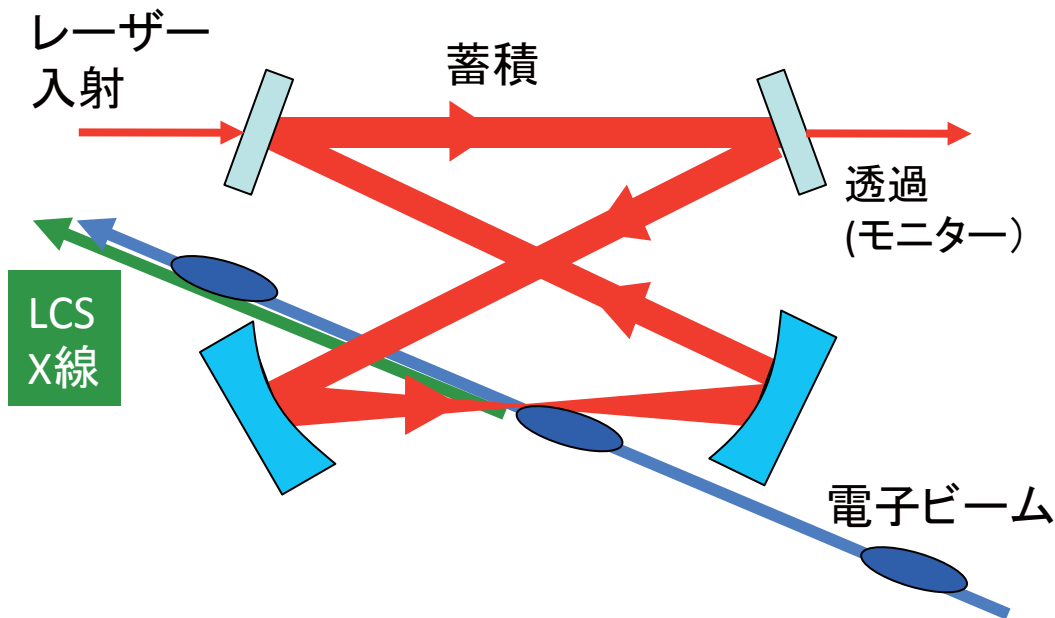


X線イメージングに向けて

- 光共振器について
 - X線検出器について
 - LUCXでのイメージング予定
 - cERLの状況
-
- 2015/3/5 全体会議@KEK 照沼

光共振器について



なぜ幾つも共振器があるのか

- 電子ビームとの衝突 → ビーム間隔と蓄積されるレーザー周期が整数倍の関係
- 加速器RF周波数
- ミラー上のレーザースポット径
- 設置スペース

	LUCX	ATF-DR(リング)	cERL	STF
共振器繰り返し周波数	357 MHz	357 MHz	162.5 MHz (1.3 GHz x1/8)	162.5 MHz
共振器長 (mm)	7560	1680	1845	3690
蓄積レーザーパルス数	9	2	1	2
衝突点レーザーサイズ h/v (um)	89/85	13/	20/30 um	44/51
衝突角度 (deg)	7.5	14	18	0

光共振器開発における背景

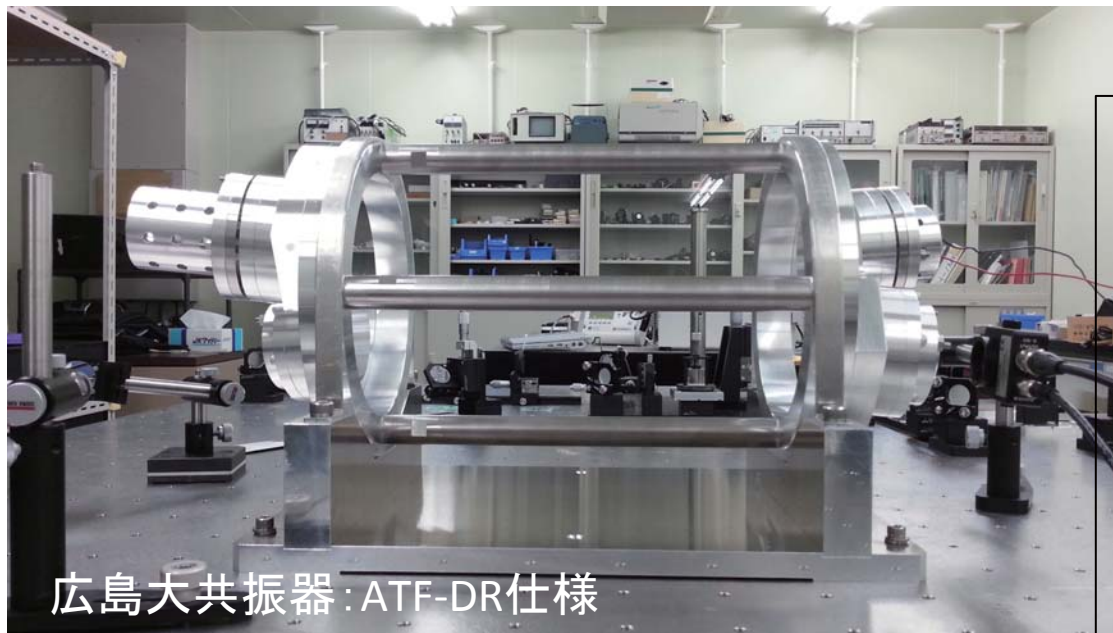
光共振器は、使用する加速器の電子ビーム間隔に基づいて設計されなければならない。

加速器での光共振器開発

- 電子ビームとの衝突技術(ビームサイズ、タイミング、安定度、・・・)
- 真空装置でなければならない
- 加速器の利用条件で光共振器の開発効率が左右される。
- 貴重なビーム時間(運転コスト、他の研究テーマなど)、加速器運転のためのその他の要因(冷凍機運転、運転シフト、電力、安全、・・・) → cERLは総合試験向き
- LUCX加速器が現状では一番効率の良い光共振器開発の場である。

加速器を必要としない光共振器要素技術開発 (広島大への再委託)

- 大学の実験室で効率よく開発できる。学生の教育にも適する。
- 光共振器の性能を決定づけるミラー系の技術開発 → 高反射ミラー技術
- 光共振器のフィードバック技術開発(高度化)
- 得られる成果を適時、加速器での光共振器へ適用していく



共振器PZTとホルダーユニット

鏡が取り付けられる方向



圧電素子はこの中



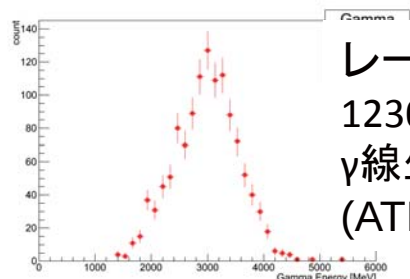
レーザー蓄積共振器の性能向上に向けた技術開発 (広島大、KEK)



