

2024 年度 修士論文

MEG II 実験液体キセノン検出器用 VUV-MPPC の
放射線損傷に関する研究
(Study on the Radiation Damage of the VUV-MPPC
in the MEG II Liquid Xenon Detector)

東京大学大学院理学系研究科
物理学専攻
素粒子物理国際研究センター 大谷研究室

馬越隆成

2025 年 1 月

概要

MEG II 実験はスイス・ポールシェラー研究所 (PSI) で行われているミューオン稀崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の探索実験であり、2021 年から 2026 年までのデータ取得により感度 6×10^{-14} (90 % CL) で $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索、発見を目指している。本研究では MEG II 実験液体キセノン (LXe) 検出器に関連する 2 つのトピックに関して報告する。1 つ目のトピックは LXe 検出器のキセノンリークに関する報告である。2023 年の MEG II ランの終わり頃、LXe 検出器内の液体キセノンの液面減少が観測された。これをきっかけにキセノンのリークチェックが 2024 年シャットダウン期間中に行われた。LXe 検出器 PMT の信号電荷の変動、検出器真空層の真空引きを止めたときの圧力上昇などから LXe 検出器には 2 種類のリークがあることが明らかとなった。1 つ目のリークは LXe 検出器に取り付けであるバルブの 1 つからのリークでそのリークレートは 5.9 kg/day であった。2 つ目のリークは検出器内容器からのリークでそのリークレートは 0.22 kg/day であった。バルブからのリークは 2024 年ランが始まる前に止めることができたが、物理データ取得を優先して内容器からリークがあるまま 2024 年ランを実施した。その際オンラインリークモニターを導入し、これらリークにいち早く気付けるようにした。内容器からのリークは 2025 年のシャットダウン期間中に止める予定である。2 つ目のトピックは LXe 検出器ガンマ線入射内面で使われているシリコン光センサー (SiPM)、MPPC (SiPM の一種) の放射線損傷に関する研究である。MEG II 実験では前実験 MEG のアップグレードとして内面の光センサーを 2 インチ PMT から 12 mm 角の MPPC に交換した。これによりガンマ線の高精細な読み出しが可能となったが、一方で当初想定されていなかった MPPC の光子検出効率 (PDE) 減少が観測された。本研究では液体キセノンシンチレーション光 (中心波長 175 nm) を放射線損傷の原因となる放射線と仮定し、常温、および液体キセノン中で MEG II 実験相当の VUV 光を MPPC に照射することで PDE 減少の再現を試みた。その結果、測定点のふらつきの影響により PDE 減少を再現することはできなかった。測定点のふらつきの要因を検討し、より精度の高い測定の可能性について検討を行なった。

目次

第 1 章	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の物理	1
1.1	標準模型	1
1.2	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索	2
1.3	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊とその背景事象	2
第 2 章	MEG II 実験	4
2.1	ビームライン	4
2.2	MEG II 実験検出器	5
2.3	感度	9
第 3 章	LXe 検出器	11
3.1	MEG 実験 LXe 検出器からのアップグレード	11
3.2	PMT	12
3.3	MPPC	12
3.4	キセノン輸送システム	14
3.5	光センサーの較正	15
3.6	MEG II 実験 LXe 検出器の局所座標系	15
第 4 章	LXe 検出器のキセノンリークに関する研究	18
4.1	グロスリーク	18
4.2	スモールリーク	21
4.3	リークのオンラインモニター	24
4.4	結論	26
第 5 章	VUV-MPPC の放射線損傷	27
5.1	SiPM の放射線損傷	27
5.2	LXe 検出器 VUV-MPPC の放射線損傷	27
5.3	吸湿サンプルへの室温中での VUV 光照射試験	33
5.4	吸湿サンプルへの液体キセノン中での VUV 光照射試験	36
第 6 章	まとめと今後の展望	44
付録		45
A	図 5.20 の相対 PDE 減少領域の計算方法	45
B	質量分析器	46

目次

1.1	クォーク、レプトンのフレーバー [1]。クォークと中性レプトンにおいてフレーバーの破れは観測されているが荷電レプトンのフレーバーの破れはまだ見つからない。	1
1.2	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の模式図。ミューオンの崩壊先の粒子陽電子とガンマ線は互いに反対方向に、同じエネルギー 52.8 MeV を持って飛んでいく。	2
2.1	MEG II 実験検出器 [2]	4
2.2	PSI 陽子サイクロトロン加速器 [3]	5
2.3	磁気スペクトロメータ COBRA[4]	6
2.4	MEG II 実験ミューオン停止ターゲット [2]	6
2.5	CDCH の全体像 [2]	7
2.6	下流側陽電子タイミングカウンター [5]	7
2.7	液体キセノン検出器の内部と液体キセノンシンチレーション光の分布	8
2.8	RDC の模式図 [2]	8
2.9	MEG 実験と MEG II 実験の偶発的背景事象の背景ガンマ線 ($E_\gamma > 48$ MeV) のソースとなるイベント事象 [2]	8
2.10	DAQ 時間に対する MEG II 実験で推定される上限感度 (90 % CL) (黒の曲線) と 3σ 発見ポテンシャル (青の曲線) [5]。黒の点は過去の年における感度を示す (2023 は予測である)。	10
3.1	52.8 MeV の信号ガンマ線のファーストインタラクションの深さに対するシンチレーション光の収集効率 [2]	11
3.2	メタルチャンネルダイノードの構造と光電子の増幅過程 [6]	12
3.3	MEG II 実験 LXe 検出器 PMT[7]。光電面表面にアルミニウムストリップが貼り付けてある。	12
3.4	PMT の回路図 [7]	12
3.5	p-on-n, n-on-p 型の SiPM ([8] の図を改変)	13
3.6	LXe 検出器内面に使われている MPPC パッケージ [9]。1 つのパッケージあたり 4 枚のチップがそれぞれ独立に乗っている。	14
3.7	弱い LED 光に対する MPPC の電荷スペクトル [10]。MPPC のゲインは 0 photo-electron ピークと 1 photo-electron のピーク間の距離から計算される。	14
3.8	MPPC のシリアル番号に対する ECF[1]。各マーカーは異なる時期に作られた MPPC の製作ロットを表す。	14
3.9	MEG II 実験キセノン純化・保管システム [11]。図は 2011 年時点のものであるため高圧ガスタンクは 8 基しかない。	15
3.10	LXe 検出器に設置されている ^{241}Am 。 ^{241}Am は金メッキタングステンワイヤーに巻かれ、金で覆われている [1]。	16

3.11	LXe 検出器に設置されている MPPC 較正用の LED ユニット。1 つの PCB に 3 つ LED がマウントされ、減光のためにテフロンで覆われている [1]。	16
3.12	LXe 検出器内の LED の配置 ([1] の図を改変)。緑色で示された LED は PMT 較正用、青色で示された LED は MPPC 較正用に用いられる。	16
3.13	MEG II 実験 LXe 検出器各面と局所座標系の関係 [12]。局所座標系の軸は赤の矢印で示された (u, v, w) である。	17
4.1	LXe 検出器に取り付けてあるゲートバルブとその接続箇所	19
4.2	リークによる液面付近の PMT の信号電荷変化	20
4.3	グロスリーク中の PMT の信号電荷変動とそのときの液面変化	20
4.4	LXe 検出器内容器の液面の形 (台形) とグロスリーク中のその液面の寸法。x, z 軸は地上面に張る軸である。	21
4.5	キセノンのスモールリーク。LXe 検出器内容器から真空層にキセノンが漏れている。	22
4.6	真空層の原子・分子のマススペクトル。物質質量 66, 131 amu 付近にキセノンのピークが見える。そのほかにも窒素や酸素などの 1 価、2 価のイオンピークが見える。	22
4.7	スモールリーク期間中の液面付近の上流面 3 列目の PMT の信号電荷変動。赤線は信号電荷を 1 次関数でフィッティングしたもの。	23
4.8	リークによる真空層の圧力上昇と液面レベルの関係	24
4.9	リーク上昇アクシデント前後におけるリークレートの時間変化。アクシデント直後のリークレートのプロット点を青丸で囲って示した。青丸のプロット点の後、リークレートを下げるために検出器の圧力を 0.107 MPa から 0.101 MPa まで下げたが依然としてのリークレートは高いままである。	25
4.10	LED データによるオンラインリークモニター。青色、マゼンタ色、赤色のプロットはそれぞれ LXe 検出器の外側、上面、上流・下流面の同じ列の PMT の信号電荷の平均値である。	25
4.11	外れ値除去前後のリファレンス PMT の相対信号電荷のヒストリー	26
5.1	2017-2020 年ビーム試験、2021 年 MEG II ランにおける VUV-MPPC の PDE 減少 ([1] の図を改変)	28
5.2	2018-2019 年に読み出された VUV-MPPC のチャンネル (赤色)。読み出されていないチャンネルは灰色、デッドチャンネルは黒である。ここで内面以外の面の PMT チャンネルは全て灰色にした ([10] の図を改変)。	28
5.3	PDE 減少と LXe 検出器放射線環境の関係 [1]	29
5.4	LXe 検出器の放射線環境 [1]	29
5.5	表面損傷のメカニズム (仮説)	30
5.6	VUV 光、可視光に対する PDE 減少の推移。横軸はミュオン照射時間である [10]。	31
5.7	VUV-MPPC の水分吸収による PDE 減少 [13]。使用された VUV-MPPC の型番は S13370-3050CN である。	32
5.8	MEG II 2022 年ランのアニーリング前の VUV-MPPC の PDE の分布 (黒) とアニーリング後の PDE の分布 (赤) [5]	32
5.9	VUV 光常温照射試験のセットアップ。20 W キセノンフラッシュランプで VUV 光を照射しているとき、リファレンス用の VUV-MPPC に VUV 光が照射されないように厚紙に遮光テープを貼ったカバーで覆った。2 W キセノンフラッシュランプで VUV 光を照射して VUV-MPPC の信号を測定しているときはこのカバーをリファレンス VUV-MPPC から外した。	33

5.10	測定系における波長スペクトル、透過率の関係	34
5.11	測定系における信号電荷分布	35
5.12	SiPM の飽和現象 [14]。レジェンド内の数字は SiPM のピクセル数を表す。	36
5.13	250 時間吸湿サンプルの電荷分布。バンドパスフィルターを 4 枚つけた 2 W キセノンフラッシュランプからこのサンプルに VUV 光を照射した。	36
5.14	各吸湿サンプルの照射時間に対する信号電荷の変動。赤色の点線は 2021 年の MEG II ランにおける PDE 減少速度から予測される振る舞いを示したもの	37
5.15	液体キセノン中での VUV 光照射試験のセットアップ	38
5.16	VUV-MPPC の 2 つのチップ（黒と赤）にかけられたオーバー電圧に対する PDE の変動 [9]	38
5.17	Chip 0, 1 にかけた動作電圧とゲインの関係	39
5.18	液体キセノン中で VUV 光照射中の Chip 0 における電荷量、ゲイン、ECF、トリガーレートの時間変化	41
5.19	液体キセノン中で VUV 光照射時の信号電荷分布	42
5.20	吸湿サンプルの Chip 0, 1 に対する相対 PDE の時間変化。緑の背景領域は予想される PDE 減少速度の不確かさを示す。	42
5.21	2017-2021 年、および 2022 年ミュオンビーム照射中の PDE 減少ヒストリー。2022 年において PDE が回復しているがこれは 2021 年ラン後のシャットダウン期間中に VUV-MPPC をアニーリングしたからである（第 5.2.4 項参照）。またアニーリング後、回復した PDE の減少速度は遅くなっているが、これはアニーリングが放射線損傷の機構に何らかの変化をもたらしたことを意味する。	43
5.22	液体キセノン中で VUV 光照射中における Chip 0, 4 の N_{phe} の時間変化。	43
B.1	四重極型のアナライザー [15]	47

表目次

2.1	MEG II 2021 年データセットにおける陽電子の位置・角度分解能 [5]	6
2.2	MEG II 実験検出器の読み出しチャンネル [5]	9
4.1	LXe 検出器内の LED と PMT を用いた方法および真空層の圧力上昇を用いた方法、これら 2 つの方法によるリークレートとそれに対する不定性の原因	23
5.1	VUV-MPPC の構造	27
5.2	使用した吸湿サンプルの吸湿状況。ここで 2 列目は温度 60 °C、湿度 90 % の環境下に VUV-MPPC をさらした時間を示す。このとき VUV-MPPC は常温 (25 °C)、常湿 (60 %) の環境下に比べて 89 倍早く水分を吸収する [13]	33
B.1	アナライザーの種類 [16]	46

第 1 章

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の物理

1.1 標準模型

素粒子の標準模型は非常に高い精度で素粒子実験の結果を説明するが一方でさまざまな綻びを含んでいる。標準模型では説明できない代表的なものとして以下のものがある。

1. 宇宙初期、粒子と反粒子は同じ数ずつ作られたはずなのに現在は粒子だけが存在していること
2. ニュートリノが質量を持つこと（ニュートリノ振動）
3. ダークマター、ダークエネルギーとは何か

標準模型を超える物理現象の 1 つとして荷電レプトンフレーバーの破れが提唱されている。標準模型において粒子が崩壊した際、崩壊の前後でそのフレーバー（世代）は保存される。一方、1998 年のニュートリノ振動発見 [17] によって中性レプトン（ニュートリノ）のフレーバーが保存されないことが明らかとなった（図 1.1）。これは標準模型が説明できない物理現象の 1 つである。

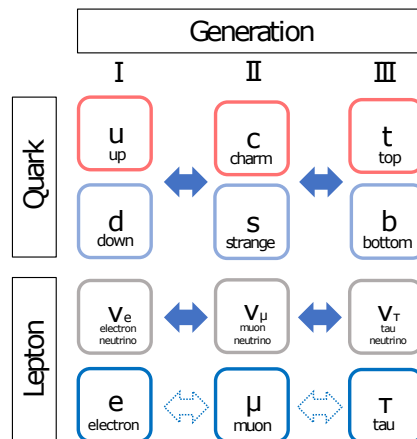


図 1.1: クォーク、レプトンのフレーバー [1]。クォークと中性レプトンにおいてフレーバーの破れは観測されているが荷電レプトンのフレーバーの破れはまだ見つかっていない。

1.2 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索

中性レプトンのフレーバーの破れが観測されたことから荷電レプトンのフレーバーの破れも観測可能であることが期待される。荷電レプトンフレーバーの破れの事象の1つとして $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊がある。この崩壊事象の崩壊分岐比は標準模型とニュートリノ振動を仮定すると $\mathcal{O}(10^{-50})$ 以下であり現在の実験技術では観測することができない。一方、超対称性を最小限仮定した標準模型、MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model) においてはそれが観測可能な崩壊分岐比 $\mathcal{O}(10^{-12}) - \mathcal{O}(10^{-13})$ で起こるとされる [18]。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索実験、MEG II 実験ではこの理論上起こるとされる崩壊分岐比と同程度の上限值 3.1×10^{-13} を達成した [19]。これは MEG II 実験最初のデータセット (2021 年データ) と MEG II 実験の前実験、MEG 実験のフルデータセットを合わせたデータセットの解析結果から得られたが、MEG II 実験では最終的に 6×10^{-14} の感度で $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索を目指している [2] (第 2.3 節参照)。これにより理論に大きな制限を課すことができる。

1.3 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊とその背景事象

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は 2 体崩壊であるためミューオンの静止系において崩壊先の粒子、陽電子とガンマ線は以下の条件を満たす (図 1.2)。

1. 陽電子とガンマ線は同じ時間、同じ位置で生成される。
2. 陽電子とガンマ線は互いに反対方向 (角度 180°) に飛んでいく。
3. 陽電子とガンマ線はミューオンの質量 (105.6 MeV) の半分のエネルギー 52.8 MeV を持つ。

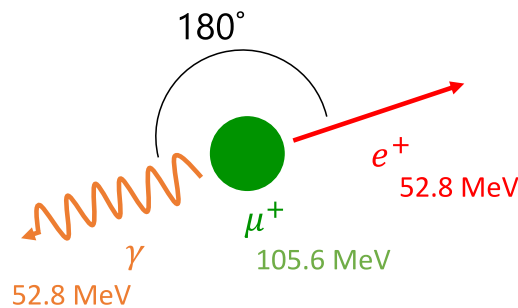


図 1.2: $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の模式図。ミューオンの崩壊先の粒子陽電子とガンマ線は互いに反対方向に、同じエネルギー 52.8 MeV を持って飛んでいく。

この信号事象を背景事象から区別するためにガンマ線のエネルギー E_γ 、陽電子の運動量 p_{e^+} 、これら粒子の相対角度 $\Theta_{e^+\gamma}$ 、相対時間 $t_{e^+\gamma}$ をよい分解能で測定する必要がある。

背景事象として物理的背景事象と偶発的背景事象の 2 つがある。物理的背景事象はミューオンの輻射崩壊 (Radiative Muon Decay, RMD) $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu\gamma$ のニュートリノが陽電子とガンマ線のエネルギーに比べて低いエネルギーを持ち去るとき、陽電子とガンマ線が信号事象のように見える事象のことである。偶発的背景事象は RMD 由来のガンマ線、ミシエル崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu$ 由来の陽電子が検出器内で対消滅してできたガンマ線、もしくはこの陽電子の制動放射により作られたガンマ線、これらガンマ線とミシエル崩壊由来の陽電子との偶発的な重なりにより信号事象のように見える事象のことである [2]。

期待される信号事象数は

$$N_{\text{sig}} = R_{\mu^+} \times T \times \Omega \times \mathcal{B} \times \epsilon_\gamma \times \epsilon_{e^+} \times \epsilon_s \quad (1.1)$$

で与えられる [2]。ここで R_{μ^+} はミューオンのビームレート、 \mathcal{B} は信号事象の崩壊分岐比、 T は測定時間、 Ω はガンマ線、陽電子の検出器に対する立体角、 $\epsilon_\gamma, \epsilon_{e^+}$ はこれら検出器の検出効率である。また ϵ_s は解析効率である。一方偶発的背景事象数は測定の分解能 (Δ で示す) に依存し、

$$N_{\text{acc}} \propto R_{\mu^+}^2 \times \Delta E_\gamma^2 \times \Delta p_{e^+} \times \Delta \Theta_{e^+\gamma} \times \Delta t_{e^+\gamma} \times T \quad (1.2)$$

で表される [2]。物理的背景事象数は簡単な方程式で表すことはできないが MEG II 実験の物理的背景事象数は偶発的背景事象数の約 68 分の 1 程度しか起こらない [19]。したがって MEG II 実験では偶発的背景事象数を削減すること、すなわち検出器の分解能を向上させることが強く求められている。

第 2 章

MEG II 実験

MEG II 実験はスイス、ポールシェラー研究所 (Paul Scherrer Institute, PSI) で行われている $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索実験である。MEG II 実験では世界最高感度で $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を探索するために、この崩壊探索に特化したユニークな検出器を持っている (図 2.1)。本章では MEG II 実験サブディテクタを中心に MEG II 実験について説明する。

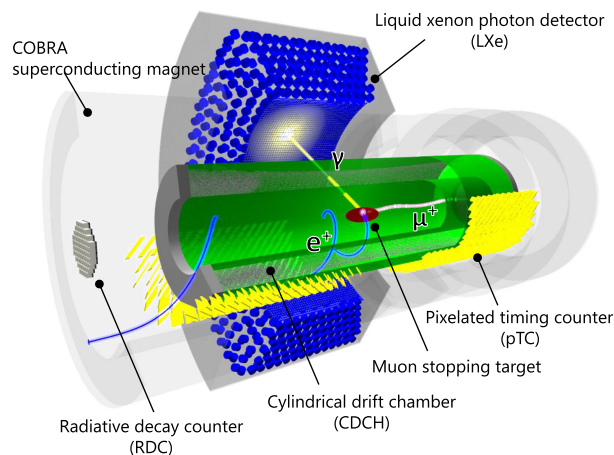


図 2.1: MEG II 実験検出器 [2]

2.1 ビームライン

PSI の $\pi E5$ チャンネルでは陽子サイクロトロン加速器 (図 2.2) により世界最大強度 ($O(\times 10^8) \mu^+ / s$) の直流ミュオンビームが供給される。MEG II 実験はこの $\pi E5$ チャンネルの直流ミュオンビームを用いている。

ミュオンビームとして大強度かつ直流のミュオンビームが適していることは式 (1.1), (1.2) から示される。式 (1.1) は統計量を溜めることで信号事象発見の可能性を高めることができることを示す一方、式 (1.2) は偶発的背景事象がミュオンビームレートの 2 乗に比例して増加することを示している。 $R_{\mu^+}^2$ を増加させないためには、同じビームレートでも一瞬で大量のミュオンビームが照射されるパルスビームを用いるよりも、単位時間あたり緩やかにミュオンが照射される直流ミュオンビームを用いる方がよい。

MEG II 実験では陽子衝突ターゲット表面で生成された表面ミュオンをビームとして使っている。そのビームレートは $(2 - 5) \times 10^7 \mu^+ / s$ にチューニングされているが、これは陽電子トラッキングのレート耐性により制限さ

