

T2K 実験ミューオンモニターに用いる
新検出器の開発
(Development of a new detector
for the muon monitor at the T2K experiment)

理学研究科
数物系専攻
本條 貴司

概要

T2K 実験は 2009 年から行われている長基線ニュートリノ振動実験である。ニュートリノ振動のパラメータの精密測定を行なっている。この実験を行う上でニュートリノビームの方向を精度良くモニターすることが不可欠である。その役割を担うのがミュオンモニターである。

ミュオンモニターは親のパイオンからニュートリノと共に生成されるミュオンの方向と強度を測定している。荷電パイオンは二体崩壊であるため、間接的にニュートリノビームの方向と強度を測定することができる。T2K 実験は今後解析方法の改善や統計量の増加によって精度を上げる計画である。その一環として、ニュートリノビームの増強を行う予定である。ビームの大強度化に伴い、現在のミュオンモニターで用いている検出器を将来使用する上で放射線損傷や、線形応答性の悪化などの懸念が生じている。そこで大強度化したビームにおいても安定的にビームのモニターができる新しい検出器の候補である EMT (Electron-Multiplier Tube) の開発を行なった。EMT の放射線耐性や線形応答性を調べるためのビームテストを東北大学電子光理学研究センターで行なった。ビームテストで用いるための検出器の支持具の設計を行った。先行研究で見られた電圧印加直後の応答の不安定性についても調べた。ビームテストを行なった結果、EMT は現在の強度から将来の強度における線形応答性の精度は 3% 以内で要求を満たしているという結果を得た。放射線耐性については将来のビーム強度による運転時間で約 500 日間の照射に対し Si の信号が 40% 程度低下したが、EMT の信号の低下は 5% 以内であった。また新たに高い放射線耐性を期待した、ダイノードに二次電子放出材を塗布していない EMT (EMT w/o al-Sb) を準備し、その応答と放射線耐性を調べた。この EMT w/o al-Sb の信号を世界で初めて確認することが出来た。

目次

1	序論	1
1.1	ニュートリノ	1
1.2	ニュートリノ振動	1
1.3	振動パラメータ測定の現状	3
1.4	ニュートリノ反応	4
2	T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験	6
2.1	実験の概要	6
2.2	実験の目的	6
2.3	大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ニュートリノビームライン	6
2.4	off-axis 法	10
2.5	前置検出器	12
2.6	後置検出器 スーパーカミオカンデ	15
2.7	今までの結果	16
2.8	将来計画	19
3	ミューオンモニター (MUMON)	21
3.1	MUMON の概要	21
3.2	MUMON の構造	23
3.3	シリコン PIN フォトダイオード	24
3.4	Ionization chamber (IC)	26
3.5	ミューオンモニターへの要請	27
3.6	MUMON におけるミューオンのフラックスと量	27
3.7	1 日当たりのミューオンの量	28
3.8	将来強度における MUMON の運転	28
4	T2K 実験ミューオンモニターに用いる新しい検出器	30
4.1	電子増倍管 (Electron-Multiplier Tube : EMT)	30
4.2	EMT の動作原理	32
4.3	EMT の放射線劣化	34
4.4	EMT の先行研究	34
5	CT (Current transformer)	36
5.1	CT の原理	36
5.2	本研究で用いた CT	39

6	ビームテストによる検出器の性能評価 1	43
6.1	ビームテスト 1 のセットアップ	45
6.2	各検出器の信号	55
6.3	照射量の評価	56
6.4	EMT の安定性	60
6.5	EMT w/o al-Sb の性能評価	60
6.6	ビームテスト 1 まとめ	62
7	ビームテストによる検出器の性能評価 2	62
7.1	ビームテスト 2 のセットアップ	62
7.2	Si array のローパスフィルター	66
7.3	高強度照射における EMT の処理	67
7.4	ビームテストのシミュレーション	68
7.5	ビームテスト 2 における照射量	69
7.6	EMT の線型応答性	71
7.7	EMT の初期不安定性	75
7.8	EMT の放射線耐性	78
7.9	ビームテスト 2 の結果まとめ	79
8	新しいミュオンモニターのデザイン	81
9	結論	82

図目次

1.1	荷電カレント準弾性散乱反応	4
1.2	荷電カレント 1π 生成反応	4
1.3	中性カレント弾性散乱反応	5
1.4	中性カレント π^0 生成反応	5
2.1	T2K 実験のビームライン	6
2.2	陽子ビームのバンチ構造	7
2.3	ニュートリノビームライン	8
2.4	3つの電磁ホーンの配置 [20]	9
2.5	電磁ホーン	10
2.6	ディケイボリューム	10
2.7	π^+ の崩壊	11
2.8	p の運動量と ν のエネルギーの関係 [21]	11
2.9	ニュートリノ振動確率とエネルギーの関係、および異なる off-axis の角度におけるニュートリノフラックスの違い。後置検出器における、 ν_μ の残存確率（上段）、 ν_e の出現確率（中段）、off-axis の角度ごとのニュートリノフラックス（下段） [22]	12
2.10	INGRID	13
2.11	ND280	14
2.12	B2 フロア検出器群の配置	15
2.13	B2 フロア検出器群をビーム上流から見た写真	15
2.14	蓄積 P.O.T および beam power の変遷	16
2.15	年ごとの蓄積 P.O.T.	17
2.16	SK で観測された ν_e (a) と $\bar{\nu}_e$ (b) の候補イベント	18
2.17	振動パラメータの結果	19
3.1	2次ビームラインの横から見た断面図 [23]	21
3.2	ミューオンの運動量分布 [24]	22
3.3	ミューオンモニターに到達するミューオンの親粒子パイオンの位相分布 [24]	22
3.4	MUMON の構造 [26]	23
3.5	MUMON の写真	24
3.6	MUMON の全体図	24
3.7	シリコン PIN フォトダイオード	25
3.8	PIN ダイオードの構造 下に電場分布を示した。	26
3.9	Ionization chamber の写真 [28]	26
4.1	EMT の写真	30
4.2	EMT デバイダー回路	30

4.3	EMT とデバイダー回路の写真 EMT のアルミニウム面にカバーが取り付けられている	32
4.4	EMT の構造	32
5.1	CT の動作原理	36
5.2	CT の断面図	36
5.3	CT の等価回路	38
5.4	CT の周波数特性	39
5.5	CT の写真	39
5.6	CT の信号測定のセットアップ	41
5.7	入力信号	41
5.8	CT からの出力信号	41
5.9	CT の線型性	42
5.10	CT の周波数特性	42
6.1	ELPH の概要図 [32]	43
6.2	ELPH ビーム出口付近の様子	44
6.3	高強度照射におけるセットアップ	45
6.4	ビームテスト 1 低強度照射のセットアップ	46
6.5	ビームテスト 1 Si のキャリブレーションのためのセットアップ	46
6.6	ビームテスト 1 ビームプロファイル測定のためのセットアップ	46
6.7	ビームテスト 1 における支持具のデザイン	47
6.8	Si の支持具 ビームテスト中は Si をアルミニウム箔で覆った	48
6.9	Si 用 PEEK カバー 1	49
6.10	Si 用 PEEK カバー 2	49
6.11	Si の支持具の構造	49
6.12	ソケットピンを取り付けた Si を横から見た図	50
6.13	EMT の支持具	50
6.14	Si の支持具のコネクタ	51
6.15	EMT の支持具のコネクタ	51
6.16	BNC コネクタを取り付けるための穴	51
6.17	SHV コネクタを取り付けるための穴	51
6.18	Si array の写真	52
6.19	Si のローパスフィルター	52
6.20	Si array のローパスフィルター	53
6.21	ビームテスト 1 DAQ セットアップ	53
6.22	アクチュエータとそのコントローラ	54
6.23	ビームテスト 1 支持具とアクチュエータのセットアップ	54
6.24	Si の信号	55
6.25	EMT の信号	55

6.26	CT の信号	56
6.27	高強度時の CT の出力信号	57
6.28	CT の入力ビームに変換した信号	57
6.29	積分範囲の例。横軸を拡大してある。	57
6.30	ビームテスト 1 ビームフラックス	58
6.31	ビームフラックス (ガウシアンフィット)	58
6.32	EMT の安定性	60
6.33	ビーム強度が 5.0×10^6 electrons/cm ² /pulse であるときの EMT w/o al-Sb の信号	61
6.34	EMT w/o al-Sb の信号	61
6.35	EMT w/o al-Sb の安定性	62
7.1	リモートコントロールのための配線	63
7.2	ビームテスト 2 における支持具のデザイン	64
7.3	ビームテスト 2 DAQ セットアップ	65
7.4	ビームテスト 2 高強度照射のセットアップ	66
7.5	ビームテスト 2 低強度照射のセットアップ	66
7.6	ビームテスト 2 Si のキャリブレーションのためのセットアップ	66
7.7	ビームテスト 2 ビームフラックス測定のセットアップ	66
7.8	ビームテスト 2 ref-Si のキャリブレーションのためのセットアップ	66
7.9	Si array の信号 低強度照射時ビーム中心付近の信号である。	67
7.10	ビームテスト 2 における Si array のローパスフィルター	67
7.11	高強度照射における EMT の処理	68
7.12	1Ω を入れている回路	68
7.13	電子のエネルギー損失	69
7.14	ミューオンのエネルギー損失	69
7.15	ビームフラックス	70
7.16	9 点照射合計のビームフラックス	70
7.17	ref-Si のキャリブレーション	72
7.18	EMT#1 の照射前の線形応答性	73
7.19	EMT#1 の 596 日分 (1.3 MW, 320 kA) 照射後線形応答性	73
7.20	EMT#2 の照射前の線形応答性	74
7.21	EMT#2 の 791 日分 (1.3 MW, 320 kA) 照射後線形応答性	74
7.22	EMT#1 のためのキャリブレーション結果	76
7.23	EMT#2 のためのキャリブレーション結果	76
7.24	初期不安定性 EMT1	77
7.25	初期不安定性 EMT2	77
7.26	EMT と Si の放射線耐性の比較	78
7.27	放射線耐性試験 EMT#1	79

7.28 放射線耐性試験 EMT#2 79

1 序論

1.1 ニュートリノ

宇宙を構成する基本的な粒子を素粒子と呼ぶ。標準理論において、物質を構成する素粒子はクォークとレプトンと呼ばれる。ニュートリノは電荷が0のレプトンである。クォークとレプトンはボソンと呼ばれる素粒子を媒介して相互作用を行う。相互作用は弱い相互作用、強い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用の4種類がある。ニュートリノは重力相互作用を除き弱い相互作用を行う。1930年に Pauli によって検出されにくい中性粒子としてその存在が予言された [1]。1935年に Fermi によりニュートリノを含んだモデルが作られた。1950年に Reines と Cowan が原子炉からの反電子ニュートリノを検出し、その検出感度が理論予測と一致したことからニュートリノの存在が確認された [2]。標準理論においてニュートリノは3世代存在し、その反粒子を含め6種類ある。荷電カレント反応 (1.1) を通して電子 (e)、ミューオン (μ)、タウ (τ) が生成されるニュートリノをそれぞれ、電子ニュートリノ (ν_e)、ミューオンニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) と呼ぶ。

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \quad (l = e, \mu, \tau) \quad (1.1)$$

1.2 ニュートリノ振動

1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一がニュートリノは質量を持ち、各フレーバーのニュートリノが異なる質量固有状態の重ね合わせであるとすれば時間発展と共にそのフレーバーを変えるという理論を提唱した [3]。1998年にスーパーカミオカンデ実験グループによりニュートリノ振動が観測され、ニュートリノに質量があることが確認された [4]。

ニュートリノの質量固有状態を $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$)、フレーバーの固有状態を $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) とする。フレーバーの固有状態は質量の固有状態の混合和として表されるとする。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{PMNS}^{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.2)$$

U_{PMNS} は Pontecorvo・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれる3行3列のユニタリ行列であり、以下のように表される。

$$\begin{aligned} U_{PMNS} &= \begin{pmatrix} U_{PMNS}^{e1} & U_{PMNS}^{e2} & U_{PMNS}^{e3} \\ U_{PMNS}^{\mu1} & U_{PMNS}^{\mu2} & U_{PMNS}^{\mu3} \\ U_{PMNS}^{\tau1} & U_{PMNS}^{\tau2} & U_{PMNS}^{\tau3} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}s_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量固有状態 ν_i と ν_j との混合角である。 δ_{CP} は複素位相である。以下簡単のために 2 世代間での混合を考える。このとき混合角を $\theta_{\alpha\beta}$ として、フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ 、 $|\nu_\beta\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ 、 $|\nu_j\rangle$ の線型結合で表される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} &= U \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \\ &\equiv \begin{pmatrix} \cos \theta_{\alpha\beta} & \sin \theta_{\alpha\beta} \\ -\sin \theta_{\alpha\beta} & \cos \theta_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.4)$$

質量固有状態の時間発展は、 ν_i のエネルギーを E_i 、運動量を \mathbf{p}_i 、位置を \mathbf{r} として、

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r})} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.5)$$

と表される。ここで自然単位系を使用している。よって、フレーバー固有状態の時間発展は式 (1.6) のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(E_i t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_i)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_j t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_j)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} |\nu_i(0)\rangle \\ |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

ここで、ニュートリノの全エネルギーを E_ν とし、 E_ν を持つニュートリノ ν_α が距離 L だけ飛行した後、 ν_β になる確率 $P_{\alpha \rightarrow \beta}$ について考える。ニュートリノの質量 m_i は非常に小さく、 $m_i \ll E_i$ であるとし $|\mathbf{p}| \approx (E_i - m_i^2/2E_i)$ 、 $L = t$ であるので、式 (1.6) は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(m_i^2 L/2E_i)} & 0 \\ 0 & e^{-i(m_j^2 L/2E_j)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} |\nu_i(0)\rangle \\ |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

よって、質量固有状態 i, j 間の質量二乗差 $\Delta_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ を用いて、

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \end{aligned} \quad (1.8)$$

と表される。また、エネルギー E_ν を持つ ν_α が距離 L だけ飛行した後、 ν_α である確率 $P_{\alpha \rightarrow \alpha}$ は

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \alpha} &= 1 - P_{\alpha \rightarrow \beta} \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる。このように、ニュートリノ振動の振動確率はニュートリノの飛行距離とエネルギーの関数となる。これを 3 世代に拡張すると同様に計算でき、 ν_α が距離 L だけ飛行した後 ν_β になる確率 $P_{\alpha \rightarrow \beta}$ は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \\ &\quad + 2 \sum_{i > j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/2E_\nu) \end{aligned} \quad (1.10)$$

また、反ニュートリノにおける振動確率 $P_{\bar{\alpha} \rightarrow \bar{\beta}}$ は U_{ab} を U_{ab}^* にすることで得られ次式のようになる。

$$P_{\bar{\alpha} \rightarrow \bar{\beta}} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L / 4E_\nu) - 2 \sum_{i > j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L / 2E_\nu) \quad (1.11)$$

式(1.10)と式(1.11)を比較すると U_{PMNS} に含まれる δ_{CP} の値が $0, \pi$ でない値ならば、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率が異なり CP 対称性が破れる。

以上のように振動確率は混合角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \Delta m_{12}^2, \Delta m_{13}^2, \Delta m_{23}^2, \delta_{CP}$ によって記述される。

1.3 振動パラメータ測定の実況

各振動パラメータの実況の測定結果を表 1.1 に示す [5]。数値は質量が順階層 ($m_1 < m_2 < m_3$) の場合である。括弧内の値は逆階層 ($m_3 < m_1 < m_2$) の場合である。

表 1.1 振動パラメータの最新結果

parameter	最適値	3 σ 区間
$\Delta m_{21}^2 (10^{-5} \text{eV}^2)$	7.55	7.05 ~ 8.24
$\Delta m_{32}^2 (10^{-3} \text{eV}^2)$	2.424 (-2.50)	2.334 ~ 2.524 (-2.59 ~ -2.39)
$\sin^2 \theta_{12}$	0.320	0.273 ~ 0.379
$\sin^2 \theta_{23}$	0.547 (0.515)	0.454 ~ 0.599 (0.453 ~ 0.598)
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0216 (0.0222)	0.0196 ~ 0.0241 (0.0199 ~ 0.0244)
δ_{CP} / π	1.21 (1.56)	0.87 ~ 1.94 (1.12 ~ 1.94)

各パラメータは以下のような実験によって求められている。

- $\Delta m_{21}^2, \theta_{12}$
スーパーカミオカンデ [6]、SNO による太陽ニュートリノ実験 [7]、KAMLAND での原子炉ニュートリノ観測 [8] によって測定されている。
- $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$
スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測 [9]、K2K 実験 [10]、MINOS 実験 [11]、T2K 実験によるミューオンニュートリノ消失事象から測定 [12] されている。
- $\Delta m_{13}^2, \theta_{13}$
2011 年に T2K 実験によって θ_{13} がゼロでない示唆が報告 [13] された。後に DayaBay [14]、RENO [15]、Double Chooz 実験 [16] および T2K 実験 [17] における ν_e 出現事象によって測定された。
- δ_{CP}
T2K 実験によって、 2σ の信頼度で $0, \pm\pi$ でないことが示唆されている [18]。

1.4 ニュートリノ反応

ニュートリノと他の物質との反応の例として、ニュートリノ-原子核反応がある。この反応は主に、荷電カレント反応 (CC 反応:Charge Current interaction) と中性カレント反応 (NC 反応:Neutral Current interaction) の二種類に分けられる。CC 反応は W^\pm ボソンを媒介する反応で、NC 反応は Z^0 ボソンを媒介する反応である。CC 反応の例を上げる。

- 荷電カレント準弾性散乱反応 (CCQE:Charged Current Quasi-Elastic interaction)

荷電カレント準弾性散乱反応 (図 1.1) はニュートリノが核子と準弾性散乱を行う二体反応である。T2K 実験のニュートリノエネルギー領域では最も支配的な反応である。

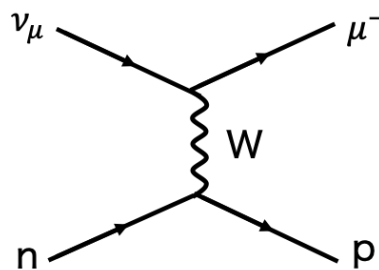


図 1.1 荷電カレント準弾性散乱反応

- 荷電カレント 1π 生成反応 (図 1.2)

CCQE の次に断面積が大きく、数 GeV の領域で支配的な反応である。

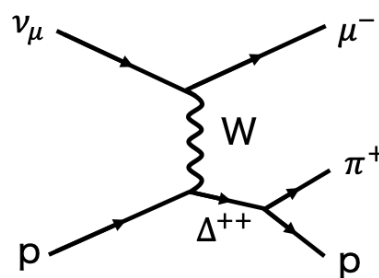


図 1.2 荷電カレント 1π 生成反応

NC 反応の例を挙げる。

- 中性カレント弾性散乱反応 (図 1.3)

終状態にレプトンを含まないため、CCQE と区別できる。

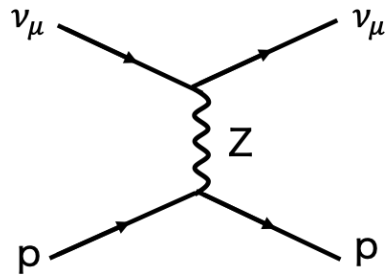


図 1.3 中性カレント弾性散乱反応

- 中性カレント π^0 生成反応 (図 1.4)

π^0 が 2γ に崩壊し電磁シャワーを起こし CCQE と区別できない可能性がある。

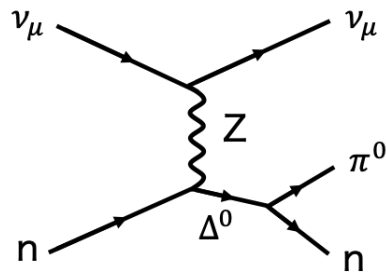


図 1.4 中性カレント π^0 生成反応

2 T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験

2.1 実験の概要

T2K 実験は図 2.1 のように茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (Japan proton accelerator research complex:J-PARC) で生成したニュートリノを約 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデ (Super Kamiokande:SK) まで飛ばす長基線ニュートリノ振動実験であり、2009 年から行われている。J-PARC ではミューオンニュートリノと反ミューオンニュートリノを選択的に生成できる。ニュートリノ生成直後とスーパーカミオカンデでニュートリノを検出し、 ν_e の出現事象と ν_μ 消失事象を観測することで、ニュートリノ振動を測定する。



図 2.1 T2K 実験のビームライン

2.2 実験の目的

ミューオンニュートリノ消失モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) の振動パラメータである混合角 θ_{23} と質量 2 乗差 Δ_{23}^2 の測定を精密に行う。電子ニュートリノ出現モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) の振動パラメータである混合角 θ_{13} の測定を行う。ニュートリノ振動をミューオンモードと反ミューオンモードで比較することで δ_{CP} を測定する。 δ_{CP} が $0, \pi$ 以外の値をとるかを調べるとレプトンセクターにおける CP 対称性の破れに繋がる。また δ_{CP} が $\pi/2$ であることがわかれば、破れが最大となる。

2.3 大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ニュートリノビームライン

T2K 実験のニュートリノビームは J-PARC で作られる。J-PARC の陽子加速器は上流から順に Linear accelerator (LINAC)、シンクロトロン Rapid-cycling synchrotron (RCS)、シンクロトロン Main ring (MR) で構成されている。LINAC により 400 MeV まで加速された陽子ビームを、さらに RCS で 3 GeV、MR で 30 GeV まで加速する。陽子ビームは 2.48 秒毎のスピルという単位で取り出されている。

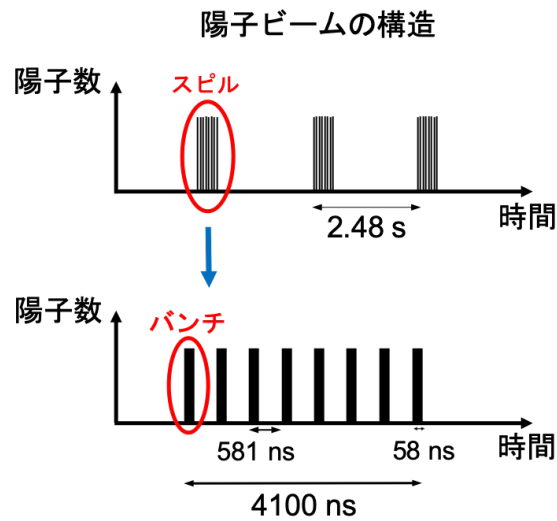


図 2.2 陽子ビームのバンチ構造

各スピルは $4.1 \mu\text{s}$ の幅を持ち、その中には図 2.2 に示すような 8 つのバンチ構造がある。J-PARC の MR で加速された陽子ビームの各パラメータを表 2.1 に示す。

表 2.1 J-PARC MR の陽子ビームのパラメータ

パラメータ	現在値
ビーム強度 (kW)	500
陽子運動エネルギー (GeV)	30
陽子数 (/spill)	2.4×10^{14}

加速された陽子ビームは図 2.3 に示した T2K 実験のニュートリノビームラインにおいて標的に打ち込まれる。T2K 実験では標的に打ち込む陽子の数を Protons on target (P.O.T.) と呼ぶ。P.O.T. はニュートリノフラックスやイベント数の基準値として用いられている。

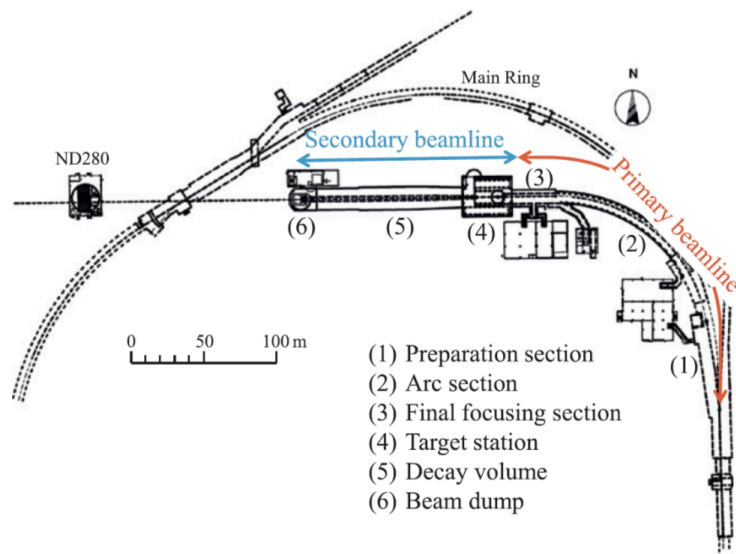


図 2.3 ニュートリノビームライン

陽子ビームはキッカーマグネットによってニュートリノビームラインに入る。ニュートリノビームラインの1次ビームラインと呼ばれる領域で陽子ビームは磁石によってSKの方に曲げられる。1次ビームラインは図2.3において、赤い線の領域である。1次ビームラインには2極磁場と4極磁場を同時に発生できる複合型超伝導磁石28台を設置している。1次ビームラインの最終部には10台の常電導磁石により、ビームを下向きに 3.637° 曲げSKの方向にビームを調整している。また、陽子ビームを炭素標的に照射するまでに、陽子ビームモニターを用いて、磁石による軌道、プロファイルの調整を行なっている。T2K実験で用いている陽子ビームモニターを以下に記す。

- Current Transformer (CT)
- Electrostatic Monitor (ESM)
- Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM)
- Beam Loss Monitor (BLM)
- Optional Transition Radiation Monitor (OTR)

それぞれについて説明する。

CT (Current Transformer)

強磁性体のトロイダルコアとそれに巻いたコイルから構成される。ビームにより発生する磁場を、コイルに生じる2次電流から測定する。このときの信号の大きさからビーム強度を算出している。CTの原理については5章で詳しく説明する。

ESM (Electrostatic Monitor)

ビーム軸周りの四方に電極が設置されており、ビームが通過した際それぞれの電極に誘起する電荷量を測定する検出器である。上下と左右でそれぞれの誘起信号を比べることで、ビームが通過した位置を求める。

SSEM (Segmented Secondary Emission Monitor)

チタン製のリボンにビームを照射し、二次電子放出に伴い誘起される信号強度からビームの重心位置、大きさを測定する。ビームに影響を及ぼすモニターである。全 19 台存在するが物理データ取得時は最下流のもの以外は外す。

BLM (Beam Loss Monitor)

アルゴンガスを主体とする混合ガスを用いたワイヤ型比例計数管で、ロスしたビームを測定する。大きなビームロスが生じた場合は直ちにビーム止める。

OTR (Optional Transition Radiation Monitor)

金属膜をビームが通過する際に生じる遷移光を測定することで、炭素標的直前におけるビームの 2 次元プロファイルを測定している。遷移光を鏡で地上に輸送した上で、CCD カメラで測定を行う。

図 2.3 の青い矢印の部分で 2 次ビームラインと呼んでいる。2 次ビームラインはターゲットステーション、ディケイボリューム、ビームダンプ、ミューオンモニターで構成されている。輸送された陽子ビームは長さ 91.4 cm、直径 2.6 cm の炭素標的と衝突する。標的と衝突した陽子は様々なハドロン反応を起こす。最も支配的な反応はパイオンを生成する反応であり、生成された荷電パイオン (π^\pm) が次の式 (2.1) と式 (2.2) ように崩壊することで、ニュートリノが生成される。



出来るだけ多くのニュートリノを利用するために、生成した π^\pm を収束させることが必要である。T2K 実験では 3 つの電磁ホーンを用いて、 π^\pm を収束させる。3 つの電磁ホーンは図 2.4 のように配置されている。炭素標的は 1 つ目の電磁ホーンの内部に設置されている。

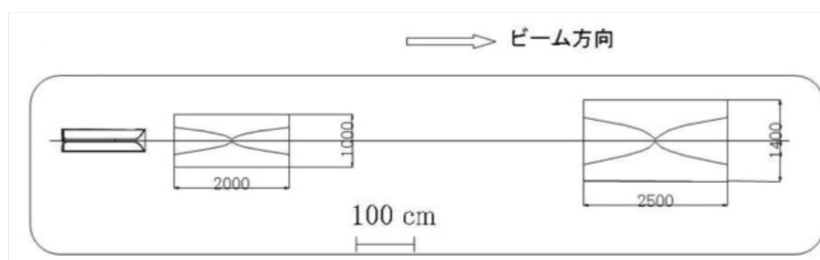


図 2.4 3 つの電磁ホーンの配置 [20]

電磁ホーンはアルミニウム合金の同軸構造でトロイダル磁場を作り出す装置である。最大で電流を 320 kA を流し 2.1 T の磁場を作ることができる。この電磁ホーンに流す電流 (ホーンカレント) は現在 ± 250 kA である。

