2008年度　修士学位論文

アバランシェ半導体光検出器の特性および中性子被曝効果の測定

奈良女子大学大学院人間文化研究科
物理科学専攻　高エネルギー物理学研究室
平井 珠生

2009年2月

目 次

第 1 章　序論 **1**

第 2 章　アバランシェ半導体光検出器 **3**
2.1　半導体検出器の一般論 3
2.2　不純物半導体 3
2.3　pn 接合した半導体検出器への応用 3
2.4　アバランシェフォトダイオード (APD) 4
2.5　Pixelated Photon Detector(PPD) 5

第 3 章　純 CsI シンチレーターの APD 読み出し **7**
3.1　KEKB ファクトリー実験 7
3.1.1　KEKB 加速器 7
3.1.2　Belle 検出器 9
3.2　B ファクトリー実験の高輝度化 13
3.2.1　SuperKEKB 加速器 13
3.2.2　SuperBelle 測定器 14
3.2.3　純 CsI シンチレーターの APD 読み出しによる電磁カロリメーター . 14
3.3　読み出しエレクトロニクスの雑音テスト 15
3.3.1　測定方法 15
3.3.2　測定結果 16

第 4 章　MPPC の中性子被曝効果 **21**
4.1　MPPC の諸元と特性 21
4.1.1　MPPC の諸元と仕様 21
4.1.2　増幅率の印加電圧および温度に対する依存性 22
4.1.3　ダークノイズ 23
4.1.4　クロストーク 23
4.1.5　電流-電圧 (I-V) 特性 23
4.1.6　光子検出効率 (Photon Detection Efficiency; PDE) 23
4.2　中性子照射試験 24
4.2.1　東京大学原子炉「弥生」 24
4.2.2　測定手順 25
4.3　照射前後の特性変化 25

4.3.1 出力波高分布 26
4.3.2 増幅率 26
4.3.3 ノイズレート 30
4.3.4 クロストークレート 32
4.3.5 I-V 特性測定 32
4.3.6 PDE (光子検出効率) 34
4.4 赤外線発光写真 40

第 5 章 結論 **41**

第 6 章 謝辞 **43**

図 目 次

2.1 APD の 3 つの異なる内部構造 5
2.2 MPPC の等価回路 6

3.1 KEKB 加速器の概観図 8
3.2 Belle 測定器の全体図 11
3.3 テストパルスを用いた測定のセットアップ図 16
3.4 プリアンプ回路図 17
3.5 プリアンプの仕様 17
3.6 プリアンプの写真 18
3.7 シェーパー回路図 18
3.8 FADC で記録したテストパルス 1 イベントのデータ 19
3.9 ペデスタルのフィット結果 20

4.1 LED をパルス状に点灯させ、MPPC の受光部に平均数個の光子が届くようにして得た波高分布 22
4.2 「弥生」の実験室 24
4.3 ADC 分布 (照射量 $2 \times 10^{10}\mathrm{neutrons/cm^2}$ のサンプル) の時間変化 26
4.4 増幅率測定のセットアップ 27
4.5 LED ドライバー回路図 27
4.6 ブレイクダウン電圧と照射量の相関関係 28
4.7 増幅率と照射量の相関関係 29
4.8 (左図)100pixel のブレイクダウン電圧の時間変化 (右図)400pixel のブレイクダウン電圧の時間変化 29
4.9 (左図)100pixel の増幅率の時間変化 (右図)400pixel の増幅率の時間変化 . . 30
4.10 ノイズレート測定のセットアップ 30
4.11 ノイズレートと照射量の相関関係 31
4.12 (左図)100pixel のノイズレート (1 p.e. 以上) と照射量の相関関係 (右図)100pixel のノイズレート (2 p.e. 以上) と照射量の相関関係 31
4.13 (左図)400pixel のノイズレート (1 p.e. 以上) と照射量の関係 (右図)400pixel のノイズレート (2 p.e. 以上) と照射量の関係 32
4.14 クロストークレートと中性子照射量の相関関係 33
4.15 (左図)100pixel のクロストークレートの時間変化 (右図)400pixel のクロストークレートの時間変化 33
4.16 漏れ電流測定のセットアップ 34

4.17 I-V 特性測定結果 35
4.18 V_{ov}=1.1V に設定して測定した電流値の照射後 60 日間の時間変化。左側は 100 ピクセル、右側は 400 ピクセル。 36
4.19 PDE 測定のセットアップ図 38
4.20 (左図)PDE 測定セットアップ (右図)PDE 測定ブロック図 38
4.21 LED 点灯時と LED 消灯時の ADC 分布 39
4.22 PDE 測定結果 39
4.23 赤外線発光写真の撮影結果 40

表 目 次

3.1 KEKB 加速器の設計パラメータ 9
3.2 Belle 測定器のパラメータ 10

4.1 照射のパターン 25

第1章　序論

高エネルギー物理学実験とは、加速器で生成される高エネルギー粒子の衝突反応から、物質の究極の構成要素と、その間に働く相互作用を探究する学問である。そのため、生成される粒子のエネルギー、運動量、種類等を高精度で計測できる検出器が要求される。検出器には様々な種類があり、検出する粒子の種類やその実験目的によって使用する検出器が分けられる。

現在、我が国において進行中で世界をリードしている高エネルギー物理学実験の一つが、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が擁する KEKB 電子 · 陽電子衝突型加速器を使った Belle 実験である。Belle 実験は、B 中間子の CP 非保存を測定することを主目的としているが、その高い輝度により B 中間子のみならず、ほぼ同量の τ 粒子も大量に生成され、幅広いテーマの研究が展開されている。

それらのうちのいくつかは高効率かつ高分解能の γ 線検出を必要とする。例を挙げれば、小林 · 益川理論の CP 非保存パラメーターの一つである ϕ_2 を得るには、$B^0 \to \pi^0\pi^0$ の崩壊分岐比と CP 非対称度の測定は不可欠である。この π^0 は $\pi^0 \to \gamma\gamma$ 過程で生じる γ 線を検出して再構成する。また、$\tau^- \to \mu^-\gamma$ のようなレプトン数を破る崩壊の探索などにも γ 線の検出は欠くべからざる項目である。

γ 線を検出し、そのエネルギーを測定する検出器は電磁カロリメーターと呼ばれる。Belle 測定器が装備する電磁カロリメーターは CsI(Tl) 結晶シンチレーターにより、入射粒子のエネルギーを蛍光 (シンチレーション光) に変換し、それを光検出器として、PIN フォトダイオードを用いて読み出すものである。この例が示すように、高エネルギー物理学実験において光検出器は重要な役割を担うデバイスである。

光検出器は光電管タイプと半導体タイプの 2 つに大きく分られる。光電管タイプの検出器は光電効果を利用したもので、高真空のガラス管中に、光電陰極と陽極を組合せた構造を基本としている。一方、半導体タイプの検出器は、内部光電効果を利用したもので、光電管タイプのものと比べて、

- 磁場の影響を受けない
- 高いフォトンカウンティング能力
- コンパクト
- 低バイアス動作

といった優れた特性を持つ。しかし、これまでの半導体検出器は増幅率が低いといった欠点も持っていた。

その欠点を克服しうる検出器が、APD(Avalanche Photo Diode) や近年開発された PPD(Pixelated Photon Detector) であり、アバランシェ増倍により電子を増幅するため、高い増倍率を持

つ。そのため、これらは発光が短いため、高レート実験でもパイルアップの影響を受けない純 CsI や $PbWO_4$ といったシンンチレーターの少い光量を補い得るデバイスとして開発や応用が進んでいる。

高エネルギー実験における APD や PPD の使用の際には、バックグラウンドとして入射する放射線による損傷を受ける。検出器が放射線被曝効果に対し、どれほどの耐性を持っているかを知ることは実験装置の設計を行うにあたって不可欠である。

本研究では、このアバランシェ増幅で電子を増倍する APD を純 CsI シンチレーターを用いたカロリメーターに適用した場合の基礎特性測定と、PPD の中性子被曝効果を測定した結果について報告する。

以降、本論文では、第 2 章で半導体光検出器について概観する。第 3 章では、B ファクトリー実験と電磁カロリメーターについて説明した後に、APD を純 CsI シンチレーターを用いたカロリメーターに適用した場合の基礎特性測定について述べる。第 4 章では浜松ホトニクス社が開発した PPD である MPPC(Multi Pixel Photon Counter) の中性子被曝効果について、照射試験の方法と結果を記し、最後に第 5 章で本研究をまとめる。

第2章　アバランシェ半導体光検出器

本章では、まず半導体検出器の一般論ついて述べ、続いてアバランシェ半導体光検出器の構造や動作原理、諸特性について述べる。

2.1　半導体検出器の一般論

半導体とは、常温における電気伝導率が金属と絶縁体の中間である物質である。半導体中の各電子は、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和からなるある一定の全エネルギーを持っているが、それらの電子の状態は、そのエネルギー固有値によって、(1) 価電子帯、(2) 禁制帯、(3) 伝導帯の三つに分けられる。価電子帯の電子は半導体中の原子に束縛されており、電気伝導に寄与しない。禁制帯は、電子が存在しえないエネルギー固有値の領域のことである。さらに高いエネルギー固有値の領域に伝導帯があり、ここまで励起された電子は外場に反応して運動し、電気伝導に寄与するキャリアとなる。

したがって、半導体を光検出器として使用する上では、入射した光子を効率良く伝導帯に励起した電子に変換し、その結果生じる電流や電荷を効果的に収集することが重要である。そのため、次節に述べるように、微量の不純物を添加 (ドープ) して、その特性を制御することが広く行われている。

2.2　不純物半導体

シリコンのような典型的な半導体結晶は、個々の原子が規則的に結合して結晶構造を作っている。結晶構造は価電子が隣りの原子の価電子と対を作り、共有結合を形成することにより生じる。3 価あるいは 5 価の原子を純粋な真性半導体に加えると、3 価の原子は半導体の価電子で満されない結合を形成し、5 価の原子は余剰な電子を与える。これらの不純物は、それぞれアクセプター不純物、ドナー不純物と呼ばれる。アクセプター不純物をドープした半導体を p 型と呼び、ドナー不純物をドープした半導体を n 型半導体と呼ぶ。導入された正孔は正 (positive) の電荷を運び、電子は負 (negative) のキャリアとなるため、この名がある。

2.3　pn 接合した半導体検出器への応用

p 型半導体と n 型半導体を接合した半導体は、一般にはダイオードとして知られている。半導体ダイオードの p と n の接合点は p 型と n 型を圧着するのではなく、n 型の一端に p 型の不純物を拡張して作る。

交流を直流に変換 (整流) する目的でダイオードを使用する場合は、p 側を高電位、n 側を低電位にすると、p 側の正孔と n 側の電子がともに接合部に向かって移動し、正孔と電子の再結合により電流が流れ続ける。この向きに電圧を印加することを順バイアスを印加すると言う。

光検出器としてダイオードを用いる場合は、それとは逆に p 側を低電位、n 側を高電位にするように直流電源をつなぐ。これを逆バイアスを印加すると言う。すると、正孔が p 側、電子が n 側に引き寄せられて、接合部近傍にはキャリアがいなくなる。この領域を空乏層と呼ぶ。この状態で光子が入射し、空乏層で光電効果により電子を伝導帯に励起すると、電子および対になって生成された正孔がそれぞれ n 側と p 側に移動することにより、電気信号パルスが生じる。

PIN フォトダイオード等では、得られる電子-正孔対の数は、入射して光電効果を起こした光子の数と同じであり、光電子増倍管のように、信号を増幅する機能はない。光量の乏しいシンチレーターやチェレンコフ光を用いる場合は、それでは信号と雑音を十分に分離して読み出すことが難しい。そこで、近年は個体内で電子なだれ (アバランシェ) を形成させることにより信号を増幅できるデバイスである、アバランシェ半導体光検出器が開発・使用されるようになってきた。次節以降に、その代表例であるアバランシェフォトダイオード (APD) とピクセル型光子カウンター (PPD) についてさらに詳しく述べる。

2.4 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (APD) とは、半導体デバイス中に、非常に強い電場を形成できる構造を設け、そこでの電子なだれ形成による信号増幅を行うことにより、受光感度を向上させたフォトダイオードである。

半導体デバイス中に強い電場を形成するための構造としては、図 2.4 に示す、ベベル・エッジ型、リーチ・スルー型、リバース型といったものが考案されている [1]。これらのうち、リバース型はシンチレーターに取り付けて用いることを主眼において作られたものである。多くのシンチレーターが発する光の波長は 500nm あるいはそれ以下なので、シリコン半導体に入射すると、空乏層の最初の $1 \sim 3\mu$m 程度の領域で光電吸収される。それにより生じた電子を即座にアバランシェ増幅する構造になっている。

APD の動作モードには、プロポーショナルモードとガイガーモードの二つがある。プロポーショナルモードでは電子なだれは形成されるが、なだれ降伏が起きるブレイクダウン電圧以下の電圧で動作させるので、増幅率は数十 ~ 100 倍程度となり、APD へ入射した光量に比例した電荷量の出力を示す。本研究で用いたプロポーショナルモードの APD は浜松ホトニクス社製の S8664-1010 型で、受光部面積 1cm^2 のリバース型である。

一方、ガイガーモードではブレイクダウン電圧以上の電圧で動作し、増幅率は $10^5 \sim 10^6$ 倍と非常に高いが、APD へ入射した光量に関係なく、決まった波高の大きな出力信号パルスを出す。この光電子増倍管に匹敵する高い増幅率を生かして、半導体ベースの光検出器でありながら単一光子検出 (またはフォトンカウンティング) を原理的に可能にしたデバイスが、次節で述べるピクセル型光子カウンター (Pixelated Photon Detector; PPD) である。

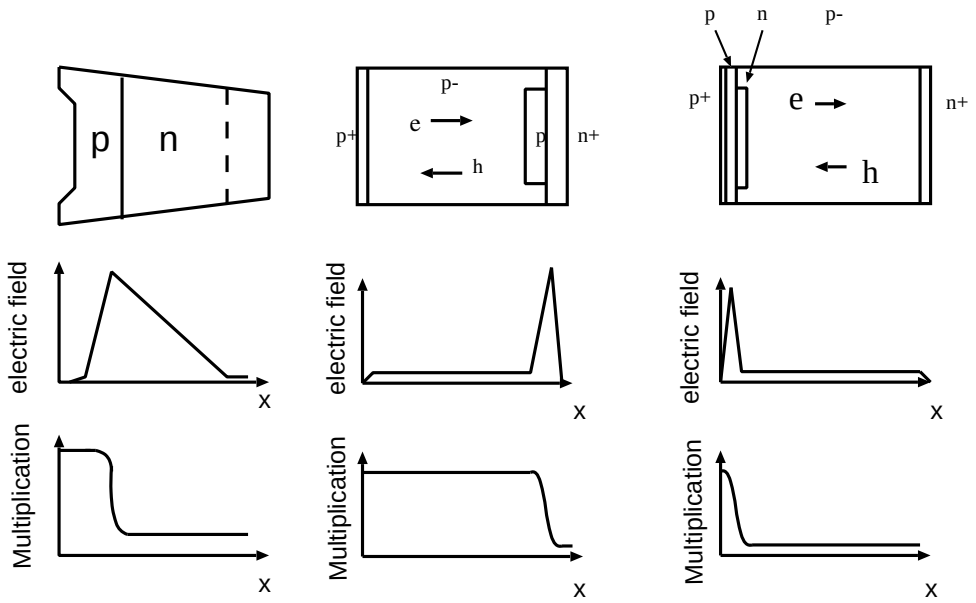

図 2.1: APD の 3 つ異なる内部構造図。左端がベベル · エッジ型、中央がリーチ · スルー型、右端がリバース型。中段と下段に各 APD の電場領域の断面と増倍率を示す。

