

SOIPIX量子イメージング研究会2024
(2024/12/19-20 奈良女子大学)



IMSS
物質構造科学研究所



SOIPIX
Silicon-On-Insulator Pixel Detector Project

PFにおけるINTPIX4NAを用いた X線撮像システムとその応用について

KEK IMSS Photon Factory

特別助教 西村龍太郎

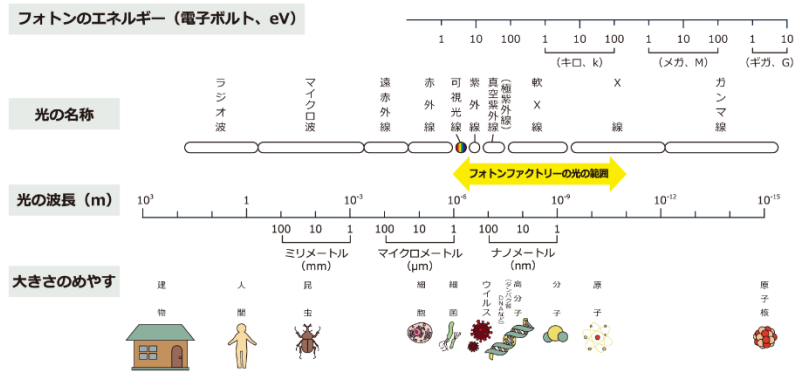
(ryutaro.nishimura@kek.jp)

Outline

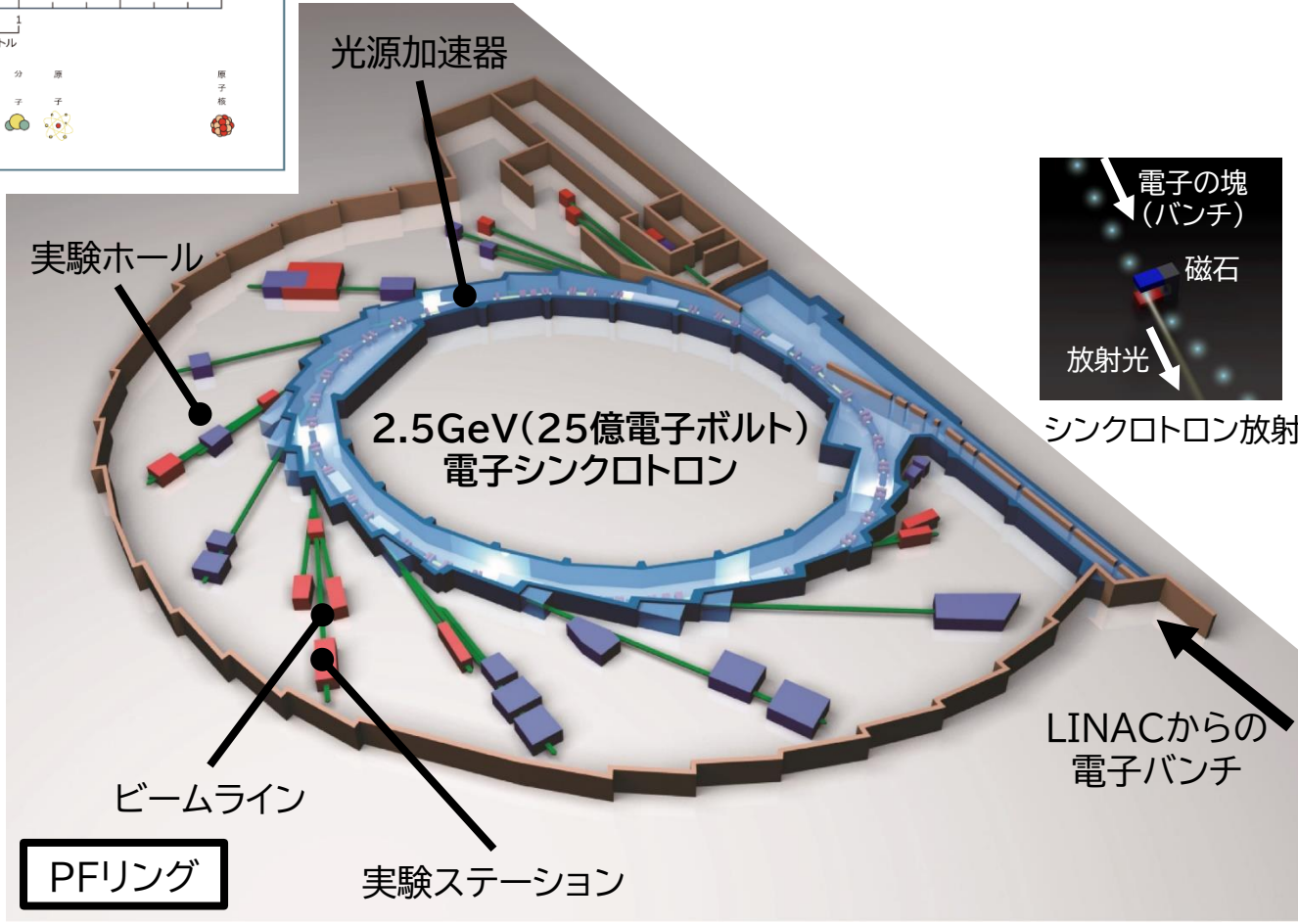
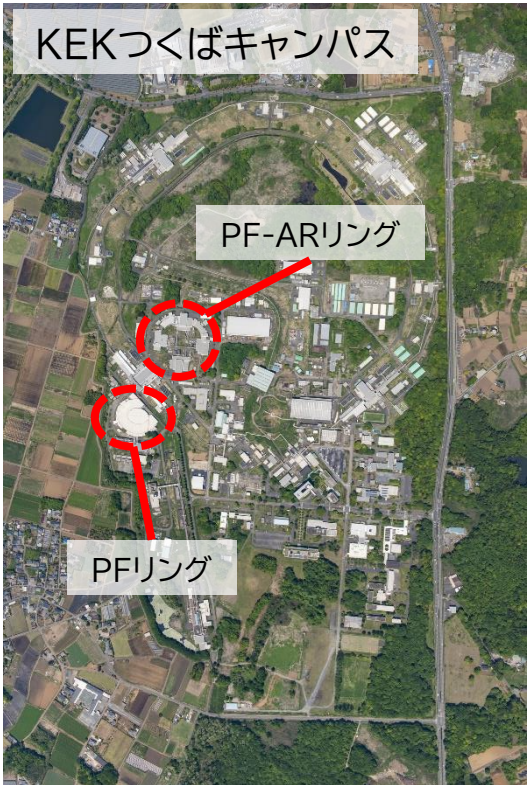
- 放射光実験施設Photon Factory(PF)について
- INTPIX4NAを用いたX線撮像システムについて
 - 構成・仕様について
 - 性能評価
- 撮像システムの応用状況
 - PF内外の状況等
 - 測定高度化に向けた取り組み
 - PFで開発・運用中の制御フレームワークSTARSとの連携
- まとめ・今後

放射光実験施設Photon Factory (PF)について

物の大きさと光(電磁波)の種類



- 大学共同利用機関法人・高エネルギー加速器研究機構(KEK)のつくばキャンパスにある放射光施設
- PFリング(2.5 GeV)、アドバンスリング(PF-ARリング, 6.5 GeV)の専用光源加速器より、真空紫外線から硬X線まで幅広いエネルギー領域の放射光を取り出して利用可能
- 2023年4月現在計47の実験ステーションが運用中



放射光実験施設Photon Factory(PF)について

放射光を使った測定例

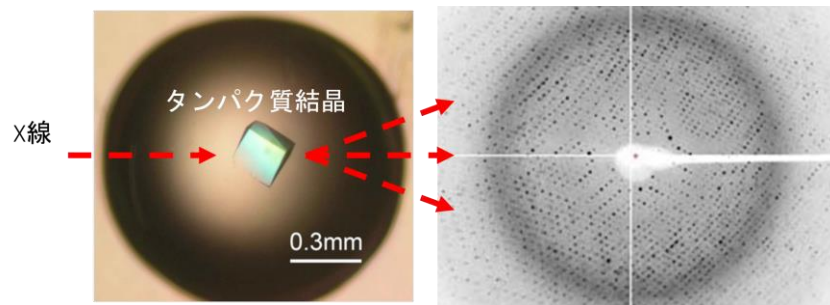
放射光はビームライン・実験ステーション毎に試料・手法に応じて波長の光を取り出したり、形状、偏光を調整して使用

実験ステーションでは、

- 試料に含まれる物質の構成を調べる(XAS、XAFS)
- 分子の構造を調べる(SAXS、WAXS)
- 試料の透過像・位相シフト像を取って内部構造を調べる(X線イメージング、X線3D-CT等)

