

# レーザーコンプトン散乱X線発生と今後の利用の展開

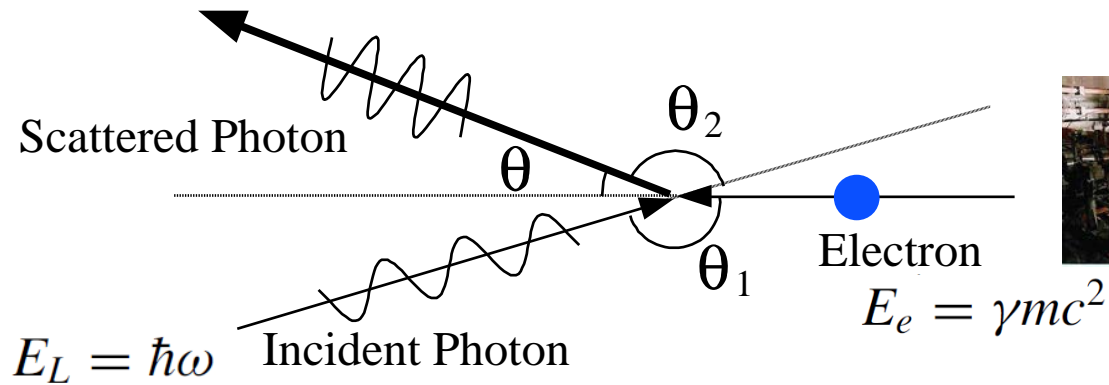
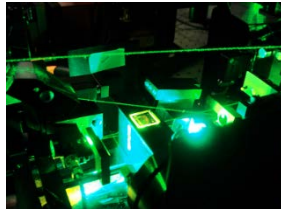
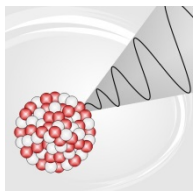
羽島 良一

日本原子力研究開発機構

ERL計画推進委員会

2015年7月14日

# レーザー・コンプトン散乱 (LCS)



$$E_X \simeq \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma E_L / (mc^2)} \quad \text{for head-on collision}$$

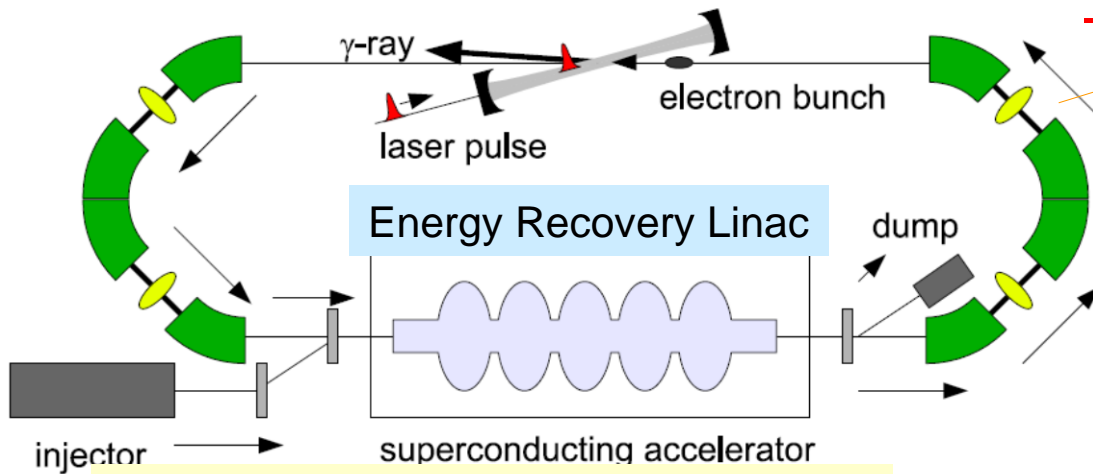
- ✓ ビーム状のX線/ガンマ線
- ✓ 偏極ビームが可能 (直線、円)
- ✓ 散乱角度とエネルギーに相関 → コリメータで準単色化

さらに、ERL と組み合わせると、大強度、高輝度化

# ERL技術にもとづく、高輝度、大強度 LCSガンマ線の提案

高密度の電子=レーザ散乱  
 高繰り返しで動作  
 → Low emittance & high-average current

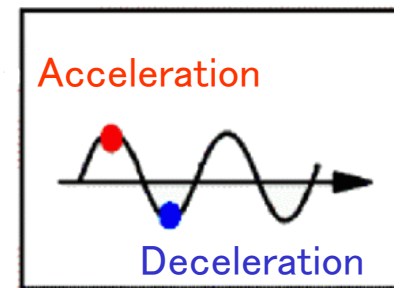
laser enhancement cavity



laser photons are recycled

high-flux  $\gamma$ -ray

electron energy is recycled



- Electron beam = 350 MeV, 13 mA
- Laser intracavity = 700 kW
- **LCS ~2MeV,  $1 \times 10^{13}$  ph/s**

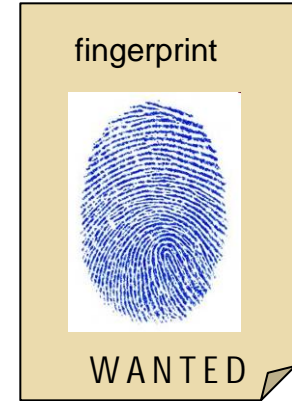
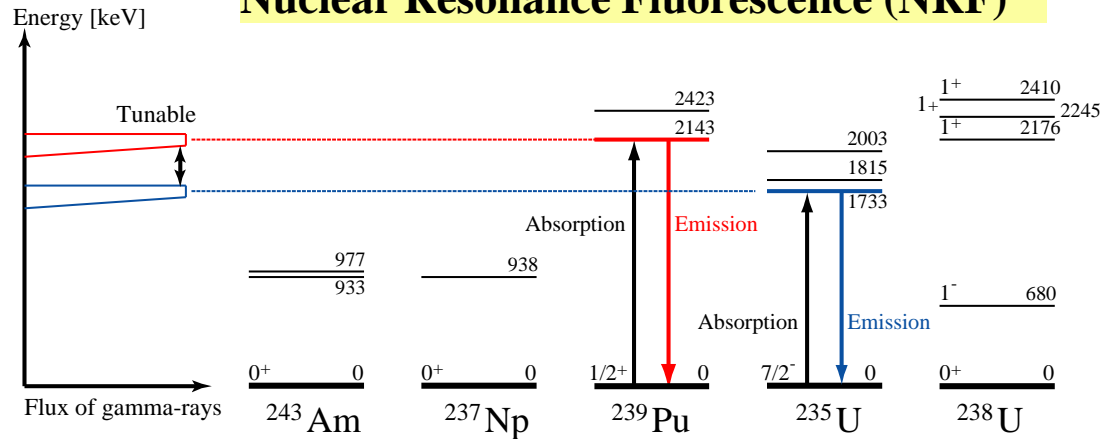
0.1 ph/eV/s →  $10^7$  ph/eV/s