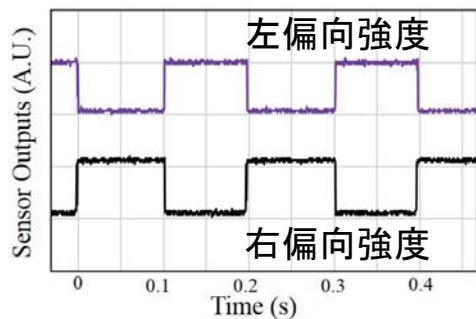
今後3年間の目標

蓄積効率の増大と制御技術の高度化

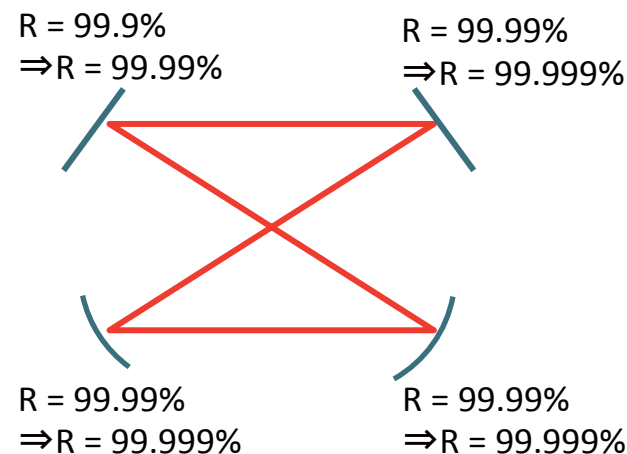
これまでのおもな成果



レーザー強度増大率:
1230 (実測値)
 γ 線生成: $\sim 2.6 \times 10^8/\text{sec}$
(ATF DR)



円偏向自動切り替えの実証



H27計画

高反射率鏡による蓄積効率向上

増大率 1230 ⇒ 5000を目指す

16600(理想値)

H28~29

耐高強度鏡による高強度化

共振器制御装置の高精度化と自動化

デジタル制御 → 多入力・汎用化対応

アナログ制御 → 高速制御

X線検出器について

SOI検出器開発(KEK)

- PO会議等で十分な報告をしていなかった
- 今までは測定するときにLUCXへ持ち込み
- **今後はLUCXに常設し、迅速にイメージング可能とする**
- cERLでイメージングする期間は一時移設、将来別途用意する
- 冷温によるノイズ低減、高分解能化を行う(H27)

その他の検出器のLCSでの評価：(株)リガクへの再委託

- H25年度、**CMOS検出器**(Rayence社製)を調達
- H26年度、**Hybrid検出器**(リガク製)を手配、納品待ち
- これらの詳細は、後でリガク様から報告して頂きます
- **これらをLUCX, cERL, 産総研のLCS X線で試験・評価する**

SOI技術を用いたX線用イメージセンサ開発

2014年度までの進捗状況

・大面積イメージセンサー開発

INTPIX4-7, INTPIX7:チップ大きさ 18mm x 18mm

・SOIイメージセンサー課題克服のための研究

バックゲート効果・クロストーク抑制

耐放射線性

→ 多種ウエハー試験

通常基板 NCZ N-type Czochralski (低抵抗基板)

高抵抗基板 N-type Float Zone (FZ),

P-type Float Zone (FZ)

