

光・量子融合連携研究開発プログラム

「小型加速器による小型高輝度X線源と  
イメージング基盤技術開発」

## 第17回全体会議

照沼 信浩

高エネルギー加速器研究機構

平成29年2月28日 KEK つくばキャンパス 2号館1階会議室大

- 報告書について

- 進捗報告

- KEK

- LCS-X線生成技術関係

照沼

- タルボ試験

百生

- 超伝導薄膜

早野(照沼)

- 量研機構・京都大

- スポーク空洞、カソード

羽島

- スポーク空洞トリミング

岩下

- 広島大

- カソード

栗木

- フィードバック

高橋

- その他

- 懇親会 送迎バス: KEK2号館前より17:30発。

お帰りは「つくば駅」まで送迎 可能です。

# 報告書について

## ■ 「H28年度業務成果報告」

- H28年度の再委託機関のみ
- 該当年度の計画書に沿った当該年度の成果報告
- 4月末までにKEKへ。取りまとめ後にJSTに提出(締め切り5月末)。

## ■ 「成果の取りまとめ」

- 全機関:事業開始時からの成果のとりまとめ
- 今までの年度報告+発表論文をベースに、技術の追跡ができるようなもの。「技術レポート」的にまとめる。
- 各機関に**原稿締め切り2月末**でお願いしています。。。  
既に、田中さん、高橋さん、栗木さんから提出頂きました。
- 原稿とりまとめ・編集(3月)→印刷用編集(4月)→製本提出(5月末)

# H28年度 X線生成性能向上のための技術開発

## ■ LUCX

- **高強度レーザー蓄積、X線生成・イメージング試験**を追求し、性能の見極め、成果の取りまとめを行う。

## ■ cERL

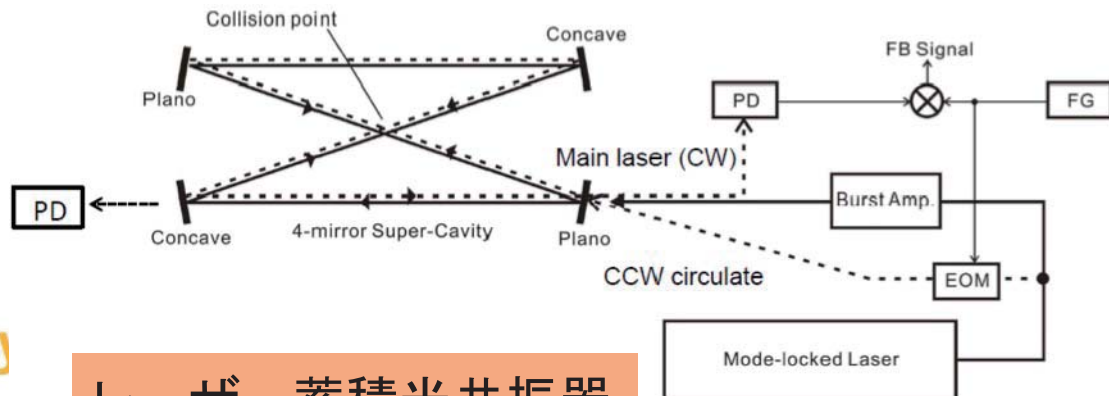
- H28年度の運転は厳しい状況。
- **CW共振器技術開発**を追求し、成果の取りまとめを行う。

X線生成・イメージング試験には、リガク、産総研、東北大、早稲田大が参加。

# パルス高輝度LCS-X線生成技術開発 (LUCX)



2次元X線検出器  
HyPix-3000



X-ray

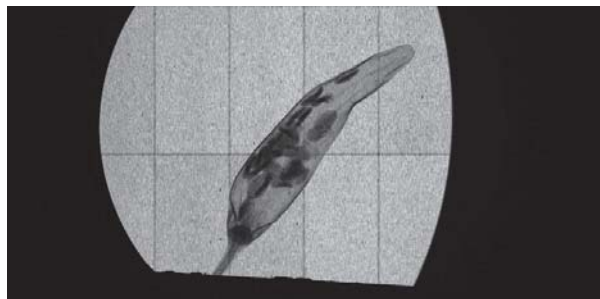
レーザー蓄積光共振器

12cell  
定在波加速管

3.6cell  
RF-gun

レーザーコンプトンX線  
(LCS-X線)

e<sup>-</sup> beam

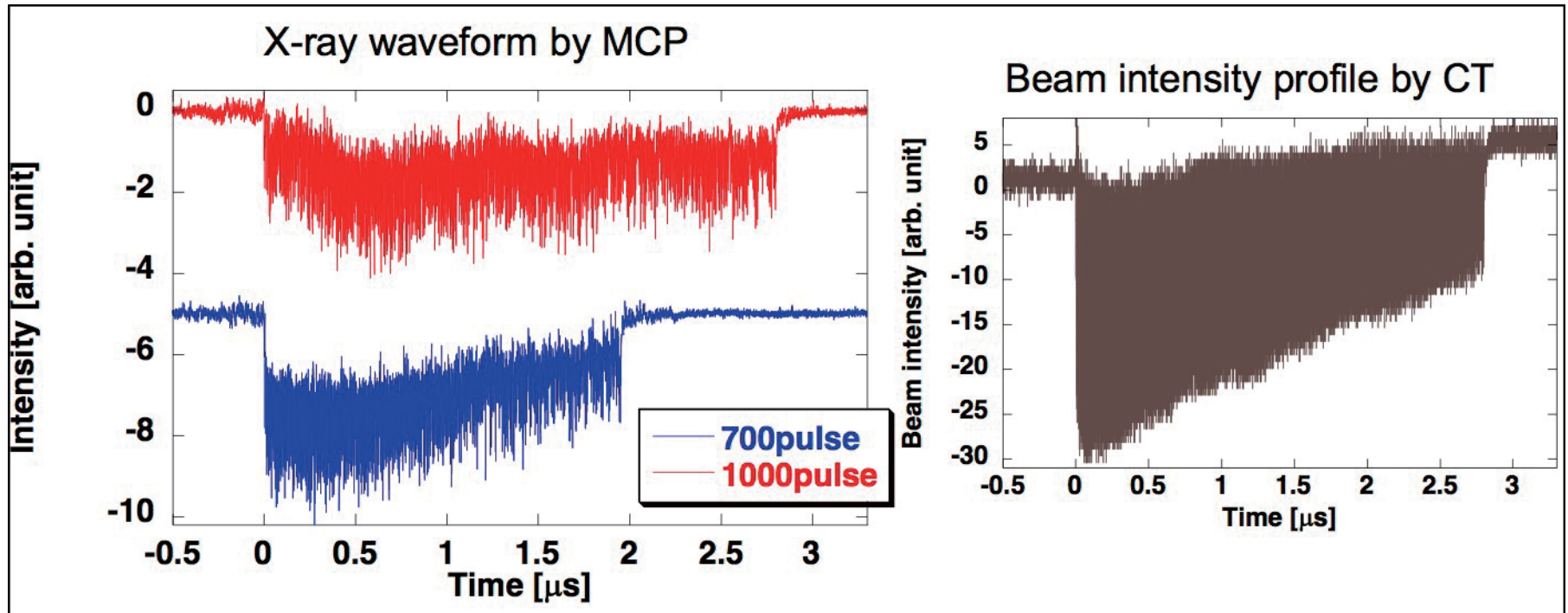


LUCX電子ビーム

- 常伝導パルス高周波加速
- 1000バンチ, 24 MeV, バンチ間隔 2.8 ns

# 電子ビーム・レーザー衝突技術 (LUCX)

## 1000バンチ電子ビームによるX線生成例



- 1000バンチ全体にわたるX線を確認も
- **衝突最適化が必要**
- 700バンチ→1000バンチにしてもあまりX線数が増えない。
- バンチ毎の強度分布が、電子ビームとX線で合わない。

# LUCX電子ビーム・レーザーの衝突最適化

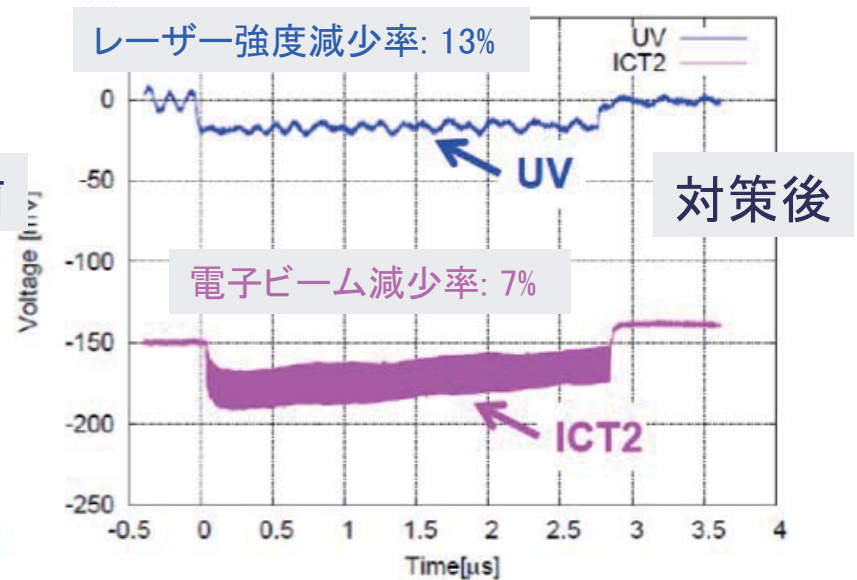
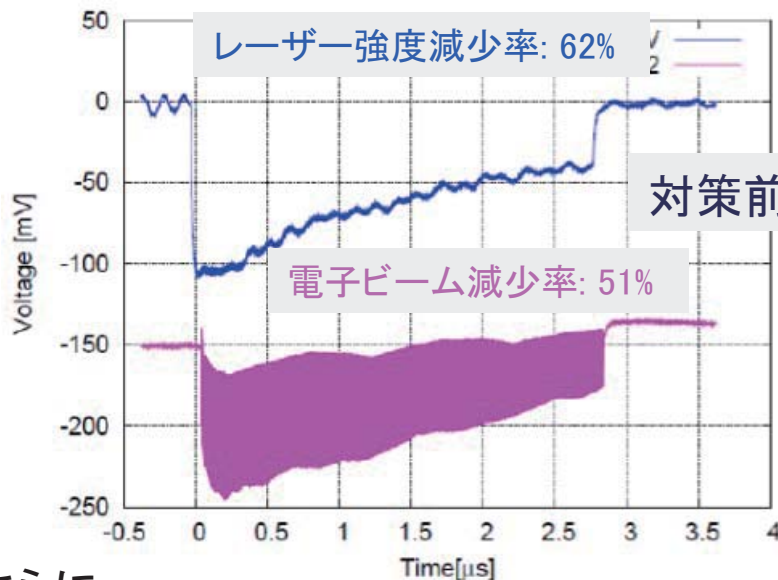
→ 1000バンチ電子ビームの改善 (H28年度)

