

修士論文

NuMI ニュートリノビームラインを用いた
T2K 実験ミューオンモニターの長期試験
(FNAL T968 実験)

京都大学理学研究科

久保 一

2008 年 1 月 31 日

概要

本論文では、T2K 長基線ニュートリノ振動実験において重要な役割を占めるミュオンモニターの開発について、フェルミ国立加速器研究所 NuMI ニュートリノビームラインにて実施中の試作機長期試験 (FNAL T968 実験) を中心に報告する。

ミュオンモニターは、イオンチェンバーと半導体検出器 (シリコン PIN フォトダイオード又は CVD ダイアモンド検出器) の 2 つの独立したシステムから構成される。パイ中間子崩壊によりニュートリノと共に生成されるミュオンの分布中心を測定することにより、ニュートリノビーム方向を各ビームバンチごとにモニターする。また、ニュートリノビーム強度変動のモニターとしても働くことができる。

ミュオンモニターはニュートリノビームの状態をリアルタイムに監視できる唯一の検出器であるため、T2K 実験の全期間において安定に動作することが求められる。そのため、ミュオンモニターの設計・精度を議論する上では、検出器の性能が長期的に安定であると保証するデータが必要である。

そこで、現在稼働中のニュートリノビームラインであるフェルミ国立加速器研究所 NuMI ビームラインにミュオンモニター試作機を設置し、実際のミュオンビームを用いた長期試験 (FNAL T968 実験) を実施した。

まず、過去の試作機に改良を加えた長期試験用のミュオンモニター試作機を新たに設計・製作し、京都大学化学研究所 100MeV 電子線形加速器を用いてビーム照射試験を行った。

それによって以前の試作機と同等の性能を持つことを確認し、また相対的なキャリブレーションデータを収集した。同時に、T2K ミュオンモニターにおける測定精度を見積もるため、検出器の基本性能評価を行った。

その後、試作機を NuMI ビームラインに運搬・設置して 1 ヶ月以上に渡る測定を行い、各検出器の安定性およびミュオンビームに対する応答を検証した。この測定期間中に、検出器に目立った問題や損傷は発見されなかった。

イオンチェンバーのチャンネル間の相対的な安定性は $\pm 0.4\%$ 以内、イオンチェンバーとシリコン PIN フォトダイオードの応答比の安定性も、圧力・温度変動を補正することで $\pm 1.2\%$ 以内に抑えることができた。

最終的に、T968 実験から得られた長期安定性のデータと、電子ビームを用いた試験の結果から得た測定精度を統合して、数値計算によって算出した各検

出器に対する要請と比較を行った。

その結果、ミュオンモニターに用いる検出器のうちイオンチェンバーとシリコン PIN フォトダイオードに関してはビーム方向、ビーム強度変動を必要な精度で長期的に安定してモニター可能であることが確認できた。

また、CVD ダイヤモンド検出器の不安定な挙動などの残る問題点については対応策を明確にした上で、T2K ミュオンモニターの設計を確定した。

目次

第 1 章	ニュートリノ振動と T2K 実験	6
1.1	ニュートリノ振動	6
1.2	T2K 実験の概要と目的	9
1.3	実験施設と実験手法	10
第 2 章	T2K 実験 ミューオンモニター	15
2.1	ミューオンモニターの概要と目的	15
2.2	ミューオンモニターの基本設計	18
2.3	ミューオンモニターに使用する検出器	19
2.4	T2K ニュートリノビームの運用計画とミューオンモニターで予想される 信号量	31
2.5	読み出し回路	32
2.6	T2K ミューオンモニターの過去の開発経緯	36
2.7	T968 実験	38
第 3 章	電子ビームを用いたミューオンモニター試作機の性能評価	40
3.1	試験の目的	40
3.2	セットアップ	41
3.3	ビーム強度の測定	49
3.4	平行平板型イオンチェンバーの性能評価	51
3.5	シリコン PIN フォトダイオードの測定	70
3.6	CVD ダイヤモンド検出器の性能評価	72
第 4 章	FNAL T968 実験	81
4.1	実験セットアップ	81
4.2	信号波形とビーム運転モード	90
4.3	シリコン PIN フォトダイオードの測定	94

4.4	平行平板型イオンチェンバーの測定	98
4.5	CVD ダイヤモンド検出器の測定	111
4.6	測定結果のまとめと考察	118
第 5 章	T2K ミューオンモニターの最終デザインと運転計画	119
5.1	測定精度の評価	119
5.2	ミューオンモニターの最終デザイン	119
5.3	ミューオンモニター準備計画	122
5.4	総括	122
謝辞		123
付録 A	平行平板型イオンチェンバーの動作原理	125
A.1	荷電粒子による電離	125
A.2	電子のドリフト速度	125
A.3	イオンのドリフト速度	130
A.4	ガス中のキャリアの振る舞い	132
A.5	収集電荷量	136
参考文献		140

第 1 章

ニュートリノ振動と T2K 実験

この章では、ニュートリノ振動の物理とニュートリノ振動実験の歴史と現状、そして T2K 実験の概要を述べる。

1.1 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが飛行中に種類 (フレーバー) を変える現象である。

3 世代のニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ)^{*1} はそれぞれ弱い相互作用のフレーバー固有状態であるが、それらが質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) と一致している理由はない。3 世代のフレーバー固有状態と質量固有状態の混合は 3 つの混合角 ($\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$) と 1 つの CP 位相 δ を用いて次のように表される。

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

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

ここで、 s_{ij}, c_{ij} はそれぞれ $\sin \theta_{ij}, \cos \theta_{ij}$ を表す。この 3 世代の混合行列 $U_{\alpha i}$ は Maki-Nakagawa-Sakata 行列 (MNS 行列) と呼ばれる。[2]^{*2}

さて、 $t = 0$ に $x = 0$ で生成された ν_α の時間発展を考える。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - p_i x)} |\nu_i\rangle \quad (1.3)$$

^{*1} CERN の LEP 実験によって、弱い相互作用をする軽いニュートリノの世代数は 3 であることが確かめられている。[1]

^{*2} ニュートリノがマヨラナ粒子の場合は、さらにマヨラナ位相が付加される。

ν_i の質量を m_i とすると $m_i \ll E_i$ であるので、 $E_i \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2E_i}$ と近似できる。また光速で運動しているとみなせるので $t = x$ とおくと、

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_i^2}{2E_i} x} |\nu_i\rangle \quad (1.4)$$

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_ν のニュートリノが、距離 $x = L$ 飛行したのちにフレーバー β として観測される確率 $P_{\alpha\beta}$ は、

$$\begin{aligned} P_{\alpha\beta} &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-i \frac{m_i^2}{2E_\nu} L} \right|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j \neq i} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu} \\ &\quad + 2 \sum_{j \neq i} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E_\nu} \end{aligned} \quad (1.5)$$

となる。ここで、質量二乗差 $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$ である。

U が対角 (混合角が 0)、あるいははニュートリノに質量がない ($m_1 = m_2 = m_3 = 0$) 場合には、式 (1.5) は第一項のデルタ関数のみとなり、振動は起こらない。

つまりニュートリノ振動が観測されるということは、ニュートリノフレーバー間に混合があり、ニュートリノに質量 (質量差) が存在していることを示している。

また、ニュートリノ振動確率はニュートリノエネルギー E_ν と距離 L の比の関数になることが分かる。この点をさらに明快にするため、最も単純な例である 2 世代間の振動を考える。

このとき混合行列は、1 つの混合角 θ を用いて

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

振動確率は式 (1.5) より

$$P_{\alpha\alpha} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E_\nu} \right) \quad (1.7)$$

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E_\nu} \right) \quad (1.8)$$

となる。ただし、ここでの単位系は Δm^2 [eV^2]、 E_ν [GeV]、 L [km] としてあり、1.27 は自然単位系からの変換に伴う定数である ($10^3 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / 4\hbar c$)。

振幅は混合の大きさ $\sin^2 2\theta$ により、 $1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E_\nu} \simeq \pi/2$ のとき振動が最大になる。また、距離・エネルギーの関数として振動確率を測定することで振動パラメータ $\theta, \Delta m^2$ の決定が可能である。

3 世代間の振動は複雑になるが、多くの場合は 2 世代間の振動に近似して考えることが出来る。

1.1.1 ニュートリノ振動実験の現状と今後

ニュートリノ振動実験における最も重要なテーマは、MNS 行列 (式 (1.1)) の 3 つの振動角 ($\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$) および 2 つの独立な質量二乗差 $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$ 、そして CP 位相 δ を決定することである。

まずは、現在までに得られているパラメータの領域をまとめる。

Δm_{23}^2 および θ_{23}

スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ モード) においてニュートリノ振動が発見され、長基線加速器ニュートリノ実験である K2K 実験、MINOS 実験 (共に $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ モード) においても同じパラメータ領域でのニュートリノ振動が確認されている [3][4][5]。

これらの実験の結果が与えるパラメータ領域は、質量二乗差 $2 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta_{23} \simeq 1$ である。

Δm_{12}^2 および θ_{12}

スーパーカミオカンデ、SNO 等の太陽ニュートリノの観測 ($\nu_e \rightarrow \nu_x$ モード^{*3})、および原子炉ニュートリノ実験 KamLAND の測定により、もう一つのパラメータ領域でのニュートリノ振動が確立されている。

これらの結果から与えられるパラメータ領域は $7 \times 10^{-5} < \Delta m_{12}^2 < 9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\tan^2 \theta_{12} \sim 0.4$ となる [6][7][8]。

θ_{13} と CP 位相 δ

残る 1 つの混合角 θ_{13} については、未だに上限が与えられているのみで、最も強い制限を与えている CHOOZ 実験 [9] の結果によると $\sin^2 2\theta_{13} < 0.16$ である。

CP 位相 δ は式 (1.1) を見ると分かるように、 $\theta_{13} = 0$ では意味を持たないため、CP 位相の測定可能性を議論するためにも有意な θ_{13} の値を得る必要がある。

*3 ν_x は ν_μ または ν_τ の意

θ_{13} 測定が可能なモード

$\Delta m_{23}^2 \simeq \Delta m_{13}^2 \gg \Delta m_{12}^2$ であることから、 $\frac{E_\nu}{L} \sim \Delta m_{23}^2$ のときには Δm_{12}^2 の影響はほとんど無視できる。そのため、式 (1.5) を近似することで

$$\begin{aligned} P_{ee} &= 1 - \sin^2 2\theta_{13} S_{23} \\ P_{e\mu} &= \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} S_{23} \\ P_{\mu\mu} &= 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} S_{23} \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる。ただし、ここで $S_{23} = \sin^2(\Delta m_{23}^2 L / 4E_\nu)$ 。

(1.9) を見ると、第一式と第二式のようなモードにおいては θ_{13} に感度があると思われる。

第一式のようなモードは純粋に θ_{13} を測定することができるが、消失モード (減少を見るモード) であるため系統誤差によって測定精度が頭打ちになる可能性がある。

原子炉ニュートリノ振動実験が測定を目指すモードがこれにあたる。

第二式のようなモードでは θ_{23} の影響と混ざってはしまうが、出現モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) としての測定が可能であり、高い発見能力を有する。

加速器ニュートリノ振動実験が目指すモードがこれにあたる。

1.2 T2K 実験の概要と目的

東海-神岡間 長基線ニュートリノ振動実験 (T2K^{*4}実験) とは、茨城県東海村の大強度陽子加速器 (J-PARC^{*5}) 50GeV 陽子シンクロトロン を用いて生成された、ほぼ純粋なミュオンニュートリノを生成点直後の前置検出器群と、295 km 離れた岐阜県飛騨市の5万トン水チェレンコフ検出器 スーパーカミオカンデ (Super-K ^{*6}) の二点で観測することによりニュートリノ振動の精密測定を行う実験であり、2009年4月に開始予定である。

T2K 実験の目的としては

- 未発見の電子ニュートリノ出現事象 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動モード) の発見。それにより振動角 θ_{13} を測定すること。
- ミュオンニュートリノ消失事象の精密測定を通じて振動パラメータ $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$ を精度良く決定すること。

などが挙げられる。特に θ_{13} の測定は、CP 非対称性パラメータ δ の測定可能性など将来

^{*4} Tokai to Kamioka

^{*5} Japan Proton Accelerator Research Complex

^{*6} Super-KAMIOKA Neutrino Detection Experiment

のニュートリノ振動実験の将来を占う上でも重要なテーマである。

1.3 実験施設と実験手法

1.3.1 J-PARC ニュートリノビームライン

J-PARC の施設配置を図 1.1 に示す。陽子ビームは線形加速器 (LINAC)、3 GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、50GeV 陽子シンクロトロン (MR) で順に加速された後、MR 内側のニュートリノビームラインへと取り出される。



図 1.1 J-PARC 大強度陽子加速器施設の施設配置図。J-PARC web サイト [10] より引用。

陽子ビームをグラファイト標的に照射して生成された大量の π 中間子は 3 つの電磁ホーンによって収束され、94 m の崩壊領域でミュオンとミュオンニュートリノに崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.10)$$

ビームに含まれる陽子、崩壊しなかった π 中間子、および低エネルギーのミュオンなどは標的から 110m 下流のビームダンプによって吸収され、ニュートリノと高エネルギー

のミューオンのみが貫通してゆく。ニュートリノおよびミューオンは崩壊時の π 中間子の運動量によって前方にブーストされているが、ある程度の広がりを持ったビームとなる。

ビームパラメータ

ビームパラメータのデザイン値を表 1.1 にまとめる。陽子エネルギーのデザイン値は 50 GeV であるが、当面の間は陽子ビームエネルギー 30 GeV での運転を行う予定である。

ビームの時間構造を図 1.2 に示す。

ビームを一度に取り出す手法 (速い取り出し) により、約 3.5 s 周期のうちの 5~6 μ s とビームタイミングが非常に限定され、宇宙線などによるバックグラウンドの影響を小さくすることができる。

表 1.1 T2K 実験ビームパラメータのデザイン値

ビームエネルギー	50 GeV
ビームパワー	0.75 MW
スピル間隔	約 3.5 s (0.285 Hz)
スピルあたり陽子数	3.3×10^{14} p/spill
バンチ数	8/spill
バンチ間隔	600~700 ns
バンチ幅	58 ns

1.3.2 Off-axis ビーム法

ビーム軸からの角度 θ の方向に 2 体崩壊 (式 1.10) によって放出されるミューオンニュートリノのエネルギー E_ν は、親の π 中間子のエネルギー E_π と運動量 p_π 、 π 中間子とミューオンの質量 m_π, m_μ を用いて

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta)} \quad (1.11)$$

と書ける。

横軸に p_π 、縦軸に E_ν をとって式 (1.11) をプロットしたものが図 1.3 である。0 度の方向に放出されるニュートリノのエネルギーは親の π 中間子の運動量に比例して増加するが、僅かにずれた方向に放出されるニュートリノのエネルギーは、親の π 中間子の運動量にあまり関係なくほぼ一定になることが見て取れる。

T2K 実験では、ビーム軸を後置検出器であるスーパーカミオカンデに向かう方向から 2.5 度ずらすことによってニュートリノのエネルギースペクトルを、295 km 先での振動

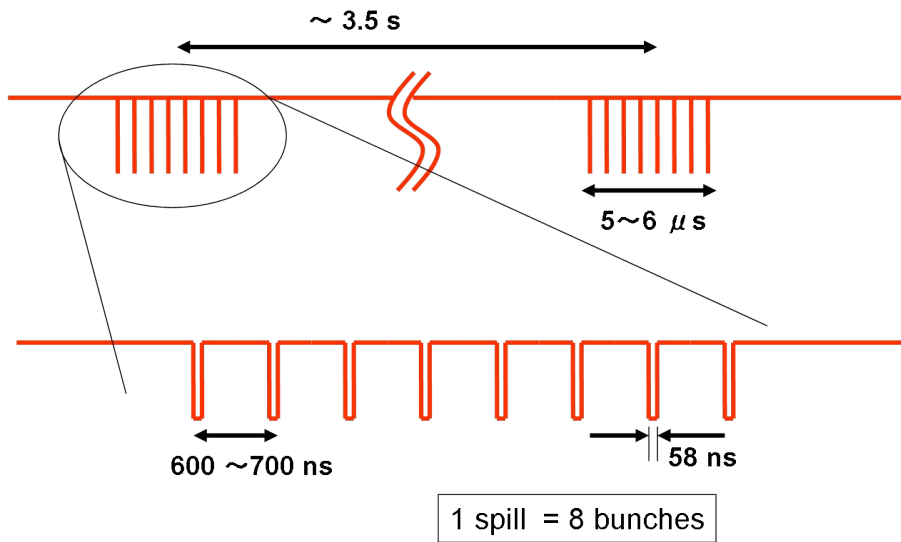


図 1.2 T2K ニュートリノビームの時間構造。

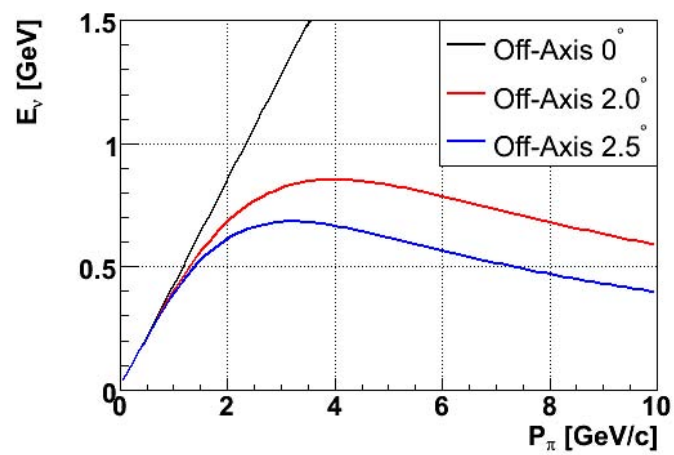


図 1.3 Off-axis 角による π 中間子 運動量とニュートリノエネルギーの関係の変化。

確率が最大になる付近 (0.5~0.7 GeV) に集中した幅の狭いものにすることが可能である (図 1.3)。これが Off-axis 法であり、実質的な統計量を増加させ、また電子ニュートリノ出現モードのバックグラウンドになる高エネルギーのニュートリノによる中性 π 中間子生成も減少させることができる。

Off-axis 法の提案は以前からなされていたが [11]、実用化されるのは T2K 実験が初めてである。

1.3.3 ミューオンモニター

ビームダンプ直後には本研究の主題であるミューオンモニターが置かれ、ダンプを突き抜けてくるミューオン (運動量 5GeV/c 以上) の分布から、各ビームバンチごとにニュートリノビーム方向を測定する。詳細は次章を参照されたい。

1.3.4 前置検出器群

ビーム標的から 280m 下流にある前置検出器ホールには Off-axis 検出器、On-axis 検出器の 2 種類の前置検出器が置かれる。

Off-axis 検出器は後置検出器スーパーカミオカンデに向かう方向に設置され、振動前のニュートリノフラックス、ニュートリノエネルギーの測定を行う。スーパーカミオカンデにおける振動が無いときの事象数およびエネルギースペクトルは Off-axis 検出器のデータからシミュレーションを用いて予測する。

On-axis 検出器 (INGRID^{*7}) はビーム軸上に設置され、ニュートリノ反応から直接ニュートリノビーム方向を測定する。反応断面積が小さいため、ミューオンモニターのように即座にビームプロファイルを構成することはできないが、ビーム強度がデザイン値に達したときには 1 日に 1 回程度の間隔でビームプロファイルを構成することが可能である。

1.3.5 後置検出器 スーパーカミオカンデ

後置検出器であるスーパーカミオカンデは約 50 kt(有効体積 22.5 kt) の純水を用いた大型水チェレンコフ検出器であり、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市 神岡鉱山内の地下 1000 m に位置している。

スーパーカミオカンデは、ニュートリノ反応で生成または散乱された荷電粒子が水中を飛行する際に発するチェレンコフ光を、水槽壁面に取り付けられた 20 インチ光電子増倍

^{*7} Interactive Neutrino GRID detector

管 (PMT) を用いてリングイメージとして観測する。ミューオンによるチェレンコフリングと電子によるチェレンコフリングは、リングの輪郭の明瞭さを比べることで判別可能である (電子は水中で電磁シャワーを形成するため、ぼやけた形のリングが観測される)。

最終的には、ミューオン事象・電子事象それぞれの数およびエネルギースペクトルを、Off-axis 前置検出器の測定から予想される値と比較することによって、ニュートリノ振動の解析が可能になる。

第 2 章

T2K 実験 ミューオンモニター

この章では、T2K 実験のビームモニターの 1 つであり、本研究の中心であるミュオンモニター 検出器の概要について述べる。

2.1 ミューオンモニターの概要と目的

T2K 実験では、Off-Axis ビーム法を使用するため、ニュートリノのエネルギー分布がビーム角度に強く依存する。そのため、実験全体に渡ってニュートリノビームの方向を監視し続ける検出器が必要不可欠である。

T2K 実験 ミューオンモニターは、ビームターゲット下流 110 m のビームダンプ直後に位置し、 π 中間子の崩壊によってミュオンニュートリノと共に生成されるミュオンの分布中心を測定することで、ニュートリノビーム中心方向の情報を各ビームバンチごとに得る検出器である (図 2.1)。さらには、上流の電磁ホーンの異常の感知、ビームフラックス変動のモニターも可能である。

2.1.1 ミューオンモニターの性能に対する要請

5 年間に渡り、安定に運用可能であること

ミュオンモニターは、ニュートリノビームをリアルタイムに監視できる唯一の検出器であるので、ミュオンモニターのトラブルは T2K 実験全体を止めてしまうことにつながる。そのような事態を引き起こさないため、ミュオンモニターは T2K 実験第一期の 5 年間に渡り安定運用可能であることが求められる。

ニュートリノビーム方向を 1 mrad 以内の精度でモニターできること

先行研究 [12] によると、ニュートリノビーム方向を 1 mrad 間違えるとニュートリノエネルギースケールに約 2%、ニュートリノフラックスに約 3% の誤差を生じる。

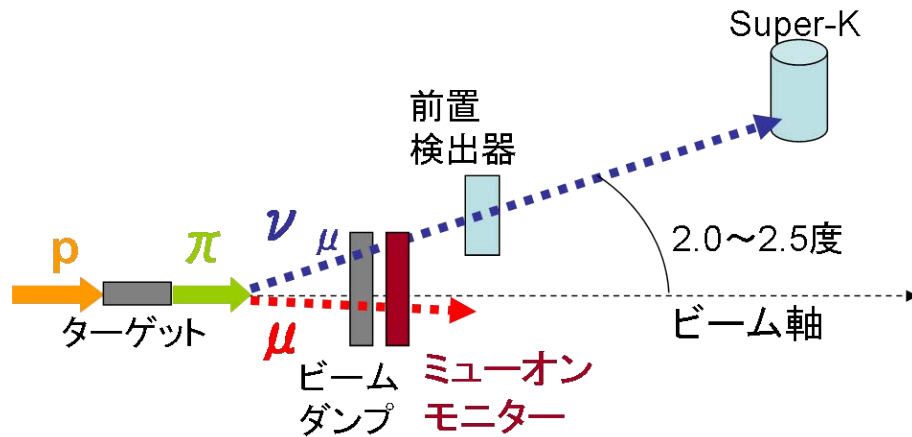


図 2.1 Off-Axis ニュートリノビームラインとミュオンモニターの模式図。

これらの系統誤差は 3% 以内に抑えれば、ミュオンニュートリノ消失モードの振動パラメータの統計誤差よりも小さくすることができる [13]。つまり、T2K 実験におけるニュートリノビーム方向の測定精度への要請は 1 mrad であるといえる。ミュオンモニターの設置場所 (ビームターゲット下流 110m) では、ビーム方向の 1 mrad のずれはビーム中心の 11 cm のずれに相当する。よって、ミュオンモニターには、ビーム中心を 11 cm よりも十分良い精度で測定することが求められる。我々は、ミュオンモニターのビーム中心測定精度の目標値を $\sigma = 3$ cm 以内に設定した。これは、 3σ (99.97%) 以上の確率で 1 mrad 以内に収まっていることを保証するという意図によるものである。

相対的なフラックス変動の測定

ミュオンモニターで相対的なフラックス変動が精度良くモニターできていれば、前置検出器に何らかのトラブルが起こった期間が存在したとしても、後置検出器のみで測定を継続し、その期間のフラックスをミュオンモニターで規格化することが可能である。つまり、ミュオンモニターはビームモニターであると同時に前置検出器のバックアップとも成り得る。

意味のある測定とするためには、相対フラックス変動を物理要請の 3% より小さく抑えることが必要である。

高強度のビームを測定できること、また 100 倍のダイナミックレンジを持つこと

T2K がデザイン強度 (50GeV, 0.75 MW) で運転した際にミュオンモニター中心で予想される荷電粒子フラックスは、およそ 2×10^7 particles/cm²/bunch にも及ぶ。ミュオンモニターはこの強度のビームを測定可能である必要がある。尚かつ T2K 実験立ち上げ直後のビームコミッショニングにも必要な検出器であるの

で、(立ち上げ当初は1バンチあたりの陽子数が最大強度の1%前後と予定されている)100倍以上のダイナミックレンジで、前項の要請精度での測定ができないといけない。

高い放射線耐性を備え、また難放射化であること

ミューオンモニター設置場所であるミューオンピットはビームダンプの直後であり、シミュレーションから予想される吸収線量 [14] は、ビーム中心で 70 ~ 200 kGy / year と非常に高い^{*1*2}。

よって、ミューオンモニターは最低でも 1 MGy に耐える素材で構成されなくてはならない。また、ミューオンモニター本体が放射化してしまうとメンテナンスが不可能または冷却に多くの時間が必要になってしまうので、鉄などの放射化しやすい物質の使用は出来る限り避ける必要がある。

メンテナンスの必要が最小限であること

1年間最大強度で運転した後、安全にミューオンモニターにアクセスするためには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、ミューオンモニターは運転中のメンテナンスを極力必要としないように設計しなくてはならない。

ビームプロファイルを構成可能な範囲をカバーしていること

ミューオンモニター設置位置での荷電粒子プロファイルはシミュレーションによる予想によると当面の陽子エネルギー 30GeV においては $\sigma \sim 107$ cm の広がりを持っている。このビームプロファイルの中心をガウシアンフィットで求めるためには、最低でも ± 50 cm の領域が必要である。さらに、ビームが中心から 20 cm 程度ずれた場合にでもプロファイルがフィット可能であるために ± 75 cm の範囲をカバーするように設計を行う。

バンチごとに読み出しが可能であること

バンチごとにビームプロファイルを測定するため、検出器の応答はバンチ間隔 (600~700 ns) よりも速くなくてはならない。また、このような短い時間間隔で連続した電荷積分を行うのは困難であるので、読み出し回路には Flash ADC を用い、波形データから各バンチでの信号量を構成する。

*1 シミュレーションによると吸収線量はほとんど物質によらず一定である。

*2 1年間の実運転時間は100日と仮定している。

2.2 ミューオンモニターの基本設計

安定な運用を保証するため、ミューオンモニターには2つの独立したシステムを用いて冗長性のある測定を行う。1つめのシステムは平行平板型イオンチェンバー、もう1つは半導体検出器(シリコン PIN フォトダイオード又は CVD ダイヤモンド検出器)によるシステムである。

2.2.1 全体設計

ミューオンモニター基本設計の概観を図 2.2 に示す。

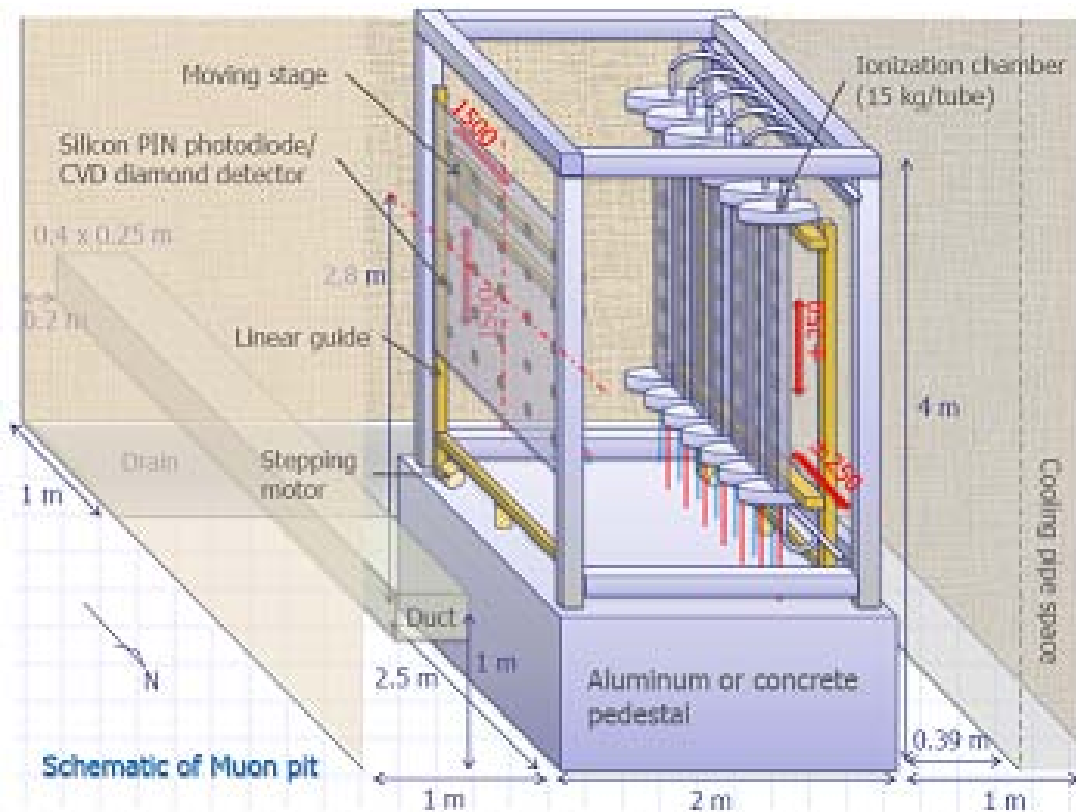


図 2.2 ミューオンモニターの模式図。

まず、前方の 150 cm × 150 cm の領域に 25 ch の半導体検出器が並び、(CVD ダイヤモンド検出器については、コストの都合で 13 ch とする可能性がある)。後方には 7 本のイオンチェンバーチューブが並ぶ。それぞれのチューブに 7 チャンネルずつ、計 49 ch のイオンチェンバーが 25 cm 間隔で設置され、測定可能領域は同じく 150 cm × 150 cm となる。

架台には駆動機構を搭載し、イオンチェンバーは全体を上下左右に 25 cm (チャンネル間隔 1 つ分) 動かすことで運用中の相対キャリブレーションを行う。半導体検出器に関しては、全体を移動可能なキャリブレーション用チャンネルを 1 つ追加しこれを移動させることによって 1 つ 1 つのキャリブレーションを行うことが出来る。

また、半導体検出器とイオンチェンバーはほぼ同じ位置で貫通するビームを観測しているのでお互いの信号を用いてクロスチェックを行うこともできる。

2.3 ミューオンモニターに使用する検出器

ミューオンモニターで使用する各検出器の設計と、本研究に関わる特性について簡単に触れる。平行平板型イオンチェンバーについては動作原理の詳細を付録に収録し、適宜参照することにする。

2.3.1 平行平板型イオンチェンバー

平行平板型イオンチェンバーの模式図を図 2.3 に示す。高電圧の印加された向かい合う極板間に、希ガスなどのガスが充填されている。この中を荷電粒子が通過すると、その飛跡に沿ってガス原子が電離されて電子・陽イオン対が生成される。生成された電子及び陽イオンは印加された電場によって各電極の方向へと移動 (ドリフト) を始める。電荷の移動によって電圧の降下が起き、それを補うために回路に電流が誘導される。この電圧変化又は電流を信号として読み出すことができる。

平行平板型イオンチェンバーは、応答・構造が単純であるので機械的な故障の恐れが少ない。また、既製品を用いずに自らの手で設計・製作することで、電極プレートサイズ、電極プレート間隔、印加電圧、使用するガス種、圧力などを選び、要請を満たすように応答をカスタマイズすることが可能である。

W 値と応答量

電子・イオン対を 1 つ生成するあたりに荷電粒子が損失するエネルギーのことを W 値と呼ぶ。高速電子に対して、ヘリウムでは 41.3 eV, アルゴンでは 26.3 eV である [15]。

ドリフト時間と信号波形

イオンチェンバーの応答時間は、電子・イオンのドリフト時間によって決まる。電子のドリフト速度は典型的には 10^6 cm/s, イオンのドリフト速度は 10^3 cm/s である。ただし、ヘリウムイオンのドリフト速度は他のイオンよりも 1 桁程度速い。

電子のドリフトによって誘導される電荷量は生じた電子・イオン対の総電荷量の半分に

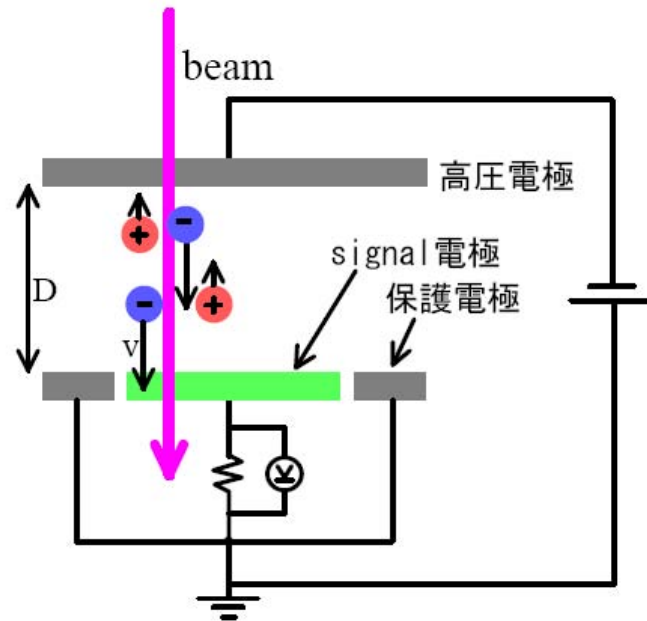


図 2.3 平行平板型イオンチェンバーの模式図。

なり、残りはイオンの移動によってゆっくりと誘導される。T2K ミューオンモニターのように、短い時定数で短時間の信号積分をする際にはほぼ電子由来の成分のみが測定される。

電荷の再結合

イオンチェンバーの応答の線形性を阻害する要因として、電荷の再結合がある。これは基本的にはドリフト中の電子とイオンが衝突して元の原子に戻る現象であり、その率は双方の電荷密度に比例する。よって、信号減少量はビーム強度に対して二次関数的に上昇することになる。

信号減少量が十分に低い場合は二次関数で近似できるが、飽和量が大きくなるにつれて多少のずれが生じてくる。そこで、簡単なモデル計算により式 (2.1) を導出し、再結合による信号減少の評価に用いた (詳細は付録参照)。

$$F(x) = P_0 + \frac{P_1}{P_2^2 x} \{-P_2 x + (P_2 x + 1) \log(P_2 x + 1)\} \quad (2.1)$$

P_0 : 定数項 (ペDESTAL) P_1 : 比例係数 P_2 : 再結合パラメータ

電子吸着

電子親和性の高いガスが混入していると、電子が吸着されて陰イオンとなるため、速い読み出しにおいては信号が減少して見えることがある。

特に、酸素は大気などから混入しやすいので注意が必要である。

Jesse 効果

ヘリウムの準安定励起状態は、20 eV 付近の高い励起エネルギーを持つため、他の原子との衝突で新たな電離を引き起こすことがある。



このような電離過程を penning イオン化と呼び、これによってガス検出器の応答量が増えることを Jesse 効果と呼ぶ。

ヘリウムガスの場合、窒素やアルゴンの 0.5% 程度の混入で収集電荷量が 40~50 % も増加する (図 A.8)。

2.3.2 平行平板型イオンチェンバーの設計

イオンチェンバーの筐体は放射化を少しでも軽減するため総アルミ製であり、全長 1,980 mm, 容積 12 L である。両端は直径 235 mm の円形フランジと、アルミ製の O-ring によって密封されている。フランジには 1/4 インチのガスパイプが溶接されており、常に一定の流量で置換することでガスの純度を保持する。

筐体内部の中心にはアルミニウム製のトレイがあり、この上に 25 cm 間隔で 7 つの電極プレート対が並んでいる (図 2.4 は以前に製作した試作機内部の写真である)。



図 2.4 過去に製作した平行平板型イオンチェンバー試作機内部の写真。

電極プレートは極めて放射線に強いセラミック製で、表面には銀と白金の合金による電極が蒸着されている。プレートサイズは 100 mm × 100 mm であるが、電場を一様にする

るため信号電極の周りに保護電極を設けているため有効面積は $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ である (図 2.5, 2.6)。



図 2.5 信号電極。周辺に見える溝の外側は保護電極。



図 2.6 高圧電極。

プレート間の間隔は、4 角に挿入するセラミックスパースーによって保持される。このセラミックスパースーの公差は $100 \mu\text{m}$ である。ギャップサイズは、過去のビームテストで 3 mm , 5 mm , 10 mm を比較評価した結果、応答速度および応答の線形性に優れる 3 mm ギャップを採用した。よって、工作精度による潜在的な個体差は最大で $100 \mu\text{m} / 3 \text{ mm} \sim 3.3 \%$ となる。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 PEEK 樹脂 (10 MGy 以上の放射線耐性を有する) を用いる。

チェンバー内に封入するガスは、ヘリウムをベースに窒素を混合したガスと、アルゴンをベースに窒素を混合したガスの 2 種類を使用する。この 2 つのガスは密度比がおおよそ 10 倍違い、信号量もほぼそれに比例した差を持つ。ビーム強度の弱いコミッションング時にはアルゴンガスを用い、アルゴンガスでの測定に支障をきたすビーム強度になればヘリウムガスに切り替える。2 種類のガスを用いることで、ダイナミックレンジを広げることが出来る。

高圧電極への電圧供給、および信号電極からの信号読み出しには、潤工社製 ポリイミド同軸ケーブルを使用する (図 2.4 に写っている橙色のケーブルである)。ポリイミドは 1 MGy 以上の放射線耐性を有する樹脂であり、絶縁性にも優れている。チェンバー内部だけでなく、放射線レベルの高いミューオンモニター室内の配線には全てこのポリイミド同軸ケーブルを使用する。

チェンバー内部・外部間の電線導入・取り出し (フィードスルー) には、LEMO 社製 SWH 型気密カプラを使用する。

2.3.3 シリコン PIN フォトダイオード

半導体検出器の 1 つには浜松ホトニクス製シリコン PIN フォトダイオード S3590-08 を用いる (図 2.7)。シリコン半導体検出器は幅広く使用されている検出器であり、その挙動・特性は良く知られている。また、T2K 実験の前身とも言える K2K 長基線ニュートリノ振動実験のミューオンモニターとしても採用され、安定に動作していた実績を持つ。



図 2.7 シリコン PIN フォトダイオードの写真。浜松ホトニクス web サイトより引用 [16]。

表 2.1 シリコン PIN フォトダイオード S3590-08 のスペック

有効面積	10 mm × 10 mm
空乏層厚さ	300 μm
最大電圧	100 V

動作原理はイオンチェンバーと類似であり、荷電粒子の通過によってウェハー内の空乏層 (キャリアが無く、電場のある領域) に生じた電子・ホール対の移動によって誘導される電流を読み出す。

放射線損傷

シリコン PIN フォトダイオードを T2K 実験ミューオンモニターに使用する上で唯一の問題となるのは放射線耐性である。シリコンダイオードに大量の放射線が照射されると、型反転現象 (p 型半導体が n 型半導体に転換される現象) により pn(pin) 接合が解消

されて動作できなくなってしまう。

T2K デザイン強度の運転においては、およそ1週間で動作しなくなるとの見積りがある [14]。

キャリアの捕獲と再結合

結晶中の不純物 (格子欠損) は、バンドギャップの間に中間準位を構成し、そこに電子やホールを捕獲することがある (捕獲中心)。捕獲された電子・ホールはやがて解放されるが、それまでの時間が回路の測定時間より長い場合には信号を減少させる。

また、半導体検出器においてもキャリアの再結合が生じるが、一般に電子とホールが不純中心に同時に捕獲されることによって再結合する過程が支配的である (再結合中心)。

したがって、半導体検出器の収集効率および線形性は不純物濃度や結晶構造に大きく依存すると言える。

2.3.4 CVD ダイヤモンド検出器

CVD ダイヤモンド検出器とは、化学蒸着 (Chemical Vapor Deposition) 法による人工ダイヤモンドを用いた検出器である。動作原理はシリコン検出器などの半導体検出器に類似であるが、特筆すべきは極めて高い放射線耐性である。そのため、将来の高輝度加速器実験において半導体検出器に代わり得る新しい検出器として注目を集めている。

本研究で用いるサンプルは CERN RD42 コラボレーションによって開発されたものである。サンプルの写真を図 2.8 に、スペックを表 2.2 に示す。結晶のサイズは 10 mm × 10 mm 程度であり、結晶サイズより若干小さな範囲に電極が蒸着されている。ウェハの厚さは 500 μm である。結晶自体の絶縁破壊電圧は数千 V であるが、最大電圧は電極部の許容電圧で 500V と決められている。

表 2.2 CVD ダイヤモンド検出器のスペック

有効面積	約 10 mm × 約 10 mm
ウェハー厚さ	500 μm
最大電圧 (電極のスペック)	500 V

化学蒸着法と結晶構造

化学蒸着法は、低温 (1000°C 以下)、低圧でプラズマ状にしたガス (メタンなど) を基板の上に堆積させることで、比較的安価に大面積のダイヤモンド結晶を得る技術である。

ただし、基盤面には多くの結晶核が同時に発生して各々が成長してゆくため、CVD ダ



図 2.8 CVD ダイヤモンド検出器の写真。

ダイヤモンドは一般に多結晶構造を取る (図 2.9)。結晶サイズは核形成面では数 μm と非常に小さいが、結晶成長面では数十 $\sim 100\mu\text{m}$ のサイズである。結晶境界の存在、および結

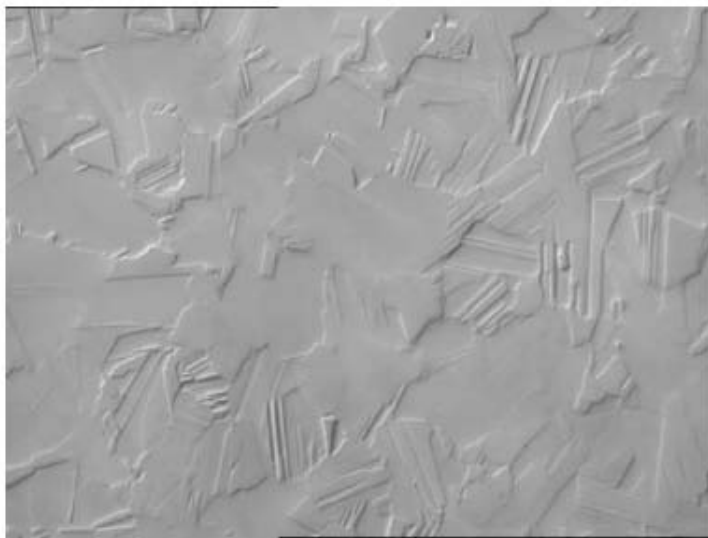


図 2.9 CVD ダイヤモンドの結晶構造、研磨後の成長面。写っている結晶構造のスケールは $10\sim 50\mu\text{m}$ [17]。

晶サイズの違いは検出器の応答を複雑にする要因となる。

電荷収集距離

多結晶の CVD ダイアモンド検出器は結晶境界が不純中心となるため、電荷収集効率は高くない。

ダイアモンドウェハーの品質を計る指標として、電荷収集距離 \bar{d} がある。これは、キャリアが捕獲されずにドリフトした平均距離を示すものであり、ウェハーの厚み D と電荷収集距離の比は、生成電荷量と収集電荷量の比と等しい。

高速の荷電粒子 (MIP^{*3}) に対して、ダイアモンドの電離量は厚さ $100 \mu\text{m}$ あたり 3,600 電子・ホール対であるので [18] 1 MIP あたりの収集電荷量を Q とすると

$$\bar{d} = \frac{Q}{eD \times 36} \quad (2.3)$$

の関係となる。

pumping 効果

結晶内の不純中心にキャリアが捕獲されると、その不純中心のエネルギー準位は埋められて (pumping されて) 捕獲できない状態になる。つまり放射線を照射し続けると捕獲中心が減少し、見かけの電荷収集距離が増えてゆくことになる。

また、pumping された不純中心が元の捕獲できる状態に戻ることを depumping と呼ぶ。

放射線量 Φ の照射による電荷収集距離の変化は [19] によると式 (2.4) のように書ける。ここで τ は時定数、 α は照射開始時の捕獲可能な不純中心と捕獲不能な不純中心の比である。

$$\bar{d} = \frac{\bar{d}(\infty)}{1 + \alpha \exp(-\Phi/\tau)} \quad (2.4)$$

2.3.5 検出器の配置と各検出器に求められる測定精度

既に述べた通り、ミューオンモニターの検出器配置は $150 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$ の範囲に、イオンチェンバーを 7×7 に並べた 49 ch、そしてシリコン PIN フォトダイオードおよび CVD ダイアモンド検出機については 25ch 又は 13 ch であり、配置図は図 2.10~2.12 の通りである。

それぞれの検出器配置について、以下の手順によりミューオンモニターへの要請 (中心決定精度 $\sigma \leq 3 \text{ cm}$, 相対フラックスモニター精度 $\sigma \leq 3\%$) を満たすためにはどのレベル

*3 Minimum Ionizing Particle

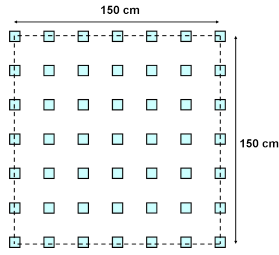


図 2.10 イオンチェンバーのチャンネル配置 (49 ch)。

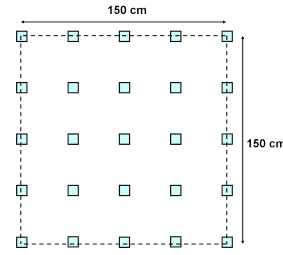


図 2.11 シリコン PIN フォトダイオード又は CVD ダイヤモンド検出器の配置 (25 ch)。

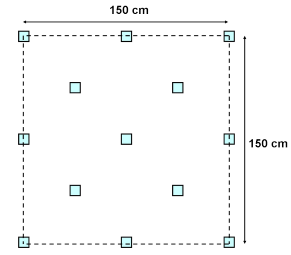


図 2.12 CVD ダイヤモンド検出器の配置で採用の可能性のある配置 (13 ch)。

で各検出器の系統誤差、測定誤差を抑えなければならぬ簡易シミュレーションで評価した。

1. ビームシミュレーションによって得られた荷電粒子プロファイルのベストフィット値 ($\sigma = 107 \text{ cm}$) を持つ 2 次元ガウシアン (式 2.5) を真のプロファイルとし、その中心は検出器中心から x_{true}, y_{true} の位置にあるものとする。

$$F(x, y) = \frac{P_1}{2\pi P_4^2} \exp\left(-\frac{(x - P_2)^2 + (y - P_3)^2}{2P_4^2}\right) \quad (2.5)$$

