

新型Si-Pad検出器の 基礎特性測定および性能評価

白川裕章 (広島大)

深沢泰司 (広島大)、田島宏康 (名古屋大 STEL)

高橋忠幸、渡辺伸、武田伸一郎 (ISAS/JAXA)

半導体センサーを用いた宇宙観測

コンプトンカメラ

コンプトン運動学を利用して光子の到来方向を決定する検出器

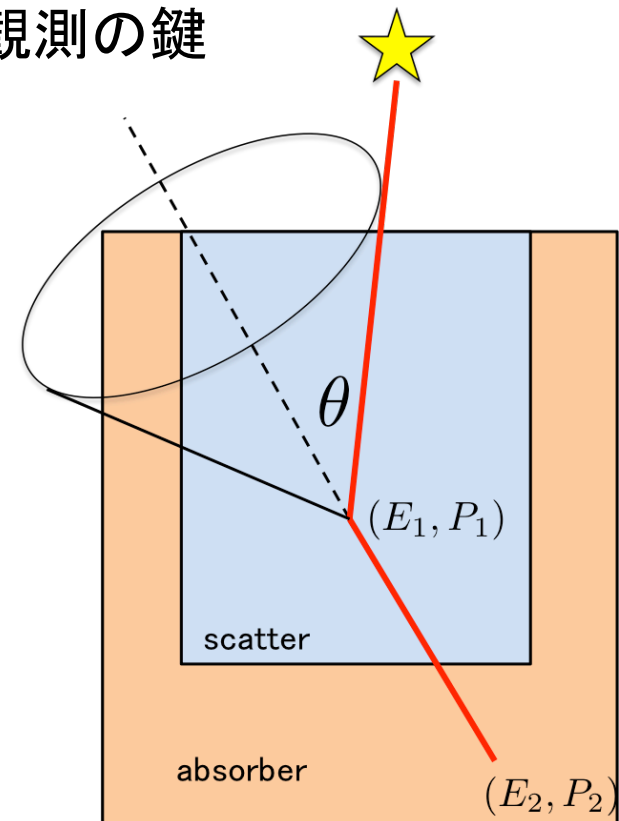
次期X線天文衛星ASTRO-H搭載軟ガンマ線検出器(SGD) (60-600keV)

MeV/sub-MeV全天ガンマ線サーベイ計画CAST (200keV-2MeV)

高い位置分解能、エネルギー分解能が高精度観測の鍵

Si半導体センサー

- ・シンチレータ+PMTに比べ十分なキャリア数
→高エネルギー分解能
- ・ターゲットとするエネルギー帯域において
光電吸収に比べ散乱の確率が高い
→散乱体センサーとして用いられる



ASTRO-H衛星 SGD用Si-Pad

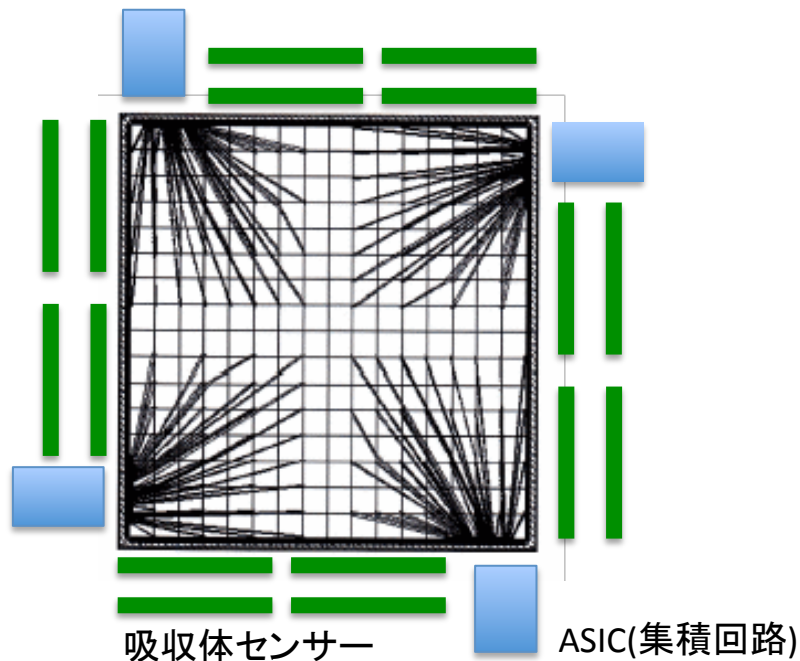
SGD用Si-Padに対する要求性能

有効面積	$> 5 \times 5 \text{ cm}^2$
1ピクセル面積	$< 3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$
有感領域の厚さ合計	$> 19 \text{ mm}$
1ピクセルあたりの容量	$< 10 \text{ pF}$
1ピクセルあたりの暗電流	$< 100 \text{ pA @ } -10 \text{ }^\circ\text{C}$
動作温度	$-30 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$

BGOコリメータ(8度)との併用
 コンプトン再構成によるバックグラウンド除去
 として利用
 →ピクセル面積, エネルギー分解能の要求から,
 以下のセンサーパラメータとなった

SGD用Si-Pad仕様

センサー面積	$5.39 \times 5.39 \text{ cm}^2$
有効面積	$5.12 \times 5.12 \text{ cm}^2$
ピクセル面積	$3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$
ピクセル数	16×16
厚さ	0.6 mm
空乏化電圧	$< 250\text{V}$
1ピクセル暗電流	$< 50 \text{ pA @ } -10 \text{ }^\circ\text{C}$



四隅からの読み出し
 →横方向に吸収体センサーの設置が可能

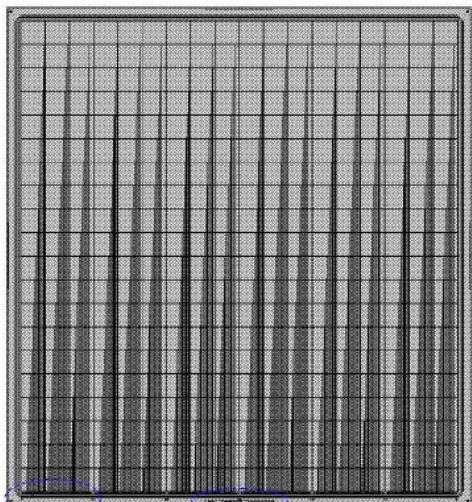
将来ガンマ線観測用コンプトンカメラに 向け開発された新型Si-Pad

SGD用Si-Padにおける課題

- ・動作温度を -20°C 前後とする必要があり冷却が大変
- ・ピクセルの位置に依存した性能のばらつき
- ・読み出しが四隅からのため、構造が複雑
- ・SGDの要求性能は満たすが、全天観測にはさらに高い位置分解能が必要

今回のSi-Padの改良点

- ・ピクセルの小型化 → 1ピクセルあたりのノイズ低減、位置分解能の向上
- ・SiO₂絶縁層を最大限厚く → センサー容量の低減
- ・読み出し線の配置変更 → センサー容量の均一化、構造の簡易化



今回開発されたSi-Padの仕様

センサー面積	4.77cm×5.21cm
ピクセル面積	2.6mm×2.6mm
絶縁SiO ₂ 層厚さ	(SGDに比べ)厚い
読み出し	一辺

性能評価

等価回路から想定される読み出しノイズ

$$\overline{\Delta E^2} = p_1 \tau + p_2 / \tau + p_3 \text{ [keV}^2\text{]}$$

電流性ノイズ

容量性ノイズ

1. ピクセルごとの基礎特性測定 (本講演内容)

1-1. body容量

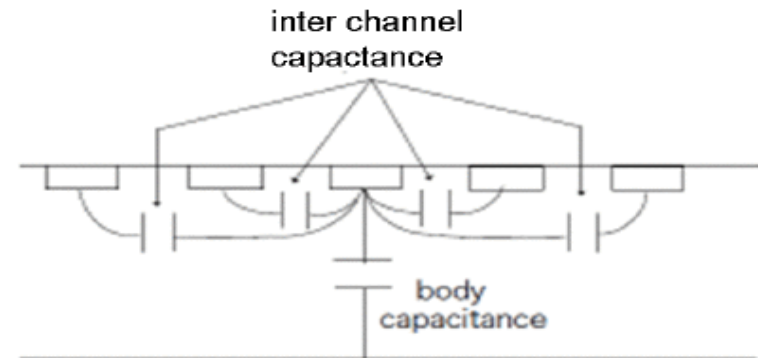
1-2. ch間容量

1-3. 暗電流

1-4. エネルギースペクトル取得

(エネルギー分解能)

