

2007年5月29日
KEK-PF

レーザーコンプトンX線光源を用いた 医学イメージング研究の可能性

兵藤 一行

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
物質構造科学研究所
放射光科学研究施設 (PF)

概要

放射光単色X線を用いたイメージング

1. X線の吸収効果：2次元検出器
血管造影（心臓診断の臨床応用）
微小血管造影
2. X線の屈折効果
関節疾患
乳がん診断

レーザーコンプトンX線源を用いたイメージング

医用画像診断

不可視情報の可視化

視診、触診、聴診



画像診断

白色X線：単純撮影、CT

単色X線：放射光

超音波

磁気共鳴現象：MRI

赤外線

RI: PET、SPECT

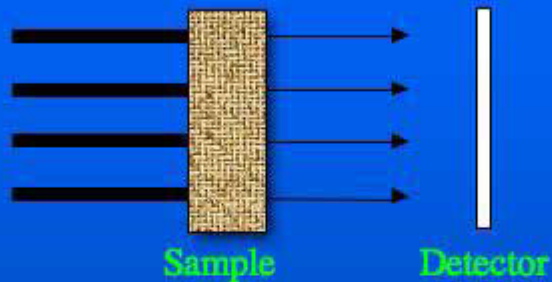
医用画像診断と単色X線

- 1910年 世界で初めての血管造影撮影
- 1931年 心カテーテル法に対してノーベル賞
- 1953年 経皮的カテーテル法の確立
- 1950年代 造影剤のK吸収端を利用するK吸収端差分法の提唱
- 1970年代 吸収フィルターを用いた疑似単色X線による撮影
2種類以上の単色X線で撮影を行うエネルギー差分法の提唱
- 1980年代 DSA (Digital Subtraction Angiography) システムの実用化
造影剤の静脈注入による動脈系（頸動脈、腎動脈）の診断

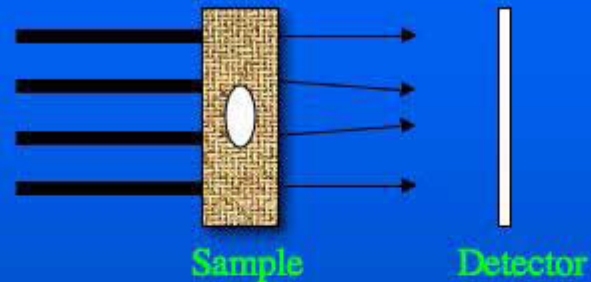
放射光単色X線の利用

- 1981年 E. Rubenstein(Stanford大学) が放射光単色X線の利用を提唱:
冠動脈系の造影剤の静脈注入による診断
- 1986年 SSRL 1次元撮影システム
- 1991年 HASYLAB 1次元撮影システム
- 1993年 NSLS 1次元撮影システム
- 1996年 PF 2次元撮影システム
- 2000年 ESRF 1次元撮影システム

