



崩壊点検出器の為の 高精細CCDセンサー及び読み出し回路



2013.2.18 ICEPPシンポジウム

東北大学 加藤恵里子

ヒッグス粒子発見



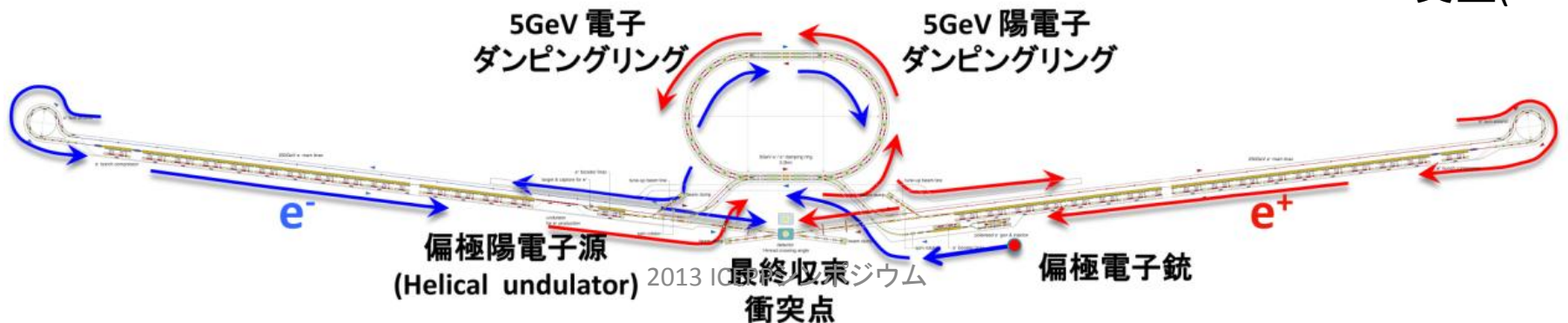
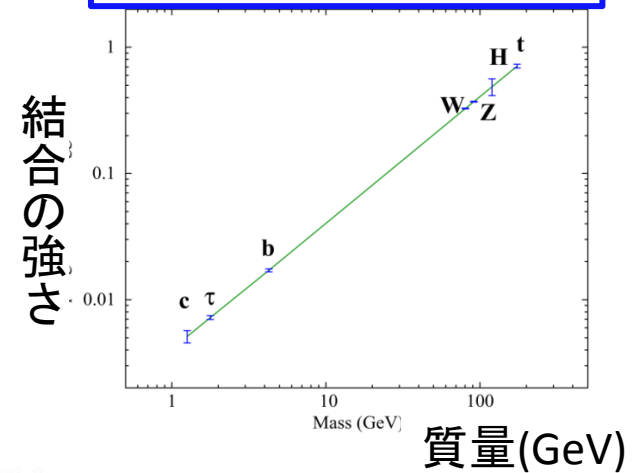
■ 2012/7/4, ヒッグス発見！

スピン、結合定数 etc..をより精密に測りたい。

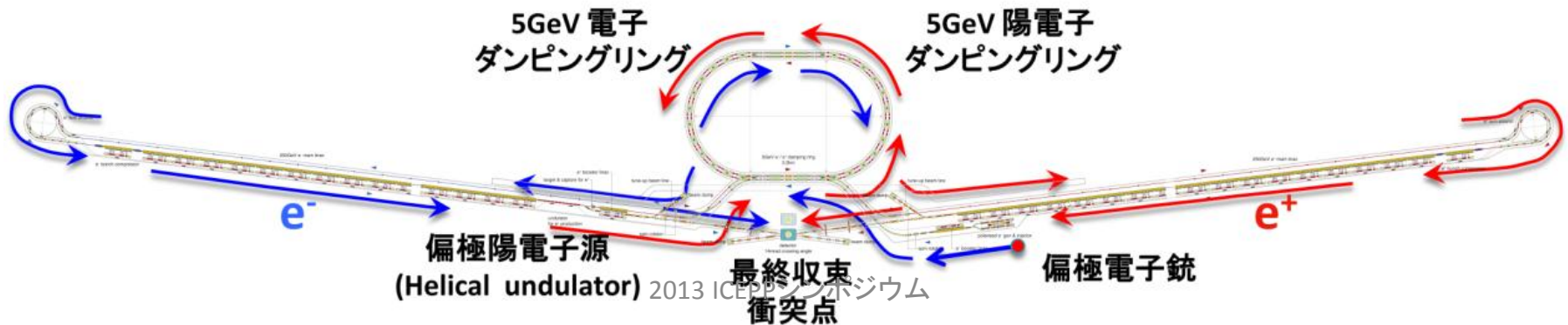
➤ ILC(国際線形加速器)

