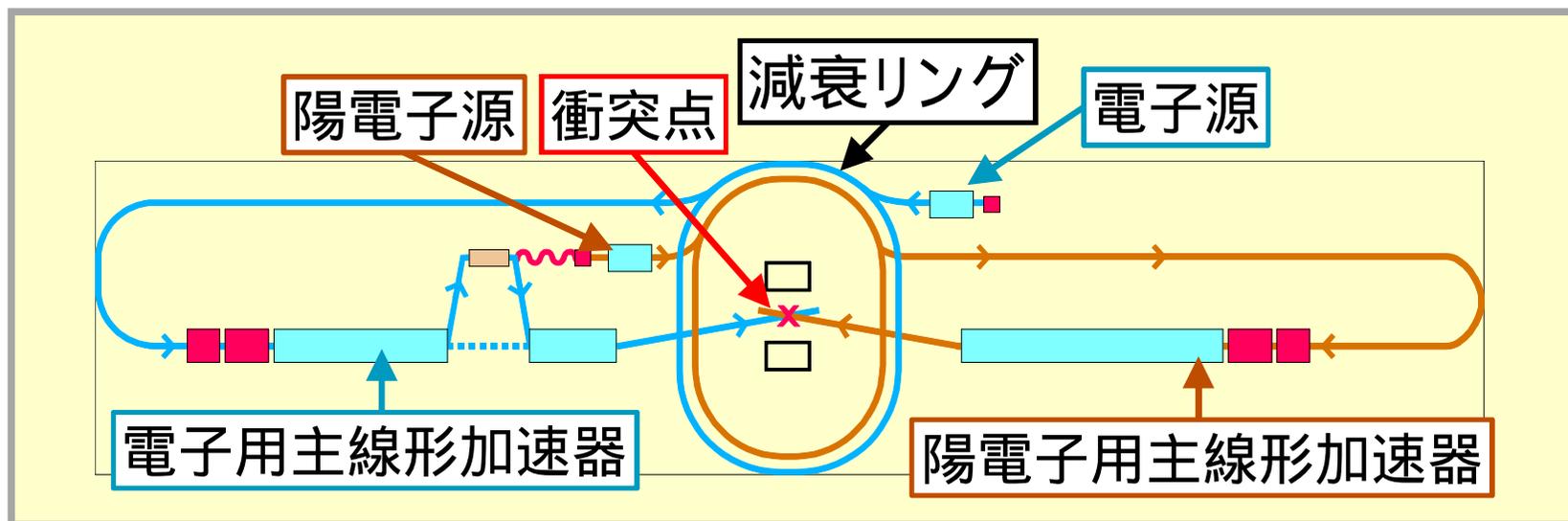




SOI 技術を用いたILC ペアモニタのための 読み出し回路の放射線耐性の評価

佐藤優太郎、新井康夫^A、池田博一^B、小貫良行、
田窪洋介、長嶺忠、山本均、その他SOIPIX グループ
東北大理、KEK^A、JAXA^B

- 電子・陽電子衝突型線形加速器
 - 重心系エネルギー：最大 500 GeV (アップグレード ~ 1 TeV)
 - 積分ルミノシティ(4 年間)：500 fb⁻¹
 - ビームサイズ: $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = (639 \text{ nm}, 5.7 \text{ nm}, 300 \text{ } \mu\text{m})$



→ 高ルミノシティを維持するには、

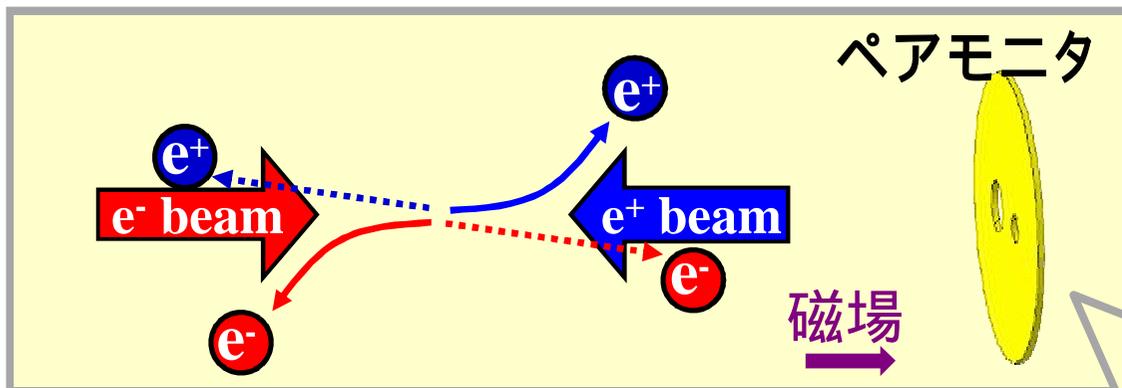
衝突点でのビームの状態を把握することが重要

→ 衝突点ビーム形状モニタ「ペアモニタ」

ペアモニタは衝突点のビームサイズを測定するピクセル検出器。

ビーム測定原理

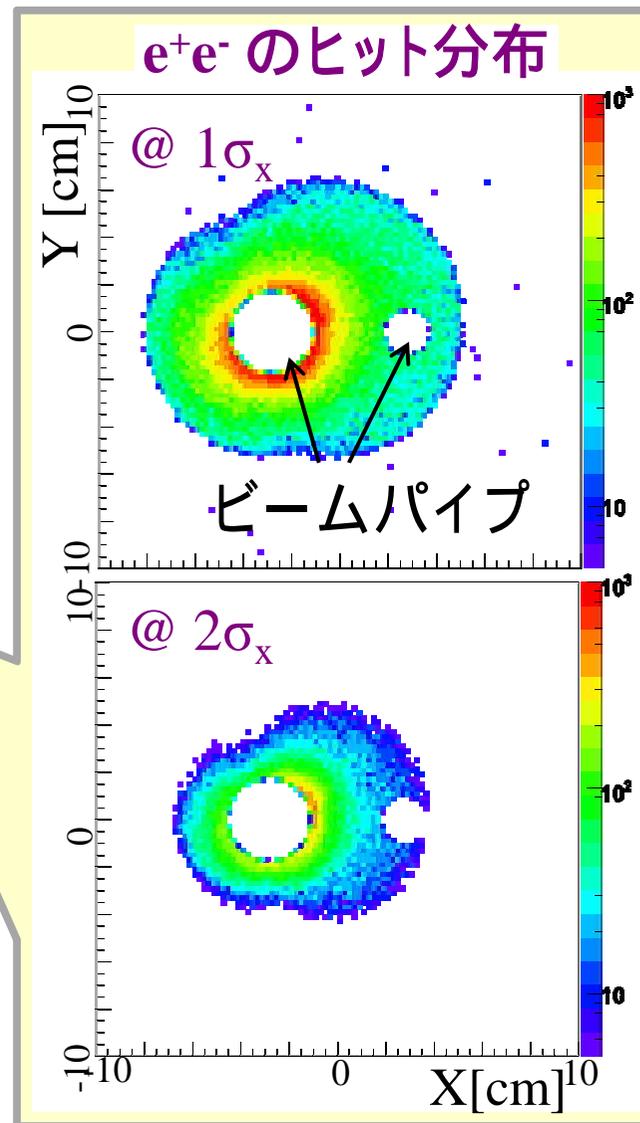
- ビーム衝突時に e^+e^- ペアが大量に生成
- 対向するビームと同電荷粒子は大きく散乱
- 大きく散乱された粒子がビーム情報を持つ



