

**cERL-LCSの進捗状況**  
**LCS-X線イメージングの報告**  
**(KEK, JAEA, リガク)**

照沼 信浩 (KEK)

2015/5/14 第11回全体会議@東北大

# cERLでのLCS X線イメージングに成功 (April 3, 2015) (KEK, JAEA, リガク)



スズメバチ



HyPix-3000 (Rigaku)  
exposure: 10 min.  
e- beam: Ave. 57.7  $\mu$ A  
Laser: 10 kW  
X-ray: 7 keV

# 4/27 プレスリリース (JAEA, KEK)

## 「核セキュリティ強化等推進事業」(JAEA)

- cEERL周回部ビームライン
- LCS X線ビームライン、実験室
- 100 W レーザー
- X線検出器(XR-100SDD)

## 「光・量子融合連携研究開発プログラム」(KEK)

- レーザー蓄積装置(光共振器)
- X線検出器(HyPix-3000)

5/5 日刊工業新聞

電子とレーザー 高頻度で衝突  
X線生成に成功

原子力機構など

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所門下 構造工学研究部門 量子ビーム応用研究センターの羽島良一研究主席は、密度を高めた電子ビームとレーザー光を高い頻度で繰り返し衝突させる手法によりX線の生成に成功した。高い強度のガンマ線を発生させる基盤技術になる成果で、ガンマ線を使った核物質の測定での応用が期待される。同機構は政府などに対して、東京電力福島第一原子力発電所の溶融燃料の測定に活用することを提案していく。

密度を高めた電子ビームを高い頻度で繰り返し加速できる加速器「エネルギー回収型リニアック(EERL)」などを使って実証した。高エネルギー加速器研究機構が持つ試験装置で電子ビームを最小30発射まで収束させて密度を高め、レーザー光を当てやすくなることなどにより電子ビームとレーザー光を1秒間に1億回以上衝突させた。その結果、6・9 MeV程度のX線の生成に成功した。この技術を基に加速器を増やし、電子ビームのエネルギーを高めることでガンマ線を生成できるという。

【本件リリース先】 4月27日(月) 15:00

(資料配付)

文部科学記者会、科学記者会、原子力規制庁記者会(仮称)、京都府政記者室、学研都市記者クラブ、大阪科学・大学記者クラブ、茨城県政記者クラブ、筑波研究学園都市記者会



平成27年4月27日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

これまでになく強く明るいX線を発生する新たな技術誕生へ  
— 毎秒1億回の電子ビーム・レーザー衝突でX線を作る —

【発表のポイント】

- あらゆる核物質の非破壊検知・測定を可能とする大強度ガンマ線の実現へ前進
- 大型放射光施設をダウンサイズし、高輝度X線の大学・病院での利用に足がかり

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(理事長 児玉敏雄、以下「原子力機構」という。)原子力科学研究所量子ビーム応用研究センターの羽島良一研究主席、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(機構長 山内正則、以下「KEK」という。)加速器研究施設の照沼信浩教授らの共同研究グループは、エネルギー回収型リニアック(EERL)において電子ビームとレーザービームを微小スポットで、1秒間に1.625億回という非常に高い頻度で衝突させる(高繰り返しで衝突させる)ことで、エネルギーのそろったX線ビームの生成に成功しました。これにより、核セキュリティ分野におけるあらゆる核物質の非破壊検知・測定を可能にする大強度ガンマ線源<sup>①</sup>(目標強度 10<sup>19</sup> ph/s)や、生体細胞の高分解能イメージングのための高輝度小型X線源<sup>②</sup>(目標ピーク強度 10<sup>19</sup> ph/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1NBW)といった、新たな計測・観察ツールとしての次世代光源へ道を開きました。

光速近くまで加速した電子ビームとレーザービームを衝突させることにより、任意のエネルギーのX線やガンマ線のビームを発生する方法は、レーザー・コンプトン散乱(LCS)<sup>③</sup>と呼ばれ、エネルギーが数keVから100keVのX線領域では、大型放射光施設の性能に匹敵する高輝度の小型X線源に、また、エネルギーが1MeV以上のガンマ線領域では、唯一のエネルギー可変の大強度ガンマ線源となり得るものです。しかしながら、電子とレーザーの衝突確率が小さいために、LCSによるX線ガンマ線源の実用化には、電子ビームとレーザービームを高密度かつ高繰り返しで衝突させる技術が必要とされてきました。

研究グループは、EERLとレーザー蓄積装置<sup>④</sup>を用いることでLCS光源実用化の鍵となる電子ビームとレーザービームの高密度かつ高繰り返し衝突が可能となることに注目し、これに必要な技術開発を進めてきました。EERLは収束サイズの小さな電子ビームを高繰り返しで加速できることから、LCSに最適な加速器です。KEKに建設されたコンパクトEERL<sup>⑤</sup>(EERL試験加速器)にLCS実験のための装置を設置し、2015年2月~4月の実験において、最小30μmの微小サイズ<sup>⑥</sup>で電子ビームとレーザービームを162.5MHzの高繰り返しで衝突させることで、10keV級の準準色<sup>⑦</sup>X線ビームの発生に成功しました。本成果によりLCSを使った高輝度、大強度のX線、ガンマ線発生を可能にする基盤技術を確認しました。今後、コンパクトEERLにおける電子ビーム電流値を目標値(10mA)まで増加させることで、LCS光源として従来に無いX線強度が得られる見込みです。

本研究の成果は5月3日から開催される第5回国際粒子線加速器会議(米/国リッチモンド)で発表される予定です。本研究の一部は文部科学省の「核セキュリティ強化等推進事業」「光・量子融合連携研究開発プログラム」によるものです。

【本件に関する問い合わせ先】

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究内容) 原子力科学研究所 量子ビーム応用研究センター 研究主席 羽島 良一 TEL: 029-282-6701

核不拡散・核セキュリティ総合支援センター 技術開発推進室 瀬谷 道夫 TEL: 029-282-5902

(報道担当) 広報報道課 中野裕範 TEL: 03-3592-2346

大学共同利用法人高エネルギー加速器研究機構

(研究内容) 加速器研究施設 加速器第6研究室 教授 照沼 信浩 TEL: 029-864-5715

EERL計画推進室 室長 教授 河田 洋 TEL: 029-879-6193

(報道担当) 広報室長 岡田 小枝子 TEL: 029-879-6046

# IPAC15; 粒子加速器国際会議

## 5/3-8, 2015, Richmond

### cERL-LCS報告

- Oral

- 坂中(KEK), Recent Progress and Operational Status of the Compact ERL at KEK

- Poster

- 永井(JAEA), High-flux Photon Generation from an ERL-based Laser Compton Photon Source
- 小菅(KEK), Development of a High Average Power Laser for High Brightness X-ray Source and Imaging at cERL

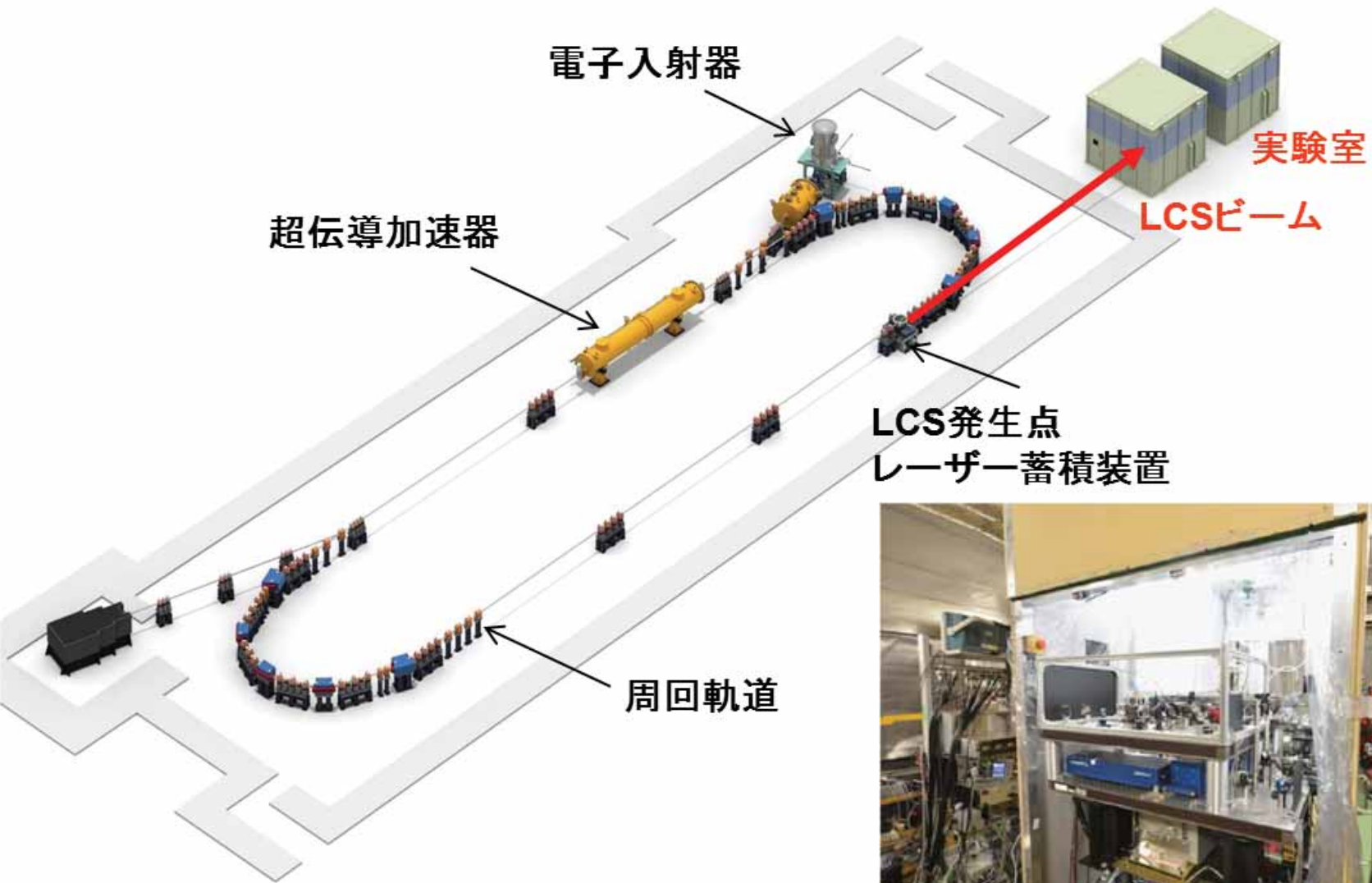
### その他の光・量子関係

- JAEA(2)、早稲田大(2)、広島大(1)、京都大(1)、日大(2)

