

第2回高周波電子銃研究会  
於JASRI/SPring8

東京大学大学院工学系研究科附属  
原子力工学研究施設  
上坂 充

“医療用RFフォトカソード電子銃の展望”

# 世界のコンプトン散乱X線源の開発状況

研究機関	電子エネルギー	電荷量	レーザー波長、パワー	X線エネルギー、強度	備考
MXI Systems Inc (既存)	25MeV	500pC	1 μm, 20J	12 ~ 50keV 1.0E+8 光子/秒	Nd:Glassレーザーを使用しているため、運転は1回/3分に限定。レーザーパワーも揺れて、X線強度不安定。
LLNL (既存)	57MeV	250pC	780nm, 400mJ	40 ~ 80keV 1.0E+7 光子/秒	Ti:Sapphireフェムト秒レーザー使用のため、電子-光子衝突のショット毎の3次元の変動が大きく、X線強度不安定。 強度変動50%
SLAC (実験中)	60MeV	500pC	800nm, 300mJ	20 ~ 85keV 1.0E+8 光子/秒	Ti:Sapphireフェムト秒レーザー使用のため、電子-光子衝突のショット毎の3次元の変動が大きく、X線はいまだ正確に計測されず。
東大/KEK/放医研	50MeV	20pC x 1000 マルチバンチ	1 μm, 2J	33keV 1.0E+9 光子/秒	レーザー周回、電子ビームマルチバンチ化による時間変動要因を除去し安定化。 強度変動10%で設計

LLNL:Lawrence Livermore National Laboratory  
SLAC:Stanford Linear Accelerator Center

東大/KEK/放医研開発研究の効果 : X線安定化、高輝度化を実現

# Pulsed, tunable, monochromatic X-ray machine at Vanderbilt's W.M. Keck Free-Electron Laser Facility

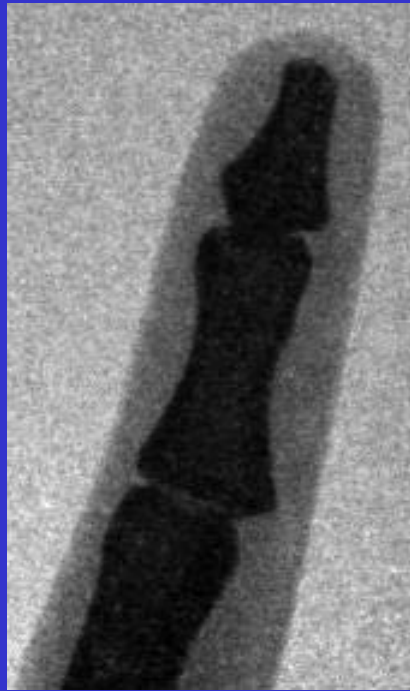
E-beam:           Linac running in “single pulse” mode  
                          up to 50 MeV  
                          1 nanocoulomb/pulse

Laser:             Tabletop Terawatt  
                          1052 nm  
                          20J – (10J compressed to 10 ps)  
                          .003 Hz

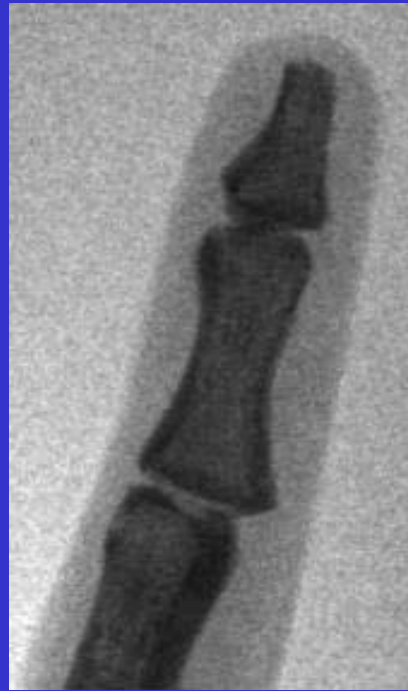
X-ray beam:        $10^{10}$  photons/shot  
                          tunable from 12 to 50 keV  
                          1-10% bandwidth  
                          Conebeam geometry



Energy differences in a finger

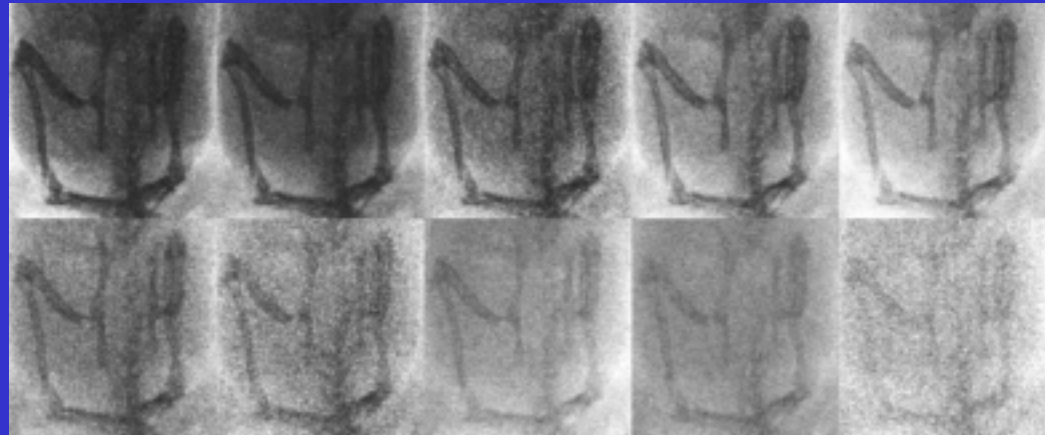


19 keV



29 keV

or in a body, such as a mouse



Energy movie from 15 keV to 33 keV

We have the ability to specifically tune the X-rays to the imaging task at hand.

# Development of an X-band Photoinjector at SLAC\*

. E. Vlieks, G. Caryotakis, R. Loewen, D. Martin, A. Menegat

SLAC, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, CA 94025, USA

Xバンドライナック・コンプトン散乱線源 DeStefano, B. Pelletier, and N.C. Luhmann,

RFガン	セル数	5.5
	電界強度 (カソード面)	200MV/m @ 16MW
	Filling time	65ns
	カソード材質	銅
	RFパルス幅	200ns
	エネルギー	7MeV
	電荷	0.5nC/サブピコ秒
	エミッタンス	1π mm.mrad

3001 Engineering III, Dept. of Appl.

Davis, CA 95616, USA

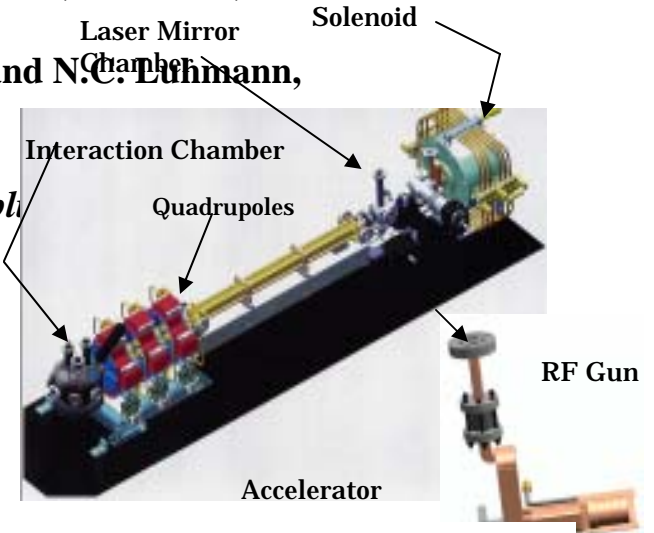
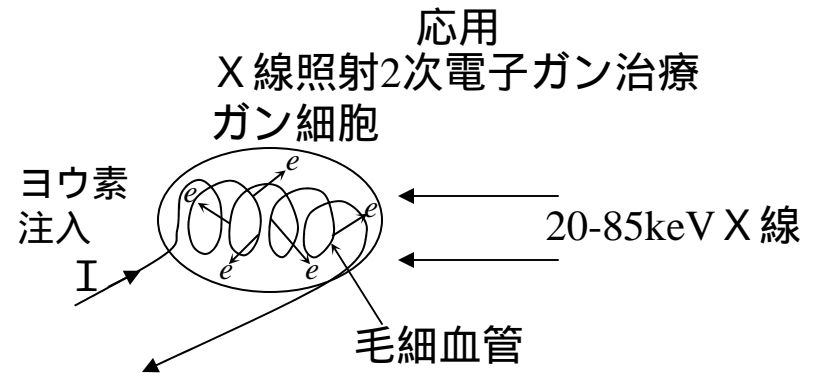


Figure 1. Photoinjector Layout

ライナック	エネルギー	60MeV
	パワー	60MW
	クライストロン	
	繰り返し	60Hz
	加速管長	1.05m

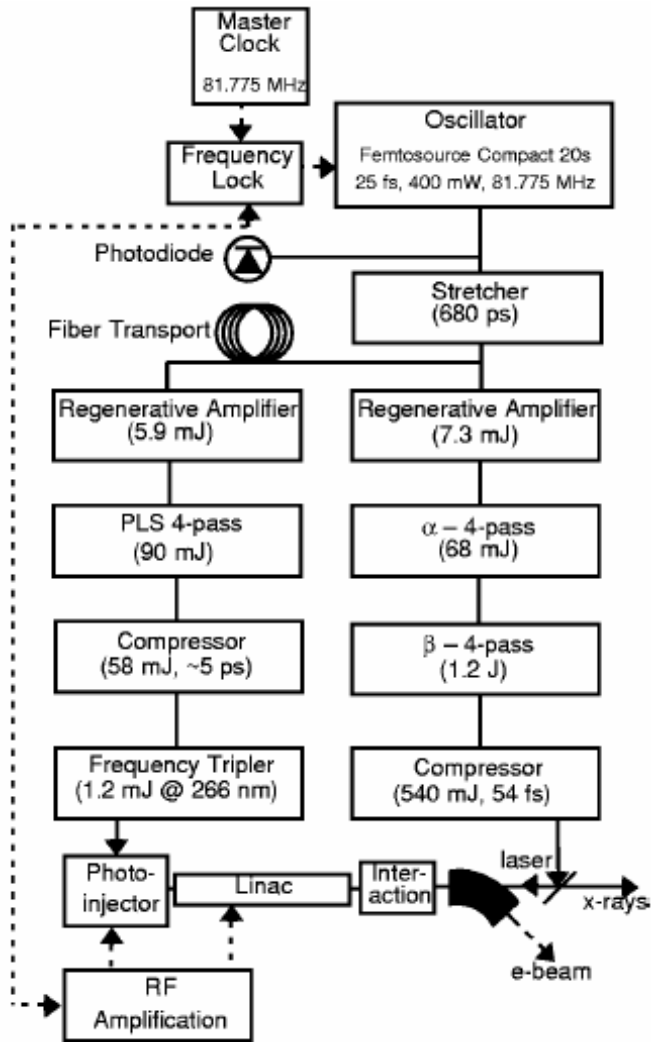
レーザー		Ti:Sapp.
X線	エネルギー	20 - 85keV
	フラックス	~ 10 <sup>8</sup> 光子/s



