

修士論文

T2K実験ミューオンモニターのための
電子増倍管の研究開発

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

瀧藤 航一

令和3年

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り、茨城県東海村にある大強度陽子加速器 J-PARC で生成されたニュートリノを、約 295km 先にあるスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノ振動のパラメーターの精密測定およびレプトンセクターでの CP 対称性の破れの探索を目的としている。ニュートリノビームの方向をリアルタイムでモニターするにはニュートリノの直接測定では難しく、同時に生成されるミュオンを測定している。その役割を担うのがミュオンモニター (MUMON) である。MUMON には現在検出器としてシリコン PIN フォトダイオードとイオンチェンバーが用いられているが、将来の J-PARC のビームの大強度化に向けて放射線耐性の問題、電離したイオンが引き起こす空間電荷効果による信号収量の低下といった懸念がある。これらの対策にむけ、従来の検出器に代わるものとして電子増倍管が開発されている。

開発中の電子増倍管 (electron-multiplier-tube ; EMT) は光電子増倍管の光電面をアルミ蒸着に変更したものであり、通過したミュオンにより発生した二次電子を増幅する。MUMON のあるミュオンピットでの実験や、東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) で行われた 2 回にわたる電子ビーム照射実験により、EMT は放射線耐性と線形応答性ともに要求されるべき性能を有していることが判明した。しかし、同時にビームの休止後の信号の初期不安定性、わずかながらの放射線損傷といった点も見え始めた。

これらの問題点に対して、EMT が光に感受性があることを利用して、LED の光照射で信号の初期不安定性を再現できるか実験を行った。そして 2021 年に ELPH で行われた 3 回目の電子ビーム照射実験は放射線耐性の限界の測定、放射線損傷の原因の解明、初期不安定性の再現性、及びその防止策を目標として行った。その結果、高電圧を印加したことによる温度上昇が原因と考えられる初期不安定性と、さらに放射線の影響が EMT 本体とディバイダ回路それぞれにある可能性が見えてきた。

これらのことを踏まえ、温度上昇が EMT のゲインにどれほどの影響を及ぼすか見るため、周囲温度を変化させながら光照射実験を行ったところ、10 °C 以上では温度上昇するにつれて出力が下がる傾向が見られた。またディバイダ回路の放射線の影響がどれほどあるのかを見るために抵抗値、静電容量をテスターで測定を行ったところ、抵抗値には特に問題がないように見えた。また静電容量は並列に接続されている抵抗の影響により値がうまく計測ができなかった。

目次

1	イントロダクション	4
1.1	序論	4
1.1.1	標準模型とニュートリノ	4
1.1.2	CP 対称性の破れとニュートリノ振動	4
1.2	T2K (Tokai to Kamioka) 実験	6
1.2.1	概要	6
1.2.2	J-PARC とニュートリノビームライン	6
1.2.3	Off-Axis 法	8
1.2.4	実験のセットアップ	10
1.2.5	最近の成果	12
1.3	ミュオンモニター (MUMON)	14
1.3.1	概要	14
1.3.2	MUMON の構造	16
1.3.3	ビームの大強度化における問題点	18
1.3.4	今後の MUMON で用いられる検出器に要求される性能	19
2	次期ミュオンモニター検出器としての電子増倍管	21
2.1	概要	21
2.2	ディバイダ回路の概要	22
2.3	ミュオンピットでの実験	23
2.4	2019 年第 1 回電子ビーム照射実験	27
2.5	2020 年第 2 回電子ビーム照射実験	31
2.6	これまでの結果を踏まえ	34
3	EMT への光照射による初期不安定性の再現	35
3.1	セットアップ	35
3.2	J-PARC での照射量に相当する光照射の見積もり	37
3.3	HV 印加と LED 照射を同時に開始した場合の信号の時間変化	37
3.4	LED を断続的に光らせた場合の信号の時間変化	38
3.5	HV 印加後 1 時間経過した後に LED 照射した場合の信号変化	39
3.6	まとめ	40
4	2021 年第 3 回電子ビーム照射実験	42
4.1	目的	42
4.2	実験場所・セットアップ	42
4.3	電子ビーム	43
4.4	初期不安定性の測定	44
4.5	放射線耐性の限界の測定	45
4.6	HV オフでの放射線損傷の試験	46
4.7	放射線損傷原因の解明の試験	47
4.8	考察	48

5	EMT の応答の温度依存性	49
5.1	セットアップ	49
5.2	評価方法	52
5.3	測定手順	53
5.4	実験結果	54
5.5	考察	56
6	ダイバクタ回路の放射線損傷の評価	58
6.1	実験方法	58
6.2	テスターの測定原理 [27]	58
6.3	電気抵抗の測定	59
6.4	静電容量の測定	60
6.5	ゲインによる評価	60
7	まとめと今後の課題	62

目 次

1.1	NuFIT グループによる 2021 年時点でのニュートリノ振動のパラメーター一覧 [5]	5
1.2	T2K 実験の概念図 [6]	6
1.3	J-PARC の全貌 [7]	7
1.4	J-PARC の陽子ビームの構造 [8]	7
1.5	ビームラインの全景 [9]	8
1.6	電磁ホーンの概要 [10]	8
1.7	π 中間子の崩壊過程 [11]	9
1.8	E_ν と p_π の関係 [11]	9
1.9	エネルギーと振動確率の関係 [25]	10
1.10	T2K 実験のビームラインと検出器の配置の概念図 [12]	11
1.11	Super-KamioKande[26]	12
1.12	INGRID[9]	13
1.13	ND280[9]	13
1.14	$\sin^2 \theta_{23}$, $\sin^2 \theta_{13}$, δ_{CP} の制限。 a の図は 68.27 % の信頼率での標準質量順序の場合の $\sin^2(\theta_{12})$ と δ_{cp} の領域を表している。星マークは T2K 実験と原子炉での実験の結果を考慮した上での最適値を表している。b の図は T2K 実験と原子炉実験で得られたデータに対し、順階層を仮定した時の $\sin^2(\theta_{23})$ と δ_{cp} の領域を表している。右のスケールは各パラメーター値の尤度の対数を-2 倍したものである。c の図は T2K 実験と原子炉実験で得られたデータに対し、正階層、逆階層における δ_{cp} の値を表している。箱型の領域は 68.27 % 信頼区間を表しており、エラーバーは 99.73 % の信頼区間を表している。 [15]	13
1.15	ミュオンモニター (MUMON) の実際の様子 [9]	14
1.16	MUMON でのプロファイルの例 左図はミュオンビームの電荷分布、右図は再構成されたプロファイルを表す [28]	15
1.17	2010 年から 2020 年の運転で得られたイベント割合と水平・垂直方向のビーム方向	15
1.18	ミュオンモニター (MUMON) の立地 [8]	16
1.19	シリコン PIN ダイオード [16]	17
1.20	イオンチェンバー [18]	17
1.21	ミュオンチェンバー内の配置 [33]	17
1.22	J-PARC の将来のビームパワーの計画 [7]	18
1.23	ビームパワー 485kW、ホーン電流 250kA 下での SiPIN ダイオードの信号収量の変化 縦軸は SiPIN ダイオードと IC の信号量の比 [17]	19
1.24	ビームパワー 460kW、ホーン電流 250kA での各バンチの SiPIN ダイオードの信号収量に対する IC の信号収量の比率 [17]	19
1.25	ビームパワー 465kW、ホーン電流 250kA 下での IC の 8 バンチ目での線形性 横軸はターゲットに照射した陽子数、縦軸は IC の信号量を陽子数で割ったもの [17]	19
2.1	電子増倍管 (右) とディバイダ回路 (左)	21
2.2	電子増倍管がミュオンの通過により電子を増幅する概念図 [17]	22
2.3	ディバイダ回路の構造 [8]	23
2.4	2017 年の測定での EMT の波形の例 検出器固有の特性とケーブルおよび電子機器の反射の両方によって引き起こされるテール成分が見えている [17]	24

2.5	2017年の測定でのビームパワー 450kW、ホーン電流 250kA のときの陽子ビームの パワーで規格化されたスピルごとの信号量。標準偏差 (RMS) と平均値 (MEAN) の比を強度分解能として算出している [17]	25
2.6	2017年の測定での EMT の線形応答性。横軸はビーム強度、縦軸はスピルごと における陽子数 10^{12} 個で補正した EMT の信号量を表す [17]	25
2.7	2017年の測定での EMT の安定性 横軸は時間、縦軸はスピルごとにおける陽子数 10^{12} 個で補正した EMT の信号量を表す [17]	26
2.8	2021年の測定結果 横軸は時間、縦軸はスピルごとにおける陽子数 10^{12} 個で補正 した EMT の信号量を表す [32]	27
2.9	ELPH のレイアウト [19] 赤丸で囲った箇所で実験を行った	28
2.10	使用した Si アレイ [29] 素子数は 64 個で、アレイの裏側には Amphenol ICC 社 の Meg-Array 84512) が付属している	28
2.11	実験のセットアップ なお文中ではこの図の Si Sensor は単に Si と呼ぶことにする [18]	29
2.12	セットアップの概念図	29
2.13	現在の J-PARC の状況下 (500kW) での EMT と SIPIN ダイオードの収量の変化 縦軸は照射後の収量とビームの照射量に応じた照射前の収量の比を表している [18]	30
2.14	EMT と Si の信号の安定性の比較 横軸はビームフラックス、縦軸は低強度照射時 の EMT と Si の収量比を表す。両者とも大強度を照射している。照射前の EMT/Si は 1 としている。低強度照射 5 は J-PARC の将来の状況下 (ビーム強度 1.3MW、 ホーン電流 320kA) で 148 日間分の電子ビーム照射後の信号を確認している。[8]	30
2.15	2 回目のビームテストのセットアップ [18]	31
2.16	セットアップの概念図	32
2.17	2 回目のビームテストのセットアップ。上流側に置かれた Si センサーの固定具 (左)、 下流側に置かれた EMT、ref.-Si センサー、Si アレイの固定具 (右) を表す [18]	32
2.18	9 点照射 左図は Si センサーの 9 点照射の例で図中の μ は Si センサーの座標を表 す。右図は左図の μ の値を 3.5mm、ビームサイズが 1.5mm としたときのビームの 均一性を表している [18]	32
2.19	現在の J-PARC の状況下 (500kW) での EMT の収量の変化 縦軸は照射後の収量 と照射直後の初期収量の比率を示している 黒い点がビームテストの測定結果、赤 線がミュオンピットでの実験結果を表している [18]	33
2.20	現在の J-PARC の状況下 (500kW) での EMT と SIPIN ダイオードの収量の変化 縦軸は照射後の収量とビームの照射量に応じた照射前の収量の比を表している 将 来の 1.3MW ビームパワーでの運転形態でも 100 日間の運転期間中に $\pm 3\%$ 以内で 安定であるという要求を満たしている [18]	33
3.1	セットアップの概念図 点線で囲った部分は暗箱内を表している	35
3.2	暗箱内のセットアップ	36
3.3	暗箱	36
3.4	EMT 固定器具	37
3.5	1 回目の測定結果	38
3.6	2 回目の測定結果	39
3.7	3 回目の測定結果	40
3.8	LED の初期不安定性 [24]	40

4.1	セットアップの概念図	42
4.2	ビーム標的周りのセットアップの実際の様子	43
4.3	7点照射の概念図 図の正方形は EMT 内のダイノードを表す	44
4.4	高強度照射における処理 [8]	44
4.5	初期不安定性の実験結果 縦軸は EMT の信号量をビーム強度で規格化したものを表している	45
4.6	放射線耐性の限界 縦軸は EMT の信号量をビーム強度で規格化したものを表している [32]	46
4.7	高強度ビームの照射による放射線耐性の検証 縦軸は高強度照射後の収量と照射前の収量の比を表している なお 0 nC 付近の点は初期不安定性の測定のものである [32]	47
4.8	EMT 本体とディバイダ回路の放射線の影響 縦軸は高強度照射後の収量と照射前の収量の比を表している [32]	48
5.1	ミュオンピットの冷却水温度 プロットの赤が往路、青が復路をあらわす	49
5.2	セットアップの概念図 点線で囲った部分は恒温槽内を表している。なお SiPIN ダイオードと熱電対・EMT に接続されているデータロガーは同一のものである。	50
5.3	温度依存性の測定に用いた恒温槽	50
5.4	実験器具の配置	51
5.5	恒温槽内の装置の様子	51
5.6	LED の温度依存性 図は日亜化学工業株式会社 白色 LED 標準仕様書 NSPW500GS-K1[20] より	52
5.7	SiPIN ダイオードの特性 [30]	53
5.8	白色 LED(NSPW500GS-K1) の波長スペクトル 図は日亜化学工業株式会社 白色 LED 標準仕様書 NSPW500GS-K1[20] より	53
5.9	温度上昇の一例 赤丸が温度を上げ始めた時点で、青丸が温度が安定するまでにかかった約 15 分間を表す。	54
5.10	1 回目の温度変化実験 (補正前) 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である	54
5.11	1 回目の温度変化実験の LED の温度依存データで補正した SiPIN ダイオードの出力 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である	55
5.12	1 回目の温度変化実験の EMT の出力 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である	55
5.13	2 回目の温度変化実験 (補正前) 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である	56
5.14	2 回目の温度変化実験 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である	56
5.15	光電面の種類における陽極感度温度係数 [31]	57
6.1	テスターによる測定の概略図	58
6.2	テスターによる電気抵抗測定の原理	59
6.3	テスターによる静電容量測定の原理	59

表 目 次

2.1	ディバイダ回路の抵抗、静電容量の設計値 抵抗値の横のパーセンテージは抵抗値の公差、静電容量の横の電圧値はコンデンサの耐圧を示している	23
4.1	検出器の使用目的	43
4.2	電子ビームの特徴	43
4.3	ビームの幅 [8]	44
4.4	放射線耐性試験前の安定化までの測定のシーケンス	45
4.5	放射線耐性試験測定のシーケンス	46
6.1	抵抗値の測定結果 (単位は $k\Omega$)	60
6.2	静電容量の測定結果 (単位は nF)	60
6.3	ゲインの評価 (簡略のため $a = 1$ とした)	61

1 イントロダクション

1.1 序論

1.1.1 標準模型とニュートリノ

素粒子とは物質を構成する最小単位、基本粒子である。素粒子の標準理論によると、素粒子は電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を媒介するゲージ粒子、自発的対称性の破れにより質量を生成するヒッグス粒子、物質を構成するクォーク、レプトンに区分される。

ニュートリノは電荷0のレプトンで、重力相互作用を除くと弱い相互作用のみ反応する。1930年にPauliによってベータ崩壊におけるエネルギー保存則の問題解決のために予言され、1932年にChadwickによって中性子が発見されたのを機に、1935年にFermiにより原子核のベータ崩壊は中性子が陽子と電子、ニュートリノに崩壊する過程であると理論づけられた。そして1959年にReinesとCowanらによる原子炉での実験でニュートリノの発見に至った。標準理論においてニュートリノは3世代存在し、それぞれ ν_e (電子ニュートリノ)、 ν_μ (ミューオンニュートリノ)、 ν_τ (タウオンニュートリノ)とよばれている。

1.1.2 CP対称性の破れとニュートリノ振動

宇宙の初期の状態、すなわちビッグバンが起きた直後の状態では粒子と反粒子の存在比が厳密に1:1であると考えられているが、現在反物質の兆候が見られていない。この宇宙の物質優勢の謎に対し、Sakharovは以下の3つの条件、(1)バリオン数を破る過程が存在すること、(2)CまたはCPの非対称性を引き起こす過程が存在すること、(3)上記2つの条件が熱的非平衡でおこなわれていること、が物質優勢の状態を生み出すのに必要であるということを提唱した。

条件(2)の1つであるCP対称性の破れは1964年にCroninとFitchらの実験により中性K中間子の崩壊モードから発見された。そして1973年に小林誠と益川敏英がクォークが3世代、すなわち6種類存在すればCP対称性の破れを引き起こすことができると指摘し、その後にチャームクォークとそして第3世代のボトムクォーク、トップクォークが発見された。1981年に三田一郎らによって小林・益川理論に基けばB中間子でのCP対称性の破れが大きくなることが指摘され、後のBファクトリー実験であるBaBar実験、Belle実験によってB中間子でのCP対称性の破れが観測され、小林・益川理論が正しいことが証明されることとなった。しかしながら観測されたCP対称性の破れでは宇宙の物質優勢を説明するには不十分で、更なる研究が進められている。

そうした中でCP対称性を大きく破る現象なのではないかと期待されているのが次に説明するニュートリノ振動である。ニュートリノ振動はニュートリノのフレーバーの固有状態が質量の固有状態の重ね合わせであり、時間の経過によって質量固有状態の相対的な位相がずれることで、フレーバーが周期的に変化する現象である。B.Pontecorvo、牧二郎、中川昌美、坂田昌一らによって予測・提唱がなされ、1998年のスーパーカミオカンデでの大気ニュートリノの測定、2005年のSNO実験での太陽ニュートリノの測定で観測され、同時に質量が0と思われていたニュートリノに質量があることが確立された。

ニュートリノのフレーバーの固有状態を $|\nu_e\rangle$ 、 $|\nu_\mu\rangle$ 、 $|\nu_\tau\rangle$ 、質量の固有状態を $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ 、 $|\nu_3\rangle$ とすると、その関係は 3×3 のユニタリ行列で表される。一般的に用いられる表式では次のように表される [1]。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ここで $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$) であり, θ_{ij} は混合角, δ_{CP} は複素位相である。この行列はニュートリノ振動を予測・提唱した上記 4 人の頭文字をとって PMNS 行列と呼ばれている。現在の観測結果から推測されるパラメーターは NuFIT グループにより図 1.1 のようになっており、質量が正階層 (Normal Ordering; NO)、すなわち $m_1 < m_2 < m_3$ という関係にある時、混合行列は図の値を用いて

$$U_{PMNS} \sim \begin{pmatrix} 0.825 & 0.545 & -0.115 + 0.0963i \\ -0.345 - 0.0539i & 0.655 - 0.0424i & 0.663 \\ 0.429 - 0.0711i & -0.520 - 0.0470i & 0.734 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

となる。これはクォークセクターでの混合行列である CKM 行列と比較すると、混合角が大きく、非対角化成分が大きい特徴を持つ。

		NuFIT 5.1 (2021)			
		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 2.6$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
without SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.86	$33.45^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.87
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.018}_{-0.023}$	0.405 → 0.620	$0.578^{+0.017}_{-0.021}$	0.410 → 0.623
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+1.0}_{-1.3}$	39.5 → 52.0	$49.5^{+1.0}_{-1.2}$	39.8 → 52.1
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02220^{+0.00068}_{-0.00062}$	0.02034 → 0.02430	$0.02238^{+0.00064}_{-0.00062}$	0.02053 → 0.02434
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	8.20 → 8.97	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 → 8.98
	$\delta_{CP}/^\circ$	194^{+52}_{-25}	105 → 405	287^{+27}_{-32}	192 → 361
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.515^{+0.028}_{-0.028}$	+2.431 → +2.599	$-2.498^{+0.028}_{-0.029}$	-2.584 → -2.413
	with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$
$\theta_{12}/^\circ$		$33.45^{+0.77}_{-0.75}$	31.27 → 35.87	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 → 35.87
$\sin^2 \theta_{23}$		$0.450^{+0.019}_{-0.016}$	0.408 → 0.603	$0.570^{+0.016}_{-0.022}$	0.410 → 0.613
$\theta_{23}/^\circ$		$42.1^{+1.1}_{-0.9}$	39.7 → 50.9	$49.0^{+0.9}_{-1.3}$	39.8 → 51.6
$\sin^2 \theta_{13}$		$0.02246^{+0.00062}_{-0.00062}$	0.02060 → 0.02435	$0.02241^{+0.00074}_{-0.00062}$	0.02055 → 0.02457
$\theta_{13}/^\circ$		$8.62^{+0.12}_{-0.12}$	8.25 → 8.98	$8.61^{+0.14}_{-0.12}$	8.24 → 9.02
$\delta_{CP}/^\circ$		230^{+36}_{-25}	144 → 350	278^{+22}_{-30}	194 → 345
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$		$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$		$+2.510^{+0.027}_{-0.027}$	+2.430 → +2.593	$-2.490^{+0.026}_{-0.028}$	-2.574 → -2.410

図 1.1: NuFIT グループによる 2021 年時点でのニュートリノ振動のパラメーター一覧 [5]

2 種類のニュートリノの場合は、エネルギー E のニュートリノ ν_l が距離 L において ν_l に変異

する確率は質量 2 乗差 Δm_{ij}^2 を用いて、

$$P_{\nu_l \rightarrow \nu_{l'}} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}] \right) \quad (1.3)$$

と書くことができる [2]。大きい方の質量 2 乗差 Δm_{31}^2 による振動が支配的で、 Δm_{21}^2 による振動が小さいような条件で実験をするには

$$\frac{\Delta m_{21}^2}{E} L = 3.6 \times 10^{-2} \cdot \frac{\frac{\Delta m_{21}^2}{7 \times 10^{-5} \text{eV}^2}}{\frac{E}{1 \text{GeV}}} \frac{L}{100 \text{km}} \ll 1, \quad (1.4)$$

$$\frac{\Delta m_{31}^2}{E} L = 1.0 \cdot \frac{\frac{\Delta m_{31}^2}{7 \times 10^{-5} \text{eV}^2}}{\frac{E}{1 \text{GeV}}} \frac{L}{100 \text{km}} \sim 1 \quad (1.5)$$

でなければならない [3][4]。この時、ニュートリノのエネルギーが一定、例えば $E = 1 \text{GeV}$ で、十分なニュートリノ振動を得るためには、 L が数百 km の地点で観測せねばならない。その為次項で紹介する T2K 実験といった長基線ニュートリノ振動実験が考案され、行われることとなった。

1.2 T2K (Tokai to Kamioka) 実験

1.2.1 概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験 (図 1.2) は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で生成した $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$ ビームを 295km 先の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) で観測を行う長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験は ν_μ の測定により、 $|\Delta m_{23}^2|$ 、 $\sin^2 2\theta_{23}$ をそれぞれ 10^{-4}eV^2 、0.01 の精度で求めること、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ を比較し、CP 対称性の破れの度合いを示す複素位相 δ_{CP} を測定することを主な目的としている。

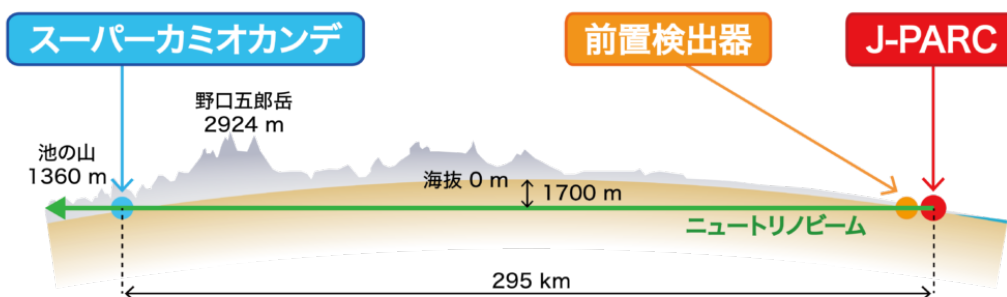


図 1.2: T2K 実験の概念図 [6]

1.2.2 J-PARC とニュートリノビームライン

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) (図 1.3) は茨城県東海村に位置している大強度陽子加速器施設である。3つの加速器で構成されており、Linear Accelerator (LINAC) で

H⁻ イオンを 400MeV まで加速させている。その後 Rapid-Cycling Synchrotron(RCS) で陽子に変換して 3GeV まで加速させ、物質・生命科学実験施設 (MLF) または Main Ring(MR) へビームを送る。MR では 30GeV まで加速し、ハドロン実験施設 (HD) とニュートリノ実験施設 (NU) へ陽子ビームを送っている。ビームの構造は図 2 のようにバンチが 8 個で構成されたスピルが 2.48 s の間隔で構成されている (図 1.4 参照)。現在のところ MR でのビーム強度は 500kW、陽子数はスピル毎に 2.4×10^{14} 個である。

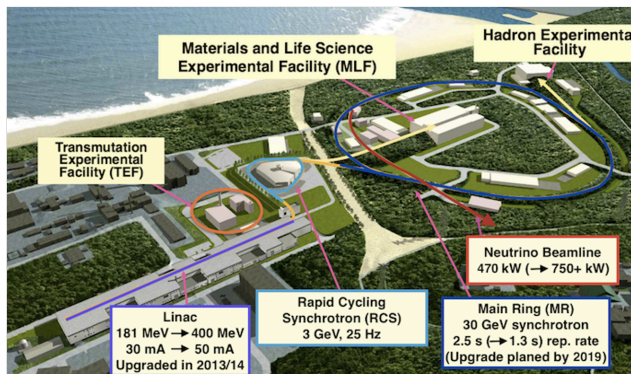


図 1.3: J-PARC の全貌 [7]

