

T2K ニュートリノ振動実験での
ミュオン検出器としての
CVD ダイヤモンド製検出器の性能評価
(Study of the CVD-diamond detector
as a muon detector in the T2K
neutrino oscillation experiment)

理学研究科

数物系専攻

田代 一晃

概要

T2K ニュートリノ振動実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で生成させたニュートリノを 295km 離れた岐阜県の神岡鉱山地下の水チェレンコフ光検出器スーパーカミオカンデに打ち込み、各検出器で得られたニュートリノ反応を比較することでミューオンニュートリノの消失モードのパラメータ精密測定や電子ニュートリノの出現モードの観測を目指すものである。J-PARC でのニュートリノの生成は陽子-陽子反応から得られるパイ中間子が反ミューオンとミューオンニュートリノに二体崩壊することで得られる。実験にはニュートリノビームのプロファイル(ビーム方向、分布、強度など)を知る必要があるが、この反ミューオンのプロファイルを測定することで間接的にミューオンニュートリノのプロファイルを知ることができる。そのための実験機器群が MUMON(ミューオン・モニター)であり、反応性の低いニュートリノビームのプロファイルをリアルタイムに知るための非常に重要な機器となっている。現状において MUMON は高い放射線耐性を持つイオンチェンバー(7×7ch)と強い信号を得られるシリコン PIN フォトダイオード(7×7+1ch)で構成されているが、シリコン PIN フォトダイオードは放射線損傷のため半年に一度の交換が必要とされる。MUMON は高放射線環境下にあるため検出器はメンテナンスフリーであることが望ましく、その代替の候補のひとつとして挙げられているのが CVD(Chemical vapor deposition)ダイヤモンドである。

MUMON で検出器として使用する場合に CVD ダイヤモンドに対する要請は以下のように、応答の非線形性が 3% 以内にあるということ、T2K ビームの最短周期である bunch 毎(2MHz 程度)の測定が可能であること、年単位での長期間にわたって誤差 3% 以内の安定な動作をすること、また高い放射線耐性をもつこと等が挙げられる。本論文では 2009 年 7 月に京都大学化学研究所にある 100MeV 電子線形加速器にて単結晶 CVD ダイヤモンドを用いてビームテストを行い、これが MUMON にて実用可能かの検証を行ったのでその結果を報告する。

目次

1	導入	3
1.1	ニュートリノ振動	3
1.2	T2K 長基線ニュートリノ振動実験	5
1.3	ミュオンモニター	8
2	ビームテスト概要	10
2.1	CVD ダイヤモンド検出器	10
2.1.1	ダイヤモンドの使用方法	11
2.1.2	Chemical Vapor Deposition 法	13
2.2	シリコン PIN フォトダイオード検出器	15
2.2.1	シリコン PIN フォトダイオードの性質	15
2.2.2	シリコン PIN フォトダイオードの放射線損傷	17
2.3	Current Transformer	18
2.4	CT の動作原理	18
2.5	100 MeV 電子線形加速器	19
2.6	測定の概要	21
2.6.1	検出器の配置	21
2.6.2	測定項目	23
3	ビームテスト結果	24
3.1	オシロスコープ波形	26
3.2	収集電荷の積分	27
3.3	Beam intensity scan	31
3.3.1	Run111	33
3.3.2	Run115	34
3.3.3	Run117	38
3.3.4	印加電圧との関係	40
3.4	長時間安定性試験	42
3.4.1	Run120	42
3.4.2	Run123	46
3.5	ビーム on/off 試験	48
4	結論	52

1 導入

1.1 ニュートリノ振動

ニュートリノは重力相互作用を除けば弱い相互作用のみする中性のレプトンである。1930年にPauliによって崩壊の際のエネルギー保存則から電氣的に中性な軽い粒子として存在が予言され、1935年にFermiによって理論づけられたが、弱い相互作用しかしないためニュートリノを直接検出するのは非常に困難であった。その後1953年にReinesとCowanによるHanfordの反応炉での $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 反応の検出によりその存在が初めて確認された[1][2]。標準模型においてはニュートリノには ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ の3世代があり質量は0とされてきた。しかし1998年のスーパーカミオカンデでの大気ニュートリノの観測によってニュートリノの世代間振動ひいては有限の質量をもつことが示された[3]。

ニュートリノ振動は3世代のフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$)が3つの縮退していない質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$)の混合状態であるために起こると考えられる。その混合は3つの混合角($\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$)とCP位相 δ を用いて次のように表せる[4]。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1)$$

ここで $U_{\alpha i}$ はMaki-Nakagawa-Sakata行列で

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし c_{ij} 、 s_{ij} は $\cos\theta_{ij}$ 、 $\sin\theta_{ij}$ を表し θ_{ij} は ν_i と ν_j の混合角である。

またフレーバー α であったニュートリノが距離 L を進んだ跡にフレーバー β になっている確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \quad (3)$$

と表され、逆にフレーバーが変わらない確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$ は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \quad (4)$$

と表される。

故にニュートリノ振動確率は質量二乗差 Δm^2 、混合角 θ 、距離 L 、ニュートリノのエネルギー E_ν をパラメーターに持つ。T2K 実験においては $L=295$ km であり、ここからミュオンニュートリノ消失モードで後置検出器の振動確率を最大にするため

$$\frac{1.27\Delta m_{23}^2[\text{eV}^2]L[\text{km}]}{E_\nu[\text{GeV}]} = \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

を $\Delta m_{23}^2 = 2.31 \sim 3.43 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ のもと解いて、 E_ν は $0.55 \sim 0.82 \text{GeV}$ が要求される [5]。

T2K 実験での主な目的は以下の 2 点である。

- 未発見の電子ニュートリノ出現モード $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の探索と振動角 θ_{13} の測定をする
- ミュオンニュートリノ消失モード $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ の精密測定によってパラメータ Δm_{12}^2 と θ_{12} の精密測定をする。

1.2 T2K 長基線ニュートリノ振動実験

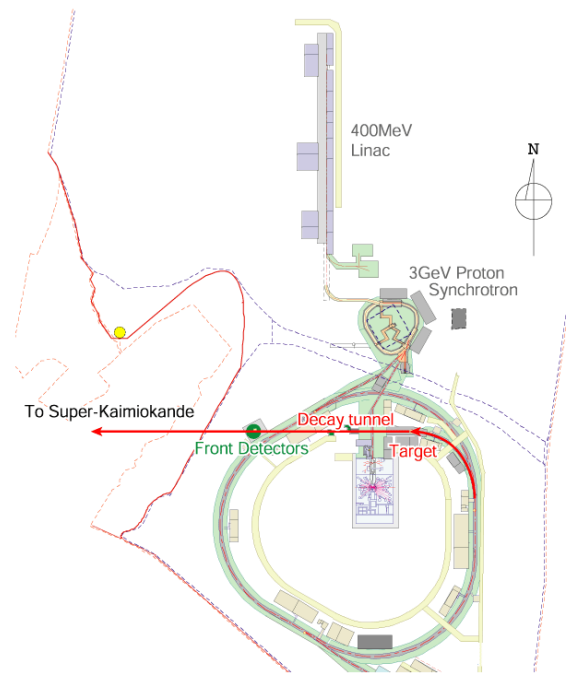


図 1.1: J-PARC、50 GeV 陽子加速器

T2K 長基線ニュートリノ振動実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC(図 1.1) にある 50 GeV シンクロトロンを用いてニュートリノビームを生成し、それを J-PARC 施設内の前置検出器とそこから 295 km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデでそれぞれ検出することでニュートリノ振動を観測する。

ニュートリノの生成過程は図 1.2 のように、まず始めに 50 GeV シンクロトロンからの陽子ビームはグラファイトターゲットに当たり陽子-陽子反応によりパイオンを生成する。そのパイオンは崩壊トンネル内で二体崩壊し、



のようにしてミュオンニュートリノを生成する。その後に置かれた鉄・コンクリートからなるビームダンプにおいて反応せずに残った陽子やパイオンや低エネルギーのミュオンが止められ、残った粒子がミュオンモニター (MUMON)、前置検出器、後置検出器にて観測される。

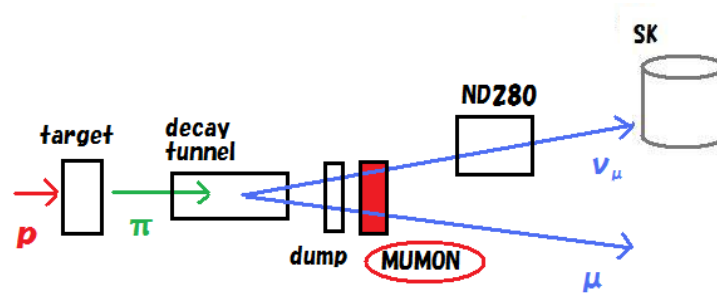


図 1.2: J-PARC でのニュートリノ生成の模式図

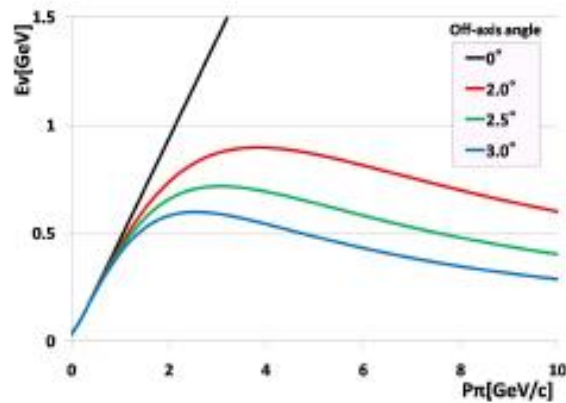


図 1.3: Off-axis 法、横軸:親パイオンの運動量 縦軸:ニュートリノエネルギー

また T2K 実験では加速器からのビーム方向を後置検出器のスーパーカミオカンデから 2.5° ずらす off-axis 法を取り入れている。図 1.3 から分かるようにビーム軸上に後置検出器を置いた場合、後置検出器で観測されるニュートリノのエネルギーは親パイオンの運動量に比例する。ところがビーム軸と後置検出器の方向にいくらか角度をつけた場合、観測されるニュートリノのエネルギー帯が制限されてくる。前小節で見たように後置検出器の位置でニュートリノ振動確率が最大になるニュートリノのエネルギーは $0.5 \sim 0.8$ GeV なので、それを実現するため off-axis 角を 2.5° に設定している。

デザイン値での T2K 陽子ビームのパラメーターは表 1.1 のようになっている、その構造は図 1.4 のように 8 つの bunch が集まって 1 つの spill を形成している。

ビームエネルギー	50 GeV
ビーム強度	0.75 MW
spill 間隔	2.11 sec
spill 中の陽子数	3.3×10^{14}
bunch 数	8
bunch 幅	58 nsec
bunch 間隔	約 600 nsec

表 1.1: デザイン値での陽子ビームのパラメータ

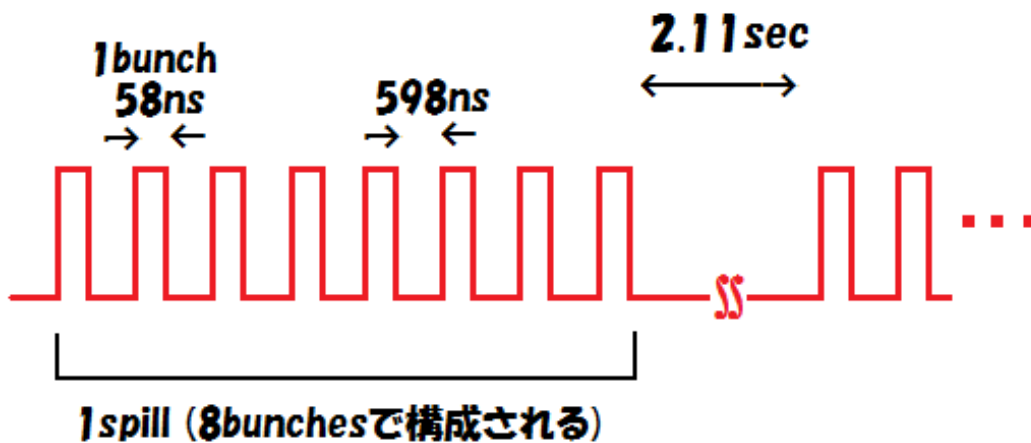


図 1.4: T2K 陽子ビームの構造

1.3 ミューオンモニター

ミューオンモニター (MUMON) はビームダンプのすぐ下流に置かれるミューオン測定用の検出器群である。ミューオンニュートリノが二体崩壊から生成されるので、同時に生成されるミューオンのプロファイルはニュートリノのプロファイルと相関がある。MUMON では反応性の低いニュートリノに代わりミューオンのプロファイルを測定することによって、ニュートリノのプロファイルをリアルタイムに知ることができる。

現行ではシリコン PIN フォトダイオードとイオンチェンバーで構成されている。シリコン PIN フォトダイオードは K2K 実験での使用実績があり [6] 到来ビーム強度が小さくても大きい応答を返せるという特徴がある。MUMON では 7×7 の 49 ch に加えて比較用に遠隔操作ができるシリコン PIN フォトダイオードも 1ch 用意されている。またイオンチェンバーは放射線耐性が高く、流入するガスを変えることによっていくつかのビーム強度に対して適正な信号値を返すことができる。MUMON では 7 ch が組み込まれたイオンチェンバーチューブが 7 本用意され、計 49ch で測定している。これら 2 種類の検出器で同時にビームプロファイルを測定できるようにしてあることでクロスチェックができるようになっており、また検出器の故障に対するバックアップ性も兼ね備えている。

