

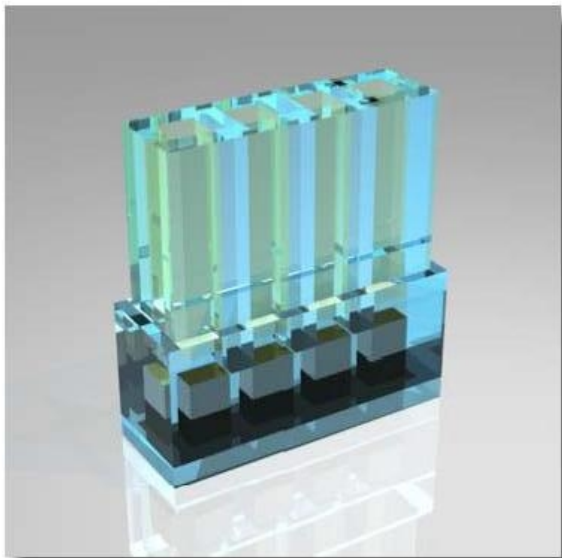
# 次期X線衛星ASTRO-H搭載 軟ガンマ線検出器に向けた Si-Pad検出器の開発

松岡正之、西野翔、田中琢也、深沢泰司(広島大学)、  
渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸(ISAS/JAXA)、  
田中孝明、田島宏康(SLAC)、  
湯浅孝行、中澤知洋(東京大学)



# SGD on ASTRO-H

## SGD概観



## SGD (Soft Gamma-ray Detector)

- ・エネルギー帯域 10 - 600 keV

BGOアクティブシールド+コンプトン運動学  
によるバックグラウンド除去

### ・BGOアクティブシールド

シールド自体を検出器にし、主検出器と  
組み合わせてBGを低減させる

### ・コンプトン運動学によるBG除去

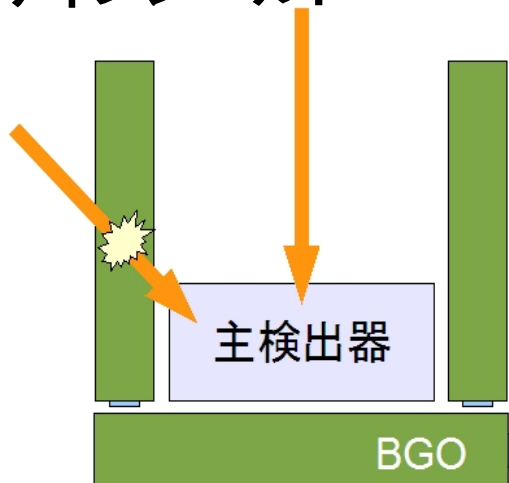
狭視野のSi/CdTeコンプトンカメラ

すざくHXDの1桁以上良い感度を目標  
(at 100 keV前後)

## SGDへの要求性能

- ・エネルギー帯域 10 - 600 keV
- ・エネルギー分解能  $< 2$  keV @ 100 keV
- ・すざくHXDより10倍良い感度 @ 100 keV

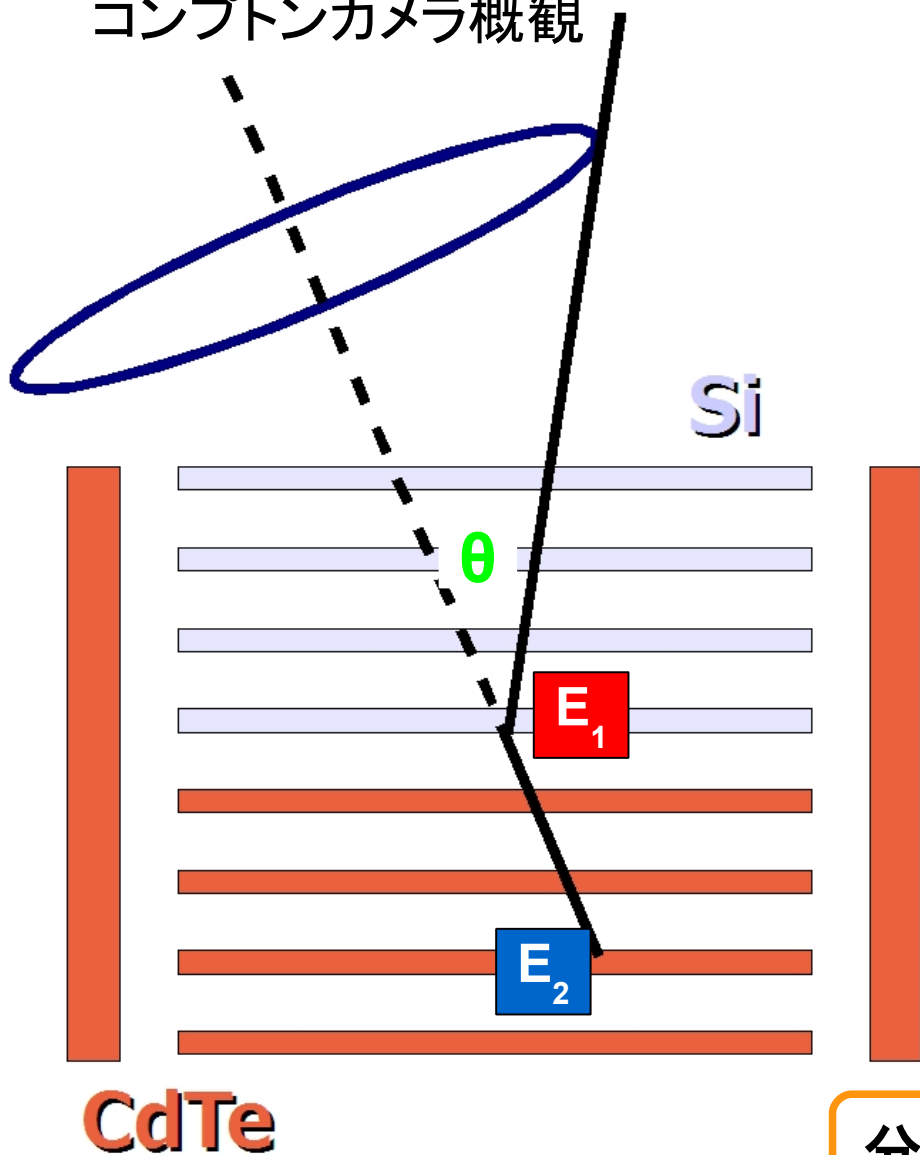
## アクティブシールド





# 狭視野のSi/CdTeコンプトンカメラ

コンプトンカメラ概観



多数のSi/CdTe 検出器

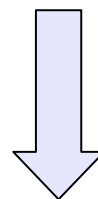
$E_1$  : 散乱エネルギー  
 $E_2$  : 吸収エネルギー

$$\cos \theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2}$$

$\theta$  → 視野内 → 天体信号  
 $\theta$  → 視野外 → 除去

コンプトンカメラへの要求

・角度分解能8度以下を目指す



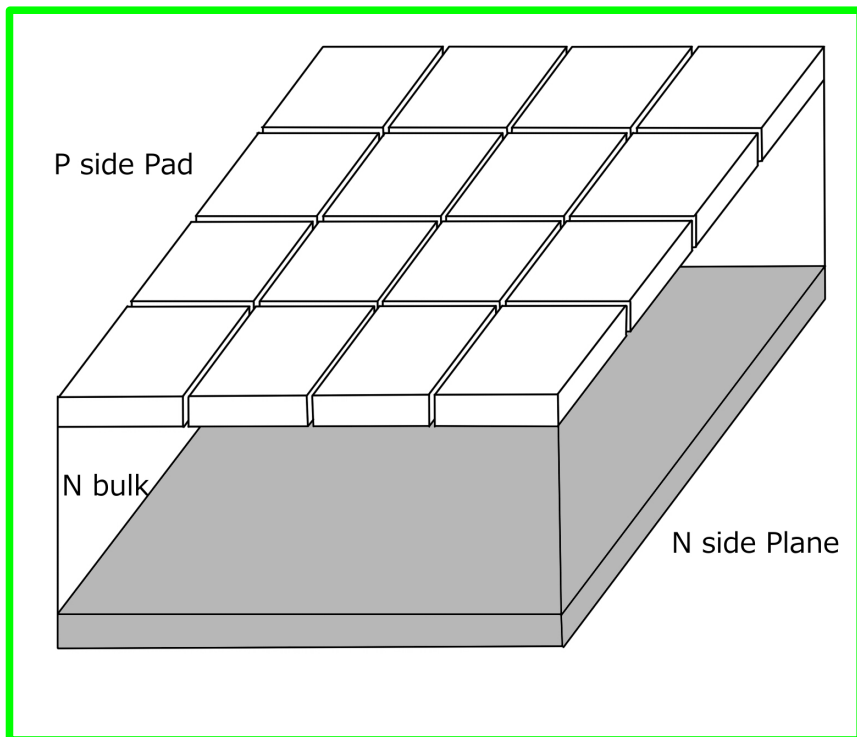
角度分解能は  
 Si/CdTeのエネルギー分解能、  
 位置分解能に影響される

分解能の良いSi/CdTe検出器が必要不可欠



# Si-Padとは

## Si-Pad検出器



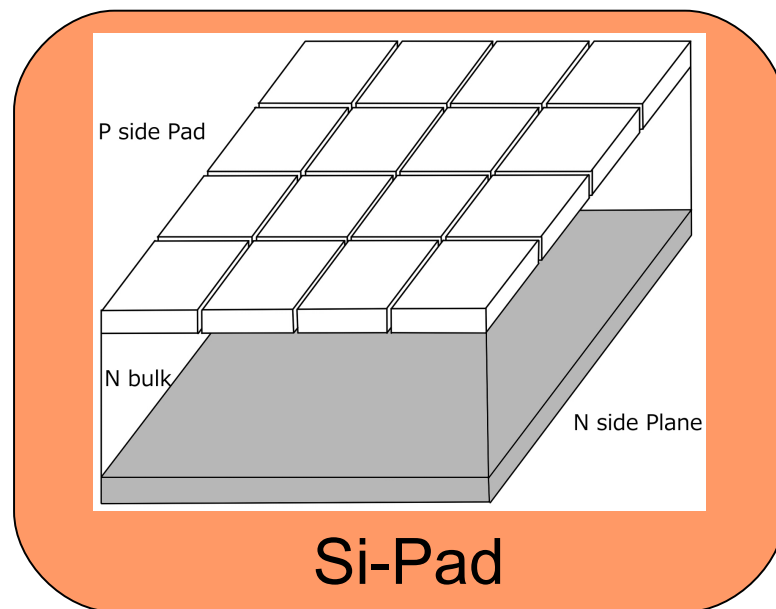
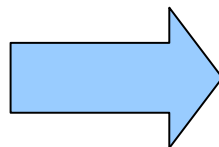
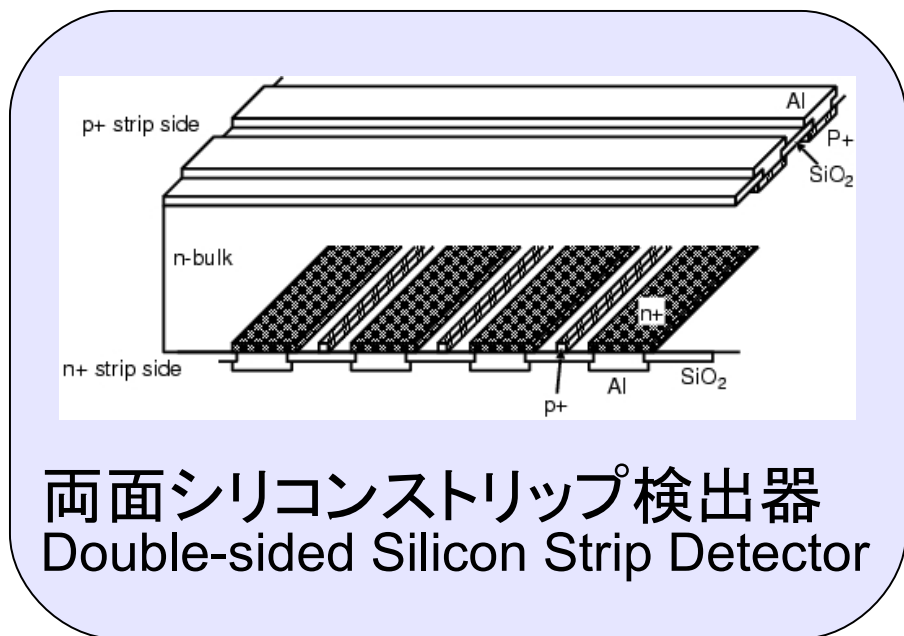
- N型Si基板の上にpixel形のP型Siを配列
- Padから読出しlineが出ており、Pad外で読出しを行う
- 粒子加速器実験で実績

- 高いエネルギー分解能
- 2次元情報を得られる
- コンプトンカメラの散乱体として適



# DSSD→Si-Pad

今まではコンプトンカメラにDSSDを用いていた



SGDにて採用

## DSSDと比べて

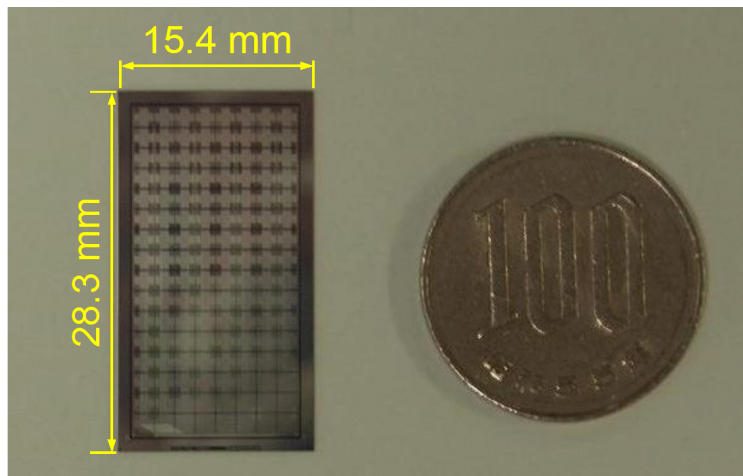
- ・電流性、容量性ノイズが小さい
- ・構造が簡単のため、機器に組み込みやすい
- ・通常の半導体プロセス技術で製造が可能

コンプトンカメラの要求を満たすため、  
エネルギー分解能 1.5 keV以下、位置分解能3mm 程度以下を目指す<sup>5</sup>

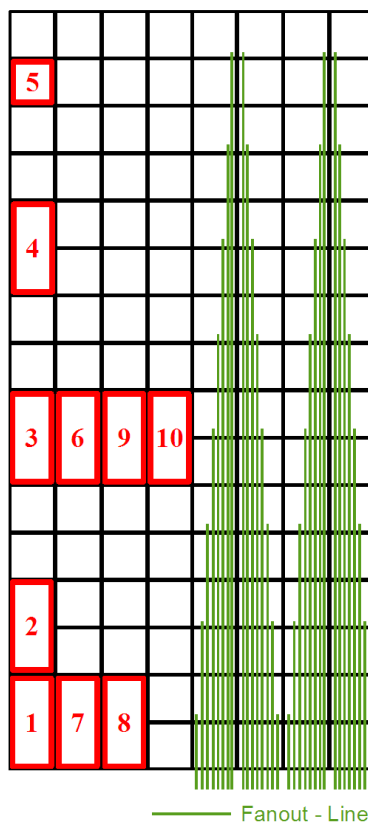


# 本研究で用いているSi-Pad

## Si-Pad

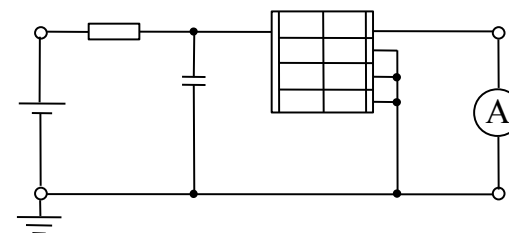


本講演で述べるSi-Pad  
 X線検出器用に初めて試作  
 PAD数 : 128 pad (= 8 x 16 )  
 PAD サイズ : 1.6 x 1.6 [mm<sup>2</sup>]  
 厚さ : 0.3 [mm]

