

未来を照らす新しい光…

小型高輝度光子ビーム発生装置

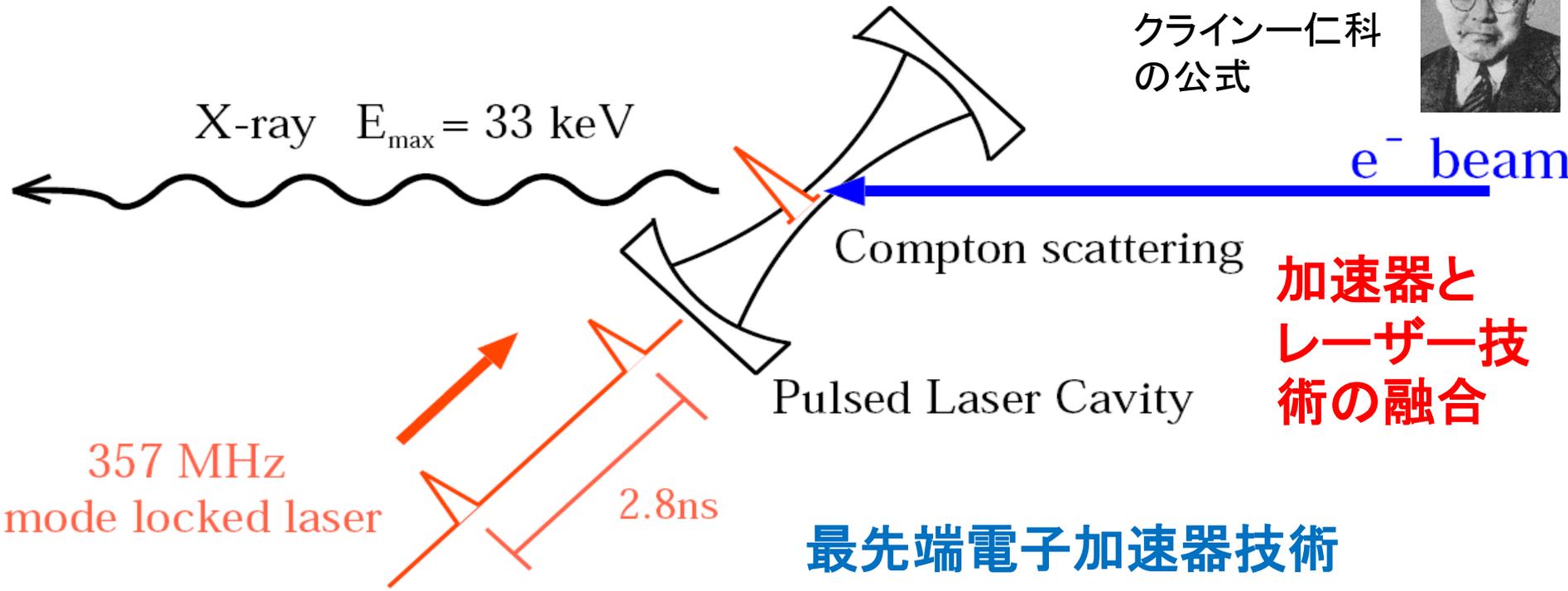
# 「超伝導加速による次世代小型 高輝度光子ビーム源の開発」

第二回「量子ビーム基盤技術開発  
プログラム」シンポジウム  
秋葉原UDXギャラリーNEXT  
2012.12.3 KEK 浦川順治

1. 導入
2. 開発目標
3. 基盤技術開発状況
4. 今後の装置開発計画

# 逆コンプトン散乱X線生成

仁科芳雄先生  
クラインー仁科  
の公式



**加速器と  
レーザー技  
術の融合**

## 最先端電子加速器技術

レーザーパルスと衝突する電子ビームもバンチと呼ばれる塊にして、電子線形加速器で高周波加速する。高輝度X線生成を実現するには、多くのバンチを加速して、レーザーパルスとの衝突点で小さく絞る必要がある。**マルチ電子バンチ加速とミクロンサイズへの電子絞り込み**が必要。**究極、連続バンチの電子ビームとレーザーパルスの衝突が可能になれば、第三世代相当の高輝度X線が小型の装置で生成できる。エネルギーリカバリー電子線形加速器(ERL)の技術(超伝導高周波加速器技術)。**

## 最先端光共振器技術

高反射率ミラーを使い、レーザーパルスが光共振器内に蓄積する。共鳴条件を満足させれば、レーザーパルスはミラーを透過して、入射レーザーパルスエネルギーの**1000倍以上**のレーザーパルスが光共振器内に蓄積される。**使い捨てしないリサイクルでリフレッシュする技術。**

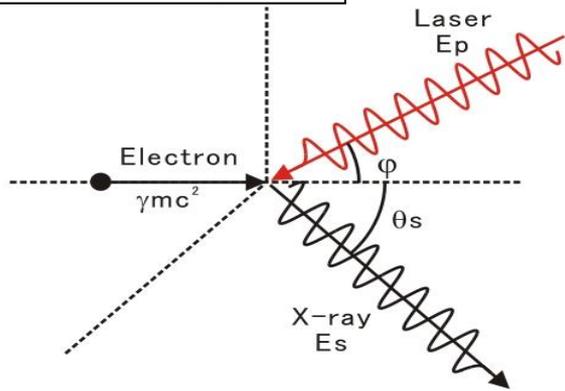
# 逆コンプトン散乱X線 (Laser-Compton Scattering) と FEL Radiation

電子エネルギーを電子静止質量エネルギー0.511MeVで割ったローレンツ因子 $\gamma$ の2乗に比例した光エネルギー放射(散乱)が起きる。また、放射光のエネルギーは、アンジュレータ周期やレーザー波長に逆比例する。

右図のSACLA(XFEL)では、超ピーク輝度のコヒーレントX線が生成利用されている。電子バンチのエネルギーは8GeVで、ローレンツ因子は15656になる。厳密ではないが、逆コンプトン散乱X線生成にローレンツ因子45の電子ビームを使えば同じエネルギーのX線生成が可能になる。つまり23MeVの電子ビームによってX線生成が実現する。



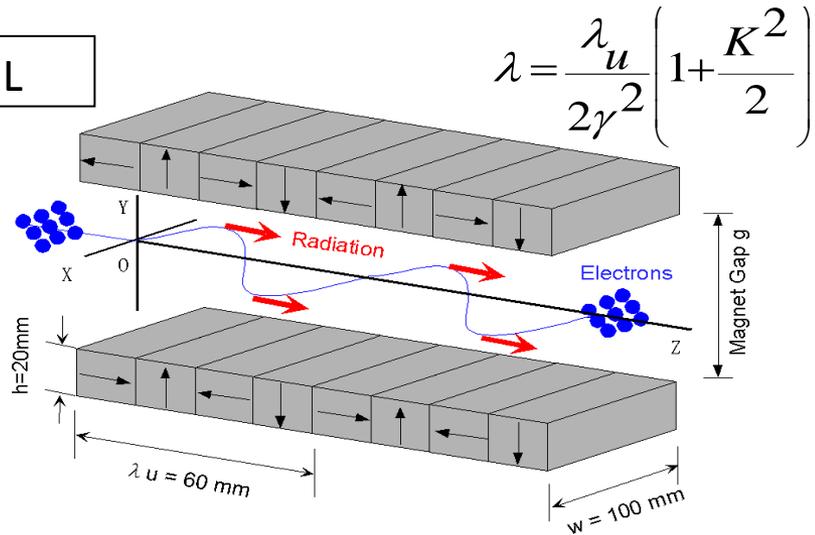
Laser-Compton Scat.



$$4\gamma^2 \cdot hc / \lambda_L$$

$$2\lambda_u / \lambda_L$$

FEL



$$2\gamma^2 \cdot hc / \lambda_u$$

# 小型加速器開発

光子ビームプロジェクト「量子ビーム」の3Dモデル  
修正のご指示を反映しました。修正箇所をチェック願います。カラーリングはチェック用のものです。

構図6

# 文部科学省委託事業「量子ビーム：超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」

この画像は、この加速器の3Dモデルの1つの視点です。これまでのチェック用画像の2倍のサイズで作成しました。(ちなみにA3版でこの画像の3倍、A1版だと6倍のサイズになります。印刷にはご注意ください。)

レーザーパルス蓄積装置

1m超伝導高周波加速空洞

15MeVから35MeV加速

1m超伝導高周波減速空洞

5MeV光高周波電子銃

2kHe 冷却装置

ビームダンプ

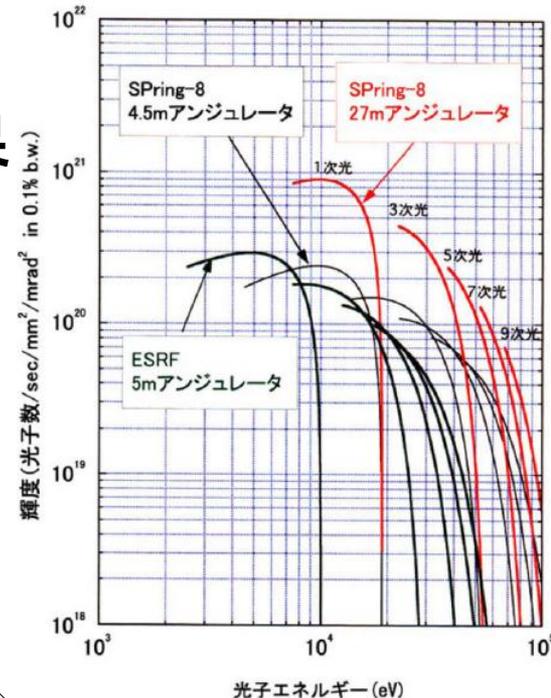
ビームラインとフランジ類の金属質感を強調する方向に修正しました。これに合わせてライティングも微調整しています。