AIST

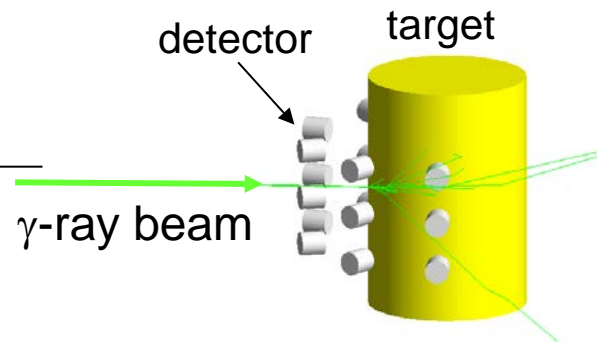
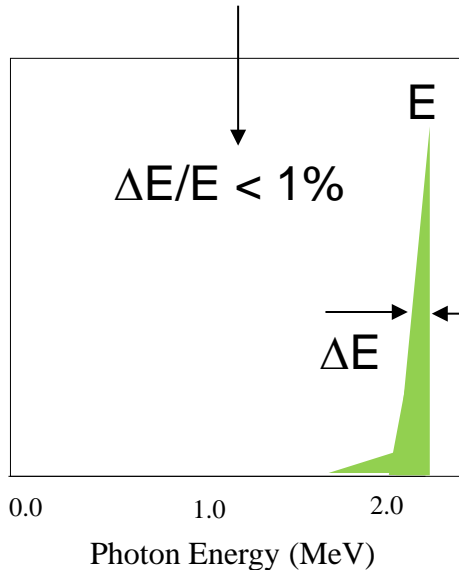
ERL

# 原子核共鳴蛍光散乱による核種の非破壊測定

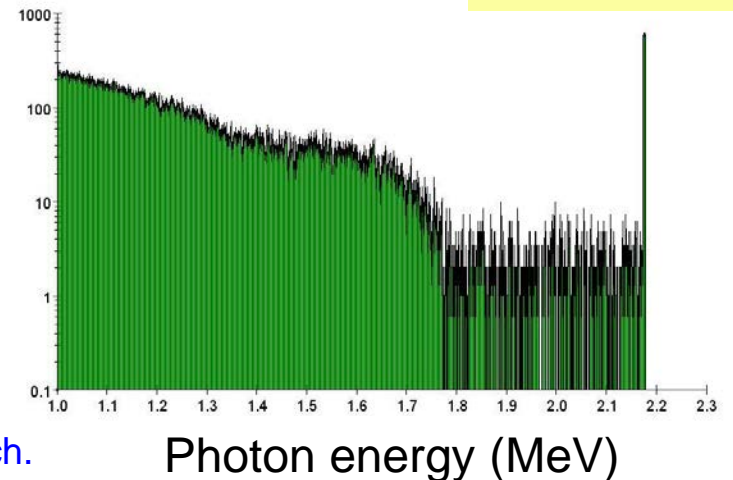
## Nuclear Resonance Fluorescence (NRF)



2.176 MeV for U-238



NRF signal  
U-238  
2.176 MeV



R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech.  
45, 441-451 (2008)

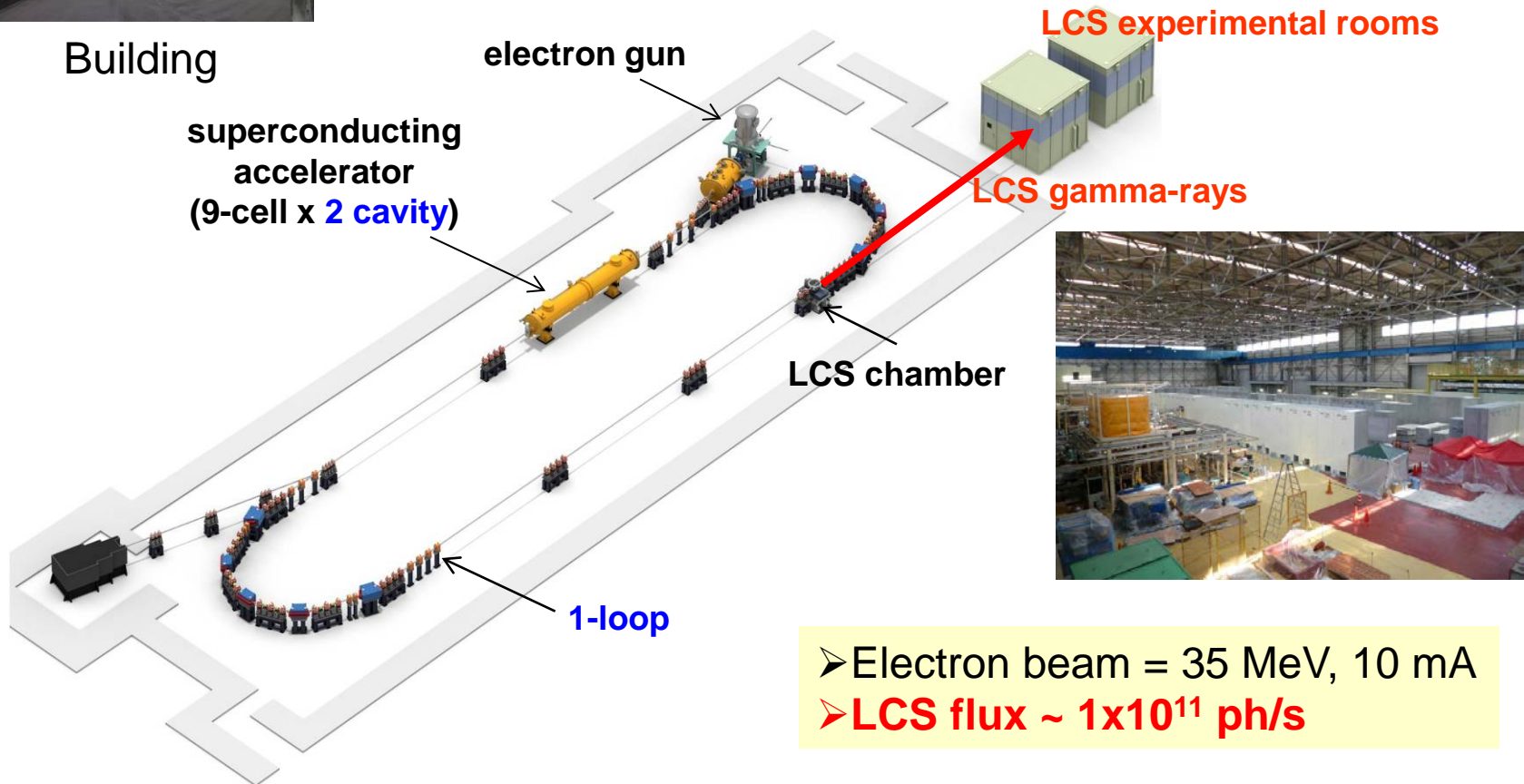
# 文科省、核セキュリティ補助金による技術開発 (2011-2014)

## cERL における実験 → ERL-LCS の技術実証



- LCS 発生に必要な機器の製作
- LCS 発生実験

Building



- Electron beam = 35 MeV, 10 mA
- LCS flux ~  $1 \times 10^{11}$  ph/s

# 光・量子融合連携研究開発プログラム(2014-2018)

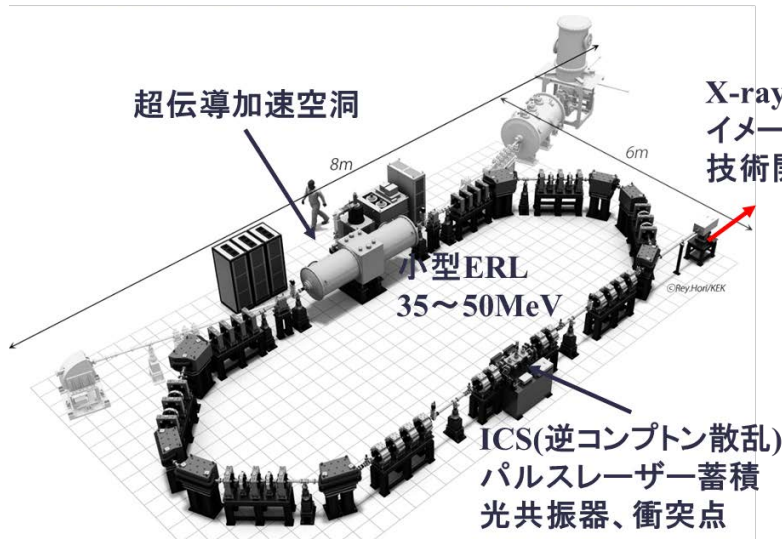
代表; 浦川順治 → 照沼信浩 (KEK)