P_1 : 積分値, P_2 : ビーム中心 (x), P_3 : ビーム中心 (y), P_4 : ビーム広がり (σ)

2. 各位置の検出器の有効領域で積分したものを真の応答 R_i^{true} とする (i は各検出器チャンネルを示す添え字)。
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 ($R_i^{real} = R_i^{true} \pm S\%$)。
4. R_i^{real} を再び式 (2.5) でフィットし、その中心 x_{real}, y_{real} およびプロファイル積分値を記録する。
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中心位置からのずれ $dr = \sqrt{(x_{real} - x_{true})^2 + (y_{real} - y_{true})^2}$ の分布の $1\sigma(68.3\%)$ 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見積もる。
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 を精度と見積もる。

中心決定精度

まずは中心決定精度を計算する。ビームが中心にある場合 ($x_{true} = y_{true} = 0$) における、各配置で検出器誤差と中心決定精度の関係は図 2.13 のようになる。

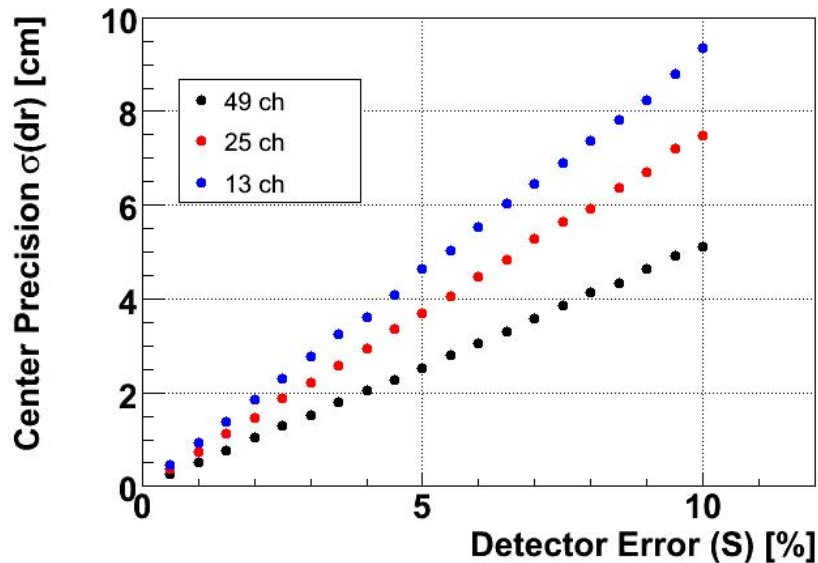


図 2.13 各検出器配置における検出器誤差と中心決定精度の関係。ビーム中心が検出器中心と一致している時。

このグラフから 13ch, 25ch, 49ch の配置において、3 cm の中心決定精度を出すために許容される測定誤差はそれぞれ 3.2%, 4.0%, 5.9% である。

次に、ビームが x, y 方向にそれぞれ 20 cm ずれた場合にも同様の計算結果を図 2.14 に示す。このとき 13ch, 25ch, 49ch の配置において、3 cm の中心決定精度を出すために許容される測定誤差はそれぞれ 2.9%, 3.8%, 4.9% である。中心決定は、ビームがずれた際にも正しく行える必要があるのでこの値を目標値とする。

相対ビーム強度の測定精度

各検出器の測定精度と、相対ビーム強度の測定精度の関係を図 2.15 に示す。

相対ビームフラックスの誤差 3% に対して許容される各検出器の測定誤差は、13ch, 25ch, 49ch の配置においてそれぞれ 2.3%, 2.5%, 3.4% である。相対ビーム強度の誤差が各検出器の誤差よりも大きくなるのは一見不思議に感じるかもしれないが、これは広い領域に広がっているビームの総量を、検出器範囲の情報から求めていることによる。

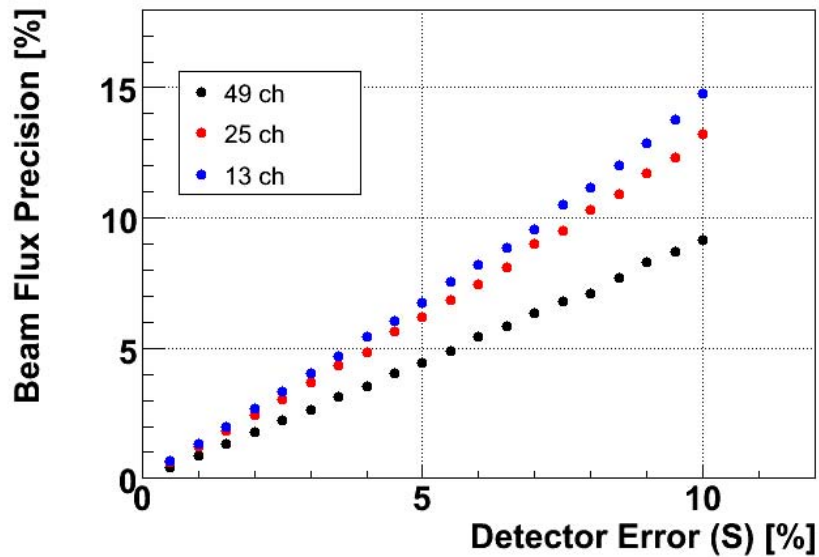


図 2.14 各検出器配置における検出器誤差と中心決定精度の関係。ビーム中心が検出器中心から x, y 方向にそれぞれ 20 cm ずれたとき。

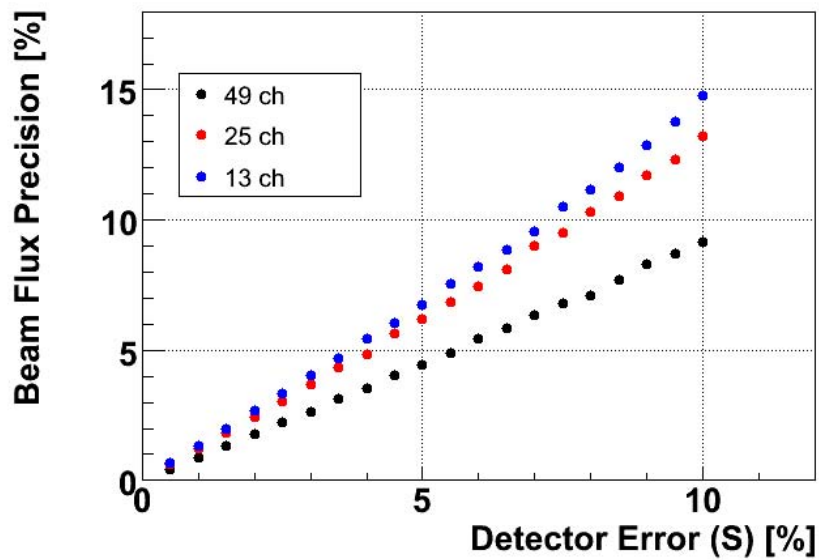


図 2.15 各検出器配置における検出器誤差と相対ビーム強度測定精度の関係。

検出器誤差の種類考察

ここまでは中心決定精度と相対フラックス精度について、検出器の誤差は全て同じように取り扱ってきたが、実際にはそれぞれに影響する誤差、影響の少ない誤差が存在する。以下にそれらを考察・分類する。

- 1パルス (1バンチ) ごとの測定のばらつき

中心決定は各ビームバンチごとに行うため、中心決定精度にはこの誤差を盛り込まなければならない。一方、フラックスについては一定期間での積分値として安定していればよいので、この誤差を考慮する必要は無い。

ミュオンモニターにおいて、この種の誤差を作る要因は主に検出器や回路のノイズである。

- 全検出器チャンネルについて連動する系統誤差

イオンチェンバーにおけるガス密度の不定性 (温度・圧力依存性) などがこれにあたる。そのような全てのチャンネルにおいて連動した変化の場合、中心決定に与える影響は小さいが、相対フラックス見積りには影響を与える。

- 検出器チャンネル間で連動しない系統誤差

検出器チャンネル間での応答比の長期的変化であり、様々な要因が考えられる。この種の誤差は、中心精度決定・相対フラックス測定の両方に影響する。

- 線形な応答からのずれ

線形な応答からのずれは、ミュオンモニターにおいては上記2つの分類の間のような働きを示す。以下にその理由を説明する。

T2K ミュオンモニターに使用するイオンチェンバー及び半導体検出器の応答の線形性を阻害する要因はキャリアの再結合であり、信号の減少量はビーム強度の2乗で近似できる。また、T2K ミュオンモニターの中央のチャンネル ($x=y=0$) に対する角のチャンネル ($x=y=75\text{cm}$) における荷電粒子フラックス比はシミュレーションによるプロファイルから計算するとおよそ 0.61 倍となる。

これらのチャンネルの応答比は、ビームが十分に弱いときは 0.61 になり、中央のチャンネルの応答が $N\% \ll 1$ 減少するようなビーム強度においては $(61 - N \times 0.61^2)/(100 - N) \simeq 0.61 + 0.0024N$ となる。

よって、最大ビーム強度で線形な応答からのずれが $N\%$ であったときはチャンネル間で連動しない系統誤差が $0.24/0.61 \times N \simeq \pm 0.2 \times N\%$ あるものとして評価する。

各検出器配置に対する測定精度のまとめ

各検出器の測定誤差の目標値を表 2.3 にまとめる。細分化した項目については、中心精度決定、相対フラックス測定それぞれについて関連する誤差に等量に割り振った値を計算し、より厳しい側の値を記入した。

表 2.3 各検出器配置に対する測定精度目標値のまとめ

		チェンバー (49 ch)	半導体 (25 ch)	半導体 (13 ch)
	中心精度決定 (1+3)	4.9%	3.8%	2.9%
	相対フラックス測定 (2+3)	3.4%	2.5%	2.3%
1	パルスごとの測定誤差	3.5%	2.7%	2.1%
2	ch 間で連動する系統誤差	2.5%	1.9%	1.6%
3	ch 間で連動しない系統誤差	合計して	合計して	合計して
	線形な応答からの減少率 ($\times 0.2$)	2.5%	1.9%	1.6%

2.4 T2K ニュートリノビームの運用計画とミュオンモニターで予想される信号量

現在予定されているコミッショニング時のビームパラメータを表 2.4 にまとめる。

表 2.4 コミッショニング期間におけるビームパラメータ。最終列の荷電粒子フラックスは、ミュオンモニター中心位置で 1 バンチあたりに予想されるものである。

期間	陽子 エネルギー	バンチあたり 陽子数	バンチ数	ビーム パワー	荷電粒子 フラックス
2009 年春	30 GeV	4.2×10^{11}	6	3.6 kW	$1.1 \times 10^5 / \text{cm}^2 / \text{bunch}$
2009 年秋	30 GeV	1.2×10^{13}	6	100 kW	$3.1 \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{bunch}$
デザイン値	50 GeV	4.2×10^{13}	8	750 kW	$2.0 \times 10^7 / \text{cm}^2 / \text{bunch}$

ミュオンモニターは、2 次粒子をバンチごとに測定するため信号量の予測に重要なのはバンチあたりのビームパワー（陽子数と陽子エネルギーの積）である（二次粒子の生成量は陽子エネルギーにほぼ比例することが知られている、ただしミュオンモニターはダン

ブを突き抜ける高エネルギーの成分のみを測定するため、これとは若干の差が生じる)。

2009 年春の立ち上げ時に予定されているバンチ当たり陽子数はデザイン値の 1/100、エネルギーは 30 GeV である。よって、立ち上げ時からデザイン値までを測定するためには約 200 倍のダイナミックレンジが必要となる。

立ち上げ時ミュオンモニター中心部で予想される荷電粒子フラックスはバンチあたり $1.1 \times 10^5 / \text{cm}^2$ であり、アルゴンガスイオンチェンバーで予想される信号量は 1ch あたり約 20 pC、シリコン PIN フォトダイオードで 1ch あたり約 0.6 nC となる。また、デザイン値においては $2.0 \times 10^7 / \text{cm}^2$ の荷電粒子フラックスが予想される。^{*4}

2.5 読み出し回路

2.5.1 ケーブリング

T2K ミューオンモニター室内は、最大 200 kGy/year という高放射線環境であるため、信号線・高電圧線の両方にポリイミドを絶縁体とした同軸ケーブルを用いる。しかし、このケーブルは高価である上に径が約 2 mm と細いため、あまり長い距離に使用すると信号の減衰やノイズの増大を招く。

そこで、ポリイミドケーブルで 10 m ほどの距離を伝送したのち、ミュオンモニター室出口付近に設置予定のパッチパネルにおいて信号線は 5D-FB 規格のケーブル、高圧線は RG-174/U 規格のケーブル (10 本バンドル) に繋ぎかえる。尚、これらのケーブルは安全のためノンハロ難燃性ケーブルを採用する。読み出し回路までのケーブルの総長は約 80 m である。

2.5.2 COPPER-FINESSE

T2K ミューオンモニターの読み出しには、COPPER - FINESSE のシステムを用いる [20]。COPPER は高エネルギー加速器研究機構で開発されたデータ収集プラットフォームである。親ボードである COPPER は VME 9U のスロットに挿入可能で、独自に CPU を搭載し、内蔵のイーサネットポートを通じて外部とのデータ通信を行うことができる (図 2.16)。

T2K ミューオンモニターでは、COPPER ボード前面のスロットに子ボードである FINESSE 65MHz Flash ADC を 4 つ挿入して使用する。Flash ADC で波形を読み出すことによりバンチごとの信号量を再構成することが可能である。それぞれの Flash ADC

^{*4} 40 GeV でのシミュレーション値をビームパワーでスケールさせた数字なので、実際はこれより若干多くなる可能性がある。



図 2.16 親ボード COPPER、前面に 4 つの子ボード (FINESSE) を挿入するスロットを有する。

は 8ch であるため、COPPER 1 ボードで合計 32 ch の読み出しが可能である。

COPPER - FINESSE のシステムは、高エネルギー加速器研究機構で行われている Belle 実験などで導入実績がある。

FINESSE 65MHz FADC

FINESSE 12-bit 65MHz FADC のスペックを表 2.5 にまとめる。

表 2.5 FINESSE 65MHz FADC のスペック

最大サンプリングレート	65MHz
精度	12 bit
入力レンジ	±1V
チャンネル数	8
内部ゲイン (標準)	×5
時定数 (標準)	52.8 ns

この ADC は差動読み出しの検出器用に設計されていたため、入力方式が differential 100 Ω となっていた。そこで入力部分を single-end 50Ω に変更した試作品を新たに製作し、正常な動作を確認した。

数値計算による FADC の時定数評価

FINESSE 65 MHz Flash ADC の信号入力部分には、実際の ADC チップの前段にオペアンプが配置されている (図 2.17)。このオペアンプ周辺の抵抗およびコンデンサを取り替えることで、時定数およびゲインをある程度の範囲で変更することが可能である。

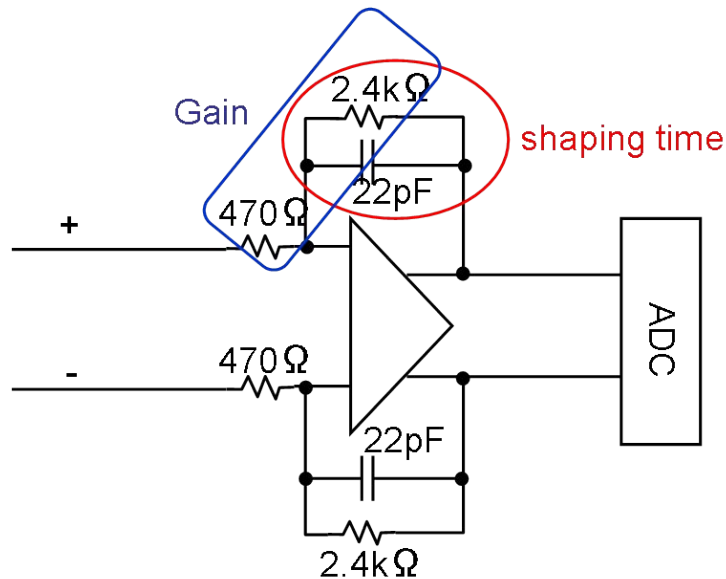


図 2.17 FINESSE 65MHz 入力部の回路図の一部。抵抗値、静電容量は基本の値。

時定数が長すぎると、バンチごとの波形分割に支障をきたすため、基本的に T2K ミューオンモニターにおいては短い時定数が望ましい。だが、オペアンプの時定数は周波数の高いノイズの影響を抑えるローパスフィルタとして機能しており、基本の 52.8 ns より下げるとサンプリングクロック周波数 ($65 \text{ MHz} \approx (15 \text{ ns})^{-1}$) 由来の内部ノイズを拾う危険性もある (実際に他の検出器開発グループが時定数の無いモジュールを作ったところ、ノイズレベルが悪化したとの報告があった)。

そのため、ミューオンモニターに用いる検出器のうち、最も応答の遅いイオンチェンバーについて波形を数値計算し、52.8 ns の時定数でバンチ分割に問題がないかを評価した。

理想的なイオンチェンバーの波形 (ビーム幅で立ち上がり、電子のドリフト時間で立ち下がる三角波) を仮定し、ビーム幅 58 ns, 回路時定数 52.8 ns ($22 \text{ pF} \times 2.4 \text{ k}\Omega$)、イオン由来の信号は無視することにする。

1 ns ステップの数値計算で求めた時定数込みの波形は図 2.18 のようになり、後続のバンチに漏れ出す信号の割合は表 2.6 のようになった。

これを見ると、電子のドリフト時間が 400 ns でも後続のバンチに漏れ出す電子由来の

信号は 0.2% 以下である。400 ns 以内のドリフト時間は 3 mm のギャップサイズで実現可能であり、52.8 ns の時定数はバンチ分割に悪影響を及ぼすことは無いと考えられる。

よって、FINESSE 65MHz FADC の時定数は 52.8 ns の基本値で使用することにした。

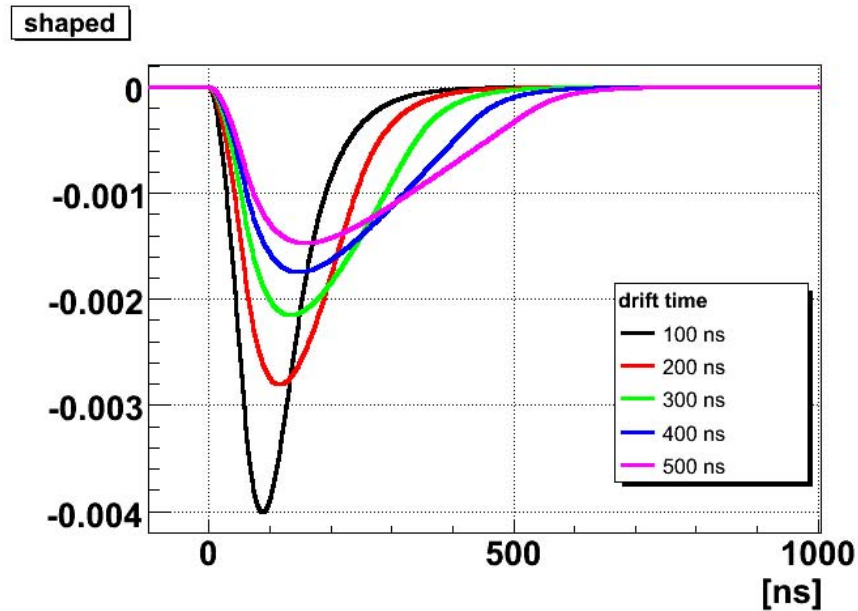


図 2.18 電子のドリフト時間を変化させたとき、FADC で見えるイオンチェンバーの波形。縦軸は積分値が 0.5 になるように規格化されている。

表 2.6 次バンチ以降に漏れ出す電子由来の信号の割合

ドリフト時間	600 ns 以降に残る信号の割合
100 ns	0.004 %
150 ns	0.007 %
200 ns	0.011 %
250 ns	0.020 %
300 ns	0.036 %
350 ns	0.070 %
400 ns	0.139 %
450 ns	0.285 %
500 ns	0.598 %

読み出し方法とノイズに関する考察

T2K ミューオンモニターでは、Flash ADC によって収集されたスピル毎の波形情報をバンチごとに分割して積分値を計算することでバンチごとの電荷量を算出する。

ビームタイミング前後の情報をペDESTALとして利用可能であるため、スピル幅よりも遅い 100 kHz 以下のノイズ成分についてはほぼ落とすことが出来る。また、50 ns の時定数がローパスフィルターとして働くため、100 MHz 以上の速いノイズ成分についても影響を小さくすることが出来る。

2.6 T2K ミューオンモニターの過去の開発経緯

T2K ミューオンモニターグループでは過去に 2 機のイオンチェンバー試作機を製作し、シリコン PIN フォトダイオード及び CVD ダイアモンド検出器サンプルと共に電子線形加速器を用いたビーム照射試験を実施、検出器の基本特性を理解しつつ改良を重ねてきた。

これまでの開発経緯については本研究の動機を説明する上で必要であるためここで簡単に触れることにする。過去の試験結果の詳細については先行研究 [14] を参照されたい。

2006 年 7 月 ビームテスト 京都大学化学研究所 先端ビームナノ科学センター 100MeV 電子線形加速器において 3 ch のイオンチェンバー試作機 (図 2.19) とシリコン PIN フォトダイオード、CVD ダイアモンド検出器を用いて行った。試験期間は準備を含めて 1 週間で、各検出器について応答の印加電圧依存性、応答の線形性などの基礎特性を研究した。

イオンチェンバーの測定では 10 mm と 3 mm のギャップサイズでヘリウムガスとアルゴンガスを用いたが、流量が低すぎたために数 % の空気が混入してしまっていた。そのため、混入した酸素によって電子が吸着されて信号の減少が見られていた。この試験で、応答の線形性および応答速度に優れる 3 mm ギャップを採用する方針を固めた。応答速度はこの段階では良好であったが、実際には混入した空気によって電子のドリフト速度が増加 (付録参照) していたことが後に判明した。CVD ダイアモンド検出器の測定では、サンプル間で応答に大きな個体差が見られた。さらに、pumping 効果の影響と推測されるビーム照射中に収集電荷量が増大してゆく挙動が見られたが、完全な理解には至らなかった。

2006 年 12 月 ビームテスト 同じく京都大学化学研究所 先端ビームナノ科学センター



図 2.19 イオンチェンバー試作機、一号機の写真。

100MeV 電子線形加速器において、実機サイズ (7 ch) のイオンチェンバーとシリコン PIN フォトダイオード、CVD ダイヤモンド検出器を用いて行った。試験期間は同じく準備期間を含めて 1 週間である。

このビームテストでは、前節で紹介した COPPER-FINESSE 65MHz FADC による読み出しシステムを導入し、正常な動作を確認した。

イオンチェンバーの測定においては酸素濃度計を導入し、流量を増やして酸素濃度 100 ppm 前後のレベルにまでガス純度を向上させた。これにより、電子吸着による信号減少は見られなくなった。

純度を上げると応答速度が急激に落ちると予想していた (図 A.3, A.4 参照) アルゴンガスに、窒素を 2% 混合したガスを使用して応答速度の向上を確認した (図 2.20)。

また、影響が少ないと見込んでいたヘリウムガスにおいてもガス純度の向上によって 3 mm ギャップにおける応答速度が 400 ns まで伸びた。前節の議論 (表 2.6) で問題無い範囲ではあるが、ヘリウムガスにおいても窒素の混合を検討することにした。

CVD ダイヤモンド検出器については、2006 年 7 月の結果を再現するデータが得られた。

これら試験で各検出器の基礎特性が評価され、ビーム中心の決定精度を T2K 実験の要請の範囲内 ($\sigma < 3\text{cm}$) に抑える性能を有すると結論付けられた。しかしこれには長期的な安定性は含まれておらず、相対ビームフラックスの測定精度を見積もることもできてい

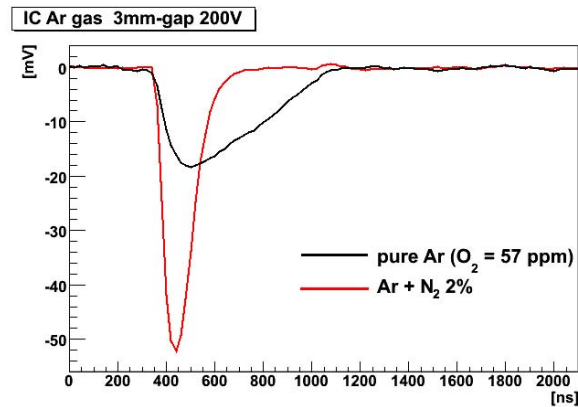


図 2.20 Ar + 2% N₂ ガス イオンチェンバーと 純アルゴンガスイオンチェンバーの波形比較。2006 年 12 月のビームテストにおける、FADC による測定。ビーム強度 $\sim 5 \times 10^7$ e⁻/pulse

なかった。

2.7 T968 実験

FNAL T968 実験とは、アメリカ合衆国 フェルミ国立加速器研究所の NuMI ビームラインにおける T2K ミューオンモニター試作機の長期試験の名称であり、本研究の中心テーマである。

2.7.1 実験の動機

前節で述べたとおり過去の電子線型加速器を用いたビーム照射試験はいずれも準備を含めて 1 週間の期間でしかなく、5 年間に渡る運用が求められる T2K 実験ミューオンモニターにとって重要な安定性に関するデータはほとんど得られていなかった。

この点を解決するためには長期試験が必要であるが、テストビームラインの長期間の使用は困難である。またミューオンモニターに用いる検出器、特に平行平板型イオンチェンバーはゲインが非常に小さいので、放射線源を用いた長期試験も現実的でない。^{*5}

そのため我々は、現在稼働中のニュートリノビームラインであるフェルミ国立加速器研究所 NuMI ビームラインにて長期試験を行い、安定性のデータを得ることにした。実際の環境に近いミューオンビームを長期間利用できる、理想的な試験環境である。

*5 数 MBq の α 線源を用いた場合でも、イオンチェンバーから予想される信号は 1 nA 程度に過ぎない。

2.7.2 試作機の設計・製作

この目的のため、過去に製作した T2K ミューオンモニター試作機に改良を加えた T968 実験用ミューオンモニター試作機を新たに設計・製作した。

本体となるイオンチェンバーチューブのサイズは、設置場所スペースの制限から T2K ミューオンモニター (全長 1,980mm, 7ch) の約半分の全長 980 mm とし、内部には 250 mm 間隔で 3ch のイオンチェンバーを設置した ((図 2.21)。イオンチェンバーの電極間ギャップは、実機設計と同じ 3 mm である。使用している素材は全て実機で使用予定のものであり、高い放射線耐性を持っている。

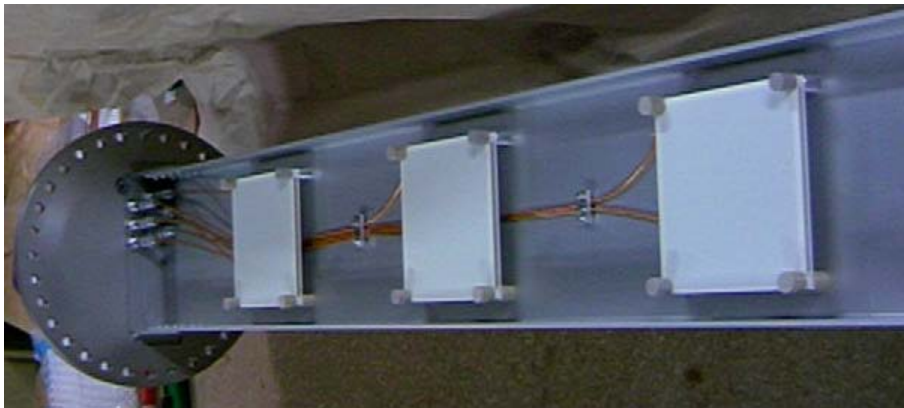


図 2.21 T968 実験用ミューオンモニター試作機の内部 (組み立て中)。約 1m 長のアルミニウムトレイ上に、実機と同じデザインのイオンチェンバーが 3ch 設置されている。

第3章

電子ビームを用いたミュオンモニター試作機の性能評価

T968 実験用試作機を、NuMI ビームラインに設置するに先立って 2007 年 6 月に京都大学化学研究所 先端ビームナノ科学センター 100MeV 電子線形加速器を用いた性能評価を行った。試験期間は準備を含めて 1 週間である。

3.1 試験の目的

この試験の第一の目的は、T968 実験用に製作したイオンチェンバー試作機が以前に作成した試作機と同様の性能で動作すると確認し、T968 実験の結果を理解するためのキャリブレーションデータを得ることである。

第二の目的は、T2K 実験に向けた各検出器の基礎特性評価であり、以前のビームテストから継続したものである。

3.1.1 測定項目

T968 実験のためのキャリブレーション測定

純ヘリウムガス イオンチェンバー の測定

T968 実験では純ヘリウムガスを使用するため、純ヘリウムを用いた動作検証を行った。具体的には、応答の印加電圧依存性、応答の線形性および収集電荷量を評価した。

イオンチェンバーチャンネル間の個体差の測定

イオンチェンバー 3ch それぞれについて測定を行うことで、収集電荷量および線

形性の個体差を評価した。有意な差が見られた場合には T968 実験の解析におけるキャリブレーション値として用いる。

CVD ダイヤモンド検出器の測定

4 つの CVD ダイヤモンド検出器サンプルの個体差を測定し、T968 実験で使用する 2 つのサンプルを選ぶ判断材料とした。

また、それらのサンプル同士、及びシリコン PIN フォトダイオードとの相対的なキャリブレーションを行う。

T2K 実験に向けた基礎特性評価

ヘリウム +1% 窒素混合ガス イオンチェンバー の測定

応答速度を向上させるためにヘリウムガスに窒素を 1% 混合したガスを用いたイオンチェンバーの性能評価を行った。また、その結果を純ヘリウムガスの結果と比較した議論を行い、T2K 実験で採用するガスを選択する。

アルゴン +2% 窒素混合ガス イオンチェンバーの測定

過去のビームテストで測定したガスではあるが、再度基礎特性評価を行う。また、ビームコミッショニング時の測定精度を検証し、さらにはヘリウムをベースにしたガスとの切り替えを行うべきタイミングについても議論を行う。

シリコン PIN フォトダイオードの測定

ビームコミッショニング時の測定精度、応答の線形性、放射線耐性を評価する。

CVD ダイヤモンド検出器の立ち上がり応答の測定

ビーム照射開始後の応答の立ち上がりについて測定を行う。

3.2 セットアップ

3.2.1 ビームパラメータ

使用した電子線形加速器のビームパラメータ、T968 実験 ミューオンモニター試作機設置場所でのビームパラメータ、そして T2K ミューオンモニター室でデザイン強度において予想されるビームパラメータの比較を表 3.1 にまとめる。

電子線形加速器からのビーム繰り返しは最大 15 Hz(約 67 ms 間隔) で、1 バンチのみである。パルス幅は T2K ビームの 1 バンチに近くなっている。ビーム強度は広い範囲で調節可能であり、T968 実験で予想されるビーム強度及び T2K 実験で予想されるビーム強度(コミッショニング時の 1% 強度を含む)を十分に再現することが出来る。ビームサイ

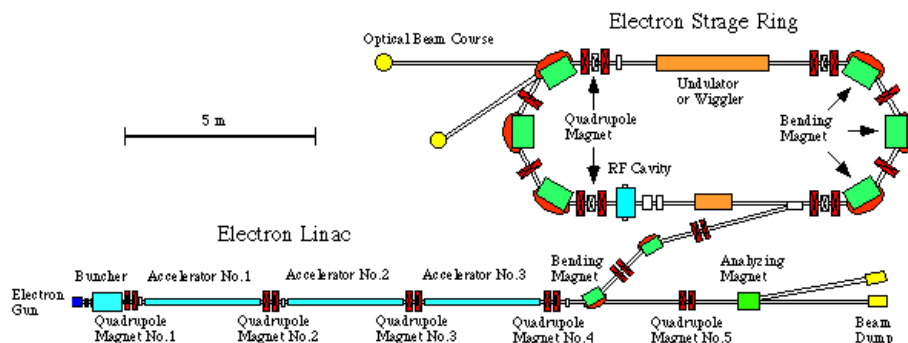


図 3.1 電子加速器のレイアウト。試験では 100 MeV 電子線形加速器 (LINAC) のみを用い、図中右下のビームダンプ直前にセットアップを組んだ。京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センターより。[21]

ズは約 6 mm (図 3.6 参照) であるが、T968 実験, T2K 実験で実際に来るミュオンビームは非常に広がっているので、有効面積の違う検出器同士を比較する場合やイオンチェンバー内の電荷密度の議論には注意が必要である。

また 100 MeV の電子による電離損失は、T2K 実験で予想されるミュオンの平均エネルギー 3 GeV における電離損失とほぼ等しいので、応答量は荷電粒子数で比較をすることができる (表 3.2) *1[22][23]。

表 3.1 100MeV 電子線形加速器 (LINAC) のビームパラメータ

	LINAC	T968	T2K(デザイン)
スピル間隔	約 67 ms	1.87 s	3.5 s
スピル幅	-	8.14 μs (9.78 μs)	5 μs
1 スピル内のバンチ数	1	420 (504)	8
バンチ間隔	-	18.8 ns	600 ns
バンチ幅	~50 ns	3~8 ns	58 ns
荷電粒子数	$10^5 \sim 10^{10}$	$4 \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{spill}$	$2.0 \times 10^7 / \text{cm}^2 / \text{bunch}$
荷電粒子数 (プレートあたり)	同上	$2.3 \times 10^8 / \text{spill}$	$1.1 \times 10^9 / \text{bunch}$
ビームサイズ (σ)	~6 mm	~ 1 m	~ 1 m

*1 ダイヤモンドに対するミュオンの電離損失はデータベースに無かったため、非結晶の炭素 (密度 2.00) に対する値を括弧つきで記述した。

表 3.2 使用した検出器に関連する物質に対する、電子又はミューオンの電離損失。電子のデータは NIST データベース、ミューオンのデータは PDG のデータベースより引用。単位は $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$

	電子 100 MeV	ミューオン MIP(~ 300 MeV)	ミューオン 3 GeV
ヘリウム	2.609	1.937	2.427
アルゴン	2.105	1.519	1.980
窒素	2.424	1.825	2.324
シリコン	1.919	1.664	1.991
ダイヤモンド	1.895	(1.749)	(2.025)

3.2.2 検出器の配置と詳細

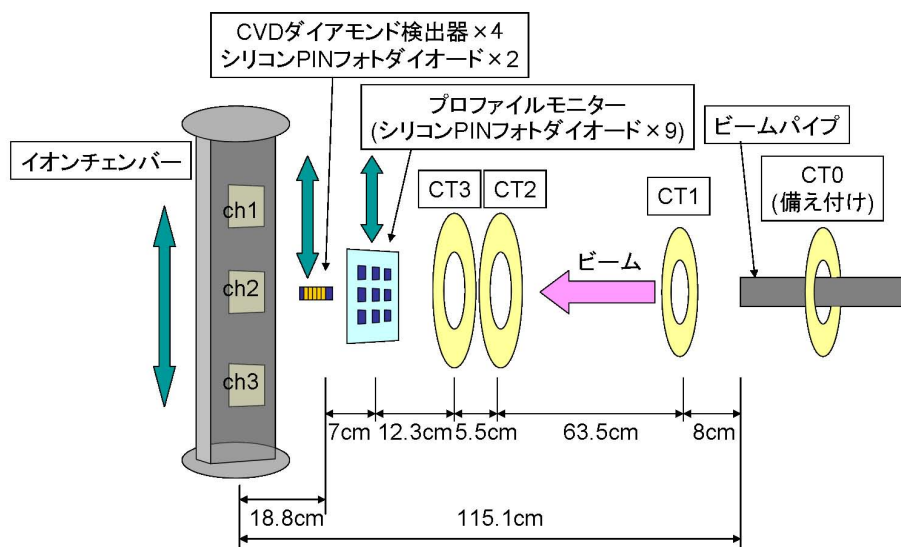


図 3.2 検出器の配置

平行平板型イオンチェンバー

イオンチェンバーチューブは、T968 試験用に製作した 3 チャンネルのものを使用した。内部には 25 cm 間隔で、電極間距離 3 mm、有感領域 $7.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$ のイオンチェンバーが 3 チャンネル設置されている。電極間距離はセラミックスペーサー (公差 $100\ \mu\text{m}$) によって決められている。

イオンチェンバーチューブ全体を上下に動かすことで、3 つのチャンネルのほぼ中央に

ビーム中心を合わせてそれぞれ測定を行った。手動で移動・固定を行っているため、アライメント精度は数 mm 程度であるが、ビームサイズ (約 6 mm) に比べて有感領域が十分に大きいため、測定には影響がない。^{*2}以後、各チャンネルのことを上にあるチャンネルから順に IC1, IC2, IC3 と呼ぶ。

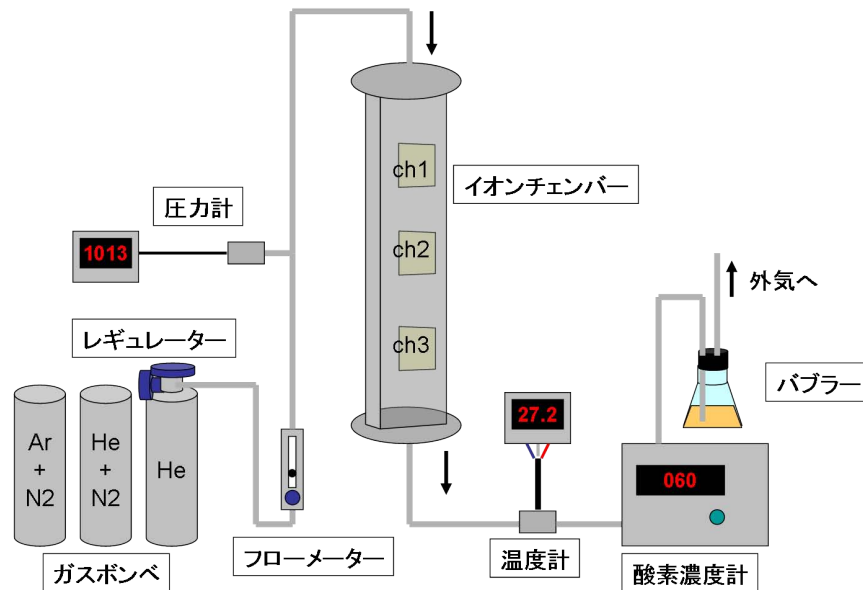


図 3.3 イオンチェンバーとガス関連のセットアップ模式図。

イオンチェンバーとガス関係のセットアップを図 3.3 に示す。ガスは純ヘリウムガス、ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス、アルゴン + 窒素 (2%) 混合ガス を用いた。各ガスは 14.7 MPa の高圧ボンベからレギュレーターで減圧、フロメーターで流量を調節された後、圧力計を通してイオンチェンバーに入る。この際、配管をつなぎ変えて純ヘリウムおよびヘリウム + 窒素ガスのときは上から、アルゴン + 窒素ガスのときには下からイオンチェンバーに入るようにした。イオンチェンバーから出てきたガスは、温度計 (白金測温抵抗体: クラス B ^{*3}) と酸素濃度計 (東レ製、LC750L) を通り、真空用油を用いたバブラーを経由して排気される。バブラーの逆端は大気に開放されているため、イオンチェンバー内もほぼ大気圧になる。空気の混入を防ぐため、バブラーまでの配管には全てステンレス製のフレキシブル配管^{*4}を用いた。ガス流量は測定中は基本的に 150 cc/分 に調節した。ガス種を切り替える際には作業を前日夜に行い、300 cc/分 程度の流量で一晩置換した。こ

^{*2} ビームの形をガウシアンと仮定すると、X,Y 方向に 1cm ずつアライメントがずれていたとしても有効領域 (7.5 cm × 7.5 cm) 内にビームの 99.999% 以上が入射する計算になる。

^{*3} 室温付近での許容差 $\approx \pm 0.4$

^{*4} Swagelok SS-FL4TA4TA4-48

れにより、測定中の酸素濃度を 20 ~ 60 ppm と、非常に低いレベルに抑えることが出来た。この酸素濃度で予想される電子吸着による信号減少は、最大でも総電荷の 0.6% 以下である。

CT (Current Transformer)

CT(Current Transformer) は、一次電流に比例した電磁誘導による二次電流を読み出す計測器のことである。ビーム測定に用いる場合、一次電流はビーム電流であり、二次電線はトロイダルコアに巻きつけたコイルとなっている形が一般的である。

ビーム強度測定のため、ビームラインに設置されている CT *⁵に加えて 3 つの CT を設置した。以後、4 つの CT をビーム上流から順に CT0, CT1, CT2, CT3 と呼ぶ。

我々の設置した 3 つの CT はコア材にファインメット® *⁶を使用している。この素材は非常に高い透磁率を持ち、周波数特性の良い CT を作ることができる。[14]

理想的な CT の信号量は巻き数 N に反比例する。少ない巻き数の CT を作れば大きな信号を得ることはできるが、漏れ磁場による損失やドループ (図 3.4 参照) の影響が大きくなり、ビームの絶対量の見積りが難しくなる。この試験では、巻き数の違う複数の CT を使用し、それぞれの役割を分けることにした。

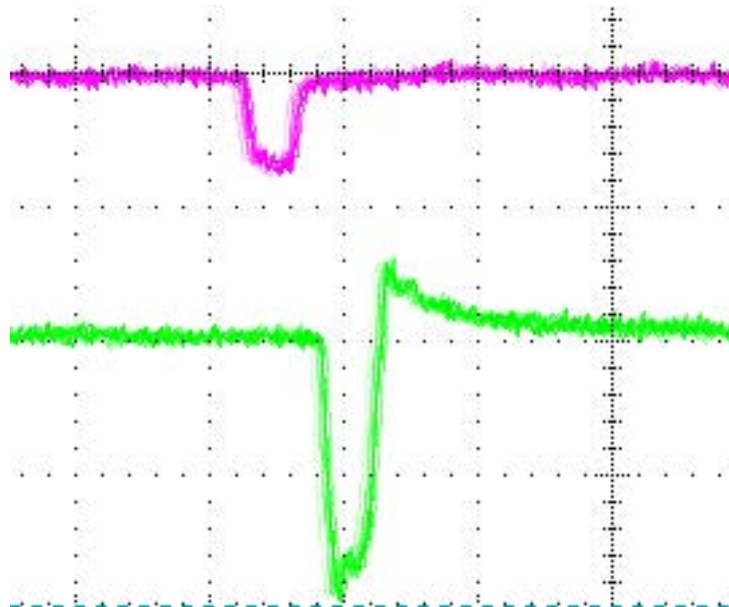


図 3.4 CT1(6 巻き, 赤) と CT2(1 巻き, 緑) のオシロ波形。CT1 の波形は元のビームの形に近いが、CT2 の波形には大きなドループ (オーバーシュート) が見られる。

*⁵ CT0 はオシロスコープでの読み出しのみであり、ビーム強度調整の際の目安として用いた。

*⁶ 日立金属 (株) の登録商標

各 CT の設計を表 3.3 にまとめる。CT1 はビームパイプ直後に設置してビーム強度のモニターに使用する。内径が小さく 6 巻きであり、漏れ磁場やドループの影響は最も小さい。CT2 は 1 巻きであるので最も信号が大きく、比較的低いビーム強度でも精度が期待できる。CT3 は検出器の近くに設置し、CT1 の補助として用いる。CT1 の応答との相関を見ることで、ビームパイプから検出器まででビームが大きく損失していないか、またその損失量が一定であるかの確認ができる。

表 3.3 試験に使用した各 CT の設計

	CT1	CT2	CT3
巻き数	6	1	6
内径 (mm)	51	76	76
外径 (mm)	79	104	104
厚み (mm)	25	25	25

プロファイルモニター

ビームの形や位置の変化のモニターと、CT では精度の出せないような弱いビームでのビーム強度測定のため、シリコン PIN フォトダイオード (浜松ホトニクス製 S3590-08, 有効面積 1 cm × 1 cm) を基板上に 1.5 cm 間隔で縦横に 3 つずつ、計 9 個並べたビームプロファイルモニターを作成・設置した (図 3.5)。

基盤ごとステッピングモーターで X 軸・Y 軸方向にそれぞれ移動可能である。測定を行う際には中央の検出器のほぼ中心をビームが通る位置で固定した。^{*7}

解析の際には、プロファイルモニターの各シリコン PIN フォトダイオードで得られた電荷量を各パルスごとに 2 次元ガウシアン (式 3.1) でフィットして総電荷量、ビーム中心位置、ビームの広がりを求めた (図 3.5)。測定位置でのビームの広がりは $\sigma = 6\text{mm}$ 程度で、これは以前に同じビームラインで行った試験のときと変わりがない。

$$F(x, y) = \frac{P_1}{2\pi P_4^2} \exp\left(-\frac{(x - P_2)^2 + (y - P_3)^2}{2P_4^2}\right) \quad (3.1)$$

P_1 : 総電荷量, P_2 : ビーム中心 (x), P_3 : ビーム中心 (y), P_4 : ビーム広がり (σ)

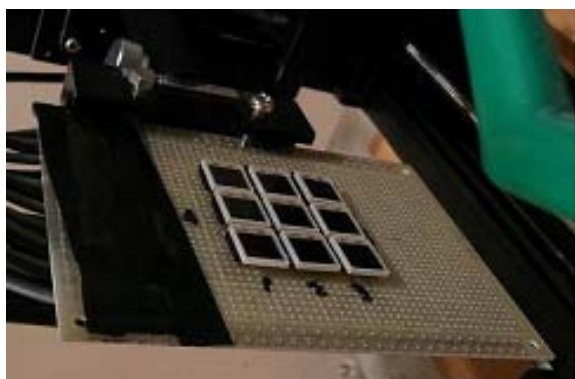


図 3.5 プロファイルモニターの写真。

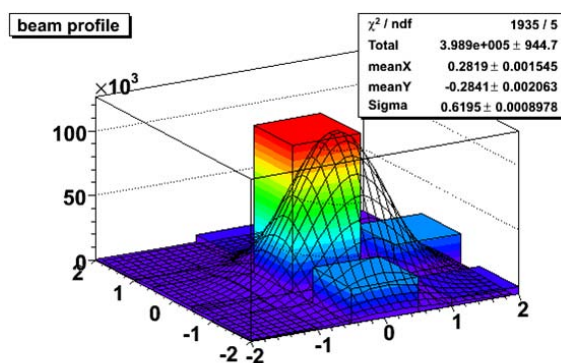


図 3.6 プロファイルモニターで測定したビームプロファイル。ある1パルスを2次元ガウシアンでフィットしたもの。



図 3.7 ダイヤモンド検出器と固定具の写真 1



図 3.8 ダイヤモンド検出器と固定具の写真 2

CVD ダイヤモンド検出器

ダイヤモンド検出器はそれぞれプラスチックの固定具で挟み、カプトンテープで絶縁・固定、銅テープの電磁シールドを付けた上で (図 3.7)、アクリル製の部品に収められている (図 3.8)。これらを図 3.9 のように、シリコン PIN フォトダイオードを固定した基盤で挟み込むように固定した。これによって、6 つの検出器の X,Y 方向の相対的なアライメントは工作精度 (0.2 mm) 程度に抑えられている。以後、前後のシリコン PIN フォトダイオードをそれぞれ Si1,Si2、ダイヤモンド検出器を上流から順に dia1,dia2,dia3,dia4 と呼ぶ。