2.5 Pixelated Photon Detector(PPD)

ピクセル型光子検出器 (Pixelated Photon Detector,PPD) は近年開発された光半導体素子である。図 2.5 に示すように、PPD は多数のピクセルに分割され、各々のピクセルはガイガーモードで動作する APD とクエンチ抵抗が並んで構成されている。ピクセルに光子が入射すると、生成された電子がアバランシェ増幅を起こし、そのピクセルに入射した光子数に関わらず、一定の信号を出力する。したがって、PPD の受光面に入射する光子数よりもピクセル数が十分多い条件で用いれば、PPD の信号の大きさは放電したピクセル数に比例することを用いて入射光子数を算出することができる。

本研究で用いた PPD は浜松ホトニクス社が開発した MPPC(Multi Pixel Photon Counter) なる製品名のものである。MPPC は出荷されているもので、受光部面積 $1\mathrm{mm}^2$、ピクセル数は 100 ピクセルまたは 400 ピクセル、典型的な印加電圧が 70V 前後で 7×10^5 程度の増幅率を有するものである。

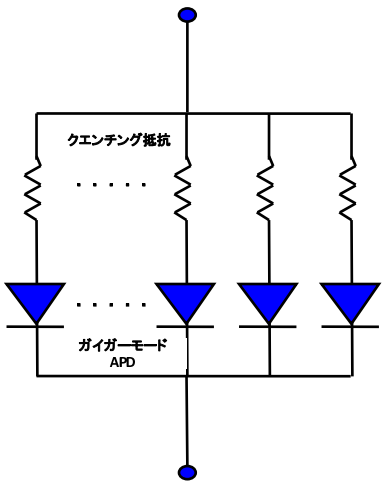

図 2.2: MPPC の等価回路。ピクセル毎に独立に動作するガイガーモード APD とクエンチング抵抗が並列に接続されており、共通の読み出しラインで読み出される。したがって、デバイスに入射した光子数は信号パルスが出力したピクセルの数として数えることができる。

第3章　純 CsIシンチレーターの APD読み出し

本章では、B ファクトリー実験およびその高輝度化計画について記す。さらにその高輝度化の際に電磁カロリメーターを設計をする上で問題になるビームバックグラウンドによるパイルアップについて説明する。続いて、パイルアップを克服する選択肢の一つとして APD を純 CsI シンチレーターと組合せることを想定した読み出しの特性評価を行った結果について記す。

3.1　KEKB ファクトリー実験

本節では、現在高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で稼働中の KEKB 加速器および Belle 測定器を概観する。

3.1.1　KEKB 加速器

KEKB 加速器は、B 中間子系における CP 非保存現象の系統的な研究によって、小林 · 益川理論の検証を行い、さらにそれを超えた物理現象の探索を行うことを主たる目的として建設された、非対称エネルギーの電子 · 陽電子衝突型加速器である。KEKB 加速器は以下のような特徴を持っている。

- 重心系のエネルギーが、$\Upsilon(4S)$ の質量に相当する 10.58GeV に設定されている。$\Upsilon(4S)$ はほとんど 100%の確率で B 中間子 · 反 B 中間子対に崩壊する [2] ので、B 中間子の大量生成に向いている。また、B 中間子 · 反 B 中間子のみが生じることから、両者の間にボーズ · アインシュタイン相関のある振動現象が起こり、時間依存 CP 非保存の測定を行う上で、他に例のない条件をもたらす。
- B 中間子の崩壊時間を精度よく測定するために、KEKB 加速器は電子は 8GeV、陽電子は 3.5GeV と両者のエネルギーが異なる非対称エネルギー、2 リング型の衝突型加速器になっている。
- CP 非保存の測定に重要な B 中間子の崩壊モードの崩壊分岐比は 10^{-5} から 10^{-6} と小さいため、大量の B 中間子 · 反 B 中間子対の生成が必要である。そのためそれまでの加速器よりも 2 桁高いルミノシティ $(1 \times 10^{34}\ \mathrm{cm^{-2}\,s^{-1}})$ を実現するように設計されている。

KEKB 加速器は非対称エネルギーの衝突型加速器なので、電子と陽電子を異なったリング中に蓄積する必要があり、2 リングを擁する。KEKB 加速器の全体図を図 3.1.1 に示

す。KEKB では既存の周長 3km のトリスタン実験で使用されたトンネルの中に、電子を蓄積する 8GeV のリングと陽電子を蓄積する 3.5GeV のリングの 2 つリングが横に並べて設置されている。電子と陽電子は各々のリングの中を反対方向に周回する。2 つのリングは富士実験棟で立体交差し、筑波実験棟中で電子と陽電子が衝突する。衝突点を囲んで発生した粒子群の検出を行うため、Belle 測定器と呼ばれる 1.5T のソレノイド磁場を用いる大型の汎用スペクトルメーターが設置されている。

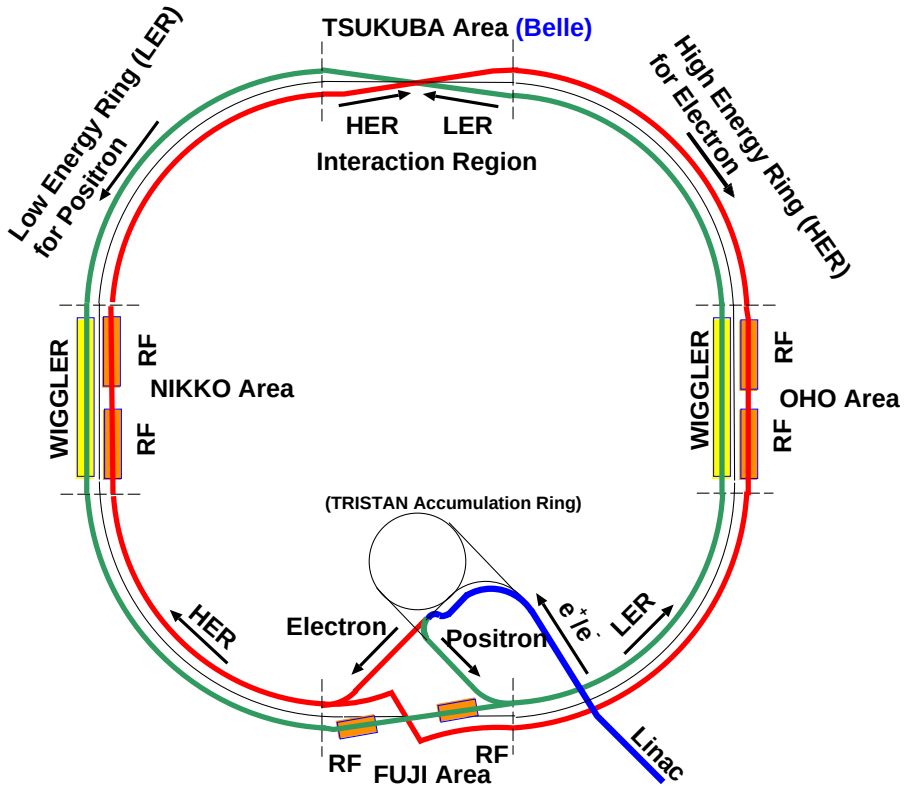

図 3.1: KEKB 加速器の概観図

KEKB 加速器ではビーム輝度 (以下ルミノシティと呼ぶ) が最大となるように設計されている。ルミノシティ $\mathcal{L}$ と断面積 σ を持つ反応の発生頻度 R との間には、$R = \mathcal{L}\sigma$ の関係が成り立つ。ルミノシティは、ビームの電流値やサイズから決まる量であり、衝突型加速器においてルミノシティは次のような式により与えられる。

$$\mathcal{L} = 2.2 \times 10^{34} \xi (1 + r)(\frac{E \cdot I}{\beta_y^*}) \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1} \tag{3.1}$$

ここで、E はビームのエネルギー (単位 : GeV)、I は蓄積電流 (単位 : A) である。また、ξ はビームチューンシフトと呼ばれる量であり、KEKB 加速器ではほぼ 0.040 の値を持つ。r は衝突点における垂直方向のビームサイズを水平方向のビームサイズで割った値であり、β_y^* は衝突点で垂直方向 (y 方向) にどれだけビームを絞れるかを表すパラメーターである。したがって、ルミノシティを大きくするためには、蓄積電流とビームチューンシフト ξ を大きくし、β_y^* を小さくする必要がある。表 3.1 に、KEKB 加速器の設計値のパラメタの値

を示す。設計値のルミノシティ$1 \times 10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ を達成するには、陽電子リングに 2.6A、電子リングに 1.1A の電流を蓄積し、ビームの y 方向のベータ β_y^* を 0.01m にする必要がある。

KEKB では、2003 年 5 月に設計値であるビームルミノシティ、$1 \times 10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ を達成した。その後も最高記録を更新し続けており、2006 年 11 月には $1.7 \times 10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ を記録した。このルミノシティは、世界中のあらゆる衝突型加速器で実現された最も高い値である。

表 3.1: KEKB 加速器の設計パラメータ

Ring	LER	HER
ビームエネルギー (e^+e^-)	3.5 GeV	8.0 GeV
周長	3016.26 m	
ルミノシティ	$1 \times 10^{34}\ \mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$	
ビーム交差角	± 11 mrad	
ビームビームチューンシフト	0.039/0.052	
Beta function at IP (β_x^*/β_y^*)	0.33/0.01 m	
ビーム電流 (e^+e^-)	2.6 A	1.1 A
ビームエネルギーの広がり	7.1×10^{-4}	6.7×10^{-4}
バンチ間隔	0.59 m	
バンチの数	5000	

3.1.2 Belle 検出器

Belle 検出器は KEKB 加速器の電子 · 陽電子の衝突点を囲んで設置されている。検出器の全体像を図 3.2 に示す。

衝突点は、測定器に至るまでの物質量を減らすためにベリリウムで作られたビームパイプの中にある。その外側に 0.1mm 以下の位置分解能で、B 中間子の崩壊点を再構成するためのシリコンバーテックス検出器 (Silicon Vertex Detecter; SVD) と荷電粒子の飛跡検出を行う中央ドリフトチェンバー (Central Drift Chamber; CDC) が設置されている。荷電粒子の種類を識別する情報を与える役割のエアロジェルチェレンコフカウンター (Aerogel Cherenkov Counter; ACC) および飛行時間カウンター (Time of Flight ;TOF) の外側で 1.5T の磁場を発生する超伝導ソレノイドの内側に電磁カロリメーター (Electromagnetic CaLorimeter; ECL) が位置している。最も外側の構造体は鉄とレジスティブプレーナーチェンバー (RPC) を 10 層以上重ねており、K_L^0 中間子と μ 粒子の検出に用いられるため KLM と呼ばれる。各々の測定器のパラメータを表 3.2 に示す。

さらに検出器各部の構造および機能について以下にまとめる。

- シリコンバーテックス検出器 (SVD)

  SVD(Silicon Vertex Detecter) は短い寿命 ($10^{-10} \sim 10^{-13}$sec) をもつ粒子の崩壊点

表 3.2: Belle 測定器のパラメータ

検出器	構成物	主要なパラメタ	読み出し チャンネル数	主な性能
ビームパイプ	ベリリウム (2 重構造)	内半径 2.3 cm 0.5 mm Be/ 2 mm He /0.5 mm Be		
粒子崩壊点 検出器	両面 シリコン ストリップ	300 μm 厚, 3 層 r = 3.0 - 5.8 cm 長さ = 22 - 34 cm	ϕ: 41k θ: 41k	$\sigma_{\Delta z} \sim 105$ μm
前方 カロリーメータ	BGO シンチレータ	2 cm × 1.5 cm × 12 cm	θ : 5 ϕ : 32	
中央飛跡 検出器	ドリフト チェンバー	アノード : 52 層 カソード : 3 層 r = 8.5 $\sim$ 90 cm -77 $\leq$ z $\leq$ 160 cm	アノード: 8.4k カソード: 1.5k	$\sigma_{r\phi} = 130$ μm $\sigma_z = 200 \sim 1{,}400$ μm $\frac{\sigma_{p_t}}{p_t}$=0.3 % $\sqrt{p_t^2+1}$ $\sigma_{dE/dx} = 6$ %
エアロジェル チェレンコフ カウンター	屈折率 n : 1.01 $\sim$ 1.03 シリカ エアロジェル	1 モジュール $\sim$ 12 × 12 × 12 cm ^{3} バレル 960 個 エンドキャップ 228 個 FM - PMT 読み出し	$\mu_{eff} = \geq 6$ 1,788 ch	K/π 1.2 $\leq$ p $\leq$ 3.5 GeV/c
飛行時間差 測定器	プラスティック シンチレーター	128 ϕ segmentation r = 120 cm, 3 m long	128 × 2 ch	$\sigma_t = 100$ ps K/π =up to 1.2 GeV/c
電磁 カロリー メータ	CsI(Tl) シンチレータ	タワー構造 $\sim 5.5 \times 5.5 \times 30 cm^3$ 結晶 バレル : r = 125 - 162 cm エンドキャップ : z = -102 and +196 cm	6,624(B) 1,152(FE) 960(BE)	σ_E/E $= \frac{0.066(\%)}{E} \oplus \frac{0.81(\%)}{E^{1/4}} \oplus 1.34(\%)$ $\sigma_{pos} = 0.5$ cm / $\sqrt{E}$ E in GeV
超電導 ソレノイド	超電導	inn.rad. = 170 cm		B = 1.5 T
K_L、μ 粒子 検出器	高抵抗 平板チェンバー (RPC)	(5 cm 鉄 + 4 cm 間隙) × 14 層 各々の間隙に 2 個の RPC θ and ϕ strips	θ: 16k ϕ: 16k	$\Delta\phi = \Delta\theta = 30$ mrad for K_L $\sigma_t = 1$ ns 1 % hadron fakes