UCLA, Univ.Michigan 医学部と共同研究

# A picosecond Compton scattering x-ray source at Lawrence Livermore National Laboratory

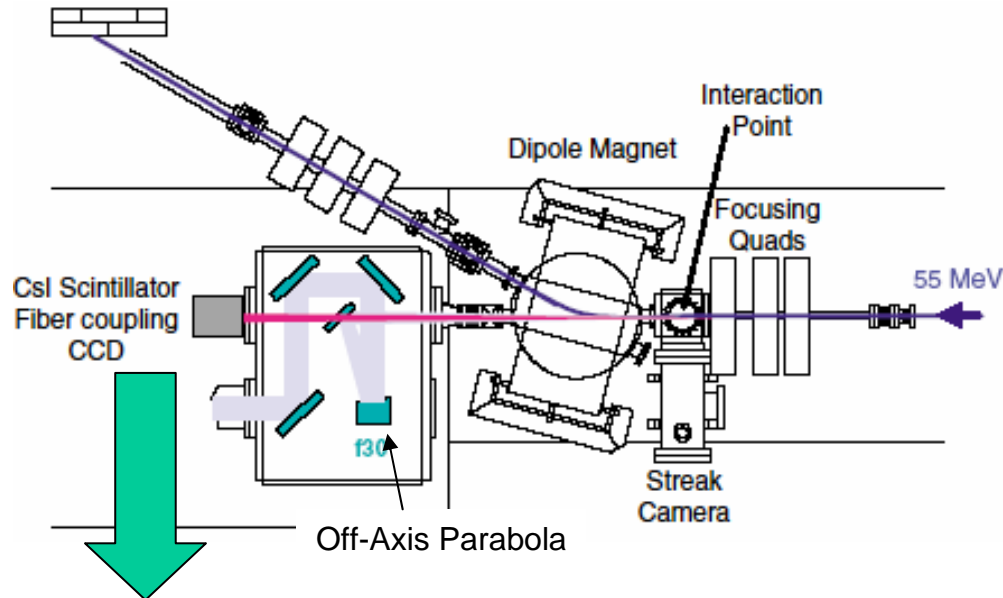
PLEIADES (Picosecond Laser-Electron Inter-Action for the Dynamic Evaluation)



## Parameters

- Electron beam
  - S-band Linac with Cu photo injector
  - Energy: 55 MeV (energy spread: 0.2 %)
  - Charge: 270pC/bunch
  - Emittance: 5 mm-mrad (Horizontal)
  - 13 mm-mrad (Vertical)
  - Beam size: 50  $\mu\text{m}$  (rms) (@ collision point)
  - Pulse duration: 2 ps
- Laser beam
  - Ti:Sapphire (CPA)
  - Energy: 180 mJ
  - $M^2$ : 1.64
  - Beam size: 42.2  $\mu\text{m}$  (FWHM) (@ collision point)
  - Pulse duration: 54 fs
- X-ray
  - Energy: 78 keV
  - Total flux:  $1.3 \times 10^6$  photons/shot
  - Divergence: 6 mrad (Horizontal)
  - 4 mrad (Vertical)

# Compton scattering experiment



## Alignment

Spatial Alignment

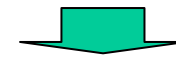
aluminum cube at collision point

Temporal Alignment

streak camera

## Future works

- Permanent quadrupole magnet for electron beam focusing  
→ beam size: 15  $\mu\text{m}$
- 540 mJ Laser pulse for interaction
- Tuning up of the UV Laser for photo injector



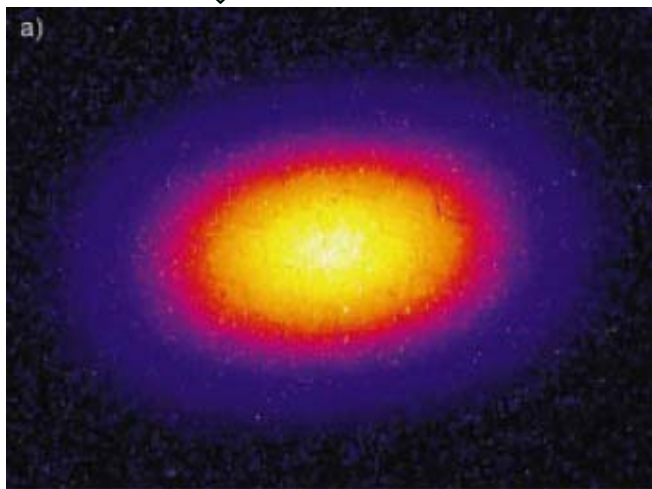
## Goal

Total flux:  $10^8$  photons/sec

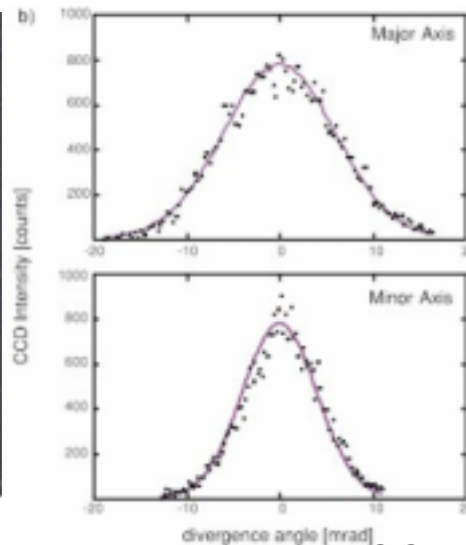
Peak brightness:

$10^{20}$  photons/ $\text{mm}^2$

/s/mrad<sup>2</sup>/0.1 % band width

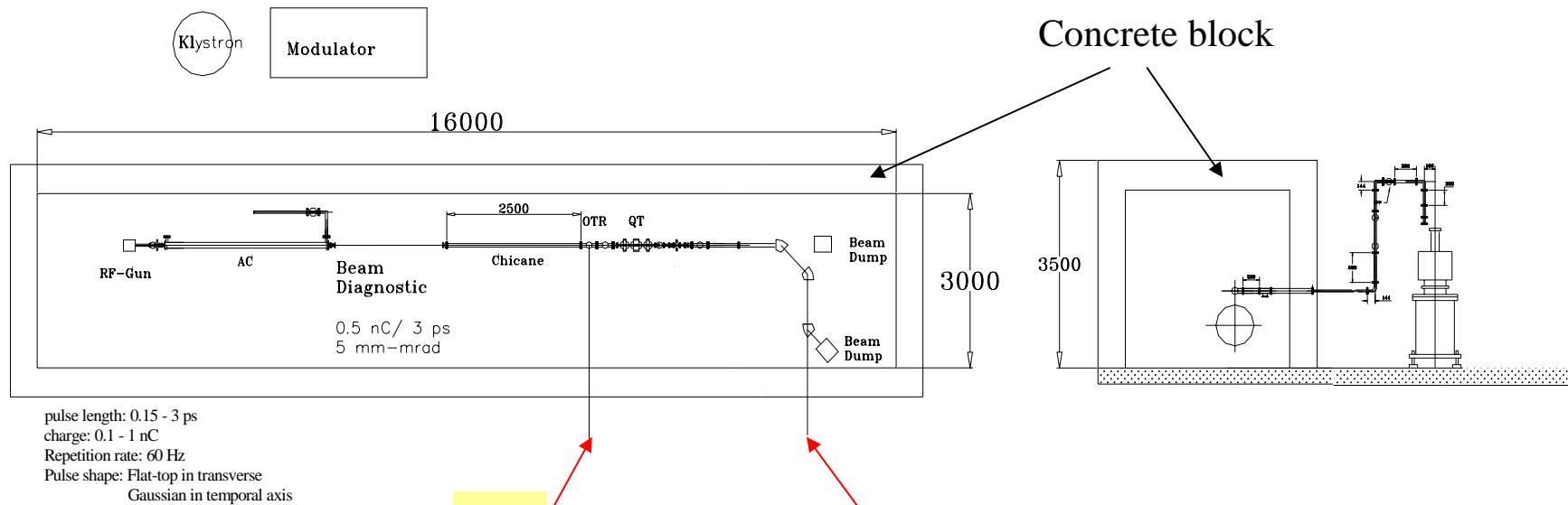


X-ray image taken by CsI Scintillator Fiber coupling CCD



# Layout of Femto-FIR Linac at PAL

## by Dr.H.S.Kang



**FIR**

- Wave number:  $< 250 \text{ cm}^{-1}$
- Energy per pulse:  $> 10 \mu\text{J}$
- Pulse repetition rate: 30 Hz

**Compton Back Scattering**

- Photon energy: 50 keV
- Pulse repetition rate: 30 Hz

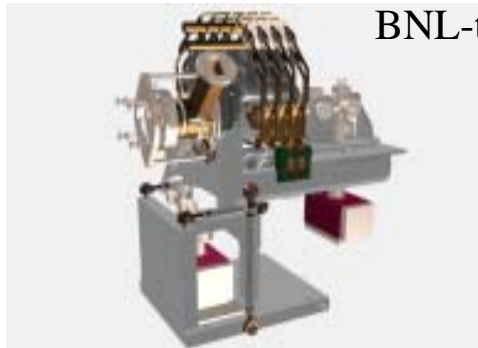


# Specifications of FS-FIR Linac at PAL

## by Dr.H.S.Kang

- Beam energy : 50 MeV
- Beam Charge : 0.1 - 1 nC
- Beam Emittance: < 5 mm-mrad
- Beam Pulse Repetition rate: 30 Hz max.
- Bunch Length
  - ✓ Before chicane: 0.15 - 2 ps
  - ✓ After chicane: 20 - 200 fs

