静岡大学

エネルギー弁別を利用したX線透過による材質識別

電子工学研究所　青木　徹

X線透過撮像やCT撮像にX線光子のエネルギースペクトルを用いる手法で、透過像の形状情報に加えて透過してきた材質の情報を得ることを可能としている。CTシステムであれば物理的に正確に、透過像システムでは荒く材質識別が可能である。
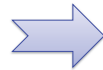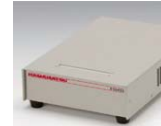
X線イメージングの利用

医療分野　　　産業分野(1)　　　セキュリティ(2)

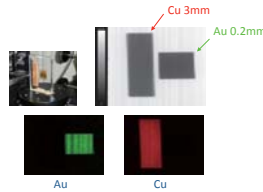エネルギー情報の利用

エネルギー弁別型フォトンカウンティング64ch CdTe放射線ラインセンサ　　マイクロフォーカスX線源

既存の撮像システムの検出器を取り換えるだけで材料識別画像が取得可能(目標)。

フォトンカウンティングX線CT装置
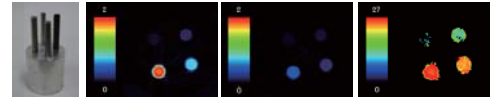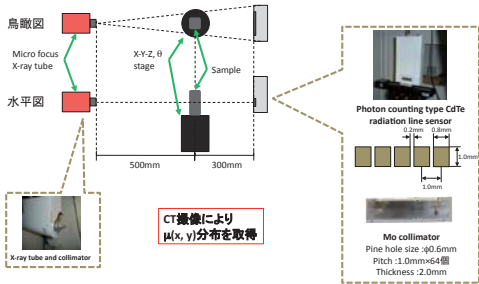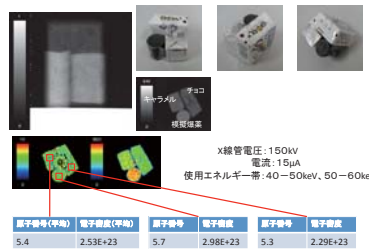

鳥瞰図
Micro focus X-ray tube
X-Y-Z, θ stage
Sample
水平図

500mm　300mm

CT撮像により μ(x, y)分布を取得

X-ray tube and collimator

Photon counting type CdTe radiation line sensor
0.2mm　0.8mm
1.0mm
1.0mm

Mo collimator
Pine hole size :φ0.6mm
Pitch :1.0mm×64個
Thickness :2.0mm

金(Au)と銅(Cu)の識別

Cu 3mm
Au 0.2mm

Au　　　Cu

複数の金属の原子番号(6〜22)識別

Sample	C	Mg	Al	Ti
Z実測値	6.18	11.7	12.7	21.7
Z理論値	6	12	13	22

食品と模擬爆弾の弁別

キャラメル　チョコ
模擬爆薬

X線管電圧：150kV
電流：15μA
使用エネルギー帯：40−50keV、50−60keV

原子番号(平均)	電子密度(平均)	原子番号	電子密度	原子番号	電子密度
5.4	2.53E+23	5.7	2.98E+23	5.3	2.29E+23

材料識別による三次元像の抽出

Chicken
Bone
Meat
Typical 3D
CT images
Extraction of born
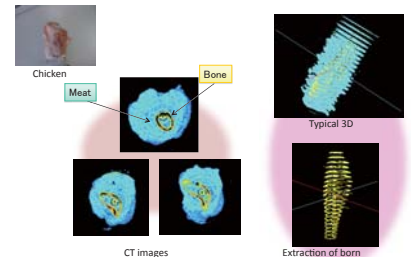
フォトンカウンティングによるエネルギー弁別の原理

Voltage
$V_{th}4$
$V_{th}3$
$V_{th}2$
$V_{th}1$
$V_{th}0$
Time
X線の電圧パルス信号

HV(200V)
Comparator　Counter
Preamplifier
Level 0
Level 1
Level 2
Level 3
Level 4
64ch
ASIC　　V_{th}: Energy threshold
64chCdTe放射線ラインセンサの構成図

Counts
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
level0-1　level1-2　level2-3　level3-4
Energy
X線のエネルギースペクトル
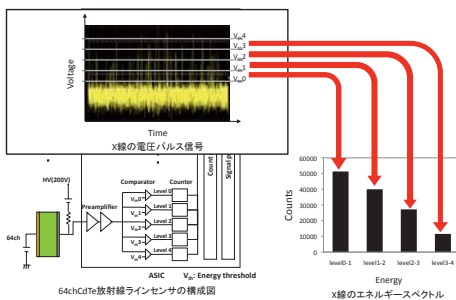
上記の研究成果は、室温動作CdTe-X線検出器、ラインセンサー、CTシステム、関連ソフトウェアなどに渡る基礎研究成果です。ご興味があれば下記までご連絡ください。

その他、下記の大型プロジェクトにおいて連携を考えています。

JST学発ベンチャー創成事業：デジタルフォトンカウンティングX線イメージャーの研究開発・および事業化を進めています。以下連携希望項目です。
・少数センサーを用いたエネルギースペクトル応用（製品）
・X線エネルギースペクトルイメージング応用

知的クラスター創成事業：テラヘルツ波と融合した非破壊検査装置の研究開発・事業化を進めています。以下連携希望項目です。
・CT技術の高精度計測化
・連続処理型CTとその応用

これらの大型プロジェクトは一部共同研究が行われているものもありますので詳しくはご相談ください。

Sequential multi sliced X-ray CT by using vertical projection for high speed CT.

Ayumu Hashimoto Yukino Imura Hisahi Morii Yoichiro Neo Hidenori Mimura and Toru Aoki

Research Institute of Electronics, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku,

Hamamatsu 432-8011 Japan

Introduction

Motivation

To do high speed sequential multi sliced X-ray CT, we propose X-ray CT by using vertical projection without revolving system of X-ray sources and detectors. In addition we use Filter Back Projection(FBP) as reconstruction method ,because of that it can obtain energy spectra and be used for material discrimination.
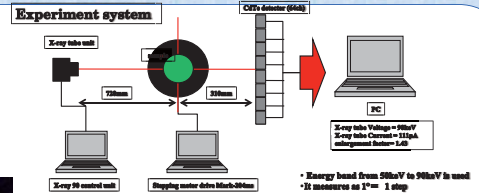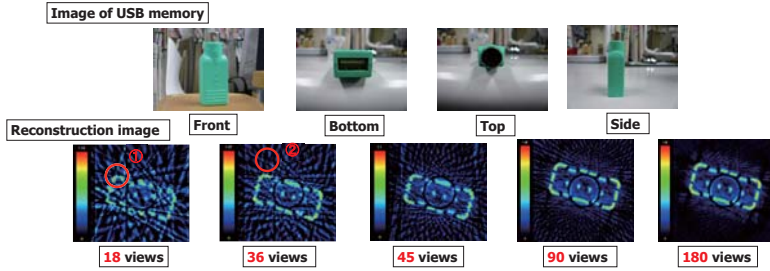
Purpose of Research

To remove revolving system, only projection data from 8 views are used for reconstructing, but obtained image is poor compared with reconstructing image of usual X-ray CT. In order to reconstruct a high quality image from 8 projection data, we suggested that not only horizontal projection and also vertical projection are used to add more information to reconstruct. In this research we improve reconstruction method and images.