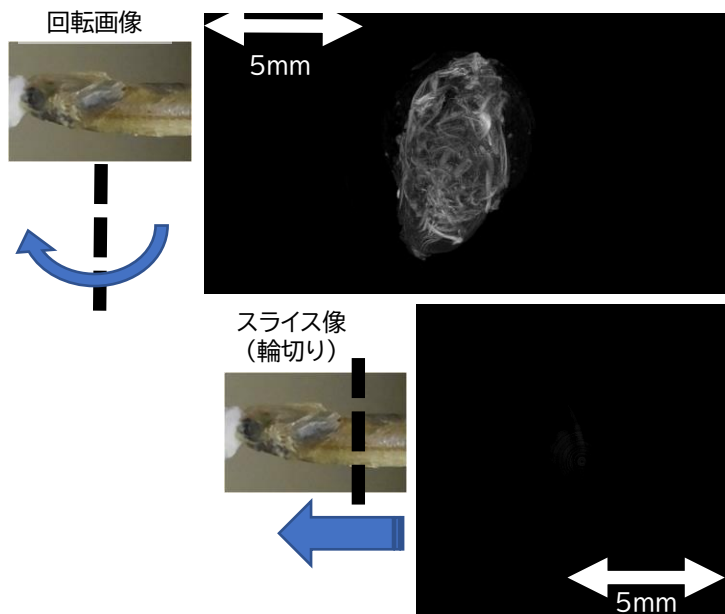
等といった様々な測定を実施

X線回折によるタンパク質分子構造測定

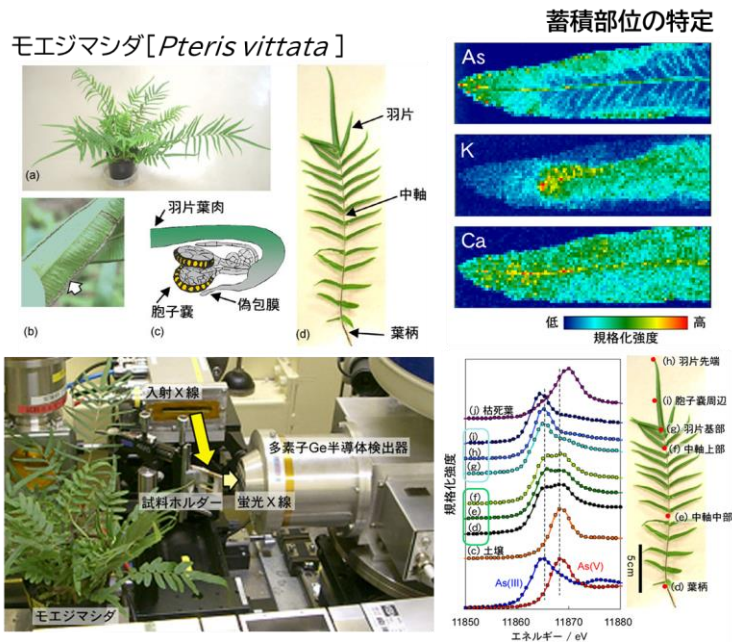


測定例 (一部)

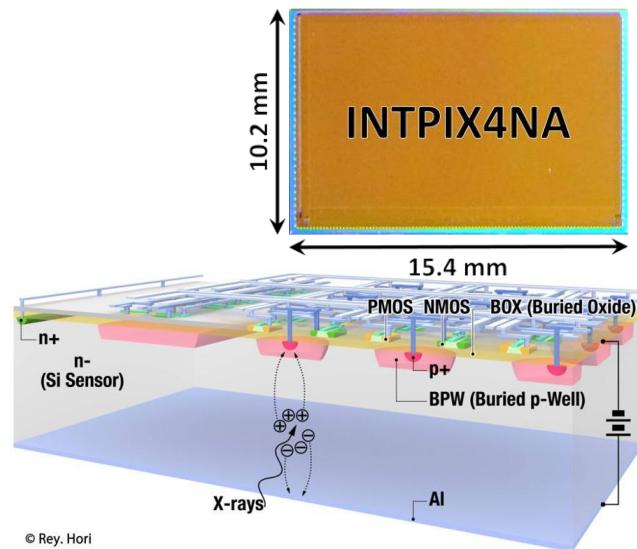
X線による生体試料3次元CT



X線吸収分光(XAS)による物質の蓄積部位測定



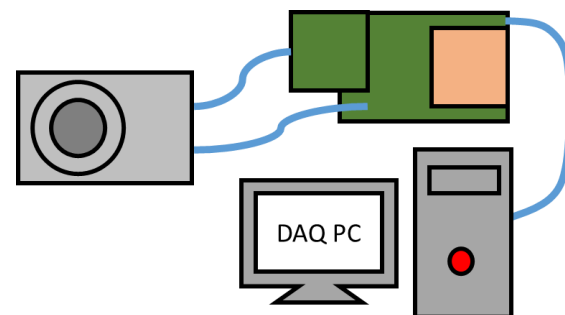
INTPIX4NAを用いたX線撮像システムについて 二次元半導体検出器SOIPIX「INTPIX4NA」を用いた X線カメラの開発と応用(2020~)



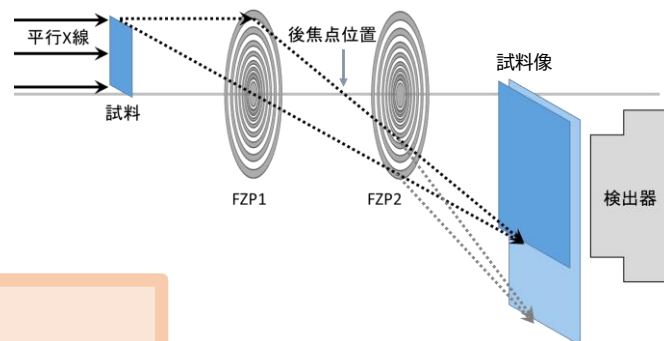
© Rey. Hori

1. 積分型SOIPIX検出器INTPIX4NAの性能評価※1・小型基板開発
2. SiTCP-XGを用いた10GbE高速読み出し基板の開発※2

5~10keVに優位性を持つ
高速・高精細・高感度X線カメラ
を開発



高速・高精細・高感度
X線カメラ



2FZPズーム光学系

PF等での応用

1. 2FZPズーム光学系※3への導入
2. 放射光による残留応力測定※4の高度化

等

※1: Nishimura, R. et al., J. Inst. 16_P08054 (2021)

※2: R3科研費(若手、21K14174)

※3: Wakabayashi, D. et al., RSI 93 033701 (2022)

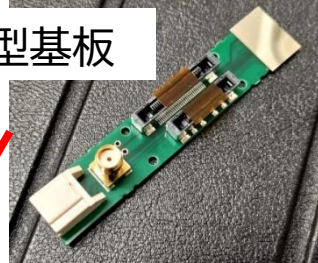
※4: Nishimura, R. et al., NIMA, Vol.978, 164380 (2020)

構成・仕様について

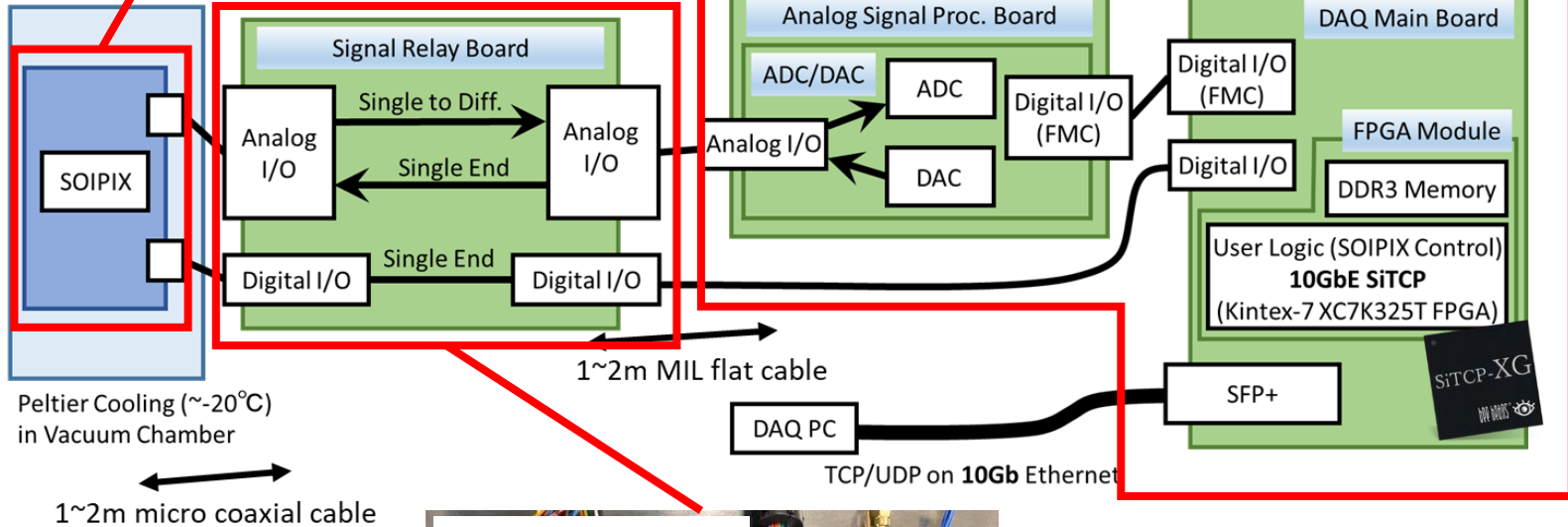
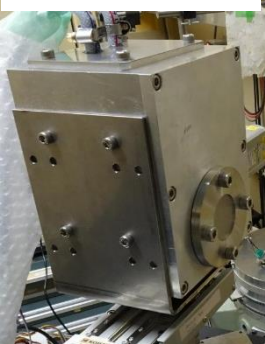
新規に開発した10GbE SiTCPによる SOIPIX検出器INTPIX4NA撮像システム