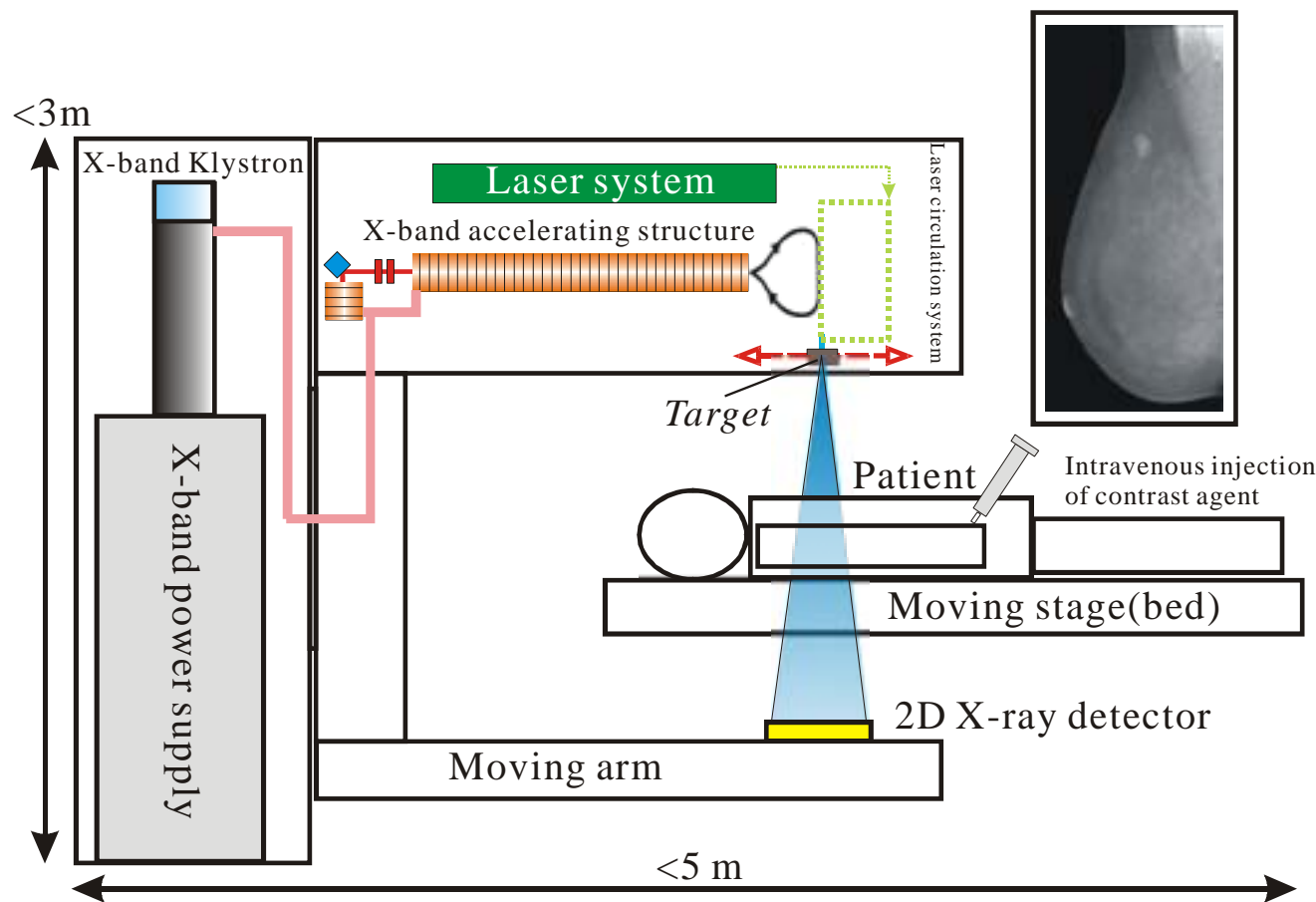
- ◆ Photocathode RF-gun
  - 1.6 cell BNL-type RF-gun with emittance compensation solenoid
  - Laser system:
- ◆ Accelerating Column: S-band, 3-m long
- ◆ Magnet
  - Solenoid
  - Quadrupole Triplet
  - Beam Analysing Magnet
  - Chicane
  - Steering Coil



BNL-type RF-gun

Beam Charge	Bunch Length after RF-gun	Bunch Length after Chicane
0.1 nC	0.2 ps	< 30 fs
0.5 nC	2 - 3 ps	< 200 fs

# 単色X線マルチ診断治療装置



< 診断 >

モノクロX線 CT  
10 – 40 keV  
( 1 keV step )

< 治療 >

白色X線  
5 – 50 MeV

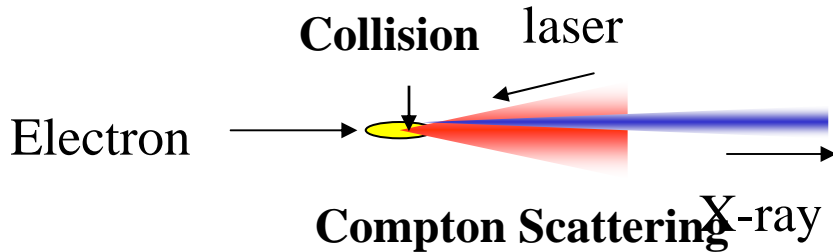
電子ビームエネルギー 5- 50 MeV

大きさ 3m × 3m × 5m 価格 4億円以内

用途: ガンの早期発見と同時治療の実現、

ヨウ素を静脈注射してガン細胞に集中した時にX線照射し、検出と治療を行う。

# Monochromatic Hard X-ray by Compton Scattering



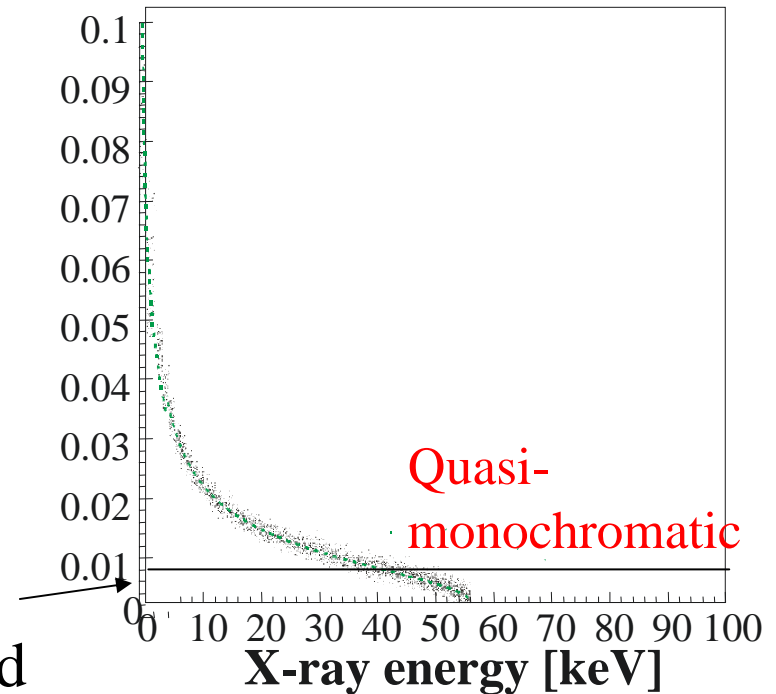
$$\lambda_r = \frac{\lambda_L}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{1}{2} K^2\right)$$

( $K$ : Wiggling angle of electron)