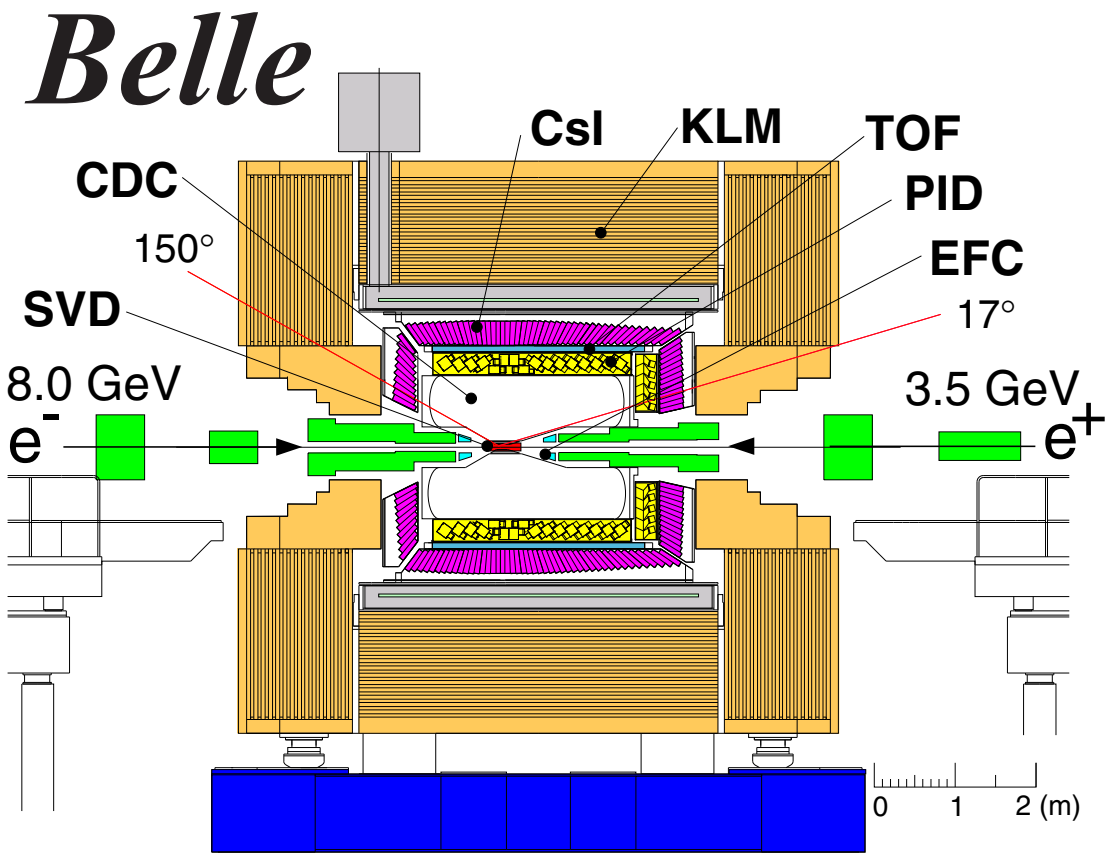

図 3.2: Belle 測定器の全体図

を測定する役割を担う。粒子の崩壊点の測定は B 中間子のみでなく、D 中間子や τ レプトンの物理の研究を行う上でも非常に重要である。本測定器は、2003 年夏までは 3 層のシリコンストリップ検出器、それ以外は 4 層を配置しており、崩壊点の z 方向 (陽電子ビームの軸に沿った方向) の分解能 $\sigma_z \sim 80\mu$m を達成している。また、SVD はその外側に位置する中央飛跡検出器 (CDC) と共に粒子の飛跡を検出し、運動量を精度良く測定する役割を担っている。

- 中央飛跡検出器 (CDC:Central Drift Chamber)

  荷電粒子の飛跡を検出し、ローレンツ力により曲った軌道の曲率半径から運動量を正確に測定することが、中央飛跡検出器 (CDC) の重要な役割である。CDC は、超伝導ソレノイドが作る 1.5T の磁場内に設置され、1 気圧の $He(50\%)$:$C_2H_6(50\%)$ 混合ガス中に、多数の (約 1 万本) 陽極ワイヤーが張られている。荷電粒子の多重散乱の影響を押さえるために、ガス、ワイヤーともに物質量の小さいものを使用しており、数万本におよぶ陰極ワイヤーはアルミニウム合金製のものを採用した。荷電粒子が通過するとガスを電離することから電子が生成され、その電子がワイヤーまで移動 (ドリフト) する時間から、粒子の通過位置までの距離を知ることができる。

- エアロジェルチェレンコフカウンター (ACC:Aerogel Čerenkov Counter)

  エアロジェルチェレンコフカウンター[1](ACC) の役割は、$K^{\pm}$ と $\pi^{\pm}$ とを識別することである。荷電粒子が ACC を通過するとその粒子速度 v と光速の比 $\frac{v}{c}$ がエアロジェルの屈折率 n に対して、

  $$\frac{v}{c} > \frac{1}{n}$$

  の条件を満たすとき、チェレンコフ光を出す。Belle 測定器では、異なった屈折率 (1.01 ~ 1.03) のエアロジェルを用いることにより、1.2 $\sim$ 3.5 GeV/c の領域で $K^{\pm}$ と $\pi^{\pm}$ を識別することができるように設計されているこの運動量領域で荷電粒子が $\pi^{\pm}$ であれば、チェレンコフ光を出し、$K^{\pm}$ であればチェレンコフ光が出ないことを利用して両者を識別する。

- 飛行時間差検出器 (TOF:Time of Flight)

  TOF(Time of Flight Counter) は、荷電粒子の飛跡時間を測定することによって K/π 中間子の識別を行うことを主目的とするプラスチックシンチレーションカウンターである。また、TOF は CDC と組み合わせて荷電粒子を検出することにより、トリガー信号を出す役割も担っている。

- 電磁カロリメーター (ECL:Electromagnetic Calorimeter)

  高エネルギーの電子や光子は、十分厚い物質に入射すると制動放射と電子対生成の連鎖反応により電磁シャワーを作り、ほぼ全エネルギーを物質中で失う。このエネルギー損失を電気信号に変換し、読み出しと記録することにより、電子や光子のエネルギーを良い精度で測定するのが電磁カロリーメーター (ECL) の役割である。ま

[1] エアロジェルは、SiO_2 からなる固体のコロイド物質で屈折率を 1.01-1.05 程度の範囲で調節して作成できる。

た、ECL で測定された全エネルギー E と CDC で測定された荷電粒子の運動量 P との比 (E/P) は、電子を他の粒子から識別する上で最も重要な量である。電子の場合には、この比が 1 に近くなるのに対し、$\pi^{\pm}$、$K^{\pm}$ などのハドロンが ECL に入射した場合には、ハドロンはエネルギーの一部を失うのみであるため、(E/P) が 1 よりずっと小さくなる。これを利用して、電子とハドロンとの識別が高い信頼度で可能となる。電磁カロリメーターについては、本章の主題である純 CsI シンチレーターの APD 読み出しと関係が深いので、さらに詳細について次節で後述する。

- K_L^0、μ 粒子検出器 (KLM)

  Belle 測定器の最も外側に位置する K_L^0 および μ 粒子検出器 (KLM) は 600MeV/c 以上の運動量領域で K_L^0 及び μ 粒子の識別を役割としている。KLM 検出器は、高抵抗平行板チェンバー (RPC) と厚さ 4.7cm の鉄を 11 層重ねた構造をもっている。

  μ 粒子は貫通力が優れているため鉄を突き抜け、多くの RPC の層に明瞭に連なった信号を残す。よって、CDC で測定した飛跡と KLM のヒットを関連づけることにより、μ 粒子の同定が可能である。一方で K_L^0 は鉄と衝突し強い相互作用によるハドロンシャワーを形成する。CDC に飛跡を残さず、KLM 内で検出されたハドロンシャワーを K_L^0 候補とする。

3.2 B ファクトリー実験の高輝度化

本節では、B 中間子崩壊における CP 非保存の精密測定と、τ レプトンのフレーバー非保存崩壊過程の探索を軸に、標準模型を超える新しい物理の探索を目指す、高輝度 B ファクトリー実験 (SuperKEKB/SuperBelle 実験) と、その実験における電磁カロリメーターを設計する上で考慮すべき点について述べる。その上で、純 CsI 結晶シンチレーターの APD 読み出しを開発する動機について記す。

3.2.1 SuperKEKB 加速器

現在の KEKB 加速器が達成した最高ルミノシティは 1.7×10^{34} cm^{-2}s^{-1}、積分ルミノシティは 2009 年 1 月現在で 895 fb^{-1} に達している。SuperKEKB 加速器は、既存の KEKB 加速器に大規模な性能改良工事を行い、当初は 2×10^{35} cm^{-2} s^{-1} と現在の 10 倍強、最終的には 8×10^{35} cm^{-2} s^{-1} と現在の 50 倍に達するルミノシティを得る計画である。加速器のルミノシティを決めるパラメーターは、KEKB 加速器について既に記述したが、SuperKEKB 加速器では、目標とするルミノシティを得るために、大電流蓄積を前提とした設計を行った場合の検討が進められている。その概略をまとめると、

- 電子の 8GeV ビームを 4.1A、陽電子の 3.5GeV ビームを 9.4A 蓄積する。
- ビーム-ビームパラメーター ξ を現在の 0.056 から 0.4 まで大きくする。
- 衝突点での y 方向のベータ関数 β_y^* を現在の 6mm から 3mm に小さくする。

となっている。これらの条件を実現するためには、リングを周回中に放射光で電子や陽電子が失うエネルギーを補う高周波加速の強化、放射光がビームパイプの壁に当って光電効果により生じる電子がビーム軌道に近寄らないような断面形状の真空ダクトの採用、衝突点付近のビーム中心軌道は有限角度で互いに交差しながら実効的に正面衝突を実現するクラブ衝突方式の採用、といった技術開発を成功させる必要がある [3]。

3.2.2 SuperBelle 測定器

加速器のルミノシティを現在の 10 倍から 50 倍に上げるために、現在の 5 倍から 10 倍に達する大電流ビームを用いることからくるビームバックグラウンドの増加に対処し、高いルミノシティにより高頻度で発生する B 中間子対生成をはじめとした信号事象データを滞りなく収集するため、Belle 測定器も既存のままではなく、性能改良工事を施す必要がある [3]。以後、本論文中ではこれを SuperBelle 測定器と呼ぶ。現在の SuperBelle 測定器の設計の概略を以下に挙げる。

- 最内層の崩壊点検出器にピクセル型半導体検出器の導入。
- ワイヤー本数を増した中央ドリフトチェンバーへの変更
- Time Of Propagation チェレンコフ検出器 (TOP)[4]、エアロジェルリングイメージチェレンコフ検出器 [5] 等の導入による荷電粒子識別能力の向上。
- 高速パイプライン読み出し能力を備えたエレクトロニクス [6] を用いた高頻度でデッドタイムのないデータ収集システム。

電磁カロリメーターについては、本研究と深い関りがあるので、次小節でより詳細に述べる。

3.2.3 純 CsI シンチレーターの APD 読み出しによる電磁カロリメーター

SuperBelle 実験では、ビームバックグラウンドは実験開始当初は現在の 5 倍から 7 倍、最終的には 20 倍に及ぶことが予想される [7]。現在の Belle 実験では、 発光量の豊富な CsI(Tl) シンチレーターと、光検出器として PIN フォトダイオード読み出しを組合せた電磁カロリメーターを使用している。この既存の電磁カロリメーターのまま高輝度実験を行う場合は、ビームパイプに近いエンドキャップ (端冠部) において、高頻度で入射するビームバックグラウンドのためにパイルアップが発生してエネルギー測定の絶対値のずれが生じるとともに、エネルギー分解能が悪化する。

現在稼働中の CsI(Tl) カロリメーターの場合、シンチレーター中のエネルギー損失 1MeV あたり 5000 個の電子-正孔対を PIN フォトダイオードで得ている。一方、カウンター 1 本あたりの雑音は、前置増幅器、波形整形回路、QtoT コンバーター、FASTBUS TDC からなる読み出し回路の総合で約 1000 個の電子、すなわち約 0.2MeV に対応する。最近の実験の状況下では、エンドキャップ部でのパイルアップに起因する雑音がこれに加わっている徴候が見られ、0.5MeV から 1MeV に達している。パイプライン方式で波形サンプリング読み出しを行うフラッシュ ADC(FADC) とデジタル信号処理 (DSP) を組合せて対処し

ても、5×10^{35} cm^{-2} s^{-1} のルミノシティ達成時のビーム電流の条件ではパイルアップによる雑音の寄与が 2.5MeV から 4MeV に達すると予想される [8]。その場合、数百 MeV 程度までの比較的低いエネルギーの光子を検出した際のエネルギー分解能に深刻な影響があり、多くの研究テーマの実行が制限される。

これには、CsI(Tl) のシンチレーションの特性、すなわち発光量は豊富であるが、発光が終了するまでの減衰時間が 1μsec と長いためにパイルアップを起しやすい、という性質が大きく寄与しており、後段の読み出しエレクトロニクスの改良で解決することは困難である。このことは、発光が終了するまでの時間が短いシンチレーターの導入が不可欠であることを意味する。高エネルギー物理学実験の電磁カロリメーターに使用できる大型のブロックを中庸な価格で生産可能で、発光量が SuperBelle 実験の使用に耐える、という条件を満す有力な選択肢の一つは純 CsI シンチレーターと考えられている。

CsI(Tl) と比較して、純 CsI シンチレーターは発光の減衰時間が約 40nsec と短く、この点では高輝度実験に向く。しかし、発光量は CsI(Tl) の約 1/10 と少い上、発光の波長も 330nm 程度と CsI(Tl) よりも短いため、信号増幅機能がなく波長が 400nm 以下の光に対して感度がない PIN フォトダイオードは使用できない。これまでに試作された SuperBelle 用純 CsI カロリメーターのプロトタイプでは、発光量の不足を補うために数十倍程度のゲインを得られる少数段の光電子増倍管 (フォトペントロード) が用いられた [8]。フォトペントロードの場合は、磁場の有無で特性が大きく異なるため、実機においては磁場の有無を検知するインターロック機能を持った高電圧供給システムを必要とする。また、直径が 2 インチと比較的大きいので、一つの CsI 結晶に一つしか取り付けられず、複数個取り付けることによって冗長性を確保することはできない。