イメージングを中心とした利用研究

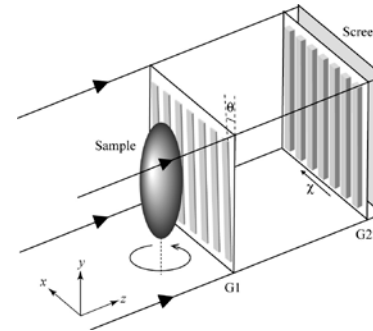
## 微小光源X線の利用

KEK、JAEA、広島大学、日本大学、早稲田大学、京都大学、産総研、東北大学、リガク

小型高輝度X線源(Peak Brightness  $10^{19}$ )  
数keVから100keV X線領域エネルギー可変光源



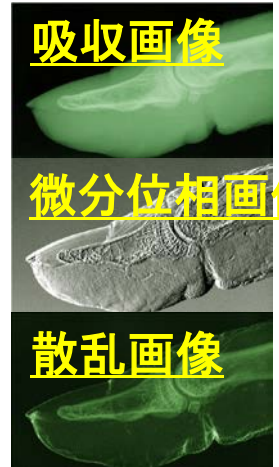
## X-ray Talbot干渉計



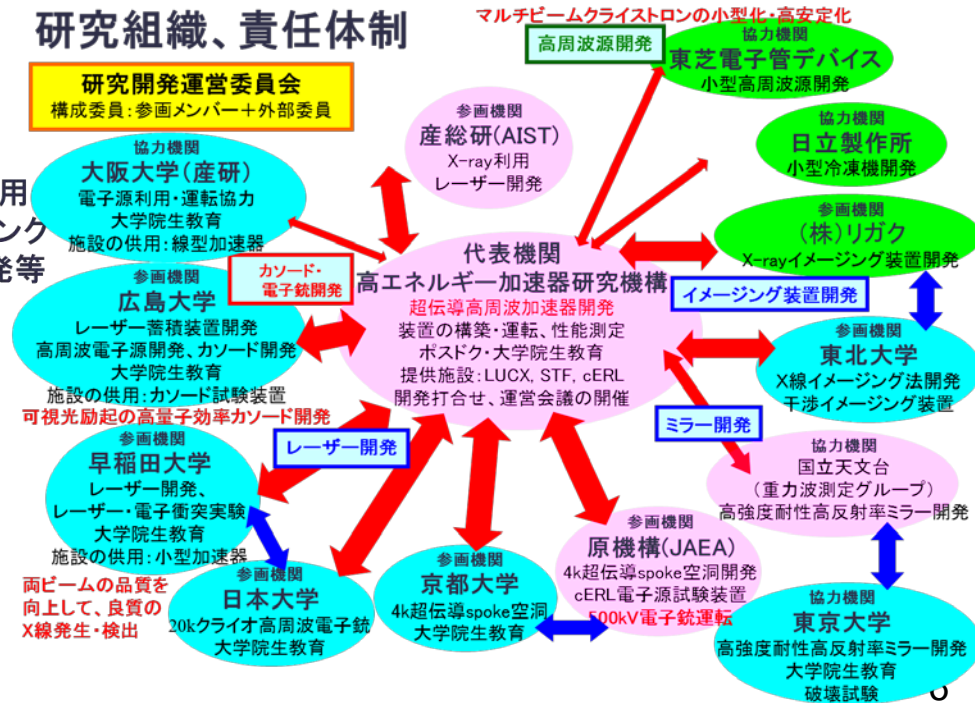
吸収画像

微分位相画像

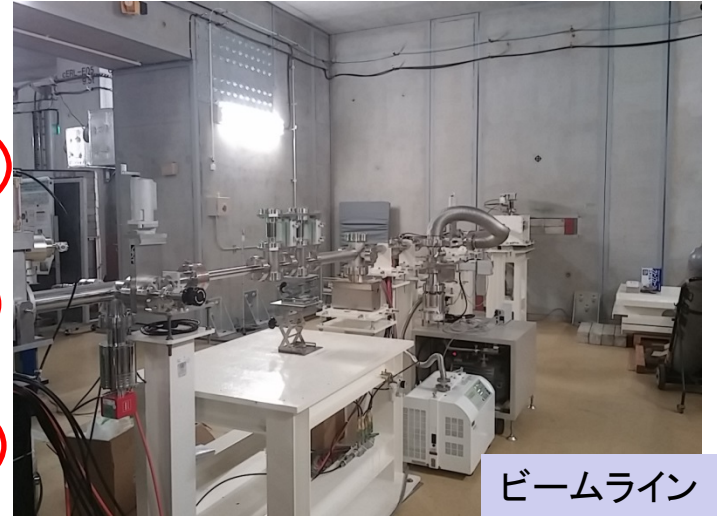
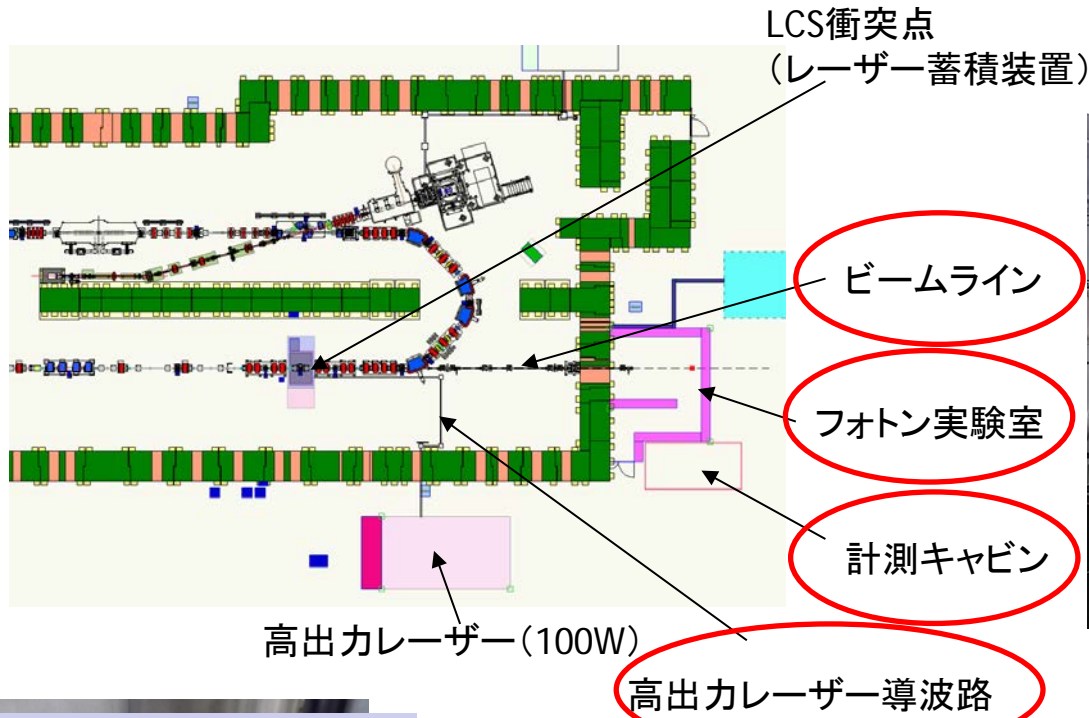
散乱画像



