

LArTPCと暗黒物質探索実験に向けた 読み出しエレクトロニクスの開発

岩手大学大学院 総合科学研究科

五十嵐大翔

Open-It Project (KEK、神戸大、呉高専)

発表内容

1. エレクトロニクス開発目標(LArTPC)
2. エレクトロニクス開発目標(暗黒物質探索実験)
3. 現在開発中のエレクトロニクスについて
4. 開発ASICのシミュレーションによる特性評価
5. まとめ

エレクトロニクスの開発目標① (LArTPCグループ)

信号読み出しエレクトロニクスへの要請

- 低雑音、高SN比
- 高集積
- 省消費電力
- 低コスト
- 液体アルゴン温度(-186°C)環境下における安定動作

ASIC(LTARS~)の開発

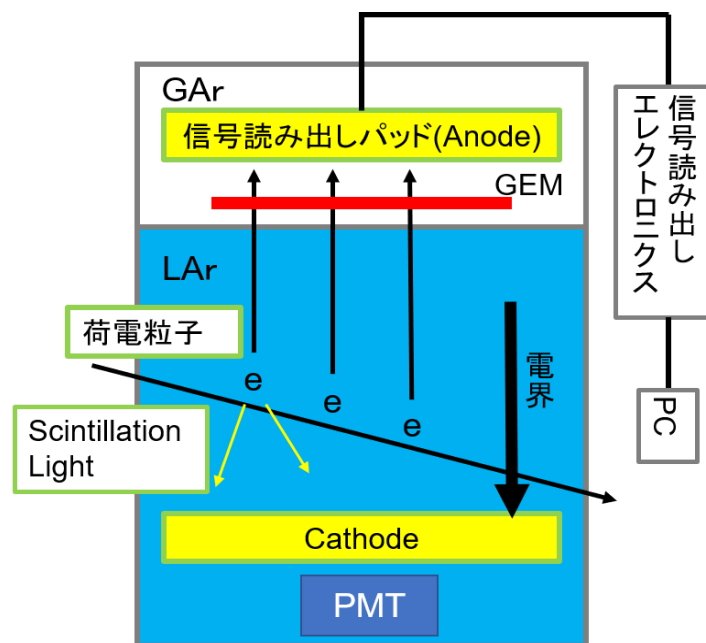
表 過去に開発されたLTARS2014の性能

ENC	6000@300 pF
ダイナミックレンジ	-60 fC~70 fC
コンバージョンゲイン	11.4 mV/fC
時定数	1 μ s



- ノイズを抑えたい(ENC2000程度)
- ダイナミックレンジを広げたい(± 1600 fC程度)

- 電荷/電圧変換・増幅・整形
- AD変換



液体アルゴンTPC概略図

※最小電離粒子による事象に対し50倍大きな信号量が見込まれるシャワー事象までみたい

エレクトロニクスの開発目標② (NEWAGEグループ)

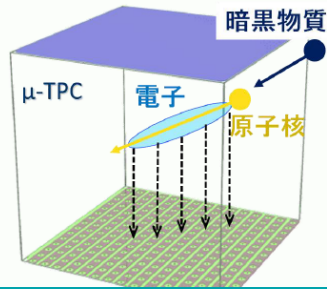
暗黒物質探索実験

1. NEWAGE NEw general WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment

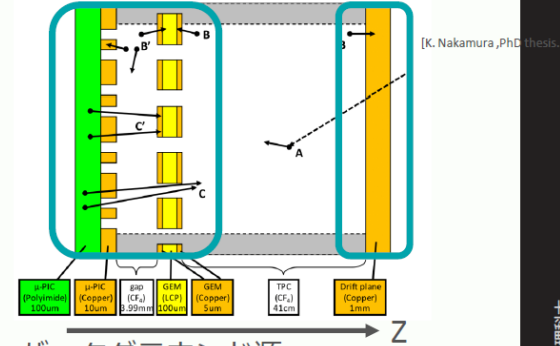
暗黒物質の「風」を捉える
到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験



2019/3/22



NEWAGE検出器バックグラウンド候補



バックグラウンド源
= μ -PIC中の放射性不純物由来の α 線

TPC(Time Projection Chamber)
2次元位置情報
+
時間情報
→
3次元
飛跡検出

NEWAGEは2次元画像飛跡検出器 μ -PIC(micro Pixel Chamber)を読み出しにした μ TPCを使用

陰イオンガス μ TPC(NI μ TPC)の開発
z軸方向の絶対位置を得ることで μ -PIC由来の α 線事象を特定し、有効体積カットで除去

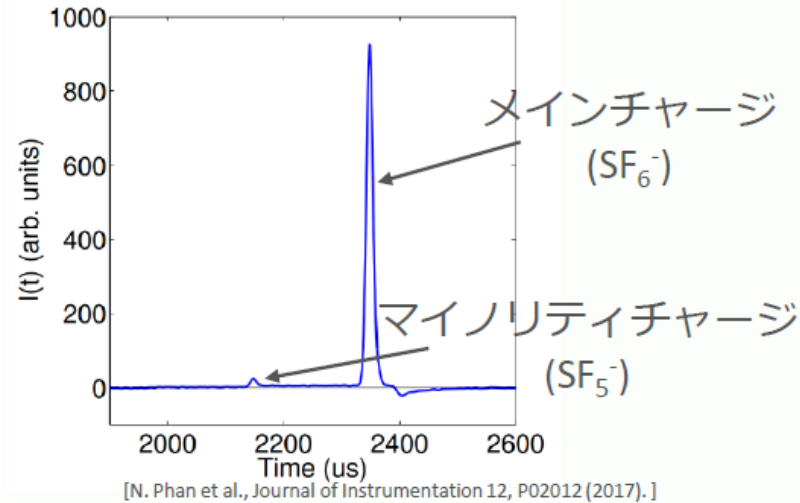
※中澤美季様(神戸大)スライド引用

JPS春季大会@東京理科大学

3

<陰イオンガスTPC>

陰イオンのドリフト速度(数 10^{-2} cm/ μ s)が電子(数 cm/ μ s)に比べて遅い
→ **時定数大の回路が必要**



※中澤美季様(神戸大)スライド引用

メインチャージに対しマイノリティチャージのピークが数%
→ **レンジの広い回路が必要**

エレクトロニクスの性能目標

開発目標達成のため、増幅率と時定数を変えられる性能を持つ回路の開発を行っている。

ゲイン大→High gain(HG)、ゲイン小→Low gain(LG)
時定数小→Fast、時定数大→Slow とする。

エレクトロニクス性能目標一覧

parameter	High gain(HG)	Low gain(LG)
時定数	1 μ s(Fast), 4 μ s(Slow),	
ノイズ(ENC)	<2000	<62500
コンバージョンゲイン	10 mV/fC	0.5 mV/fC
ダイナミックレンジ	± 80 fC	± 1600 fC

※検出器容量は300 pFを想定して、S/N10以上で読み出すことを仮定している

上記目標達成に向け、二つのASICを開発している

開発中のASIC①

LTARS2018_K06A

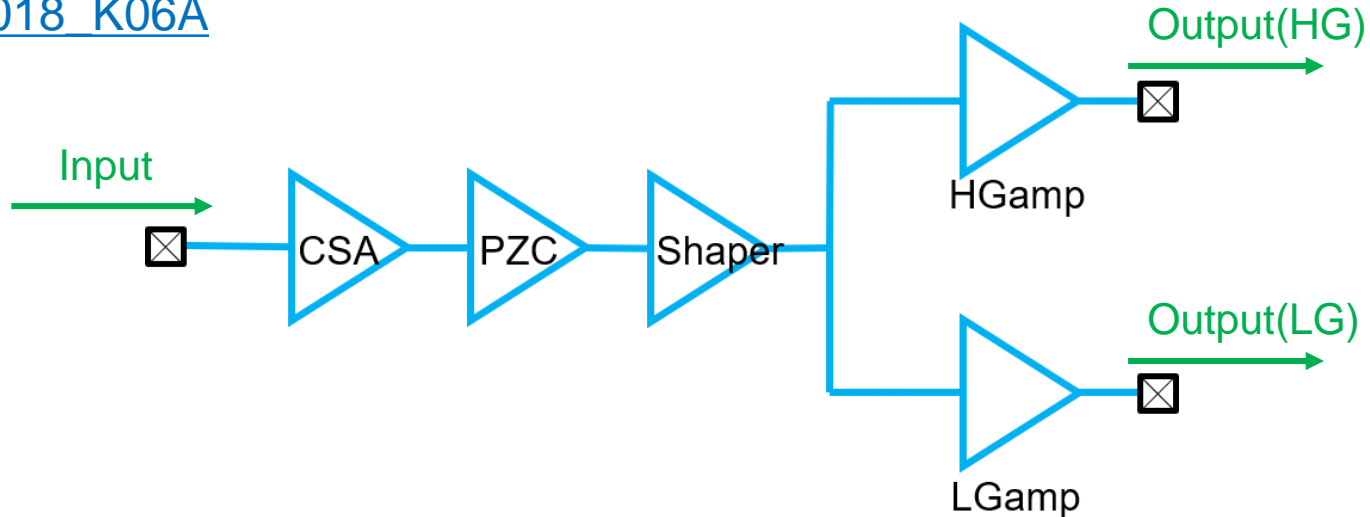


図 LTARS2018_K06A回路構成(1 ch)

ASICの回路構成と特徴

- CSA ... 電荷/電圧変換。
- PZC(ポールゼロキャンセル回路) ... アンプの長い時定数をキャンセル
- Shaper ... 電圧信号の増幅・波形整形。内部の帰還抵抗値の調整により、時定数の切り替えが可能
- 一つの入力に対して、二つの波形を同時に出力可能

開発中のASIC②

LTARS2018_K06B

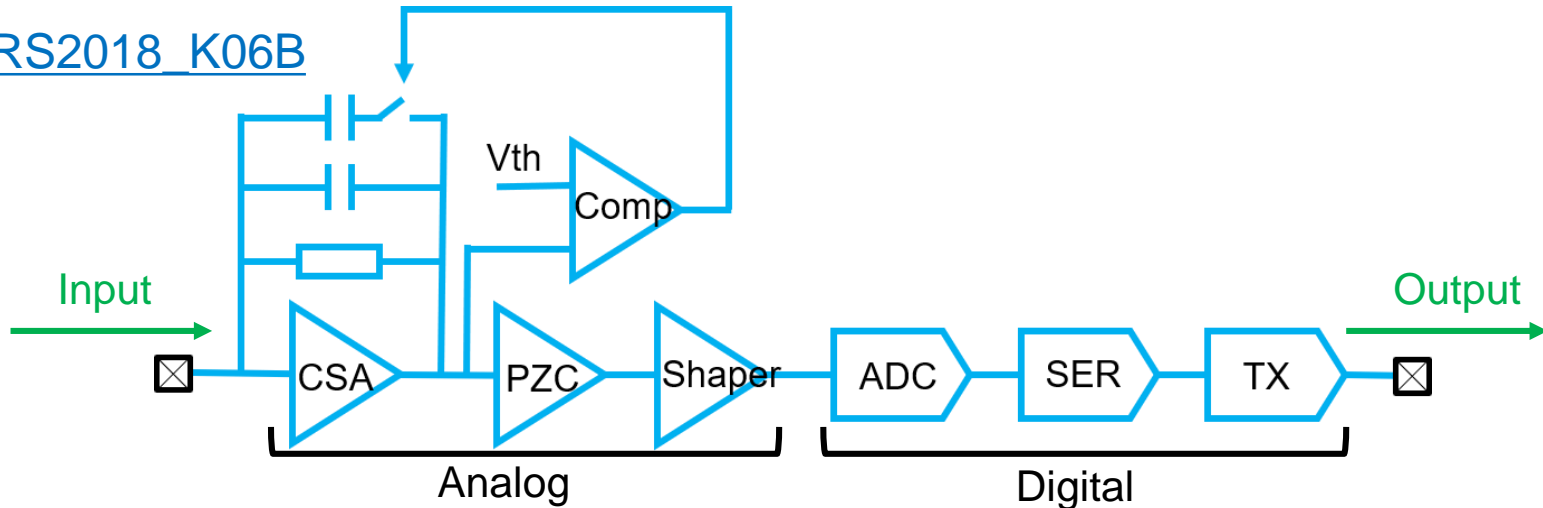


図 LTARS2018_K06B回路構成(1 ch)

ASIC回路構成と特徴

<アナログ部>

- CSA ... 電荷/電圧変換。
- Comp(コンパレータ) ... CSAの出力信号に応じて、ゲインの自動切り替えを行う
- PZC(ポールゼロキャンセル回路) ... アンプの長い時定数をキャンセル
- Shaper ... 電圧信号の増幅・波形整形。内部の帰還抵抗値の調整により、時定数の切り替えが可能

<デジタル部>

- ADC ... AD変換(8 bits)
- SER ... シリアライザでシリアル化
- TX(トランスミッター) ... 高速伝送・ノイズ対策のため差動信号方式(LVDS)で伝送

デジタル部までの実装は
今回初

LTARS (ASIC) の開発過程

過去のLTARS

- LTARS2014
 - アナログボード(LTARS2014実装), デジタルボードの二枚構成

↓ LArTPC, NI μ TPC両方に対応できるようなASICへ

- LTARS2016_K01
 - 大ダイナミックレンジ、時定数の切り替え
 - MT回路、TK回路

↓ レイアウト段階での最適化を行い、ノイズ低減を図った。

- LTARS2018_K06A,B
 - A, Bそれぞれ別に開発
 - A→MT回路改良、B→TK回路改良

	High Gain(マイノリティピーク)	Low Gain(メインピーク)
時定数	4 μ s	○
検出器容量	300pF	
ノイズ (電子数)	<2000 (0.3fC) △	<6.4 \times 10 ² (10fC) ○
ダイナミックレンジ	-80fC~80fC ○	-1600fC~1600fC ○
ゲイン	10mV/fC ○	0.5mV/fC ○

