

APD読み出しによる BSOカロリメーターの宇宙線テスト

2011/3/25 関西高エネ研究発表会

前田奈津子 岩下友子 村上潤 宮林謙吉 (奈良女子大学)

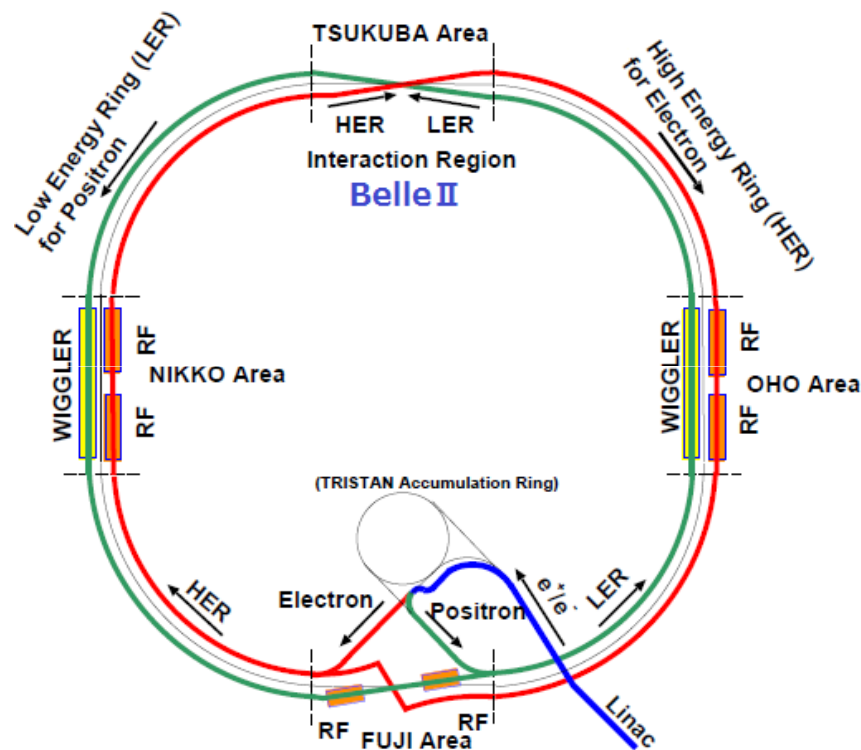
Outline

- ▶ SuperKEKB加速器とBelleII測定器
- ▶ APDとBSOシンチレーター
- ▶ 宇宙線を用いた性能試験
 - ▶ E.N.Eの測定
- ▶ 放射線耐性試験
 - ▶ 中性子および γ 線の照射
- ▶ まとめ



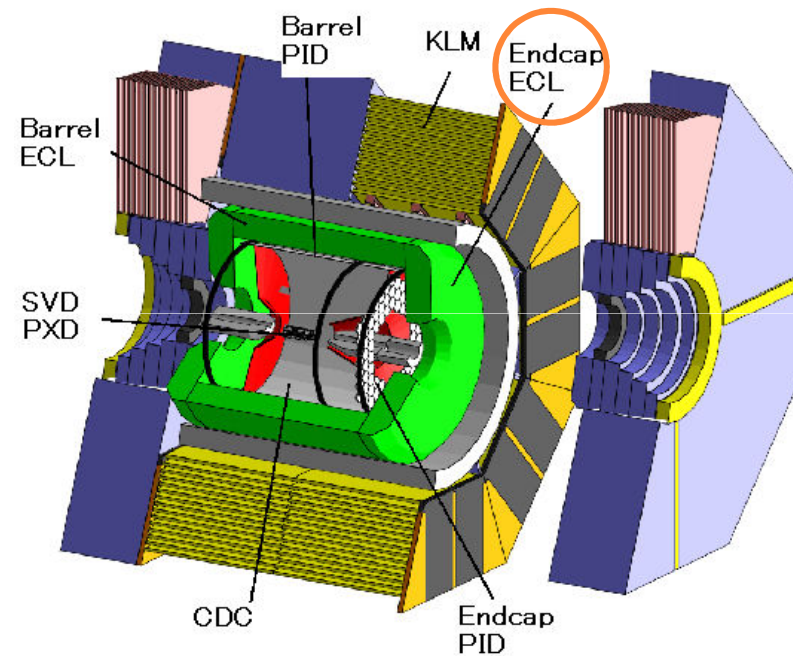
SuperKEKB加速器とBelleII測定器

SuperKEKB加速器



現在の40倍のルミノシティ
 $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-2}$
を目指す

BelleII測定器



エンドキャップECLではパイルアップ
対策として、発光時間の短いシ
ンチレーターの導入を検討

現在のBelleの電磁カロリメーター

現在の電磁カロリメーター

CsI(Tl)シンチレーター + PIN-PD

😊 発光量: 多い

● 増幅機能なし

😞 減衰時間: 長い(1μsec)

問題

対策

BelleIIでは、パイルアップによるエネルギー分解能の悪化

減衰時間の短いシンチレーターの導入

↳ PureCsI、BSO

しかし発光量が少ないため増幅機能を持つ光検出器が必要

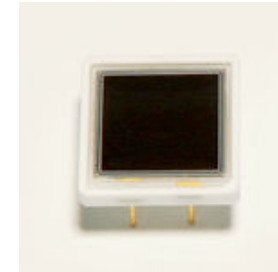
↳ アバランシェフォトダイオード(APD)

PureCsI、BSOシンチレーター + APD

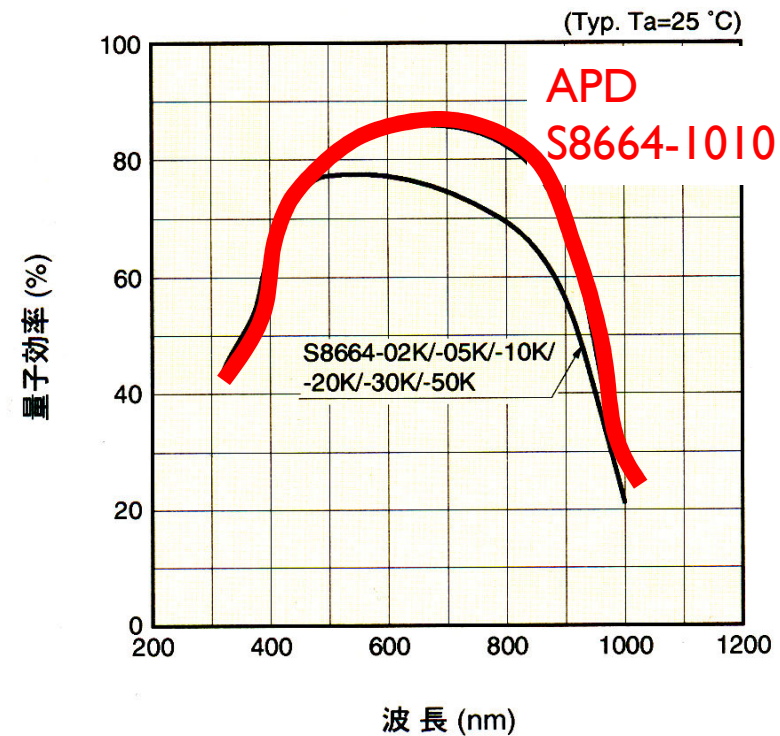
アバランシェフォトダイオード(APD)

▶ APD

シリコン半導体の内部に強い電場勾配を作ること
でアバランシェ(電子なだれ)を形成し、信号を
増幅させる機能を持つ半導体素子



- ❖ 浜松ホトニクス社製
S8664-1010型
- ❖ 受光面の大きさ1cm × 1cm
- ❖ 量子効率は
 - ❖ PureCslの発光波長300nmで約40%
 - ❖ BSOの発光波長480nmで約80%
- ❖ 磁場の影響なし



浜松ホトニクス社カタログより抜粋

BSOシンチレーター

- ▶ BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)のGeをSiに置換($\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$)した結晶
- ▶ 潮解性がなく扱いやすい
- ▶ 密度が大きく、 $X_0=1.15\text{cm}$ 、 $R_M=2.63\text{cm}$ と短い
 - ▶ 結晶を既存のものよりも小さくできる
- ▶ 発光量はPureCslと同程度だが、**発光波長が480nm**と長い
 - ▶ PureCsl(発光波長300nm)と比べ多くの光検出器において量子効率がよい



今回測定に用いたBSOシンチレーター
($2.2 \times 2.2 \times 18\text{cm}^3$)

各シンチレーターの特徴

	PureCsl	BSO	BGO	Csl(Tl)
密度(g/cm ³)	4.53	6.80	7.13	4.53
輻射長(cm)	1.86	1.15	1.12	1.86
モリエール半径(cm)	3.57	2.63	3.10	3.57
発光波長(nm)	300	480	480	560
光量(Nal(Tl)=100)	3.7	2~3	10	165
減衰時間(ns)	~10	100	300	1300
潮解性	若干有	無	無	若干有