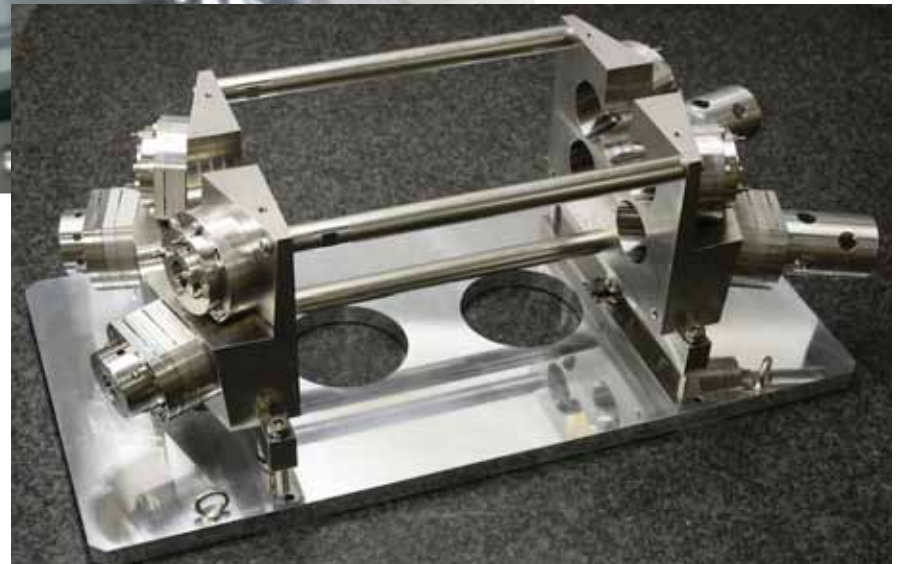
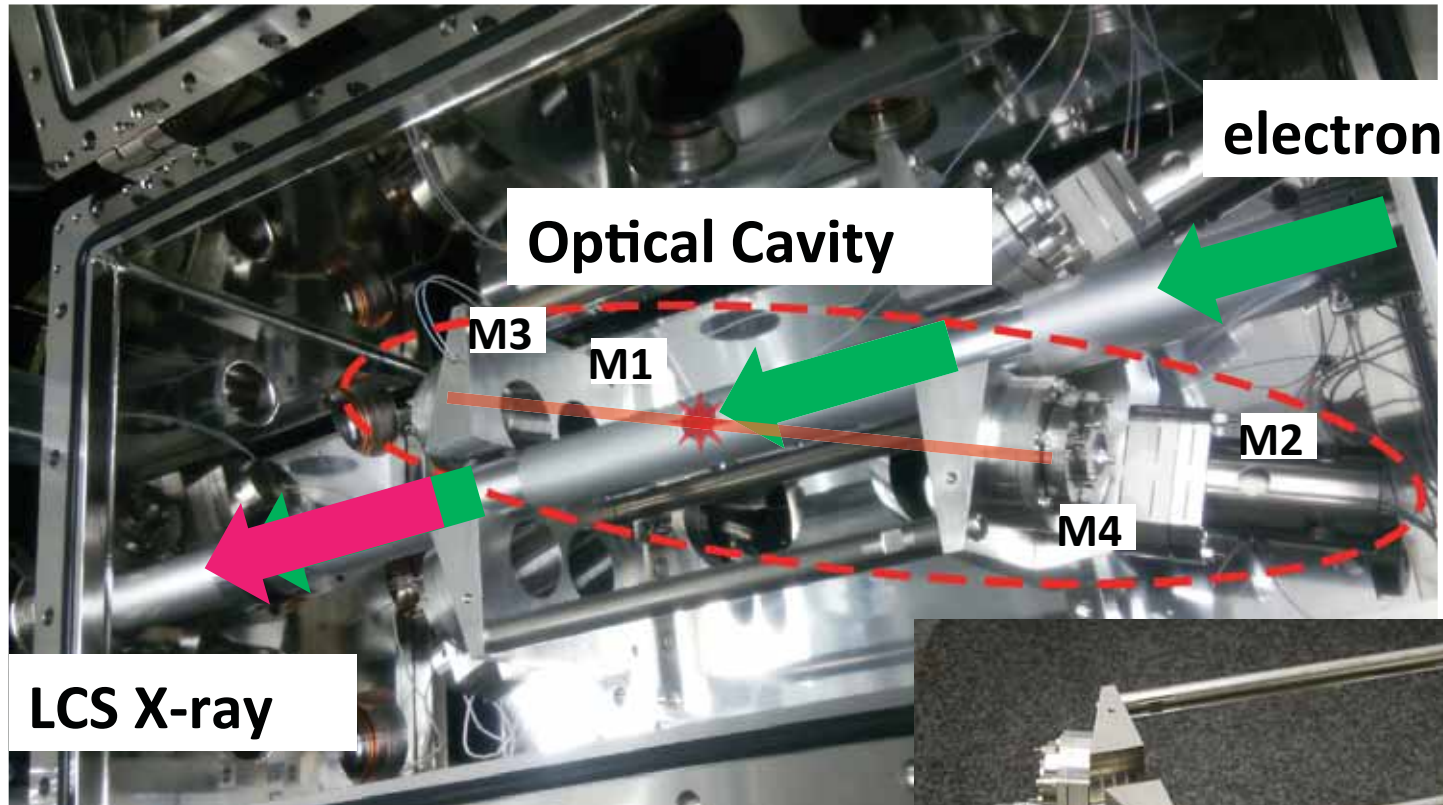
# cERL-LCS: 3~4月の経緯

- H26年度3月第一週; 前回3/5の全体会議(KEK)
  - cERLでLCSを開始、3/2に初めてのLCSを確認。
  - 光共振器の位相ロックは未完: **0.23 photon/sec@SDD**
- その後(～4/3)
  - **位相ロックを確立** ← フィードバック系のノイズ対策、アンプゲイン
  - 共振器レーザー調整
  - 電子ビーム調整(軌道、ビームサイズ、ビームロス低減、**CW運転**。)
  - 電子ビーム電流 **30uA → 80 uA(上限100uA)**
  - **LCS-X線: 1200 photon/sec @SDD (beam ave. 57.7 uA)**
  - **X線イメージング試験(4/2-4/3)**
- 4/3 ビーム停止。(次回は5/25～5週間。LCSは後半を予定。)