○ MT回路の達成項目 ○ TK回路の達成項目

MT回路

- ほぼ要請値達成
- ノイズ要請値は4000(@300pF)でも実装上問題ない。
→4000(@300pF)は達成している
(オフセットはレイアウトの配線と考えられるので改善の余地あり)

TK回路

- 要請値未達成の項目が多いが、トランジスタの改良&一部レイアウトの見直しで達成可能だと考えられる。

図 LTARS2016_K01性能
(中澤美季様スライド引用)

LTARS2018_K06A(MT回路改良版)→中村君(神戸大)担当

LTARS2018_K06B(TK回路改良版)→五十嵐(岩手大)担当



KEKで設計された回路についてCadence社のVirtuosoを用いた回路シミュレーションにより、設計段階の性能評価を行った。

今回、シミュレーションの細かい内容は私の担当したBのみについて触れ、性能評価のまとめとして、A, B両方の結果を最後に示す。

また、エレクトロニクスの性能目標との比較を行うため、デジタル側を抜いた、アナログ部のみ、かつ手動でゲインの切り替えを行った際のシミュレーションの結果を示す。

回路シミュレーション

KEKの岸下様、島崎様に教わりながら進めました。

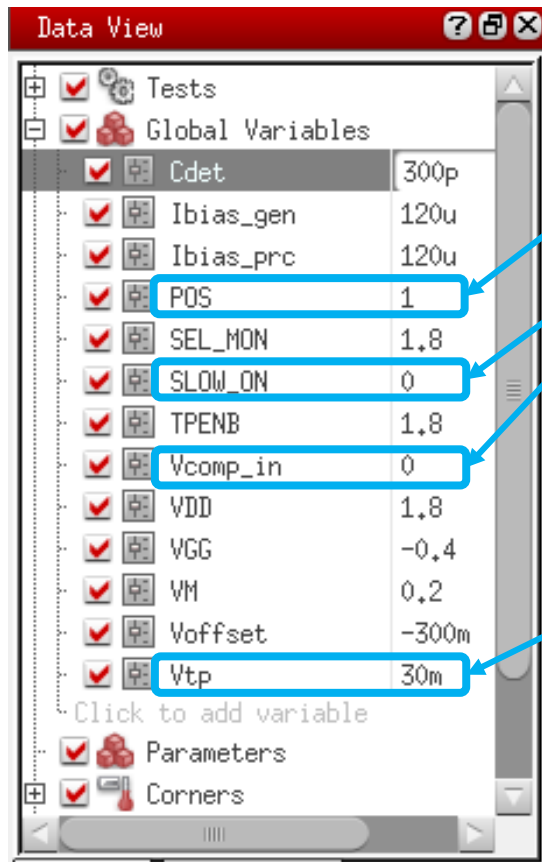


図 設定パラメーター一覧

※電源電圧0, 1.8 Vでオペレートしている

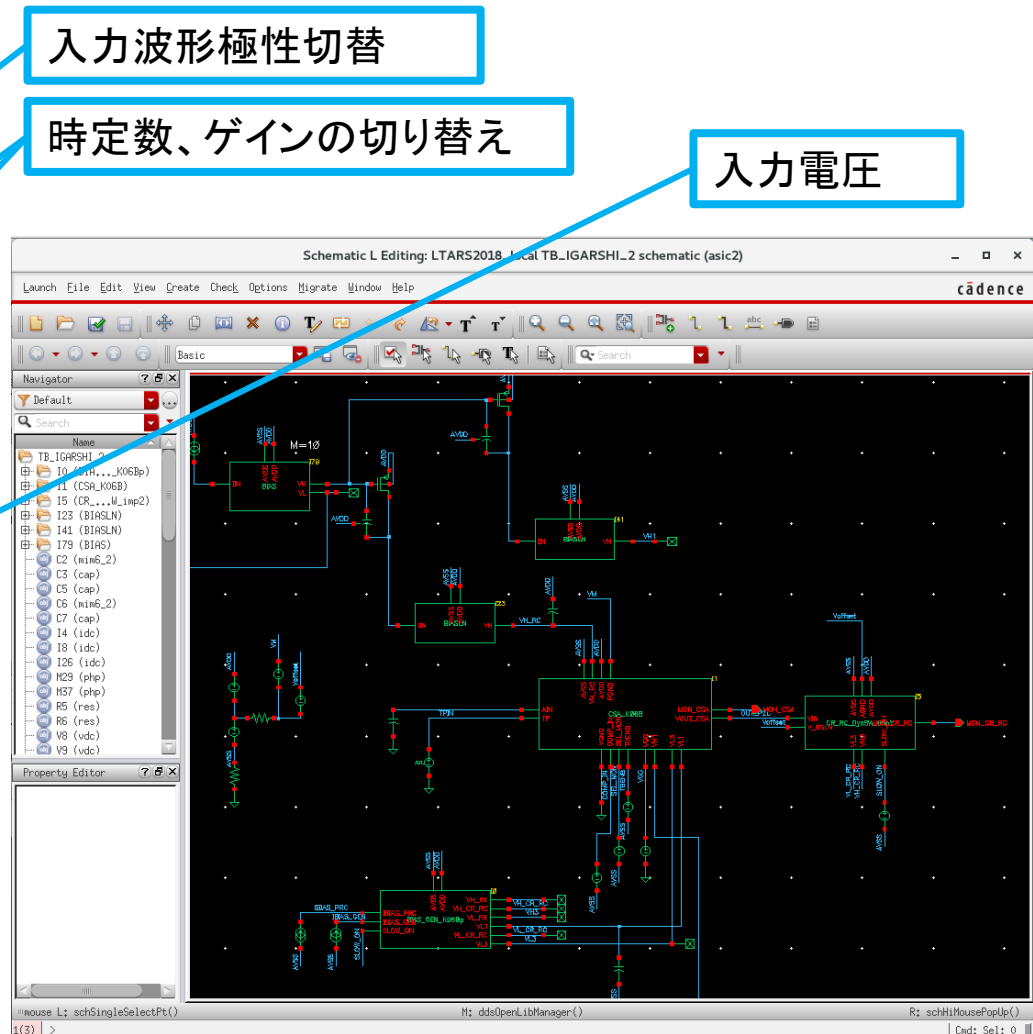
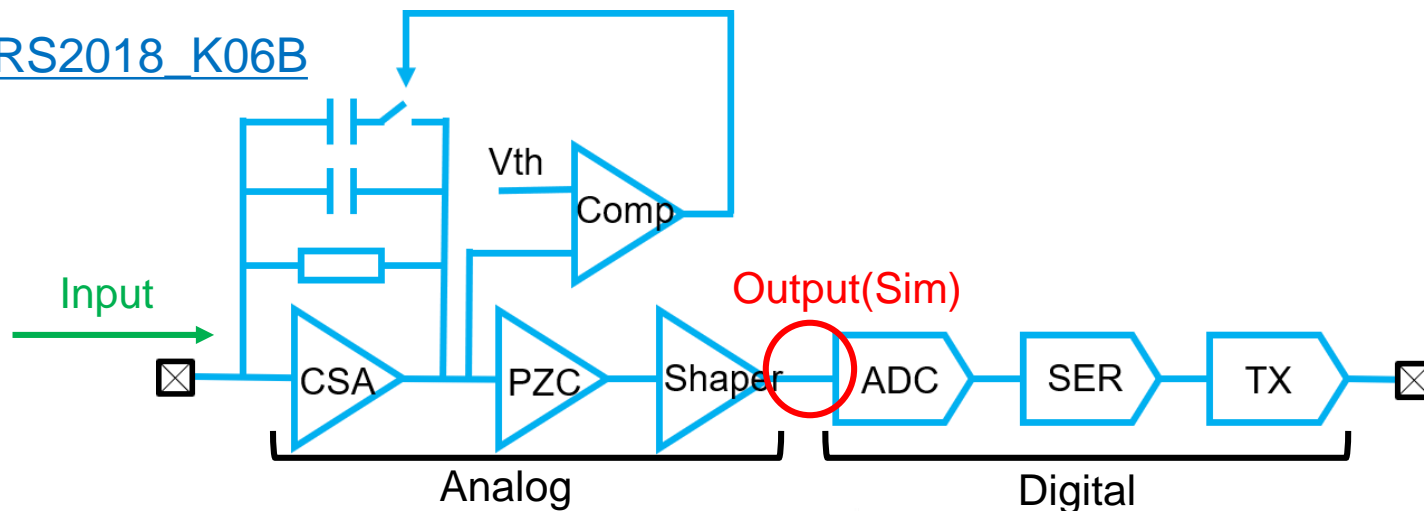


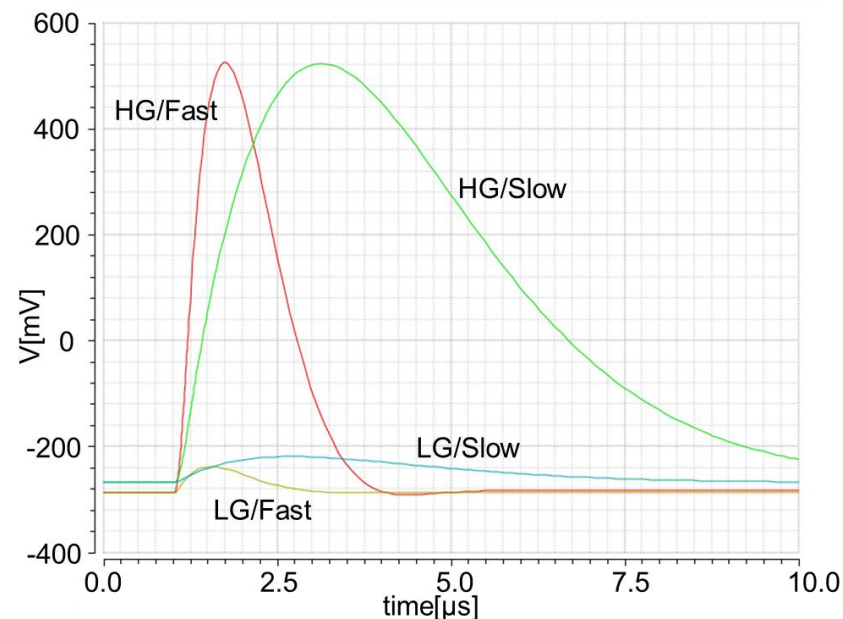
図 アナログ部シミュレーション用テストベンチ

ASIC特性評価

LTARS2018_K06B



入力電圧正,負それぞれで、HG/LG, Fast/Slowを切り替えた時のダイナミックレンジ、コンバージョンゲイン、ノイズについて評価した。
(8通りの結果が出てくる)

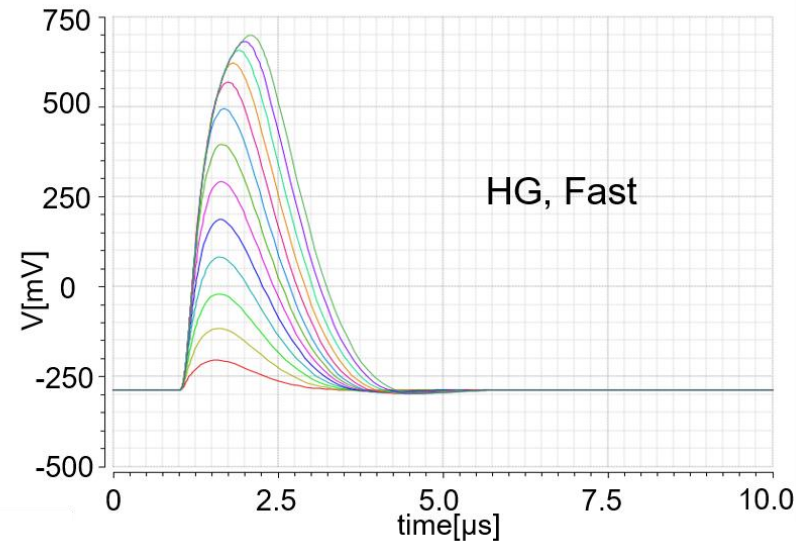


入力電荷80 fCにおけるHG/LG, Fast/Slow切替時の出力波形

コンバージョンゲイン、ダイナミックレンジ評価方法

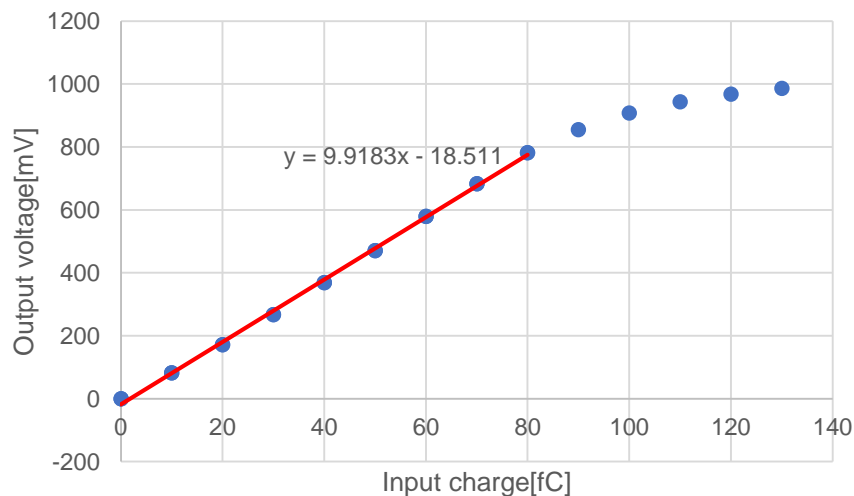
評価方法

- 入力電荷と出力電圧波高値をプロット。
- HG時±0~130 fC(10 fC刻み)
- LG時±0~2600 fC(200 fC刻み)

