

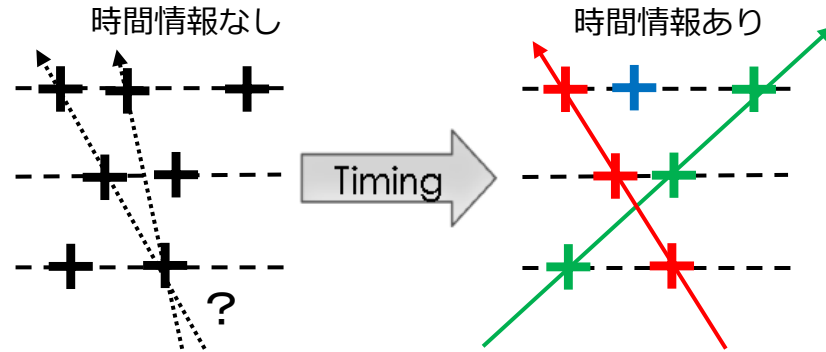
# 新型LGAD飛跡検出器(ACLGAD)の細密化と放射線耐性に関する研究

筑波大学 修士1年  
植田 樹

北彩友海, 原和彦, 中村浩二<sup>^A^</sup>, 鈴木尚紀  
筑波大学, 高工研<sup>^A^</sup>

# LGAD検出器

将来の大型加速器実験の高輝度化  
→内部飛跡検出器のアップグレードが必要



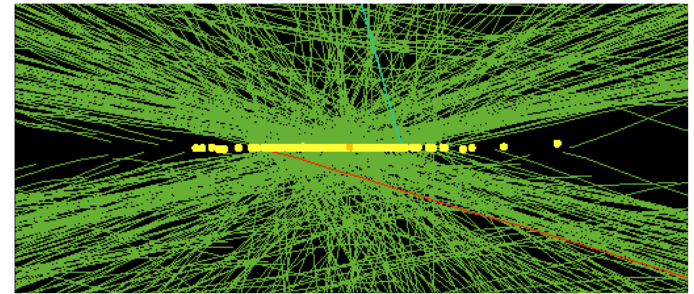
より精密な粒子の飛跡再構成が可能に

高時間分解能 & 高位置分解能を併せ持つ飛跡検出器が必要

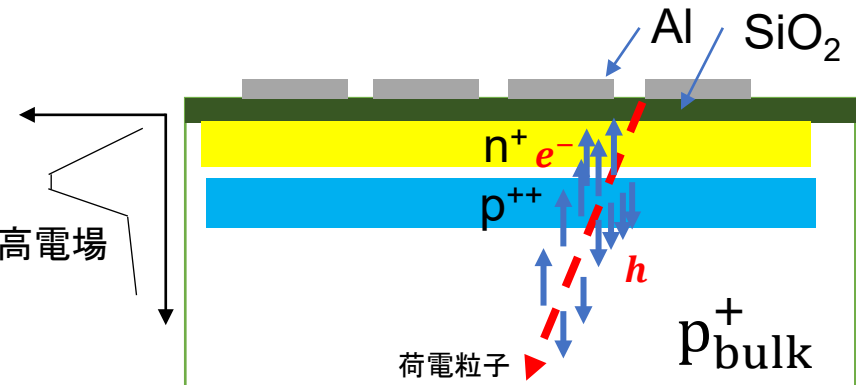
## Low Gain Avalanche Diode 検出器

- $N^+$ -in-P型半導体検出器+内部増幅機能
- 増幅層での局所的な雪崩増幅→高い増幅率 高電場
- 高い時間分解能( $\sim 30\text{ps}$ )を持つ検出器

HL-LHC MCシミュレーション(200 pile up)



将来の高輝度  
加速器実験  
(FCCなど)



# モチベーション(放射線耐性)

## HL-LHC

## FCC

5倍



- 積分ルミノシティ ( $4000 \text{ fb}^{-1}$ )
- NIEL : バルク損傷
  - 3層目 ( $r = 16 \text{ cm}$ ):  $2.8 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
  - 最内層 ( $r = 4 \text{ cm}$ ):  $2.6 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- TID: 表面損傷  $19.8 \text{ MGry}$  ( $r = 4 \text{ cm}$ )

- 積分ルミノシティ ( $20000 \text{ fb}^{-1}$ )
- NIEL : バルク損傷
  - 3層目 ( $r = 16 \text{ cm}$ ):  $1.4 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
  - 最内層 ( $r = 4 \text{ cm}$ ):  $1.3 \times 10^{17} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- TID: 表面損傷  $\sim 99 \text{ MGry}$  ( $r = 4 \text{ cm}$ )

Parameter	unit	LHC	HL-LHC	HE-LHC	FCC-hh
$E_{cm}$	TeV		14	27	100
Peak luminosity $\times 10^{34}$	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	1	5	25	30
bunch spacing	ns			25	
$\sigma_{inel}$	mbarn		85	91	108
$\sigma_{tot}$	mbarn		111	126	153
$\langle p_T \rangle$	GeV/c		0.6	0.7	0.76
$dN_{ch}/d\eta _{\eta=0}$			7	ppの断面積	9.6
Number of bunches			2808		10600
BC rate	MHz		31.6		32.5
Peak pp collision rate	GHz	0.85	4.25	27.3	32.4
Peak avg PU events/BC		27	135	864	997
Goal integrated luminosity	$\text{ab}^{-1}$	0.3	3(4)	10	20

積分ルミノシティ

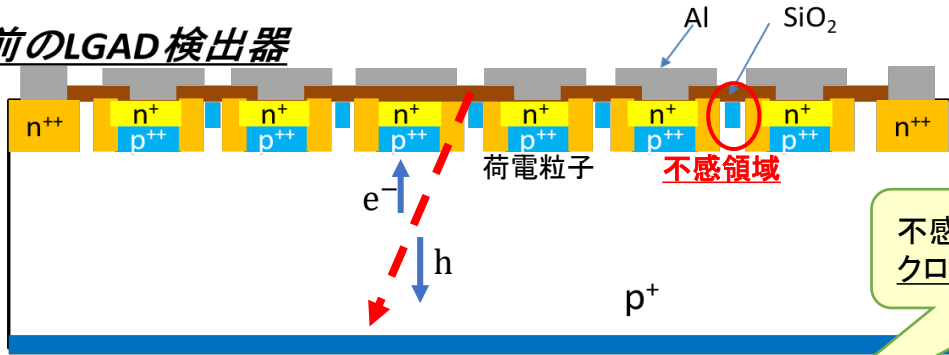
積分ルミノシティ  
HL-LHC  $\times 5$ 倍

※  $r = 16 \text{ cm}$ での実装 &  $10000 \text{ fb}^{-1}$ 到達時に入れ替え  $\rightarrow 0.7 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

