
レーザーコンプトン散乱装置(産総研の装置)

酒井 文雄

住友重機械工業(株)

2007.7.9 PF研究会資料

フェムト秒テクノロジー研究(NEDOプロジェクト)

第1期1995(H7)-2000(H12)

第2期2001(H13)-2004(H16)

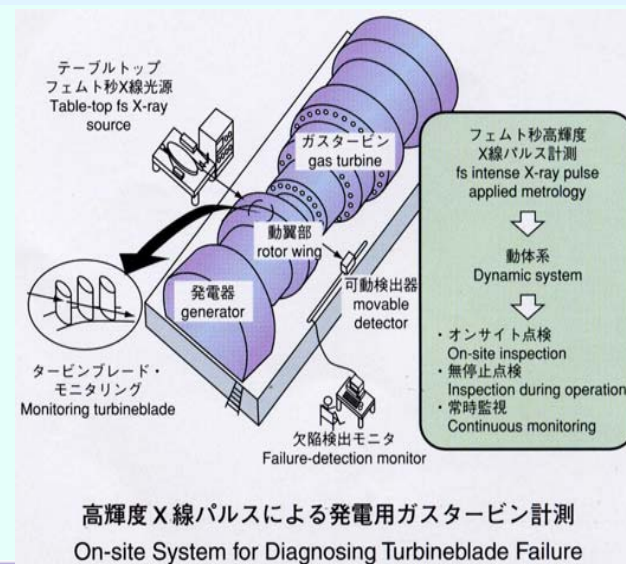
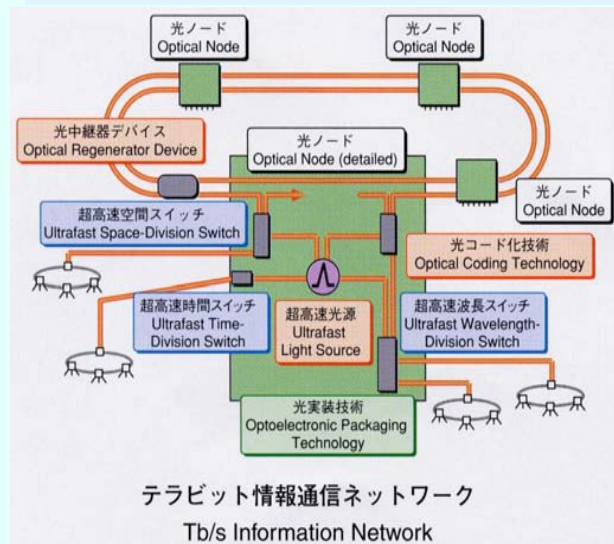
研究開発内容

(1) 超短パルス光エレクトロニクス技術の研究開発

超高速の物理現象、超微細プロセス技術、デバイス化技術
テラビット情報通信用の超高速光源・スイッチ等の光デバイスの開発
(NEC, 日立, 三菱電, 東芝, 松下, 富士ゼロックス, 富士通, パナソニック)

(2) 超短光パルス応用計測技術の研究開発

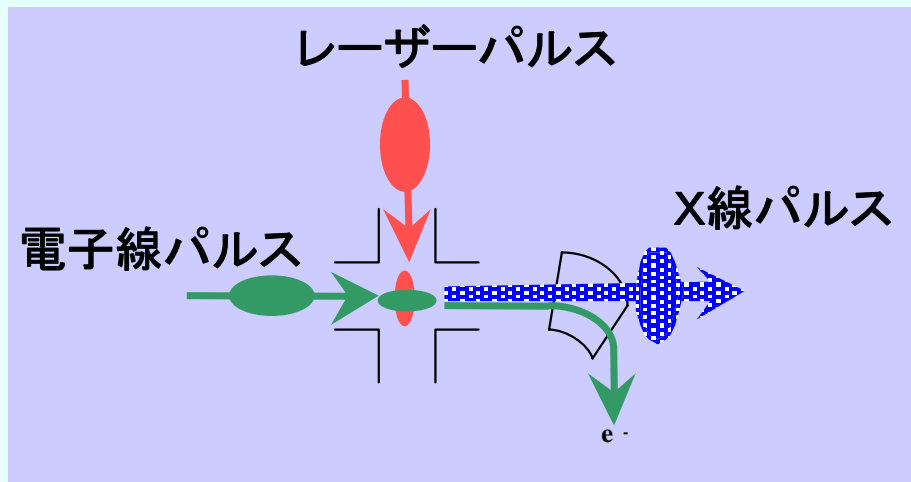
フェムト秒光パルスと高密度電子線パルスの衝突による高輝度X線パルス発生
超高速動体のモニタリング等に利用できる新計測技術の開発(住友重機械)



発表内容

1. レーザーコンプトン散乱によるX線発生
2. 発生装置
3. X線の利用例
4. 産総研の装置の現状
5. まとめ

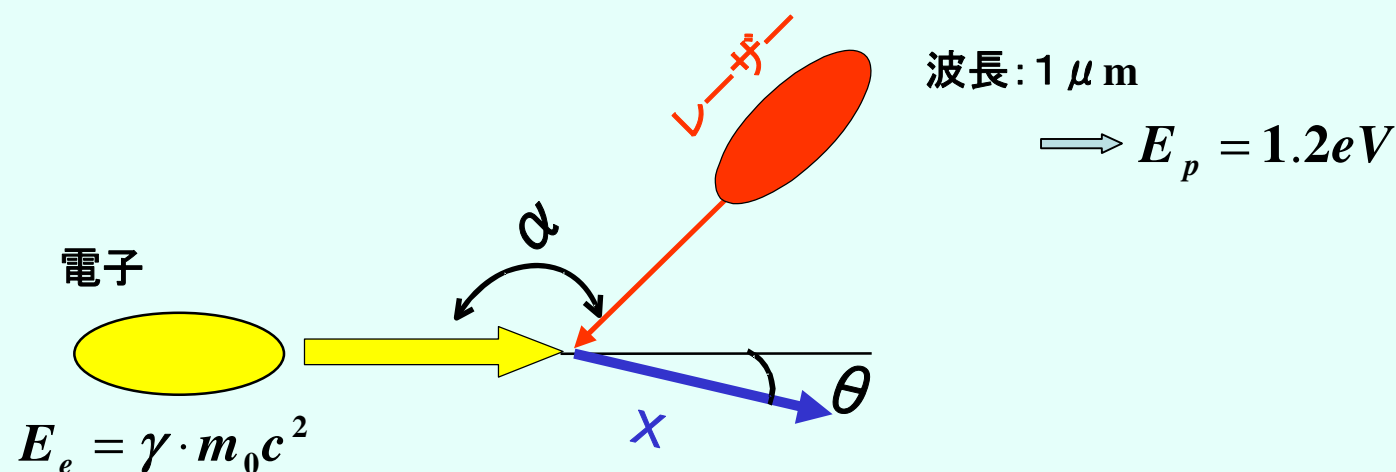
フェムト秒レーザーと電子線の衝突による フェムト秒高輝度X線発生



発生X線の特徴

1. 短パルス性
(数ps—数100fs)
2. 波長可変性
3. 準単色性
4. 指向性
5. 高偏極性
6. 装置のコンパクト性

発生X線の特徴 (エネルギーの可変性と準単色性)



・散乱X線のエネルギー ($\gamma m_0 c^2 \gg E_p$)

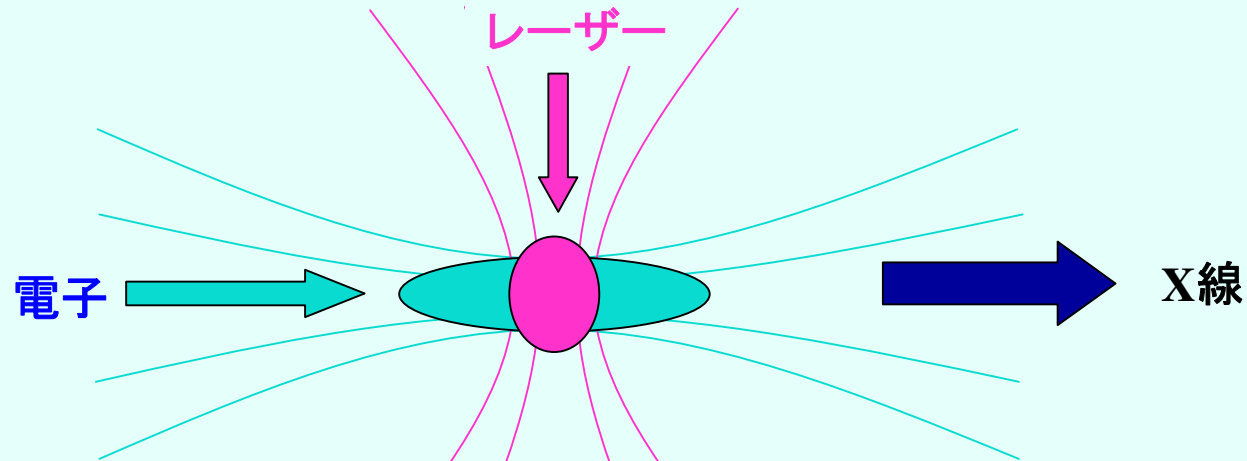
$$E_x = \frac{1 - \beta \cos \alpha}{1 - \beta \cos \theta} E_p$$

$\alpha=180^\circ$ 、 $\theta=0^\circ$ の時

$E_e=14\text{MeV} \rightarrow E_x=4.6\text{keV}$

$E_e=40\text{MeV} \rightarrow E_x=30\text{keV}$

発生X線の特徴(短パルス性)



- ・散乱X線のパルス幅は各々のパルスの相互作用時間
- ・90度での衝突

$$\sigma_{Xt} = \frac{\sigma_{Le}}{\sqrt{\sigma_{Le}^2 + \sigma_{We}^2 + \sigma_{Wp}^2 + \sigma_{Lp}^2}} \sqrt{\sigma_{We}^2 + \sigma_{Wp}^2 + \sigma_{Lp}^2} \approx \sqrt{\sigma_{We}^2 + \sigma_{Wp}^2 + \sigma_{Lp}^2}$$

(電子パルス幅は十分長い)

- ・180度での衝突 $\sigma_t = \sigma_{Le} + \frac{\sigma_{Le}}{4\gamma^2} \approx \sigma_{Le}$

主な技術開発項目

1. 発生X線量の増大

- ・発生するX線量は衝突する領域での電子と光子数の積(密度)に比例する

$$N_x \propto \rho_e \cdot \rho_p \cdot V$$



短パルス性と高収束(高品質)

- ・高輝度電子源の開発(フォトカソードRF電子銃)
- ・短パルス高輝度レーザーの開発(TWレーザー)

