

JLC用バーテックス検出器に関するR&D

2000/3/31 @日本物理学会 (近畿大学)

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所

杉本康博

内容：

- JLC実験においてバーテックス検出器の置かれる状況
 - 物理
 - ビームバックグラウンド
- バーテックス検出器用デバイスとしてのCCDのR&D
 - S/N比
 - 空間分解能
 - 放射線耐性

JLCで予想されるビームバックグラウンド

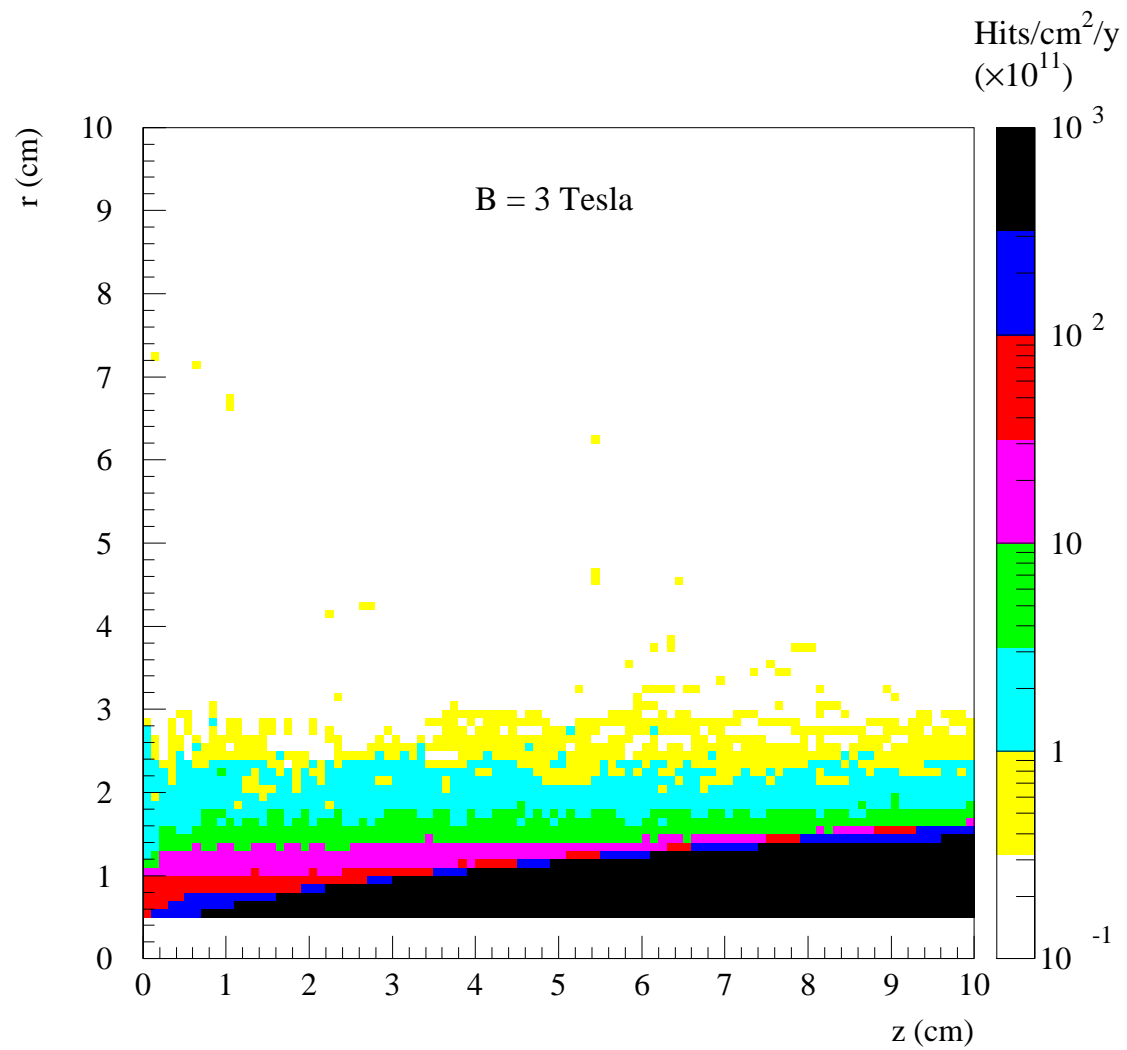
電子／陽電子： $\sim 1.5 \times 10^{11} / \text{cm}^2 / \text{y}$ (B=2T, R=24mm)

Beam-beam 相互作用で対生成されるLow-pt e^\pm

中性子： $\sim 10^8 / \text{cm}^2 / \text{y}$

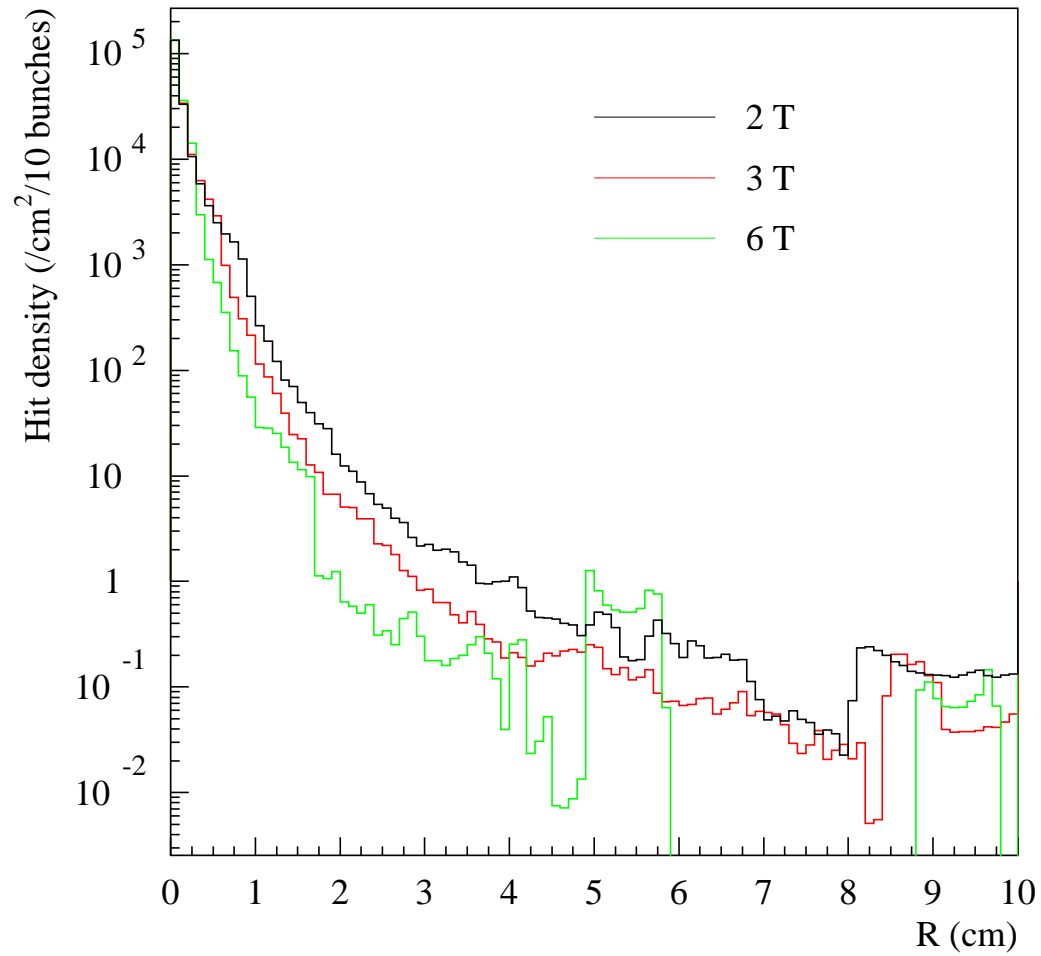
e^\pm / γ がおこすEM ShowerからPhoto-nuclear reactionによって核のGiant Dipole Resonance 経由で生じる