読み出しノイズに寄与

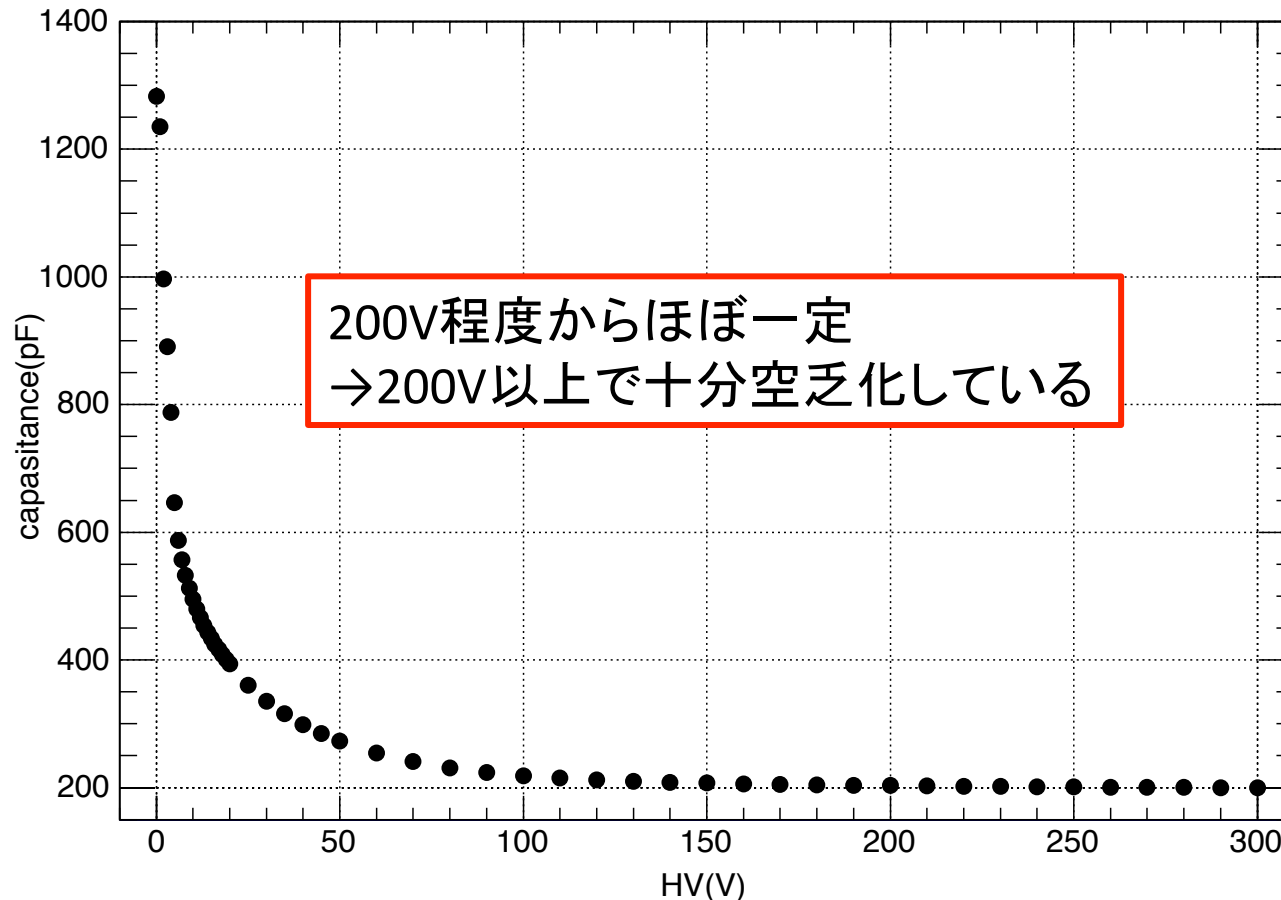


11個のピクセルを選び、それらについてピクセルごとの基礎特性測定を行った。

2. 集積回路(ASIC)を用いた多チャンネル同時読み出し

全体body容量

すべてのピクセルおよびGuard RingとNsub平板との間に生じる容量を測定した
body capacitance

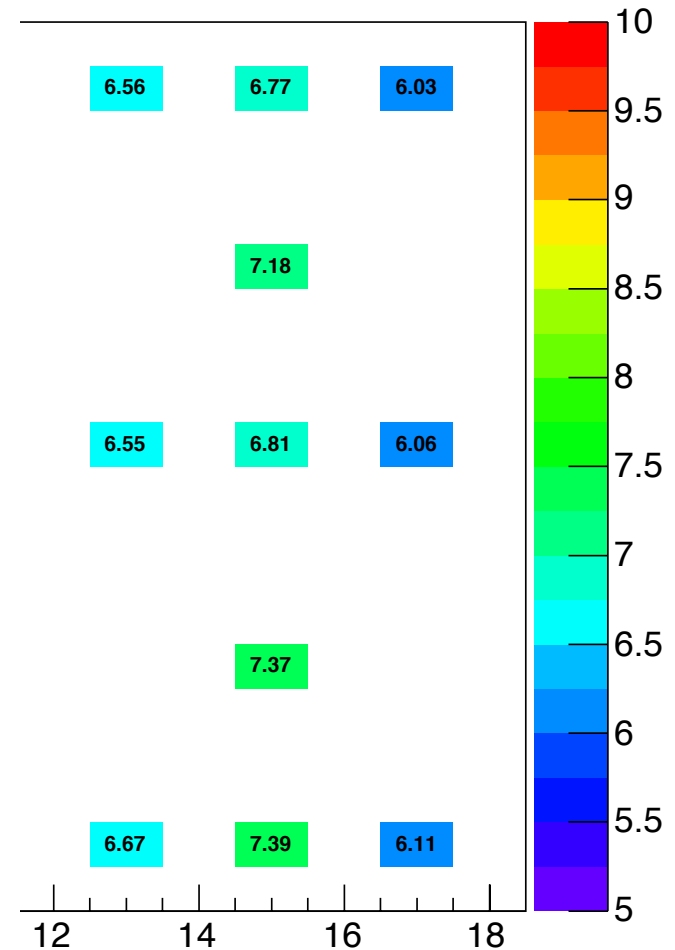
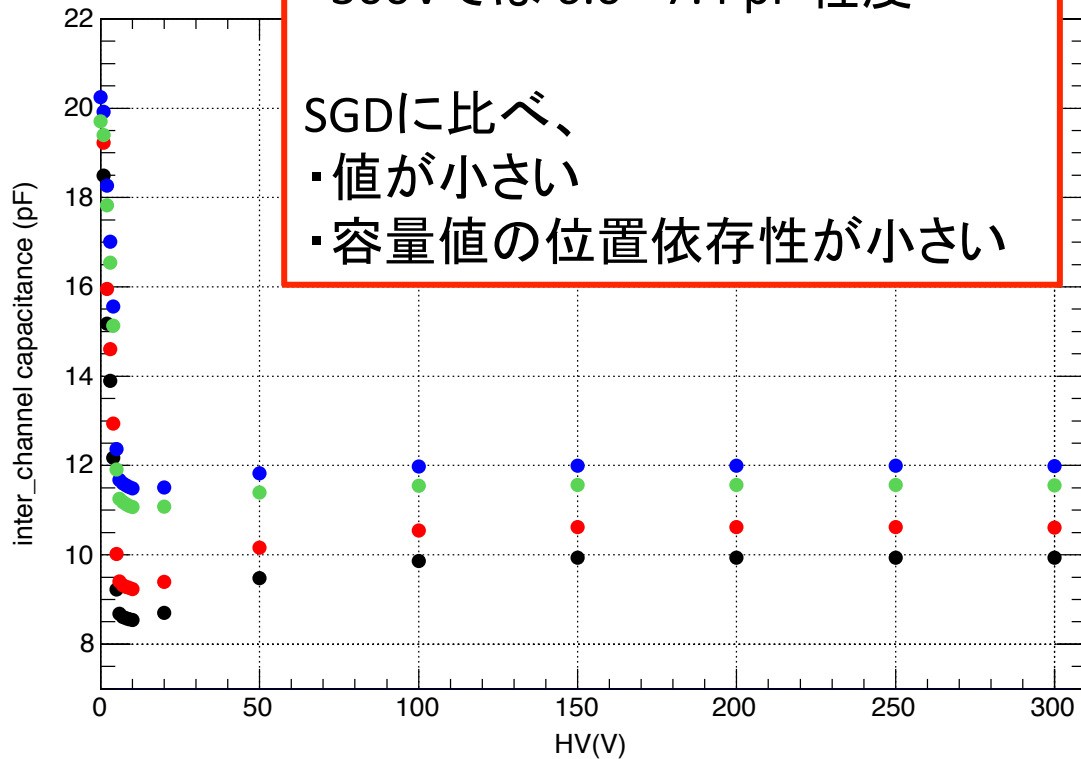