## ■ バンチ電荷の非一様性が問題

→ RF電子銃・光カソード用レーザーの一様化

### ■ レーザーの増幅システムの改善を実施

- ✓ 一様化のため増幅器の出力を下げた。レーザー強度は従来約半分
- ✓ 電子銃光カソードの量子効率を上げるため、カソード生成装置を改善した。



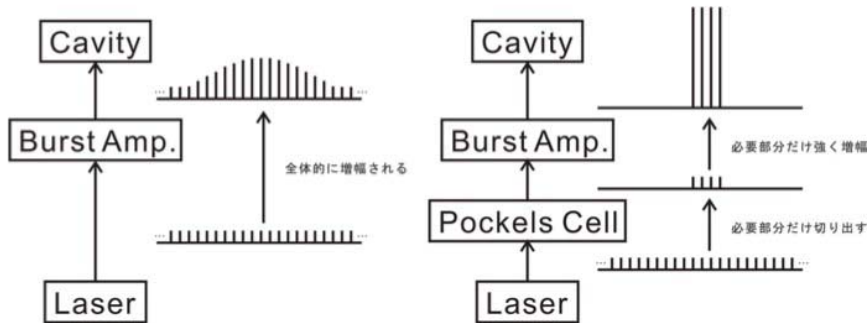
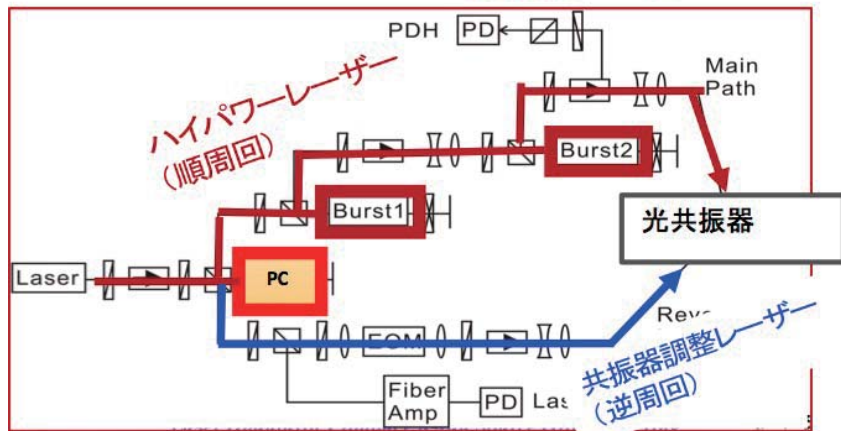
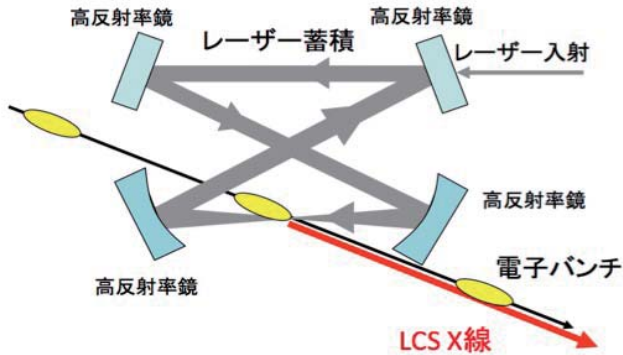
さらに、

## ■ バンチ毎のエネルギーを揃える

- RF電子銃(8MeV)にRF振幅変調を適用
- 主加速管(16MeV)には2016に適用済み。

# 大強度レーザー蓄積技術開発

## レーザー蓄積光共振器開発 (LUCX)



### パルスレーザー蓄積の高度化

357 MHz, 10 usec, 繰り返し 3.1 Hz

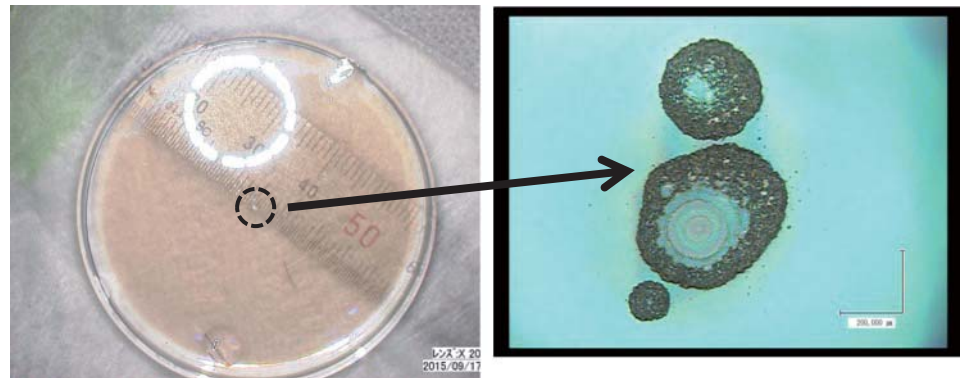
課題開始時の蓄積レーザーパワー: **100 kW**

- 逆周回フィードバック技術
- バースト増幅
- 光共振器環境の改善 (清浄化、振動対策)
- 蓄積レーザーパワー: **300 kW** (2015年)

ポッケルスセル導入によるバースト増幅  
効率化 → 860 kW 達成 (2015)

1MWを越えたところでミラー破損

→ H28年度 高強度蓄積を追求



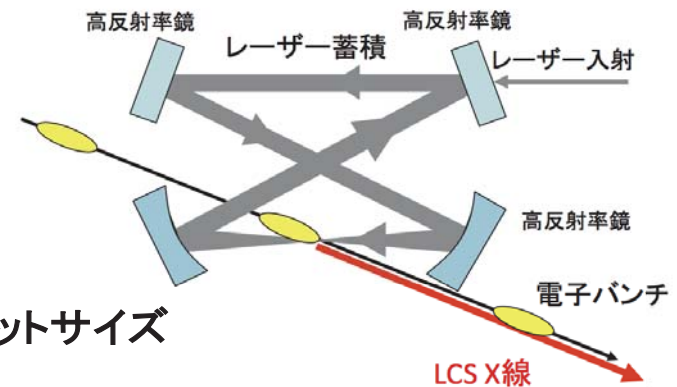
# ミラー破壊を避けて、レーザー蓄積強度を上げる

## ミラー上のスポットサイズを大きくする

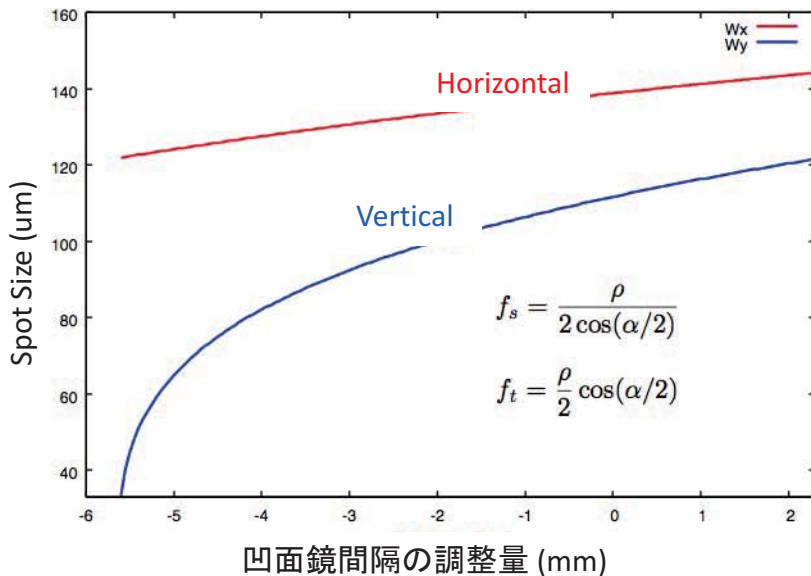
- レーザーパワー密度を破壊しきい値以下にする
- 衝突点(フォーカス点)のスポットサイズは小さくなる(相乗効果)