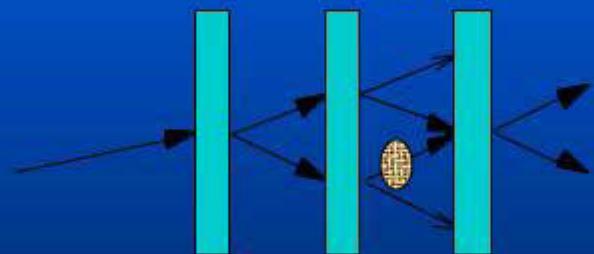
放射光単色X線を用いた撮影方法



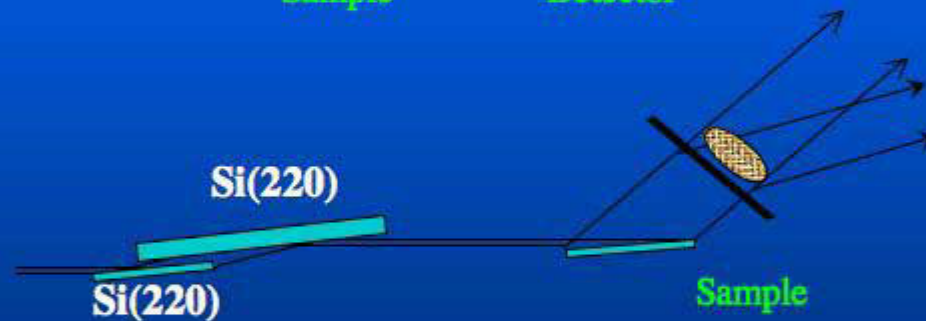
absorption



diffraction



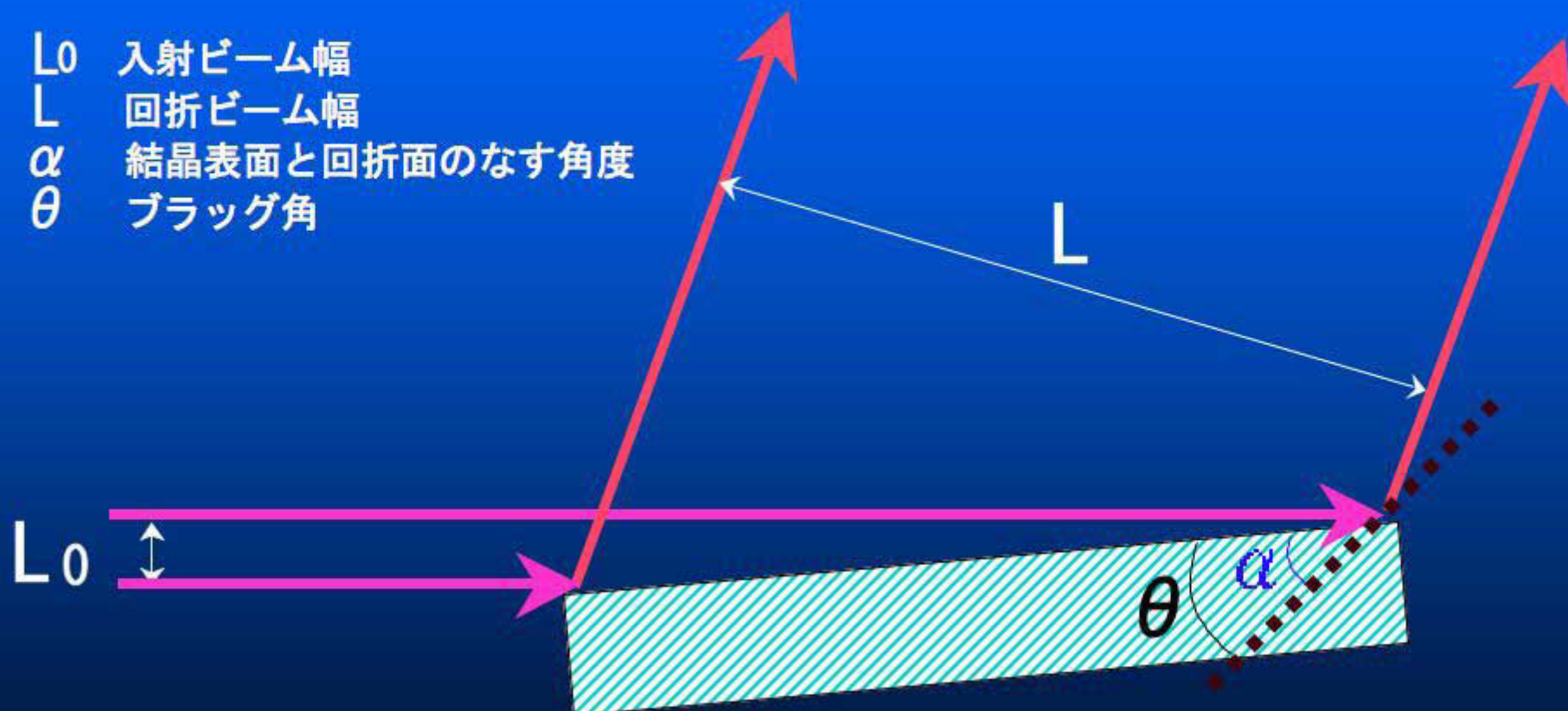
Sample
phase sift



空間分解能
濃度分解能

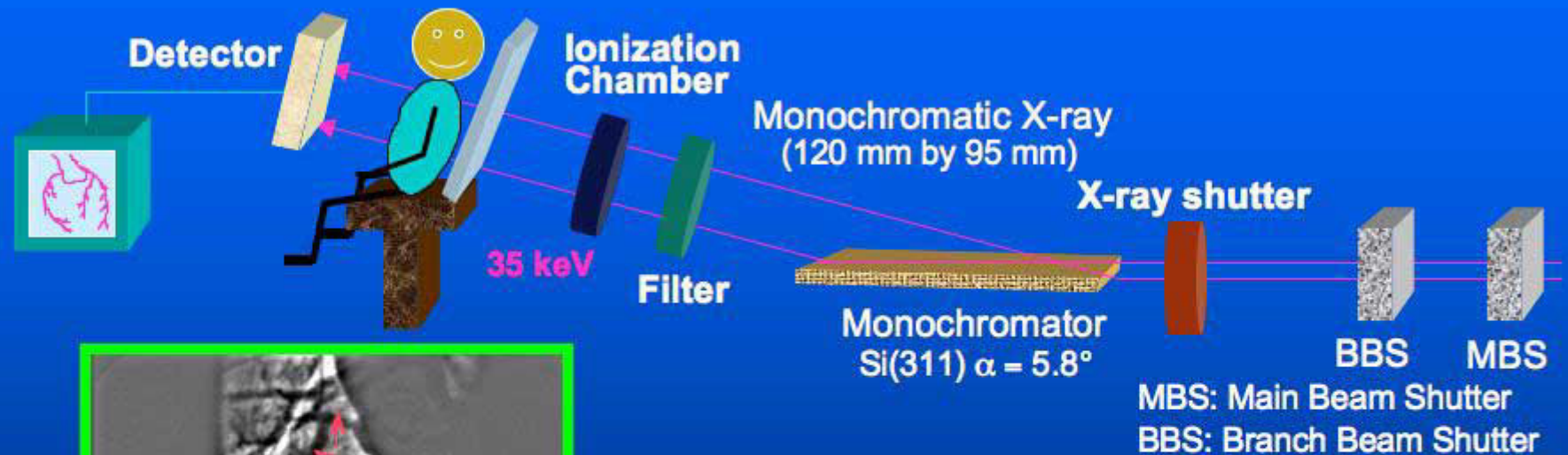
分光結晶の非対称反射 キーポイント

- L_0 入射ビーム幅
- L 回折ビーム幅
- α 結晶表面と回折面のなす角度
- θ ブラッグ角

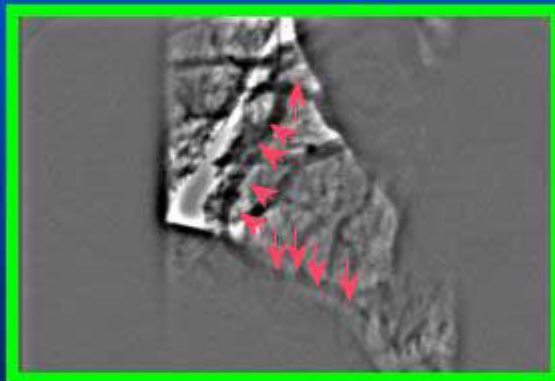


$$L = L_0 \times \sin(\theta + \alpha) / \sin(\theta - \alpha)$$

臨床用 2次元動画画像診断システム



PF-AR NE1 (MPW beamline)



