

ナノテラスにおける3極ウィグラーを用いた 電子ビーム診断システム

第20回日本加速器学会年会
2023年8月31日

上島考太^{A)}, 高野史郎^{B),C),A)}, 前坂比呂和^{C)}, 正木満博^{B), A)}, 藤田貴弘^{B), A)}, 出羽英紀^{B), A)},
渡部貴宏^{B),C),A)}, 深見健司^{B),C),A)}, 谷内努^{B), A)}, 清道明男^{B), A)}, 土山翼^{D)}, 及川治彦^{D)},
伊原彰^{D)}, 齋田涼太^{D)}, 西森信行^{A)}

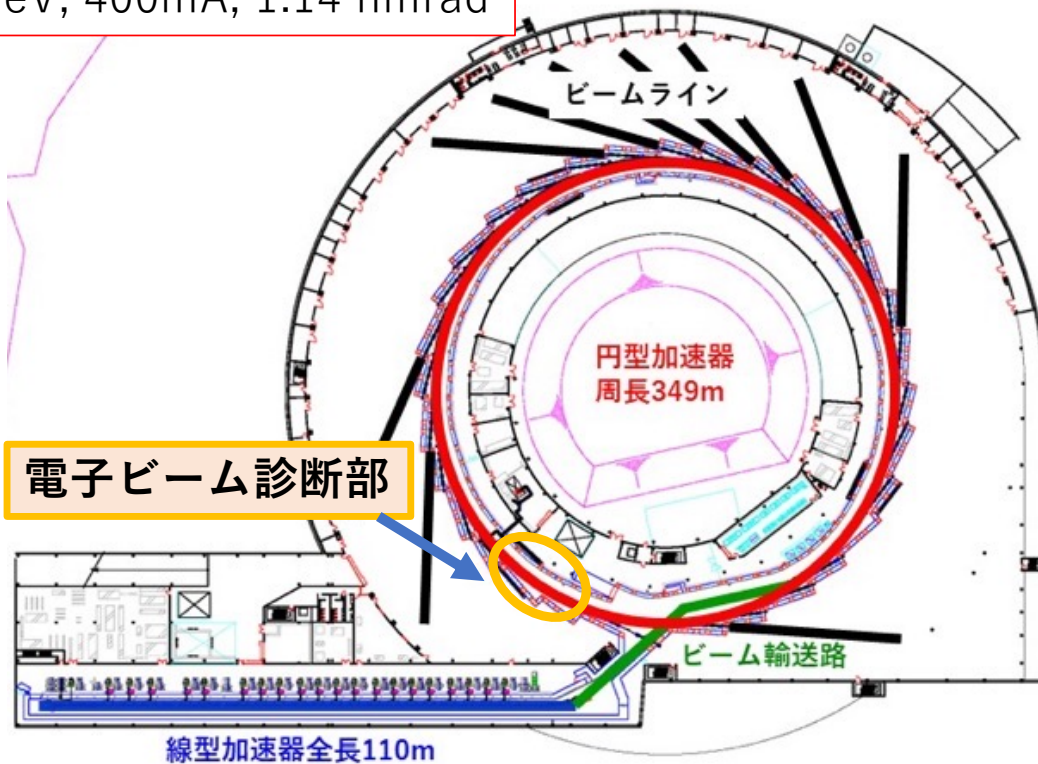
A)量研, B) 高輝度光科学研究センター, C) 理研, D)量研/NAT

内容

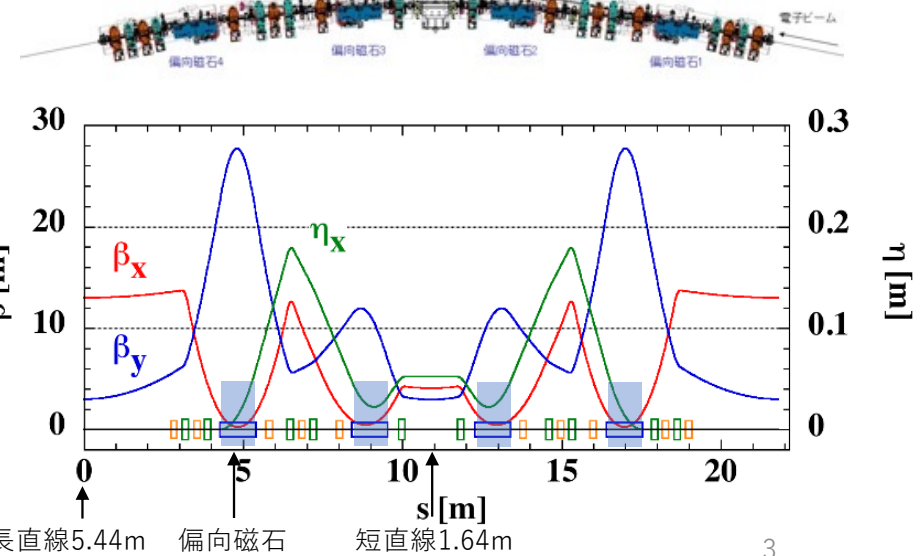
- ナノテラスの電子ビーム診断システム
- 3極ウィグラーの開発、設置
- First Light 観測
- X線ピンホールカメラ(XPC)の性能評価
- まとめ

