

T2K長基線ニュートリノ振動実験におけるダイヤモンド検出器
の性能評価

(Performance evaluation of the diamond detector in the T2K Long
Baseline Neutrino Oscillation Experiment)

理学研究科

数物系専攻

中居貴士

概要

T2K (Tokai to Kamioka) 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) で大強度ニュートリノビームを作り、295km 離れた岐阜県神岡町の地下 1000 メートルに位置する東京大学宇宙線研究所の 5 万トン水チェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデ (SK) に打ち込み、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動を発見し、 θ_{13} の測定、そして θ_{23} 、 Δm_{23}^2 について精密測定することを目的とするニュートリノ振動実験である。T2K 実験においてニュートリノビームは、陽子ビームを炭素ターゲットに衝突させて生成されるパイ中間子の崩壊から得られるニュートリノを使用している。ニュートリノは検出しにくいいため、ニュートリノビームのプロファイルを知るのは容易でない。そこで、ミューオンモニター (MUMON) でミューオンニュートリノと共に生成されるミューオンを検出することにより、間接的にニュートリノビームのプロファイルをリアルタイムで知ることができる。MUMON では現在シリコン PIN フォトダイオードを使用しているが、今後ビーム強度が上がると放射線損傷のため使用できなくなる。そこで、シリコン PIN フォトダイオードの代替として CVD (Chemical vapor deposition) ダイヤモンドが考えられている。

CVD ダイヤモンドは 2009 年に京都大学化学研究所にある電子線形加速器でビームテストにて MUMON で使用できることが確認された。そして、その後 J-PARC の MUMON にインストールして T2K 実験の実際のビームを照射した。

本論では、MUMON にインストールした CVD ダイヤモンドの T2K 実験のビームでの応答の評価と CVD ダイヤモンドの配置の検討を報告する。

目次

第1章 導入	3
1.1 ニュートリノ振動	3
第2章 T2K 実験	5
2.1 概要・目的	5
2.1.1 T2K 実験の概要と目的	5
2.1.2 off-axis 法	5
2.2 J-PARC	6
2.3 ニュートリノビームライン	7
2.3.1 陽子ビーム強度モニター (Current Transformer; CT)	8
2.3.2 炭素ターゲット	8
2.3.3 電磁ホーン	8
2.3.4 崩壊トンネルとビームダンプ	8
2.3.5 ミューオンモニター (MUMON)	8
2.4 前置検出器	8
2.4.1 ND280 off-axis 検出器	9
2.4.2 on-axis 検出器 (Interactive Neutrino GRID; INGRID)	10
2.5 後置検出器:スーパーカミオカンデ	11
2.5.1 スーパーカミオカンデ	11
2.5.2 T2K ビームデータ	11
第3章 ミューオンモニター (MUMON)	13
3.1 ミューオンモニターの性能に対する要請	13
3.2 イオンチェンバー	14
3.3 シリコン PIN フォトダイオード	15
3.4 エレクトロニクスとケーブル	16
第4章 CVD ダイヤモンド 検出器	17
4.1 ダイヤモンド 検出器	17
4.1.1 ダイヤモンドの分類	17
4.1.2 検出器としての使用方法	19
4.2 データ解析	21
4.2.1 Good spill selection	21
4.2.2 信号波形	22
4.2.3 線形性	23
4.2.4 長期安定性	24
4.3 ミューオンモニターにおけるダイヤモンド 検出器のチャンネル配置	26
4.3.1 ミューオンビームのプロファイル再構成	27
4.3.2 簡易シミュレーションによる検討	28
4.3.3 シリコン PIN フォトダイオードのデータを用いた検討	31
4.4 ダイヤモンド 検出器のパッケージ	32

4.4.1	パッケージの変更	33
4.4.2	紫外線に対する応答確認	34
第 5 章	結論	35

第1章 導入

1.1 ニュートリノ振動

ニュートリノは、電氣的に中性でスピン 1/2 のレプトンであり、電子ニュートリノ ν_e 、ミューオンニュートリノ ν_μ 、タウオンニュートリノ ν_τ の3世代がある。素粒子物理学の標準模型において、ニュートリノは弱い相互作用しかせず質量がゼロとして扱われている。しかし、大気ニュートリノの観測から、ニュートリノは世代間で振動しており有限の質量を持つことが示唆されている。

ニュートリノ振動とは、ある種類のニュートリノが時間経過と共に別の種類のニュートリノに変化する現象である。これは弱い相互作用のフレーバー固有状態が3つの縮退していない質量固有状態の混合状態であるため起こると考えられている。フレーバー固有状態を $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ 、質量固有状態を (ν_1, ν_2, ν_3) とすると、フレーバー固有状態は次のように表せられる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (\alpha = \{e, \mu, \tau\}, i = \{1, 2, 3\}) \quad (1.1)$$

行列 $U_{\alpha i}$ は Maki-Nakagawa-Sakata 行列 (MNS 行列) と呼ばれ、以下のように表せられる。

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ で、 θ_{ij} は ν_i と ν_j の混合角である。また、 δ は CP 非保存の位相である。

時刻 $t=0$ 、位置 $L=0$ においてフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ で生成されたニュートリノの時間発展について考える。まず、質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の時間発展は、

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - p_i t)} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.3)$$

となる。ここで、 E_i , p_i はそれぞれエネルギーと運動量であり、 L は時刻 t におけるニュートリノの飛行距離である。また、自然単位系 ($\hbar = c = 1$) を使用している。ニュートリノの質量が十分に小さい ($m_i \ll E_i$) なら、エネルギーは以下のように近似でき、

$$E_i \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \quad (1.4)$$

また、ニュートリノが光速に近い ($t \approx L$) とすると、

$$|\nu_i(L)\rangle = e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}L} |\nu_i\rangle \quad (1.5)$$

となる。 $|\nu_\alpha\rangle = \sum U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$ より、距離 L においてフレーバー固有状態は

$$|\nu_\alpha(L)\rangle = \sum U_{\alpha i} |\nu_i(L)\rangle = \sum e^{-i\frac{m_i^2}{2E}L} |\nu_i\rangle \quad (1.6)$$

となる。ここで、ある決まったエネルギーを考え、 $E_i = E$ とした。

よって、時刻 $t=0$, $x=0$ にフレーバー α であったエネルギー E のニュートリノが、距離 L を飛行し

た時にフレーバー β として観測される確率 P は、

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 \\
&= \left| \sum U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_i^2}{2E} L} U_{\beta i}^* \right|^2 \\
&= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum \sum \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \\
&\quad \pm 2 \sum \sum \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right)
\end{aligned} \tag{1.7}$$

となる。ここで、質量二乗差 $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$ である。第三項の符号 \pm は CP 非保存の影響であり、+がニュートリノで-が反ニュートリノに対応している。CP 位相である δ がゼロであれば、この項がゼロになる。そして、 U が対角（混合角がゼロ）、あるいはニュートリノの質量がゼロの場合は式 (1.7) が第一項のみになり振動が起らない。

今日までに行われてきたニュートリノ振動実験から、 $\Delta m_{21}^2 \ll |\Delta m_{31}^2| \simeq |\Delta m_{32}^2|$ ということがわかっていて。これにより式 (1.7) は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \simeq \delta_{\alpha\beta} + 4|U_{\alpha 3}|^2(|U_{\beta 3}|^2 - \delta_{\alpha\beta}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right) \tag{1.8}$$

となり、 $\Delta m_{31}^2 \simeq \Delta m_{32}^2$, $\theta_{13} \simeq 0$ なので、 ν_μ の振動確率については以下のように表せられる。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) \tag{1.9}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) \tag{1.10}$$

ここまで、自然単位系をもちいたので、振動の位相は、

$$\frac{\Delta m^2}{4E\hbar c} L = 1.267 \cdot \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} \cdot L [\text{km}] \tag{1.11}$$

である。

T2K 実験では $L=295\text{km}$ であり、ここからミューニュートリノ消失モードで後置検出器における振動確率を最大にするニュートリノのエネルギーは、

$$\frac{1.267 \Delta m_{23}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} = \frac{\pi}{2} \tag{1.12}$$

から求められる。

第2章 T2K実験

2.1 概要・目的

2.1.1 T2K実験の概要と目的

T2K実験は茨城県東海村と岐阜県神岡町を結ぶ長基線ニュートリノ振動実験である。J-PARCでミュオンニュートリノビームを作り、振動前のニュートリノをJ-PARCで測定し、295km飛んだ後のニュートリノをスーパーカミオカンデで観測する(図2.1)。そして、T2K実験では振動確率を最大にするために世界で初めてoff-axis法を利用している。



図 2.1: T2K 実験の概略図

T2K実験の主な目的は以下の2つである。

- 未発見の電子ニュートリノ出現事象 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ を発見し、混合角 θ_{13} の測定
- ミュオンニュートリノ消失事象 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ による混合角 θ_{23} 、 Δm_{23}^2 の精密測定

θ_{13} の探索において、現在の上限値 $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.15$ より一桁以上良い感度の $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.006$ を見込んでいる。また、混合角 θ_{23} 、 Δm_{23}^2 の精密測定は $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定に対して重要であり、 $\theta_{23}=45^\circ$ であるかを定める。

2.1.2 off-axis 法

off-axis法は、ニュートリノビーム中心を検出器の方向からずらすことで、幅の狭いエネルギースペクトルのニュートリノビームを得る手法である。

T2K実験では陽子ビームを炭素ターゲットに当て、2次粒子であるパイオンの2体崩壊($\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$)からのミュオンニュートリノを用いている。パイオンの2体崩壊におけるニュートリノエネルギー E_ν は実験室系で次のように表される。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta_\nu)} \quad (2.1)$$

ここで、 m_π 、 E_π 、 p_π はパイオンの質量、エネルギー、運動量を、 m_μ はミュオンの質量であり、 θ_ν はパイオンの入射方向に対するニュートリノの放出角である(図2.2)。 $\theta=0^\circ$ 、 2.0° 、 2.5° 、 3.0° の時の E_ν と p_π の関係を図2.3に示した。これを見ると、 $\theta=0^\circ$ においてニュートリノのエネルギーはパイ

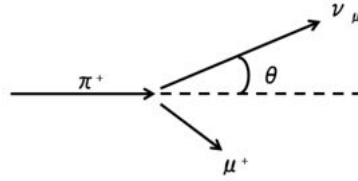


図 2.2: パイオンの崩壊図。

オンの運動量に比例しているのに対して、 $\theta=2.0^\circ, 2.5^\circ, 3.0^\circ$ ではパイオンの運動量にあまり依存せず狭い範囲に揃うことがわかる。

スーパーカミオカンデにおいてニュートリノの振動確率が最大になるのは、ニュートリノエネルギーが $0.5\sim 0.7\text{GeV}$ 程度であるため (図 2.4)、T2K 実験ではニュートリノビーム方向をスーパーカミオカンデの方向から 2.5° ずらしている。

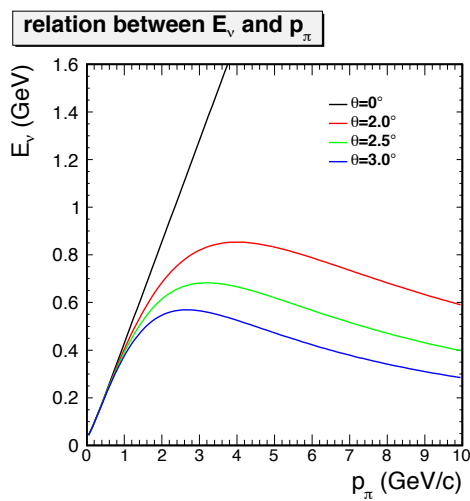


図 2.3: ニュートリノのエネルギーとパイオンの運動量との関係。

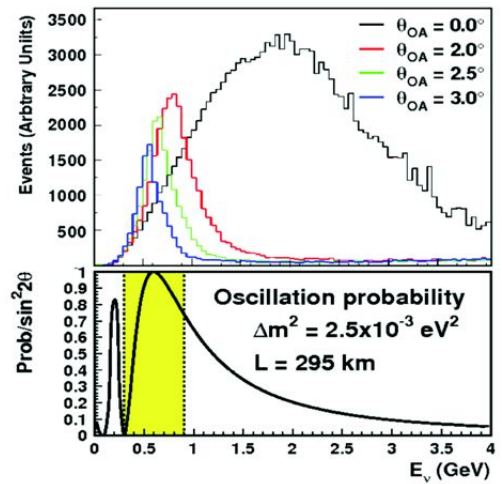


図 2.4: 上は off-axis 法によるニュートリノのエネルギースペクトル。下はニュートリノ振動確率。

2.2 J-PARC

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は中性子、ミューオン、ニュートリノなどの粒子ビームを生成する複合型加速器施設である。それらのビームを用いて、様々な実験が行われている (図 2.2)。J-PARC は下記の 3 つの加速器から構成されている。

