

折り返し積分を用いた ピクセルADC内蔵 擬似3次元粒子検出LSIに関する研究

○永塩 啓、 K. P. Sengendo、 宮原正也、 松澤昭

東京工業大学大学院 理工学研究科
電子物理工学専攻
松澤・岡田研究室

- 概要
- ADC内蔵擬似3次元粒子検出LSI(QPIX)
- Charge Sensitive Amplifier (CSA)
- CSA用折り返し積分技術
 - 容量型折り返し積分
 - 電流源型折り返し積分
- 結論と予定

- 次世代実験に向けた暗黒物質探索のための粒子検出器が求められている。粒子検出器では、粒子が発生させた電子の検出によって、その粒子の3次元情報を得る。このため、検出LSIには検出感度とダイナミックレンジの拡大が求められる。
- LSI内のCharge Sensitive Amplifier(CSA)には検出感度とダイナミックレンジにトレードオフ関係があったが、折り返し積分を用いることで解決する。
- 本発表では、2つの折り返し技術を比較する。電流源型では検出感度10倍、ダイナミックレンジ25dBの性能向上が見込める。

	QPIX		Timepix
	[1]	Target	
ダイナミックレンジ	10 fC ~ 1.5 pC	1 fC ~ 3 pC	0.1 fC ~ 12 fC
検出感度	1.6 fC	0.16 fC	-

[1]Fei Li et al., NIMPR 2011, pp.101-105

ADC内蔵擬似3次元粒子検出LSI (QPIX)

<検出プロセス>

粒子がガス分子と衝突しガス分子がイオン化



電子がドライブ電界により下方向へ加速
(アバランシェ発生)



増幅された電子がピクセルパッドへ到達し検出

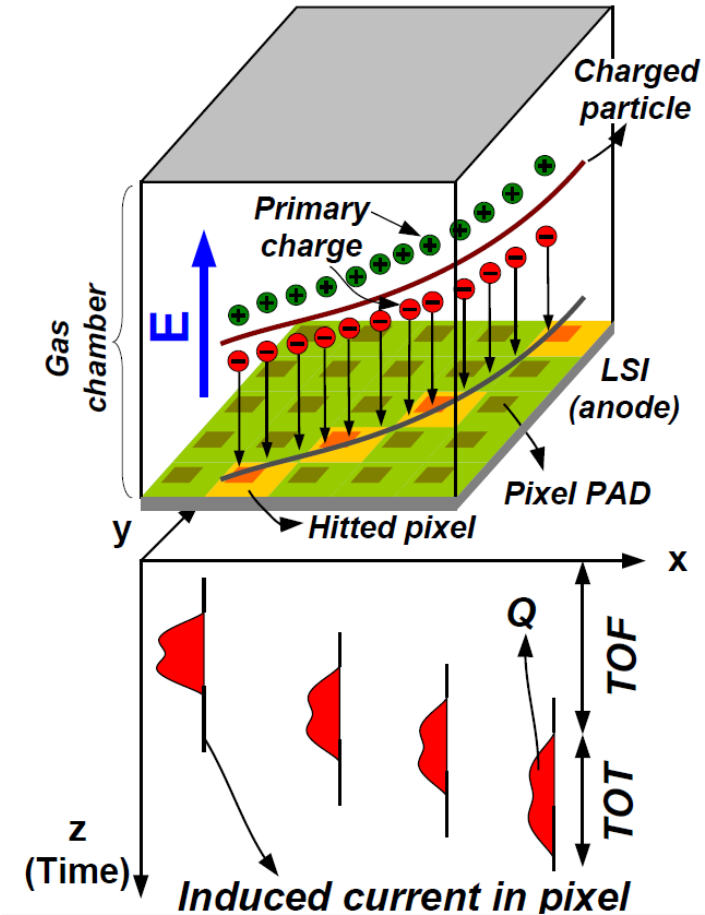
得られる情報

TOT (Time Over Threshold) ⇒ 信号の時間幅

TOF (Time of Flight) ⇒ z座標

ピクセルの位置 ⇒ x-y 座標

ADC ⇒ 総電荷量



Charge Sensitive Amplifier (CSA)

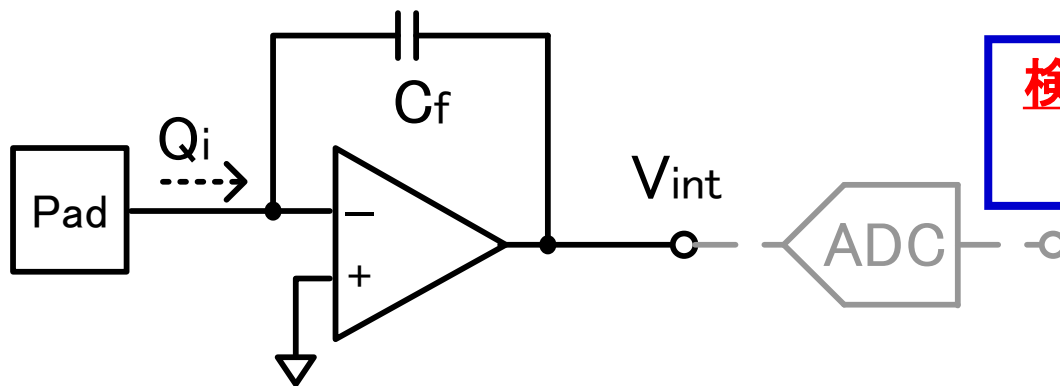
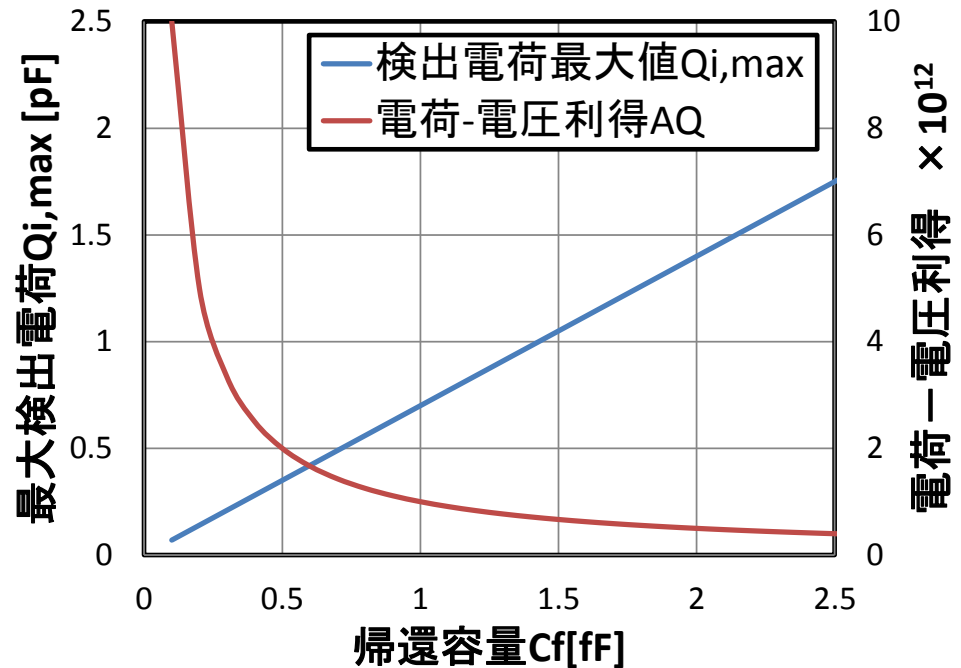
検出した電子をCSAで電圧に変換し、A/D変換