検出器小型基板



冷却容器



最高フレームレート350Hz
検出器冷却温度-20°C
で安定駆動を実現

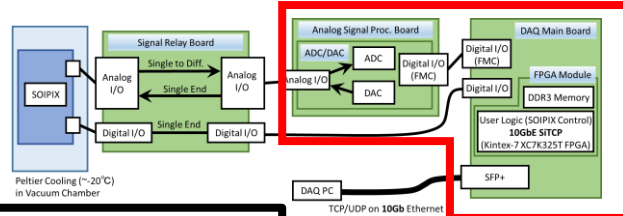
DAQソフトウェアについては
従来のSEABAS2基板の
ものが流用可能



信号中継基板

DAQ名称:
PF-DAQSIX
Photon Factory
Data Acquisition system
for SOIPIX Imaging with
XG-Ethernet

SOIPIX検出器撮像システム メイン基板部



FPGA Module Board (Prime Systems KX-Card7)

AMD Xilinx Kintex-7 FPGA
 • XC7K160T-2FFG676
 • XC7K325T-2FFG676

等選択可能
(開発環境はVivado)

将来次世代FPGAへの更新も可能

DDR3 Memory 1.5GB
(512MBx3)

SPI Memory etc.



10GbE版SiTCPを
ユーザーロジックと
混載して実装

<https://www.prime-sys.co.jp/products/kxcard7/>

DAQ Main Board (DETECTOR I/F Board Ver.1)

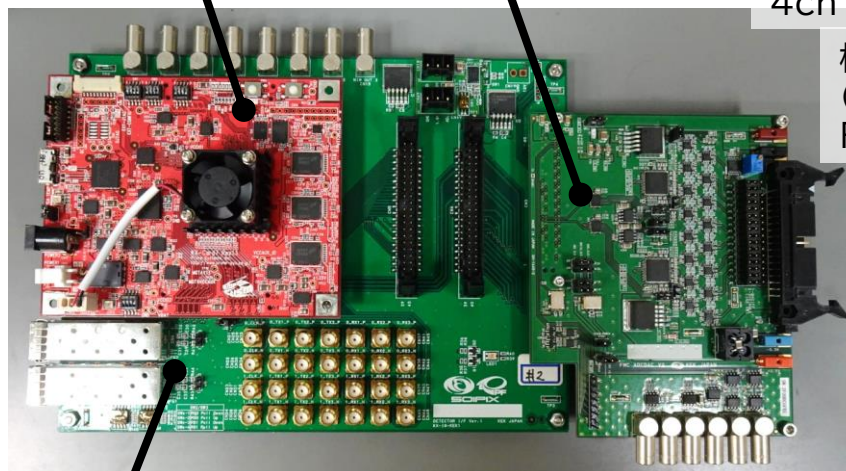
FPGAモジュール基板を取り付けて使用するインターフェース基板

- SPF+ I/F x2 (10GbE通信等に使用)
- NIM Input x4, Output x4 (LEMO)
- SMA IF x28
- MIL 40pin IF x2
 - 差動対応40pin有効x1
 - 一部クロック用GNDガード付配線含む34pin有効 x1

Analog Signal Proc. Board Mezzanine Board for Detector (GND GN-1645-2)

8ch ADC (AD9637) x2
 4ch DAC (DAC124S085CIMM) x2

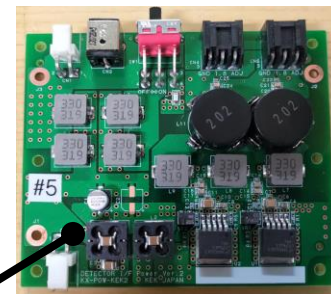
検出器(中継基板)側とは34pin MIL
(2pin NC)で接続
FMC LPCを介してメイン基板と接続



給電用基板 (KX-POW-KEK2)

外部から+5V(~10A)の給電を受けて、

- FPGAモジュール(+5V)
- 検出器方面(+1.8~+3.3V x1、+1.8V x1)
に給電

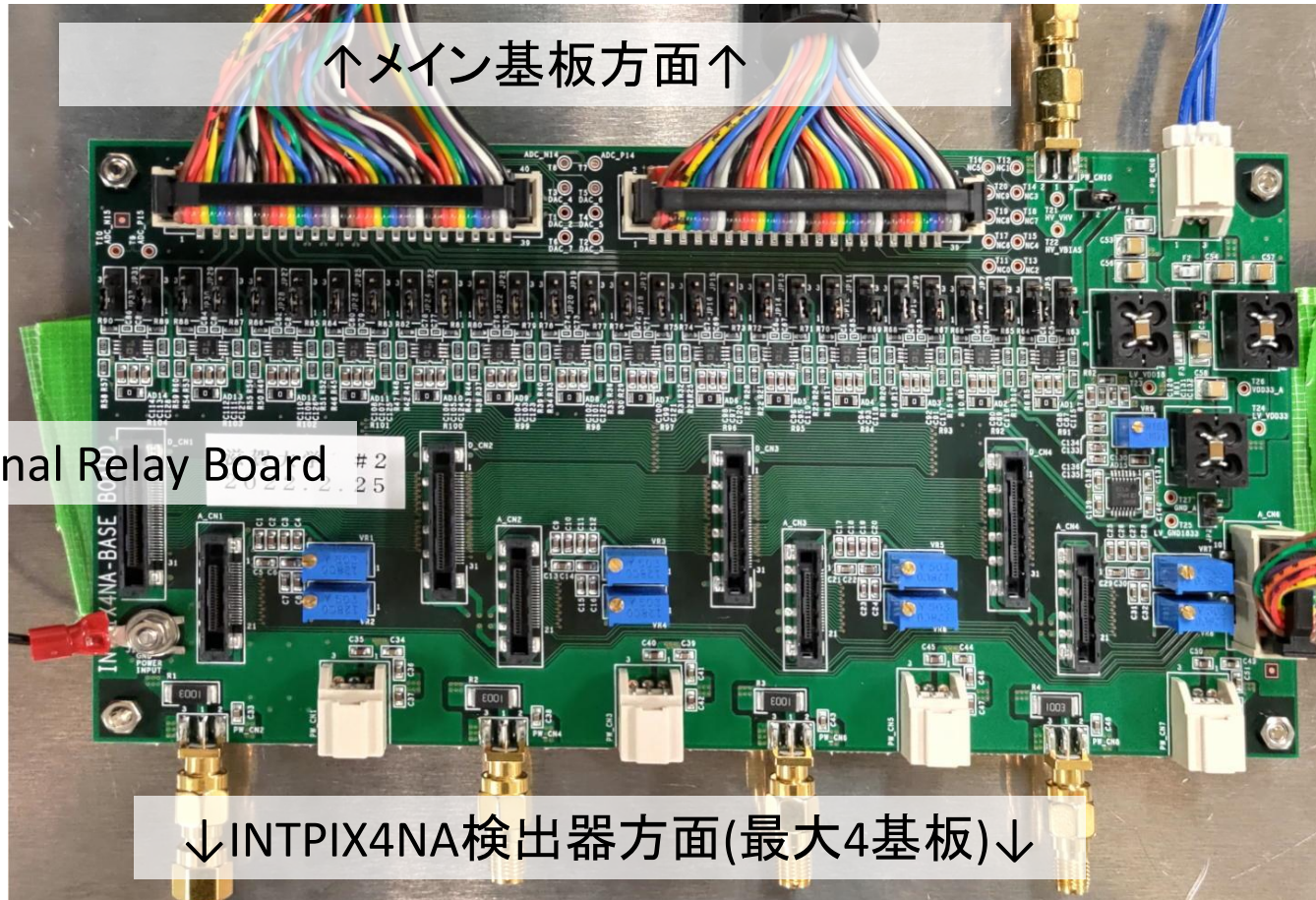
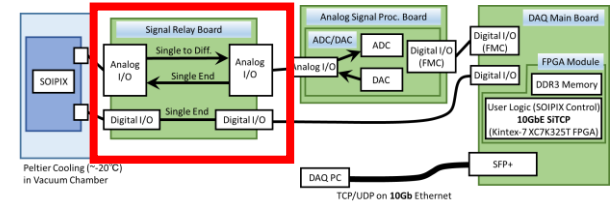


詳細については下記URL(右QRコード)に記載
<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=172818436>



構成・仕様について

SOIPIX検出器撮像システム 中継基板部



検出器出力→読出しシステム方向については
中継基板上でシングルエンド→差動に変換

詳細については下記URL(右QRコード)に記載

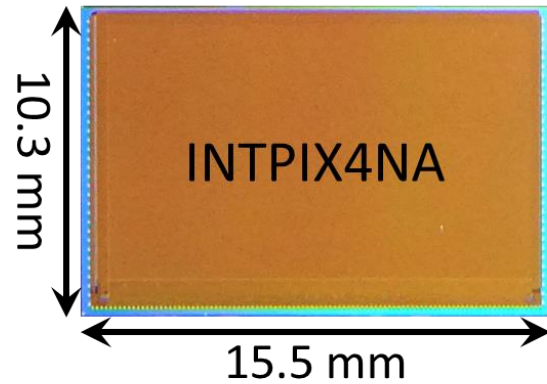
<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=172818436>