- 線形加速器 (LINAC)
- 3GeV シンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron; RCS)
- 50GeV シンクロトロン (Slow-Cycling Main Ring Synchrotron; MR)

まず、LINAC で H^- を 181MeV まで加速させ、荷電変換フォイルによって陽子ビームに変換し RCS に入射する。RCS では 2 バンチの陽子ビームを 25Hz 周期で 3GeV まで加速させる。そして、この RCS ビームの内で約 $4\sim 5\%$ を MR に供給する。MR には一度に 2 バンチずつを 4 回注入し、計 8 バンチの陽子ビームを 30GeV まで加速させる。最終的に、MR で加速された陽子ビームは速い取り出しでニュートリノビームラインに送られる。MR の周期は $\sim 3\text{Hz}$ であり、ビーム強度の設計値は RCS が 1.0MW 、MR が 0.75MW である。



図 2.5: J-PARC の概略図

2.3 ニュートリノビームライン

1 周期内の一連のバンチは MR からスパイルとして T2K ニュートリノビームラインに取り出され、炭素ターゲットに照射される。そして、ハドロン反応によりパイオンを含む多数のハドロンが生成される。生成されたパイオンは電磁ホーンによって収束され、崩壊トンネル内で式 (2.2) のように二体崩壊する。



この崩壊により、ミュオンニュートリノビームが生成される。ビームに含まれる陽子、崩壊しなかったパイオン、および低エネルギーのミュオンなどは崩壊トンネルよりビーム下流にあるビームダンプによって吸収される。その結果、主にニュートリノと高エネルギーのミュオンが通過し、ミュオンモニターに到達する。(図 2.3)

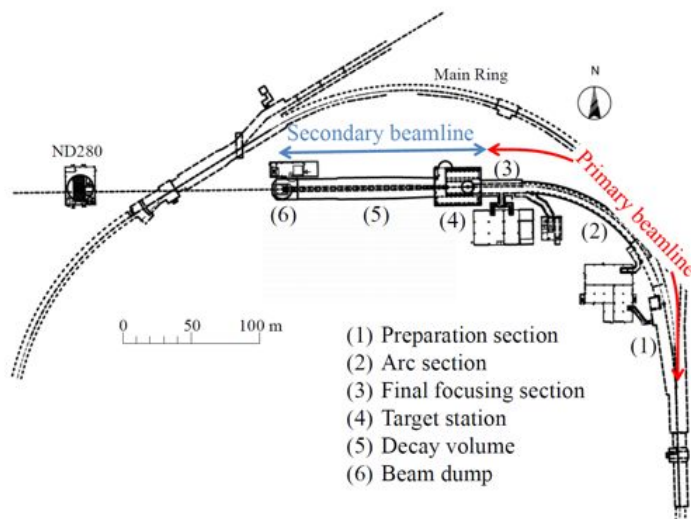


図 2.6: ニュートリノビームラインの概略図。

2.3.1 陽子ビーム強度モニター (Current Transformer; CT)

CTは強磁性体コアに銅線を50巻したトロイダルコイルである。陽子ビームがCTを通過する際に発生するトロイダル磁場によって生じる誘導電流を信号として読み出す。また、CTはビームタイミングも測定している。

2.3.2 炭素ターゲット

ターゲットコアは直径2.6cm、長さ91.4cm、密度 1.8g/cm^3 の炭素棒である。コアは炭素チューブで覆われており、チタンケースに收容されている。ターゲットは第1電磁ホーン内に置かれ、陽子ビーム照射に伴う発熱の冷却のためにヘリウムガスが流されている。

2.3.3 電磁ホーン

電磁ホーンは2つのアルミニウム合金の同軸磁石から成っており、磁石はパルス電流を負荷することでトロイダル磁場を内部に生成する。最大磁場は320kAの電流で2.1Tになる。

T2Kでは3つの電磁ホーンを適用しており、第1ホーンはパイオンを収集し、第2, 3ホーンはそれらを収束する。最大磁場を得るために内部の直径を出来るだけ小さくし、パイオン吸収を最小にするために磁石を出来るだけ薄くして、ニュートリノフラックスを最大になるように調整してある。第1, 2, 3ホーンの長さは、それぞれ1.5m, 2.0m, 2.5mである。

2.3.4 崩壊トンネルとビームダンプ

崩壊トンネルは長さ96mの鉄容器であり、厚さ6mの鉄筋コンクリートで覆われている。水で壁やコンクリートを冷却するために、ビーム軸に沿って鉄壁にプレートコイルを溶接している。

ビームダンプは崩壊トンネルの直後に置かれており、75トンの炭素(1.7g/cm^3)から成っていてヘリウム容器に入っている。容器の内外に鉄プレートが置かれており、計2.4mの厚さになる。そして、5GeV以上のミュオンだけがビームダンプを通過し下流のミュオンピットに到達できる。

2.3.5 ミューオンモニター (MUMON)

ミュオンモニターは炭素ターゲットからビーム下流118mに位置しており、ミュオンニュートリノと共に生成されるミュオンをバンチ毎に測定することで間接的にニュートリノの強度・プロファイルを測定している。ミュオンモニターについては次章で詳しく述べる。

2.4 前置検出器

ニュートリノのエネルギースペクトル、フレーバー、反応率を前置検出器によって測定している。前置検出器は炭素ターゲットから280m下流に設置しているため、ND280と呼ばれる。前置検出器はスーパーカミオカンデの方向に位置する off-axis 検出器と、ビーム軸上に位置する on-axis 検出器 (INGRID) から構成される (図 2.7, 図 2.8)。 (図 2.7)

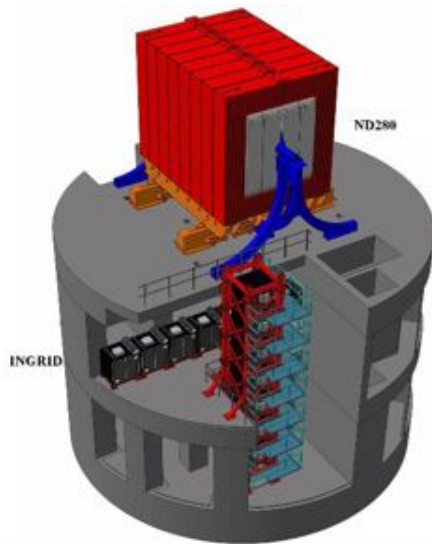


図 2.7: 前置検出器の概略図。ニュートリノビームは図の手前から後方に入射される。

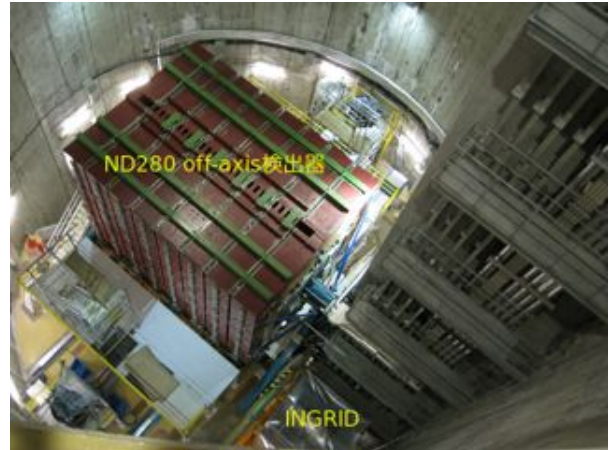


図 2.8: 前置検出器ホールの写真。

2.4.1 ND280 off-axis 検出器

Magnet

off-axis 検出器には CERN の UA1 実験で使用していたダイポールマグネットが使われており、このマグネット内に検出器群が收容されている。マグネットに 2.9kA の電流を流し 0.2T の水平な一様磁場を生成させて、検出器内で反応した荷電粒子の運動量を測定する。

P0D(Pi-zero Detector)

P0D はマグネット内の最上流に置かれており、鉛薄膜とプラスチックシンチレータと水ターゲットによるサンドイッチ構造になっている。P0D ではスーパーカミオカンデにおける ν_e 出現に対するバックグラウンドを見積もるために、中性カレント反応 ($\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \pi^0 + X$) により生成した π^0 を測定する。

Tracker

ND280 では P0D の下流に以下の 2 種類の飛跡検出器を用い、荷電カレント反応によって生成した荷電粒子の運動量を測定している。

- TPC(Time Projection Chamber)
TPC は混合ガス Ar:CF₄:iC₄H₁₀(95:3:2) と MicroMegas を使用している。TPC によって測定した荷電粒子の運動量を用いて、ニュートリノのエネルギースペクトルを再構成し、また、粒子識別のための電離率を測定している。計 3 台の TPC が用いられている。
- FGD(Fine Grained Detector)
FGD は TPC が交互に挟むように設置されており、計 2 台の FGD が用いられている。FGD はセグメント化されたシンチレータ層で構成されており、飛跡検出以外にニュートリノ反応ターゲットとしての役割もある。

ECAL(Electromagnetic Calorimeter)

ECALはP0D、TPC、FGDを覆うように設置されており、プラスチックシンチレータ層と鉛層から構成されている。ECALの役割は、内部の検出器で生成した γ 線を検出することと、荷電粒子を検出し粒子識別(e, μ, π)をすることである。

SMRD(Side Muon Range Detector)

SMRDはマグネットの全サイドに設置されており、マグネットヨークの隙間にプラスチックシンチレータ層が挿入されている。内部の検出器から抜け出たミュオンの飛程を測定し、運動量を再構成する。

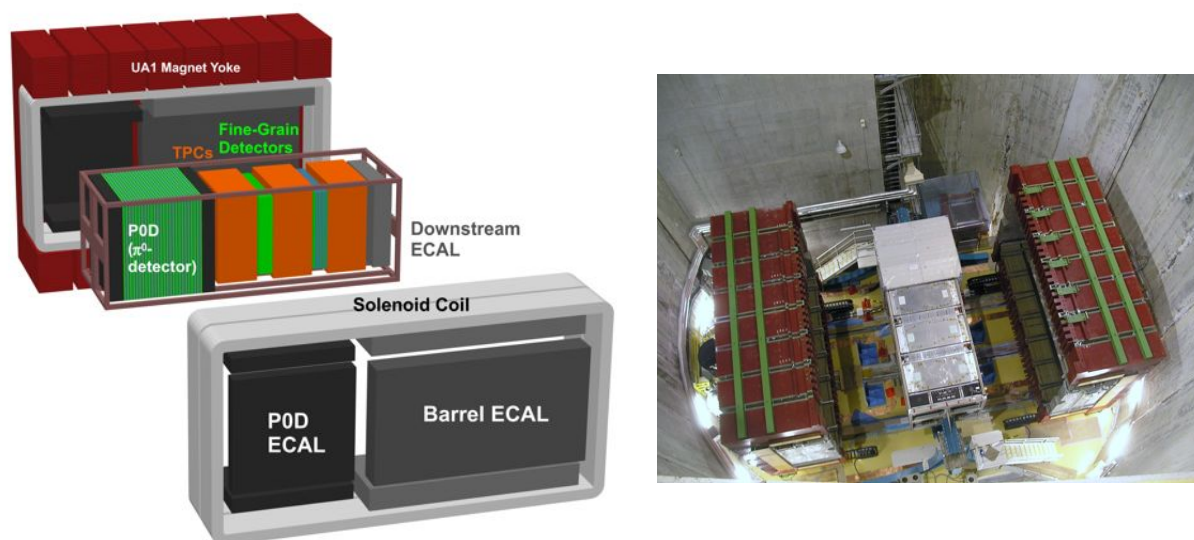


図 2.9: ND280 off-axis 検出器の概略図。右は Magnet が開いた状態の写真。

2.4.2 on-axis 検出器 (Interactive Neutrino GRID; INGRID)

