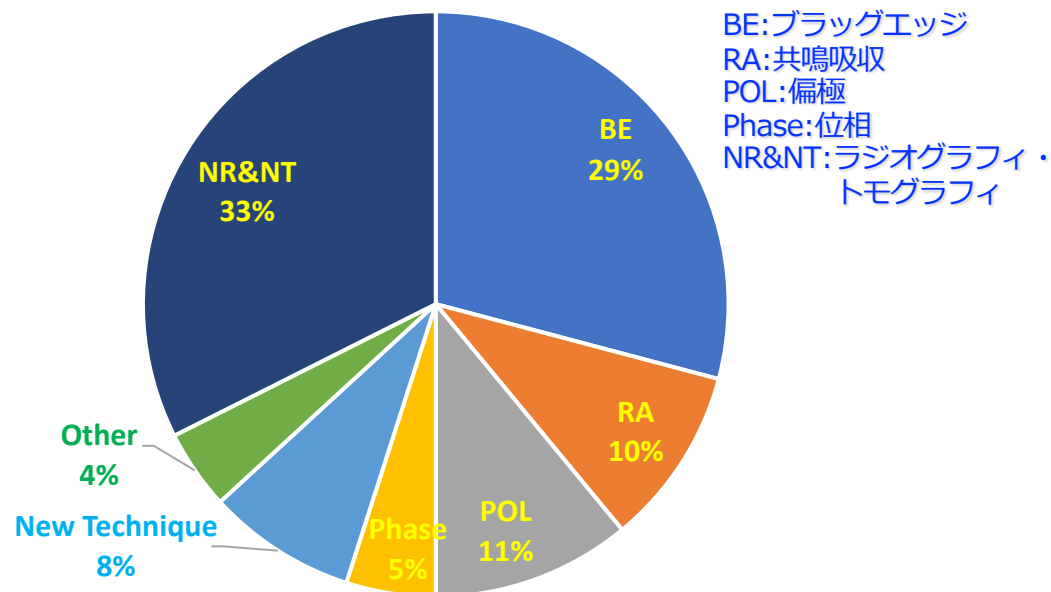
これまでのRADENの利用状況

ビームタイム使用割合・利用手法による分類

ビームタイム使用割合 (2015A~2021A)



利用手法で分類した課題数の割合 (2015A~2021A)