2. 安定的なX線の発生

- ・パルス幅は相互作用時間(衝突時間)である。電子線パルス幅が1ps以上あるため、90°での衝突によりフェムト秒X線を発生する。



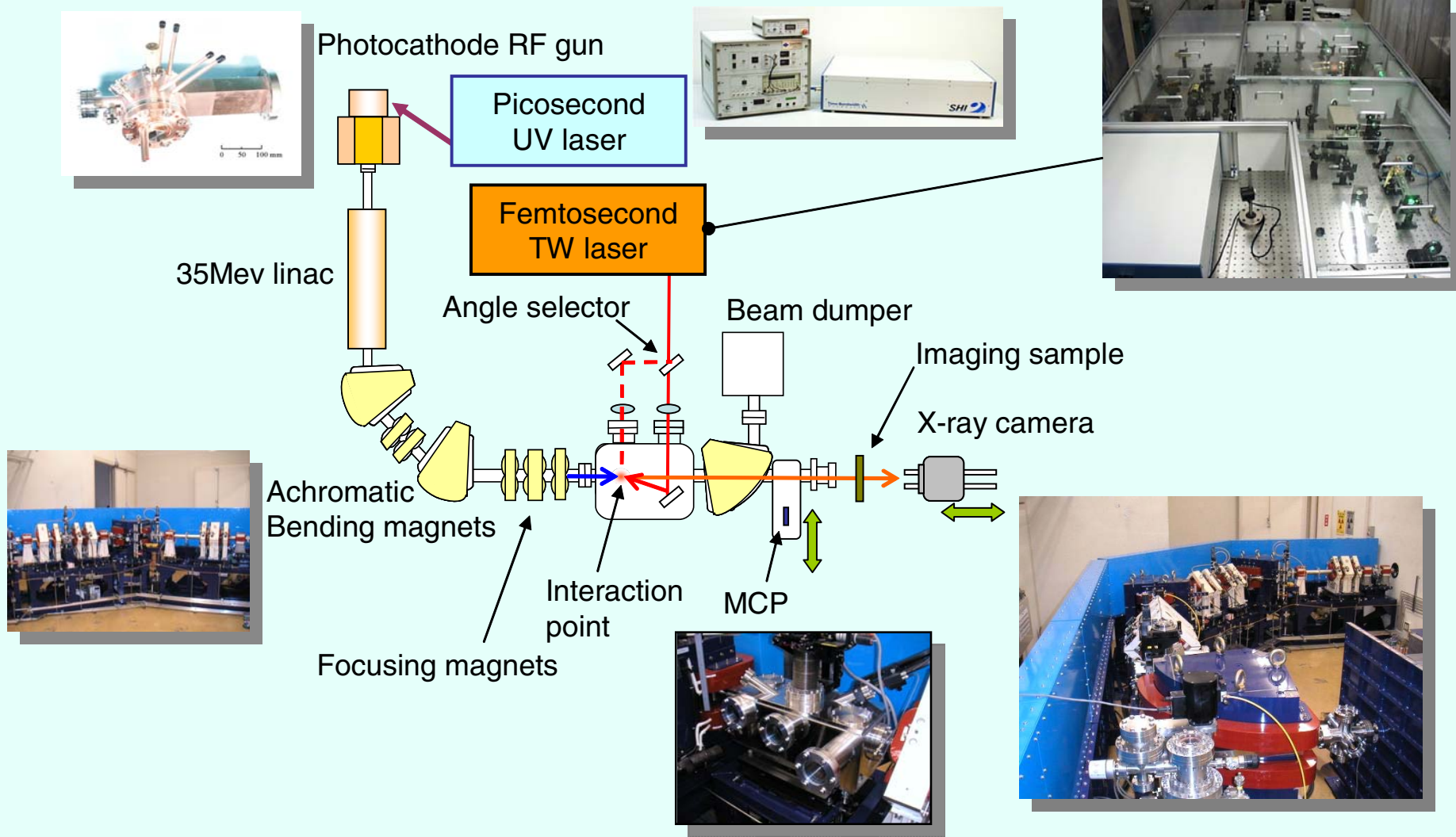
強度、空間、時間領域での安定

- ・フェムト秒領域での電子線とレーザーの同期技術の開発

発表内容

1. レーザーコンプトン散乱によるX線発生
2. 発生装置
(電子線、短パルスレーザー、同期系)
3. X線の利用例
4. 産総研の装置の現状
5. まとめ

X線発生システム



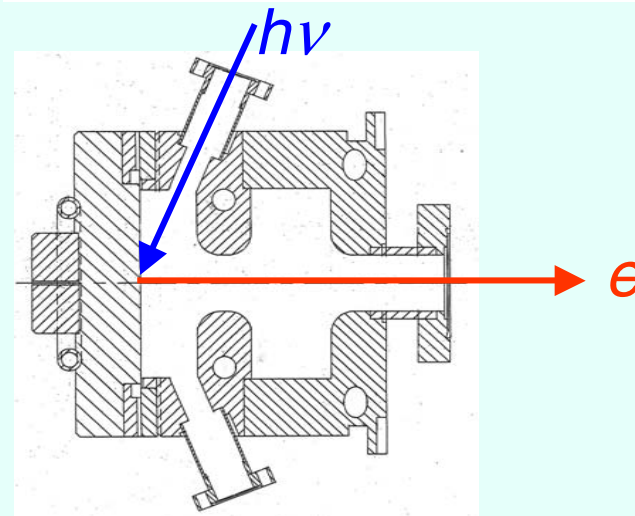
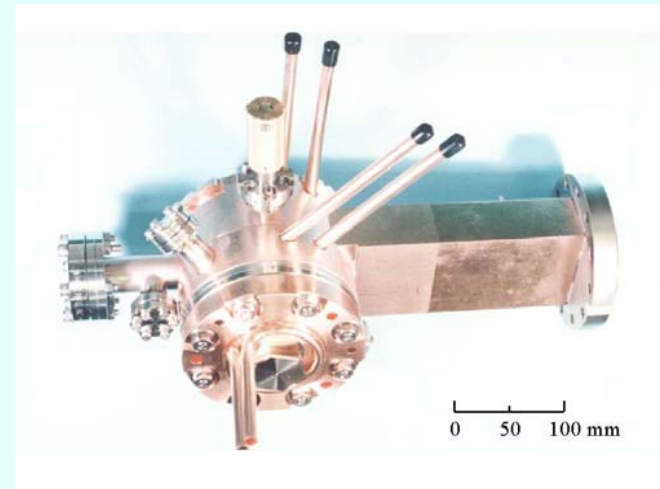
レーザーフォトカソードRF電子銃

本RF電子銃の主構造としては、無酸素銅で作られたS-バンド1.6セルとなっている。更にエミッタンス補正のため、高精度ソレノイド電磁石が取り付けられている。

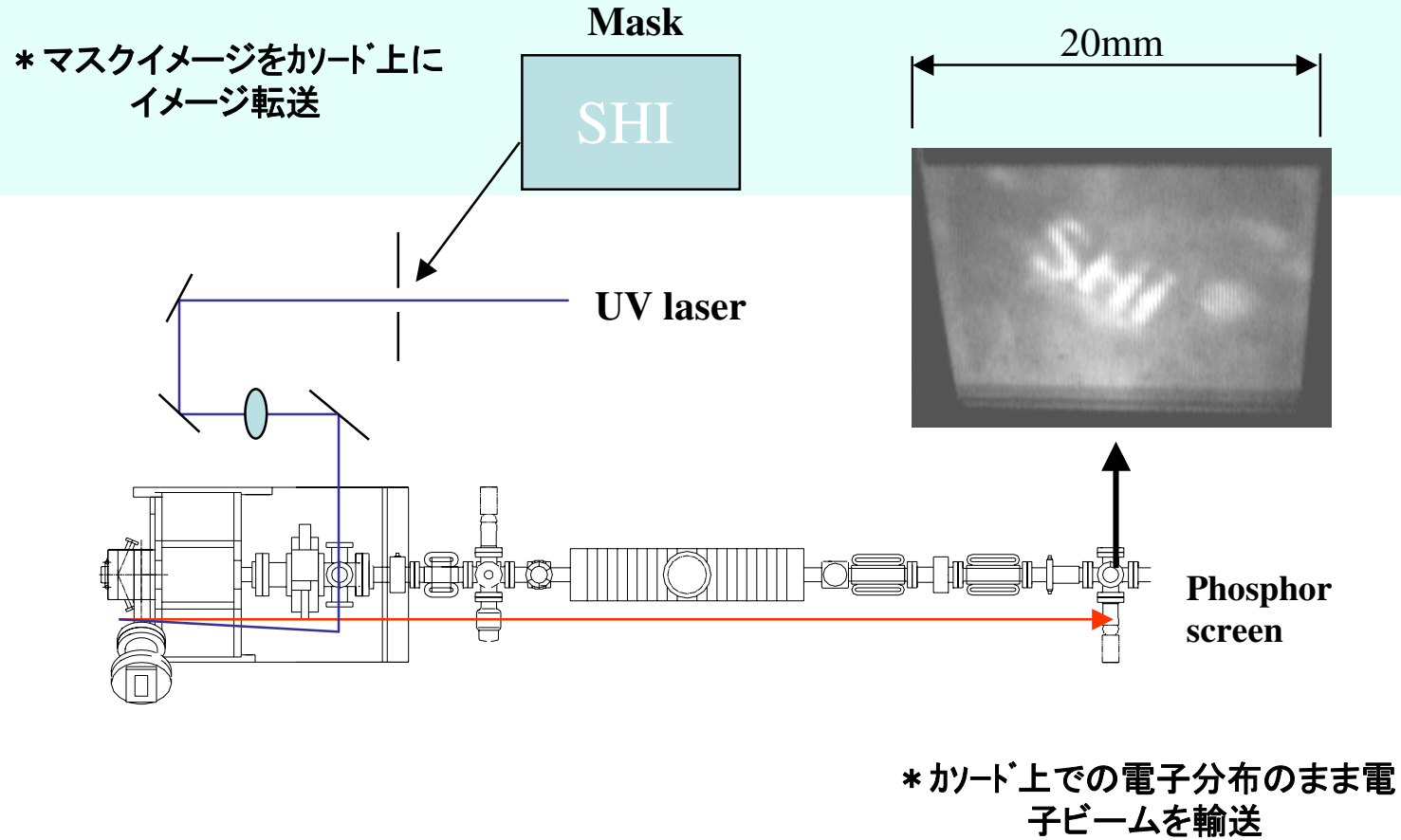
- ▮ コンプトンX線の発生
- ▮ 自由電子レーザー
- ▮ リニアコライダー
- ▮ 高速現象の動解析

主要仕様

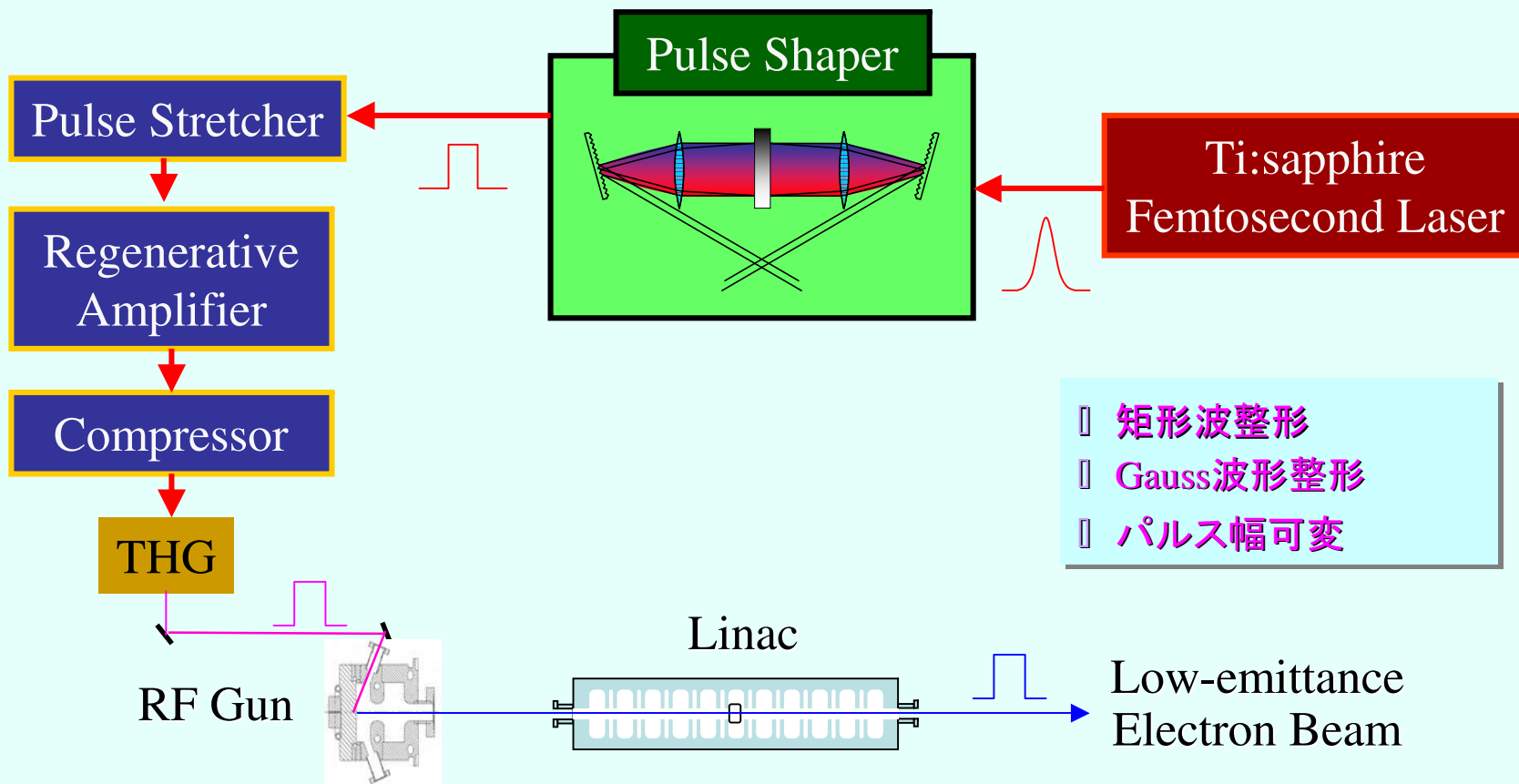
Electron energy	>3 MeV@6MW
Charge/pulse	>1 nC @100μJ laser pulse
Pulse length	3 ps @10ps laser pulse
Normalized emittance	<3 mm-mrad