$$\lambda_L \approx 1\mu m \quad (\text{laser wavelength})$$

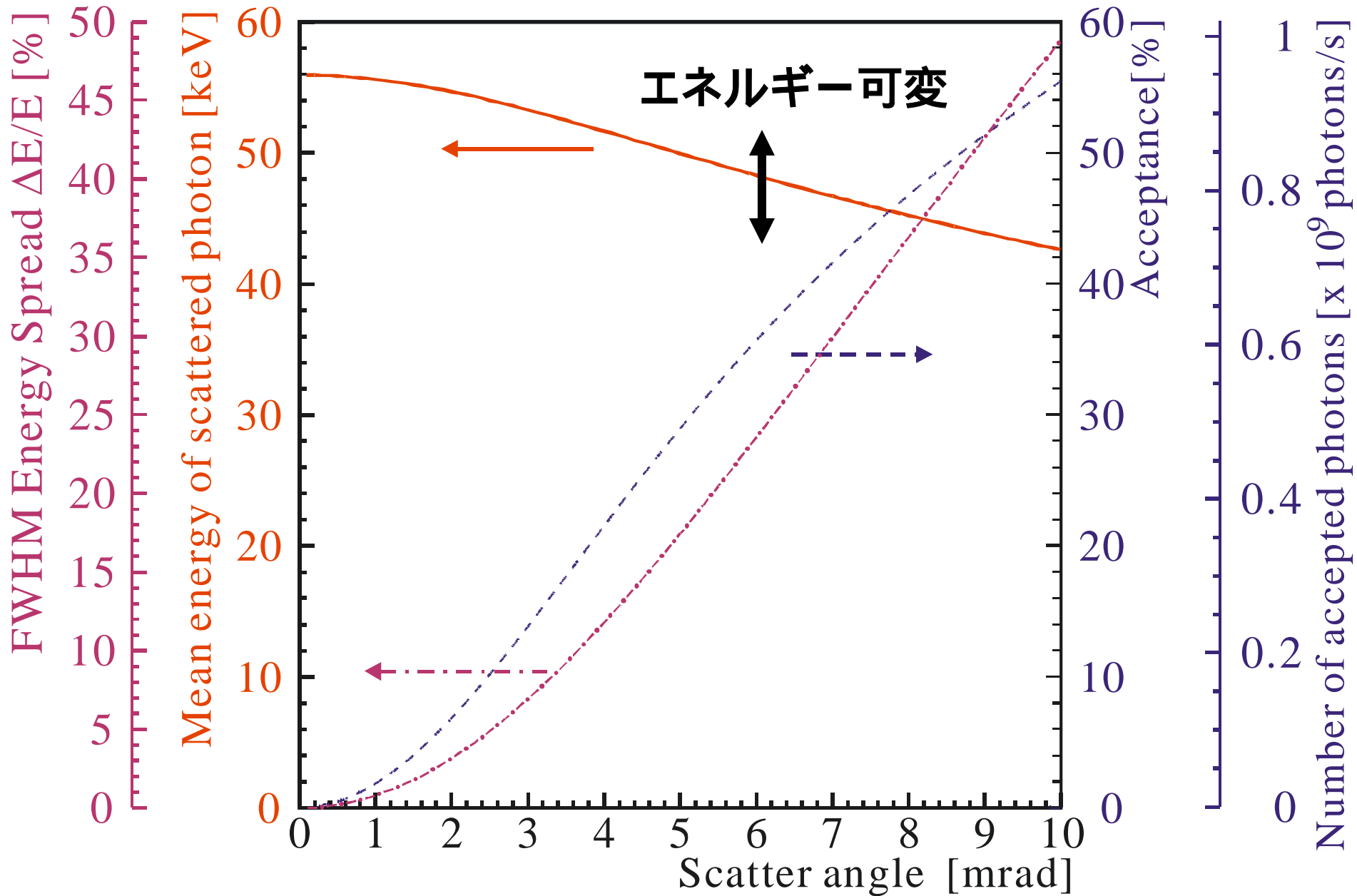
$$\gamma \leq 10^2 \quad (50MeV)$$

$$\lambda_\gamma \leq 1\text{\AA} \quad (\text{X-ray})$$

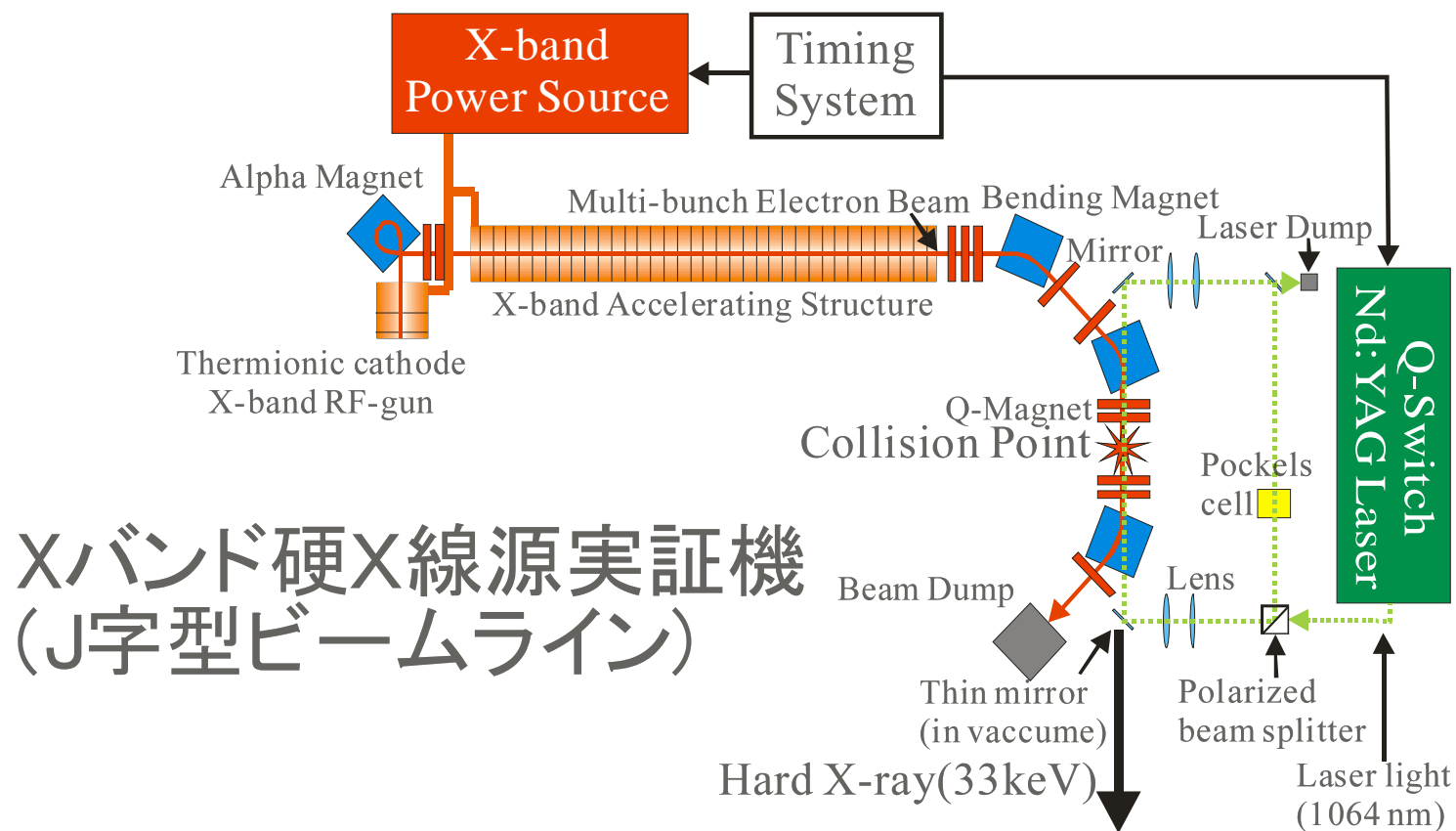


X-ray energy vs Angle

# Characteristic of Compton scattered X-rays



## 2. Xバンド線形加速器を用いた小型硬X線源実証試験

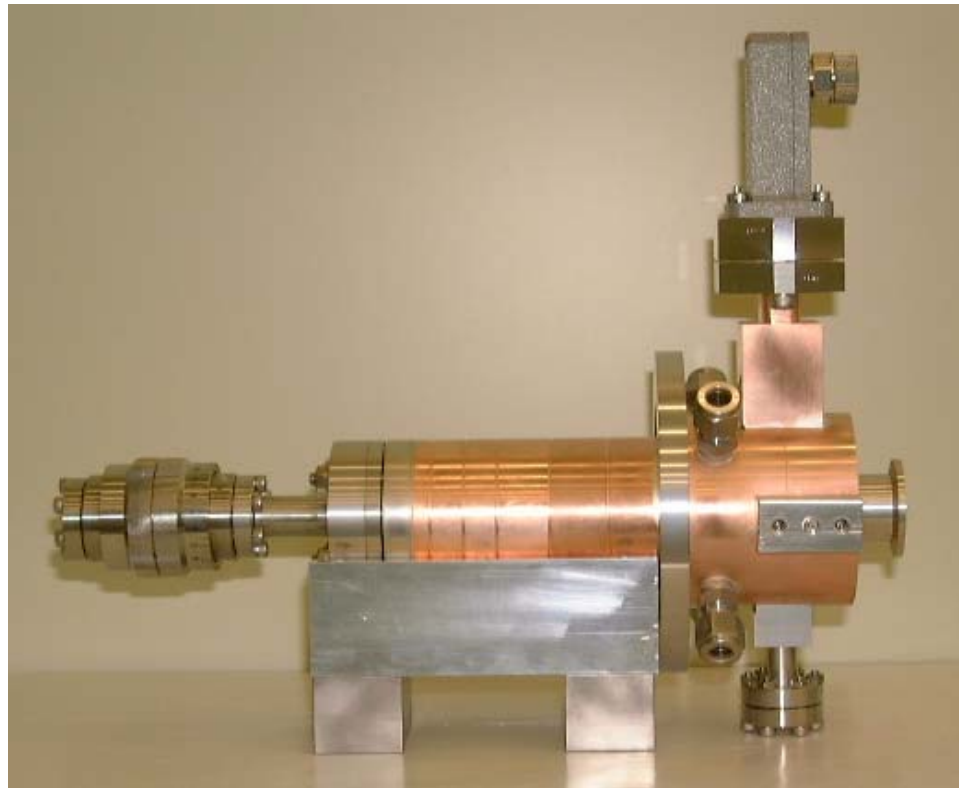


### Xバンド硬X線源実証機 (J字型ビームライン)

X-band Thermionic-cathode RF-gun: 20pC/bunch,  $10^4$  bunches/pulses  
 Nd:YAG laser: wavelength: 1064nm, pulse length: 10ns, 2J/pulse, 10pps  
 X-ray yield :  $1.7 \times 10^7$  photons/pulse ( $1.7 \times 10^8$  photons/s)

大強度硬X線源を比較的シンプルなシステムで実現

# X-band Thermionic Cathode RF-Gun



Frequency	11.424GHz
Mode	$\pi$
Cell	3.5
Cathode	thermionic
RF Power	5.4MW



## XバンドRFモジュレータ -

- パルストランス巻線比 1:32(15.63kV:500kV) PFN部の低電圧化  
空気中での必要耐電圧減少(小型化)
- 低インダクタンスパルストランス(1次側1ターン)
- PFN部4パラレル駆動 低インピーダンス負荷に対応



ピーク電力	142 [MW]
PFN電圧	15.63 [kV]
電流	9.1 [kA]
パルス幅(半値幅)	3.0 [ $\mu$ sec]
平坦部	1.0 [ $\mu$ sec]
繰り返し	50 [pps]
平均電力	22 [kW]
パルストランス昇圧比	1:32
スイッチ	サイラトロン2本
高電圧充電電源	インバータ方式
電圧(最大)	32 [kV]

プレハブ小屋(GLC用 従来型) タンス程度

# ハイパワーレーザーサーキュレーションによるX線強度増強

2Jレーザーパルス単発衝突  $10^7$  photons/pulse  
 電子ビームパルス長:  $1\mu\text{s}$  10000bunches ( $10^8/\text{s}$ )  
 レーザーパルス長10ns(FWHM)  
 110バンチと衝突(他の電子は衝突しない)

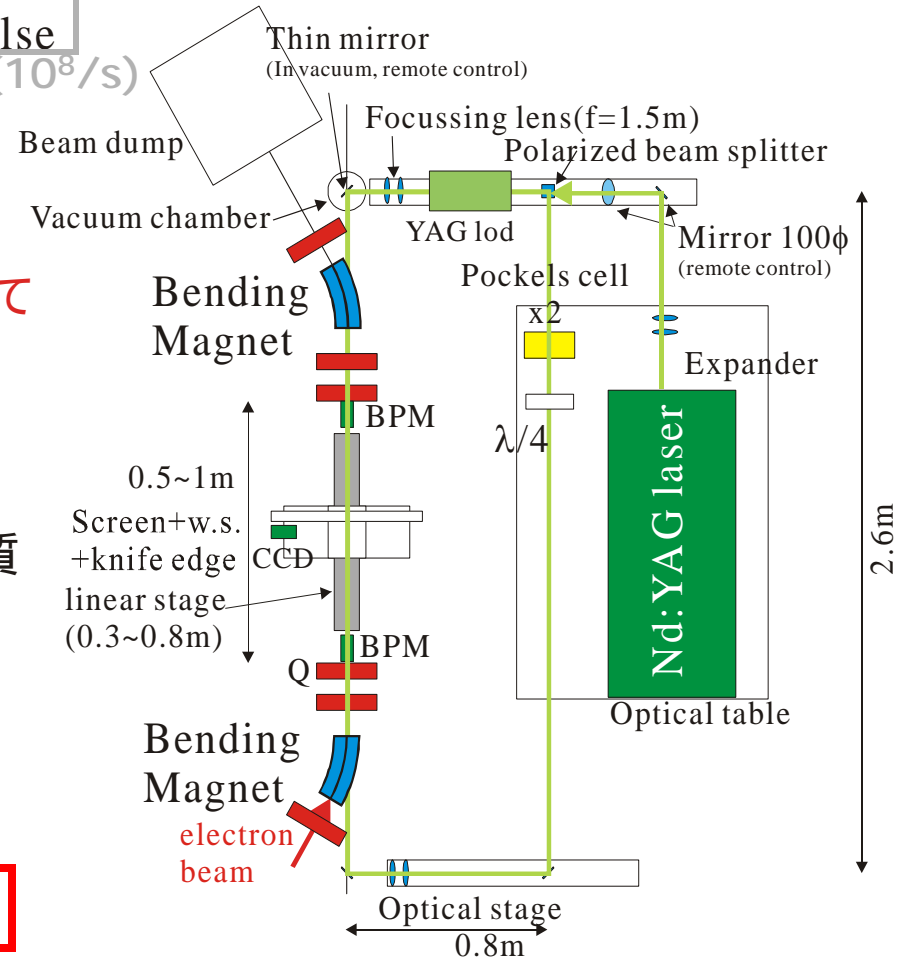
衝突後のレーザー光を再度衝突点に入射して  
 X線強度を増大させる。

サーキュレーション1周: 21ns  
 $1\mu\text{s}$ に最大47回衝突可能  
 レーザーパルスエネルギー損失をゲイン媒質  
 で補償

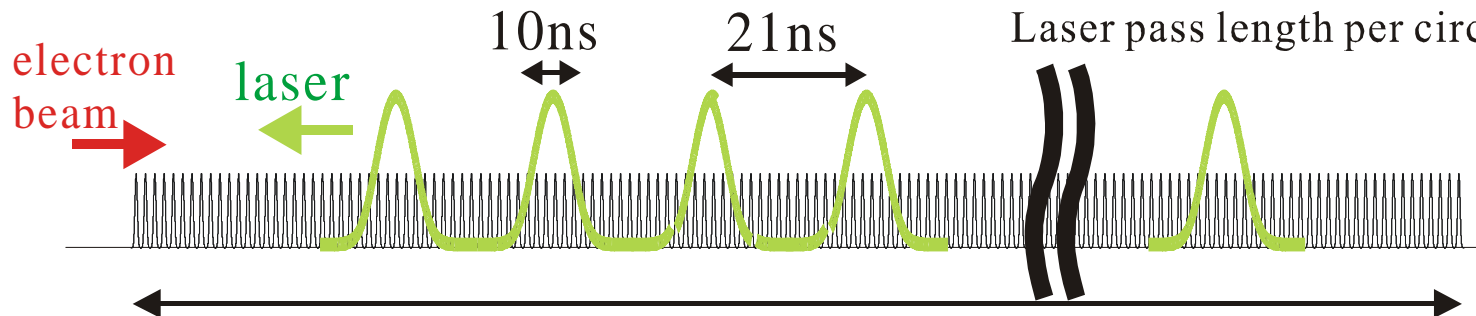
> 5J/pulseのレーザーは商業的に存在

5J/pulseのレーザーが40回以上衝突  
 X線強度100倍

$10^9$  photons/pulse ( $10^{10}$  photons/s) (全光子)