加速器構成

周長 349m
 16セル, ビームライン28本
 3GeV, 400mA, 1.14 nrad

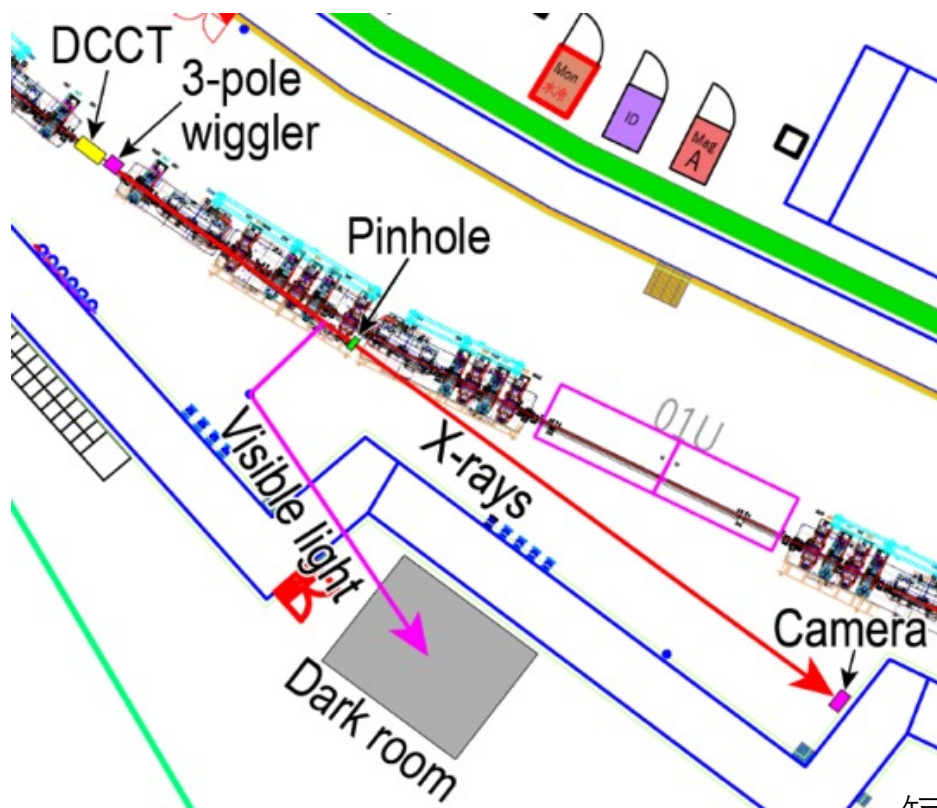


3GeV蓄積リング基本セルの構成
 機能複合型偏向電磁石 4台
 4極電磁石 10台
 6極電磁石 10台



電子ビーム診断システム

1本の短直線部に蓄積電流モニター用のDCCTと電子ビーム診断用の光源を設置



光源: 3極ウィグラー
硬X線から可視光領域まで幅広い波長域の光源

- ・硬X線を用いた横方向電子ビームサイズ測定により、エミッタンス及びカップリング比を診断
- ・可視光成分を暗室まで導き、ストリークカメラを用いたバンチ長測定も計画。

$$\text{ビームサイズ } \sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x + \left(\frac{n_x \sigma_E}{E}\right)^2} \quad \sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y}$$

ビームサイズを観測し、エミッタンスを求める。
カップリング比も求まる。

光源-ピンホール 5.225m
光源-カメラ 14.782m

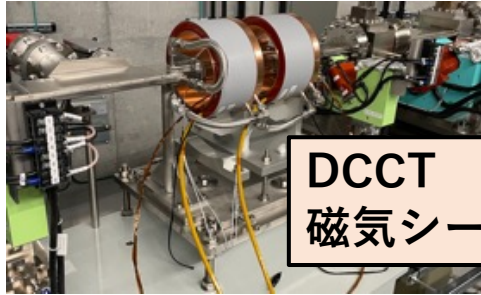
短直線部でのビームサイズ
(設計値)

$$\sigma_x = 80 \mu\text{m} (\epsilon_x 1.14 \text{ nm rad})$$

$$\sigma_y = 6 \mu\text{m} (\text{カップリング} 1\%)$$

ビームサイズ測定 目標分解能 5 μm以下

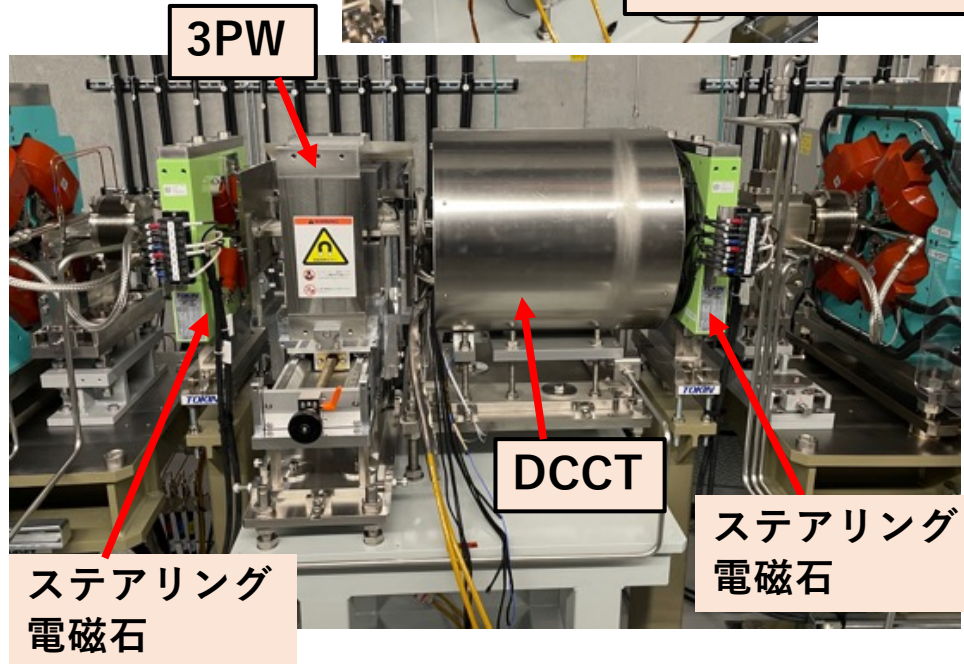
短直線部の機器構成



DCCT
磁気シールド内部

短直線部機器構成

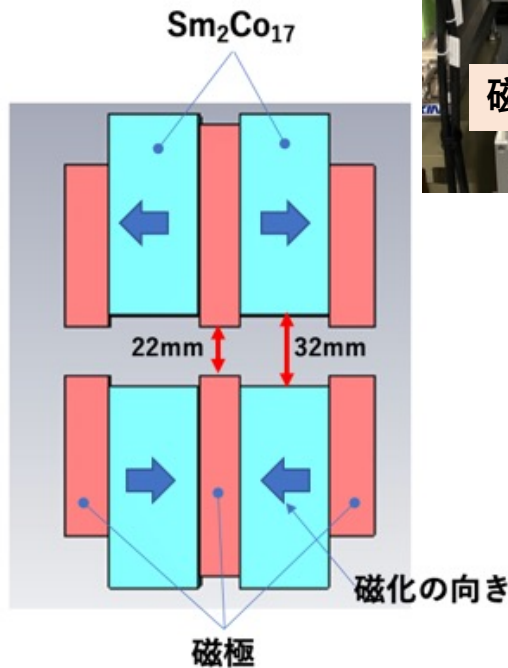
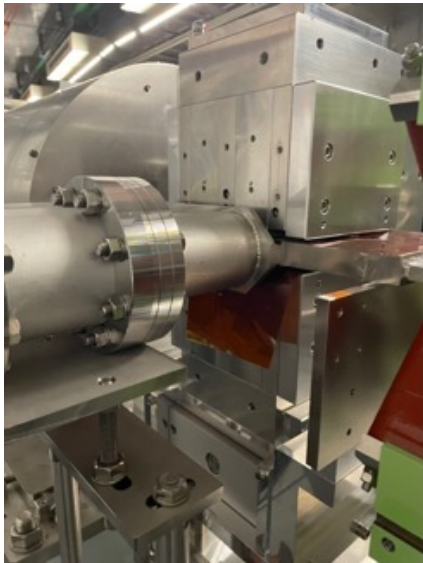
- ・ステアリング電磁石：軌道補正のため
- ・DCCT：電流モニター
- ・3極ウィグラー：電子ビームサイズモニター