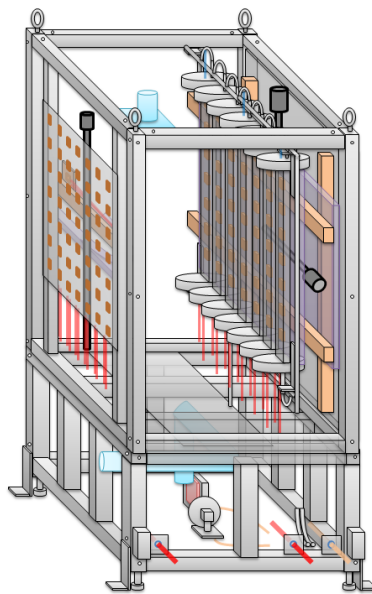


図 1.5: ミューオンモニター概観図。左側に敷き詰められているのがシリコン PIN フォトダイオード、右側のチューブがイオンチェンバー。

デザイン値においてミュオンモニター内に入射すると見込まれる粒子の数は 1.33×10^8 /cm²/spill でありその中でもミュオンはその 84% にあたる 1.19×10^8 /cm²/spill、電子は 15.7% の 1.75×10^7 /cm²/spill であり、MUMON にて照射される粒子のほとんどが占められる [6]。つまり MUMON は高放射線環境下であるため、そこで用いられる検出器は放射線耐性が高く出来るだけメンテナンスフリーで長期間動作することが求められる。ところがこれらのデザイン値での粒子に曝される時、シリコン PIN フォトダイオードは放射線損傷による信号低下や型反転が起き数年単位での計測ができないと見込まれている [6]。

そのためシリコン PIN フォトダイオードの代わりとなる検出器が求められており、CVD 単結晶ダイヤモンドや APD(avalanche photodiode) や CT(current transformer) 等がその候補に挙げられている。例えば CVD 単結晶ダイヤモンド検出器を MUMON で用いる際に求められる性能は次のようなものである。

- 到来するビームの 1bunch 毎の測定ができること。
- ニュートリノビーム方向を 1 mrad 以上の精度でモニターできるよう系統誤差が 3% 以内に抑えられること [6]。
- 数年単位で安定な動作をすること。
- 高い放射線耐性を持つこと。

次節からこの CVD 単結晶ダイヤモンド検出器について詳しく述べる。

2 ビームテスト概要

ここでは2009年7月に行ったCVDダイヤモンドを用いたビームテストの設備や測定項目について説明する。

2.1 CVDダイヤモンド検出器

CVDダイヤモンドは近年に研究開発が盛んな人工ダイヤモンドである。天然・人工ダイヤモンドには表2.1の四種類があり、今回用いたCVDダイヤモンドはIIa型に分類される。

種別	特徴
Ia型	0.1%程度の窒素を含有し、それが結晶中に偏析している。 天然ダイヤモンドに多い
Ib型	0.1%程度の窒素を含有し、それが結晶中に分散している。 高圧合成ダイヤモンドに多い
IIa型	不純物が少ないダイヤモンドで、熱的・光学的に優れた性質を持つ。 気相低圧合成ダイヤモンドに多い
IIb型	純粋なダイヤモンドにホウ素等がドーピングされたもので、 半導体的性質を示す。

表 2.1: ダイヤモンドの種別 [7]

一般的にダイヤモンドはバンドギャップエネルギーが5.48 eVで抵抗値が $\sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ と絶縁体に分類される。しかし荷電粒子の通過に伴って価電子帯から伝導帯に励起された電子をダイヤモンド膜の両端に数100Vの高電圧をかけて読みだすことで放射線検出器として利用できる(図2.1)。このためダイヤモンド製検出器は動作原理としては半導体検出器として分類される。このCVDダイヤモンドの特徴として非常に高い放射線耐性が挙げられる。過去に行われた実験では $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ の陽子(24 GeV/c)を照射した測定において、シリコン製検出器は放射線損傷により応答しなく

なったのに対し CVD ダイヤモンド製検出器のシグナルには変化が見られなかったという報告がある [9]。

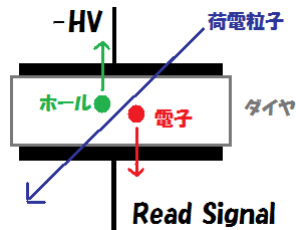


図 2.1: ダイヤモンド検出器の動作原理

2.1.1 ダイヤモンドの使用方法

今回実験に使用したのは Element Six 社製の単結晶の CVD ダイヤモンドであり、これは RD42 として CERN で研究開発が行われているものである。製造されたダイヤモンドは図 2.2 のような透明な構造で、今回はその $4 \times 4 \times 0.5$ mm のチップの両面に信号読み出しの為の金メッキ加工を施したものを使用する。この実際の写真が図 2.3 である。これを図 2.4 のようにホルダーに入れて検出器として使用する。このホルダーはダイヤモンドチップを両面から極板で挟み小基板のねじ四つで締め付けるようになっており、極板から LEMO コネクタに結線されている。極板の片方からはマイナス数百ボルトの高電圧をかけ、もう片方からはダイヤモンドで得られた信号を取り出せるようになっている。ホルダーの材料はアクリル板やガラスコンポジット基板¹を使用しており、今回の研究は短期間で CVD ダイヤモンド検出器の動作特性を調べるため特に放射線耐性は考慮されていない。

¹基盤にサンハヤト製 ICB88G、コネクタにレモジャパン製 EPL.00.250.NTN、極板にマックエイト製 HRP-20P-G 等

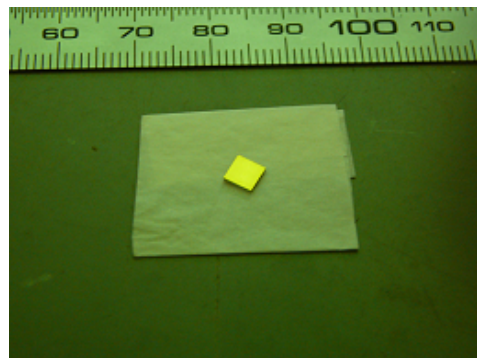
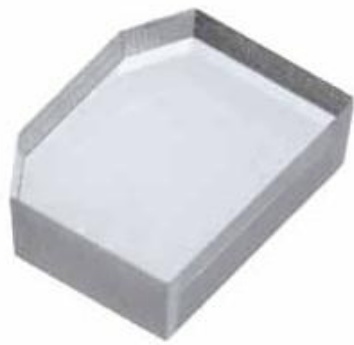


図 2.2: 単結晶 CVD ダイヤモンド [8]

図 2.3: 実際使用したダイヤモンドチップ

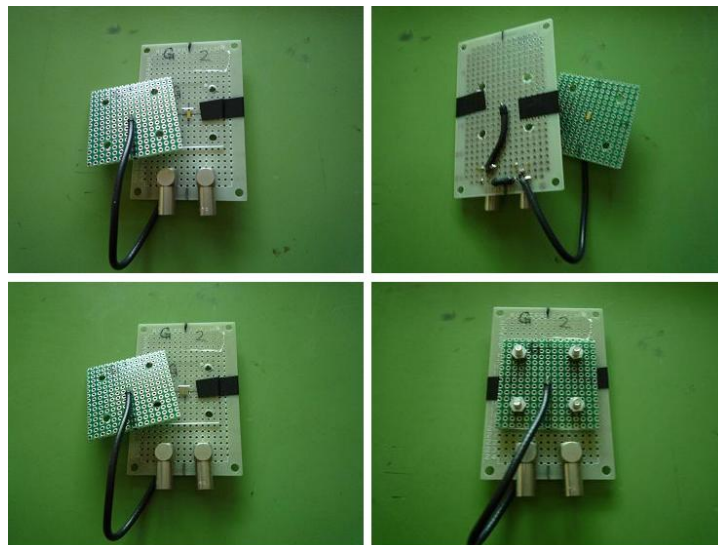


図 2.4: ダイヤモンドのホルダー。左上:ホルダー単体 右上:その裏面 左下:中央にダイヤモンドをセットした所 右下:極板で挟み込んだ所

2.1.2 Chemical Vapor Deposition 法

CVD ダイヤモンドという語の「CVD」とは Chemical Vapor Deposition の略で化学気相成長法や化学蒸着法と呼ばれる製造法を示し、半導体薄膜などの製造法として一般的な方法である。CVD 法で使用される蒸着炉は図 2.5 のように模式され、低圧環境下に置いた substrate(下地) にガスを流してその上にダイヤモンドを堆積させる方法である。CVD ダイヤモンドを製造する場合は、気圧を 1~200 Torr² に設定し、ガスには 1~5% のメタン等の炭化水素と水素分子の混合気体を用いる。炭化水素は substrate 上に堆積させる炭素の源となり、水素は安定にダイヤモンドのみを堆積させるために重要な役割を担う(後述)。単結晶ダイヤモンドを製造する際の substrate にはエピタキシャル成長³させるために単結晶ダイヤモンド膜を用いる必要がある。もし多結晶ダイヤモンドを製造させるのであれば substrate はシリコンやシリコンカーバイドなどが使用される。

結晶成長の原理は、まず流入されたガスが蒸着炉内の 2000 °C ほどのフィラメントで加熱されラジカル状態⁴となるところから始まる。ラジカルとなった炭化水素は substrate の上にどんどん反応しながら堆積していくが、ほとんどがエネルギー準位的に安定なグラファイトとして堆積しダイヤモンドはわずかしか得られない。しかし雰囲気中のラジカル水素はグラファイトと非常に強く反応し、その速度はダイヤモンドにくらべ 10~100 倍の速さで substrate 上からグラファイトを取り去ってしまう。また温度が 800 度を超える substrate 上のダイヤモンドは残った水素基を水素分子の形で放出することが知られている [10]。このようにして substrate 上に純度の高い単結晶のダイヤモンドのみが堆積される。

ここでは熱フィラメントをエネルギー源にする方法を述べたが、この方法ではダイヤモンドの表面積を大きくしようとするとき substrate も大きくする必要があるので表面上の温度分布を均一に保つことが難しくなり安定な成長を得にくいというデメリットがある。エネルギー源として熱フィラメントの代わりにマイクロ波やアークジェットやプロトーチなどを用いた方法もあるが、substrate の温度をおおむね 1000 °C にするという点で共通し成長の原理は同様である [11]。

2

$$1\text{Torr} = \frac{1}{760}\text{気圧}$$

³結晶が substrate の結晶方位を受け継いでなされる成長

⁴原子や分子中の電子が励起されて遊離し不対電子が発生することで、その原子や分子の反応性が非常に高くなった状態

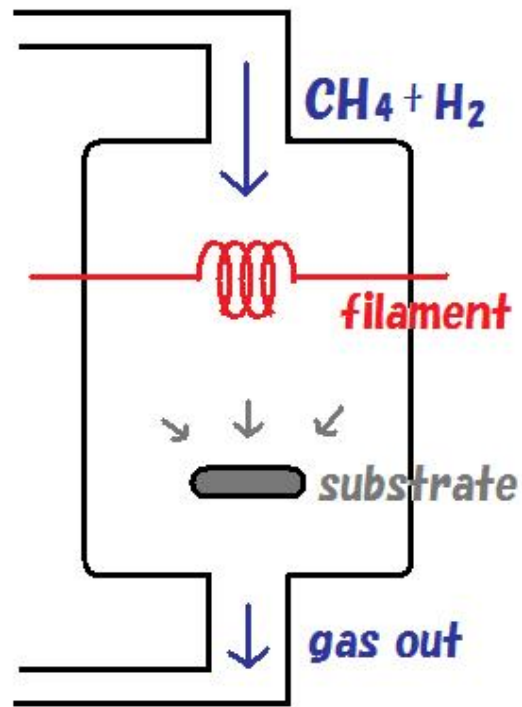


図 2.5: CVD 法の蒸着炉の模式図

2.2 シリコン PIN フォトダイオード検出器

本実験で CVD 単結晶ダイヤモンド検出器のリファレンスの検出器として主に用いたシリコン PIN フォトダイオード検出器について述べる。今回用いたのは図 2.6 の HAMAMATSU S3590-08 であり、これは主に高エネルギー実験用に開発された大面積型、白セラミックベースのフォトダイオードである。サイズは有感面積が $10 \times 10 \text{ mm}^2$ でウェーハの厚さが $300 \mu\text{m}$ 、最大許容印加電圧が 100 V となっている [6]。これは実際に T2K 実験で MUMON 内に組み込まれているシリコン PIN フォトダイオードと同一の製品である。本実験では CVD ダイヤモンド検出器との信号量を比較するために用いる。

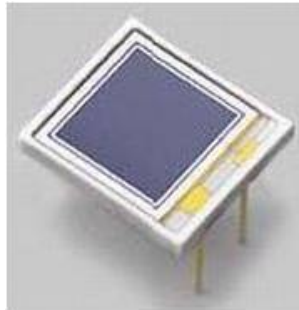


図 2.6: HAMAMATSU S3590-08

2.2.1 シリコン PIN フォトダイオードの性質

シリコン(ケイ素)は4価の元素で価電子帯(VB)と伝導帯(CB)の間のバンドギャップエネルギーが 1.124 eV の半導体⁵であり、半導体デバイスによく使用される。これもダイヤモンドと同様に、真性半導体として荷電粒子の到来による電離損失エネルギーにより電子を価電子帯から伝導帯に励起させてそれを読み出すこともできるが(図 2.7)、それでは電子と正孔の濃度を外因的に制御出来るといふ半導体の特徴を生かしきれない。

この真性半導体にそれより多い価電子をもつドナー不純物をドーブしたものを n 型半導体と言う。図 2.8 左はシリコン結晶中に 5 価のリンをドーブした模式図であり、リンが周りのシリコンと共有結合をして電子が一つ余っている。この電子が価電子帯と伝導帯の間の中でも伝導帯のすぐ近くにドナー準位を形成する。バンドギャップ