INGRIDの構造は水平方向に7台、垂直方向に7台のモジュールが十字に、さらに、非十字の位置に2台のモジュールを配置し、ビーム中心から $\pm 5\text{m}$ の領域を覆っている(図2.10)。各モジュールは9枚の鉄プレートと11枚のプラスチックシンチレータ層のサンドイッチ構造になっており、一つのモジュールの大きさは $120\text{cm} \times 120\text{cm} \times 130\text{cm}$ である(図2.11)。また、各モジュールに対し、VETOとしてシンチレータプレーンで上部と左右部を囲っている。鉄層でのニュートリノ反応で生成された荷電粒子をシンチレータで検出することで、ニュートリノビームのプロファイルを測定し、ニュートリノビームの方向を測定する。

INGRID Proton Module

Proton Moduleの構造はINGRIDとほとんど同じであるが、鉄層がなくシンチレータ層のみで構成されている。これにより、INGRIDにおいて鉄層で止められるような低エネルギーの粒子を検出することができるため、ニュートリノ反応モードを区別してニュートリノ反応の不定性の理解とニュートリノビームについてより深い理解をすることを目的としている。

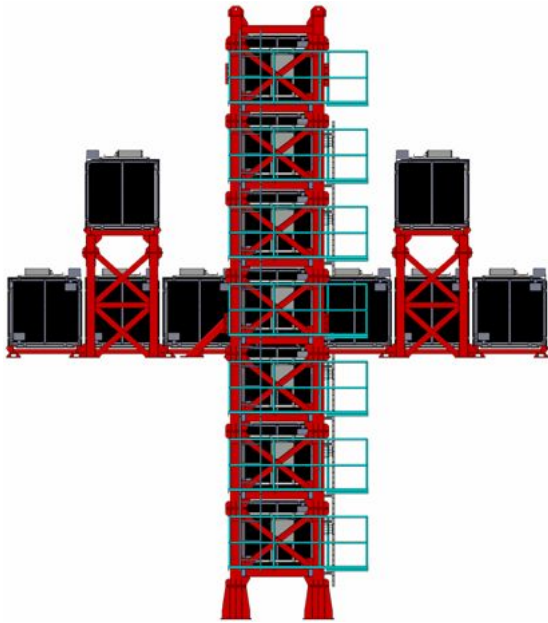


図 2.10: off-axis 検出器 INGRID の概略図。

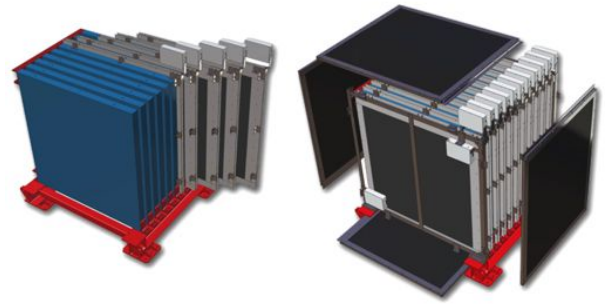


図 2.11: INGRID の各モジュールの構成図。青色の板が鉄プレートで、その間にあるのがシンチレータ層。

2.5 後置検出器:スーパーカミオカンデ

T2K ではスーパーカミオカンデを後置検出器として使用している。スーパーカミオカンデは大気ニュートリノや太陽ニュートリノの研究などにも動作している。

2.5.1 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは J-PARC から 295km 離れた岐阜県神岡鉱山の地下 1,000m に設置された超純水 5 万トンの水チェレンコフ検出器である。直径 39m、高さ 42m 円筒状の形をしており、有効体積は 22.5k トンである。主に内水槽と外水槽から成り、内水槽は約 11,200 本の 20 インチ光電子増倍管が円筒状の壁に設置されている。ニュートリノが水と相互作用して生成された荷電粒子のチェレンコフ光を測定し、そのチェレンコフリングを再構成することにより粒子の発生点、エネルギー、進行方向、粒子識別を行っている。外水槽には 8 インチの光電子増倍管が 1,885 本設置されており、宇宙線ミューオンなどのバックグラウンドの除去として使用される。(図 2.12, 図 2.13)

2.5.2 T2K ビームデータ

スーパーカミオカンデはチェレンコフ光量とイベントヒットのタイミングを記録している。T2K ビームデータはビーム到達タイミングと同期した 1msec の時間窓内の全ヒットをデータとしている。ビーム到達時間は J-PARC とスーパーカミオカンデ間で同期した GPS 時間を利用しており、T2K ビームは炭素ターゲットに衝突してからおよそ 1msec 後にスーパーカミオカンデに到達する。

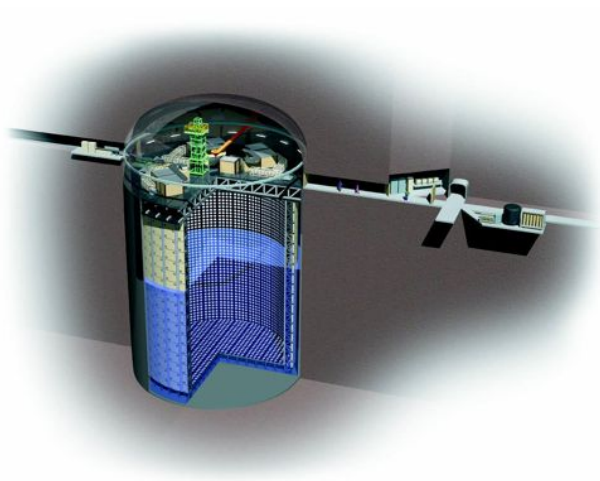


図 2.12: スーパーカミオカンデの概略図。

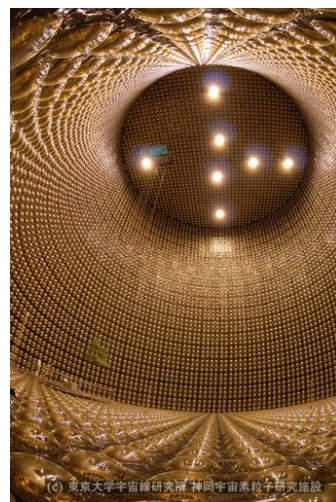


図 2.13: スーパーカミオカンデ内部の写真。

第3章 ミューオンモニター (MUMON)

ミューオンモニターは炭素ターゲットから 118m、ビームダンプから 18.5m 下流に置かれており、ニュートリノと同じ親パイ中間子から生成されたミューオンを検出することにより、ニュートリノの強度とプロファイルをバンチごとにリアルタイムでモニターしている。ミューオンモニターには、ビームダンプによって 5Gev/c 以上の運動量を持ったミューオンだけが到達することができる。ニュートリノビームの方向は、炭素ターゲットからミューオンビームのプロファイル中心への方向で測定されている。

現在、ミューオンモニターは二つの独立した検出器システムから構成されている。ビーム上流側にシリコン PIN フォトダイオード、ビーム下流側にイオンチェンバーが、7×7ch のセンサーが 25cm 間隔で並んでおり、150×150cm² の領域を覆っている。

イオンチェンバーは仕組みが単純で放射線耐性が高いが、安定した応答を得るためには流入するガスを適切に制御する必要がある。一方、シリコン PIN フォトダイオードは取扱いも簡単であり、信号量がイオンチェンバーと比べると大きいため、T2K 実験のビーム強度が低い初期段階では有益であるが、放射線耐性が低いというデメリットがある。これら 2 種類の検出器でプロファイルを測定することによりクロスチェックができ、冗長性があり補完的な測定を可能にしている。

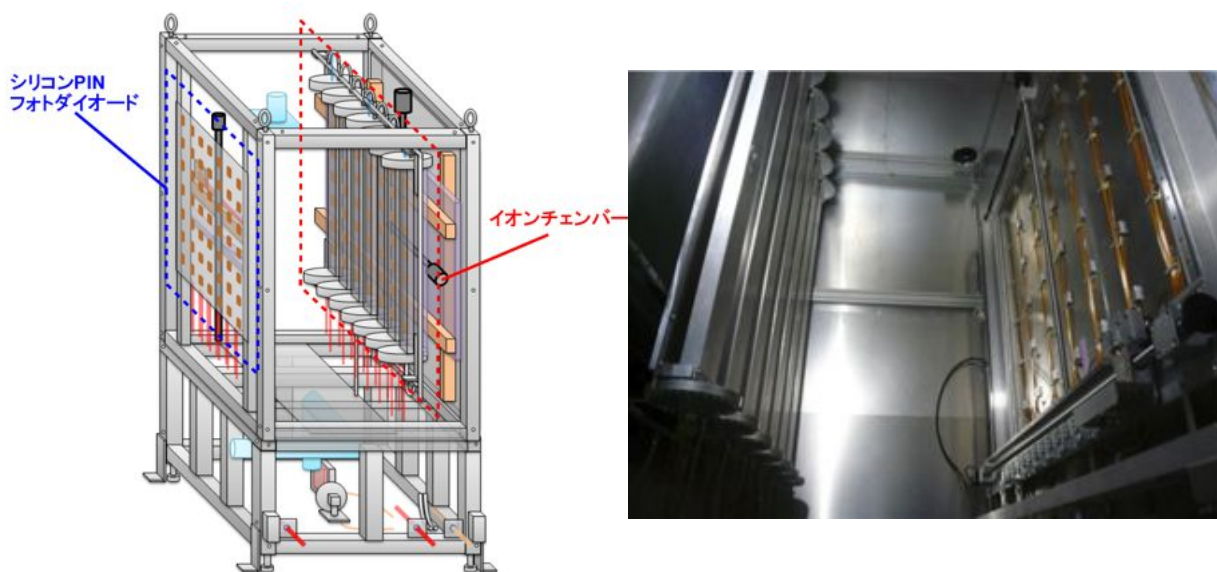


図 3.1: ミューオンモニター

3.1 ミューオンモニターの性能に対する要請

ミューオンモニターへの要請：

1. ニュートリノビームの方向を 1 mrad 以内の精度でモニターできること。
ニュートリノビーム方向が on-axis に対して 1 mrad ずれると、ニュートリノエネルギー

ケールに約2%、ニュートリノフラックスに約3%の誤差が生じる。これによって、ミュオンニュートリノ消失モードの振動パラメータの系統誤差が統計誤差を超えてしまう。そのため、ニュートリノビーム方向の測定精度は1 mrad より良い精度が要請され、0.3mrad 以内の精度でビーム方向をモニターすることに設定した。(ミュオンモニターにおいてビーム中心測定精度 $\sigma=3\text{cm}$) これは $3\sigma(99.97\%)$ 以上の確率で1 mrad 以内に収まっていることを保証している。

2. 3%以内の精度でビーム強度の安定性をモニターできること。

ミュオンモニターは前置検出器がトラブルにより停止した際のバックアップとして働くことも要求しており、上記で述べたようにニュートリノフラックスを3%以内に抑えないと系統誤差が統計誤差を上回ってしまうため、相対フラックスの変動を3%より良い精度でモニターすることが必要である。

3. バンチごとにビームの強度・方向をモニターできること。

T2K 実験でのビームはバンチ構造になっているので、バンチごとにビームの強度・方向をモニターする必要がある。

4. T2K ビーム強度デザイン値 (750kW) の1%以下の強度に対しても測定できること。

ビーム強度デザイン値750kWの1%程度で、試験運転やビームチューニングを行う。そのため、1%以下の強度に対しても良い精度でビームの強度・方向を測定する必要がある。

($10^5 - 10^7 \mu/\text{cm}^2/\text{bunch}$ のミュオンビーム、 $4 \times (10^{11} - 10^{13})\text{proton}/\text{bunch}$ の陽子ビーム強度に相当する。)

5. 高い放射線耐性を持つこと。

デザイン値の750kWで1年間(実運転時間100日)で、ミュオンモニターでは吸収線量が100kGyと予想される。この高い放射線下においても運転できるように、高い放射線耐性が必要となる。また、鉄やプラスチックなどの放射化しやすい物質の使用も避けなければならない。

6. 出来る限りメンテナンスフリーで安定な動作をすること。

デザイン値のビーム強度で1年間運転したあと、安全にミュオンモニターにアクセスするのに1週間程度の冷却が必要と見積もられている。実験を止める時間を最小限にするため、出来るだけメンテナンスフリーで安定な動作をすることが求められる。

3.2 イオンチェンバー

ミュオンモニターでは平行板型のイオンチェンバーを使用している。

表 3.1: イオンチェンバーの運転条件

使用ガス	Ar+N ₂ (2%) ($\leq 150\text{kW}$) He+N ₂ (1%) ($\geq 150\text{kW}$)
有効面積	75mm×75mm
極板間隔	3 mm
印加電圧	200 V
ガス圧	130 kPa
温度	34 °C
酸素濃度	$\leq 10 \text{ ppm}$

