

液体キセノンTPC用8チャンネル, アナログー フロントエンドアンプの製作(2)

開発と動作測定

液体キセノングループ

佐賀大理工, 高工研^A, 放医研^B, 東大素セ^C, 横国大^D, 東
貴俊, °田内利明^A, 春山富義^A, 田中秀治^A, 三原智^A, 真
木晶弘^A, 笠見勝祐^A, 鈴木祥仁^A, 藤井祐樹^C, 杉山晃, 中
村正吾^D, 熊田雅之^B, 田中真伸^A 他KEKDTPグループ

登壇者：佐賀大学 D3 東貴俊

開発にあたって

- KEKエレクトロニクスグループ主催 KEK加速器支援事業がサポートするASIC製作教育プログラムによる土台
- KEKエレクトロニクスシステムグループの支援

内容

- 液体キセノンTPC(LXeTPC)のフロントエンド
エレクトロニクス(FEXE08:8chアンプ)
- アンプ概要
- 基本性能試験(Linearity, ENC)
- まとめ、展望

LXeTPCのフロントエンド エレクトロニクス

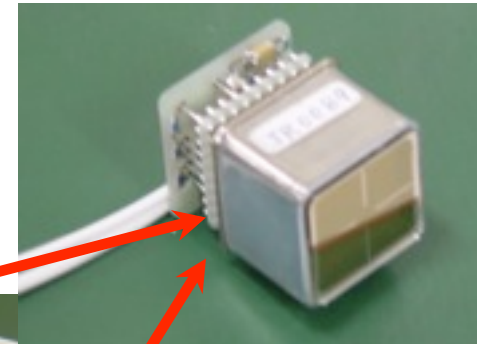
液体キセノンTPC (Time Projection Chamber)を用いて、PET(Positron Emission Tomography)の開発を目指す。

条件

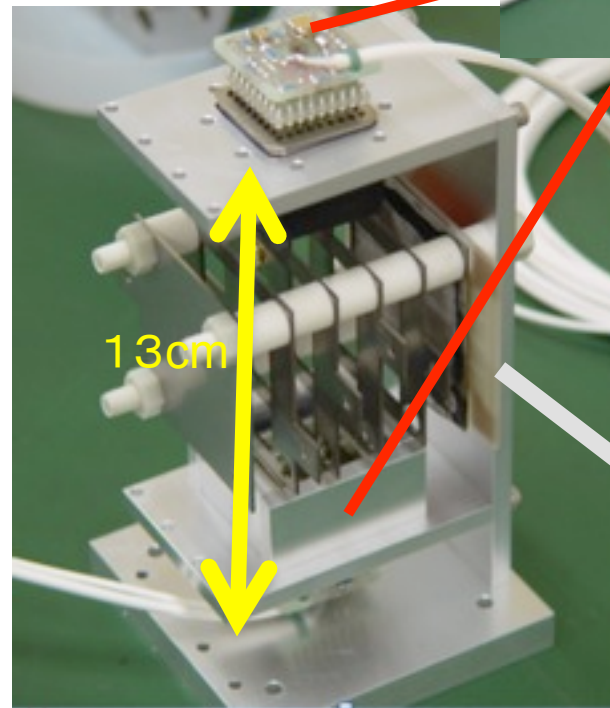
- 高レート (10 MHz以上) であること。
- 高分解能 (位置、エネルギー)

↓
低ノイズの必要性

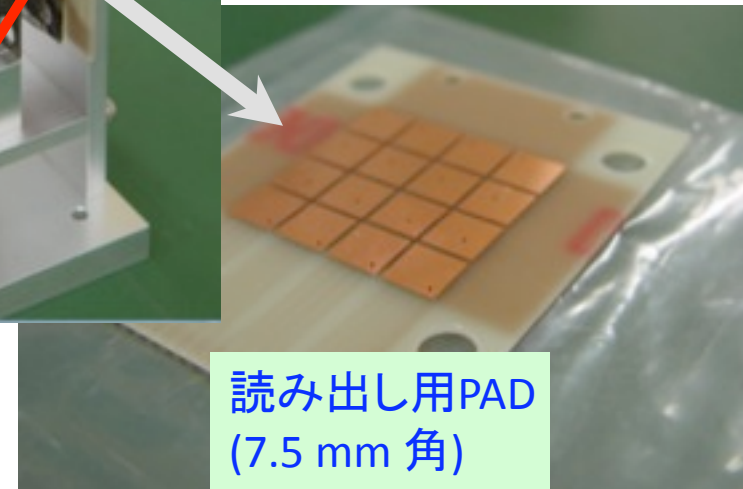
光電子増倍管



R5900-06AL12S-ASSY,
28mm x 28mm

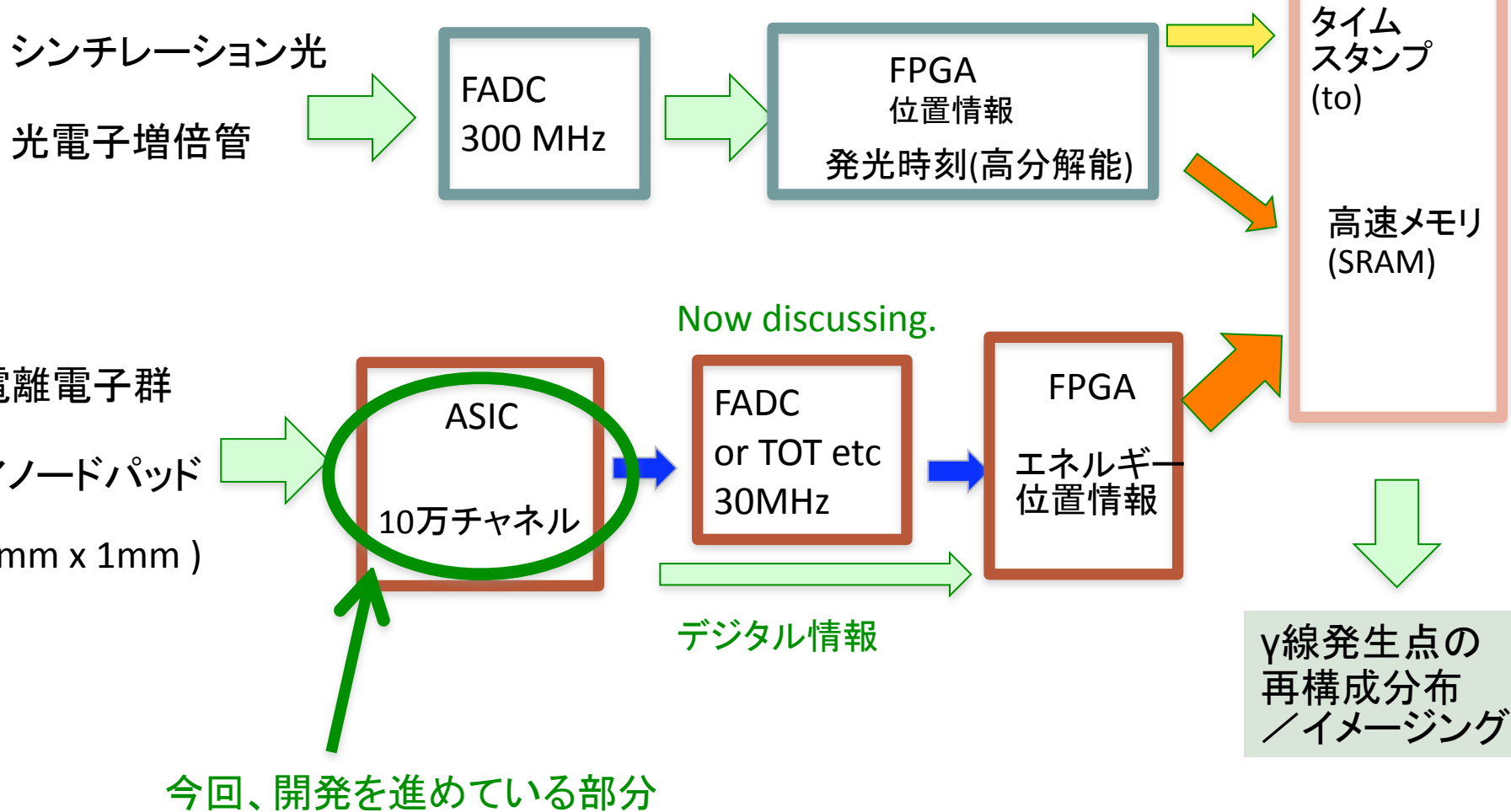


13cm



読み出し用PAD
(7.5 mm 角)

エレクトロニクスシステム

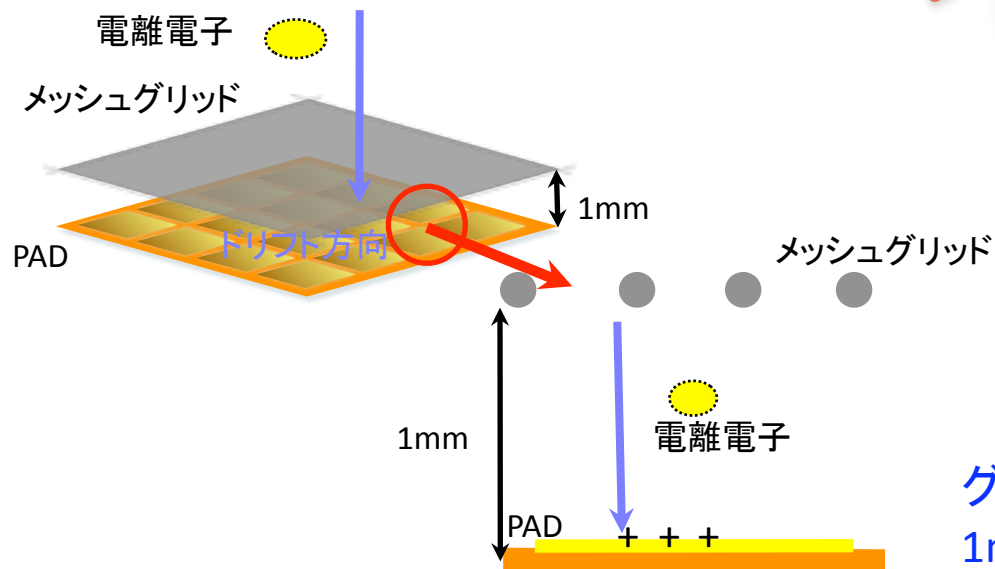


液体キセノン内では、 $1\gamma(511\text{keV})$ 当り

約33,000個の電離電子が発生し、

これが電荷信号となる。

($W=15.6 \pm 0.3 \text{ eV/ 個}$ の場合)



時定数を調整することにより、
信号処理の最適化を行う

- PADに到達した電荷信号をなるべくケーブルを介さず増幅、整形する。
- 一緒に液体キセノンにつかる。それに近い温度(-110°C)に耐える。

アンプの仕様に関連

電荷量 $\text{約}33,000 \times 1.6 \times 10^{-19} = \text{約}5.3 \text{ [fC]}$

→ 入力電荷範囲 $-25 \text{ [fC]} \sim 25 \text{ [fC]}$ に設定。

ピーキングタイム $500\text{ns}, 1\mu\text{s}$ に設定。

グリッド・PAD間
 1mm を $2.2\text{mm}/\mu\text{s}$ でドリフト
 $0.45\mu\text{s}$ (2mm 間では $1\mu\text{s}$)
シェイパーの仕様に関連

→ 温度耐性 -110°C

仕様(目標値)

	目標値
入力電荷範囲	- 0.025 ~ 0.025 pC
ゲイン	8.2 V/pC
ピーキングタイム	1 us(外部スイッチで変更可)
消費電力	10 mW/ch 以下
ノイズ(ENC)	2000e (Cd = 1pF)
チップ(ダイ)の大きさ	3 mm x 3mm
電源電圧	+ 2.5, -2.5
チャンネル数	8 ch
プロセス	0.5 μm CMOS
温度耐性	~ -110°C

