修士論文

電子線によるハイパー核分光用
シリコンストリップ検出器のふるまい

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

鵜養美冬

平成１２年

Abstract

The first experiment for hypernuclear spectroscopy by the $(e, e'K^+)$ reaction was carried out with the best energy resolution of 600 keV (E89-009) at Thomas Jefferson National Accelerator Facility during March — May, 2000. We have developed an array of silicon strip detector (SSD) as a focal plane detector of the scattered electron spectrometer. Radiation hardness of the SSD is one of key issues for the success of the experiment, since counting rate of the 80 cm focal plane detector is expected to be 10^8 Hz and the integrated dose during 3 months runs to be as high as 10 kGy.

We tested the radiation hardness of the SSD by directly irradiating it by the 200 MeV electron beams up to 170 kGy at Laboratory Nuclear Science Tohoku University. The leakage current, efficiency and noise level were measured every 10 kGy irradiation. Any degradation of the efficiency was not observed up to 50 kGy, which corresponds to the dose 5 times larger than the maximum expected one for E89-009. Even above 50 kGy, the efficiency was recovered by increasing the bias voltage up to 100 kGy. Although the leakage current and the noise level increased linearly to the dose, those changes were within acceptable level.

No degradation of the performance was observed during E89-009, in which the estimated dose was less than 10 kGy. We could operate the SSD with the efficiency greater than 97 % and the S/N ratio better than 100.

In conclusion, the SSD developed for E89-009 can be operated for a long period without any degradation of the performance under high-counting environment.

Contents

1 Introduction **1**

1.1 Λ Hypernuclei . . . 1

1.2 Background of Spectroscopic Study of Λ Hypernuclei . . . 2

1.2.1 History . . . 2

1.2.2 Characteristic of the Reaction to Produce Λ Hypernuclei . . . 2

1.3 Purpose of This Paper . . . 3

2 Spectroscopy of Λ Hypernuclei by the (e,$e'K^+$) Reaction **5**

2.1 Introduction . . . 5

2.2 Electromagnetic Production of Λ Hypernuclei . . . 6

2.2.1 Kinematics . . . 6

2.2.2 Kaon Background . . . 10

2.2.3 Electron Background . . . 11

2.3 Experimental Setup and Condition . . . 12

2.3.1 HyperNuclear Spectrometer System: HNSS . . . 12

2.3.2 Kaon Arm : SOS Spectrometer . . . 14

2.3.3 Electron Arm : ENGE Spectrometer . . . 16

3 Silicon Strip Detector (SSD) and Readout Electronics **17**

3.1 Operation Principle of SSSD . . . 17

3.2 Radiation Damage . . . 21

3.2.1 General Radiarion Damage Effect . . . 21

3.2.2 Expected Damage for E89-009 . . . 21

3.3 Structure of the SSD for E89-009 . . . 22

3.3.1 Readout Types of SSD . . . 22

3.3.2 Bias Method . . . 24

3.3.3 Guard-Ring Structure . . . 25

3.3.4 Total Design . . . 25

3.4 Readout Electronics . . . 29

3.4.1 TEKZ Chip . . . 29

3.4.2 Front End Board . . . 30

3.4.3 ECL Driver Board and Multihit TDC . . . 30

4 SSD Irradiation Experiment **33**
4.1 Experimental Setup and Method . . . 33
4.1.1 Radiation Dose . . . 33
4.1.2 Bias Voltage . . . 36
4.1.3 Comparator Threshold . . . 37
4.2 Efficiency Measurement . . . 38
4.2.1 Method . . . 38
4.3 Noise Level Mesurement . . . 39
4.3.1 Method . . . 39
4.4 Result . . . 40

5 SSD Performance at E89-009 **45**
5.1 Monitoring System . . . 45
5.2 SSD Performance . . . 46
5.2.1 Leakage Current . . . 47
5.2.2 Efficiency . . . 47
5.2.3 Noise Level . . . 49
5.2.4 Summary . . . 50

6 Summary **51**

A Files : data ,program ,etc. **57**
A.1 Files of this paper . . . 57
A.2 LNS experiment :raw data ,source file & etc. . . . 57
A.3 Jlab SSD data . . . 58

List of Tables

1.1 Characteristic of Λ hypernuclei production 2

2.1 Specifications of CEBAF 5
2.2 Cross section of Λ hypernuclei production 6
2.3 K photoproduction threshold 10
2.4 Kinematical condition 12
2.5 Expected energy resolution 12
2.6 SOS specification 14
2.7 SOS particle singles rate 14
2.8 Enge spectrometer specification 16

3.1 SSD specification 26
3.2 TEKZ specification 29

4.1 Dose of each irradiation and dose of integration 37

5.1 CAEN monitor specification 45

List of Figures

2.1 $p(e, e'K^+)\Lambda$ Feynman Diagram 6
2.2 Kinematics of the electroproduction 7
2.3 Virtual photon flux Γ 8
2.4 $\gamma p \to K^+\Lambda$, $\gamma p \to K^+\Sigma^0$ total cross section 9
2.5 Λ recoil momentum 10
2.6 Top and side views of the HNSS 13
2.7 SOS detector package 15
2.8 Focal plane detector 16

3.1 SSD status 18
3.2 States of n-type MOS structure 19
3.3 SSD genetral view 20
3.4 Non ionizing energy loss 22
3.5 Readout method 1 23
3.6 Readout method 2 23
3.7 Bias method 24
3.8 Equivalent circuit network of SSD 25
3.9 SSD structure (top view) 27
3.10 SSD structure (Side view) 28
3.11 Functional circuit diagram of TEKZ 29
3.12 Front End Borad 31

4.1 Setup during irradiation 34
4.2 Beam profile measured by BPM 34
4.3 Beam profile 36
4.4 SSD Bias 36
4.5 Circuit diagram to measure SSD efficiency 38
4.6 Leakage current vs applied bias voltage 40
4.7 Efficiency v.s. threshold 41
4.8 Efficiency v.s. dose 42
4.9 Noise level difference 43
4.10 Noise level v.s. dose 44

5.1 Alignment of the scattered electron focal plane detector 46
5.2 SSD hit pattern 46
5.3 leakage current during E89-009 47
5.4 SSD Efficiency during E89-009 48

5.5 SSD average noise level σ 49
5.6 SSD Noise level σ difference 50

Chapter 1

Introduction

1.1 Λ Hypernuclei

Λ 粒子は質量 1115.68MeV、スピン・パリティー $\frac{1}{2}^+$、アイソスピン 0、クォークモデルの描像では u,d,sからなる、ストレンジネス量子数 -1 のバリオンである。Λ は自由空間では寿命 2.63×10^{-10}s で弱い相互作用によってのみ崩壊し、典型的には $\mathrm{p}\pi^-$ または $\mathrm{n}\pi^0$ に崩壊する。

ハイパー核とは Λ や Σ のようなストレンジネス量子数をもつ粒子（ハイペロン）が原子核内に束縛されてできる原子核である。特に原子核内に入った粒子が Λ の場合、Λ ハイパー核という。原子核内にストレンジネス量子数を持つバリオンを導入することによっていくつかの原子核物理の新しい側面がでてくる。

通常の原子核では外殻部分においては核子のふるまいは独立一粒子近似でうまく説明できる。ところが、独立一次粒子近似が原子核の内殻部でなりたっているかどうかは、内殻では、陽子・中性子はパウリ原理が強く働くために実験的に情報を得ることが困難である。そのため、その描像の正当性はわかっていない。一方ハイペロンは核子によるパウリ原理をうけないために、原子核の中心部分に容易にはいっていける。このことはハイペロンが原子核内部を調査するためのプローブとして適していることを示している。原子核深部の情報はハイパー核のエネルギー準位、核内での崩壊などから引き出せる。これまでのハイパー核研究から原子核内における Λ は一体ポテンシャル中の Λ 粒子という shell model の考えで理解できることがわかっている。またハイパー核の基底状態は、ハイペロンが 1s 軌道という核の深部に入った状態であるために、核物質中におけるハドロンの質量などの特性変化（核の媒質効果）などの研究が期待されている。

核力という観点からは、核子間の核力は直接散乱実験を行なうことによってデータを得ることができ、現象論的に良く理解されているが、Λ 核子の散乱実験は困難である。しかし Λ ハイパー核の核構造研究からも核子 Λ 間の核力に関する情報を得ることができる。原子核内部における核子のふるまいは有効相互作用によって記述されるが、Λ 核子間の 2 体相互作用は核子間の相互作用に比べて小さいので 2 体相互作用から原子核内での多体の効果をとり入れて計算される有効相互作用 (G-matrix 計算) の信頼性が高いとされている。特に比較的構造が単純な少数多体系の軽い Λ ハイパー核に関する詳細な核構造に関する情報を得ることができれば、核構造から得られた有効相互作用を G-matrix と比較することによって 2 体相互作用の情報を得ることが出来る。より多くのハイパー核に対し、より詳細な分光実験を行なうことはとても重要なことだといえる。

1.2 Background of Spectroscopic Study of Λ Hypernuclei

1.2.1 History

Λ ハイパー核は、１９５２年に宇宙線による核反応生成物として原子核乾板の中でで初めて発見された。[1] その後加速器を用いてつくられた K^- 中間子ビームを使用しての原子核乾板、泡箱実験で A<15 の軽い Λ ハイパー核の存在が確認され、基底状態の束縛エネルギーが測定された。しかし乾板、泡箱等を使用しての実験は検出ハイパー核の数が乏しく統計精度が悪かった。

１９７０年代になって CERN [2] や BNL[3] でカウンター実験が $(K^-_{in-flight}, \pi^-)$ 反応によって始められた。

１９８０年代になると $(K^-_{stopped}, \pi^-)$ 、(π^+, K^+) 反応によるハイパー核研究行なわれるようになった。$(K^-_{stopped}, \pi^-)$ による実験はまず CERN によって１９７０年代初頭に行なわれたが [4] 、その後、高エネルギー物理学研究所（現在 高エネルギー加速器研究機構:KEK）の陽子加速器 (KEK-PS) に舞台がうつっていった。[5]

現在では KEK-PS の超伝導 K 中間子スペクトロメーター (SKS) においてさかんに (π^+, K^+) 反応を用いた Λ ハイパー核分光研究がおこなわれ [6] [7] [8] 、BNL では $(K^-, \pi^-\gamma)$ 反応による同時計測実験や (K^-, K^+) 反応を利用したダブルストレンジネス核の研究も行なわれている。最近では、２章にて述べる米国 Thomas Jefferson National Accerator Facility (JLAB) の超伝導連続電子線加速器 (CEBAF) を使用した $(e, e'K^+)$ 反応によるハイパー核研究がはじまり今後の新しいハイパー核分光実験の手法として注目されている。

1.2.2 Characteristic of the Reaction to Produce Λ Hypernuclei

これまでに行なわれてきた Λ ハイパー核分光実験、および JLAB での電子線を用いた分光実験における生成反応毎の主な特徴を Table 1.1 に示す。

Table 1.1: Characteristic of Λ hypernuclei production

reaction		入射運動量 (GeV/c)	$\Delta s, \Delta l$	運動量移行 (MeV/c)	特徴
in-flight (K^-, π^-)	n → Λ	∼ 0.8	$\Delta s = 0$ $\Delta l = 0$	$q < 100$	recoilless, 発熱反応 外殻の原子核と反応 substitutional state を主に励起
stopped (K^-, π^-)	n → Λ	0	$\Delta s = 0$ Δl =0,1,2..	$q = 250$	生成率大 様々な state を励起
(π^+, K^+)	n → Λ	∼ 1.0	$\Delta s = 0$ $\Delta l =$ 大	$q > 300$	recoil 大、吸熱反応 high spin,streched state を主に励起
$(e, e'K^+)$ (γ, K^+)	p → Λ	$p_\gamma =$ 1.0−1.5	$\Delta s = 0, 1$ $\Delta l =$ 大	$q > 300$	吸熱反応 recoil 大 high spin,spin-flip,streched state を励起

入射運動量は実験における典型的な値

電磁相互作用による Λ ハイパー核生成は以下の様にこれまで行なわれていた中間子２次ビームによる反応とは大きく異なる。
(1)**spin-flip 振幅が大きく**これまで生成しにくかった spin-flip 状態を non spin-flip 状態と同程度に生成できる。
(2) **陽子を Λ に変換**する反応のため、これまで生成できなかったハイパー核や中性子の多いハイパー核が生成可能となる。
(3) **１次ビームを使用する** $(e, e'K^+)$ 反応においてはこれまでエネルギー分解能が 2MeV 程度であった分光実験が 1MeV 以下の高分解能で可能となり、core 核の励起状態を分離することが可能になると期待されている。

1.3 Purpose of This Paper

本論文の目的は Jefferson Lab. で２０００年３月から５月にかけて行なわれた $(e, e'K^+)$ 反応による初の Λ ハイパー核分光実験 (E89-009)[9] において散乱電子位置検出器として使用された Silicon Strip Detector (SSD) のふるまい、特に放射線損傷にたいする耐久性を議論することである。

２章において E89-009 の実験概要と散乱電子焦点面上での検出器に対する条件を示し、３章では、一般的な SSD の特性および E89-009 に使用するために開発された SSD のデザインを示す。４章では東北大学原子核理学研究施設 200MeV 電子線加速器を使用した SSD 放射線照射実験及びその結果を載せる。５章では E89-009 において実際に SSD が示した性能を載せる。６章において全体的な SSD の性能を議論しまとめを行なう。

Chapter 2

Spectroscopy of Λ Hypernuclei by the $(e,e'K^+)$ Reaction

2.1 Introduction

これまでの Λ ハイパー核分光実験では中間子 2 次ビームを使用していたためにビームエミッタンスが非常に大きいなどの理由から、エネルギー分解能は最高でも 2MeV(FWHM) 程度が限界であった。電子線のような一次ビームを使用しての分光実験を行なうことができれば高分解能測定が可能となる。

1990 年代米国バージニア州、Thomas Jefferson National Accerator Facility(JLAB) において、連続電子線加速器 Countinuous Electron Beam Accerator Facility (CEBAF) が建設された。

Table 2.1: Specifications of CEBAF

Beam energy	≤4.065GeV *
Energy spread	$\leq 10^{-4}$(FWHM)
Beam current	$\leq 200\mu$A
Radio-frequency	499MHz
Beam bunch separation	2 ns
Beam bunch width	1.67 ps
Beam emittance	2×10^{-9}mm mrad
Duty factor	100%
Beam mode	CW/Pulsed

*2000 年 5 月現在のエネルギー。

Table 2.1 に CEBAF の特徴を示す。CEBAF では最大 4GeV の連続ビーム (duty factor 100%) を A、B、C 3 つの実験ホールに同時に輸送することができる。最大ビーム電流は 200μA と極めて大きい。CW は Countinuos Wave の略。現在 CEBAF では Beam Energy Upgrade 計画が進行中で、最高 12GeV の beam energy を目指している。

このような良質で大強度の電子線加速器の完成により、電子線によるハイパー核分光実験が可能となり、２０００年春に JLAB において電子線を用いた p-shell 領域の Λ ハイパー核分光実

験 (E89-009) が行なわれた。電子線を用いてのハイパー核分光実験は初の試みである。今後さらに高い分解能のスペクトロメーター (HKS:現在建設中) を使用しての分光実験 (E97-008:p-shell & above p-shell) が計画されている。

2.2 Electromagnetic Production of Λ Hypernuclei

2.2.1 Kinematics

$(e, e'K^+)$ 反応の素過程は以下の通りである。

$$\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda \tag{2.1}$$

Fig.2.1 に反応の Feynman Diagram を示す。

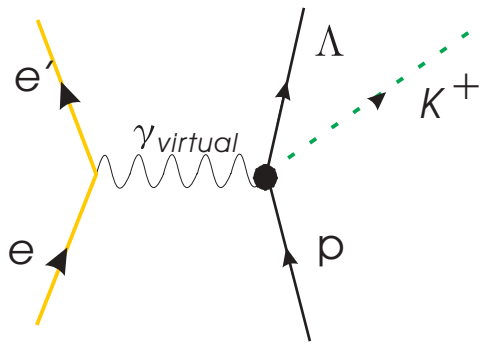


Figure 2.1: $p(e, e'K^+)\Lambda$ Feynman Diagram

Table 2.2 に示す通り、この反応は中間子ビームを使用した $\pi^+ n \rightarrow \Lambda K^+$、$K^- n \rightarrow \Lambda \pi^-$ 反応と比較して、Λ の生成断面積は 2 桁から 3 桁ほど小さい。ハイパー核の生成断面積は小さいが、ビームの強度を十分強くすることができるので、これまでのハイパー核生成の収量と同程度の収量を得ることができる。

Table 2.2: Cross section of Λ hypernuclei production

Reaction	cross section $[d\sigma/d\Omega] \times P_{stick}$	Beam intensity [s^{-1}]
in-flight(K^-, π^-) (recoilless)	200mb/sr$\times 10^{-2}$	10^4
stopped (K^-, π^-)*	5mb/sr$\times 10^{-1}$	10^4
(π^+, K^+)	0.5mb/sr$\times 10^{-3}$	10^6
$(e, e'K^+)$	0.5μb/sr$\times 10^{-3}$	10^{13}

P_{stick} は Λ の sticking probability
*stop K^- の断面積は π^- スペクトロメーター (∼100msr) と
減速前のビーム運動量を仮定した時の断面積に相当する値を示す。

反応の kinematics は

$$e(\boldsymbol{p}_e, E_e) + p(\boldsymbol{p}_p, E_p) \to e'(\boldsymbol{p}_{e'}, E_{e'}) + \Lambda(\boldsymbol{p}_\Lambda, E_\Lambda) + K^+(\boldsymbol{p}_K, E_K) \tag{2.2}$$

で与えられる。Fig.2.2 に kinematics の図を示す。virtual photon は $q = (\boldsymbol{q}, \omega)$、$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{p}_e - \boldsymbol{p}_{e'}$、$\omega = E_e - E_{e'}$ で与えられる。

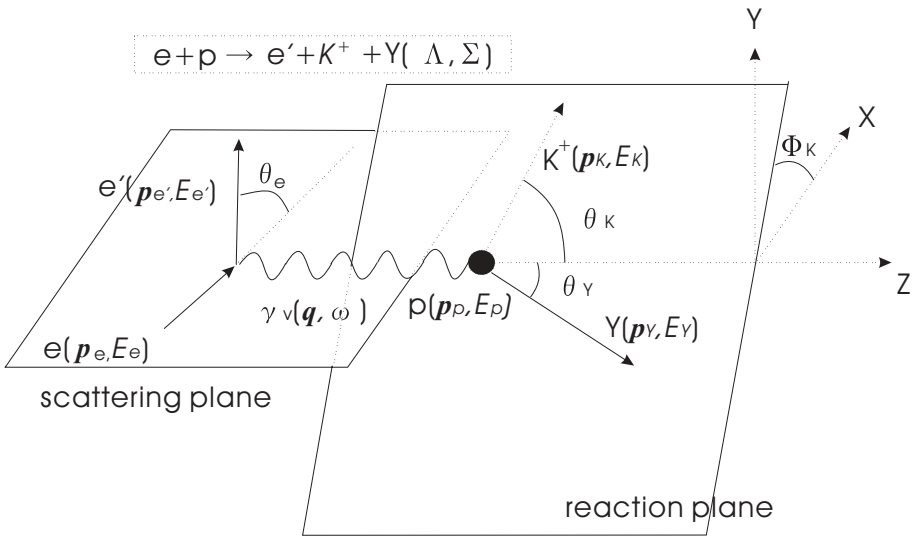


Figure 2.2: Kinematics of the electroproduction

この反応における effective virtual photon energy E_γ、virtual photon flux Γ、vitual photon の transverse と longitudinal の polarization ε、ε_L は

$$E_\gamma = \omega + \frac{q^2}{2m_p} \tag{2.3}$$

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2\pi^2 Q^2} \frac{E_\gamma}{1-\varepsilon} \frac{E_{e'}}{E_e} \tag{2.4}$$