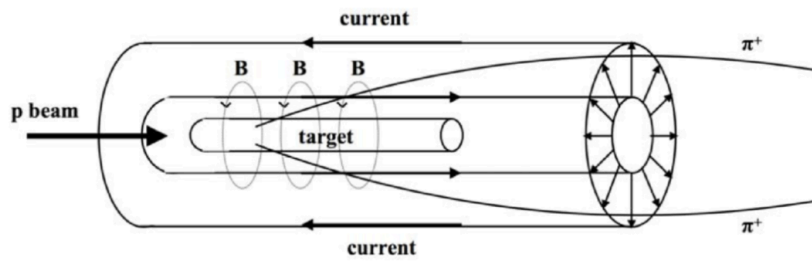


図 2.5 電磁ホーン

ニュートリノを多く集めたいときは π^+ を、反ニュートリノを集めたい場合は π^- を収束させる。 π^+ を収束してビームラインを運転することを Forward horn current (FHC) モード、 π^- を収束する場合は Reversed horn current (RHC) モードと言う。ディケイボリュームは 96 m のトンネルである。 π が μ と ν_μ に崩壊するのに十分な長さに設計されている。



図 2.6 ディケイボリューム

トンネルの終点には炭素および鉄のブロックとコンクリートの壁で作られたビームダンプがある。そこで、ニュートリノと高エネルギーのミューオン以外の粒子を吸収させる。ビームダンプの背後、標的から 118 m の位置に Muon monitor (MUMON) がありミューオンを検出する。ミューオンモニターについては次章で詳しく説明する。

2.4 off-axis 法

T2K 実験は off-axis 法を採用している。off-axis 法とはニュートリノビームの中心軸 (π^\pm の収束軸) を検出器の方向からずらすことにより、幅の狭いエネルギー分布のニュートリノビームを得る

方法である。この方法は 1995 年に BNL-E889 グループにより発表されたものである [19]。

2.4.1 off-axis 法の原理

off-axis 法の原理について述べる。式 (2.1) の崩壊により生成される ν_μ のエネルギー E_ν とする。図 2.7 のように π^+ の進行方向と ν_μ の成す角を θ とし、 π^+ の質量、エネルギー、運動量をそれぞれ m_π 、 E_π 、 p_π とする。

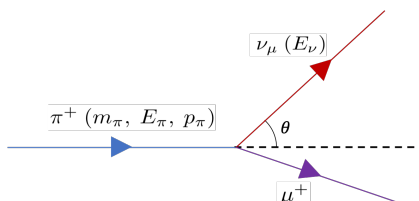


図 2.7 π^+ の崩壊

このとき、 E_ν は次の式で表される。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\nu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (2.3)$$

この式 (2.3) より導かれる $\theta = 0^\circ$ (on-axis)、 $\theta = 2^\circ$ (off-axis 2° :OA 2°)、 $\theta = 2.5^\circ$ (OA 2.5°)、 $\theta = 3^\circ$ (OA 3°) である場合の p_π と E_{ν} はそれぞれ図 2.8 のようになる。

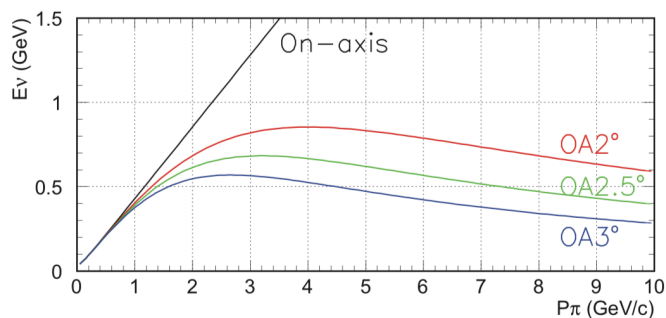


図 2.8 p の運動量と ν のエネルギーの関係 [21]

$\theta = 0$ の場合は、 E_ν は p_π に比例しているのに対し、 $\theta = 2^\circ$ 、 2.5° 、 3° の場合は、 E_ν は p_π への依存度が低いことがわかる。このように π^\pm の運動量が高い範囲に分布していたとしても、 π^\pm の取束軸からずれた方向においては、ニュートリノのエネルギーは狭い範囲に絞られる。

2.4.2 T2K 実験における off-axis 法

図 2.9 に基線長 295 m における、ニュートリノの振動確率と off-axis の角度を変えた場合のエネルギーの関係を示す。T2K 実験では、 $\theta = 2.5^\circ$ を採用している。 $\theta = 2.5^\circ$ にすることで、ニュー

トリノビームのエネルギーピークが約 0.7 GeV となり、後置検出器において振動確率が高いエネルギー領域と一致させている。

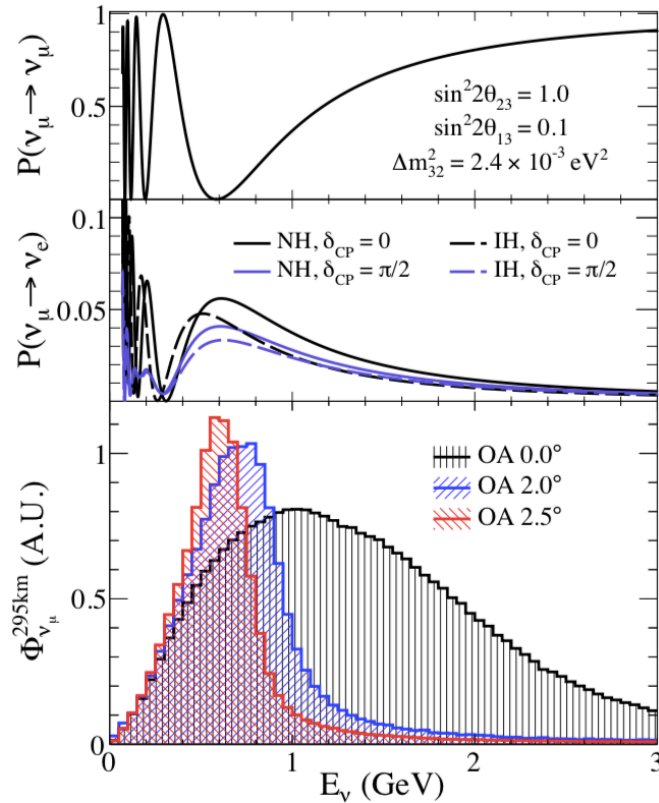


図 2.9 ニュートリノ振動確率とエネルギーの関係、および異なる off-axis の角度におけるニュートリノフラックスの違い。後置検出器における、 ν_μ の残存確率（上段）、 ν_e の出現確率（中段）、off-axis の角度ごとのニュートリノフラックス（下段） [22]

この off-axis 法を採用することによって、ビーム方向と後置検出器におけるニュートリノビームの強度やエネルギーに間に強い相関が生まれる。ビームの方向が 1 mrad ずれると、後置検出器におけるビーム強度が約 3% 変化し、エネルギーピークが約 13 MeV 変化するとシミュレーションされている [21]。そのため、ニュートリノビームの方向を監視することが重要である。

2.5 前置検出器

ニュートリノ生成直後のニュートリノを測定する検出器は大きく分けて INGRID*1、ND280*2、B2 フロア検出器群の 3 つがある。INGRID はニュートリノビーム軸上に設置されており、ニュートリノビームのプロファイルを測定する。図 2.10 のように、水平方向に 7 つ、鉛直方向に 7 つのモジュールが配置されている。1 つのモジュールの大きさは 1.24 m×1.24 m×0.95 m である。鉄 9 層とシンチレータ 11 層の構造である。シンチレータの中に埋め込んだ波長変換ファイバーと Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を用いて、鉄とニュートリノの反応によって生成した荷電粒子

を検出している。

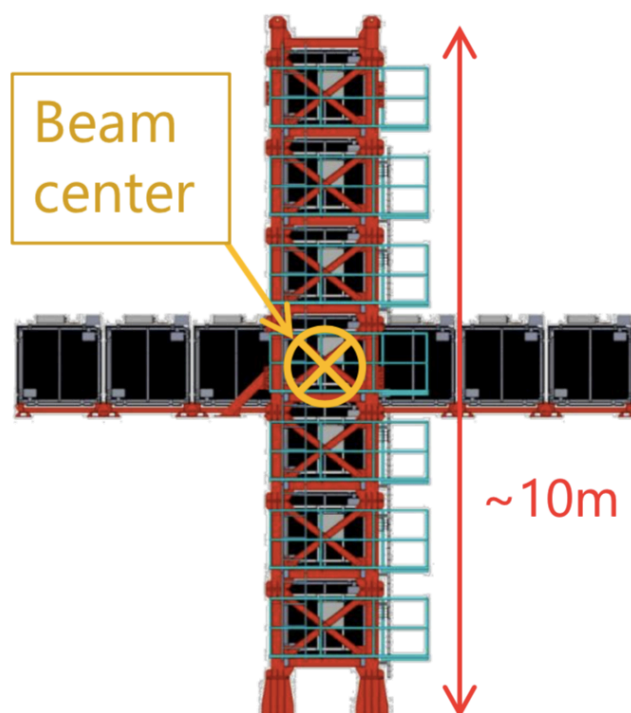


図 2.10 INGRID

ND280 は炭素標的から 280 m 離れた位置に設置されている。ニュートリノビーム軸から 2.5° ずれた方向に設置されている。ニュートリノのエネルギー分布、反応断面積などを測定する複合検出器である。

*1 Interactive Neutrino GRID

*2 ND は NearDetector の略である。280 は標的から 280 m 離れた位置にあることを意味する。

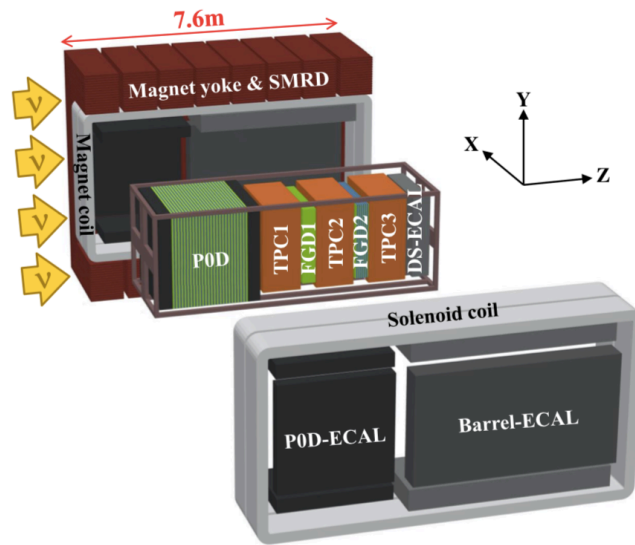


図 2.11 ND280

ND280 は図 2.11 の様な構造をしており、以下のコンポーネントからなる。

- UA1 Magnet
ニュートリノ反応で生成された荷電粒子を曲げ、運動量を測定する。
- P0D (π^0 Detector)
プラスチックシンチレータと水標的が交互に並べられた構造である。 π^0 を生成する中性カレント反応の断面積を測定する。
- FGD (Fine Grained Detector)
プラスチックシンチレータから構成されている。ビームの上流と下流で 2 台使用されている。ニュートリノの標的かつ、生成された荷電粒子の反応点付近の飛跡を検出する。下流側は水とプラスチックシンチレータから構成され、水とシンチレータの散乱断面積比を測定することができる。
- TPC (Time Projection Chamber)
P0D と 2 台の FGD の下流側に設置され、ニュートリノ反応で生じた荷電粒子の電荷、運動量を測定する。
- ECal (Electromagnetic Calorimeter)
鉛とプラスチックシンチレータを交互に重ねられた構造である。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子を検出する。
- SMRD (Side Muon Range Detector)
横方向に飛ぶミューオンを捉える飛跡検出器である。

B2 フロア検出器群は WAGASCI、proton module、Wall MRD、baby-MIND の 4 種類の検出器と NINJA 実験の検出器からなる。off-axis 1.5° における水標的や CH 標的におけるニュートリノ反応

の微分断面積を精密に測定している。これらの検出器の配置は図 2.12 の様になっている。図 2.13 はビーム上流側から見た様子である。以下に各検出器について説明する。

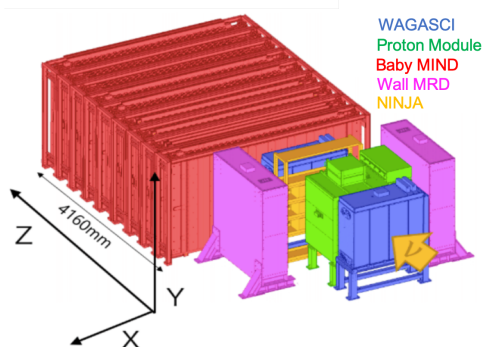


図 2.12 B2 フロア検出器群の配置



図 2.13 B2 フロア検出器群をビーム上流から見た写真

- **WAGASCI**
水を標的とする検出器である。3次元格子状構造のシンチレータで構成されている。
- **Proton Module**
CH を標的とする検出器である。2種類のシンチレータで構成されている。
- **Wall MRD**
標的検出器で大角度方向に生成されたミューオンの検出器である。鉄とシンチレータで構成されている。
- **baby-MIND**
標的検出器で下流方向に生成されたミューオンの検出器である。鉄コア磁石とシンチレータで構成されている。
- **NINJA 実験**
原子核乾板を用いて、低エネルギー ($E < 1$ GeV) 領域でのニュートリノ反応の精密測定を行う実験である。

2.6 後置検出器 スーパーカミオカンデ

T2K 実験では後置検出器としてスーパーカミオカンデ (SK) を使用している。SK はニュートリノ生成点から約 295 km 離れた場所にある。直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒型で 50 kt の水で満たされている、大型水チェレンコフ検出器である。SK の水のタンクは 2 層構造で、内側の inner detector (ID)、外側の outer detector (OD) からなる。OD は 8 inch の PMT が 1885 個が設置されており、宇宙線などからのバックグラウンドを除去することを目的としている。ID は 20 inch の PMT が 11129 個が設置されていて、ニュートリノから生成された荷電粒子からのチェレンコフ光

を検出する。SK はチェレンコフ光のリングの鮮明さから電子とミュオンを区別することができる。

2.7 今までの結果

T2K 実験において、2010 年 1 月 20 日から 2020 年 2 月 12 日までに蓄積した P.O.T. とビーム強度の変遷を図 2.14 に示す。2020 年 2 月 12 日時点において、合計で 3.64×10^{21} P.O.T. 分のデータを蓄積している。MR のビーム強度は 2020 年に 500 kW に達した。図 2.14 において実線は蓄積した P.O.T.、点はビーム強度を示す。また紫は反ニュートリノモード (RHC) での運転、赤はニュートリノモード (FHC) での運転を示す。青い実線は合計の P.O.T. を示している。

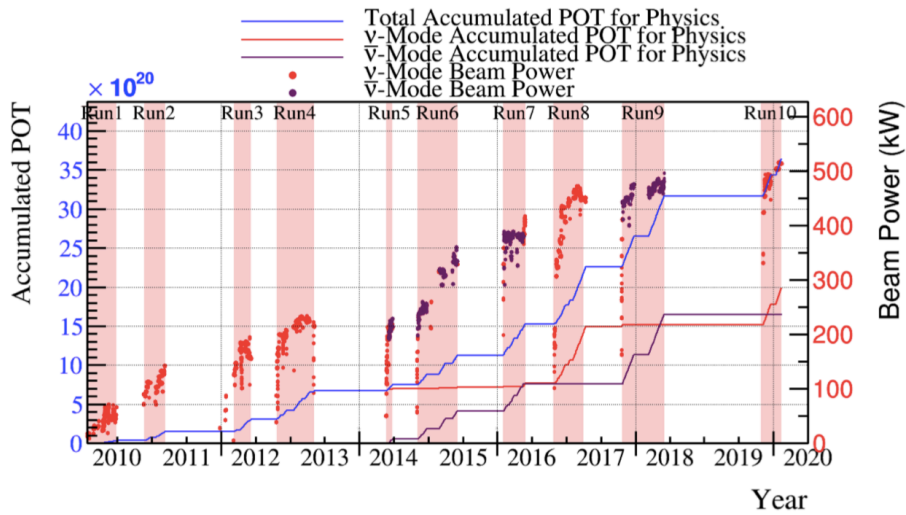


図 2.14 蓄積 P.O.T および beam power の変遷

図 2.15 に年毎の積算 P.O.T. をプロットしたものを示す。

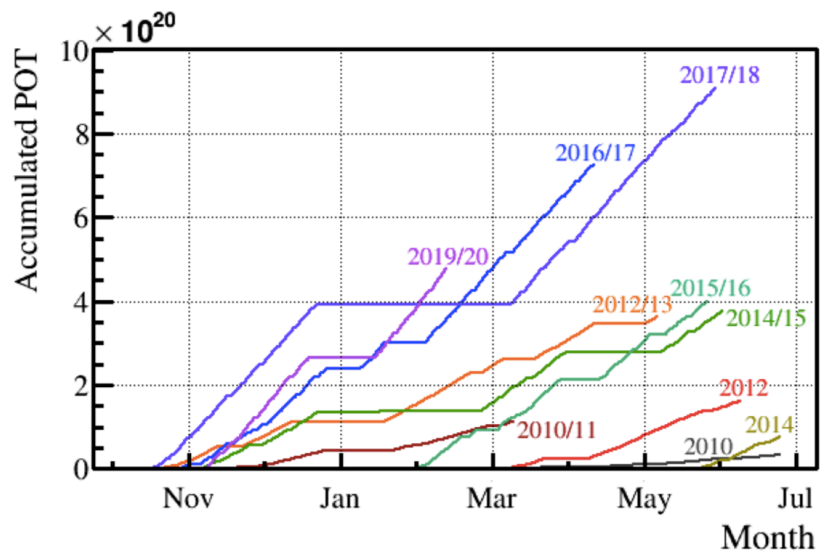


図 2.15 年ごとの蓄積 P.O.T.

このように現在 T2K 実験は 1 年間に 2 ヶ月から 4 ヶ月程度データを蓄積している。以下に 2010 年 1 月から 2018 年 5 月までに取得したデータを用いたニュートリノ振動パラメータの解析結果を示す [18]。図 2.16 は SK で観測された ν_e (a)、 $\bar{\nu}_e$ (b) の再構成されたエネルギー分布のデータである。色が付いている積み上げ棒グラフはバックグラウンドと $\delta_{CP} = 0$ である場合の振動を考えたときの予測である。また 2 種類の点線は $\delta_{CP} = -\pi/2$ 、 $\delta_{CP} = +\pi/2$ である場合の予測である。

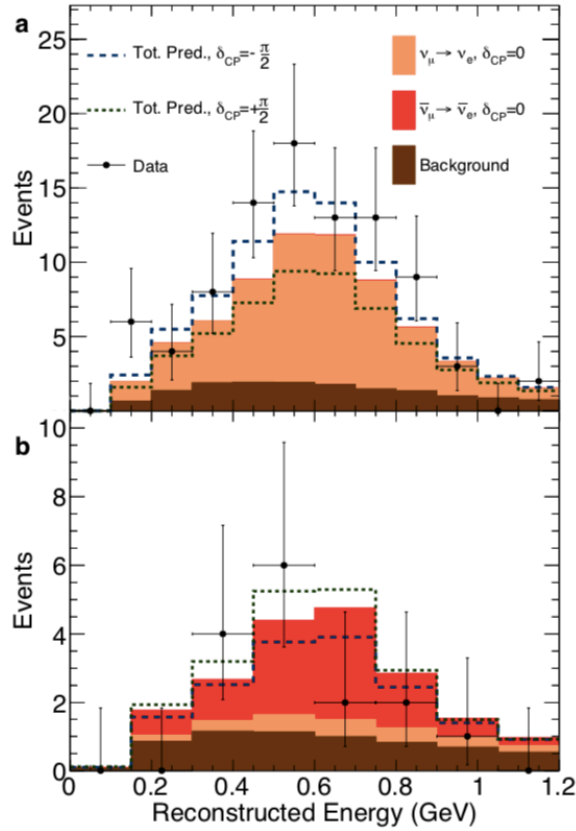


図 2.16 SK で観測された ν_e (a) と $\bar{\nu}_e$ (b) の候補イベント

これらの予測値は、ニュートリノの質量階層は順階層を、 $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{23}^2 は最適値を適用している。 $\sin^2 \theta_{13}$ 、 $\sin^2 \theta_{12}$ と Δm_{21}^2 は外部実験の世界平均の値を適用している。

ニュートリノ振動のパラメータの結果を図 2.17 に示す。図 2.17 の a のそれぞれの領域は、順階層で 68.27% の信頼区間を表している。星は T2K 実験と原子炉実験の結果を組み合わせた最適値を表している。図 2.17 の b は T2K 実験と原子炉実験の結果を適用している。質量順階層における結果である。カラーの値は各パラメータの尤度の対数の -2 倍の値を表している。図 2.17 の c は質量順階層と逆階層における δ_{CP} を表している。縦のラインが最適値を表している。箱型の領域は 68.27% 信頼区間を表している。また、エラーバーは 99.73% の信頼区間を表している。逆階層に関しては 68.27% 信頼区間の領域がない。初めて δ_{CP} の値を有意度 3σ の閉区間で制限を与えることが出来た。

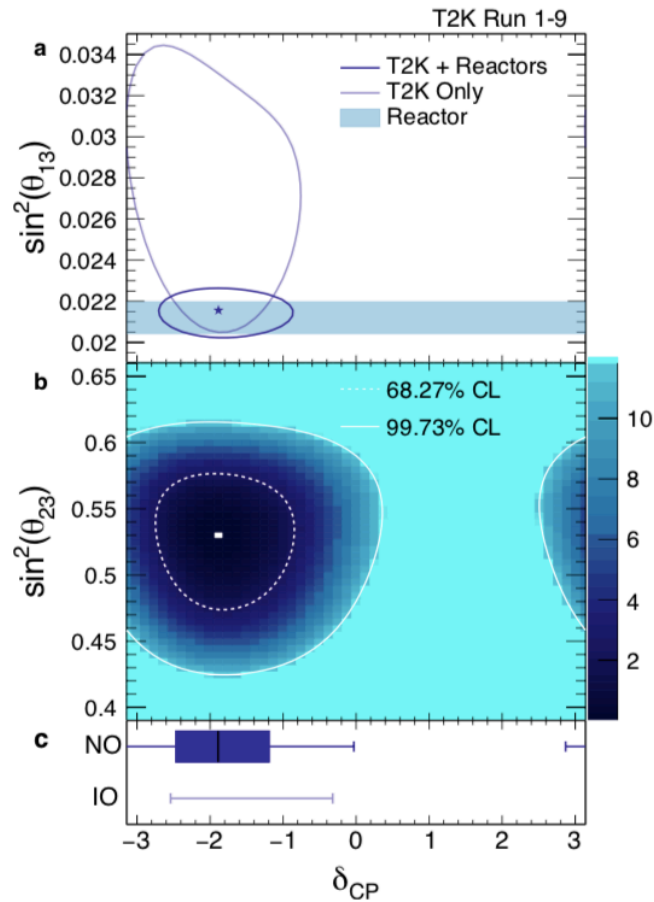


図 2.17 振動パラメータの結果

2.8 将来計画

実験の精度を上げるため系統誤差、統計誤差を削減していく必要がある。系統誤差は新たな検出器の建設や新たな解析方法の確立によって削減していく計画である。統計誤差はビームの大強度化、検出器の大質量化を進めることで削減する。

現在新たな後置検出器ハイパーカミオカンデ (Hyper Kamiokande:HK) の建設が進められている。HK が完成すると後置検出器の有効体積が約 8 倍になる予定である。HK が完成するまでの 6 年間に段階的にニュートリノビームの強度を上げる予定である。ニュートリノビームのアップグレードは主に 3 つの方法で行われる。1 つ目は J-PARC の陽子ビーム 1 パルスあたりに含まれる陽子の数を増やすことである。2 つ目はビームを打ち出す周期を短くすることである。3 つ目は荷電パイオン収束用の電磁ホーンの電流を大きくすることである。最終的には J-PARC の加速器ビーム強度を 1.3 MW に、電磁ホーンの電流を 320 kA にする予定である。HK 完成後は大質量化した後置検出器と高強度ビームを用いて、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れの探索の感度を 5σ ま

で上げることを目指す。ここでいうビーム強度は以下のように計算される。

$$\text{Beam Power [W]} = (\text{protons energy [eV]} \times 1.6 \times 10^{-19}) [\text{J}] \times \frac{\text{protons/pulse}}{\text{repetition cycle [s]}} \quad (2.4)$$

Repetition cycle が 2.48 s で 500 kW 運転時の陽子数は、 2.6×10^{14} protons/pulse、 3.3×10^{13} protons/bunch に相当する。

現在と将来のビームコンディションについて表 2.2 に記す。

表 2.2 ビームの大きさ

		現在		将来	
強度 (kW)	陽子数 (protons/cm ² /pulse)	500	2.58×10^{14}	1300	3.14×10^{14}
	operation cycle (s)		2.48		1.16
電流 (kA)		250		320	

3 ミューオンモニター (MUMON)

3.1 MUMON の概要

T2K 実験ではニュートリノの生成と共に生じるミューオンを検出することでニュートリノビームの方向と中心を 1 バンチ毎にモニターしている。ミューオンモニターは 2 次ニュートリノビームラインにおいて炭素標的から 118 m 下流に位置する (図 3.1)。炭素、鉄などで構成されるビームダンプの直後に設置されており、MUMON に到達する粒子のほとんどが 5 GeV/c 以上のパイオンから生成されたミューオンである。

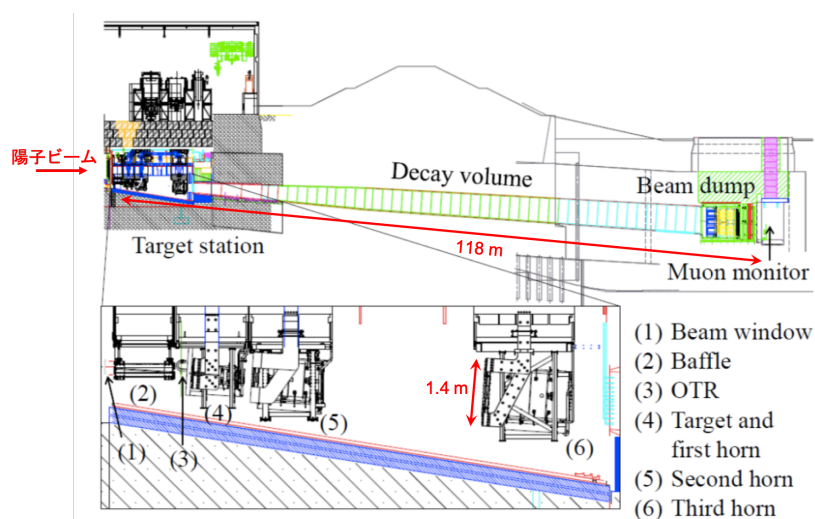


図 3.1 2 次ビームラインの横から見た断面図 [23]

ミューオンモニターはミューオンビームの方向と強度を測定する。荷電パイオンはミューオンとニュートリノの二体崩壊である。そのため、荷電パイオン崩壊後のミューオンビームを測定する事で、もう一方のニュートリノビームを推定することができる。ミューオンモニターにおける、ミューオンの運動量分布を図 3.2 に示す。

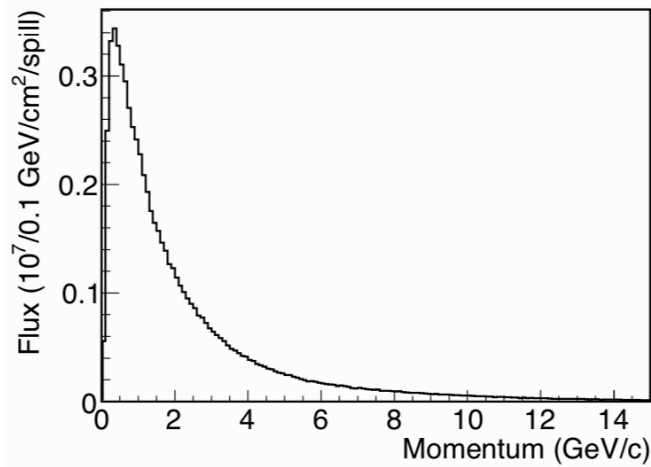


図 3.2 ミューオンの運動量分布 [24]

