

T2K 実験ミューオンモニターに用いる
電子増倍管の開発

(Development of the electron multiplier tubes
for the muon monitor in the T2K experiment)

理学研究科
数物系専攻
山本達也

概要

T2K 実験は 2009 年から日本で行われている長基線ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で生成されたニュートリノビームを、約 295km 離れたスーパーカミオカンデで観測することでニュートリノ振動確率を測定する。T2K 実験ではニュートリノビームと反ニュートリノビームのそれぞれでの測定を比較することで、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見を目的としている。CP 対称性の破れは物質優勢宇宙を説明する手掛かりと考えられており、素粒子物理学において非常に重要な研究課題の一つである。これまでの観測で CP 対称性の破れの兆候は確認されているが、統計量を増やしより高い精度の結果が必要である。統計量増加のため J-PARC ではビームの大強度化が計画されており、将来的にビーム強度は現在の 2.6 倍に増強される。

ニュートリノビームの方向をリアルタイムで監視するにはニュートリノの直接観測では難しく、ニュートリノと同時に生成されるミュオン方向と強度を測定することでニュートリノビームを間接的に監視している。その役割を担っているのがミュオンモニター (MUMON) である。現在、ミュオンモニターでは Si 検出器とイオンチェンバーの 2 種の検出器が用いられているが、将来のビーム大強度化に向けて Si 検出器では放射線耐性の問題、イオンチェンバーでは高強度領域における線形性の問題が懸念されている。これらの問題の対策として、新たな検出器の候補である電子増倍管 (Electron Multiplier Tube : EMT) の開発を行っている。

EMT は光電子増倍管 (PMT) の光電面をアルミ蒸着に変更したものであり、貫通するミュオンがアルミニウムやダイノードで発生する二次電子を増幅し信号として読み出す。これまでの研究により、放射線耐性や線形性に関してはミュオンモニターとしての要請を満たすことが確認されたが、運転開始直後から信号が減少しその後安定するという初期不安定性が確認された。また、LED 照射における EMT の信号応答に温度依存性があることが確認され、初期不安定性の原因である可能性が浮上した。EMT の放射線による劣化の原因の特定や荷電粒子の照射における EMT の信号応答の温度依存性の評価が課題となった。現在、EMT の放射線による劣化の原因の候補としてカソードの劣化とダイノードに蒸着されているアルカリ金属アンチモンが挙げられている。本研究では、これらの課題の解決に向け東北大学電子光理学研究センター (ELPH) において第 4 回電子ビーム照射試験を行い、カソードの劣化の評価と電子ビーム照射における温度依存性の測定を行った。この試験の結果、EMT の放射線による劣化の原因はカソード面の劣化でなくダイノードに蒸着されているアンチモンである可能性が深まった。また、電子ビーム照射における温度依存性は LED 照射における温度依存性より大きく、初期不安定性の原因の可能性が深まった。

目次

第 1 章	ニュートリノ物理	8
1.1	素粒子標準模型とニュートリノ	8
1.2	ニュートリノ振動	8
1.2.1	ニュートリノ振動の定式化	9
1.3	ニュートリノによる反応	10
第 2 章	T2K 実験	12
2.1	実験の概要と目的	12
2.2	大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ニュートリノビームライン	12
2.3	前置検出器	14
2.3.1	INGRID	14
2.3.2	ND280	15
2.4	後置検出器：スーパーカミオカンデ	16
2.5	off-axis 法	17
2.5.1	off-axis 法の原理	17
2.5.2	T2K 実験における off-axis 法の利用	18
2.6	これまでの結果	20
2.7	将来計画	20
第 3 章	ミュオンモニター (MUMON)	22
3.1	MUMON の概要と目的	22
3.2	MUMON の構造と検出器	22
3.2.1	MUMON に求められる性能	23
3.2.2	Si 検出器	24
3.2.3	イオンチェンバー	25
3.2.4	データの読み出しシステム	25
3.3	MUMON のアップデート計画	26
第 4 章	電子増倍管 (Electron Multiplier Tube : EMT)	28
4.1	EMT の概要	28
4.2	デバイダー回路の概要	29
4.3	EMT に要求される性能	30
4.4	J-PARC におけるミュオンビームでの測定	31
4.4.1	これまでの J-PARC での試験	31
4.4.2	2023 J-PARC での試験計画	36

4.5	ELPH での電子ビーム照射試験	38
4.5.1	ELPH	38
4.5.2	2019 第 1 回電子ビーム照射試験	39
4.5.3	2020 第 2 回電子ビーム照射試験	42
4.5.4	2021 第 3 回電子ビーム照射試験	44
4.6	これまでの電子ビーム照射試験のまとめ	51
第 5 章	2022 第 4 回電子ビーム照射試験	52
5.1	目的	52
5.1.1	EMT の温度依存性の電子ビームを用いた評価	52
5.1.2	放射線劣化の原因究明	52
5.2	セットアップ	53
5.2.1	実験のセットアップ	53
5.2.2	検出器	53
5.2.3	電子ビーム	57
5.2.4	高強度ビームの照射方法	59
5.3	高強度ビームの照射方法の評価	59
5.4	測定項目と測定手法	60
5.4.1	EMT の温度依存性	62
5.4.2	EMT のカソード劣化の評価試験	62
5.5	解析とその結果	64
5.5.1	CT によるビーム強度の測定	64
5.5.2	EMT の信号応答の評価方法	65
5.5.3	EMT の温度依存性	66
5.5.4	EMT のカソード劣化の評価試験	68
5.6	第 4 回電子ビーム照射試験のまとめ	75
第 6 章	結論	77
	謝辞	78
	参考文献	79

表目次

1.1	素粒子標準模型	8
4.1	デバイダー回路の抵抗、静電容量の設計値。	30
4.2	各ダイノード間の分配電圧の比	30
4.3	線形性の測定におけるビームと EMT のステータス	33
4.4	第 3 回電子ビーム照射試験に用いた電子ビーム	46
5.1	電子ビーム照射試験で用いた CT の仕様 [24]	53
5.2	今回の試験で用いた EMT の用途。	57
5.3	デバイダー回路の抵抗、静電容量の設計値。	58
5.4	今回の試験で用いたデバイダー回路の用途。	58
5.5	改造デバイダー回路の抵抗値と静電容量。	59
5.6	各ビーム強度における 1 パルス当たりの電荷量	59
5.7	OTR による高強度ビームプロファイル測定の結果	61
5.8	カソード劣化の評価測定における EMT とデバイダー回路の組み合わせ。	63
5.9	3 日目の測定において HV をかけて待機させていた組み合わせ	74
5.10	高強度ビームを照射した改造デバイダー回路の抵抗値と静電容量の変化。	75

目次

1.1	CCQE 反応	11
2.1	T2K 実験の概要図	12
2.2	J-PARC の加速器の構成	13
2.3	ニュートリノビームライン [7]	13
2.4	陽子ビームの時間構造	14
2.5	ニュートリノモニター棟の概観図	14
2.6	INGRID の概観図	15
2.7	ND280 の概観図	16
2.8	スーパーカミオカンデの概観図 [14]	17
2.9	スーパーカミオカンデの内部	17
2.10	π^+ の崩壊	18
2.11	π 崩壊における π の運動量と ν のエネルギーの関係 [16]	18
2.12	ニュートリノのエネルギー E_ν とニュートリノ振動確率の関係と異なる off-axis 角によるニュートリノフラックスの違い。スーパーカミオカンデにおける ν_μ の残存確率 (上段), ν_e の出現確率 (中段)、各 off-axis 角に置けるニュートリノフラックス (下段)[17]	19
2.13	T2K 実験の検出器の配置図 [17]	19
2.14	これまでに T2K 実験で炭素標的に照射された陽子数 (POT) とビーム強度の変遷。赤、紫の点はそれぞれニュートリノモードと反ニュートリノモードでの運転時のビーム強度、赤、紫のグラフはそれぞれニュートリノモードと反ニュートリノモードにおける POT の蓄積量、青のグラフ両モードの蓄積量の合計である。	20
2.15	T2K 実験のビーム強度のアップグレード計画 [21]	21
3.1	2 次ビームラインの横からの断面図 [21]	22
3.2	MUMON の構造 [22]	23
3.3	MUMON の写真。右側が上流の Si 検出器、左側が下流のイオンチェンバーである。	23
3.4	Si PiN フォトダイオード [23]	24
3.5	Si 検出器の原理 [24]	24
3.6	イオンチェンバー [26]	25
3.7	MUMON と地上システムの関係 [23]	26
3.8	Si 検出器の放射線耐性 [27]	27
3.9	イオンチェンバーの線形性 [27]	27
4.1	電子増倍管 (右) とデバイダー回路 (左)[28]	28
4.2	EMT の動作原理 [27]	29

4.3	デバイダー回路の構造 [23]	29
4.4	2021 年試験における設置された EMT(左) とその配置図 (右)[24]。写真のシャーシ (アルミニウムの箱) 内に EMT が取り付けられている。	31
4.5	2021 年の J-PARC での試験における EMT の信号波形 [24]。(c)2021A と (d)2021B には、他の EMT の 5 倍の amplifier がかかっている。	32
4.6	各ビーム強度における陽子ビームの POT 分布 [24]	33
4.7	各ビーム強度における EMT の信号収量 (yield) 分布 [24]	34
4.8	EMT の線形性の測定結果 [24]。横軸はビーム強度、縦軸は EMT の信号収量を照射陽子数 (POT) で規格化した値である。 点は測定データ、実線は一次関数でのフィッティング結果で矢印はフィッティングから $\pm 1\%$ の範囲 (residual) である。また、黒は 500V、赤は 450V の高電圧を印可した時の結果を表す。比較のため 450V のプロットは 500v, 510kW の値でスケール合わせをした。	35
4.9	2018 年における EMT(P5B) の安定性 [24]。横軸は日時、縦軸は信号収量を POT で規格化した値である。	36
4.10	2021 年における EMT(P5B) の安定性 [24]。横軸は日時、縦軸は信号収量を POT で規格化した値である。	37
4.11	EMT の治具の設置例。左の写真の 3 つのソケットにデバイダー回路のピンを挿し EMT を固定する。右の写真のように EMT の治具をアルミニウムの箱で覆う。	37
4.12	EMT の設置位置。それぞれの四角形 (緑、橙) は Si 検出器の位置を表しており、橙の四角形の位置に Si 検出器の治具の上に重ねて EMT を設置する。	38
4.13	ELPH の実験施設の全体図 [29]	39
4.14	ELPH での試験の実験に使用した場所付近の様子 [23]	39
4.15	第 1 回電子ビーム照射試験のセットアップ。[30]	40
4.16	第 1 回電子ビーム照射における放射線耐性の測定の結果。[30] 現ビーム強度 (500kW) における EMT と Si 検出器の信号応答の変化。横軸は照射日数、縦軸は信号応答の照射前後における比を表す。	41
4.17	第 1 回電子ビーム照射試験における CT の信号と比較した EMT の信号応答。J-PARC の現在 (500kW) と将来 (1.3MW) の運転強度相当をそれぞれ縦の線で示した。[31]	41
4.18	第 2 回電子ビーム照射試験のセットアップ。[30]	42
4.19	高強度ビームにおける 9 点照射。左図は Si 検出器の 9 点照射の例で図中の μ は各点の座標を表す。右図は左図の μ を 3.5mm、ビームサイズを 1.5mm としたときのビームの均一性を表す。[30]	43
4.20	第 2 回電子ビーム照射試験における EMT(赤) と Ref-Si(黒) の放射線照射量ごとの信号の劣化。[31] 横軸は現ビーム強度 500kW における照射日数、縦軸は各検出器の照射前後の比を表す。	43
4.21	第 2 回電子ビーム照射試験における新品の EMT の初期不安定性。[31] 横軸は現ビーム強度 500kW における照射日数、縦軸は各検出器の照射前後の比を表す。	44
4.22	第 3 回電子ビーム照射試験のセットアップ。[30] 下図において OTR は示されていないが CT 上流に設置した。	45
4.23	高強度ビームにおける 7 点照射。	46
4.24	高強度ビームにおける EMT の有効領域における相対的なビームフラックスの例。	47

4.25	第 3 回電子ビーム照射試験における放射線耐性試験の結果。[24] 横軸は上から順に、照射したビームの電荷量、J-PARC 500kW 運転に換算した日数、J-PARC 1.3MW 運転に換算した日数である	47
4.26	EMT の HV on(黒) と HV off(赤) の信号劣化の比較。[24] 横軸は上から順に、照射したビームの電荷量、J-PARC 500kW 運転に換算した日数、J-PARC 1.3MW 運転に換算した日数である。	48
4.27	放射線損傷の原因のための測定の概要。赤字の A、II は高強度ビームにより劣化させた。	49
4.28	EMT 本体とデバイダー回路の放射線照射による影響 [24]	49
4.29	第 3 回電子ビーム照射試験における初期不安定性試験の結果。[28] 縦軸は EMT の信号をビーム強度で規格化したものを表している。	50
4.30	EMT に LED を照射したときの信号の温度依存性 [28]。橙が温度上昇時であり、青が温度下降時の信号応答である。Si PiN フォトダイオードは 0.5% 以内で安定していた。	50
5.1	第 4 回電子ビーム照射試験のセットアップ。	54
5.2	電子ビーム照射試験で使用した CT[24]	55
5.3	電子ビーム照射試験で使用した Si array[33]	56
5.4	電子ビーム照射試験で使用した OTR。アルミ箔で生じた遷移放射光の後方放射を鏡で反射しカメラで読み取る。	57
5.5	デバイダー回路の構造 (再掲)[23]	58
5.6	第 4 回電子ビーム照射試験の高強度ビームの照射方法のイメージ図。赤線は高強度ビームの照射位置、青丸は EMT 全体 (直径 14.6mm)、実線は EMT のダイノード (一辺 8.8mm)、点線は 45° 回転させた時の EMT のダイノード、n は照射経路の段数を表す。	60
5.7	高強度ビームの照射方法のシュミレーションの例。左図はダイノードが傾きなく水平に取り付けられている場合の結果。右図はダイノードが水平から 20° 傾いた角度で取り付けられている場合の結果。	61
5.8	ダイノードの角度と照射効率および非一様性の関係。横軸はともにダイノードの角度である。縦軸は左図ではビームの照射効率、右図では照射電子数分布の標準偏差 (非一様性) である。	61
5.9	検出器のセットアップ [24]	62
5.10	EMT に設置した温度計。写真のように EMT の中央部に温度計の感温部がくるように取り付けた。	63
5.11	低強度ビーム調整の信号	64
5.12	低強度ビーム調整のための CT と mon-Si の関係	65
5.13	高強度ビームにおける CT の入力信号	66
5.14	ref-Si と EMT の信号。測定では ref-Si に 1/79.4 倍のアッテネーターがかけられていた。本図は 79.4 倍した補正後の信号波形である。	66
5.15	ref-Si と EMT の積分値の関係。	67
5.16	EMT の温度依存性の測定の結果。	67
5.17	EMT に LED を照射したときの信号の温度依存性 [28]。再掲。	68

5.18	EMT のカソード劣化の評価試験の結果 1。横軸は EMT のダイノードに照射された電荷量 (黒) とそれを J-PARC 将来強度 1.3MW で換算した日数 (赤)、縦軸は EMT の信号収量/ref-Si の信号収量である。	69
5.19	EMT のカソード劣化の評価試験の結果 2。横軸は EMT のダイノードに照射された電荷量 (黒) とそれを J-PARC 将来強度 1.3MW で換算した日数 (赤)、縦軸は EMT の信号収量/ref-Si の信号収量の照射前との比である。	70
5.20	Si-array による低強度ビームの中心と広がりの一ストリープロット。左図はビーム中心、右図はビームの広がりの一ストリープロットである。	71
5.21	シュミレーションによる EMT と ref-Si の照射効率の一ストリープロット。左図は赤が EMT の照射効率、青が ref-Si の照射効率の一ストリープロット、右図は EMT の照射効率/ref-Si の照射効率の一ストリープロットである。	72
5.22	照射効率による補正前後の信号収量の比較。左図は補正前、右図は補正後である。EMT とデバイダー回路の組み合わせは上から A2,A3,B0,B2,B3 である。また、橙の線は測定日の境を表している。	73

第 1 章

ニュートリノ物理

1.1 素粒子標準模型とニュートリノ

物質を構成する最小単位の粒子は素粒子と呼ばれ、素粒子標準模型によって記述されている。素粒子は表 1.1 のように物質を構成するフェルミオンと相互作用を媒介するボソンに分類される。フェルミオンにはクォークとレプトンが存在し、それぞれ電荷は等しいが質量が異なる 3 世代で構成されている。各世代間では電荷は等しいが質量が異なる。また、フェルミオンにはそれぞれ逆の電荷をもった反粒子が存在している。ボソンは強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用を媒介する 4 種のゲージ粒子と素粒子に質量を与えるヒッグス粒子から構成されている。

ニュートリノは電荷を持たない中性レプトンであり重力相互作用を除くと弱い相互作用のみに反応する。1930 年に W.Pauli に検出されにくい中性粒子として提唱され [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。1956 年には F.Reines と C.Cowan が原子炉からの反電子ニュートリノを水分子との相互作用により検出し、ニュートリノの存在が証明された [2]。また、電子 (e)、ミューオン (μ)、タウ (τ) が生成される荷電カレント反応 (1.1) では、それぞれ電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) が反応する。

表 1.1 素粒子標準模型

	フェルミオン			ボソン	
	第一世代	第二世代	第三世代	ゲージ粒子	スカラー粒子
クォーク	u	c	t	g	
	d	s	b	γ	H
レプトン	e^-	μ^-	τ^-	Z^0	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	W^\pm	

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

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動が、ニュートリノが時間発展とともにフレーバーを変える現象である。1962 年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一らによりニュートリノが質量を持ち、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る、時間発展とともにニュートリノのフレーバーは変化する

という理論を提唱した [3]。1998 年にスーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測でニュートリノ振動を確認し、ニュートリノが質量を持つことが証明された [4]。

ニュートリノの質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$)、フレーバー固有状態を $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) とし、フレーバー固有状態は質量固有状態の線形結合で表されるとする (1.2)。

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

ここで、 $U_{\alpha i}$ は Pontecorvo・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれる 3 行 3 列ユニタリー行列であり、以下のように表される。

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ 0 & 1 & 0 \\ s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量固有状態の混合角、 δ_{CP} は複素位相を表しており、 $\delta \neq 0, \pi$ の時、PMNS 行列は虚部を含み、CP 非対称を生むため δ_{CP} は CP 位相角とも呼ばれる。

1.2.1 ニュートリノ振動の定式化

以下では簡単のため、2 世代間振動の場合を考える。この時の混合角を $\theta_{\alpha\beta}$ とすると、フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle, |\nu_\beta\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_i\rangle, |\nu_j\rangle$ の線形結合で表せる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\alpha\beta} & \sin \theta_{\alpha\beta} \\ -\sin \theta_{\alpha\beta} & \cos \theta_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

ν_i のエネルギーと運動量、位置をそれぞれ $E_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{r}$ とすると、質量固有状態の時間発展は

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r})} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.6)$$

と表せる。ここでは自然単位系を用いている。よって、フレーバー固有状態の時間発展は以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\alpha\beta} & \sin \theta_{\alpha\beta} \\ -\sin \theta_{\alpha\beta} & \cos \theta_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r})} |\nu_i(0)\rangle \\ e^{-i(E_j t - \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{r})} |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

ここで、ニュートリノは質量 m_i は非常に小さく、光速に近い速度 $m_i \ll E_i$ で L だけ飛行したとすると、 $|\mathbf{p}| \approx E_i - \frac{m_i^2}{2E_i}$ 、 $L = t$ であるから、式 (1.7) は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\alpha\beta} & \sin \theta_{\alpha\beta} \\ -\sin \theta_{\alpha\beta} & \cos \theta_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i} L} |\nu_i(0)\rangle \\ e^{-i\frac{m_j^2}{2E_j} L} |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

よって、エネルギー 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 $P_{\alpha \rightarrow \beta}$ は

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{m_i^2 - m_j^2}{4E_\nu} L \right) \\ &= \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2]}{E_\nu [\text{GeV}]} L [\text{km}] \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる。ここで、 Δm^2 は質量二乗差を表し、 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ で定義される。また、距離 L だけ飛行した後 ν_α である確率 $P_{\alpha \rightarrow \alpha}$ は

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \alpha} &= 1 - P_{\alpha \rightarrow \beta} \\ &= 1 - \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{m_i^2 - m_j^2}{4E\nu} L \right) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{1.27\Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2]}{E\nu [\text{GeV}]} L [\text{km}] \right) \end{aligned} \quad (1.10)$$

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 L とエネルギー E の関数となる。

3世代間振動に対しても同様に計算が可能であり、 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。

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re} (U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \\ &\quad + 2 \sum_{i > j} \text{Im} (U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

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}^* に変えることで得ることができ、以下のように書ける。

$$\begin{aligned} P_{\bar{\alpha} \rightarrow \bar{\beta}} &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re} (U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \\ &\quad - 2 \sum_{i > j} \text{Im} (U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

式 (1.11) と式 (1.12) を比較すると PMNS 行列 U に含まれる δ_{CP} が $\delta_{\text{CP}} \neq 0, \pi$ であれば、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。

1.3 ニュートリノによる反応

ニュートリノは電荷を持っておらず電磁相互作用をしないため直接観測ができないため、ニュートリノと原子核と散乱によって生成される粒子を検出することで間接的に観測が可能である。ニュートリノと原子核の反応は大きく分けて、荷電カレント反応 (Charged Current(CC)) と中性カレント反応 (Neutral Current(NC)) の2種類がある。CC 反応は W^\pm ボソンが媒介する反応で、NC 反応は Z^0 が媒介する反応である。

ここでは、後述する T2K 実験でフレーバー識別に利用する荷電カレント反応について扱う。T2K 実験では約 0.6GeV のニュートリノビームが使用されている。このエネルギー領域では荷電カレント準弾性散乱反応 (Charged Current Quasi Elastic interaction(CCQE)) が支配的である。CCQE 反応はニュートリノが核子と準弾性散乱を起こす2体反応であり、その様子は以下のようなものである (図 1.1)。

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \quad (1.13)$$

$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow n + l^+ \quad (1.14)$$

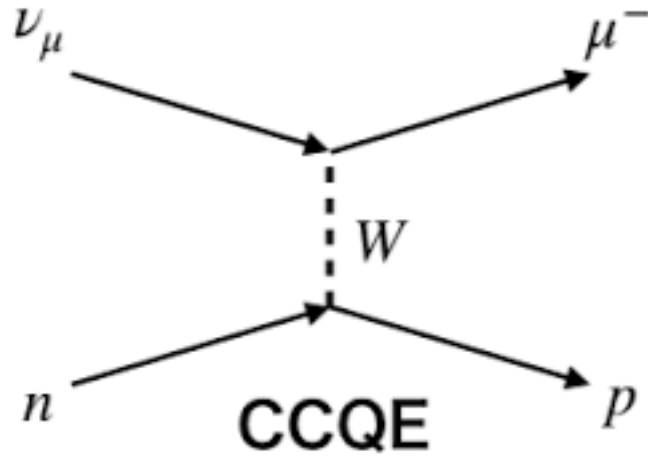


図 1.1 CCQE 反応

CCQE 反応は 2 体反応であるから、終状態の粒子の運動を用いて元のニュートリノエネルギーを再構成することが可能である。CCQE 反応を仮定することで、観測された反応由来の荷電レプトンの散乱角 θ_l と運動量 p_l 及びエネルギー E_l を用いてニュートリノエネルギー E_ν は式 1.15 のように求めることができる。

$$E_\nu = \frac{(m_N - E_b)E_l - \frac{m_l^2}{2}}{(m_N - E_b) - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (1.15)$$

ここで m_l, m_N はそれぞれ荷電レプトンと核子の質量、 E_b は束縛エネルギーと呼ばれ、核子を原子核内に束縛しているエネルギーである。振動確率はニュートリノのエネルギーに依存するため、振動パラメータの精密測定のためにもエネルギーの再構成は非常に重要である。

第 2 章

T2K 実験

2.1 実験の概要と目的

T2K(Tokai to Kamioka) 実験 [5] とは日本で行われている長基線ニュートリノ振動実験の一つである。茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (Japan proton accelerator research complex : J-PARC)[6] で生成されたニュートリノビームを構内の前置検出器と約 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にある水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデ (Super Kamiokande : SK) で検出しニュートリノ振動の測定を行っている (図 2.1)。T2K 実験のニュートリノビームは ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ を選択的に生成することができ、 ν_e 出現事象と ν_μ 消失事象の精密測定を行う。 ν_e 出現事象 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) から混合角 θ_{13} 、 ν_μ 消失事象 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) から混合角 θ_{23} と質量二乗差 Δm_{23}^2 といった振動パラメータの測定が可能である。また、 ν_μ モードと $\bar{\nu}_\mu$ モードとで比較することで CP 位相角 δ_{CP} の測定が可能であり、 $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ を示すことでレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見につながる。



図 2.1 T2K 実験の概要図

2.2 大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ニュートリノビームライン

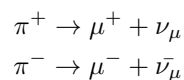
J-PARC の陽子加速器は、上流から線形加速器 LINAC (Linear accelerator)、シンクロトロン RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、シンクロトロン MR (Main Ring) の 3 つで構成されている (図 2.2)。LINAC により 400MeV まで加速された陽子ビームは、さらに RCS で 3GeV、MR で 30GeV まで加速される。



図 2.2 J-PARC の加速器の構成

その後、MR から取り出された陽子ビームはニュートリノビームラインの一次ビームラインで複合磁場型超電導磁石 (Superconducting Function Magnet : SCFM) により、SK の方向に曲げられ 2 次ビームラインへ送られる (図 2.3)。また、陽子ビームは図 2.4 のように 8 バンチの内部構造を持つ 2.48 秒毎のスパイルで構成されている。

2 次ビームラインに入った陽子ビームはグラファイト標的に照射され、ハドロン反応を起こし π 中間子などの多数の粒子を生成する。生成された π 中間子は 3 台の電磁ホーンにより収束され、下流の崩壊領域 (Decay Volume) で以下の崩壊を起こしニュートリノビームが生成される。



電磁ホーンの極性を変化させ、収束させる π 中間子の電荷を変えることでミューニュートリノビームモードと反ミューニュートリノビームモードの選択が可能となる。

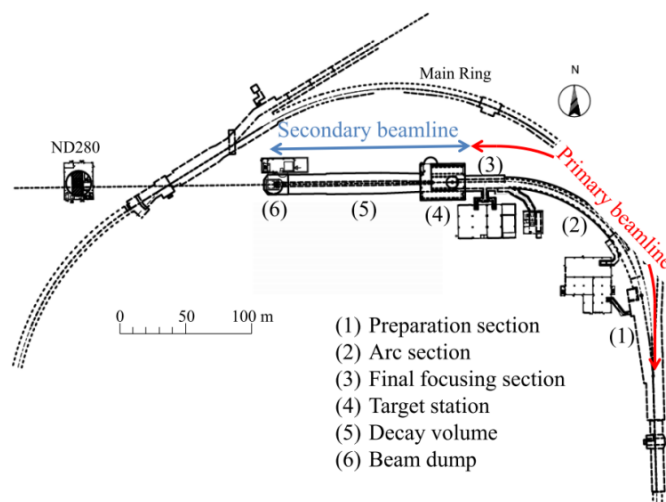


図 2.3 ニュートリノビームライン [7]

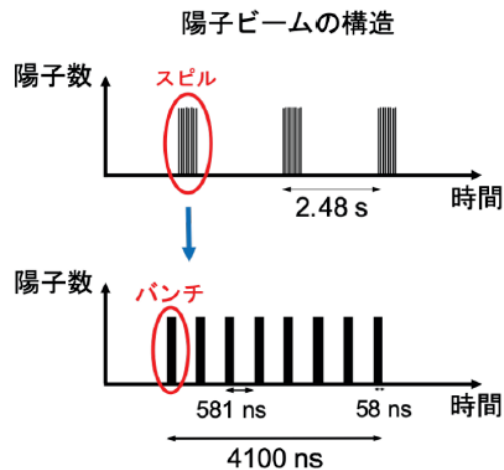


図 2.4 陽子ビームの時間構造

2.3 前置検出器

T2K 実験では生成直後のニュートリノを測定する前置検出器としてビーム軸上に設置された INGRID(on-axis 検出器) と π 中間子の平均崩壊地点とスーパーカミオカンデを結ぶ直線上に位置する ND280(off-axis 検出器)、B2 フロアの検出器群 (WAGASCI,NINJA) の3つで構成されている。これらの検出器はグラファイト標的から 280m 下流に設置されている。前置検出器のあるニュートリノモニター棟の概観図を示す (図 2.5)。

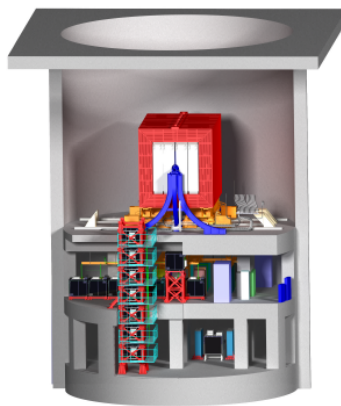


図 2.5 ニュートリノモニター棟の概観図

2.3.1 INGRID

INGRID はニュートリノ軸上に設置された on-axis 検出器であり、ニュートリノを直接観測するビームモニターである。ニュートリノの反応断面積は非常に小さいが、高強度ニュートリノビーム発生点付近に位置しているため観測が可能である。ただし、ビームの方向を求めるには約 1 日程度の統計量をためる必要がある。

INGRID は鉛直方向、水平方向それぞれ 7 台のモジュールを配置した十字型モジュールとその両肩

に1台ずつ設置されたモジュールの計16モジュールで構成された検出器である(図2.6)。各モジュールは1.24m×1.24m×0.95mの大きさで、鉄層が9層とシンチレータ層が11層のサンドウィッチ構造となっている。鉄層でニュートリノは鉄ターゲット中の中性子と荷電カレント反応(式1.1)を起こし、生成されたミュオンをシンチレータ層で検出する。荷電カレント反応でミュオンとともに生成される陽子はミュオンに比べ質量が大きく運動エネルギーも小さいため、鉄層内ですぐに静止する。シンチレータ層はシンチレータ棒24本ずつが90°回転した2層構造のトラッキングプレートとなっている。シンチレータ棒に荷電粒子が通過することでシンチレーション光が発生し、中心を通る波長変換ファイバーと光検出器 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) により信号を読み出す。各モジュールで検出した信号からニュートリノ反応数を算出し、ニュートリノビームの中心を決定する。

