

# SLHCのためのシリコンマイクロストリップ 検出器の開発

**秦野 博光(筑波大)**

**金 信弘, 原 和彦, 三井真吾(筑波大)**

**池上 陽一, 海野 義信, 高力 孝, 寺田 進(KEK)**

**中野 逸夫, 田中 礼三郎(岡山大)**

**高嶋 隆一(京都教育大), 花垣 和則(阪大)**

**他アトラスSCTグループ**

# SLHC (Large Hadron Collider) 実験

**SuperLHC**: 2017年頃にルミノシティをさらに10倍にするupgrade

- ATLASの内部飛跡検出器をすべてシリコン検出器にする
- 現行のSCTシリコン検出器は、放射線耐性を上げたものと交換

SCT領域:  $R=30$  cmから  $88$  cmでは、 $8 \times 10^{14}$  から  $3 \times 10^{14}$  1-MeV  $n_{eq}/cm^2$  の放射線量が見込まれている (線量への寄与は、およそ、陽子:中性子=1:1)

## 本研究の目的

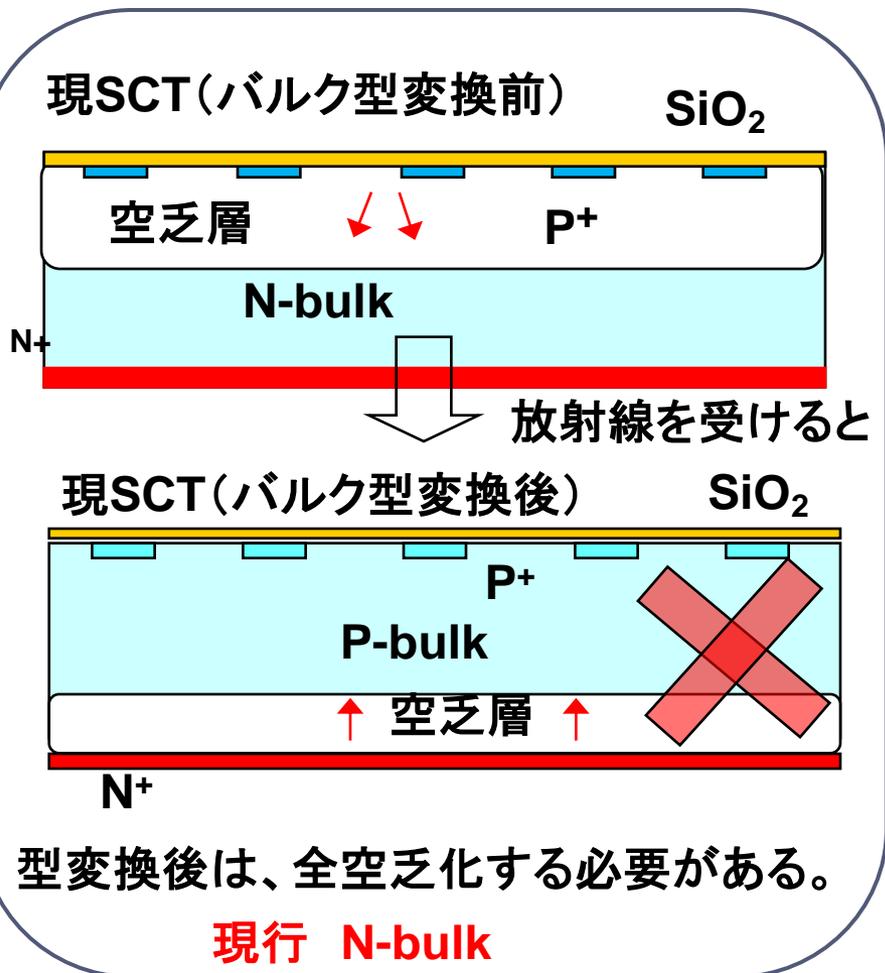
放射線耐性のあるセンサーをp型シリコンを用いて設計する  
1 cm<sup>2</sup>のテストセンサーを陽子や中性子照射して耐性を測定する

# シリコン検出器の放射線損傷

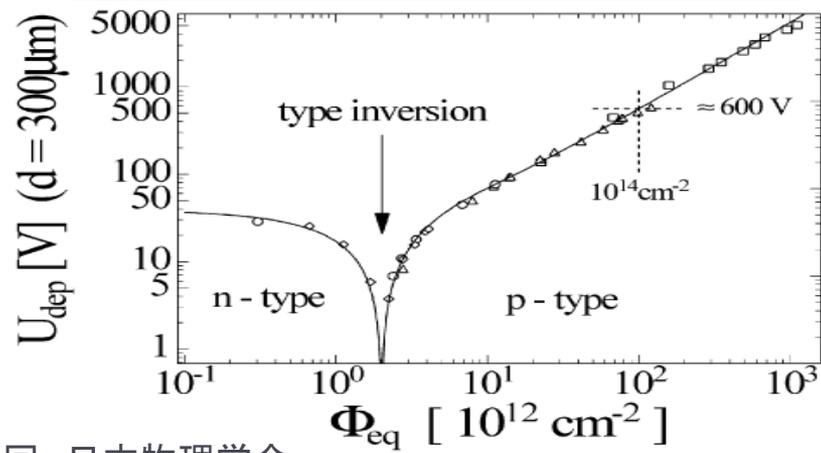
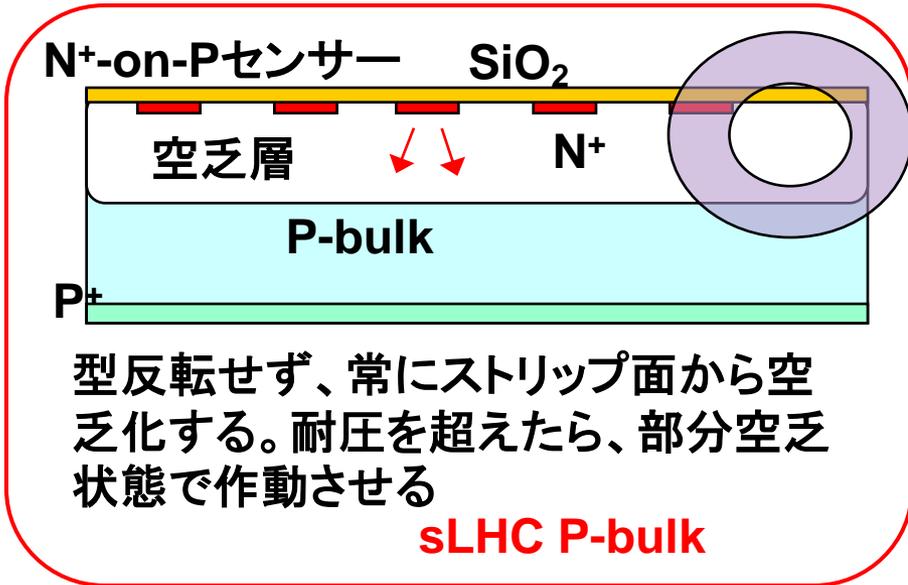
## 現SCT (p<sup>+</sup>-on-n)放射線耐性

~  $2 \times 10^{14}$  (1MeV-n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>)

LHCの10年分で、システム耐圧に達する。



## 高放射線耐性p型ウェハーセンサーの開発

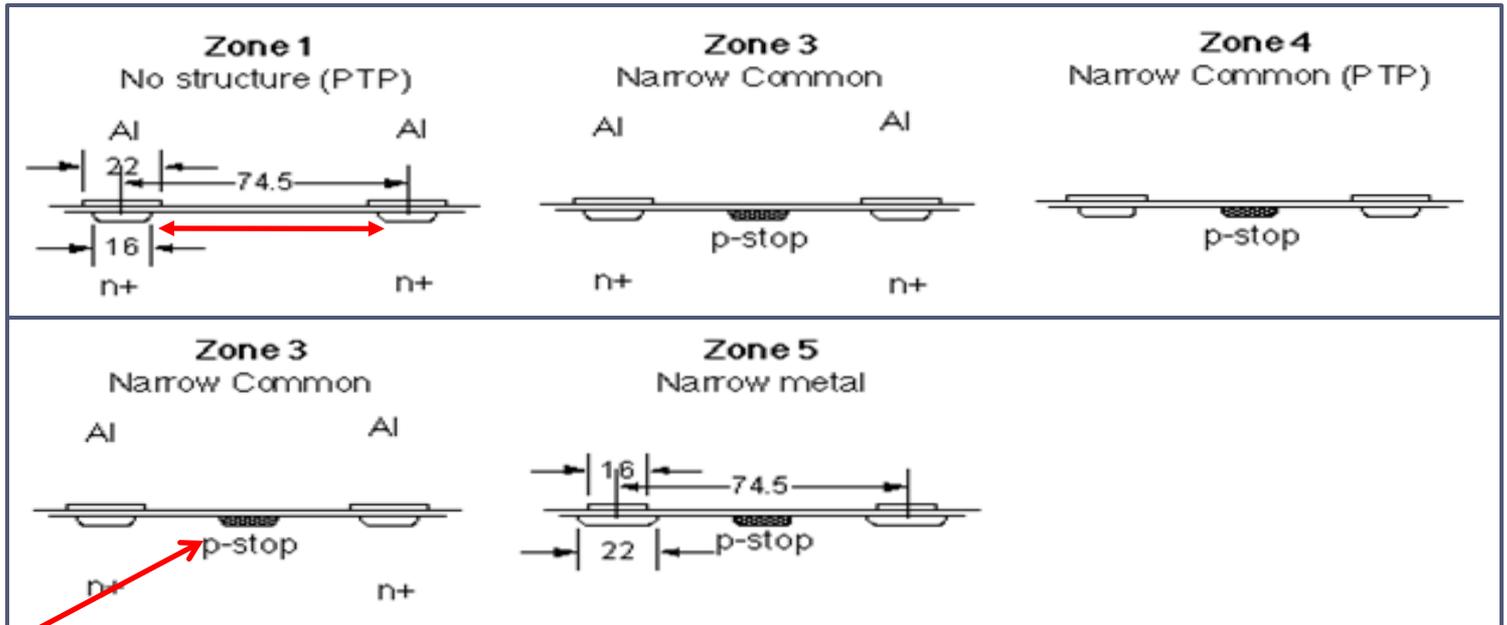


# P型シリコン検出器の開発

## P型センサー開発の問題点:

電子層がシリコン表面に蓄積しやすく電極分離劣化  
(電極分離構造P-STOPやP-SPRAYが必要?)