⁵バンドギャップエネルギーがおよそ 1 eV の物質を半導体と呼ぶ

エネルギー 1.124 eV に対して、ドナー準位と伝導帯の間は 0.044 eV [12] とギャップが非常に狭くなるので n 型半導体では伝導電子が増加する⁶。これに対して真性半導体にそれより少ない価電子をもつアクセプタ不純物をドーピングしたものを p 型半導体と言う。図 2.8 右はシリコン結晶中に 3 価のホウ素をドーピングした模式図であり、ホウ素が周りのシリコンと共有結合をして正孔が一つ余っている。これも同様に価電子帯のすぐ近くにアクセプタ準位を形成して価電子帯からの励起電子が増えるため、価電子帯に多くの正孔が得られる。

これら p 型 n 型の半導体の間に真性半導体を挟み込んで p 層 i 層 n 層の構造を持つのが PIN フォトダイオードである。この際 n 層から電子が、p 層から正孔が拡散することで再結合が起き、さらに i 層はもともとキャリアを持たないので i 層の周りに i 層より大きなキャリアが不在の地域 (空乏層) を生じる。実験ではこれに p 側から負電圧をかけることで p 層から正孔を n 層から電子を読み出せるようになる。その際空乏層は p 層 n 層より比抵抗が遥かに大きいので印加バイアスがほとんど空乏層にかかることになり、p 層で励起された電子は空乏層で加速されて n 層側から読みだされることになる。このような原理で PIN フォトダイオードでは速い応答が得られ検出効率も良くなる。

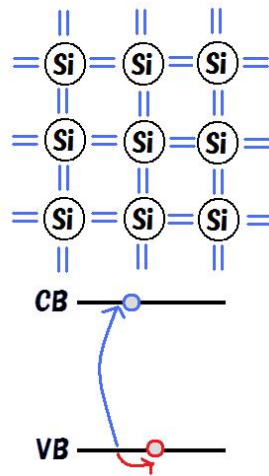


図 2.7: シリコンの結晶格子の模式図とそのバンドギャップ。
青丸が電子、赤丸が正孔を示す。

⁶室温での熱エネルギーが約 0.0256 eV

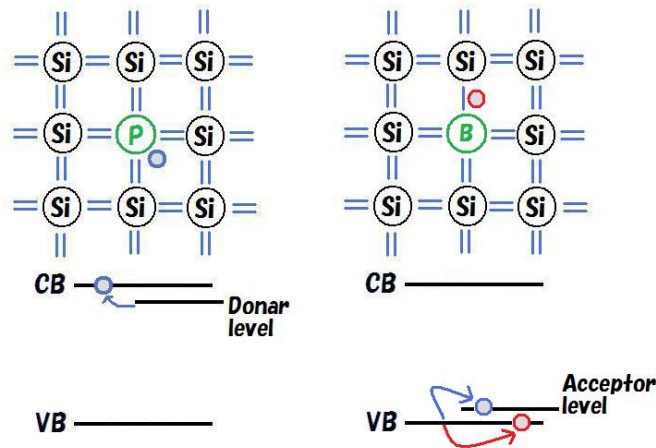


図 2.8: シリコンの結晶格子にドーブした模式図とそのバンドギャップ
 左:5 価のリンをドーブ 右:3 価のホウ素をドーブ

2.2.2 シリコン PIN フォトダイオードの放射線損傷

シリコン結晶に粒子が入射するとその電離損失エネルギーから電子が励起されるが、そのエネルギーが十分大きいと結晶中からシリコン原子をはじき出してしまふ。このような原子のはじき出しによって格子中に原子の欠如が発生したり、はじき出された原子が格子のすきまに入り込んだり、規則的な結晶格子に割り込んで不規則な格子を形成したりする。不規則な格子の存在によってバンドギャップ中に新たなエネルギー準位が発生することになり、その為キャリアの捕獲や再結合が起こることにより信号の減少が起こる。

MUMON 上では T2K ビームのデザイン値で半年程度のビームをあてると収集電荷量が 90% に落ちることが分かっている [13]。

2.3 Current Transformer

Current Transformer(CT) はドーナツ型の磁性体の周りに銅線を巻きつけたトロイダルコアのビーム検出器である。図 2.9 のようなもので、信号量が小さいので本実験では補助的なリファレンスとして主にビームが出たタイミングを知るために使用する。



図 2.9: Current Transformer

2.4 CT の動作原理

CTはこの穴の中にビームが通るようにセッティングして使用する。電子などの荷電粒子のビームは電流とみなすことができるから、ドーナツ型の磁性体⁷の穴を通ったビームによって磁性体中に磁束回路ができる。この磁束は磁性体中に沿ってちょうど円形に収まって空気中に逃げていったりしない。磁性体の周りには銅線が巻きつけてあって、磁性体中の磁束によって誘導電流が発生するのでこれを読み出すことで最初の荷電粒子のビーム強度に比例したシグナルを得られる。

⁷トロイドとも呼ぶ

2.5 100 MeV 電子線形加速器

本実験は京都大学化学研究所の先端ビームナノ科学センターにある 100 MeV 電子線形加速器をビーム源として行った。

この加速器のレイアウトは図 2.10 である。図の左側が上流となっており、上流から電子ビームを発生させる熱電子銃、ビームを進行方向に圧縮するバンチャー部、2857 MHz の高周波磁界によって 100 MeV まで電子を加速する 3 本の加速管から構成される。また加速された電子ビームが発散しないように集束レンズとして四重極電磁石が用いられ、バンチャー部にはビームをせき止めるスクリーンが挿入できるようになっている。この熱電子銃のフィラメントに印加する電圧を操作することでビーム中の電子の数を、ひいてはビームの強度を調整できる。CVD ダイヤモンド等の検出器はビームダンプのすぐ上流に置かれる。この加速器の主な仕様は表 2.2 の通りである。

MUMON において到来すると予想される粒子はそのほとんどがミューオンであるが、ダイヤモンド中での電離損失値は電子のそれとほとんど変わらない⁸。従って今回ビーム源は電子線形加速器で代用する。

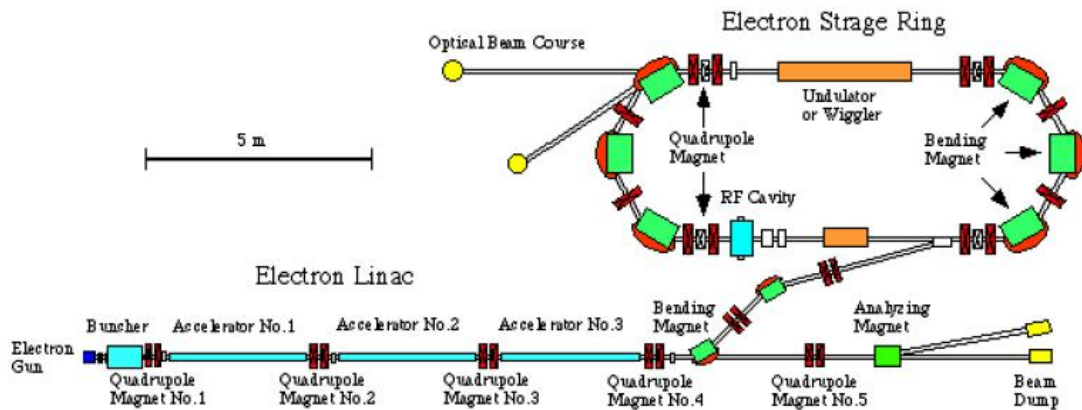


図 2.10: 100 MeV 電子線形加速器

⁸ミューオンの電離損失は $1.992 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$ で電子は $1.884 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$

出力電子ビーム	ビームエネルギー: 100 MeV ビーム電流: 100 mA パルス幅: 1 μ sec 最大パルス繰り返し: 20 Hz
熱電子銃	ビーム電流: 100 mA 最大パルス繰り返し: 20 Hz
バンチャー部	プリバンチャー: 定在波型リエントラント空洞 バンチャー: 進行波型加速管
加速管 (定勾配型 Disc-loaded 加速管)	本数: 3 本 長さ: 3 m 運転周波数: 2857 MHz 最大加速勾配: 15 MeV/m
高周波源 (Klystron-ITT8568)	出力高周波電力: 20 MW カソード電力: 250 kV、250 A パルス幅: 2 μ sec
集束電磁石	低エネルギー部: ソレノイドコイル 高エネルギー部: Doublet 四重極電磁石

表 2.2: 100 MeV 電子線形加速器の仕様 [14]

2.6 測定の概要

2.6.1 検出器の配置

実験時の検出器の配置は図 2.11 のようになっている。図右側がビーム上流にあたり、そのすぐ下流に Current Transformer 1 つが画面左端の黒い架台に CVD 単結晶ダイヤモンドとシリコン PIN フォトダイオードが設置される。これらはビームに対してアラインメントされており、各検出器の中心とビームの断面の中心は一致するよう配置されている。

CVD ダイヤモンドとシリコン PIN フォトダイオードは図 2.13 のようにまとめて電動式の架台にセットされている。セットされているのは CVD 単結晶ダイヤモンドが 2 つとリファレンス用のシリコン PIN フォトダイオードが 2 つで、図 2.12 のようにビーム上流から si1、Dia2、Dia1、si2⁹の順に並んでいる。加速器が運転している最中には周辺に立ち入れないので、電動式架台はモニタールームからリモートコントロール出来るようになっている。同様の理由で CVD ダイヤモンドとシリコン PIN フォトダイオードへの印加電圧もモニタールームからコントロールし、HV supply のスイッチを操作した場合に発生するスパイクを除去するためにローパスフィルター¹⁰を組み込んである。全ての検出器からのシグナルは Flash ADC にて読みだされる。この Flash ADC の仕様は表 2.3 の通りで、1pulse のビームに対して十分早いサンプリングが可能である。また Current Transformer は応答信号が小さいため Flash ADC との間に 5 倍のアンプが組み込まれ、逆に CVD ダイヤモンドとシリコン PIN フォトダイオードは応答が大きいので -30 dB¹¹のアッテネーターが組み込まれている。Flash ADC のトリガーにはビームパイプ上に組み込まれた CT が配る信号を使用する。また検出器からの信号を Flash ADC からオシロスコープにつなぎかえることによってリアルタイムに応答を確認することもできる。

サンプリング周期:	65 MHz
ADC 解像度:	12bits
レンジ:	-1 V ~ +1V
インピーダンス:	50 Ω

表 2.3: Flash ADC の仕様

⁹si はシリコンの略、Dia はグラフのキャプション中でしばしば Cdia と呼ばれる

¹⁰100 k Ω の抵抗器と 0.1 μ F のコンデンサーから成る

¹¹約 0.032 倍



図 2.11: 実験中の検出器

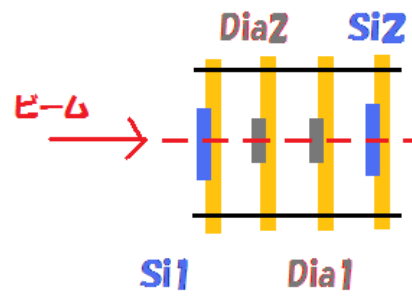


図 2.12: シリコン PIN フォトダイオードとCVD ダイアモンドの並び

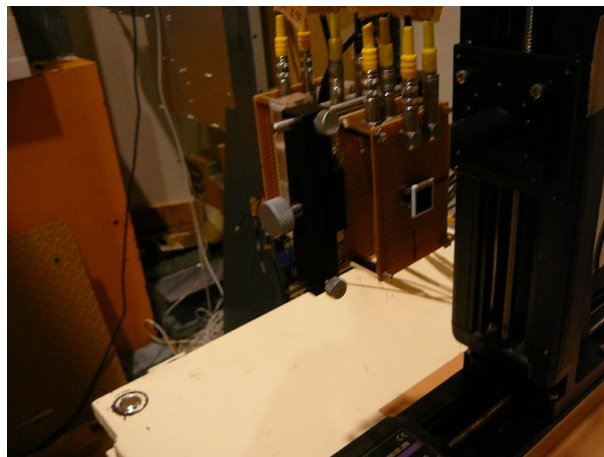


図 2.13: CVD ダイアモンドとシリコン PIN フォトダイオード

2.6.2 測定項目

本実験で CVD 単結晶ダイヤモンドに対して以下の測定を行う。

- Beam intensity scan
CVD ダイヤモンドに対して照射するビーム強度を上げ下げして応答の線形性を見る。MUMON で使用する際に要求されるのは 3% 以内の非線形性である。今回は CVD ダイヤモンドに対する印加電圧を 100 V、300 V、500 V に変えてそれぞれ測定を行った。
- Long term run
CVD ダイヤモンドに長時間にわたって同強度のビームを当て続け、応答の時間発展性を調べる。今回は 40 分間測定を行い、また強弱 2 種類のビームで同様の実験を行った。
- Beam on/off test
CVD ダイヤモンドに対して照射するビームを 1 分間隔で on/off させ、その応答の立ち上がり/立ち下りに不審な挙動がないか調べる。この測定を行うモチベーションは、以前 CVD 多結晶ダイヤモンドで同様の実験を行った際に、立ち上がりに数分間にわたって 5% ほどの信号上昇不良が見られたためである [6]。

またこの他にもおよそ 600 nsec 間隔で到来する T2K ビームの bunch 毎の測定ができるような速い応答が得られるかどうかについても検証する。また今回は検証を行っていないが、数年単位での使用に耐えうる高い放射線耐性も求められている。

次節ではこれらの検証で得られた結果について報告する。

3 ビームテスト結果

ここでは本実験での測定結果について述べる。

測定は表 3.1 の順に行われ、ランナンバーが割り当てられている。ただし Run124 については得られた応答が小さすぎたため主にバックグラウンドデータとして使用する。