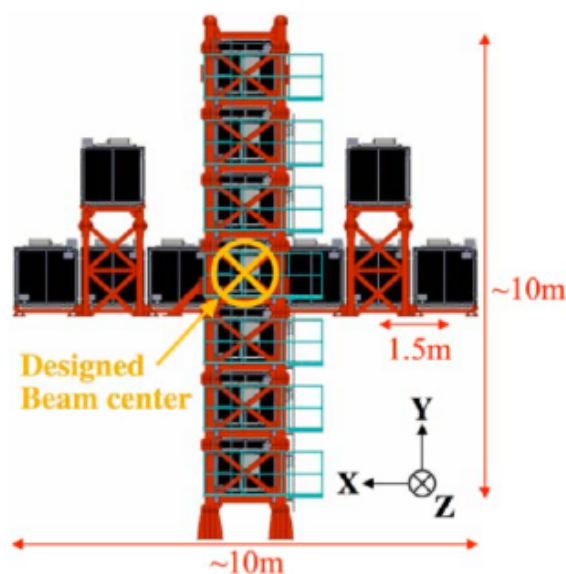


図 2.6 INGRID の概観図

2.3.2 ND280

ND280 は炭素標的から 280m 下流に位置し、ニュートリノビーム軸から 2.5° だけずれた軸上に設置された off-axis 検出器であり、スーパーカミオカンデ方向のニュートリノを測定している。図 2.7 に ND280 の概観図を示す。スーパーカミオカンデに向かうニュートリノの数やエネルギー分布、反応断面積を測定しフラックス予測の計算に利用する。ND280 は複数の検出器から成る複合検出器で、その構成は以下のようなものである。

- UA1 Magnet
0.2T の磁場で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。
- π^0 detector (P0D) [8]
水の核子との中性カレント反応 $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + N + \pi^0 + X$ が起こり、生成された π^0 の反応断面積を測定する。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サンドウィッチ構造である。
- Time Projection Chamber (TPC) [9]
他検出器とニュートリノの相互作用で生じた荷電粒子の電荷や運動量 dE/dx などを測定し

粒子の識別を行う。

- Fine Grained Detector (FGD) [10]
ビーム上流と下流の2ヶ所に設置されている。上流はプラスチックシンチレータで構成されたトラッキングプレート30層が重なったモジュールで荷電粒子の飛跡を検出する。下流はトラッキングプレート層と水層のサンドウィッチ構造のモジュールでシンチレータと水の散乱断面積比を測定する。
- Electromagnetic Calorimeter (ECal) [11]
P0D、TPC、FGDを囲うように設置されており、鉛層とシンチレータ層のサンドウィッチ構造の電磁カロリメータである。内部の検出器から飛び出してきた γ 線などを測定し、測定したエネルギーを補完して全事象の再構成を行う。
- Side Muon Range Detector (SMRD) [12]
ニュートリノ反応において、大角度で散乱したミューオンの方向と運動量を測定する。

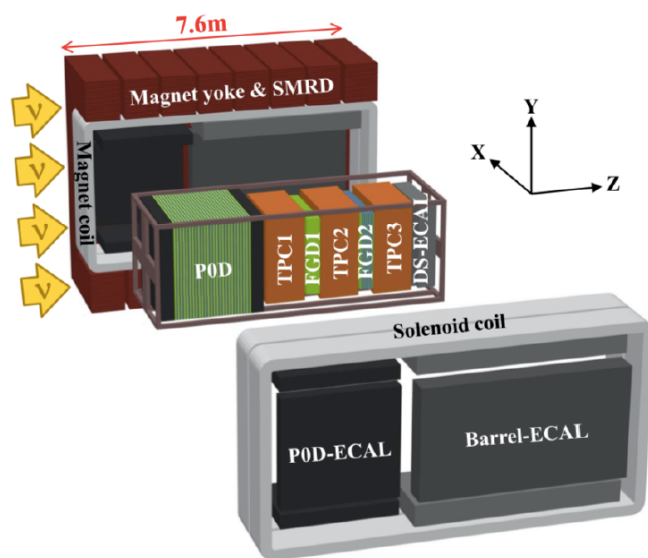


図 2.7 ND280 の概観図

2.4 後置検出器：スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ [13] は J-PARC から約 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山地下 1000m に位置するニュートリノ検出器である (図 2.8、図 2.9)。T2K 実験ではニュートリノ振動の後置検出器の役割を担っている。直径 39.3m、高さ 41.4m の円筒型の水タンクで、中には 50kt の超純水で満たされており世界最大級の水チェレンコフ検出器である。水タンクは内側の Inner Detector (ID) と外側の Outer Detector (OD) の 2 層構造となっている。ID は 50cm 口径の光電子増倍管 (PMT) 11129 個取り付けられており、ニュートリノと水が反応して生成されるミューオンまたは電子のチェレンコフ光を検出する。OD は 20cm 口径の光電子増倍管 (PMT) 1885 個取り付けられており、バックグラウンドとなる宇宙線ミューオンをほぼ 100% 取り除くことができる。スーパーカミオカンデはミューオン、電子それぞれのチェレンコフ光からニュートリノ反応点、エネルギー、方向等の情報を求めることができ、T2K 実験では ν_μ 事象と ν_e 事象を観測することでニュートリノ振動の振動パラメータを測定する。

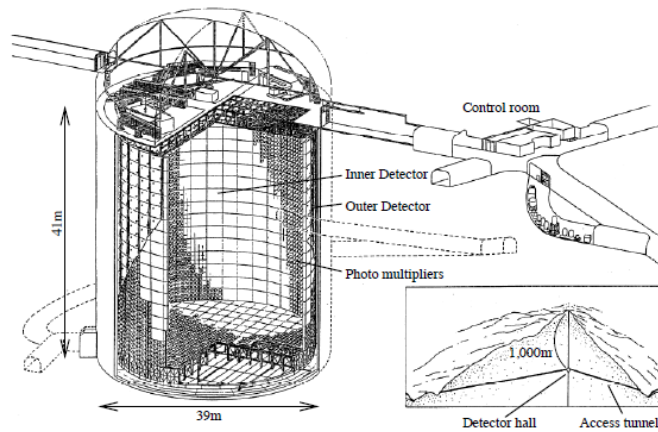


図 2.8 スーパーカミオカンデの概観図 [14]

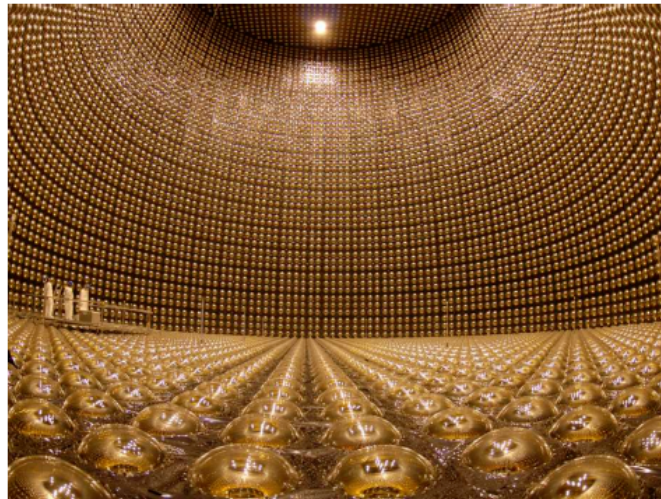


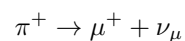
図 2.9 スーパーカミオカンデの内部

2.5 off-axis 法

off-axis 法とは、ビームの中心軸 (π^\pm の収束軸) を検出器の方向から数度ずらすことにより、鋭いエネルギー分布を持ったビームを得る方法である。ビーム軸からずらす角度を off-axis 角という。この方法は、1995 年に BNL-E889 グループにより発表された [15]。

2.5.1 off-axis 法の原理

off-axis 法の原理を述べるに際して、以下の反応について考える。



崩壊により生成された ν_μ のエネルギーを E_ν とする。図 2.10 のように、 π^+ の質量、エネルギー、運動量をそれぞれ m_π, E_π, p_π 、ミューオンの m_μ, ν_μ と π^+ の進行方向のなす角を θ とすると、 E_ν は次

式のように表される。

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

式 (2.1) より、 $\theta = 0^\circ$ (on-axis)、 $\theta = 2^\circ$ (off-axis 2° :OA 2°)、 $\theta = 2.5^\circ$ (OA 2.5°)、 $\theta = 3^\circ$ (OA 3°) の時の E_ν と p_π の関係は図 2.11 のようになる。図 2.11 より、 $\theta = 0^\circ$ の時は E_ν は p_π に比例しているが、 $\theta = 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ$ の時は、 E_ν は p_π の依存性が低くなっているのが分かる。このように π^\pm の運動量分布が広くても、収束軸からずれた方向であればニュートリノのエネルギー分布は狭い範囲に絞ることができる。

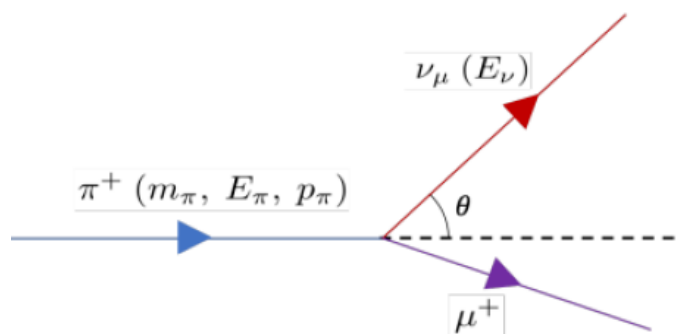


図 2.10 π^+ の崩壊

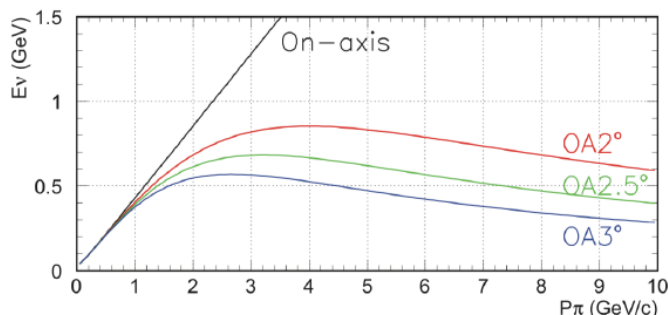


図 2.11 π 崩壊における π の運動量と ν のエネルギーの関係 [16]

2.5.2 T2K 実験における off-axis 法の利用

T2K 実験ではこの off-axis 法を採用している。図 2.12 は T2K 実験におけるニュートリノ振動確率とそれぞれの off-axis 角におけるニュートリノフラックスの分布を示している。ニュートリノ振動確率はニュートリノのエネルギー E_ν に依存するため、ニュートリノ振動確率が最大になるエネルギーをニュートリノフラックス分布の最大値に持つような off-axis 角を選べばよい。そのため、T2K 実験では図 2.13 のように off-axis 角 θ を 2.5° に設定している。 $\theta = 2.5^\circ$ におけるニュートリノビームのエネルギーピークは約 0.7GeV である。

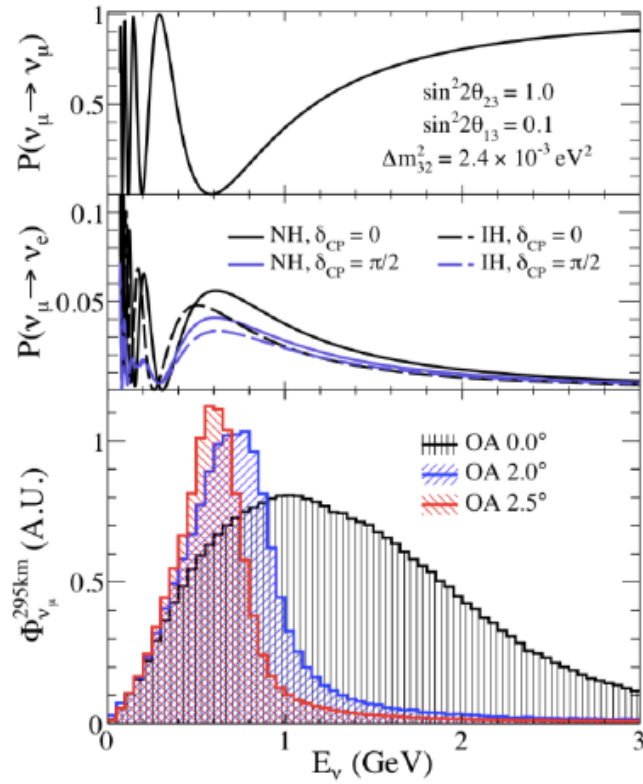


図 2.12 ニュートリノのエネルギー E_ν とニュートリノ振動確率の関係と異なる off-axis 角によるニュートリノフラックスの違い。スーパーカミオカンデにおける ν_μ の残存確率 (上段)、 ν_e の出現確率 (中段)、各 off-axis 角に置くニュートリノフラックス (下段)[17]

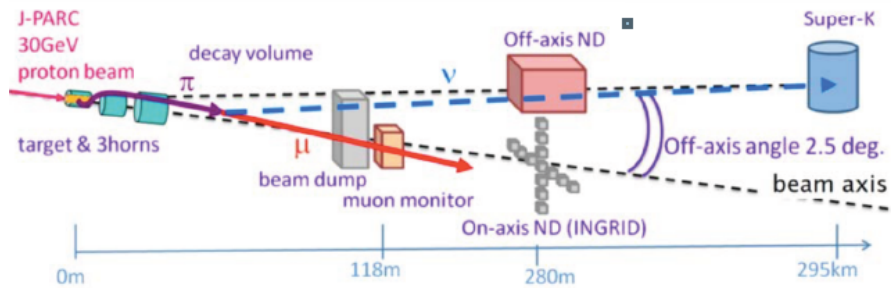


図 2.13 T2K 実験の検出器の配置図 [17]

2.6 これまでの結果

T2K 実験は 2010 年 1 月に稼働が始まり、2021 年 4 月までに 3.82×10^{21} 個の陽子を用いた測定でデータを蓄積してきた。図 2.14 は T2K 実験でこれまでに照射された陽子数 (POT) とビーム強度の変遷である。これまでビーム強度の強くすることで、統計量の蓄積を加速させてきた。現在までに約 515kW での安定的な運転が確認されている。全陽子数のうち、56.8% (2.17×10^{21} POT) がニュートリノモード、43.2% (1.65×10^{21} POT) が反ニュートリノモードでの測定である。

T2K 実験の最初の目的は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の検証であったが、2011 年にその兆候が確認された。2012 年には中国の Daya Bay 実験が原子炉からの ν_e の損失から混合角 θ_{13} の存在が明かされ [18]、2013 年には T2K 実験により世界で初めて $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の存在が確立された [19][20]。2014 年から反ニュートリノモードでの測定も開始され、現在までに CP 対称性の破れの兆候も捉えている。

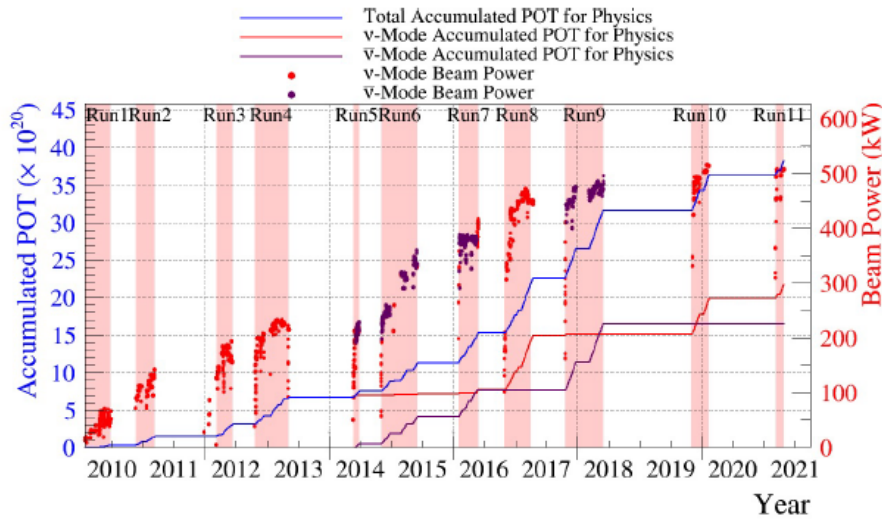


図 2.14 これまでに T2K 実験で炭素標的に照射された陽子数 (POT) とビーム強度の変遷。赤、紫の点はそれぞれニュートリノモードと反ニュートリノモードでの運転時のビーム強度、赤、紫のグラフはそれぞれニュートリノモードと反ニュートリノモードにおける POT の蓄積量、青のグラフは両モードの蓄積量の合計である。

2.7 将来計画

今後の T2K 実験の課題は、CP 対称性の破れの発見と CP 位相角 δ_{CP} の精密測定である。実験の精度向上のために系統誤差や統計誤差を削減することが必要である。系統誤差は新しい検出器の建設や新しい解析方法の確立によって削減する計画である。統計誤差はビームの大強度化とハイパーカミオカンデ計画のビーム強度と検出器の両面からアップグレードを計画している。

ハイパーカミオカンデは 2027 年稼働開始予定である。場所はスーパーカミオカンデから 8km 南の地下 650m で、T2K 実験のセットアップを変えることなく off-axis 角 2.5° のニュートリノビームを観測する。ハイパーカミオカンデはスーパーカミオカンデの約 8.4 倍の有効体積を持ち、統計量も 8.4 倍となる。ビームの大強度化はハイパーカミオカンデ計画に合わせて更なる統計量の増加が狙いである。図 2.15 は T2K 実験のビーム強度のアップグレードの計画を示したものである。現在、ビーム強度

は 500kW であり、1 パルス当たりの陽子数が 2.58×10^{14} protons/cm²/pulse, 陽子ビームサイクルが 2.48s である。2023 年春には陽子ビームサイクル 1.3s で 750kW のビーム強度での運転が計画されている。さらに、2027 年のハイパーカミオカンデ稼働開始までに陽子数 3.14×10^{14} protons/cm²/pulse、陽子ビームサイクル 1.16s で 1.3MW のビーム強度の達成を目指している。また、電磁ホーンの電流を 250kA から 320kA に変更も計画されている。

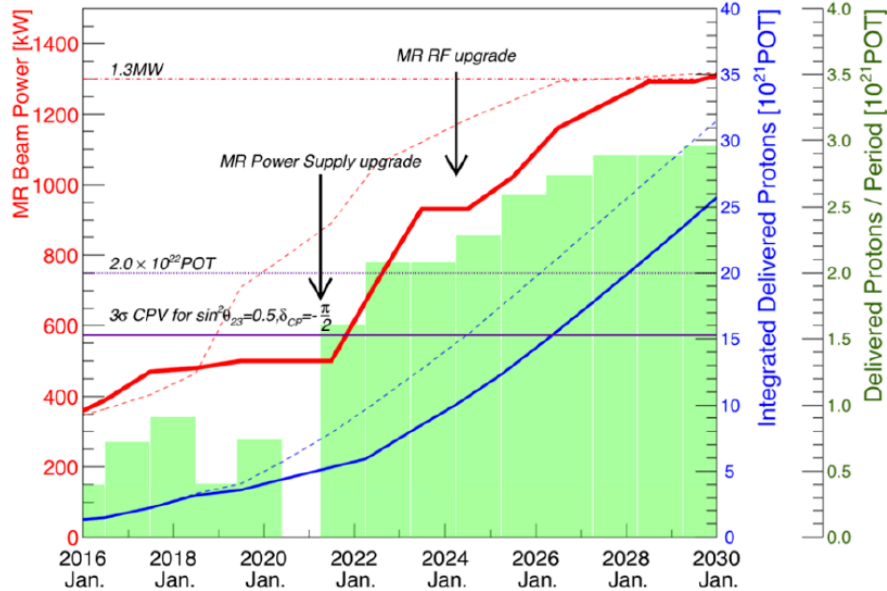


図 2.15 T2K 実験のビーム強度のアップグレード計画 [21]

第3章

ミュオンモニター (MUMON)

3.1 MUMON の概要と目的

MUMON は、ニュートリノと同時に生成されるミュオンの方向、強度を測定することでニュートリノビームの方向を間接的に監視するための検出器である。MUMON はビームダンプのすぐ下流炭素標的から 118m、地下 18.5m に設置されている (図 3.1)。ビームダンプのさらに下流に位置するため、MUMON が測定するのはビームダンプを通過してきた 5GeV 以上のミュオンである。大強度の荷電粒子を検出するため 1 バンチ毎に十分な統計量が得られ、T2K 実験で唯一リアルタイムでニュートリノビームの方向を測定することができる。

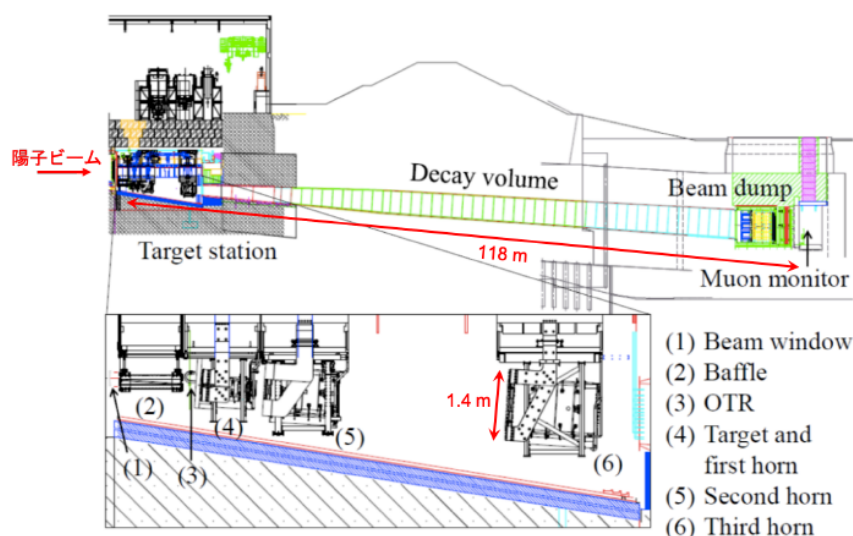


図 3.1 2次ビームラインの横からの断面図 [21]

3.2 MUMON の構造と検出器

現在の MUMON では上流側にシリコン (Si) 検出器、下流側にイオンチェンバー (IC) を使用しており、それぞれ 25cm 間隔で 7×7 の 49 チャンネルで $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ の領域をカバーしている。2種類の検出器を使用することでクロスチェックや片方が故障した際のバックアップとして機能している。

図 3.2、図 3.3 はそれぞれ MUMON の全体像と内部の写真である。また、MUMON の検出器が設置されている場所はミュオンピットと呼ばれる。

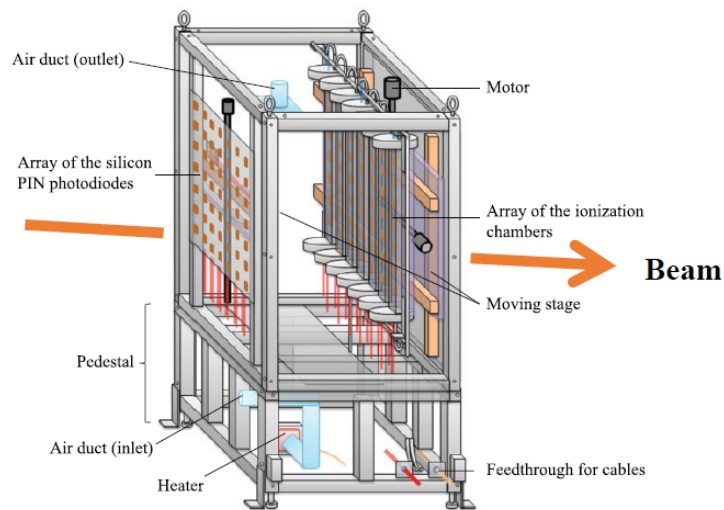


図 3.2 MUMON の構造 [22]

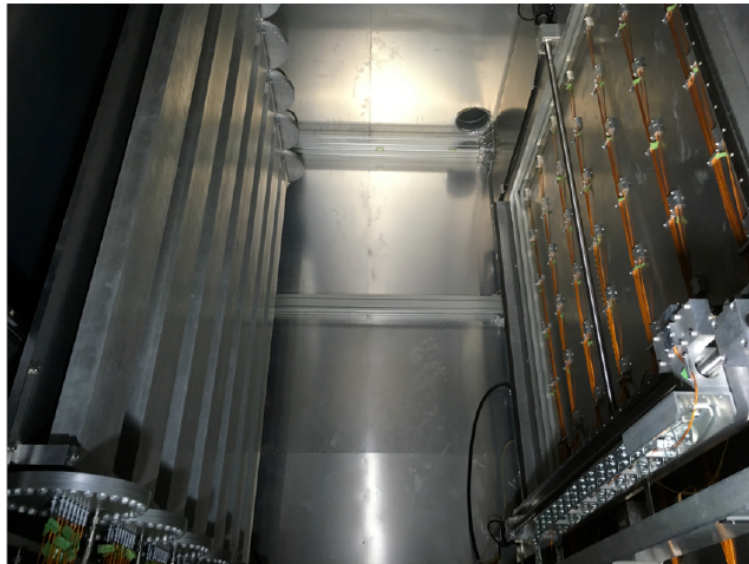


図 3.3 MUMON の写真。右側が上流の Si 検出器、左側が下流のイオンチェンバーである。

3.2.1 MUMON に求められる性能

MUMON に求められる性能としては以下のとおりである。

- ニュートリノビームの強度を 3 % 以内の精度で安定的に測定できること。
- ニュートリノビームの方向を 0.25mrad 以内の精度で測定できること。これは MUMON でのミュオンビームのプロファイル測定において 3cm 以内の精度に相当する。
- バンチ毎に方向と強度が測定できること。
- 放射線耐性が高いこと。運転中は検出器の交換ができないため、少なくとも 1 回の運転期間 (約 100 日) で信号劣化が見られないこと。

現在のビーム強度 (500kW) における運転では、Si 検出器とイオンチェンバーはこれらの要請を満たしている。

3.2.2 Si 検出器

Si 検出器には浜松ホトニクス社の大面積 Si PiN フォトダイオード (S3590-08) を使用している。図 3.4 はその写真である。Si PiN フォトダイオードの有感面積は 10mm × 10mm である。MUMON では PPEK 製の土台に固定しアルミニウムのケースに覆った状態で、25cm 間隔で 7 × 7 個設置している。

図 3.5 は Si PiN フォトダイオードによるミューオンの検出原理の模式図である。Si の有感領域に荷電粒子が通過すると、電磁相互作用により Si 中の電子が励起され入射粒子の検出器中でのエネルギー損失に比例した数だけ電子正孔対が生成される。測定時は Si 検出器に高電圧がかけられており、それにより電子が加速され信号として検出できる。事前に行われた電子ビーム照射試験 [25] 等により、Si PiN フォトダイオードは放射線耐性が低く長期間ビームに照射されると信号が劣化することが分かっている。そのため、T2K 実験のランごとに、半数を新しいものに交換して運用している。

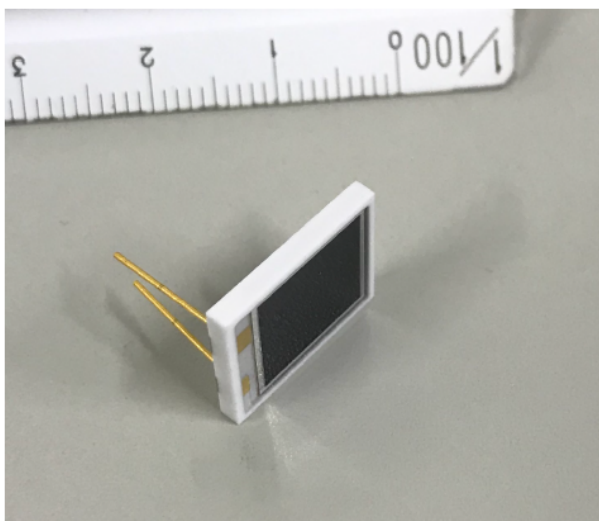


図 3.4 Si PiN フォトダイオード [23]

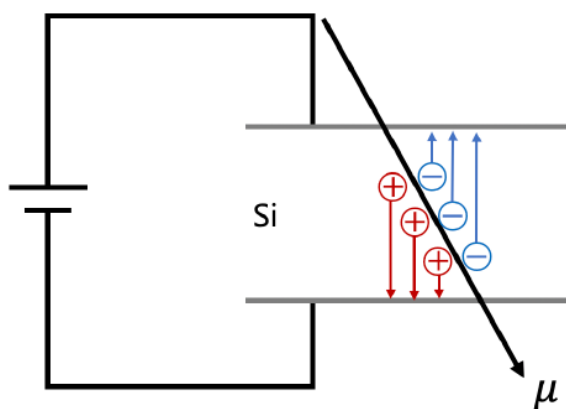


図 3.5 Si 検出器の原理 [24]

3.2.3 イオンチェンバー

MUMON には平行板型のイオンチェンバーを使用している。図 3.6 のように 1 本のイオンチェンバーに 25cm で 7 個センサーが並べられている。MUMON ではこのイオンチェンバーを 7 本並べて合計 49 個のセンサーを設置している。センサーは 2 枚のセラミックプレート (100mm × 100mm) を 3mm 間隔で平行に並べた構造で、1 枚に信号電極 (75mm × 75mm) もう 1 枚には 200V の高電圧を印可する電極 (93mm × 93mm) が取り付けられている。イオンチェンバー内にはガスが充填されており、ミュオンが通過するとガスが電離する。セラミックプレート間は信号電極が取り付けられている 75mm × 75mm の領域に高電圧による電場が生じているため、この体積中で発生したイオンが加速され信号として検出される。充填するガスはビーム強度が 2.3×10^{13} proton/bunch 以下であれば Ar(98%)+N₂(2%) の混合ガスを、それ以上のビーム強度であれば He(99%)+N₂(1%) の混合ガスを用いる。これは He ガスが Ar ガスに比べ信号が約 1/10 になるため、このような使い分けを行っている。N₂ は応答を速くする目的で充填している。