- 最大検出電荷 $Q_{i,max}$

$$Q_{i,max} = C_f V_{int,max}$$

- 理想的な電荷-電圧利得 A_Q

$$A_Q = \frac{V_{int}}{Q_{in}} = -\frac{1}{C_f}$$

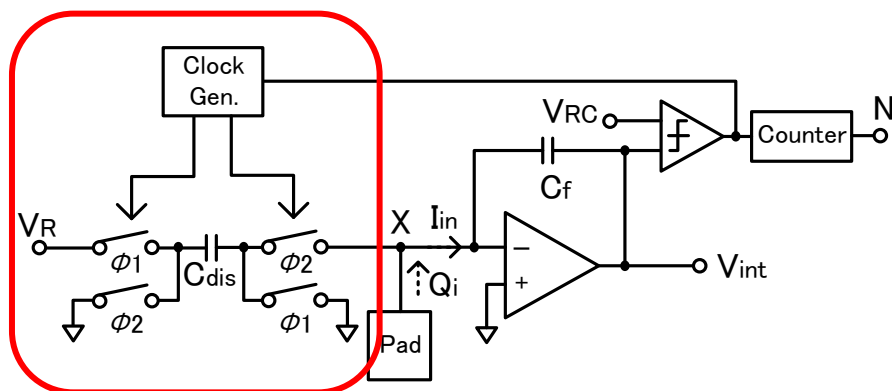


**検出感度とダイナミックレンジに
トレードオフの関係**

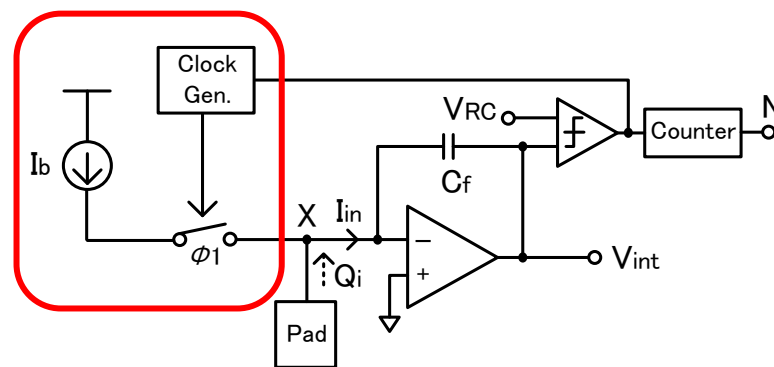
入力電荷量に応じて C_f を一定量放電することで
出力を飽和させることなくCSAを動作

ダイナミックレンジ拡大

容量型折り返しCSA

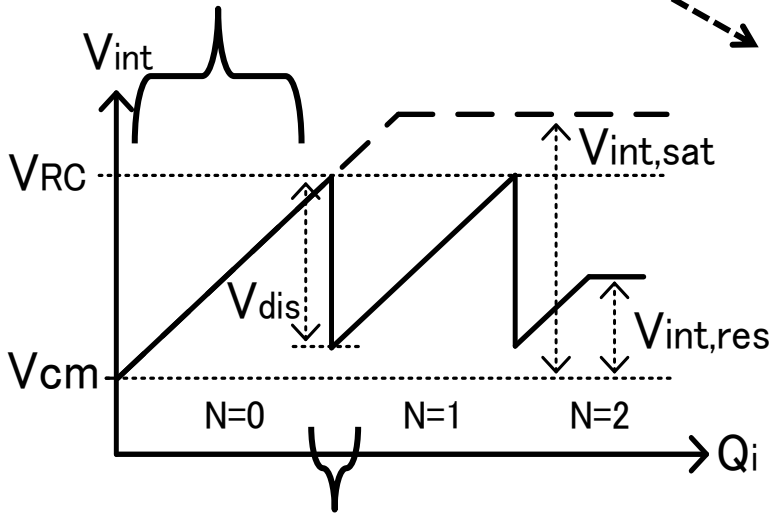


電流源型折り返しCSA



容量型折り返し積分CSA

積分フェーズ



折り返しフェーズ

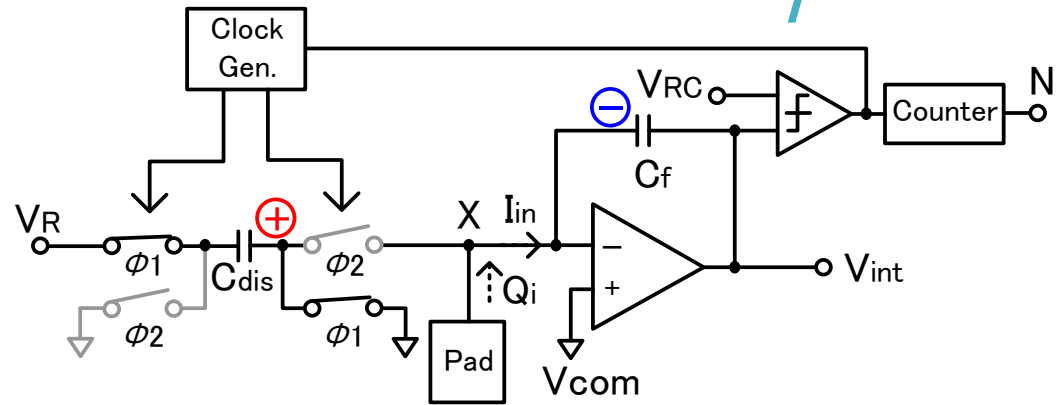
蓄積
電荷

放電
電荷

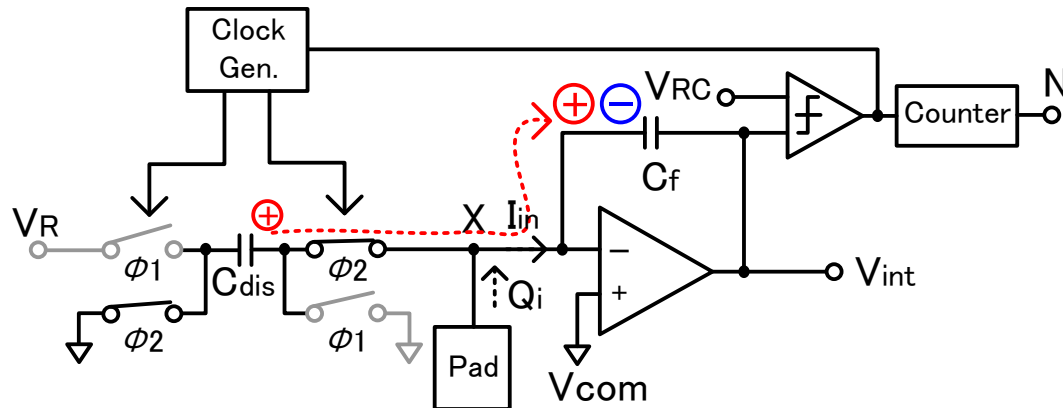
放電後
電荷

$$-V_{int}C_f + N \cdot (V_R - V_i)C_{dis} = -V_{int,res}C_f$$

(N: 折り返し回数)