現在のBelleで使用

宇宙線を用いた性能試験

電磁カロリメーターの性能評価

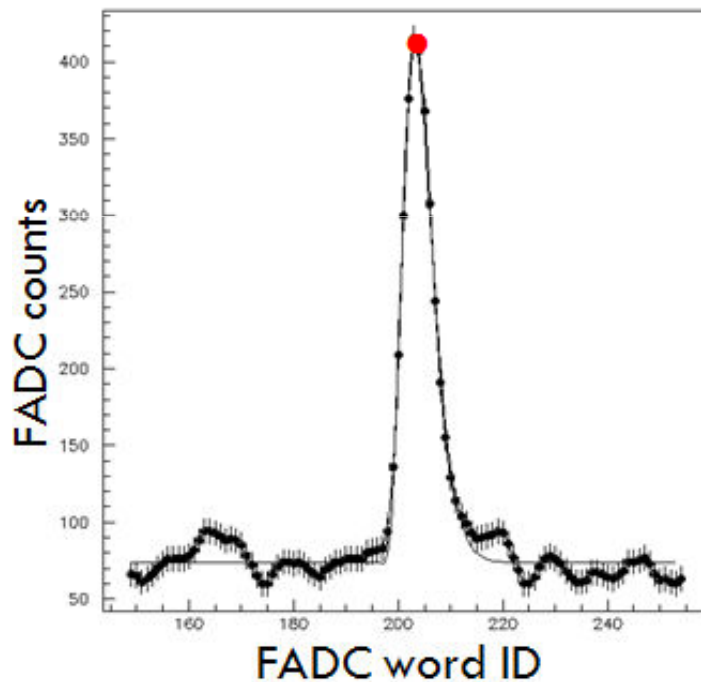
- 電磁カロリメーターではエネルギー分解能が最も重要。
Bファクトリー実験の電磁カロリメーターでは、
雑音レベルと信号の大きさの比が重要となる。
- 雑音レベルを検出エネルギーに換算した値E.N.E. (Equivalent Noise Energy) を用いて、PureCsIやBSOシンチレーターにAPDを組み合わせた場合の性能評価を行った。(目標値 $E.N.E \leq 0.5\text{MeV}$)



E.N.Eの測定1

▶ 波高を求める手順

FADCイベントのデータ



Fitの関数

$$f(t) = \frac{a}{n^n e^{-n}} \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)^n \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) + \text{ペDESTAL (FADC無信号時の信号)}$$

- $n=5$ • a : 波高 • τ : 時定数
- t_0 : パルスのスタート時刻

E.N.Eの測定2

▶ E.N.E.(Equivalent Noise Energy)の求め方

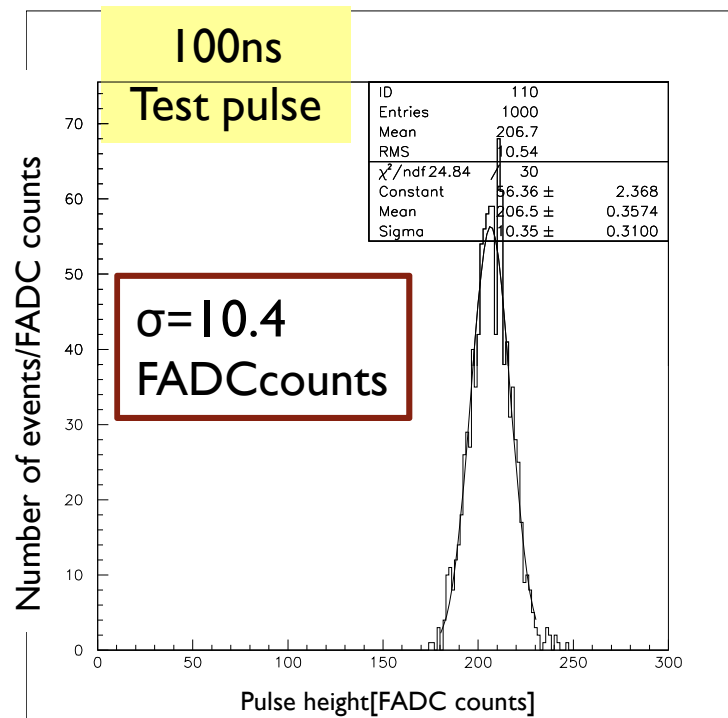
$$\text{E.N.E} = \Delta E \times \frac{\sigma}{h} (\text{MeV})$$

- ΔE : 宇宙線の μ 粒子(平均エネルギー1 GeV)が結晶中を通過する際に失うエネルギー
- 雑音レベル σ の測定 → テストパルスを用いる
- 波高 h の測定 → 宇宙線を用いる

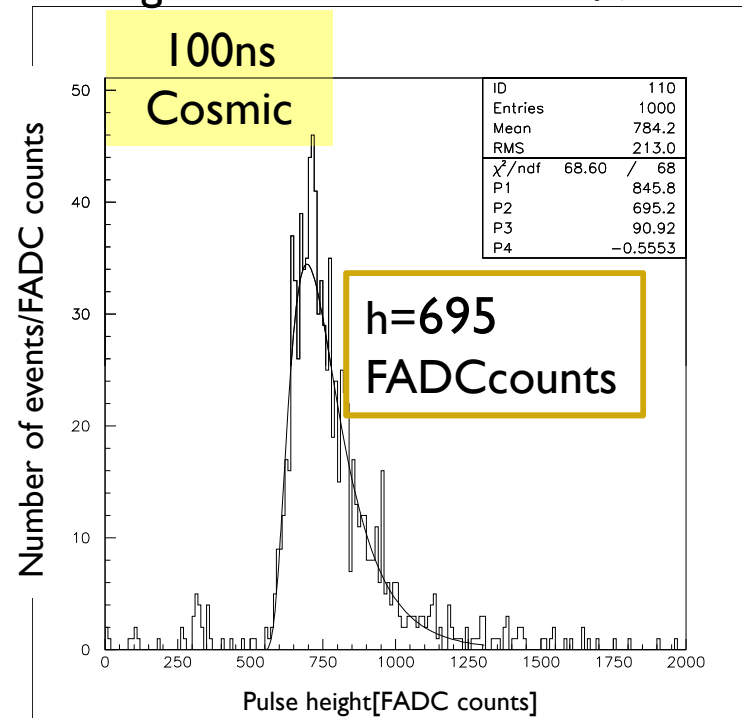


測定結果

テストパルス1000イベントの波高分布



宇宙線1000イベントの波高分布を
Logarithmic Gaussianでフィット



BSO(2.2cm × 2.2cm × 18cm)の時
 $E.N.E. = 18.7 \times (10.4/695.2) = 0.28\text{MeV}$

測定結果のまとめ

結晶	プリアンプ の種類	シェーパーの波形 整形時定数(ns)	E.N.E. (MeV)
BSO ($2.2 \times 2.2 \times 18 \text{cm}^3$)	CMS7200	100	0.28
PureCsI ($5.5 \times 5.5 \times 30 \text{cm}^3$)	CMS7200	30	2.0

目標 E.N.E $\leq 0.5 \text{MeV}$
(十分なエネルギー分解能を得るため。)

→ BSOシンチレーターとAPDの組み合わせは実用に耐えうる
発光波長がAPDの量子効率が良好な領域であるため

→ 純CsIシンチレーターとAPDの組み合わせは困難

放射線耐性試験

BelleIIのバックグラウンド

● 中性子被曝

- 高エネルギー γ 線の放出を伴うBhabha散乱により生じた γ 線が、加速器トンネル内の物質と相互作用し中性子を発生する。
- BelleIIにおける中性子被曝量は1年で 10^{11} neutrons/cm²が予想される。

● γ 線被曝

- 衝突点付近からくる～数MeV程度の低エネルギーの γ 線
- BelleIIの電磁カロリメーターでは空間線量に換算して1年で10Gyの γ 線被曝が予想される。