れているからである [5]。

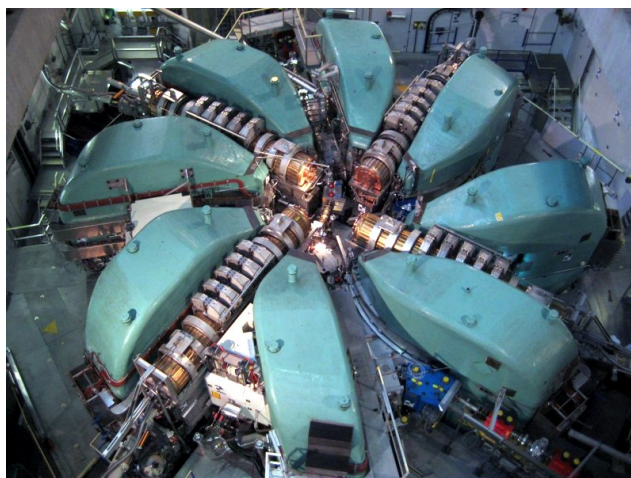


図 2.2: PSI 陽子サイクロトロン加速器 [3]

2.2 MEG II 実験検出器

MEG II 実験は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊を探索しているからその検出器はミュオンの崩壊先の粒子、陽電子とガンマ線の検出に特化している。陽電子のトラッキングには CDCH (Cylindrical Drift Chamber)、時間測定には陽電子タイミングカウンター (pixelated timing counter, pTC) が用いられている。この際、低運動量の陽電子は COBRA (COnstant Bending RAdius) 電磁石によって曲げられてこれら検出器に入らないようになっている。これら低運動量陽電子のエネルギーと時間は RDC (Radiative Decay Counter) によって測定され、偶発的背景事象の特定に用いられている。ガンマ線のエネルギー、相互作用点の位置、時間の測定には液体キセノン (LXe) 検出器が用いられている。以下の章ではこれら検出器を中心に MEG II 実験検出器について説明する。

2.2.1 COBRA 電磁石

MEG II 実験検出器内部は超伝導電磁石 COBRA (COnstant Bending RAdius、図 2.3) により勾配磁場 (中心付近 1.27 T からその両端 0.49 T まで) がかけられており [2]、ミュオン停止ターゲットで生成された陽電子のうち低運動量のものが陽電子検出器 (CDCH と pTC、第 2.2.3, 2.2.4 項参照) に入るのを防いでいる。これにより信号事象に近いエネルギー領域の陽電子だけを測定することが可能になる。

2.2.2 ターゲット

プラスチック (BC400) 製のミュオン停止ターゲットがミュオンビームを止めるために COBRA 電磁石中心にビーム軸に対して 15° の角度で置かれている (図 2.4)。このターゲットはミュオンビームをできる限り静止させなければならない一方で、ミュオン崩壊由来の陽電子のターゲット内でのエネルギー損失を減らすためにターゲットの物質量は小さくしなければならない。この相反する要求を満たすために MEG II 実験では測定とシミュレーションに基づいてミュオン停止ターゲットのデザインは最適化されている [5]。ターゲットの位置と平坦性はミュオンの崩壊点の系統誤差を制限するために特に重要なパラメータである。そのため図 2.4 のターゲットに描かれたドットを CCD カメラによりモニターすることで、ターゲットの位置、向き、形を知ることができる。その精度はビーム軸方向に関して約 $100 \mu\text{m}$ 、ビーム軸に垂直な方向に関して $10 \mu\text{m}$ である。



図 2.3: 磁気スペクトロメータ COBRA[4]



図 2.4: MEG II 実験ミュオン停止ターゲット [2]

2.2.3 CDCH

CDCH (Cylindrical Drift Chamber、図 2.5) は陽電子の運動量、位置を測定する。CDCH はヘリウムとイソブタンの混合ガス（混合比 90:10）が詰まった低物質の円筒（長さ 1.93 m）と 1728 本の金メッキタンングステンセンスワイヤーセルからできている [5]。アクセプタンス領域のセンスワイヤー約 1200 本により陽電子の信号は読み出される。MEG II 2021 年データセットにおいて CDCH で測定された陽電子の位置・角度分解能は表 2.1 のようになった。

表 2.1: MEG II 2021 年データセットにおける陽電子の位置・角度分解能 [5]

$\sigma_{y_{e^+}}$ (mm)	$\sigma_{z_{e^+}}$ (mm)	$\sigma_{\phi_{e^+}}$ (mrad)	$\sigma_{\theta_{e^+}}$ (mrad)
0.74	2.0	4.1	7.2

2.2.4 pTC

ミュオン崩壊による陽電子とガンマ線の相対時間を正確に測定することは偶発的背景事象削減のために重要である。陽電子の時間を正確に測定するために陽電子タイミングカウンター（pixelated Timing Counter）が MEG II 実験では使われている（図 2.6）。pTC は 2 つの半円筒形のモジュールで構成されており、1 つのモジュールは 256 個のカウンター（プラスチックシンチレータタイル（Saint-Gobain BC-422, $L \times W \times T = 120 \times (40 \text{ or } 50) \times 5 \text{ mm}^3$ ）にシリコン光センサー（Silicon photomultiplier, SiPM）を取り付けたもの）で構成されており、それぞれのモジュール



図 2.5: CDCH の全体像 [2]

ルは上流、下流側に設置されている。その時間分解能は幅 40 mm のカウンターで 80-100 ps、50 mm のカウンターで 100-120 ps であり、pTC 全体で 43 ps である [2, 5]。

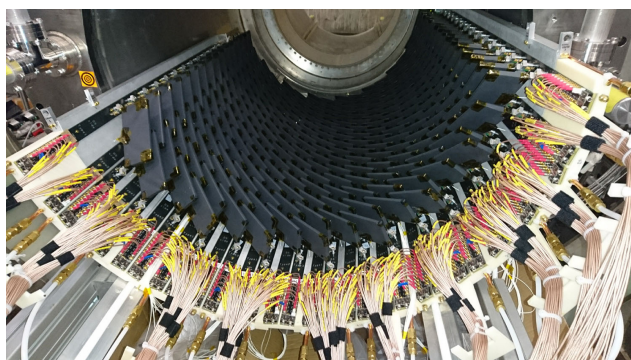


図 2.6: 下流側陽電子タイミングカウンター [5]

2.2.5 LXe 検出器

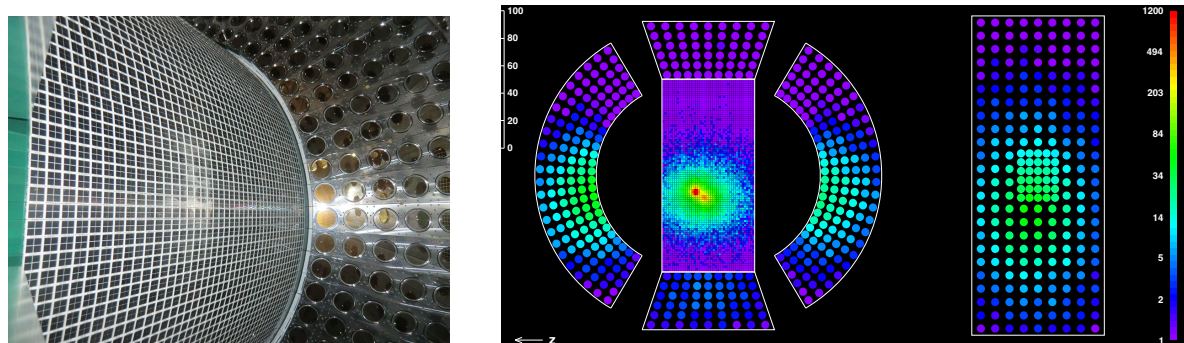
液体キセノン (LXe) 検出器は 900 L の液体キセノンをシンチレータとして用いることでガンマ線のエネルギー、位置、時間を測定する検出器である (図 2.7a)。液体キセノンは高光量であること、ガンマ線に対する速い応答、高い阻止能力、均一性などから素粒子物理など幅広い分野でよく使われるシンチレータである。

液体キセノンのシンチレーション光は VUV (Vacuum Ultraviolet) 領域の光でありその波長は 175 nm であるため可視光に感度のある通常の光センサーでは検出することができない。そこで MEG II 実験では VUV 光に感度のある光センサー、光電子増倍管 (Photomultiplier tube, PMT) と SiPM を独自に開発し用いている [9, 20]。VUV-MPPC (型番 S10943-4372、浜松ホトニクス製、SiPM の一種) 4092 個が LXe 検出器入射内面、PMT (型番 R9869、浜松ホトニクス製) 668 個がそれ以外の面を覆うことでガンマ線によるシンチレーション光を検出している (図 2.7b)。なお、LXe 検出器の詳細は第 3 章で述べる。

2.2.6 RDC

RDC (Radiative Decay Counter) は RMD 由来の低エネルギー陽電子の時間とエネルギーを測定して偶発的背景事象を特定することを目的とした検出器である。RDC は陽電子の時間を測定するためのプラスチックシンチレータとエネルギーを測定するための LYSO 結晶からなっている (図 2.8)。

MEG II 実験では偶発的背景事象が主な背景事象となっているが (第 1.3 節参照)、その背景ガンマ線のソースと



(a) LXe 検出器の内部 [2]。光センサー (MPPC と PMT) が各面に敷き詰められている。

(b) 液体キセノンシンチレーション光の分布 [2]。内面の光センサーは 12 mm 角の MPPC であるため (PMT が用いられた) 他の面に比べてより高精細な分布となっている。

図 2.7: 液体キセノン検出器の内部と液体キセノンシンチレーション光の分布

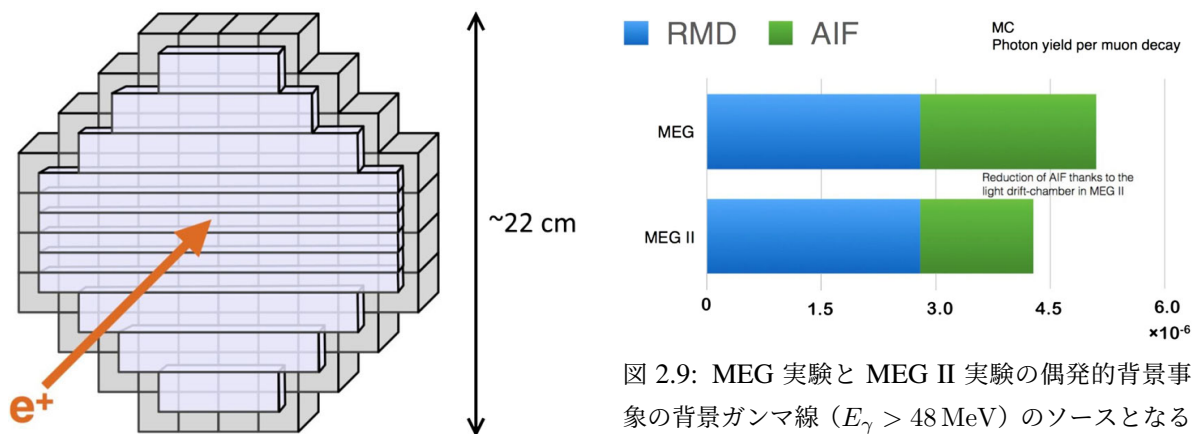


図 2.8: RDC の模式図 [2]

図 2.9: MEG 実験と MEG II 実験の偶発的背景事象の背景ガンマ線 ($E_\gamma > 48 \text{ MeV}$) のソースとなるイベント事象 [2]

なる事象、RMD と AIF (Annihilation In Flight) の割合は図 2.9 のようになる。MEG ドリフトチェンバー [20] と比べて低物質量の CDCH により AIF 由来の偶発的背景事象は大きく削減できたが、一方で RMD 由来の偶発的背景事象数は MEG 実験と変わらない。したがって RMD 由来の偶発的背景事象を特定することが MEG II 実験において非常に重要となる。

RDC は下流側に置かれているがシミュレーションによると 42 % の RMD 由来のガンマ線 ($E_\gamma > 48 \text{ MeV}$) を特定でき (ミューオン停止ターゲットで生成された陽電子の内 48 % は下流側に飛んでいく)、その検出効率は 88 % である [5]。下流側 RDC によって $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の感度は 7 % 向上したが [5]、現在インストールに向けて開発されている上流側 RDC はさらに感度を数 % 改善することを目指している。

2.2.7 トリガーと DAQ

MEG II 実験のトリガー・DAQ (Data Acquisition) システムは DRS4 (Domino Ring Sampler) [21] を用いていた MEG トリガー・DAQ システムから発展したものである。MEG II 実験検出器の高精細化により読み出しチャンネル数は MEG 検出器の約 4 倍である。MEG II における読み出しチャンネルを表 2.2 にまとめた。

WaveDAQ システムは最大で 16 枚の WaveDREAM ボード [2] を含むクレート 35 台により構成される。

表 2.2: MEG II 実験検出器の読み出しチャンネル [5]

Detector	Channel type	# channels	MEG
LXe det. inner face	MPPC	4092	216 (PMT)
LXe det.	PMT	668	630
pTC	SiPM	1024	60 (PMT)
CDCH	Differential	2432	1728
	Frontend		
Others	Various	57	≈50
Total		8591	2639

WaveDREAM ボードは 2 つの DRS4 チップを搭載し、16 チャンネルの DAQ プラットフォームを持っている。DRS4 チップは 0.8-5 GSPS の範囲のサンプリングスピードでアナログ信号をデジタル信号に変換する働きを持つ。WaveDREAM ボードの各入力チャンネルは検出器信号の波形の時間・波高を記録するために 0.25-100 の範囲で増幅率を変えることができる。またこれら入力チャンネルは最大 240 V のバイアス電圧を SiPM にかけることができる [5]。

2.3 感度

図 2.10 に DAQ 時間に対する MEG II 実験で推定される感度を示す。感度予想には MEG II 検出器の現在の状態やデータ解析が反映されている。再構成アルゴリズム改善や系統誤差のさらなる理解により感度を向上させることが可能であるが、それが無い場合でも 2026 年の MEG II データ取得終了までに目標感度 6×10^{-14} を達成できる可能性は十分高い。

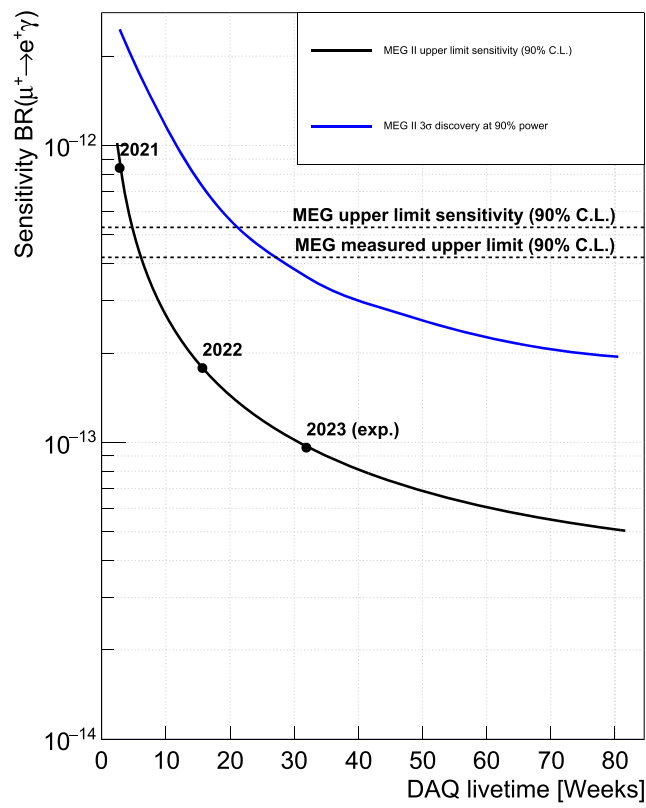


図 2.10: DAQ 時間に対する MEG II 実験で推定される上限感度 (90 % CL) (黒の曲線) と 3σ 発見ポテンシャル (青の曲線) [5]。黒の点は過去の年における感度を示す (2023 は予測である)。

第 3 章

LXe 検出器

3.1 MEG 実験 LXe 検出器からのアップグレード

MEG II 実験の前実験、MEG 実験では同様に LXe 検出器が使用されていたが、MEG 実験 LXe 検出器ではガンマ線の入射内面の光センサーとして 2 インチ PMT (型番 R9869、浜松ホトニクス製) を用いていた [11]。しかしその受光面 45 mm は隣の PMT との間隔 62 mm より小さい。図 3.1 は 52.8 MeV の信号ガンマ線のファーストインタラクションの深さに対するシンチレーション光の収集効率を示す。図 3.1 は収集効率がガンマ線の入射位置に強く依存することを示すが、この入射内面の非一様性により特に浅い領域 ($w < 2$ cm) において MEG 実験のガンマ線の位置分解能は悪化した [2]。

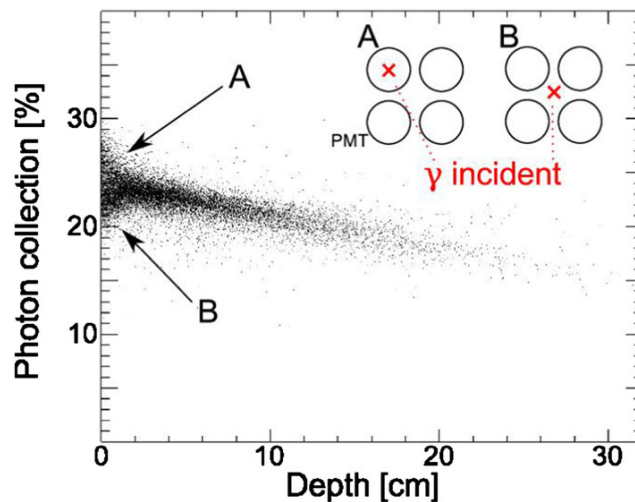


図 3.1: 52.8 MeV の信号ガンマ線のファーストインタラクションの深さに対するシンチレーション光の収集効率 [2]

MEG II 実験 LXe 検出器では内面の光センサーを PMT から 12 mm 角の MPPC (型番 S10943-4372、浜松ホトニクス製、第 3.3 章参照) に置き換えた [2]。これによりガンマ線の位置分解能は浅い領域 ($w < 2$ cm) で MEG 実験 $(\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w) = (5, 5, 6)$ mm [22] から $(\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w) = (2.5, 2.5, 5.0)$ mm [5] に改善された (LXe 検出器の局所座標系に関しては第 3.6 節を参照)。

3.2 PMT

MEG II 実験 LXe 検出器 PMT は VUV 領域に属するキセノンのシンチレーション光 ($\lambda=175 \text{ nm}$) を検出するために浜松ホトニクスと共同で開発された [6]。この PMT はメタルチャンネルダイノード (図 3.2) を用いており、それにより短い区間で高い増幅率 (ゲイン) を達成し、また磁場 (最大 10^{-2} T) に対して高い耐性を持つ。PMT は液体キセノン温度 ($\sim 165 \text{ K}$) で用いられ、VUV 光を通す石英窓、VUV 光に感度のあるバイアルカリ (K-Cs-Sb) 光電面を持つ。また低温において増加するシート抵抗を減らすためにアルミニウムストリップが光電面表面 (図 3.3) に貼り付けてある。高レート光に対して安定した電圧供給を行うためにツェナーダイオードの保護回路を最後 2 つのダイノードに組み込み、発熱を抑えるために全部で $16 \text{ M}\Omega$ の抵抗が回路に組み込まれている (図 3.4)。PMT の量子効率 (Quantum Efficiency, QE) とゲインはバイアス電圧 850 V をかけたときそれぞれ約 15 %、 1.8×10^6 である。

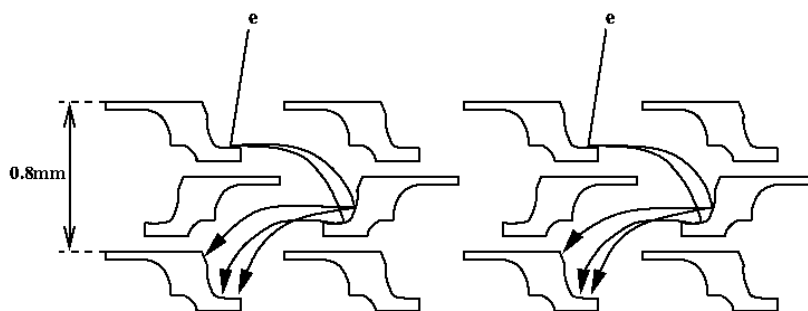


図 3.2: メタルチャンネルダイノードの構造と光電子の増幅過程 [6]

3.3 MPPC

MPPC は磁場に不感であり 1 光子に対して感度があることから較正において PMT よりも有用である。また MPPC を用いたより高精細なシンチレーション光の読み出しは浅い領域でシンチレーション光に転換したガンマ線のより正確な再構成を可能にする (第 3.1 節参照)。PMT よりも低物質量の MPPC を用いることで MEG に比べ



図 3.3: MEG II 実験 LXe 検出器 PMT [7]。光電面表面にアルミニウムストリップが貼り付けてある。

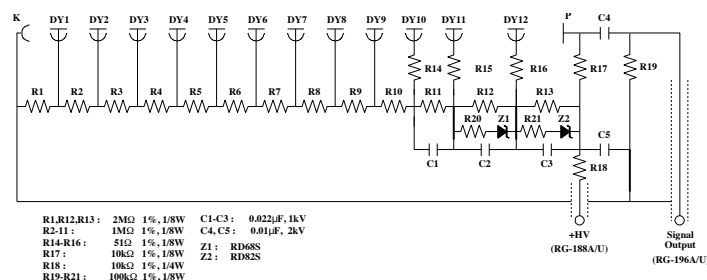


図 3.4: PMT の回路図 [7]