3極ウィグラー設計条件

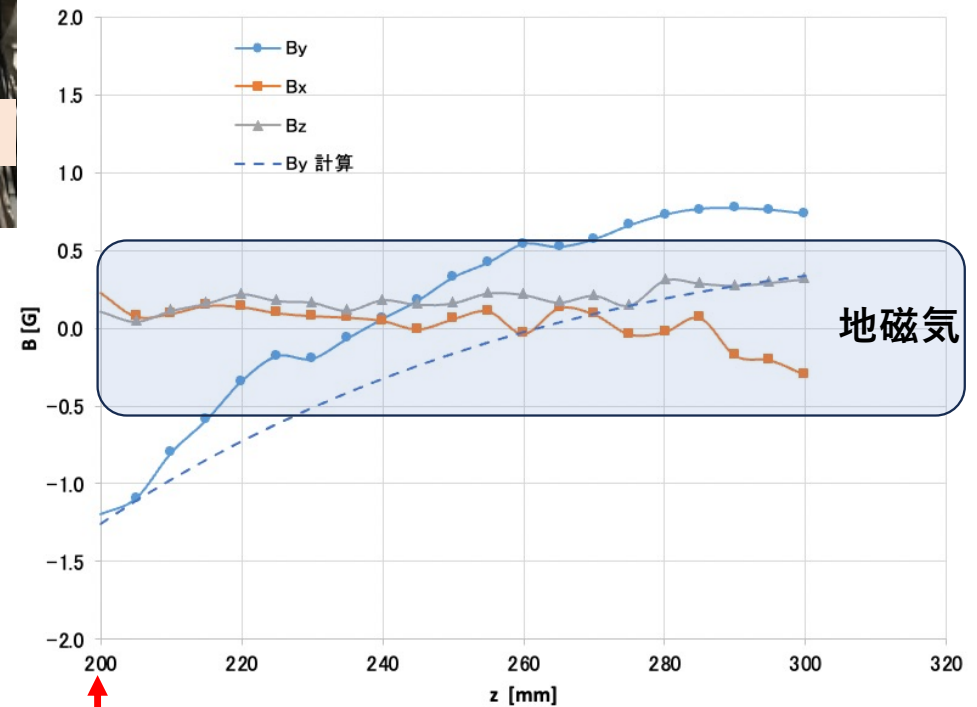
- ・ 50keVの硬X線を発生させるため **ピーク磁場1.2T以上**
- ・ 積分磁場ByL **1 Tmm以下 (0.1mrad以下)**
- ・ 空間制限により **180mm以内**
- ・ **磁極ギャップ22mm以上**
- ・ DCCTセンサーヘッドへの **漏れ磁場対策が必要**

3極ウィグラー



ハイブリッド型の3極ウィグラー
 永久磁石 サマリウムコバルト (Sm₂Co₁₇)
 磁極 電磁軟鉄 SUY-1 相当
 両端に磁気シールドを設置

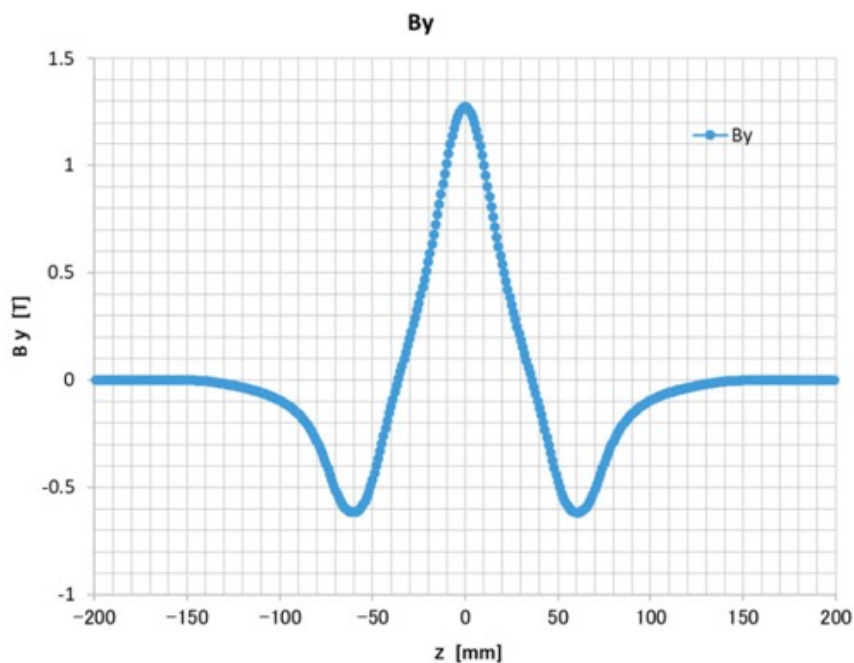
ビーム軸上測定 (シールド有)



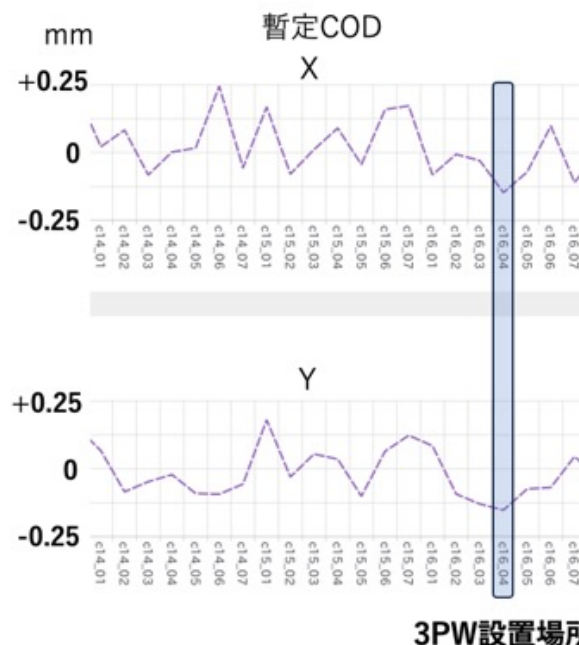
磁気シールド
 設置場所

漏れ磁場：地磁気程度に抑えられた。

3極ウィグラーの性能



ピーク磁場 1.274 T
 積分磁場ByL 0.056 Tmm
 (-200~+200mm積分値)



ステアリング		キック角 μrad
3PW 上流	水平	7.98
3PW 上流	垂直	-3.39
3PW 下流	水平	8.95
3PW 下流	垂直	-5.25

ステアリング電磁石(最大 $250 \mu\text{rad}$)
 3PWのCODへの影響は、ほぼ無し。

低エミッタンス光源リングのエミッタンス診断

第3世代光源の発展とともに放射光を用いるエミッタンス診断が大きく飛躍 #

SPring-8での微小エミッタンス診断技術

➤ 単色可視光

2次元放射光干渉計 ##

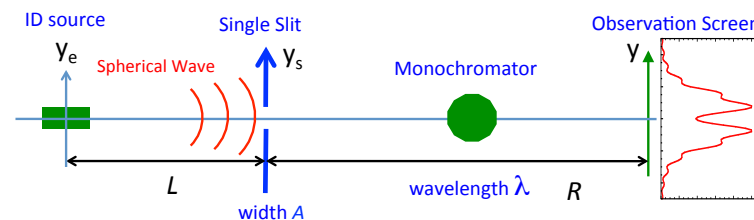
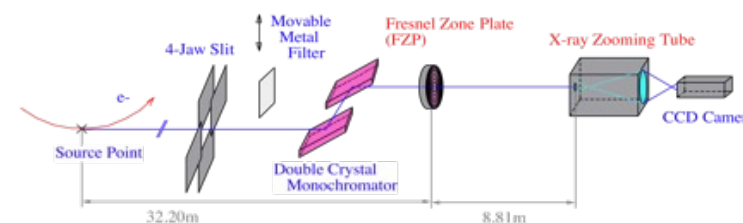
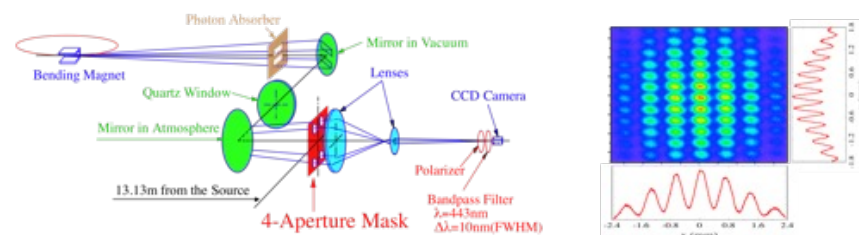
➤ 単色X線