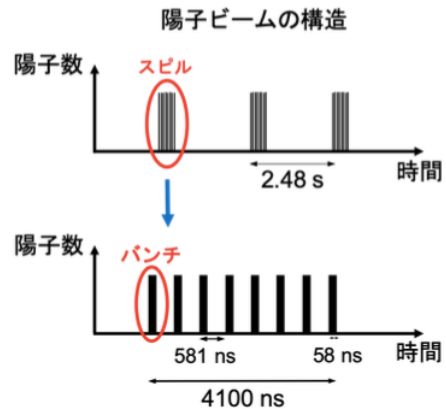


図 1.4: J-PARC の陽子ビームの構造 [8]

ニュートリノのビームラインは図 1.5 のようになっている。まず MR から陽子ビームを取り出し、グラファイト標的に照射して荷電 π 中間子を生成する。この π 中間子はその後ディケイボリュームと呼ばれるドリフト空間で

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.6)$$

とミューオンとミューニュートリノに崩壊し、ここで得られたミューニュートリノを前置検出器やスーパーカミオカンデで観測するという流れとなっている。ニュートリノは 1.1 章で述べた通り弱い相互作用でのみ反応する為、ニュートリノビーム自身を加速・偏向させるのは不可能である。そのため親粒子の荷電 π 中間子を 3 台の電磁ホーン (図 1.6) を用いてなるべく前方に収束させている。電磁ホーンは同軸構造をしており、数百 kA (現在は 250kA) のパルス電流 (ホーン電流) を流してトロイダル磁場を作り出す装置である。グラファイト標的で反応しなかった陽子、ディケイボリュームで崩壊せず通過してきた π 中間子、低いエネルギーのミューオンはディケイボリュームの終端に位置するビームダンプによって受け止められる [11]。

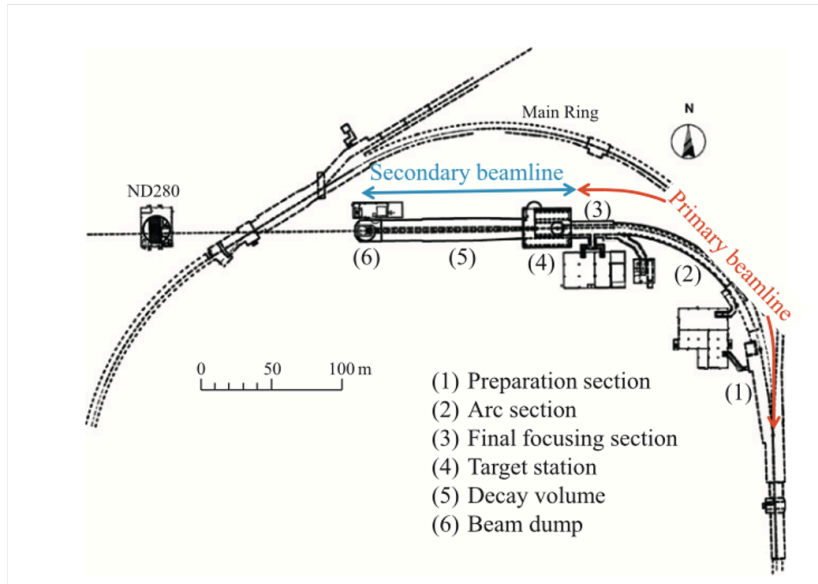


図 1.5: ビームラインの全景 [9]

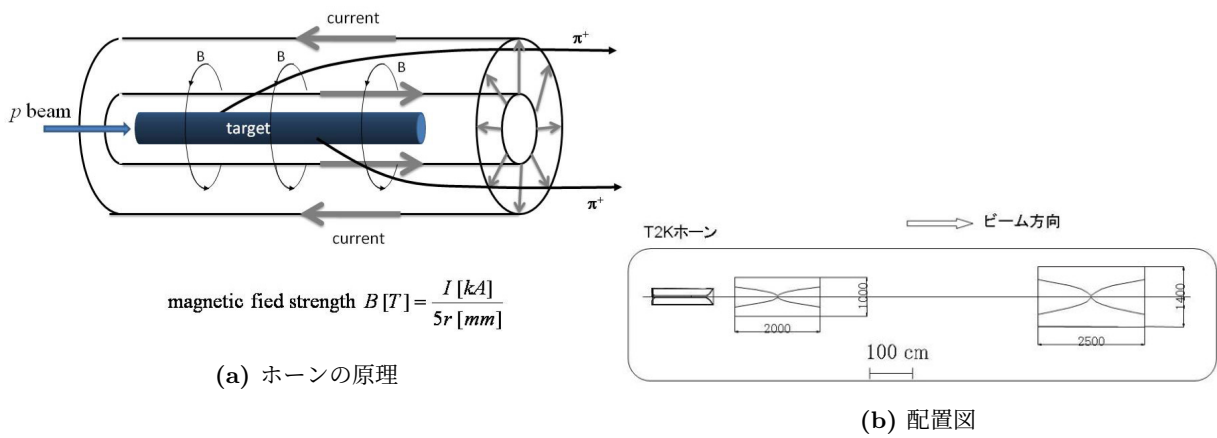


図 1.6: 電磁ホーンの概要 [10]

1.2.3 Off-Axis 法

ニュートリノ振動実験では、ニュートリノ振動の起こる確率をできるだけ大きくせねばならない。T2K 実験では Off-Axis 法とよばれるビームの中心軸から 2.5° ずらした方向で観測することでニュートリノのエネルギー分布を振動する付近にできるだけ集中させる方法をとっている。

π 中間子から ν_μ と μ が生成したとする。 π の進行方向と ν_μ の放出方向のなす角度を θ とすると (図 1.7 参照)、 ν_μ のエネルギー E_ν は、

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\nu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (1.7)$$

で表される。(ただし m_ν 、 m_π は π 中間子、 ν_μ の質量、 E_π 、 p_π は π 中間子のエネルギー、運動量である。) このとき θ が 0° (On-Axis)、 2° (Off-Axis 2° ; OA 2°)、 2.5° (OA 2.5°)、 3° (OA 3°) の場合の p_π と E_ν の関係を見ると、図 1.8 のように On-Axis の場合では、 E_ν は p_π に比例しているのに対し、Off-Axis の場合では依存度が低いことがわかる。これにより p_π が広い範囲で分布していた場合でも、ビームの中心軸すなわち π 中間子の収束軸からずれた方向のニュートリノは狭い分布のエネルギーを持つことができる (図 1.9 参照)。

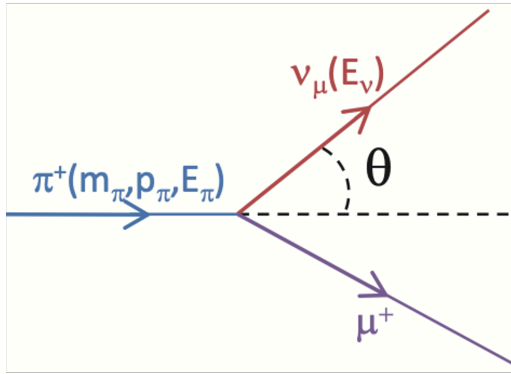


図 1.7: π 中間子の崩壊過程 [11]

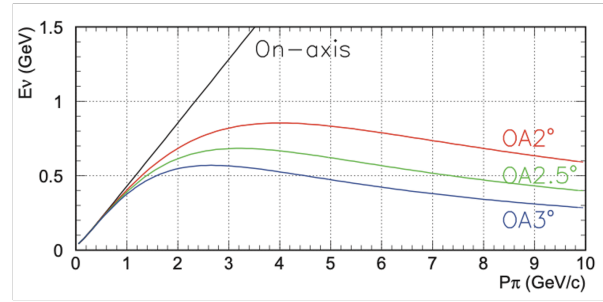


図 1.8: E_ν と p_π の関係 [11]

基線長 295km の T2K 実験において、 $\theta = 2.5^\circ$ を採用することで、ニュートリノビームのピークエネルギーが振動確率が高いエネルギー帯である約 0.6GeV と一致させている。

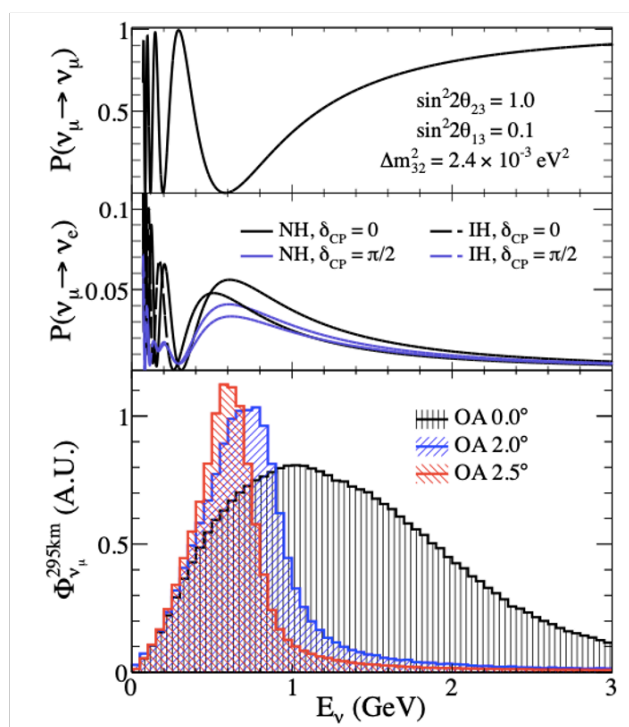


図 1.9: エネルギーと振動確率の関係 [25]

1.2.4 実験のセットアップ

T2K 実験では図 1.10 のようにビームの中心軸上 (On-Axis) には下流 118m にミュオンモニターと呼ばれる π 中間子の崩壊により生成されたミュオンをとらえる検出器と、下流 280m には前置検出器の一つである INGRID が設置されている。そして中心軸から 2.5° ずれた直線上 (OA 2.5°) では下流 280m に前置検出器の一つの ND280、そして 295km 先にスーパーカミオカンデが設置されている。他には T2K 実験の系統誤差を減らす目的のためにニュートリノ反応の微分断面積を精密測定している WAGASCI 検出器群が OA 1.5° の軸上で設置されている。

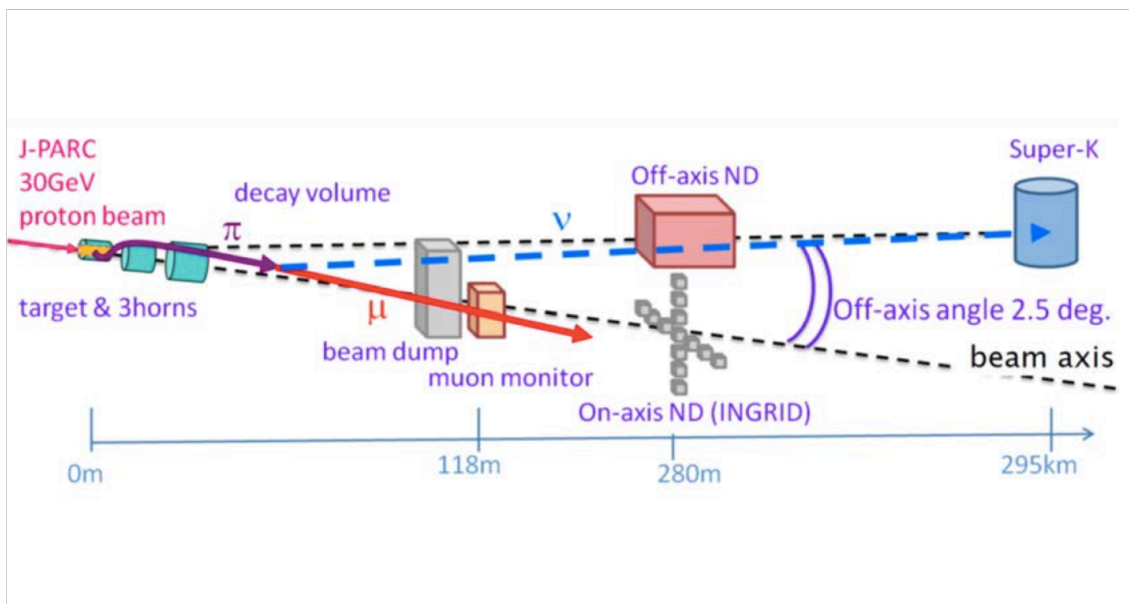


図 1.10: T2K 実験のビームラインと検出器の配置の概念図 [12]

振動後のニュートリノ振動を観測するのは、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)(図 1.11) である。直径 39.3m、高さ 41.4m の大きさでその中に 50kt もの超純水が蓄えられたタンクが存在し、その内部には 20 インチの光電子増倍管が表面に 11200 本、外側に Veto 用光電子増倍管が 1885 本備え付けられている。水とニュートリノの反応により生成した荷電粒子がチェレンコフ放射を起こし、そのチェレンコフ光を検出する役割を担う。チェレンコフ光は荷電粒子が水中での光速よりも速く飛跡する時に円錐状に放射される光のことであり、その放射角 θ は荷電粒子の速度と光速の比 β 、屈折率を n とすると

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.8)$$

という関係式がある。これよりエネルギー、生成点、運動方向の再構成を行うことができる。またミューオンからのチェレンコフ光によるリングが明瞭なのに対し、電子からのそれは電磁シャワーの影響により不明瞭になることを利用し、 ν_e の事象か、 ν_μ の事象かを識別することができる。T2K 実験ではこの識別を用いてニュートリノ振動のパラメーターを測定している。現在はニュートリノの観測精度向上を目的に、中性子捕獲反応を起こしやすくするため、2020 年に約 13t の硫酸ガドリニウムが混ぜられている [22]。

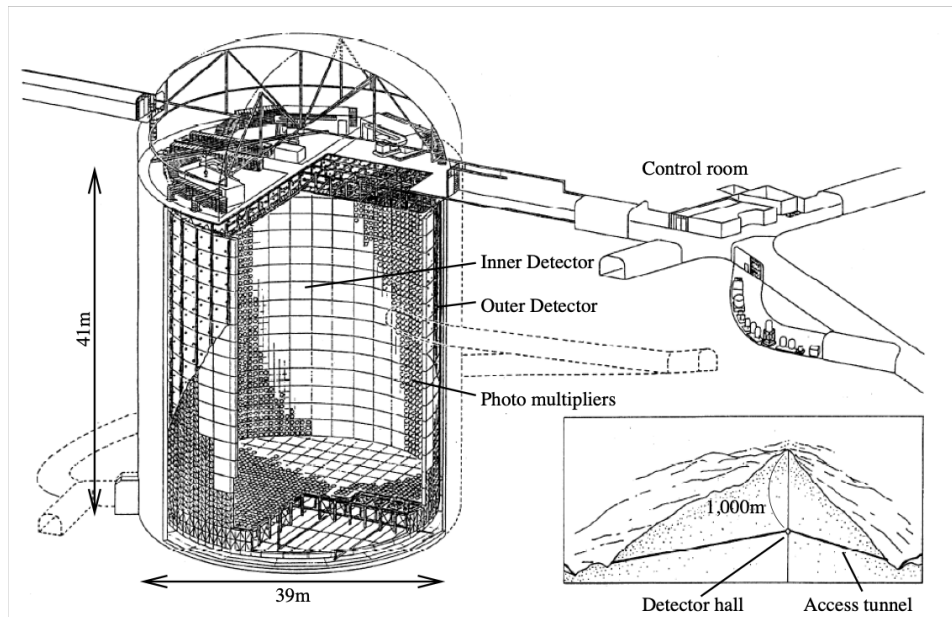


図 1.11: Super-KamioKande[26]

次に前置検出器群は直接ニュートリノの測定を行っている。SK では観測したニュートリノの反応数とエネルギー分布を測定し、予想と比較して振動パラメータを測定を行なっている。この予想にはニュートリノビームの特性やニュートリノ反応断面積の理解が必要不可欠である。そのため前置検出器ではニュートリノビームとニュートリノ反応断面積の測定を行っている。T2K 実験では前置検出器をニュートリノ生成標的から 280m 下流に設置しており、INGRID(図 1.12) と ND280(図 1.13) と WAGASCI という 3つの検出器群がある。INGRID は十字に配置された 7 台の縦型モジュールと 7 台の横型モジュール器からなる。モジュールは鉄の層 9 層、とシンチレータ層 11 層がサンドイッチの様な構造をしており、鉄とニュートリノの反応頻度を測定することで、ニュートリノビームのモニター及びビーム方向測定を行なっている。ND280 はビーム軸から 2.5° ズレた位置にあるいわば Off-Axis のニュートリノを測定している。プラスチックと水を標的としており、ビームフラックス、エネルギースペクトル、ニュートリノ種類、ニュートリノ反応断面積の測定を行なっている [9]。

1.2.5 最近の成果

2010 年 1 月から 2020 年 1 月までに取得したデータの解析結果が 2020 年に Nature 誌に投稿された [15]。図 1.13 ではニュートリノ振動のパラメータの制限を表している。 δ_{cp} に対し、 3σ の制限を与えている。

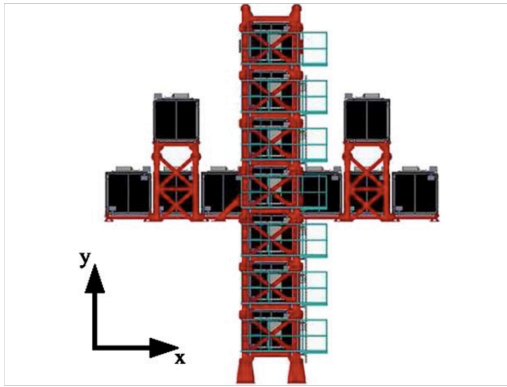


図 1.12: INGRID[9]

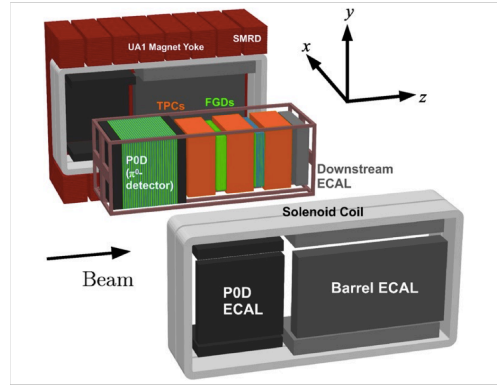


図 1.13: ND280[9]

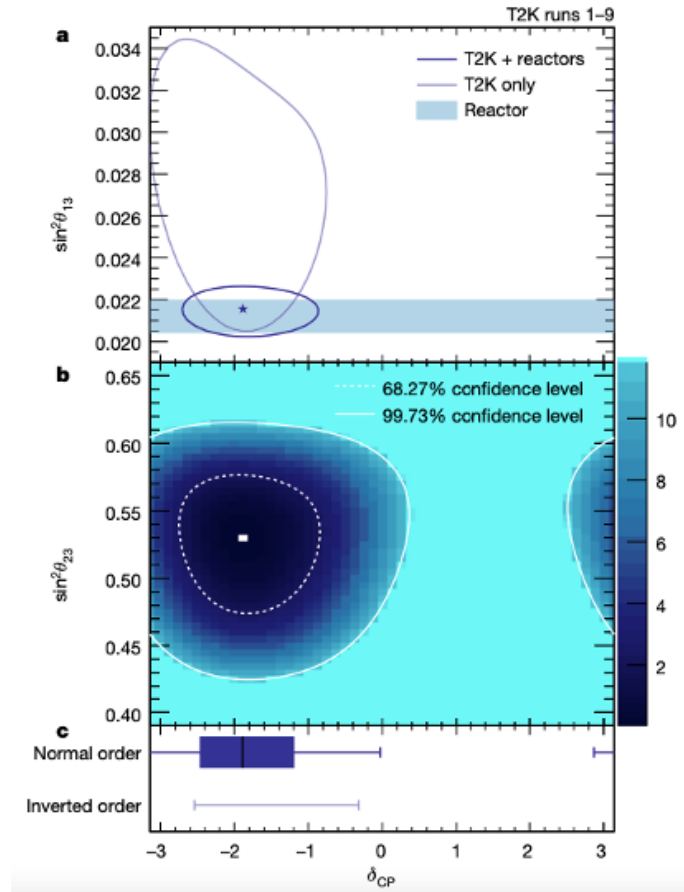


図 1.14: $\sin^2 \theta_{23}$, $\sin^2 \theta_{13}$, δ_{CP} の制限。 a の図は 68.27% の信頼率での標準質量順序の場合の $\sin^2(\theta_{12})$ と δ_{CP} の領域を表している。星マークは T2K 実験と原子炉での実験の結果を考慮した上での最適値を表している。b の図は T2K 実験と原子炉実験で得られたデータに対し、順階層を仮定した時の $\sin^2(\theta_{23})$ と δ_{CP} の領域を表している。右のスケールは各パラメーター値の尤度の対数を -2 倍したものである。c の図は T2K 実験と原子炉実験で得られたデータに対し、正階層、逆階層における δ_{CP} の値を表している。箱型の領域は 68.27% 信頼区間を表しており、エラーバーは 99.73% の信頼区間を表している。[15]

1.3 ミューオンモニター (MUMON)

1.3.1 概要

Off-Axis 法を使っている T2K 実験ではビーム方向が 1mrad ずれるとスーパーカミオカンデにおけるニュートリノビームの強度が約 3% 変化し、エネルギーピーク が約 13MeV 変化することが予測されている。そのためビーム方向を高精度で観測せねばならない [11]。しかし、INGRID 検出器によりニュートリノを検出してビームの方向・強さを決めるには、ニュートリノの反応断面積の小ささが理由で、半日から 1 日分のデータが必要であり、ビーム機器の問題があった場合などに即座に対応ができない。そのため、リアルタイムにビームをモニタリングするために π 中間子の崩壊で ν_μ と同時に生成されるミュオンのプロファイルをミュオンモニター (MUMON)(図 1.15) で測定し、ニュートリノビームの方向・強さを予測している。プロファイルの例を図 1.16、得られた測定データを図 1.17 に示す。

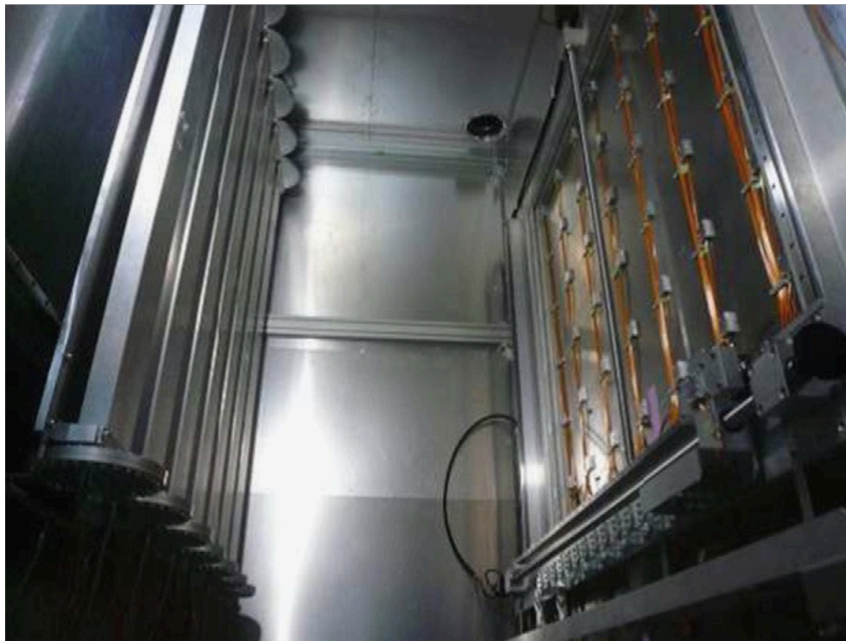


図 1.15: ミューオンモニター (MUMON) の実際の様子 [9]