- 重心エネルギー: 250GeV~
- 積分ルミノシティ: 500fb⁻¹(4年間)

質量と結合定数の関係



先週のGoogleロゴ



ILCの崩壊点検出器

■ 崩壊点検出器への要求

- 高精度なHiggsとのcoupling測定
- 高効率、高純度のフレーバー同定

目標崩壊点分解能

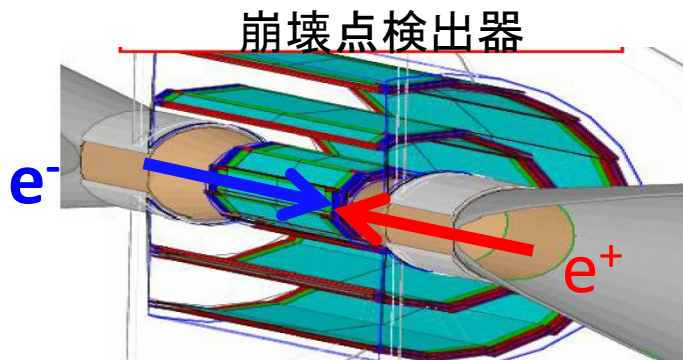
$$\sigma = 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^2 \theta} (\mu m)$$

■ 崩壊点検出器

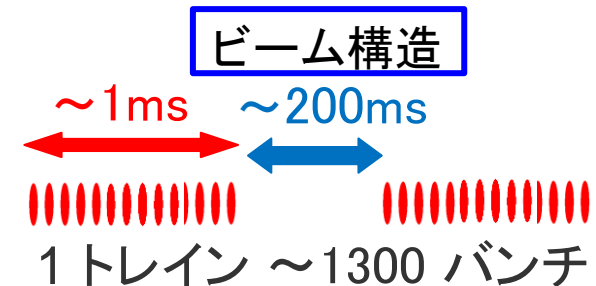
- 高い崩壊点分解能 → 衝突点近傍に設置
- 正確な飛跡再構成 → ピクセル占有率 $\sim 9(1)\%$

両方満たすためには...

➤ トレイン間複数読み出し or ピクセルを高精細にする



FPCCD(FinePixelCCD)崩壊点検出器



FPCCD崩壊点検出器

■ FPCCD(FinePixelCCD)崩壊点検出器

構造

ピクセルサイズ $5 \times 5 \mu\text{m}^2$
厚さ,有感: $15 \mu\text{m}$, Si $50 \mu\text{m}$

全空乏化
トレイン間読み出し

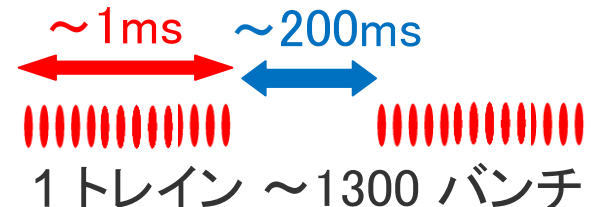
総ピクセル数: 1.6×10^{10}

特性

- 😊 高い位置分解能
- 😞 小信号
- 😊 高い2粒子分解能力
- 😊 ビーム由来高周波ノイズの影響ない
- 😞 高速読み出し

➤ FPCCD用読み出し回路及びCCDを開発

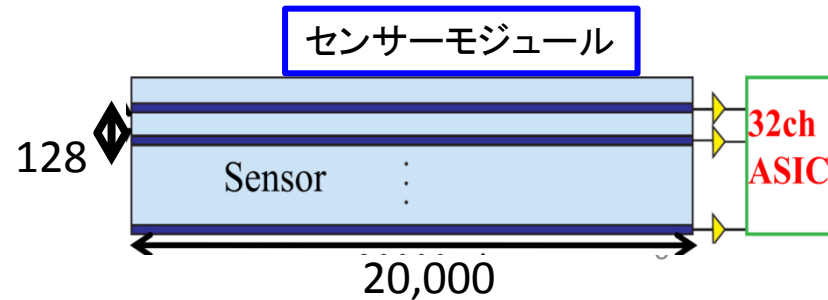
ビーム構造



CCDと読み出し回路への要求性能

■ 読み出し速度 > 10Mpix/sec

- トレイン間(200ms)で 1.6×10^{10} pixelを6000ch並列読み出し



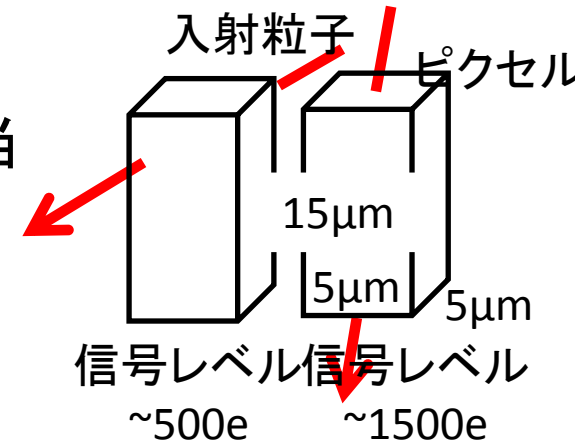
■ 信号測定精度 < 50電子相当

- 小さな信号レベル: ~500電子
- ノイズレベル + AD変換精度 < 50電子相当

■ 消費電力 < 6mW/ch (ASIC)