シリコンの厚さ(空乏層の厚さ)はSGDとほぼ同じだが
面積比から予想される値(415pF)と比べ小さい
←全チャンネルをボンディングしていない影響か？

ch間容量

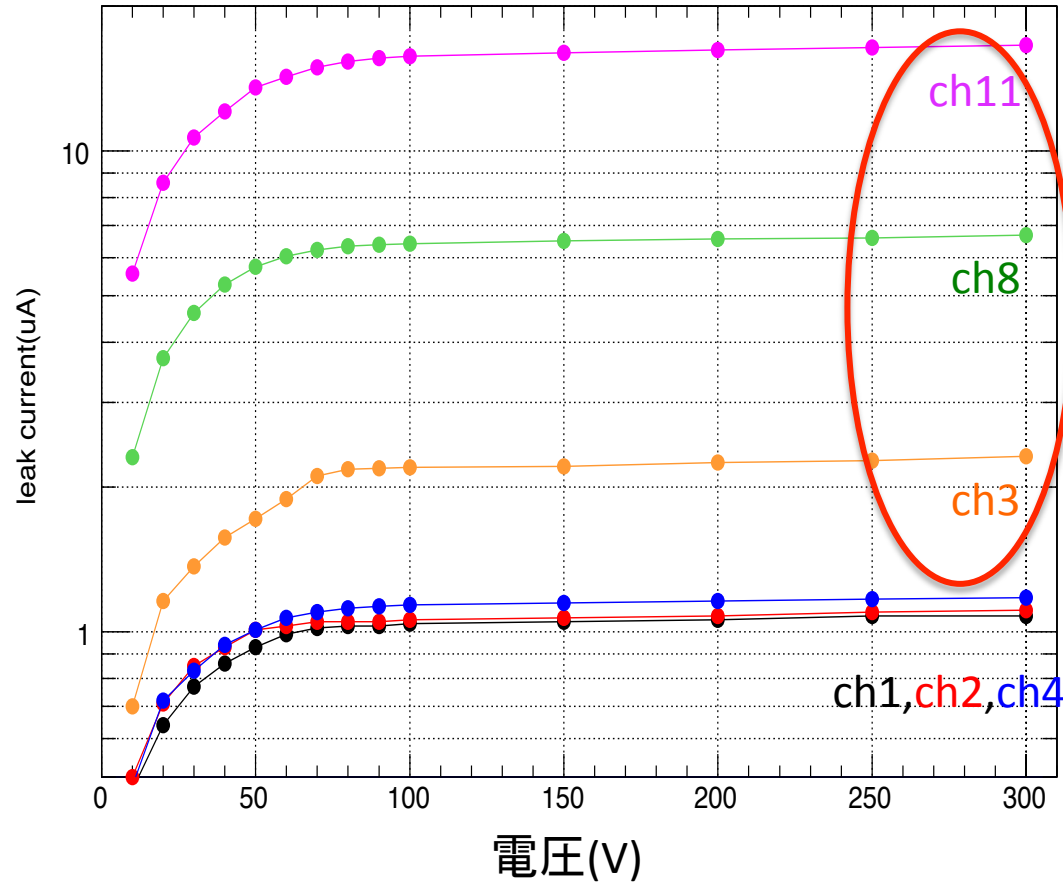
あるピクセルとその他のピクセルおよび読み出し線との間に生じる容量を測定
(読み出し用と同等の基板を用い、読み出しの際に生じる浮遊容量を評価し差し引いた)

- ・100V程度からほぼ一定
 - ・300Vでは 6.0 - 7.4 pF 程度
- SGDに比べ、
- ・値が小さい
 - ・容量値の位置依存性が小さい

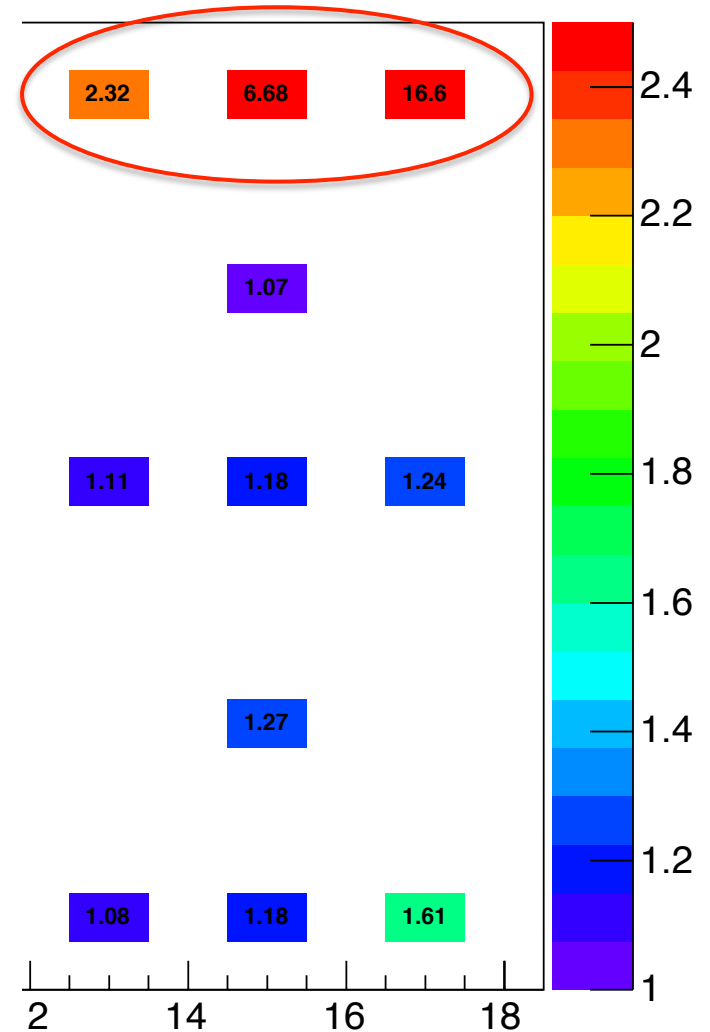


暗電流

Leakage Current (-20°C)

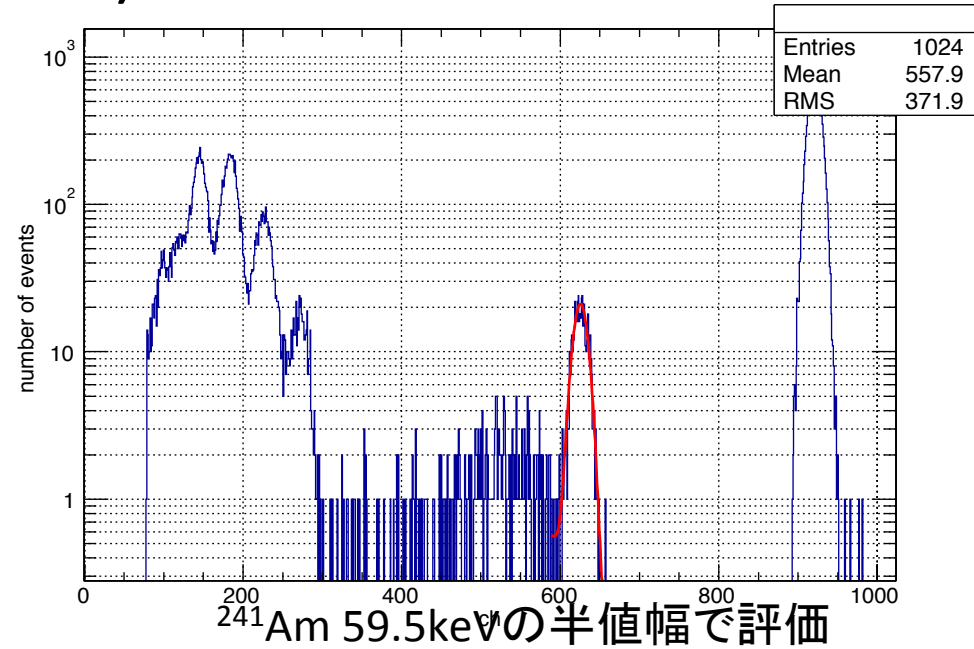
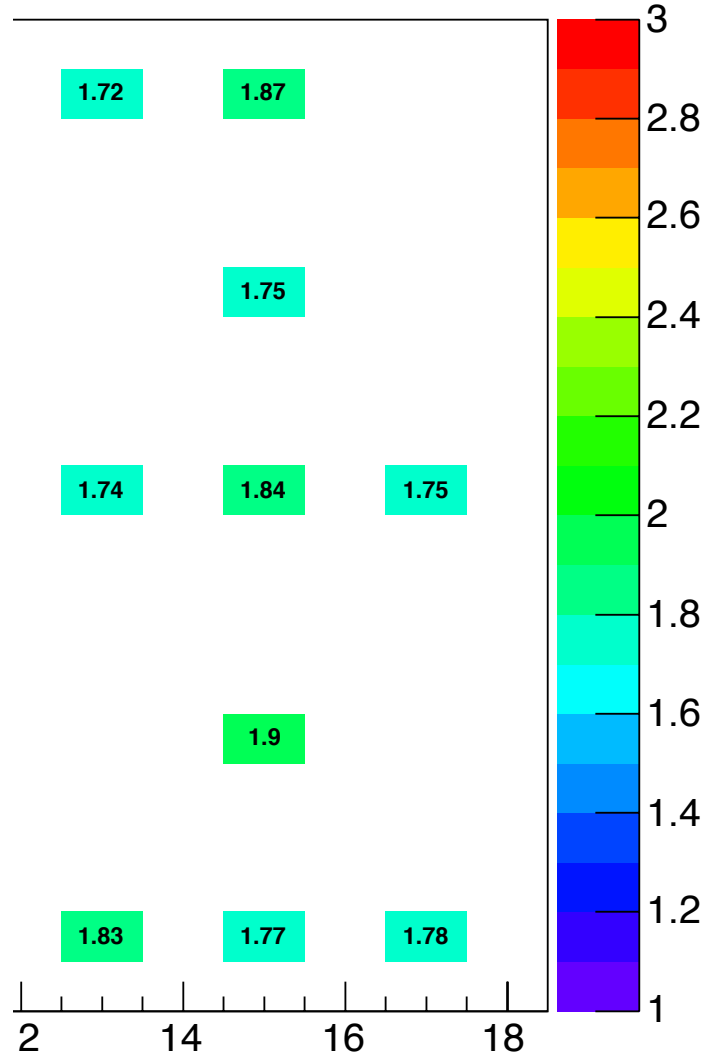