LGADセンサー放射線耐性の目標値:  $O(10^{16})$

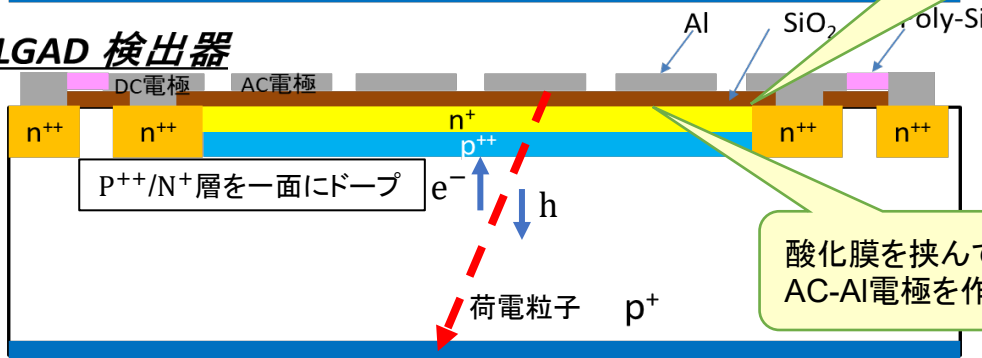
# AC-LGAD

## 以前のLGAD検出器



不感領域が小さくなる。  
クロストークが懸念。

## AC-LGAD 検出器

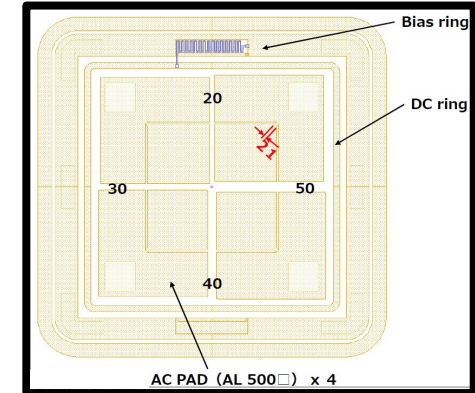


酸化膜を挟んで  
AC-Al電極を作成

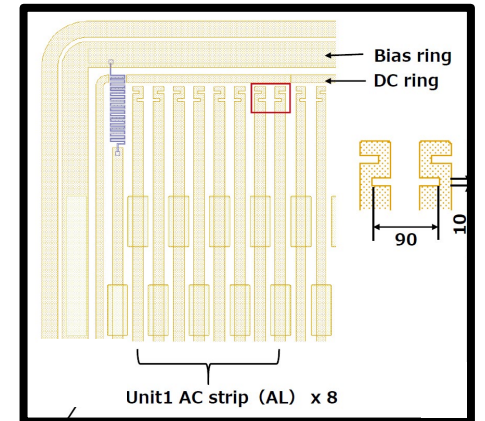
### 最適化の際に必要なパラメーター

1. n+のドーピング濃度 → 抵抗値(クロストークの大きさに影響)
2. p++ドーピング濃度 → 放射線耐性
3. 電極の大きさ/電極数 → 位置分解能 ⇔ 信号の大きさ