## 研究組織、責任体制



# コンパクトERLにおけるLCS実験のための設備(1)



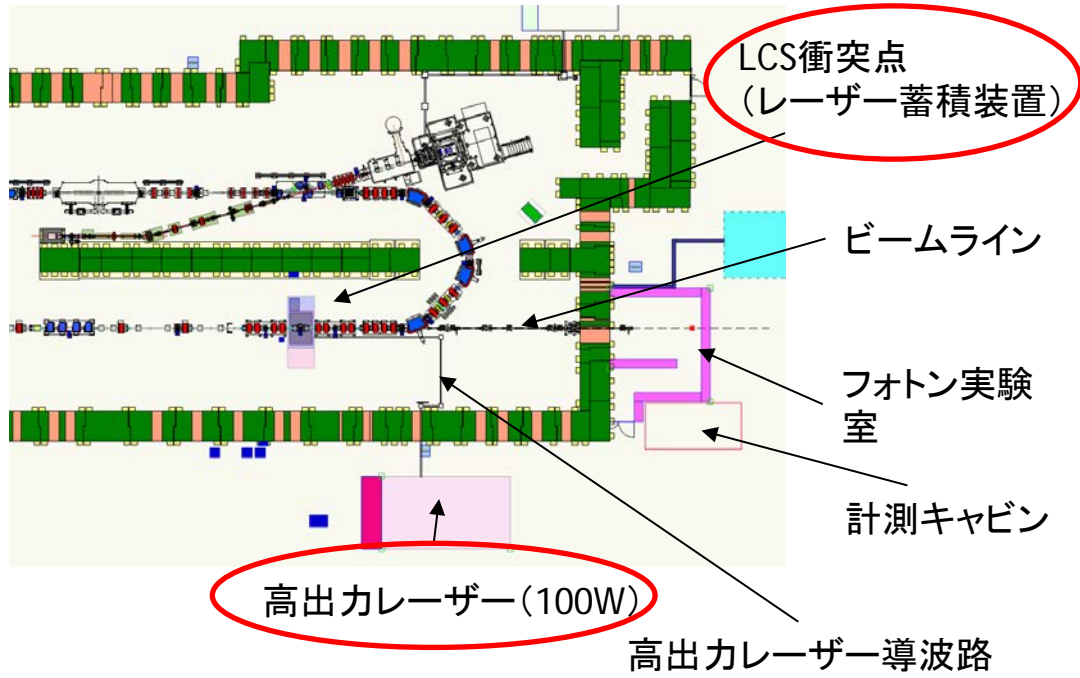
高出カレーザー導波路



フォトン実験室(内部)  
3 m x 4.5 m



# コンパクトERLにおけるLCS実験のための設備(2)



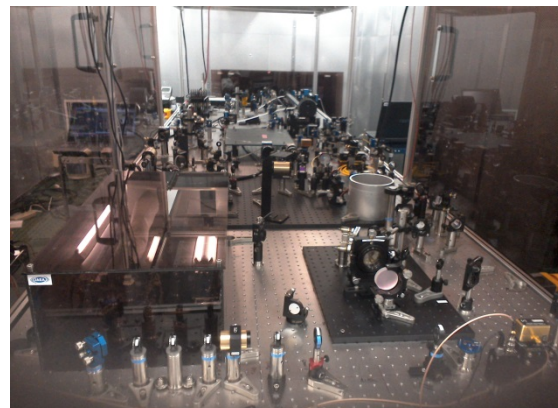
LCS衝突点(クリーンハッチ外観)



LCS衝突点  
(レーザー蓄積装置の搬入)



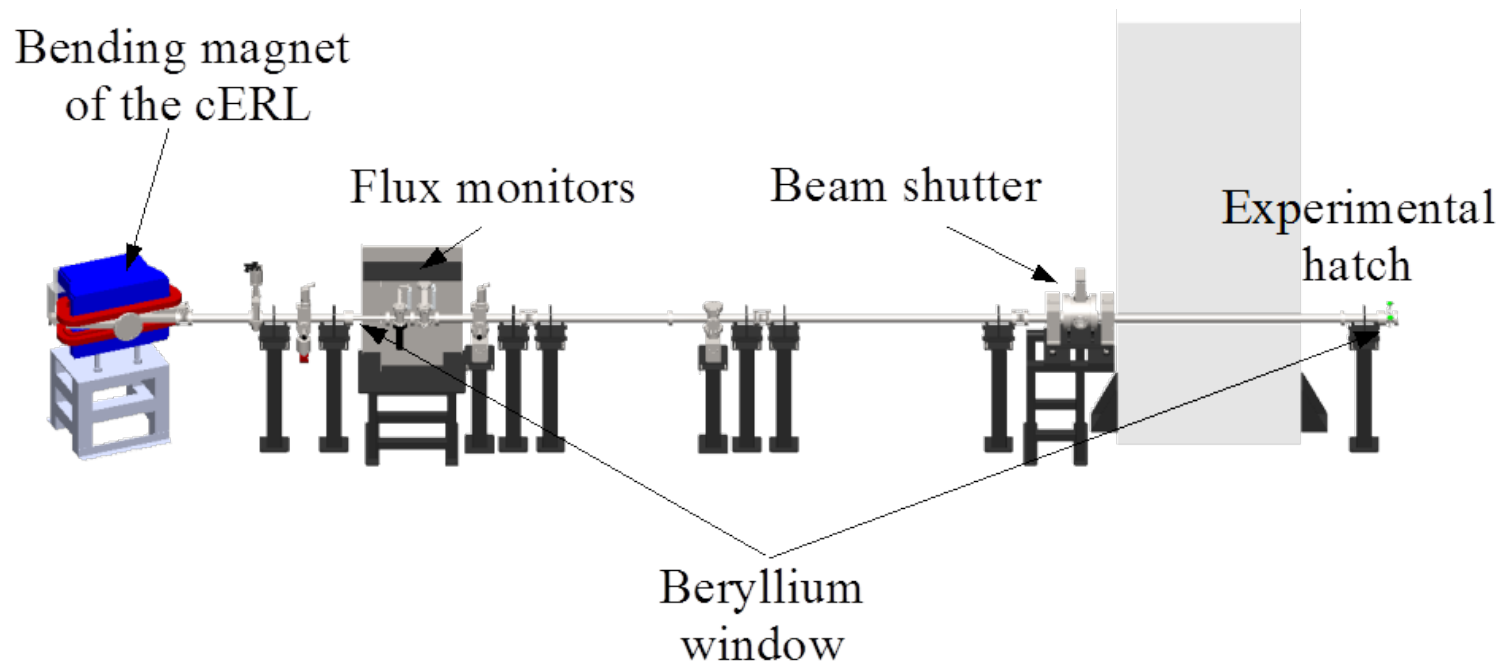
高出カレーザー(レーザー室外観)



高出カレーザー(関西研より移設)