## ↔ 共振器の凹面鏡間隔を小さくする

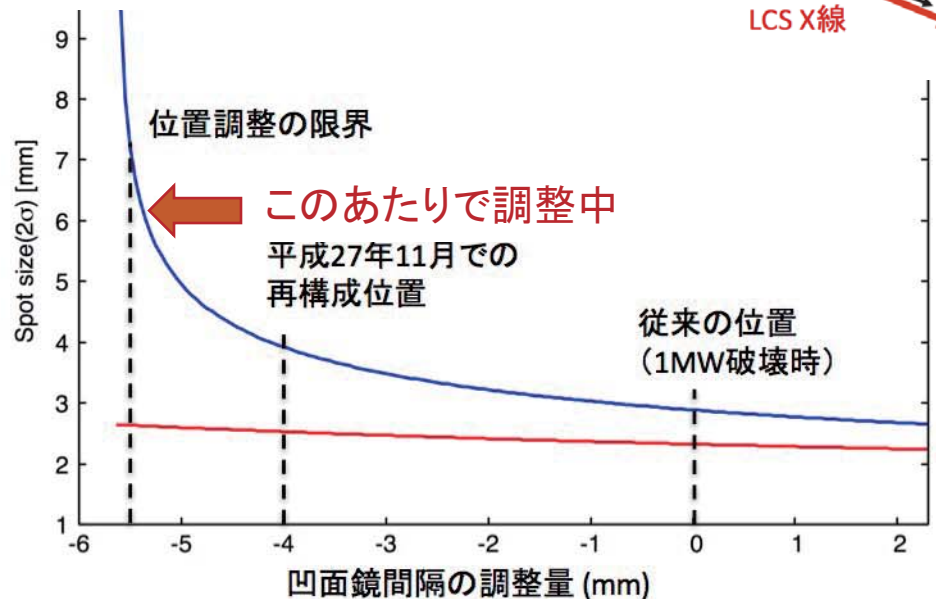
✓ 最大 1.3 MW の蓄積を達成した。



### 衝突点のスポットサイズ

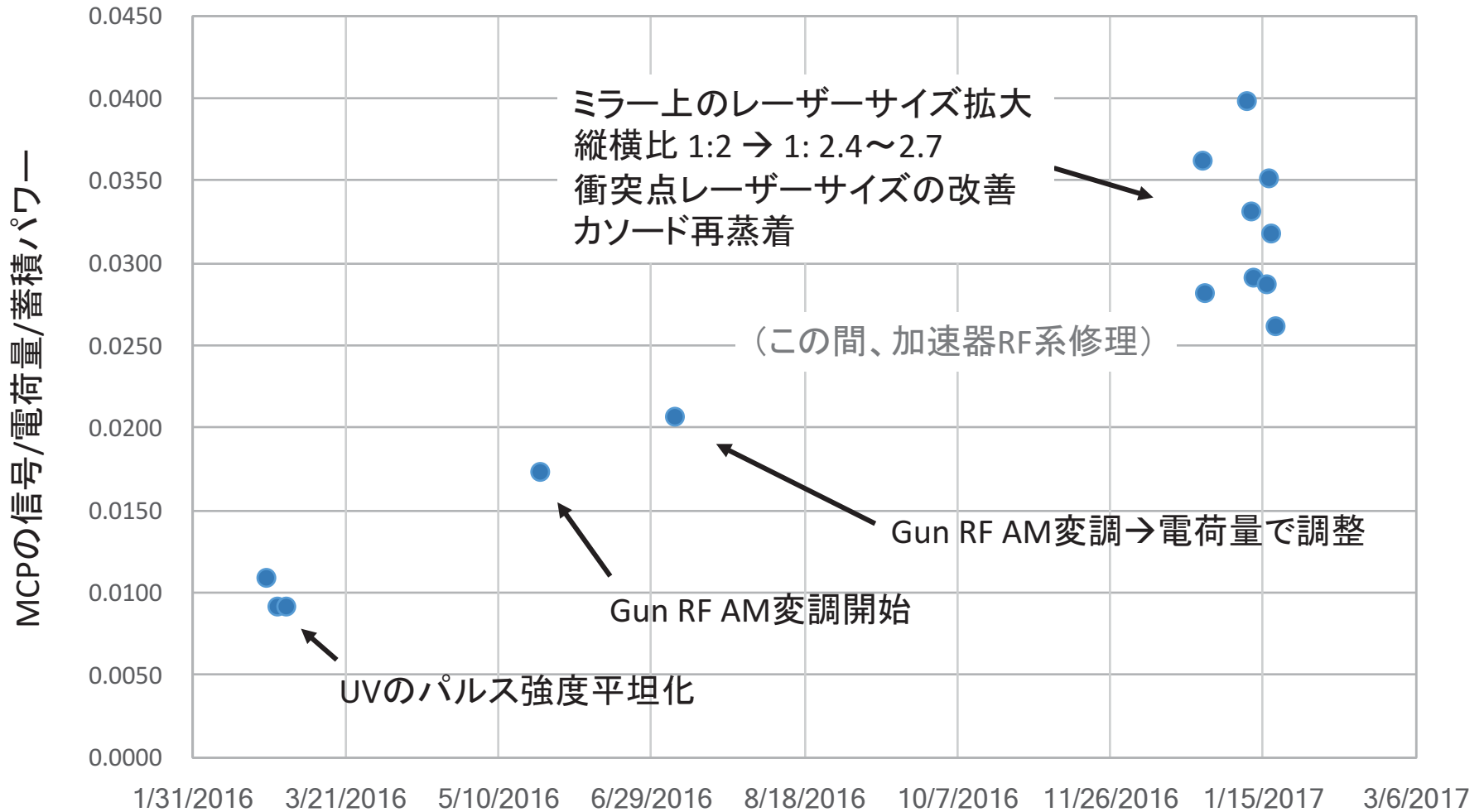


### ミラー上のスポットサイズ



# 電子ビーム・レーザーの衝突効率の改善 (H28年度)

## 電荷量と蓄積パワーで規格化したLCS-X線強度



# 最大X線生成

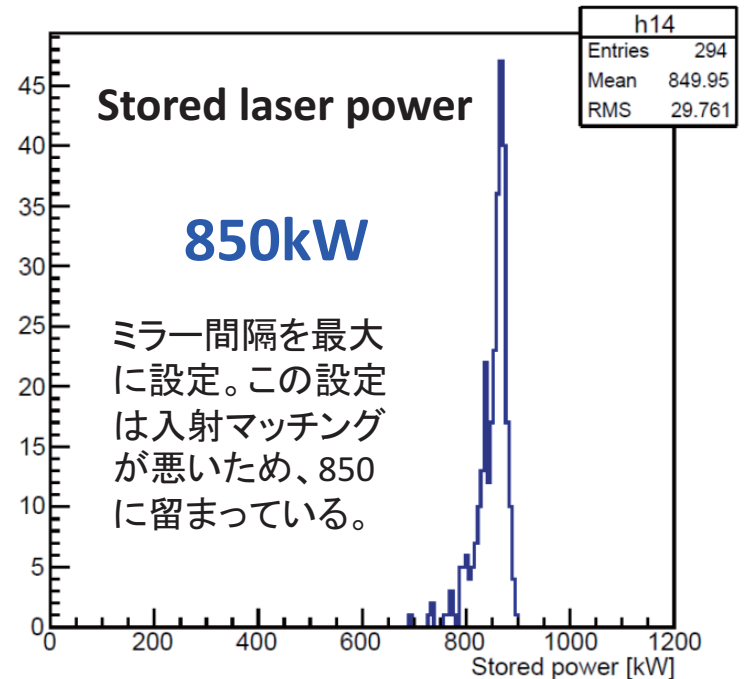
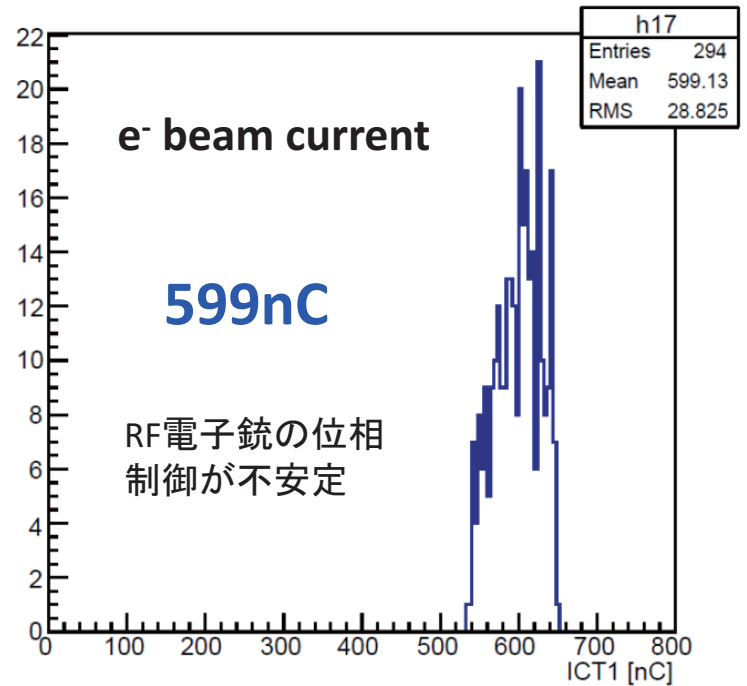
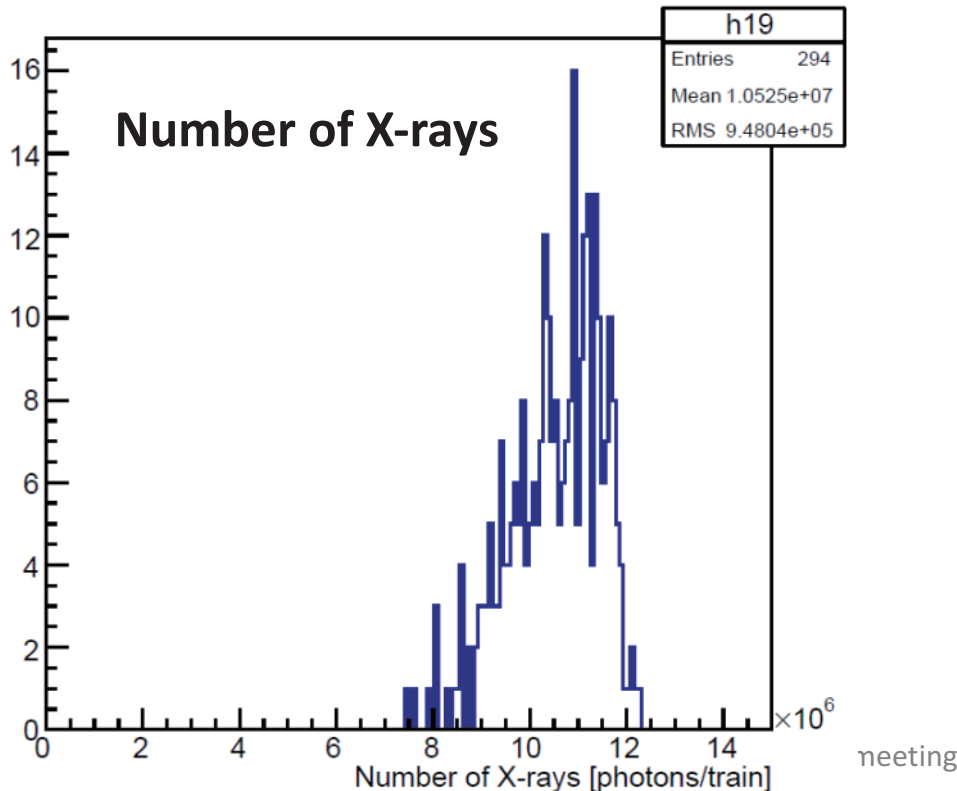
2017/1/20