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{2|\boldsymbol{q}|^2}{Q^2} \tan^2 \frac{\theta_e}{2}\right)^{-1} \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_L = \frac{Q^2}{\omega^2} \varepsilon \tag{2.6}$$

と表すことができる。α は微細構造定数、m_p は proton の静止質量、$q^2 = \omega^2 - \boldsymbol{q}^{\,2} = -Q^2$ である。

３重微分断面積は以下の式で表すことができる。[11]

$$\frac{d^3\sigma}{\delta E'_e d\Omega'_e d\Omega_K} = \Gamma \left[\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \varepsilon_L \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} + \varepsilon \frac{d\sigma_P}{d\Omega_K} \cos 2\Phi_K + \sqrt{2\varepsilon_L(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_I}{d\Omega_K} \cos \Phi_K \right] \tag{2.7}$$

K^+ を散乱電子と同一平面上で検出し（scattering plane と reaction plane が同一平面）散乱電子を前方で検出する場合、virtual photon は real photon と近似でき、３重微分断面積は

$$\frac{d^3\sigma}{dE'_e d\Omega'_e d\Omega_K} = \Gamma\left[\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \varepsilon\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}\right] \tag{2.8}$$

$$= \Gamma\frac{d\sigma_{TL}}{d\Omega_K} \tag{2.9}$$

と表すことができ、Λ の生成断面積は virtual photon flux と K^+ の photo production 生成断面積との積で表される。

virtual photon flux を θ_e の関数であらわすと

$$\begin{aligned}\Gamma = \frac{\alpha}{4\pi^2\omega}\Bigg[&\frac{E_e^2+E_e'^2}{2E_e^2}\left(\frac{m^2\omega^2}{4E_e^2E_e'^2}+\sin^2\frac{\theta_e}{2}\right)^{-1}\\ &-\frac{E'_e m^2\omega^2}{4E_e^3E_e'^2}\left(\frac{m^2\omega^2}{4E_e^2E_e'^2}+\sin^2\frac{\theta_e}{2}\right)^{-2}\\ &-\frac{(E_e+E'_e)^2}{4E_e^2}\left(\frac{\omega^2}{4E_eE'_e}+\sin^2\frac{\theta_e}{2}\right)^{-1}\Bigg]\end{aligned} \tag{2.10}$$

となり、Γ が最大値をもつのは

$$\theta_{e\mathrm{min}} = \sin^{-1}\frac{m\omega}{4E_eE'_e} \tag{2.11}$$

となり、ほぼ $\theta_e \sim 0$ において Γ が最大になることを示す。[15] Fig.2.3 に Virtual photon flux の角度依存性を示す。また K^+ 生成断面積も 0 度で生成率が最大となる。[13]

このため、ハイパー核生成率をあげるためには e'、K^+ 共に出来るだけ前方において検出できることが望ましい。

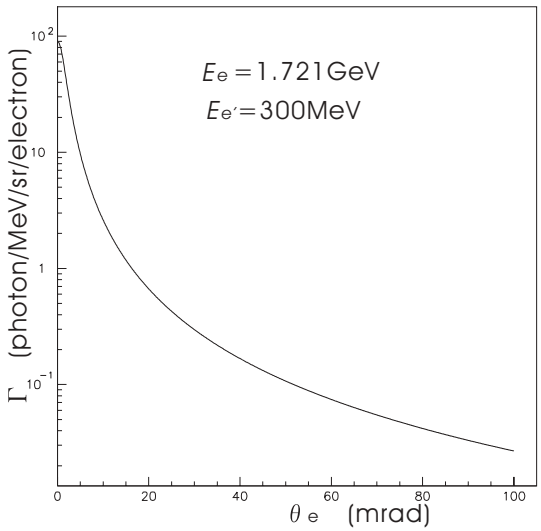


Figure 2.3: Virtual photon flux Γ

Fig.2.4 に $\gamma p \to K^+\Lambda$ 反応及び K^+ のバックグラウンドとなる $\gamma p \to K^+\Sigma^0$ 反応の photon energy に対する全断面積の実験結果を示す。[14] Λ 生成の断面積は photon energy が threshold(911MeV) から急激に立ち上がり、1.1GeV から 1.5GeV 付近まで平坦になっており 1.6GeV 近くから下がり始める。

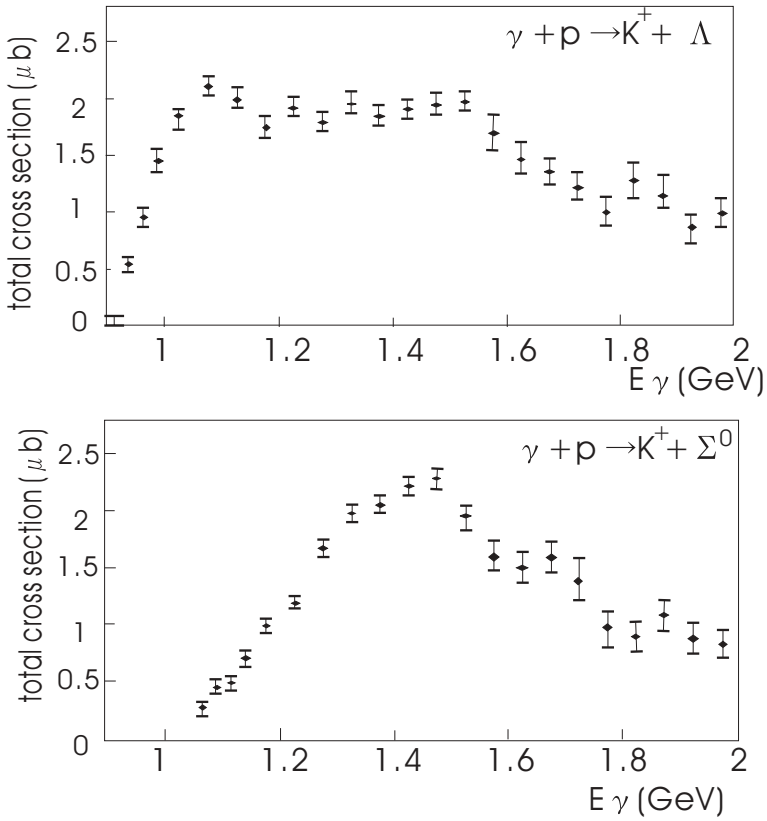


Figure 2.4: $\gamma p \to K^+\Lambda$, $\gamma p \to K^+\Sigma^0$ total cross section [14]

Fig. 2.5 に反応毎の Λ recoil momentum を示す。[10] recoil momentum を出来るだけ抑えることで Λ の原子核にたいする sticking probability があがりハイパー核生成率をあげることが可能になる。また K^+ を前方で検出することは Λ の recoil momentum を抑えられるという利点もある。

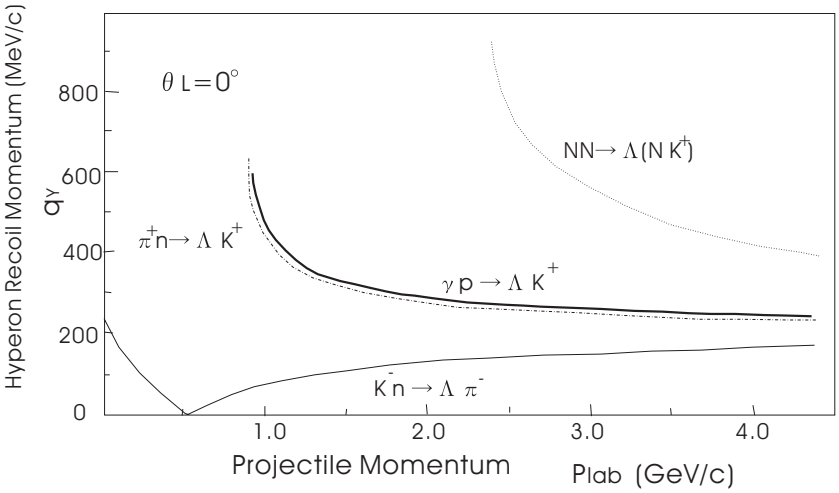


Figure 2.5: Λ recoil momentum [10]

2.2.2 Kaon Background

Table 2.3 に γN 反応によって生成される K^+ の反応毎の E_γ threshold を示す。$E_\gamma > 1$ GeV の領域では不必要な K^+ が生成されてしまう。しかし $E_\gamma < 1$ GeV の領域では Fig.2.4 に示すように十分な反応断面積を得ることができない。

Table 2.3: K photoproduction threshold

Reaction	Gamma threshold(MeV)
$\gamma p \to K^+\Lambda$	911
$\gamma p \to K^+\Sigma^0$	1044
$\gamma n \to K^+\Sigma^-$	1051
$\gamma p \to K^+\Lambda(1405)$	1451
$\gamma p \to K^+\Lambda(1520)$	1691
$\gamma p \to K^{*+}(892)\Lambda$	1680
$\gamma p \to K^{*+}(892)\Sigma^0$	1846
$(K^{*+} \to K^+\gamma)$	
$\gamma p \to \phi(1020)p$	1575
$(\phi \to K^+K^-)$	

E_γ は適度な反応断面積が得られ、不必要なバックグラウンドの生成をおさえ、recoil momentum が小さくなるような最適な範囲を選択する必要がある。

2.2.3 Electron Background

0 °方向で散乱電子を検出する時に問題となるのが制動放射によりエネルギーを失った電子が大量にスペクトロメーター入射することである。

beam energy E [GeV]、photon energy k [GeV]、入射電子数 N_e、target thickness d [mg/cm^2] とした時、$E - k_{min} \sim E - k_{max}$ の範囲の制動放射による電子数 $N_{e'}$ は以下の式に従う。[18]

$$N_\gamma = \frac{d}{X_0} \int_{k_{min}}^{k_{max}} \left(\frac{4}{3} - \frac{4}{3} y + y^2 \right) \frac{dk}{k} \tag{2.12}$$

$$N_{e'} = N_\gamma N_e \tag{2.13}$$

ただし $y = k/E$、X_0[mg/cm^2] は target の radiation length。この電子は 0 °にピークを持つ。

2.3 Experimental Setup and Condition

Table 2.4 に実際の運動学的条件を挙げる。

Table 2.4: Kinematical condition

Beam energy	1.864 GeV or 1.721 GeV
Beam current	0.2 ∼ 1.5 μA
e scattering angle	0 °
E'_e	268-367 MeV or 242-358 MeV
K^+ scatterin angle	2 °(central)
p_{K^+}	1.24 GeV/c or 1.12 GeV/c

2.3.1 HyperNuclear Spectrometer System: HNSS

E89-009 実験が行なわれた Hall C には SOS(Short Orbit Spectrometer) と HMS(High Momentum Spectrometer) の二つのスペクトロメーターが常設されている。E89-009 実験においては散乱電子、K^+ をともに前方において検出するためにこの二つを同時に使うことは不可能である。そのため新たに Target 下流に Splitter Magnet を設置し、K^+ 検出用には SOS を用い、散乱電子位置検出用に ENGE spectrometer を設置することで前方での同時検出が可能となった。この system を総称して HNSS と呼ぶ。エネルギー分解能は全体で 600keV(@^{12}C 、10mg/cm^2) となるようにデザインされている。Table 2.5 にパート毎のエネルギー分解能への寄与及び全体でのエネルギー分解能を示す。

Table 2.5: Expected energy resolution

Item	Contribution(FWHM)
Beam momentum	172 keV
SOS momentum	560 keV
Enge momentum	60 keV
Scattering angle(13 mr)	240 keV
Target	17 keV
overall	636 keV

Target を ^{12}C(10 mg/cm^2)、Beam energy 1.72 GeV としたとき。

Fig.2.6 に HNSS 全体図を載せる。

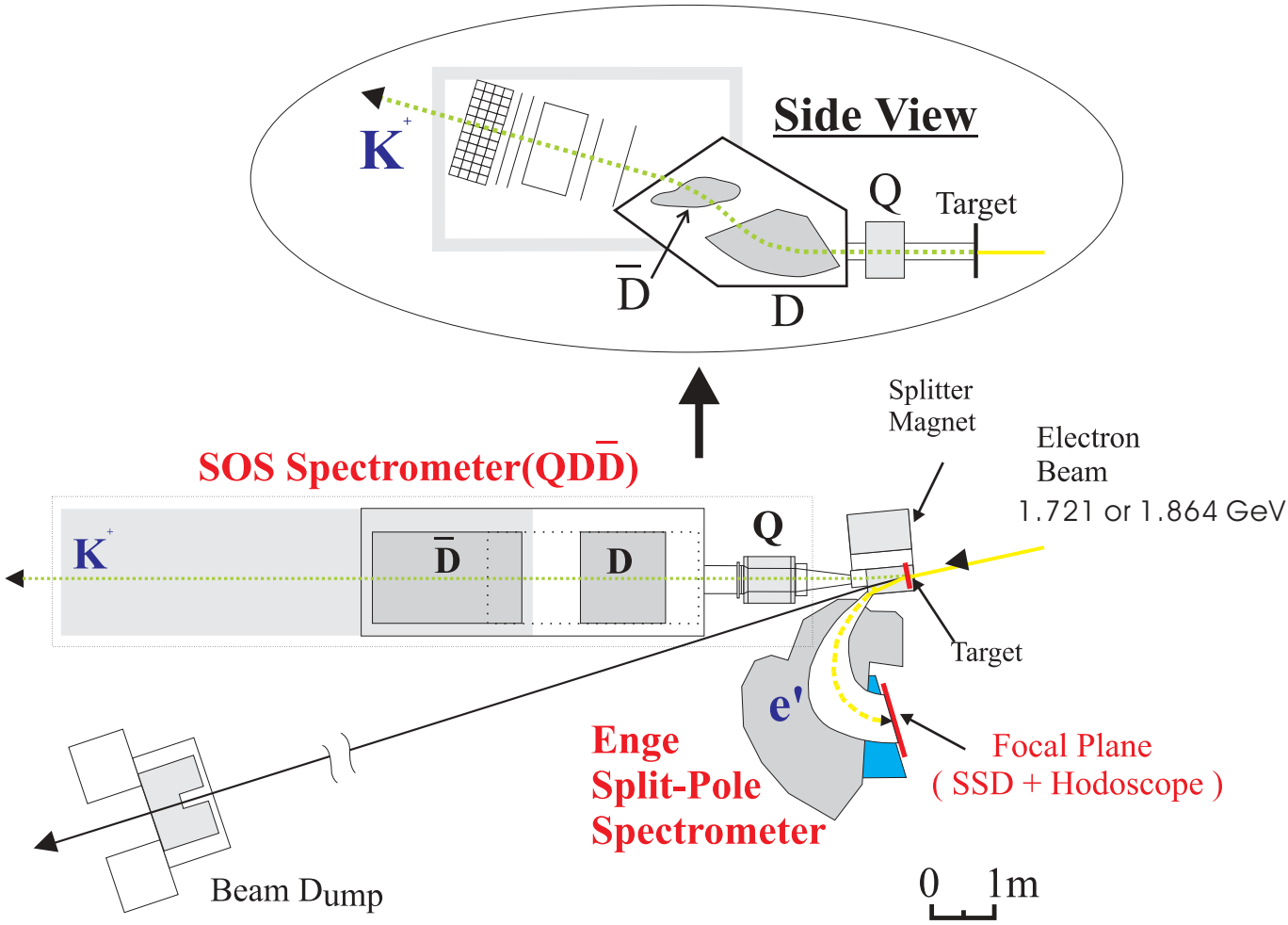


Figure 2.6: Top and side views of the HNSS

2.3.2 Kaon Arm : SOS Spectrometer

SOS には K^+ の他に多量の e^+、π^+、p が入射してくる。そのため、K^+ は以下の検出器を使用して、軌道測定、運動量測定及び粒子識別 (Particle Identification :PID) を行なう。Table 2.6 [17] に過去に測定された SOS の性能を示す。ただし、acceptance に関しては Splitter magnet を入れていないものなので今回の実験に関しては表に示した通りではない。Table 2.7 に E89-009 で実際に測定された粒子毎の singles rate を示す。

Table 2.6: SOS specification

momentum	$\leq$	1.75 GeV/c
Horizontal acceptance		120 mr
Vertical acceptance		80 mr
Solid angle acceptance	$\leq$	11 msr
$\delta p/p$		5×10^{-4}(FWHM)
Momentum bite	$\pm$	20 %
Dispersion		2.7 cm/ %
Focal plane dimention		40× 120 cm^2
Total path length		10 m
K^+survival rate		33 %

Table 2.7: SOS particle singles rate

Particle	singles rate [s^{-1}]
K^+	0.17
π^+	1400
p	140
e^+	10^4

Drift Chambers

２つの Drift Chamber は Focal plane を挟む形で設置されている。１つの Drift Chamber は cell size 1cm 、UU'VV'XX' ６面からなり、１面あたりの位置分解能は 200μm。ガスは Ar:C_2H_6=50:50（重量比）を大気圧下で用いている。

Hodoscope Arrays

SX1、SY1、SX2、SY2 の４面からなるプラスチックシンチレーターホドスコープである。Trigger Counter として、また Time of Flight Counter として使用されている。SX1、SY1 と SX2、SY2 間は 1.5m で時間分解能は１面あたり 120ps。

Cerenkov Counters

PID 用のカウンター。通過した荷電粒子が物質の屈折率 n に対し $\beta > \frac{1}{n}$ のときに放出されるチェレンコフ光を検出することで n に応じて通過粒子を識別する。ここでは、SOS に入射してくる粒子 e^+、π^+、K^+、p の中から K^+ だけを分別する。今回使用する運動量領域においては Gas Cerenkov(GC) は e^+ が通過した時のみ発光するため veto counter とし、Lucite Cerenkov(LC : n=1.49) では p のみ発光しないため proton と他の粒子を識別し、Aerogel Cerehnkov(AC : n=1.034) は e^+、π^+ が通過したときに発光するため、veto counter として使用する。