Problem of reconstruction by projection data from 8 views.

①Improving reconstructing image by using vertical project. ②Estimation of effect of simultaneous projections on detectors. ③Estimation of atomic number from few views by using material discrimination formula .

Change of reconstructing image by the number of views

Image of USB memory

Front | Bottom | Top | Side

Reconstruction image

18 views | 36 views | 45 views | 90 views | 180 views

Experiment system

X-ray tube Voltage = 90keV
X-ray tube Current = 111µA
enlargement factor= 1.43

• Energy band from 50keV to 90keV is used
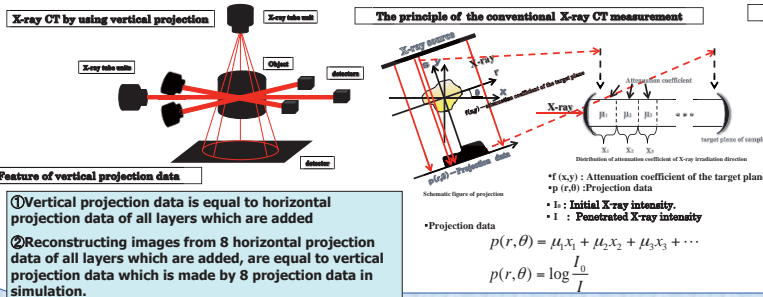• It measures as 1°= 1 step

These pictures show image deterioration and it depends on views. It is considered two kinds of deterioration.

Kind of deterioration
①The shape deterioration.
② Image deterioration from noise of reconstructing method by few views .

Proposal of using vertical projection for reconstructing a high quality image

X-ray CT by using vertical projection

The principle of the conventional X-ray CT measurement

• f (x,y) : Attenuation coefficient of the target plane
• p (r,θ) :Projection data
• I_0 : Initial X-ray intensity.
• I : Penetrated X-ray intensity

• Projection data

$$p(r,\theta) = \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \cdots$$

$$p(r,\theta) = \log \frac{I_0}{I}$$

purpose

To improve a reconstructing image and get atomic number from it, moreover removing noise without deterioration of CT value is needed. From the result of "Change of reconstructing image from the number of views", to estimate amount of change from a reconstructing image by 8 views to by 360 view is possible and it can get a high quality image from a reconstructing image from 8 projections. Therefore, we use features ① and ② to get that and improve that.

Formula for estimating amount of change

$$\frac{H_{2x} - H_x}{V_{2x} - V_x} \fallingdotseq \frac{Y - H_{2x}}{V_{4x} - V_{2x}}$$

H : Reconstructing image from horizontal projections
V : Reconstructing image from vertical projections
X : The number of views
Y : Improved image

Feature of vertical projection data

①Vertical projection data is equal to horizontal projection data of all layers which are added

②Reconstructing images from 8 horizontal projection data of all layers which are added, are equal to vertical projection data which is made by 8 projection data in simulation.

Experiment result

Experiment system

X-ray tube Voltage = 150keV
X-ray tube Current = 30µA
enlargement factor= 1.6

• Energy band from 50keV to 90keV

Sample data

Front | Top | Side

Operational Amplifier

Model : LN 386N-1
Height : 4mm
Width : 10mm
Depth : 7mm

Height from bottom

Experiment result

	Reconstructing image from 8 views	Improving image	Reconstructing image from 360 views
4mm			
3mm			
2mm			
1mm			

This is the best images by this experiment

Formula that is proposed by Jackson and Hakes

$$Z^4 = \frac{\mu(E_2)G(E_1,Z) - \mu(E_1)G(E_2,Z)}{\mu(E_1)F(E_2,Z) - \mu(E_2)F(E_1,Z)}$$

Z : atomic number of a material
F(E,Z) : Factor of photo electric term of the linear attenuation coefficient
G(E,Z) : Factor of scattering term of the same
$\mu(E_1)$:attenuation coefficient at E1
$\mu(E_2)$: attenuation coefficient at E2

Sample data

Aluminum :
Atomic number 13
Height : 21mm
Diameter : 20mm

Experiment result

Al(13) | Measurement area

8 views | 16 views | 32 views | 64 views

X-ray tube Voltage = 150 KeV
X-ray tube Current = 30 µA
enlargement factor= 1.6
µ(E1) : attenuation coefficient at 45 Kev
µ(E2) : attenuation coefficient at 65 Kev

Atomic number from a reconstructing image by poor number of views

	8 views	16 views	32 views	64 views
Average	12.74407	13.30751	13.30751	13.31359
Minimum	1.635575	1.998132	2.028215	4.44532
Maximum	30.34417	30.42775	30.42775	30.81948

Experiment system

X-ray tube Voltage = 150keV
X-ray tube Current = 30µA
enlargement factor= 1.6

• Energy band from 50keV to 90keV

Sample data

Carbon :
Atomic number 6
Height : 100mm
Diameter : 15mm

2 simultaneously projections data Compared with 1 projection data

According to this result 2simultaneous projections data is nearly equal to 1 projection data, because deference between these values are one thousandth compare with 2 simultaneous projections data and 1 projection data. Moreover red line shows that Noise from detector by time fluctuation for 5 seconds and it is not stable . It is more serious for detector.

Conclusion

● To use vertical projection data for a improving reconstructing image is effective but it also still remain some problems.

● The number of views, over 8 views, don't effect about getting effective atomic number of material.

● In 2 simultaneous projections, 1 projection doesn't effect another projection data.