proton照射  
サンプル



neutron照射  
サンプル

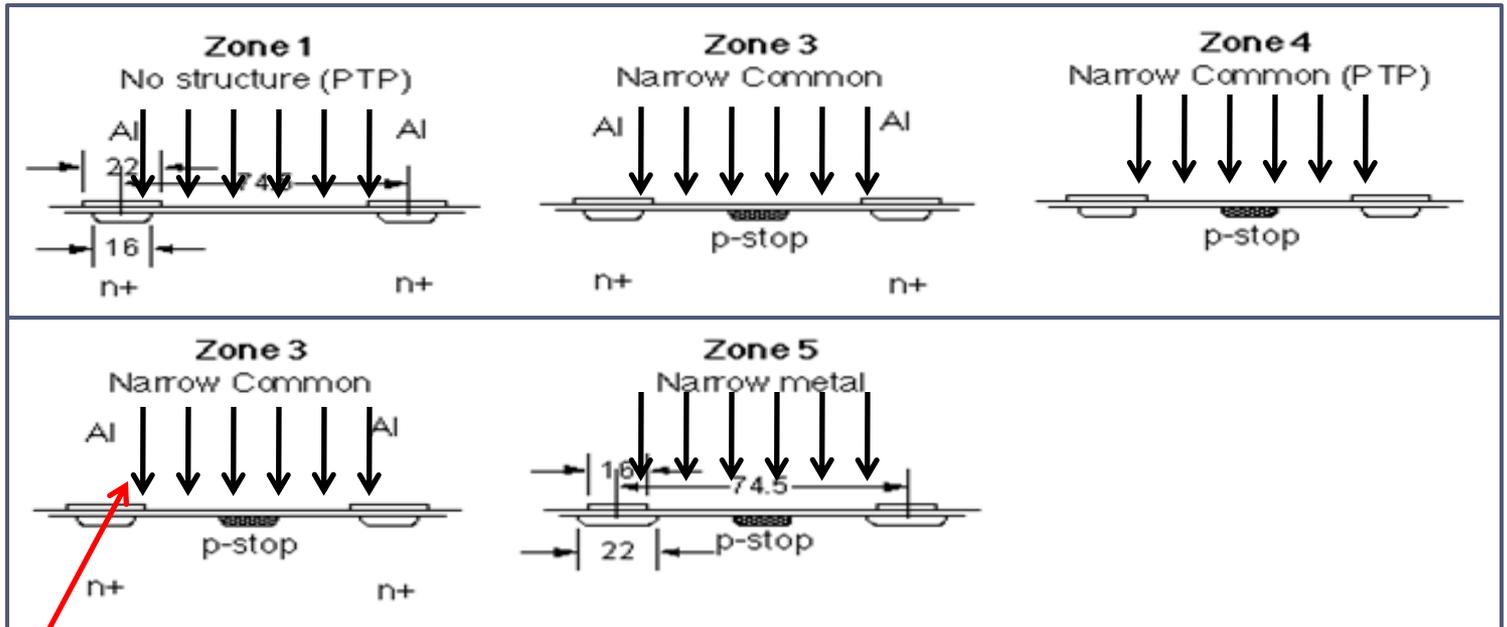
**pstop, pspray**: 酸化膜SiO<sub>2</sub>に正電荷が蓄積し、Pバルク部表面に引き寄せられた電子のために、ストリップ間が電氣的に繋がるのを防ぐ

# P型シリコン検出器の開発

## P型センサー開発の問題点:

電子層がシリコン表面に蓄積しやすく電極分離劣化  
(電極分離構造P-STOPやP-SPRAYが必要?)

proton照射  
サンプル



neutron照射  
サンプル

pstop, pspray: 酸化膜SiO<sub>2</sub>に正電荷が蓄積し、Pバルク部表面に引き寄せられた電子のために、ストリップ間が電氣的に繋がるのを防ぐ

# 照射

## ・proton照射:

東北大CYRICにおいて、70-MeVの陽子線を照射した

サンプル: Zone 1 (Pspray 有/無), 3, 4 (Pspray+Pstop, Pstopのみ)

Fluence: 2.3, 6.0, 13.2 $\times 10^{14}$  1-MeV  $n_{eq}/\text{cm}^2$

合計サンプル数: Zoneの違い  $\times$  sprayのあるなし  $\times$  放射線量 = 3  $\times$  2  $\times$  3 = 18

## ・neutron照射:

スロバキアのLiubljlana原子炉において、中性子を照射

サンプル: Zone 3, 5 (Pspray+Pstop, Pstopのみ)

Fluence: 2, 5, 10 $\times 10^{14}$  1-MeV  $n_{eq}/\text{cm}^2$

合計サンプル数: Zoneの違い  $\times$  sprayのあるなし  $\times$  放射線量 = 2  $\times$  2  $\times$  3 = 12

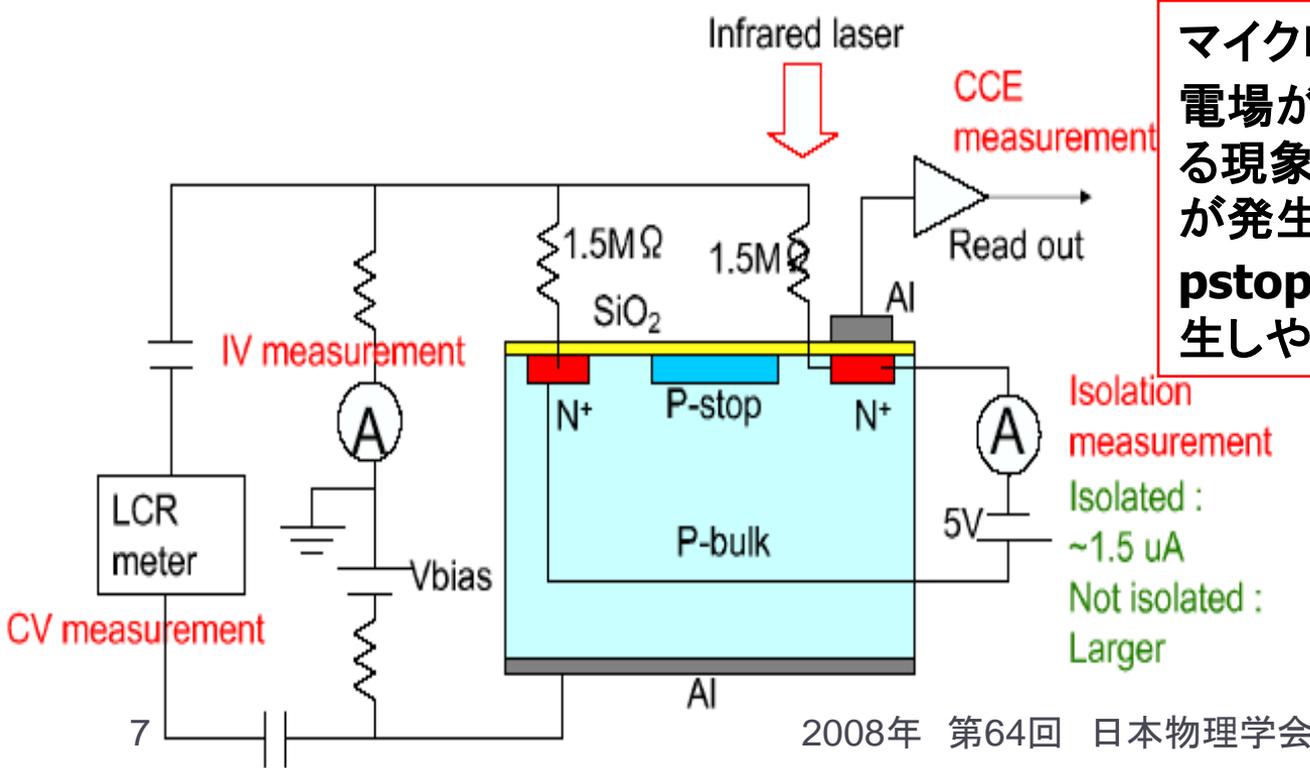
# センサー特性の測定

**I-V測定**: マイクロ放電の発生

**Isolation**: ストリップ間が電氣的に分離しているか評価

**C-V測定**: 全空乏化電圧の評価

測定は、全サンプルをアニーリング後(60°Cの恒温槽に80分)におこなった



## マイクロ放電

電場が局所的に強くなると発生する現象。高電場によって電子雪崩が発生し急激に電流が増大する。**pstop**のような構造が加わると発生しやすい

# I-V

X-axis: Bias: 0~1kV

Y-axis: Leakage current@-20°C: 0~25uA

p/n照射量の差

Pstopのみ  
(Z1は構造なし)

青: proton z1

黄緑: proton z3

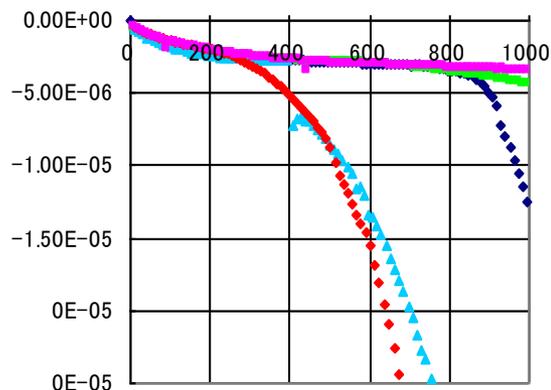
水色: proton z4

赤色: neutron z3

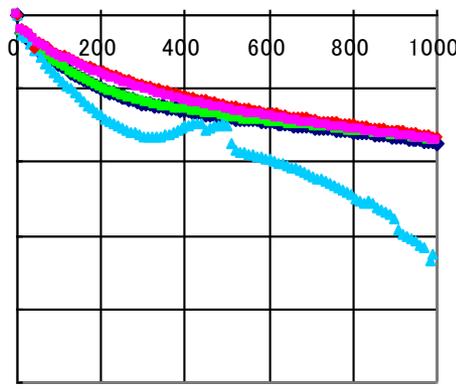
ピンク: neutron z5

Stop+Spray

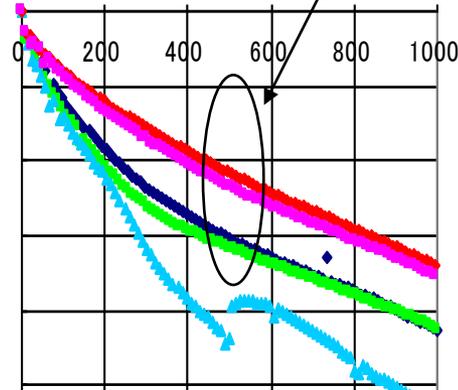
(Z1はsprayのみ)