Laser pass length per circulation: 6.4m(21ns)

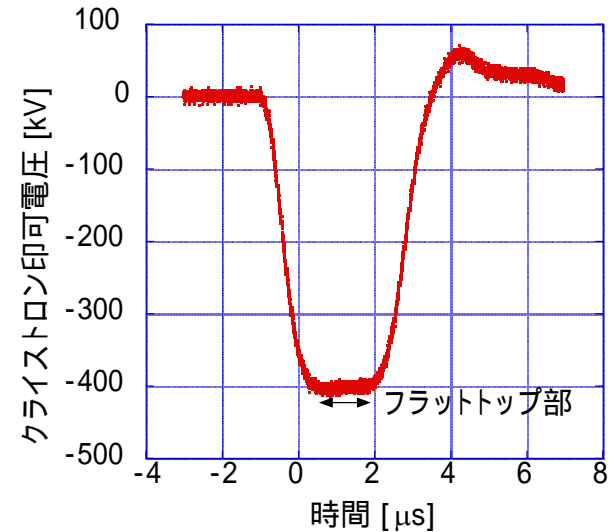




# 高圧電源動作試験

設定出力電圧403.2kV、繰り返し5ppsで100個の出力電圧波形を取得。フラットトップ内各時点での変動を評価。

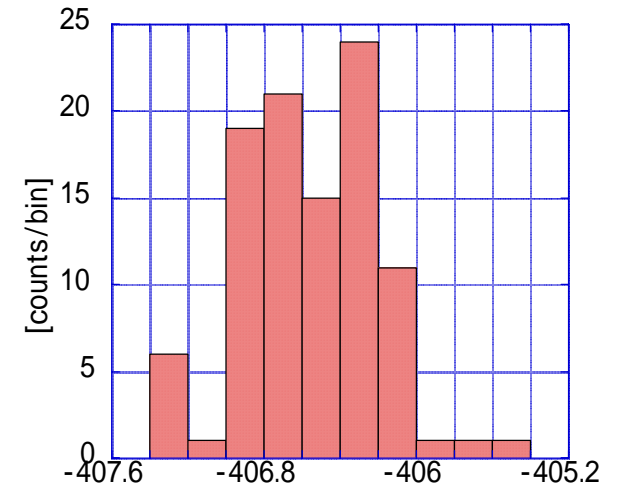
クライストロン印可電圧の変動が標準偏差で $\pm 0.1\%$ 以内であることを確認



高圧電源出力電圧波形

出力電圧測定結果

時間	最大値 [kV]	最小値 [kV]	平均値 [kV]	標準偏差
先頭 (0.7 $\mu$ s)	-409.37	-407.70	-408.56	0.32 kV (0.078 %)
中央 (1.2 $\mu$ s)	-407.34	-405.54	-406.56	0.35 kV (0.086 %)
終端 (1.7 $\mu$ s)	-406.27	-404.58	-405.48	0.34 kV (0.085 %)



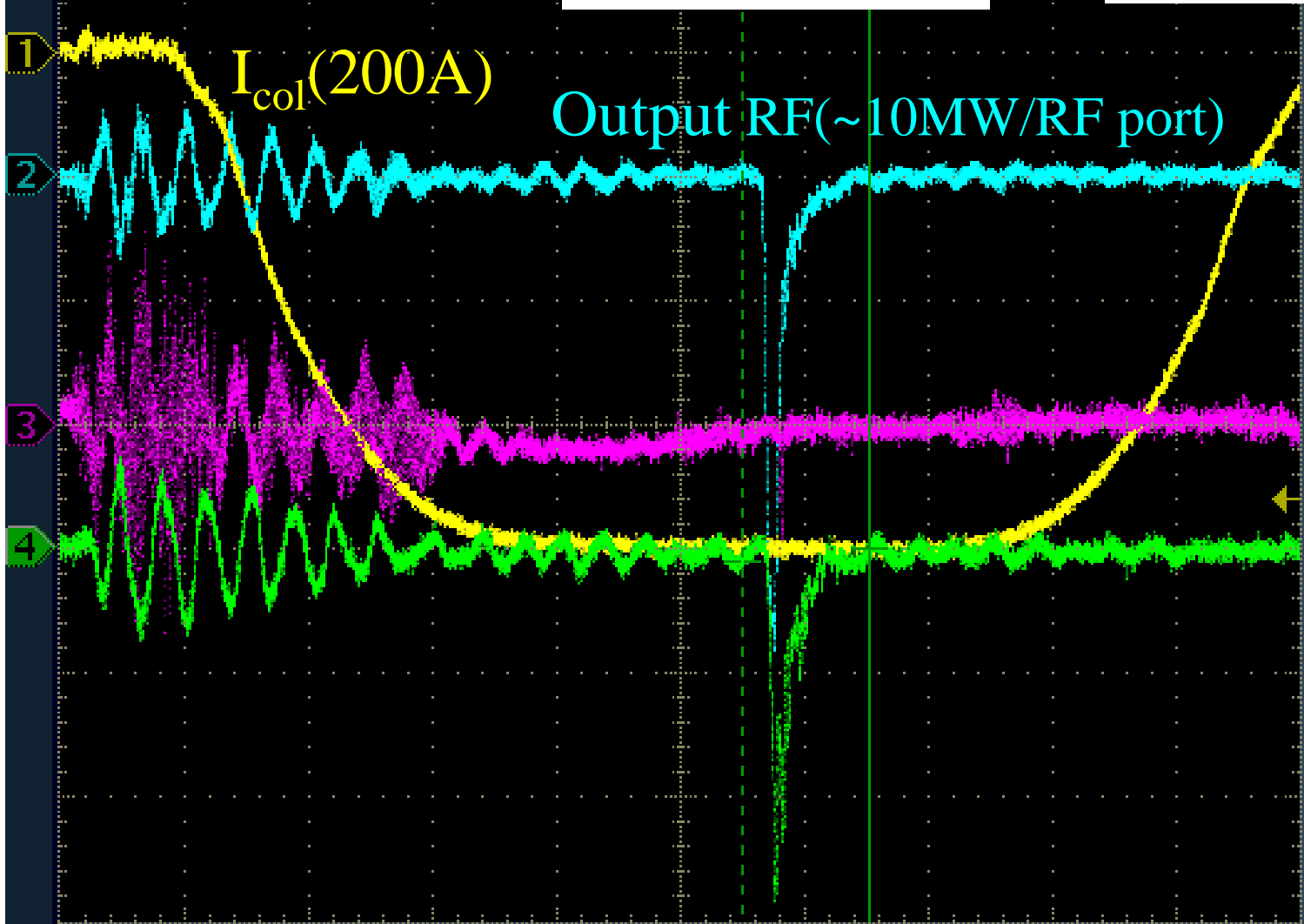
出力電圧変動  
(フラットトップ中央)

Tek Run

Trig?

# X-band RF

現在20MW達成



△: 408ns  
 @: 1.41μs

Ch1 Min  
 -20.5 V

Ch2 Min  
 -192mV

Ch3 Min  
 -10.4mV

Ch4 Min  
 -286mV

Ch1 5.00 V Ch2 50.0mVΩ M 400ns A Ch1 ∩ -18.0 V  
 Ch3 10.0mVΩ Ch4 100mVΩ

30.00 %

27 Sep 2004  
 16:56:56

## Experiment

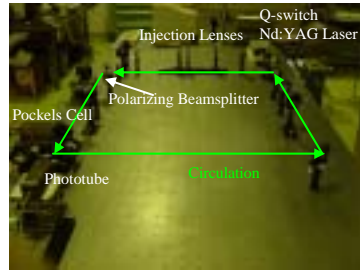
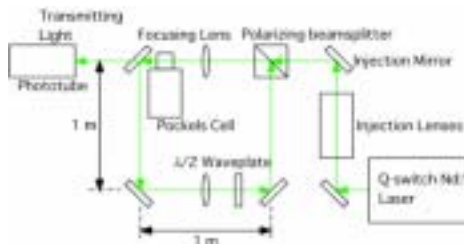
We are doing a proof-of-principle experiment for the laser pulse circulation system.

Purposes of the experiment are

- Proving enhancement of the laser intensity in the circulation system.
- Measurement of the revolving laser, the transmission efficiency and the enhancement amount.
- Establishment of a technique to control the laser beam profile at the collision point in order to apply the system into the hard X-ray source.

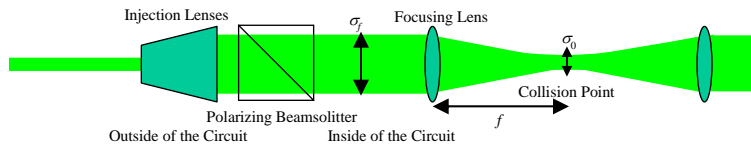
Property of the Laser

Wavelength	$\lambda = 532 \text{ nm}$
	Q-switch Nd:YAG Laser (2nd harmonic)
Pulse Energy	25 mJ/pulse @532nm
Pulse Width	3-5 ns (FWHM)



Experimental Setups

### Control of the Beam size at the Collision Point



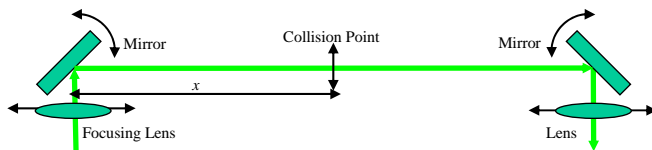
The beam size at the collision point  $\sigma_0$  (rms) is

$$\sigma_0 = M^2 \frac{\lambda f}{4\pi \sigma_f}$$

$\sigma_f$ : Beam size at the focusing lens  
 $f$ : Focal length of the focusing lens

The beam size at the collision point is controlled outside of the circuit.

### Control of the Beam Position at the Collision Point



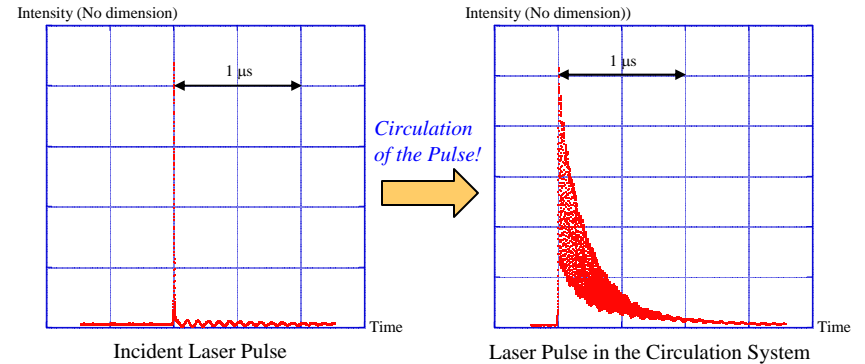
The beam position at the collision point is  $r = x\theta + l$

$\theta$ : Angle of the mirror before the collision point (0.02° accuracy). ← Rough Control  
 $l$ : Position of the focusing lens (5μm accuracy). ← Precise Control

To avoid an error due to circulation, we move the lens and mirror after the collision point equally to the focusing lens and the mirror before the collision point.