e^\pm Background Hit Density



e^\pm Background Hit Density

$\cos\theta < 0.9$



CCD Vertex DetectorのR&D

Collaboration:

佐賀大学、富山商船高専、KEK
新潟大学、東北大学、青森大学

内容：

- Beam Test によるMIPに対するS/N、空間分解能の測定
- 放射線耐性のテスト
 - 電子
 - 中性子
 - ガンマ線

JLCにおける常温付近($>0^{\circ}\text{C}$)での長期運転を目標とする
(冷却による機械的変型、クライオスタットの物質量をさける)

なぜCCDか？

Si Strip Detectorは？

ビームバックグラウンドによるHit Rate:

~1 hit/mm²/train = 1 hit/(20μm×5cm-strip)/train (100% occupancy)

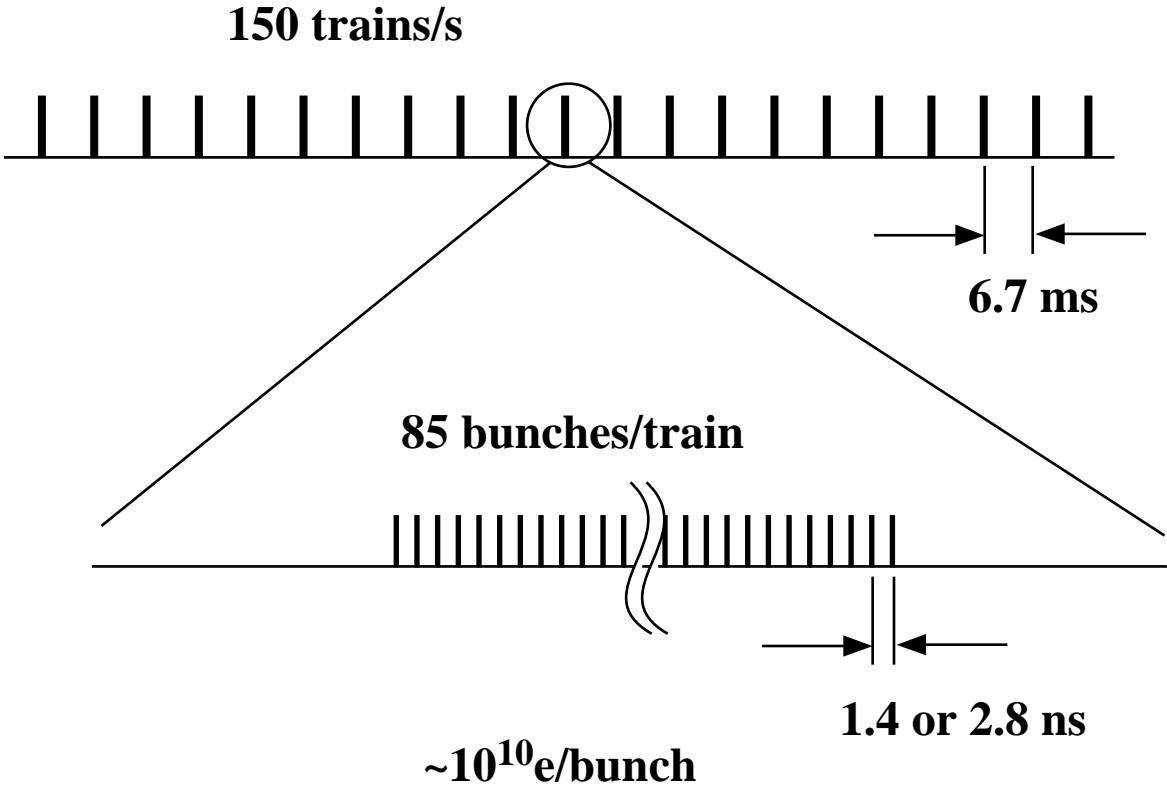
-> Si strip detector は使えない

Active Pixel Sensorは？

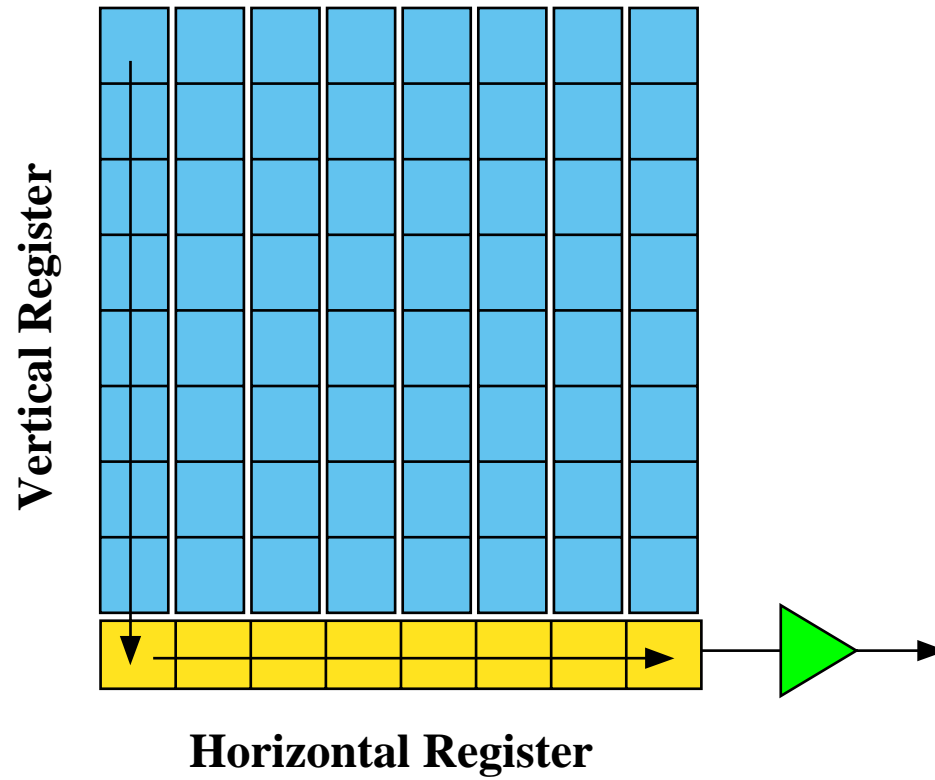
	APS	CCD
ピクセルサイズ	大	小
消費電力	大	小
読み出し速度	速い	遅い(JLCではOK)
物質量	大	小
放射線耐性	優	可(?)