予想される放射線量を考慮して、APDに

- 中性子: 10^{11} neutrons/cm², 10^{12} neutrons/cm²
- γ 線: 10Gy, 100Gy

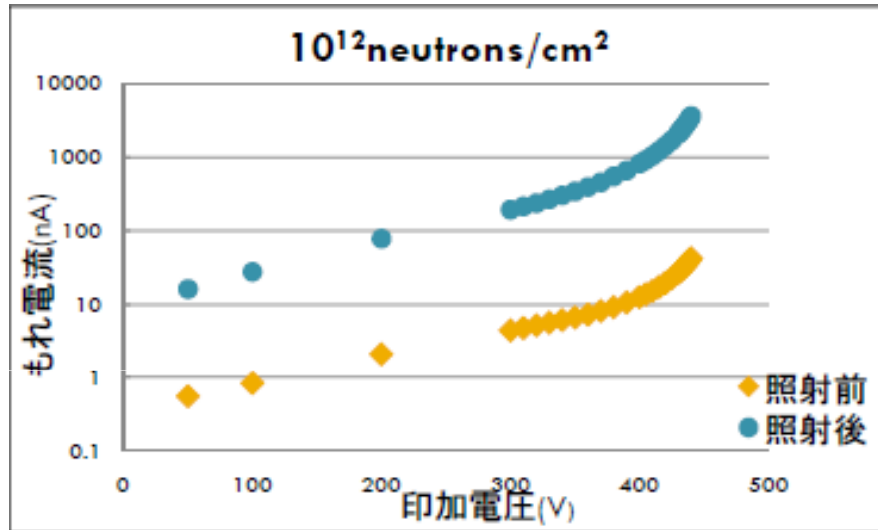
照射した時のI-V特性と量子効率(QE)と増幅率(Gain)の積の変化を測定

ピコアンメータ
を用いる

LED点灯時の電流値と消灯時の漏れ電流の
差から求める

中性子照射前後での I-V特性およびQE×Gainの変化

I-V特性



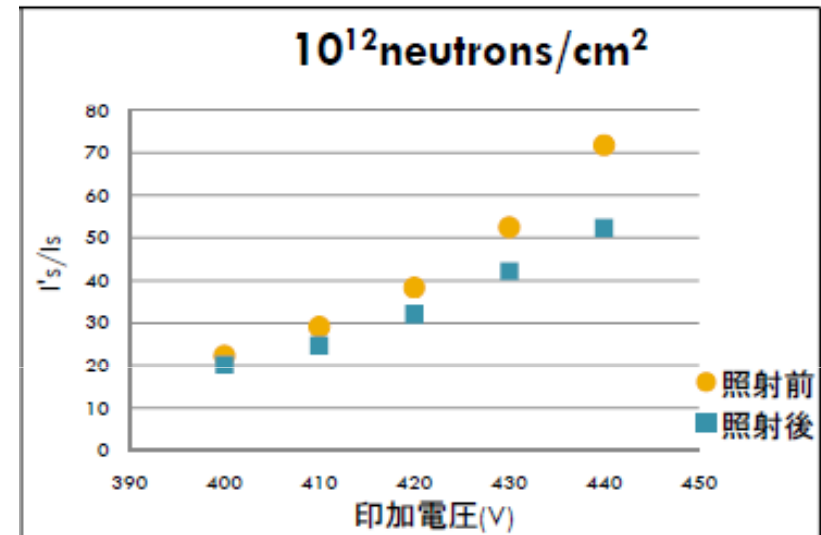
照射後の漏れ電流は、

10¹¹neutrons/cm²照射した場合、照射前の約10倍

10¹²neutrons/cm²照射した場合、照射前の約100倍に増加した。

→ 照射量に比例して漏れ電流が増加する

QE×Gain



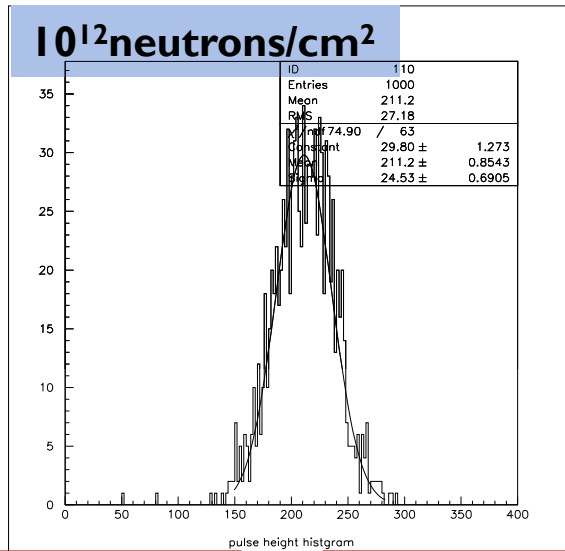
▶ 10¹¹neutrons/cm²照射した場合、顕著な変化は見られない。

▶ 10¹²neutrons/cm²照射した場合、印加電圧が高くなるにつれて悪化。

▶ 440Vでは約30%低下する。

宇宙線を用いた中性子照射前後の測定

- ▶ 中性子を照射したAPDにBSOシンチレーターを接着し、宇宙線を用いて測定を行った
テストパルス
宇宙線



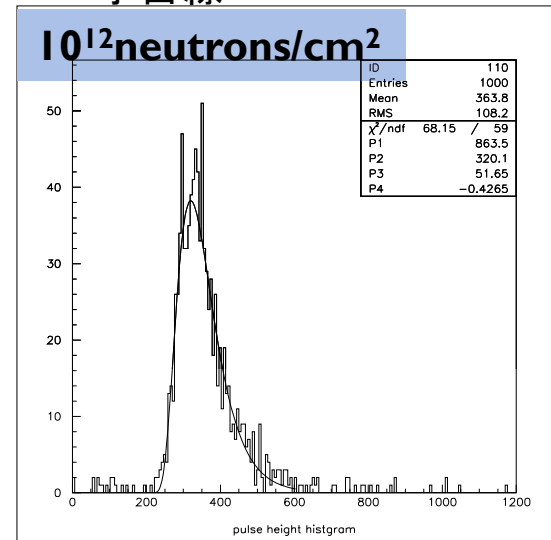
$\sigma=8.7$
FADCcounts

照射前



$\sigma=24.5$
FADCcounts

照射後



$h=480$
FADCcounts

照射前



$h=320$
FADCcounts

照射後

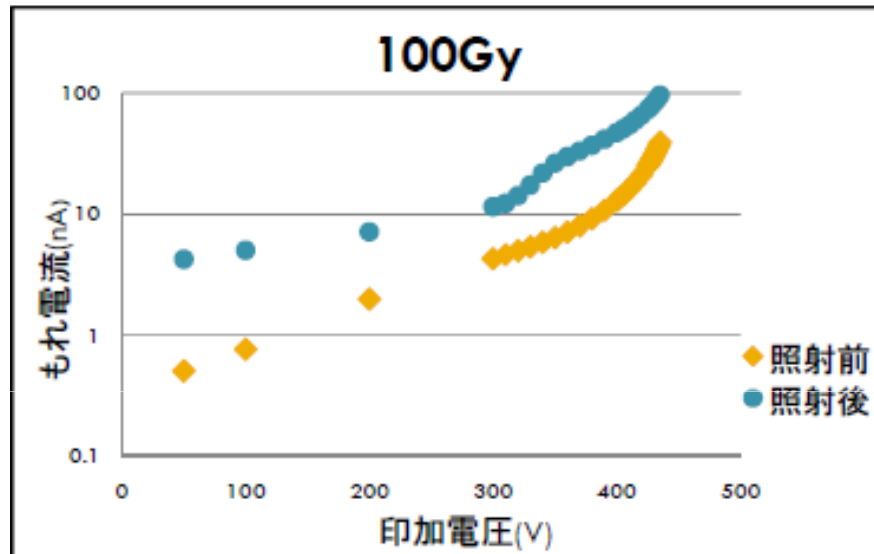
中性子照射前後でE.N.Eは
 10^{11} neutrons/cm²で約2倍(0.34→0.77)
 10^{12} neutrons/cm²で約4倍(0.34→1.43)
悪化