ペアモニタは e^+e^- のヒット分布から、ビーム測定を行う

特徴

- ナノメートルレベルの精度で測定可能
- 非破壊型ビームモニタ
- 加速器の運転への素早いフィードバックが可能



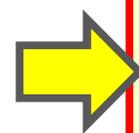
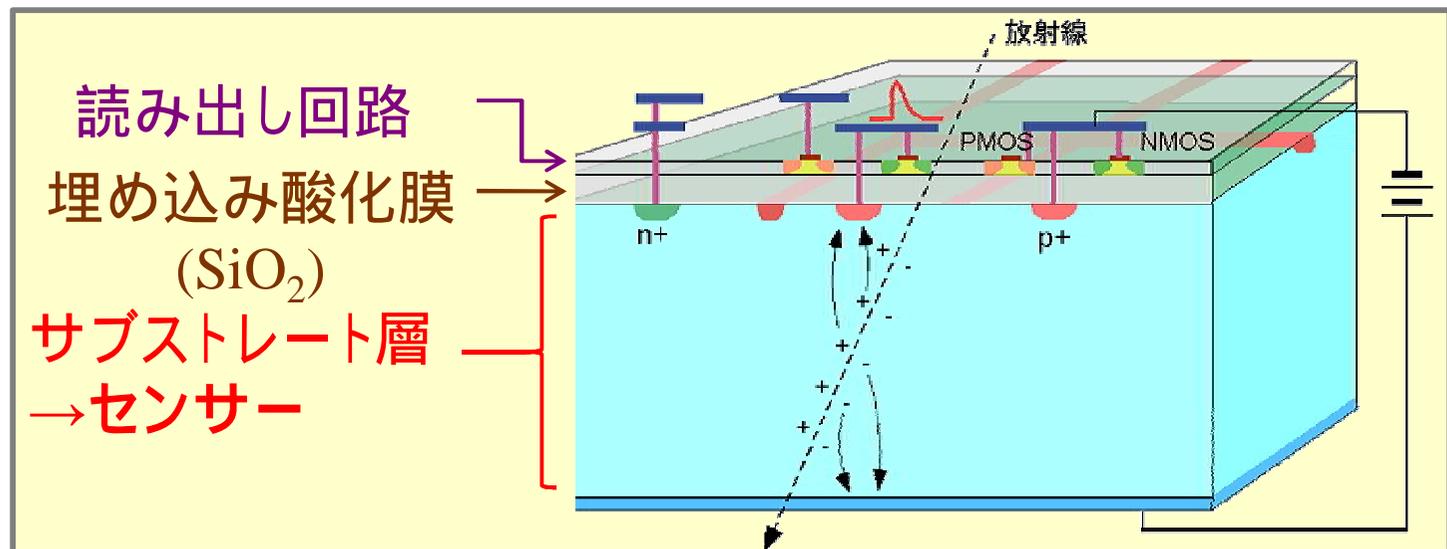
…ilc SOI 技術を用いた読み出し回路の開発

SOI 技術を用いて、ペアモニタ用読み出し回路の開発を進めている。

SOI Pixel 検出器

- KEK のSOI pixel グループが開発中の、
センサーと読み出し回路を同一ウェハ上に成型する**一体型検出器**

- 高速化
- 低消費電力
- 低物質質量

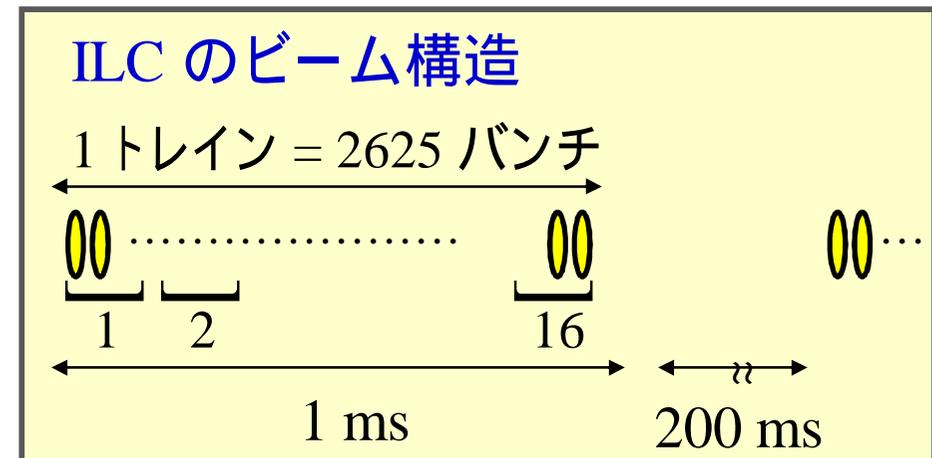


SOI pixel グループ主催のMPW (Multi Project Wafer) Run に参加して、ペアモニタのための読み出し回路を試作した。

今回のペアモニタの試作回路は一体型ではない。

要求性能

1. 時間分解能 : **260 ns 以下**
(バンチ間隔以下)
2. 雑音レベル : **1000 電子以下**
(信号レベルは15,000 電子)
3. 放射線耐性 : **数Mrad / year 以上**
4. トレイン内の場所に依存したビームサイズ測定
→ トレインを16 分割して(~164 バンチ)、それぞれの部分で計数して、
トレイン間(~200 ms) に読み出しを行う方式を採用。