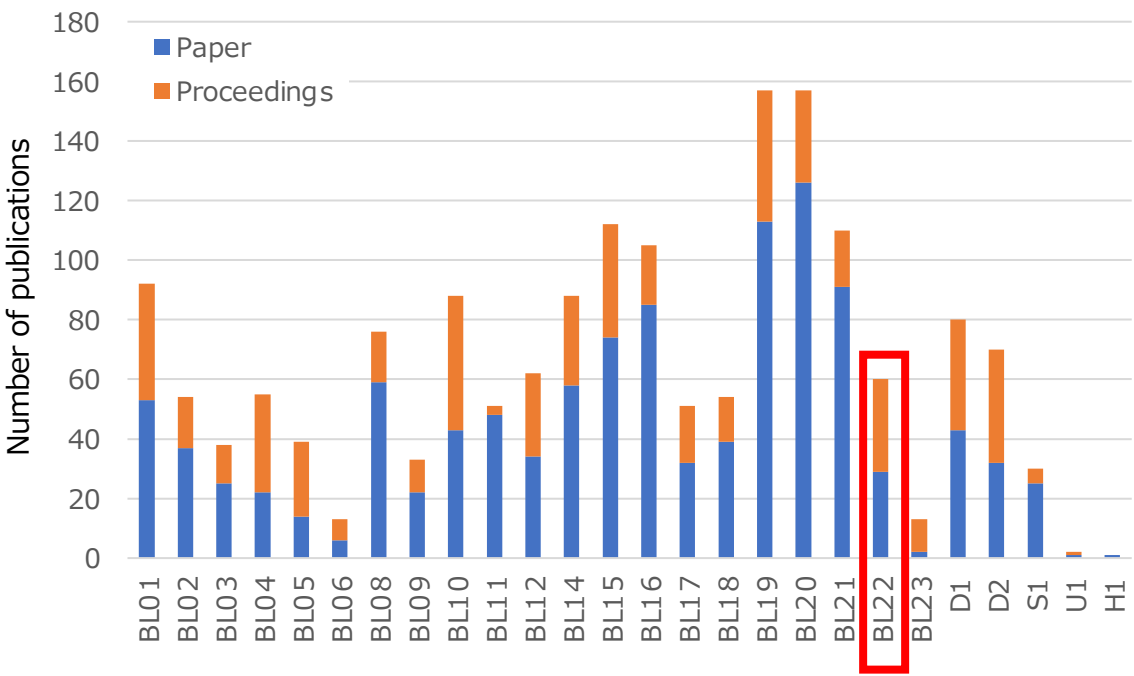


装置課題・プロジェクト関係：5割弱
一般（短期+長期）：5割強

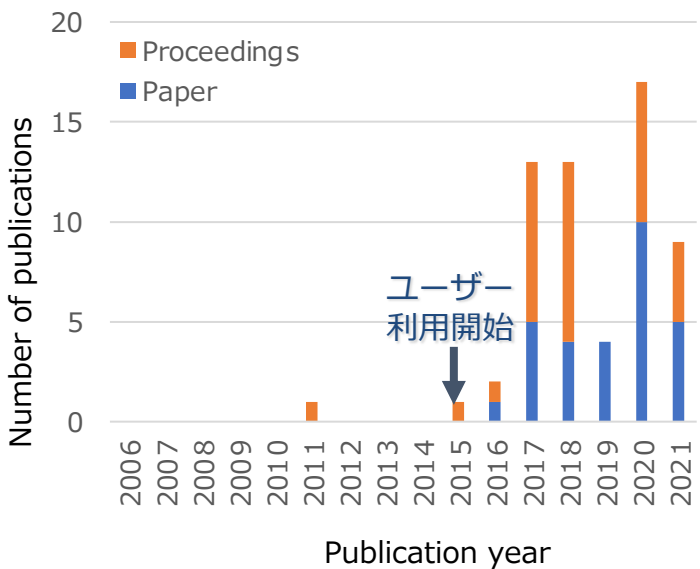
装置課題+プロジェクト課題 < 25%程度
一般課題等の使用割合は6~7割へ

- 5割強の課題がエネルギー分析型イメージングを利用
→ 割合が減少傾向
- NR&NTが増加中
→ 産業利用課題の増加が原因の一つ

Num. pubs. (paper & proc.) 2006-2021



BL22 Num. pubs. (paper & proc.)



2015年運用開始という後発組で、企業ユーザーが多い割にかなりの検討を見せているはず。

コロナウィルスの影響

2020年度は大きく影響を受けたが2021年度は比較的影響は軽微。

外国人ユーザーは一部代理実験で実施。（ほとんどは未実施のまま。延期もしくは再申請。）

Fast Track課題の受入 http://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/applying/FTP_v01.html 英語ページのみ

…> テスト実験課題。装置グループが代理で実験を実施。R02年度より受け入れを開始。

- ※ 一般課題優先のため、スケジュールが合わない場合には実施されない可能性もある
試料は原則返送しない
申請前に装置グループとの事前相談が必要（事前相談無しの課題は受入れない）