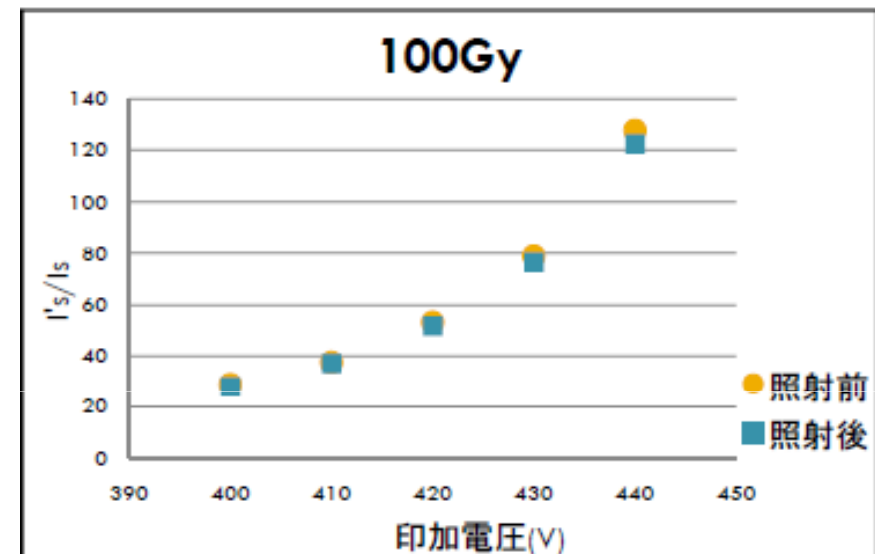
何らかの対策が必要

γ 線照射前後での I-V特性およびQE $\times$ Gainの変化

I-V特性



QE $\times$ Gain

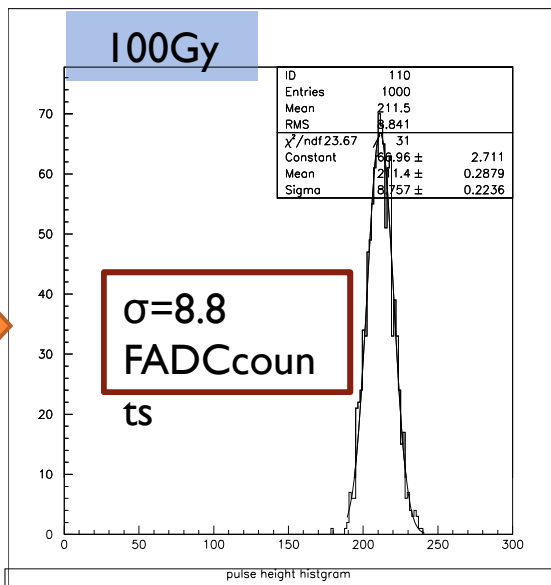
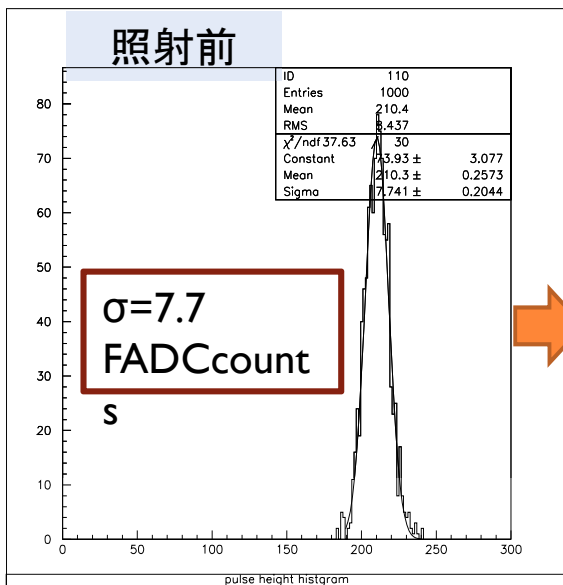


照射後の漏れ電流は、

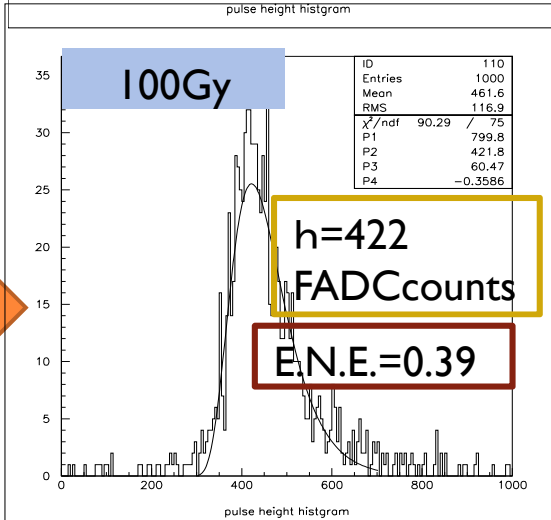
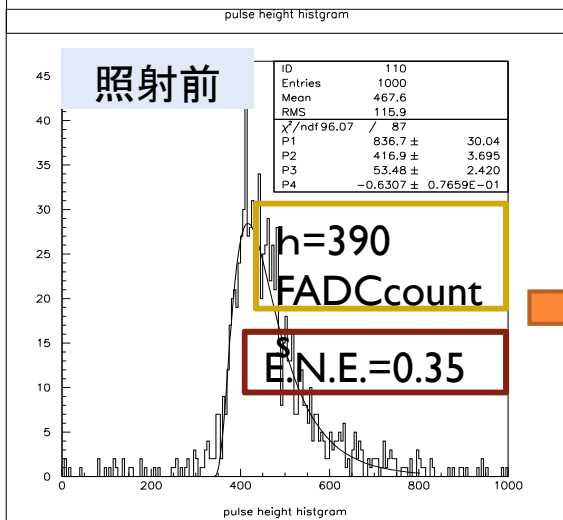
- 10Gy照射した場合、最大で約10~20%増加
- 100Gy照射した場合、
 - 印加電圧が低いところで約7~8倍大きくなる。
 - 330~390Vでは、山のようなカーブを描き、最大約4倍大きくなる。

- ▶ 10Gy、100Gy共に照射前後で顕著な変化は見られない

宇宙線を用いた γ 線照射前後の測定



- 波高、E.N.E.共に10Gy、100Gy照射後に顕著な変化は見られない。



Belle II のアップグレードに用いる上で、 γ 線被爆の効果は事実上大きな問題にならないといえる。

まとめ

- ▶ APD + 高速無機シンチレーターの性能評価
 - ▶ BSO + APD E.N.E = 0.28 MeV 十分な性能が得られる
 - ▶ PureCsI + APD E.N.E = 2.0 MeV 実用は困難である
 - ▶ APDの放射線耐性試験
 - ▶ 中性子 → 漏れ電流値が大きく増加
 - ▶ 10^{11} neutrons/cm² ENE 0.34 MeV → 0.77 MeV
 - ▶ 10^{12} neutrons/cm² ENE 0.34 MeV → 1.43 MeV
 - ▶ γ 線
 - ▶ 10 Gy ENE 0.40 MeV → 0.40 MeV
 - ▶ 100 Gy ENE 0.35 MeV → 0.39 MeV
- 何らかの対策が必要
- BelleIIでの実用にあたって
問題はない





Back up

電磁カロリメーターの原理

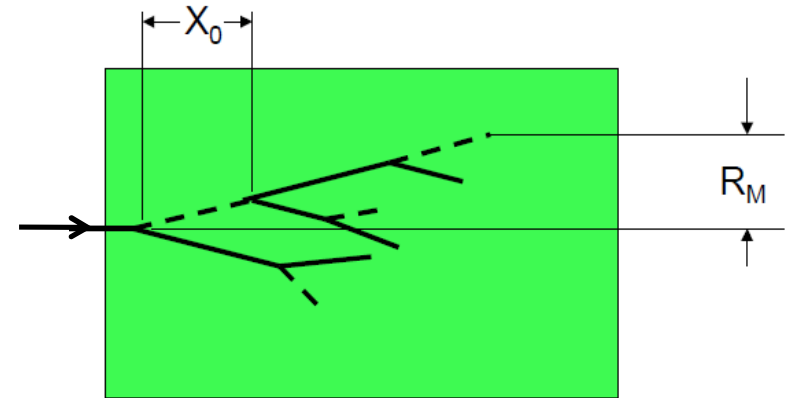
ECL(電磁カロリメーター)
電子や光子のエネルギーの測定

電子・光子がカロリメーターに入射

制動放射や電子対生成といった反応を起こし、電磁シャワーを形成

ほぼ全てのエネルギーを落としていく

そのエネルギーを信号に変換して読み出すことで測定



カロリメーター中
のシャワーの様子

モリエール半径(R_M)

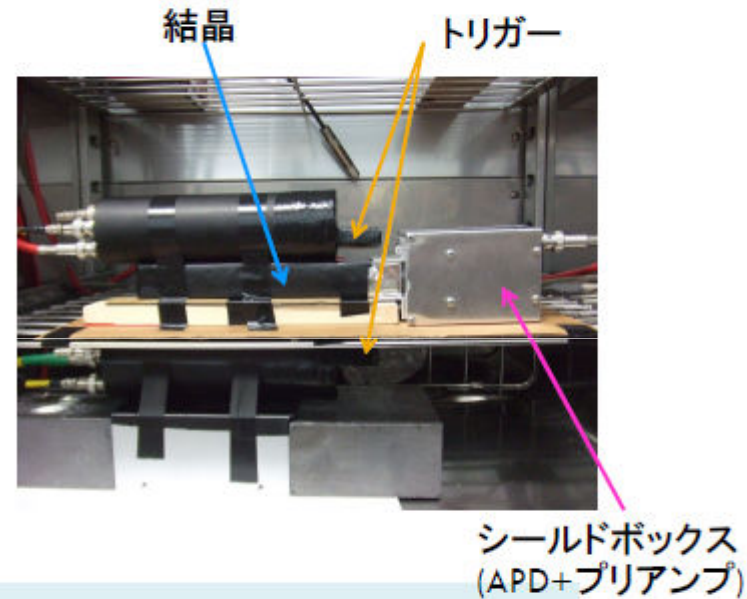
シャワーの横方向の広がりの指標
となる量

輻射長(X_0)