*7 イオンチェンバーを除く各検出器のアライメントはビームライン最下流の四重極磁石の中心を基準にして、レーザー測量器具を用いて行った。精度は 1 mm 程度である。

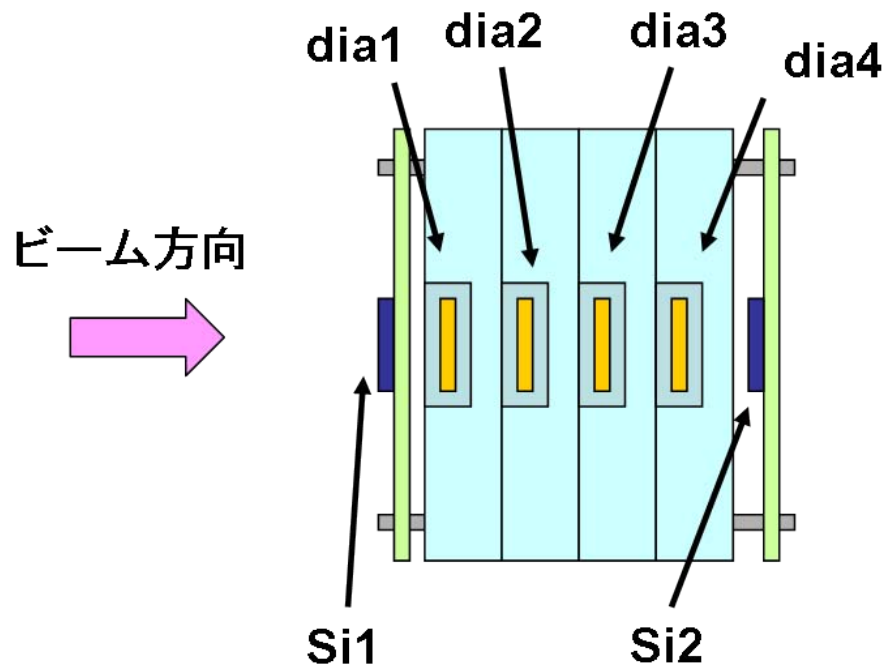


図 3.9 ダイヤモンド検出器と、シリコン PIN フォトダイオードの配置の模式図。

3.2.3 読み出し回路

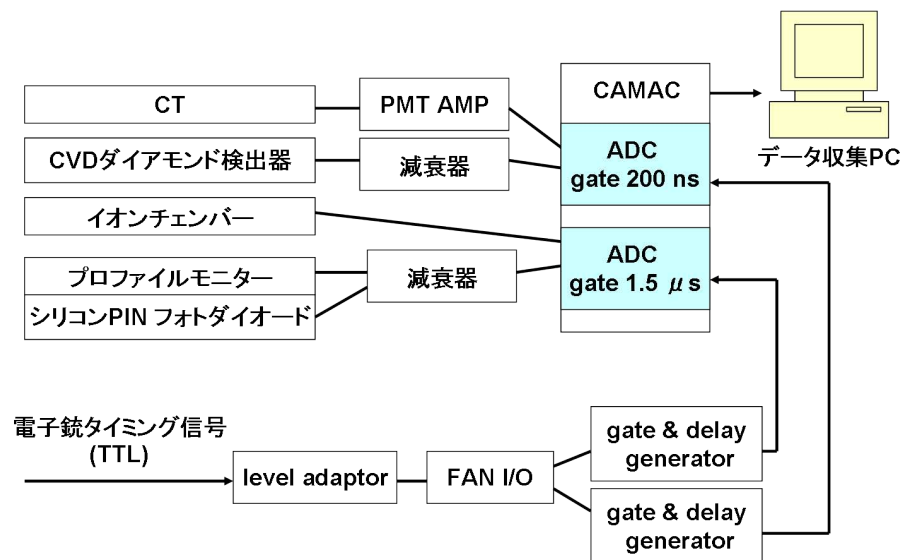


図 3.10 読み出し回路の概念図

読み出しには電荷積分型 ADC (1nC, 12bit) を用いた。CT の信号は非常に小さいので PMT AMP で約 10 倍 (+20dB) に増幅した。逆にシリコン PIN フォトダイオードと CVD ダイヤモンド検出器の信号は大きすぎるので可変減衰器で 16 ~ 46 dB の減衰を加えた。各チャンネルの増幅・減衰量の設定を表にまとめる。

表 3.4 各検出器の増幅・減衰量の一覧

検出器	増幅量・減衰量 (dB 表示)	倍率表示
CT	+20dB	×10
シリコン PIN フォトダイオード (Si1,Si2)	-46dB	1/200
CVD ダイヤモンド検出器	-30dB	1/31.6
プロファイルモニター (中央)	-46dB	1/200
プロファイルモニター (上下左右)	-30dB	1/31.6
プロファイルモニター (四隅)	-16dB	1/6.31

CT と CVD ダイヤモンド検出器の信号は応答が速いので、200 ns のゲート幅で積分した。CT2 (1 巻き) は、そのまま積分するとドループ (図 3.4) によって信号が減少してしまうので、信号が最大になるように 48 ns のディレイを加えた。イオンチェンバーとシリコン PIN フォトダイオードの信号は、1.5 μ s のゲート幅で積分した。

3.3 ビーム強度の測定

3.3.1 ビームの絶対強度の見積り

ビームパイプ直後に設置した CT1 は 6 巻きで内径も小さいため損失が少なく、ビーム量のある程度までは正確に見積もれるはずではあるが具体的に損失量を求めるのは容易ではない*8。

そこで、プロファイルモニターの信号量との比を取ることでビーム量の見積りの妥当性を検証し、さらには CT の信号損失量を見積もることにした。図 3.11 は横軸に CT1(6 巻き) の収集電荷量の 6 倍、縦軸にプロファイルモニターの 9 つのシリコン PIN フォトダイオードから構成されたビームプロファイルの積分値を取っている。(ビームサイズに対して十分に大きなシリコン PIN フォトダイオードを置いたときの収集電荷量に相当する。) 直線でフィットしたときの一次係数は 3.34×10^4 であり、これが CT1 を基準にしたときのシリコン PIN フォトダイオードのゲインである。一方、シリコン PIN フォトダ

*8 電流を通してキャリブレーションをしたとしても、電流を通す電線に電流が誘導されてしまい、荷電粒子を通したときとは違う結果をもたらしてしまう。

イオードの電離数は $9,000/\text{MIP}\cdot 100\mu\text{m}$ であることが知られており、実際にレーザーを使ってこの型の検出器 (HAMAMATSU S3590-08) をテストした際の結果 [14] もこれに一致していて、収集効率は 100% に近いと推測される。これにシリコン PIN フォトダイオードの厚み $300\mu\text{m}$ と、表 3.2 から求まる MIP と 100 MeV 電子でのシリコンに対する電離損失の比 1.153 を掛けると、ゲインは 3.11×10^4 となる。

両者は 10% 以内で一致しており、CT1 を用いたビーム強度の測定にはこの範囲内での信頼性があると言える。プロフィールモニターを用いた測定と CT を用いた測定の間でビーム強度の整合性を取るため、シリコン PIN フォトダイオードの電離数 $9,000/\text{MIP}\cdot 100\mu\text{m}$ が正しいと仮定し、CT1 の損失量をあらかず補正値を 0.92 とする。CT2(1 巻き), CT3(6 巻き) にも同様のフィットを行い、補正値 0.37, 0.87 を得た。

$$\text{ビーム電荷量} = \text{CT の収集電荷量 (測定値)} / \text{補正値} \times \text{巻き数}$$

T2K デザイン強度で、イオンチェンバーの 1 プレートあたりに予想される荷電粒子数 $1.1 \times 10^9 / \text{bunch}$ に相当する収集電荷量は、CT1($\times 6$) で 162 pC, CT2 で 65 pC, CT3($\times 6$) で 153 pC に相当する。

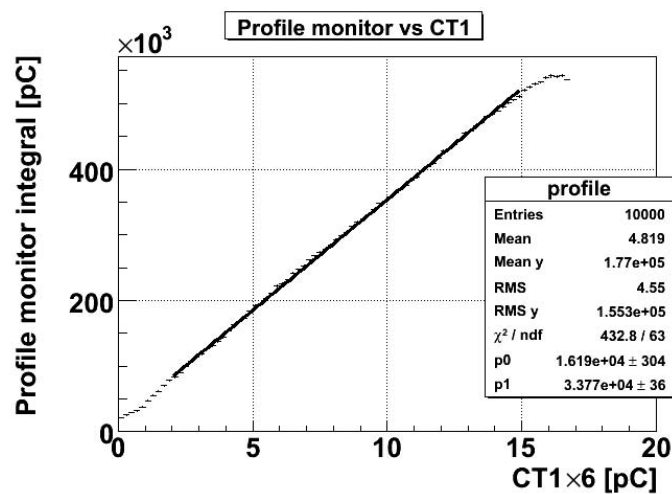


図 3.11 縦軸:プロフィールモニターの 9 つのシリコン PIN フォトダイオードから構成された総電荷量 [pC], 横軸:CT1 の収集電荷量を 6 倍したもの [pC]

3.3.2 ビームの強度変動の測定

ビームの絶対量は 10% 程度の精度でしか見積もれていないが、性能評価においてより重要なのはビームの相対的な強度変化が精度良くモニターできていることである。図 3.12 は、CT1(6 巻, 小径) と CT2(1 巻, 大径) の応答の相関を取ったものである。CT1 の

収集電荷量 ($\times 6$) が ~ 200 pC、T2K デザイン強度の 120% 以上まで良く相関している。フィット直線との比を取ると、T2K 10% \sim 120 % 強度の範囲内では中心値が 0.5% 内に収まっている (図 3.13)。

2 種類の巻き数、サイズ、そして収集電荷量の異なる CT の応答が、全く同じ関数形で飽和するとは考えにくく、ビームの相対的な強度変化は、これら CT によって 0.5% 以内でモニターされていると考えられる。

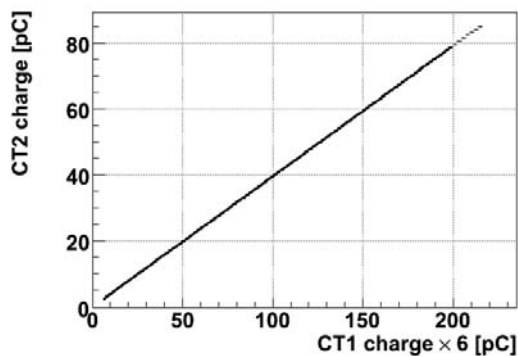


図 3.12 CT1 と CT2 の相関。実線はフィット直線。

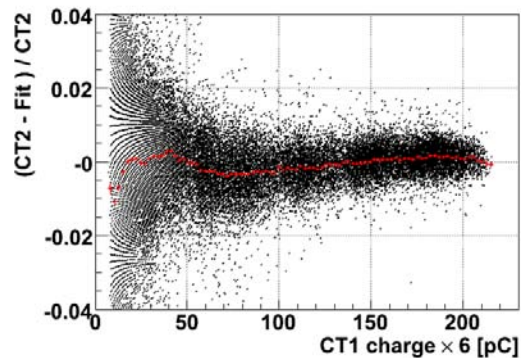


図 3.13 左図のデータのフィット直線からのずれ。黒はデータ点、赤は中心値とそれぞれの標準誤差。

3.4 平行平板型イオンチェンバーの性能評価

3.4.1 純ヘリウムガス イオンチェンバー

純ヘリウムガスを用いた試験では、T968 実験に向けた試作機のチェックを行う。具体的には、イオンチェンバーが従来の T2K ミューオンモニター試作機と同様に動作していることの確認、純ヘリウムガスイオンチェンバーの基礎特性の再確認、そして T968 実験と比較するためのキャリブレーションデータの収集を行う。

シグナル波形と応答速度

まずは信号波形の確認をする。純ヘリウムガス イオンチェンバーのシグナル波形の印加電圧を変えたときの変化を図 3.14 に示す。波形は理想的なイオンチェンバーの応答のように三角形をしている。印加電圧を上げるに従い、電子のドリフト時間が短くなるので応答は速く、波高は高くなってゆく。図 3.14 から波形の頂点から元のレベルに戻るまでを電子のドリフト時間と考えると、200V で約 400 ns, 300V で約 300ns と読み取れる。以前 (2006 年 12 月) の試作機を用いた試験の際の波形ともよく一致していた。

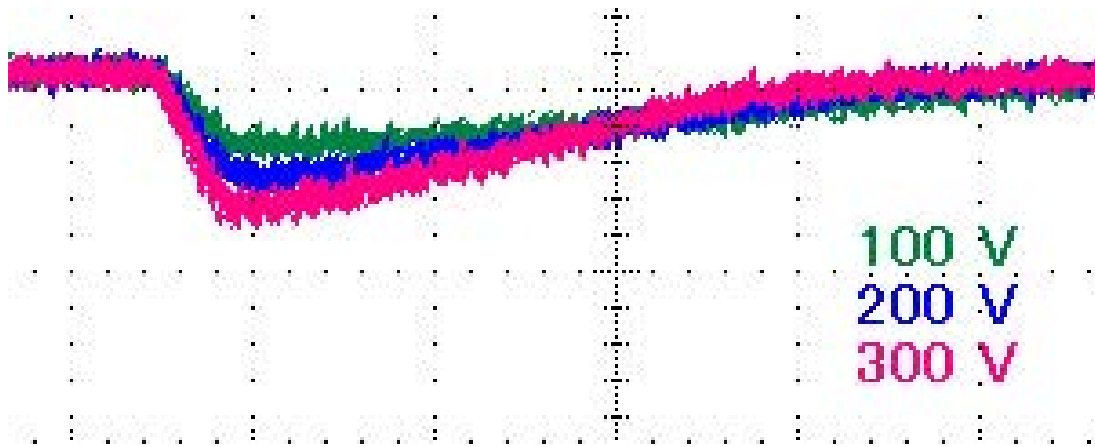


図 3.14 純ヘリウムガスイオンチェンバー シグナル波形。ビーム強度 $\sim 1 \times 10^9$ e^-/pulse 、縦軸のスケールは1目盛り 100 mV、横軸のスケールは1目盛り 100 ns。

応答の印加電圧依存性

ビーム強度を $6.0 \sim 8.0 \times 10^8 e^-/\text{pulse}$ (T2K 60% ~ 80%) でほぼ一定に保ち、純ヘリウムガスイオンチェンバーの ch1 の印加電圧を 0V から 350V までの 16 点で変えながら測定を行った。各電圧点で 1000 イベント (約 1 分) のデータを集めている。酸素濃度は十分に低く、予想される酸素による電子吸着量は最大でも総電荷の 0.2% 以下である。

応答は、100 V までに急激に立ち上がっている。この領域では、電荷収集効率が上昇していているものと思われる。

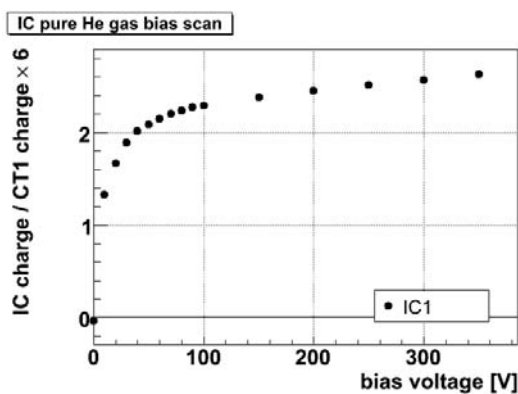


図 3.15 純ヘリウムガス イオンチェンバー 応答の印加電圧依存性

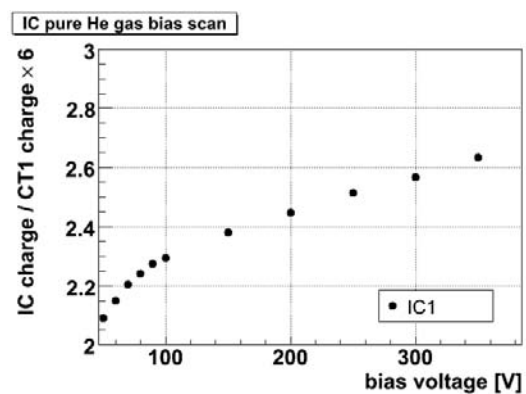


図 3.16 純ヘリウムガス イオンチェンバー 応答の印加電圧依存性 (拡大図)

100 V 以降も応答は増加し続けているが、その増加率はおよそ 0.06% /V と非常にゆるやかであり、一般的な電源で印加電圧が 1V 以内の精度で制御できることを考えると、測定に影響を及ぼすような変化ではない。

表 3.5 純ヘリウムガス イオンチェンバー 印加電圧依存性 測定条件

	ビーム強度 [e ⁻ /pulse]	ガス温度 []	ガス圧 [hPa]	酸素濃度 [ppm]
IC ch1	6.0 ~ 8.0 × 10 ⁸	26.8	1008	20

この信号増大の原因は電荷収集効率の上昇ではなくイオンのドリフト速度が上昇することによって、積分時間内に入る割合が増加しているためだと思われる。

大気圧付近では、ヘリウムイオンは他のヘリウム原子と衝突してヘリウム分子イオン He₂⁺ となってドリフトする。文献によると He₂⁺ イオンの移動度は 20 cm²/volt·sec である (付録参照, 図 A.7)。

このことを実証するために、試験での状況を元に数値計算を行った。ゲート幅は 1.5 μs であるが、ビームタイミング後の実際の積分時間は 約 1.35 μs であるのでこの時間幅に入るイオン由来の信号成分の割合を計算した。パルスは 50 ns 幅の矩形、イオンのドリフト速度は電場のみによると仮定し、キャリア再結合の影響及びケーブル・回路の時定数は無視した。印加電圧 350 V, He²⁺ イオンの移動度 20 cm²/volt·sec のときの信号波形は 図 3.17 のように予想され、相当量のイオン由来の信号 (青) が混入していることが見て取れる。

ヘリウムガス中での He²⁺ イオンの移動度 20 cm²/volt·sec と 22 cm²/volt·sec の場合での計算結果を表 3.6 に、データとの比較を図 3.18 に示す。計算値の方では、電子由来の信号成分の収集率は 100% としている。図 3.18 の縦軸は、増加率の比較がしやすいようにそれぞれ印加電圧 350 V のときの値で規格化した。

表 3.6 純ヘリウムガス イオンチェンバー イオン由来の信号の混入率

印加電圧 \ イオン移動度	20cm ² /volt·sec	22cm ² /volt·sec
100 V	5.80 %	6.38 %
150 V	8.64 %	10.9 %
200 V	11.4 %	12.5 %
250 V	14.2 %	15.5 %
300 V	16.9 %	18.5 %
350 V	19.6 %	21.4 %

印加電圧 350 V ではイオン由来の信号の約 20% がゲート内に入っており、無視できない効果を与えている。図 3.18 の比較を見ると、印加電圧 150V 以上では測定データと計算値の増加率は揃っており、収集電荷量の増加がイオン由来の信号によるものだというこ

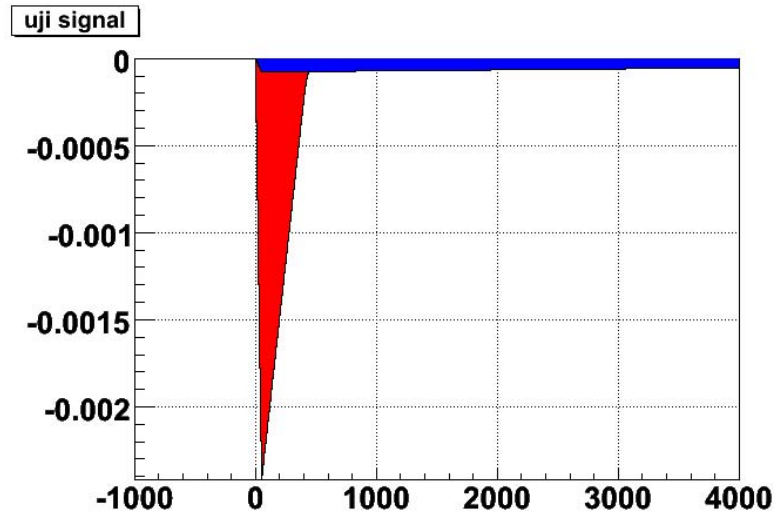


図 3.17 純ヘリウムガス イオンチェンバー波形の計算。赤が電子由来、青がイオン由来の信号成分。

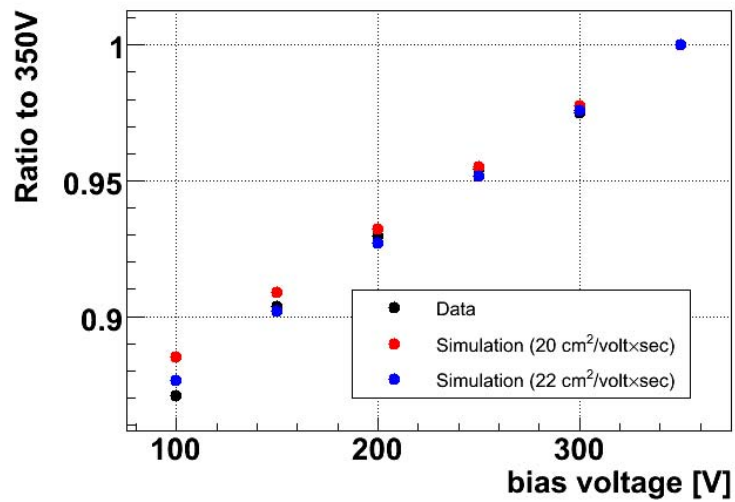


図 3.18 純ヘリウムガス イオンチェンバー、印加電圧 100V 以降の応答の増加量。計算値と実測値の比較。

とを裏付けている。印加電圧 100V の点ではデータ点が計算値を下回っている。これは電荷収集率が 100% に達していないためと考えられ、次節の応答の線形性の測定もこのことを裏付けている。

3.4.2 応答の線形性

次に、印加電圧 50~200 V の 4 点でビーム強度を T2K デザイン強度の 130% ($1.4 \times 10^9 e^-/\text{pulse}$) 付近から 10 分間かけて T2K デザイン強度の 5% ($5 \times 10^7 e^-/\text{pulse}$) 程度まで連続的に変化させて測定を行い、応答の線形性を見た。ビーム強度を除き、測定時の条件 (表 3.7) は、印加電圧依存性の測定時とほぼ同じである。

測定結果を図 3.19 にまとめる。各点にはペDESTAL の RMS で誤差を付けてある。参考のため、深緑線で T2K で予想される最大ビーム強度のところに線を入れた。明らかに、低い印加電圧ではビーム強度が強いときに信号の飽和があり、印加電圧を上げると線形になっていく傾向が見て取れる。

表 3.7 純ヘリウムガス イオンチェンバー 応答の線形性 測定条件

	ビーム強度 [e^-/pulse]	ガス温度 []	ガス圧 [hPa]	酸素濃度 [ppm]
IC ch1	$0.5 \sim 14 \times 10^8$	26.8	1008	21

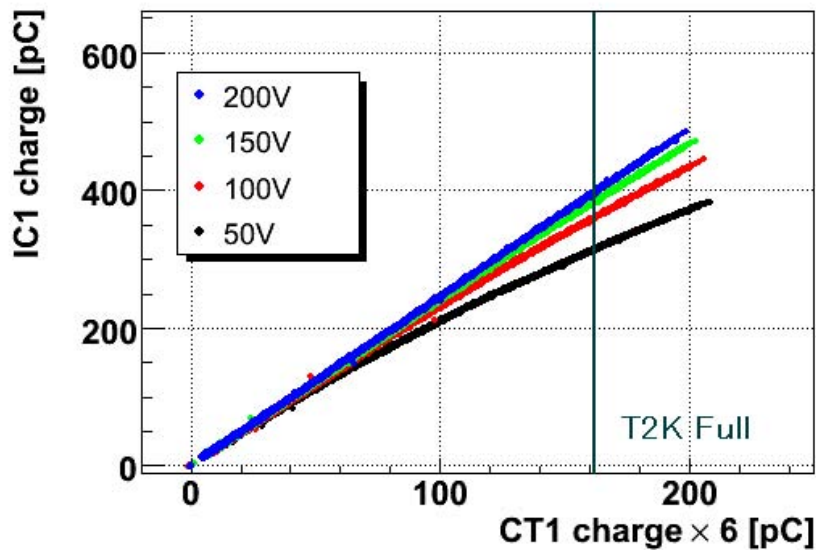


図 3.19 純ヘリウムイオンチェンバー 応答の線形性。イオンチェンバーと CT の収集電荷量の相関。各点はデータ点。

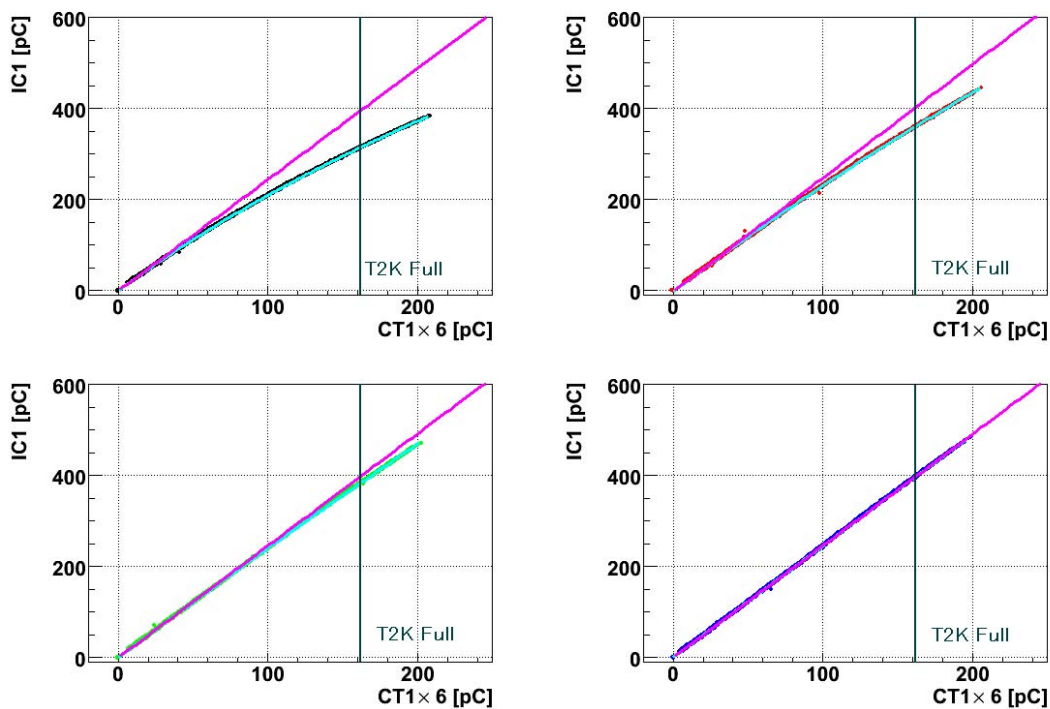


図 3.20 純ヘリウムイオンチェンバー 印加電圧依存性。左上 50V、右上 100V、左下 150V、右下 200V。水色線が式 (A.23) によるフィット曲線、桃色線が再結合のない理想的な応答を示す直線。

再結合による線形性の悪化を評価するために、それぞれの印加電圧でのデータを式 (2.1) を用いてフィットしたのが図 3.20 である。信号の飽和量の多い印加電圧 50V の場合でも、フィット曲線はデータに良く合っている。フィット曲線とデータとのずれをプロットしてみると (図 3.21)、ビーム強度が弱く測定精度の悪い点を除いて 1% 以内に収まっている。

フィットから求めた理想的な応答直線との比を取ってプロットすると、再結合による信号の減少量を評価することができる。プロットを図 3.22 に、T2K 最大強度での減少量を表 3.8 の第一項にまとめる。

ただし、このプロットから直ちに T2K 実験および T968 実験での測定における再結合の影響を見積もることは出来ない。なぜならば、試験で使用した電子線形加速器によるビームと、実際の T2K 実験、T968 実験においてミュオンモニターで観測されるビームではビーム径が大きく異なっており (表 3.1)、同じ電荷量を観測した場合でも、ガス中の電荷密度には大きな差がある。また T2K 実験のビームは約 $6 \mu\text{s}$ 間に 8 バンチあるため、イオンが収集されないうちに次のビームパルスが来ることになり、後半のバンチにおいてイオン密度が高くなることも考慮しなくてはならない。

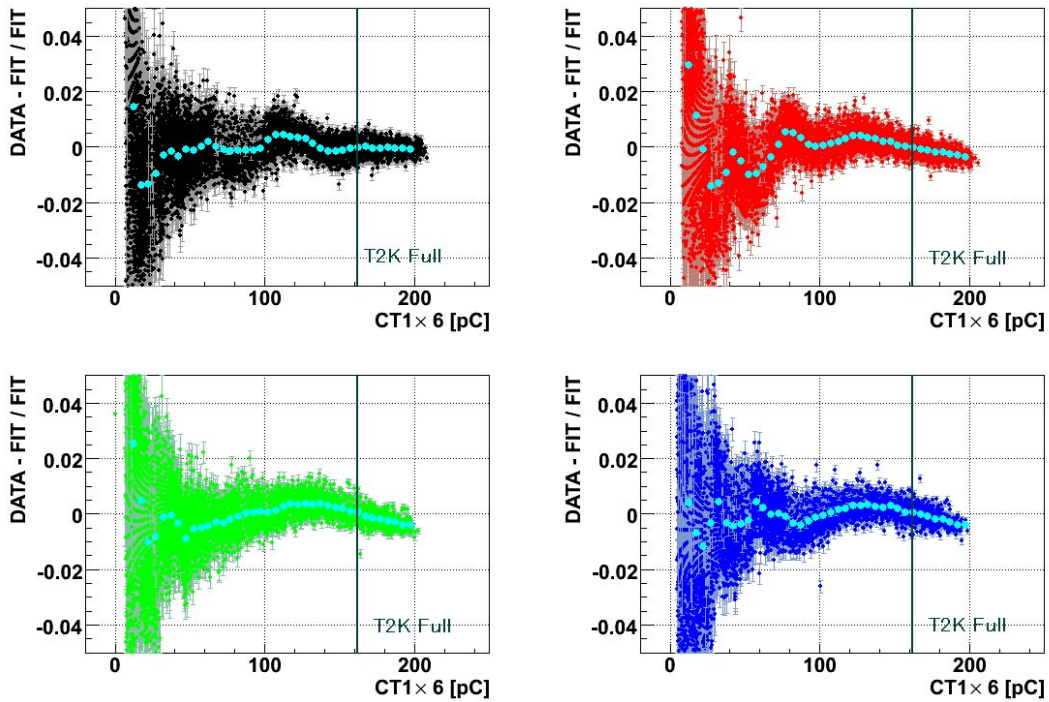


図 3.21 純ヘリウムイオンチェンバー 印加電圧依存性。左上 50V、右上 100V、左下 150V、右下 200V。データとフィット曲線とのずれをプロットしたもの。水色の点は中心値を表す。

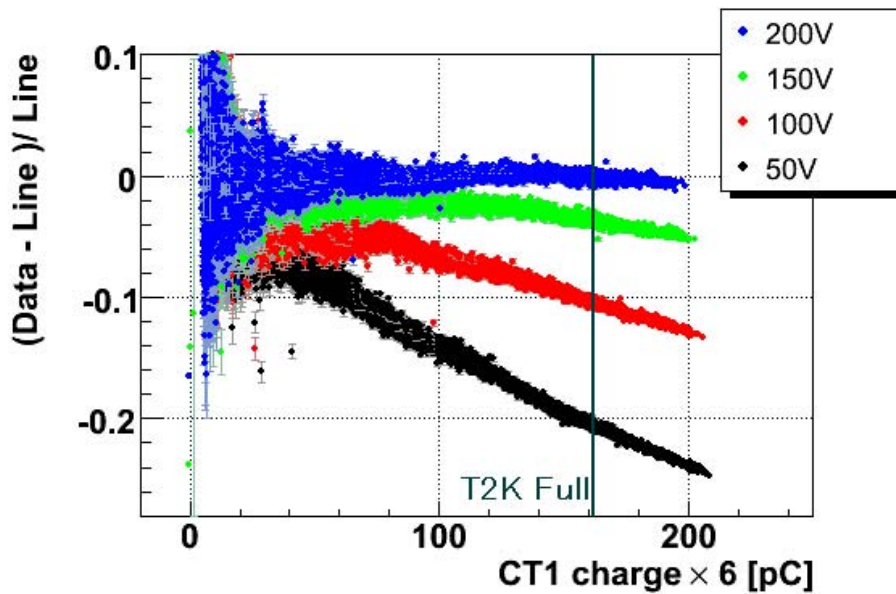


図 3.22 純ヘリウムイオンチェンバー 応答の線形性。再結合のない理想的な応答からのずれ。

ここで、平均二乗電荷密度という量を定義・導入する。チェンバースプレートの有効面積 (S) 内における電子密度を $N^-(x, y)$, イオン密度 $N^+(x, y)$ (簡単のため、 z 軸方向には一様と仮定する) として、平均二乗電荷密度 \bar{N}^2 を

$$\bar{N}^2 = \int_S N^-(x, y)N^+(x, y) dx dy / S \quad (3.2)$$

と定義する。再結合量はこれに比例するはずであり、収集電荷量ではなく平均二乗電荷密度の等しい点で比較を行うべきである。電子ビームの場合はプロファイルモニターから再構成された二次元ガウシアンが正しいと仮定し、T2K 実験、T968 実験では電子・イオンの電荷密度はプレート内で一様として計算した。T2K 8 バンチ目におけるイオン密度は、イオンの移動速度によって異なるがヘリウムガスの場合 1 バンチ目の約 7 倍程度になる。

最終的な結果を、表 3.8 にまとめる。ただし、1 ビーム粒子あたりの電子・イオン対生成数を $n_i[\text{cm}^{-1}]$ とおいた。平均二乗電荷密度を比較すると、1 プレート当たりの粒子数を同じにしたとき今回の試験状況は T2K 実験の最終バンチよりも多く再結合の影響を受けていることが分かる。T968 実験で予想される電荷密度はさらに低いため、再結合の影響による線形性の悪化は見られないと予想される。印加電圧 200V においては相対ビーム強度の測定精度範囲内で線形な応答が見られる。

この結果より、T968 実験でのイオンチェンバースプレートの印加電圧を 200V に確定した。

表 3.8 各ビームラインにおける電荷密度の比較と、再結合による収集電荷損失の見積り。

	electron LINAC	T2K (1st bunch)	T2K (8th bunch)	NuMI (T968)
ビーム強度 [particles/plate]	1.1×10^9	1.1×10^9	1.1×10^9	2.3×10^8
平均二乗電荷密度 [cm^{-6}]	$4.8 \times 10^{15} n_i^2$	$3.8 \times 10^{14} n_i^2$	$2.7 \times 10^{15} n_i^2$	$1.7 \times 10^{13} n_i^2$
平均二乗電荷密度に相当する CT1($\times 6$) 収集電荷量 [pC]	162	46	122	9.6
再結合損失率 (50V)[%]	20.5	7.4	16.6	1.8
再結合損失率 (100V)[%]	10.5	3.4	8.2	0.8
再結合損失率 (150V)[%]	3.8	1.1	2.9	0.2
再結合損失率 (200V)[%]	0.2	0.1	0.1	0.0

電離量の見積り

印加電圧 200 V における測定データにはほぼ再結合の影響が無いと思われるため、このデータから電離量を見積もる。T2K デザイン強度 ($1.1 \times 10^9 e^-$) において、ビーム自体の電荷量は 176 pC、対する IC1(200 V) の収集電荷は 395 pC である。イオン由来の信号が約 12 % 収集されていることを考慮すると、1 電子あたりの電子・イオン対生成数は $395/176/\{0.5 \times (1 + 0.12)\} \simeq 4.01 [3\text{mm}^{-1}] = 13.4 [\text{cm}^{-1}]$ と見積もられる。また表 3.2 と表 3.7 を用いて W 値 (1 電子・イオン対あたりの平均電離損失) を算出すると 32.7 eV となる。純粋なヘリウムであれば、40 eV 以上となるはずであるが、それよりも若干小さな値になっている。

この原因は 2 つ考えられ、1 つはビーム強度を低く見積もりすぎている (すなわち、CT の損失量を小さく見積もりすぎている) 可能性、もう 1 つはガス中の不純物による Jesse 効果 (penning イオン化) によって電離量が増えている可能性である。

後者について、酸素濃度は約 20 ppm と十分低く、酸素が空気の混入によるものと仮定すると窒素濃度も 100 ppm 以下と見積もられるが、20% の W 値減少を説明するには少なすぎる。空気以外の不純物混入 (例としては、前日の測定に使用していたアルゴンガスが置換し切れていないなど) の可能性も疑われる。

これについては、次の測定においてさらに議論を行う。

3.4.3 He + 1% N₂ ガス イオンチェンバー

ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガスの測定は、純ヘリウムガスと比較して応答速度の向上が得られていること、そして線形性等の基礎特性に悪化が無いかの確認を行い、T2K 実験で使用可能であるかを判断することを目的とする。また 3 チャンネル 全てで測定を行ってチャンネル間の個体差を求める。

シグナル波形と応答速度

ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバーのシグナル波形の印加電圧を変えたときの変化を図 3.23 に示す。信号の波形は純ヘリウムガスするとき (図 3.14) 同様の三角形をしているが、若干ドリフト時間が短くなっている。電子のドリフト時間は 200V で約 350 ns, 300V で約 250ns と読み取れる。図 2.18、表 2.6 に示した数値計算の結果より、200 V で運用してもバンチ読み出しには支障の無い応答速度であると言えるが、さらに応答速度を高めるために窒素の混合率を増やすことも検討している。

純ヘリウムガスと、ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガスの印加電圧 200V の波形を比較してみると、ドリフト速度の増加をはっきりと見て取ることが出来る。(図 3.24)。しかし、

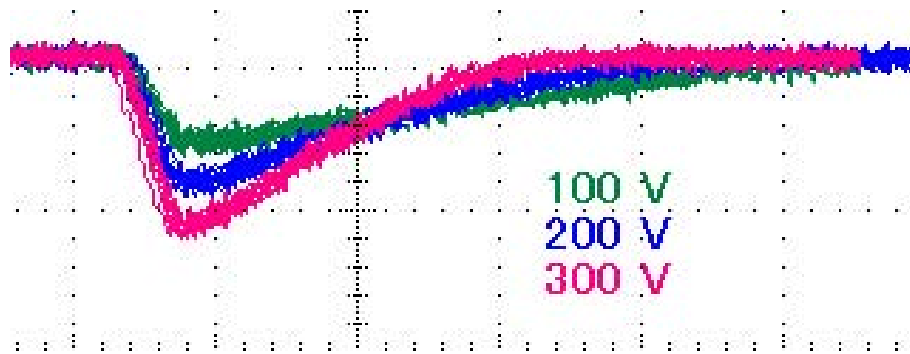


図 3.23 He + 1% N₂ ガス イオンチェンバー シグナル波形。ビーム強度 $\sim 1 \times 10^9$ e⁻/pulse、縦軸のスケールは 1 目盛り 100 mV、横軸のスケールは 1 目盛り 100 ns。

アルゴンガスに 2% の窒素ガスを混合したとき (図 2.20) と比べるとその効果は小さい。これは、原子半径の小さなヘリウムガスではラムザウアー効果の恩恵が得られないためである (付録参照)。

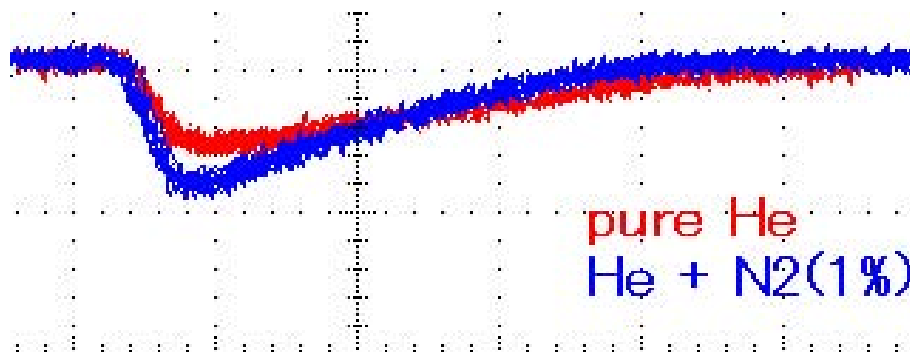


図 3.24 純ヘリウムガスとヘリウム + 窒素 (1%) ガス イオンチェンバー シグナル波形の比較。印加電圧 200V、ビーム強度 $\sim 1 \times 10^9$ e⁻/pulse、縦軸のスケールは 1 目盛り 100 mV、横軸のスケールは 1 目盛り 100 ns。

応答の印加電圧依存性

ヘリウム + 窒素 (1%) ガスイオンチェンバーについても、印加電圧を変えながら応答の印加電圧依存性を測定した。純ヘリウムガスは放電を起こしやすいので、350 V までの測定としたが、混合ガスでは 400 V までの 17 点でそれぞれ 1,000 イベント (約 1 分間) の測定を行った。ビーム強度は各測定間で若干異なってしまったが、 $5.5 \sim 8.5 \times 10^8$ e⁻/pulse (T2K 50 ~ 80 %) にコントロールした。

測定結果を図 3.25、図 3.26 に示す。純ヘリウムガスイオンチェンバーと同じく、応答は 100V までにほぼ立ち上がってそこからゆるやかに上昇しており、それぞれ収集効率の

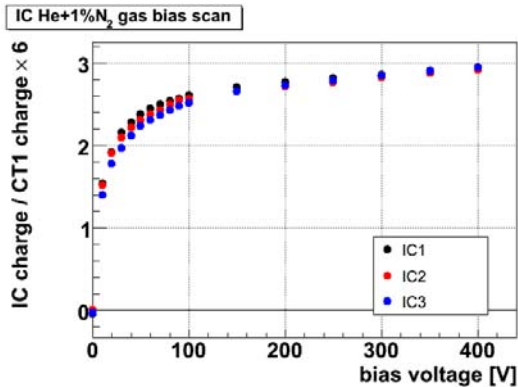


図 3.25 He + 1% N₂ ガス イオンチェンバー 応答の印加電圧依存性

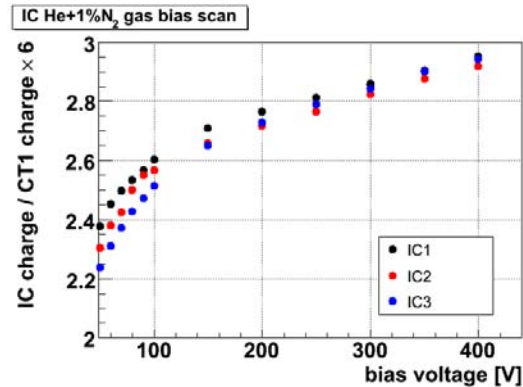


図 3.26 He + 1% N₂ ガス イオンチェンバー 応答の印加電圧依存性 (拡大図)

表 3.9 He + 1% N₂ ガス イオンチェンバー 印加電圧依存性 測定条件

	ビーム強度 [e ⁻ /pulse]	ガス温度 []	ガス圧 [hPa]	酸素濃度 [ppm]
IC ch1	5.5 ~ 6.5 × 10 ⁸	27.8	1017	61
IC ch2	6.0 ~ 7.0 × 10 ⁸	27.6	1016	61
IC ch3	8.0 ~ 8.5 × 10 ⁸	27.5	1018	63

上昇とイオン由来の信号の混入と解釈できる。

各チャンネル間で比較すると、多少のばらつきが見られる。特に、低い印加電圧では IC3 の応答が小さくなっているが、これは測定時のビーム強度の違いによるものと思われる。すなわち、低い印加電圧では応答の線形性が悪いので、最も高いビーム強度で測定された IC3 で収集効率が他よりも下がってしまう。印加電圧 200 V 以上では応答は 2% 以内で揃っているが、厳密な議論のためには同じビーム強度で比較しなければならない。チャンネル間の個体差の議論は次節の線形性測定において改めて行う。

次に、純ヘリウムガスイオンチェンバーとの比較を行う。両方のガスで測定を行った IC ch1 について、10V から 350 V までの測定点で図 3.25 と図 3.15 の値の比を取った物が図 3.27 である。グラフは右下がりになっているが、これはビーム強度が若干違うことと、混合ガスでは一部の正電荷がドリフト速度の遅い窒素分子イオン^{*9}によっても運ばれることによってイオン由来の信号成分の電荷積分幅への混入が少なくなっているためと考えられる。

1% の窒素が混合されると Jesse 効果によって完全に純粋なヘリウムに比べて約 40% 電離量が増加するはずであるが、信号量の増分は 9% ~ 16% に留まっている。ヘリウム

*9 我々の状況下では N₄⁺ イオンも寄与すると考えられる。

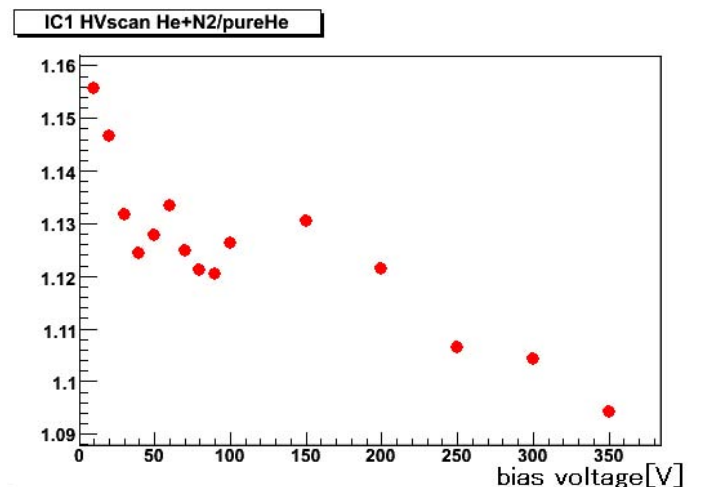


図 3.27 純ヘリウムガスとヘリウム + 窒素 (1%) ガス イオンチェンバー 収集電荷量の比較。

と窒素の密度比 7.0, 混合比 1% から予想される 6% よりは大きいものの、やはり純ヘリウムガスの測定においては、不純ガスの混入があって電離量が増えていたものと思われる。アルゴンが原因の場合は 0.2% 程度の混入と推定される (図 A.8 参照)。

応答の線形性

純ヘリウムガスでの測定と同じく、印加電圧 50~200 V の 4 点でビーム強度を T2K 最大強度の 130% ($1.4 \times 10^9 e^- / \text{pulse}$) 付近から 10 分間かけて T2K 最大強度の 5% ($5 \times 10^7 e^- / \text{pulse}$) 程度まで連続的に変化させて測定を行い、応答の線形性を見た。

結果を図 3.28 から図 3.33 に示す。純ヘリウムガスの測定のとおり同様、それぞれのデータについて式 (2.1) を用いてフィットを行い再結合の影響の無い理想的な応答の直線を求めている。