< 10mW/ch (CCD)

- クライオスタット(-40°C)内に設置。
- 総消費電力 < 100W



➤ 全ての要求を満たす読み出し回路ASIC及びCCDを開発

近況

■ CCDの開発

ー浜松ホトニクス試作

☆ ニュース

ー6 μm^2 ,epi15 μm 厚の
CCD製造に成功!!

☆ 課題

ー5 μm^2 へ、ノイズ、消費電力↓

■ 読み出しASICの開発

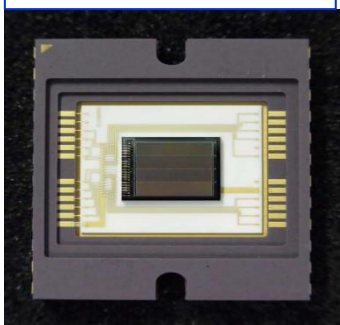
ー2つの試作に関わってきた。

☆ 試作と性能

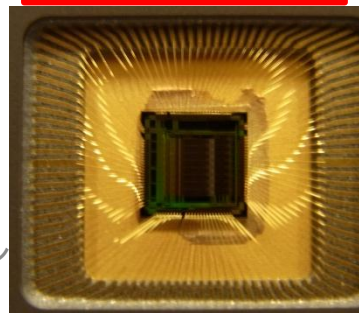
| | 速度 | 測定精度 | 消費電力 |
|------|----|------|------|
| 二次試作 | △ | ○ | × |
| 三次試作 | ○ | ○ | ○ |

➤ 読み出しASICの開発、評価及びCCDを合わせた性能評価

6 μm^2 試作CCD



二次試作ASIC



三次試作ASIC



ASICデザインの基本方針

■消費電力<6mW/ch

- 読み出し回路での主な消費電力源はADC
- 電荷再分配型ADCを使用

■読み出し速度>10 Mピクセル/s

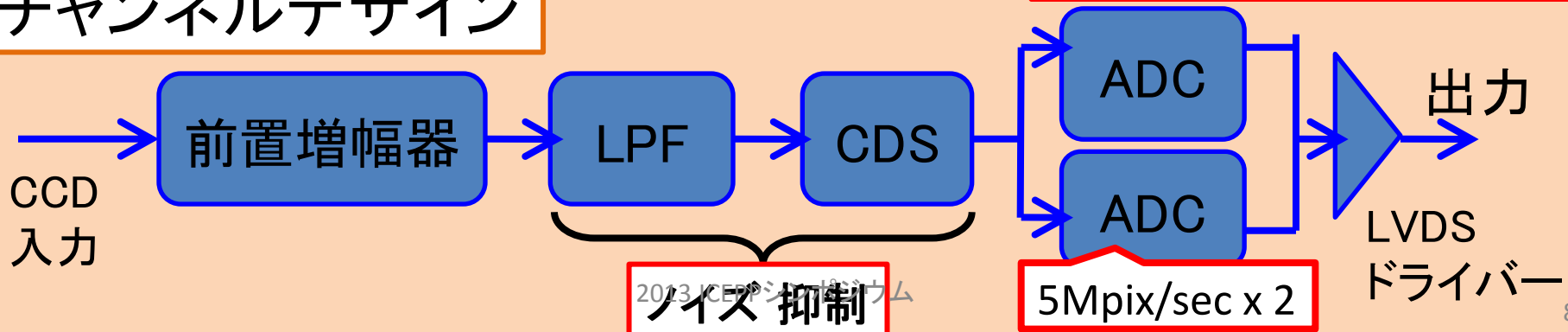
- 5Mピクセル/sのADCを二つ用いる。

■入力信号の測定精度 <30電子相当

- ノイズ:ローパスフィルタ(LPF)、相関二重サンプリング(CDS)をもちいる。
- AD変換: 多bitADC (5bit以上)

電荷再分配型 ADC
(低消費電力 & 比較的高速)