外部予算関係

NEDO「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

高空間分解能撮像技術の開発・応用

燃料電池セルの水／氷の識別イメージング

Liイオン電池の熱暴走試験

10 μ m以下の分解能の実現に向けて

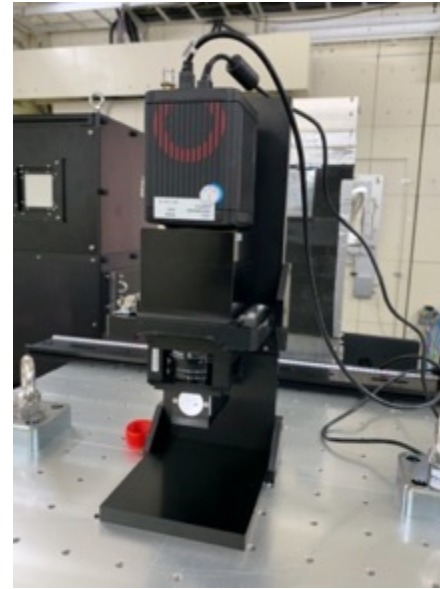
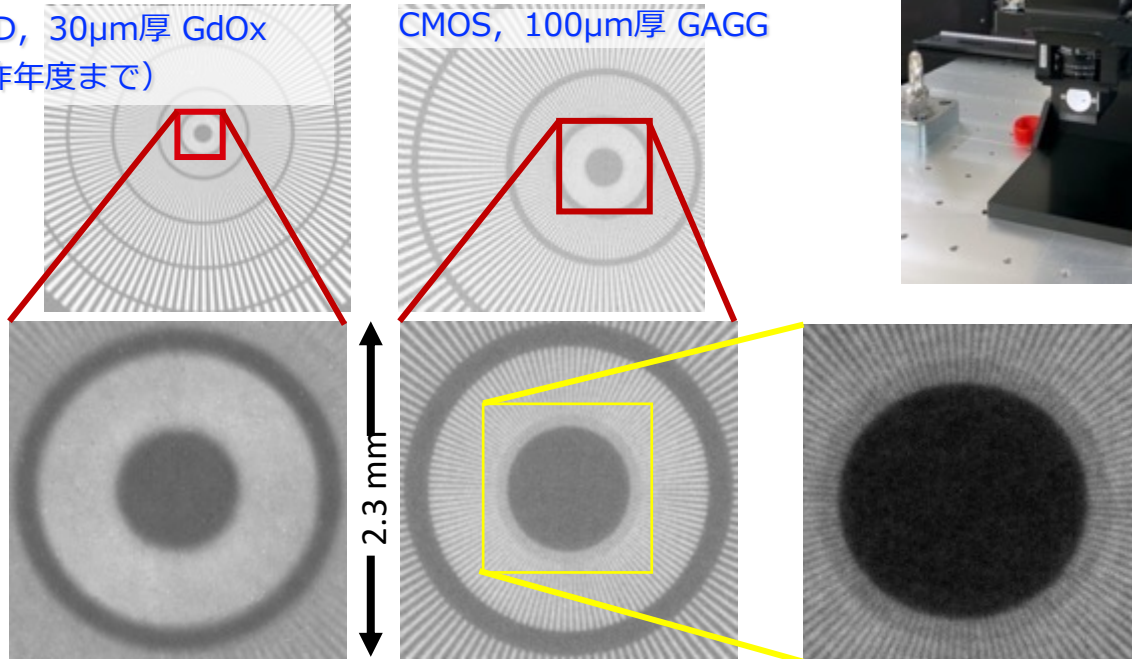
高分解能X線イメージング用撮像系を導入

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

シーメンススターパターンを用いた分解能評価結果

CCD, 30 μ m厚 GdOx
(昨年度まで)

CMOS, 100 μ m厚 GAGG



K. Isegawa, et al., J. Imaging, 7, 232 (2021)

10 μ m幅のラインを識別可能
(MTF=10.5 μ m)