## Pad型 (2x2 500umx500um)

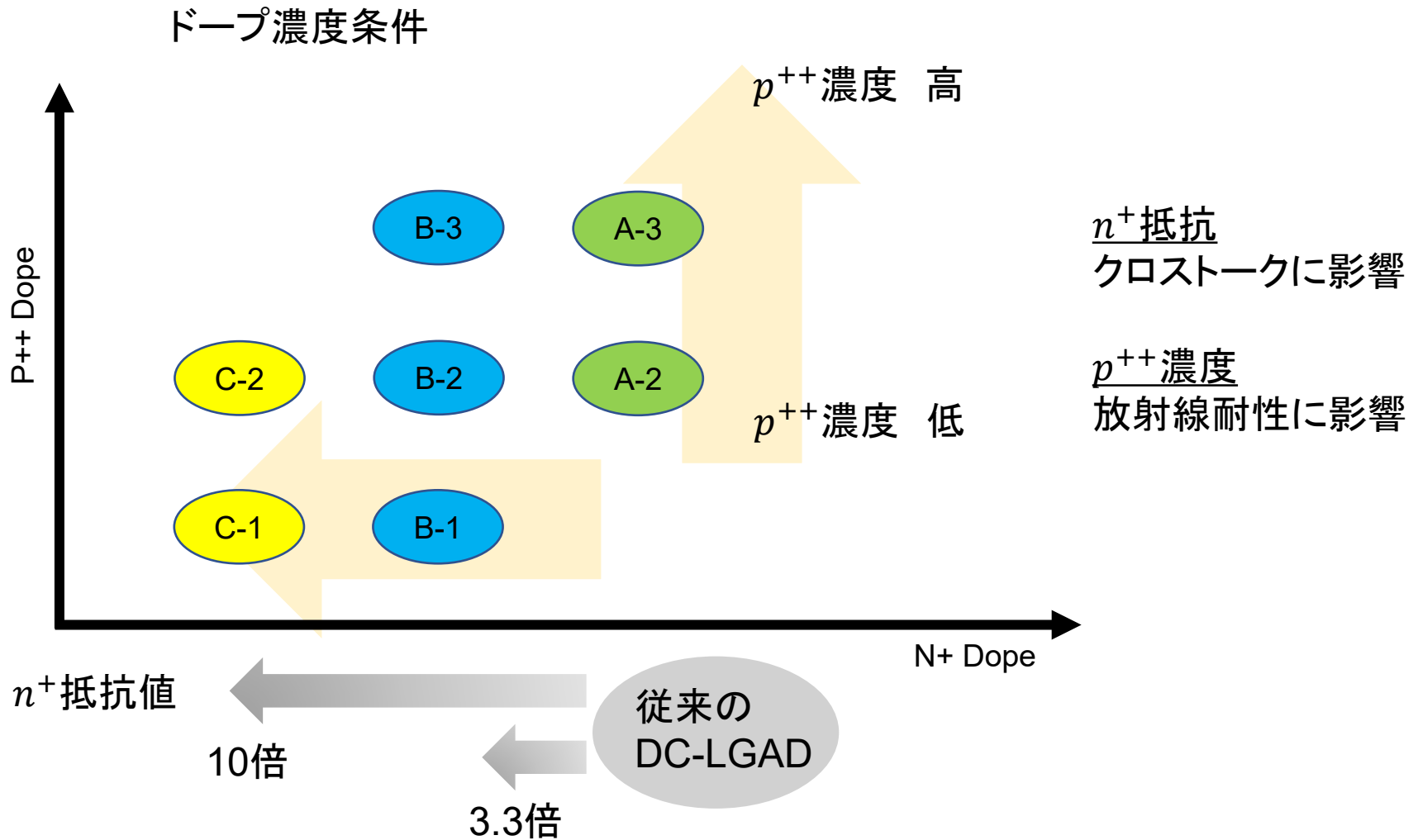


## Strip型 (80um pitch)



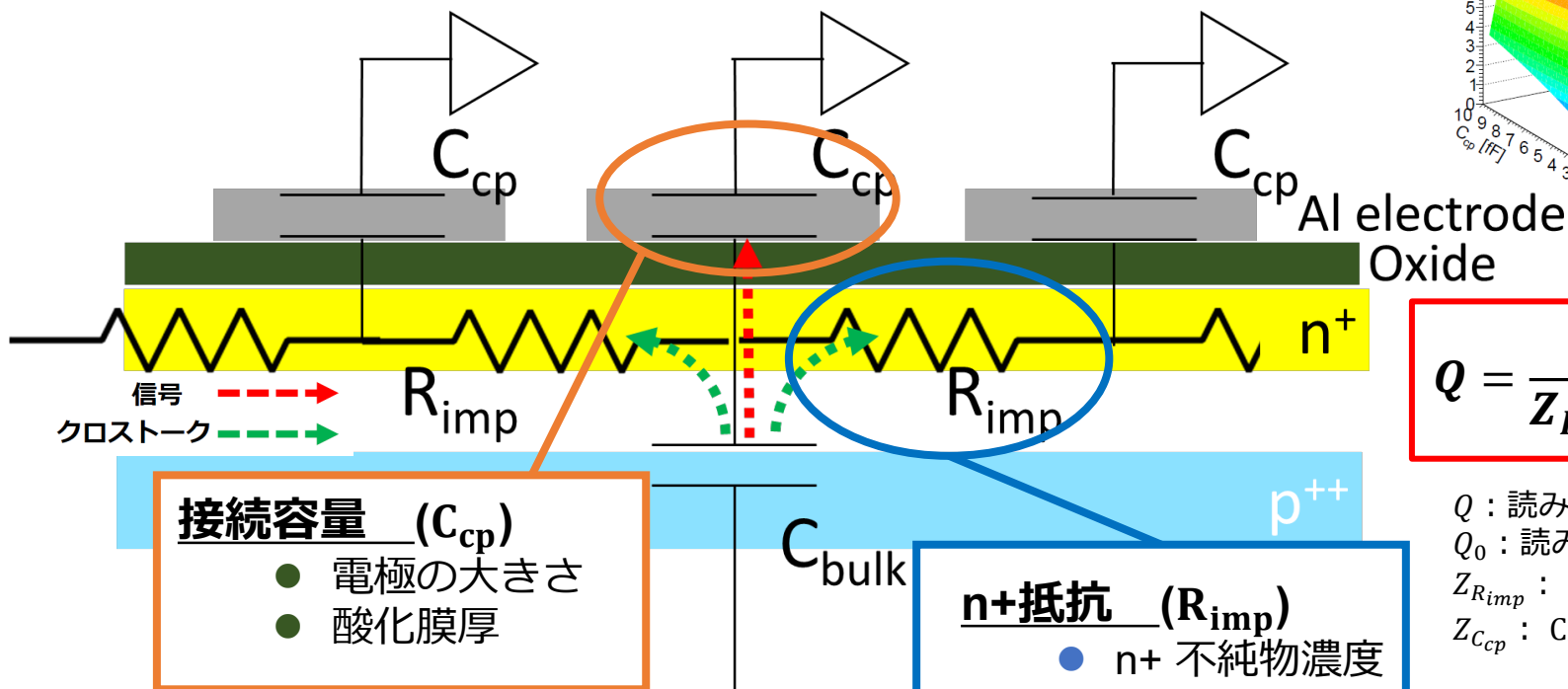
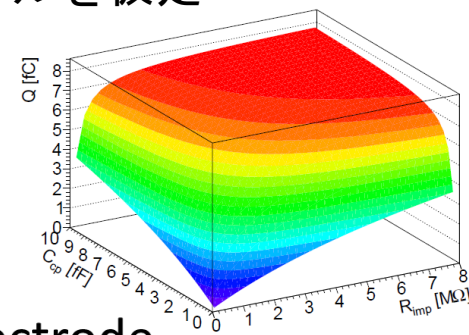
電極数 & 電極サイズ  
信号の大きさに影響

# センサー最適化



# 信号の読み出しモデル

- 信号の大きさを理解するために信号が読み出されていくモデルを仮定
  - 信号の大きさは2つのインピーダンス比で決定： $R_{imp}$ と $C_{cp}$



$$Q = \frac{Z_{R_{imp}}}{Z_{R_{imp}} + Z_{C_{cp}}} Q_0$$

$Q$  : 読み出される電荷  
 $Q_0$  : 読み出される前の電荷  
 $Z_{R_{imp}}$  :  $R_{imp}$ のインピーダンス  
 $Z_{C_{cp}}$  :  $C_{cp}$ のインピーダンス

1. 信号サイズ大： $C_{cp}$ 大きく、 $R_{imp}$ 大きくする
2. クロストーク小： $R_{imp}$ 大きくする

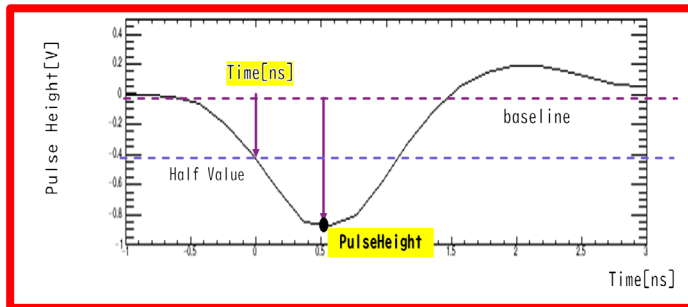
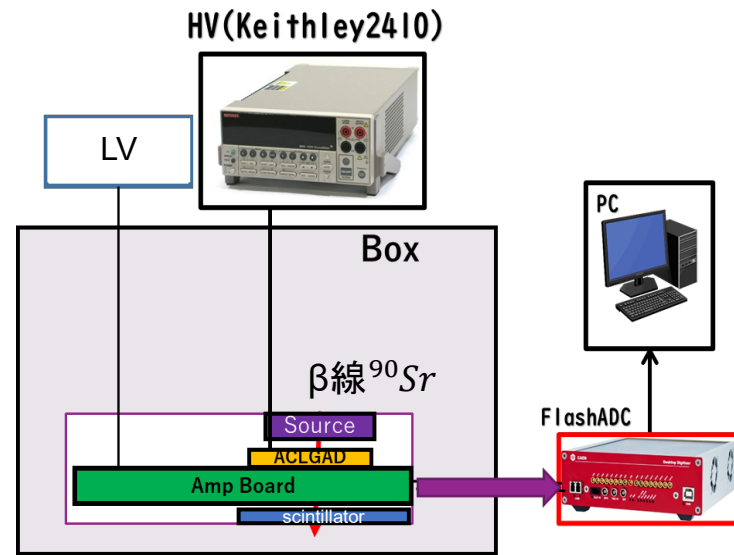
- ➡
- ① 電極の細密化( $C_{cp}$ 小): 信号が小さくなる
  - ②  $n^+$ 抵抗値を大きくする(A→Cタイプ): クロストークが小さく