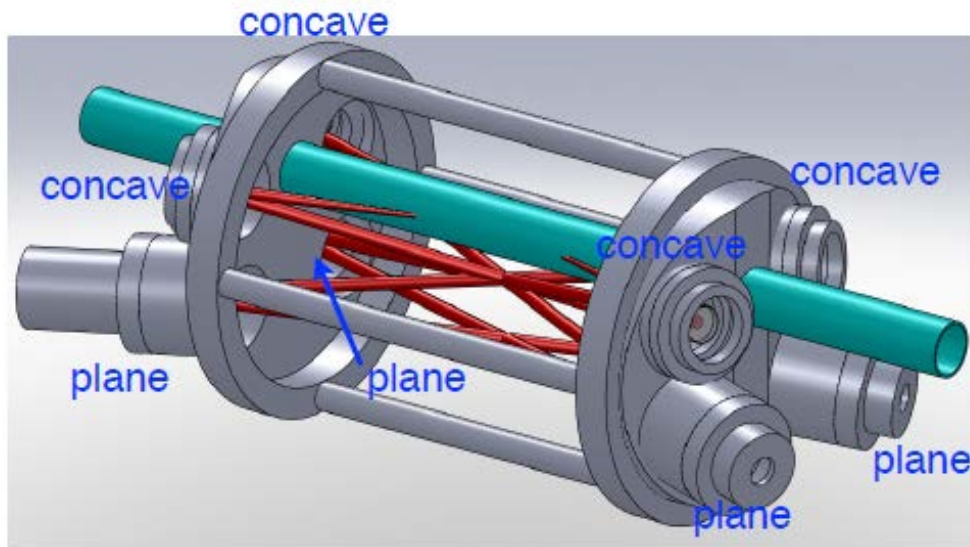


# LCSビームライン(第2アーケから光子実験室へ)



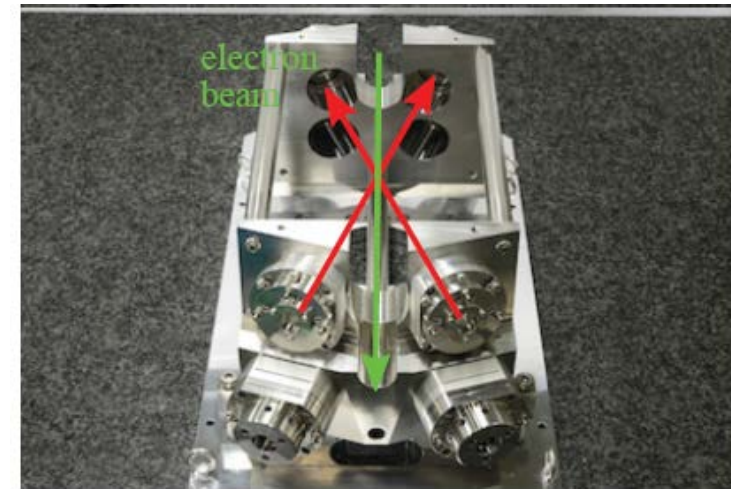
- Be窓で加速器本体と独立の真空
- 2か所でLCS測定: Flux Monitor (シンチレータ、SDD)と光子実験室
- ビームシャッターが閉じていれば、光子実験室に入室可

# レーザー蓄積装置



KEKにて開発(赤木 智哉)

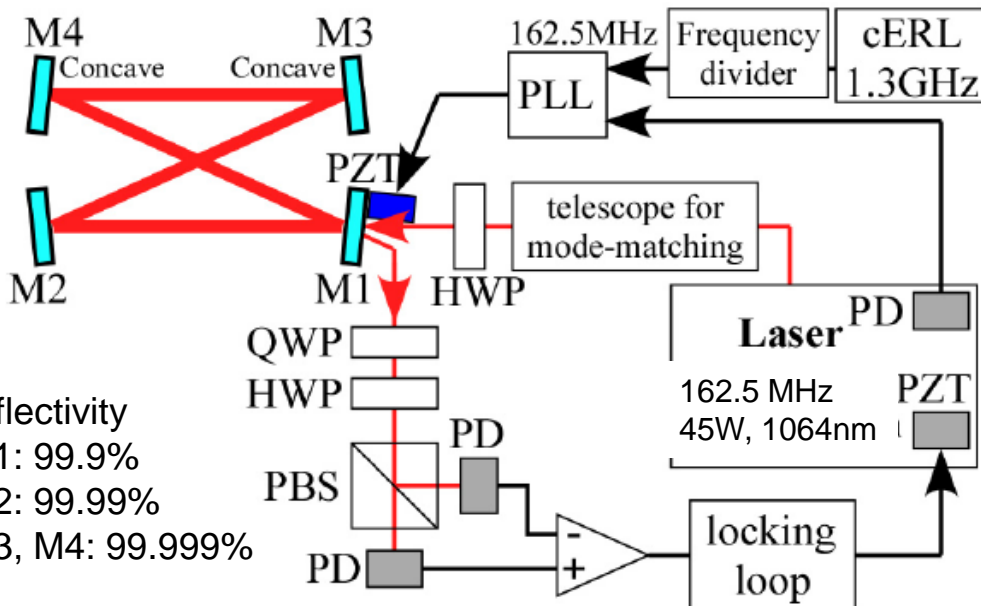
T. Akagi et al., Proc. IPAC-2014, p.2072  
 A. Kosuge et al., Proc. IPAC-2015, TUPWA-66



二本のレーザーを同時に蓄積



二種の偏光X線/ガンマ線を同時に(または、パルスごとに)発生可能  
 (これまでの実験では1台のレーザー)



reflectivity  
 M1: 99.9%  
 M2: 99.99%  
 M3, M4: 99.999%

waist size:  $\sigma=30\mu\text{m}$

# コンパクトERLにおけるLCS実験

H26年 6月: cERLマシンタイムにて、LCSビームライン位置でのBG測定

7月: LCS実験のための変更申請(電流10 $\mu$ A $\rightarrow$ 100 $\mu$ A)

運転休止中: LCS実験のための施設の建設、装置の組み立てと調整

H27年

2月12日: **施設検査**

2月23日 162.5 MHz (LCS用)へ変更、LCS optics のビーム調整

2月26日: **LCS実験開始**

3月2日: **LCS信号確認**、その後、信号の増強を目指した調整を継続

4月3日まで: LCS測定、イメージング実験

6月25-26日: LCS測定、イメージング実験

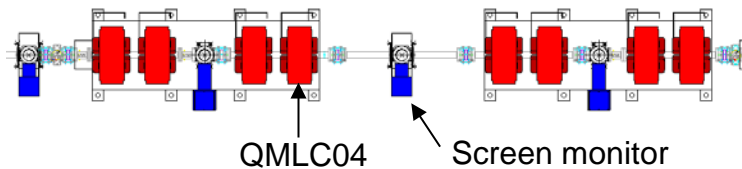
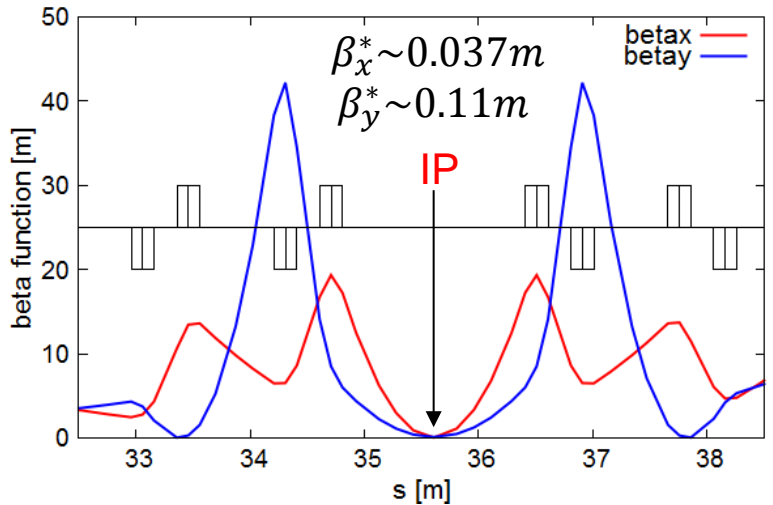
# LCS実験のための電子ビーム調整