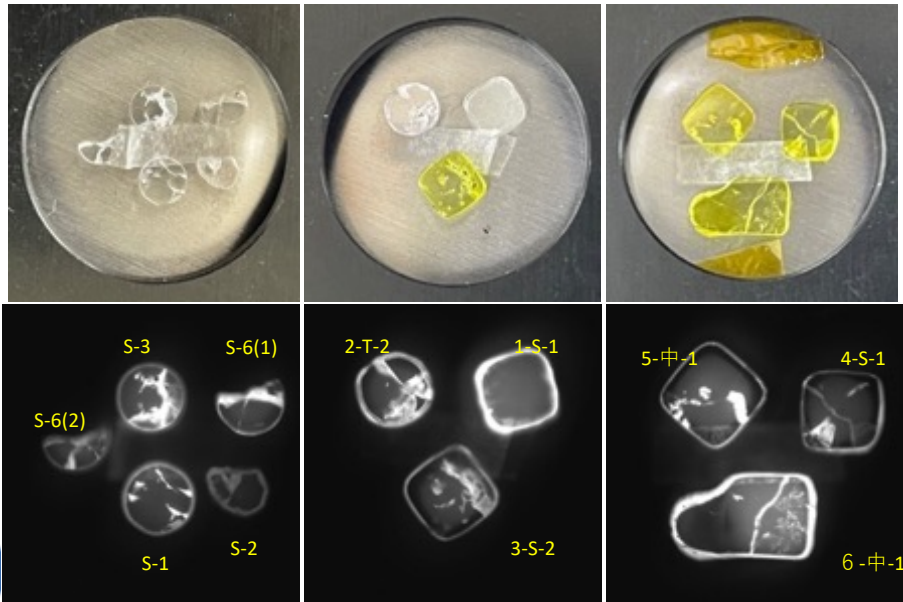
CMOSカメラと拡大光学系で10μmの分解能を実現

さらなる高分解能化 → 高倍率レンズの導入による像の拡大
光量の減少を補う

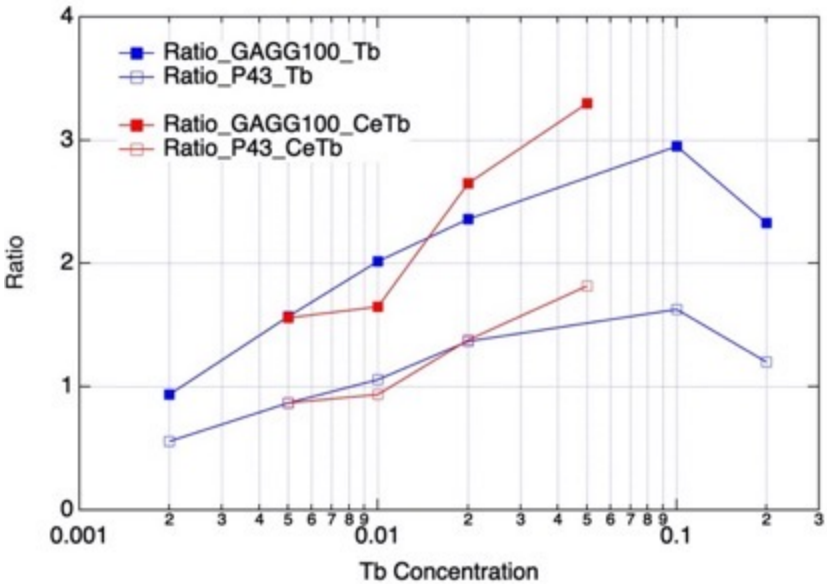
- ・ 光IIによる増幅
- ・ GAGGに代わる明るいシンチレータの開発

単結晶シンチレータの開発 … 東北大（黒澤准教授）との協力を開始

Tb添加のGGG結晶



最大でGAGGの3倍強、P43の1.8倍
くらいの輝度。
Ce-Tbのco-dopeの効果はありそう。



光IIとCMOSカメラを用いたエネルギー選択型イメージングの導入（水と氷の識別イメージングのため）

→ シンチレータの残光が透過率の評価に影響することが判明

・・・できるだけ残光の短いシンチレータが必要。

Scintacor社製シンチレータ

Phosphor coatings: 6LiF-ZnS screens

<https://scintacor.com/products/neutron-detection-screens/>

Screen Type	NDFast	ND	NDg
Formulation	6LiF ZnO:Zn	6Li ZnS:Ag	6LiF ZnS:Cu,Al
Peak Emission	505um	450nm	530nm
Decay to 10%	3.5us	80us	85us
Afterglow	Ultra low	Low level	Low level

Scintacor製シンチレータの残光特性評価

比較したシンチレータ

NDFast (厚さ0.2mm)

NDg (厚さ0.2mm)

PSI-LiF/ZnS (厚さ0.1mm)

PSI-Gadox (厚さ0.03mm)

撮像系

カメラ : ORCA FUSION + 光II

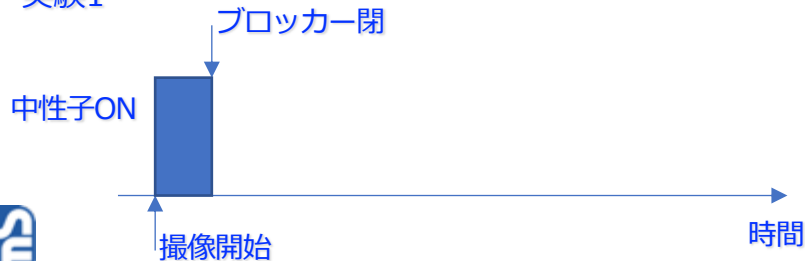
IIのゲインは900 (NDgのみ880)