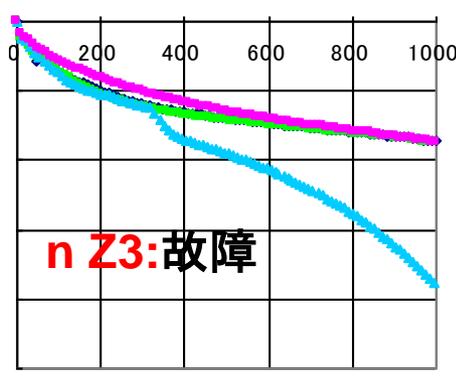
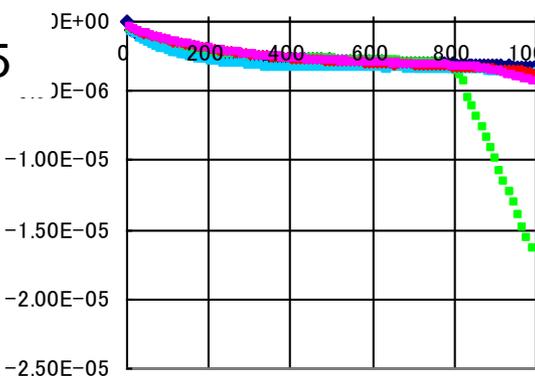
p2.1, n2.0 ( $\times 10^{14}$ )



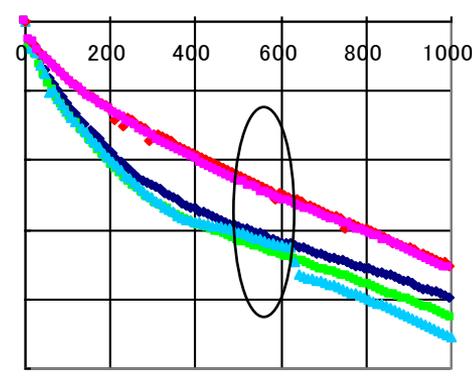
6.0, n5.0 ( $\times 10^{14}$ )



p13.2, n10.0 ( $\times 10^{14}$ )



n Z3:故障



Zone4を除き、Pstopの構造やPsprayの有無による違いはみられない  
Zone4に関しては、現在調査中。照射量 $2.0 \times 10^{14}$ でMDを確認

# C-V

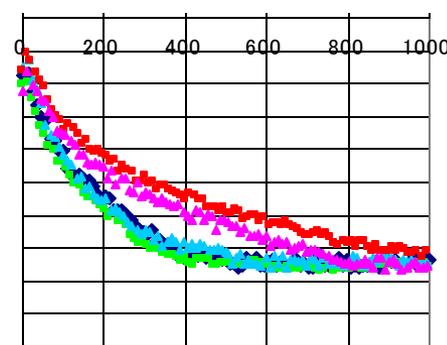
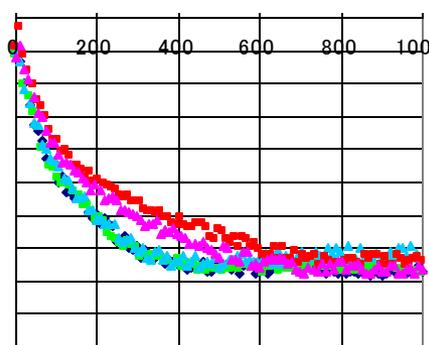
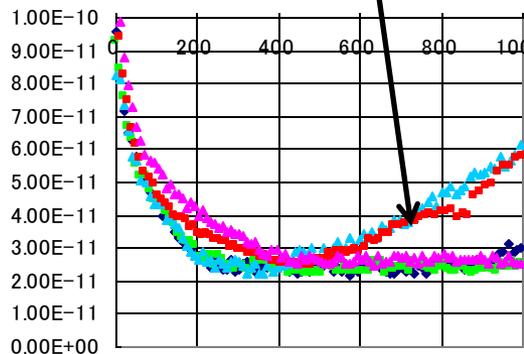
X-axis: Bias: 0~1kV

Y-axis: Bulk Capacitance (0~100 pF)

## I-Vの影響

AP (80)Dn5-5

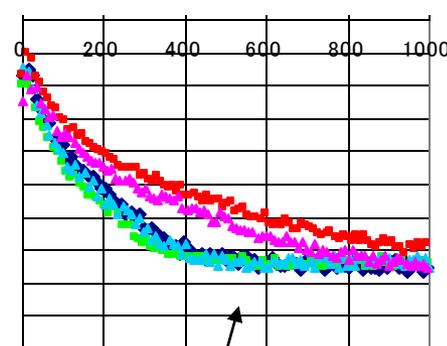
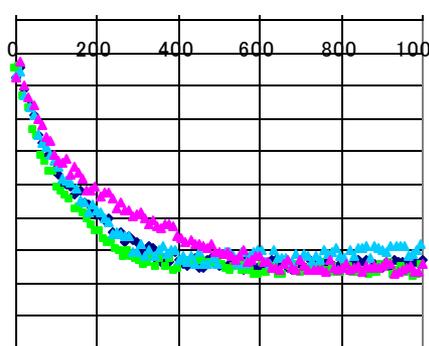
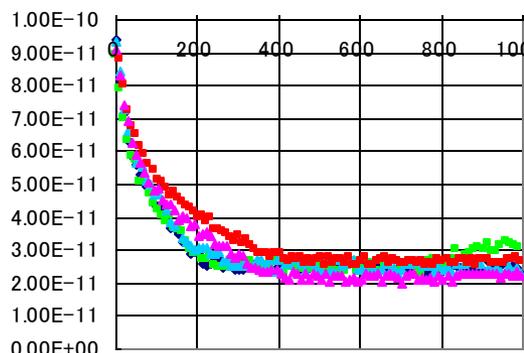
AP (80)Dn10-10



p2.1, n2.0 ( $\times 10^{14}$ )

6.0, n5.0 ( $\times 10^{14}$ )

p13.2, n10.0 ( $\times 10^{14}$ )



Pstopの構造やPsprayの有無による違いはみられない  
nによる損傷はpよりも大きい

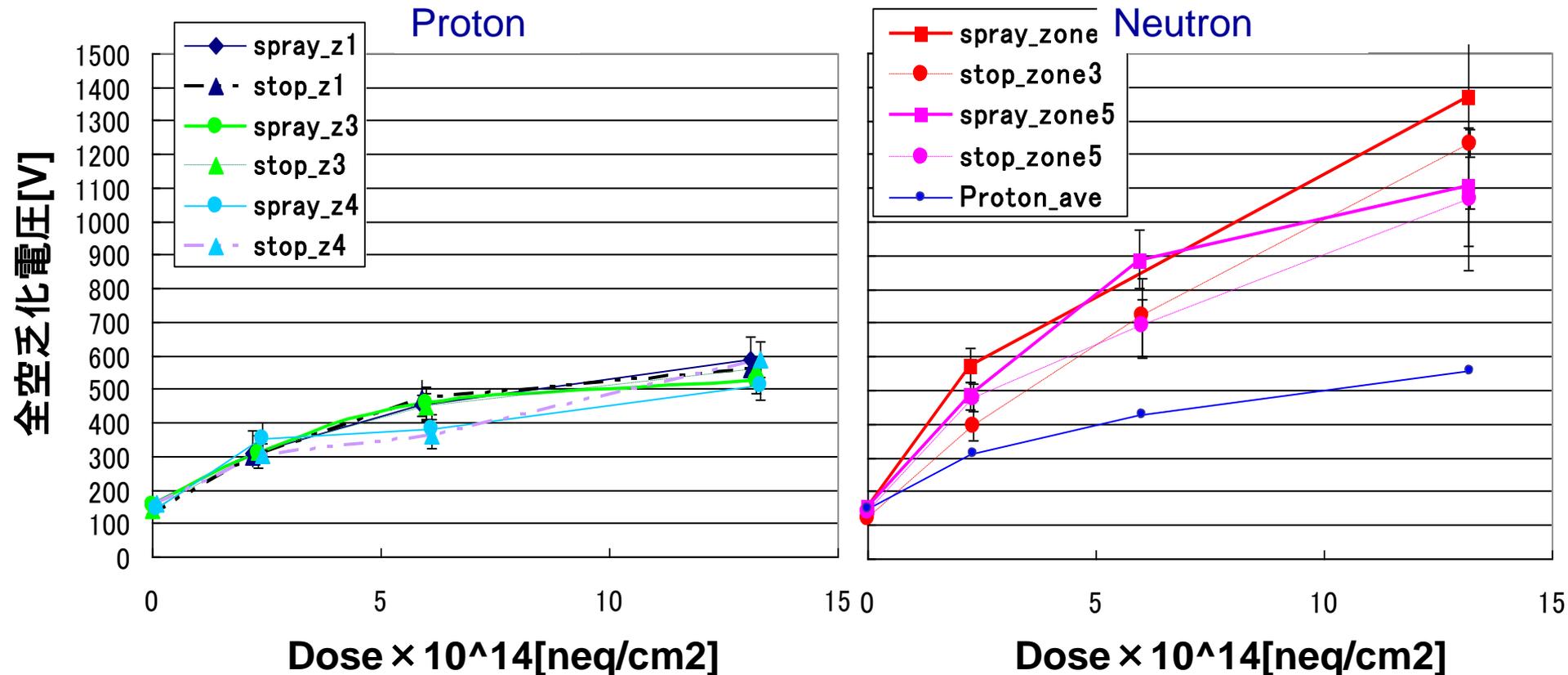
Pstopのみ  
(Z1は構造なし)

青: proton z1  
黄緑: proton z3  
水色: proton z4  
赤色: neutron z3  
ピンク: neutron z5

Stop+Spray  
(Z1はsprayのみ)

# 全空乏化電圧

1/C<sup>2</sup>はバイアス電圧に比例し、全空乏化後は一定になることから評価



NIEL (non-ionizing energy loss) 係数で規格化したprotonとneutron照射量は、シリコンの損傷(全空乏化電圧の上昇)をスケールできない可能性がある