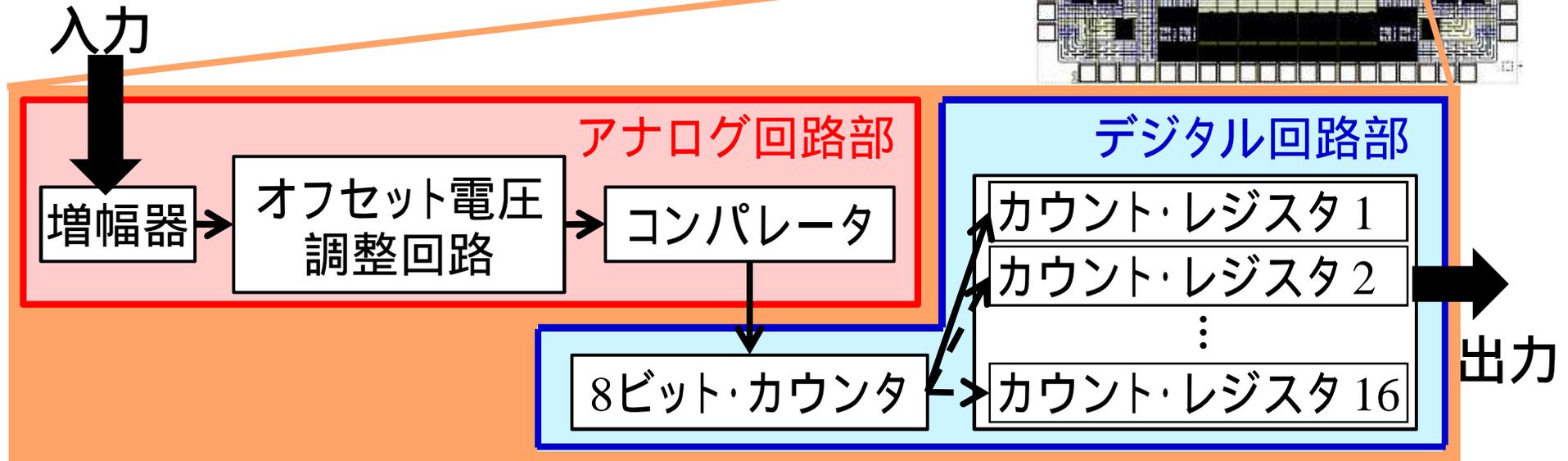
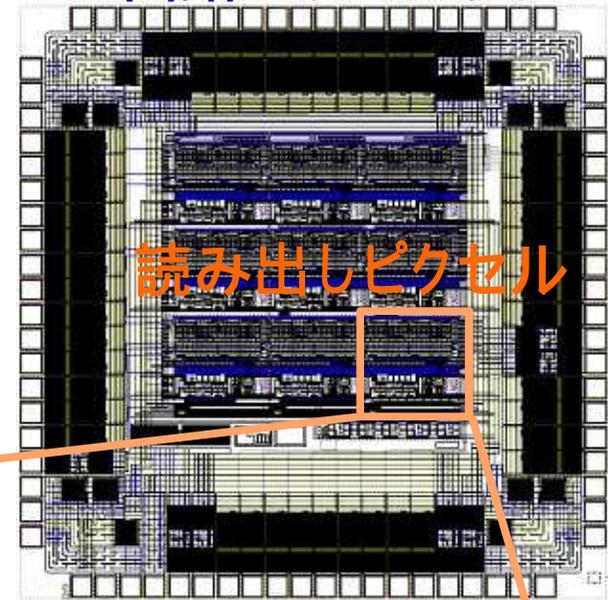


➡ これらの要求性能を満たすように回路の設計・製作を行った。

- 回路設計の原案は池田博一氏(JAXA) による。

- 製造プロセス : FD-SOI CMOS 0.2 μm
- チップサイズ : 2.5 x 2.5 mm^2
- ピクセル数 : 9 (3x3)
- ピクセルサイズ : 390 x 350 μm^2
 - 試験的に、ピクセルごとに異なる検出器容量を負荷

回路のレイアウト



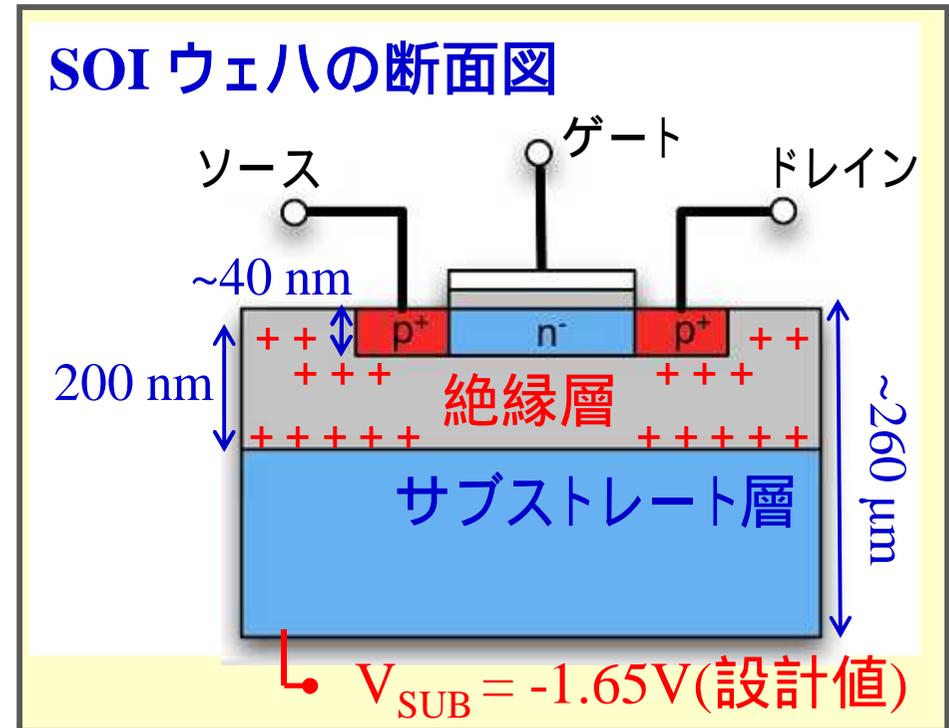
試作した回路の放射線試験を行った。
(動作試験は実施済み@2009年秋季大会)