CSAはCfに電荷を蓄積

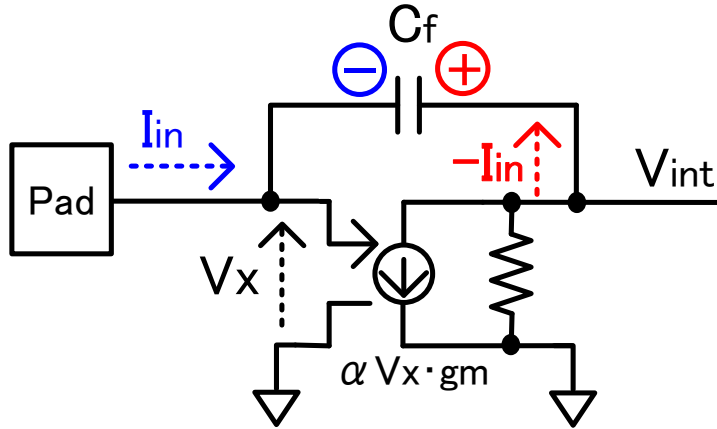


Cf電荷をCdisで放電

$V_R < V_{cm}$

容量型の電荷エラー

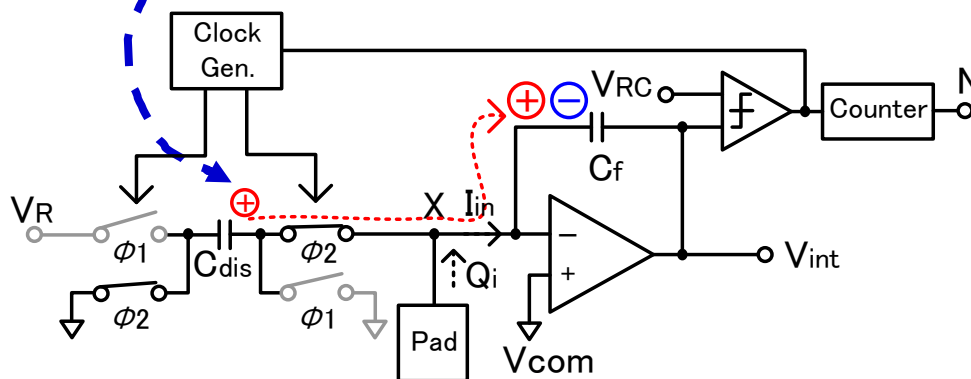
ノードXの電圧 V_X が入力電流に依存 $V_X \approx \frac{I_{in}}{\alpha g_m}$ Ex. $V_X \approx -1mV$
($I_{in} = -100nA$)