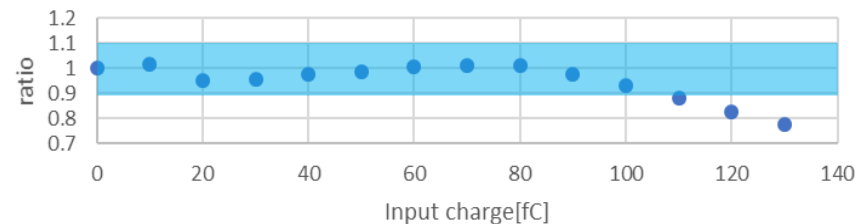


入力電荷0~130 fC(10 fC刻み)時の出力波形

Gain curve(HG/Fast)



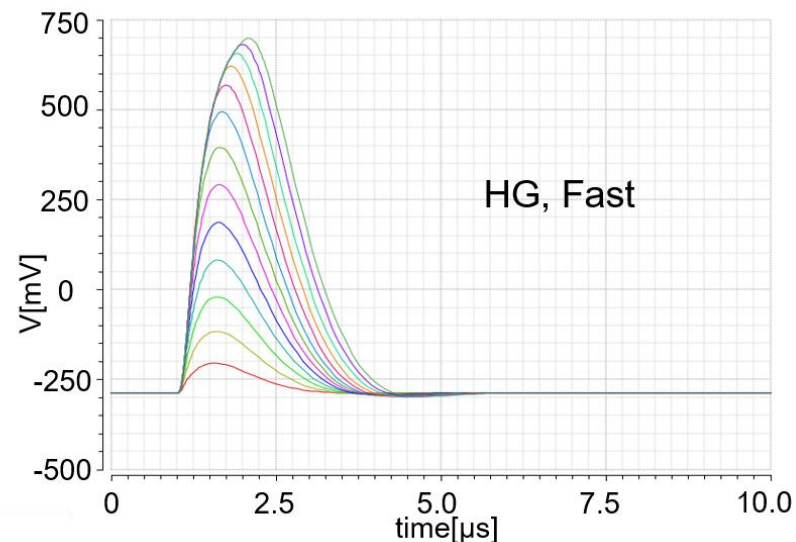
ratio(pHF)



コンバージョンゲイン、ダイナミックレンジ評価方法

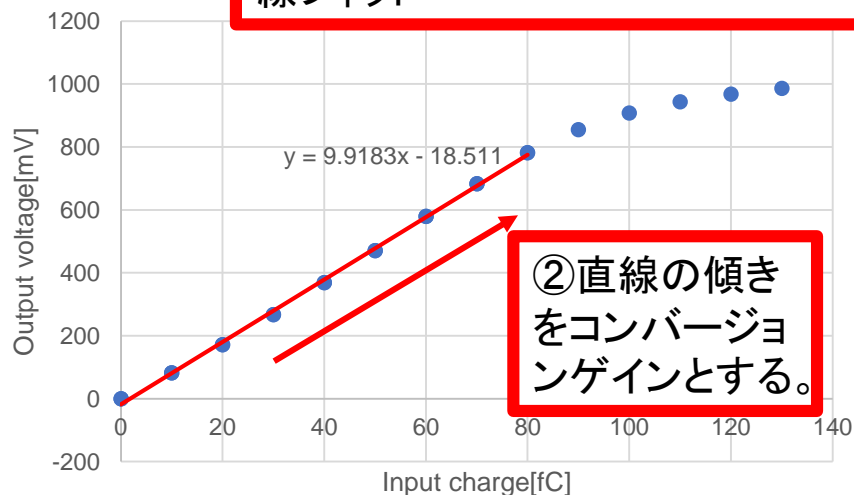
評価方法

- 入力電荷と出力電圧波高値をプロット。
- HG時±0~130 fC(10 fC刻み)
- LG時±0~2600 fC(200 fC刻み)



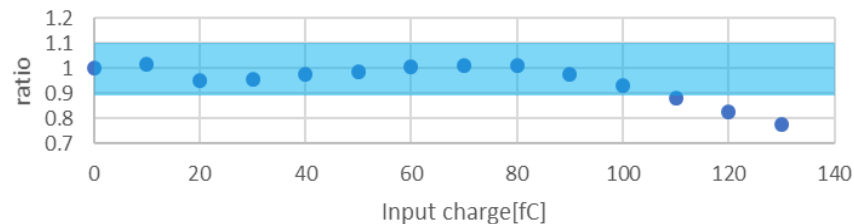
入力電荷0~130 fC(10 fC刻み)時の出力波形

①HG時は、入力電荷0~±80 fC (LG時は、0~±1200 fC)選択し直線フィット



②直線の傾きをコンバージョンゲインとする。

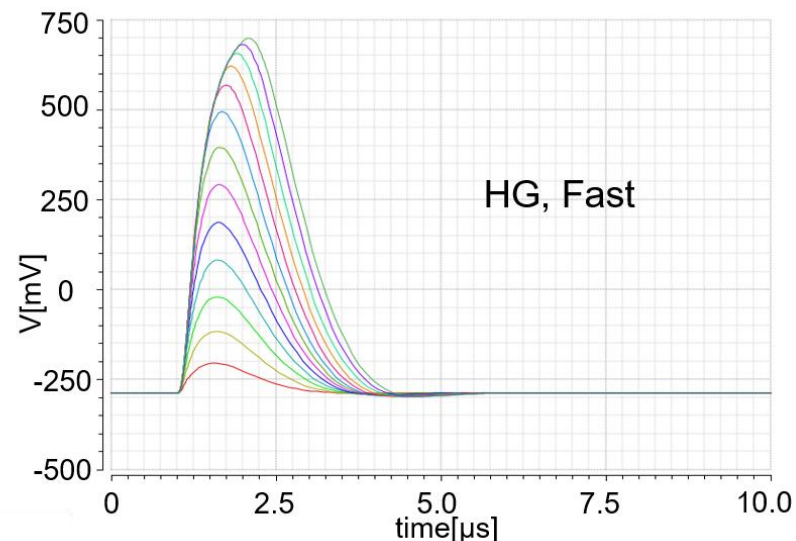
ratio(pHF)



コンバージョンゲイン、ダイナミックレンジ評価方法

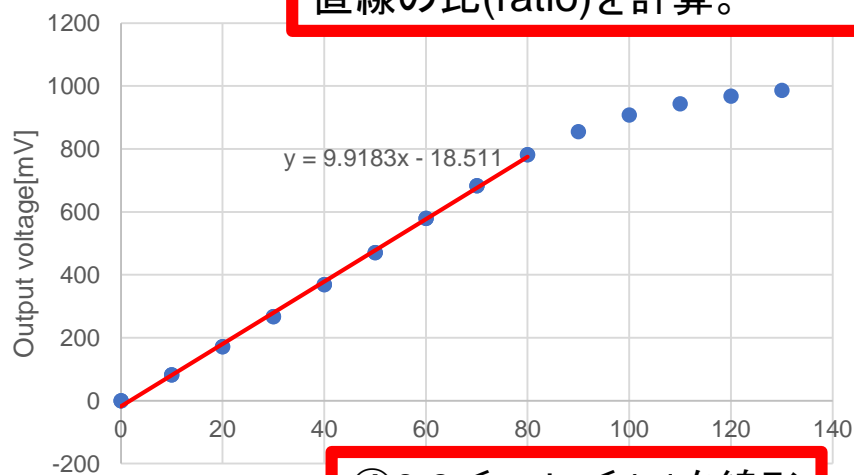
評価方法

- 入力電荷と出力電圧波高値をプロット。
- HG時±0~130 fC(10 fC刻み)
- LG時±0~2600 fC(200 fC刻み)



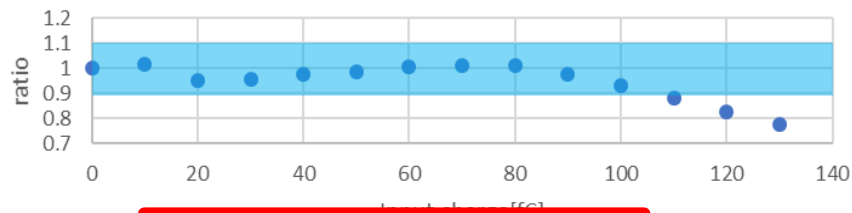
入力電荷0~130 fC(10 fC刻み)時の出力波形

③データ点とフィットによって得た直線の比(ratio)を計算。



④ $0.9 \leq \text{ratio} \leq 1.1$ を線形領域(青枠)と定義。

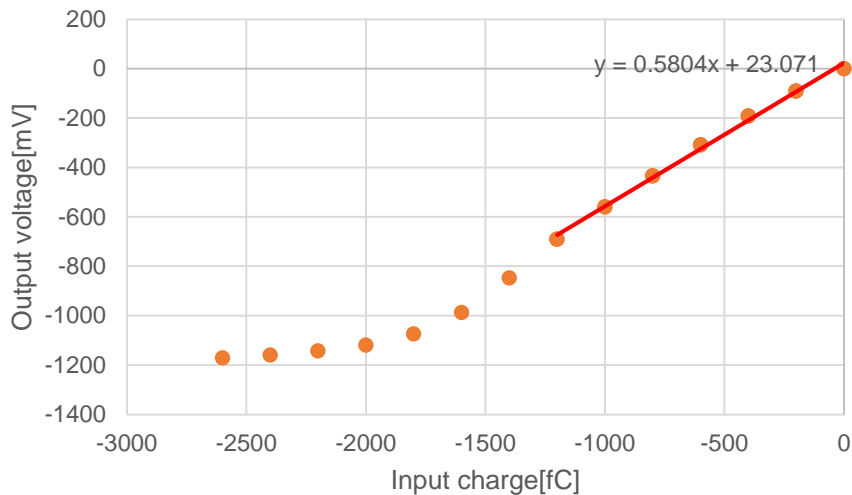
ratio(pHF)



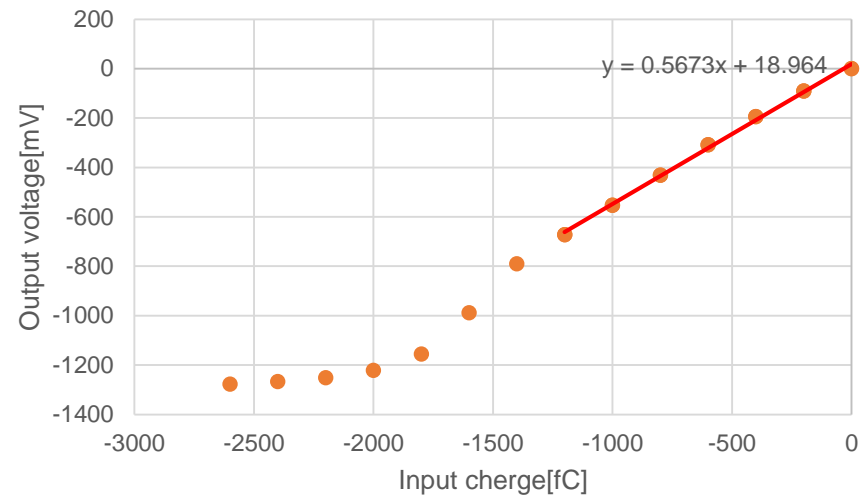
⑤青枠内に入るプロットをダイナミックレンジとする。

レンジ、ゲイン (負極性, LG@Cdet=300 pF)

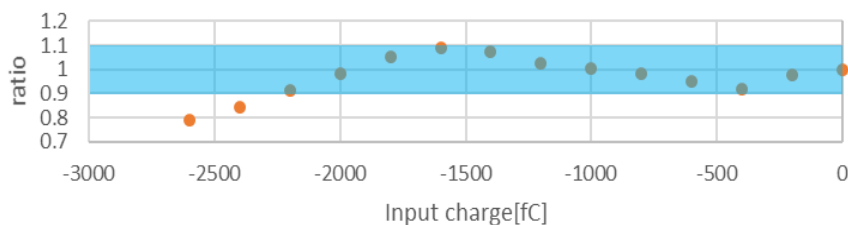
Gain curve(LG/Fast)



Gain curve(LG/Slow)

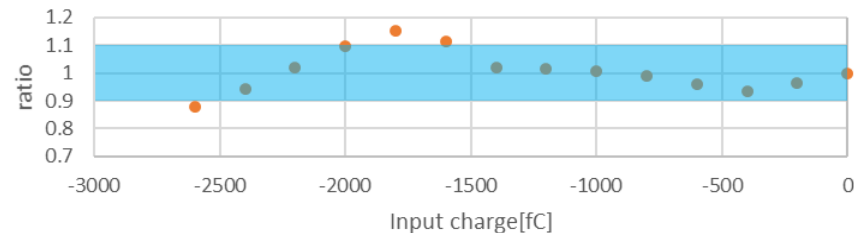


ratio(nLF)



- コンバージョンゲイン 0.58 mV/fC
- ダイナミックレンジ -2200~0 fC

ratio(nLS)