多バンチビーム生成用レーザー装置

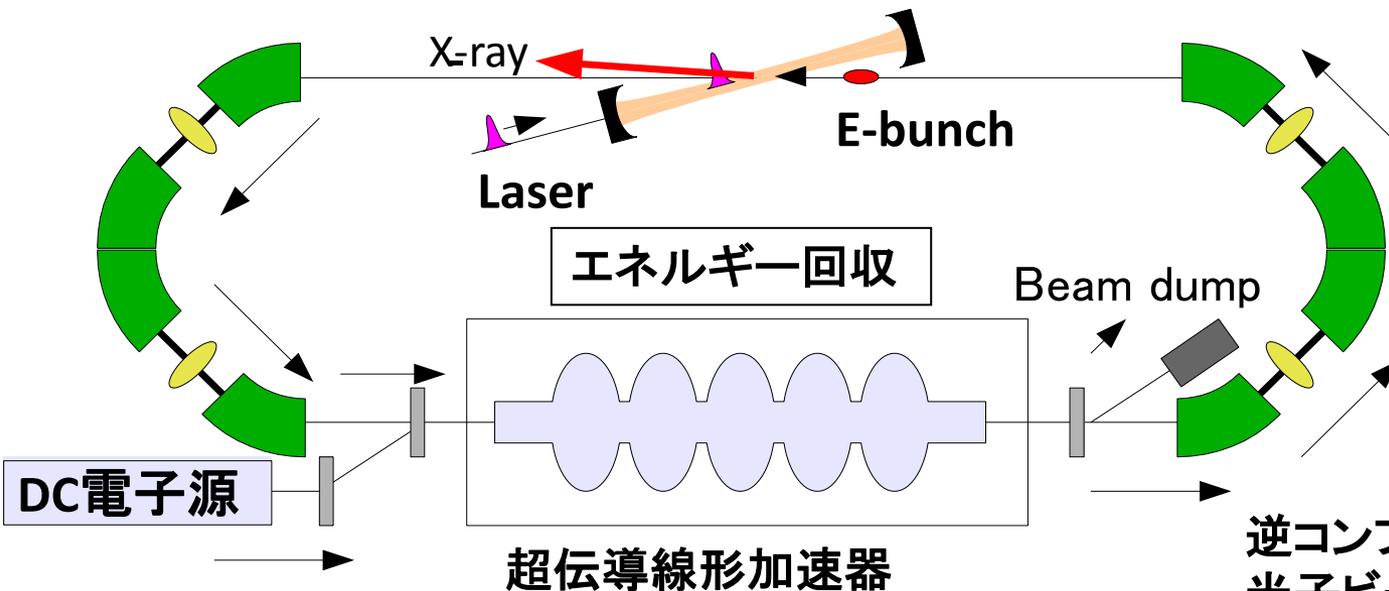
# エネルギー回収型超伝導線形加速器 技術による究極の小型高輝度X線源

2013年度実証実験予定

## 最先端光共振器開発



Spring-8  
27mアンジュレータ  
世界最強高輝度X線源  
Brightness  $10^{21}$   
Photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup> in 0.1%b.w.



逆コンプトン散乱: 高エネルギー  
光子ビーム生成に最適

35MeV electron beam x 1 $\mu$ m laser = 23keV X-ray

Brightness  $10^{19}$  Photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup> in 0.1%b.w. を実現

# Journal of Synchrotron Radiation

ISSN 0909-0495

**Photon Flux :**

**$\sim 10^{10}$  photons/sec 1%bw**

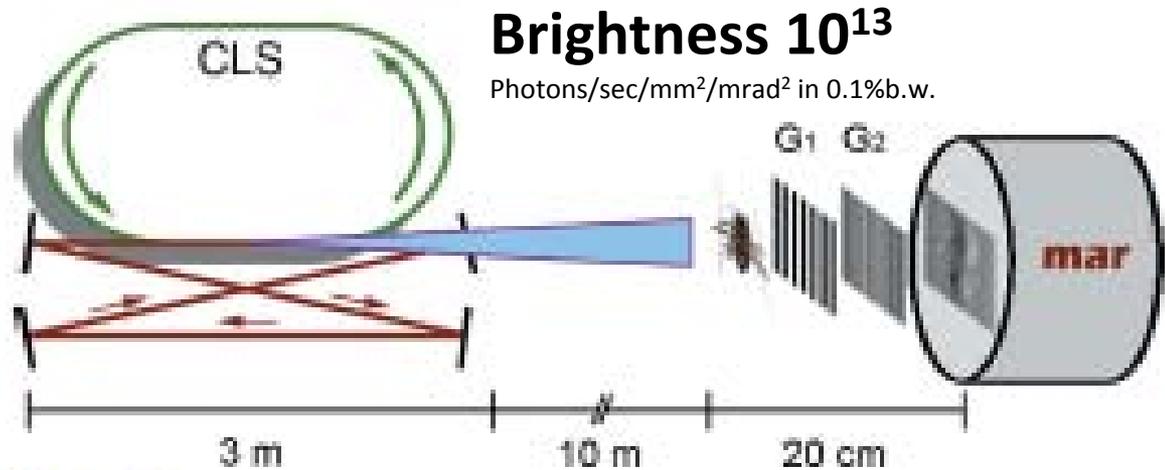
**<sup>c</sup>Lyncean Technologies Inc.**

**Hard X-ray phase-contrast imaging with  
the Compact Light Source based on inverse  
Compton X-rays**

Martin Bech,<sup>a\*</sup> Oliver Bunk,<sup>b</sup> Christian David,<sup>b</sup> Ronald Ruth,<sup>c,d</sup> Jeff Rife,<sup>c</sup>  
Rod Loewen,<sup>c</sup> Robert Feidenhans'l<sup>a</sup> and Franz Pfeiffer<sup>b,e\*</sup>

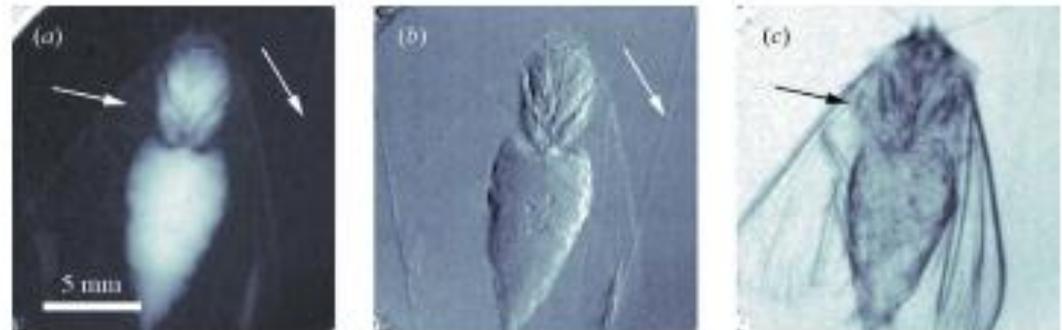
<sup>a</sup>University of Copenhagen, Universitetsparken 5, DK-2100 Copenhagen, Denmark, <sup>b</sup>Paul Scherrer  
Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland, <sup>c</sup>Lyncean Technologies Inc., 370 Portage Avenue,  
Palo Alto, CA 94306, USA, <sup>d</sup>Stanford Linear Accelerator Center, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park,  
CA 94025, USA, and <sup>e</sup>École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland.  
E-mail: bech@fys.ku.dk, franz.pfeiffer@psi.ch

The first imaging results obtained from a small-size synchrotron are reported.  
The newly developed Compact Light Source produces inverse Compton X-rays  
at the intersection point of the counter propagating laser and electron beam.  
The small size of the intersection point gives a highly coherent cone beam with a  
few milliradian angular divergence and a few percent energy spread. These  
specifications make the Compact Light Source ideal for a recently developed  
grating-based differential phase-contrast imaging method.



**Figure 1**

Sketch of the experimental set-up (not to scale). To the left is the  
Light Source with an electron storage ring and a laser cavity. A  
X-ray beam is produced at the electron-laser intersection point,  
passing onto the sample. The grating interferometer to the right consists  
of two gratings,  $G_1$  and  $G_2$ , and a MAR CCD detector.



**Figure 3**

Three types of image contrast of a moth after data processing. (a) Standard absorption-contrast  
image. (b) Differential phase-contrast image. (c) Dark-field image. All three images are obtained  
from the same data set. Arrows indicate regions where the phase-contrast and dark-field images  
reveal details not visible on the standard X-ray image.

**X線照射時間100秒以上**

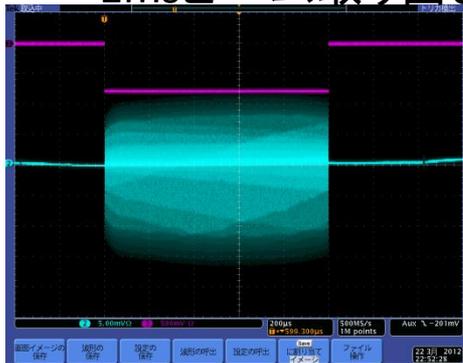
**January 2009**

# 量子ビーム「STF加速器」 現在までに達成されているビーム

07132012 Hayano

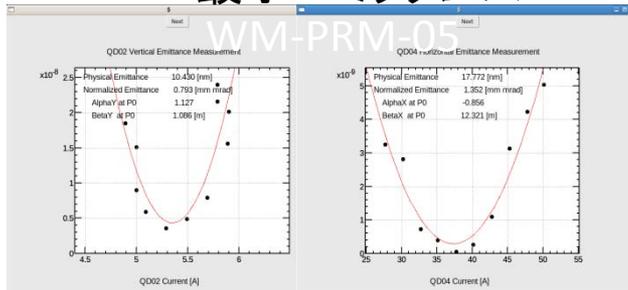
V1.0

## 1msビーム取り出し



RF電子銃からの1msフラットビーム取り出し (RF feedback ON) 03.22.2012 50pC/bunch

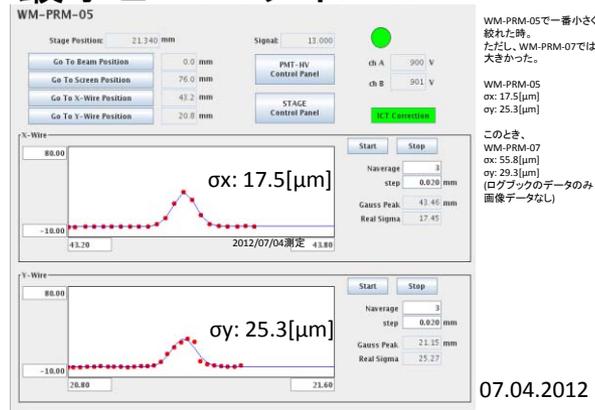
## 最小エミッタンス



Date	Normalized Emittance [nm mrad]		RF gun [MW]	SC cav. [MV/mm]	Main Solenoid : Main/Backing	UV Laser	Charge [pC]	Energy [MeV/C]
	Vertical	Horizontal						
13/June	0.79	1.3	3.5	14.5, 24.0	306.23 / 100.73	φ1mm	15-25	39.1