Shower Counter

鉛ガラスブロックからできている。主にブロック内で電磁シャワーを発生させる e^+ を識別するために使用する。e^+ だけが電磁シャワーを発生させ光量が大きいために hadron を落さない程度の threshold を設定しトリガーレベルでの e^+ カットを行なう。

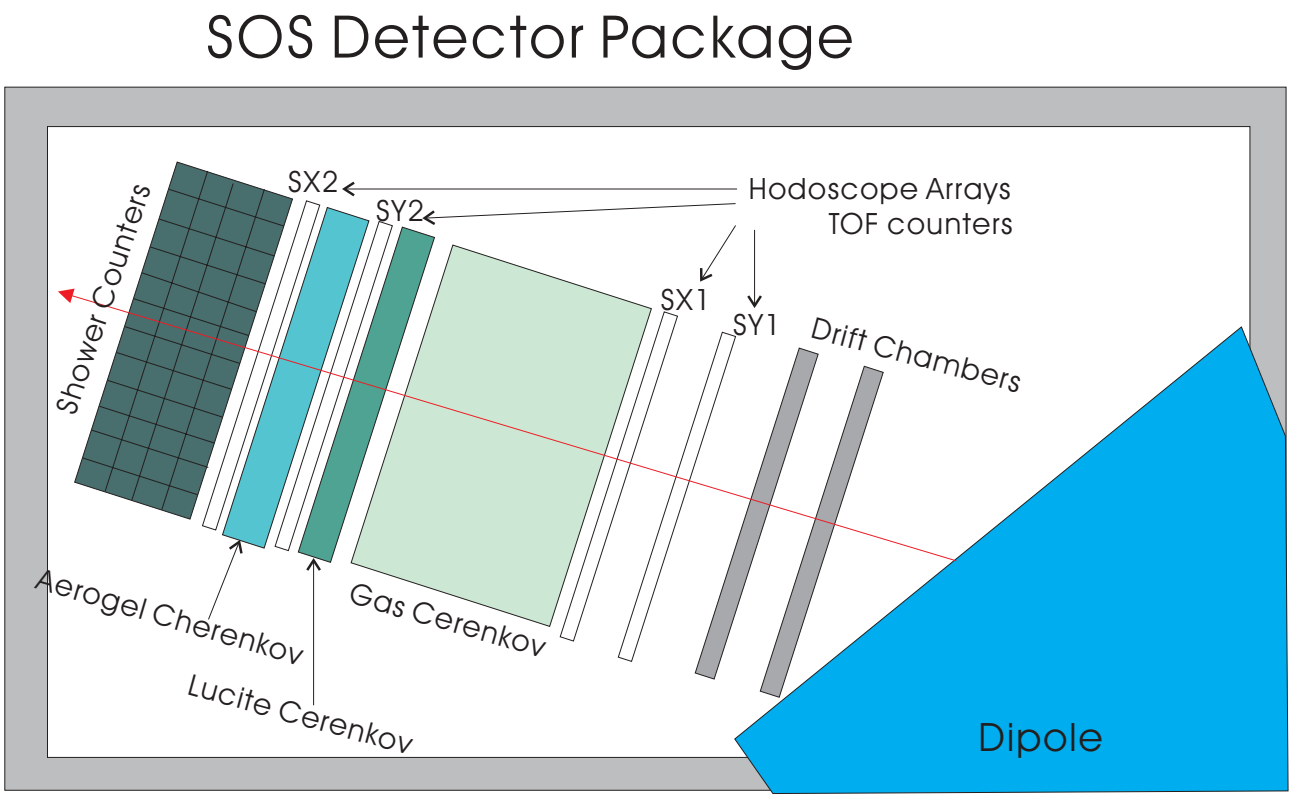


Figure 2.7: SOS detector package

2.3.3 Electron Arm : ENGE Spectrometer

散乱電子は 0 °方向で検出するために散乱電子の他に大量の制動放射によりエネルギーを失った電子が入射してくる。Eq.2.13 からビーム強度を 1μA ^{12}C 10mg/cm^2($X_0 = 42.67$g/cm^2) としたとき焦点面全体で約 2×10^8Hz の電子が入射する。また焦点面に対し電子は約 45 °の角度で入射する。全体でのエネルギー分解能 (FWHM)600keV を達成するために散乱電子側の位置分解能を 700μm 以下に抑えることのできる検出器が要求される。この要求をみたすべく Silicon Strip Detector (SSD) が位置検出器として採用された。(詳細は 3 章にて述べる。)

Enge Spectrometer は split-pole magnet とその焦点面上に設置された位置検出器として Silicon Strip Detector と時間測定用のプラスチックシンチレーターホドスコープから構成されている。焦点面上には SSD を電子の入射方向に対し垂直になるように１０枚設置し下流側に SSD 一枚あたり 8 本のシンチレーターを設置した。(See Fig. 2.8)

ホドスコープ 1 本あたりの singles rate が 2MHz 以下になるような条件でビーム強度が 1μA 程度と決定された。Table 2.8 に Enge Spectrometer の性能を示す。

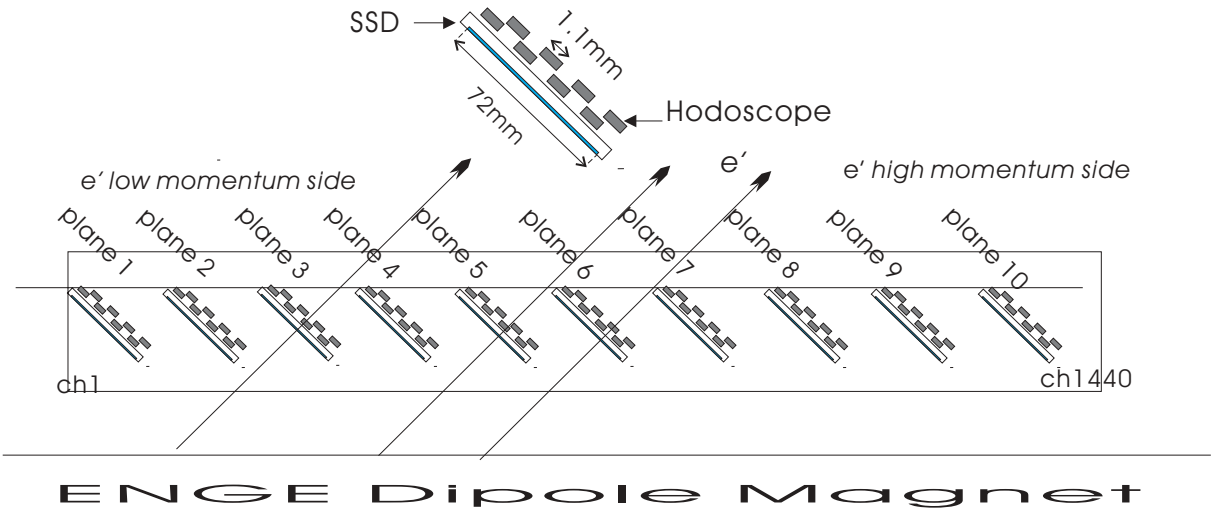


Figure 2.8: Focal plane detector
焦点面上での検出器配置拡大図

Table 2.8: Enge spectrometer specification

momentum	$\sim$	300MeV/c
horizontal acceptance		25 mr
vertical acceptance		20 mr
total length		5 m
momentum bite	$\pm$	20 %
focal plane length		74 cm
$\delta p/p$		5×10^{-4}(FWHM)

Chapter 3

Silicon Strip Detector (SSD) and Readout Electronics

JLAB E89-009 において、散乱電子焦点面位置検出器に要求される性能をみたす検出器として SSD が挙げられる。Silicon Strip Detector (SSD) は近年急速にシリコン半導体産業が発達し、１９８０年代から高エネルギー実験に位置検出器として利用されるようになった半導体放射線検出器である。その利点としては荷電粒子の飛跡を位置精度 20μm 以下で測定できること、室温で使用できることなどが挙げられる。

散乱電子焦点面検出器に要求される性能は以下の通りである。

- $\sim$ 700 μm 以下の位置分解能
  全体のエネルギー分解能 600 keV、Enge spectrometer で 100 keV 以下を達成するために散乱電子焦点面上では 700 μm 以下の位置分解能が必要。

- High rate 耐性 10^8 Hz/80 cm (focal plane)
  制動放射によりエネルギーを失った電子が beam intensity 1 μA、target が ^{12}C 10 mg/cm^2 のときに 2×10^8 Hz の電子が焦点面上に入射することとなる。（位置検出器の strip pitch =500 μm とすると 10^5 Hz/strip。）

- focal plane に対する electron 入射角 40 度 $\sim$ 60 度
  Enge split-pole magnet の性質上焦点面に対し 40 $\sim$ 60 °の角度で電子が入射する。

斜め入射の為通常の Drift Chamber では十分な分解能を得ることができない。また斜め入射でも十分な分解能を出すことができる Vertical Drift Chamber は rate に弱く、想定された条件下においては動作させることが出来ない。そこで上記の条件を満たす検出器として SSD が採用され、実験デザインにあわせた SSD が開発された。この章において、SSD の一般的特性、及び開発された SSD の特徴を述べる。

3.1 Operation Principle of SSSD

SSD は貫通する荷電粒子の位置測定を目的として、N 型半導体ウエハーの表面に Strip 状に細長い P 型半導体層をつくりその上にアルミニウム電極をつけた構造の固体検出器である。

P 型半導体と N 型半導体を接合する (pn junction) と、接合面で拡散電流が流れ、接合面の両側に空乏層 (depletion layer) と呼ばれる carrier が全く存在しない領域が形成され、両方のフェルミレベルが等しくなるように電位差が生じる。荷電粒子がこの空乏層を通過する時、軌跡に

そって electron-hole pair が生成される。この生成された electron や hole を分離し、その電荷量を電極で読み出すことによって通過位置を測定する検出器となる。このデバイスに逆バイアスを与えることで、(1)e-h pair の再結合をふせぎ (2) 半導体内の carrier を両電極に引き寄せて多くの領域を空乏層化出来る。デバイスの厚さ全体を空乏層化できる逆バイアスをかけることで、結晶全体が放射線検出器となりより多くの電荷が収集出来るようになる。Fig.3.1 に SSD 内部の簡略化した図を示す。

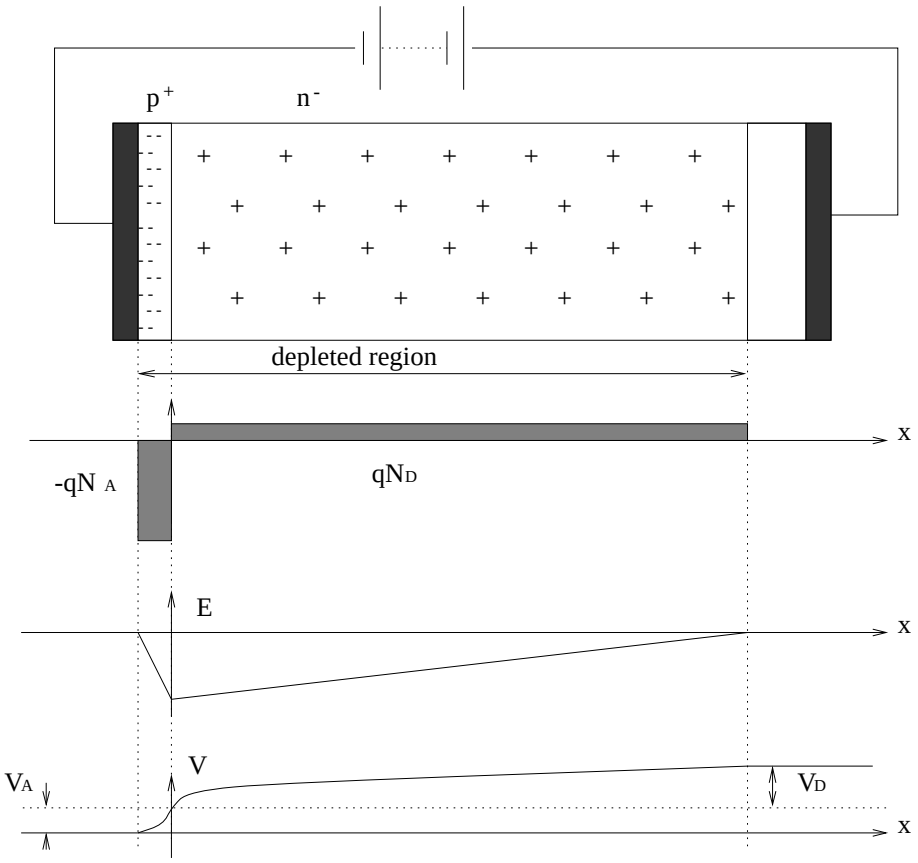


Figure 3.1: SSD status

高い比抵抗率 (数 kΩcm,$N_D \sim 10^{12}$ cm^{-}3) の N 型シリコン半導体に高い濃度の P ドープを行なった一般的な SSD では、接合面での空乏層の厚さは、外からかけた逆バイアス電位を V_R [V] とすると、

$$w_{depl} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q_e N_D} V_R} \approx 36\mu\mathrm{m}\sqrt{V_R} \tag{3.1}$$

となる。N_D は n 型半導体の donor 密度。これよりシリコン半導体の厚さが 300 μ m としたとき、全空乏層化に要する電圧 (full depletion valtage) はおよそ 70 V とあたえられる。

空乏層内に荷電粒子の軌跡にそって造られた electron と hole は、速やかにそれぞれ電極に掃引されてスパイク状のシグナルとして検出される。この間にうける拡散による広がりは数 μm 程度なので信号を受けとった電極の位置に粒子が通過したと特定できる。

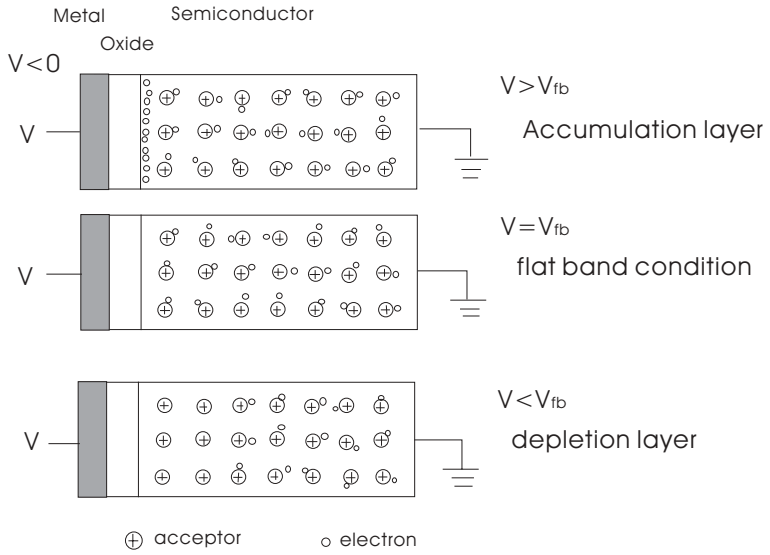


Figure 3.2: States of n-type MOS structure

electron と hole の半導体内における mobility μ_n、 μ_p は、シリコン半導体 (真性に近い半導体において比抵抗 $\rho \approx 4$ k Ω cm) では、室温において $\mu_n \sim 1350$ cm^2/V·s, $\mu_p \sim$500 cm^2/V·s となる [19]。空乏層の中では電場がおよそ 3 kV/cm となるために、粒子の通過によってできた自由電子が電極まで移動する時間は厚さ 300 μm として $t_{max} = 7.4$ ns で electron と hole の寿命 (~ 1 μs) に比べて十分に短くほとんど全ての電荷量を信号としてとりだすことができる。

P^+ 層は Strip 状になって分離されており個々の電極に 1 対 1 に対応する。各 Strip 間は SiO_2 膜及び Poly-Si により絶縁されているのでとなりあう電極間は電気的によく分離された状態になっている。

結晶の損傷や電場の局在などにより pn 接合面や酸化膜内部に電荷がたまることがある。このとき接合面では電荷は拡散されずに蓄積層 (accumulation layer) を形成する。この蓄積された電荷に対し、打ち消しあうだけの電場をかけなければならない。このときの電圧が flat band votage (V_{fb}) と呼ばれる。Fig.3.2 に印加電圧毎の SSD 内部の様子を示した図を載せる。デバイスが損傷を受けていない場合、$V_{fb} = 0$ と考えて良い。帯電量にたいする flat band voltage の増加量 ΔV_{fb} は以下の式であたえられる。[22]

$$\Delta V_{fd} = \frac{e d_{ox}}{\varepsilon} \Delta N_{ox} \tag{3.2}$$

d_{ox}、ε、ΔN_{ox} はそれぞれ SiO_2 の厚さ、誘電率、単位面積あたりの内部の帯電量である。

Fig 3.3 に典型的な片面読み出し SSD の概観図を示す。

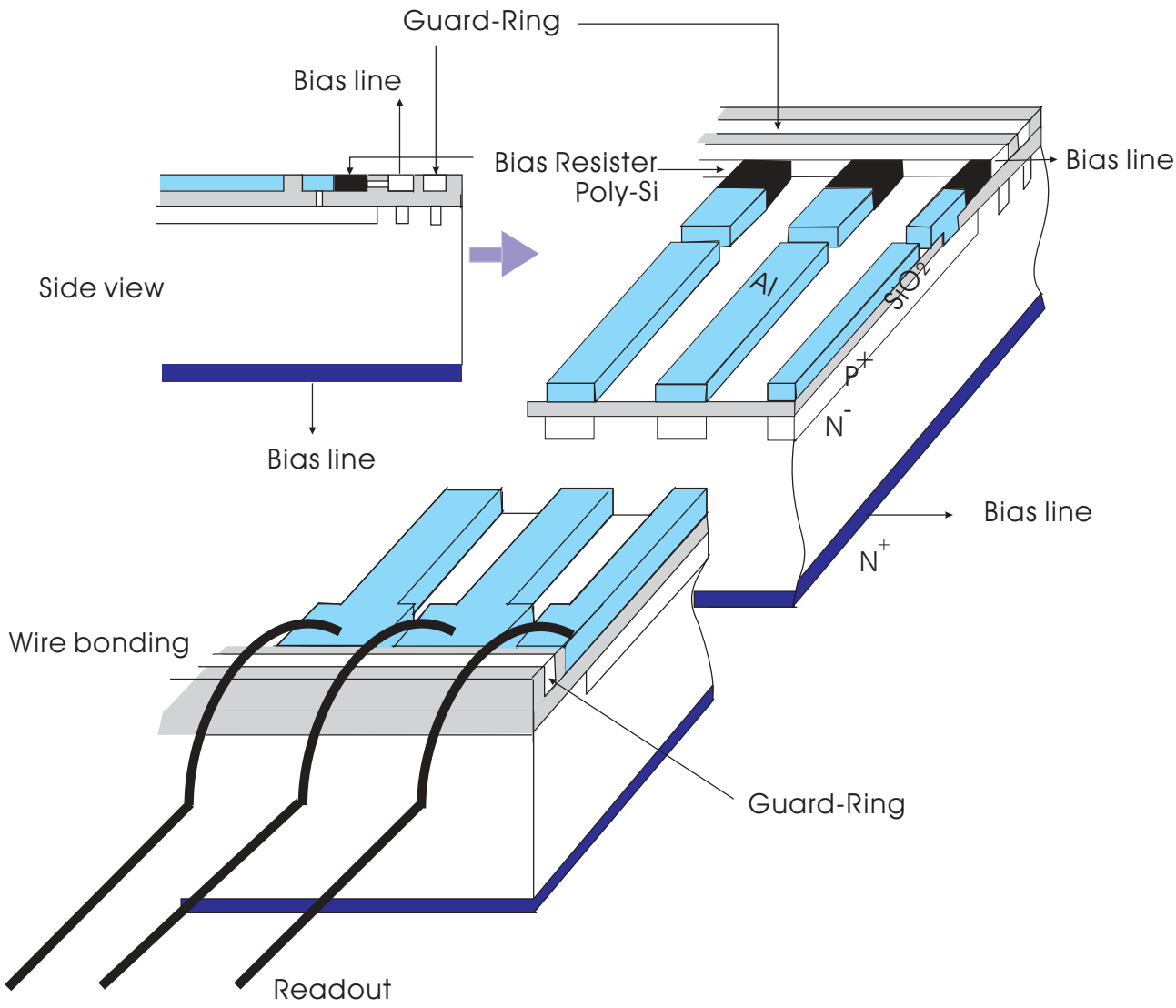


Figure 3.3: SSD genetral view

3.2 Radiation Damage

3.2.1 General Radiarion Damage Effect

E89-009 実験で SSD は半導体検出器を放射線高計数率下において長期にわたって使用する。ここで問題となるのが、放射線損傷による性能の劣化である。半導体検出器の放射線損傷は２つの種類があり、それぞれの原因によって特徴づけられる。