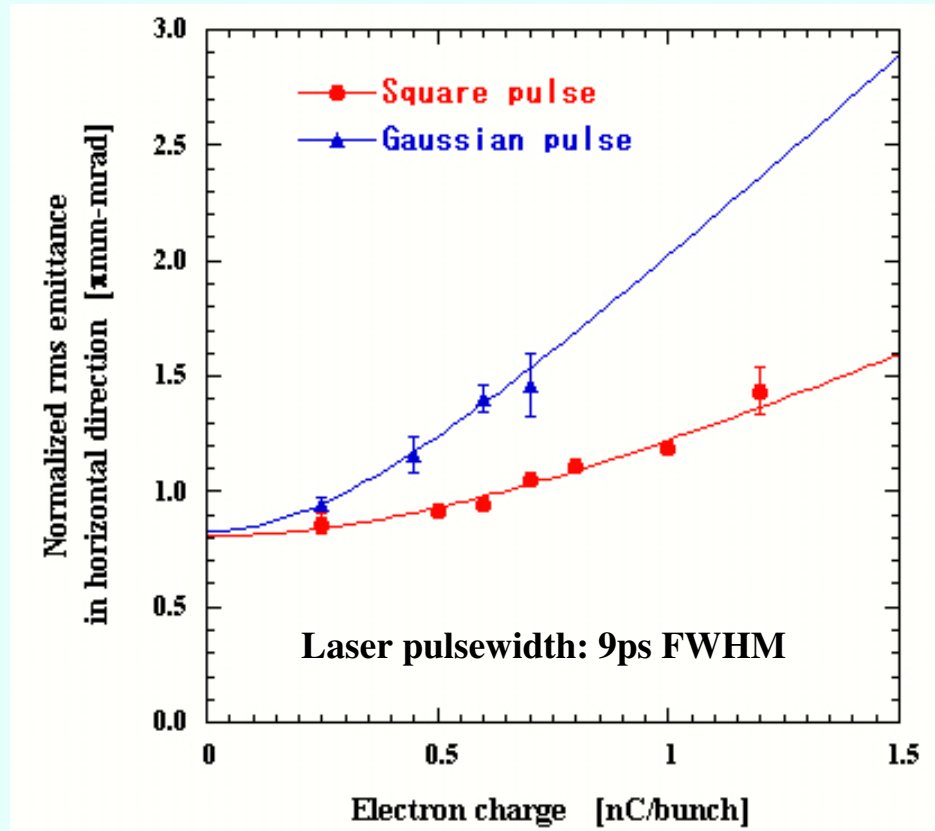
高品質電子ビーム(低エミッタンス)



レーザーパルス時間波形整形による低エミッタンス電子ビームの発生



エミッタンスの測定結果



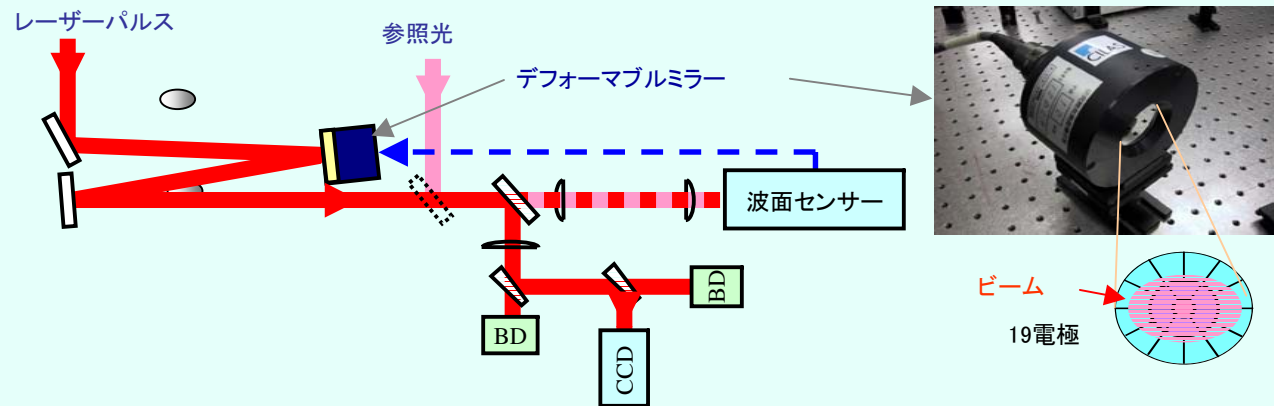
$$\varepsilon_n = \sqrt{(a' \cdot Q)^2 + b'^2}$$

	a'	$b' = \sqrt{\varepsilon_{rf}^2 + \varepsilon_{th}^2}$
	π mm-mrad/nC	π mm-mrad
Gaussian(9ps)	1.85\pm0.13	0.83\pm0.05
Square (9ps)	0.92\pm0.05	0.81\pm0.03

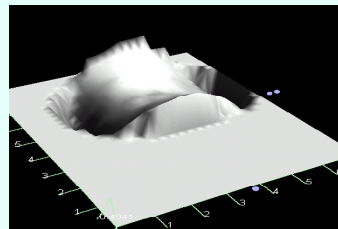
$$\varepsilon_{rf} \approx 0.6\pi \text{mm} - \text{mrad}$$