## Results

Intensity of the Laser Pulse



The laser pulse revolves more than 50 times (650 ns).

Attenuation of the laser pulse energy at 400 ns (the 30th revolution) is approximately 80%.

- The transmission efficiency is larger than 90% ( $A > 0.9$ ).
- Using the circulation system, the X-ray yield will become more than 10 times.

$$I_0 A^{30} = 0.2 I_0$$

$$I_0 = 94.7\%$$

Therefore,

*the monochromatic hard X-ray source will generate at least  $10^9$  photons/sec with the laser pulse circulation system!*

## Summary

- We develop the laser pulse circulation system for the compact monochromatic hard X-ray source.
- Using this system, the X-ray yield will become 10 times larger.
- In the experiment, the transmission efficiency was larger than 90% and the laser intensity became more than 10 times.
- We do further experiments for laser profile control at the collision point.

## REFERENCES

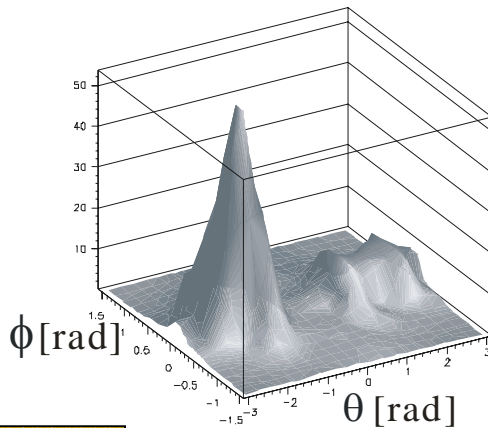
- [1] M. Uesaka et al., "X-band RF Gun/Linac for inverse Compton Scattering", 21th Int. LINAC Conf., Gyeongju, Korea, 2004.
- [2] K. Dobashi et al., AAC 2004, inpress.
- [3] A. Fukasawa et al., presented at APAC, Beijing, China, 2001.
- [4] F. Ebina et al., "Laser circulation system for compact monochromatic hard X-ray generator", Proc. 1st Particle Accelerator meeting, Japan 2004.
- [5] F. E. Carroll, American Journal of Roentgenology 179 583 (2002).
- [6] A. E. Vieks et al., "Development of an X-band Photoinjector at SLAC", 21th Int. LINAC Conf., Gyeongju, Korea, 2004.

# Low noise radiation of deceleration system

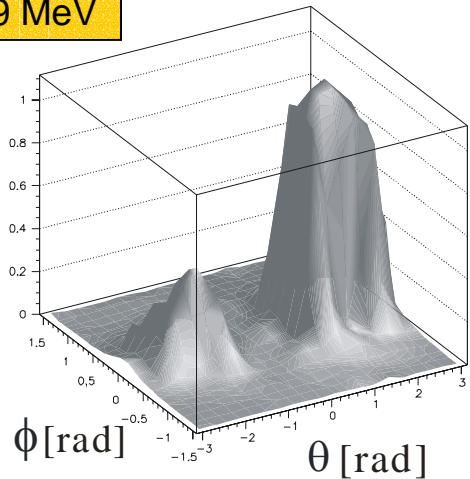
Radiated Energy (Relative value)

3.5 MeV

Electron energy



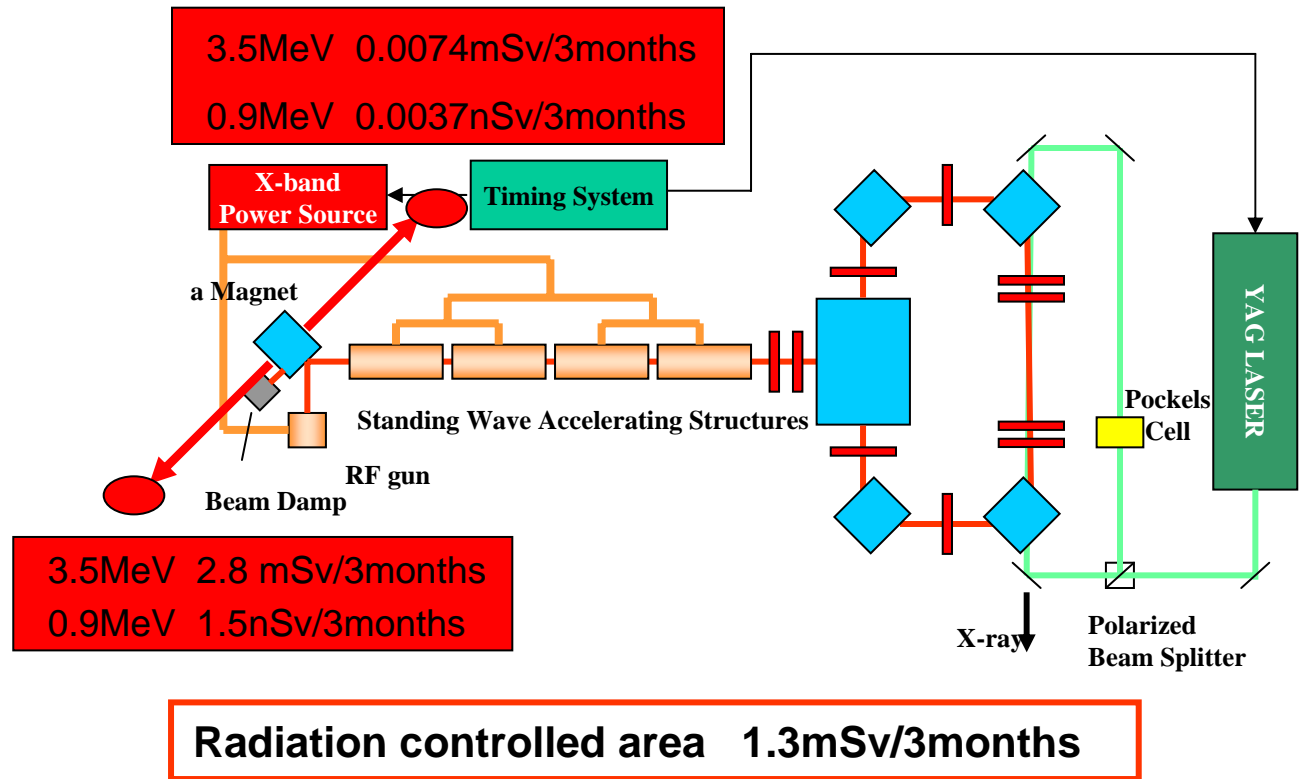
0.9 MeV



Both simulated by GEANT3

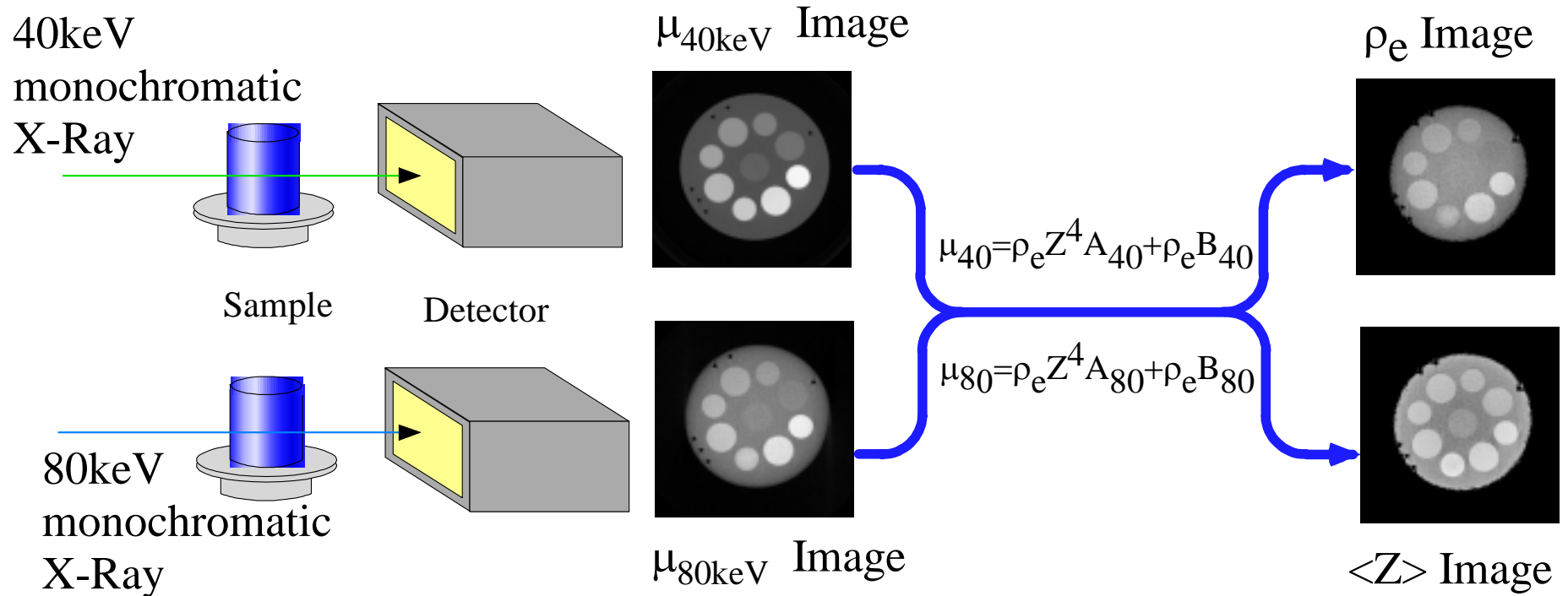
The value of radiation at two points

● Observation points



In case of 0.9MeV, the value is less than the limit of radiation controlled area.