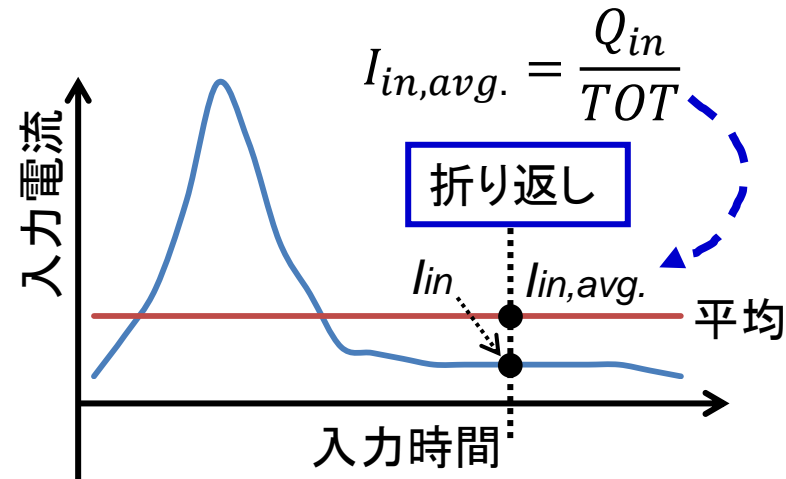
入力電流は観測できないため、
容量型では
電荷エラーが正確に推定できない

放電時でも C_{dis} に電荷が残る

$$Q_{err} = -C_{dis} V_X \approx \frac{C_{dis} I_{in}}{g_m}$$



$$V_X(I_{in}) \neq V_X(I_{in,avg.})$$



入力電流に依存しないために電流源を用いる。

積分フェーズ

入力電荷が少ない
(CSA output $V_{int} < V_{RC}$)
CSAは C_f に電荷を蓄積

◎ V_x に感度が少なく、入力電流にほとんど依存しない。

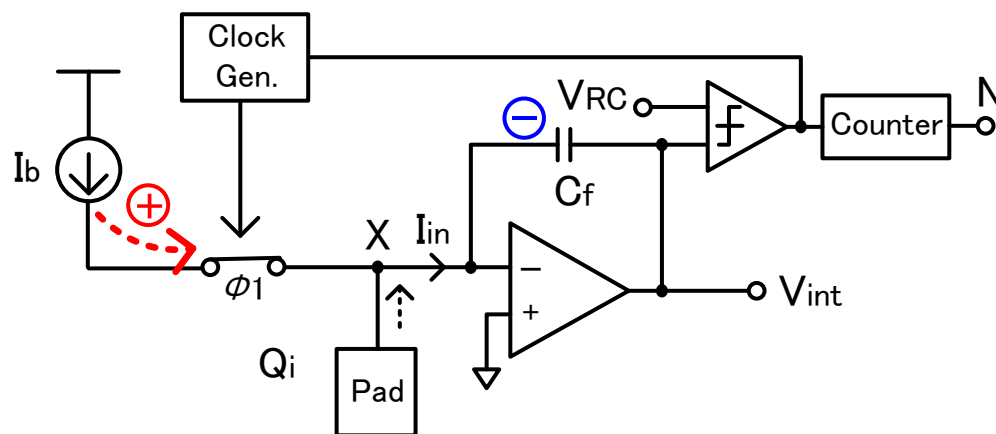
◎ 総放電電荷量

$$Q_{dis} = I_b \cdot t_{dis}$$

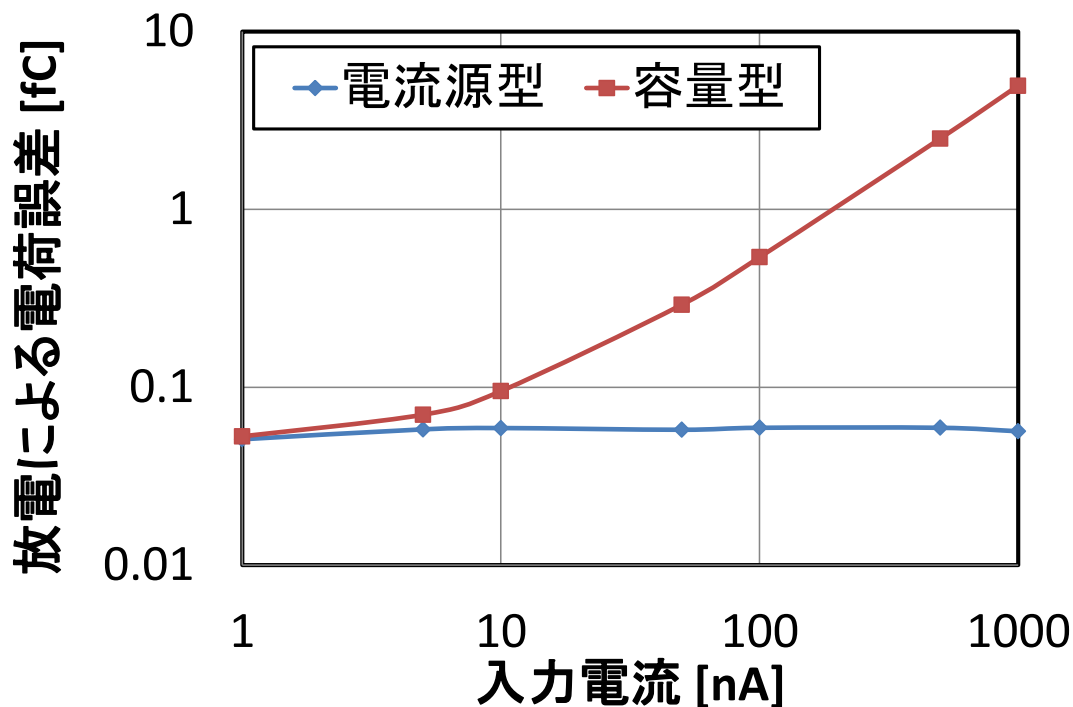
(t_{dis} : 放電合計時間)

折り返しフェーズ

入力電荷が大きい
(CSA output $V_{int} > V_{RC}$)
 C_f に蓄積した電荷の一部
を電流 I_b で放電



放電による電荷誤差の入力電流依存性 (容量型 vs. 電流源型)

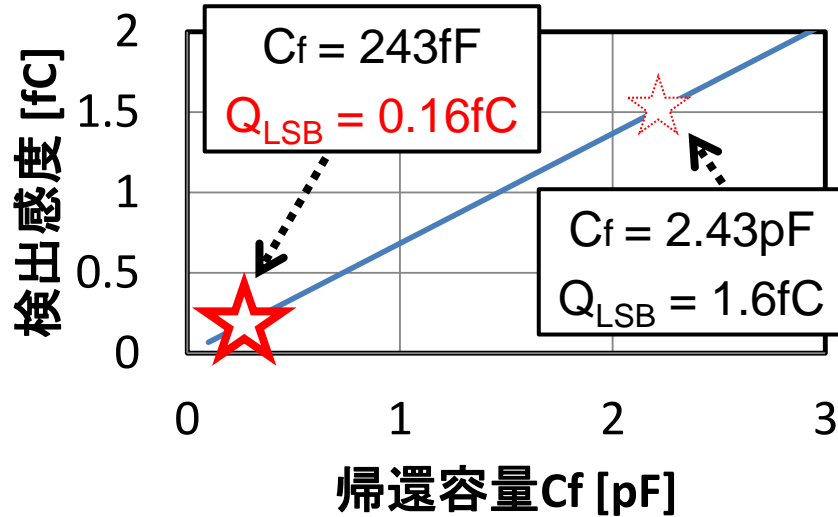


シミュレーション条件

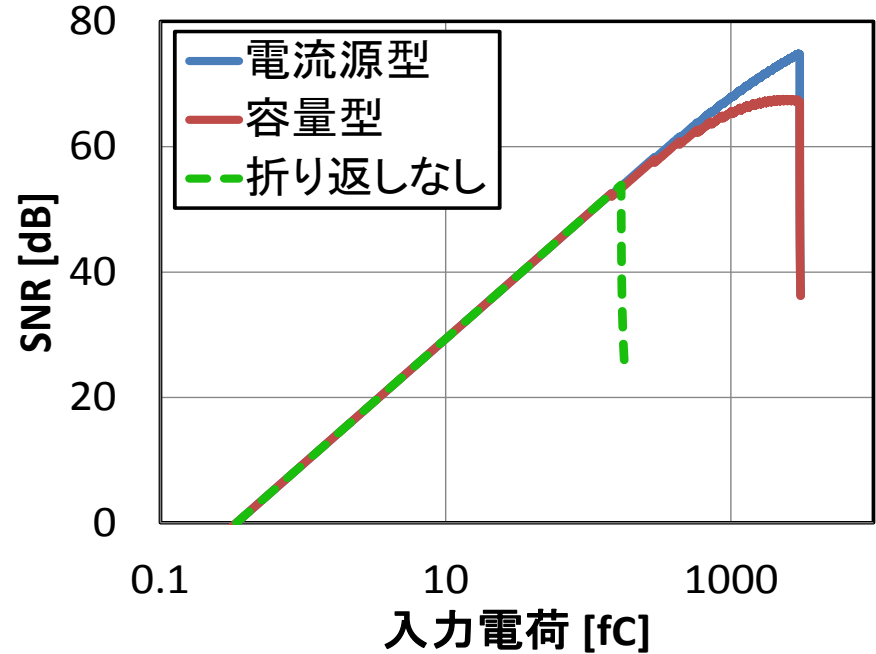
プロセス	180nm
電源	1.8V
クロック	10MHz
Cf	243fC
放電電流	4.86uA
放電容量	243fC
Vcom	0.7V

電流源型の誤差は入力電流にほとんど依存しない!!!

<検出感度>



<ダイナミックレンジ>



検出感度10倍
ダイナミックレンジ25dB
向上！！

	電流源型	容量型	折り返しなし
ダイナミックレンジ	1fC ~ 3pC	1fC ~ 2.3pC	1fC ~ 170fC
SNR,max [dB]	74.9	67.5	53.9

(Cf = 243fC)

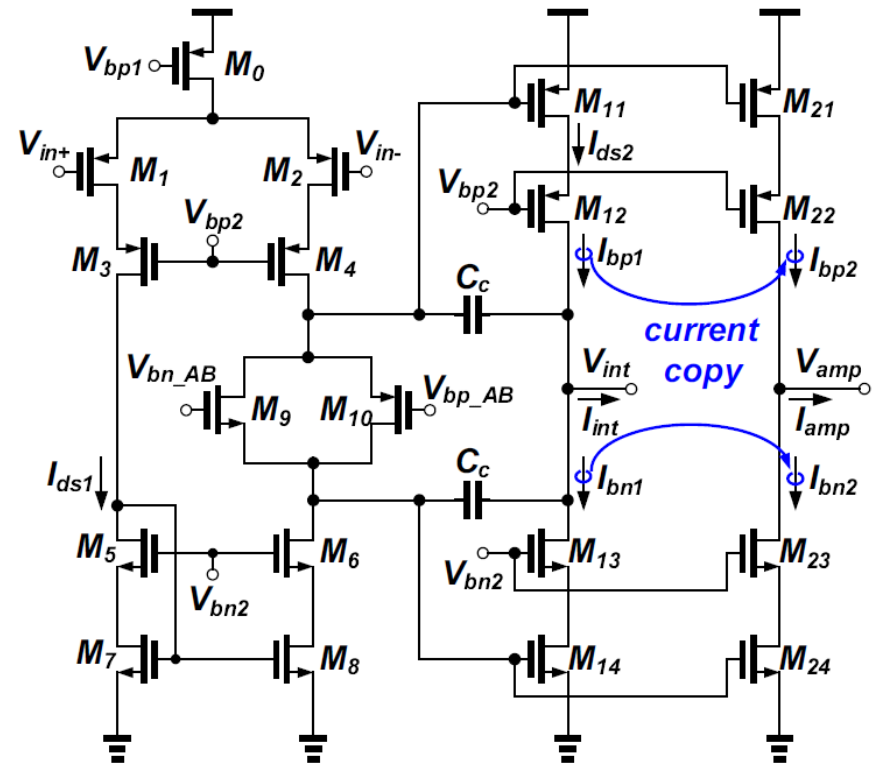
結論

- CSAに折り返し積分を用いることで、検出感度とダイナミックレンジのトレードオフの課題を解決した。
- 電流源型CSAを用いることで、検出感度を10倍、ダイナミックレンジ25dBの性能向上が実現した。

今後

- 180nmプロセスで電流源を用いた折り返し積分CSAを用いてQPIXを設計し、検出感度とダイナミックレンジの向上を実証する。

- Consist of 2-stage operational amplifier and class-AB buffer
- Low power consumption
- Sufficient gain
- C_c for stability
- Class-AB buffer for its driving ability because of large capacitor array of SAR ADC !