高エネルギーの電子が入射した際、
エネルギーが最初の $1/e$ になる長さ

恒温槽内の様子

13



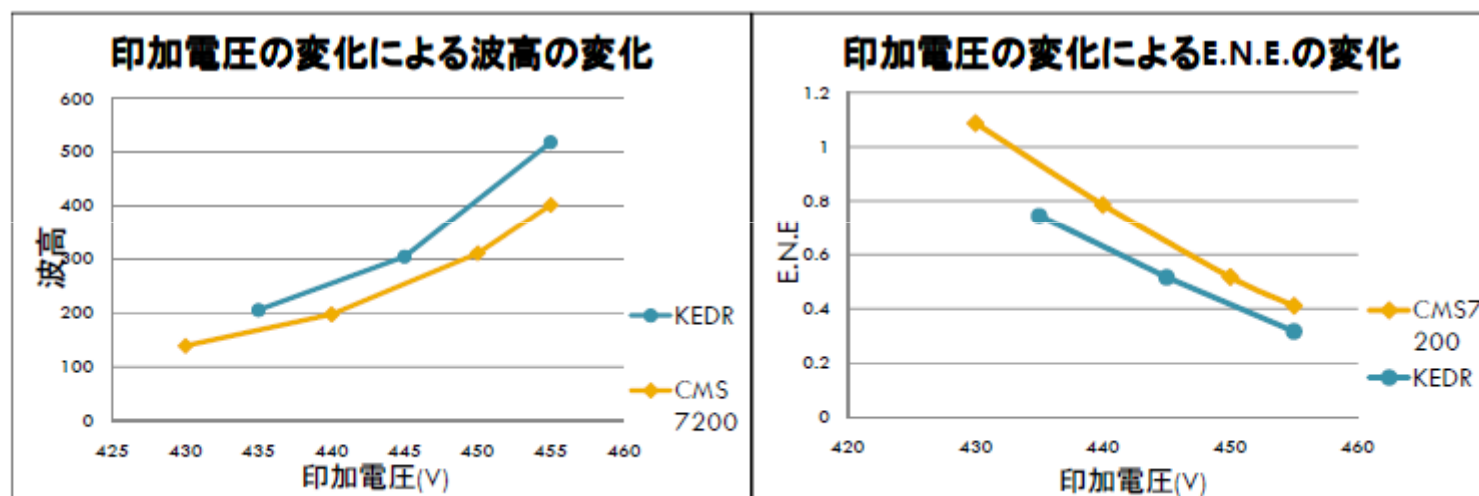
実験で使用した結晶のサイズ

- PureCsl 断面 $5.5\text{cm} \times 5.5\text{cm}$, 長さ 30cm
既存の Belle 電磁カロリメーターに使用されているものと同じ
- BSO 断面 $2.2\text{cm} \times 2.2\text{cm}$, 長さ 18cm

APDの印加電圧依存性

19

CMS7200タイプと増幅率改造後のKEDRタイプの二種類のプリアンプについて測定。



- 波高は印加電圧を10V下げると35~40%減少する。
- E.N.E.は印加電圧が高い方が良くなる。

BSO結晶の断面積の違いの効果

20

結晶の断面積の違いによる集光効率の変化を確認する。

結晶	サイズ(cm ³)	製造元	ΔE (MeV)	波高h	E.N.E (MeV)
BSO(A)	2.2 × 2.2 × 18	FFK	18.7	401	0.41
BSO(B)	4 × 4 × 18	FFK	34	390	0.76



測定結果のまとめ

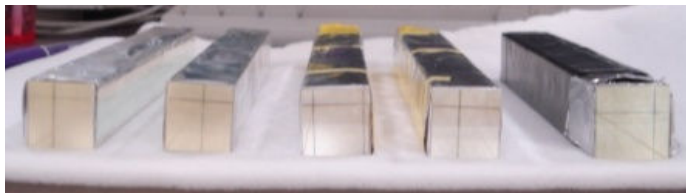
結晶	プリアンプの種類	シェーパーの波形整形時定数(ns)	E.N.E. (MeV)	
PureCsl 減衰時間(~10ns)	CMS7200	30	2.0	
	KEDR オープンループゲイン ^大	30	2.1	
BSO 減衰時間(~100ns)	CMS7200	30	0.41	
	KEDR	30	0.47	30%改善
	KEDR改	30	0.32	10%改善
	√ Cf ^小	100	0.29	
	CMS7200	30	0.41	30%改善
フィードバックコンデンサ(5pF→2pF)		100	0.28	



Oxide(株)制作のBSOシンチレーターについて

- ▶ Oxide(株)で作成されたBSOシンチレーターの個体差について調べた

結晶	サイズ(cm ³)	製造元	波高h
BSO(No.1)	2×2×20	オキサイド	351
BSO(No.2)	2×2×20	オキサイド	352
BSO(No.3)	2×2×20	オキサイド	437
BSO(No.4)	2×2×20	オキサイド	487



発光量の最大値と最小値の差は相対値で30%

既存のBelle電磁カロリメーターのCsI(Tl)結晶の発光量の差は40%程度

→ BSO結晶の発光量の個体差は実用上問題にならない。

中性子と γ 線の照射

▶ 中性子の照射

- ▶ 東京大学原子炉「弥生」



ウラン燃料空気冷却型高速炉

- 最大出力: 2kW
- 照射できる中性子の平均運動エネルギー: 約 1 MeV

▶ 「線」の照射

- ▶ 東京工業大学放射線照射施設



- 線源 ^{60}Co
- 線源の強度からサンプルの位置と照射時間を計算しサンプルを設置

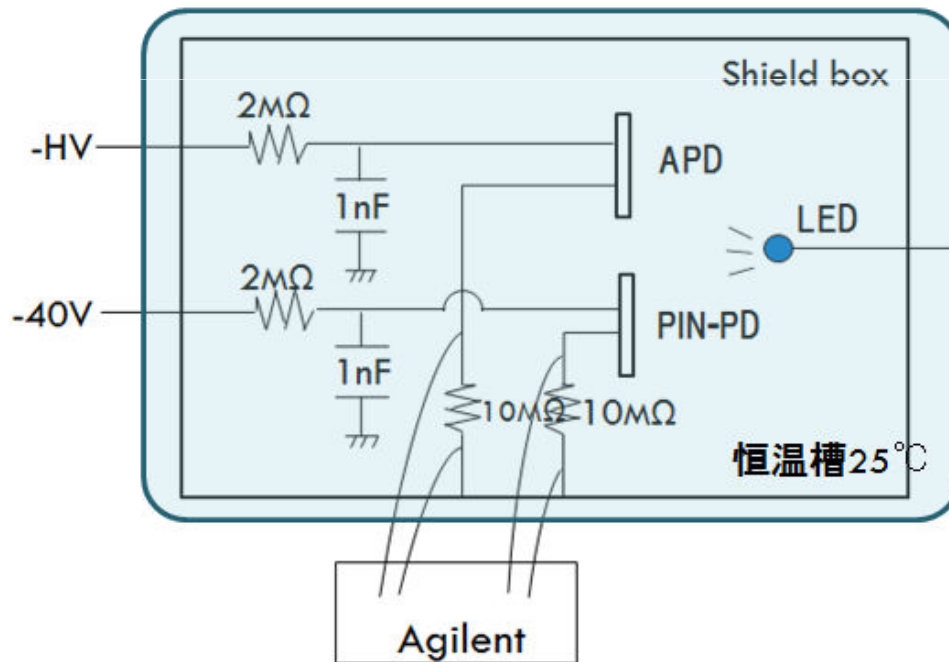
I-V特性とQE × Gainの測定

▶ I-V特性の測定

- ▶ ピコアンメーターを使用し、APDの温度を恒温槽で25℃に保って、漏れ電流を測定

▶ QE × Gainの測定

- ▶ APDの印加電圧を変化させ(PIN-PDは40Vで一定)、APDとPIN-PDそれぞれのLED点灯時の電流値と消灯時の漏れ電流値から求める。(PIN-PDの増幅率は1)