Shizuoka University
Research Institute of Electronics

High Energy Resolution CdTe Schottky Diode γ-Ray Detectors

L.A. Kosyachenko[1], T. Aoki[2,3], C.P. Lambropoulos[4], V.A. Gnatyuk[2,5],
V.M. Sklyarchuk[1], O.L. Maslyanchuk[1], E.V. Grushko[1,2], O.F. Sklyarchuk[1], A. Koike[3]

[1] Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Kotsyubynsky Str. 2, Chernivtsi 58012, Ukraine
[2] Research Institute of Electronics, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu 432-8011, Japan
[3] ANSeeN Inc., 216, Incubation Center, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu 432-8561, Japan
[4] Technological Educational Institute of Chalkida, Psahna, Evia 34400, Greece
[5] V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv 03028, Ukraine

Abstract Schottky diode X/γ-ray detectors based on semi-insulating Cl-doped CdTe crystals produced by Acrorad Co. Ltd. have been developed and investigated. Both the Schottky and ohmic contacts were formed by deposition of Ni electrodes on the opposite faces of (111) oriented CdTe crystals pre-treated by Ar ion bombardment with different parameters. A record-low value of the reverse leakage current in the fabricated Ni/CdTe/Ni Schottky diodes at high voltages (–5 nA at 300 K for the area of 10 mm^2 at bias voltage V = 1500 V) was achieved that was caused by the charge transport mechanisms which were interpreted on the basis of known theoretical models. The developed detectors have shown the record high energy resolution in the measurements of the spectra of ^{137}Cs and ^{57}Co isotopes, (FWHM of 0.42% and 0.49% , respectively). From a comparison of the spectra taken with the detector irradiated from the Schottky contact side and from the opposite side with an ohmic contact, the concentration of uncompensated impurities (defects) in the CdTe crystals has been determined. The obtained value has been found to be close to the optimal one.

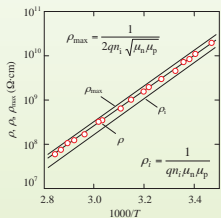## Characteristics of CdTe crystals and Ni/CdTe/Ni diodes with a Schottky contact

Fig. 1 The temperature dependences of the resistivity of CdTe crystal ρ, the resistivity of the material with intrinsic conductivity ρ_i and the maximum resistivity ρ_{max}.
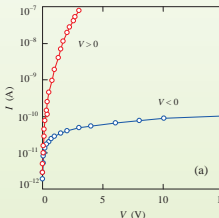
Fig. 2. Room temperature I-V characteristic of the Ni/CdTe/Ni diode structure at low bias voltages (a) and reverse I-V characteristic of the detector in a wide range of voltages (b).
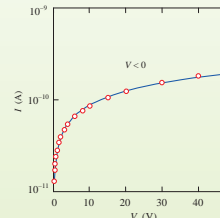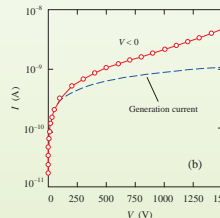
Fig. 3. Comparison of the experimental reverse I-V characteristic of the Ni/CdTe/Ni diode structure (circles) with the calculated results (solid line) according to the Sah-Noyce-Shockley theory (T = 300 K).
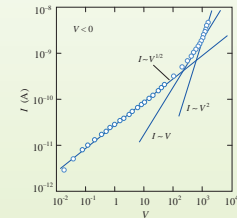
Fig. 4. Reverse I-V characteristic of the Ni/CdTe/Ni diode structure in double logarithmic coordinates. The approximation of the root ($I \sim V^{1/2}$), linear ($I \sim V$) and quadratic ($I \sim V^2$) dependences of the current on bias voltage are shown by straight lines.

Energy resolution and detection efficiency of Ni/CdTe/Ni diode detectors
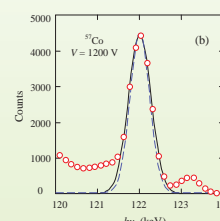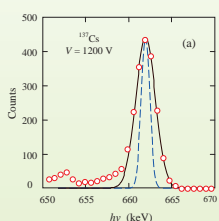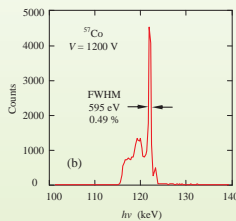
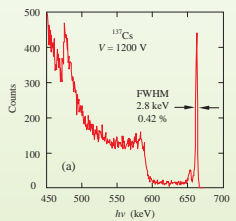### A. Detector spectrometric characteristics

Fig. 5. Spectra of ^{137}Cs and ^{57}Co isotopes taken with the Ni/CdTe/Ni detector at voltage of 1200 V .

Fig. 6. Comparison of the emission peaks of ^{137}Cs and ^{57}Co isotopes (circles) with the normal Gaussian distribution (solid lines). The dashed lines show the peak shapes under the condition that resolution of the detector is due only to statistical fluctuations of the number of ionizations by absorbed photons.
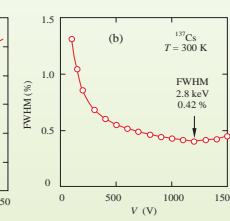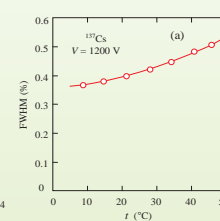
Fig. 7. The effect of temperature (a) and bias voltage applied to the detector (b) on the FWHM in the emission spectrum of a ^{137}Cs isotope.

Energy resolution and detection efficiency of Ni/CdTe/Ni diode detectors

A. Detector spectrometric characteristics
B. Effect of the SCR depth on detection efficiency
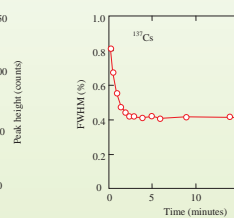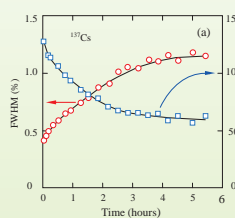### C. Dependence of detection efficiency on the concentration of uncompensated impurities