て MEG II 実験 LXe 検出器の検出効率は 4 % 向上した [2, 5]。

3.3.1 MPPC の構造

SiPM には n 型半導体に p 型半導体をマウントした層構造 (p-on-n) と n-on-p の層構造がある (図 3.5)。青色光の Si に対する吸収長は約 180 nm [1] で赤色光に比べて短いため Si 表面で吸収される。青色光が n-on-p 型の SiPM に入射した場合、n 型半導体で吸収された青色光は電子正孔対を作るが、このうちホールがキャリアとなる。一方 p-on-n 型に青色光が入射した場合は電子がキャリアとなる。

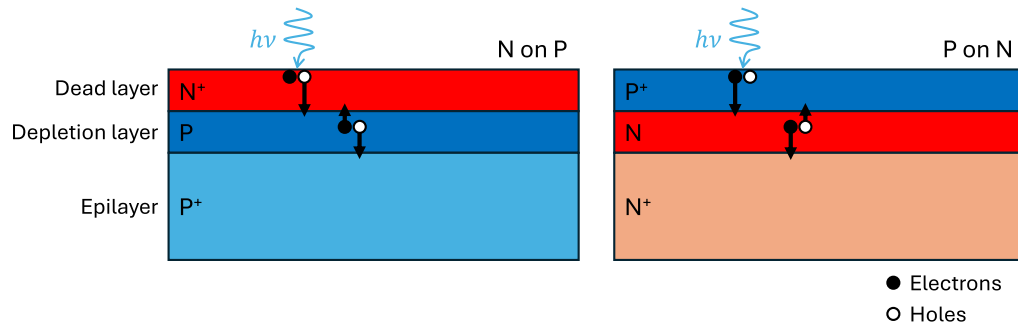


図 3.5: p-on-n, n-on-p 型の SiPM ([8] の図を改変)

シリコン内では電子の易動度はホールより約 3 倍大きく、また平均自由行程もホールの約 40 倍である [8]。p-on-n 型の SiPM に青色光が入射した際キャリアは電子であるため、より多くの青色光を検出したい場合 p-on-n 型の SiPM が使われる。液体キセノンシンチレーション光は VUV 領域の光であるため、より多くの光を検出するために MEG II 実験では p-on-n 型の MPPC が使われている [2]。

3.3.2 MPPC のサイズ

LXe 検出器内面で使われている MPPC は 6 mm 角のチップを 4 つ直列接続した合計 12×12 mm² の受光面を持つ (図 3.6)。市販の MPPC の受光面は最大で 6 mm 角であるが、LXe 検出器では最低でも 10×10 mm² の受光面を持つ MPPC が要求される。10 mm 角以上のチップはダークカウントレートや電気容量が大きくなるため LXe 検出器に向いていない。そこで電気容量を小さくしつつダークカウントレートを抑えるために上のような MPPC を浜松ホトニクスと共同で開発した [9]。またこれら各チップには並列にバイアス電圧をかける (このように各チップの信号を直列で読み出しつつ並列にバイアス電圧をかける回路はハイブリッド接続と呼ばれる [1])。MPPC のゲインを揃えるために同じようなバイアス電圧を持つチップを 4 つ選んで 1 つの MPPC パッケージにマウントした。

3.3.3 ECF と製造ロット

MPPC 信号にはクロストーク (cross-talk) やアフターパルス (after-pulse) が含まれているため (これらを合わせて CTAP と呼ぶ) これを較正する必要がある [2]。較正のパラメータとして ECF (Excess Charge Factor) がある。ECF は電荷スペクトル (図 3.7) を用いて以下のように計算される。

MPPC で検出される光電子数 μ は信号電荷の平均値を 0 p.e. と 1 p.e. の電荷量の差 (MPPC のゲイン) で割って

$$\mu = \frac{\text{信号電荷の平均値}}{\text{MPPC のゲイン}} \quad (3.1)$$

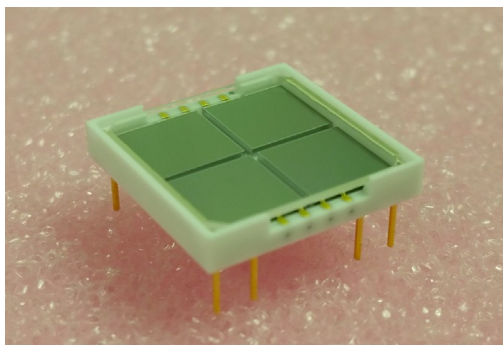


図 3.6: LXe 検出器内面に使われている MPPC パッケージ [9]。1つのパッケージあたり4枚のチップがそれぞれ独立に乗っている。

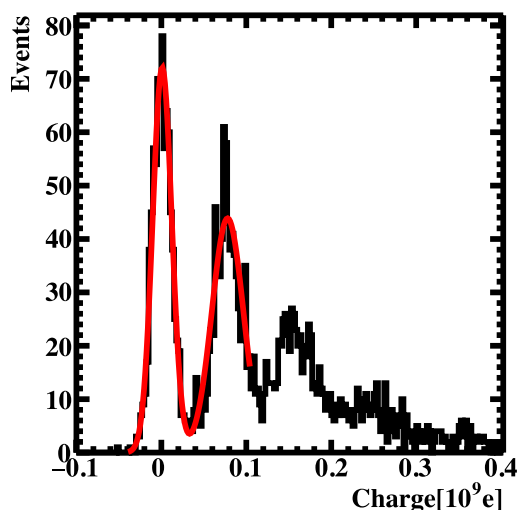


図 3.7: 弱い LED 光に対する MPPC の電荷スペクトル [10]。MPPC のゲインは 0 photo-electron ピークと 1 photo-electron のピーク間の距離から計算される。

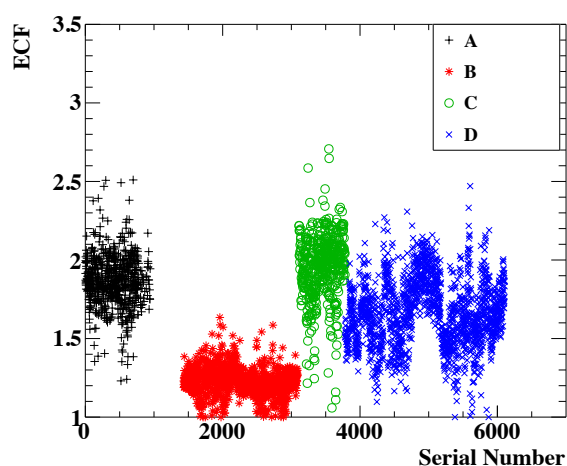


図 3.8: MPPC のシリアル番号に対する ECF [1]。各マーカーは異なる時期に作られた MPPC の製作ロットを表す。

と計算される。しかし μ には CTAP が含まれているため本来の検出光子数 λ は ECF (> 1) を用いて

$$\lambda = \frac{\mu}{\text{ECF}} \quad (3.2)$$

と表される。 λ はポアソン分布に従うと考えられるので $\lambda = -\log(N_0/N_{\text{total}})$ で与えられる。ここで N_0 は 0 p.e. のイベント数、 N_{total} は全イベント数である。これを (3.2) に代入することで ECF は得られる。

図 3.8 に MPPC のシリアル番号に対する ECF を示す。これら MPPC は 4 つの異なる時期に大量に製作されたがその製作ロットごとに ECF に個体差があることが明らかとなった [2]。これら ECF は測定により較正された値が解析において用いられている。

3.4 キセノン輸送システム

図 3.9 に MEG II 実験キセノン純化・保管システムを示す。MEG II 実験はシャットダウン期間中、キセノンを安全に保管するために 1000 L の液体キセノンを保管できるデュワーとそれに相当するガスキセノンを保管するため

の 10 基の高圧ガスタンクを持っている [20]。1000 L デュワーは低温 (~ 165 K) を維持するためにパルスチューブ冷凍機と液体窒素配管、インシュレーション層が備わっている。デュワーは断熱フレキシブル管で直接 LXe 検出器とつながっているため、素早く液体キセノンを検出器に輸送することができる。一方、高圧ガスタンクは 1 基あたり 360 kg のキセノン (液体キセノン 120 L に相当する) を補完することができ、長期シャットダウン期間中に使われる。

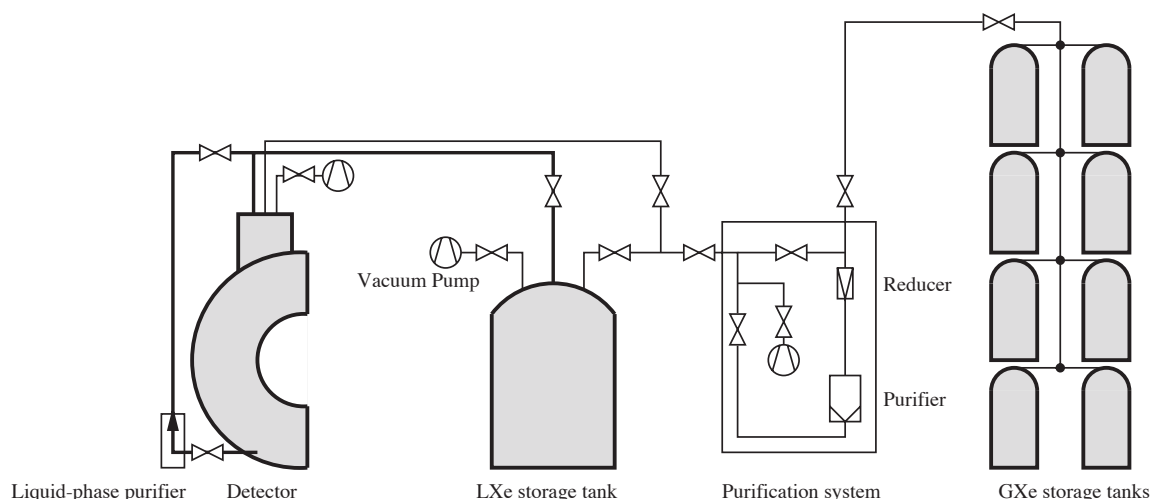


図 3.9: MEG II 実験キセノン純化・保管システム [11]。図は 2011 年時点のものであるため高圧ガスタンクは 8 基しかない。

液体キセノン内の不純物 (酸素、水など) を取り除くために MEG II 実験では 2 つの純化装置が用いられている。1 つはガス純化装置、メタルヒートゲッターでこれに気体を通すことで希ガス以外の全ての気体分子を取り除くことができる [11]。MEG II ラン中 LXe 検出器内のガスキセノンはこのゲッターを通して純化されるがその純化速度は 0.06 L/h と遅く、900 L の検出器内液体キセノンを純化するのに十分ではない。もう 1 つの純化装置としてモレキュラーシープを用いた液純化装置があり、これにより液中の不純物を取り除くことができる。液純化装置は LXe 検出器のそばにあり、検出器底の配管を通して液純化装置に液体キセノンは輸送・循環される。液体キセノン循環による熱量が少ないことからこの装置による純化速度は 70 L/h と早く、これは 900 L のキセノンを純化させるのに十分である [11]。なお液純化装置はノイズ源となるため MEG II ラン中は稼働されない。

3.5 光センサーの較正

LXe 検出器の中には光センサー較正用にアルファ線源 ^{241}Am (図 3.10) と LED (図 3.11, 3.12) が設置されている。 ^{241}Am から出た 5.5 MeV のアルファ線は PMT の QE や液体キセノンの光学特性のモニターに使われる。液体キセノン中にある LED には 2 種類あり、1 つは MEG 実験から引き継いだ PMT ゲイン測定用の LED、もう 1 つは MPPC ゲイン測定用に MEG II 実験で新たに導入された LED である (それぞれ図 3.11 の緑、青の LED)。これらデータ測定は毎日行われる。

3.6 MEG II 実験 LXe 検出器の局所座標系

MEG II 実験 LXe 検出器では解析において局所座標系 (u, v, w) を用いている (図 3.13)。 u はビーム軸に向かう方向、 v は LXe 検出器の下面から上面に向かう、内面に沿う方向、 w は内面から外面に向かう方向で深さを表す。



図 3.10: LXe 検出器に設置されている ^{241}Am 。 ^{241}Am は金メッキタングステンワイヤーに巻かれ、金で覆われている [1]。

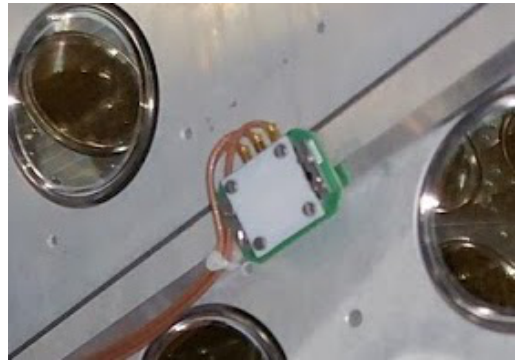


図 3.11: LXe 検出器に設置されている MPPC 較正用の LED ユニット。1つの PCB に 3つ LED がマウントされ、減光のためにテフロンで覆われている [1]。

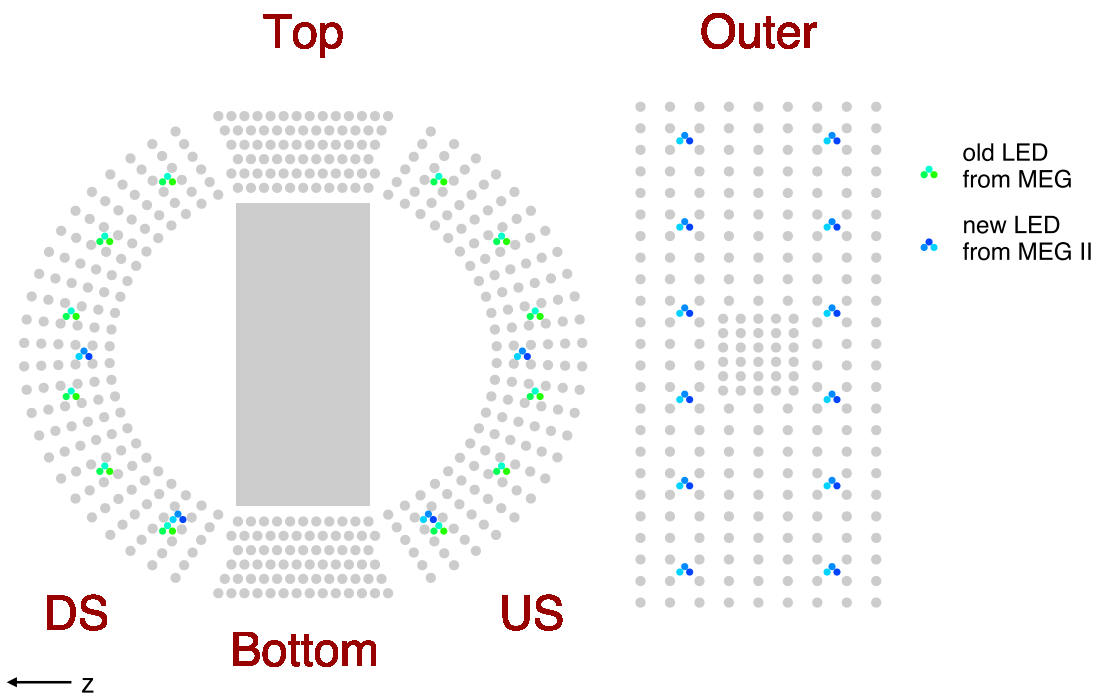


図 3.12: LXe 検出器内の LED の配置 ([1] の図を改変)。緑色で示された LED は PMT 較正用、青色で示された LED は MPPC 較正用に用いられる。

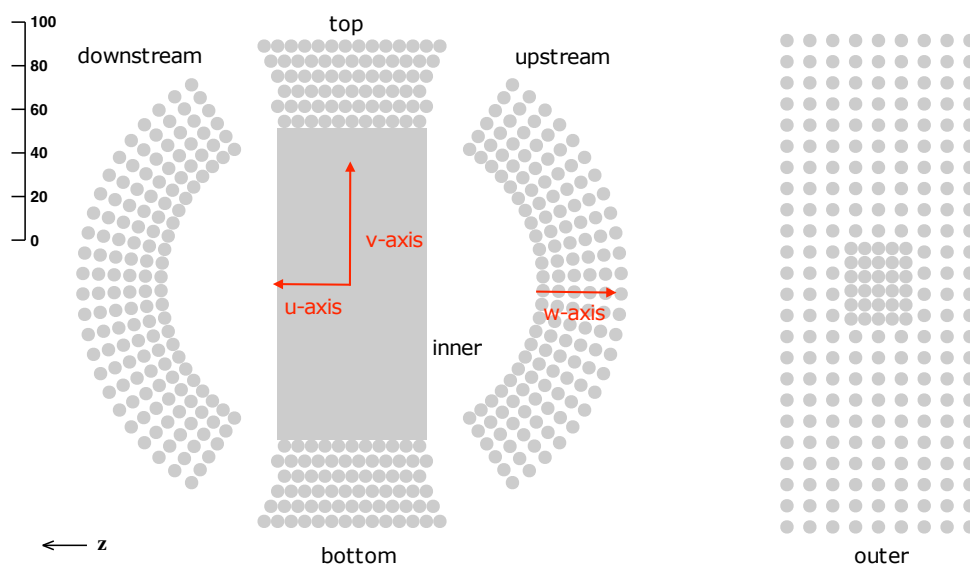


図 3.13: MEG II 実験 LXe 検出器各面と局所座標系の関係 [12]。局所座標系の軸は赤の矢印で示された (u, v, w) である。

第 4 章

LXe 検出器のキセノンリークに関する研究

2024 年 MEG II ランにおいてキセノンのリークが観測された。観測されたリークは 2 種類あり 1 つをグロスリーク、もう 1 つをスモールリークと便宜上呼ぶ。グロスリークとスモールリークはともに LXe 検出器 PMT の信号を追うことで発見された。本章では 2024 年におけるキセノンのリークチェックおよびリークモニター方法に関して報告する。

4.1 グロスリーク

4.1.1 ゲートバルブからのリーク

キセノンのグロスリークは LXe 検出器上部に取り付けてあるゲートバルブ*¹ (10840-CE14、VAT 製、図 4.1a) から検出器内のガスキセノンが大気に逃げたことが原因である。このゲートバルブは圧縮空気を開閉用のチューブに送らない限り開いたまま、もしくは閉じたままであることが期待される。LXe 検出器立ち上げ後ゲートバルブを閉めるためのチューブに圧縮空気を送り確実に閉めていたが、何らかの理由によりゲートバルブがリークタイトでないことが判明した*²。ゲートバルブの先はダイアフラムバルブを通して大気につながっているがこのダイアフラムバルブも何らかの理由によりリークタイトでなかったため、ゲートバルブとダイアフラムバルブを通してキセノンは大気中に漏れていった (図 4.1b)。

4.1.2 キセノンの検出

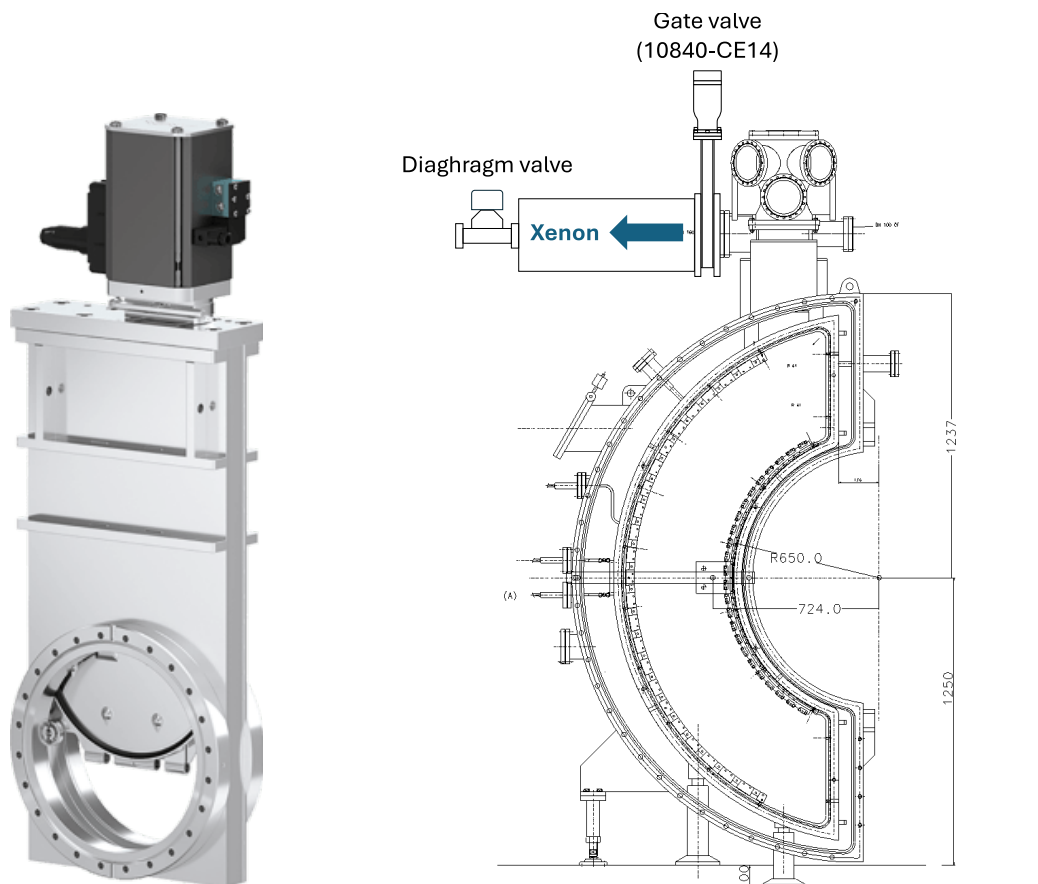
グロスリークはゲートバルブの先に質量分析器 (型番 QME 220、部品番号 PTM28602、Pfeiffer Vacuum 製) を取り付けてゲートバルブ・質量分析器間の原子・分子のマススペクトルを測定した。その結果、質量 66, 131 amu 付近に著しいピークを確認した。キセノンの物質量は約 131 であるためこれらのピークはそれぞれ 2 価、1 価のキセノンイオンに対応し、キセノンがゲートバルブから漏れていることが確認された。質量分析器に関しては付録 B を参照。