<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=345112977>



構成・仕様について

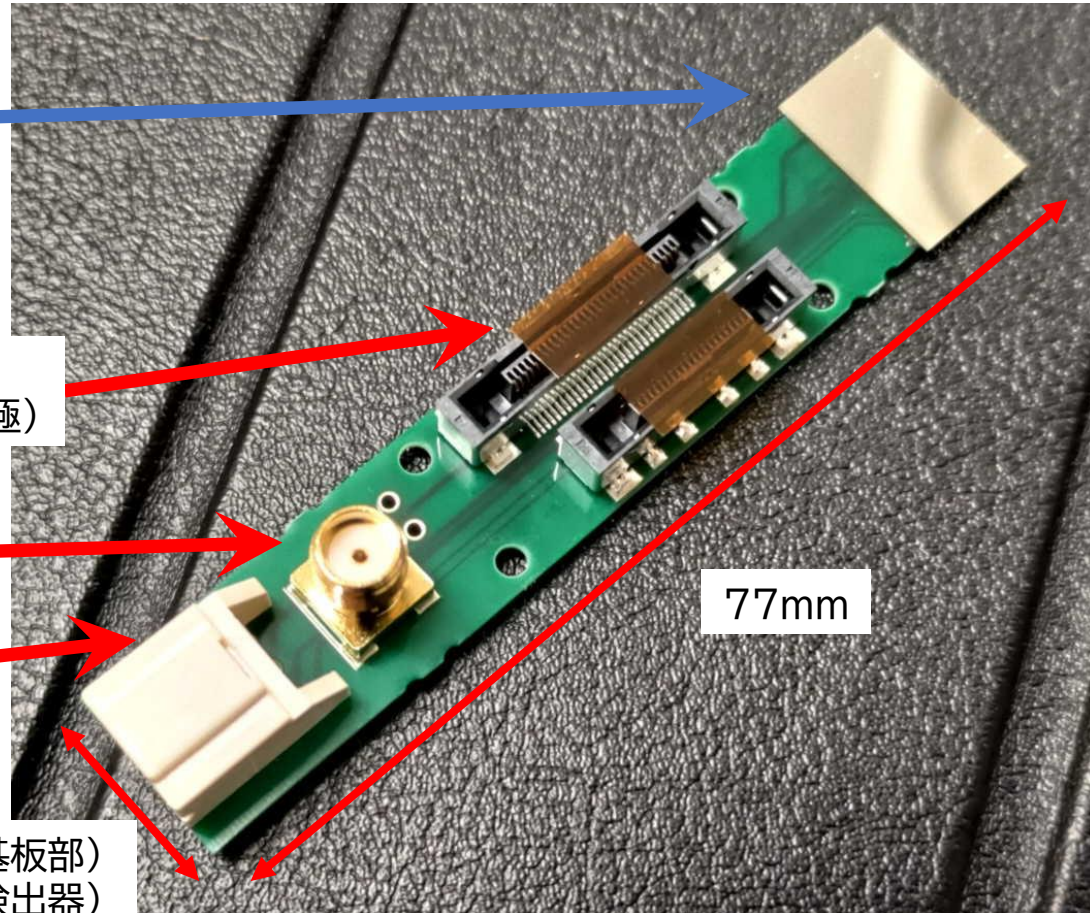
INTPIX4NA 1素子基板



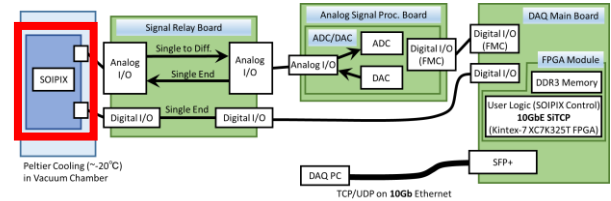
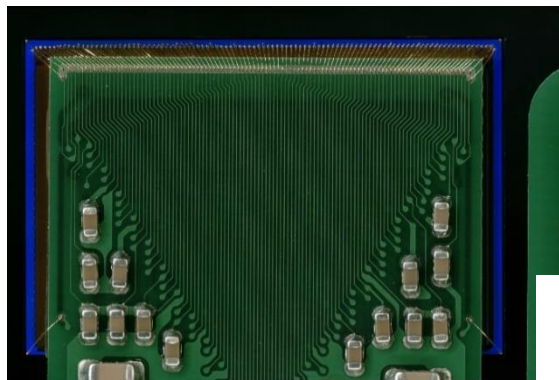
デジタル・アナログ信号線用コネクタ
(FX16、デジタル:31極、アナログ21極)

HV電源用コネクタ(SMA)

LV電源用コネクタ(DF1E)



14mm(基板部)
15mm(検出器)

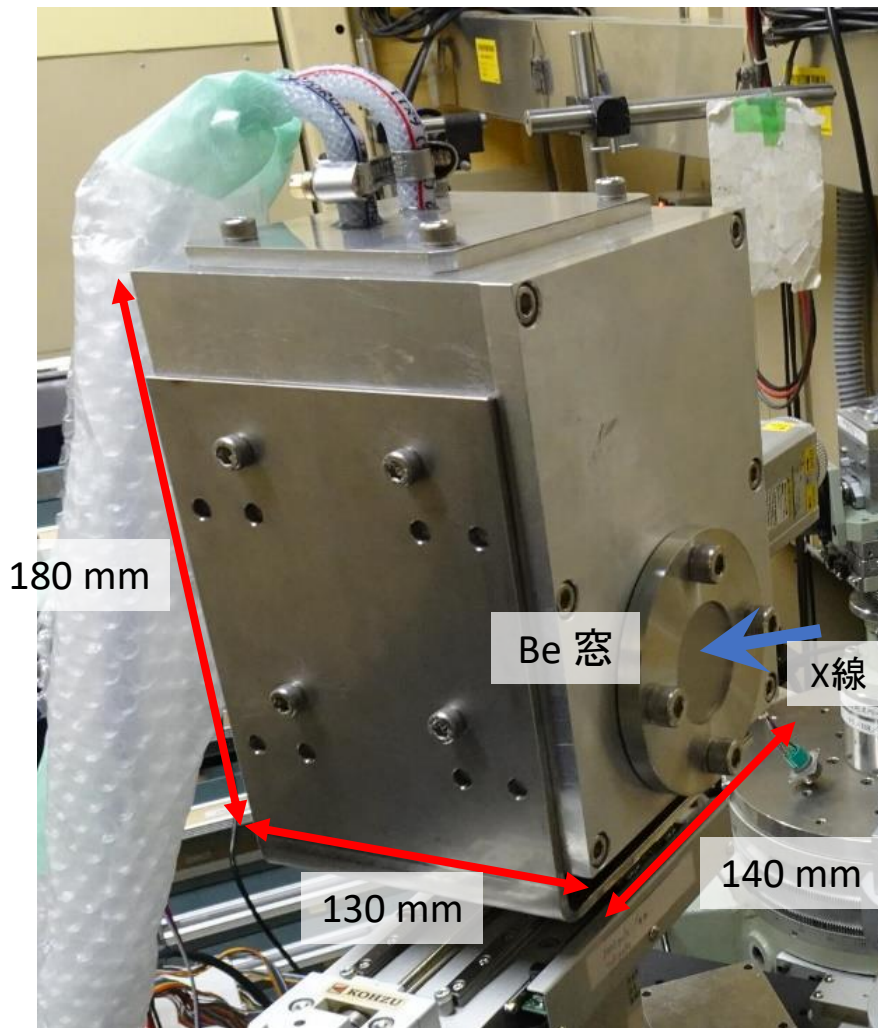


詳細については下記URL(右QRコード)に記載
<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=345112977>