→ 感度を上げる

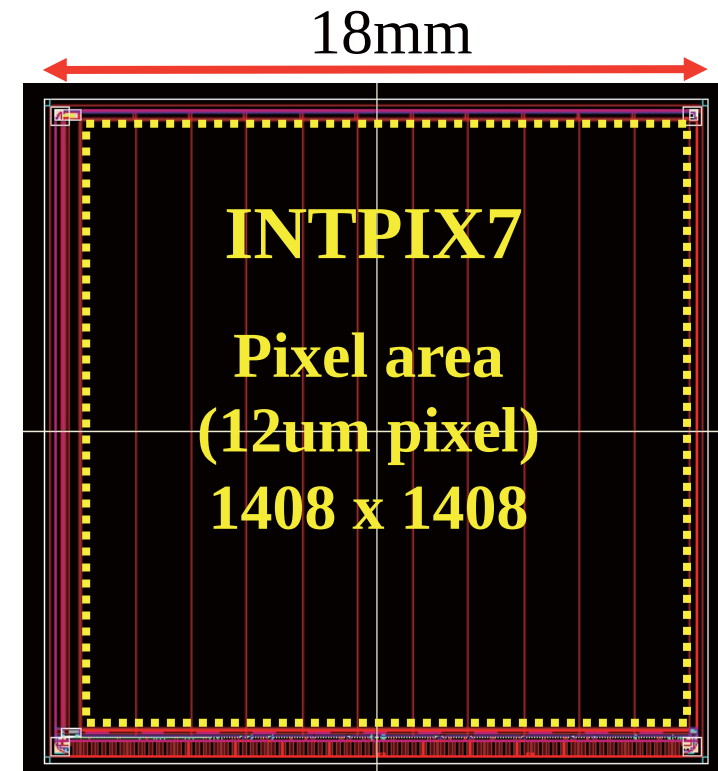
2重SOI基板

→ 上記課題克服

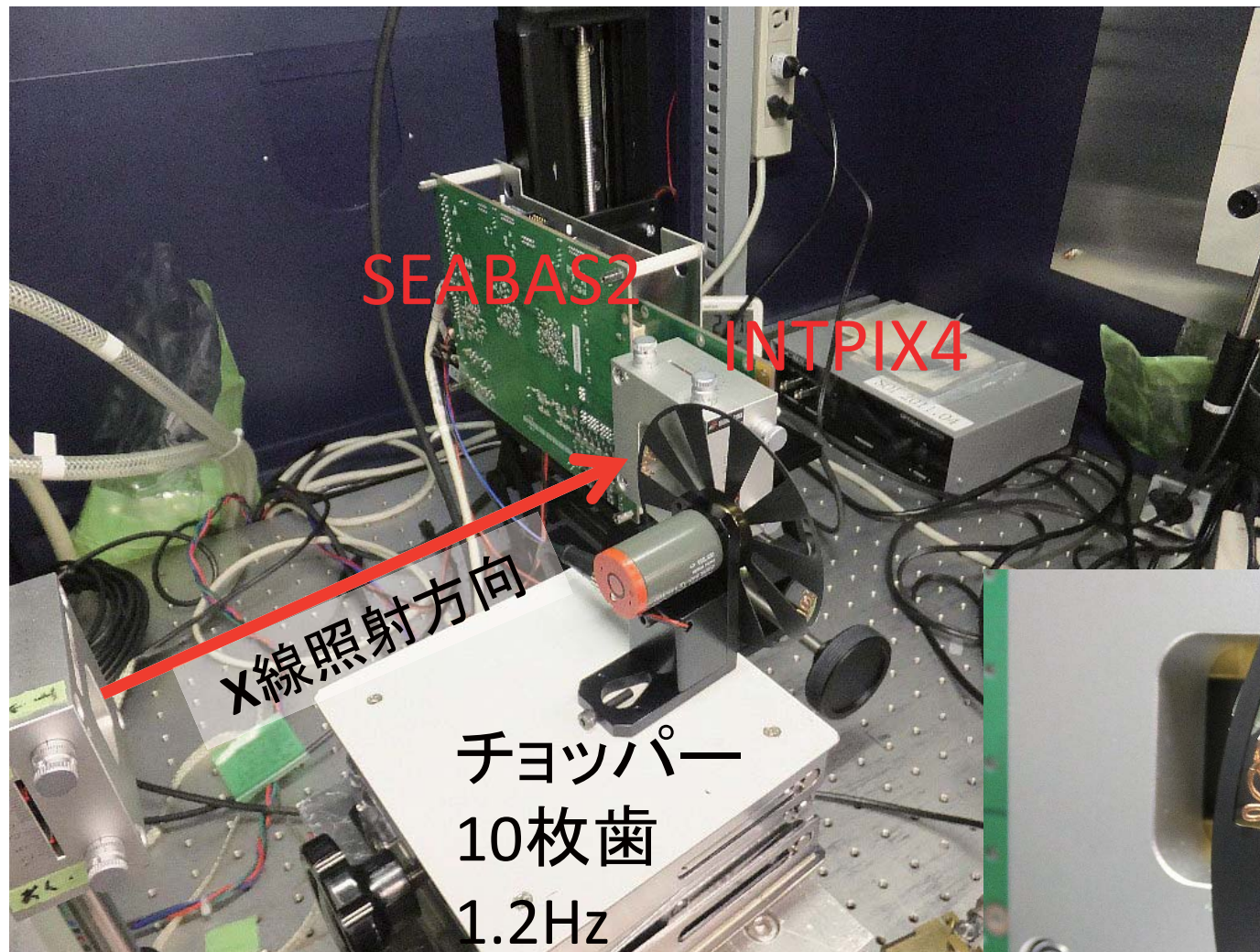
・高速読み出しシステムの開発

DAQ基板アップグレード(SEABAS2)

DAQソフトウェア改良



X線像動画撮影実験 実験セットアップ



INTPIX4
17um pixel
832x512
(QB実験で使用)

チョッパーに
金属片を含めた

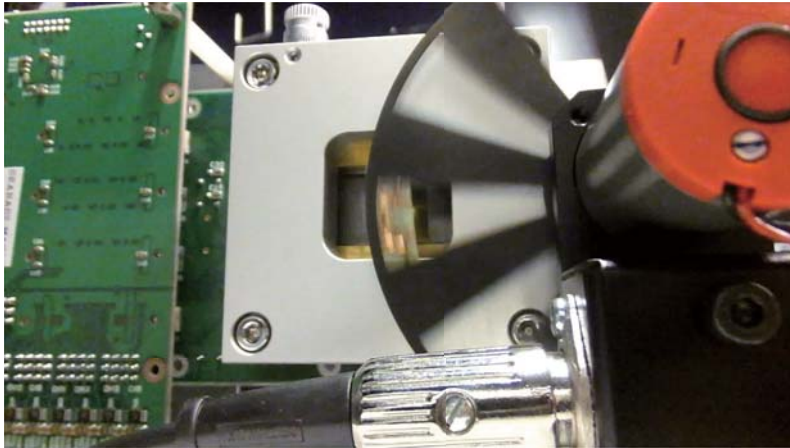


データ収集システムのアップグレード

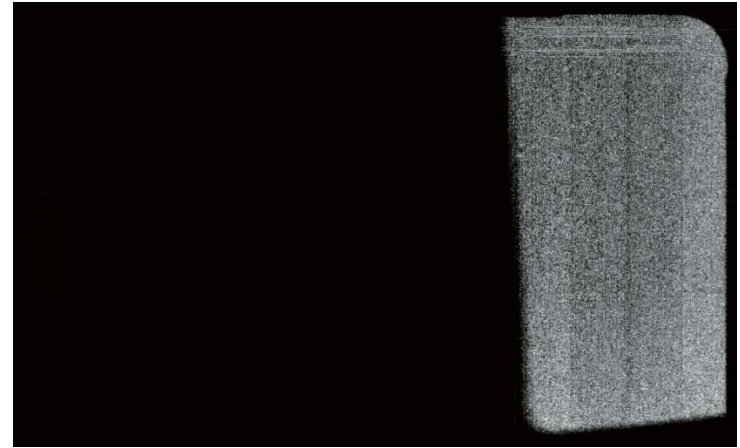
QB実験(FY2008-FY2012) 3Hz & 5Hz : dead time が10-30%
→ (2014) 60-70Hz データ取得に成功