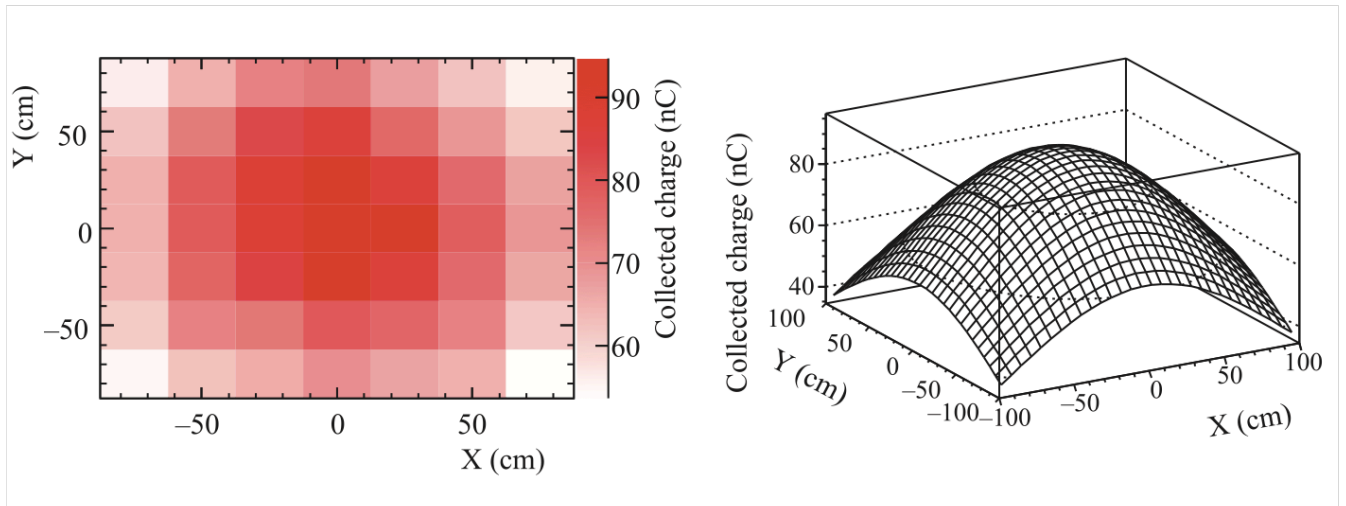


図 1.16: MUMON でのプロファイルの例 左図はミュオンビームの電荷分布、右図は再構成されたプロファイルを表す [28]

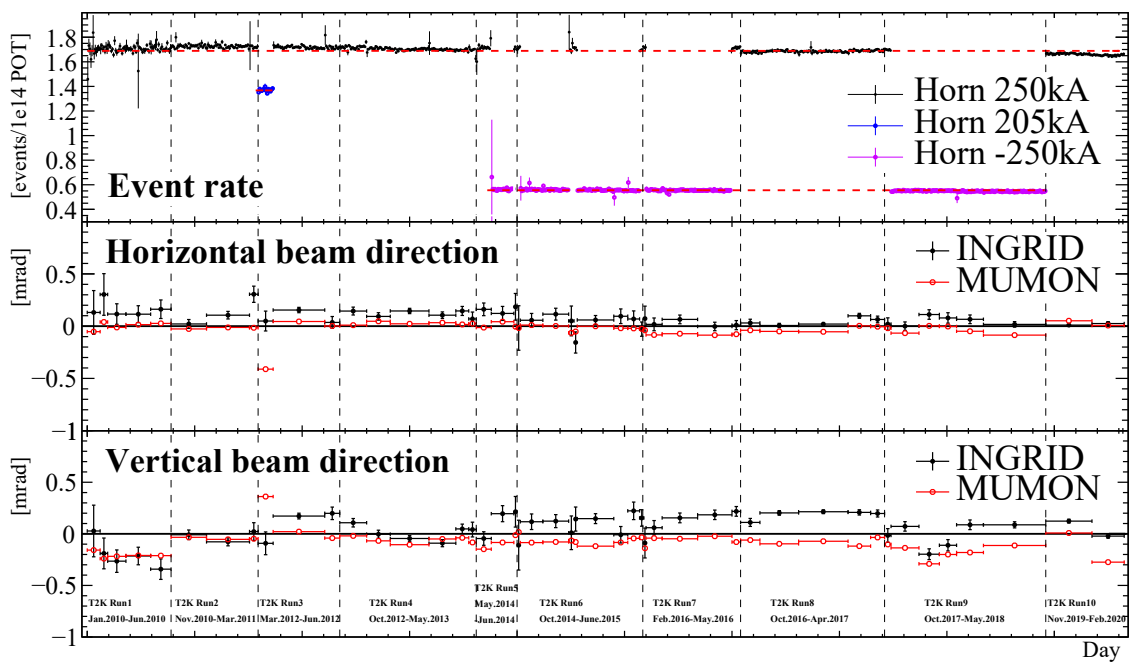


図 1.17: 2010 年から 2020 年の運転で得られたイベント割合と水平・垂直方向のビーム方向

MUMON は図 1.18 のように J-PARC のニュートリノ実験施設第 3 設備棟 (NU3) の地下 18.5m に位置し、検出器から地上までの約 70m を同軸ケーブルを用いてつなぎ、HV 印加や信号取得を行なっている [8]。

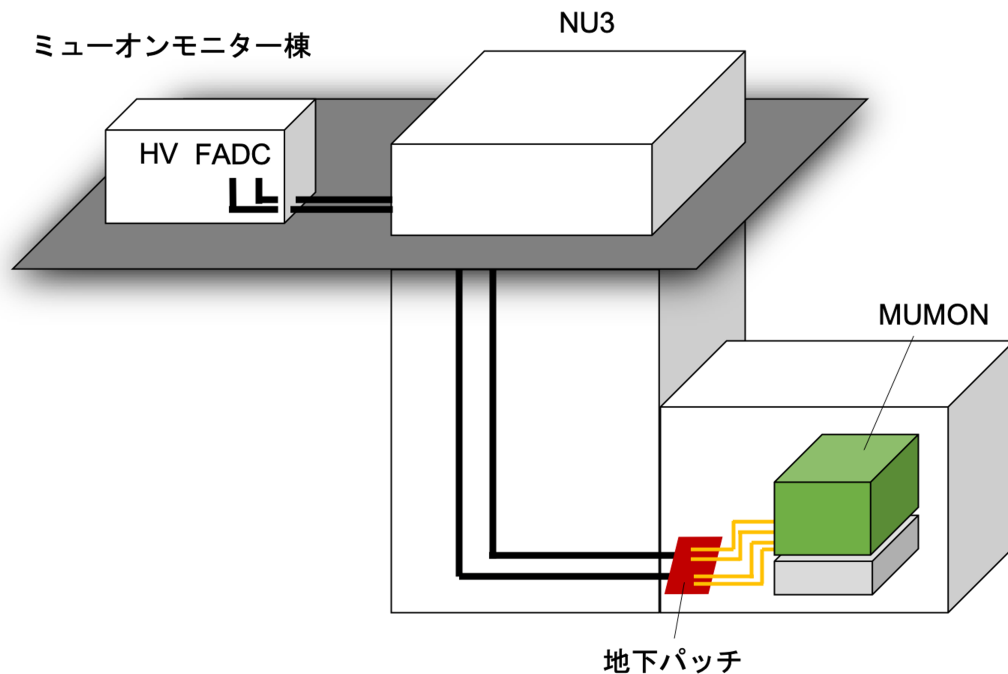


図 1.18: ミューオンモニター (MUMON) の立地 [8]

1.3.2 MUMON の構造

MUMON は 2 つの検出器からなり、温度を一定に保つため、断熱材を挟んだアルミニウムのパネルで構成された箱ミュオンチェンバーに収められている。2 つの検出器を設置するのは冗長性のある測定によるシステムとしての安定性を担保するためと、独立な検出器間でのクロスチェックによる検出器の信頼度を高めるためである [16]。検出器の 1 つはシリコン PIN ダイオード (浜松ホトニクス; S3590-08) からなる。10 × 10mm² の検出領域をもち、300μm 空乏層をもつ半導体センサーである。これがミュオンチェンバーのビーム上流部の 150 × 150cm² の範囲に 25cm の間隔で 7 × 7 個配置されている。もう一つは平行平板型イオンチェンバー (IC) である。チャンネルとして 100 × 100mm² のセラミック製プレートが 2 枚、3mm の間隔で平行に並んでいて、そのうち 1 枚に信号を読み取るための 75 × 75mm² の電極があり (グラウンド電極で覆われている)、もう 1 枚に電圧印加のための 93 × 93mm² の電極が取り付けられている。そして 7 チャンネルが 25cm の間隔で一つのガスチェンバーに収められている。このイオンチェンバーを 25cm の間隔で 7 本設置している。電離させるためのガスは低ビーム強度では Ar と N₂ の混合気体を、高ビーム強度では He と N₂ の混合気体を用いている。

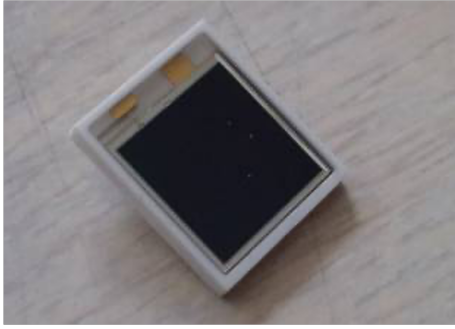


図 1.19: シリコン PIN ダイオード [16]



図 1.20: イオンチェンバー [18]

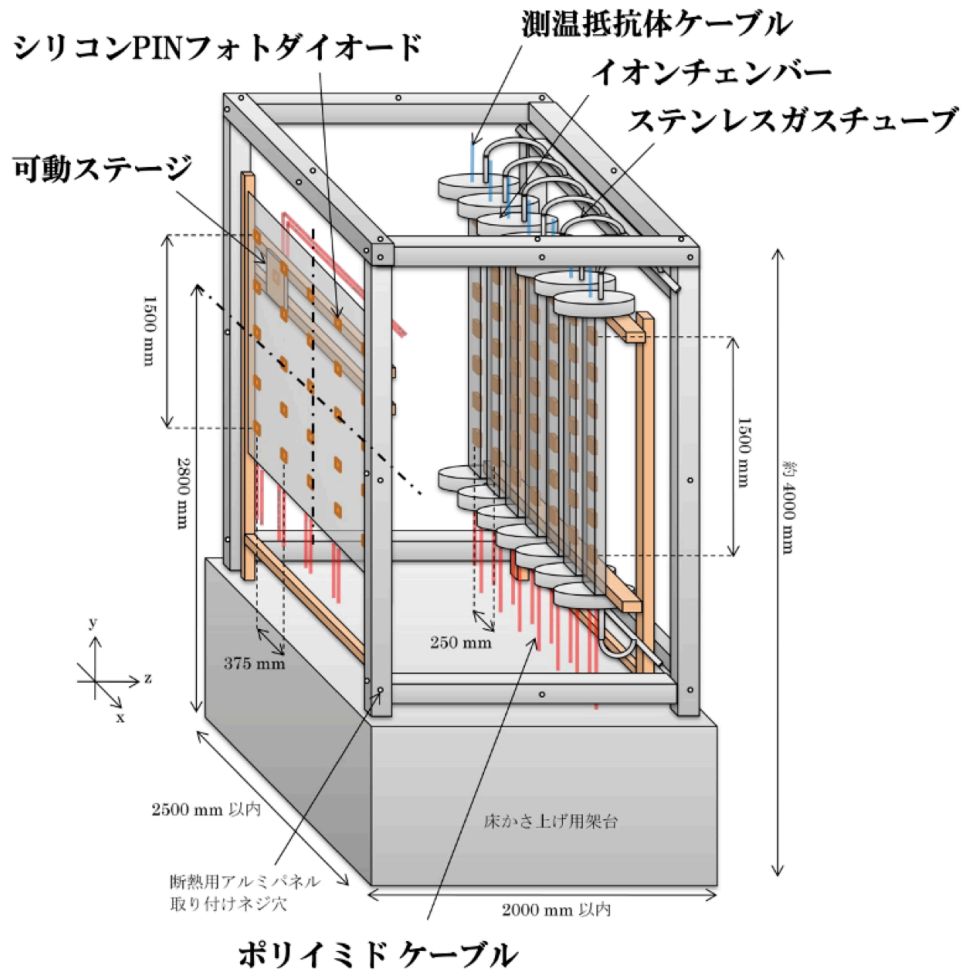


図 1.21: ミューモンチェンバー内の配置 [33]

1.3.3 ビームの大強度化における問題点

T2K 実験では依然として測定において統計誤差が支配的である。そこで J-PARC ではビームパワーを図 1.22 にあるように現在の 500kW から 1.3MW、ホーン電流を 250kA から 320kA へアップグレードする計画である。ビームパワーを上げるために、加速サイクルを 2.48 s から 1.16 s に短くする計画であり、この時ミュオンモニターでのミュオンのフラックスは 80ns のビームバンチ 1 つあたり $4.9 \times 10^6/\text{cm}^2$ 、1 日あたりの吸収線量は $\sim 2440\text{Gy}$ と推定される。

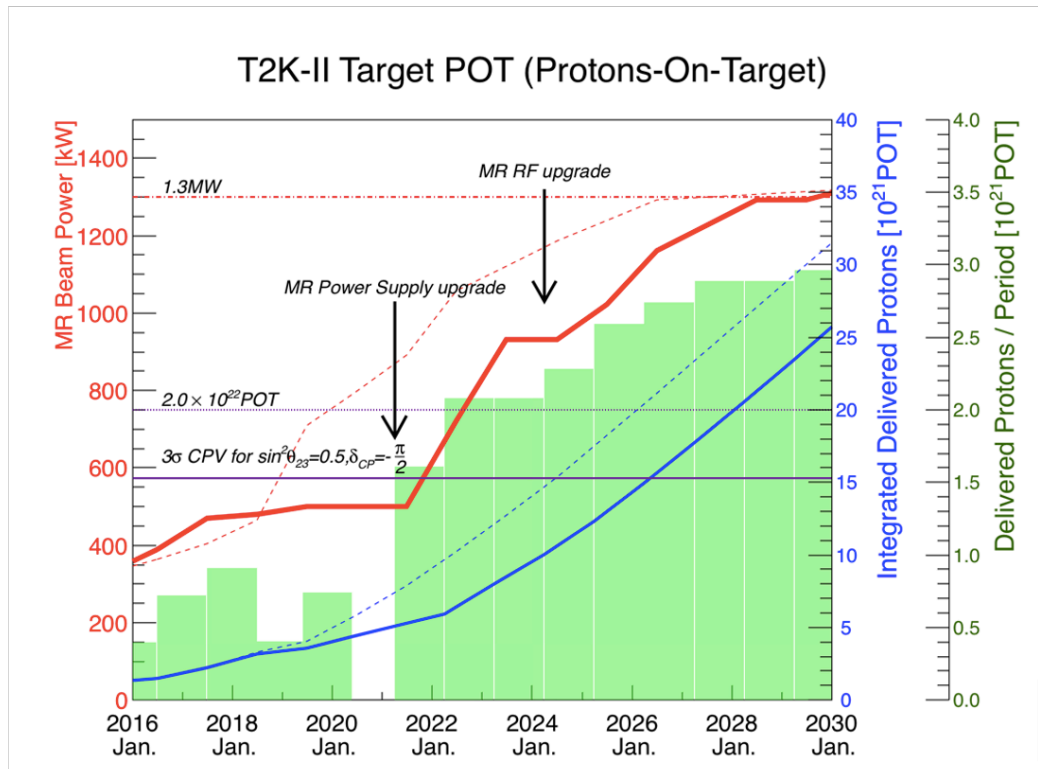


図 1.22: J-PARC の将来のビームパワーの計画 [7]

しかしこの大強度化に向けて、従来の検出器では問題が見えてきた。SiPIN ダイオードをビームパワー 485kW、ホーン電流 250kA の環境下で 5.5ヶ月照射したところ図 1.23 のように信号量が約 1%減少する様子が見られた。これより将来の大強度の環境下 (1.3MW、320kA) では毎月の交換が必要であると予測されている。そして交換には放射線管理区域での作業が必要となるため現実的とは言えない。イオンチェンバーでは電離電子とともに生成したイオンがスリット間に蓄積し、その空間電荷効果のため、図 1.24、1.25 のように信号の収量の低下が見られている [17]。

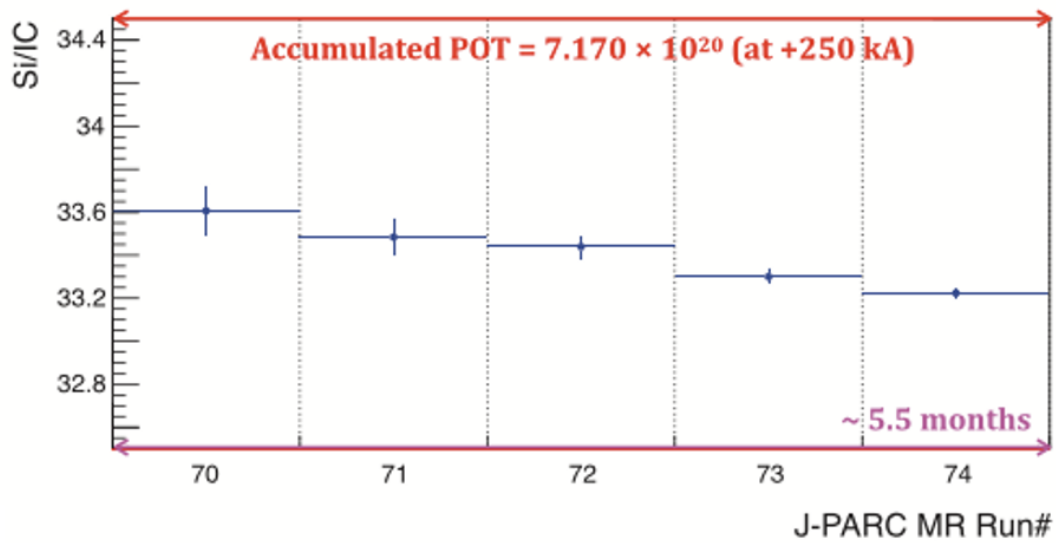


図 1.23: ビームパワー 485kW、ホーン電流 250kA 下での SiPIN ダイオードの信号収量の変化 縦軸は SiPIN ダイオードと IC の信号量の比 [17]

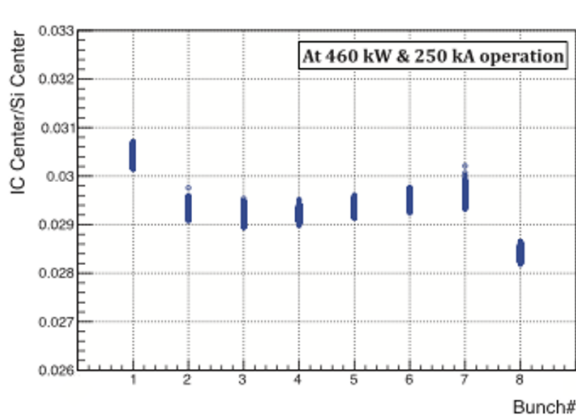


図 1.24: ビームパワー 460kW、ホーン電流 250kA での各バンチの SiPIN ダイオードの信号収量に対する IC の信号収量の比率 [17]

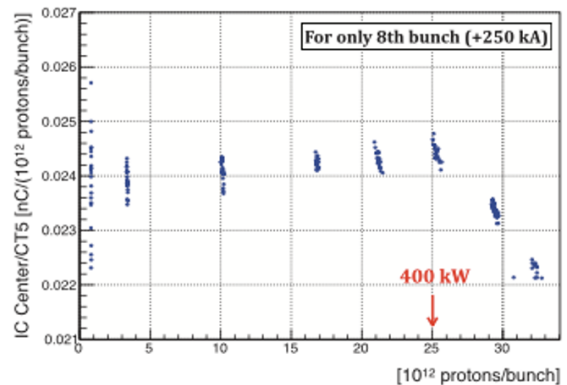


図 1.25: ビームパワー 465kW、ホーン電流 250kA 下での IC の 8 バンチ目での線形性 横軸はターゲットに照射した陽子数、縦軸は IC の信号量を陽子数で割ったもの [17]

1.3.4 今後の MUMON で用いられる検出器に要求される性能

MUMON での現状の要請は

- 3%以内の精度でのニュートリノビームの強度測定
- 0.25mrad 以内の精度でのニュートリノビームの方向の測定
- バンチ毎、 $10^5 \sim 10^7 \mu\text{on}/\text{cm}^2/\text{bunch}$ のビーム強度での測定が可能な十分な信号応答速度、強度分解能

- 高い放射線耐性と安定性

である。これにより検出器の線形応答性と安定性に起因する測定誤差は3%以内、ミュオンプロファイルは4%以内の精度で、ビーム強度を測定せねばならない。結論として高い線形性、強度分解能、応答速度、安定性、放射線耐性が求められる。

2 次期ミュオンモニター検出器としての電子増倍管

ミュオンモニター (MUMON) はニュートリノと同時生成されるミュオンを測定することにより、リアルタイムでニュートリノビームをモニタリングすることができる検出器である。しかし J-PARC のビームの大強度化に向けて、従来使用されている検出器では問題点が見えてきた。そのため次期検出器の開発が行われており、その候補の 1 つが電子増倍管 (Electron Multiplier-Tube; EMT) である。この章では EMT の概要及び EMT の性能を評価するために行われた過去の実験について述べる。

2.1 概要

ミュオンモニターの新しい検出器として、光電子増倍管の光電面をアルミ蒸着に取り替え、二次電子を増倍する電子増倍管 (Electron Multiplier-Tube; EMT) (図 2.1) を用いることを考える。電子が増幅される様子の概念図を図 2.2 に示す。通常のアルカリ光電面では抵抗値が大きいため、ミュオンビームにより大量の二次電子が発生すると、電圧の降下が起こるため、アルミ蒸着としている [17]。元となった光電子増倍管は浜松ホトニクス製の R9880-110 である。

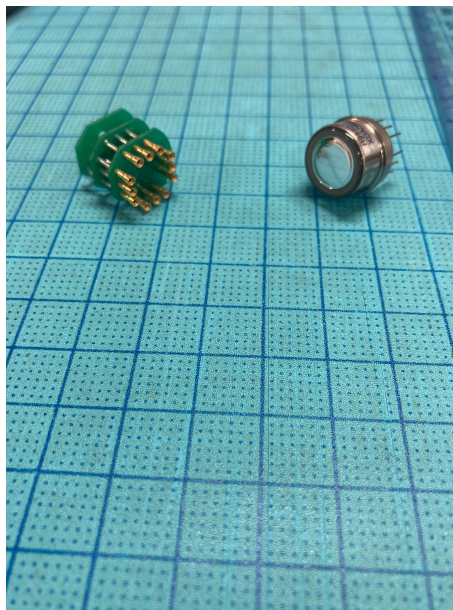


図 2.1: 電子増倍管 (右) とディバイダ回路 (左)

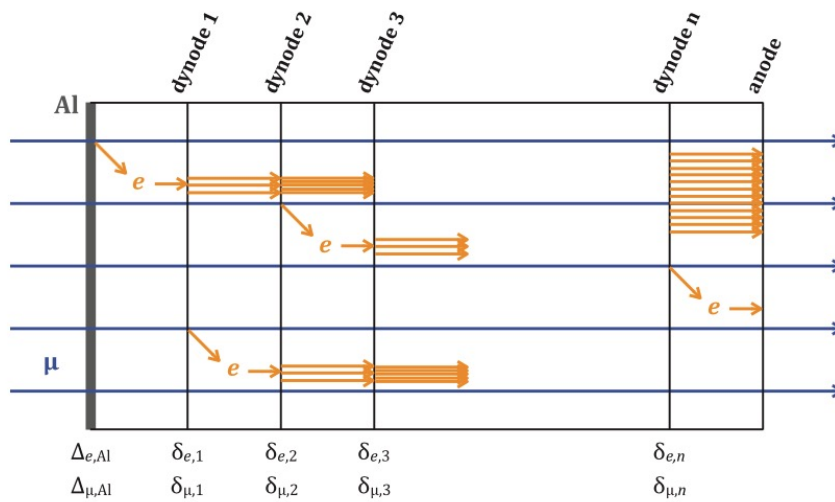


図 2.2: 電子増倍管がミュオンの通過により電子を増幅する概念図 [17]

2.2 ディバイダ回路の概要

R9880-110 のダイノードはメタルチャンネル型であり、10 段構造になっている。従って、接続するディバイダ回路は図 2.3 のように 11 個の抵抗 $R_1 \sim R_{11}$ とコンデンサー 5 個 $C_1 \sim C_5$ で構成されている。表 2.1 にそれぞれの抵抗値と静電容量を記す。印加 HV の最大値は -500V で、ダイノード間の電圧比は 1.3 : 1.3 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1.3 : 3.3 : 0.5 である。 R_9 、 R_{10} の値を大きくしているのは、大きな信号まで線形性を保つためである。