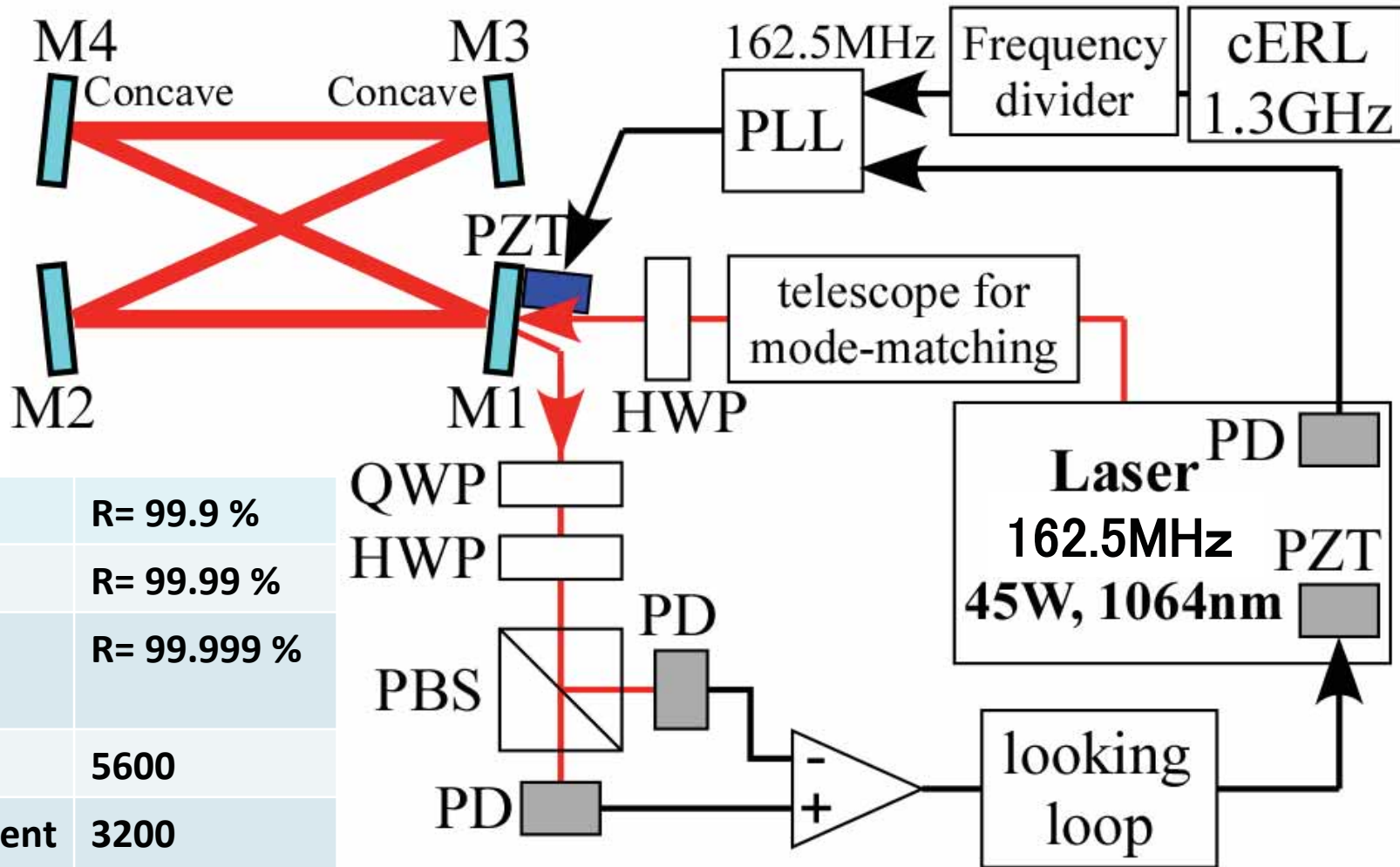
# cERL-LCS:おさらい



# cERL-LCS: 光共振器の構成



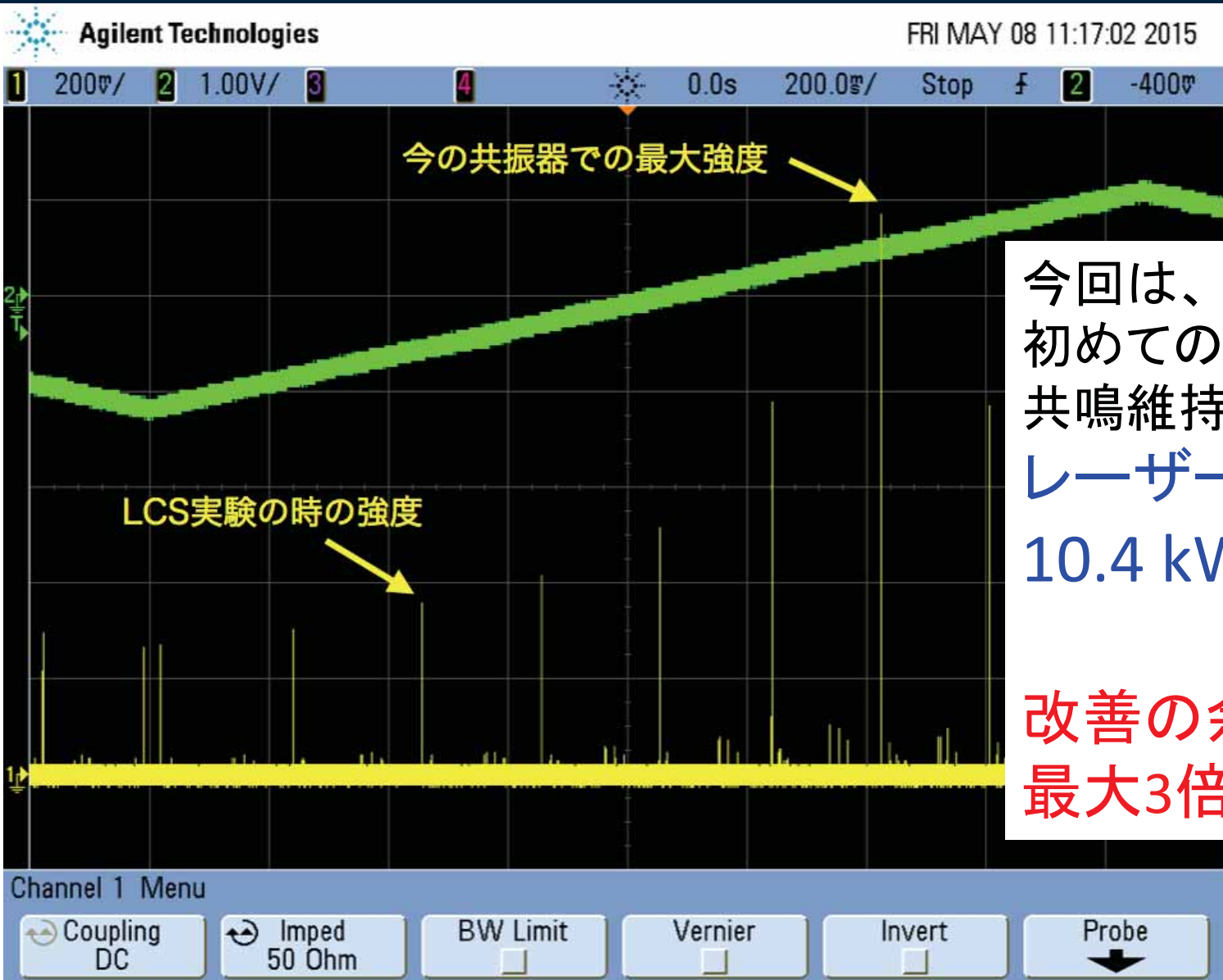
# cERL-LCS: 光共振器の構成



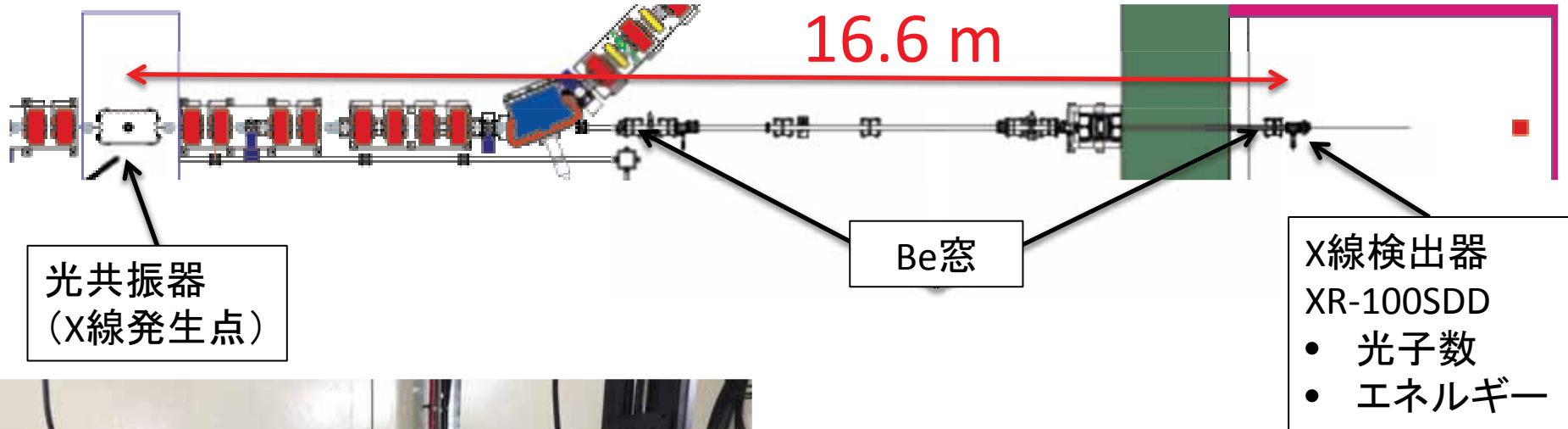
M1	R= 99.9 %
M2	R= 99.99 %
M3 & M4 (Concave)	R= 99.999 %
finesse	5600
Enhancement factor	3200



# cERL-LCS: 光共振器の設定



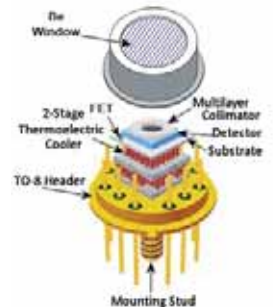
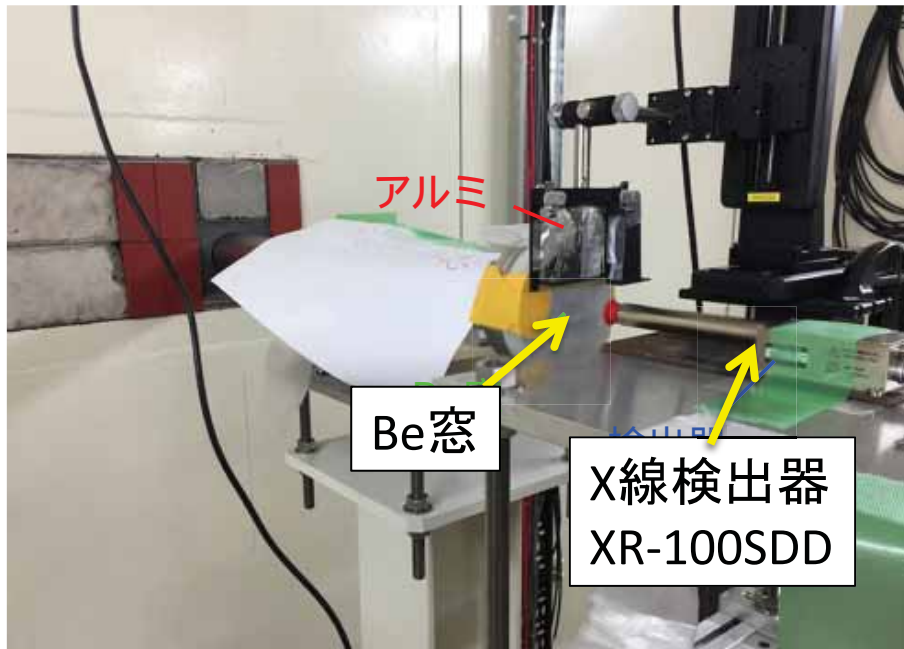
# cERL-LCS: 衝突調整時の構成



XR-100SDD Silicon Drift検出器

仕様

- 検出器サイズ : 25mm<sup>2</sup>
- シリコン厚 : 500 $\mu$ m
- エネルギー分解能@5.9keV : 125eV ~ 140eV FWHM (Peaking time:11.2 $\mu$ s)
- 検出器Beウィンドウ厚 : 0.5mil ( 12.5  $\mu$ m )



# 検出した光子数(設計と概算比較)

電子ビーム 0.5pC/b, 162.5 MHz x 10ms x 5 Hz  
レーザー 10kW

検出器5mm角のものが、衝突点から16m  
の位置にある。

Be窓(200um and 300um)と空気3cmの減衰

これでスケールすると、検出器に入射する光子数は

測定(5分のデータ)の総数 = 15000個

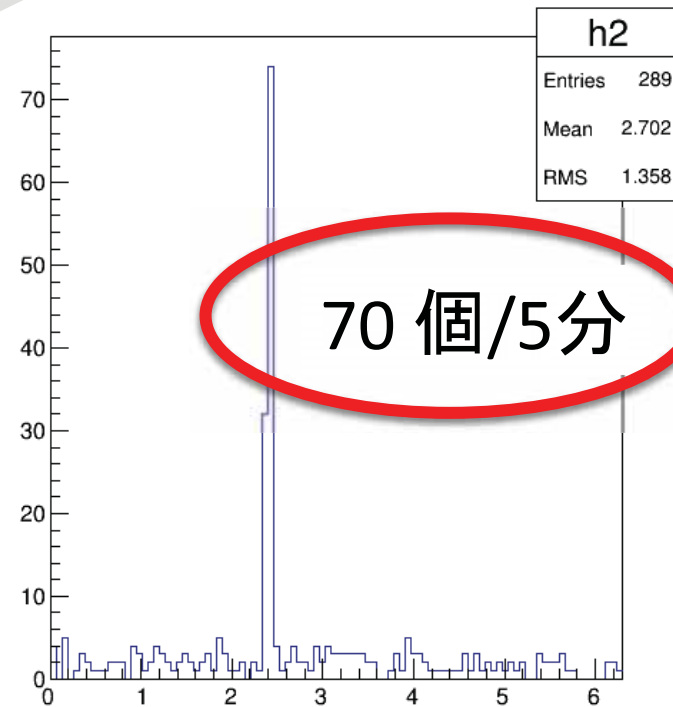
電子ビームとレーザー(相対位相)を固定していない。ランダムに衝突タイミングを探す。