衝突点での生成X線数

$1.05 \times 10^7$  [photons/train]

12.5Hz換算で

$1.3 \times 10^8$  ph/sec



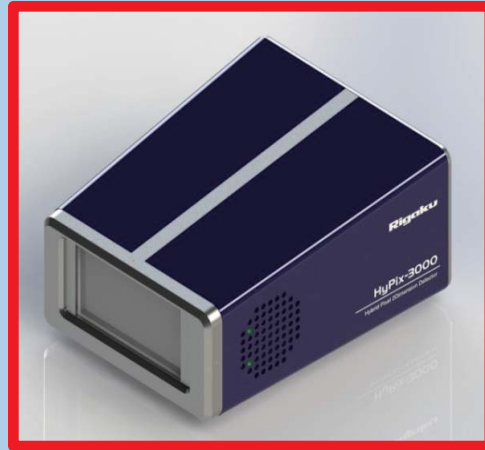
# LCS-X線イメージング技術開発 (検出器)

リガク、KEK



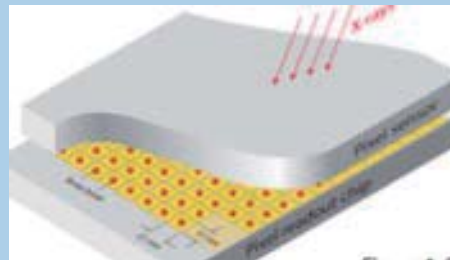
Rayence CMOS H25調達  
**電荷積分型**  
ピクセルサイズ  
(50umX50um)

X線の数え落としが無い。  
弱い信号ではS/Nが低下



HyPix-3000 H26調達  
**Photon Counting型**  
ピクセルサイズ  
(100umX100um)

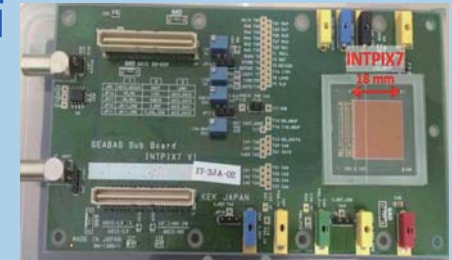
**X線エネルギー分別**  
多数入射での数え落としがある



## SOI (Silicon on Insulator) 検出器

文部科学省 新学術領域研究  
「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」の協力

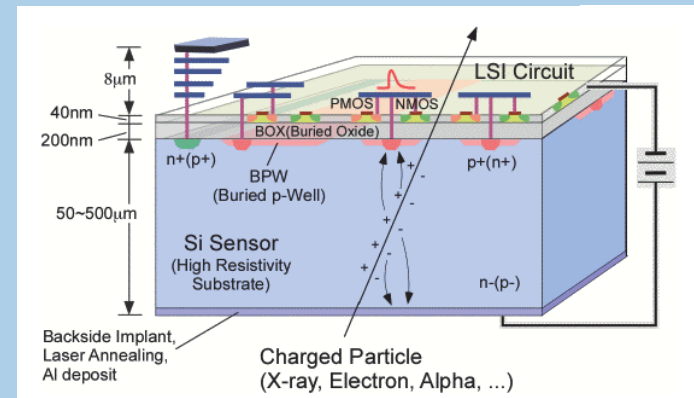
## LCS-X線のイメージング技術開発への応用・評価



SOI-INTPIX

## Photon Counting型

ピクセルサイズ (17umX17um)



# 吸収イメージ

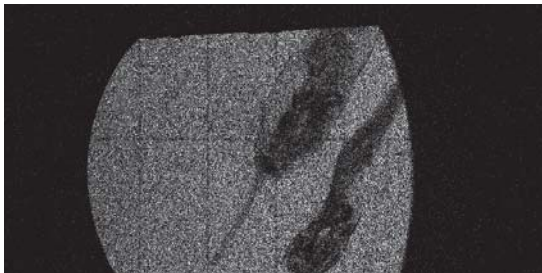
測定時間を変えて、とうがらし、にぼしの吸収イメージを測定

$1.1 \times 10^7$  photons/train (Total band)

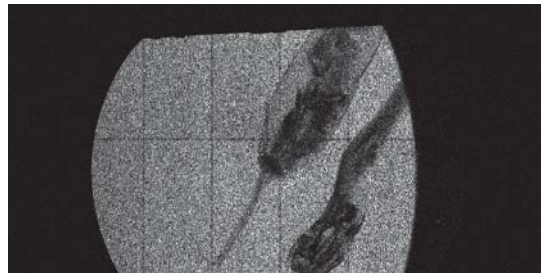
3.13Hz運転なので、 $3.4 \times 10^7$  photons/sec (Total band)

HyPix-3000でのカウントは 4.6 – 4.9 photons/sec/pixel

320msec



960msec



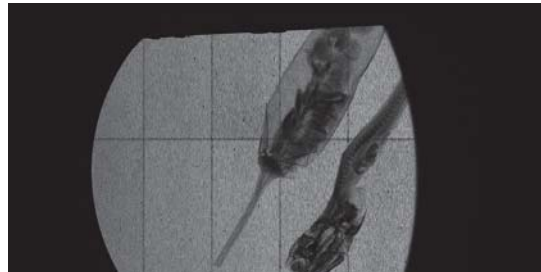
10sec



30sec



60sec



300sec



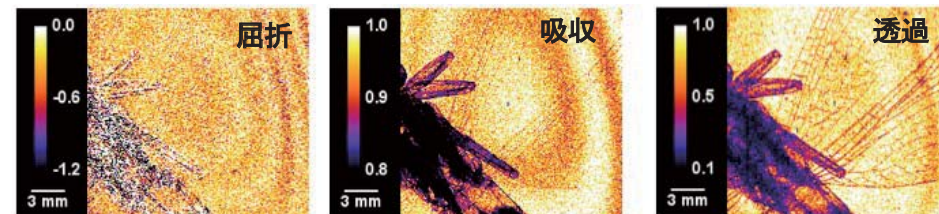
# 取りまとめとしてのイメージング試験

LUCXにおけるLCS-X線生成は、ほぼ見極めた状態と言える。  
「成果のとりまとめ」として一連のイメージング試験を実施中。

## タルボ位相イメージング

- 現在のX線強度は、平成27年8月の試験時と比べて、**約10倍強**である。
- 前回：データ取得に5時間  
→ 30分。  
→ 百生さん報告

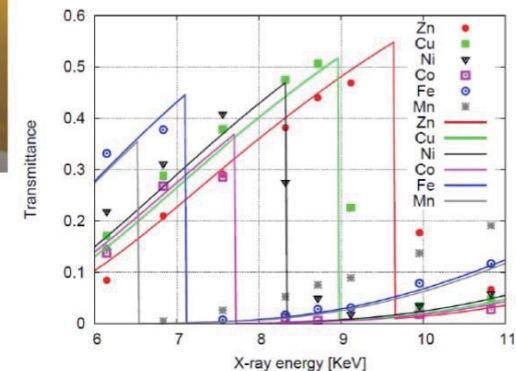
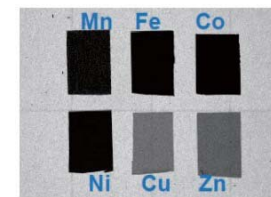
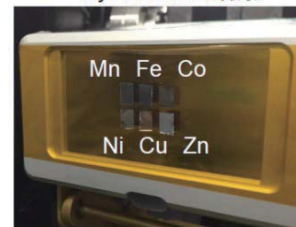
第1回LUCXにおけるタルボ試験の結果(H27.8)