Fig. 8. The time variation of energy resolution and detection efficiency of ^{137}Cs isotope radiation during the continuous action of voltage 850 V applied to the Ni/CdTe/Ni detector (a), and recovery of energy resolution after switching off the bias voltage (b).
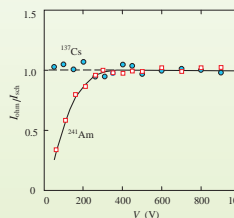
Fig. 9. The ratio of the peak heights in the spectra of ^{137}Cs and ^{241}Am isotopes, taken under irradiation of the detector from the sides of an ohmic contact and Schottky contact, respectively, depending on the bias voltage applied to the detector
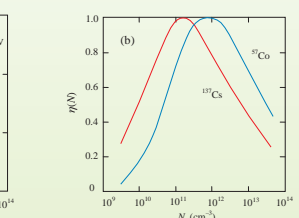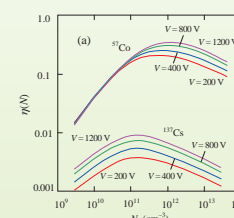
Fig. 10. The calculated dependence of detection efficiency of CdTe crystal with a Schottky contact on the concentration of uncompensated impurities N for the peaks of ^{137}Cs and ^{57}Co isotopes at different bias voltages V applied to the crystal (a) and the normalized spectra of isotopes at voltage of 400 V (b)

Conclusion

The electrical characteristics and X/γ-ray detection efficiency of the Ni/CdTe/Ni Schottky diodes based on chlorine-doped CdTe crystals with nearly intrinsic conductivity are investigated.

(1) It is shown that the I-V characteristics of the Ni/CdTe/Ni Schottky diode structure with a record-low reverse leakage current at high bias voltages can be quantitatively described in terms of known physical models: the generation-recombination in the spatial charge region, the processes under conditions of strong electric fields and currents limited by space charge.

(2) The Ni/CdTe/Ni structures have extremely high energy resolution (FWHM of 0.42% and 0.49% for the lines in the spectra of ^{137}Cs and ^{57}Co isotopes, respectively) the values of FWHM of the lines in the measured spectra are close to the theoretical limit.

(3) From the ratio of the peak heights in the spectra of a ^{241}Am isotope measured under irradiation of the detector from the sides of an ohmic contact and Schottky contact, respectively, the concentration of uncompensated impurities (electrically active defects) $N \approx 10^{12}$ cm^{-3} in the CdTe has been determined.

(4) Calculation of the dependence of the detection efficiency on the concentration of uncompensated impurities in the crystals for ^{57}Co and ^{137}Cs isotopes has been done. The maxima on the $\eta(N)$ curves at N ranging from 2×10^{11} cm^{-3} to 10^{12} cm^{-3} are observed. The value of $N = 10^{12}$ cm^{-3} in the CdTe crystals produced by Acrorad Co. Ltd. is close to the optimum value.

IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM & MEDICAL IMAGING CONFERENCE
21ST SYMPOSIUM ON ROOM-TEMPERATURE SEMICONDUCTOR X-RAY AND GAMMA-RAY DETECTORS
Washington State Convention Center • Seattle, WA USA • 8-15 November 2014

SEATTLE 2014 NSS/MIC

IEEE NPSS NUCLEAR & PLASMA SCIENCES SOCIETY
IEEE

Photoluminescence of CdTe(111) Single Crystals after Laser Irradiation

D.V. Gnatyuk
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
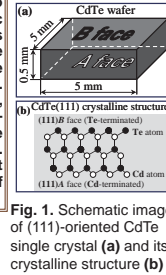*3-5-1 Johoku Hamamatsu 432-8011, Japan*
dimamid@i.ua

T. Ito, T. Aoki
Research Institute of Electronics, Shizuoka University
3-5-1 Johoku Hamamatsu 432-8011, Japan
rtaoki@ipc.shizuoka.ac.jp

Application of CdTe semiconductor

X-ray Computer Tomography
Security, Monitoring
Space Science
Nuclear Monitoring
Industry

Low temperature photoluminescence (PL) of high-resistivity detector-grade Cl-compensated CdTe semiconductor crystals subjected to irradiation with nanosecond (τ = 7 ns) laser pulses of the second harmonic (λ = 532 nm) of a YAG:Nd laser is studied. Irradiation of CdTe crystals within the certain range of laser pulse energy densities results in a relative decrease in the emission intensity in both the deep energy level and edge regions and an increase in the exciton band intensity in the PL spectra. The evolution of the PL spectra depending on laser energy density, excitation level and temperature under excitation are analyzed. Laser-stimulated transformation of the point defect structure of the CdTe surface region and mechanisms of laser-induced defect formation are discussed. The optimal regimes of laser processing have been obtained which result in the minimum ratio of the defect and exciton bands that is an evidence of an increase in the structural perfection of the irradiated crystals.

Experimental procedure

Chemical etching

Laser irradiation

Fig. 1. Schematic image of (111)-oriented CdTe single crystal (a) and its crystalline structure (b)

#	Details of applied irradiation
0	Non-irradiated CdTe crystal
1	50 mJ/cm²
2	75.8 mJ/cm²
3	101.7 mJ/cm²
4	146.6 mJ/cm²

Tab. 1. Data on the surface treatments of CdTe samples No 1-5.
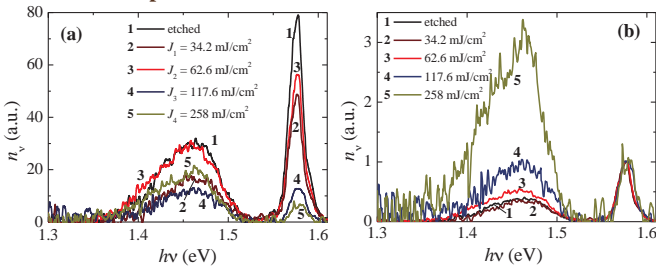
Results: PL spectra at 80 K

Fig. 2. PL spectra of the CdTe(111) crystals measured from the Te-terminated side at excitation power density J_{ex} = 4.5 W/cm² for etched sample (1) and for samples treated by laser pulses of energy densities: J_1 = 34.2 mJ/cm² (2), J_2 = 62.6 mJ/cm² (3), J_3 = 117.6 mJ/cm² (4) and J_4 = 258 mJ/cm² (5) (a). The same spectra normalized by the intensity of the PL band at 1.57 eV (b).