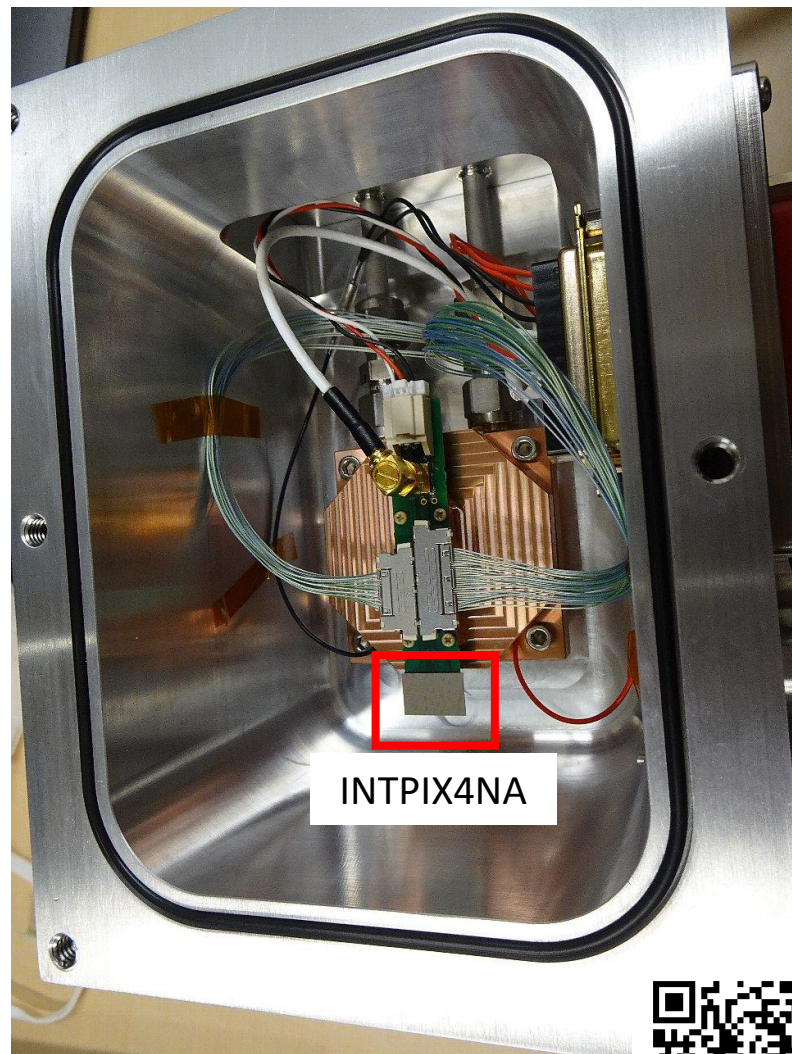
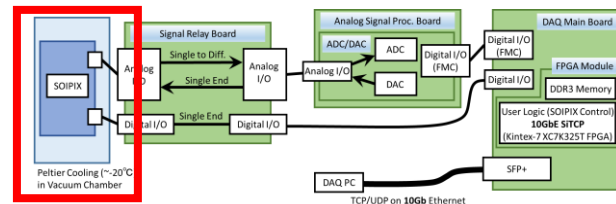
構成・仕様について

検出器冷却容器



検出器→ペルチェ素子→水冷(チラー循環:設定温度+2℃~)
の経路で排熱
冷却容器内は結露防止のため排気

→-20℃での運用が可能



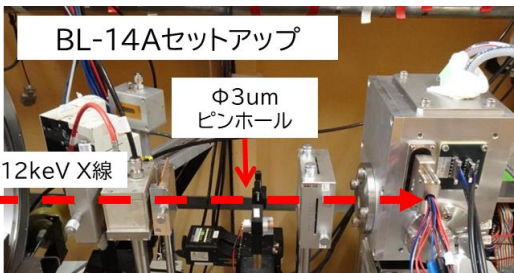
詳細については下記URL(右QRコード)に記載
<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=345112977>



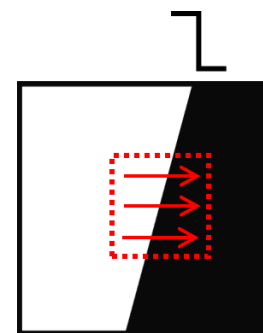
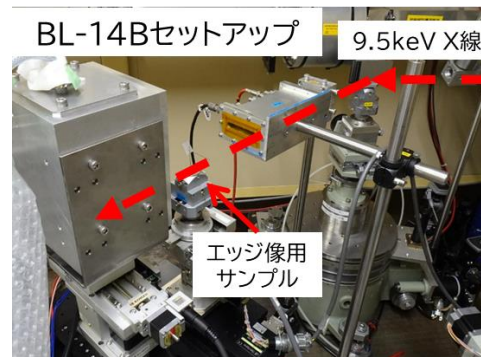
X線カメラの性能評価

エネルギー分解能・ノイズ評価(PF BL-14A)

解像特性(MTF)評価(PF BL-14B)

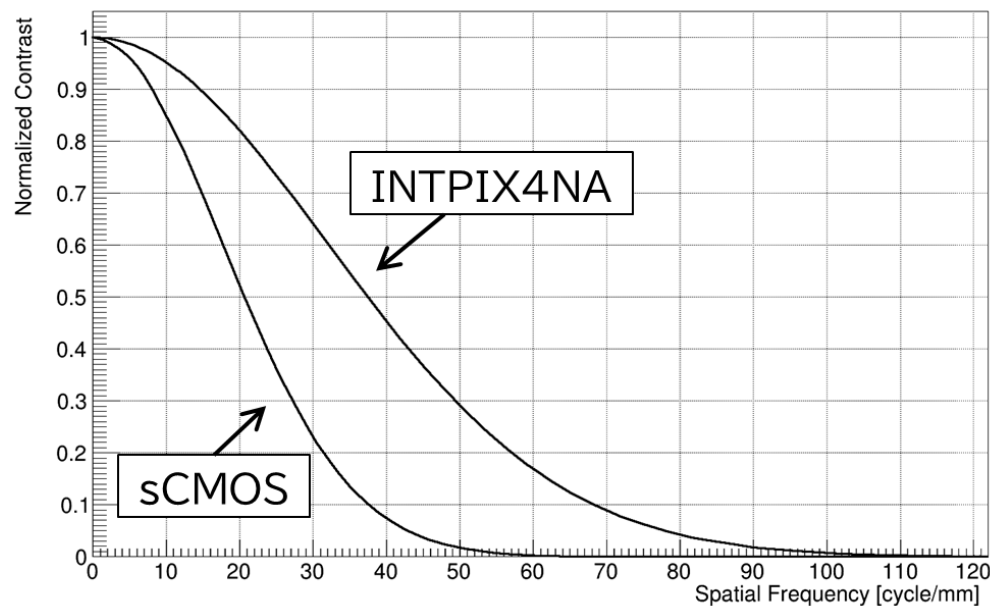
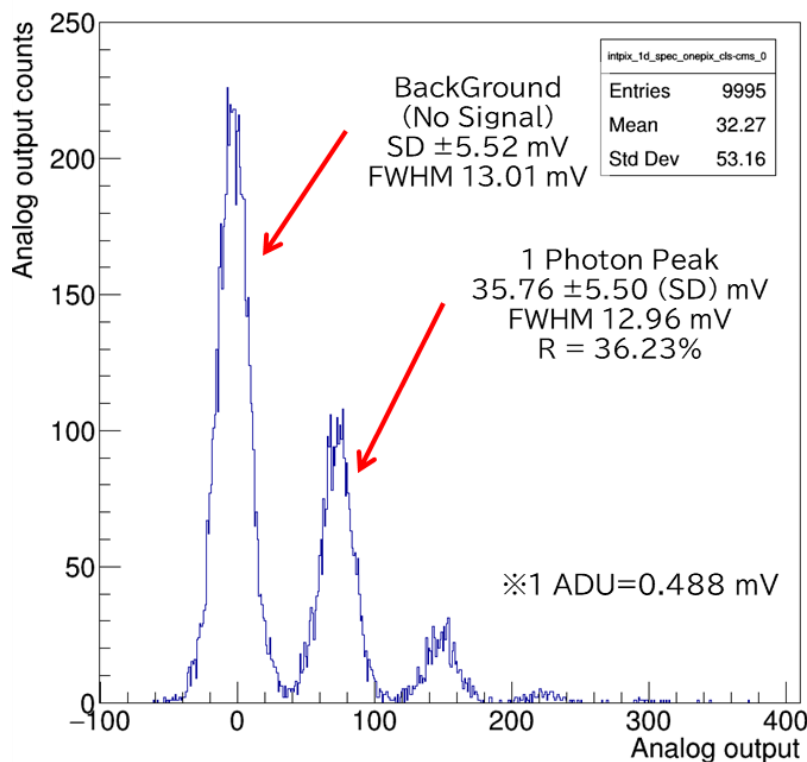


検出器ゲイン：
10 $\mu\text{V}/\text{e}$



斜めエッジ法による合成LSFから
解像特性(MTF)を算出

Modulation Transfer Function



エネルギー分解能(R) : 36.23 %@12 keV
ENC (SD) per pixel : 61.36e

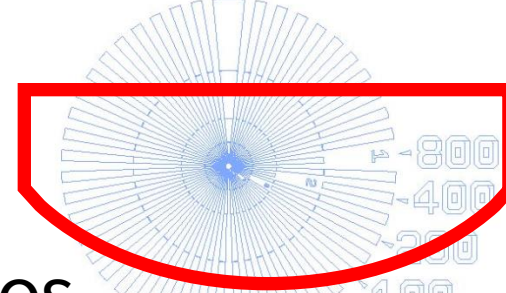
ナイキスト周波数(29.4cycle/mm)において
MTF > 65%

X線カメラの性能評価

PF AR-NE1A 2FZPズーム光学系での性能評価

E=14.4keV、2FZP(拡大率115.44倍)
ジューメンスターパターン

25 NM INNER
1.4 UM OUTER
HALF PITCH



sCMOS

露光時間

$$5\text{s} \times 100 = 500\text{s}^2$$

I/I₀正規化像

SOIPIX(INTPIX4NA)

露光時間

$$0.5\text{s} \times 1000 = 500\text{s}$$

I/I₀正規化像

sCMOSより良好なコントラスト
sCMOSでは見えないパターン中心部
の構造まで解像できている

sCMOSと同程度のコントラストであれば1/10程度の時間で撮像可能

撮像システムの応用状況(整備・試験中含む)