電荷信号
5fCに対応

インダクション
タイムに対応

温調への影響

電荷量
33000eに対し、
1/10以下

プロセス仕様

CMOS仕様

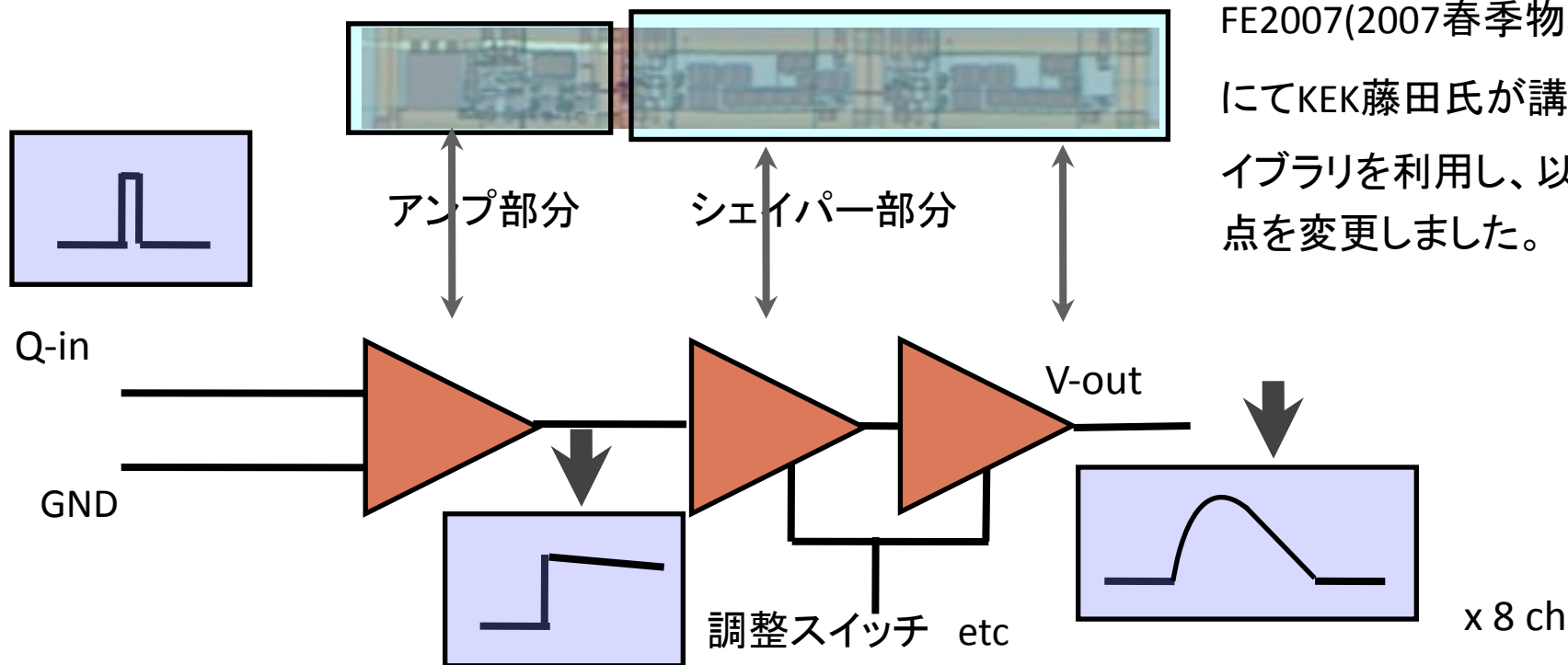
多チャンネル化に
向けて

予算に対応

キセノン
温度

ASICの機能

- アンプ、シェイパーのコンポーネントに関してはFE2007(2007春季物理学会にてKEK藤田氏が講壇)のライブラリを利用し、以下の3点を変更しました。



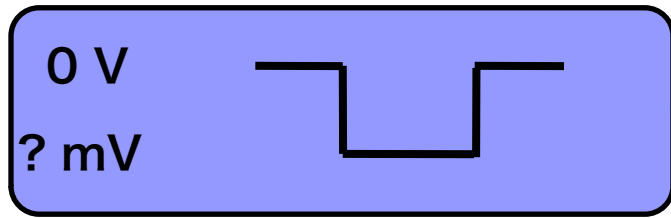
- デジタル出力を排除し、アナログ出力に変更しました。(コンパレータによるグラウンドふらつき、ノイズ影響を抑制するため)
- アンプはゲインを稼ぐ為に帰還キャパシタを変更しました。アンプ機能に特化しています。
- シェイパーは時定数を変える為にキャパシタを増やし、フレキシブルに変更するためにMOSスイッチなどをつけます。

基本性能試験

- 基本性能試験としては、線形性(Linearity), 入力電荷範囲(Dynamic Range), 利得(Conversion Gain), 消費電力, ノイズなどの測定が挙げられます。
- 前回の測定では、線形性について簡単な測定を行った。ノイズを受けにくいプリント基板をデザインしたので、今回は線形性に加え、ノイズの測定について説明します。

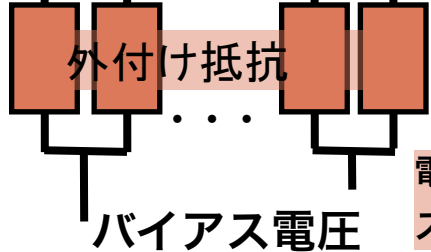
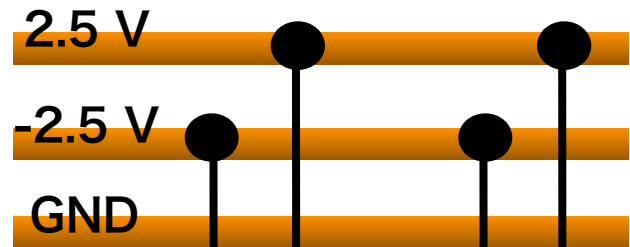
試験方法(線形性)

Pulse Generator



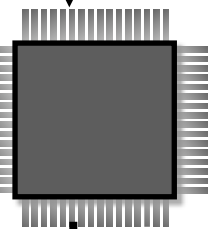
Capacitance

Power Supply



アンプのテスト入力に
矩形波を入れてその波高に
対する出力波高の相関を調べる。

Input channel



Output channel

電源電圧・
スイッチへ

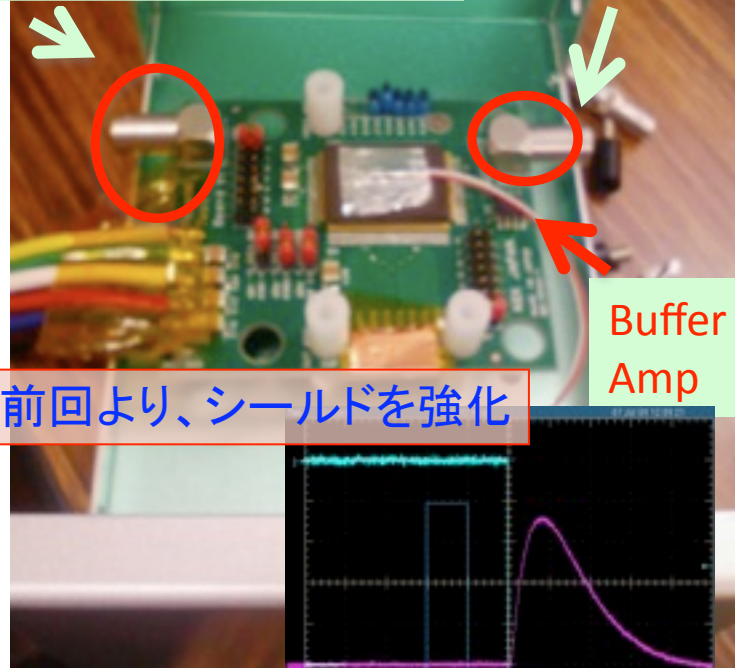
本来はミラー回路への
電圧供給

テスト出力(buffer x1)
からの波形をみる

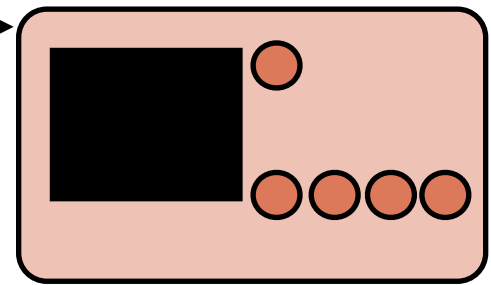
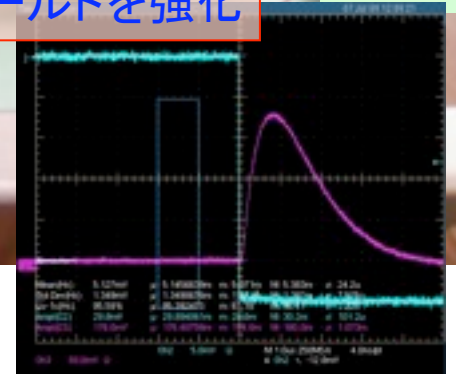
テストボードを新しく作成した。

テストイン
(LEMO,ジャンパー切り替え)

テストアウト
(LEMO)



前回より、シールドを強化



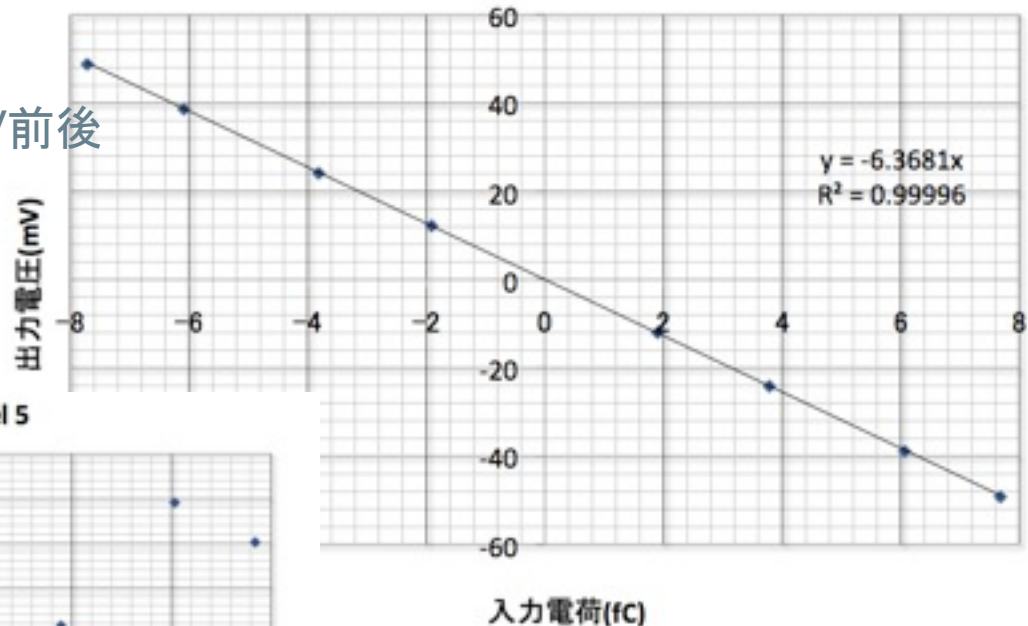
Oscilloscope

試験結果とグラフ

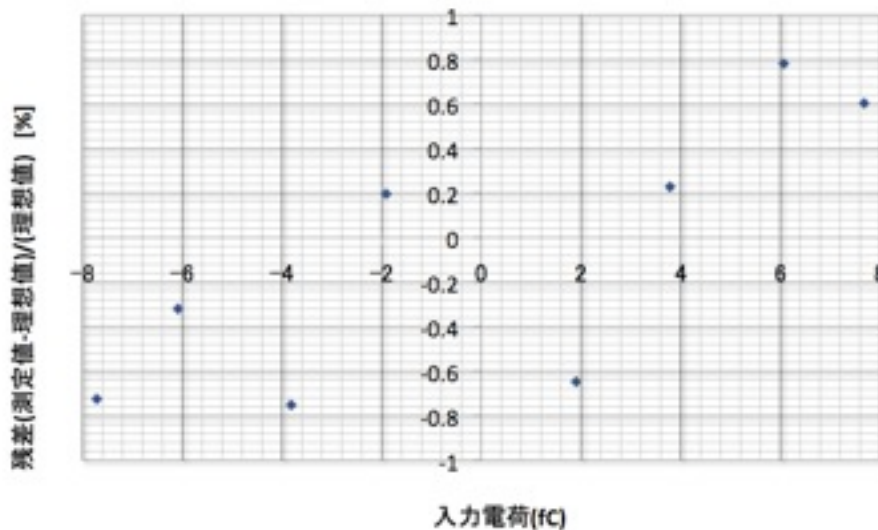
- LinearityのfittingとResidualを示す。
(Chip2 ch 5)