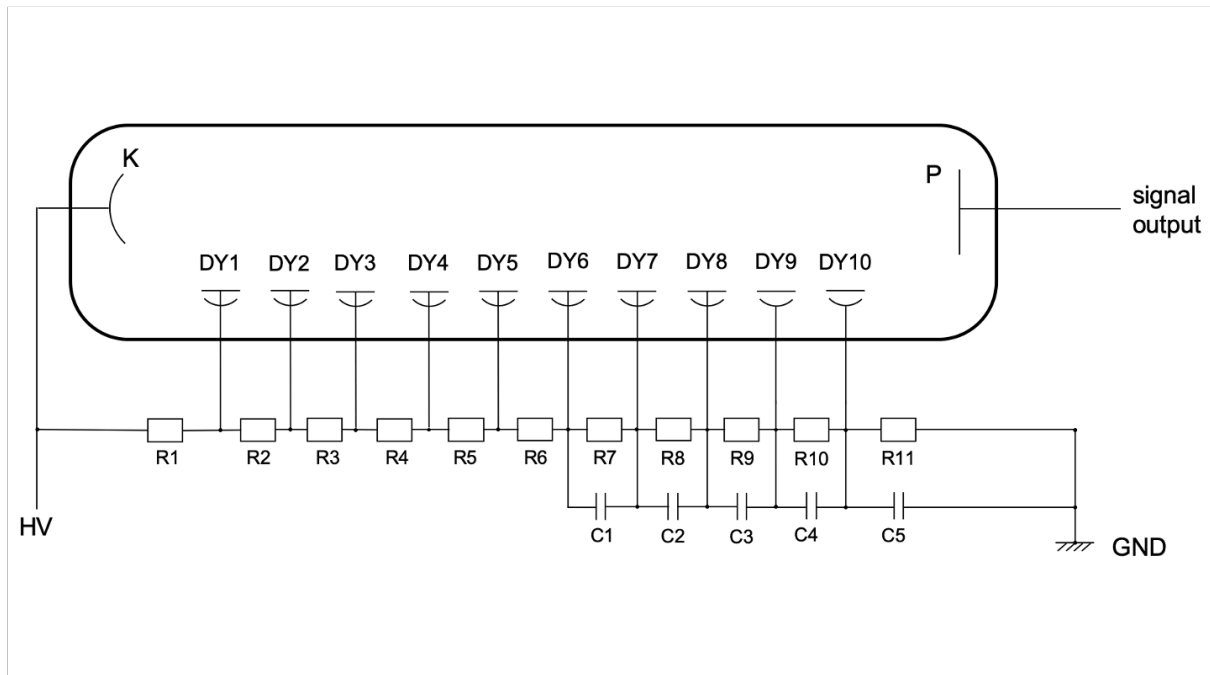


図 2.3: デイバイダ回路の構造 [8]

表 2.1: デイバイダ回路の抵抗、静電容量の設計値 抵抗値の横のパーセンテージは抵抗値の公差、静電容量の横の電圧値はコンデンサの耐圧を示している

抵抗	kΩ	コンデンサ	nF
R_1	200 (±5 %)	-	-
R_2	200(±5 %)	-	-
R_3	150 (±5 %)	-	-
R_4	150(±5 %)	-	-
R_5	150 (±5 %)	-	-
R_6	150 (±5 %)	-	-
R_7	150 (±5 %)	C_1	10(200V)
R_8	150 (±5 %)	C_2	10(200V)
R_9	200 (±5 %)	C_3	10(200V)
R_{10}	510 (±5 %)	C_4	330(200V)
R_{11}	75(±5 %)	C_5	330(50V)

2.3 ミューオンピットでの実験

2017年および2021年に実際のMUMONがあるミューオンピットでEMTをミューモンチェンバーの下流側の壁の外側に設置し、その性能が調べられた。2017年では2個のEMTをハンドメイドのデイバイダ回路と共に設置した。この時のダイノードの電圧比は一般的な1:1:1:1:1:

1:1:1:1:1:0.5であった。2021年には加えて新品の EMT3 個を表 2.1 のディバイダ回路と共に設置して測定が行われた。

2017年の測定結果では信号応答(図 2.4)、強度測定分解能(図 2.5)においては要求値を満たしていた。線形応答性については図 2.6のように-450Vのほうが線形性が良い結果が得られた。この結果から、ダイノード下流での空間電荷効果により線形性が悪化していると推測され、表 2.1のような電圧比を採用した。さらに図 2.7のようにビーム休止後やビーム開始直後で信号量が5%下がりその後安定になるという傾向が見られ、信号の安定性の要求値である3%を超えてしまっていた。これを信号の初期不安定性と呼ぶこととする。

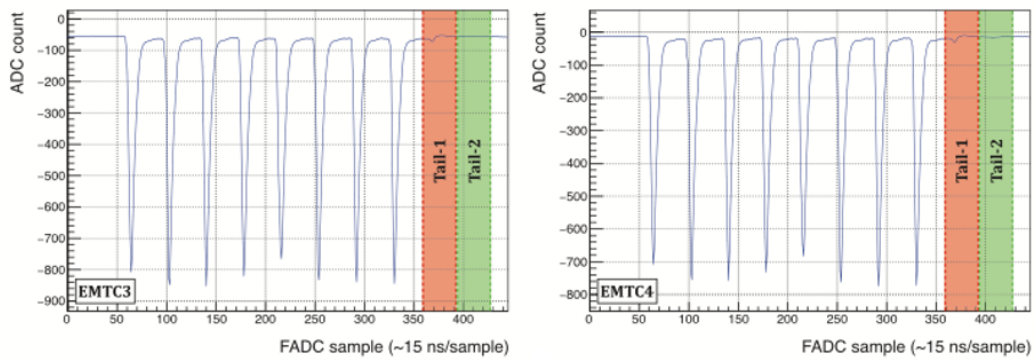


図 2.4: 2017年の測定での EMT の波形の例 検出器固有の特性とケーブルおよび電子機器の反射の両方によって引き起こされるテール成分が見えている [17]

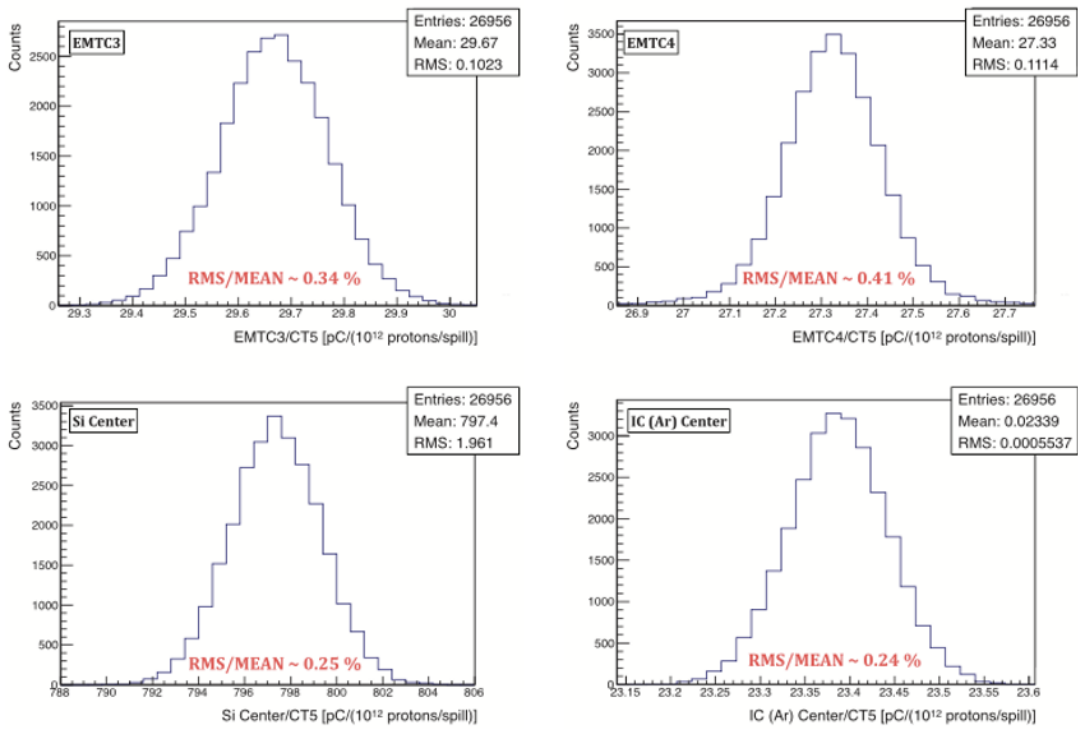


図 2.5: 2017 年の測定でのビームパワー 450kW、ホーン電流 250kA のときの陽子ビームのパワーで規格化されたスパイルごとの信号量。標準偏差 (RMS) と平均値 (MEAN) の比を強度分解能として算出している [17]

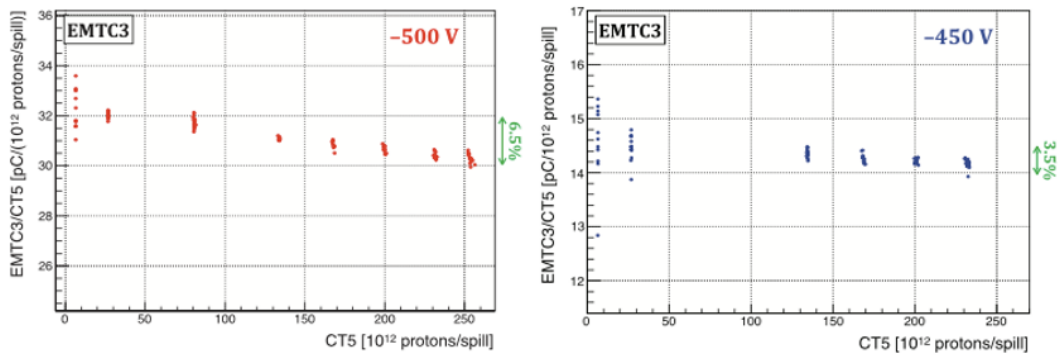


図 2.6: 2017 年の測定での EMT の線形応答性。横軸はビーム強度、縦軸はスパイルごとにおける陽子数 10^{12} 個で補正した EMT の信号量を表す [17]

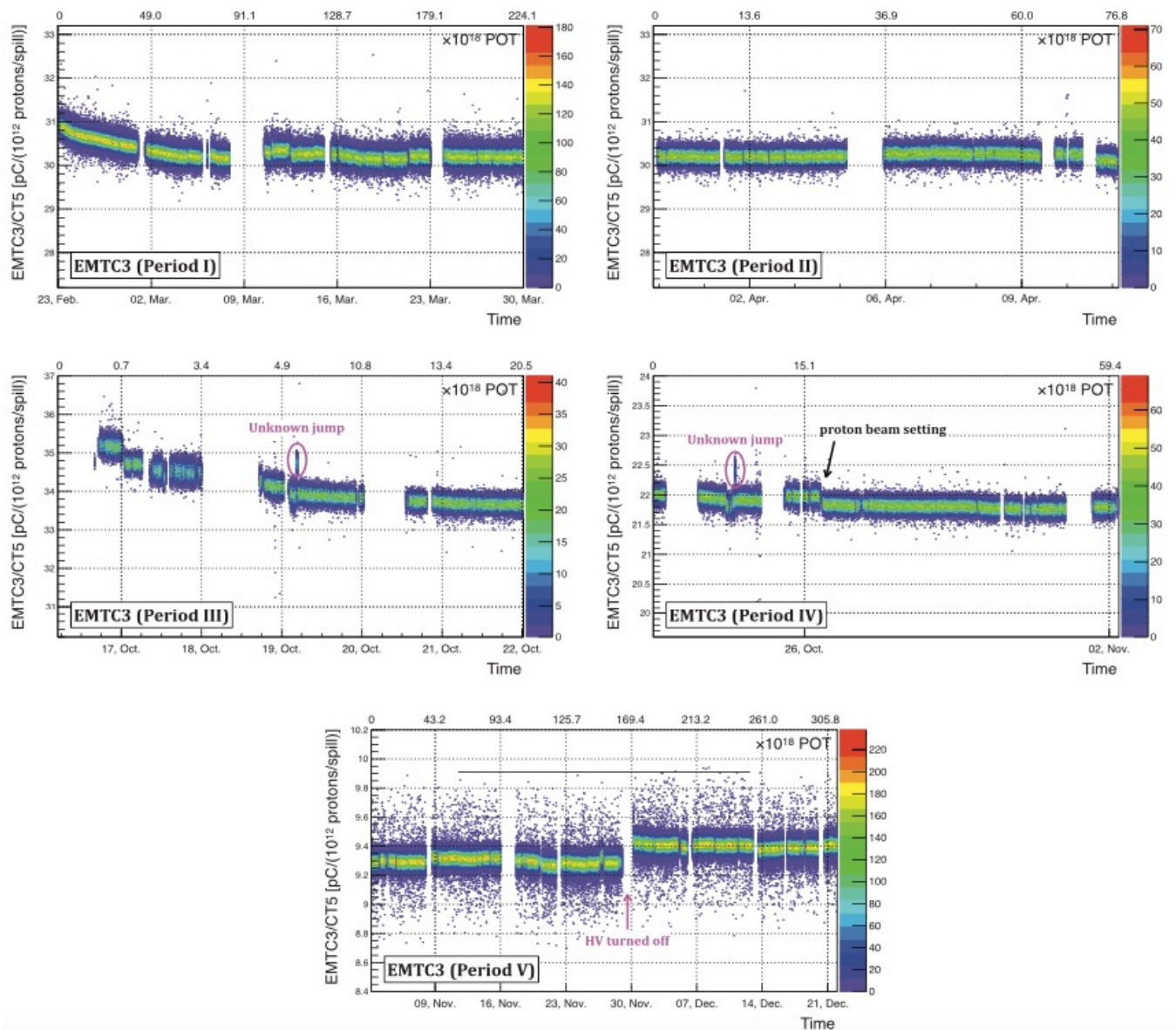


図 2.7: 2017 年の測定での EMT の安定性 横軸は時間、縦軸はスピンごとに陽子数 10^{12} 個で補正した EMT の信号量を表す [17]

2021 年の測定でも同様に図 2.8 のようにビーム休止後やビーム開始直後で信号量が数%下がり、その後安定になるという傾向が見られた。

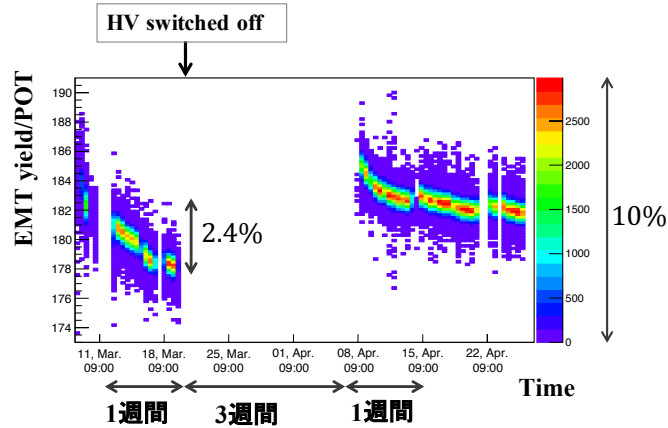


図 2.8: 2021 年の測定結果 横軸は時間、縦軸はスピルごとにおける陽子数 10^{12} 個で補正した EMT の信号量を表す [32]

2.4 2019 年第 1 回電子ビーム照射実験

東北大学電子光理学研究センター (ELPH) の本体室 (図 2.9 参照) に位置している入射用線形加速器を用いて、EMT に電子ビーム照射を行う実験を行った。この実験の目的は

- 放射線耐性
- 線形応答性

の測定である。図 2.11 の様にビーム強度測定用カレントトランスフォーマー (CT)、照射用と比較用の SiPIN ダイオード (浜松ホトニクス S3590-08)(Si と ref-Si)、EMT を串刺しに配置した状態で、電子ビームを高強度 (1~10nA) と低強度 (0.1~1pA) で交互に照射して、J-PARC の将来の状況下 (ビーム強度 1.3MW、ホーン電流 320kA) でミュオンビーム 300 日分に対応する電子ビームが照射された。セットアップの概念図を図 2.12 に示す。ビームのプロファイル測定には Si アレイ (浜松ホトニクス S13620-02)(図 2.10) を用いた。また遠隔で PC から EMT と Si をビームから出し入れするために SUS 社のアクチュエータとそのコントローラを使用した。

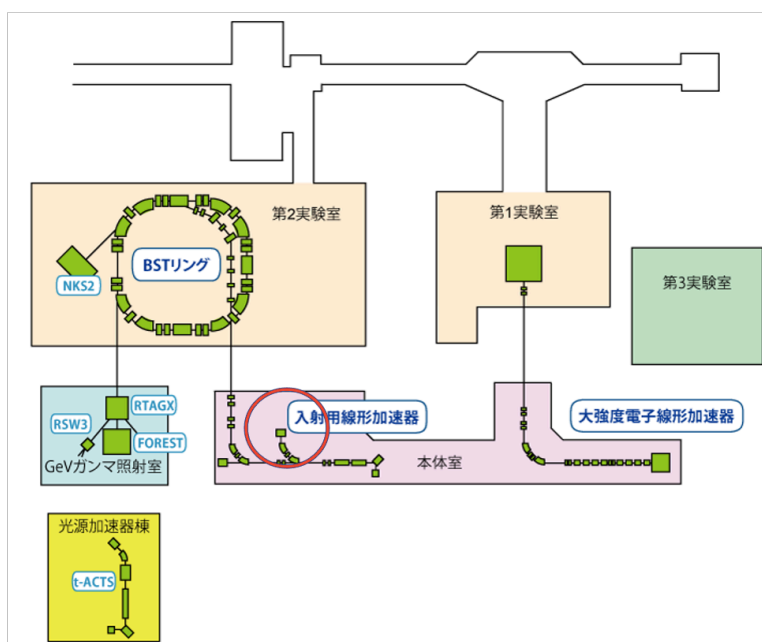


図 2.9: ELPH のレイアウト [19] 赤丸で囲った箇所で行った実験を行った

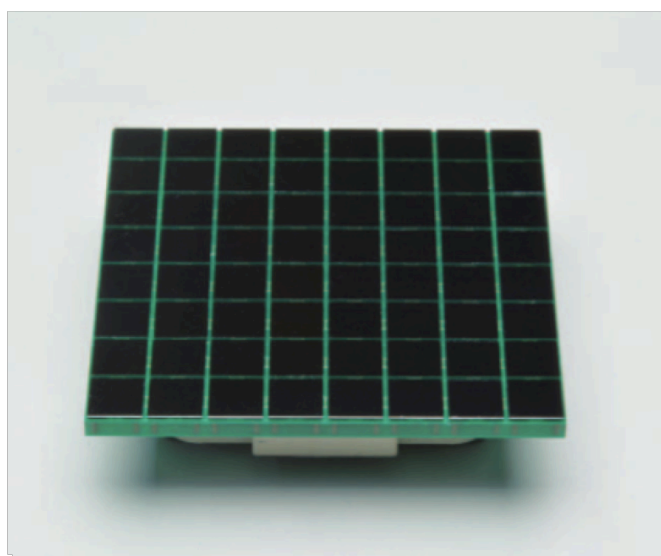


図 2.10: 使用した Si アレイ [29] 素子数は 64 個で、アレイの裏側には Amphenol ICC 社の Meg-Array 84512) が付属している

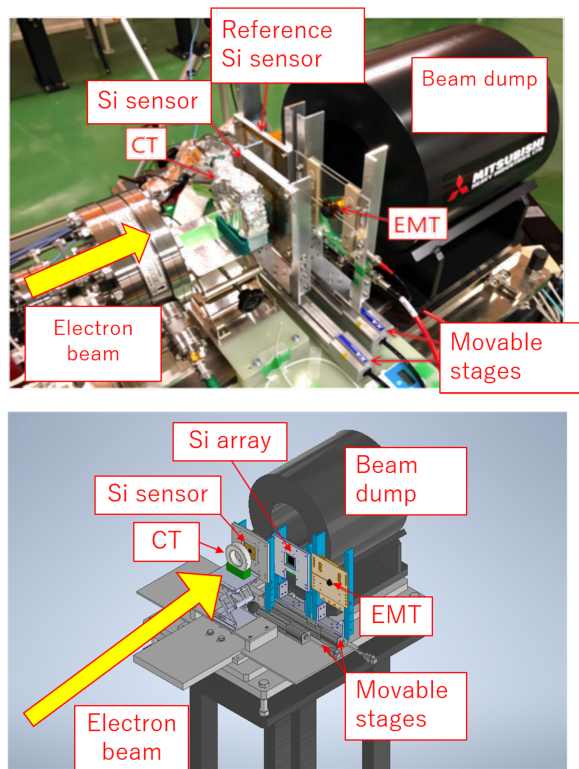


図 2.11: 実験のセットアップ なお文中ではこの図の Si Sensor は単に Si と呼ぶことにする [18]

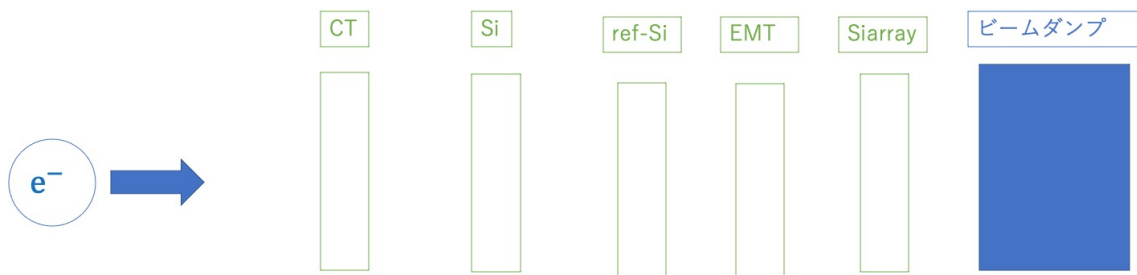


図 2.12: セットアップの概念図

結果は図 2.13 に示すように放射線耐性は SiPIN ダイオードよりも優れていることがわかった。また図 2.14 に示すように J-PARC の将来の強度での稼働時の線形応答性も SiPIN ダイオードよりも優れていた。しかし放射線耐性の限界がこの時点ではわからず、加えて電子ビームの断面積が EMT の光電面と比べて小さく、ビーム照射に偏りがあることが問題点となった。

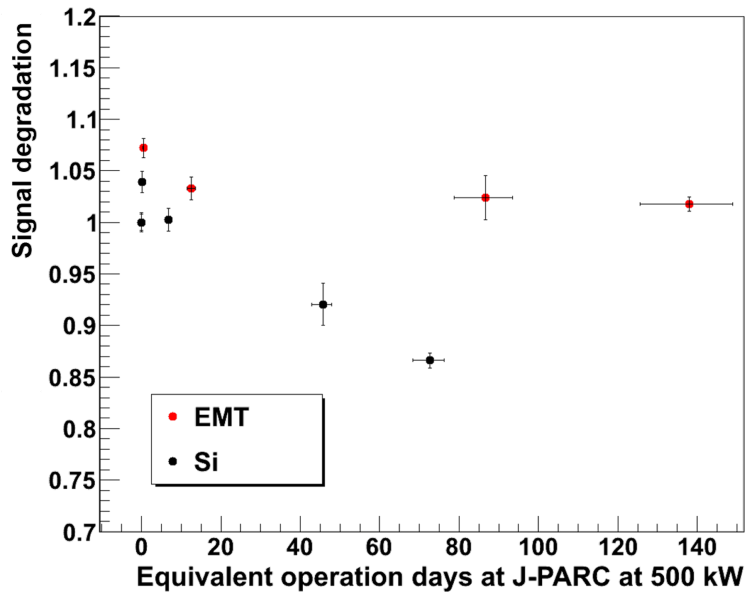


図 2.13: 現在の J-PARC の状況下 (500kW) での EMT と SIPIN ダイオードの収量の変化 縦軸は照射後の収量とビームの照射量に応じた照射前の収量の比を表している [18]