X線像動画撮影実験

可視光動画



X線像動画



※プレゼンテーションでは解像度は落としてあります

ROOT5.34.16+OpenCV2.4.10+Qt5.4 VC2010 32bit build

新たなDAQソフトウェアで60～70Hzでのデータ取得に成功した

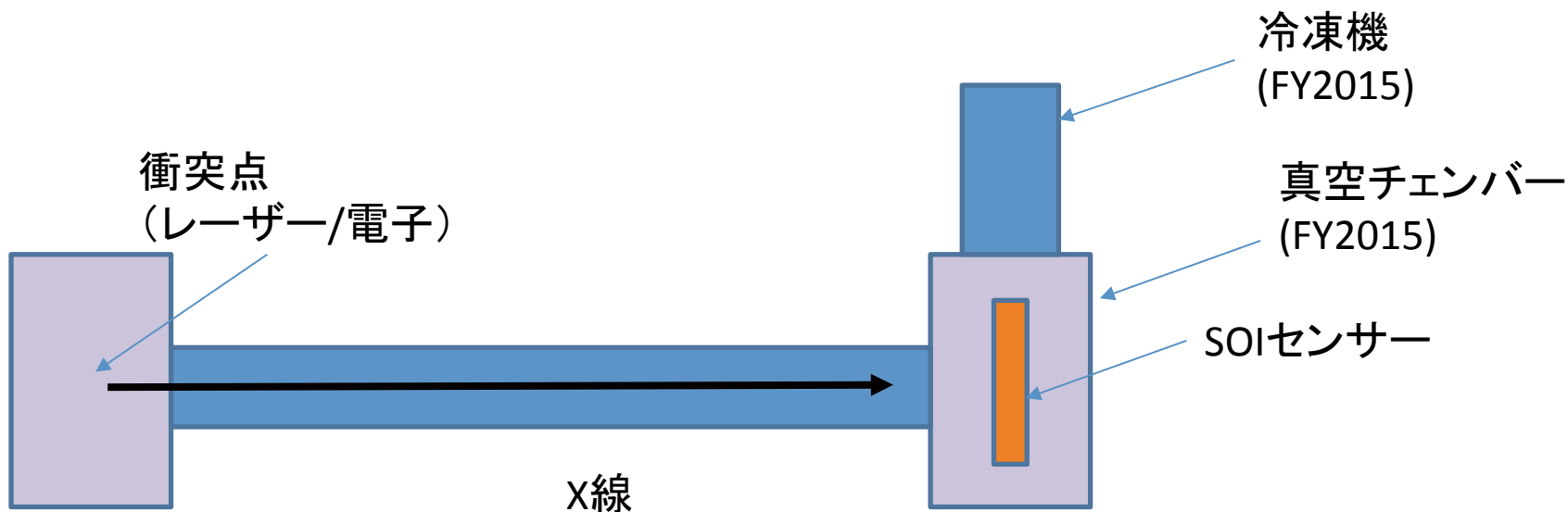
課題: フレームレートが安定しない

→ TCP転送の安定性、使用PCの処理能力

SOI技術を用いたX線用イメージセンサ開発

2015年度以降の開発計画

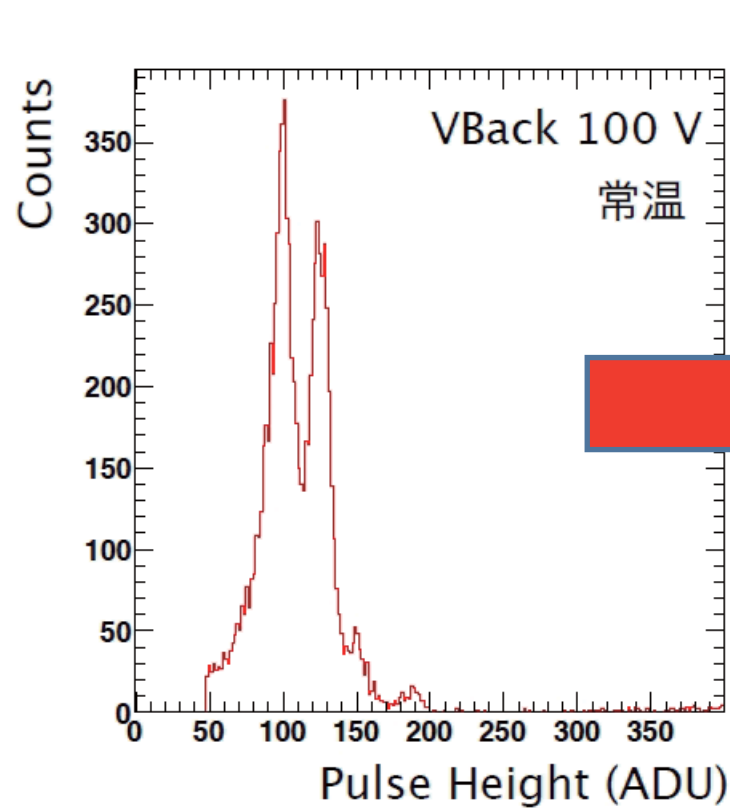
- ・[継続]イメージセンサー高度化
- ・[継続]DAQソフトウェア高度化
- ・冷却システムを含めたSOIデータ収集システムの構築
- ・LUCX/cERLでの運用を目指す



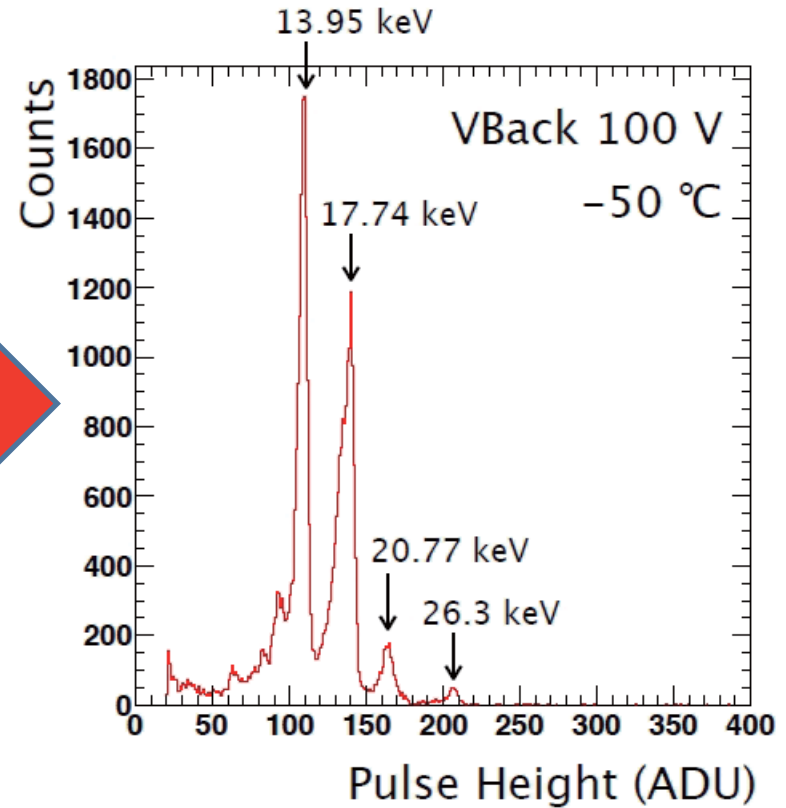
SOI検出器低温駆動の効果(例)

Am-241 X線スペクトル

XRPIX2b(KEK,京都大,総研大)



エネルギー分解能が悪い



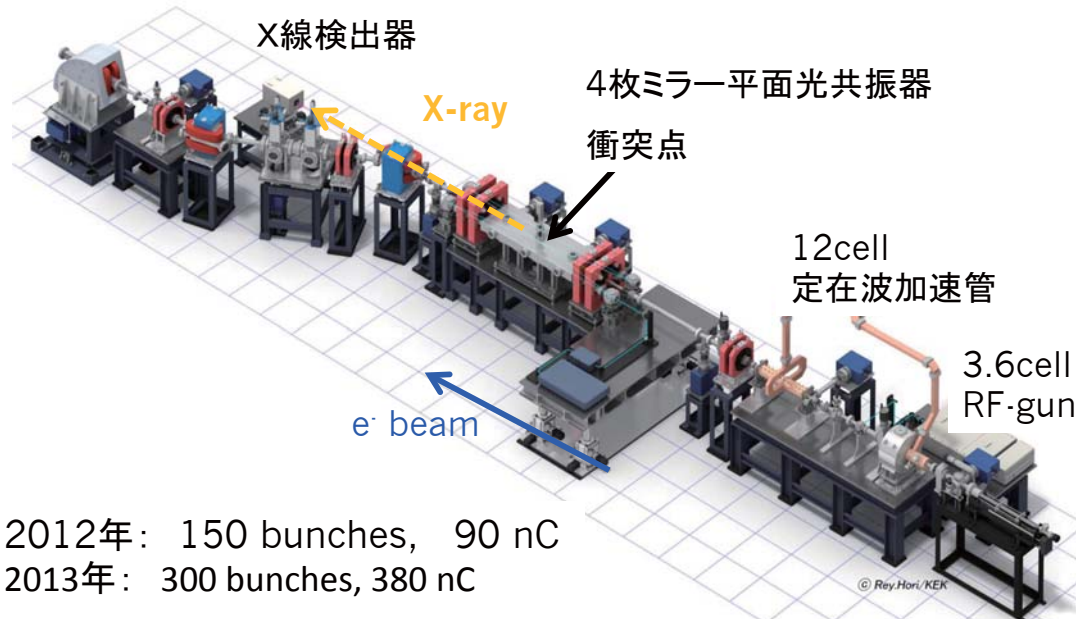
エネルギー分解能向上

条件: ブロックA(BPW 12 μ m角), シングルピクセルイベント
Event th. 10-sigma, split th. 3-sigma, 20k frames
冷却時: Gain@100V = 7.0 uV/e- 読み出しノイズ 68e-(rms)

LUCXの状況

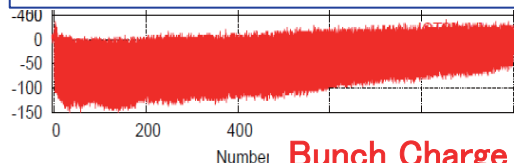
小型常伝導線型加速器(LUCX)の電子ビーム開発

高輝度LCS X線生成の基盤技術開発に必要な電子ビーム技術開発

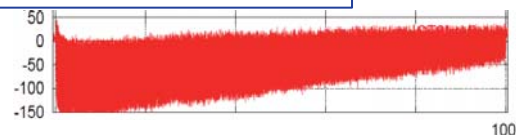
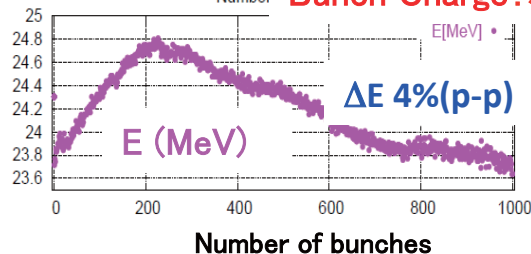