$$\varepsilon_{th} \approx 0.6\pi \text{mm} - \text{mrad}$$

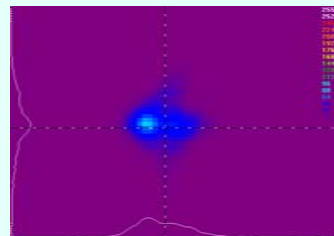
波面制御



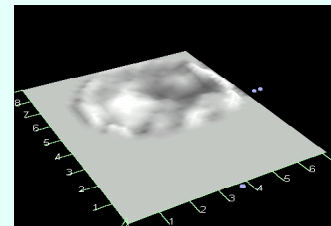
デフォーダブルミラーを用いた閉ループ(10Hz)波面補正



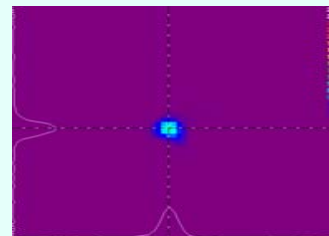
0.33λ@rms



補正前



0.05λ@rms



補正後

波面データ

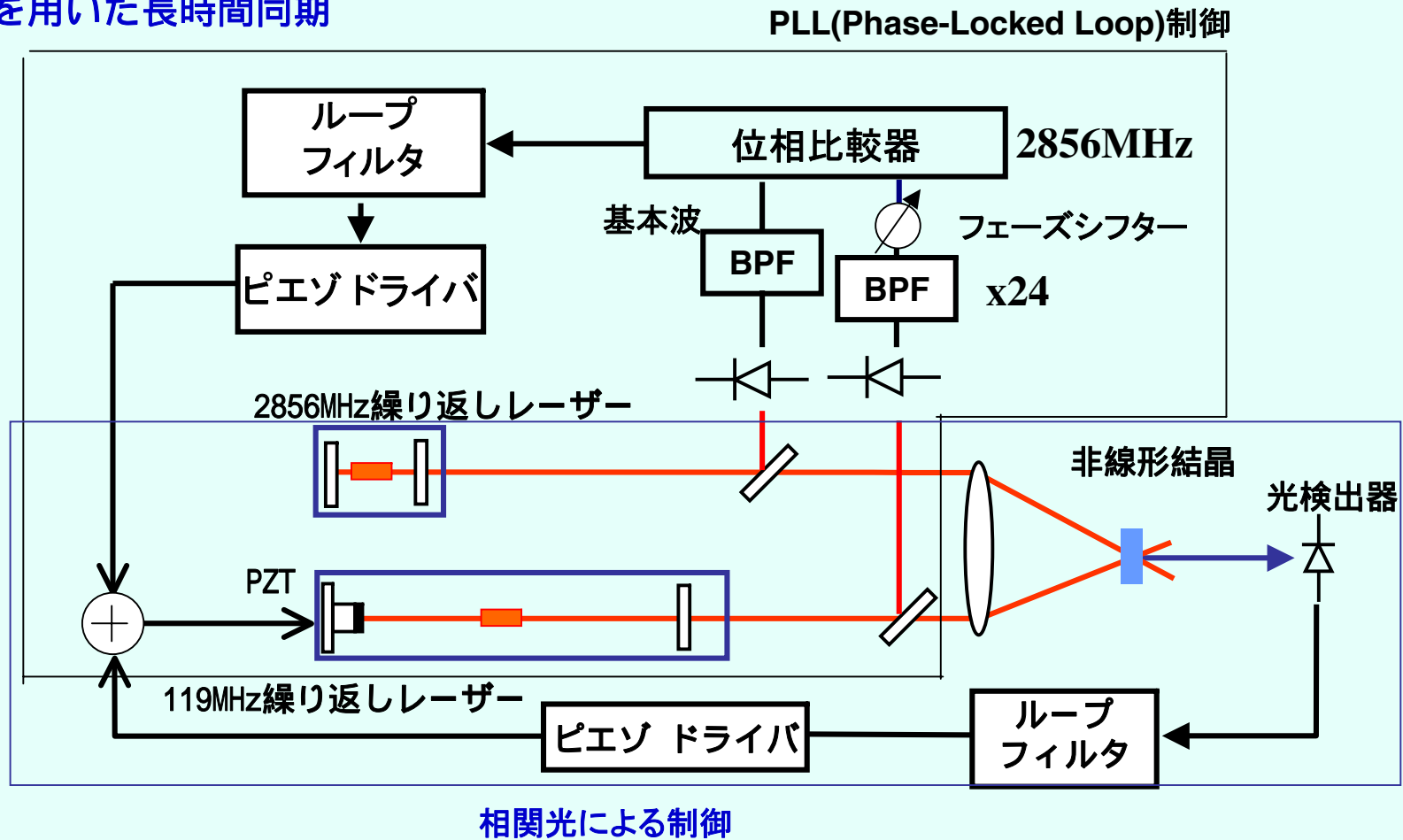
遠視野像

FESTA集中研究所

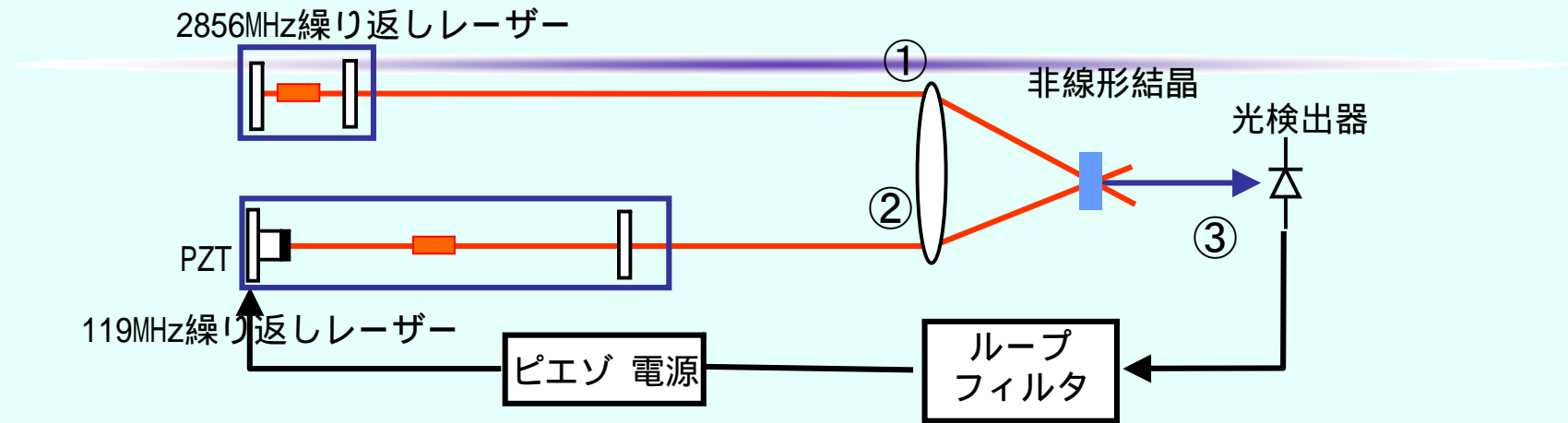
繰り返しの異なるレーザーの同期 PLL(Phase-Locked Loop)制御と相関光による制御の併用

1.高調波を用いた高精度同期(短時間)

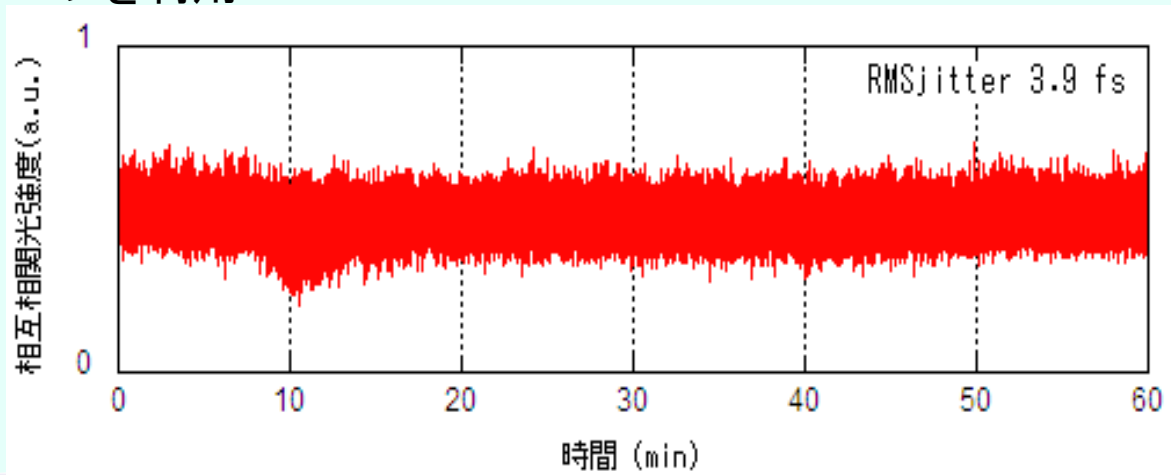
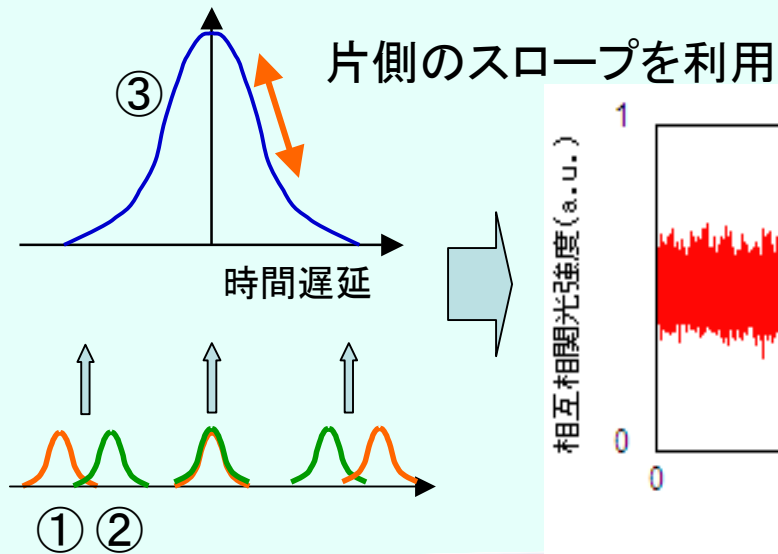
2.相関光を用いた長時間同期



相互相関光を用いたジッター評価

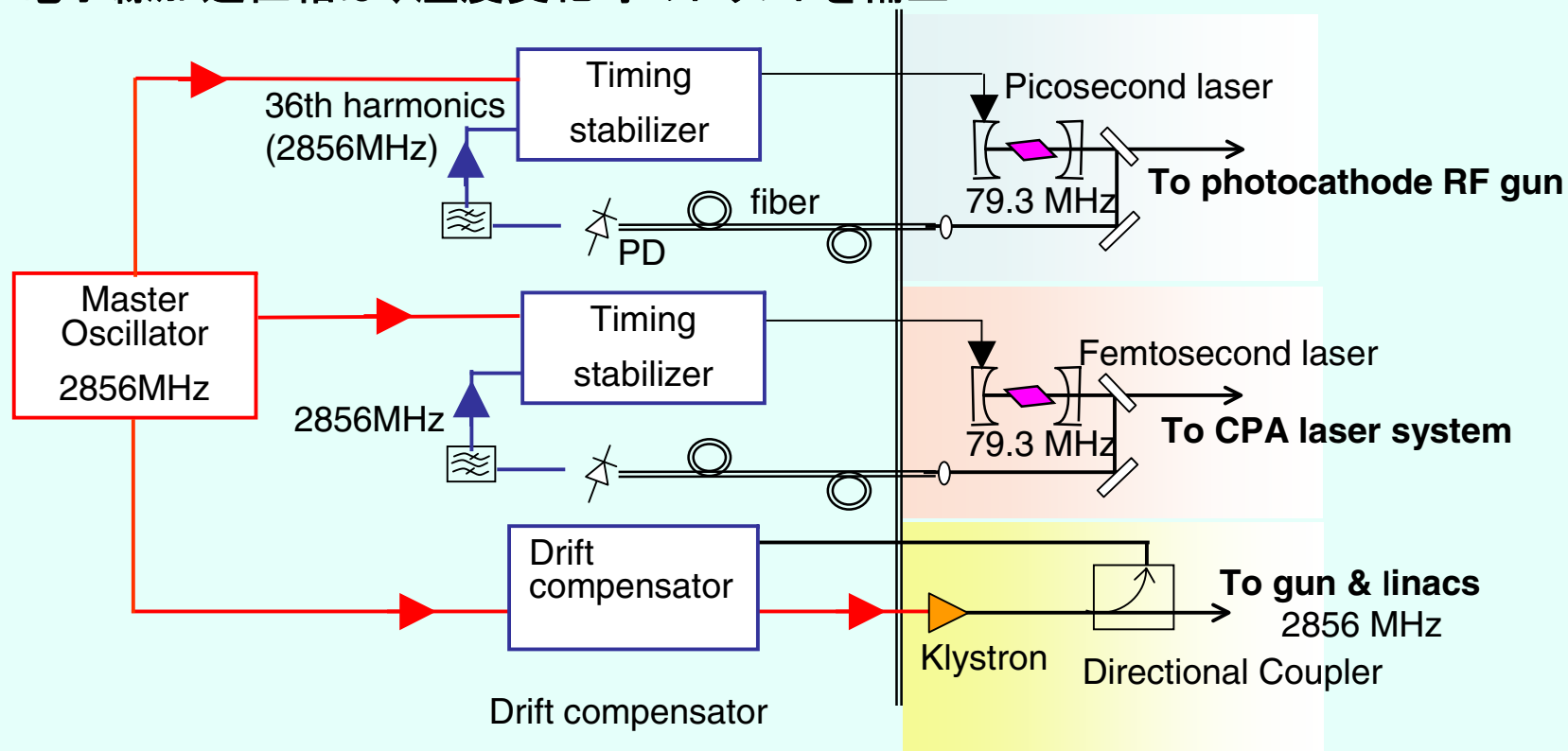


相関光強度プロファイル



低タイミングジッターの同期システム

- ・2台のレーザー発振器は繰り返し周波数(79.3MHz)の36倍高調波で基準周波数2856MHzに同期し、その差を10fsに制御 (Proceedings of SPIE, 5194, 149-156 (2003))
- ・電子線加速位相は、温度変化等のドリフトを補正



将来的には、レーザー、電子線、X線を利用して同期系の補正を行う

実験条件

・Electron parameters

Energy	38 MeV ($\sigma=0.2\%$)
Bunch charge	0.8 nC
Bunch width	3 ps (rms)
Beam size	30 - 50 μm (rms)
Normalized emittance	3 mm·mrad

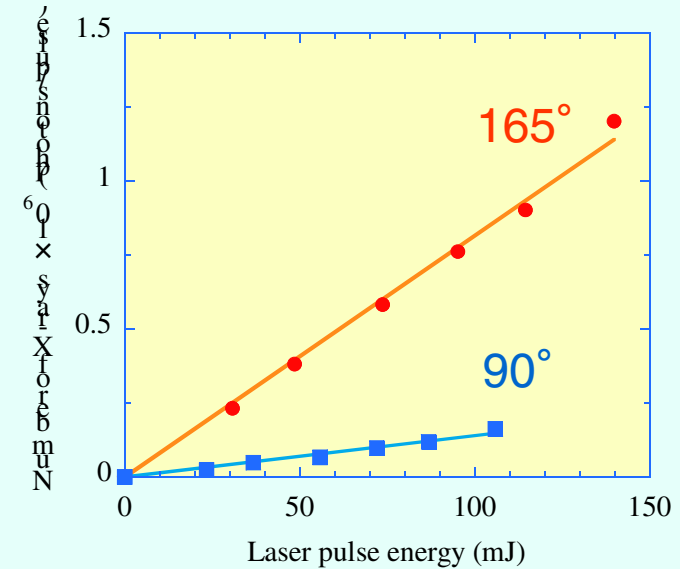
・Laser parameters

Pulse energy	200 mJ
Pulse width	50 fs (FWHM)
Wavelength	800 nm
Beam size	$\sim 10 \mu\text{m}$ (rms)
Interaction angle	90 $^{\circ}$, 165 $^{\circ}$

X線発生実験結果(I)—強度

Interaction angle	165 °	90 °
Energy*	34keV	17 keV
Number of total photons (photons/pulse)	2×10^6	5×10^5
Pulse width (rms)*	3 ps	150 fs
Repetition rate	10Hz	