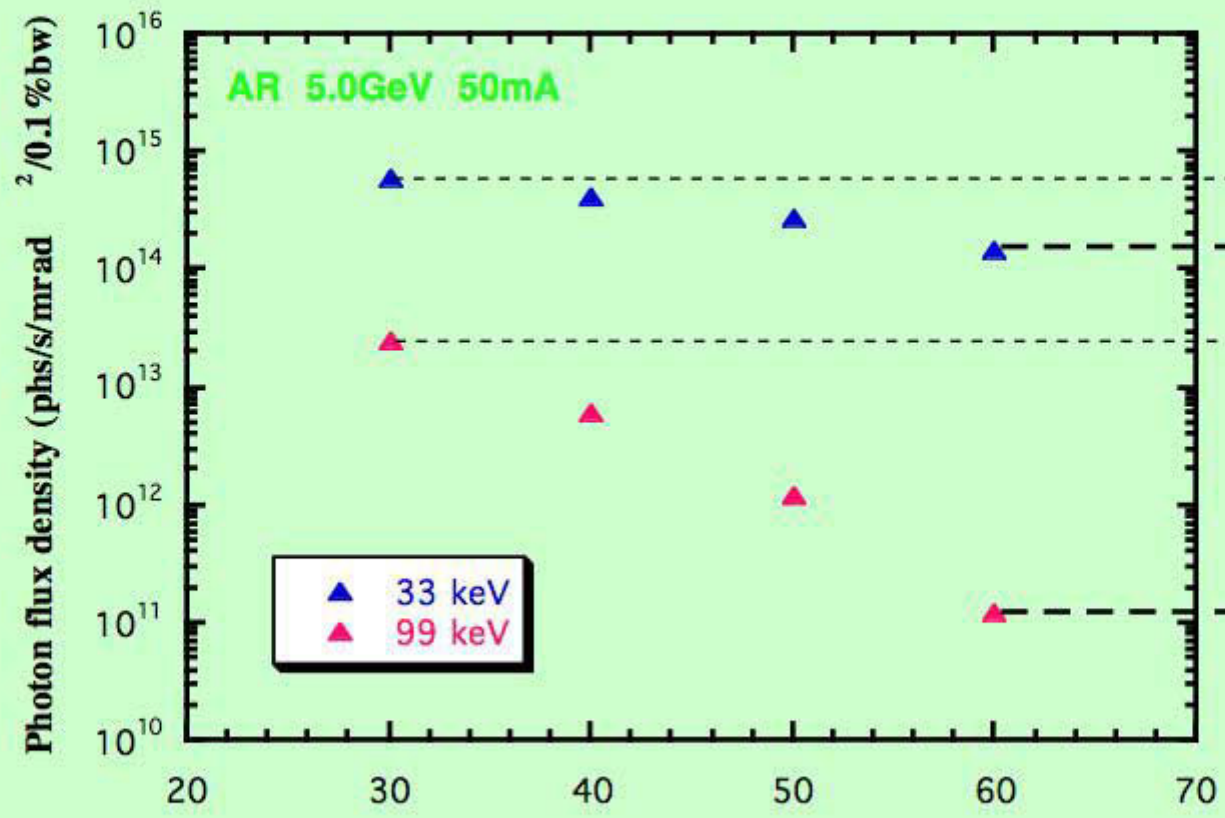
撮影結果の一例 (筑波大学提供)
右冠動脈が明瞭に識別できる。

臨床応用時の条件

| | |
|------|--------------------|
| 照射時間 | 3.2-4.2 msec/image |
| 撮影速度 | 6-10 images/sec |



造影室の内部



FPD (Flat Panel Detector)



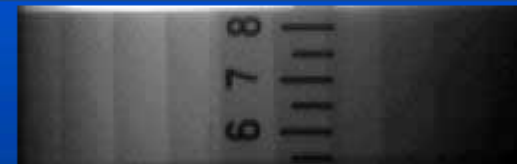
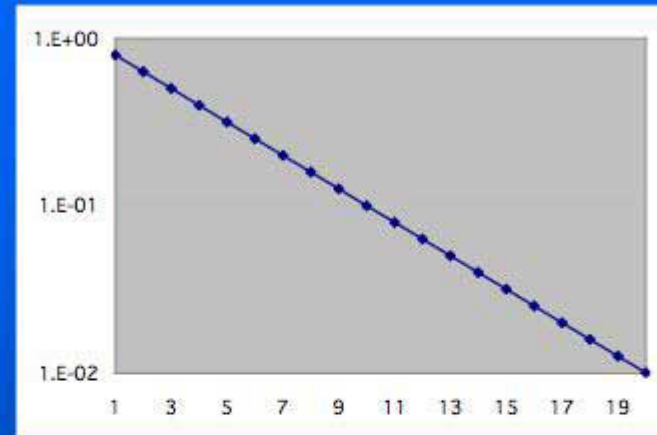
Dynamic range
Digital images

Varian PS2520

Pixel: 1536×1920 (Max)

Spatial resolution: 127 μ m

Fluorescent screen: CsI



アルミステップに対する透過X線強度

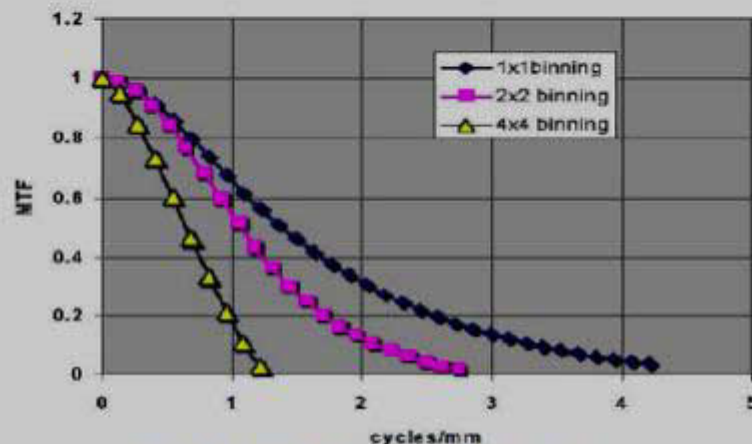
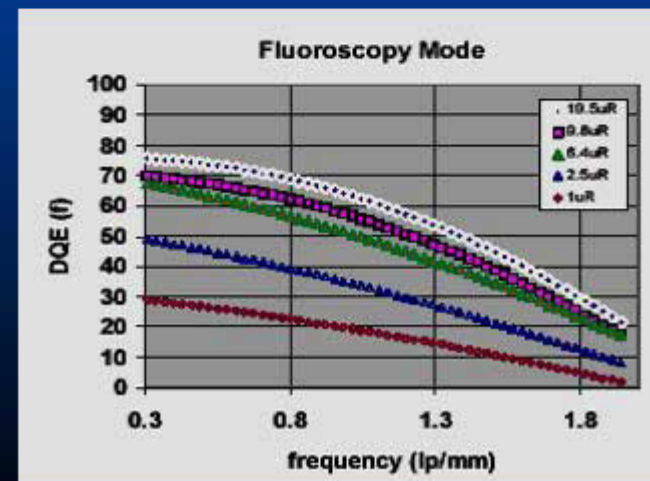
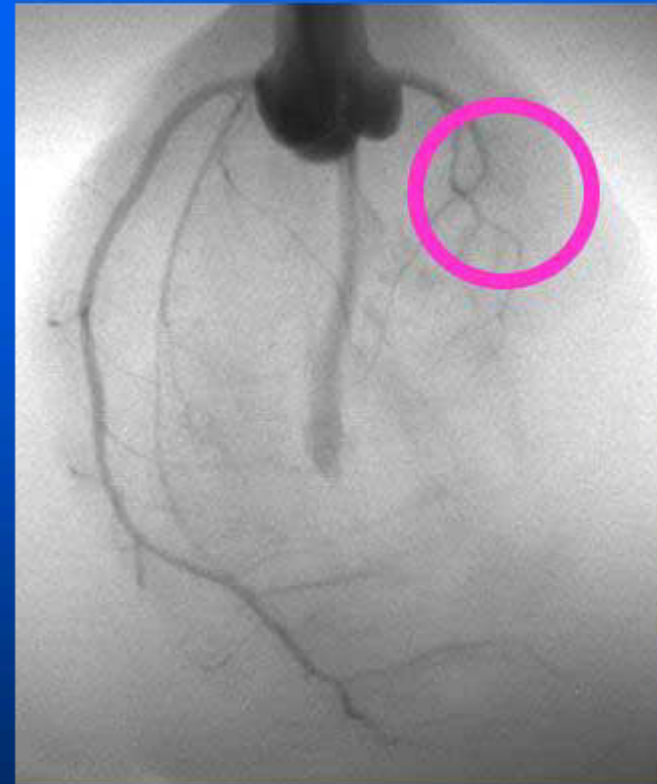
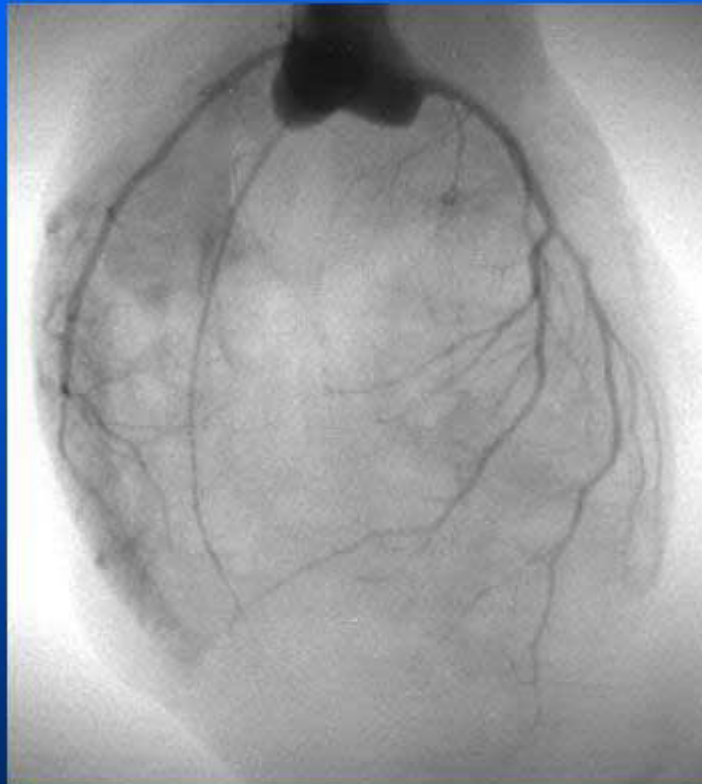