→ より系統的な、protonとneutron 照射実験が必要

# Isolation

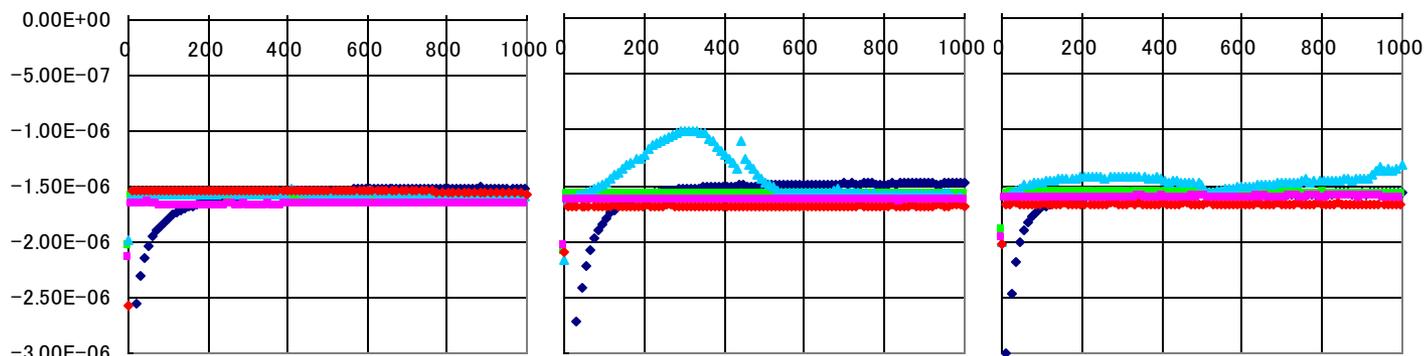
X-axis: Bias 0~1kV

Y-axis: inter DC pads current  $-3\mu\text{A}\sim 0$

AP f(80)Dn2-2

AP f(80)Dn5-5

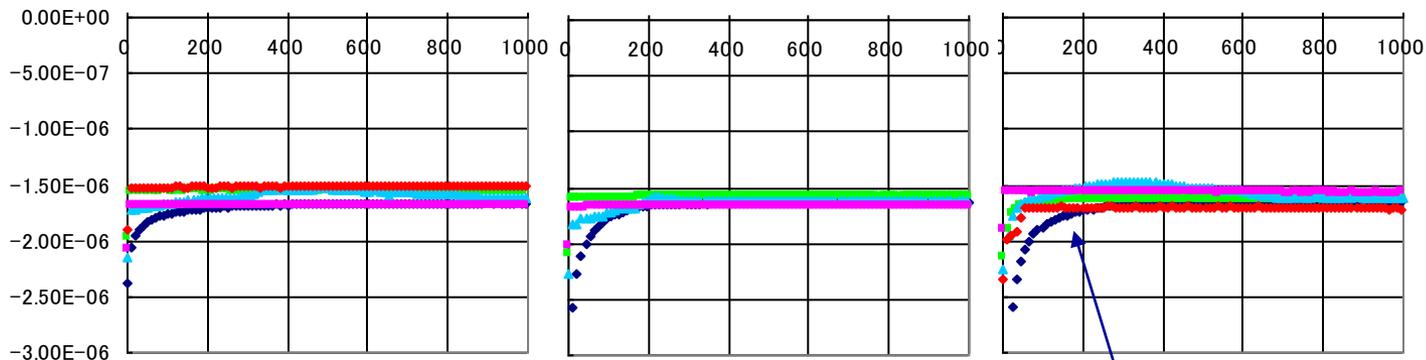
AP f(80)Dn10-10



p2.1, n2.0 ( $\times 10^{14}$ )

6.0, n5.0 ( $\times 10^{14}$ )

p13.2, n10.0 ( $\times 10^{14}$ )



Pstopのみ  
(Z1は構造なし)

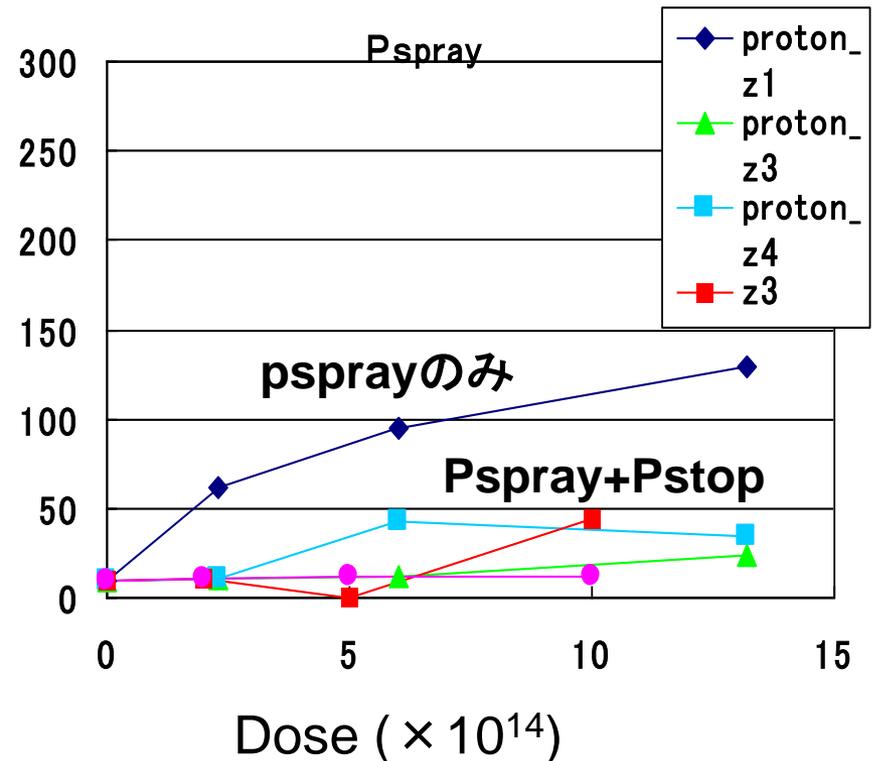
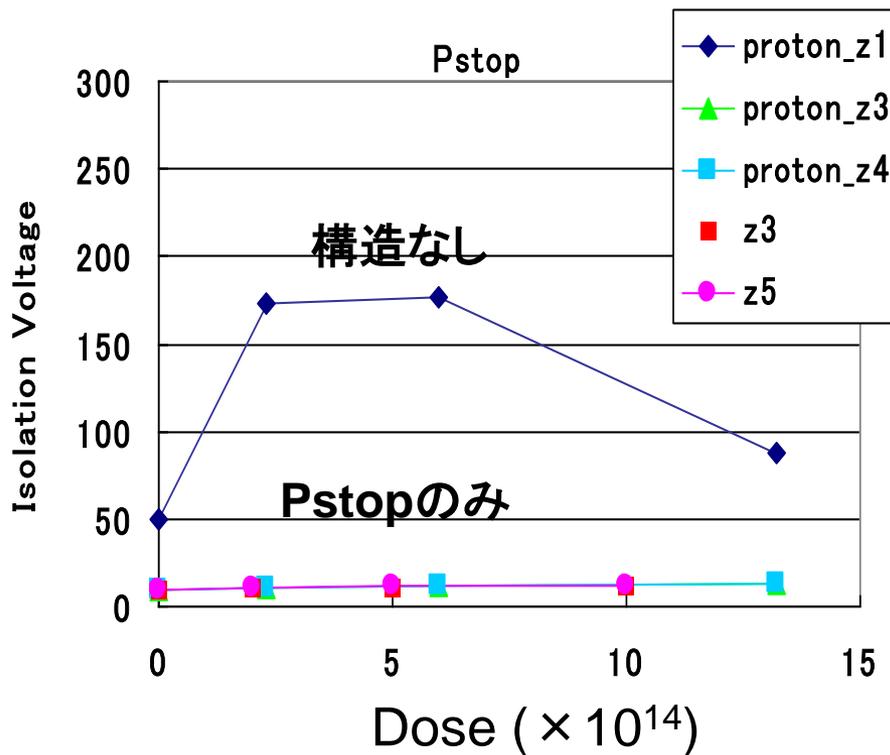
- 青: proton z1
- 黄緑: proton z3
- 水色: proton z4
- 赤色: neutron z3
- ピンク: neutron z5

Stop+Spray  
(Z1はsprayのみ)

電流値がplateauになった値を1.1倍し、その電流値をこえたBiasの値をIsolation Voltageと定義

電極分離が達成し、バイアス抵抗で決まる電流値に漸近

# Isolation Voltage



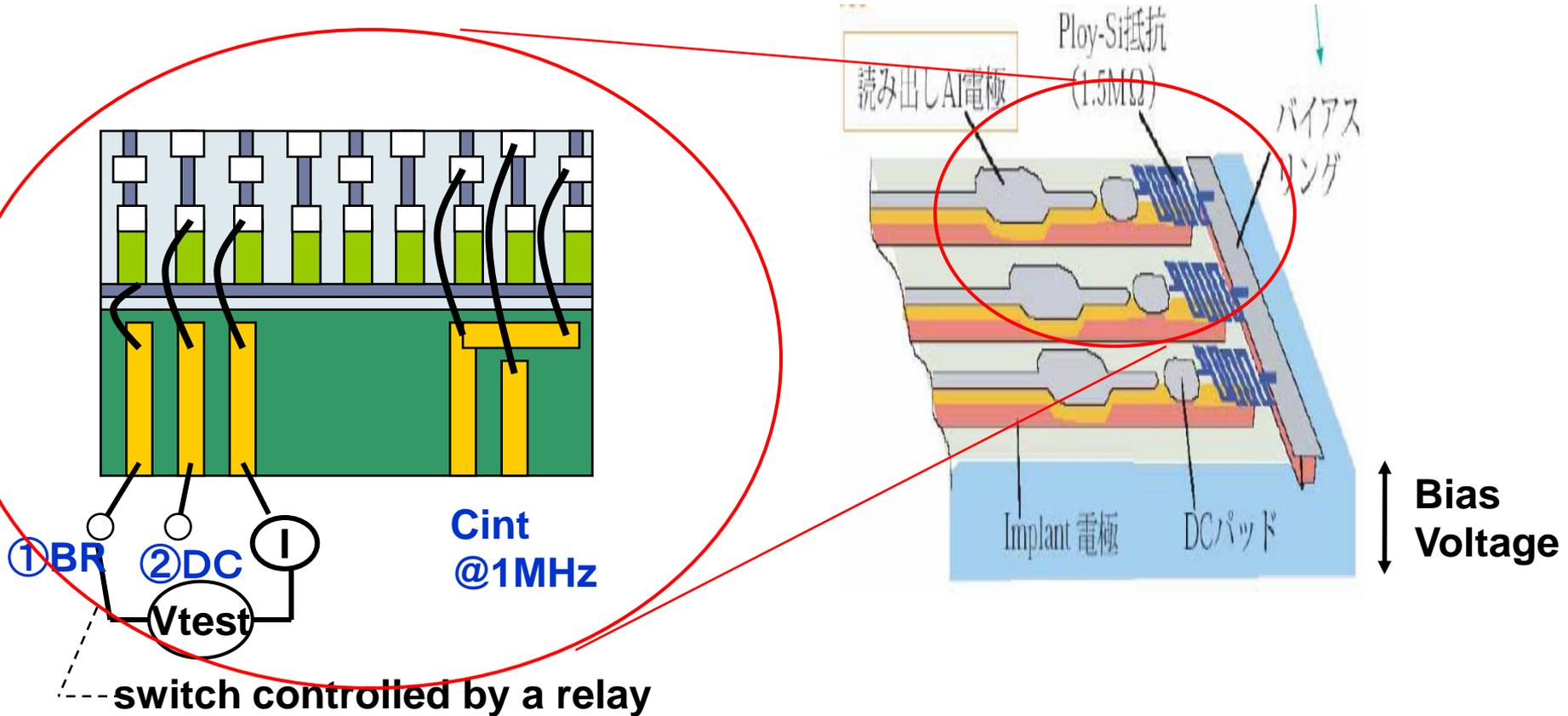
Zone1以外: 数V~50VでIsolationを達成  
 Zone1: 200V以下で達成

運転電圧以下なので、すべて使用可能であるが、照射時の電極分離の安定性を評価する必要がある: コバルト照射時の測定実験を実施中

# Rbias, Cintの測定

バイアス抵抗Rbiasや電極間容量Cint(1MHz) (どちらもノイズと関与)の特性が照射により変化するか？

Bias Voltageを0V~1000Vまで変えながら測定(照射前は20°C、照射後は-20°C)