傾向は同じで、印加電圧を上げるほど応答は線形になる。それぞれのチャンネル、印加電圧での収集電荷量の減少率を表 3.10 にまとめる。純ヘリウムガスイオンチェンバーと比較すると生成される電荷量が増加したためか、若干の線形性悪化が見られるが印加電圧 200V では T2K デザイン強度、最終バンチで 1.3% ~ 2.7% の減少率でしかない。

この信号減少率から生じる、ch 間に非連動な系統誤差は $\pm 0.6\%$ 以下であり、イオンチェンバーに対する目標値 (2.5%) より十分小さく、T2K 実験での使用に問題は無いと言える。

応答の個体差

T968 実験に向けたキャリブレーションの一環として、イオンチェンバーの各チャンネル間の個体差を議論する。

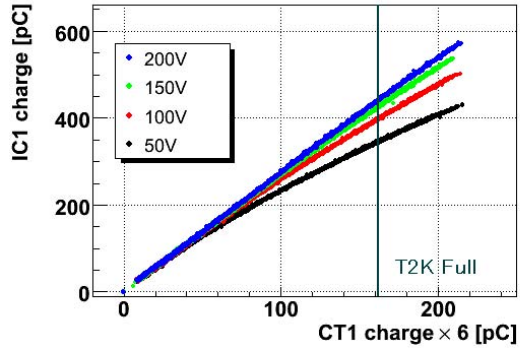


図 3.28 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch1 応答の線形性。イオンチェンバーと CT の収集電荷量の相関。各点はデータ点。

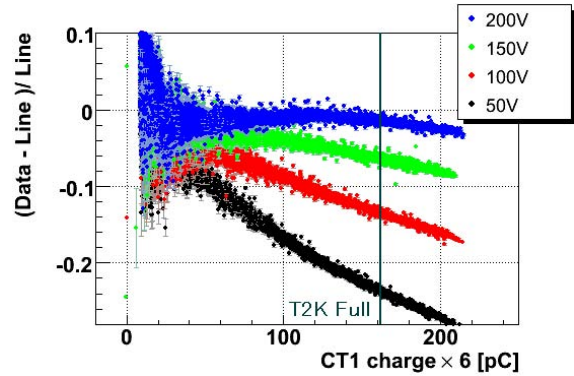


図 3.29 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch1 応答の線形性。再結合のない理想的な応答からのずれ。

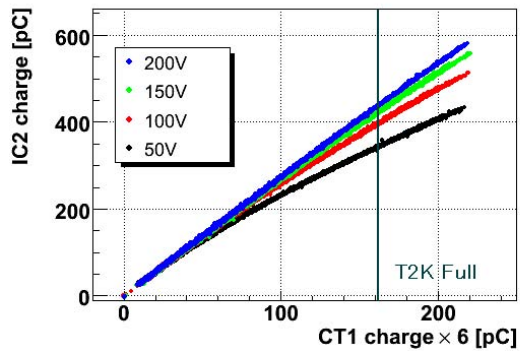


図 3.30 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch2 応答の線形性。

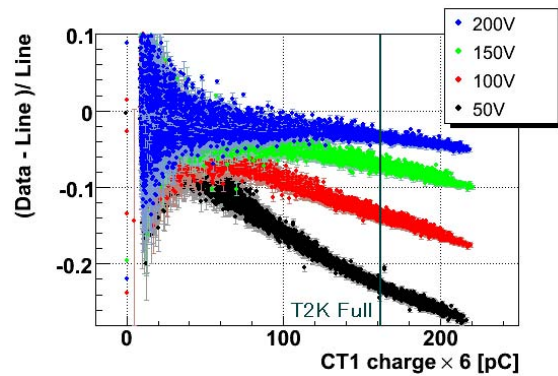


図 3.31 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch2 応答の線形性。再結合のない理想的な応答からのずれ。

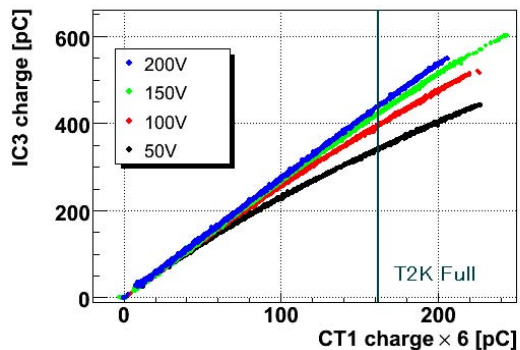


図 3.32 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch3 応答の線形性。

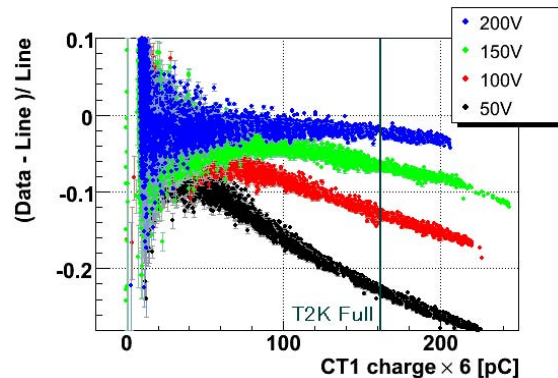


図 3.33 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch3 応答の線形性。再結合のない理想的な応答からのずれ。

表 3.10 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス、再結合による収集電荷損失の見積り。ここで $n_i[\text{cm}^{-1}]$ は電子・イオン対生成数。

	electron LINAC	T2K (1st bunch)	T2K (8th bunch)
ビーム強度 [particles/plate]	1.1×10^9	1.1×10^9	1.1×10^9
平均二乗電荷密度 [cm^{-6}]	$4.8 \times 10^{15} n_i^2$	$3.8 \times 10^{14} n_i^2$	$2.7 \times 10^{15} n_i^2$
平均二乗電荷密度に相当する CT1($\times 6$) 収集電荷量 [pC]	162	46	122
IC ch1			
再結合損失率 (50V)[%]	23.7	8.8	19.3
再結合損失率 (100V)[%]	13.5	4.5	10.3
再結合損失率 (150V)[%]	6.5	2.0	5.0
再結合損失率 (200V)[%]	1.8	0.5	1.3
IC ch2			
再結合損失率 (50V)[%]	22.7	8.3	18.4
再結合損失率 (100V)[%]	13.5	4.5	10.7
再結合損失率 (150V)[%]	7.1	2.2	5.5
再結合損失率 (200V)[%]	3.5	1.0	2.7
IC ch3			
再結合損失率 (50V)[%]	22.5	8.2	18.8
再結合損失率 (100V)[%]	12.8	4.2	10.1
再結合損失率 (150V)[%]	6.6	2.0	5.1
再結合損失率 (200V)[%]	2.4	0.7	1.8

各チャンネルの印加電圧 200V でのデータを比較に用いた。個体差を見るために、ch1 のデータをフィットした曲線を用いて ch2, ch3 を割り算し、同時にプロットしたのが図 3.34 である。各チャンネルの応答は完全に重なって見える。

このプロットの各グラフの縦軸の平均を取ると、それぞれ 0.000, -0.0043, -0.0028 となった。つまり、各チャンネルの応答は 0.5% 以内で揃っているという結果になった。この数字は、セラミックスペーサーの公差とギャップ間距離の比より最大限に見積もられる誤差範囲 3.3% ($100\mu\text{m}/3\text{mm}$) 内に充分収まっている。

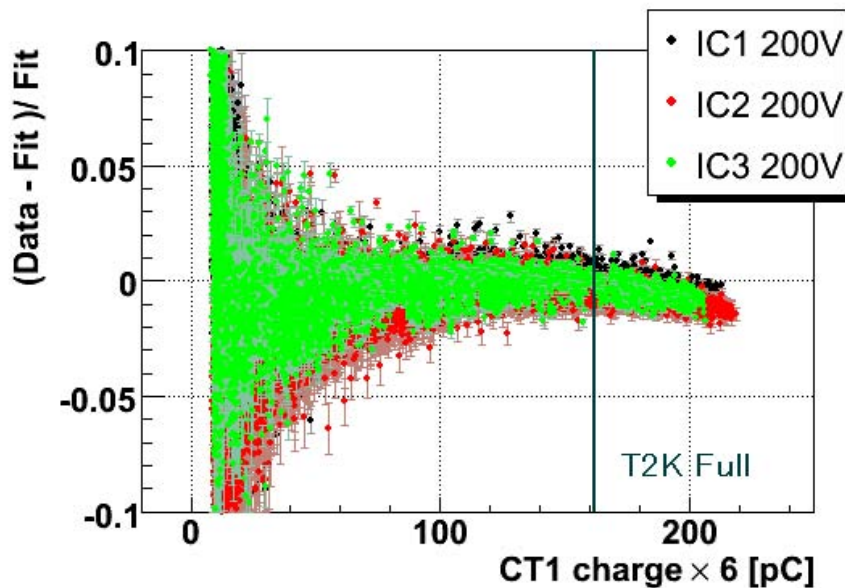


図 3.34 ヘリウム + 窒素 (1%) ガス イオンチェンバー 印加電圧 200V チャンネル間の比較。縦軸は、ch1 に対するフィット曲線で規格化されている。

3.4.4 Ar + 2% N₂ ガス イオンチェンバー

アルゴン + 窒素 (2%) ガスについては、2006 年 12 月に行った試験で測定を行っているが、確認のため 1 ch について印加電圧依存性及び応答の線形性の測定を行った。

シグナル波形と応答速度

アルゴン + 窒素 (2%) ガス イオンチェンバーのオシロスコープで測定した波形を図 3.35 に示す。

この試験では純アルゴンでの測定は行わなかったが、2006 年 12 月の試験で取った純アルゴンガスの波形とアルゴン + 窒素 (2%) ガスの波形を比較 (FADC による測定) すると、著しい応答速度の向上が確認できている (図 2.20)。

図 3.35 から 200 V における電子のドリフト時間は 150 ns 前後、 2×10^6 cm/s 程度のドリフト速度を持っていることになり、図 A.4 のアルゴン + 窒素 (1.8%) ガスのデータともよく一致する。

応答の印加電圧依存性

アルゴン + 窒素 (2%) 混合ガスについても、印加電圧を 0 V から 400 V までの 17 点で変えながらそれぞれ 1,000 イベント、約 1 分間の測定を行った。ビーム強度は

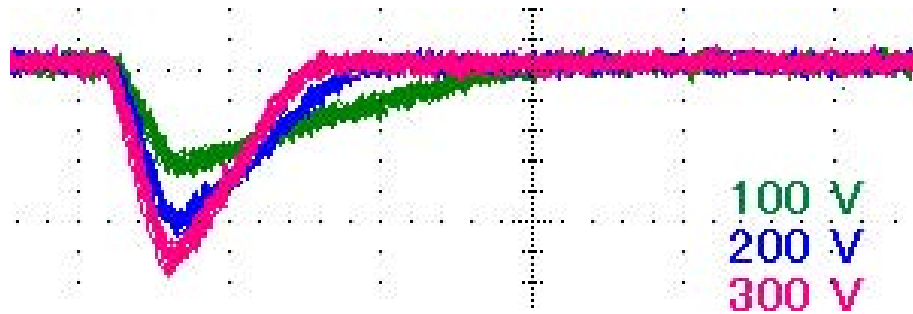


図 3.35 Ar + 2% N₂ ガス イオンチェンバー シグナル波形。ビーム強度 $\sim 3 \times 10^7$ e⁻/pulse、縦軸のスケールは 1 目盛り 50 mV、横軸のスケールは 1 目盛り 100 ns。

$2.5 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7$ e⁻/pulse (\sim T2K 2.5%) 程度で保った。

このビーム強度では CT の信号はアンプを通して数 pC であって、精度の良い測定ができないためビーム強度は Si プロファイルモニターによって各パルスごとに構成したビームプロファイルの積分値を用いて規格化した。

結果を図 3.36 に示す。30~100 V の点で測定値がばらついているが、検出器の応答ではなくペDESTALが不安定になったためである。これを示すため、図中青点にはビームを照射していない ch3 のデータを同じスケールでプロットしている。影響の大きさは違うものの、明らかに相関を持っていることが分かる。

そのため、あまり精度の良い測定にはなっていないが、印加電圧 30 V までに応答が立ち上がり、以後ほぼ一定になる傾向は見て取ることができる。

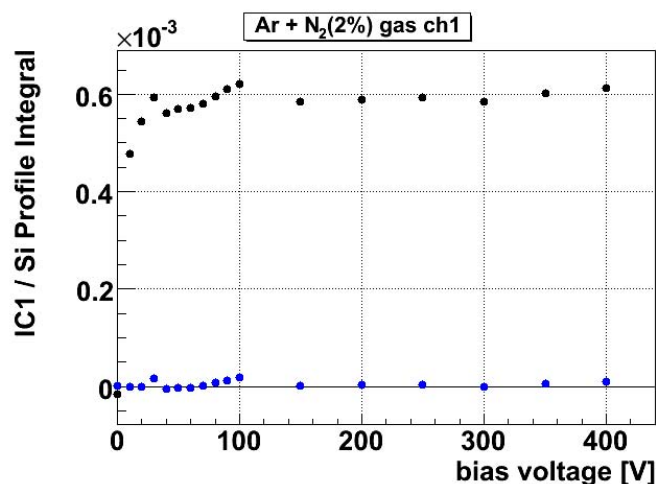


図 3.36 アルゴン + 窒素 (2%) ガス イオンチェンバー 応答の印加電圧依存性。黒点がビームを照射した ch1 のデータ。青点で示すのが、ビームを照射していない ch3 のデータ。

表 3.11 アルゴン + 窒素 (2%) ガス イオンチェンバー 印加電圧依存性 測定条件

	ビーム強度 [e^-/pulse]	ガス温度 []	ガス圧 [hPa]	酸素濃度 [ppm]
IC ch1	$2.5 \sim 3.0 \times 10^7$	29.9	1008	10

応答の線形性

ヘリウムガスでの測定と同様に、印加電圧 50~200 V の 4 点についてそれぞれビーム強度を 10 分間かけて連続的に変化させて測定をおこなった。ビーム強度は T2K 最大強度の 8% ($9 \times 10^7 e^-/\text{pulse}$) 付近から T2K 最大強度の 0.2% ($2 \times 10^7 e^-/\text{pulse}$) 程度までである。

結果を図 3.37 と図 3.38 に示す。それぞれのデータについて式 (2.1) を用いてフィットを行い再結合の影響の無い理想的な応答の直線を求めている。

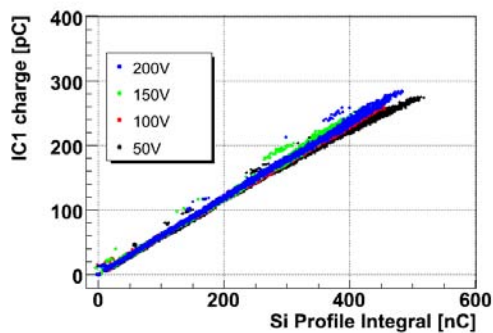


図 3.37 アルゴン + 窒素 (2%) 混合ガス イオンチェンバー ch1 応答の線形性。イオンチェンバーと CT の収集電荷量の相関。各点はデータ点。

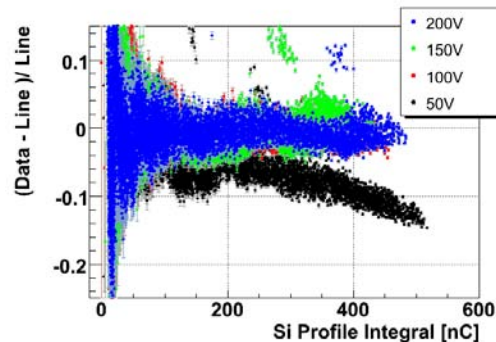


図 3.38 アルゴン + 窒素 (2%) 混合ガス イオンチェンバー ch1 応答の線形性。再結合のない理想的な応答からのずれ。

印加電圧 50V では若干の信号減少が見られるが、100 V 以上の応答にはほとんど差が見られない。フィット結果から求めた $9.0 \times 10^7 e^-/\text{pulse}$ (Si プロファイルモニター総電荷量 448 nC) の時の理想的な応答からの信号減少量は、印加電圧 50V, 100V, 150V, 200V のときそれぞれ 10.6%, 1.5%, 1.2%, 0.2% である。この時の平均二乗電荷密度は $3.3 \times 10^{13} n_i^2 \text{ cm}^{-6}$ ($n_i [\text{cm}^{-1}]$ は長さあたりの電子・イオン対生成数) であり、荷電粒子フラックス $1.2 \times 10^8 \text{ particles/plate/pulse}$ (T2K 11%) のときの T2K 第 8 バンチと等しい。

よって、印加電圧 200 V を付与するとこの範囲までは再結合の影響なく測定が可能であると言える。

3.4.5 パルスごとの測定精度とガス種切り替え時期

パルス毎の測定精度は、現場のノイズレベルや読み出し方法に依存するため、試験における値はあくまで参考にしかならないが、少なくとも試験環境と同等の状況であれば、求める精度が全ビーム強度範囲で得られるということを確認する。

まず、実験立ち上げ時の荷電粒子フラックス $1.1 \times 10^5 / \text{cm}^2 \simeq 6.2 \times 10^6 / \text{plate/pulse}$ 付近におけるアルゴン + 窒素 (2%) イオンチェンバー (印加電圧 200 V) の測定精度を求める。 $6.2 \times 10^6 e^- / \text{pulse}$ (Si プロファイルモニター総電荷量 31 nC) の前後 20% の 810 イベントにおいて、イオンチェンバーと Si プロファイルモニターの応答比を取ったのが図 3.39 である。

信号サイズが約 20 pC と非常に小さいため SIGMA/MEAN は約 3.1% とかなり広がっている。ただし、ここには規格化に用いたプロファイルモニターの測定誤差も含まれている。プロファイルモニターのペDESTALの広がり 0.67 nC から見積もられる誤差 $0.67/31 \simeq 2.2\%$ を差し引くとこのビーム強度でのイオンチェンバーのパルスごとの測定誤差は 2.2% となる。

同様に、ガス種切り替え時期のヘリウム + 窒素 (1%) ガスイオンチェンバーについても評価を行う。荷電粒子フラックス $1.2 \times 10^8 \text{ particles/plate/pulse}$ (T2K 11%) までの範囲においては、アルゴン + 窒素 (2%) ガスで信号飽和の問題なく測定できることを保証できたので、ガスの切り替えは最も早くてその点ということになる。

よって、荷電粒子フラックス $1.2 \times 10^8 / \text{pulse}$ 付近におけるヘリウム + 窒素 (1%) イオンチェンバー (印加電圧 200 V) の測定精度を求めれば良い。これでもまだビーム強度が低いので、最も信号の大きい CT である CT2 (1 巻) を用いて規格化する。 $1.2 \times 10^8 e^- / \text{pulse}$ (CT2 総電荷量 7.1 nC) の前後 20% の 1181 イベントにおいて、イオンチェンバーと CT1 の応答比を取ったのが図 3.40 である。

SIGMA/MEAN は約 1.8% CT2 のペDESTALの広がり 0.07 pC から見積もられる最低限の誤差 1.0% を差し引くと、イオンチェンバー由来の誤差は 1.5% となる。

実際にはさらに高いビーム強度までアルゴン + 窒素 (1%) ガスで測定可能と考えられるため、ガス種類切り替え時の測定精度の落ち込みはそれほど問題にならないと思われる。

以上より、ノイズ環境がこの試験と同等であった場合 T2K 実験の最初期からデザイン値までの全ての期間において、バンチごとの測定精度を 2.2% 以内に抑えることができる。

3.4.6 イオンチェンバー 測定結果のまとめと結論

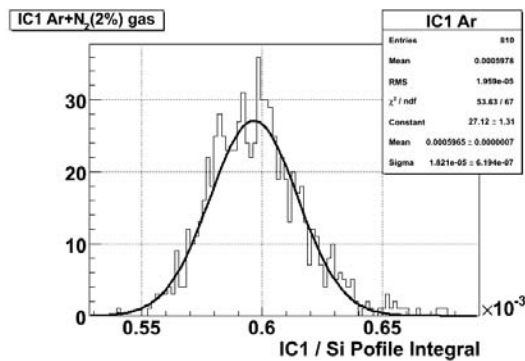


図 3.39 アルゴン + 窒素 (2%) 混合ガス イオンチェンバー ch1 印加電圧 200V 。 T2K コミッショニングビーム最初期相当のビーム強度 (6.2×10^6 e⁻/pulse) における応答の分布。

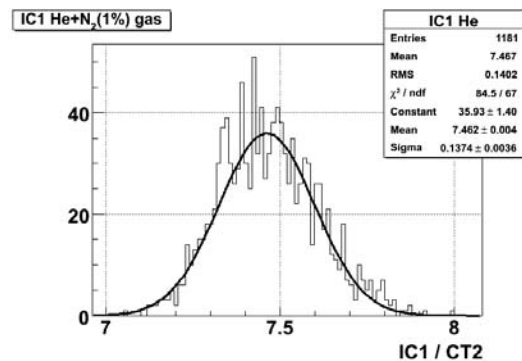


図 3.40 ヘリウム + 窒素 (1%) 混合ガス イオンチェンバー ch1 印加電圧 200V 。 T2K デザイン強度 11% 相当のビーム強度 (1.2×10^8 e⁻/pulse) における応答の分布。

純ヘリウムガス イオンチェンバー 印加電圧依存性

印加電圧 100~150 V までに応答は立ち上がり、以後緩やかに上昇を続ける。この上昇はイオン由来の信号の混入によってうまく説明できる。

純ヘリウムガス イオンチェンバー 線形性

応答は印加電圧を上げるほど線形になり、印加電圧 200V では測定精度以上の信号飽和が確認できない。T968 実験では 200V にて通常運転を行う。

ヘリウム + 窒素 (1%) ガス イオンチェンバー 線形性

応答は印加電圧を上げるほど線形になり、印加電圧 200V では最大でも 2.7% の信号減少に留まる。T2K 実験でも 200V にて運用可能である。

純ヘリウムガスとヘリウム + 窒素 (1%) ガスの比較

印加電圧 200V における電子のドリフト時間は純ヘリウムガスで約 400ns、それに対してヘリウム + 窒素 (1%) ガスでは約 350ns と若干の速度向上が見られる。収集電荷量は 9~16% の増加であったが、これは平均密度の増加 (約 6%) と Jesse 効果による増加量 (約 40% と予想される) の和に比べて小さく、ヘリウムガスに不純ガスが混入していた可能性が高い。

応答速度、および不純ガス濃度に対する安定性の面から T2K 実験ではヘリウム + 窒素混合ガスを採用する。混合比は現状の 1% で使用可能であるが、さらに応答速度を高めるため、混合比を上げて再度試験を行うことも検討している。

3 チャンネル間の個体差

T968 実験用イオンチェンバー試作機 3ch 間の個体差は製作精度から見積もられる上限 3.3% よりも充分小さな範囲に収まっており、測定精度 (0.5%) 内で収集電荷量に個体差は確認できない。

アルゴン + 窒素 (2%) ガス イオンチェンバー 線形性

応答は印加電圧 100 V の時点でほぼ線形になり、印加電圧 200V では $9 \times 10^7 e^- / \text{pulse}$ まで測定精度以上の信号飽和が確認できない。T2K 実験においては、印加電圧 200V にて、少なくとも T2K 最大強度の 11% までは応答の飽和の影響を受けずに使用可能である。

コミッショニングビームにおける測定精度

最初期のコミッショニングビーム ($1.1 \times 10^5 \text{ particles/cm}^2 / \text{bunch}$) 相当のビーム強度において、バンチごとの各チャンネルの測定精度は、2.2% と見積もられた。もし、T2K 実験環境でのノイズレベルがこの試験と同等であれば、この数字は中心決定精度の要請を満たすものである。

3.5 シリコン PIN フォトダイオードの測定

本試験において、シリコン PIN フォトダイオードは主に低いビーム強度におけるリファレンスとして使用しているが、その線形性と測定精度を再確認することにする。

また、これまでの試験で照射した電子の量から放射線耐性を見積もる。

3.5.1 応答の線形性

まず、シリコン PIN フォトダイオード ch1 (Si1) について応答の線形性の評価を行う。比較対象は、最も応答の大きい CT である CT2(1 巻) とした。応答の相関を図 3.41 に示す。

収集電荷量 140 nC ($2.8 \times 10^7 e^- / \text{cm}^2 = \text{T2K } 140\%$) 程度に至るまで、信号量の飽和はほとんど見られない。二次関数でフィットして信号減少量を見積もると、T2K 100% において 1.3% との結果になった。

ただし、シリコン PIN フォトダイオードはデザイン値のビームでは放射線耐性の問題で使用できない。従って実際に使用するビーム強度範囲内では、有意な信号減少が見られることはないと思われる。

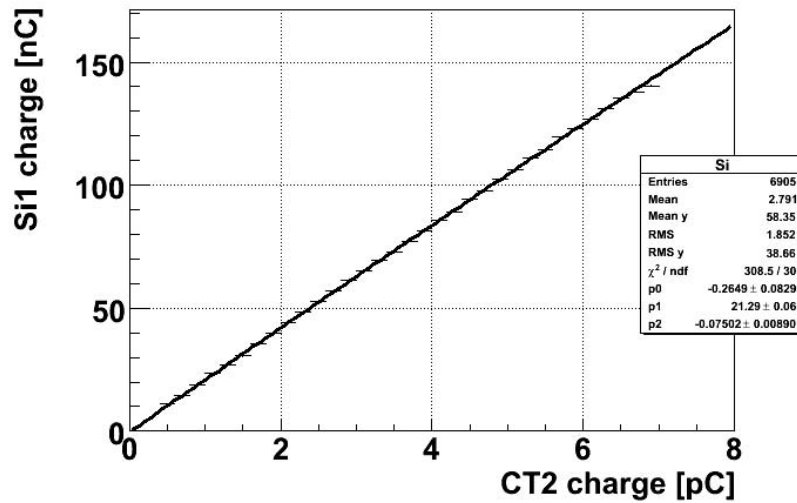


図 3.41 シリコン PIN フォトダイオード ch1 と CT2(1 巻) の応答の相関。実線は二次関数によるフィット。

3.5.2 コミッショニング時の測定精度

T2K 実験立ち上げ時の荷電粒子フラックス (1.1×10^5 particles/cm²/bunch) においても、シリコン PIN フォトダイオードで得られる信号量は 550 pC あり、十分な信号サイズである。

プロファイルモニター中心にあるシリコン PIN フォトダイオードについて、そのビーム強度領域で測定した収集電荷量の分布を図 3.42 に示す。減衰器は外した状態で測定を行っている。ビーム強度の不定性も含んだ数字ではあるが、この分布から SIGMA/MEAN を求めると 1.4% となる。

3.5.3 放射線耐性

今回の試験中において、放射線損傷による応答の減少を示したシリコン PIN フォトダイオードは存在しなかった。

これまでの電子ビーム照射試験の累積で最も多くの電子ビームを照射されたサンプル (No. 8) は、2006 年 12 月の試験で 7.46×10^{12} e⁻/cm²、今回 (2007 年 6 月) の試験では 3.56×10^{12} e⁻/cm²、合計 1.1×10^{13} e⁻/cm² の照射を受けている (図 3.43, 3.44)。

この検出器の受けた放射線ダメージは T2K デザイン強度の 7×10^4 spill \approx 2.8 日分に相当する。また最初期のコミッショニングにおいては 1.8 年分に相当している。シリコン

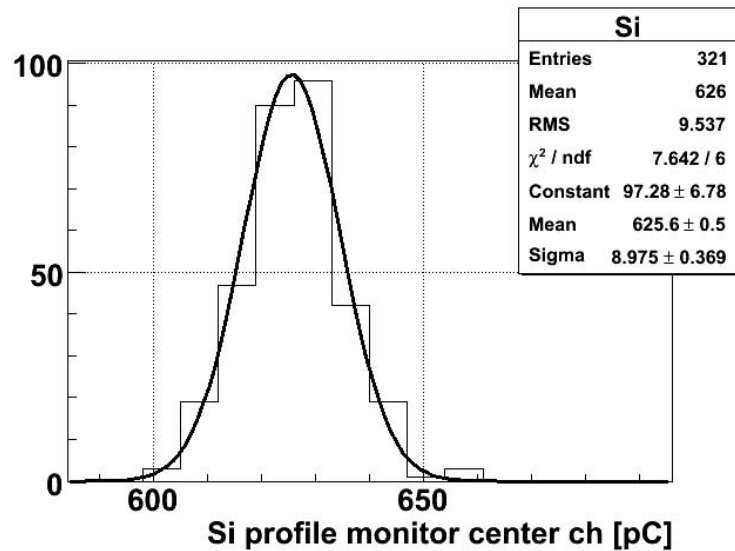


図 3.42 T2K コミッショニング最初期相当のビーム強度におけるシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の分布。

PIN フォトダイオードの放射線耐性はビームコミッショニングへの使用には充分であると言える。

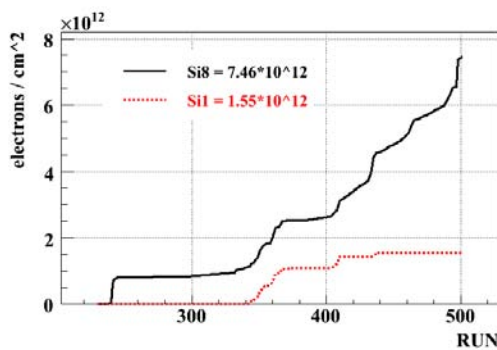


図 3.43 2006 年 12 月の試験における、シリコン PIN フォトダイオード、サンプル No.8 への電子照射量。

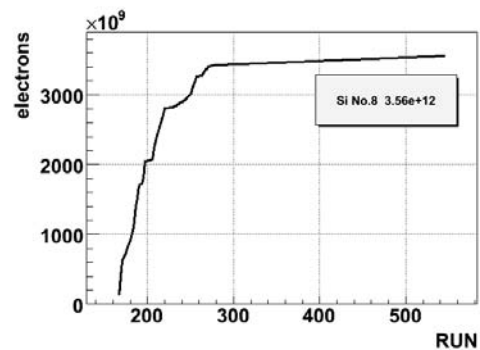


図 3.44 2007 年 6 月の試験における、シリコン PIN フォトダイオード、サンプル No.8 への電子照射量。

3.6 CVD ダイヤモンド検出器の性能評価

CVD ダイヤモンド検出器においては、ビーム照射後の応答の立ち上がりの検証を行った。また、T968 実験に向けた事前測定となるデータも収集した。

3.6.1 信号波形

オシロスコープによる CVD ダイヤモンド検出器の信号波形を図 3.45, 図 3.46 に示す。2つの波形は同じサンプルについて印加電圧 100 V と 500 V で測定したものである。パルス幅は、共に 50 ns 程度でピーム幅とほぼ等しい。つまり、応答速度は印加電圧 100 V でも非常に速い。波高は印加電圧によって増加しているように見える。

この時のビーム強度は、およそ $1.2 \times 10^7 \text{e}^-/\text{cm}^2$ (T2K 60%) であり、減衰量を補正した後のパルス高は、100 V で約 6 V, 500 V で約 15 V である。

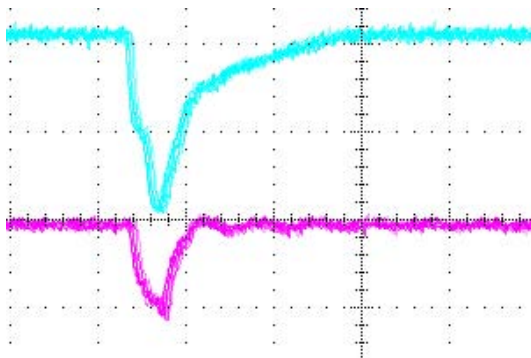


図 3.45 CVD ダイヤモンド検出器 ch1 の信号波形 (赤)、印加電圧 100 V。(青) は同時に測定したシリコン PIN フォトダイオード ch 1 の信号波形。横軸は 1 目盛り 100 ns、ビーム強度 $\sim 1.2 \times 10^7 \text{e}^-/\text{cm}^2$ 。

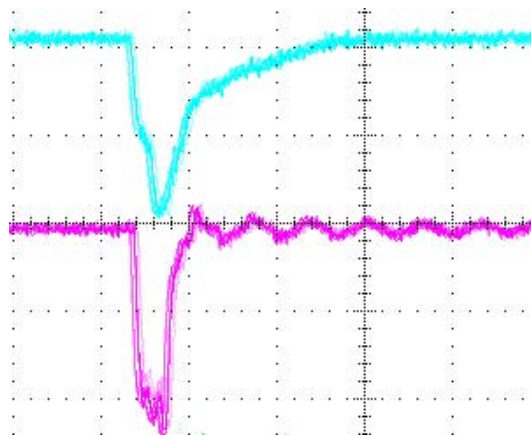


図 3.46 CVD ダイヤモンド検出器 ch1 の信号波形 (赤)、印加電圧 500V。(青) は同時に測定したシリコン PIN フォトダイオード ch 1 の信号波形。横軸は 1 目盛り 100 ns、ビーム強度 $\sim 1.2 \times 10^7 \text{e}^-/\text{cm}^2$ 。

3.6.2 散乱による損失量の見積り

CVD ダイヤモンド検出器の測定では、前後に設置しているシリコン PIN フォトダイオード (Si1, Si2) をリファレンスとして用いる (配置図 3.9)。シリコン PIN フォトダイオードと、ダイヤモンド検出器はほぼ同じ有効面積 ($10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) を持っているためほぼ同一量の粒子が貫通しているものと期待できる。

ただし、ダイヤモンド検出器を固定しているアクリルの厚みが各 1 cm あり、その物質により散乱されて、有効領域から外れてしまう電子も少なからず存在すると思われる。

そこで、まずは前後のシリコン PIN フォトダイオードの応答比を取ることで CVD ダイヤモンド検出器の列中でのビーム損失量を見積もった。図 3.47 に前後のシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量比を示す。ところどころビーム位置由来と思われるずれ

はあるものの、後方の Si2 の収集電荷量は Si1 の収集電荷量に比べ 平均 9.0% 少ない。これは過去の測定 [14] で確かめられたシリコン PIN フォトダイオード同士の個体差 $\pm 2.2\%$ を上回っている。これにより、ダイヤモンド検出器固定具を 1 枚通過するごとに 1.7 ~ 2.7% の損失があると見積もられる。

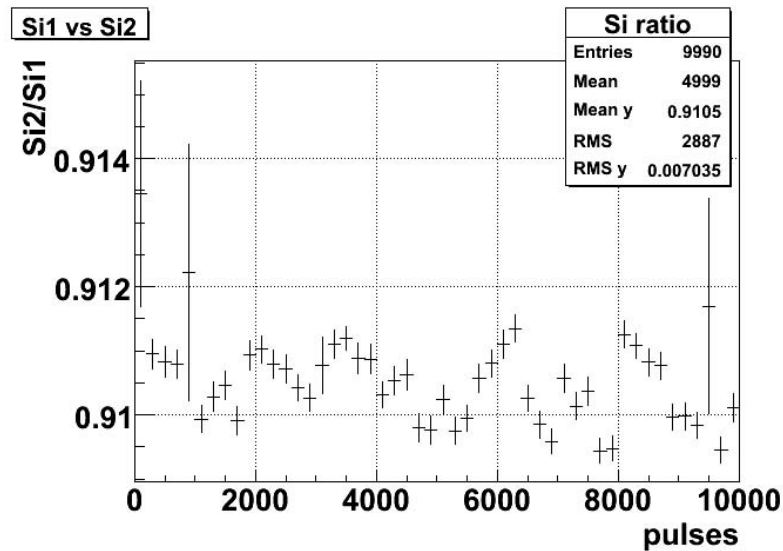


図 3.47 前後のシリコン PIN フォトダイオードの応答比。10,000 パルス分 (約 10 分間) のデータ。

3.6.3 ビーム照射時間と応答の関係

ダイヤモンド検出器の測定では、最初にビーム照射開始後の応答の変化 (pumping 効果) の影響を研究した。

ビーム照射開始後 約 400 パルス (約 27 秒)、および 50,000 パルス (約 50 分) の応答変化をそれぞれ 図 3.48, 図 3.49 に示す。縦軸は前方のシリコン PIN フォトダイオード (Si1) で規格化している。このときの Si1 で見積もられるビーム強度は $1.0 \sim 1.2 \times 10^7 e^- / \text{cm}^2$ (T2K デザイン値の 50~60%) である。

ビーム照射直後の応答変化を見ると、全てのサンプルにおいて応答の立ち上がりが見られる。ただし、その幅はサンプルごとに違っており、サンプル 3, 4 で特に大きい。

図 3.49 でさらに長い時間幅で応答変化を見ても、全てのサンプルでわずかながら増加が続いており、サンプル 3, 4 の増加幅が大きい傾向は変わらない。また、明らかにサンプル 2 の収集電荷量大きいことが見て取れる。これらは全て、過去のビームテストでも見られていた傾向である。

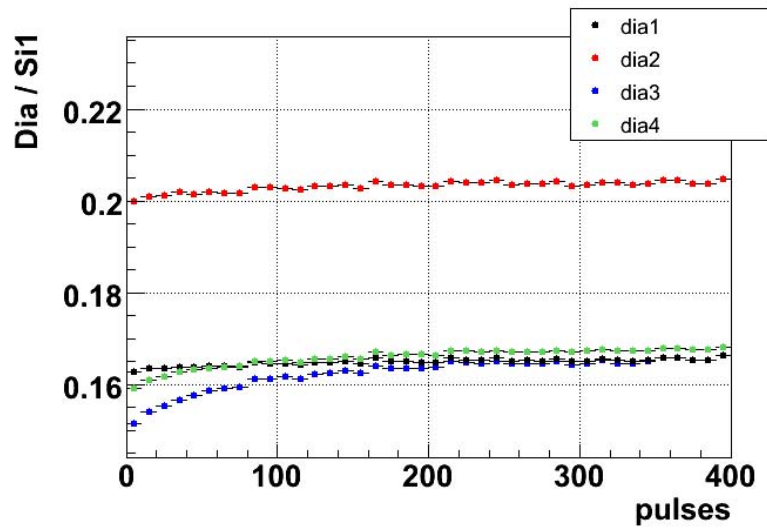


図 3.48 ビーム照射開始後 400 パルスの応答変化。

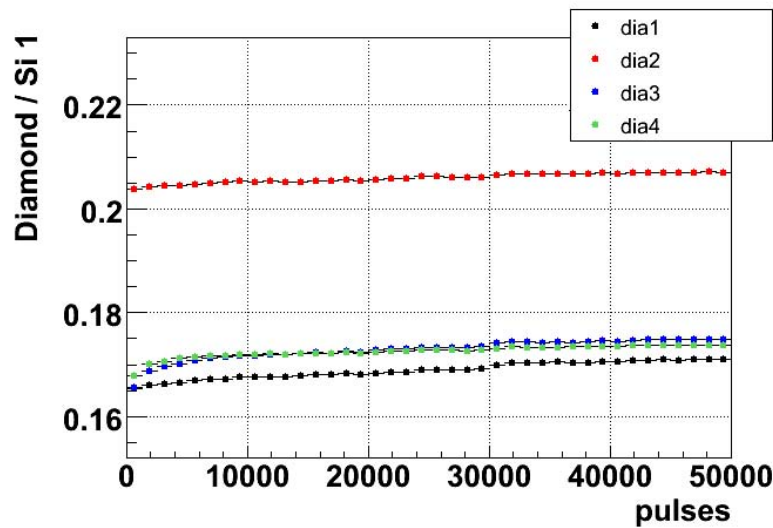


図 3.49 ビーム照射開始後 50,000 パルスの応答変化。

3.6.4 応答の印加電圧依存性及び 応答の線形性

各 CVD ダイヤモンド検出器サンプルの印加電圧 100V, 200V, 300V, 400V, 500V について、ビーム強度を $1 \times 10^6 \sim 2.6 \times 10^7 \text{ e}^-/\text{cm}^2$ (T2K 5%~130%) の範囲内で変化させて測定を行った。測定結果を図 3.50 から図 3.53 に示す。

また、CVD ダイヤモンド検出器については式 (2.1) のようなフィット関数を用意して

いないので、これらの分布を二次関数を用いてフィットして、二次係数を 0 と置くことで信号飽和の無いときの応答直線を見積もった。直線からのずれをプロットしたものを図 3.54 から図 3.57 に示す。

こうして見ると、印加電圧を上げるほど応答は線形になる傾向を見せてはいるが、サンプルごとに個性が見られる。サンプル 1 については印加電圧を上げてもさほど応答の線形性に変化が見られないが、サンプル 3,4 においては印加電圧が低いときに高ビーム強度で大きな信号飽和が見られ、印加電圧を上げると改善されてゆく。

電極の最大許容電圧である 500 V を印加したとき、T2K デザイン強度における信号減少の量はサンプル 1,2,3,4 でそれぞれ 8.5 %, 7.1%, 10.3%, 8.3 % と、比較的揃うようになる。

T968 実験での動作電圧は予定通り 500 V とする。

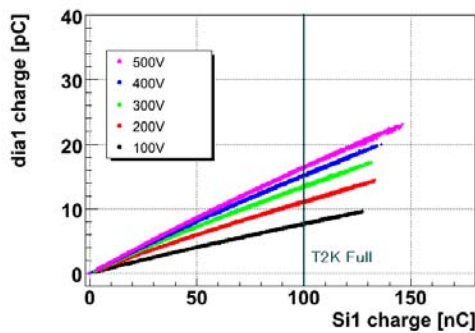


図 3.50 CVD ダイアモンド検出器 サンプル 1 の測定。

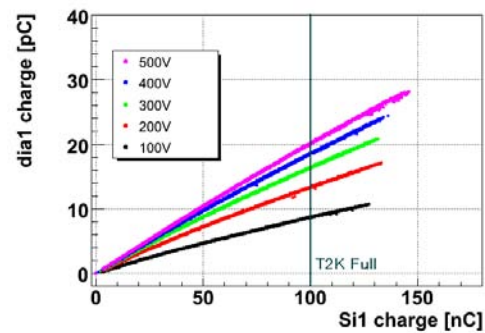


図 3.51 CVD ダイアモンド検出器 サンプル 2 の測定。

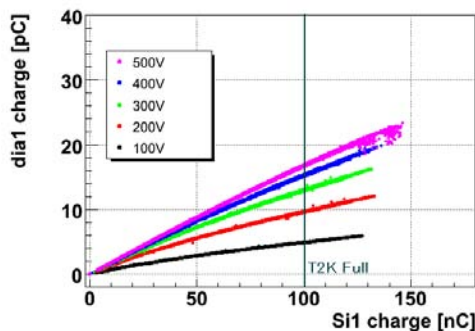


図 3.52 CVD ダイアモンド検出器 サンプル 3 の測定。

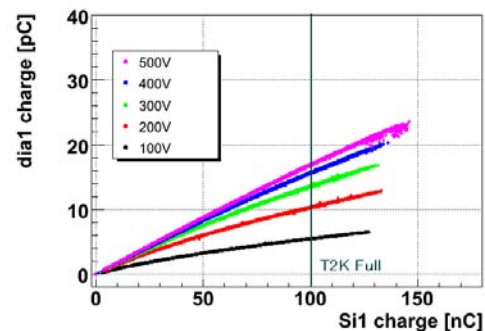


図 3.53 CVD ダイアモンド検出器 サンプル 4 の測定。

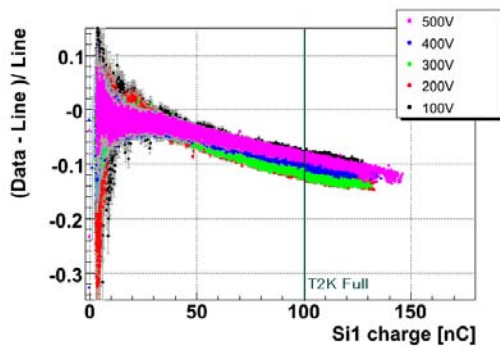


図 3.54 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル1の測定。二次関数フィットによって見積もった直線的な応答からのずれ。

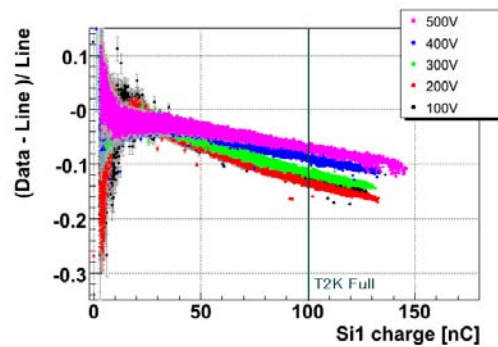


図 3.55 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル2の測定。二次関数フィットによって見積もった直線的な応答からのずれ。

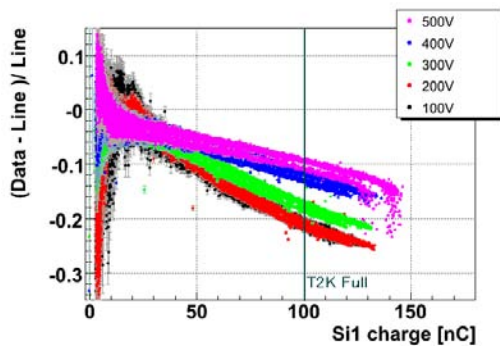


図 3.56 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル3の測定。二次関数フィットによって見積もった直線的な応答からのずれ。

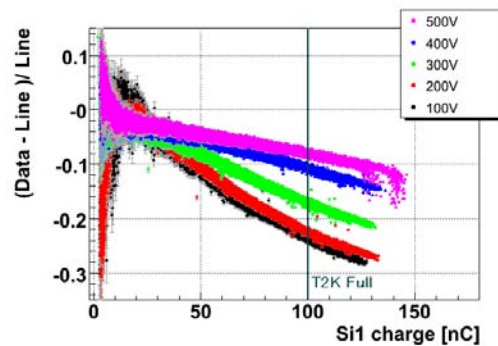


図 3.57 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル4の測定。二次関数フィットによって見積もった直線的な応答からのずれ。

3.6.5 サンプルの電極サイズ、状態のばらつき

CVD ダイヤモンド検出器サンプルのシールドを開封して電極の状態を見ると、サンプルごとに違いがあることが確認できた。

電極の写真を図 3.58 から 3.65 に示す。ここで、表面・裏面はあくまでも便宜上の区別であり成長面・核形成面の別を表しているわけではない。

サンプル1は何らかの原因により、片側の電極に損傷(はがれ)があるようであり、信号が小さいのはこのためと思われる。サンプル2は電極の形がいびつではあるが電極面積としては大きく、信号が最も大きいことも理解できる。サンプル3とサンプル4は電極面積は小さいものの比較的電極のサイズ、形状が揃っており、状態も良いように見える。実際にサンプル3とサンプル4の応答は似通っている。

このように、サンプル間の応答の個体差の一部は電極の損傷または電極形成の不備に



図 3.58 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 1 表面



図 3.59 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 1 裏面



図 3.60 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 2 表面



図 3.61 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 2 裏面



図 3.62 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 3 表面



図 3.63 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 3 裏面



図 3.64 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 4 表面



図 3.65 CVD ダイヤモンド検出器 サンプル 4 裏面

よって引き起こされていたと理解できる。

構造的に差異または欠陥のあるサンプルを測定しても、検出器自体の性能評価にならないため T968 実験で用いる CVD ダイヤモンド検出器サンプルには状態の良いサンプル 3 及びサンプル 4 を用いることに決定した。