7keVに対応する位相範囲に入る確率はおおよそ1/360

→ 約40個/5分間

実測データ 70 個/5分  
(現時点では上出来)

2015/Mar/4 19:25



電子ビームとレーザーの相対位相

3/5 第10回全体会議(KEK)

# cERL-LCS: H27 4月のビーム状態

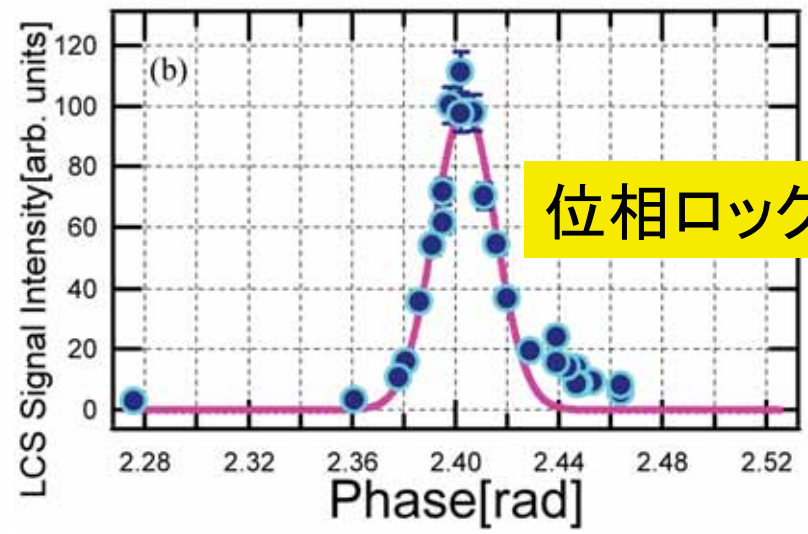
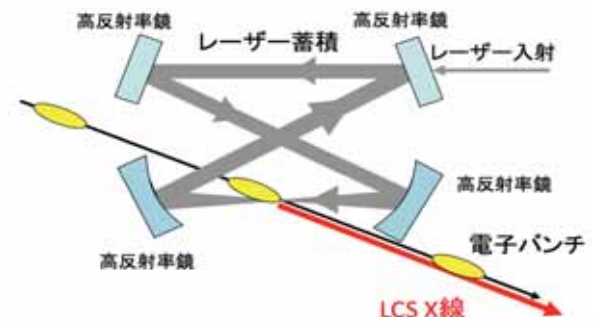
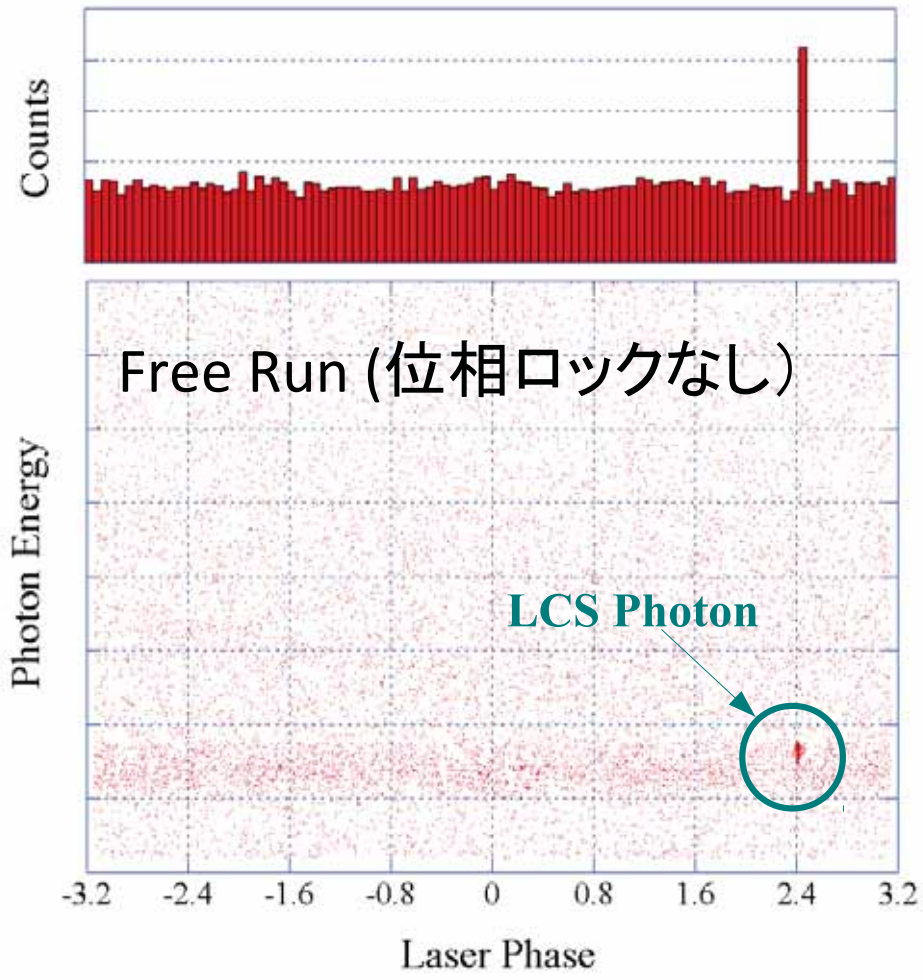
## Intra-cavity Laser Beam

Wavelength [nm]	1064
<b>Average power [kW]</b>	<b>10.4</b>
Pulse duration [ps, rms]	5.65
<b>Spot size [<math>\mu\text{m}</math>, rms]</b>	<b>30</b>
Collision angle [deg.]	18
Repetition rate [MHz]	162.5

## Electron Beam

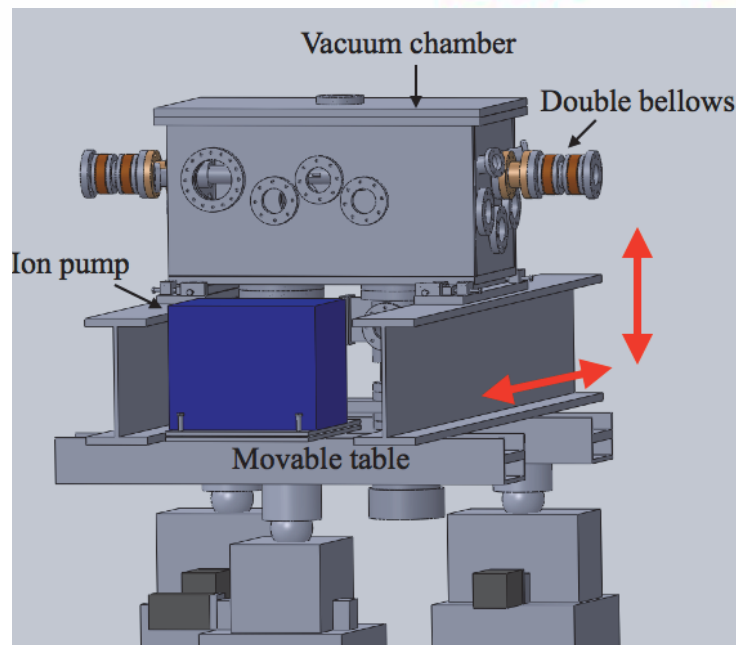
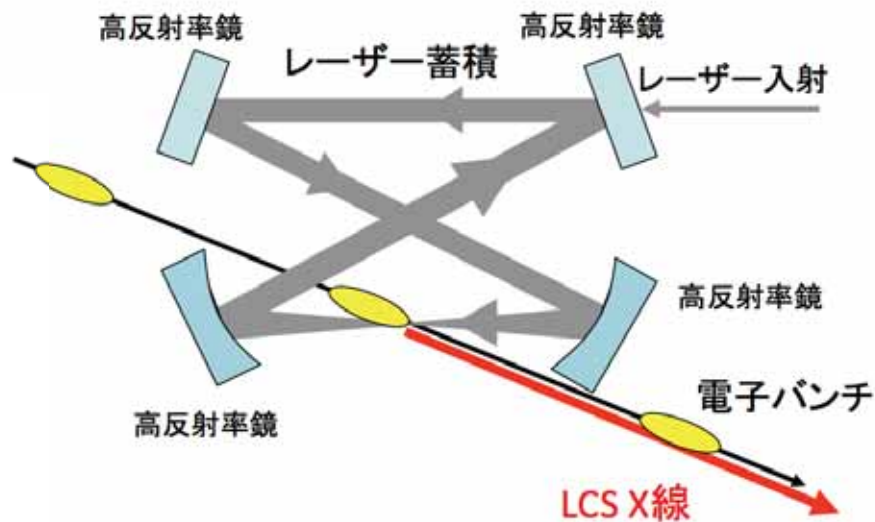
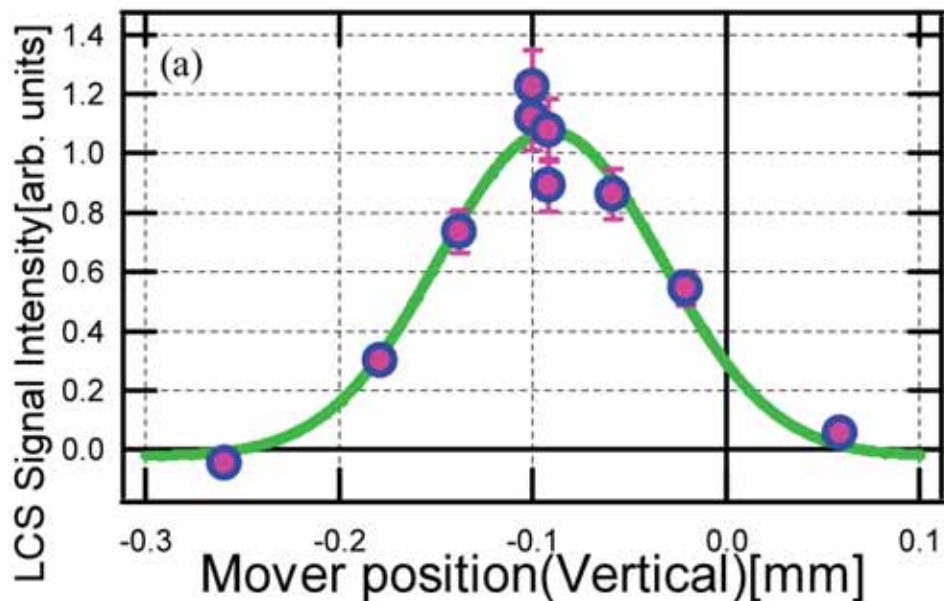
<b>Energy [Mev]</b>	<b>20</b>
Bunch charge [pC] <b>CW beam current [<math>\mu\text{A}</math>]</b>	0.36 <b>58</b>
Bunch length [ps, rms]	2
<b>Spot size [<math>\mu\text{m}</math>, rms]</b>	<b>30</b> <b>(~130)</b>
Emittance [mm mrad, rms]	0.4
Repetition Rate [MHz]	162.5