FZPによるイメージング ###,

フレネル回折法 ####

➤ 白色硬X線

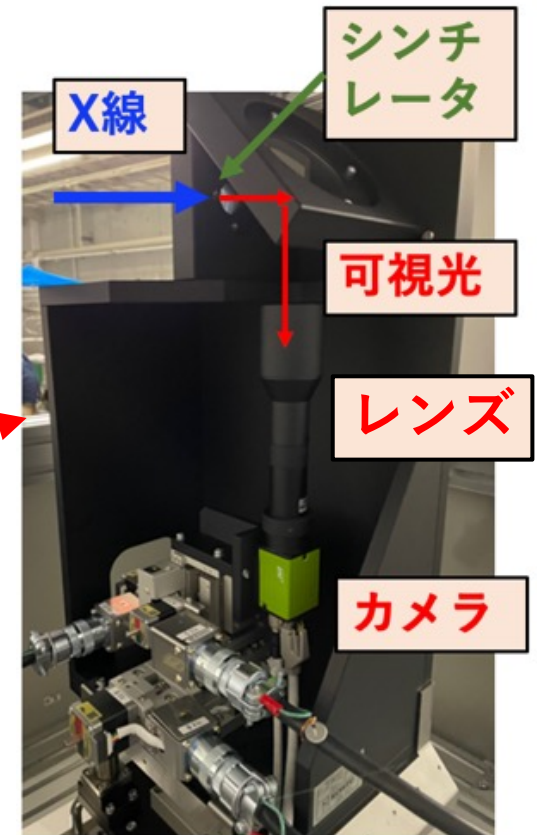
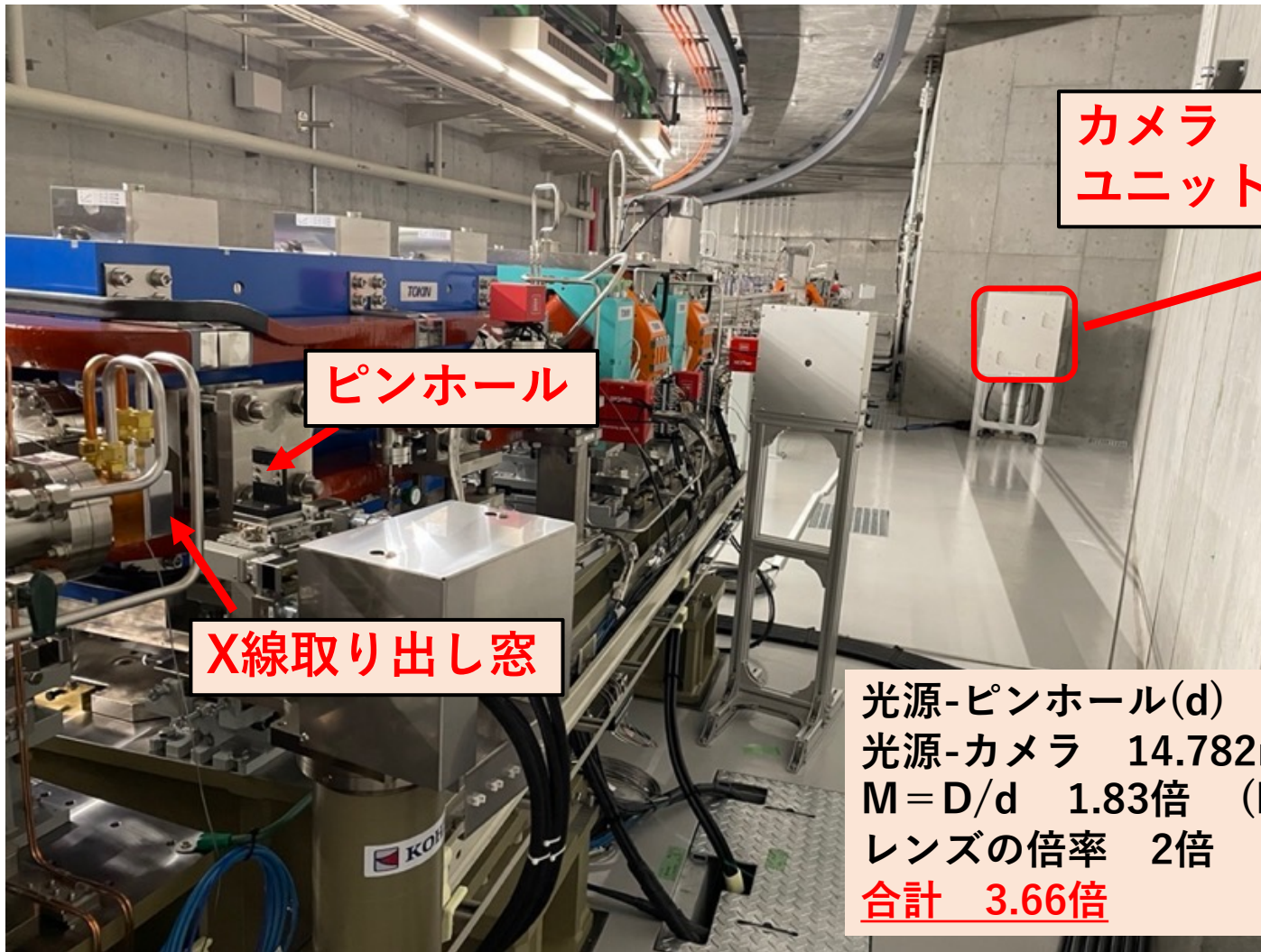
X線ピンホールカメラ #####



ナノテラスではX線ピンホールカメラを採用
 ✓X線分光素子を用いずに必要分解能を実現可能

S. Takano, IPAC2010 WEZMH01; H. Maesaka, IPAC2015 THYC1; S. Takano and H. Tanaka, IBIC2019 THB002.
 ## M. Masaki and S. Takano, J. Synch. Rad. 10 (2003) p.295.
 ### S. Takano, et al., Nucl. Instr. and Meth. A556 (2006) p.357.
 #### M. Masaki, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 18 (2015) 042802.
 ##### S. Takano et al., IBIC2015 TUCLA02.