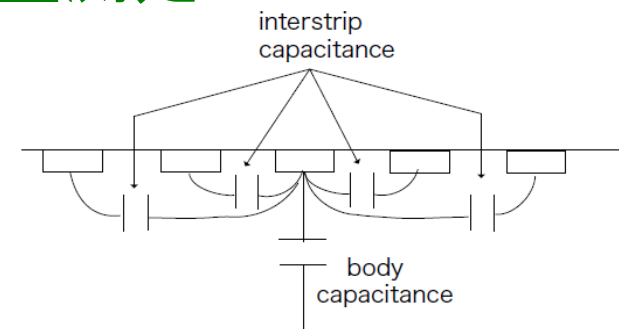


基礎特性での読出し部

## ・暗電流測定



## ・容量測定



## ・1ch. Read

温度、チャンネル、RI などの条件を変え、スペクトルを得、エネルギー分解能を計算

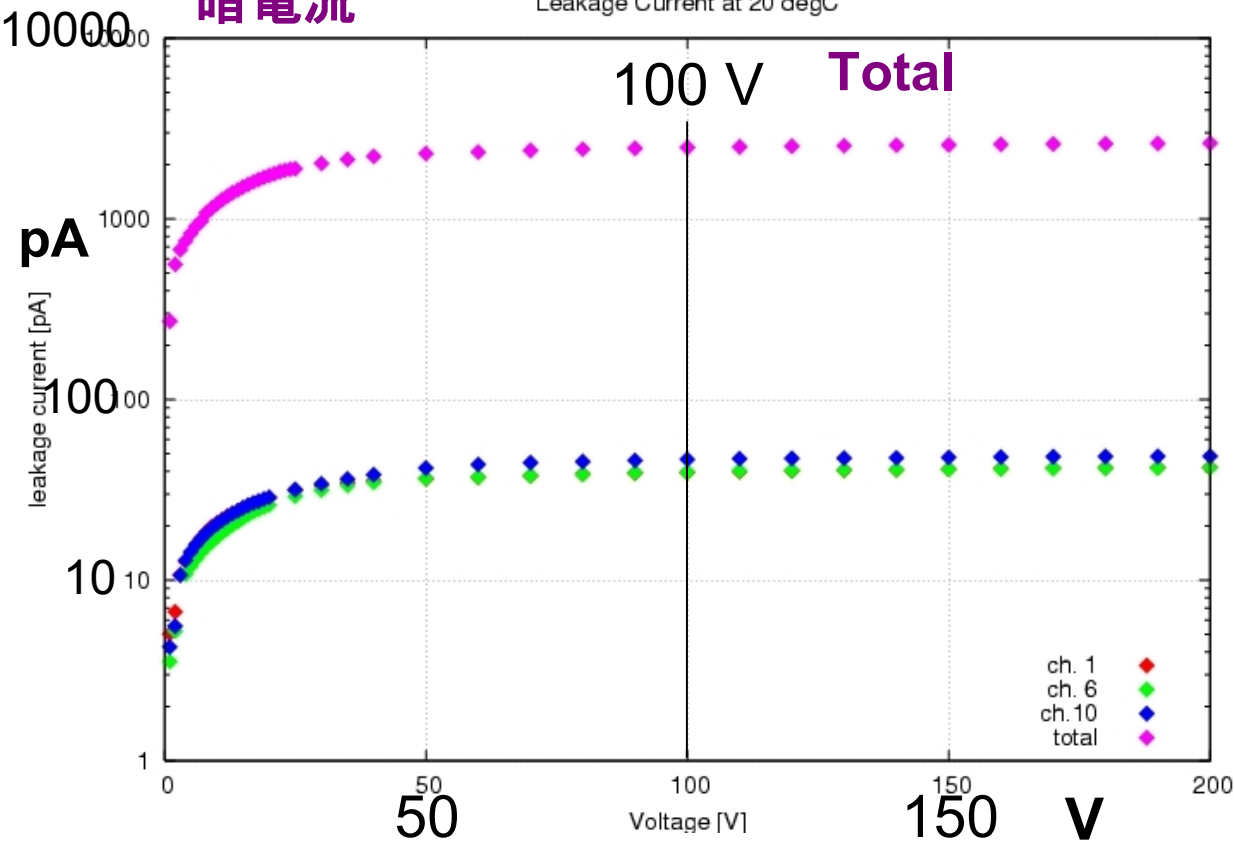
コンプトンカメラSi-Pad 部のデザイン決定のため  
 8x16 pad Si-Pad の基礎性能評価を行った



# Si-Pad 暗電流測定 (常温)

## 暗電流

Leakage Current at 20 degC



## 単位面積あたり

- ・常温 : 9.1 pA/mm<sup>2</sup>
- ・-20 °C : 0.16 pA/mm<sup>2</sup>

## 測定条件

- ・ HV : 0 to 200 V
- ・ 温度 : 20 °C

## 結果

印加電圧 100 Vにおいて

ch. 1 : 39.4 pA

ch. 6 : 39.6 pA

ch.10 : 46.6 pA

total : 2483 pA

(各ch. の50 - 60 倍前後)

## 結果 (-20 °C)

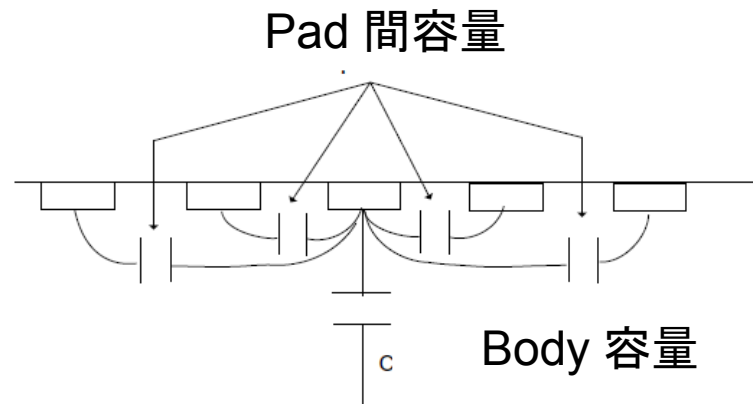
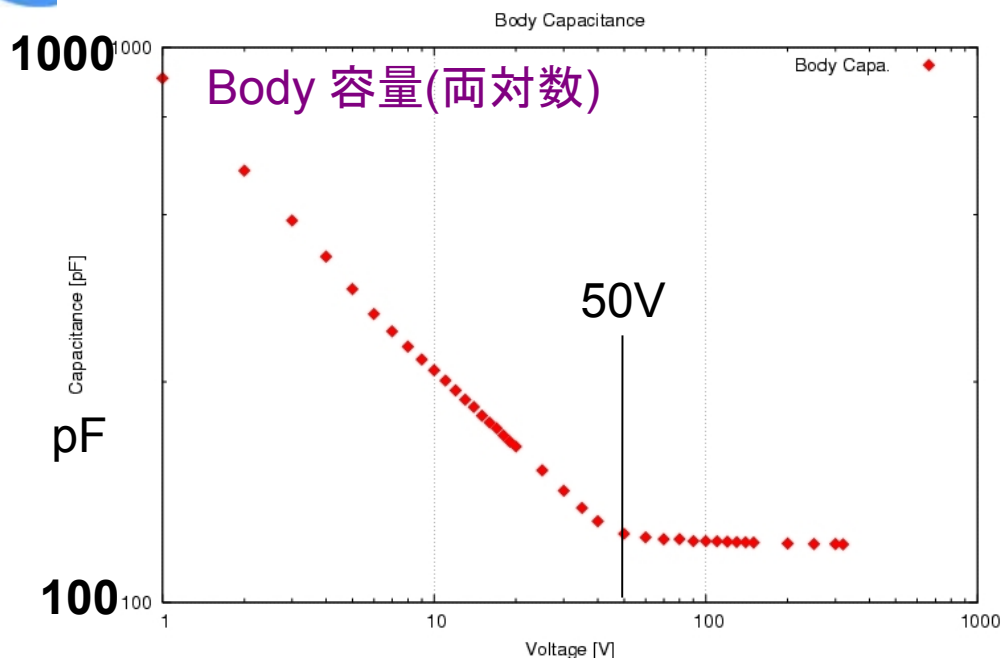
印加電圧 100 V

ch.10 : 0.801 pA

total : 26.8 pA



# Si-Pad 容量測定



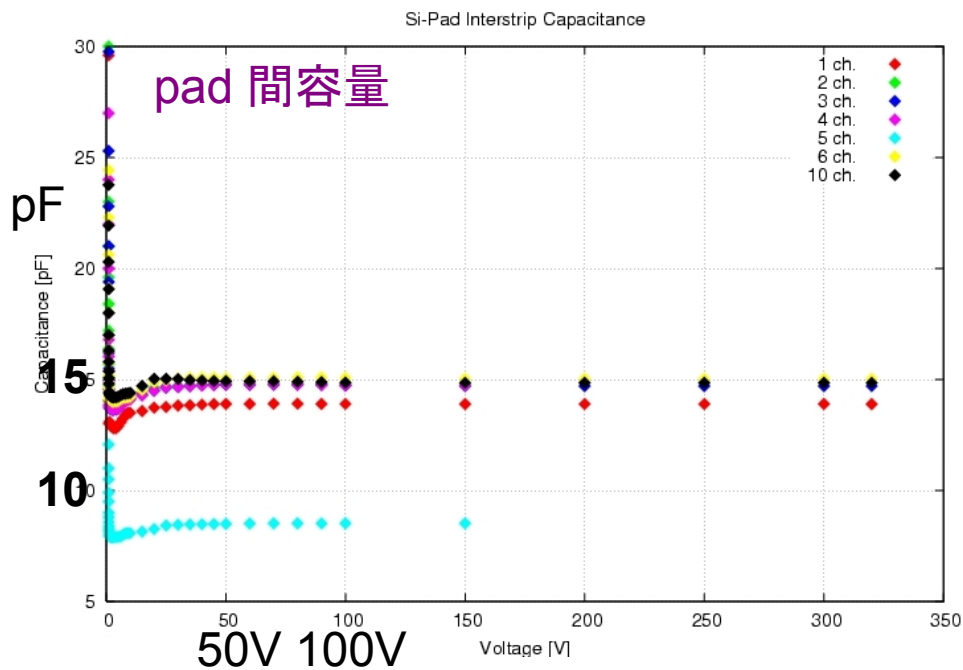
## Body 容量結果

- ・50 V付近で完全空乏化
- ・印加電圧 100 Vにおいて  
→全Body 容量 129 pF

## Body 容量見積もり

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

~ 114 [pF]  
ほぼ一致している



## Pad 間容量結果

- ・50 V付近で全て安定
- ・14 - 15 pF / ch. 程度に落ち着く

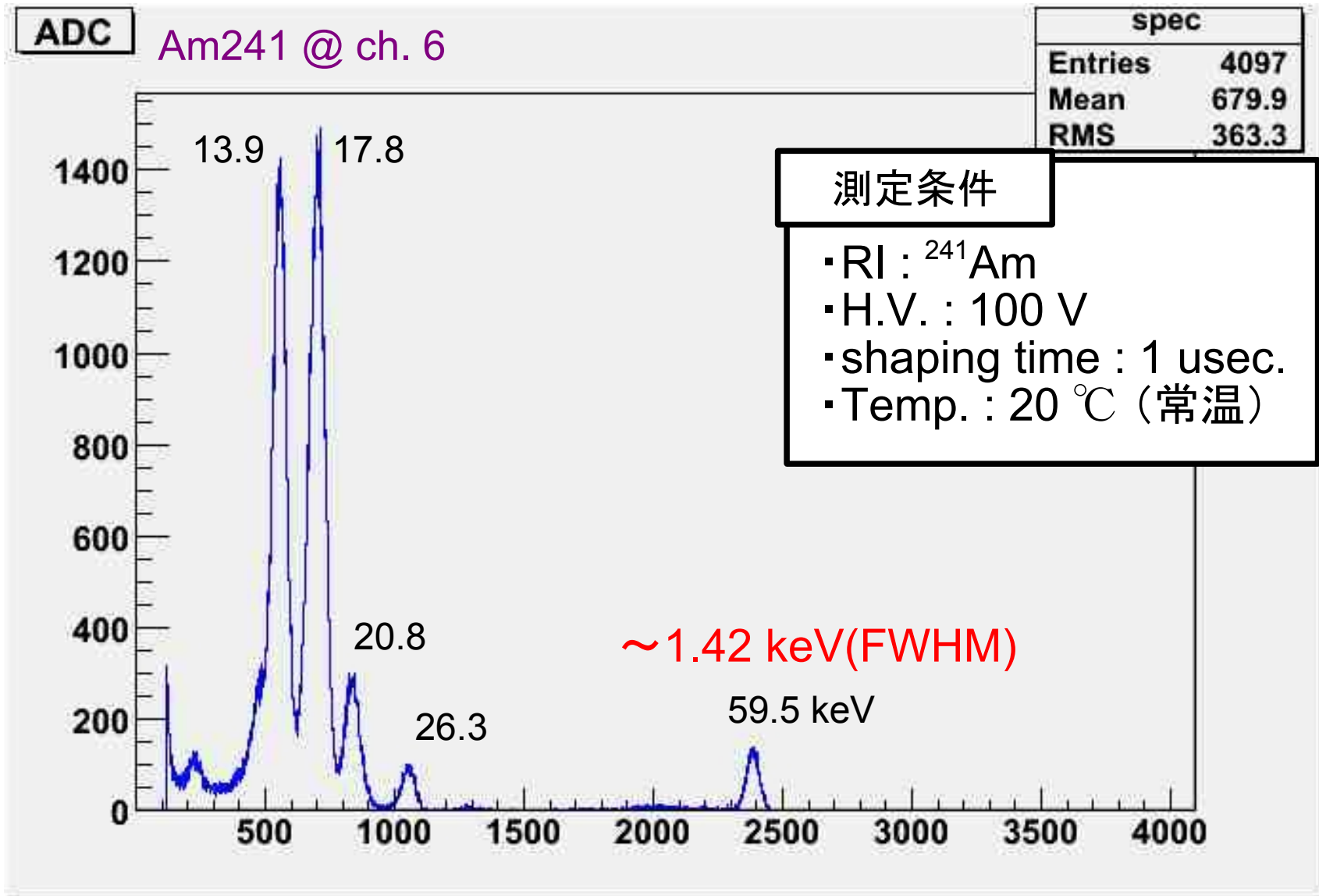
$$C = (0.8 + 1.6 \frac{w}{p}) l$$

~ 22.2 [pF]