グロスリーク発見後、ゲートバルブを閉めるためのチューブに継続的に圧縮空気を送り続けゲートを確実に閉めた*³。これによりグロスリークは止まった。さらに安全を期すためにダイアフラムバルブを交換した。

*¹ このゲートバルブは大気と真空引き後の検出器内容器を完全に遮断するために使われる。

*² ゲートバルブは適切に閉めるオペレーションがなされていたが、わずかにゲートに隙間があった可能性が高い。

*³ この操作はマニュアルに反しているが臨機的にこのような操作を行った。本来であれば一度圧縮空気をこのチューブに送ればゲートが閉じたままであることが期待される。



(a) LXe 検出器で使用されているゲートバルブ (10840-CE14)。圧縮空気を送ることでゲートを開閉できる。

(b) LXe 検出器とゲートバルブ、ダイヤフラムバルブの位置関係。LXe 検出器から見てゲートバルブの先はダイヤフラムバルブを通して大気に解放されている。

図 4.1: LXe 検出器に取り付けてあるゲートバルブとその接続箇所

4.1.3 リークレートの計算

LXe 検出器内には図 3.12 のように光センサー (MPPC, PMT) 較正用の LED が設置されている。この LXe 検出器内の LED と PMT を用いてリークレートを計算することができる。

図 4.2 に LED を光らせたときのリークによる液面付近の PMT の信号電荷変化を示す。2 列目の PMT はリーク前液体キセノンの中 (液層) にいたがリーク後液体の外 (ガス層) に出ている。これによりリーク後、2 列目の PMT の信号電荷はリーク前の約 3 分の 1 に減少する。これは液体キセノン中にある LED からの光が液面で反射してガス層にある PMT にその 3 分の 1 ほどしか到達しないからである。

リーク期間中にこの PMT 信号電荷の減少速度を追っていくことでキセノンのリークレートを計算できる。図 4.3a にグロスリーク期間中に液層からガス層に面するようになった上流面 2 列目の PMT の信号電荷ヒストリーを示す。グロスリークの直前 (6 月 13 日あたり) まで LXe 検出器にキセノンの輸送をしており、6 月 13 日まで上流面 2 列目の PMT はガス層に面していた。信号電荷は増えている。またこのプロットでは一番最初の信号電荷で各電荷を割り規格化している。信号電荷変化を 1 次関数でフィッティングしたときその傾きは -0.19 day^{-1} であっ

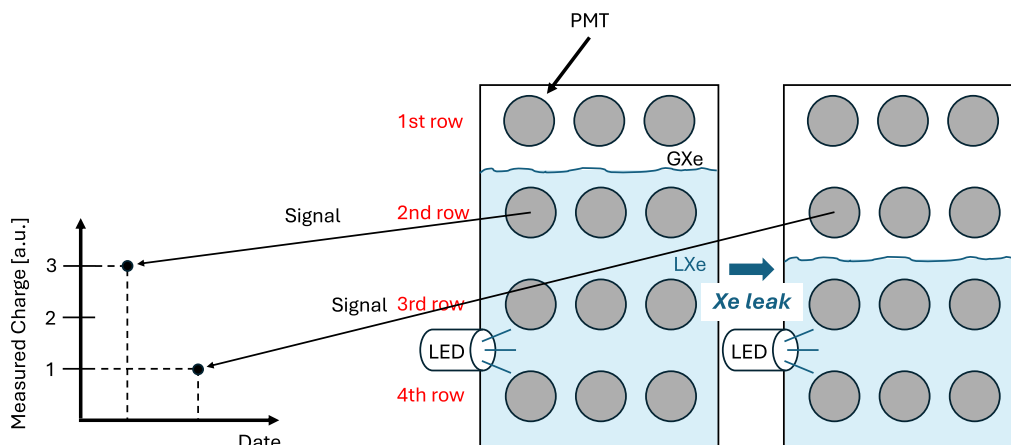
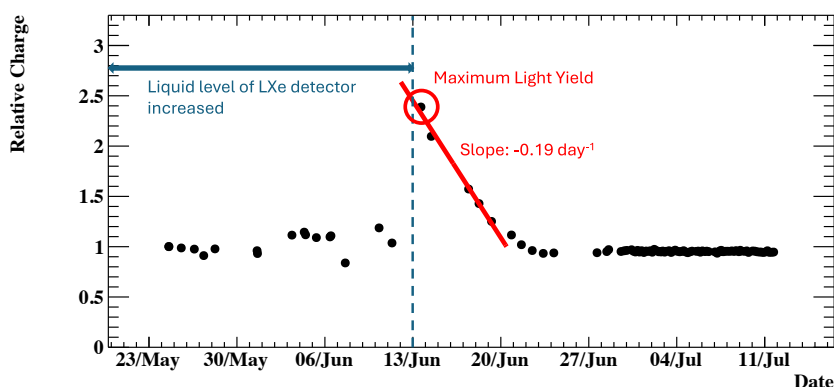
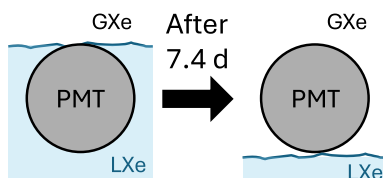


図 4.2: リークによる液面付近の PMT の信号電荷変化

た。リーク前この PMT の信号電荷は約 2.4 a.u. であったがその後約 1 a.u. に達しプラトーになった。最大の信号電荷 2.4 a.u. から最小の信号電荷 1 a.u. に達するまでの日数は信号電荷減少の傾き -0.19 day^{-1} を用いると 7.4 日であった (図 4.3b)。



(a) グロスリークによる上流面 2 列目の PMT の信号電荷変動。赤線は信号電荷変化を 1 次間数でフィッティングしたもの。また青線の矢印で示された期間中検出器にキセノンの輸送を行った。



(b) グロスリーク中に PMT が液中からガス中に出るまでにかかる時間

図 4.3: グロスリーク中の PMT の信号電荷変動とそのときの液面変化

リークによって LXe 検出器内の PMT の受光面が液層からガス層に面するようになるまでに失われる液体キセノンの体積は液面の表面積と PMT 受光面の直径から計算した。検出器内容器の液面は図 4.4 のような台形の形をしている。液面付近の PMT の位置情報から液面の大きさは図 4.4 に記されているような寸法である。また PMT

受光面の直径が 45 mm であることから [1]、これを液面の減少高さとする PMT 受光面が液層からガス層に面するまでに失われる液体キセノンの体積は約 14.8 L と計算される。またキセノンの液密度は 2.95 g/cm^3 であるから [1]、14.8 L の液体キセノンの質量は約 43.7 kg である。したがって 7.4 日で液体キセノン 43.7 kg 失っているからグロスリークのレートは 5.9 kg/day であると考えられる。

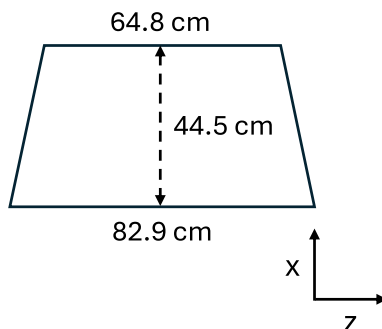


図 4.4: LXe 検出器内容器の液面の形（台形）とグロスリーク中のその液面の寸法。x, z 軸は地上面に張る軸である。

4.2 スモールリーク

4.2.1 スモールリークの発見

グロスリークとは全く別のリーク、スモールリークが起こっていることが 2024 年明らかとなった。これは液体キセノンを LXe 検出器に満たしたあと真空層でキセノンが発見されたことから判明した (図 4.5)。図 4.6 に真空層に漏れたキセノンを捉えた、質量分析器による真空層の原子・分子のマスペクトルを示す。物質質量 66, 131 amu 付近にキセノンのピークが見える。

このリークは検出器を冷やした際に生じるリークであると考えられる。その理由は常温においてヘリウムリーク検出器を用いたリークチェックの際、リークを検出することができなかったからである。またスモールリークは MEG II 実験開始時 (2021 年) から起こっている可能性があり、そのリークレートは徐々に増加した可能性がある。

4.2.2 スモールリークのリークレート

第 4.1.3 項と同じように PMT の信号電荷減少を追ってスモールリークのリークレートを計算した。スモールリーク期間中の液面付近の上流面 3 列目の PMT の信号電荷減少の傾きは -0.013 day^{-1} であった (図 4.7)。この傾きを用いると図 4.7 の最大の信号電荷約 3 a.u. から最小信号電荷約 1 a.u. に達するまでの日数は約 154 日と計算される。154 日の間に失われる液体キセノンの質量は 43.7 kg であるから (第 4.1.3 項参照)、スモールリークのリークレートは 0.28 kg/day であった。

4.2.3 真空層の圧力上昇を用いたリークレートの計算

LXe 検出器真空層は真空度 ($O(1) \text{ Pa}$) を維持するために常に真空引きされている。キセノンは真空層に漏れているため真空引きを止めたとき図 4.8a のように真空層の圧力は上昇する。LXe 検出器液面レベルに対する真空層の圧力上昇率の関係を調べるために、LXe 検出器に段階的に液体キセノンを輸送していき、液面レベルが 5-20 % 増えるごとに真空層の真空引きを止めて圧力上昇率を測定した (図 4.8b)。LXe 検出器液面レベル 50 % 付近で急にリークレートが上昇することから液面レベル 50 % 付近に相当する位置にリークがあることが推測される。

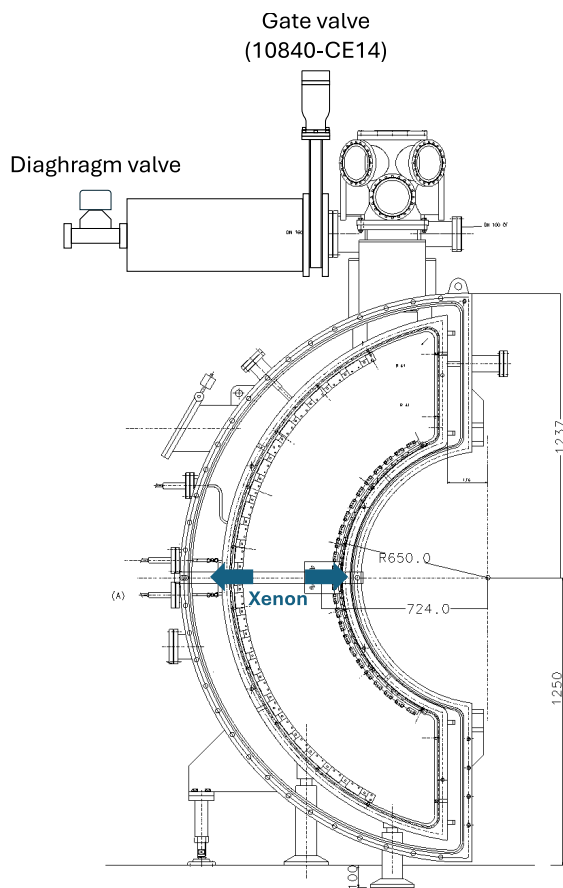


図 4.5: キセノンのスモールリーク。LXe 検出器内容器から真空層にキセノンが漏れている。

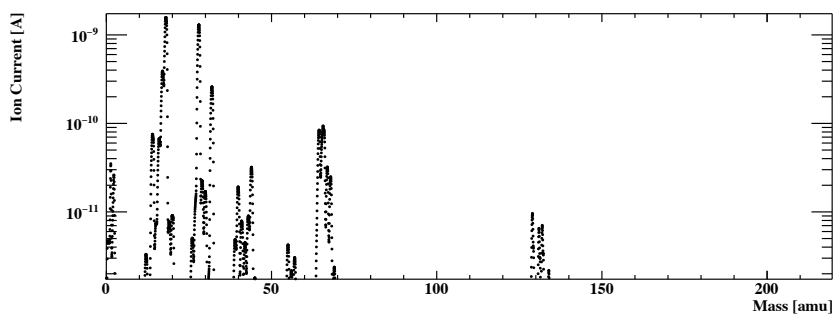


図 4.6: 真空層の原子・分子のマススペクトル。物質質量 66, 131 amu 付近にキセノンのピークが見える。そのほかにも窒素や酸素などの 1 価、2 価のイオンピークが見える。

図 4.8b からキセノンのリークレートを計算することができる。オフセットを除くために図 4.8b の最大リークレートから最小リークレートを引くと 84.4 Pa/h であった。このリークレートをキセノンの質量に換算するために、理想気体の状態方程式から導かれる質量リークレートの式

$$\dot{M} = \dot{P} \frac{M_{Xe} V}{RT} \tag{4.1}$$

を用いた。 \dot{P} は圧力表記でのリークレート、 M_{Xe} はキセノンの物質質量 131 g/mol、 V は LXe 検出器真空層の体積、 R は気体定数 $8.31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 T は真空層の温度である。 $V = 1000 \text{ L}$ 、 $T = 200 \text{ K}$ とおき、 $\dot{P} = 84.4 \text{ Pa/h}$ を代

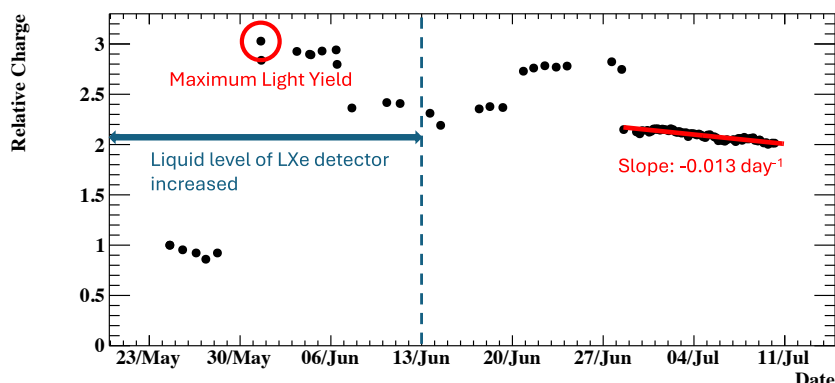


図 4.7: スモールリーク期間中の液面付近の上流面 3 列目の PMT の信号電荷変動。赤線は信号電荷を 1 次関数でフィッティングしたもの。

入すると質量リークレート 0.16 kg/day が得られる。これは LXe 検出器内の LED と PMT を用いたリークレートの計算値 0.28 kg/day (第 4.2.2 項) と 2 倍以内で一致している。LXe 検出器内の LED と PMT を用いた方法および真空層の圧力上昇を用いた方法、これら 2 つの方法によるリークレート計算の平均値 0.22 kg/day をスモールリークのリークレートとする。またこれら 2 つの方法によるリークレート計算の不定性の原因として考えられるものを表 4.1 にまとめた。

表 4.1: LXe 検出器内の LED と PMT を用いた方法および真空層の圧力上昇を用いた方法、これら 2 つの方法によるリークレートの値とその値に対する不定性の原因

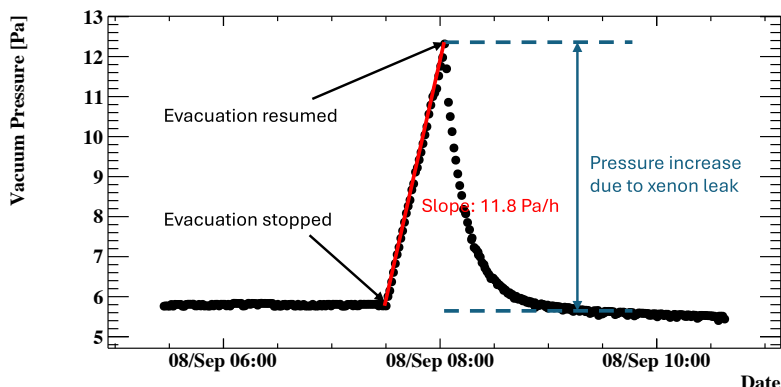
	LED と PMT を用いた方法	真空層の圧力上昇を用いた方法
リークレート [kg/day]	0.28	0.16
不定性の原因	リークで失った液体キセノンの質量 PMT の最大信号電荷	インシュレーションの体積、温度

4.2.4 スモールリーク上昇アクシデント

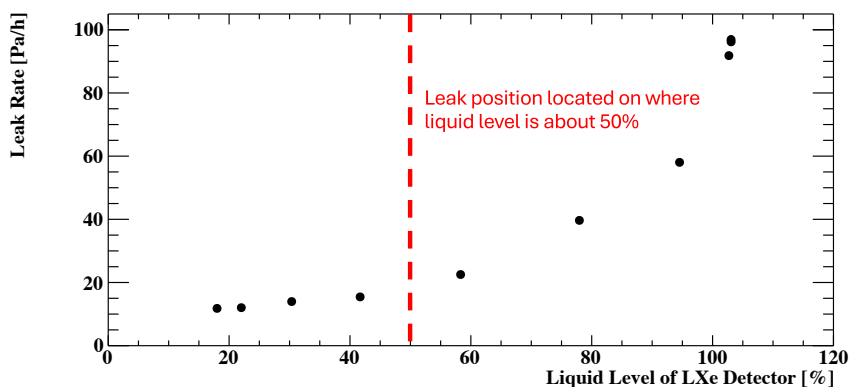
2024 年 11 月、LXe 検出器内容器の圧力を調整する Slow Control System (SCS) [2] の不具合により LXe 検出器の圧力が 0.15 MPa まで上昇するアクシデントが生じた*4。これによりリークレートはアクシデント前に比べて約 6 倍上昇した (図 4.9)。ここで図 4.9 のリークレートは真空層の真空引きを止めたときの圧力上昇率から計算された。リークレート上昇直後、検出器の圧力を 0.107 MPa から 0.101 MPa まで下げたが依然としてリークレートは高いままである。LXe 検出器内容器のガスケット (Helicoflex Spring-Energized Metal Seal、Prophysik 製) は常温、低温 (~165 K) 間の温度変化に対してリークタイトであるためにバネの入った特殊なガスケットを使用している。ガスケットに使われているバネが経年劣化により弾性を失い、検出器の圧力上昇とともに伸びたバネは検出器の圧力を下げても縮まらず、そこからリークが発生している可能性がある。

このリーク上昇アクシデントによりキセノンリークはより深刻なものとなり、このリークを止めない限り MEG II

*4 LXe 検出器の圧力が 0.15 MPa 以上になると安全弁が開き検出器内のガスキセノンが外に放出され、圧力がそれ以上上昇しないように設計されている。また MEG II ラン中 LXe 検出器の圧力は通常 0.125±0.05 MPa で運用されるが、リーク発見後リークレートを下げるために検出器の圧力を 0.107 MPa まで下げて運用していた。



(a) 真空層の真空引きを止めたときのリークによる圧力上昇



(b) LXe 検出器液面レベルに対するリークレート変動

図 4.8: リークによる真空層の圧力上昇と液面レベルの関係

ランを続けることが困難となった。2024 年 MEG II ラン終了後、LXe 検出器内容器カバーの増し締め、あるいは内容器のガスケット交換を行いリークを解消する。

4.2.5 リークキセノンの回収

LXe 検出器内容器から真空層へのキセノンリークが明らかとなった後、真空層に漏れたキセノンをポンプを用いて液体窒素で冷やした高圧ガスタンク（図 3.9 参照）に集め、固体キセノンとして回収している^{*5}。回収したキセノンは純化ののち再び LXe 検出器に戻す予定である。

4.3 リークのオンラインモニター

物理データ取得を優先し、2024 年 MEG II ランはスモールリークがあるまま実施された。MEG II ラン中、キセノンのリーク（グロスリーク、スモールリーク）に少しでも早く気づくためにリークのオンラインモニターを導入した。MEG II ランの間、光センサー較正用のデータ（LED を点滅させたときの光センサーの信号のデータ、LED データと呼ばれる）を毎日取得している。この LED データを利用して PMT の相対的な信号電荷の推移を見るこ