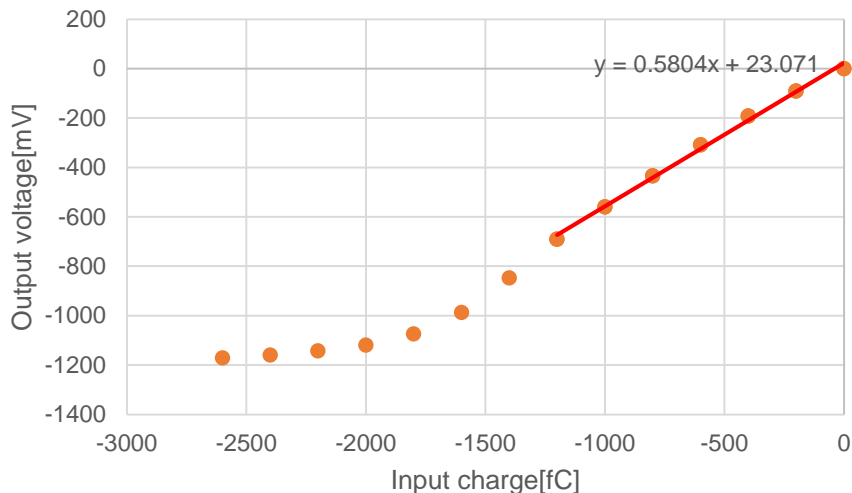


- コンバージョンゲイン 0.57 mV/fC
- ダイナミックレンジ -1400~0 fC

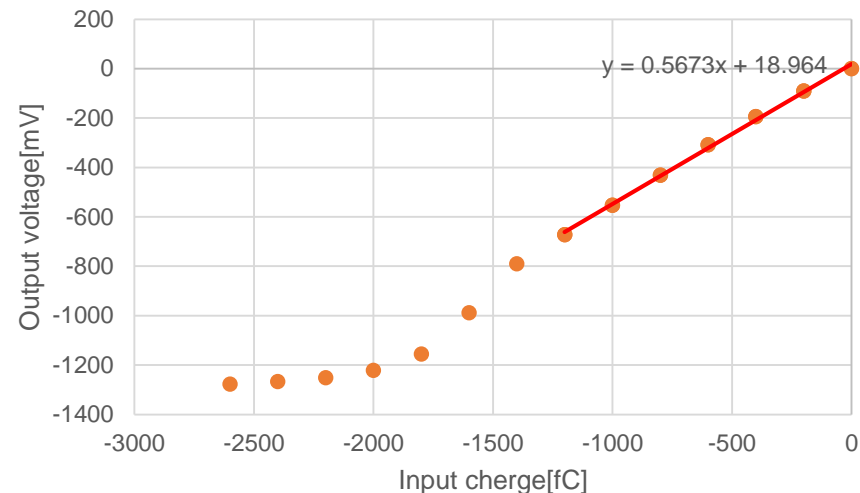
※目標は-1600 fC

レンジ、ゲイン (負極性, LG@Cdet=300 pF)

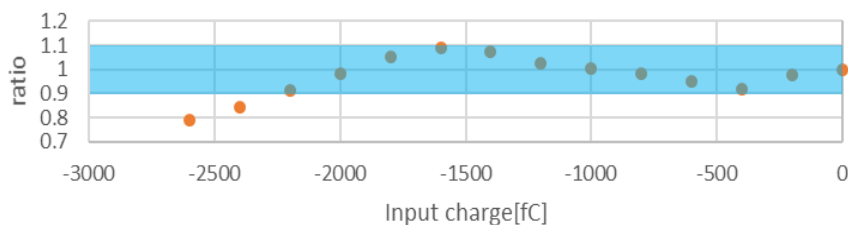
Gain curve(LG/Fast)



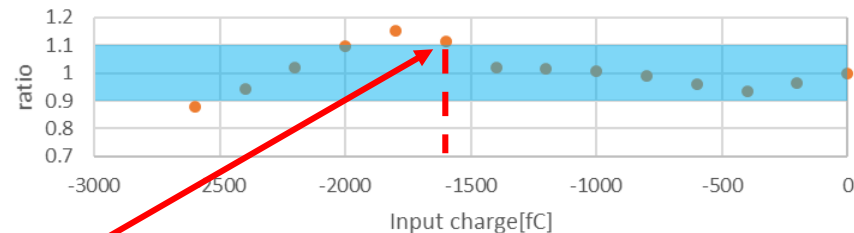
Gain curve(LG/Slow)



ratio(nLF)



ratio(nLS)

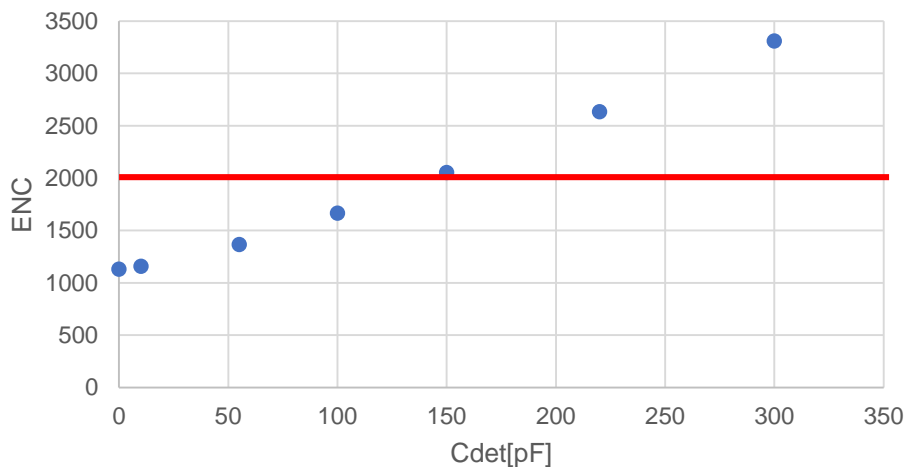


わずかに、ratio=1.1を超えている。これは、オフセットの電圧等のパラメータを調整することで、要請範囲内に収められる。(実際にオフセットを変更したシミュレーションも行ったが、今回は割愛)また、フィッティングに使うプロットの選択によっても変化すると考えられる。

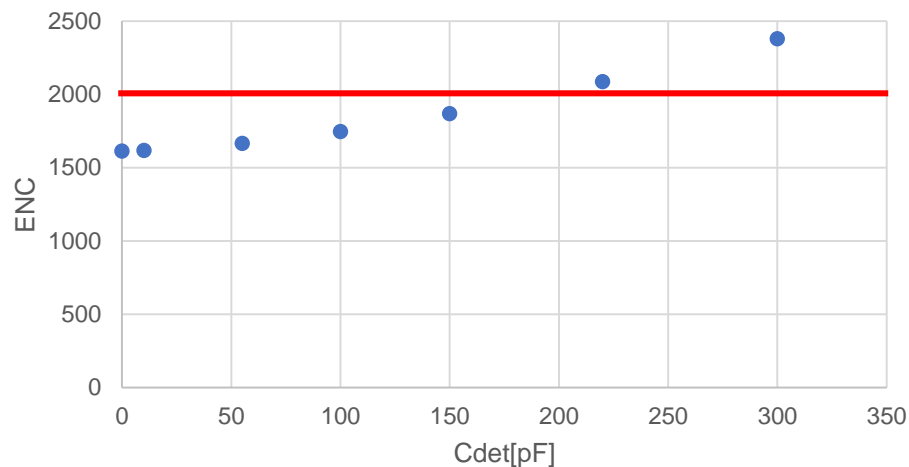
ノイズ特性 (+)

- 赤線、赤字はENC要請値
- HG時は、Cdet増加に従いノイズ量は要請値を超えてくる
- LG時は、ノイズ量は要請値以下に抑えられている

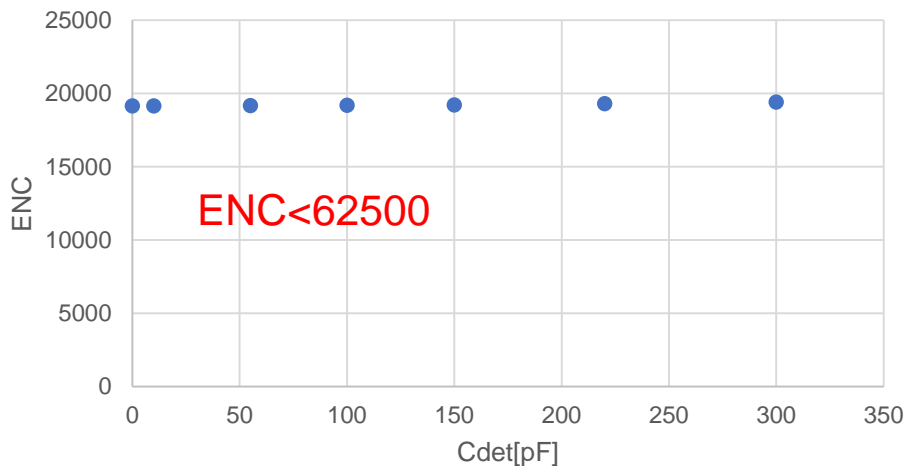
Noise@ +HG/Fast



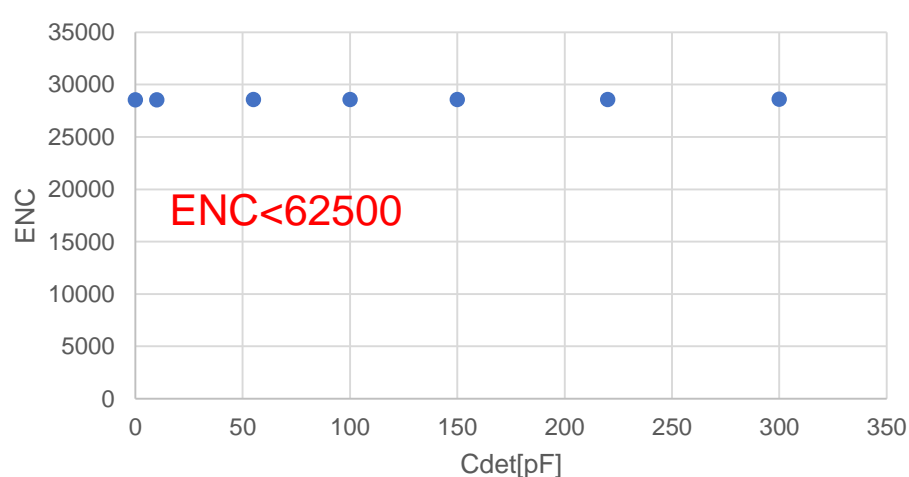
Noise@ +HG/Slow



Noise@ +LG/Fast



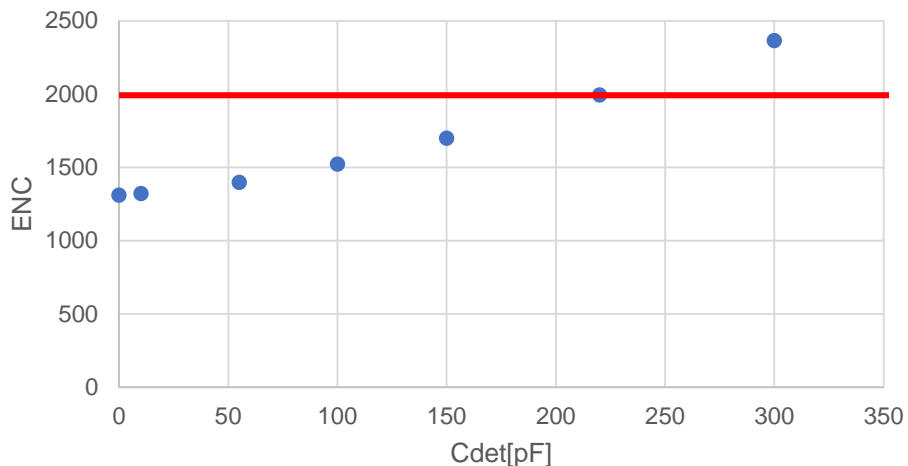
Noise@ +LG/Slow



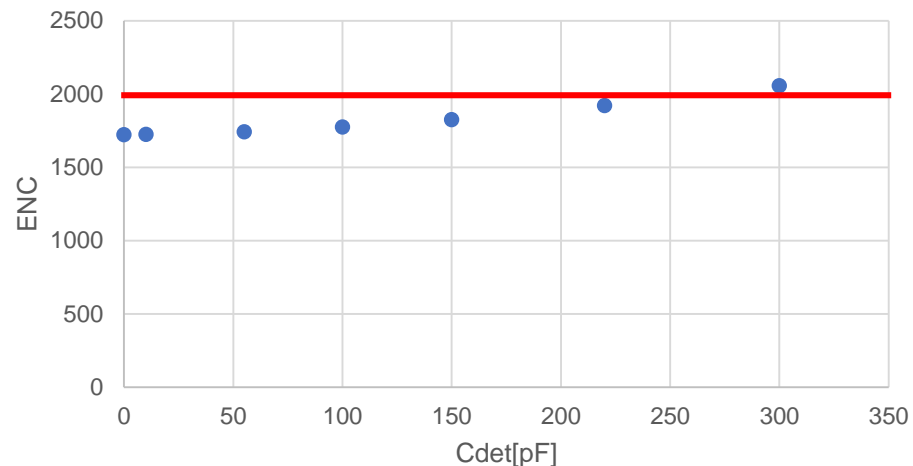
ノイズ特性 (一)

- 赤線、赤字はENC要請値
- HG時は、Cdet増加に従いノイズ量は要請値を超えてくる
- LG時は、ノイズ量は要請値以下に抑えられている

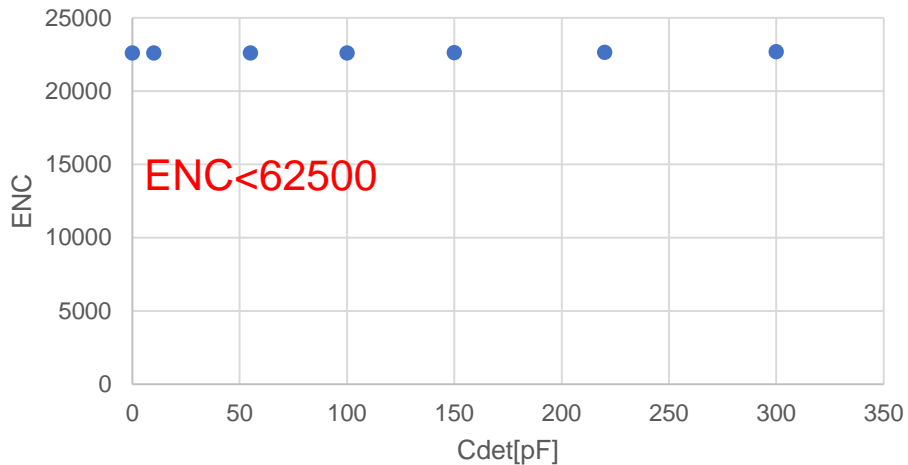
Noise@ -HG/Fast



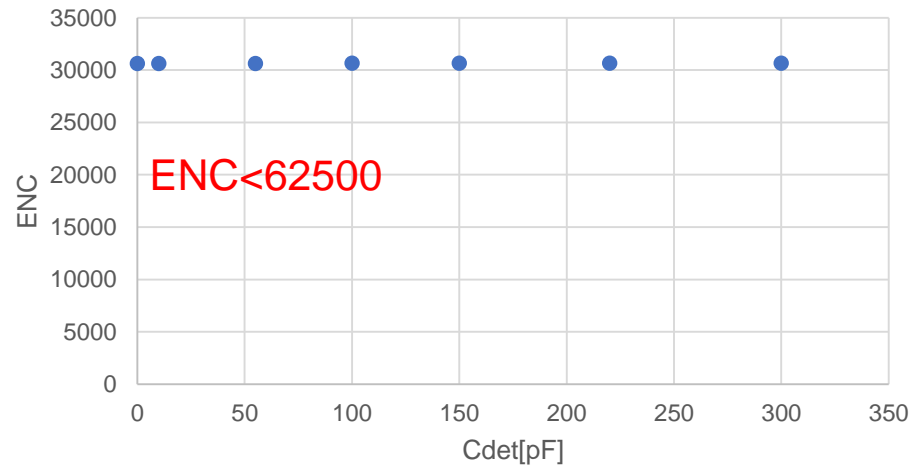
Noise@ -HG/Slow



Noise@ -LG/Fast



Noise@ -LG/Slow



SNについて

DUNE 10kton液体アルゴン検出器での信号読み出しを仮定した時...