Surface damage

SSD 内において荷電粒子通過による ionization に起因する。
損傷のメカニズムは完全には解明されていないが以下のように理解されている。粒子の通過により酸化膜内部で e-h pair が生成される。電場がかけられていないと electron と hole はすぐに再結合されるが、電場がかけられていると electron は電極にすぐに掃引されるのに対し、再結合されなかった hole は電極間に電場の不均一さがあると電場の向きにそって Si/SiO_2 表面に移動し、そこでトラップされる。酸化膜表面において電荷が増加することにより
(1)leakage current を生じ、アンプに流れ込む電流のゆらぎからくる shot noise の原因になる。
(2)flat band voltage が増加し、全空乏層化する電圧が大きくなる。
(3) 絶縁膜の役割である SiO_2 が正に帯電することでバイアスの電場を乱しノイズが増加する。
などの変化が生じる。[20]

Bulk damage

SSD 結晶内部での non ionizing energy loss(NIEL) に起因する。
荷電粒子や中性子が SSD 内部での NIEL をおこし、Si 原子が結晶中の格子点から離れてしまうと点欠陥が格子中に形成される。点欠陥は e-h pair の生成や再結合の中心となる。その結果
(1) 暗電流 (Bulk leakage current) が増加し Noise の原因となる。
(2) 点欠損は疑似 acceptor となるため N 型半導体は P 型に近付いていき、全空乏層化電圧は照射量に比例して上昇する。

3.2.2 Expected Damage for E89-009

Fig.3.4 に エネルギー毎の Electron 、Neutron、Proton の NIEL による Displacement Damage を表す。この図から 300 keV の electron による NIEL は Hadron と比較すると十分小さい。従来 surface damage による損傷は bulk damage のものよりも十分小さいと考えられるが、電子線の場合 surface damage による損傷が大きくなると考えられる。考慮にいれないでもよい。散乱電子焦点面位置検出器として SSD が使用される為、電子線以外の粒子の通過はほとんどない。E89-009 において予想される放射線損傷は主に Surface damage によるものと考えられる。全実験期間を通じ、SSD が受ける照射量は最大で 10 $\sim$ 20 kGy (3 months) と予想される。

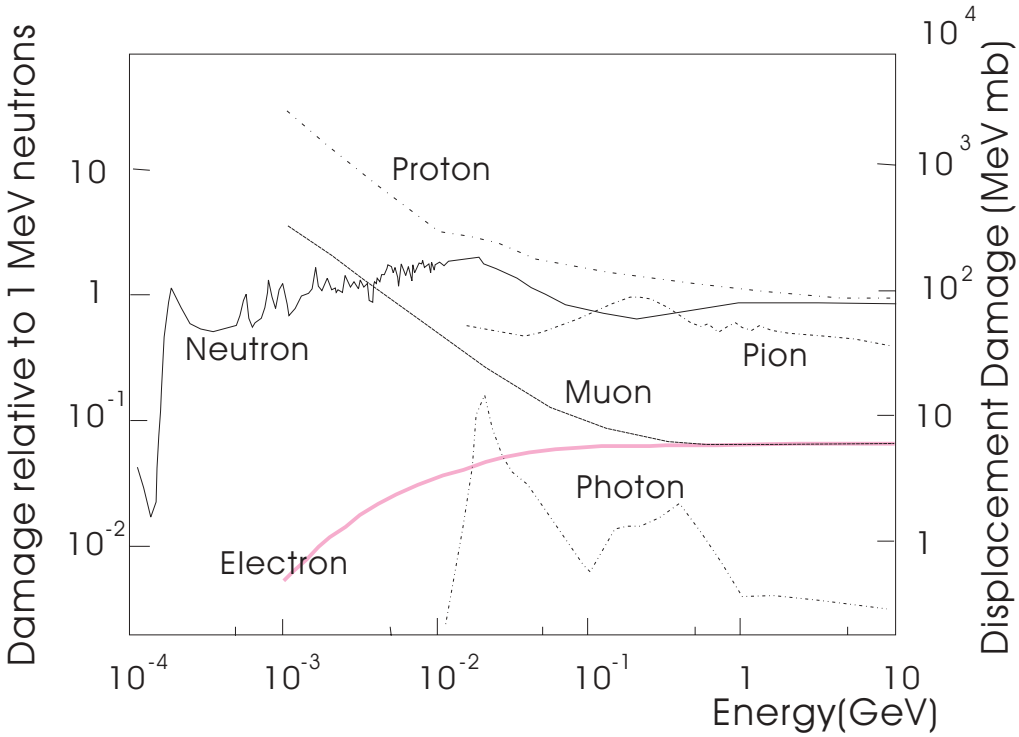


Figure 3.4: Non ionizing energy loss

3.3 Structure of the SSD for E89-009

E89-009 において、高計数率下での安定した動作が求められ、また実験が長期にわたることにより放射線損傷が予想されることから放射線損傷に対し、耐久性の高い構造が望まれる。

SSD は実験条件によりそれに適したデザインを選択することで実験計画にみあったデザインのものを製作することができる。以下に浜松ホトニクスと東北大学との議論の上、放射線耐性が強くなるよう設計された SSD のデザインと採用されたタイプを挙げる。

3.3.1 Readout Types of SSD

DC coupling Readout or AC coupling Readout

Fig 3.5 に示したように、AC 結合読み出しと DC 結合読み出しの 2 種類の読みだし方法がある。

AC 結合読み出しは、SSD と Al 電極間に SiO_2 膜をはさむために、SSD 内部で発生した leakage current が直接回路に流れてこないという利点がある。leakage current の増加が予想されるため、読み出しの方式としては **AC 結合型を採用** している。図はそれぞれの読み出し方式について P^+ 側から読み出した場合について示している。

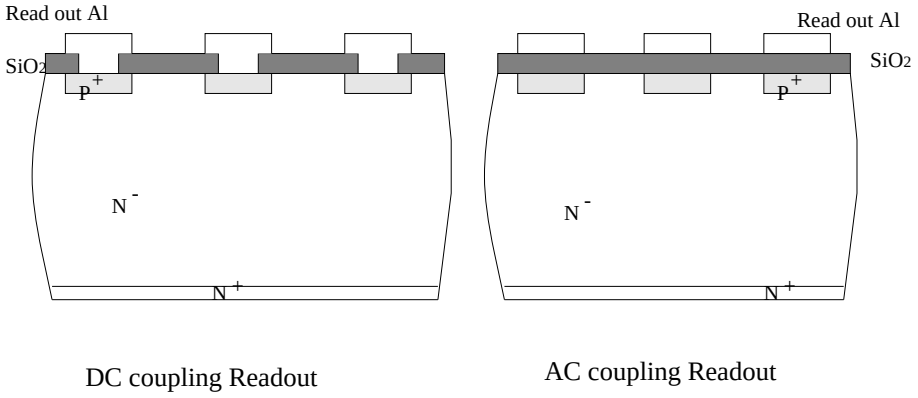


Figure 3.5: Readout method 1

All-channel Readout or Charge-division Readout

図に示す読み出しはそれぞれ All-channel Readout、Charge-division Readout と呼ばれる読み出しの方式である。All-channel Readout が全チャンネルを読み出しているのに対し、Charge-division Readout は、数チャンネル間隔で読み出している。後者は Readout electronics を節約できる利点があるが、高計数率の条件下では不向きである。読み出しの方式は、**All-channel Readout を採用**している。

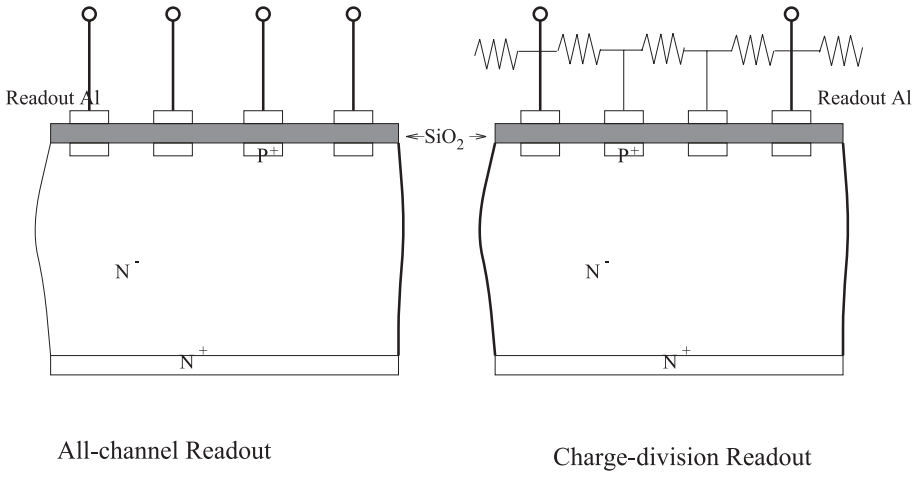


Figure 3.6: Readout method 2
図は片面読み出し、AC 結合型としたときの読み出し

Single-sided or Double-sided

SSD の読み出しには、片面読み出しと両面読み出しがある。片面読み出しは SSD の片側からの読み出しで、1 次元の位置検出しかできない。基本的には P^+ 側で読み出す。一方、両面読み出しは 2 次元の位置検出が可能で P^+ 側の Strip と直交する N^+ 側の Strip があり、N^+Strip 間には Strip を分離させるために P stop 拡散層が形成されている。[23] 今回の仕様では、電子は横方向にのみ運動量によってわけられるので、**片面読み出しを採用**している。

Strip pitch , Width of Strip and Width of Readout Electrodes

Strip pitch を P、Strip 巾を W とした時に、W/P が大きいほど Full depletion voltage が小さくてすむ。しかし、W/P が大きければ隣合う Al 電極間の Capacitance が大きくなってしまいアンプの Noise が増加してしまう。[23] 求める分解能を満たすために Strip pitch は 700μ 以下が求められている。

以上のかねあいから、妥当な線として $W = 360\mu$m、$P = 500\mu$m が採用された。

Readout Al 電極の巾は Strip の巾よりも短い方が breakdown 電圧が高くなることが確かめられている。[24] このため、$W = 360\mu$m に対して Al 電極の幅を 352μm とし、P^+Strip 巾が Bias line 方向に長くなる設計になっている。

3.3.2 Bias Method

SSD のバイアスは P^+ 層と N^+ 層の電位差としてかけられる。

Al 電極は Preamp に直接接続されていてるため、Al 電極の電位はアンプを通じ GND 電位になっている。P^+ 層に負電圧をかけると SiO_2 膜内に Bias による電場が生じ電位差が大きくなり、帯電しやすくなってしまう。そのため N^+ 側にバイアスをかけ P^+ 層の電位を GND に接続する。こうすることで P^+ 層-Al 電極間の電位差を抑えることができる。両面読み出し方式の場合はかならずどちらかの電位が GND でなくなるために Al 電極との間の電位が大きくなり、放射線損傷に弱い構造になってしまう。

P^+ 層と GND の間に Poly-Si 抵抗がはさんである。この抵抗値が大きいほど Noise が減らせるが計数率や leakage current が生じた場合のこの部分での電圧降下が大きくなることが予想される。[23] 今回の SSD において Poly-Si 抵抗はおよそ 10MΩ のものを採用した。

さらにバイアス供給ライン上には、110 kΩ 保護抵抗が入っているので、leakage current が増大した場合電圧降下を考えなければならない。

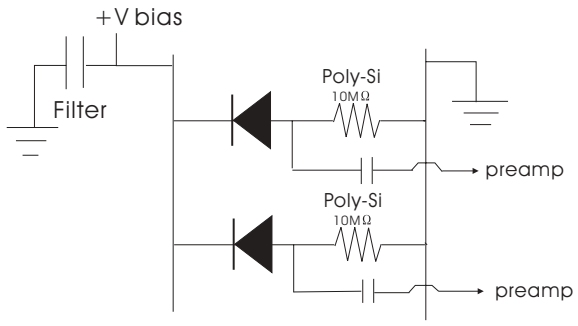


Figure 3.7: Bias method

3.3.3 Guard-Ring Structure

Metal-Oxide Semiconductor 構造 (MOS 構造) とよばれるこのようなデバイスの問題点として、デバイスの周辺部に局在的に強い電場が現れ、ウェハーを機械的に切断したことによる結晶の損傷もあり、leakage current が増大してしまい、検出器として働かなくなる領域になるということが挙げられる。より多くの領域を有効領域にするため Stip 一本分を有効領域を取り囲むように配置し、電場の整形と leakage current の吸い取りにあてた構造を Guard-Ring 構造という。この Guard-Ring 構造を採用した。

3.3.4 Total Design

Fig.3.8 に SSD の等価回路を示す。図中の Bias line から GND に接続されるような構造になっている。

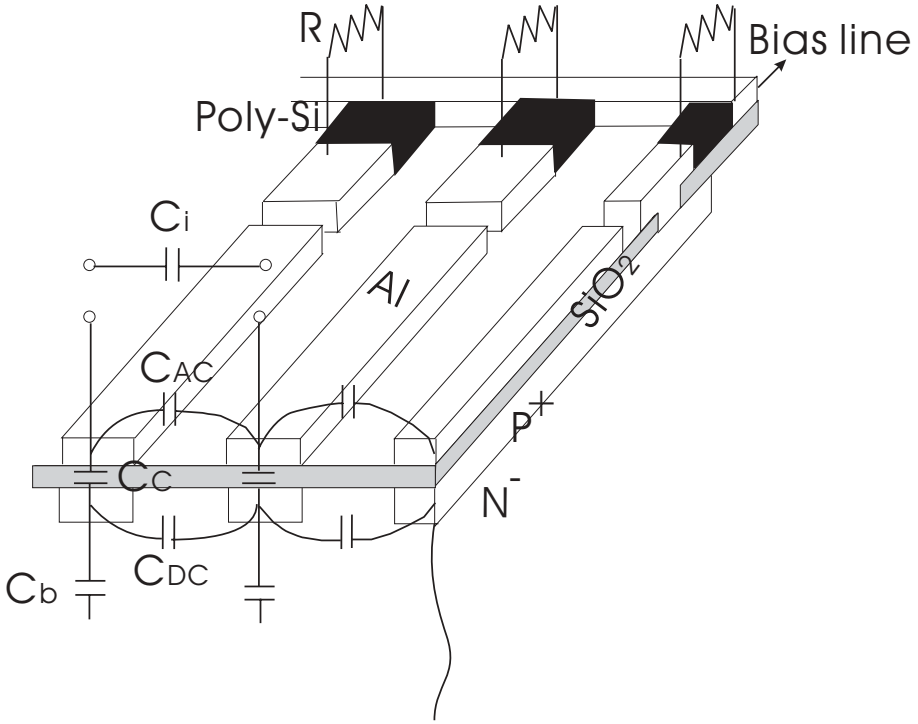


Figure 3.8: Equivalent circuit network of SSD

SSD の回路中には Fig. 3.8 中にあるような静電容量がうまれる。

● **Coupling Capacitance:** C_c
AC readout の Al 電極と拡散層間にあらわれる静電容量。

● **Interstrip Capacitance:** C_i

それぞれの Strip 間の静電容量でその値は、

$$C_i = C_{AC} + \frac{1}{1/C_{DC} + 2/C_c} \tag{3.3}$$

で与えられる。C_{AC} は Al 電極間の静電容量、C_{DC} は P^+Strip 間の静電容量。

● **Body Capacitance:** C_b
SSD の P^+N^- 間の静電容量。
● **Load Capacitance:** C_d
接続されているアンプ側からみた静電容量で、

$$C_d = C_{itotal} + C_b \tag{3.4}$$

で与えられる。C_{itotal} は readout pad と他の全ての readout pad 間 の静電容量として得られる。

C_c は他の Strip に電荷が広がるのを防ぐためにアンプの feedback Capacitance や C_{DC}、C_b と比べて十分に大きくなければならない。一方、C_i はできるだけ小さい方が noise を減らすことができる。

Table 3.1 に SSD chip の性質をまとめる。Fig.3.9、Fig.3.10 に SSD chip の図を載せる。

Table 3.1: SSD specification

Chip size	74 mm × 52 mm
Active Area	72 mm × 50 mm
Thickness	325 ± 15 μm
Readout Method	AC coupling
Number of Strip	144
Number of Readout Strip	144
Strip Pitch	500 μm
Strip Width	360 μm
Readout Al Width	352 μm
Bias Resistance(Poly-Si)	10 MΩ
Breakdown Voltage	$>$ 150 V
Total Capacitance	$<$ 20 pF