Rbias:①で $V_{test}=\pm 5V$

②はIsolation測定用

# Rbias

X-axis: Bias 0~1kV

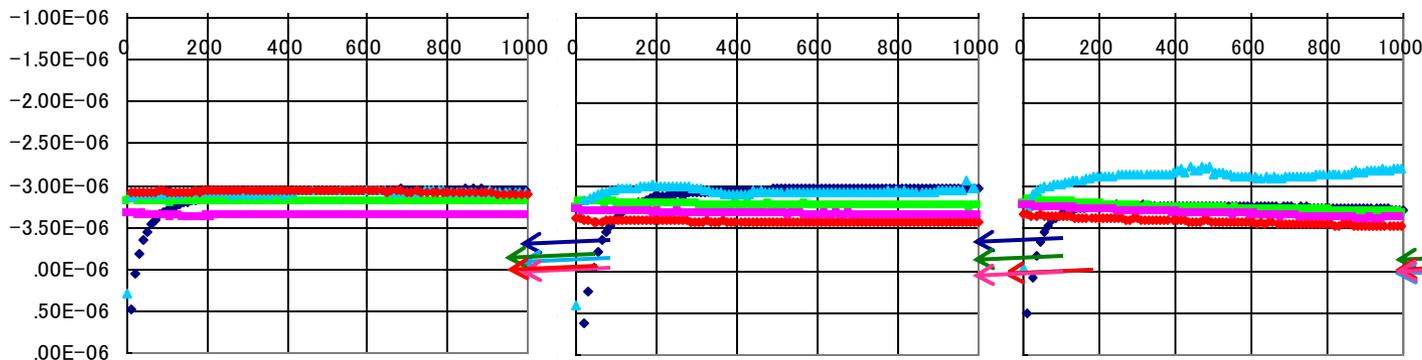
Y-axis: DC-BR current 1~5 $\mu$ A

矢印は、照射前の値

AP (80)Dn5-5

AP (80)Dn10-10

Pstopのみ  
(Z1は構造なし)



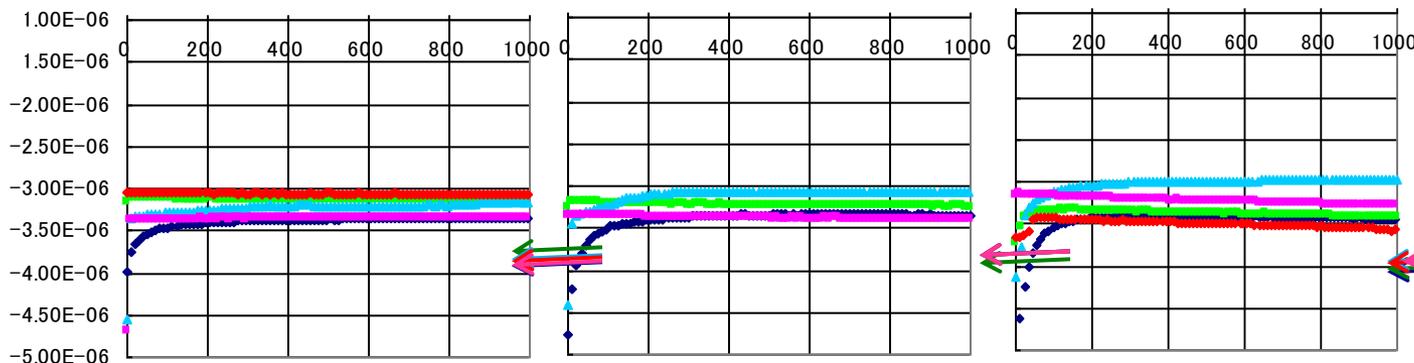
p2.1, n2.0 ( $\times 10^{14}$ )

6.0, n5.0 ( $\times 10^{14}$ )

p13.2, n10.0 ( $\times 10^{14}$ )

青: proton z1  
黄緑: proton z3  
水色: proton z4  
赤色: neutron z3  
ピンク: neutron z5

Stop+Spray  
(Z1はsprayのみ)



照射前後で30%程度の差がみられるが、照射量に依存する変化はない  
⇒ 表面状態の変化が主で、ポリシリコンの変化は小さい

# Cint

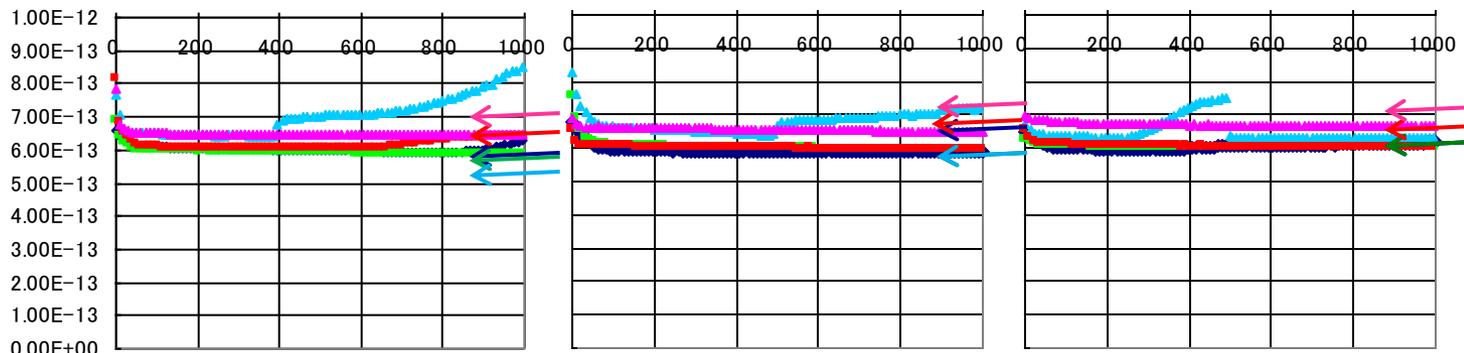
X-axis: Bias 0~1kV

Y-axis: interstrip capacitance 0~1pF

矢印は、照射前の値

AP (80)Dn5-5

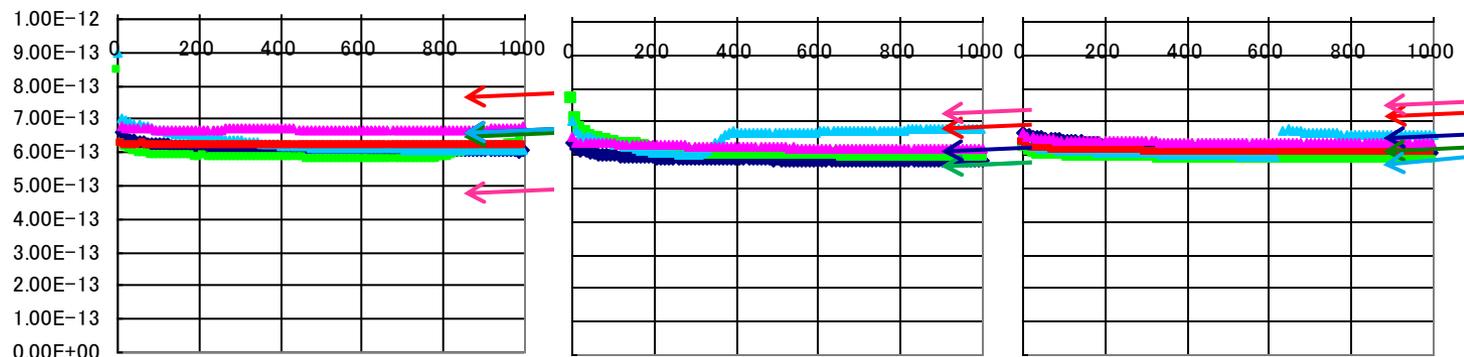
AP (80)Dn10-10



p2.1, n2.0 ( $\times 10^{14}$ )

6.0, n5.0 ( $\times 10^{14}$ )

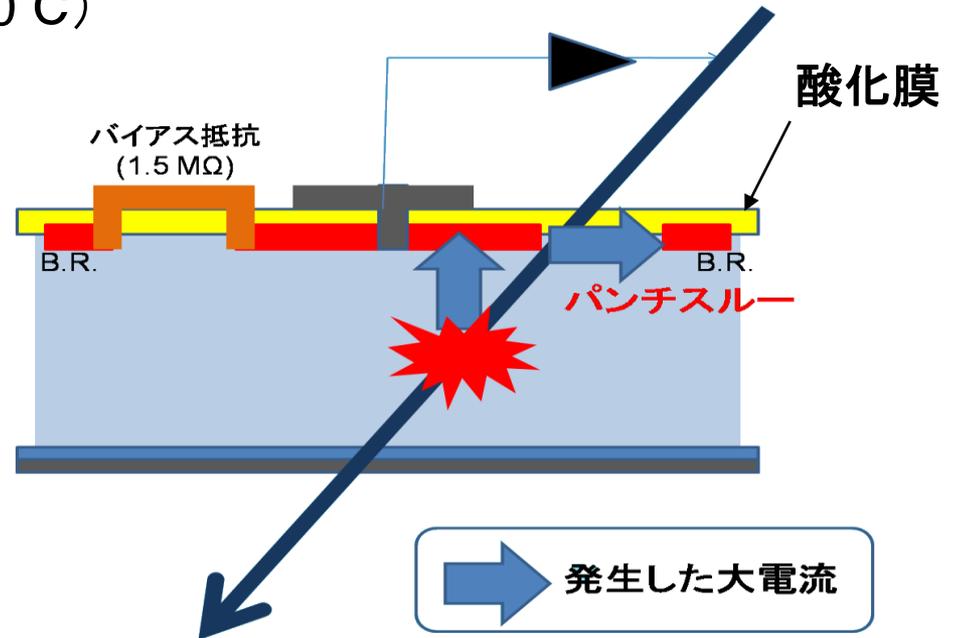
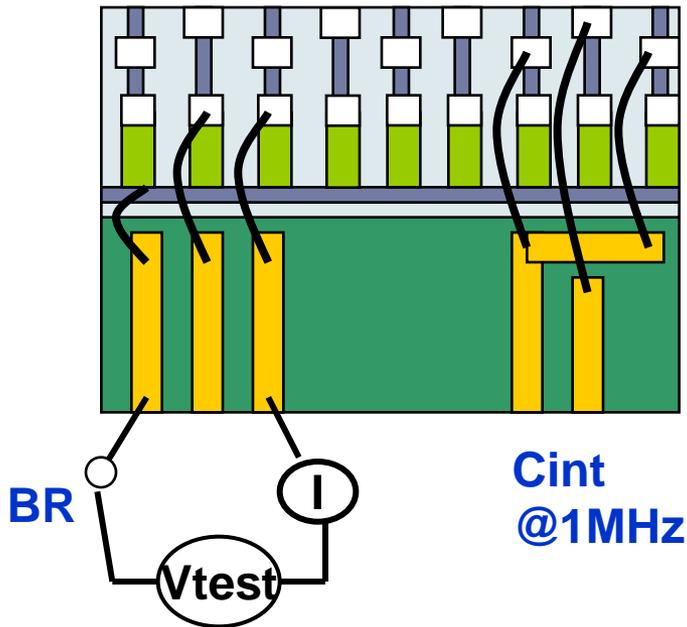
p13.2, n10.0 ( $\times 10^{14}$ )