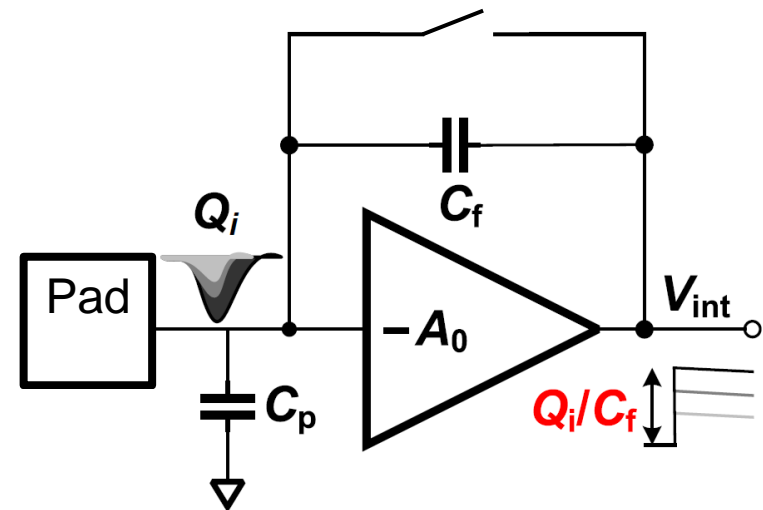
★ To improve the detection sensitivity

↓ $A_Q = -\frac{1}{C_f}$


smaller feedback capacitance



↓ $C_f = \frac{Q_{i,max}}{V_{int,max}}$

The maximum of detectable input charge becomes smaller



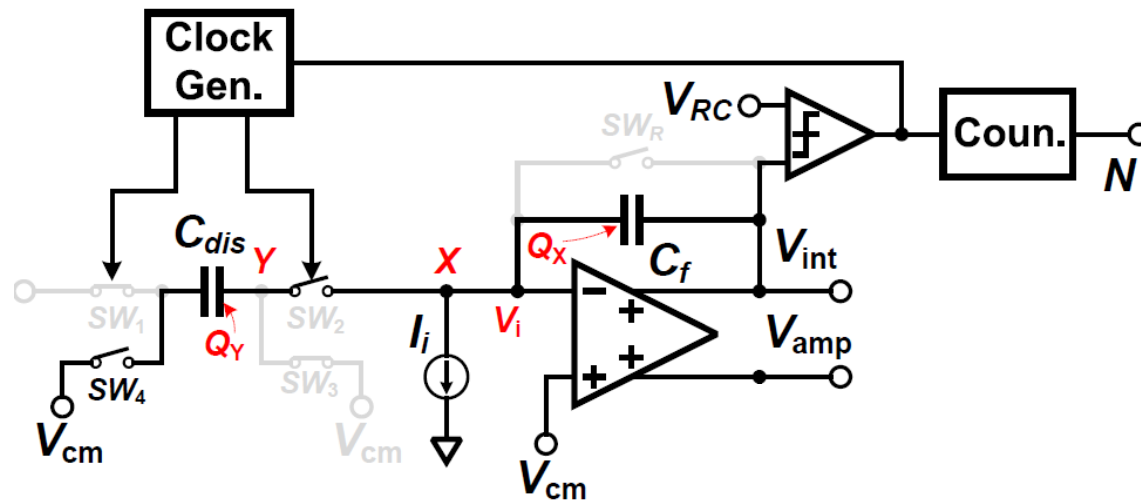
Trade-off between the Detection Sensitivity
and Input Charge Range

- If the input charge is large (CSA output $V_{int} > V_{RC}$)
  the folding CSA works in folding phase

Part of the charge on C_f flows out through C_{dis} , and the CSA output drops below V_{RC}  Integration phase  folding phase

- These operation repeat depending on the amount of input charge

Keeps the amplifier out of risk of saturation !!



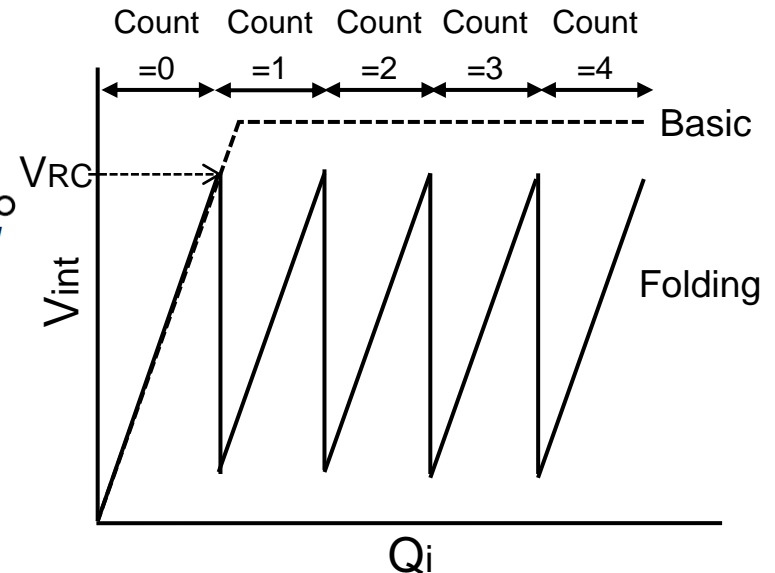
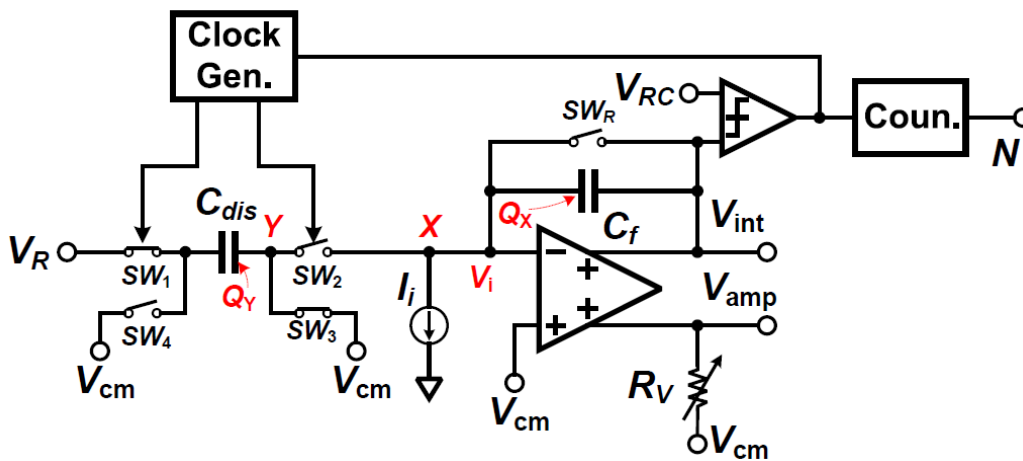
According to the law of conversation of charge at X point, the sum of the charge is equal before and after the folding operation