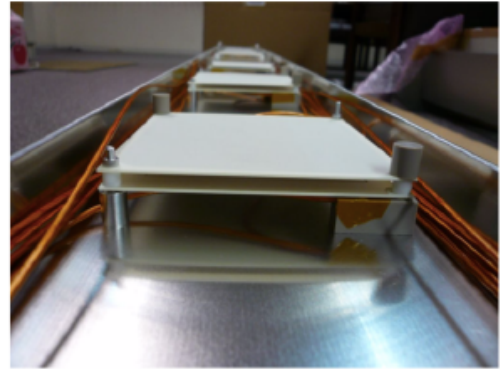


図 3.6 イオンチェンバー [26]

3.2.4 データの読み出しシステム

MUMON では、地下のミュオンピットと地上のミュオンモニター棟 (ミュオンハット) を約 70m の同軸ケーブルで接続し、HV の印可や信号の伝送を行っている (図 3.7)。波形記録装置 (FADC) はサンプリング周波数が 65MHz、ダイナミックレンジが 2V、分解能が 12bit である。FADC のゲインは Si 検出器には 1 倍、イオンチェンバーには 5 倍である。

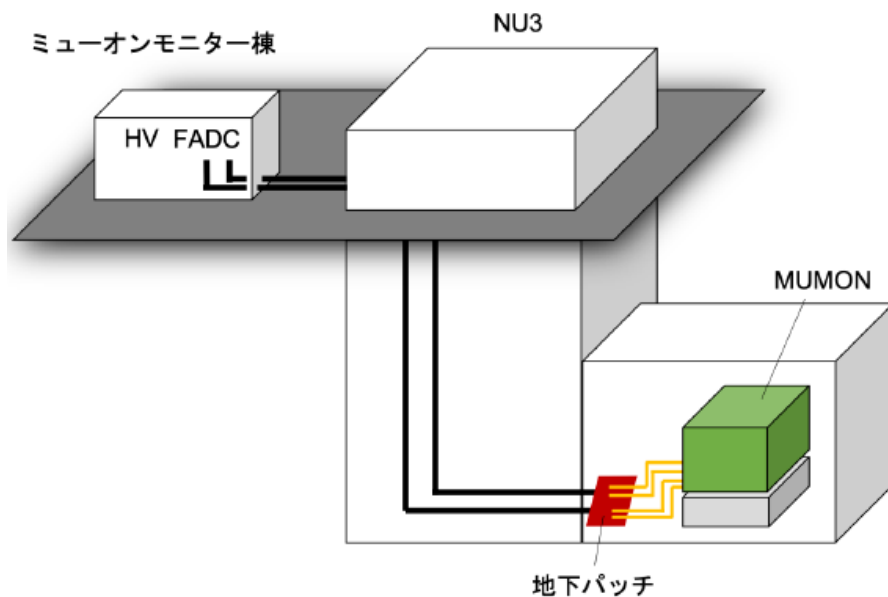


図 3.7 MUMON と地上システムの関係 [23]

3.3 MUMON のアップデート計画

前章で述べたように、T2K 実験はハイパーカミオカンデ計画とビーム大強度化計画が進められており、2027 年にはビーム強度が現在の 500kW から 1.3MW に引き上げられる。ビーム増強後は 1 バンチ当たりの陽子数が増えるため、MUMON における 1 バンチ当たりのミュオンフラックスが $3.6 \times 10^6 \text{muons/cm}^2/\text{bunch}$ から $4.7 \times 10^6 \text{muons/cm}^2/\text{bunch}$ の 1.3 倍になる。また、陽子ビームサイクルが 2.48s から 1.16s にアップグレードされることにより 1 日当たりのミュオンフラックスは $1.0 \times 10^{12} \text{muons/cm}^2/\text{day}$ から $2.8 \times 10^{12} \text{muons/cm}^2/\text{day}$ の 2.8 倍となる [23]。現行の MUMON に検出器は現在のビーム強度では問題なく運用できているが、将来強度のビームでは以下の問題が指摘されている。

図 3.8 は T2K 実験における Si 検出器の信号劣化を示したものである。横軸は T2K 実験の 5.5 ヶ月の測定期間、縦軸は 49 ヶ所ある測定点における Si 検出器とイオンチェンバーの信号比の平均である。また、この時のビーム強度は 460kW で、イオンチェンバーの信号は期間内で $\pm 0.2\%$ 以内で安定であった。したがって、この約 1.2% の信号の減少は Si 検出器の放射線損傷による信号劣化が原因といえる。T2K 実験のこれまでの測定においては 100 日程度の運転ごとに Si 検出器の半数を交換するという運用を行っていたが、将来のビーム強度においては Si 検出器の放射線損傷が速まるため、この運用は困難である (1 ヶ月程度での交換が必要となる)。

図 3.9 はイオンチェンバーのビーム強度に対する応答である。横軸は炭素標的に照射された陽子数、縦軸は陽子数で規格化したイオンチェンバーの信号である。図から読み取れるように、ビーム強度 400kW に相当する $25 \times 10^{12} \text{protons/bunch}$ 以上の強度で信号の低下が確認された。これは空間電荷効果による影響である。

これらの問題を解決するため、高強度ビームでも長期間運用できる新しい検出器の開発を進めている。

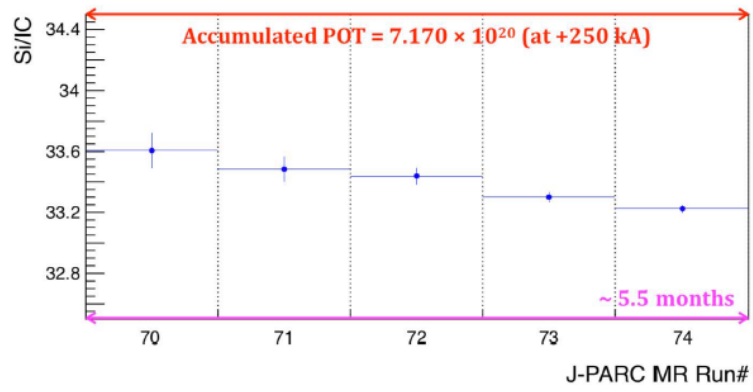


図 3.8 Si 検出器の放射線耐性 [27]

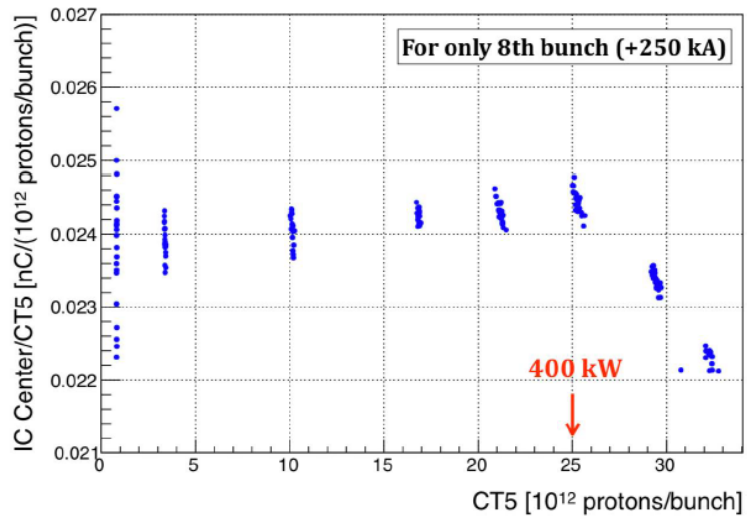


図 3.9 イオンチェンバーの線形性 [27]

第 4 章

電子増倍管 (Electron Multiplier Tube : EMT)

MUMON はニュートリノと同時に生成されるミュオンを測定することで、ニュートリノビームのリアルタイムモニタリングが可能な検出器である。しかし、前章で述べたように J-PARC のビーム大強度化に伴い、現行の検出器での問題点が露わになった。そのため MUMON に用いる新検出器の開発が進められており、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 J-PARC で行われたミュオンビームによる測定について述べる。

4.1 EMT の概要

電子増倍管 (EMT) は光電子増倍管 (PMT) の光電面をアルミ蒸着に変更した構造である (図 4.1)。通常の PMT では二次電子の放出率向上のため、光電面素材にアルカリ金属やアンチモンが使用されているが、EMT では放射線耐性を高めるために光電面にアルミ蒸着を行っている。MUMON での測定対象は大強度のミュオンビームであり、光電面による二次電子放出率を上げなくても十分な信号が得られる。本研究で用いる EMT は浜松ホトニクス社の PMT(R9880U-110) を元に製作されている。

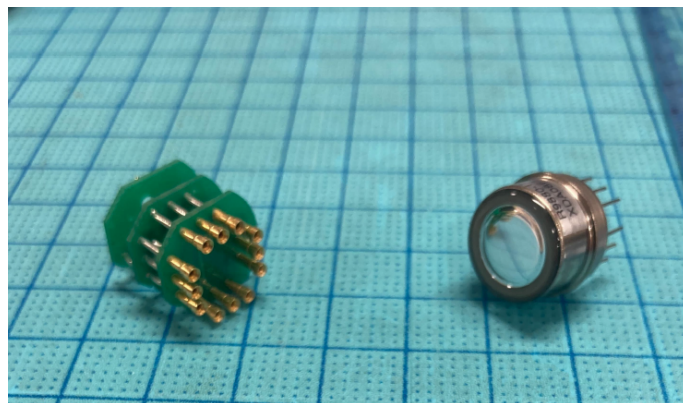


図 4.1 電子増倍管 (右) とデバイダー回路 (左)[28]

EMT の動作原理は荷電粒子が EMT を通過する際に、EMT 内部の複数のダイノードのいずれかで電磁相互作用により二次電子を放出し、その二次電子をダイノード間の高電圧で増幅し信号として検出する (図 4.2)。

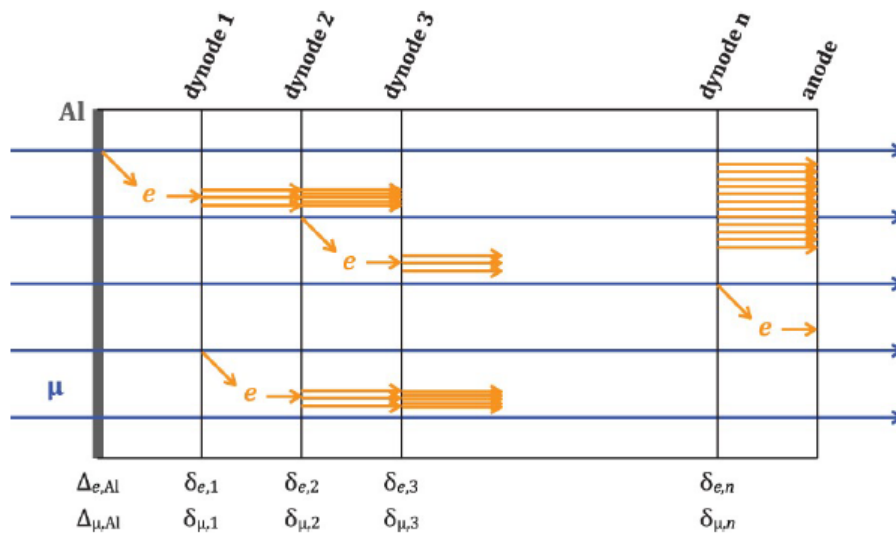


図 4.2 EMT の動作原理 [27]

EMT を用いる利点は、放射線耐性の高さと応答の速さである。EMT や PMT といった二次電子の放出を利用した検出器は、半導体である Si 検出器より放射線耐性が高いと考えられており、高放射線環境下で広く活用されている。また、Si 検出器やイオンチェンバーより信号応答が速く、ビームのバンチ毎の測定に適している。

4.2 デバイダー回路の概要

EMT のダイノードの形状はメタルチャンネル型であり、10 段構造となっている。そのため、接続するデバイダー回路は図 4.3 のように 11 個の抵抗 $R_1 \sim R_{11}$ と 5 個のコンデンサ $C_1 \sim C_5$ で構成されている。表 4.1 にそれぞれの抵抗値と静電容量を記す。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。印可電圧の最大値は $-500V$ でダイノード間の分配電圧比は表 4.2 の関係になっている。浜松ホトニクス社の PMT で使用されるデバイダー回路には、本来ポリブチレンテレフタレート (PBT) やポリアセテート (POM) 製の絶縁カバーがされているが放射線の影響を受ける可能性があるため図 4.1 のように回路をむき出しの状態で使用する。

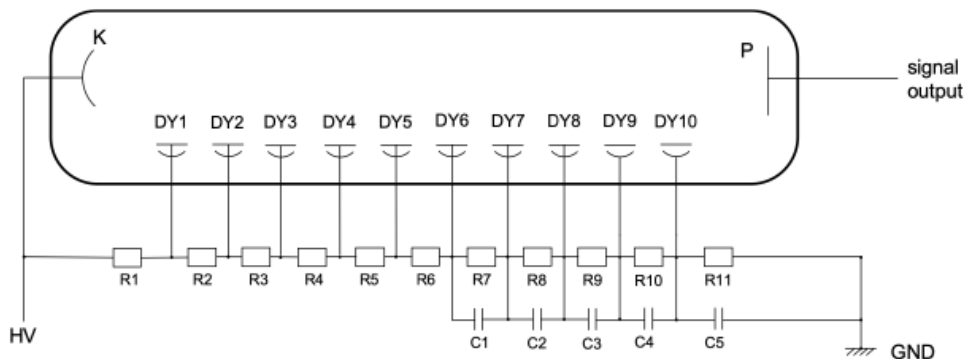


図 4.3 デバイダー回路の構造 [23]

表 4.1 デバイダー回路の抵抗、静電容量の設計値。

抵抗	k Ω	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(500V)

表 4.2 各ダイノード間の分配電圧の比

	分配電圧比
K - DY1	1.3
DY1 - DY2	1.3
DY2 - DY3	1.0
DY3 - DY4	1.0
DY4 - DY5	1.0
DY5 - DY6	1.0
DY6 - DY7	1.0
DY7 - DY8	1.0
DY8 - DY9	1.3
DY9 - DY10	3.3
DY10 - GRD	0.5

4.3 EMT に要求される性能

EMT を MUMON における新検出器として使用するにあたり、以下の要件を満たす必要がある。

- ビーム強度に対する信号応答の線形性が十分保たれていること (0 ~ 1.3MW の範囲で ±3% 以内)
- 放射線耐性が十分高いこと (1.3MW のビーム強度で年間 100 日の運用において信号劣化が 3% 以下)

以上の要件の検証及び EMT の特性の理解を目的に、本研究では J-PARC でのミュオンビームでの測定や電子ビームを用いた照射試験を行った。

4.4 J-PARC におけるミュオンビームでの測定

2018 年、2021 年の T2K 実験のニュートリノビーム運転時に、実際のミュオンビームによる測定が行われた。また、2023 年 4 月からの T2K 運転時にも EMT の試験測定が計画されている。本節ではこれまでの J-PARC で行った EMT の試験の概要と 2021 年試験における結果、2023 年 4 月の T2K 運転時における計画について述べる。

4.4.1 これまでの J-PARC での試験

2018 年、2021 年の試験は P5A,P5B,2021A,2021B,2021C と名付けられた 5 個の EMT を用いて行われた。2018 年の試験では 2 個の EMT(P5A,P5B)、2021 年の試験では新たに 3 個の EMT(2021A,2021B,2021C) を追加し合計 5 個の EMT が使用された。両試験ともに EMT を MUMON 最下流の壁の外側に設置し測定が行われた (図 4.4)。

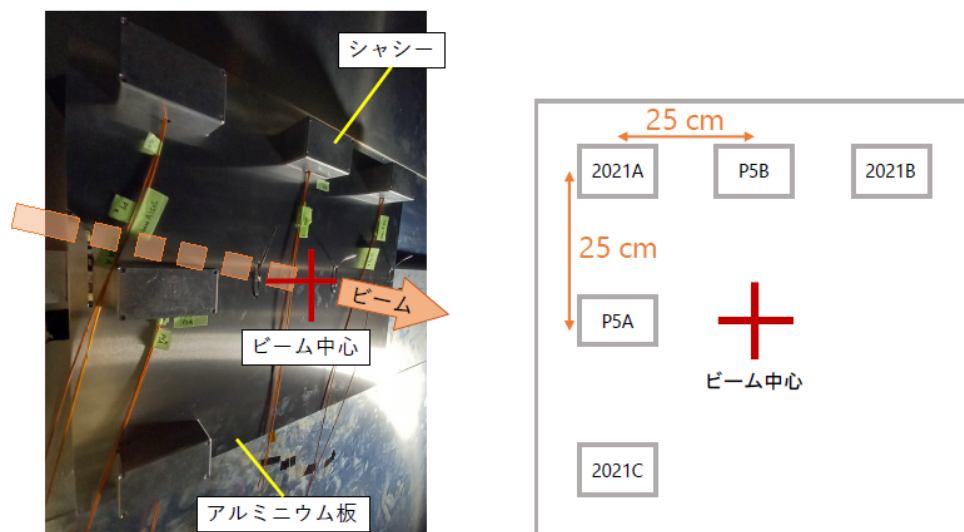
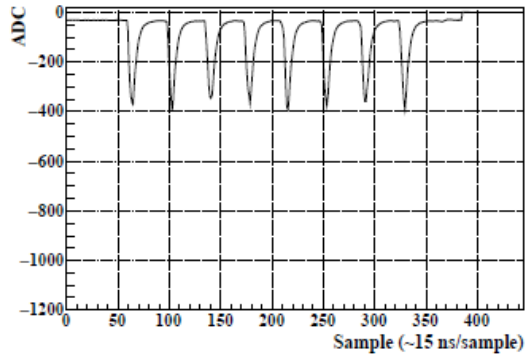


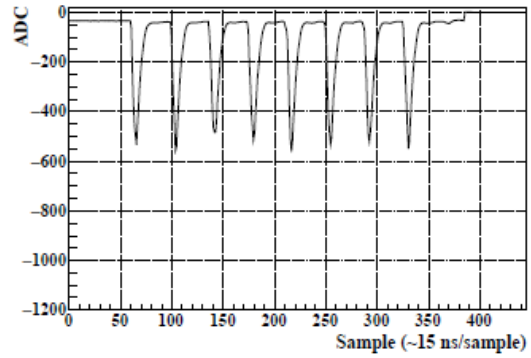
図 4.4 2021 年試験における設置された EMT(左)とその配置図(右)[24]。写真のシャシー(アルミニウムの箱)内に EMT が取り付けられている。

2021年試験における測定結果

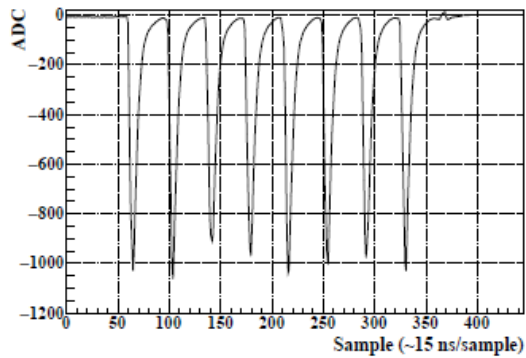
2021年試験ではビームモニターの応答の線形性の測定と信号の安定性の試験が行われた。図4.5は2021年試験において得られた EMT の信号波形である。



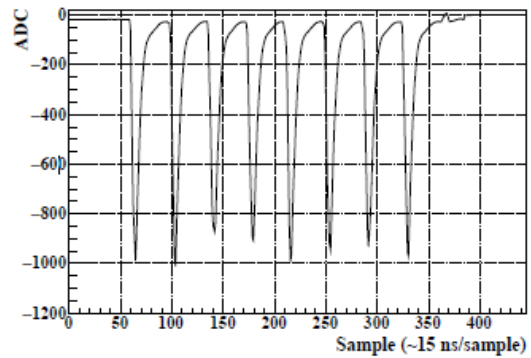
(a) P5A



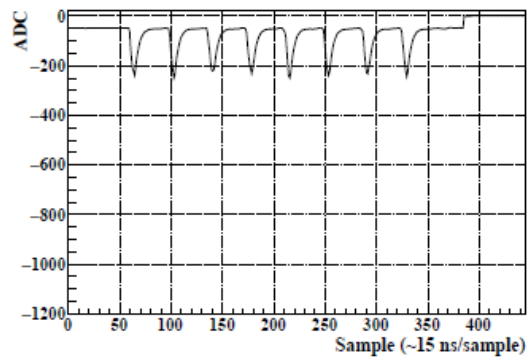
(b) P5B



(c) 2021A



(d) 2021B



(e) 2021C

図4.5 2021年のJ-PARCでの試験における EMT の信号波形 [24]。(c)2021A と (d)2021B には、他の EMT の 5 倍の amplifier がかかっている。

線形性の測定

線形性の試験は2021年3月19日と4月26日の2日間行われ、それぞれの測定におけるビームと EMT のステータスは表 4.3 の通りであった。線形性の比較のため、両日において EMT にかける高電圧 (HV) の値を変更して行った。図 4.6 は各ビーム強度における POT 分布である。ここで、POT(Proton on Target) は炭素標的に照射された陽子数を表す量である。また、図 4.7 はそれぞれの EMT について、各ビーム強度における信号収量の分布である。信号収量は、EMT の信号波形をベースラインを基準に積分した値であり、EMT の出力電荷量に比例した値である。

EMT の線形性は、信号収量を陽子ビームの POT で規格化した値で評価を行った。図 4.8 は線形性の測定の結果 (ビーム強度と EMT の信号収量/照射電子数 (POT) の関係) である。図中の実線は一次関数 $y = ax + b$ でのフィッティング結果であり、 a は POT を基準とした比例関係からのずれを表す (EMT の応答が POT に比例する場合、 $a = 0$ となる)。線形性を表す一次関数からの逸脱 (residual) は、全てのデータ点において 1% 以内に収まっており、EMT が T2K 実験の MUMON 検出器としての要件を満たすことが確認された。

表 4.3 線形性の測定におけるビームと EMT のステータス

測定日	3月19日	4月26日
Beam PowerkW	100,200,365,510	33,62,220,400,510
Horn CurrentkA	+250	+250
Shots	50	50
EMT HV	500	450

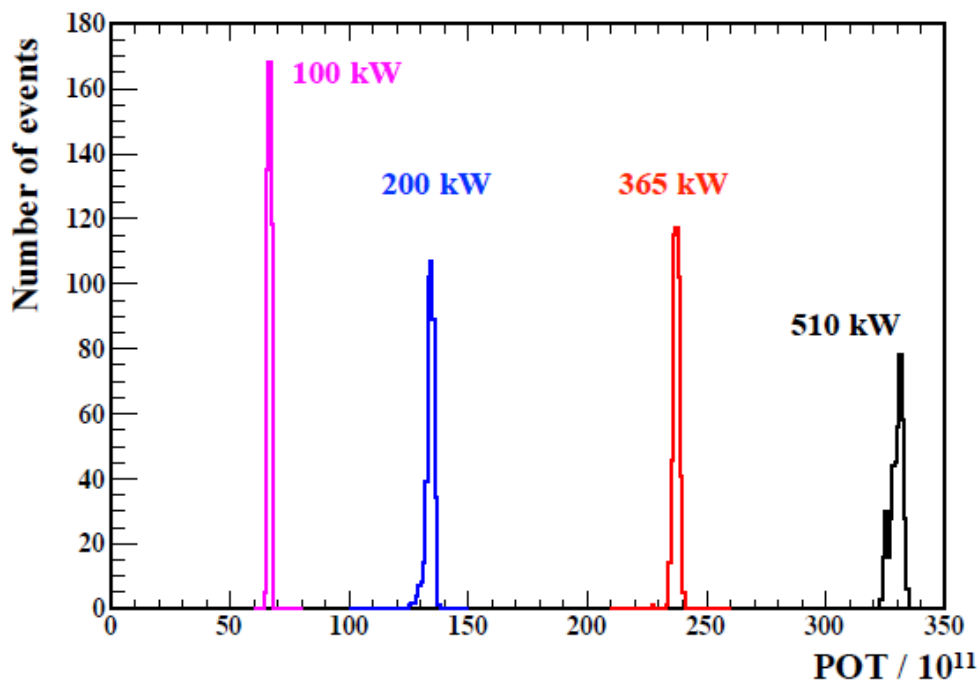
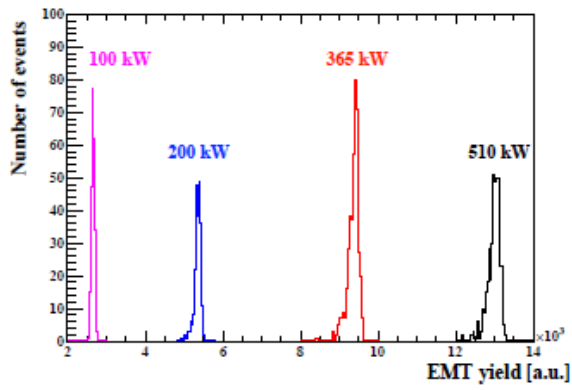
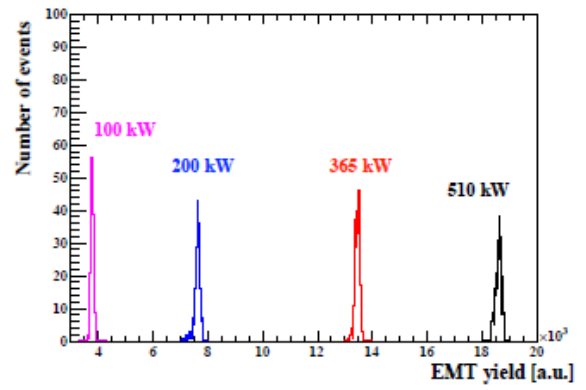


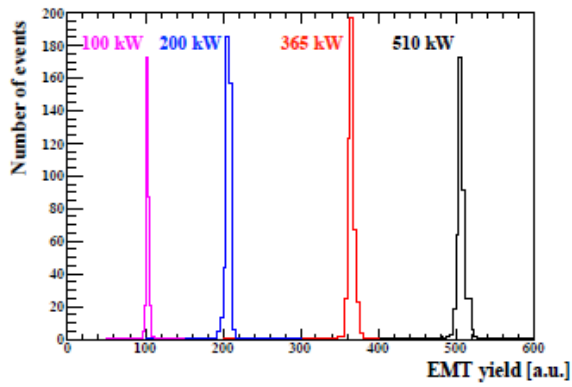
図 4.6 各ビーム強度における陽子ビームの POT 分布 [24]



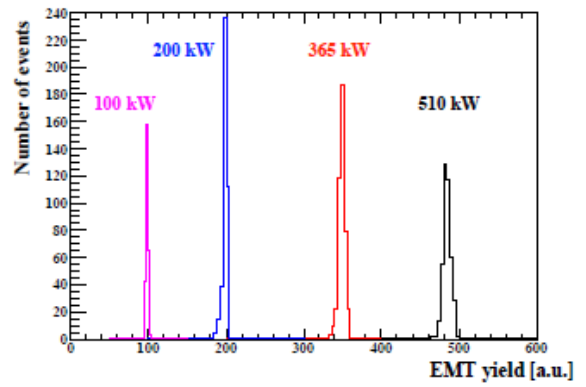
(a) P5A



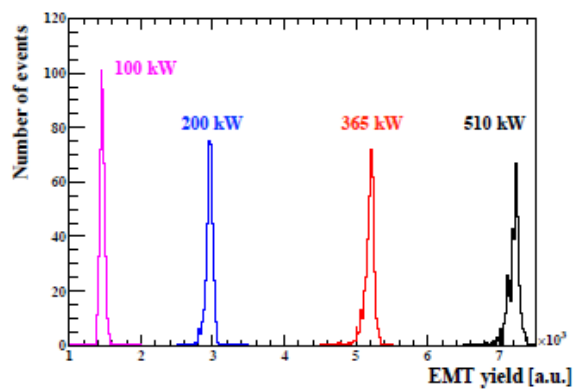
(b) P5B



(c) 2021A

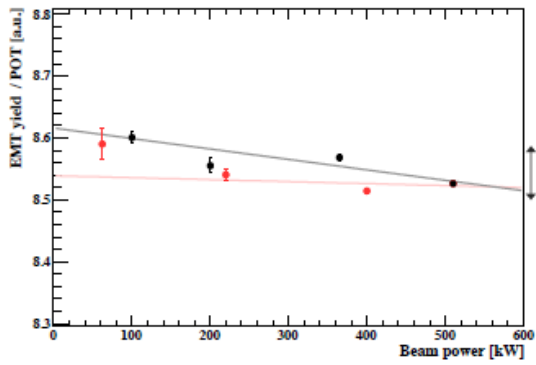


(d) 2021B

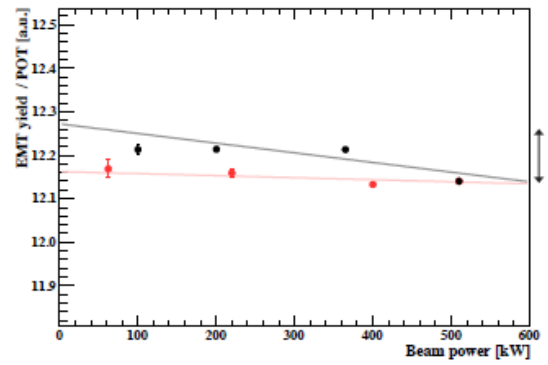


(e) 2021C

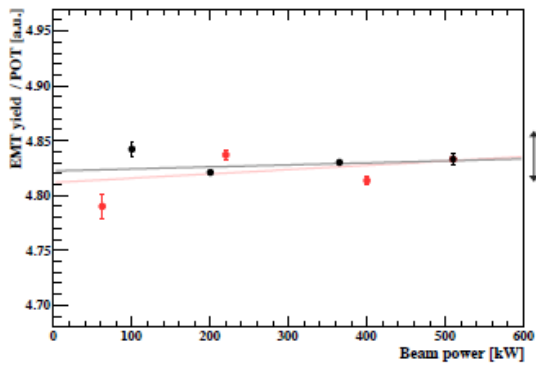
図 4.7 各ビーム強度における EMT の信号収量 (yield) 分布 [24]