2012年: 150 bunches, 90 nC
2013年: 300 bunches, 380 nC

2014年: 1000 bunches, 600 nC,
RF振幅変調によるエネルギー補正システムを構築



Bunch Charge: バンチ列後半で1/2に減少している



ΔE 1.3%(p-p): 衝突安定化

Number of bunches (1000)

- 1 MWパルスレーザー蓄積技術
- 357 MHz, ~20um衝突技術
- X線イメージング技術

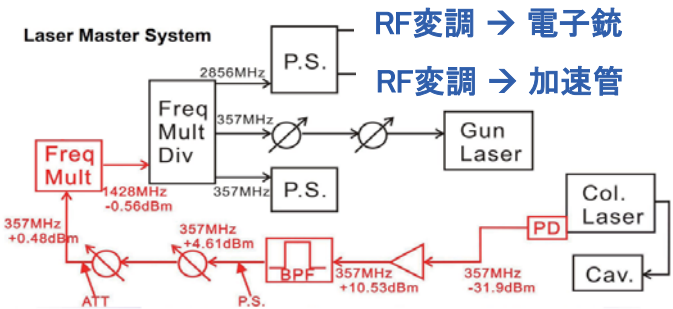
LUCXビーム目標:

30 MeV, バンチ間隔 2.8 ns
1000 bunches/pulse,
衝突ビームサイズ $\sigma \sim 20 \mu\text{m}$

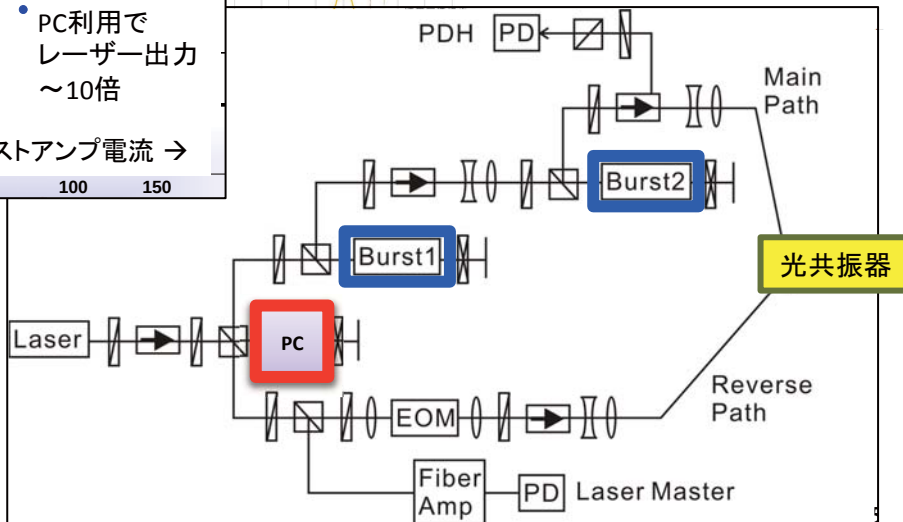
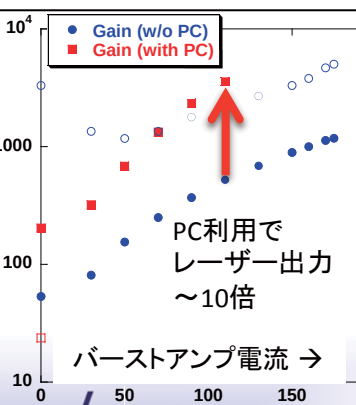
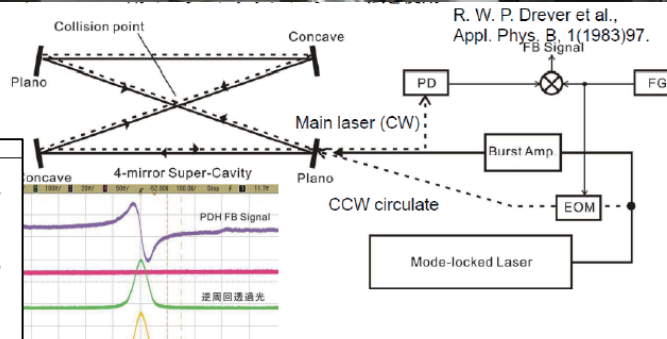
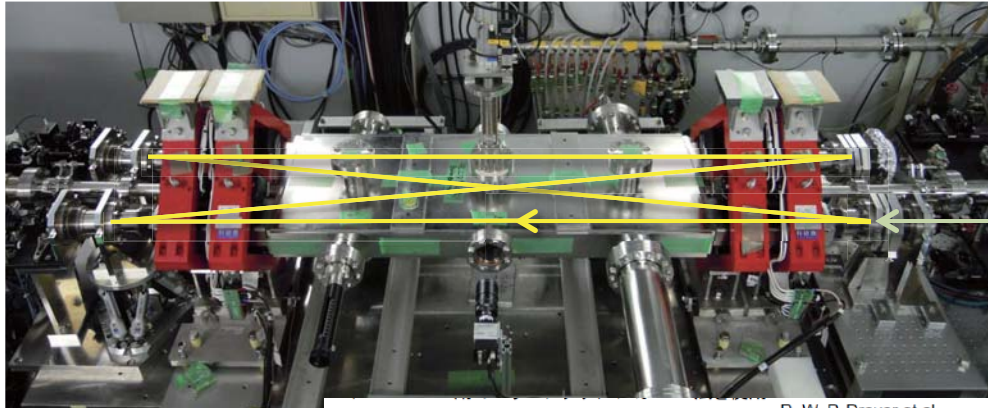
H27年度目標

- **安定且つ一様な強度での1000 bunch beamの実現を目指す**
- **衝突ビームサイズ60→30um**

RF制御系および電子ビーム・蓄積レーザー衝突制御系の高度化



LUCXにおけるレーザー蓄積技術開発 (KEK, 早稲田大)



目標 レーザー蓄積 1 MW

今までの成果

- 逆周回レーザーによる光共振器制御
- 入射レーザーの増幅
 - バースト増幅(二段階)
 - ポッケルスセル(PC)によるバースト増幅効率化(x10を見込む)

共振器ミラーの破壊 調査対策中

← Max Planck Inst... MWの実績あり

レーザー蓄積実績 (PCなし)