- 衝突部にて “Low-beta” = ”極小ビームサイズ”
- 小さなビーム損失のままビームを輸送

調整技術を確立

Design optics (example: “70% middle” optics)

$\sigma_x^* = 21 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_y^* = 33 \mu\text{m}$  at IP



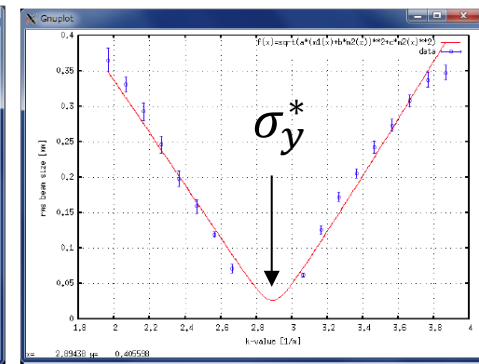
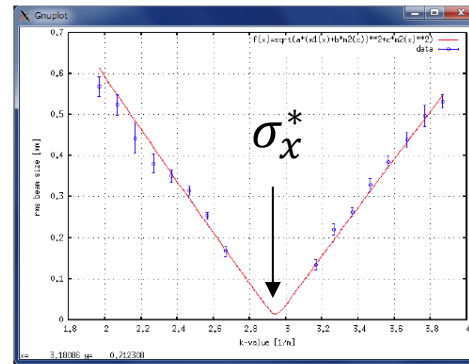
Bunch charge: 0.5 pC/bunch,  
Normalized emittances:  $(\epsilon_{nx}, \epsilon_{ny}) = (0.47, 0.39)$  mm·mrad



衝突点ビームサイズ  
(Q-scanにて測定)

$\sigma_x^* \sim 13 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_y^* \sim 25 \mu\text{m}$  (example)

Beam size at the screen monitor ↑



K-value of QMLC04

K-value of QMLC04

$\sigma_x^*, \sigma_y^* <$  (resolution of the screen monitor)

S. Sakanaka et al., Proc. IPAC-2015, TUBC1

# LCS ビームの発生

## 電子ビームパラメータ

Energy [MeV]	20
Bunch charge [pC]	0.36
Bunch length [ps, rms]	2
Spot size [ $\mu\text{m}$ , rms]	30
Emittance [mm mrad, rms]	0.4
Repetition Rate [MHz]	162.5
Beam current [ $\mu\text{A}$ ]	58

## レーザー蓄積装置パラメータ

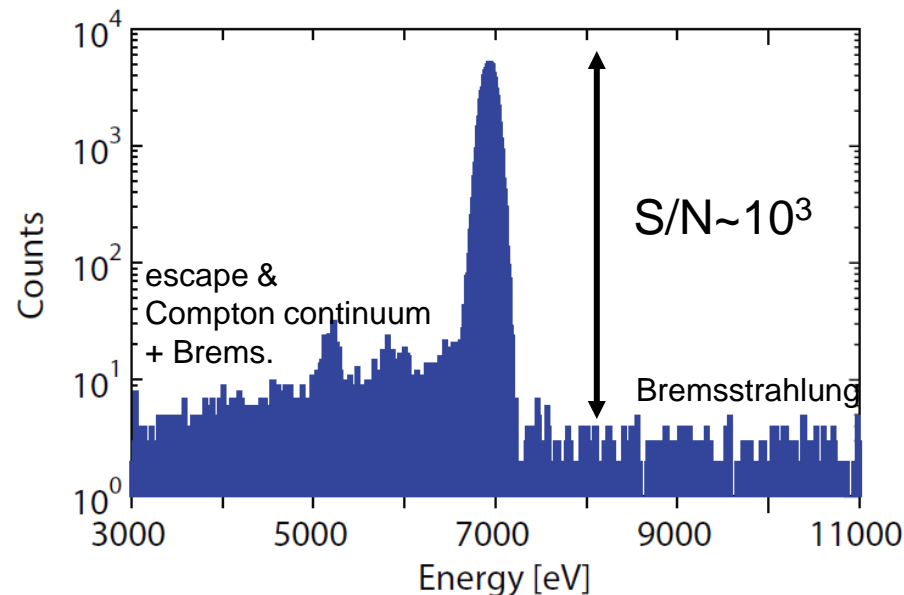
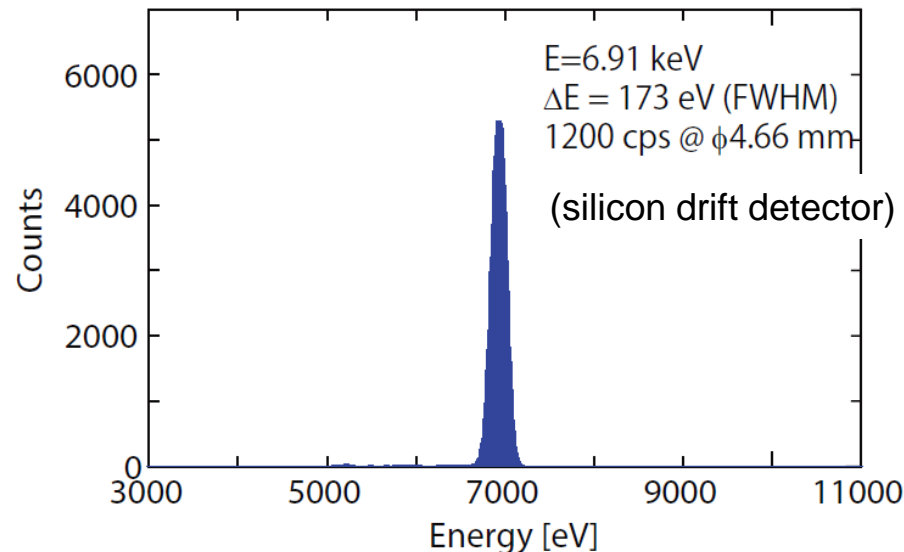
Center wavelength [nm]	1064
Pulse energy [ $\mu\text{J}$ ]	64
Pulse length [ps, rms]	5.65
Spot size [ $\mu\text{m}$ , rms]	30
Collision angle [deg]	18
Repetition rate [MHz]	162.5
Intracavity power [kW]	10

## 実験結果 (2015年3-4月のマシンタイム)

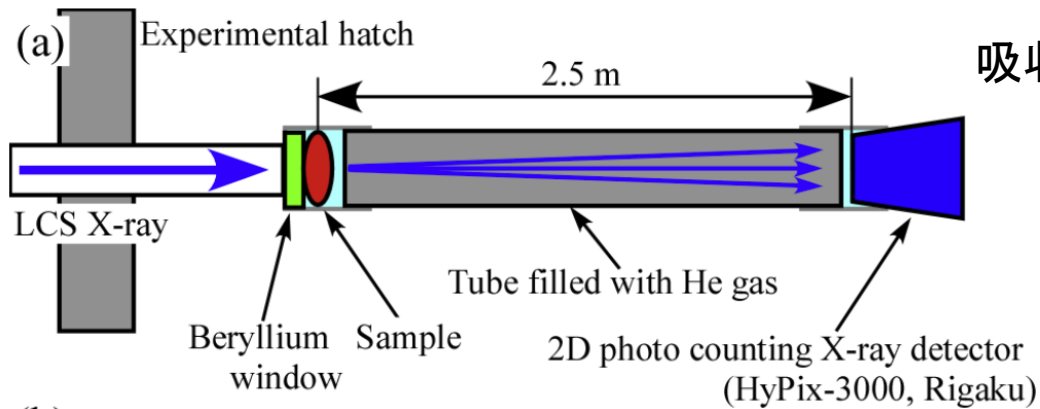
光子エネルギー = 6.9 keV  
計数率 = 1200 cps @  $\phi 4.66\text{mm}$  (\*)  
発生点フラックス =  $4.3 \times 10^7$  ph/s (\*\*)