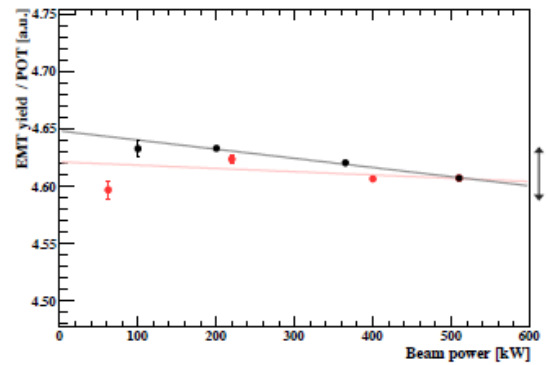
(a) P5A



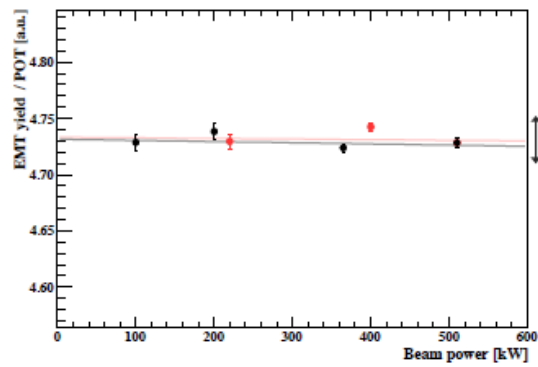
(b) P5B



(c) 2021A



(d) 2021B



(e) 2021C

図 4.8 EMT の線形性の測定結果 [24]。横軸はビーム強度、縦軸は EMT の信号収量を照射陽子数 (POT) で規格化した値である。

点は測定データ、実線は一次関数でのフィッティング結果で矢印はフィッティングから $\pm 1\%$ の範囲 (residual) である。また、黒は 500V、赤は 450V の高電圧を印可した時の結果を表す。比較のため 450V のプロットは 500V、510kW の値でスケール合わせをした。

安定性の測定

図 4.9、図 4.10 はそれぞれ 2018 年、2021 年の EMT の信号安定性の測定の結果である。2018 年の試験 (図 4.9) においては、初めの 1 ヶ月で約 15% の信号減少が見られその後安定した。4 月 12 日頃に値が大きく変わっているのは、EMT への印可電圧を変更したためである。2021 年の試験 (図 4.10) においては、初めの 1 週間で約 2.4% の信号減少が見られ、この挙動は 2018 年の試験でも確認されていた。このビーム休止後やビーム開始直後で EMT の信号が減少し、その後安定するという傾向を初期不安定性と呼ぶ。また、2021 年試験において運転再開後の信号収量が 4% 程度上がっている。この現象の原因は以下の 2 つが考えられる。

- 一度 HV を off にし再度 on にしたこと
使用した HV の目盛りは 1V 刻みで 0.5V 程度の変動があると考えられ、HV の 0.5V の変動は 1V の信号収量の変化に対応する。
- ビーム休止期間を経て EMT の状態が元の状態に戻ったこと
先行研究においても、休止期間を設けると信号収量が回復し再開後に再び低下することが確認されている。

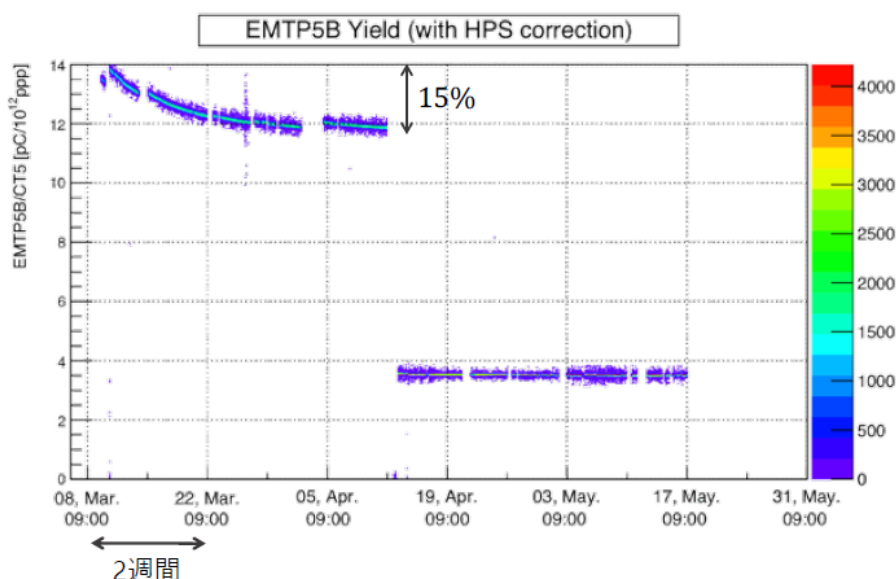


図 4.9 2018 年における EMT(P5B) の安定性 [24]。横軸は日時、縦軸は信号収量を POT で規格化した値である。

4.4.2 2023 J-PARC での試験計画

2023 年 4 月から T2K 実験ではニュートリノビームの運転が行われる。それに合わせ MUMON グループでは EMT のミュオンビームでの試験測定を計画している。測定内容は先行研究 (2018 年、2021 年) 同様に線形性の測定と安定性の測定である。ここからはセットアップについて述べる。

今回使用する EMT は新しく購入した 7 個で、設置場所を先行研究の場所から変更する。これは事前に行われた LED の照射測定において EMT の信号の温度依存性が見られたためである [28]。前回までの設置場所は温度管理されている enclosure の外壁であり、温度計が設置されておらず温度依存性の影響が懸念される。そのため温度管理されている enclosure 内に移動し図 4.11 のように Si 検出器のすぐ

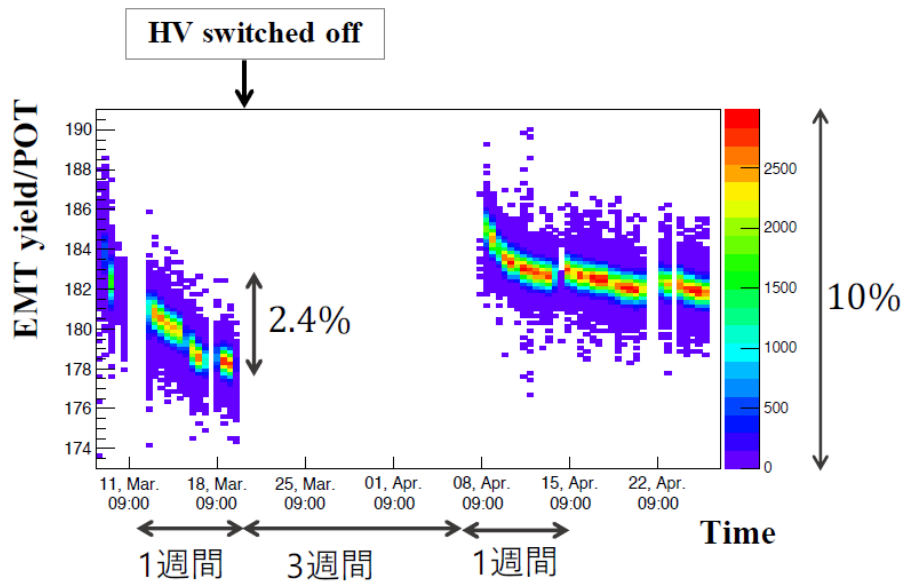


図 4.10 2021 年における EMT(P5B) の安定性 [24]。横軸は日時、縦軸は信号収量を POT で規格化した値である。

下流側に重ねて設置する。EMT を設置するにあたり新しく治具の開発を行い、将来的に放射線耐性の低い Si 検出器と入れ替えて EMT の本格導入に対応できるような設計にした。また、7 個の EMT の設置位置であるが 7×7 個ある Si 検出器の真ん中横 1 列に設置する (図 4.12)。

enclosure 内の温度管理をより正確にするため、温度計を enclosure 内の 2 ヶ所と enclosure 外壁の 1 ヶ所の合計 3 ヶ所に追加設置した。

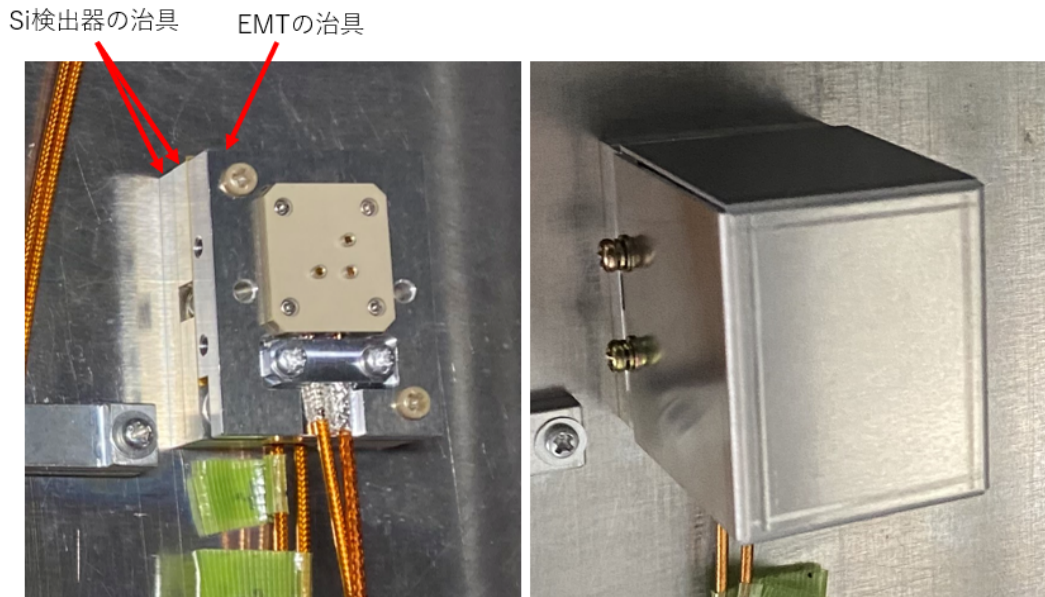


図 4.11 EMT の治具の設置例。左の写真の 3 つのソケットにデバイダー回路のピンを挿し EMT を固定する。右の写真のように EMT の治具をアルミニウムの箱で覆う。

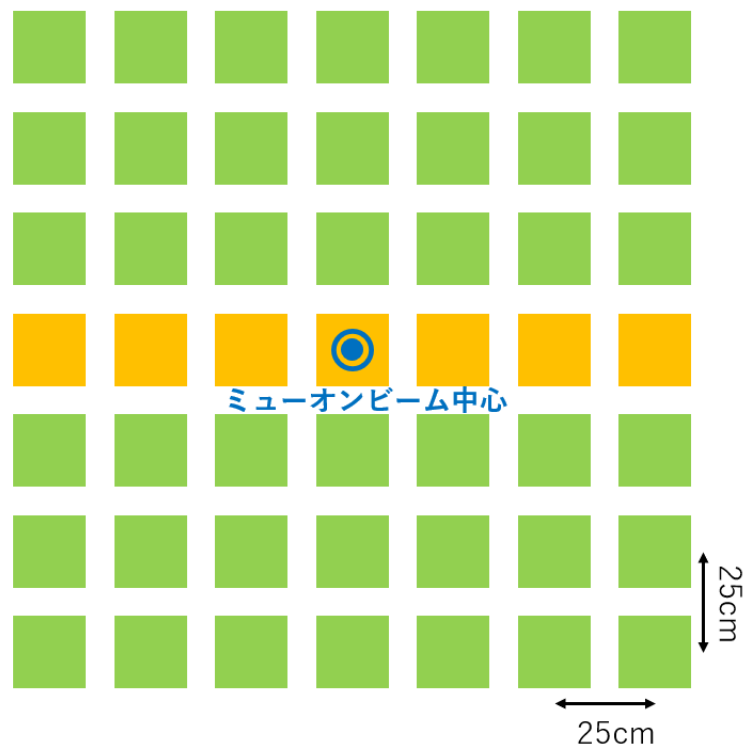


図 4.12 EMT の設置位置。それぞれの四角形 (緑、橙) は Si 検出器の位置を表しており、橙の四角形の位置に Si 検出器の治具の上に重ねて EMT を設置する。

4.5 ELPH での電子ビーム照射試験

EMT の放射線耐性と信号の安定性について調べるため、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) の本体室のシンクロトロン入射用線形加速器を用いて電子ビームの照射試験を行った。これまでに 4 回のビームテストを行っており、時期は以下のようなものである。

- 第 1 回：2019 年 11 月
- 第 2 回：2020 年 11 月
- 第 3 回：2021 年 10 月
- 第 4 回：2022 年 11 月

この節では第 1~3 回の電子ビーム照射試験の概要および結果について述べる。また、本論文の主題は第 4 回の電子ビーム照射試験についてであり、5 章で述べる。

4.5.1 ELPH

図 4.13 は ELPH の実験施設の全体図である。図中の実験室は全て地下に存在する。電子ビーム照射試験で用いたのは、本体室のシンクロトロン入射線形加速器である。この加速器は最大エネルギー 90MeV、最大周期 7Hz の電子ビームを生成することができる。図 4.14 は実験に使用した場所付近の写真である。図中のビーム出口とビームダンプ間の約 30cm の場所にセットアップを組み電子ビーム照射試験を行った。

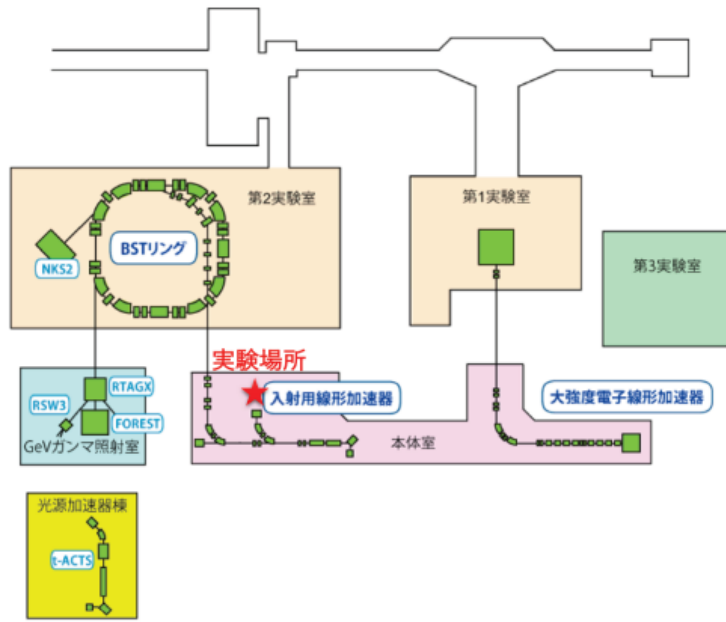


図 4.13 ELPH の実験施設の全体図 [29]

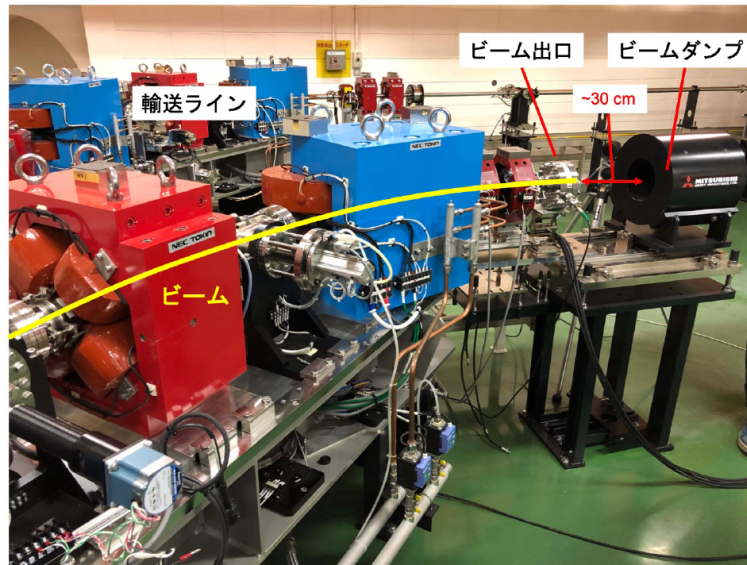


図 4.14 ELPH での試験の実験に使用した場所付近の様子 [23]

4.5.2 2019 第 1 回電子ビーム照射試験

2019 年 11 月に EMT の第 1 回電子ビーム照射試験が行われた。この試験での目的は

- EMT の放射線耐性の測定
- EMT の信号の線形応答性の測定

である。

セットアップ

セットアップは図 4.15 のようにした。最上流にはビーム電流測定のための CT 検出器 (5.2.2 項参照) が設置されている。その下流には EMT の信号応答を比較するための Si 検出器 (Ref-Si) が設置されている。最下流には EMT と Si array 検出器 (5.2.2 項参照) が設置されており、可動ステージによりビーム上の検出器を入れ替えることができるようになっている。Si array は定期的に EMT の代わりにビーム上に入れられ、低強度ビームのプロファイル測定を行う。

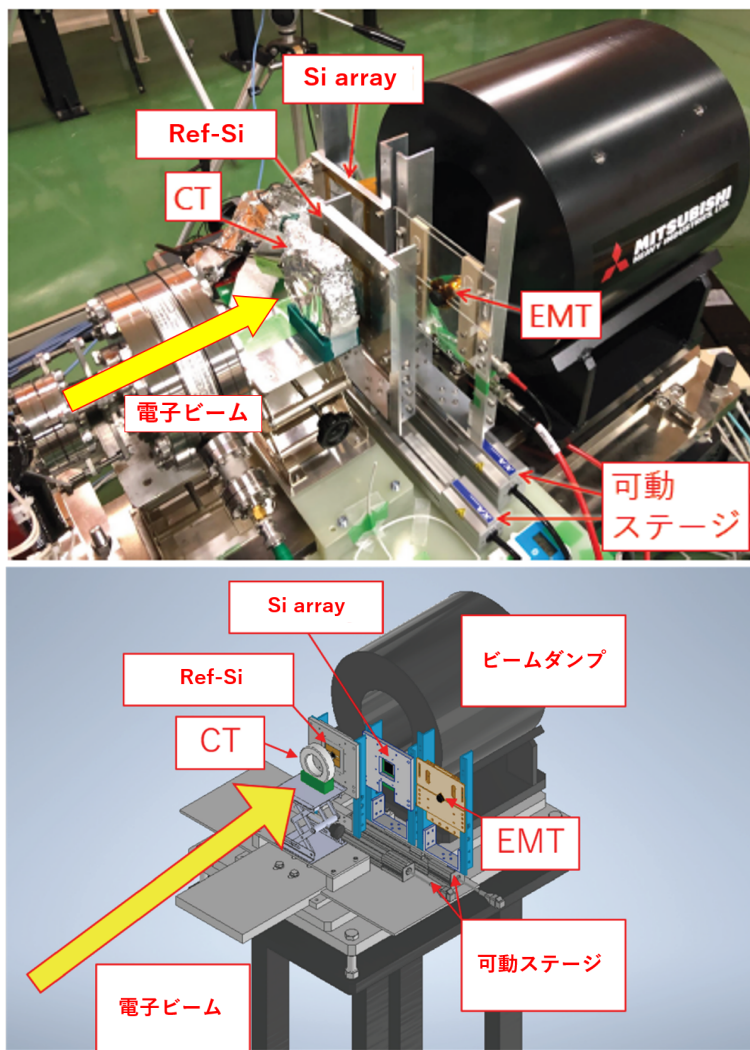


図 4.15 第 1 回電子ビーム照射試験のセットアップ。[30]

放射線耐性の測定

本測定では CT、Ref-Si、EMT をビームに対して串刺しに配置し、短時間に大量の電子ビームを検出器に照射するための 1 ~ 10nA の高強度ビーム運転と、その後の検出器応答を J-PARC のミュオンビーム相当の強度で評価するための 0.1 ~ 1pA の低強度ビーム運転を交互繰り返し行った。最終的に合計でビーム強度 1.3MW、電磁ホーン 320kA における J-PARC のミュオンビーム 300 日分相当の電子ビームが照射した。

図 4.16 は本測定の結果である。図 4.16 が示すように EMT は Si 検出器より優れた放射線耐性を持つことが分かった。しかし、本測定では放射線耐性の限界が確認できなかった。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。

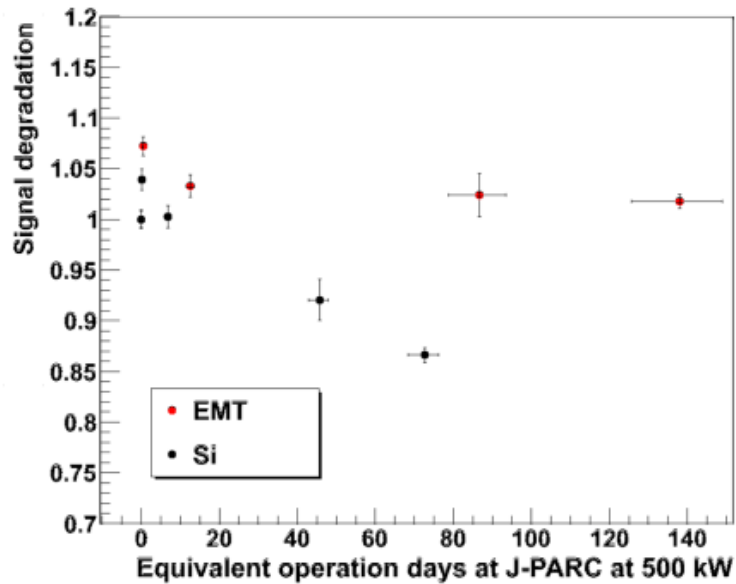


図 4.16 第 1 回電子ビーム照射における放射線耐性の測定の結果。[30] 現ビーム強度 (500kW) における EMT と Si 検出器の信号応答の変化。横軸は照射日数、縦軸は信号応答の照射前後における比を表す。

線形応答性の測定

本測定では低強度ビーム照射における EMT の信号応答と CT の信号を比較した。その結果が図 4.17 である。EMT の信号応答は現在から将来のビーム強度にかけて線形性が保たれており、線形応答性能は大強度運転における要件を満たしていることが確認された。

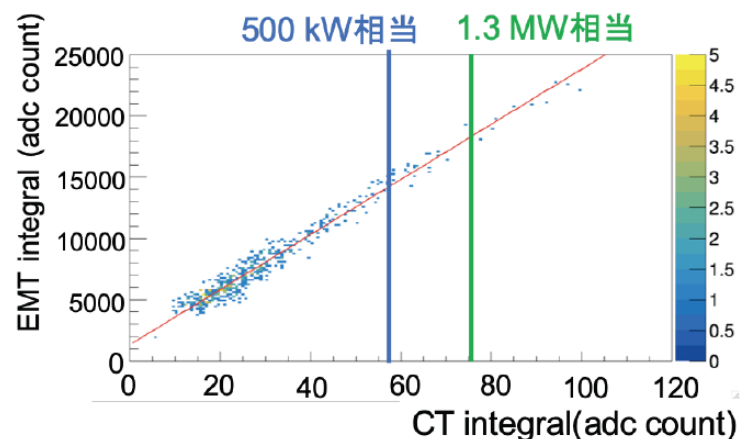


図 4.17 第 1 回電子ビーム照射試験における CT の信号と比較した EMT の信号応答。J-PARC の現在 (500kW) と将来 (1.3MW) の運転強度相当をそれぞれ縦の線で示した。[31]

4.5.3 2020 第2回電子ビーム照射試験

2020年11月に EMT の第2回電子ビーム照射試験が行われた。この試験での目的は

- EMT の放射線耐性の限界の測定
- EMT の初期不安定性の測定

である。

セットアップ

セットアップは図 4.18 のようにした。測定は第1回と同様に CT、Ref-Si、EMT を串刺しの配置で行った。第1回からの変更点について述べる。

可動ステージを追加することで Ref-Si と EMT をビームに対して垂直な平面内で自由に動かせるようにし、高強度ビームを図 4.19 のように 9 点に照射した。このことにより、問題点であったビーム照射の偏りを改善した。また、下流側の可動ステージに Mon-Si を追加した。Mon-Si は低強度ビームが正しく照射されているか確認するための検出器である。

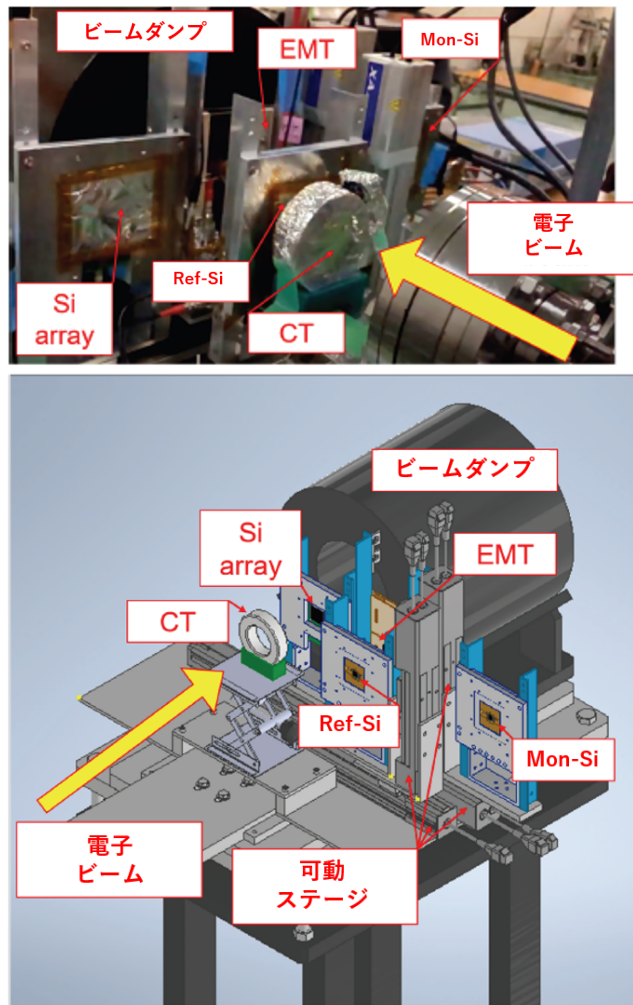


図 4.18 第2回電子ビーム照射試験のセットアップ。[30]

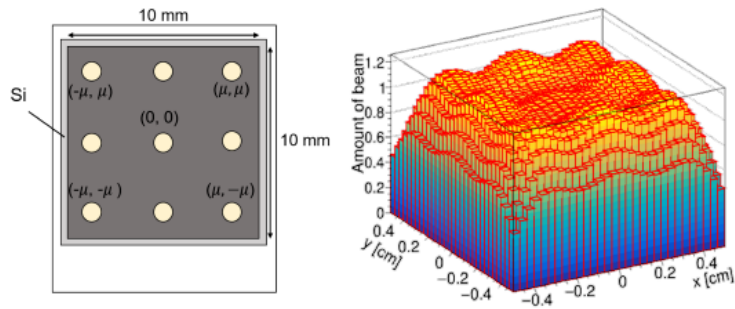


図 4.19 高強度ビームにおける 9 点照射。左図は Si 検出器の 9 点照射の例で図中の μ は各点の座標を表す。右図は左図の μ を 3.5mm、ビームサイズを 1.5mm としたときのビームの均一性を表す。
[30]

放射線耐性の限界の測定

図 4.20 は本測定の結果である。図が示すように Si 検出器は現在のビーム強度で 1500 日分相当の照射に対して 40% 以上の信号の減少が見られるが、EMT は 5% 程度以内の減少しか見られなかった。この結果から EMT は Si 検出器に比べはるかに高い放射線耐性を持っており、将来の大強度運転における 100 日程度の使用に対して要件を満たしていることが確認された。しかし、収量測定に 3% 以上のばらつきが見られたため、セットアップの改善等による測定精度の向上が課題となった。

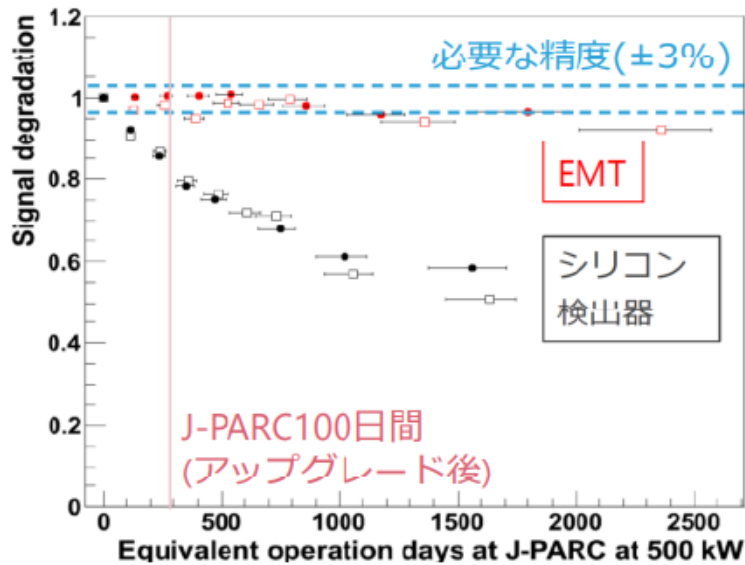


図 4.20 第 2 回電子ビーム照射試験における EMT(赤) と Ref-Si(黒) の放射線照射量ごとの信号の劣化。
[31] 横軸は現ビーム強度 500kW における照射日数、縦軸は各検出器の照射前後の比を表す。

初期不安定性の測定

本測定は 2 個の EMT に対して測定を行い、図 4.21 のような結果が得られた。2 個とも照射後から徐々に信号が落ちて、J-PARC の現在のビーム強度換算で 2 日分の照射後に $\pm 1\%$ 以内に安定化した。つまり、J-PARC での測定と同様の初期不安定性が見られた。

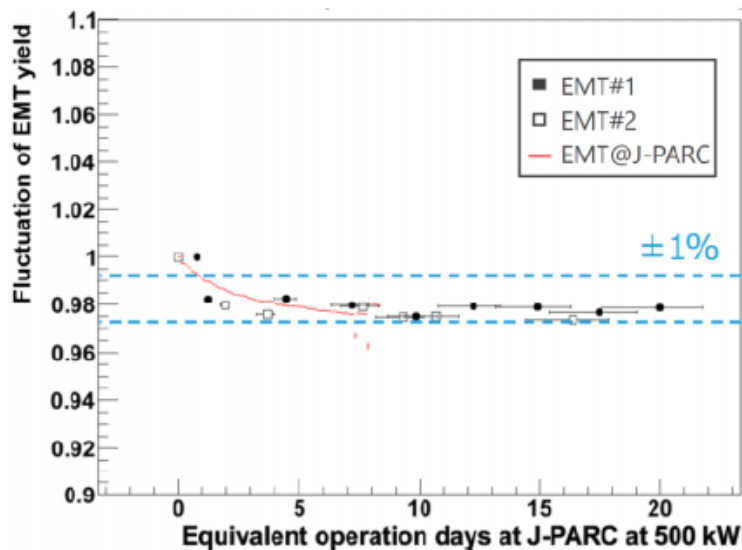


図 4.21 第 2 回電子ビーム照射試験における新品の EMT の初期不安定性。[31] 横軸は現ビーム強度 500kW における照射日数、縦軸は各検出器の照射前後の比を表す。