本実験で 100 MeV 電子線形加速器からのビームは断面がガウス分布を示し、検出器を配置した位置では表 3.2 のようなパラメーターとなるように設定されている。また得られたビームにはビーム強度の高いものと低いものが混在している。それは図 3.1 で示されるように Shot Number が奇数番か偶数番かで分けられる。ただし Run の切り替え時にデータ取得を中断するので Run111 の様に奇数番に弱ビームが偶数番に強ビームが割り当てられることもあれば Run117 のように奇数番に強ビームが偶数番に弱ビームが割り当てられることもあるが、同一 Run 中に入れ替わることはない。強ビームの方が弱ビームに比べて、ビーム上流の検出器とビーム下流の検出器との応答差が少ないので、この章では強ビームについての解析結果を述べることにする。またこの原因は加速器からくるビームのエネルギーが不安定であるか、もしくはビーム方向が振れているかが考えられる。

ランナンバー	測定内容
Run111	CVD ダイアの印加電圧 -500 V での Intensity scan
Run115	CVD ダイアの印加電圧 -300 V での Intensity scan
Run117	CVD ダイアの印加電圧 -100 V での Intensity scan
Run120	T2K ビームの 100% 程度のビーム強度で 40 分の安定性測定
Run121	Run120 のビーム強度のまま 1 分周期のビーム on/off 試験
Run123	T2K ビームの 10% 程度のビーム強度で 40 分の安定性測定
Run124	Run123 のビーム強度のまま 1 分周期のビーム on/off 試験

表 3.1: 本実験での実験ランナンバー

ビーム周期: 15 Hz
ビーム時間幅: ~ 100 nsec
ビーム断面サイズ ¹² : 直径 10 mm、 $\sigma \sim 6$ mm
ビーム強度: $10^6 \sim 10^8$ e/cm ² /pulse

表 3.2: 本実験でのビームパラメーター

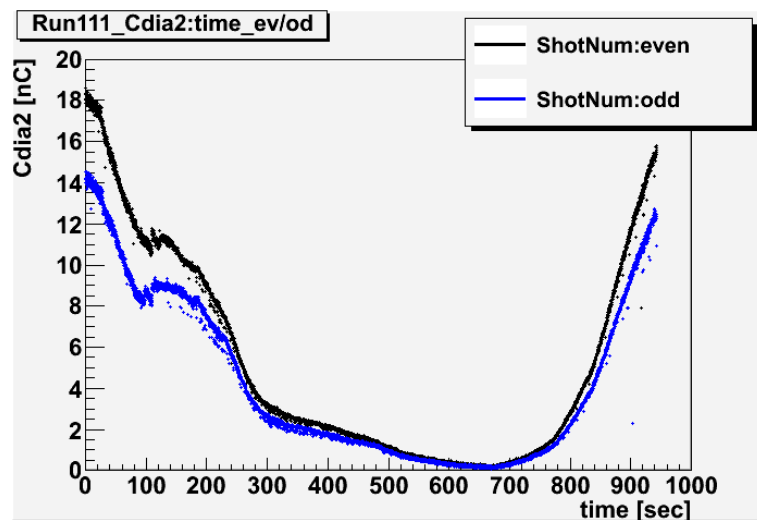


図 3.1: Beam intensity scan の際の、横軸:時間、縦軸:Dia2 からの電荷量強度の異なる 2 ビームが交互に来ている

また稀に存在するビームタイミングであるにもかかわらず下流までビームが到来しなかった場合や、1 回のビームトリガーにもかかわらず 2 shot が出ている場合などのイレギュラー、また Flash ADC で読みだす際にオーバーフローしたイベントは解析から除外している。

¹²直径は蛍光板で見たビーム断面の直径、 σ は 2×3.3 mm のシリコン PIN フォトダイオードを 3×3 の 9 つ配置した検出器からガウシアンで再構成した

3.1 オシロスコープ波形

図3.2はオシロスコープで見たCVDダイヤモンドとシリコン PIN フォトダイオードの応答である。印加電圧はシリコン PIN フォトダイオードには -80 V がCVDダイヤモンドには -300 V が印加されており、約 $1 \times 10^5 / \text{cm}^2 / \text{pulse}$ の電子ビームが出ている。オシロスコープの画像は数 shot 分の入力波形を重ね書きしているので強いビームと弱いビームの波形が重なって見えている。

CVDダイヤモンドの応答は 100 nsec 弱で上がり切っているのに対しシリコン PIN フォトダイオードは 200 nsec ほどまでテールを引いている。CVDダイヤモンドはシリコン PIN フォトダイオードに比べても充分速い応答を得ることができ、 600 nsec 間隔で到来する T2K ビームの bunch 毎の測定も可能であることが分かった。

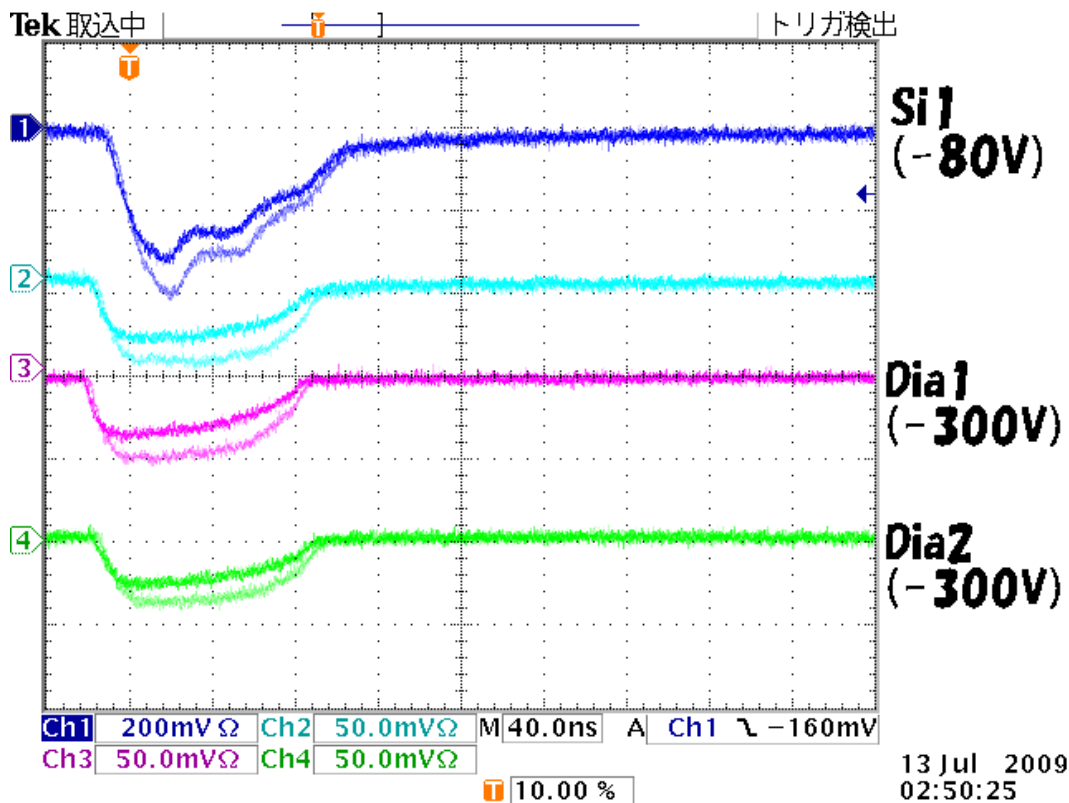


図 3.2: オシロスコープでみた応答。青:シリコン PIN フォトダイオード 1、紫:CVD ダイア 1、緑:CVD ダイア 2

3.2 収集電荷の積分

ここではFlash ADC で得られた波形データから電荷値を積分する方法について述べる。

図 3.3 はCVD ダイア 2 で得られた Flash ADC の波形データの例である。横軸はサンプリングクロックを表し1トリガーにつき 65 MHz で 190回サンプリングする。縦軸はDia2 の ADC カウントを表し、 $-1 \sim +1$ V のレンジで解像度が 12bit なので1カウントは $1/2048$ V に相当する。ちなみにここでは約 1.7×10^7 e/cm²/pulse のビームが出ていてこれはMUMONで見積もられる粒子数の約 100% であるが、応答が消えるまで 500nsec 程度かかっている。

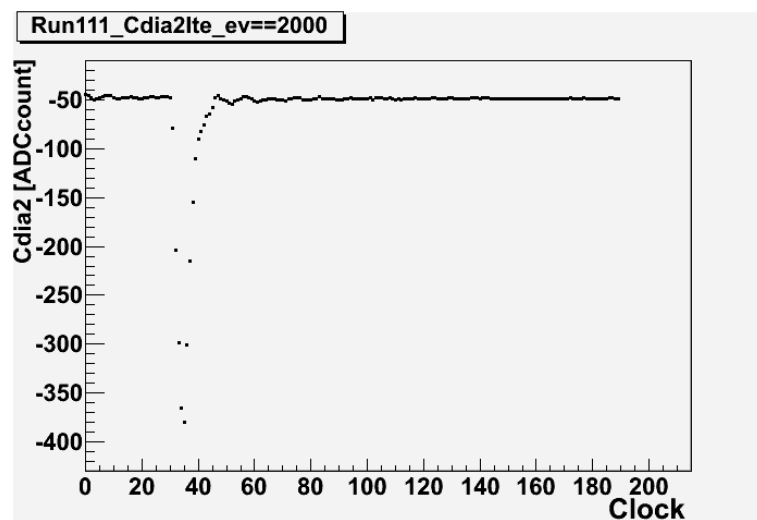


図 3.3: CVD ダイアモンド 2 の Flash ADC でみた波形。横軸がサンプリングクロック、縦軸が ADC カウント。

ここからまずノイズと思われる信号を取り除く。図 3.4 はビーム on/off 試験においてビームが off の状態の 300 イベントの平均波形を Run121 前半、Run121 後半、Run124 前半、Run124 後半の 4 区間とって表示したものである。4 波形ともビーム到来タイミングでのしみを除けばよく一致しているので、これをバックグラウンドノイズと判断した。バックグラウンドサンプルとして図 3.5 のそれぞれの検出器の Run124 での 300 event の平均波形 (黒線) を使用した。

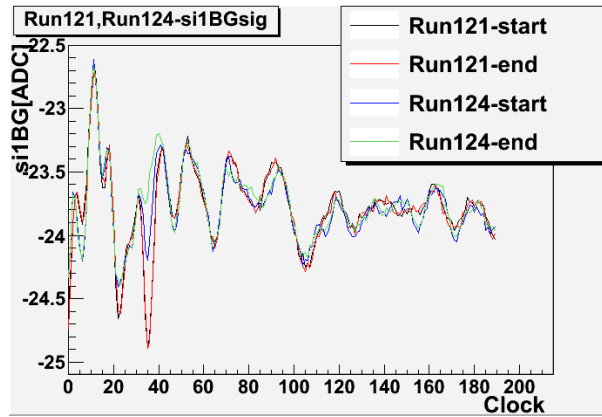


図 3.4: si1 のビームシャット中の信号波形 300 event の平均。黒:Run121 前半部、赤:Run121 後半部、青:Run124 前半部、緑:Run124 後半部から 300 event とった。

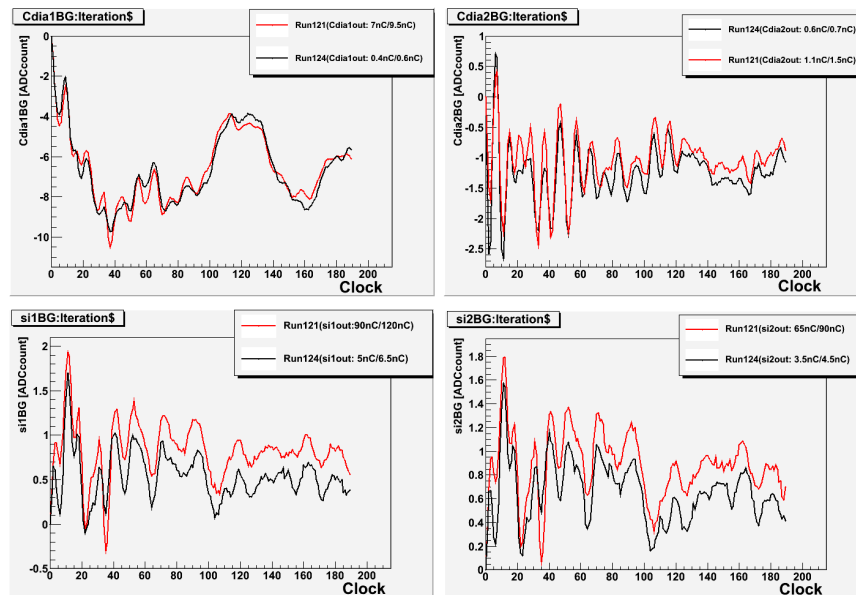


図 3.5: 各検出器のビームシャット中の信号波形 300 event の平均。赤線が Run121、黒線が Run124 を表し、左上:Dia1、右上:Dia2、左下:si1、右下:si2。

波形から収集電荷値を積分する範囲は図 3.6 を例に説明する。以前はビーム到来前の 25 クロック (約 380 nsec) でペDESTALを決めその後 100 クロック (約 1500 nsec) で電荷量を計算していた。その後波形のテールの部分にグラウンドレベルの降下が寄与している疑いがある事から、ビーム到来直後 50 クロック (約 770 nsec) で電荷量を計算しその後 110 クロック (約 1700 nsec) でペDESTALを計算するよう改めた。両計算方法で Run124 でのビームオフ時約 1600 shot の信号値の分布は Dia2 において図 3.7 のようになり、全検出器の分布パラメータは表 3.3 のようになった。

すべての検出器で Flash ADC での 1 カウントが約 6 pC なのに対して mean 値はかなり 0 に近づいており、 σ も小さくなっている。Dia2 と si1 と si2 が非常に似た分布を持つが Dia1 のみ他と比べて約 30% も σ が広がっているのは Dia1 は読み出し部の金メッキの導通が失われている事¹²が原因だと考えられる。このため Dia1 と Dia2 による個体差の評価は難しくなっている。