## エネルギー可変性のデモ

- 小型リニアックは、RF加速位相を瞬時に変更することで、容易に電子ビームエネルギーを調整できる。
- K吸収端前後のエネルギーで撮像

HyPix-3000で撮影



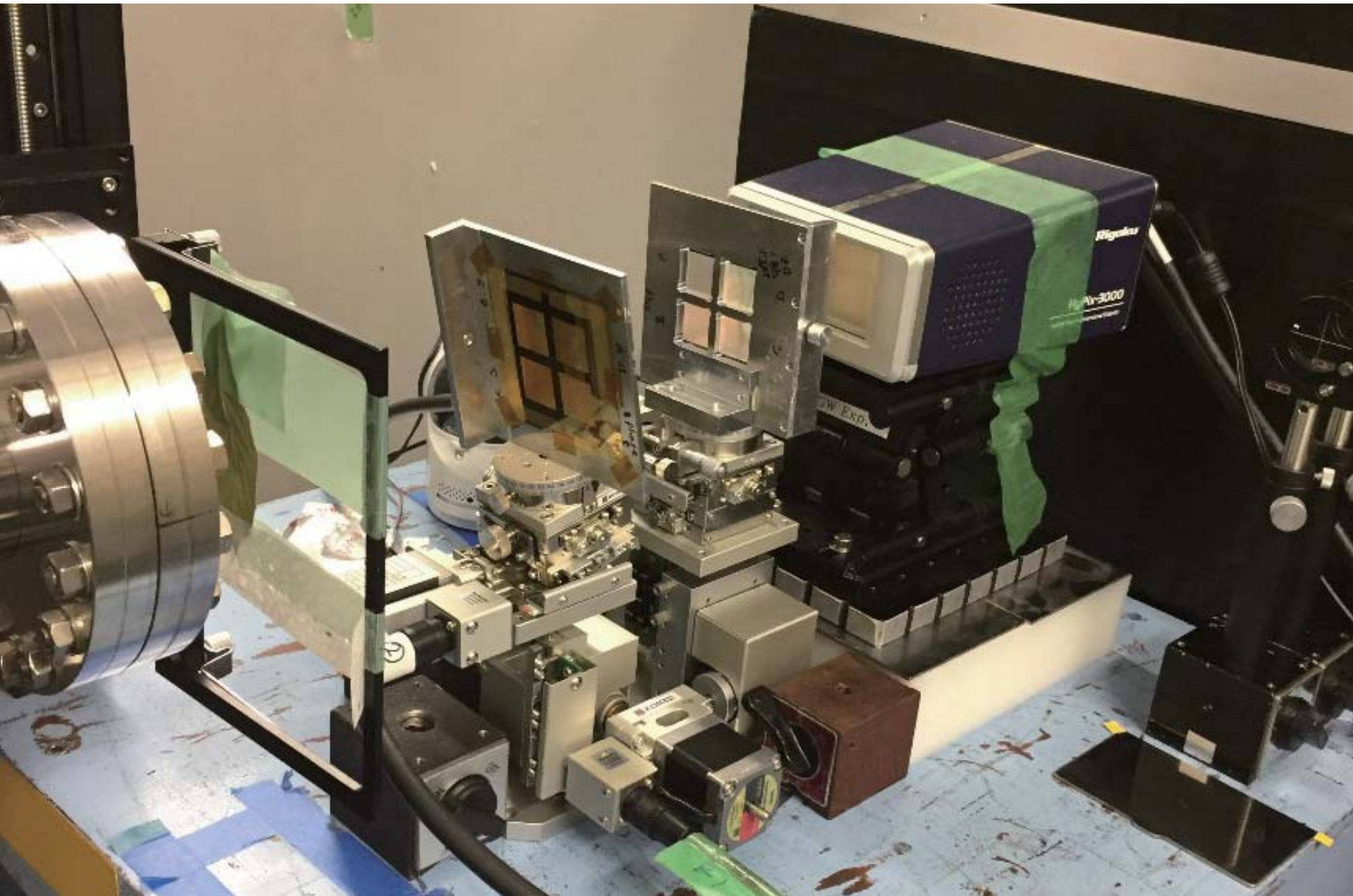
その他、CT、屈折コントラスト、拡大

.....

## SOI検出器

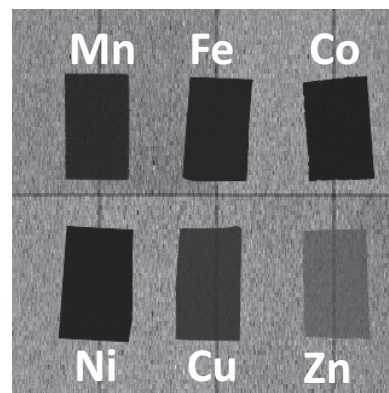
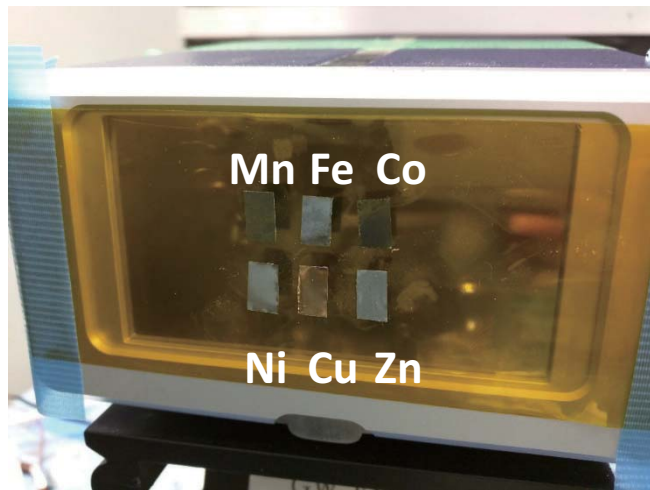
(左)X線8.7 keVでの金属箔透過画像。(右)透過率の測定結果と理論値。

# LUCXでのタルボ干涉計配置 2017/2/14-17



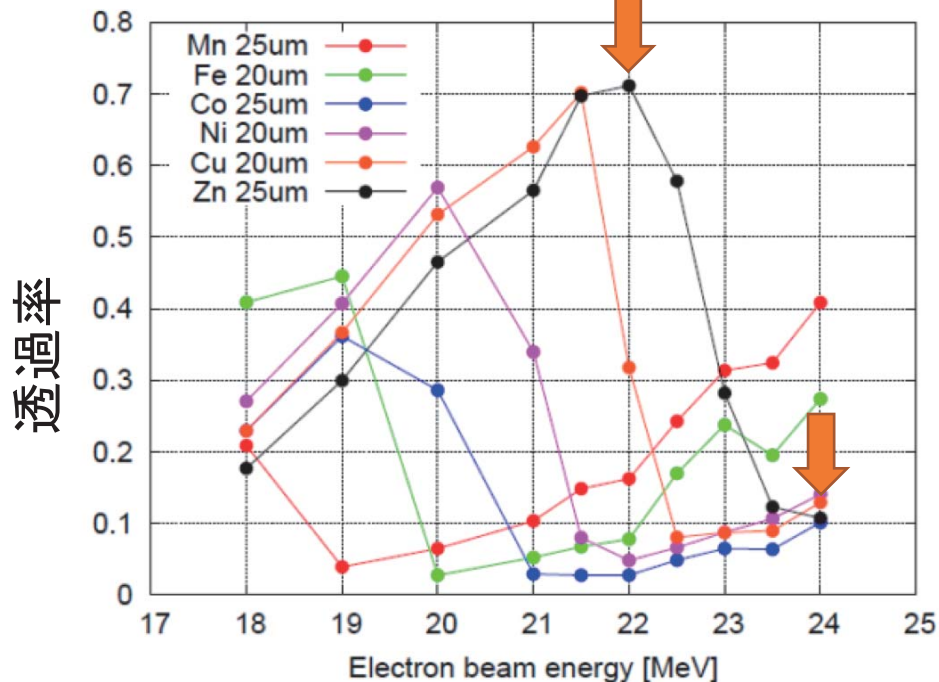
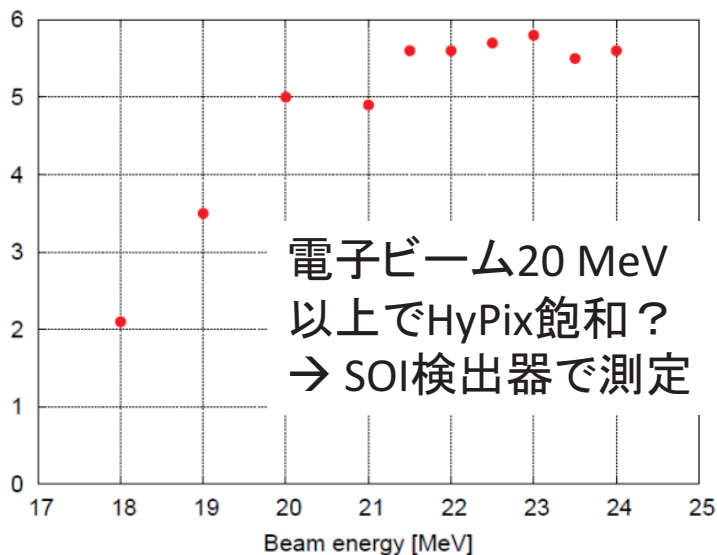
# K吸収端サンプルテスト