$$-V_{int}C_f + V_R C_{dis} = -V_{int,res}C_f$$

$V_{int,res}$ is the residual voltage of V_{int}

After N times of discharge operation

$$-V_{int}C_f + N \cdot V_R C_{dis} = -V_{int,res}C_f$$



The signal pulse width t_{pulse}

$$t_{pulse} = TOT \cdot T$$

TOT : count

T : clock period

The input current using t_{pulse}

$$I_{in} = \frac{Q_i}{t_{pulse}}$$

The charge error is rewritten using t_{pulse}

$$Q_{err} = \frac{NC_{dis}C_c I_{in}}{C_f g_{m1}} = \frac{NC_{dis}C_c Q_i}{C_f g_{m1} t_{pulse}}$$

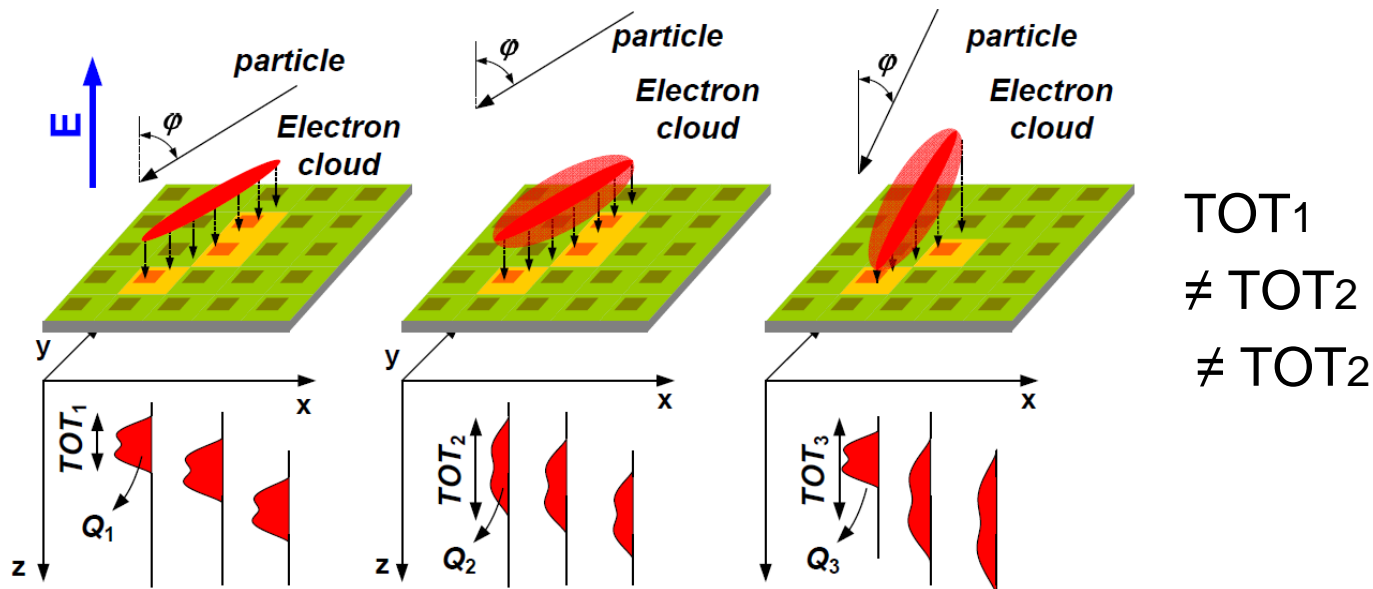
Charge error can be calculated !!!

- 以下のすべての状況で同じ電荷量が発生していたとしても、得られるTOT情報が異なる。このため、TOTのみから推定する電荷量はすべて異なる。

従来の読み出し回路では推定される電荷量が電子雲拡散や粒子の飛行角度に依存し、高い精度が得られない。

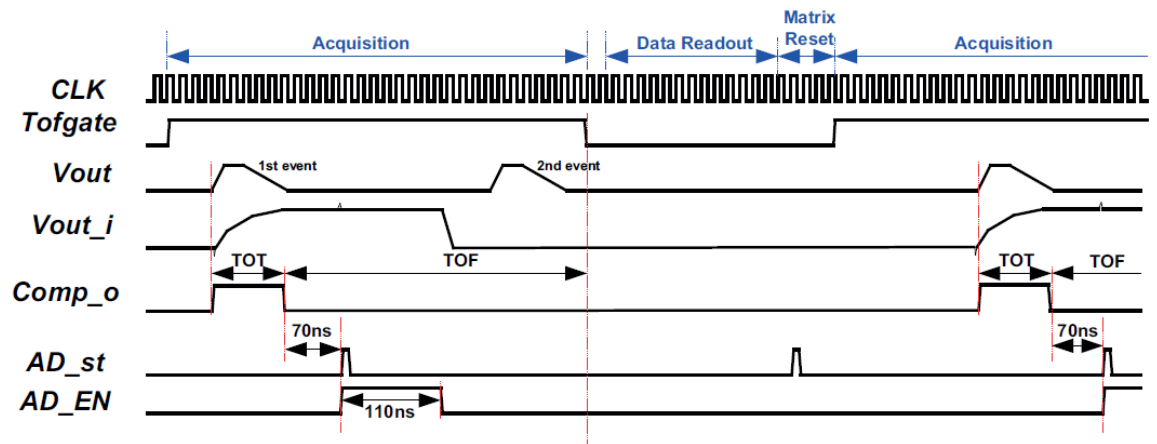
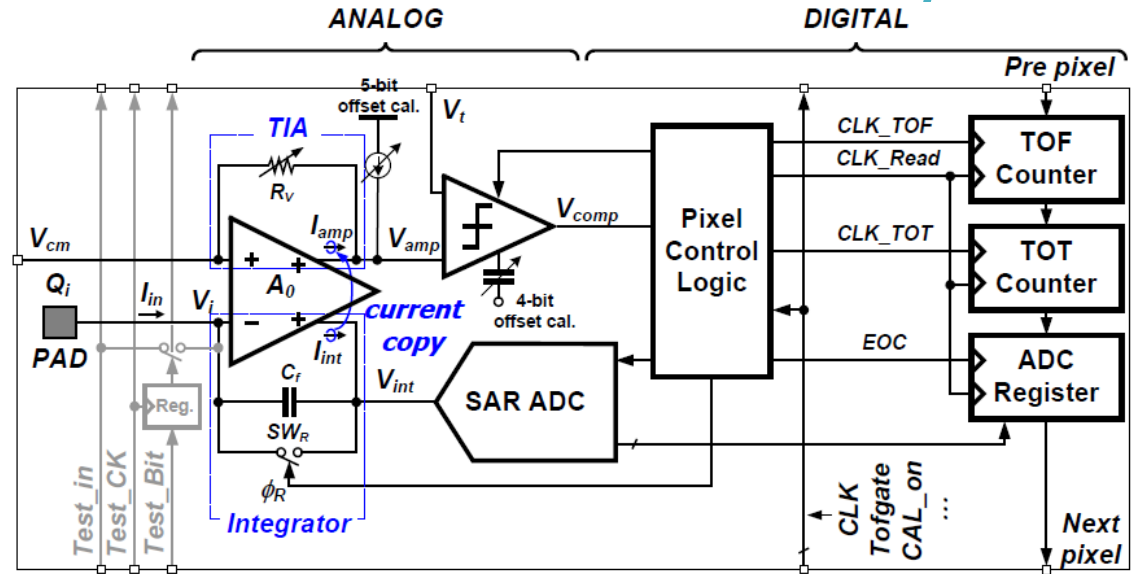