1チャンネルデザイン

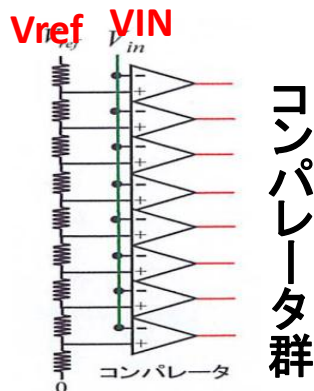


様々なADC

様々なADCがある。

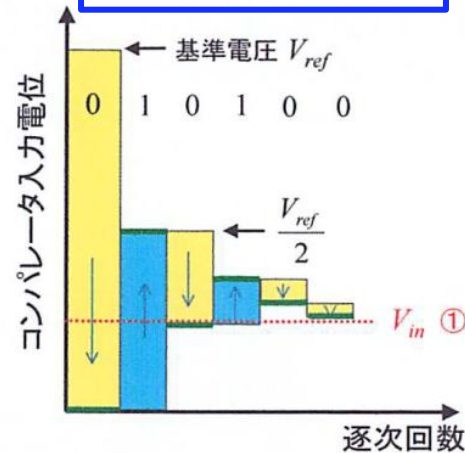
— Flash ADC, 逐次比較型ADCなど

Flash ADC

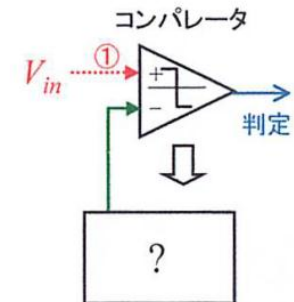


参照電圧たくさん用意し、
一度に比較。
高速、低分解能
高消費電力、

逐次比較型ADC

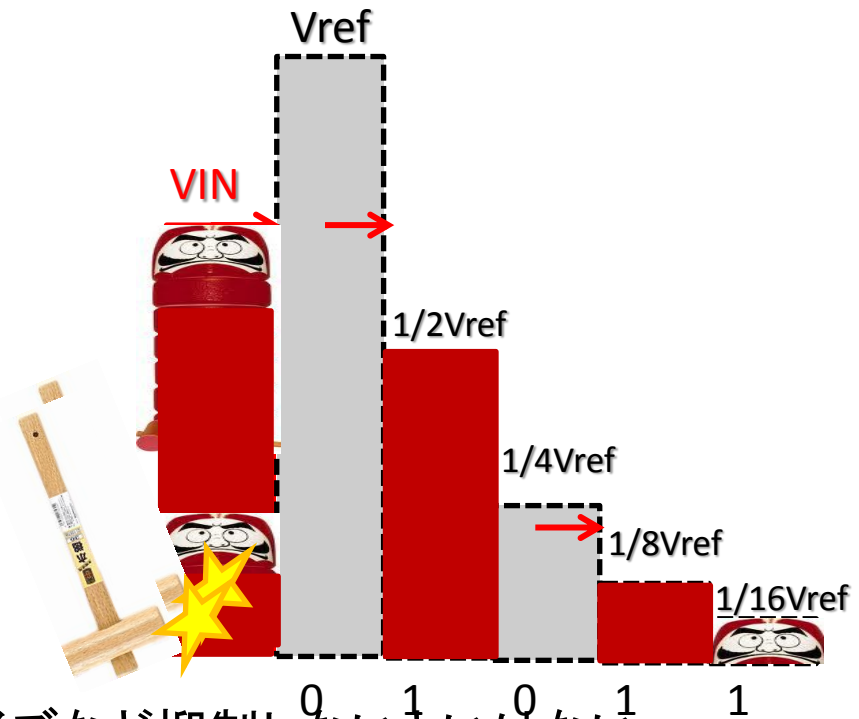


バイナリ探索
比較的高速、高分解能



電荷再分配型ADC

- 電荷再分配型ADC
 - キャパシタで生じた電荷を利用した逐次比較型ADC(切り崩し型)
 - 比較結果によって基準電荷の足し引きを決める。(電荷再分配)
- 低消費電力
 - 逐次比較→コンパレータ1個
- 高精度
 - バイナリ探索
- 読み出し速度(サンプリングレート)
 - 要求性能を満す程度まで実現可