# Si-Pad 1ch. Read $^{241}\text{Am}$

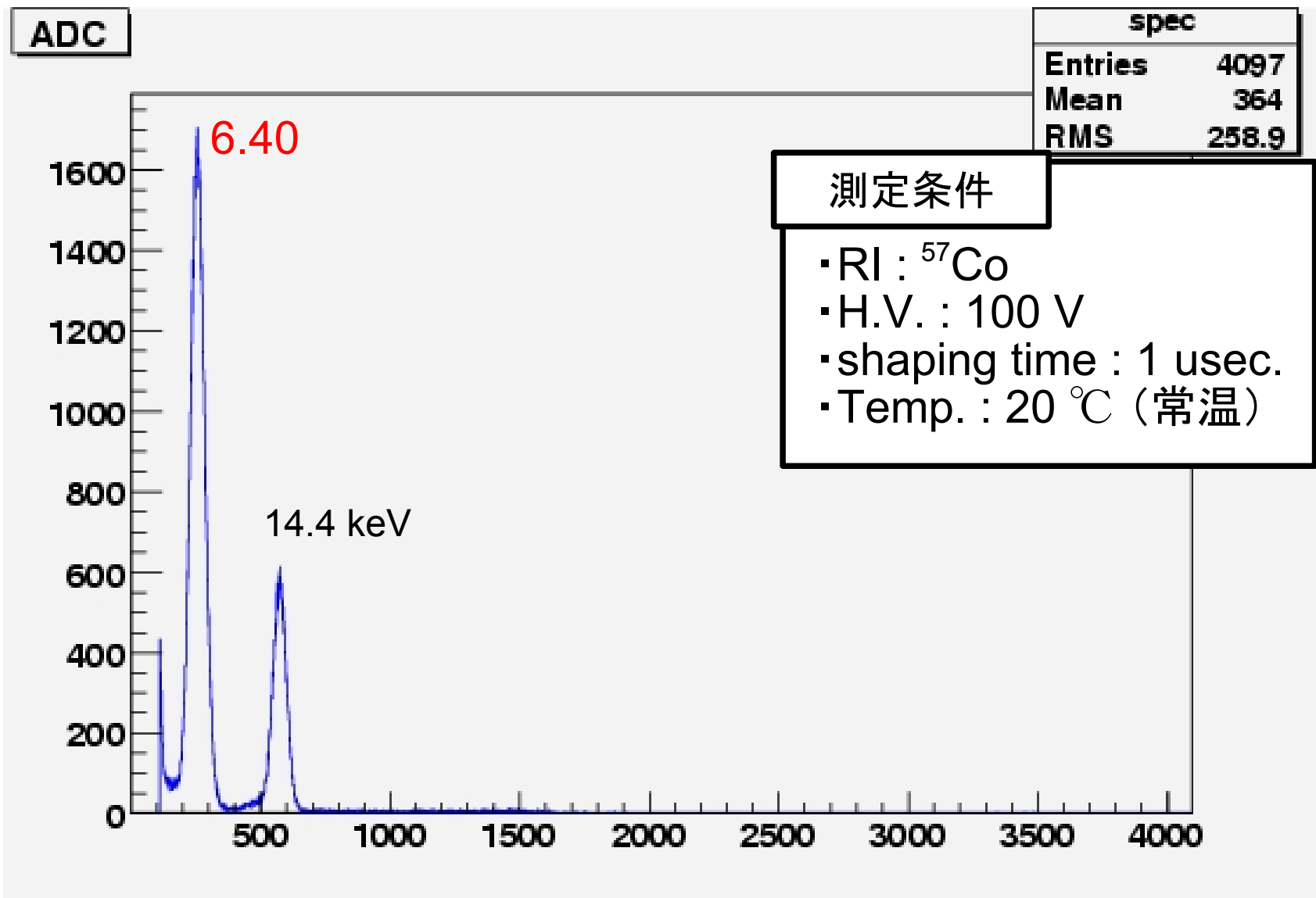


低温(-10 °C)の場合

$\Delta E(\text{FWHM}) = 1.28 \text{ keV}$  at 59.5 keV



# Si-Pad 1ch. Read $^{57}\text{Co}$



$^{57}\text{Co}$  の6.40 keV ラインも見えている

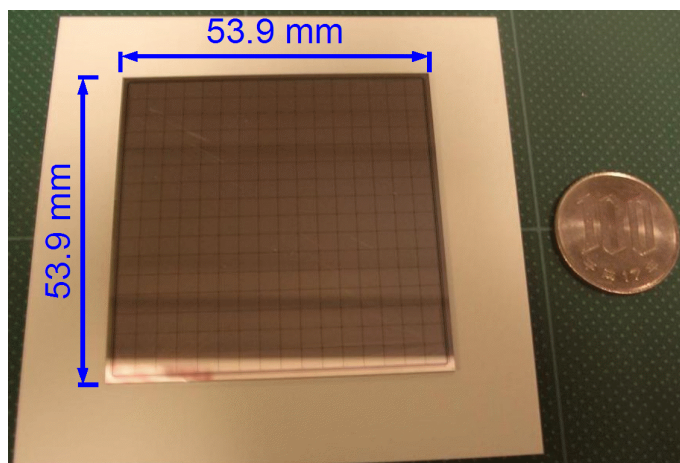


# 新しいSi-Pad

Si-Pad検出器はX線用として設計通りに動く

→ これらの結果をもとにFM搭載Si-Pad を設計

## Si-Pad 2



FMの設計にほぼ近いSi-Pad

Si-Pad サイズ : 53.9 x 53.9 [mm<sup>2</sup>]

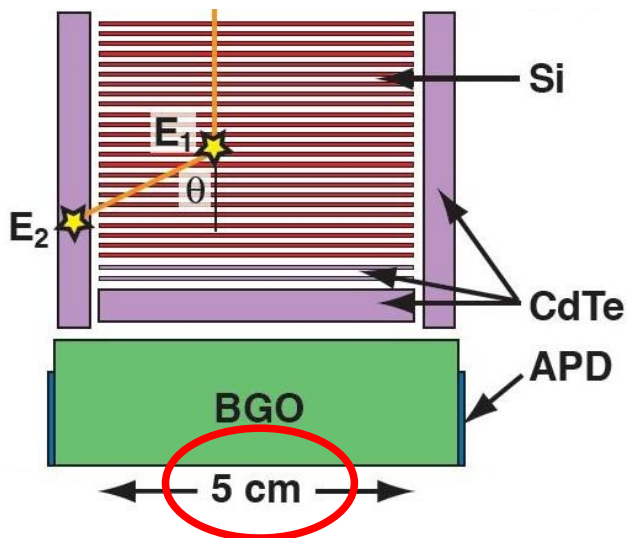
PAD 数 : 256 pad (= 16 x 16)

PAD サイズ : 3.2 x 3.2 [mm<sup>2</sup>]

厚さ : 0.6 [mm]

四隅で読出を行う

- ・ 有効面積がほぼFMと同等
- ・ 読出しチャンネル数と位置分解能の兼ね合いから PADサイズは3.2 mm



現在、基礎特性評価に向けた  
測定回路を開発している



# 新しいSi-Padの分解能見積もり

## 現Si-Pad

- ・面積 :  $2 \times 1.6 \times 1.6 \text{ mm}^2$
- ・厚さ :  $0.3 \text{ mm}$
- ・Pad間隔 :  $0.075 \text{ mm}$

## New Si-Pad

- ・面積 :  $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$
- ・厚さ :  $0.6 \text{ mm}$
- ・Pad間隔 :  $0.060 \text{ mm}$

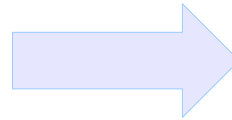
## 測定結果

$$I_{lc} = 0.80 \text{ pA } (-20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$C_{\text{body}} = 2.02 \text{ pF}$$

$$C_{\text{inter}} = \text{約 } 15 \text{ pF}$$

$$C_{\text{total}} = \text{約 } 17 \text{ pF}$$



## 測定予想

$$I_{lc} = 1.60 \text{ pA } (-20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$C_{\text{body}} = 2.02 \text{ pF}$$

$$C_{\text{inter}} = \text{約 } 10 \sim 15 \text{ pF}$$

$$C_{\text{total}} = \text{約 } 12 \sim 17 \text{ pF}$$

これから予想されるEnergy 分解能は $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ で **$1.2 \sim 1.4 \text{ keV}$**

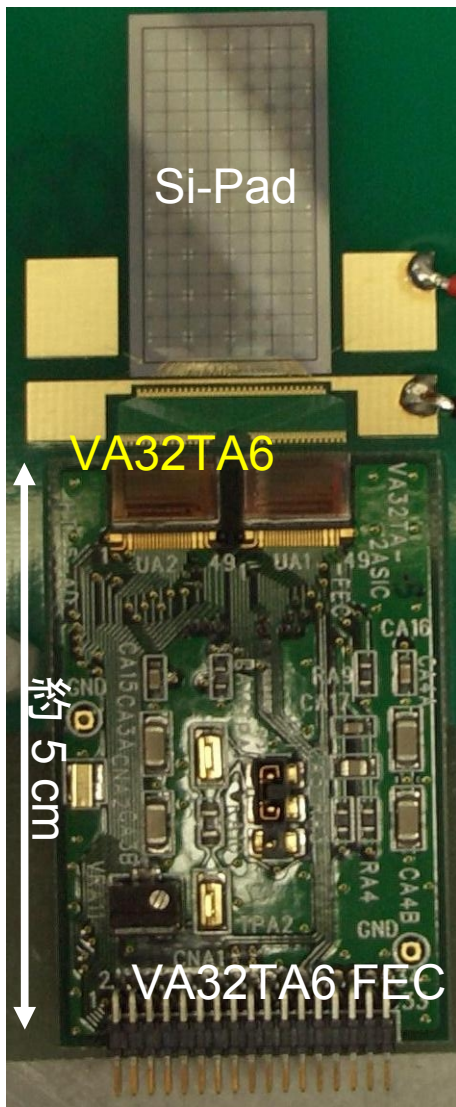
SGD での要求性能を十分満たすと期待している



# Multi Read 用ASIC - VA32TA6

Si-Pad の全pad を同時に読む

➔ 新しい半導体検出器読出しASIC 【VA32TA6】



- ASTRO-H搭載VATA450のプレモデル
- 32 ch.分のCSA, Shaping Amp., Sample Hold
- ADCされDigital信号で出力

現在このSi-PadでVA32TA6による  
読出し作業を行っている



# まとめと今後

## まとめ

- ・常温においてch. あたり、暗電流が約40 pA
- ・Body 容量がch. あたり、2.02 pF、  
Pad 間容量が約15 pF
- ・エネルギー分解能(FWHM)は $^{241}\text{Am}$ で1.42 keV(常温)を達成
- ・これらのデータから新しいSi-Padの見積もりを行うと、  
エネルギー分解能が1.2 ~ 1.4 keV(−20 °C)と予想される  
→コンプトンカメラの性能として適

## 今後

- ・新しいSi-Pad の基礎特性評価
- ・全ch. を同時に読み出すためのシステム開発
- ・そのためのASIC であるVA32TA6 の動作確認



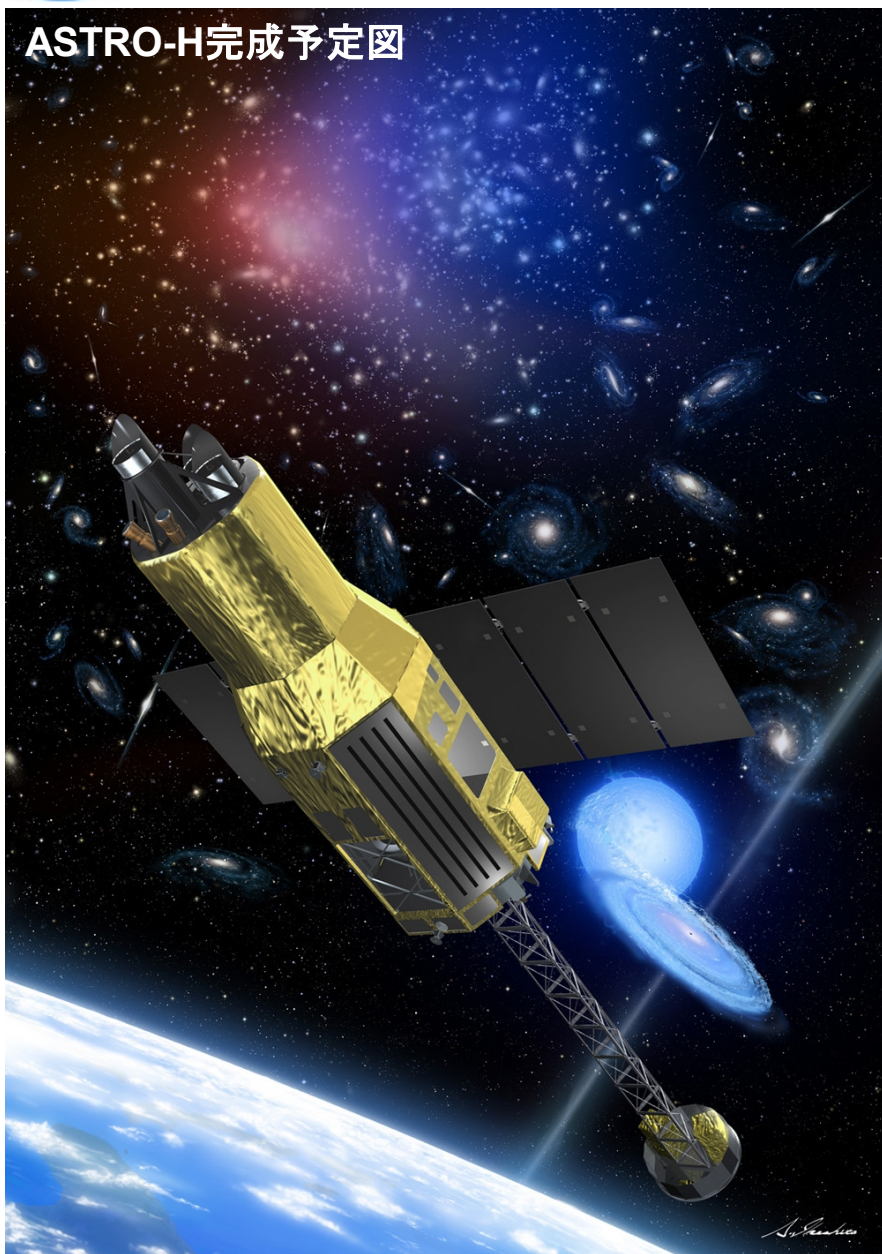
# 補足





# ASTRO-H

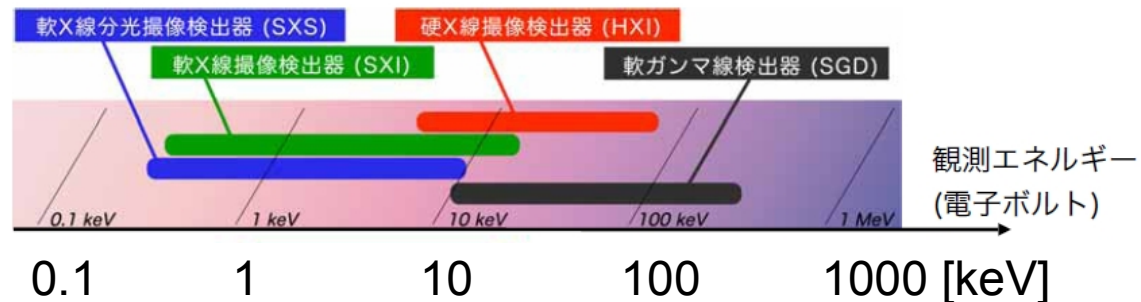
ASTRO-H完成予定図



## 次期X線天文衛星ASTRO-H(旧称NeXT)

2013年打ち上げ予定

- ・硬X線撮像システム(HXI) : 5 – 80 keV
- ・軟X線分光システム(SXS) : 0.3 – 10 keV
- ・軟X線撮像システム(SXI) : 0.5 – 12 keV
- ・軟ガンマ線検出器(SGD) : 10 – 600 keV