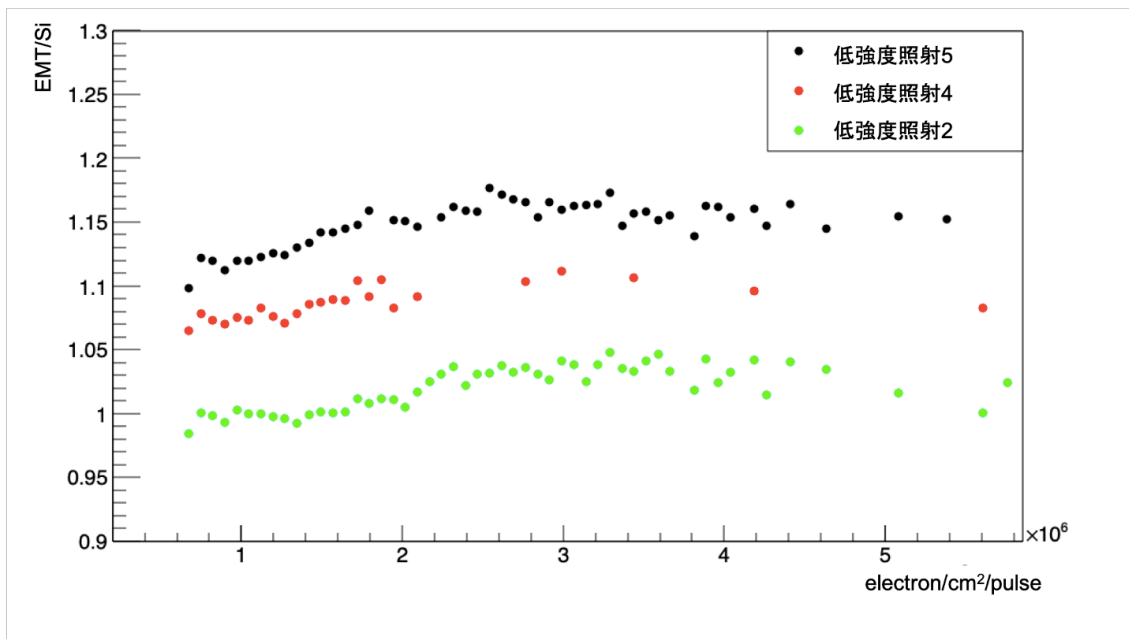


図 2.14: EMT と Si の信号の安定性の比較 横軸はビームフラックス、縦軸は低強度照射時の EMT と Si の収量比を表す。両者とも大強度を照射している。照射前の EMT/Si は 1 としている。低強度照射 5 は J-PARC の将来の状況下 (ビーム強度 1.3MW、ホーン電流 320kA) で 148 日間分の電子ビーム照射後の信号を確認している。[8]

2.5 2020年第2回電子ビーム照射実験

第2回目の電子ビーム照射実験も1回目と同様にELPHの本体室で行われた。この実験では

- 放射線耐性の限界の測定
- EMTの初期不安定性の測定

を目的として行われた。図2.15にこの時のセットアップを、図2.16にセットアップの概念図を載せる。放射線劣化の偏りを無くすために、図2.17の稼働ステージを用いて標的をビームに対して垂直な平面内で動かし、高強度ビームを図2.18のように9点照射させた。検出器の配置は前回と同様にCT、Ref-Si、EMTを串刺し状にした状態で実験が行われた。

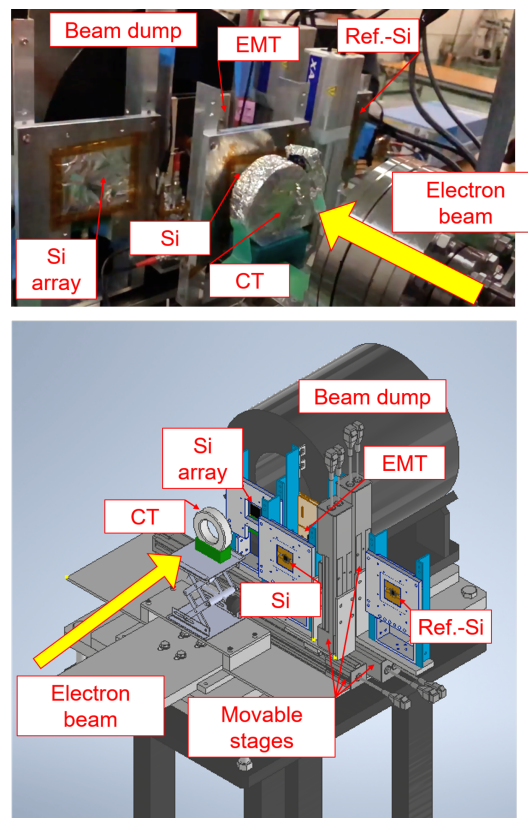


図 2.15: 2回目のビームテストのセットアップ [18]

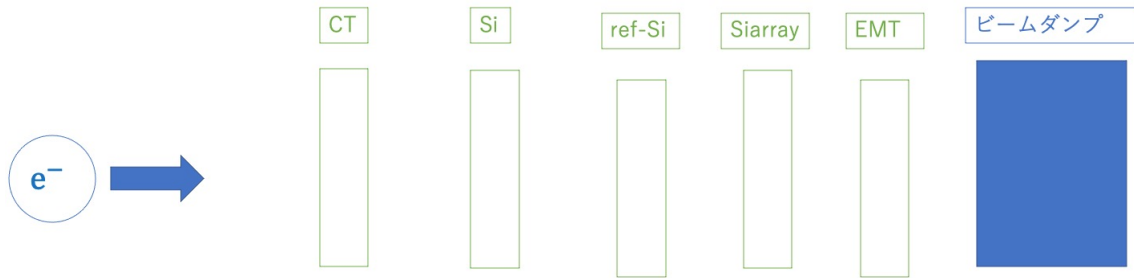


図 2.16: セットアップの概念図

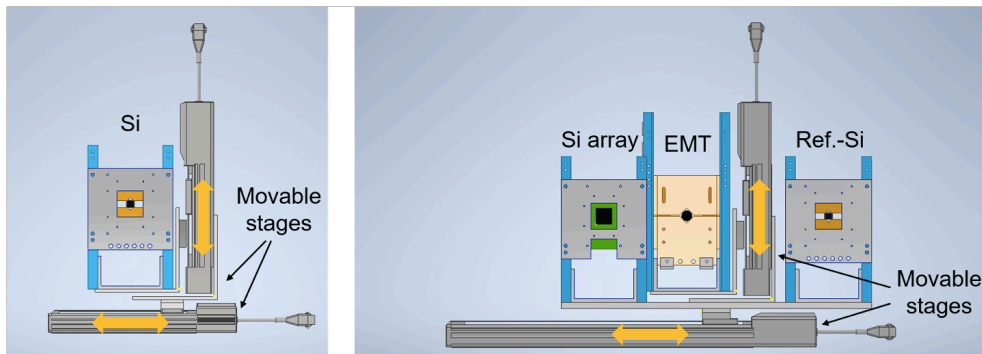


図 2.17: 2 回目のビームテストのセットアップ。上流側に置かれた Si センサーの固定具 (左)、下流側に置かれた EMT、ref-Si センサー、Si アレイの固定具 (右) を表す [18]

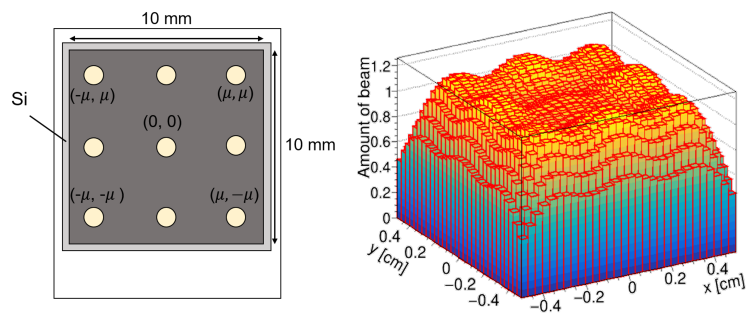


図 2.18: 9 点照射 左図は Si センサーの 9 点照射の例で図中の μ は Si センサーの座標を表す。右図は左図の μ の値を 3.5mm、ビームサイズが 1.5mm としたときのビームの均一性を表している [18]

図 2.19 に照射開始後の収量の変化の様子を載せる。収量が徐々に落ちて J-PARC の現在の稼働日数で換算して 2 日後に信号が 1 % の範囲で安定した様子が見られた。ミュオンピットで測定した時と同様の初期不安定性が見られた。図 2.20 にはビームの照射量に応じた EMT、SiPIN ダイオードの収量の変化の様子を載せる。2 つの EMT 両方とも放射線損傷による劣化が見ることができた。しかし収量のばらつきが 3 % 以上だったため、セットアップの改善による測定精度向上が課題となった。

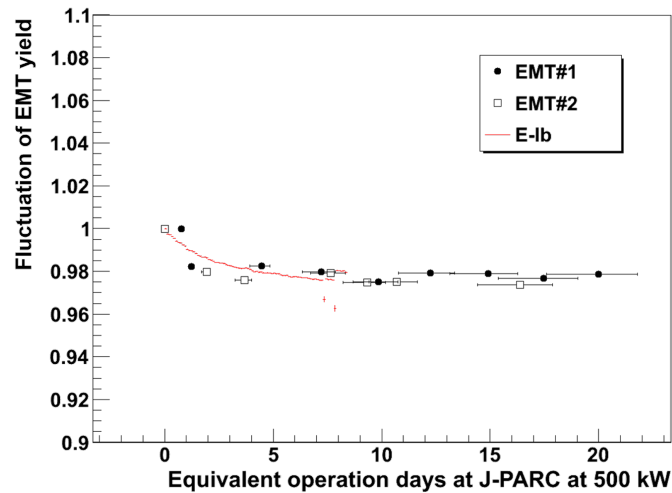


図 2.19: 現在の J-PARC の状況下 (500kW) での EMT の収量の変化 縦軸は照射後の収量と照射直後の初期収量の比率を示している 黒い点がビームテストの測定結果、赤線がミュオンピットでの実験結果を表している [18]

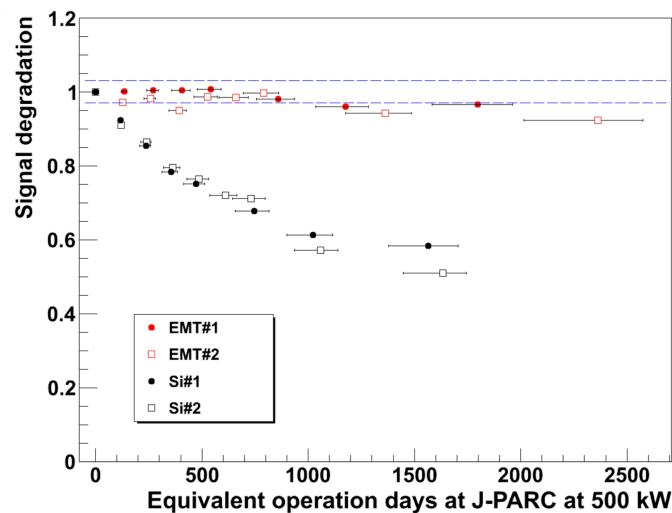


図 2.20: 現在の J-PARC の状況下 (500kW) での EMT と SiPIN ダイオードの収量の変化 縦軸は照射後の収量とビームの照射量に応じた照射前の収量の比を表している 将来の 1.3MW ビームパワーでの運転形態でも 100 日間の運転期間中に $\pm 3\%$ 以内で安定であるという要求を満たしている [18]

2.6 これまでの結果を踏まえ

ミューオンピットでの測定では、図 2.8 にみられるように設置後最初の照射時だけでなく、ビーム休止後の再開時にも信号の初期不安定性が観測されている。EMT は光に多少の感度があることを利用し、ビーム休止後に光を照射して初期不安定性を解消できないかと考えられる。光照射による実験は 3 章で述べる。また放射線の劣化の原因が、増幅された電子を一番多く受ける EMT の最終段のダイノードにあるのではと推測された。これの対抗策として低い HV を印加することで寿命を伸ばすことができるかもしれないという考えに至ることになった。これらの点を踏まえ 2021 年 10 月に 3 回目の電子ビーム照射実験を行うことになった。

3 EMT への光照射による初期不安定性の再現

電子増倍管 (EMT) はわずかながら光に感度があることがわかっている。そこでミュオンピットの実験で見られた信号の初期不安定性を光照射で再現することを試みた。この章では EMT に HV を印加し、LED で光照射を行い、初期不安定性について調査した結果を述べる。

3.1 セットアップ

図3.1にセットアップの概念図を載せる。暗箱内に図3.2のように白色LEDと新品のEMT(XDA0805)を設置し、光照射を行なった。HVは-450V、LEDは 200Ω の抵抗と直列に繋ぎ、直流安定化電源(KIKUSUI;PMM24-1QU)を用いて5.44Vの電圧を印加した。LED-EMT間の距離は1cmとし、信号の読み出しは $1M\Omega$ の抵抗を並列に接続したテスター(SANWA;PC5000a)を用いた。テスターのインピーダンスは $10M\Omega$ である[23]。暗箱としては図3.3の万能アルミ保管箱(TRUSCO;TAC-480BK)を用いた。側面に穴を3箇所開け、SHVケーブル2本、BNCケーブル2本、lemoケーブル1本を通し、黒色のビニルテープ、絶縁テープで穴を塞ぐという加工を施した。EMTを設置する台は図3.4のようなアルミケース(タカチ電機工業;MB16-9-25-PS-WB2109300130)に穴を開け、SHVコネクタ、BNCコネクタを接続し、EMTのディバイダ回路のピンを接続するコネクタをはんだ付けしたユニバーサル基盤2枚をスペーサー、ネジ等で固定し、導線でコネクタ間をはんだ付けしたものを用いた。

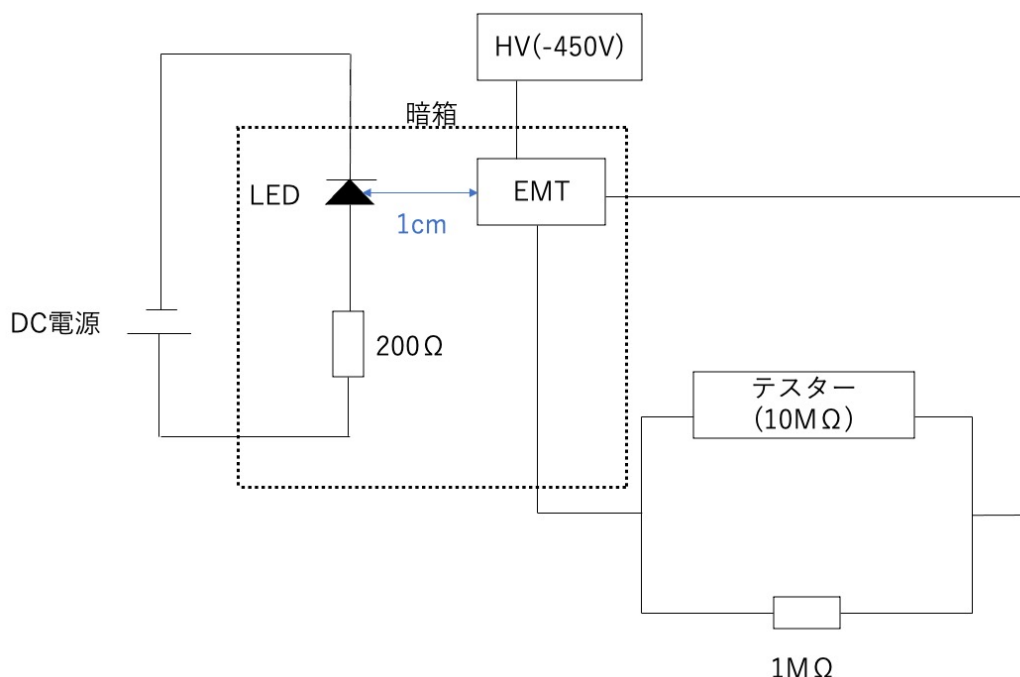


図 3.1: セットアップの概念図 点線で囲った部分は暗箱内を表している

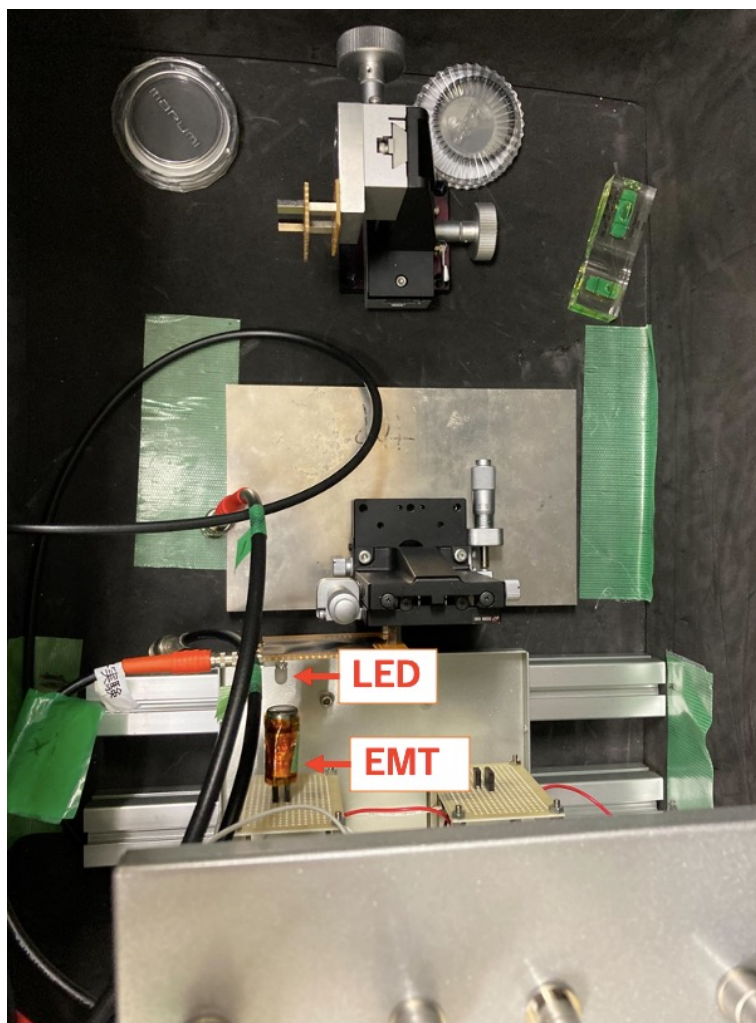


図 3.2: 暗箱内のセットアップ

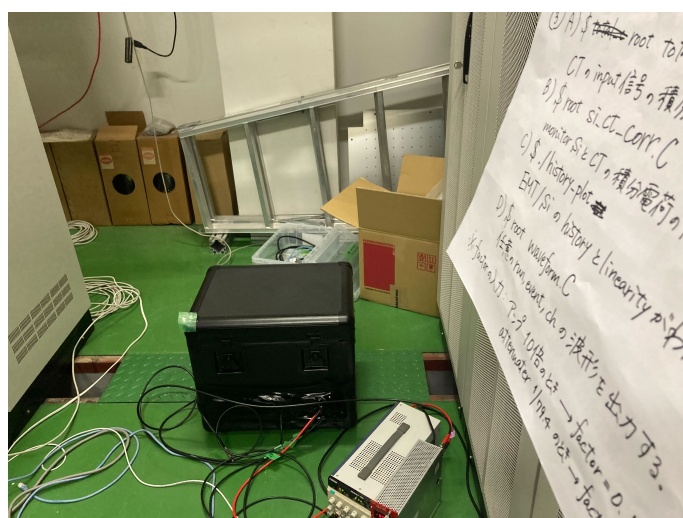


図 3.3: 暗箱

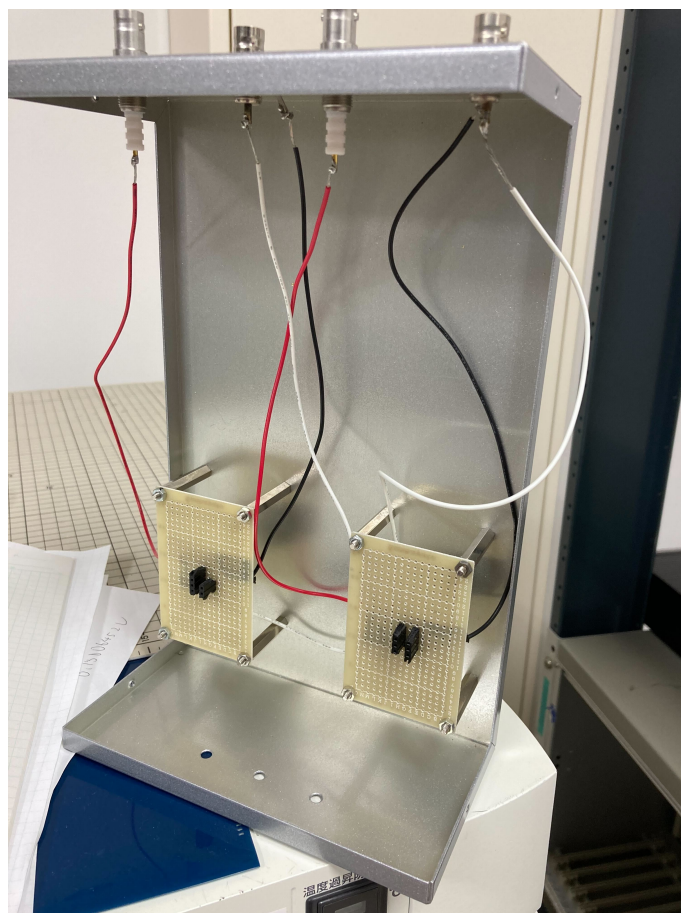


図 3.4: EMT 固定器具

3.2 J-PARC での照射量に相当する光照射の見積もり

ミュオンピットでの EMT の出力は加速器からの陽子数 10^{12} 個あたり 15pC である。500kW 運転時の 1 スピルの陽子数は 2.4×10^{14} 個、スピル間隔は 2.48 s である。図 2.7、2.8 より EMT が安定化するのには 500kW のビーム強度で数日から 2 週間程度である。LED による光照射を行い、1 時間で J-PARC 2 週間分と同様の出力を得たいとすると

$$15 \times 10^{-12} \times 10^{-12} \times 2.4 \times 10^{14} \times 3600 \times 24 \times 14 / 2.48 = 0.00176\text{A} \quad (3.1)$$

の電流値を出力させる必要がある。これを $1\text{M}\Omega$ で読み出すと、出力電圧が 488mV となる。このような出力を出すように LED を DC で駆動する。

3.3 HV 印加と LED 照射を同時に開始した場合の信号の時間変化

1 回目の測定では HV 印加と LED 照射を同時に開始し、出力の変化を見た。1 分おきに測定し、合計 70 分間の測定を行った。得られた結果は図 3.5 のようになった。バックグラウンドは 10^{-2}mV 単位のため、それ以外での出力の変化が見えた。EMT の出力が時間経過とともに 1% 下がり、40 分経過で安定する様子が見られる。これらをふまえるとおよそ 10 日分の J-PARC の運転により

信号が安定したと言える。EMT で見られていたビーム小休止での初期不安定性と似た状態が見られた。

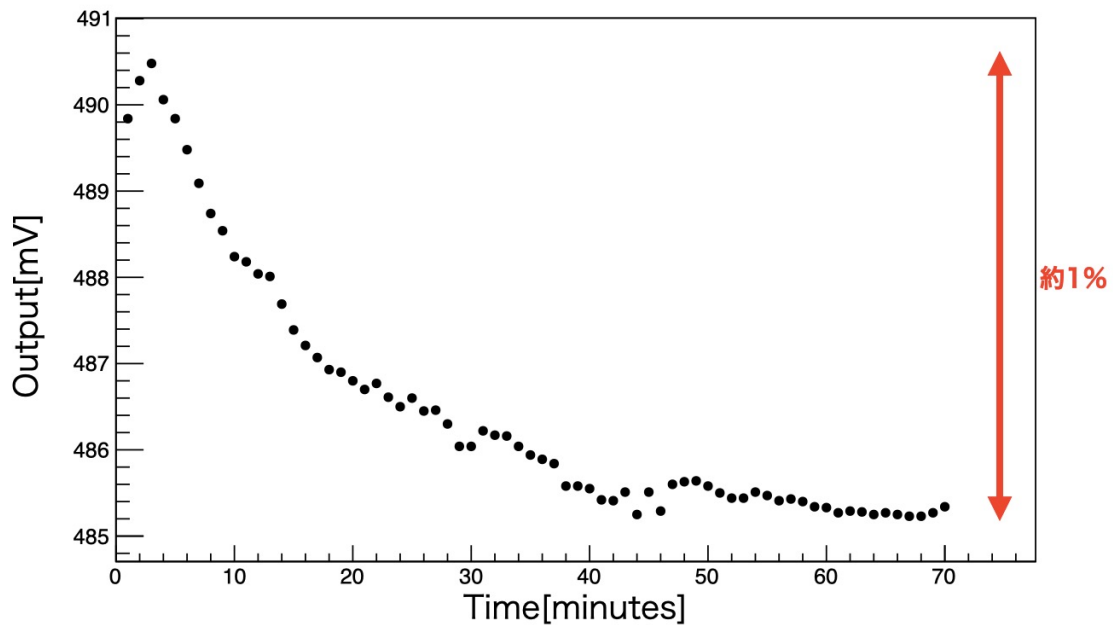


図 3.5: 1 回目の測定結果

3.4 LED を断続的に光らせた場合の信号の時間変化

3.3 節で観測された結果が、光照射によるものかどうかを確認するために、HV を-450V 印加し、5 分おきに LED を断続的に十数秒光らせ、その時の出力を見る。LED にかける電圧は 5.40V とした。図 3.6 が得られた結果である。1 回目の実験と同様に HV 印加から 40 分~60 分ほどで信号量が 1.3 % 減少していき、その後安定するという挙動が見られた。この結果は EMT の収量変化が信号増幅作用によるものではないことを示している。