イオンチェンバーの構成

イオンチェンバーは7つのアレイから構成されている。各アレイには7つのセンサーが含まれており、25cm 間隔に配置されている。各センサーは、セラミックの表面に銀と白金の合金を蒸着させたものを電極プレートに使用し、4角にセラミックスペーサーを挿入し、間隔 3mm に離されている。極板プレートの大きさは 100mm×100mm であるが、電場を一様にするために信号電極の周りに保護電極を設けているので、有効面積は 75mm×75mm である。また、プレートを支持する部品および電線の露出を防ぐための絶縁部品には、放射線耐性の高い PEEK 樹脂を用いている。

ガスシステムと温度・圧力・酸素濃度の制御

イオンチェンバーには、ビーム強度によって2種類のガスを使い分ける。低いビーム強度 ($\leq 150\text{kW}$) では $\text{Ar}+\text{N}_2(2\%)$ の混合ガスを、高いビーム強度 ($\geq 150\text{kW}$) では $\text{He}+\text{N}_2(1\%)$ の混合ガスを使用する。このようにガスをビーム強度で Ar と He に使い分ける理由は、最小電離粒子 (MIP) において単位長さ当たりの信号量が Ar は He に比べ 10 倍以上大きく、 $\text{Ar}+\text{N}_2(2\%)$ ではビーム強度が 150kW を超えると電子とイオンの再結合による信号量の飽和が起きると予想されるためである。

N_2 はクエンチャーとして混合されており、電子の熱運動が分子の回転エネルギーなどに分けあたえられ、電子のドリフト速度が速くなる。また、異種のガスが混合されている場合、一方の分子の準安定励起状態は他の原子との衝突で新たな電離を引き起こし信号量が増加する (Jesse 効果)。そのため、 N_2 を一定以上混合することで電離量の変動を防ぎ、信号量の変動を抑える役割もしている。

温度・圧力に変動によってガスの密度が変動すると、生成されるイオン対の量が変動し、信号量の変動につながる。この信号量の変動を 3% 以内に抑えるために、圧力・温度ともに 2% 以内の変動に抑える必要がある。また、ガスに酸素が混入すると電子が吸着されて陰イオンとなるため、速い読みだしにおいて信号量が減少する。100ppm で 1% の信号量減少が確認されている。

温度においては、ヒーターで 34.0°C になるように調節し、 0.5°C (0.14%) 程度の変動に抑えられている。圧力においては、 $130\pm 0.2\text{kPa}$ (0.17%) の変動に保たれている。酸素濃度に関しては、10ppm 以下に抑えられている。

3.3 シリコン PIN フォトダイオード

シリコン PIN フォトダイオードは浜松ホトニクス社製の S3590-08 を使用している。これは主に高エネルギー用に開発された白セラミックベースの半導体検出器である。有感面積が $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ で、空乏層の厚さが $300\mu\text{m}$ である。ミュオンモニターでは逆電圧 80V をかけて使用する。

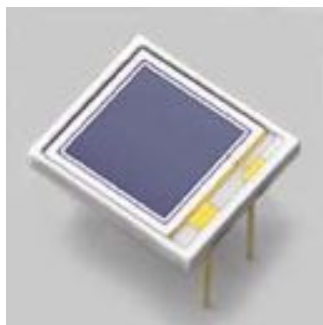


表 3.2: シリコン PIN フォトダイオード (S3590-80) の仕様

有感面積	10 mm×10 mm
空乏層の厚さ	300 μm
最大印加電圧	100 V

図 3.2: 浜松ホトニクス社製 S3590-08 の写真

放射線損傷

ミュオンモニターにおいて、シリコン PIN フォトダイオードには放射線耐性の問題がある。入射粒子のエネルギーが十分に大きいと、結晶格子中の Si 原子核との弾性散乱によって格子欠陥ができてしまう。これにより、シリコンのバンドギャップ中に新しいエネルギー準位が生成する。そして、この新たに生成したエネルギー準位でキャリアの捕獲・再結合が起こり、信号が減少につながる。また、大量の放射線が照射されると、シリコン PIN フォトダイオードの p 型半導体が n 型半導体に転換されることで pin 接合が解消されて動作しなくなってしまう。これらは不可逆的な減少であるので、放射線損傷の影響が消えることはない。

100MeV の電子ビームテストにおいて、 2.1×10^{14} 電子/cm² の照射で信号が約 4 % 減少する [1]。 2×10^{14} 電子/cm² は、デザイン値 (750kW) の T2K ミュオンビームの 2ヶ月間の照射に相当する。

3.4 エレクトロニクスとケーブル

信号の読み出しには COPPER/FINESSE システムを採用している。COPPER は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発されたデータ収集プラットフォームであり、FINESSE 65MHz Flash-ADC を挿入して使用している。

Flash-ADC は 8 バンチ全てをカバーするために、7 μ sec のゲートを開けており、イオンチェンバーの信号は内部ゲイン $\times 5$ 、シリコン PIN フォトダイオードの信号は内部ゲイン $\times 1$ の Flash-ADC に入力される。ただし、シリコン PIN フォトダイオードの信号は Flash-ADC のフルスケールを超えることがあるので、ビーム強度に応じて Attenuator (減衰率: 0 dB, -15 dB, -30 dB) で減衰させて Flash-ADC に入力する。

表 3.3: FINESSE 65MHz Flash-ADC の仕様

最大サンプリングレート	65MHz
精度	12bit
入力レンジ	$\pm 1V$
チャンネル数	8
内部ゲイン	$\times 1$ or $\times 5$
時定数	52.8ns
入力インピーダンス	50 Ω

電圧印加回路に関しては、HV ユニットからのサージ電圧を防ぐために Low-pass filter を介して HV をかけている。イオンチェンバーには 200V を、シリコン PIN フォトダイオードには -80V を印加している。

ケーブルは信号/HV とともに放射線耐性の高いインピーダンス 50 Ω のポリイミド同軸ケーブルを使用している。検出器から 10m ほどポリイミドケーブルでミュオンモニター室出口付近のパッチパネルまで繋ぎ、そこから信号は 5D-FB 規格のケーブルに、HV は RG-174/U 規格のケーブルに繋ぎ替えて伝送している。これらのケーブルは難燃性のノンハロゲンケーブルを使用している。

第4章 CVDダイヤモンド検出器

上述したように、シリコンPINフォトダイオードは放射線耐性が低いため、その代替の候補に放射線耐性の高いダイヤモンド検出器が挙げられている。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ダイヤモンドのビームテストを行い、ミュオンモニターで使用できることを検証した。その後、J-PARCのミュオンモニターにダイヤモンド検出器を1つインストールし、T2K実験での実際のビームを照射した。本章ではJ-PARCにインストールしたダイヤモンド検出器について述べる。

4.1 ダイヤモンド検出器

4.1.1 ダイヤモンドの分類

天然ダイヤモンドおよび合成ダイヤモンドは、すべて表4.1の4種類に分類される。ダイヤモンド検出器に使用している単結晶CVDダイヤモンドはIIa型である(図4.1)。

表 4.1: ダイヤモンドの分類

タイプ	窒素含有量	特徴
Ia	N > 5ppm	典型的に0.1%程度の窒素を含有しており、薄板状に窒素が偏析している。天然ダイヤモンドの大部分がこの型に属する。
Ib		典型的に0.1%程度の窒素を含有しており、Ia型と異なり置換原子の形で含まれている。高压合成ダイヤモンドの多くが属する。
IIa	N < 5ppm	不純物が少なく、光学的・熱的に優れた性質を持つ。ドープレスなCVDダイヤモンドの大部分がこの型に属する。
IIb		純粋なダイヤモンドにホウ素がドーピングされている。p型半導体となり、半導体的性質を持つ。



図 4.1: IIa 型 CVDダイヤモンドの写真

単結晶 CVD(Chemical Vapor Deposition) ダイヤモンド

CVD(Chemical Vapor Deposition, 化学気相成長)は固体薄膜の生成過程であり、ガス状原料の供給とその化学反応を制御して基板(substrate)に個体物質を堆積させる化学過程である。ダイヤモンド合成に使われるのと同様に、半導体デバイスの製造で広く使われている。これに対して、膜堆積が物理的作用(蒸発による気化や固相への凝縮など)によって制御される場合は、PVD(Physical Vapor Deposition)と呼ばれる。[2]

CVDダイヤモンド合成では、一般的に大気圧より低い圧力下(典型的に1~200Torr)で行われ、ガス状原料は水素とメタンのような炭化水素との混合ガスである。炭化水素は1~5%程度含まれており、ダイヤモンドの形成をする炭素源となる。

水素は合成過程において重要な役割をしている。水素は、合成過程で働くために”水素ラジカル(H^{\cdot})”の状態が存在しなければならない。CVDダイヤモンド合成をするための条件下では、炭素は最もエネルギー的に安定な状態であるグラファイトがダイヤモンドより熱力学的に好まれるため、基板には主にグラファイトが堆積する。しかし、水素ラジカルは基板に形成したグラファイトをととても速く(ダイヤモンドを取り去るより10~100倍の速さで)取り去ってしまうので、基板表面での反応はダイヤモンド形成だけが残る。他の水素の重要な役割は、成長するダイヤモンド表面で炭素原子に付着した浮遊炭素を終わらせることであり、その結果表面が安定になり非ダイヤモンド形成への再構成を防ぐ。これらのため、水素の効果なしでは、CVDダイヤモンド合成は起こらない。

水素ラジカルを作ることはエネルギーを大量消費する過程であり、エネルギー供給は熱フィラメント、アークジェット、マイクロ波やブローチで行う。商業的にはCVDダイヤモンド合成の水素ラジカルを生成するのに、熱フィラメントやマイクロ波が一般的である。Element Six社²では、マイクロ波プラズマ化CVD過程で主にダイヤモンド合成をおこなっている。このシステムでは、反応ガスを流入した反応炉内に基板を置いている(図4.2)。空洞内で、マイクロ波によって水素-炭化水素の混合ガスをプラズマ状に励起させている。これにより、基板上に水素ラジカルを供給している。良質なダイヤモンド生成させるために、基板は通常700~1200℃に保たれている。

単結晶になるか多結晶になるかは基板によって決まってくる。単結晶の場合は基板は単結晶ダイヤモンドでなければならない。これはエピタキシャル成長³をさせるためである。多結晶の場合は、シリコンやシリコンカーバイド、モリブデンとタングステンを含んだカーバイドなどが基板として用いられる。[3]

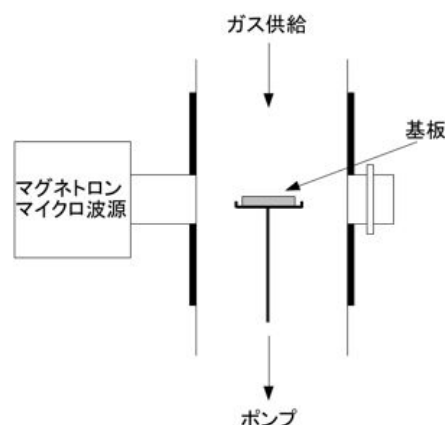


図 4.2: CVD 法の反応炉の概略図

¹基本的に水素ラジカルは反応性が高い状態

²今回ダイヤモンド検出器に使用したダイヤモンドの製造会社

³基板と同一の結晶構造・方位を引き継ぐ成長

4.1.2 検出器としての使用方法

ダイヤモンドのバンドギャップエネルギーは5.47eVであるため絶縁体⁴に分類される。しかし、検出原理は半導体検出器と同じで、入射した荷電粒子によりホール・電子対を生成し印加電界中をホール・電子対が移動して検出器から電気信号を作り検出するため、半導体検出器に分類される。図4.3はダイヤモンド検出器の概略図である。また、ダイヤモンドの物性値を表4.2にまとめた。今回用いたダイヤモンドはElement Six社製の単結晶CVDダイヤモンドである。

ダイヤモンドチップのサイズは4mm×4mm×500μmであり、信号を読み出すための極板として両面をメタライズされている(図4.4)。

表 4.2: シリコンとダイヤモンドの物性

特性	単位	シリコン	ダイヤモンド
原子番号		14	6
質量数		28.09	12.011
密度	g/cm ⁻³	2.33	3.52
格子定数	nm	0.543	0.357
熱伝導率	W/mK	150	2000
比誘電率		11.8	5.6
抵抗	Ωcm	>10 ¹³	10 ⁶
ホール移動度	cm ² /Vs	480	3800
電子移動度	cm ² /Vs	1350	4500
キャリア寿命	μs	2500	~2
絶縁破壊電圧	MV/cm	0.3	~4
電荷収集距離	μm		~250 at 1V/μm
バンドギャップ	eV	1.12	5.47
ホール飽和速度	cm/s	10 ⁷	
電子飽和速度	cm/s	0.9×10 ⁷	2×10 ⁷
平均ホール・電子対生成エネルギー	eV	3.62	13.6
放射長	cm	9.37	12.2
比電離損失	MeV/cm	3.88	6.14