一方、APD の場合は特性が磁場の有無に左右されず、数十倍のゲインも確実に得られ、小型なので一つの CsI 結晶に複数個取り付けて冗長性を確保することも可能である。前章で紹介したように、浜松ホトニクス社が 1cm^2 の受光部を持つ、これまでよりも大面積のリバース型 APD の開発に成功しており、これが純 CsI シンチレーター読み出しの実用に耐えるならば、SuperBelle 実験の電磁カロリメーターとして有力な選択肢となり得ると考えた。そこで、これまでにフォトペントロードを用いたプロトタイプ純 CsI カウンターの読み出しのために開発されたエレクトロニクスを導入し、APD と組合せた場合について、主としてエレクトロニクスの雑音レベルを調査する試験を実行した。それについて次節で述べる。

3.3 読み出しエレクトロニクスの雑音テスト

本節では、これまでに純 CsI カウンターのフォトペントロード読み出しのために開発されたエレクトロニクスと APD を組合せた場合の特性調査をノイズの行った結果について記す。

3.3.1 測定方法

テストパルスを用いた測定セットアップを図 3.3 に示す。遮光し-370V を印加した APD をプリアンプに接続した、その出力をシェーパーとフラッシュADC (FADC) を内蔵した

CAMAC モジュールで受ける。クロックジェネレーターが発する NIM パルスの幅をゲートジェネレーターで 10μs まで広げた上で、アッテネーターで電圧を 0.1V とし、これをプリアンプに送るテストパルスとする。プリアンプのテスト入力のコンデンサの静電容量 0.2pF と掛け合せると、試験電荷は 0.2pC となる。FADC は 43MHz の内蔵クロックで駆動され、12bit のレンジを持ち、256 ワードのリングバッファーを持っている。サンプルアンドホールドされたデータはリングバッファーに常時上書きされており、記録すべきパルスと同期したストップ信号を受け取ると、リングバッファーの内容を保持してそのデータを読み出す命令の実行を待つ。このストップ信号も、テストパルス源であるクロックジェネレーターのパルスを与えた。

使用したプリアンプの写真を図 3.6、回路図を図 3.4、仕様を表 3.5 に示す。このプリアンプは、既存の CsI(Tl) カロリメーターの PIN フォトダイオード読み出しに使用されているものを改造し、マザーボードの上に 2 枚載っていたプリアンプのドーターボードを片方を外し、differential 転送のドライバ回路のドーターボードに置換したものである。FADC モジュールに内蔵されているシェーパーの回路図を図 3.7 に示す。シェーピングの時定数は 30nsec である。

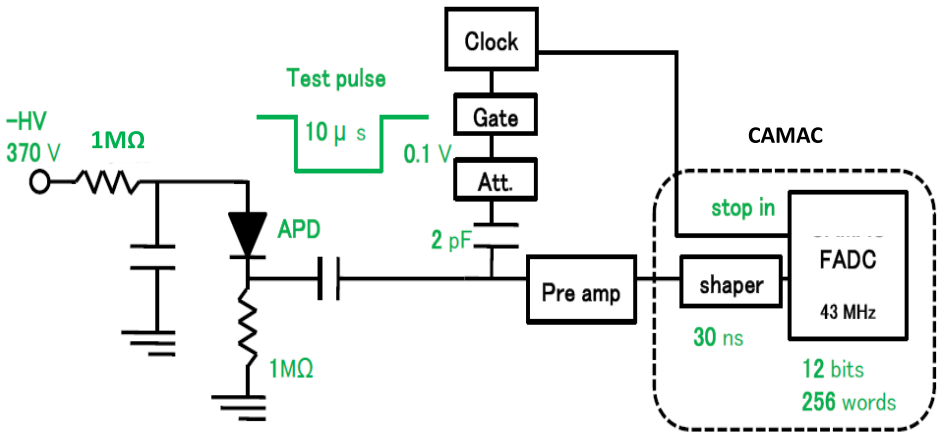

図 3.3: テストパルスを用いた測定のセットアップ図。

3.3.2 測定結果

得られた波形 1 イベントのデータを図 4.3 に示す。パルスのピークは 200 ワード、すなわち 460nsec 付近に位置しており、これは与えたストップ信号のタイミングと一致してい

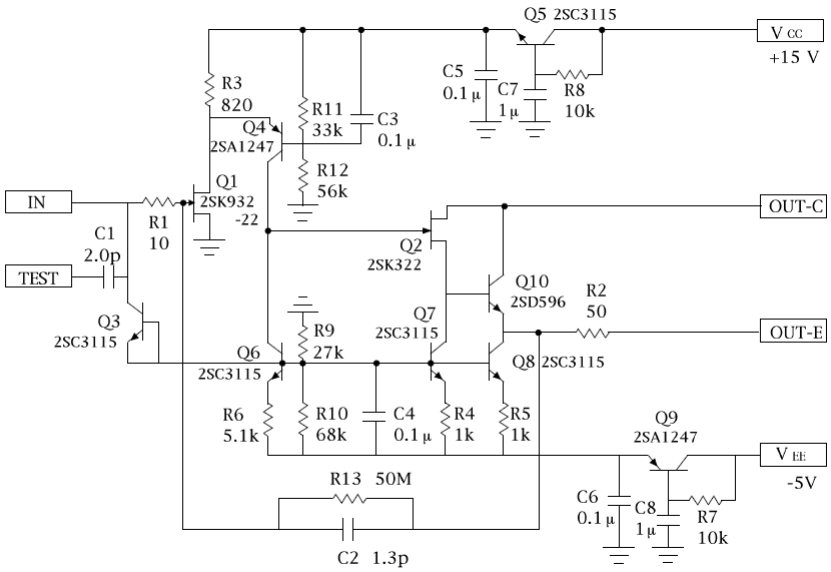

図 3.4: プリアンプ回路図。テスト入力のコンデンサの静電容量は 2.0pF である。

power consumption	125	mW
feed back capacitor	1.3	pF
drain current for input JFET	5	mA(typical
transconductance for input JFET	25	mS(typical)
noise level ($\tau = 1\mu s$)	620	electrons at 100pF
noise slope	2.8	electrons/pF
decay time	65	μs
charge to voltage conversion	0.77	V/pC
dynamic range of the output	5	V
integral nonlinearity	< 0.03	%

図 3.5: プリアンプの仕様

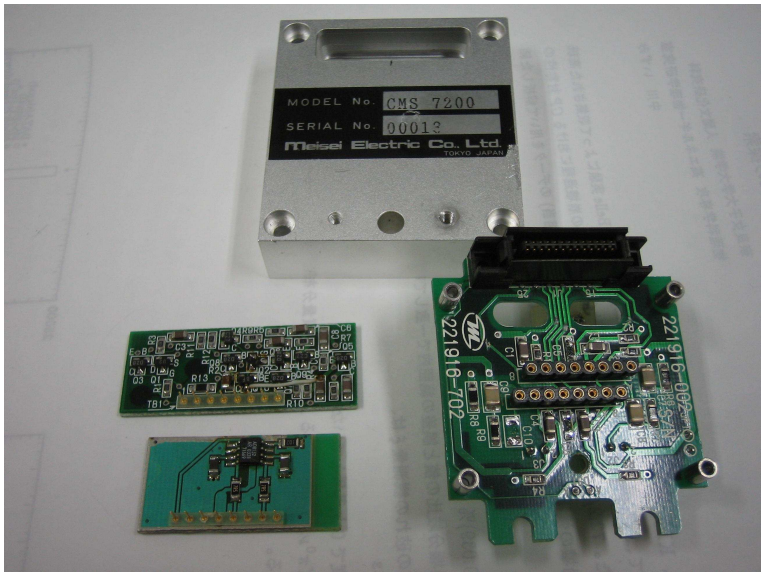

図 3.6: プリアンプの写真

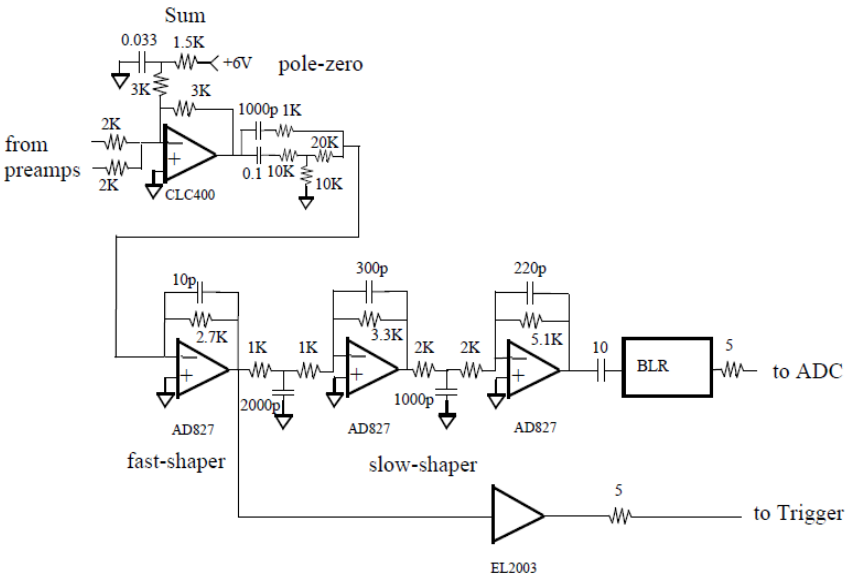

図 3.7: シェーパー回路図

る。また、ピークの ADC カウントは 2800 カウントである。これが 0.2pC の信号電荷に対応する。

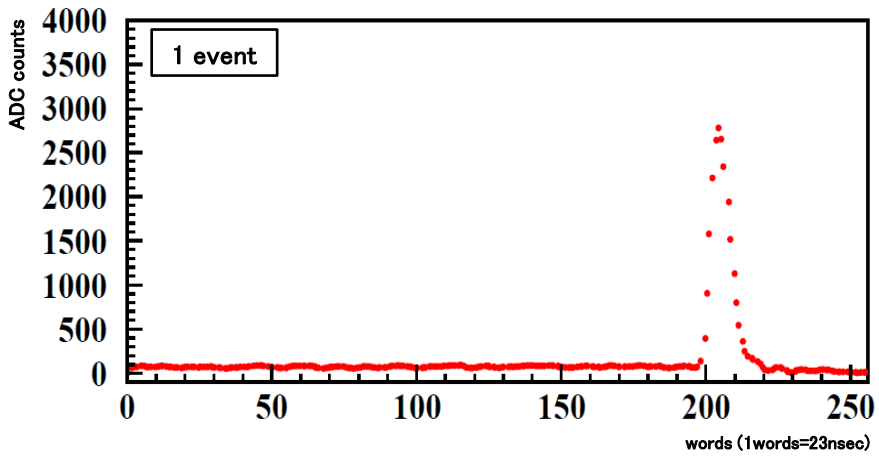

図 3.8: FADC で記録したテストパルス 1 イベントのデータ

一方、雑音の量は無信号時、つまり 1 から 190 ワード目までと 220 から 256 ワード目までのデータで見積ることができる。この無信号時のデータをペデスタル部と呼ぶ。ペデスタル部のデータを一次元の分布に投影し、ガウス分布でフィットした結果を図 3.3.2 に示す。これより、σ は 8.4 カウントとなった。この無信号時のデータのばらつきは雑音によるものなので、0.2pC 入射した時に 2800 カウントを得たことから、APD とこの読み出しエレクトロニクスを組合せた際の雑音レベルを Equivalent Noise electrons(ENe) で求めると、

$$\mathrm{ENe} = \frac{0.2 \times 10^{-12}}{1.9 \times 10^{-19}} \cdot \frac{8.4}{2800} = 3.8 \times 10^{3} \tag{3.2}$$

となる。以上の結果より、APD を純 CsI シンチレーターの読み出しに用いた場合の雑音を見積る。3.2 節でも述べたとおり、現在稼働中の CsI(Tl) カロリメーターの場合、シンチレーター中のエネルギー損失 1MeV あたり 5000 個の電子-正孔対を PIN フォトダイオードで得ている。SuperBelle で純 CsI シンチレーター一つにつき APD(S8864-1010) を一つ接着した場合、光量は 10/1、発光波長の違いにより量子効率は相対的に 1/2、面積は 1/4、増幅率は 50 倍となるので、

$$5000 \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} \times 50 = 3.1 \times 10^{3}\ \mathrm{electrons/MeV} \tag{3.3}$$

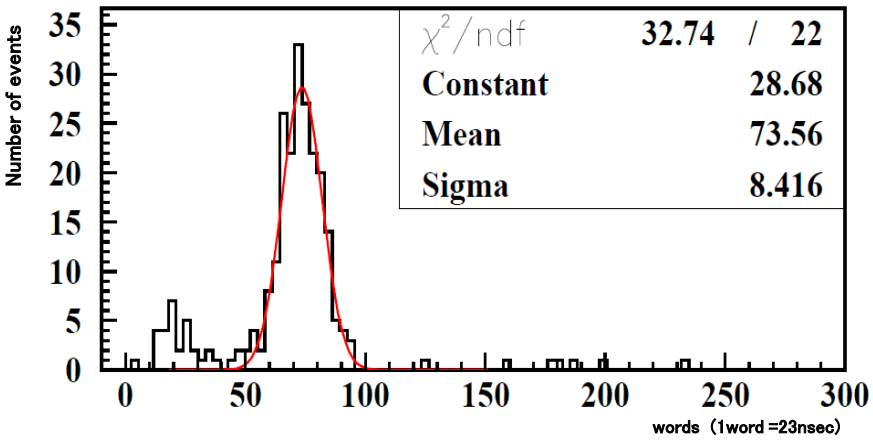

図 3.9: ペデスタルのフィット結果。σ は 8.4 カウントとなった。

となり、雑音レベルは、

$$\frac{3.8 \times 10^3}{3.1 \times 10^3} = 1.2\mathrm{MeV} \tag{3.4}$$

と見積ることができる。

この値は既存の ECL の雑音レベルである (0.2MeV) の 6 倍あるが、APD を 4 枚のアレイとし、同じ位相で寄与するコヒーレント雑音を小くすれば、1/2 の 0.6MeV にすることが可能である。この値はビームバックグラウンドのパイルアップによる現在のエンドキャップ部における雑音と同程度であり、純 CsI の APD 読み出しが実用に耐えうる見通しを初めて示したと言える。

第4章　MPPCの中性子被曝効果

高エネルギー実験における APD や PPD の使用の際には、バックグランドとして入射する放射線による損傷を受ける。検出器が放射線被曝に対し、どれほどの耐性を持っているかを知ることは、実験装置の設計を行うにあたり、必要不可欠である。