# cERL-LCS: 電子ビーム・レーザーの衝突調整 (Timing)



$\sigma_{\text{meas}} = 0.0166 \text{ rad}$   
**→ 11.5 ps (主に jitter?)**  
**位相ロックの安定化!**  
 (電子ビーム&レーザー →  $\sigma = 6 \text{ ps}$ )

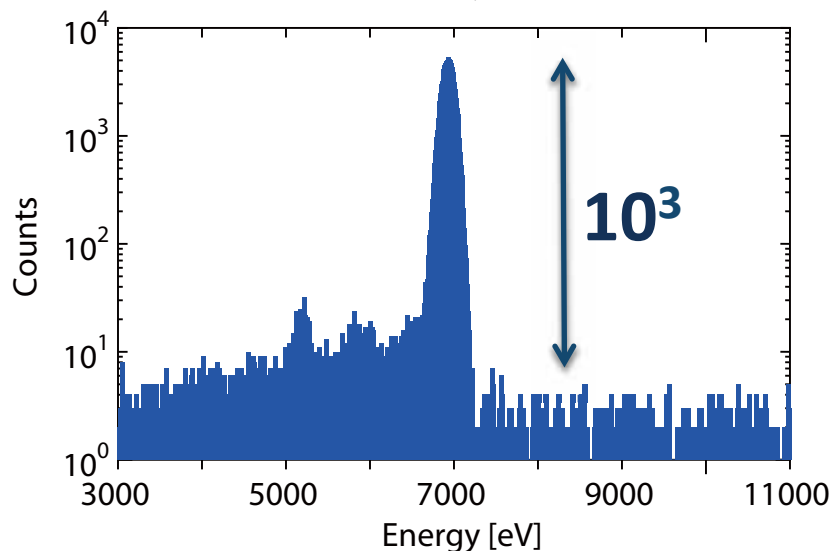
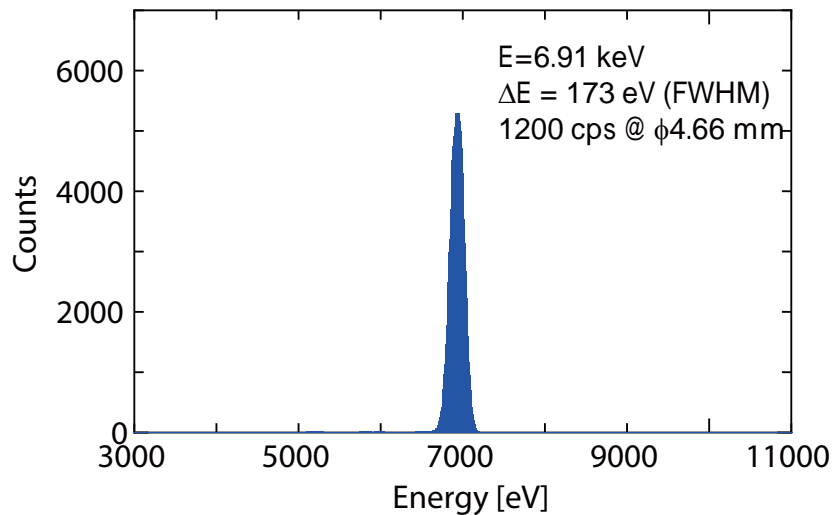
# cERL-LCS: 電子ビーム・レーザーの衝突調整 (垂直)



$\sigma_{\text{meas}} = 57.6 \text{ } \mu\text{m}$   
 → レーザー 30  $\mu\text{m}$  とすると  
 電子ビーム 49  $\mu\text{m}$

IPAC15 by Kosuge(KEK)

# cERL-LCS: 発生X線の光子数



IPAC15 by R.Nagai (JAEA)

- 電子ビーム: 20 MeV
- レーザー波長: 1064 nm
- 衝突角  $18^\circ$

**$E= 6.91$  keV,  $\Delta E= 173$  eV (FWHM)**

(期待値 6.96 keV,  $\Delta E$  33eV)

$\Delta E$ はSDDの分解能程度

→ 検出器を変えて再評価へ

- 平均ビーム電流 57.7  $\mu$ A
- 蓄積レーザー 10kW

**1200 cps by  $\phi 4.66$ mm (SDD)**

(期待値3000cps)

→ Total photon flux

**$4.3 \times 10^7$  /sec @発生点**

# LCSガンマ/X線源の比較

	方式	電子ビームエネルギー	電子ビーム電流	LCS エネルギー	LCS フラックス(発生点) photon/sec	LCS エネルギー幅 (FWHM)	1mAあたり フラックス ph/s/mA
<b>cERL (実験値)</b>	ERL + レーザー蓄積	20 MeV	58 $\mu$ A	<b>6.9 keV</b>	<b><math>4.3 \times 10^7</math></b>	0.5% (計算値)	$8 \times 10^8$
cERL (10mA)	↓	↓	10 mA	↓	$7 \times 10^9$	↓	↓
産総研TERAS <sup>[1]</sup>	蓄積リング + 外部レーザー	0.3-0.8 GeV	300 mA	<b>1-30 MeV</b>	<b><math>1 \times 10^6</math></b>	~5%	$3.3 \times 10^3$
兵庫県立大 NewSUBARU <sup>[2]</sup>	蓄積リング + 外部レーザー	1-1.5 GeV	200 mA	<b>6-17 MeV</b>	<b><math>6 \times 10^6</math></b>	~ 10%	$2.5 \times 10^4$
<b>Duke大学 HIGS<sup>[3]</sup></b>	蓄積リング + FEL	0.24-1.03 GeV	110 mA	<b>1-95 MeV</b>	<b><math>1 \times 10^9</math> (2 MeV時)</b>	~5%	$1 \times 10^7$

[1] H. Toyokawa, Compton Sources for X/gamma Rays: Phys.and Applications , Sep. 7-12, 2008, Alghero, Italy

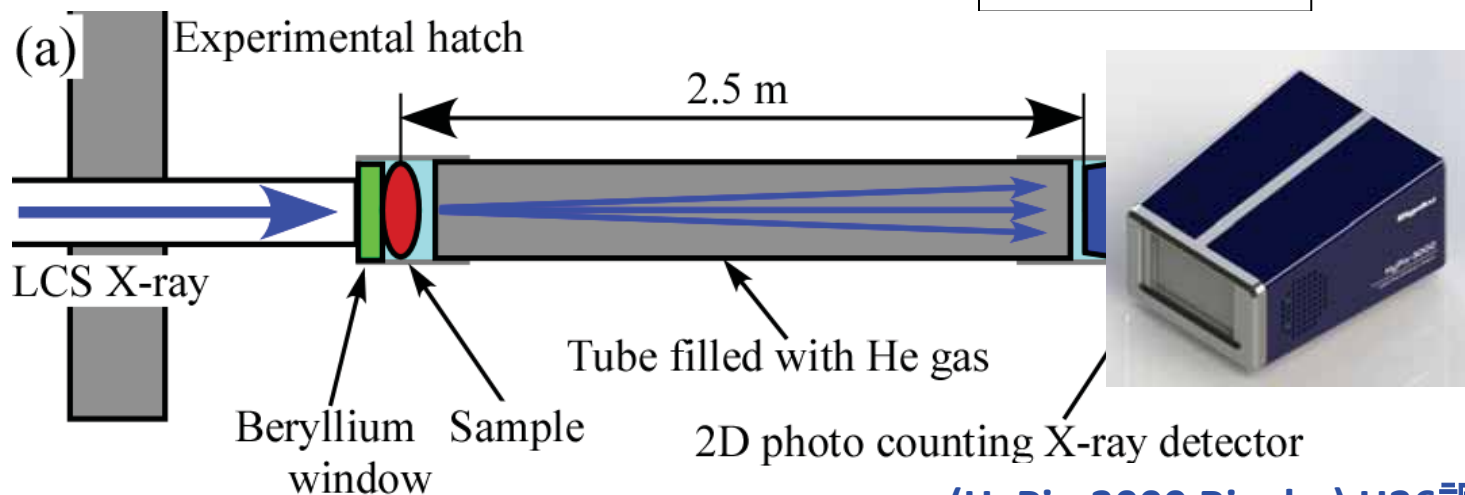
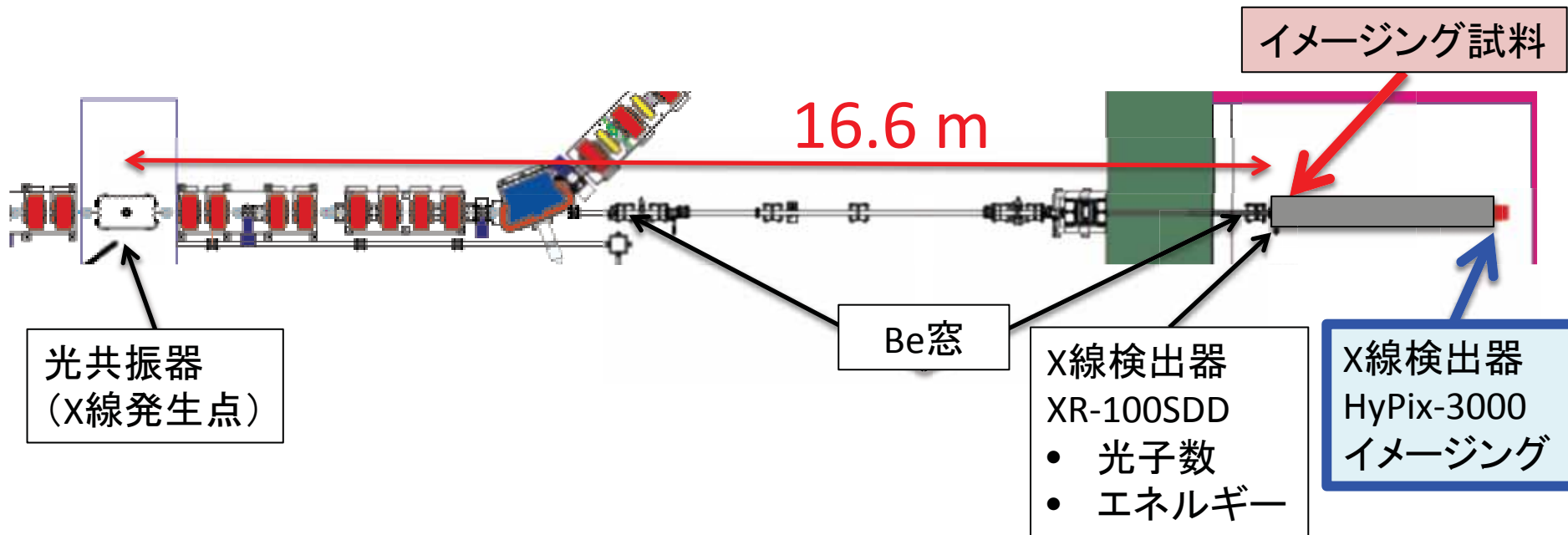
[2] 宮本、加速器学会誌、Vol.5, pp.111-116 (2008)