出力電圧の σ 値は1mV前後

Dynamic Range of channel 5



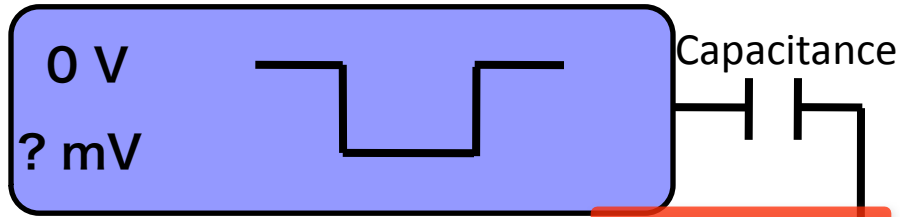
Dynamic Range of channel 5



入力電荷 -8 ~ 8 fCの範囲では
残差0.8%以下に抑えられている。

試験方法(ENC)

Pulse Generator



キャパシタを付加

検出器容量



検出器容量を付加し、ノイズ量をオシロスコープで測定する。

テストイン

テストアウト



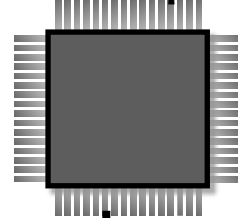
測定中は、さらにフタをしてアルミ泊などで包む。

ノイズ測定では検出器の静電容量としてキャパシタを並列につけてその電荷容量の変化に対するベースラインのふらつきの大きさをプロットした

ENCとはEquivalent Noise Chargeの略で、ノイズの電荷量を等価の電子数で表したもの。
S/N比を評価する上で便利。

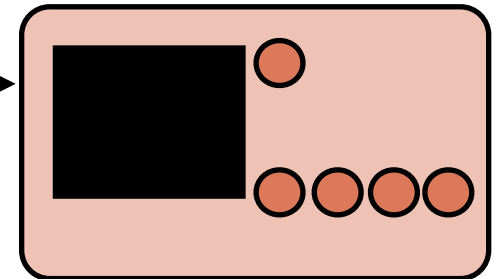
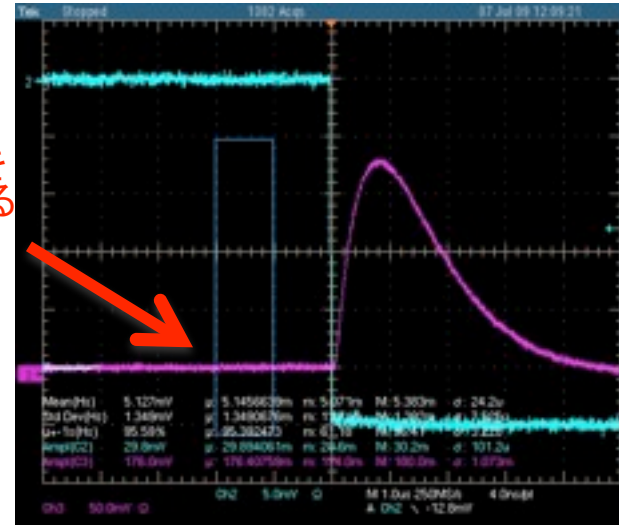
ベースラインの標準偏差の平均値をオシロにより読み取る

Input channel



Output channel

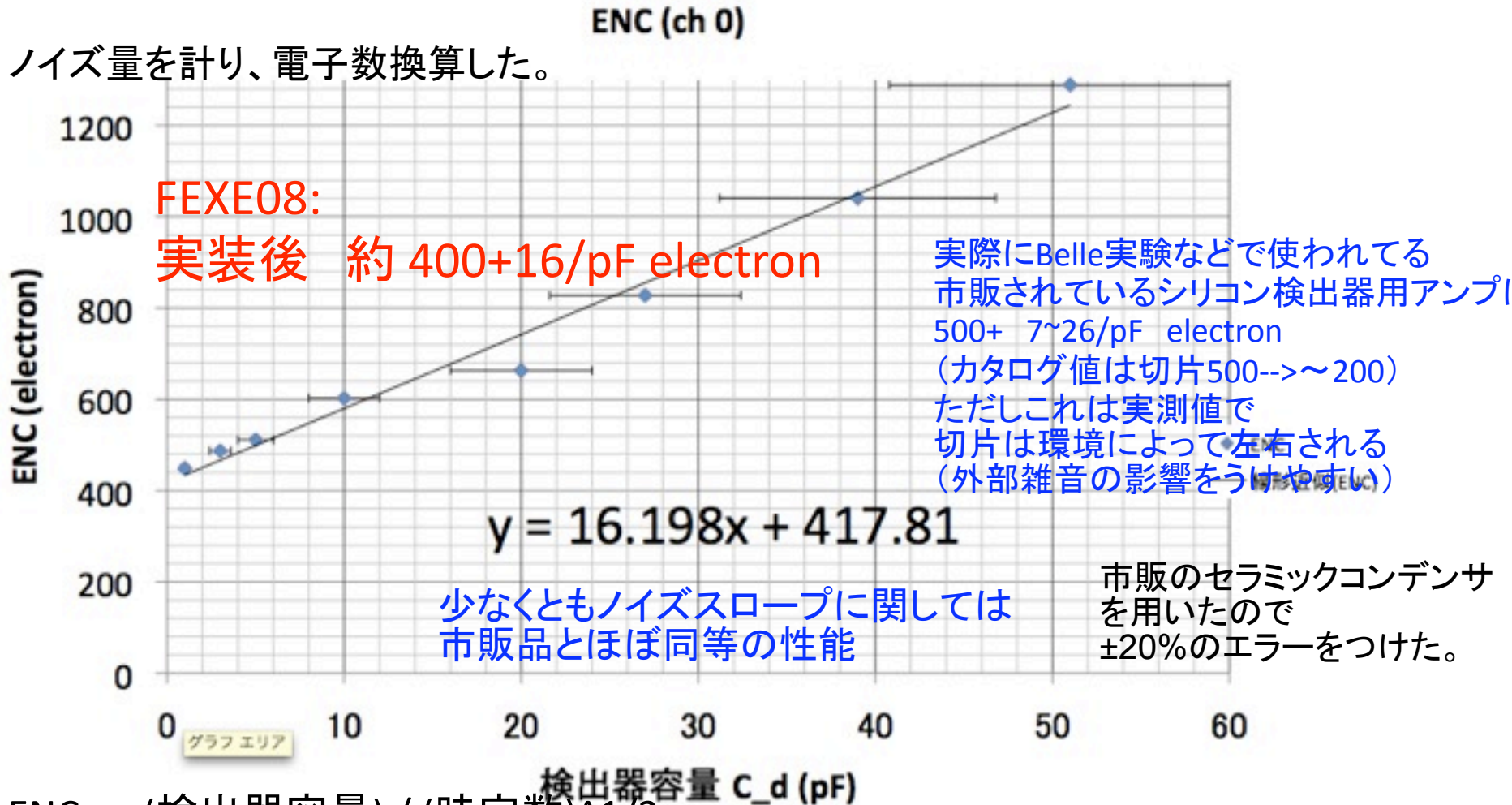
テスト出力(buffer x1)からの波形をみる



Oscilloscope

Tektronix (TDS5054)

ノイズ(ENC)常温時



$ENC \propto (\text{検出器容量}) / (\text{時定数})^{1/2}$

PADの容量を含めた入力容量を数pFとすると、ENCは高々600程度で、十分高いS/Nが得られると期待される。

まとめ

- 液体キセノンTPCに適したアンプの開発と動作試験を行いました。
- ノイズ量は、約400 electron とかなりの低ノイズを達成、多チャンネル化、低雑音化はほぼ目標達成できそうです。

	目標値	測定値
入力電荷範囲	- 0.025 ~ 0.025 pC	-0.06 ~ 0.1 pC
ゲイン	8.2 V/pC	6.0 ± 0.5 V/pC
ピーキングタイム	1 us (外部スイッチで変更可)	1 us, 500ns, etc
消費電力	10 mW/ch 以下	10 mW/ch 前後
ノイズ(ENC)	2000e (Cd = 1pF)	約 400 e (Cd=1pF)
チップ(ダイ)の大きさ	3 mm x 3mm	-
電源電圧	+ 2.5, -2.5	-
チャンネル数	8 ch	-
プロセス	0.5 μm CMOS	-
温度耐性	~ -110°C	調査中

展望

今後、10万チャンネルのプロトタイプ及び小型実証機評価用としてアナログ-デジタル変換部も含めるためにさらなる低消費電力化を考慮したシステムASICを製作する必要がある。

そのため、プロセスを0.25 μ mへ変更し改良型ASIC開発を開始。

- ・ 高ゲイン化
- ・ 高密度多チャンネル化に向け、チャンネル数を32へと拡充
- ・ S/N比が10以上の低ノイズアンプ
- ・ 低温(-110)でも安定動作

予定

	目標値
入力電荷範囲	- 0.025 ~ 0.025 pC
ゲイン	10 V/pC
ピーキングタイム	1 us, 500ns, variable (外部スイッチで変更可)
消費電力	5mW/ch 以下
ノイズ(ENC)	2000e (Cd = 1pF)以下
チップ(ダイ)の大きさ	3 mm x 3mm
電源電圧	+ 2.5, -2.5
チャンネル数	32 ch
プロセス	0.25 μ m CMOS
温度耐性	~ -110°C

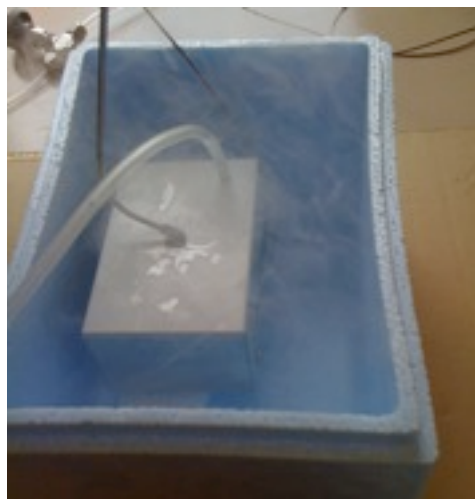
終

ご清聴ありがとうございました。

付録

冷却試験

- 発泡スチロールの箱の中で冷却
- アルミの箱に穴を空け、そこから乾燥窒素ガスを流し入れながら、液体窒素を流し込む
- 発泡スチロールの箱の表層に窒素を吹きかける