試作回路にX線を照射して、放射線耐性を調べた。

- X線発生装置：FR-D (リガク社) @ KEK
 - 標的：Cu (~8 keVの光子)
- 照射量：最大2 Mrad

放射線効果

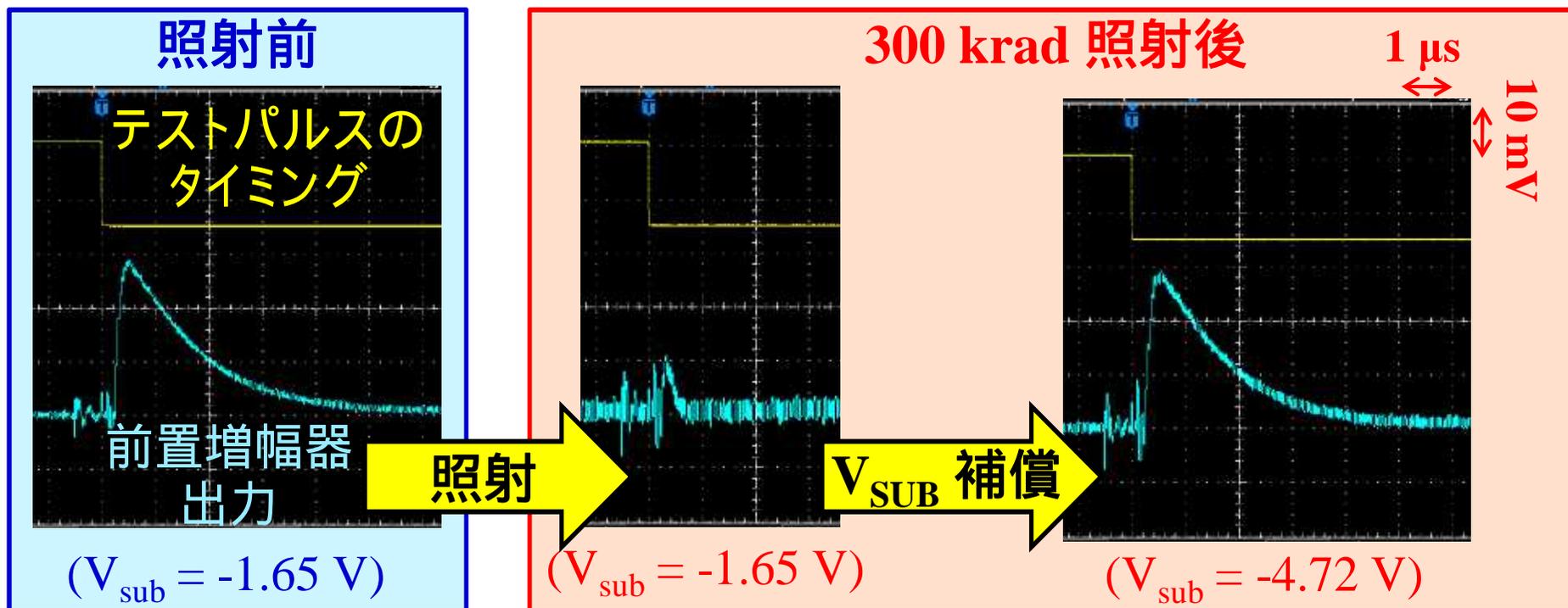
- シングルイベント効果
 - 入射粒子によって生じる
 - 一時的な電流による不具合。
- SOI は高耐性。
- トータルドーズ効果
 - 絶縁層に蓄積する電荷による影響
 - 照射量に比例