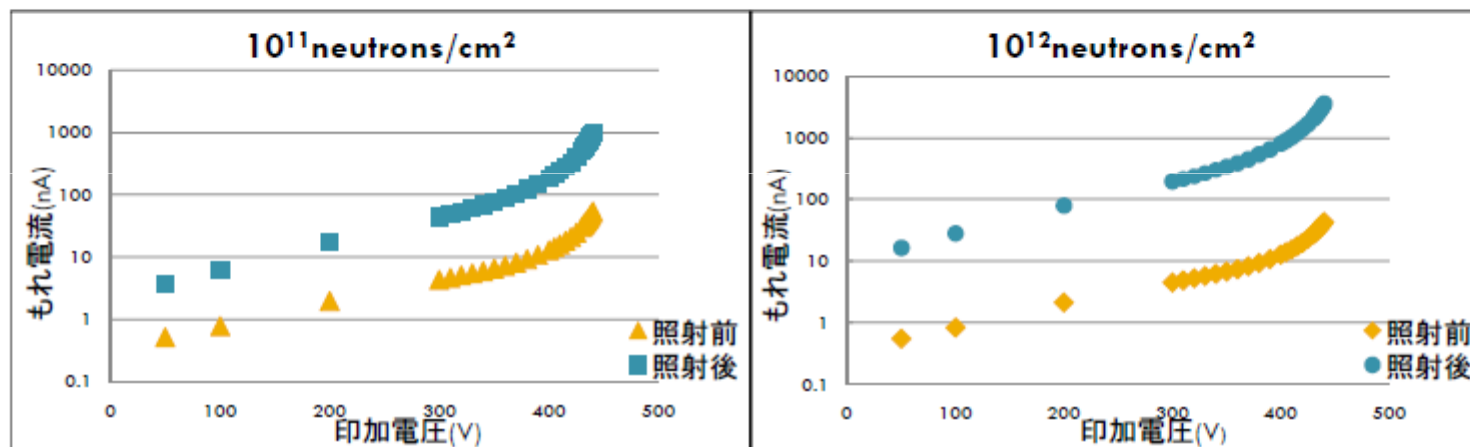
$$\frac{V_{APD}(LED \text{ 点灯}) - V_{APD}(LED \text{ 消灯})}{V_{PIN-PD}(LED \text{ 点灯}) - V_{PIN-PD}(LED \text{ 消灯})} = \frac{I'_s}{I_s} \propto QE \times Gain$$

- I'_s : LEDの光を受けてAPDから生じた電流
- I_s : " PIN-PDから生じた電流

中性子照射前後でのI-V特性の変化

25

測定方法 ピコアンメーターを使用し、APDの温度を恒温槽で25°Cに保って、漏れ電流を測定。



照射後の漏れ電流は、

10^{11} neutrons/cm²照射した場合、照射前の約10倍

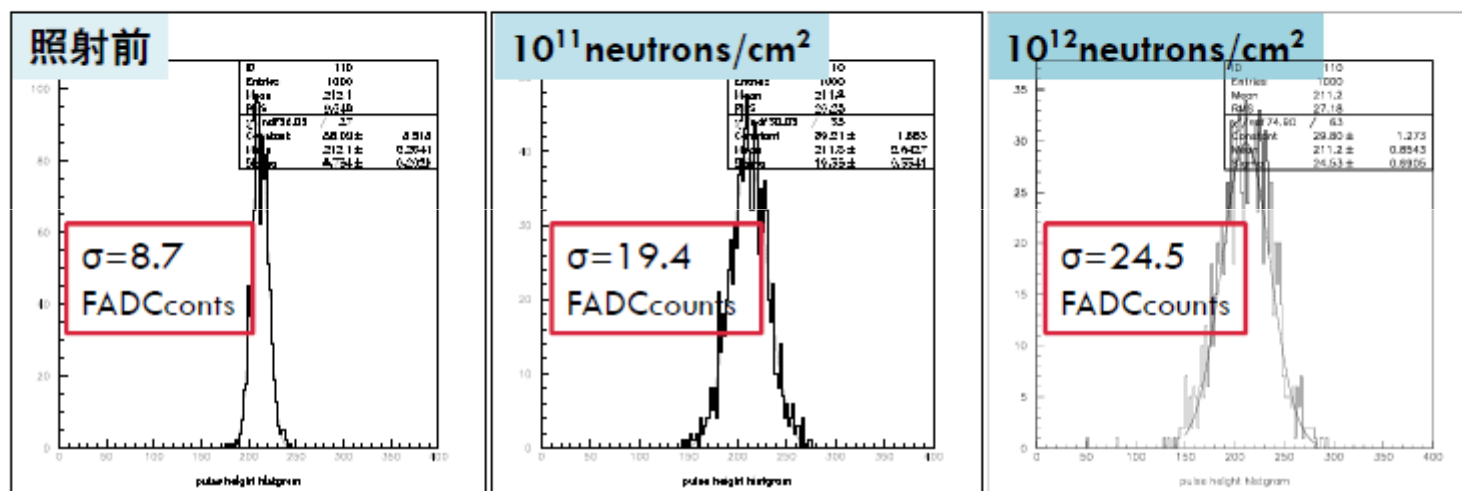
10^{12} neutrons/cm²照射した場合、照射前の約100倍に増加した。

→ 照射量に比例して漏れ電流が増加することがわかる。

中性子照射による雑音レベルへの影響

26

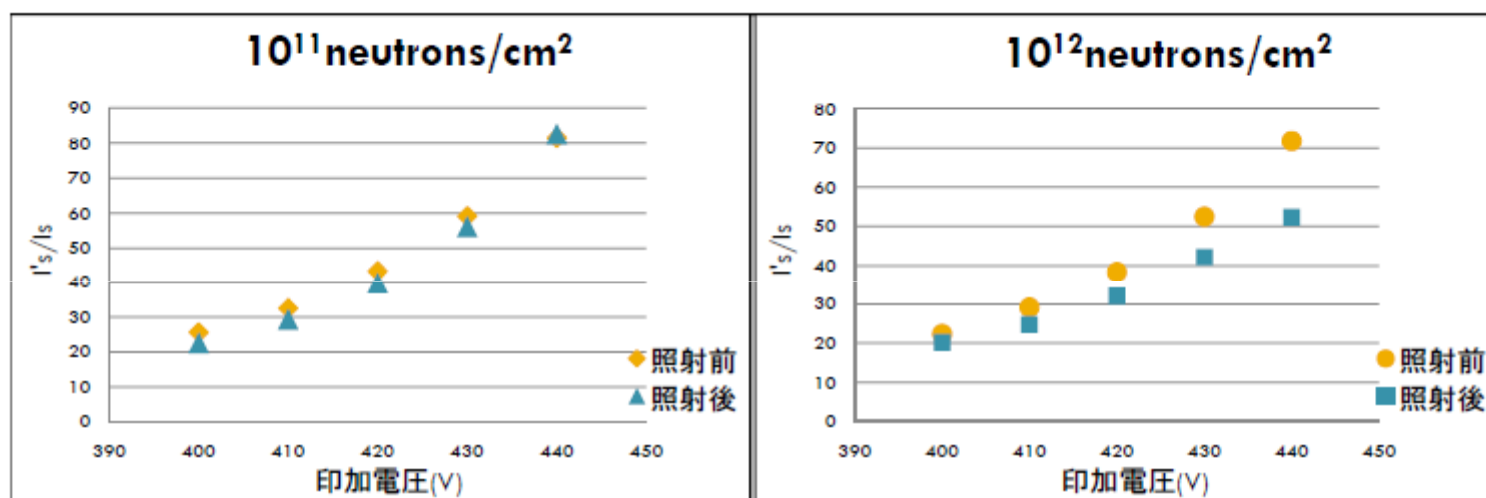
照射前後での漏れ電流の増加が、雑音レベルにどのくらい影響しているか調べる。



照射後の雑音レベルは、
10¹¹neutrons/cm²照射した場合、照射前の約2倍
10¹²neutrons/cm²照射した場合、照射前の約3倍
大きくなることがわかる。

中性子照射前後でのQE × Gainの変化

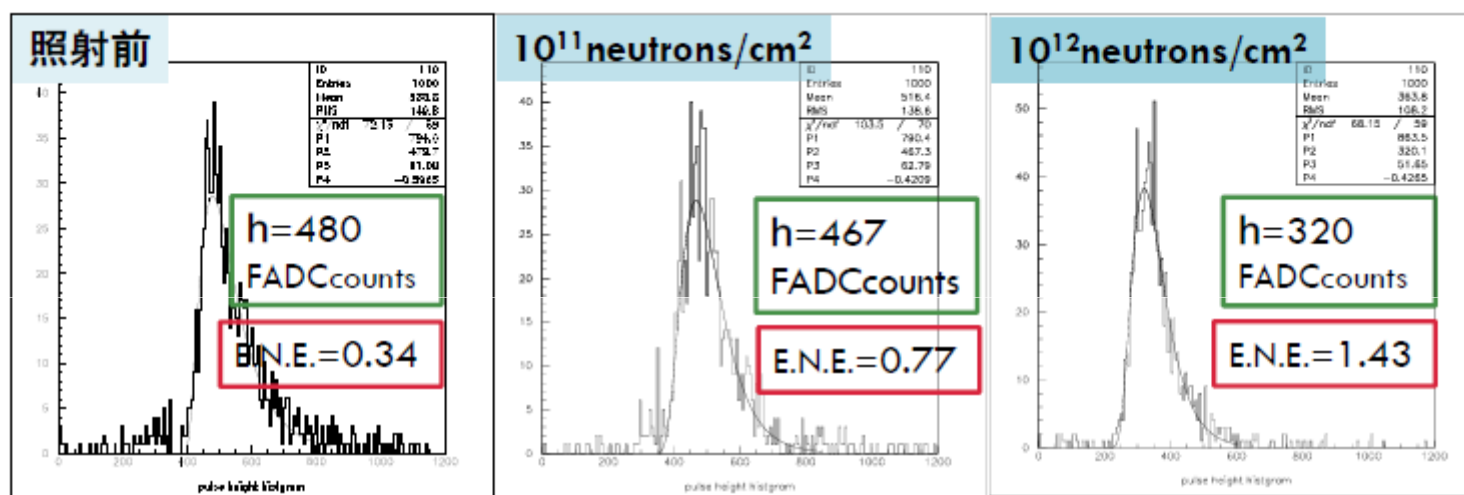
28



- 10¹¹neutrons/cm²照射した場合、顕著な変化は見られない。
- 10¹²neutrons/cm²照射した場合、印加電圧が高くなるにつれて悪化。
 - 440Vでは約30%低下する。