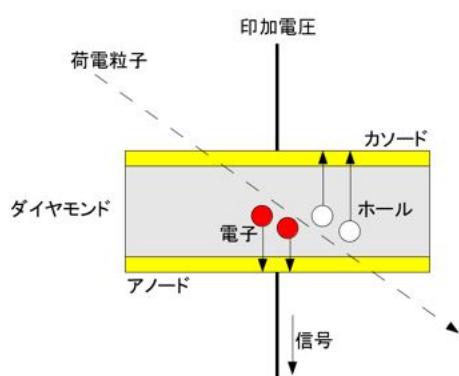


図 4.3: ダイヤモンド検出器の概略図

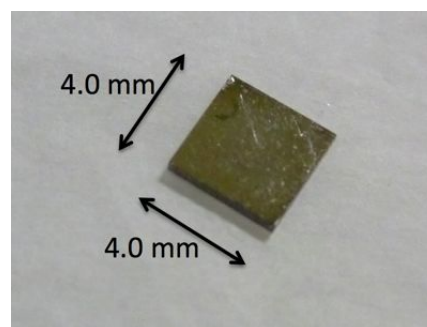


図 4.4: 今回、ダイヤモンド検出器に使用したダイヤモンドチップの写真。大きさ4mm×4mm、厚さ500μm。

⁴バンドギャップが5eV以上であるものは絶縁体に分類される。

このダイヤモンドチップの極板に直接ハンダ付けはせずに、パッケージを利用して金属ピンで挟み、金属ピンの一方は印加電圧ケーブルに、他方は信号読み出しケーブルにハンダ付けして繋げている。今回は、放射線耐性を考慮して、パッケージには PEEK 材を、ケーブルはポリイミドケーブルを使用している。(図 4.5、図 4.6)



図 4.5: ミューオンモニターに設置したダイヤモンド検出器の写真。(左) ダイヤモンドチップを乗せる前。(中央) 金属ピンの上に乗せた後。(右) PEEK 材のパッケージで挟み込み、ネジ止めしたもの。

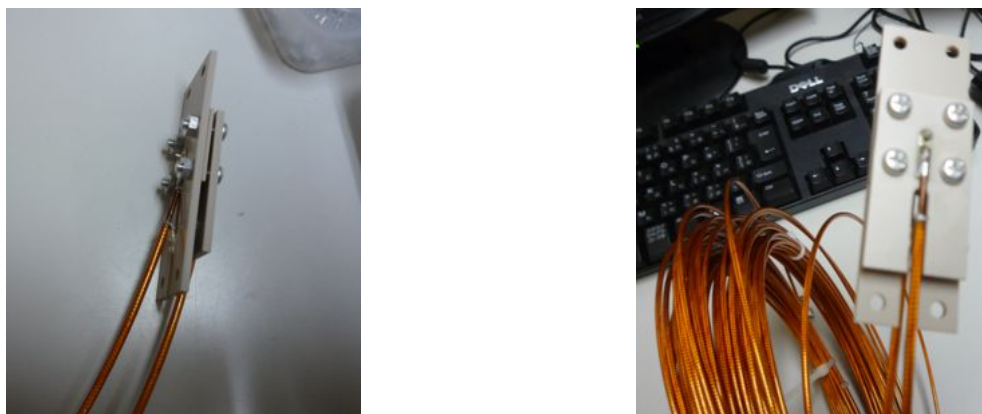


図 4.6: ミューオンモニターに設置したダイヤモンド検出器の写真。ダイヤモンドチップを挟み込んだパッケージの金属ピンにポリイミドケーブルをハンダ付けしたもの。

J-PARC におけるダイヤモンド 検出器の設置場所

ダイヤモンド検出器をミューオンモニター内に 1 個インストールした。設置した場所は、ミューオンモニターのビーム上流に対して中心から一つ右にあるシリコン PIN フォトダイオードのすぐ裏に付けた (図 4.7)。そのため、今後ダイヤモンド検出器を付けたシリコン PIN フォトダイオードの信号をリファレンスとして性能を評価する。

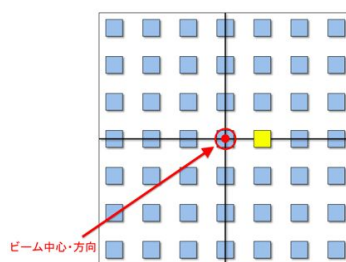


図 4.7: ミューオンモニター内のダイヤモンド検出器の設置位置。シリコン PIN フォトダイオード 49ch 中の黄色がダイヤモンド検出器の設置した位置。ビームは紙面から手前に突き出る方向。

セットアップ

今回の実験では、ダイヤモンド検出器には印加電圧 200V にして使用した。また、基本的に印加電圧・読み出しなどのエレクトロニクスはミュオンモニターのシリコン PIN フォトダイオードと同じで、信号は Flash-ADC により読み出した。

表 4.3: ダイヤモンド検出器の仕様

有感面積	4.0 mm×4.0 mm
厚さ	500 μ m
印加電圧	200 V

4.2 データ解析

T2K 実験は 2010 年 1 月から物理ランを開始し、2010 年夏にシャットダウンを挟み、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震が起こるまでデータ取得を行っていた。物理ランをシャットダウン前後で RUNI と RUNII とに分ける⁵。ビーム強度を上げるために RUNI と RUNII とでは、陽子ビームのスピル周期およびスピル当たりのバンチ数が異なる。表 4.4 に詳細をまとめた。

RUN36~37 において、ダイヤモンド検出器の印加電圧が 80V になっていたため、波形はテールを引き信号電荷を収集しきれていないと思われる。そのため、RUN36~37 を除き、今回のデータ解析はシャットダウン前の RUN29~34 とシャットダウン後の RUN38 のデータを用いて解析する。

表 4.4: RUNI と RUNII とのビームパラメータ

	RUNI	RUNII
MR RUN	RUN29~34	RUN36~38
期間	2010 年 1 月 ~ 6 月	2010 年 11 月 ~ 2011 年 3 月
陽子ビーム エネルギー	30 GeV	
スピル周期	3.52 sec	3.2 sec
バンチ数	6/スピル	8/スピル
バンチ間隔	581 nsec	
バンチ幅	58 nsec	

4.2.1 Good spill selection

ND280 や SK での解析の際に、ニュートリノビームのクオリティを保証するために下記の選別 ” Good spill selection ” が課せられる。ダイヤモンド検出器の解析においても、Good spill selection を経た Good spill のデータだけを用いる。

1. 物理ラン :

物理ランのスピルが選択される。この選択によりキャリブレーションやビーム軌道調整などのビームのチューニング・モニタースタディが除かれる。

⁵RUNI と RUNII はさらに加速器 MR の RUN ナンバーで分けられる

2. ビームトリガー：

ビームトリガーのスピルが選択される。ビームトリガーは加速器と同期しており、加速器から来たスピルを選択し、テストダミートリガーのスピルが除かれる。
3. Good GPS status：

T2K 実験では2つの GPS 受信機を用いており、原子時計が搭載されている GPS 衛星から時間と位置情報が受信機に送られる。GPS システムの良い状態を保証するために、2つの GPS 受信機の時間差が 200 nsec 以下であることを要求する。
4. スピルフラグ：

ビーム方向最下流にある CT での陽子数が 1 スピル当たり 1×10^{11} 以上であることを要求する。機器の異常による Machine Protection System (MPS) や Person Protection System (PPS) が作動した直後は加速器からのビームトリガーが来ているにもかかわらずビームが来ない場合などのスピルを除く。
5. Normal beam condition：

ビームライン上の電磁石の異常や検出器が止まるなどのアクシデントの際に、そういったイベントを除く。
6. Horn current cut：

3つの電磁ホーン電流値すべてが設定値の2%以内に抑えられていることを要求する。
7. Muon profile center cut：

ミュオンビーム方向が x, y 軸方向⁶ともに $\pm 10\text{cm}$ 以内であることを要求する。
8. Muon yield cut：

1 スピル当たりの陽子数で規格化した muon yeild⁷の変動が $\pm 5\%$ 以内であることを要求する。

4.2.2 信号波形

ダイヤモンド検出器およびリファレンスとしたシリコン PIN フォトダイオードの信号から得られた Flash-ADC 信号波形を図 4.8 に示す。信号の速い応答と立ち上がりが見られ、シリコン PIN フォトダイオードと同様にバンチ構造が確認できる。

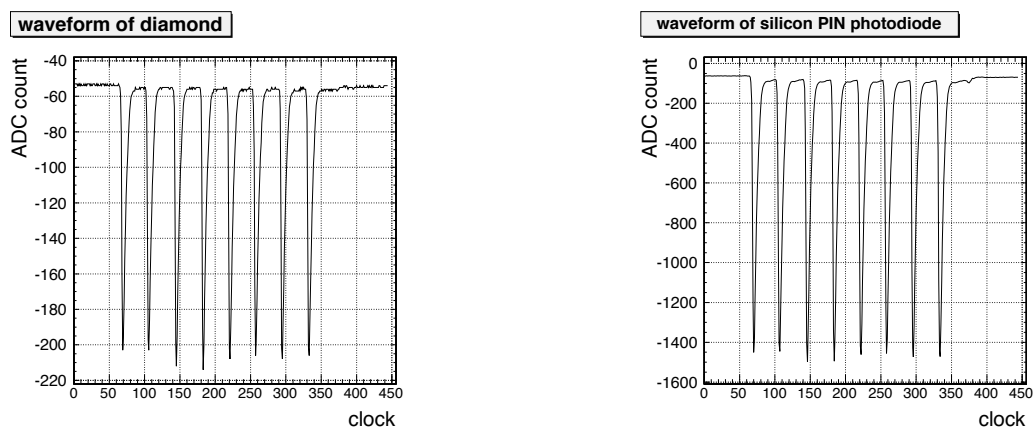


図 4.8: ダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの Flash-ADC 波形。(左) がダイヤモンド検出器の波形で、(右) がシリコン PIN フォトダイオードの波形である。

⁶ビームの進行方向を z 軸方向とし、左手系を用いている。

⁷シリコン検出器 49 チャンネルの全収集電荷量

収集電荷量

信号は各バンチごとに Flash-ADC の波形データを積分してペDESTALを引く、そして、これに ADC カウントから電荷への較正值をかけることで、収集電荷量に換算する。次に、詳細を述べる。

- 積分範囲
ビームライン最下流の CT により陽子ビームの時間情報を得ており、そこから各バンチの積分開始位置を決めている。そして、バンチ幅のデザイン値が 581nsec であるため、積分開始位置から 37clock($\approx 569\text{nsec}$) を積分範囲としている。
- ペDESTAL
純粋な収集電荷を求めるためペDESTAL分を差し引いている。バンチがくる前の信号、及び最後のバンチから 20clock 後の信号の平均をペDESTALとしている。
- 電荷への較正值
既知である QT ジェネレータの出力を変えて積分 ADC カウントを求め、それを 1 次関数でフィットしそこから電荷への較正值を求めている。ケーブル伝送や読み出し回路による信号量の変化を考慮し、キャリブレーションを行っている。

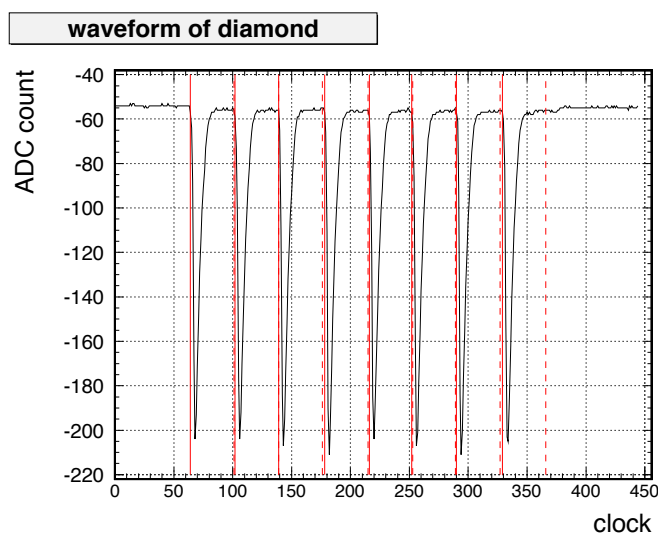


図 4.9: ダイヤモンド検出器の Flash-ADC 波形。実線が積分開始位置であり、点線が積分終了位置である。

4.2.3 線形性

リファレンスとしたシリコン PIN フォトダイオードの信号に対するダイヤモンド検出器の信号の線形性を評価する。

RUN29~34

スピルごとにおいて、横軸にシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量を、縦軸にダイヤモンド検出器の収集電荷量をプロットしたグラフを図 4.10 に、それを一次でフィットした関数からのズレを図 4.11 に表している。