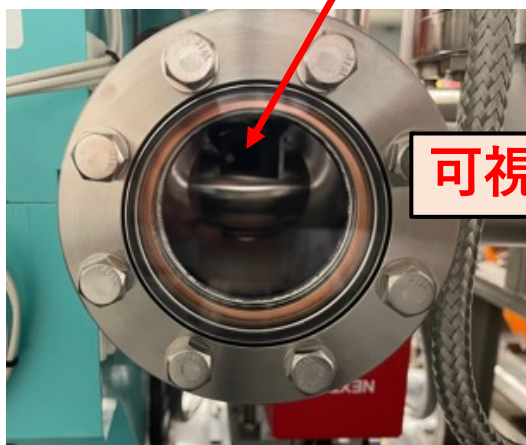
X線ピンホールカメラ



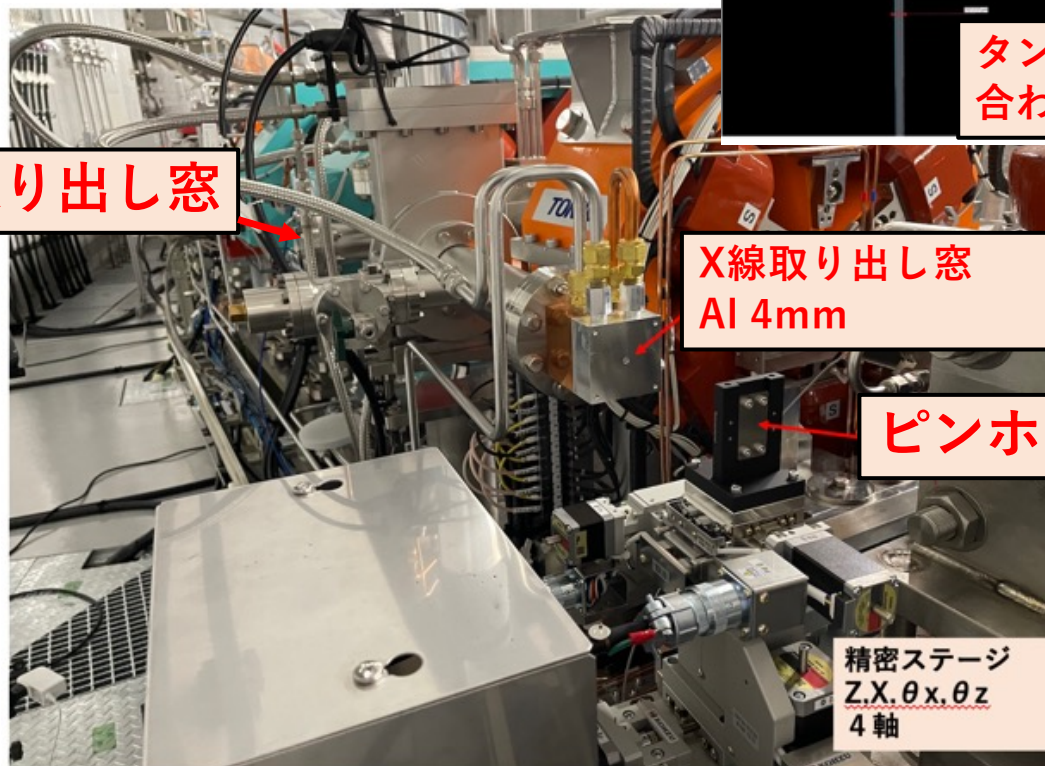
光源-ピンホール(d) 5.225m
光源-カメラ 14.782m
 $M = D/d$ 1.83倍 (D 9.557m)
レンズの倍率 2倍
合計 3.66倍

光取り出しライン

可視光取り出し用ミラー
光軸から3mm上にずらして設置



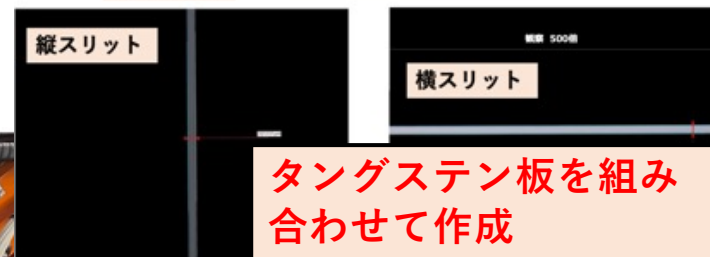
可視光取り出し窓



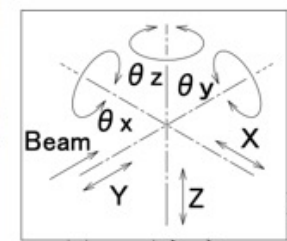
X線取り出し窓
Al 4mm

ピンホール

精密ステージ
Z, X, θ_x , θ_z
4軸

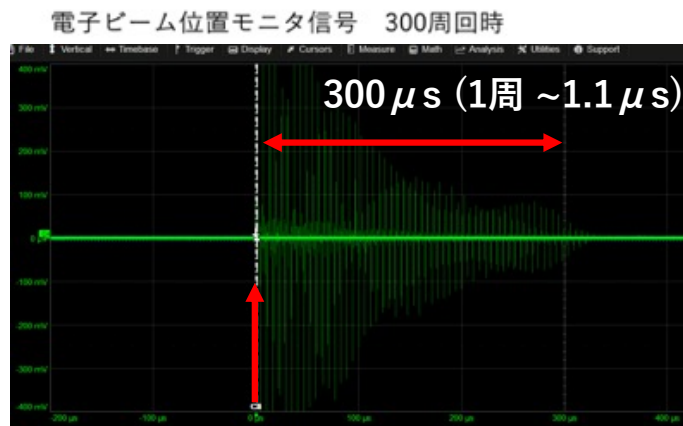
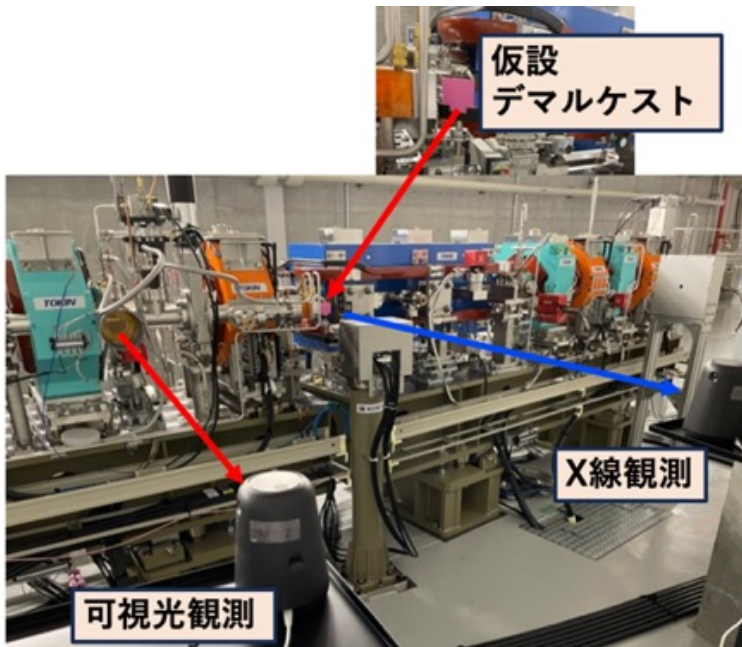