以降は積分された電荷量を用いて議論する。

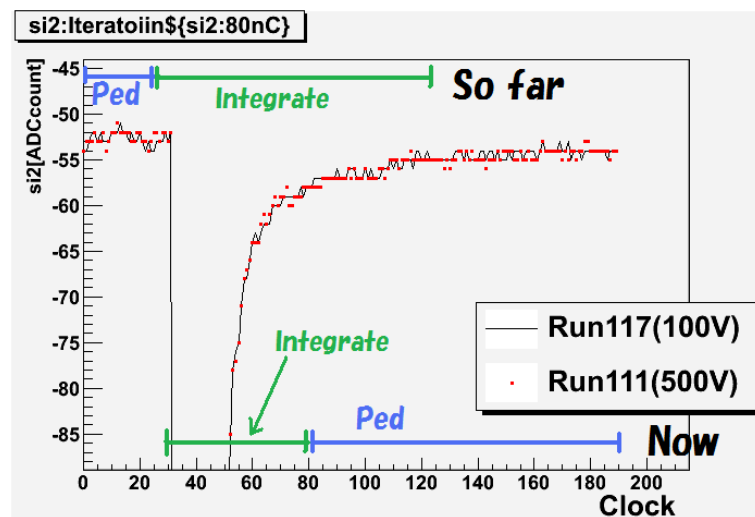


図 3.6: Flash ADC 波形から電荷を積分する範囲。緑の範囲で電荷値を積分し青の範囲でペDESTALを計算。

¹²一度半田付けして出来た合金には導通がなく、再度の半田付けも出来なかった。

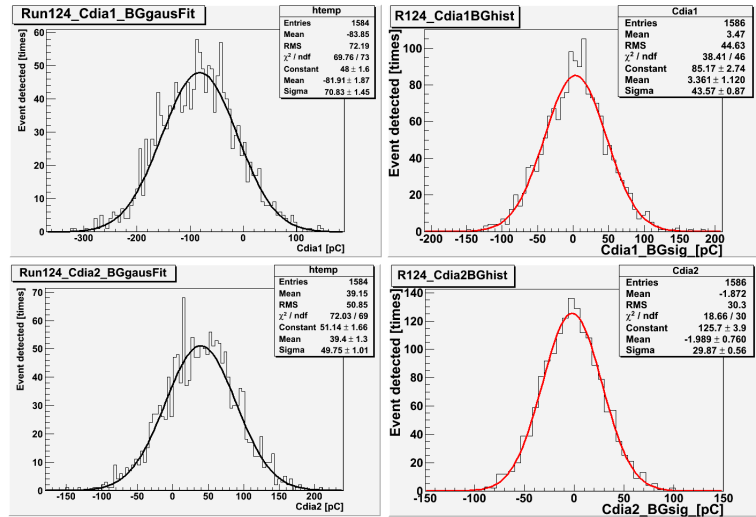


図 3.7: CVD ダイア 2 のビームオフ時の波形。左:以前の計算方法にて、右:改めた計算方法にて

	so far		→	now	
	mean	σ		mean	σ
Dia1	-81.91	70.83		3.361	43.57
Dia2	39.40	49.75		-1.989	29.87
si1	-8.542	85.18		-2.016	28.73
si2	-43.60	87.72		1.158	29.34

表 3.3: 各 CVD ダイア、シリコン PIN フォトダイオードでの積分方法変更前後での分布のパラメータ。単位:pC

3.3 Beam intensity scan

ここではCVD単結晶ダイヤモンドに対して照射するビーム強度を上げ下げしてその応答の線形性を検証する。

実験は3回行い、各測定でのCVDダイヤモンドへの印加電圧のみ変更しているが、シリコンPINフォトダイオードへの印加電圧は -80 V で変更はなく、

CVDダイヤモンドにもシリコンPINフォトダイオードにも -30 dB のアッテネーターが取り付けられている。例としてRun111での時間とDia2の電荷値の関係は図3.8のようになっており、このようにビーム強度を一度下げその後上げる。

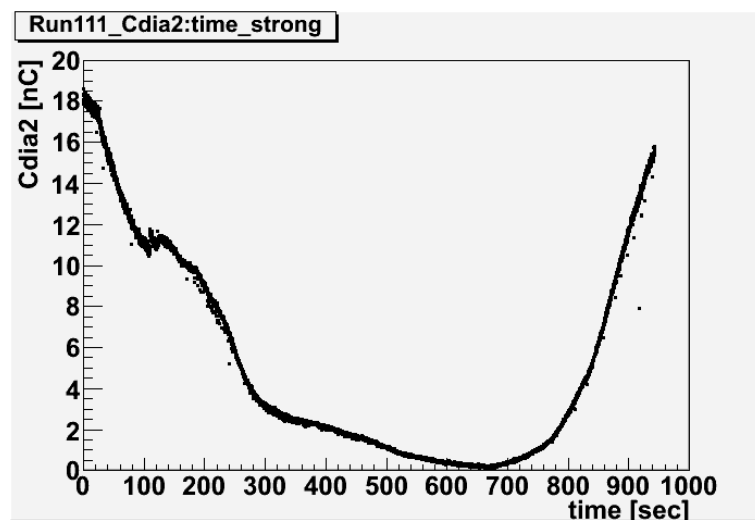


図 3.8: CVD ダイヤ 2 に照射したビーム強度の時間変化

解析方法は、まず図3.9のように得られたデータをリファレンスのシリコンの信号値に対するCVDダイヤモンドの信号値をsi1の電荷量 30 nC から 70 nC の範囲を選んで線形Fitする。選択範囲を 30 nC から 70 nC とした根拠は、 30 nC 以下ではランダムエラーにより全域でのFitから 3% ずれたイベントが出てくるからであり、上限値 70 nC は後述のビームが不安定となる領域を避けたためである。次に図3.10のようにFitからのずれを全域でみていくが、このときリファレンスで 10 nC ごとに分布を取りそのRMS(青色エラーバー)と分布の平均値の 68% 誤差(赤色エラーバー)をつける。この方法でCVDダイヤモンド検出器は非線形性が 3% 以内であれという要請を満たしているか検証していく。同時に印加電圧を変えながらRun111、Run115、Run117と実験しているのでCVDダイヤモンドの応答の印加電圧特性も見ていく。

また図3.10でsi1で見て 90 nC 付近に見えるような急な信号比の変動がしばしば

見受けられるが、すべての検出器で同一タイミングで見えることから不安定なビームに起因すると考えられる。

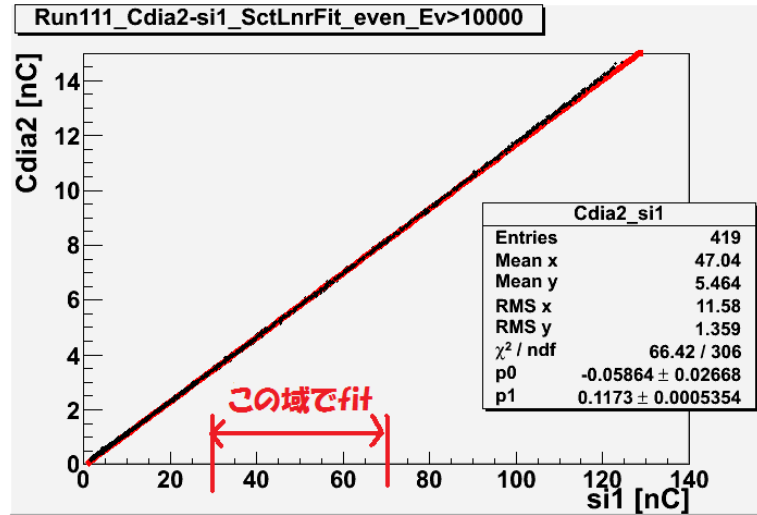


図 3.9: Intensity scan 解析。si1 に対する Dia2 の信号量を表し、赤線は si1 の信号量で 30 nC から 70 nC の範囲で直線 Fit したものである。

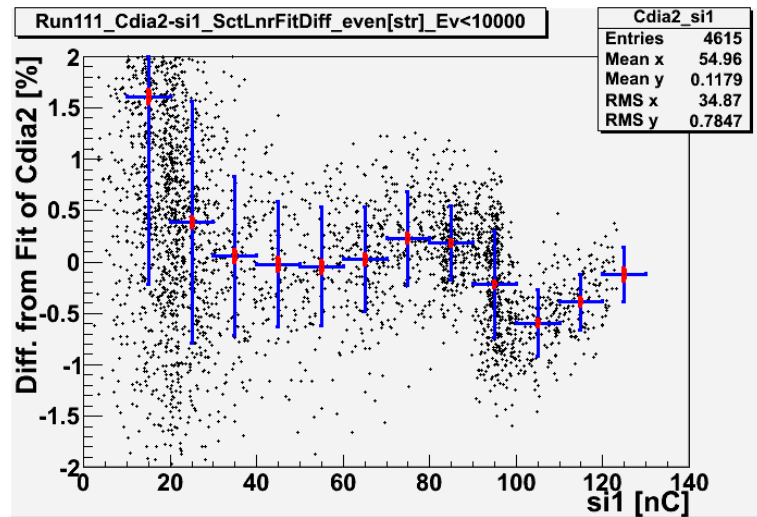


図 3.10: Intensity scan 解析。Fit からのずれを見る。

3.3.1 Run111

Run111ではCVDダイヤモンドに -500 V の電圧を印加し、ビーム強度をはじめ $4.1 \times 10^7\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ から $4.2 \times 10^5\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ まで落としその後 $3.2 \times 10^7\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ まで上昇させた¹³。これはMUMONにおいて予想される粒子数になおすと、230%から2.5%へ下げ、そこから190%に上げたことに相当する。

ビームの不安定な領域を避けるため、ビーム強度を上げている状態でなおかつ強弱2状態あるビームのうち強ビームについてのイベントを選択すると、その結果は図3.11となった。si1で見て10もしくは20 nCから最大ビーム強度までの間で3%以内の非線形性におさまっている。これはDia2でみて 2.1×10^6 から $3.2 \times 10^6\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ に相当する

si1でみてビーム強度が80 nC、Dia2でみて8 nC付近からDia/siの比が大きくなっていくのは以前の実験でもみられており[6]、シリコンPINフォトダイオードの信号飽和によるものと考えられている。CTをリファレンスにしてシリコンPINフォトダイオードの線形性を同様の手順で見たものが図3.12である。si1などは最大で1%ほどの信号量の降下が見えるが、ダイヤモンドでは信号量の降下を断定できるほどのトレンドは見えない。シリコンPINフォトダイオードの信号降下量を80 nCから100 nCの範囲では -0.5% 、100 nCから120 nCの範囲では -1% と見積もると、シリコンの系統的な信号降下割合を ε_{si} 、系統的な降下のなかった場合の信号値を Sig_{si} とおいた場合

$$\frac{\text{Sig}_{dia} \times \varepsilon_{dia}}{\text{Sig}_{si} \times \varepsilon_{si}} = \frac{\text{Sig}_{dia}}{\text{Sig}_{si}} \times \varepsilon_{dia/si}$$

となる。今 $\varepsilon_{dia/si}$ はプロットから求められ ε_{si} に見積もった値を用いて ε_{dia} を計算できるので表3.4のようにCVDダイヤモンドの最大信号降下量を求められる。ただしMUMONで想定される粒子数に対しては信号の降下はほとんど見えていない。

¹³Dia2でみたビーム強度

	$\varepsilon_{\text{dia/si}}$	ε_{si}	ε_{dia}
Dia2:si1	+0.84%	-1%	-0.17%
Dia2:si2	+0.50%	-0.5%	-0.0025%
Dia1:si1	+0.45%	-1%	-0.55%
Dia1:si2	+0.29%	-0.5%	-0.31%

表 3.4: Run111 での CVD ダイヤモンドの最大信号降下量

3.3.2 Run115

Run111 では CVD ダイヤモンドに -300 V の電圧を印加し、ビーム強度をはじめ 3.3×10^7 e/cm²/pulse から 2.1×10^5 e/cm²/pulse まで落としその後 3.6×10^7 e/cm²/pulse まで上昇させた。これは MUMON において予想される粒子数になおすと、190% から 1% へ下げ、そこから 210% に上げたことに相当する。

ビームの不安定な領域を避けるため、ビーム強度を上げている状態でなおかつ強弱 2 状態あるビームのうち強ビームのイベントを選択すると、その結果は図 3.13 となった。si1 で見て 10 もしくは 20 nC から最大ビーム強度までの間で 3% 以内の非線形性におさまっている。これは Dia2 でみて 2.1×10^6 から 3.2×10^6 e/cm²/pulse に相当する。

また Run111 と同様に CVD ダイヤモンドの信号飽和による最大の応答の降下を計算すると表 3.5 となった。

	$\varepsilon_{\text{dia/si}}$	ε_{si}	ε_{dia}
Dia2:si1	+0.73%	-1%	-0.28%
Dia2:si2	+0.29%	-0.5%	-0.21%
Dia1:si1	+0.31%	-1%	-0.69%
Dia1:si2	-0.14%	-0.5%	-0.64%