* Calculated value



Laser energy vs. Number of X-ray photons

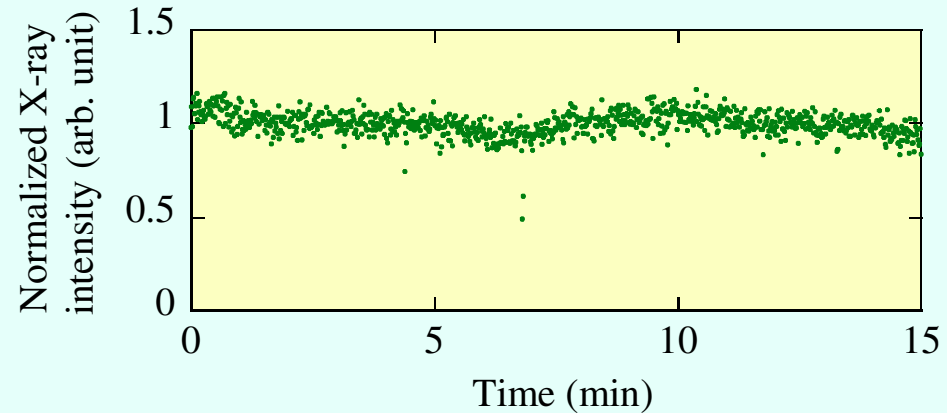
X線発生実験結果(I)—安定性

・Shot-to-shot の安定性 (15 min)

165 °

6% (rms)

(* Laser intensity 5%(rms))



90 °

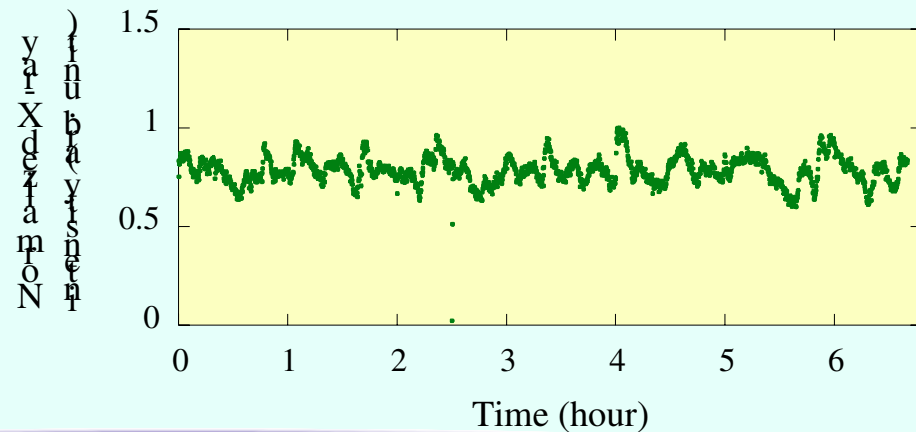
11% (rms)

・長時間での安定性 (7h)

90 °

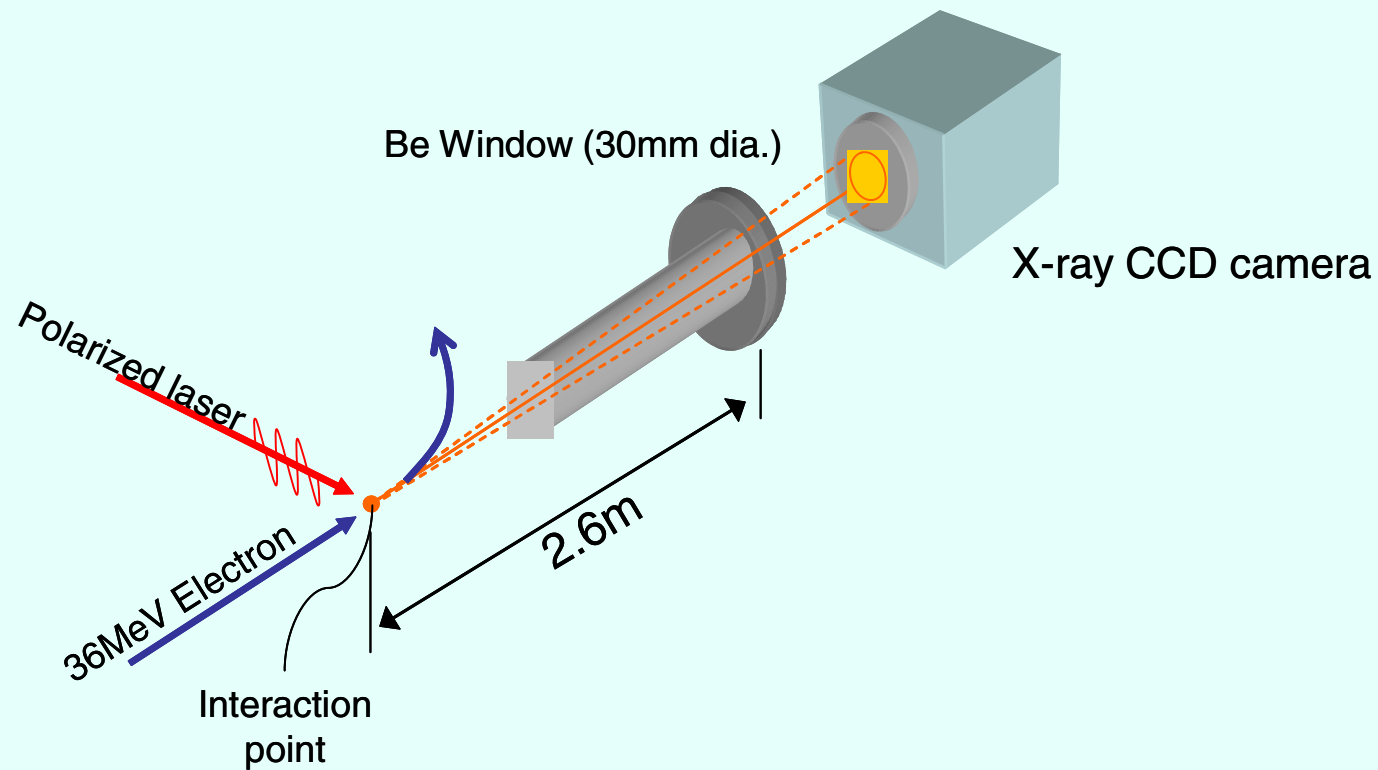
8 % (rms)

(10秒間(100pulses)の積算の変化)



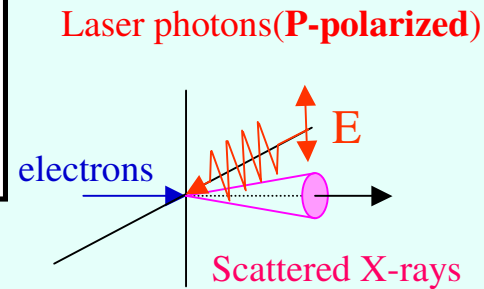
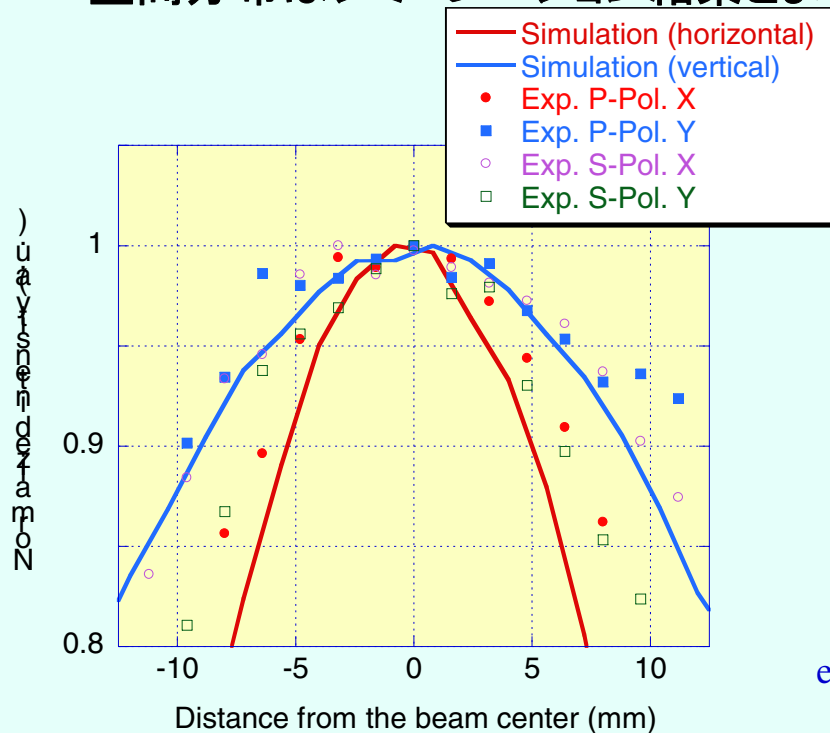
X線強度およびエネルギーの空間分布測定

- ・X線CCDカメラを用いたX線の強度およびエネルギーの空間分布の測定
- ・最大エネルギー: 15keV (36 MeV electron, 90° interaction)



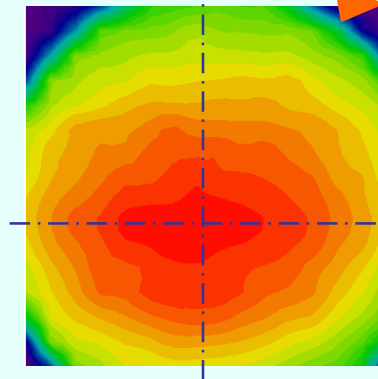
X-線強度の2D分布

- 空間分布は楕円形であり、その向きはレーザーの偏光向きに依存する
- 空間分布はシミュレーション結果とよく一致する

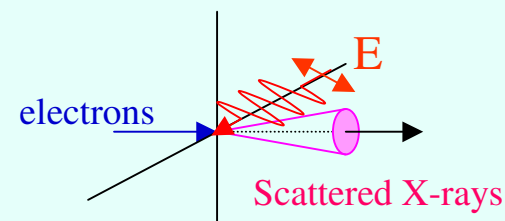


Aperture of the window

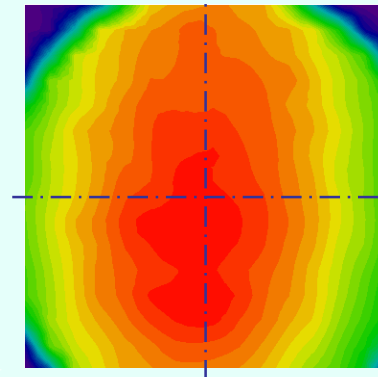
P-polarization



Laser photons (S-polarized)