サブストレータ層の電位 V_{SUB} による
トータルドーズ効果の補償を観測する。

前置増幅器の信号波形

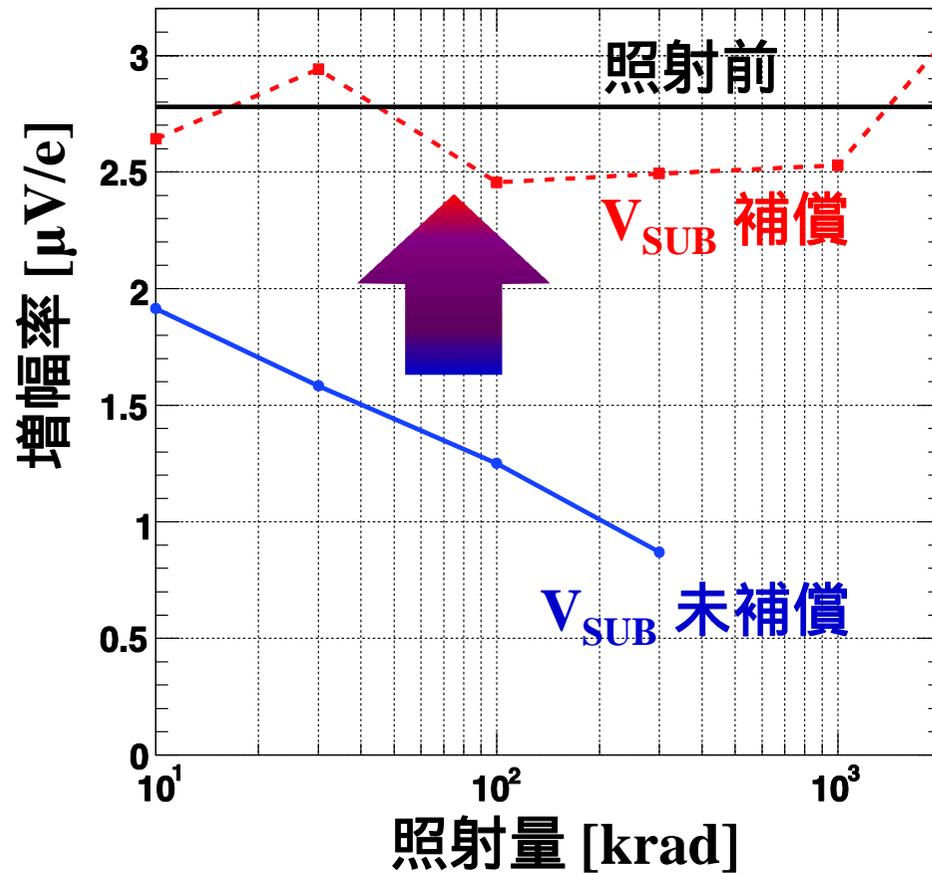
照射前後及び V_{SUB} 補償時で前置増幅器の信号波形を比較した。



照射するにつれて、信号波形は小さくなったが、 V_{SUB} 補償により信号波形は照射前の波形に戻せている。

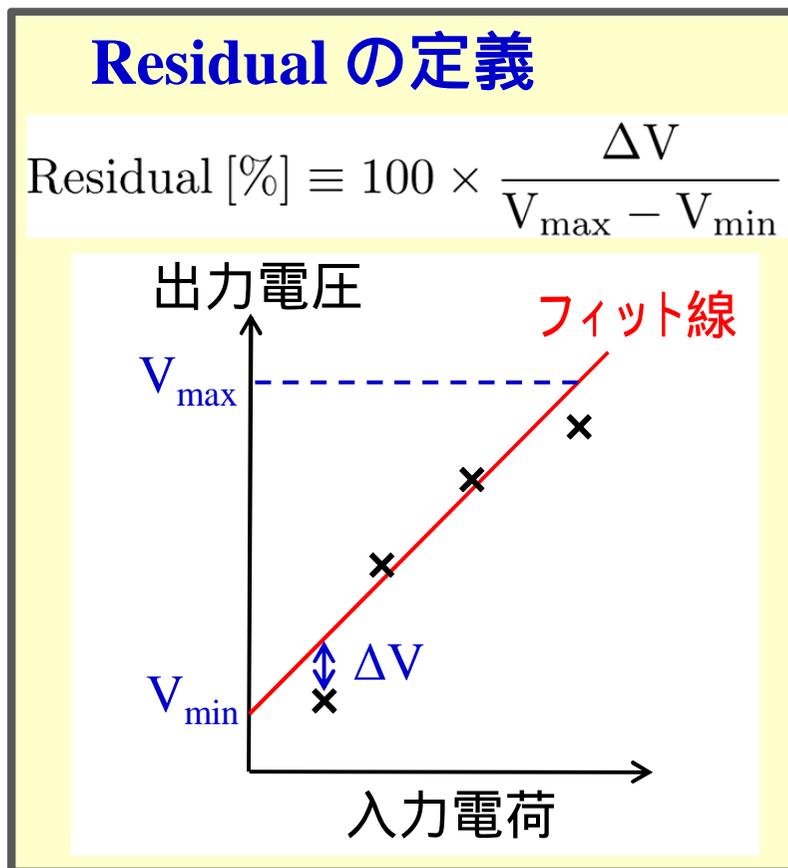
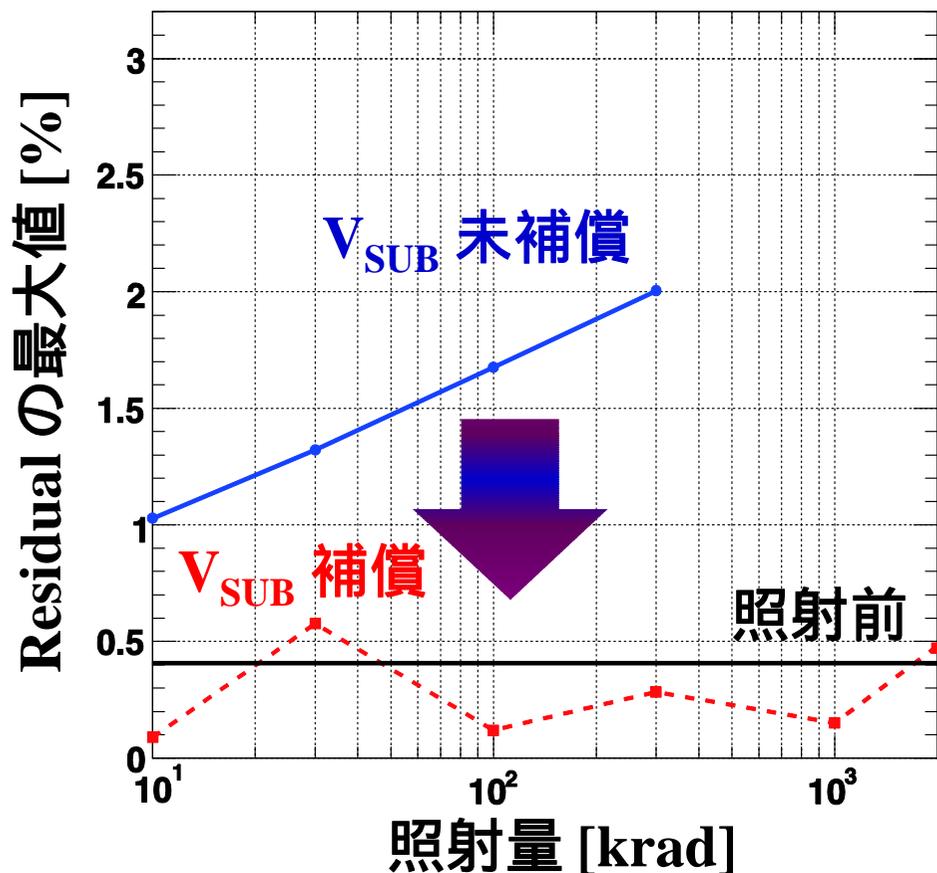
1 Mrad 以上の照射後は、 V_{SUB} 補償をしないと、トランジスタが導通してしまい、正常に動作しなくなった。

照射前後及び V_{SUB} 補償時で増幅率を比べた。



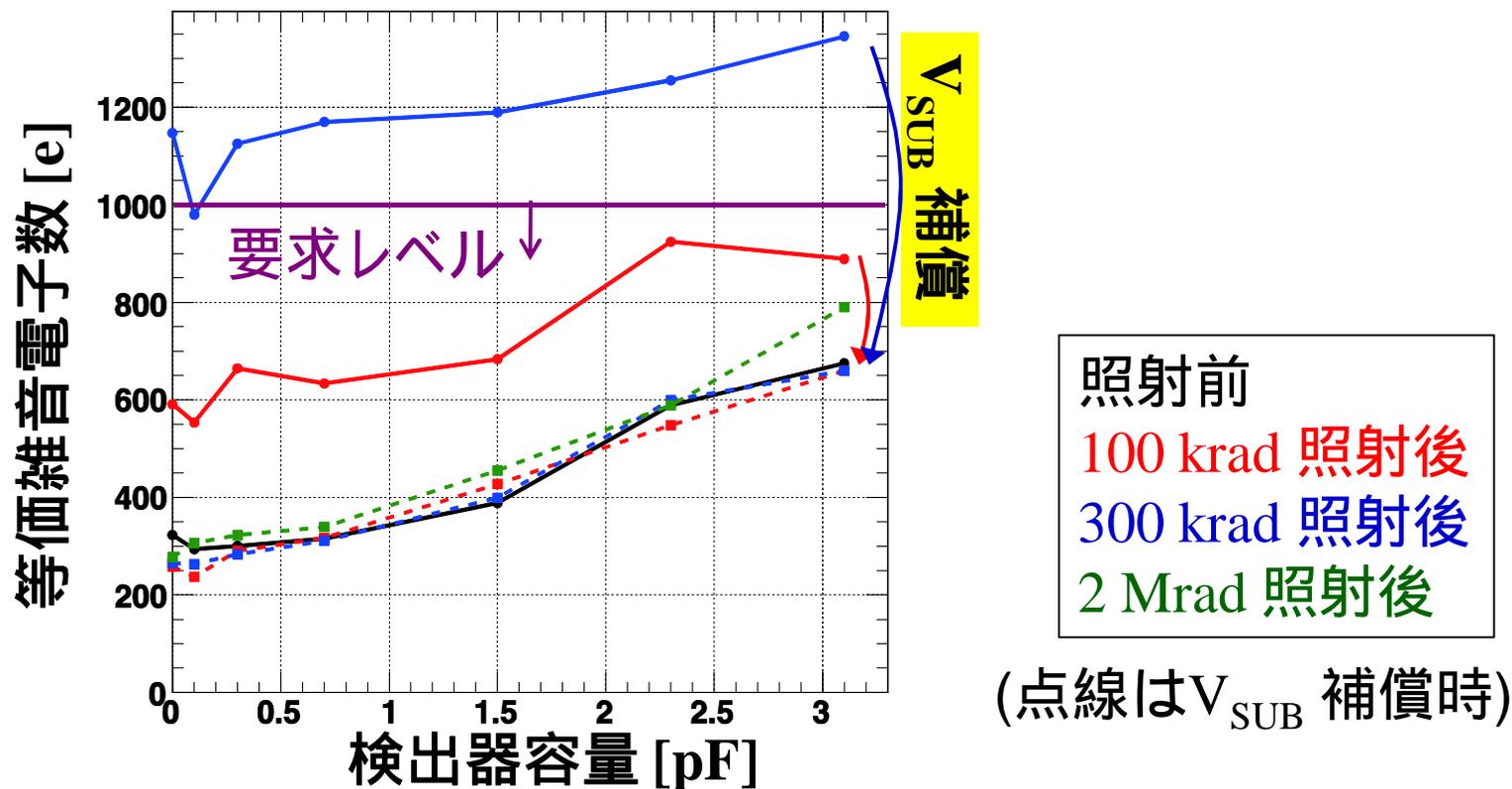
照射するにつれて、増幅率が低下したが、
 V_{SUB} 補償により、増幅率は照射前のレベルに戻している。