ワイヤースキャナーによるビームのエミッタンス計測 06.13.2012

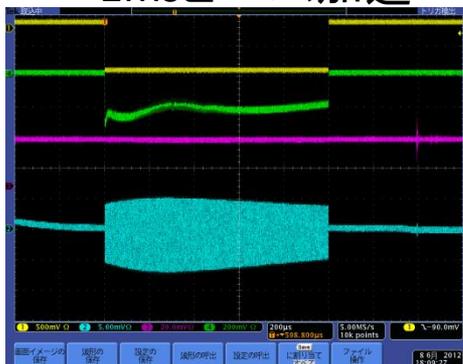
## 最小ビームサイズ@WM-PRM-05



07.04.2012

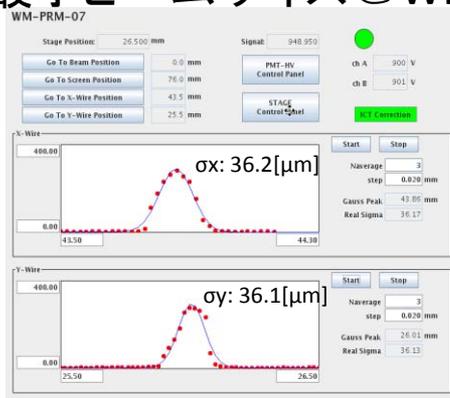
WM-PRM-05で一番小さく絞れた時。ただし、WM-PRM-07では大きかった。  
WM-PRM-05  
σx: 17.5[μm]  
σy: 25.3[μm]  
このとき、WM-PRM-07  
σx: 55.8[μm]  
σy: 29.8[μm]  
(ログブックのデータのみ  
画像データなし)

## 1msビーム加速



1msビーム加速(15pC/bunch) (Gun/SCRF RF feedback ON) 06.08.2012

## 最小ビームサイズ@WM-PRM-07 Dispersion測定



07.04.2012

目標: 衝突点で10μm

超伝導空洞のRF位相を変えてエネルギーを振り、WM-PRM-05、-07のDispersionを測定

SC phase 240deg	40.58 MeV/c (B1)
SC phase 150.20A)	40.02 MeV/c (B1)
SC phase 250deg	
SC phase 148.10A)	

この2点でのビーム位置のずれからDispersionを計算した。  
ビーム位置はワイヤースキャナーで測定。

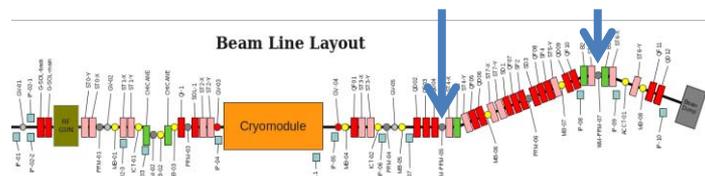
	$\Delta x$	$\Delta y$	$r_x$	$r_y$
WS-PRM-05	85μm	14μm	6.2mm	1.0mm
WS-PRM-07	42μm	14μm	3.1mm	1.0mm

測定されたサイズσ = 35μm, σ<sub>y</sub>/P=0.002 (0.2%), r<sub>x</sub>=6mmと仮定すると、Dispersionの影響を引いたサイズは $\text{Spr}(35^2 - 16^2 * 1000^2 * 0.002^2) = 32.8\mu\text{m}$ になる。ほとんど影響はない。測定値が20μmの場合でも、16μm 10μmに較ぶらうという場合はDispersionを1.2mmに減らす必要がある。

Momentum spreadが測定できていないので、これを測定する場所を作る必要がある。  
07.04.2012

WM-PRM-05

WM-PRM-07

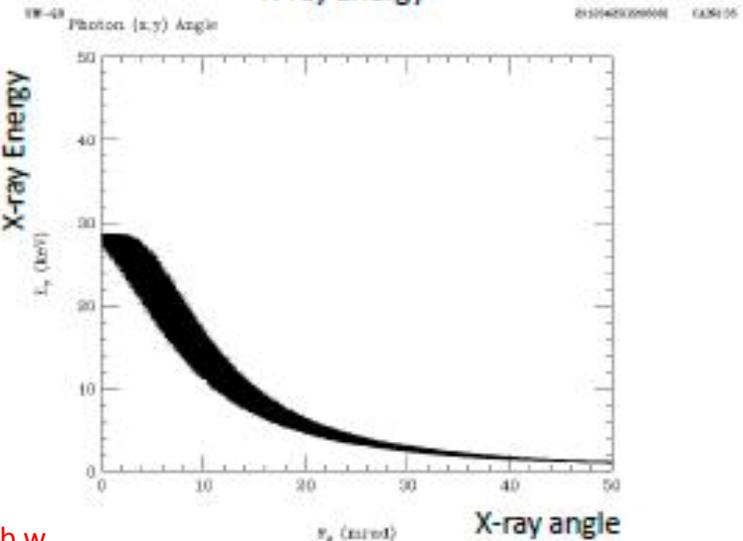
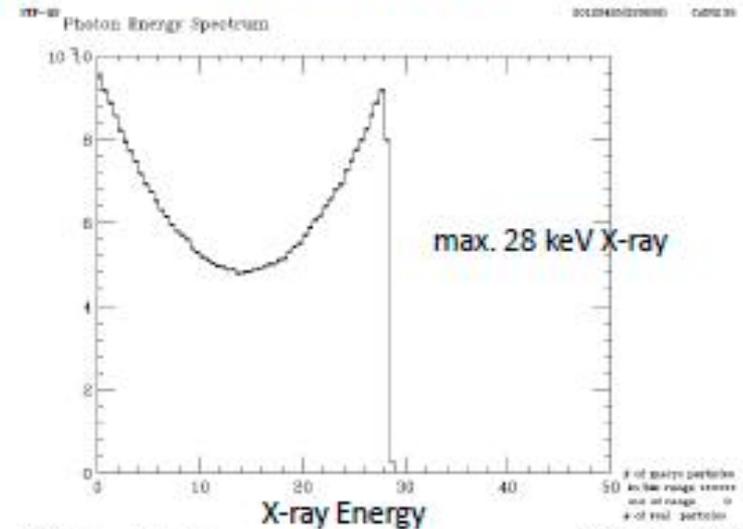


レーザーパルスビームサイズ約80μm  
目標: 衝突点で20μm以下のビーム収束  
X線検出器へのBGは許容値以下  
X線測定開始したが、検出できていない。  
12月21日まで実験継続。

# Plan of X-ray generation by Inverse-compton scattering

4-mirror laser accumulation, head-on with e-beam

40MeV, head-on collision



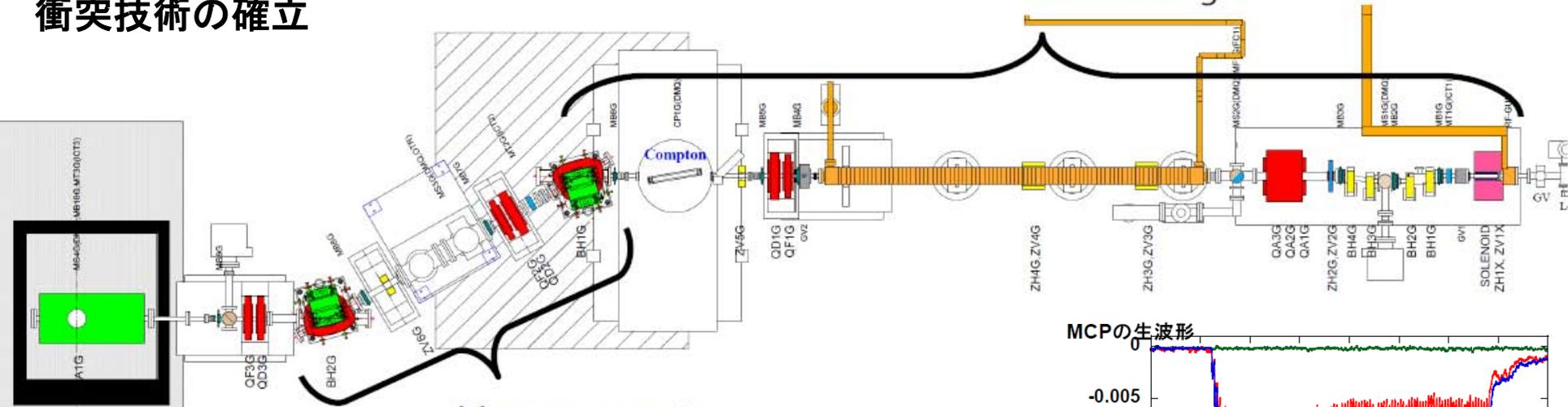
	Electron	Laser
Energy	40MeV	1.17eV ( $\lambda=1064\text{nm}$ )
Energy spread	0.1% (rms)	
Beam size(rms)	10 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
Pulse width(FWHM)	12ps	12ps
Intensity	61.5 pC/bunch	50mJ/pulse
Number of bunches	162500	---
Emittance	0.5 $\pi$ mm mrad	
Collision angle	0deg (Head on)	
Rep. Rate	5Hz	

**Brightness  $10^{17}$**

Photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup> in 0.1%b.w.