タングステン板を組み合わせて作成

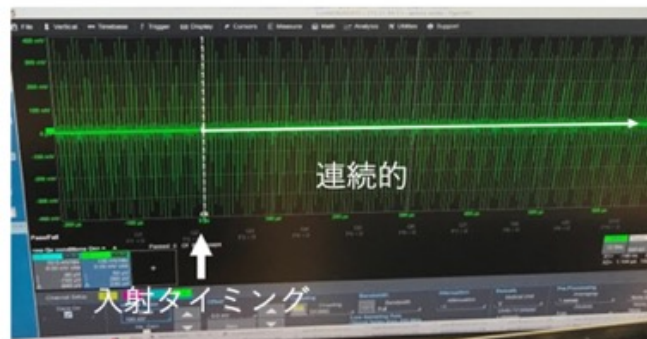


First Light 観測

5月29日BT部調整開始
2週間後、放射光観測成功
3週間後、ビーム蓄積成功

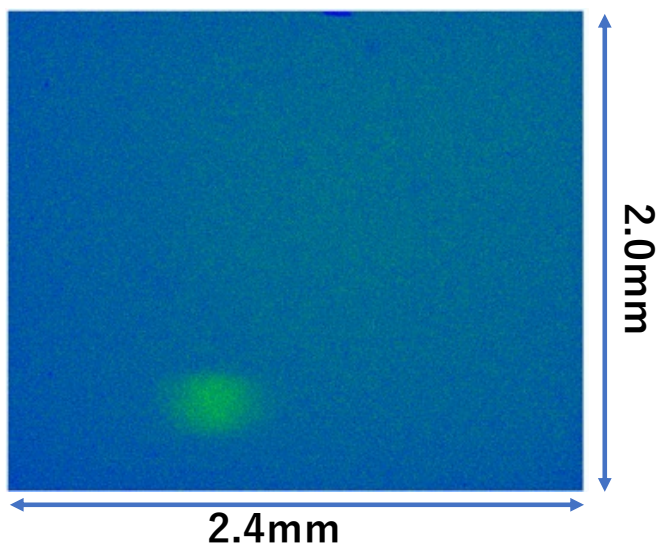


電子ビーム位置モニタ信号 蓄積時



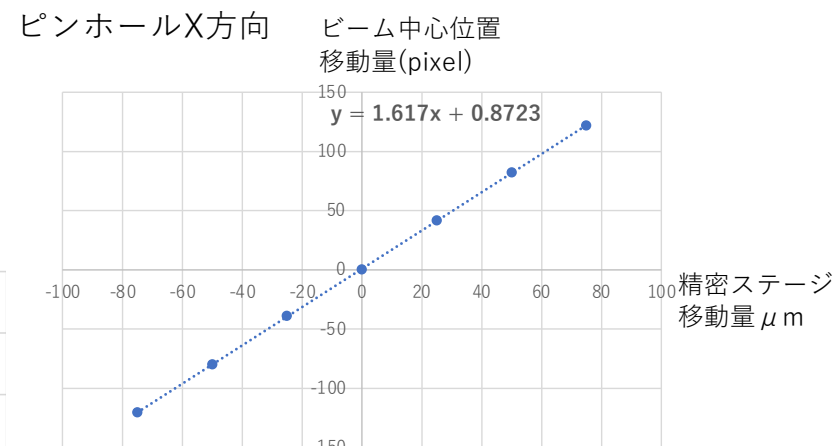
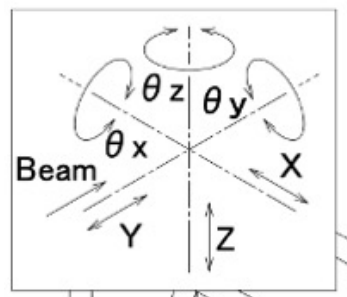
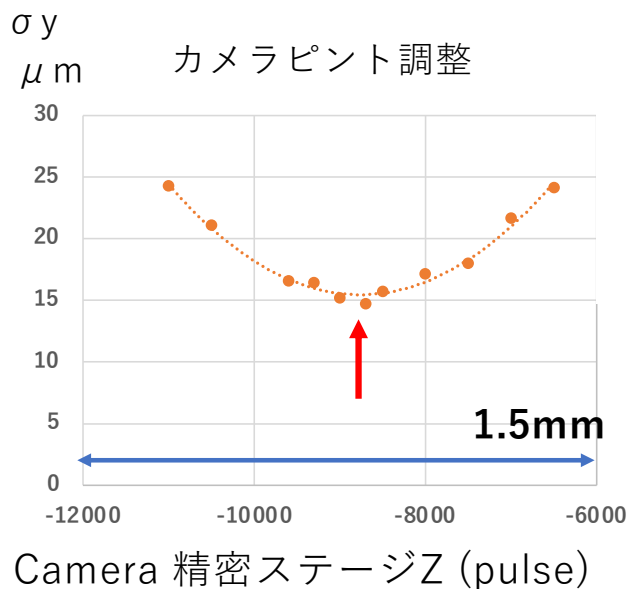
X線ピンホールカメラ調整