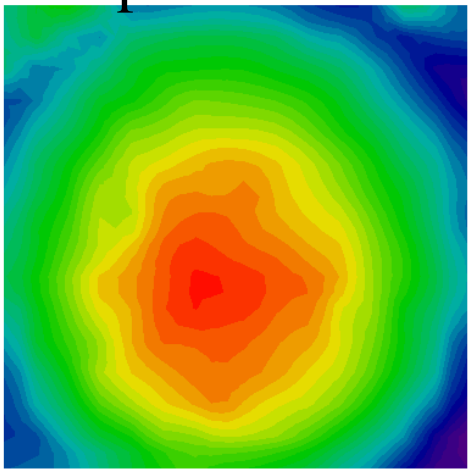


S-polarization

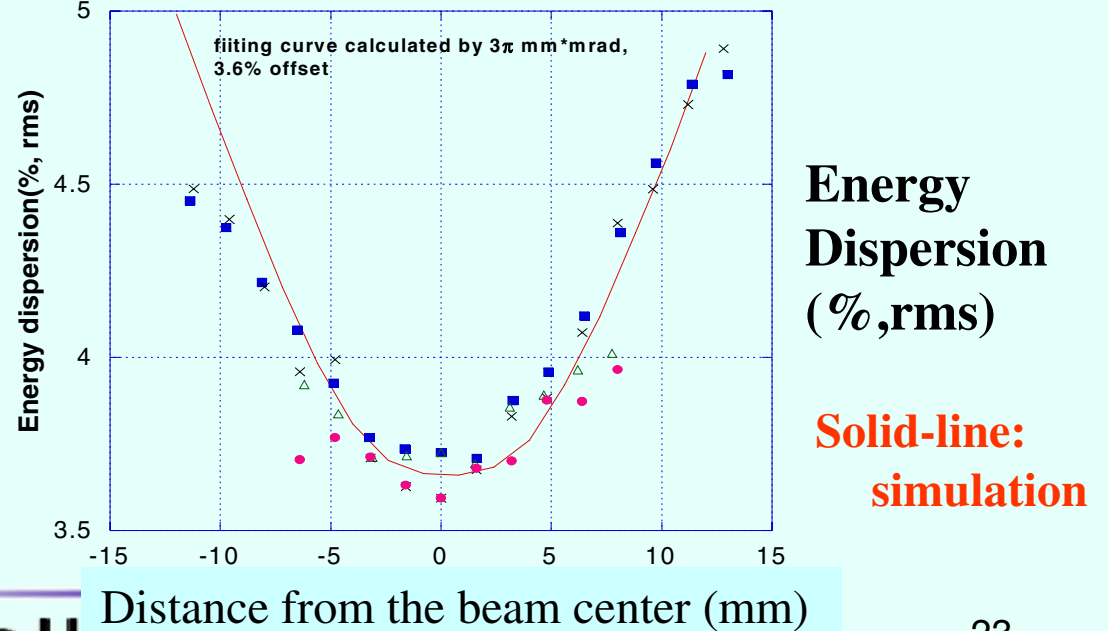
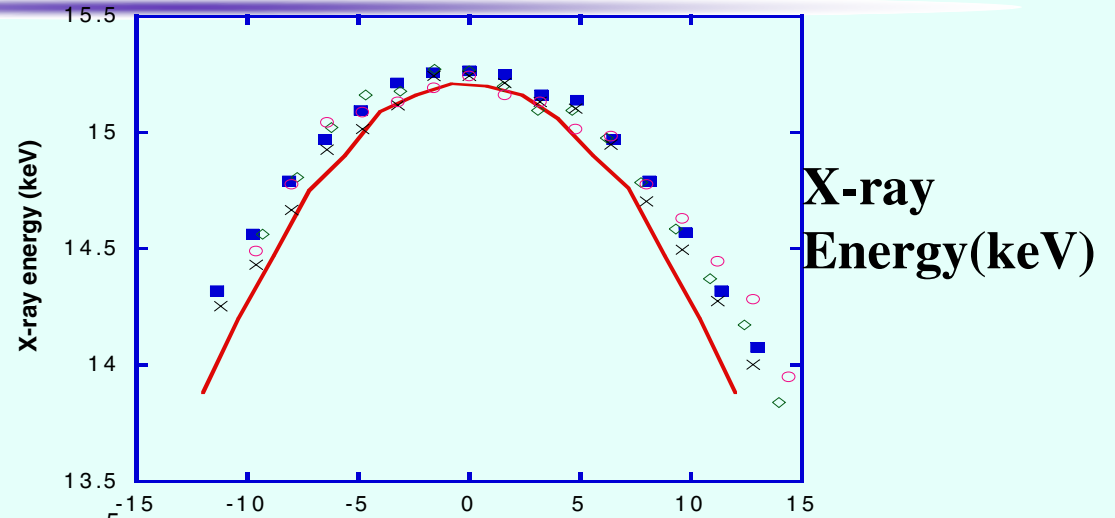
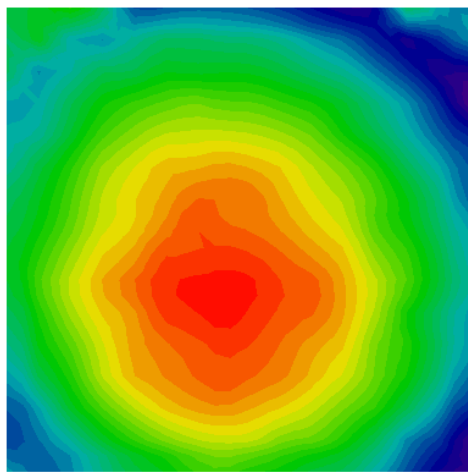


X-線エネルギーの2D分布

S-polarization



P-polarization



Distance from the beam center (mm)

発表内容

1. レーザーコンプトン散乱によるX線発生
2. 発生装置
3. X線の利用例
(動解析、イメージング)
4. 産総研の装置の現状
5. まとめ

フェムト秒での構造変化の時分割測定

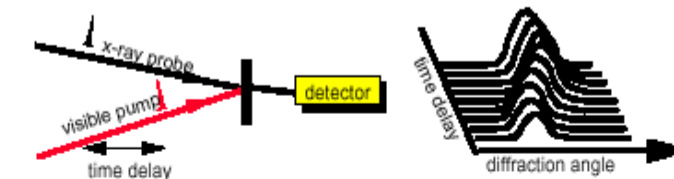
(Lawrence Berkeley National Lab.より)

Structural Dynamics in Condensed Matter

fundamental time scale for atomic motion
vibrational period: $T_{\text{vib}} \sim 100$ fs

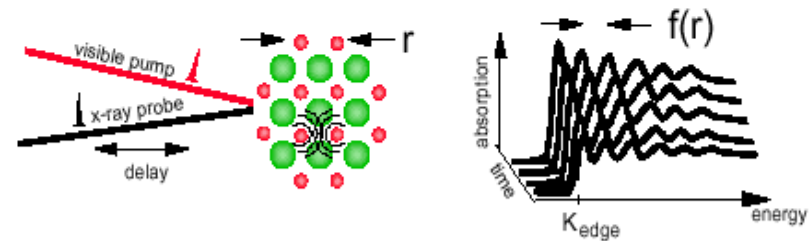
- ultrafast chemical reactions
- ultrafast phase transitions
- surface dynamics
- ultrafast biological processes

time-resolved x-ray diffraction



ordered crystals - phase transitions, coherent phonons

time-resolved EXAFS, NEXAFS, surface EXAFS

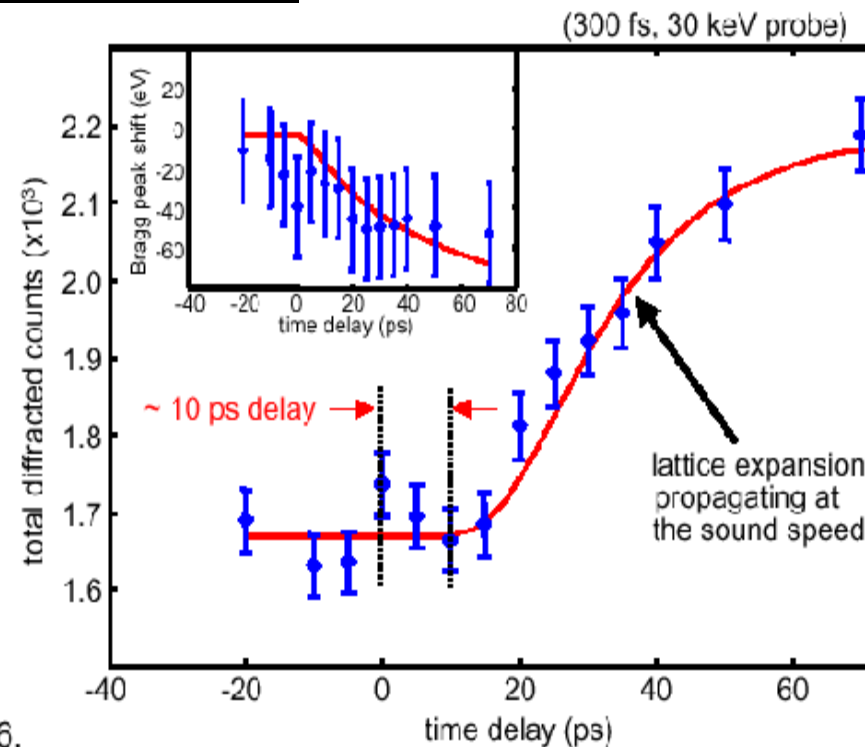
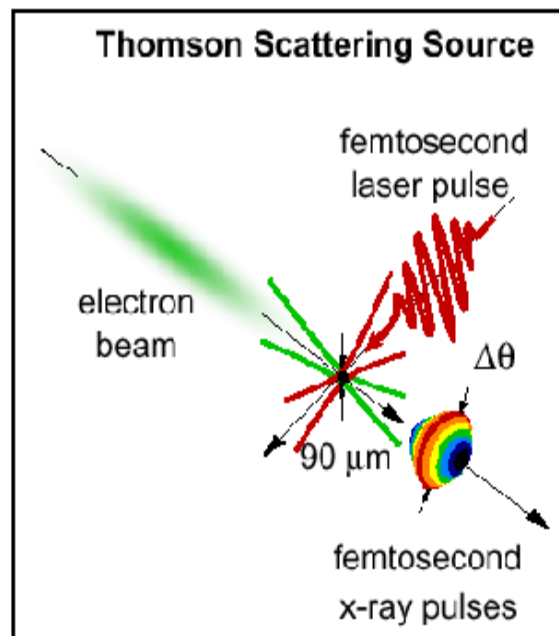


complex/disordered materials - chemical reactions
surface dynamics
bonding geometry

レーザーコンプトン散乱によるフェムト秒X線を用いた測定例

(Lawrence Berkeley National Lab.)

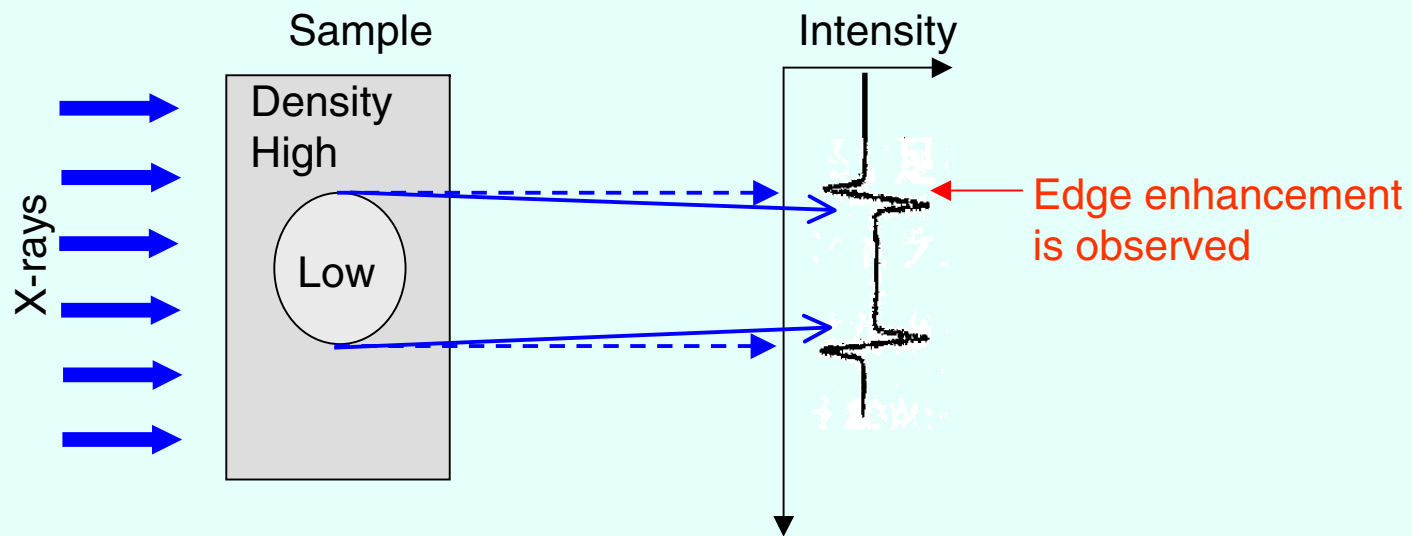
Laser Heated InSb

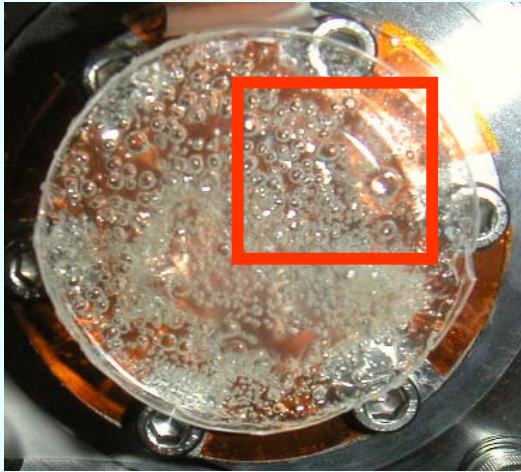


Leemans et al., *Phys. Rev. Lett.*, 1996.
Schoenlein et al., *Science*, 1996.