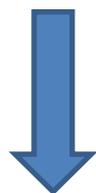
target:  $1.3 \times 10^{10}$  photons/sec/1%bw

# 常伝導線形加速器によるX線発生 衝突技術の確立



Measurement  
&  
tuning if possible

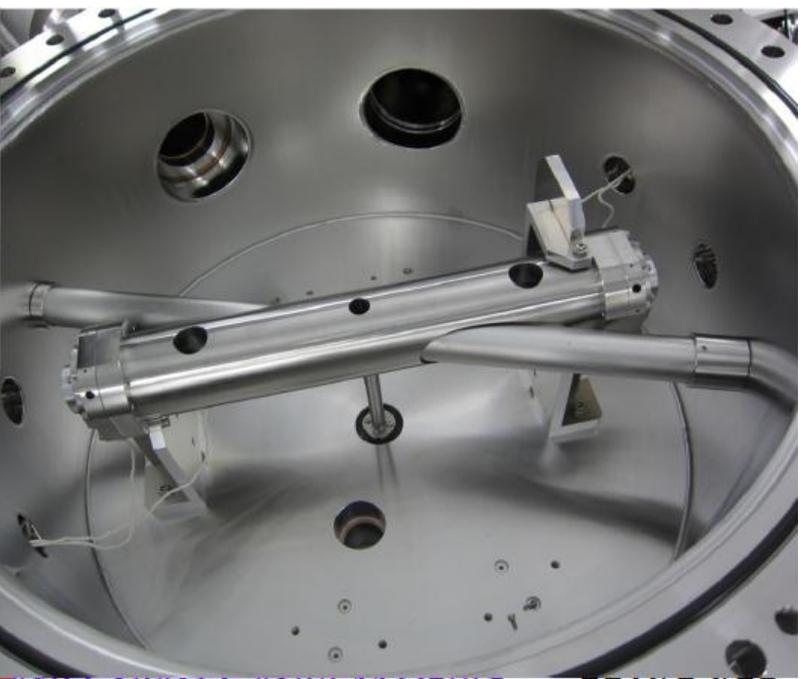
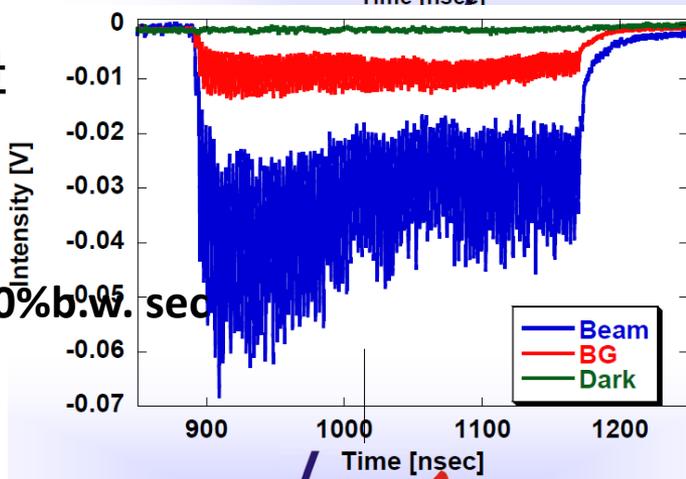
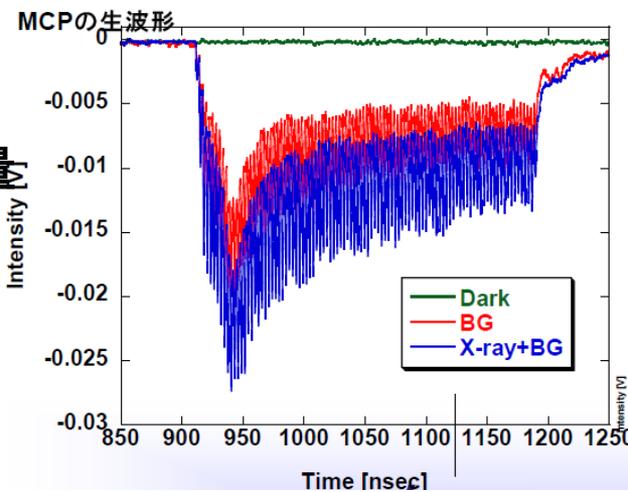
**H2011.7月**のX線量  
334 photons/train  
at detector



2~4倍

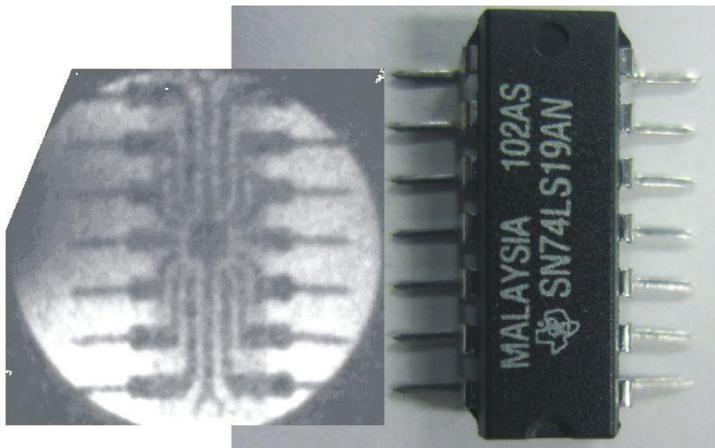
**H2011.10月**のX線量  
1447 photons/train  
at detector

$2.1 \times 10^5$  photons /  $\sim 10\%$  b.w. sec  
at 12.5Hz operation

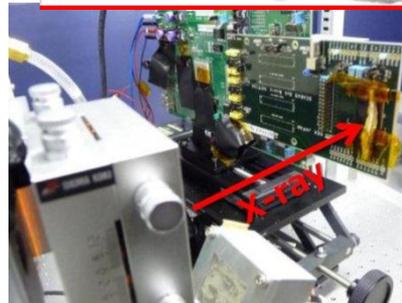
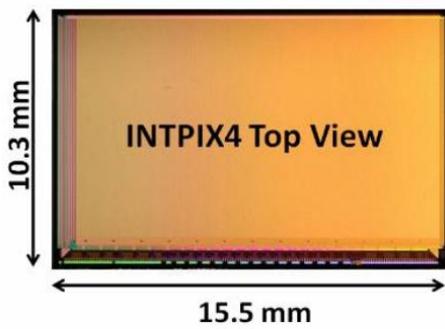
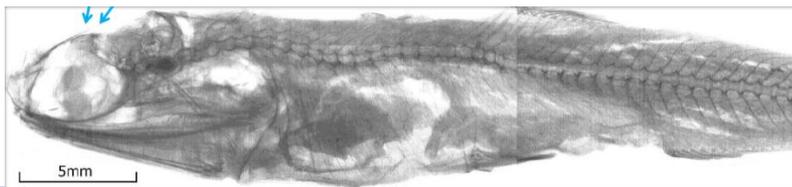
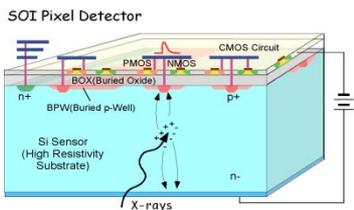
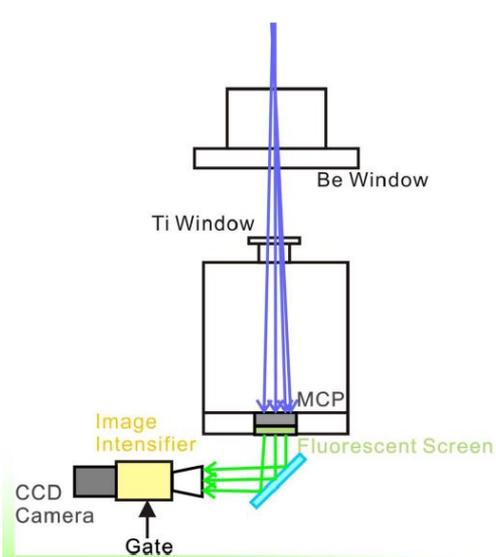
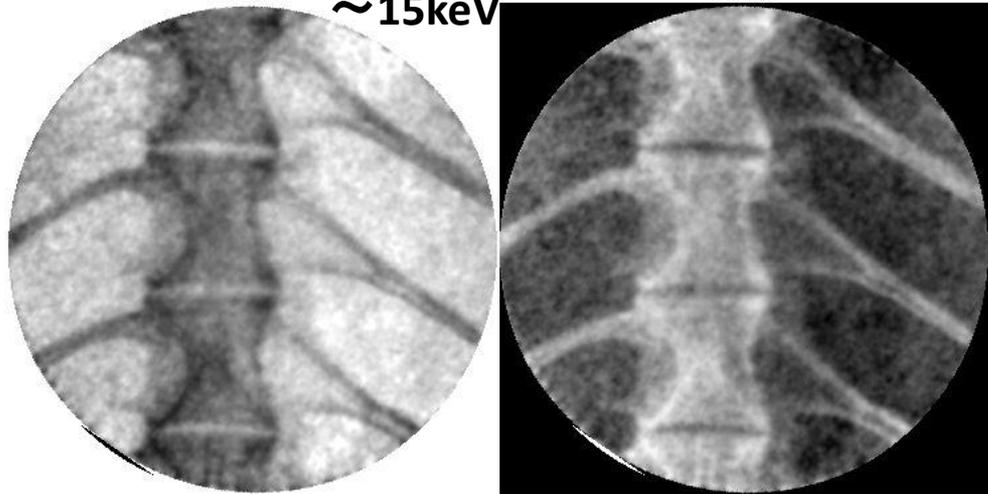


製作した3.5 cell RF Gunと12 cell booster加速管を2012年9月末に設置した。ビームによる性能試験を2月までに行う予定。I-MCP+I.I.やSOIによるX線イメージングの取得試験、位相コントラスト法によるX線イメージングの取得等もLUCXで行う。

~30keV



~15keV

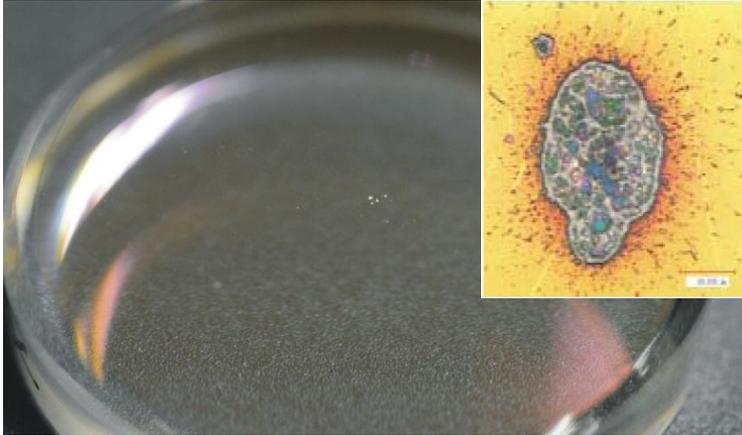


SOI Pixel DetectorによるX-ray Imaging試験(2月末までに行いたい。)

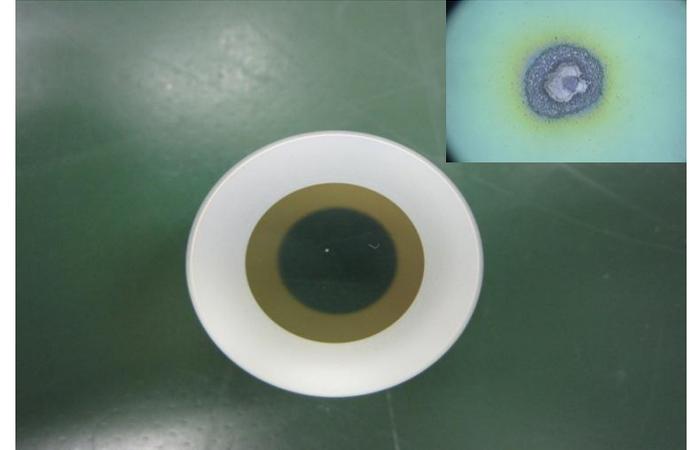
357MHzモードロックレーザーによって2度高反射率ミラーが破壊した。

概算した蓄積強度として、1~2mJ/pulse (以前までは0.4mJで運転)でミラーがダメージを受け、実験ストップダメージの位置はセンターよりも少しずれていた。