照射前後で最大16%の差がみられるが、照射量に依存した変化は見られない

# PTP測定

Bias Voltage: 300Vで測定(照射後-20°C)



PTP:  $V_{test} = 0V \sim \pm 100V$

**PTP** (punch-through protection)  
ビームロスなど大電流発生時に、酸化膜を保護する  
P電極とバイアスリング間距離を適正に設計し、  
 $0V < V_{pt}(\text{パンチスルー達成電圧}) < 100V$

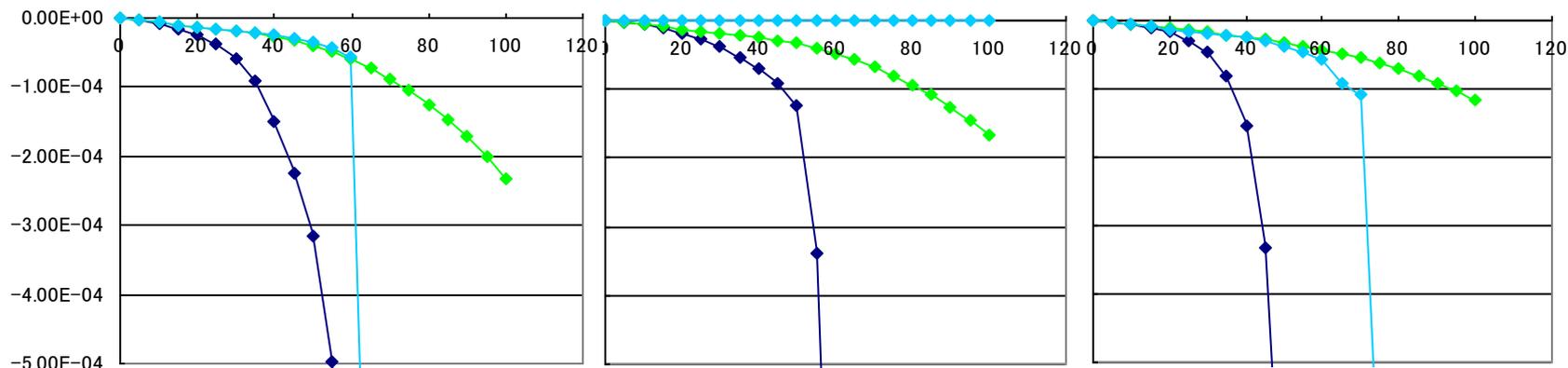
# PTP測定

青: proton z1 (PTP設計あり)  
 黄緑: proton z3  
 水色: proton z4 (PTP設計あり)

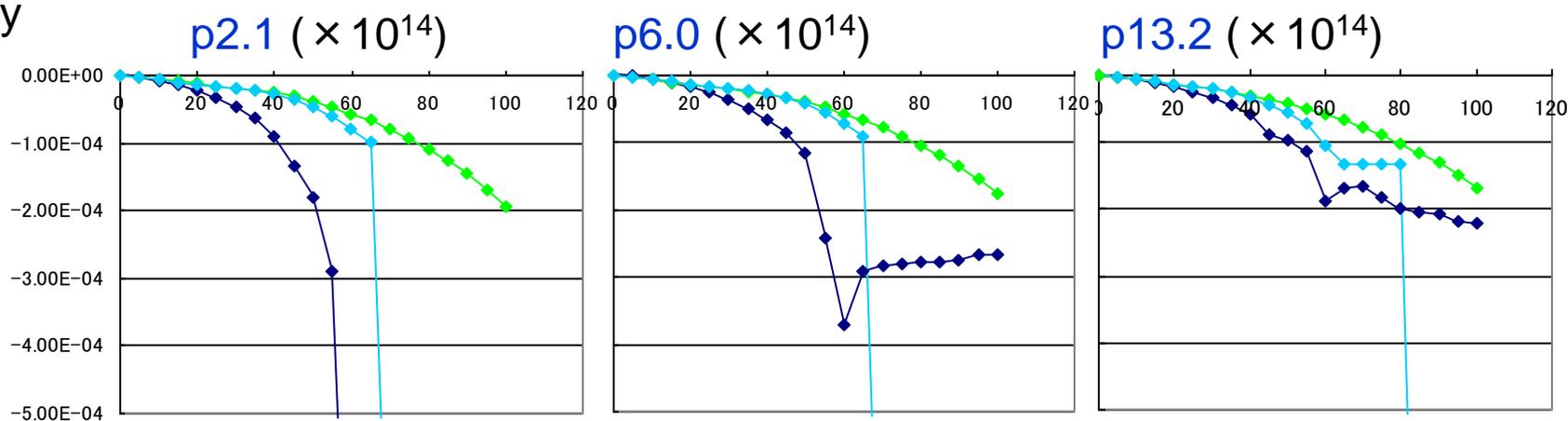
X-axis: テスト電圧 0~100V  
 Y-axis: DC-BR current: 0~5mA

AP 10-10

stop

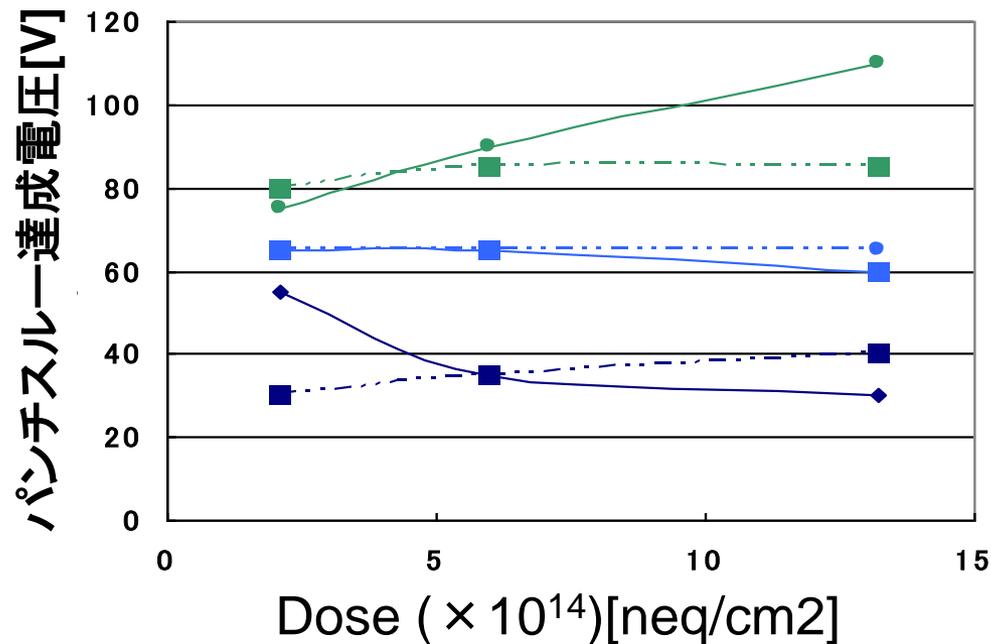


stop+spray



$R_{pt} = -V \times R_{bias}(1.5M\Omega)/(V - I \times R_{bias})$ の関係がある  
 $R_{pt}$ が1.5M $\Omega$ となる値をパンチスルー達成電圧として評価

# パンチスルー達成電圧



PTP設計したZ1やZ4のパンチスルー電圧は100V以下で、照射により劣化することはない。

# Summary

## SLHC用p型シリコン検出器の放射線耐性を、 protonとneutron照射により評価した

- **I-V**:  $2 \times 10^{14}$  pstopサンプル→MDを確認  
他のサンプル→pstopの構造やpsprayの有無による暗電流の違いはみられない
- **全空乏化電圧**(500V以下で全空乏化がのぞましい)  
proton: 600V以下で全空乏化, neutron: 1300V以下で全空乏化
- **Isolation**: (運転電圧よりも十分低いこと) ⇒proton/neutronで差はなかった  
Zone1以外: 50V以下でIsolationを達成, Zone1: 200V以下で達成している
- **Cint**: ⇒proton/neutronで差はなかった  
照射前後で最大16%の変化、照射量への依存はみられない
- **Rbias**: ⇒proton/neutronで差はなかった  
照射前後で最大30%の変化、照射量への依存はみられない
- **PTP**: PTP設計が実証され、照射により劣化することもない

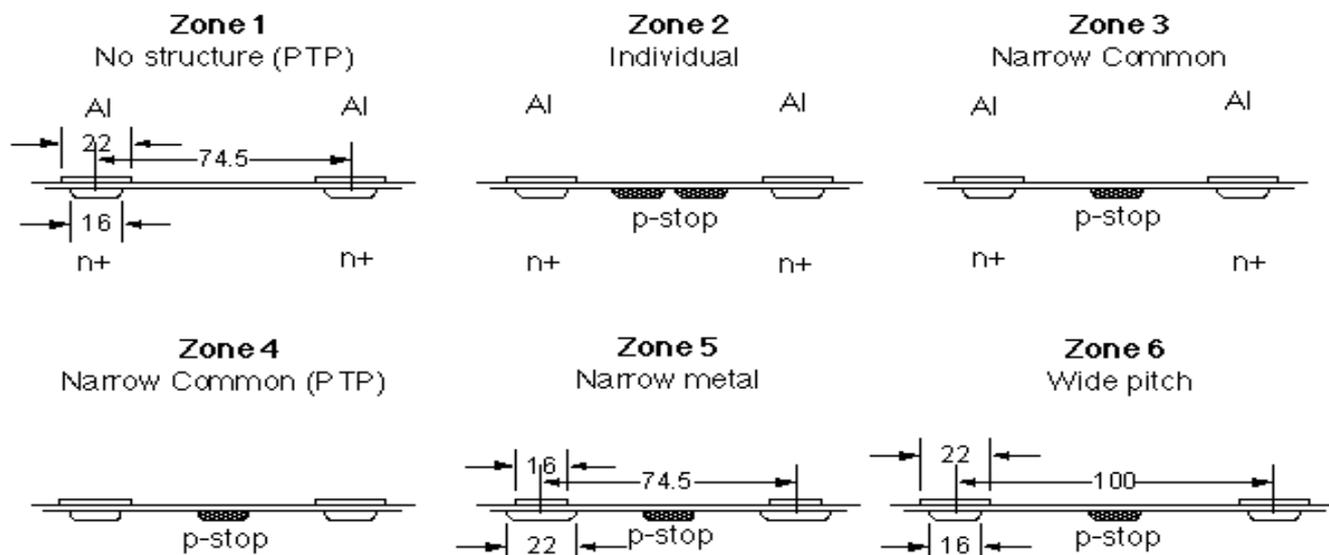
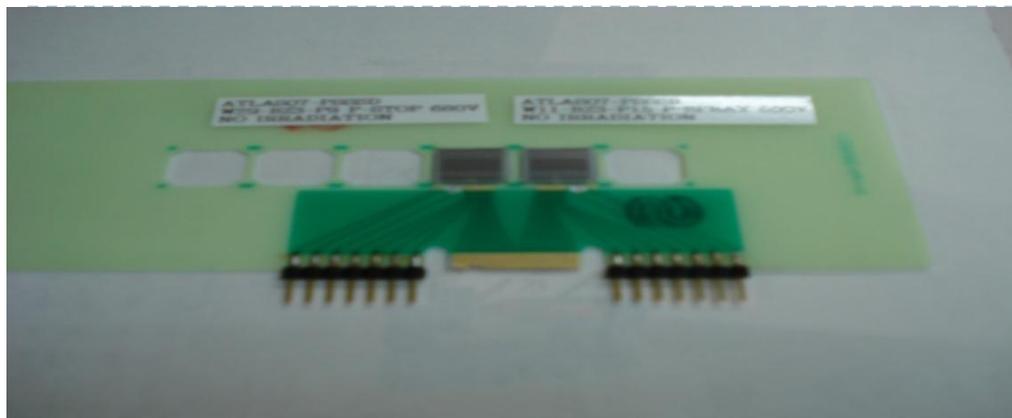
実機サイズのセンサーを製作するための測定評価を行ってきた。  
今後は、照射時のセンサー表面の変化をみるためのコバルト照射実験  
実機サイズのセンサーでの性能評価