ホーンカレントが 320 kA、MR のビーム強度が 3.3×10^{14} protons/spill の場合の、JNUBEAM を使ったモンテカルロシミュレーションの結果である。JNUBEAM とは、T2K 実験のビームラインにおいて、ニュートリノビームを生成する過程をシミュレートするプログラムである。JNUBEAM は GEANT3 [25] をベースに作られている。ミューオンの平均運動量は ~ 3 GeV/c である。ミューオンモニターに到達するミューオンの親粒子のパイオンの位相分布は図 3.3 となっている。

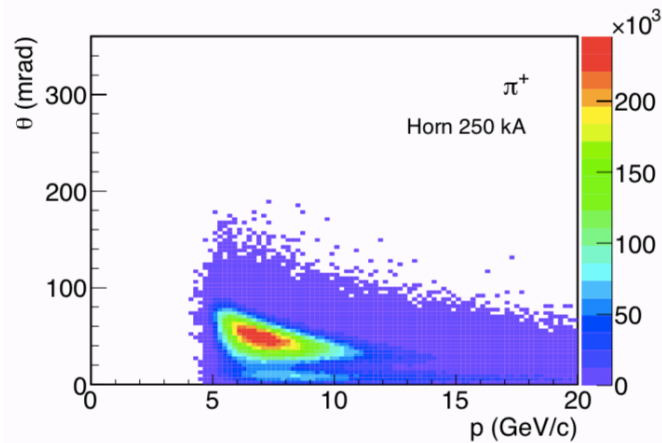


図 3.3 ミューオンモニターに到達するミューオンの親粒子パイオンの位相分布 [24]

図 3.3 を見ると、10 mrad 付近と 50 mrad 付近の 2 つのピークが見られる。50 mrad 付近のピークは電磁ホーンによって収束されたパイオンが崩壊したミューオンである。10 mrad 付近のピークはホーンによる影響を受けずに到達するミューオンである。MR のビーム強度が 750 kW で 100 日間運転した場合、ミューオンモニターにおける吸収線量は ~ 100 kGy と推定される。そのためミューオンモニターがある場所では鉄や通常のプラスチックなどは使用出来ず、このことを考慮した構造にする必要がある。

3.2 MUMON の構造

現在の T2K 実験のミュオンモニターは Ionization chamber (IC) とシリコン PIN フォトダイオード (Si) からなる。それぞれのセンサーが 25 cm 間隔で並べられており、7×7 の 49ch で 150 cm×150 cm の領域をカバーしている (図 3.4)。

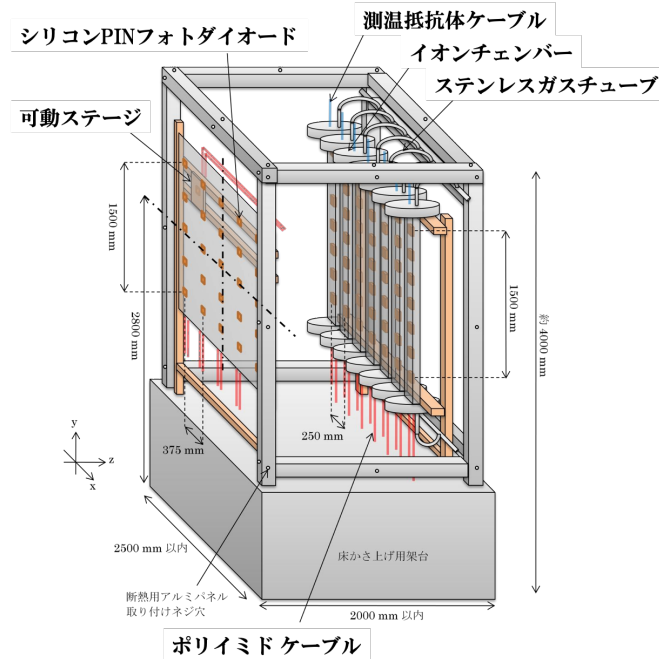


図 3.4 MUMON の構造 [26]

Si がビームの上流側に設置されている。架台やフレームはアルミニウムで作られている。MUMON の架台には Si のキャリブレーションを行うための可動ステージが取り付けられている。可動ステージにはキャリブレーション用の Si が取り付けられている。T2K 実験のビームタイムの最初に遠隔でこの可動ステージを動かして 49 個ある Si のキャリブレーションを行う。図 3.5 は MUMON の写真であり、紙面の右側がビーム上流である。

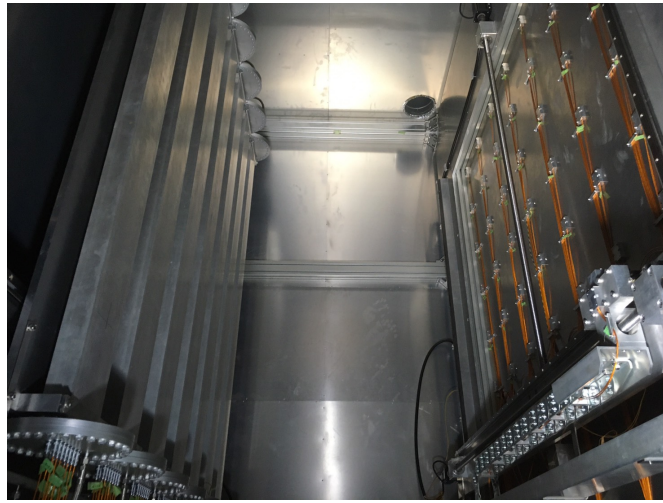


図 3.5 MUMON の写真

MUMON の概要を図 3.6 に示す。MUMON は J-PARC ニュートリノ実験施設第 3 設備棟 (NU3) の地下 18.5 m に位置している。検出器から地下のパッチパネルまでの約 10 m は信号線や HV 線として、放射線耐性がある同軸ポリイミドケーブルを用いている。地下のパッチパネルから地上までの約 60 m は同軸ノンハロゲンケーブルを用いている。コントロールルームは地上のミュオンモニター棟にある。

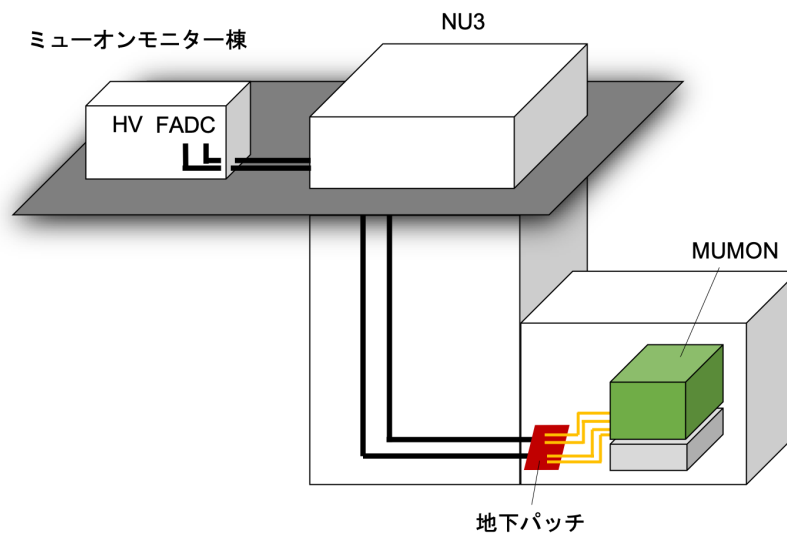


図 3.6 MUMON の全体図

3.3 シリコン PIN フォトダイオード

浜松ホトニクス社の S3590-08 を使用している。図 3.7 はその写真である。

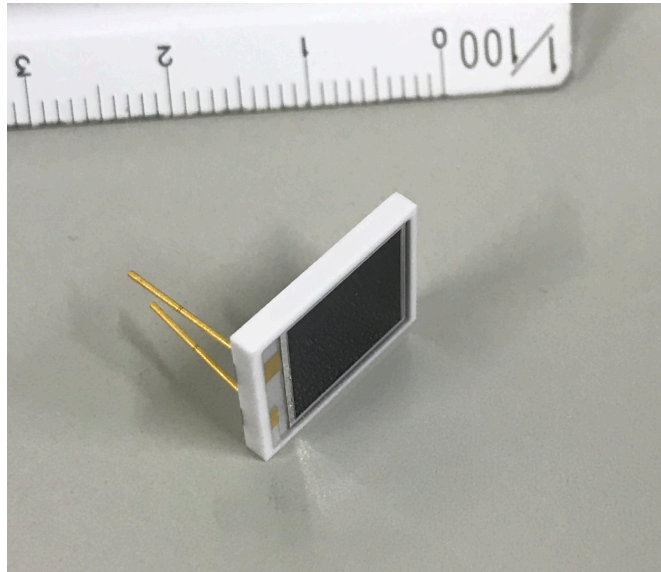


図 3.7 シリコン PIN フォトダイオード

表 3.1 Si の規格 [27]

有感面積	10×10 mm ²
空乏層厚	0.3 mm
許容電圧	100 V

3.3.1 半導体の性質

半導体は電気抵抗が金属と絶縁体の間の値となる物質である。

i 型半導体

不純物が含まれていない半導体である。真性半導体と呼ばれる。

n 型半導体

真性半導体にそれよりも価電子数の多いドナー不純物をドーブしたものが n 型半導体である。例として 4 価のシリコンに 5 価のリンがドーブされる。

p 型半導体

真性半導体よりも価電子が少ないアクセプタ不純物をドーブしたものが p 型半導体である。例として Si に 3 価のホウ素がドーブされる。

PIN 構造

図 3.8 に PIN ダイオードの構造を示す。PIN ダイオードは p 型半導体と n 型半導体の間に真性半導体を設けた PIN 構造の半導体である。i 層にはキャリアが無いので、相対的に空乏層が広がる。また i 層の比抵抗は p 層、n 層よりもずっと大きいので印加バイアスはほと

んど i 層にかかり境界で急激に 0 に落ちる。したがって、PIN ダイオードの有感領域はおおよそ i 層の厚さで決まっており、pn 接合に比べ、広い空乏層を得ることができる。

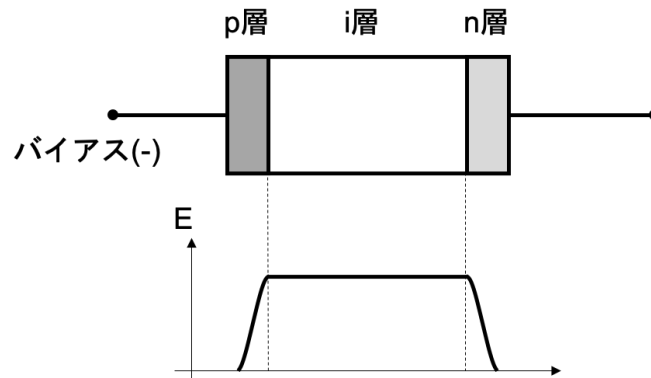


図 3.8 PIN ダイオードの構造 下に電場分布を示した。

3.4 Ionization chamber (IC)

ミューオンモニターとして平行板型の IC が用いられている。図 3.9 がその写真である。

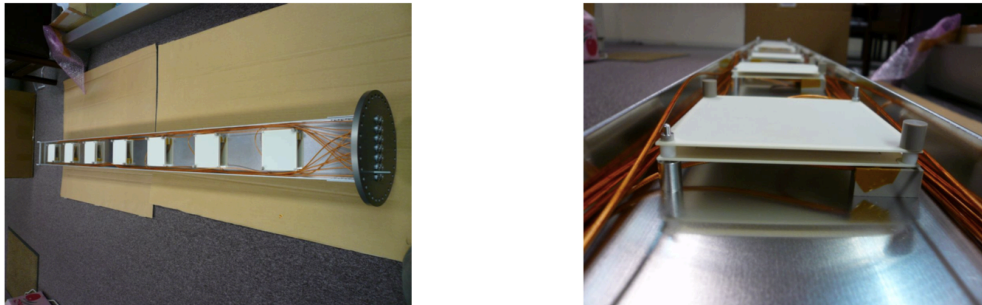


図 3.9 Ionization chamber の写真 [28]

7つの IC にそれぞれ7つのセンサーがある。そのセンサーは25 cm 間隔で並べられている。センサーは大きさが $100 \times 100 \text{ mm}^2$ であるセラミック製プレートを2枚平行に3 mm 隔てて並べた構造である。そのうち1枚は $75 \times 75 \text{ mm}^2$ の信号を読み取る電極があり、その周りはグラウンド電極で覆われている。もう片方のプレートには電圧を印加する $93 \times 93 \text{ mm}^2$ の電極が取り付けられている。均一な電場が生じる $75 \times 75 \text{ mm}^2$ の範囲を有感面積としている。つまり、 $75 \times 75 \times 3 \text{ mm}^3$ の体積内で生じた信号を取り出す。ビーム強度が 2.3×10^{13} protons/bunch までは、ガスを Ar 98% と N_2 2% とする。それ以上の強度の時は He 99% と N_2 1% とする。これは Ar ガスは He ガスに比べ信号の波高値が10倍であるためである。

3.5 ミューオンモニターへの要請

ミューオンモニターへの要請は T2K で用いているビームのコンディションによって決まる。ミューオンモニターへの要請は以下ようになる。

- ミューオンビーム強度を測定することにより、ニュートリノビーム強度を 3% 以内の精度で測定する。
- ニュートリノビームの方向を 1 mrad 以内で調整するために、ニュートリノビームの方向を 0.25 mrad 以内の精度で測定する。これはミューオンプロファイルの中心を 3 cm の精度で測定することに相当する。
- バンチ毎にミューオンビームの方向と強度を測定する。
- $10^5 \sim 10^7$ muons/cm²/bunch のビーム強度で測定が可能である。
- 修理や交換のためのメンテナンス時間を最小にし、安定的な動作をする。

以上の要請を満たすためには検出器の線型応答性と安定性に起因する測定誤差が 3% 以内である必要がある。ミューオンプロファイルは各検出器の相対的な信号を用いているため、上の 2 番目の項目を達成するため各検出器は 4% 以内の精度でミューオンの強度を測定する必要がある。

3.6 MUMON におけるミューオンのフラックスと量

3.6.1 ミューオンフラックス

T2K 運転中の MUMON におけるミューオンフラックスを ϕ_μ とする。電磁ホーンの電流が 250 kA の場合、POT とミューオンフラックスの関係は

$$\phi_{\mu,250\text{kA}} = 1.09 \times 10^5 \text{ muons/cm}^2/10^{12}\text{POT} \quad (3.1)$$

である。電磁ホーンの電流を現状の 250 kA から 320 kA にすると、SK でのニュートリノフラックスが 10% 大きくなる [29]。MUMON におけるミューオンフラックスも同様に 10% 程度大きくなると考えられ、その時の POT とミューオンフラックスの関係は

$$\phi_{\mu,320\text{kA}} = 1.20 \times 10^5 \text{ muons/cm}^2/10^{12}\text{POT} \quad (3.2)$$

となる。ビームパワーが 500 kW で繰り返し周期が 2.48 s の時の陽子数 $N_p^{500\text{kW},2.48\text{s}}$ は

$$N_p^{500\text{kA},2.48\text{s}} = 3.22 \times 10^{13}\text{POT/bunch} \quad (3.3)$$

である。また、ビームパワーが 1.3 MW で繰り返し周期が 1.16 s の時の陽子数 $N_p^{1.3\text{MW},1.16\text{s}}$ は

$$N_p^{1.3\text{MW},1.16\text{s}} = 3.93 \times 10^{13}\text{POT/bunch} \quad (3.4)$$

である。

よって

$$\begin{aligned}\phi_{\mu,250kA}^{500kW,2.48s} &= \phi_{\mu,250kA} \times N_p^{500kW,2.48s} \\ &= 3.6 \times 10^6 \text{ muons/cm}^2/\text{bunch}\end{aligned}\quad (3.5)$$

となる。同様に、ビームパワーが 1.3 MW、で繰り返し周期が 1.16 s の時

$$\begin{aligned}\phi_{\mu,320kA}^{1.3MW,1.16s} &= \phi_{\mu,320kA} \times N_p^{1.3MW,1.16s} \\ &= 4.7 \times 10^6 \text{ muons/cm}^2/\text{bunch}\end{aligned}\quad (3.6)$$

まとめると、表 3.2 のようになる。

表 3.2 ビームの現在と将来の対応

	現在	将来
$\phi_{\mu}^{\text{normalized}} (10^5 \text{ muons/cm}^2/10^{12}\text{POT})$	1.09	1.20
$N_p (10^{13} \text{ POT/bunch})$	3.22	3.93
$\phi_{\mu} (10^6 \text{ muons/cm}^2/\text{bunch})$	3.6	4.7

以上より、J-PARC の加速器と T2K ビームラインのアップグレードにより、バンチ毎のミュオンフラックスが 1.3 倍になる。

3.7 1日当たりのミュオンの量

次に MUMON に照射されるミュオンの量について説明する。1 バンチ毎のミュオンのフラックスは式 (3.5) と式 (3.6) であるが、現在のサイクルは 2.48 s で将来は 1.16 s になる予定である。1 日 (86400 s) 運転した際の照射量は現在 Φ_{current} と将来 Φ_{future} では以下ようになる。

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{current}} &= \phi_{\mu,250kA}^{500kW,2.48s} \times 8 \times \frac{86400}{2.48} \\ &= 1.00 \times 10^{12} \text{ muons/cm}^2/\text{day}\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{future}} &= \phi_{\mu,320kA}^{1.3MW,1.16s} \times 8 \times \frac{86400}{1.16} \\ &= 2.80 \times 10^{12} \text{ muons/cm}^2/\text{day}\end{aligned}\quad (3.8)$$

よって、現在に比べ、将来 MUMON に照射される 1 日当たりのミュオンの量は 2.8 倍になる。

3.8 将来強度における MUMON の運転

MUMON は 2009 年の T2K 実験開始時から現在まで実験の安定的な遂行に寄与してきた。しかし、ビームの大強度化に伴いいくつかの問題が生じている。1 つ目は Si の放射線損傷による信号の減少である。485 kW, 250 kA の環境下で 5.5 ヶ月運転した結果、Si の信号量が 1% 程度減少した。要求されている減少量は 3% である。将来のビーム強度では 5 ヶ月程度の運転で要求量を下回

ると予測される。現在 T2K 実験の 1 回の物理 Run は連続で 2 ヶ月から 4 ヶ月程度である。この間 MUMON を安定的に動作させる必要がある。現在はこの懸念からすでに 2 回の物理 Run 毎に Si を交換している。2 つ目は IC の大強度ビーム化における信号の減少である。MR のビーム強度が 400 kW 以上である時、IC の信号が低下する現象が見られた。これは多くの電子イオンペアが生成されて空間電荷効果により収集されるイオンの量が減少するためであると考えられる。大強度化ビームによる運転時に IC と Si の応答が共に要求される波高値を下回ると、ニュートリノの方向をバンチ毎に監視することが出来なくなる。そのため Si や IC に代わって、大強度ビームでも安定的な MUMON の運転が可能な新しい検出器の開発を進めている。

4 T2K 実験ミューオンモニターに用いる新しい検出器

4.1 電子増倍管 (Electron-Multiplier Tube : EMT)

新しい検出器の候補が EMT である。図 4.1 は EMT の写真である。EMT は光電子増倍管 (photo multiplier tube : PMT) の光電面をアルミニウムに置き換えた構造をしている。この研究で用いた EMT は 浜松ホトニクス社の PMT (R9880U-110) を元にしてている。

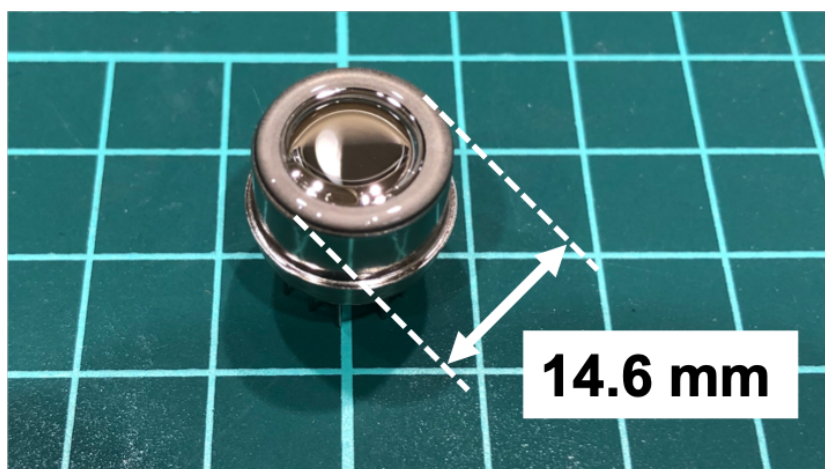


図 4.1 EMT の写真

ダイノードの構造は元の PMT と同じであり、ダイノードの形状はメタルチャンネル型である。アルミ蒸着された円形のカソードの有効領域は 50.26 mm^2 (半径 4 mm) である。ダイノードの有感領域はスリット込みで $\sim 77.44 \text{ mm}^2$ ($\sim 8.8 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$) である。

各ダイノード間の電位差を供給するデバイダー回路は図 4.2 のようになっている。各抵抗と電気容量は表 4.1 の値である。

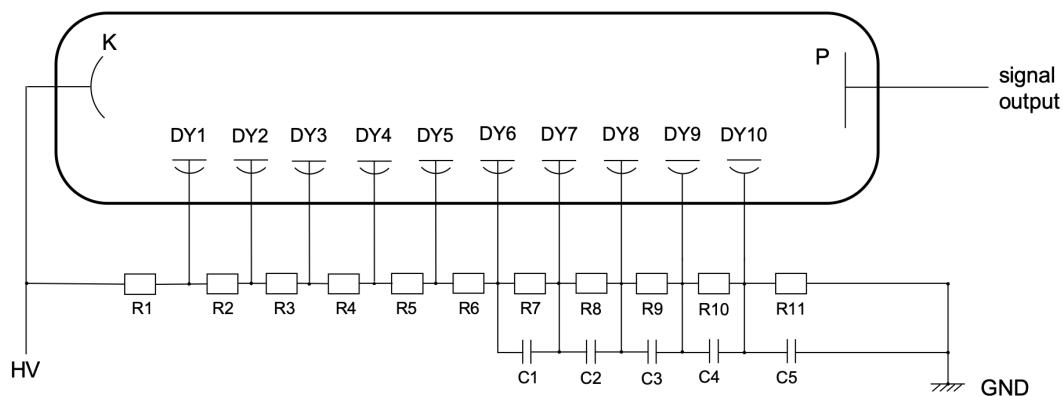


図 4.2 EMT デバイダー回路

表 4.1 EMT デバイダー回路の抵抗と電気容量

R1	200 k Ω	-	-
R2	200 k Ω	-	-
R3	150 k Ω	-	-
R4	150 k Ω	-	-
R5	150 k Ω	-	-
R6	150 k Ω	-	-
R7	150 k Ω	C1	0.01 μ F
R8	150 k Ω	C2	0.01 μ F
R9	150 k Ω	C3	0.01 μ F
R10	510 k Ω	C4	0.33 μ F
R11	75 k Ω	C5	0.33 μ F

このデバイダー回路には EMT の線形応答性を良くするため、直列にデカップリングコンデンサーが組み込まれている。またこれらの抵抗値は -1000 V を印加したとき、分配電圧が表 4.2 になるように設計されている。

表 4.2 各ダイノード間の分配電圧

	分配比	分配電圧 (V)
K-DY1	1.3	94.9
DY1-DY2	1.3	94.9
DY2-DY3	1.0	73.0
DY3-DY4	1.0	73.0
DY4-DY5	1.0	73.0
DY5-DY6	1.0	73.0
DY6-DY7	1.0	73.0
DY7-DY8	1.0	73.0
DY8-DY9	1.3	94.9
DY9-DY10	3.3	240.9
DY10-GND	0.5	36.5

図 4.3 は EMT とデバイダ回路の写真である。浜松ホトニクス社の PMT で使用されているデバイダー回路はポリブチレンテレフタレート (PBT) やポリアセタール (POM) の絶縁カバーが使用されているが、放射線対策としてこれらを使用しない構造にした。

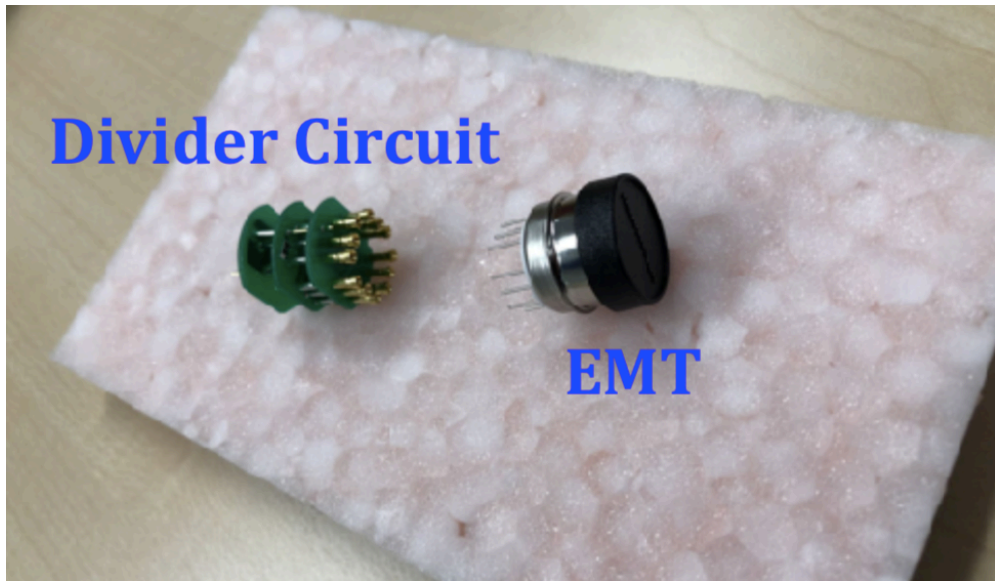


図 4.3 EMT とデバイダー回路の写真 EMT のアルミニウム面にカバーが取り付けられている

4.2 EMT の動作原理

荷電粒子が入射すると、アルミ表面および各ダイノードにおいて二次電子を放出する。その放出された二次電子を各ダイノードで増幅させ信号としてとりだす。二次電子放出率は、素材や入射粒子の種類、粒子のエネルギーによる。

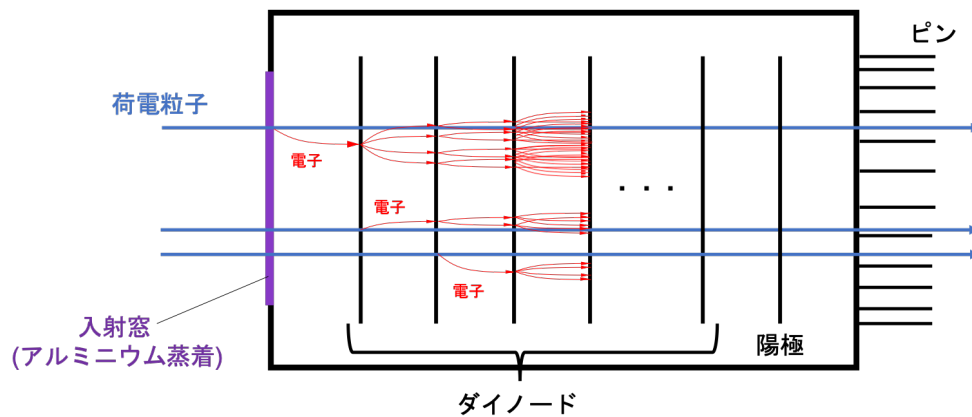


図 4.4 EMT の構造

ここでダイノードが n 段の PMT の場合そのゲイン G は次のように表される。

$$G = \delta_{e,1} \times \delta_{e,2} \times \cdots \times \delta_{e,n} = \prod_{i=1}^n \delta_{e,i} \quad (4.1)$$