2008年



2011年



**ミラー開発** 国立天文台重力波グループ、東大工学部大津研、シグマ光機  
LMA (Laboratoire Materiaux Avances)との共同開発研究を立ち上げる。

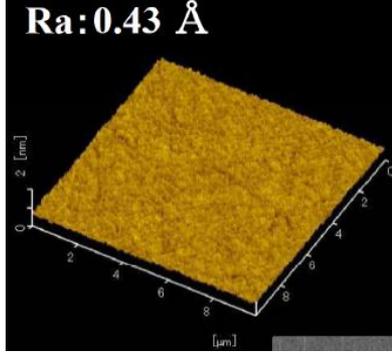
Mirror上でのレーザーサイズを大きくする。1inch mirrorから2 inch mirrorへ。

LMAは99.999%の高反射率ミラーを6ppm以下(吸収・散乱)のロスで誘電多層膜蒸着できる技術と装置を所有している。0.5オングストローム以下のmicro-roughnessミラー母材をアメリカ又はドイツから購入できる。必要な1 inch及び2 inch ミラー母材は入手した。低ロスミラーへ。

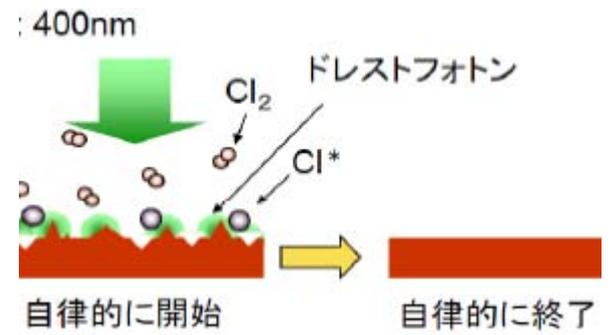
99.9%までの高反射率ミラーの場合、通常のみラー取り扱いが許されるが、99.99%以上のミラーでは高度なクリーンルーム内で慎重に取り扱わなければならない。

高強度ピーク電場による誘電多層膜破壊の閾値を高めるミラー製作法を開発しなければならない。

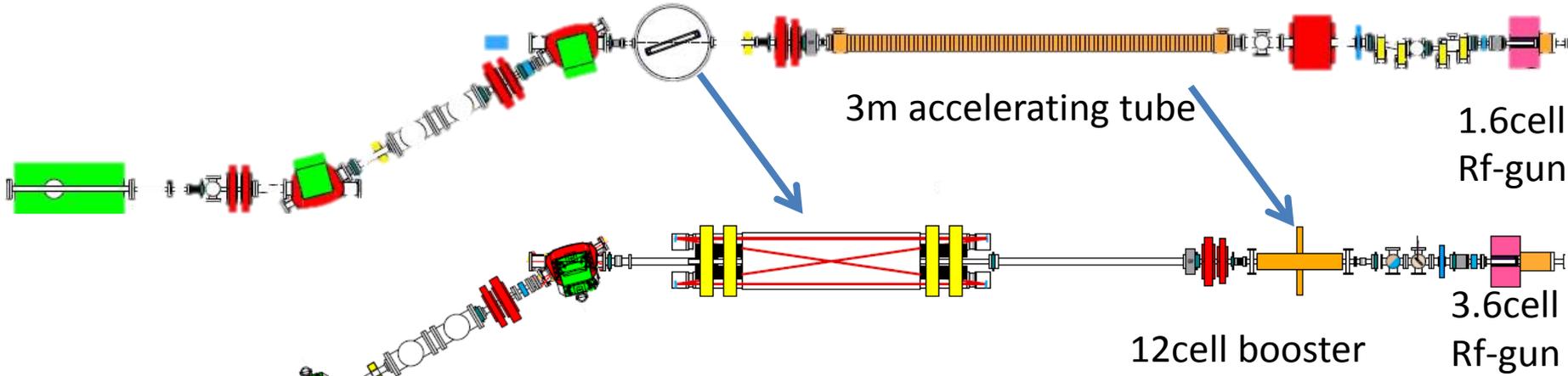
研磨(Super-polish)の精度測定。散乱ロスを少なくする。



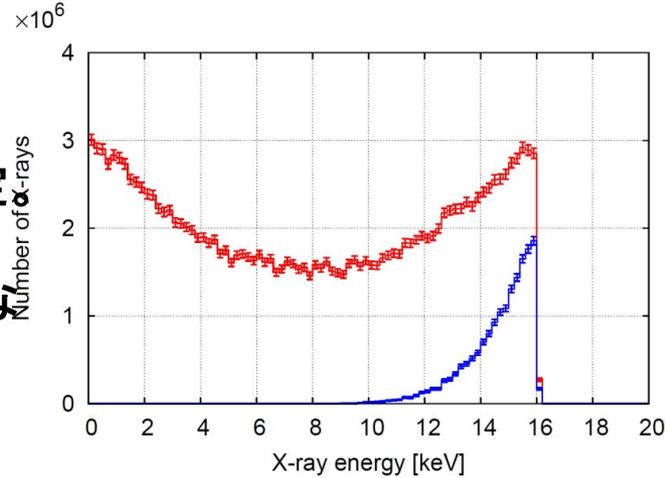
ドレストフォトンによる自律的  
光化学エッチング  
ミラー誘電多層膜  
強度が上がる。



## 常伝導加速器の高性能化



$2.1 \times 10^8$  photons/sec · 10%BWのX線フラックスが得られる予定  
少なくとも鮮明なX-rayイメージングを取得して、2012年度中に  
小型加速器X線源の有用性を示す。数秒以内の照射で精細な  
X線イメージ取得。



# 500-kV DC 電子銃の開発

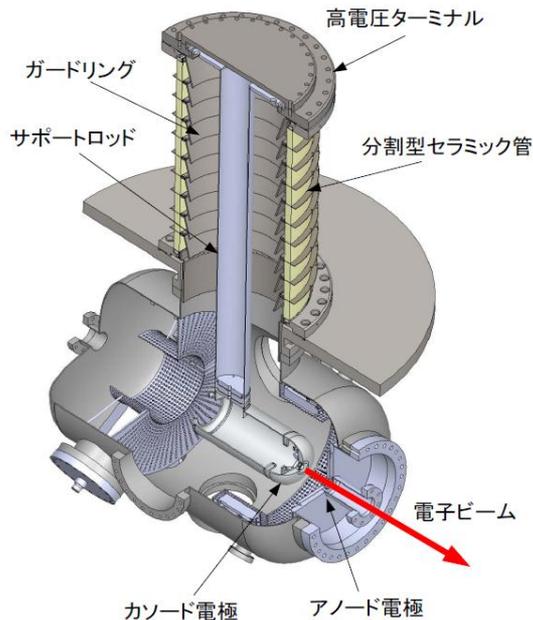
## 開発のねらい

レーザー・コンプトン光源のフラックス、輝度の向上には、電子ビームの大電流化が必須

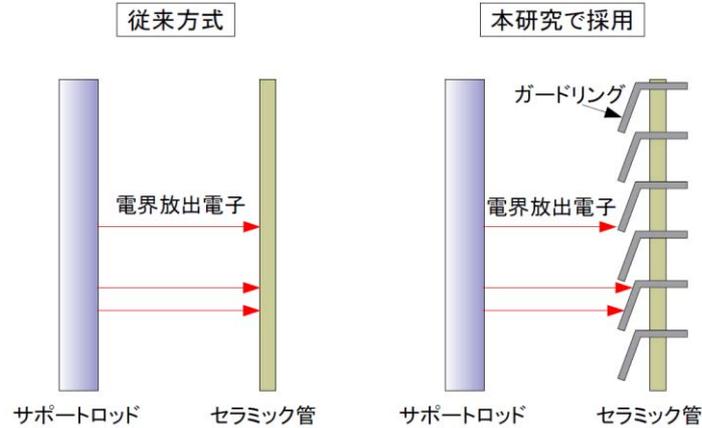


大電流、低エミッタンス電子ビームを生成可能な直流型(DC)電子銃を開発する。  
低エミッタンスのため高電圧(500kV)の動作を目指す  
—— 従来技術では 350kV が限界

## 開発した電子銃



## 技術開発のポイント



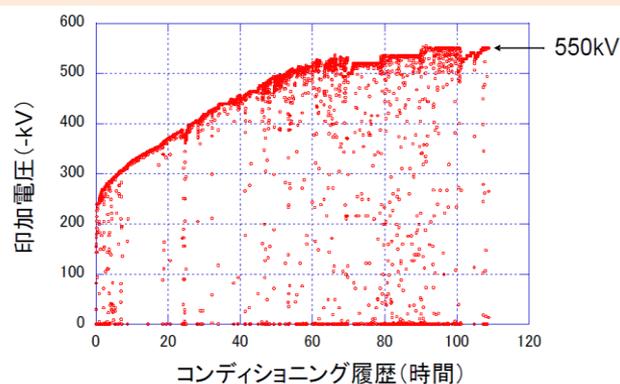
従来型のDC電子銃＝電界放出電子によるセラミックの帯電、破損が高電圧化の障壁  
開発したDC電子銃＝分割型セラミック管、ガードリングを考案し、セラミックの破損を防止

## 高電圧発生装置



コッククロフト＝ウォルトン型  
高電圧発生装置  
500kV-10mA の仕様

## 電圧印加試験



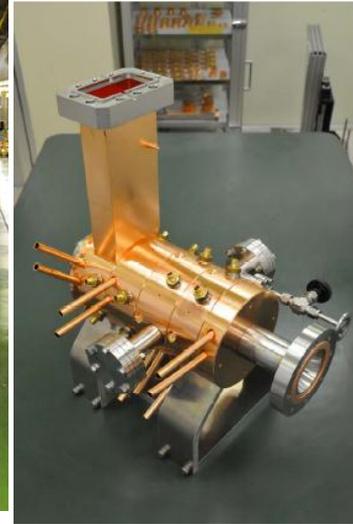
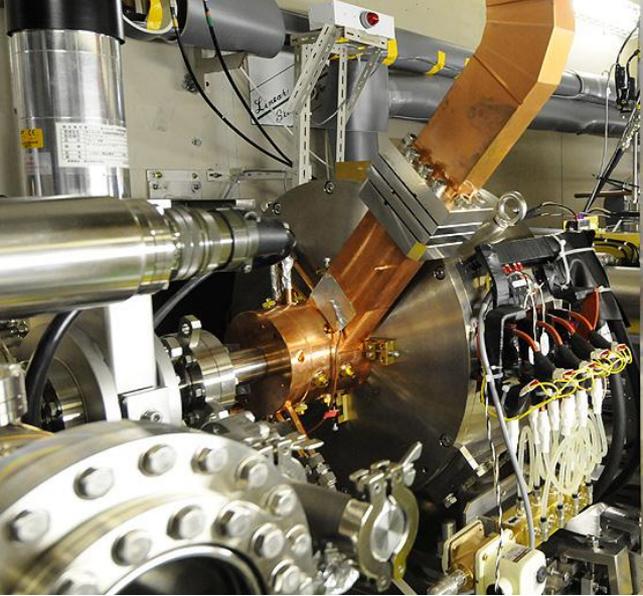
## 開発の成果