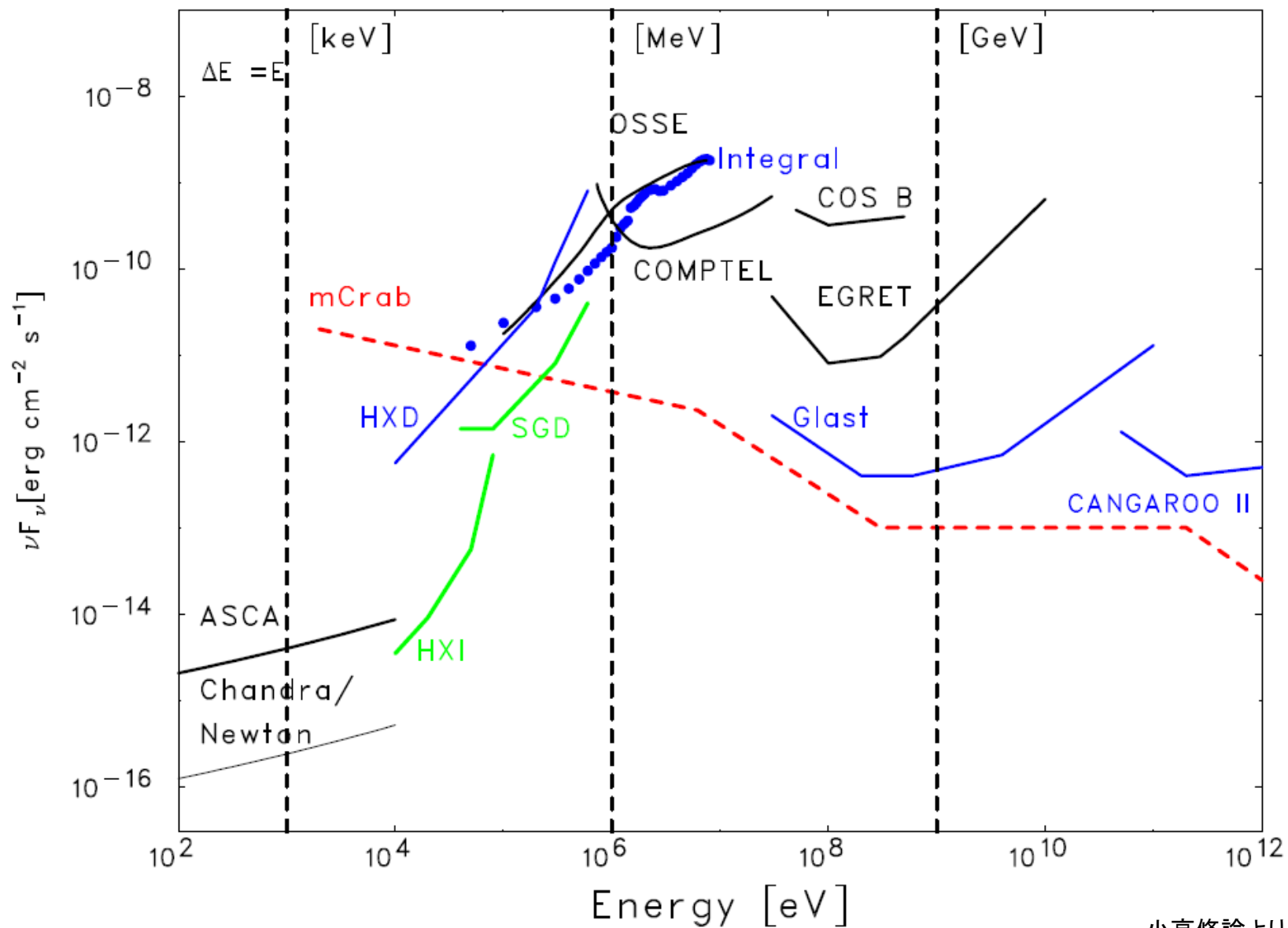


1 keV以下～600 keVの幅広い帯域で、  
精度の高い観測を行うことができる





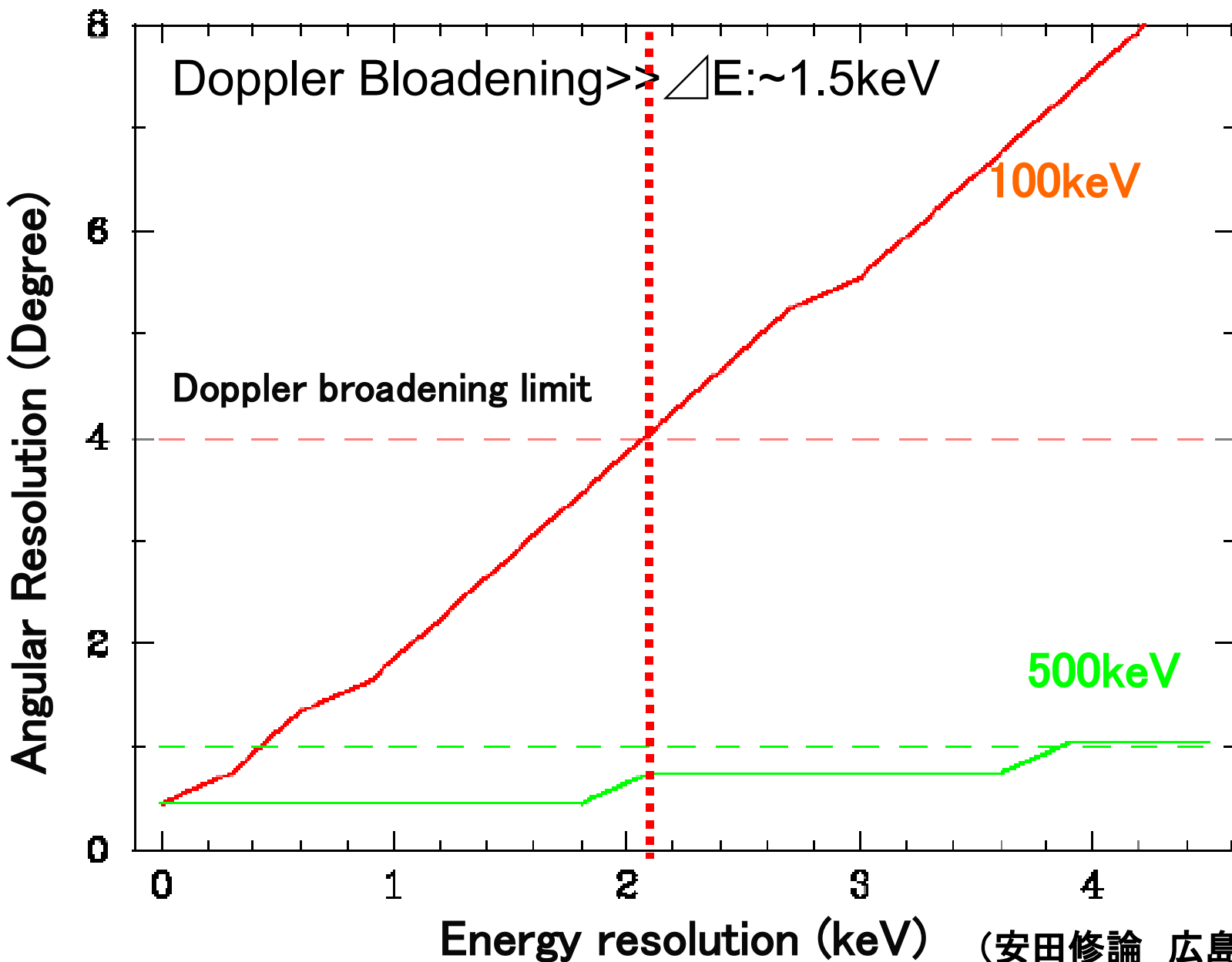
# 代表的な観測機器の感度



小高修論より



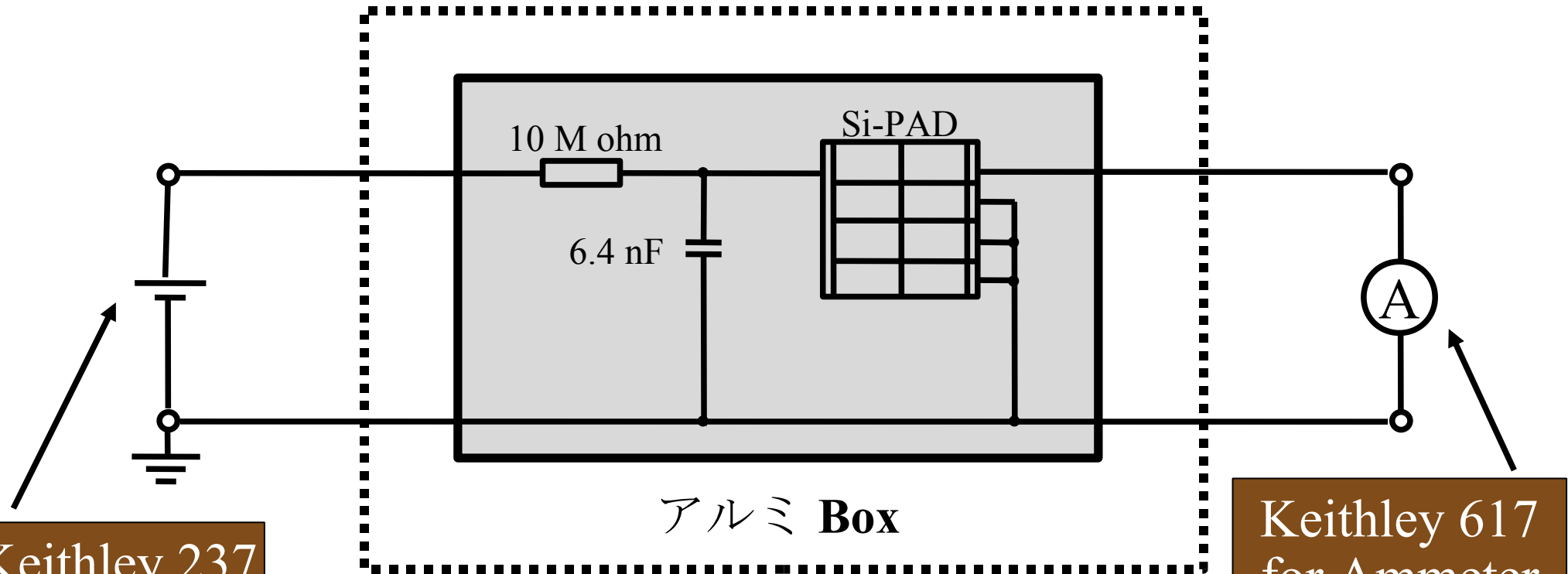
# エネルギー分解能と角度分解能





# Si-Pad Leak電流セットアップ

恒温槽



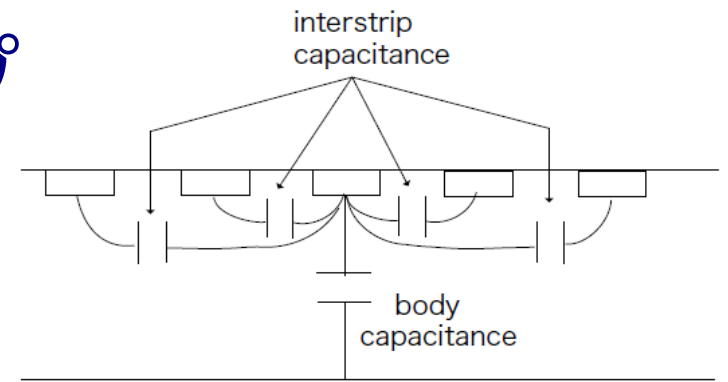
Keithley 237 for HV

Keithley 617 for Ammeter



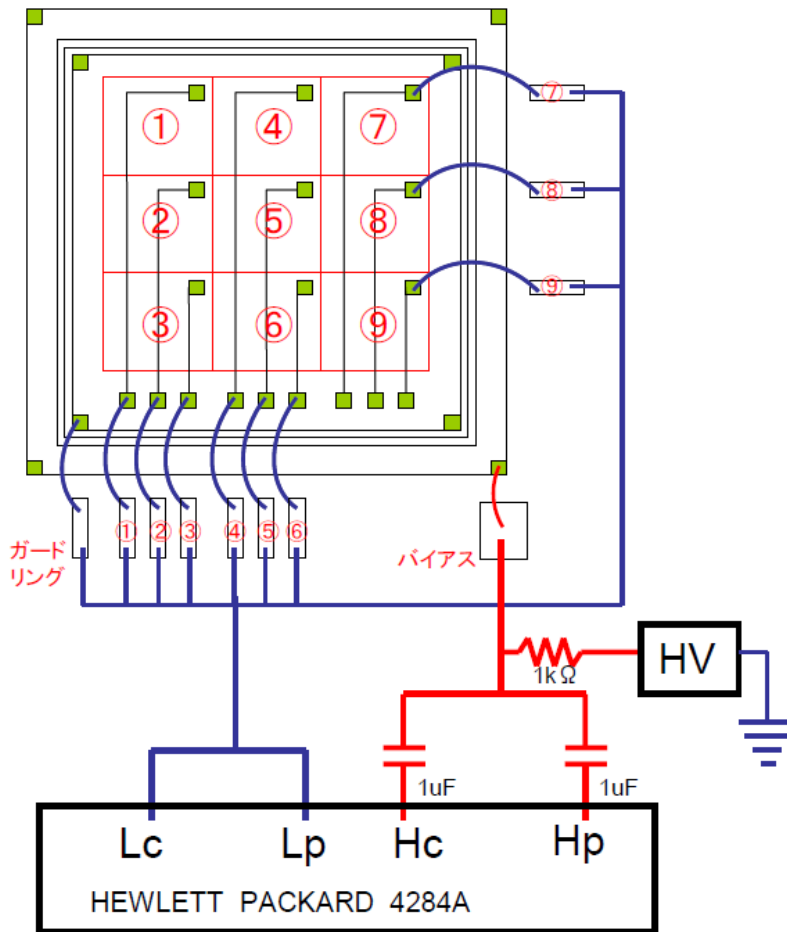


# Si-Pad 容量測定セットアップ

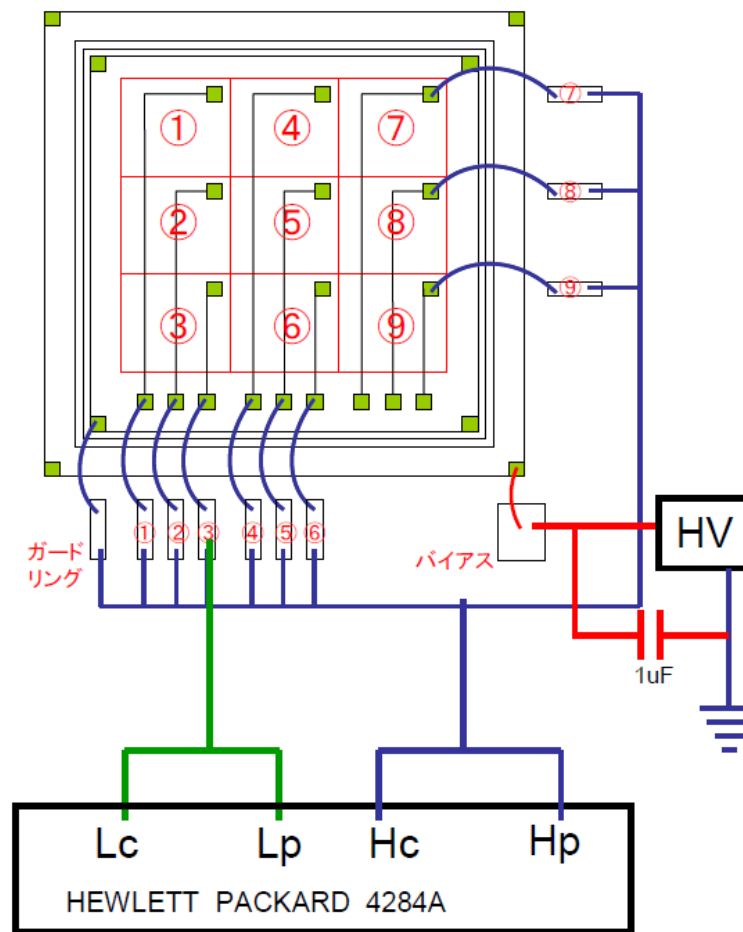


## 容量測定セットアップ

### Body 間容量



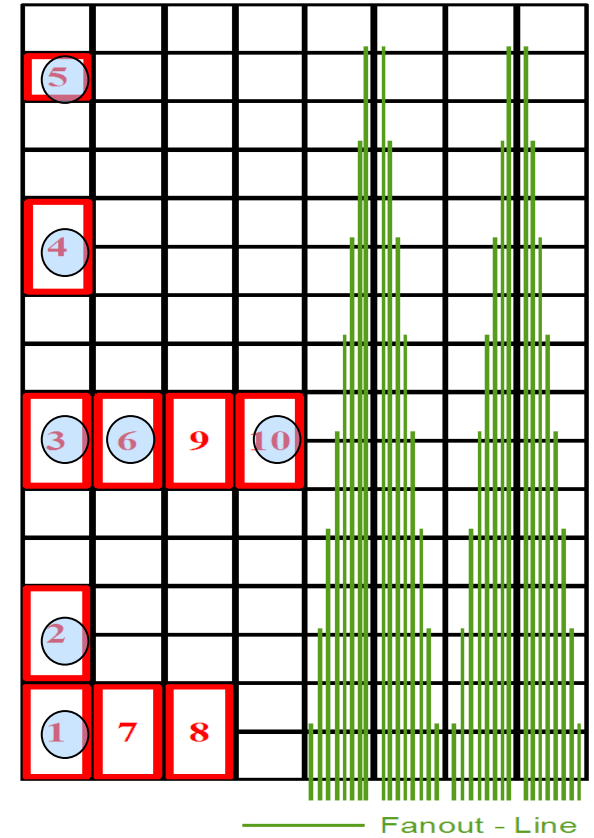
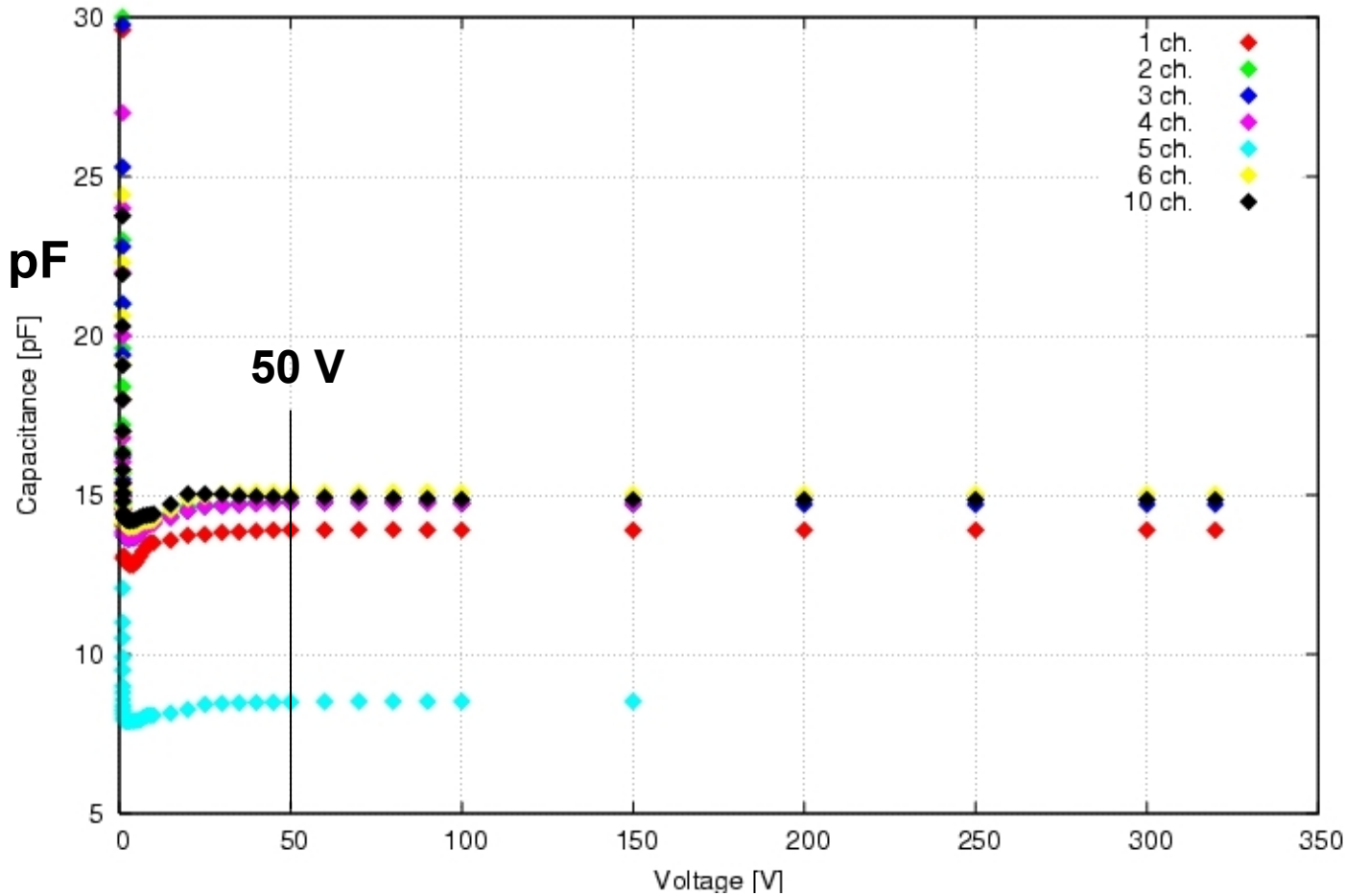
### Pad 間容量





# 容量測定 (Interstrip)

Si-Pad Interstrip Capacitance



@100 V

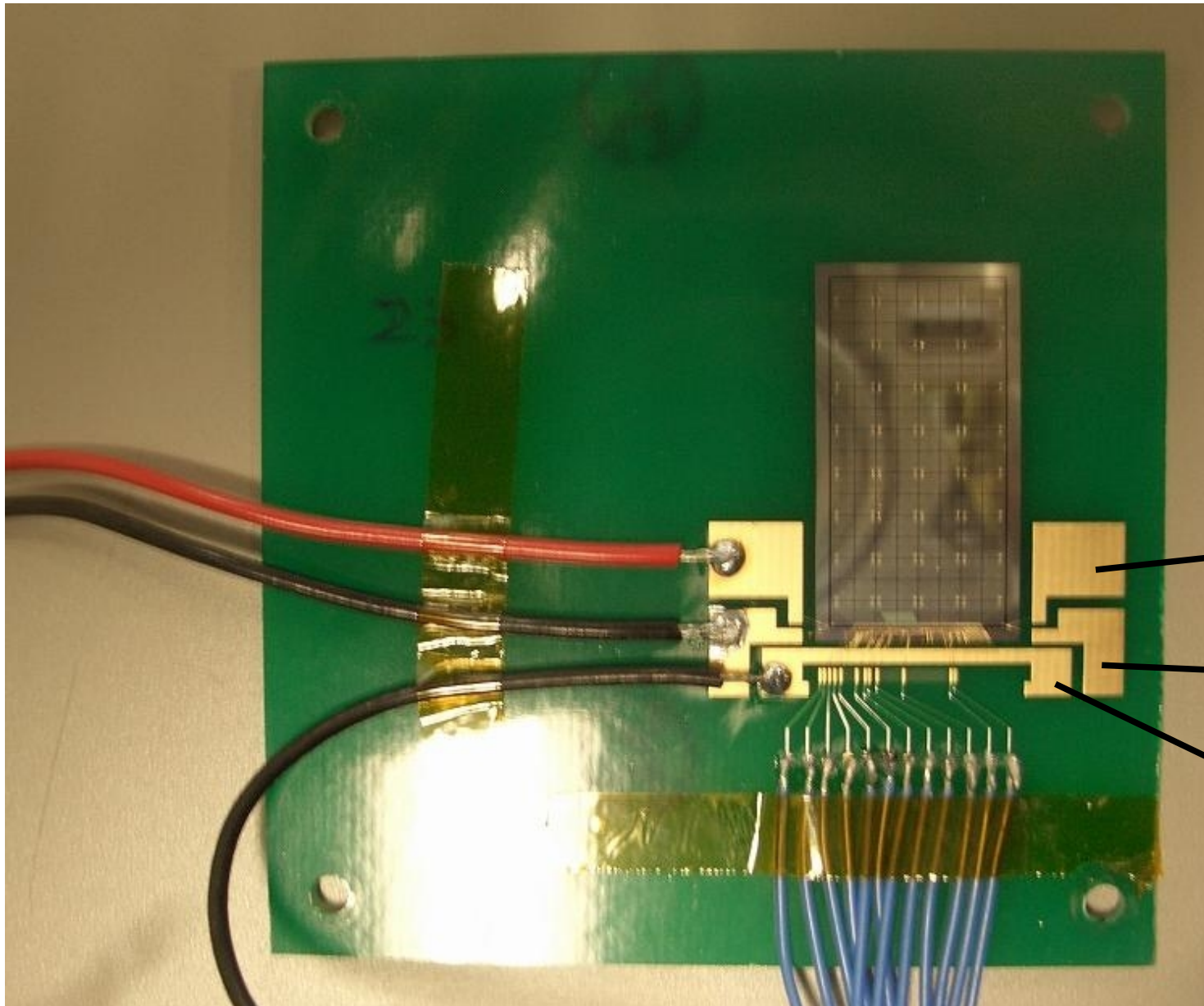
- ch. 1 : 13.90 pF
- ch. 2 : 14.77 pF
- ch. 3 : 14.72 pF
- ch. 4 : 14.74 pF