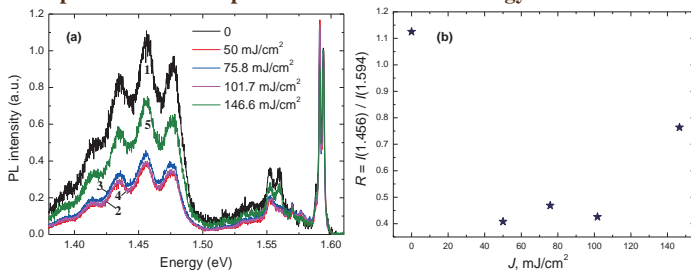## PL spectra at 5 K – dependence of irradiation energy

Fig. 4. PL spectra of the CdTe(111) crystals measured from the Te-terminated side at excitation energy J_{ex} = 150 mcW for non-irradiated sample (0) and for samples treated by laser pulses of energy densities: J_1 = 50 mJ/cm², J_2 = 75.8 mJ/cm², J_3 = 101.7 mJ/cm² and J_4 = 146.6 mJ/cm². The spectra are normalized by the intensity of the intrinsic PL band at 1.59 eV (a). The relative intensity of the bands in different densities (b).

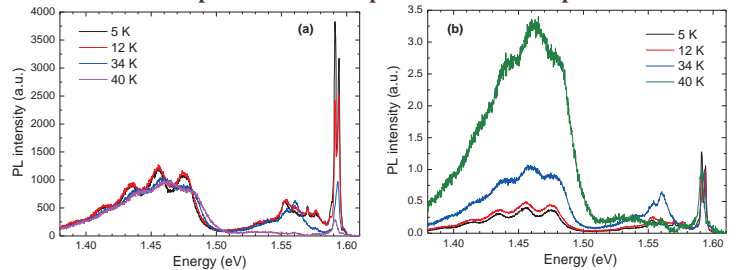## PL spectra at 5 K – dependence of the temperature

Fig. 3. PL spectra of the CdTe(111) crystals at excitation power density I_{ex} = 200 mcW for sample treated by laser pulse of energy density J = 101.7 mJ/cm² in dependence of the temperature (a). The spectra are normalized by the intensity of the PL band at 1.59 eV (b).

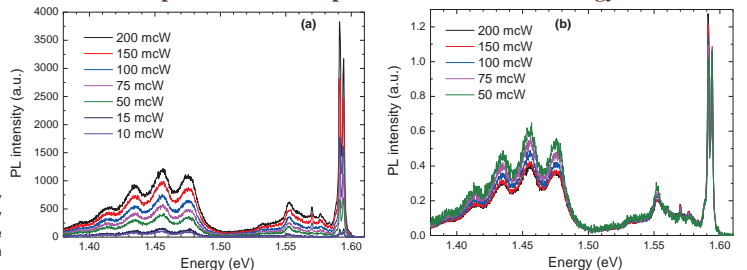## PL spectra at 5 K – dependence of excitation energy

Fig. 5. PL spectra of the CdTe(111) crystal, samples treated by laser pulse of energy density J_2 = 75.8 mJ/cm² (a). The same are spectra normalized at 1.59 eV (b).

The PL spectra of all investigated CdTe samples can be divided into three regions: (I) the deep level emission region (1.390-1.510 eV), (II) the edge emission region (1.510-1.580 eV), and (III) the exciton emission region (1.580-1.604 eV). These regions are generally associated with defect bands (I), shallow donor-acceptor pair transitions and LO-phonon replicas of the exciton lines (II), and exciton recombination (III), respectively.

The relative redistribution of the band intensities in three regions of the PL spectra, particularly a decrease in the intensity in the deep level and edge regions and increase exciton bands for CdTe crystals subjected to laser treatment with nanosecond pulses of energy density $J \sim$ 50-100 mJ/cm² (Fig. 4) has demonstrated the possibilities of modification of the surface state and improvement of the point defect structure in the surface region of CdTe.

Summary

The evolution of PL spectra of CdTe(111) crystals subjected to irradiation with nanosecond laser pulses are attributed to transformation of point defect structure of the surface region of the samples. The relative redistribution of the band intensities in three regions of the PL spectra, particularly a decrease in the intensity in the deep level and edge regions and increase exciton band intensity after laser irradiation with the certain energy densities has demonstrated the possibilities to modify the surface state and increase the structural perfection of the surface region of CdTe. Employing radiation of the second harmonic of a **YAG:Nd** laser with wavelength longer compared with that of excimer **KrF** laser radiation used before has allowed us to modify and study thicker surface layer of CdTe the material. On the base of the analysis of the PL spectra obtained at different laser pulse energy densities, excitation levels and temperatures, the optimal regimes of laser processing of CdTe crystals have been developed.

高ダイナミックレンジフォトンカウンティングX線イメージャー

小池 昭史・奥之山 隆治・四ノ宮 文二・森井 久史・根尾陽一郎・三村 秀典・青木 徹

静岡大学 電子工学研究所

Background

CdTeフォトンカウンティングX線ラインセンサ
文部科学省　知的クラスタ創成事業により開発
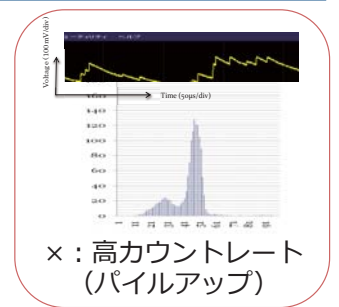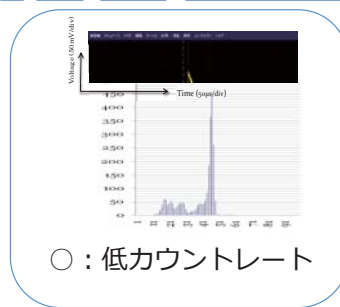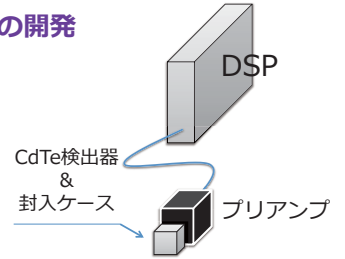

浜松ホトニクス㈱C10413販売中

放射線エネルギー情報の取得が可能
- ✓ 対応エネルギー帯域　　　　　　：30keV～1MeV
- ✓ エネルギー分解能　　　　　　　：20KeV
- ✓ カウントレート：～30Kcps
　　　　　　　（高エネルギー分解能設定時）

**実用検査には測定速度（カウントレート）、
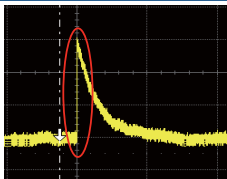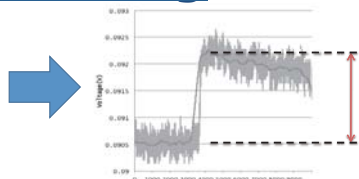エネルギー分解能に大きな課題がある。**