し・か・し！！

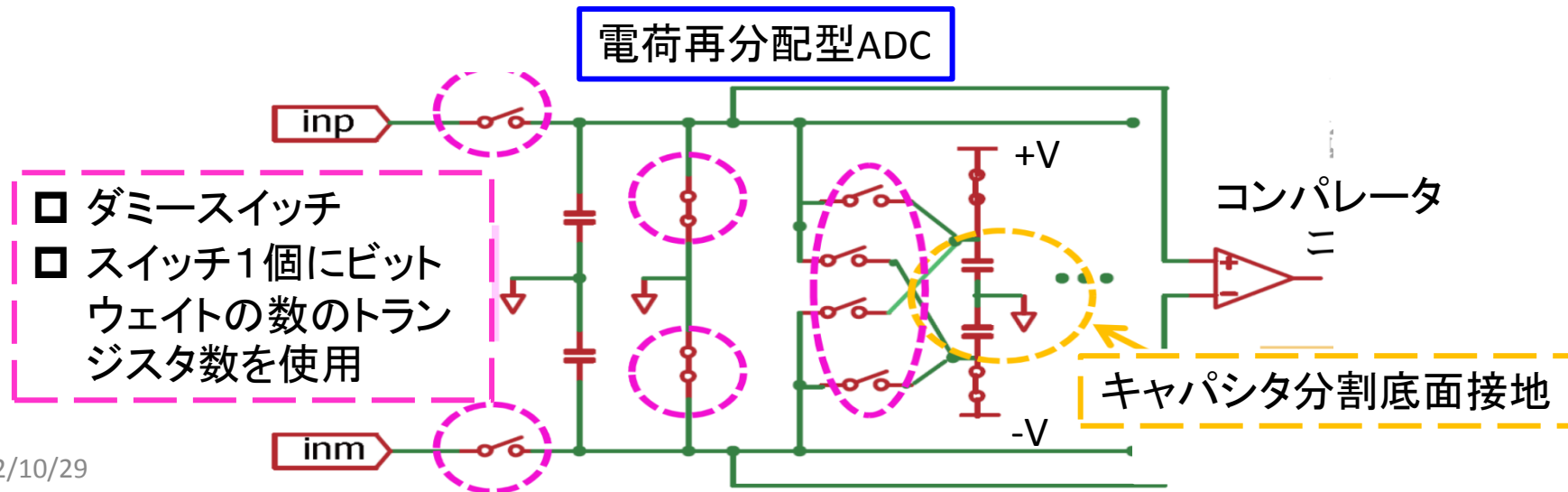
- 予期せぬ寄生容量、スイッチのノイズなど抑制しないといけない。
- 回路自身を出す様々なノイズの影響なども考えないといけない

二次試作回路ASIC

二次試作回路、寄生容量対策

■ 高速、高精度AD変換のためには、

- スイッチ、再分配電荷を生成するキャパシタの寄生容量の影響をキャンセル。
- 高速安定化の為、コンパレータへの供給電源のピン数を増加。



二次試作読み出し回路評価結果

■ 消費電力: 30.8 mW/ch → 三次試作で狙う

■ 入力信号測定精度 ($= \sqrt{DNL^2 + \text{ペDESTAL幅}^2}$)

– 微分非直線性(DNL) $\equiv f(x) - data(x)$

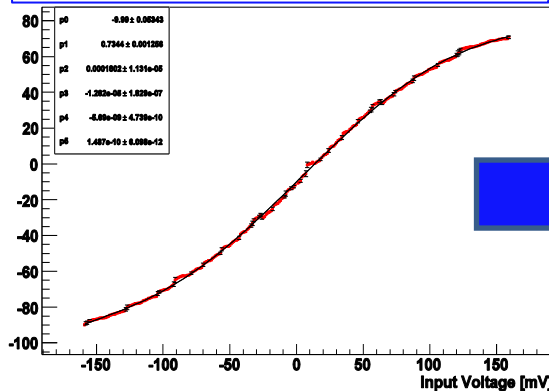
➤ 入力信号測定精度@10Mpix/s = **~16e-相当**

< 要求性能30e-

x : 入力電圧
 $f(x)$: フィット線
 $data(x)$: ADC出力

ADCカウント

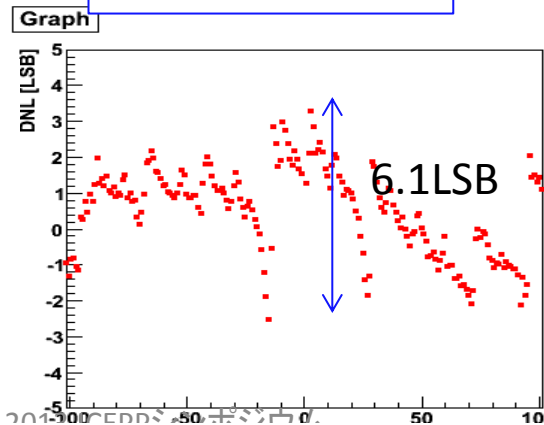
入力電圧vsADCカウント



テストパルス入力電圧(mV)

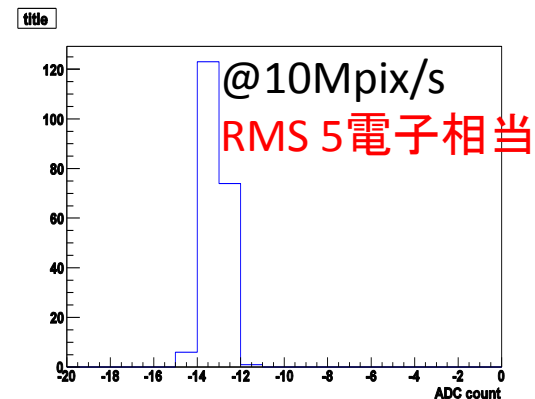
微分非直線性

微分非直線性



テストパルス入力電圧(mV)