多くのピクセルは1.0-1.6pA
SGDのものに比べ単位面積あたりの
電流値が小さい(1/4 ~ 1/6)



上端のピクセルで暗電流が大きい？

エネルギースペクトル(-20°C)



左図測定条件

HV:300V

温度:-20°C

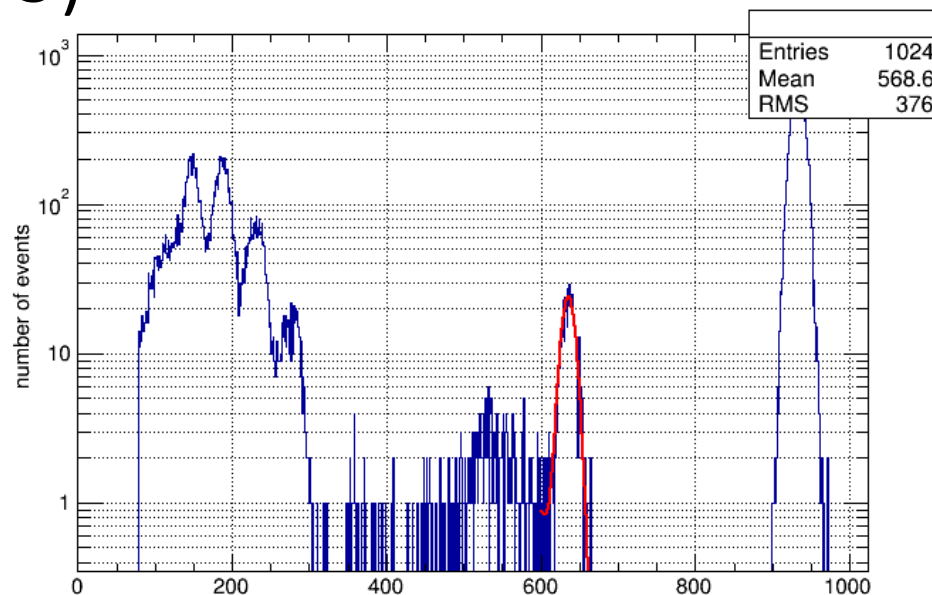
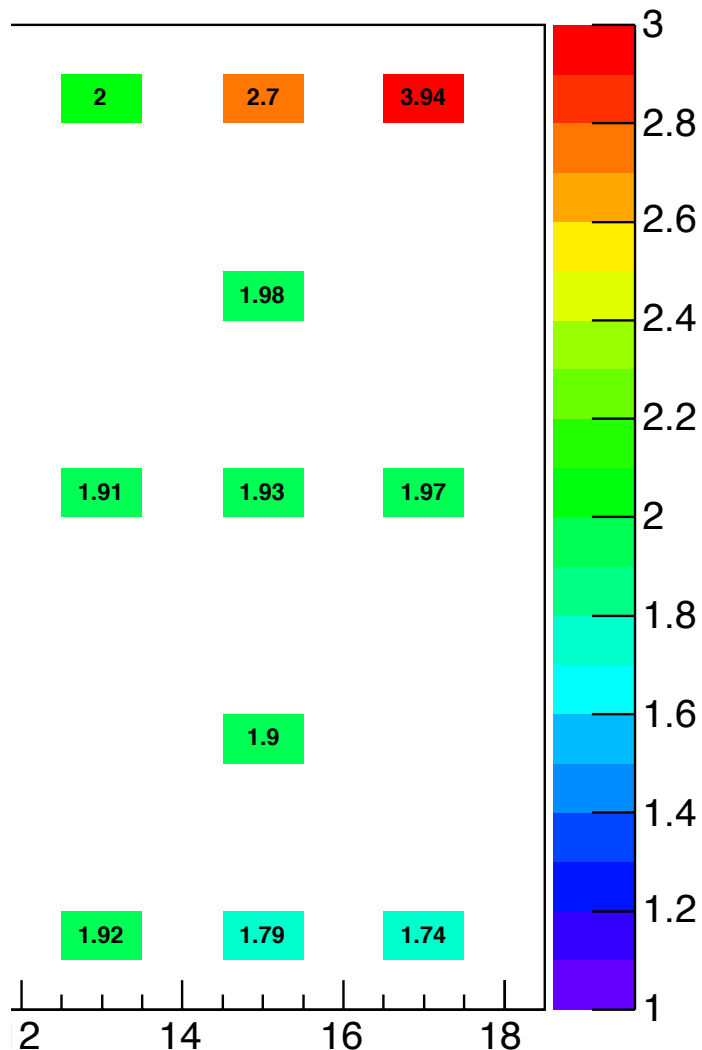
Shaping time: 6us

単位:keV(@59.5keV)

位置によらず1.7 - 1.9 keV程度

SGD用Si-Pad: 読み出し線の影響で四隅で分解能がよくない
今回開発されたSi-Pad: 大きな位置依存性は見られない

エネルギースペクトル(20°C)