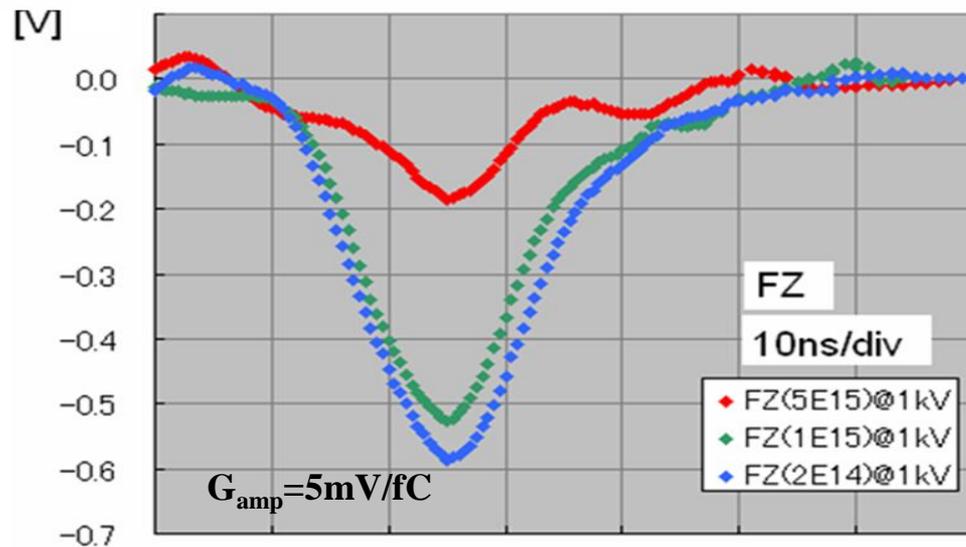
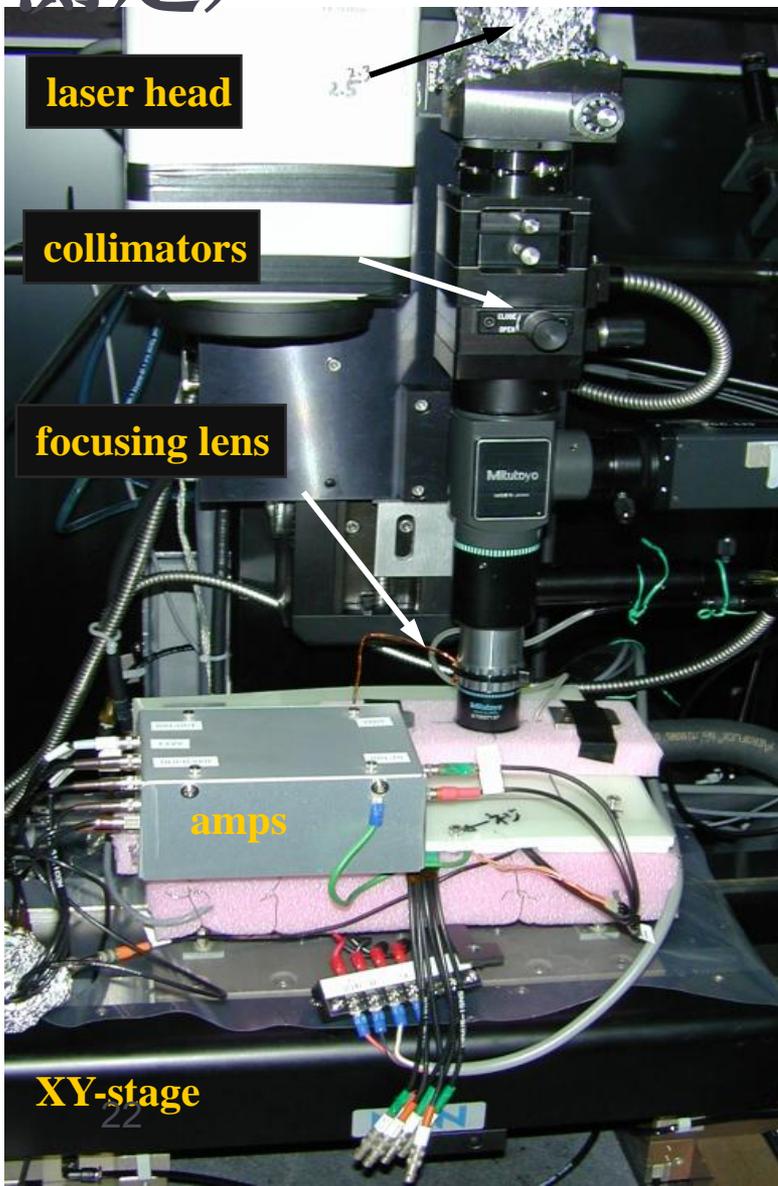
---

# BACK UP

# 写真

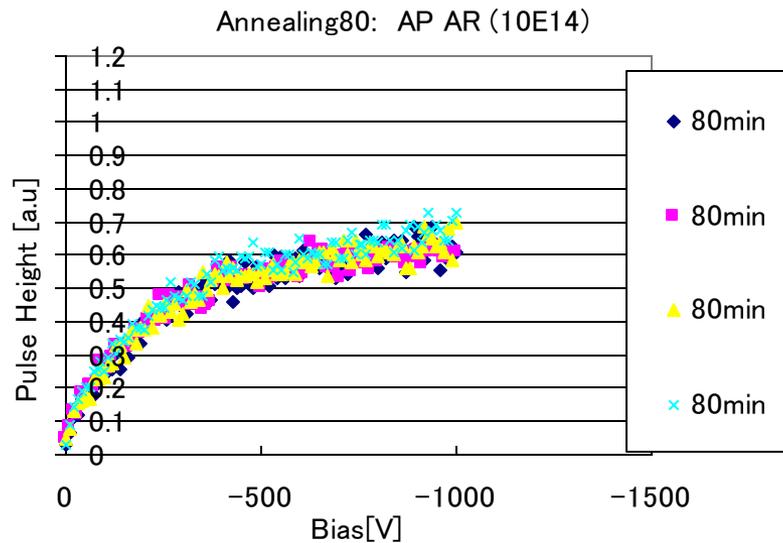
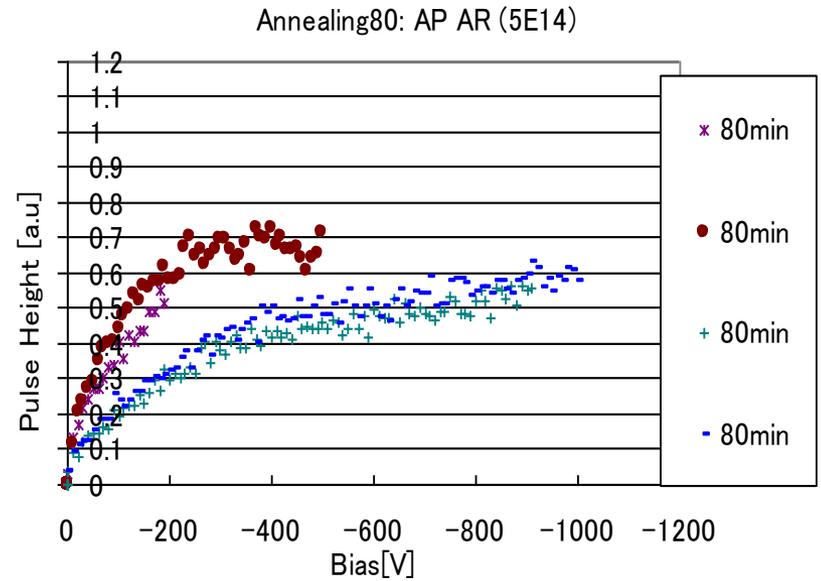
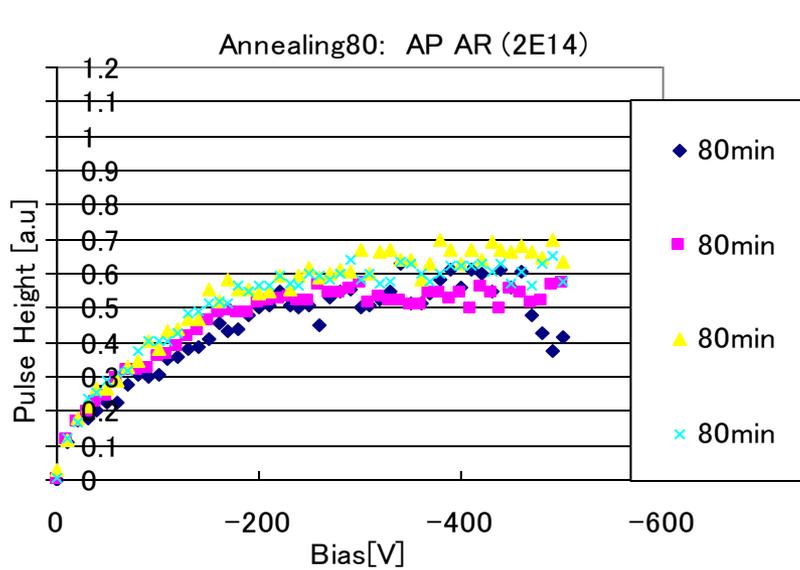