-40°CでのペDESTAL分布



ADCカウント

二次試作回路

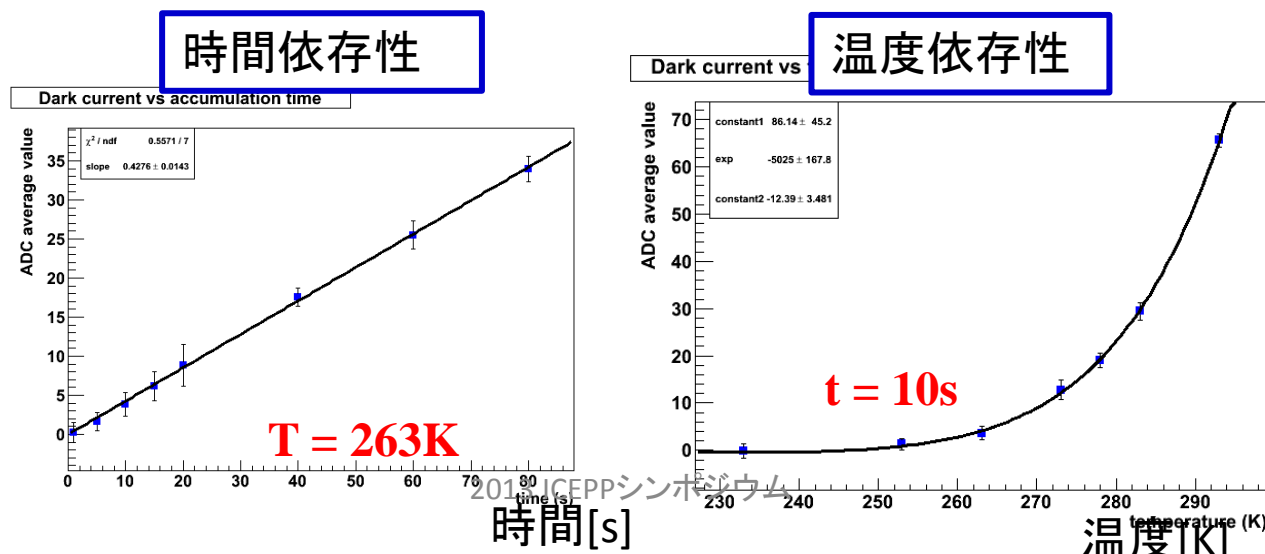
ASIC+12 μm^2 CCD@2.5MPIX/S

ペDESTAL分布によるノイズ評価

■ ダークカレント:

ー ILC稼働環境下(200ms, -40°C)で、ダークカレント抑えられている

■ ペDESTAL分布: ノイズ: ~55電子(ASIC 単独テスト14電子)



線源によるテスト

■ Sr90@常温, 2.5Mpix/s

- 2MeV β 線で電荷分布を調べた
- 隣のピクセルへの染み出しが少ない

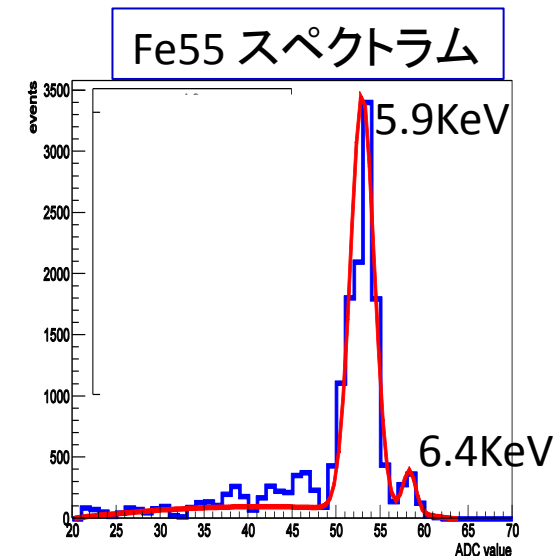
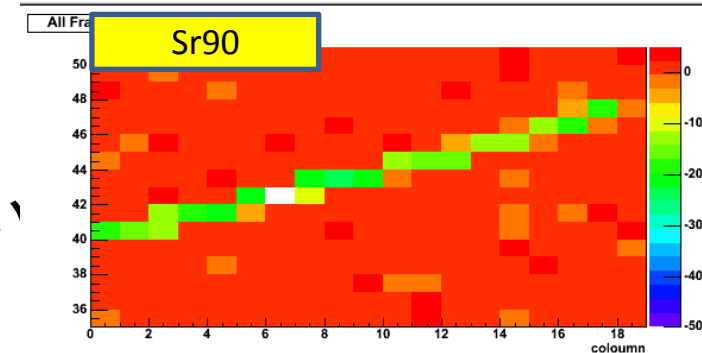
➤ 高い2粒子分解能力の可能性