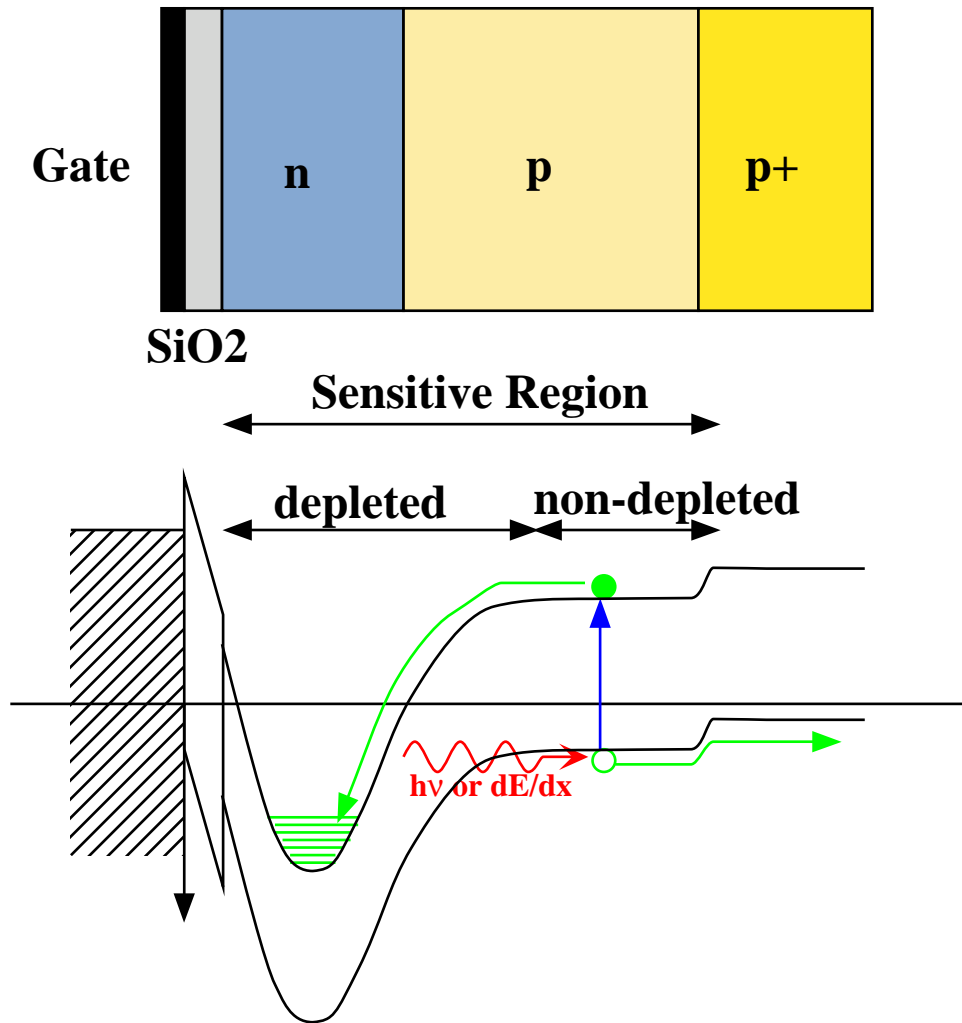
➡ 放射線耐性さえクリアできればCCDがベスト

JLCのビームの構造



CCDの構造



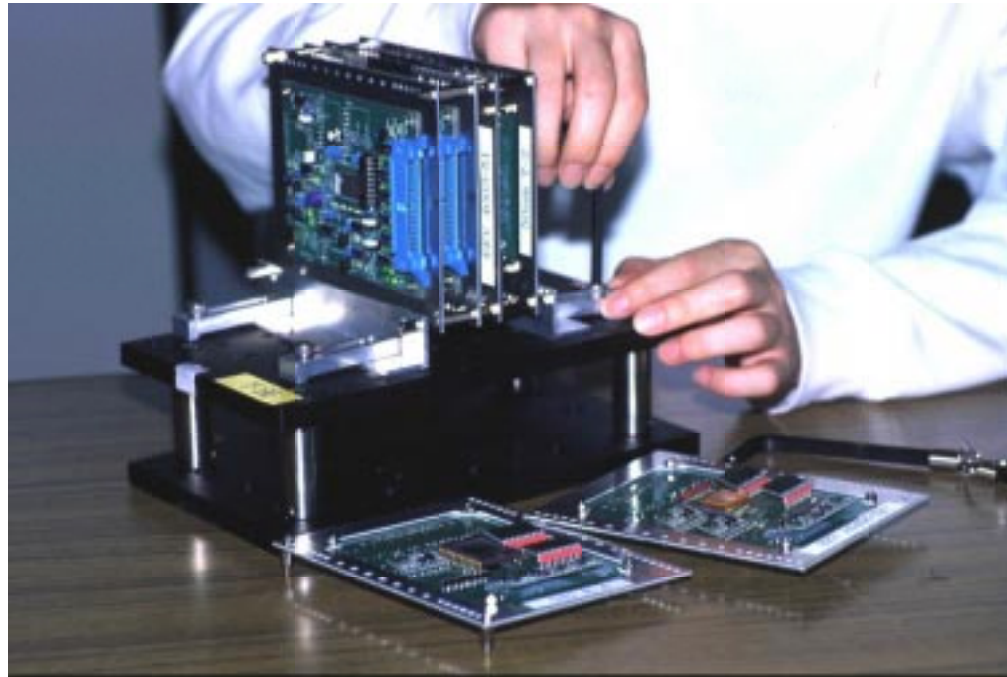


有感領域のうち、空乏化していない部分での電子の熱拡散によって、垂直入射の荷電粒子に対しても複数のピクセルがヒットし、重心法などによって高い分解能がえられる。

S/N比と空間分解能

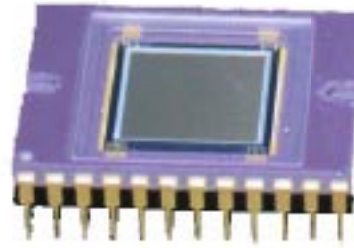
Beam Test:

- 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 GeV/c π^- beam
- 動作温度：-15~+15°C
- 読み出しサイクル：3秒
- 4層のCCDサンプル
 - 1,2,4層：HPK 10 μ m
 - 3層：HPK10 μ m or HPK50 μ m or EEV20 μ m



CCD samples

**Hamamatsu
S5466**



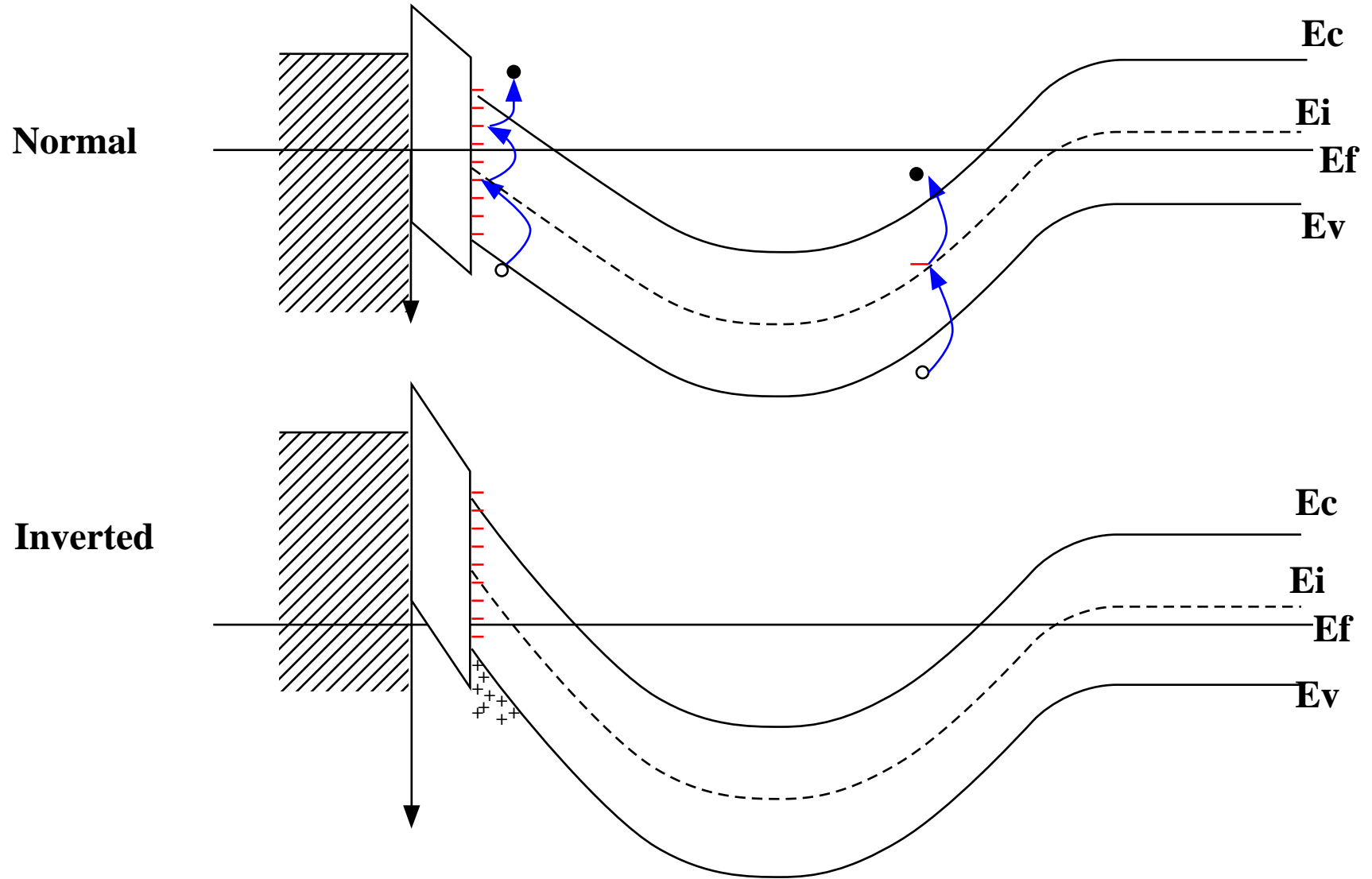
**EEV
CCD02-06**



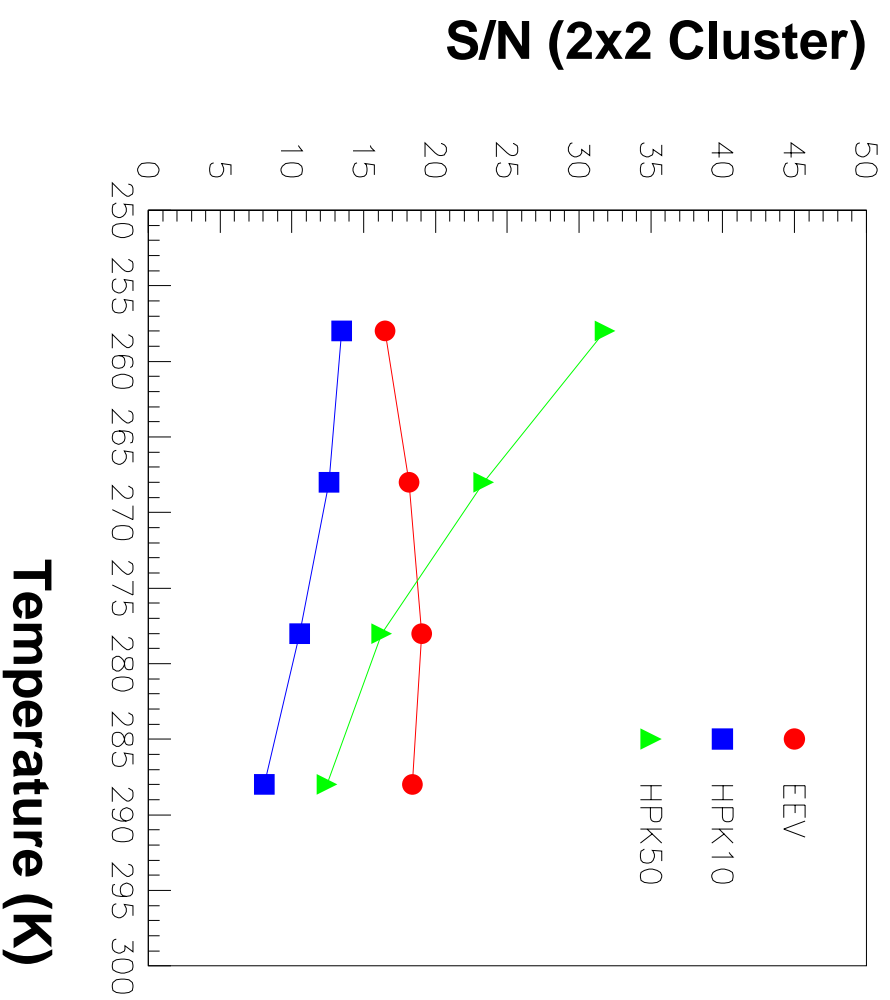
Pixel size	24 μm	22 μm
Epi. thickness	10 / 50 μm	20 μm
Gate oxide	SiO_2	$\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$
Clock	2-phase	3-phase
Gain	2 $\mu\text{V}/e$	1 $\mu\text{V}/e$
Mode	Inverted	Inverted