$\delta_{e,i}$ は i 番目のダイノードにおける二次電子放出率である。

EMT をミュオンモニターとして用いる場合、出力信号を作るのは主にミュオンとミュオンによって生成された高エネルギーの電子（デルタ線）である。デルタ線のエネルギーは数百 MeV である。これらのミュオンとデルタ線のほとんどは EMT を通過する。それゆえ、すべてのダイノードにおいてミュオンとデルタ線によって二次電子が放出される。 $\Delta_{e,Al}$ と $\Delta_{\mu,Al}$ をそれぞれ電子とミュオンがアルミニウムに入射した時の二次電子放出率とする。 $\delta_{e,i}$ と $\delta_{\mu,i}$ をそれぞれ、電子とミュオンが i 番目のダイノードに入射したときの二次電子放出率とする。 e を電気素量、 A_{sur} をカソード（アルミニウム）の表面積 (cm^2)、 A_i を各ダイノードの表面積 (cm^2) とする。 ϕ_{μ} と ϕ_e をそれぞれミュオンとデルタ線のフラックス ($/\text{cm}^2$) とする。出力される電荷 Q は以下のように表される。

$$Q = Q_{\mu} + Q_e \quad (4.2)$$

$$Q_{\mu} = e\phi_{\mu} \left\{ A_{sur}\Delta_{\mu,Al} \prod_{i=1}^n \delta_{e,i} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(A_i \delta_{\mu,i} \prod_{j=i+1}^n \delta_{e,j} \right) \right\} \quad (4.3)$$

$$Q_e = e\phi_e \left\{ A_{sur}\Delta_{e,Al} \prod_{i=1}^n \delta_{e,i} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(A_i \delta_{e,i} \prod_{j=i+1}^n \delta_{e,j} \right) \right\} \quad (4.4)$$

この電荷 Q はおよその概算はできる。ここではデルタ線による影響を無視する。各パラメータは以下ようになる。R9880 に -500 V 印加した場合のゲインは 5×10^3 であり、ダイノードは 10 段であるので $\delta_{e,i}$ は式 (4.1) より ~ 2.35 である。数 GeV のミュオンに対する二次電子放出は [30] によると、 $\Delta_{\mu,Al}$ と $\delta_{\mu,i}$ は 0.08 になる。 A_{sur} は 0.526 cm^2 （半径 4 mm）である。R9880 のダイノードはスリット込みでの電極 1 枚の面積は $\sim 0.7744 \text{ cm}^2$ である。スリットの大きさは無視し $A_i = 0.7744 \text{ cm}^2$ とする。将来強度におけるミュオンフラックスは式 (3.6) より $\phi_{\mu} = 4.7 \times 10^6 \text{ muons/cm}^2/\text{bunch}$ である。以上より、 Q はこのようになる。

$$Q = 579.6 \times 10^{-12} [\text{C}] \quad (4.5)$$

4.2.1 許容電荷量

EMT のデバイダ回路のデバイダ電流 I_d は供給電圧 V 、 i 番目のデバイダー抵抗を R_i として以下のように表される。

$$I_d = \frac{V}{\sum_{i=1}^{10} R_i} \quad (4.6)$$

この研究で使用した EMT のデバイダ回路の場合、供給電圧が 500 V であるとき、 I_d は 240 μA になる。これ以上の信号電流が流れると、下流側のダイノードでパイルアップが起きてしまう。使用時は出力信号の電流がデバイダ電流の 1/10 以下になることが望ましい。この場合ゲインが 5×10^3 の時、5 nC/s が上限となる。

4.3 EMT の放射線劣化

T2K 実験のニュートリノビームが生成されている間、ミューオンモニターは高い放射線環境下にある。長期間の使用による放射線劣化について以下のような原因が考えられる。

- カソード (アルミニウム) の劣化
- ダイノードの劣化
- デバイダー回路の劣化

それぞれについて説明する。

- カソード (アルミニウム) の劣化

カソードは金属であり二次電子放出材は含まれていない。そのため放射線による二次電子放出率の変化はダイノード表面に比べ小さいと考えられる。

- ダイノードの劣化

電流電荷によりダイノード面の二次電子放出率が変化することが考えられる。ダイノードには二次電子放出材としてアルカリ金属 -Sb (アンチモン) が塗布されている。電子の衝突によりアルカリ金属の乖離が起これ、二次電子放出率が低下すると考えられる。特に電流が多く流れる後段のダイノードの負担が大きくなる。このダイノードによる劣化は PMT でも同様に現れ、出力電流量の関数で現れる。この場合 EMT は印加電圧を下げることで、後段のアノード電流を小さくし、劣化を抑えることができる。

- デバイダー回路の劣化

デバイダー回路はビームに晒される構造となっているため、検出器の劣化に影響する可能性がある。この場合は放射線耐性が良いコンデンサーを用いるなどの対策が考えられる。

EMT の放射線による信号応答の劣化はダイノードの劣化が主要であると考えられている。そこで本研究ではダイノードにアルカリ金属 -Sb が塗布されていない EMT を用意しその性能も評価した。以降その EMT を EMT w/o al-Sb と記す。

4.4 EMT の先行研究

EMT を MUMON の場所に設置し、現在の T2K 実験のビーム強度における線型応答性と信号の安定性を調べている [31]。ここで信号というのは EMT からの出力信号を FADC で読み取ったときの積分値である。その結果を次に記す。

- 線型応答性

460 kW, 250 kA まで 1% 程度で線型性を保持していた。

- 波高の安定性

運転開始直後から、EMT の信号が減少し続け、総出力電荷が数 mC になると信号が安定し

た。その後 2 ヶ月程度運転し、信号は 1% 程度で安定していた。信号の安定化に要した運転時間は数日から 2 週間程度であった。

4.4.1 EMT のウォーミングアップ

先行研究において、EMT に $\sim 3 \times 10^{12}$ muons/cm² 程度ビームが照射されるまで EMT の信号が下がる現象が見られた。これはダイノードに塗布されているアルカリ金属 -Sb の安定性に関係していると考えている。PMT は通常使用される前に光をいくらか照射して信号を安定させる「ウォーミングアップ」が行われる。この PMT のウォーミングアップは数 μ A 程度の出力信号で数分間行われる。EMT は光検出器では無いためこのウォーミングアップは行わずに使用を開始した。先行研究 [31] において 2 つの EMT に関して信号が安定するまでに要した照射電荷量が測定されている。その結果を表 4.3 に示す。

表 4.3 EMT が安定するまでに照射されたビームの量 [31]

EMT 番号	$\times 10^{18}$ POT	照射された電荷 (nC)	総出力電荷 (mC)
1	~70	~941	2.0
1	~13	~174	0.4
2	~50	~672	1.3
2	~13	~174	0.4

5 CT (Current transformer)

5.1 CT の原理

CTは磁性体からなるトロイダルコアの内側に荷電粒子ビームを通し、それを1次コイルとみなしたトランスである。コアに巻いた2次コイルに誘導される電圧はビーム電流に比例するのでビーム強度を測定することができる。電源を必要とせずビームの強度を測定できるという特徴がある。CTはT2K実験の1次ビームラインにおいて陽子ビームのビーム強度を測定するために使用されている。次章以降で説明する本研究のビームテストにおいてビーム強度を測定するためにCTを使用した。

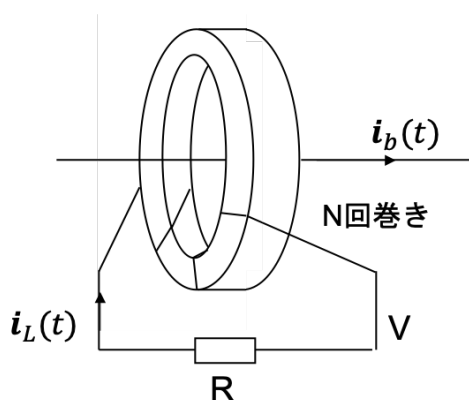


図 5.1 CT の動作原理

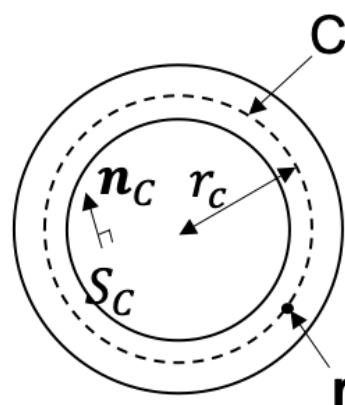


図 5.2 CT の断面図

図 5.1 において、コアの穴の部分を通過する電流を $i_b(t)$ 、コイルの巻き数を N 、誘導電流を $i_L(t)$ 、電場を $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 、磁場を $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ とする。コアの透磁率を μ とする。アンペール・マクスウェルの法則より、

$$\text{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu \left(\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{i}_b(t) + N\mathbf{i}_L(t) \right) \quad (5.1)$$

図 5.2 において、閉曲線を C とし、 C が作る面を S_c とする。閉曲面 S_c 内で積分すると、

$$\int_{S_c} \text{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{n} dS_c = \int_{S_c} \mu \left(\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t} + \mathbf{i}_b(t) + N\mathbf{i}_L(t) \right) \cdot \mathbf{n} dS_c \quad (5.2)$$

ストークスの定理より

$$\oint_C \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{r} = \int_{S_c} \mu \left(\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{i}_b(t) + N\mathbf{i}_L(t) \right) \cdot \mathbf{n} dS_c \quad (5.3)$$

$\mathbf{n}_C \perp \mathbf{i}_b$ 、 $\mathbf{n}_C \perp \mathbf{i}_L$ と考えると、

$$\oint_C \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{r} = \mu \left(\int_{S_c} \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \cdot \mathbf{n} dS_C + \mathbf{i}_b(t) + N \mathbf{i}_L(t) \right) \quad (5.4)$$

コア内部の平均磁束密度 $\bar{B}(t)$ は次のようになる。

$$\bar{B}(t) = \frac{\mu}{2\pi r} \left\{ \epsilon \int_{S_C} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \cdot \mathbf{n} dS_C + \mathbf{i}_b(t) + N \mathbf{i}_L(t) \right\} \quad (5.5)$$

ここで外場 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ の変化はないとすると、

$$\bar{B}(t) = \frac{\mu}{2\pi r} (\mathbf{i}_b(t) + N \mathbf{i}_L(t)) \quad (5.6)$$

となる。コアの断面積を S_D とすると、コイルに生じる磁場は

$$\phi(t) = \bar{B}(t) S_D \quad (5.7)$$

と表される。誘導される電圧 $V(t)$ は

$$\begin{aligned} V(t) &= N \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \frac{\mu N S_D}{2\pi r_C} \frac{d}{dt} (\mathbf{i}_b(t) + N \mathbf{i}_L(t)) \end{aligned} \quad (5.8)$$

負荷抵抗を R とすると、

$$\mathbf{i}_L(t) = -\frac{V(t)}{R} \quad (5.9)$$

である。よって、

$$\frac{R}{L} V(t) + \frac{d}{dt} V(t) = \frac{R}{N} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_b(t) \quad (5.10)$$

と表される。ただし、 L はコイルの自己インダクタンスで、

$$L = \mu \frac{N^2 S_D}{2\pi r_C} \quad (5.11)$$

である。

$\mathbf{i}_b(t) = I_b(\omega) e^{i\omega t}$ 、 $V(t) = V(\omega) e^{i\omega t}$ とするとして式 (5.10) を解くと、

$$V(\omega) = \frac{\frac{i\omega}{\omega_L} R I_b}{1 + \frac{i\omega}{\omega_L} N} \quad (5.12)$$

となる。ここで、 $\omega_L = \frac{R}{L}$ であり、遮断周波数と呼ばれる。

$\omega \ll \omega_L$ のとき、

$$V \simeq i \frac{\omega}{\omega_L} \frac{R I_b}{N} \quad (5.13)$$

$\omega \gg \omega_L$ のとき、

$$V \simeq \frac{R I_b}{N} \quad (5.14)$$

となることがわかる。

次の図 5.3 のような場合を考える。

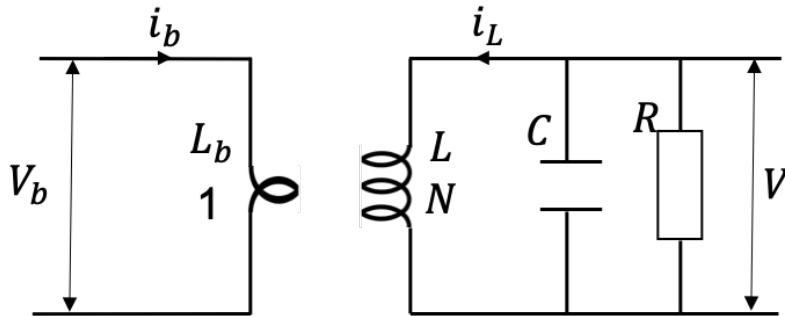


図 5.3 CT の等価回路

式 (5.10) の負荷抵抗を抵抗 R と電気容量 C の並列複素インピーダンス $Z = \frac{R}{1+i\omega CR}$ で置き換えて解くと、

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \frac{\frac{i\omega L}{R} \frac{RI_b}{N}}{1 + \frac{i\omega L}{R} - \omega^2 LC} \\ &= \frac{i \frac{RI_b}{N}}{i + \frac{\omega L}{R} - \omega^2 LC} \end{aligned} \quad (5.15)$$

となる。ただし、

$$\omega_L = \frac{R}{L}, \quad \omega_H = \frac{1}{RC} \quad (5.16)$$

であり、 ω_L は低域遮断周波数、 ω_H は高域遮断周波数と呼ぶ。また、共振周波数 ω_0 と Q 値は次式で表せられる。

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_L \omega_H} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.17)$$

$$Q = \frac{\omega_L}{\omega_0} = \frac{\omega_0}{\omega_H} = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5.18)$$

Q の値が小さいとき、周波数特性は図 5.4 のようなバンドパス特性を示す。

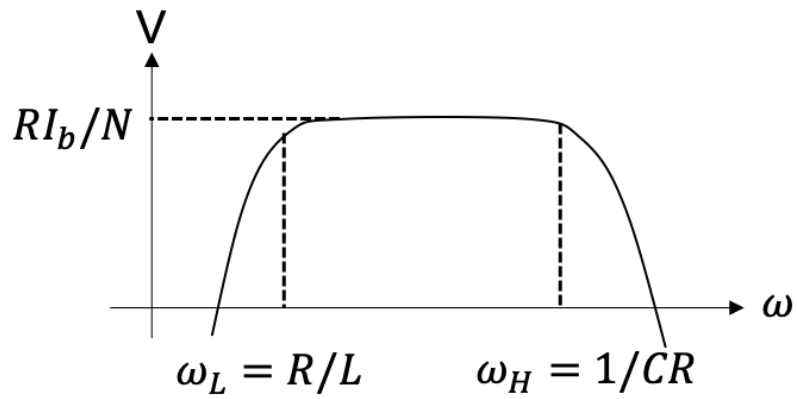


図 5.4 CT の周波数特性

5.2 本研究で用いた CT

図 5.5 は本研究で用いた CT の写真である。



図 5.5 CT の写真

この CT のスペックを表 5.1 に示す。

本研究で用いた CT のコア材である、ファインメット FT-3KL の物理特性を表 5.2 に示す。

表 5.1 CT のスペック

型番	F7555G
コアの内径 (mm)	51.0±0.7
コアの外径 (mm)	79.0±0.7
コアの厚さ (mm)	25.0±0.7
有効断面積 (mm ²)	146.3
平均磁路長 (mm ²)	205.0
コア材	ファインメット FT-3KL

表 5.2 ファインメット FT-3KL の物理特性

初透磁率* ³	17000
インピーダンス透磁率* ¹	18500
飽和磁束密度* ⁴ (T)	1.23
残留磁束密度* ⁴ (T)	0.06
保磁力* ⁴ (A/m)	0.6
キュリー温度 (°C)	570
飽和磁歪定数 (×10 ⁶)	~0.0
抵抗率 (μΩm)	1.2
密度 (kg/m ³)	7.3×10 ³

この CT の入力信号に対する出力信号の線型性を図 5.6 のようなセットアップで調べた。ファンクションジェネレータで入力信号を作り入力、出力波形を FADC で読み取った。

*³ 20 °C, 100 kHz の場合*⁴ 20 °C の場合

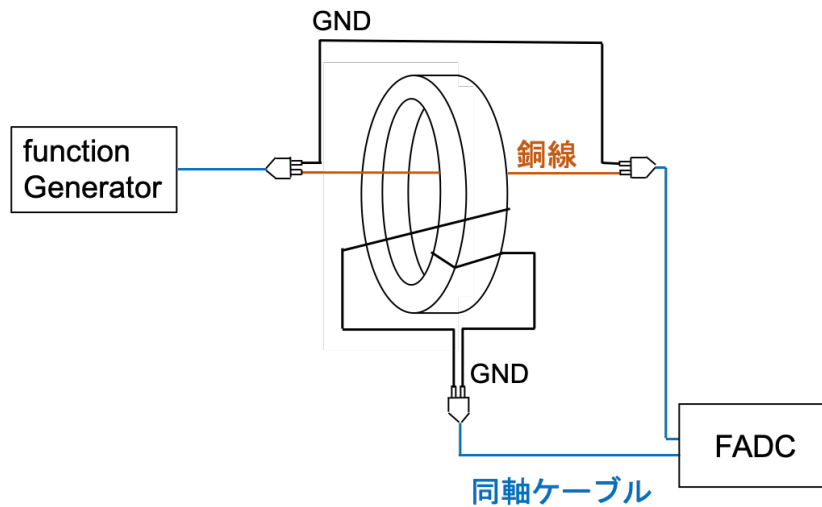


図 5.6 CT の信号測定の設定アップ

入力信号をパルス幅 100 ns、電圧 500 mV、立ち上がり及び立ち下がり時間を 5 ns としたときの入力信号 (図 5.7) に対する CT の出力信号は図 5.8 のようになった。

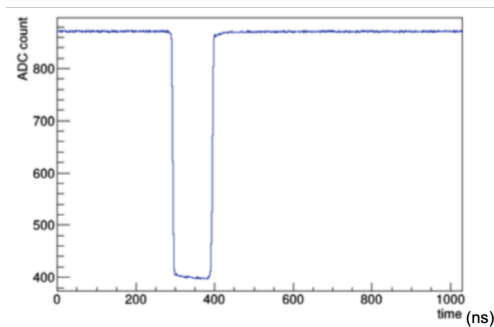


図 5.7 入力信号

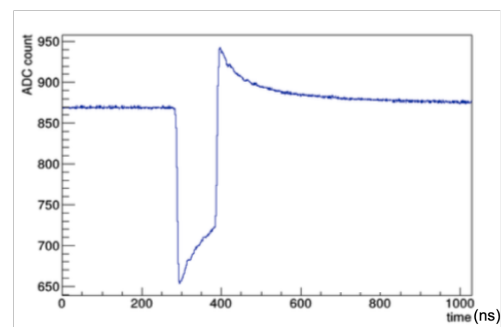


図 5.8 CT からの出力信号

パルス幅を 100 ns、1 μ s、3 μ s、パルス高を 50 mV、100 mV、300 mV、500 mV に変えて CT の線型性を確認した。また入力信号の立ち上がり時間及び立ち下がり時間を 5 ns と 20 ns の場合についてそれぞれ測定した。結果を図 5.9 に示す。図 5.9 の横軸は入力信号の ADC カウントの積分値であり、縦軸は出力信号の ADC カウントの積分値である。

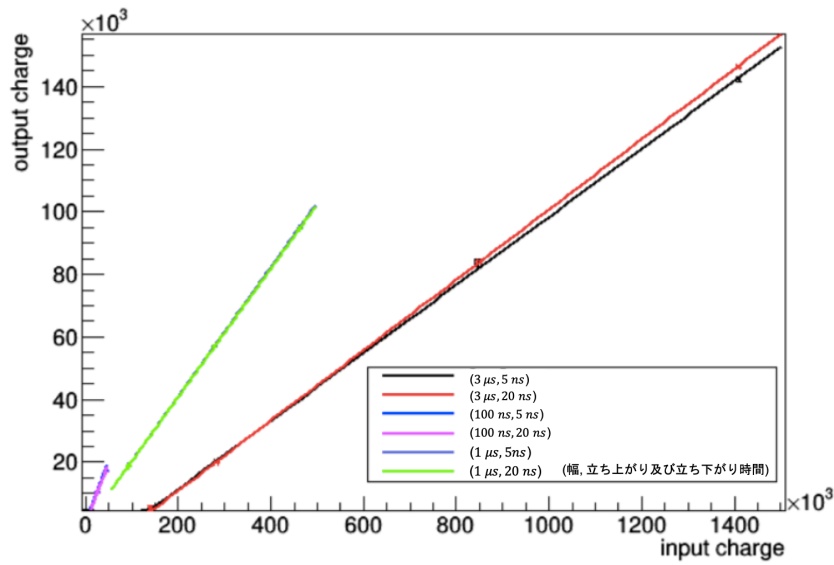


図 5.9 CT の線型性

入力信号のパルス幅によって傾きが異なることがわかる。

次に CT の周波数特性を調べた。セットアップは図 5.6 と同様にし、入力信号はサイン波を用いた。入力信号の周波数を変化させ、入力信号と出力信号のをそれぞれ記録した。それらの信号をフーリエ変換により周波数空間に置き換え、大きさの比と位相差を調べた。結果を図 5.10 に示す。

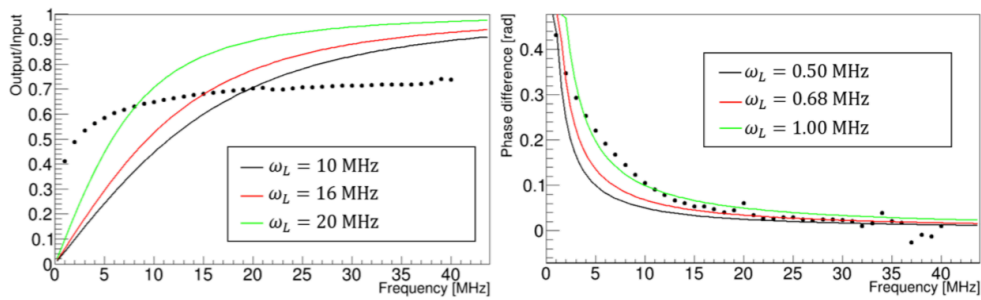


図 5.10 CT の周波数特性

黒のプロットが測定結果である。

式 (5.12) を $RI_b = V_{in}$ とし、 $V(\omega) = V_{out}$ として書き換えると次のようになる。

$$\frac{V_{in}}{N} = \left(1 - i \frac{\omega_L}{\omega}\right) V_{out} \quad (5.19)$$

図 5.10 の各実線はこの式 (5.19) より計算した。コアの透磁率は周波数に依存するので、インダクタンス L も同様に周波数に依存する。したがって CT の遮断周波数 ω_L は周波数依存性がある。測定結果が式 (5.19) の実線と合うわけではなく、CT の周波数特性の目安としてプロットに重ね書きをした。この測定結果を次章以降で述べるビームテストの解析で使用した。

6 ビームテストによる検出器の性能評価 1

EMT の性能を評価するためのビームテストを行なった。

ビームテストは東北大学電子光物理学研究センターにあるシンクロトロン入射用線形加速器を用いた。図 6.1 の赤丸で示す入射用線形加速器の偏向ビームラインの出口に検出器を設置し、ビームの照射を行なった。

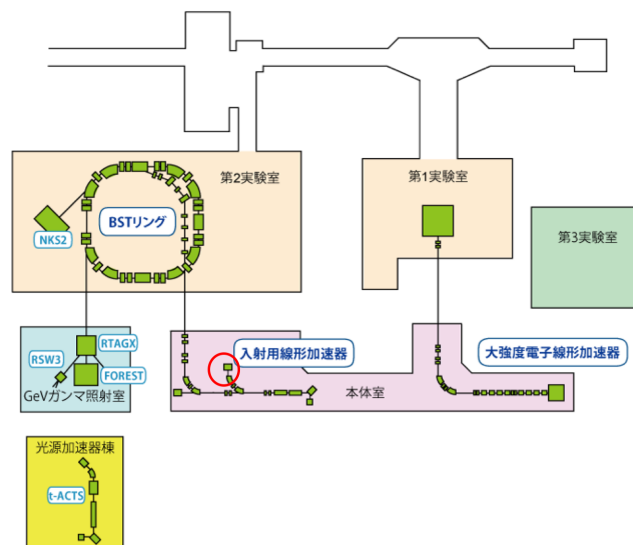


図 6.1 ELPH の概要図 [32]

ビーム出口付近は図 6.2 のようになっている。

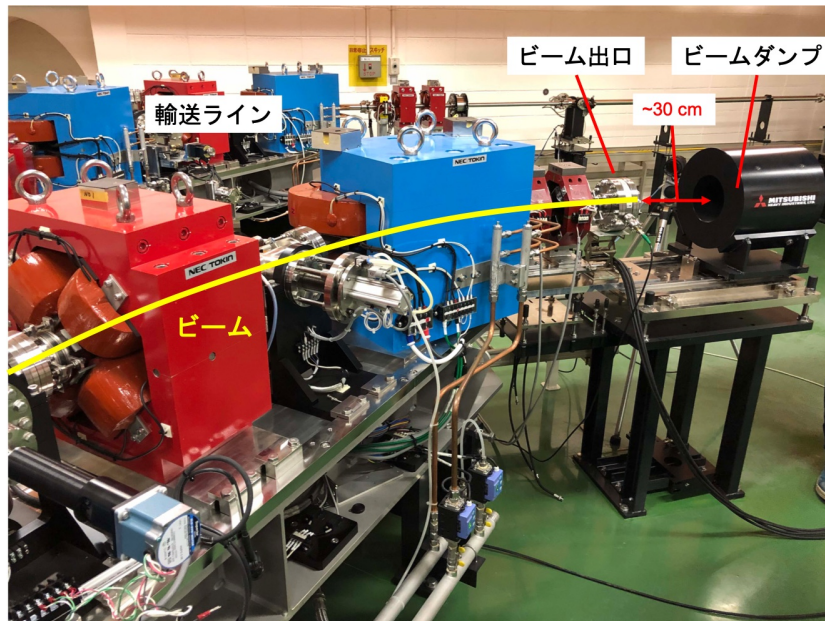


図 6.2 ELPH ビーム出口付近の様子

線形加速器で 90 MeV まで加速した電子を 2 台の 45 度偏向電磁石と 1 台の 4 極電磁石で輸送する。ビームの出口には直径 30 mm、厚さ 30 μm のチタン窓がある。チタン窓からビームダンプまでの約 30 cm の場所を使用した。

ビームテストは 2 回行なった。

- ビームテスト 1 (2019 年 11 月 27 日、28 日)
- ビームテスト 2 (2020 年 11 月 10 日、11 日)

場所は共に東北大学電子光理学研究センターである。この章ではビームテスト 1 について説明する。ビームテスト 2 については次章で説明する。

表 6.1 にビームテストのパラメータをまとめた。低強度照射は T2K 実験 MUMON における 1 バンチ当たりミューオンビームと同程度の電荷量である。中強度、高強度とは一度に数分から数日分の T2K 実験ミューオンビームの電荷量と同程度になるように設定した。詳しくは後で説明する。

表 6.1 ビームパラメータ

	ビームテスト 1	ビームテスト 2
電子のエネルギー (MeV)	90	90
低強度照射時のパルス当たりの電荷量 (C)	$\sim 1 \times 10^{-12}$	$\sim 1 \times 10^{-12}$
中強度照射時のパルス当たりの電荷量 (C)	-	$\sim 0.3 \times 10^{-9}$
高強度照射時のパルス当たりの電荷量 (C)	$\sim 3 \times 10^{-9}$	$\sim 20 \times 10^{-9}$
照射試験時のパルス繰返し (Hz)	1	7

6.1 ビームテスト 1 のセットアップ

ビームテスト 1 では以下の測定を行なった。

- EMT の放射線耐性 (長期安定性)
- EMT w/o al-Sb の信号の確認
- EMT w/o al-Sb の放射線耐性 (長期安定性)

これらを調べるために、T2K 実験の MUMON におけるビーム強度と同程度のビーム強度を照射する低強度照射と短時間で T2K の運転数日分を照射する高強度照射を交互に行なった。低強度照射のビーム強度は $1 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ electrons/pluse 程度である。これは現在から将来までの T2K 実験ミューオンモニターにおける 1 バンチ相当のビームフラックスに相当する。高強度照射におけるビーム強度は $1 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{10}$ electrons/pluse 程度である。高強度照射にけるセットアップは図 6.3 のように Si と EMT を並べて照射した。

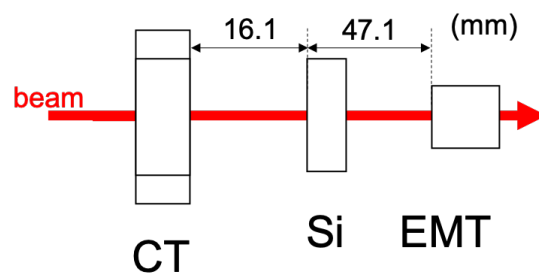


図 6.3 高強度照射におけるセットアップ

低強度照射は図 6.4 と図 6.5 と図 6.6 の 3 種類のセットアップで行なった。図 6.4 は低強度における Si と EMT の応答を調べるためのセットアップである。図 6.5 の ref-Si は高強度照射時はビームに当てず、低強度照射時に EMT と入れ替え、照射した Si のキャリブレーションを行うためのものである。図 6.6 は Si array 検出器を用いビームのフラックスを測定するためのセットアップである。Si array については以下で詳しく説明する。