表 3.5: Run115 での CVD ダイヤモンドの最大信号降下量

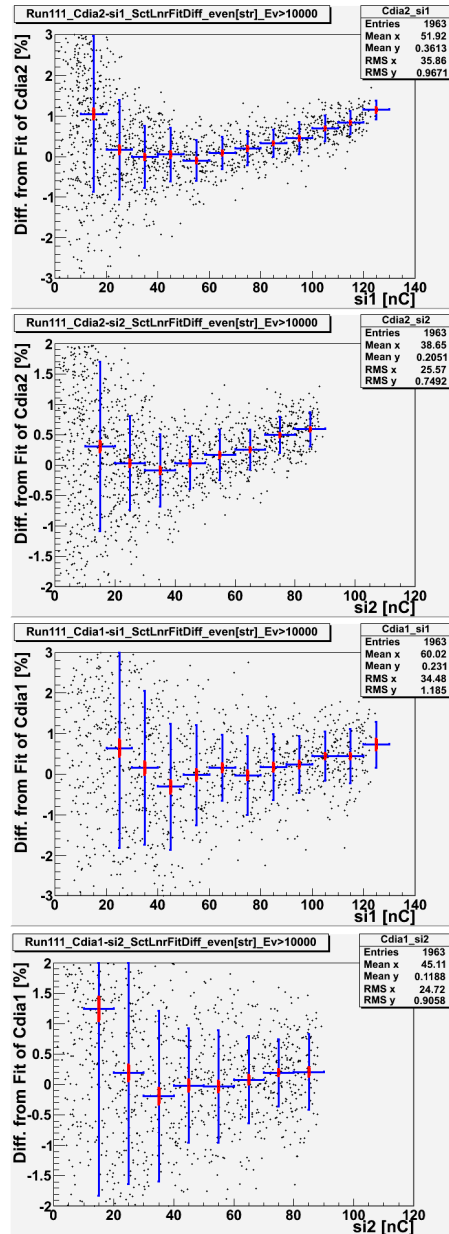


図 3.11: Run111、Intensity scan 解析結果。上から si1 に対する Dia2、si2 に対する Dia2、si1 に対する Dia1、si2 に対する Dia1。Dia2 と si1 で比べたとき、si1 で 75 nC 付近が MUMON で見積もられる粒子数の 100% に対応する。

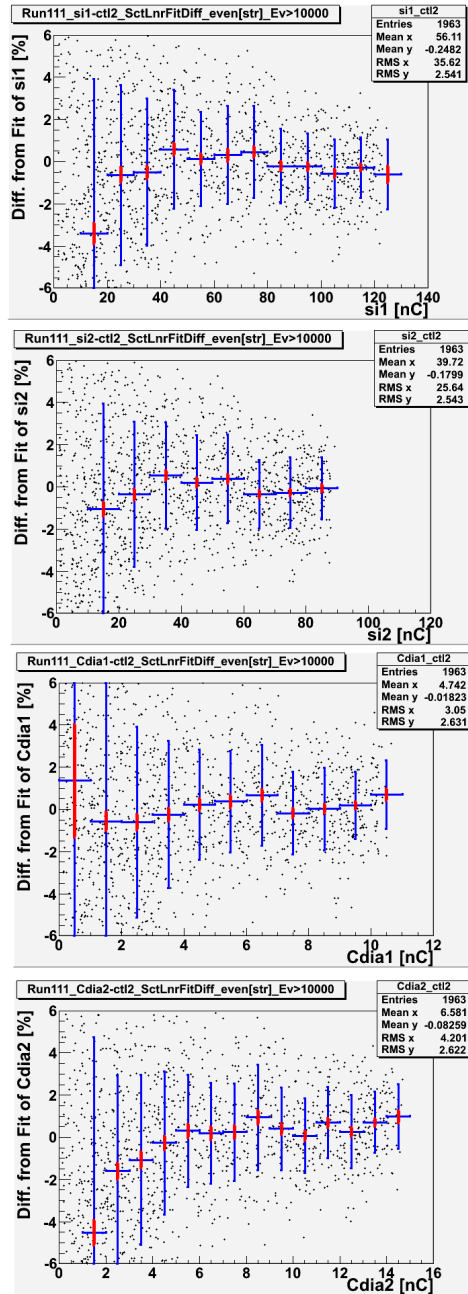


図 3.12: Run111、CT に対する各検出器の応答の Fit からのずれ。上から si1、si2、Dia1、Dia2。

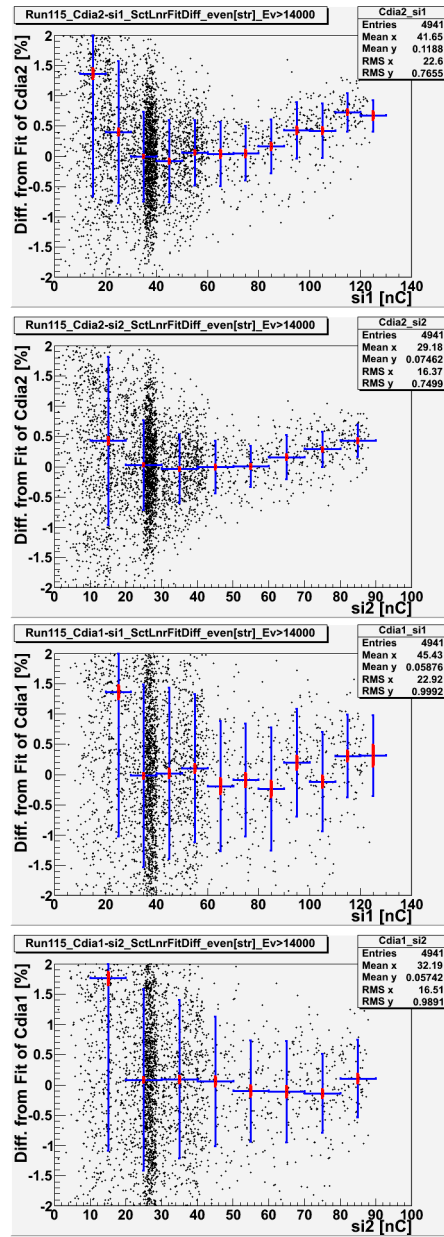


図 3.13: Run115、Intensity scan 解析結果。上から si1 に対する Dia2、si2 に対する Dia2、si1 に対する Dia1、si2 に対する Dia1。Dia2 と si1 で比べたとき si1 で 75 nC 付近が MUMON で見積もられる粒子数の 100% に対応する。

3.3.3 Run117

Run117ではCVDダイヤモンドに -100 V の電圧を印加し、ビーム強度をはじめ $2.8 \times 10^7\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ から $4.2 \times 10^5\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ まで落としその後 $2.6 \times 10^7\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ まで上昇させた。これはMUMONにおいて予想される粒子数になおすと、160%から2.5%へ下げ、そこから150%に上げたことに相当する。

ビームの不安定な領域を避けるため、ビーム強度を上げている状態でなおかつ強弱2状態あるビームのうち強ビームについてのイベントを選択すると、その結果は図3.14となった。si1で見て10もしくは20 nCから最大ビーム強度までの間で3%以内の非線形性におさまっている。これはDia2でみて 2.1×10^6 から $3.2 \times 10^6\text{ e/cm}^2/\text{pulse}$ に相当する

またRun111と同様にCVDダイヤモンドの信号飽和による最大の応答の降下を計算すると表3.6となった。

	$\epsilon_{\text{dia/si}}$	ϵ_{si}	ϵ_{dia}
Dia2:si1	-0.36%	-1%	-1.4%
Dia2:si2	-0.58%	-0.5%	-1.1%
Dia1:si1	+0.075%	-1%	-0.93%
Dia1:si2	-0.13%	-0.5%	-0.63%

表 3.6: Run117 での CVD ダイヤモンドの最大信号降下量

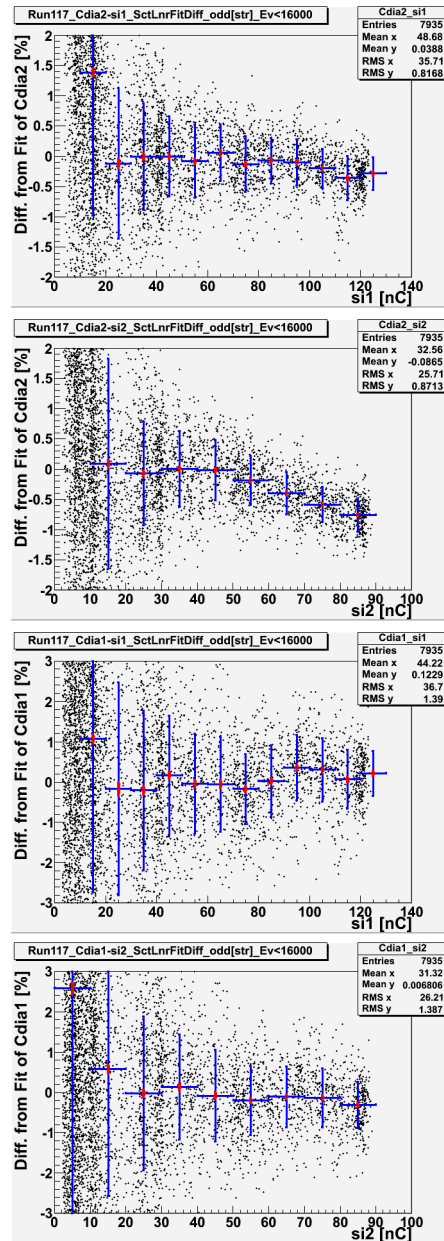


図 3.14: Run117、Intensity scan 解析結果。上から si1 に対する Dia2、si2 に対する Dia2、si1 に対する Dia1、si2 に対する Dia1。Dia2 と si1 で比べたとき si1 で 75 nC 付近が MUMON で見積もられる粒子数の 100% に対応する。

3.3.4 印加電圧との関係

si1 に対する Dia2 の収集電荷量をみておく。si1 の電荷量で 30 nC から 70 nC の区間で線形 Fit をとった時の一次係数から、-500 V 印加時には 0.1184、-300 V で 0.1165、-100 V で 0.1085 となり -500 V 印加時を 100% とすると、-300 V 印加時には 98.40% に、-100 V 印加時には 91.64% になった。この時の Flash ADC で見た 1 shot の波形は図 3.15 の様になっていて、各印加電圧時に Dia2 が約 13 nC のイベントを比べたものである。-500 V 印加時と -300 V 印加の波形は目に見えて変わらないが、100 V 印加時には最大波高が 30% ほど下がりその分テールを引くようになっている。また 50 クロック目や 60 クロック目に小刻みなピークを形成しながら信号が減衰していくが、この原因は分かっていない。

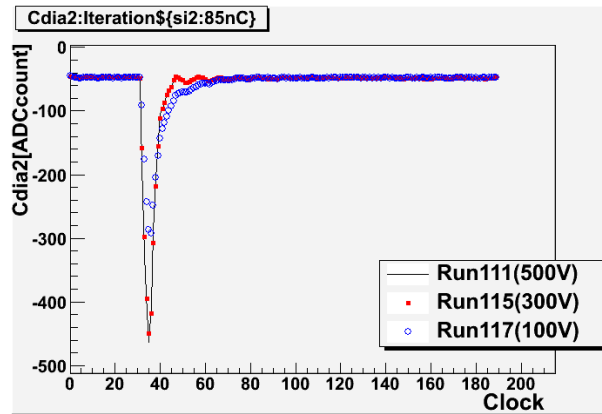


図 3.15: Dia2 の信号が約 13 nC のイベントの Flash ADC で見た波形。黒:-500 V 印加、赤:-300 V 印加、青:-100 V 印加している。

また、これまで計算した CVD ダイヤモンド自体の計算された信号飽和量の印加電圧依存性は図 3.16 のようになった。リファレンスに si1 を使っている場合、si1 の電荷量で 110 から 120 nC の範囲での Dia2 の信号降下を示し、それは約 3×10^7 e/cm²/pulse のビームに相当する。またリファレンスに si2 を使っている場合、si2 の電荷量で 80 から 90 nC の範囲での Dia2 の信号降下を示し、約 2×10^7 e/cm²/pulse のビームに対する飽和量を示している。青線が Dia/si の Fit からのずれとその 68% 誤差、緑が分布の RMS、赤が計算された CVD ダイヤモンドの信号降下割合とその 68% 誤差である。si1 と Dia2 で見ると -500 V の印加電圧を加えたとき 0.17% の降下であるのに比べて -300 V の場合だと 0.28% の降下、-100 V の場合だと 1.4% の降下になって急激に信号量が減る。Dia1 は Dia2 とくらべて異なる印加電圧依存性を持っている

よう見えるが、個体差に依るものかダイヤモンド表面の金メッキの導通が失われていることに依るものなのかは分からない。

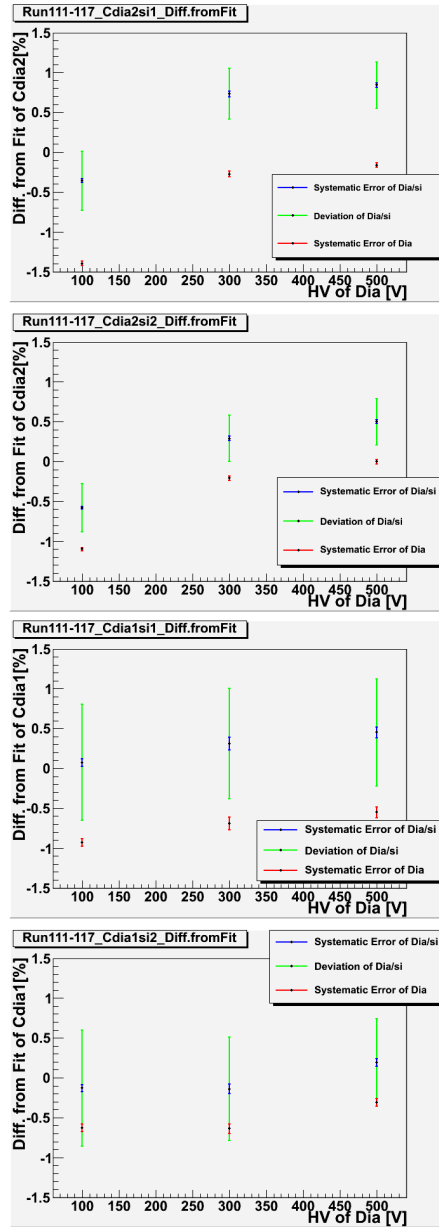


図 3.16: CVD ダイヤモンドの信号降下量の印加電圧依存性。赤線が各印加電圧における CVD ダイヤモンドの信号降下量とその誤差。

上から si1 に対する Dia2、si2 に対する Dia2、si1 に対する Dia1、si2 に対する Dia1。

3.4 長時間安定性試験

ここでは長時間にわたり同強度のビームを照射し、CVD 単結晶ダイヤモンドの応答に時間発展性がないか検証する。なお CVD ダイヤモンドに印加する電圧は -500 V であり、シリコン PIN フォトダイオードへは -80 V の電圧を印加し、双方とも -30 dB のアッテネーターを通してている。