X線初観測 2023年7月

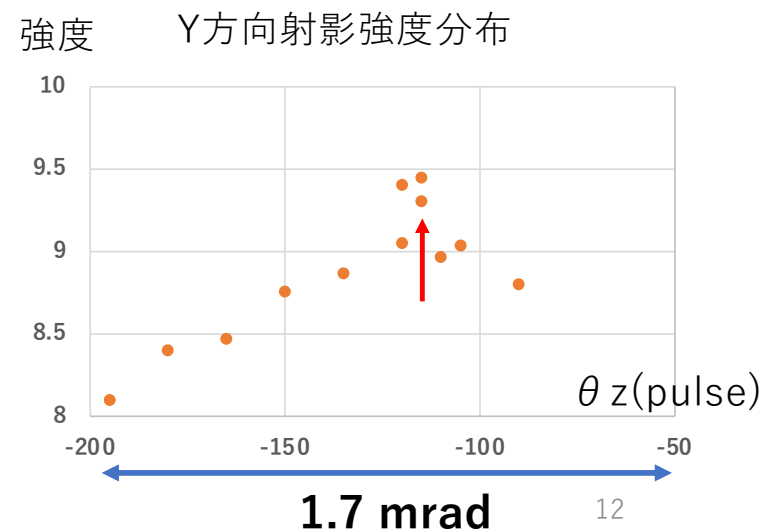


露光時間 50msec
蓄積電流2.5mA

カメラのピント調整
ピンホールの角度調整 θ_z, θ_x
ピクセル・サイズ換算校正

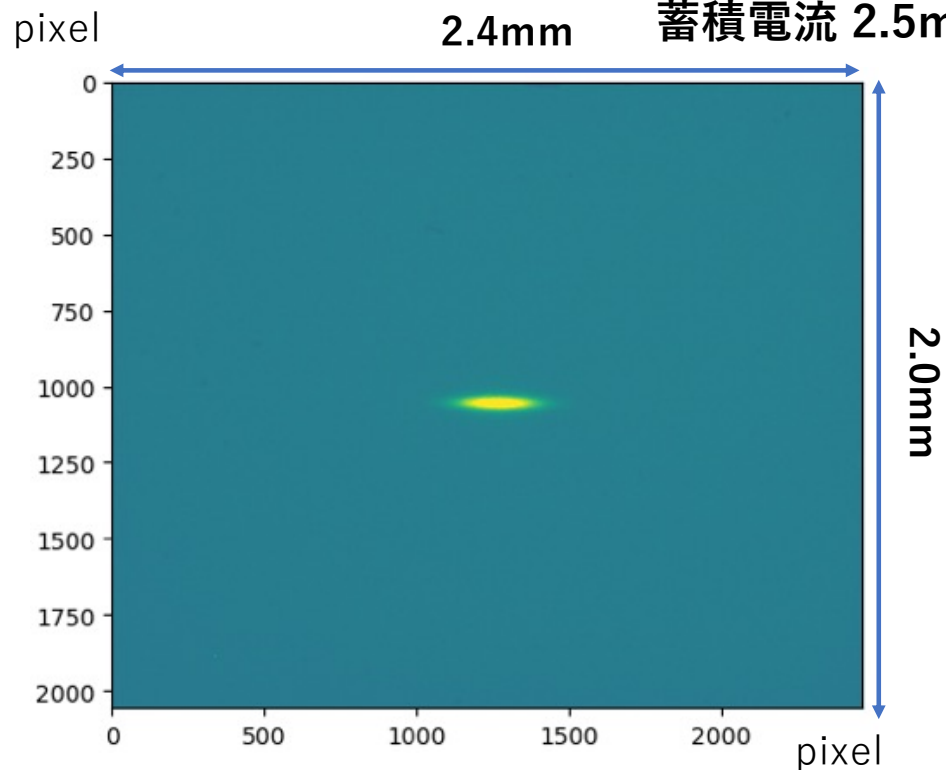


0.96 μm /pixel



蓄積電子ビーム像

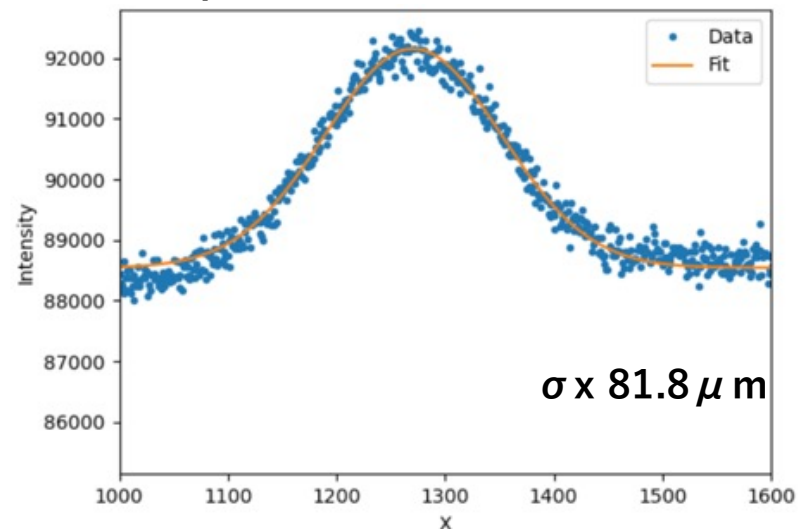
露光時間 10 msec
蓄積電流 2.5mA



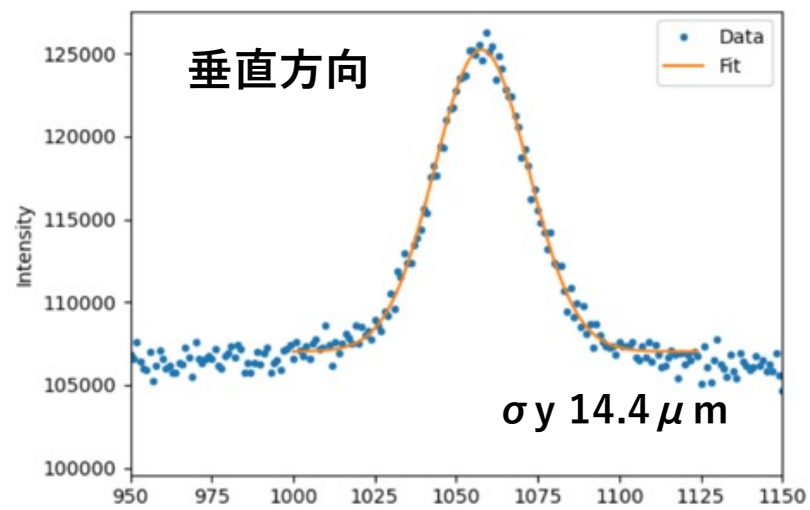
常時ビームサイズをモニター可能
オプティクス調整
Bunch by bunch feedback(BBF)調整等に活用