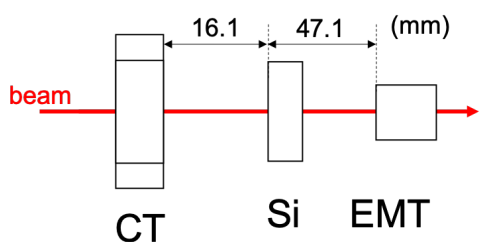


図 6.4 ビームテスト 1 低強度照射のセットアップ

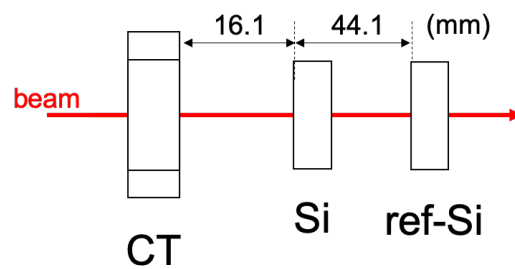


図 6.5 ビームテスト 1 Si のキャリブレーションのためのセットアップ

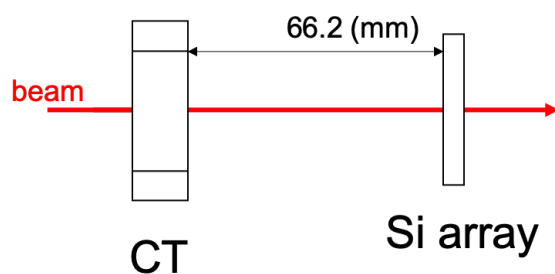


図 6.6 ビームテスト 1 ビームプロファイル測定のためのセットアップ

CT は高強度照射におけるビーム強度を測定するために設置した。Si は現在の MUMON で使用しているものと同じものを用いた。Si と EMT の性能を比較する目的である。

このような検出器の配置にするために各検出器の支持具をデザインした。デザインした支持具をビーム出口に並べている様子が図 6.7 である。ビームの上流側には Si、下流側には EMT と Si array の支持具を設置している様子である。

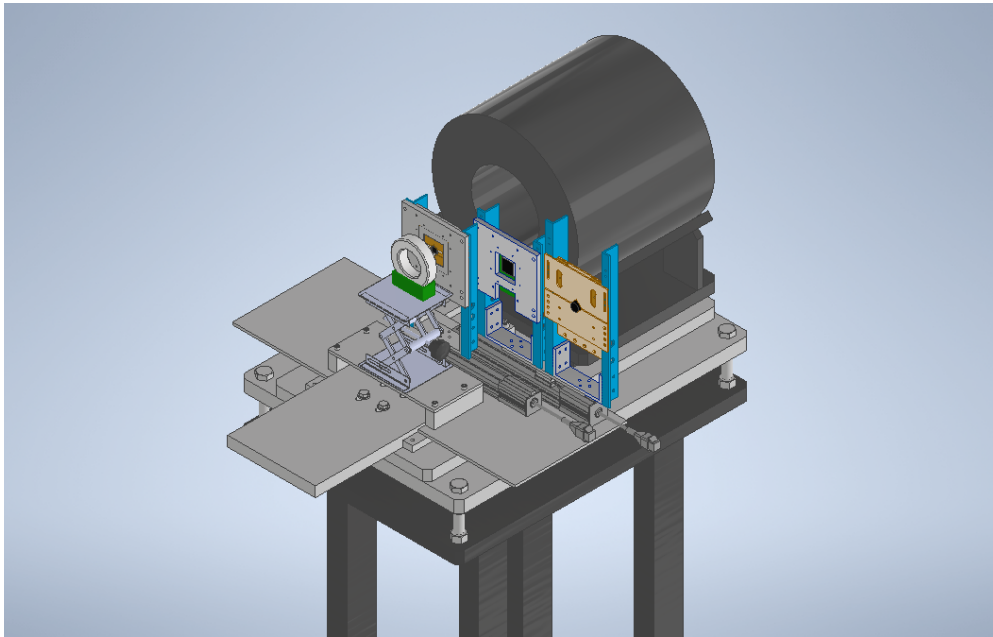


図 6.7 ビームテスト 1 における支持具のデザイン

以下で各検出器の支持具について詳しく説明する。まず、図 6.8 の Si の支持具について説明する。

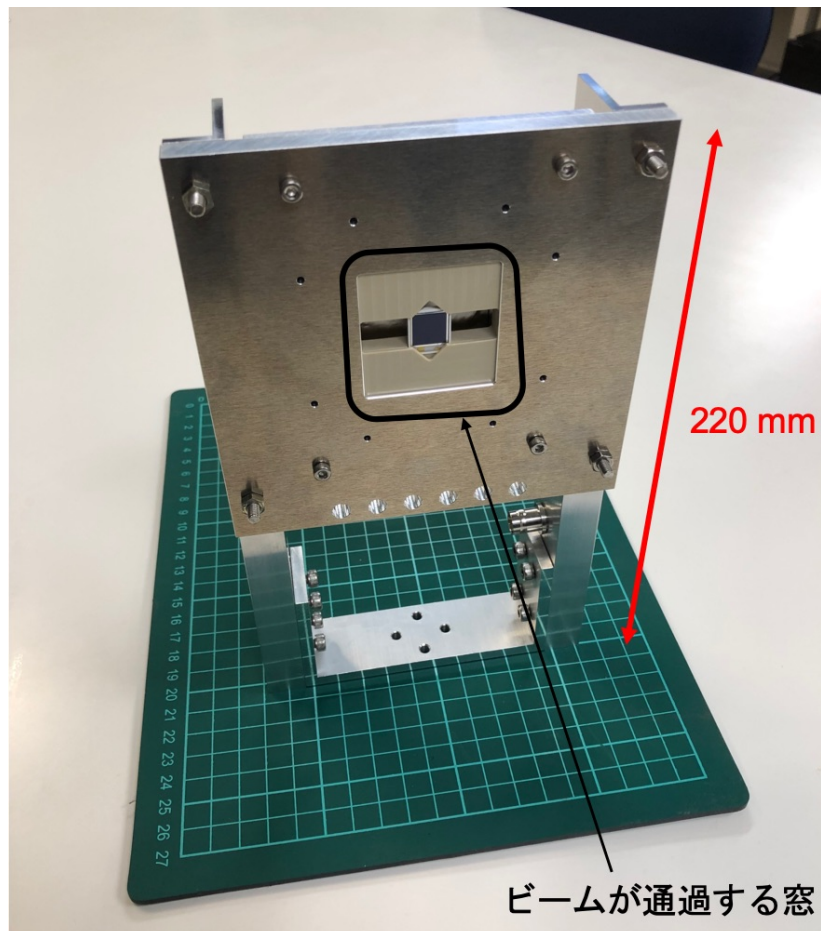


図 6.8 Si の支持具 ビームテスト中は Si をアルミニウム箔で覆った

柱や Si を固定するための枠の部分など大部分はアルミニウムで構成されている。支持具と Si を絶縁して固定するために、Si の周辺は放射線耐性が高い絶縁体である PEEK を用いた。Si の固定方法は図 6.9 と図 6.10 のような PEEK のカバーを用意し、図 6.11 のように Si を挟み込むという形にした。

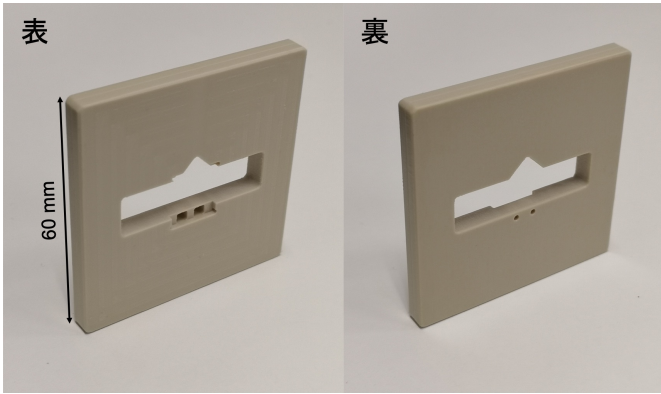


図 6.9 Si 用 PEEK カバー 1

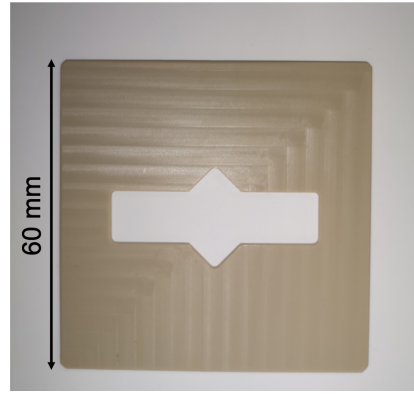


図 6.10 Si 用 PEEK カバー 2

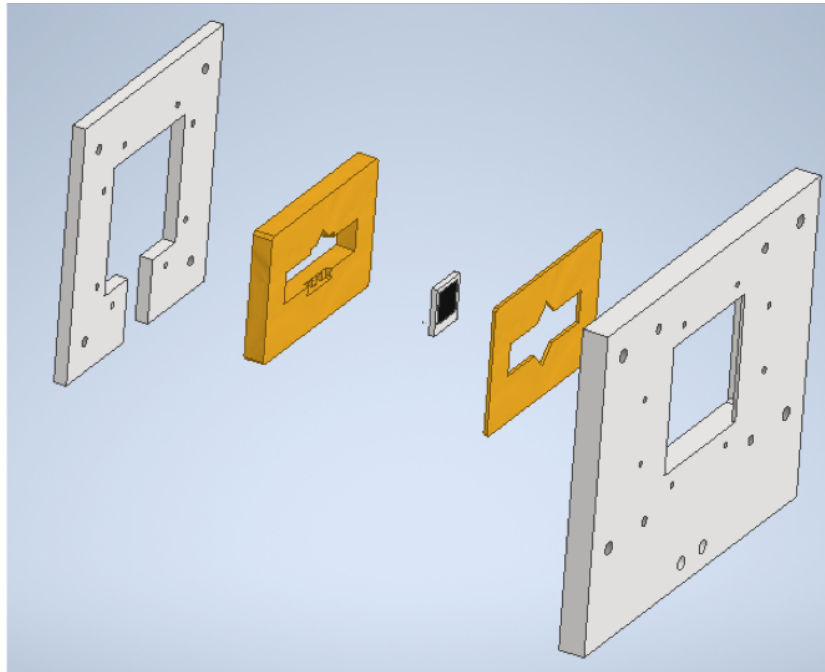


図 6.11 Si の支持具の構造

ビームが通過する部分は物質による散乱を抑えるために図 6.8 のように物質がない構造になっている。ビーム照射中はノイズ対策のため窓の部分にアルミニウム箔を貼り付けた。Si の裏面のピンにマックエイト社のソケットピン PM-1 を挿し、PEEK カバーの中で図 6.12 のように固定される。



図 6.12 ソケットピンを取り付けた Si を横から見た図

ソケットピンを図 6.9 の表側から 2 つ穴に入れ、裏側から半田付けをした。
次に図 6.13 の EMT の支持具について説明する。

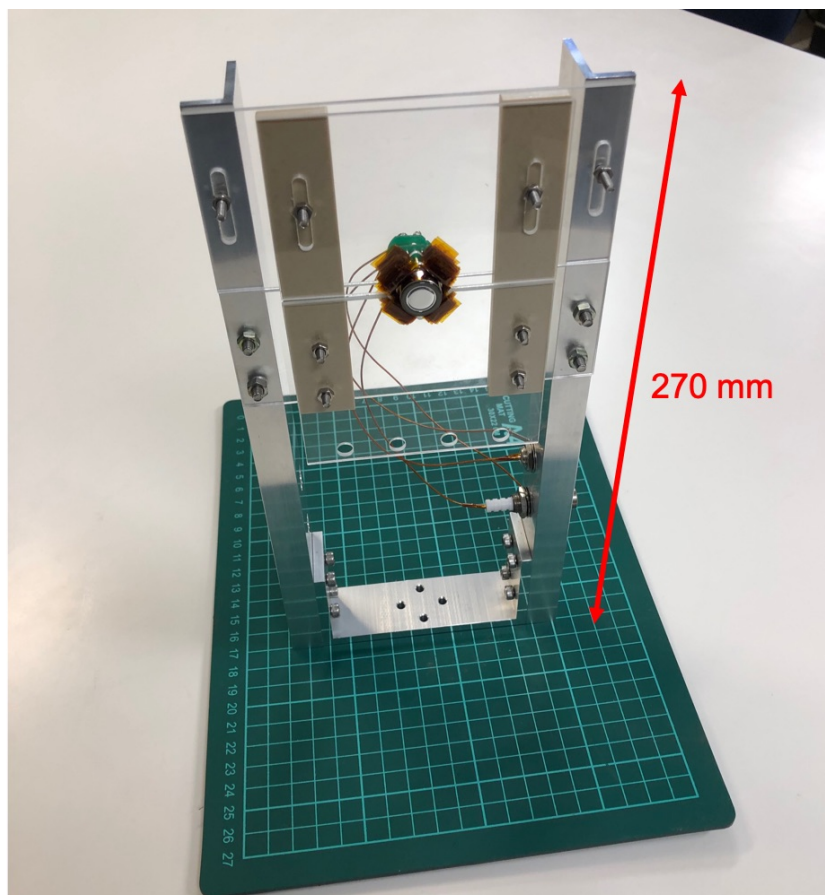


図 6.13 EMT の支持具

柱や土台はアルミニウムで構成される。EMT を挟み込んでいる透明な板の素材はアクリルである。アクリル板に挟まれている茶色のスペーサーの素材は PEEK である。PEEK とアクリル板を止めているネジを緩めることで上側のアクリル板が上下し EMT を交換することが出来る。

Si や EMT からの出力信号を FADC に入力するために、LEMO ケーブルを用いた。実験中にケーブルが切断されるのを防ぐため、図 6.14 と図 6.15 のようにヒロセ電機社の BNC コネクタ (UG-625/U-4(40)) を用いた。EMT のデバイダー回路のピンからコネクタまでのケーブルは放射線耐性が高いポリイミドケーブルを用いた。BNC コネクタを使用するために支持具の柱に図 6.16 の形の穴を開けた。EMT の HV の入力には SHV 規格のケーブルを用いた。これも同様に HUBER+SUHNER 社の SHV コネクタ (22_SHV-50-0-2/133_N) を使用し、支持具の柱に図 6.17 の形の穴を開けた。

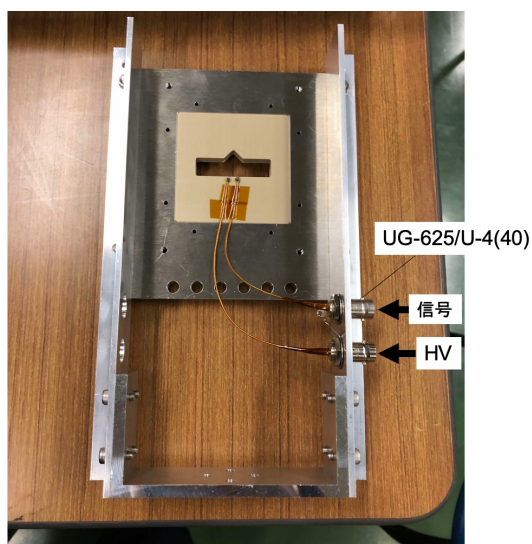


図 6.14 Si の支持具のコネクタ

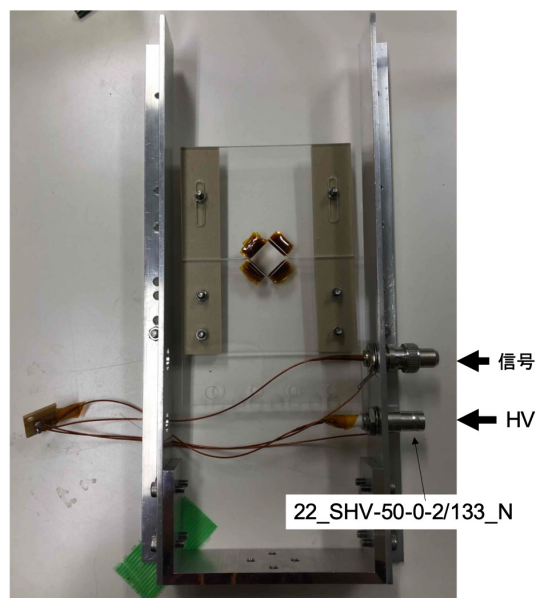


図 6.15 EMT の支持具のコネクタ

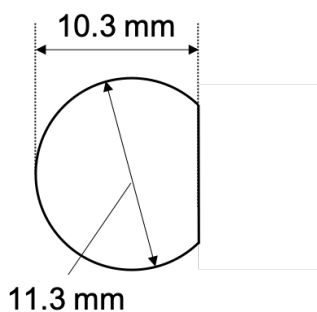


図 6.16 BNC コネクタを取り付けるための穴

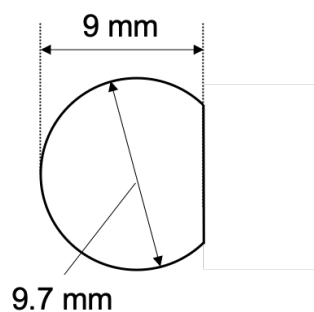


図 6.17 SHV コネクタを取り付けるための穴

ビームフラックスの測定を目的として、浜松ホトニクス社の 64 素子 Si フォトダイオードアレイ (S13620-20) を使用した (図 6.18)。アレイの裏側には Amphenol ICC 社の Meg-Array (84512) が付属している。アレイのサイズは 24 mm×24 mm であり、素子数は 64 個、各素子の受光面は 2.5 mm×2.5 mm である。

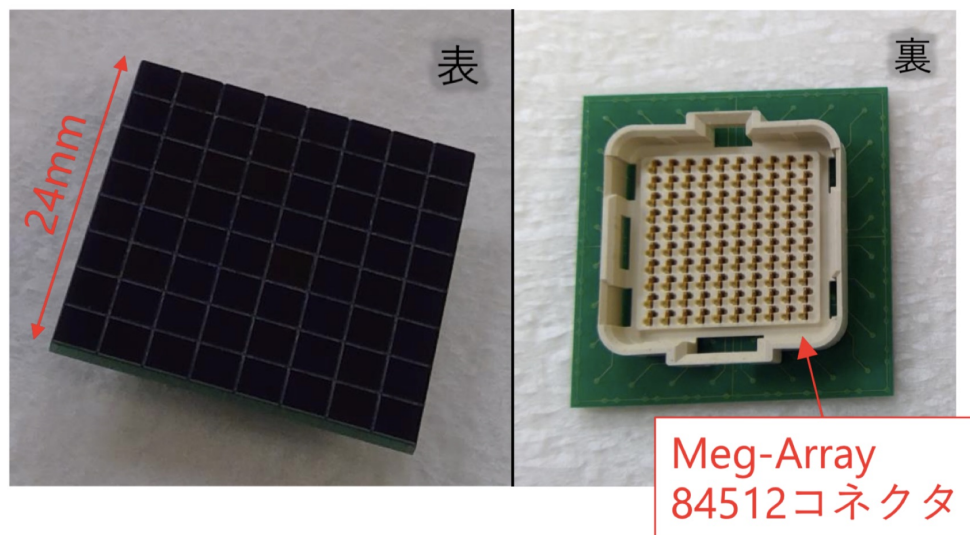


図 6.18 Si array の写真

CT、Si、EMT の信号の読み出しに CAEN 社の FADC (DT5725) を用いた。Si array の信号読み出しには CAEN の FADC (DT5740) を用いた。それぞれ以下の表 6.2 のような特性である。

表 6.2 FADC の規格

	DT5725	DT5740
channels	8	32
range	2 V	2 V
resolution	14 bit	12 bit
sample rate	250 MS/s	62.5 MS/s

Si と Si array にはそれぞれ図 6.19、図 6.20 に示すローパスフィルターを使用した。ビームは 1 Hz のパルスであるため時定数は十分である。それぞれの信号より供給電荷量が十分になるようにコンデンサーを選択した。

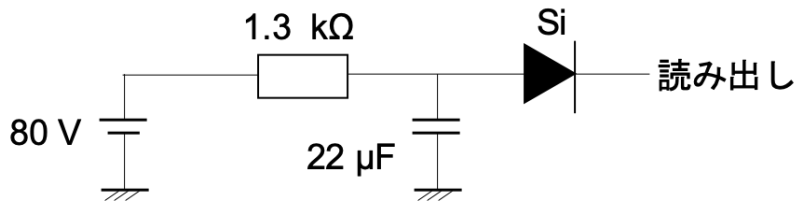


図 6.19 Si のローパスフィルター

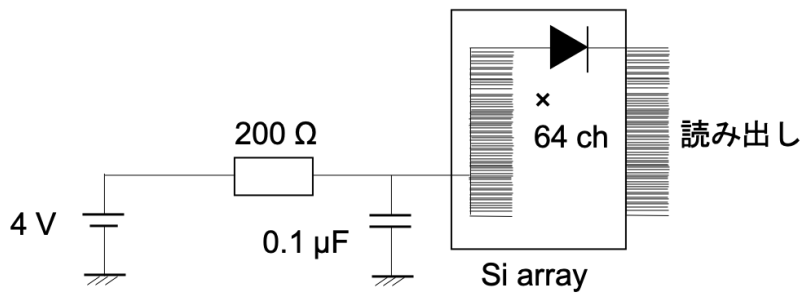


図 6.20 Si array のローパスフィルター

Si のローパスフィルターの時定数は 2.89×10^{-2} s であり、コンデンサーの供給電荷量は 1.8×10^{-3} C である。

検出器とその読み出しシステムの全体のセットアップを図 6.21 に示す。

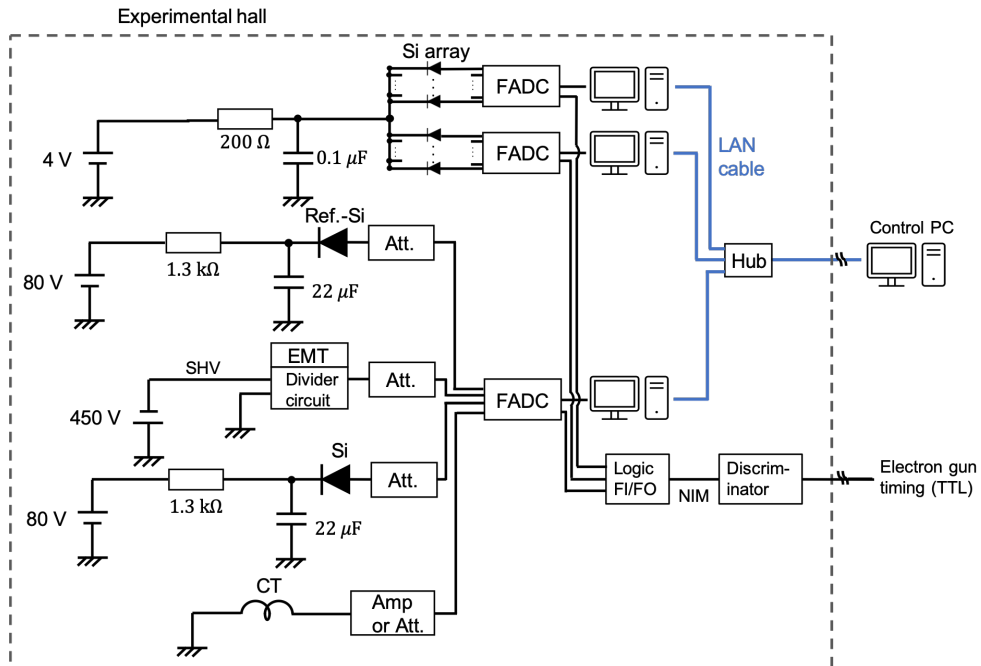


図 6.21 ビームテスト 1 DAQ セットアップ

Si array のローパスフィルターの時定数は 2.0×10^{-5} s であり、コンデンサーの供給電荷量は 0.4×10^{-6} C である。

遠隔で EMT や Si をビームから出し入れするために遠隔で操作が可能なアクチュエータを用いた。アクチュエータはそのコントローラを通し PC から制御できる。図 6.22 は用いたアクチュエータとそのコントローラである。このアクチュエータのステージに Si や EMT の支持具を設置した。

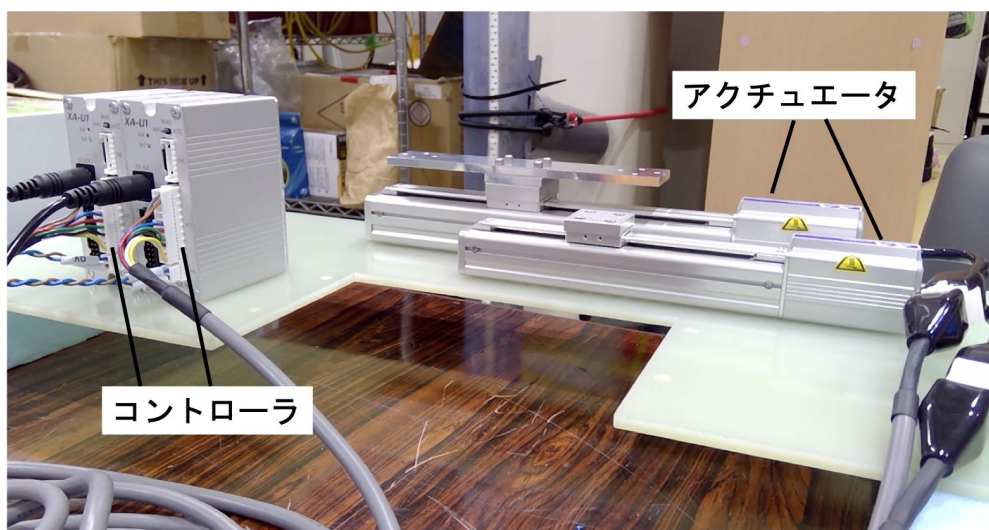


図 6.22 アクチュエータとそのコントローラ

アクチュエータのコントロールシステムのセットアップを図 6.23 に示す。図 6.23 中のアクチュエータとコントローラは表 6.3 のものを使用した。

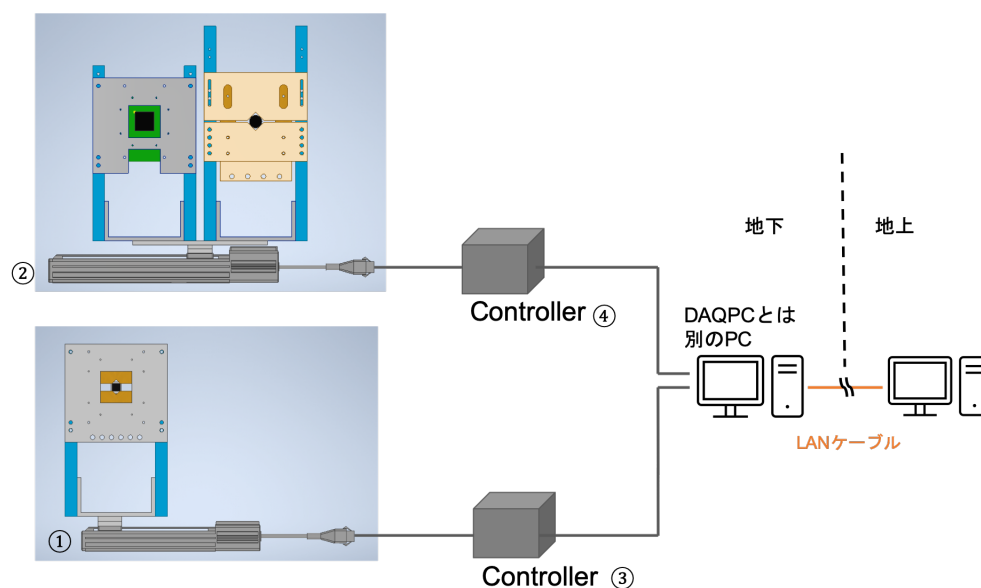


図 6.23 ビームテスト 1 支持具とアクチュエータのセットアップ

表 6.3 ビームテスト 1 で使用したアクチュエータとコントローラ

図 6.23 における番号	型番	社名
1	XA28-100	SUS 社
2	XA35L-150	SUS 社
3	XA-U1	SUS 社
4	XA-U1	SUS 社