3.6.6 収集電荷量と電荷収集距離の評価

T968 実験で用いるサンプル 3, サンプル 4 について、T968 実験のデータとの比較に用いるため相対的な収集電荷量比、及び電荷収集距離の評価を行う。

前節の印加電圧 500 V でのデータについて、サンプル 3, 4 に近い側 (後方) のシリコン (Si2) との応答の相関をプロットして二次関数でフィットしたものが図 3.66, 図 3.67 である。

フィットの一次係数を見ると、サンプル 3 については 0.1982, サンプル 4 については 0.1968 となった。この数字は、T968 実験で予想されるような低いビーム強度でのシリコン PIN フォトダイオードとそれぞれのダイヤモンド検出器サンプルの応答比に対応するものと推測できる。

また、Si1 と Si2 の応答比から見積もったダイヤモンド検出器固定具 1 層当たりのビーム減衰率 (1.7~2.7 %) も考慮すると、サンプル 3 については 0.188~0.192, サンプル 4 については 0.192~0.194 となり、低いビーム強度領域でのサンプル 3 とサンプル 4 の応答は 2% 程度のレベルで揃っている。

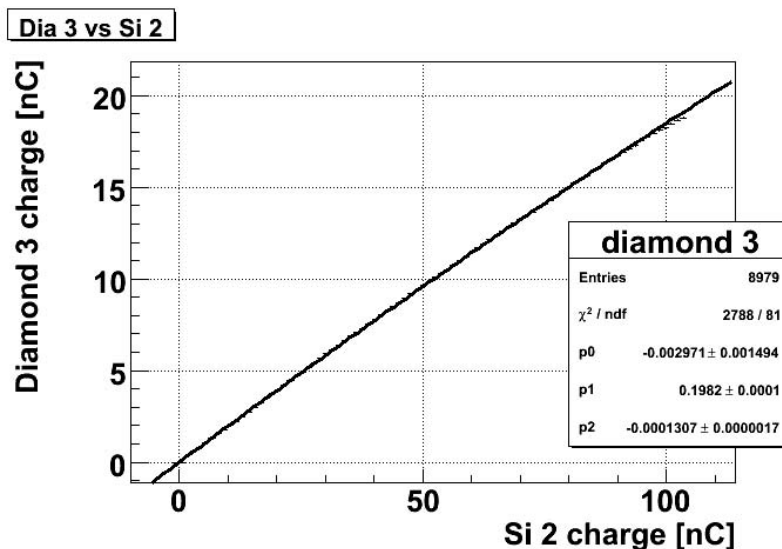


図 3.66

また、これらの応答比と表 3.2, 式 (2.3) から電荷収集距離を求めると 151 μm , 154 μm

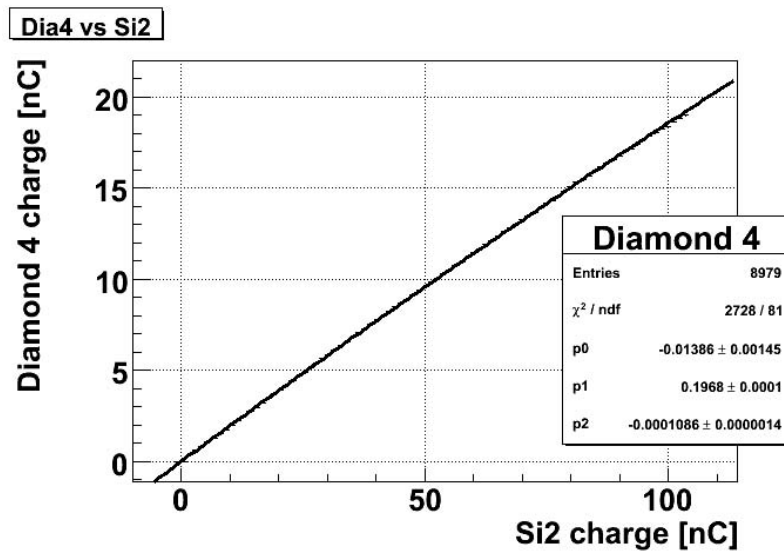


図 3.67

となる。

第 4 章

FNAL T968 実験

再度繰り返すことになるが、FNAL T968 実験 (実験代表者:横山 将志) とは、アメリカ合衆国 フェルミ国立加速器研究所の NuMI ビームラインにおける T2K ミューオンモニター試作機の長期試験の名称であり、本研究の中心テーマである。

T2K 実験での環境に近いビームを用いて、過去のビームテストでは得られていなかった長期安定性のデータを収集する。

FNAL T968 実験の主要な目的及び測定項目を以下にまとめる。

- T2K ミューオンモニターの長期安定性の検証
 - ガス圧・ガス温度に対する補正精度の確認
 - 相対フラックス測定精度の評価
 - 長期的安定性を含めたビーム中心決定精度の評価
- T2K ミューオンモニター実機設計のための最終確認
 - ミューオンビームに対する応答の検証
 - 検出器の有感領域以外の部分にビームが当たることによる影響の確認
 - その他表面化していなかった問題の発見
- シリコン PIN フォトダイオードの放射線損傷の検証
- CVD ダイヤモンド検出器の応答の検証

4.1 実験セットアップ

T968 実験のセットアップと NuMI ビームラインの概要について説明する。

4.1.1 NuMI ビームライン

NuMI ビームラインは、フェルミ国立加速器研究所の Main Injector 加速器からの 120 GeV 陽子ビームを利用したニュートリノビームラインである。このビームラインでは現在、長基線ニュートリノ振動実験である MINOS 実験が行われている。

ビームラインの概観を図 4.1 に示す。カーボン標的に Main Injector からの 120 GeV 陽子を入射し、 π 中間子を生成する。2 つの電磁ホーンにより収束された π^+ 中間子は 675 m の崩壊領域中でミュオンとミュオンニュートリノに崩壊する。残存する陽子と π 中間子を中心とする二次ハドロンは 5 m のハドロン吸収体で止められ、ニュートリノと高エネルギーのミュオンのみが通過してゆく。

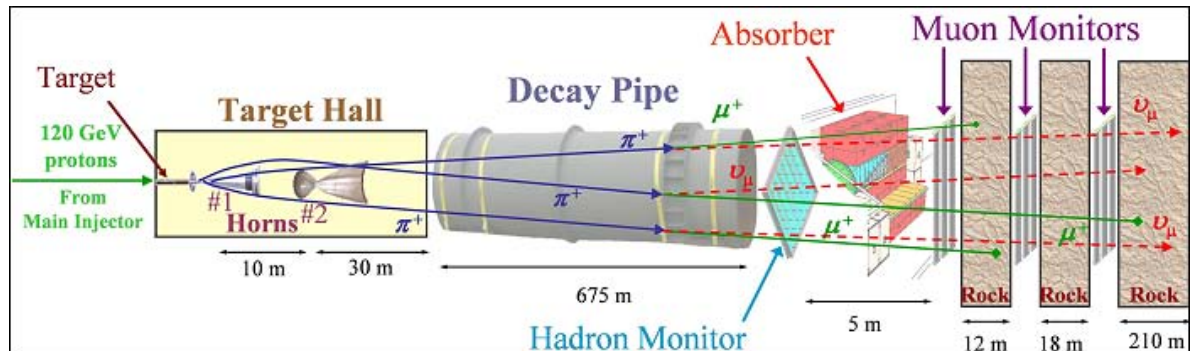


図 4.1 NuMI ビームラインの概観図 (MINOS コラボレーションより)

4.1.2 NuMI ビームパラメータ と運転モード

NuMI ビームデザインパラメータを表 4.1 にまとめる。括弧内は NuMI 単独運転モード (後述) の時の値である。NuMI ビームスピルは数個のバッチと呼ばれるビームバンチの集合から成り、全体で約 $10 \mu\text{s}$ の長さである。1 つのバッチには 18.8 ns 間隔の 84 個のビームバンチが含まれている。

スピル間隔はデザイン値では 1.87 s となっているが、実際に測定した値では 2.20 s である。

現在、Main Injector は 2+5 モード と呼ばれるモードで運転されている^{*1}。前段の Booster 加速器から Main Injector に入射された 7 つのバッチのうち、2 つのバッチは

^{*1} 2+9 モードと呼ばれる運転モードも研究されている。この運転モードでは 11 バッチを Main Injector に入射し、最後尾を除く 5 つのバッチを 2 段重ねにする。そして、先頭の 2 段重ねのバッチが反陽子生成に、残りの 9 バッチ (2 段重ね 4 つと、最後尾の 1 バッチ) が NuMI に使用される。

slip stacking と呼ばれる手法により重ねられて、先頭バッチとなる。通常この先頭バッチは陽子・反陽子衝突型加速器 Tevatron のための反陽子生成に使用され、残りの 5 バッチが NuMI にて使用される [24]。反陽子生成を行わないときには、7 バッチ (2 つ重ねられた先頭バッチ +5 バッチ) 全てが NuMI で使用される。

表 4.1 NuMI デザインパラメータ

	NuMI	T2K (参考)
ビームパワー (最大)	404 kW	750 kW
陽子エネルギー	120 GeV	50 GeV
1 スピル陽子数 (最大)	4×10^{13}	3.3×10^{14}
スピル間隔	1.87 s	3.5 s
スピル幅	8.14 μ s (9.78 μ s)	5 μ s
1 スピル内のバンチ数	420 (504)	8
バンチ間隔	18.8 ns	600 ns
バンチ幅	3~8 ns	58 ns

4.1.3 NuMI Muon Monitors

NuMI ビームライン下流部を上から見た様子を図 4.3 に示す。Muon Alcove と呼ばれる岩盤をくり抜いて作られた小部屋が 3 つあり、ここに二次ミュオン分布を測定するための Muon Monitor が 1 機ずつ設置されている*²。Muon Alcove 1 はハドロン吸収体の下流 8 m にあり、ここには生成時のエネルギーが 5 GeV 以上のミュオンが到達する。Muon Alcove 2 は Muon Alcove 1 から 12 m の岩盤を隔てた下流にあり、生成時 12 GeV 以上のミュオンを測定できる。最後の Muon Alcove 3 はさらに 18 m の岩盤で隔てられており、ここに到達できるミュオンは生成時 24 GeV 以上であったもののみである [25]。

3 つの muon monitor は同一構造をしており、9 つのチューブの内部にそれぞれ 9 チャンネルずつ、計 81 チャンネルの平行平板型イオンチェンバーが並べられている。各チェンバーの中心間距離は 25.4 cm、電極間のギャップは 3 mm である。ガスにはほぼ純粋なヘリウムガスを使用し、大気圧で常に毎時 10~30 L の流量で流されている。

*² Muon Alcove 4 も存在するが、使用されていない。

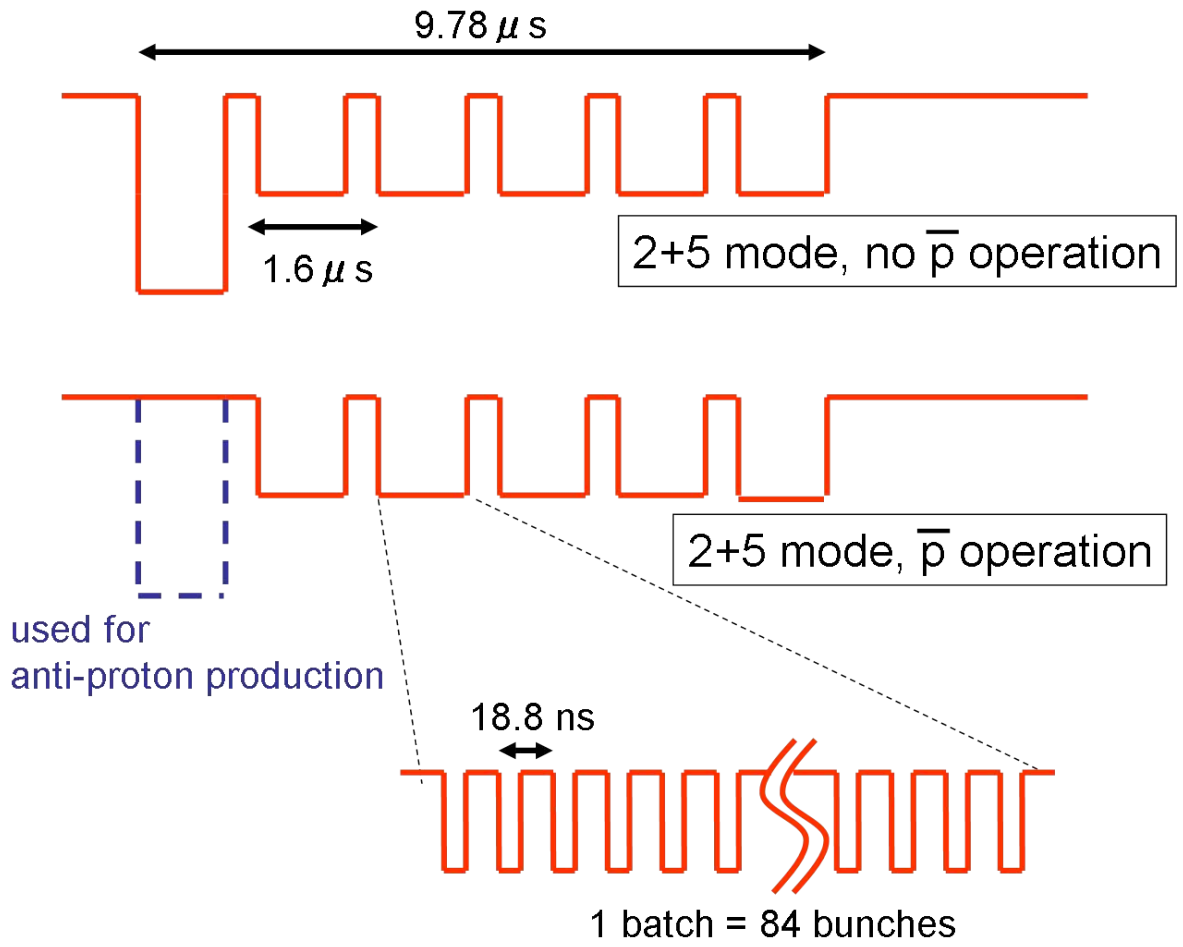


図 4.2 NuMI ビームの時間構造。

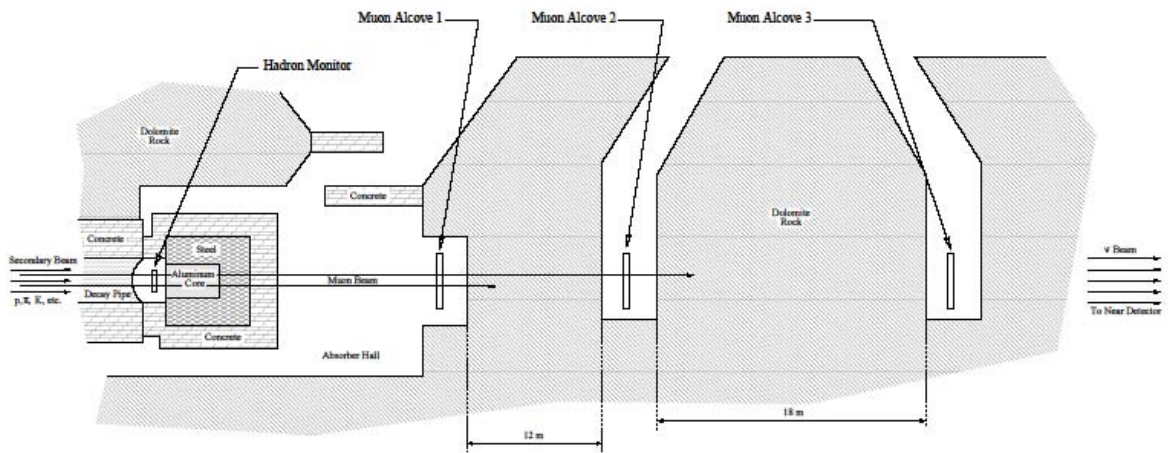


図 4.3 NuMI ビームライン下流部の鳥瞰図。

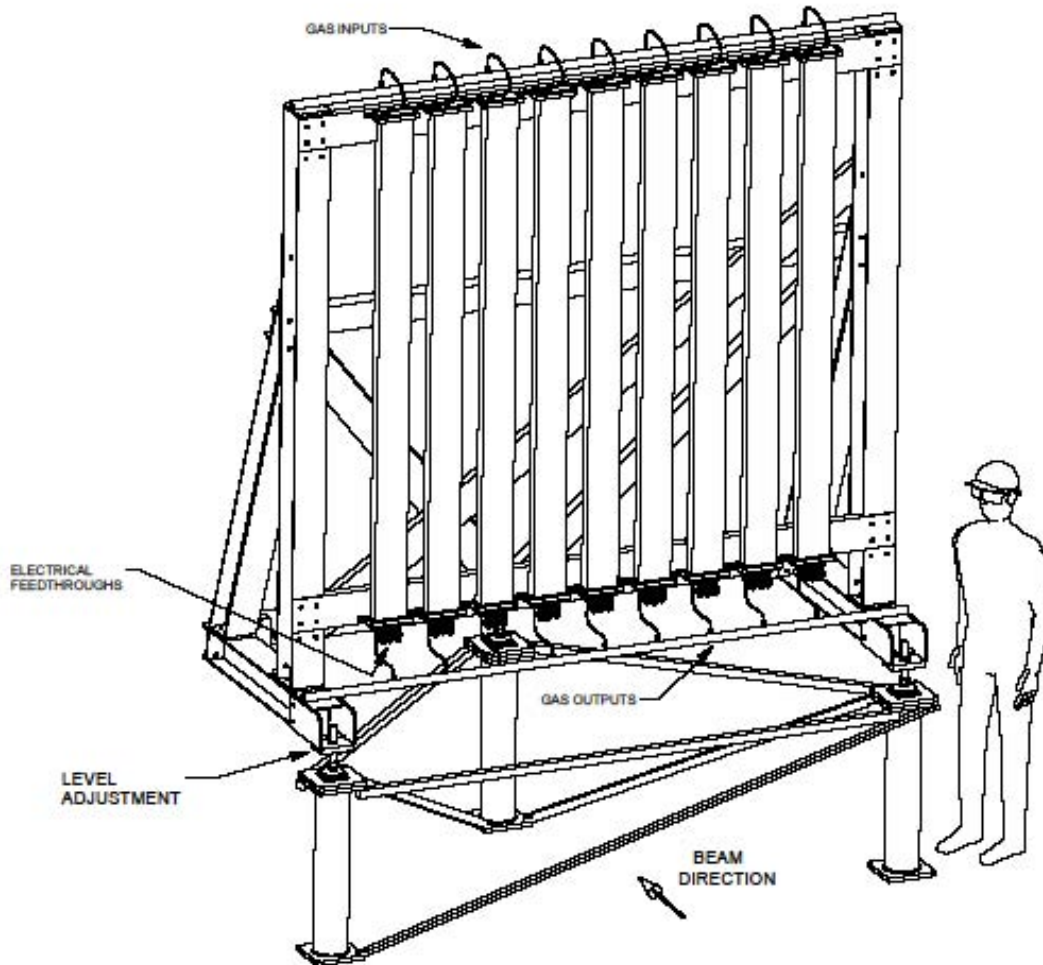


図 4.4 NuMI muon monitor の模式図。9 つのチューブに 9 つずつ、計 81ch のイオンチェンバーが設置されている。

4.1.4 試作機の設置場所とビーム環境

T968 実験用試作機は、NuMI の 2 番目の muon monitor 直後の位置に設置されている。専用の架台を設置するスペースが無いいため、チェンバーチューブ本体に固定具を取り付け、NuMI muon monitor 架台後部のアングルに引っ掛ける形で固定を行った (図 4.5)。

ダイヤモンド検出器、シリコン PIN フォトダイオードについては、イオンチェンバー 3 ch のうち上から 2 ch について、中心軸上の下流側表面に固定し、貫通するビームの同時測定を可能にした (図 4.6)。

NuMI muon monitor 中心からの相対位置は、水平方向には 1 cm 以内、鉛直方向に約-19cm、ビーム軸方向に約 40cm である。



図 4.5 NuMI muon monitor の架台上に設置されたミュオンモニター試作機の写真。

NuMI muon monitor 2 で測定されたビームプロファイルは図 4.7[25] のように水平、垂直方向共に $\sigma \sim 80\text{cm}$ の幅を持っている。シミュレーションによって予測されたビーム中心での荷電粒子フラックスは陽子ビーム強度 10^{12} ppp(Proton Per Pulse) あたり $8.5 \times 10^4/\text{cm}^2$ 、最高強度 4×10^{13} ppp においては $3.4 \times 10^6/\text{cm}^2$ すなわち T2K デザイン値 1 バンチの 17% に相当する。典型的なビーム強度は、その約半分の 2×10^{13} ppp である。

同じくシミュレーションで予測された放射線吸収量はビーム中心で 12 kGy/year ^{*3} である [26]。これらシミュレーションは、LE と呼ばれるターゲット・ホーン位置でのもの

^{*3} 1 年の POT(ターゲット入射陽子数) を 4.0×10^{20} としたときの値。

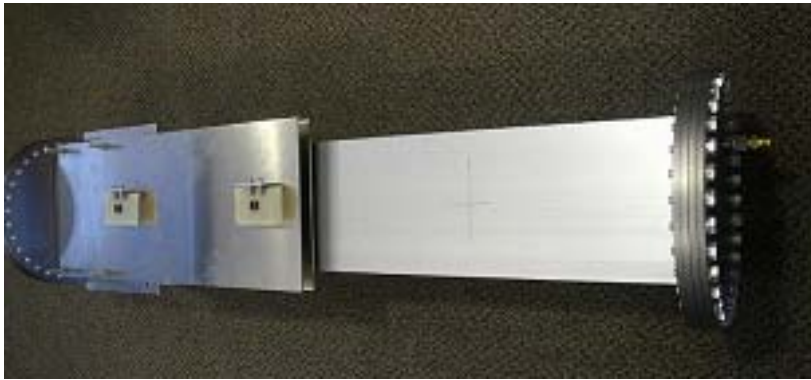


図 4.6 T968 実験用ミュオンモニター試作機の外観。イオンチェンバーチューブの上に 2 枚のアルミ板があり、それぞれに 2ch ずつのシリコン PIN フォトダイオードと、CVD ダイアモンド検出器を固定してある。

であり、現行の LE10 と呼ばれるターゲット・ホーン位置とは若干異なる。しかし、muon alcove 2 で観測されるような高エネルギーミュオンの親となる π 中間子は元々それほど収束されていないため、フラックスに大きな違いは生じない。

4.1.5 ガスシステム

ヘリウムガスは NuMI muon monitor2 の排気を利用した。

ガスシステムの模式図を図 (4.8) に示す。

地上のガスポンベから 1/4 インチ配管で供給されたガスは、muon alcove2 入り口前のラックにて流量を調整、圧力を測定された後 NuMI muon monitor2 に入る。NuMI muon monitor2 からの排気はバブラーを介して T968 実験イオンチェンバーに供給される。T968 実験イオンチェンバーからの排気は数メートルの配管を通じてダクトに開放されている。

ガス流量は測定期間中 10L/h ~ 30L/h で調節されていた。測定開始前に 10L/h の流量で酸素濃度を測定したところ、バブラー入り口で約 15 ppm, T968 実験イオンチェンバーの排気で約 50 ppm であった。電子吸着による収集電荷量の減少が見えるような酸素レベルではないが、T968 実験イオンチェンバーでは若干の悪化が見られる。この原因は、バブラーから T968 実験イオンチェンバーまでの配管が金属製でなく樹脂製であり、多少のリークがあるためだと思われる。

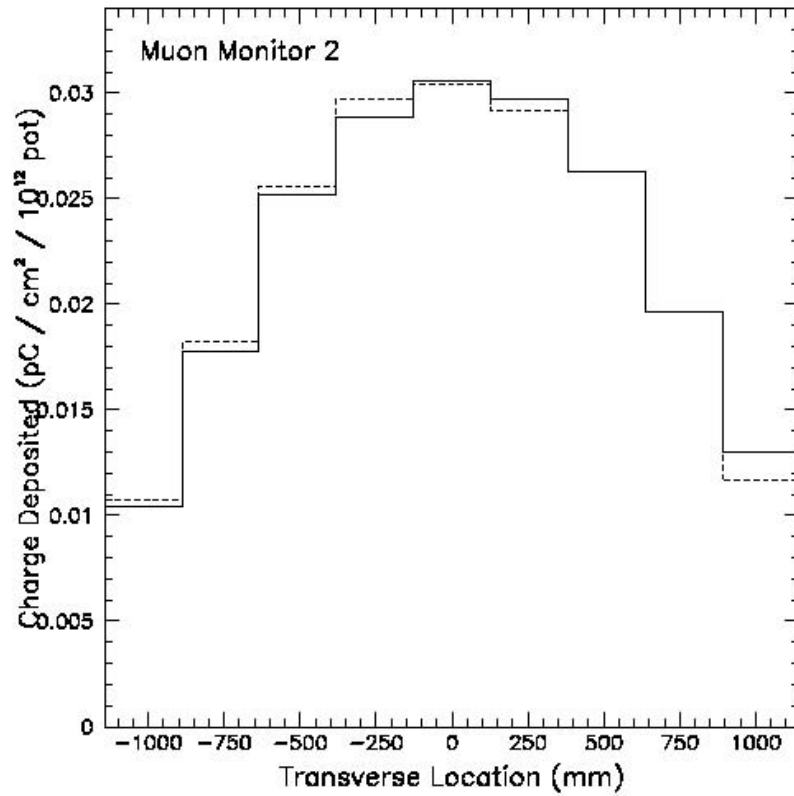


図 4.7 NuMI muon monitor 2 で測定されたビームプロファイル。実線は水平方向、点線は垂直方向のプロファイルを表す [25]。

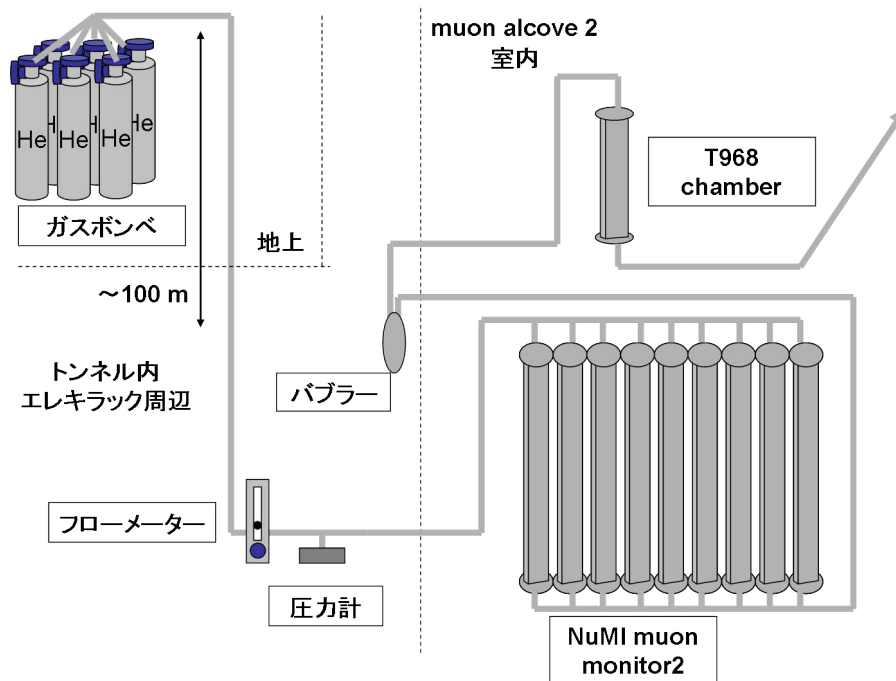


図 4.8 T968 実験、ガスシステムの模式図。NuMI muon monitor 2 の排気を利用している。

4.1.6 読み出し回路とデータ収集

読み出し回路及びデータ収集システムの模式図を図 4.9 に示す。メインのデータ収集システムには CAMAC を用いた。NuMI ビームはスピル幅が約 $10\mu\text{s}$ と長いので、電荷積分時間を長く設定できる LeCroy 社製 ADC 2249W (11bit, 積分型, full range 500pC) を用いた。

トリガータイミングは上流のキッカーのタイミング信号から取り、ビームタイミングに合ったトリガー (ビームトリガー) と、0.5 秒遅延させたトリガー (ペDESTALトリガー) の2種類のトリガーを作成した。これによって、各イベントごとにペDESTALを測定することができる。それぞれのトリガー信号は、トリガーの種類を判別するために ADC の2つのチャンネルにも入力されている。

イオンチェンバーの信号は十分に小さいので直接 ADC に入力し、CVD ダイヤモンド検出器の信号は-25 dB の減衰をかけた上で ADC に入力している。シリコン PIN フォトダイオードは信号を分割して、タイミング情報を取る目的にも使用した。当初はは2チャンネル共に分割して TDC で読み出していたが、Si2 のディバイダーに若干問題があり、測定精度を悪くしていたため、Si1 のみを TDC で読み出すシステムに変更した。Si2 の減衰量は-35 dB、Si1 の減衰量は-30 dB と約 1/2 の分割なので合計約-36 dB に相当する。

キャリブレーション精度 ± 0.05 dB の減衰器を2つずつ直列に用いているため、1ch あたり最大で ± 0.1 dB (1.1%) のキャリブレーション誤差を生じる。

NuMI muon monitor 2 を含む、NuMI ビームラインの各種モニターのデータ (表 4.2) は Web を通じて収集可能であり、我々の測定データと時間情報を元に結合した。

また、各検出器に印加する電圧は CAMAC のインターフェイスを通じてリモートでコントロール、及び監視可能である。

表 4.2 解析に用いた NuMI デバイス一覧

デバイス名	説明
E:TORTGT	NuMI ビームターゲット直前での陽子ビーム強度
E:MM2INT	NuMI muon monitor 2 81ch の総電荷
E:MM2GPR	NuMI muon monitor 2 に供給されているヘリウムガスの圧力
E:MM2RTD	NuMI muon monitor 2 内部温度
E:MM2GF	NuMI muon monitoe 2 に供給されているヘリウムガス流量

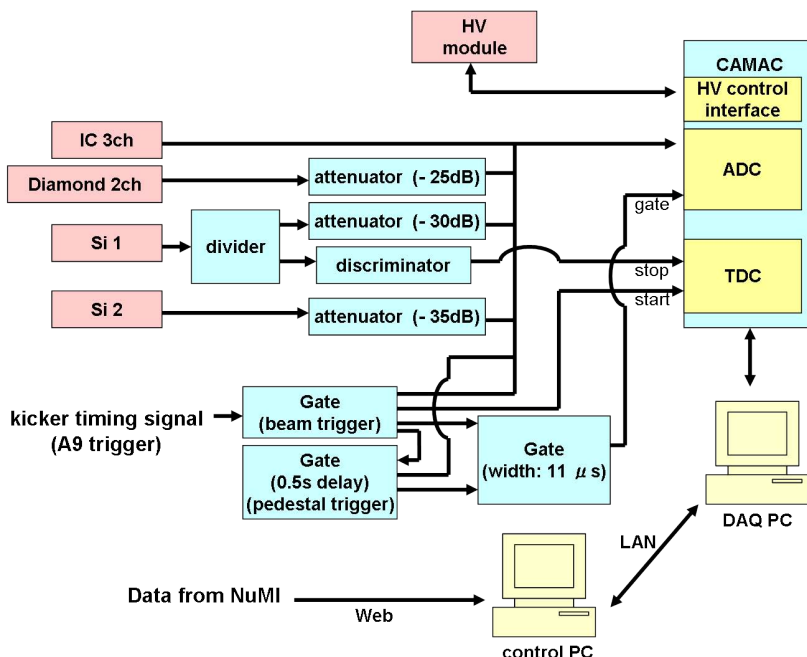


図 4.9 読み出し回路及びデータ収集システムの模式図。

4.2 信号波形とビーム運転モード

4.2.1 オシロスコープの波形

長期試験のデータ収集を本格的に開始する前に、オシロスコープをトンネル内に持ち込んで、生信号波形の確認を行った。

まず、シリコン PIN フォトダイオードの波形と ADC に入れるゲートを図 4.10 に示す。このパルスは反陽子生成に先頭バッチが使用される運転モードのもので、大きさのほぼ等しい 5 つのビームバッチを見ることが出来る。

ゲート幅は約 $11\mu\text{s}$ としていた。前に広いのは先頭バッチがこの位置に来るためであり、イオンチェンバーの電子のドリフト時間を考慮して後方にも $1\mu\text{s}$ 程度の余裕を持たせている。

図 4.11 もシリコン PIN フォトダイオードの波形であるが、このパルスは反陽子生成を行っていない NuMI 単独モードのものである。先頭に他のバッチの約 2 倍のサイズのバッチが追加されており、計 6 つのビームバッチを見ることが出来る。

今後、図 4.10 のようなパルスを 5-batch モード、図 4.11 のようなパルスを 6-batch モードと呼ぶ。

次にイオンチェンバーの信号波形を図 4.12 に示す。信号のサイズは予想通りではある

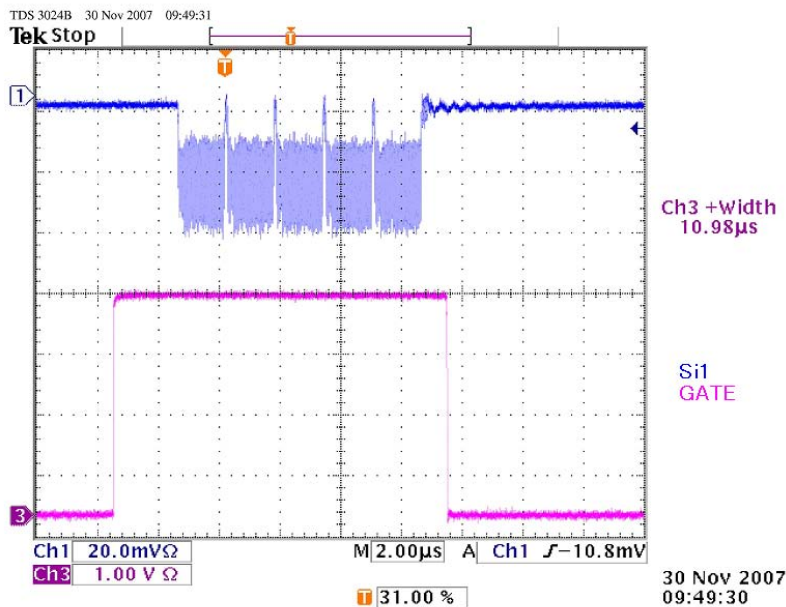


図 4.10 Si1 の生波形と、ADC Gate。印加電圧 100V。

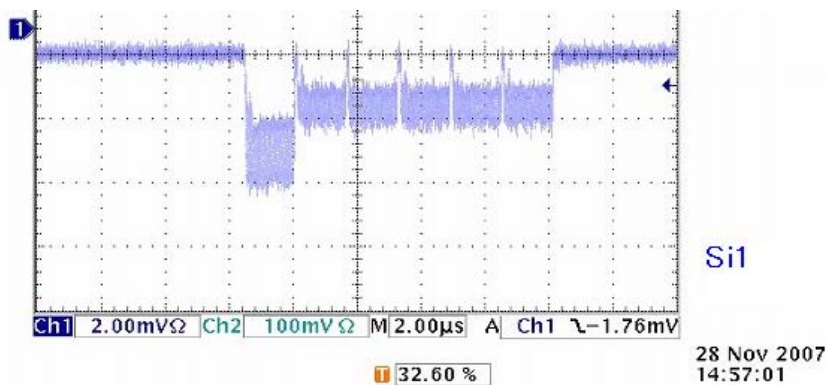


図 4.11 Si1 の波形 印加電圧 100V。ただし、-30dB で減衰させてある。

が、0.5 mV 以下と非常に小さい。

最後に CVD ダイアモンド検出器の信号波形を図 4.13 に示す。CVD ダイアモンド検出器は最も応答速度が速いため、ビームのバンチ構造 (19 ns 間隔) まではっきりと見て取ることができる図 4.14。

4.2.2 ビームタイミング

前節で見たように NuMI ビームには異なる運転モードがあり、先頭バッチの無い 5 バッチ波形と、先頭バッチのある 6 バッチ波形が主に測定される。このことがイオンチェン

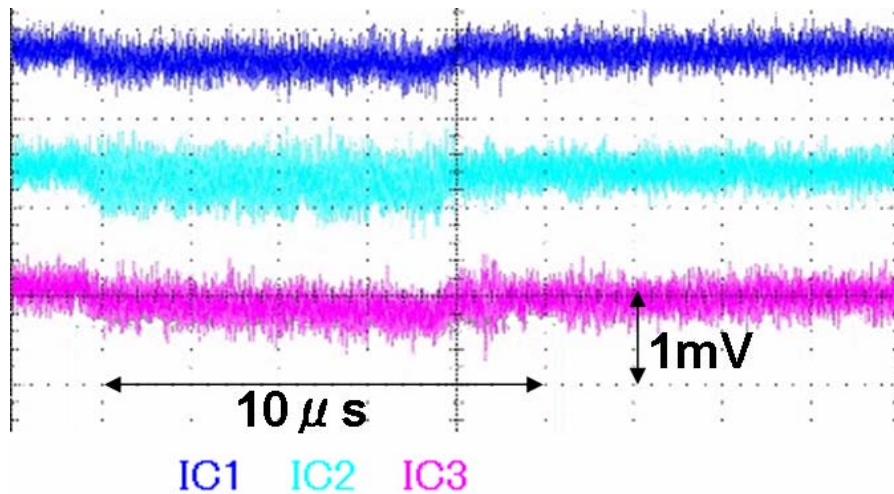


図 4.12 イオンチェンバーの生波形 印加電圧 200V。上から順に ch1,ch2,ch3 の波形。縦軸は 1 目盛り 1mV, 横軸は 1 目盛り $2\mu\text{s}$ 。

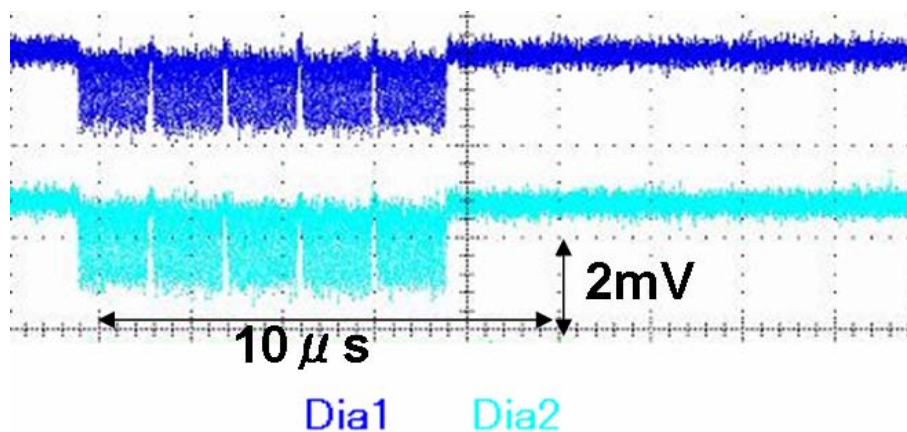


図 4.13 CVD ダイヤモンド検出器の波形 印加電圧 500V。上から順に ch1,ch2 の波形。ただし、-20dB の減衰を加えている。縦軸は 1 目盛り 2mV, 横軸は 1 目盛り $2\mu\text{s}$ 。

バーの測定に影響を及ぼす。先頭バッチの信号はゲート内の早いタイミングに来るため、他のバッチよりも多い割合でイオン由来の信号が積分される。結果として、5 バッチ波形よりも 6 バッチ波形の方が相対的に多くイオン由来の信号を測定することになる。

そのため、イオンチェンバーの安定性を論じるためにはこれらの運転モードを分割して解析する必要がある。運転モードの判別には TDC の情報を用いる。バッチ数が減る際には前のバッチが無くなるため、先頭バッチのタイミングを取ることによってバッチ数の判別が可能である。

図 4.15 が TDC による先頭バッチのタイミング情報である。縦軸は対数スケールでイ

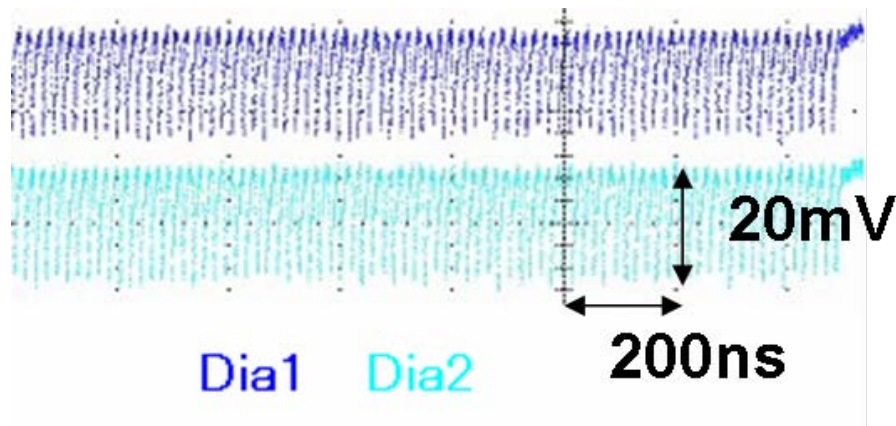


図 4.14 CVD ダイヤモンド検出器の生波形 拡大図。印加電圧 500V。上から順に ch1,ch2 の波形。

イベント数、横軸は TDC count (1 count = 1ns) である。図中で最初の大きな 2 つのピークは、それぞれ 6 バッチと 5 バッチのパルスであり、周辺の連続的な分布は、実際のビームタイミングとトリガータイミング (上流のキッカーからの信号) との相対的なふらつき (jitter) によって埋められているものと思われる。また、数は少ないものの後方には 4 バッチ、3 バッチ、2 バッチ、1 バッチのパルスと思われるイベントも見受けられる。それぞれのピークは、正しくバッチ間隔 (約 $1.6 \mu\text{s}$) で並んでいる。

それぞれのピークについて、分布が最大になる点から $\pm 150 \text{ ns}$ でカットをかけて各バッチ数のイベントとみなすことにした (図 4.15 中の各色で塗られている部分)。6 バッチ及び 5 バッチのイベントで全体の 99.7% を占めており、以後の解析では主にこれらのデータを使用することにする。

4.2.3 ビーム運転状況

本格的に長期試験のデータ収集を開始した 11 月 30 日以降の NuMI ターゲット直前の CT (E:TORTGT) で計測された陽子ビーム強度の推移を図 4.16 に示す。ビーム強度は最大で $3 \times 10^{13} \text{ ppp}$ ^{*4}、典型的には $2 \times 10^{13} \text{ ppp}$ である。5 バッチのときと 6 バッチのときを比較すると、6 バッチのときは約 1.4 倍 (先頭バッチは二倍の強度であるので $5/7 = 1.4$ となる) 強くなっている。

図 4.16 の縦軸 (ビーム強度) を投影したものが図 4.17, 図 4.18 であり、これを見ると 5 バッチモードでは $1.8 \times 10^{13} \text{ ppp}$ 付近、6 バッチモードでは $2.5 \times 10^{13} \text{ ppp}$ 付近のイベントが非常に多く、それ以外のビーム強度のイベントは少ない。

^{*4} Proton Per Pulse

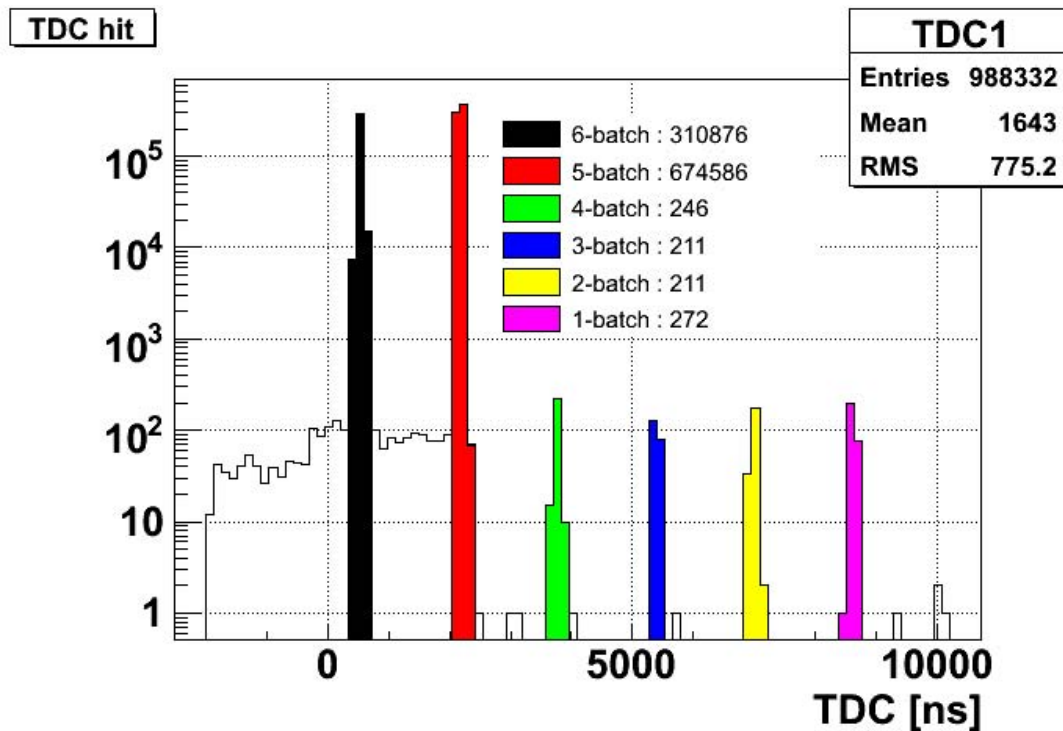


図 4.15 TDC タイミング情報。縦軸はイベント数 (対数スケール)。

12月初旬のビーム強度が弱くなっているが、これは上流の LINAC の真空に問題が生じたからである。

4.3 シリコン PIN フォトダイオードの測定

4.3.1 ビーム強度と応答の相関

ビームターゲット直前における陽子ビーム強度と、シリコン PIN フォトダイオードの応答の相関を図 4.19 に示す。応答はほぼ線形に見えるが、図 4.20 のように比を取ってみるとフラットにならず、低いビーム強度で明らかなずれを見ることが出来る。

低いビーム強度で応答が少ないという電荷の再結合とは逆の相関であり、検出器の特性としては理解しがたい。イオンチェンバー及びダイヤモンド検出器においても同様の現象が見られることもあり、この原因はビームそのものにあると思われる。低いビーム強度のパルスは、ビームの出し始めの調整や何らかの問題が生じたときなどに主に存在しており、強いビーム強度のときと比べると明らかにクオリティの悪いイベントを集めていることになる。また、図 4.16、図 4.17 を見直しても、収集電荷が大きく下がっているような 5×10^{12} ppp 以下のビーム強度にはほとんどイベントが無いことがわかる。