これまで、浜松ホトニクス社が開発した PPD である MPPC の放射線耐性に対しては、^{60}Co γ 線照射試験 [9] や陽子照射試験 [10] が行われてきたが、中性子耐性については未だ測定されていない。Belle 実験のように、電子 · 陽電子衝突型の実験であっても、電子あるいは陽電子ビームが発した放射光や輻射バーバー散乱による高エネルギー γ 線が、加速器トンネル内の物質と相互作用して発生した中性子が相当数漂っており、電磁カロリメーターや KLM 検出器のように外側に配置されているコンポーネントでは主要なバックグラウンド源の一つとなっている。Belle 実験の電磁カロリメーターにおける中性子被曝量は 10^{12}neutrons/cm^2/年 である。本章では、MPPC の基礎特性を記した後、MPPC の中性子被曝効果を調べるために、茨城県東海村にある東京大学原子炉「弥生」において行った中性子照射試験の方法と結果について述べる。

4.1　MPPCの諸元と特性

本節では、MPPC の諸元を概説した後、基礎特性である増幅率、ダークノイズ、クロストーク、漏れ電流、光子検出効率について述べる。これらの項目について、中性子照射前後での変化を調べた。

4.1.1　MPPCの諸元と仕様

第 2 章で記したように、MPPC は PPD の一種であり、ピクセル毎に独立なガイガーモード APD とクエンチ抵抗を持っている。ガイガーモードを用いることにより、増幅率は 10^5 ~ 10^6 に達し、信号の出たピクセルの数に対応した離散的な分布の波高を示すため、受光部に達した光子数を得るフォトンカウンティングが可能である。70V 程度の逆バイアス電圧の印加で動作し、受光部面積が 1mm^2 で、ピクセル数が 100、400 および 1600 のものが市販製品として出荷されており、シンチレーションファイバーあるいは波長変換ファイバーを介した読み出しに使用できる。図 4.1 に LED をパルス状に点灯し、受光部に平均数個の光子が届くようにして得た波高分布を示す。等間隔に立つ、各々のピークが 0 光子、1 光子、2 光子... を受光部で検出した場合に対応する。理想的には、この分布は受光部に届く光子数を反映したポアソン分布であるが、後述するダークノイズとクロストークにより、実験的に得られる分布は若干変ったものになる。このような波高分布から、ピーク間隔 (ADC カウント) を得て、波高の記録に用いた ADC の傾き (1ADC カウントあ

たりの信号電荷) と使用した増倍器のゲインと増幅率、そして電気素量を用いて、サンプルであるデバイスの増幅率を求めることができる。

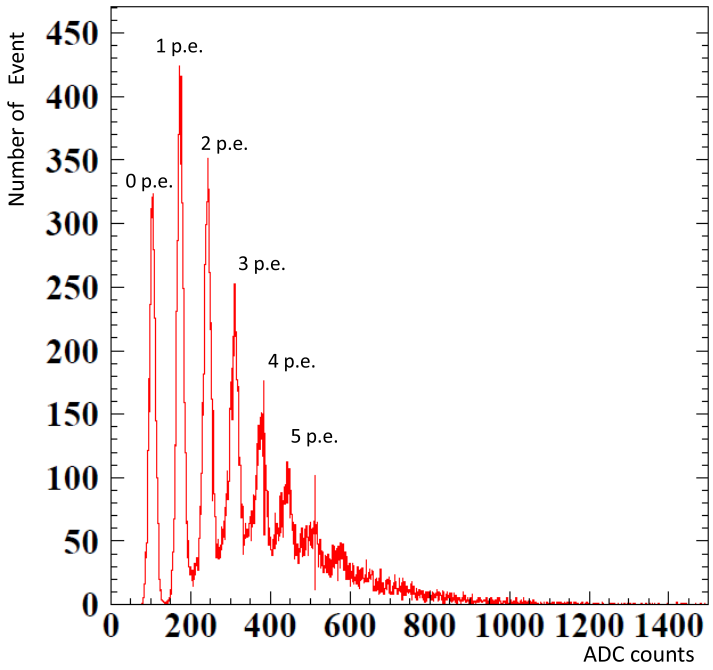

図 4.1: LED をパルス状に点灯させ、MPPC の受光部に平均数個の光子が届くようにして得た波高分布

4.1.2 増幅率の印加電圧および温度に対する依存性

1 光電子を検出してアバランシェ増倍の結果得られる信号電荷を $Q_{\rm out}$、印加電圧を $V_{\rm bias}$、ブレイクダウン電圧を V_0 とすると、係数 C を用いて、

$$Q_{\rm out} = C \times (V_{\rm bias} - V_0) \tag{4.1}$$

となることが知られている。この係数はコンデンサの静電容量と同じ次元の量なので、ピクセルキャパシタンスと呼ばれる。ガイガーモードのアバランシェ形成は当該ピクセルの全面にわたって放電が広がるため、得られる $Q_{\rm out}$ はピクセルの面積つまりピクセルの静電容量 (キャパシタンス) に比例することを反映した呼び名とも言える。この $Q_{\rm out}$ を電気素量 e で割ったものが増幅率 G である。

MPPC に限らず、アバランシェ半導体光検出器の増幅率は一般に低温になると高くなる。電子なだれを形成する際、電子は固体内の格子振動によるフォノンと衝突する。低温になると、このフォノンが少なくなるため、電子が電場により加速されて得たエネルギーをフォノンとの衝突で散逸する寄与が小さくなり、有効に次の電離を起こすからである。この理由により、冷却しなければ実用にならないデバイスの例もあるが、MPPC の場合は常温でも動作可能であることが一つの特徴である。

4.1.3 ダークノイズ

MPPC の受光部に光が当っていなくても発生するパルスをダークノイズと呼ぶ。これは空乏層内で電子が熱励起されると、それがアバランシェ増倍して発生するものである。したがって、低温になれば、その発生頻度は下がる。MPPC の場合、1 光電子相当以上の波高を持つダークノイズのパルス発生頻度は常温で数百 kHz である。放射線損傷により、内部構造の境界や半導体の結晶格子に欠陥ができると、そこからは電子の熱励起が起りやすくなって、ダークノイズのレートが上がる。したがって、MPPC の放射線損傷を議論する上で、重要なパラメーターの一つである。

4.1.4 クロストーク

ガイガーモードのアバランシェ増幅では、多数の電子が電離されるが、電離が起きた原子は励起状態にあるので、しばしば光子の放出により脱励起する。この光子がデバイス内の別のピクセルに検出されて、そこでもアバランシェ増幅を起こす現象をクロストークと呼ぶ。クロストークが起こると実際に検出された光子の数より多くのピクセルから信号パルスが発生してしまう。

-

4.1.5 電流-電圧 (I-V) 特性

ブレイクダウン電圧以下の印加では、MPPC に逆バイアス電圧を印加すると、印加電圧によらず、ほぼ一定な 0.1μA オーダーの電流が定常的に流れる。これは半導体検出器で一般に漏れ電流と呼ばれるもので、空乏層中で熱励起により発生した電子-正孔対の移動によっており、MPPC が増幅せず単なる固体電離箱として動作しているからである。ブレイクダウン電圧以上では、ダークノイズのパルスの時間的平均が電流値に大きく寄与するため、電圧のわずかな上昇に対して電流が急激に増える。したがって、この領域での電流値はダークノイズの頻度と増幅率の積でかなりの部分が説明できる。放射線損傷により、デバイス中に欠陥ができると I-V 特性も大きく変化することが予想される。

4.1.6 光子検出効率 (Photon Detection Efficiency; PDE)

光子検出効率 (PDE) とは、受光面に一光子が入射した際にそれを検出できる確率のことである。MPPC の PDE は、次のような式で表される。

$$\mathrm{PDE} = QE \times \epsilon_{\mathrm{geometry}} \times \epsilon_{\mathrm{geiger}} \tag{4.2}$$

ここで、QE は 1 光子が入射した際に電子-正孔対を生成する確率 (量子効率) である。$\epsilon_{\mathrm{geometry}}$ はピクセル面積中の有感領域の割合 (開口率)、$\epsilon_{\mathrm{geiger}}$ は電子-正孔対がガイガー放電を起こす確率である。MPPC と光電子増倍管を」比較すると、シリコン半導体は 80 ~ 85%程度の量子効率を有するのに対して、光電陰極は最高でも 30 ~ 40%程度である。また $\epsilon_{\mathrm{geiger}}$ は比較的 1 に近い。開口率が 60 ~ 70%であることを考慮すると、MPPC の受光部の面積は小さいものの PDE では光電子増倍管を上回っており、シンチレーションファイ

バー等の読み出しについては、マルチアノード型光電子増倍管よりも有利と言える。この PDE も中性子照射したサンプルと未照射のサンプルを比較する測定を行った。

4.2 中性子照射試験

4.2.1 東京大学原子炉「弥生」

中性子照射は茨城県東海村にある東京大学原子炉「弥生」[11] で行った。「弥生」はウラン燃料空気冷却型の高速炉で、最大熱出力は 2kW である。照射できる中性子は平均運動エネルギー 1MeV 程度の高速中性子である。図 4.2 に実験室の様子を示す。右側に見える構造物が炉心を収めた遮蔽体で、上にあがるとサンプルを内部に吊り下げるためのハッチがある。

図 4.2: 「弥生」の実験室の様子。右側に見える構造物が炉心を収めた遮蔽体で、上にあがるとサンプルを下げるためのハッチがある 。

弥生の中性子線量フラックス (F) は以下のように表される。

$$F = 1.5 \times 10^9 \text{ neutrons/cm}^2 \text{ Wh} \tag{4.3}$$

このフラックスは米国ロスアラモス研究所で開発された MCNP-4B (Monte Carlo N-Particle Transport Code) と呼ばれるコードによって計算された値で、Wh は原子炉の積分熱出力である。すなわち、炉の熱出力を W、照射時間を h(hour) とし、その積をとったものである。したがって、1W で 1 時間中性子を照射したときの照射量中性子フルエンス (積分フラックス) は、N=1.5×10^{9}neutrons/cm^2 となる。

今回の試験では Belle 測定器の電磁カロリメーター部分におけるこれまでの中性子被曝線量を参考に、表 4.1 に示す熱出力と照射時間の組み合わせで 8 パターン行った。

熱出力 (W)	時間 (sec)	N (neutrons/cm^2)
1	750	3.1×10^8
4	610	1.0×10^9
10	750	3.1×10^9
40	610	1.0×10^{10}
80	610	2.0×10^{10}
100	750	3.1×10^{10}
400	610	1.0×10^{11}
1000	750	3.1×10^{11}

表 4.1: 照射のパターン

照射したサンプルは 100 ピクセルおよび 400 ピクセルのもので、照射に使える弥生のマシンタイムの制限に対応し、かつ照射後における特性の回復 (アニーリングと呼ぶ。) の有無を測定するために、照射量毎に異なる個体のサンプルを使用した。

4.2.2 測定手順

照射と、その前後の MPPC サンプルの特性測定の流れは次のようにした。前節で述べたように、MPPC の特性は温度に依存する項目が多く存在するので、恒温槽を用いて 20 ℃の一定温度に保って測定した。

(1) 照射前測定 (東海村「弥生」側室にて)

- 基礎性能測定 (ゲイン、ブレイクダウン電圧、ノイズレート、I-V 特性)

(2) 中性子照射 (「弥生」)

(3) 照射直後測定 (「弥生」側室および KEK にて)

- 約 10 日間隔で経時変化を測定
- ゲイン、ブレイクダウン電圧、ノイズレート、漏れ電流、PDE の照射後測定は 90 日後まで行った。

4.3 照射前後の特性変化

照射前後の特性変化の測定結果を、測定方法を説明した後に記す。

4.3.1 出力波高分布

図 4.3 は 2×10^{10}neutrons/cm^2 照射した 100 ピクセルサンプルの照射前後の ADC 分布である。照射 2 日後には波高分解能の低下により見えなくなっていたピークが、9 日後には 1 光子が確認できるようになり、60 日後にはさらに若干の回復した。中性子被曝後、波高分解能が悪化するのは、デバイス内部の欠陥の生成により、ダークノイズのパルスの頻度が増加し、それによるパイルアップで、出力電位のベースラインが揺動するためである。一方、$1\times$ 10^{11}neutrons/cm^2 照射したサンプルは 60 日経過しても光子計数能力は回復しなかった。ダークノイズの増加については後述する。

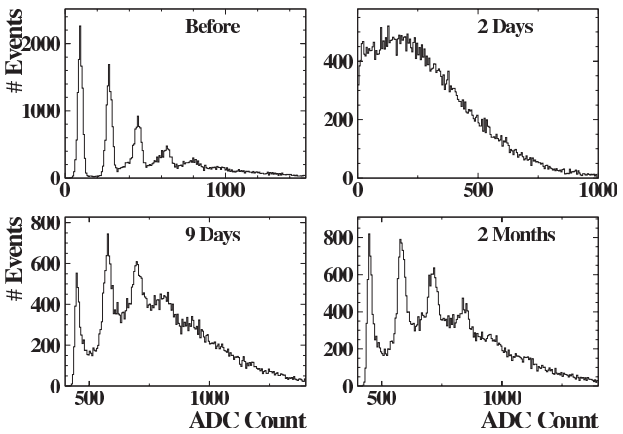

図 4.3: ADC 分布 (照射量 2×10^{10}neutrons/cm^2 のサンプル) の時間変化の様子。測定日は照射前、2 日後、9 日後、60 日後。

4.3.2 増幅率

増幅率測定のセットアップ図を図 4.4、LED のドライバー回路を図 4.5 に示す。LED から数個の光電子 (数 p.e.) に対応する程度の光量を MPPC に入射させ、そのシグナルをアンプで増幅し CAMAC の電荷積分型 ADC で測定する。4.1.1 でも述べたとおり、ADC 分布を Gaussian 分布関数でフィットし、ペデスタルピークと 1 p.e. ピークの間隔を得て、1 カウントあたりの信号電荷、使用したアンプの増幅率と電気素量から MPPC の増幅率が求められる。

また、増幅率と印加電圧の関係から、4.1 式によりブレイクダウン電圧 V_0 を決定する。

照射量とブレイクダウン電圧の相関関係を図 4.6 に、増幅率との相関関係を図 4.7 に示す。これらより照射量の多いサンプル (10^{11}neutrons/cm^2) 場合でも、ブレイクダウン電圧の変化は 50mV 程度と小さいことがわかる。

ブレイクダウン電圧の時間変化を図 4.8 に、増幅率の時間変化を図 4.9 に示す。測定環境等の変化をモニターする目的で、未照射のサンプルも同時に測定した。これらの図より、ブレイクダウン電圧、増幅率ともに、照射前後で顕著な変化は見られず、時間変化も大きくないことがわかる。