4.5.4 2021 第 3 回電子ビーム照射試験

2021 年 10 月に EMT の第 3 回電子ビーム照射試験を行った。この試験での目的は

- EMT の放射線耐性の精密測定
- EMT の放射線による劣化の原因の調査
- EMT の初期不安定性の理解

である。第 2 回の電子ビーム照射試験では 2 個の EMT でしか測定できておらず、また測定のばらつきが大きかった。第 3 回の電子ビーム照射試験ではより精度の高い測定により長期の安定性を検証し、EMT の放射線耐性の限界の探索が目的である。

セットアップ

セットアップは図 4.22 のようにした。基本のセットアップは第 1 回、第 2 回と同様であり、CT、Ref-Si、EMT の串刺し配置で測定を行った。第 2 回からの変更点について述べる。

高強度ビームの照射方法を見直した。EMT のダイノードの有感領域は 1 辺 8.8mm の正方形であるため、設置する角度による照射効率等への影響が考えられた。その影響を小さくするため、第 2 回の 9 点照射から 7 点照射に変更した (図 4.23)。

最上流に OTR モニターを追加した。OTR モニター (5.2.2) は遷移放射 (Optical Transition Radiation) を利用した光学モニターである。これまでの試験では、Si array 検出器は放射線耐性が低いため、高強度ビームのプロファイル測定が行えなかった。高強度ビームのプロファイル測定モニターとして第 3 回から新たに導入した。

低強度ビームにおける測定と高強度ビームにおける測定の切り替え作業を全て遠隔でできるようにした。これまでの試験では、切り替え作業のために一度ビームを止めていた。これを全て遠隔で行うことでビームを止めず、ビームの状態を変えることなく測定ができるようになった。

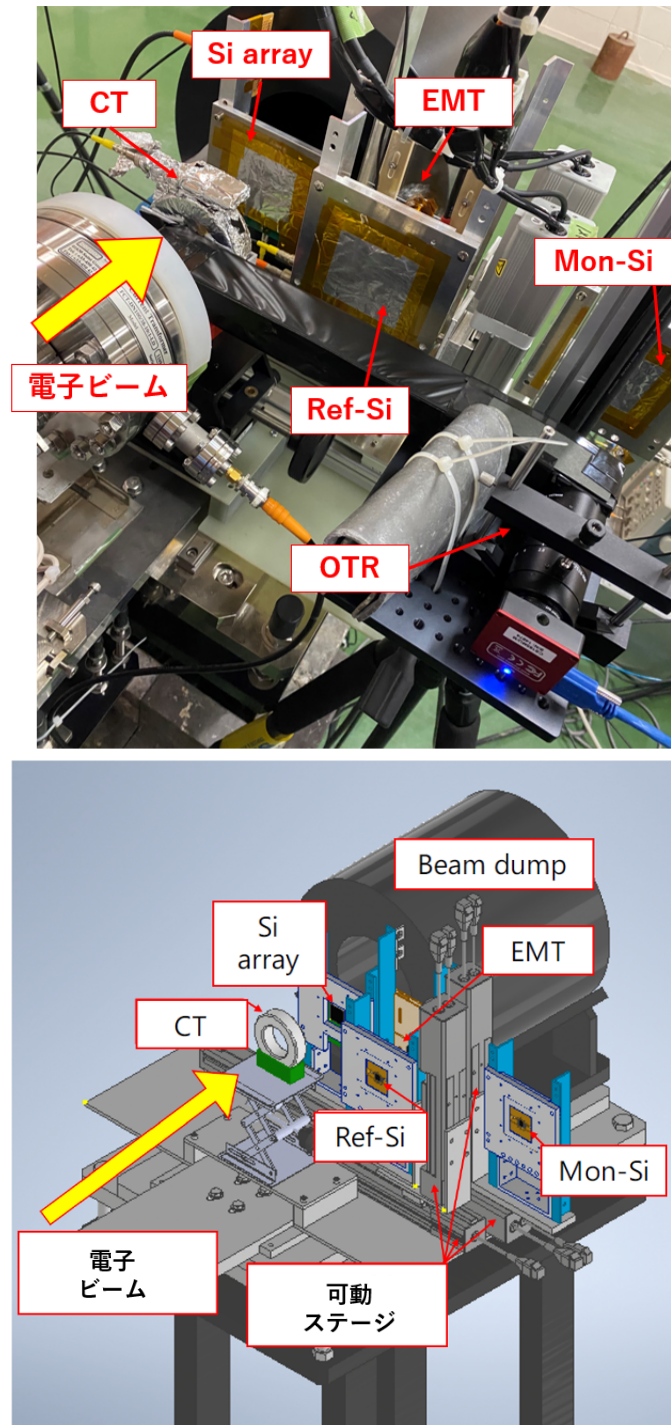


図 4.22 第 3 回電子ビーム照射試験のセットアップ。[30] 下図において OTR は示されていないが CT 上流に設置した。

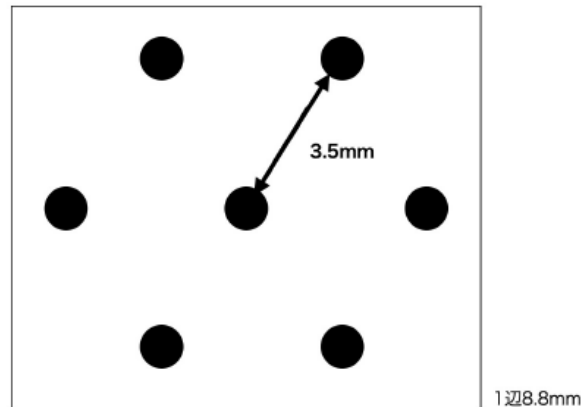


図 4.23 高強度ビームにおける 7 点照射。

電子ビーム

第 3 回の試験では 3 種類の電子ビームを用いた。それぞれのビームの特徴や用途を表 4.4 に示す。低強度ビームは J-PARC のミュオンビーム相当の強度で EMT の信号の応答の評価するため、中強度ビームは初期不安定性試験において小刻みに放射線を照射するため、高強度ビームは放射線耐性試験においてまとめて放射線を照射し劣化をさせるために用いた。

表 4.4 第 3 回電子ビーム照射試験に用いた電子ビーム

ビーム	電荷量	用途
低強度ビーム	1pC	EMT の応答確認
中強度ビーム	0.3nC	小刻みに放射線を照射
高強度ビーム	20nC	まとめて放射線を照射

OTR による高強度ビームプロファイル測定

第 3 回電子ビーム図 4.24 は OTR モニターを用いて測定した高強度ビームプロファイルを 7 点で重ねたものである。EMT の有効領域に対してビームの入射効率は約 70% であり、照射量に最大 3 倍程度の非一様性が確認された。

放射線耐性の測定

EMT の放射線耐性の評価のため、将来の J-PARC のビーム強度で約 1000 日分相当のビームを EMT に照射した。

その結果が図 4.25 である。縦軸は EMT の信号収量の平均値であり、横軸は EMT に照射した電荷量とこれを J-PARC の運転時で換算した日数である。また、赤の縦線はビームの大強度化における 100 日分相当の電荷量を表している。この期間では信号の変化量は $\pm 3\%$ 以内であり、ミュオンモニターとしての要件を満たすことが確認された。この結果は第 2 回の試験の結果とも一致する。また、J-PARC の現在の強度において 1000 日程度の照射までの間で 10% 程度の信号の低下が見られたが、その後また信号が安定することが確認された。

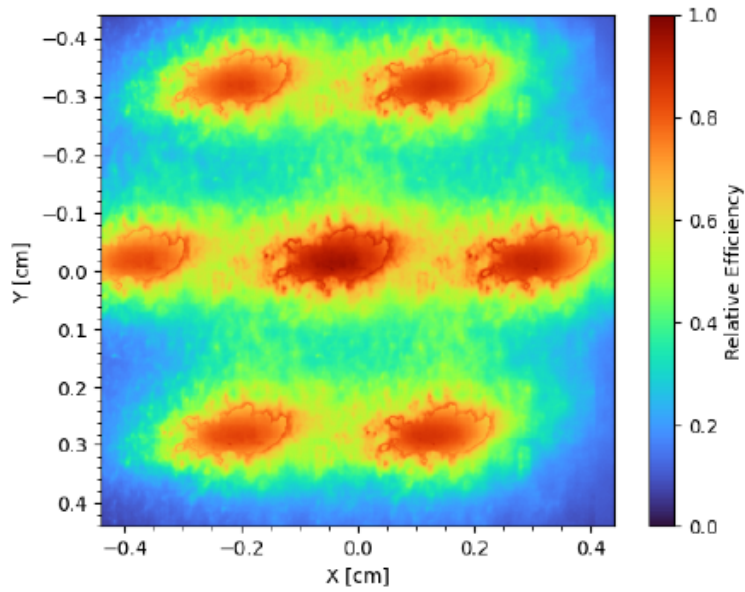


図 4.24 高強度ビームにおける EMT の有効領域における相対的なビームフラックスの例。

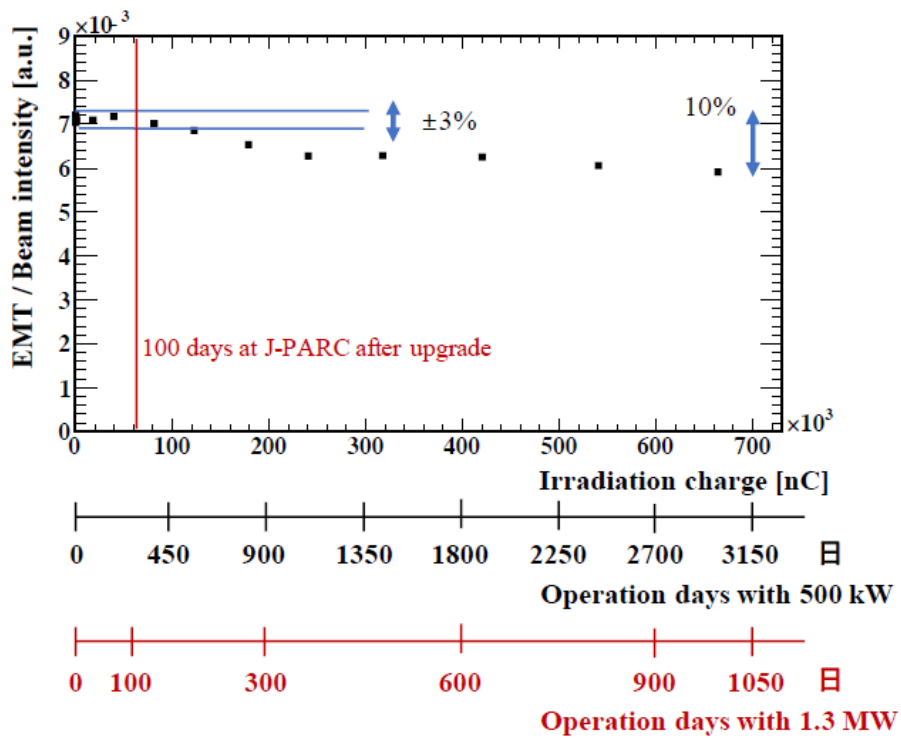


図 4.25 第 3 回電子ビーム照射試験における放射線耐性試験の結果。[24] 横軸は上から順に、照射したビームの電荷量、J-PARC 500kW 運転に換算した日数、J-PARC 1.3MW 運転に換算した日数である

放射線による劣化の原因の調査

EMT の HV の OFF 試験

EMT の放射線による信号の劣化がダイノードにおける大量の二次電子の放出によるものなのかどうかを評価するため、EMT にかける HV を OFF(0V) にして J-PARC の現在のビーム強度で 1000 日分相当の電子ビームを照射し、その後 HV を ON(-450V) にして状態安定後である 30 分経過後に低強度ビームで信号の応答を確認し、放射線耐性試験で用いた常時 HV を on にしていた EMT と比較した。

その結果が図 4.26 である。図から読み取れるように HV on、HV off ともに同様の信号劣化が見られた。そのため、放射線による劣化の原因はダイノードにおける大量の二次電子の放出によるものでないと考えられる。この結果をうけて、放射線損傷の原因を EMT 本体とデバイダー回路のどちらであるのかを検証するために次節のような試験を行った。

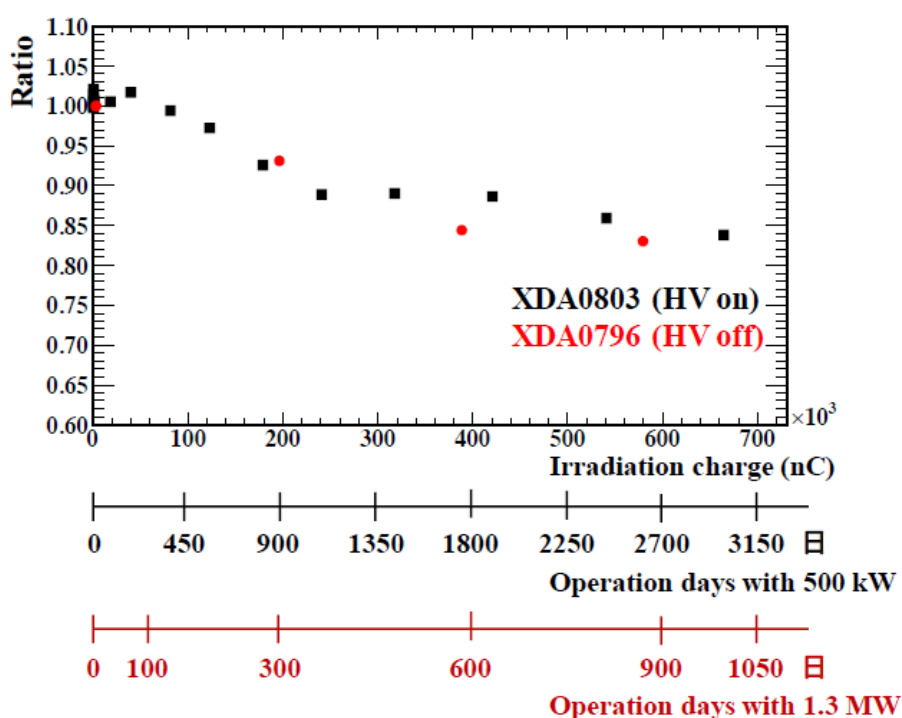


図 4.26 EMT の HV on(黒) と HV off(赤) の信号劣化の比較。[24] 横軸は上から順に、照射したビームの電荷量、J-PARC 500kW 運転に換算した日数、J-PARC 1.3MW 運転に換算した日数である。

放射線損傷の原因説明のための測定

EMT の放射線損傷の原因が EMT 本体かデバイダー回路のどちらであるかを特定するため、これらの組み合わせを変えて高強度ビームに照射した。本測定の手順は図 4.27 である。図のように EMT 本体にのみ高強度ビームを照射した場合とデバイダー回路にのみ高強度ビームを照射した場合とを比較することで、信号劣化の原因がどちらであるかを確かめる。

その結果が図 4.28 である。EMT 本体にのみ照射した場合は約 15% の信号の減少が見られ、デバイダー回路にのみ照射した場合は約 10% の信号の増加が見られた。よって、EMT の信号の減少の原因はデバイダー回路より EMT 本体で生じていると考えられた。また、デバイダー回路への照射で信号の増加が見られたが、原因特定には至っておらずより詳細な測定が必要となった。

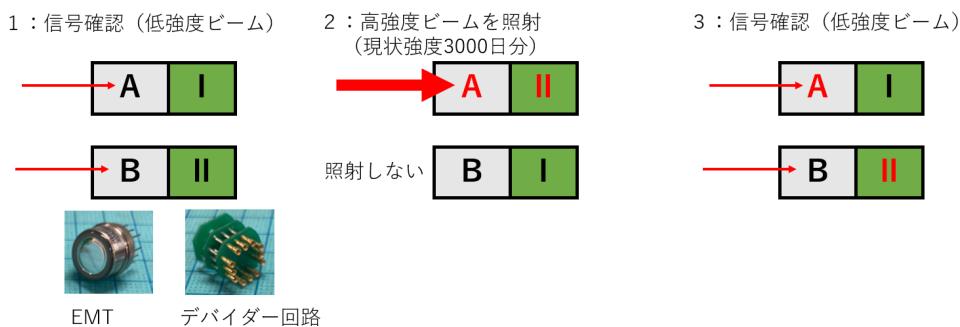


図 4.27 放射線損傷の原因のための測定の概要。赤字の A、II は高強度ビームにより劣化させた。

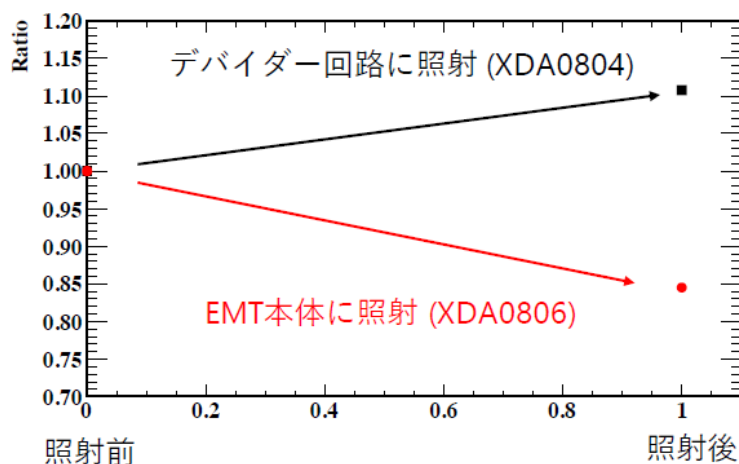


図 4.28 EMT 本体とデバイダー回路の放射線照射による影響 [24]

初期不安定性の測定

初期不安定性の測定での結果を図 4.29 に示す。第 2 回の試験で見られていた EMT の初期不安定性のような傾向は確認できなかった。第 3 回の試験では EMT の HV 印可後 30 分経過した後に測定を開始した。これは事前に行われた光照射による EMT の初期不安定性の再現試験において、HV 印可後 30 ~40 分は温度上昇により徐々に信号が下がりその後安定するということが確認されたためである [28]。一方、第 2 回の試験では HV 印可直後に測定していた。そのため、電子ビーム照射試験における初期不安定性は HV の印可直後に測定していたことが起因したと考えられる。つまり、EMT の応答に温度依存性がある可能性が浮上した。

第 3 回電子ビーム照射試験後に、別途実験室で温度依存性を LED 照射で Si PiN フォトダイオードとの比較を行い検証した [28]。その結果が図 4.30 である。図のように PMT の出力には約 3.5% の温度依存性が見られた。またこの時、Si PiN フォトダイオードは 0.5% 以内で安定していた。前述の通り、ミュオンピットでは温度管理されている enclosure の外に EMT を設置してあったため、周囲の冷却水等の影響を受けている可能性が高まった。

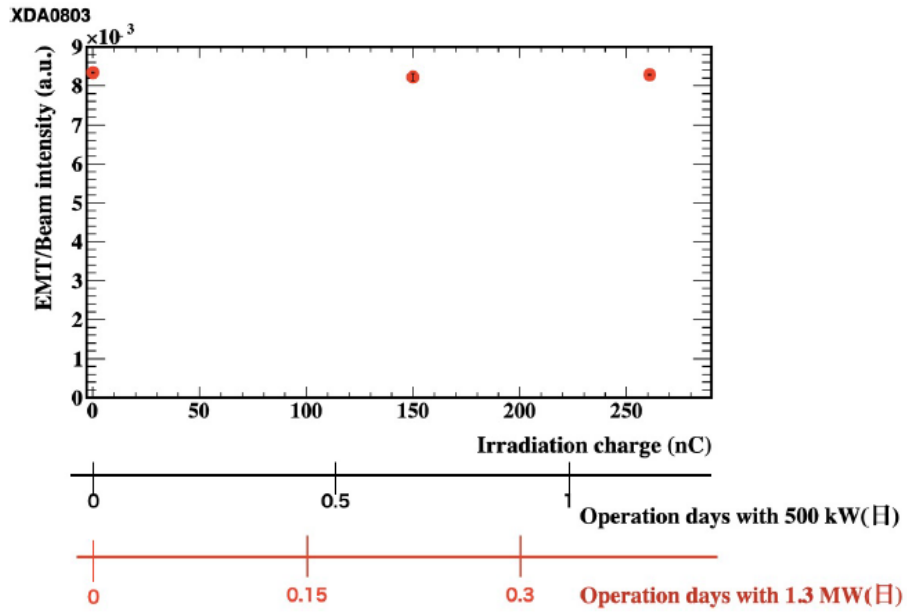


図 4.29 第 3 回電子ビーム照射試験における初期不安定性試験の結果。[28] 縦軸は EMT の信号をビーム強度で規格化したものを表している。

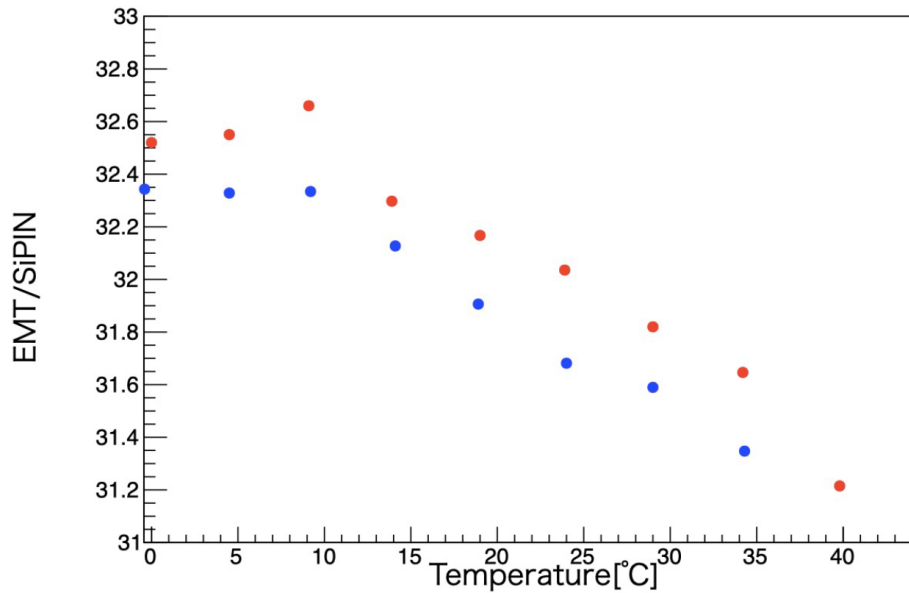


図 4.30 EMT に LED を照射したときの信号の温度依存性 [28]。橙が温度上昇時であり、青が温度下降時の信号応答である。Si PiN フォトダイオードは 0.5% 以内で安定していた。

4.6 これまでの電子ビーム照射試験のまとめ

過去3回の電子ビーム照射試験の結果において、EMTは応答の線形性が保たれており、将来強度100日分相当のビームに対して信号の変化が±3%以内であることが分かった。つまり、EMTはJ-PARCのビーム大強度化後のMUMONにおける検出器としての要件を満たすことが確認された。そして、現在強度1000日程度分照射までの間で約10%の信号低下が見られたが、その後安定するという結果が得られた。しかし、OTRによる高強度ビームのプロファイル測定の結果によると高強度ビームの照射に最大3倍の非一様性があった。また、EMTの放射線損傷の原因の特定のための試験を行った。ここで、放射線の大量照射によるEMTの信号応答の低下が起こる主な原因として考えられるものを4つ挙げる。

1. 大量に電子増幅が起きることにより後段のダイノードが劣化し、二次電子増幅率が低下する
2. デバイダー回路の劣化により、分配率の変化や線形応答性が悪化する
3. カソードに蒸着したアルミニウムの劣化により、そこで生成される二次電子の数が減少する
4. 1とは異なり、放射線がダイノードやダイノードに蒸着されているアルカリ金属アンチモンを劣化させ、二次電子増幅率が低下する

第3回の試験では原因1,2について調査した。まず、原因1についてはEMTのHVのOFF試験の結果から後段のダイノード劣化が原因ではないと考えられる。次に、原因2については放射線損傷の原因解明のための測定(EMT本体とデバイダー回路にのみ照射した試験)の結果からEMT本体に信号の減少の原因があると考えられる。EMT本体の劣化の原因はカソードのアルミ蒸着面の二次電子放出率の低下が有力となった。また、デバイダー回路への照射で信号増加が見られたため、更なる検証が必要となった。

EMTの初期不安定性に関しては、HV印可による温度変化の可能性が浮上し、追加検証によりEMTの温度依存性はLEDに対しては確認された。しかし、MUMONではミュオンが飛来してくるため荷電粒子に対しての温度依存性の検証が必要である。

以上を踏まえ、EMTの放射線劣化の原因の究明、電子ビームに対する応答の温度依存性の評価が急務となり次章の第4回電子ビーム照射試験を行った。

第 5 章

2022 第 4 回電子ビーム照射試験

5.1 目的

2022 年 11 月に第 4 回の電子ビーム照射試験がこれまで同様 ELPH で行われた。この試験の目的は

- EMT の温度依存性の電子ビームを用いた評価
- EMT の放射線劣化の原因究明

である。

5.1.1 EMT の温度依存性の電子ビームを用いた評価

第 3 回電子ビーム照射試験では、図 4.29 のように初期不安定性は確認されず、ELPH での初期不安定性は HV 印可による温度上昇が原因であると考えられ、EMT の応答に温度依存性がある可能性が浮上した。その後の実験室での LED 照射における測定では約 3.5% の温度依存性が確認された (図 4.30)[28]。しかし、T2K 実験のミュオンモニターとして運用する際は、貫通する荷電粒子に対する性能を調べる必要がある。そこで、ELPH の 90MeV 程度の電子ビームを用いて、EMT の信号応答の温度依存性の測定を行う。

5.1.2 放射線劣化の原因究明

第 3 回電子ビーム照射試験では高強度ビームを EMT 本体のみに照射した場合とデバイダー回路のみに照射した場合との比較を行い、図 4.28 のように前者では信号が約 15% 減少し、後者では約 10% 増加するという結果が得られた。デバイダー回路でこのようなことが起きた原因としてデバイダー回路内の電気抵抗、コンデンサの抵抗値・静電容量が放射線の影響を受けたためと考えられているが、電気抵抗は設計値の 5% の範囲に収まっており異常は見られなかった。また、第 3 回の試験の結果から EMT 本体の信号減少の原因として残っているものに原因 3(4.6 節) のカソードのアルミ蒸着の劣化、原因 4(4.6) の全てのダイノード、特に蒸着されているアルカリ-アンチモンの劣化が挙げられる。これらを受けて本試験では放射線劣化の原因を特定するために、デバイダー回路に対しては高強度ビームの照射前後で抵抗値・静電容量の測定を行い比較する。また、図 4.28 のような第 3 回の試験の結果の再現性を確かめる。EMT 本体に対してはカソードと 1 段目ダイノードの間をショートさせたデバイダー回路 (以下、改造デバイダー回路と呼ぶ) を用いることでカソード劣化が電子増幅に与える影響を抑えた測定を行う。そして、通常のデバイダー回路との比較を行いアルミ蒸着の放射線劣化の相対的な評価を行う。

5.2 セットアップ

5.2.1 実験のセットアップ

セットアップは図 5.1 のようにした。基本のセットアップはこれまでの試験と同様であり、CT、Ref-Si、EMT の串刺し配置で測定を行った。セットアップは上流から順番に

- 1 : OTR
- 2 : CT
- 3 : Ref-Si(比較用 Si 検出器)
- 4 : EMT、Si array、Mon-Si(モニター用 Si 検出器)

が配置されている (図 5.1)。Ref-Si は上流の可動ステージに取り付けられており、ビームラインへの出し入れが遠隔で行える。EMT、Si array、Mon-Si は下流の可動ステージに横並びに取り付けられておりビームライン上に乗せる検出器の入れ替えを遠隔で行う。また、EMT に関しては高強度ビームを一樣に照射するため鉛直方向にも動かす (ELPH のビームは EMT に対して細いため EMT を動かしながら照射する)。高強度ビームを照射する際は回路の抵抗を 50Ω から 1Ω に切り替えて電流を流しやすくすることにより、空間電荷効果を抑制している。

図 5.1 中の送風機、ヒーター、温度計、筒は EMT の温度依存性の測定の際に用いる。

5.2.2 検出器

CT(Current Transformer)

本試験では、電子ビームの強度測定のために図 5.2 に示す CT を用いた。この CT は第 3 回で使用したものと同一である。表 5.1 は使用した CT の仕様である。CT はリング状の磁性体でできたコアにコイルを巻いて使用する装置で、リングの内側を通過した電流を計測する非破壊型の検出器である。電磁誘導の原理を利用した検出器であり、電流を削ることなく測定できるため、J-PARC の陽子ビームのモニターにも利用されている。また、高強度ビームを低強度の安全な電流として取り出すことができることも利点である。本試験では出力信号からフーリエ変換を用いて入力信号を再現し [24]、その波形から CT を通過した電荷量 (電子数) を求める。

表 5.1 電子ビーム照射試験で用いた CT の仕様 [24]

外径	79mm
内径	51mm
幅	25mm
材質	ファインメット [32]
透磁率	18500H/m
コイルの巻き数	6 回

Si 検出器

ミュオンモニターで使用している Si 検出器 (3.2.2 項参照) と同じものを用いる。本試験では、異なる目的で Ref-Si と Mon-Si と名付けられた 2 個の Si 検出器を使用する。