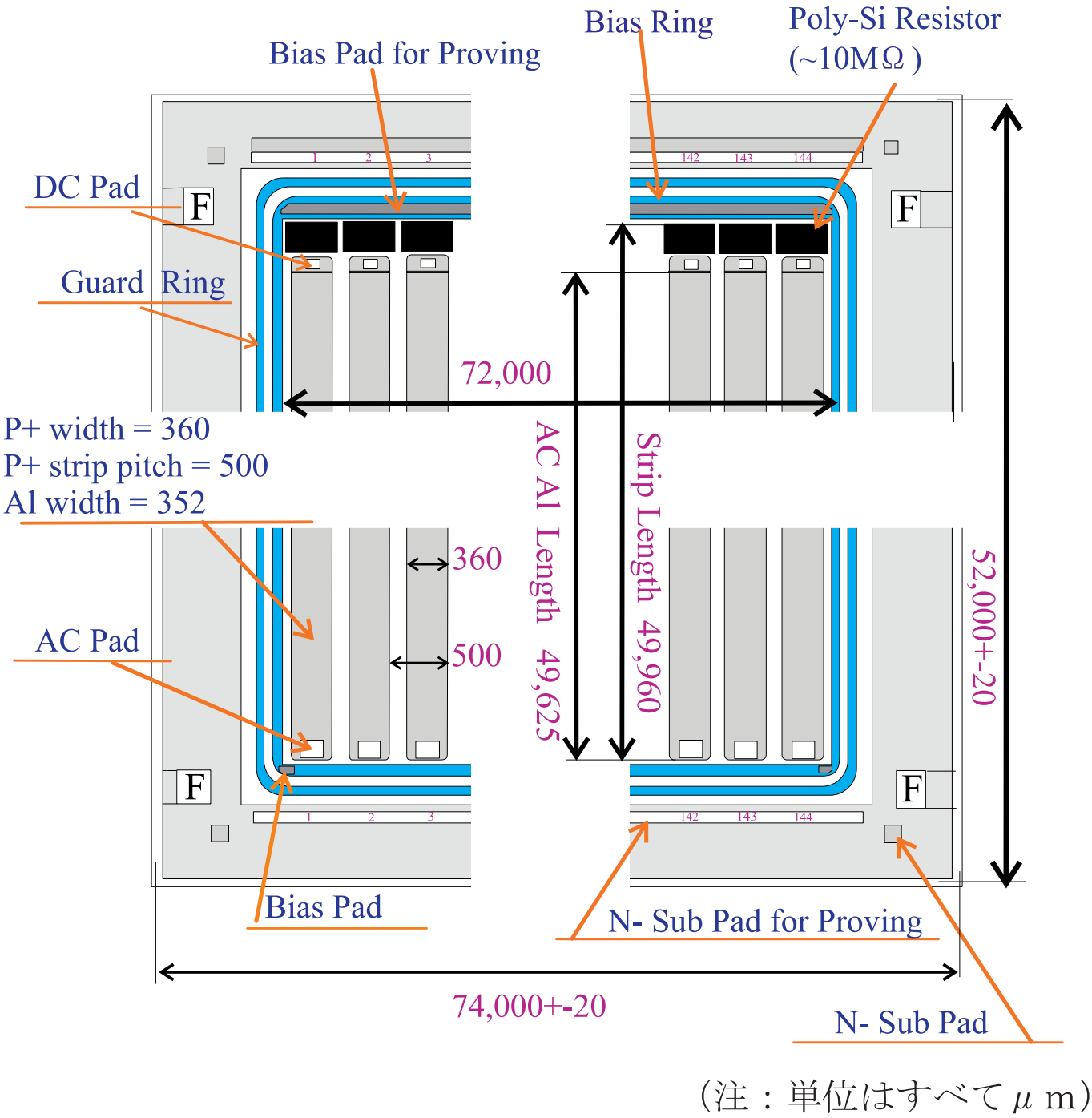
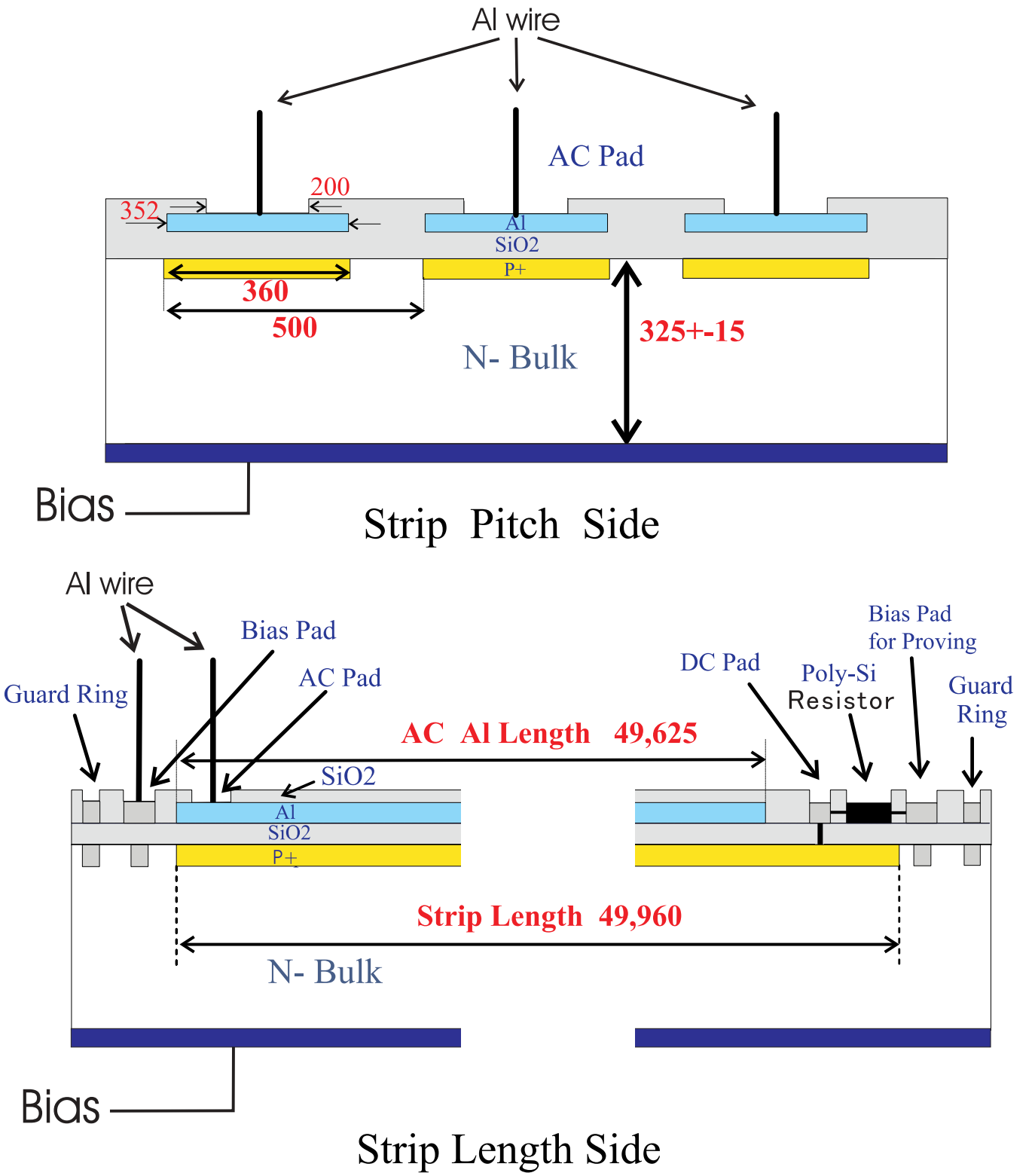


Figure 3.9: SSD structure (top view)



（注：単位は全てμm）

Figure 3.10: SSD structure (Side view)

3.4 Readout Electronics

SSD Readout Electronics は E89-009 共同研究グループである Houston 大学によって設計、製作された。

3.4.1 TEKZ Chip

全チャンネル読み出し方式を採用する為に高密度実装のアンプが必要となり、且つ高計数率下での安定な動作が求められる為に shaping amplifier は 100ns 以下の速い shaping time を持つ物が求められる。charge 読み出し方式にすることで Strip pitch 幅以下の位置分解能を達成することもできるが、読み出しに数 μs/strip かかってしまうため高計数率下での読み出しには向かない。求められる位置分解能も Strip pitch 程度で十分なために Binary 読み出し方式が採用された。以上の性能を満たす Preamp、Shaper、Discriminator 内蔵の TEKZ chip を採用している。TEKZ chip は California 大学 Santa Cruz 校において高エネルギー実験 (ZEUS) の為に開発された。SSD から読み出された信号は TEKZ に入力され、増幅、整形、デジタル化されて出力される。時間情報に関しては、SSD 下流側に時間測定用 Scintillator Hodoscope を設置している。SSD の時間分解能は Hodoscope との対応をとるためには数 10 ns 程度あれば十分である。TEKZ では Discriminator threshold 用電圧を変化させることで threshold を外部から remote control 出来るようになっている。

TEKZ の仕様を Table 3.2 に示し、簡略化した回路図を 3.11 に示す。

Table 3.2: TEKZ specification

Size	5.385 × 4.904 mm^2
Number of channels	64
Shaping time	32 ns
Gain	164 ± 7 mV/fC
Output pulse width	40 ns
Output pulse height	800 mV

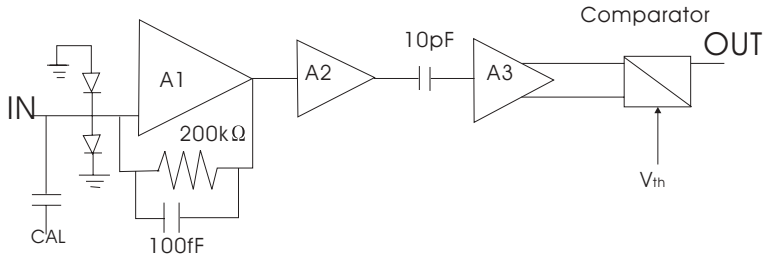


Figure 3.11: Functional circuit diagram of TEKZ

3.4.2 Front End Board

SSD と TEKZ chip は Front End Board (FEB) と呼ばれる一つの基板上に装着される。SSD からの readout channel は 144 ch であるので、一枚の SSD にたいして 3 つの TEKZ chip を取りつける。TEKZ からのデジタル信号は TEKZ chip 1 つに対し 1 本の 64 pin flat cable を介して ECL Driver Board に送られる。

SSD bias 用電圧、FEB を動作させる電圧 (+6 V)、TEKZ の threshold controll 用電圧も 64pin flat cable、ECL Driver Board を介して送られてくる。(threshold は 1 つの SSD においては全 channel 共通)

FEB 上には計 3 つの flat cable connector が設置され、TEKZ threshold、SSD bias 調査用の端子がプリントされており、実際の threshold 、印加電圧を調べることが出来る仕様になっている。

3.4.3 ECL Driver Board and Multihit TDC

高計数率の信号をすべて読み出すために、TDC は Multihit TDC を用いる。E89-009 において TDC は LeCroy 社製 FASTBUS Multihit TDC (1877) を用いた。1877 TDC は ECL 入力のために、入力信号を ECL に変換する必要がある。そのため、マキシム社製 dual ECL driver chip (MAX906) を用いて TEKZ logic signal を ECL logic signal に変換する。この chip は flip-flop 回路により外部 clock と AND をとって出力する方式のものである。1 つの chip で 2 つの signal を ECL signal に変換できる。

一枚の ECL Driver Board 上には入力 48 channel 分の変換を行なうための 24 個の ECL Driver chip と 50 MHz clock 信号出力用 chip が取り付けられている。また SSD bias、FEB 用電圧、threshold controll 用電圧 ラインがプリントされており、この board に直接入力することで電圧を供給できる。

Fig. 3.12 に SSD chip と FEB の図を示す。

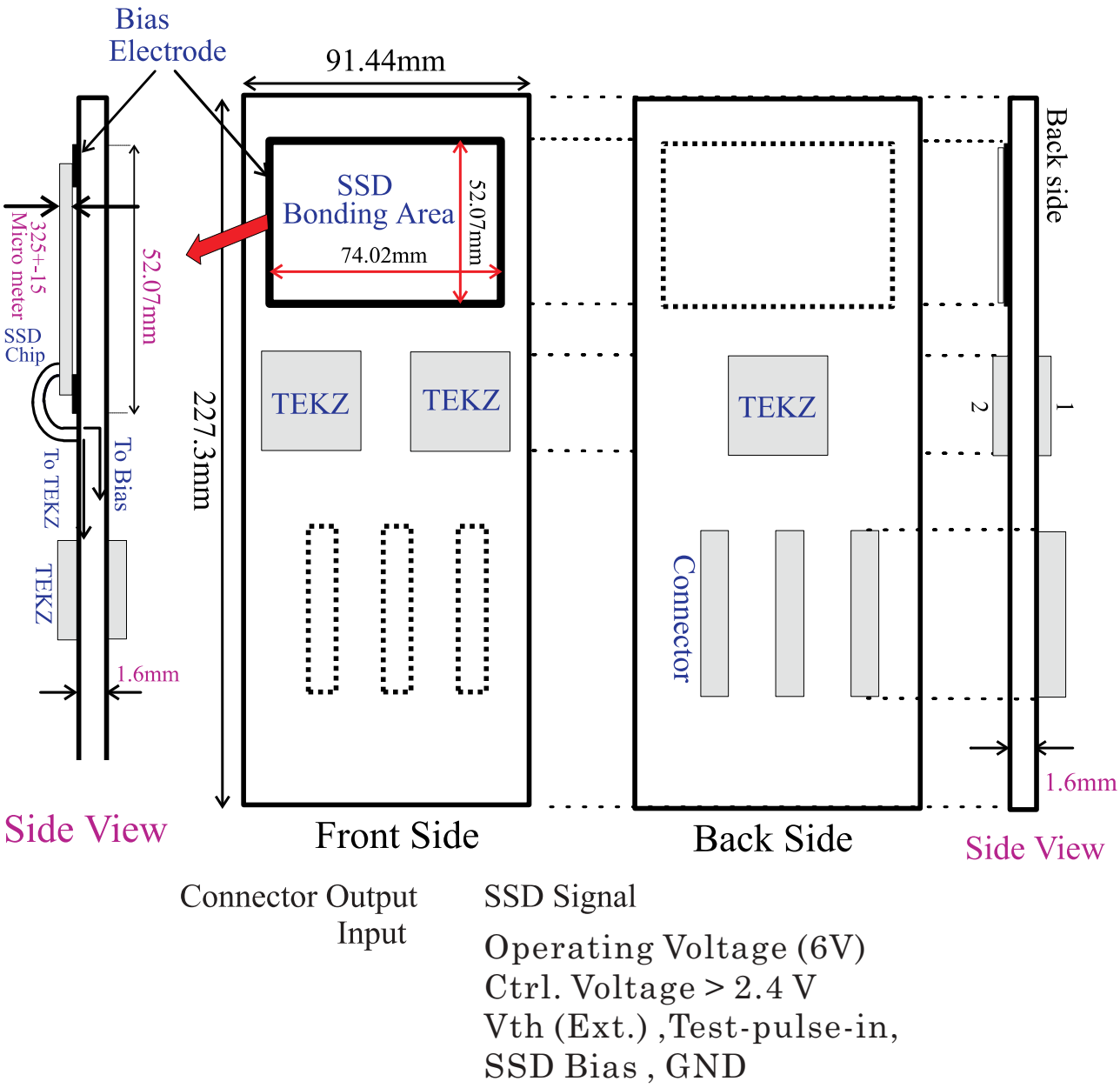


Figure 3.12: Front End Borad

Chapter 4

SSD Irradiation Experiment

E89-009 実験のために開発した SSD に対し、放射線損傷耐性という点における検出器使用限界を探るのを目的として電子線ビームを直接 SSD に照射し、性能の変化を測定する実験を行なった。

放射線損傷により、酸化膜帯電による直接的な full depletion voltage の増加や、leakage current 増加にともなう Poly-Si 抵抗部分による電圧降下による間接的な Bias 用電源の出力電圧に対する full depletion voltage 増加にともない一定印加 Bias 下における検出効率が保証されなくなると考えられる。

Full depletion voltage は、Bias に対する C_{total} の測定、SSD 自身にかかる Bias にたいする leakage current を測定することにより得られる。しかし、この手法を実際の実験期間中に行なうことは非現実的なことといえる。

そこで今回の実験ではそれらの代わりに検出効率、Noise level を測定した。ビーム照射時に Secondary Emission Chamber、Beam Profile Monitor を使用しビーム量、ビーム面積を測定し照射量を導出した。10 kGy 毎にビームを止めて ^{90}Sr (3 MBq) 線源を用いてビーム照射部分の検出効率の測定、Random noise を使用して Noise Level を測定した。その結果より照射量に対する性能の変化、測定器としての性能を議論する。

4.1 Experimental Setup and Method

本実験は平成１２年１１月東北大学原子核理学研究施設において 200 MeV electron beam (pulse mode) を使用し行なわれた。照射中のセットアップ簡略図を Fig. 4.1 に示す。

実験はビーム照射とビームを止めて検出効率、Noise level 測定を繰り返しおこなった。

ビーム照射中は読み出し回路は off にしたが、SSD には Bias 100 V を印加した。

4.1.1 Radiation Dose

照射量を求めるために、通過粒子数および照射面積の測定が必要となる。Fig. 4.1 中でしめした、SEM、BPM はそのための検出器でそれぞれ以下のように動作する。

SEM : Secondary Emission Chamber

２次粒子放出による２次粒子の電荷を測定する電離箱。集められた電荷は Current Integrator により 10^{-10} C 毎にパルス化され出力される。このパルスをスケーラーで数え電荷量とする。検出効率は 10%と較正されているので 1 nC/signal。

BPM : Beam profile monitor

Chamber 内で粒子の通過により電離した電荷量を 1.27 mm 間隔で基盤にプリントされた strip 電極で、電流値として読み出せ、後段の Buffer アンプで電圧値に交換される。Buffer アンプで

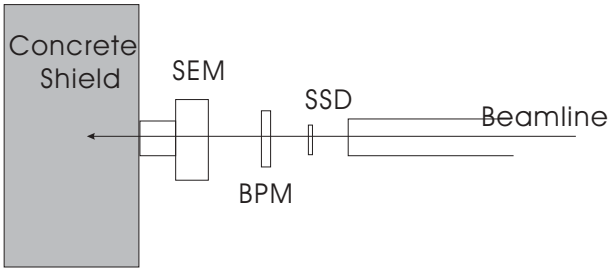


Figure 4.1: Setup during irradiation
SEM:Secondary Emission Chamber as a current monitor,
BPM:Beam Profile Monitor as a beam size monitor

は 32 strip のうち 1 strip ずつ clock で切りかえることにより strip 番号を時間に変換する。出力をデジタルオシロスコープで記録することによりビームの形をモニターする。Fig. 4.2 にデジタルオシロスコープで読みだした時の図を示す。

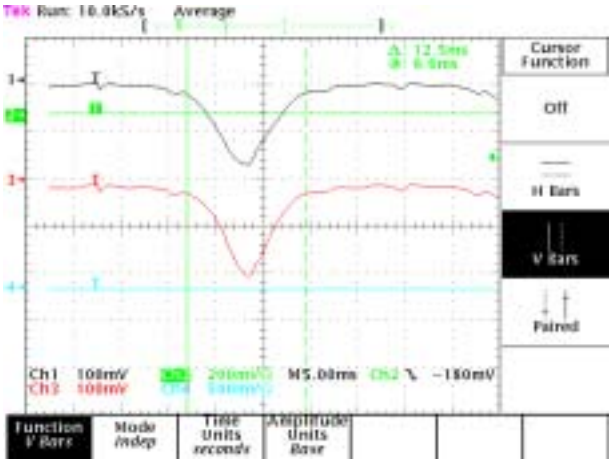


Figure 4.2: Beam profile measured by BPM
BPM をデジタルオシロスコープで読みだし、平均化した図
上線が Y-profile を示し、下線が X-profile を示している。
1 ms が 1 strip (1.27 mm) に対応している。