^{241}Am 59.5keVの半値幅で評価

左図測定条件

HV:300V

温度:20°C

Shaping time: 6us

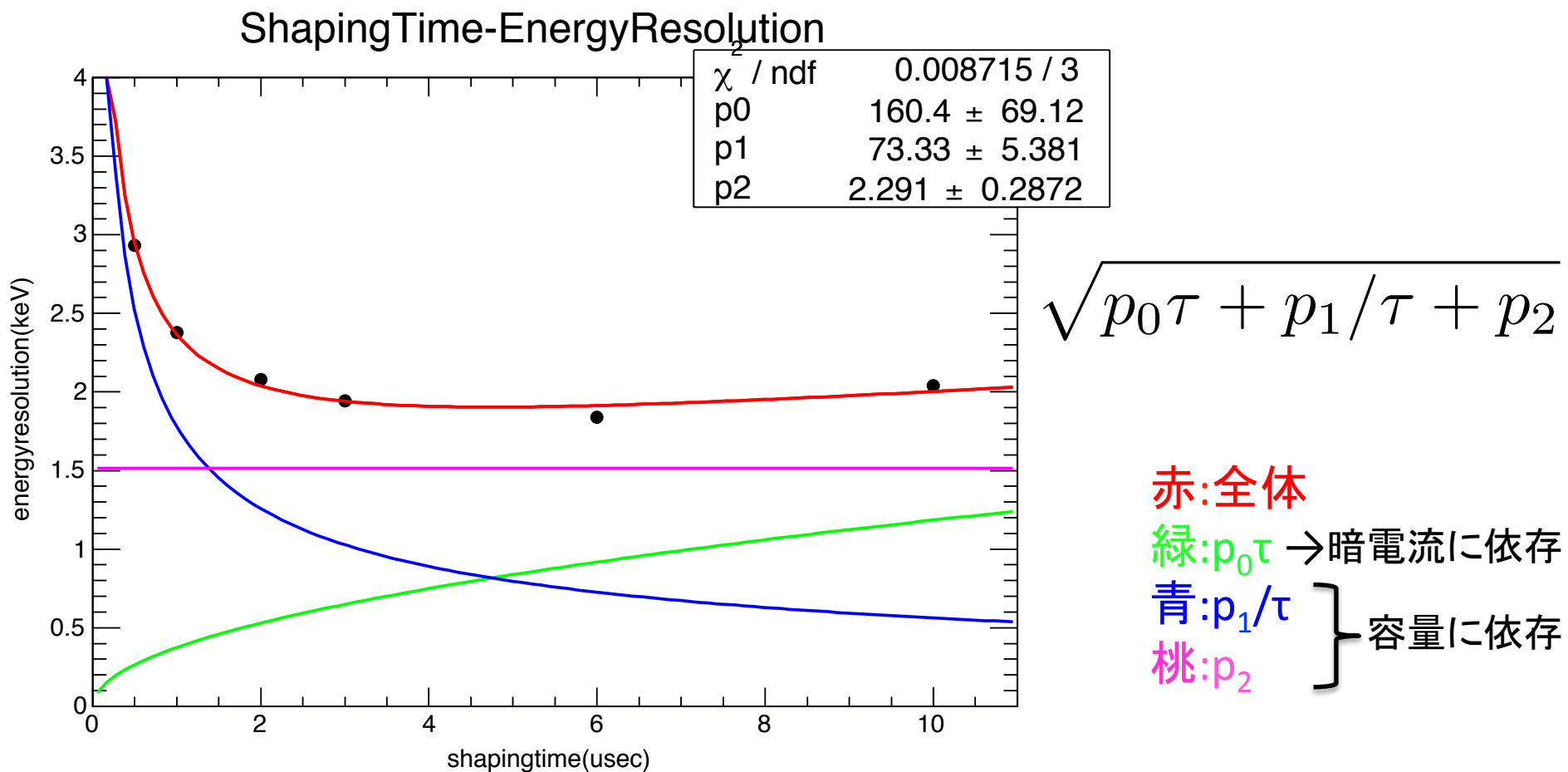
単位:keV(@59.5keV)

常温でも多くのピクセルで2keVを達成

SGD用Si-Pad: 読み出し線の影響で四隅で分解能がよくない
今回開発されたSi-Pad: 大きな位置依存性は見られない

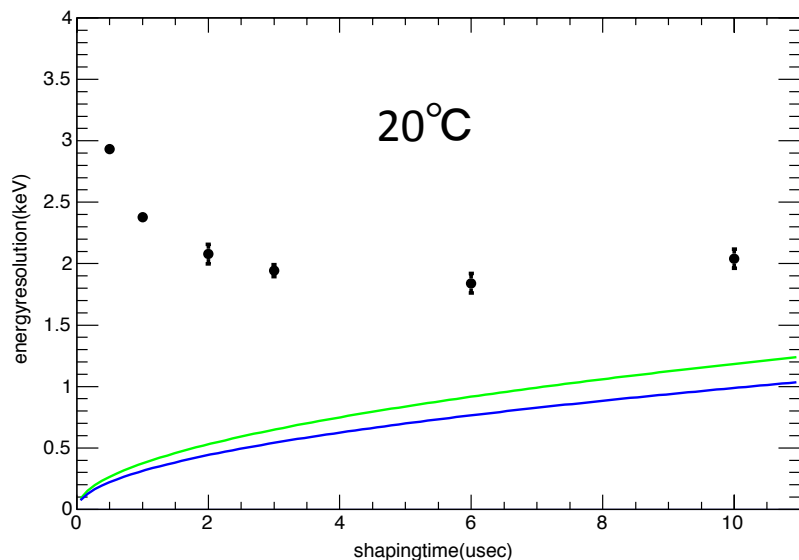
ノイズ評価

エネルギー分解能と波形整形の時定数(シェーピングタイム)の関係を
ノイズの理論式を用いてフィッティングし、
どのような成分が検出器のノイズに影響しているかを調べている

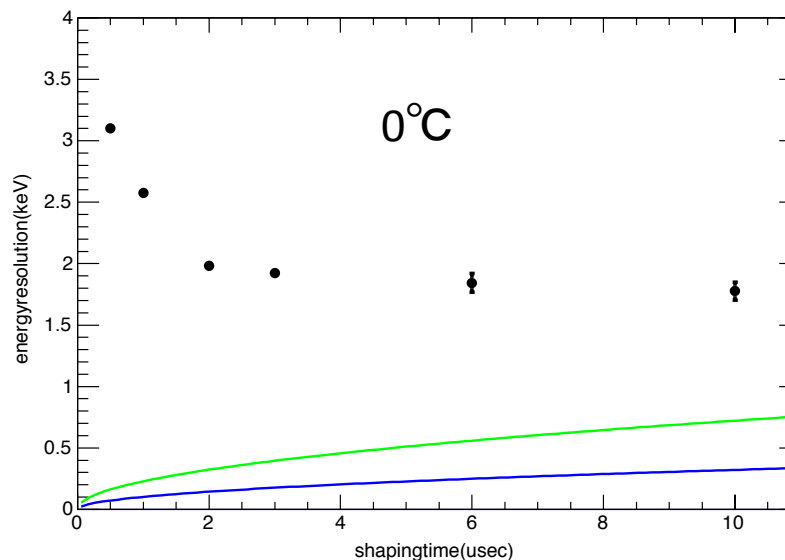


電流の寄与

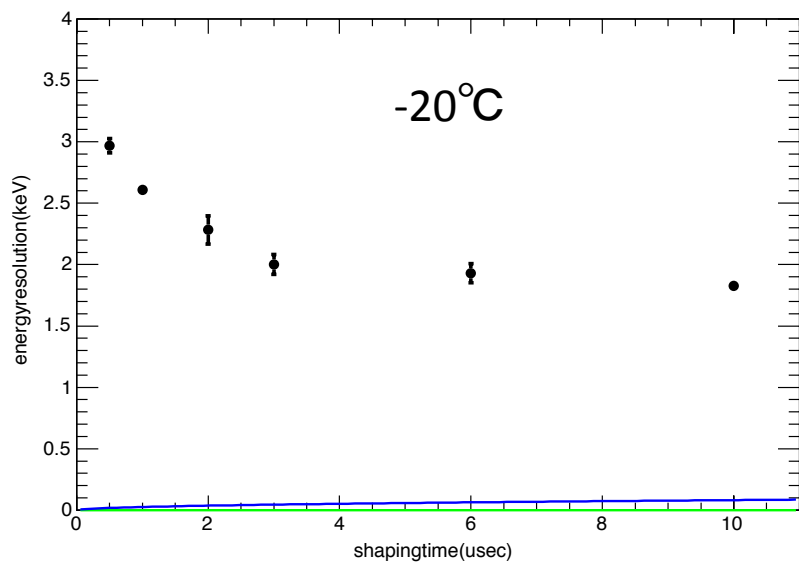
ShapingTime-EnergyResolution@20deg



ShapingTime-EnergyResolution@0deg



ShapingTime-EnergyResolution@m20deg



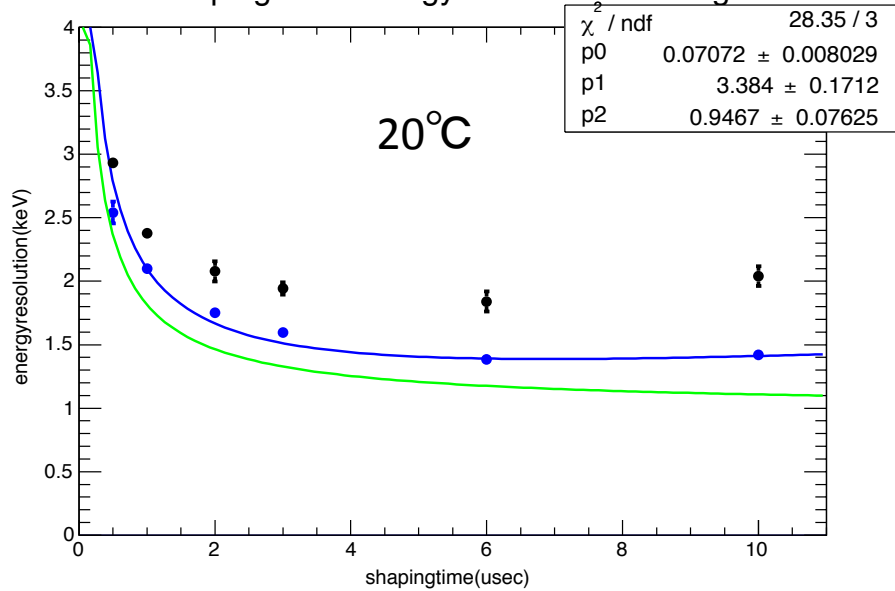
$$\overline{\Delta E^2} = p_1 \times \tau$$