Purpose

高カウントレート対応信号処理の開発
- ▢ 高速プリアンプによる信号取得
  - ○ 立ち上がり時間短縮
  - × 出力信号のS/N悪化
- ▢ デジタル波形処理装置（DSP）
  - ○ 立ち上がり情報の利用
  - ○ パイルアップ除去
  - ○ ノイズカットフィルタ
- ▢ 検出器封入ケース
  - ○ 低ノイズ化

DSP

CdTe検出器
&
封入ケース

プリアンプ

○：低カウントレート　　　　×：高カウントレート
　　　　　　　　　　　　　　　　　（パイルアップ）

Detection & Filtering
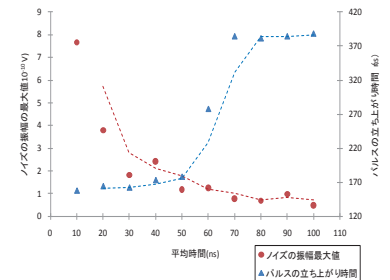

信号取得 &
高速デジタイズ

ローパスフィルタリング処理
& パルスハイト取得

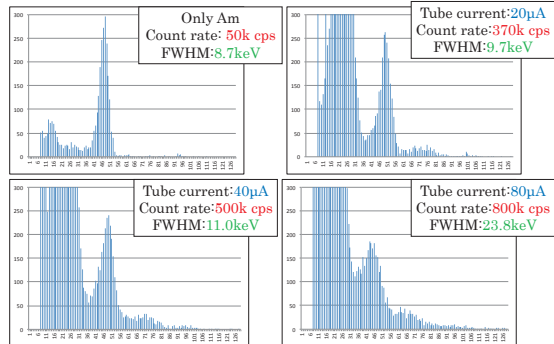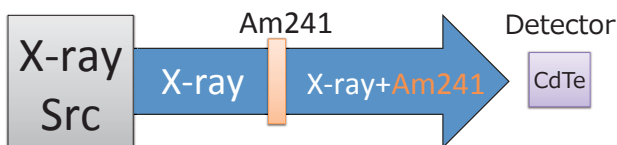**正確なパルスハイト（エネルギーに比例）
取得のためにはノイズ除去が必須**

ノイズ低減
- ▢ 従来法
  アナログ微分積分処理
  （処理速度に問題）
- ▢ 本方法
  デジタルフィルター処理

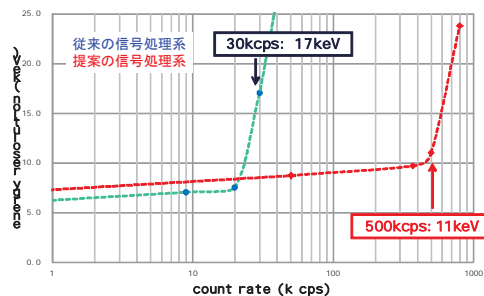ローパスフィルター、FFTフィルター等を検討し、ノイズフィルター効果とDSPでの実装を考慮し、単純移動平均法を採用

単純移動平均時間の最適化
（ノイズ除去と立ち上がり時間）

High Count-Rate Experiment

X-ray
Src

X-ray　X-ray+Am241

Am241

Detector

CdTe

Only Am
Count rate: 50k cps
FWHM:8.7keV

Tube current:20μA
Count rate:370k cps
FWHM:9.7keV

Tube current:40μA
Count rate:500k cps
FWHM:11.0keV

Tube current:80μA
Count rate:800k cps
FWHM:23.8keV

パルスハイト方式では高カウントレート
　　状況化においても分解能を維持できた
　　（～500kcpsまで）

従来の信号処理系
提案の信号処理系

30kcps: 17keV

500kcps: 11keV

従来型とパルスハイト型信号処理の比較

Conclusions

- ✓ フルデジタル処理による高速・高性能パルスカウント処理
- ✓ パイルアップ時にも高エネルギー分解能を実現
- ✓ 実用カウントレートを従来の30kcps→500kcpsへ拡大
- ✓ 実用的な検査装置への適用が可能
- ✓ X線液体危険物検査装置へ応用、
  画像センシング展にてデモンストレーション中

Shizuoka University

CdTeフォトンカウンティング検出器による高コントラストK-Edge CT

静岡大学電子工学研究所 情報学研究科 安次富寛一、中川央也、真田拓人、三村秀典、青木徹

研究背景

X線は物質の透過性を利用して産業、医療、セキュリティの分野でX線検査やX線CTに活用されている

■物質特定：二つのエネルギー帯域の情報を利用して実効原子番号、電子密度の特定が可能（Dual energy法）

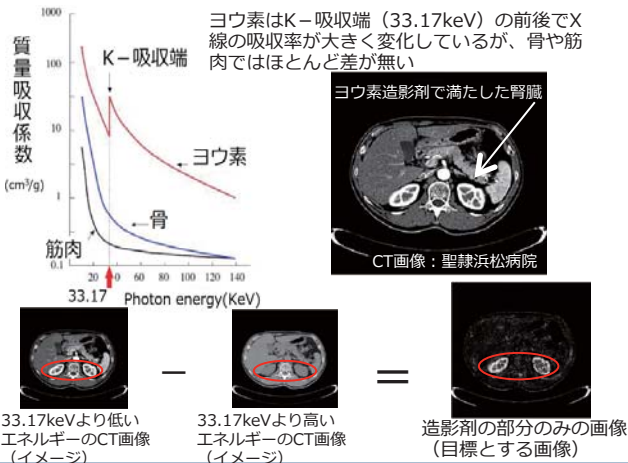■X線医療を低線量・低被ばくで実現する要求が高い。
◆**CdTeフォトンカウンティング検出器**
- 半導体（CdTe）を用い**高感度**
- フォトンカウンティング方式による**エネルギー情報**の取得

→ **低被ばく・低線量治療**

目的

K-Edge CT法におけるエネルギー帯バンド幅の影響の検討

K-Edge CT差分法

ヨウ素はK－吸収端（33.17keV）の前後でX線の吸収率が大きく変化しているが、骨や筋肉ではほとんど差が無い

質量吸収係数 (cm²/g)、Photon energy(KeV)、K－吸収端、ヨウ素、骨、筋肉、33.17

ヨウ素造影剤で満たした腎臓
CT画像：聖隷浜松病院

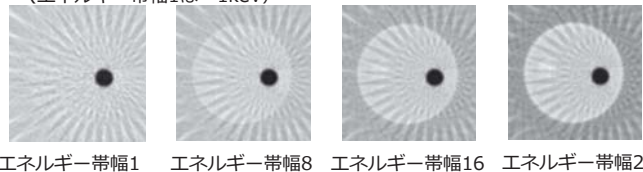33.17keVより低いエネルギーのCT画像（イメージ） － 33.17keVより高いエネルギーのCT画像（イメージ） ＝ 造影剤の部分のみの画像（目標とする画像）