放射線照射実験において照射量を示す量としていくつかの単位が論文中に使用されている。

- Gy
  放射線が物質を通過した時のエネルギー損失から求める。Gy=J/kg
- rem
  100 rem=1 Gy
- $particles/\mathrm{cm}^2$
  単純に粒子が単位面積当りに通過した量を示し、エネルギー損失によらない。

今回照射量を表す量として Gy を使用し、あわせて $particles/\mathrm{cm}^2$ (e^-/cm^2) を表記する。

Dose Calculation

Q[nC]:ビーム量（SEM 値）S[cm^2]:ビーム面積 ρ[g/cm^2]:密度 d[cm]:厚さ
とした時、SSD 中でのエネルギー損失 E[J]、物質量 M[kg] は以下の式であたえられる。ただしエネルギー損失は電子を minimum ionizing particle として 2 MeVcm^2/g とした。

$$E = \frac{Q \times 10^{-9}}{e} \cdot 2 \times 10^6 \cdot e \cdot \rho d[\mathrm{J}] \quad , \quad M = \rho d S \times 10^{-3}[\mathrm{kg}] \tag{4.1}$$

よって、照射量 D[Gy] は

$$D = \frac{E}{M} = \frac{2Q}{S}[\mathrm{Gy}](= \frac{1}{1.6} \times \frac{Q}{S} \times 10^{10}[e^-/\mathrm{cm}^2]) \tag{4.2}$$

と与えられる。

Mesurement Method

beam profile が以下のような式にしたがう楕円形とする。See Fig. 4.3 .

$$G(x,y) = Aexp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-X_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-Y_0)^2}{\sigma_y^2}\right)\right\} \tag{4.3}$$

BPM より得られたこのを profile の x、y への射影を fitting して得られた σ_x、σ_y はそれぞれ

$$\sigma_x = 4.85 \pm 0.11[\mathrm{mm}], \sigma_y = 7.29 \pm 0.13[\mathrm{mm}] \tag{4.4}$$

この楕円の面積は

$$S_{\sigma_x\sigma_y} = \pi\sigma_x\sigma_y = 1.110 \pm 0.010[\mathrm{cm}^2] \tag{4.5}$$

面積 $S_{\sigma_x\sigma_y}$ の楕円内に beam が入る確率は

$$P = \frac{\int\int^{\frac{(x-X_0)^2}{\sigma_x^2}+\frac{(y-Y_0)^2}{\sigma_y^2}\leq 1} dxdyG(x,y)}{\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dyG(x,y)} = 0.3935 \tag{4.6}$$

と求められ、楕円中を通過した beam 量は

$$Q' = 0.3935Q \tag{4.7}$$

である。よって照射量は楕円内ではビームの分布は一様であると仮定すると平均照射量は

$$D = \frac{2Q'}{S_{\sigma_x \sigma_y}} \tag{4.8}$$

で求めることができる。今回はこうして求めた量を照射量とした。

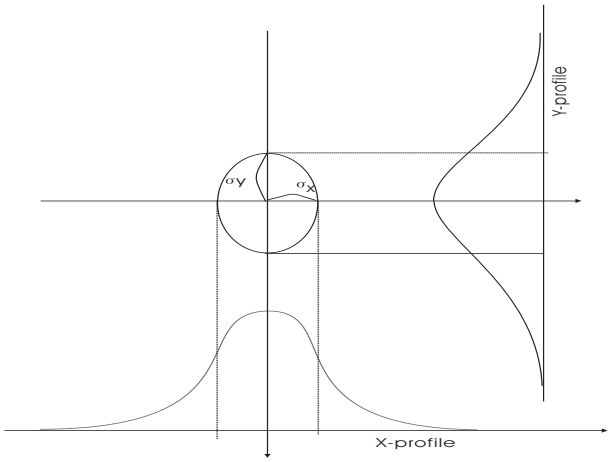


Figure 4.3: Beam profile
空間分布とその x、y 方向への射影

Table 4.1 に各照射毎の SEM の値 (Q) と積算の照射量を示す。一回の照射は約 10 kGy となった。

4.1.2 Bias Voltage

Eq.3.1 から厚さ 325μm を全空乏層化する電圧は 80 V と与えられる。Fig.4.4 にバイアス供給の簡略化した回路図を示す。実験結果中においてのバイアス表記は V_{sup}:電源からの出力電圧、V_{device}:Si ウェハー+Poly-Si 抵抗にかかる電圧 ($V_{sup} - V_{drop}(210k\Omega)$) である。

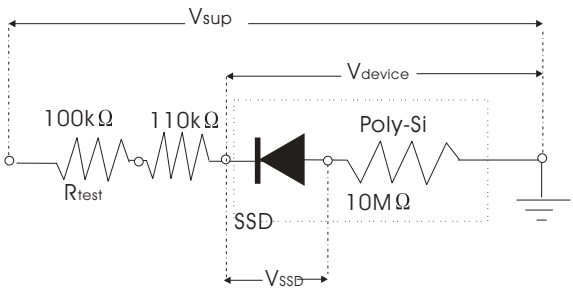


Figure 4.4: SSD Bias

Table 4.1: Dose of each irradiation and dose of integration

照射番号	Q [nC]	積算 Q [nC]	Total Dose [kGy]	Total Dose [$\times 10^{13} e^-/\mathrm{cm}^2$]
1	15024	15024	10.651±0.048	3.33±0.03
2	15026	30050	21.304±0.096	6.66±0.06
3	15020	45070	31.953±0.144	9.99±0.09
4	15042	60112	42.617±0.192	13.32±0.12
5	15024	75136	53.268±0.240	16.65±0.15
6	15013	90159	63.911±0.288	19.97±0.18
7	15029	105188	74.566±0.336	23.30±0.21
8	15035	120223	85.225±0.384	26.63±0.24
9	15017	135240	95.872±0.432	29.96±0.27
10	15034	150274	106.530±0.480	33.29±0.30
11	15011	165285	117.172±0.528	36.62±0.33
12	15065	180350	127.853±0.576	39.95±0.36
13	15023	195373	138.503±0.624	43.28±0.39
14	15050	210423	149.173±0.672	46.62±0.42
15	15042	225465	159.837±0.720	49.95±0.45
16	15049	240514	170.506±0.768	53.28±0.48

4.1.3 Comparator Threshold

TEKZ chip に内蔵された Comparator の thresholdV_{th} [mV] は外部から電圧 V_{ext} [mV] をあたえることで変化させることが出来る。[26]

$$V_{th} = V_0 + \frac{1257\ [\mathrm{mV}] - V_{ext}}{2} \tag{4.9}$$

V_0 は外部コントロールを行なわなかった場合の threshold 値を示している。FEB 上の半固定抵抗を調節することにより V_0 も手動で変化させることができる。

TEKZ chip 内のアンプの gain g は 160 mV/fC と与えられておりアンプには offset voltage V_{off} (入力電荷 0 の時に出力される電圧) が設定されている。今回使用した SSD における V_{off} は 140 mV である。threshold に相当する電荷量 C_{th} [fC] は以下の式で表すことが出来る。

$$C_{th} = \frac{V_{th} - V_{off}}{g} \tag{4.10}$$

4.2 Efficiency Measurement

照射量が増加するにしたがって、leakage current の増加、full depletion voltage の増加が予想される。また、leakage current の増加にともない Bias Resister (Poly-Si) による電圧降下が増大すると考えられる。SSD が全空乏層化していないと収集される電荷が小さくなり、検出効率が減少してくる。そこで正常な動作を保証するために、照射量毎の検出効率を測定した。

4.2.1 Method

^{90}Sr 線源 (3 MBq) からの β 線を、コリメーター 5 mmϕ を用いて照射部分にあてた。TDC は LeCroy 3377(Multihit TDC) を使用した。SSD を通過した β 線を厚さ 2 mm 、1.6 × 1.6 cm^2 プラスチックシンチレーターで検出し、それを Trigger として TDC の common stop に入力。また DAC を使用し、online で TEKZ discriminator threshold を変化させ、threshold 毎の検出効率を測定し、それを印加電圧を変えて数点測定した。

測定の回路図を Fig.4.5 に示す。

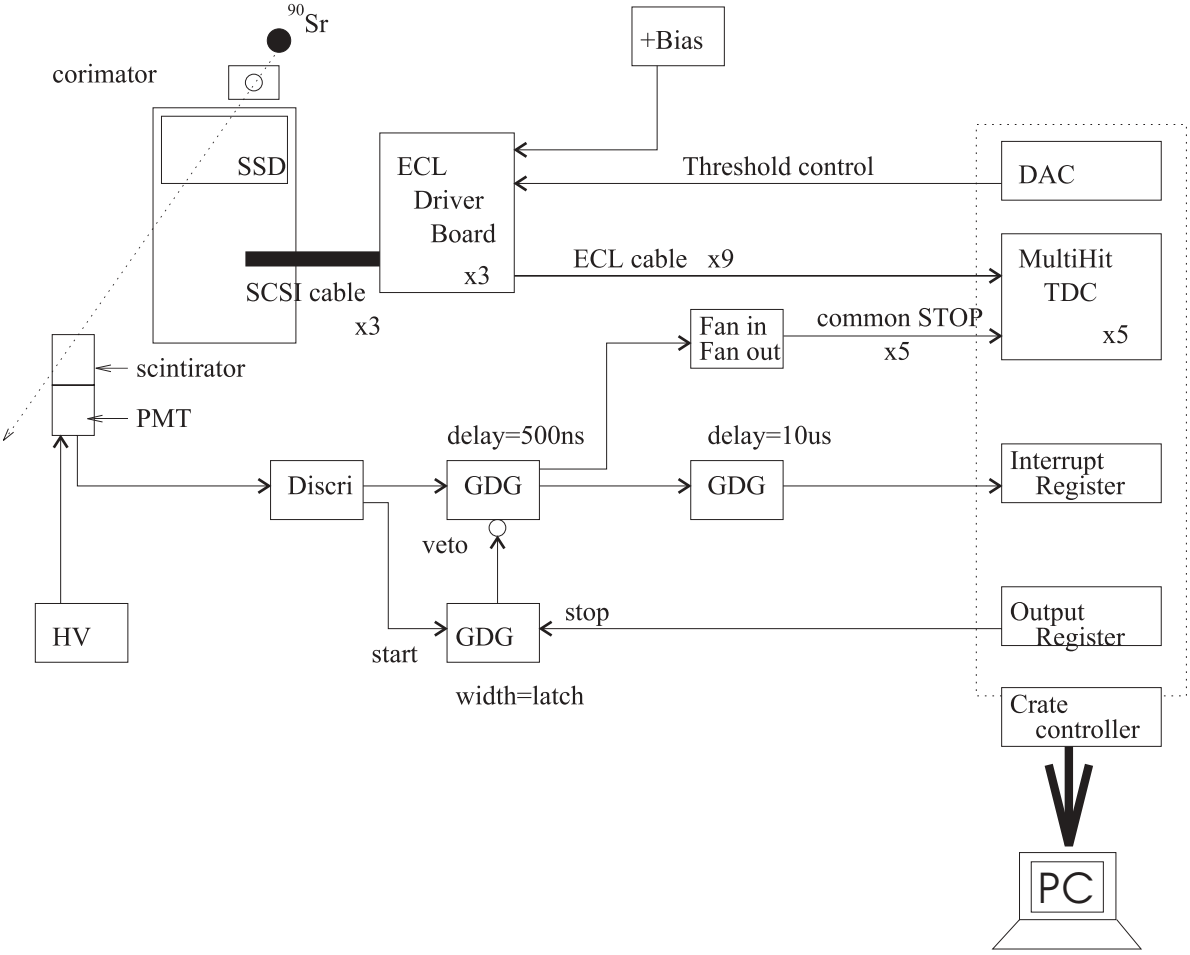


Figure 4.5: Circuit diagram to measure SSD efficiency

4.3 Noise Level Mesurement

照射量が増えるにつれて、leakage current の増加に起因する shot noise、酸化膜の絶縁悪化によるアンプから見た Capacitance の変化から Noise level が増加することが予想される。Signal に対して、Noise が十分低い状態が保たれているのか保証しなければならない。実験期間中、Strip 当り 10^5 Hz の signal に対し、Noise rate が 1%以下の 1 kHz 内におさめることが望ましい。

TEKZ threshold V_{th} に対し、時間あたりの Noise count rate N が従う式は以下の通りである。[21]

$$N = N_0 exp\left(-\frac{((V_{th} - V_{off})/g)^2}{2\sigma_n^2}\right) = N_0 e^{-\frac{C_{th}^2}{2\sigma^2}}$$

N_0 は shaping time τ_s の関数で、$\tau_s = 32$ ns のとき 4.4 MHz。ここであたえられている σ(fC) の値を Noise level と定義する。100 kHz 下での使用にあたり、S/N 比を 100 以上とするためには Noise count rate を 1 kHz 以下に抑えなければならない。threshold を 340 mV とすると $\sigma_n < 0.5$ fC が求められる。

Noise level $\sigma_n[e^-]$ はアンプに入力するノイズの電荷量を示しており、TKKZ の入力側からみた SSD の capacitance(C_{total}) およびアンプに流れる leakage current (i_{amp}) によって決定される。C_{total} に対する Noise level は測定されており、以下の式で与えられることがわかっている。[25]

$$\sigma_C(C) = 650e^- + 43 \times C_{total} \qquad [e^-] \tag{4.11}$$

SSD の tatal capacitance は 20pF 以下の設計となっているので照射前の Noise level は 1510 e^- (0.24fC) 以下となる。

アンプに流れる leakage current によるアンプから出力される shot noise 量は以下の式で与えられる。[21]

$$\sigma_i(i_{amp}) = \sqrt{\frac{2i_{amp}\tau_s}{e}} \tag{4.12}$$

τ_s はアンプの時定数。$\tau_s = 32$ ns（実際に使用しているアンプの時定数）としたとき i_{amp}=1 μA にたいして、noise は 630 e^- (~0.1 fC) に相当する。

σ_n は σ_C、σ_i に対し以下の式で与えられる。

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_i^2} \tag{4.13}$$

C_{total} が変化しないとしたとき i_{amp} が 20 μA 以下ならば 0.5 fC 以下に抑えることができる。

4.3.1 Method

単位時間当り 1 ch 毎のカウント数を測るために、Multihit TDC を使用した。LeCroy 3377 TDC は最大 32μs、depth 16 で記録が出来る為に、1 MHz 程度まではスケーラーとして使用が可能である。setup を Fig. 4.5 に示す、検出効率設定用の回路上で Trigger 信号をシンチレーターから、pulser で発生させた signal にかえて時間当りの noise rate を測定した。

4.4 Result

Fig.4.6 に 0 kGy、18 kGy、110 kGy 照射時に測定した Bias 毎の SSD 全体に流れる leakage current の図を示す。測定の方法は、電源直後に取り付けた Fig. 3.7 上の 100 kΩ 抵抗にかかる電圧から計算し SSD 前までの電圧降下を計算にいれたものである。照射量の増加にともない leakage current が増大している。この電流値は 144 ch 分に相当するものだが、leakage current が増加しているのは照射部分のみに起因するため照射された channel に集中して leakage current が流れていると思われる。

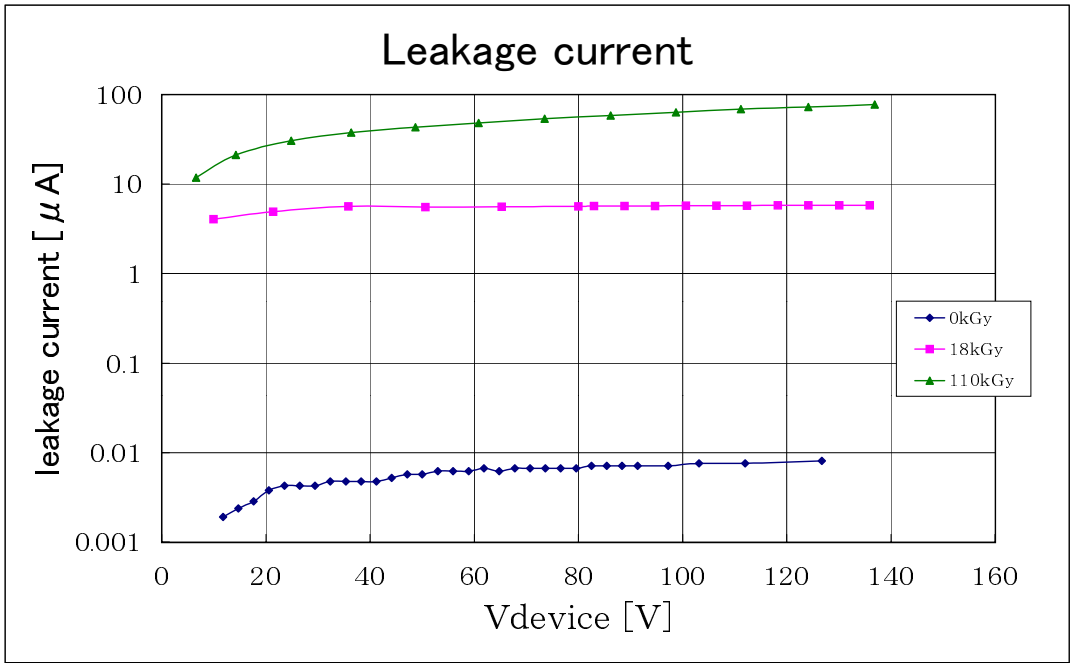


Figure 4.6: Leakage current vs applied bias voltage

Fig. 4.7 に threshold を変化させたときの検出効率を示した図をのせる。それぞれの図は照射量毎になっている。この図から 50 kGy まで $V_{sup} > 80$ V においては Bias の高低にかかわらず threshold に対する検出効率の変化はみられないことから $V_{sup} = 80$ V においてほぼ全空乏層化が保たれていることがわかる。