金属箔: Mn 25um, Fe 20um, Co 25um, Ni 20um, Cu 20um, Zn 25um



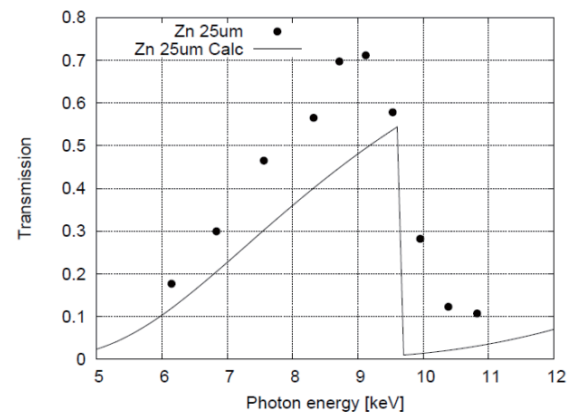
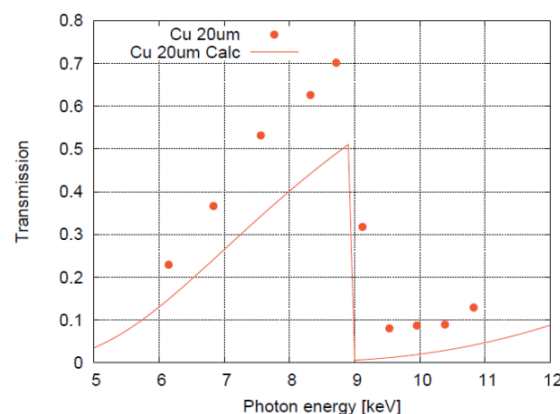
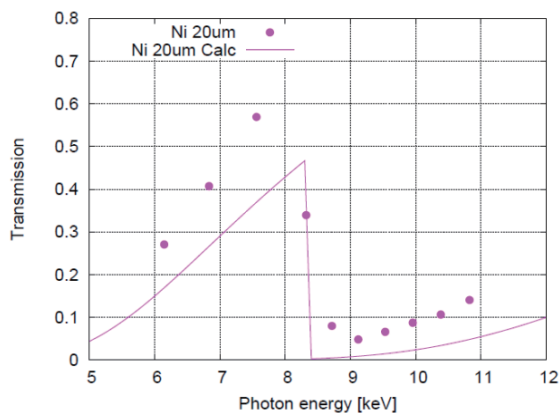
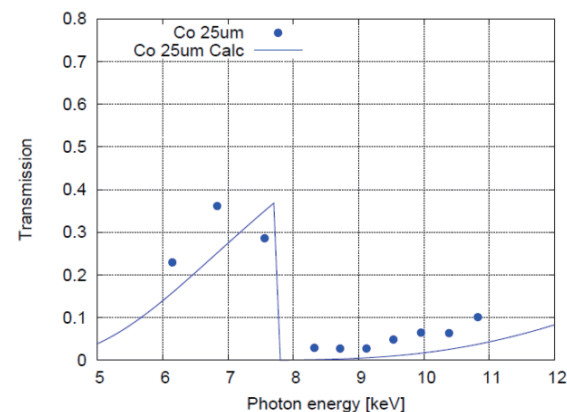
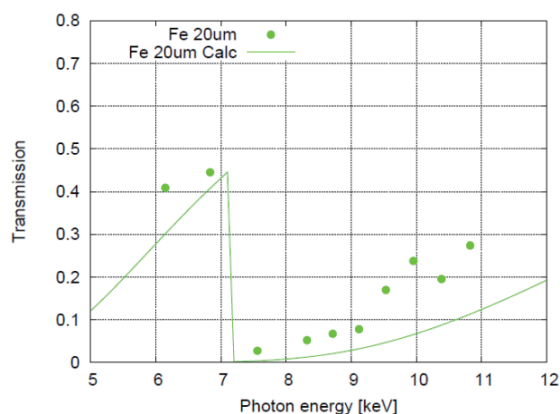
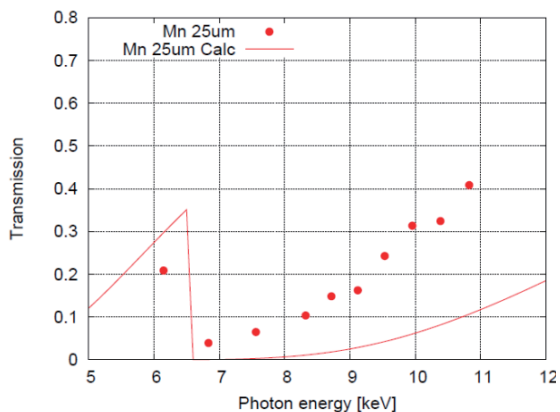
電子ビーム 22 MeV  
露光2分

ピクセルあたりのX線数



# K-edge imaging

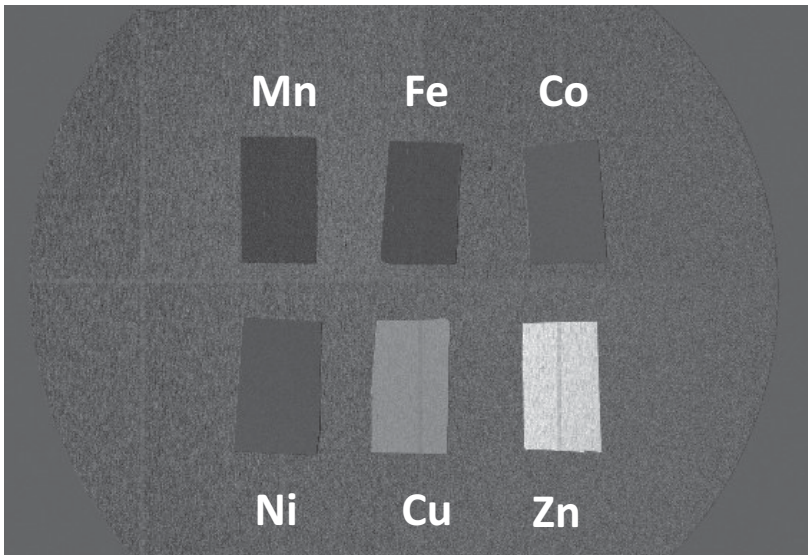
測定された透過率は計算値より高く出ている。  
1ショットのX線数が強く、光量が高いほどHyPixでの数え落としが増えるため。  
(透過率を計算する分母が小さくなる。)



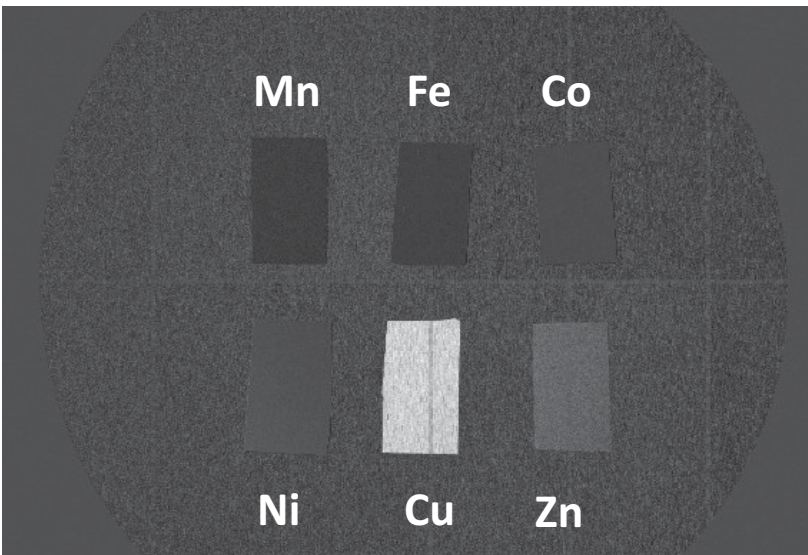
# K-edge imaging

Zn, Cuの K-edge付近で差分を取ると、それぞれの金属箔が強調される。

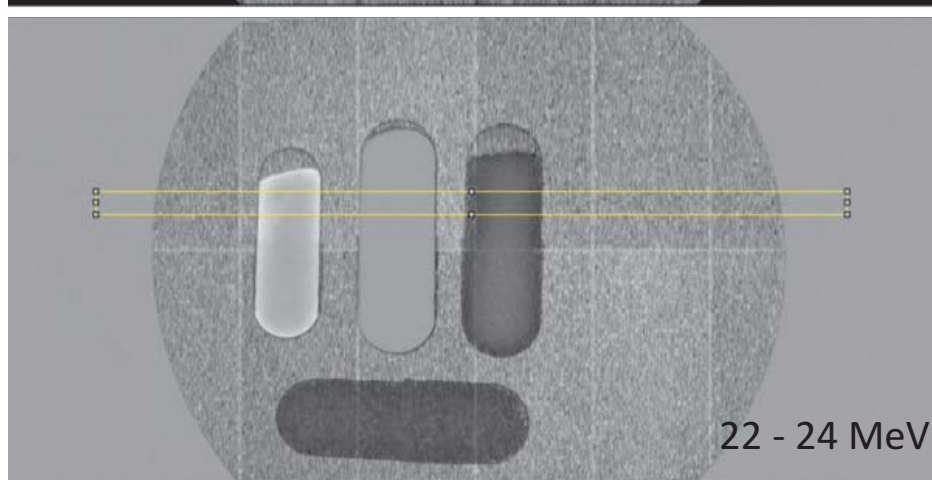
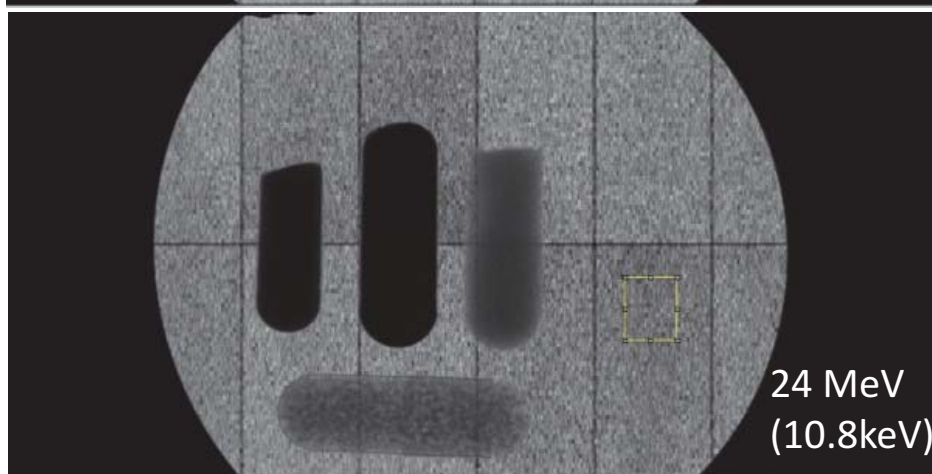
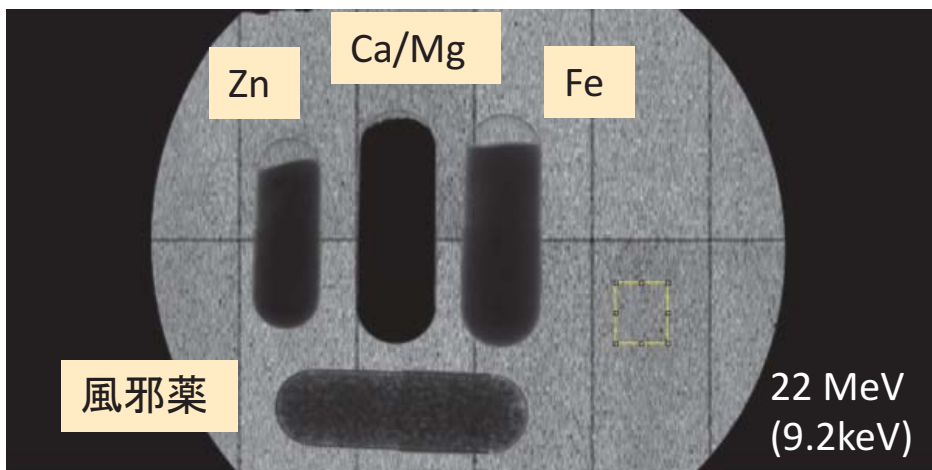
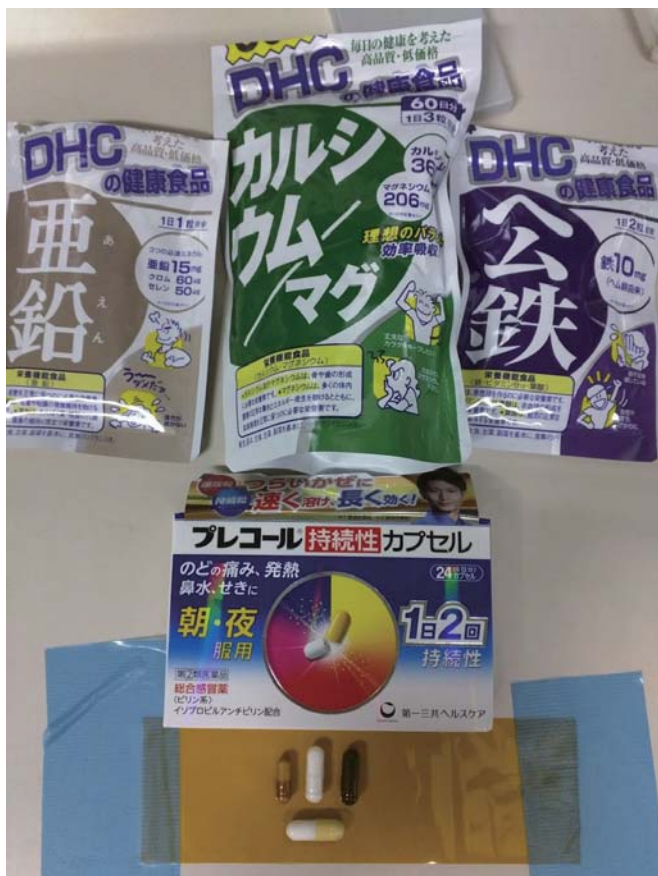
電子ビーム22.0MeV – 23.5MeVの差分