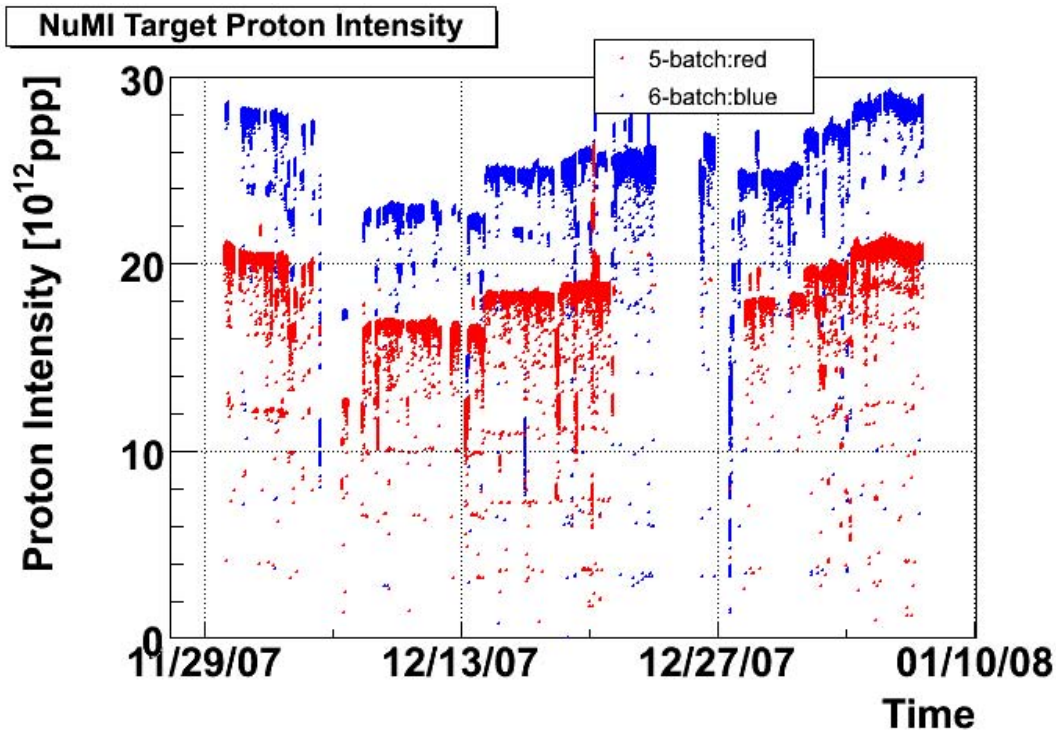


図 4.16 陽子ビーム強度の推移、各点は 1 スピル。

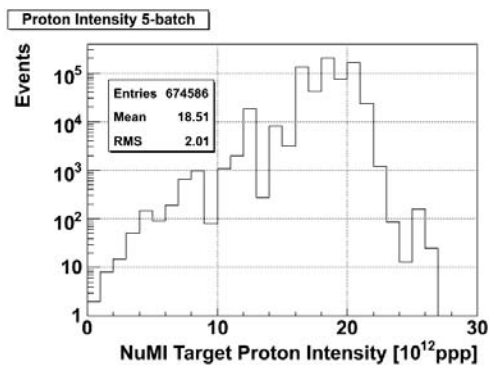


図 4.17 5 バッチモード、ビーム強度の分布。縦軸は対数スケール。

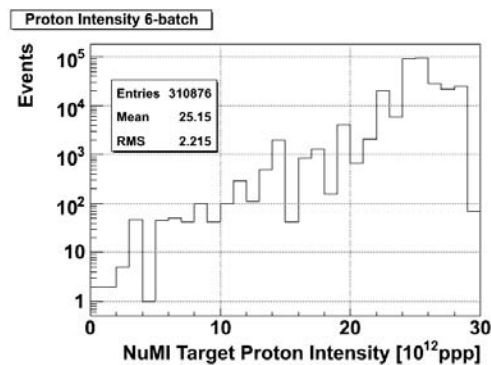


図 4.18 6 バッチモード、ビーム強度の分布。縦軸は対数スケール。

検出器の安定性を議論する際に、このようなイベントを含めるのは不適切である。そのため、基本方針として 10×10^{12} ppp 以上のイベントを用いて解析を行うことにした。

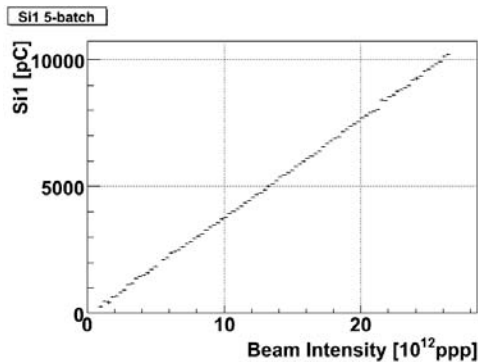


図 4.19 5 バッチモード、シリコン ch1 の収集電荷量とビーム強度の相関。

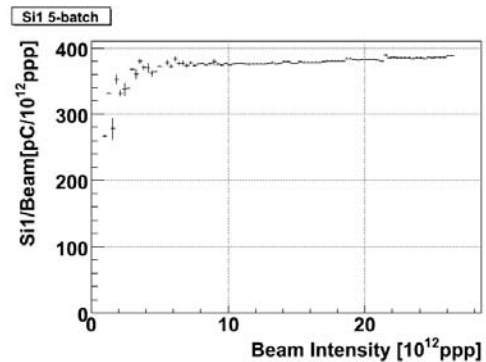


図 4.20 5 バッチモード、縦軸はビーム強度で規格化されたシリコン ch1 の収集電荷量。横軸はビーム強度。

4.3.2 シリコン PIN フォトダイオードの安定性

1 ヶ月半の測定におけるシリコン PIN フォトダイオードの応答の安定性を図 4.21、図 4.22 に示す。収集電荷量は陽子ビーム強度で規格化し、 10×10^{13} ppp でカットをかけている。ビームコンディションによると思われる変動はあるものの、応答は $\pm 1.5\%$ 程度のレベルで一定しており放射線損傷を受けている兆候なども見られない。5 バッチモード、12/24 付近のデータが大きくずれているように見えるが、これはこの期間に 5 バッチのパルスがほとんど無いためである (図 4.16 参照)。

また、Si2 については 12 月 11 日にセットアップを変えており (divider と減衰器の交換)、その前後のデータの間には 1% 程度のキャリブレーション誤差が存在する。

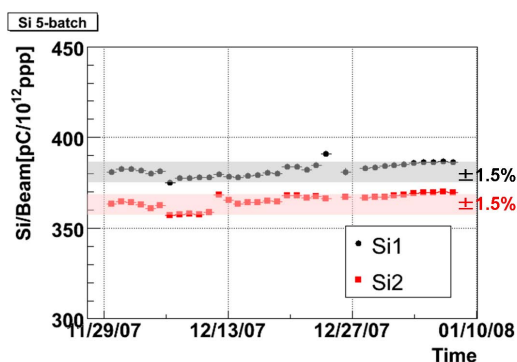


図 4.21 5 バッチモード、シリコン PIN フォトダイオードの安定性。

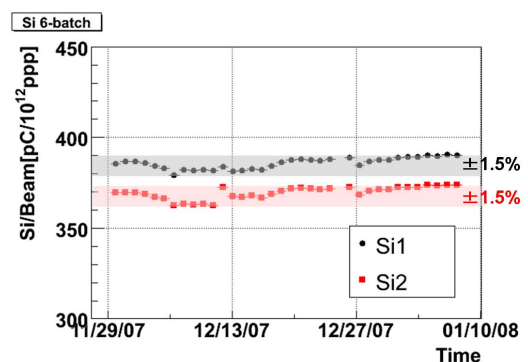


図 4.22 6 バッチモード、シリコン PIN フォトダイオードの安定性。

各チャンネルの収集電荷量を表 4.3 に、分布を図 4.23～図 4.26 に示す。ch2 については問題のある divider を使用していた 12 月 11 日までのデータを除いているため、総数が

若干少なくなっている。

シリコン PIN フォトダイオードにおいても 5 バッチと 6 バッチでは若干の違いが見られる。運転モードが違うことによって、ビーム品質またはビームの形に何らかの差がある可能性がある。平均を取ると Si1 は $383.5 \text{ pC}/10^{12} \text{ ppp}$, Si2 は $368.6 \text{ pC}/10^{12} \text{ ppp}$ となり Si1 の収集電荷量の方が 4.0% 多い。ただし、回路のキャリブレーション誤差が最大で 2.2%、シリコン PIN フォトダイオードの個体差が最大 2.2% あるので、この差は有意であるとは言えない。分布の RMS/MEAN は 1.3% 以下であり、ビーム自体の変動と測定精度を含めても非常に安定であるといえる。

測定されるミュオンの平均エネルギーを T2K と同じ (およそ 3 GeV) と仮定すると、表 3.2 より 1 粒子あたりの電子・ホール対生成数はおよそ 3.23×10^4 となる。この数字から見積もられる荷電粒子フラックスは、Si1 で $7.4 \times 10^4 / \text{cm}^2 / 10^{12} \text{ ppp}$ 、Si2 で $7.1 \times 10^4 / \text{cm}^2 / 10^{12} \text{ ppp}$ となる。この数字はシミュレーションによるビーム中心での値 ($8.5 \times 10^4 / \text{cm}^2 / 10^{12} \text{ ppp}$) とほぼ一致している。

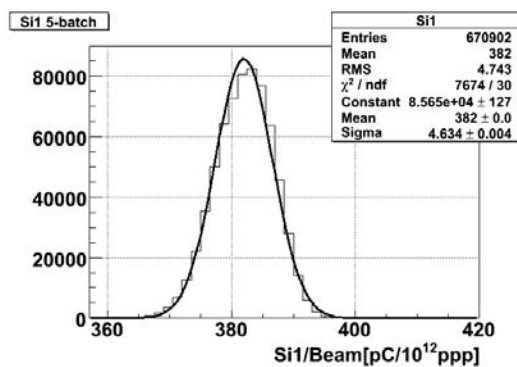


図 4.23 5 バッチモード、シリコン PIN フォトダイオード ch1 の収集電荷量。

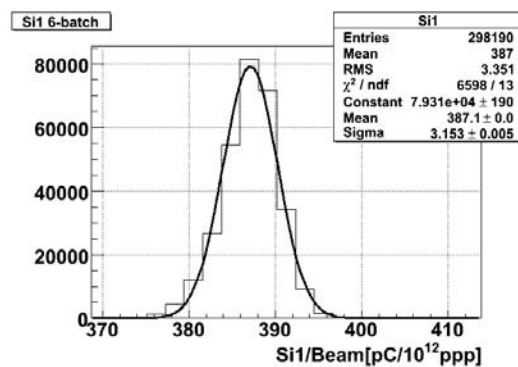


図 4.24 6 バッチモード、シリコン PIN フォトダイオード ch1 の収集電荷量。

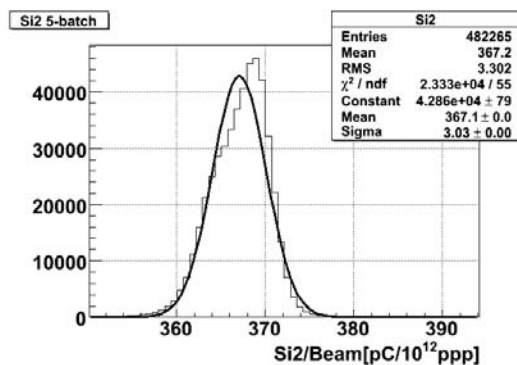


図 4.25 5 バッチモード、シリコン PIN フォトダイオード ch2 の収集電荷量。

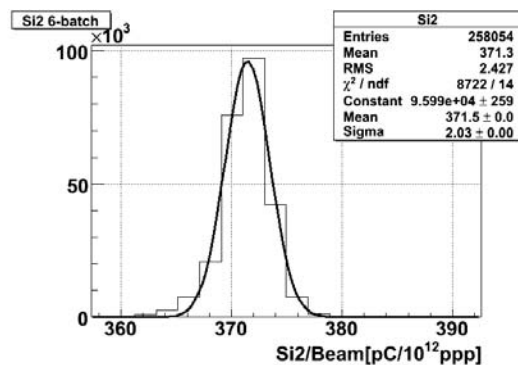


図 4.26 6 バッチモード、シリコン PIN フォトダイオード ch2 の収集電荷量。

表 4.3 陽子ビーム強度で規格化された シリコン PIN フォトダイオードの応答量。単位は $[\text{pC} / 10^{12} \text{ppp}]$

	5-batch		6-batch	
	MEAN	RMS	MEAN	RMS
Si ch1	382.0	4.74	387.0	3.35
Si ch2	367.2	3.30	371.3	2.43

4.3.3 シリコン PIN フォトダイオードの放射線耐性

Si1 のフラックス見積り ($7.4 \times 10^4 / \text{cm}^2 / 10^{12} \text{ppp}$) を用いて、測定期間中の累計荷電粒子数を計算すると $1.90 \times 10^{12} \text{particles/cm}^2$ となった (図 4.27 に推移を示す)。これは、T2K デザイン強度で予想される荷電粒子フラックス $1.6 \times 10^8 \text{ particles/cm}^2 / \text{spill}$ のおよそ $1.2 \times 10^4 \text{ spill} \simeq 12$ 時間分に相当する。立ち上げ当初の T2K コミッショニングビームにおいては、 $6.3 \times 10^5 \text{ particles/cm}^2 / \text{spill}$ であるので最低でも 122 日間は安定に動作し続けることを保証できる。

現状では、電子ビームを用いた測定の方がより高い制限を与えているが、ミュオンが支配的であり、陽子・中性子もわずかながら含む実際に近い環境での測定でも確認できたことの意義は大きい。今後、半年程度測定を続ければ放射線損傷による信号の減少が見える可能性がある。

4.4 平行平板型イオンチェンバーの測定

4.4.1 バッチ数による応答の違い

平行平板型イオンチェンバーは、イオン由来の信号成分が長いテイルを引くためビームタイミングによって ADC ゲート内で積分される割合が違ってくる。

TDC カウント (先頭バッチのタイミング) とイオンチェンバー ch1 の応答量の相関を図 4.28 に示す。ただし、図 4.15 で色の付いたバッチ数の判断できるイベントのみをプロットしている。ビーム強度のカットは $\text{バッチ数} \times 2 \times 10^{12} \text{ppp}$ でかけた。明らかに早いタイミングのイベント (6 バッチ側) の収集電荷量が多くなっている。

それぞれのバッチ数での IC1 の収集電荷量の分布を図 4.29 に、平均値を表 4.4 にまとめる。バッチ数に伴って収集電荷量が増加しているのが見て取れる。また、4 バッチ以下ではイベント数が少なく、ビームも不安定な場合が多いので測定精度が悪くなっている。

この増加がイオン由来の信号成分によるものと検証するため、数値計算と比較を行う。

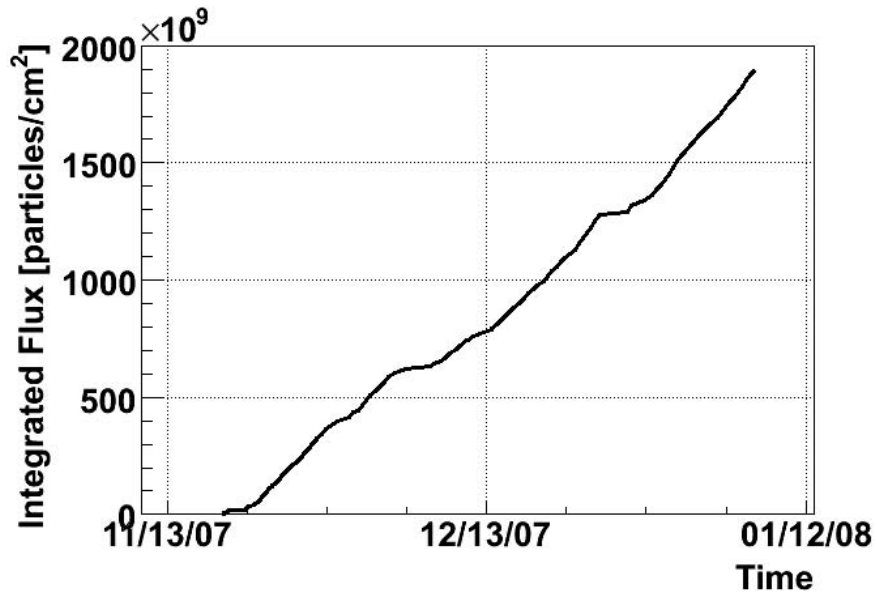


図 4.27 Si1 に対する累計荷電粒子フラックスの見積り。

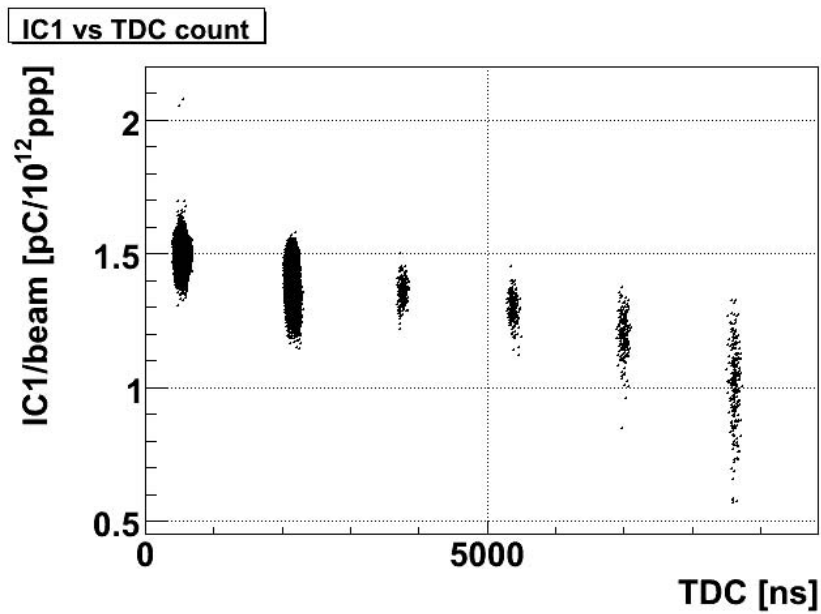


図 4.28 先頭バッチのタイミングと、IC1 収集電荷量の関係。

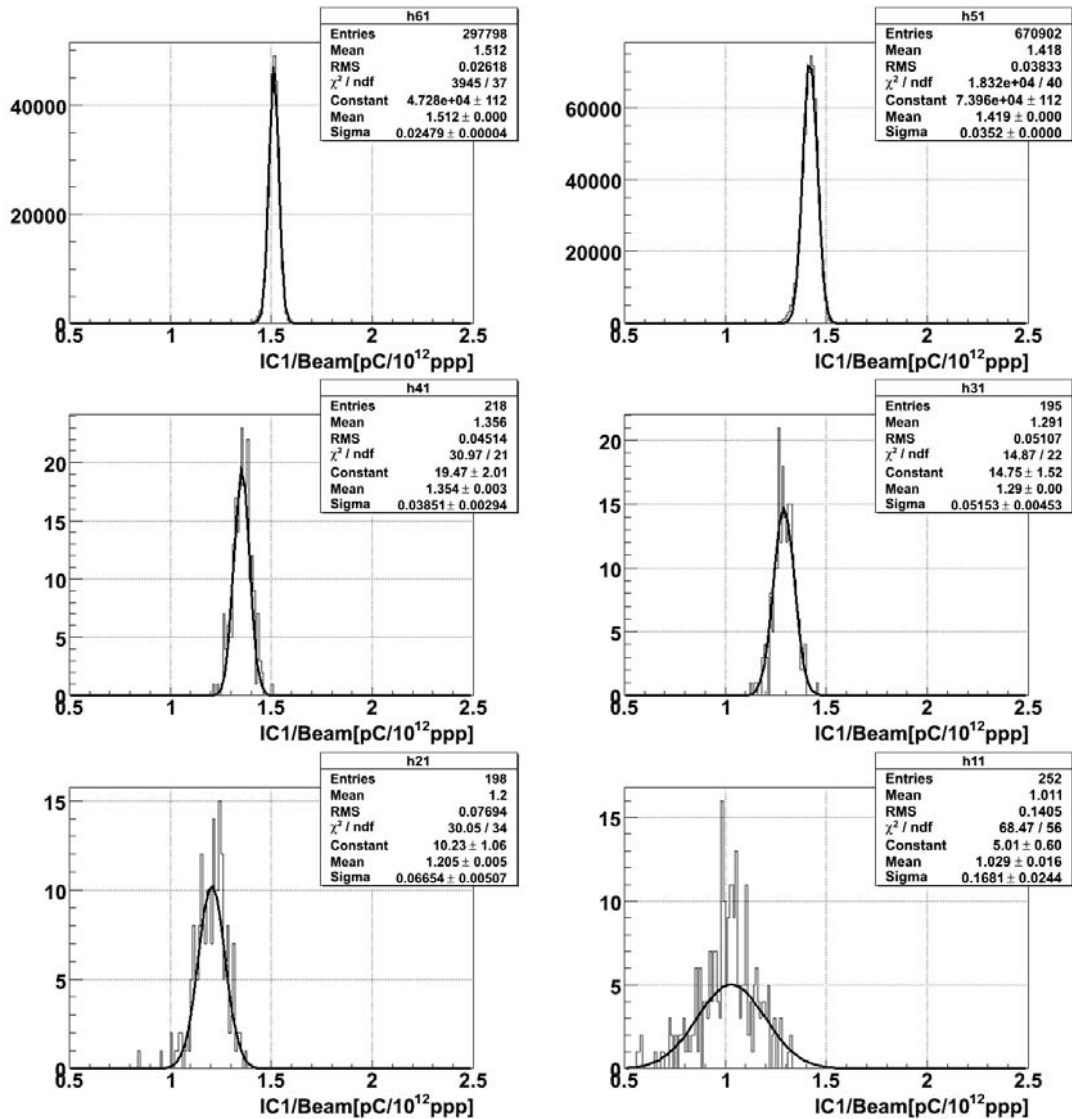


図 4.29 各バッチ数に対するイオンチェンバーの収集電荷量。陽子ビーム強度で規格化している。左上 6 バッチ、右上 5 バッチ、左中 4 バッチ、右中 3 バッチ、左下 2 バッチ、右下 1 バッチ。

1 バッチ波形から 6 バッチ波形のそれぞれについて、電子のドリフト時間 400ns, イオンの移動度 $20 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$, 印加電場 $200 \text{ V} / 3 \text{ mm}$ の条件で、1 ns ステップで波形を計算した。バッチ間隔は $1636 \mu\text{s}$, バッチ幅は $1.579 \mu\text{s}$ で、バンチ構造は無視しバッチ内でビーム強度は一定とした。回路等の時定数は考慮していない。計算された波形を図 4.30 に示す。6 バッチ波形のみ、先頭バッチのサイズは 2 倍である。縦軸は相対スケール。

電荷積分時間幅は、オシロスコープによる波形とゲート信号のタイミングを図 4.10 から読み取るとビームタイミング後 $10.55 \pm 0.1 \mu\text{s}$ である (誤差はビームタイミングとトリガータイミングの間の jitter)。この積分時間内に入るイオン由来の信号成分量を計算する

表 4.4 陽子ビーム強度で規格化された イオンチェンバー ch1 の応答量。単位は [pC / 10¹² ppp]

バッチ数	平均値	RMS
6	1.512	0.026
5	1.418	0.038
4	1.356	0.045
3	1.291	0.051
2	1.200	0.055
1	1.011	0.141

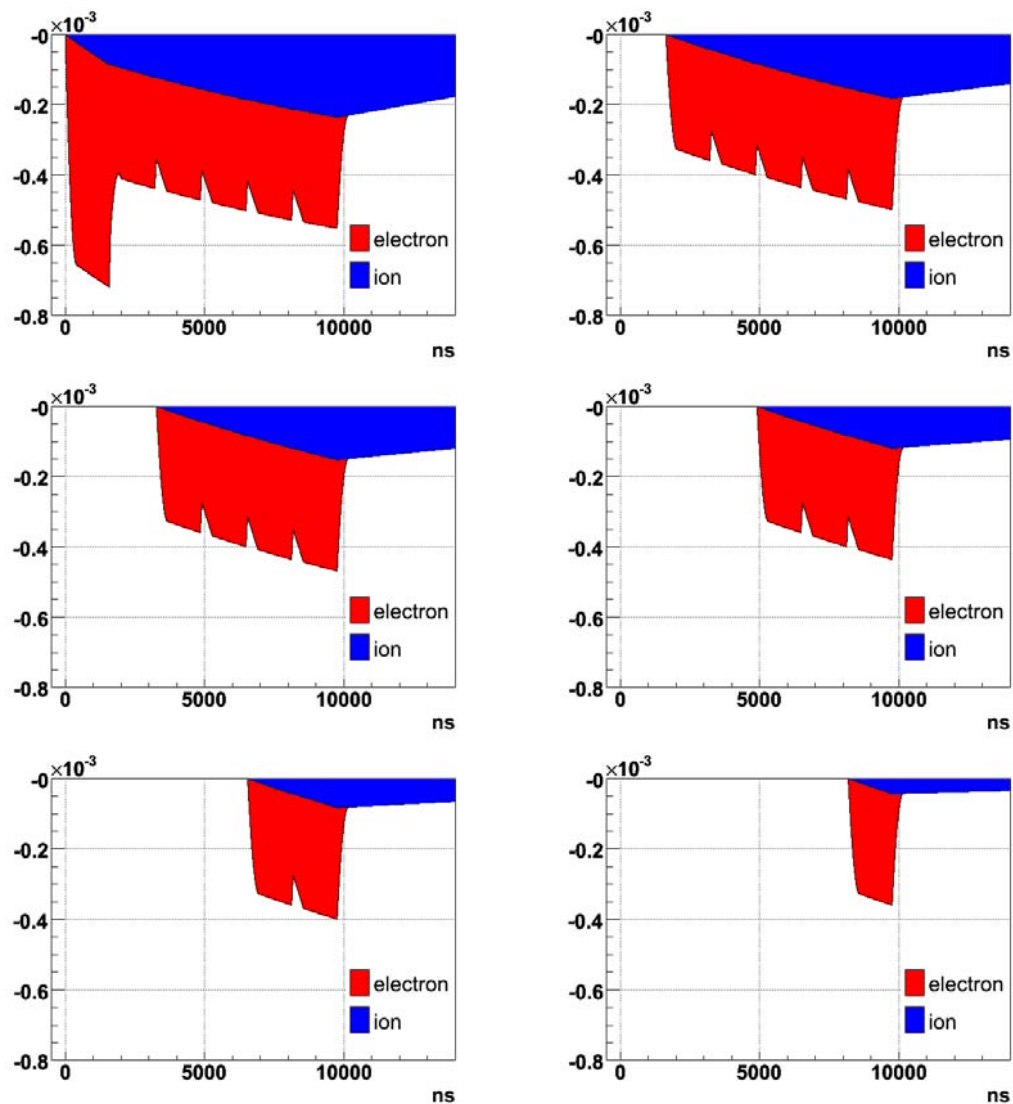


図 4.30 各バッチ数に対するイオンチェンバー波形の計算

と、表 4.5 のようになった。6 バッチモードにおいては、イオン由来の信号の実に 46% が積分されている。

表 4.5 ADC ゲート内で積分されるイオン由来の信号の割合。

バッチ数	積分されるイオン由来の信号成分の割合
6	46.1 ± 0.6 %
5	37.4 ± 0.7 %
4	31.9 ± 0.7 %
3	26.2 ± 0.8 %
2	20.0 ± 0.8 %
1	13.5 ± 0.8 %

データ (表 4.4) との増加率の比較を行ったのが図 4.31 である。縦軸は 6 バッチ時の点を基準に規格化している。

4 バッチ以下ではやはりビームクオリティが悪いためかデータ点のほうが下にあり、特に 1 バッチでその傾向が顕著である。

5 バッチと 6 バッチの間での増分は測定データで 6.2%、計算値で 6.0% とよく一致しており、移動度 $\simeq 20 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ の He_2^+ イオン由来の信号によって応答の違いを理解することができる。

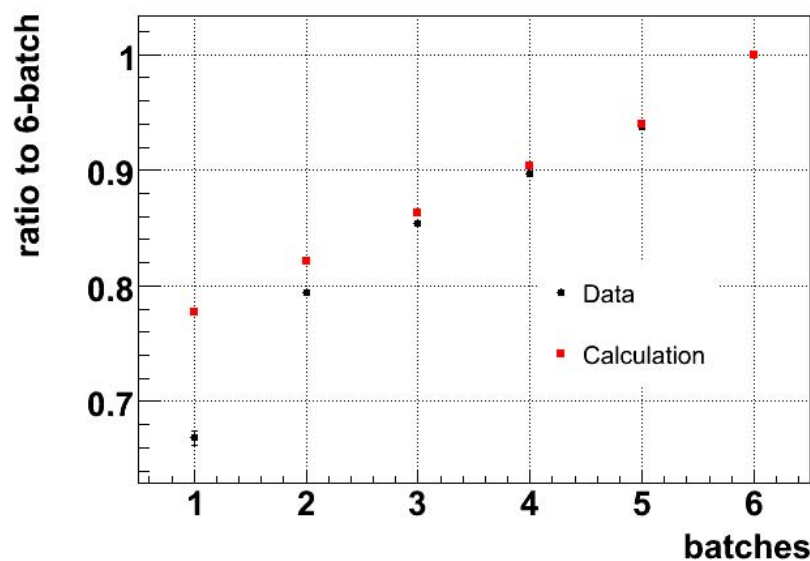


図 4.31 データと計算値の比較。6 バッチの収集電荷量で規格化。

4.4.2 平行平板型イオンチェンバーの安定性

環境の変化

応答が温度にわずかに依存するのみである半導体検出器とは異なり、イオンチェンバーの安定性を議論するうえでは環境変化が非常に重要である。

NuMI の各種環境モニターから取得したガス圧・ガス温度・ガス流量の変動を以下の図 4.32、図 4.33、図 4.34 にそれぞれ示す。ガス圧は大気圧の変動を反映しており、平均値 797.7 Torr を中心に最大 $\pm 2\%$ の範囲内で変動している。一方のガス温度は、地下室内で室内灯以外の熱源がほとんどないためか平均 $27.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ を中心に $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ で安定している。絶対温度にすると $\pm 0.17\%$ の差でしかなく、温度由来の変動は無視できる範囲内と思われる。

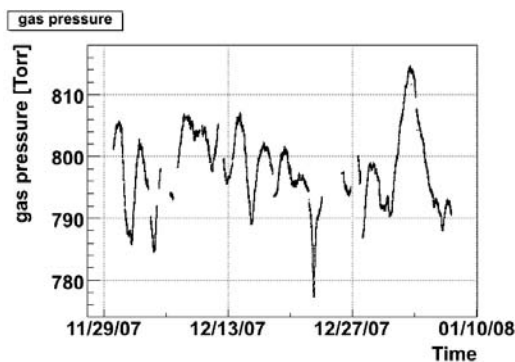


図 4.32 ガス圧力の変動。

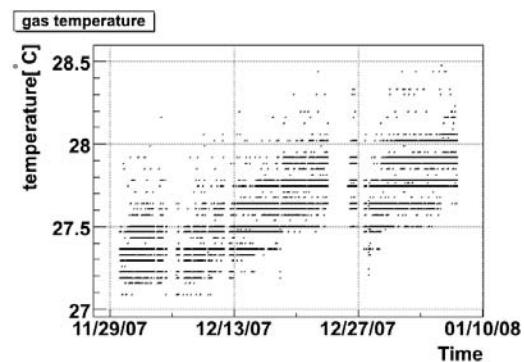


図 4.33 ガス温度の変動。

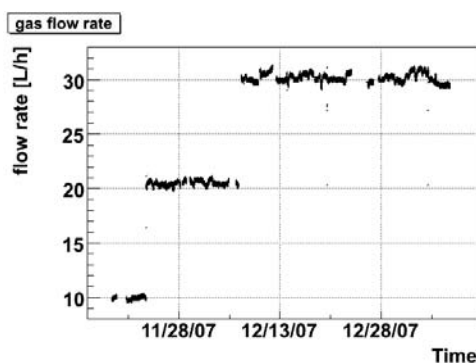


図 4.34 ガス流量の変動。

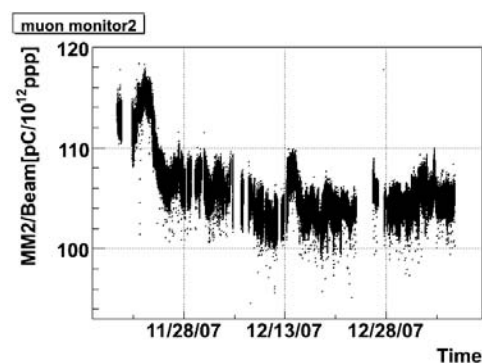


図 4.35 NuMI muon monitor 2 の収集電荷量の推移。

ガス流量のみ、実験のセットアップを固定させる以前 (11月30日以前) のデータもプロットしている。ガス流量は当初 10L/h であったものが、20L/h, 30L/h へと段階的に引き上げられた。これは NuMI muon monitor の収集電荷量が以前よりも多く、ガス純度が悪いことが疑われたためである。実際に、図 4.35 で NuMI muon monitor の収集電荷

量の推移を見てみるとガス流量が 10L/h から 20L/h に切り替えられた直後に大きく減少しているのが見て取れる。20L/h から 30L/h へと切り替えた際には、ガス純度の改善が頭打ちになったためか、それほど大きな変化は見られない。流量 10L/h, 20L/h, 30L/h における muon monitor 2 の収集電荷量 (10^{12} ppp あたり) はそれぞれ、116.1 pC, 108.4 pC, 106.4 pC である (ガス流量を切り替えてから 3 日以上経過した後のイベントのみを平均した)。長期試験の前に我々が測定した酸素濃度は、muon monitor 2 の排気がバブラーに入る地点で約 15 ppm であったが、この酸素濃度から見積もられる窒素濃度 ~ 100 ppm では 10% の信号量の差を説明するには少なすぎる。チェンバー内もしくは周辺において、何らかのガスの発生源があるのかも知れない。

T968 イオンチェンバーの ch1 6 バッチ時で同様の値を求めると 10L/h, 20L/h, 30L/h で収集電荷量が (10^{12} ppp あたり) それぞれ 1.619 pC, 1.504 pC, 1.512 pC となった。ただし、10L/h の時にはゲート位置、ゲート幅が異なるため、単純に比較はできない。イオン由来の信号の積分されている割合はそれぞれのゲートで $51.1 \pm 0.6\%$, $46.1 \pm 0.6\%$ と見積もられるため、電子由来の信号成分のみになるように補正をかけると 1.071 ± 0.004 pC, 1.029 ± 0.004 pC, 1.035 ± 0.004 pC (ここに付けた誤差はゲート幅不定性のみ) となる。つまり 10L/h から 20L/h へ切り替えた際の信号減少量は約 4% で NuMI muon monitor の半分程度、20L/h から 30L/h へ切り替えた際には若干増加している (ビーム由来の変動幅の範囲内であると考えられる)。差が出た原因としては、電荷積分時間が挙げられる。NuMI muon monitor は積分時間 1 ms で積分して波高を読み出しているためイオン由来の電荷まで全て積分しているが、T968 実験のイオンチェンバーは約 $11\mu\text{s}$ のゲート幅で電荷を直接積分しているため penning イオン化によって電離されたヘリウム以外のガス分子のイオン (典型的に He_2^+ イオンよりも 10 倍以上遅い) による信号は数% 以下しか積分できない。そのため、Jesse 効果が電子による分のみしか見えないと考えられる。

この結果より考察できることは、純粋なヘリウムガスを用いて安定した応答を得るためには penning イオン化による電離の量を一定にせねばならない、つまりガスの純度に非常に気を配る必要があるということである。

T2K 実験では応答速度を高めるためにヘリウムに窒素を 1% ないしはそれ以上混合したガスを使用する予定であるが、1% 以上の窒素が penning イオン化の量を常に最大限にするため、不純ガスの濃度に多少の変動があっても純ヘリウムガスのように大きな応答の変動は見られないと考えられる。この点からも T2K 実験では、混合ガスを用いるべきである。

チャンネル間及び NuMI muon monitor2 との比較

応答の安定性をまずチャンネル間で比較してみる。図 4.36, 図 4.37 がそれぞれ 5 バッチモード、6 バッチモードにおける陽子ビーム強度で規格化された収集電荷量の推移であ

る。参考として、NuMI muon monitor 2 (81ch) の平均収集電荷量を同時にプロットした。陽子ビーム強度 10×10^{12} ppp 以下のイベントは今まで同様カットしてある。

それぞれのチャンネルの応答は $\pm 3\%$ 程度の幅で変動しているが、3チャンネル全てで揃って変動しているように見える。これは、同じチューブにある故にガス圧の変化、ガス温度の変化、ガス純度の変化の全てについて同じように影響を受けているためと思われる。比を取ってプロットしてみると、ch1 と ch2 の比は $\pm 0.15\%$ 内 (図 4.38)、ch1 と ch3 の比は $\pm 0.4\%$ 内 (図 4.39) で一定である。

イオンチェンバーについて、チャンネル間で連動しない変動は1ヶ月以上の期間に渡り $\pm 0.4\%$ 以内で抑えられていると言える。

NuMI ミューオンモニターとの相関はそれに比べると目に見えて悪くなっている。これは配管に距離があるため、ガス純度の変動に時間差があること、ガス純度に対する応答の変化量に違いがあること、中心付近に3chのみ並べている我々のチェンバーと異なり、周辺部まで広い範囲をカバーしているためビームの形の変化の現れに差があることなどが考えられる。それでも、ガス圧、ガス温度による応答の変動はキャンセルするものと思われ、実際に比をプロットしてみると (図 4.40, 図 4.41)、LINAC の真空トラブルが解決してビーム安定しだした12月15日以降では $\pm 1\%$ 程度の変動幅に収まっている (12月24日付近の5バッチが大きくずれているが、これはこの期間にほとんど5バッチのパルスが無かったためである。)

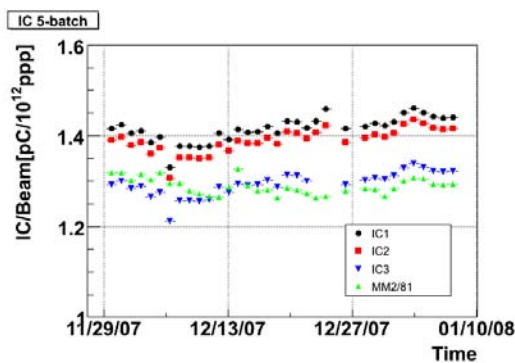


図 4.36 5バッチモード、平行平板型イオンチェンバーの安定性。

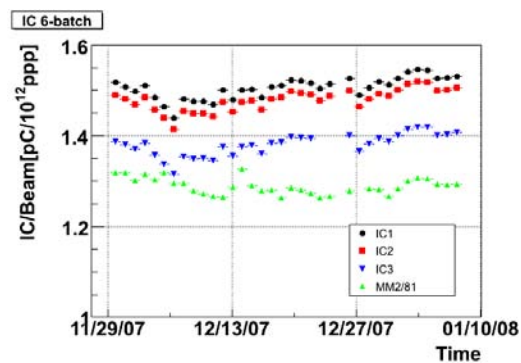


図 4.37 6バッチモード、平行平板型イオンチェンバーの安定性。

再び、T968 イオンチェンバーのチャンネル間の比較に話を戻す。ch1 と ch2 の収集電荷量の違いは、ch1 を基準にして平均 1.75% 、同じく ch1 と ch3 の違いは平均 8.41% である。ビーム中心とプレート中心の距離は ch1 が上側に 8.5 cm 、ch2 が下側に 16.5 cm 、ch3 が 41.5 cm であり、これらをグラフにすると図 4.42 のようになる。フィットは3点3パラメーターで自由度0のためあくまでも参考程度にしか意味を持たないが、3つのチャンネル間の応答の違いは 100 cm 程度の広がりビームの形を見ているとして理解で

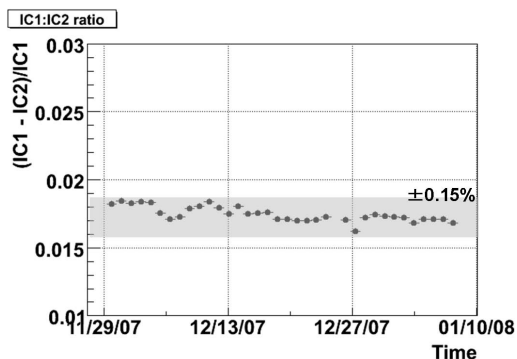


図 4.38 平行平板型イオンチェンバー ch1 と ch2 の比較。

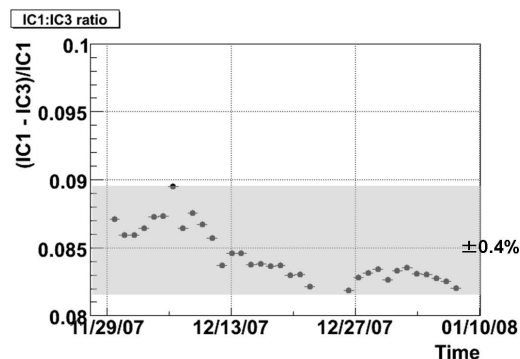


図 4.39 平行平板型イオンチェンバー ch1 と ch3 の比較。

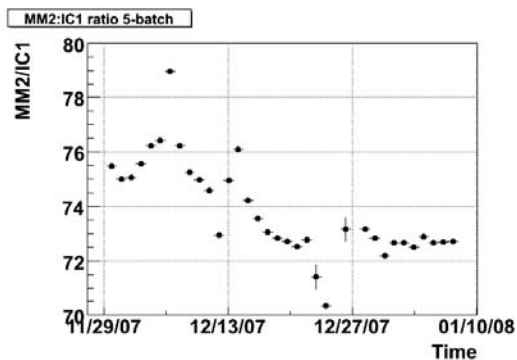


図 4.40 5 バッチモード、平行平板型イオンチェンバー ch1 と NuMI muon monitor2 の比較。

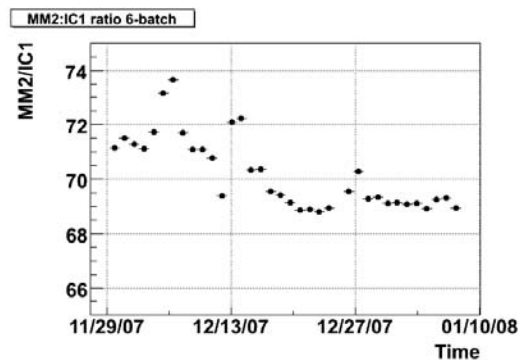


図 4.41 6 バッチモード、平行平板型イオンチェンバー ch1 NuMI muon monitor2 の比較。

きる。

圧力および温度変動による応答の変化

ヘリウムガスは希ガスであるので、極めて理想気体に近い性質を示す。そのため、理想気体の状態方程式を用いてガス圧・ガス温度の変動の補正を施し、応答の安定性がどのように変わるかを見る。具体的には以下の式を用いる。ここで P, T はそれぞれ圧力・絶対温度の測定値、 \bar{P}, \bar{T} はそれぞれ圧力・絶対温度の測定期間内の平均値である。T968 実験の環境では温度の変動は小さく、主に圧力の変動が補正される。

$$Q_{corrected} = Q_{measured} \times \frac{P}{\bar{P}} \times \frac{\bar{T}}{T} \quad (4.1)$$

まず収集電荷量とガス圧の相関を見る。上流の LINAC の真空トラブルが解決しビームの安定しだした 12 月 15 日以降のデータを用いた。図 4.43, 図 4.44 が T968 実験イオンチェンバー ch1 についてのプロット、図 4.45, 図 4.46 が NuMI muon monitor2 についてのプロットである。

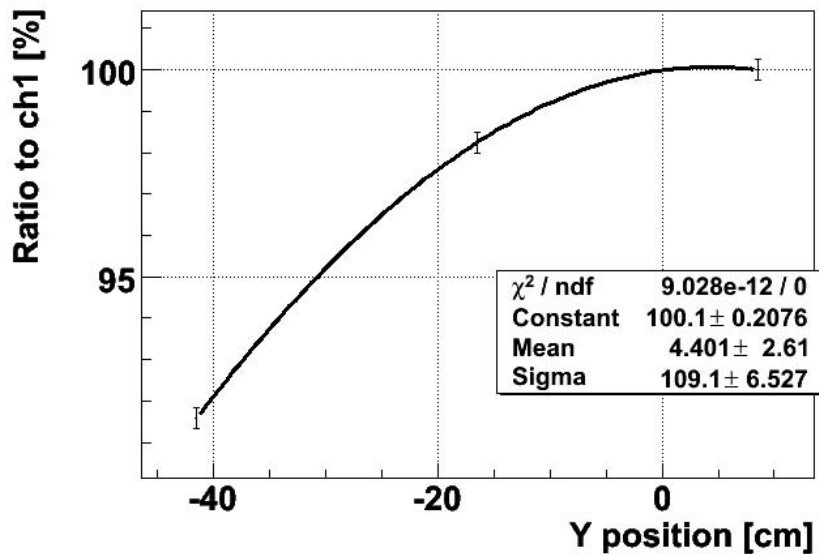


図 4.42 イオンチェンバー 3 チャンネルの収集電荷量と位置の関係。誤差棒は個体差。

かなりのばらつきはあるものの、一次関数でフィットした結果から求まる収集電荷量の増加率は IC1 の 5 バッチ、6 バッチでそれぞれ 0.11%/Torr , 0.11%/Torr 、 NuMI muon monitor2 の 5 バッチ、6 バッチでそれぞれ 0.10%/Torr , 0.14%/Torr であり、いずれも 800 Torr 前後で理想気体の状態方程式から予想される 0.125%/Torr に近い増加率である。

図 4.43 から図 4.54 に、各検出器の式 (4.1) によって補正を施す前と後の収集電荷量推移を示す。これを見ると、局所的には補正の効果が見受けられるが、全体としての応答のばらつきはさほど減少していない。(例えば、IC1 6 バッチでは最大 2.5% 程度であったばらつきが、最大 2.0% 程度に減少している。) 補正の大きさは最大でも $\pm 2\%$ 、RMS にすると $\pm 1\%$ 程度であるため、ビーム由来の応答の変化に隠れてしまっているものと思われる。

T968 イオンチェンバーの各チャンネルの補正後の推移を注意深く見てみると、ビーム強度の推移 (図 4.55, 図 4.56) と何らかの相関を見せていることが分かる。NuMI muon monitor2 ではこの傾向は顕著ではない。ビーム強度が高いほど、T968 イオンチェンバーが測定している中央付近にフラックスが集中するような傾向があるのかも知れない。

このままではガス圧・温度の補正が有効であったかの判断が出来ないので、T968 実験イオンチェンバー ch1 と ch2 を陽子ビーム強度ではなく、同じ位置にあるシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量で規格化することで、ビームの形の変化による影響のキャンセルを試みる。