- ch. 5 : 8.52 pF
- ch. 6 : 15.07 pF
- ch.10 : 14.86 pF

## 結果

- 50 V付近で全て安定  
(ch.によっては20 Vで安定するものもある)
- 14 -15 pF / pad あたりに落ち着く



# Si-Pad ボンディング基板



基盤サイズ  
縦 70 mm  
横 70 mm

HV

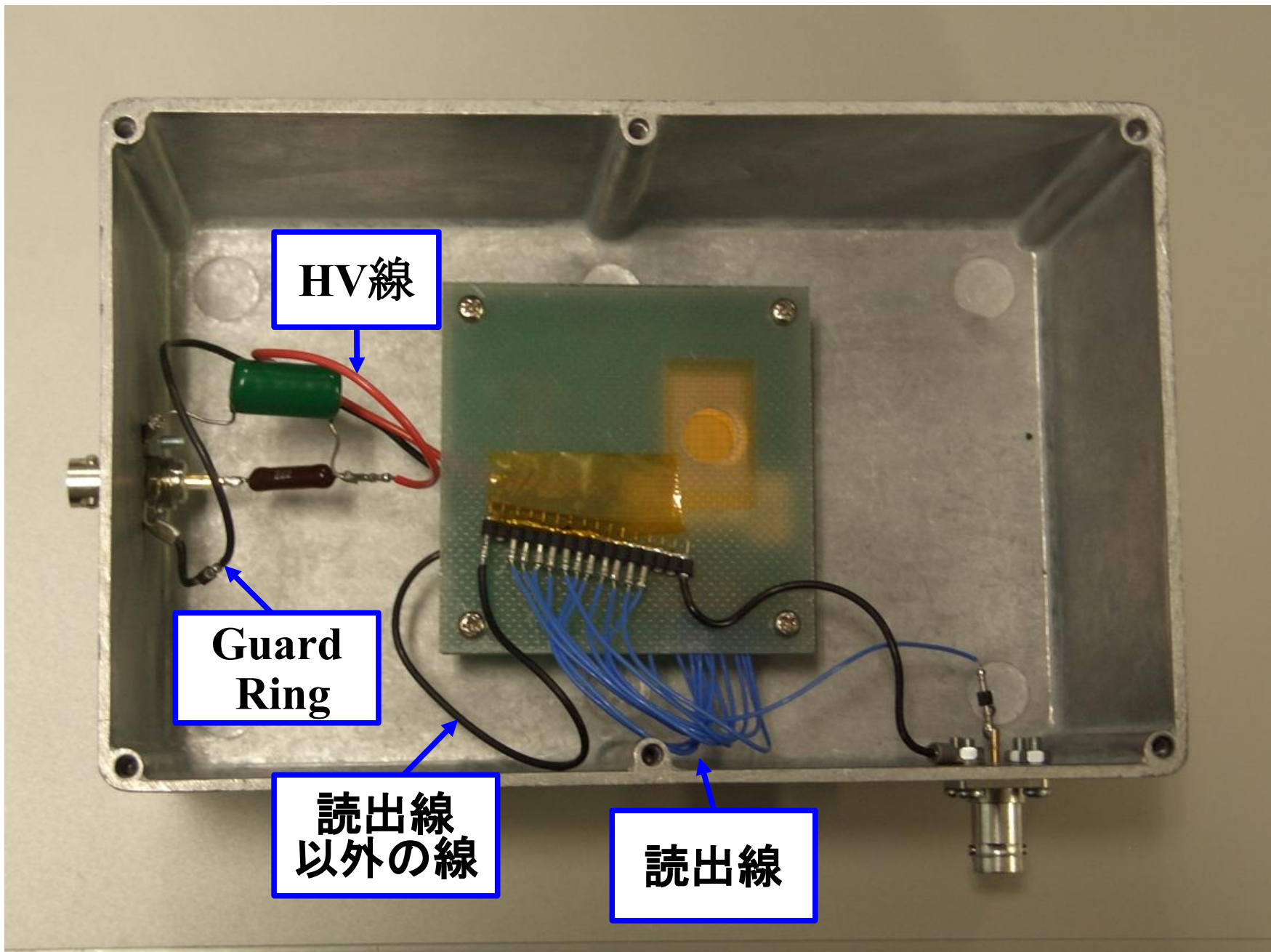
Guard Ring  
GNDにおと  
す  
使わないCh.  
GNDにおとす

※左右同じ





# Leak電流セットアップ 写真



HV線

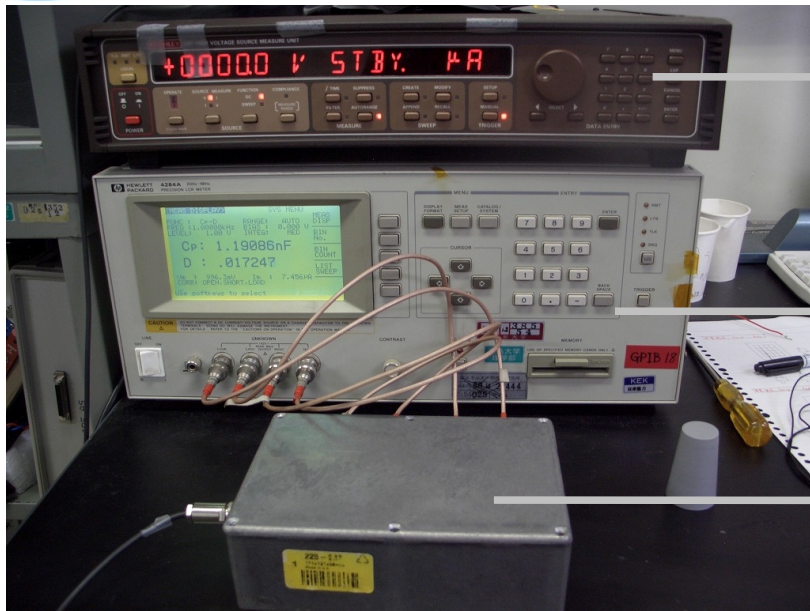
Guard  
Ring

読出線  
以外の線

読出線



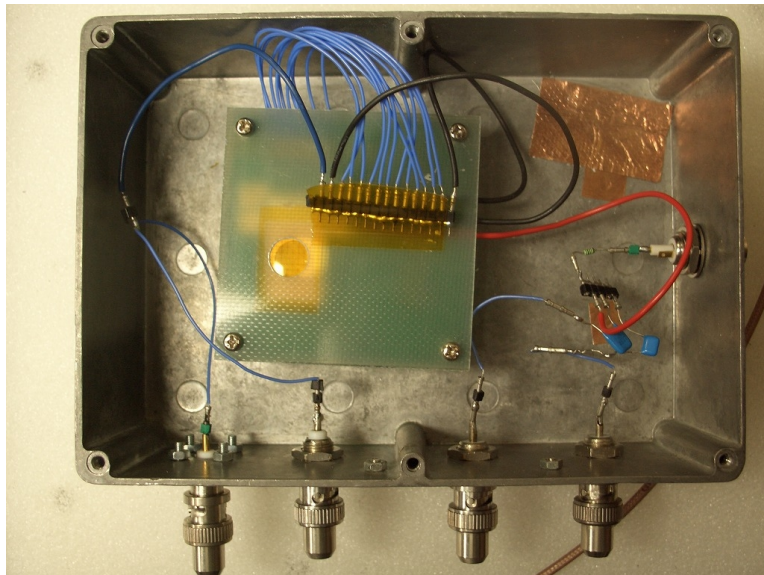
# 容量測定セットアップ写真



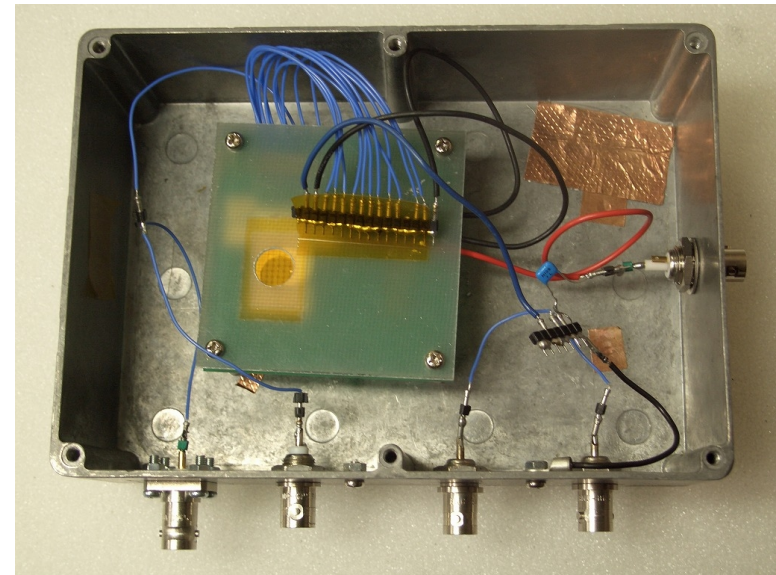
Keithley 237  
— 電圧印加のため

Hewlett Packard 4284A  
— 容量測定機器

アルミボックス  
— この中にSi-Padをセットし、  
全体を暗幕で覆う



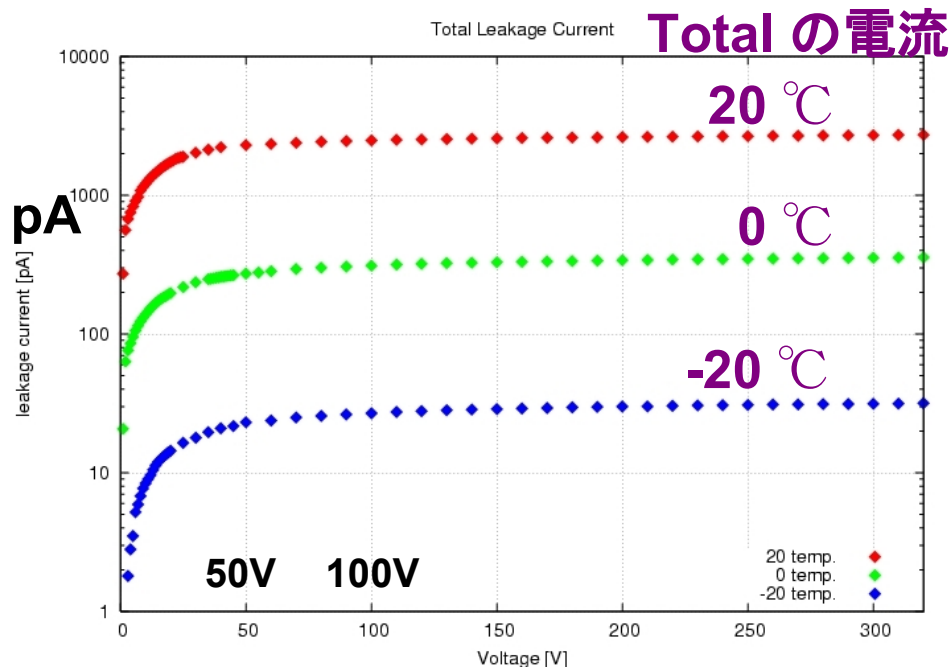
Body Capacitance 測定



Inter pad Capacitance 測定



# Si-Pad leak電流測定



## 測定条件

- 温度 : -20、0、20 °C
- total とch. 10の電流
- Delay 60 sec.