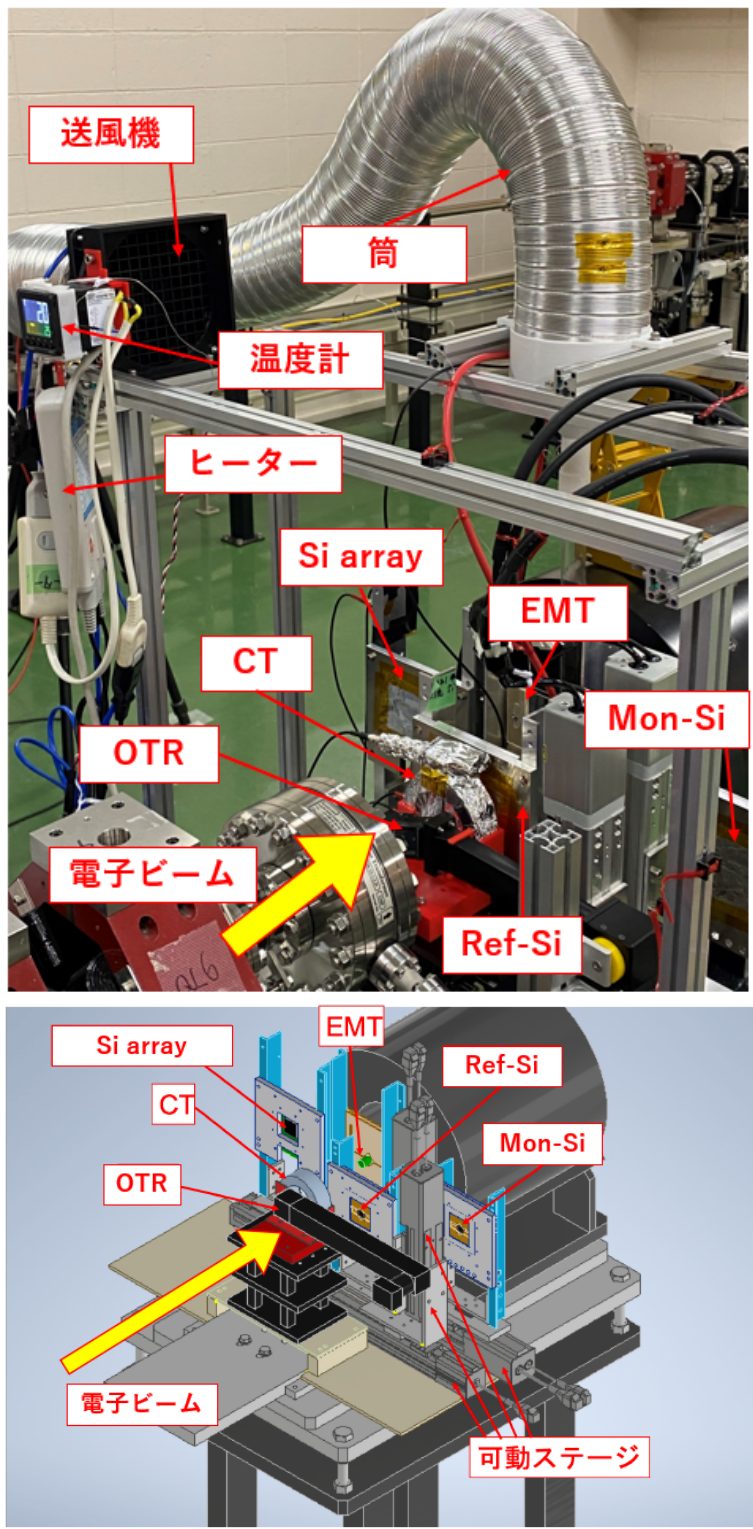


図 5.1 第 4 回電子ビーム照射試験のセットアップ。

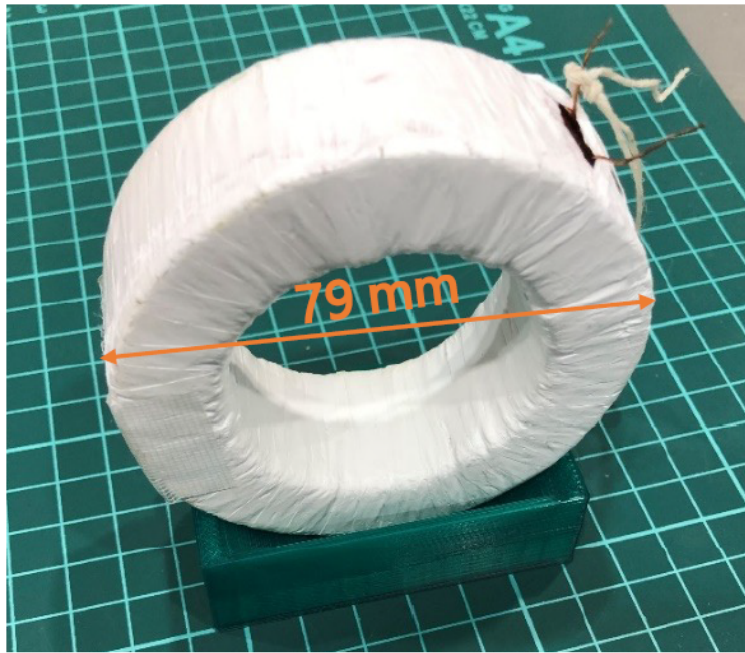


図 5.2 電子ビーム照射試験で使用した CT[24]

Ref-Si は EMT と信号を比較するための比較用 Si 検出器である。Si 検出器は挙動がよく理解されているため、ビームの電荷量のばらつきを評価するのに適している。EMT の信号確認と同時に Ref-Si の信号を取得することで、信号確認時のビームのばらつきを補正することができる。高強度ビームを照射すると劣化してしまうため、低強度ビームの測定のみを使用した。

Mon-Si は CT では確認できない低強度ビームの強度調整をするためのモニター用 Si 検出器である。あらかじめキャリブレーションにより Mon-Si の信号の高さと CT から求めた電荷量を対応づけておく。試験では Si 検出器と CT の応答が比例関係であると仮定して、低強度領域への外挿から低強度ビーム強度を見積もり T2K 実験でのミュオンビーム強度と同程度になるよう強度を調整した。また、低強度ビームによる測定を始める前のビーム強度の確認に使用した。

Si array

Si array は浜松ホトニクス社製の 64 素子 Si フォトダイオードアレイ (S13620-02) を使用した (図 5.3)。大きさは 24mm × 24mm で、8 × 8 個の Si 素子が並んでおりそれぞれが単独の Si 検出器として動作する。Si 検出器であるため低強度ビームによる測定時のみに使用し、各素子の信号量から低強度ビームの広がり測定する。

OTR

本試験ではビームプロファイル測定のために図 5.4 に示す OTR を用いた。OTR は、遷移放射 (Optical Transition Radiation) を利用したモニターで、荷電粒子が誘電率の異なる媒質を通過した時に発生する遷移放射光をカメラで読み取り画像解析することでビームプロファイル測定を行う。電子ビーム照射試験では、スクリーンにアルミ箔を使用しそこで生じた遷移放射光のうち可視光領域の後方放射を利用する。第 3 回電子ビーム照射試験でビームのプロファイルモニターとして初めて導入したが、様々な問題点が確認された。そのため、本試験では以下に記す改良を加えた。

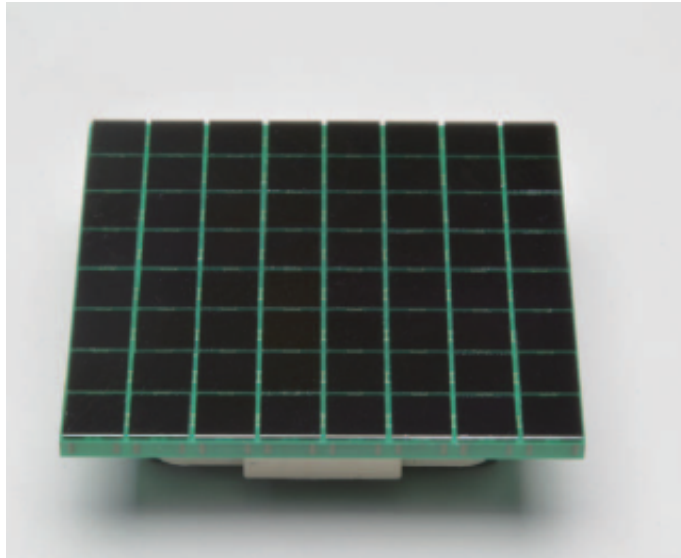


図 5.3 電子ビーム照射試験で使した Si array[33]

- 遷移放射光のガイドパイプ、OTR の治具の開発
第 3 回の試験では急造品ということもあり、カメラを三脚で固定していた。そのため、正確な位置が定まらず位置較正をスクリーンであるアルミ箔のエッジ検出で行った。本試験では新しく開発したガイドパイプや治具で OTR の固定を行った。
- OTR のダイナミックレンジの拡大
第 3 回の試験では高強度ビームの撮影には成功したが、低強度ビームは撮影できなかった。また、高強度ビームにおいてはビーム像の一部が飽和していた。本試験ではカメラのゲインを上げること、露光時間を長くすることで低強度ビームの撮影を可能にした。ゲインは低強度ビーム時には 40 ~ 48dB、高強度ビーム時には 0 ~ 3dB で測定を行った。露光時間は低強度ビーム時に 5sec、高強度ビーム時に 0.1sec に設定した。また、光学フィルターを追加することで高強度ビームにおける ADC カウントの飽和を防ぐ。
- スクリーンのアルミ箔を 2 枚に追加
第 3 回の試験では遮光対策としてブラックシートを被せていた。ブラックシートの材質は PVC や塩化ビニルで放射線による劣化がモニターに影響を与えることが懸念された。遷移放射には、放射に必要な媒質の長さ (形成領域長) があり、その長さのオーダーは媒質のプラズマ周波数に反比例する [34][35]。アルミニウムの形成領域長は約 $1\mu\text{m}$ [36] で、PVC のプラズマ周波数はアルミニウムの約 1/10 で形成領域長は約 $10\mu\text{m}$ であり PVC でも遷移放射が起きる可能性がある。その影響を小さくするため、アルミ箔を 2 枚に追加した。しかし、本試験では前述した新しい遷移放射光のガイドパイプの開発により遮光対策は行われ、ブラックシートは用いなかった。
- スクリーンサイズの拡大
第 3 回の試験ではスクリーンサイズが小さく、ビーム像の全てを撮影することができなかった。本試験ではスクリーンサイズを拡大しビーム像全体の撮影を可能にする。OTR の解析によるとスクリーンサイズは約 $16.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ であった。(ELPH のビームサイズ ~ 数 mm)

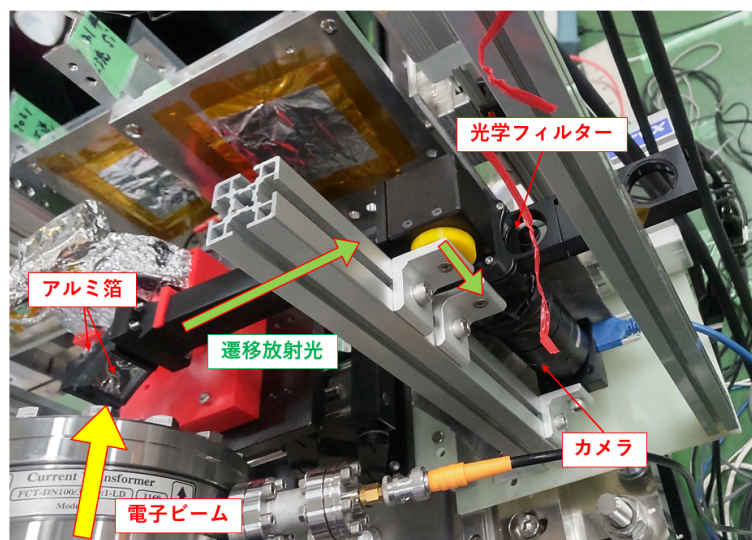


図 5.4 電子ビーム照射試験で使用した OTR。アルミ箔で生じた遷移放射光の後方放射を鏡で反射しカメラで読み取る。

EMT とデバイダー回路

本試験で用いた EMT は 2022 年に新しく購入した 3 個を使用した。個体名は XDA0814、XDA0816、XDA0817 であり、以下それぞれ EMT(A)、EMT(B)、EMT(C) と呼ぶ。それぞれの EMT の本試験における用途を表 5.2 にまとめる。本試験では 4.2 で示した通常デバイダー回路 (以下、通常デバイダー回路と呼ぶ) 1 個と、カソードと 1 段目のダイノード間をショートさせた改造デバイダー回路 5 個を用いた。それぞれのデバイダー回路の抵抗値、静電容量の設計値を表 5.3 に示す。デバイダー回路の個体判別のため、通常デバイダー回路を (0)、改造デバイダー回路を (1)~(5) と名付ける。それぞれのデバイダー回路の本試験における測定項目を表 5.4 にまとめる。測定項目の詳細は次節 (5.4) で述べる。また、1~5 のデバイダー回路の試験前に測定した抵抗値、静電容量の値を表 5.5 にまとめる。表 5.5 から分かるように改造デバイダー回路 1 の C_4 の静電容量の値が設計値より 5% 以上大きかったため、本試験では測定に使用しなかった。

表 5.2 今回の試験で用いた EMT の用途。

EMT	個体名	高強度照射の有無	用途
A	XDA0814	-	低強度ビームでの測定にのみ用いる
B	XDA0816	✓	カソード劣化試験における高強度ビーム照射用 1
C	XDA0817	✓	カソード劣化試験における高強度ビーム照射用 2

5.2.3 電子ビーム

本試験では 2 種類の電子ビームを用いた。それぞれのビームの 1 パルス当たり電荷量と用途を表 5.6 に示す。低強度ビームは J-PARC のミュオンビーム相当の強度で EMT の信号応答を評価するため、高強度ビームは EMT を放射線で劣化させるために用いた。

表 5.3 デバイダー回路の抵抗、静電容量の設計値。

抵抗 [kΩ]		
	通常	改造
R ₁	200	0
R ₂	200	180
R ₃	150	180
R ₄	150	180
R ₅	150	180
R ₆	150	180
R ₇	150	180
R ₈	150	180
R ₉	200	180
R ₁₀	510	470
R ₁₁	75	75
コンデンサ [nF]		
C ₁	10	10
C ₂	10	10
C ₃	10	10
C ₄	330	330
C ₅	330	330

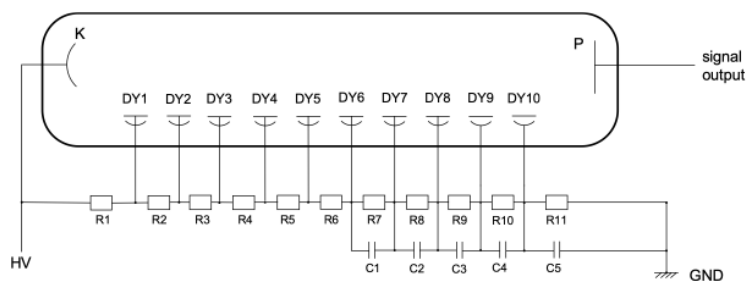


図 5.5 デバイダー回路の構造 (再掲)[23]

表 5.4 今回の試験で用いたデバイダー回路の用途。

デバイダー回路	Status	耐圧電圧	カソード劣化	温度依存性
0	通常	500V	✓	-
1	改造	500V	静電容量が設定値より大きいため本試験では使用しない	-
2	改造	500V	✓	-
3	改造	500V	✓	-
4	改造	500V	✓	-
5	改造	500V	-	✓

表 5.5 改造パイダー回路の抵抗値と静電容量。

抵抗 [kΩ]						
改造パイダー回路						
	設計値	1	2	3	4	5
R ₁	0	0	0	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0
R ₂	180	179.9	180.5	179.6	180.6	180.2
R ₃	180	180.3	179.8	179.8	180.5	180.2
R ₄	180	180.1	180.2	180.4	180.6	180.0
R ₅	180	179.9	179.5	179.8	180.4	180.1
R ₆	180	180.2	179.6	179.6	179.9	179.8
R ₇	180	179.9	180.1	179.6	180.2	180.1
R ₈	180	179.7	179.7	179.6	179.9	179.9
R ₉	180	180.6	180.1	179.3	179.8	179.7
R ₁₀	470	468	466	466	466	467
R ₁₁	75	75.0	74.9	74.9	75.0	74.9

コンデンサ [nF]						
C ₁	10	10.3533	10.3089	10.3441	10.4407	10.3398
C ₂	10	10.2633	10.3157	10.3204	10.3053	10.1804
C ₃	10	10.3417	10.3573	10.1859	10.3150	10.4176
C ₄	330	354.391	330.142	332.615	329.783	331.601
C ₅	330	339.469	332.768	331.978	346.096	335.664

表 5.6 各ビーム強度における 1 パルス当たりの電荷量

ビーム	電荷量	用途
低強度ビーム	1pC	EMT の応答確認
高強度ビーム	20nC	EMT を放射線で劣化

5.2.4 高強度ビームの照射方法

第 3 回の試験では、高強度ビームの照射において図 4.24 のように非一様性が 3 倍程度あったことが確認された。ミュオンビットでのミュオンビームは 1 ~ 2mm のビーム幅であり EMT にほぼ一様に照射される。本試験では、高強度ビーム照射中に EMT を連続的に動かし続けることで一様に電子ビームを照射する。EMT の動かし方は図 5.6 の赤線のような蛇行経路を、設定した照射時間の間往復し続けるという方法を取った。EMT 本体の断面は円形であるがダイノードは一辺 8.8mm の正方形であるため、角度によって照射効率等にばらつきが生じる可能性がある。そのため、蛇行経路を一辺 16mm とし EMT のダイノードの大きさに対して十分大きな幅に設定した。

5.3 高強度ビームの照射方法の評価

高強度ビームの照射方法を評価するためシミュレーションを行った。図 5.6 の照射経路を縦横の幅が異なる格子点と捉え、電子ビームに見立てた 2 次元ガウス分布に従う乱数を各点に対して 100,000

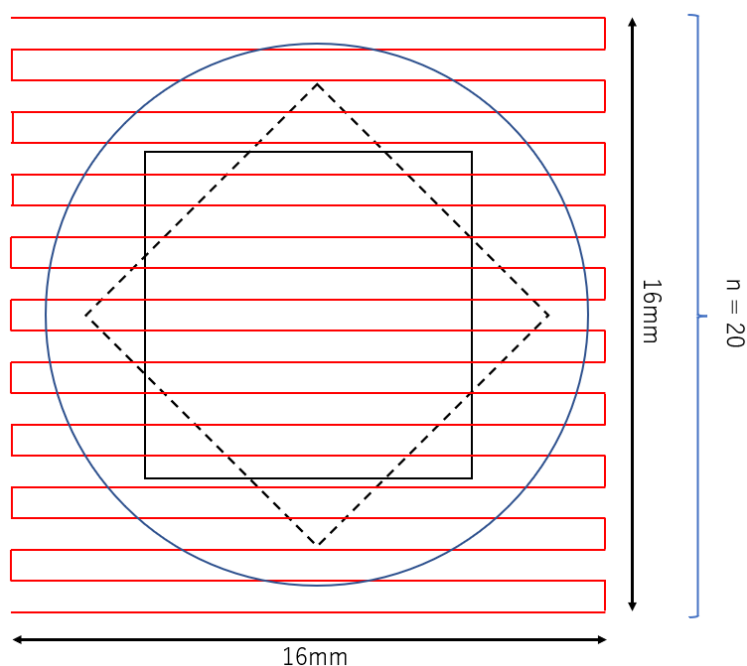


図 5.6 第 4 回電子ビーム照射試験の高強度ビームの照射方法のイメージ図。赤線は高強度ビームの照射位置、青丸は EMT 全体 (直径 14.6mm)、実線は EMT のダイノード (一辺 8.8mm)、点線は 45° 回転させた時の EMT のダイノード、n は照射経路の段数を表す。

個つつ降らした。そして、ダイノード領域内に入った照射電子の割合および照射の一様性を評価した。5.2.4 で述べたようにダイノードの角度により照射効率等がばらつく可能性があるため、ダイノードの角度を 5° 刻みで 0°~45° まで傾けた場合のシュミレーションを行った。また、表 5.7 に OTR による高強度ビームにおけるプロファイル測定結果を示す。このビームの広がりを用いてシュミレーションを行った。図 5.7 はそれぞれの角度でのシュミレーションの例である。左上図の上段はシュミレーションにおける設定したパラメータ、下段はシュミレーション結果の値である。efficiency は照射効率 (ダイノード領域内に照射される電子の割合)、sigma は右下図のヒストグラムの標準偏差で非一様性の指標、min,max はそれぞれ最もビームの当たっていない (当たった) 場所の照射電子数を表す。右上図は照射位置を表す。左下図はダイノード領域内のピクセル数で規格化した照射電子数分布 (2 次元ヒストグラム)、右下図は左下図の各ピクセルにおける照射電子数をヒストグラムにしたものである。このシュミレーションの結果を図 5.8 に示す。左図はダイノード角度と照射効率の関係、右図はダイノード角度と照射電子数分布の標準偏差 (非一様性) の関係を示している。照射効率は約 28% で一定で、照射電子数分布の標準偏差も 0.005 で一定という結果が得られた。つまり、角度によらず照射効率と非一様性は一定であり EMT の取り付ける角度による不定性は排除することができる。さらに、照射電子数の位置による違いは最大約 3% と非常に小さく、一様性は保証されていると言える。また、照射効率は各角度における照射効率の平均を取った 28.15% であったとし、EMT のダイノードに照射された電荷量の計算に用いる。

5.4 測定項目と測定手法

本試験では、信号確認用の低強度ビームと放射線によって EMT を劣化させる高強度ビームを用いた (表 5.6)。それぞれのビーム強度に対して、図 5.9 のような検出器のセットアップで照射を行った。低強

表 5.7 OTR による高強度ビームプロファイル測定の結果

方向	ビーム幅 (mm)
x	1.18mm
y	1.23mm

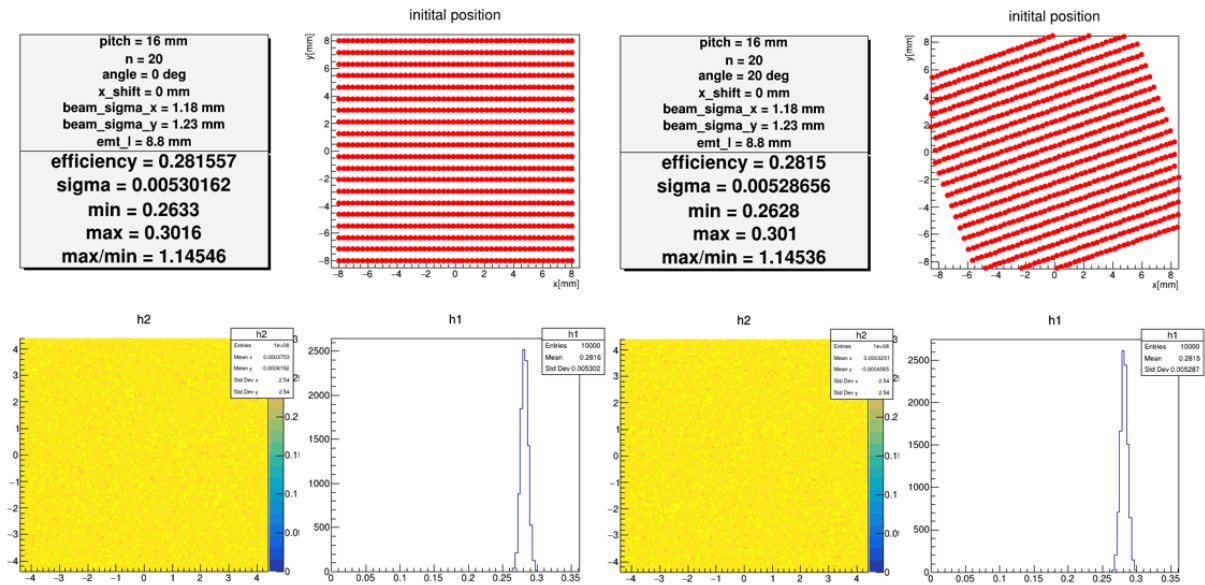


図 5.7 高強度ビームの照射方法のシュミレーションの例。左図はダイノードが傾きなく水平に取り付けられている場合の結果。右図はダイノードが水平から 20° 傾いた角度で取り付けられている場合の結果。

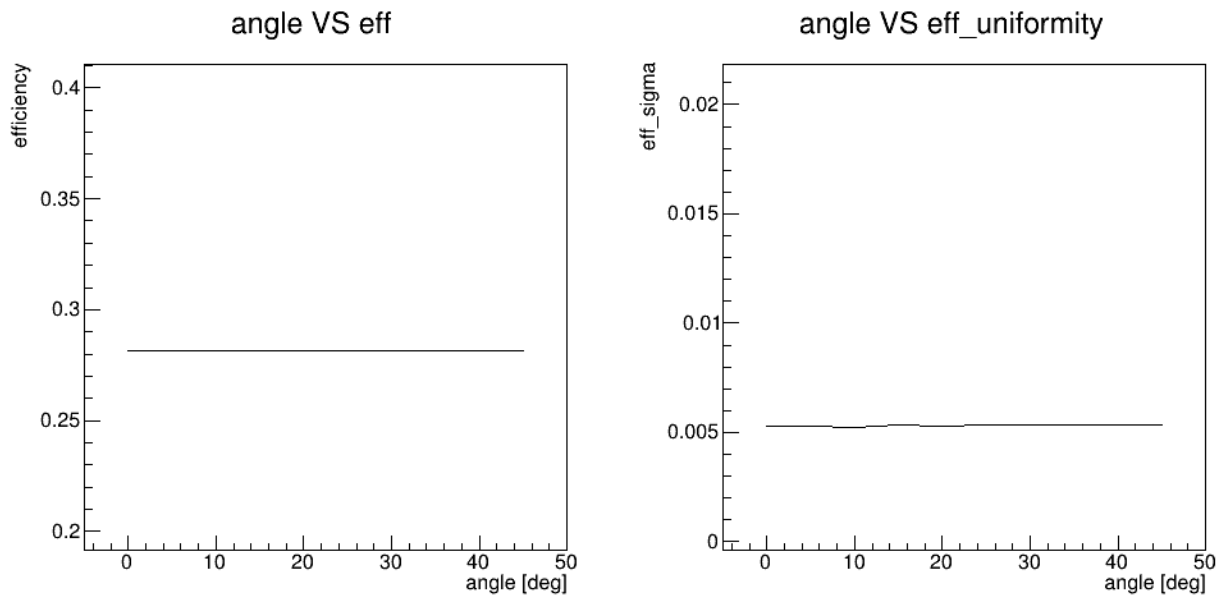


図 5.8 ダイノードの角度と照射効率および非一様性の関係。横軸はともにダイノードの角度である。縦軸は左図ではビームの照射効率、右図では照射電子数分布の標準偏差 (非一様性) である。

度ビームでは T2K 実験のミューオンビーム相当の強度で電子ビームを照射し、ref-Si と EMT の信号を測定する。高強度ビームでは EMT にのみ照射を行い、EMT を放射線で劣化させる。高強度ビームの照射前後で、低強度ビームでの測定を行い照射前後での信号収量を比較する。

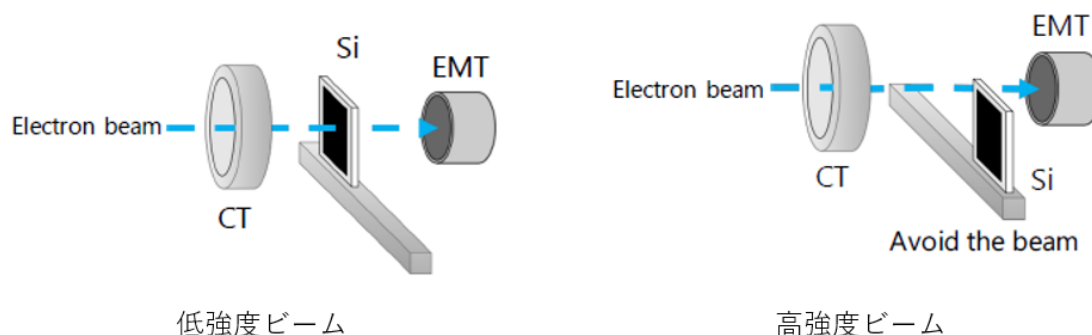


図 5.9 検出器のセットアップ [24]

5.4.1 EMT の温度依存性

電子ビーム照射における EMT の信号応答の温度変化を評価するため、EMT(A) と改造デバイダー回路 (5) を用い 20,30,40°C において昇温時と冷却時のそれぞれで測定を行った。図 5.1 中の筒の中にヒーターの電熱部を入れ送風機で風を送ることで、温風を作り出し EMT に当て温度を上げる。温度を下げる際は、ヒーターの電源を OFF にし自然放熱で行う。温度計の感温部を図 5.10 のように EMT の中央部に取り付け温度をフィードバックすることでヒーターの電源の ON/OFF を切り替え温度調整を行う。測定は温度モニターを Web カメラで監視し、温度が安定してから測定を行った。設定温度の変更はビームを一旦停止し、手動で行った。測定手順を以下に示す。

1. 設定温度を 20°C に設定し、20°C で安定したことを確認した。
2. 低強度ビームで EMT の信号を測定した。
3. 設定温度を 30°C に変更し、30°C で安定したことを確認した。
4. 低強度ビームで EMT の信号を測定した。
5. 以降、40°C を 2 回、30°C、20°C と同様に繰り返した。

5.4.2 EMT のカソード劣化の評価試験

第 3 回電子ビーム照射試験では高強度ビームを EMT 本体のみに照射した場合とデバイダー回路のみに照射した場合との比較を行い、前者では信号が約 15% 減少し、後者では約 10% 増加するという結果が得られた。これにより EMT 本体に放射線劣化の原因がある可能性が深まった。

そこで放射線劣化の原因究明を目的に EMT のカソードの劣化を評価するための改造デバイダー回路を用いた測定を行った。高強度照射前後で複数の EMT とデバイダー回路の組み合わせで測定を行うことで、カソード劣化の評価とともに第 3 回の試験で得られた結果等の再現性を確かめる。カソード劣化の評価試験は 2 日目と 3 日目の計 2 回行った。測定を行った EMT とデバイダー回路の組み合わせを以下に示す。また、それぞれの組み合わせで用いた EMT とデバイダー回路を表 5.8 にまとめる。