21.5MeV – 23.5MeVの差分



# Zn K吸収端試験



K吸収端(keV)

25	Mn	6537.7
26	Fe	7110.8
27	Co	7708.8
28	Ni	8331.5
29	Cu	8980.5
30	Zn	9660.8



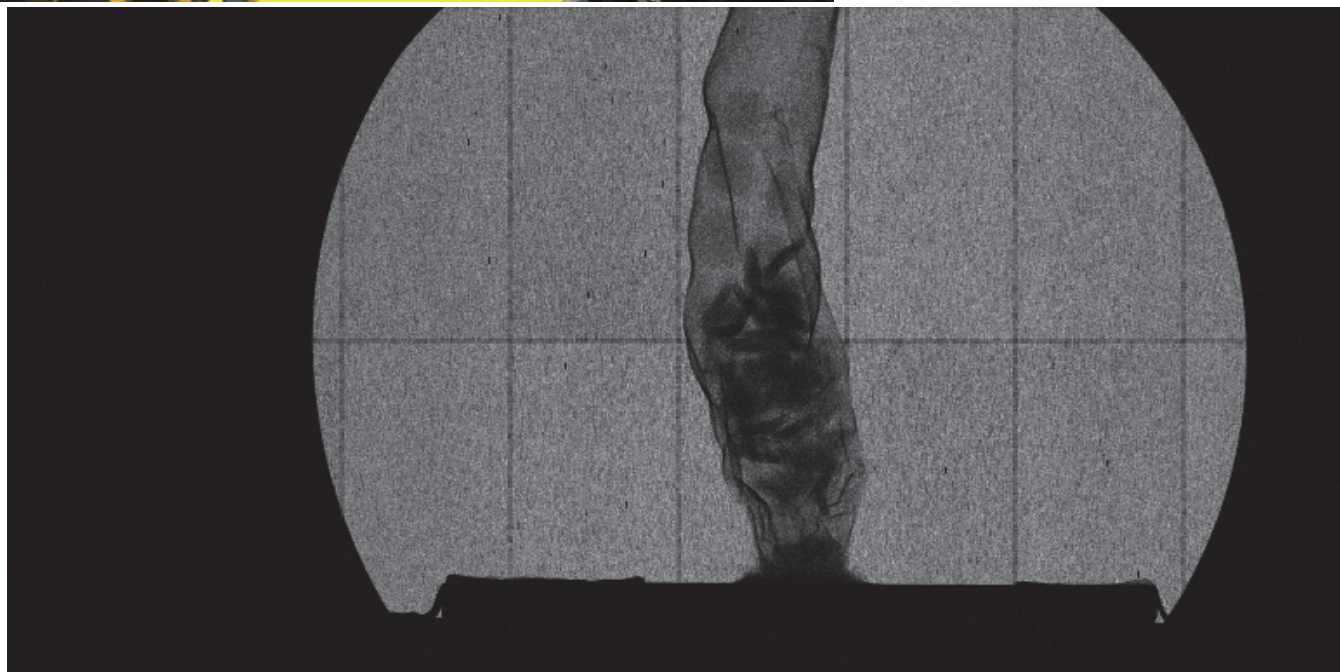
# その他、CTスキヤンのデータ取得



1度ずつ、360度回転  
1枚、10秒で撮影。

HyPixでのカウント数は、  
4.4 photons/sec/pixel

CT画像解析は、坂上君に依頼中。



唐辛子

# H28年度

## cERLのCW 162.5MHz運転は無い → LCS実験は事実上不可能。

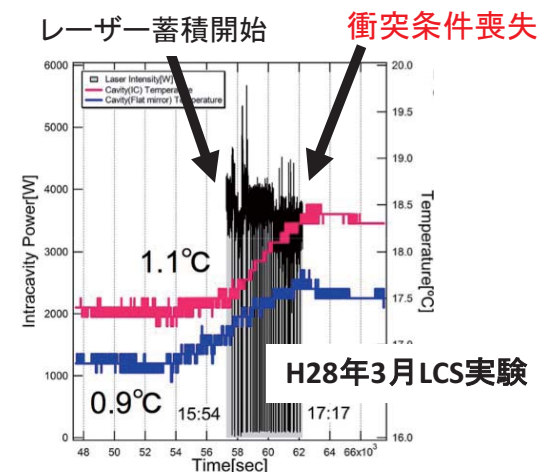
### 光共振器の高度化のための技術追求を行う。現在10kW → 将来1MW

#### 実験時の課題1: 光共振器長の熱膨張

- 入射レーザーと共振器は同期(蓄積)しなければならない。

共振器長フィードバック: 光共振器のミラーをピエゾで駆動(最大30 $\mu$ m)

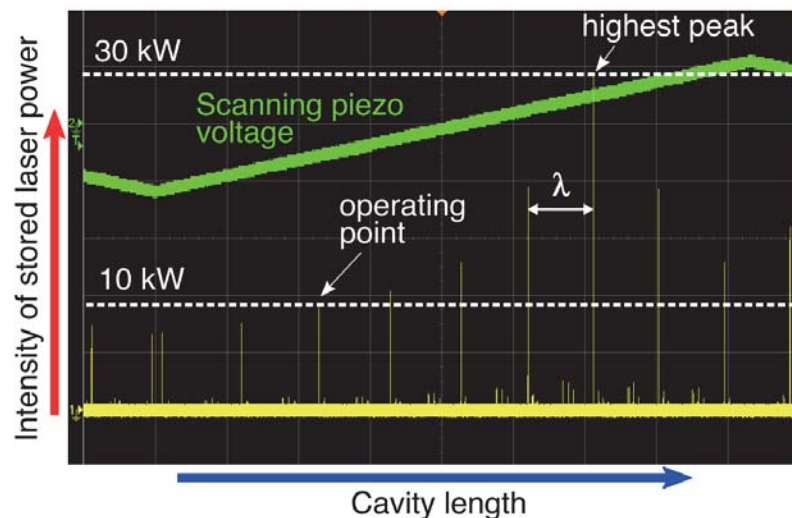
- 電子ビームと蓄積レーザーも同期(衝突)しなければならない。
- H28年3月: 熱蓄積で光共振器が伸びる → LCS衝突条件を失う
  - 共振器は1 $^{\circ}$ C上昇。軸(SUS)の伸びで定量的に説明できる。
  - 入射レーザー(30W)に対して30ppm程度の散乱が寄与と評価。
  - LCS 実験時期毎に挙動が異なっていた。
  - 散乱光隔離・熱除去を考慮した装置設計の徹底



#### 実験時の課題2:

##### レーザー蓄積最大点での維持

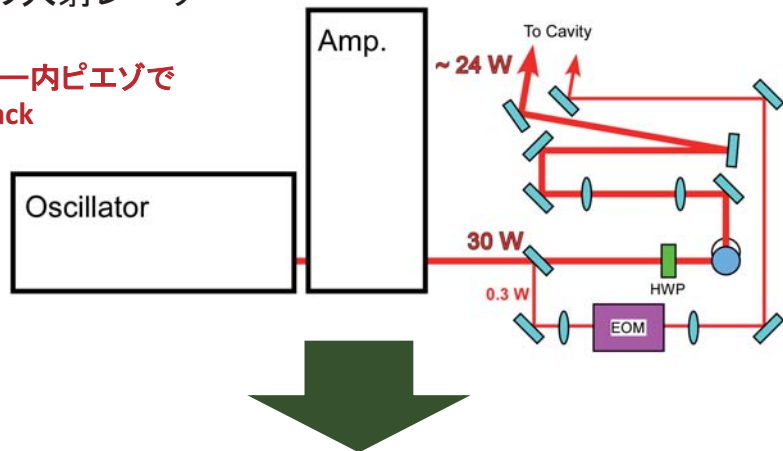
- 共振器長によって断続的な共振点が存在するが、最大の共振点はfeedback条件が狭く、維持することが困難であった。
- 条件の緩い共振点(蓄積強度1/3)に下げてもLCS実験を実施せざるを得なかった。