6.2 各検出器の信号

ビームテスト 1 における各検出器からの波形を記す。図 6.24 は Si、図 6.25 は EMT の信号である。EMT からの出力電荷の積分値は ~ 50 pC である。ビームの強度は $\sim 3.0 \times 10^6$ electrons/pluse 程度である。Si は印加電圧を 80.0 V にしている。この値は現在の MUMON で Si がビームを測定するときの印加電圧と同じ値である。EMT の印加電圧は -450 V である。先行研究における EMT の印加電圧は -500 V であるが、ビームテストにおいて出力波高を Si と同程度にするために印加電圧を少し低く設定した。

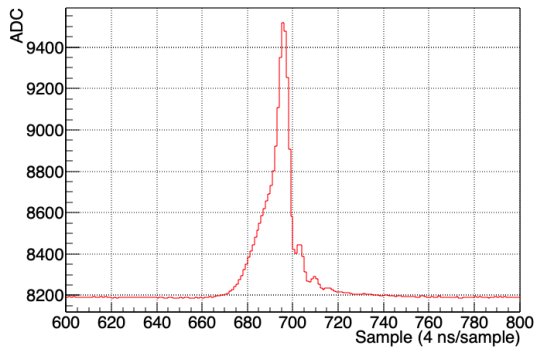


図 6.24 Si の信号

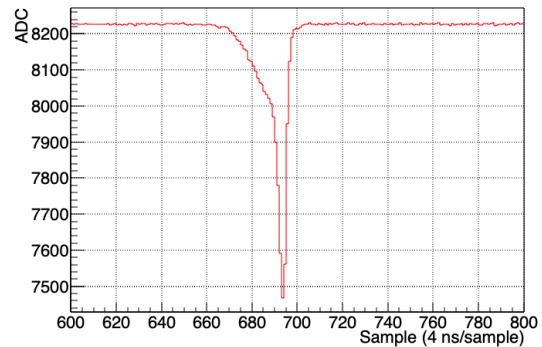


図 6.25 EMT の信号

図 6.26 は CT の信号である。このビーム強度では事前に行った CT の測定では信号が確認出来ないと考えられていたが、アンプで 10 倍にすることで信号を確認することができた。

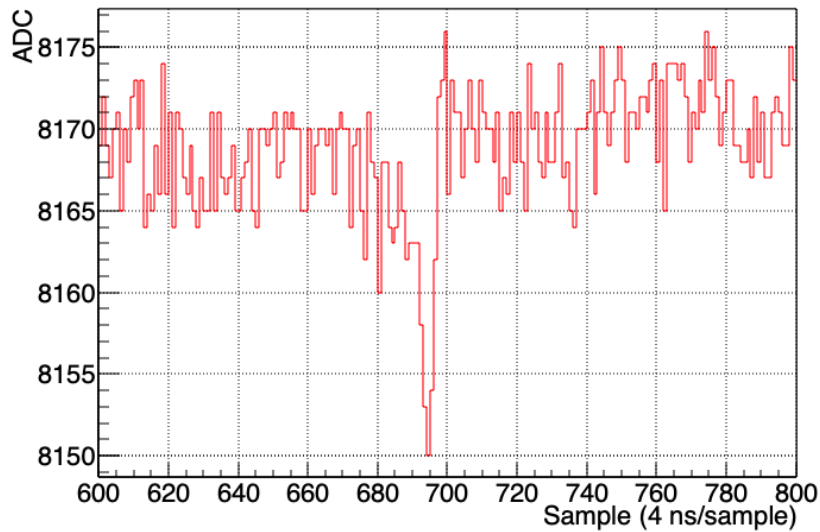


図 6.26 CT の信号

6.3 照射量の評価

検出器へ照射されるビームの量の評価は CT および Si array を用いて行なった。照射量の評価の手順を記す。

1. CT の周波数特性を測定
2. CT からの出力信号をフーリエ変換により周波数空間に移す
3. CT の周波数特性を用いて、出力信号を入力信号に変換
4. 逆フーリエ変換により時間空間に戻す
5. 変換された信号を積分し、ビームの電荷量を得る
6. Si array の結果よりビームの大きさを求める
7. Si array の結果と CT の結果を組み合わせ各検出器への照射量を評価する

1. 2. 3. 4. に関しては前章の結果を用いて行う。以下に例を示す。

図 6.27 は高強度照射における CT の出力信号である。この信号をフーリエ変換によって周波数空間に移し、図 5.10 の周波数特性に従って入力信号に変換し、逆フーリエ変換によって時間空間に戻した。入力信号に変換した信号は図 6.28 のようになる。

5. は図 6.28 の信号を積分する。積分範囲は以下のようにした。まず FADC の 0 sample から 400 sample の間でペDESTALを決める。ペDESTALの ADC カウントから一番差がある ADC カウントを持つ sample 番号を peak の位置とする。peak の位置での ADC カウントの 1/10 となる sample 番号を peak の位置から sample 番号が大きくなる方と小さくなる方から 2 箇所探す。その sample 番号から、さらに peak と逆の方向に 10 sample 移動した sample 番号間を積分範囲とした。例としては図 6.29 のようになる。

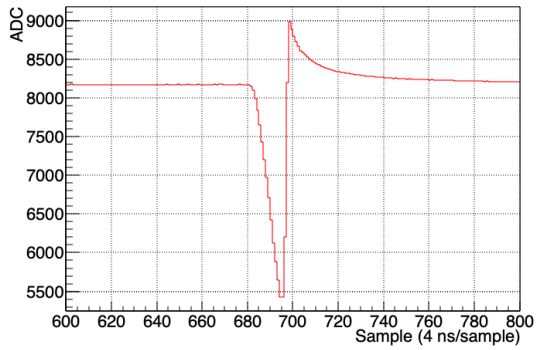


図 6.27 高強度時の CT の出力信号

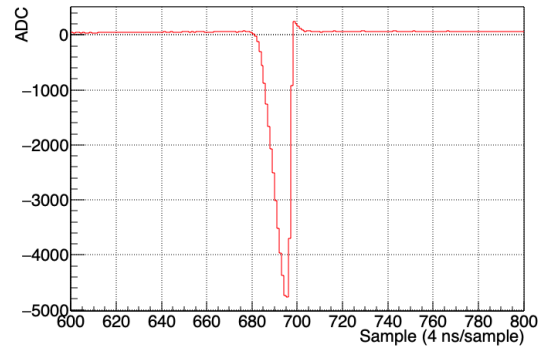


図 6.28 CT の入力ビームに変換した信号

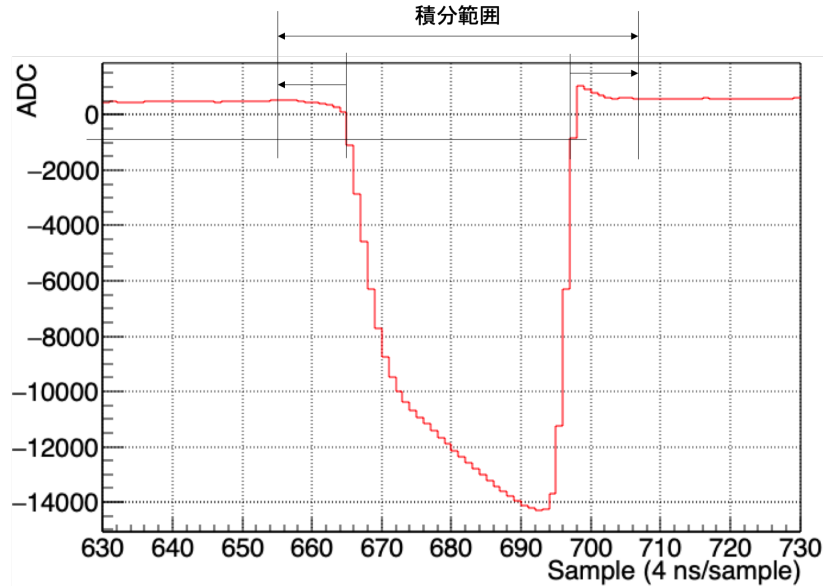


図 6.29 積分範囲の例。横軸を拡大してある。

その積分結果から、ビームの全電荷量を求める。1 パルスのビームの ADC カウントの積分値を A_i (ADC count) とする。高強度照射のすべてのパルスの積分値の合計を A_{total} とする。

$$A_{total} = \sum A_i \quad (6.1)$$

使用した FADC は表 6.2 より、ビームの全電荷 Q_{total} は以下ようになる。

$$Q_{total} [\text{C}] = A_{total} \times \frac{2 [\text{V}]}{2^{14}} \frac{1}{50 [\Omega]} \times 4 \times 10^{-9} [\text{s}] \quad (6.2)$$

ここで 50Ω は FADC のインピーダンスである。よって、ビームの全電子数 $N_{e,total}$ は

$$N_{e,total} = \frac{Q_{total} [\text{C}]}{1.602 \times 10^{-19} [\text{C}]} \quad (6.3)$$

である。

6.7. についてはビームテスト 1、ビームテスト 2 それぞれについて以下で説明する。

6.3.1 ビームテスト 1 における照射量

Si array によってビームのフラックスを測定した。図 6.30 は約 100 イベントの平均の結果である。

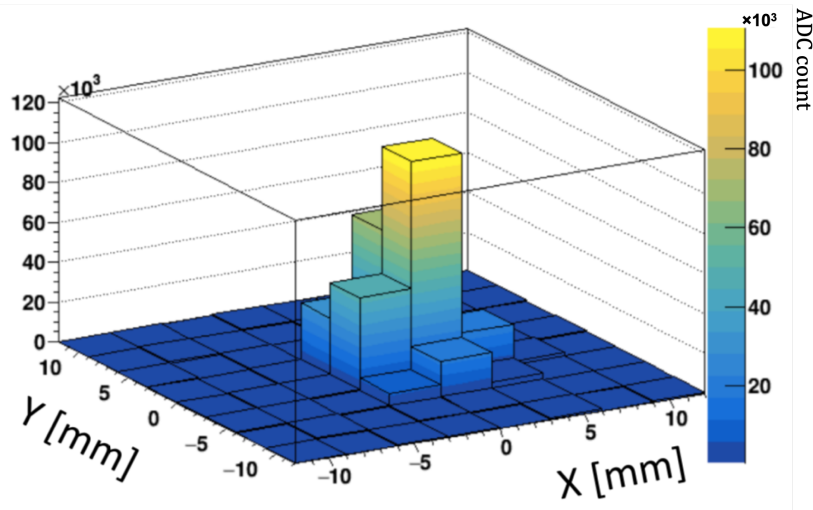


図 6.30 ビームテスト 1 ビームフラックス

この結果に対し、式 (6.4) で表される、2次元ガウシアンフィットを行なった。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(y - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (6.4)$$

μ_x 、 μ_y は中心からのずれ、 σ_x 、 σ_y は標準偏差である。フィット結果は図 6.31 のようになった。ビームフラックスを複数回に分けて測定し、 σ_x 、 σ_y の平均値とその誤差は表 6.4 のようになった。

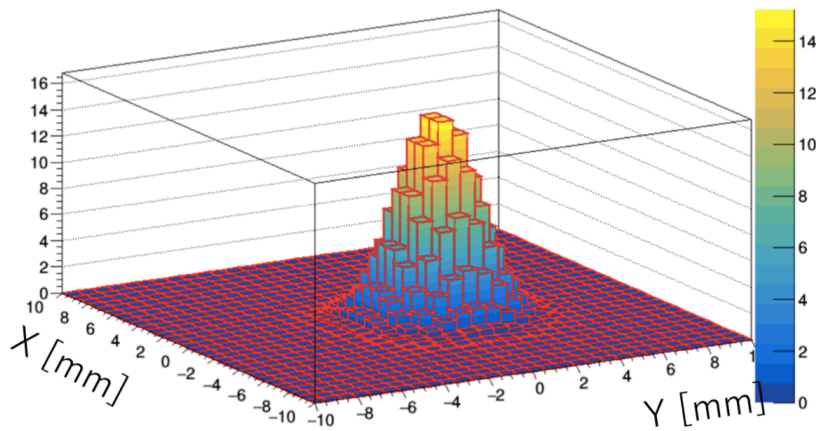


図 6.31 ビームフラックス (ガウシアンフィット)

表 6.4 ビームテスト 1 ビーム幅

σ_x (mm)	1.43 ± 0.10
σ_y (mm)	1.45 ± 0.09

以上の結果より、照射量を計算した。ここで Si の有感領域は 1 辺が 1 cm の正方形であり、EMT の有感領域は直径が 0.8 cm の円であり、ビームの太さが検出器の有感領域に対して小さい。これは MUMON におけるミュオンフラックスとは大きく異なるということである。この違いに放射線耐性を調べるための照射量の評価において誤差が生じるのでそれについて評価した。ビームが細いため検出器の中心と端では照射量が大きく異なる。ビームが最も当たっていた場所における単位面積あたりの照射量を「Max」とする。ガウシアンフィットの 1σ の範囲内における単位面積当たりの照射量の平均を「 1σ 」とする。ガウシアンフィットの検出器の範囲全体における単位面積当たりの照射量の平均を「総数」とする。「総数」はビームは局所的にしか照射されていないがそのビームが全体に照射されているとして照射量を考えている。ビームテスト 1 では低強度照射を 5 回、高強度照射を 4 回交互に行なった。最初の低強度照射は照射前の信号を測定するための照射である。2 回目の低強度照射から 5 回目の低強度照射までの照射量を T2K 運転時間に換算した。表 6.5 は照射量を現在の MUMON におけるビーム強度での運転年数に換算した値である。表 6.6 は照射量を将来の MUMON におけるビーム強度での運転年数に換算した値である。T2K 実験は 1 年間でニュートリノビームを出す日数はおおよそ 100 日であるので、100 日を 1 年とした。

表 6.5 ビームテスト 1 の照射量 ビーム強度:500 kW パルス周期:2.5 s

	照射量 (year)			
	低強度 2 までの累計	低強度 3 までの累計	低強度 4 までの累計	低強度 5 までの累計
Max	$0.0181^{+0.0020}_{-0.0022}$	$0.522^{+0.057}_{-0.063}$	$3.58^{+0.39}_{-0.43}$	$5.73^{+0.57}_{-0.63}$
1σ	$0.0141^{+0.0015}_{-0.0017}$	$0.407^{+0.045}_{-0.049}$	$2.79^{+0.31}_{-0.34}$	$4.47^{+0.45}_{-0.49}$
総量	$0.00235^{+0.00012}_{-0.00017}$	$0.0678^{+0.0036}_{-0.0050}$	$0.465^{+0.025}_{-0.034}$	$0.744^{+0.035}_{-0.047}$

表 6.6 ビームテスト 1 の照射量 ビーム強度:1.3 MW パルス周期:1.16 s

	照射量 (year)			
	低強度 2 までの累計	低強度 3 までの累計	低強度 4 までの累計	低強度 5 までの累計
Max	$0.00601^{+0.00066}_{-0.00072}$	$0.176^{+0.019}_{-0.021}$	$1.19^{+0.13}_{-0.14}$	$1.90^{+0.21}_{-0.23}$
1σ	$0.00469^{+0.00052}_{-0.00056}$	$0.136^{+0.015}_{-0.016}$	$0.93^{+0.10}_{-0.11}$	$1.48^{+0.16}_{-0.18}$
総量	$0.000781^{+0.000041}_{-0.000058}$	$0.0226^{+0.0012}_{-0.0017}$	$0.155^{+0.008}_{-0.011}$	$0.246^{+0.013}_{-0.018}$

ビームの 1σ の領域はビームテスト中、主にビームが検出器に当たる場所である。放射線劣化は主にその範囲で起こっていると考えられ、以降ビームテスト 1 における放射線耐性を評価するための照射量の基準を「 1σ 」で考える。

6.4 EMT の安定性

Si と EMT の相対的な信号の劣化を評価した。図 6.32 の横軸はビームフラックスであり、縦軸は各低強度照射時における、EMT/Si を表している。ただし、照射前における EMT/Si の値を 1 としている。

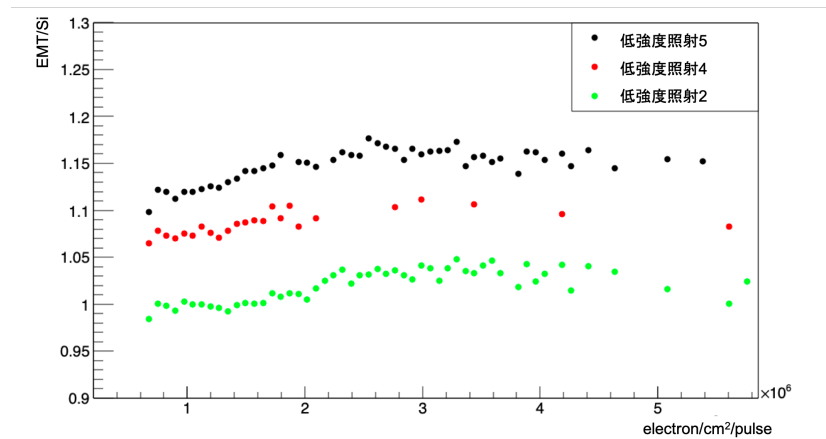


図 6.32 EMT の安定性

図 6.32 を見ると照射量が増えるに連れて縦軸の値が大きくなっていることがわかる。これは Si に対する EMT の相対的な信号の安定性を表している。低強度照射 5 は将来の T2K 実験の運転時間で 148 日間照射した後の信号を確認している。Si は低強度照射 5 において EMT に比べ ~10% 多く信号が減少したと考えられる。T2K 実験の現在の強度で換算すると低強度照射 5 における照射時間は 447 日である。MUMON の Si は現在の強度約 165 日間の運転で 1% 信号が小さくなる現象が見られている。この結果によって Si と EMT の相対的な放射線耐性がわかった。

6.5 EMT w/o al-Sb の性能評価

この研究で初めて EMT w/o al-Sb の信号を確認することが出来た。アンプを用いて EMT w/o al-Sb の信号を 10 倍にしてビーム強度が 4×10^6 electrons/cm² /pulse 程度までは信号を確認した。EMT w/o al-Sb への印加電圧は -1000V とした。図 6.33 はビーム強度が 5.0×10^6 electrons/cm²/pulse であるときの EMT w/o al-Sb の信号である。信号はアンプによって 10 倍にしている。

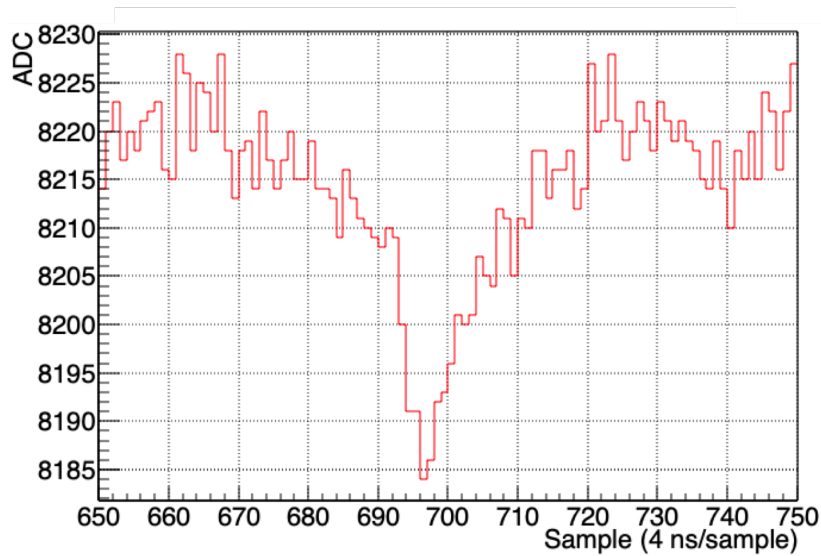


図 6.33 ビーム強度が 5.0×10^6 electrons/cm²/pulse であるときの EMT w/o al-Sb の信号

EMT w/o Al-Sb は信号を 10 倍にすることで、将来の T2K 実験 (1.3 MW, 320 kA) の MUMON におけるビームで信号が確認できると考えられる。

ビームフラックスが 8.1×10^{10} electrons/cm²/pulse のときの波形を図 6.34 に示す。

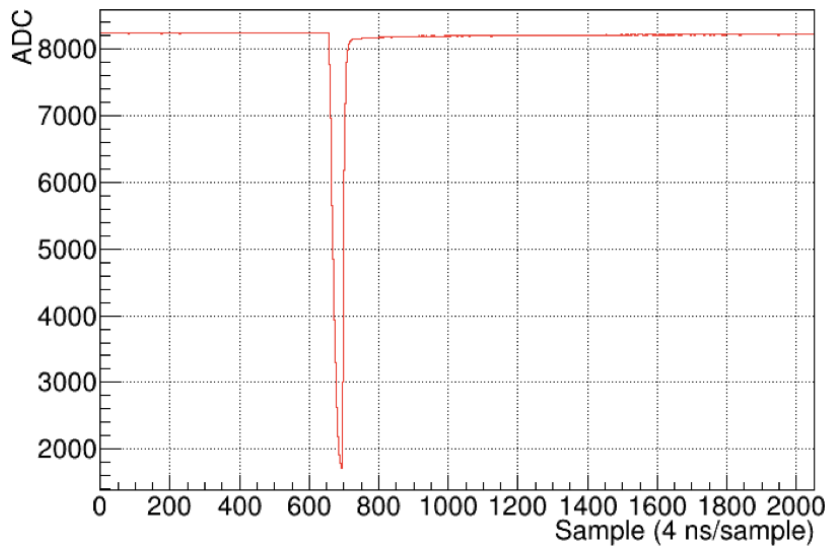


図 6.34 EMT w/o al-Sb の信号

EMT に入射させるビーム電荷に対する EMT の出力信号の電荷の比は表 6.7 のようになった。これは通常の EMT と比べ、 4.8×10^{-3} 倍程度の信号の大きさである。

EMT w/o al-Sb には 1.15×10^{14} electrons/cm² の照射を行なった。

照射量 0.12×10^{14} /cm² から 1.15×10^{14} /cm² までの EMT w/o al-Sb の信号の安定性を図 6.35 に示す。

表 6.7 EMT w/o al-Sb のビームの電荷と出力電荷の比

ビームの電荷 (pC/pluse)	ビームフラックス (10^6 electrons/cm ² /pluse)	EMT からの出力電荷 (pC)	ビームの電荷と出力電荷の比
50	405.3	36	0.72

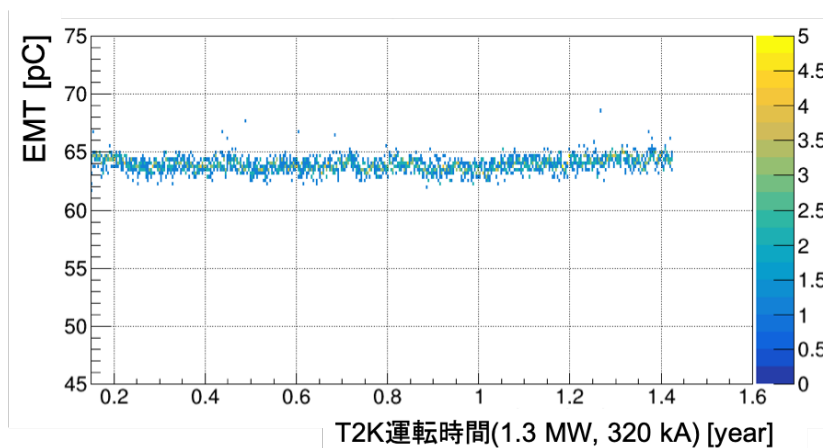


図 6.35 EMT w/o al-Sb の安定性

この照射に対して信号の劣化は見られなかった。

6.6 ビームテスト 1 まとめ

T2K 実験の将来強度のビームを 148 日分の運転時間照射した場合、Si は EMT よりも 10% 多く劣化する。EMT w/o al-Sb の信号を初めて確認することができた。

EMT w/o al-Sb の応答は通常の EMT に比べ、 4.8×10^{-3} 倍であった。EMT w/o al-Sb に T2K 実験の将来強度のビームを 115 日分の運転時間照射したときに信号の劣化は確認されなかった。

7 ビームテストによる検出器の性能評価 2

7.1 ビームテスト 2 のセットアップ

ビームテスト 1 ではアクチュエータの電源がついているときのノイズが問題となった。そのためビームテスト 1 では低強度照射時はアクチュエータの電源を切ってデータ取得を行った。アクチュエータの電源を操作するために管理区域に入らなければならなかったため、ビームを照射できない時間が多く生じてしまった。そのビームが照射できない時間を減らすために、アクチュエータを遠隔で電源の ON/OFF の操作を行える様なセットアップを考えた。加えて検出器の大きさに対してビームが細く、その細かいビームで 1 点照射を行っていたので検出器の劣化が局所的にしか起こってなく、MUMON におけるビームフラックスと大きく異なるという問題が生じた。この研

究での目的は MUMON における EMT の安定性や線型性を調べることなので、MUMON におけるフラックスに近いビームを用いて比較することが重要である。この問題を解決するために検出器をビーム軸に対して垂直方向の平面で動かすことを可能にした。リモートでコントロールが可能にするため、以下の表 7.1 の器具を用い図 7.1 の様にセットアップを行なった。

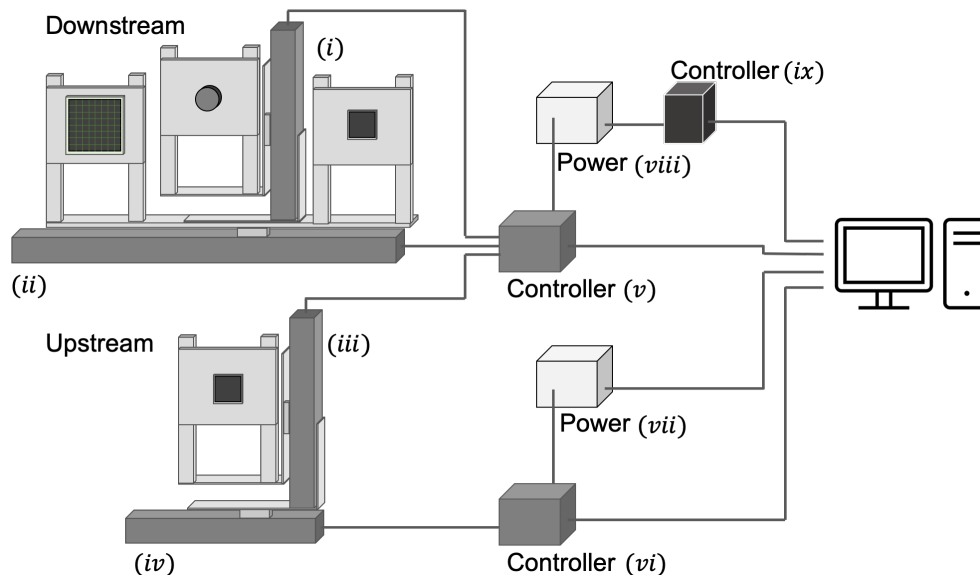


図 7.1 リモートコントロールのための配線

表 7.1 型番

図 7.1 内の番号	型番	社名
(i)	XA42L-50E	SUS 社
(ii)	XA42L-350EW	
(iii)	XA42L-50E	
(iv)	XA35L-150	
(v)	XA-A3	
(vi)	XA-U1	
(vii)	P4K-80	松定プレジジョン社
(viii)	P4K-80	
(ix)	GS610	横河電機社