(\*) Detector collecting angle is  $4.66\text{mm}/16.6\text{m} = 0.281$  mrad

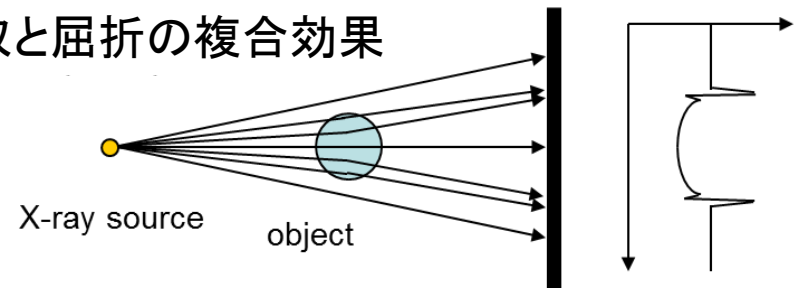
(\*\*) CAIN/EGS simulations with the detector count rate



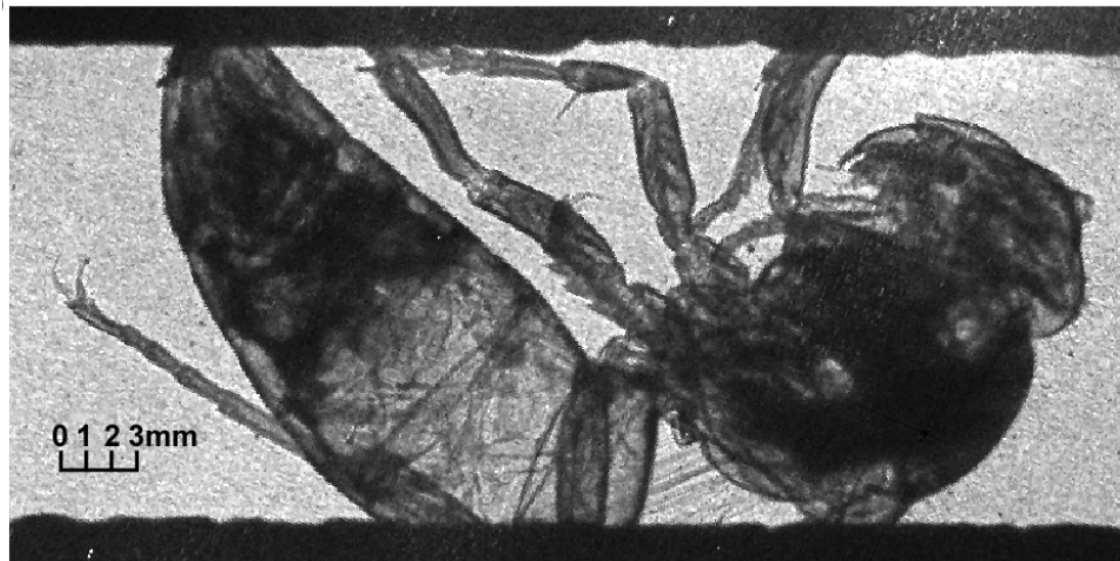
# LCSビームによるイメージング（ハチ）



吸収と屈折の複合効果



→ エッジが強調された画像



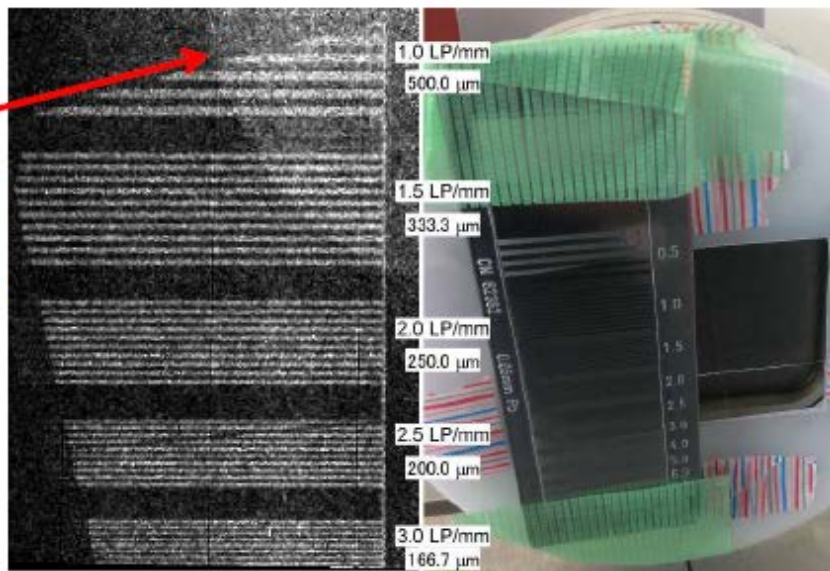
An X-ray image of a hornet taken with LCS-produced X-ray.

Detector: HyPix-3000 from RIGAKU. Detector was apart from the sample by approx. 2.5 m.