Figure 6 Pre-sampled MTF as a function of the binning mode.



微小血管系の評価(CCD) II

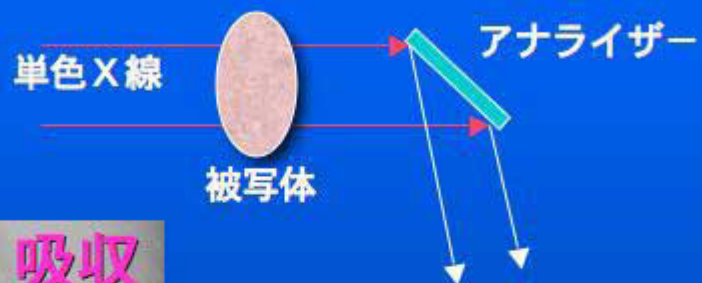


ラットの心血管系の撮影結果（筑波大学提供）

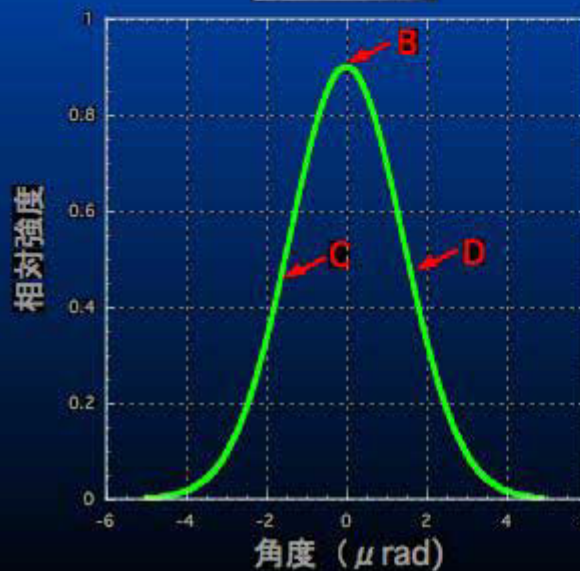
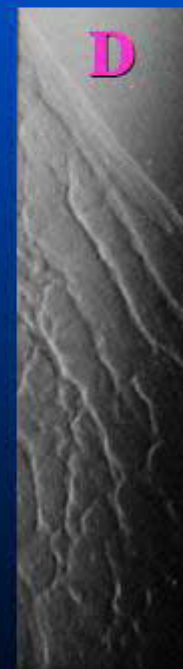
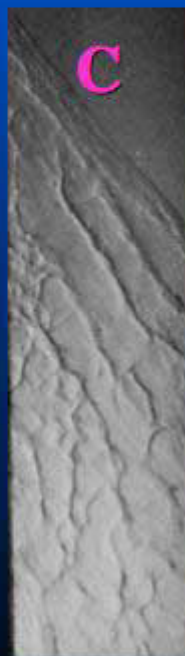
| | |
|---------|---------------------|
| X線エネルギー | 33.3 keV |
| 照射面積 | 25 mm(V) × 30 mm(H) |
| 空間分解能 | 28 μ m |
| 照射時間 | 100 msec/image |
| 撮像系 | CCD-TV |