照射前後及び V_{SUB} 補償時で線形性を比べた。



照射するにつれて、線形性が悪くなっているが、
 V_{SUB} 補償により、線形性は照射前のレベルに戻している。

照射前後及び V_{SUB} 補償時で等価雑音電子数を比べた。



照射前
 100 krad 照射後
 300 krad 照射後
 2 Mrad 照射後

(点線は V_{SUB} 補償時)

照射するにつれて、等価雑音電子数が増加しているが、 V_{SUB} 補償により、雑音レベルは照射前のレベルに戻せている。

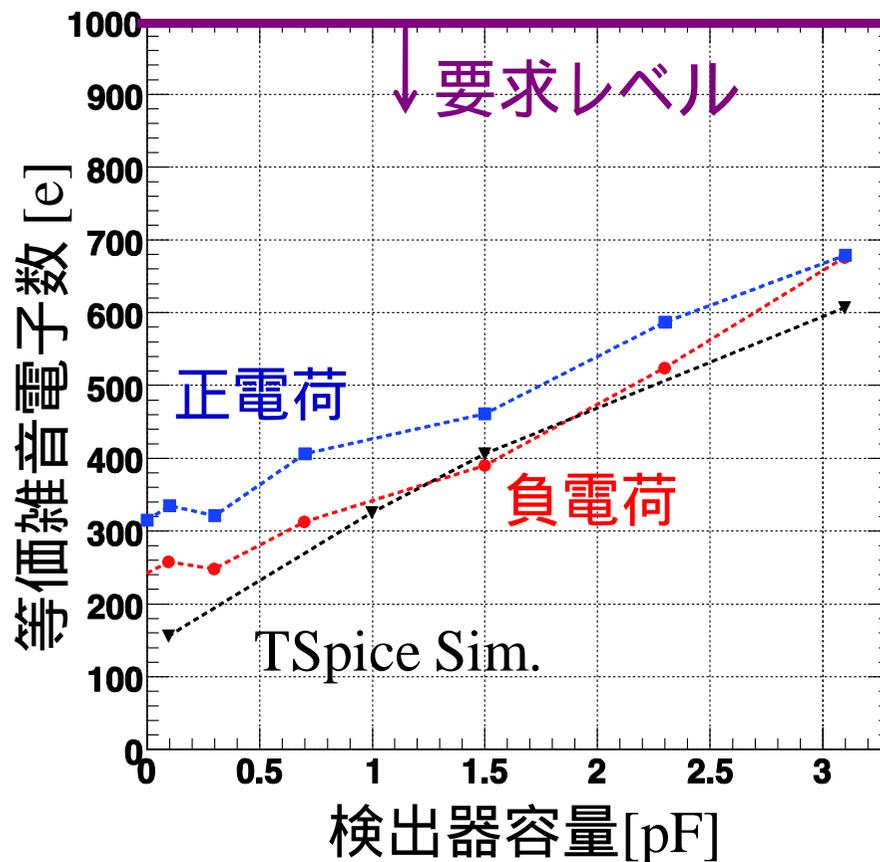
2 Mrad 以上の放射線耐性と、サブストレート層の電位 V_{SUB} によるトータルドーズ効果の補償が確認できた。

- ILC 衝突点ビーム形状モニタ“**ペアモニタ**”の開発を進めている。
- SOI プロセスで試作した読み出し回路の**放射線試験**を行った。
 - **2 Mrad 以上の放射線耐性と、サブストレート層の電位 V_{SUB} によるトータルドーズ効果の補償を確認できた。**