世界初、550 kV の電圧印加に成功  
→ プレス発表(2010年3月)

DC電子銃の標準設計を確立  
→ 国内外で同型機4台が製作中

500 kV ビーム生成試験、10 mA  
ビーム生成試験の完了  
→ 超伝導空洞と組み合わせた運転  
を行うため、KEK へ移設

# 光高周波電子銃開発



1.3 GeV ATF Linac, results by 80 MeV beam.

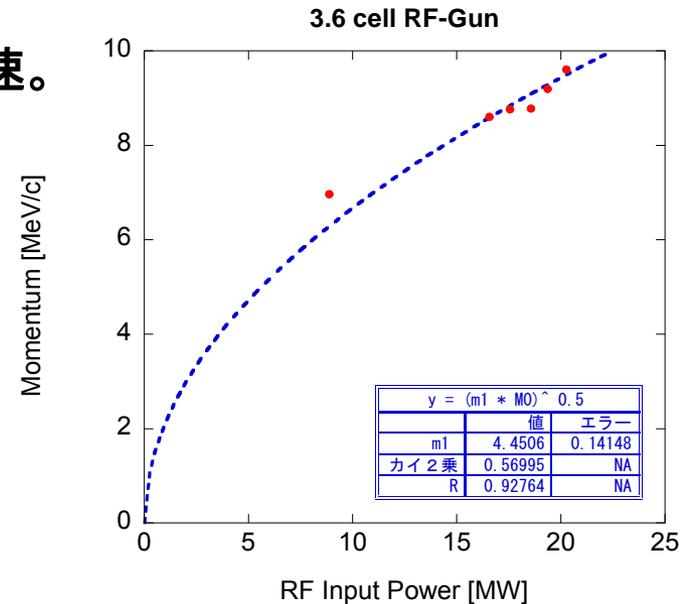
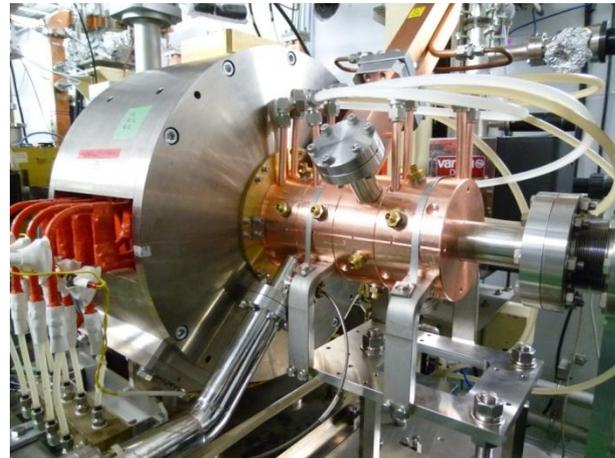
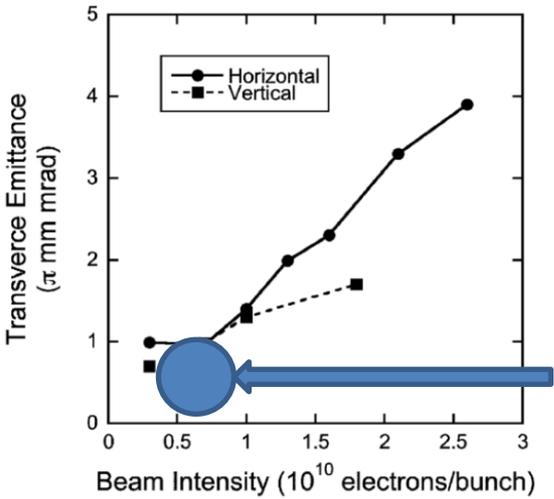
10 MeV 3.6 cell gun

6 MeV 1.6 cell gun

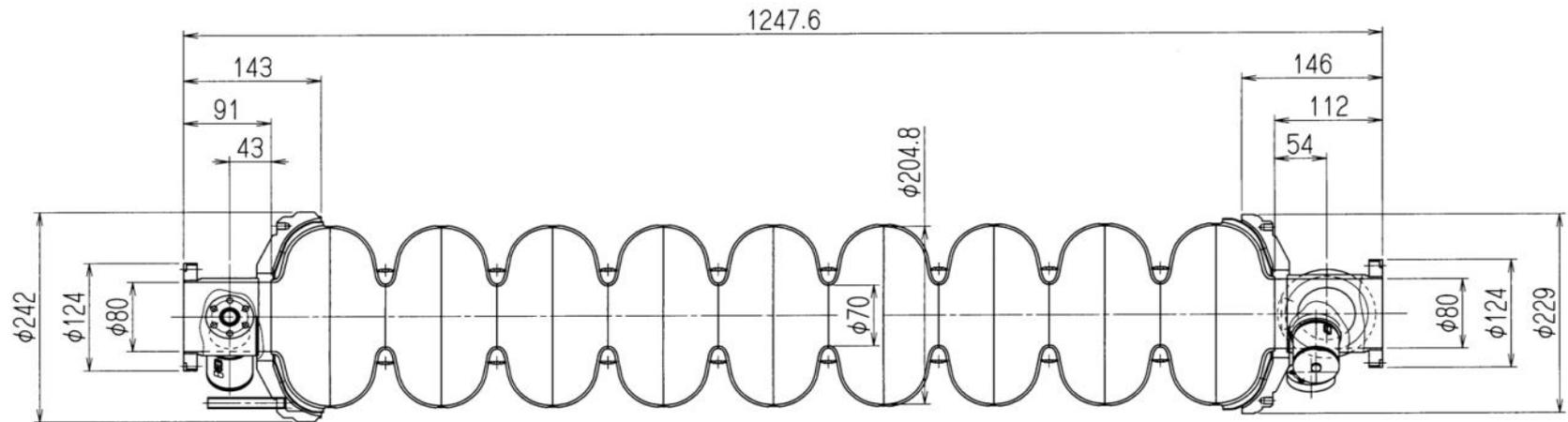
2002年からの開発研究によって、最高性能のマルチバンチ電子ビーム生成に成功。

100 pC/bunchの電子ビーム輝度を上げる方法を開発中。

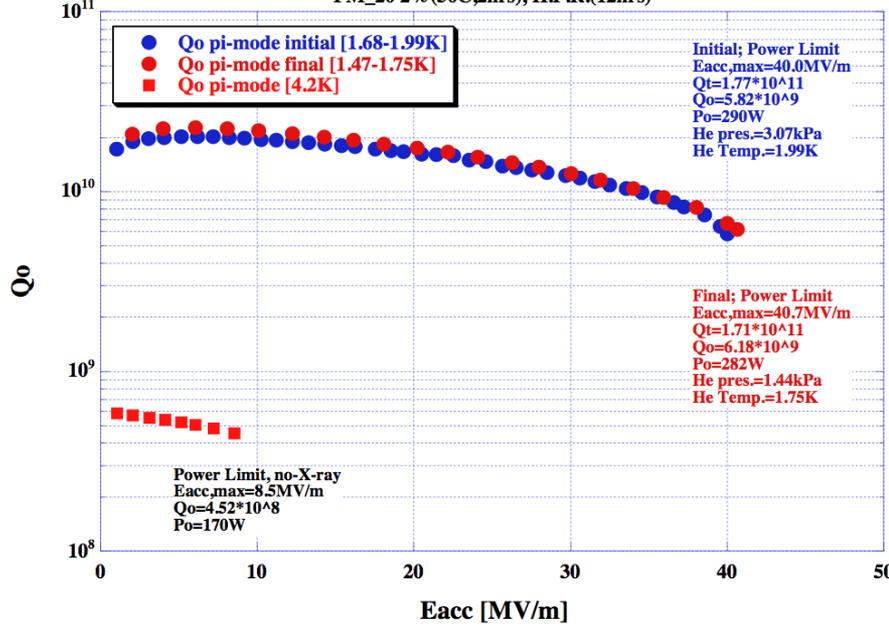
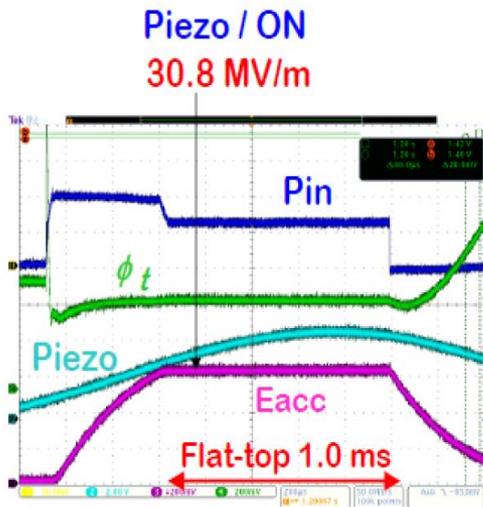
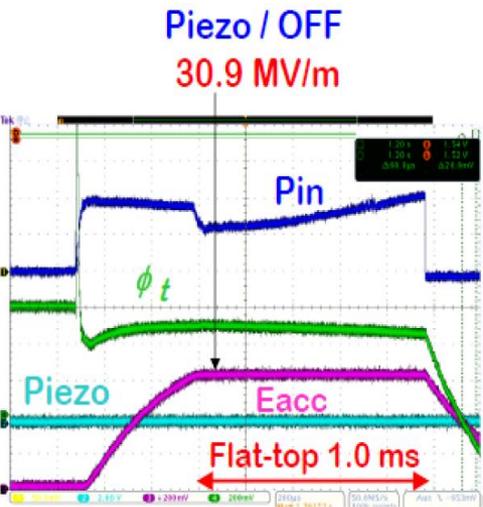
電子パルス当り数百バンチ生成して9 MeV程度まで加速。