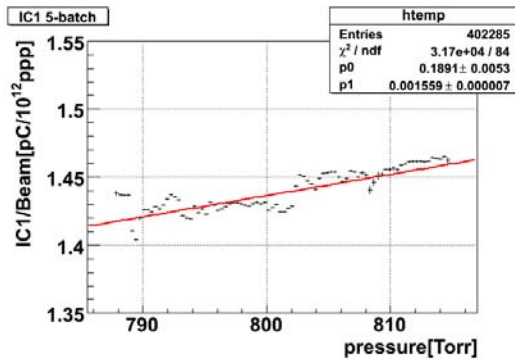


図 4.43 5 バッチモード IC1 ガス圧力と収集電荷量の相関。

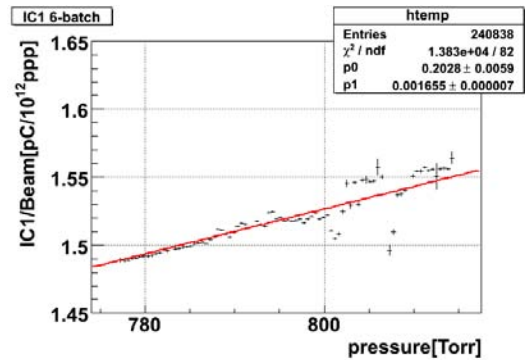


図 4.44 6 バッチモード IC1 ガス圧力と収集電荷量の相関。

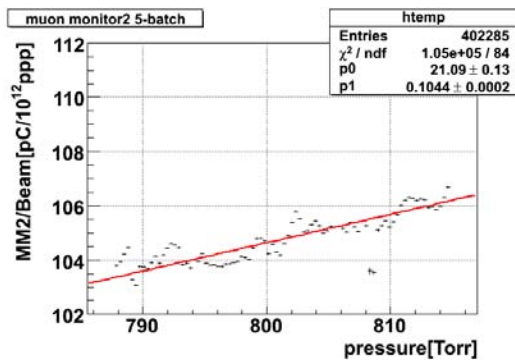


図 4.45 5 バッチモード NuMI muon monitor2 ガス圧力と収集電荷量の相関。

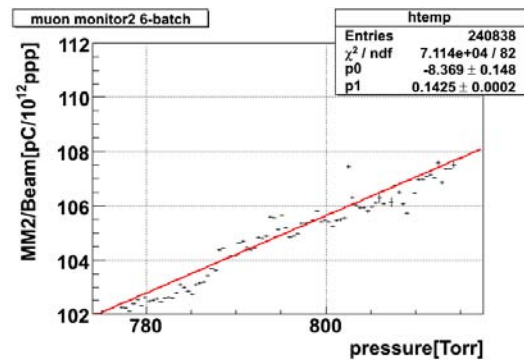


図 4.46 6 バッチモード NuMI muon monitor2 ガス圧力と収集電荷量の相関。

図 4.57 から図 4.60 を見ると、補正後の応答比はよく安定している。5 バッチモードの 12 月 22 日から 28 日までの期間はほとんどイベントが無いために多少ずれのある点も見られるが、それらの点を除けば、補正後のイオンチェンバーとシリコン PIN フォトダイオードの応答比は半月以上の期間に渡り $\pm 1.2\%$ 内で安定しており、ガス圧・温度の補正は少なくともこのレベルの精度で可能であると結論付けられる。

このことよりイオンチェンバーのチャンネル間で連動する系統誤差 (ガス圧による変動の補正精度) を 1.2% 、シリコン PIN フォトダイオードの安定性は全体で 1.2% 以下と評価する。

収集電荷量と電子・イオン対生成数の見積り

イオンチェンバーの各チャンネルの収集電荷量を図 4.61 から図 4.66 と表 4.6 にまとめる。それぞれのデータは平均圧力 797.7Torr, 27.6°C を基準に補正されている。収集電荷量は 25pC 前後しかないのでパルス毎の測定精度はあまり良くなく、分布の広がりほぼ測定精度が決めている。RMS/MEAN は 2~3 % である。

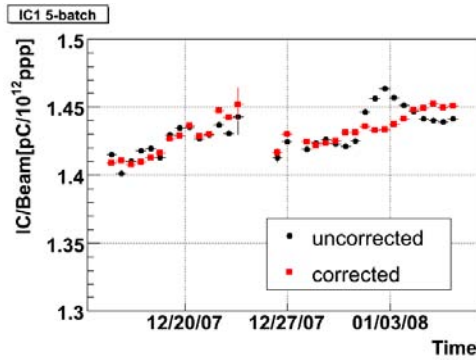


図 4.47 5 バッチモード IC1 圧力・温度補正。

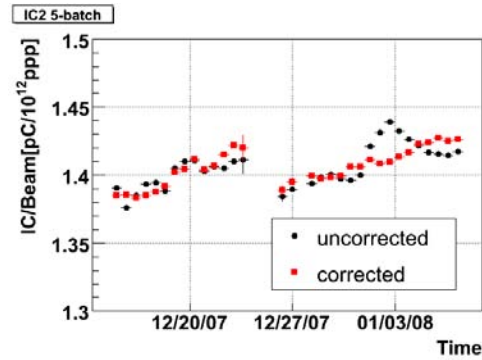


図 4.48 5 バッチモード IC2 圧力・温度補正。

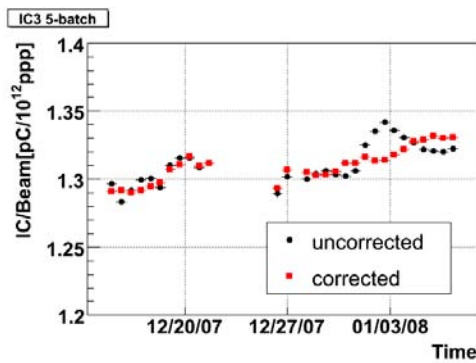


図 4.49 5 バッチモード IC3 圧力・温度補正。

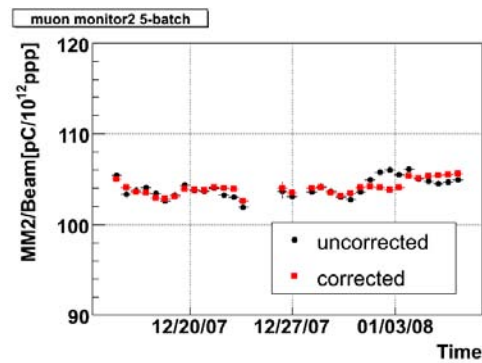


図 4.50 5 バッチモード NuMI muon monitor2 圧力・温度補正。

表 4.6 陽子ビーム強度で規格化された イオンチェンバーの応答量。単位は [pC / 10¹² ppp]

	5-batch		6-batch	
	MEAN	RMS	MEAN	RMS
IC ch1	1.416	0.039	1.518	0.028
IC ch2	1.391	0.039	1.494	0.028
IC ch3	1.296	0.039	1.391	0.029

IC ch1, 5 バッチの 10^{12} ppp あたりの収集電荷量 1.416 pC と、Si1 の収集電荷量から見積もった荷電粒子フラックス $7.4 \times 10^4 / \text{cm}^2 / 10^{12}$ ppp、波形の数値計算から求めた 5 バッチ時のイオン由来信号の積分される割合 37.4%、プレート面積 7.5 cm^2 、これらの数値を用いてイオン・電子対生成数を求めると $3.09 / 3 \text{ mm} = 10.3 / \text{cm}$ となる。同じく、6 バッチについて収集電荷量 $1.518 \text{ pC} / 10^{12} \text{ ppp}$ 、イオン由来信号の積分される割合 46.1% を用いると、 $3.12 / 3 \text{ mm} = 10.4 / \text{cm}$ となる。

さらに平均ガス圧 797.7Torr, 平均温度 27.6°C と表 3.2 から 3GeV ミューオンのヘリウム中での電離損失を用いると、W 値は 5 バッチの測定から 40.0eV, 6 バッチの測定が

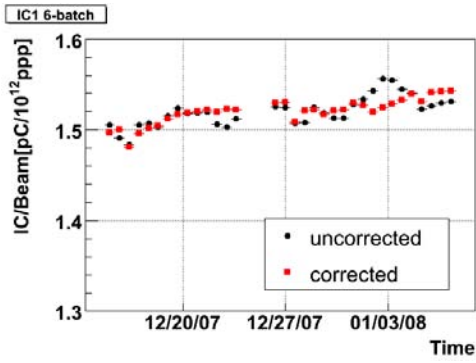


図 4.51 6 バッチモード IC1 圧力・温度補正。

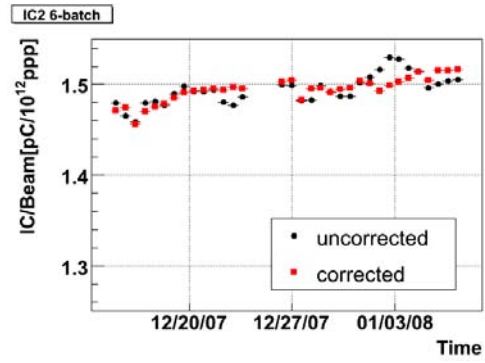


図 4.52 6 バッチモード IC2 圧力・温度補正。

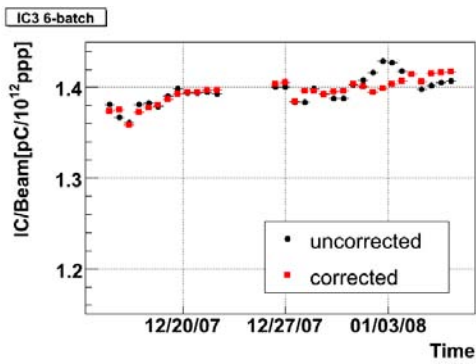


図 4.53 6 バッチモード IC3 圧力・温度補正。

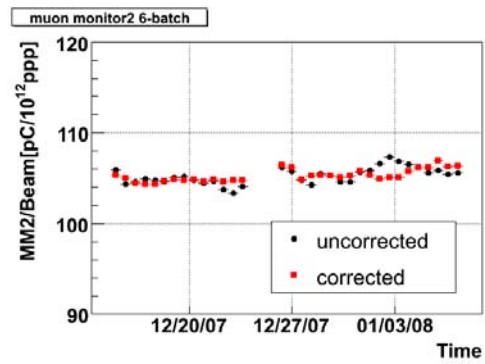


図 4.54 6 バッチモード NuMI muon monitor2 圧力・温度補正。

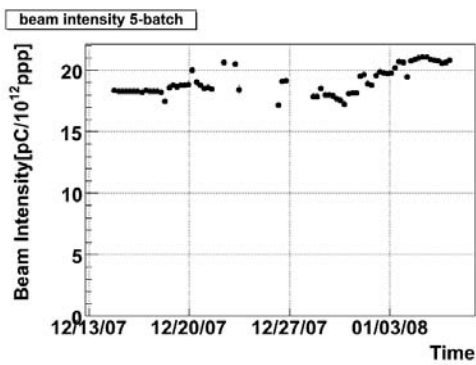


図 4.55 5 バッチモード、平均陽子ビーム強度の推移。

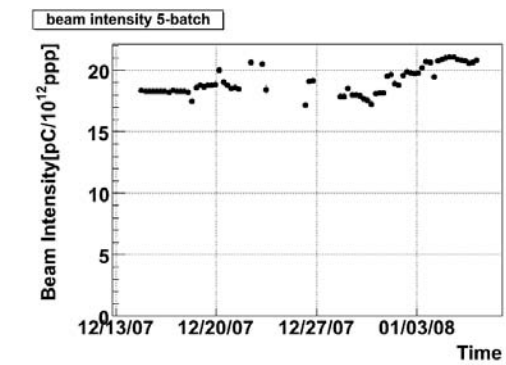


図 4.56 6 バッチモード、平均陽子ビーム強度の推移。

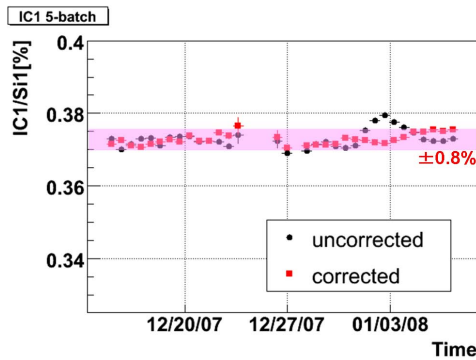


図 4.57 5 バッチモード IC1 圧力・温度補正。Si1 の収集電荷量との比。

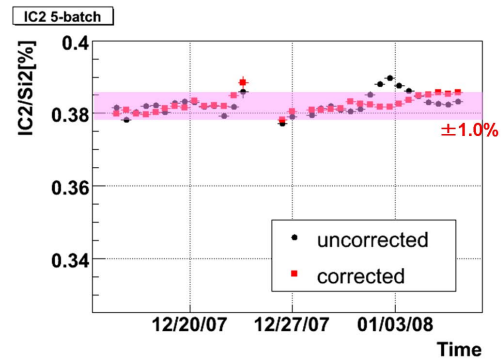


図 4.58 5 バッチモード IC2 圧力・温度補正。Si2 の収集電荷量との比。

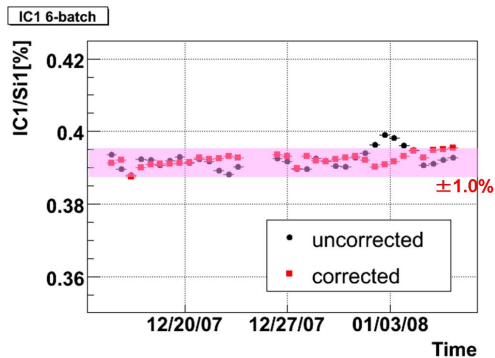


図 4.59 6 バッチモード IC1 圧力・温度補正。Si1 の収集電荷量との比。

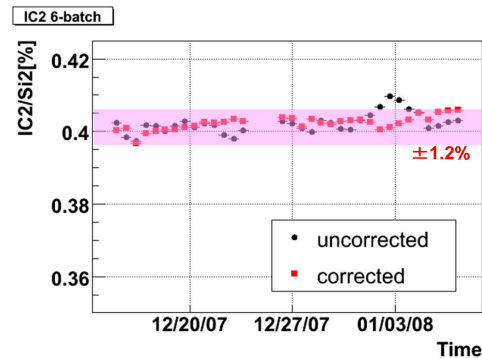


図 4.60 6 バッチモード IC2 圧力・温度補正。Si2 の収集電荷量との比。

ら 40.3eV となり高純度のヘリウムにおける値 (40 ~ 46 eV) の範囲内である。電子ビームを用いた試験より 20% ほど高い結果であり、このことも電子ビームでの試験において、空気以外の不純ガス (アルゴンガスの可能性が濃厚である) が混入していたことを支持している。

4.5 CVD ダイヤモンド検出器の測定

4.5.1 立ち上がり応答

図 (4.67) は半日ほどの期間にわたり、同じ位置になるシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量で規格化されたダイヤモンド検出器の収集電荷量をプロットしたものである。ビームが止まる度に収集電荷量が減少し、連続して照射されるにしたがってゆっくりと応答が立ち上がってゆく様子が見て取れる。この挙動は電子ビームを用いた試験で見えていた挙動と同じである。

さらに拡大してみると、最初の数パルスで急激に立ち上がった後、数分程度の時定数を

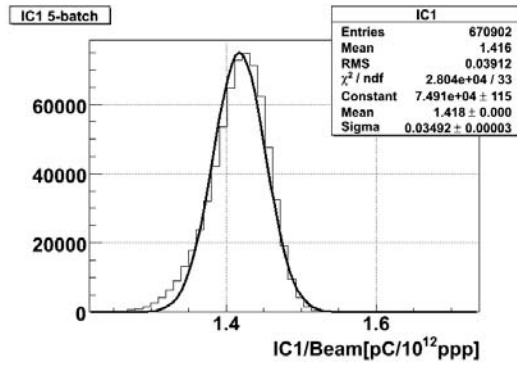


図 4.61 5 バッチモード、イオンチェンバー ch1 の収集電荷量。ガス圧・温度補正済み。

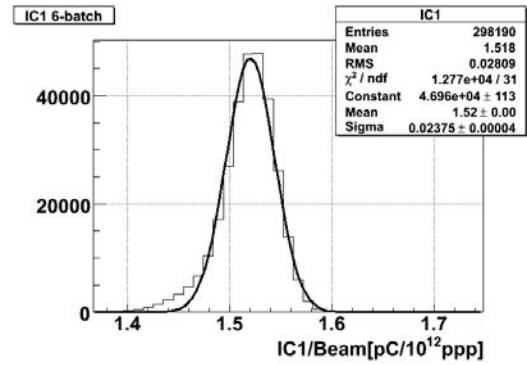


図 4.62 6 バッチモード、イオンチェンバー ch1 の収集電荷量。ガス圧・温度補正済み。

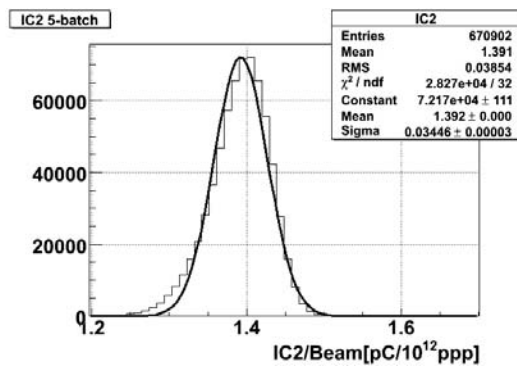


図 4.63 5 バッチモード、イオンチェンバー ch2 の収集電荷量。ガス圧・温度補正済み。

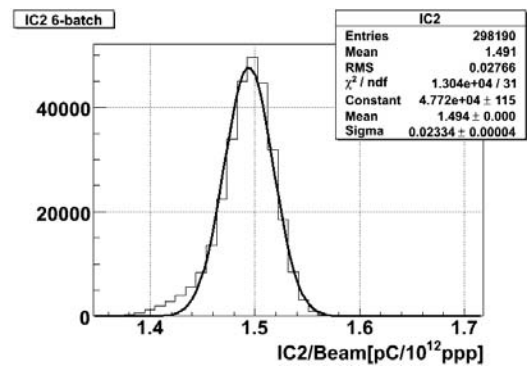


図 4.64 6 バッチモード、イオンチェンバー ch2 の収集電荷量。ガス圧・温度補正済み。

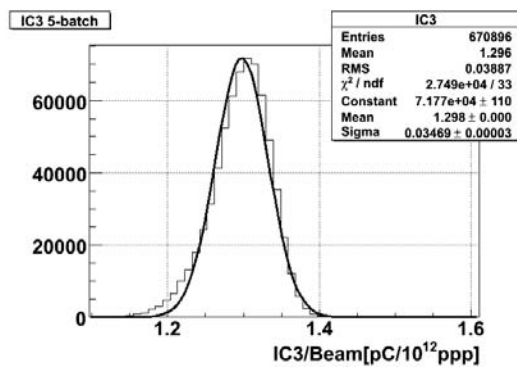


図 4.65 5 バッチモード、イオンチェンバー ch3 の収集電荷量。ガス圧・温度補正済み。

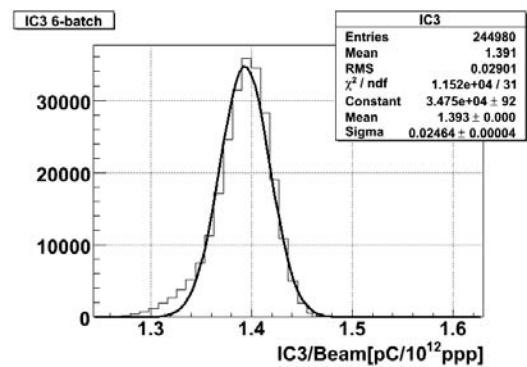


図 4.66 6 バッチモード、イオンチェンバー ch3 の収集電荷量。ガス圧・温度補正済み。

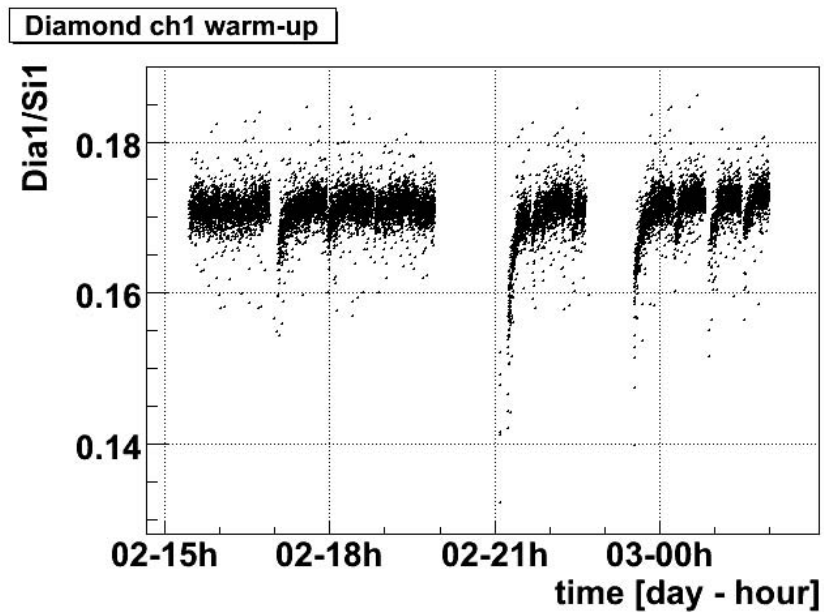


図 4.67 ダイヤモンド検出器の立ち上がり応答。

持って回復している (図 4.68)。この立ち上がりを、式 (2.4) を用いてフィットを試みた
が、最初の急激な立ち上がりを再現しないため式 4.2 のように 2 つの時定数成分に拡張し
てフィットを行うと、時定数はそれぞれ 6.9 秒、447 秒となった。

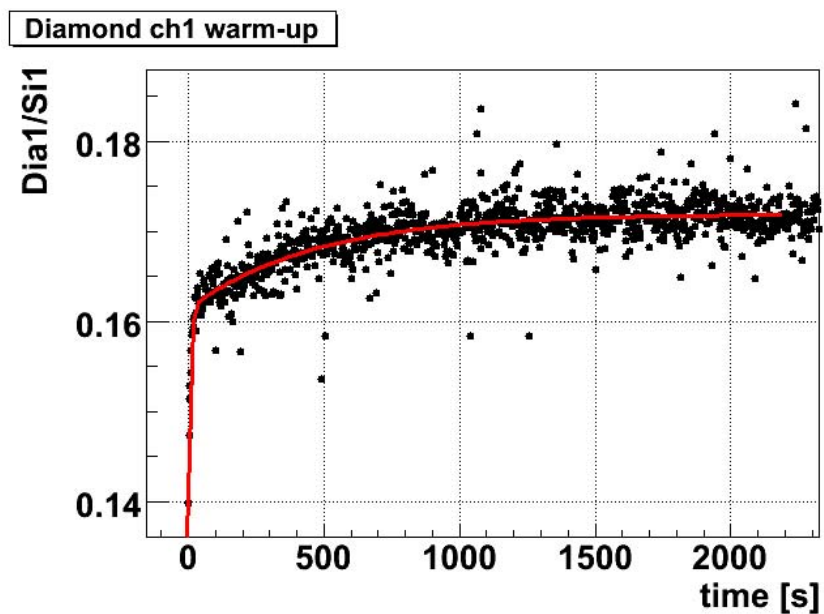


図 4.68 ダイヤモンド検出器 ch1 の立ち上がり応答。拡大図。

$$Q = \frac{Q(\infty)}{1 + \alpha_1 \exp(-t/\tau_1) + \alpha_2 \exp(-t/\tau_2)} \quad (4.2)$$

また、収集電荷量の減少はビーム照射が止まっていた時間との相関を持っている。図 4.69 は、ダイヤモンド検出器 ch1 について以下の 3 つの条件を満たすイベント (合計 1,181 イベント) のみをプロットしたものである。

- 5 秒以上のインターバル (ビーム照射の無い持間) があつた後の最初のパルスであること。
- 前回の連続したビーム照射が 100 パルス以上連続していたこと。
- 前回の連続したビーム照射の前のインターバルが 100 秒以内であること。

縦軸は、通常の収集電荷量 (1,000 パルス以上連続で照射されている時のイベントの平均値) からの差である。100 秒のインターバルで約 7%, 5000 秒以上のインターバルになると約 20% の信号減少が見られる。

実線はこの信号減少が中間準位の depumping によるものと考えて、簡単なモデルを立てて行ったフィット結果である。以下に詳細を説明する。

信号の減少率は pumping されていない中間準位の量に比例するとする。連続した照射が行われている間は、ほぼ全て of 中間準位が pumping されていると仮定する。中間準位が depumping される時定数を τ 、全て of 中間準位が depumping されているときの信号減少率を k とすると、信号減少率 D はインターバル時間 t の関数で、

$$D = -k\{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (4.3)$$

となる。しかし、この関数ではうまくデータを再現することができなかつたため時定数の違う 2 つの準位があるとして式 (4.3) を次のように書き換えた。

$$D = -(k_1 + k_2) + k_1 \exp(-t/\tau_1) + k_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (4.4)$$

式 (4.4) を用いたフィットを行うと、データをかなり良く再現した。ベストフィットのパラメータは、 $k_1 = 0.0918$, $\tau_1 = 75.8$, $k_2 = 0.127$, $\tau_2 = 2.91 \times 10^3$ となり、ほぼ同じ大きさの寄与を持つ 1 分程度の時定数の成分と、1 時間程度の時定数の成分があるという結果になった。

4.5.2 応答の安定性

連続してビームが照射されている時のイベントに限って安定性を議論する。データには 1,000 パルス以上連続でビームが照射されているときのイベントのみを用いた。

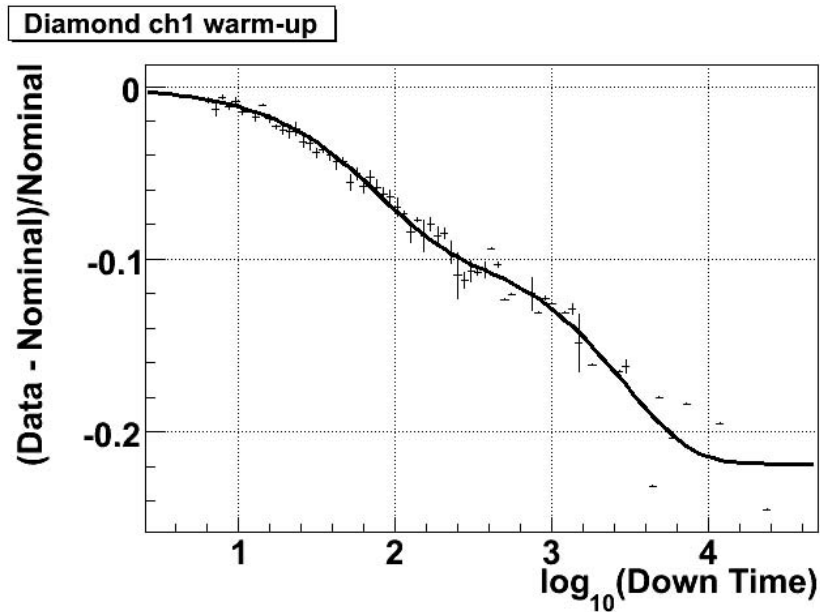


図 4.69 ダイヤモンド検出器 ch1, ビーム照射インターバルと収集電荷量減少率の関係。横軸は対数スケール。実線は 2 成分の指数関数でフィットしたもの (式 4.4)。

各チャンネルの収集電荷量の推移を、シリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量で規格化したものを図 4.70, 図 4.71 に示す。連続してビームが照射されているときには CVD ダイヤモンド検出器の応答は安定しており、シリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量に対する相対的な安定性は $\pm 1.7\%$ 以内である。

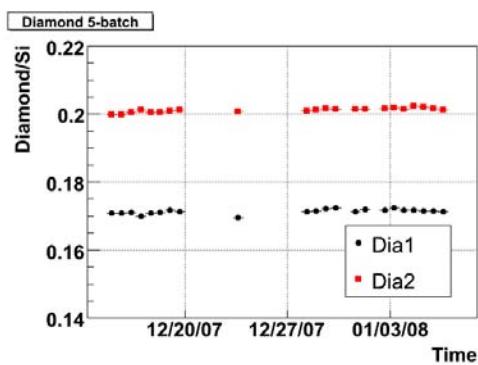


図 4.70 5 バッチモード、CVD ダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの応答比の推移。

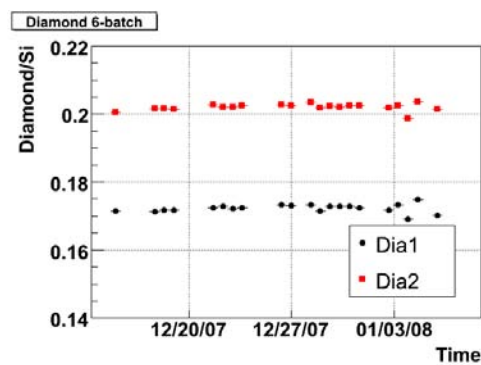


図 4.71 6 バッチモード、CVD ダイヤモンド検出器とシリコン PIN フォトダイオードの応答比の推移。

4.5.3 収集電荷量と電荷収集距離

最後に収集電荷量から電荷収集距離を求め、電子ビームを用いた試験の結果と比較する。陽子ビーム強度で規格化した CVD ダイヤモンド検出器の収集電荷量を図 4.72 から図 4.75、および表 4.7 にまとめる。データには 1,000 パルス以上連続でビームが照射されているイベントのみを用いた。

平均を取ると、ch1 が $66.47 \text{ pC}/10^{12}\text{ppp}$, ch2 が $74.65 \text{ pC}/10^{12}\text{ppp}$ 、同じ位置にあるシリコン PIN フォトダイオードとの比はそれぞれ 0.1733, 0.2025 となる。電子・イオン対生成数は ch1 が 5.60×10^3 , ch2 が 6.54×10^3 、電荷収集距離は表 3.2 と式 (2.3) を用いてそれぞれ $134 \mu\text{m}$, $157 \mu\text{m}$ と求まる。

電子ビームを用いた測定では、この 2 つのサンプルの応答は 2 % 程度で揃っていたが T968 実験の測定結果では約 15% の開きがでた。この差は明らかに回路のキャリブレーション誤差 (最大に相関した場合でも 2.2%) を上回っている。

また、ch2(サンプル No.4)の方が電子ビームでの測定 (ch3: $151 \mu\text{m}$, ch4: $154 \mu\text{m}$) と近い値を示している。原因はよくわからないが、仮説としてはスプリアム ($10 \mu\text{s}$) 以下で非常に早く depumping する不純中心の成分が存在すること、あるいはセットアップ中に ch1(サンプル No.3)に何らかの損傷を与えてしまった可能性などが考えられる。

表 4.7 陽子ビーム強度で規格化された CVD ダイヤモンド検出器の応答量。単位は $[\text{pC} / 10^{12} \text{ ppp}]$

	5-batch		6-batch	
	MEAN	RMS	MEAN	RMS
Diamond ch1	65.76	1.16	66.96	0.75
Diamond ch2	73.87	1.09	75.19	0.69

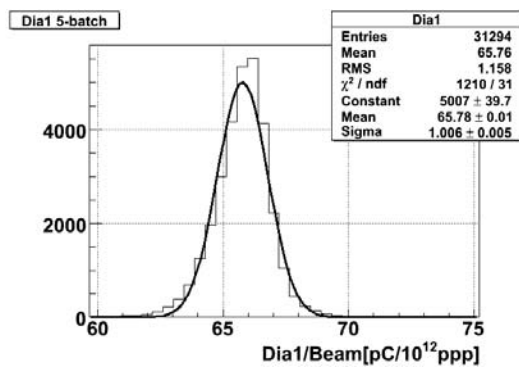


図 4.72 5 バッチモード、CVD ダイヤモンド検出器 ch1 の収集電荷量。

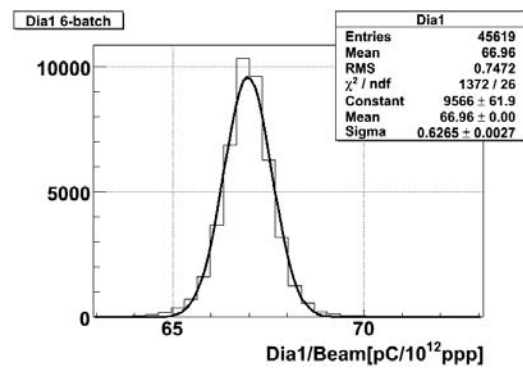


図 4.73 6 バッチモード、CVD ダイヤモンド検出器 ch1 の収集電荷量。

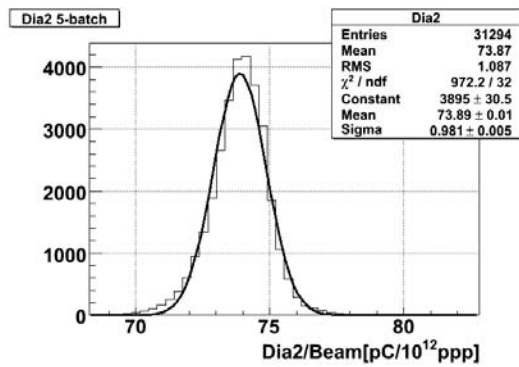


図 4.74 5 バッチモード、CVD ダイヤモンド検出器 ch2 の収集電荷量。

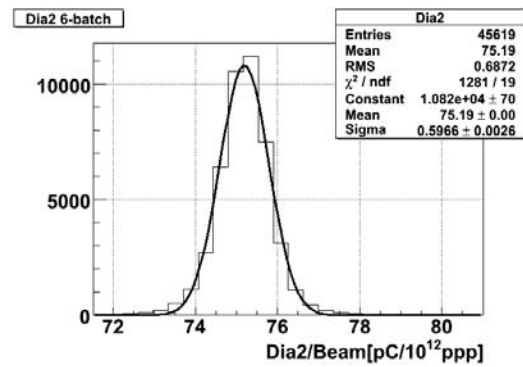


図 4.75 6 バッチモード、CVD ダイヤモンド検出器 ch2 の収集電荷量。

4.6 測定結果のまとめと考察

シリコン PIN フォトダイオードの安定性 一ヶ月以上に渡る測定において、陽子ビーム強度で規格化したシリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量の分布は $RMS/MEAN < 1.3\%$ のレベルで安定している。また、同じ位置にあるイオンチェンバーの応答との相関からも安定性は 1.2% 以下と評価される。

シリコン PIN フォトダイオードの放射線耐性 1.90×10^{12} particles / cm^2 の荷電粒子照射後においても信号の減少は見られない。T2K コミッショニングビームにおいては4ヶ月以上安定に動作することが、ミュオンビームを用いた測定によっても保証された。

イオンチェンバーのバッチ数に対する応答の差異 加速器の運転モードによって、イオンチェンバーの応答に差異が生じていたが、 He_2^+ イオン由来の信号成分の影響として理解することができた。

イオンチェンバーの安定性 純ヘリウムを用いた測定においては、わずかなガス純度の変動によっても Jesse 効果により収集電荷量が増加することを確認した。しかし、この問題は既に混合ガスを使用することで解決済みである。チャンネル間の相対的な安定性は $\pm 0.4\%$ 以内と極めて安定である。

圧力・温度変動による影響と補正の効果 ビームおよびガス純度の比較的安定していた、後半の半月のデータではイオンチェンバーの収集電荷量とガス圧力の間には良い相関が見られ、増加率は $0.11\%/Torr$ であった。温度に関しては、変動自体が小さすぎたため明確な相関を見ることはできなかった。

シリコン PIN フォトダイオードとの応答比に対して、理想気体の状態方程式を仮定した補正を行うと、 $\pm 1.2\%$ 内で安定な推移となった。これにより、かなりの距離のガス配管を隔てた圧力計での測定値を用いた補正であっても一定の効果を示すことが分かった。

CVD ダイヤモンド検出器の立ち上がり応答 電子ビームを用いた試験と同様の立ち上がり応答が見られた。わずか 100 秒間の照射インターバルでも、直後には信号がおよそ 7% 減少しており、安定な測定は困難であると言わざるを得ない。

対策として、結晶境界に多くの不純中心を持つ現在の CVD ダイヤモンド検出器サンプルではなく単結晶ダイヤモンドの検出器を用いることを検討している。

CVD ダイヤモンド検出器の安定性 1000 パルス以上連続してビームが照射されているときに限れば、シリコン PIN フォトダイオードの収集電荷量比は $\pm 1.7\%$ 内で安定であった。よって、立ち上がり応答の問題さえ解決すればダイヤモンド検出器もこのレベルで安定して使用可能であると推察できる。

第 5 章

T2K ミューオンモニターの最終デザインと運転計画

この章では、研究全体を通じた結論をまとめ T2K ミューオンモニターの最終デザインと運転計画を報告する。

5.1 測定精度の評価

T968 実験、および電子線形加速器を用いた試験によって得られた各検出器の測定精度・安定性が、T2K の要請を満たすものであるかを表 2.3 の測定精度目標値と比較することで評価する。

ただし、パルス毎の測定精度は現場のノイズ環境に大きく左右されるためあくまでも試験と同様の環境であったときの参考値である。

5.2 ミューオンモニターの最終デザイン

5.2.1 平行平板型イオンチェンバーのデザイン

基本設計

平行平板型イオンチェンバーについては、長期安定性も含めて T2K 実験に使用可能な性能を有していることが確認された。予想されるビーム中心精度は $\sigma \simeq 1.4\text{cm}$ 、相対フラックス測定精度は 1.3% 以内である。

また、機械的な欠陥等も発見されなかったため T968 実験用イオンチェンバー試作機を

表 5.1 イオンチェンバー (49 ch) 測定精度のまとめ

	種別	目標精度	実測値または予測値	参照図表
1	パルスごとの測定誤差	3.5%	2.2%	図 3.39
2	ch 間で連動する系統誤差	2.5%	1.2%	図 4.57~4.60
3	ch 間で連動しない系統誤差	合計して	0.4%	図 4.38~4.39
	線形な応答からの減少率 ($\times 0.2$)	2.5%	0.6%	表 3.10
中心精度決定関連誤差 (1+3)		4.9%	2.3%	
中心決定精度		3 cm	1.4 cm	
相対フラックス測定関連誤差 (2+3)		3.4%	1.4%	
相対フラックス測定精度		3%	1.3%	

表 5.2 シリコン PIN フォトダイオード (25 ch) 測定精度のまとめ

	種別	目標精度	実測値または予測値	参照図表
1	パルスごとの測定誤差	2.7%	1.4%	図 3.42
2	ch 間で連動する系統誤差	1.9%	1.2%	図 4.57~4.60
3	ch 間で連動しない系統誤差	合計して		
	線形な応答からの減少率 ($\times 0.2$)	1.9%	0.3% <	図 3.41
中心精度決定関連誤差 (1+3)		3.8%	1.9%	
中心精度決定精度		3 cm	1.6 cm	
相対フラックス測定関連誤差 (2+3)		2.5%	1.2%	
相対フラックス測定精度		3%	1.4%	

ベースにした、7 ch, 2m のサイズのイオンチェンバー 計 7 本を最終デザインの基本とする。電極間ギャップは 3 mm, 通常運転電圧は 200 V である。

最新の設計図を以下に示しておく。

環境モニター

イオンチェンバーの応答を変化させる要因となる、圧力・温度をモニターするシステムについてであるが、圧力変動については、長期試験によってチェンバー外部に圧力計を設置しても $\pm 1.2\%$ の精度でデータを補正できることが示された。そのため圧力計はミューオンモニターに向かうガス配管ライン中に設置する。

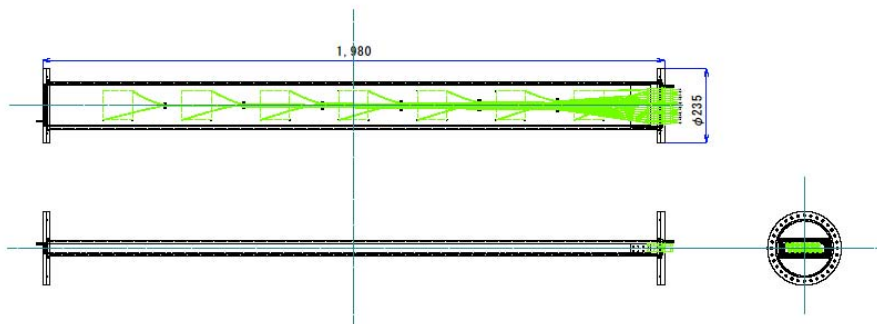


図 5.1 T2K 実験ミューオンモニター イオンチェンバーの設計図。同一の物を 7 つ (+ 予備 1 つ) 製作する。

温度モニターについては、長期試験でデータが得られていないためイオンチェンバー内部に白金抵抗温度計 (クラス 1/3B : 室温付近での測定精度 0.15°C) を設置することにした。

また、圧力については減圧弁・背圧弁を用いた制御、温度については、ミューオンモニターの領域を囲んだ上でパッケージエアコンを用いた制御を行うことを計画している。それぞれの制御目標レベルは $\pm 1\%$ (温度に関しては絶対温度であるから $\pm 3^{\circ}\text{C}$) である。

圧力・温度制御と検出器内外のモニターによる測定からの補正を組み合わせることで、環境が与える相対フラックス測定に対する系統誤差を 1% 以内に抑えられるものと期待できる。

使用するガス

コミッショニング時にはアルゴン + 窒素 (2%) ガスで測定を開始し、荷電粒子フラックスが増加してアルゴンガスイオンチェンバーの線形性が悪化ようになる時期からはヘリウム + 窒素 (1%) ガスで測定を行う。切り替えを行う点は、少なくとも 1.2×10^8 particles/plate/pulse (T2K 11%) 以降である。

ヘリウムガスに混合する窒素の比率は、今後の試験次第で増加させる可能性もある。

5.2.2 半導体検出器の使用方針

コミッショニング時には、放射線損傷を受けずに安定動作することが確かめられたシリコン PIN フォトダイオードを用いる。予想される中心決定精度は 1.6 cm で相対フラックス測定精度は 1.4% とそれぞれ要請の範囲内であるため、チャンネル数も予定通り 25 とする。

CVD ダイヤモンド検出器は、現在のサンプルではビームが断続的に停止するような状

況下で安定した測定を行うことができない。そのため、単結晶ダイヤモンドを用いた検出器あるいはより薄いウェハーのダイヤモンドを用いた検出器を早急に研究、開発する必要がある。既に、単結晶ダイヤモンド検出器のサンプル調達準備を始めている。

5.2.3 読み出し回路

読み出し回路には、予定通り COPPER-FINESSE 65MHz Flash ADC を用いる。時定数は 52.8 ns で問題ないことを数値計算から検証した。

また、過去のビームテストにおいて試作機を使用し、正常な動作を確認している。

5.3 ミューオンモニター準備計画

2008 年度始めにイオンチェンバー 7 機 (+ 予備 1 機) の製作、シリコン PIN フォトダイオードおよび読み出し回路の購入を済ませ、夏までに電子ビームを用いて全数を測定し、相対的にキャリブレーションを行う。

架台及びガスシステムの準備も秋までに平行して進め、以降は J-PARC サイドにて組み立て、インストール、コミッショニング作業を行う。

2009 年 4 月から予定されているニュートリノビームのコミッショニングには、ミューオンモニターが必要不可欠である。T2K 実験のスケジュールを遅延させないため、全ての作業は 2008 年度中に行う。

5.4 総括

本研究では、T2K 実験 ミューオンモニターの開発の一環として電子ビームを用いたミューオンモニター試作機の性能評価、そして NuMI ニュートリノビームラインを用いた長期試験を行った。

それぞれの試験から得られたデータにより、イオンチェンバー、シリコン PIN フォトダイオードについては現在の設計で T2K 実験からの要請であるビーム中心決定精度 3cm, 相対ビームフラックス測定精度 3% を満たす性能をもっていると判断し、設計を確定した。

また、イオンチェンバーについては環境由来の変動を出来る限り抑えるため、環境設備および環境モニターを整備中である。

残る問題は、CVD ダイヤモンド検出器の安定性であるが、これについては単結晶ダイヤモンドを用いた検出器の試験・開発を早急に進める方針である。

謝辞

大学院での研究生活のひとつの節目となるこの論文を書き上げた今、これまでの2年間を振り返ってみると、多くの方々に出会い、支えられ、励まされながら、刺激的な毎日を送ることができた私は本当に幸せ者であったと実感しています。

研究全般に渡り、的確なご指導とご教育を頂いた中家剛准教授には感謝の言葉も見つかりません。中家先生の何事にも鋭く切り込む視線は、常に私の憧れであり、目標であり続けています。

市川温子准教授には、ミュオンモニターの設計やビームテストの解析において数々の助言と教育的なご意見を頂きました。厚くお礼を申し上げます。

横山将志助教には、T968 実験の代表者として当地での実験準備から解析、論文執筆中の助言に至るまで最も身近に指導を頂きました。遠方の地で、右も左も分からない私を導いてくださったことに心よりの感謝を申し上げます。

また、ミュオンモニターグループの先輩であり T968 実験の共同実験者でもある松岡広大さんは、研究全般において、時には先駆者として私に道を示し、時には教育し、そして時には議論の相手となることで、常に私を高めてくださいました。本当にありがとうございます。

フェルミ国立加速器研究所におきましては試験を許可し、準備段階から数多くの手助けをして頂いた NuMI, MINOS 実験関係者の皆様。特に Sacha Kopp, Marek Proga, Laura Loiacono の3名には感謝の気持ちでいっぱいです。

また、慣れない土地での生活や研究を支えてくださった SciBooNE 実験の田中秀和さん、平出克樹さん、栗本佳典さん、中島康博さん、武居秀行さん。大変お忙しい中、色々とお気にかけていただきありがとうございました。

ビームテストにおいては、野田章教授をはじめ化学研究所先端ビームナノ科学センターの皆様にお世話になりました。特に、白井敏之助教には何度も深夜までお付き合いいただきまして、大変ご迷惑をおかけ致しましたこととお詫びすると共に、最大限のお礼を述べたいと思います。

高エネルギー加速器研究機構におきましてはお忙しい中においても、ミュオンモニ

ターに対して多くの貴重なご指摘を下さいました西川公一郎教授、そして読み出し回路のテストなどにおいて広くご指導頂き、さらにはビームテストでもご助力いただきました坂下健、五十嵐洋一 両氏をはじめと致しまして、ミュオンモニターの開発に数々の助言を頂きましたニュートリノグループの皆様には厚く感謝致します。

そして、京都大学高エネルギー物理学研究室の皆様にはありとあらゆる面で支えられ、励まされました。

まだまだここに挙げ切れないほど、沢山の人に出会い、助けられました。この二年間の出会いは私にとって何よりの宝物です。

最後になりましたが、精神的な支えとなってくれた家族と最愛の人に、精一杯の感謝を伝えて締めくくりたいと思います。

久保 一

付録 A

平行平板型イオンチェンバーの動作原理

A.1 荷電粒子による電離

ガス中を荷電粒子が通過すると、その飛跡に沿ってガス原子(分子)が電離され、電子・イオン対が生成される。

電子・イオン対の生成量は荷電粒子がガス中で損失したエネルギーにほぼ比例し、1イオン対の生成に必要なエネルギー損失を W 値と呼ぶ。荷電粒子の電離損失は、以下の Bethe-Bloch の式で表される(記号の意味は [27] を参照)。種々の物質に対する電離損失は図 A.1 のように、入射粒子が $\beta\gamma = 3 \sim 4$ のとき最小値を取り、この時のエネルギー損失を最小電離損失、この付近のエネルギー領域の粒子を MIP (Minimum Ionizing Particle) と呼ぶ。一般的な物質における最小電離損失は $2 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$ 前後である。

$$-\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (\text{A.1})$$

T2K ミューオンモニターに関わる各種ガスの一次電離ポテンシャル、 W 値、および MIP による電子・イオン対生成数を表 A.1 にまとめる。粒子が失ったエネルギーの一部は原子・分子の励起などにも消費されるため、 W 値はガスの一次電離ポテンシャルよりも大きな値になる。