3.4.1 Run120

Run120 では図 3.17 の様にビームを照射し 40 分間の安定性測定を行った。この時照射ビームは Dia2 でみて 1.4×10^7 e/cm²/pulse から 3.2×10^7 e/cm²/pulse の間で変動している。これは MUMON で見込まれる粒子数の 80 から 190% に相当する。

前小節で見たように、この範囲では CVD ダイヤモンドもシリコン PIN フォトダイオードにも信号の飽和が予想される。この飽和を補正するために Intensity scan 測定を行った際のデータを使用する。図 3.9 の様なシリコンに対するダイヤモンドの信号量を見たグラフにおいて、リファレンスの si で見て 10 nC 毎に区間を区切ってその範囲内で線形 Fit をとる。si1 で見て 40 から 50 nC の区間で信号飽和がないとし、この区間での Fit 線を非飽和 Fit 線にする。次に si1 で 80 nC 以上の信号飽和区間で得られたデータの Dia の信号値からその区間内での Fit 線に照合して”理想的に信号飽和した場合の si の値”を得る。その si の値を今度は非飽和 Fit 線と照合して”si にも Dia にも信号飽和がなかった場合の Dia の信号値”を得る。この”理想的に信号飽和した場合の si の値”と”si にも Dia にも信号飽和がなかった場合の Dia の信号値”を補正済みデータとして解析する。

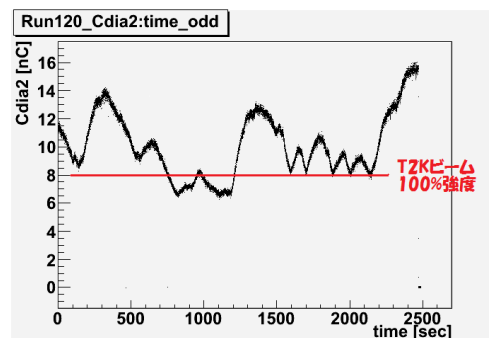


図 3.17: Run120 長時間安定性測定での Dia2 の信号。横軸:経過時間 縦軸:Dia2 の電荷量。

補正の前後で Dia2/si1 の 0 次 Fit からのズレは図 3.18 のようになった。

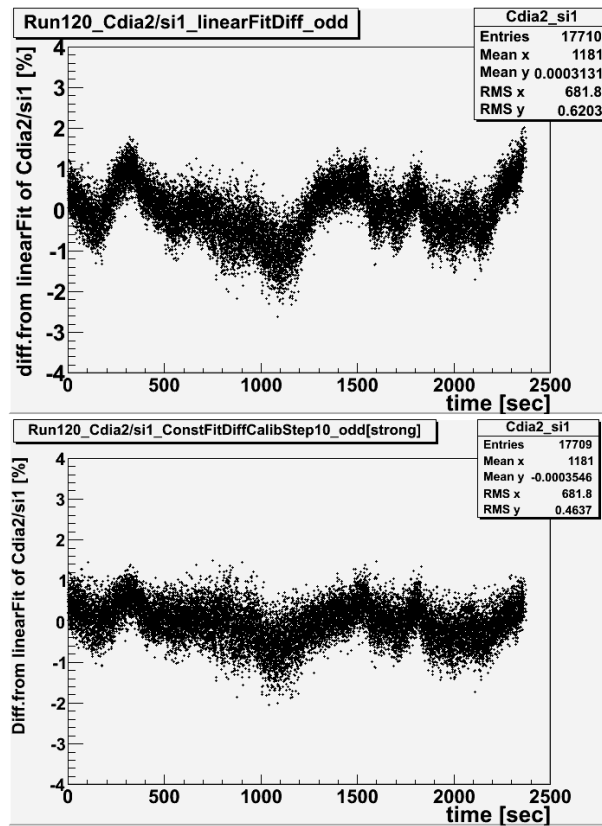


図 3.18: Run120 長時間安定性測定での Dia2/si1 の 0 次 Fit からのズレ。上図が前述の補正前で下図が補正後で横軸は経過時間である。

補正をかけた後、シリコン PIN フォトダイードの信号値に対する CVD ダイアモンドの信号値 Dia/si の時間経過を 0 次 Fit をとって、そこからのズレを見ていく。それを表したものが図 3.19 になり、青色のエラーバーは 200 sec 毎にとった分布の RMS、赤色のエラーバーは分布の平均値の誤差 (68%) を示す。

各グラフとも補正後にもかかわらずビーム強度との相関が見えるが、特に Dia/si の信号比での時間発展性は見えない。200 sec 毎の分布の平均値を見ることによって各グラフの安定性をまとめると表 3.7 のようになり、この範囲での安定性が見られた。

検出器	最小・最大誤差
Dia2/si1	$-0.53 \pm 0.01\% \sim +0.41 \pm 0.01\%$
Dia2/si2	$-0.50 \pm 0.01\% \sim +0.32 \pm 0.01\%$
Dia1/si1	$-0.40 \pm 0.02\% \sim +0.38 \pm 0.03\%$
Dia1/si2	$-0.31 \pm 0.02\% \sim +0.43 \pm 0.03\%$

表 3.7: Run120、40 分間のビーム安定性まとめ。

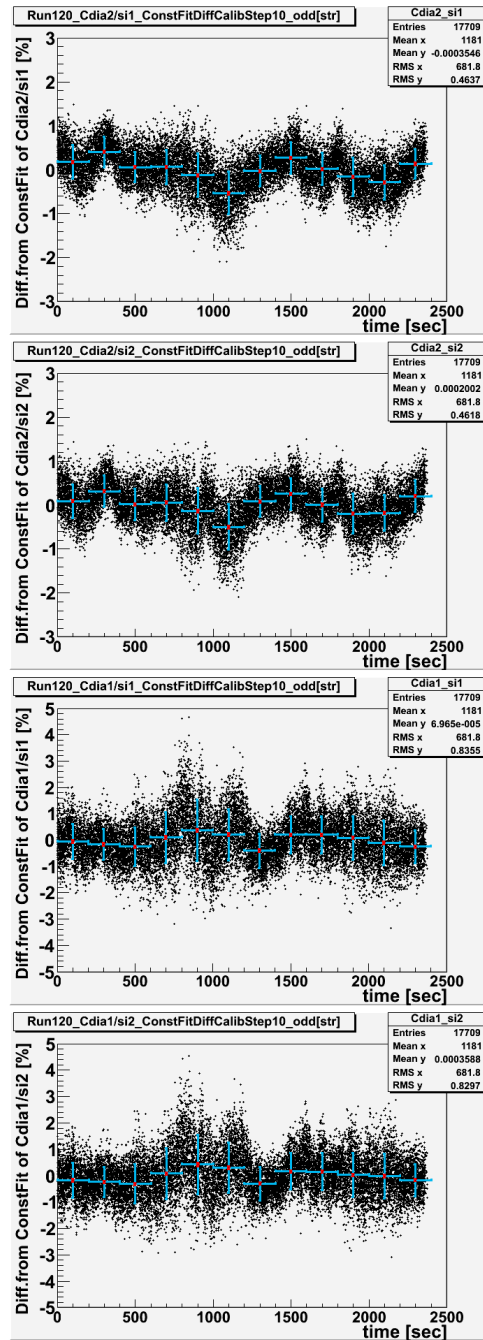


図 3.19: Run120 長時間安定性測定での Dia2/si1 の 0 次 Fit からのズレ。上から si1 に対する Dia2、si2 に対する Dia2、si1 に対する Dia1、si2 に対する Dia1。

3.4.2 Run123

Run123 では図 3.20 の様にビームを照射し 40 分間の安定性測定を行った。この時照射ビームは Dia2 の電荷量で 1.7×10^6 e/cm²/pulse から 2.6×10^6 e/cm²/pulse の間で変動している。これは MUMON において見込まれる粒子数の 10 から 15% に相当する。

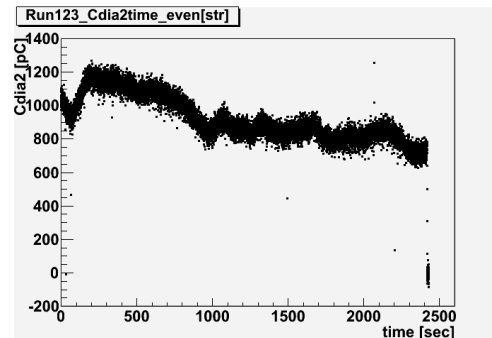


図 3.20: Run123 長時間安定性測定での Dia2 の信号。横軸:経過時間 縦軸:Dia2 の電荷量。

この範囲ではシリコン PIN フォトダイオードの信号が飽和することはないので、補正をかけずに Dia/si 比の 0 次 Fit をとってそこからのズレをみたものが図 3.21 である。またここから 200 sec 毎の分布の平均値を見ることによって各グラフの安定性をまとめると表 3.8 のようになった。

検出器	最小・最大誤差
Dia2/si1	$-0.59 \pm 0.09\% \sim +0.42 \pm 0.07\%$
Dia2/si2	$-0.46 \pm 0.09\% \sim +0.51 \pm 0.07\%$
Dia1/si1	$-1.5 \pm 0.2\% \sim +1.9 \pm 0.2\%$
Dia1/si2	$-1.4 \pm 0.2\% \sim +2.1 \pm 0.2\%$

表 3.8: Run123、40 分間のビーム安定性まとめ。

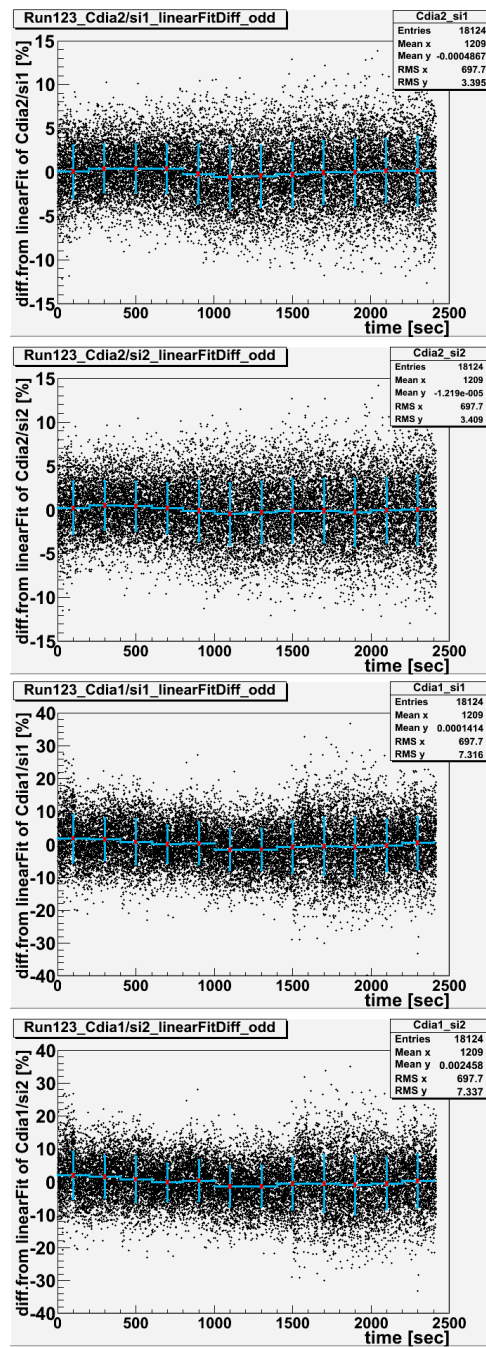


図 3.21: Run123 長時間安定性測定での Dia2/si1 の 0 次 Fit からのズレ。上から si1 に対する Dia2、si2 に対する Dia2、si1 に対する Dia1、si2 に対する Dia1。

3.5 ビーム on/off 試験

ここではCVDダイヤモンドに1分間隔でビームをさせ、CVD単結晶ダイヤモンドの立ち上がり/立ち下り応答に不審な挙動がないか検証する。

この実験の動機は、過去にCVD多結晶ダイヤモンドで同様の実験を行ったところ立ち上がり時に数分間に渡り5%程度の信号上昇不良が見られたためである [6]。CVD単結晶ダイヤモンドにも同様の現象が起きるかどうか検証する。

ビームの開け閉めは図 3.22 の様な時間配分で行った。ここでは 2.1×10^7 または 3.0×10^7 e/cm²/pulse のビームが出ている。これはMUMONにおいて見込まれる粒子数の130または190%に相当する。この測定の前に長期安定性試験をしているのでそれも含めれば40分ビーム開 → 1分ビーム閉 → 1分ビーム開 → 1分ビーム閉 → 1分ビーム開 → ビーム閉となる。ビームの開閉はバンチャー部にあるスクリーンを用いて行い、測定中にフィラメントへの印加電圧を変更してビーム強度を変えたりしない。なおこのスクリーンの挿入は0.5 sec、スクリーンの抜出には0.7 secの時間がかかり、15 Hzのビーム周期と比べて充分速いわけではない。故にスクリーンが移動中の場合シリコンPINフォトダイオードとCVD単結晶ダイヤモンドにあたるビーム量に差があり¹⁴比較ができない。ここではシャッターが開いた後の挙動にのみ注目することとする。

解析方法はまずCTを用いてシャッターが開閉中に採られたイベントを決定し、各検出器でその前後100イベントの平均値をとる(図 3.23)。それをビーム上昇率0%と100%のレベルと定義して、シャッター開閉前後のビーム上昇率を比較する。