- 黒 : Amピークからの実測値
- 青 : 電流値から推定したノイズ
- 緑 : フィッティングから推定したノイズ

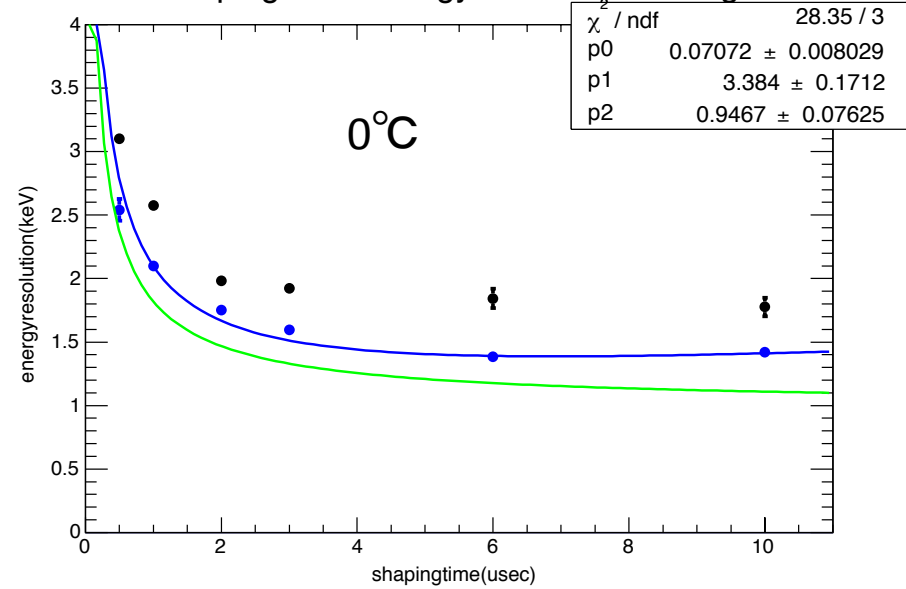
- 温度依存性が見える
- 全体への寄与は小さい

容量の寄与

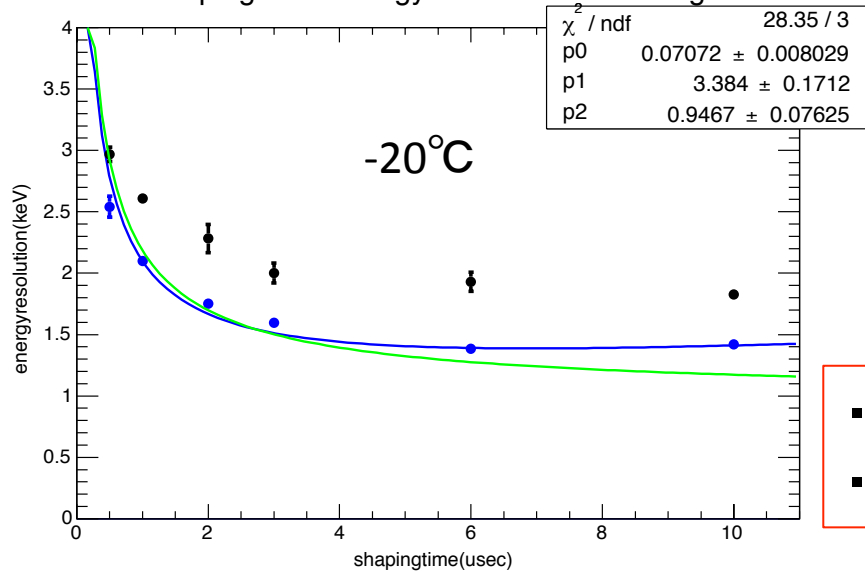
ShapingTime-EnergyResolution@20deg



ShapingTime-EnergyResolution@0deg



ShapingTime-EnergyResolution@m20deg



$$\overline{\Delta E^2} = p_2/\tau + p_3$$

黒: Amピークからの実測値
 青: 容量値から推定したノイズ
 緑: フィッティングから推定したノイズ

- 温度では大きく変化しない
- 暗電流に比べ全体への寄与は大きい

まとめ

将来ガンマ線観測用コンプトンカメラに向け開発された新型Si-Padに対して基礎特性の測定を行った

- ・読み出し線の配置の変更に伴うch間容量の均一化が見られた
- ・暗電流値は小さいが、個体差によるものと思われる
- ・エネルギー分解能の位置依存性は小さくなっている
- ・常温でも2keVのエネルギー分解能を達成できた

各温度で暗電流、容量のノイズへの寄与を調べた

- ・暗電流の寄与が小さくなった

今後

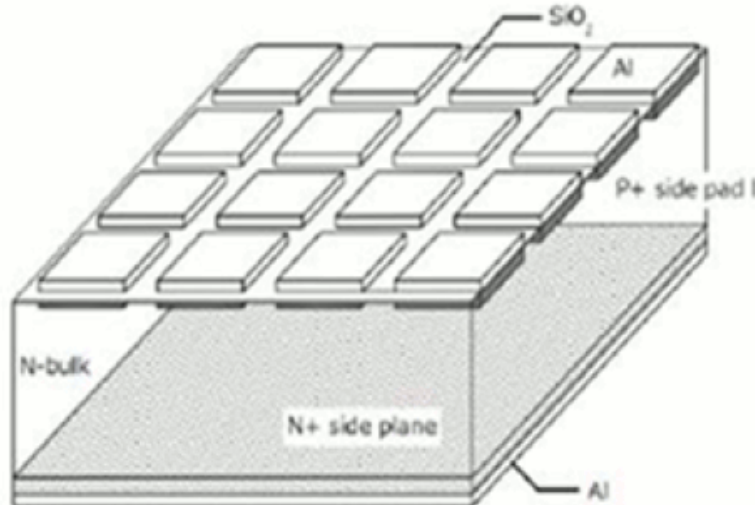
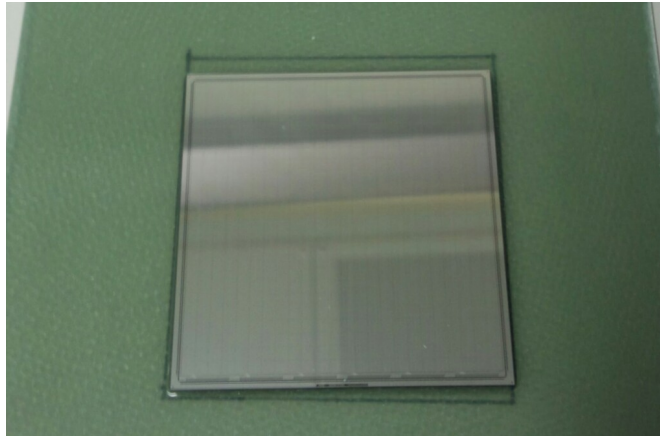
集積回路(ASIC)を用いた多チャンネル同時読み出し

Si-Pad検出器

Si半導体を用いたPad型センサー

(n型ウエハー) + (p+型のピクセル状インプラント)
+ (n+型平板)

n+型平板、各ピクセルには電極が取り付けられ、
信号線を介して信号を読み出すことができる



読み出し原理

1. ガンマ線入射
2. 空乏層内にて散乱,吸収が生じる
3. 光子の失ったエネルギーに比例した数のキャリア対が生成
4. キャリアが電場によって移動し電気信号として読み出される

読み出しノイズ

主な原因

暗電流

センサー容量

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \simeq 0.58 I_n \tau + \{f(C_{in}, \tau)\}^2 [keV^2]$$