➡ 実測定で確認

# セットアップ

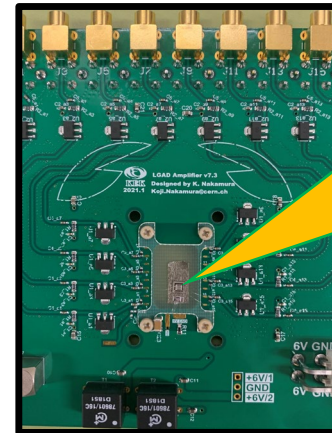
## ベータ線照射実験

ベータ線の読み出し信号の測定実験  
信号サイズの比較: Pad型, Strip型センサー

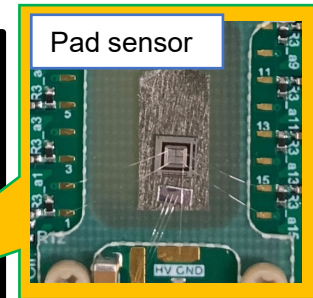


波高(pulse height): max voltage – baseline

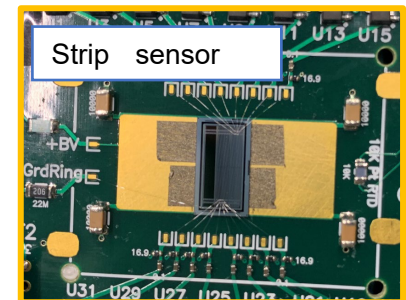
アンプボード



5GS/s 10bit  
12bit ADC  
2V full range

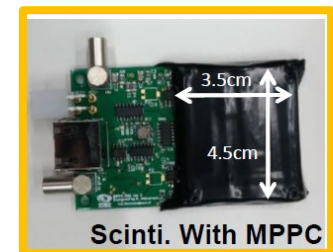


Pad sensor



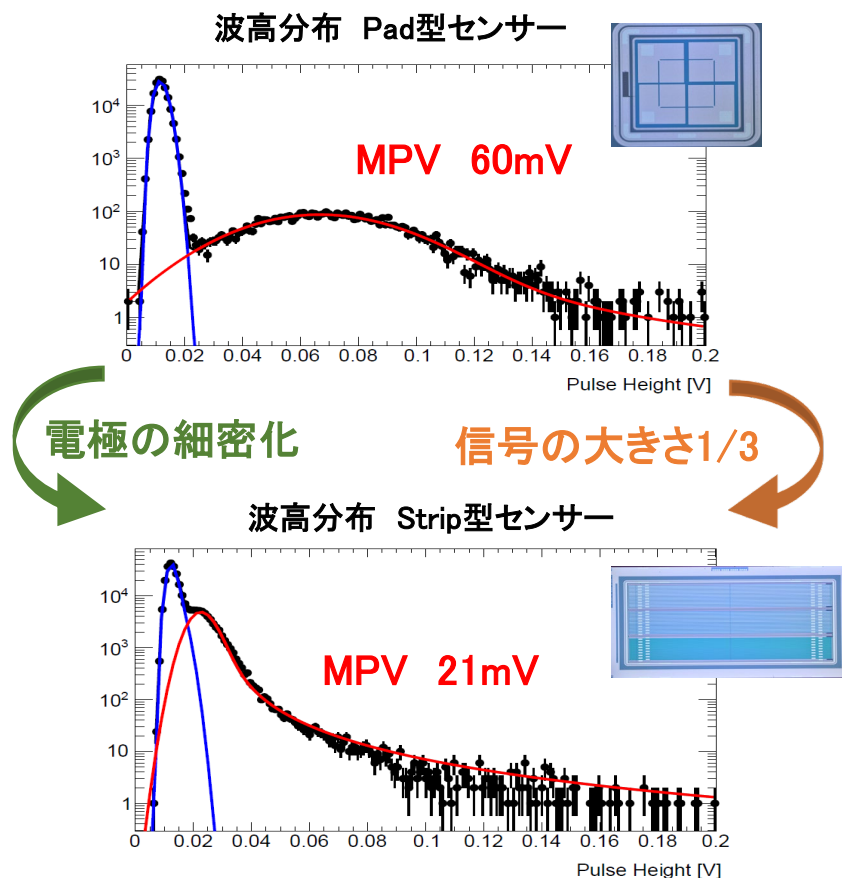
Strip sensor

信号orノイズのピーク値  
→波高として設定  
波高分布を作り比較する

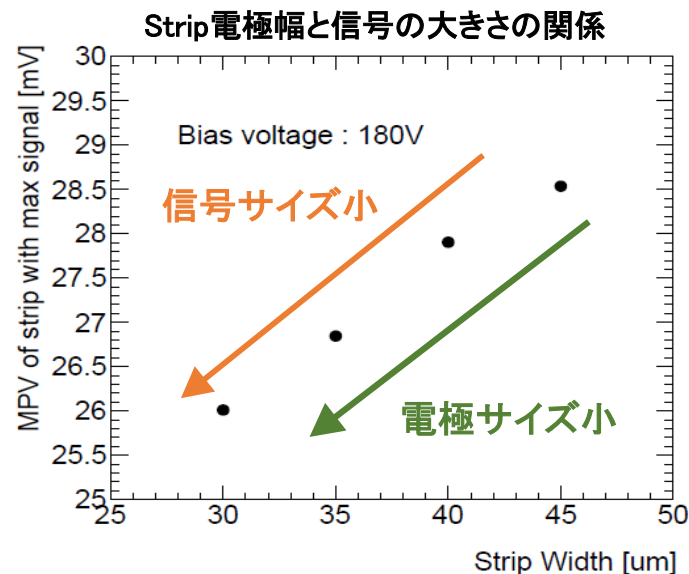


# 信号の大きさ測定

- Pad型センサーとStrip型センサーの比較  
(ドーブ量C2タイプ: 抵抗高)



- Stripセンサー電極幅ごとの比較



電極の細密化により信号の大きさは  
小さくなる

→ より電極を細密化しても信号が確認できるよう、  
信号を大きくする工夫が必要



# 照射済みセンサーについて

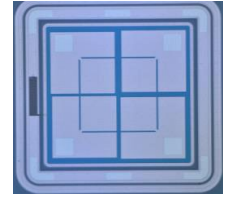
**TID**  
表面損傷

**NIEL**  
バルク損傷



**アクセプタ・リムーバル**

放射線ダメージにより増幅層の  
 $p^{++}$ 濃度が減少する現象



Pad sensor  
(2x2,500  $\mu\text{m}$  x 500  $\mu\text{m}$ )

**照射量**

- $1 \times 10^{14}$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- $5 \times 10^{14}$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- $1 \times 10^{15}$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- $5 \times 10^{15}$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