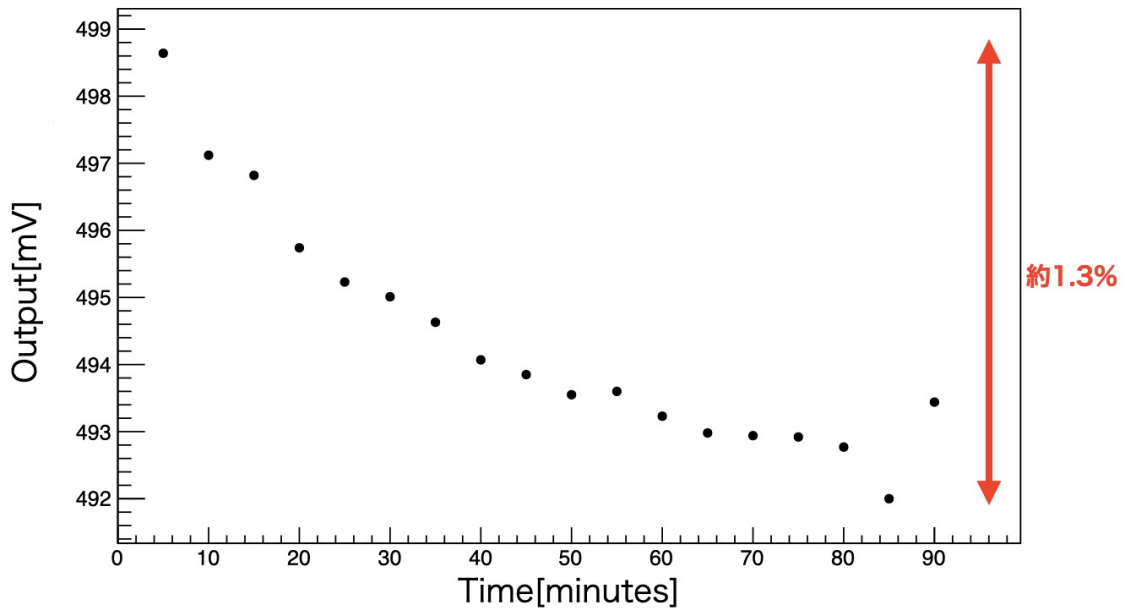


図 3.6: 2 回目の測定結果

3.5 HV 印加後 1 時間経過した後に LED 照射した場合の信号変化

3.3 節及び 3.4 節の測定で HV 印加から 60 分経過した後、信号が安定している兆候がみられていたため、事前に HV を印加した状態でも信号が安定するかを確認した。HV 印加後 60 分経過した後に、LED を連続照射し、信号量の変化を見た。LED にかける電圧は 5.4V とした。結果は図 3.7 のように出力の減少は見られず、約 0.24 % とわずかながらに出力の上昇があったがほぼ一定であることが見て取れた。開始直後の一点の値が大きいのは、電流が LED の半導体材料の接合部で光と熱に変換され、接合部の温度が上昇し、効率が低下することで図 3.8 のように LED に点灯開始から約 40 秒間、LED の初期の明るさの不安定性が影響していると思われる [24]。

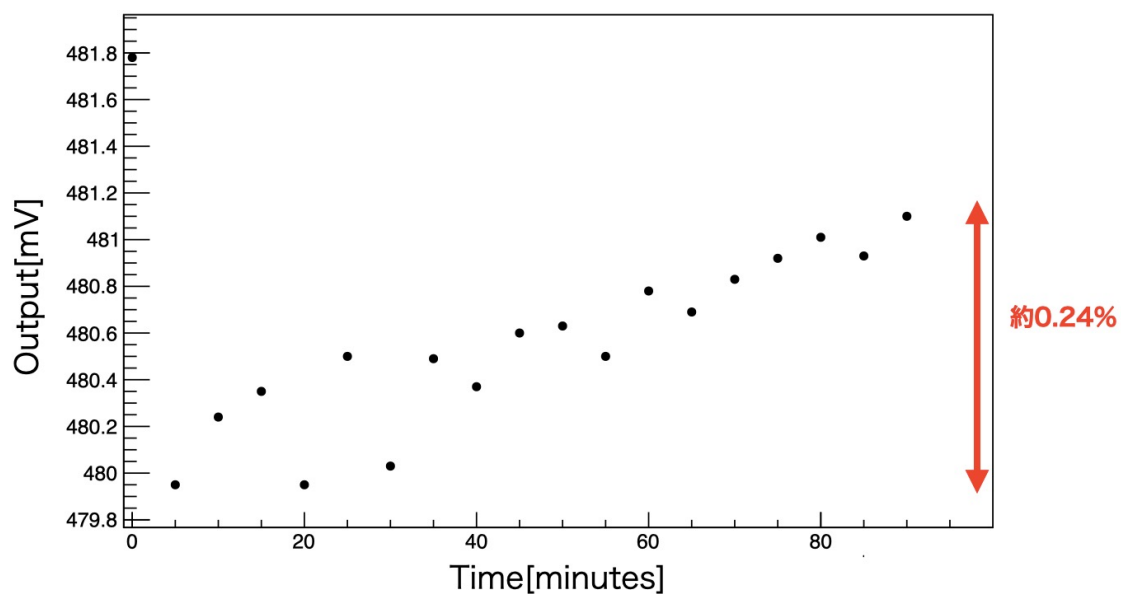


図 3.7: 3 回目の測定結果

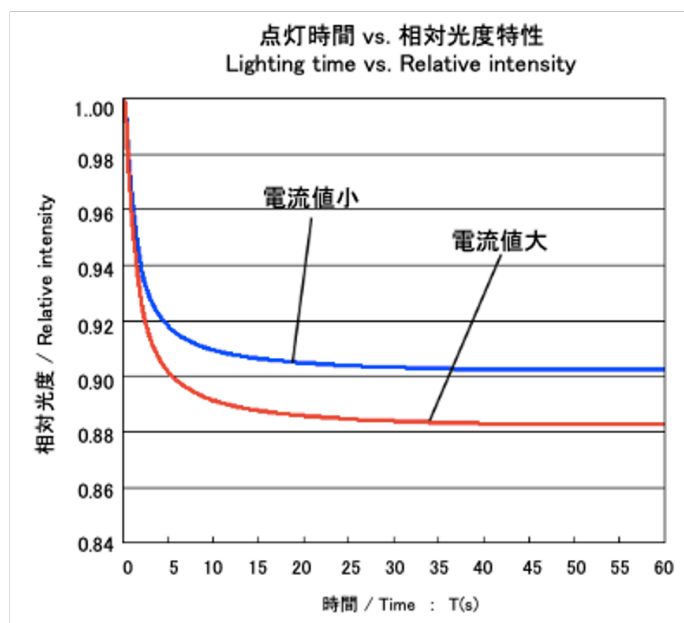


図 3.8: LED の初期不安定性 [24]

3.6 まとめ

HV 印加を開始した時点で LED 照射を行ったとき、EMT の出力が下がり続け、40~60 分経過後に信号が安定するということが、事前に 60 分 HV を印加した状態で LED を照射した時、EMT

の信号は安定していることがわかった。EMT のこのような信号の変化が見られた理由として、HV 印加による抵抗の温度上昇により、ディバイダ回路の電圧比率が変化し、ゲインが変化したということが推測される。この仮説に基づくと 40 分から 60 分経過後は温度が安定し、抵抗値変化によるゲイン変化が乏しくなったと考えられる。しかしこれらの測定では温度計を使用していなかったため、どれ程抵抗の温度、または周囲の温度に変化があったかはわからなかった。5 章では周囲の温度がどれほど EMT の信号の変化に影響しているかを確認する。

4 2021年第3回電子ビーム照射実験

4.1 目的

3回目の電子ビーム照射実験は

- 放射線耐性の測定
- 初期不安定性の測定
- 短期休止後の不安定性の対策

を目的として2021年10月19日から23日にかけて行われた。

4.2 実験場所・セットアップ

これまでと同様にELPHのシンクロトロン入射用電子線型加速器からの90MeVの電子ビームを用いた。これは電子散乱効果をできるだけ小さくするように、安定して大強度を取り出せる最高エネルギーにしている。検出器はEMT(新品のXDA0803、XDA0804、XDA0806、XDA0796、2020年に使用したXDA0798の計5個)と、SiPINダイオード(S3590-08)(ref-SiとSi-monitor)とSiアレイ(S13620-02)、と我々が独自に製作したCTと遷移放射光(Optical Transission Radiation;OTR)モニターを使用した。EMTに印加する電圧は-450Vにした。第2回のビーム試験では、ビーム切り替え時に一旦ビームを停止してEMTの回路の切り替えとCTのアッテネータの切り替えを行っていたため、ビームの状態が変化し、収量にばらつきが表れてしまった。そのため今回は遠隔操作で行えるようにした。

データの読み取りにはCAENの波形デジタルイザ(DT5725が1台、DT5740が2台)(FADC)を用いた。配置についてはCT、OTRモニター、ref-Si、EMTをビームに対して串刺し状に配置した。図4.1にセットアップの概念図、図4.2に実際の様子、表4.1に各検出器の用途を載せる。



図 4.1: セットアップの概念図

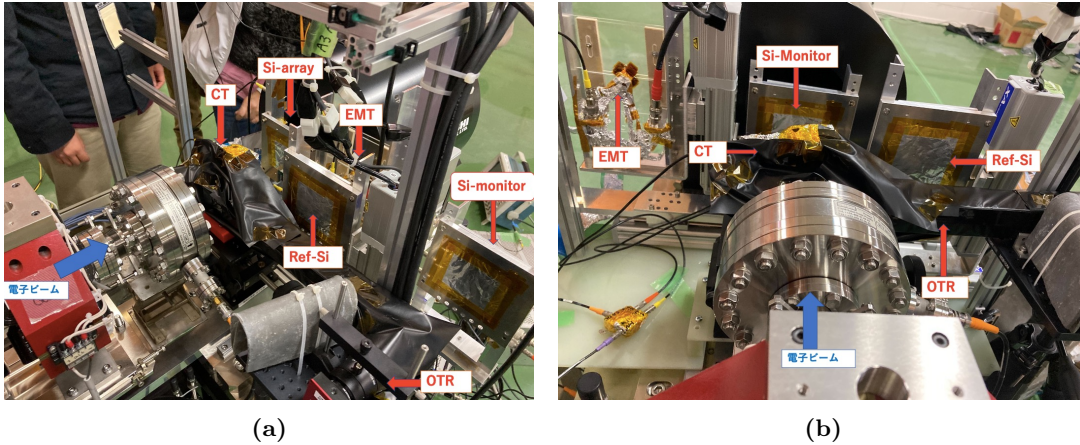


図 4.2: ビーム標的周りのセットアップの実際の様子

表 4.1: 検出器の使用目的

検出器の名称	使用目的
CT	ビーム強度測定
OTR モニター	中・高強度ビームの分布測定
Si-array	低強度ビームの分布測定
ref-Si	低強度ビームにおける EMT の応答との比較
Si-monitor	低強度ビームに切り替えた時のビーム確認

4.3 電子ビーム

今回の実験では3種類の強度の電子ビームを用いて、初期不安定性の測定、放射線耐性の測定を行った。ビームのそれぞれのデータは表 4.2 の通りである。低強度は照射後の検出器応答を J-PARC のミュオンビーム相当の強度で評価するため、中強度は小刻みに放射線照射するため、高強度は短時間に放射線照射するために用いられる。また EMT の有効領域 (直径 8mm の円) に対して ELPH の電子ビームのサイズは表 4.3 のように小さい。そのため EMT 全体を一様に照射するため、図 4.3 のように検出器を 3.5mm の間隔で移動させ、7 点の位置で照射を行った。また高強度では EMT に大量の荷電粒子が入射するため、アノード電流が流れすぎて出力の電圧降下が起こり、増幅が抑制されてしまうため、図 4.4 のように EMT と FADC の回路に 1Ω の抵抗を並列に接続することで、電圧降下を防ぐようにした [8]。

表 4.2: 電子ビームの特徴

強度	周波数 (Hz)	電流 (nA)	パルスごとの電荷 (nC/pulse)	電子数 (個/pulse)	パルスごとの吸収線量 (Gy)	目的
低	7	0.007	0.001	6.24×10^6	5.16×10^{-3}	EMT の応答測定
中	7	1.89	0.27	1.69×10^9	1.39	小刻みに放射線を照射
高	7	155.26	22.18	1.38×10^{11}	114.4	まとめて放射線を照射

表 4.3: ビームの幅 [8]

方向	ビーム幅 (mm)
x	1.43 ± 0.10
y	1.45 ± 0.09

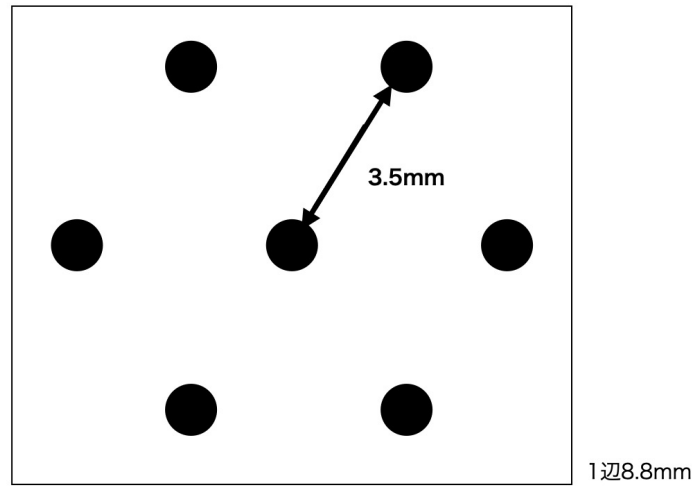


図 4.3: 7点照射の概念図 図の正方形は EMT 内のダイノードを表す

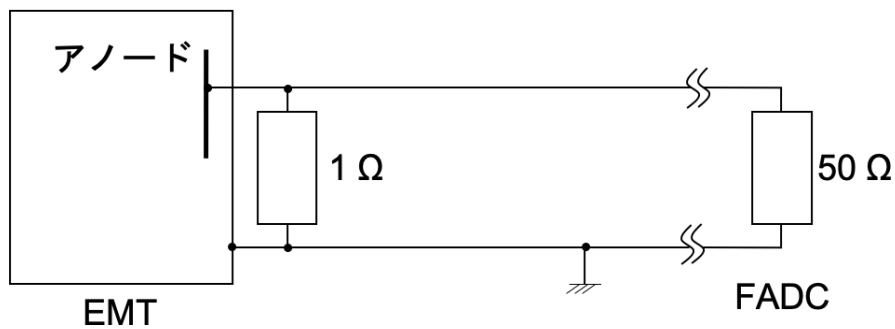


図 4.4: 高強度照射における処理 [8]

4.4 初期不安定性の測定

放射線耐性試験前に各 EMT に対して、表 4.4 の様に (i) EMT の応答確認 (60 s 間)、(ii) ビームのプロファイル測定 (30 s 間)、(iii) 中強度ビーム照射、(iv) 低強度への切り替えの時、本当に低強度になっているかの確認というシーケンスを繰り返すことで、初期不安定性を調べた。

表 4.4: 放射線耐性試験前の安定化までの測定のシーケンス

	ビームの強度	ビーム上流の検出器	中段の検出器	ビーム下流の検出器
(i)(60s)	低	CT	ref-Si	EMT
(ii)(30s)	低	CT	-	Si-array
(iii)	中	CT	-	EMT
(iv)	低	CT	-	Si-monitor

結果は図 4.5 に載せる。前回の実験で見られていた信号の初期不安定性を確認することができなかった。3章で述べたように光照射の測定で HV 印加後 30~40 分間は温度上昇により、初期不安定性の様に徐々に信号が下がり、その後安定するという傾向が確認されたため、今回のビームテストでは HV 印加後、30 分以上経過してから測定を行った。以前のビームテストでは HV 印加直後に測定を行っていたため、初期不安定性が見られていた可能性が高い。

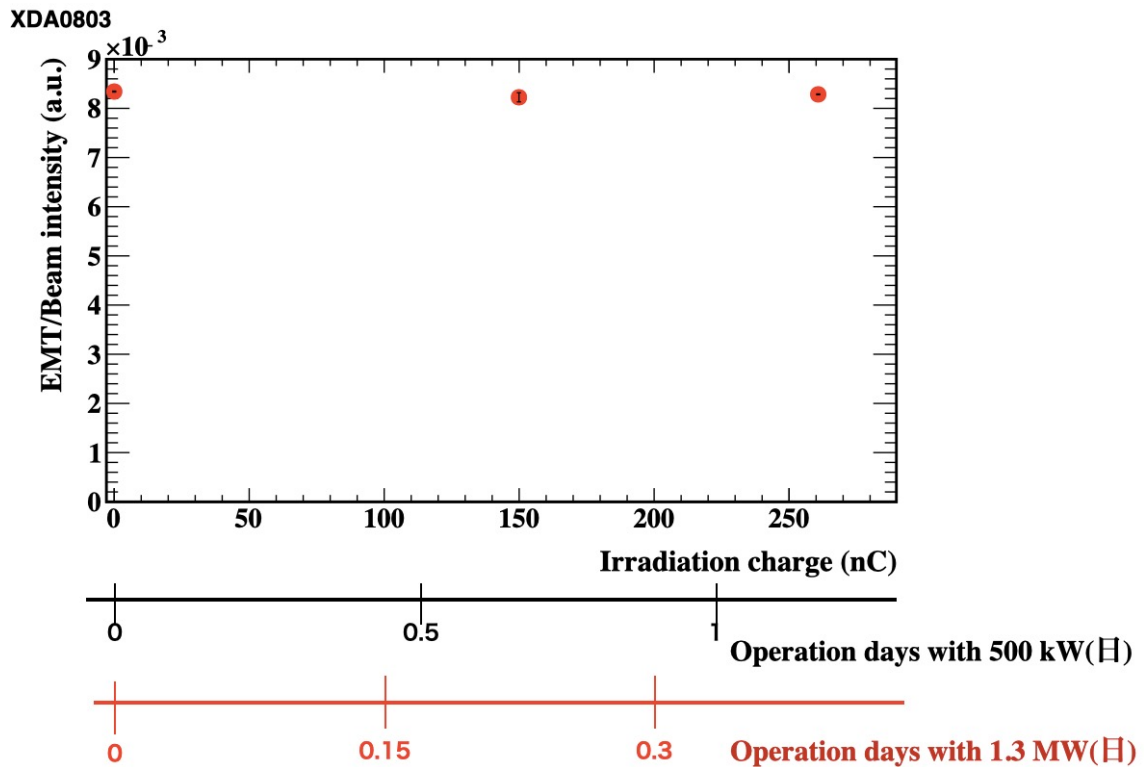


図 4.5: 初期不安定性の実験結果 縦軸は EMT の信号量をビーム強度で規格化したものを表している

4.5 放射線耐性の限界の測定

放射線耐性の測定では、表 4.5 の様に (i) EMT の応答確認 (60 s 間)、(ii) ビームのプロファイル測定 (30 s 間)、(iii) 放射線損傷のための高強度ビーム照射、(iv) 低強度への切り替えの時、本当に低強度になっているかの確認というシーケンスを繰り返すことで、放射線耐性の限界を計測した。

表 4.5: 放射線耐性試験測定の一連のシーケンス

	ビームの強度	ビーム上流の検出器	中段の検出器	ビーム下流の検出器
(i)	低 (60 s)	CT	ref-Si	EMT
(ii)	低 (30 s)	CT	-	Si-array
(iii)	高	CT	-	EMT
(iv)	低	CT	-	Si-monitor

図 4.6 に結果を示す。現在の J-PARC のビーム強度 500kW の状況では 450 日までは 3% の範囲で安定していることがわかり、高い放射線耐性を有していることがわかった。将来の大強度運転 (ビーム強度 1.3MW、ホーン電流 320kA) の状況下でも 100 日は使用することができると言える。

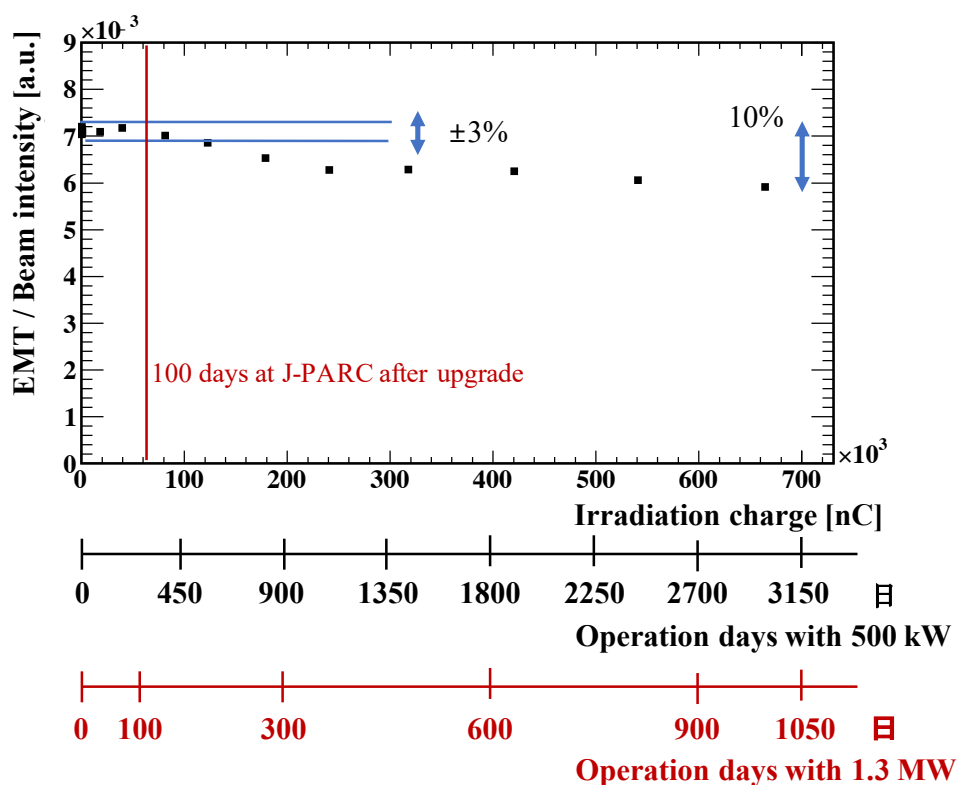


図 4.6: 放射線耐性の限界 縦軸は EMT の信号量をビーム強度で規格化したものを表している [32]

4.6 HV オフでの放射線損傷の試験

放射線損傷の原因が最終段のダイノードであるかを確認するために、XDA0796 に対して、

1. EMT の HV をオフにする
2. J-PARC の現在の状況下 (ビームパワー 500kW) での約 1000 日分に相当する高強度ビーム照射
3. 低強度への切り替えの時、本当に低強度になっているかの確認のための低強度ビーム照射

4. EMT の HV をオンにする (ただし 1~4 は 30 分以上あけ、電圧値を-450V とする)
5. EMT の応答確認のための低強度ビーム照射を 30 分行う

を 3 回繰り返し行った。

結果を図 4.7 に載せる。オフにした時、HV オンで照射した場合と同じような放射線損傷による信号の低下が見られた。HV をオフにすれば増幅がないことを意味しているので、最終段のダイノードが放射線損傷の信号低下の主要因ではなかったことが判明した。よって放射線損傷の原因として考えられるのは、アルミ蒸着されたカソード面か、ディバイダ回路、ダイノード全体のいずれかであると推測できる。損傷の原因を探るために EMT 本体、ディバイダ回路を分けて電子ビーム照射を行うことにした。