- 放射線(ガンマ線、電子線)試験

バックアップ

しきい値スキャンを行い、雑音評価を行った。

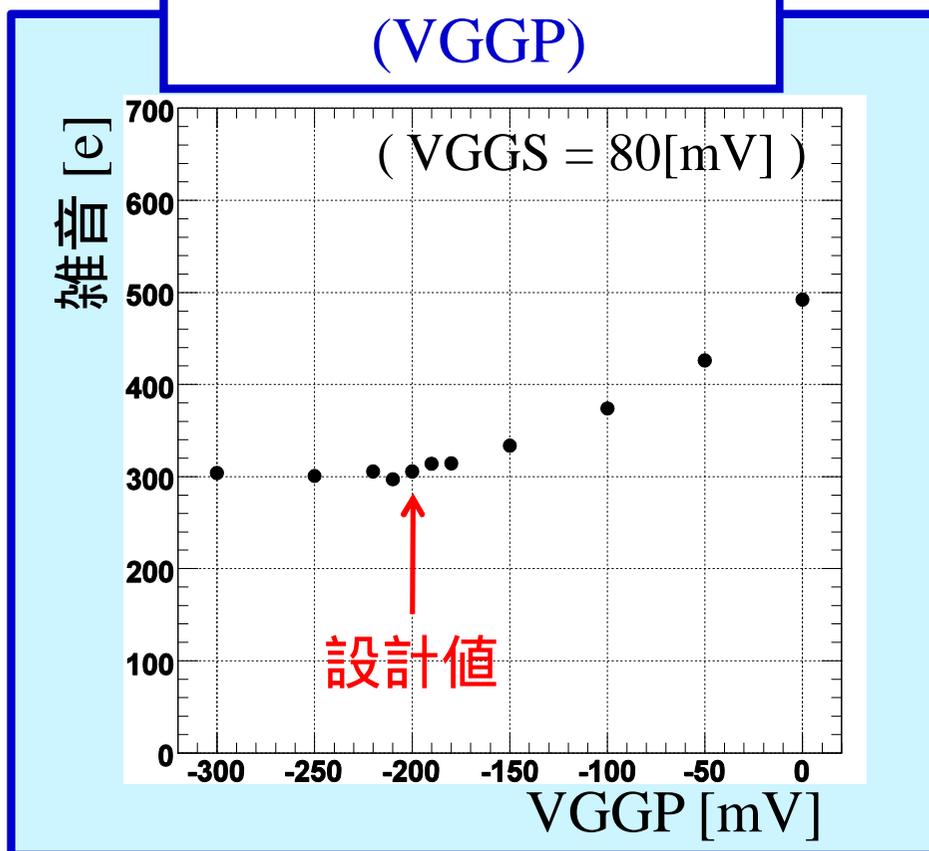


- 検出器容量が3.1 pF の時、等価雑音電子数は700 電子程度。

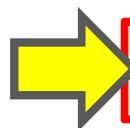
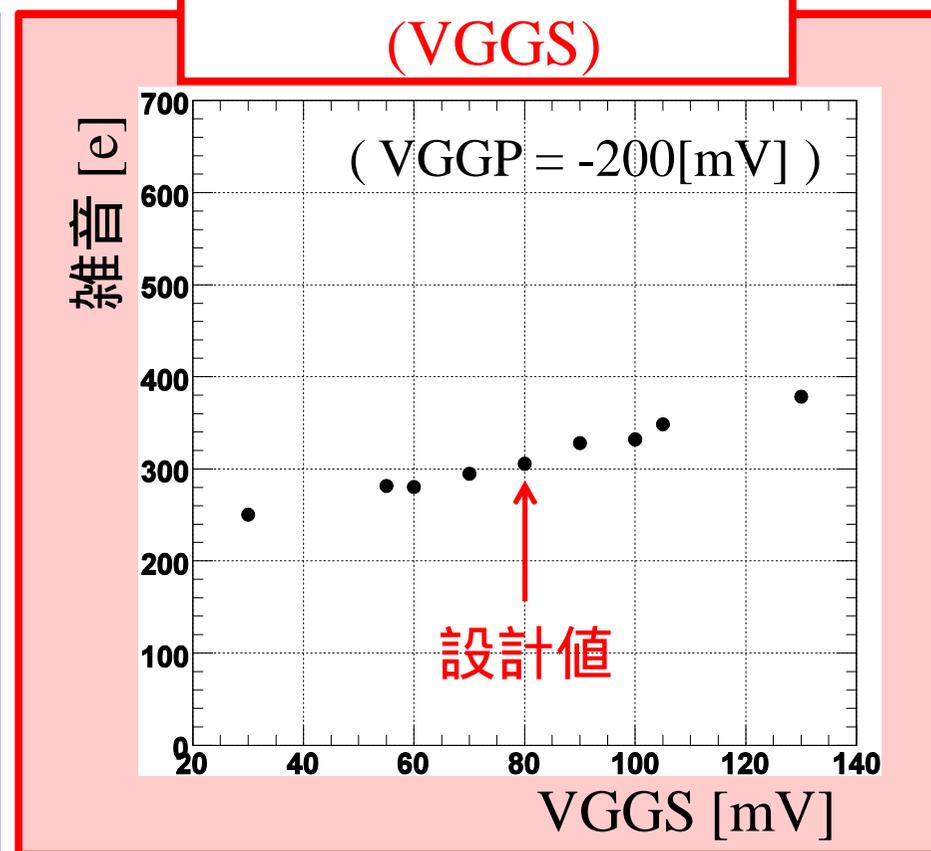
➡ 雑音レベルの要求性能を満たしていることが確認できた。

増幅器の時定数を変化させた時の雑音の変化を調べた。

前置増幅器の時定数
(VGGP)



整形増幅器の時定数
(VGGS)



雑音は急激には増えていない(安定している)。

放射線吸収量は以下の式から求められる

- 放射線吸収量 = (照射した光子数) × (1 光子当たりの線量)