■ Fe55@-40°C, 2.5Mpix/s

- S/N : 37
- エネルギー分解能: 120 eV

高いS/N, 高エネルギー分解能

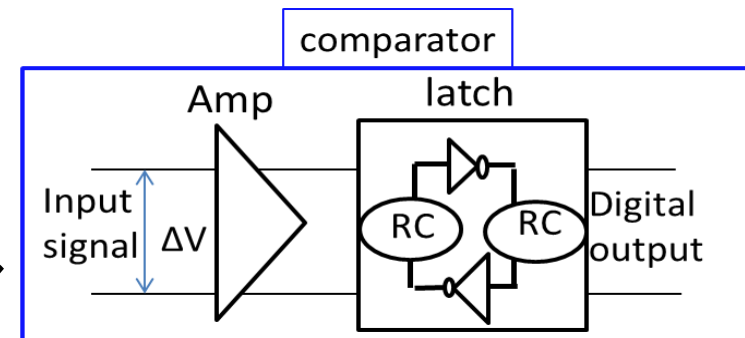
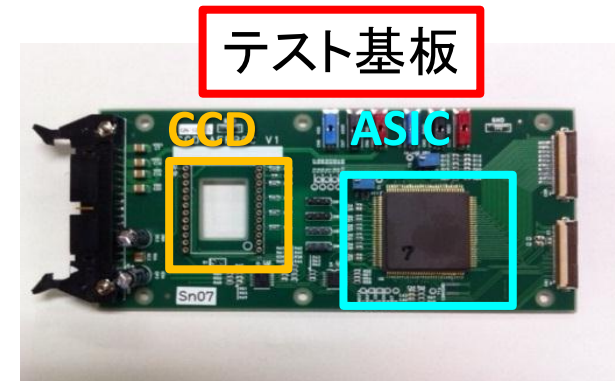
➤ 高感度, 低雑音検出器



三次試作回路ASIC

三次試作回路デザイン

- 三次試作回路
 - 低消費電力プロトタイプ
- 消費電力対策
 - 回路の簡素化
 - プロセス微細化 (0.35→0.25um)
- プロセスの微細化に伴って。。
 - コンパレータ速度上昇。
 - スピードコントロール機能搭載し、DNL改善



➤ 10MPix/s動作成功し、消費電力も5.8mW/ch(<6mW/ch)

三次試作回路DNL改善

<二次試作回路>

■ DNL @ 低速

- SAR ADC のキャパシタ容量比がまだビットウェイトからずれてる。

■ DNL @ 高速

- ビット切り替わり時にmeta-stable状態に→高速動作でビット飛び。

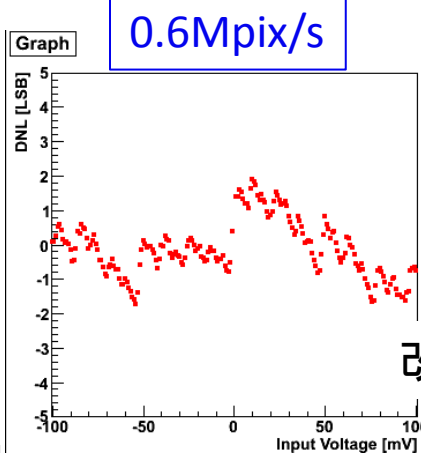
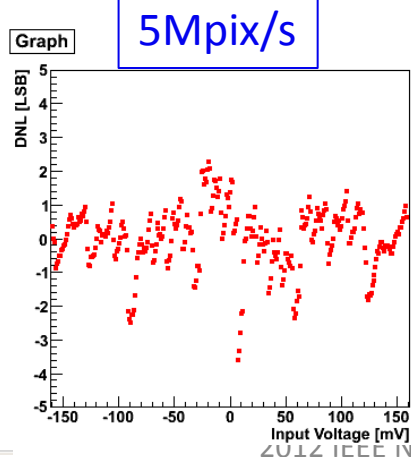
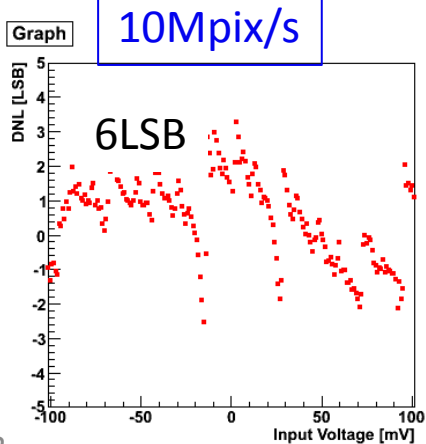
➤ 三次試作回路では、レイアウト改善、スピードコントロール