■Photon Factory (PF)内

- 2FZPズーム光学系(9.6keV/14.4keV)@AR-NE1A
 - 倍率30-300倍での可変倍率イメージング
 - シュリーレン位相像による位相差イメージング
 - 低強度条件下でのX線ラミノグラフィ
- マイクロCT撮像(吸収/DEI位相差)@BL-14B
- 分離型X線干渉計@BL-14C
- 放射光を用いたX線残留応力測定@BL-14A

■PF外

- 金属リチウムのミュオン特性X線測定@J-PARC
- 超冷中性子による弱い等価原理検証@東京大
- X線残留応力測定(2素子基板使用)@金沢大
- X線残留応力測定/X線イメージング応用@滋賀大

撮像システムの応用状況(整備・試験中含む)

■Photon Factory (PF)内

- 2FZPズーム光学系(9.6keV/14.4keV)@AR-NE1A
 - 倍率30-300倍での可変倍率イメージング
 - シュリーレン位相像による位相差イメージング
 - 低強度条件下でのX線ラミノグラフィ
- マイクロCT撮像(吸収/DEI位相差)@BL-14B
- 分離型X線干渉計@BL-14C 撮像例を示します
- 放射光を用いたX線残留応力測定@BL-14A

■PF外

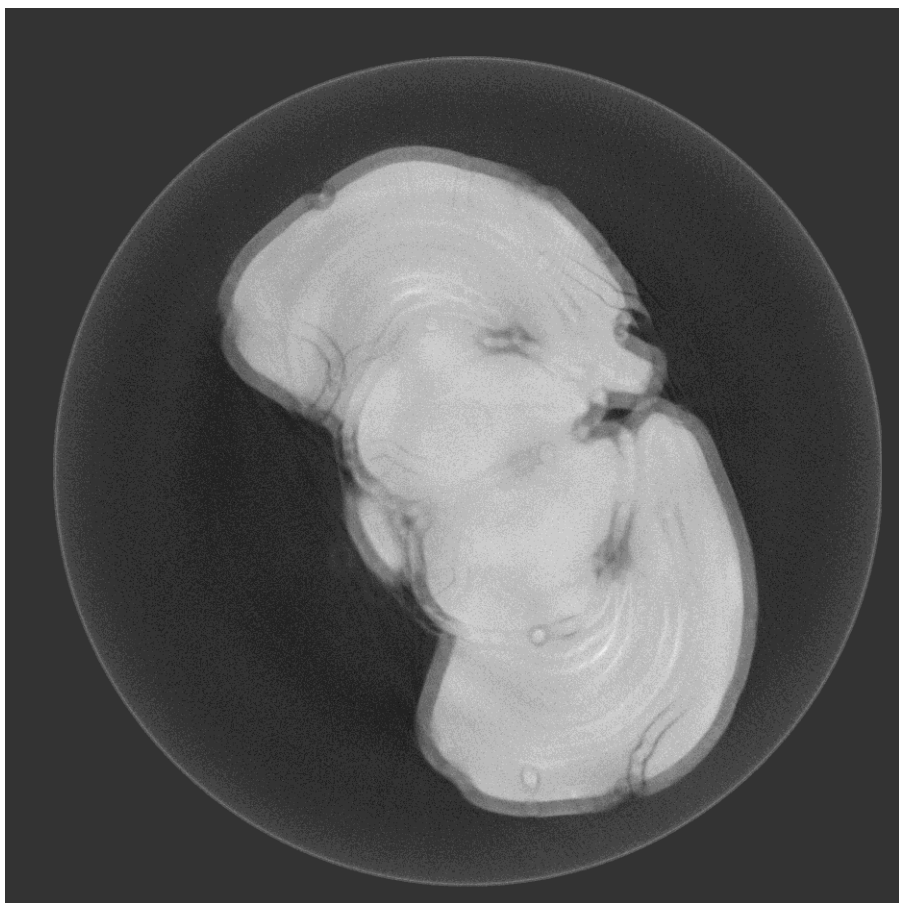
- 金属リチウムのミュオン特性X線測定@J-PARC
- 超冷中性子による弱い等価原理検証@東京大
- X線残留応力測定(2素子基板使用)@金沢大
- X線残留応力測定/X線イメージング応用@滋賀大

撮像システムの応用状況

分離型X線干渉計による生体試料撮像@BL-14C (マウスの脳のCT)

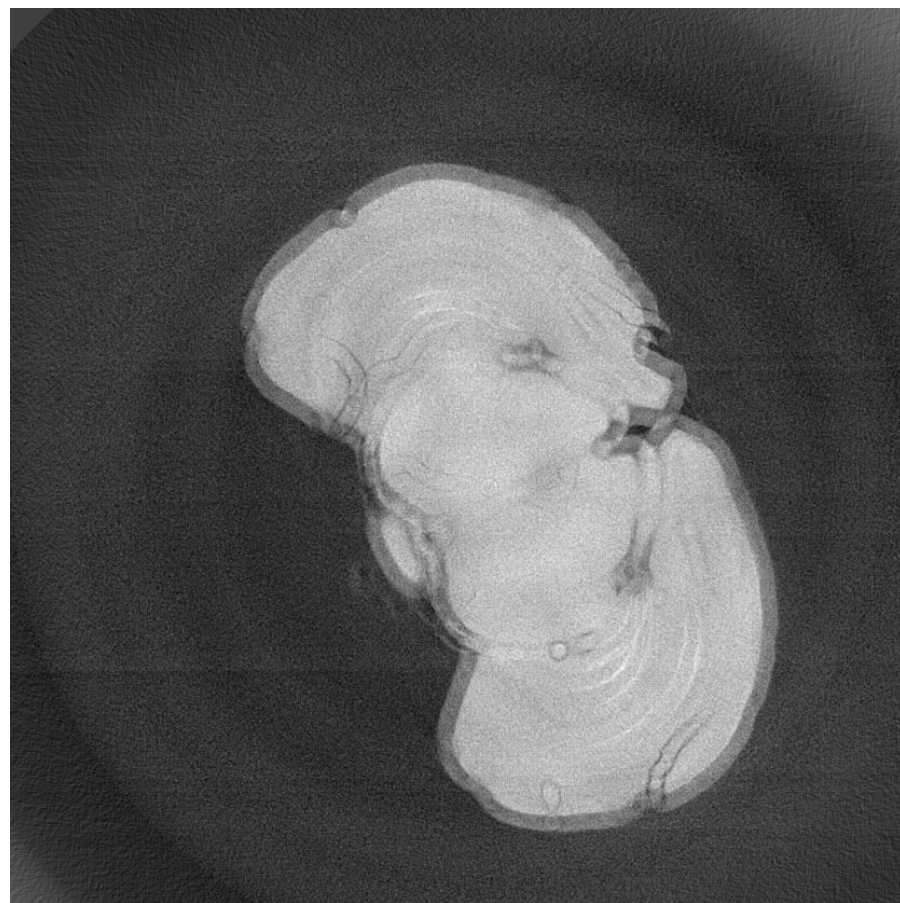
Zyla (CCDカメラ)