^{*5} これは第 4.2.4 項のリーク上昇アクシデント前から行われていた。

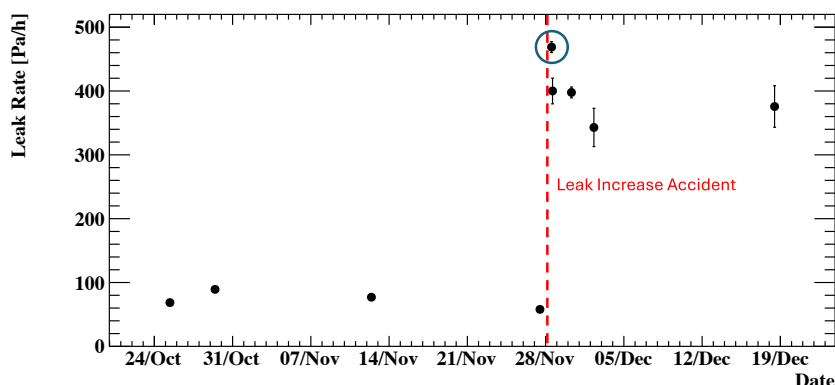


図 4.9: リーク上昇アクシデント前後におけるリークレートの時間変化。アクシデント直後のリークレートのプロット点を青丸で囲って示した。青丸のプロット点の後、リークレートを下げるために検出器の圧力を 0.107 MPa から 0.101 MPa まで下げたが依然としてのリークレートは高いままである。

とでリークをモニターすることができる (図 4.10)。図 4.10 において上流・下流面の PMT の信号電荷が減少傾向にあるがこれは液面がこれら PMT の高さにかつキセノンリークにより信号電荷が減少していることを示している。ここで図 4.10 において相対信号電荷として一番最初のプロット点で規格化した値を用いた。

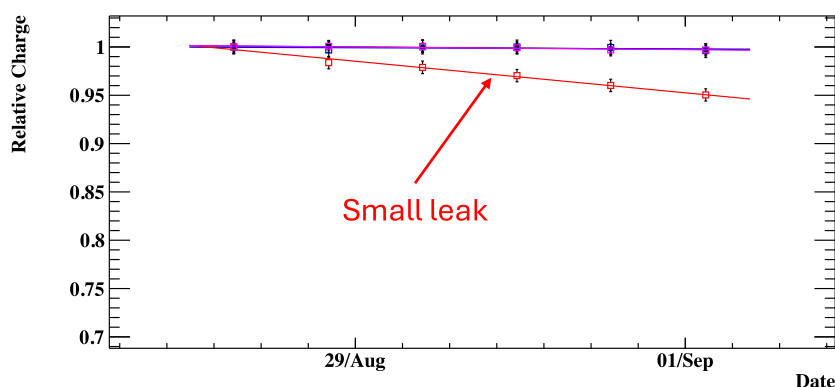
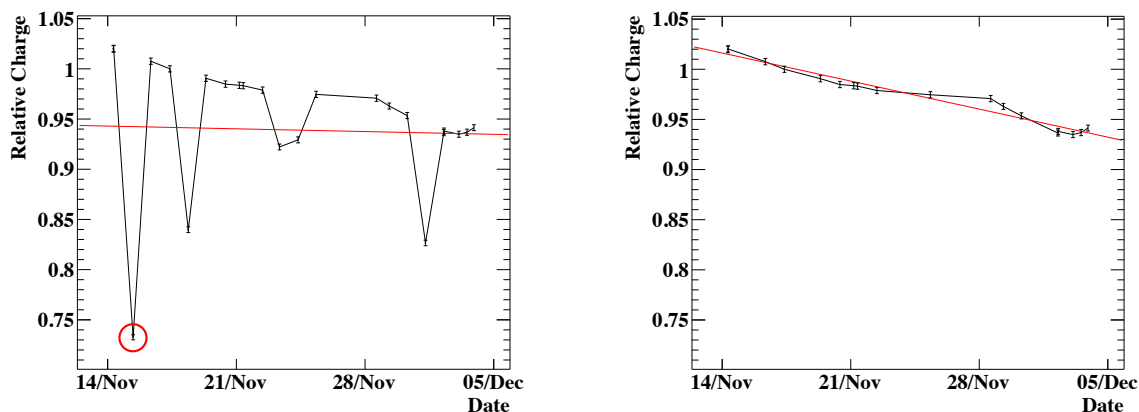


図 4.10: LED データによるオンラインリークモニター。青色、マゼンタ色、赤色のプロットはそれぞれ LXe 検出器の外表面、上表面、上流・下流面の同じ列の PMT の信号電荷の平均値である。

グロスリークに対しては 1 日ごとに各プロット点の相対信号電荷の差からリークを検出し、スモールリークに対しては過去 7 日間のプロット点を線形フィッティングしその傾きの大きさからリークを検出する (図 4.10 参照)。これらアルゴリズムからグロスリークに対しては 1 日で、スモールリークに対しては 1 週間でリークが発生してから気づけるようになっている。

LED データには LED 光の不安定性から外れ値が含まれる。この外れ値をリーク検出から除くために液体キセノンに浸っていることが確実な LXe 検出器下部に位置している PMT (リファレンス PMT と呼ぶ) の相対信号電荷を線形フィッティングし、フィッティング関数から最も外れた点 (図 4.11a の赤丸で囲まれた点) を取り除き、再度フィッティングするという操作を繰り返した。この操作をフィッティング関数とプロット点との差の絶対値が 0.03 以下になるまで繰り返し、全ての外れ値を取り除いた (図 4.11b)。残った LED データだけをオンラインリークモニターで用いることで精度よくリークを検出することができる。



(a) 外れ値を除く前のリファレンス PMT の相対信号電荷の歴史。赤色の直線は線形フィッティングしたときの関数。

(b) 外れ値を除いた後のリファレンス PMT の相対信号電荷の歴史

図 4.11: 外れ値除去前後のリファレンス PMT の相対信号電荷の歴史

4.4 結論

2024 年、LXe 検出器で 2 種類のキセノンリークが発生した。1 つはグロスリークと呼ばれ、LXe 検出器で使われているゲートバルブのリークタイトが損なわれ、このバルブを通してキセノンがリークしたのが原因である。そのリークレートは 5.9 kg/day であった。LXe 検出器上部のゲートバルブを閉めるためのチューブに圧縮空気を送り続けることでグロスリークは止まった。

もう 1 つのリークとしてスモールリークがあり、これは LXe 検出器内容器から真空層へのキセノン漏れが原因である。そのリークレートは 0.22 kg/day であったが 11 月の LXe 検出器 Slow Control System 障害のアクシデントによりそのリークレートは約 6 倍増加した。2024 年 MEG II ラン終了後、検出器内容器カバーの増し締め、ガasket 交換などを行いスモールリーク解消を目指す。

またこれらリークを MEG II ラン中オンラインモニターするようなシステムを導入した。リークが発生した際にはグロスリークは 1 日で、スモールリークは 1 週間で気づけるようになっている。

第 5 章

VUV-MPPC の放射線損傷

MEG II 実験液体キセノン検出器において VUV-MPPC の光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) 減少が観測されている [5]。これはビームタイム中に起こることから一種の放射線損傷だと考えられているが、本章では VUV-MPPC の放射線損傷に関する研究を報告する。

5.1 SiPM の放射線損傷

SiPM の放射線損傷にはバルク損傷と表面損傷がある。バルク損傷は高エネルギー粒子 (陽子、パイオン、電子、光子など) が SiPM 内の Si 原子を弾き出して格子欠陥を生じる現象である。表面損傷は光子や荷電粒子が酸化物 (SiO₂) や Si-SiO₂ 境界面、これら境界面の欠陥部分に正孔を作る現象を言う。これら放射線損傷によってダークカウントの上昇、信号事象の減少などの悪影響が生じる [23]。なお表面損傷の詳細な説明は第 5.2.2 項で行う。

5.2 LXe 検出器 VUV-MPPC の放射線損傷

MEG II 実験では VUV 光に感度のある VUV-MPPC (型番 S10943-4372、浜松ホトニクス製) が LXe 検出器の内面において使われている (図 3.6、表 5.1)。この VUV-MPPC を用いて 2017 年からビーム試験が始まったが、ビームタイム中に VUV-MPPC の PDE の急激な減少を観測した (図 5.1 参照)。ここで図 5.1 では LXe 検出器内面中心付近の VUV-MPPC の PDE の平均値の推移をプロットした (図 5.2)。PDE 減少はビームタイム中に観測されたためこれは VUV-MPPC の放射線損傷によるものと考えられる。本節ではこれまで行われてきた VUV-MPPC の放射線損傷に関する研究について説明する。

表 5.1: VUV-MPPC の構造

Parameters	Value	Unit
Number of channels	4 (2×2)	-
Effective photo-sensitive area	5.95×5.85	mm ² /ch.
Pixel pitch	50	μm
Number of pixels / channel	13685	-
Window	Quartz (no seal)	-
Package	Ceramic with pin	-

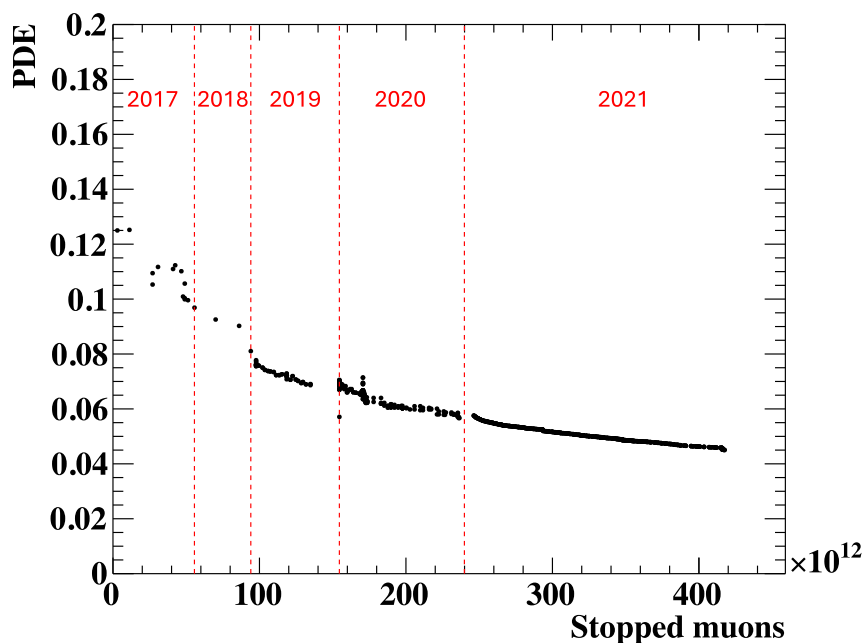


図 5.1: 2017-2020 年ビーム試験、2021 年 MEG II ランにおける VUV-MPPC の PDE 減少 ([1] の図を改変)

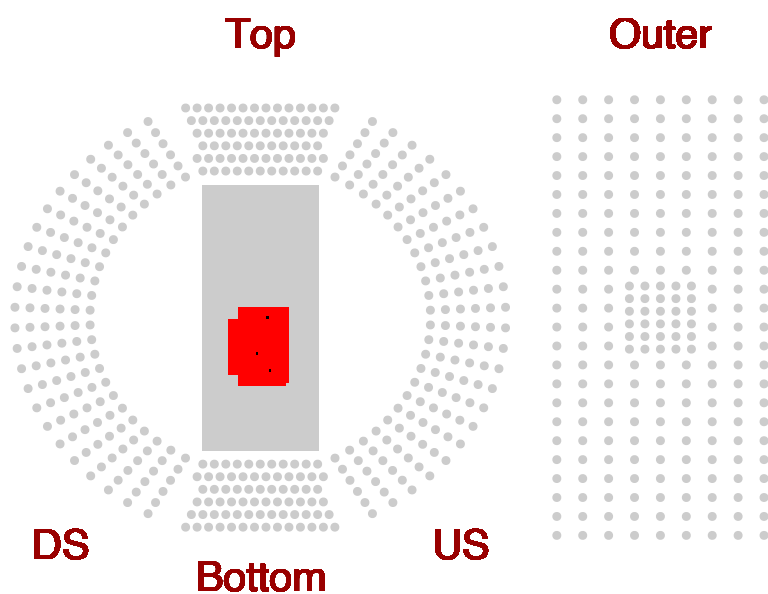
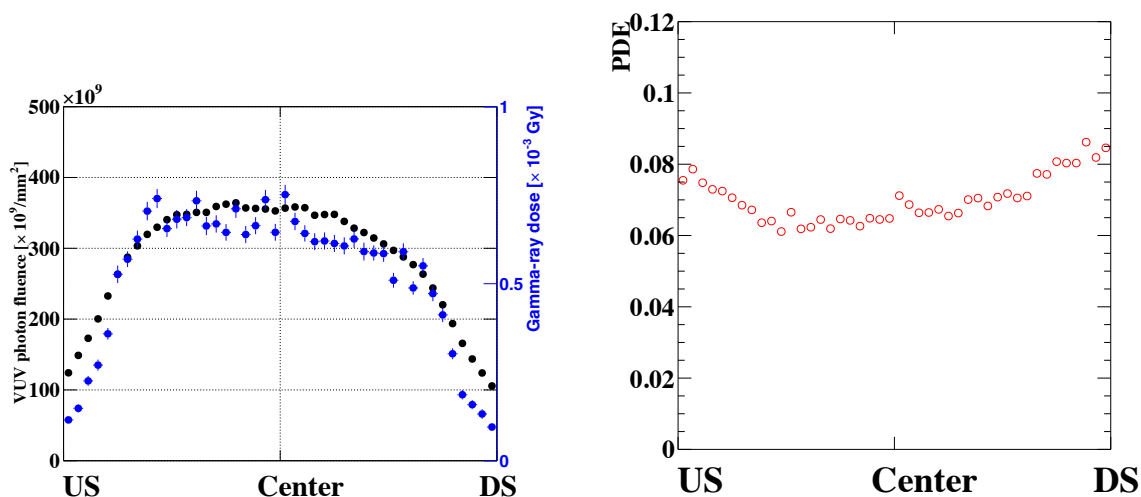


図 5.2: 2018-2019 年に読み出された VUV-MPPC のチャンネル (赤色)。読み出されていないチャンネルは灰色、デッドチャンネルは黒である。ここで内面以外の面の PMT チャンネルは全て灰色にした ([10] の図を改変)。

5.2.1 VUV-MPPC 放射線損傷の候補となる放射線

VUV-MPPC の放射線損傷の原因として最も疑わしい放射線は VUV 光とガンマ線である。その理由は VUV 光とガンマ線が LXe 検出器中心付近ほど多く照射され (図 5.3a, 5.4)、これら放射線が多く照射された VUV-MPPC ほど PDE 減少が大きいからである (図 5.3b)。

以上の観点から VUV-MPPC の PDE 減少、つまり放射線損傷は VUV 光、ガンマ線の照射量と正の相関がある。これら放射線を放射線損傷の原因と仮定し、これまでラボテストが行われてきた。例えば VUV 光を室温、低温 (~170 K)、液体キセノン中で VUV-MPPC に照射する実験が行われたが、実機の VUV-MPPC の PDE 減少を再現することはできなかった [24]。同様に室温、低温中でガンマ線照射が行われたが PDE 減少を再現することはできなかった [25]。液体キセノン中でガンマ線を VUV-MPPC に照射する実験は過去に行われていないため、ガンマ線が VUV-MPPC の放射線損傷の原因となる放射線である可能性は残っている。



(a) MC シミュレーションによる位置座標 u に対する VUV 光とガンマ線の照射量の変化

(b) VUV-MPPC の PDE 減少の位置依存性

図 5.3: PDE 減少と LXe 検出器放射線環境の関係 [1]

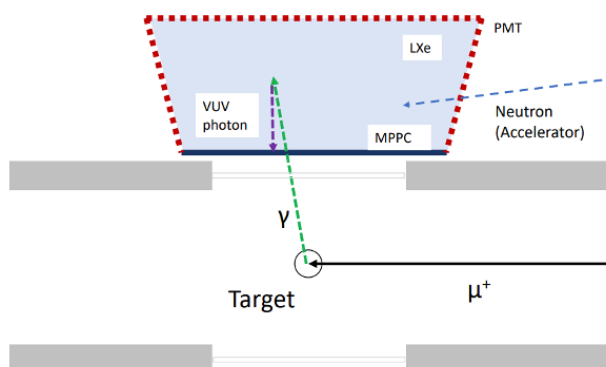


図 5.4: LXe 検出器の放射線環境 [1]

5.2.2 VUV-MPPC の表面損傷

VUV 光やガンマ線による放射線損傷として考えられるのが表面損傷である (第 5.1 節参照)。VUV-MPPC の表面損傷として図 5.5 のモデルを考えている。荷電粒子が VUV-MPPC の不活性化層 (SiO_2) に入射すると、電子正孔対が作られる*¹。移動度が高く格子欠陥にトラップされる確率が低い電子はその場にとどまらないが、一方正孔は VUV-MPPC に印加された電場により不活性化層と Si の境界面 (不活性化層側) に集まり、正の電荷を蓄積する。このように荷電粒子によって SiPM の Si- SiO_2 境界面に正の電荷が溜まることを表面損傷と呼ぶ。

SiPM は逆バイアスの電圧をかけて使用される。VUV-MPPC に逆バイアスの電圧をかけると図 5.5 の Si 層上部の p 型半導体が負、下部の n 型半導体が正に帯電し図だと上から下の方向に電場が生じる。しかし境界面に正の電荷が溜まることで p 型半導体の負の帯電を弱め、VUV-MPPC にかかる電場を弱めてしまう。これにより VUV 光に対する PDE (以下 PDE_{VUV} と書く) が減少するがその原理を以下に説明する。

可視光 (ここでは青色の波長を持つ光を想定する) の Si に対する吸収長は比較的長い (~180 nm) [1]、VUV-MPPC の表面 (SiO_2) に可視光が入射したとき Si 層の奥深くまで侵入して電子正孔対を作る (図 5.5)。この電子正孔対の電子は Si にかけてられた電場によりドリフト運動しアバランシェ層に到達する。アバランシェ層に到達した電子はアバランシェ増幅を引き起こし、電気信号として光が検出される。一方、VUV 光の Si に対する吸収長は短いため (~6 nm) [1]、VUV 光が VUV-MPPC の表面に入射したとき Si 層の表面付近に電子正孔対を作る。不活性化層と Si 層の境界面に正の電荷が溜まり境界面の電場を弱めていると、VUV 光により生成された境界面付近の電子はドリフト運動してアバランシェ層に到達する前に Si 層内のホールと再結合しやすくなる。その結果、VUV 光が VUV-MPPC に入射しても光を検出することができず PDE_{VUV} の減少が観測される。

LXe 検出器 VUV-MPPC において、 PDE_{VUV} の減少が可視光に対する PDE 減少に比べて約 10 倍大きいことは本仮説が正しいことを示唆している (図 5.6)。

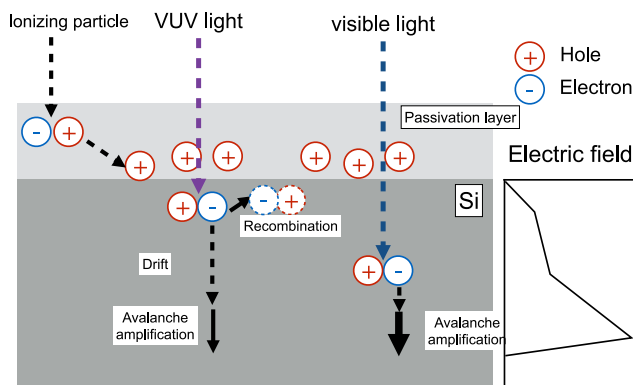


図 5.5: 表面損傷のメカニズム (仮説)

5.2.3 VUV-MPPC 内の水分による PDE 減少

VUV-MPPC は水分を吸収すると PDE が減少することが知られている [13]。図 5.7 に温度 60 °C、湿度 90 % の環境下に VUV-MPPC をさらしたときの PDE 減少を示す。ここでレジェンドの時間はこの環境下に VUV-MPPC をさらした時間を表す。このとき VUV-MPPC は常温 (25 °C)、常湿 (60 %) の環境下に比べて約 89 倍早く水分を吸収するが、長時間高温・高湿度環境に置かれた VUV-MPPC ほどの波長領域の光に対しても PDE 減少が大

*¹ 不活性化層は VUV を透過するが、一部の VUV は吸収され電子正孔対が作られる。

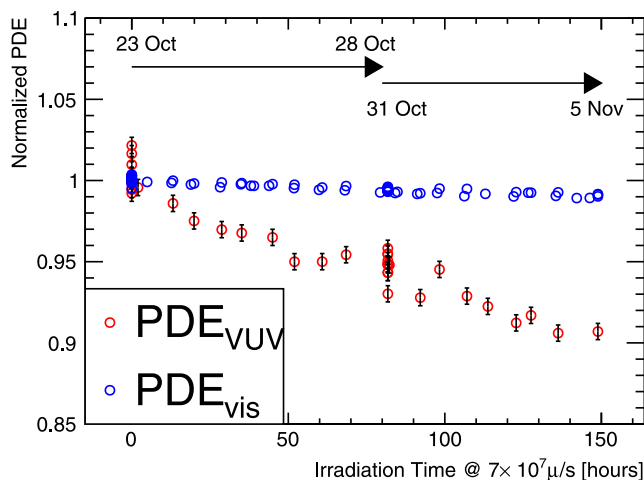


図 5.6: VUV 光、可視光に対する PDE 減少の推移。横軸はミュオン照射時間である [10]。

きい。

VUV-MPPC は VUV 光に感度を持たせるために耐湿・耐紫外効果のある保護層（エポキシ樹脂やシリコンゴムで作られる）を持っていない [9]。これにより水分が VUV-MPPC 内の Si-SiO₂ 境界面に溜まりやすく、この水分により光電変換層の電場が弱められ PDE が減少する（第 5.2.2 項参照）。2015 年実験室で VUV-MPPC の PDE_{VUV=175 nm} が測定されたがそのときの値はおおよそ 20% 以上であった [26]。ところが 2017 年に VUV-MPPC を LXe 検出器にインストールし、再度 VUV-MPPC の PDE_{VUV=175 nm} を測ってみると約 15% まで下がっていた。これは長期保管中およびインストール期間中*2に VUV-MPPC が水分を吸ってしまったことが原因である可能性が高い。第 5.2.4 項で述べるようにアニーリングによって PDE は約 15% まで回復するがそれ以上は回復しない。これはアニーリングにより表面損傷を回復させることはできるがアニーリングの温度が水分を蒸発させるのに十分でないため（常圧で 100°C 以下、第 5.2.4 項参照）、水分による PDE 減少を取り除くことができていないことを示唆する。