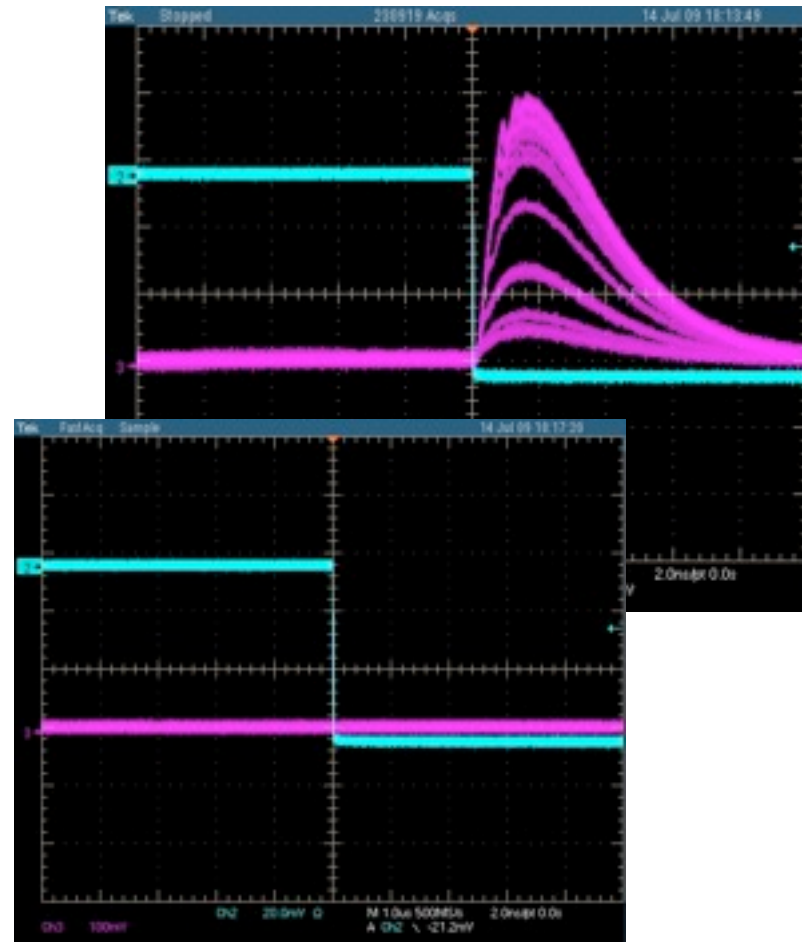


発泡スチロール箱にフタをすれば
 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度まで
コントロール可能



結果

- -20°C ぐらいから振動しだす。
- -80°C 近くになると検出効率が悪くなり、やがて消える。
- 常温に戻すともとに戻る。



原因については調査中

考えられる原因

- 帰還部のバイアスの問題
- 実装の問題
- 電源のパスコンの問題
- 電源の安定供給
- 使われている素子の問題
- 接触の問題
- その他

検証 or 対策

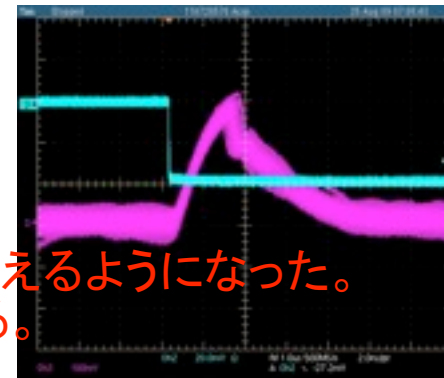
- バイアスの抵抗値を調整
- FE2006の冷却試験
- パスコンを温度特性のよいものに変える
- GNDを強化
- テスト入力のキャパシタを除去
- ・LEMO,ジャンパーなどバネ接触部分をすべてハンダ付け
・ボンディングをエポキシで固定

可能性



カレントミラーのつけ忘れによる
帰還部バイアスの問題が一番疑わしい。

動作温度に適したバイアスを与えることで信号が見えるようになった。
しかし、波形は変形しており、原因を現在探っている。



帰還部バイアスの問題

- レイアウトのデザイン時に、カレントミラーをつけ忘れてしまった。

ミラーしているMOSTランジスタに流れる、ソース電流値をシミュレーションにより求める。

- カレントミラーを用いた場合(シミュレーション値)

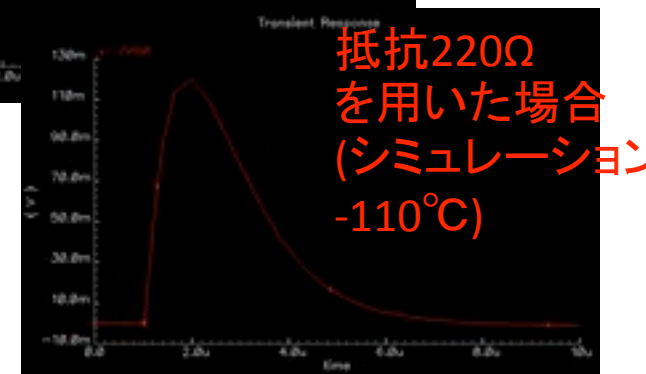
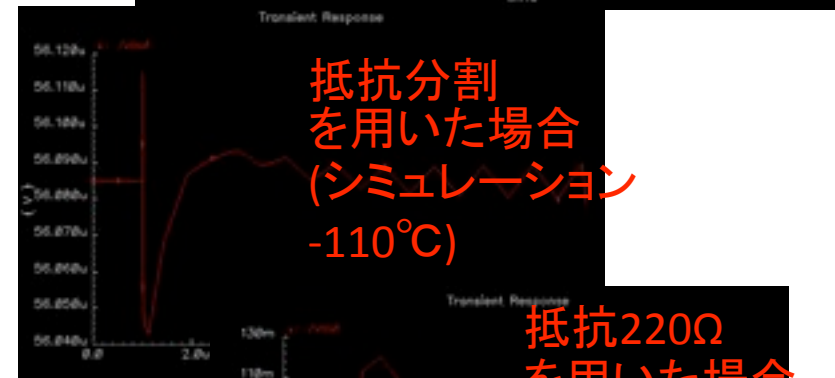
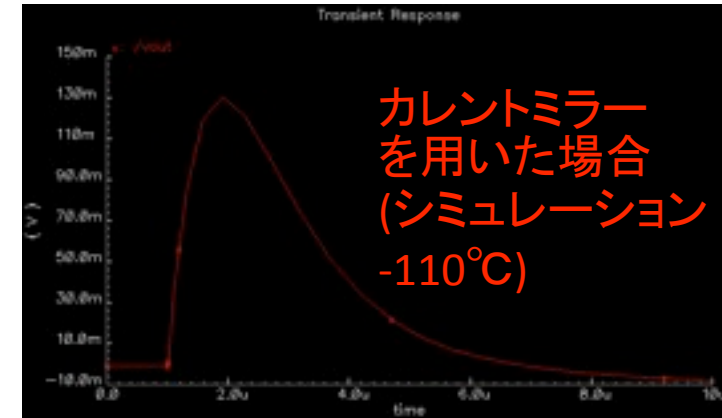
25°Cのとき -4.4 nA -110°Cのとき -4.1 nA

- 抵抗分割の場合(シミュレーション値)

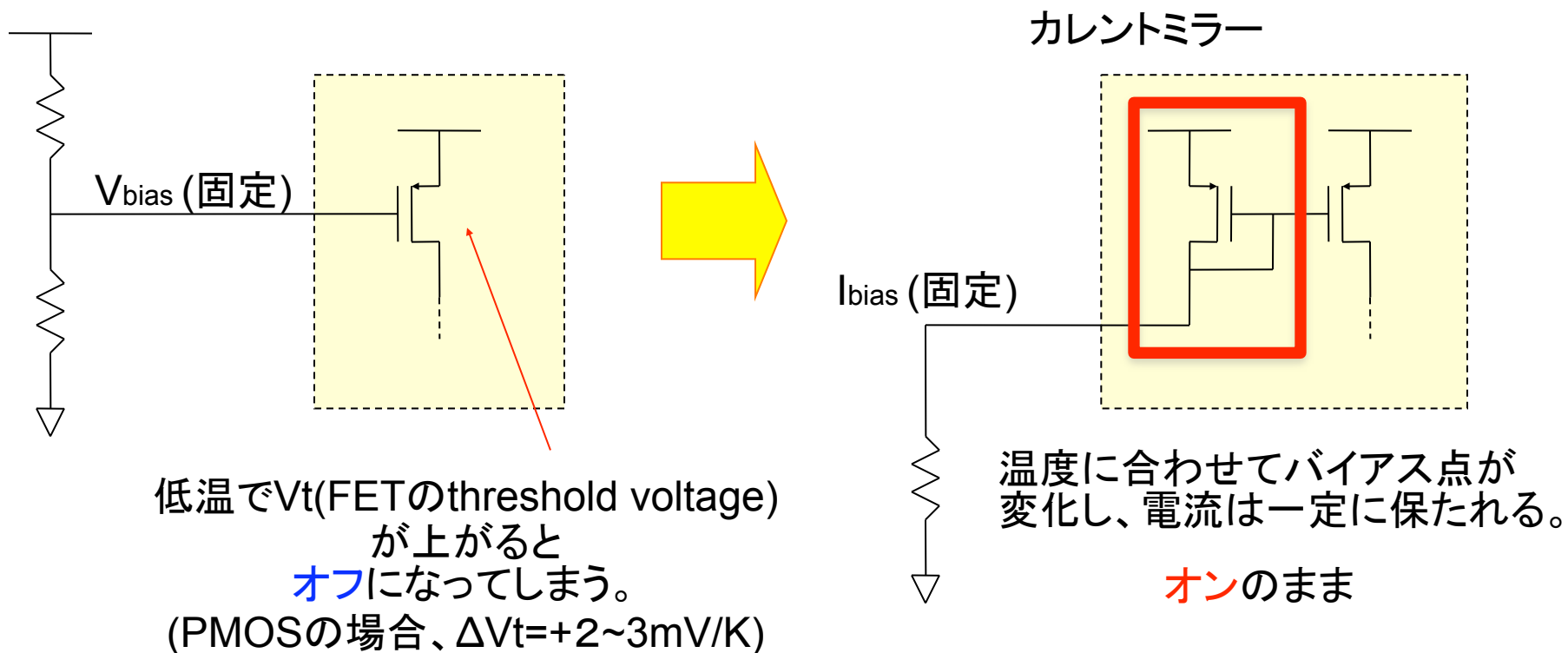
25°Cのとき -1.5 nA -110°Cのとき -1.4 pA

- 抵抗値を変えて無理に電流値を上げて見る(150Ω → 220Ω, シミュレーション値)

25°Cのとき -576 nA -110°Cのとき -230 pA



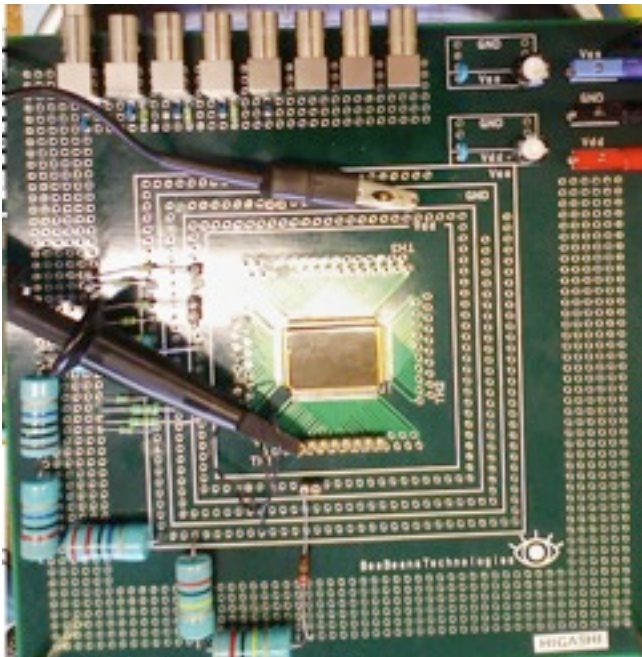
低温でのゲイン振動の原因



シミュレーション結果は、この仮定とConsistent。
ただし、ゲインが小さくなるのは分かるが、振動するのは再現できていない。

試験状況

- 新しく試験用のPCボードをデザインした。

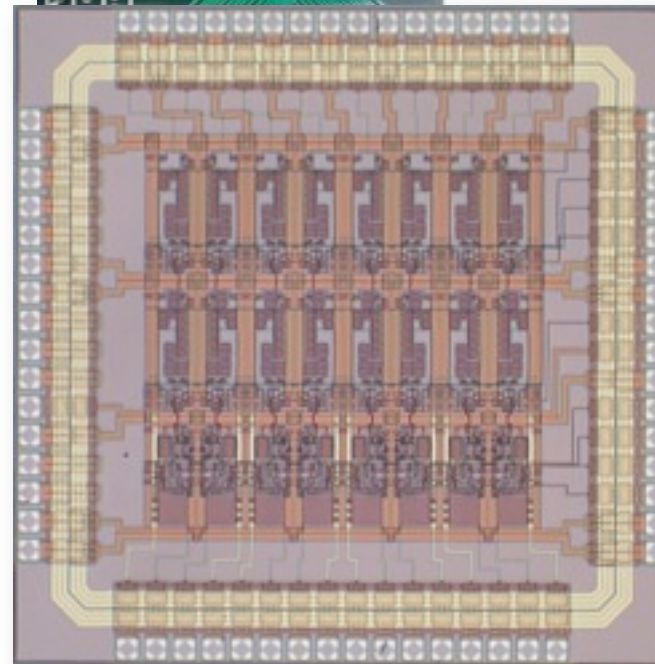
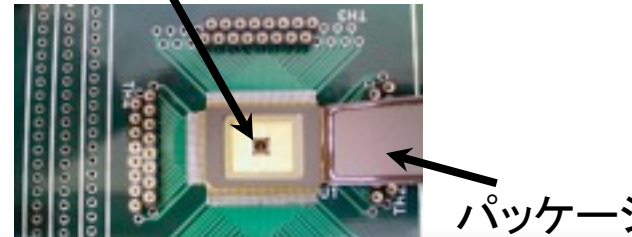