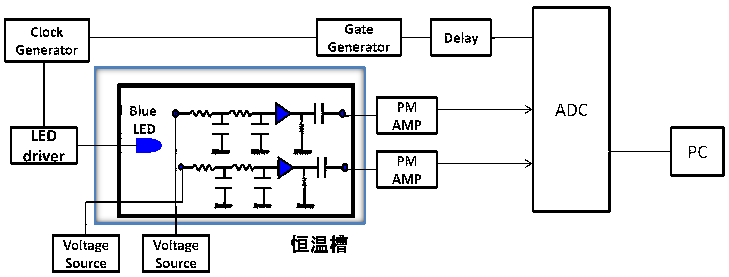

図 4.4: 増幅率測定のセットアップ。

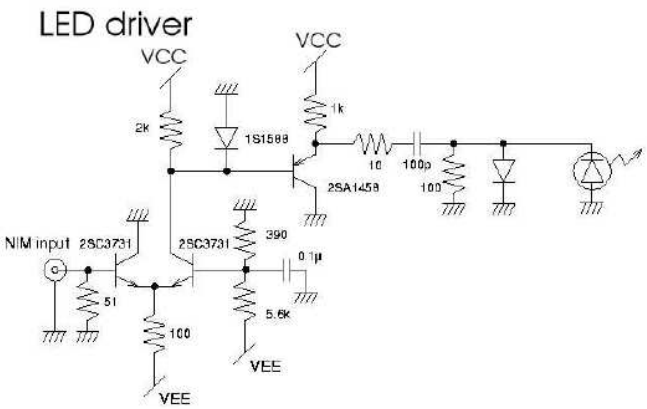

図 4.5: LED ドライバー回路図

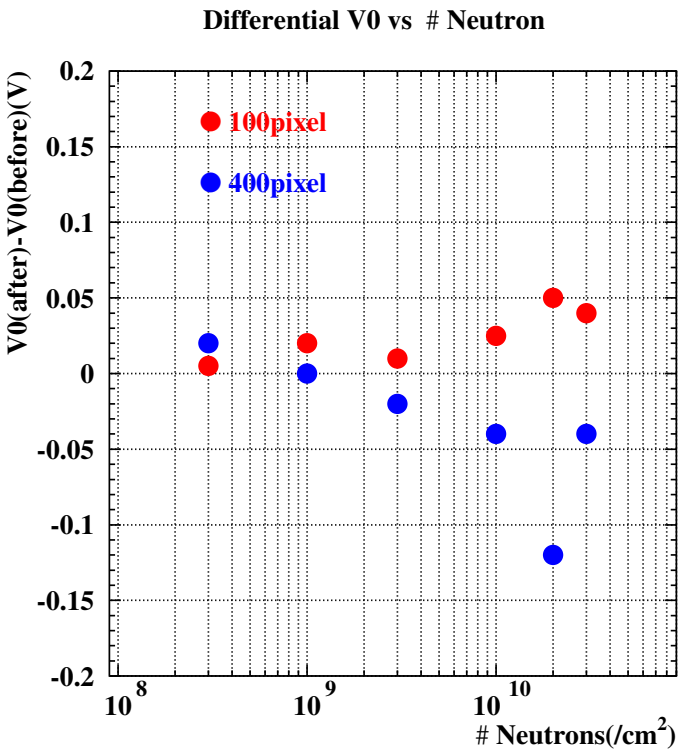

図 4.6: ブレイクダウン電圧と照射量の相関関係

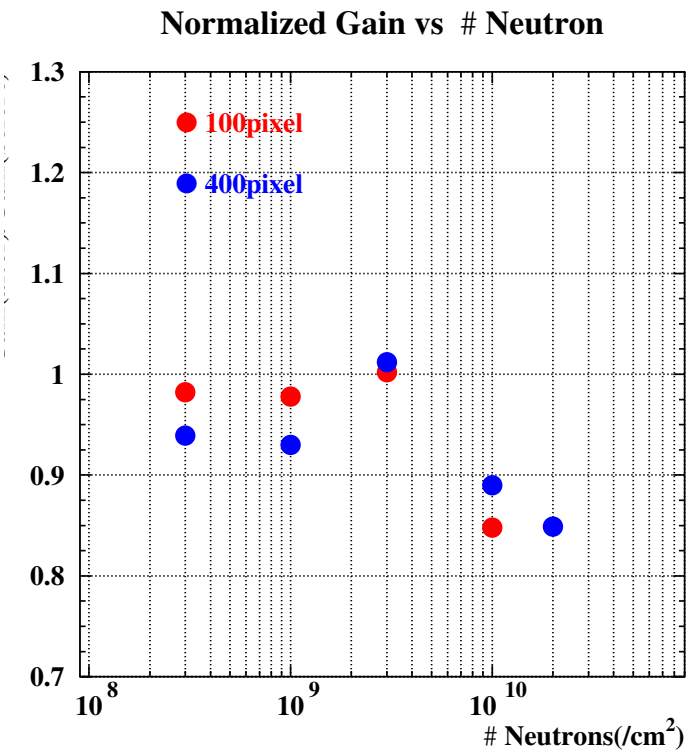

図 4.7: 増幅率と照射量の相関関係

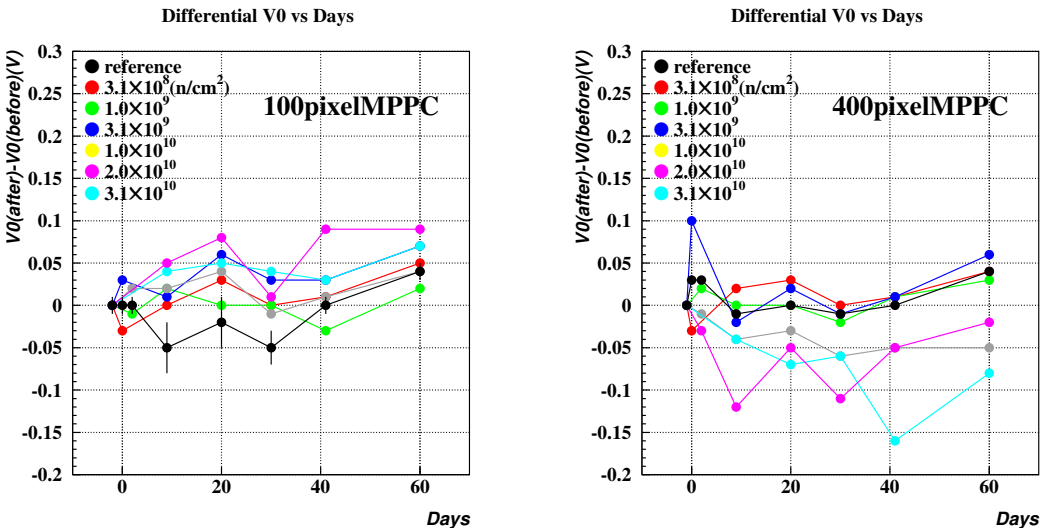

図 4.8: (左図)100pixel のブレイクダウン電圧の時間変化 (右図)400pixel のブレイクダウン電圧の時間変化 。照射前の V_0 を 0V とする。

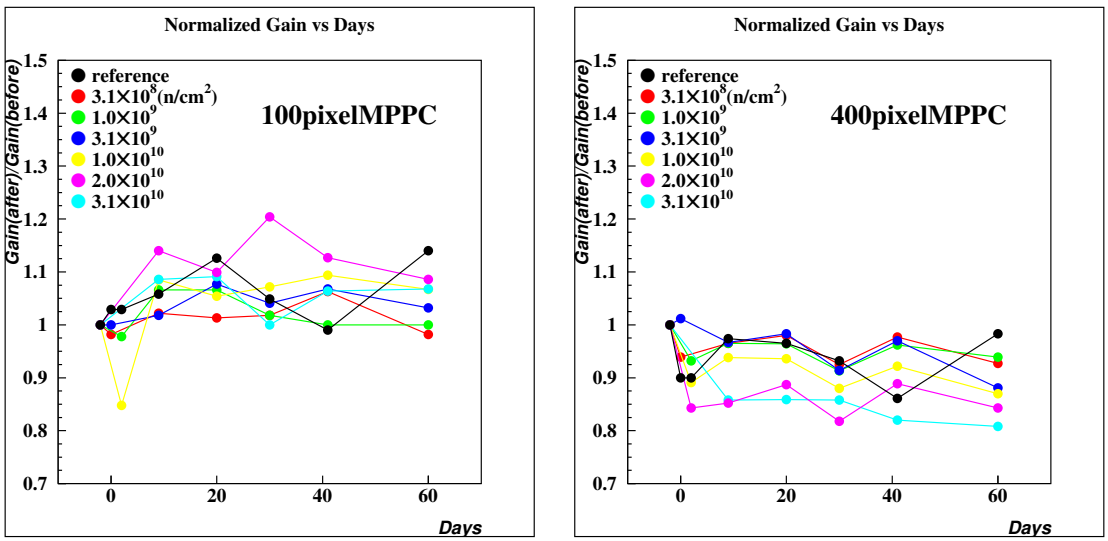

図 4.9: (左図)100pixel の増幅率の時間変化 (V_{ov}=1.0V) (右図)400pixel の増幅率の時間変化 (V_{ov}=1.4V)

4.3.3 ノイズレート

図 4.10 にノイズレート測定のセットアップを示す。光を当てない状態での MPPC の信号に対し、ディスクリミネーターのしきい値を 0.5p.e. 相当に設定した場合と 1.5p.e. 相当にした場合のそれぞれのカウントレートをスケーラーで測定した。

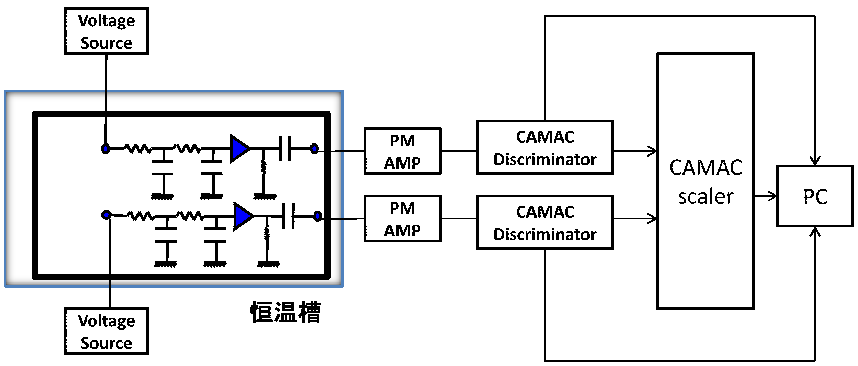

図 4.10: ノイズレート測定のセットアップ

ノイズレートと照射量の相関関係をを図 4.11 に示す。図より、ノイズレートは照射量の増加とともに増加していることが確認できる。

続いて、時間変化の様子を 100 ピクセルを図 4.12、400 ピクセルを図 4.13 に示す。図より、ノイズレートは時間の経過とともに若干の減少が見られるが、完全には回復しない。これは後述する I-V 特性にも似た傾向がみられる。

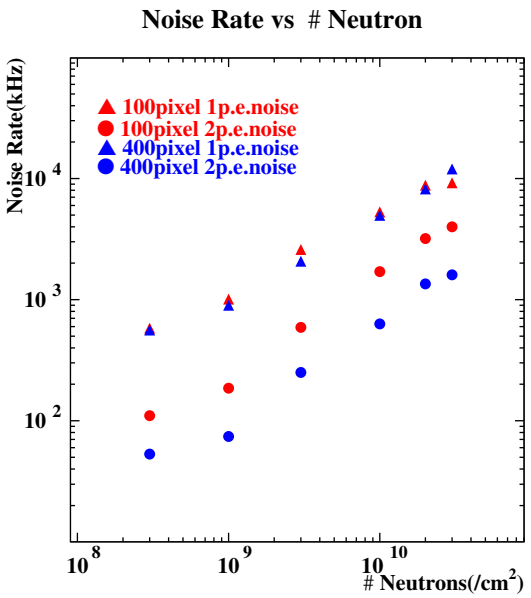

図 4.11: ノイズレートと照射量の相関関係

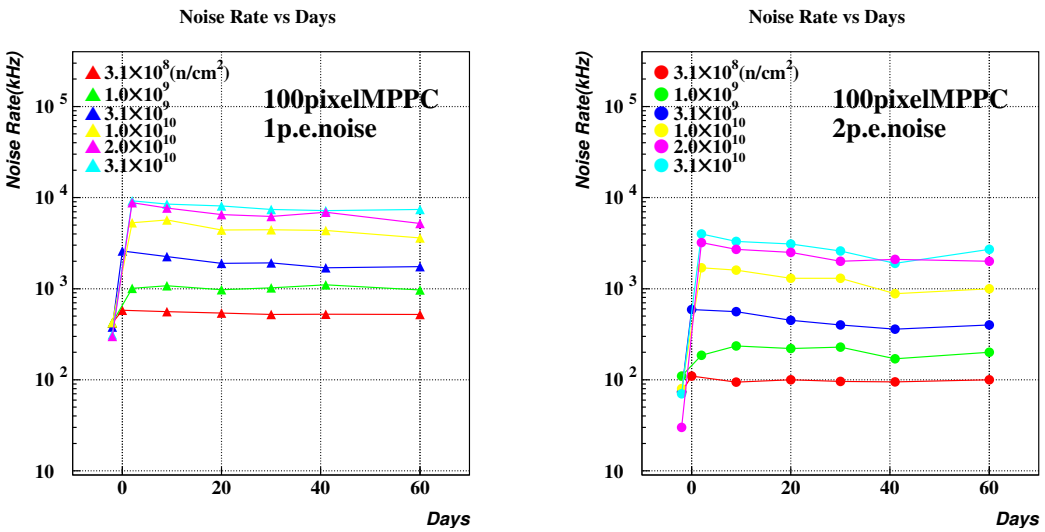

図 4.12: (左図)100pixel のノイズレート (1 p.e. 以上) と照射量の相関関係 (右図)100pixel のノイズレート (2 p.e. 以上) と照射量の相関関係

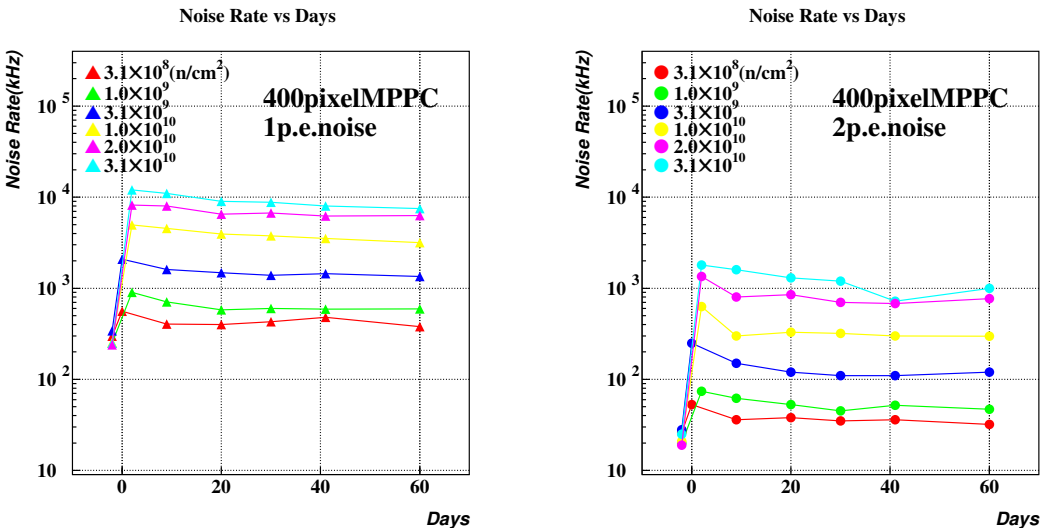

図 4.13: (左図)400pixel のノイズレート (1 p.e. 以上) と照射量の関係 (右図)400pixel のノイズレート (2 p.e. 以上) と照射量の関係