# レーザーによる収集電荷の測定 (CCE測定)



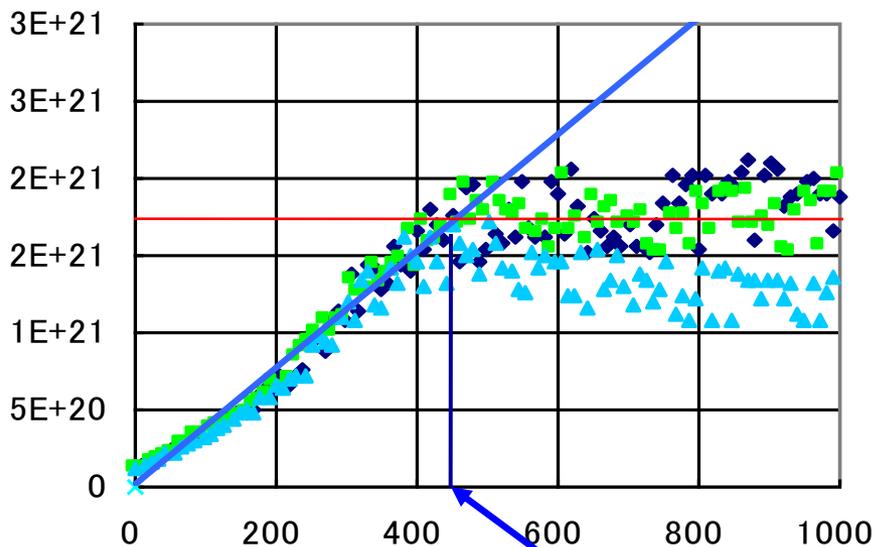
パルスNd:YAG(1064nm)はSiの内部まで侵入するので、通過する粒子に対する応答に近い信号を得られる。図は $1\sim 10\times 10^{15}$ 照射後の応答

(V<sub>b</sub>=1kV) 日本物理学会



# 全空乏化電圧

## LCRメーターによる測定

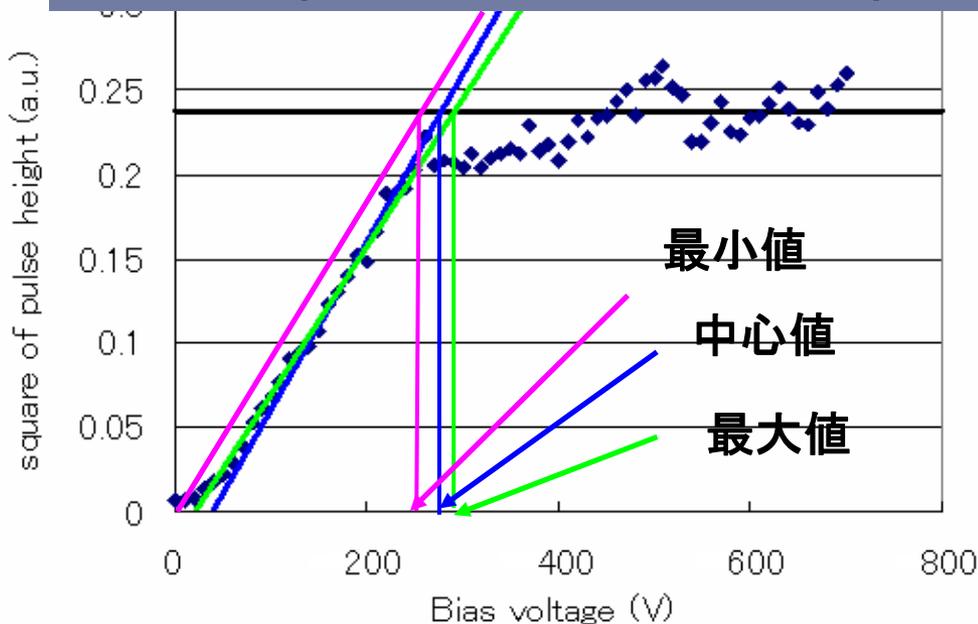


全空乏化電圧

$1/C^2$ はバイアス電圧に比例し、全空乏化後は一定になる。

$$C_{bulk} = S \sqrt{\frac{e\epsilon}{2V} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}$$

## CCE測定(レーザーによる収集電荷)

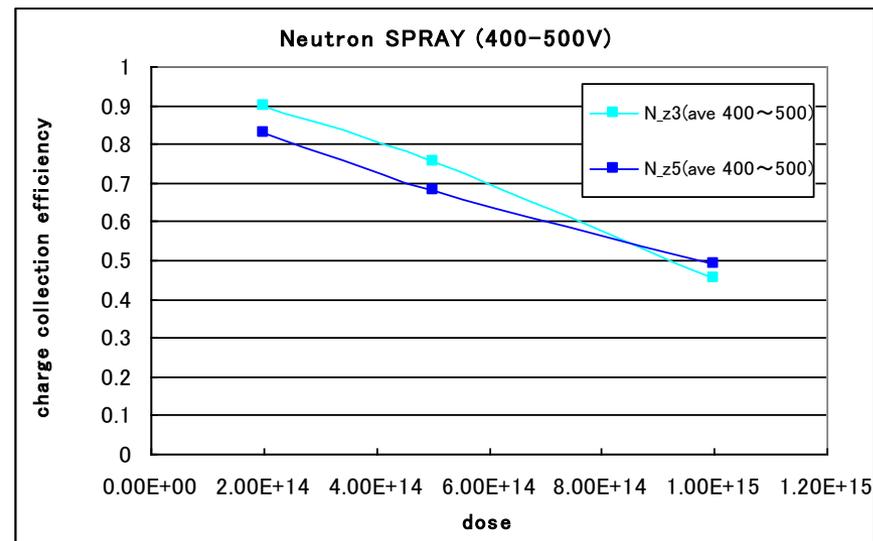
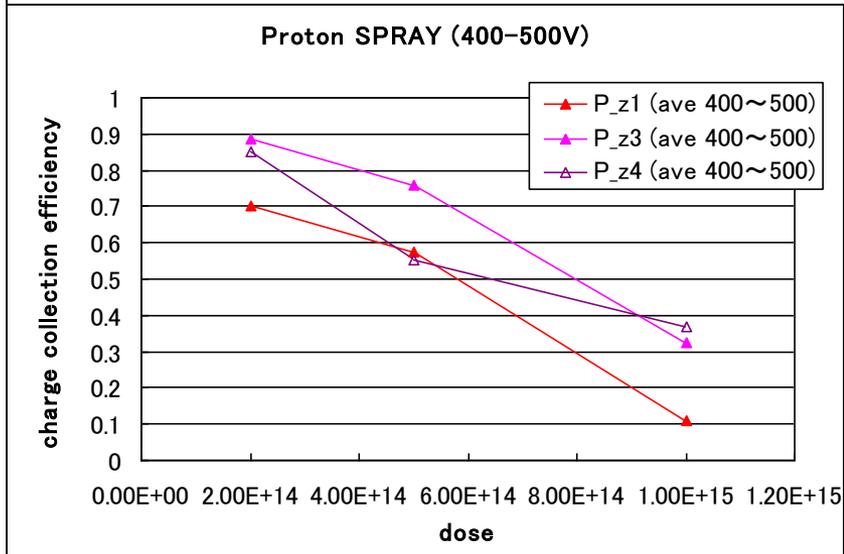
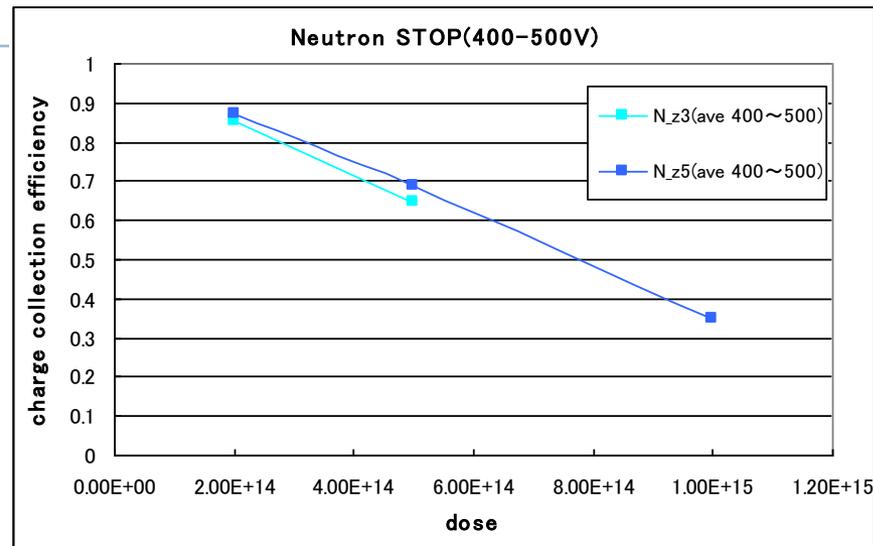
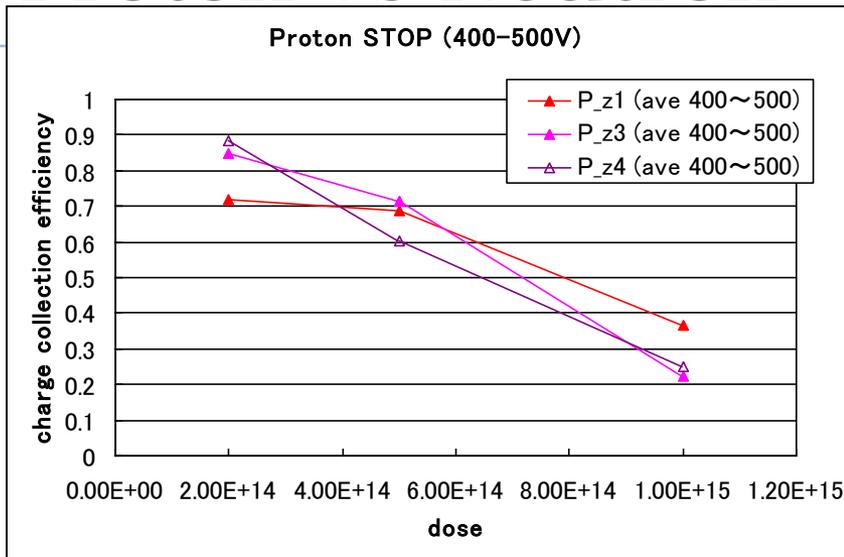


収集電荷は空乏層の厚さに比例。収集電荷の2乗はバイアス電圧に比例し、全空乏化後は一定になる。

$$d = \sqrt{\frac{2eV}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

( $N_A$ =アクセプタ密度  $N_D$ =ドナー密度  $\epsilon$ =シリコン誘電率  $V$ =逆バイアス電圧  $e$ =素電荷  $d$ =空乏層の厚さ)

# Proton vs Neutron



▶ Preliminary!!