暗電流

主に空乏層に熱励起された電子

$$I(T) \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

→大きな温度依存あり

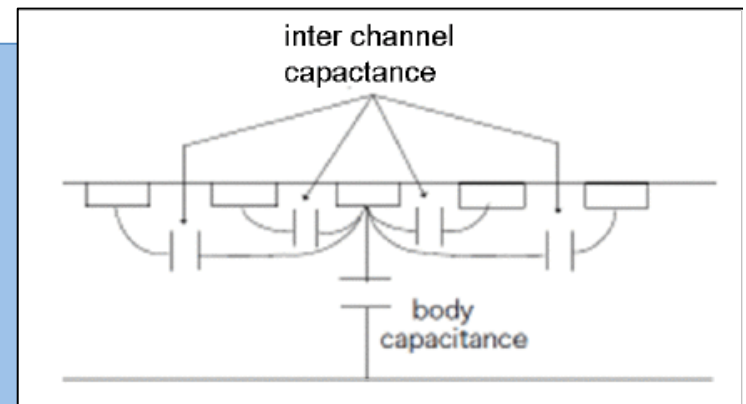
センサー容量

Body容量

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

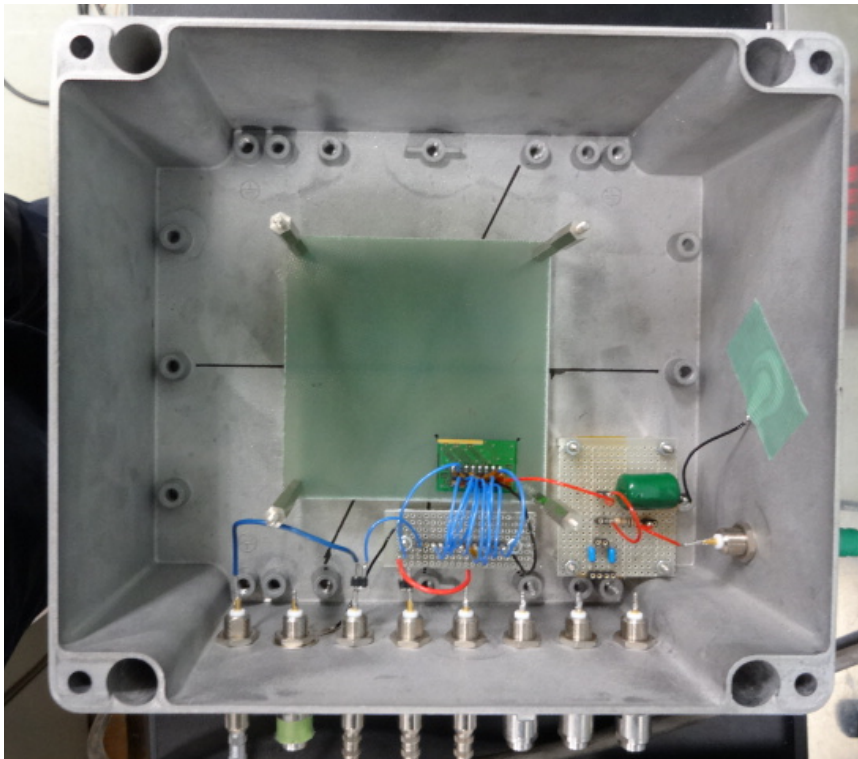
ch間容量

pixelどうしに生じる容量
読み出し線とpixelの距離にも依存



浮遊容量測定

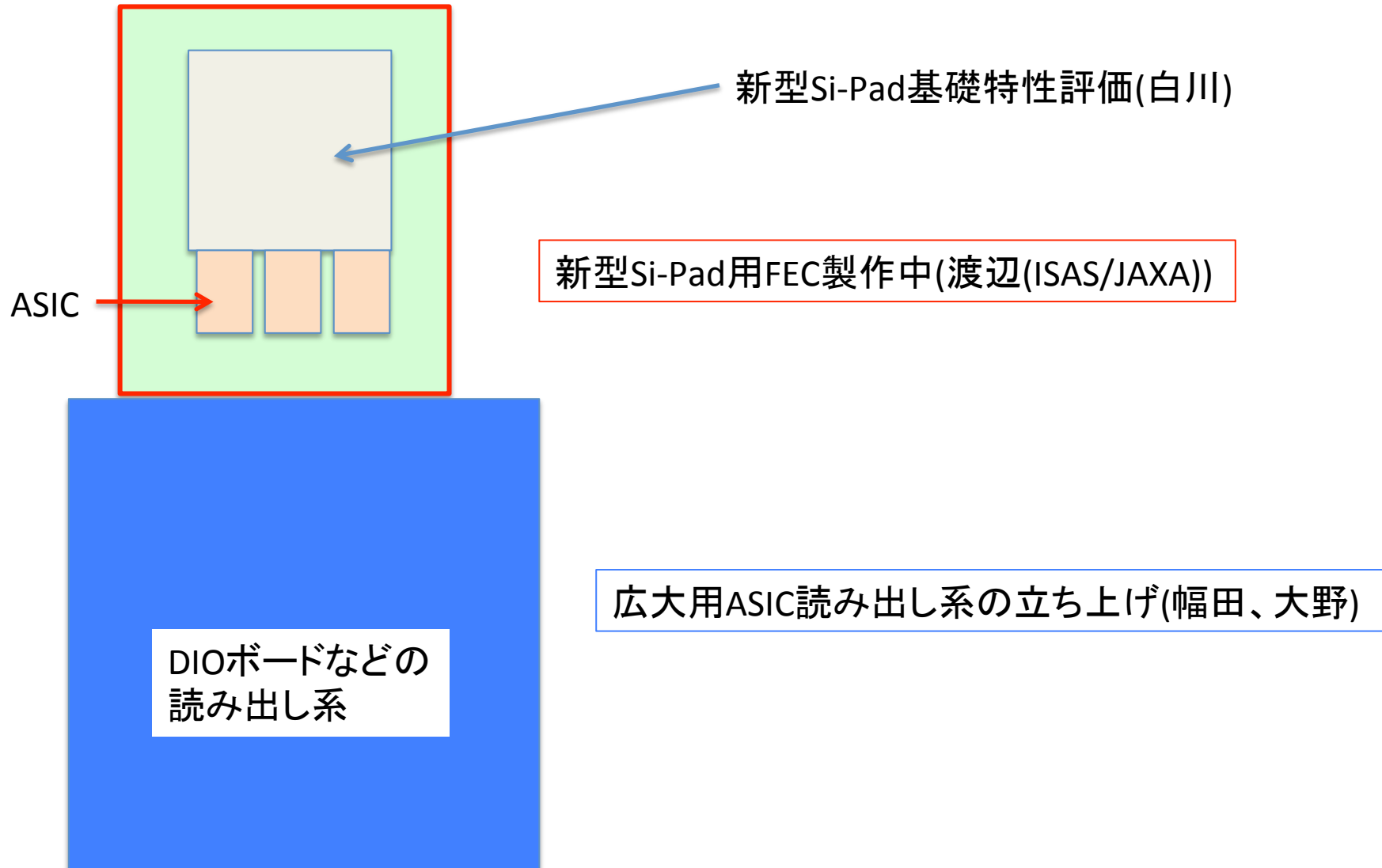
Pad1読み出しに用いているものと
同等の読み出し基板を作成し、
基板や読み出し線による浮遊容量を測定
→浮遊容量は3.3-4.7pF



大きな位置依存性は見られない

ASIC読み出しに向けて

実際の読み出しにはASICを用いる。
将来的にはASICでの読み出しを目指す
が、現状では各所準備が整っていない。



新型Si-Pad基礎特性評価(白川)

新型Si-Pad用FEC製作中(渡辺(ISAS/JAXA))

広大用ASIC読み出し系の立ち上げ(幅田、大野)

DIOボードなどの
読み出し系

半導体検出器の特徴

シンチレーター+PMTに比べキャリア対生成に必要なエネルギーが小さい
→十分なキャリア数を稼ぐことができるため高いエネルギー分解能

Si半導体が用いられる理由

数十keV以上で散乱断面積が吸収断面積より大きい
→散乱しやすい
広く使われている

SGD用Si-Padの全体body容量は447pF(道津修論)