4.3.4 クロストークレート

クロストークレートの測定方法はノイズレート測定時と同様である。アバランシェ増幅により発生する光子がデバイス内の別のピクセルに伝播して起こるクロストークは、一次的なアバランシェ増幅と時間差がほとんど無く生じる。したがって MPPC を暗黒下におき、2p.e. 以上の波高を示す事象は、ダークノイズが発生した際にクロストークにより複数のピクセルが信号パルスを発したものである。よってクロストークレート $R_{\rm cross}$ は MPPC に LED の光を当てずに測定した 0.5p.e. のノイズレート $R_{0.5\rm p.e.}$ と 1.5p.e. のノイズレート $R_{1.5\rm p.e.}$ を用いた以下の式から算出することができる。

$$R_{\rm cross} = \frac{R_{1.5\rm p.e.}}{R_{0.5\rm p.e.}} \tag{4.4}$$

クロストークレートの測定結果を図 4.14 に示す。クロストークレートは $10^{10}\rm neutrons/cm^2$ まででは、大きくは変らないことがわかる。次に、時間変化を図 4.15 示す。時間変化に関しても、顕著な変化は見られない。

4.3.5 I-V 特性測定

図 4.3.5 に I-V 特性測定のセットアップを示す。光を当てない状態でソースメーターで MPPC に逆バイアス電圧を 0V からブレイクダウン電圧の数 V 上まで電圧を徐々に変化させながら印加し、電流値を測定した。このとき、MPPC 読み出し回路中の合成抵抗 104kΩ による電圧降下は無視できないので、これを考慮し、MPPC の両極間に印加されている正味の電圧を求めた。

得られた測定結果を図 4.3.5 に示す。この図は各照射サンプルの照射後 60 日後の漏れ電流値をまとめたものである。横軸は $V_{\rm ov}$ で、これは前述のように印加した電圧から読み出し回路の合成抵抗による電圧降下と、ブレイクダウン電圧を引いたものである。いずれ

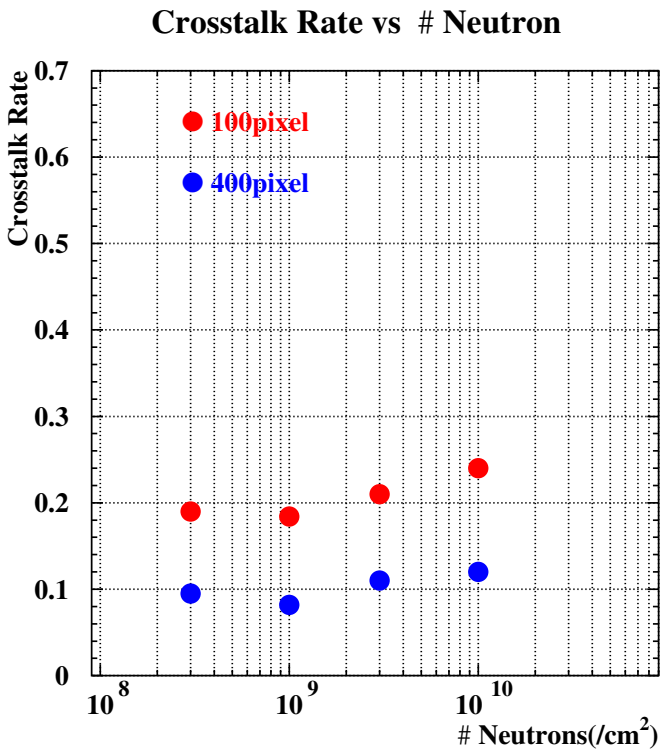

図 4.14: クロストークレートと中性子照射量の相関関係.。100 ピクセルの V_{ov} は 1.0V で、400 ピクセルの V_{ov} は 1.4V である。

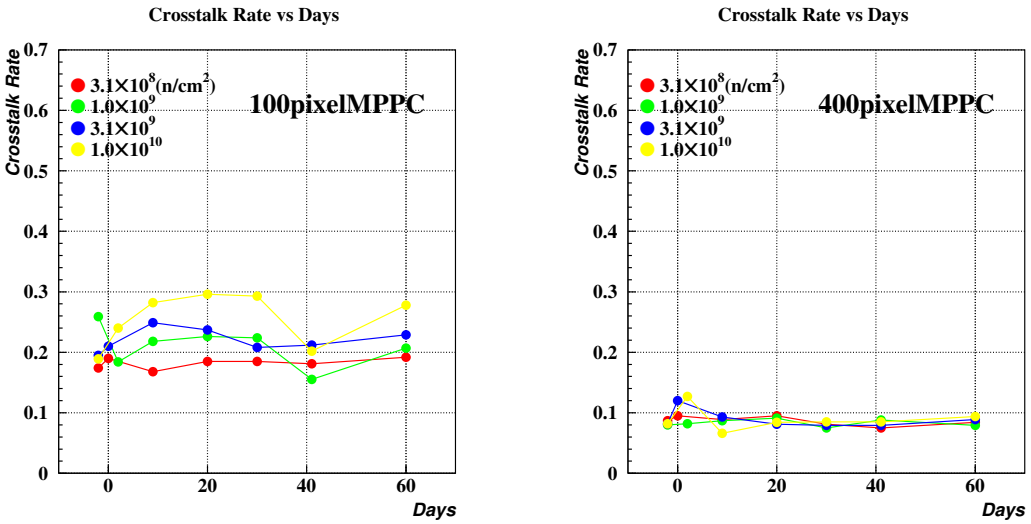

図 4.15: (左図)100pixel のクロストークレートの時間変化 (右図)400pixel のクロストークレートの時間変化]

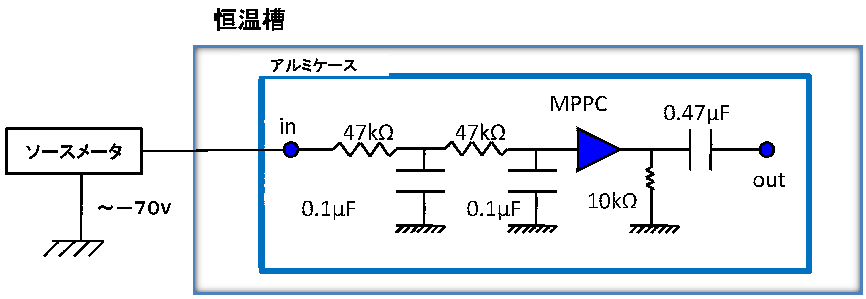

図 4.16: 漏れ電流測定のセットアップ。MPPC 読み出し回路中の合成抵抗は 104kΩ による電圧降下が起こる。

のサンプルも $V_{\rm ov}$ の上昇とともに漏れ電流値は上昇するが、また、照射量が増えるほど、カーブの上昇が急になっており、なだれ降伏の効果が顕著に増大している。

また、漏れ電流の時間変化を図 4.3.5 に示す。これは $V_{\rm ov}$=1.1V の電流値をプロットしている。400 ピクセルで照射量が少いものは最初の 10 日間のうちに電流の減少が見られるが、それを除くと、全体的に電流の減少はわずかで、時間経過による回復は小さいものであることがわかった。

4.3.6 PDE (光子検出効率)

PDE は、各サンプルの照射前後の比較ではなく、未照射のサンプルと照射後のサンプルを比較して相対的な PDE を求めた。これは PDE の絶対値測定は単純ではないため、サンプル個体ごとの PDE 測定を照射前に測定する手順を省いたためである。以下、PDE と述べるときは、この相対 PDE を指す。未照射のリファレンスとなるサンプルと照射後のサンプルに同量の光子数を入射すれば、相対 PDE は 4.5 式で与えられる。今回求めるものは相対 PDE であるので、両者に同量の光子が入射したとして、

$$\text{Relative PDE} = \frac{N_{\rm p.e.}}{N_{\rm p.e.}({\rm ref})} \tag{4.5}$$

で表される。ここで $N_{\rm p.e.}$ は照射サンプルに入射した平均光子数、$N_{\rm p.e.}({\rm ref})$ は未照射サンプルに入射した平均光子数を示す。

セットアップを図 4.19、基板を図 4.20 に示す。アルミボックスの中には、照射後サンプルと未照射のサンプルを同様の読み出し回路を備えた基板に搭載し、その横には LED を収めた箱がある。箱の穴から出た光は波長変換ファイバー (WLSF) を通して MPPC まで伝搬する。今回、WLSF の両端を LED 箱の穴と MPPC に接続する部分には T2K 実験のファイバー読み出しのために開発された GOMI コネクター [12] を使用した。

PDE を得るには、両者の MPPC に入射する光子数のわずかな差を求め、4.5 式に対する補正を行う必要がある。図 4.20 の右図は照射後サンプルと未照射サンプルの測定セット

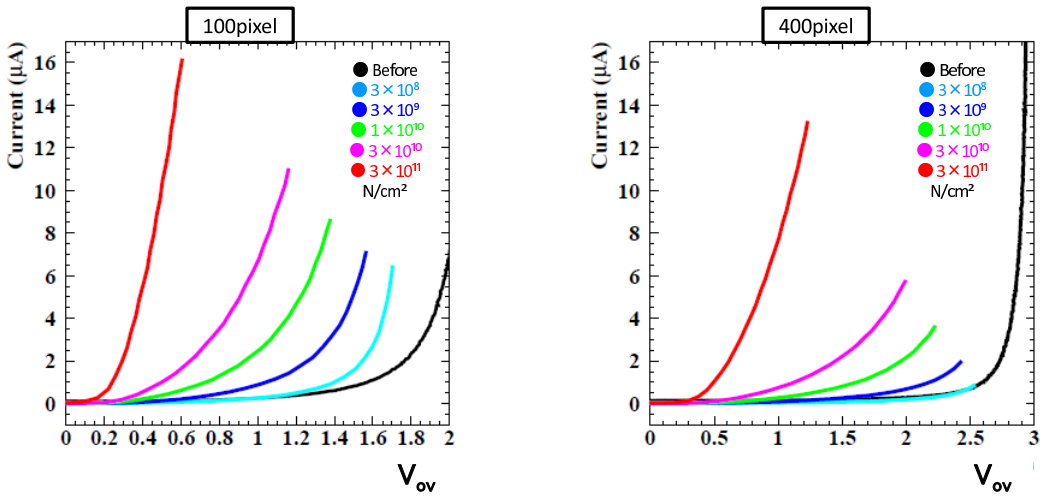

図 4.17: I-V 特性測定結果。照射後 60 日の漏れ電流値である。照射量が多くなるほど、印加電圧がブレイクダウン電圧も上回った際のなだれ降伏の効果が顕著に増大していく。

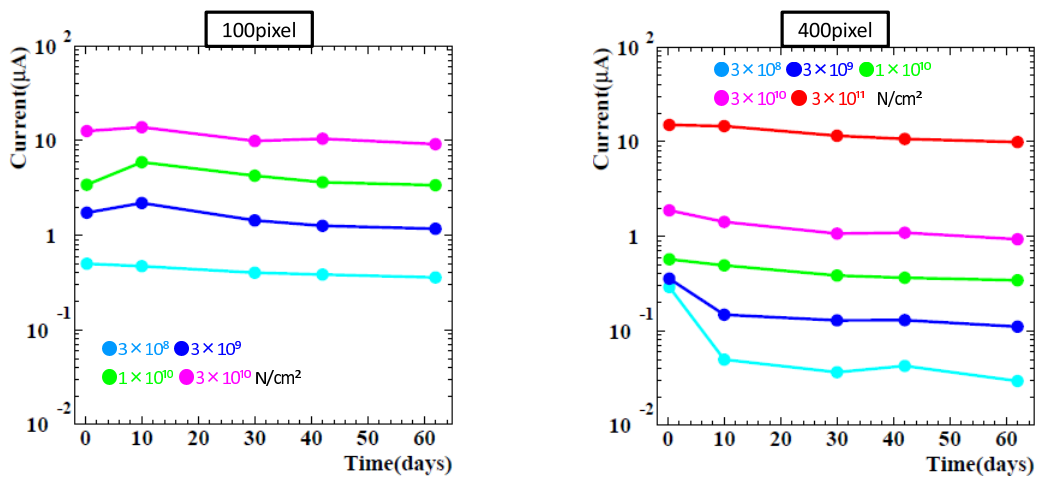

図 4.18: V_{ov}=1.1V に設定して測定した電流値の照射後 60 日間の時間変化。左側は 100 ピクセル、右側は 400 ピクセル。

アップのブロック図である。ここで、穴 A、B に入射する光子数をそれぞれ $N_{\rm A}$、$N_{\rm B}$ は、照射後サンプルと未照射サンプルに入射する光子数を N、$N_{\rm ref}$、そしてファイバーの透過率を ϵ_1、ϵ_2 とすると、

$$\begin{aligned} N &= N_{\rm A} \times \epsilon_1 \\ N_{\rm ref} &= N_{\rm B} \times \epsilon_2 \end{aligned} \tag{4.6}$$

となる。これら各パラメーターを MPPC と WLSF の接続の組合せを変えた測定結果から求めた結果、補正係数 α を

$$\alpha = \frac{N}{N_{\rm ref}} = 0.96 \pm 0.05 \tag{4.7}$$

と得た。ここで注意すべきは、LED を点灯して 1 p.e. 以上のイベントの平均光子数から PDE を求めると、クロストーク等の影響のため PDE を過大評価してしまう。クロストークは MPPC の中のいずれかのピクセルから信号が出た場合のみ、それに付随して発生する。したがって、0 p.e. の事象数から不感確率 (inefficiency) を求め、1 から引き算して PDE を得る方が不定性がない。さらに、ダークノイズとそれに付随するクロストークの影響を引き算して、正味の不感確率を得るため、LED 消灯時の ADC 分布も収集した。(図 4.3.6)