[3] HIGS beam parameters: <http://www.tunl.duke.edu/web.tunl.2011a.higs.php>



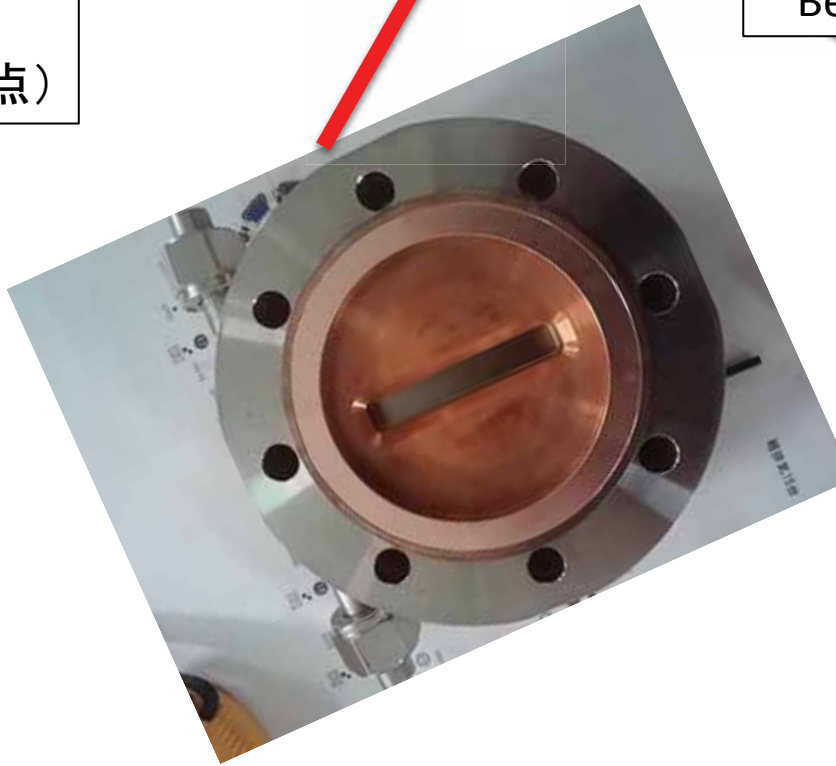
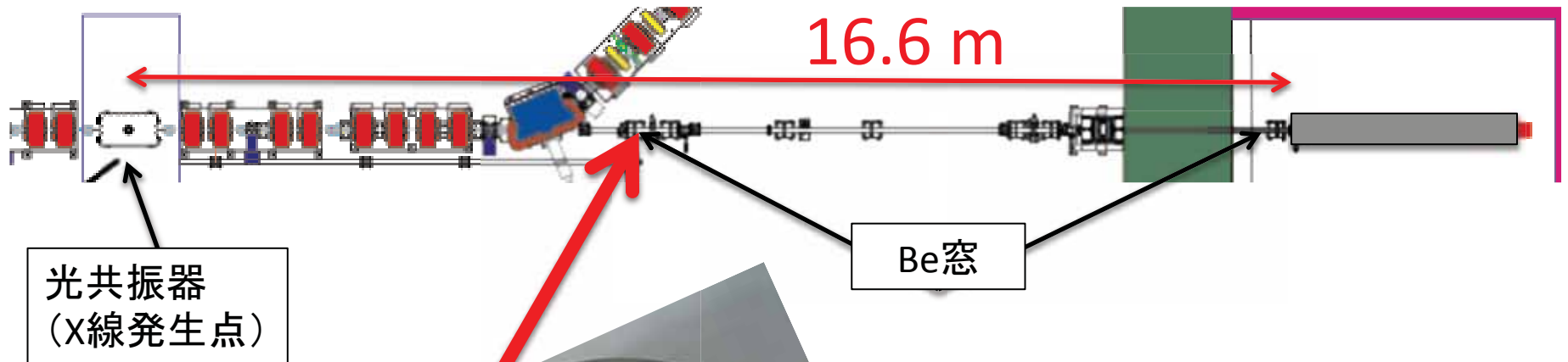
# cERL-LCS X線イメージング試験

# cERL-LCS: H27 3月-4月の構成



(HyPix-3000 Rigaku) H26調達

# 補足:



## 上流のBe窓

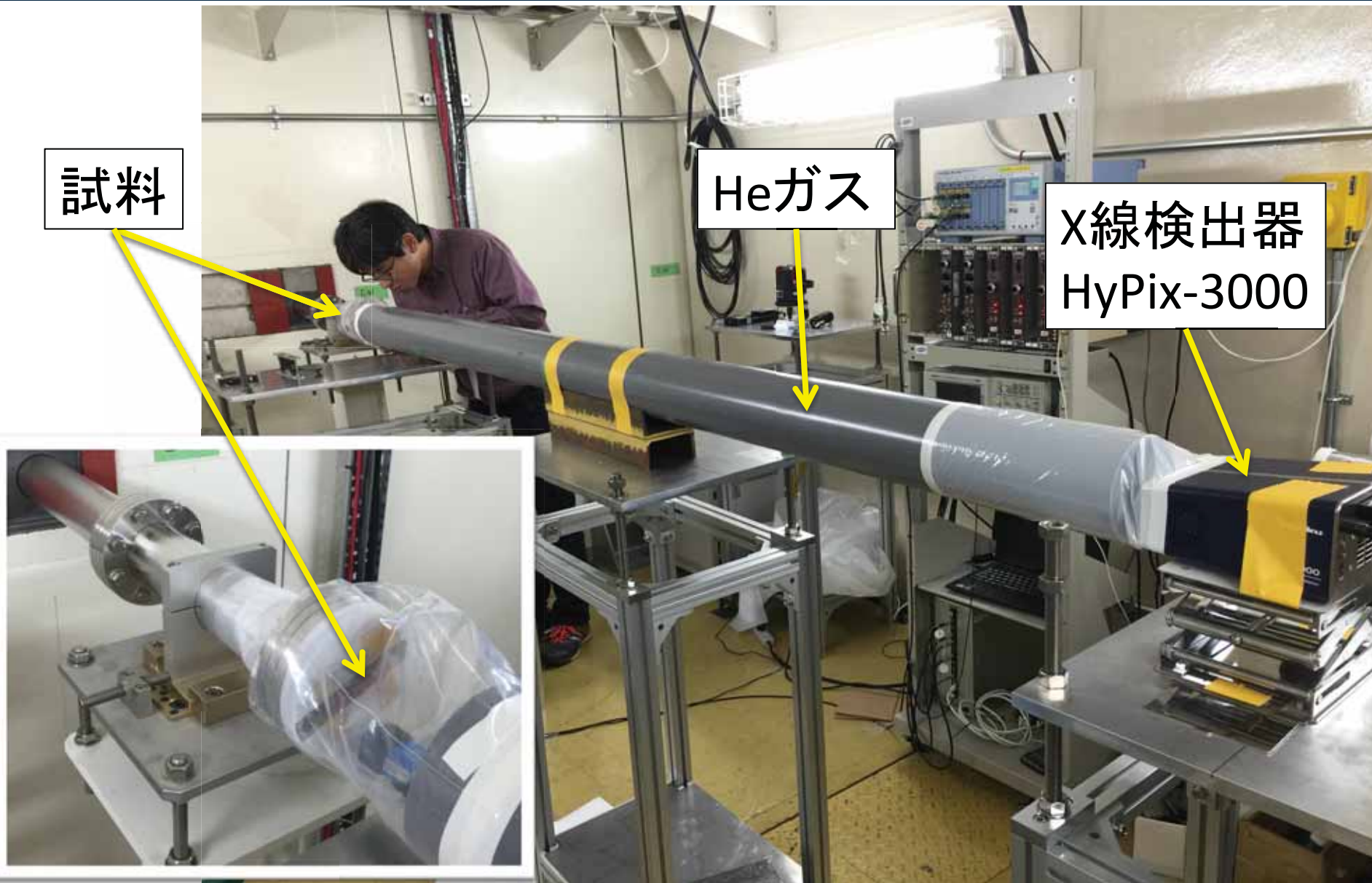
- 用意したものに不具合が生じたので急遽KEKにあったもので代用した。
- 取付穴の都合で22.5°回転して設置。
- イメージング時の有効口径を決めている。
- 今月、交換した。