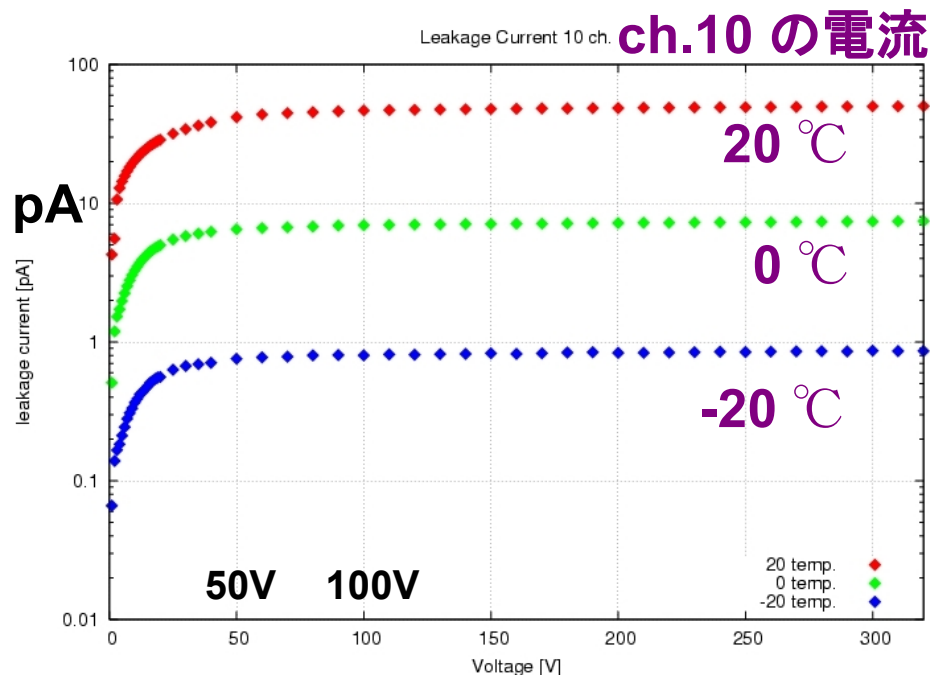
## Total 電流 結果

印加電圧 100 Vにおいて

20 °C : 2483 pA

0 °C : 310.8 pA

-20 °C : 26.8 pA



## ch.10 電流 結果

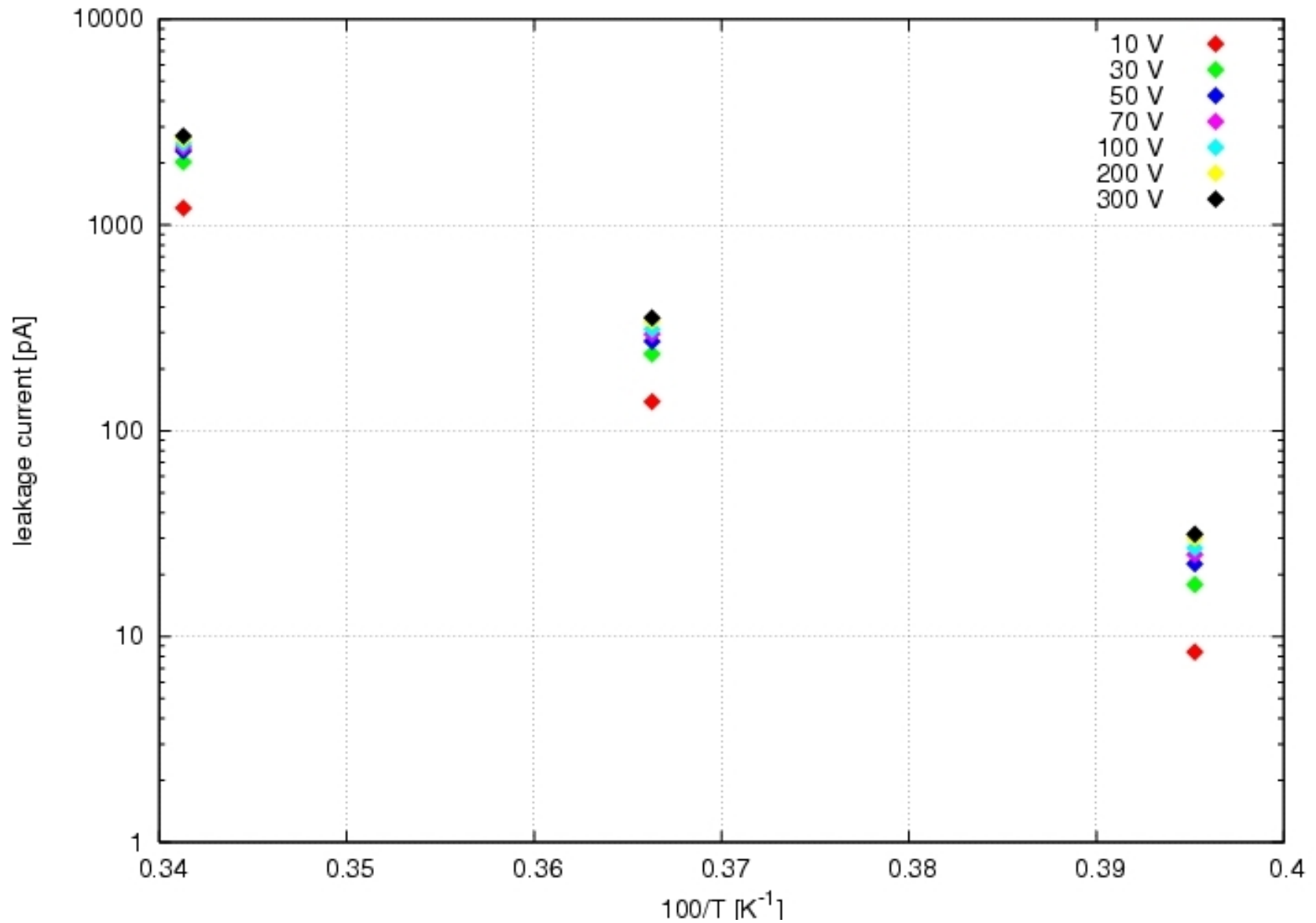
印加電圧 100 Vにおいて

20 °C : 46.6 pA

0 °C : 6.95 pA

-20 °C : 0.801 pA

# Leak 電流温度依存性 グラフ

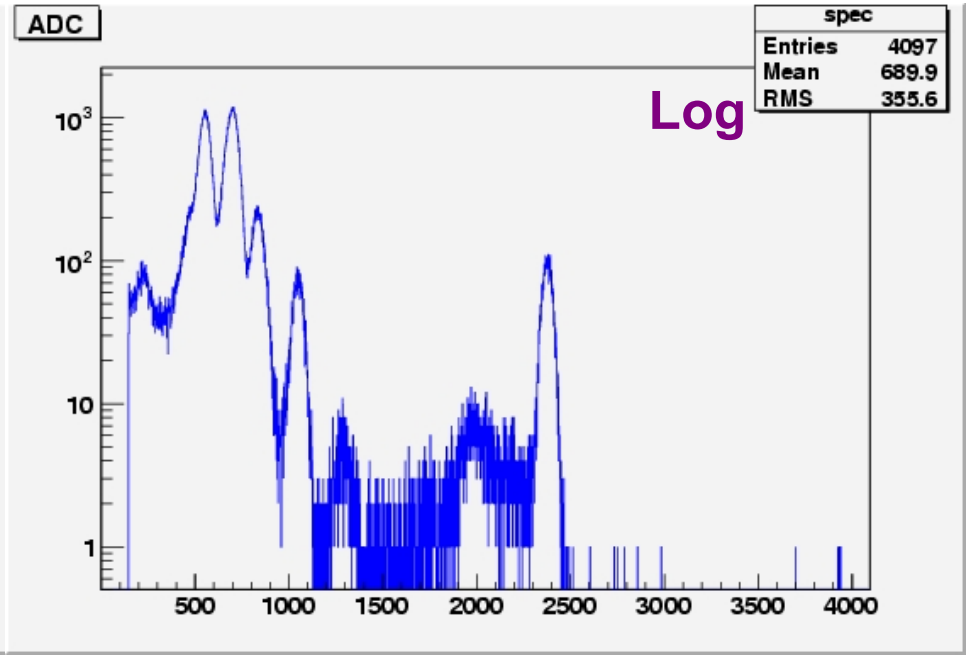
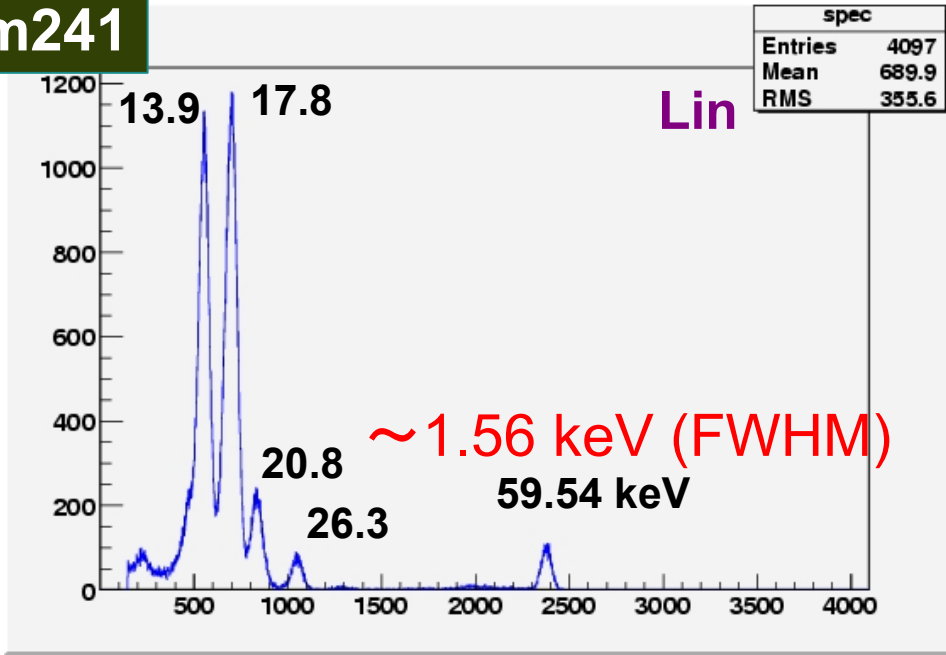




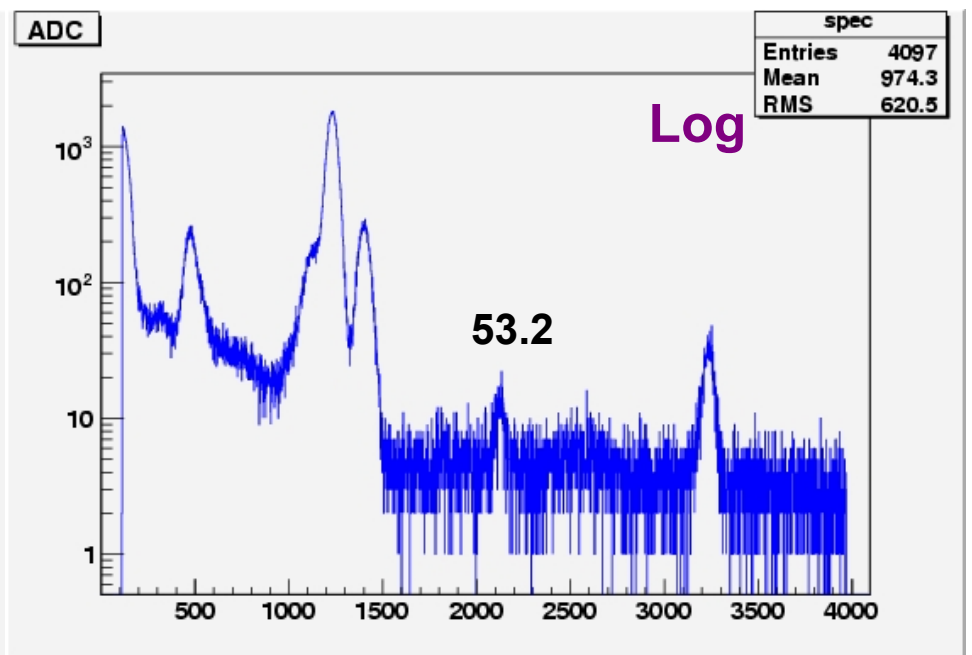
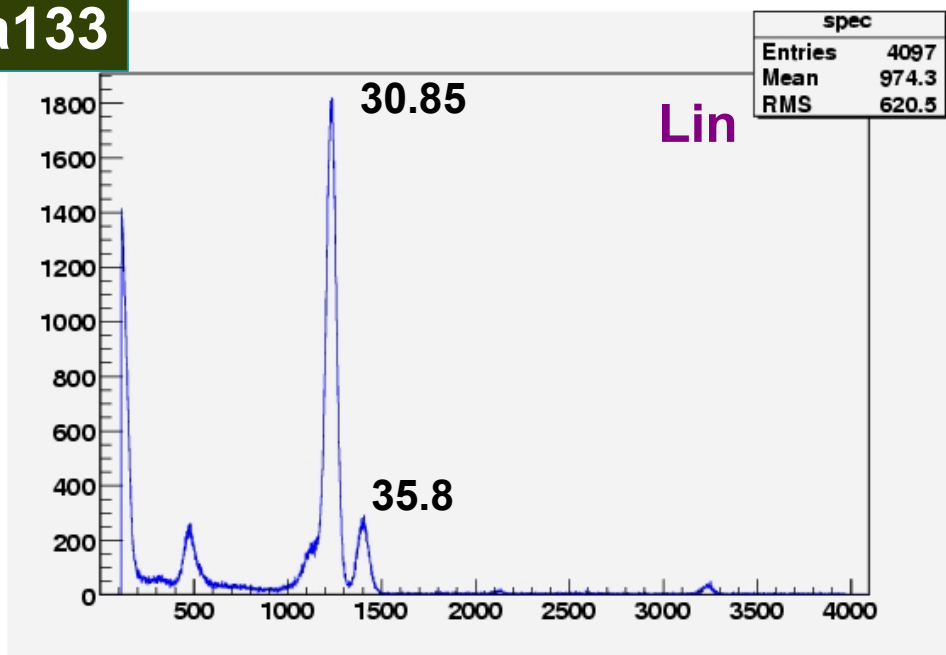
# 1 ch.読み出し(1)