X線の屈折を利用した画像診断 I

DEI(Diffraction Enhanced Imaging) 法

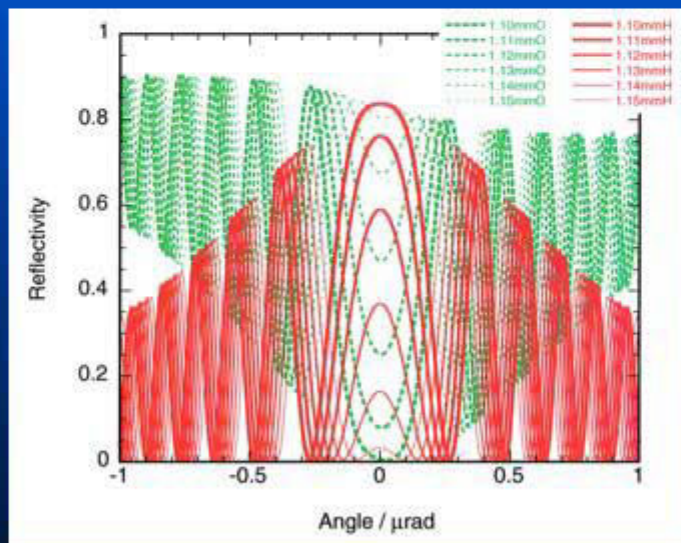


豚の骨
33 keV



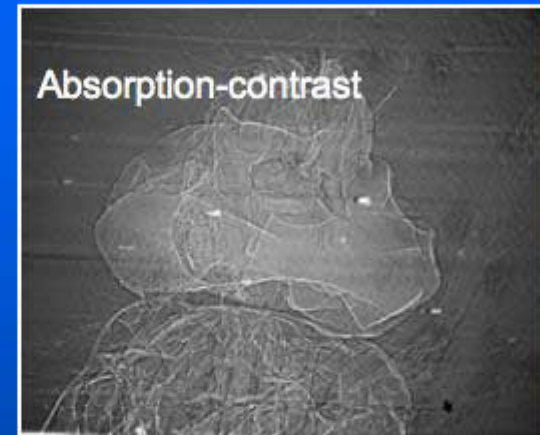
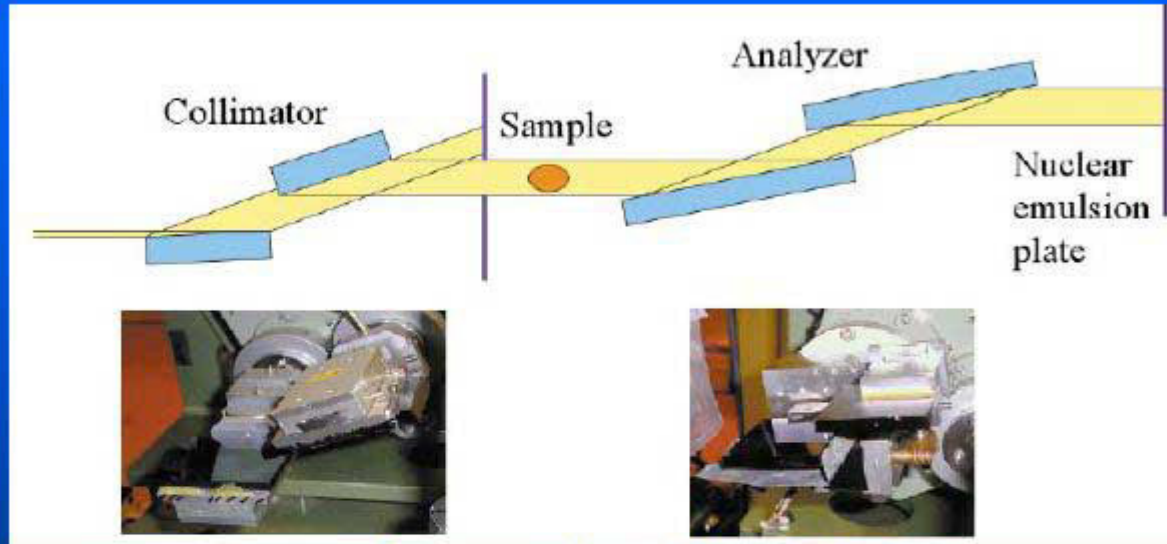
X線の屈折を利用した画像診断 II

ラウエ回折の利用



透過波と回折波の関係 (35 keV)

X線の屈折を利用した画像診断 III

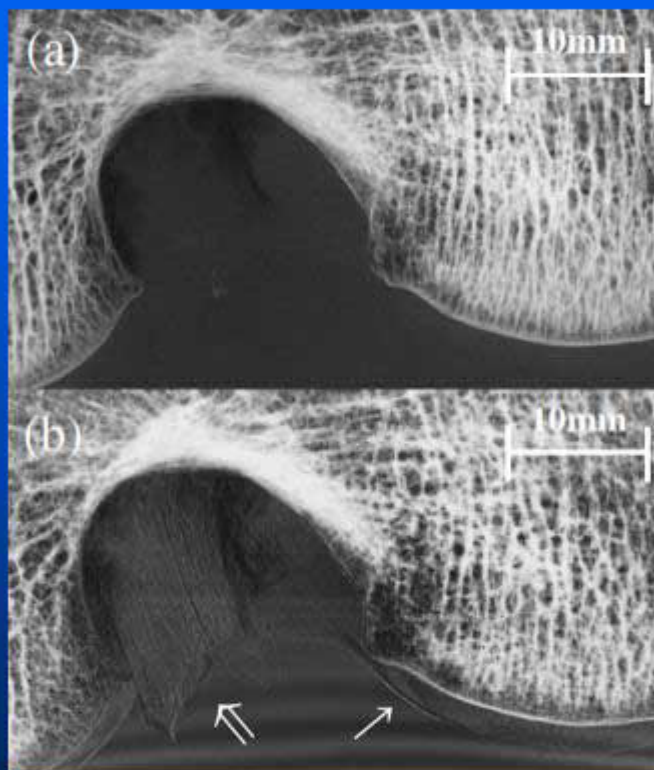


ブラッグ回折の利用

X-ray refraction by a sample
(X-rays propagate along z-axis)

$$\alpha_x \approx \frac{1}{k} \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad \alpha_y \approx \frac{1}{k} \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