宇宙線を用いた測定結果

29



10^{11} neutrons/cm²照射した場合
 10^{12} neutrons/cm²照射した場合

照射後の波高

約2.5% ↓

約30% ↓

E.N.E

約2倍 ↓

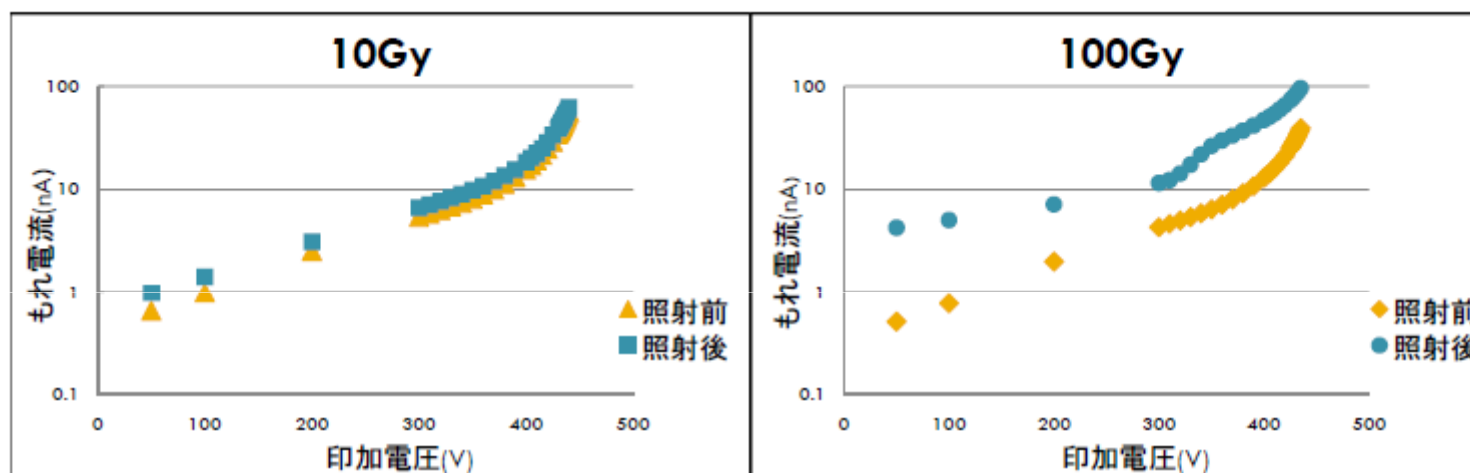
約4倍 ↓

LEDを用いた測定結果を
裏付けるものとなった。

Belle II 実験のアップグレードにAPDを用いる場合、
中性子被爆に対して何らかの対策が必要である。

γ線照射前後でのI-V特性の変化

31

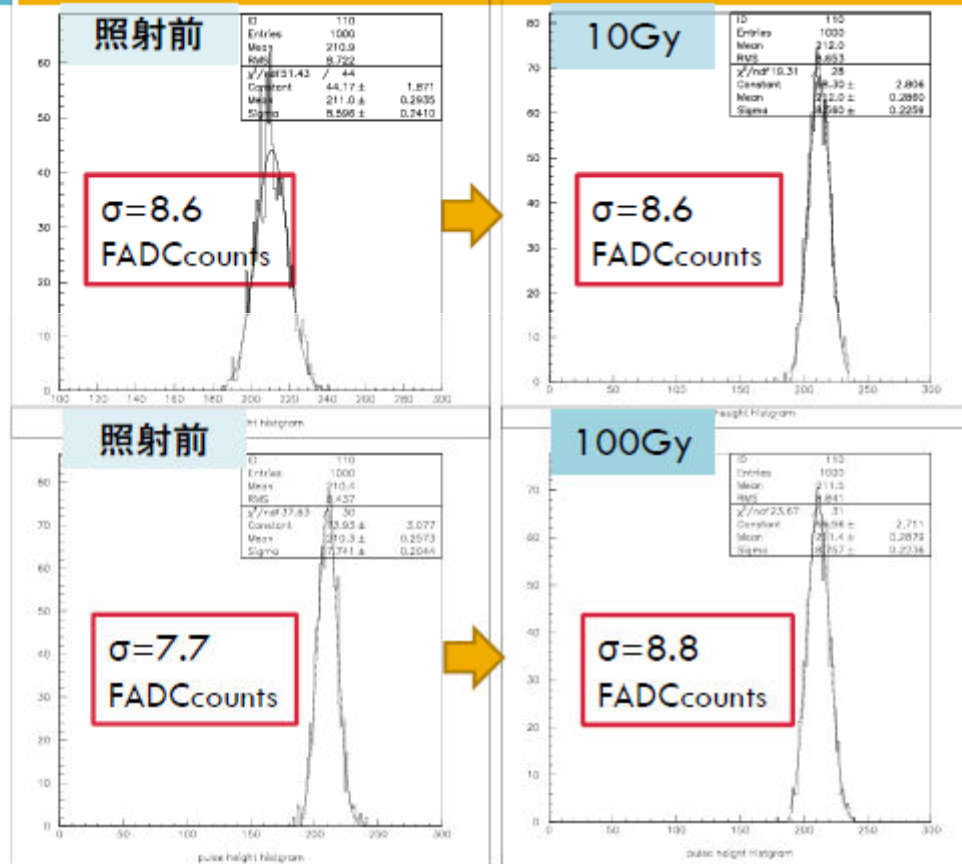


照射後の漏れ電流は、

- 10Gy照射した場合、200~400Vの間で約10~20%増加する。
- 100Gy照射した場合、
 - 印加電圧が低いところでは、約7~8倍大きくなる。
 - 330~390Vでは、山のようなカーブを描き、最大約4倍大きくなる。