# cERL-LCS: H27 4/1~4/3の実験室構成

試料

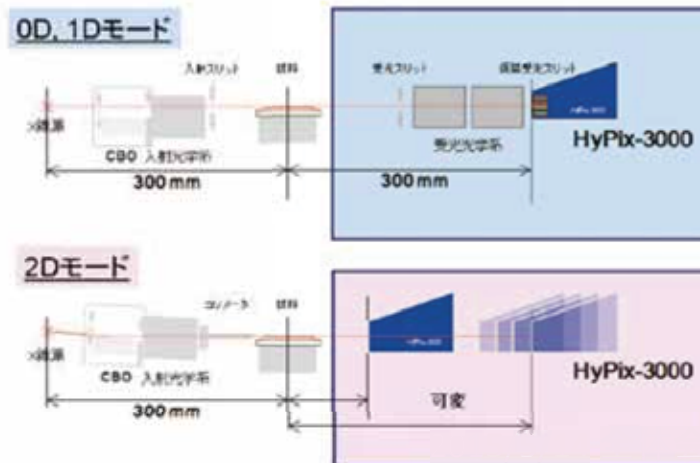
Heガス

X線検出器  
HyPix-3000



# cERL-LCS: 今回使用したX線検出器(イメージング)

仕 様	
検出素子	ピクセル型シリコン半導体素子
有効検出面積	2,984 mm <sup>2</sup> (77.5 × 38.5 mm)
ピクセルサイズ	100 × 100 μm
ピクセル数	775 × 385 = 298,375 ピクセル
データ転送フォーマット	Differential / 31 bit / Zero dead time
計数率	Global: > 2.9 × 10 <sup>11</sup> cps Local: > 1 × 10 <sup>6</sup> cps/pixel
検出効率	Cr, Fe, Co, Cu: 99% Mo: 38%
読み出し時間	3.7 ms (zero dead timeモードでは0 ms)
エネルギー分解能	25%以下 (@CuKα)
寸法	147(W) × 93(H) × 180(D) mm
重量	約 2 kg



# cERL-LCS: X線イメージング 2015/4/3



スズメバチ

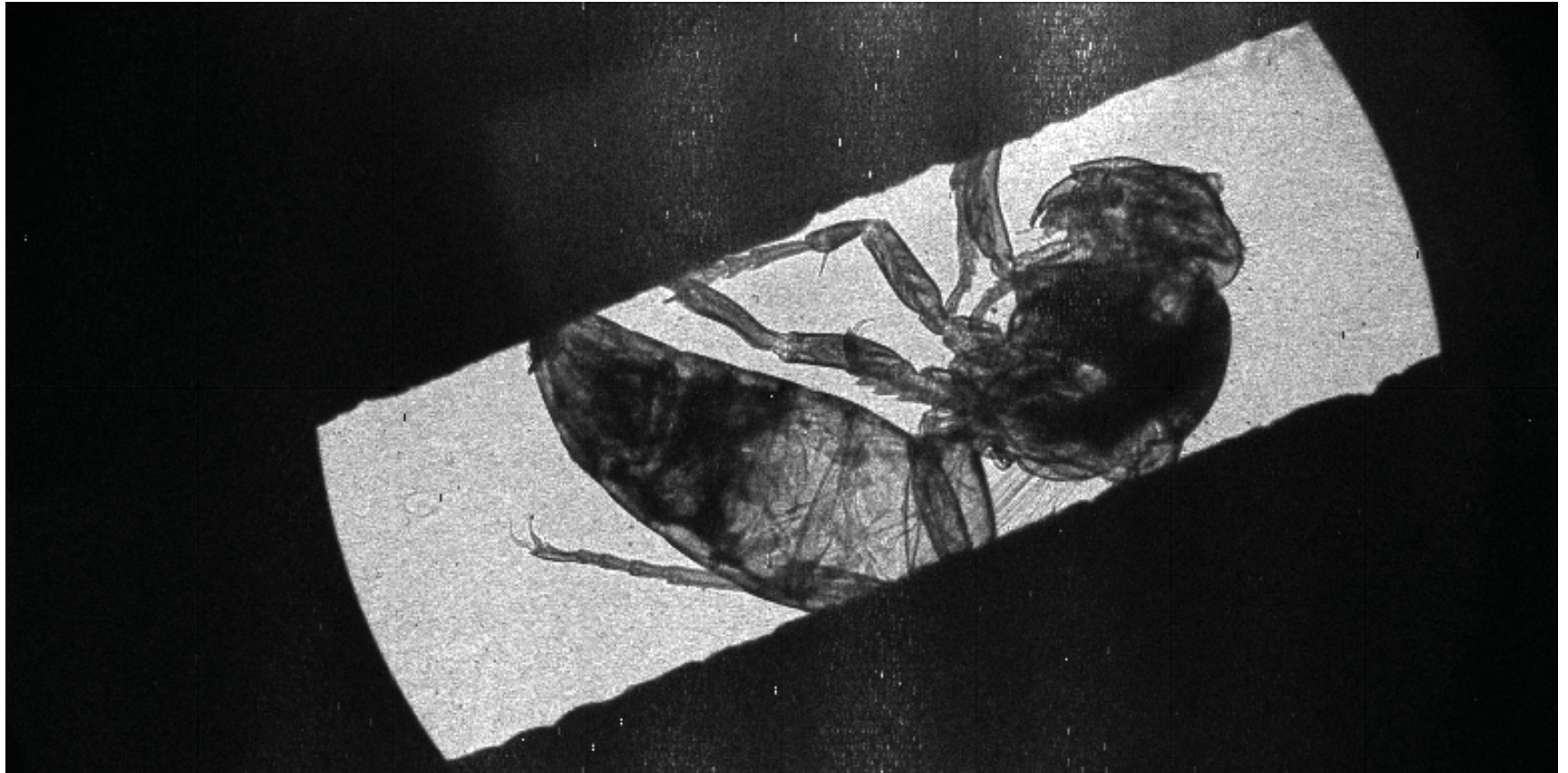
LCS 準単色・極小光源  
全方向に等しく良好な画像

薄い翅(ハネ)を支える翅脈が見える他、  
体内の構造を良好なコントラストで観察。

HyPix-3000

- 6~10keV選択
- 積算 10 sec X  
62 set (10 min)

38.5 mm



HyPix-3000受光面 77.5 mm

## とうがらし、ファイバー

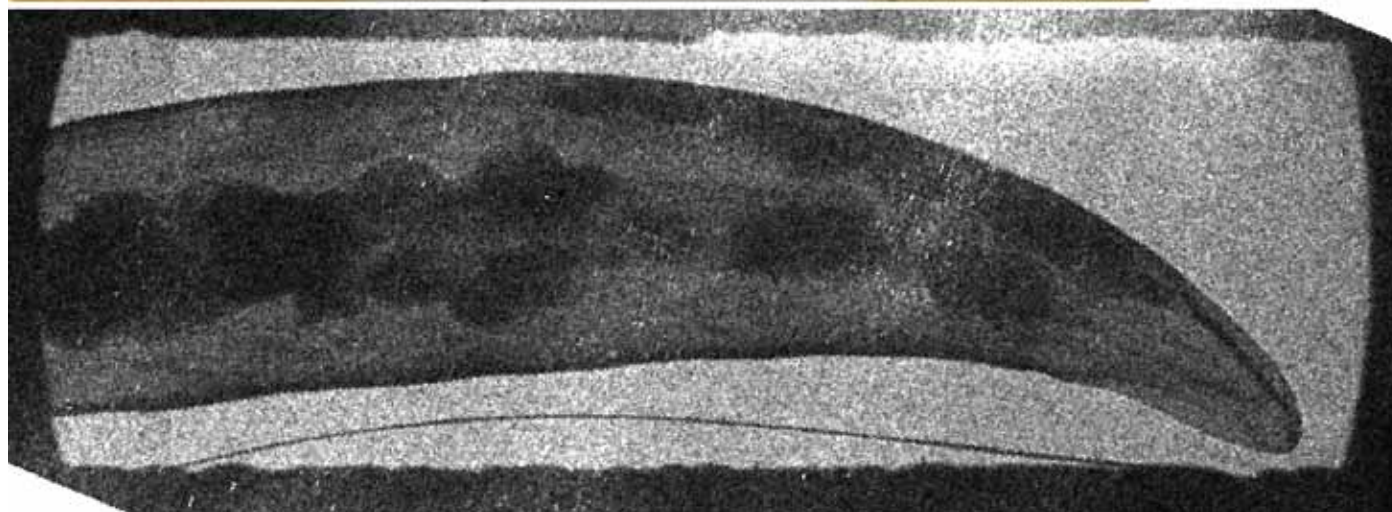


前半

10sec 50 times exposure  
0.16 count/sec/pixel  
(100x100 $\mu\text{m}^2$ )

後半

10sec 30 times exposure  
0.12 count/sec/pixel

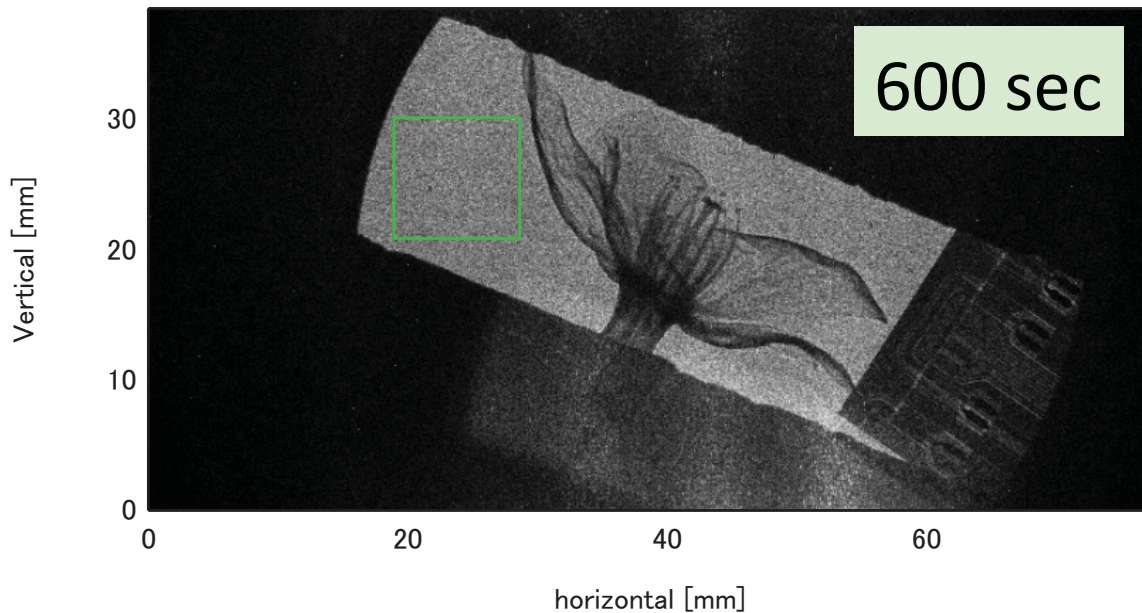
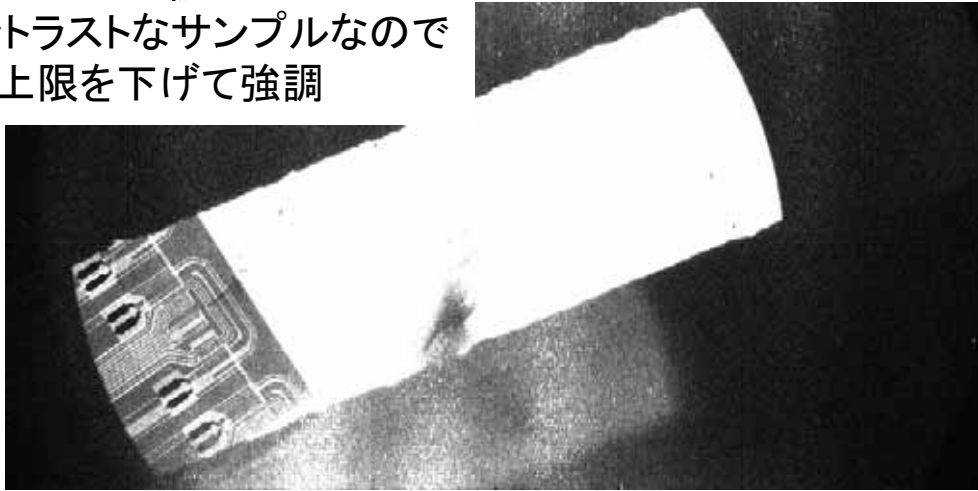