@ch. 6 , H.V. : 100 V ,  
shaping time : 1 usec. , Temp. 22 °C

## Am241



## Ba133

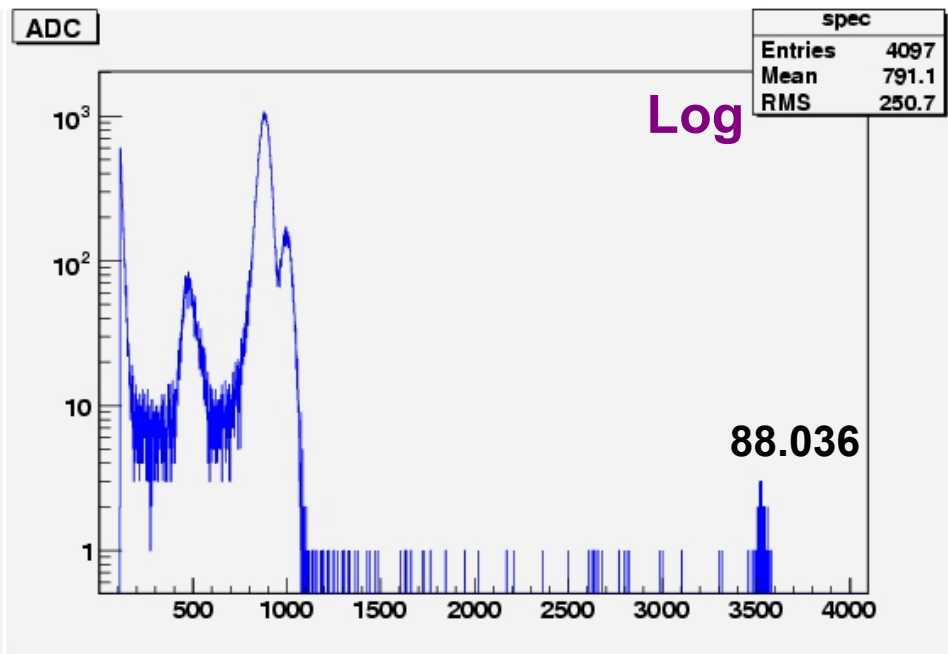
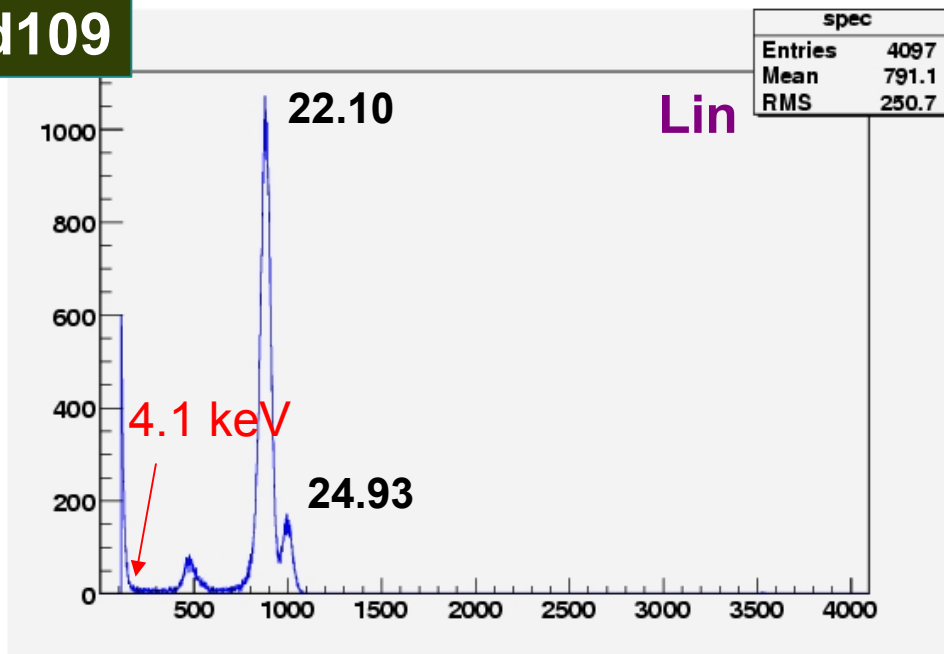




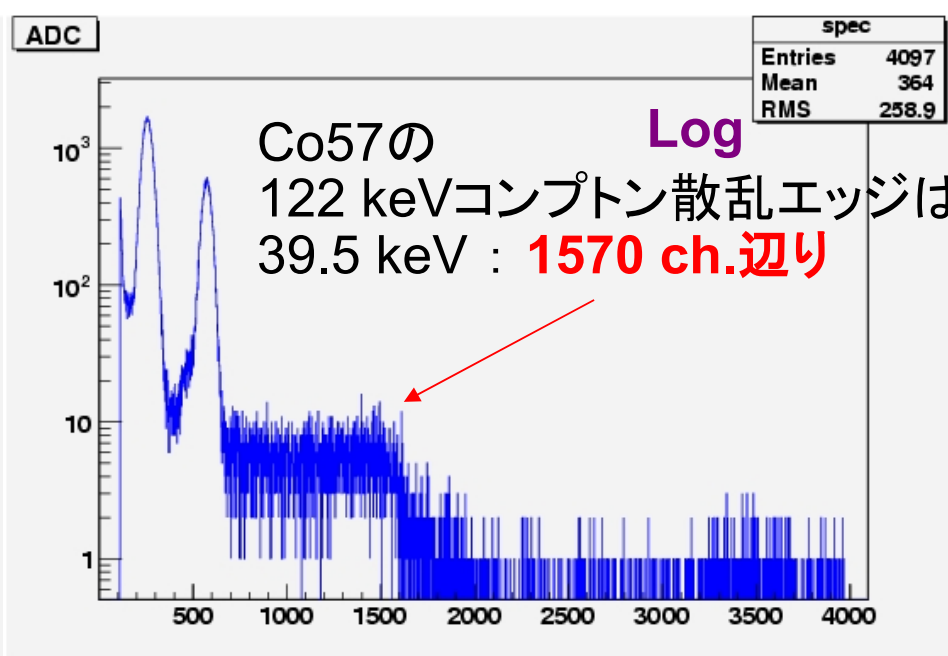
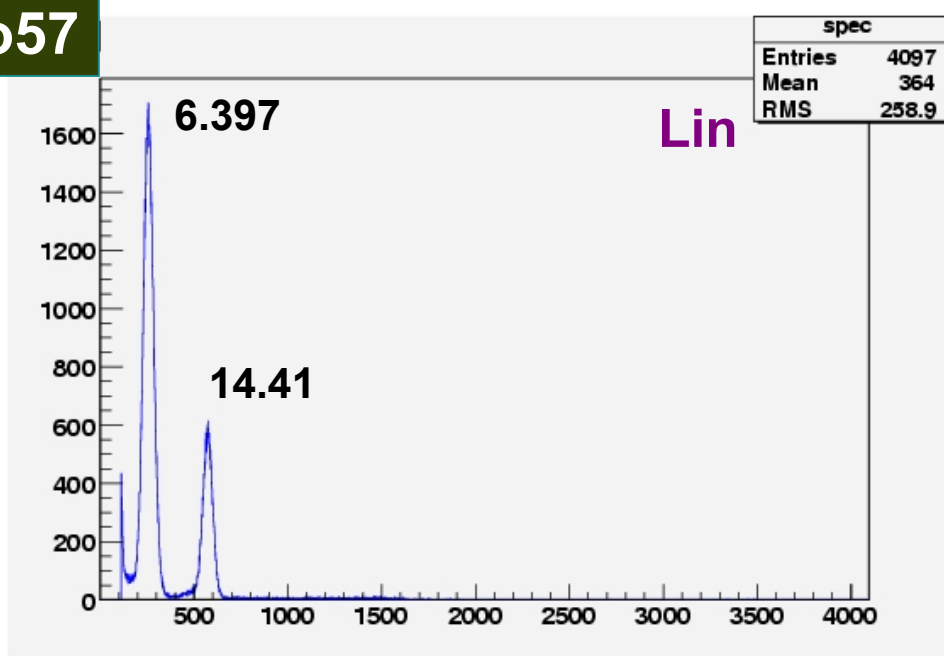
# 1 ch.読み出し(2)

@ch. 6 , H.V. : 100 V ,  
shaping time : 1 usec. , Temp. 22 °C

## Cd109



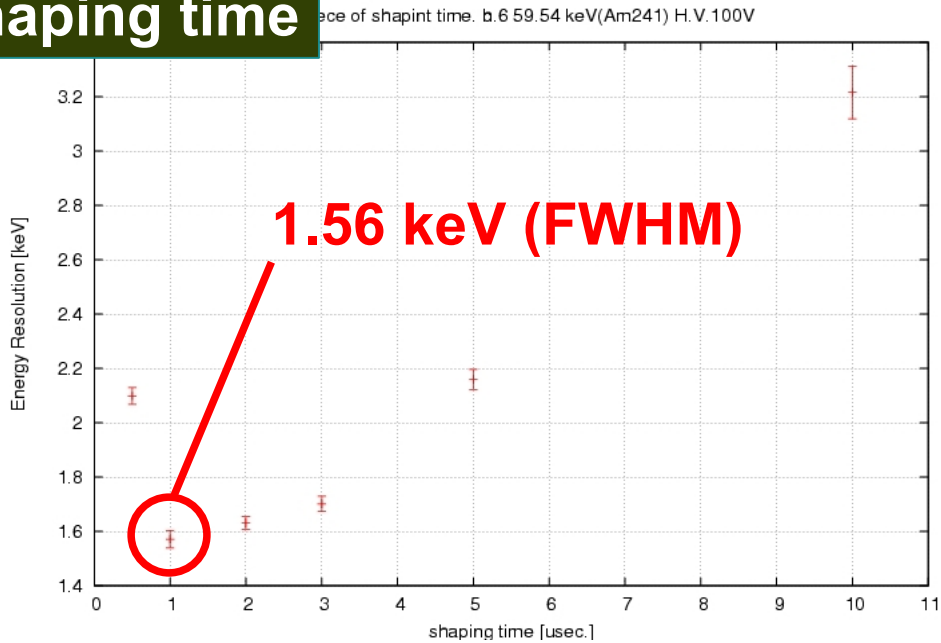
## Co57





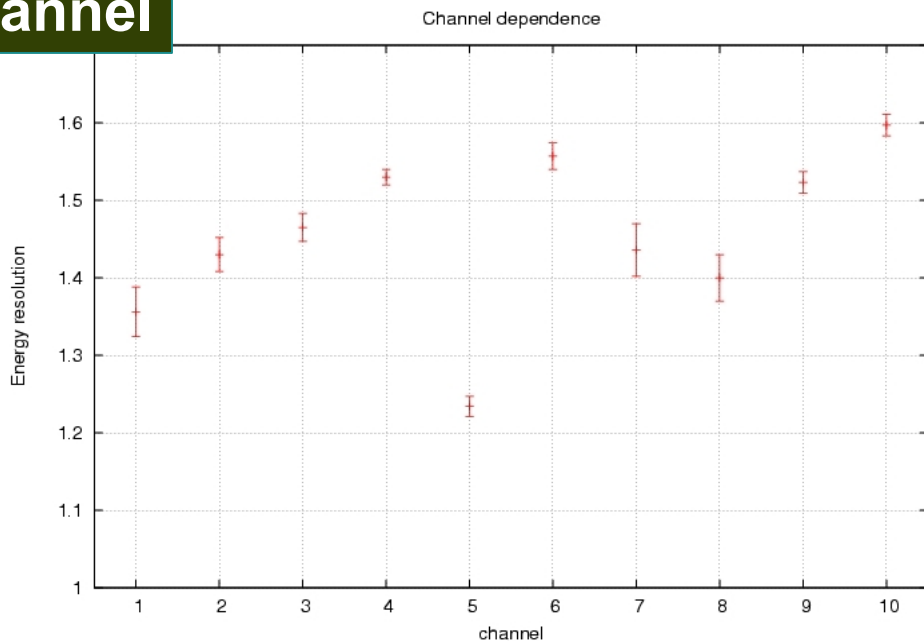
# Shaping time, ch. 依存性 @59.54 keV (Am241), H.V. : 100 V , Temp. 22 °C

## Shaping time



**Shaping time は1 usec.が最も適切**  
**→以降はこの値で用いる**

## channel



**FWHMは概ね1.5 keV前後**

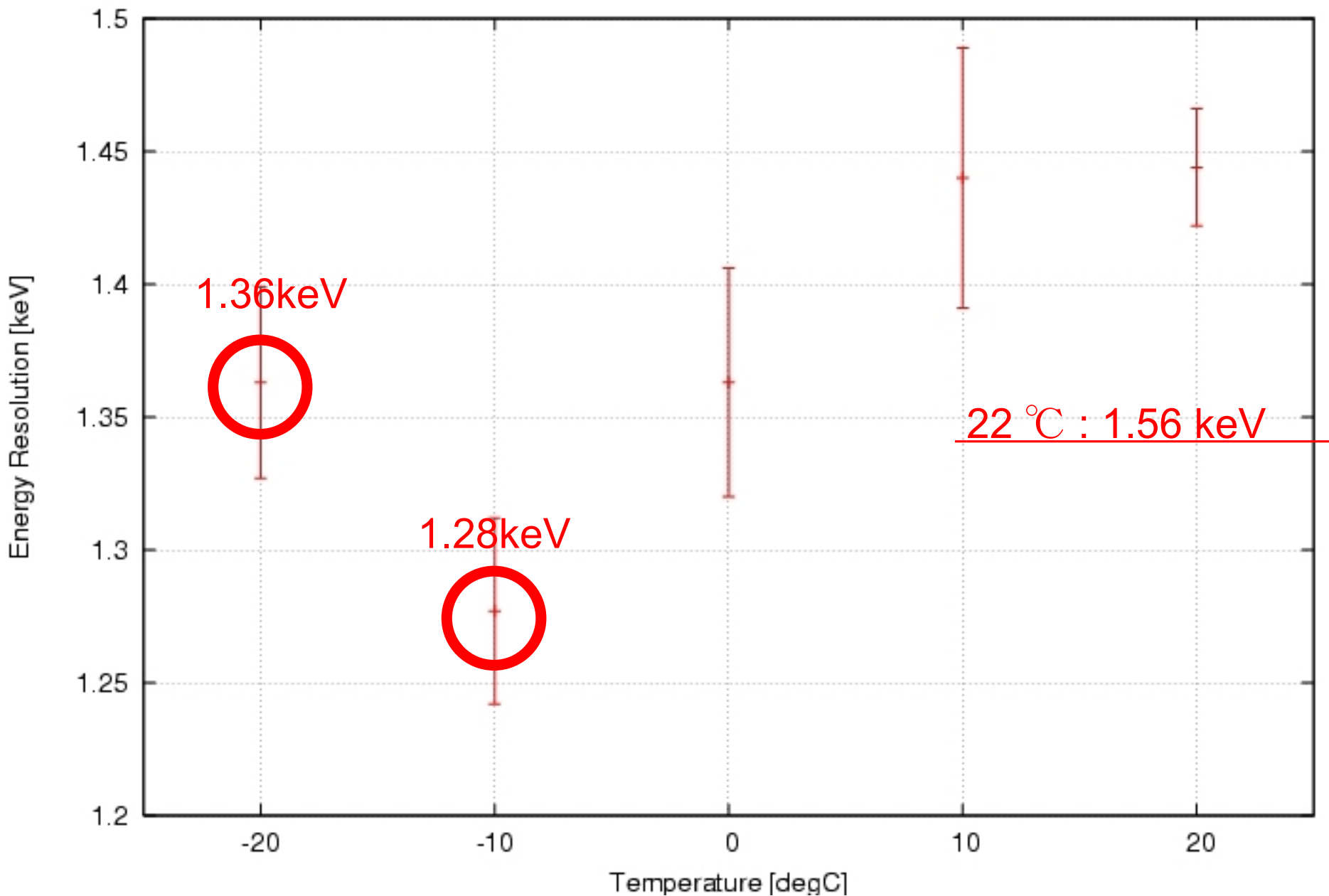


# 1 ch.read Eres温度依存性

@ch. 6 , RI : Am241  
H.V. : 100 V , shaping time : 1 usec.  
shaping gain : 2

59.54keV peak

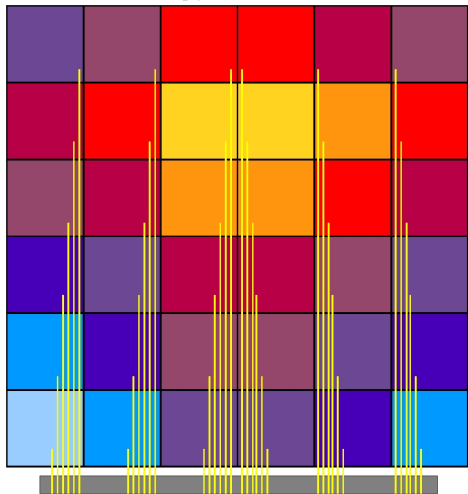
Eres(FWHM) depend on Temp. at Am241 59.54keV, ch6, shaptime=1usec., shapgain=2, H.V.=100V