信号減衰、GEMによる増幅を考慮すると、

- 1 chあたり3 fC (=18750electron)の電荷量がエレクトロニクスに入る

※LAr不純物濃度100 ppt(自由電子寿命3 ms)、GEM増幅率20倍を仮定。

表 LTARS2018_K06BのSN一覧(HG時)

	+HG/Fast	-HG/Fast
ENC	3310	2364
S/N	5.7	7.9

※液体アルゴンTPCを仮定しているため、Slowの検討は除いた

S/N=10達成のためにはさらなる検討が必要

ASIC性能まとめ

要請値とシミュレーション値(正極性@Cdet=300 pF)

	要請値		Sim(K06A)		Sim(K06B)	
	HG	LG	HG	LG	HG	LG
時定数[μ s]	1(Fast)/ 4(Slow)	1(Fast)/ 4(Slow)	3.7/7.7	3.7/7.7	1.06/3.62	0.69/2.15
ノイズ(ENC)	<2000	<62500	2015/ 1635	5409/ 5557	3310/ 2380	19407/ 28614
コンバージョンゲイン [mV/fC]	10	0.5	9.45/8.9	0.5/0.47	9.92/9.57	0.61/0.59
ダイナミックレンジ[fC]	80	1600	80/80	2200/ 2200	100/100	1600/ 1400

<正極性>

- LG時には、K06A, Bともに、要請値をクリア。
- HG時は、ほとんどの条件において要請値を超えてしまう。

<負極性>

- 負極性も、ノイズについて同様

要請値とシミュレーション値(負極性@Cdet=300 pF)

	要請値		Sim(K06A)		Sim(K06B)	
	HG	LG	HG	LG	HG	LG
時定数[μ s]	1(Fast)/ 4(Slow)	1(Fast)/ 4(Slow)	3.5/7.1	3.5/7.1	0.79/2.15	0.79/2.56
ノイズ(ENC)	<2000	<62500	2157/ 1865	4847/ 5217	2364/ 2055	22668/ 30650
コンバージョンゲイン [mV/fC]	10	0.5	10.07/ 9.56	0.57/0.51	12.59/ 10.36	0.58/0.57
ダイナミックレンジ[fC]	-80	-1600	-80/-80	-1800/ -1800	-100/ -80	-2200/ -1400

<ダイナミックレンジ>

- 要請値を満たさない場合は、シミュレーション時のパラメータを設定しなおすことで調整可能

まとめ

大型液体アルゴンTPC実用化に向けた信号読み出しエレクトロニクスの開発

新たに設計したエレクトロニクスのシミュレーションによる特性評価



ダイナミックレンジ、コンバージョンゲインにおいて、要請値を満たす結果が得られた。しかし、ノイズについては要請値を満たしていない。今後は、ノイズ性能に関する検討も含め、本シミュレーション結果を元に、ASICの開発を進めていく。

今後の予定

現在、ASICの特性評価用ボードを作成中であり、今後は、シミュレーションで得られた、ASICの性能見積もり結果と、特性評価用ボードを用いた実験結果との比較を行っていく。

Back up

LTARS2018 K06

<特徴>

- 180 nm CMOS プロセス
- 16 ch
- CSA + PZC&shaper + ADC + LVDS の構造

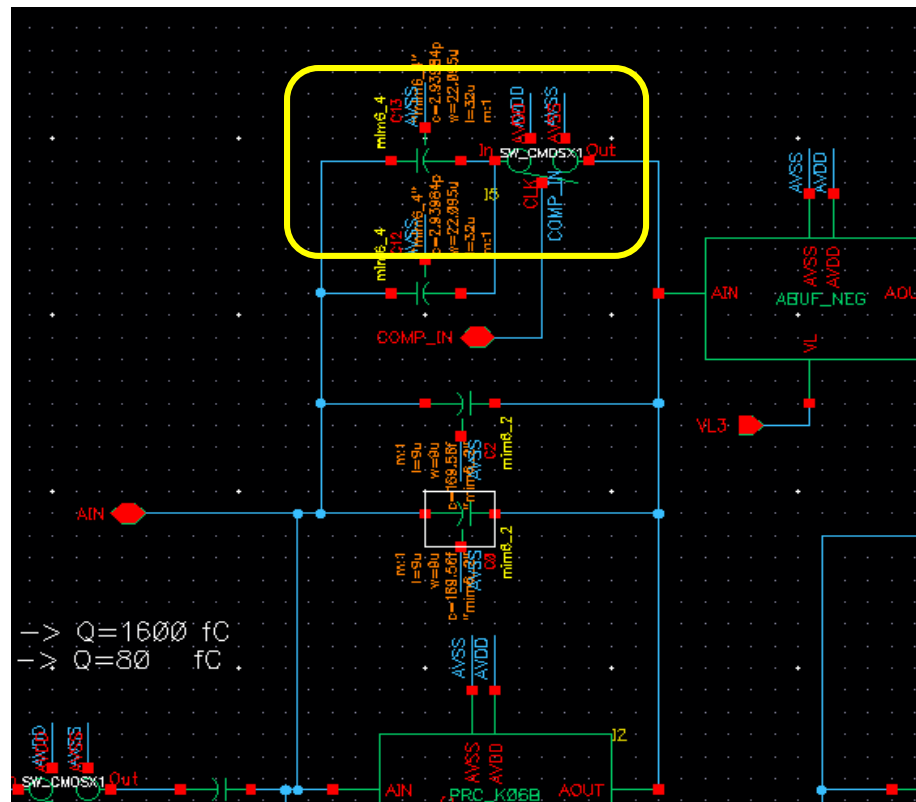
CSA ... 電荷/電圧変換
shaper ... 時定数をキャンセル
ADC ... アナログ/デジタル変換
LVDS ... 差動信号方式

アナログ デジタル

- CSAのゲインを切り替えられる
 - CSA'sゲイン $\propto 1/C_f$
 - SW→ON ... ゲイン小
 - SW→OFF ... ゲイン大
 - 約20倍ゲインが違う

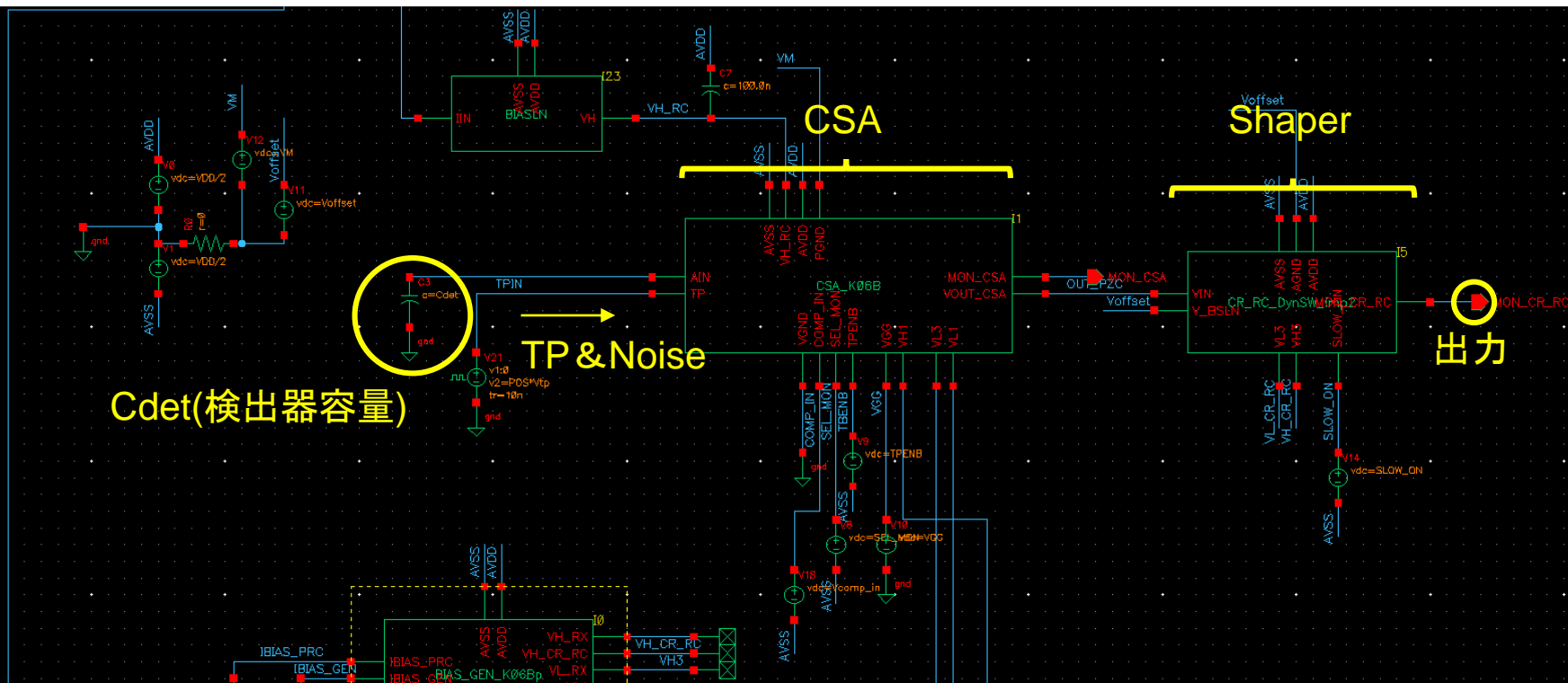
<仕様>

parameter	Value	
Cdet	300 pF	
parameter	Narrow range	Wide range
Noise(ENC)	2000以下	6.25×10^4
gain	10 mV/fC	0.5 mV/fC
Dynamic range	80 fC	1600 fC



CSAの一部回路構成

シミュレーション用構成回路



- 入力電源にノイズをのせてシミュレートする(ノイズの設定は次スライド)
- <回路変更点>
- 負極性入力時、出力波形がおかしい(ピーキングタイムが変化する、ゲインが2倍程度低い等)現象を確認
- CSAに与えるバイアス回路の不具合→修正した(回路図の変更はない)

バイアス回路：回路素子に一定の電圧や電流をあらかじめ与える回路。動作点の最適化を目的としている

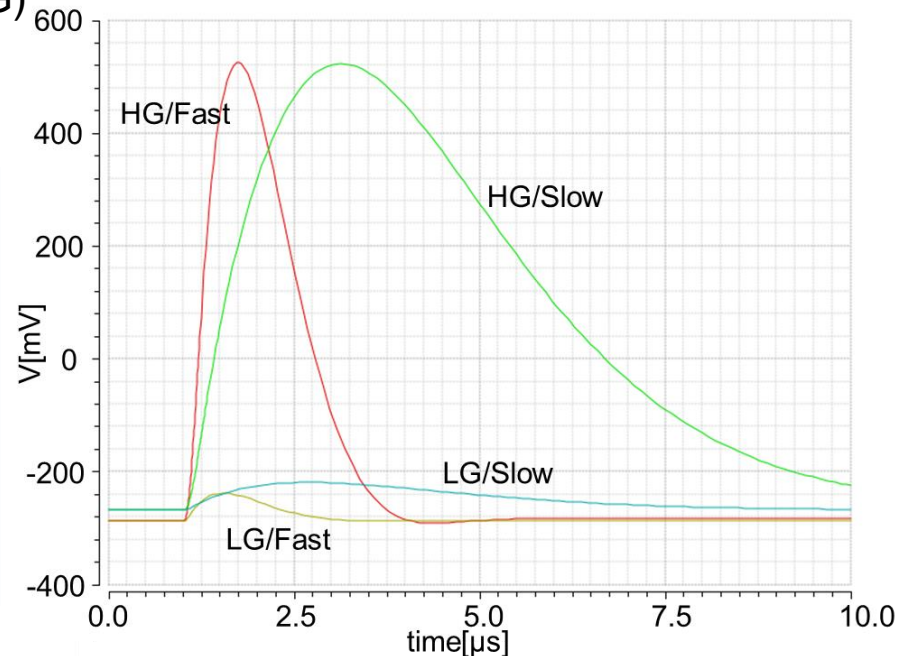
エレクトロニクスへのTPCからの要請

- ゲイン切替 : High gain(以下HG), Low gain(以下LG)
- 時定数切替 : Fast, Slow

TPCからの要請値

parameter	High gain(HG)	Low gain(LG)
検出器容量(Cdet)	300 pF	
時定数	4 μ s(Slow), 1 μ s(Fast)	
ノイズ(ENC)	<2000	<62500
コンバージョンゲイン	10 mV/fC	0.5 mV/fC
ダイナミックレンジ	± 80 fC	± 1600 fC
Power	<50 mW	