AC-LGAD初の照射済みサンプルを用いて、

- 照射ダメージによる性能の低下
- 増幅層( $p^{++}$ )の濃度による性能の変化などを理解する

ドーパ濃度条件

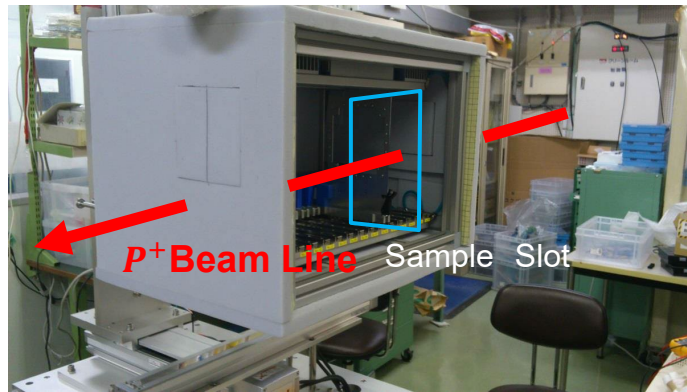
		$n^+$ 抵抗		
		低	中	高
$p^{++}$ 濃度	低		B-1	C-1
	中	A-2	B-2	C-2
	高	A-3	B-3	

照射量依存性

未照射,  $1e14, 5e14$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$   
B-3

$p^{++}$ 濃度依存性

$1 \times 10^{14}$   $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$   
B-1, B-2, B-3



- 東北大学RIセンター(CYRIC)
- 70MeVの陽子線照射実験 $\sim 1000\text{nA}$

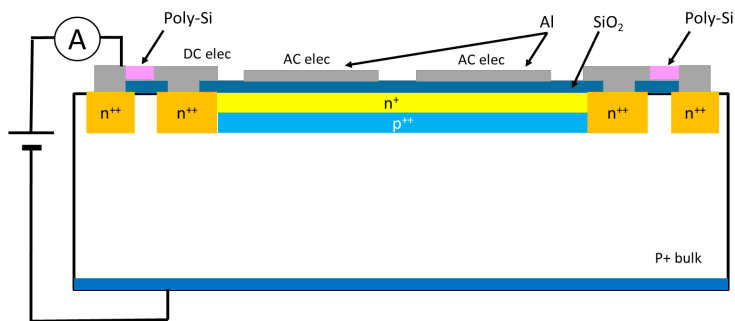
# 照射サンプル評価

## IV測定

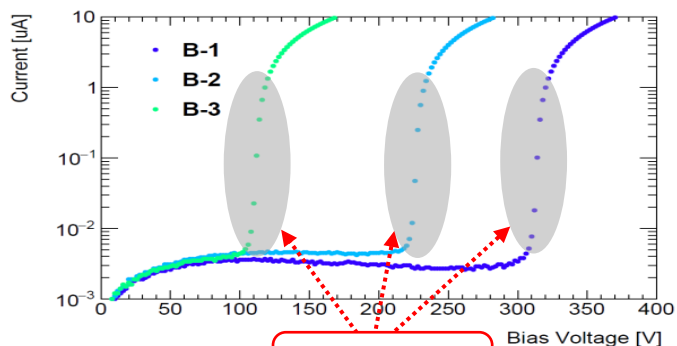
バイアス電圧を変化させ、暗電流を測定

- 未照射サンプルからの変化
- $p^{++}$ 濃度の違うセンサーでの変化

### セットアップ



### IV(未照射サンプル)



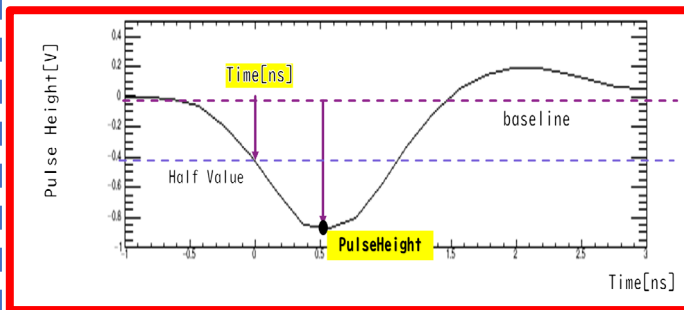
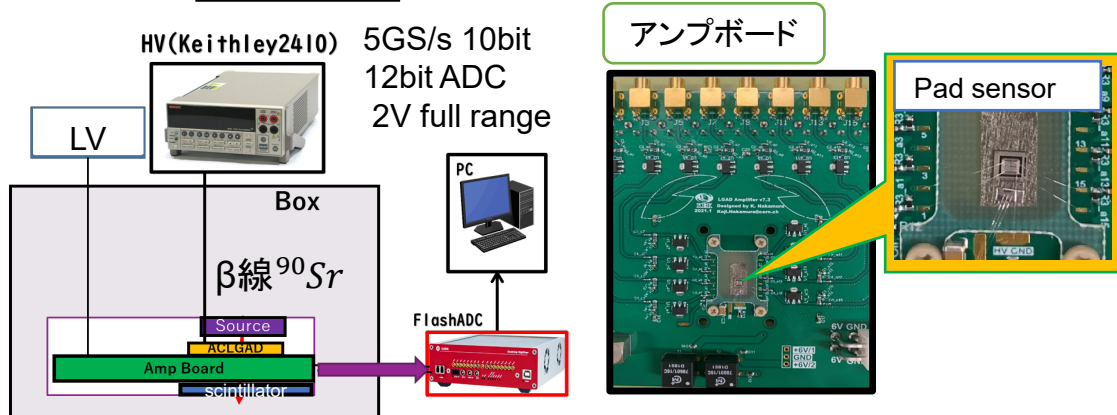
雪崩増幅