シリコン PIN フォードの収集電荷量が小さいところ ($<6000\text{pC}$; $\sim 10\text{kW}$) はゆらぎが大きく中心値

のズレが大きいが、それより大きいところでは中心値が1%以内であり、その標準偏差も3%に収まっている。また、収集電荷量が大きくなるにつれてゆらぎが小さくなっていくのがわかる。バンチごとに見ても同様に、収集電荷量が大きくなるにつれてゆらぎが小さくなっており、収集電荷量が5000pC以上では中心値が2%以内、標準偏差が3%以内に収まっている。

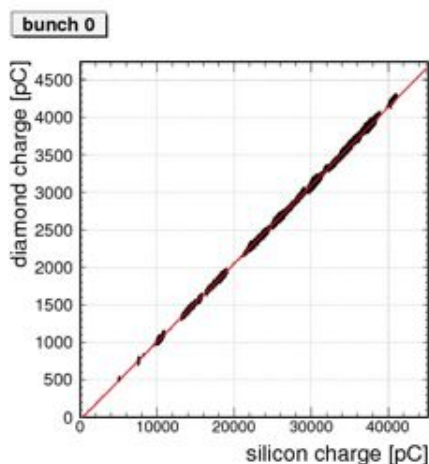


図 4.10: RUN29~34 において横軸にシリコン PIN フォトダイオード、縦軸にダイヤモンド検出器の収集電荷量をとったスパルごとのプロット。赤線は一次関数でフィットした直線。

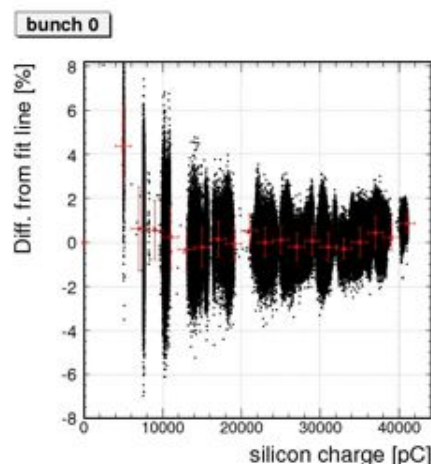


図 4.11: RUN29~34 におけるスパルごとでフィット直線からのズレ。赤は中心値とそれぞれの標準偏差。

RUN38

RUN38 においてもスパルごとで、横軸にシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量を、縦軸にダイヤモンド検出器の収集電荷量をプロットしたグラフを図 4.12 に、それを一次でフィットした関数からのズレを図 4.13 に表している。

シリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量が 5×10^4 pC 付近にある 3 点はバンチ数が 1 つの点であり、それらはフィット直線からのズレが 2% 程度になっている。それら以外 ($7 \sim 8 \times 10^4$ pC 範囲) では、中心値も標準偏差も 1% 以内に収まっている。バンチごとでも基本的に 1% 以内に収まっている。

4.2.4 長期安定性

長期にわたりダイヤモンド検出器が安定に動作していたかを評価する。

RUN29~34

RUN29~34 においてスパルごとのダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の比の変動を図 4.14 に示している。また、信号比の平均と RMS をバンチごとも含めて表 4.6 にまとめた。スパルごとに見ると $\text{RMS}/\text{Mean} = 0.75\%$ で、バンチごとに見ても 1.2~1.4% で RUN29~34 を通して安定に動作していたことがわかる。スパルごととバンチごとで RMS/Mean が 2 倍近く異なるのは、スパルごとの方が収集電荷量が大いことにより揺らぎが小さくなっているためだと思われる。

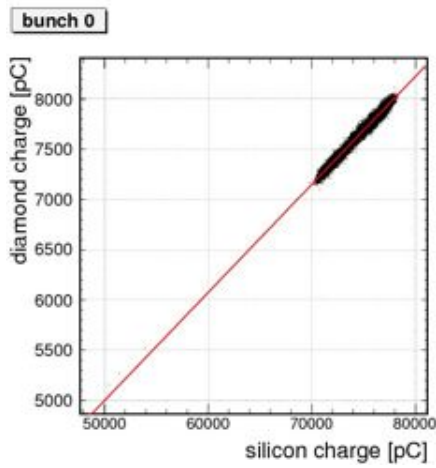


図 4.12: RUN38 において横軸にシリコン PIN フォトダイオード、縦軸にダイヤモンド検出器の収集電荷量をとったスピルごとのプロット。赤線は一次関数でフィットした直線。

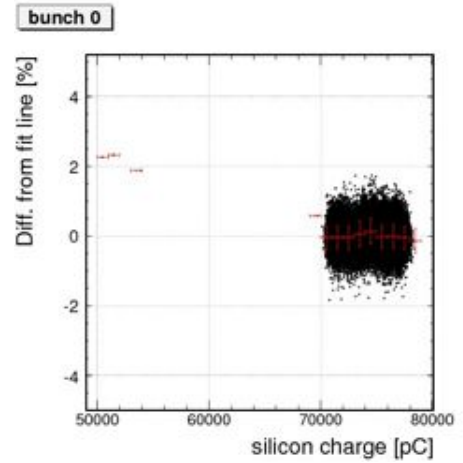


図 4.13: RUN38 におけるスピルごとでフィット直線からのズレ。赤は中心値とそれぞれの標準誤差。

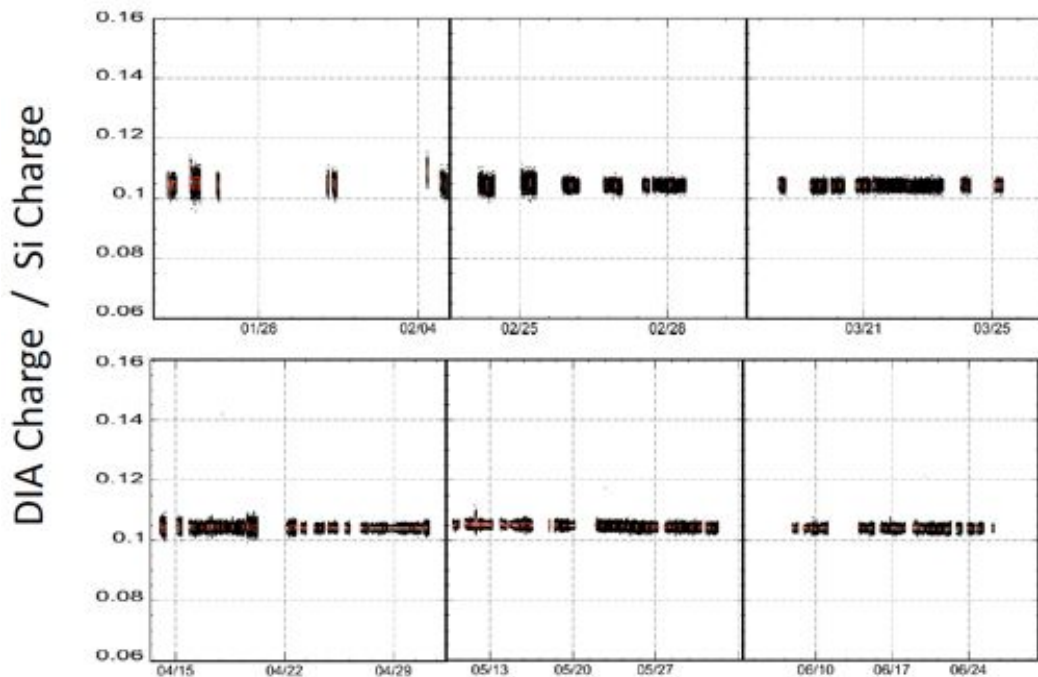


図 4.14: RUN29~34 のスピルごとにおけるダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の比の変動。

表 4.5: RUN29~34 におけるスピルごととバンチごとのダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の比の平均と RMS。バンチ 0 はスピルごとの信号比。

バンチ	Mean	RMS [10^{-3}]	RMS/Mean [%]
1	0.103	1.41	1.4
2	0.104	1.26	1.2
3	0.104	1.33	1.3
4	0.105	1.39	1.3
5	0.105	1.35	1.3
6	0.106	1.50	1.4
0	0.104	0.784	0.75

RUN38

RUN38 においてスピルごとのダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の比の変動を図 4.15 に示している。スピルごとに見ると $\text{RMS}/\text{Mean}=0.32\%$ で、バンチごとに見ても $0.6\sim 0.7\%$ で RUN29~34 を通して安定に動作していたことがわかる。スピルごとがバンチごとより良いのは RUN29~34 の時と同様の理由による。また、RUN29~34 よりも良くなっているのは期間が短いという理由もあるが、ビーム強度が RUN29~34 よりも高く収集電荷量が大きいためにより揺らぎが小さくなっているためである。

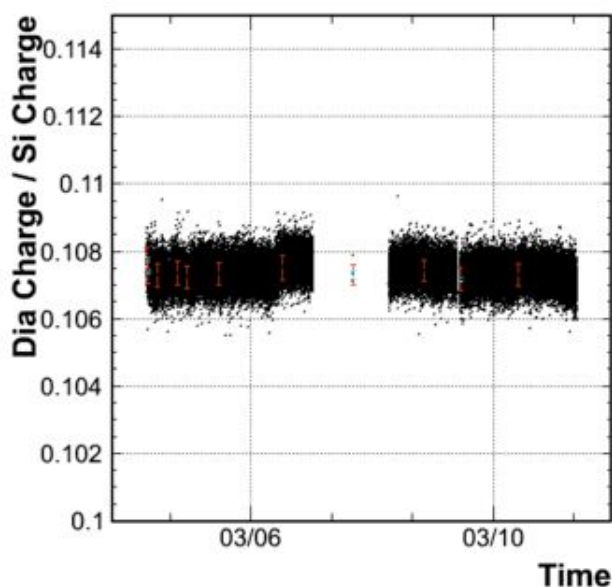


図 4.15: RUN38 のスピルごとにおけるダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の比の変動。

4.3 ミューオンモニターにおけるダイヤモンド検出器のチャンネル配置

現在、シリコン PIN フォトダイオードは $7 \times 7 = 49$ ch を配置しているが、ダイヤモンド検出器は高価であるため 49 チャンネル配置するのは現実的でない。そのため、チャンネル数を減らした上で、いくつかのチャンネル配置パターンを提案し、どのようなパターンでチャンネル配置するのがよいのか

表 4.6: RUN38 におけるスピルごととバンチごとのダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の比の平均と RMS。バンチ 0 はスピルごとの信号比。

バンチ	Mean	RMS [10^{-3}]	RMS/Mean [%]
1	0.101	0.706	0.70
2	0.105	0.648	0.62
3	0.109	0.659	0.60
4	0.111	0.702	0.63
5	0.106	0.715	0.67
6	0.107	0.664	0.62
7	0.111	0.685	0.62
8	0.108	0.741	0.69
0	0.107	0.345	0.32

を検討する。今回、基本的にはチャンネル数を 13ch として、軸対称となるようなチャンネル配置を提案した。提案したチャンネル配置のパターンは下記の 7 パターンである。現在シリコン PIN フォトダイオードが設置されている位置を選択しており、パターン ⑥ だけチャンネル数が 17ch となっている。