このセットアップを実現させるために、支持具のデザインを改めて行なった。デザインした支持具をビーム出口付近に設置している様子を図 7.2 に示す。

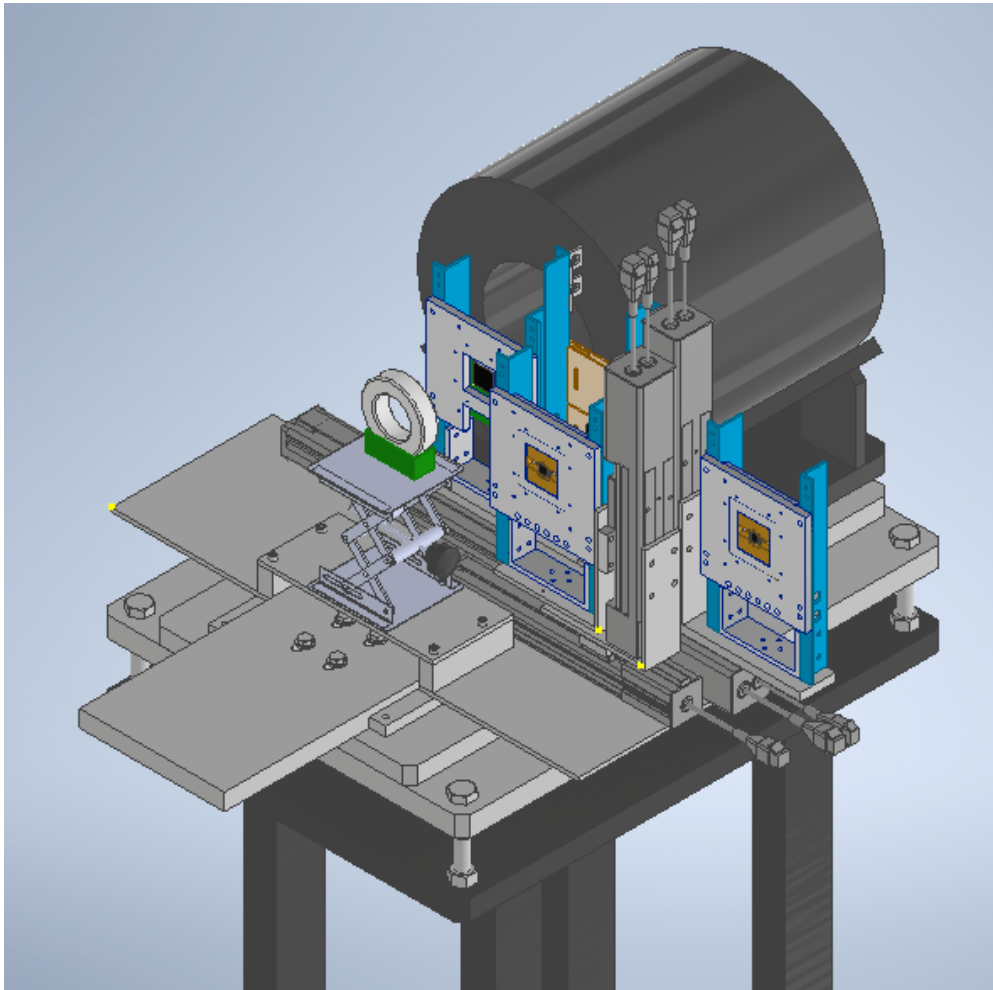


図 7.2 ビームテスト 2 における支持具のデザイン

またビームテスト 2 では Si array のローパスフィルターを改善し、検出器と信号の読み出し系統は図 7.3 の様にした。Si array のローパスフィルターについては次節で詳しく説明する。

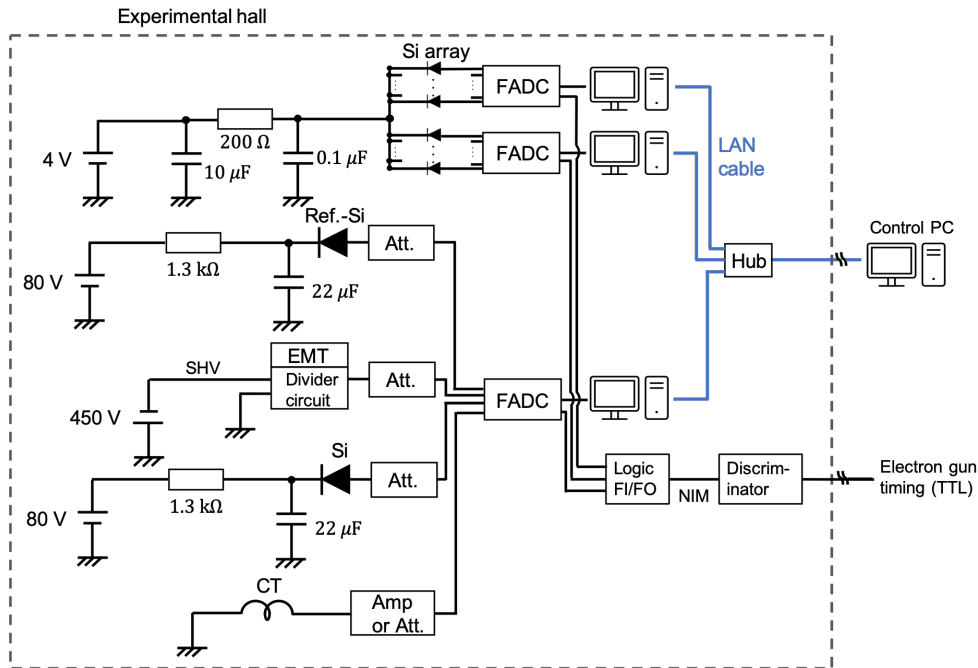


図 7.3 ビームテスト 2 DAQ セットアップ

ビームテスト 2 における測定内容は次の項目である。

- EMT の現在の MUMON のビーム強度から将来の強度に対する線型応答性
- EMT の初期不安定性
- EMT に T2K 実験数年分のミュオンビームを照射したときの安定性 (放射線耐性試験)
- EMT の個体差の測定

ビームテスト 1 で行なった高強度照射と低強度照射を繰り返す長期安定性試験に加えて、先行研究 [31] で見られた EMT の初期不安定性を調べるため、ビーム強度が 2×10^9 electrons/pluse 程度 (中強度) である照射を行なった。中強度照射と、 3×10^6 electrons/pluse 程度 (低強度) の照射を交互に行い、信号の変化を調べた。また、EMT の個体差を測定するために 2 つの EMT で同様の測定を行った。以降それぞれ EMT#1、EMT#2 として区別する。中強度照射と高強度照射は図 7.4 のセットアップで行なった。低強度照射は図 7.5、図 7.6、図 7.7、図 7.8 のセットアップで行なった。

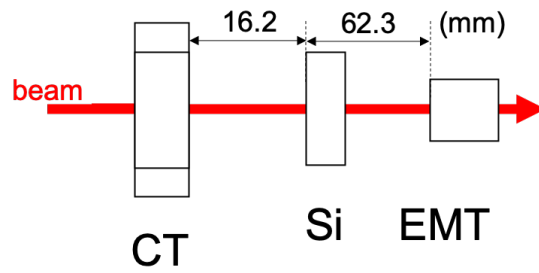


図 7.4 ビームテスト 2 高強度照射のセットアップ

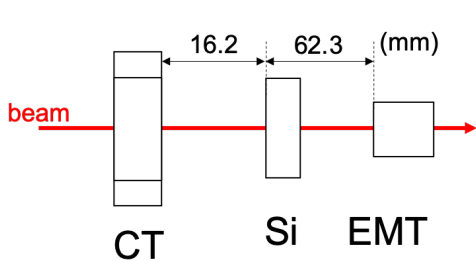


図 7.5 ビームテスト 2 低強度照射のセットアップ

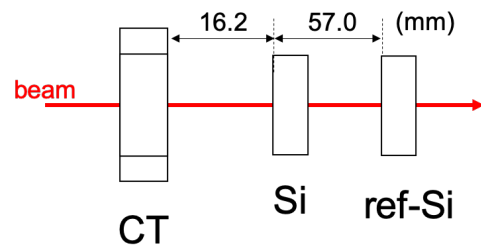


図 7.6 ビームテスト 2 Si のキャリブレーションのためのセットアップ

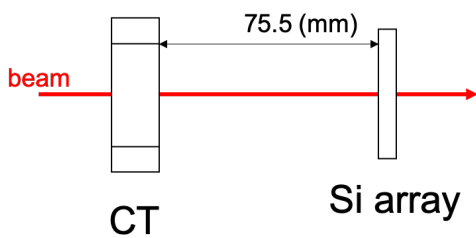


図 7.7 ビームテスト 2 ビームフラックス測定のためのセットアップ

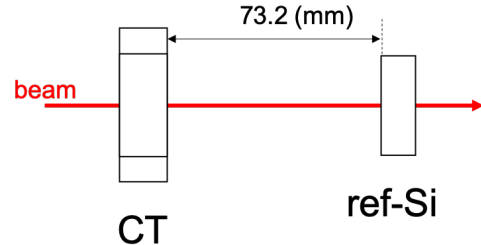


図 7.8 ビームテスト 2 ref-Si のキャリブレーションのためのセットアップ

7.2 Si array のローパスフィルター

ビームテスト 1 では Si array のローパスフィルターを図 6.20 のようにした。このローパスフィルターの時定数は $20 \mu\text{s}$ 、供給される電荷は $0.4 \times 10^{-6} \text{ C}$ であった。図 7.9 は Si array のビーム中心付近のチャンネルの信号である。

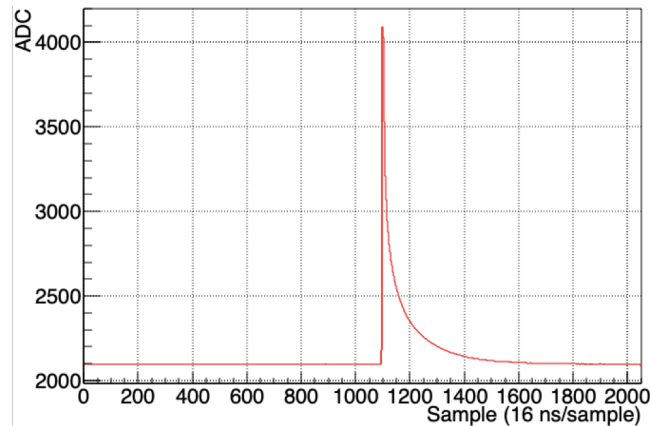


図 7.9 Si array の信号 低強度照射時ビーム中心付近の信号である。

この信号の積分値は約 1×10^5 counts である。そこから信号の電荷量を計算すると 15.6×10^{-9} C である。Si array は全 64ch である。仮に 8 つの ch で同時に計測された場合、トータルの信号電荷量は 0.125×10^{-6} C となる。この電荷量であればコンデンサーは必要な電荷は供給できるが、強い信号が来たとき必要な電荷が供給されず正しくビームプロファイルを測定できなくなってしまう。実際にはビームは細いため中心付近の数 ch にしかビームは照射されていないがより十分な電荷が共有されるようにするためビームテスト 1 の Si array のローパスフィルターに $10 \mu\text{F}$ のコンデンサーを加え、次の図 7.10 のようにした。

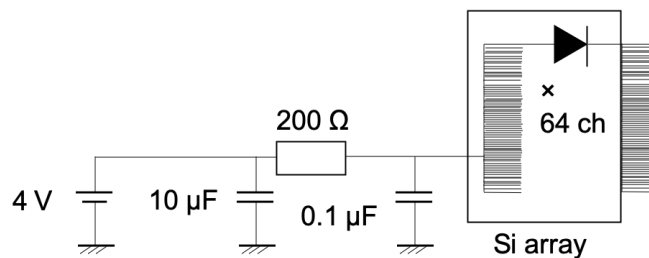


図 7.10 ビームテスト 2 における Si array のローパスフィルター

7.3 高強度照射における EMT の処理

EMT に大量の荷電粒子が入射、アノード電流が流れすぎると出力の電圧降下が入力のバイアス電圧よりも大きくなり、バイアス電圧と同程度になるまで増幅過程が抑制されてしまう。EMT の劣化においてダイノードでの劣化が主要な部分を占めている場合、増幅過程が抑制されれば、それに見合った劣化が起こらなくなると考えられる。そのため、増幅によって大きな電流が流れたとして、電圧降下が小さくなるように図 7.11 ような処理を行なった。

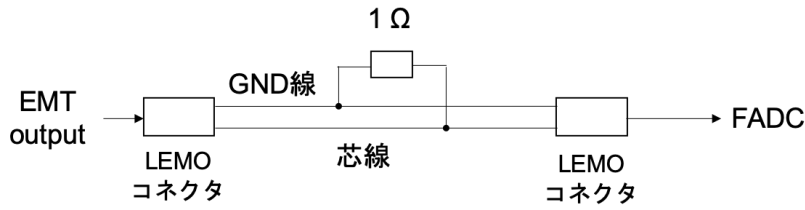


図 7.11 高強度照射における EMT の処理

1 パルスのビーム電荷量が約 15 pC であるとき、EMT の出力信号の電圧降下は約 2 V であった。入射電荷が大きくなるほど出力信号の電圧降下は大きくなる。単純に比例すると考えると 20 nC のビームの時出力信号の電圧降下は 2700 V となる。ビームテストでは EMT の印加電圧を -450 V にしているため、増幅過程が抑制されてしまう。図 4.2 の陽極の出力のすぐ近くに 1 Ω を挟むことで出力信号の電圧降下が 1/50 になる。このようにすることで、20 nC のビームに対し、増幅は正常に行われ、出力信号は 54 V に抑えることができる。

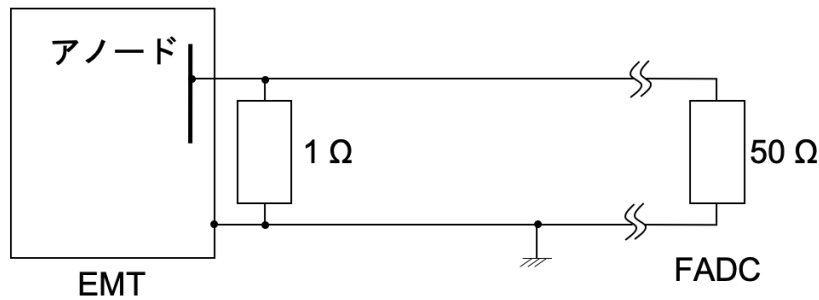


図 7.12 1Ω を入れている回路

7.4 ビームテストのシミュレーション

7.4.1 ビームの散乱

ビームの散乱は照射量に影響するので、FLUKA [33] [34] によるシミュレーションを行なった。検出器はビームテストのセットアップと同様にビームに対して串刺し状に並べた。ビームテストにおいて EMT は最下流に位置しており、上流にある Si やその支持具によって多少ビームが散乱してしまう。Si や支持具など上流に空気以外の物質が無い場合に EMT の有感領域に入射する電子の数を 100% とした。結果は表 7.2 のようになった。

表 7.2 散乱のシミュレーション

ビームテスト	Si と EMT 間の距離 (mm)	EMT への入射率 (%)
ビームテスト 1	47.1	95.5
ビームテスト 2	62.3	92.8

それぞれのビームテストにおいて、4.5%、7.2% ほど EMT へ入射する電子数が減少することがわかった。この結果を照射量の評価に用いた。

7.4.2 ビーム粒子の違い

粒子の種類や物質によってエネルギー損失が異なる。MUMON におけるミューオンのエネルギー分布は図 3.2 のようになっており平均は約 3 GeV である。本研究のビームテストで使用した電子は 90 MeV である。このエネルギー損失は検出器の劣化に影響を及ぼす。FLUKA によるシミュレーションにより、各粒子におけるエネルギー損失をシミュレートした。

EMT に電子を照射した結果は図 7.13 のようになり、ミューオンを照射した結果は図 7.14 のようになった。

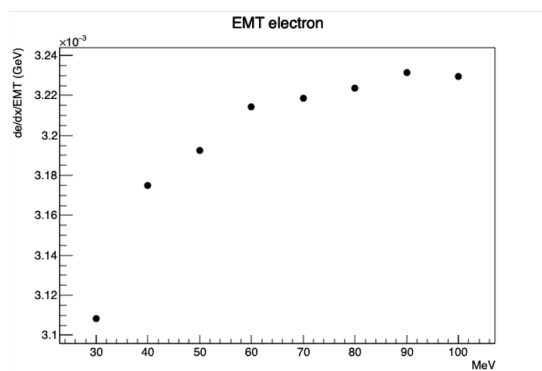


図 7.13 電子のエネルギー損失

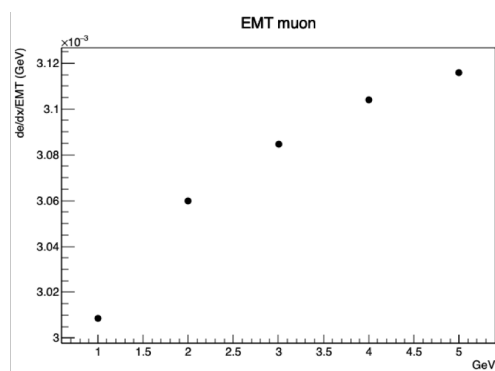


図 7.14 ミューオンのエネルギー損失

横軸は照射した粒子のエネルギー、縦軸はエネルギー損失である。粒子による違いで 3% ほどエネルギー損失の大きさが異なることがわかった。電子の方がエネルギー損失が大きいので、ビームテストと MUMON において同じ電荷量照射した場合ビームテストの方が多く放射線ダメージを与えることになる。照射量を T2K の運転時間に換算するにあたって最大 3% 換算運転時間が長くなると考えられるので、この 3% は照射量の系統誤差として考える。

7.5 ビームテスト 2 における照射量

ビームテスト 2 では高強度照射を 9 点に分けて行なった。この方法により、照射を満遍なく行うことができた。しかし、ビームを検出器の中心からずらすことでビームの端の方の電子が検出器に照射されずビームの総電荷に対して検出器に照射される電荷少なくなってしまふ。そのロスを評価するために、ビームプロファイルとその中心を測定した。ビームテスト 1 と同様に 2 次元ガウシアンフィットを行なった。Si array によるビームプロファイルの測定結果とガウシアンフィット結果は図 7.15 のようになった。

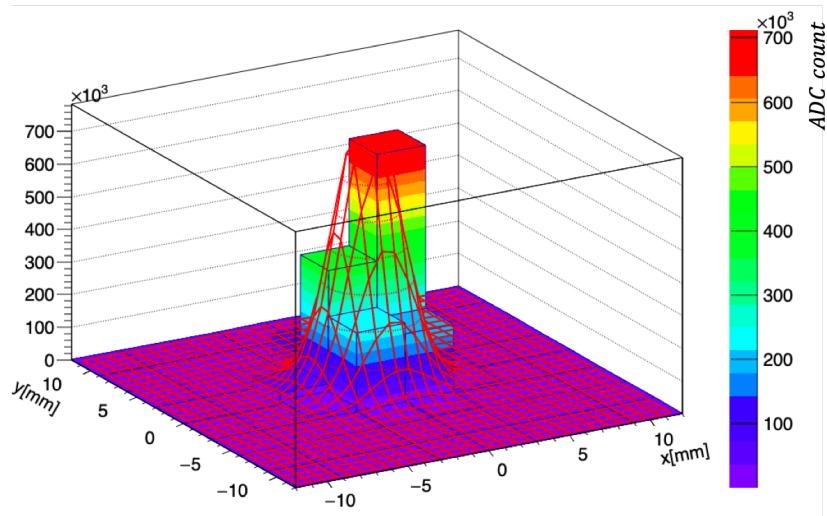


図 7.15 ビームフラックス

2回に分けて測定を行なった。その結果を式(6.4)のパラメータを使い表 7.3 にまとめた。

表 7.3 ビーム幅

	1回目	2回目	平均
σ_x (mm)	1.72	1.73	1.73
σ_y (mm)	1.76	1.77	1.77
μ_x (mm)	-0.08	-0.11	-0.095
μ_y (mm)	0.87	0.78	-0.83

得られたビームの中心と幅の結果から、9点合計したビームのフラックスが図 7.16 のようになった。

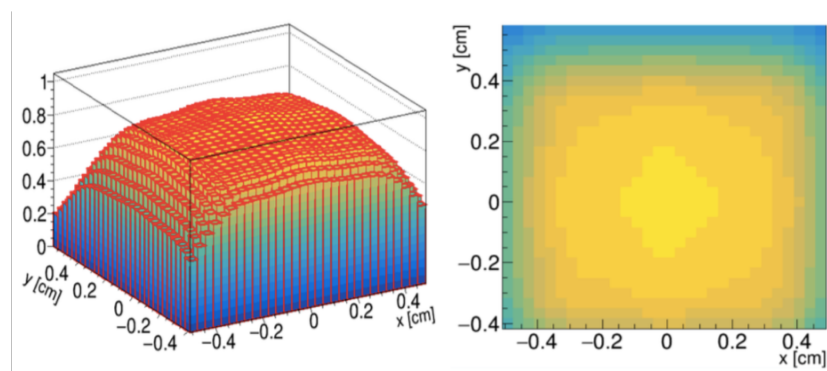


図 7.16 9点照射合計のビームフラックス

この結果より、ビームの総電子数に対する各検出器に入射する電子の割合を求めた。

表 7.4 効率

	効率
Si	74%
EMT	85%

各検出器の入射率は表 7.4 のようになる。また、電子の散乱による効果で下流の EMT に入射する電子の数は減少する。シミュレーション結果よりその効果を考慮する。以上より、各低強度照射時点における累計照射量を計算した。表 7.5 は長期安定性試験における各低強度照射時点での照射量である。

表 7.5 長期安定性試験における照射量 現在の T2K ビーム強度 (500 kW, 250 kA) による運転時間に換算している。セット番号は各低強度照射に対応している。

セット番号	Si#1[day]	EMT#1[day]	Si#2[day]	EMT#2[day]
1	118	136	119	128
2	248	272	239	259
3	354	407	363	392
4	472	542	487	526
5	748	859	610	659
6	1024	1177	732	791
7	1565	1799	1059	1362
8	-	-	1420	1990
9	-	-	1634	2363

EMT#1 の長期安定性試験における照射量は 1815 日分 (500 kW, 250 kA)、また将来における運転では、596 日分 (1.3 MW, 320 kA) であることがわかった。また EMT#2 の長期安定性試験における照射量は 2410 日分 (500 kW, 250 kA)、また将来における運転では、791 日分 (1.3 MW, 320 kA) であることがわかった。次節の EMT の線型応答性の評価において各 EMT の照射前と最後の低強度照射の信号を比較した。

7.6 EMT の線型応答性

各高強度照射の間に EMT の線型性を測定した。CT の信号の取得に用いた FADC の特性は表 6.2 により、信号の積分値が x ADC カウントのとき、1 パルスの電荷量 Q (C) は式 (6.2) と同様に次の様に表される。

$$Q = \frac{x \times 2}{2^{14}} \times \frac{1}{50} \times 4 \times 10^{-9} \quad (7.1)$$

ここで Si の有感面積は 1.0 cm^2 、EMT の有感面積は 0.77 cm^2 である。Si array の結果より検出器の大きさに対してビームの大きさは小さいので、それぞれの検出器に入射するビームフラックス

F_{Si} と F_{EMT} (C/cm²) は次のようになる。

$$F_{Si} = \frac{Q}{1.0} \quad (7.2)$$

$$F_{EMT} = \frac{Q}{0.77} \quad (7.3)$$

線型応答性の評価におけるビーム強度は検出器に入射した総電荷量を検出器の有感領域で割った値として考える。

ref-Si のキャリブレーションにより ref-Si とビームの関係を調べた。結果は図 7.17 のようになった。

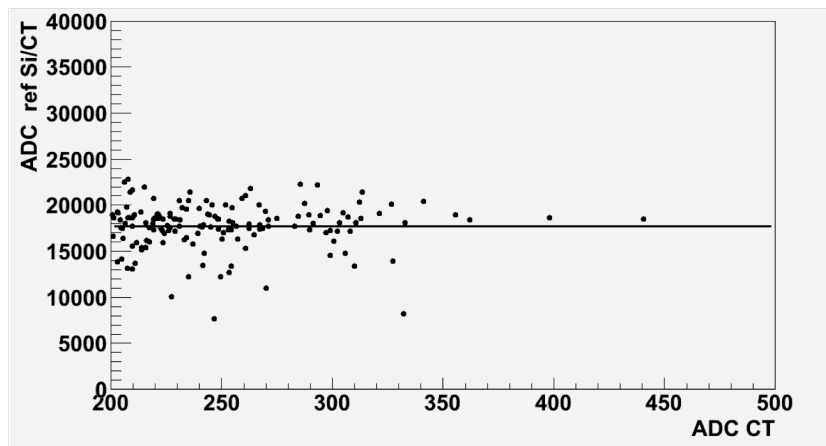


図 7.17 ref-Si のキャリブレーション

横軸は CT の出力信号を、フーリエ変換と周波数特性を利用して入力信号に換算した信号の積分値である。縦軸は ref-Si の ADC カウントを横軸で割った値である。

その結果 ref-Si と CT (入力) の ADC カウントの比は次のようになった。

$$\frac{rSi_{adc}}{CT_{adc}} = 17690 \pm 2521 \quad (7.4)$$

ただし、ref-Si の出力信号の ADC カウントを rSi_{adc} とし CT (入力) の ADC カウントを CT_{adc} とする。

式 (7.3)、式 (7.3)、式 (7.4) より、ビームの電子数を N (個/pulse) として次のように表せられる。

$$\frac{rSi_{adc}}{N} = 0.290 \pm 0.041 \quad (7.5)$$

この結果を用いて低強度照射におけるビーム強度を評価した。

EMT#1 と EMT#2 の照射前と照射後の線型応答性を調べた結果を以下に示す。EMT 印加電圧はそれぞれ -450 V である。赤い点線はそれぞれ $\pm 3\%$ の範囲を表している。

まず EMT#1 の結果を図 7.18 と図 7.19 に示す。

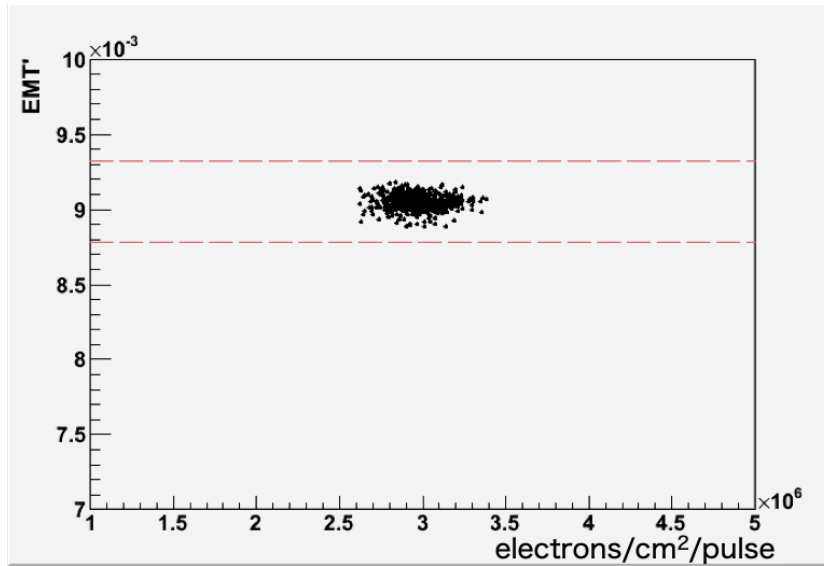


図 7.18 EMT#1 の照射前の線形応答性

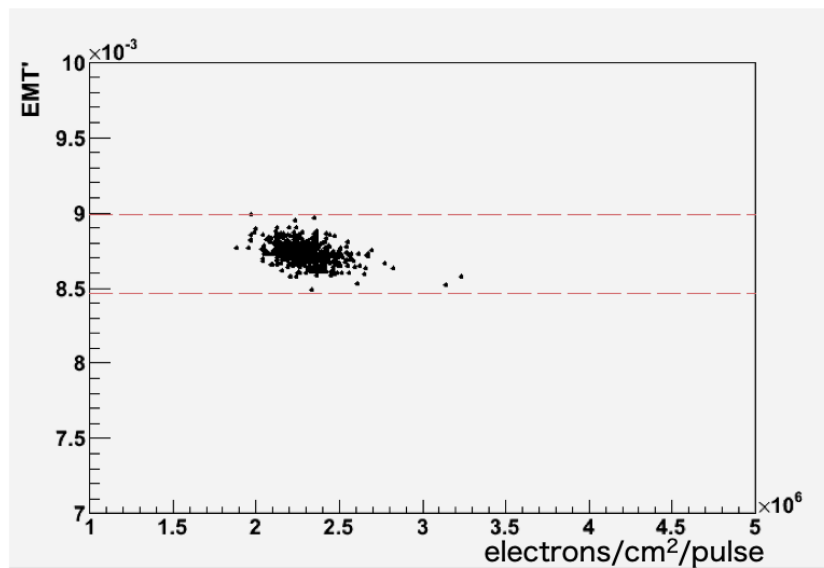


図 7.19 EMT#1 の 596 日分 (1.3 MW, 320 kA) 照射後線形応答性

横軸はビームフラックス、縦軸は ref-Si でキャリブレーションした後の EMT の信号になっている。MUMON におけるビーム強度は 3.6×10^6 muons/cm²/bunch (現在) ~ 4.7×10^6 muons/cm²/bunch (将来) である。図 7.18 と図 7.19 を見ると照射強度が現在よりも小さい範囲であるが線形応答性は 3% 以内であった。これは先行研究の結果と矛盾していない。また照射後に線型性が悪化している現象は見られなかった。