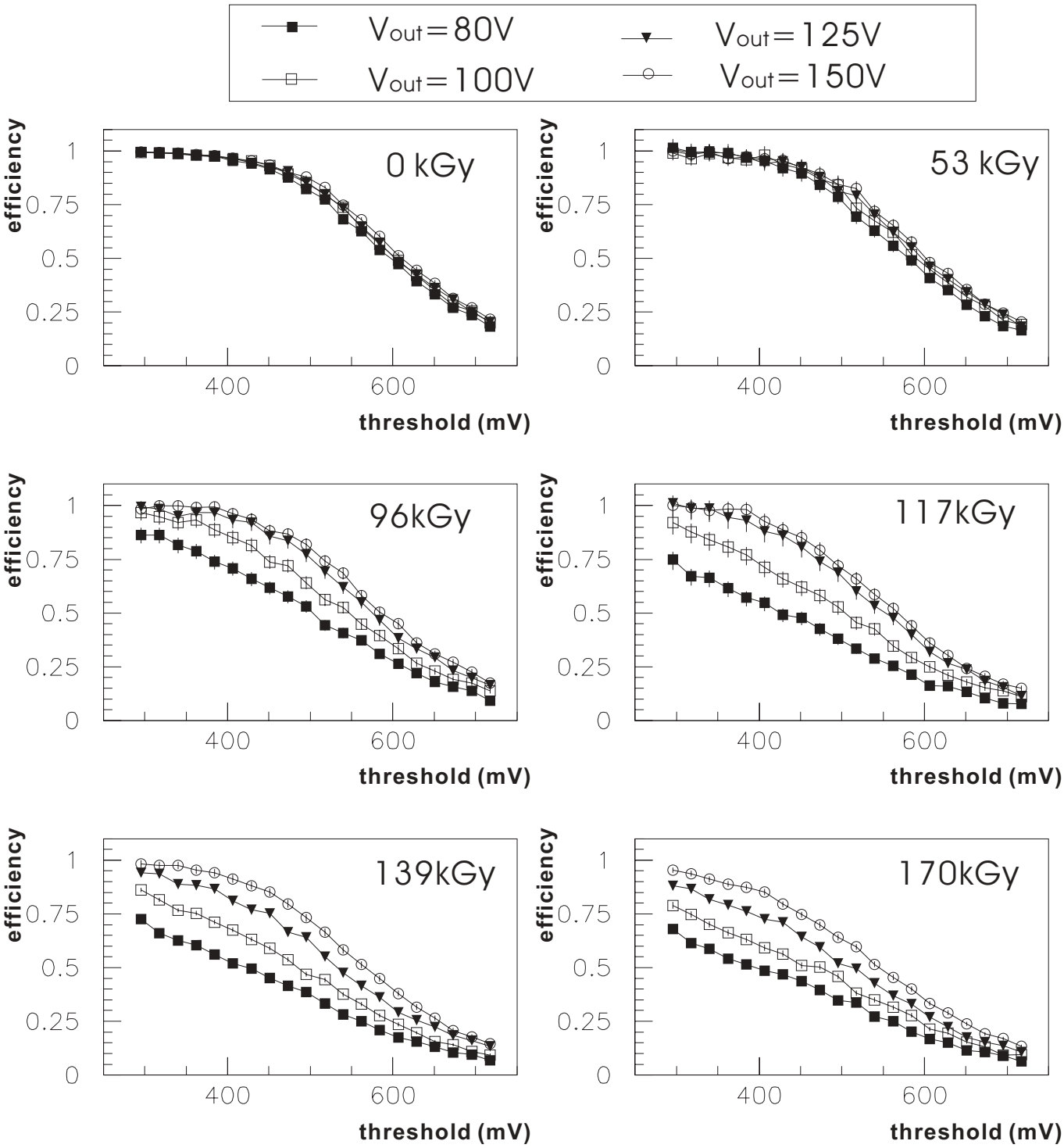


Figure 4.7: Efficiency v.s. threshold

Fig. 4.8 に照射量毎の threshold 340 mV における検出効率変化の照射量に対する変化を示す。照射量が 50 kGy まではこの threshold においては検出効率の低下がみられない。また V_{sup} を 150 V まであげることで 100 kGy まで検出効率を損なうことなく動作させられることがわかった。

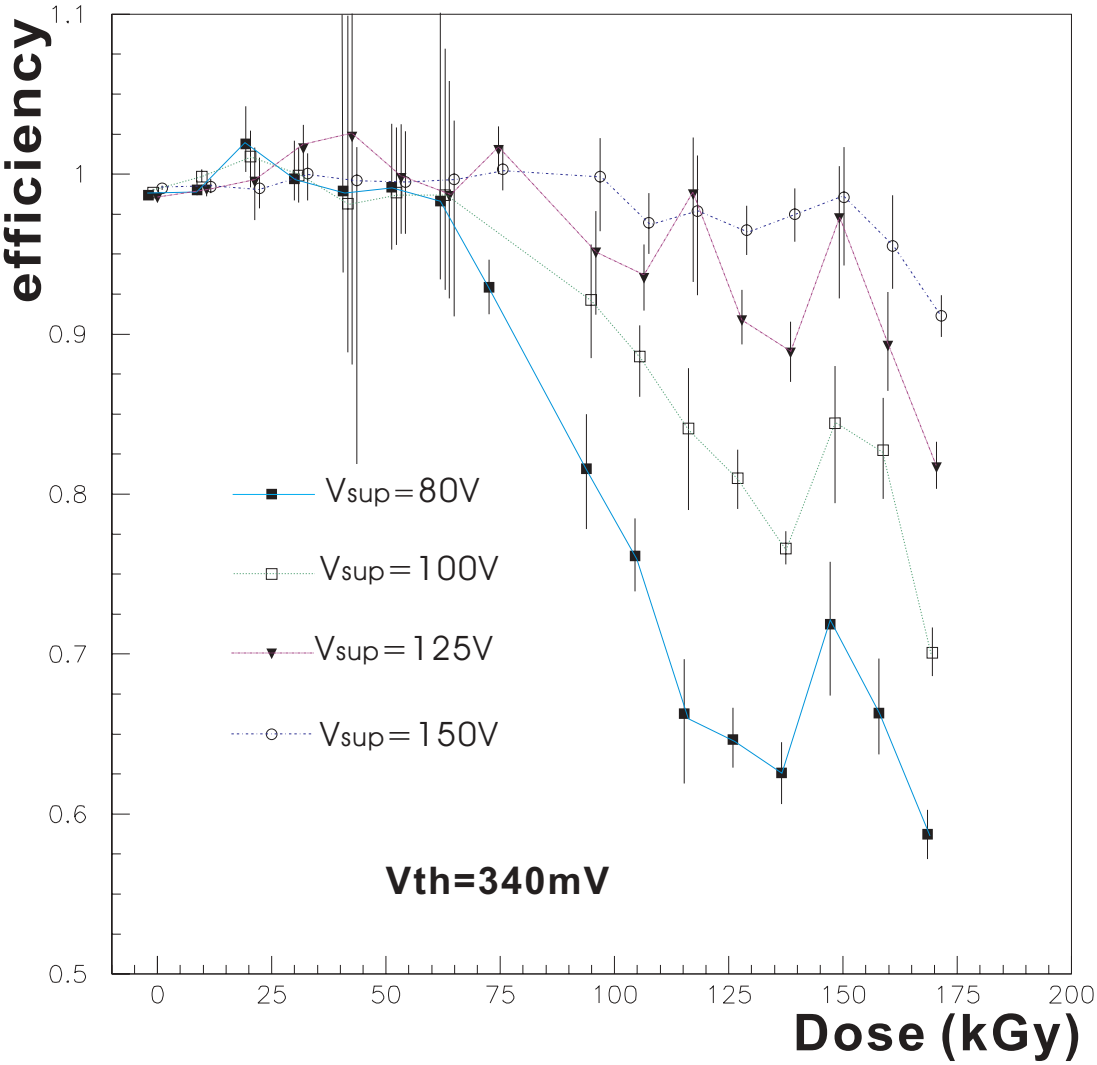


Figure 4.8: Efficiency v.s. dose

Fig.4.9 に channel 毎の実験前後の Noise level 変化を示す。照射部分の Noise level が明らかに増加しているのがわかる。Fig. 4.10 に照射部分及び照射部分からはずれている部分それぞれ 10 ch 分の照射量毎の Noise level 変化を示す図をのせる。照射部分の noise level は照射量に比例して増加しているが照射部分からはずれた部分の Noise level はほとんど変化がないといえる。照射部分の増加量も S/N 比 100 以上の目標が十分に達せられる値である。

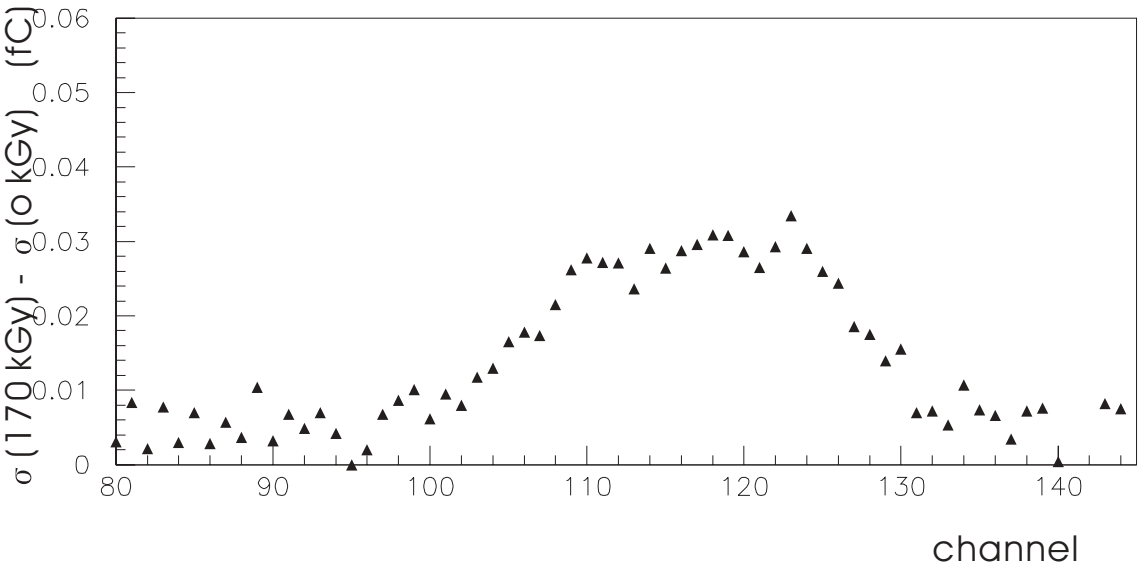


Figure 4.9: Noise level difference
実験前後の Noise level 増加量

今回の実験結果から照射量 100 kGy までは Bias 電圧をあげることで検出効率、S/N 比を損なうことなく SSD が使用できることが示された。

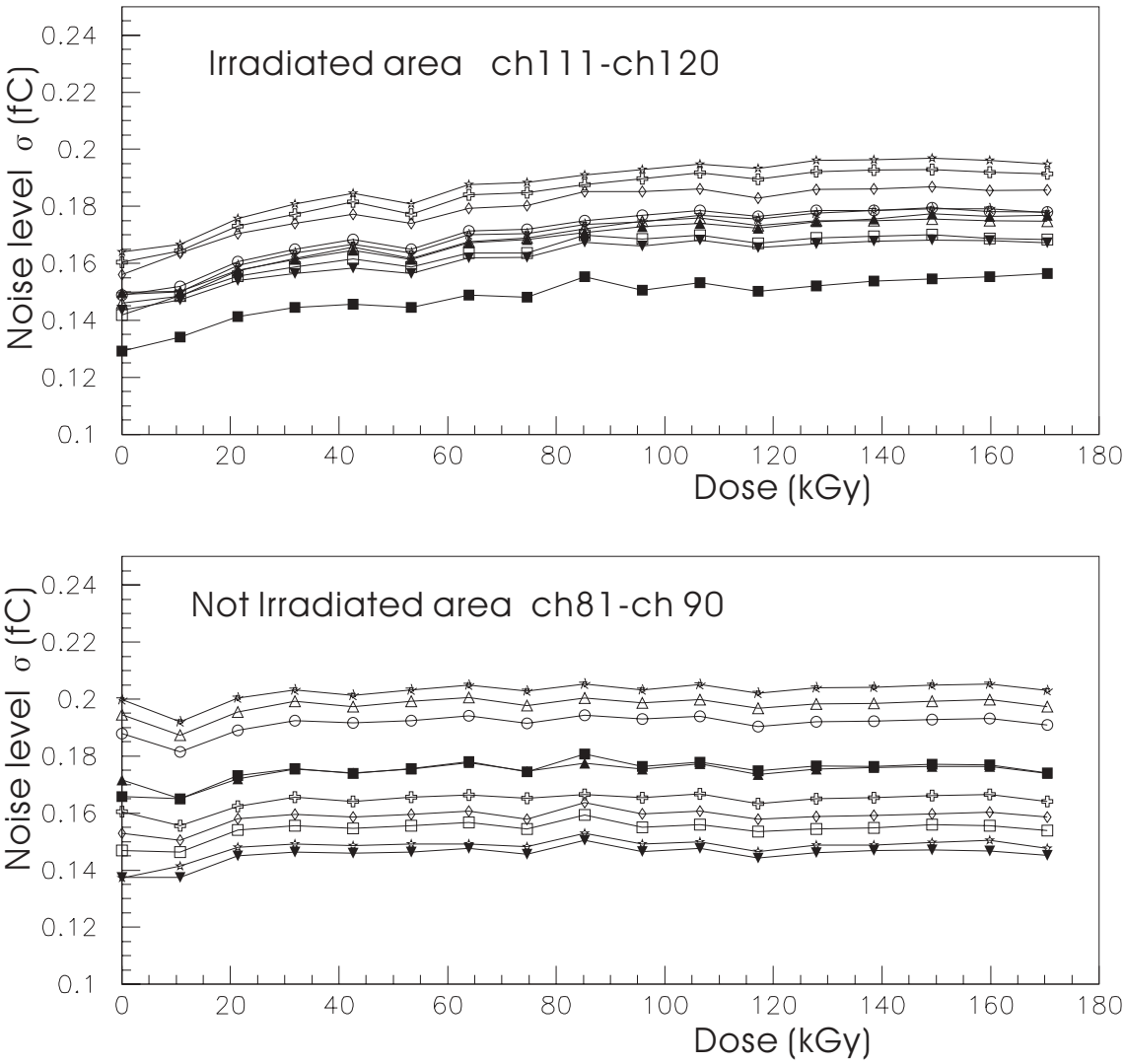


Figure 4.10: Noise level v.s. dose
上図:照射部分 10ch 下図:未照射部分 10ch

Chapter 5

SSD Performance at E89-009

実験期間を通じて、SSD が正しく動作しているかを監視する必要がある。実際の実験期間中におこなったモニターを説明し、実際の SSD の性能を述べる。

5.1 Monitoring System

Leakage Current

SSD に印加する電圧は CAEN 社製の HV supply module A504 を使用した。この module は remote で印加電圧設定、操作が可能であり、印加電圧値、電流値をモニター画面から読み出すことが可能である。

Table 5.1: CAEN monitor specification

CAEN	A504
V monitor resolution	0.04 V
I monitor resolution	10 nA
I monitor minimum	10 nA

Table 5.1 にこの module のモニター性能を示す。

Efficiency

SSD の検出効率は offline による解析において時間測定用の下流側におかれたシンチレーターホドスコープをトリガーとし算出する。

Noise Level

beam を使用せずに pulser で発生させたトリガーを使用して、random noise rate を threshold 毎に測定し、Noise level を測定した。

5.2 SSD Performance

Fig. 5.1 に焦点面上の SSD 配置図を示す。Fig. 5.2 に SSD の hit pattern 図をしめす。全 1440 ch 中 missing channel はわずかに 3 ch だけであった。

Plane 4 の SSD は実験期間中に一回交換したために今後図から省くことがある。（放射線損傷のためではなく電源供給ライン上の不具合により交換。）

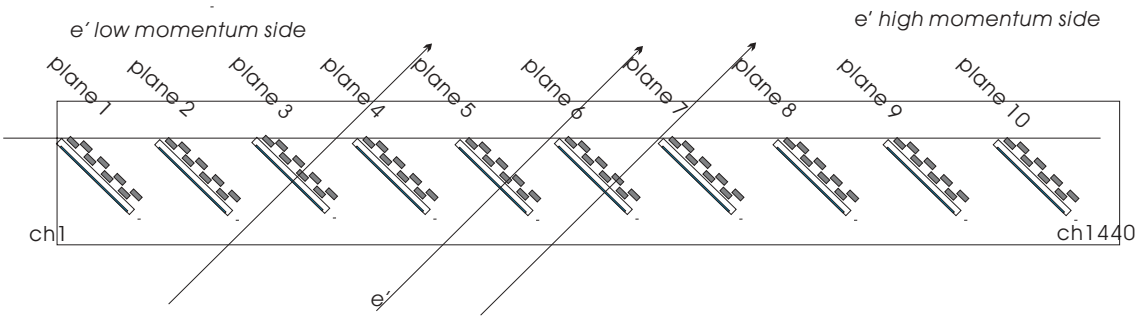


Figure 5.1: Alignment of the scattered electron focal plane detector

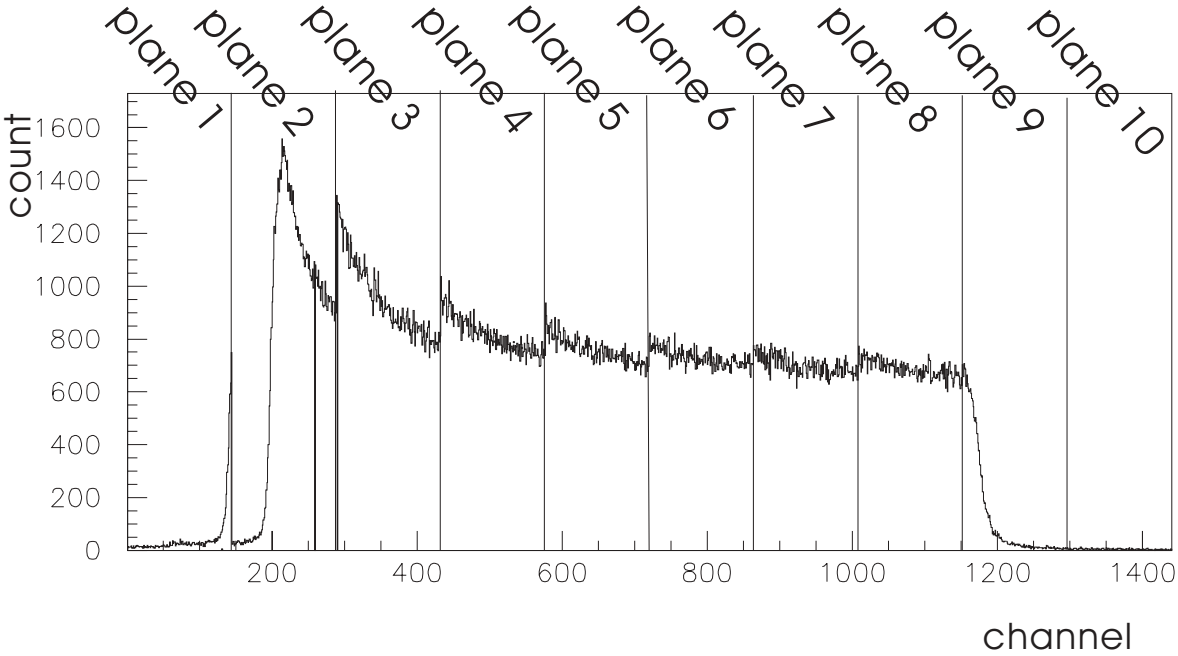


Figure 5.2: SSD hit pattern

5.2.1 Leakage Current

Fig. 5.3 に各 SSD の Bias line 上に流れた leakage current 変化の図を示す。

leakcage current が減少している部分はメンテナンス期間のためビームが全くなかった期間と一致している。各 SSD の leakage current 増加量は照射量にたいして比例している。Fig. 5.2 に示すように各 SSD 毎に照射量が異なっているが照射量がほとんど等しかった plane 5、6、7 は leakage current 増加量が等しくなっており、照射量にたいする leakage current は SSD の個性によらないことがわかる。