フィルター無し

水平方向

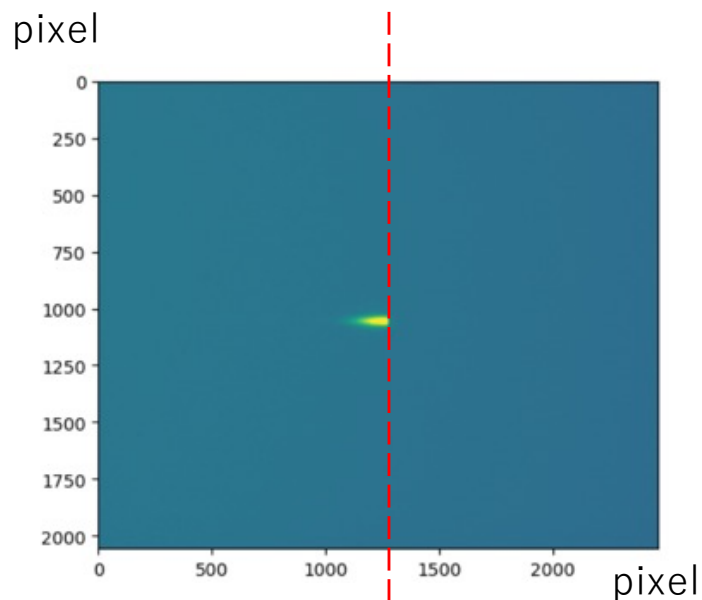


垂直方向



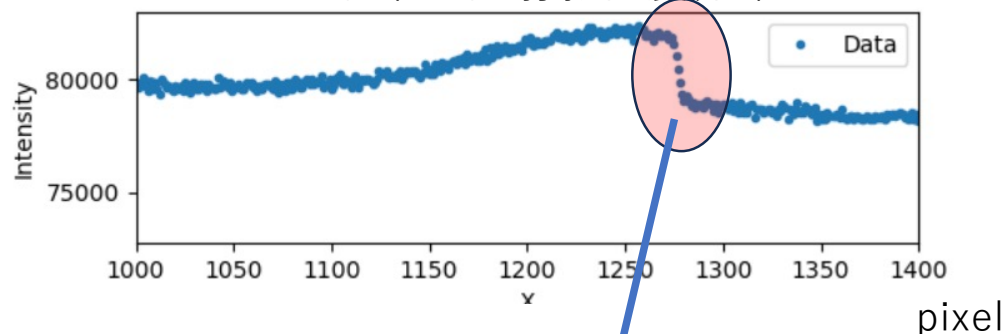
X線像検出部の分解能評価

ナイフエッジ法

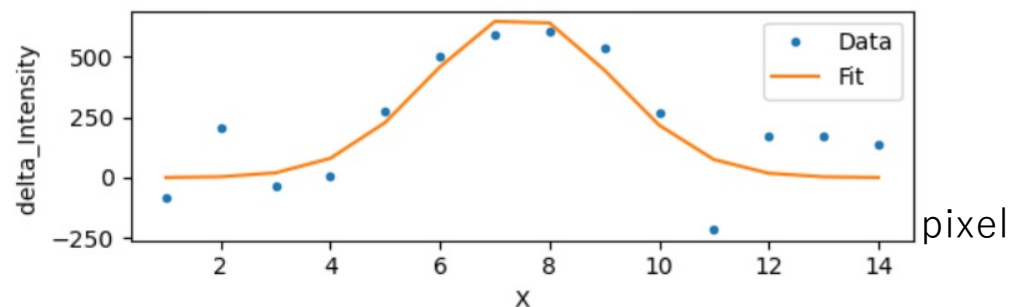


スリットを用いて
X線像検出部の分解能評価

水平方向射影強度分布

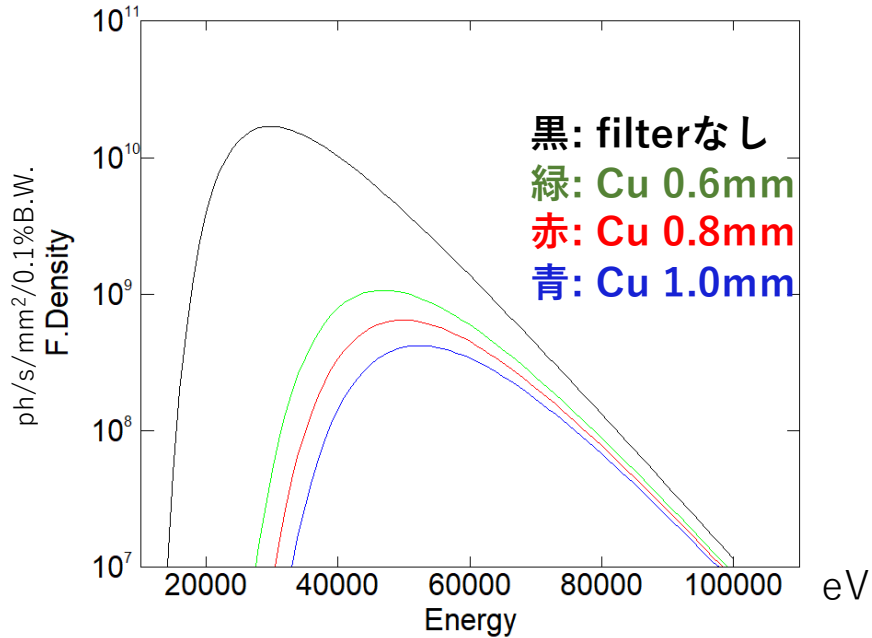


微分強度分布



分解能
1シグマ 1.7pixel -> 1.6 μ m

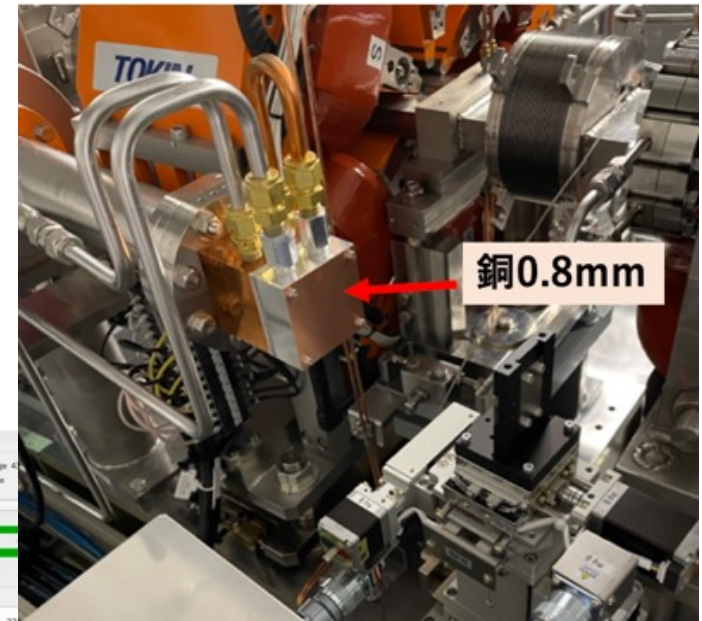
X線ピンホールカメラの性能



低エネルギーX線をカットすることで、
回折の影響が低減し、分解能が向上する

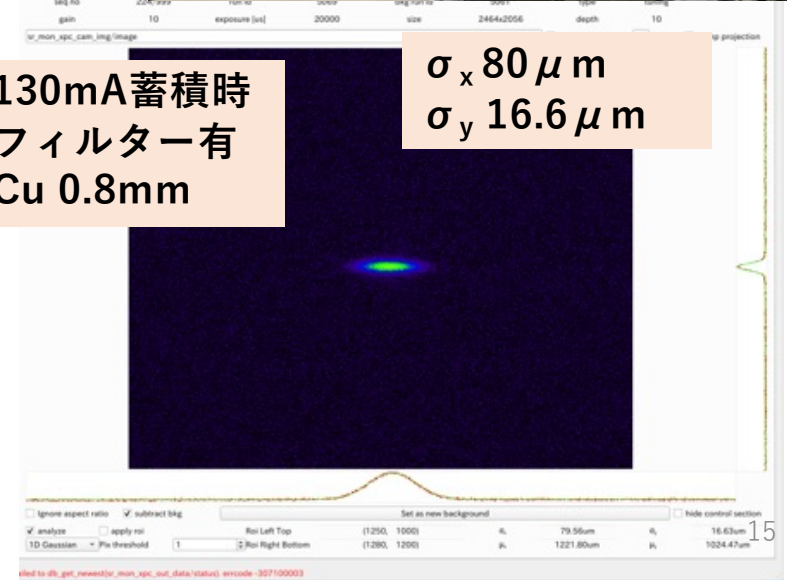
	X線エネルギー	回折による分解能	Total
Filter なし	30keV	5.3 μ m	5.5 μ m
Cu 0.8mm	50keV	4.1 μ m	4.4 μ m

Filterを入れることで、分解能5 μ m以下を達成



130mA蓄積時
フィルター有
Cu 0.8mm

σ_x 80 μ m
 σ_y 16.6 μ m



まとめ

- 3極ウィグラーの製作が完了し、ピーク磁場1.274T
積分磁場0.056Tmmと要求仕様を上回り、設置も完了した。
- 2023年6月 First Light の観測に成功
- X線ピンホールカメラで蓄積電子ビームの撮像に成功
- X線ピンホールカメラの性能評価を行い、 $5\mu\text{m}$ 以下の分解能を達成した。今後オプティクス調整、BBFの調整等に活用する。