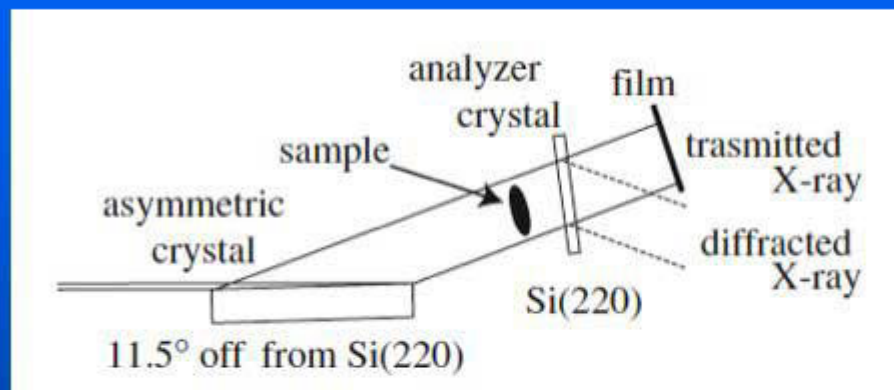
X線の屈折を利用した画像診断 IV



(a) X線吸収像

(b) 暗視野像

軟骨、靭帯が識別できる。



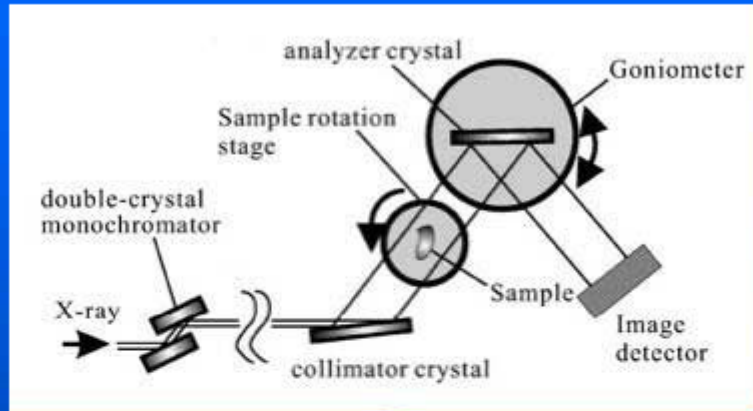
暗視野撮影法によるシステム

PF独自の新しいイメージング法の可能性

2次元画像の実時間撮影（2次元動画像）

照射X線の有効利用

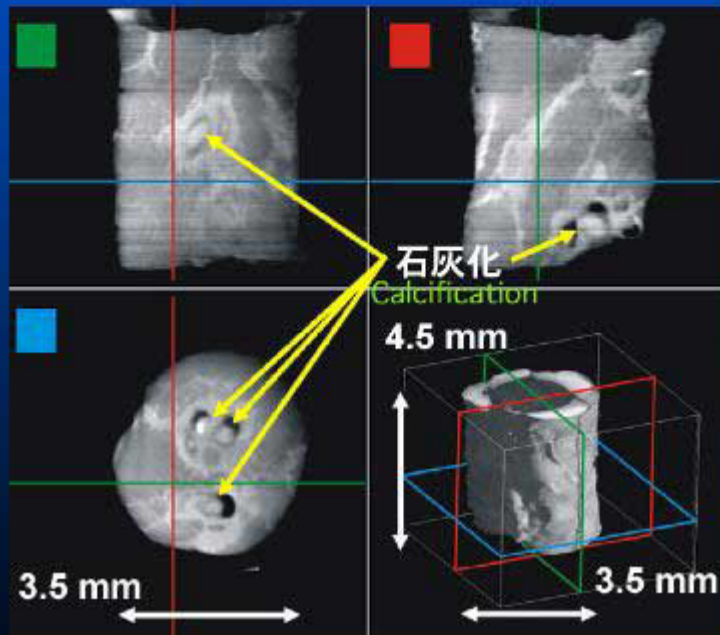
X線の屈折を利用した画像診断 V



DEI-CT



蟻の3次元画像



乳管の3次元画像

New X-ray pathology

I. Koyama, et al. : AIP Conf. Proc., 705 (2004) 1283.

A. Maksimenko, et al. : Appl. Phys. Lett., 86 (2005) 124105.

レーザーコンプトンX線(LCX)の特性

発光点の大きさ（焦点サイズ）：50 μm

光子密度(40 keV)： 1.3×10^6 photons/mm²/sec

照射面積：直径 100 mm 程度

小焦点、大きな照射面積、準単色X線、エネルギー可変
光学素子は使用しなくても良い

屈折効果の方向性がない

吸収効果+屈折効果による画像（照射X線の有効利用）

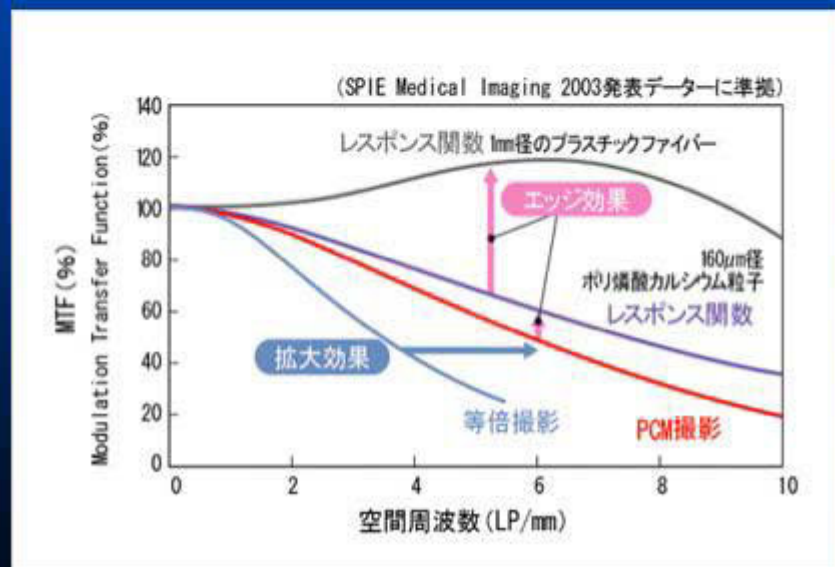
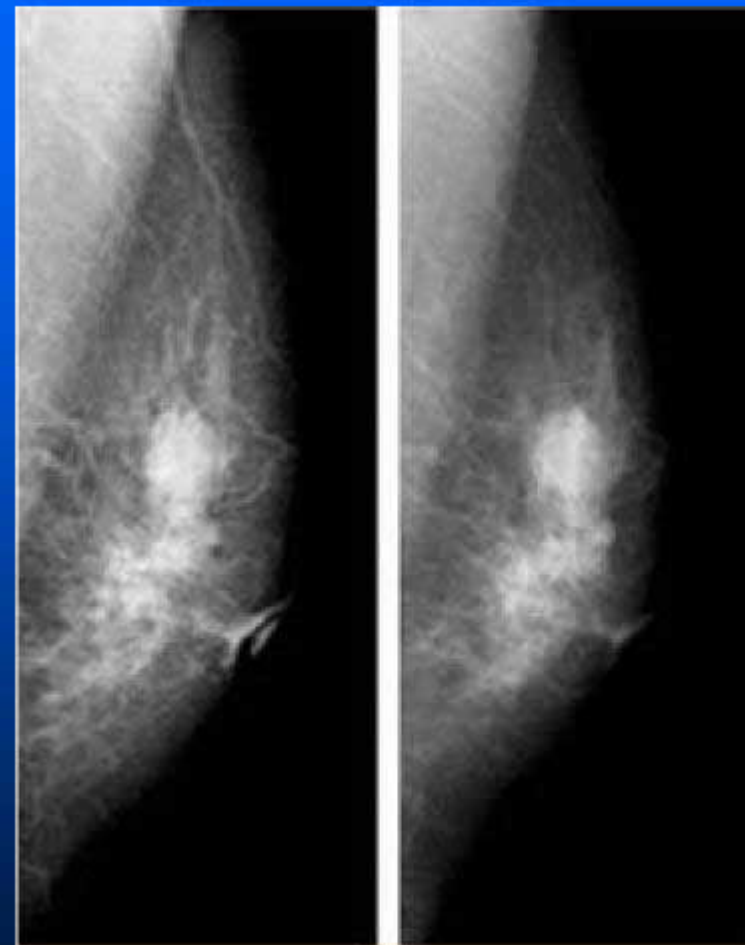
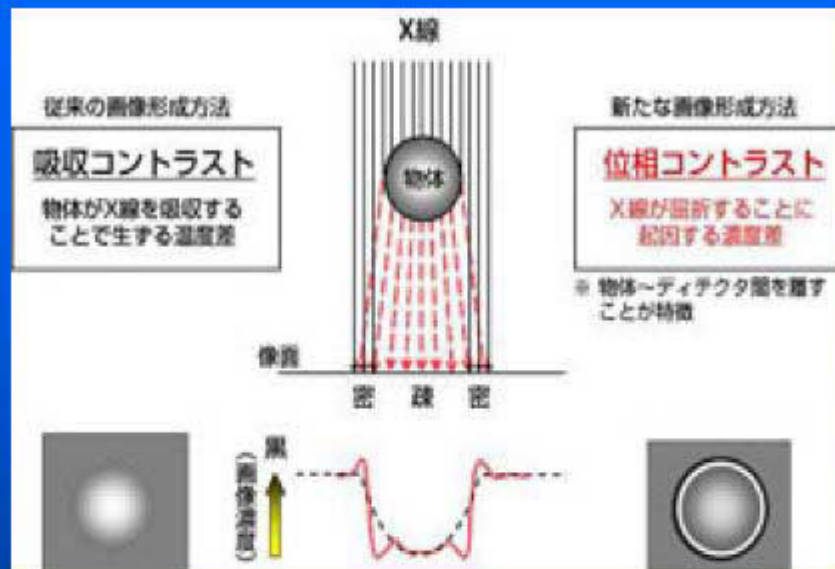
通常発生装置に比較して、高空間分解能、高濃度分解能