## ベータ線照射実験

ベータ線の読み出し信号の測定実験

信号サイズ、クロストーク: Pad型, Strip型センサー  
照射サンプル: 信号サイズの大きさの変化

### セットアップ



波高(pulse height): max voltage – baseline

信号orノイズのピーク値  
→波高として設定  
波高分布を作り比較する

# 照射量依存性

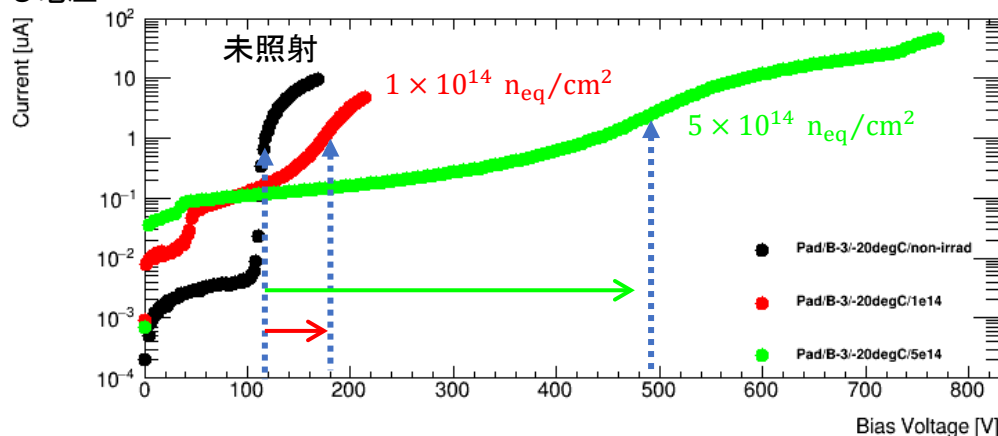
## 動作電圧

雪崩増幅により、最も増幅が得られる電圧

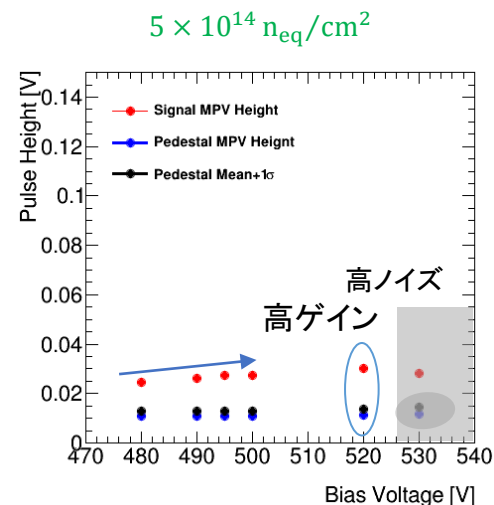
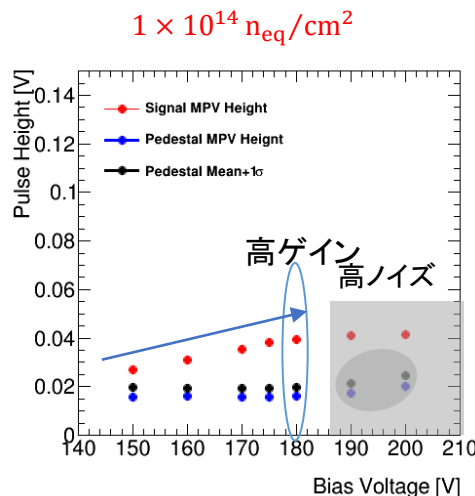
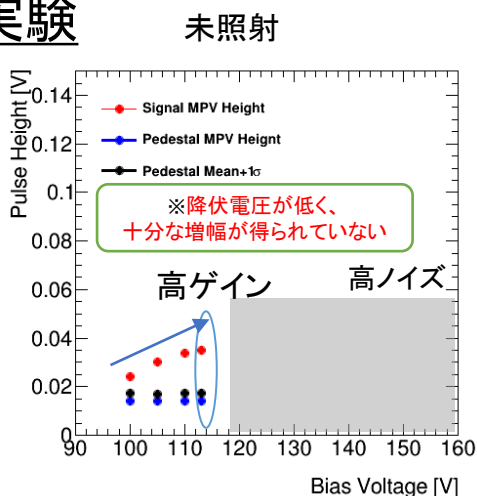
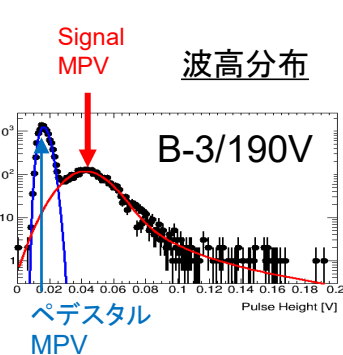
## IV測定結果

### IV特性

- 動作電圧が照射によって大きく増加する
- 暗電流の増加
  - NIELによる照射ダメージ
- 雪崩増幅による増加がなだらかに
  - 増幅機能の低下(アクセプタ・リムーバル)



### ベータ線照射実験



### Signal MPV

未照射	$0.035 \pm 0.002V$
$1 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$	$0.039 \pm 0.001V$
$5 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$	$0.030 \pm 0.002V$

- $5 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$  (B-3)までは信号の観測が可能
  - 照射ダメージで動作電圧(高ゲイン電圧)が増加
  - 照射ダメージにより信号サイズは小さくなる
- $5 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2 \sim 75\% \times 1 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$

# p<sup>++</sup>濃度依存性

# IV測定

# 動作電圧

雪崩増幅により、最も増幅が得られる電圧  
IV測定で増加率が最大となる電圧

## 照射前後の変化

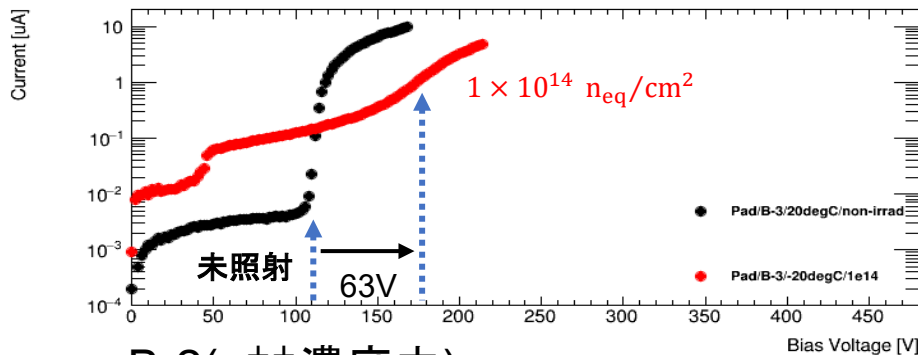
- 暗電流の増加
- 動作電圧が増加する
- 雪崩増幅による増加がなだらかに  
→ p<sup>++</sup>濃度に依らず共通

## p<sup>++</sup>濃度依存性

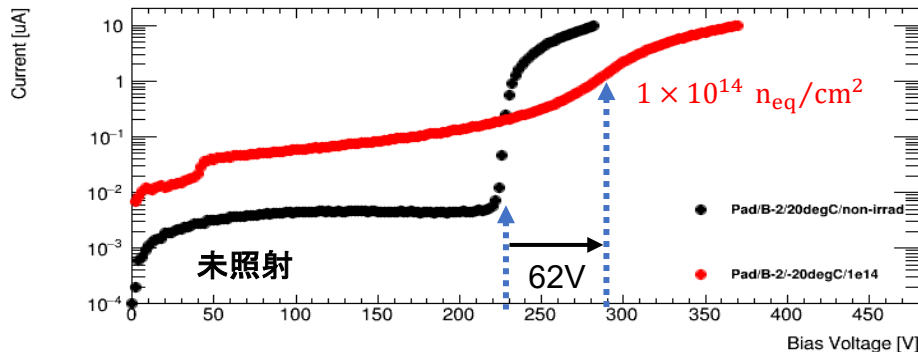
- 動作電圧の増加量が一定(約65V)
- p<sup>++</sup>濃度が高いほど  
低い動作電圧で増幅可能