5.2.4 アニーリング

SiPM の表面損傷はアニーリングを行うことで回復することが知られている。VUV-MPPC においてもアニーリングにより PDE が回復することが確かめられた [10]。VUV-MPPC のアニーリングは約 1.8 W のジュール熱を与えて行われる [5, 10]。これは逆バイアス電圧約 71 V をかけた VUV-MPPC に LED 光を照射しながら約 25 mA の電流を流すことで実現される。これにより VUV-MPPC は温度約 70°C まで温められる [10]。このアニーリングを 28 時間行うことにより例えば 2022 年の VUV-MPPC の PDE はアニーリング前、全 VUV-MPPC 平均で約 6% だったのがアニーリング後約 15% まで回復した（図 5.8）。MEG II 実験ではこのアニーリングを毎年ラン終了後に行い VUV-MPPC の PDE 減少に対処している。

5.2.5 VUV-MPPC 内の水分による表面損傷加速の可能性

以上の観点から LXe 検出器 VUV-MPPC の PDE 減少の原因として放射線損傷、特に表面損傷が強く考えられる。また同時にこれら VUV-MPPC は Si-SiO₂ 境界面に PDE を減少させるのに十分な量の水分を含んでいる

*2 納品からインストール終了まで約 2 年を費やしたがインストール期間中 8 ヶ月ほど大気中に VUV-MPPC はさらされていた。

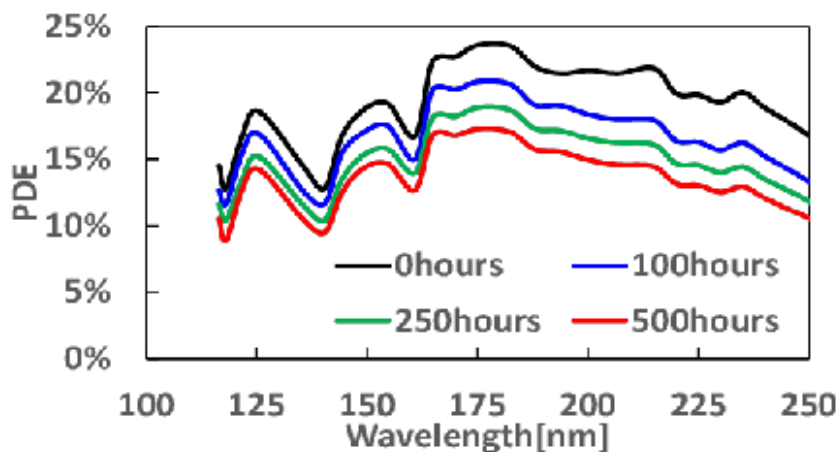


図 5.7: VUV-MPPC の水分吸収による PDE 減少 [13]。使用された VUV-MPPC の型番は S13370-3050CN である。

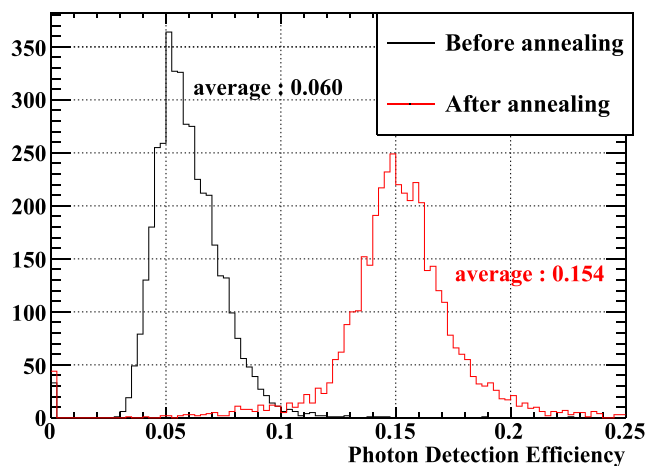


図 5.8: MEG II 2022 年ランのアニーリング前の VUV-MPPC の PDE の分布 (黒) とアニーリング後の PDE の分布 (赤) [5]

ことが強く示唆される (第 5.2.3 項)。H₂O は極性分子であるため SiO₂ 層内でイオン化しやすい*³。これらから VUV-MPPC の Si-SiO₂ 境界面に溜まった水分が表面損傷を加速していると仮説を立てた。これを確かめるために吸湿した VUV-MPPC サンプルに室温、液体キセノン中で VUV 光を照射して実機の VUV-MPPC の PDE 減少の再現を試みた。

*³ Si-SiO₂ 境界面の格子欠陥部分に SiH⁺ もしくは SiOH₃⁺ 基が生成される可能性がある。

5.3 吸湿サンプルへの室温中での VUV 光照射試験

5.3.1 セットアップ

表 5.2 のそれぞれ異なる吸湿時間で吸湿させた VUV-MPPC*4 に常温で VUV 光を照射して実機の PDE 減少の再現を試みた。実験のセットアップを図 5.9 に示す。MgF₂ 窓を持つ 20 W のキセノンフラッシュランプ (L12745-03-3、浜松ホトニクス製) に波長ピーク 172 nm をもつバンドパスフィルター (25172FNB、eSource Optics 製) 1 枚を取り付けて VUV 光を照射をした。図 5.10a, 5.10b にそれぞれ 20 W キセノンフラッシュランプの波長スペクトル、バンドパスフィルターの透過スペクトルを示す。

VUV 光に対する酸素の吸収断面積は窒素に比べて約 10 倍大きいことから [27]、VUV 光照射は窒素中で行った。また照射後のデータ測定用に 2 W キセノンフラッシュランプ (L13651-03-3、浜松ホトニクス製) にバンドパスフィルターを 4 枚つけて VUV-MPPC に VUV 光を照射し、信号波形を取得した。ここで波形デジタイザーとして DRS4 を用いた [21]。

表 5.2: 使用した吸湿サンプルの吸湿状況。ここで 2 列目は温度 60 °C、湿度 90 % の環境下に VUV-MPPC をさらした時間を示す。このとき VUV-MPPC は常温 (25 °C)、常湿 (60 %) の環境下に比べて 89 倍早く水分を吸収する [13]

	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Condition (60 °C, 90 %)	0 hour	125 hour	250 hour

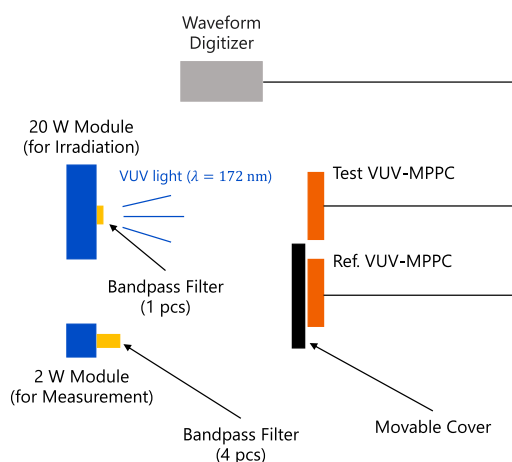
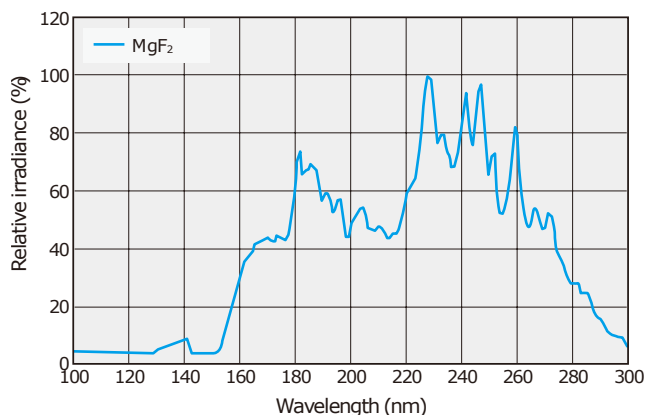
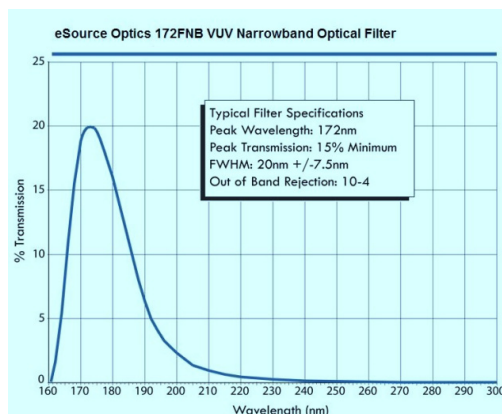


図 5.9: VUV 光常温照射試験のセットアップ。20 W キセノンフラッシュランプで VUV 光を照射しているとき、リファレンス用の VUV-MPPC に VUV 光が照射されないように厚紙に遮光テープを貼ったカバーで覆った。2 W キセノンフラッシュランプで VUV 光を照射して VUV-MPPC の信号を測定しているときはこのカバーをリファレンス VUV-MPPC から外した。

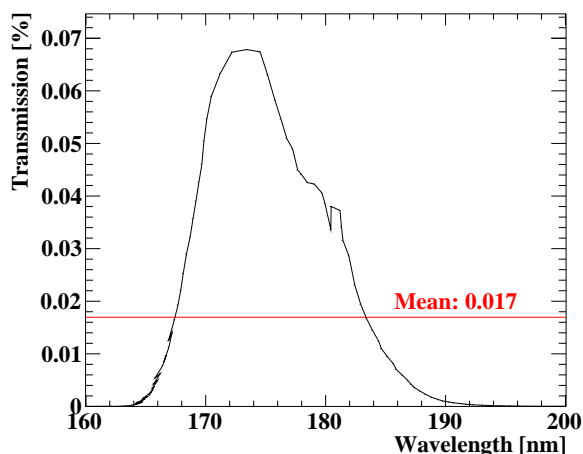
*4 これらのサンプルでは吸湿加速の前に常圧、150 °C で 16 時間のベーキングを行い、過去の放射線損傷、水分吸収を回復させた。また吸湿サンプルは浜松ホトニクスに作製いただいた。



(a) MgF₂ 窓を持つ 20 W キセノンフラッシュランプの波長スペクトル [28]



(b) バンドパスフィルターの透過スペクトル [29]



(c) バンドパスフィルターを MgF₂ 窓を窓材として持つキセノンフラッシュランプに 4 枚つけたときの波長に対する透過率

図 5.10: 測定系における波長スペクトル、透過率の関係

5.3.2 照射量

照射レートの見積もりはバンドパスフィルターを 5 枚フラッシュランプにつけたときの信号電荷の大きさ、およびバンドパスフィルター 1 枚あたりの透過率から求めた。図 5.11a にバンドパスフィルターを 5 枚つけたときの信号電荷分布を示し、その平均値（ガウス分布の中央値）は 24.8 a.u. であった。一方 LED を弱く光らせて VUV-MPPC 1 チップのゲインを測定した結果、その値は 1.55×10^{-3} a.u. であった（図 5.11b）。よってバンドパスフィルター 5 枚をフラッシュランプにつけて VUV-MPPC に照射した際に検出される光電子数は 1.60×10^4 である。

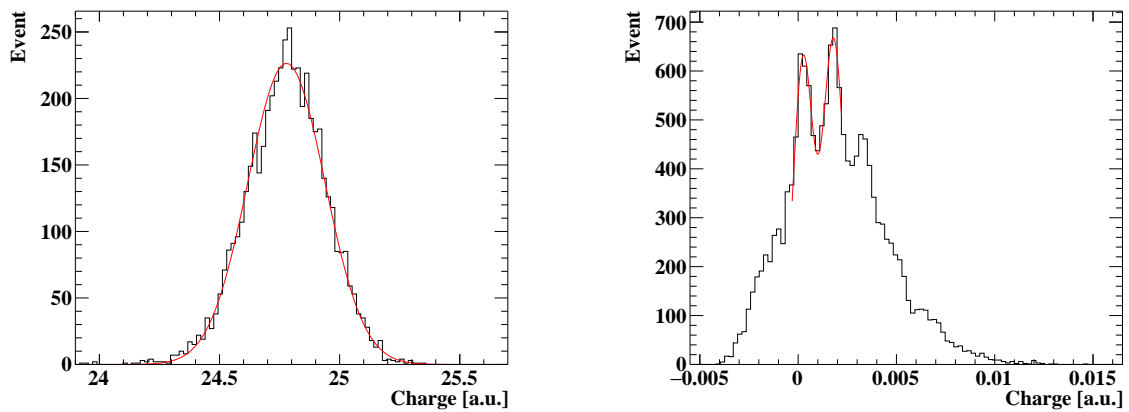
ここで SiPM は受光面のピクセル数と同等の光電子数が入射すると飽和現象を起こすことが知られている。SiPM の飽和現象とは測定された光電子数が実際に入射した光電子数に比べて小さくなってしまふ現象のことである（図 5.12）。飽和現象は以下のように補正した。

照射試験で使用した VUV-MPPC の 1 チップのピクセル数は 13685 である（表 5.1）。したがって検出光電子数のピクセル数に対する比は約 1.17 であった。ここで、SiPM のピクセルは信号が検出された後、ある時定数で

回復して再び信号を検出できるようになるが、使用したキセノンフラッシュランプの発光周期は 50 Hz であり、VUV-MPPC のピクセルの時定数 ($\mathcal{O}(10)$ ns) [9] に比べて十分遅いのでピクセル数以上の光電子数が検出可能である。この比 1.17 を図 5.12 のピクセル数 1024 個の SiPM の飽和曲線に対応づけるとピクセル数の 1.17 倍の光電子数 (1.20×10^3) が検出された際、実際の光電子数は 2.33×10^3 である。したがってこれをもとに測定系における実際の光電子数を計算すると

$$\text{光電子数} = \frac{2.33 \times 10^3}{1.20 \times 10^3} \cdot 1.60 \times 10^4 = 3.11 \times 10^4 \quad (5.1)$$

となる。



(a) バンドパスフィルター 5 枚を 20 W キセノンフラッシュランプに取り付けて VUV 光を照射したときの電荷分布

(b) LED を弱く光らせたときの電荷分布。赤の曲線はダブルガウシアンでフィッティングした曲線。フィッティングされた 2 つの山は左側が 0 p.e.、右側が 1 p.e. に対応し、2 つのピークの差の値をゲインとした

図 5.11: 測定系における信号電荷分布

また図 5.10a, 5.10b からキセノンフラッシュランプにバンドフィルターを 4 枚つけることで図 5.10c のような透過スペクトルを得ることができる。VUV 領域を $\lambda=160-200$ nm の波長領域と定義するとこの波長スペクトルは平均 0.017 % の透過率を持つ。したがってこの透過スペクトルは $\lambda=172$ nm 付近にピークを持つことから VUV-MPPC の PDE の波長依存性を無視すると、バンドパスフィルター 4 枚により VUV-MPPC の信号電荷は 99.983 % 減少すると考えられる。よってバンドパスフィルターを 1 枚だけつけたフラッシュランプによる光電子数は $3.11 \times 10^4 / 0.00017 = 1.8 \times 10^8$ と推測される。照射レートは以下の式

$$\text{照射レート} = \frac{\text{光電子数}}{\text{PDE}} \cdot \frac{1}{\text{ECF}} \cdot \text{トリガーレート} \cdot \frac{1}{1 \text{ チップの表面積}} \quad (5.2)$$

を用いると

$$\begin{aligned} \text{VUV 光照射レート} &= \frac{1.8 \times 10^8}{0.15} \cdot \frac{1}{1.2} \times 50 \text{ sec}^{-1} \times \frac{1}{5.95 \times 5.85 \text{ mm}^2} \\ &= 1.4 \times 10^9 \text{ photon} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

となる。ここでトリガーレートとして 20 W キセノンフラッシュランプの発光周期 50 Hz (フラッシュランプに送られるファンクションジェネレータからの矩形波の周波数) を用い、PDE として 15 % を仮定した。また VUV-MPPC の 1 チップの光電面の表面積として表 5.1 の値 $5.95 \times 5.85 \text{ mm}^2$ を用いた。なお ECF の値として第 5.4.3 項のおおよその値 1.2 を用いた。

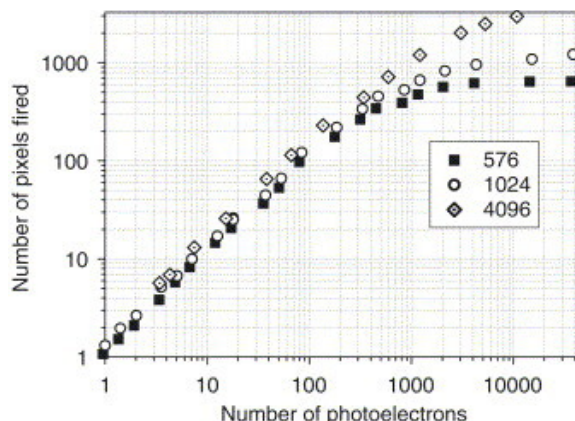


図 5.12: SiPM の飽和現象 [14]。レジェンド内の数字は SiPM のピクセル数を表す。

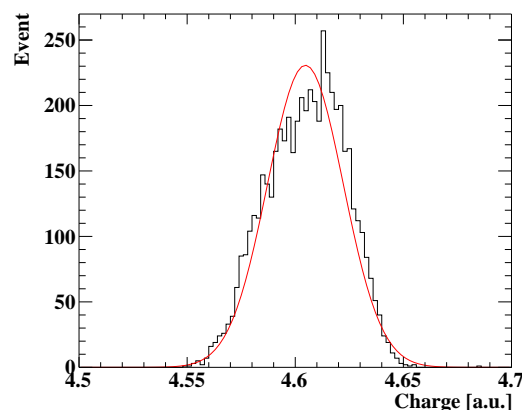


図 5.13: 250 時間吸湿サンプルの電荷分布。バンドパスフィルターを 4 枚つけた 2 W キセノンフラッシュランプからこのサンプルに VUV 光を照射した。

本測定において吸湿サンプルに図 5.9 のセットアップで 25 時間 VUV 光を照射した。したがって照射量は 1.3×10^{14} photon \cdot mm $^{-2}$ である。これは 2021 年 MEG II ランの VUV 光照射量 2×10^{11} photon \cdot mm $^{-2}$ [1] の約 10^3 倍である。

5.3.3 結果

250 時間吸湿サンプルにバンドパスフィルターを 4 枚つけた 2 W キセノンフラッシュランプから VUV 光を照射したときの電荷分布を図 5.13 に示す。信号電荷はガウスフィッティングのピークから計算した。図 5.14 に照射時間に対する各吸湿サンプルの 2 つのチップの信号電荷の変動を示す。ここで照射量変動を較正するために各データ点をリファレンスの信号電荷で割り、その値を一番最初のプロット点で割って規格化した。図 5.14 からどの吸湿サンプルにおいても MEG II 実験 LXe 検出器 VUV-MPPC の PDE 減少を再現することはできなかった。

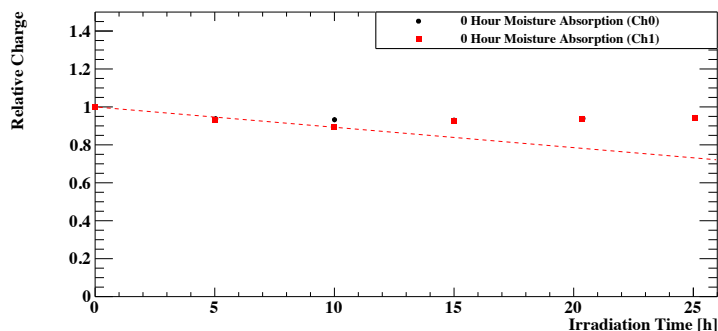
5.3.4 議論

文献 [24] によると常温照射において 2021 年 MEG II ランにおける VUV 光照射量のおよそ 10^4 倍を VUV-MPPC に照射し、表面損傷を加速して PDE 減少を観測することに成功している。本実験においてその 10 分の 1 の VUV 光を吸湿サンプルに照射したが PDE 減少を再現することはできなかった。