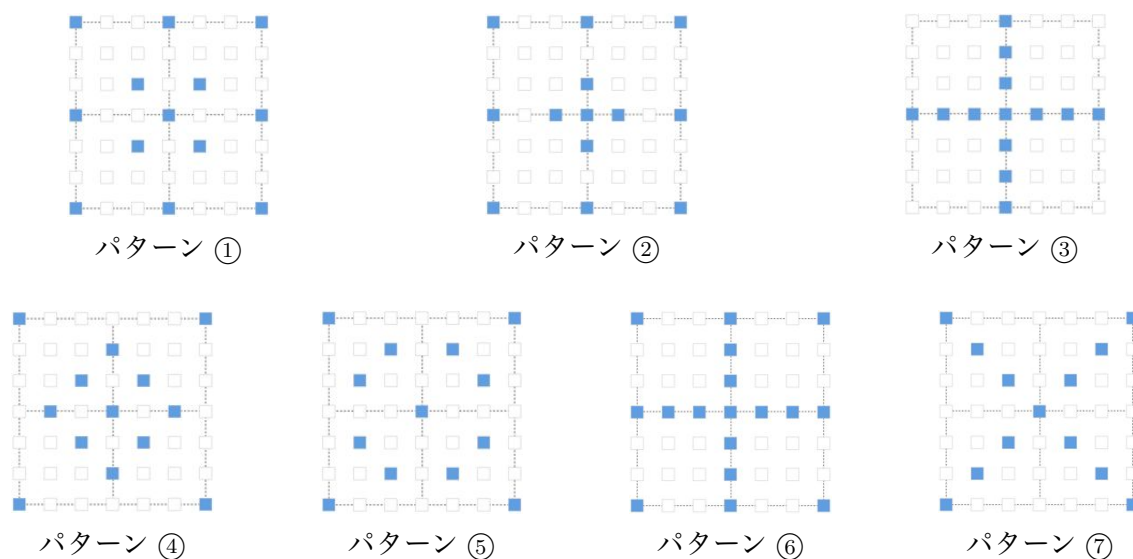


図 4.16: 提案した 7 つのチャンネル配置パターン

4.3.1 ミューオンビームのプロファイル再構成

ミュオンモニターでのビームプロファイルの再構成は次の手順で行っている。まず、実際の検出器有効面積にあわせた 7×7 マスの二次元ヒストグラムに各チャンネルの収集電荷量を詰める。そして、そのヒストグラムを下記の二次元ガウス分布 (式 4.1) でフィットし、そこから得られたパラメータを用いてプロファイルの再構成をする。

$$F(x, y) = A \exp \left\{ -\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (4.1)$$

ここで、 A はフィット関数のピーク値、 x_0, y_0 はそれぞれ x 方向と y 方向のプロファイル中心、 σ_x, σ_y はそれぞれ x 方向と y 方向におけるビームの広がりを表している。

4.3.2 簡易シミュレーションによる検討

まず、簡単なシミュレーションにより、各パターンチャンネル配置において、ミュオンモニターへの要請である中心決定精度 $\sigma \leq 3\text{cm}$ と相対フラックスモニター精度 $\sigma \leq 3\%$ を満たすために各チャンネルに要求される測定誤差を評価する。

シミュレーションの方法：

1. 二次元ガウス分布 (式 4.2) を真のビームプロファイルとし、その中心は検出器中心を原点とすると (x_{true}, y_{true}) の位置にあるとする。二次元ガウス分布の広がりにはビームシミュレーションから得られた荷電粒子プロファイルのベストフィット値 $\sigma=107\text{cm}$ とする。

$$F(x, y) = \frac{C}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(x - x_{true})^2}{2\sigma^2} - \frac{(y - y_{true})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4.2)$$

C : 積分値, σ : ビームの広がり

2. 各位置にある検出器の有効面積で積分したものを真の応答 R_i^{true} とする。 $(i$ は各検出器のチャンネルを示す添字。)
3. 各位置の真の応答に、 $\sigma=S\%$ の正規分布に従う誤差を導入したものを現実の応答 R_i^{real} とする (式 4.3)。

$$R_i^{real} = R_i^{true} \pm S\% \quad (4.3)$$

4. R_i^{real} を二次元ヒストグラムに詰め、二次元ガウス分布でフィットし、プロファイル中心 (x_{real}, y_{real}) とプロファイル積分値を得る。
5. 3.~4. の試行を 10,000 回繰り返す。
6. 10,000 回の試行で得た真のプロファイル中心位置からのズレ dr (式 4.4) の分布の 1σ (68.3%) がそれ以下に収まる範囲を $\sigma(dr)$ とし、これを中心決定精度として見積もる。

$$dr = \sqrt{(x_{real} - x_{true})^2 + (y_{real} - y_{true})^2} \quad (4.4)$$

7. 相対フラックスについては、同じく 10,000 回の試行によって得られた積分値分布の RMS/Mean を精度として見積もる。

中心決定精度

真のプロファイル中心が $(x_{true}=0, y_{true}=0)$ における中心決定精度におけるシミュレーションの結果を図 4.17 に、ミュオンモニターの中心決定精度 $\sigma \leq 3\text{cm}$ を満たす時の各検出器の測定誤差を表 4.7 に示す。シミュレーション結果は、中心決定精度においてパターン ⑥ が一番良く、パターン ③ が一番悪くなった。パターン ⑥ が一番良い要因としては、チャンネル数が他のチャンネル配置と比べて 4 ch 多いことが効いてきている。また、ミュオンモニター (150cm×150cm) に対してビームの広がり大きいため、ビーム中心位置から遠いほど中心にある検出器の信号との差が明確になりフィッ

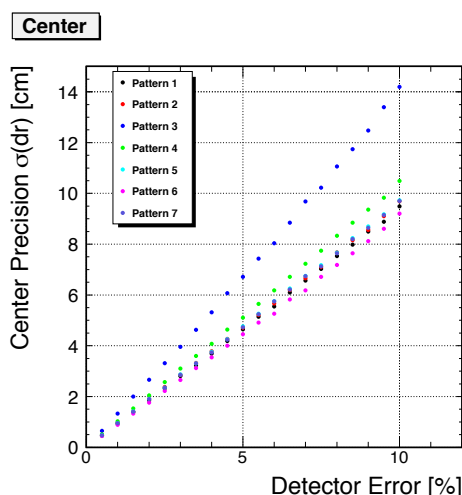


図 4.17: 各パターンのチャンネル配置における検出器の測定精度と中心決定精度の関係。真のプロファイル中心が検出器中心と一致している場合。

表 4.7: ミューオンモニターの要求する中心決定精度 $\sigma \leq 3\text{cm}$ を満たすために必要な各検出器の測定精度。真のプロファイル中心が検出器中心と一致している場合。

チャンネル配置パターン	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
許容される測定精度	3.2 %	3.1 %	2.2 %	2.9 %	3.1 %	3.3 %	3.1 %

トする際に精度が上がる。そのため、パターン ③ が同チャンネル数の他のチャンネル配置と大きく差が出てきたと考えられる。

さらに、ビームプロファイルの中心決定はビームがズレた時にも正しく行える必要があるため、ビームが x, y 方向にそれぞれ 20cm ずれた場合に対しても、同様のシミュレーションを行った。真のプロファイル中心が $(x_{true}=20, y_{true}=20)$ における中心決定精度におけるシミュレーションの結果を図 4.18 に、ミューオンモニターの中心決定精度 $\sigma \leq 3\text{cm}$ を満たす時の各検出器の測定誤差を表 4.8 に示す。シミュレーション結果は、全体的に約 0.3 % ずつ悪くなったが、ビーム中心 $(x_{true}=0, y_{true}=0)$ の場合と同様に、パターン ⑥ が良く、パターン ③ が他と比べて大きく悪くなる結果になった。

表 4.8: ミューオンモニターの要求する中心決定精度 $\sigma \leq 3\text{cm}$ を満たすために必要な各検出器の測定精度。真のプロファイル中心が検出器中心から x, y 方向にそれぞれ 20cm ずれた場合。

チャンネル配置パターン	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
許容される測定精度	2.9 %	2.8 %	1.8 %	2.7 %	2.8 %	3.0 %	2.8 %

相対フラックス強度の測定精度

相対フラックス強度の測定精度におけるシミュレーションの結果を図 4.19 に、ミューオンモニターの要求する相対フラックス強度モニター精度 $\sigma \leq 3\%$ を満たす時の各検出器の測定精度を表 4.9 に示す。相対フラックスに関しても、パターン ③ が他のチャンネル配置と比べてかなり悪い結果となった。これも中心決定精度の時と同様に、各チャンネルの真の応答の差が他と比べて小さいので各チャンネルの測定精度が効いてフィットを悪くしていることが原因だと考えられる。

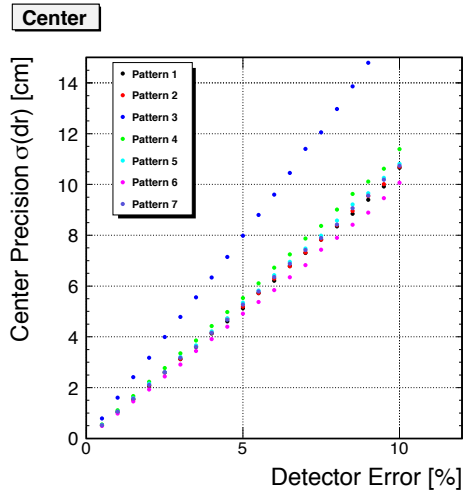


図 4.18: 各パターンのチャンネル配置における検出器の測定精度と中心決定精度の関係。真のプロファイル中心が検出器中心から x, y 方向にそれぞれ 20cm ずれた場合。

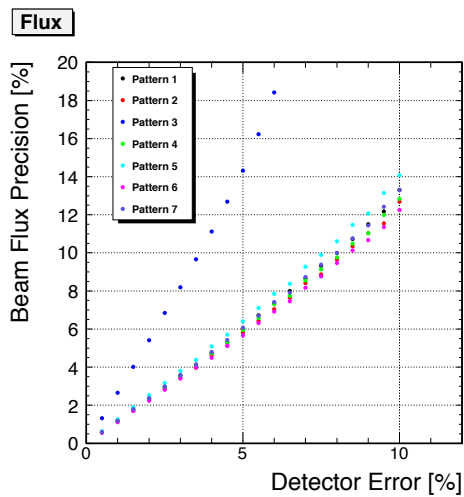


図 4.19: 各パターンのチャンネル配置における検出器の測定精度と、相対フラックス強度の測定精度の関係。真のプロファイル中心が検出器中心と一致している場合。

表 4.9: ミューオンモニターの要求する相対フラックス強度モニター精度 $\sigma \leq 3\%$ を満たすために必要な各検出器の測定精度。真のプロファイル中心が検出器中心と一致している場合。

チャンネル配置パターン	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
許容される測定精度	2.9 %	2.8 %	1.8 %	2.7 %	2.8 %	3.0 %	2.8 %

4.3.3 シリコン PIN フォトダイオードのデータを用いた検討

次に、シリコン PIN フォトダイオードの信号を使用して、提案したチャンネル配置を検討する。全 49ch を用いてプロファイルを再構成すると同じように、提案した各パターンでの各チャンネルだけを二次元ヒストグラムに詰め、フィットしプロファイルを再構成する。そして、全 49ch を用いて求めたプロファイル中心と各パターンで求めたプロファイル中心との差を比較する。比較に使用したデータは RUN38 のスピルごとのデータであり、ビーム中心は安定していた (表 4.10)。

表 4.10: RUN38 のスピルごとの再構成したプロファイル中心の平均と RMS

	イベント数	x [cm] (RMS)	y [cm] (RMS)
RUN38	130,433	0.1591 (0.1935)	1.942 (0.2466)

軸対称 (相関なし) の二次元ガウス分布を仮定した場合

二次元ガウス分布 (式 4.1) でフィットし比較した結果を図 4.20 に示す。動径方向のズレ dr は、パターン ①② が $dr \approx 1.3\text{cm}$ 、パターン ④⑤⑥⑦ が $dr \approx 2\text{cm}$ 、パターン ③ が $dr \approx 3.8\text{cm}$ となり、パターン ③ が他のチャンネル配置と比べてズレが大き、つまり、精度が悪くなった。そして、パターン ⑥ がパターン ①② よりズレが大きくなった。パターン ⑥ はパターン ② に 4ch 付け加えたチャンネル配置であるにも関わらず、チャンネル数が少ない方がズレが小さくなるのは、フィット関数の軸対称の二次元ガウス分布をビームプロファイルとして仮定していたことが影響している可能性がある。