A.2 電子のドリフト速度

荷電粒子の通過によって電極間のガス中に生成された電子および陽イオンは、印加された電場によって各電極の方向に加速され、ランダムな熱運動をしながら総体的には一定方

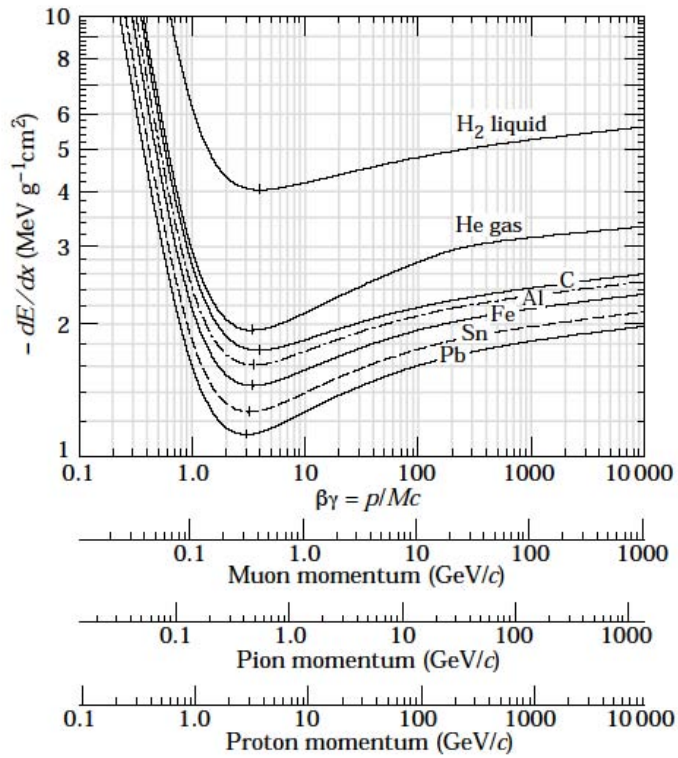


図 A.1 種々の物質に対する荷電粒子のエネルギー損失 [27]。

表 A.1 各種ガスに対する一次電離ポテンシャル、最小電離損失 [23]、W 値 [15](高速電子に対するもの) および単位長さ当たり電子・イオン対生成数。20°C, 1atm における密度で計算。

ガス種	一次電離ポテンシャル (eV)	W 値 (eV)	最小電離損失 (keV/cm)	電子・イオン対生成数 (cm ⁻¹ /MIP)
He	24.6	41.3	0.322	7.8
Ar	15.8	26.3	2.52	96
N ₂	15.5	34.8	2.14	61
O ₂	12.2	30.8	2.40	78
Air		33.8	2.18	64

向への移動（ドリフト）を始める。

一般に、電子のドリフト速度はイオンのドリフト速度の $10^2 \sim 10^3$ 倍である。単位時間に誘導する電荷の量（あるいは誘導する電流の強さ）はドリフト速度に比例するため、T2K ミューオンモニターのように速い時定数で読み出す用途においては、主に電子のドリフトが信号形成に寄与する。

ドリフト速度は一般に電場 E (V/cm) と圧力 P (Torr) の比 E/P にスケールすることが知られており、電場が強いほど、また圧力が小さいほど速くなる。

ヘリウムとアルゴンについて、電子のドリフト速度と E/P の関係を図 A.2[28], 図 A.3[29] に示す。

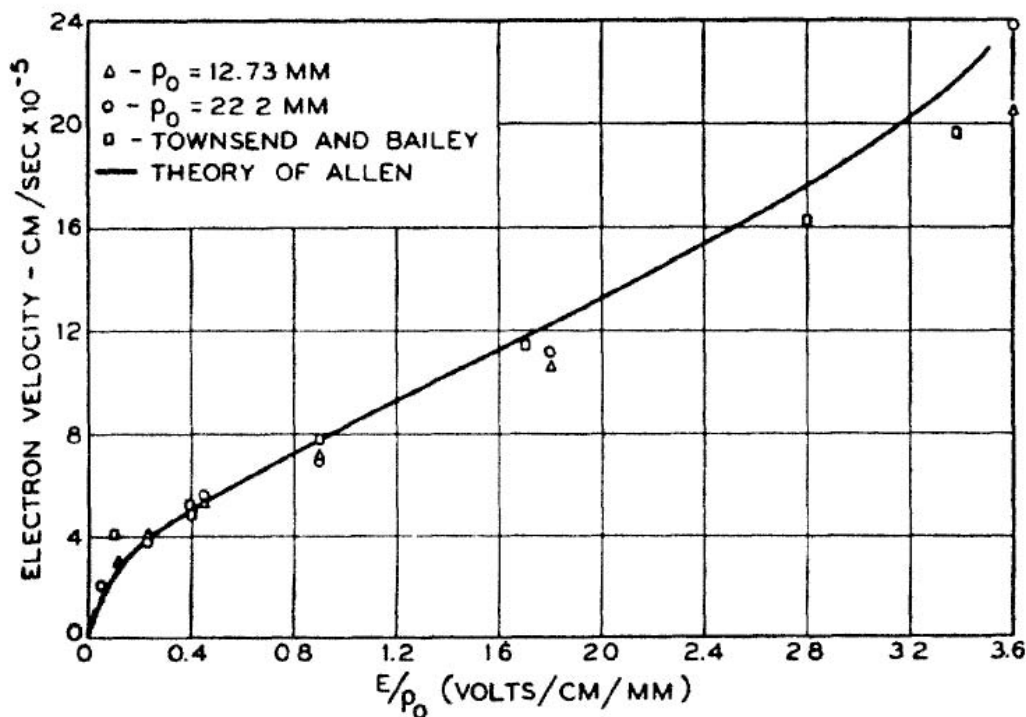


図 A.2 ヘリウム中の電子のドリフト速度と E/P の関係。

T2K ミューオンモニターの場合は、大気圧付近 (760 Torr)、電極間ギャップ 3 mm、印加電圧 200~300 V であるので、 E/P はおよそ 1 前後である。 $E/P \sim 1$ のとき、ヘリウムおよびアルゴンのドリフト速度はそれぞれおよそ 9×10^5 cm/s, 4×10^5 cm/s、3 mm のドリフトにかかる時間はそれぞれ約 350ns, 750ns となる。

純粋なアルゴンのドリフト速度は T2K ミューオンモニターに用いるには遅すぎるが、希ガスに少量の分子ガスを混入するとドリフト速度は劇的に変化する。図 A.4 はアルゴンに少量の窒素を混入した際のドリフト速度であるが、1.8% の窒素を混合することで $E/P \sim 1$ のときの電子のドリフト速度は 2×10^6 cm/s にまで増加している。このとき、

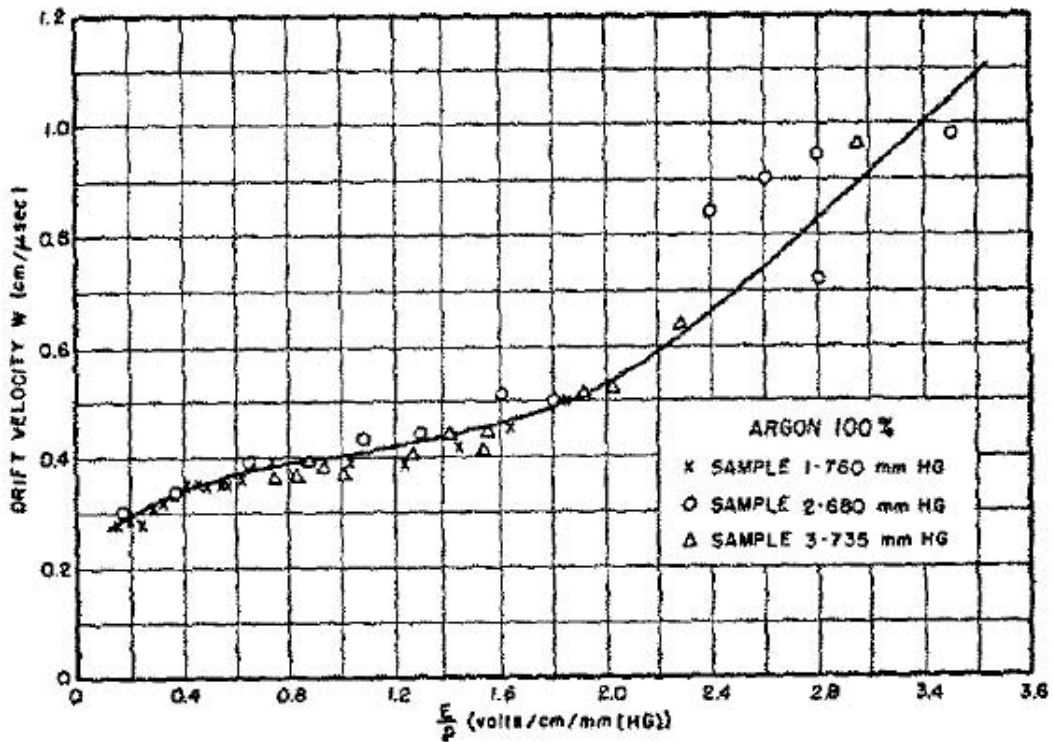


図 A.3 アルゴン中の電子のドリフト速度と E/P の関係。

3 mm のドリフトにかかる時間は約 150ns である。

この理由を以下に説明する。電場方向への電子のドリフト速度 ω は、電場 E 、電子の運動速度 v (ドリフト速度と異なり熱的な運動速度のことである)、平均自由行程 λ 、そして電子の質量 m_e を用いて式 (A.2) のように表される [30]。

$$\omega = \frac{2}{3} \frac{eE}{m_e} \left\langle \frac{\lambda}{v} \right\rangle + \frac{1}{3} \frac{eE}{m_e} \left\langle \frac{d\lambda}{dv} \right\rangle \quad (\text{A.2})$$

また定常にドリフトしているとき、エネルギーの保存から

$$eE\omega = \langle \Lambda ev / \lambda \rangle \quad (\text{A.3})$$

ここで、 Λ は 1 衝突あたりに電子の失う平均エネルギー。

平均自由行程が運動速度に寄らないとの近似を行うと、式 (A.2), (A.3) より

$$v = [2(3\Lambda)^{-\frac{1}{2}} eE\lambda / m_e]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2}{3} \frac{eE}{m_e} \frac{\lambda}{v} \\ &= \left[\frac{2}{3} \left(\frac{1}{3} \Lambda \right)^{\frac{1}{2}} eE\lambda / m_e \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.5}) \end{aligned}$$

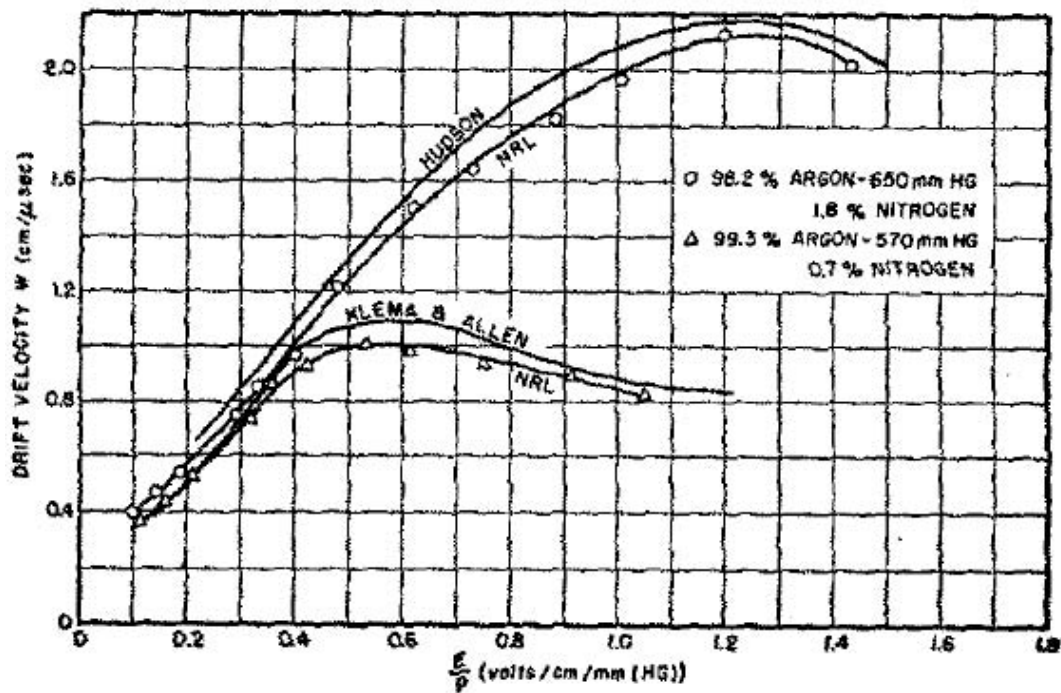


図 A.4 アルゴン-窒素混合ガス中の電子のドリフト速度と E/P の関係。

となり、ドリフト速度は熱運動速度に反比例する。熱運動速度とドリフト速度の Λ 依存性に注目すると、前者は $1/4$ 乗に反比例しているのに対し、後者は $1/4$ 乗に比例している。つまり、電子のドリフト速度を高めるためには 1 衝突あたりに失うエネルギーを大きくして熱運動速度を落としてやるとよいことが分かる。

一般に分子の回転励起、振動励起による運動量移行 (エネルギー損失) は希ガス原子との弾性衝突に比べて大きく、希ガス中にこれらの自由度を持つ分子ガスを混合することで Λ を増加、 v を減少させ、ドリフト速度を上げることができる (同時に、電荷の拡散を防ぐ効果もある)。図 A.5 にアルゴンにイソブタンを混合した際の電子エネルギーの変化を示す。7% ほどの混入でも、1 桁程度電子の熱運動エネルギーが抑制されているのが確認できる。

アルゴンガスの場合は、分子ガス混合の効果が特に顕著に現れる。多くの分子ガスが振動励起のピークを持つ 1 eV 前後の電子エネルギー領域において、アルゴン原子の衝突断面積は非常に小さくなっている (図 A.6)。これはラムザウアー効果と呼ばれ、電子の波長が原子のサイズに近くなることで一種の共鳴が起こり、断面積に極小をつくる現象である。そのため、1 eV 前後のエネルギー領域では混合された分子ガスとの衝突が支配的になり、平均エネルギー損失 Λ 、そしてドリフト速度が飛躍的に上昇することになる [31]。図 A.4 でアルゴン-窒素混合ガスのドリフト速度にピークがあることはこれによって説明

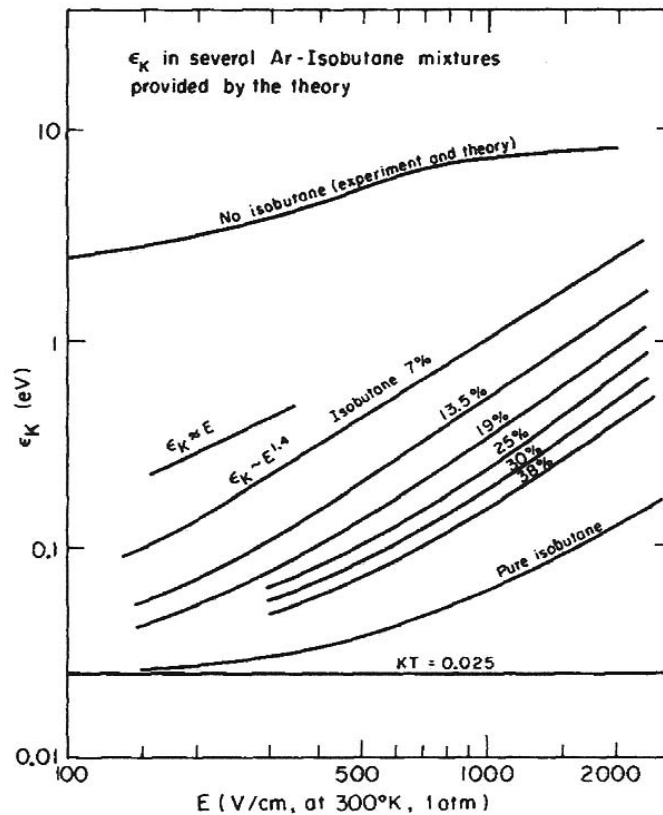


図 A.5 アルゴン-イソブタン 混合ガスにおける電子の平均熱運動エネルギー [30]。

することが出来る。

チェンバーに充填するガスとして、アルゴンに混合される一般的なガスとしてはエタン・イソブタンなどの有機分子ガスなどがあるが、容易なアクセスができないミュオンモニターの特性を踏まえ、安全面を優先して不燃性の窒素を混合する。

A.3 イオンのドリフト速度

ガス中のイオンのドリフト速度は、広い領域で E/p によく比例することが知られており、ドリフト速度 u は

$$u = \mu \frac{E}{p/760\text{Torr}} \quad (\text{A.6})$$

と書ける。ここで、比例係数 μ を移動度と呼ぶ。一般的な単位は $[\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}]$ である。

アルゴンガス中の Ar^+ イオンの移動度は $1.7 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ であり [31]、1atm, 3 mm ギャップに 200 V を印加した状況下ではおよそ $1 \times 10^3 \text{ cm/s}$ となり、前節で議論した電子のドリフト速度 $\sim 10^6 \text{ cm/s}$ よりも 3 桁遅いものであり、速い読み出しにおいてはイオンの運

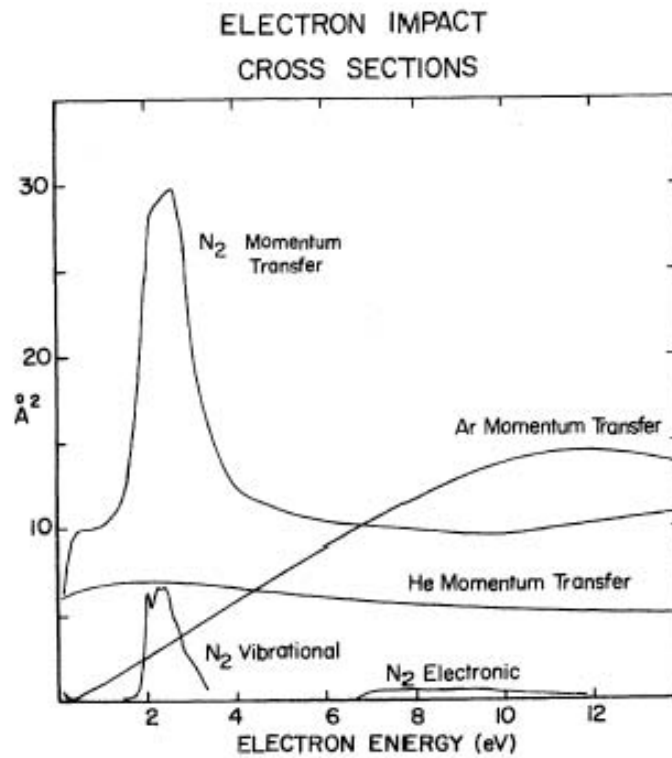


図 A.6 種々のガスに対する電子衝突断面積 [32]。

動はほとんど無視して構わなくなる。

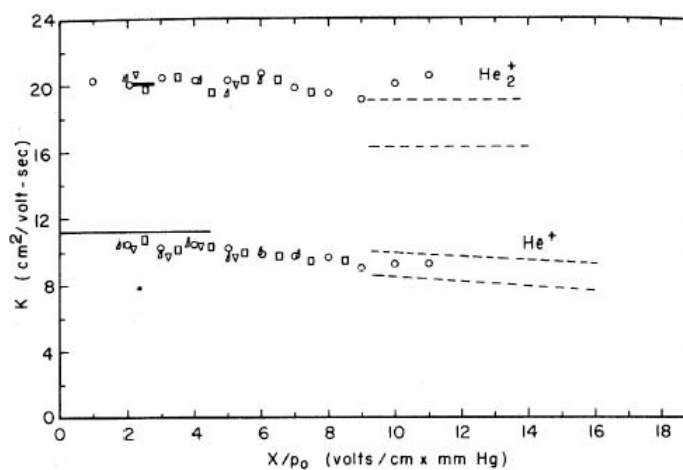


図 A.7 ヘリウムイオン及びヘリウム分子イオンの移動度 [33]。

ヘリウムの場合は質量が軽いいため他のイオンよりも1桁ほど移動度が高く、ヘリウムガス中の He^+ イオンの移動度はおよそ $10\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ である。さらに、高密度の状況において

は他のヘリウム原子との衝突によってヘリウム分子イオン (He_2^+) を構成し、ヘリウムイオンとは異なった移動度でドリフトする。

He_2^+ の移動度はおよそ $20\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ であり、常温、大気圧下の測定ではこの移動度が観測される。3 mm ギャップに 200 V を印加した際には $1.3 \times 10^4 \text{ cm/s}$ のドリフト速度となる。これは電子のドリフト速度の 1% ~ 2% にも相当し、速い読み出しにおいてもイオン由来の信号が測定に無視できない影響を及ぼす。

A.4 ガス中のキャリアの振る舞い

A.4.1 ガス増幅

印加される電場が強くなると、ドリフト中の電子のエネルギーが上がり、この電子が新たな電離を引き起こすことが可能になる。このような二次的な電離作用によって、収集電荷量が増大することをガス増幅と呼ぶ。

ガス増幅が起こるためには一定の電場強度が必要になる。この電場強度閾値は、ガス種・ガス圧によって変化するが典型的には $10^4/\text{cm}$ 程度である。

ワイヤーチェンバーの場合はワイヤー付近が高電場になるためガス増幅が起こるが、平行平板型の電極では電場が一定で、せいぜい $1\text{kV}/\text{cm}$ 程度なため、ガス増幅は基本的に発生しない。ガス増幅のないガスチェンバーを一般的にイオンチェンバーと呼ぶ。

A.4.2 Jesse 効果 (penning イオン化)

ガス中で荷電粒子の損失したエネルギーの一部は、ガス原子の励起にも消費される。ある原子 X の励起状態 X^* の励起エネルギーが、ガス中に混合した原子 Y の電離エネルギーより高い場合、これらの衝突によって新たな電離が起こる。



このような過程を penning イオン化と呼び、これによって電子・イオン対生成数が増大することを Jesse 効果と呼ぶ。

ヘリウムの準安定状態の励起エネルギーは 20.6 eV, 19.8 eV と非常に高く、他の原子のイオン化ポテンシャルを上回っている (アルゴン:15.8 eV、窒素:15.5 eV、酸素:12.2 eV)。そのため、ヘリウムガスでは特に Jesse 効果が顕著に見られる。

アルゴン、および窒素の混合による電離量の増加を表したのが図 A.8 である [34]。図中の Jesse(1955) の測定結果は横軸 (混入量) が正しくないとの指摘があるため、Harris(1976) のデータを信頼する。これを見るとわずか 0.5% の混合によってでも、40~50 % もの電離量増加があることが分かる。Jesse 効果ため、ヘリウムガスの見かけ

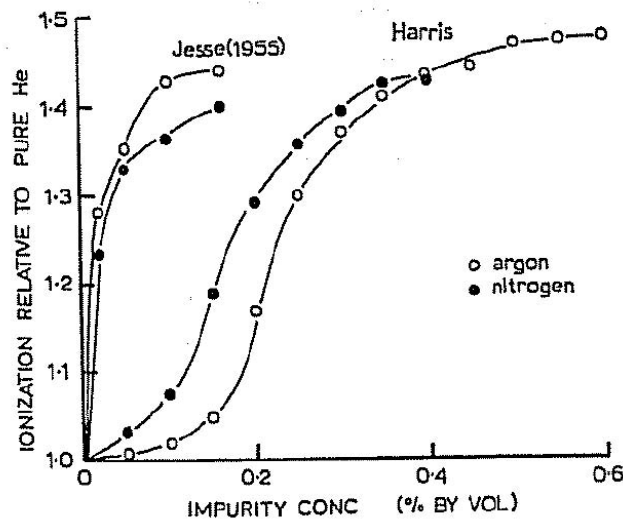


図 A.8 アルゴン、および窒素の混合によるヘリウムガス電離量の増加。

の W 値は純度によって大きく変動する。実際ヘリウムガスの W 値は、ガス純度の良い比較的新しい実験結果では 40 eV 以上であるが、1940 年代以前の古い実験結果においては 30 eV 以下である [35]。

A.4.3 再結合

ドリフトする電子・イオンの密度が高くなると両者が会って再結合し、元の原子(分子)に戻る可能性が高くなる。再結合は収集電荷量の飽和を引き起こし、イオンチェンバーの応答の線形性を悪化させる原因となる。

陽イオンの密度を N^+ 、電子(又は陰イオン)の密度を N^- とすると、再結合率は

$$-\frac{dN^+}{dt} = -\frac{dN^-}{dt} = \alpha N^+ N^- \quad (\text{A.8})$$

と書け、 α を再結合定数と呼ぶ。

再結合定数は電子の場合 $10^{-7} \text{cm}^3/\text{s}$ 以下の値を取る [31]。

A.4.4 電子吸着

ガス中に電子親和力の高いガスが混入していると、ドリフト中の電子がこれらの分子にトラップされて陰イオンとなる。速い読み出しを行う T2K ミューオンモニターの場合では、陰イオンのドリフトによる信号は測定されないため電子吸着は信号を減少させる原因となる。

本研究の条件において、特に注意が必要な負性ガスとしては酸素が挙げられる。酸素は空気中に多く含まれており、配管やチェンバー本体のリーク、および内部表面からの放出などで容易にチェンバーガス中に混入する。

以下、酸素ガスによる電子吸着量について議論する。ドリフト電子と酸素分子の一回の衝突あたりの吸着確率を h とする。 h は図 A.9 に示すように電子の運動エネルギーと関係している。2.0 eV 付近では酸素分子を励起 (励起エネルギー 1.6eV) してエネルギーを失った電子が吸着されるためにピークを形成している。

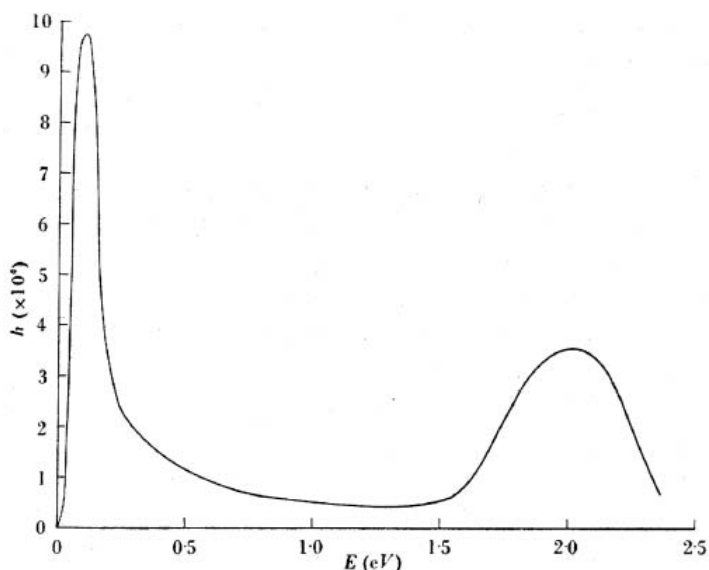


図 A.9 電子エネルギーに対する酸素による電子吸着確率 [25]。

また、電子のエネルギーが酸素の解離エネルギーである 5eV 付近になると



といった過程 (dissociative attachment) が支配的になる。この過程は最大 $2 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ 程度、 h で表すと 2×10^{-3} 程度の数値を取る。

本研究で使用するガス中での平均電子エネルギーと電場・圧力比 E/p との関係を図 A.11 に示す [37]。縦軸はガスの平均運動エネルギーに対する比であり η と置く。電子エネルギー ϵ と η の関係は、

$$\epsilon = \eta \times \frac{3}{2} k_B T = \eta \times 0.0388 \text{eV} \quad (\text{A.10})$$

となる。

よって、電子の運動速度 v は $\frac{1}{2} m_e v^2 = \epsilon$ より $1.17 \times 10^7 \sqrt{\eta} \text{cm/s}$, また、酸素に対する衝突断面積は電子エネルギー 0.1 ~ 10 eV において $5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ 程度でほぼ一定であ

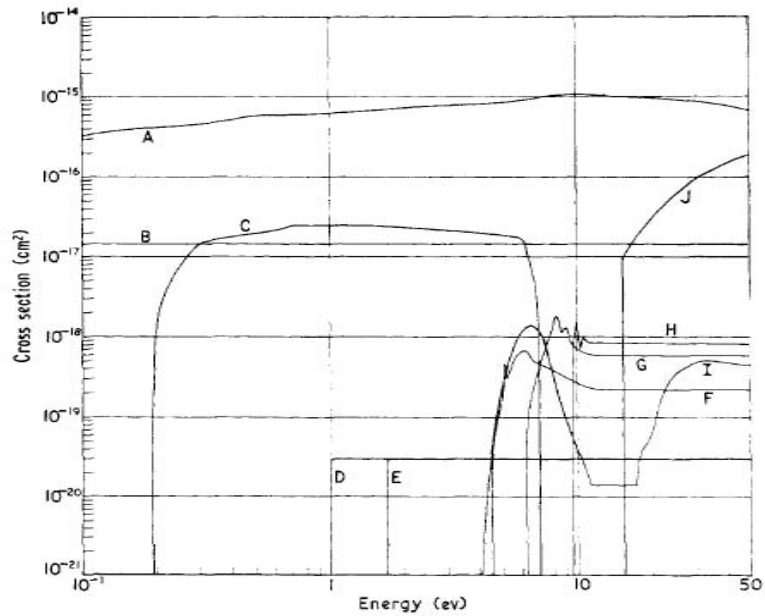


図 A.10 酸素分子に対する電子の各種過程の断面積 [36]。最も上方の (A) が弾性散乱、下方の (I) が dissociative attachment であり 5~8 eV において最大 $2 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ のピークを形成している。

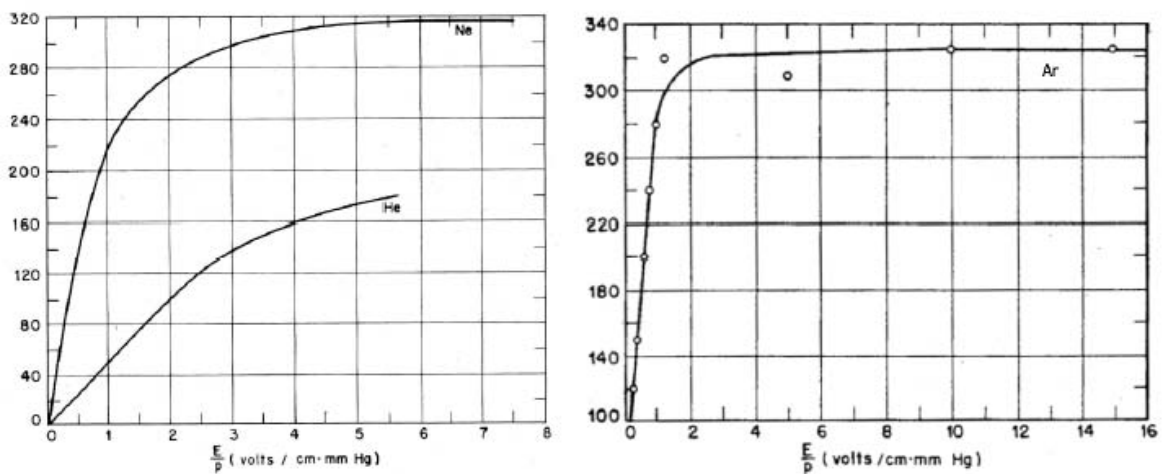


図 A.11 各種希ガスについての E/p に対する電子エネルギーの変化。縦軸はガスの平均運動エネルギーに対する比 (η)。

り (図 A.10)、[38] に従って平均自由行程 λ は酸素分圧 x [Torr] に対して $\frac{6}{x} \times 10^{-2}$ cm と近似できる。すなわち、単位時間あたりの電子吸着確率は h を用いて

$$h \frac{v}{\lambda} = 1.9 \times 10^8 h x \sqrt{\eta} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (\text{A.11})$$

となる。

電子吸着の最初のピーク (~ 0.15 eV) は、 η で表すとおよそ 4 であり、大気圧化のヘリウムガスでは 60 V/cm, アルゴンガスでは図 A.11 からは読み取れないが 10 V/cm 以下であると考えられる。第二ピーク (~ 2.0 eV) は $\eta \sim 50$ であり、同じく大気圧化のヘリウムガスでおよそ 800 V/cm, アルゴンガスではこれも読み取れないが、傾きから 100 V/cm 以下と考えられる。そして、dissociative attachment の始まる 5 eV, $\eta \sim 130$ はヘリウムガスで約 2 kV/cm, アルゴンガスで約 200 V/cm となる。ただし、アルゴンガスに分子状気体が混合されると電子エネルギーが減少するため注意が必要である。

A.5 収集電荷量

理想的な平行平板イオンチェンバーの収集電荷量を考える。ガスは純度が十分に良い希ガスとし、penning イオン化、電子付着、ガス増幅はないものとする。極板間の間隔を D , 極板対の静電容量を C , 電子のドリフト速度を ω , イオンのドリフト速度を u とおく。

時刻 $t=0$ に、信号電極から距離 x の所に電荷 $-Q$ の電子と $+Q$ のイオンができたしよう。それぞれが移動することによって、極板間電圧が単位時間当たり $(Q\omega + Qu)/CD$ だけ変化する。回路時定数が十分に短かければ、それを補うために電流が誘導されて計測される。電流 I は、

$$I = (Q\omega + Qu)/D \quad (\text{A.12})$$

となる。最終的に、電子のドリフトによって誘導される電荷量は $Q\omega/D \cdot x/\omega = Qx/D$ であり、残りの $Q(D-x)/D$ はイオンのドリフトによってゆっくりと誘導される。ここで重要なのは、誘導電流の強さはその瞬間に極板に到達した電荷量ではなく、ドリフト中の電荷の量と、そのドリフト速度によっているということである。

次に、このイオンチェンバーに断面積 S の一様なパルス状のビームが極板に対して垂直に入射した場合を考える (図 A.12)。 $t=0$ で、ビームの通過した柱内に密度 $N_0^+ = N_0^- = N_0$ でイオンと電子が瞬時に生成されるとする。注の体積 V 、総電離量 Q は明らかに

$$V = SD \quad (\text{A.13})$$

$$Q = eN_0V = eN_0SD \quad (\text{A.14})$$

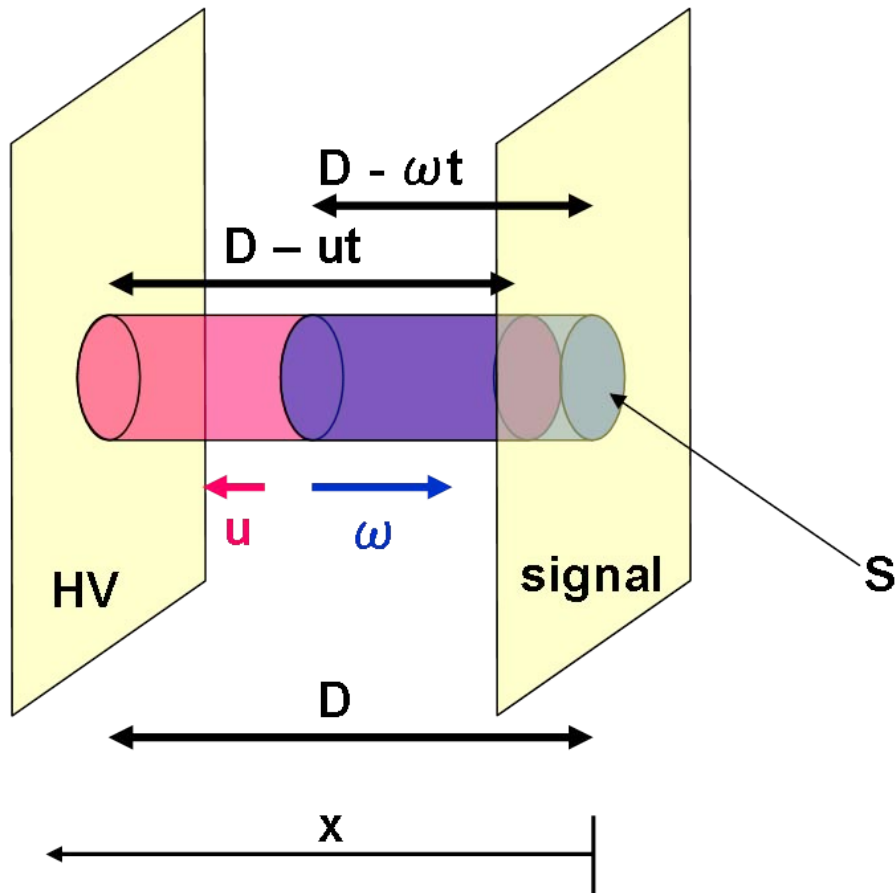


図 A.12 パルス状のビームが垂直に入射した場合の模式図。

と書ける。ただし e は素電荷。一般に $\omega \gg u$ であるので簡単のため、 $t \leq D/\omega \equiv \tau$ ではイオンは生成された場所にとどまっています、電子のみがドリフトすると考える。時刻 t において電子が存在する領域は信号電極側から $D - \omega t$ までであるから、再結合の影響が無い場合に電子の移動によって短時間に誘導される電荷量 U_e は、

$$U_e = \int_0^{\tau} \frac{\omega}{D} e N_0 S (D - \omega t) dt \quad (\text{A.15})$$

$$= \int_0^{\tau} \frac{e N_0 V}{\tau} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) dt \quad (\text{A.16})$$

$$= \frac{1}{2} e N_0 V = \frac{1}{2} Q \quad (\text{A.17})$$

となり、総電離量のちょうど半分が電子のドリフトによって短時間に誘導・収集される。ドリフトする電子の数は一定の割合 ($N_0 S \omega$) で極板に到達して減少し続けるため、信号は最初が最も強く、直線的に減少してゆく三角形の波形になる。

次に電荷の再結合の影響を考えて、ビーム強度に対する収集電荷量の変化を見る。再結合数は A.4 節に述べたとおり電子密度とイオン密度の両方に比例し、再結合定数 α を用

いて単位時間単位体積当たり $\alpha N^+ N^-$ と書ける。再結合する電荷が総電荷に比べて十分少ない場合には $N^+ = N^- \cong N_0$ と見なせるので電荷量の減少分は N_0 の二次式となり、ビーム強度すなわち N_0 と収集電荷量の対応は二次関数で近似できる。

再結合量が増えてくると二次関数ではうまく合わなくなってくるので、ドリフト中に電荷密度が減少することによる影響も考えなくてはならない。電子付着等の影響は無視しているので、電子の存在する領域 $0 \leq x \leq D - \omega t$ においては $N^+(t) = N^-(t) = N(t)$ とみなせ、

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\alpha N^2(t) \quad (\text{A.18})$$

これを $N(0) = N_0$ の初期条件で解くと

$$N(t) = \frac{N_0}{\alpha N_0 t + 1} \quad (\text{A.19})$$

式 (A.16) の N_0 を $N(t)$ で置き換えると

$$U_e = \int_0^\tau \frac{eV}{\tau} \frac{N_0}{\alpha N_0 t + 1} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) dt \quad (\text{A.20})$$

$$= \frac{eN_0 V}{\tau^2} \left\{ -\frac{\tau}{\alpha N_0} + \frac{\alpha N_0 \tau + 1}{\alpha^2 N_0^2} \log(\alpha N_0 \tau + 1) \right\} \quad (\text{A.21})$$

$$= \frac{eV}{(\alpha \tau)^2 N_0} \{ -\alpha \tau N_0 + (\alpha \tau N_0 + 1) \log(\alpha \tau N_0 + 1) \} \quad (\text{A.22})$$

のように収集電荷量 U_e のビーム強度すなわち N_0 依存性が書ける。フィット関数としては、ペDESTALの補正を行う定数項を追加して

$$F(x) = P_0 + \frac{P_1}{P_2^2 x} \{ -P_2 x + (P_2 x + 1) \log(P_2 x + 1) \} \quad (\text{A.23})$$

$$P_0 : \text{定数項 (ペDESTAL)} \quad P_1 : \text{比例係数} \quad P_2 : \text{再結合パラメータ} \quad (\text{A.24})$$

として用いる。この式を $P_2 \rightarrow 0$ としたときの近似は、式 (A.17) と式 (A.22) を比較すれば明らかなように $P_0 + 1/2 P_1 x$ であり、フィットによって再結合の影響の無い理想的な応答の直線を求めることもできる。

さて、ここまでの議論で無視してきたイオン由来の信号について考える。イオンのドリフト速度 u は一般に電子のドリフト速度の $1/100 \sim 1/1000$ であり、すべての収集電荷を測定するためには非常に長い電荷積分時間が必要となる。イオンのドリフト時間 D/u よりも電荷積分時間 T が短い場合、実際に測定される電荷量 U_i は再結合の影響を無視すると

$$U_i = \int_0^T \frac{u}{D} e N_0 S(D - ut) dt \quad (\text{A.25})$$

$$= \frac{uT}{D} Q \left(1 - \frac{uT}{2D} \right) \quad (\text{A.26})$$

となる。

イオン由来の信号についても再結合の影響を厳密に取り扱うべきではあるが、電子のドリフトに関する情報も必要になって複雑である。本研究での測定の範囲内ではイオン由来の信号の収集率、再結合率ともに小さいため厳密な議論は行わず、イオン由来の信号の再結合による減少率は電子由来の信号の減少率と等しいと仮定して議論を行う。つまり、イオン由来の信号の混入は、式 (A.23) の形を変えずに P_1 をスケールさせるだけになる。

参考文献

- [1] The ALEPH Collaboration, The DELPHI Collaboration, The L3 Collaboration, The OPAL Collaboration, The SLD Collaboration, The LEP Electroweak Working Group, and The SLD Electroweak & Heavy Flavour Groups. Precision electroweak measurements on the Z resonance. *Phys. Rept.*, Vol. 427, p. 257, 2006.
- [2] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata. Remarks on the unified model of elementary particles. *Prog. Theor. Phys.*, Vol. 28, p. 870, 1962.
- [3] Y. Ashie et al.(Super-Kamiokande Collaboration). Measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by Super-Kamiokande I. *Phys. Rev.*, Vol. D 71, p. 112005, 1995.
- [4] E. Aliu et al.(K2K Collaboration). Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 94, p. 081802, 2005.
- [5] B. J. Rebela et al. (MINOS Collaboration). First minos results with the numi beam. *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, Vol. 168, p. 195, 2007. hep-ex/0701049.
- [6] S. Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration). Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of Super-Kamiokande-I data. *Phys. Lett.*, Vol. B 539, p. 179, 2002.
- [7] S. N. Ahmed et al.(SNO Collaboration). “ measurement of the total active B-8 solar neutrino flux at the sudbury neutrino observatory with enhanced neutral current sensitivity. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 92, p. 181301, 2004.
- [8] T. Araki et al. (KamLAND Collaboration). Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion. *Phys.Rev.Lett.*, Vol. 94, p. 081801, 2005.
- [9] M. Apollonio et al. (CHOOZ Collaboration). Search for neutrino oscillations on a long base-line at the chooz nuclear power station. *Eur. Phys. J.*, Vol. C27, p. 331, 2003.
- [10] J-PARC 大強度陽子加速器施設 <http://j-parc.jp>.

-
- [11] (BNL-E88 9collaboration) D.Beavis et al. Long baseline neutrino oscillation experiment at the ags. *BNL-52459*, 1995.
- [12] 栗本佳典. T2K 実験におけるニュートリノビームモニターの開発. Master's thesis, 京都大学大学院 理学研究科, 2005.
- [13] 平出克樹. J-PARC ニュートリノ振動実験のための Off-axis 前置検出器の基本設計および apd 読み出し系の開発. Master's thesis, 京都大学大学院 理学研究科, 2004.
- [14] 松岡広大. T2K 長基線ニュートリノ振動実験 ミューオンモニターの開発. Master's thesis, 京都大学大学院 理学研究科, 2006.
- [15] International Commission on Radiation Units and D.C. Measurements, Washington. Average energy required to produce an ion pair. *ICRU Report*, Vol. 31, , 1979.
- [16] 浜松ホトニクス株式会社. Si PIN フォトダイオード S3590-08.
- [17] W. Adam et al. (The RD42 Collaboration). Status of the r&d activity on diamond particle detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A511, p. 124, 2003.
- [18] C. White et al. Diamond detectors for high energy physics. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A 351, p. 217, 1994.
- [19] M. Bruzzi et al. A study of charge collection processes on polycrystalline diamond detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A 530, p. 146, 2004.
- [20] *Development of a PCI Based Data Acquisition Platform for High Intensity Accelerator Experiments*, 2003. hep-ex/0305088.
- [21] 京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センター.
- [22] NIST Data Base. Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html>.
- [23] Particle Data Group, Atomic and Nuclear Properties of Materials, <http://pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties/>.
- [24] K. Seiya, et al. Multi-batch slip stacking in the main injector at fermilab. Presented at Particle Accelerator Conference (PAC 07), Albuquerque, New Mexico, 25-29 Jun 2007.
- [25] R.M.Zwaska. *Accelerator Systems and Instrumentation for the NuMI Neutrino Beam*. PhD thesis, The University of Texas at Austin, 2005.
- [26] D.Harris and Nancy Grossman. Radiation dose estimates the monitoring system. *NuMI-NOTE*, Vol. 845, , 2002.
- [27] W.-M. Yao, et al. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G*, Vol. 33, pp. 1+, 2006. <http://pdg.lbl.gov>.
- [28] J. A. Hornbeck. Microsecond transient currents in the pulsed townsend ischarge.

- Phys. Rev.*, Vol. 83, p. 374, 1951.
- [29] J. M. Kirshner and D. S. Toffolo. Drift velocity of electrons in argon and argon mixtures. *J. Appl. Phys.*, Vol. 23, p. 594, 1952.
- [30] V. Palladino and B. Sadoulet. Application of classical theory of electrons in gases to drift proportional chambers. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. 128, p. 323, 1975.
- [31] K. Kleinknecht. *detector for particle radiation second edition*. Cambridge, 1986.
- [32] Jr. W.H. Long, et al. Electron drift velocities in molecular-gas-rare-gas mixtures. *Phys. Rev. A*, Vol. 13, p. 471, 1976.
- [33] L. B. Loeb. *Basic Processes of Gaseous Electronics*. University of California Press, 1955.
- [34] S. J. Harris and C. E. Doust. Energy per ion pair measurements in pure helium and helium mixtures. *Radiation Research*, Vol. 66, p. 11, 1976.
- [35] M. Inokuti. Introduction to the symposium on the jesse effect and related phenomena. *Radiation Research*, Vol. 59, p. 343, 1974.
- [36] H. MYERS. Analysis of electron swarm experiments in oxygen. *J. Phys. B*, Vol. 2, p. 394, 1969.
- [37] B. Rossi and H. Staub. *Ionization Chambers and Counters*. McGraw-Hill Book, 1949.
- [38] B. Rossi and H. Staub. *Ionization Chambers and Counters*. Cambridge Univ. Press, 1950.