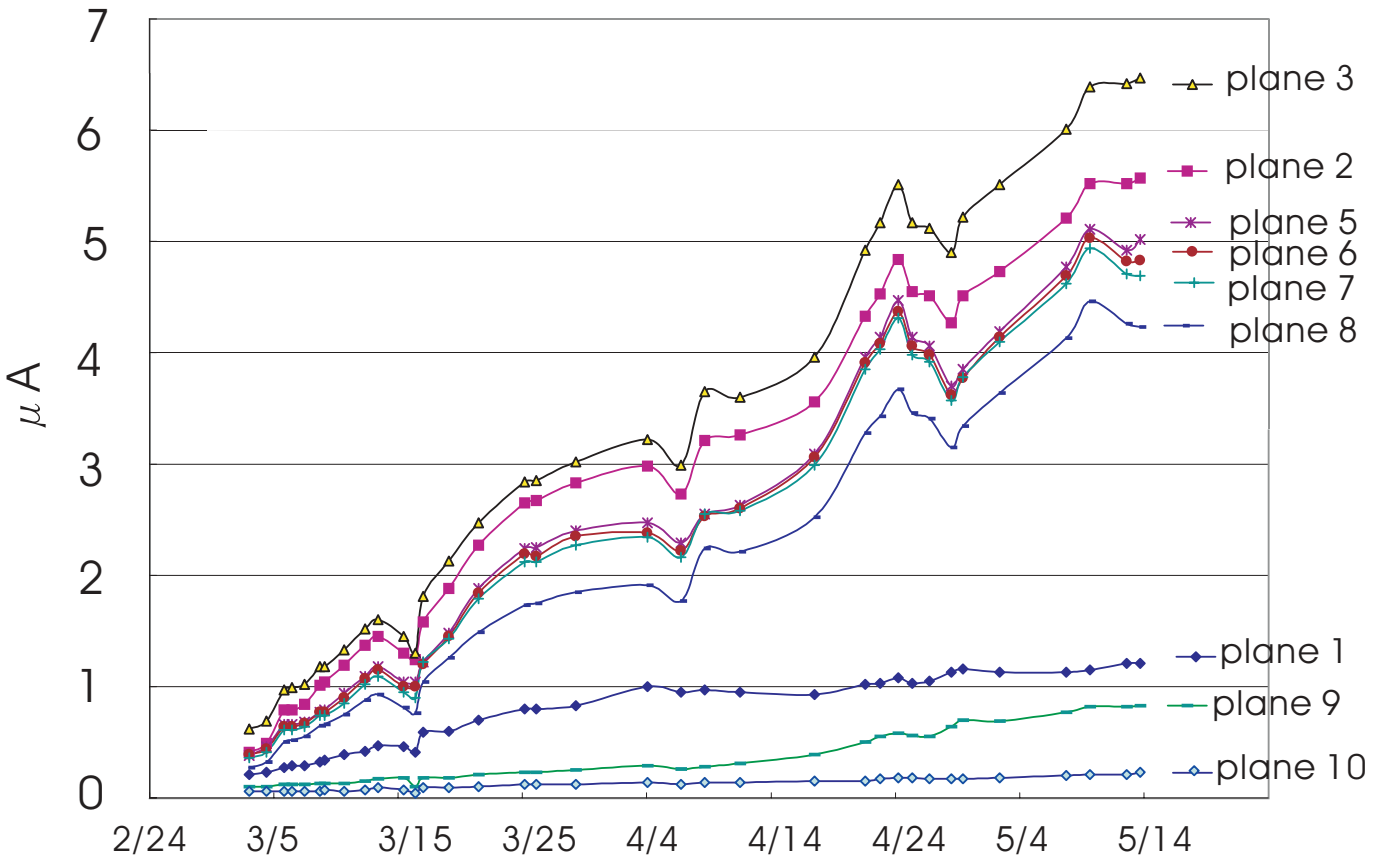


Figure 5.3: leakage current during E89-009
V_{out}=80 V、ビームが無い状態で測定

5.2.2 Efficiency

Fig.5.4 の検出効率の変化を示す。実験期間中の Bias は 80 V、threshold は 340 mV に設定されていた。この条件における検出効率は実験期間通じて 97% 以上であった。

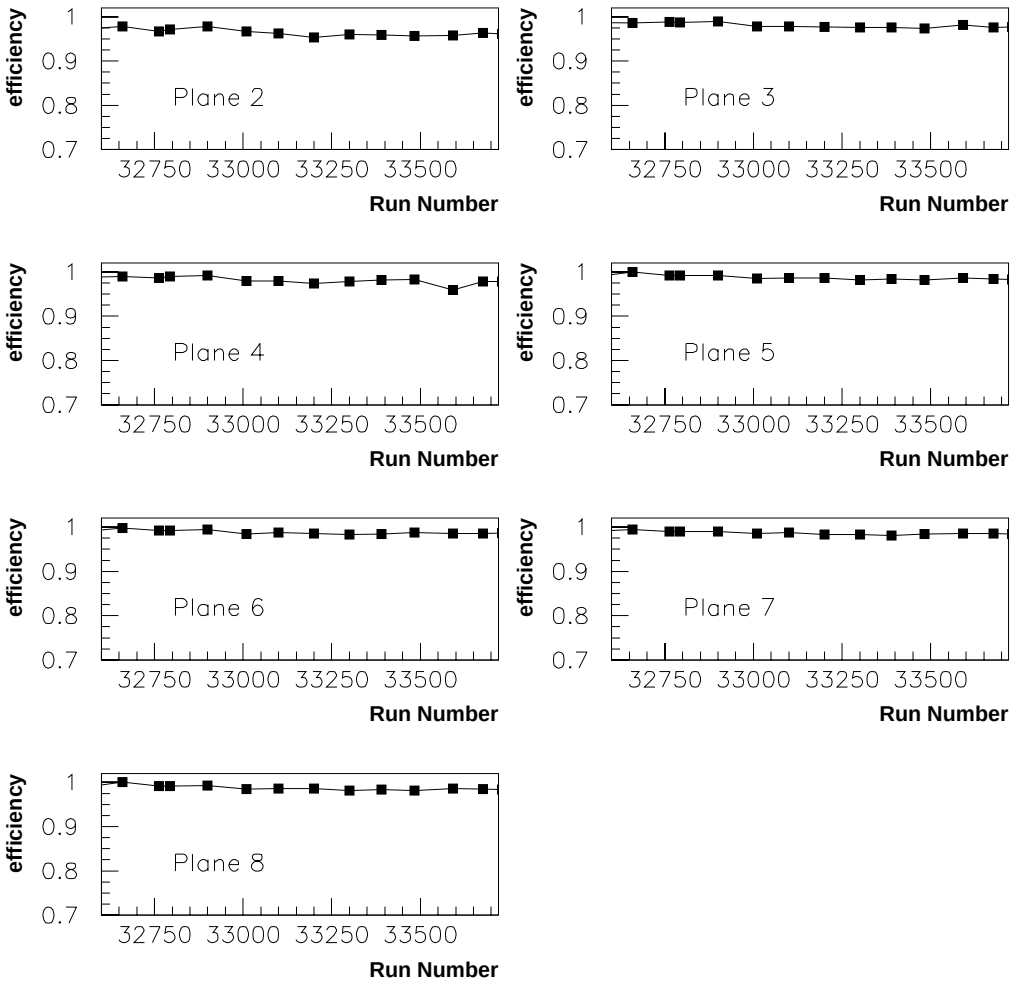


Figure 5.4: SSD Efficiency during E89-009
実験期間中を通しての plane 毎の $V_{sup} = 80$ V 、V_{th}=340 mV での検出効率

5.2.3 Noise Level

Fig. 5.5 に plane 毎の Noise level 平均値の変化を示す。この図からは照射量にたいする変化はほとんどみることは出来ない。

Fig.5.6 に実験前後の Noise level の差を channel 毎に示した図をのせる。比較の為に hit pattern 図を右上に添えた。この図から、照射量に比例した Noise level 変化があることがわかる。しかしこの変化量は微量であり性能は損なわれていない。

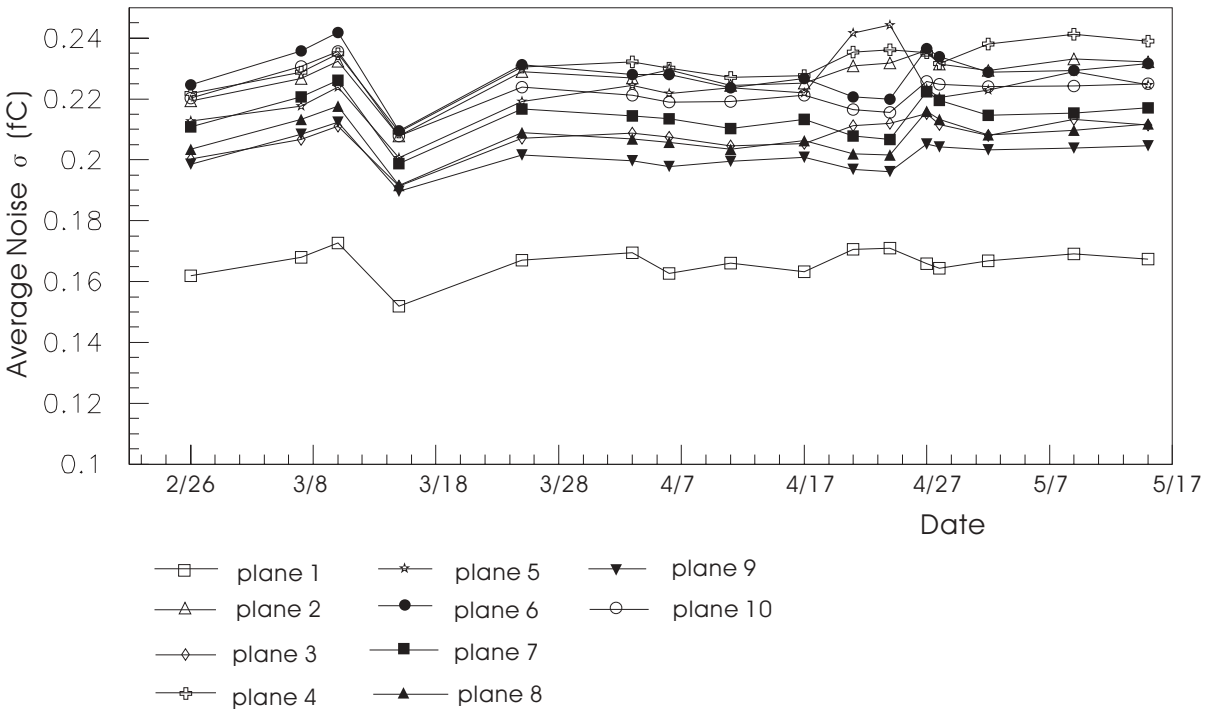


Figure 5.5: SSD average noise level σ
実験期間中を通しての plane 毎の Noise σ 平均値の変化

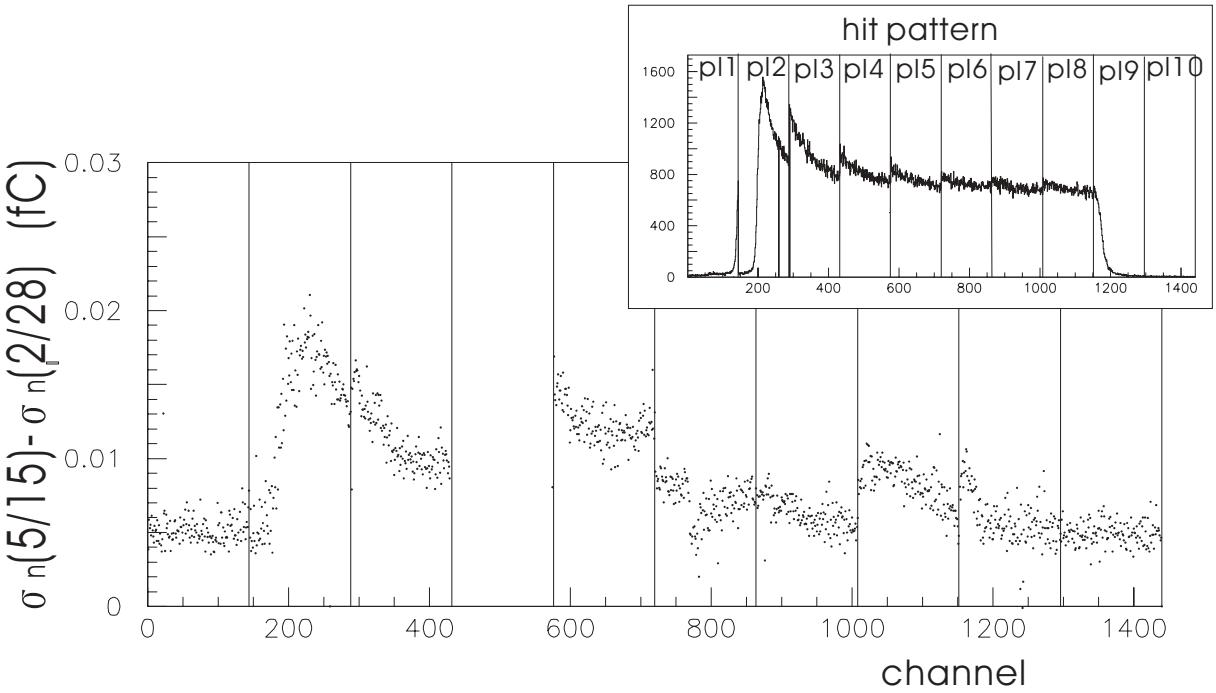


Figure 5.6: SSD Noise level σ difference
E89-009 前後 Noise level σ の差

5.2.4 Summary

3 カ月間の実験期間を通じ、検出効率が 97% 以上を保ち S/N 比が 100 を下回ることがなく開発コンセプトにあげられていた性能を全て満たしていたといえる。

Chapter 6

Summary

２０００年３月から５月にかけて $(e, e'K^+)$ 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験が行なわれた。電子線を用いた Λ ハイパー核分光実験は初の試みであった。この実験において散乱電子の位置検出器として開発された SSD を使用した。実験期間中において SSD は Noise rate 、検出効率の両方に関して性能の変化は見ることができなかった。

２０００年１１月に東北大学原子核理学研究施設において 200MeV 電子線 を使用して SSD の放射線損傷耐性に関する実験を行なった。この結果から E89-009 における照射量の５倍以上の照射量に相当する 50kGy までは Bias 電圧 80V においても検出効率を損なうことなく使用できることがわかり、E89-009 において性能の劣化が見られなかったことが裏付けられた。また照射量が 50kGy をこえても Bias 電圧をあげることで 100 kGy まで検出効率、S/N 比を損なうことなく使用できることがわかった。このことにより今回開発した SSD は電子線高計数率下において性能を損なうことなく長期にわたって使用出来ることが示された。

Acknowledgment

本論文の作成にあたり御助力、御協力下さった皆様に感謝致します。

橋本治教授には物理学の指導から、実験におけるサポートをいただき感謝しております。田村裕和助教授には物理学、実験学の指導を始め論文作成にあたっての細やかな指導を感謝いたします。中村哲助教授には実験、解析において御助力ご指摘いただき感謝いたします。高橋俊行氏には実験の準備、解析に対する御助力、御指導をはじめ実験や物理学をはじめとする日常の疑問に解答していただき感謝しております。藤井優氏には実験学、物理学、その他にわたり丁寧に御指導や解説をしていただき感謝しております。

原子核物理講座のスタッフ、学生の皆様には日常生活から実験と多岐にわたり御協力、また潤いをあたえてくださり感謝します。また加藤守夫氏、川村直子氏には日常におけるサポートをいただきありがとう御座いました。

核理研での実験にあたって、核理研や中間エネルギーグループのスタッフ、学生大勢の皆様に大変助けていただきました。深く感謝いたします。

JLAB における実験におきましては、Hampton 大学、JLAB スタッフまた Houston 大学のスポークスパーソンの E. V. Hungerford 教授及び回路の設計者である A. Lan 教授 には E89-009 実験において様々なご援助、御指導をいただき感謝いたします。

Bibliography

[1] Danysz and Pniewski, Phil. Mag. 44 (1953) 348.

[2] W.Brucknen et. al. *Phys. Lett.* 62B (1976) 481

[3] R. E. Chrien et. al. *Phys. Lett.* 89B (1979) 31

[4] M. A. Fasseler et. al. *Phys. Lett.* 48B (1973) 463

[5] H. Tamura et. al. *Phys. Rev.* C40 (1989) 479

[6] T. Hasegawa et. al. *Phys. Rev.* C53 (1996) 1210

[7] O. Hashimoto for the E336 collaboration *Nucl. Phys* A639 (1998) 93c

[8] T. Nagae *Nucl. Phys.* A676 (2000) 269c

[9] E. V. Hungerford *JLAB E89-009 Proposal*
http://www.jlab.org/exp_prog/proposals/89/PR89-009.pdf

[10] 今井憲一 原子核研究 Vol. 43 No. 6

[11] M. Sotona and S.Frullani *Prog. of Theoretical Phys. Supplement* No.117 (1994) 151

[12] Ed V. Hungerford *Prog. of Theoretical Phys. Supplement* No.117 (1994) 135

[13] Bennhold and L.E. Wright *Phys. Rev.* C39 (1989) 927.

[14] By SAPHIR collaborations (M. Q. Tran et. al.) *Phys. Lett.* B464 (1998) 331

[15] C. Hyde-Wright, et al *Proc. of the 1985 CEBAF Work shop*

[16] Yung-Su Tsai, *Rev. Mod. Phys.*46 (1974) 815

[17] W.J. Cummings, *SOS Handbook*(Jefferson Lab.VA)1996

[18] Particle Data Group *Eur. Phys. J* C 15 2000

[19] 近藤敬比古 特別講義ノート 1999

[20] R. Wunstorf *IEEE*44-3 (1997)

[21] E. Barberis et al. *Nucl. Instrum. and Methods* A364 (1995) 507.

[22] R. Wunstorf et al. *Nucl. Instrum. and Methods.* A377 (1996) 397.

[23] HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Catalog *Si Photodiodes and Charge Sensitive Amplifiers for Scintilation Counting and High Energy Physics*

[24] T.Ohsugi et. al. *Nucl. Instrum. and Methods.* A342 (1994) 22.

[25] E.Barberis et. al. *Nucl. Instrum. and Methods.* B32 (1994) 513.

[26] Allan K. J. Lan *SSD Electronics User Guide*(Internal report)