- ① 劣化させる EMT + 劣化させる改造デバイダー回路

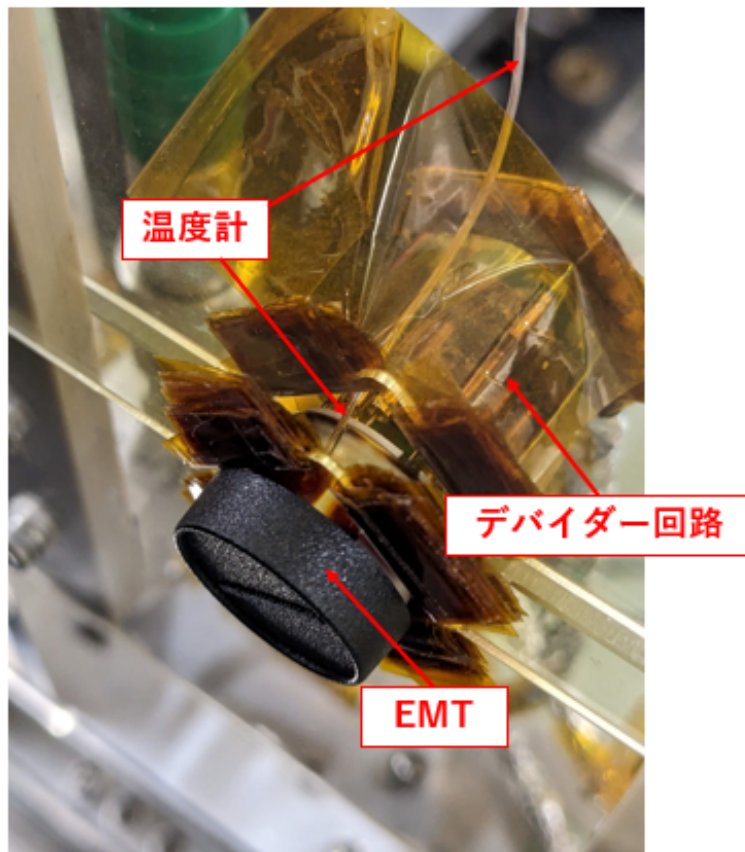


図 5.10 EMT に設置した温度計。写真のように EMT の中央部に温度計の感温部がくるように取り付けた。

- ② 劣化させない EMT + 劣化させる改造デバイダー回路
- ③ 劣化させる EMT + 劣化させない通常デバイダー回路
- ④ 劣化させる EMT + 劣化させない改造デバイダー回路

組み合わせ①は、ミュオンモニターのエミュレーションである。改造デバイダー回路を用いた場合の放射線耐性を評価する。組み合わせ②では、改造デバイダー回路のみを劣化させデバイダー回路の変化の影響を評価する。組み合わせ③では、EMT だけを劣化させ、劣化させていない通常デバイダー回路で第 3 回の試験のような信号減少が再現できるかを確認する。組み合わせ④では、EMT だけを劣化させ、劣化させていない改造デバイダー回路で EMT の信号劣化を打ち消すことができるかを評価する。また、組み合わせ③と組み合わせ④を比較することでカソード劣化の評価を行う。

表 5.8 カソード劣化の評価測定における EMT とデバイダー回路の組み合わせ。

測定項目	2 日目		3 日目	
	EMT	デバイダー回路	EMT	デバイダー回路
①	B	3	C	4
②	A	3	A	4
③	B	0	C	0
④	B	2	C	2

2 日目の試験では、EMT(B) と改造デバイダー回路 (3) に合計で J-PARC 将来強度 1.3MW 運転時

約 1500 日分の電子ビームを照射した。また、3 日目の試験では、EMT(C) と改造デバイダー回路 (4) に合計で J-PARC 将来強度 1.3MW 運転時約 1000 日分の電子ビームを照射した。

5.5 解析とその結果

5.5.1 CT によるビーム強度の測定

低強度ビームの調整

低強度ビームは 1 パルス当たりの電荷量が T2K 実験のミュオンビームの 1 バンチ分の照射量になるよう、1pC 程度を目安に調整した。CT はこのビーム強度に感度がないため、CT で見えるレベルの強度付近で Mon-Si との信号比測定した。図 5.11 は CT の出力信号を入力信号に変換した波形と Mon-Si の信号波形である。波形記録装置 FADC のサンプリングレートが 250MHz であるため、横軸の 1 点の間隔は 4ns である。CT の出力信号を入力信号に変換する際にベースラインを 0 に合わせてあり、波形の積分値から電荷量を算出した。積分値を S とすると、FADC のサンプリングレートが 4ns であることと 1ADC カウント当たり 0.125mV であること、また回路の抵抗に 50Ω を用いたことから、電荷量 Q [pC] は以下のように計算できる。

$$Q[\text{pC}] = S \times 4\text{ns} \times 0.125\text{mV} \times \frac{1}{50\Omega} \quad (5.1)$$

Mon-Si は初めの 660 点の平均値をベースラインとして、そのベースラインから信号のピークの高さを算出した。積分値ではなくピークの高さを用いる理由は、時間に限りがある測定の中、目視で積分値からビーム強度を調整することは困難であるためである。CT から算出した電荷量 Q と Mon-Si のピークの高さ h の関係を図 5.12 に示す。図 5.12 の $0 \sim 8\text{pC}$ の範囲で一次関数によるフィッティングを行った。横軸を Q [pC]、縦軸を h とすると以下ようになる。

$$h = (360.9 \pm 9.7)Q + (3622 \pm 39) \quad (5.2)$$

式 5.2 より、1 パルス当たり 1pC になるように調整するためには Mon-Si のピークの高さを $h = 3983$ にすれば良いと分かった。低強度ビームでの測定を行う時は、毎回 Mon-Si の信号のピークが $h \sim 4000$ であることを確認してから、Ref-Si と EMT をビームラインに設置して測定を始めた。

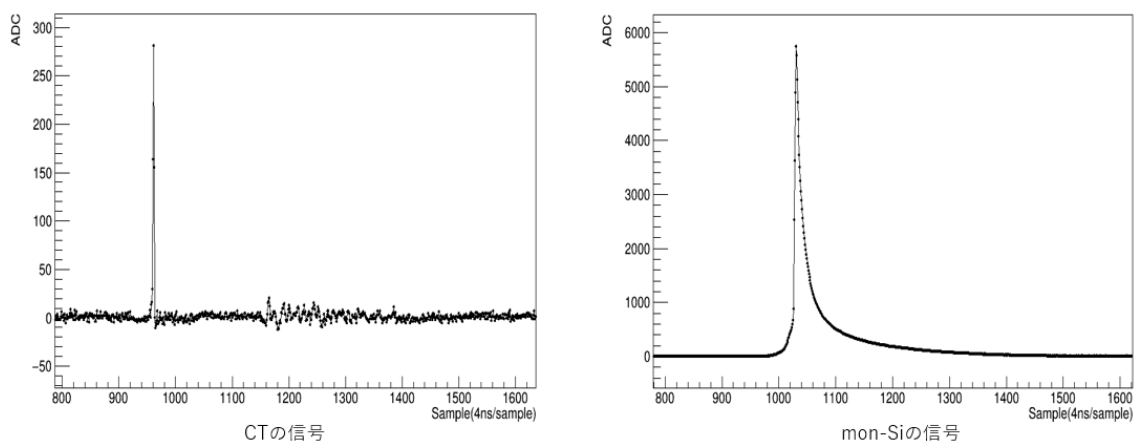


図 5.11 低強度ビーム調整の信号

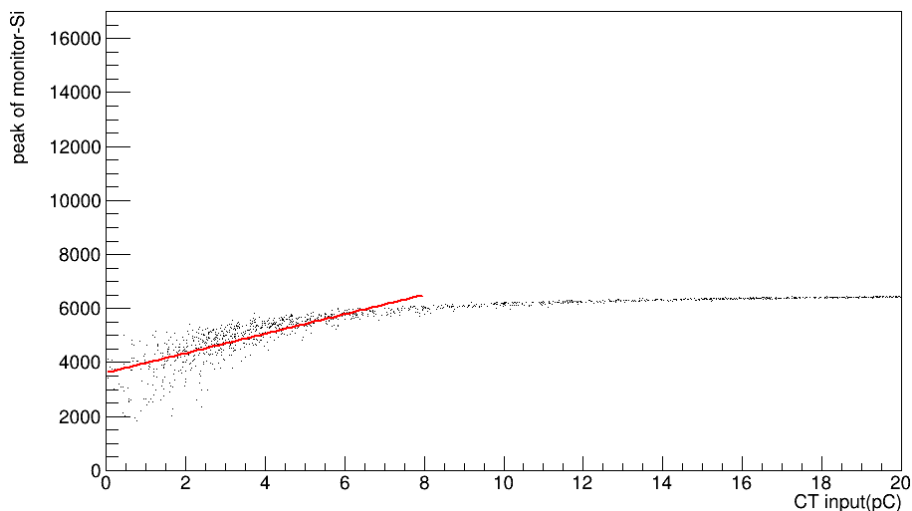


図 5.12 低強度ビーム調整のための CT と mon-Si の関係

高強度ビームにおける電荷量の算出

高強度ビームは 1 パルス当たり 20nC 程度を目安に調整した。図 5.13 は CT の出力信号を入力信号に変換した波形である。実際の波形は矩形波であると考えられるが、フーリエ変換による入力信号の再現が完全でなく、パルスの立ち上がりの直前でベースラインが下がってしまっている。同様に、パルスの立ち下がりからベースラインに戻るところで大きく曲がってしまっている。波形に図中の赤丸のようなパルスが見られるが、ELPH 側の CT の入力波形でも同様の特徴が確認されたため CT の故障ではなく正常な波形であると判断した。積分値 S を算出するにあたり、パルスの波高と時間幅は入力波の微分で決まりベースラインの湾曲の影響は大きく受けないと考えた。この入力波形を平行四辺形に見立てて図 5.13 に示した $W \times H$ を積分値 S とした。ここで、 W は立ち上がり付近と立ち下がり付近で極小となるサンプル番号の幅、 H は立ち上がり付近と立ち下がり付近で極小となっている ADC カウントの平均値とサンプル番号 900 における ADC カウントとの差とした。波形記録装置 FADC のサンプリングレートが 250MHz であること、1ADC カウント当たり 0.125mV であること、回路全体の抵抗が 50Ω であることを用いると、この波形の電荷量 Q は以下のように求めることができる。

$$Q[\text{pC}] = (W \times 4\text{ns}) \times (H \times 0.125\text{mV}) \times \frac{1}{50\Omega} \quad (5.3)$$

高強度ビームにより EMT に照射された電子の総電荷量の算出には、この方法で求めた電荷量と 5.3 節で求めた照射効率 28.15% を用いた。

5.5.2 EMT の信号応答の評価方法

EMT の信号応答の変化を評価するのに、EMT の信号と ref-Si の信号の積分値の比を用いた。図 5.14 は低強度ビームにおける ref-Si と EMT の信号波形である。横軸は波形記録装置 FADC のサンプル番号、縦軸は ADC カウントである。また、ref-Si に関しては測定時に $1/79.4$ 倍のアッテネーターをかけており、図には 79.4 倍した補正後の信号を示している。ref-Si、EMT とともに初めの 660 点の平均値をベースライン、800~1400 を積分範囲として積分値を求めた。

図 5.15 は ref-Si と EMT の積分値の関係を示したものである。横軸は ref-Si の積分値、縦軸は EMT の積分値であり、赤線は $1000 \times 10^3 \sim 3000 \times 10^3$ の範囲での一次関数によるフィッティング結果であ

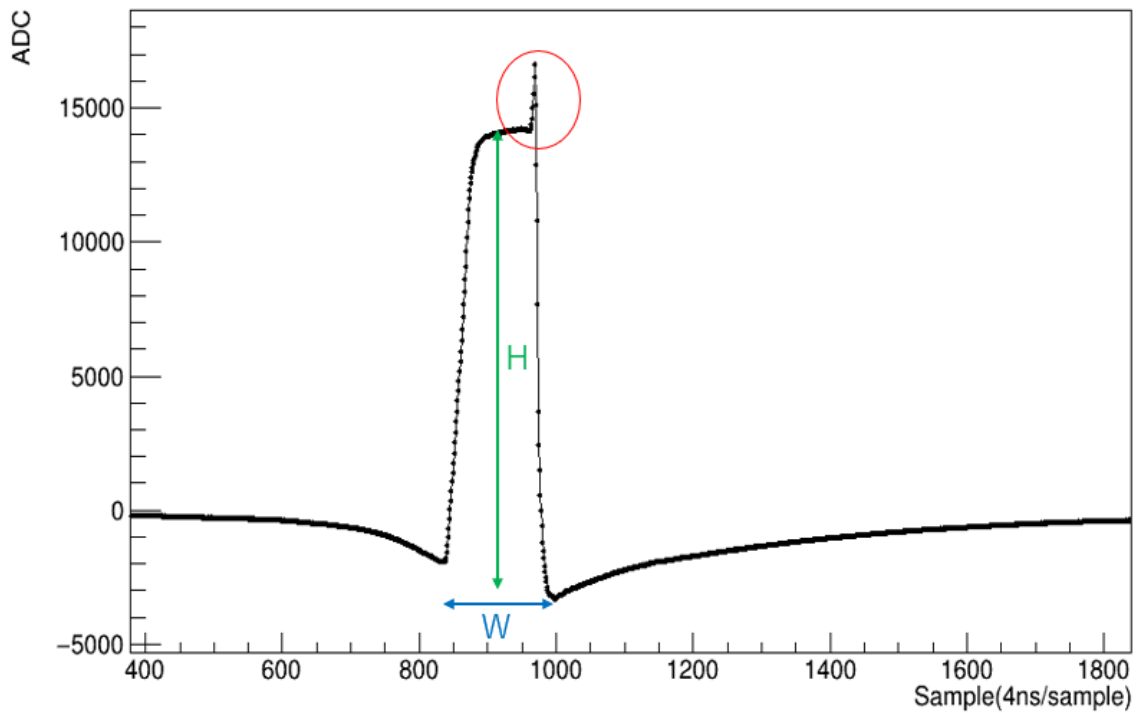


図 5.13 高強度ビームにおける CT の入力信号

る。この一次関数によるフィッティングで得られた傾きを「EMT の信号収量/ref-Si の信号収量」として EMT の信号応答の評価に用いる。

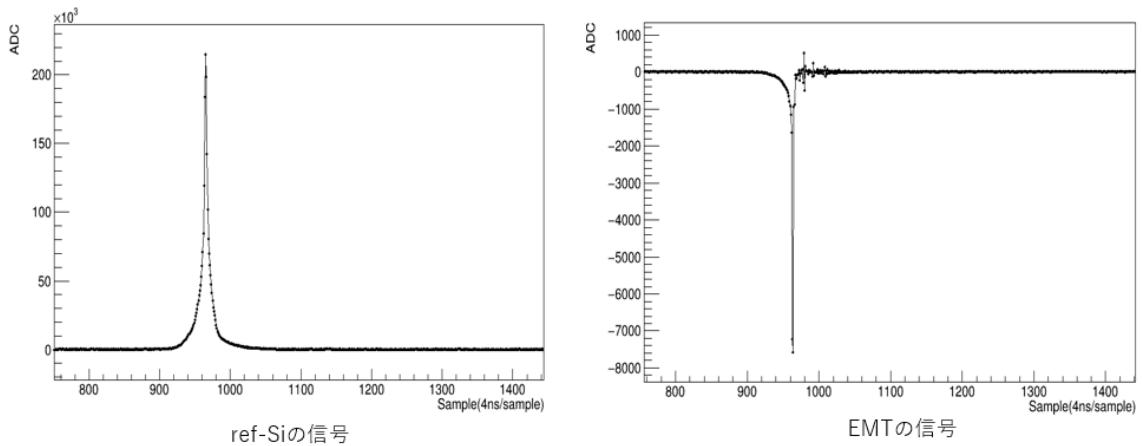


図 5.14 ref-Si と EMT の信号。測定では ref-Si に 1/79.4 倍のアッテネーターがかけられていた。本図は 79.4 倍した補正後の信号波形である。

5.5.3 EMT の温度依存性

温度依存性の測定の結果を図 5.16 に示す。縦軸は EMT の信号収量/ref-Si の信号収量の 20°C(昇温時) との比であり、横軸は測定時の EMT の温度である。赤は昇温時における測定結果、青は降温時における測定結果である。電子ビームの照射において 20°C~40°C の間で最大 7% 程度の温度依存性があることが分かった。これは図 5.17 に示す LED 照射における約 3.5% の温度依存性に比べ大きく、荷電

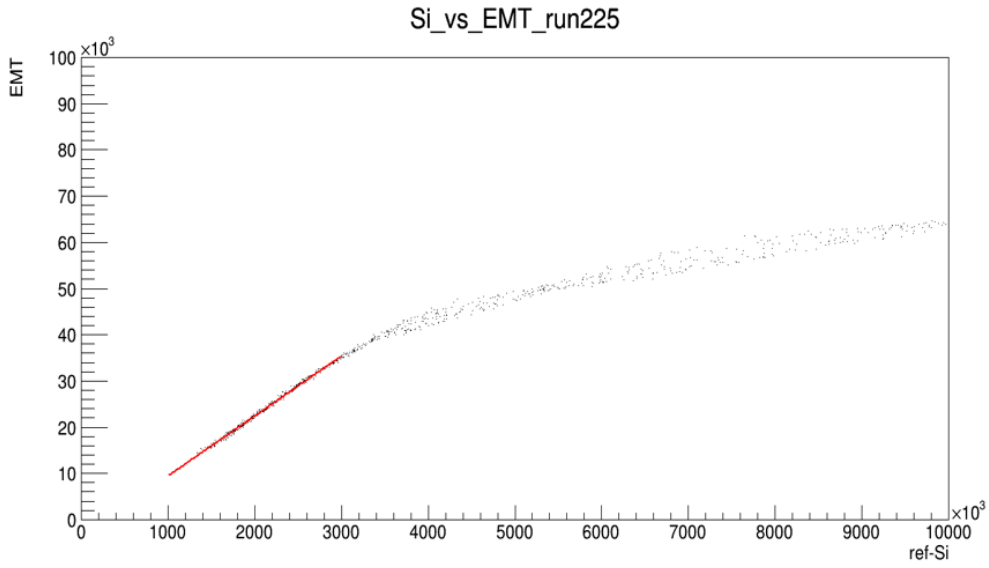


図 5.15 ref-Si と EMT の積分値の関係。

粒子の照射ではより温度の影響を受けやすいことが分かった。この結果より、ミュオンピットでの測定における初期不安定性の原因に EMT の信号の温度依存性がある可能性が高くなった。

temperature dependence

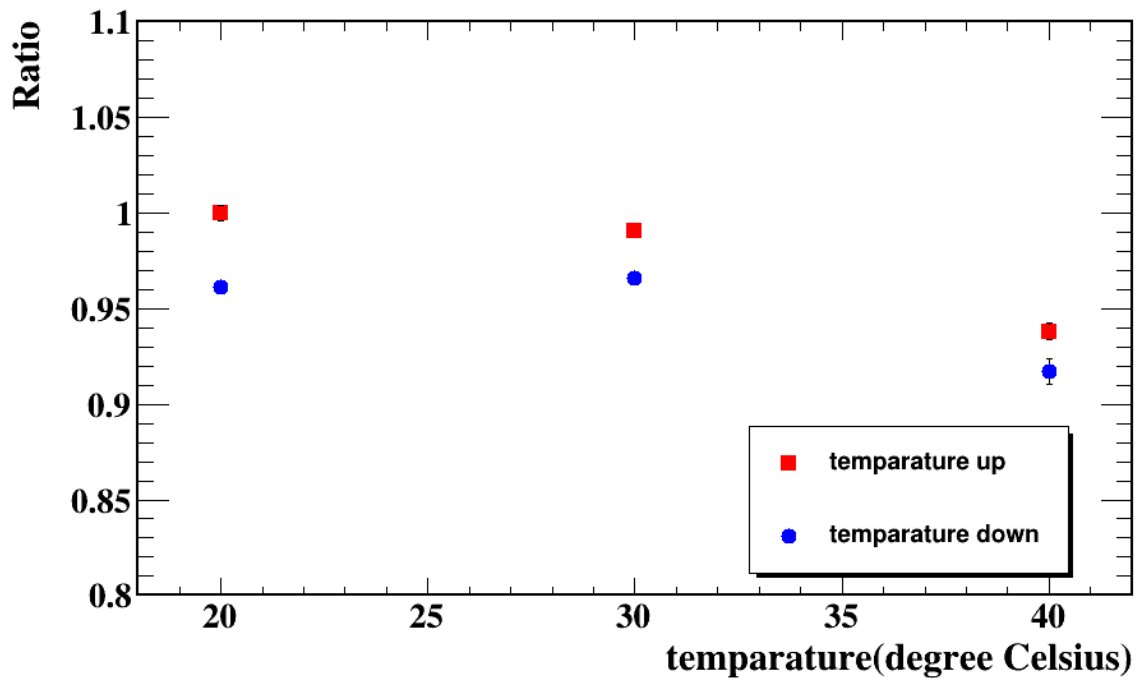


図 5.16 EMT の温度依存性の測定の結果。

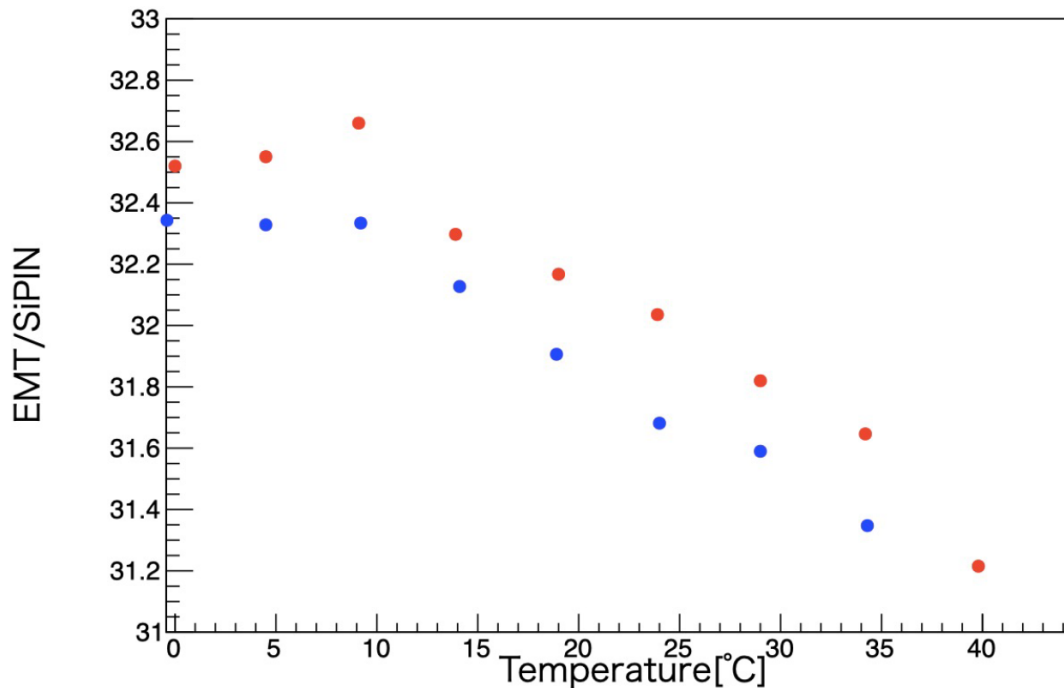


図 5.17 EMT に LED を照射したときの信号の温度依存性 [28]。再掲。

5.5.4 EMT のカソード劣化の評価試験

カソード劣化の評価試験は 2 日目と 3 日目で計 2 回行った。この 2 回の試験の結果を図 5.18、図 5.19 に示す。横軸は全て EMT のダイノードに照射された電荷量 (黒) とそれを J-PARC 将来強度 1.3MW で換算した日数 (赤) である。縦軸は、図 5.18 では EMT の信号収量/ref-Si の信号収量、図 5.19 では EMT の信号収量/ref-Si の信号収量の照射前との比である。誤差棒は一次関数フィッティング時におけるフィッティングのずれを表している。両図とも上図が 2 日目の結果、下図が 3 日目の結果である。また、各マーカーは

- 劣化させる EMT + 劣化させる改造デバイダー回路 (緑: B3,C4)
- 劣化させない EMT + 劣化させる改造デバイダー回路 (赤: A3,A4)
- 劣化させる EMT + 劣化させない通常デバイダー回路 (黒: B0,C0)
- 劣化させる EMT + 劣化させない改造デバイダー回路 (青: B2,C2)

を表している。

2 日目 (上図) と 3 日目 (下図) の結果を比べると、3 日目の測定では 2 日目と異なる点が以下の 3 点見られた。

- 全体的に信号収量の低下が見られた。
- 黒 (C0)、青 (C2) で照射後の信号収量低下が見られない
- 赤 (A4)、黒 (C0)、青 (C2) の信号収量の照射前との比の大小関係が異なる

まず、この 3 点が起きた要因について考える。

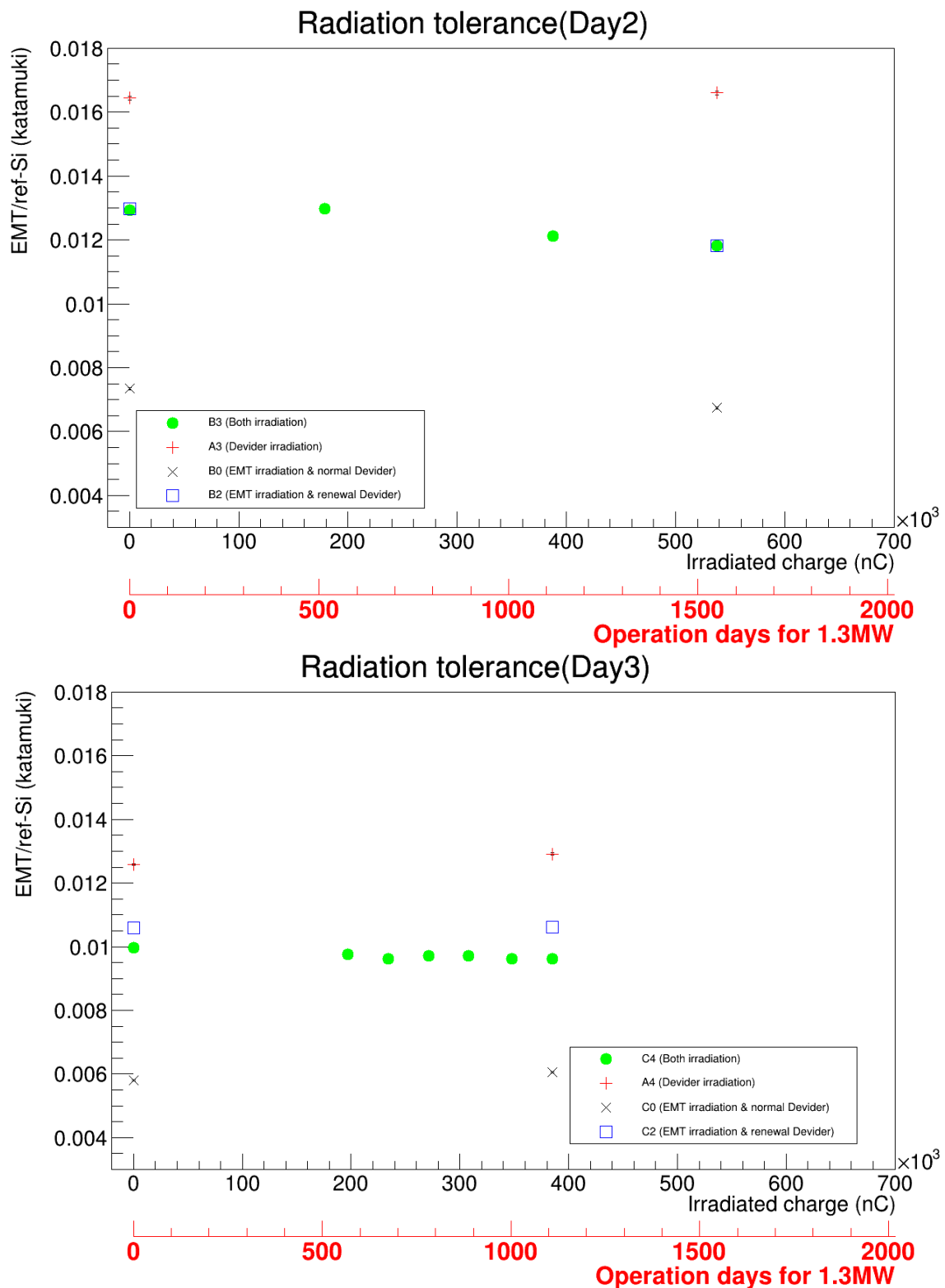


図 5.18 EMT のカソード劣化の評価試験の結果 1。横軸は EMT のダイノードに照射された電荷量 (黒) とそれを J-PARC 将来強度 1.3MW で換算した日数 (赤)、縦軸は EMT の信号収量/ref-Si の信号収量である。