次に EMT#2 の結果を図 7.20 と図 7.6 に示す。

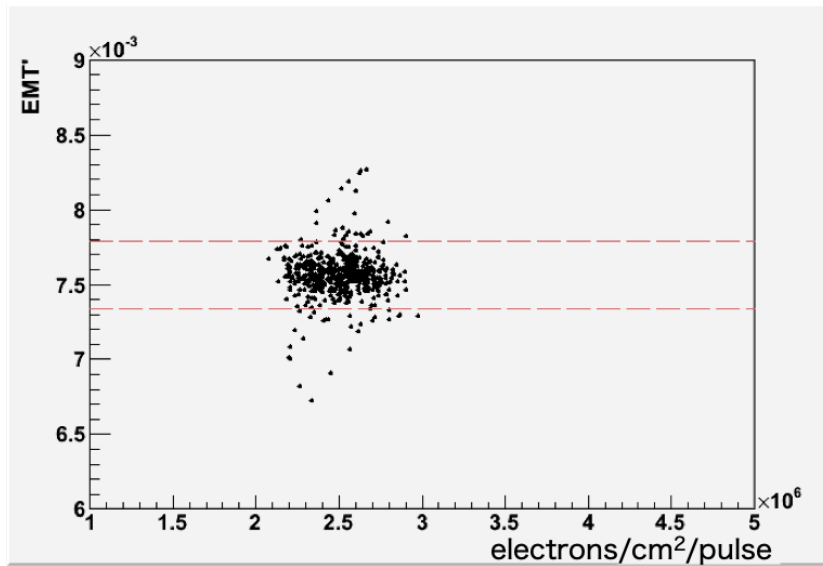


図 7.20 EMT#2 の照射前の線形応答性

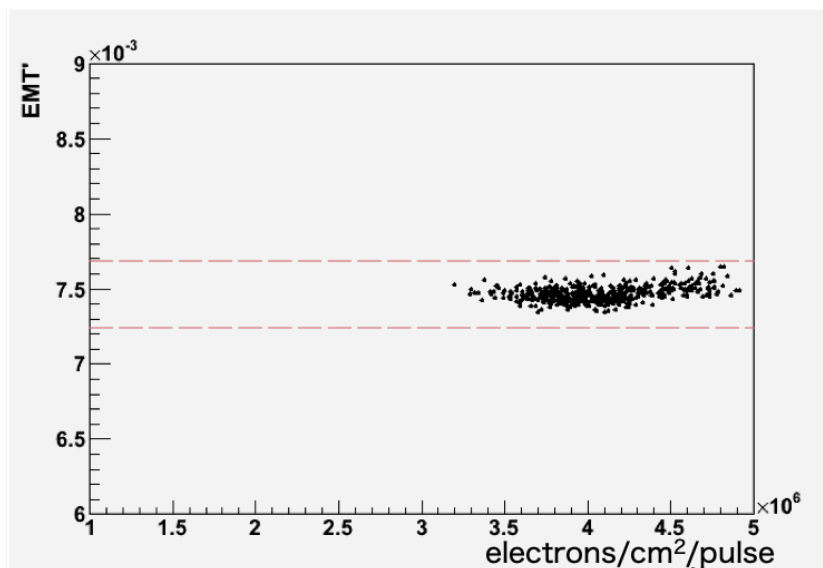


図 7.21 EMT#2 の 791 日分 (1.3 MW, 320 kA) 照射後線形応答性

EMT#2 に関して照射前は 3% 以上でバラついている。このときのビーム強度は現在の MUMON におけるビーム強度の 2/3 程度である。ビーム強度が増加することによって信号が小さくなっているわけではないので、このバラツキはビーム側の問題である可能性がある。照射後の図を見ると、EMT#2 の照射後の測定では将来強度程度の線形応答性を確かめることができた。照射後の線形応答性は 3% 以内であり、将来強度における線形応答性を確認することができた。

1 パルスのビームに含まれる電荷 Q_{beam} と 1 パルスの EMT の出力信号の電荷 Q_{EMT} より、ゲ

イン G を以下のように定義する。

$$G = \frac{Q_{EMT}}{Q_{beam}} \quad (7.6)$$

低強度照射における、照射前の EMT#1、EMT#2 のゲインの結果は以下ようになった。今回

表 7.6 2020EMT のゲイン

EMT	G
EMT#1	160.1 ± 23.7
EMT#2	133.76 ± 21.8

測定した 2 つの EMT ではゲインに ~20% の個体差があった。

7.7 EMT の初期不安定性

EMT の先行研究において電圧を印加して信号を取り始めてから数日の間信号が下がり続けるが現象が見られた。この初期不安定性を 2 つの EMT に関して調べた。それぞれ $\sim 4.7 \times 10^{12}$ electrons/cm²/pulse (中強度) だけ照射する毎に、 $\sim 3 \times 10^6$ electrons/cm²/pulse (低強度) 程度のビームを照射し出力電荷量の変化を調べた。EMT#1 は 500 kW での運転時間 20.0 日、EMT#2 は 16.4 日に相当するビームを照射した。各低強度照射時における累計照射量を現在の T2K の MUMON における運転時間に換算した。換算時間は表 7.7 のようになった。

表 7.7 初期不安定性試験における照射量

現在の T2K ビーム強度 (500 kW, 250 kA) による運転時間に換算している

セット番号	EMT#1[day]	EMT#2[day]
1	0.76	1.94
2	1.24	3.67
3	1.71	5.87
4	4.46	7.65
5	7.22	9.34
6	9.85	10.7
7	12.3	12.5
8	14.9	14.4
9	17.5	16.4
10	20.0	-

まず、低強度照射毎に照射 Si と ref-Si のキャリブレーション結果を図 7.22 (EMT#1) と図 7.23 (EMT#2) に示す。横軸は低強度照射のセット番号、縦軸は照射 Si/ref-Si になっている。

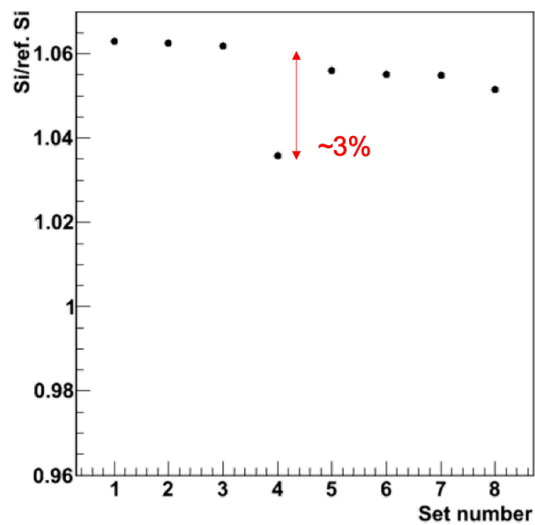
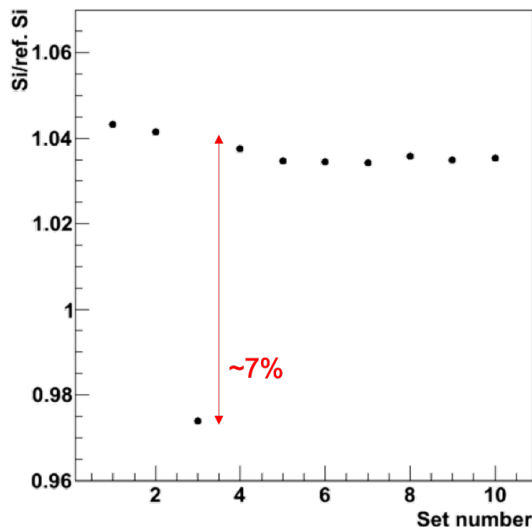


図 7.22 EMT#1 のためのキャリブレーション結果 図 7.23 EMT#2 のためのキャリブレーション結果

図 7.22 を見ると、3 セット目のキャリブレーション結果だけ他のセットに比べ 7% 程度異なる値となった。また、図 7.23 を見ると 4 セット目のキャリブレーション結果だけ他のセットに比べ 3% 程度異なる値となっている。このずれている 2 点に関してはキャリブレーションがうまく行えていなかったと考えられる。キャリブレーションが行えていない理由として考えられるのは、検出器の位置のずれである。検出器の位置はアクチュエータを用い遠隔で操作していた。このときアクチュエータのステージの位置を手打ちで指定していた。通常はビームが検出器の中心に当たる位置に検出器を移動させている。このとき検出器の位置を数 mm 間違えて指定した場合、検出器に完全にビームが当たらず、キャリブレーションが正常に行えない。

EMT#1 と EMT#2 の初期不安定性試験の結果を図 7.24 と図 7.25 にそれぞれ示す。横軸は換算時間、縦軸は EMT の信号をキャリブレーション後の Si の信号で割った値になっている。

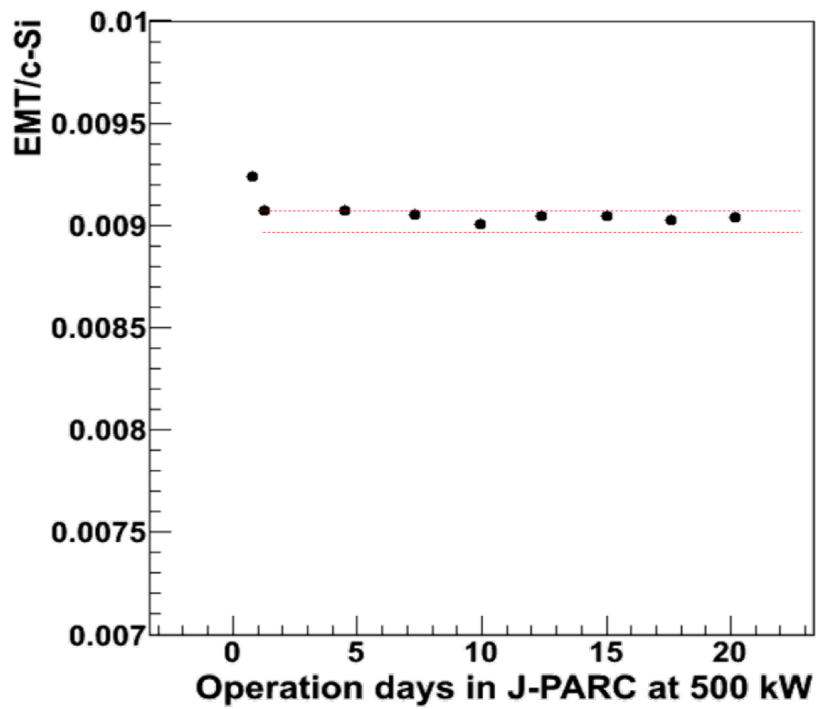


図 7.24 初期不安定性 EMT1

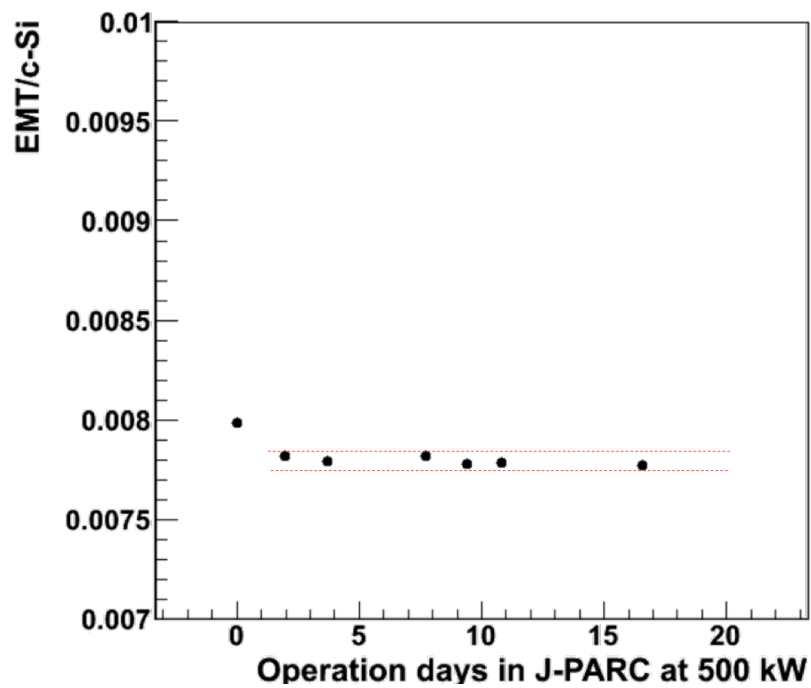


図 7.25 初期不安定性 EMT2

赤い点線は 1% の範囲を表している。キャリブレーションがうまくいかなかったと考えられる

セットを除くと EMT#1 は 1.24 日の照射で安定し、EMT#2 は 1.94 日の照射で安定した。この間に照射された電荷は 192 nC と 304 nC である。将来強度では、それぞれ 0.4 日と 0.7 日で安定する。

7.8 EMT の放射線耐性

放射線耐性試験では EMT を将来 MUMON で使用することを考え、EMT の放射線耐性を調べた。それぞれ $\sim 4.7 \times 10^{12}$ electrons/cm²/pulse 程度照射する毎に、 3×10^6 electrons/cm²/pulse 程度のビームを照射し信号を確かめた。この長期安定性試験は初期不安定性試験の後に行った。初期不安定性で確認した EMT の信号が安定した後を基準としている。結果を図 7.26 に示す。縦軸は EMT の信号が安定するまで照射した後の EMT と Si の信号を 1 として照射後との比をプロットしている。

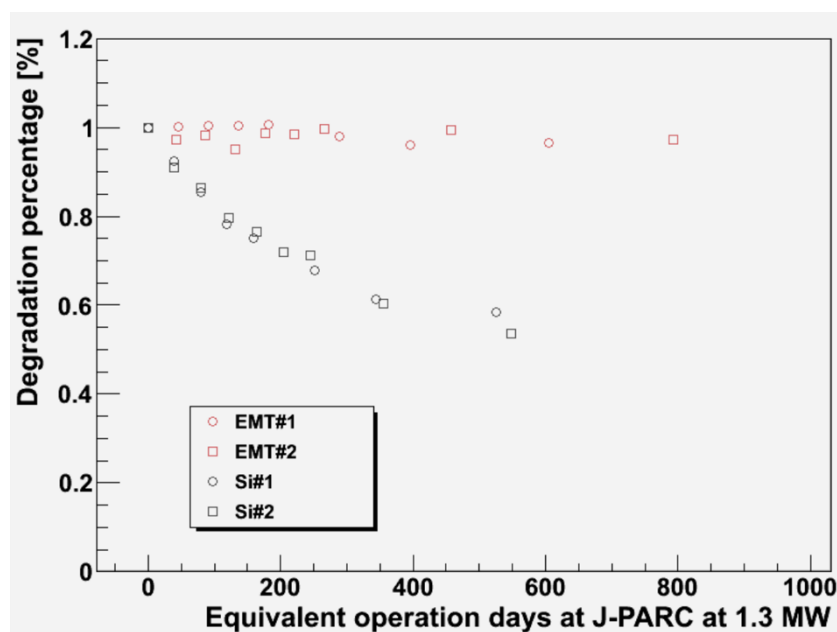


図 7.26 EMT と Si の放射線耐性の比較

Si は T2K の将来強度による 500 日分の運転により、信号が 40% 程度低下するのに対し、EMT は 5% 程度の信号の低下しか起こっていないことがわかる。EMT は Si に対し放射線耐性は非常に良いことがわかった。

EMT#1 の結果のみをプロットしたものを図 7.27 に、EMT#2 の結果のみをプロットしたものを図 7.28 に示す。

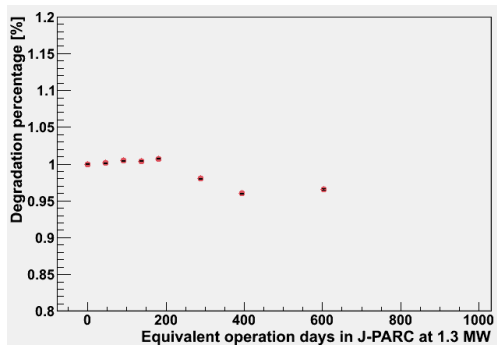


図 7.27 放射線耐性試験 EMT#1

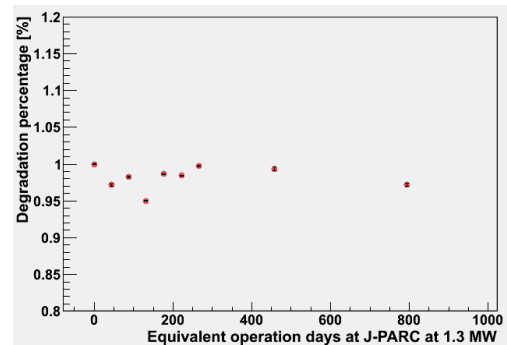


図 7.28 放射線耐性試験 EMT#2

EMT#1 に関しては 194 日の運転に対し信号が 0.5% 以内で安定していた。その後 ~400 日の運転で信号が 4% 減少した。

EMT#2 に関しては各低強度照射における信号に 5% 程度の揺らぎが見られる。図 7.28 を見ると、運転日数 282 日分の照射で照射前のレベルに戻っている。先行研究において 2 ヶ月程度の照射に対して信号は 1% 以内で安定していた。EMT の放射線劣化による信号の減少はあるとしても、この期間で信号が減少して元に戻るような不安定性があることは考えにくい。この揺らぎは ref-Si とのキャリブレーションからくる揺らぎの可能性がある。信号の大きさは 5% の範囲で揺らいではいるが、信号の劣化はこの揺らぎの範囲以内に収まっていると考えられる。EMT#1 に関してこの揺らぎが起こっている可能性がある。約 600 日の照射に対して信号の劣化は約 5% 以内には収まっていると考えられる。

7.9 ビームテスト 2 の結果まとめ

EMT#1 の照射前の線形応答性は $2.5 \sim 3.3 \times 10^6$ muons/cm²/pulse 相当のビームに対して $\pm 3\%$ 以内の精度であった。EMT#1 には T2K 実験の将来の運転時間で 596 日分ビームを照射した。照射後は $2.1 \sim 3.3 \times 10^6$ muons/cm²/pulse 相当のビームに対して線形応答性は $\pm 3\%$ 以内の精度であった。

EMT#2 の照射前の線形応答性は $2.0 \sim 3.0 \times 10^6$ muons/cm²/pulse 相当のビームに対して $\pm 6\%$ 程度の精度であった。EMT#2 には T2K 実験の将来の運転時間で 791 日分のビームを照射した。照射後は $3.3 \sim 4.9 \times 10^6$ muons/cm²/pulse 相当のビームに対して線形応答性は $\pm 3\%$ 以内の精度であった。

2 つの EMT の初期不安定性について調べた。EMT#1 は T2K 運転時間で 0.4 日分の将来強度のビーム照射で信号が安定した。また、EMT#2 は T2K 運転時間で 0.7 日分の将来強度のビーム照射で信号が安定した。

2 つの EMT の放射線耐性を調べた。将来強度 (1.3 MW, 320 kA) で 194 日分の運転で EMT#1 の信号の劣化は 1% 程度であると考えられる。

EMT#2 に関しては将来強度 (1.3 MW, 320 kA) で約 800 日程度の運転による信号の劣化は 5% 以内であると考えられる。

この2つの照射前におけるゲインの個体差は20%であった。

8 新しいミュオンモニターのデザイン

EMT は Si よりも放射線耐性がよく、EMT#1 については約 200 日の運転に対して信号の 1% 以上の劣化は見られなかった。これは T2K の運転時間で約 2 年分に相当する。現在強度から将来強度までの 3% 以内の線形応答性は確かめられた。現在強度以下の線形応答性については精度が 3% 以上になる個体もあったが、先行研究や他の個体でそのような現象は見られていない。ビーム強度が上がることによって、線型性が悪化するようなことは確認されなかった。EMT は MR のビーム強度が 1.3 MW でホーンカレントが 320 kA の運転に対しても使用可能であると考えられる。EMT の設置場所は現在の MUMON の Si がある位置を考えている。IC は低強度では十分使用可能であり、放射線耐性は考える必要がない。そこで IC と EMT を併用する。また、MUMON に CT を設置する研究も進められている。J-PARC では 2021 年の 4 月よりビームを止め、加速器のアップグレード作業に入る予定である。その間に MUMON のアップグレード作業を進め、ビームの大強度化に対応する。個体差や EMT による MUMON の運転が可能かを調べるために、今年の 2 月末からのビームで新たな EMT を 9 個 MUMON に設置しミュオンビームフラックスを測定する予定である。

9 結論

T2K 実験においてニュートリノ振動パラメータの測定精度の向上のためにはビームの大強度化が必要である。ビームの大強度化に伴いミューオンモニターの安定的な運転が問題となっている。新たなミューオンモニターの検出器として EMT の開発が行われており、現在のビーム強度における線形応答性や放射線耐性は良好であった。しかし、将来のビーム強度における性能を評価する必要があるため東北大学 ELPH の電子ビームを用いて EMT の性能評価を行った。そのビームテストで使用する支持具などのセットアップの設計を行った。また遠隔で検出器の位置を操作して効率よくビームテストを遂行することができた。EMT の現在強度 (500 kW, 250 kA) から将来強度 (1.3 MW, 320 kA) までのビーム照射に対する線形応答性は $\pm 3\%$ 以内に保たれていた。EMT の線型性応答性は将来の T2K 運転時間換算で 791 日分照射した後も悪くはならなかった。2 つの EMT の信号の応答を比較すると個体差が約 20% あった。EMT の放射線耐性は Si に比べて非常によく、将来強度で約 600 日間照射したとき 5% 以上の信号の劣化は起こっていないと考えられる。EMT w/o al-Sb の応答は通常の EMT に比べ 4.8×10^{-3} 倍程度であった。EMT w/o al-Sb の信号の劣化は 1.15×10^{12} muons/cm² 相当の照射では確認されなかったが、通常の EMT でも同程度の照射に対して 1% 以上の信号の劣化は確認されていないものがあるため、二次電子放出材が無いことによる放射線耐性の改善は確認出来なかった。EMT は将来の MUMON で使用可能であるという結果は得たが個体差があり、より複数の EMT を用いて性能を評価する必要がある。

謝辞

2年間多くの人に支えられ研究を行うことができました。このような環境で研究を行えたことに感謝します。特に本研究を指導して頂いた清矢良浩教授、山本和弘准教授には非常にお世話になりました。常日頃から解析方法についてや学会などのスライドの指導、私の拙い日本語の修正など多くの助言を頂きました。また物理や検出器について、考え方や学ぶ姿勢、研究とは何かについてなど多くのことを教えてくださり感謝します。奥沢徹名誉教授には毎週ミーティングで多くの助言を頂きありがとうございます。京都大学の市川温子准教授、木河達也助教、東京理科大学の石塚正基教授にはビームテストの準備や実施において多くのお力添えをいただき感謝します。一緒に研究をした和泉奈央さんには感謝の気持ちで一杯です。芦田洋輔さんには EMT についてや研究の楽しさなど多くのことを学ばせていただきました。ウィスコンシン大学に移ってからも気にかけて頂いていることに感謝します。安留健嗣さんにはビームテストの準備や T2K 実験の運転など様々ことでお世話になりました。また常に気にかけていただき、多くの相談に答えて頂きありがとうございます。田島正規さんにはビームテストの準備において多くの助言して頂きありがとうございます。松原綱之助教にはビームテストの準備で大変お世話になりました。ありがとうございます。中平武准教授、坂下健准教授、多田将准教授、Megan Friend 助教を始め高エネルギー加速器研究機構の皆様には多くの助言を頂き感謝します。柏木茂准教授、石川貴嗣助教を始め東北大学電子光理学研究センターの皆様にはビームテストの準備や実施において大変お世話になりました。中野英一教授にはこの論文の内容について助言をして頂き感謝します。研究室の同期である、小幡拓也君、池内響輝君、小向倅平君には日頃から助言や手伝いをして頂きました。また、いつも楽しく研究できましたありがとうございます。豊田博俊さんには研究の助言に加え、いつも声をかけてくださりとても励みになりました。ありがとうございます。大阪市立大学高エネルギー物理学研究室の皆様には様々な面でお世話になりました。ありがとうございます。最後にいつも私を支えてくれている家族に心から感謝します。

参考文献

- [1] W. Pauri, Letter of 4 December to L.Meitner et al. (1930)
- [2] F.Reines and C.L. Cowan et al. , “Detection of the Antineutrino”, Phys. Rev. 117 (1960)
- [3] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata. , “Remarks on the uni ed model of elementary particles”, Prog. Theor. Phys. Vol. 28, p. 870 (1962)
- [4] Y.Fukuda et al. , “Measurement of the Flux and Zenith-Angle Distribution of Upward Throughgoing Muons by Super-Kamiokande” Phys. Rev. Lett. 82 2644-2648 (1999)
- [5] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), “Prog. Theor. Exp. Phys. 2020”, 083C01 (2020)
- [6] K.Abe et.al. , “Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III”, Phys. Rev. D 83, 052010(2011)
- [7] B. Aharmim et. al. (The SNO Collaboration) , “Measurement of the ν_e and Total 8B Solar Neutrino Fluxes with the Sudbury Neutrino Observatory Phase-III Data Set” ,Phys. Rev. C 87,015502 (2013)
- [8] S. Abe et al. (KamLAND Collaboration), “Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND” , Phys. Rev. Lett.100, 221803 (2008).
- [9] Y.Fukuda et al, “Measurement of the Flux and Zenith-Angle Distribution of Upward Throughgoing Muons by Super-Kamiokande’ ’ , PRL. 82, 2644
- [10] M.H.Ahn et al. (K2K Collaboration), “Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment”, Phys. Rev. D 74, 072003 (2006)
- [11] P.Adamson et al. (MINOS Collaboration), “Measurement of the Neutrino Mass Splitting and Flavor Mixing by MINOS”, Phys. Rev.Lett. 106, 181801 (2011)
- [12] K. Abe et al., “Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam” ,Phys. Rev. Lett. 112, 18180 (2014)
- [13] K. Abe et al. (T2K Collaboration), “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam” , Phys.Rev.Lett. 107, 041801 (2011)
- [14] David M. Webber, on behalf of the Daya Bay Collaboration, “An Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay” (2012)
- [15] Soo-Bong Kim (for RENO collaboration), “Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment” (2012)
- [16] Erica Caden, for the Double Chooz collaboration, “Studying Neutrino Directionality with Double Chooz” arXiv:1208.3628 (2012)
- [17] K. Abe et al. (The T2K Collaboration), “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam” Phys. Rev. Lett. 112.061802 (2014)
- [18] K. Abe et al (The T2K Collaboration), “Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations” Nature 580, 339-344 (2020)
- [19] D.Beavis et al., (BNL-E889 Collaboration), “Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment at

- the AGS”, (1995)
- [20] 市川温子, “T2K 実験ニュートリノ生成機器”, 高エネルギーニュース Vol.28 No.4 (2010)
 - [21] 木河達也, “T2K 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究”, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, (2011)
 - [22] 安留健嗣, “新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築”, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, (2019)
 - [23] K. Abe et al., “J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report”, aXiv:1908.05141 (2019)
 - [24] Kodai Matsuoka, “Measurement of the Neutrino Beam with the Muon Monitor and the First Result of the T2K Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment” Doctor thesis Kyoto U. (2011)
 - [25] R. Brun et al. “GEANT-Detector Description and Simulation Tool” Cern Program Library Long Write-up W5013 (1993)
 - [26] K. Matsuoka et al., “Design and performance of the muon monitor for the T2K neutrino oscillation experiment” Nucl. Instrum. Meth. A 624 591-600 (2010)
 - [27] HAMAMATSU 社 Si PIN フォトダイオード S3590-08/-09/-18/-19 データシート
 - [28] 鈴木研人, “T2K ニュートリノ振動実験におけるニュートリノビームの測定とビーム形状に起因する系統誤差の評価”, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, (2011)
 - [29] “Proposal for an Extended Run of T2K to 20×10^{21} POT”, arXiv:1609.0411 (2016)
 - [30] D. R. Winn and Y. Onel, J. Phys.: Conf. Ser. 404, 012021 (2012)
 - [31] Y. Ashida et al., “A new electron-multiplier-tube-based beam monitor for muon monitoring at the T2K experiment” Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 103H01(2018)
 - [32] <https://www.ins.tohoku.ac.jp/about/?id=a5>
 - [33] T.T. Böhlen et al., “The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications”, Nuclear Data Sheets 120, 211-214 (2014)
 - [34] A. Ferrari et al., “FLUKA: A multi-particle transport code”, CERN-2005-10 (2005), SLAC-R-773, INFN/TC-05-11 (2005)