チップとテストボード

ダイ(3mm x 3mm)はワイヤーでボンディングされている

ダイ

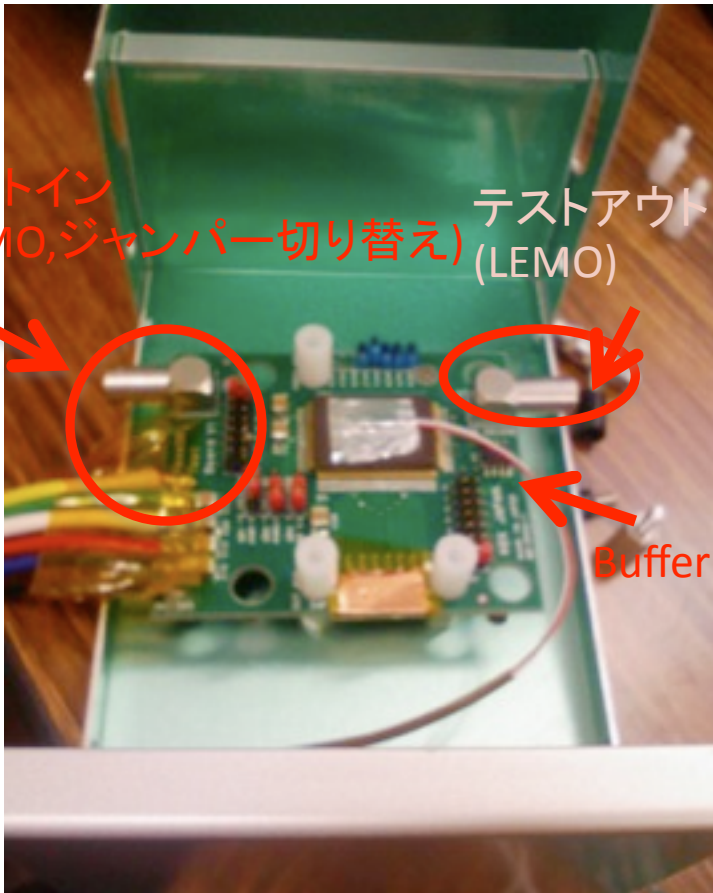
パッケージのフタ



ダイの顕微鏡写真

テストイン (LEMO, ジャンパー切り替え) テストアウト (LEMO)

Buffer



冷却終了

- テストボードをアルミの箱ごとポリ容器に移し替える。
- ポリ容器に窒素ガスを流し込む。

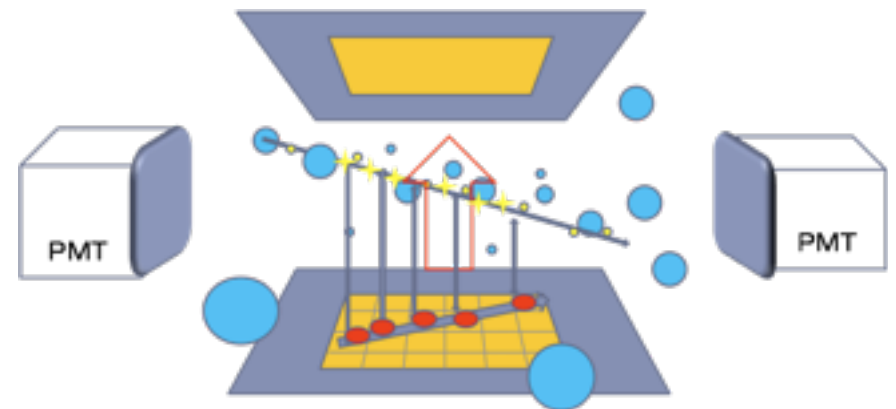


液体キセノン検出器

- 現在、Liquid Xenon groupでは液体キセノンTPC(Time Projection Chamber)を利用したPET(Positron Emission Tomography)の開発研究を行っている。読み出しアンプまでのケーブルによる信号のノイズ除去や、信号の高速処理などを課題としている。ICによる読み出し増幅を用いることでこの問題をカバーするという考えがある。そこで、実際にTPCの信号処理に適したASIC(Application specific integrated circuit)を開発をすすめている。
- TPCによる時間のプロジェクションをPMT信号(Start), PAD信号(Stop)として行う。

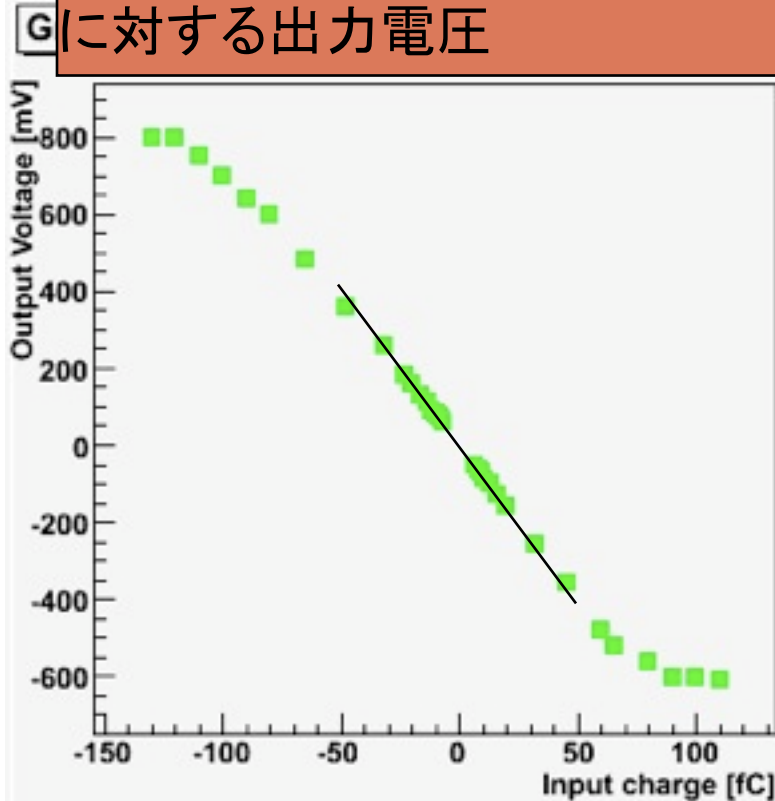


読み出しアンプまでの
ケーブルノイズを除去したい

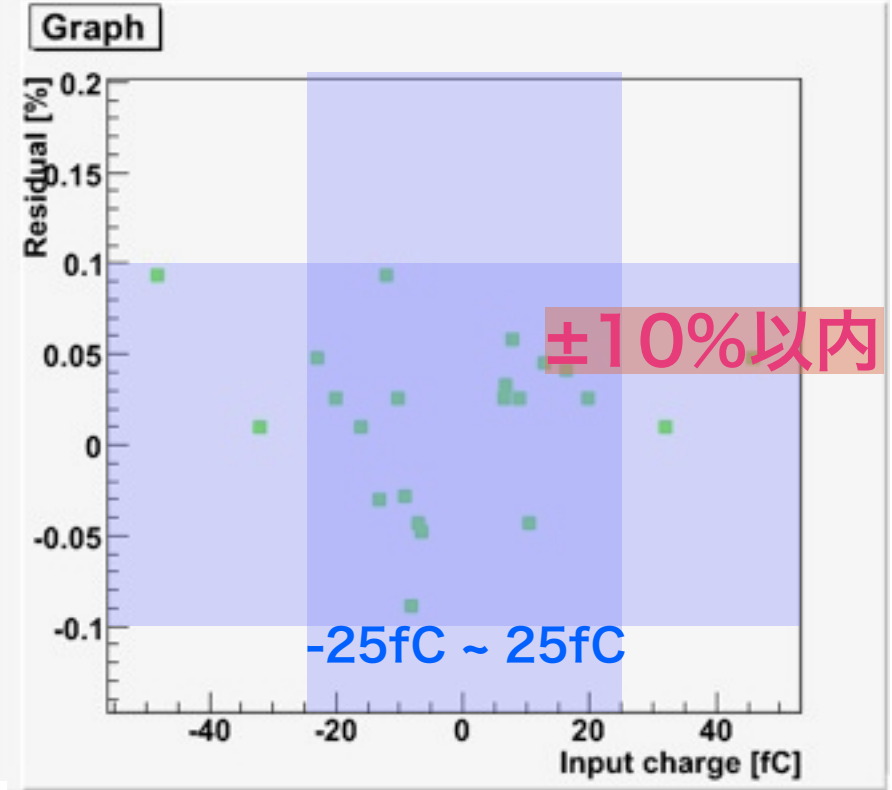


前回の結果

入力電荷(-130fC ~ 120fC)
に対する出力電圧

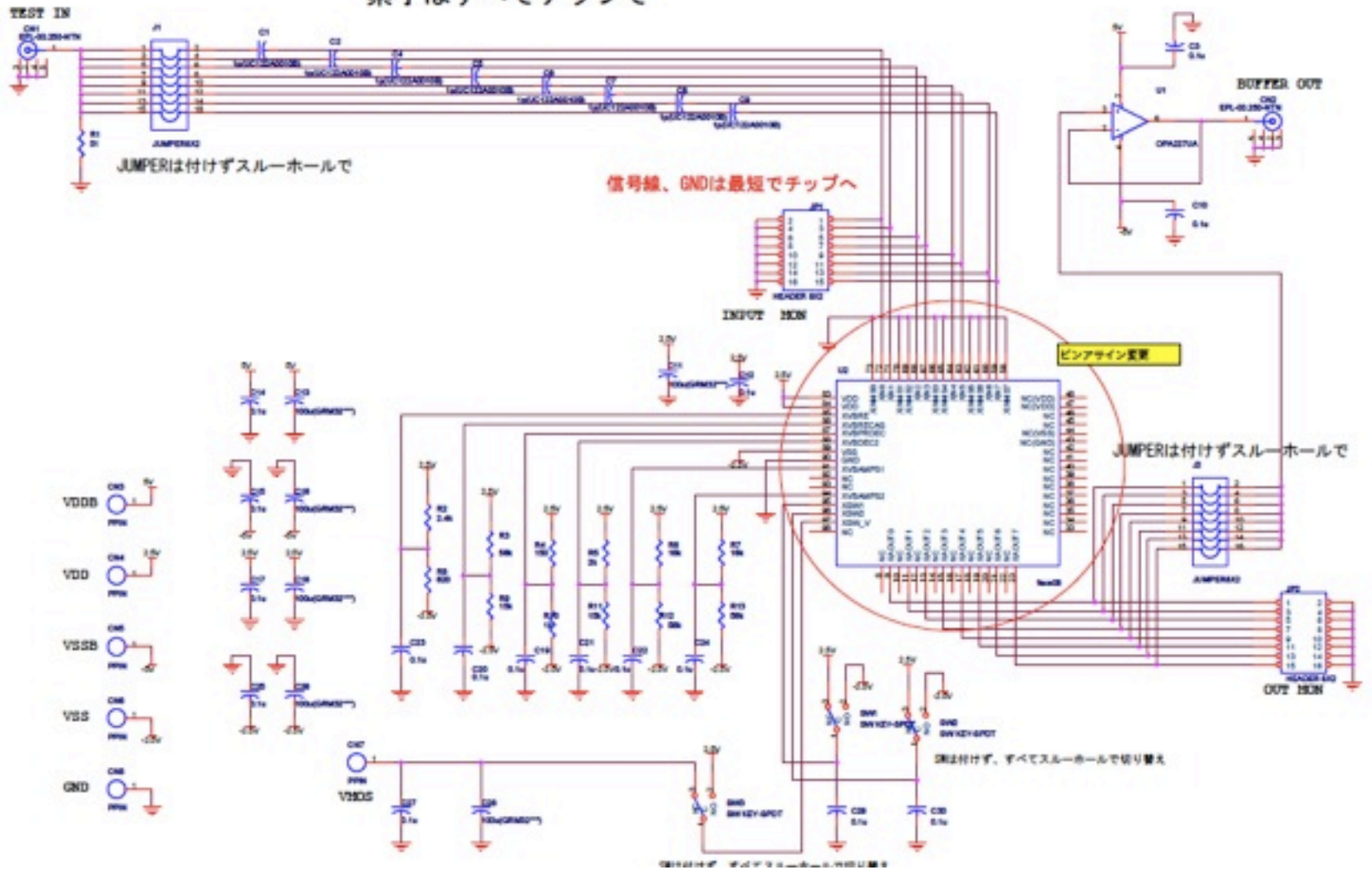


(予想ゲイン出力) - (実際の出力)