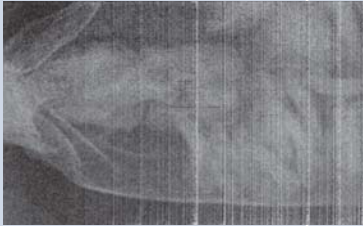
- 0.7 mJ/pulse
- 250 kW まで到達

H27年度計画

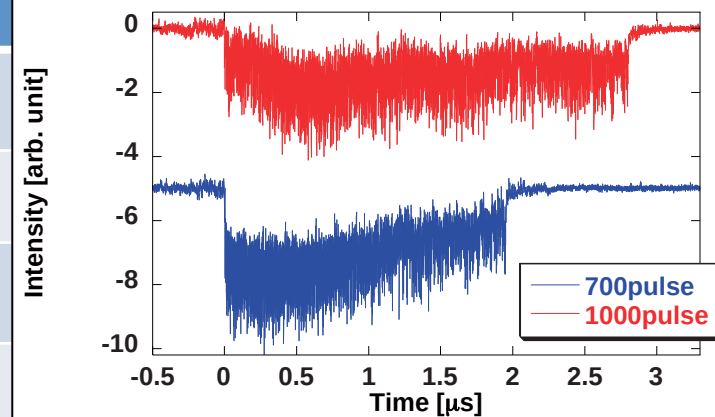
- 光共振器でのレーザー蓄積の追求
 - PCの利用 (a few MW !)
 - ミラー条件の改善
- 衝突サイズの追求 → 30 μm

LUCXにおけるLCS X線生成 (KEK, 早稲田大)

機器故障のため3月中旬より調整再開
学会開け3/25からX線試験→イメージング

	2013.3	2013.6	2014.11
Laser size HxV (um)	89x85	89x85	-
Laser power (kW)	100	151	214
beam bunch/train	150	210	1000
beam charge/train (pC)	135	290	600
beam size, HxV (um)	85x95	85x95	
X-ray photons/sec	6.4×10^6	1.8×10^7	
Imaging	SOI ピクセルセンサー 12000 shots (12.5Hz)		
			
	とうがらし		

MCPで測定したX線信号波形 (2014)



期待光子数 (2013年3月実績との比較)

- 現時点でのレーザーおよび電子ビームの強度アップでの見積もり

~ 10^8

- 今後、ポツケルスセルによる増幅効率化で更に10倍以上を期待

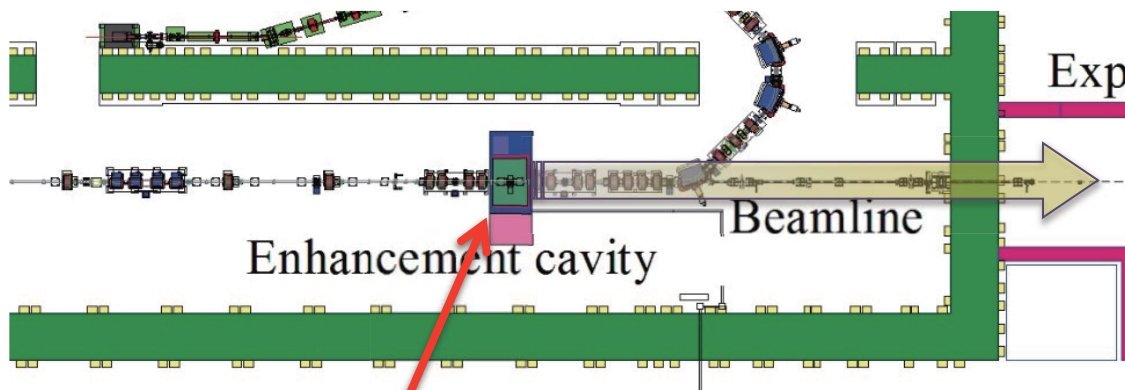
→ 10^9

更なる改善

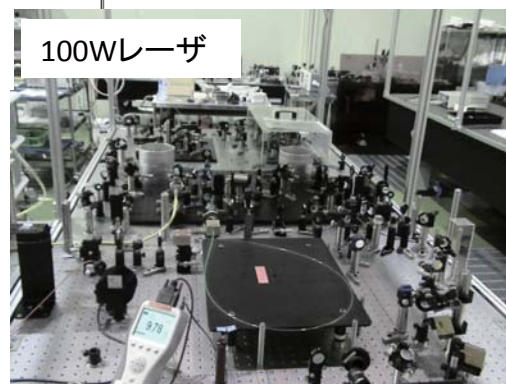
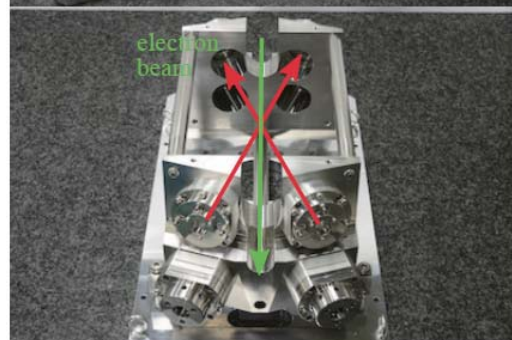
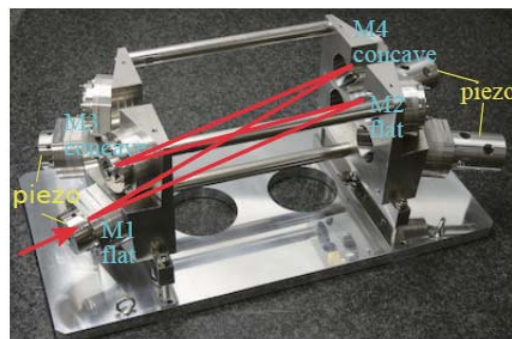
- 1000バンチ改善、衝突サイズ→30 umなど

cERLの状況

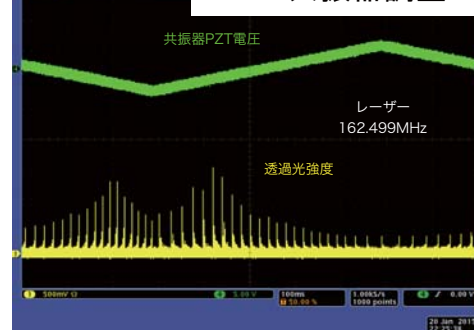
cERLにおけるLCS X線生成実証実験の準備状況 (KEK, JAEA)



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 (予定)	cERL放射線施設検査
2/16 ～ 4/3	ビーム増強 30uA→～(100uA) ビーム利用 LCS X線生成実験
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)	ビーム増強 100uA→1mA
H29年春 (見込み)	ビーム増強 1mA→10mA～ 10¹³ photons/secを目指す

cERLにおけるLCS 衝突調整を開始 2/26～

- 2/13 放射線施設検査(合格) 20MeV, 30 uA
- 2/23～ 電子銃レーザー 162.5 MHz、
LCSに合わせたビーム調整を開始
- 2/26-27 電子ビームとレーザーの衝突を試みる
バックグラウンド落とし、検出器調整
- 3/2(月) LCS X線を確認 (7keV)
- 3/4 光共振器制御系安定化
→ 信号増強、共鳴維持改善