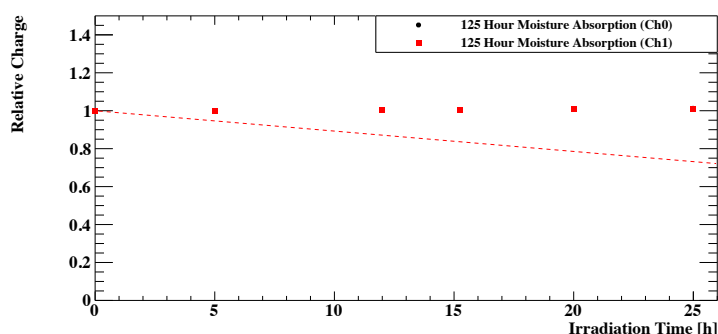
5.4 吸湿サンプルへの液体キセノン中での VUV 光照射試験

5.4.1 セットアップ

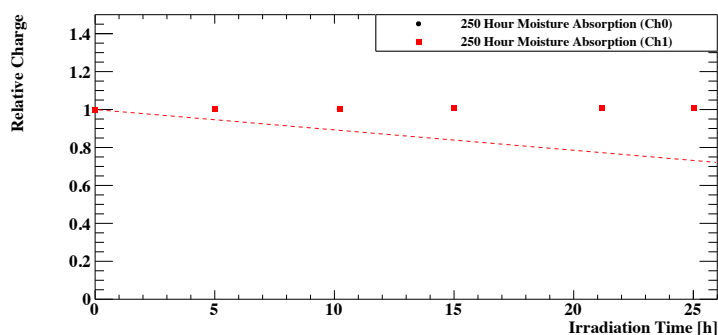
室温中における VUV 光照射試験で LXe 検出器 VUV-MPPC で見られた PDE 減少を再現することができなかったため、実機の環境と同じ液体キセノン中で VUV 光を VUV-MPPC に照射し PDE 減少の再現を試みた。照射試験のセットアップを図 5.15 に示す。スモールチェンバーと呼ばれる容器に液体キセノンを溜め (図 5.15a)、溜まった液体キセノン中にアルファ線源 (^{241}Am) と LED、VUV-MPPC を図 5.15b のような位置関係で設置して VUV-MPPC に VUV 光を照射した。ここで LED は VUV-MPPC のゲイン測定用に設置した。またテスト用の



(a) 0 時間吸湿サンプルの照射時間に対する信号電荷の変動



(b) 125 時間吸湿サンプルの照射時間に対する信号電荷の変動



(c) 250 時間吸湿サンプルの照射時間に対する信号電荷の変動

図 5.14: 各吸湿サンプルの照射時間に対する信号電荷の変動。赤色の点線は 2021 年の MEG II ランにおける PDE 減少速度から予測される振る舞いを示したものの

VUV-MPPC の他にリファレンス用 VUV-MPPC を設置し較正に用いた。液体キセノンをスモールチェンバーに溜める際、ガスキセノンをゲッター (MonoTorr PS3-MT3-R-2、SAES Pure Gas 製) に通して純化し、パルスチューブ型冷凍機 (PDC08、アルバック・クライオ製) と液体窒素で冷やしたスモールチェンバーにガスキセノンを送ることでガスキセノンを液化し溜めることができる。

本測定においてテストサンプルとして表 5.2 の 250 時間吸湿サンプルを使用した。また波形デジタイザーとして WaveDREAM ボードを用いた [2]。

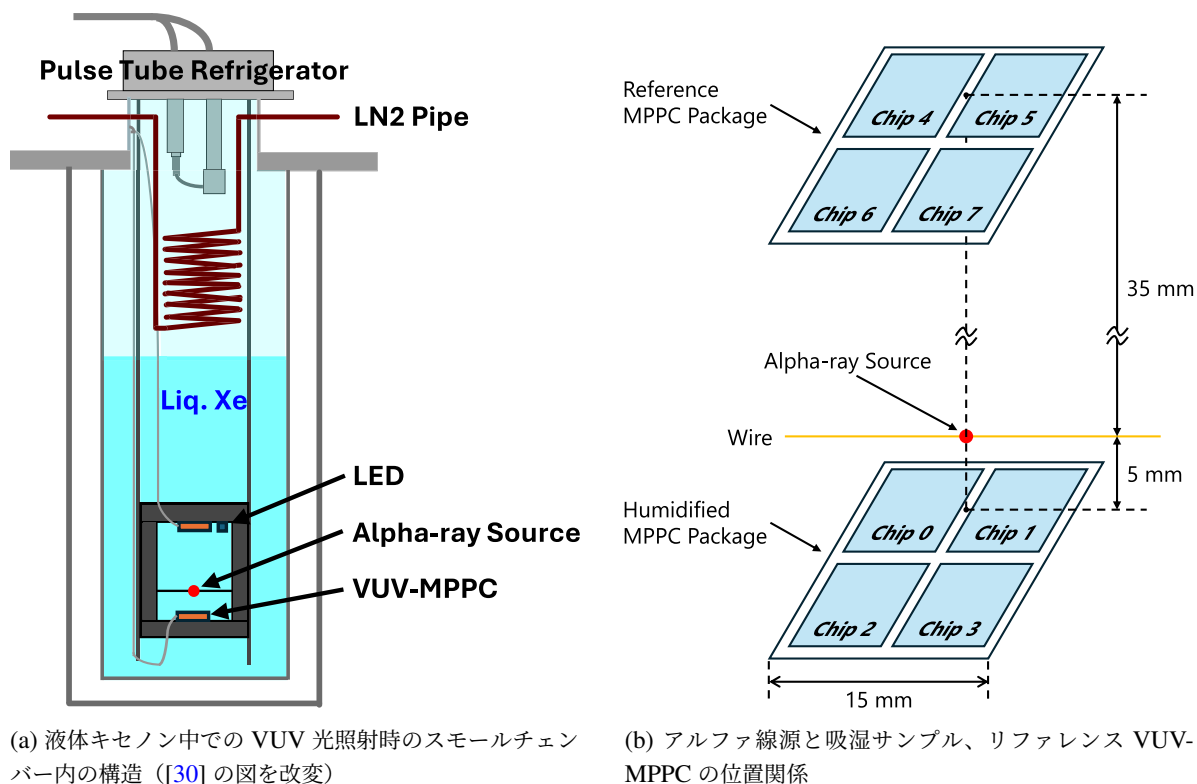


図 5.15: 液体キセノン中での VUV 照射試験のセットアップ

5.4.2 PDE

一般に SiPM の PDE はかけられたオーバー電圧（動作電圧から降伏電圧を引いたもの）に依存する。図 5.16 に VUV-MPPC の 2 つのチップ（黒と赤）のオーバー電圧に対する PDE の変動を示す。

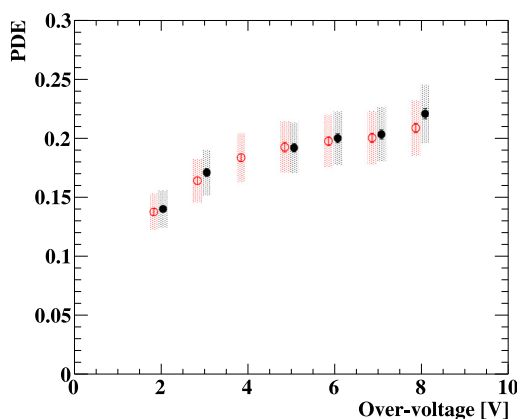


図 5.16: VUV-MPPC の 2 つのチップ（黒と赤）にかけられたオーバー電圧に対する PDE の変動 [9]

VUV-MPPC の PDE を測定するために液体キセノン中におけるテストサンプルの降伏電圧を測定した。その際 SiPM のゲインがオーバー電圧に比例することを用いた。図 5.17 に Chip 0, 1 にかけて動作電圧に対するゲインの変動を示す。図 5.17 から Chip 0, 1 の降伏電圧はどちらも 45.73 [V] であった。本測定において Chip 0, 1 にそれ

ぞれ 49.32, 49.22 V の動作電圧をかけたので Chip 0, 1 のオーバー電圧はそれぞれ 3.59, 3.49 V であった^{*5}。

図 5.16 からオーバー電圧が 3.5 V のとき PDE は約 18 % と考えられる。図 5.16 で使用された VUV-MPPC が 0 時間吸湿サンプルだと仮定すると図 5.7 から 175 nm の VUV 光に対する PDE は約 24 % である。一方測定で使用された吸湿サンプルは 250 時間吸湿されているので 175 nm の VUV 光に対する PDE は約 19 % である。図 5.7 の測定におけるオーバー電圧を MPPC (型番 S13370-3050CN、浜松ホトニクス製) の推奨オーバー電圧 4 V と仮定すると、Chip 0, 1 のおおよそのオーバー電圧は約 3.5 V だから吸湿サンプルの PDE は

$$18\% - \frac{3.5\text{ V}}{4\text{ V}} \cdot (24 - 19)\% = 14\% \quad (5.4)$$

となる。

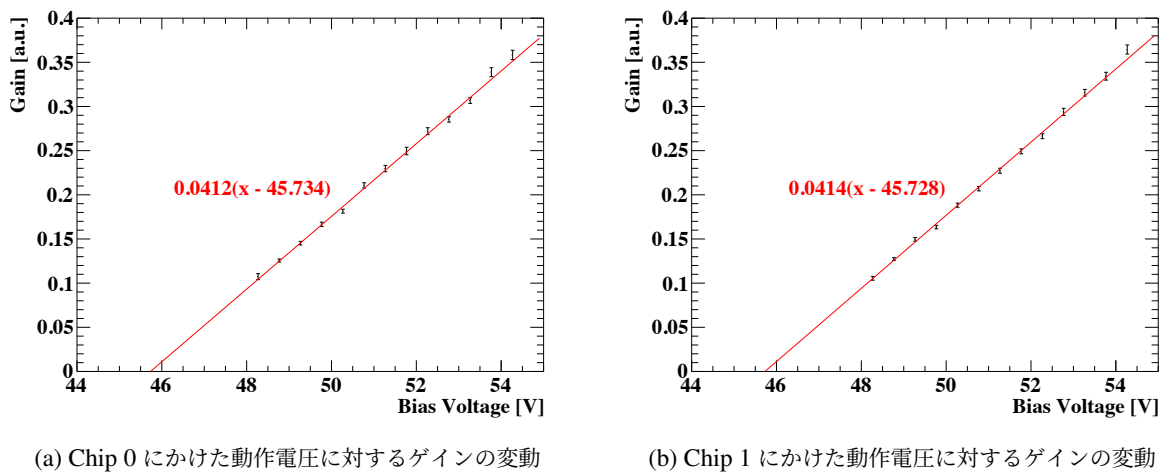


図 5.17: Chip 0, 1 にかけた動作電圧とゲインの関係

5.4.3 照射量

アルファ線源に最も近い Chip 0 (図 5.15b 参照) の VUV 光照射中における電荷量、ゲイン、ECF、トリガーレートの時間変化を図 5.18 に示す。ここで電荷量のピーク値、平均値はそれぞれ電荷分布のピークのガウスフィッティング、平均値から計算した (図 5.19a) またゲインは 0 p.e.、1 p.e. の 2 つのピーク差から計算した (図 5.19b)。Chip 0 の電荷量 (図 5.18b)、ゲイン、ECF の平均値を用いることで Chip 0 に対する VUV 光の照射レートは式 (5.2) から

$$\begin{aligned} \text{VUV 光照射レート} &= \frac{1.372 \times 10^{10}}{1.300 \times 10^7} \cdot \frac{1}{0.14} \cdot \frac{1}{1.245} \cdot 37.83 \text{ sec}^{-1} \cdot \frac{1}{5.95 \times 5.85 \text{ mm}^2} \\ &= 6.58 \times 10^3 \text{ photon} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \end{aligned} \quad (5.5)$$

と計算される。ここで Chip 0 の PDE の値として第 5.4.2 項の値 14 %、表面積の値として表 5.1 の 5.95×5.85 mm² を用いた。

式 (5.5) から本測定期間 (300 時間) 中における照射量は 7.11×10⁹ photon·mm⁻² であった。一方 2017 年から 2021 年までの MEG II ラン中に VUV-MPPC の 1 つのチップに照射された光子数は 4.0×10¹¹ photon·mm⁻² であったから [1]、これら MEG II ラン中の VUV 光照射量に対する本測定の VUV 光照射量の比は 0.018 であった。

^{*5} 室温における動作電圧の規格値から液体キセノン温度 (約 165 K) における動作電圧を割り出し VUV-MPPC に印加した。温度係数として 56 mV·K⁻¹ を用いた [2]

5.4.4 結果

図 5.20 に吸湿サンプル (Chip 0 および 1) の相対 PDE の時間変化を示す。ここで相対 PDE とは電荷分布のピーク値をゲインで割ったもの (光電子数、 N_{phe} で表す) の一番最初のプロット点を値 1 として規格化したものである。また図 5.20 では VUV 光照射中のキセノンの吸収長の減少、温度変化による VUV-MPPC の応答の変動を較正するために 4 つのリファレンスチップ (Chip 4-7) の N_{phe} で規格化した (図 5.22)。ここでプロット点のふらつきを減らすために 5 点で移動平均をとった。

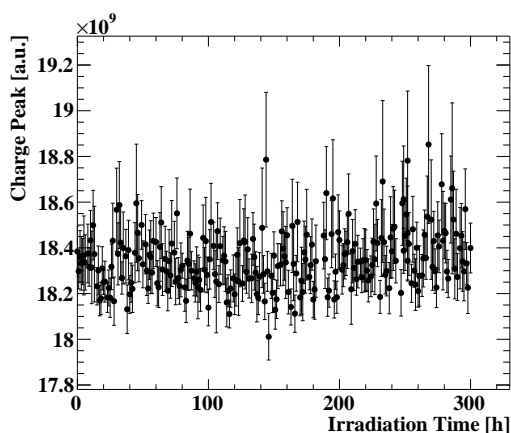
図 5.20 の緑の背景領域は予測される相対 PDE 減少速度の不確かさを示す。ここで緑の背景領域の下限と上限はそれぞれ 2017-2021 年、2022 年の MEG II ラン中の実機の VUV-MPPC の PDE 減少カーブを用いて作成した (図 5.21)。なおこの予想される相対 PDE 減少速度の不確かさの計算方法に関しては付録 A を参照。

5.4.5 議論

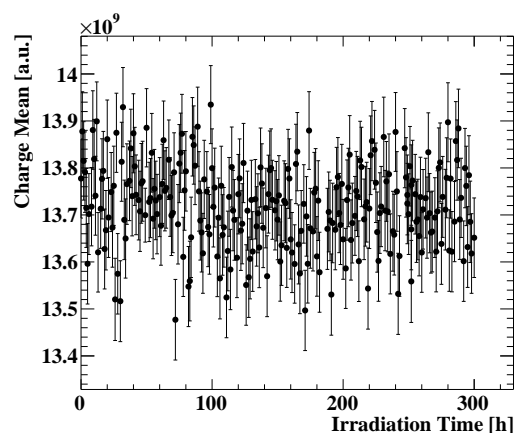
図 5.20 において相対 PDE の減少傾向は見えるが、データ点のふらつきが大きく、実機の VUV-MPPC の PDE 減少を再現できているか否か判断できない。プロット点のふらつきが大きい原因はリファレンス VUV-MPPC の各チップの統計量がテスト VUV-MPPC の Chip 0, 1 に比べて約 50 分の 1 の VUV 光子しか入射しないことである*6。またこれらプロット点は Chip 0, 1 の両方でよく似た周期性を持つが、5 点で移動平均をとったときのトリガーレート (図 5.18f) においても周期的なふらつきが見られる。したがって周期的なふらつきはトリガー由来であると考えられる。

プロット点のふらつきを減らすにはリファレンス VUV-MPPC を受光面が VUV-MPPC の約 10 倍の 2 インチ PMT (型番 R9869、浜松ホトニクス製。受光面 45 mm ϕ) [1] に置き換えることである。これによりリファレンス光センサーの入射光子数を約 10 倍増やすことができ、プロット点のふらつきを約 3 倍減少させることができる。

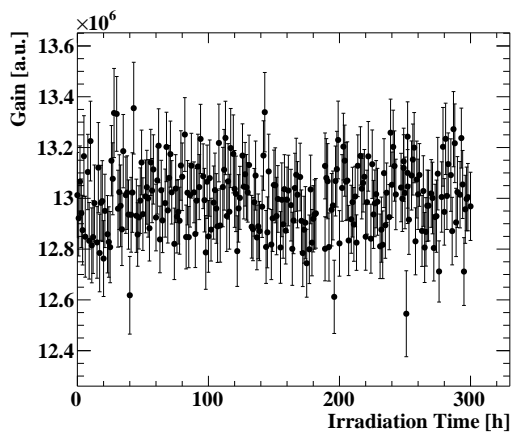
*6 光センサーに入射する光子数は光センサーと光源間の距離の 2 乗に反比例するが、図 5.15b からテストサンプルに入射する VUV 光子数のリファレンスサンプルに対する比は $(35/5)^2=49$ となり約 50 である。



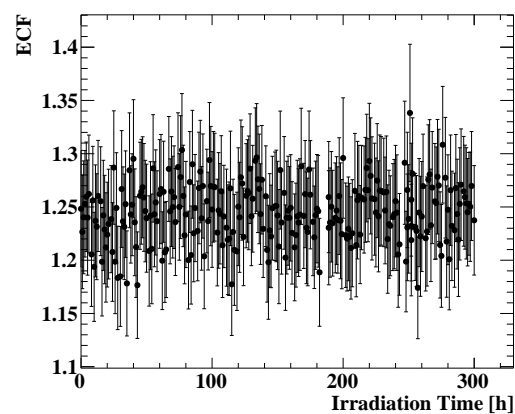
(a) 液体キセノン中で VUV 照射中における Chip 0 の電荷量（ピーク）の時間変化



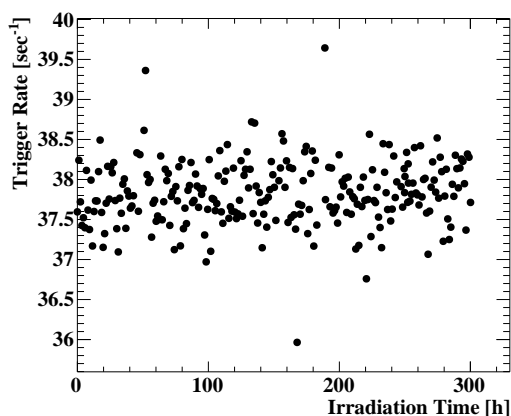
(b) 液体キセノン中で VUV 照射中における Chip 0 の電荷量（平均）の時間変化



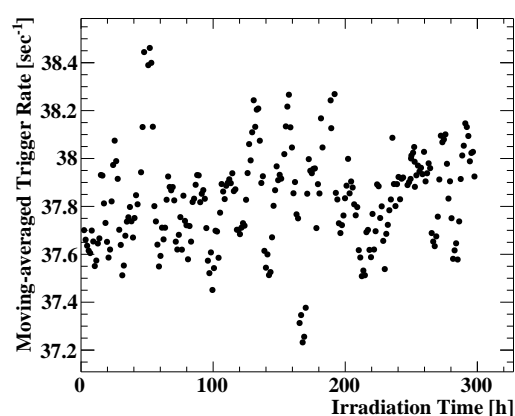
(c) 液体キセノン中で VUV 照射中における Chip 0 のゲインの時間変化



(d) 液体キセノン中で VUV 照射中における Chip 0 の ECF の時間変化

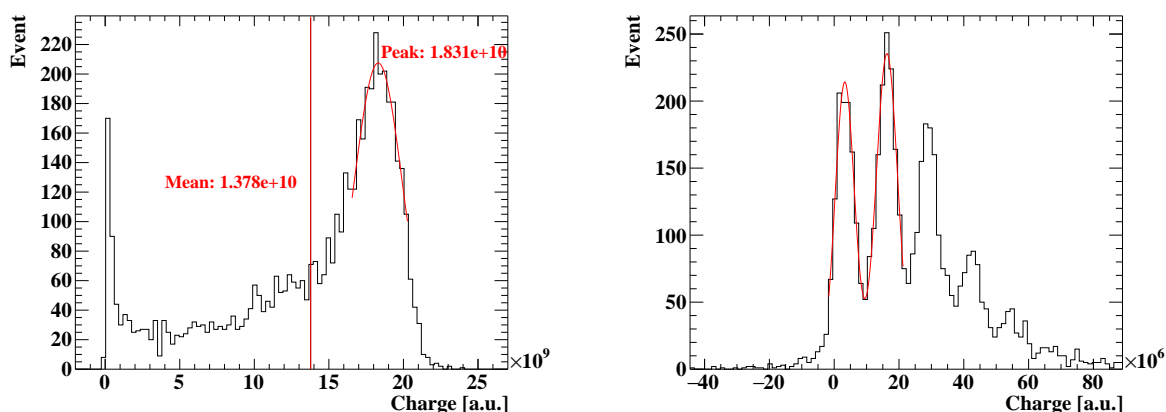


(e) 液体キセノン中で VUV 照射中における Chip 0 のデータのトリガーレートの時間変化



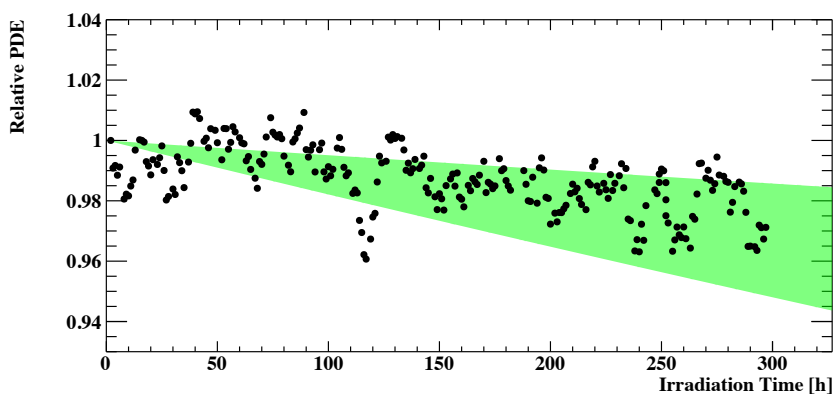
(f) 図 5.18e のトリガーレートで 5 点で移動平均をとったときの時間変化