(Surface current is strongly suppressed with inverted mode)

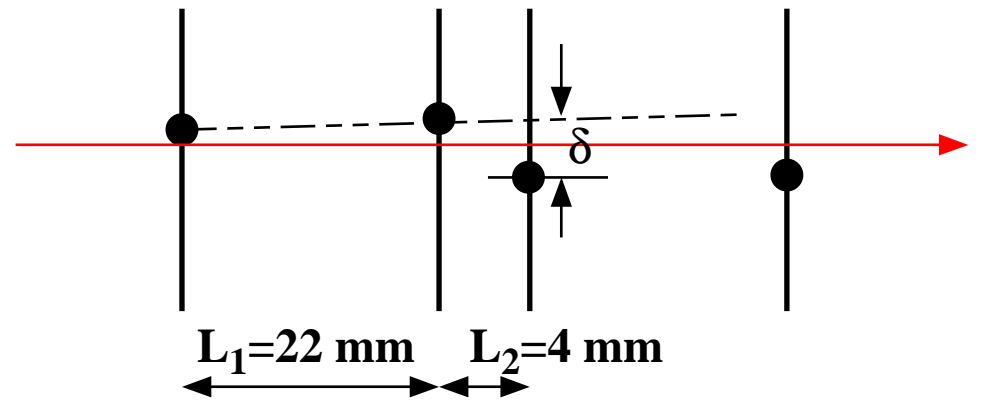
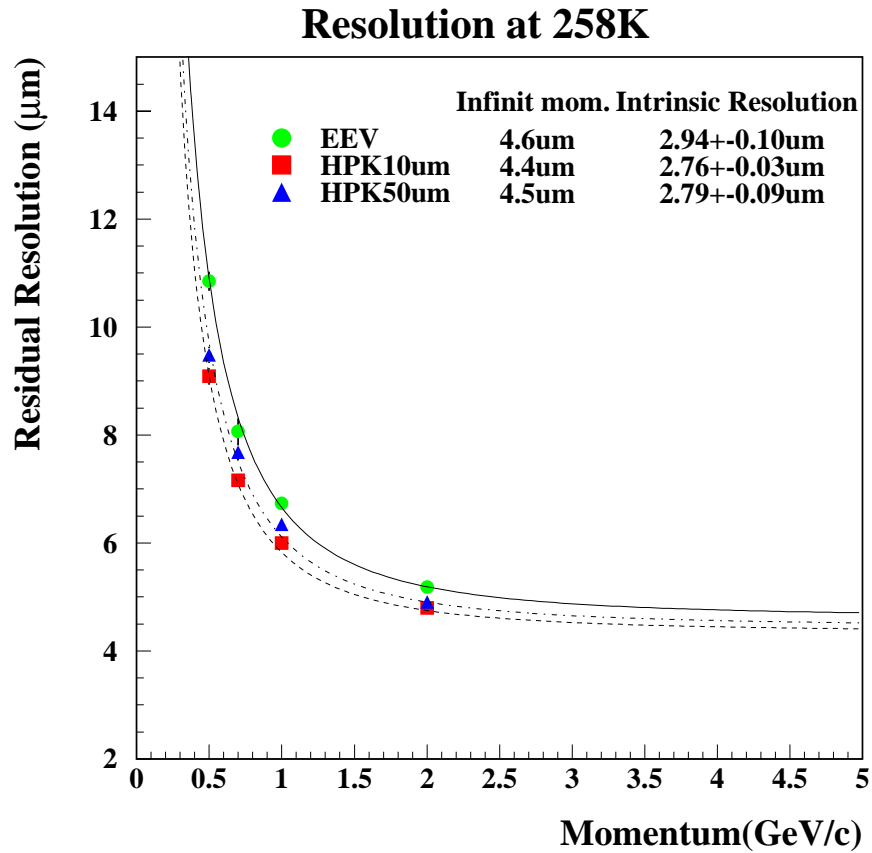
Inverted Mode (MPP Mode)