γ線照射による雑音レベルへの影響

32

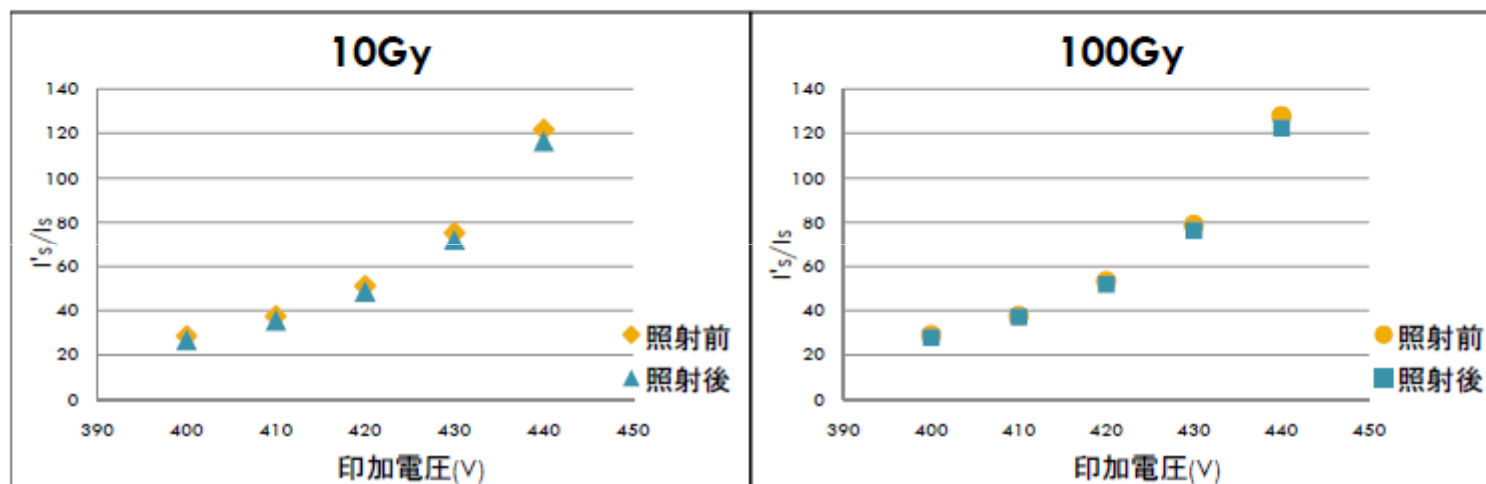


- 10Gy、100Gy共に照射前後で顕著な変化は見られない。

- 漏れ電流の変化が4倍程度では、雑音レベルへの影響は無視できることがわかった。

γ 線照射前後でのQE $\times$ Gainの変化

33

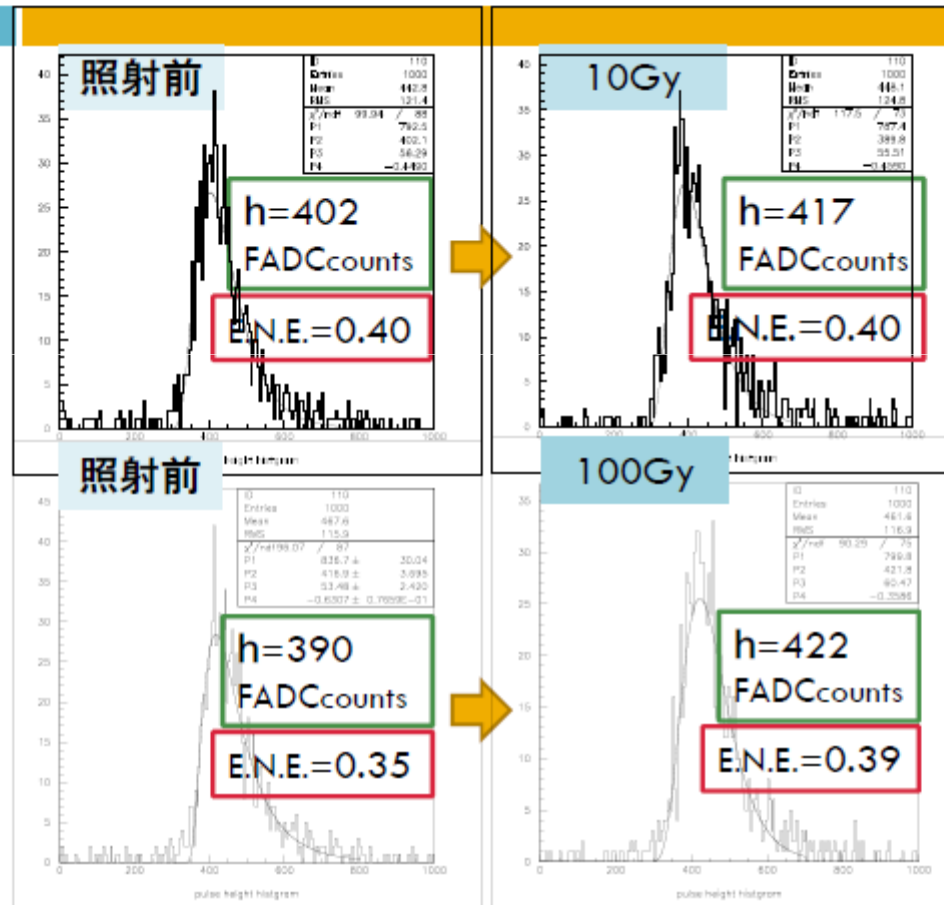


10Gy、100Gy共に照射前後で顕著な変化は見られない。



宇宙線を用いた測定結果

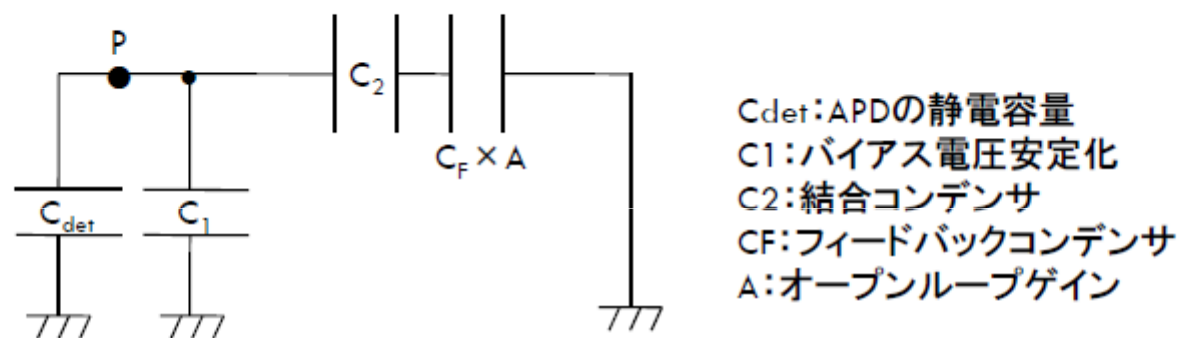
34



- 波高、E.N.E.共に
10Gy、100Gy照射後
に顕著な変化は見ら
れない。

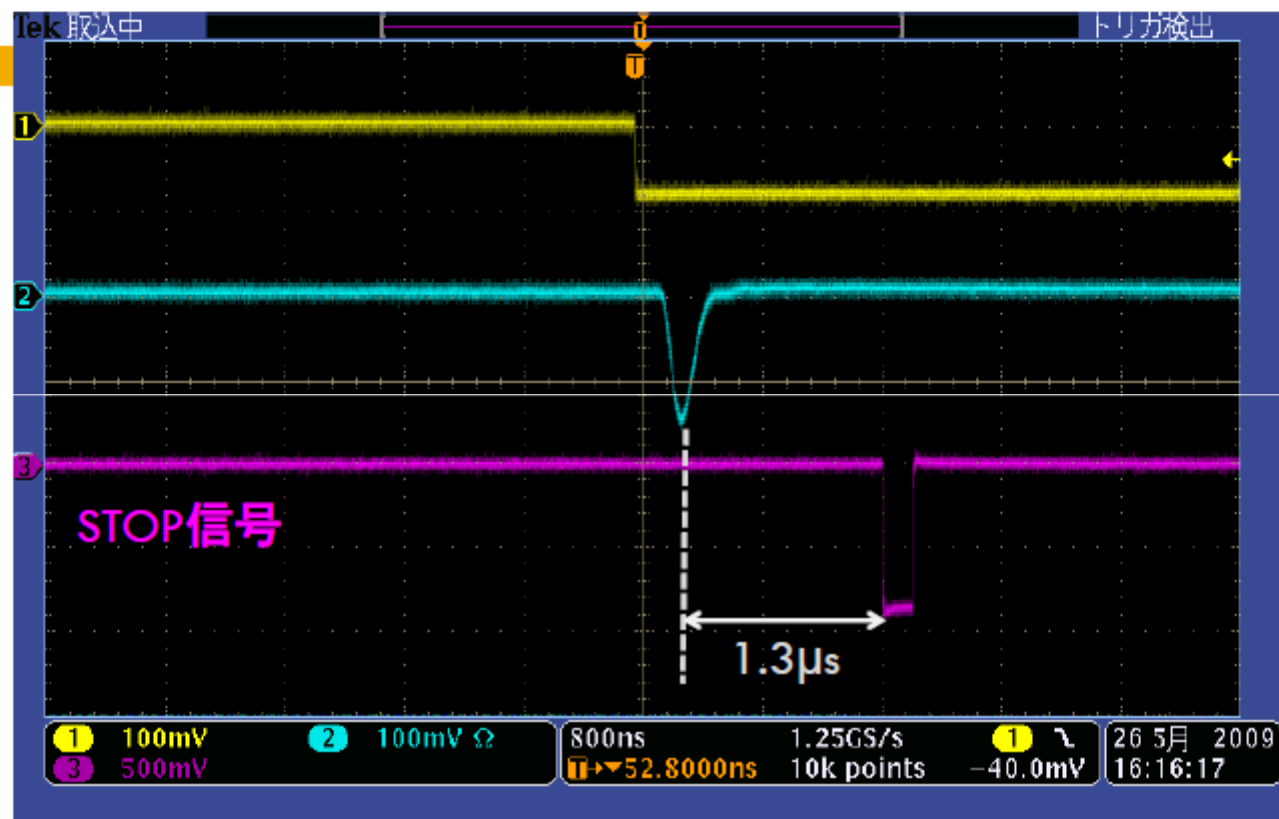
Belle II のアップグレードに用いる上で、 γ 線被爆の効果は事実上大きな問題にならないといえる。

信号電荷収集効率を評価するための等価回路



A が十分に大きければ、増幅率は C_F によって決まる。

CMS7200タイプはKEDRタイプに比べて A が小さいので電荷収集効率が低い。



APD原理

44

- アバランシェフォトダイオード(APD)とは、
 - アバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用して受光感度を上昇させたフォトダイオードである。
- アバランシェ増倍とは
 - 半導体中に大きな電界があると、光子の衝突によって発生する電子が加速され、他の半導体原子と衝突して複数の電子を弾き出す。ここで弾き出された電子は電界によって加速され、他の半導体電子に衝突してさらに電子を弾き出す。この連鎖によって、移動する電子が爆発的に増える現象。
 - アバランシェ増倍によって微弱な光でも大きな電位変化を引き起こせるため、フォトダイオードの受光感度を大きく上昇させることが可能になる。