想定入力電荷範囲内では
10%程度の誤差が見られた。(改善の必要あり)

素子はすべてチップで



JUMPERは付けずスルーホールで

信号線、GNDは最短でチップへ

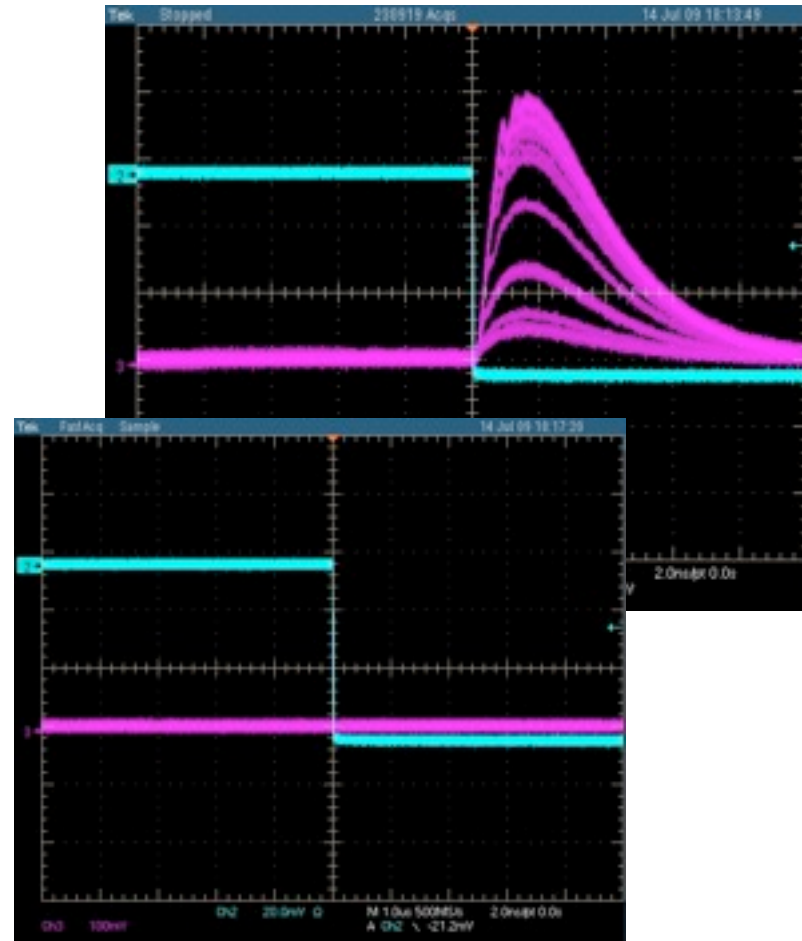
ピンアサイン変更

JUMPERは付けずスルーホールで

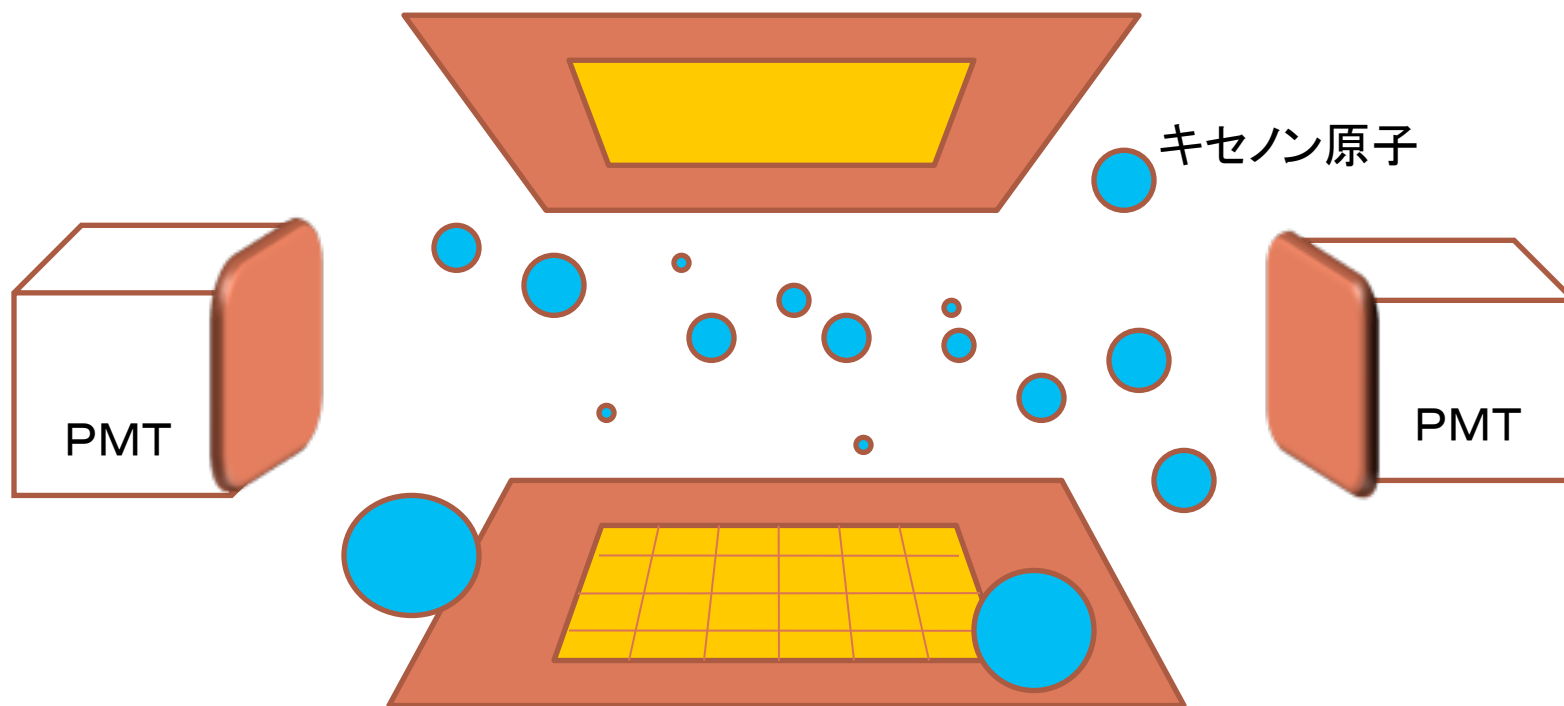
跳びは付けず、すべてスルーホールで切り替え

結果

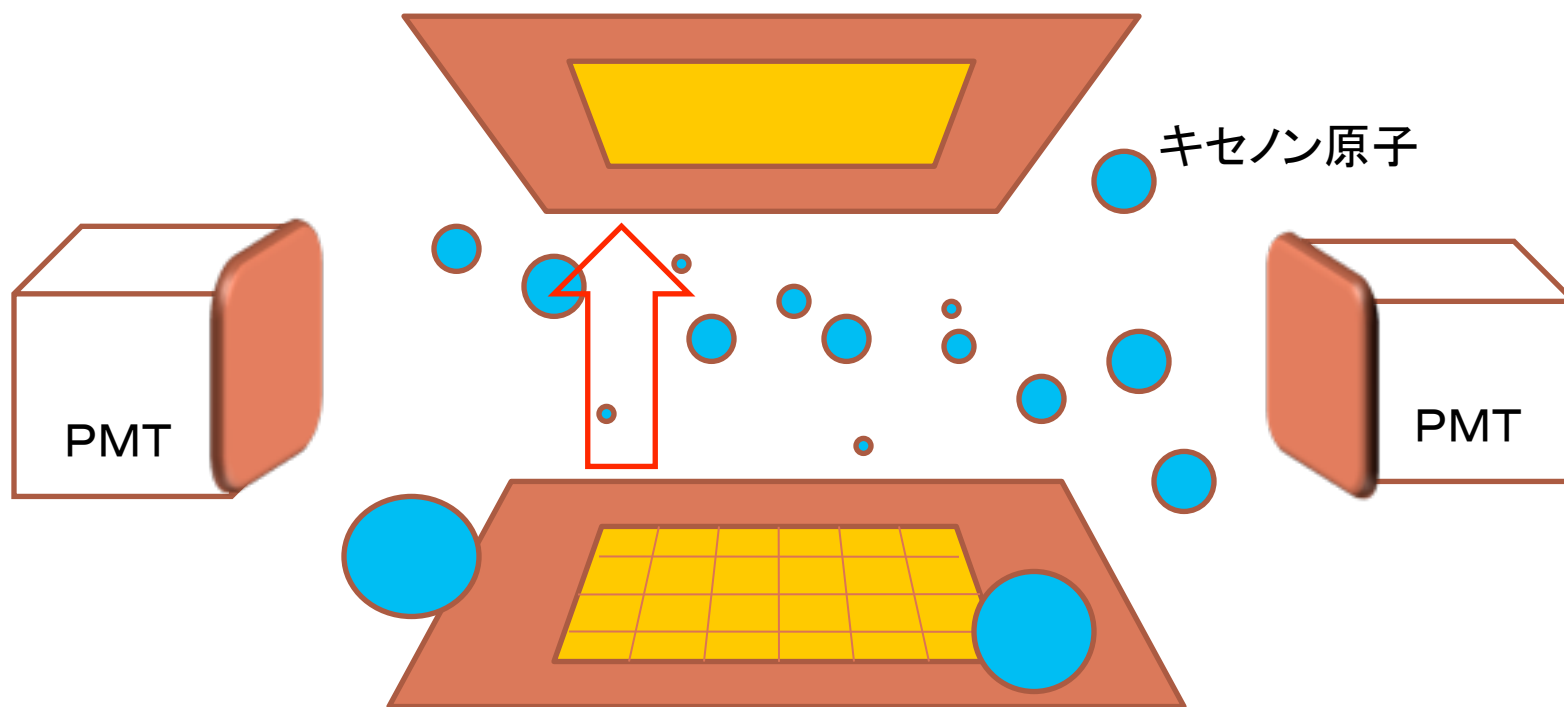
- -20°C ぐらいから振動しだす。
- -80°C 近くになると検出効率が悪くなり、やがて消える。
- 常温に戻すとともに戻る。