- ・多くが1.0~1.6pA@-20°C←pixelサイズを考慮しても値小さい

単位面積あたりで比較すると

(SGD) / (pad1) = 1.01 / 0.15 ~ 0.24 (pA/mm²): 4~6倍程度の差

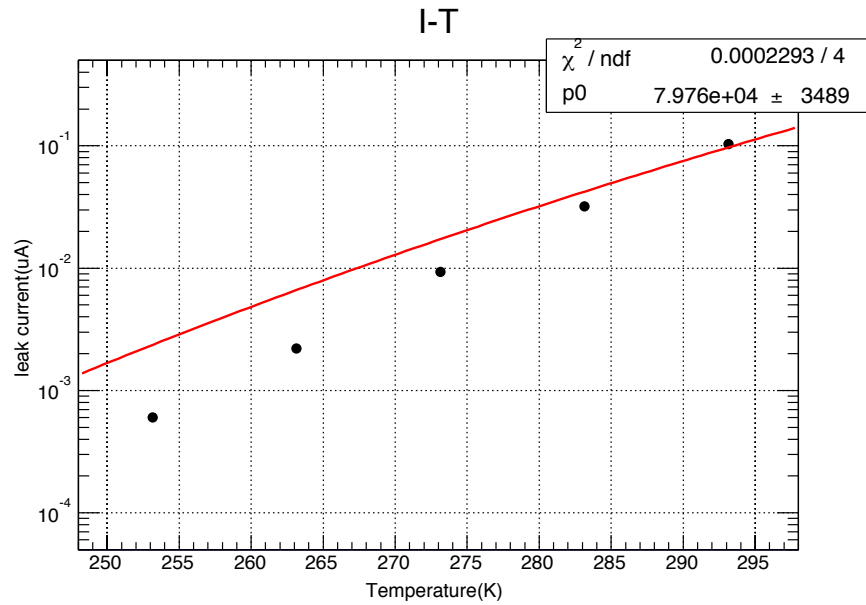
熱設計

冷却の負担を減らす

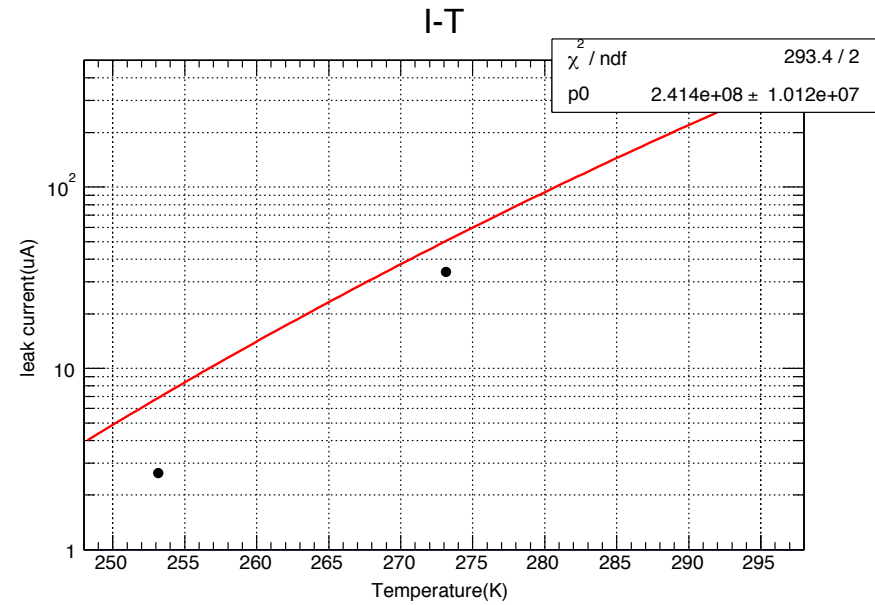
ピクセル小型化→ピクセル数増→ASIC増→発熱増→高温可動の方がいい

測定が暗電流ことの確認

$$I \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$



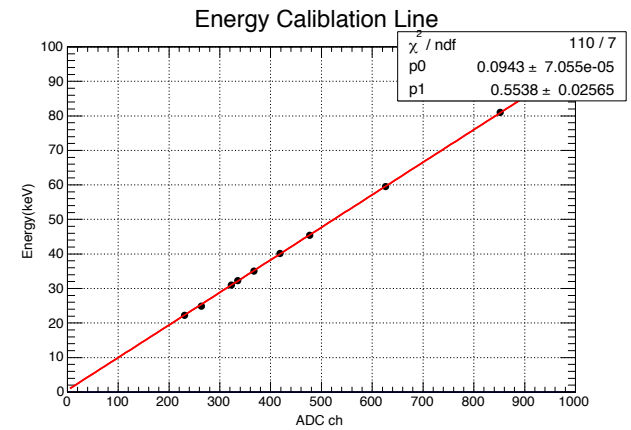
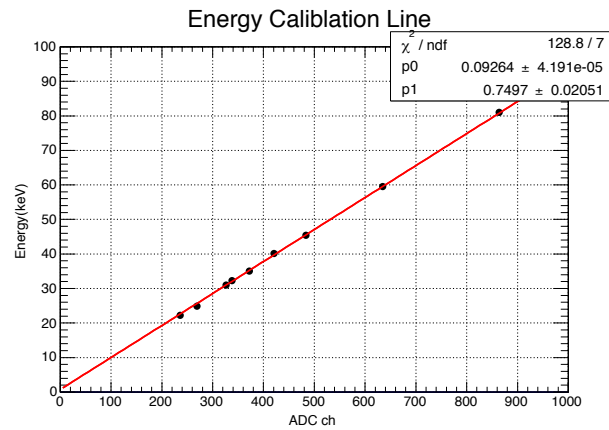
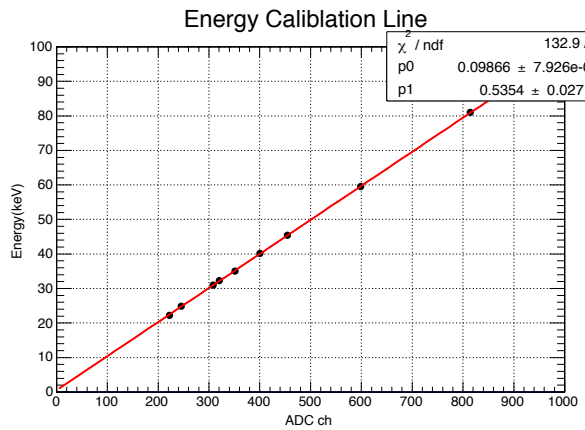
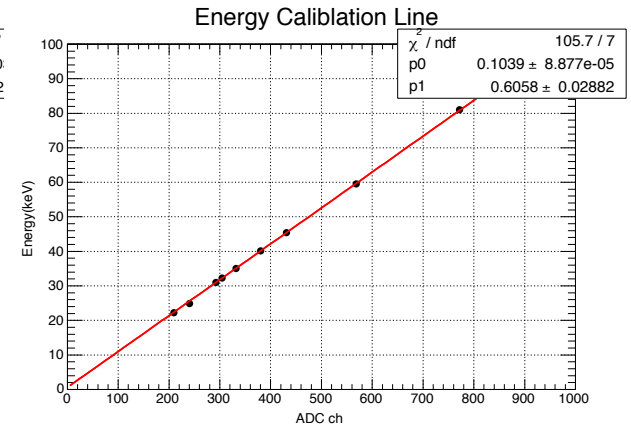
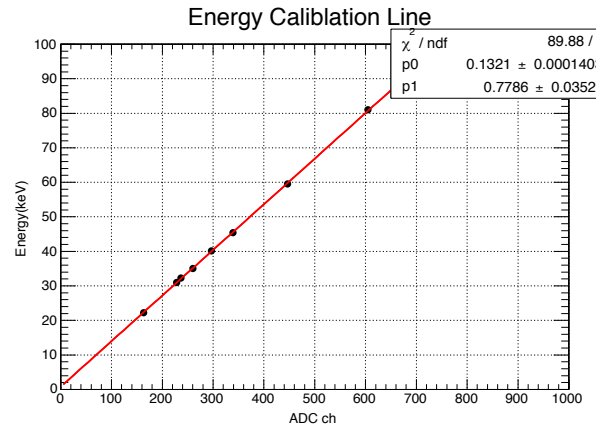
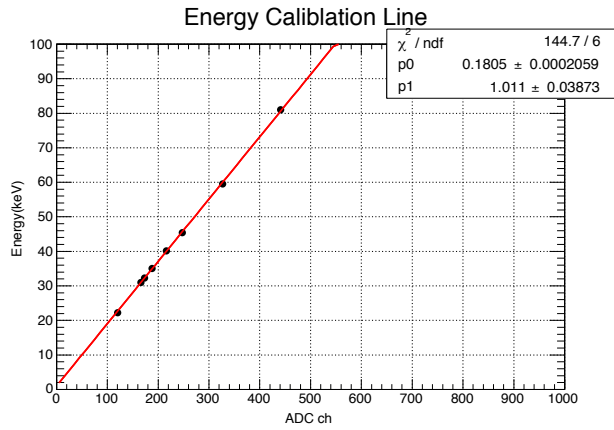
新型



SGD

どちらも温度変化20°Cで電流値が1桁変化

エネルギー較正直線(ch6,各シェーピングタイム)



容量勾配測定(各シェーピングタイム)