# 課題: レーザー蓄積最大点での維持: Feedback応答の改善

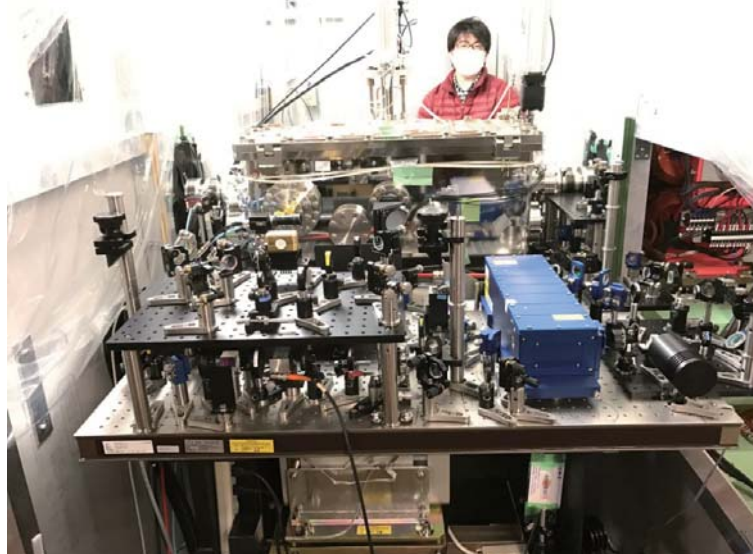
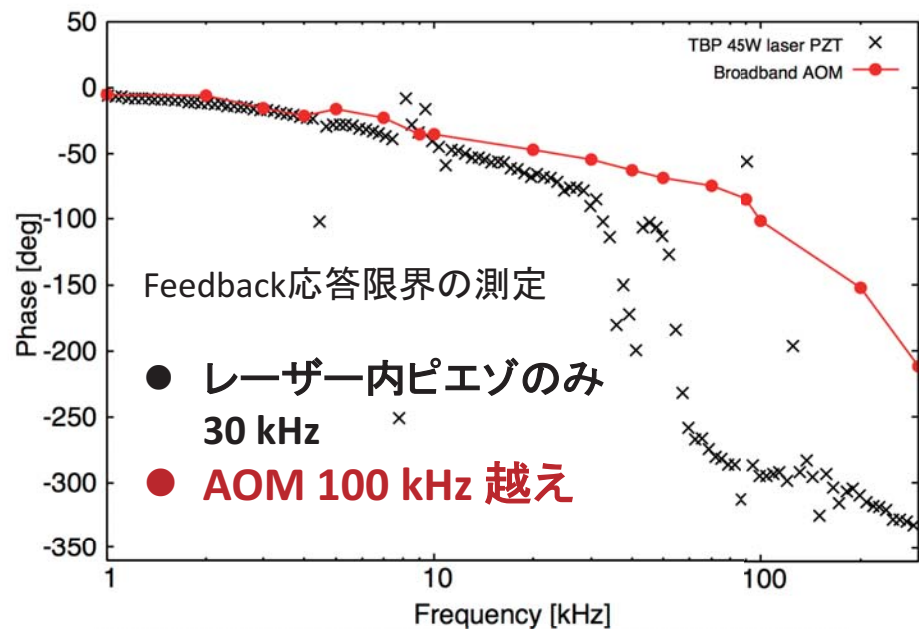
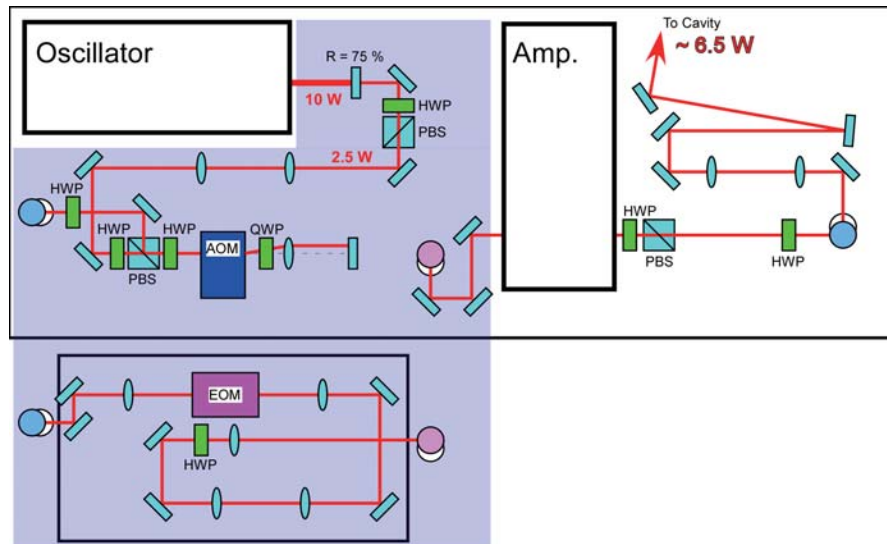
従来の入射レーザー構成

レーザー内ピエゾで Feedback

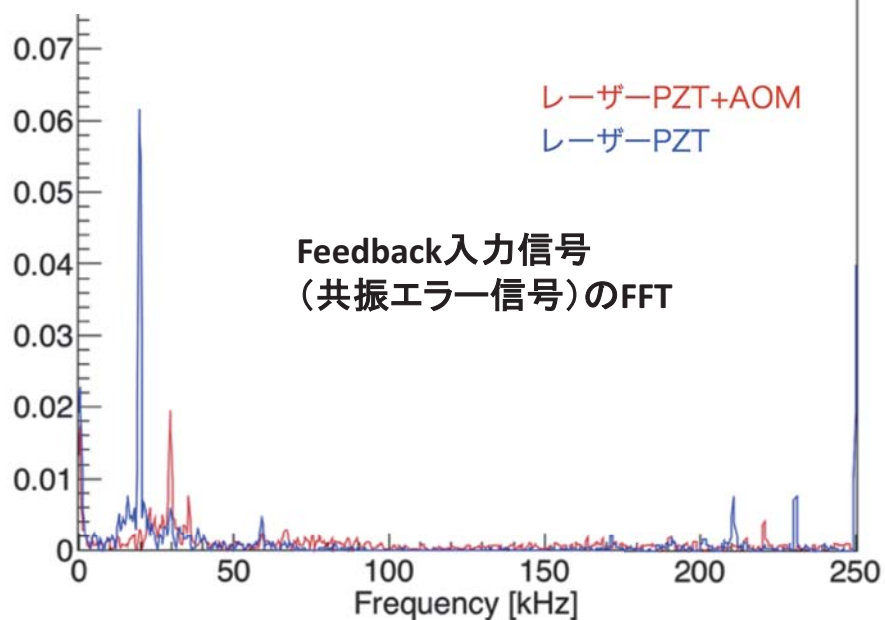
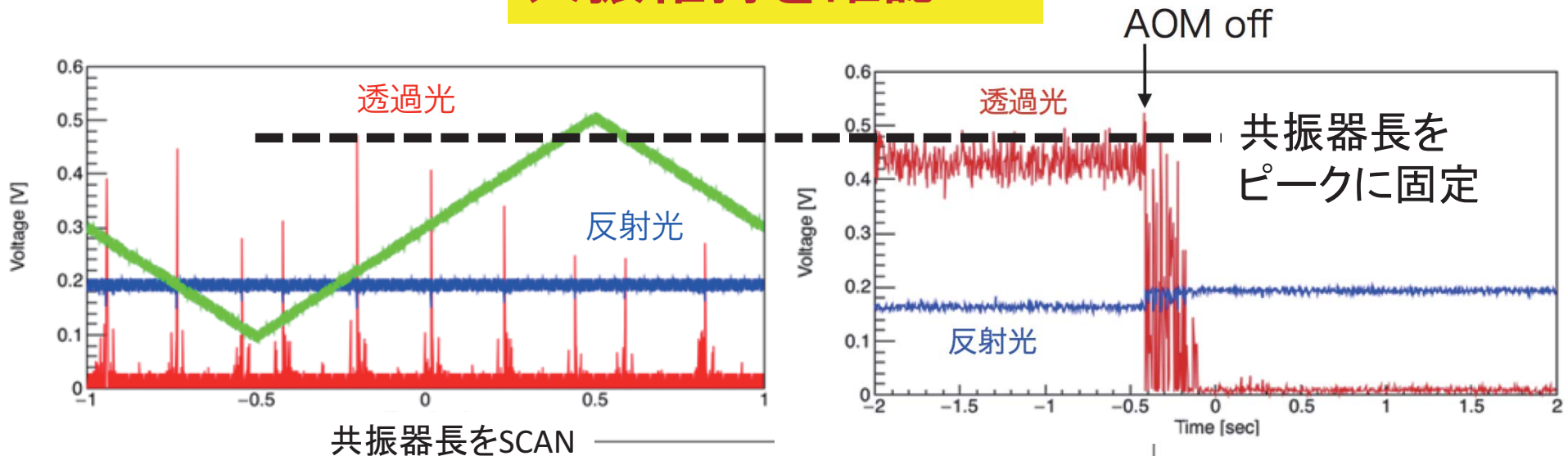


H28年度の入射レーザー構成

AOM(Acoustic-Optic Modulator) 高速feedbackを追加



# 最大ピークでの 共振維持を確認



# まとめ

- 「進捗状況の把握」として、性能の追求・見極めは終了。昨年度から5~6倍のX線強度。改めてX線画像を撮像している。
- LUCXでは1パルス(2.8usec)あたりの生成X線が増え、Pixel size 100 umのHyPix-3000では数え落としが生じている。  
→ 同17 umのSOI検出器でのイメージングをまとめる。
- 補足：タルボ試験では、X線格子での減衰により数え落としは無いレベルである。5~6月に新しい格子が届く(東北大)ので、追試験を予定している。この試験のため、ビーム運転繰り返しを4倍(12.5Hz)に上げる予定。
- 技術レポートとしての「成果の取りまとめ」は原稿収集中  
3月中に編集、体裁を整えて年度報告書と共に5月末に提出となる。