S/N_{EE}



空間分解能



$$\delta^2 = 2\sigma^2(L_1^2 + L_2^2 + L_1L_2)/L_1^2 + (\theta_{MS}L_2)^2$$

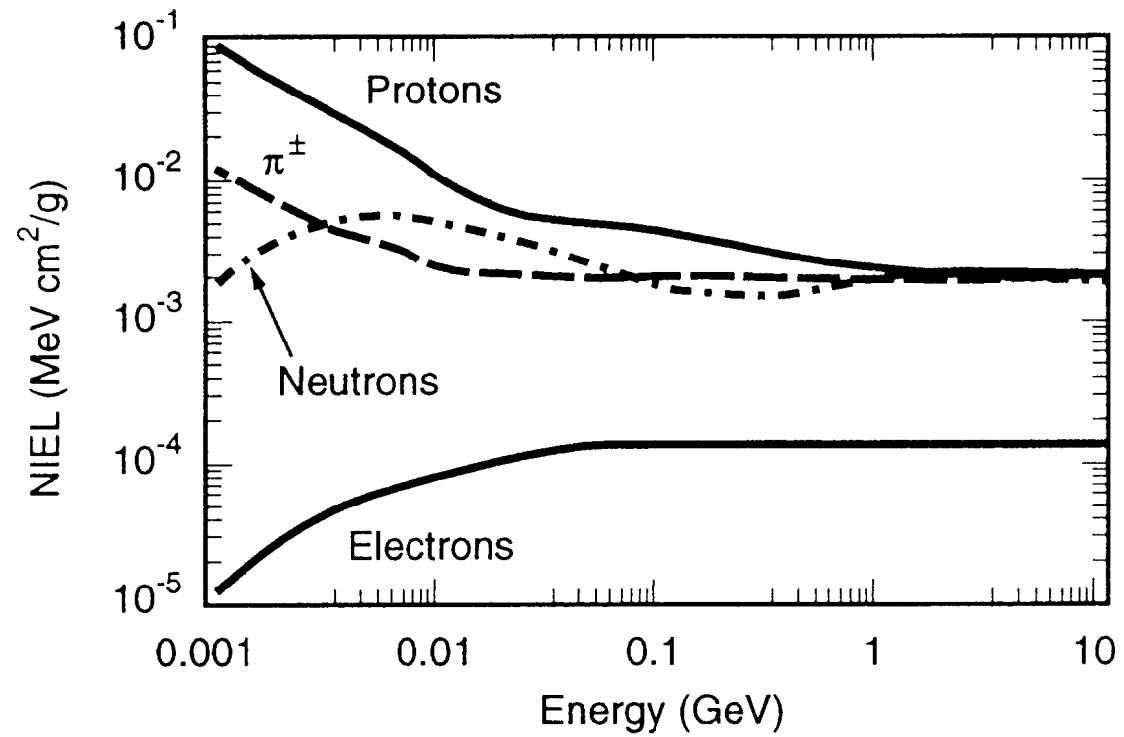
(δ : residual resolution, σ : intrinsic resolution)

放射線耐性

CCDのRadiation Damage

- **Surface Damage --- SiO₂およびSiO₂/Si 境界でのダメージ**
荷電粒子がSiO₂を通過すると生じる
dE/dX に比例（低エネルギーで顕著）
影響：暗電流の増加
動作電圧のシフト
- **Bulk Damage --- Si バルク中のダメージ**
荷電粒子でも中性子でも生じる
Non-ionising energy loss (NIEL)にほぼ比例
影響：暗電流の増加（Hot pixelの出現）
転送効率の悪化(Charge Transfer Inefficiency:CTI の増加)

Non-Ionising Energy Loss



照射に用いた放射線源

- 電子線源

^{90}Sr (10mCi) $t_{1/2} = 28.5\text{y}$ $E = 0.546 \text{ MeV}$
-> ^{90}Y $E = 2.283 \text{ MeV}$

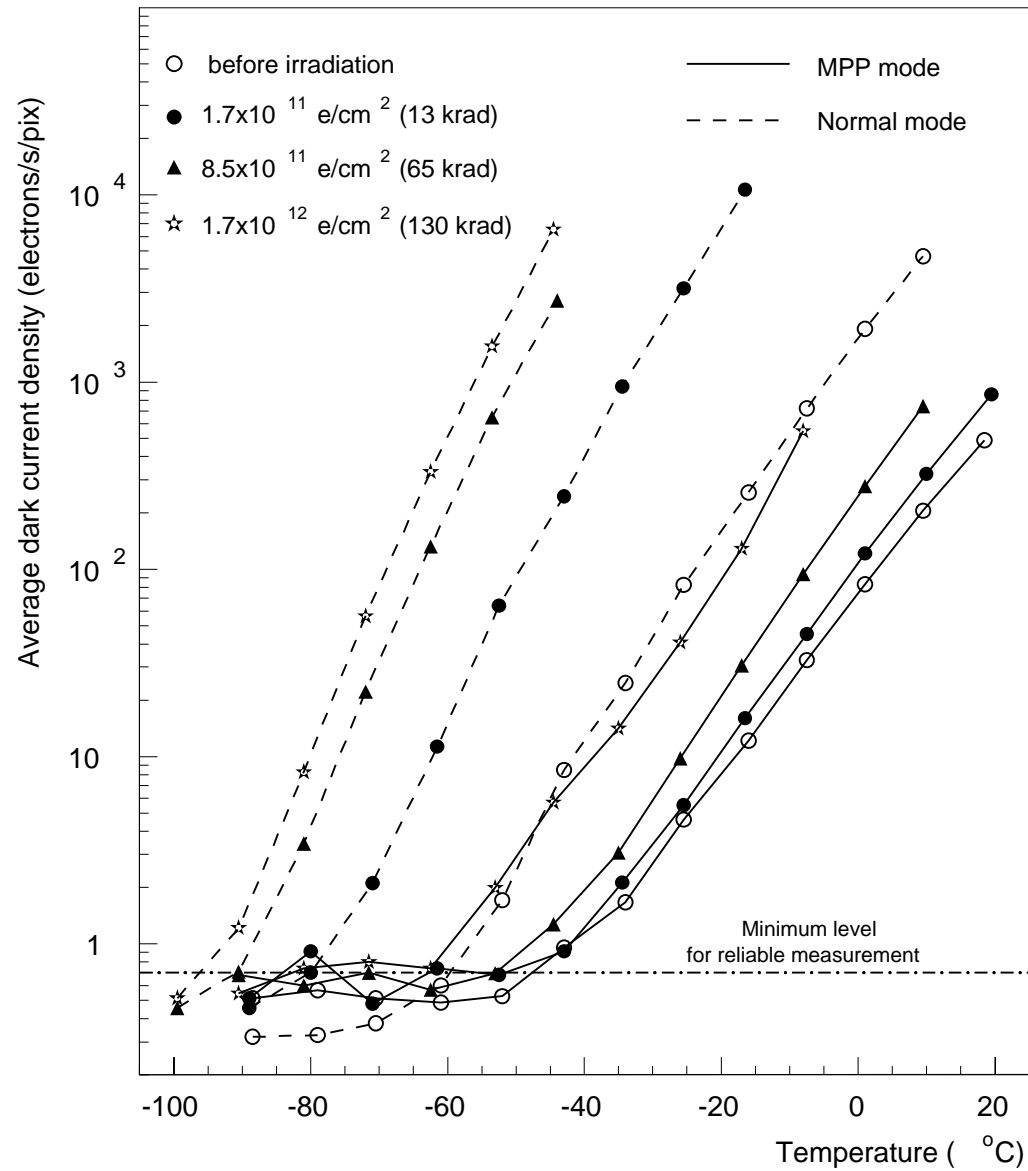
$\langle dE/dX \rangle \sim 3 \times dE/dX$ (MIP)