6.5um正方画素を2x2ビニング



INTPIX4NA

17um正方画素



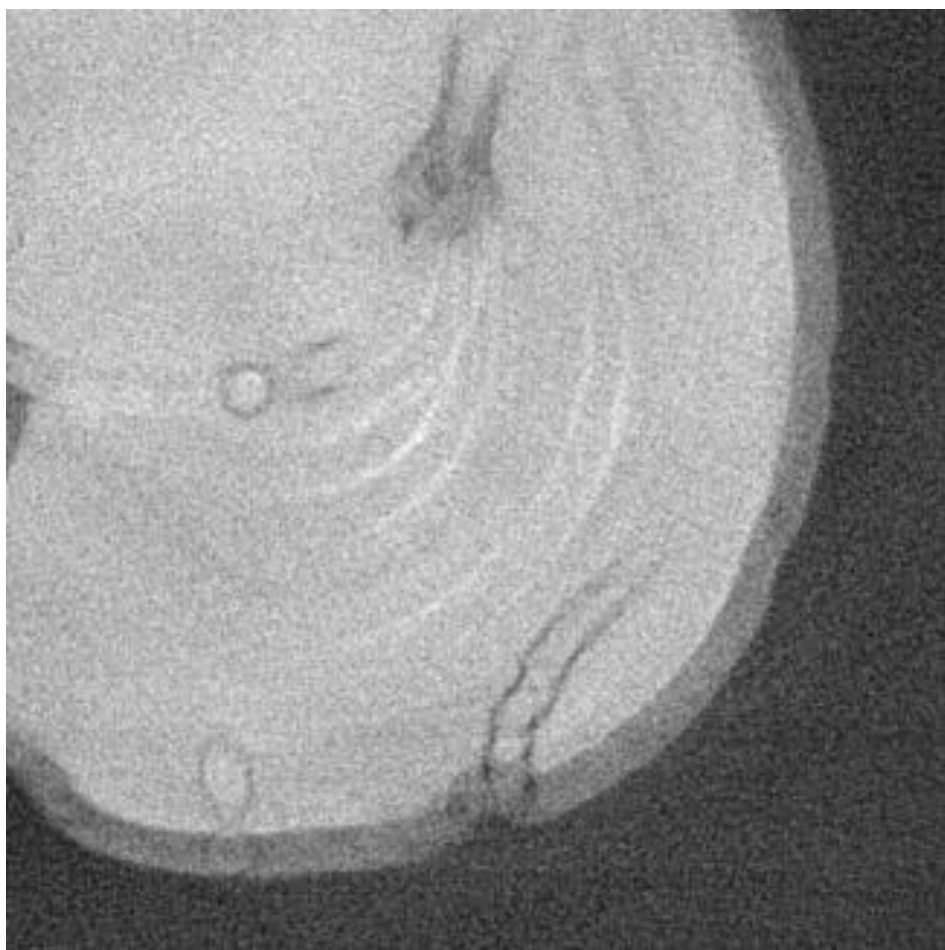
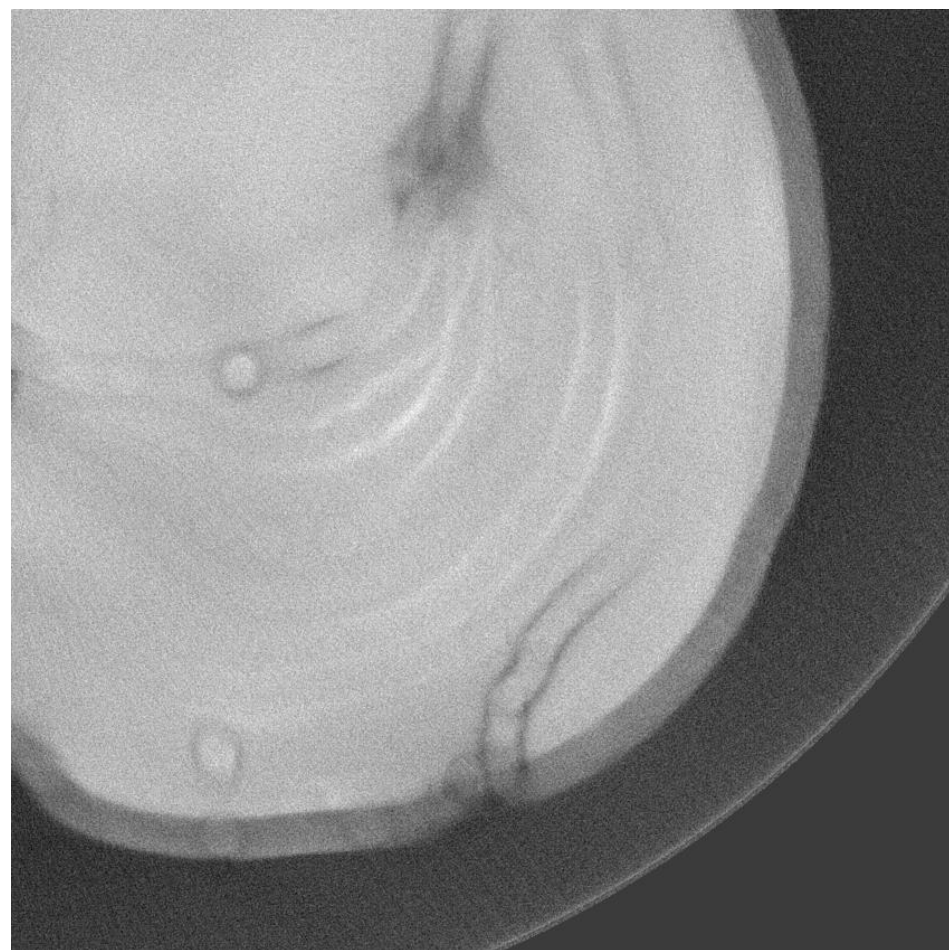
分離型X線干渉計による生体試料撮像@BL-14C (マウスの脳のCT)

Zyla (CCDカメラ)

6.5um正方画素を2x2ビニング

INTPIX4NA

17um正方画素



撮像システムの応用状況(整備・試験中含む)

STARSフレームワークによる
光学系・ステージ等周辺機器との連動制御

■Photon Factory (PF)内

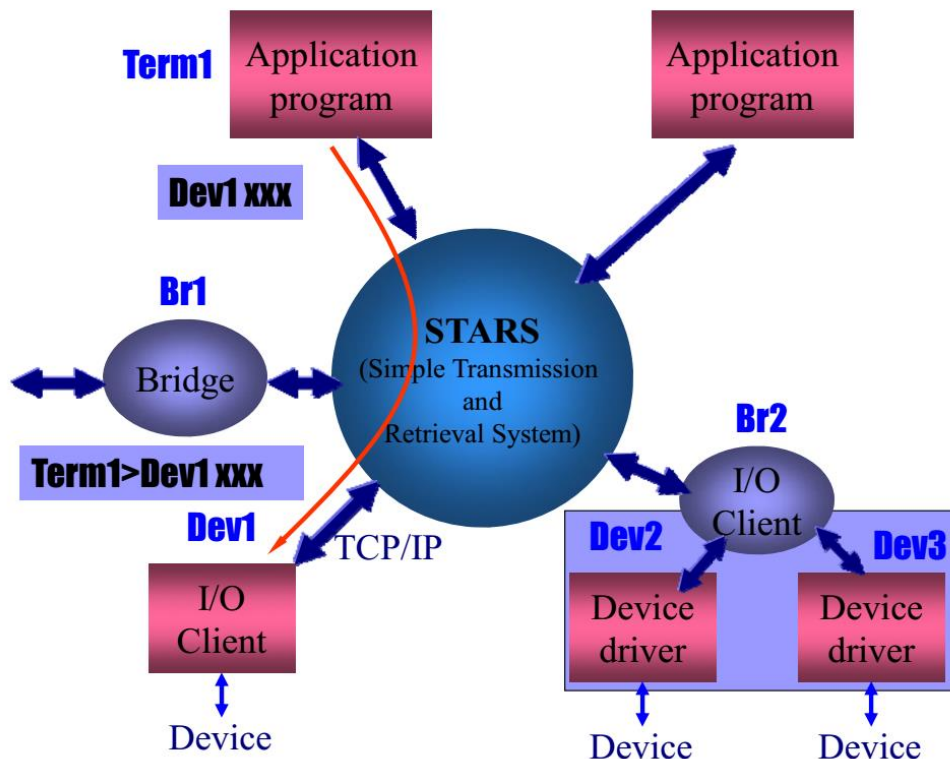
- 2FZPズーム光学系(9.6keV/14.4keV)@AR-NE1A
 - 倍率30-300倍での可変倍率イメージング
 - シュリーレン位相像による位相差イメージング
 - 低強度条件下でのX線ラミノグラフィ
- マイクロCT撮像(吸収/DEI位相差)@BL-14B
- 分離型X線干渉計@BL-14C
- 放射光を用いたX線残留応力測定@BL-14A

■PF外

- 金属リチウムのミュオン特性X線測定@J-PARC
- 超冷中性子による弱い等価原理検証@東京大
- X線残留応力測定(2素子基板使用)@金沢大
- X線残留応力測定/X線イメージング応用@滋賀大