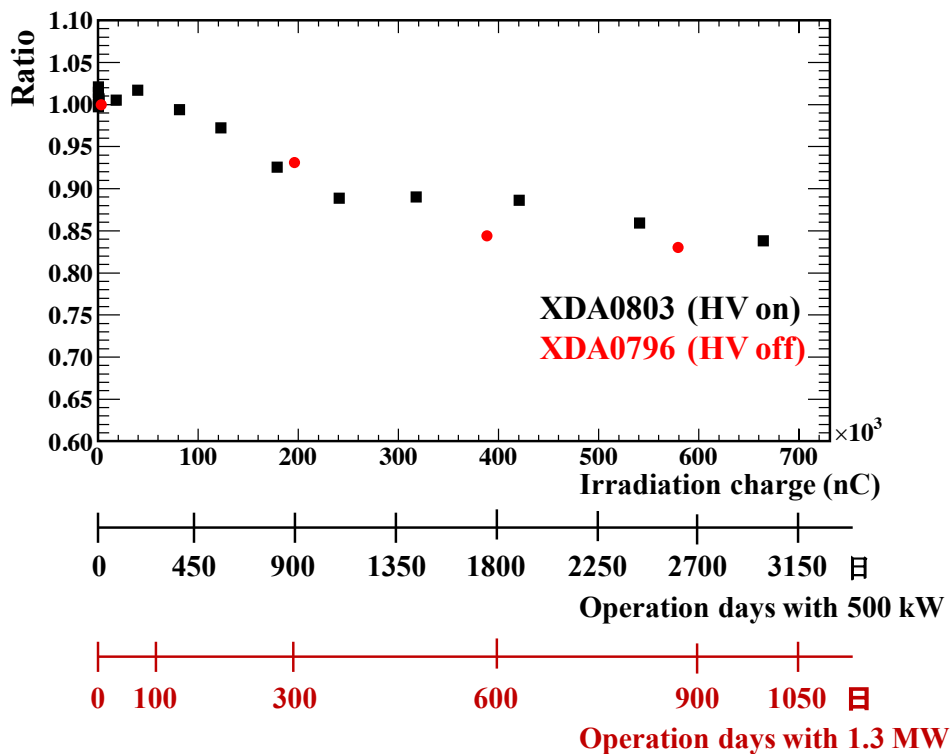


図 4.7: 高強度ビームの照射による放射線耐性の検証 縦軸は高強度照射後の収量と照射前の収量の比を表している。なお 0 nC 付近の点は初期不安定性の測定のデータである [32]

4.7 放射線損傷原因の解明の試験

放射線損傷が EMT 本体かディバイダ回路のどちらかであることを特定するために、EMT の XDA0804 と XD0806 を対象に両方に低強度ビームで応答を確認した後、互いのディバイダ回路を交換し、XDA0806 のみに高強度のビームを照射し、J-PARC(500kW)3000 日分に相当する量の電子ビームを照射した。その後ディバイダ回路を元に戻して、低強度ビームの応答の変化を計測した。

結果は図 4.8 に示すとおり、EMT 本体のみに照射した場合は、照射前と比較し、約 15 % の収量の減少が見られ、ディバイダ回路のみに照射した場合は 10 % の増加が見られた。

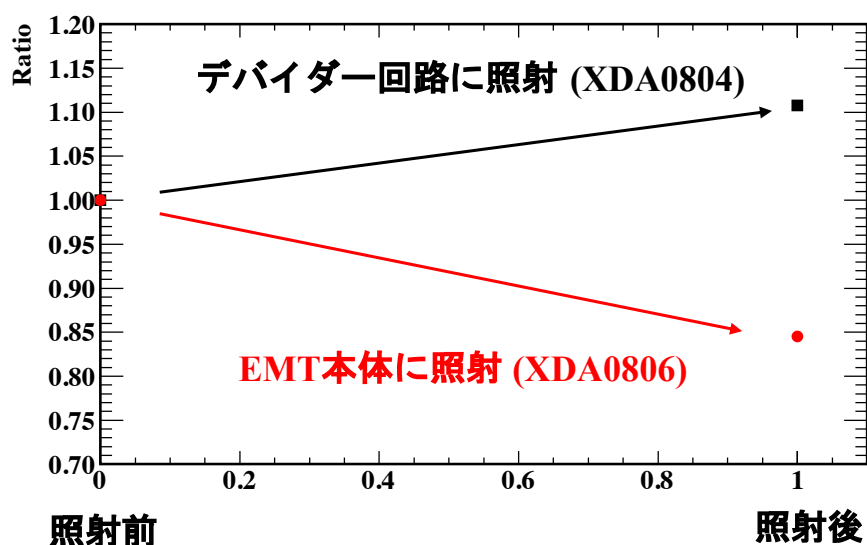


図 4.8: EMT 本体とデバイダ回路の放射線の影響 縦軸は高強度照射後の収量と照射前の収量の比を表している [32]

4.8 考察

第3回目の電子ビーム照射実験では、過去の実験からの予想を裏切る様な結果が見えた。まず初期不安定性が見えなかったということである。これは3章で EMT の光照射による測定で確認されたように、これまでの測定では初期不安定性が HV 印加によりデバイダ回路の温度上昇したことが原因であると疑われる。

次に HV を印加するか否かに関わらず、信号の減少が見えたことで、最終ダイノードの損傷が主な原因ではないということがわかった。そして EMT 本体のみに高強度ビームを照射した場合は信号量が約 15% 減少し、デバイダ回路のみに照射した場合は 10% の上昇が計測された。HV がオフでも信号の減少が見られることから、EMT 本体についてはアルミ蒸着のカソード面、またはダイノード全体の損傷が疑われる。これについてはアノード・第1ダイノード間の抵抗の抵抗値を小さくすることで、電圧差が小さくなり寿命が伸ばすことができる可能性がある。またデバイダ回路については電気抵抗・コンデンサに何らかの放射線による影響が出ていると予想され、それぞれの抵抗値、静電容量を測定することが必要である。

5 EMTの応答の温度依存性

第3回目のELPHでの電子ビーム照射、LEDでの光照射により、EMTの初期不安定性はHV印加によるEMT本体、ディバイダ回路の温度上昇による分圧比の変化の影響が原因として疑われた。図5.1はミュオンピットで循環している冷却水の往路と復路での温度を表している。この冷却水はディケイボリウム(Decay Borium)の壁が放射線により加熱され、温度が過度に上昇するのを防ぐためのもので、ビーム開始直後やメンテナンスでビームを停止し、その後再開したときに温度が上昇しているのが見られる。これによりミュオンピットの温度も数日かけて上昇していること、そして2.3節の測定ではEMTはミュオンチェンバーの外側につけられていたことを考慮すると、EMTはその温度変化の元にあったことが考えられる。このことからEMTの周囲温度依存性についての理解が今後の運用のためにも必要不可欠である。この章では恒温槽内にLEDとEMTを設置し、周囲の温度を変化させ、EMTの温度依存性について調査した結果をまとめる。

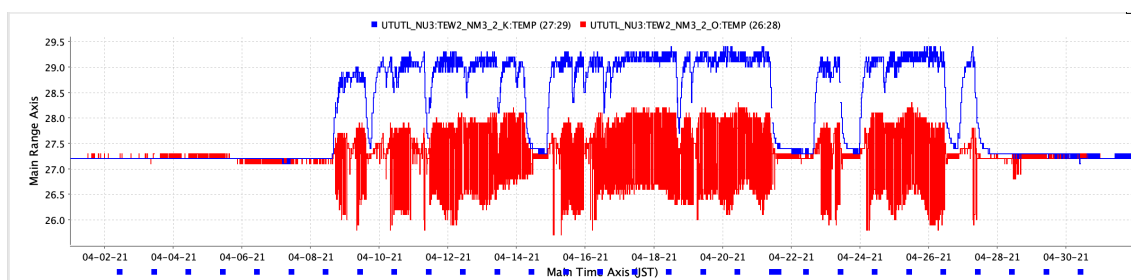


図 5.1: ミュオンピットの冷却水温度 プロットの赤が往路、青が復路をあらわす

5.1 セットアップ

セットアップの概念図を図5.2に示す。恒温恒湿機(エスベック;PU-2KT)内に熱電対(極細タイプ)、白色LED(日垂化学;NSPW500GS-K1)、EMT(XDA0805)と比較のためにシリコンPINダイオード(S3590-08)を設置し、温度を変化させながら測定を行った。LED-EMT間、SiPINダイオード-LED間の距離をそれぞれ3cmずつ離れた。光照射においては前述のLEDに200Ωの抵抗を直列に接続したものを直流安定化電源(KIKUSUI;PMM24-1QU)を用いて印加して行った。3章の光照射実験より初期不安定性の影響をなくすため、HV印加60分以上経過後に恒温槽を起動させることにした。測定にはデータロガー(GRAPHTEC;GL100-WL、GS-4VTと対応PCソフトのGL100-240-840-APS)を用いた。図5.3に実際に用いた恒温槽、図5.4に実験装置の実際の様子、図5.5に恒温槽内の実際の様子を載せる。

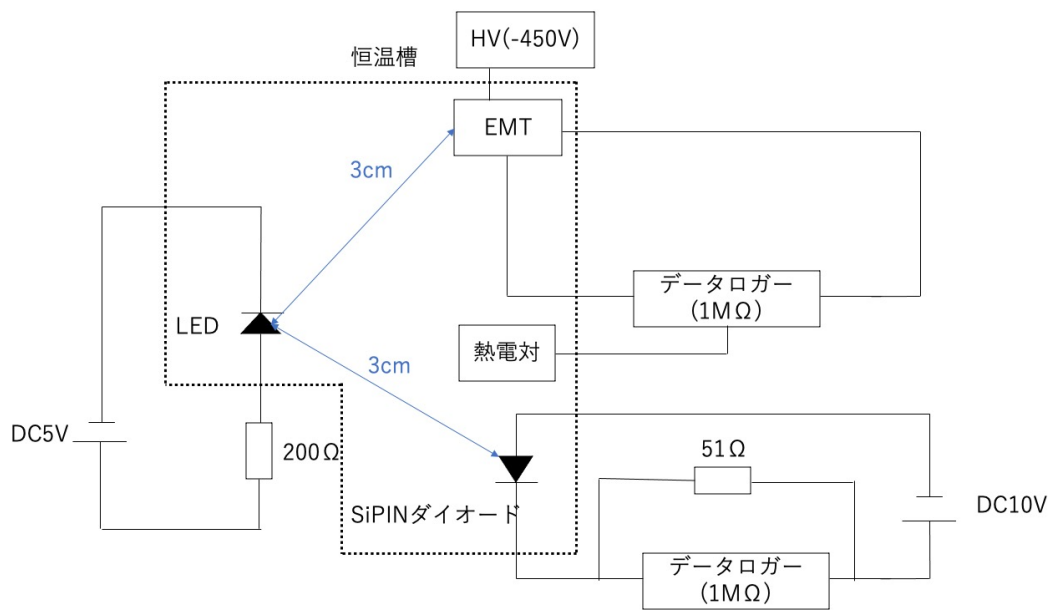


図 5.2: セットアップの概念図 点線で囲った部分は恒温槽内を表している。なお SiPIN ダイオードと熱電対・EMT に接続されているデータロガーは同一のものである。



図 5.3: 温度依存性の測定に用いた恒温槽

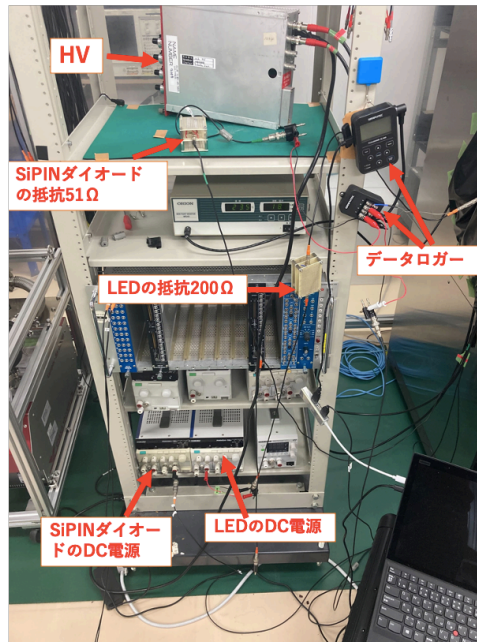


図 5.4: 実験器具の配置

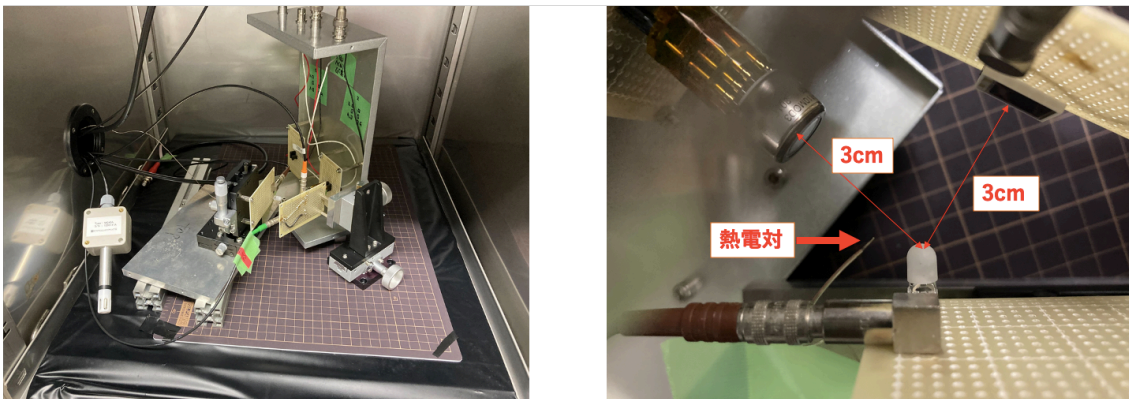


図 5.5: 恒温槽内の装置の様子

5.2 評価方法

LEDには光束の初期不安定性がある。そのため測定値に関してはLED照射後に45秒以上経過した時の出力値を参照することにする。また図5.6のように周囲温度の上昇につれ光束が下がる傾向がある。そこで熱電対により記録された温度に近い温度の相対光束を図5.6よりもとめ、EMTとSiPINダイオードの出力を補正した。

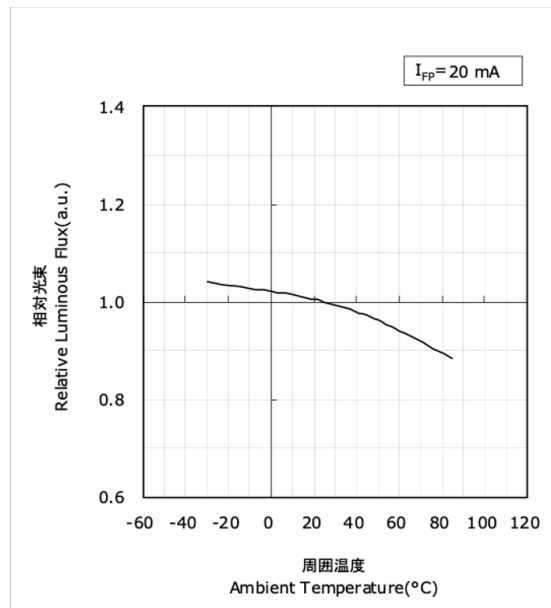


図 5.6: LED の温度依存性 図は日垂化学工業株式会社 白色 LED 標準仕様書 NSPW500GS-K1[20] より

用いた SiPIN ダイオードは図 5.7 のように一定の波長領域では温度変化に強く、可視光の範囲では感度が波長が長くなるほど高くなる特徴を持つ。そのため図 5.8 のような波長スペクトルをもつ今回の LED に対して、この SiPIN ダイオードが LED の温度依存性のレファレンスとして有用だと期待される。そこで補正なしの EMT の出力を SiPIN ダイオードの出力で割ったものも評価し、補正後の EMT 出力と比較する。

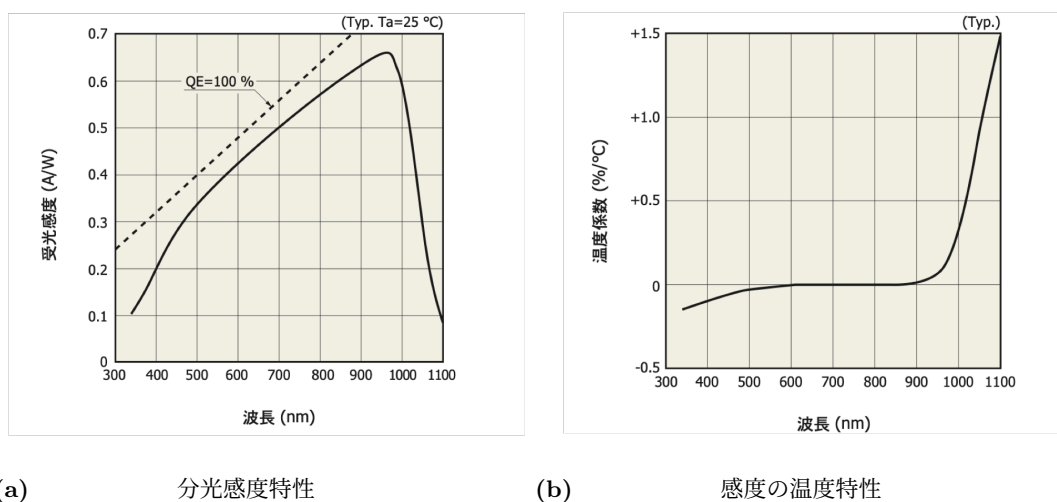


図 5.7: SiPIN ダイオードの特性 [30]

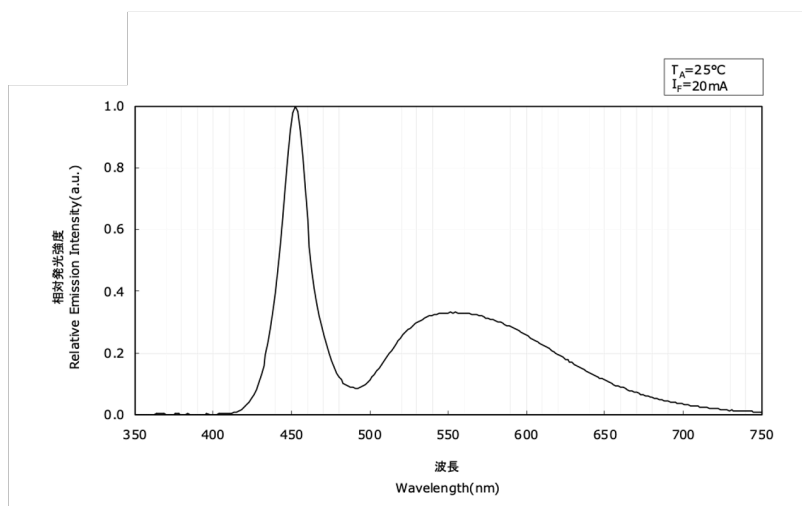


図 5.8: 白色 LED(NSPW500GS-K1) の波長スペクトル 図は日垂化学工業株式会社 白色 LED 標準仕様書 NSPW500GS-K1[20] より

5.3 測定手順

EMT の HV(-450V)、SiPIN ダイオードの電圧 (10V) を印加し、2 時間経過後に恒温槽の起動と測定を開始させる。測定は 30 s ごとに 1 回行う。温度の設定は $0\text{ }^\circ\text{C}$ から $40\text{ }^\circ\text{C}$ まで $5\text{ }^\circ\text{C}$ 刻みで上げていった。その後 $40\text{ }^\circ\text{C}$ から $0\text{ }^\circ\text{C}$ まで $5\text{ }^\circ\text{C}$ 刻みで下げていった。 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 刻みで増減させる時、熱電対で温度の変化過程を見たところ図 5.9 のようにおおよそ 15 分以上経過した時に温度が安定しているので、LED 照射・測定間のスパンを 15 分以上開けることにした。LED 照射時間は 2 分間取り、LED 照射から 90 s 経過した時の出力と温度を読み取った。2 度目の測定では温度の設定は逆の順番で $40\text{ }^\circ\text{C}$ から $0\text{ }^\circ\text{C}$ まで $5\text{ }^\circ\text{C}$ 刻みで下げていき、その後 $0\text{ }^\circ\text{C}$ から $40\text{ }^\circ\text{C}$ まで $5\text{ }^\circ\text{C}$ 刻みで上げていった。この時は EMT の HV 印加と SiPIN ダイオードの電圧印加開始から 1 時間経過後に恒温槽を

起動させ、LED 照射・測定間のスパンを 15 分以上開けることにし、LED 照射時間は 2 分間取り、LED 照射から 90 s 経過した時の出力と温度を読み取った。



図 5.9: 温度上昇の一例 赤丸が温度を上げ始めた時点で、青丸が温度が安定するまでにかかった約 15 分間を表す。

5.4 実験結果

図 5.10、5.11、5.12 に 1 回目の測定結果を載せる。図 5.10 は LED 出力の温度補正をする前のものであり、図 5.11 は LED 出力の温度補正をした SiPIN ダイオードの出力で、温度依存性が見られず、温度補正がうまくいっていることを示している。図 5.12 で LED の温度依存データで補正した場合と、SiPIN ダイオードの出力で補正した場合を比較したところ、ほとんど同じような結果が得られた。10 °C以下では変化はほとんどなく、10 °C以上では 0.12 %/°C または 0.15 %/°C で EMT の出力が下がっている。そして温度を上げる過程のほうが温度を下げる過程よりも出力が大きいというヒステリシスな特徴が見て取れた。

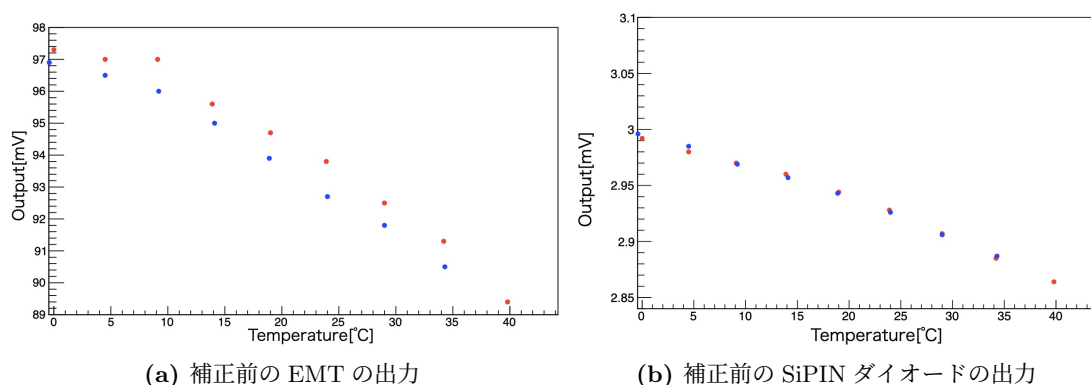


図 5.10: 1 回目の温度変化実験 (補正前) 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である

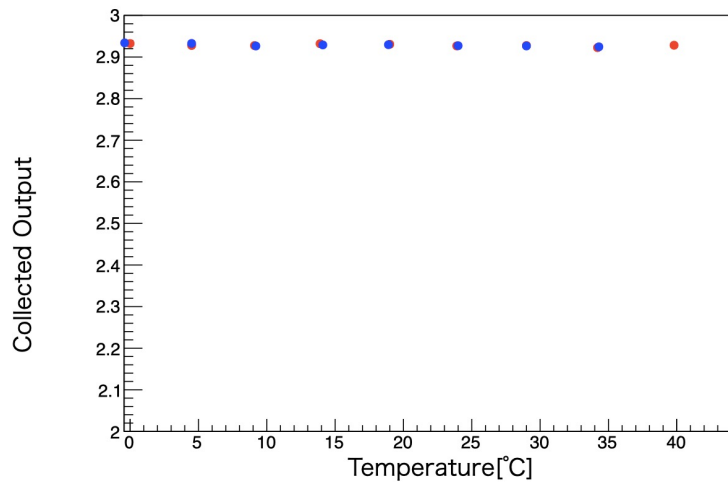
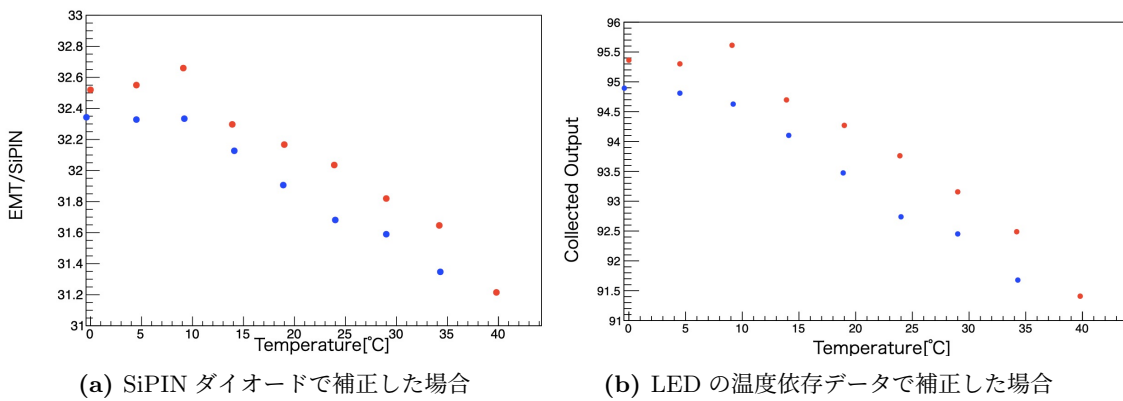