K-Edge CT差分法の高コントラスト化

■データ取得後にヨウ素のK-Edgeの前後のエネルギー帯のCT画像を作成し差分をとる。従来の手法ではエネルギー分解能が低いが、今回のフォトンカウンティング方式ではエネルギー帯を細かく設定できる

エネルギー帯AのCT画像　エネルギー帯BのCT画像　エネルギー帯CのCT画像　エネルギー帯DのCT画像

エネルギー帯A、Bの差分画像 エネルギー帯幅16keV（従来の手法）
エネルギー帯C、Dの差分画像 エネルギー帯幅5keV（今回の手法）
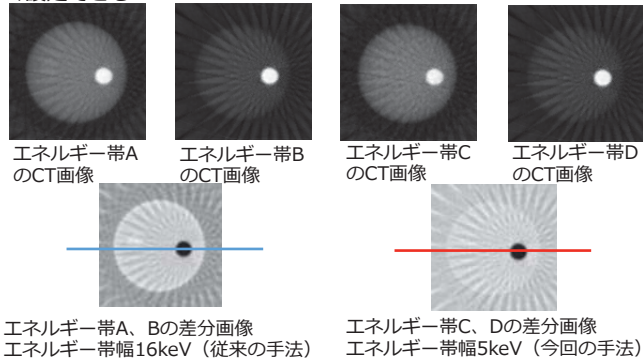
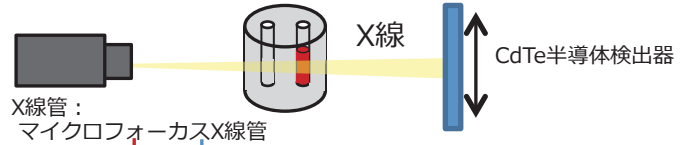■使用するエネルギー帯幅による画像の変化（エネルギー帯幅1は～1keV）

エネルギー帯幅1　エネルギー帯幅8　エネルギー帯幅16　エネルギー帯幅24

実験手法

①ヨウ素水溶液をアクリルの容器に入れX線CT撮像を行う

ヨウ素水溶液（30mg/ml）
アクリル

ファントムのイラスト　ファントムの側面の様子　ファントムの上部の様子

②フォトンカウンティング方式の半導体検出器を用いてエネルギーと線量のデータをとりCT画像を描画した。

X線管：マイクロフォーカスX線管　X線　CdTe半導体検出器

◆CT画像上の赤と青の2本の線上のX線のスペクトルの一部を下のグラフに示す。

得られたCT画像

K－吸収端33.17keV）

カウント数
4000
3000
2000
1000
0

ヨウ素
アクリル

エネルギー帯C　エネルギー帯D
エネルギー帯A　エネルギー帯B

0　10　20　30　40　50　60　KeV
70

アクリルとヨウ素水溶液の各エネルギーごとのX線のカウント数（スペクトル）

0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6

1　64　127　ch

従来の手法
今回の手法

各差分画像の線上の画素値

0.5
0
-0.5
-1
-1.5

1　64　ch　127

エネルギー帯幅1
エネルギー帯幅8
エネルギー帯幅16
エネルギー帯幅24

結果

■エネルギー帯A、BのCT画像の差分画像とC、Dの差分画像では後者の方がよりアクリル部分が排除されヨウ素の部分が強調されていることが確認できる。

■使用するエネルギー帯幅を細くするほどコントラストが高くなり、対象物が抽出された画像を作成できた

まとめ

■半導体フォトンカウンティング検出器で得られたエネルギー情報を利用し、K-Edge CT差分法において、対象物のみを抽出する画像を得ることができた

■CTに使用するエネルギー帯は細いほど差分画像のコントラストは高くなるが、使用するデータ量は減りCTが不可能になることも考えられる。

低被ばく放射線計測技術に関する研究

[1]静岡大学大学院情報学研究科／電子工学研究所、[2](株)ANSeeN 青木徹[1,2]
小池昭史[1,2]、中川央也[1]、森井久史[1]、奥之山隆治[1]

青木 徹

フォトンカウンティング技術はガンマ線などの放射線計測では古くから用いられている方法である。X線領域ではX線フォトンのエネルギーと数を検出でき、検出素子や回路などのノイズ成分がエネルギー一軸方向へ変換され、カウント数方向（強度軸方向）はノイズレスとなる。また、低線量領域ではフォトンの時間揺らぎが問題となるがCT撮影を用いることで原理的に揺らぎを平均化できる。積算型（従来型計測法）のCdTe検出器と、フォトンカウンティング型のCdTe検出器を用いて、線量を低下したときの影響の違いについて主に考察する。

1.研究背景・目的

低線量X線撮像は医療現場の低被ばく化に向けて盛んに研究されている。現在、多くは撮像方法や画像再構成の改良によるIR法が研究開発され、一部実用化が始まっている。本論文では、撮像の際の「検出方法」そのものを従来から変えることで、低線量での高い画質の画像を撮影する技術について議論する。
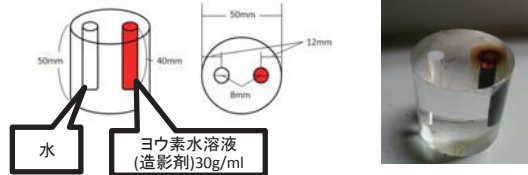
本研究所で進めているナビジョンサイエンスは従来の光子や電子を集団統計的に扱う画像技術から、ナノ領域で個々に取り扱うことで新しい画像科学を構築する学術領域である。本研究は之を駆使して「フォトンカウンティング」イメージングを進め、これによる低被ばくX線イメージングについて研究を行った。
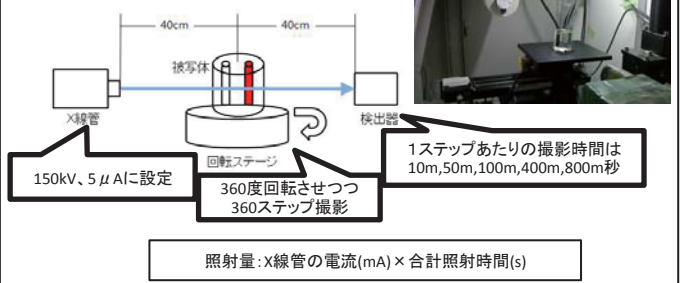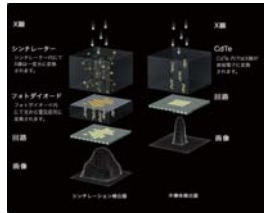
[CdTeフォトンカウンティング型検出器]
低被ばく放射線計測を実現し得る検出器として本研究グループで研究開発を続けている。
・ポイント
1. CdTe（カドミウムテルライド）
2. フォトンカウンティング