※黄色部分がLAR-TPCからの要請値



入力電荷80 fCにおけるHG/LG, Fast/Slow切替時の出力波形

回路シミュレーションより、アナログ部に電荷を入力したときの、アナログ部出力電圧波形をモニターし、HG/LG, Fast/Slowを切り替えた時のダイナミックレンジ、コンバージョンゲイン、ノイズについて評価した

ノイズ評価方法

評価方法

- CSAに、電荷60 fCを入力
- ノイズ量はENCで算出
- 検出器容量(Cdet)=0, 10, 55, 100, 150, 220, 300[pF]と変え、HG/LG, Fast/Slowを比較
- 実際の検出器は、Cdet=300 pF想定

検出器容量：

ケーブルなどに発生する浮遊容量。ノイズ発生原因のひとつ。ノイズの大きさは、検出器容量(Cdet)依存性があり、検出器容量の増加に伴って、ノイズも増加する。

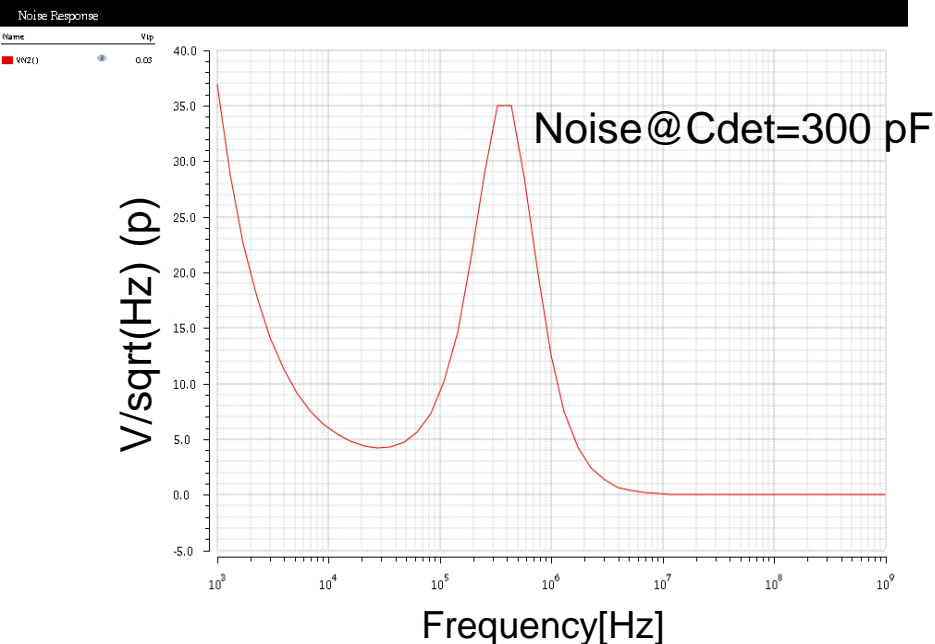
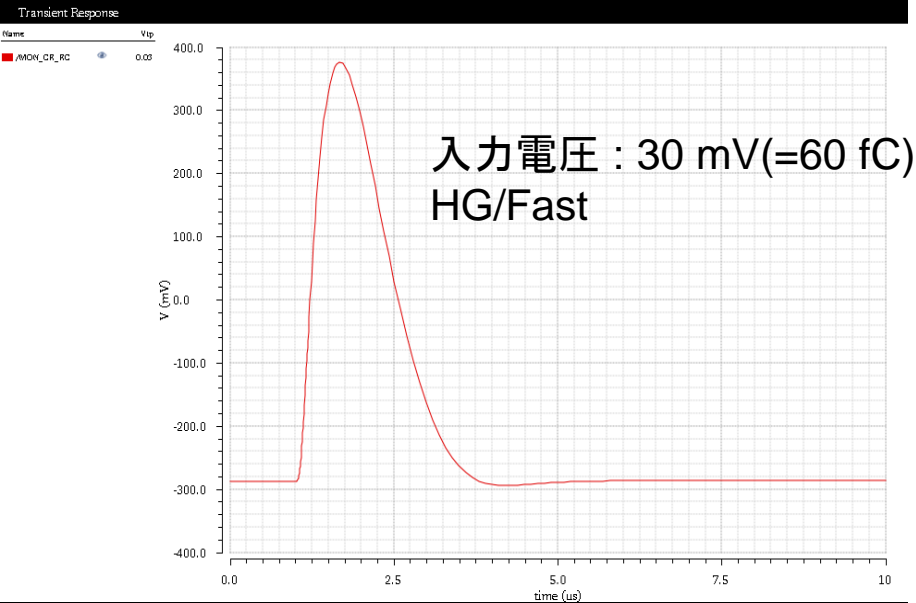
ENC計算式

ENC : Equivalent Noise charge (入力等価雑音電子数)

$$ENC[electron] = \frac{\sigma[mV]}{conversion\ gain[mV/fC] \times 1.6 \times 10^{-4}[fC]}$$

- σ ・・・ノイズ電圧
- コンバージョンゲイン ... 出力電圧/入力電荷

ノイズ設定



- ノイズの大きさは、検出器容量依存性があり、検出器容量の増加に伴って、ノイズも増加する
- ノイズ量はENC : Equivalent Noise charge (入力等価雑音電子数)で評価する
- ノイズ密度 : $V/\sqrt{\text{Hz}}$
- 左下プロットを積分して、ノイズ量を電圧[V]で導出する

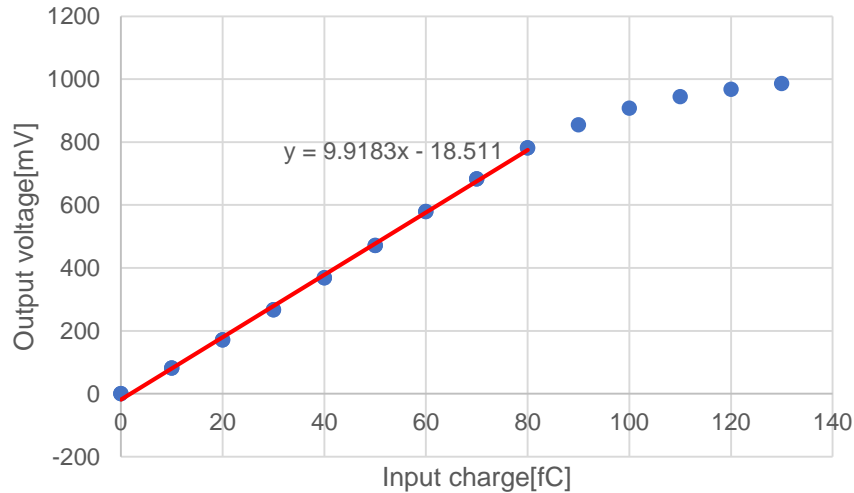
$$ENC[\text{electron}] = \frac{\sigma[\text{mV}]}{\text{conversion gain}[\text{mV/fC}] \times 1.6 \times 10^{-4}[\text{fC}]}$$

- σ ...標準偏差(今回は積分して得られたノイズ電圧)
- コンバージョンゲイン...出力電圧を入力電荷で割ったもの。検出器容量依存性がある。
- 検出器容量...読み出しパッドから信号増幅回路までをつなぐケーブルなどに発生する浮遊容量のこと。ノイズ発生原因のひとつ。

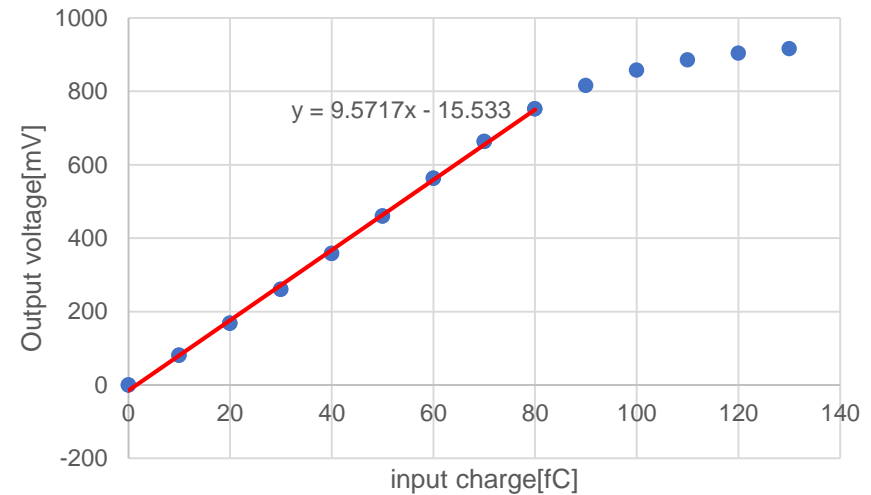
Cdet=0, 10, 55, 100, 150, 220, 300[pF]と変え、HG/LG, Slow/Fastを比較

レンジ、ゲイン (正極性, HG@Cdet=300 pF)

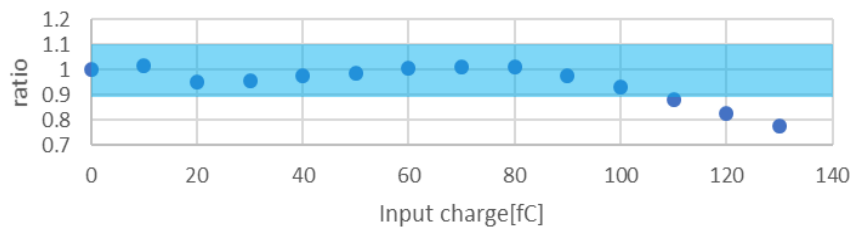
Gain curve(HG/Fast)



Gain curve(HG/Slow)

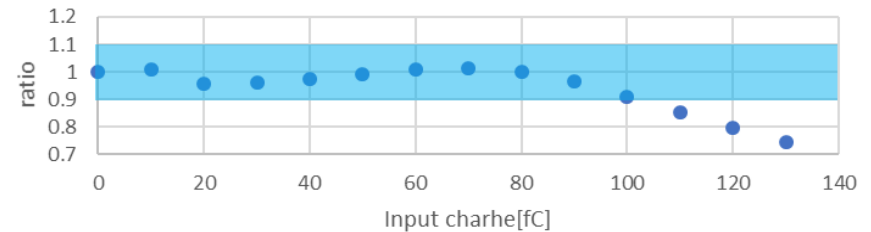


ratio(pHF)



- コンバージョンゲイン 9.92 mV/fC
- ダイナミックレンジ 0~100 fC

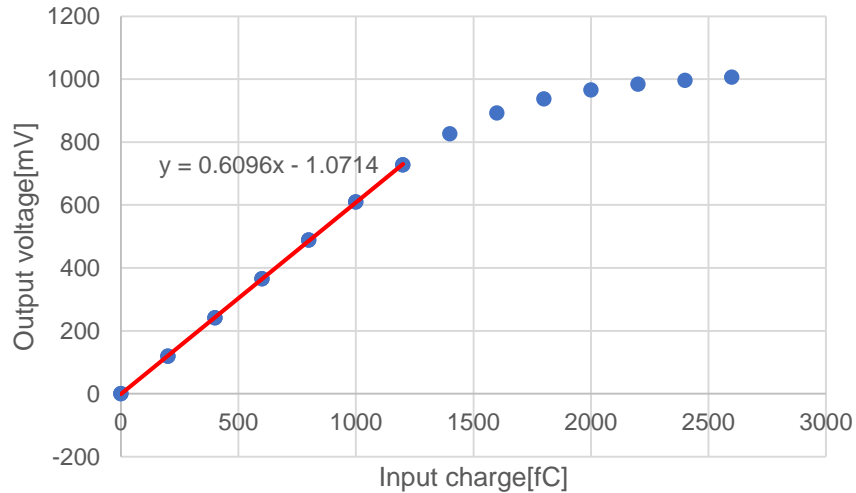
ratio(pHS)



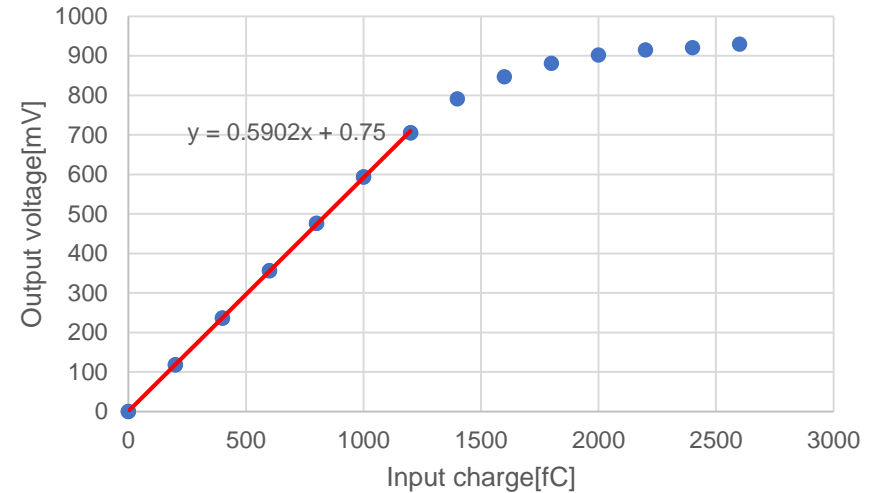
- コンバージョンゲイン 9.57 mV/fC
- ダイナミックレンジ 0~100 fC

レンジ、ゲイン (正極性, LG@Cdet=300 pF)

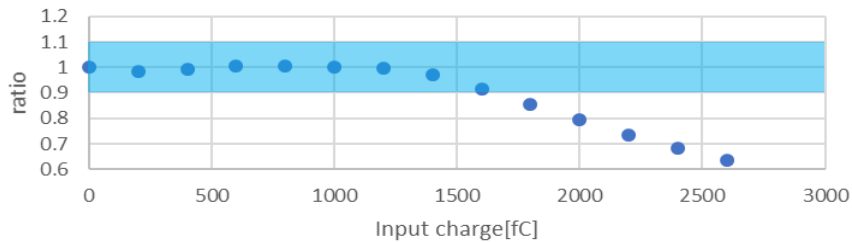
Gain curve(LG/Fast)