FoV : 10cm

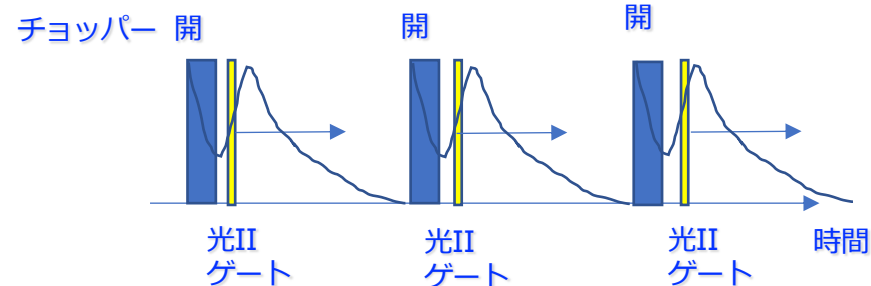
実験内容

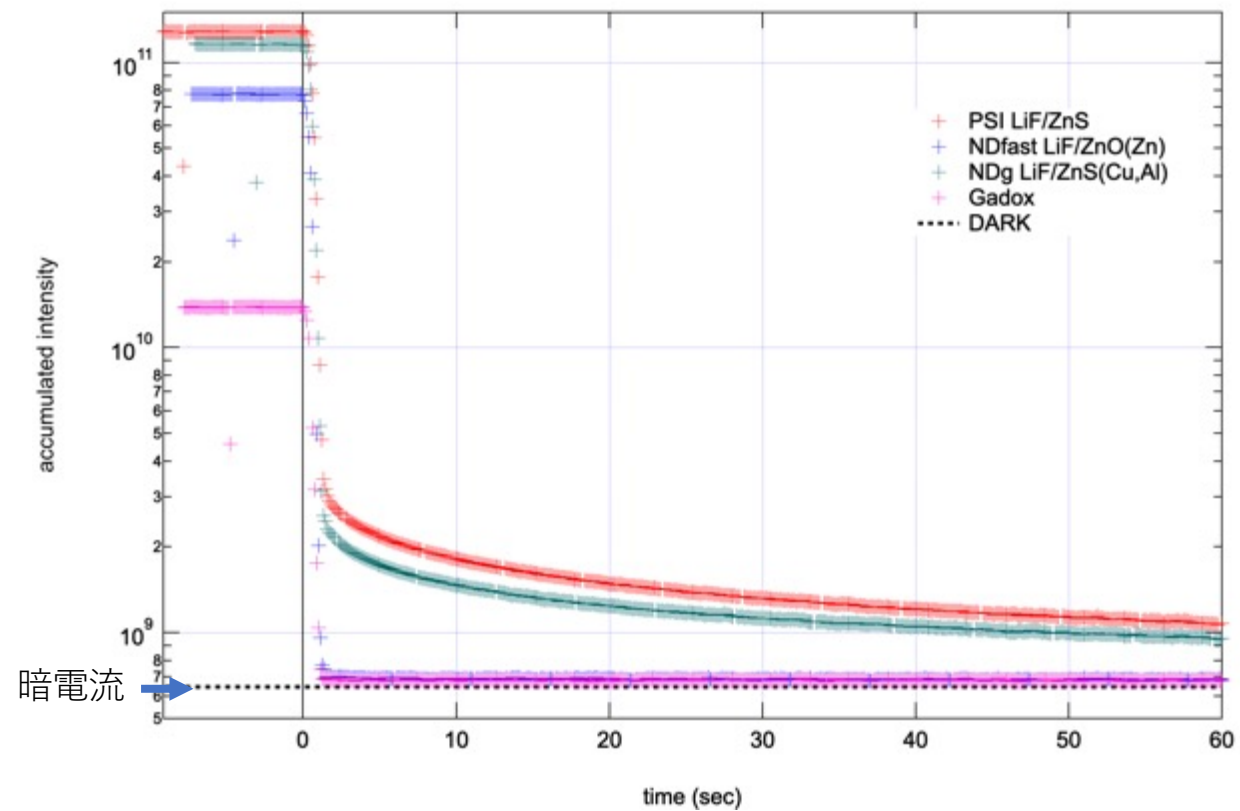
1. 長時間の残光特性評価 : 撮像開始後にブロッカーを閉めて、その後の残光を撮像する。露光時間100msec、6000枚
2. 短時間の残光特性評価 : 40msecの間での残光を評価するため、0~10msecだけチョッパーを開き、10msec以降の飛行時間での残光を測定する。光IIのゲート機能を使用。ゲート幅1msecで10msec~38msecまでスキャン。露光時間は1secで10回繰り返して平均を計算。