今後

- 共振器の電子ビームに対する位相をロック(衝突の維持)
- 各種パラメターの最適化によるX線の増強
- 3, 4月のビームランでイメージングに挑戦したい

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の減衰効果は1/4

これでスケールすると、検出器に10個x5Hzの信号が入る。

測定(5分のデータ)では、50個x300sec = 15000個

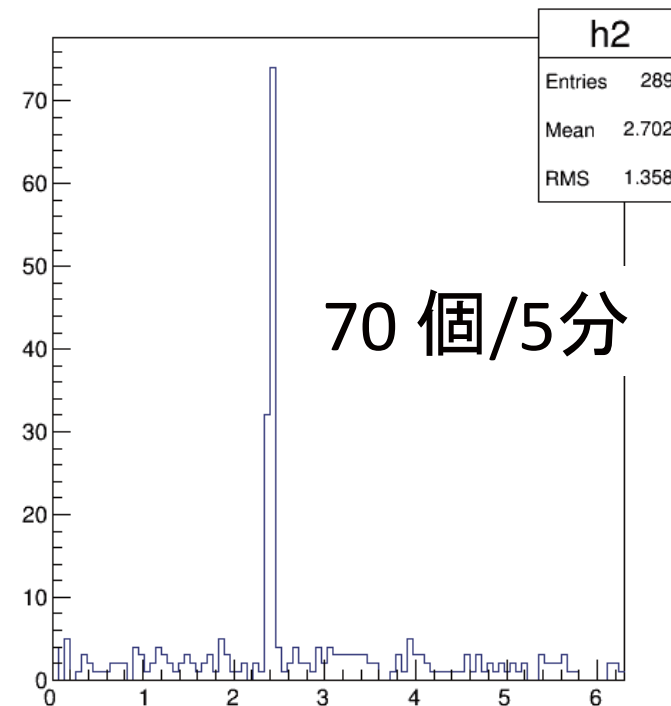
電子ビームに対してレーザー(相対位相)を固定していない。ランダムスキャンで衝突タイミングを探す。

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

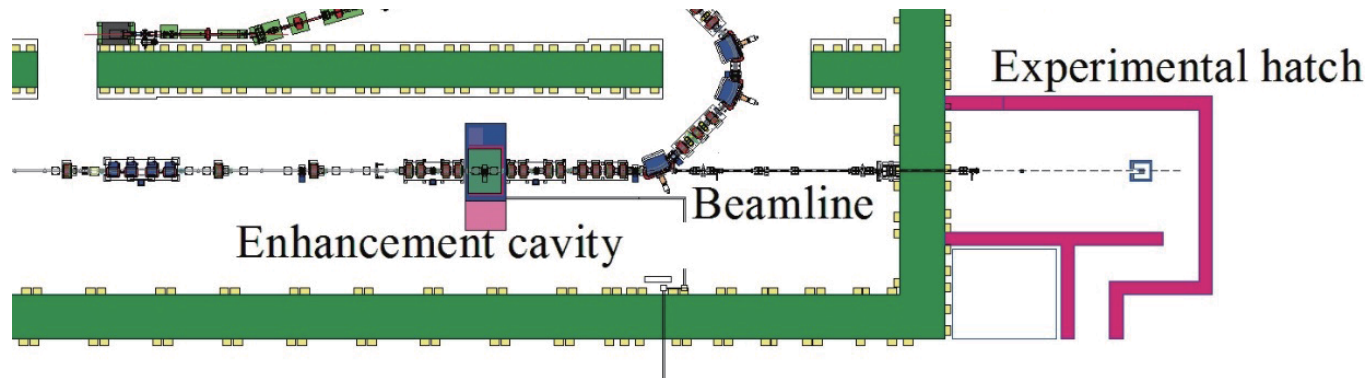
実測データ 70 個/5分
(現時点では上出来)

2015/Mar/4 19:25



電子ビームとレーザーの相対位相

現状のビーム条件によるCW運転光子数見積もり



実験ハッチでの光子数 1.1×10^6 photon/sec (CAINでの計算)

- IPから16.6mの位置に $\Phi 50\text{mm}$ のベリリウム窓を想定
- **電子ビーム CW運転**
- 2013年のLUCXでのイメージング: IPから2.5mの検出器で 6×10^4 photon/sec

電子ビーム		光共振器	
Energy	20 MeV	波長	1064 nm
Bunch charge	0.5 pC	Pulse energy	60 uJ
Bunch length	2 ps (rms)	Pulse duration	5.7 ps (rms)
Spot size	30 um (rms)	Spot size	30 um (rms)
Emittance	0.2 mm mrad	衝突角	18°

理想的な電子ビームとレーザーになった場合のLCS発生数の見積もり

電子ビーム: 0.77 pC

レーザー: 100 W x 2550 倍

マクロパルス内の平均値

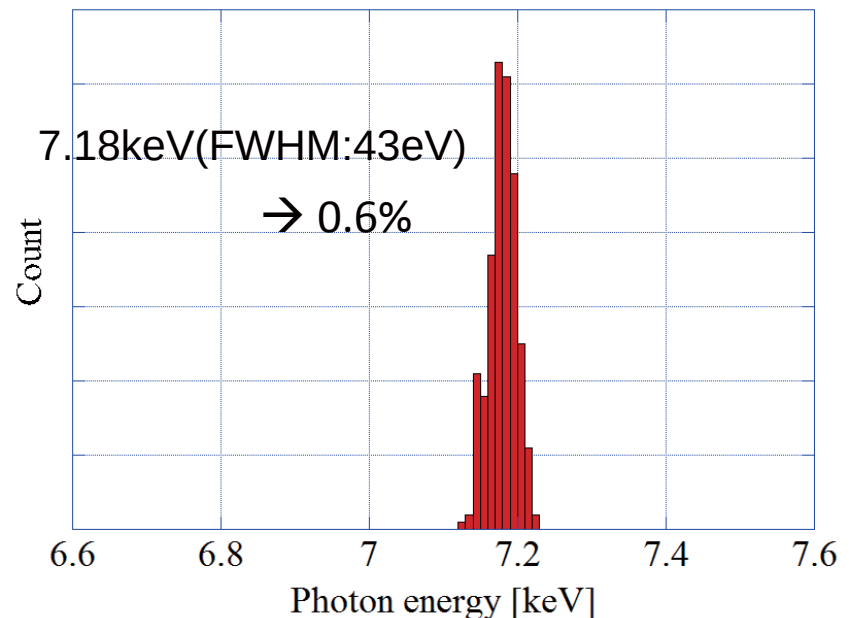
$7.5 \times 10^9 \text{ ph/s}$ @ 発生点

$5.4 \times 10^7 \text{ ph/s}$ (*) @ フラックスモニタ、 $\Phi 30 \text{ mm}$

$3.5 \times 10^7 \text{ ph/s}$ (*) @ 実験室、 $\Phi 50 \text{ mm}$

(*) Be 窓の透過率 85% は含まず

Parameters of the electron beam	
Energy [MeV]	20
Bunch charge [pC]	0.77
Bunch length [ps, rms]	3
Spot size [μm , rms]	50
Emittance [mm mrad]	0.3
Parameters of the laser	
Wavelength [nm]	1030
Energy per pulse [mJ]	1.5
Pulse duration [ps, rms]	2
Collision angle [deg]	18
Spot size [μm , rms]	50



実験室でのスペクトル(CAIN 計算値)

赤木さん(加速器学会 Proc.)

spot size $\sigma=20/30 \mu\text{m}$

超伝導薄膜について

薄膜で期待できる相乗効果

- 特にCW加速器でのメリットが大きい
- Q_0 値の改善が2桁程度→冷凍システム小型化。臨界磁場が高くなる。単層で～2倍、多層で5～10
- H_{peak} を上げて、 E_{peak} を下げる形状が選択できる
→Field emission が起こりにくい
- 臨界温度も上がる。2k→4k, より高い周波数の選択
- さらに
- スポーク空洞・・・カプラーなどが外周に配置→長さを短くできる

超伝導薄膜研究計画2015

担当(KEK超伝導空洞技術開発)