Gain curve(LG/Slow)

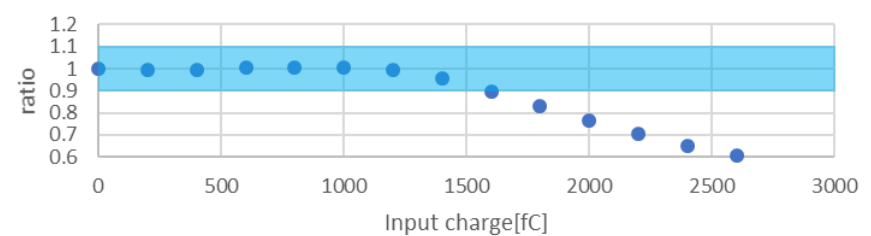


ratio(pLF)



- コンバージョンゲイン 0.61 mV/fC
- ダイナミックレンジ 0~1600 fC

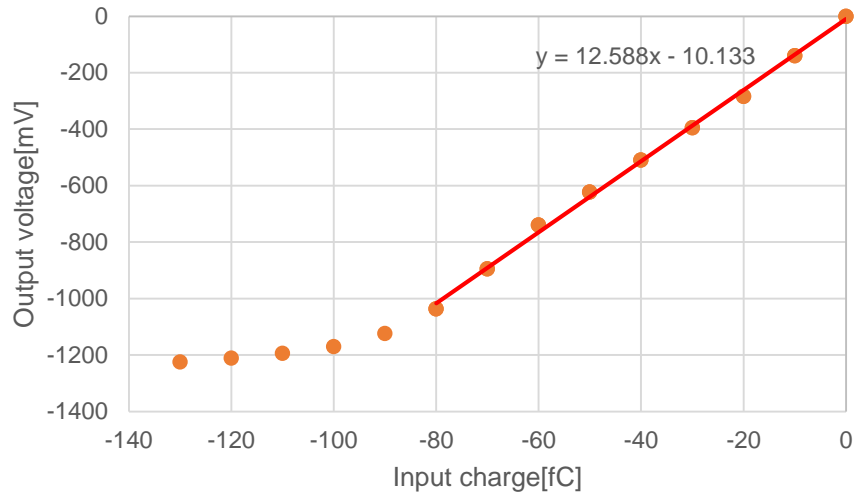
ratio(pLS)



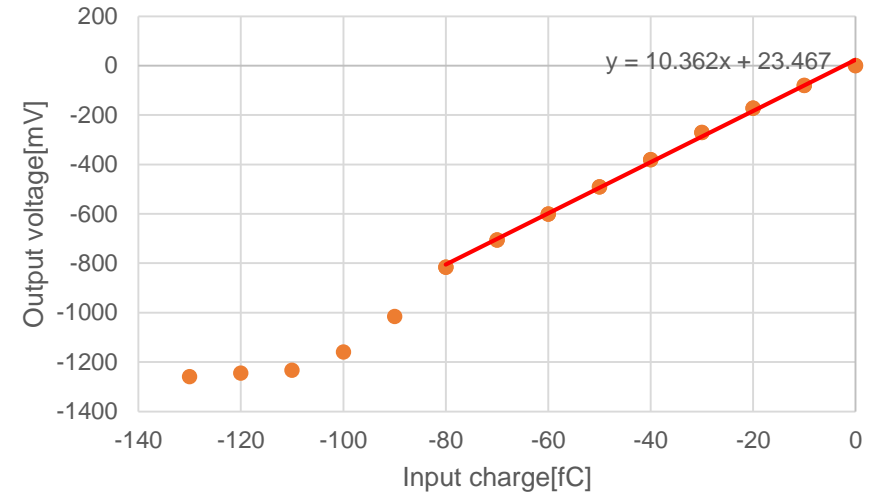
- コンバージョンゲイン 0.59 mV/fC
- ダイナミックレンジ 0~1400 fC

レンジ、ゲイン (負極性, HG@Cdet=300 pF)

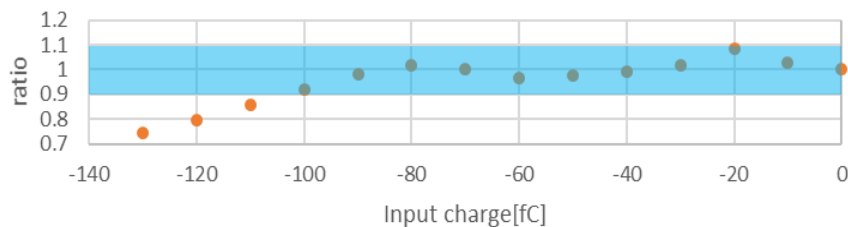
Gain curve(HG/Fast)



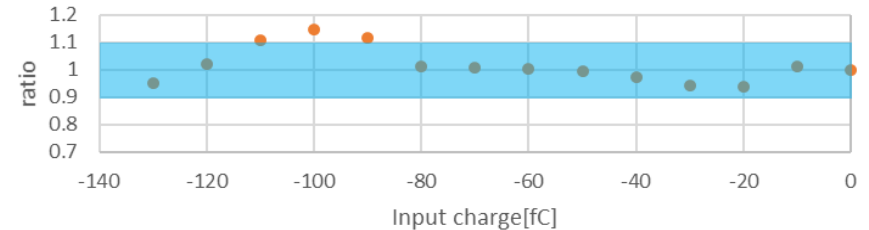
Gain curve(HG/Slow)



ratio(nHF)



ratio(nHS)

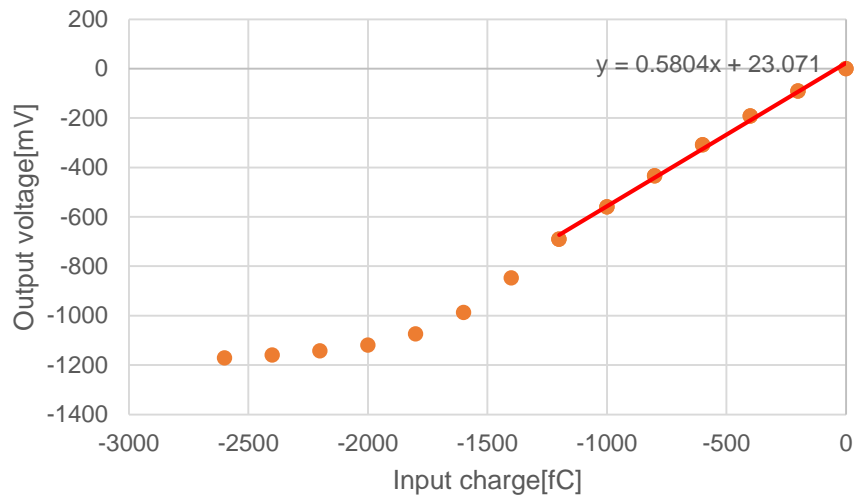


- コンバージョンゲイン 12.59 mV/fC
- ダイナミックレンジ -100~0 fC

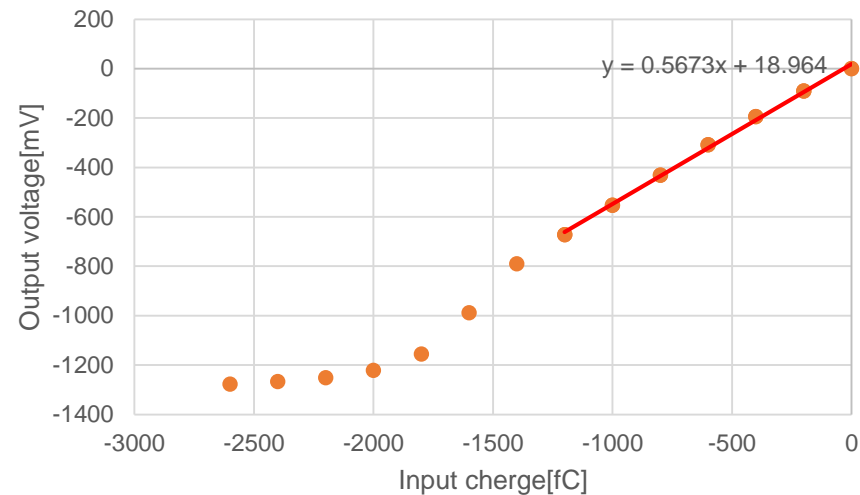
- コンバージョンゲイン 10.36 mV/fC
- ダイナミックレンジ -80~0 fC

レンジ、ゲイン (負極性, LG@Cdet=300 pF)

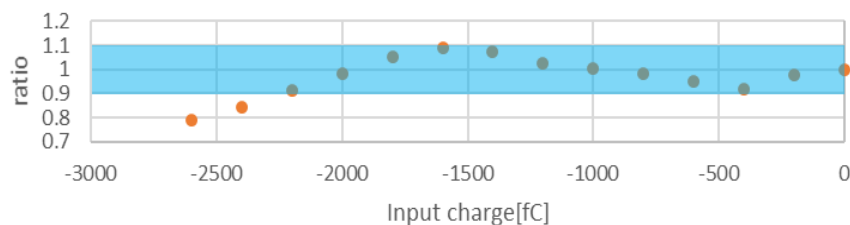
Gain curve(LG/Fast)



Gain curve(LG/Slow)

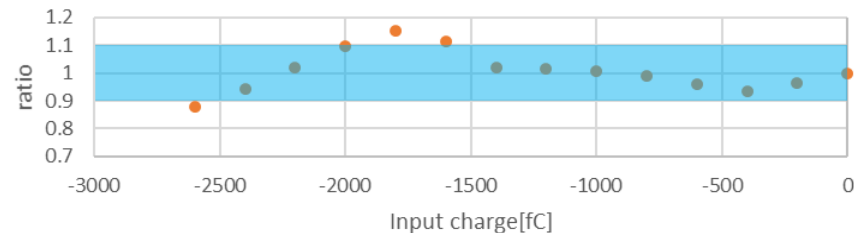


ratio(nLF)



- コンバージョンゲイン 0.58 mV/fC
- ダイナミックレンジ -2200~0 fC

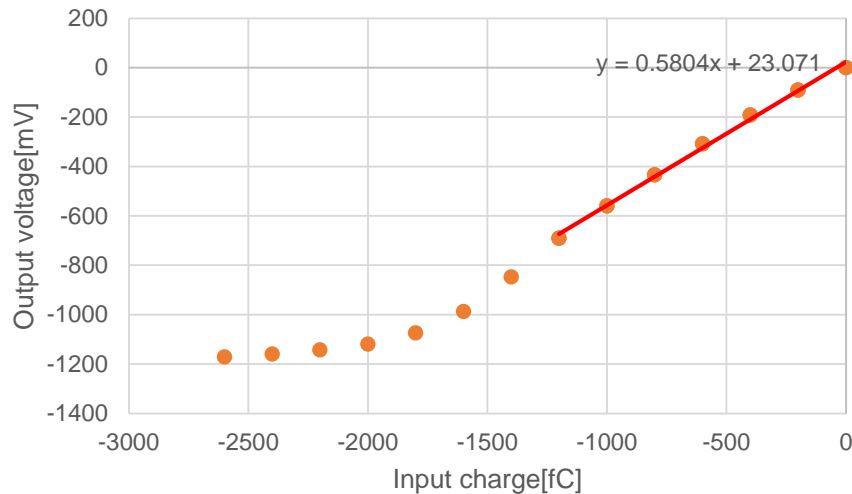
ratio(nLS)



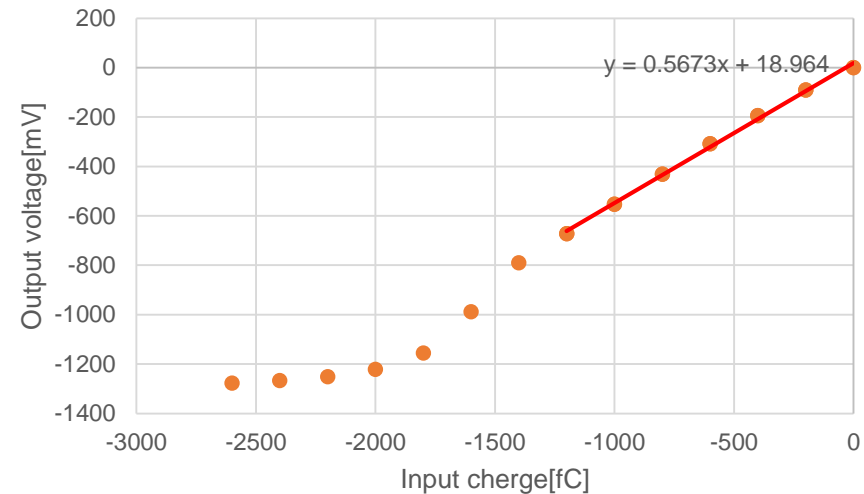
- コンバージョンゲイン 0.57 mV/fC
- ダイナミックレンジ **-1400**~0 fC

レンジ、ゲイン (負極性, LG@Cdet=300 pF)

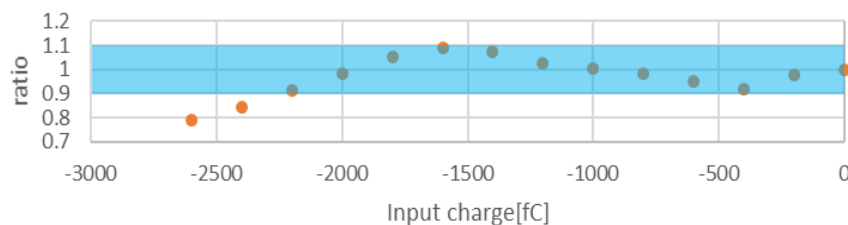
Gain curve(LG/Fast)



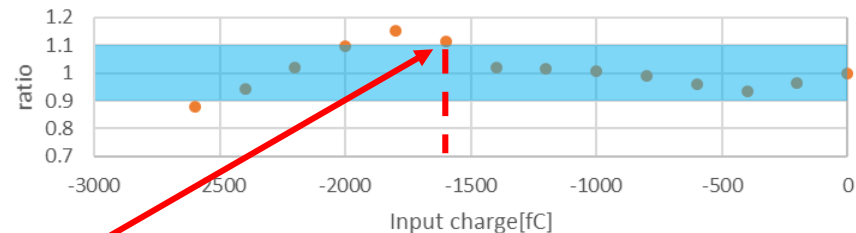
Gain curve(LG/Slow)



ratio(nLF)



ratio(nLS)



わずかに、ratio=1.1を超えている。これは、オフセットの電圧等のパラメータを調整することで、要請範囲内に収められると思われる。また、フィッティングに使うプロットは任意で選択しているため、取り方によっても変化すると考えられる。

SNについて

DUNE 10kton液体アルゴン検出器での信号読み出しを仮定すると...