# 超伝導加速空洞の製作と性能、パルス運転用は35MV/m性能を実現

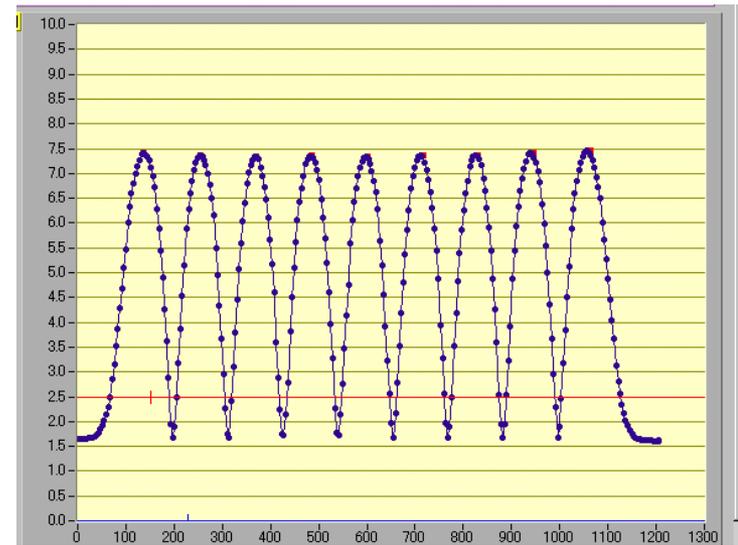


MHI No.12[Quantum Beam Cavity] 2nd. Vertical Test 12/08/2010  
 EP-II(35~40mA/cm<sup>2</sup>, 10μm), Water flow(1.5hrs),  
 FM\_20 2%(50C,2hrs), H.P.R.(12hrs)

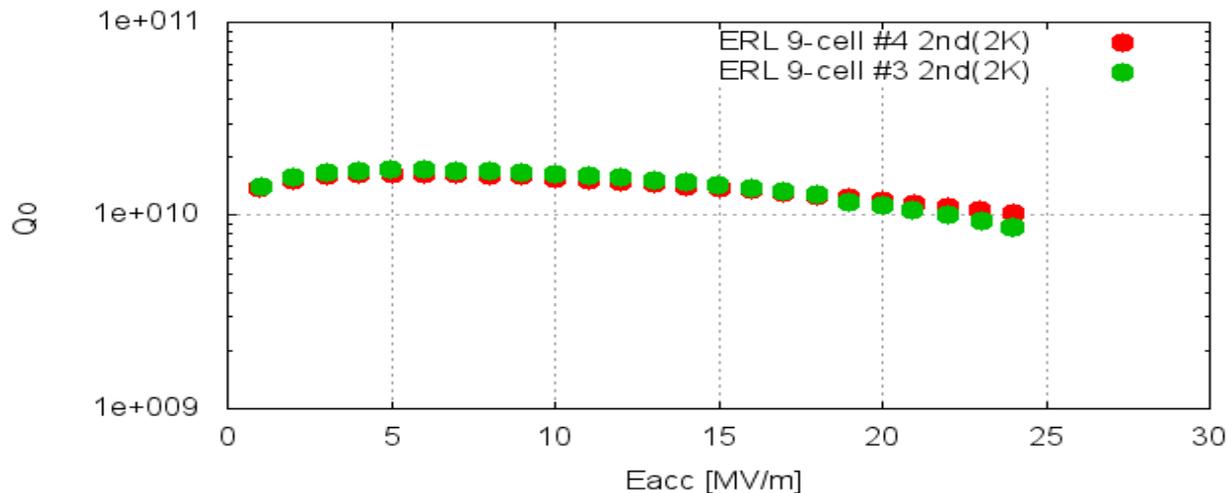


電子ビーム加速での目標値は30MV/m程度

## 連続運転用超伝導加速空洞



ビーズを用いて計測された9連空洞の軸上加速電場分布。各セルの周波数を $10\mu\text{m}$ の精度で調整することで、98%の均一度を達成している。

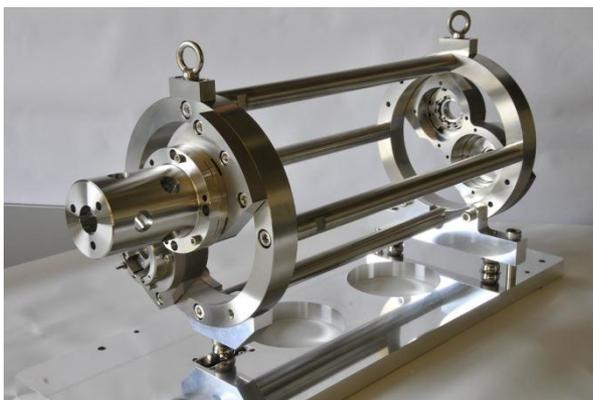


加速・減速を合わせた200mAビームが作る有害高調波対策を有する2台の9セル型空洞を製作し、空洞単体の性能では最高25MeVを実現した。そのときの各空洞の電力損失は70Wであった。11MeV×2台運転では26Wで済む。

## 2-Mirror Cavity --> 4-Mirror Cavity



$\sigma_{\text{spot}} \sim 30 \text{ micron}$        $F \sim 2000$

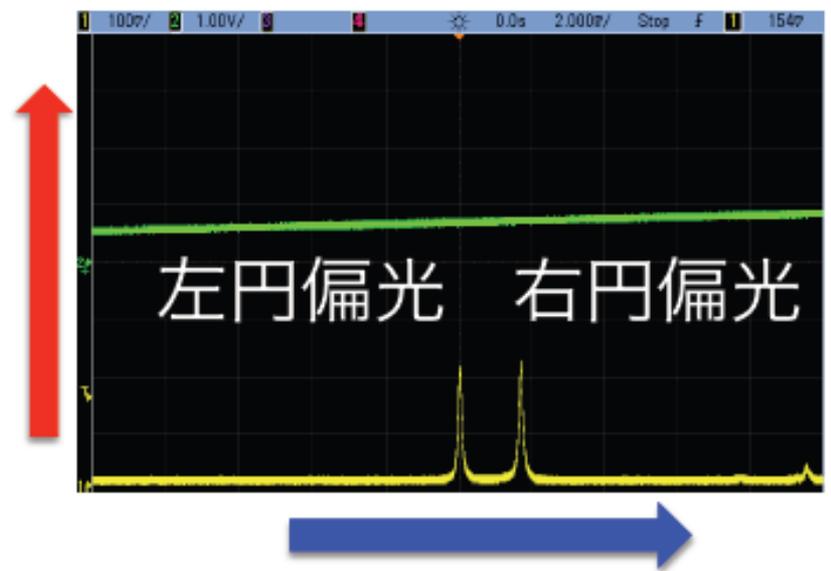


$\sigma_{\text{spot}} \sim 15 \text{ micron}$        $F \sim 5000$



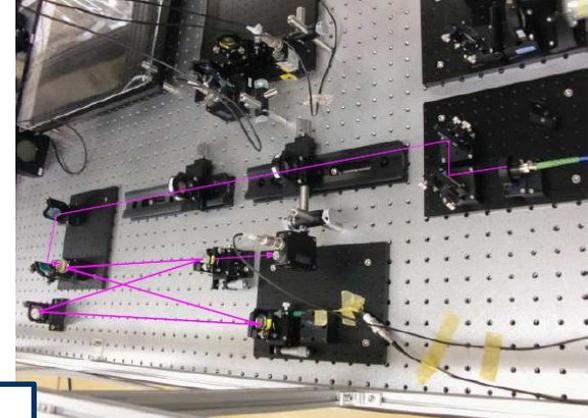
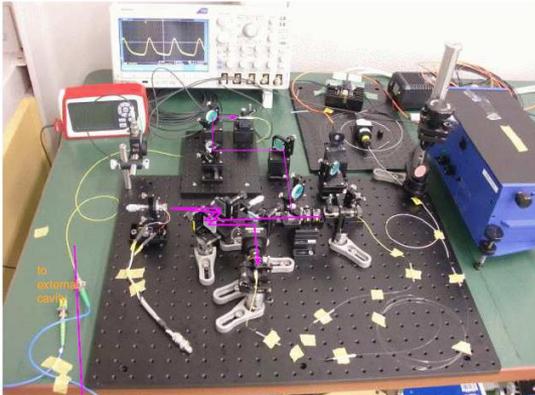
3次元4枚鏡光共振器は完成した。1.3GeV蓄積リング加速器に設置後、23MeV超高輝度ガンマ線生成実験を行った。一昨年、2枚鏡光共振器を使った実験では $2 \times 10^7$  Photons/secが実測された。鏡の反射率を99.7%から99.99%に上げ、衝突点におけるLaser waist sizeを $30 \mu\text{m}$ から $15 \mu\text{m}$ に絞った。2000倍のガンマ線強度増大と円偏光選択が高速で行えるのが特徴である。