早野 10%

加藤 30%

佐伯 20%

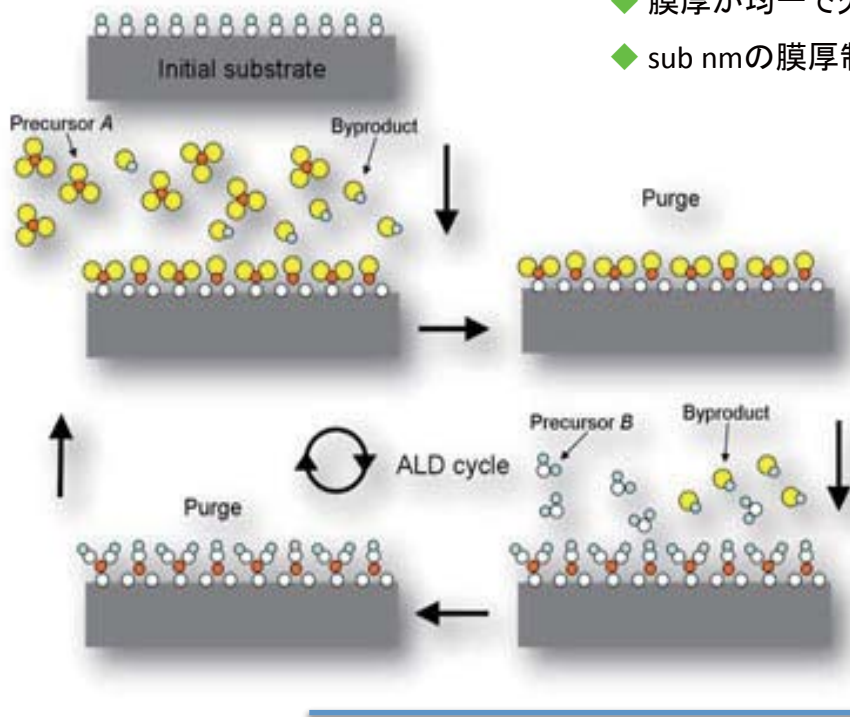
久保 30%

超伝導薄膜を高純度ニオブ単結晶サンプルに生成

Atomic layer deposition (ALD、原子層堆積法)を使用して、サンプル表面に薄膜を積層生成する。

なめらかな基板にALD法で成膜すると、現在薄膜生成時に問題となっている点を解決できる。

- ◆ どのような曲面にも成膜可能。
- ◆ 膜厚が均一で欠陥が生じにくい。
- ◆ sub nmの膜厚制御が可能。



◆ 工程

- ① 材料gas A (蒸気・気体の状態で、precursor: 前駆体)を投入
例 有機金属のTMA = $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$
- ② 窒素gasで、未反応気体と副生成気体をpurge
- ③ 材料gas Bを投入
例 H_2O
- ④ 窒素gasで、未反応気体と副生成気体をpurge

これを繰り返し、原子層を積層していく。

ALD装置



第1ステップとして、表面分析装置に装填可能な大きさのNbサンプル表面に薄膜を積層生成後、組成及び構造分析を行うとともに、低温時の超伝導特性を測定し、高性能な超伝導薄膜を得るための材料ガス選定、成膜条件サーチを行う。

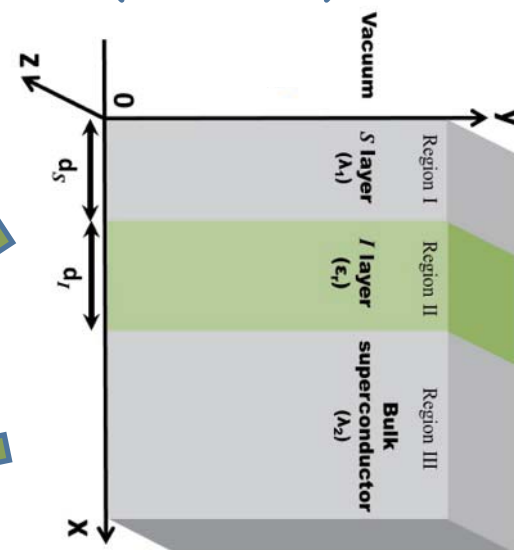
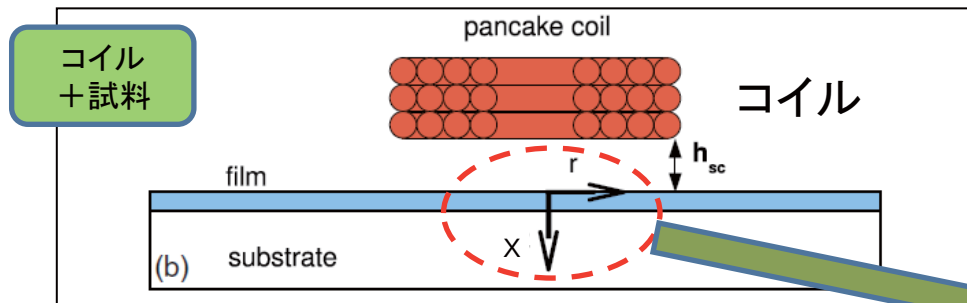
ALD装置を購入予定

薄膜構造による高い下部臨界磁場(B_{c1})を測定

コイルに電流を流して磁場 B を発生・変化させる。同時に試料からの誘導磁場によるコイル電圧 V を測定する。温度 T を極低温で変化させて、この測定を繰り返す。

コイルによる磁場 B

超伝導状態:
磁場は試料内に侵入できない。



試料表面に多層膜構造

多層膜試料
(ALD法で製作)



極低温
実験

小型冷凍機
コイル
+ 試料

小型冷凍機
(既存)

小型クライオスタット
(必要)

各温度 T で、コイル磁場が下部臨界磁場 B_{c1} に達すると、試料の超伝導が破れ、コイル磁場が試料に侵入する。この時、コイル電圧の変化(ΔV)が観測される。 $B_{c1}(T)$ の測定!

実験セットアップ全体を収める小型クライオスタットを購入予定

H27年度計画 業務項目

小型電子加速器とレーザー光共振器によるLCS X線発生 総合試験

① X線生成性能向上のための技術開発及び各要素技術の開発支援	KEK
② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立	KEK
③ …及びレーザー蓄積装置のフィードバック技術開発	広島大
⑦ 大強度高繰返しレーザー開発	早稲田大

LCS X線イメージング手法の開発

⑤ 小型高輝度X線源を用いたX線イメージング装置の基盤技術開発	リガク
⑧ 小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法の開発	AIST
⑩ 小型高輝度X線発生装置を用いたX線位相イメージング法の開発	東北大

大出力高品質電子源の開発

③ 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソード 及び…	広島大
④ (マルチアルカリ光カソード開発)	JAEA
⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発	日本大

超伝導空洞の開発

④ スポーク型超伝導空洞の開発	JAEA
⑨ スポーク型超伝導空洞開発における設計及び非破壊検査	京都大
⑪ 超伝導高周波加速空洞高電界化の新技术の開発	KEK

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

数keVから100keVのX線領域の小型高輝度X線源 (Peak Brightness: 10^{19})
に必要な基盤技術開発

4K 325MHz
スポーク型超伝導空洞

マルチアルカリ・光カソード

20Kクライオ光陰極高周波電子銃

X線利用:
数keV~100keV
X線イメージング

小型ERL (30~50MeV)
1 MW 電子ビーム

パルスレーザー蓄積光共振器
1 MW レーザー蓄積