# 2色X線CTの原理



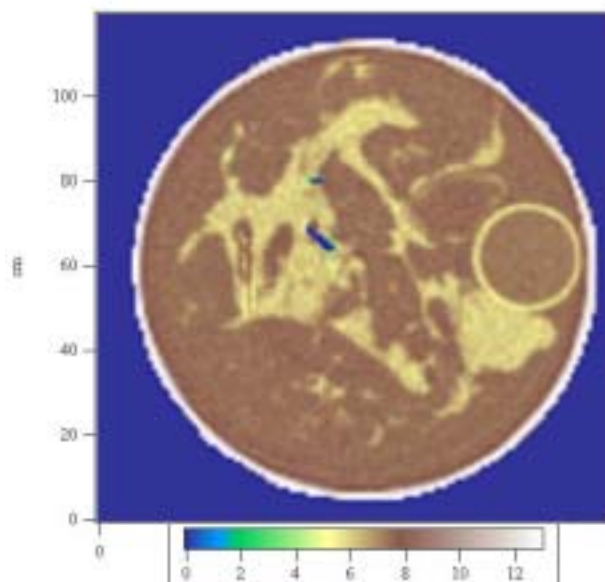
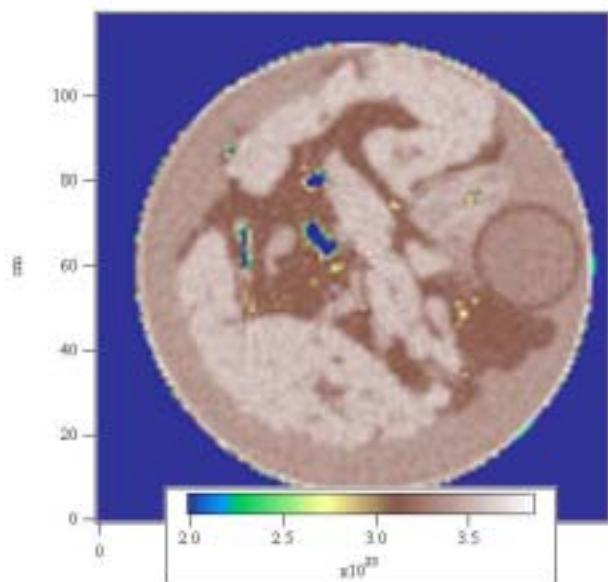
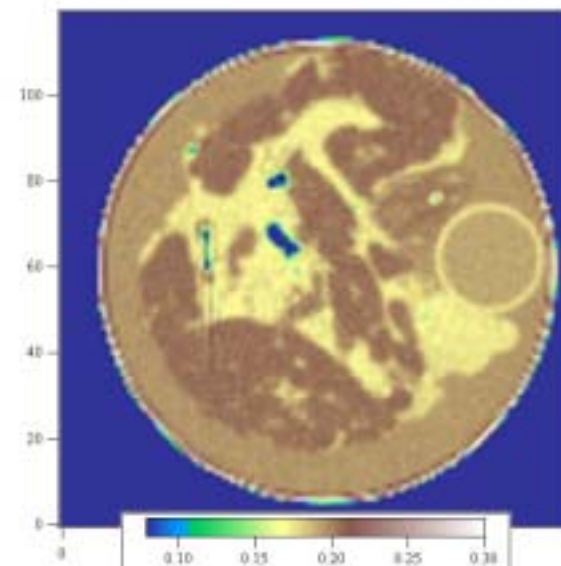
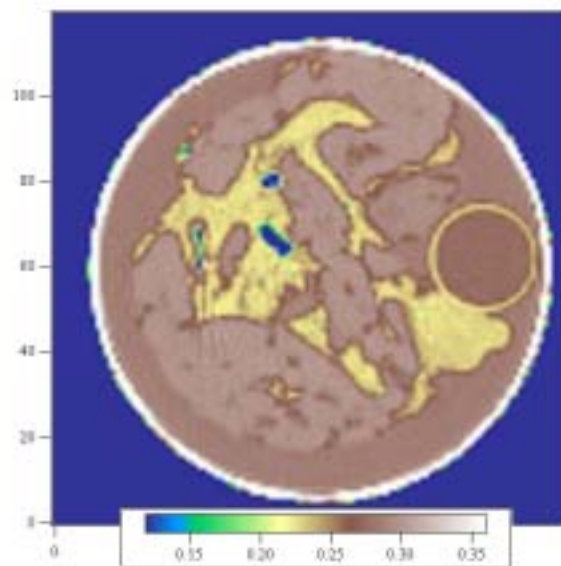
- 豚の膀胱

右: 40keV

線減弱係数

左: 70keV

線減弱係数



左: 電子密度画像  
右: 実効原子番号  
画像

# 高感度X線検出器の検討

電氣的S/Nの向上 X線必要強度理論値まで下げられる

X-ray Flat-Panel detector

各社で開発中 (10cm × 10cm ~ 40cm × 40cm)

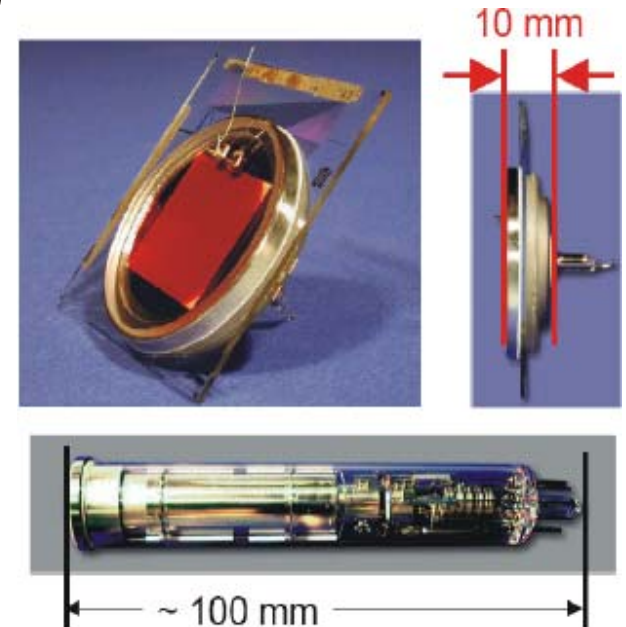
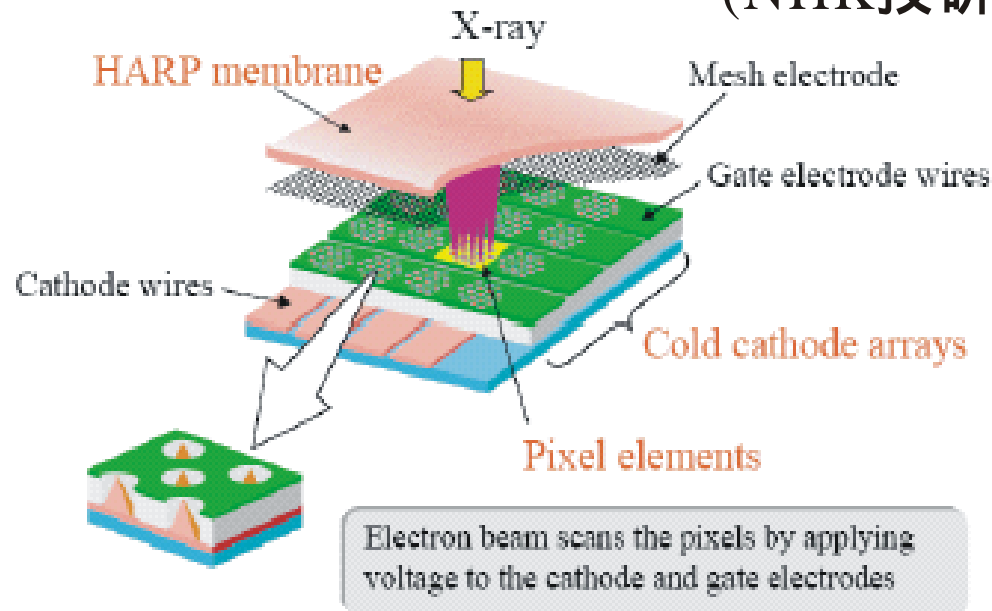
TFT液晶ディスプレイ製造技術を応用

原理、構造は各社で多少異なる

シャープ: 直接変換型(CdTe等)

Philips: CsIシンチレーション光 光検出器

X HARP(High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor)  
(NHK技研 谷岡氏)

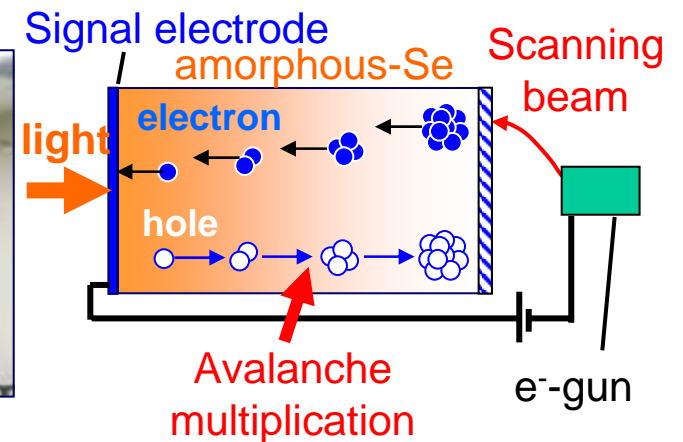
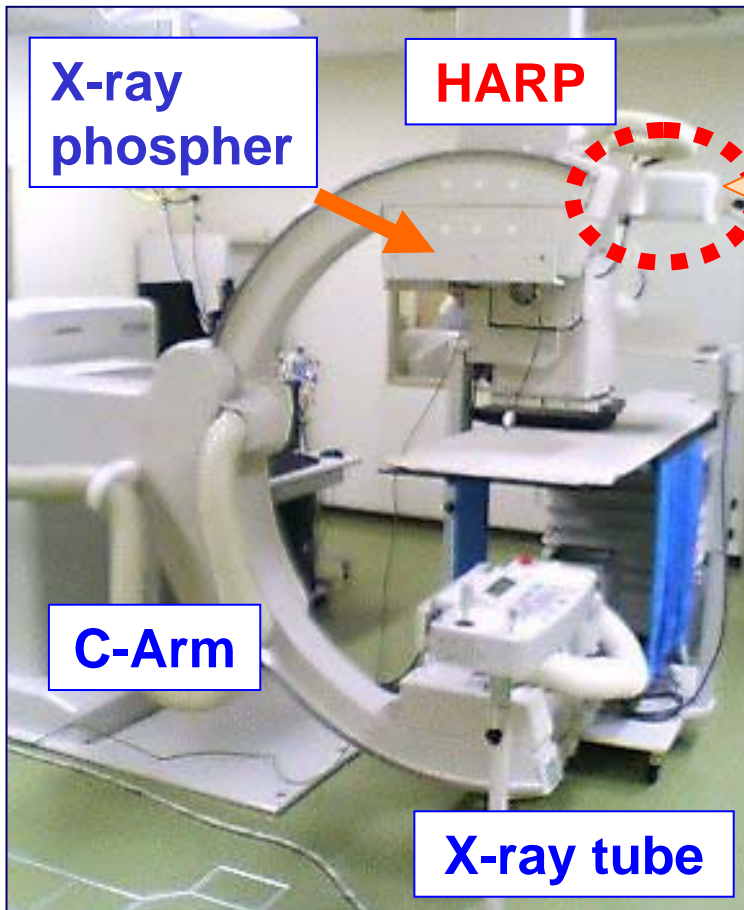


# Ultra Micro-vessel Angiography

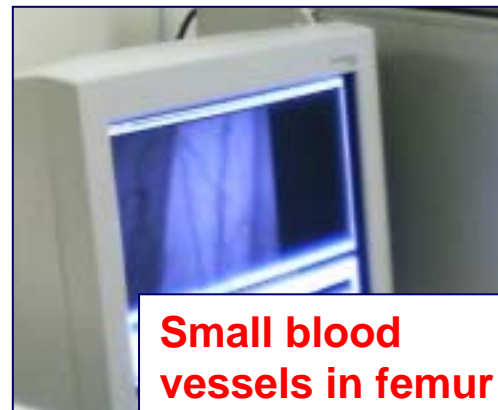
@ NCVC (National CardioVascular Center)

X-ray tube (50kVp) with high-sensitivity HARP camera

**HARP** (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) camera



Micro-vessels visualized by contrast agent



Imaging area:

20cm × 20cm

Space resolution:

25 μm



# Ultra Micro-vessel Angiography by Compact Monochromatic Hard X-ray Source

## Ultra Mico-vessel angiography by monochromatic hard X-ray

- 30 images/s
- Space resolution: 25  $\mu\text{m}$

### Required photon intensity

$4.8 \times 10^{10}$  photons/ $\text{mm}^2/\text{s}$  @33-35keV  
 $4.8 \times 10^9$  photons/ $\text{mm}^2/\text{s}$  @51-54keV

## Compact hard X-ray source based on electron-laser collision

- 10 times circulated laser colliding with electron

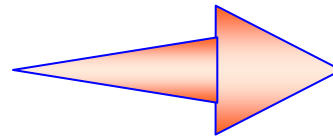
### Expected photon intensity

$2 \times 10^7$  photons/ $\text{mm}^2/\text{s}$  @33-35keV  
 $1 \times 10^7$  photons/ $\text{mm}^2/\text{s}$  @51-54keV

## Angiography by the compact hard X-ray source

- High-sensitivity HARP camera
- 10 images/s
- Pixel size (100  $\mu\text{m}$   $\times$  100 $\mu\text{m}$ )

Photon intensity is reduced



Angiography can be performed!