屈折コントラストイメージング

- ・従来の吸収コントラストと比較して、異なった屈折率の物質の境界が強調される
- ・光源には高い空間コヒーレントが要求される

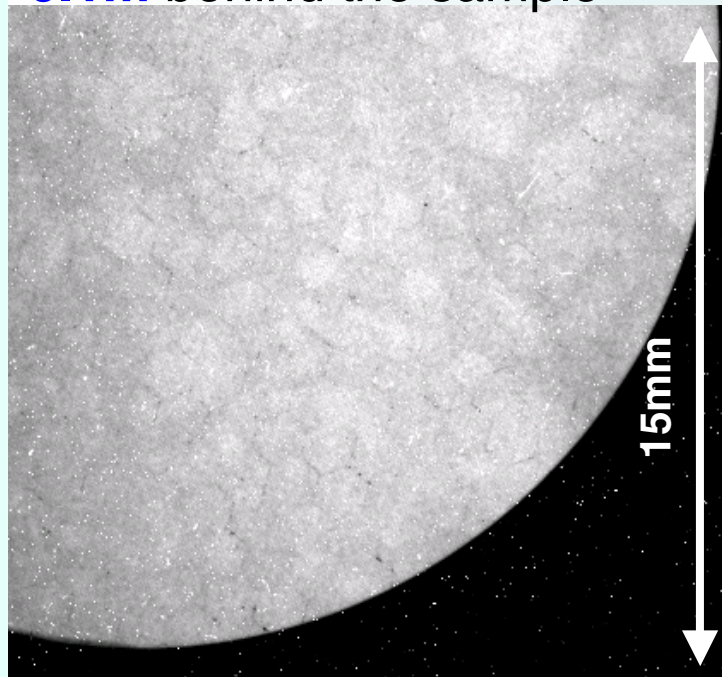




屈折コントラストの測定例

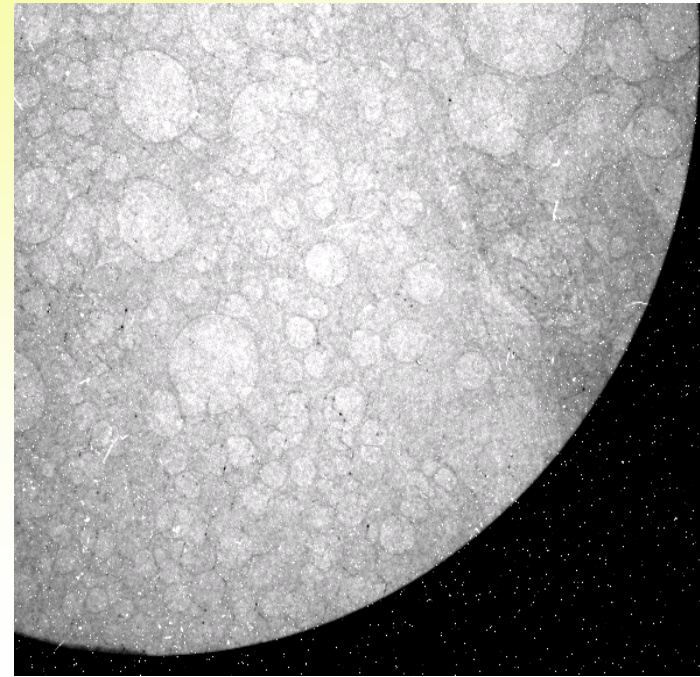
- ・接着剤中の気泡
- ・X線エネルギー：17keV

CCD images at
0.1m behind the sample



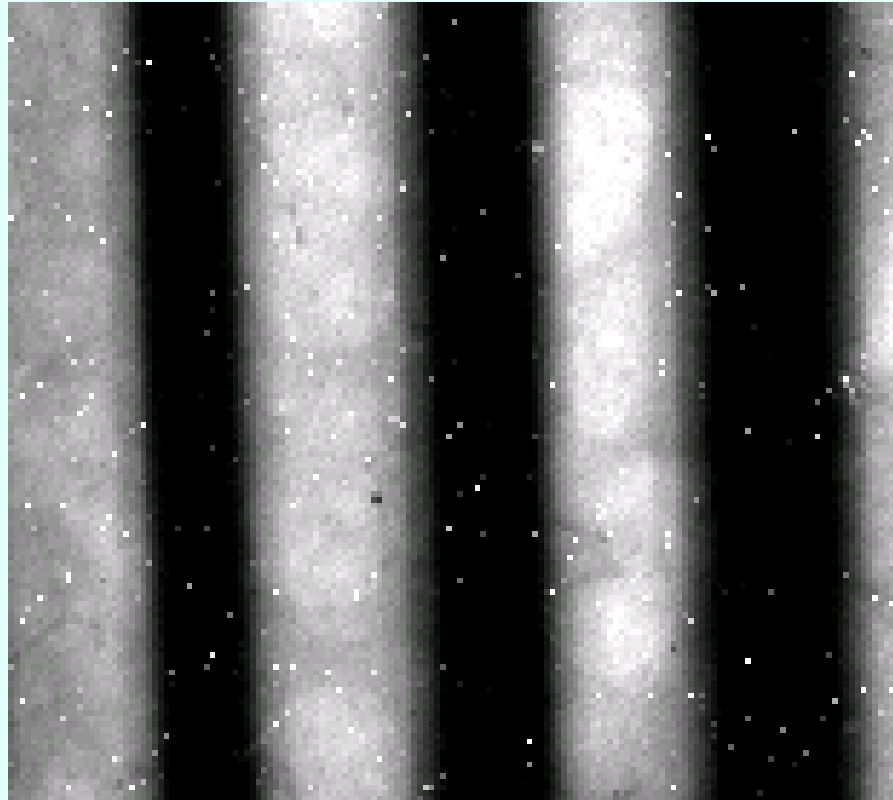
Edge enhancement is observed.

1m

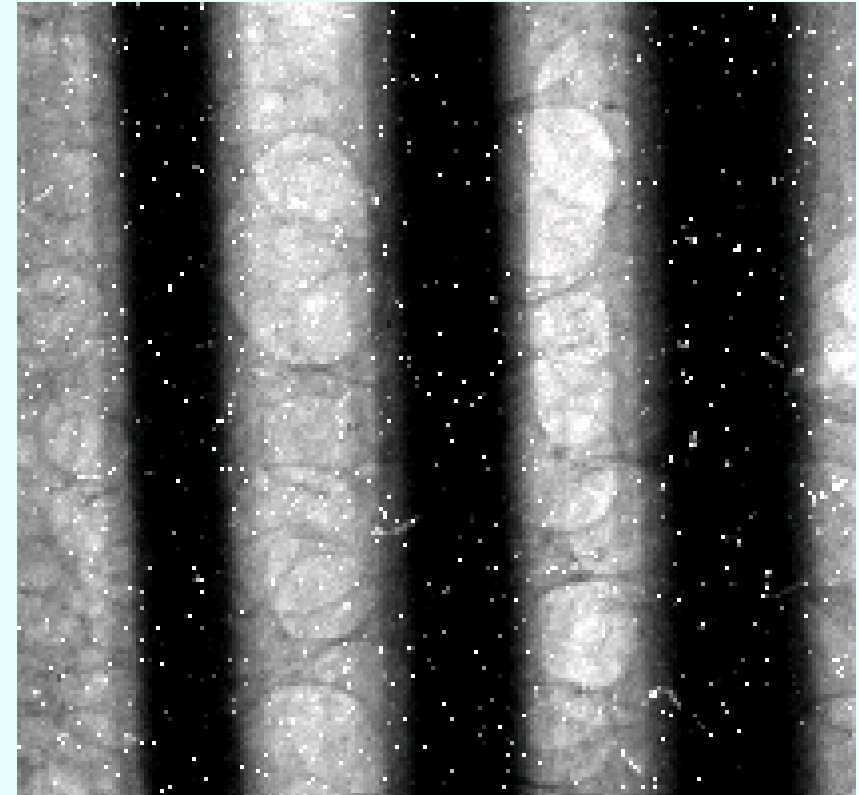


接着剤中の気泡の屈折コントラスト(2)

ファイバー
1mm



13cm離れたところでの像

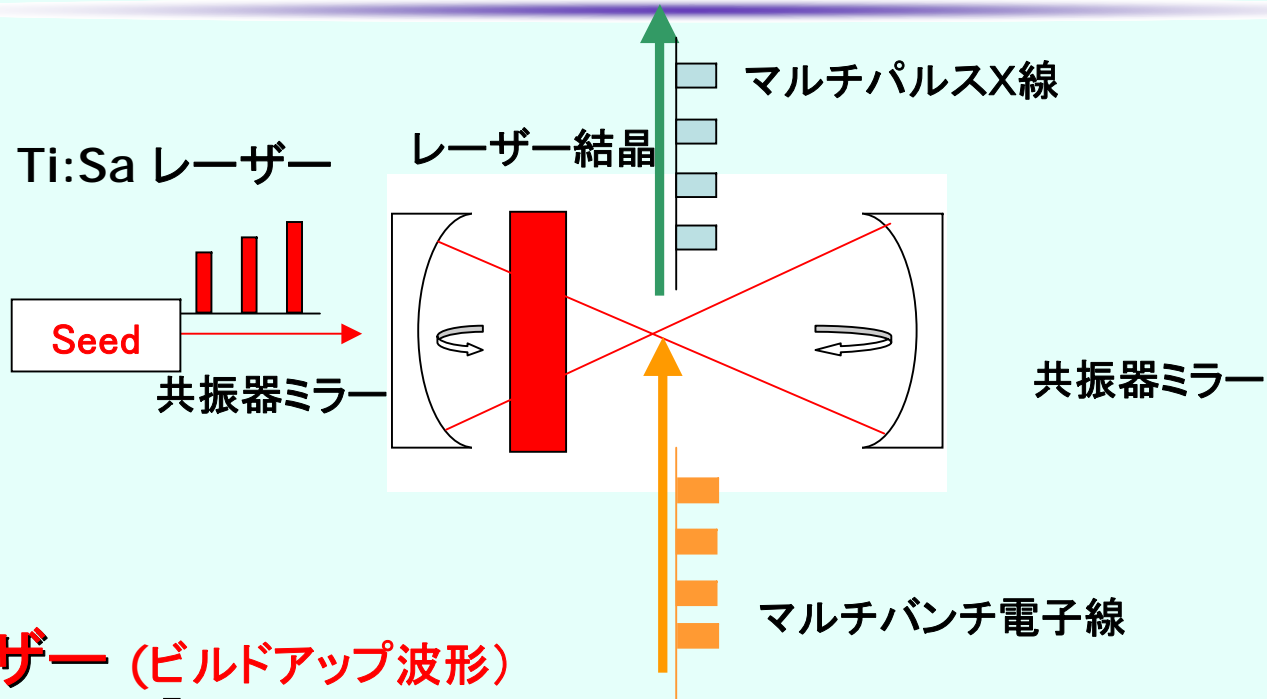


1.1m離れたところでの像

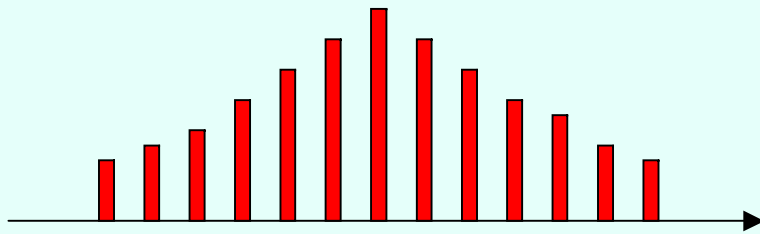
発表内容

1. レーザーコンプトン散乱によるX線発生
2. 発生装置
3. X線の利用例
(動解析、イメージング)
4. 産総研の装置の現状
(平均X線量増大のための開発)
5. まとめ