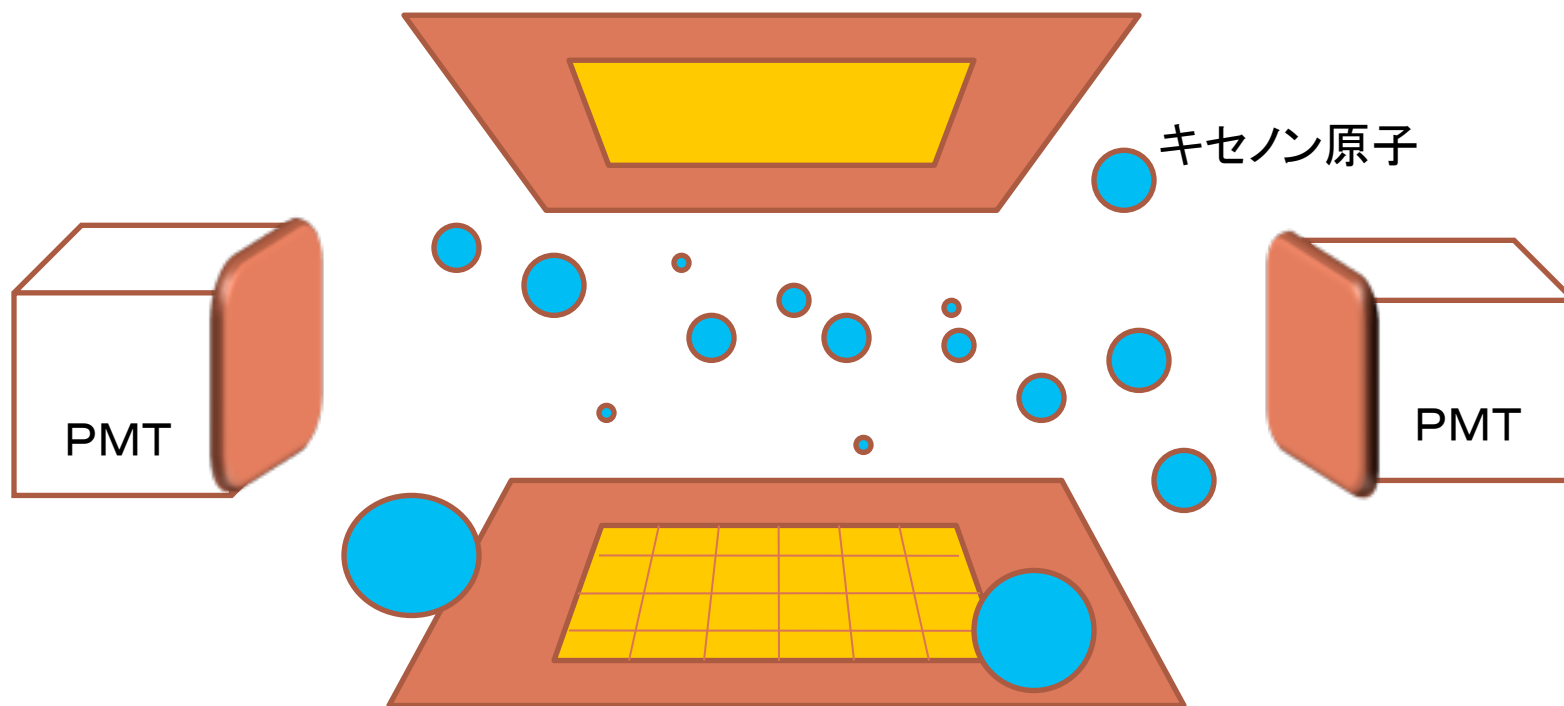
TPCの原理



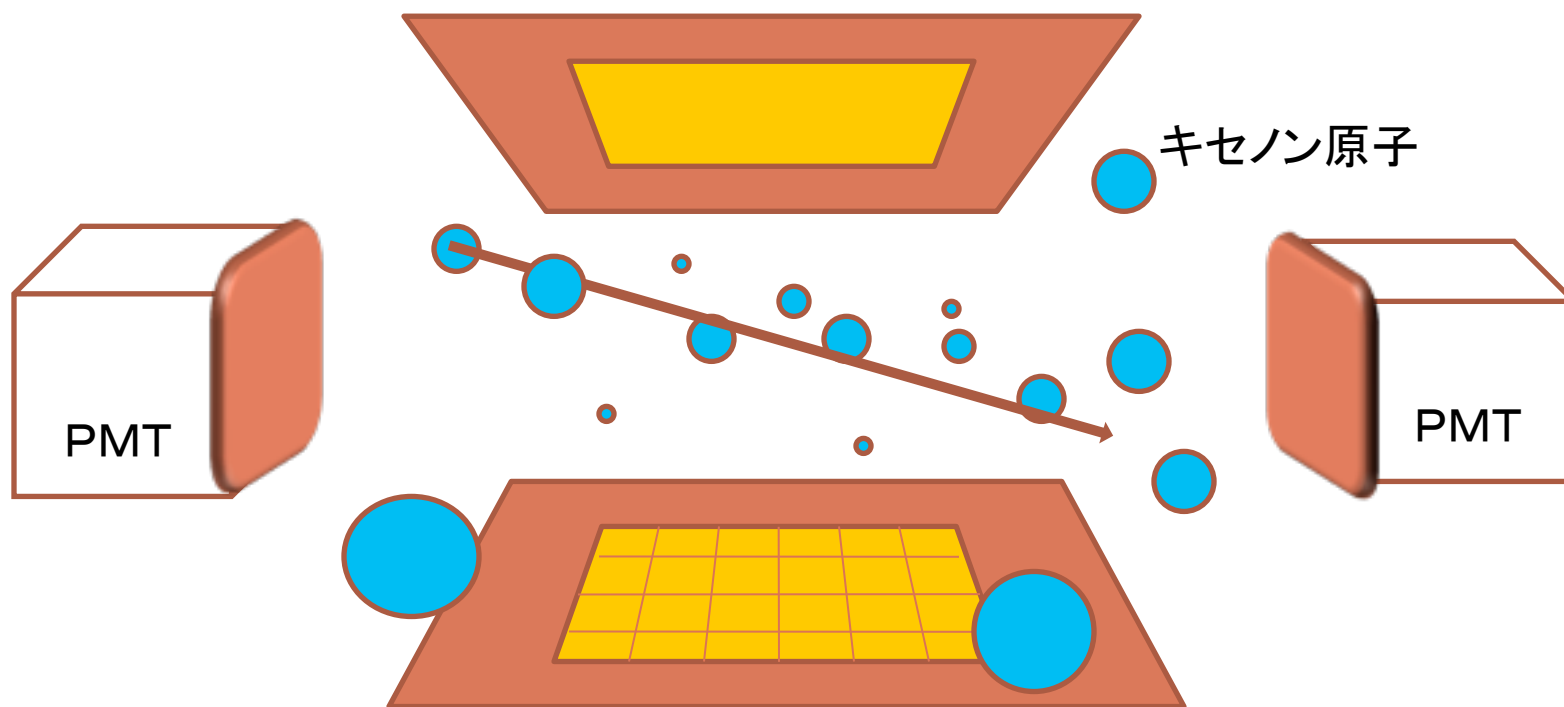
TPCの原理



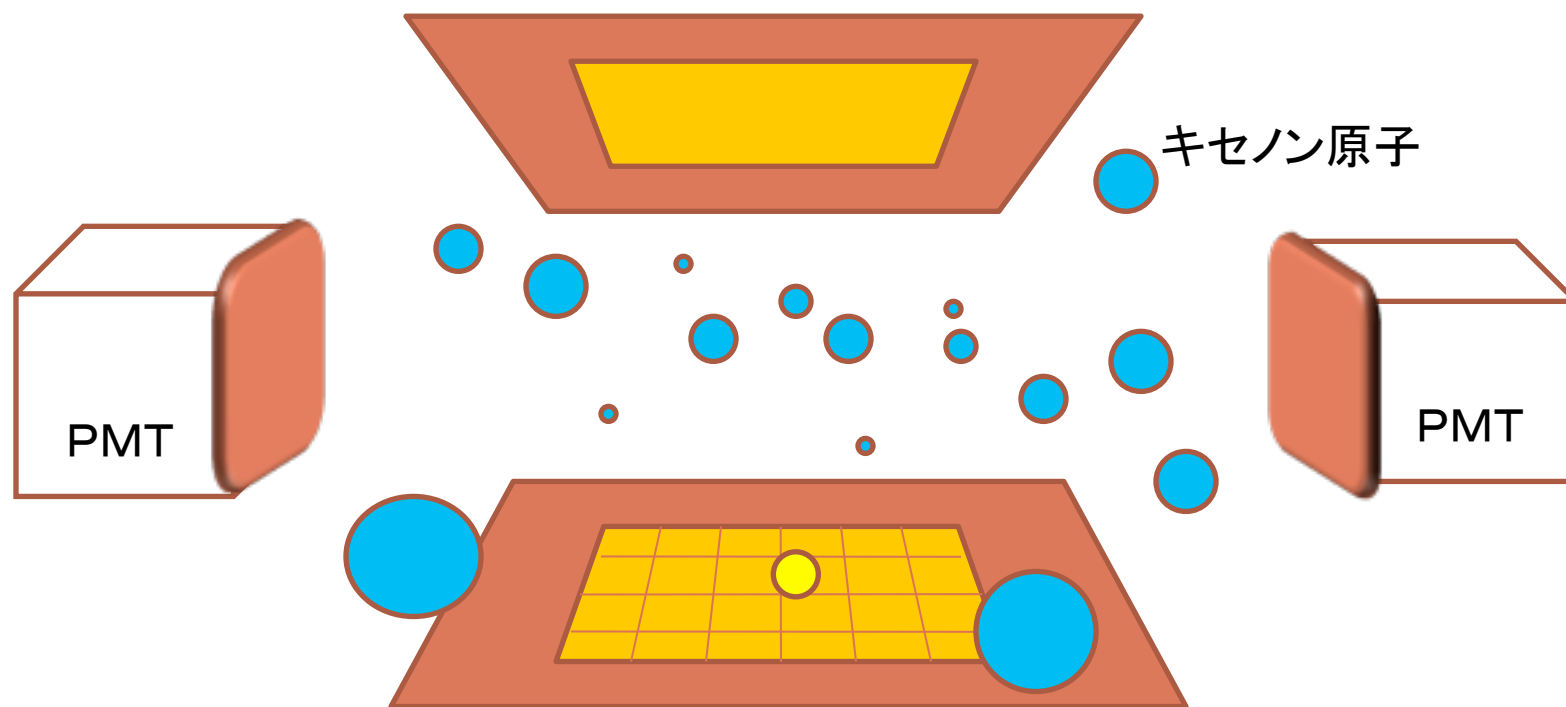
TPCの原理



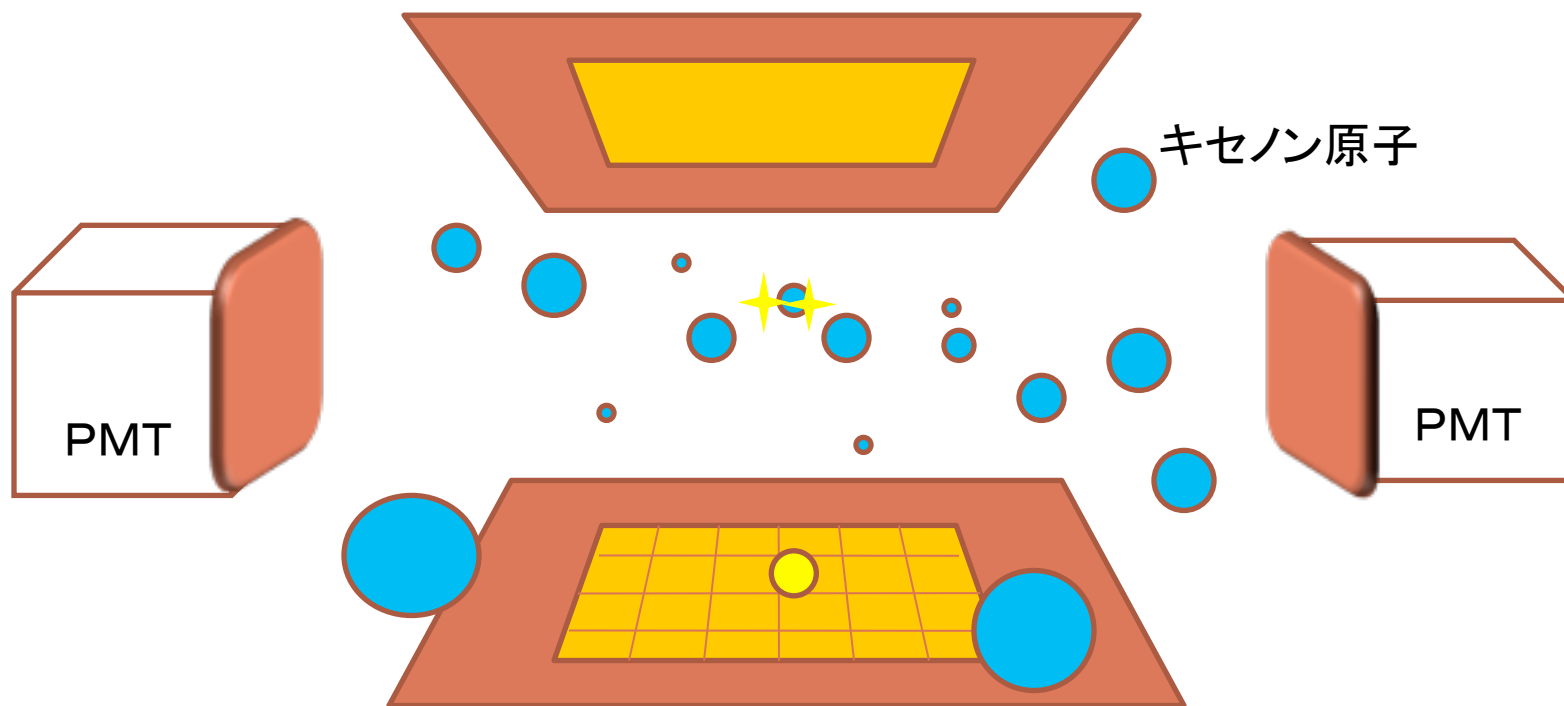
TPCの原理



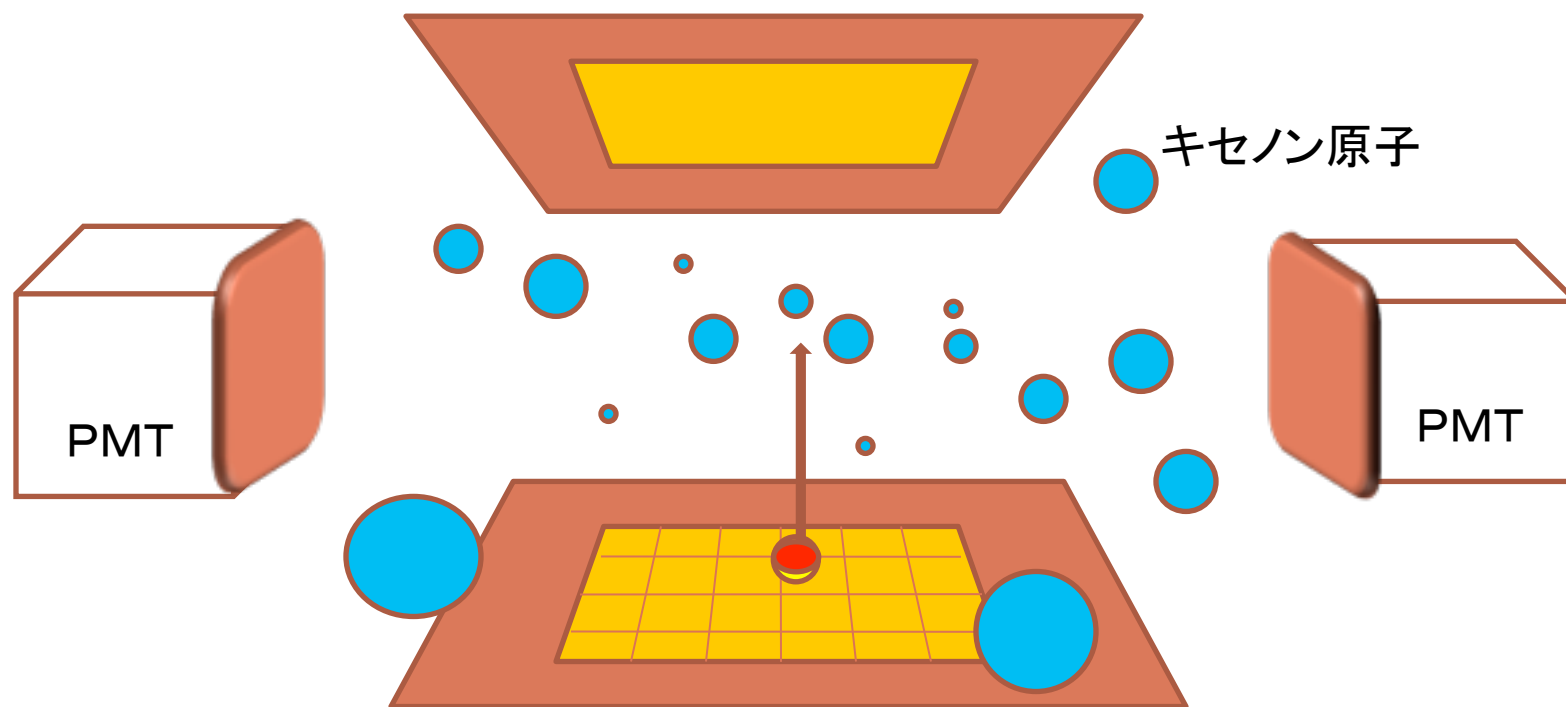
TPCの原理



TPCの原理



TPCの原理



ライブラリ

ライブラリ(1) プリアンプ

- 構成

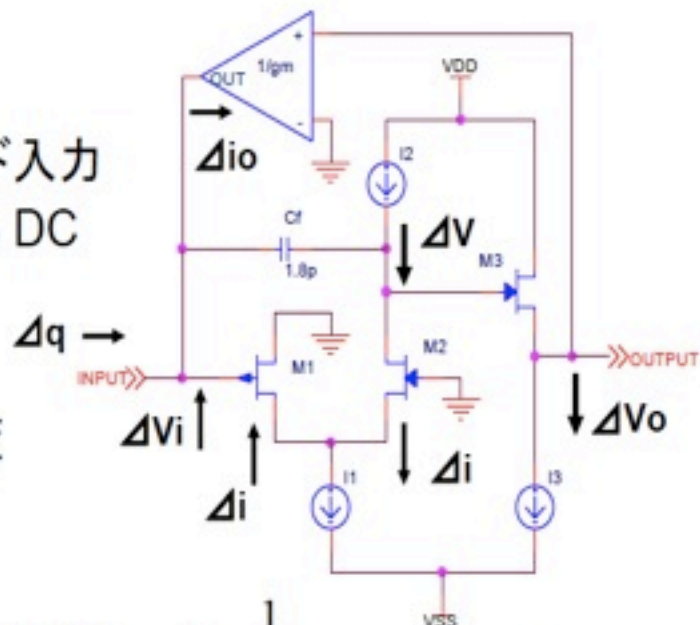
- シングルエンド
- フォールディッドカスコード入力
- Discharging Amp による DC フィードバック

- 特長

- 両極性入力、時定数可変
- 外部コントロール不要

- 主な仕様

- 入力電荷範囲: -1.5pC~1.5pC
- ゲイン: 0.5V/pC
- ノイズ: 5900e @Cd = 100pF
- 時定数: $10^{-6}s \sim 10^{-5}s$

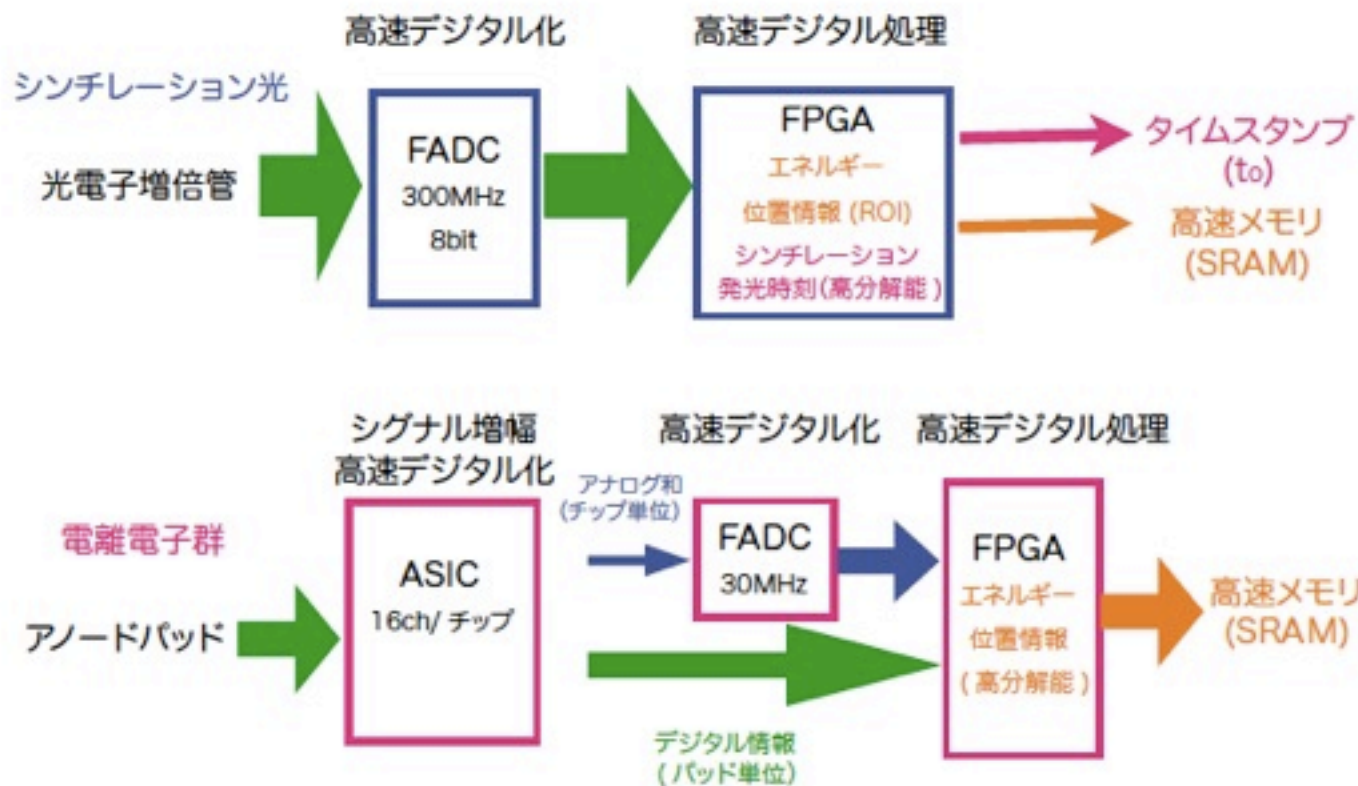


$$A \approx \frac{1}{C_f}$$

$$\tau = \frac{C_f}{g_m}$$

$$T(s) = -\frac{1}{g_{mf}} \frac{1}{1 + sC_f \frac{1}{g_{mf}}}$$

エレクトロニクスシステムの概要



シンチレーション光の情報 (Region Of Interest -ROI 情報、発光時刻)、電離電子の情報 (精密位置、エネルギー情報) をそれぞれFPGA技術によりオンボードでパイプライン処理する

・計測数の見積もり

液体Xeのシンチ光1個当たり必要なエネルギー: 23eV

線源からPMT=5cm

$$N_{\text{photon}} = 5.5 \times 10^6 [\text{MeV}] / 23 [\text{eV}] = 2.3 \times 10^5$$

光電面=2cm × 2cm

$$Q = N_{\text{photon}} \times \frac{\Omega}{4\pi} \times Q.E. \times Gain \times e = 2.3 \times 10^5 \cdot 7.0 \times 10^{-3} \cdot 0.2 \cdot 6 \times 10^6 \cdot 1.6 \times 10^{-19}$$
$$= 310 [\text{pC}]$$

理想的な場合のADC出力(700V): 1240[count]

液体キセノン中での	
イオン対生成に必要なエネルギー	15 eV
ファノ因子	約20
ドリフト速度	2.2 mm/us
拡散定数	50 cm ² /s