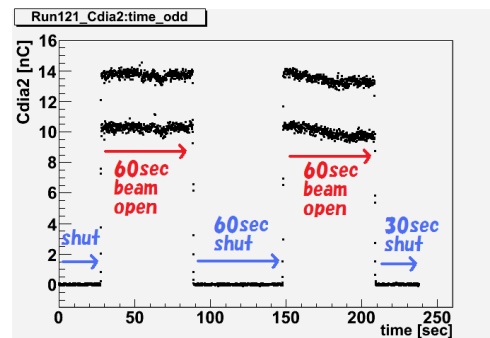


図 3.22: Run121 ビーム on/off 試験の様子、横軸:経過時間 縦軸:Dia2 の電荷量。

¹⁴ビーム断面の直径 10 mm に対してシリコン PIN フォトダイオードの有感面積が 10×10 mm で CVD 単結晶ダイヤモンドは 4×4 mm である。

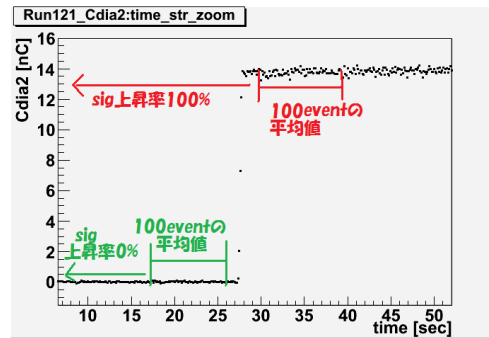


図 3.23: Run121 ビーム on/off 試験での上昇率の決め方

もっともビーム上流に近い Dia2 と si1 の強ビームついてみた結果は図 3.24 のようになった。右列において立ち上がりでの始め 3 点と立ち下りでの後ろ 5 点はシャッター動作中にあたるイベントである。その前後での Dia2 と si1 の信号を比べると、信号立ち下り時には問題がないように見える。信号立ち上がり時においても過去の例に見られたような数分間に及ぶ 5% もの信号減少は見られなかったが、5 イベント (0.3 sec) 程度に 0.5% ほどの信号上昇不良傾向が見える。これについては 0.5% の変動は立ち上がり後の 100 イベントでの統計誤差の範囲内であることと、図 3.25 のように他のイベントで必ずしもこのようになっていないことから、系統的な信号の上昇不良ではないと考えられる。

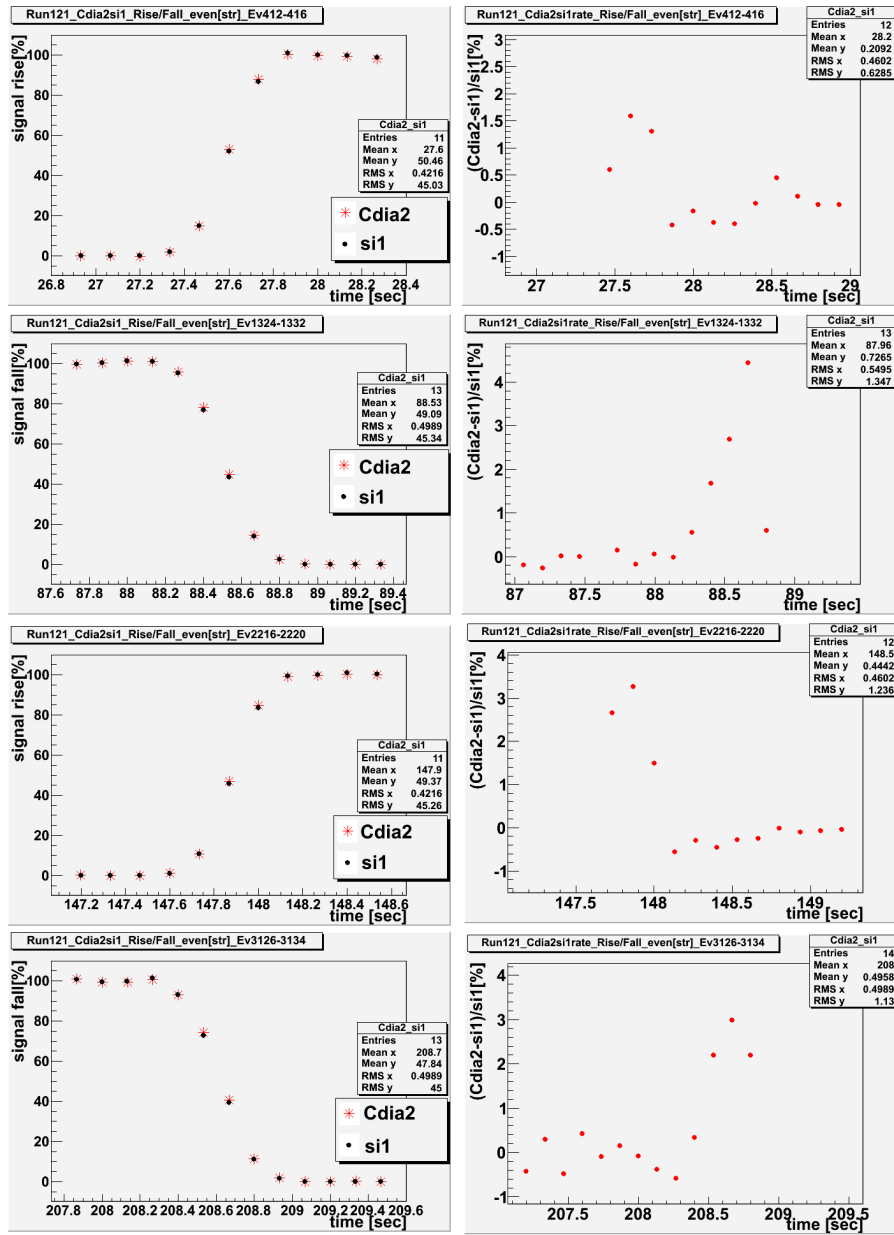


図 3.24: Run121 ビーム on/off 試験。左列が Dia2 と si1 の信号上昇率の比較、右列がその際の si1 に対する Dia2 の信号量比。また上段から第一立ち上がり、第一立ち下がり、第二立ち上がり、第二立ち下がり。

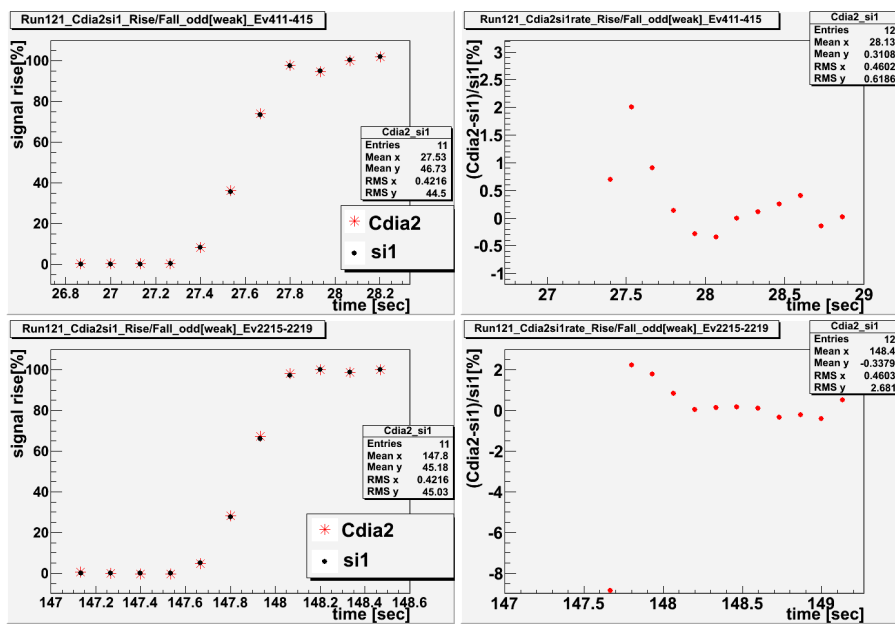


図 3.25: Run121 ビーム on/off 試験。弱ビームによる Dia2/si1 の第一、第二立ち上がりで、右列の始め 3 点はシャッター動作中のエントリーである。

4 結論

100 MeV 電子線形加速器を用いて CVD 単結晶ダイヤモンドの性能評価を行った結果についてまとめる。

- CVD 単結晶ダイヤモンドの信号は応答が速く、T2K ビームのデザイン値での bunch 毎の測定が可能である。
- CVD ダイヤモンド応答の非線形性は -500 V の印加電圧時には 2.1×10^6 から $3.2 \times 10^7 \text{e/cm}^2/\text{pulse}$ の範囲で要請された 3% 以内になることがわかった。これは T2K ビームのデザイン値での MUMON 内で想定される粒子数の 12 から 190% に相当する。
- $3.2 \times 10^7 \text{e/cm}^2/\text{pulse}$ のビームに対する CVD ダイヤモンド自体の系統的な信号降下量は -0.2% 程度であるおそれがあるが、 $1.7 \times 10^7 \text{e/cm}^2/\text{pulse}$ の MUMON 内で想定される粒子数の 100% 以下のビームに対してはほとんど見えなかった。
- CVD ダイヤモンドの印加電圧依存性は -500 V 印加に比べて -300 V 印加の場合は収集電荷量が 2% 落ちるが系統的な信号降下量は T2K ビームの枠内では見られなかった。しかし、 -100 V 印加の場合は Flash ADC 波形がテールを引くようになるので bunch 毎の測定に支障をきたすおそれがある。
- 40 分間のビーム連続照射に対する安定性は、およそ -0.5 から $+0.4\%$ で時間発展性のトレンドは見えなかった。
- 1 分間隔のビーム on/off では、特に過去に見られた信号上昇不良は見えなかった。

T2K 実験へはビーム強度が $2.1 \times 10^6 \text{e/cm}^2/\text{pulse}$ (MUMON での粒子数の 12%) 以上での使用において要請された条件を満たすことがわかった。

今後の課題としては CVD ダイヤモンドの個体差の評価や、アッテネーターの値を調節しての $2.1 \times 10^6 \text{e/cm}^2/\text{pulse}$ 以下のビーム強度での応答の線形性を見る必要がある。

謝辞

修士課程での3年間を振り返るに当たりこれほど多くの人と接し、またお世話になった事は今までになかったように感じます。

本研究室の清矢先生、山本先生、また退官なされた奥沢先生方各位には公私ともに大変お世話になりました。これまで物理と言えば座学ばかりしてきましたがこの研究室に所属して機械工作にも手を出す機会を頂き、新しい楽しみまた道を示して頂きました。また研究発表などに対して的確な指摘・また新しい方向性などを示して頂くにつけ、自分の未熟さを知ると同時に学問の奥の深さを感じた次第です。研究室同窓の方々に置かれましても、私が3年間なんとかして乗り切れたのも皆様の温かいお言葉と楽しい時間があってこそそのものだと感じます。

T2Kグループでは本当に多くの方々と接し、大変勉強になりました。中でもMU-MONグループの京都大学の松岡氏、久保氏、村上氏、鈴木氏には実験・作業を通して大変多くのことを教えて頂きました。この論文を執筆するにあたり皆様のお力なしでは全く完成しなかつたろうことを今ひしひしと感じております。本当にありがとうございました。この実験をするにあたって加速器運転にお力を頂きました、京都大学化学研究所の野田先生、想田先生、頓宮氏にも深く御礼を申し上げます。また他にも丸山先生をはじめとしてKEKの方々、京都大学の中家先生、市川先生、東京大学の横山先生にも多くのご助言を頂きました。

皆々様のおかげでようやくですが今の私があることに深く感謝いたしております。いつか何か別の形で恩を返させて頂けるようこれからも努力していく所存であります。

参考文献

- [1] F.Reines and C.L.Cowan,“Detection of the Free Neutrino”, Phys. Rev. 92, p830(1953)
- [2] C.L.Cowan, F.Reines, F.B.Harrison, H.W.Kruse and A.D.McGuire,“Detection of the Free Neutrino:a Confirmation”, Science 124, p103(1956)
- [3] Y.Fukuda et al. (Super Kamiokande Collaboration),“Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos”,Phys. Rev. Lett. 81, p1562(1998)
- [4] Z.Maki,M.nakagawa and S.Sakata,“Remarks on the Unified Model of Elementary Particles”,Prog. Theor. Phys. 28, p870(1962)
- [5] 村上明、修士論文、京都大学 (2010 年)
- [6] 松岡広大、修士論文、京都大学 (2007 年)
- [7] 犬塚直夫・澤邊厚仁、ダイヤモンド薄膜、産業図書株式会社 (1987 年)
- [8] element six 社、[http://www.e6cvd.com/en/media/e6/e6advancedmaterials/MonoditeMCC\(SingleCrystalCVD\).pdf](http://www.e6cvd.com/en/media/e6/e6advancedmaterials/MonoditeMCC(SingleCrystalCVD).pdf)
- [9] D. Meier et al. (RD42 Collaboration), ”Proton Irradiation Study of CVD Diamond Detectors for High Luminosity Experiments at the LHC”, CERN-EP/98-79 (1998)
- [10] 加茂睦和、マイクロ波プラズマ法によるダイヤモンドの気相合成、プラズマ・核融合学会誌 第 68 巻第 2 号, p131(1992 年)
- [11] element six 社、<http://www.e6cvd.com/cv/page.jsp?pageid=335>
- [12] 薄膜ハンドブック (第二版)、日本学術振興会薄膜第 131 委員会、オーム社 (2008 年)
- [13] 久保一、ミュオンモニターを用いた T2K 実験ビームコミッショニング 2、2009 年秋季日本物理学会
- [14] 京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センター、<http://wwwal.kuicr.kyoto-u.ac.jp/www/accelerator/elinac.html>