その結果から以下のように PDE の導出を行った。μ を照射後サンプルの平均光電子数、$\mu_{\rm ref}$ を未照射サンプルの平均光電子数としたとき、

$$\mathrm{PDE} = \frac{\mu}{\mu_{\rm ref} \times \alpha} \tag{4.8}$$

となる。LED 点灯による光子の数は Poisson 分布をしていると仮定でき、MPPC が x 個の光子を検出する。

$$\frac{P(x) = e^{-\mu}\mu^x}{x!} \tag{4.9}$$

となるので、光子が検出されない、すなわちペデスタルになる確率 $P(0)$ は、

$$P(0) = e^{-\mu} = \frac{N_{\rm ped}}{N_{\rm all}} \tag{4.10}$$

よって、

$$\mu = -\ln(\frac{N_{\rm ped}}{N_{\rm all}}) \tag{4.11}$$

ここで、$N_{\rm ped}$ はペデスタルのイベント数、$N_{\rm all}$ は全イベント数である。以上より、平均光電子数を求めることによって PDE を導出した。

PDE の測定結果を図 4.3.6 に示す。$V_{\rm ov}$ が上昇するとともに PDE も上昇が見られる。これは、電子 · 正孔対が発生した際にガイガーモードのアバランシェ増幅する確率 $\epsilon_{\rm geiger}$ が印加電圧とともに上昇するからである。また、照射量によらず誤差の範囲で測定点の分布がほぼ一致していることから、今回試験した照射量の範囲では中性子被曝による光子検出効率の変化は顕著なものではないことがわかった。

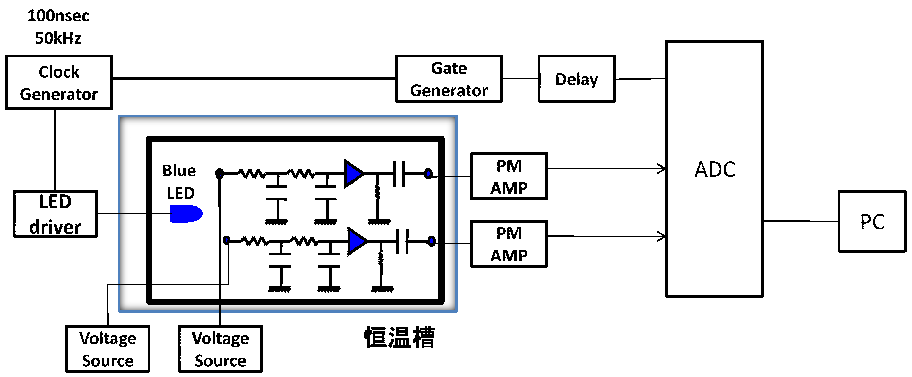

図 4.19: PDE 測定のセットアップ図

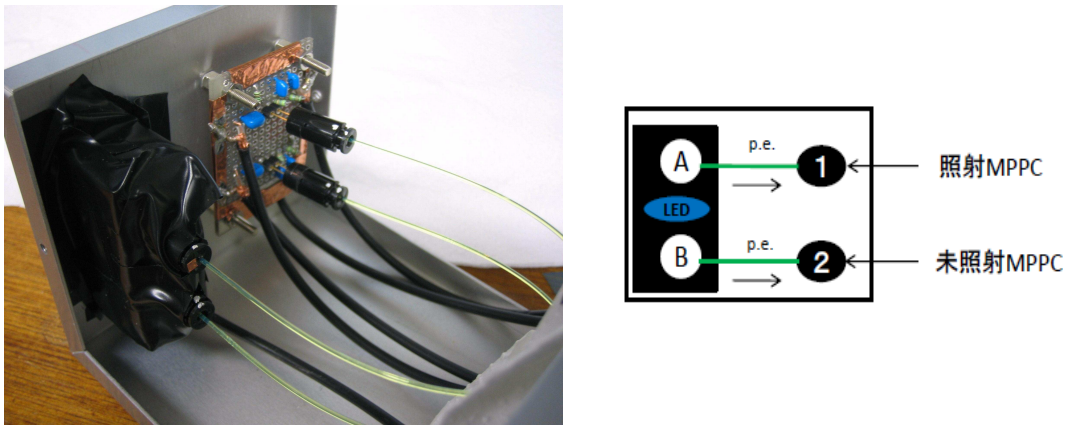

図 4.20: (左図)PDE 測定セットアップ (右図)PDE 測定ブロック図

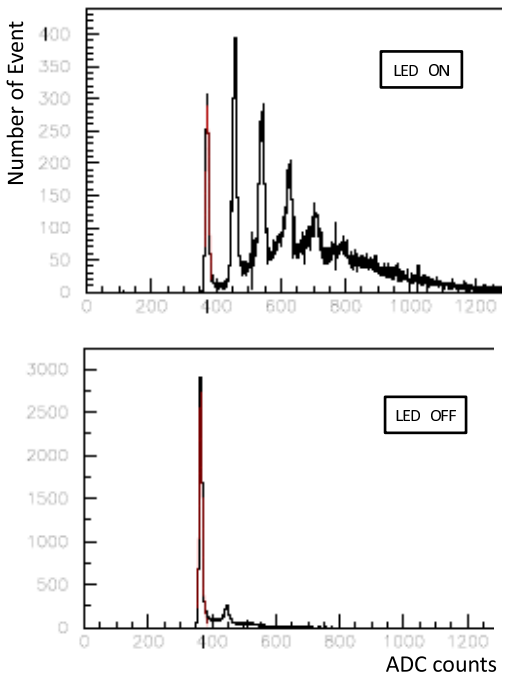

図 4.21: LED 点灯時と LED 消灯時の ADC 分布

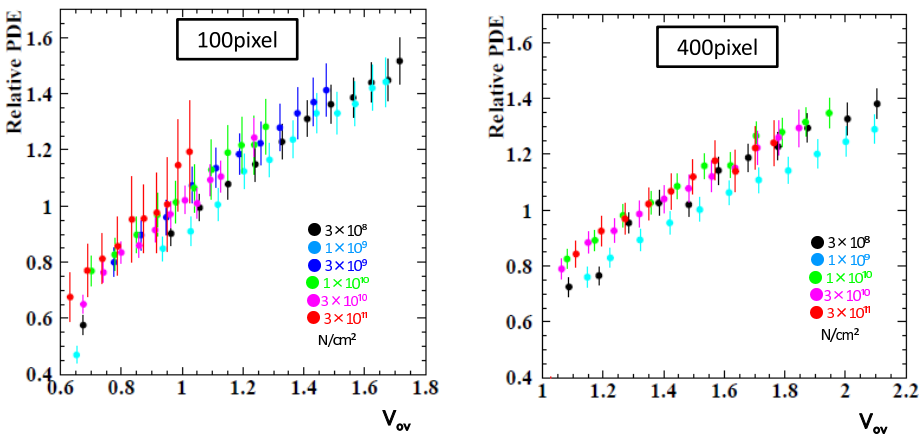

図 4.22: PDE 測定結果。照射後 90 日に測定。

4.4 赤外線発光写真

照射後サンプルのデバイス内部の電流密度分布に関する情報を得るため、赤外線発光写真を撮影した。電流密度の高い場所 (ホットスポット) があれば、そこで発生するジュール熱により、周囲よりも高いフラックスで赤外線が放射されるからである。撮影には、浜松ホトニクス製の冷却 CCD カメラ C4480-21-25w を使用した。撮影手順は以下の通りである。

1. カメラと MPPC の位置を合せ遮光
2. ランプを点灯させ撮影
3. ランプを消灯し露光時間 1 分で撮影
4. 逆バイアスを印加し露光時間 1 分で撮影

これらの画像を編集する。まず 4. で撮影した画像のピクセルごとのデジタルデータから 3. のそれを引き算してバックグラウンンドを取り除く。そしてその画像に 2. を重ね合わせた結果得られたのが図 4.4 である。

図中の赤い部分は発熱量が閾値を超えている部分である。照射量の多いサンプルほど、電圧降下が多くなり、サンプルに実際に印加されている電圧が小さくなるため、$V_{\rm ov}(\Delta V)$ が小さくなる。各サンプルに流した電流値は 5μA なので、ジュール熱の発生量は同じである。ホットスポットは、デバイス内の構造、すなわちピクセル境界や配線部分などと無関係でランダムに生じている。中性子による MPPC の損傷は、内部構造の境界部における破壊ではなく、シリコン結晶中の格子欠陥生成によるバルク損傷が支配的 [10] であるという仮説と無矛盾であると言える。

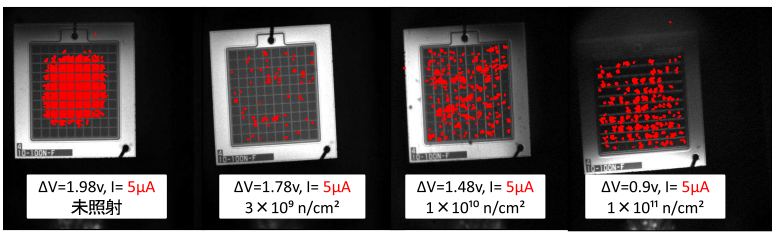

図 4.23: 赤外線発光写真の撮影結果。

第5章　結論

本研究では、アバランシェ増倍する光検出器である APD(Avalanche Photo Diode) と PPD(Pixelated Photon Detector) をとりあげ、その特性を評価する測定を行った。

SuperBelle 実験の電磁カロリメーターとして、純 CsI シンチレーターを用いる際に、光検出器として浜松ホトニクス社製 S8664-1010 型 APD を用いると、シンチレーターのブロック一つに一個をとりつけた場合に雑音レベルは 1.2MeV であるという結果を得た。これは、この APD 数枚をシンチレーターに取り付けるなどの改良により、実用に耐えうる見通しを初めて示したものである。

また、浜松ホトニクス社製の PPD である MPPC(Multi Pixel Photon Counter) の中性子被曝効果を測定した。照射線量 10^{8}-10^{12}neutrons/cm^{2} の範囲では増幅率とブレイクダウン電圧、光子検出効率 (PDE) は顕著な変化が見られなかったが、I-V 特性、ノイズレートは照射に伴い大きく変化し、光子計数能力は 10^{11}neutrons/cm^{2} 以上を被曝すると失われることも明かになった。この結果はこれまで未知であった MPPC の中性子被曝効果を明かにし、ビーム衝突実験ににおいて、チェレンコフリングイメージ検出器など、光子計数能力が必要なコンポーネントに用いるためには、さらに放射線耐性の向上が必要であることがわかった。

第6章　謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になりました方々にこの場を借りてお礼申し上ます。

宮林謙吉准教授には卒業研究生からの 3 年間、大変お世話になりました。最後の最後までご心配をおかけしましたが、先生にはいつも熱心に御指導して頂きました。本当にありがとうございました。野口誠之教授にはミーティングやゼミなどで大変わかりやすく御指導して頂きました。先生の日頃からの色々なお話は大変勉強になりました。林井教授はよく実験室に様子を見に来てくださり、適切なアドバイスを頂きました。

片岡佐知子先輩、関谷絢子先輩、藤川美幸希先輩をはじめとする先輩方にも相談に乗って頂くなど、大変お世話になりました。片岡先輩のなさっている BellePlus 等のアウトリーチ活動に参加させていただいたことは貴重な経験となりました。

また、同期の玉木智子さん、津田幸枝さんには学部から合せると 6 年間大変お世話になりました。M 1 のとき、私が KEK に出張して何度もゼミを欠席している間も資料を揃えていてくれたことは本当に嬉しかったです。高エネルギー物理学研究室の皆様に深く感謝いたします。

中性子照射試験では、KEK 測定器開発室、光センサーグループの皆様に大変お世話になりました。

東京理科大学の角田周一君とは一緒に実験、解析を行いました。お互い何もわからない状態からのスタートでしたが、共に成長ができて良かったです。

KEK の中村勇助教には中性子照射試験のみならず、修士の 2 年間を通して非常に多くの御指導を頂きました。適切な御指導のおかげでなんとか研究を進めることができました。また、KEK に滞在している間は様々な面でお世話になりました。本当に感謝しております。

KEK の中平武助教には測定システムの構築や解析において非常に多くの御指導を頂きました。

防衛大学校の松村徹助教にも多くのアドバイスを頂きました。筑波大学の山崎秀樹さん、生野利典君には測定と解析において大変お世話になりました。

高力孝先生には赤外線発光写真撮影の際に測定手順から解析方法まで御指導頂きました。

京都大学の五味慎一さんには MPPC や GOMI コネクターについての様々なアドバイスをいただきました。

斉藤勲助手、仲川勉氏をはじめとする東京大学原子炉「弥生」の皆様にも、照射試験の際に大変お世話になりました。皆様に深く御礼申し上げます。

APD の読み出し開発では、Belle の ECL グループの皆様に大変お世話になりました。特に Alexander Kuzumin 氏、Vasily Shebalin 氏には測定のセットアップについて丁寧に御指導いただきました。東京工業大学の片岡淳助教には APD について様々なアドバイスを頂きました。皆様に深く感謝いたします。

また、KEK の西田昌平助教にはノート PC のセットアップ等で何度もお世話になりました。大変感謝しております。

最後に、私のこれまでの大学生活を支えて下さった家族、友人に深く感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

[1] J. Kataoka *et al.* , Nucl. Instrum. Meth. A **541** 391 (2005).

[2] Review of Particle Physics ,July 2008,Phys.Lett.B667 ,1- (2008).

[3] "Super B Factory at KEK", `http://superb.kek.jp/`

[4] M. Akatsu, T. Ohshima *et al.*, "Time of propagation Cherenkov counter for particle identification.", Nucl. Instrum, Meth, **A440**, 124 (2000).

[5] S. Korpar *et al.*, "Design optimization of the proximity focusing RICH with dual aerogel radiator using a maximum-likelihood analysis of Cherenkov rings.", Nucl. Instrum, Meth, **A595**, 256 (2008).

[6] T. Higuchi *et al.*, "Development of a PCI based data aquisition platform for high intensisty accelerator experiments.", in the Proceedings of 2003 Conference for Computing in High-Energy and Nuclear Physics (CHEP03), hep-ex/0305088.

[7] "Requirements to the detectors", talk given by Peter Krizan at "Open meeting for SuperKEKB detector collaboration", 2008 Mar. 19, KEK, Tsukuba, Japan.

[8] "SuperKEKB Letter of Intent", KEK Report 04-4.

[9] 松原綱之, "新型半導体検出器 MPPC の放射線耐性の研究", 修士論文, 東京工業大学, 平成 19 年度.

[10] T. Matsumura *et al.*, arXiv:0901.2430, accepted by Nucl. Instrum. Meth. A.

[11] 東京大学原子炉「弥生」,http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/ rokan/index.html

[12] 五味慎一, "半導体検出器 MPPC の性能評価システムの構築", 修士論文, 京都大学, 平成 19 年度.