センサー耐圧 < 700V  
動作電圧が低電圧であるほど有利

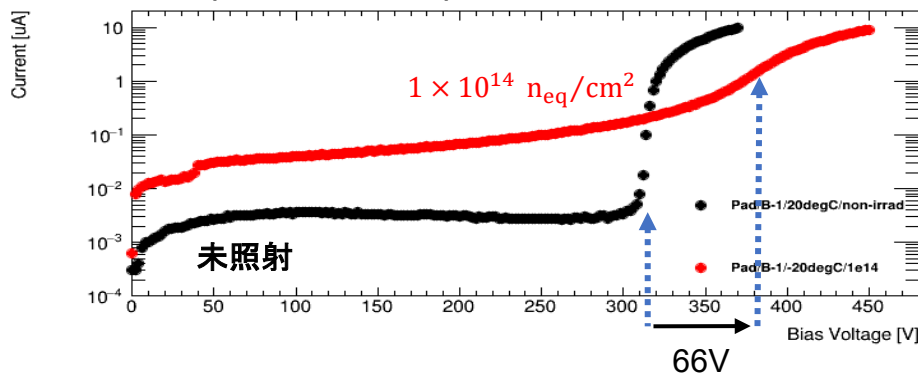
B-3(p<sup>++</sup>濃度高)



B-2(p<sup>++</sup>濃度中)



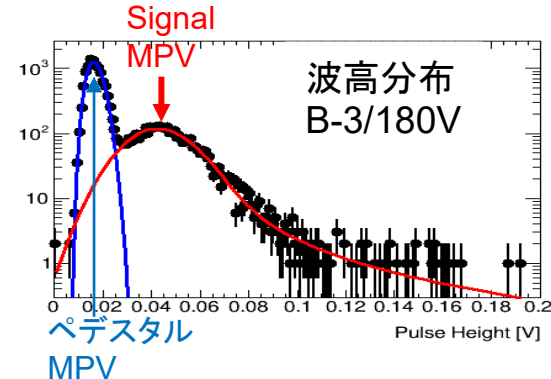
B-1(p<sup>++</sup>濃度低)



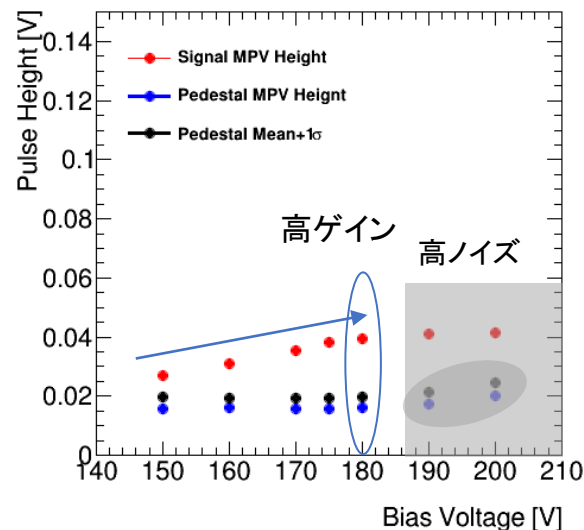
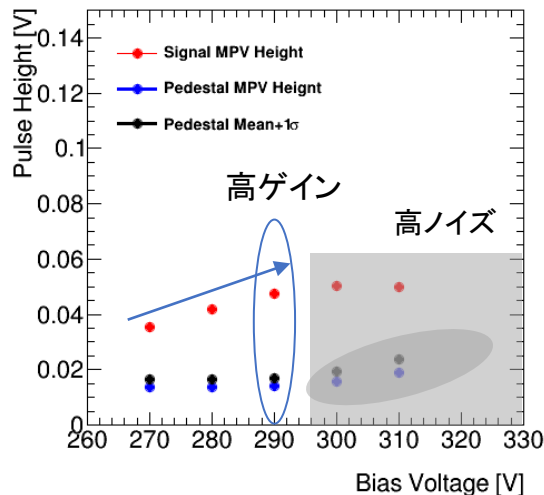
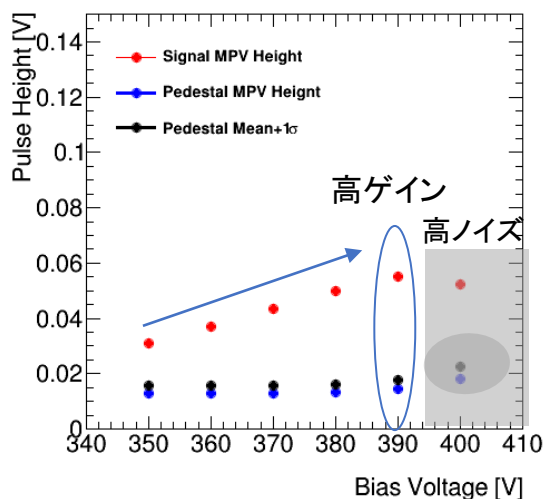
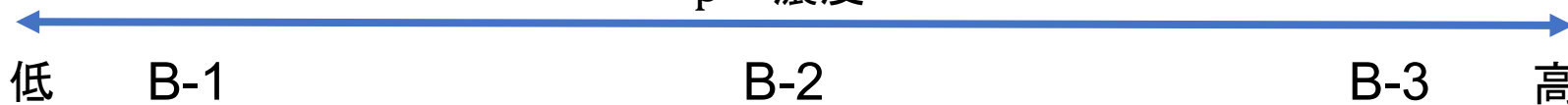
# p<sup>++</sup>濃度依存性

# ベータ線照射実験

$$1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$$



p<sup>++</sup>濃度



	B-1 (p <sup>++</sup> 低)	B-2 (p <sup>++</sup> 中)	B-3 (p <sup>++</sup> 高)
Signal MPV	0.055 ± 0.001 V	0.050 ± 0.001 V	0.039 ± 0.001 V
動作電圧 (高ゲイン)	390 V	290 V	180 V
動作電圧 (IV測定)	385V	290V	180V