6~10keV選択

800 sec

# cERL-LCS: X線イメージング 2015/4/3

フレキシブル基板  
高コントラストなサンプルなので  
Count上限を下げて強調



サクラ、フレキシブル基板



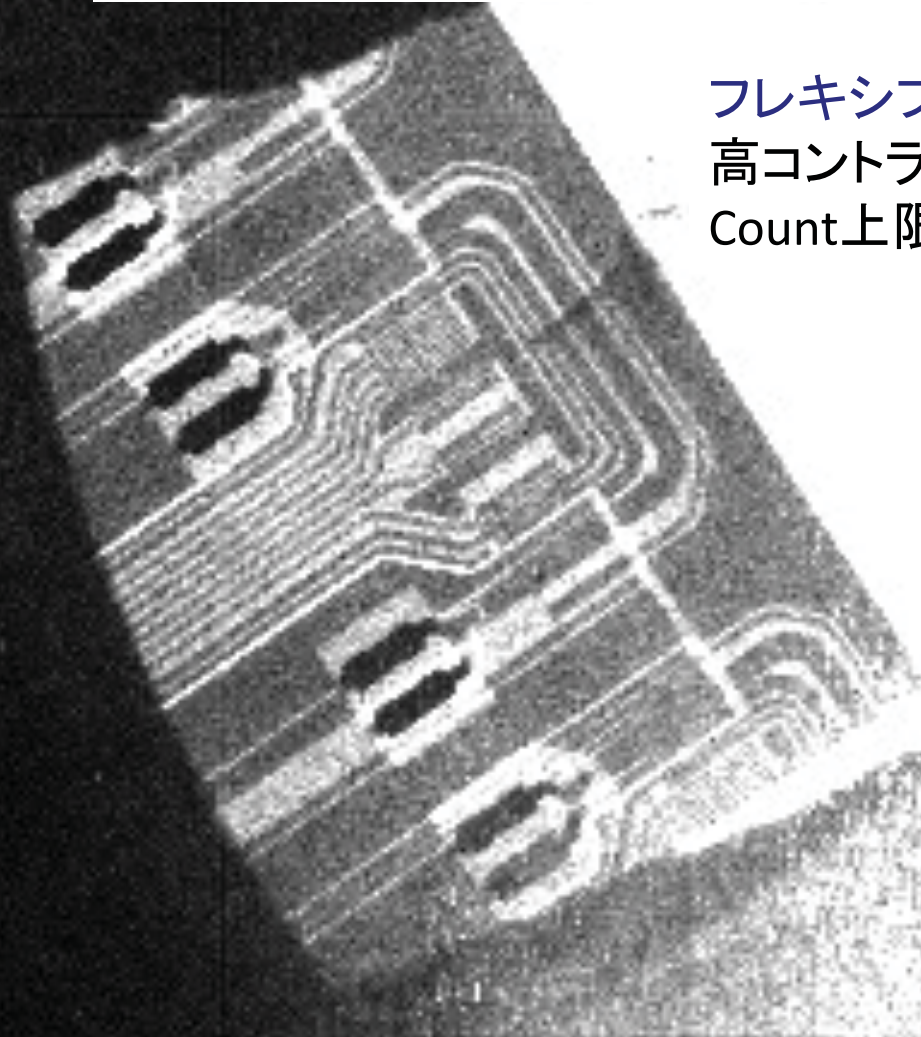


ほぼ一様な分解能

Pixel size 100umX100umの限界

フレキシブル基板

高コントラストなサンプルなので  
Count上限を下げて強調



# cERL-LCS: X線イメージング 第1回まとめ

第1回LCSイメージングでの確認	今後の対応
全方向に鮮明な画像(微小光源)	HyPix-3000 (100um)^2
	SOI (10um)^2での撮像
	等方性を示すサンプル
X線光量 1200 cps@SDD( $\phi$ 4.66) 発光点で $4.3 \times 10^7$ /sec	ビームサイズ (130um)→30→xx
	光共振器の位相ロック改善 (11ps→5?)
	より高い共鳴点でのレーザー蓄積 (→3倍)
	光共振器の熱対策(長期安定化)
	電子ビーム電流(57.7uA→100uA)
	最大電流 100uA(H27)→1mA(H28?)→10mA(H29?)
屈折イメージング (時間的に2.5mの測定のみだった)	試料と検出器の距離(屈折あり無し)
	視野の拡大(Be窓交換済み)
	Heパイプ改善(X線損失の低減)
	位相イメージング(東北大)への調査・試験

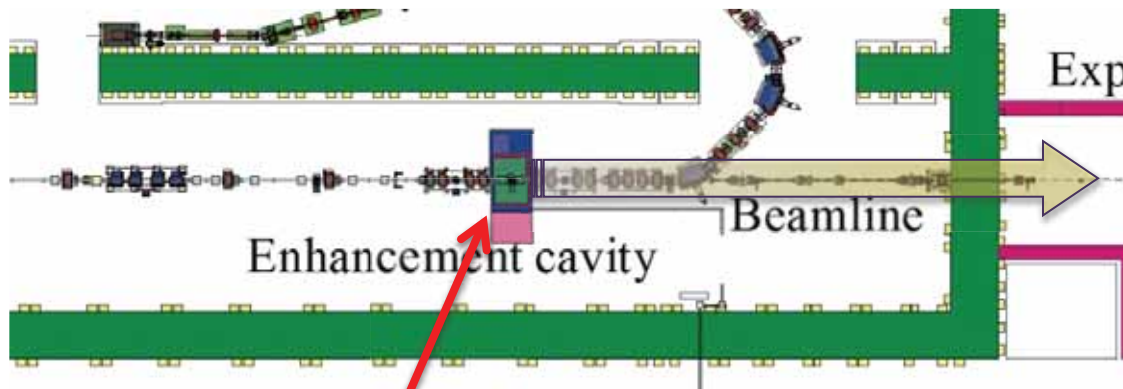
# 放射光医学研究者の関心

cERLでのLCS-X線開発は始まったばかりだが、今回の結果に強い関心を持つ関係者の動きがある。

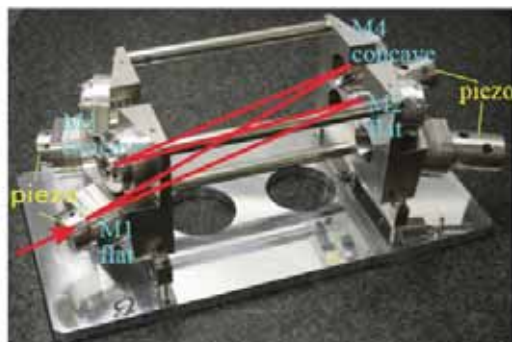
- **河田 洋一 氏**：KEK物講研 ERL推進室長
- **兵藤 一行 氏**：KEK物講研
  - 放射光単色X線を用いた医療イメージングの専門家
  - LCS-X線の医学応用に関心、今回もイメージングについてアドバイスや激励を頂いている
- **盛 英三** (もり ひでぞう) **先生**：東海大学 医学部教授
  - 産学官連携功労者表彰：日本学術会議会長賞、文部科学大臣表彰：科学技術賞を受賞された著名な先生。
  - 病院で使えるような小型LCS-X線源に以前から関心があると、河田氏。科研費などの検討もされているとのこと
  - 一昨日(5/13)に河田・兵藤両名が大学を訪問し、今回の結果を紹介。今後の連携協力などを視野に入れた展開の可能性

backups

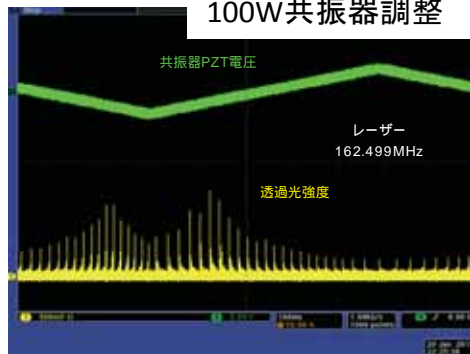
# cERLにおけるLCS X線生成実証実験の準備状況 (KEK, JAEA)



cERL用光共振器  
(4鏡共振器x2; 45W, 100Wレーザー)



100W共振器調整



H26年 11月	100Wレーザー設置 (関西原研→KEK cERL)
12月	LCSビームライン設置 光共振器組み込み 45Wレーザー調整
H27年 1月～	光共振器調整を開始 (45W, 100W)
1/29～	cERLビーム調整運転開始 検査条件 10uA→30uA
2/13	cERL放射線施設検査
2/16～ 4/3	<b>ビーム増強 30uA→～(100uA)</b> <b>ビーム利用 LCS X線生成実験</b>
6月	H27年度 第一回ビーム運転 (一ヶ月)
11月	H27年度 第二回ビーム運転 (一ヶ月)
2月??	H27年度 第三回ビーム運転 (一ヶ月)
H28年春 (見込み)	<b>ビーム増強 100uA→1mA</b>
H29年春 (見込み)	<b>ビーム増強 1mA→10mA～</b> <b>10<sup>13</sup> photons/secを目指す</b>