(Space resolution: 100  $\mu\text{m}$ )

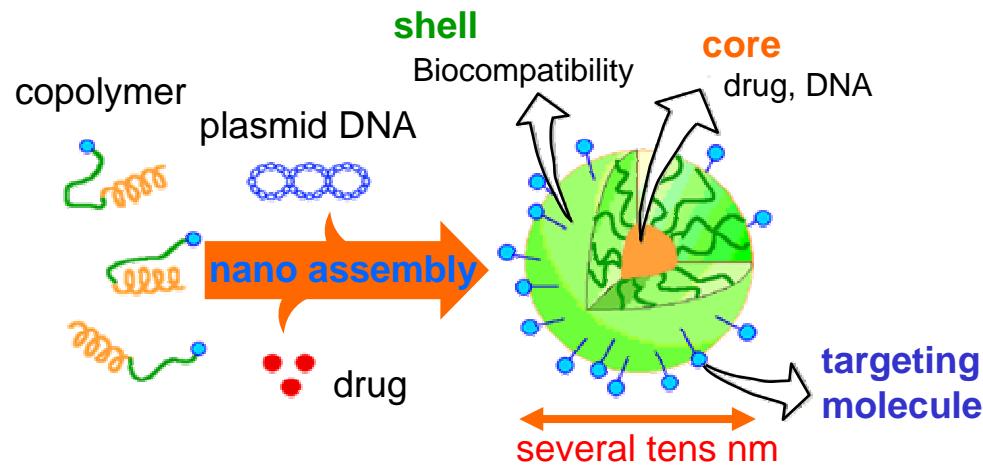
## Future plan to perform ultra micro-vessel angiography

High power laser (7J/pulse), 40 times circulated laser, Wide length of electron macro pulse and Small light spot (25  $\mu\text{m}$  diameter) etc...  $\rightarrow$  Space resolution: 25  $\mu\text{m}$

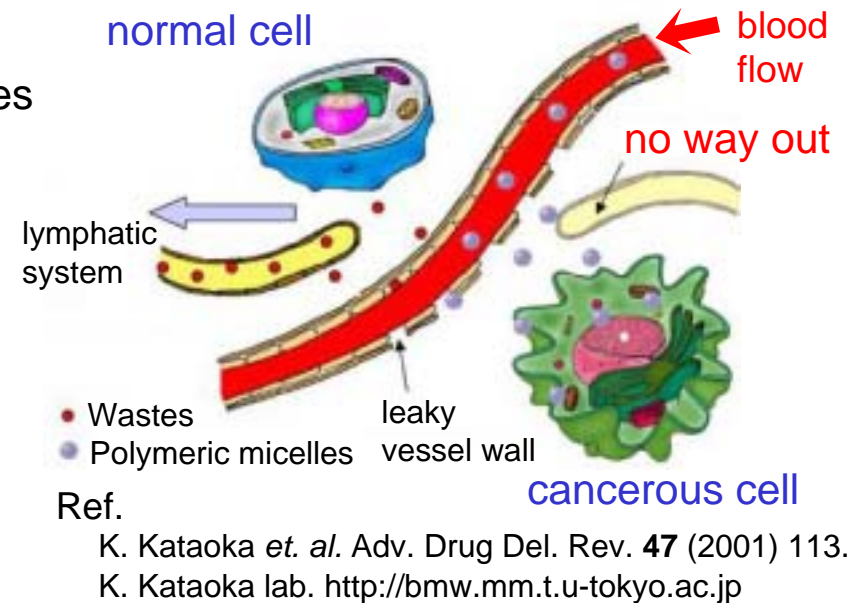
# Applications of Hard X-ray and Nano Particles for Cancer Therapy and Diagnosis

## Polymeric micelles for drug delivery

- Application for cancer therapy
- Site-specific targeting and accumulation by micelles



## Tumor targeting



## X-ray application for cancer therapy and diagnosis with micelles

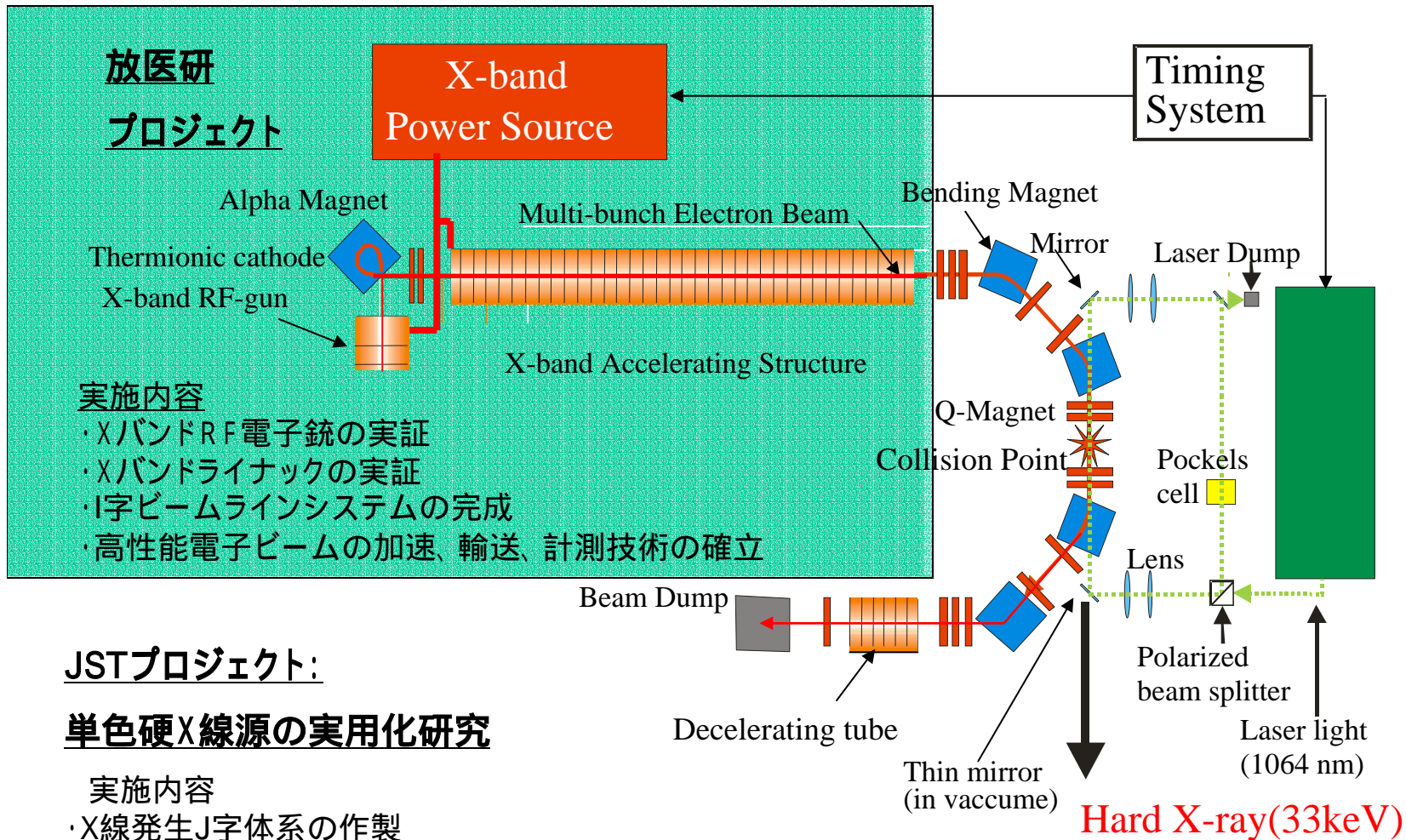
### Diagnosis

- X-ray imaging of tumors
- Contrast agent including Iodine delivered and accumulated by micelles

### Therapy

- Enhanced radiation damage to cancer cells targeted and stimulated by micelles with specific agents
- X-ray irradiation to micelles for nuclei acid and protein delivery to cancer cells

# 放医研・JSTの切り分け



## 実施内容

- ・XバンドRF電子銃の実証
- ・Xバンドライナックの実証
- ・I字ビームラインシステムの完成
- ・高性能電子ビームの加速、輸送、計測技術の確立

## JSTプロジェクト:

### 単色硬X線源の実用化研究

#### 実施内容

- ・X線発生J字体系の作製
- ・レーザー周回システムの開発
- ・高輝度、単色硬X線の発生、計測技術の確立
- ・X線利用技術の研究
- ・診断・治療両用機的设计
- ・ビーム減速システムによる低ノイズ放射線化技術の確立

# X線利用：茨城県「小型ライナック医療応用研究会」

平成16年度

平成17年度

コア研究会

利用計画  
2色X線CTによる元素分布同定  
化学放射線治療(ナノミセル微粒子、  
オージェカスケード治療)  
血管造影用イメージング  
マモグラフィ用位相コントラストイメージング

共同利用実験  
同 左  
地域振興策立案

拡大医療  
応用研究会

化学放射線治療科学研究会

シンポジウム



# 放射線治療マンパワー

	日本	米国
放射線治療医	350人	2300人
医学物理士	120人	4000人
放射線治療技師	4万人	多数

# まとめ

1. Xバンド熱RFガン・ライナック型コンプトン散乱単色X線源 (109photons/s以上)を平成17年上期に完成(電子加速まで放医研第1期、X線発生をIHI - JSTプロジェクト)
2. 平成17年度下期より、茨城サイエンスフロンティア計画の中で共同利用
  - 2色X線CTによる元素番号分布
  - 血管造影イメージング
  - X線増感薬品伝達システム
3. 放医研第2期では、X線グループは、カートリッジ型フォトカソードにより、コンプトン散乱に寄与しない無駄な電子の除去し、ノイズ放射線を低減できるシステムを構築。
4. 日米協力による普及システムを模索。