<三次試作回路>

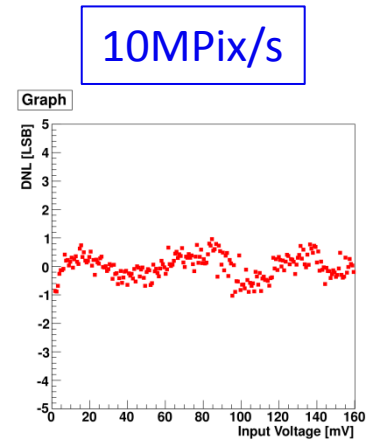
➤ 改善！ DNL=±0.9LSB, ペDESTAL幅1.2LSB = **19e-相当** < 要求30e-

二次試作回路

三次試作回路

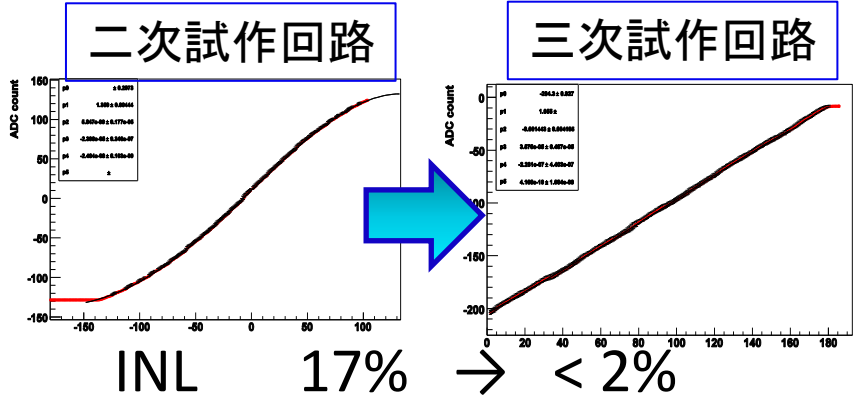


改善！！



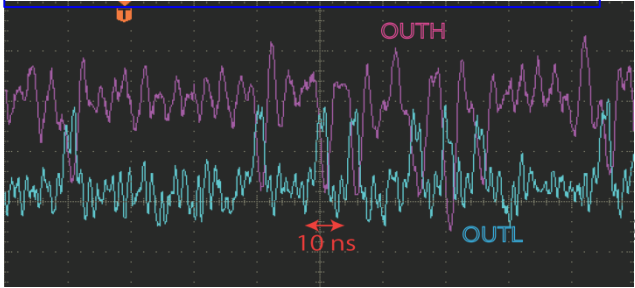
三次試作回路のその他の改善

- INL(積分非直線性)
 - 全体の曲がり度



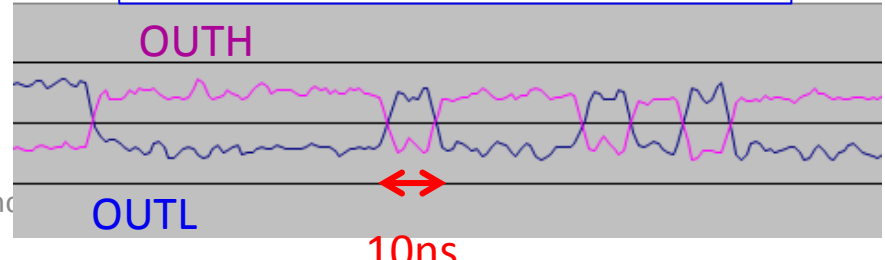
- 信号伝送方式
 - 10Mpix/s = 100MHz ADC コンパレータ CK
 - Return zero → non return zero
 - high期間が長い(10ns), サンプリングが容易に

二次試作回路: return zero



ASICの出力信号

三次試作回路: non return zero



まとめと今後

■ FPCCDの為の読み出し回路の開発及びCCDとの評価を行っている。

■ 二次試作回路+12 μm^2 CCD

ASIC+CCD (pedestal): 😊 ノイズ、ダークカレント抑えられている
 (Sr90): 😊 電荷の染み出し少ない
 (Fe55): 😊 高いS/N

■ 全ての要求性能を満たす読み出し回路(三次試作回路)ができた。

| | 速度 | 測定精度 | 消費電力 |
|------|----|------|------|
| 三次試作 | ○ | ○ | ○ |

■ 今後

- 新しい6 μm^2 CCD+三次試作回路の性能評価
- ビームテストによる位置分解能の導出