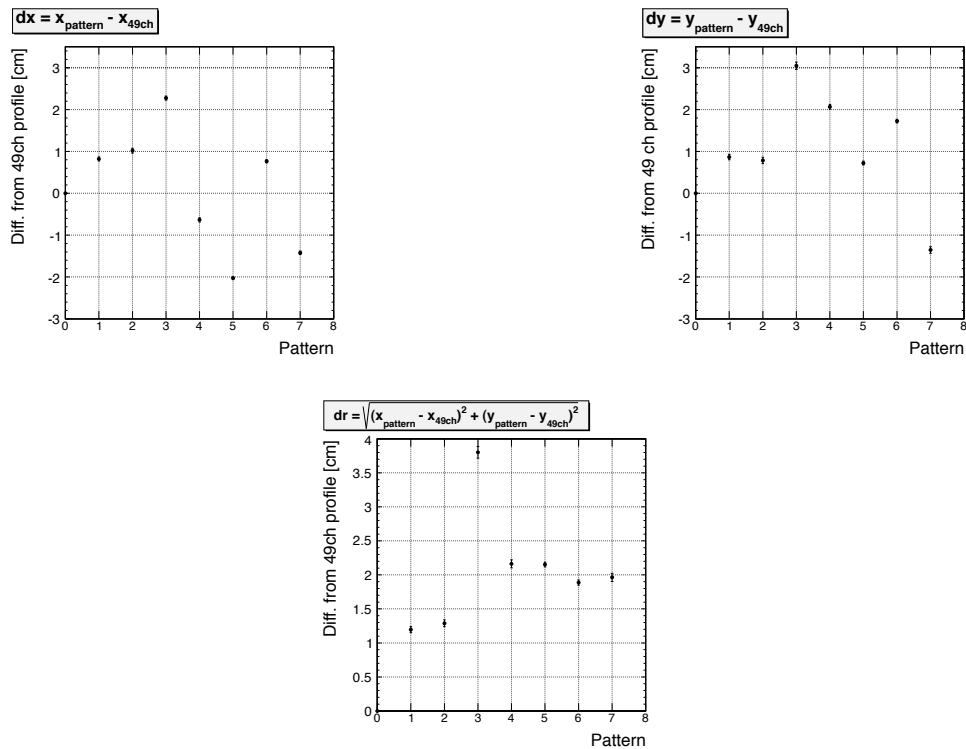


図 4.20: 全 49ch で求めたプロファイル中心と各パターンで求めたプロファイル中心とのズレ。(上)x, y 方向におけるズレの平均値。(下) 動径方向におけるズレの平均値。共に、RMS を誤差としている。

非軸対称 (相関あり) の二次元ガウス分布を仮定した場合

そこで、実際のビームプロファイルが非軸対称 (相関あり) の二次元ガウス分布 (式 4.5) であると仮定する。

$$F(x, y) = A \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right\} \right] \quad (4.5)$$

$$\rho = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x\sigma_y} : \text{相関係数 } (|\rho| \leq 1), \quad Cov(x, y) : \text{共分散}$$

フィット関数を式 4.5 にしてデータを用いた比較を再度行った結果が、図 4.21 である。チャンネル数が多いパターン ⑥ が最もズレの小さい結果となった。

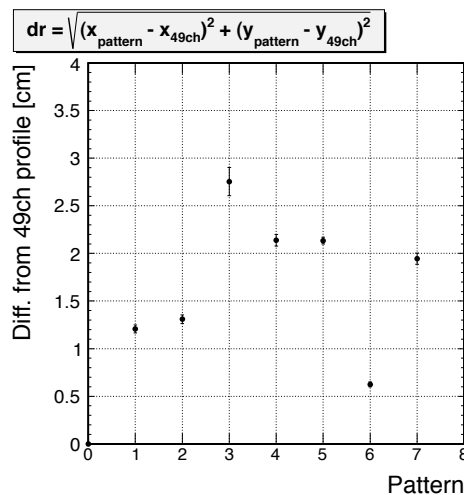


図 4.21: フィット関数を相関ありの二次元ガウス分布とした時の全 49ch で求めたプロファイル中心と各パターンで求めたプロファイル中心とのズレ。

全 49ch のフィットから得た相関係数 $\rho = -0.032$ となりほとんど相関がなく、相関ありとなしの二次元ガウス分布のフィットパラメータにおいてほとんど変化がなかった (表 4.11)。表 4.11 のパラメータを持った相関ありの二次元ガウス分布 (式 4.5) を、各位置にある検出器の有効面積で積分した値を二次元ヒストグラムに詰めたものと、実際の信号量を詰めた二次元ヒストグラムを見比べてみると、フィットから得た方はわずかに相関が見えるが、実際のデータと同じプロファイルには見えない (図 4.22)。厳密に実際のビームプロファイルは軸対称の二次元ガウス分布ではないため、チャンネル数が少ないと実際のプロファイルと異なるチャンネルを選択した時のズレへの影響が大きくなる。ただ、相関なしよりも相関がある二次元ガウス分布が実際のビームプロファイルに近づいたため、ズレへの影響が小さくなり、パターン ② のズレが小さくなったと考えられる。

4.4 ダイヤモンド 検出器のパッケージ

地震により J-PARC では地盤沈下や地割れなどダメージを受けた。その際に、検出器へのダメージを確かめる必要がある。検出器の動作確認として、シリコン PIN フォトダイオードではペンライトの光を使った応答確認が行われた。しかし、ダイヤモンド検出器は光を照射できず動作確認が行えなかった。そのため、今後このような時に手軽に動作確認ができるように、パッケージを改良する。ただし、ダイヤモンドはペンライトの光の波長領域には感度がないため、光を使った応答確認をするには感度のある波長領域の光を使用しなくてはならない。(後述 4.4.2)

表 4.11: 全 49ch を相関ありとなしの二次元ガウス分布でフィットした時のフィットパラメータの平均。

	x [cm] (RMS)	y [cm] (RMS)	σ_x (RMS)	σ_y (RMS)	ρ (RMS)
相関あり	0.1259 (0.1948)	1.957 (0.2466)	102.4 (0.4588)	114.7 (0.6344)	-0.032 (9.7×10^{-4})
相関なし	0.1591 (0.1935)	1.942 (0.2466)	102.4 (0.4583)	114.7 (0.6335)	

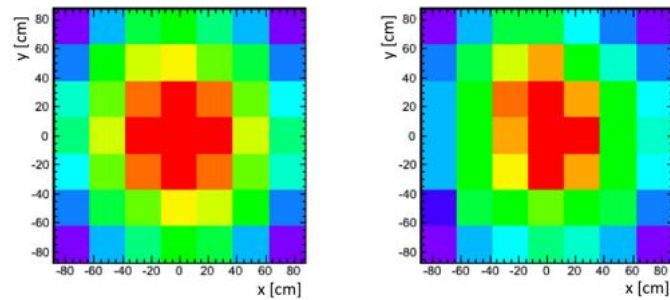


図 4.22: (左) フィットから得たパラメータにおける相関ありの二次元ガウス分布で各検出器の有効面積で積分した値を 7×7 マスの二次元ヒストグラムに詰めたもの。(右) データを詰めたもの。

4.4.1 パッケージの変更

基本的には現在ミュオンモニターにインストールしたダイヤモンド検出器のパッケージと同じであるが、変更点は中層板に溝を入れダイヤモンドに光を当てれるようにし、また、その溝からゴミが入らないようにフタを設ける (図 4.23)。矢印の部分にネジで止める。

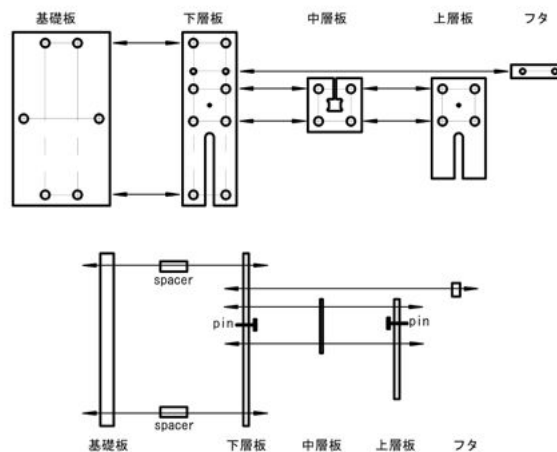


図 4.23: 変更したパッケージの概略図。

4.4.2 紫外線に対する応答確認

半導体の光学的性質

価電子帯から伝導帯へと電子を励起することで、シリコン PIN フォトダイオードやダイヤモンド検出器の信号を得ていた。荷電粒子との相互作用により励起していたが、バンドギャップに相当する波長を持った光子により電子を励起することができる（図 4.24）。エネルギーと波長の関係式は

$$\lambda[\text{m}] = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{E[\text{eV}]} \quad (4.6)$$

である。ダイヤモンドのバンドギャップ $E_g=5.47[\text{eV}]$ に相当する波長は $\lambda=227[\text{nm}]$ となり、紫外線領域になる。可視光などそれより長い波長では伝導帯にまで電子を励起することが出来ないので、動作確認をするには波長が 227nm の紫外線を当てる必要がある。

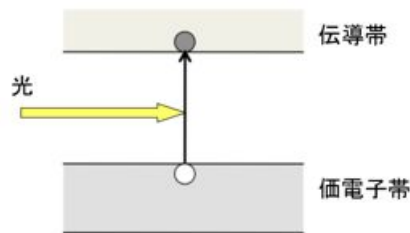


図 4.24: 光励起によるキャリアの生成の概略図。

ダイヤモンド 検出器の応答確認

実際にダイヤモンドチップをパッケージに挟み込み、感度のある波長をもった紫外線を当てて動作確認をした（図 4.25）。紫外線を照射すると信号が出ているのが確認できた。（図 4.26）。

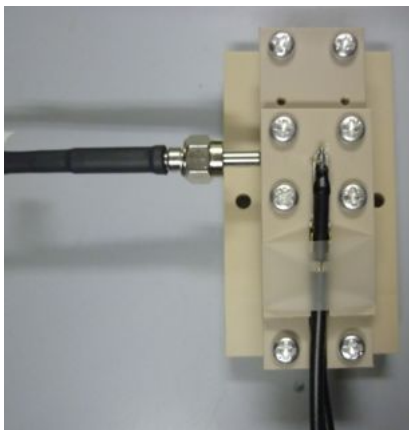


図 4.25: 動作確認の写真。ライトガイドのコネクタがパッケージと干渉したため横から照射した。

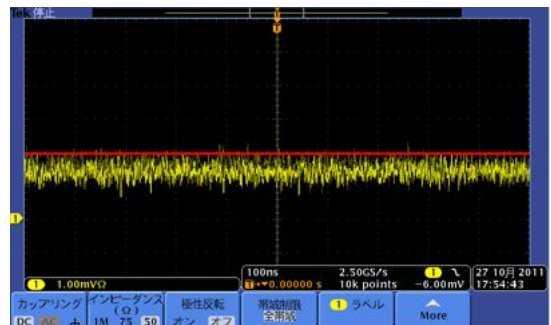


図 4.26: 紫外線を照射したときのオシロ画像。赤線は紫外線を照射していないときの信号レベル。

第5章 結論

T2K 実験で用いているシリコン PIN フォトダイオードの代替候補であるダイヤモンド検出器を、ミュオンモニターに一つインストールし、実際の T2K 実験物理ラン時のミュオンを照射して得たデータにより性能評価を行った。シリコン PIN フォトダイオードに対して、スピルごとにおいてもバンチごとにおいても、非線形性は 3% 以内であった。また、長期安定性に関しても、 $RMS/Mean=1.5\%$ 以内に収まっており、安定に動作していることが確認できた。

チャンネル配置については、いくつかのパターンを検討した。簡易シミュレーションにおいては、チャンネル数が多く、信号差を出すために端のチャンネルをつけ、満遍なく配置するのがよいと考えられた。シリコン PIN フォトダイオードの信号を用いた検討では、相関無しと有りとの 2 次元ガウス分布でプロファイルを再構成する場合で系統的なズレの結果が異なってきた。相関無しの 2 次元ガウス分布で再構成する場合のこと考えると、パターン ①② が良いという結果になった。

パッケージの変更を考え、紫外線により簡単にダイヤモンド検出器の動作確認ができるようになった。

謝辞

清矢良浩先生、山本和弘先生ご指導ありがとうございました。また、京都大学の先生や先輩方に感謝いたします。

参考文献

- [1] 松岡広大、博士論文、京都大学（2011年）
- [2] 薄膜ハンドブック 第2版（2008年）
- [3] element six 社 HP.
- [4] 久保一、修士論文、京都大学（2008年）
- [5] 鈴木研人、修士論文、京都大学（2011年）