総電荷量をピクセル内のADCで直接測定！！



★読み出しフェーズ
(Tofgate=Low)
⇒蓄積したデータの
読み出し
(TOT, TOF, ADC)

★電荷検出フェーズ
(Tofgate=High)
⇒電荷を検出し、TOT,
TOF, ADCのデータ
を収集



電流源					
パッド入力電流[A]	Folding前誤差[fC]	Folding後誤差[fC]	誤差[fC]	誤差絶対値[fC]	
1.00E-09	4.560317	4.50165	-0.058667	0.058667	
5.00E-09	8.86E-01	8.26E-01	-0.06	0.06	
1.00E-08	4.41E-01	3.82E-01	-0.059	0.059	
5.00E-08	8.98E-02	3.21E-02	-0.0577	0.0577	
1.00E-07	4.80E-02	-1.12E-02	-0.0592	0.0592	
5.00E-07	1.34E-02	-4.58E-02	-0.0592	0.0592	
1.00E-06	6.68E-03	-4.99E-02	-0.05658	0.05658	
スイッチトキャパシタ					
パッド入力電流[A]	Folding前誤差[fC]	Folding後誤差[fC]	誤差[fC]	誤差絶対値[fC]	
1.00E-09	4.5603	4.6117	0.0514	0.0514	
5.00E-09	8.86E-01	9.56E-01	0.0701	0.0701	
1.00E-08	4.41E-01	5.37E-01	0.0951	0.0951	
5.00E-08	9.23E-02	3.83E-01	0.291	0.291	
1.00E-07	5.01E-02	5.89E-01	0.5386	0.5386	
5.00E-07	2.56E-02	2.53E+00	2.5048	2.5048	
1.00E-06	3.34E-02	5.00E+00	4.964	4.964	

- QPIX(Quasi-3D Pixel Readout LSI)は総電荷量推定の精度向上を目的とした新しい粒子検出用読み出し回路であり、すべてのピクセル内に SAR ADCを搭載し、総電荷量を直接測定する。

★電荷量測定と同時にTOFとTOTも測定

TOT (Time Over Threshold)

⇒信号の時間幅

TOF (Time of Flight)