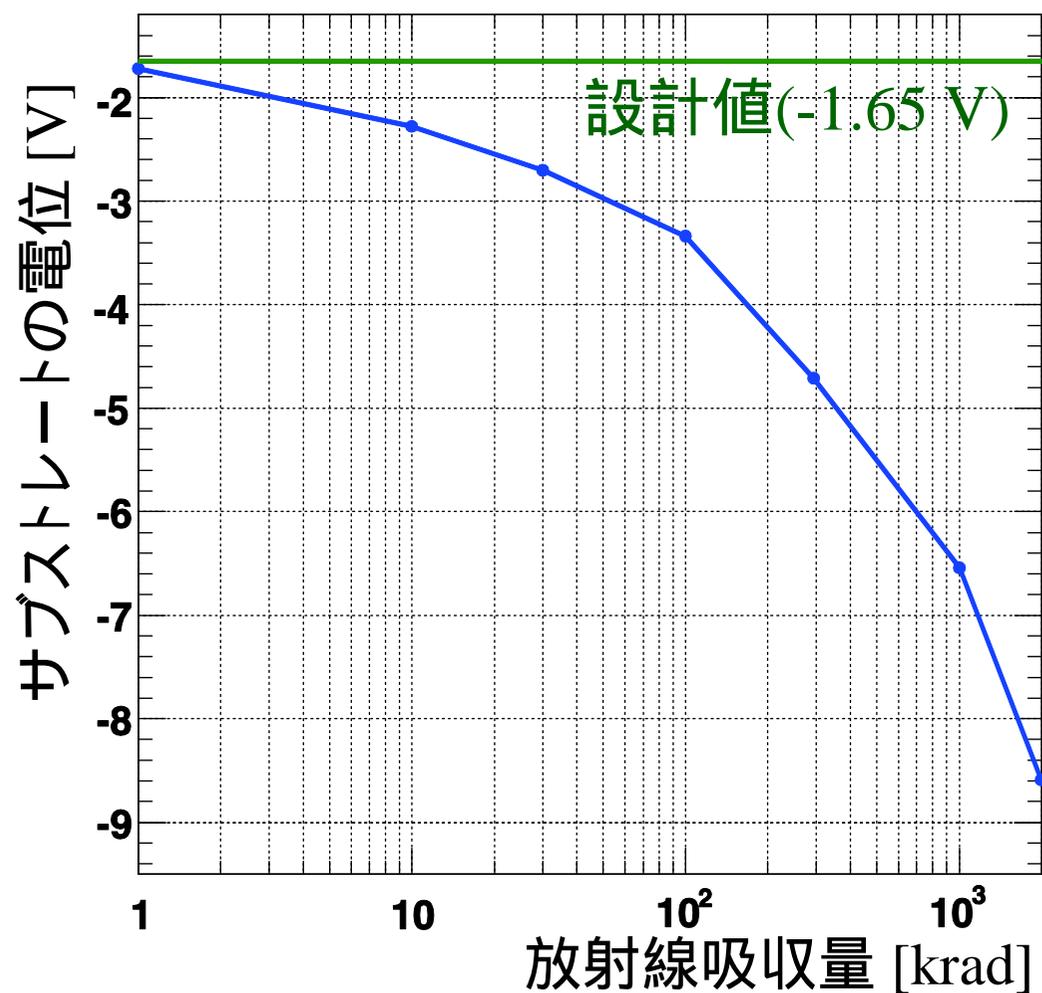
照射した光子数

- フォトダイオードの光電流を用いて見積もっている。
 - 応答定数 $k = 2.5 \times 10^9$ [photon/ μ A]

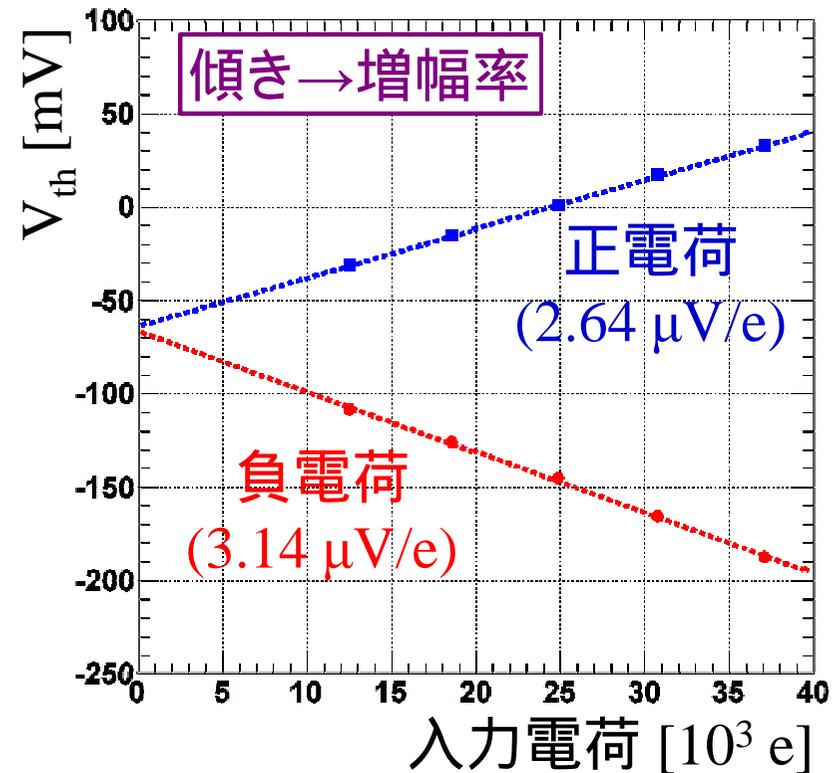
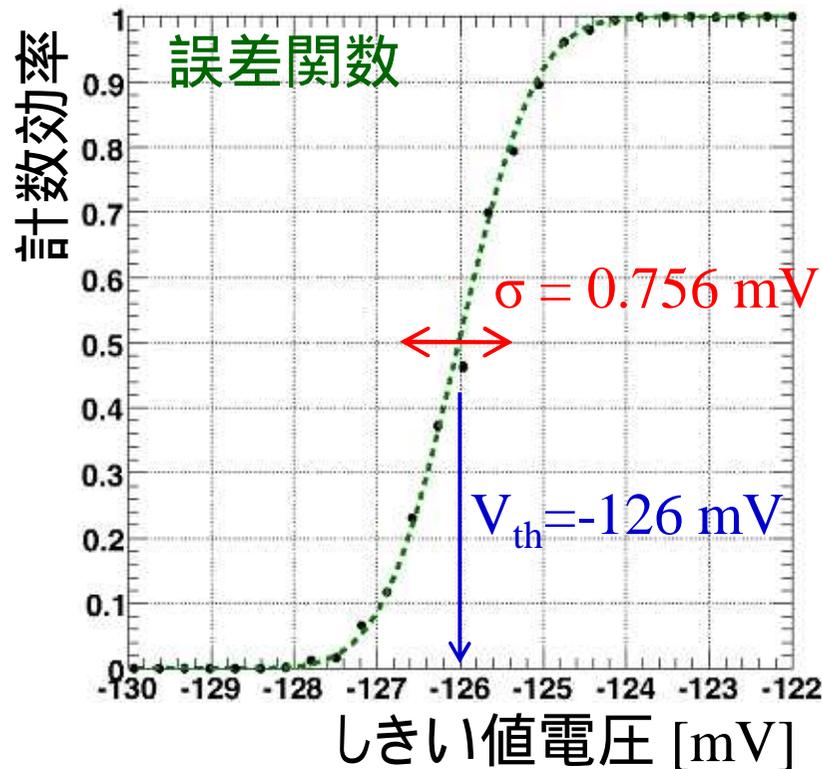
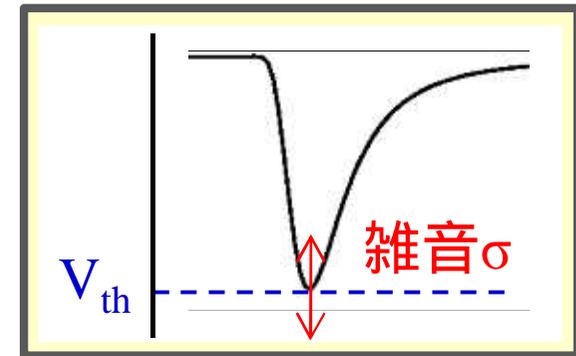
1 光子当たりの線量

- 光子のエネルギー : 8.19 keV
 - $K\alpha$ 線(8.04 keV) と $K\beta$ 線(8.91 keV) の加重平均
- 減衰長($\lambda \sim 66 \mu\text{m}$) までに光子が全て吸収されたと仮定。
- シリコンの密度 $d = 2.33 \text{ g/cm}^3$

- 前置増幅の出力波高が照射前の高さに戻るように、サブストレートの電位を調節した。



コンパレータのしきい値を変えながら、
計数効率を測定し、誤差関数でフィットした。



→ 等価雑音電子数 (= 雑音 σ / 増幅率) を求める。

$$\text{Residual} [\%] \equiv 100 \times \frac{\Delta V}{V_{\max} - V_{\min}}$$