信号減衰、GEMによる増幅を考慮すると、
エレクトロニクスに到達する最小電荷信号 = 3 fC/ch (=18750electron)

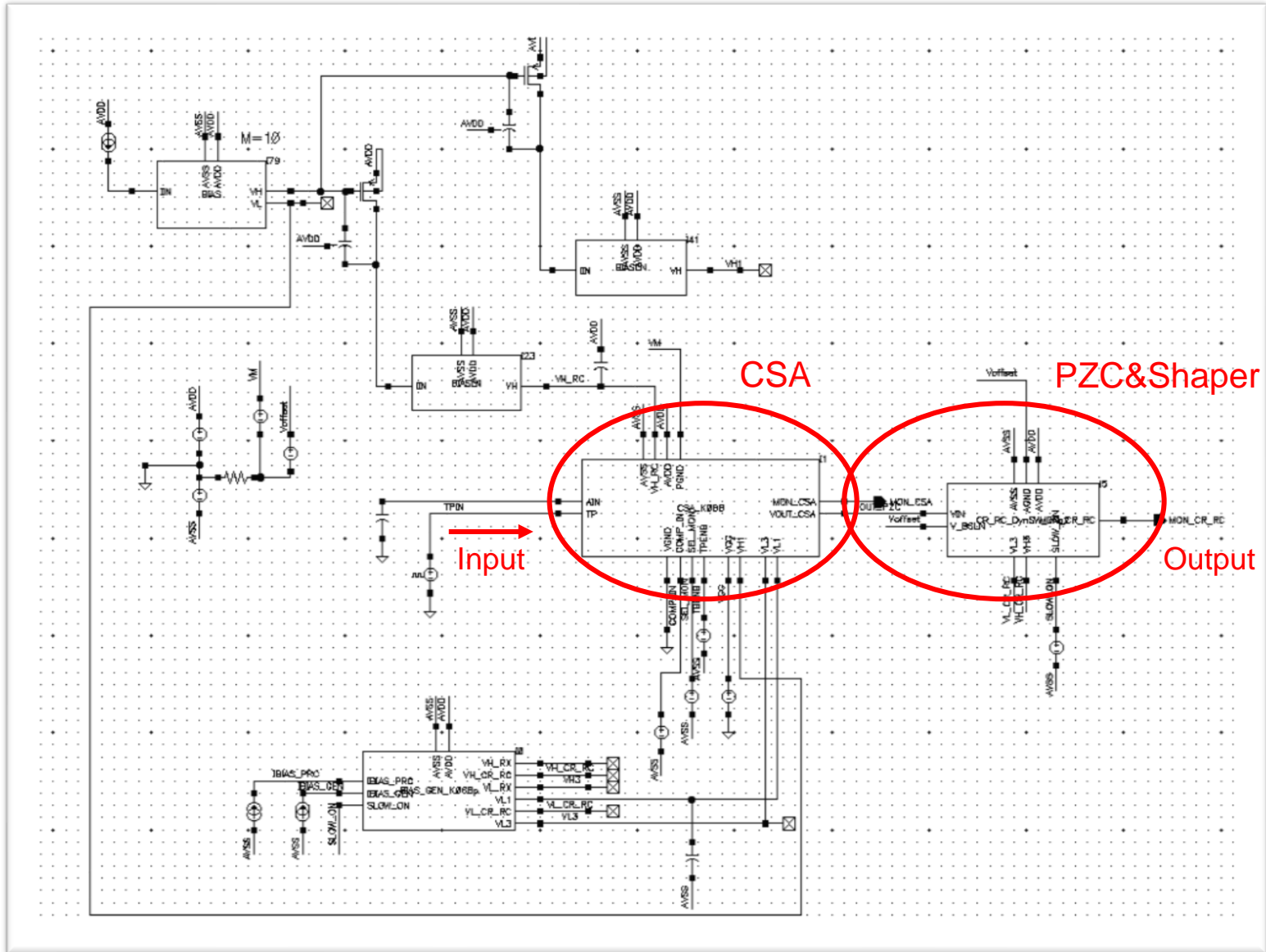
表 LTARS2018_K06B

	LTARS2014	LTARS2016_K01	LTARS2018_K06B
ENC	6000	6500	3310
S/N	3.1	4.7	5.7

1 chあたりで得る電荷信号量概算

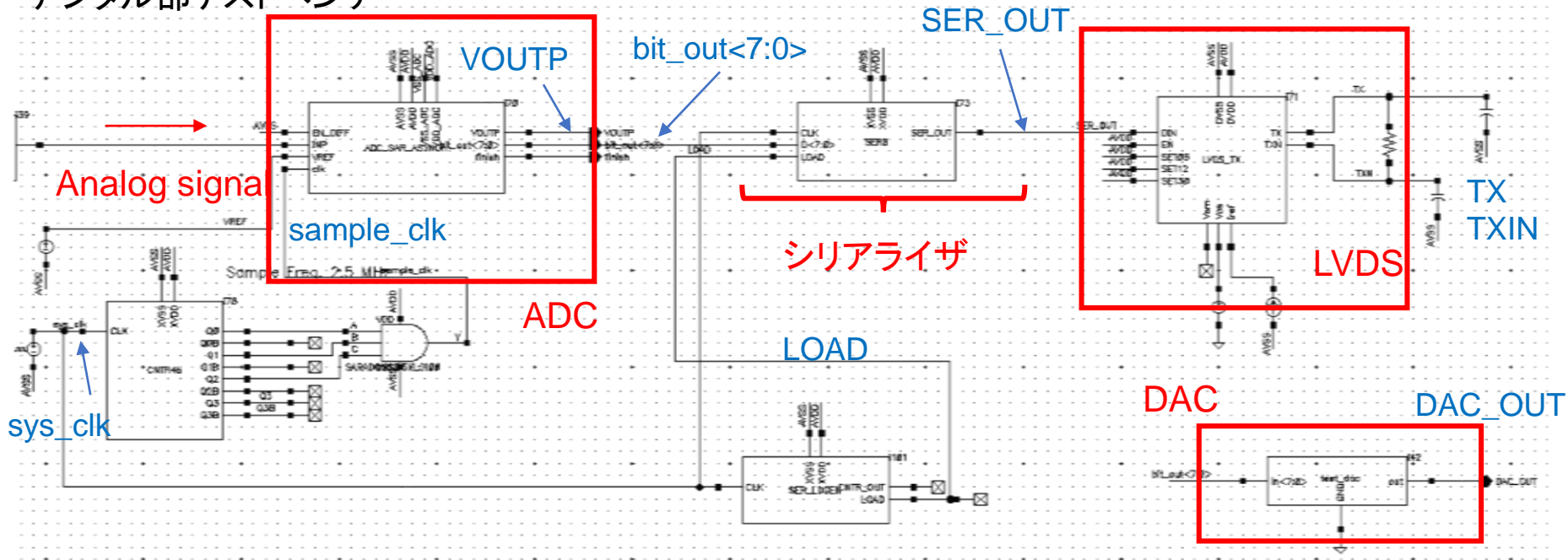
- MIPを仮定
 - 電離電子9000 e- (=1.5 fC/mm)発生
 - イオンと再結合により2/3の6000 e- (=1.0 fC/mm)
 - LAr不純物濃度100 ppt(電子寿命3 ms)を仮定して、1/10に減衰→0.1 fC/mm
※コンサバな値。エレキに対しては厳しい要求。
- GEMによる増幅(20倍を仮定)→2 fC/mm
- 信号読み出しパッドピッチが3 mm/ch→2 fC/mm × 3 mm/ch=6 fC/ch
- X,Y方向に二分され、1ch あたりに得られる電荷信号量は、3 fC/ch

アナログ部回路図



デジタル部シミュレーション

デジタル部テストベンチ



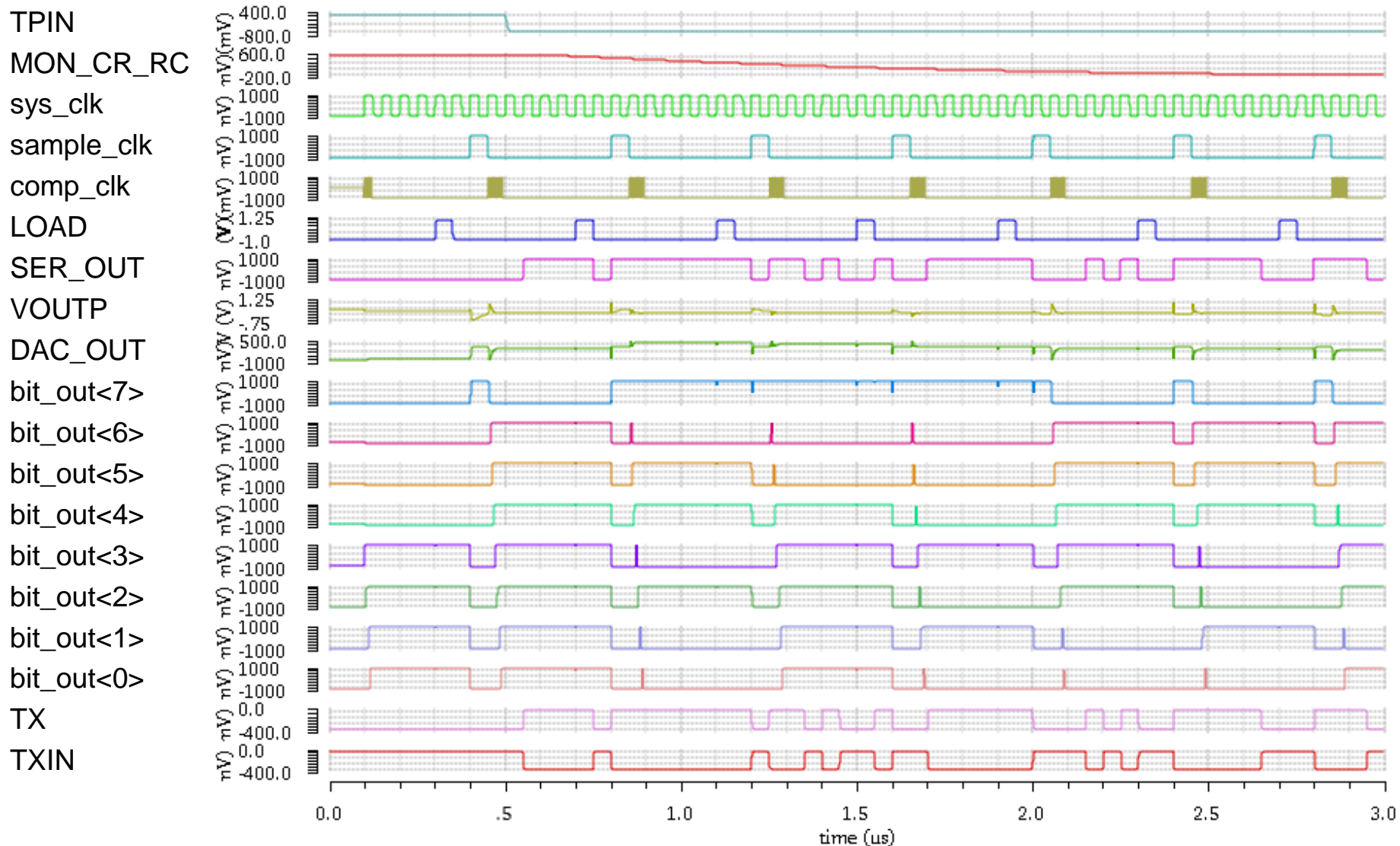
- 上図回路は、LTARS2018_K06Bの構成回路ではないが、同様の機能を有する回路。
- 動作原理の理解、確認が目的

<デジタル部構成回路>

- ADC(8 bit) ... A/D変換を行う (逐次比較型ADC)
- シリアライザ ... AD変換されたバイナリデータを1bitずつ後段に送る。
- トランスミッター ... 差動信号方式(LVDS)で伝送
- DAC ... DA変換を行う

Parameter	説明
TP_IN	入力パルス
MON_CR_RC	アナログ部出力
sys_clk	ADC、シリアライザの同期用クロック
sample_clk	ADCのクロック(サンプリング周波数2.5 MHz)
comp_clk	ADC内比較器のクロック
LOAD	シリアライザのクロック(周波数2.5 MHz)
SER_OUT	シリアライザ出力
VOUTP	ADC出力
DAC_OUT	DAC出力
bit_out<n>	ADC内比較器の比較結果(バイナリデータ)
TX	トランスミッター出力(LVDS)
TXIN	

シミュレーション波形



- **sample_clk** ... ADCのクロック。サンプリング周波数2.5 MHz(0.4 μs毎)。
- **compare_clk** ... コンパレータのクロック。sample_clkの立下りで動作開始。
- **LOAD** ... シリアライザのクロック。0.4 μs毎