# Si-Pad multi read -VA32TA6-

Si-Pad読出イメージ

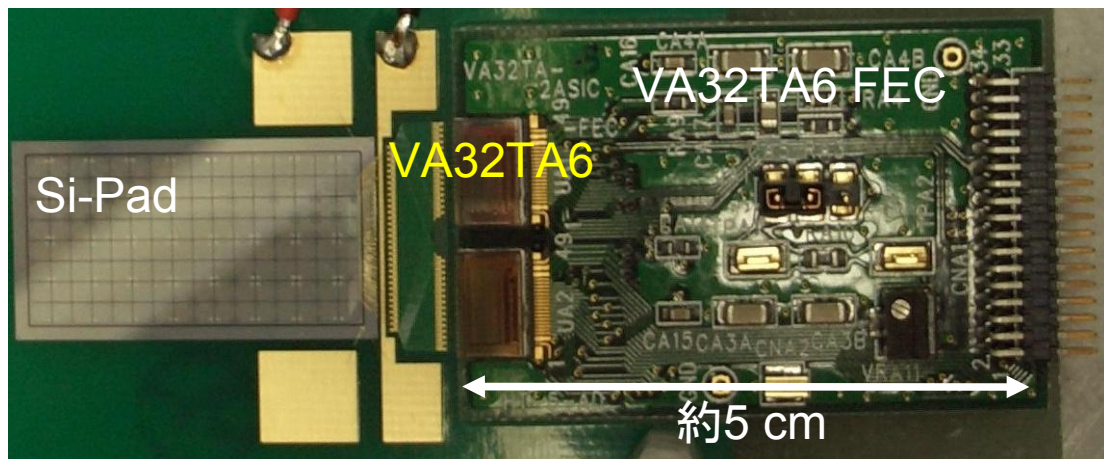


## Si-Padの全パッドを同時に読む

全部で64 ch.あり、それぞれにCSA,shaper,ADCを付け、また同時に読み出そうとするには今までの装置では不可

➔ 新しい半導体検出器読出しASIC[VA32TA6]

- ・ASTRO-Hに搭載されるVATA450の姉妹品
- ・一度に32ch.分のS/Hを行う
- ・ADC機能が付いている



すでにFECに実装されたものを用いる。  
FlashADCとSpaceWireでVA32TA6の

- ・設定変更 (Set Register)
- ・設定確認 (Readback Register)
- ・データ読み取り

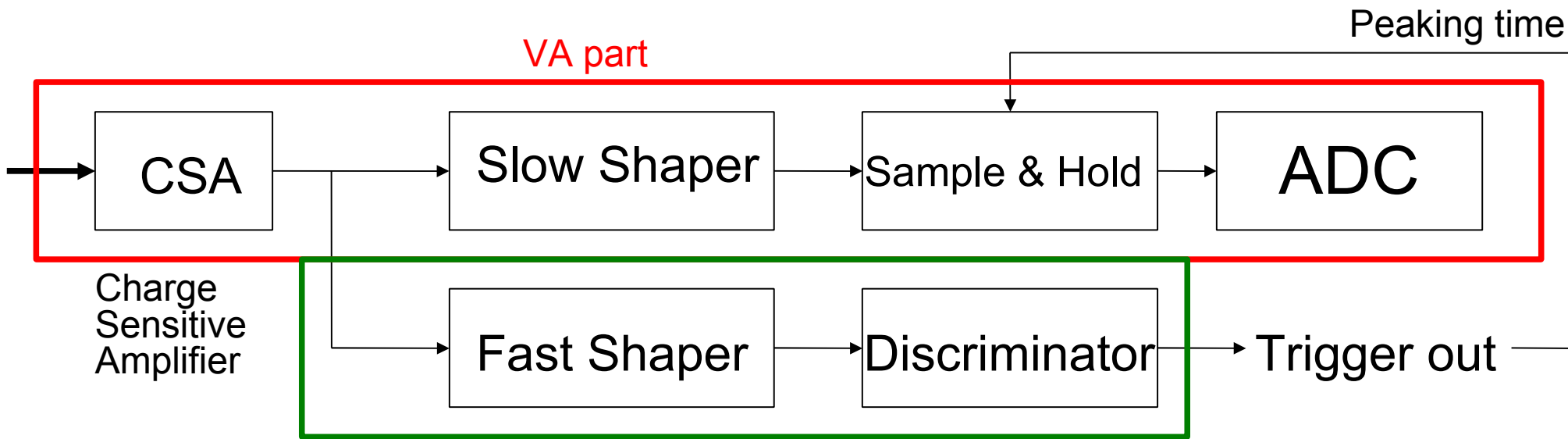
などを行う。



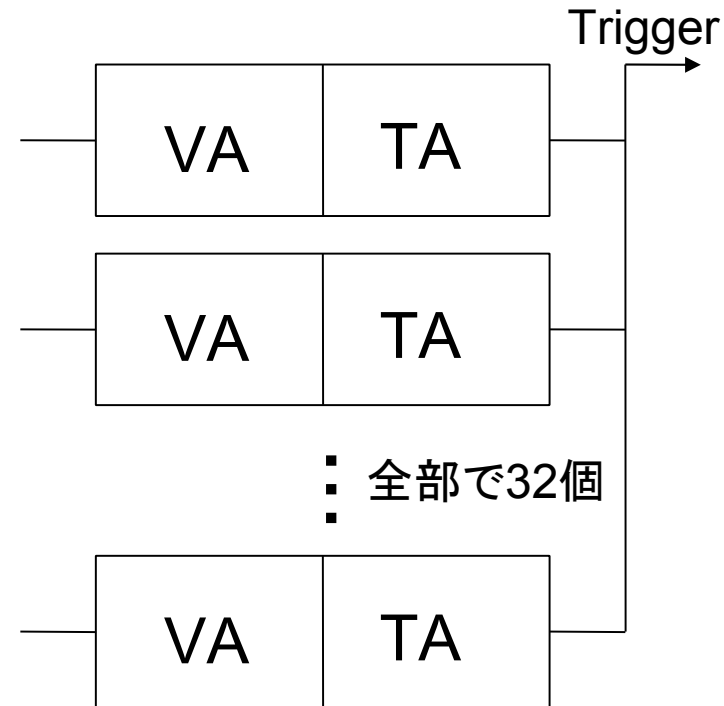
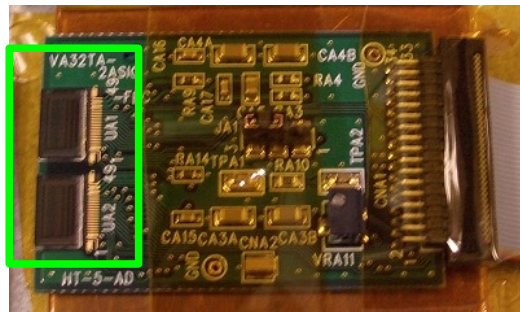
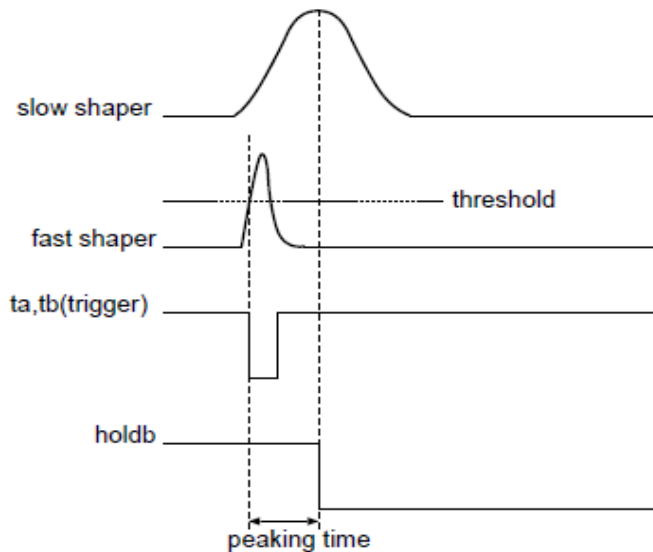


# VA32TA6

VA part



TA part



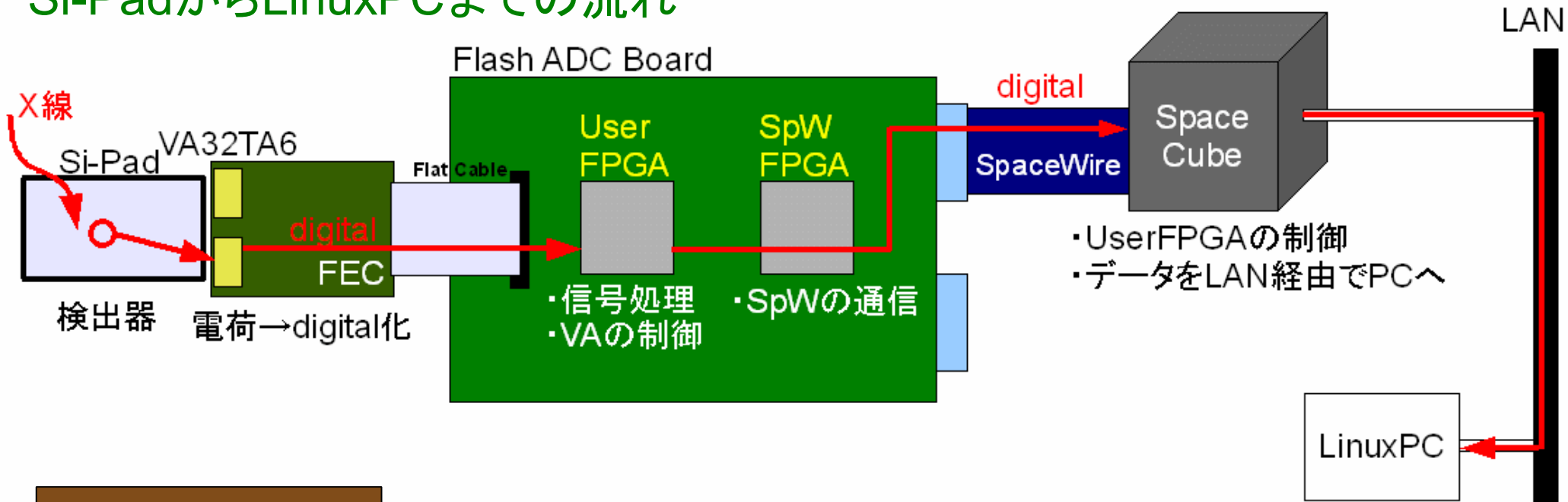
Fastからトリガ判定  
SlowをSample&Hold→ADC





# VA32TA6-FPGA-SpaceWire

## Si-PadからLinuxPCまでの流れ



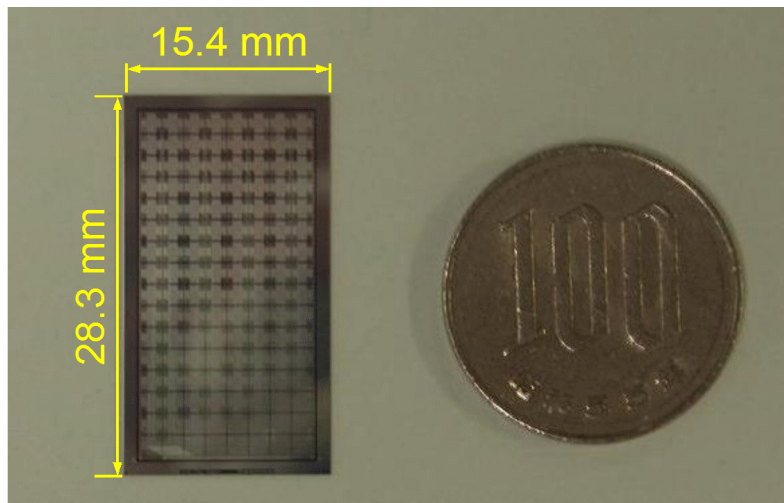
### 開発すべき箇所

- ・データ取得のための装置開発
- ・User FPGAでのVA32TA6設定制御回路用VHDL
- ・User FPGAでのVA32TA6からのデータ取得回路用VHDL
- ・SpaceCubeでのUser FPGA制御及びデータ取得用C++



# 本研究で用いているSi-Pad

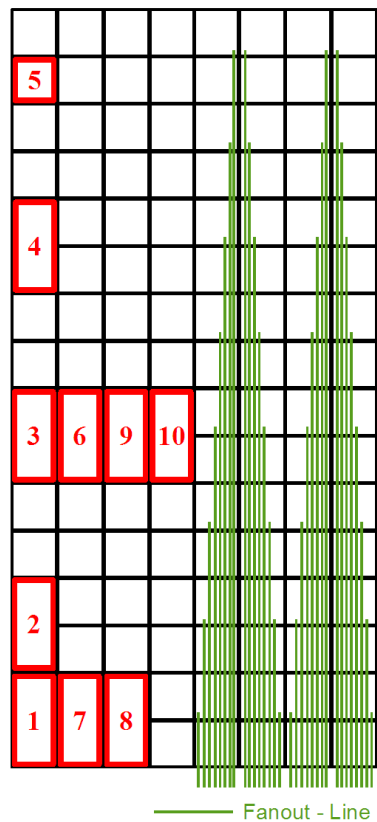
## Si-Pad 1



### 本講演で述べるSi-Pad X線検出器用に初めて試作

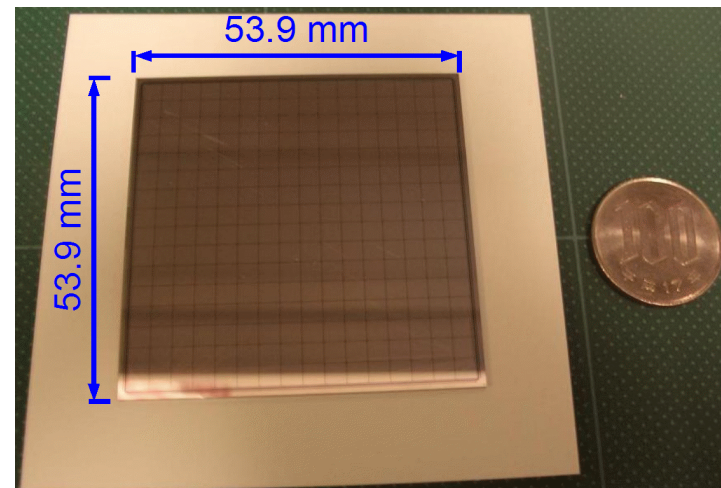
PAD数 : 128 pad (= 8 x 16 )  
PAD サイズ : 1.6 x 1.6 [mm ]  
厚さ : 0.3 [mm]

FANOUT-Line が走り、下部で読出する  
縦二つのpadを繋ぎ、64 ch.となっている



基礎特性での読出し部

## Si-Pad 2



### FMに近いSi-Pad

Si-Pad サイズ : 53.9 x 53.9 [mm ]  
PAD 数 : 256 pad (= 16 x 16 )  
PAD サイズ : 3.1 x 3.1 [mm ]  
厚さ : 0.5 [mm]  
FANOUT-Lineにより、四隅で読出

コンプトンカメラSi-Pad 部のデザイン決定のため  
8x16 ch. Si-Pad 1 の基礎性能評価を行った



# SGD on ASTRO-H