透過光強度

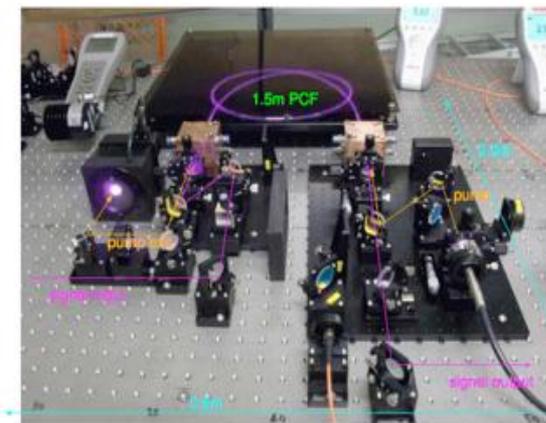
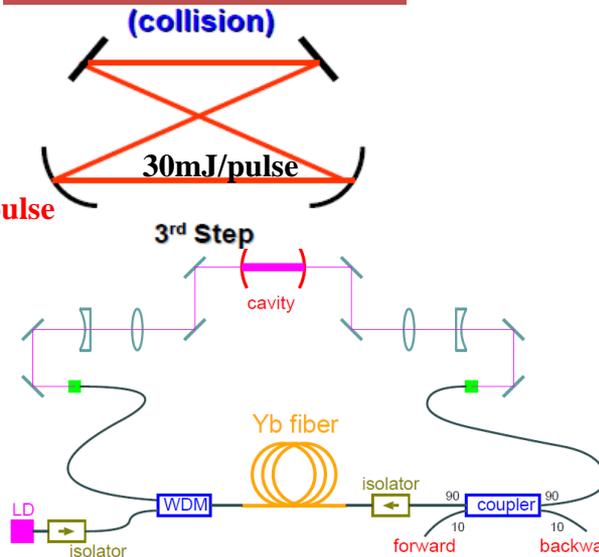
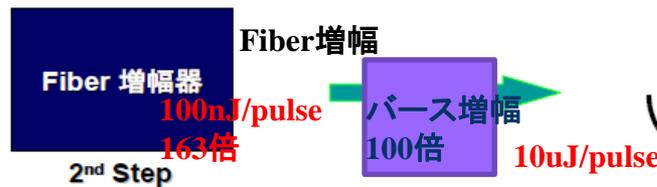
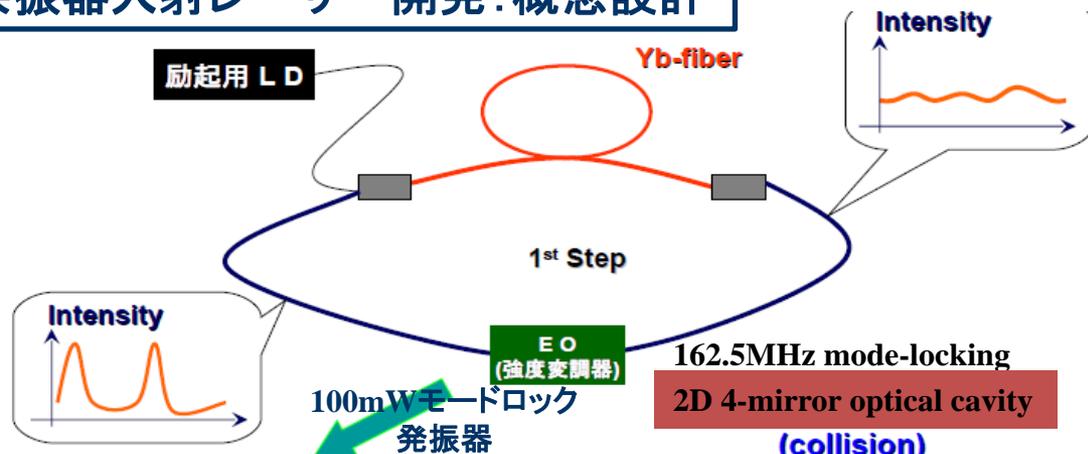
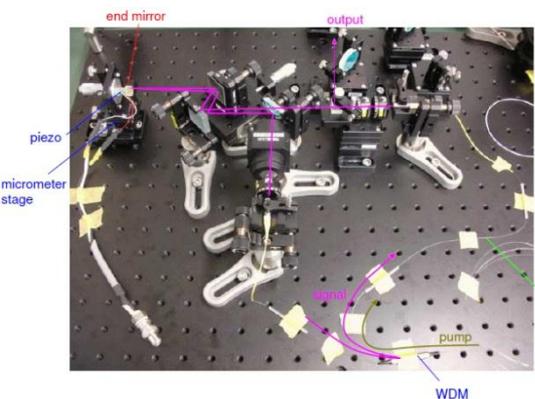


共振器長

More than 20,000 times



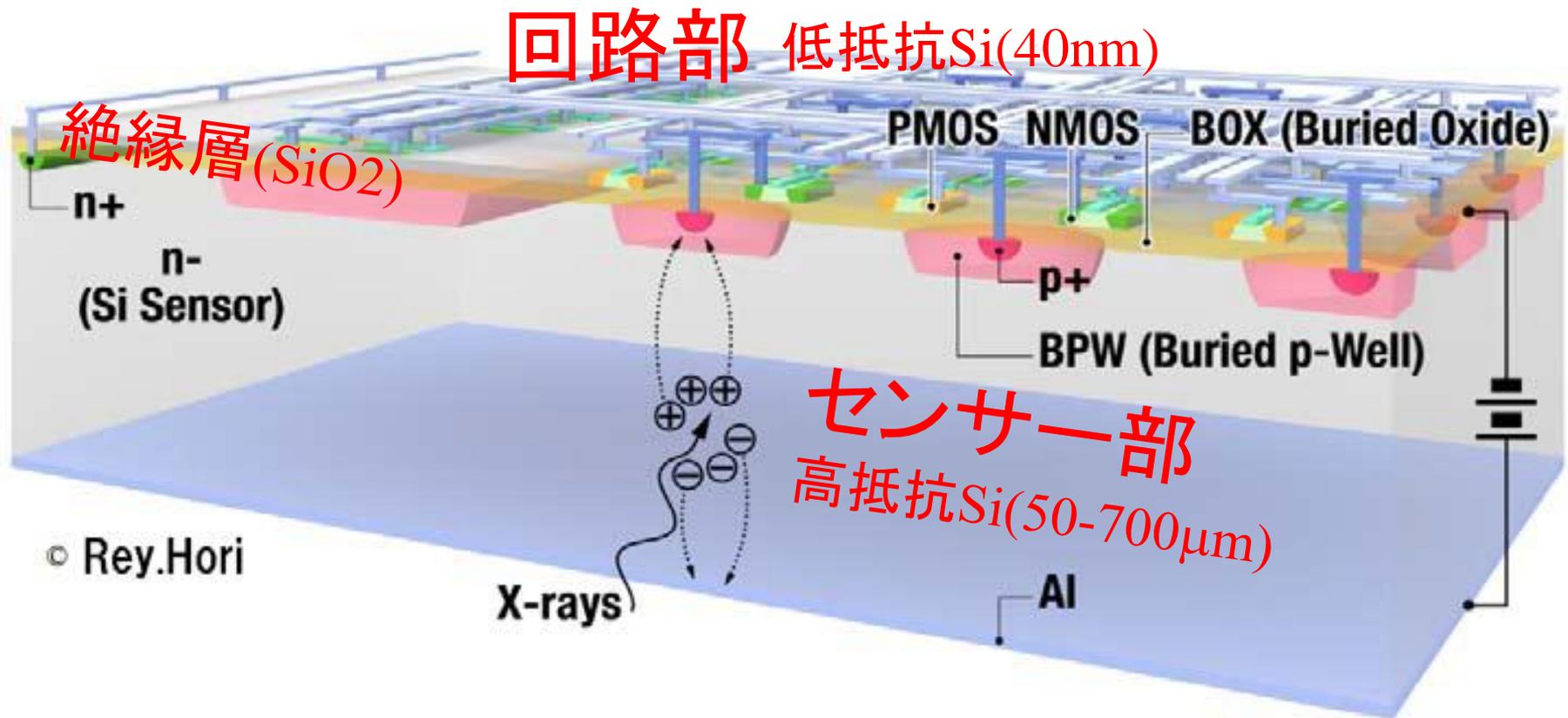
光共振器入射レーザー開発: 概念設計



数十W程度までのレーザー装置を開発したが今後改善しなければならない問題を残している。バーストモード運転ではピークパワー数kWが必要である。連続運転モードでは200Wを目標にしている。

# 高性能X線検出器の開発

SOI(Silicon On Insulator)技術によるピクセルセンサー



センサー・回路一体型

高ゲイン・高速・低消費電力・低コスト

# 本基盤技術開発の最終目標(2018年3月までに技術確立)。

両ビームの平均電流・平均パワーを究極まで上げる。安定マイクロビーム衝突。

1.3GHz連続バンチ供給が実現できるように超伝導技術開発を推進する。バンチ電荷量77pCを目標に開発を進める。200mA運転を目指したERL技術が必要。

モードロックレーザー発振器の繰返しを1.3GHz程度まで上げ、100nJ/pulse程度まで増幅する。この時のレーザーの平均パワーは、 $100\text{nJ} \times 1.3\text{GHz} = 130\text{W}$ である。

レーザーパルスを高反射率ミラーで閉じ込め蓄積する光共振器の増大率を30000倍とする。これによって、 $100\text{nJ} \times 30000 = 3\text{mJ/pulse}$ のレーザーが光共振器内で電子バンチと1.3GHzの繰返しで衝突する。

**$10^{14}$  photons/sec・1%bandwidth**程度のX線Fluxが小型加速器で生成。

## まとめ

加速器技術・レーザー技術の進展、何が理想的な技術？

平均パワーを上げる。衝突繰返しを上げる。357MHz→1.3GHz、超伝導加速技術。ピークパワーによる高反射率誘電多層膜ミラー破壊を避ける。

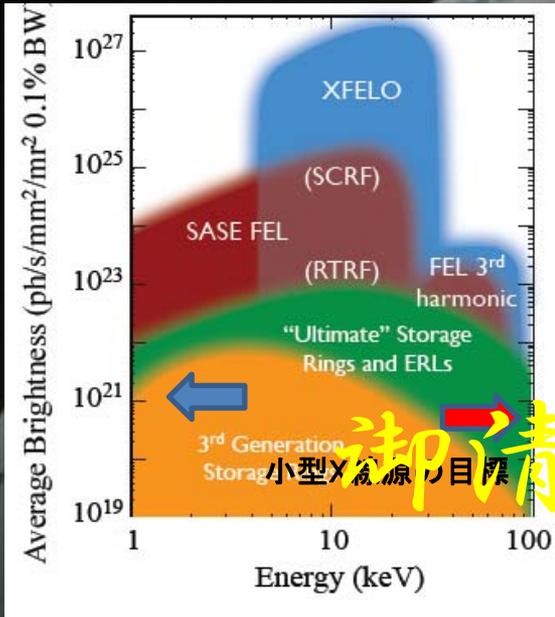
装置普及に必要な条件：

1. 大強度高品質ビーム(100mA)、極微小ビーム衝突の実現(5 $\mu\text{m}$ )、小型化(8mx6m)、
2. ターンキーオペレーション(自動運転フィードバック系の構築)、  
(インテグレーション制御システムの確立):ソフト及びハードの高信頼化が重要。
3. cERLとパルスレーザー蓄積装置の融合技術によるさらなる高性能化。

# もっと光を！

■ 微小ナノ領域をプローブする 強力な放射光

次世代放射光源 ERL、XFEL-O



御清聴、有難う御座いました。

■ 物質開発グループ・産業界との 緊密な協力体制

半導体技術、次世代エレクトロニクス技術 (CMOS、スピントロニクス、分子エレクトロニクス、DNAコンピュータ、フォトニクス、など)

環境・エネルギー利用技術 (太陽光発電、人工光合成、燃料電池、触媒開発、など)

生体機能利用技術 (創薬、新薬開発、医療診断、再生医療、バイオチップ、医療用マイクロロボットなど)