マルチ衝突レーザー開発



レーザー (ビルドアップ波形)



電子ビーム



共振器長: 5.7 m (3本seed)、7.6 m (4本) 9.5 m (5本)

レーザー波長: 800nm

レーザー出力: 平均100 mJ × 100 pulse (total 10J)

レーザーパルス幅: 10 ps ~ 20 ps

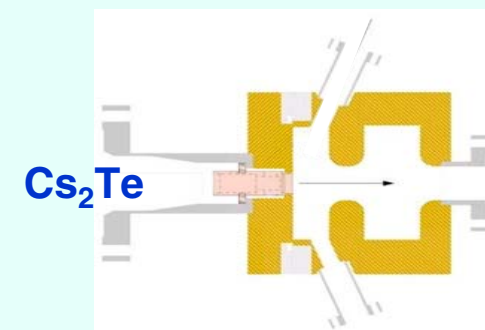
レーザースポットサイズ: 40 ~ 50 μm

LCS硬X線発生装置アップグレードについて

1. マルチバンチ電子ビーム生成

- フォトカソード用マルチパルスレーザーの開発
- 半導体フォトカソード(Cs_2Te) ロードロックシステムの開発

2. マルチ衝突レーザーの開発

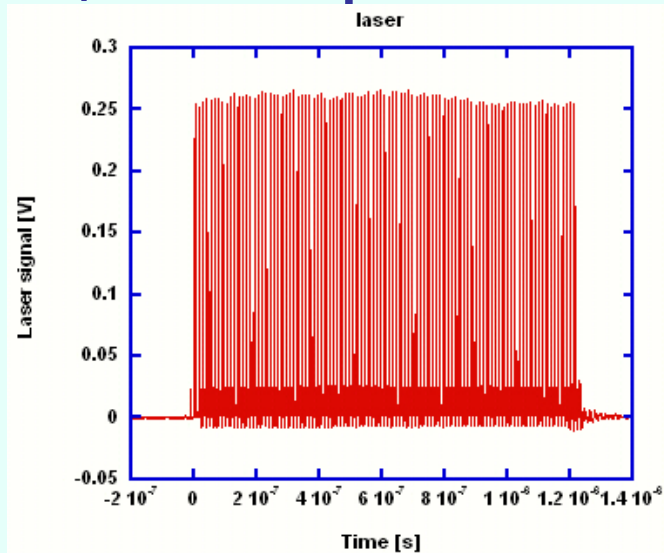


LCS硬X線の2桁以上の収量増加を目指す → 10^9 photon/s (全エネルギー)

マルチバンチ電子ビーム生成

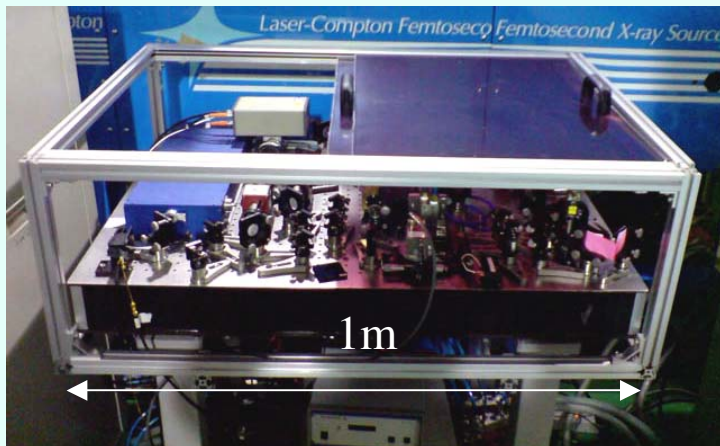
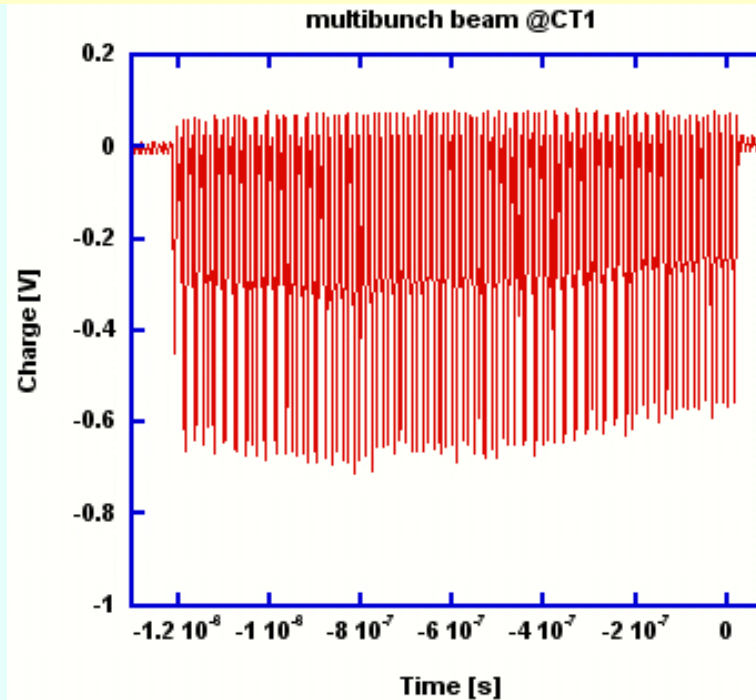
小型全固体マルチパルスレーザー

- $8 \mu\text{J} \times 100 \text{ pulse/ macro pulse@UV}$



マルチバンチ電子ビームの現状 (Mgカソード)

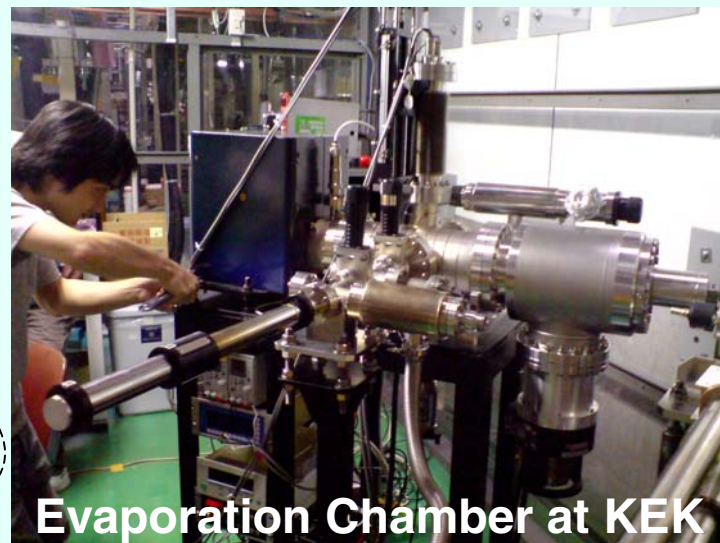
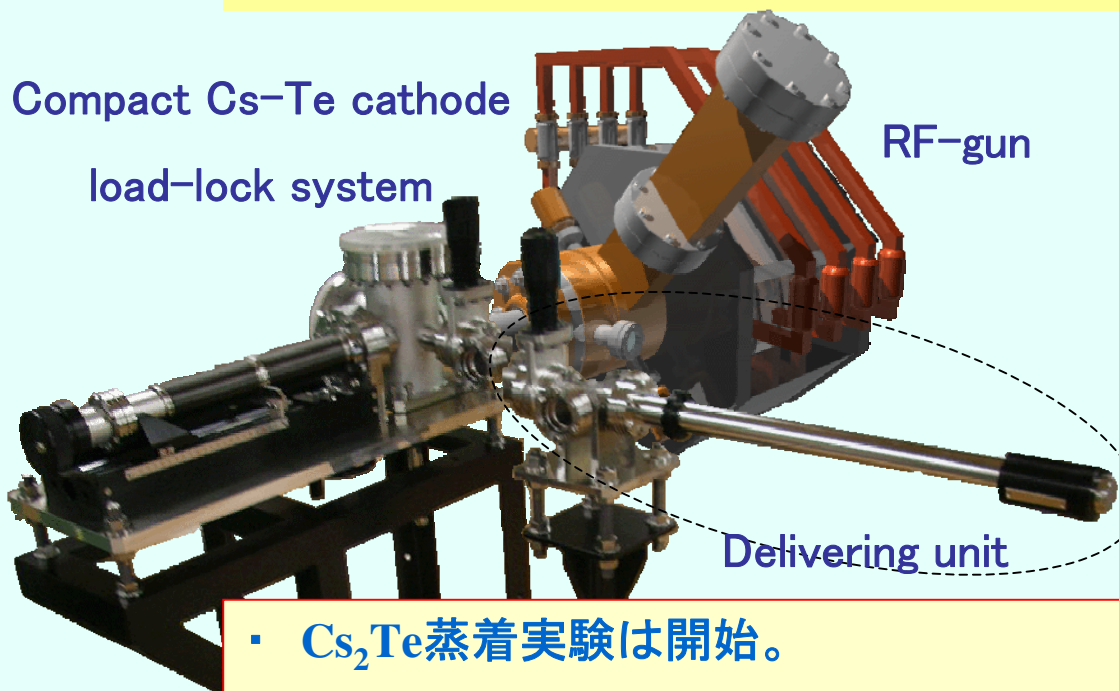
- $0.6 \text{ nC} \times 100 \text{ bunch/ macro pulse}$



半導体(Cs_2Te) カソードロードロックシステム

Development of compact load-lock system for multi-bunch electron beam generation

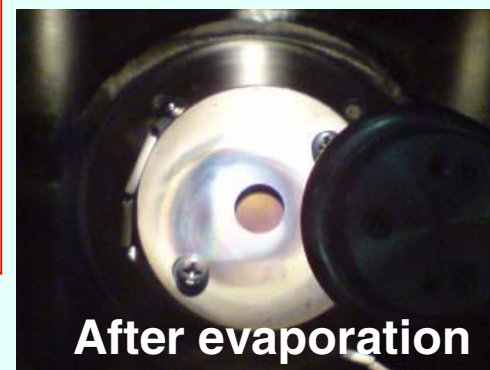
(Collaborating with KEK)



Evaporation Chamber at KEK

- Cs₂Te蒸着実験は開始。
- 7月中 本格的にRF-gunへ装着し、
1nC/bunch × 100bunchの
マルチバンチ電子ビーム生成を目指す。

Mo plug



After evaporation

Evaporation has finished!

まとめ

レーザーコンプトン散乱によるX線の安定発生に成功.

- エネルギーは15-34KeV。
- X線強度は165度で最大 2×10^6 photons/pulse (全散乱フォトン).
90度で最大 5×10^5 photons/pulse (全散乱フォトン).
- 同期システムの安定化等により、X線強度の安定性の向上
 - ・90度衝突で11%(rms)、165度(ほぼ正面)で6%の安定度
 - ・7時間の長時間運転も行い、安定度8%(100pulse積算で)
- X線の強度分布およびエネルギー分布を測定し、計算と比較してよい一致を確認
- 屈折コントラスト によるイメージングをデモンストレーション

現在、開発装置は産総研に移設(2005年度)、運転が開始されている。利用実験を再開するとともに、強度向上を目指した開発を進めている。