測定高度化に向けた取り組み PFで開発・運用中の制御フレームワークSTARSとの連携

STARS Simple Transmission And Retrieval System



- アプリケーションと測定器の通信を仲介するシステム
- スター型トポロジで1対1もしくは1対多の情報交換が可能

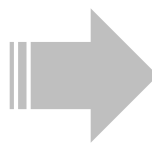
→実験ステーションでの測定・制御を連動させ、自動化・省力化・高度化

※同様の仕組みとしては、EPICS、TANGO、MADDOCA、TINE等

詳細については下記に記載
<https://stars.kek.jp/>

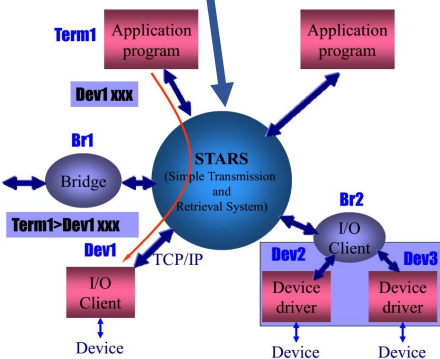
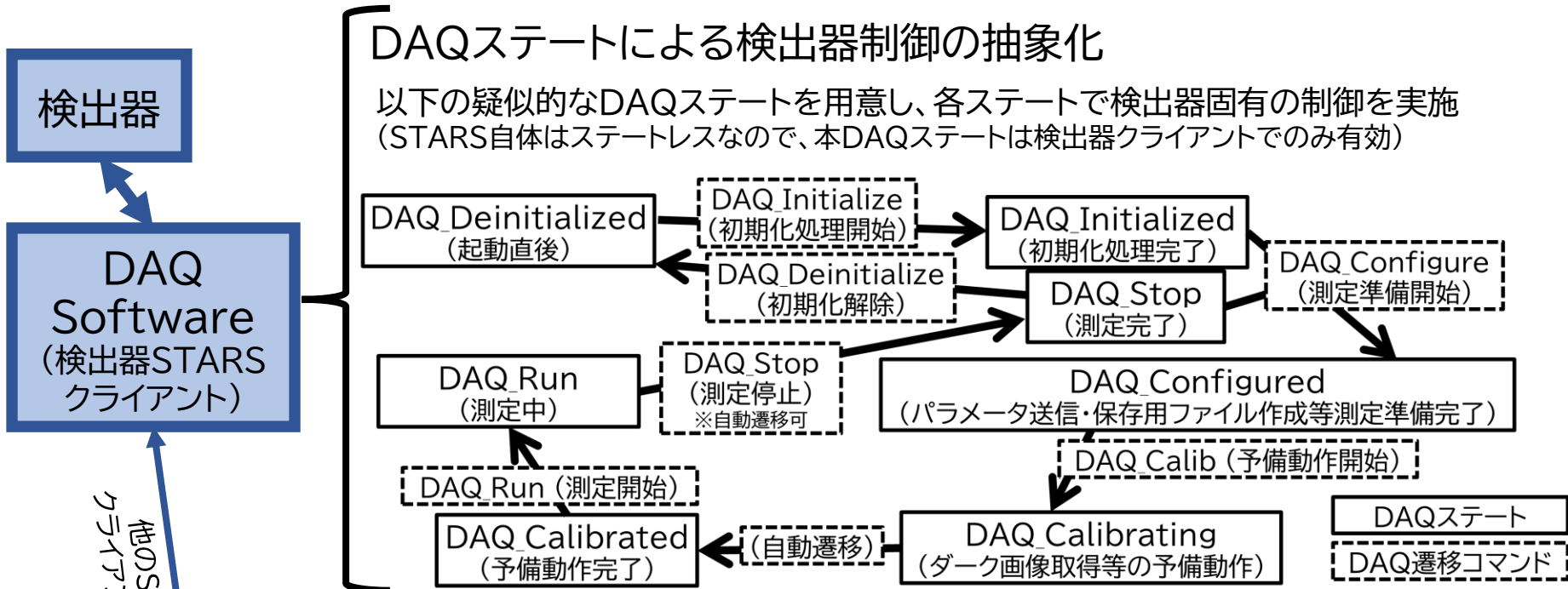


INTPIX4NAを含むX線検出器用の
共通STARSコマンドを整備



用途・条件に応じて
他の検出器と切り替えつつ
INTPIX4NAを活用

検出器共通STARSコマンド



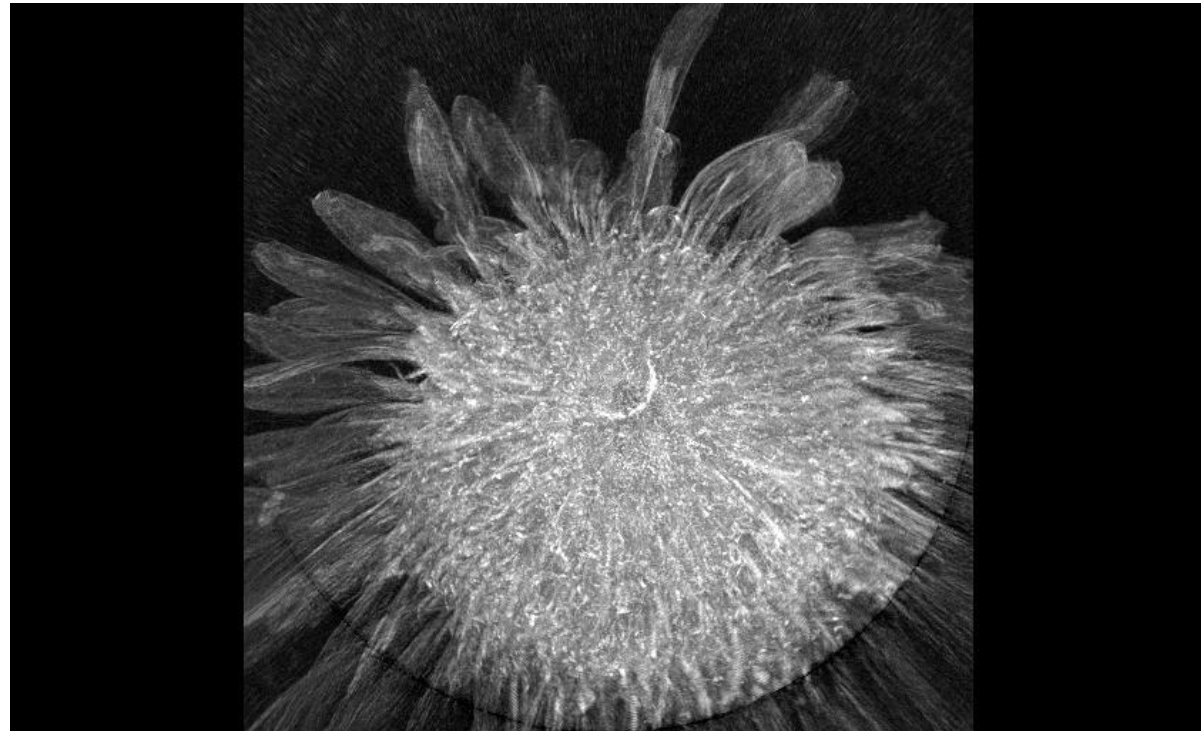
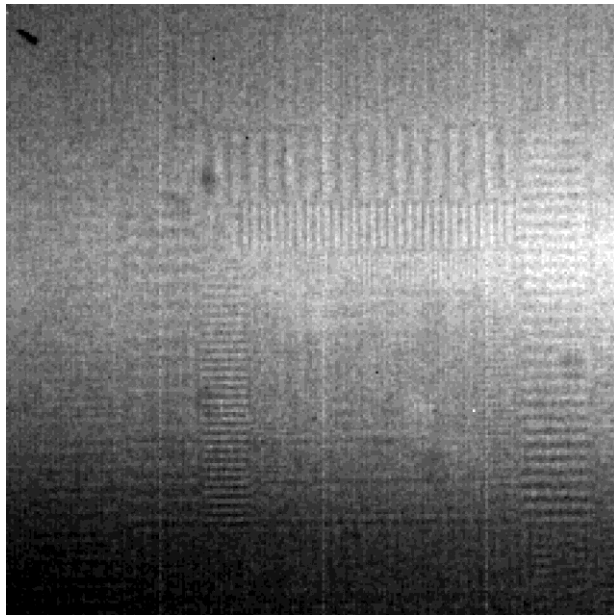
一部がよく使われる
パラメータ設定コマンド
については実装を
推奨するものとして用意
(コマンド/サブノードの
両方で実装)

コマンド/サブノード名	設定パラメータ
INTEGT	フレーム当たり露光時間
FNUM_C	ダーク画像 取得フレーム数
FNUM_D	測定(撮像)時 取得フレーム数
RUNID_EN	RunIDを有効化
RUNID_NUM	RunID番号設定
JSONParam	その他のパラメータ 一括設定用コマンド (JSON形式)

STARSフレームワークによる連動制御下での測定例

ズーミング光学系における
フォーカス調整
@PF AR-NE1A

CT撮像@PF BL-14B
(試料:ヒメジヨオンの花)



その他、ステージと連動して大きなサンプルを移動しつつ撮像し、疑似的な大視野撮像を行う、ビームラインの状態に応じた撮像の一時中断・再開といった測定も可能。
また、撮像時の入射X線強度、リングカレント、温度、湿度といった情報を自動的に記録・収集するといったことも可能。

まとめ・今後に向けて

SOIPIX検出器「INTPIX4NA」と
DAQ「PF-DAQSIX」を核とするX線撮像システム

- FPGAモジュール等からなる複数基板で構成
 - 検出器本体と読み出し基板を分離し、ケーブルで接続する構成
- SiTCP-XGを用いた10GbEによる高速読み出しシステムによって最高350Hzに対応
- ペルチェ素子を用いた検出器冷却容器で長時間露光に対応
- DAQソフトウェアについては従来基板SEABAS2との高い制御互換性を確保



開発した新システムによるX線カメラでは良好な解像特性を確認

コントラストがつかない軟組織や
微細な構造をもつ対象、放射線損傷に弱い試料等、
低強度・低コントラストな条件での撮像に利用可能

まとめ・今後に向けて

現在、PF内外での応用を検討・推進中

- 2FZPズーミング光学系@PF AR-NE1A
- X線干渉計による位相イメージング@PF BL-14C
- X線マイクロCT撮像@PF BL-14B
- 放射光を用いたX線残留応力測定@PF BL-14A
- 金属リチウムのミュオン特性X線測定@J-PARC
- 超冷中性子による弱い等価原理検証@東京大
- X線残留応力測定(2素子基板使用)@金沢大
- X線残留応力測定/X線イメージング応用@滋賀大

etc.

STARSフレームワークを使用した

- 検出器共通コマンド
- 外部機器との統合制御

も開発中

X線カメラとしての応用可能性はもちろんの事、
DAQシステムについても応用の可能性があればぜひお声がけください！

ご清聴頂き ありがとうございました

詳細については下記に記載しております

1. PF-DAQSIX(読出し基板群)

<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=172818436>

2. INTPIX4NA小型基板/中継基板

<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=345112977>

3. STARS

<https://stars.kek.jp/>

4. 本撮像システムに関する論文

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169429>



1



2



3



4