1. CdTe（カドミウムテルライド）
人体を透過しやすい高いエネルギーのX線の吸収が大きく感度の高い検出器である。さらにX線の光子から電荷へ直接変換するため、変換効率が高く、光の拡散による画像ぼけが生じない、医療向けの画像検出器として有望な検出器材料である。Pin検出器の開発などでさらに高性能化に成功している。

CdTe半導体は従来のシンチレーション検出器と比べて、光の拡散が原理的に生じない

2. フォトンカウンティング
同じCdTeを使用しても蓄積型検出器と比べて、フォトンカウンティング検出器は強度軸方向のノイズの影響を受けずに撮影することができる。一般的なノイズはエネルギー一軸方向に加わる。

蓄積型検出器　　　　　フォトンカウンティング検出器
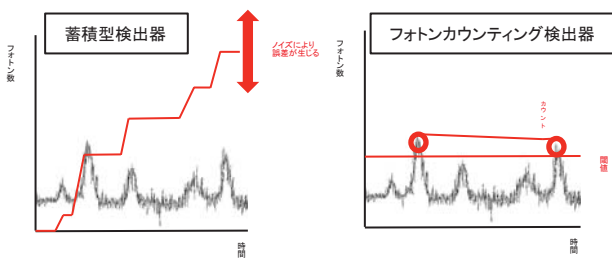
蓄積型検出器とフォトンカウンティングのノイズの影響の違い（イメージ図）

[透過像撮像での蓄積型とフォトンカウンティング型の比較]

蓄積型
X線管出力
・ 80 kV
・ 5 mA
検出器仕様(H社製)
・シンチレータ
・100μm□ピクセル

従来の検出方式　　フォトンカウンティング方式

フォトンカウンティング型
X線管出力
・ 80 kV
・ 0.05 mA
検出器仕様（ANSeeN XDS-001型）
・CdTe（フォトンカウンティング）
・500μm□ピクセル

2.実証検討

[方法]
蓄積型検出器とフォトンカウンティング型検出器の両検出器において、減弱係数が人体に近いアクリルファントムをCT撮影して画像を得る。

画像はCT値により描画されているので、アクリルファントムのCT値の理論値を求め、両検出器で撮影された画像と比較して誤差（RMSE）の大きさを確認することで評価を行う。
※今回は理論値の代わりに撮影時間が最も長い(800m秒の)画像のCT値を理論値として使用した。

使用機材

被写体	アクリルファントム（下図参照）
X線管	L12161-07 150kV, 0.5mA （浜松ホトニクス）
蓄積型検出器	SCAN300F (AJAT), ANS-FPD試作品 (ANSeeN)
フォトンカウンティング型検出器	X-123CdTe (amptek), ANS-XDS001 (ANSeeN)

[アクリルファントム]

50mm　40mm　50mm　8mm　12mm

水　　ヨウ素水溶液
（造影剤）30g/ml

[実験配置図]

40cm　40cm
X線管　被写体　検出器
回転ステージ

150kV、5μAに設定
360度回転させつつ360ステップ撮影
1ステップあたりの撮影時間は10m,50m,100m,400m,800m秒

照射量：X線管の電流(mA)×合計照射時間(s)

[画像を評価する際の指標]
画像の分解能、コントラスト、シグナルノイズ比の中から、今回はシグナルノイズ比に注目して、画像の「二乗平均平方根誤差(RMSE)」を求めた。RMSEは以下の式により求められる。

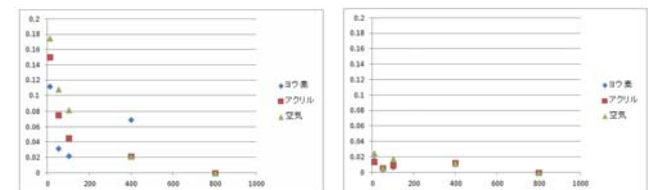$$ RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \hat{x}_i)} $$

※ x_i =とるべき理論値、 $\hat{x}_i$ =実測値、n=各部分の要素の数
RMSEは理想とするCT画像のCT値をとるべき理論値としたとき、その値と実測値がどれほど誤差が生じているか示している。よって、0に近いほど実測値と理論値との誤差が小さいことになる。

3.結果

フォトンカウンティング型検出器

蓄積型検出器

撮影時間:	10m秒	50m秒	100m秒	400m秒	800m秒
照射量:	0.018mA・s	0.09mA・s	0.18mA・s	0.72mA・s	1.44mA・s
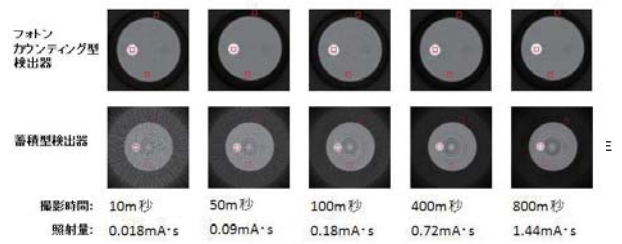
蓄積型検出器画像のRMSE　　フォトンカウンティング型検出器画像のRMSE

ヨウ素　アクリル　空気

[考察・結論]
画像の赤枠はRMSEを求める際の実測値として用いた部分で、ヨウ素、アクリル、空気の3種類を測定した。また、理論値は800m秒の画像の赤枠部分を検出器別で利用した。
800m秒を理想とする画像とした場合、蓄積型の画像は撮影時間が減るにつれてRMSEが増加する一方で、フォトンカウンティング型の画像は撮影時間によるRMSEの増加はほとんどない。さらに低線量においては、フォトン揺らぎにより急激にノイズ増加すると予測されるが今回の範囲では観察されていない。
よって、低被ばく放射線検出技術において、フォトンカウンティング型検出器は蓄積型検出器と比べると優位性を持ち、低被ばくであるということが示されたといえる。