$\langle \text{NIEL} \rangle \sim 1/5 - 1/10 \times \text{NIEL}$ (H.E. e^{\pm})

- 中性子源

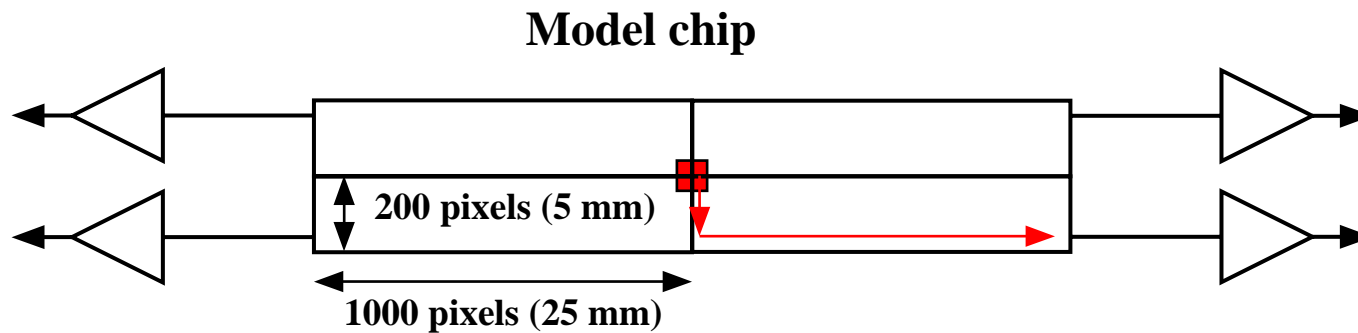
^{252}Cf (100 μCi) $t_{1/2} = 2.645\text{y}$ $\langle E \rangle = 2.14 \text{ MeV}$

暗電流



CTI

- 放射線照射によってバルク中に生じるトラップレベルに信号電荷がトラップされることによる転送効率の悪化 -> 信号電荷の減少
- Si中の電荷の移動距離 : SSD; ~ 数百 μm
CCD; ~ 数cm
- 許容されるCTIの上限の目安



Vertical CTI $1 \cdot 10^{-3}$: $(1-0.001)^{200} = 0.82$

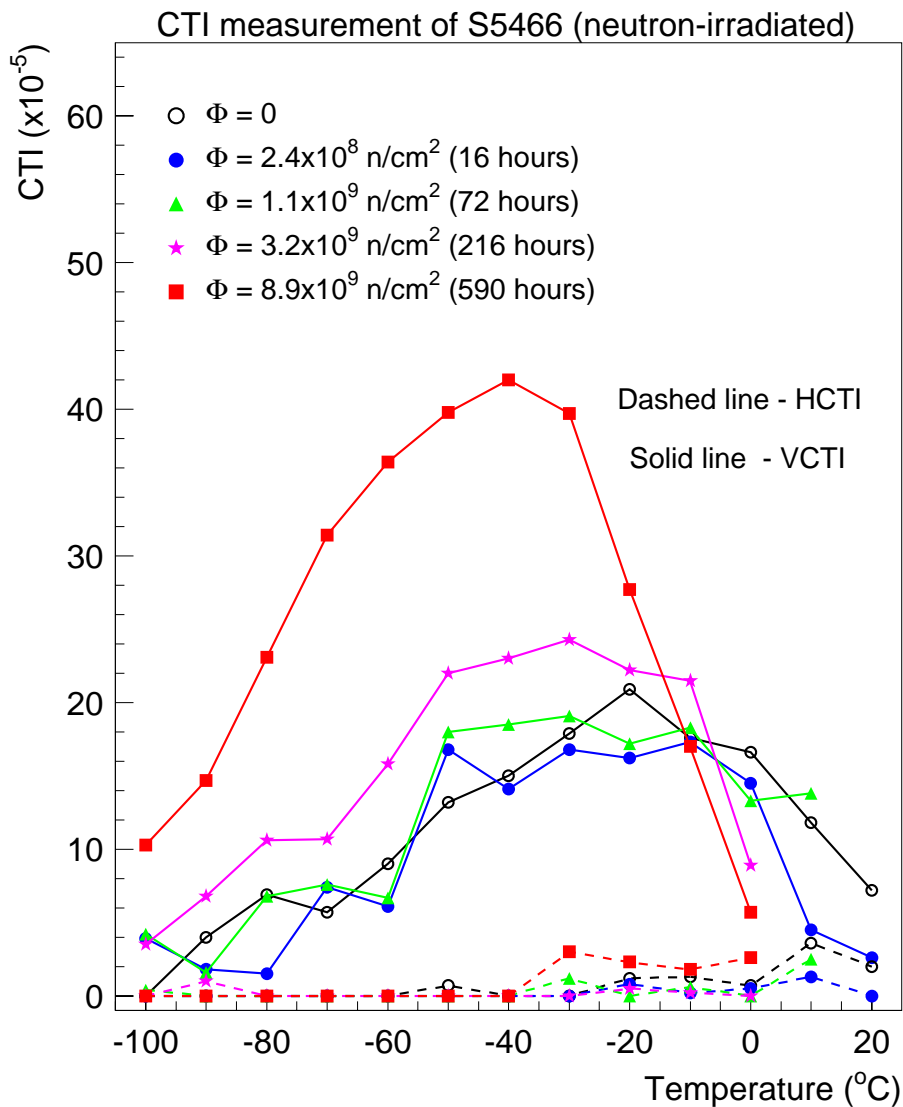
Horizontal CTI $0.2 \cdot 10^{-3}$: $(1-0.0002)^{1000} = 0.82$

-> Worst case: $0.82 \cdot 0.82 = 0.67$

CTIの測定方法

- ^{55}Fe からの**5.9keV X線**のスペクトルのピーク的位置と
CCD上の入射位置(すなわち転送回数)との相関から求める
- シャッター開：蓄積(約2秒間)
シャッター閉：読み出し(約1秒間)
(読み出しサイクル = 3秒)
- 測定温度： $-100^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$