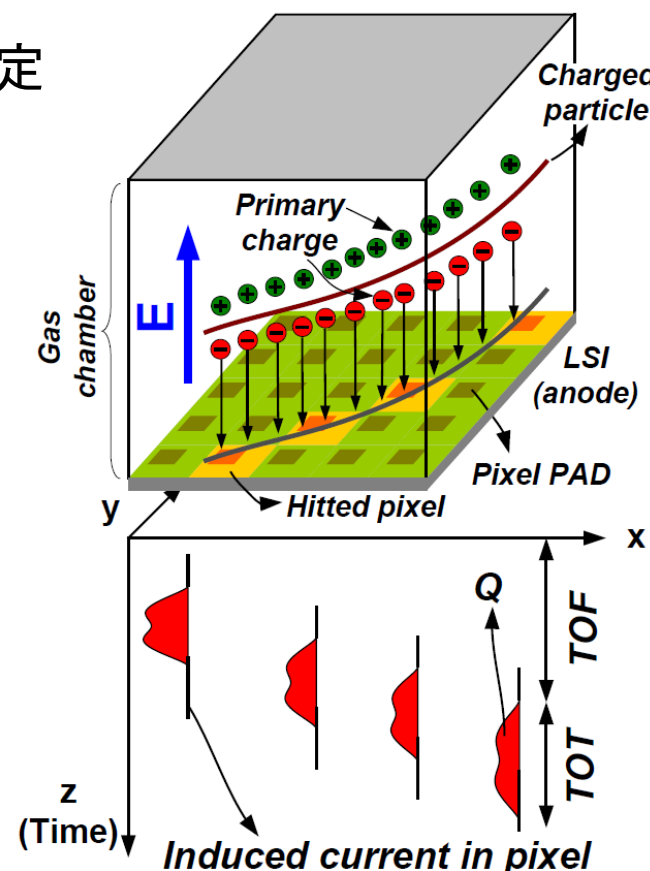
⇒z座標

ADC

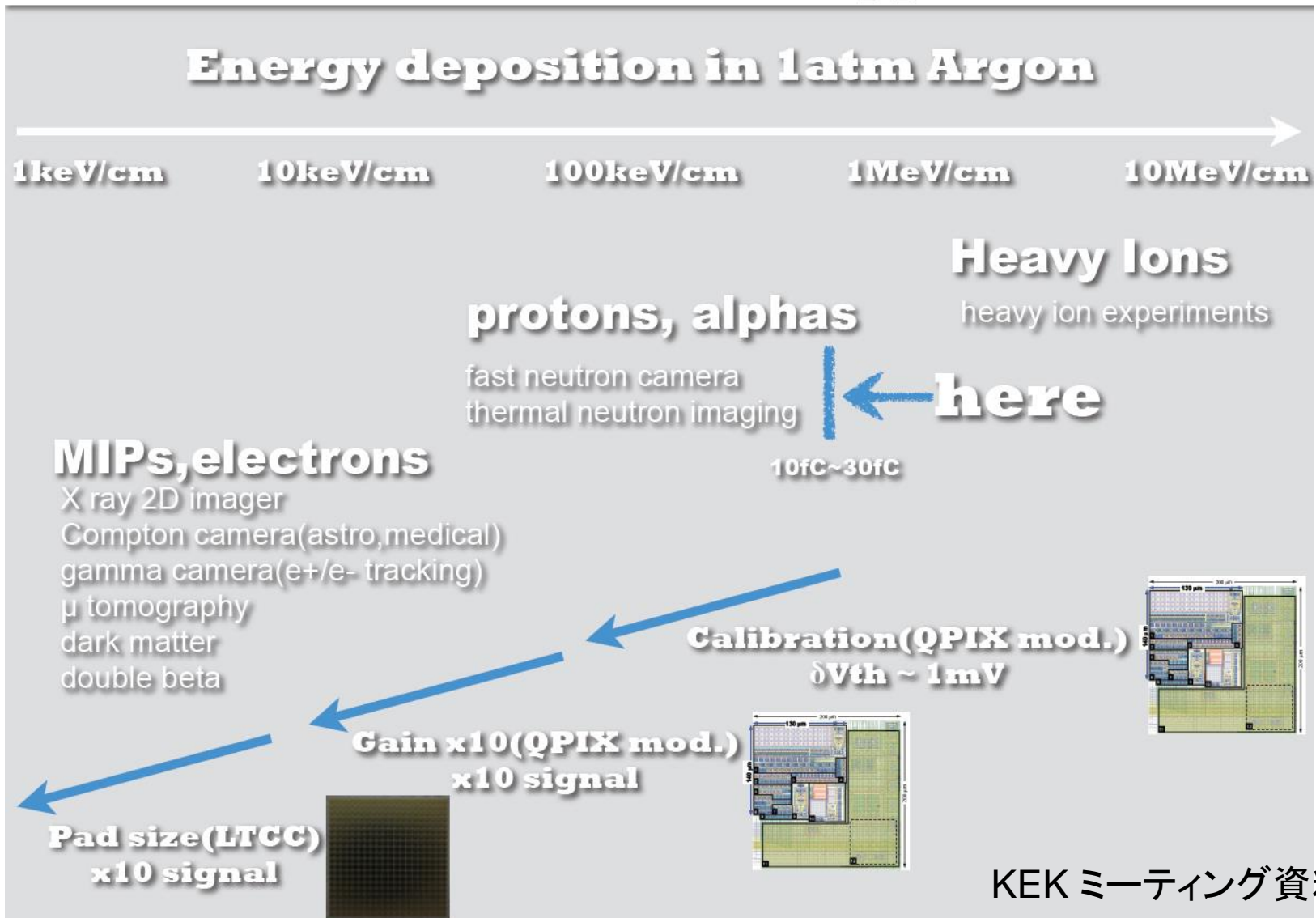
⇒検出された総電荷量

ピクセルの位置

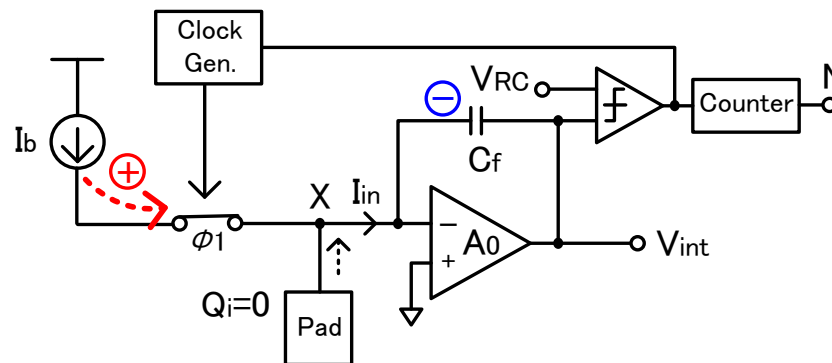
⇒x-y 座標



Detection threshold and applications

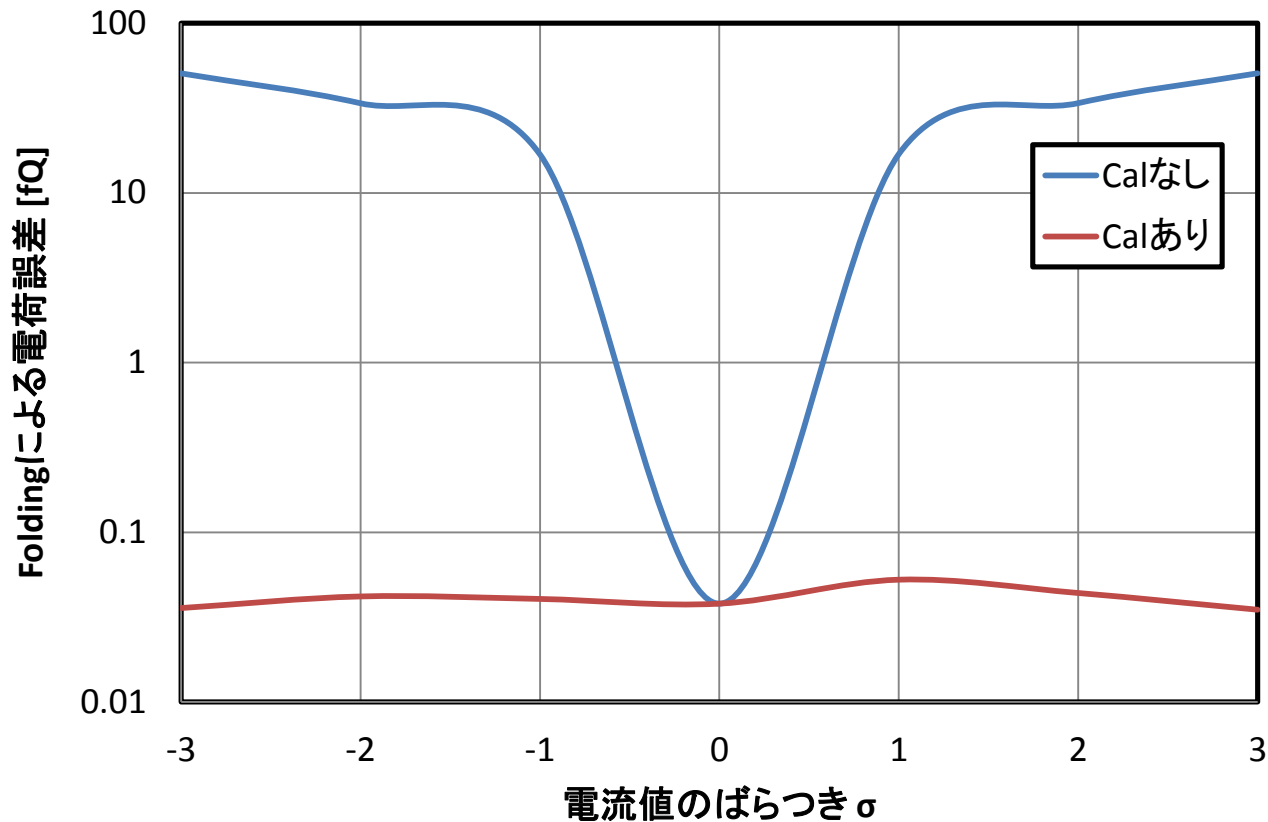


- パッドに電荷が入って来ない状態で、Folding用の電流を一定時間流し、その時の電荷を測定する。



- このときの電荷量をピクセルごとに測定し、データとしてあつめておく。Foldingした回数分をそのピクセルのFolding電荷量で補償する。
- この補償により、1回のFoldingで誤差が1LSB以下に抑えられる。

- カレントミラーのミスマッチ(1σ)=562.7nA
- Calによって $\pm 3\sigma$ の範囲を補正。
- **最大で誤差99.93%減**



- 新しい粒子検出LSIであるQuasi-3D Pixel Readout LSI(QPIX)では、すべてのピクセルにA/D変換器を内蔵し、高い精度の電荷量推定が可能である。
- QPIX内で用いられる従来のCSAでは、検出感度とダイナミックレンジの間にトレードオフの関係があり、性能向上の課題であった。
- CSAに折り返し積分技術を用いることで検出感度とダイナミックレンジの両方を向上させることができる。

	QPIX		Timepix
	[1]	Target	
ダイナミックレンジ	10 fC ~ 1.5 pC	1 fC ~ 3 pC	0.1 fC ~ 12 fC
検出感度	1.6 fC	0.16 fC	-

[1]Fei Li et al., NIMPR 2011, pp.101-105