実験1

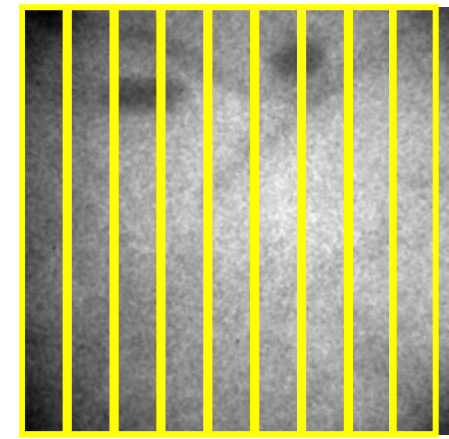


実験2



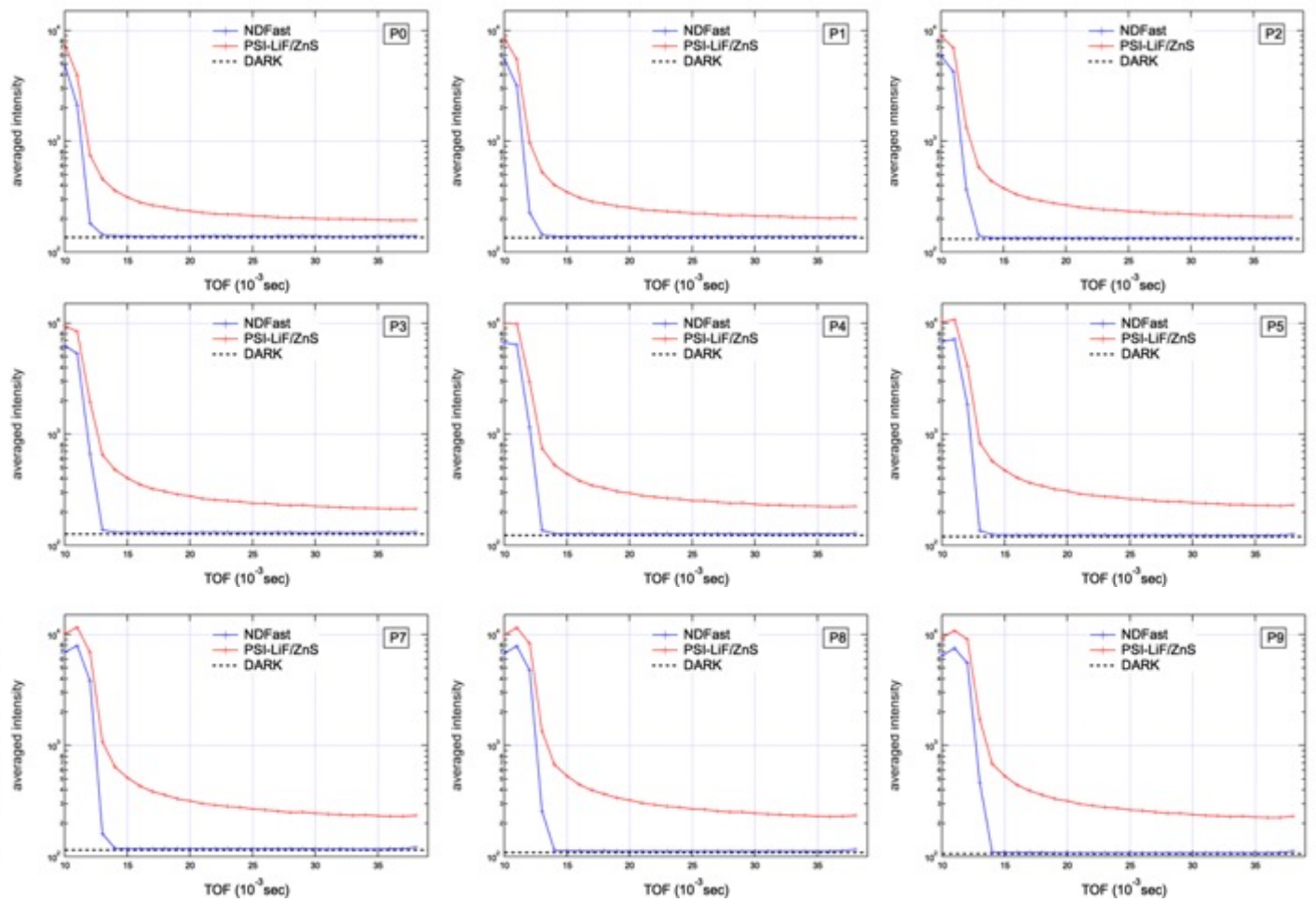


輝度値の積算値の時間変化
(ブロッカー閉時を 0 として、60secまでを表示)



P0 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9

FoVの中場所ごとに比較
(チョッパーの開口移動のため、
露光時間が場所ごとに違う)



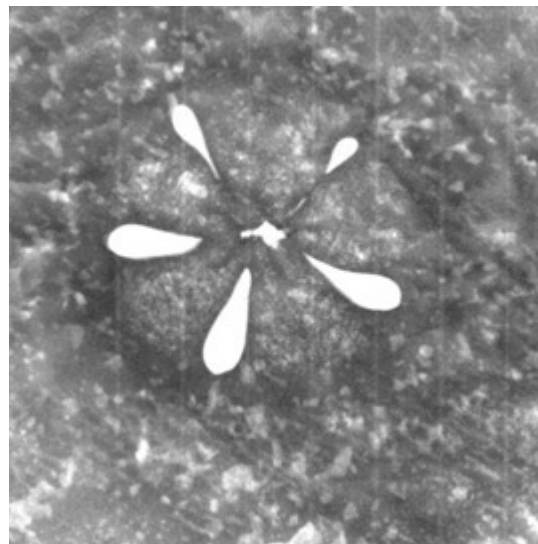
茨城県農業総合センターからの相談を受けて、中性子位相イメージングを梨の観察に応用



中性子透過像 → 水の分布によるコントラスト

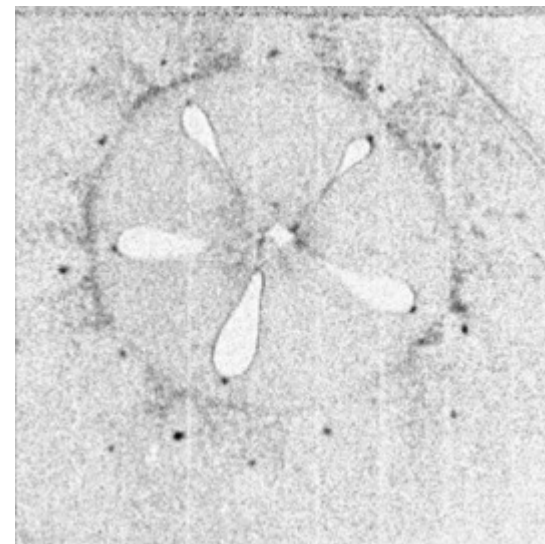
Visibility像 → 細胞組織による小角散乱を反映したコントラスト

中性子透過率分布（水の分布）



コントラスト範囲 (0.4~0.8)

Visibility像（微細構造の相違）



コントラスト範囲 (0.5~1.0)

- 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…)
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
- 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中
撮像時間の短縮・空間分解能の向上
抽出情報量／種類の拡大
- プロジェクト・共同研究を通じた中性子イメージング技術開発・応用研究を展開
燃料電池研究
産業応用
- JRR-3、J-PARCの特徴を活かし、効果的な利用を進める

中性子イメージングに関する質問・利用相談等お受けいたします。