Neutron Irradiated CCD



高温でのCTIの減少は、増加した暗電流がトラップを埋めてしまうことによる

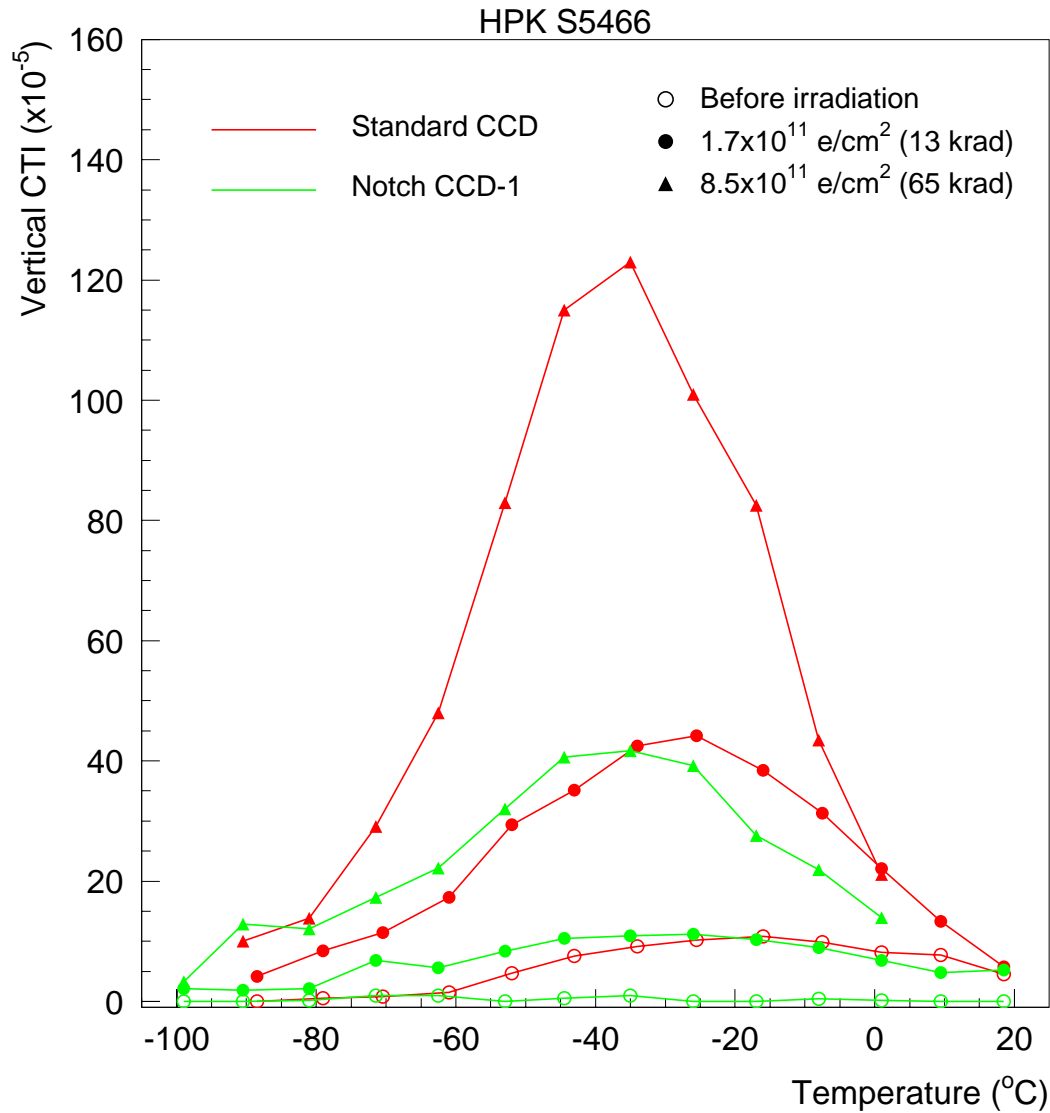
読み出し時間が短くなれば減少しなくなる

0°Cにおいて予想されるCTI:
CTI ~ 7×10^{-4} @ $8.9 \times 10^9 \text{ n/cm}^2$

CTI ~ 1×10^{-3} となるFluxは

$\sim 1.5 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$

Electron Irradiated CCD



0°CにおいてCTI~ 1×10^{-3}
となるFluxは

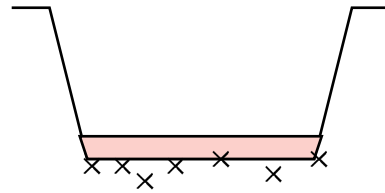
$\sim 3 \times 10^{11} \text{ e/cm}^2$

$\sim 1 \times 10^{12} \text{ e/cm}^2$ (ノッチ付き)

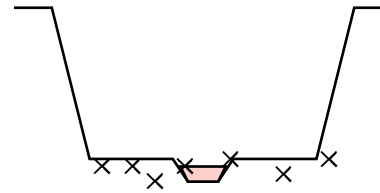
NIELのエネルギー依存性を
考慮に入れると、許容される
 e^\pm バックグラウンドはこの
値の1/5~1/10

ノッチ付きCCD

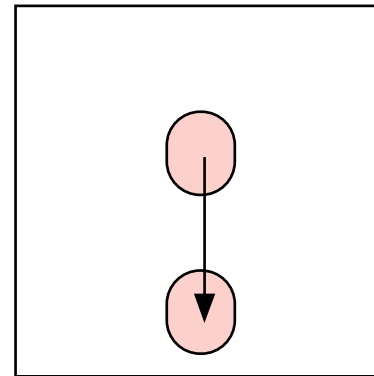
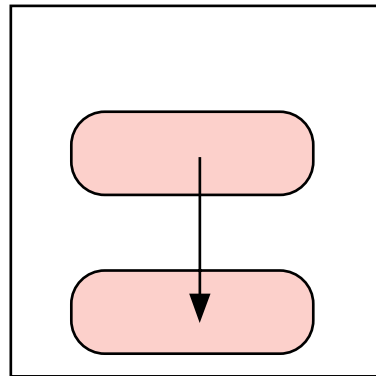
Normal CCD



Notch CCD



× Trap



まとめ

JLC実験で使われるバーテックス検出器の候補として、CCDのR&Dをおこなってきた。これまでの研究の結果、以下のことが明らかになった。

- 常温付近($>0^{\circ}\text{C}$)においても MIPに対して $S/N > 10$
- $3\mu\text{m}$ を切る空間分解能
- 放射線耐性 ;
 - **Inverted Mode** の採用によって、**Surface Damage**の影響は深刻ではない
 - CTI;
 - 0°C において
 - 中性子(^{252}Cf) : $\sim 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ -> JLC 100年分
 - 電子(^{90}Sr) : $\sim 3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$
 $\sim 10^{12}/\text{cm}^2$ (ノッチ付き) -> JLC 1年分
 - -100°C まで冷却すれば、さらに1桁程度の耐性の向上

結論 : - 新しい技術(Inverted Mode, ノッチ等)を採用することによって
CCDをJLCのバーテックス検出器に使えるメドが立った。
- 衝突点により一層近くに置くためにはさらなる放射線耐性の向上が必要
- 冷却運転のオプションも追求すべき