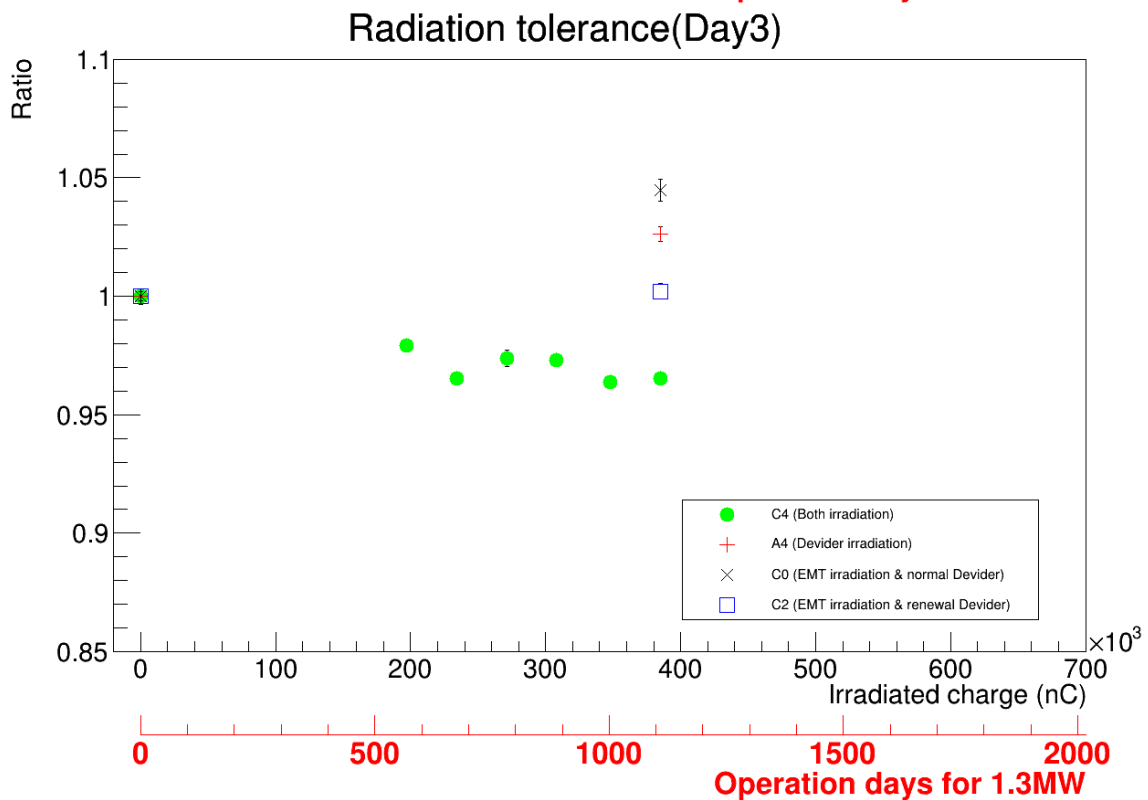
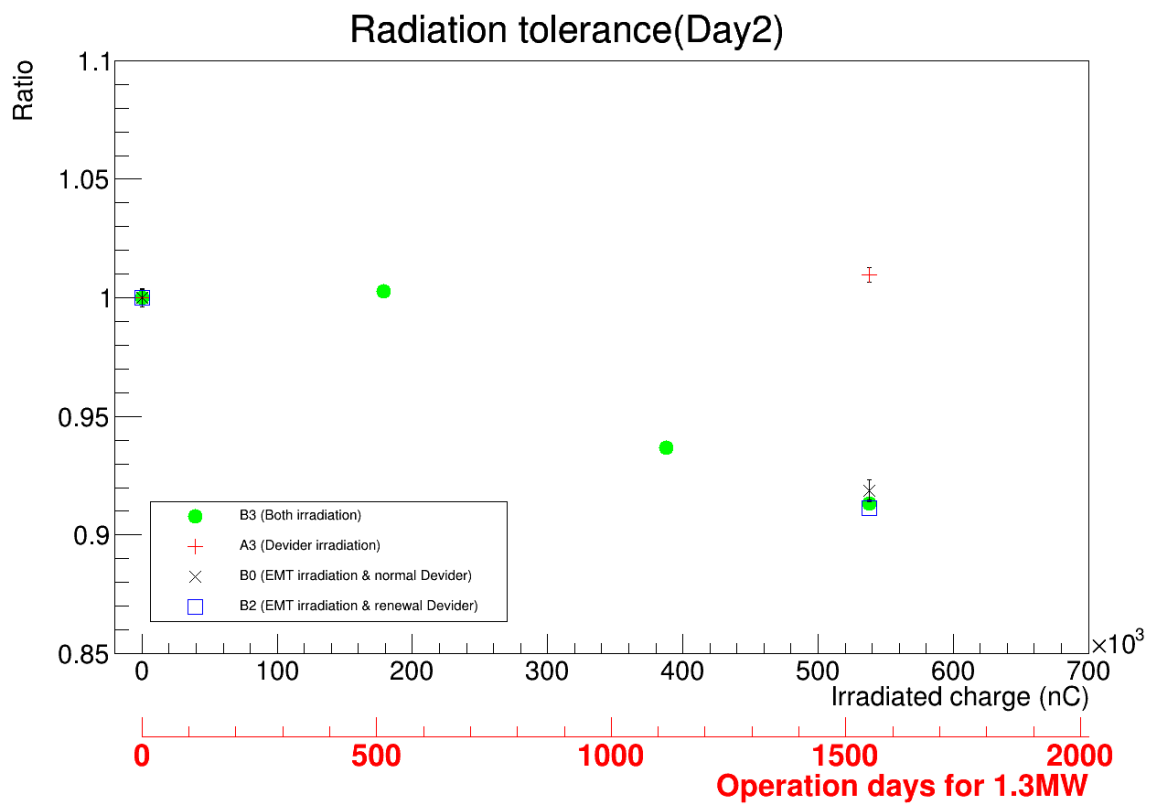


図 5.19 EMT のカソード劣化の評価試験の結果 2。横軸は EMT のダイノードに照射された電荷量 (黒) とそれを J-PARC 将来強度 1.3MW で換算した日数 (赤)、縦軸は EMT の信号収量/ref-Si の信号収量の照射前との比である。

全体的な信号収量の低下

図 5.18 から分かるようにどの組み合わせにおいても、3 日目の信号収量が 2 日目の信号収量から約 10 ~ 15% 程度の低下が見られた。ここで、Si-array による低強度ビームのプロファイル測定の結果を図 5.20 に示す。図から分かるように、鉛直方向のビーム中心が日ごとに上方向に移動しているのが分かる。また、EMT と ref-Si の有感領域の大きさはそれぞれ一辺 8.8mm と一辺 10mm と異なる。これらのことから、ビーム中心がずれたことによる照射効率の変化が EMT と ref-Si の間で異なりそれにより信号収量の低下が見られたと考えられた。

そこで、シュミレーションを用いて EMT と ref-Si に対する照射効率を求め、この照射効率を用いて信号収量の補正を行い、補正前後での比較を行った。シュミレーション方法は (5.3 節) と同様の方法を取り、照射位置をビーム中心の 1 点のみとした。しかし、本シュミレーションでは EMT のダイノードの向きは考慮していない。ここで、Si-array、EMT、ref-Si の位置調整にはレーザー墨出し器を用いており、各検出器の中心はビームラインに対して一致しているとした。シュミレーションによる照射効率の結果が図 5.21 である。得られた照射効率を用いて、信号収量の補正前後の比較を行った。その結果が図 5.22 である。ここで、比較を行うのは個体差の影響をなくするため日を跨いで測定に用いた EMT とデバイダー回路の組み合わせのみである。図 5.22 から分かるように、補正前、補正後ともに個体に関係なく約 10 ~ 20% の信号減少が確認できる。つまり、各検出器の中心が一致していた場合はビームのずれによる照射効率の変化は信号収量の低下の要因ではないと考えられる。

そこで、全体的な信号収量の低下の残る要因としては、レーザー墨出し器による位置調整で各検出器の中心がずれいた可能性、照射効率のシュミレーションに用いた EMT の有感領域の形状が実際と異なっていた可能性 (本シュミレーションでは EMT のダイノードの向きは考慮されていない)、EMT のダイノードの二次電子放出率に位置依存性がある可能性が考えられる。

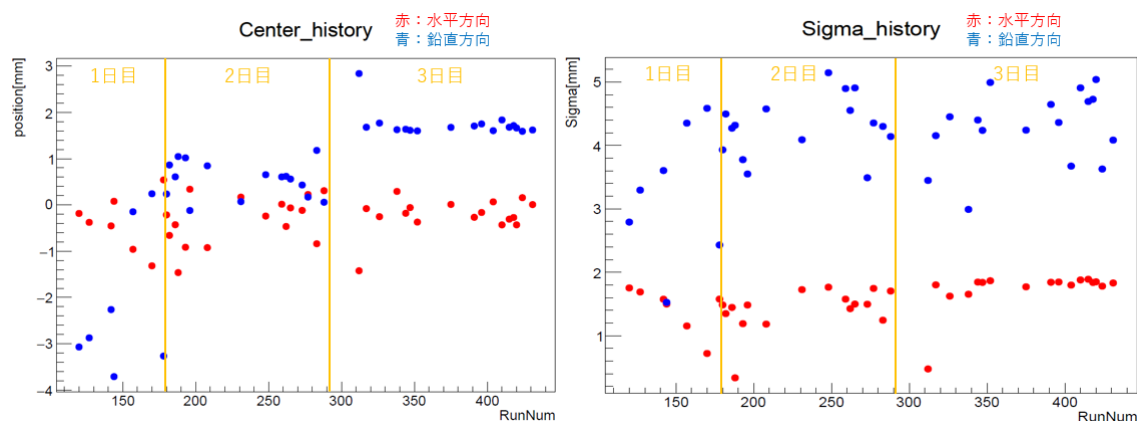


図 5.20 Si-array による低強度ビームの中心と広がり履歴プロット。左図はビーム中心、右図はビームの広がり履歴プロットである。

黒 (C0)、青 (C2) で照射後の信号収量が減少していない

図 5.19 において、2 日目の測定では黒 (B0)、青 (B2) とともに 8% 程度の信号収量の減少が見られた。一方、3 日目の測定では黒 (C0) は信号収量が約 5% 上昇し、青 (C2) は信号収量が変化しなかった。この原因として、測定に用いた ref-Si の劣化が考えられる。ref-Si は高強度ビームを照射していないが、高強度ビームの散乱にさらされていた可能性がある。高強度ビームの散乱にさらされることで、徐々に

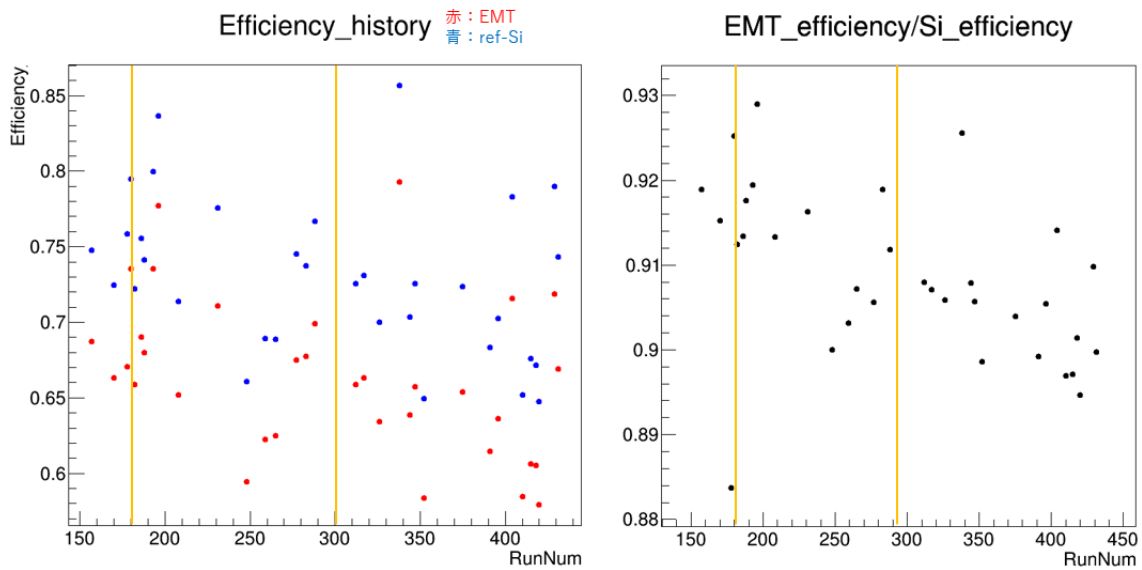


図 5.21 シュミレーションによる EMT と ref-Si の照射効率のヒストリープロット。左図は赤が EMT の照射効率、青が ref-Si の照射効率のヒストリープロット、右図は EMT の照射効率/ref-Si の照射効率のヒストリープロットである。

劣化が進み 3 日目の高強度照射中に劣化が無視できないほど大きくなり測定に影響を与えたと考えられる。徐々に劣化していた証拠として、2 日目の高強度ビームの使用後から ref-si に 0.3mA の漏れ電流が流れていたことが挙げられる。また、第 3 回電子ビーム照射試験では毎日 ref-Si の交換を行っていたが本試験では一度も交換を行わなかった。さらに、高強度ビームの照射方法の変更により高強度ビームの照射時間も第 3 回電子ビーム照射試験に比べ長かった。これらから、3 日目の測定において信号収量の減少が確認されなかったのは高強度ビームの散乱による ref-Si の劣化が原因の可能性が高い。

赤 (A4)、黒 (C0)、青 (C2) の信号収量の照射前後の比の大小関係が異なる

図 5.19 において、2 日目の測定では照射前後の比は赤 (A3) が一番大きい。一方、3 日目の測定では黒 (C0) が一番大きい。これは前述の高強度ビームの散乱による ref-Si の劣化だけでは説明できない。そこで原因として EMT の初期不安定性が現れたこと、測定の系統誤差が大きく影響してしまったことが考えられた。第 3 回の試験の初期不安定性試験において、HV 印可して約 30 分程度の経過した後測定する必要があることが分かった。2 日目の測定ではどの組み合わせの測定においても 30 分待機したが、3 日目の測定では試験時間の短縮のため測定中に、次に測定する予定の EMT とデバイダー回路の組み合わせを HV を印可した状態で待機させていた。そして、直前の組み合わせの測定が終了したら、待機させていた EMT の HV を一度切りすぐにビームラインに設置した後 HV 印可を再開した。この作業により HV が切れていた時間は約 1～2 分であり、これにより、初期不安定性が現れた可能性がある。初期不安定性は第 2 回の試験から約 3% あることが確認されている。この作業を行った EMT とデバイダー回路の組み合わせを表 5.9 にまとめる。また、図 5.22 の最上図の左図 (補正前) の 1 日目の結果の 4 点はビームを止めず状態を変えずに測定したランである。よってこの結果から約 4～5% 程度の測定の系統誤差があることが可能性がある。以上の 2 点の影響により、2 日目の測定と 3 日目の測定の間で赤、黒、青の信号収量の照射前後の比の大小関係が異なる結果が得られた可能性がある。

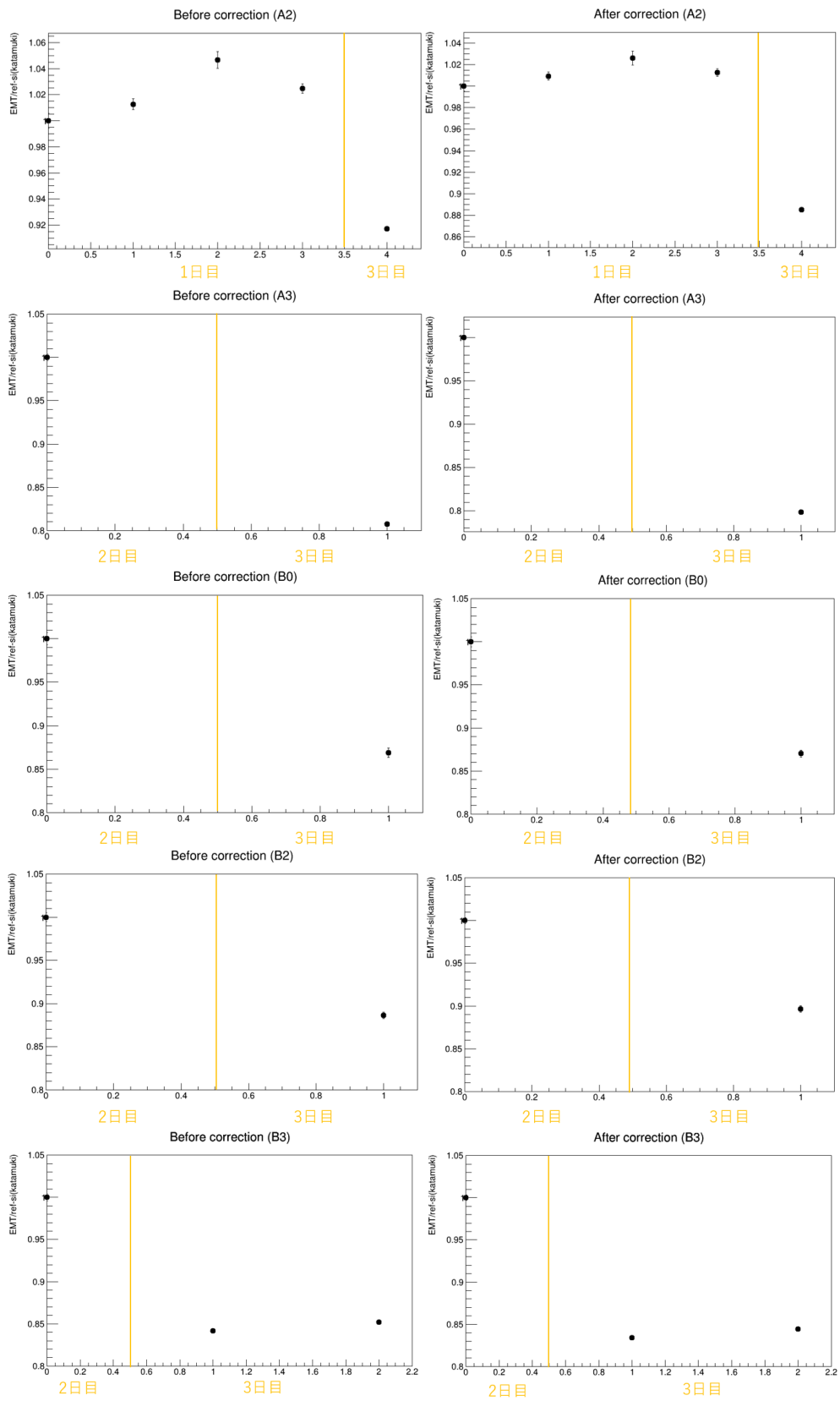


図 5.22 照射効率による補正前後の信号収量の比較。左図は補正前、右図は補正後である。EMT とデバイダー回路の組み合わせは上から A2,A3,B0,B2,B3 である。また、橙の線は測定日の境を表している。

表 5.9 3 日目の測定において HV をかけて待機させていた組み合わせ

EMT+ デバイダー回路	高強度照射前	高強度照射後
A4	✓	✓
C0	✓	✓
C2	✓	-
C4	-	-

カソード劣化の評価試験の結論

これまで述べたように、3 日目の測定には不明な要素が多いことが分かる。また、劣化させる EMT+劣化させない通常デバイダー回路を用いた測定 (黒:B0、C0) において、図 5.19 より 2 日目の測定では約 8% の減少、3 日目の測定では約 5% の増加と異なる結果が得られた。第 3 回の試験での EMT のみを劣化させた場合の測定では約 15% の減少が確認されている (図 4.28)。

これらから、以下では 2 日目の測定結果 (上図) が正しいとして評価を行う。

- 劣化させる EMT + 劣化させる改造デバイダー回路 (緑：B3)

本測定はミュオンモニターのエミュレーションであり、改造デバイダー回路を用いた場合の放射線耐性を評価することが目的である。図 5.19 より、J-PARC 将来強度 1.3MW で 500 日分照射までは減少が見られず、1000 日分照射では 7%、1500 日分照射では 10% 程度の減少が見られた。この結果から、改造デバイダー回路を用いることで J-PARC 将来強度 1.3MW 運転で約 500 日間運用できる可能性があることが分かった。

- 劣化させない EMT + 劣化させる改造デバイダー回路 (赤：A3)

本測定は改造デバイダー回路に対する高強度照射による影響の評価が目的である。図 5.19 より、高強度照射による信号収量の変化はほぼ見られなかったが、表 5.10 のように改造デバイダー回路の静電容量の値に変化があった。抵抗に関しては変化はないが、静電容量は改造デバイダー回路 3,4 とともに設計値の 5% 以内ではあるが、 C_4 は設計値より 10nF 小さく、 C_5 は設計値より 10nF 大きくなった。この結果から、高強度ビームの照射によって静電容量の値が変化することが分かったが、その原因や EMT の信号に対する影響は解明できておらず更なる検証を行う必要がある。

- 劣化させる EMT + 劣化させない通常デバイダー回路 (黒：B0)

本測定は EMT だけを劣化させ、劣化させていない通常デバイダー回路を用いて第 3 回電子ビーム照射試験のような約 15% の信号減少の再現が目的である。図 5.19 より、約 8% の信号減少が確認された。減少量は第 3 回に比べ半減しているが、EMT だけに照射した場合は信号減少するという同様の傾向が見られた。

- 劣化させる EMT + 劣化させない改造デバイダー回路 (青：B2)

本測定は EMT の劣化を新品の改造デバイダー回路を用いることで打ち消すことができるかを評価すること、黒 (B0) と比較しカソード劣化を評価することが目的である。図 5.19 より、約 8% の信号減少が確認された。この減少量は通常デバイダー回路での測定と同じであり、改造デバイダー回路を用いても EMT の劣化は打ち消せないことが分かった。また、通常デバイダー回路と改造デバイダー回路と結果

表 5.10 高強度ビームを照射した改造デバイダー回路の抵抗値と静電容量の変化。

抵抗 [kΩ]					
改造デバイダー回路					
		高強度照射前		高強度照射後	
	設計値	3	4	3	4
R ₁	0	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0
R ₂	180	179.6	180.6	179.5	180.6
R ₃	180	179.8	180.5	179.7	180.4
R ₄	180	180.4	180.6	180.3	180.6
R ₅	180	179.8	180.4	179.7	180.3
R ₆	180	179.6	179.9	179.6	179.8
R ₇	180	179.6	180.2	179.5	180.1
R ₈	180	179.6	179.9	179.5	179.9
R ₉	180	179.3	179.8	179.3	179.7
R ₁₀	470	466	466	469	467
R ₁₁	75	74.9	75.0	74.9	73.9
コンデンサ [nF]					
C ₁	10	10.3441	10.4407	10.3047	10.4446
C ₂	10	10.3204	10.3053	10.3250	10.3102
C ₃	10	10.1859	10.3150	10.1906	10.3195
C ₄	330	332.615	329.783	322.293	318.606
C ₅	330	331.978	346.096	341.499	340.923

に違いが見られないため、カソードの劣化は EMT の放射線による劣化の主な原因ではないことが分かった。よって、放射線による劣化の原因がダイノードに蒸着されているアルカリ-アンチモンの劣化である可能性が高くなった。

5.6 第 4 回電子ビーム照射試験のまとめ

EMT の温度依存性の電子ビームを用いた評価、EMT の放射線劣化の原因究明を目的として 2022 年 11 月に第 4 回電子ビーム照射試験を ELPH で行った。

EMT の温度依存性の評価に関しては、電子ビームに対する EMT の信号応答の温度依存性は最大約 7% あり、LED 照射に対する温度依存性 (約 3.5%) よりも大きいことが分かった。このことから、J-PARC ミューオンピットにおける初期不安定性の原因に EMT の信号の温度依存性がある可能性が高くなった。

EMT の放射線劣化の原因究明に関しては、カソードと 1 段目ダイノード間をショートさせた改造デバイダー回路を用いることでカソード劣化が電子増幅に与える影響を抑えた測定を行った。その結果、EMT の放射線による劣化の原因はカソードの劣化が原因ではなく、ダイノードに蒸着されているアルカリ-アンチモンの劣化である可能性が深まった。また、この測定の他に EMT とデバイダー回路の様々な組み合わせで高強度ビーム照射前後の信号の比較を行った。EMT、改造デバイダー回路ともに劣化させたミューオンモニターのエミュレーションでは J-PARC の将来強度 1.3MW 運転において約 500

日の運用ができる可能性があることが分かった。EMT のみを劣化させ、劣化させない通常デバイダー回路の測定では第 3 回の試験の再現を行い、信号の減少率は半減したが第 3 回の測定同様に信号の減少が見られた。EMT のみを劣化させ、劣化させない改造デバイダー回路の測定では通常デバイダー回路を用いた場合と同様の信号減少が確認され、EMT の劣化を新しい改造デバイダー回路で打ち消せないことが分かった。改造デバイダー回路のみを劣化させた場合、信号減少は見られなかったが静電容量の値が変化した。高強度ビームの照射によりデバイダー回路の静電容量の変化が起きることが分かったが、その原因や EMT の信号に対する影響の解明には至っておらず、更なる検証を行う必要がある。

また本試験では、ビームプロファイル測定の精度向上のためビームモニターの改良と一様に EMT に放射線を試射するため高強度ビームの照射方法の改善を行った。ビームモニターの改良に関しては、OTR の治具の開発や光学フィルターの導入、カメラのゲインの調整等を行った。照射方法の改良に関しては、高強度ビーム照射時に EMT を連続的に動かすことで、EMT に対する照射の非一様性は最大約 3% に押さえることができた。

第6章

結論

T2K 実験ミューオンモニターは J-PARC のビーム大強度化に伴い、十分な測定精度と高い放射線耐性を持った新たな検出器の開発を行っている。その候補の1つが電子増倍管 (EMT) である。これまでの J-PARC での試験や東北大学電子光理学研究センター (ELPH) での試験から、初期不安定性の原因が EMT の温度依存性の可能性があり LED 照射に対しては温度依存性があること、放射線による劣化がデバイダー回路でなく EMT 本体にあることが判明していた。また、ELPH での第3回の試験では電子ビームによる照射に約3倍の非一様性が存在し、放射線照射量の見積りに最大3倍の不定性があった。

これらを受け本研究では、荷電粒子に対する EMT の温度依存性の測定、EMT の放射線による劣化の原因の究明を目的に ELPH で第4回電子ビーム照射試験を行った。ビームモニターの改良や照射方法の改良を行うことで、EMT に対する高強度ビームの照射の非一様性は最大約3%に抑えることができた。

EMT の温度依存性の評価に関しては、電子ビームに対する EMT の信号応答の温度依存性は最大約7%あり、LED 照射に対する温度依存性 (約3.5%) よりも大きいことが分かった。このことから、J-PARC ミューオンピットにおける初期不安定性の原因に EMT の信号の温度依存性がある可能性が深まった。EMT の放射線劣化の原因究明に関しては、カソードと1段目ダイノード間をショートさせた改造デバイダー回路を用いることで実質的にカソードの劣化の影響がない測定を行った。その結果、EMT の放射線による劣化の原因はカソードの劣化が原因ではなく、ダイノードに蒸着されているアルカリ-アンチモンの劣化である可能性が深まった。さらに、この測定により改造デバイダー回路を用いることで、J-PARC の将来強度 1.3MW 運転において約500日の運用ができる可能性があることが分かった。

謝辞

2年間という短い期間の中、多くの方々に支えられたことで研究を進めることができました。仙台での電子ビーム照射試験や J-PARC への出張など数多くの中々味わうことのできない経験をさせていただきました。皆様の支えがあったからこそ充実した大学院生活を送ることができ、こうして修士論文を書き上げることができたことに感謝しております。清矢良浩教授には解析の方針についてなどおおくの研究に関するアドバイスや学会のスライドの添削など丁寧に指導して頂き大変感謝しております。山本和弘准教授には研究に不可欠な環境の構築や整備など多くのサポートして頂き、私たち学生は研究に専念することができたと実感しています。ありがとうございます。東北大学の市川温子教授には普段のミーティングなどで数多くの鋭いアドバイスを頂き、物理や検出器への理解を深めることができました。ありがとうございます。東北大学の中村輝石助教には EMT の治具の開発やコンピュータの関連知識など、研究活動を通して様々なことを指導して頂きました。ありがとうございます。本條貴司さんには CAD の使い方やコードの中身について丁寧に解説して頂いたり、様々な面で研究のサポートをして頂きました。また、川村悠馬君、東北大学の瀧藤航一さん、笠間奏平君、東京理科大学の石塚正基教授、中村妃南さん、京都大学の木河達也助教、安留健嗣さん、KEK の坂下健准教授、松原綱之助教には研究に関してアドバイスやお手伝いをして頂きました。ありがとうございます。研究室の同期である長谷和哉君には学部生を合わせ6年間をともに過ごし、色々な場面で助けられました。最後に、これまでの人生ずっと支えてくれた家族に心から感謝いたします。

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 Free Antineutrino" Phys. Rev. 117 (1960)
- [3] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata., "Remarks on the unified 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] Y.Itow et al. "The JHF-Kamioka neutrino project" arXiv:hep-ex/0106019 (2001)
- [6] Y.Yamazaki et al. "Accelerator Technical Design Report for J-PARC" KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044 (2003)
- [7] K. Abe et al. (T2K collaboration), "The T2K Experiment", Nucl. Instrum. Meth. A 659(1):106-135 (2011).
- [8] S. Assylbekov et al., "The T2K ND280 Off-Axis Pi-Zero Detector", Nucl. Instrum. Meth. A 68648 (2012)
- [9] N. Abgrall et al., "Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors", Nucl. Instrum. Meth. A 637 25 (2011)
- [10] P. A. Amaudruz et al., "The T2K Fine-Grained Detectors", Nucl. Instrum. Meth. A 696 1 (2012)
- [11] D. Allan et al., "The electromagnetic calorimeter for the T2K near detector ND280", Journal of Instrum. 8 10019 (2013)
- [12] S. Aoki et al., "The T2K Side Muon Range Detector (SMRD)", Nucl. Instrum. Meth. A 698135 (2013)
- [13] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), "The Super-Kamiokande detector", Nucl. Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- [14] K. Abe et al. (T2K collaboration), "Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam", Phys. Rev. 88(3):032002 (2013).
- [15] D.Beavis et al., (BNL-E889 Collaboration), "Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment at the AGS", (1995)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] F. P. An et al., "Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay", Phys. Rev. Lett. 108:171803 (2012).
- [19] K. Abe et al. (T2K collaboration), "Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon

- Neutrino Beam” , Phys. Rev. 88(3):032002 (2013).
- [20] K. Abe et al. (T2K collaboration), ” Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam” , Phys. Lev. Lett. 112(6):061802 (2014).
- [21] K. Abe et al., “J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report” , aX-ive:1908.05141 (2019)
- [22] K. Suzuki et al., ” Measurement of the muon beam direction and muon flux for the T2K neutrino experiment” , Prog. Theor. Exp. Phys. 2015(5):053C01 (2015).
- [23] 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 (Development of a new detector for the muon monitor at the T2K experiment)” , 修士論文, 大阪市立大学大学院 (2020).
- [24] 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, 東京理科大学大学院 (2021)
- [25] 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).
- [26] 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)
- [27] Y. Ashida, M. Friend, A. K. Ichikawa, T. Ishida, H. Kubo, K. G. Nakamura, K. Sakashita, W. Uno, ” A new electron-multiplier-tube-based beam monitor for muon monitoring at the T2K experiment” , Prog. Theor. Exp. Phys. 2018(10):103H01 (2018).
- [28] 瀧藤航一, ”T2K 実験ミュオンモニターのための電子増倍管の研究開発” , 修士論文, 東北大学大学院 (2021)
- [29] 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/about/>
- [30] 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)
- [31] 東北大学 電子光理学研究センター 共同利用申込書 別紙 (2022)
- [32] 日立金属株式会社, ” 「ファインメット」 EMC 総合カタログ” , <https://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm3-k.pdf>
- [33] 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/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13620-02_kmpd1198j.pdf
- [34] Boris Dolgoshein, Transition radiation detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Volume 326, 1993
- [35] S. Bhadra, et al., Optical transition radiation monitor for the T2K experiment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Volume 703, 2013
- [36] 笠間奏平, ”T2K 実験の MUMON における次期検出器候補 EMT の放射線耐性試験のための遷移放射を用いた大強度電子ビームプロファイル” , 卒業論文, 東北大学 (2021)