図 5.11: 1 回目の温度変化実験の LED の温度依存データで補正した SiPIN ダイオードの出力 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である



(a) SiPIN ダイオードで補正した場合

(b) LED の温度依存データで補正した場合

図 5.12: 1 回目の温度変化実験の EMT の出力 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である

図 5.13、5.14 に 2 回目の測定結果を載せる。1 回目の測定とほとんど同じような特徴の結果が得られた。図 5.14 より 10 °C 以上では 0.16 %/°C または 0.18 %/°C で EMT の出力が下がっている。そして依然として温度を上げる過程のほうが温度を下げる過程よりも出力が大きいというヒステリシスな特徴を持つことがわかった。1 回目と 2 回目の測定ではほぼ同じ様な結果が得られたことから、15 分間以上の LED 照射及び測定のスパンで周囲温度とデバイス回路自体の温度の差異が少なくなったといえる。

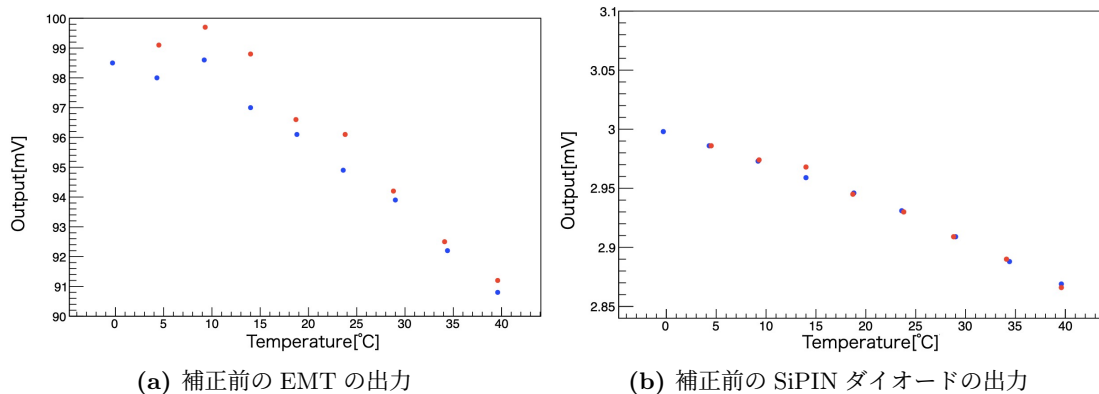


図 5.13: 2 回目の温度変化実験 (補正前) 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である

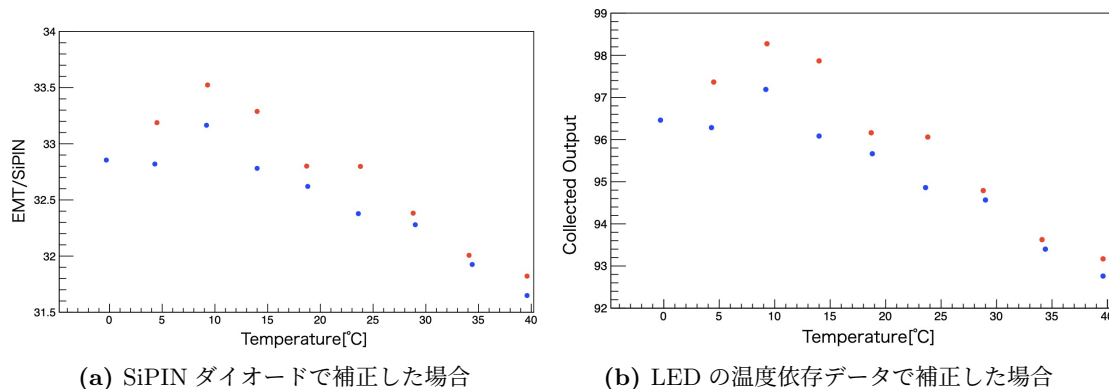


図 5.14: 2 回目の温度変化実験 青のプロットは 40 °C から 0 °C、赤のプロットは 0 °C から 40 °C まで変化させた結果である

5.5 考察

今回の測定及び 4.5 節の結果より、今までの実験で見られた初期不安定性は温度変化によるものである可能性が高まった。次回の T2K 実験ビームタイムではミュオンピットにおいて温度管理されているミュモンチェンバー内に EMT を設置し、測定を行おうと考えている。

温度によりゲインが増減する原因として考えられるのは、陽極の温度特性である。PMT では図 5.15 のように光電面の種類によっては陽極感度の温度係数が異なり、長い波長領域で温度係数がマイナスからプラスに変化する特徴を持っている。今回の EMT の実験では 10 °C 以上でマイナスの温度係数が見られる [31]。また PMT はダイノードは温度を一旦下げて (-34 °C) もう一度温度を同じ状態にした時に、ダイノード表面の状態が変化してゲインなどが変化することが知られている [21]。EMT において温度を上げる過程のほうが温度を下げる過程よりも出力が大きい状態が生まれたのはこのダイノード表面の状態変化によるものと考えられなくもないが、PMT の場合ではゲインが下がる特徴が見られており、今回の実験結果は逆の傾向が見られている。この点から別の要因の可能性もあるため、今回のようなヒステリシスな特徴が見られた原因については特定できなかった。

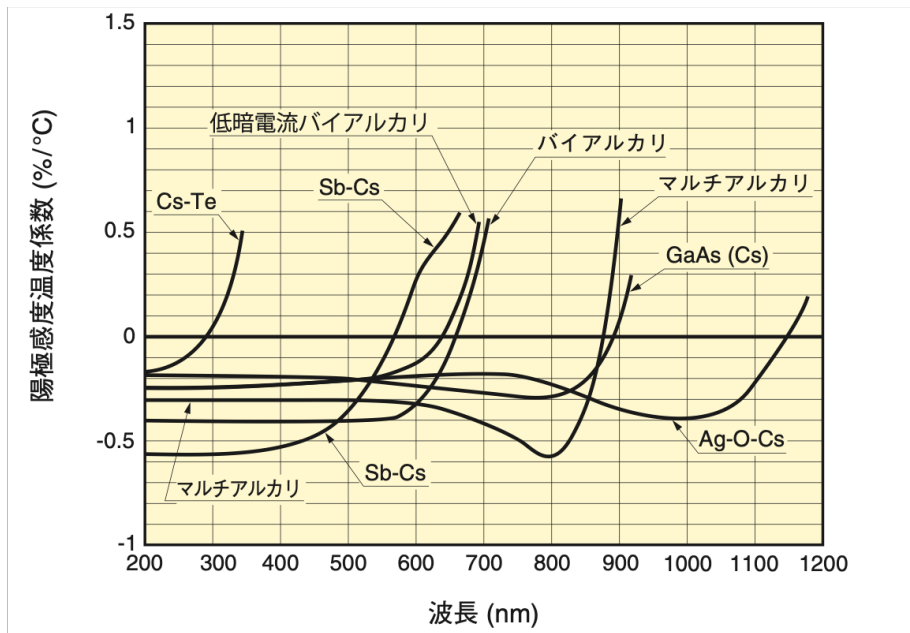


図 5.15: 光電面の種類における陽極感度温度係数 [31]

6 ディバイダ回路の放射線損傷の評価

4.7章にあるようにディバイダ回路のみに高強度の電子ビームを照射した後に、EMT 本体とともに収量を測定したところ、照射前と比べ収量が 10 % 上昇した。ディバイダ回路のゲインに影響を与えているのは分圧比、すなわち回路上の電気抵抗と電圧を安定させるコンデンサーである。これらが照射により何らかの変化があり、ゲインが変化したと考えられる。この章ではディバイダ回路の放射線影響が電気抵抗あるいはコンデンサーにあることを確認するため、抵抗値と静電容量を測定し、結果を踏まえゲインの影響を議論する。

6.1 実験方法

照射したディバイダ回路は放射化の影響により、管理区域外に持ち出すことができなかった。そのため ELPH の第 2 実験室で測定を行った。デジタルマルチメーター (HIOKI 3801) を図 6.1 のようにディバイダ回路の端子にあて、抵抗・コンデンサの抵抗値、静電容量を測定する。今回測定を行ったのは光照射・温度依存性実験で用いている XDA0805(1 回目の温度依存性実験を終えた直後) と、第 3 回目の ELPH での電子ビーム照射実験で使われた XDA0806、XDA0804、XDA0803、XDA0796、XDA0798 の 6 個である。このうち 2020 年に高強度ビームを照射したのは XDA0798 の 1 個、2021 年に照射したのは XDA0803、XDA0804、XDA0796 の 3 個である。

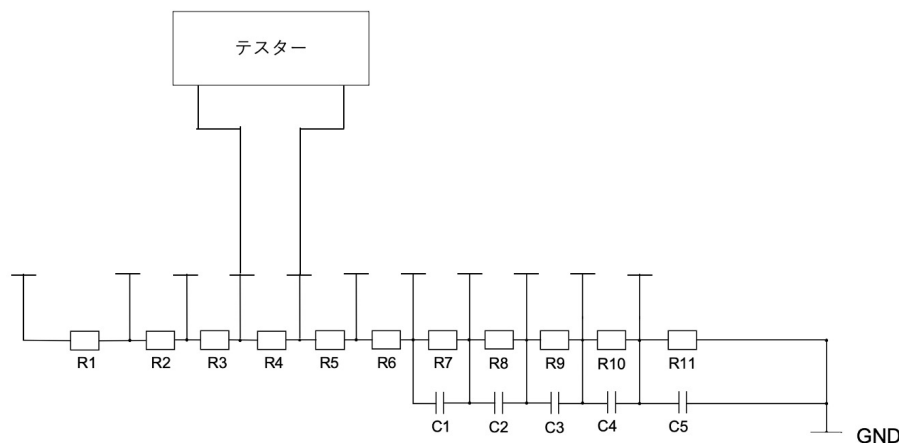


図 6.1: テスターによる測定の概略図

6.2 テスターの測定原理 [27]

テスターにおける電気抵抗測定は、図 6.2 のようにテスター内部の電流発生回路から既知の電流 I_S を測定対象に流し、測定対象の両端で得られた電圧 V_X を用いて、測定対象の抵抗値 R_X を

$$R_X = \frac{V_X}{I_S} \quad (6.1)$$

のように電圧、電流の比として算出している。

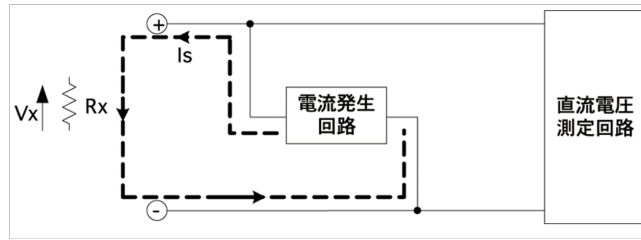


図 6.2: テスターによる電気抵抗測定の原理

静電容量も同様に図 6.3 のように既知の電流 I_S を測定対象に流し、内部のタイマーでコンデンサの端子間の電圧が基準電圧 V_C に達するまでの時間 T_C を計測している。これらの値を用いて測定対象の静電容量 C_X を

$$C_X = \frac{I_S \times T_C}{V_C} \quad (6.2)$$

のように電流と時間の積と電圧の比として算出している。

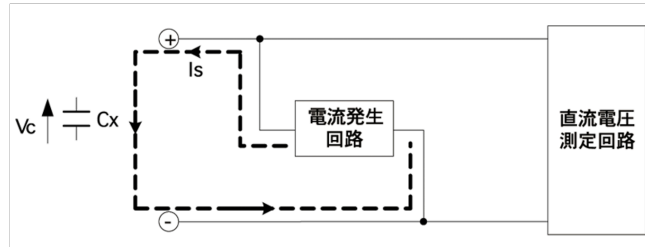


図 6.3: テスターによる静電容量測定の原理

6.3 電気抵抗の測定

電気抵抗測定の結果は表 6.1 のようになった。どのディバイダ回路の抵抗値もディバイダ回路の設計値の公差 5% の範囲内であり、放射線による目立った損傷などは見つけることはできなかった。

表 6.1: 抵抗値の測定結果 (単位は kΩ)

	設計値	XDA0806	XDA0804	XDA0803	XDA0796	XDA0798	XDA0805
	-	高強度未照射	高強度照射	高強度照射	HV0V で高強度照射	2020 年に高強度照射	LED で光照射
R_1	200	199.5	200.6	200.3	199.5	201	200.8
R_2	200	199.4	200.1	200.2	200.4	200.7	200.3
R_3	150	149.8	150	149.9	150.2	149.8	149.7
R_4	150	149.8	149.7	149.7	150.1	149.2	149.6
R_5	150	149.5	149.6	149.8	149.5	150.2	149.7
R_6	150	149.7	149.8	149.6	149.8	150	150.2
R_7	150	149.4	149.5	150	149.6	150.3	149.4
R_8	150	149.6	149.9	149.9	150	149.6	149.5
R_9	200	199.6	199.8	200.7	200.8	199.4	201
R_{10}	510	515	515	511	512	510	508
R_{11}	75	74.8	74.8	74.8	74.8	74.8	74.8

6.4 静電容量の測定

測定によって得られた値は表 6.2 のようになった。 C_1 、 C_2 、 C_3 、は設計値に比べて 10~20 % の変化、 C_1 は 5 %~10 % 程の変化があるが、 C_5 は 2 倍近い値が測定された。これらは並列に接続されている電気抵抗により基準電圧に達するまでの時間が正確に測定できず、測定値が大きすぎてしまった可能性が高い。よってこの測定で得られた静電容量はあまり信頼できないものと言える。そして静電容量を測定するために別の方法を考える必要がある。

表 6.2: 静電容量の測定結果 (単位は nF)

	設計値	XDA0806	XDA0804	XDA0803	XDA0796	XDA0798	XDA0805
	-	高強度未照射	高強度照射	高強度照射	HV0V で高強度照射	2020 年に高強度照射	LED で光照射
C_1	10	11	10	11	10	10	10
C_2	10	12	10	10	10	10	10
C_3	10	10	9	9	9	9	9
C_4	330	365	343	354	343	356	348
C_5	330	679	699	662	641	651	667

6.5 ゲインによる評価

6.3 節では抵抗値には大きな問題がなかったが、抵抗値の 5 % の範囲の中で、抵抗値の組み合わせ次第ではゲインが大幅に変わることも考えられる。そうした懸念点を踏まえ、この章では抵抗値の変化によってゲインがどれほど変化するかを評価する。

ゲイン G は印加した HV を V 、ダイノード間の抵抗を $R_i (1 \leq i \leq 11)$ とすると

$$G = \prod_{i=1}^{n=11} a \times \left(V \times \frac{R_n}{\sum_{i=1}^{11} R_i} \right)^k \quad (6.3)$$

と書くことができる。ただし a は定数、 k は電極の構造・材質で決定され、0.7 から 0.8 までの値をとる [31]。この式を用いて、設計値の 5 % の公差の範囲で設定値でのゲインから 10 % 増える組み合わせを探したところ、抵抗値が例えば (210,210,143,143,143,143,143,143,210,530,73) と仮定した時 (単位は全て kΩ)、表 6.3 のようにゲインが設計値から約 10~12 % 減少する。表 6.1 の結果は

これほど大きな変化は起きていないことを示しているが、照射前の測定値がないため結論づけることができない。加えてこの状態で静電容量に異常があったとしても、原因の判別がうまく行えないことが示唆される。そのため正確に評価するためには照射前後で測定を行う必要がある。結論として今回の実験ではディバイダ回路の放射線の影響の原因は判明できなかった。

表 6.3: ゲインの評価 (簡略のため $a = 1$ とした)

	設計値	仮定値	XDA0806	XDA0804	XDA0803	XDA0796	XDA0798	XDA0805
	-	-	高強度未照射	高強度照射	高強度照射	HV0V で高強度照射	2020 年に高強度照射	LED で光照射
$k = 0.7$	1.12777×10^{12}	1.00786×10^{12}	1.11135×10^{12}	1.1117×10^{12}	1.1224×10^{12}	1.1202×10^{12}	1.1252×10^{12}	1.1291×10^{12}
$k = 0.8$	5.94226×10^{13}	5.22604×10^{13}	5.8437×10^{13}	5.84579×10^{13}	5.91×10^{13}	5.8969×10^{13}	5.927×10^{13}	5.9506×10^{13}

7 まとめと今後の課題

本研究では T2K 実験において初期不安定性の再現及び原因の究明と、放射線損傷の原因の特定と放射線耐性の限界の測定を目的として行われた、電子増倍管の光照射実験と東北大学電子光理学研究センターで行われた 3 回目の電子ビーム照射実験での結果をふまえ、電子増倍管の周囲温度依存性の実験、電子ビームに照射後のディバイダ回路の放射線の影響の有無を調べる実験を行った。

光照射による実験では HV の印加によるディバイダ回路の温度上昇によって抵抗値が変化し、分圧比変化によるゲインの減少が見られた。電子増倍管の初期不安定性に似た傾向を持っており、初期不安定性の要因が温度の可能性はある。

これを踏まえ、測定の前に HV 印加後必ず 30 分間時間を置くようにした。その結果電子ビーム照射実験の結果は以前見られていた初期不安定性が見られなくなった。放射線損傷については HV の印加の有無にかかわらず損傷が見られた、ディバイダ回路、電子増倍管個別に照射すると、電子増倍管側は 15 % の信号の減少、ディバイダ回路側は 10 % の上昇が見られたりと、実験前に予測されたものとは異なった結果が得られた。以前の電子ビーム照射実験では HV 印加直後に電子ビームを照射したが、今回は HV を印加後 30 分経過した後に照射している事実から初期不安定性が温度による可能性が高まった。また放射線損傷の主な要因が最終段のダイノードではないことがわかった。

電子増倍管の周囲温度依存性の実験では 0 °C から 40 °C まで上げた場合と 40 °C から 0 °C まで下げた場合はどちらも 10 °C 以上の温度領域で温度が上がるごとに出力が下がるという結果が得られた。このゲインの変化の要因として考えられるのは陽極の温度特性によるものと考えられる。しかしアルミニウムの光電面での波長ごとの陽極感度の温度係数の特定は今回の実験ではできなかった。また温度を上げていく過程のほうが下げていく過程よりも出力が大きいというヒステリシスな特徴が見られた。この特性はダイノードに起因するものと考えられなくもないが、光電子増倍管でみられるそれとは逆の傾向であり、別の要因の可能性もある。そのため電子増倍管の温度に対するヒステリシスな特性の原因は判明しなかった。しかしながら電子増倍管は温度の影響があることは今回の実験で明らかになったので、ミューモンピットでの実験は次回からは温度一定に保たれたミューモンチェンバー内で行う必要がある。

ディバイダ回路のテスターでの計測では、抵抗値は 5 % の公差の範囲内であった。そして静電容量は並列に接続された抵抗の影響でうまく値が取れなかった。抵抗値に関しては設計値の 5 % の公差の範囲では、抵抗値の組み合わせ次第では十分にゲインの 10 % 以上の増減を作り出すことができる。従って照射前後で抵抗値を測定する必要がある。またコンデンサについては、同じく照射前後で静電容量を精度よく計測する方法を考案せねばならない。

今回の実験を踏まえると将来の J-PARC の運転では約 100 日も放射線耐性があること、初期不安定性が温度依存によるものかもしれず、解消が可能かもしれないという今回の実験結果から、電子増倍管の次期検出器候補としての期待がますます大きくなったと言える。

謝辞

初めての大学院生活、研究生生活ということで何も知らずに博士前期課程の道を進んだ。しかしどういふわけか新型コロナウイルスが流行し始め、様々な研究活動、研究会などが次々と制限され、教員の異動も合間って自分は何をしたら良いかわからぬまま結局1年を棒に振ってしまった。2年目に突入して研究に本腰を入れようにも、研究活動を碌にやってこなかったのが依然として何も動けぬまま時間が過ぎ、タイムリミットが迫るたびに絶望感に駆られやはり思うように動けなかった。どうにか研究を進めこうして修士論文を書いている訳だがやはり今でも将来の不安を抱えている。こんなどうしようもない私を見捨てることなく、研究を見てくださった市川温子教授と中村輝石助教には申し訳ない気持ちとともにここに感謝の意を表したい。また研究について同じ研究室に所属している平船精大氏にはたびたび研究生生活についてアドバイスをいただき、ありがとうございます。また笠間奏平氏、大阪市立大学の本條貴司氏、山本達也氏、東京理科大学の中村妃南氏、石塚正基氏、京都大学の木河達也氏、安留健嗣氏、KEKの坂下健氏、松原綱之氏には色々研究のアドバイス・お手伝いをしていただき本当にありがとうございます。あなたがたの支えがなければこの研究は進みませんでした。そしてKEKに異動してしまわれたが、修士1年のときに心の支えとなってくれた與那嶺亮、佐藤瑶両氏には感謝の意しかない。そして今まで支えてくれた研究室の皆様、そして家族には感謝の意を表すとともに、お粗末な出来ではあるがこの論文を捧げたい。

参考文献

- [1] Ling-Lie Chau, Wai-Yee Keung, Phys. Rev. Lett. 53, 1802 (1984)
- [2] Particle Data Group (K. Hagiwara et al.): Phys. Rev. D66, 010001 (2002)
- [3] 例えば、林青司 ”素粒子の標準模型を超えて” 丸善出版
- [4] 例えば、林青司 ”ニュートリノの物理学 素粒子像の変革に向けて” サイエンス社
- [5] www.nu-fit.org, JHEP 09 (2020) 178 [arXiv:2007.14792]
- [6] T2K 実験 ホームページ (<https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>)
- [7] K.Abe et al. , “J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report” [arXiv:1908.05141] (2019)
- [8] 本條貴司, “T2K 実験ミュオンモニターに用いる新検出器の開発”, 大阪市立大学大学院理学研究科 (2021)
- [9] K.Abe et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 659 (2011) 106-135
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 松岡広大, “T2K 長基線ニュートリノ振動実験 ミュオンモニターの開発”, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, (2007)
- [14] 青木茂樹、中家剛、塚本敏文, ”T2K 実験 前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis”、高エネルギーニュース Vol.29 No.2 (2010)
- [15] K. Abe et al (The T2K Collaboration), “Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations” Nature 580, 339-344 (2020)
- [16] 松岡広大、久保一、横山将志, ”T2K 実験ミュオンモニターの開発”, 高エネルギーニュース Vol.29 No.1 (2010)
- [17] Y. Ashida et al., ”A new electron-multiplier-tube-based beam monitor for muon monitoring at the T2K experiment” Prog. Theor. Exp. Phys. 2018(10), 2018. 103H01 [arXiv:1805.07712]
- [18] Izumi Nao, ”Evaluation of a new detector for the T2K muon monitors”, Master Thesis, Department of Physics Faculty of Science and Technology Tokyo University of Science (2021)
- [19] 東北大学電子光理学研究センターホームページ (<https://www.lns.tohoku.ac.jp>)
- [20] 日亜化学工業株式会社 白色 LED 標準仕様書 NSPW500GS-K1

- [21] W.R.Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Experiments A How-to Approach", Springer-Verlag
- [22] K.Abe et al., "First Gadolinium Loading to Super-Kamiokande" [arXiv:2109.00360] (2021)
- [23] SANWA PC5000a 取扱説明書 (https://www.sanwa-meter.co.jp/japan/pdf/manual/digital_multimeters/PC5000a_JP.pdf?channel=sanwa)
- [24] スタンレー電気【資料】LED の明るさと色調 (<https://premium.ipros.jp/stanley/product/detail/2000602874/>)
- [25] K.Abe et al., Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Phys. Rev. D, 88:032002 (2013)
- [26] Y.Itou et al., "The JHF-Kamioka neutrino project", [arXiv:hep-ex/0106019]
- [27] 日置電機株式会社 テスターの機能と使い方 (<https://www.hioki.co.jp/jp/products/listUse/?category=42>)
- [28] K.Suzuki et al., "Measurement of the muon beam direction and muon flux for the T2K neutrino experiment", Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 053C01
- [29] 浜松ホトニクス 64素子Siフォトダイオードアレイ S13620-02 データシート (https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13620-02_kmpd1198j.pdf)
- [30] 浜松ホトニクス SiPIN フォトダイオード S3590 シリーズ データシート (https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s3590-08_etc_kpin1052j.pdf)
- [31] 浜松ホトニクス 光電子増倍管ハンドブック (https://www.hamamatsu.com/sp/hq/mktg-LP/201707_pmt/PDF/PMT_handbook_v4J.pdf)
- [32] 中村妃南, "T2K 実験ミュオンモニターにおけるビームアップグレードに向けた新型検出器の開発", 修士論文 東京理科大学 理工学部
- [33] 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)