# LCSビームによるイメージング（テストチャート）

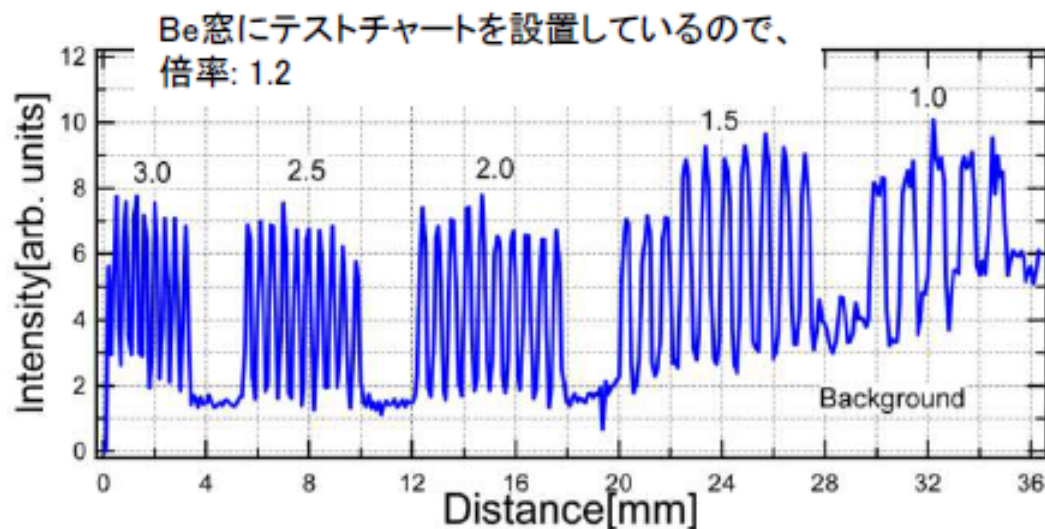
測定時間: 13分

Background  
 $3 \times 10^{-3}$  photons/sec/100mm<sup>2</sup>  
LCS X線信号の10%以下



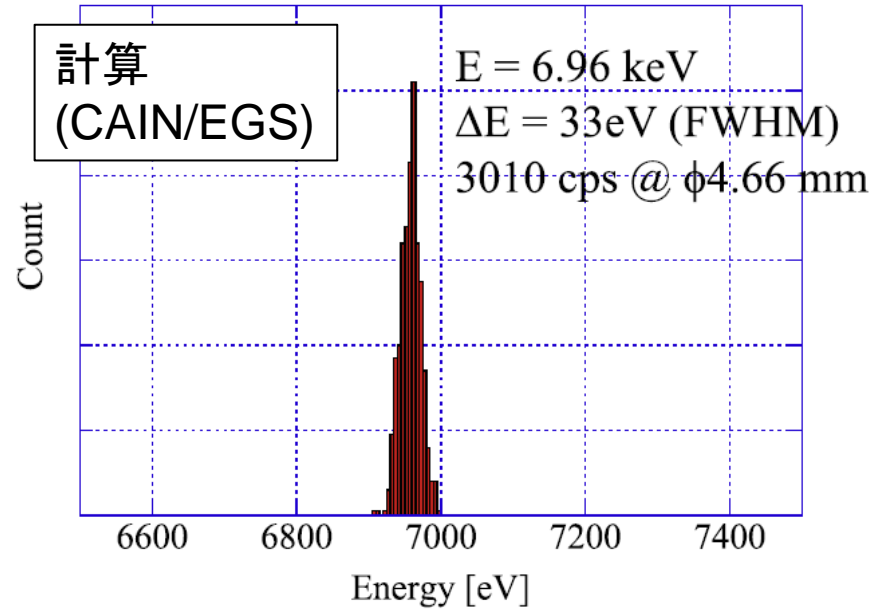
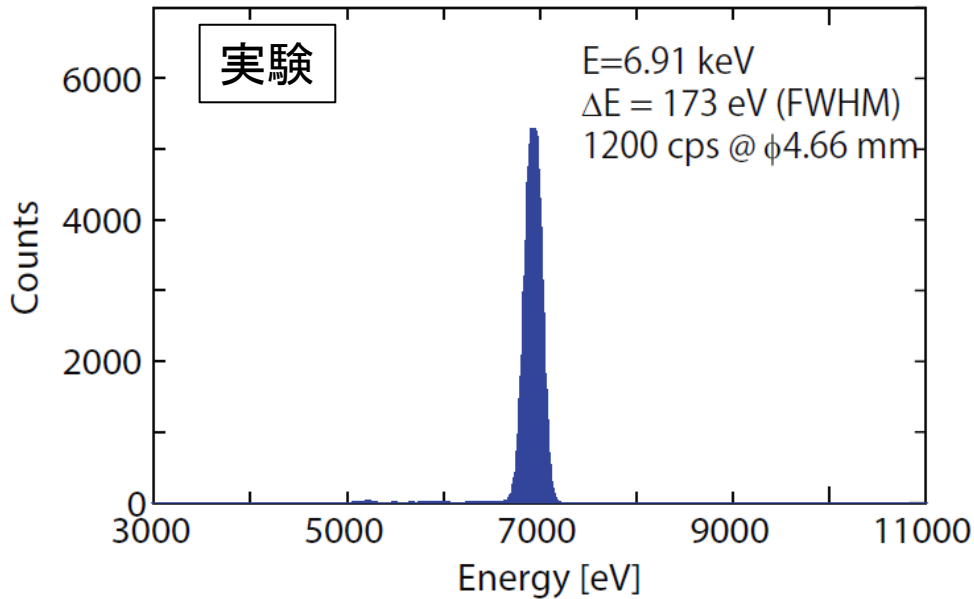
測定時間: 13分(770秒)  
ピクセル 100 μm x 100 μm

ピクセルあたりフラックス  
平均 0.08 ph/s  
最大 0.2 ph/s



検出器ピクセルサイズに  
相当する分解能が得られている

# 実験結果と設計計算の比較



## 発生光子数

ファクター=2.5 で一致

## エネルギー幅

検出器分解能で制約 153eV@5.9keV (Fe-55)

二乗和の法則を仮定すると、  
検出したLCSのエネルギー幅は

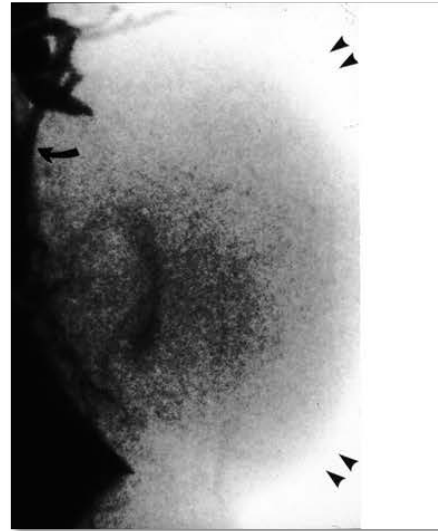
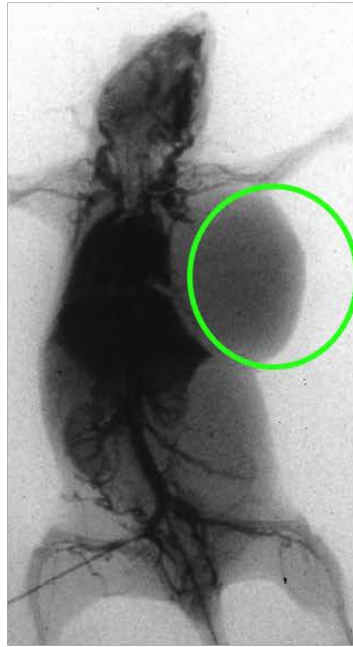
$$\sqrt{173^2 - 153^2} = 81 \text{ eV}$$

エネルギー幅を比較するためには、  
検出器の分解能が足りない  
→ 結晶分光器による測定を試みたい

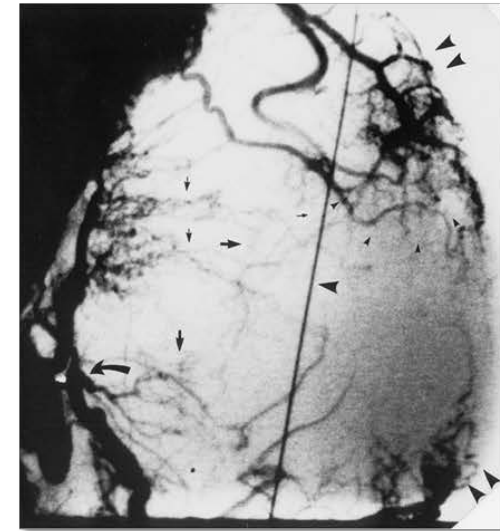


# 今後の展開（微細血管の造影）

X線HARP検出器の利用



通常 X 線発生装置



放射光単色X線

## 腫瘍血管系造影像

(東海大学提供)

H. Mori, et al.

X線エネルギー

33.3 keV

照射面積:

25 mm (V) × 30 mm (H)

空間分解能

25 μm

照射時間

30 msec/image

撮像系

HARP-TV



指先の毛細血管の造影から糖尿病の診断へ

## まとめ、今後の計画

- cERLにて、LCS関連装置、施設を設置し、LCS発生実験を行った。“ERL+レーザ蓄積”で世界初。
- 短期間の実験でX線を確認
  - 加速器の安定性、運転調整の正しさを証明
- 発生光子数、エネルギースペクトルを測定し、ほぼ設計通りの値を得た
- イメージング実験(屈折イメージング配置)を行い、画像を取得した
  
- 今後は、LCS利用の積極的な展開を検討
- 7 keV (~1% BW)、 $10^7$ - $10^8$  ph/s/ $\phi$ 50mm(10 mA時)
- さらに、2本のレーザを使った偏極切り替えの可能性