- 3タイプで信号を観測
- IV測定で観測した動作電圧で高い増幅

- 放射線損傷で動作電圧が高くなる
- センサー耐圧 < 700V

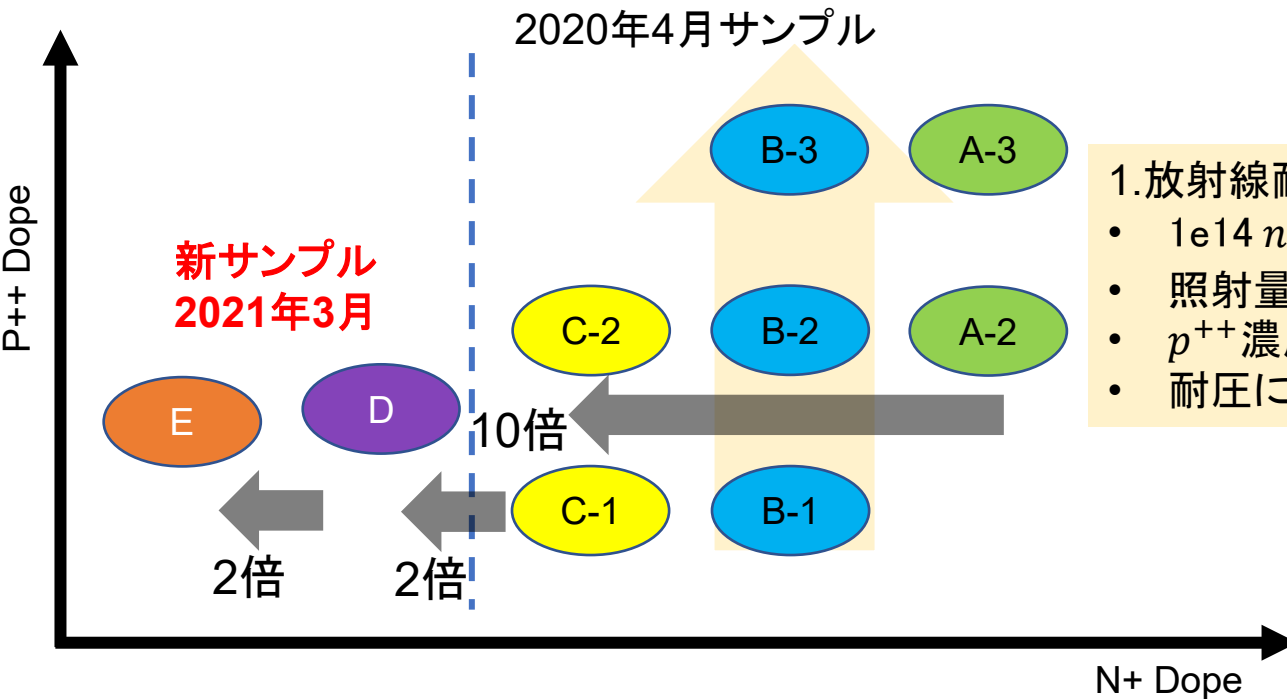
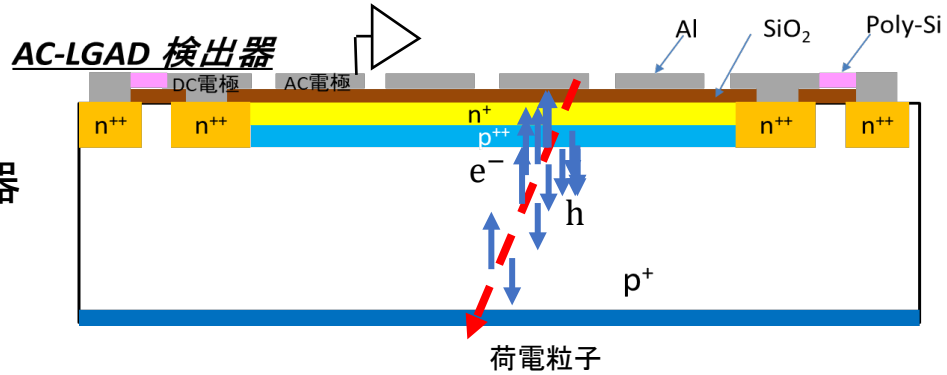
➡ p<sup>++</sup>濃度が高いほど放射線耐性が高い

# まとめ・今後(1)

将来の高輝度加速器実験のための飛跡検出器

→LGAD検出器

- 高時間分解能(～30ps)
- AC-LGADの最適化



## 1.放射線耐性

- $1e14 n_{eq}/cm^2, 5e14 n_{eq}/cm^2$
- 照射量が大きくなる→信号が小さくなる
- $p^{++}$ 濃度が高いほど、低電圧で動作
- 耐圧により、高濃度ほど耐性が高い

## 2.細密化

電極サイズを小さくするほど

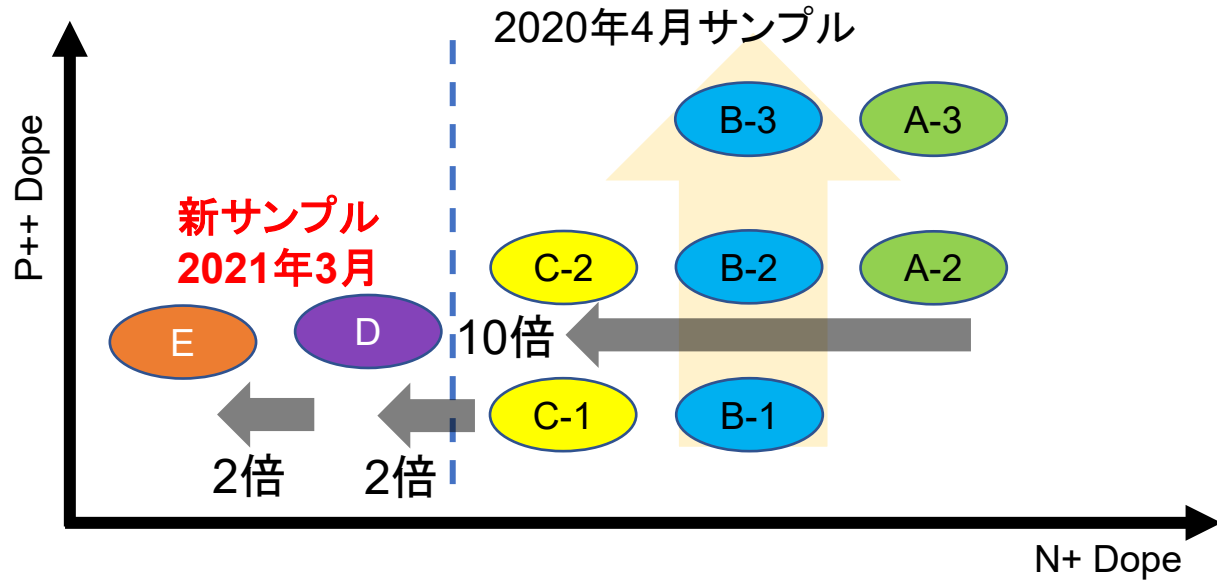
- 信号サイズが小さくなる
- クロストーク量が増加

## 3.今後

- 時間分解能測定
- 新サンプルの測定
- 放射線耐性の研究

# まとめ・今後(2)

## LGADセンサー放射線耐性



目標値:  $0(10^{16})$

照射量

- $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- $5 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- $5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

現時点では  $0(10^{15})$  が限界?

新サンプルでは信号の大きさに関する研究がメイン → 耐性の向上が見込めない

未測定  
TIDによるクロストークへの影響  
アクセプタ・リムーバルによる  $p^{++}$  濃度の変化

- 次のサンプル
- ドープ濃度の最適化 ( $p^{++}$  濃度)
- doping profile の変更