装置の小型化の可能性



医学応用、臨床応用

微小焦点によるイメージングI



微小焦点によるイメージング II

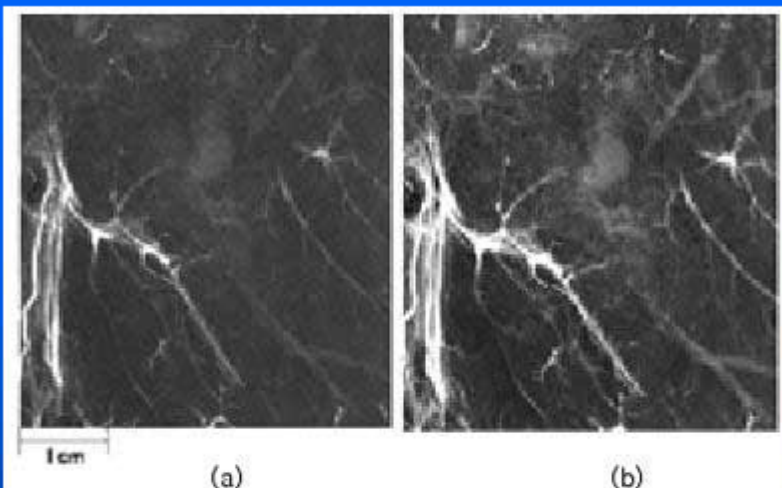


Fig.8 Radiographs of an extracted lung-specimen obtained with (a) a contact radiography and (b) a phase-contrast imaging. (The image size of the phase-contrast imaging was reduced to be equivalent with that of contact imaging for convenience in comparison.)

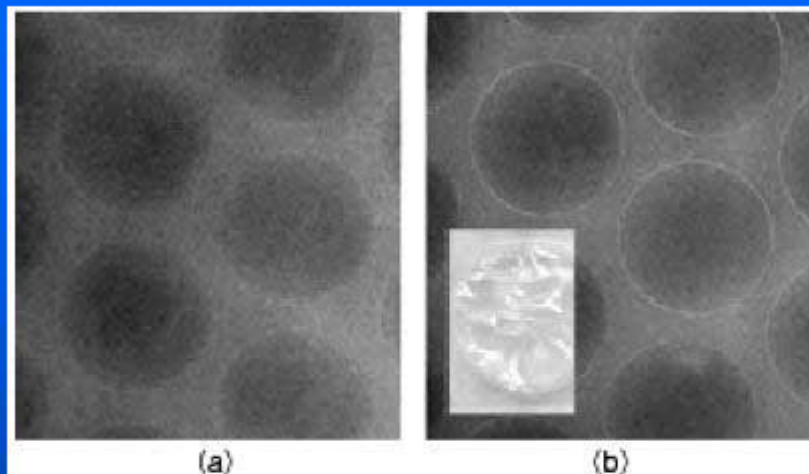


Fig.7 Radiographs of an air-cap obtained with (a) a contact radiography and (b) a phase-contrast imaging. (The image size of the phase-contrast imaging was reduced to be equivalent with that of contact imaging for convenience in comparison.)

全方向に境界領域の画像強調が見られる
焦点サイズ: $100\mu\text{m}$ 、 $R1: 1\text{m}$ 、 $R2: 0.5\text{m}$
Moターゲット



放射光によるファントム撮影の例

LCXによるイメージングI

臨床応用の可能性

1. 乳がん診断、石灰化、乳腺異常部位の描出
2. 骨、関節疾患の描出（高齢化社会への適応）
3. 抹消血管系の診断

基礎医学、生理学、動物学、薬学、、、、、

4. 小動物に対する診断（疾患の機序の解明、創薬、ペット）

課 題

各種疾患診断に最適なパラメータの検討

得られる画像の医学的、臨床的評価

時分割イメージングの可能性

得られるLCXの出射方向の変更

LCXによるイメージング II

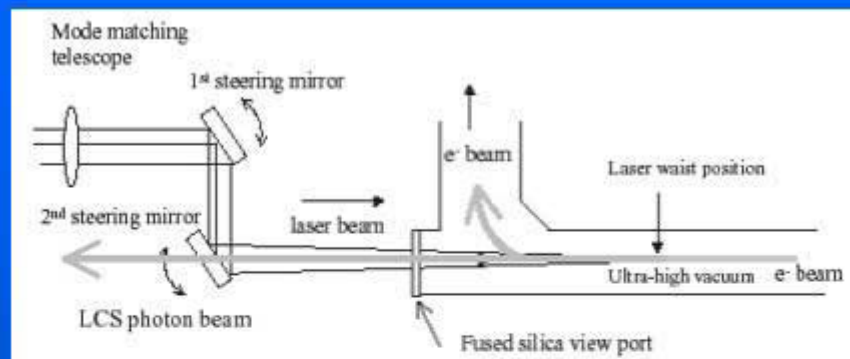
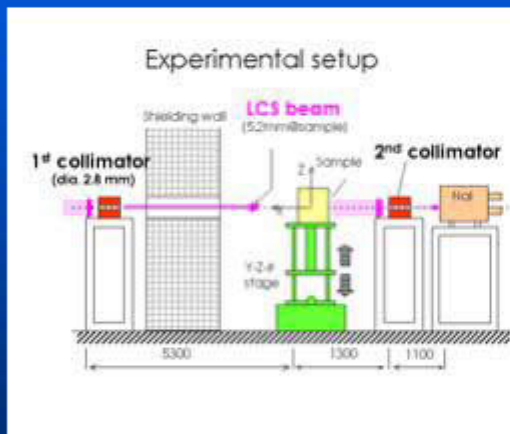
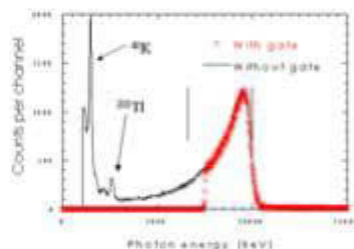


TABLE I. Properties of the AIST-LCS photon facility.

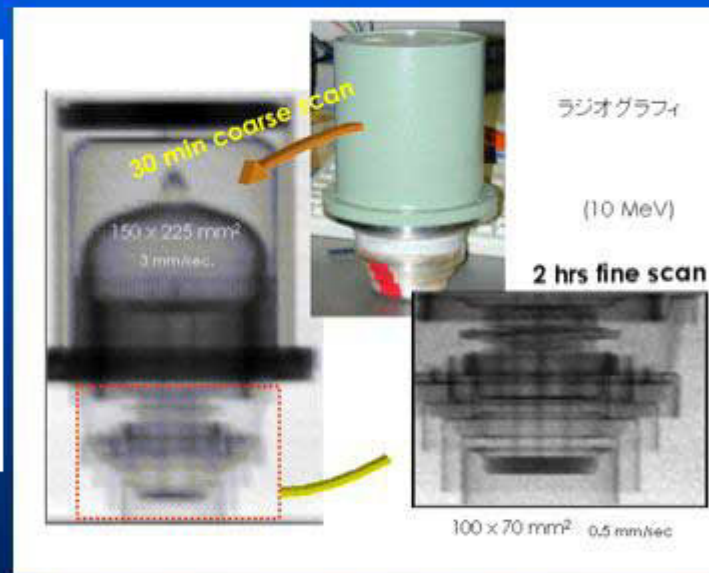
| Laser | λ (nm) | cw/pulse (kHz) | LCS photon (MeV) |
|-------------------------|----------------|-----------------------------|------------------|
| Nd:YLF 1st | 1053 | cw (40 W)/Pulse(1-10, 25 W) | 1.6-10 |
| Nd:YLF 2nd | 527 | Pulse(1-10, 15 W) | 3-20 |
| Nd:YLF 3rd | 351 | Pulse(1-10, 2 W) | 5-30 |
| Nd:YLF 4th | 263 | Pulse(1-10, 500 mW) | 7-40 |
| Nd:YVO ₄ 2nd | 532 | cw (5 W) | 3-20 |
| Nd:YVO ₄ 1st | 1064 | cw (10 W) | 1.6-10 |



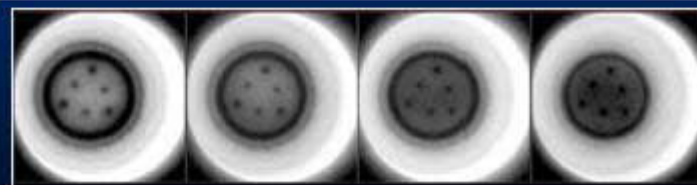
Pulse height spectra of NaI(Tl)



10 MeV, 2nd 2mm collimator

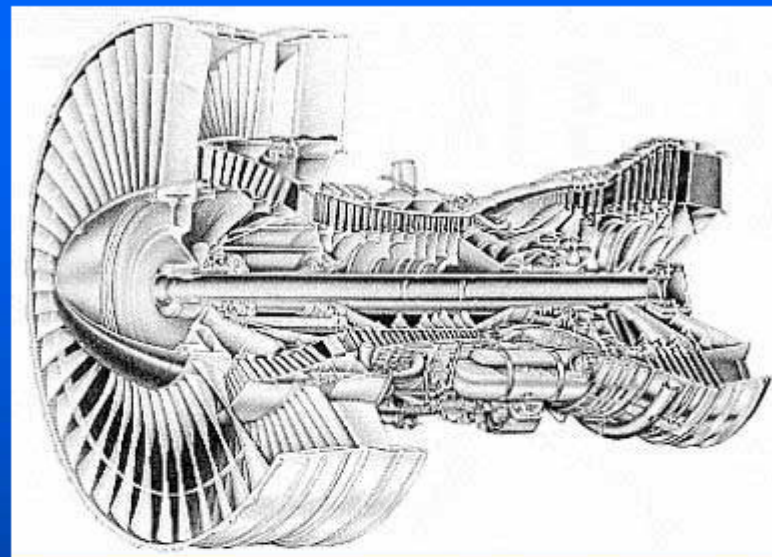
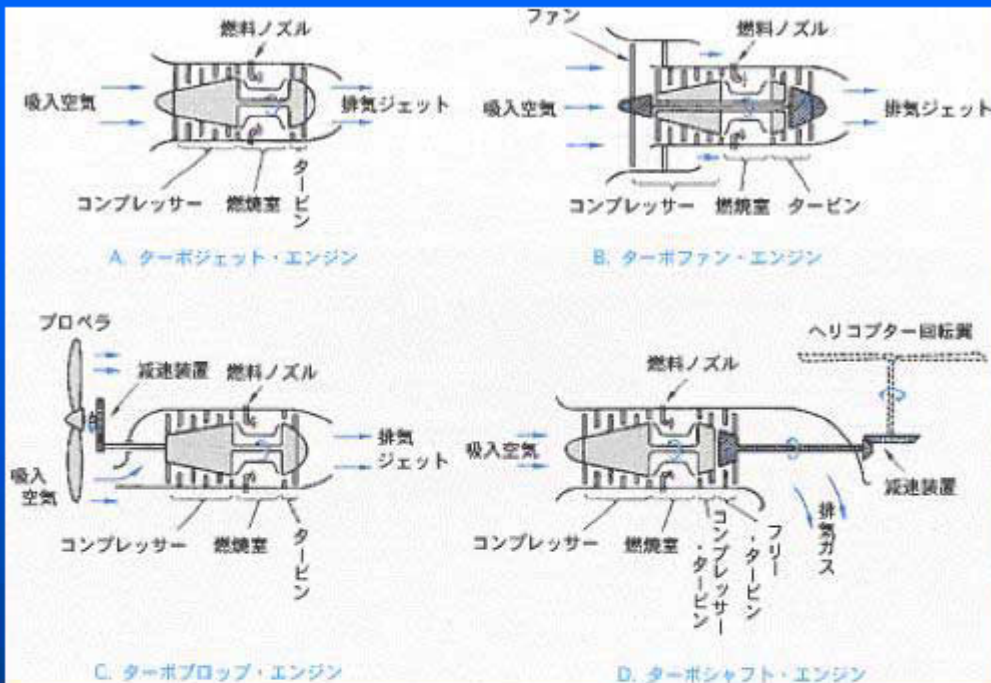


発散角: **0.2 mrad**
 フラックス: **1e+6 photons cm⁻² s⁻¹**
 画像分解能: **650 μ m**
 エネルギー範囲: **1 - 40 MeV**



産総研HPより
 H.Toyokawa: NIM 545(2005)469.

LCXによるイメージング III



ターボファンエンジン

100,000 rpm
6,000 rpm

航空機用のタービンブレードは、内部に冷却用の空気を流す穴があけてあり非常に複雑な構造となっている。

時分割イメージングへの期待
産業応用への期待