図 5.18: 液体キセノン中で VUV 照射中の Chip 0 における電荷量、ゲイン、ECF、トリガーレートの時間変化

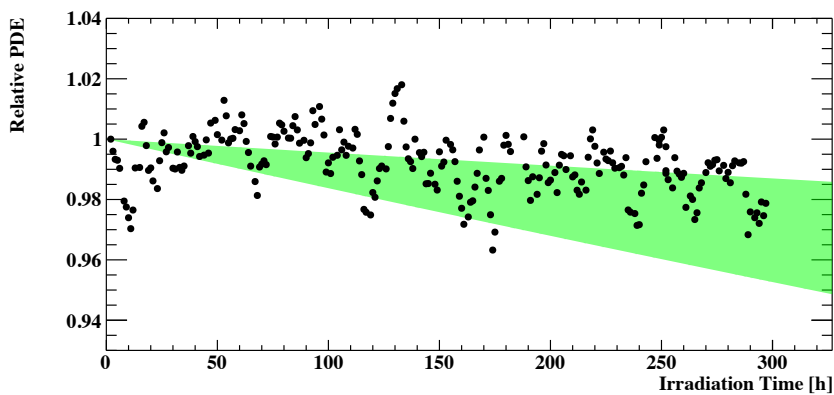


(a) アルファ線由来のシンチレーション光による電荷分布。照射量の見積もりにおいて電荷分布の平均値を用い、PDE の推移を見るときはピーク値を用いた。
 (b) LED を弱く光らせたときの電荷分布。0 p.e. と 1 p.e. の 2 つのピーク差をゲインとした。

図 5.19: 液体キセノン中で VUV 光照射時の信号電荷分布

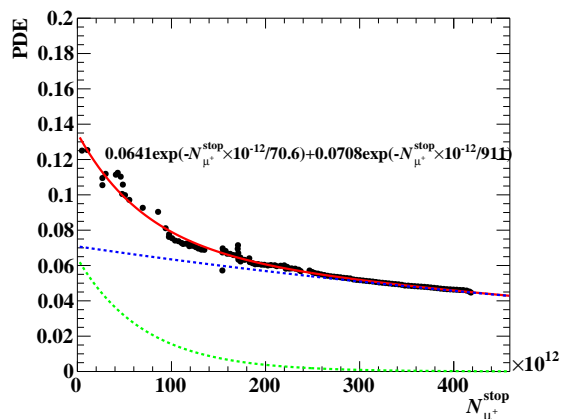


(a) 吸湿サンプルの Chip 0 に対する相対 PDE の時間変化

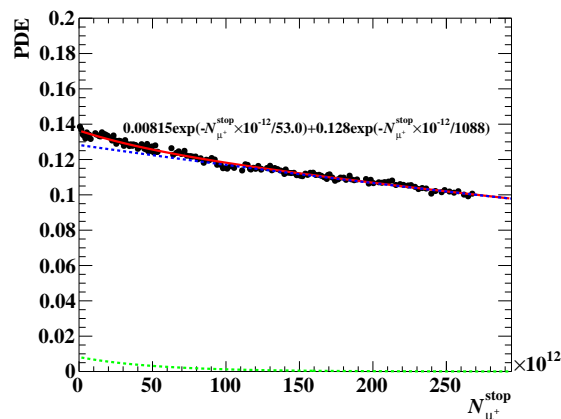


(b) 吸湿サンプルの Chip 1 に対する相対 PDE の時間変化

図 5.20: 吸湿サンプルの Chip 0, 1 に対する相対 PDE の時間変化。緑の背景領域は予想される PDE 減少速度の不確かさを示す。

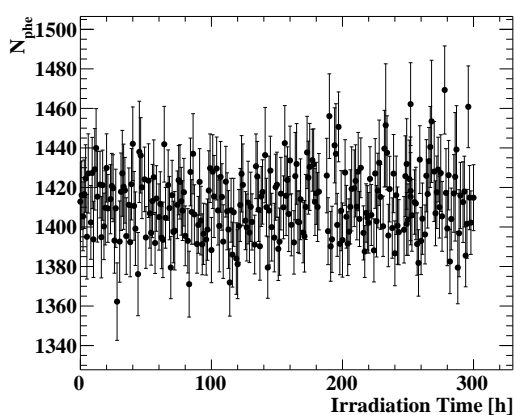


(a) 2017-2021 年ミュオンビーム照射中の PDE 減少ヒストリー [1]

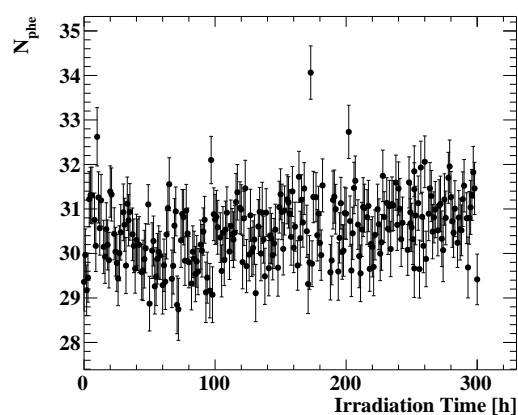


(b) 2022 年ミュオンビーム照射中の PDE 減少ヒストリー

図 5.21: 2017-2021 年、および 2022 年ミュオンビーム照射中の PDE 減少ヒストリー。2022 年において PDE が回復しているがこれは 2021 年ラン後のシャットダウン期間中に VUV-MPPC をアニーリングしたからである (第 5.2.4 項参照)。またアニーリング後、回復した PDE の減少速度は遅くなっているが、これはアニーリングが放射線損傷の機構に何らかの変化をもたらしたことを意味する。



(a) 液体キセノン中で VUV 光照射中における Chip 0 の N_{phe} の時間変化



(b) 液体キセノン中で VUV 光照射中における Chip 4 (リファレンスステップ) の N_{phe} の時間変化

図 5.22: 液体キセノン中で VUV 光照射中における Chip 0, 4 の N_{phe} の時間変化。

第6章

まとめと今後の展望

本論文では LXe 検出器のキセノンリーク、および VUV-MPPC の放射線損傷に関する研究を報告した。2024 年に観測されたキセノンのリークとしてグロスリークとスモールリークがある。これらリークは LXe 検出器 PMT の信号電荷の変動、検出器真空層の真空引きを止めたときの圧力上昇などから発見された。グロスリークのリークレートは 5.9 kg/day であるが、リーク箇所である LXe 検出器上部のゲートバルブに圧縮空気を送り続けることでこのリークを止めることができた。一方スモールリークのリークレートは 0.22 kg/day であるが、これは LXe 検出器内容器から真空層へのリークが原因である。2024 年 MEG II ランはスモールリークあるまま実施されたが、リークのオンラインモニターシステムを導入し、ラン中リークを常にモニターした。2024 年ラン終了後、検出器内容器のガスケットの増し締め、ガスケット交換などを行いスモールリーク解消を目指す。

また LXe 検出器 VUV-MPPC の PDE 減少の原因解明に向けてラボで PDE 減少の再現を試みた。水分を吸収した VUV-MPPC に VUV 光を照射することで表面損傷が加速すると仮説を立て、吸湿サンプルに常温および液体キセノン中で VUV 光を照射した。常温において MEG II 実験相当の VUV 光を照射した結果、PDE 減少を再現することができなかった。一方液体キセノン中で VUV 光を照射した結果、PDE 減少傾向は見られたが測定点のふらつきが大きく、PDE 減少を再現できているか否か判断できなかった。測定点のふらつきを約 3 倍減らすために、リファレンス光センサーを VUV-MPPC から 2 インチ PMT に交換すればよいことが明らかとなった。測定改善の可能性を示し、PDE 減少の解明にさらに一步迫ることができた。

付録

A 図 5.20 の相対 PDE 減少領域の計算方法

2017 年から 2021 年 MEG II ランにおける PDE 減少ヒストリー（図 5.21a）は 2 つの指数関数を用いることで正しくフィットすることができたが、一方で 2022 年 MEG II ランにおける PDE 減少ヒストリー（図 5.21b）では 1 つの指数関数でフィッティングされた。これは図 5.21a では 2 つの異なる種類の放射線損傷により PDE が減少している可能性を示唆し、図 5.21b ではただ 1 つ種類の放射線損傷により PDE が減少していることを示唆する。本測定においてそれら過去の PDE 減少の内どの時定数の放射線損傷が見られるのか不明であるため、2017 年-2021 年 MEG II ランの PDE 減少ヒストリーのフィッティング関数と 2021 年 MEG II ランの PDE 減少ヒストリーフィッティング関数の両方を用いて予想される PDE 減少の推移を計算した。

MEG II ラン中の PDE 減少ヒストリー、図 5.21a と図 5.21b を定数 A_1 , A_2 、時定数 τ_1 , τ_2 を持つ関数

$$f(x) = A_1 \exp[-x/\tau_1] + A_2 \exp[-x/\tau_2] \quad (\text{A.1})$$

でフィッティングすると 2017-2021 年、2022 年の PDE 減少ヒストリーのフィッティング関数はそれぞれ

$$f_{2017-2021} = 0.0641 \exp\left[-N_{\mu^+}^{\text{stop}} \times 10^{-12}/70.6\right] + 0.0708 \exp\left[-N_{\mu^+}^{\text{stop}} \times 10^{-12}/911\right] \quad (\text{A.2})$$

$$f_{2022} = 0.00815 \exp\left[-N_{\mu^+}^{\text{stop}} \times 10^{-12}/53.0\right] + 0.128 \exp\left[-N_{\mu^+}^{\text{stop}} \times 10^{-12}/1088\right] \quad (\text{A.3})$$

となる。本測定における Chip 0 に対する VUV 光照射量 $7.11 \times 10^9 \text{ photon} \cdot \text{mm}^{-2}$ をこのフィッティング関数の x 軸、停止ミュオン数 $N_{\mu^+}^{\text{stop}}$ に直すために、2017-2021 年 MEG II ラン中の VUV 光照射量 $4.0 \times 10^{11} \text{ photon} \cdot \text{mm}^{-2}$ を用いると、

$$N_{\mu^+, \text{measurement}}^{\text{stop}} = \frac{7.11 \times 10^9 \text{ photon} \cdot \text{mm}}{4.0 \times 10^{11} \text{ photon} \cdot \text{mm}} \cdot 420 \times 10^{12} = 7.5 \times 10^{12} \quad (\text{A.4})$$

となる。また本測定における照射時間は 300 時間であるから、式 (A.2) の $N_{\mu^+}^{\text{stop}}$ を図 5.21a の x 軸、時間 t に変換すると

$$f_{2017-2021, \text{measurement}} = 0.0641 \exp\left[-(7.5 \times 10^{12}/300) \times 10^{-12}t/70.6\right] + 0.0708 \exp\left[-(7.5 \times 10^{12}/300) \times 10^{-12}t/911\right] \quad (\text{A.5})$$

となる。また本測定においてテストサンプルの PDE は 14 % と考えられるから（第 5.4.2 項）、2 つの指数関数の係数を 0.14 に合わせると

$$f_{2017-2021, \text{measurement}} = 0.0655 \exp\left[-(7.5 \times 10^{12}/300) \times 10^{-12}t/70.6\right] + 0.0735 \exp\left[-(7.5 \times 10^{12}/300) \times 10^{-12}t/911\right] \quad (\text{A.6})$$

これを $t = 0$ のときのこの関数の値で割ることで、本測定において予想される相対 PDE 減少曲線が得られる。 $f_{2022, \text{measurement}}$ に対しても同様の計算を行うと

$$f_{2022, \text{measurement}} = 0.00837 \exp \left[-\left(7.5 \times 10^{12} / 300\right) \times 10^{-12} t / 53.0 \right] + 0.132 \exp \left[-\left(7.5 \times 10^{12} / 300\right) \times 10^{-12} t / 1088 \right] \quad (\text{A.7})$$

が得られる。同様の計算を Chip 1 に対しても行うと $f_{2017-2021, \text{measurement}}$ と $f_{2022, \text{measurement}}$ はそれぞれ

$$f_{2017-2021, \text{measurement}} = 0.0655 \exp \left[-\left(6.8 \times 10^{12} / 300\right) \times 10^{-12} t / 70.6 \right] + 0.0735 \exp \left[-\left(6.8 \times 10^{12} / 300\right) \times 10^{-12} t / 911 \right] \quad (\text{A.8})$$

$$f_{2022, \text{measurement}} = 0.00837 \exp \left[-\left(6.8 \times 10^{12} / 300\right) \times 10^{-12} t / 53.0 \right] + 0.132 \exp \left[-\left(6.8 \times 10^{12} / 300\right) \times 10^{-12} t / 1088 \right] \quad (\text{A.9})$$

となった。これら $f_{2017-2021, \text{measurement}}$ 、 $f_{2022, \text{measurement}}$ はそれぞれ図 5.20 の予想される相対 PDE 減少カーブの下限、上限に対応する。

B 質量分析器

質量分析器は原子や分子などの荷電粒子の質量 M に対する電荷 Z の比 M/Z を用いてこれら荷電粒子を分別する検出器のことである。質量分析器は原子・分子をイオン化するイオン源、これら荷電粒子に電場をかけることで M/Z 比に対応して粒子を区別する質量分離部（アナライザー）、各イオンの存在量を計算する検出部、アナライザーの制御や検出部で得られたデータを解析・管理するコンピュータ、また真空ポンプなどからなる。荷電粒子はその M/Z 比によって磁場をかけたときの運動性が異なるが、この運動性の違いにより荷電粒子を分別する方法として表 B.1 にあるようなアナライザーが使われている。アナライザーおよび検出部は真空状態に保たれているがこれはイオン同士の衝突を避けるためである

表 B.1: アナライザーの種類 [16]

型式	略号	原理
四重極型	Q	連続したイオンビームの高周波 2 次元四重極電場中の軌道安定性に基づく分離
二重収束型（磁場型）	EB (or BE)	偏向した連続イオンビームの磁場中でのローレンツ力に基づく運動量による収束と電場による運動エネルギーによる就職を組み合わせた分離
飛行時間型	TOF	パルス状イオンビームの飛行時間による分離
イオントラップ型	IT	トラップされたイオンの高周波 3 次元四重極電場中における軌道安定性による分離
イオンサイクロトロン共鳴型	ICR	トラップされたイオンの磁場中でのサイクロトロン周波数による分離。検出にフーリエ変換を利用

四重極型のアナライザーを持つ質量分析器が最も普及している。四重極の対極する電極に $\pm(U + V \cos \omega t)$ の電圧がかかった 4 重極の中に荷電粒子が入射すると、特定の M/Z 比を持つ荷電粒子のみ四重極の中を突き進み検出部に入るがそれ以外の荷電粒子は発散し掃き出される。第 4.1.2, 4.2.1 項で用いられた質量分析器（型番 QME 220、部品番号 PTM28602、Pfeiffer Vacuum 製）においてこの四重極型のアナライザーが用いられている。

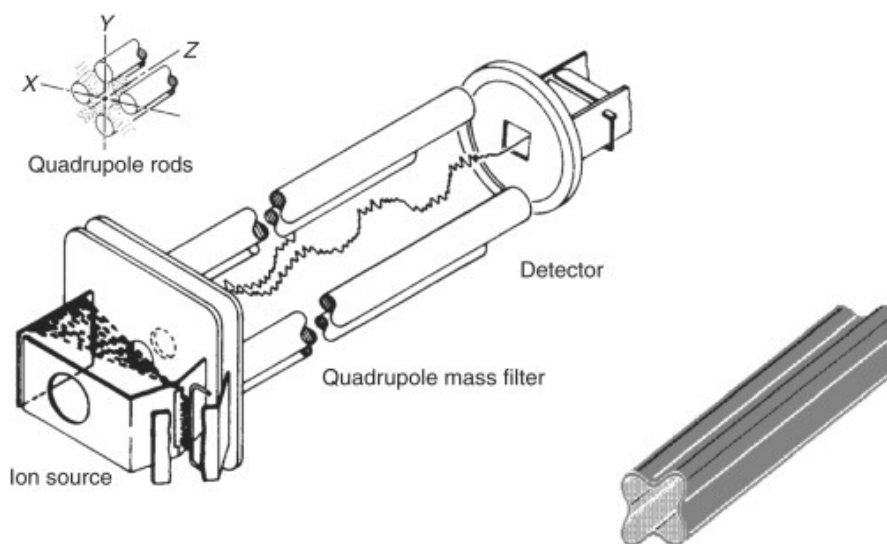


図 B.1: 四重極型のアナライザー [15]

謝辞

指導教員の大谷航准教授にはスイス・PSIでの1年以上におよぶ滞在を快く受け入れていただいたこと感謝申し上げます。スイスでの研究生生活は今後博士課程に進む上でも、また社会人となる上でも代えがたい経験となっている。また岩本敏幸助教にもPSI滞在中大変お世話になった。私が初めてPSIの実験装置を用いて研究を始めた頃、右も左もわからない筆者を親身になってご指導いただいた。この場を借りて感謝申し上げます。森俊則教授は忙しい日々の中、MEG II 実験のコラボレーションミーティングなどでお会いする機会があり、その度に的を得た助言をいただいた。「馬越くんはもう少し英語を頑張った方がいい」という1年前にいただいた助言は今だに身に染みている。その言葉を励みに色々な国籍の研究者と議論あるいは他愛のない会話をし、自らの英語力を高めている。

Lukas Gerritzen 特任助教にも言葉では表しきれないほど助けられた。私が初めての海外生活で特に英語で困っている際よく助け舟を出してくれ、なんとか乗り切った場面がいくつかあった。またスイスドイツ語圏での滞在中であったため、ドイツ人の彼からためになるドイツ語もたくさん教えてもらい、楽しくスイスに滞在することができた。また潘晟特任助教は私の怠け癖から研究が滞っているときも我慢強くご指導くださり、たくさんのご迷惑をおかけしたと思うとともに感謝の思いでいっぱいである。また大矢淳特任助教からは研究に対する姿勢を学ばせていただいた。普段から研究の話をする彼から研究に対する熱い思いを聞かせていただき、また時折いただく研究に関する指摘は的を得ており大変助かった。

研究室の学生にも感謝申し上げます。まずPSI滞在中メンバーから。山本健介さんには公私とも色々なことに関して大変お世話になった。特にスモールチェンバーを用いた測定は彼の助けがなければ成し得なかったものでこの場を借りて感謝申し上げます。Lukas と山本さんと行った四国旅行では旅行下手な筆者を色々なところに連れて行って下さり、大変感謝している。米本拓さんはPSI滞在中を盛り上げるために旅行を計画していただき、PSIで楽しく過ごさせていただいた。松下彩華さんは私がPSIに初めて滞在中の際、公私ともに助けていただいた。またインターンで数ヶ月PSIに来ていた榊原滯さん、清野拓己さんにも大変お世話になった。榊原さんはみんなと旅行に行く際必ず付いて来てくれ、筆者を楽しませてくれた。特にクリスマスマーケットに行った際はワイン好きな彼女は余裕そうにグリュウワインを飲み干し筆者を驚かせた。清野拓己さんも旅行の際付いて来てくれることがあり、また一人旅行が好きな彼からは旅行先での楽しい話を聞かせていただき大変よい気分転換となった。

東京滞在中のメンバーにも並々ならぬ助けをいただいた。村田樹さんは筆者の東京滞在中、何をやればよいかわからない筆者の研究のアドバイスを下さり大変助かった。池田史さんは独特な感性から筆者を笑わせてくれ、また数多くの面白い話を聞かせてくれて研究の合間に楽しませていただいた。李維遠さんは筆者が東京で研究を始めた際、実験器具の使い方など多岐に渡って筆者に教えてくださり、ハード面でもソフト面でも大変お世話になった。同期の神山大樹さん、小川拓泰さん、高津大誠さんには公私共に助けられた。神山さんは色々なことで忙しいにも関わらず筆者の長い世間話を聞いていただき、また彼からもためになる話をたくさん聞かせていただいた。小川さんとはお互い四国出身ということもあり気兼ねなく方言で話すことができ、研究の合間に楽しい会話をさせていただいた。高津大誠さんは研究以外のことにも精力的でその方面に関してたくさん面白い話を聞かせていただいた。

ICEPPの秘書の方々にも感謝申し上げます。特に物品購入やPSI出張の手続きをスムーズに行なっていただき大変助かった。

最後に大学院まで研究を続けるという筆者のわがママを快く許していただいた両親、また兄弟に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] Kobayashi, S. “Full Commissioning of Liquid Xenon Scintillation Detector to Search for $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ with the Highest Sensitivity in MEG II Experiment,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo (2022).
- [2] Baldini, A. M., Baracchini, E., Bemporad, C. et al. “The design of the MEG II experiment: MEG II Collaboration,” *European Physical Journal C*, **78** (2018), DOI: [10.1140/epjc/s10052-018-5845-6](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5845-6).
- [3] “Paul Scherrer Institute (PSI),” <https://www.psi.ch>, Accessed: 2024-12-30.
- [4] 「素粒子物理国際研究センター、大谷航研究室」, <https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~wataru/OotaniLab/>, Accessed: 2024-12-30.
- [5] Afanaciev, K., Baldini, A. M., Ban, S. et al. “Operation and performance of the MEG II detector,” *European Physical Journal C*, **84** (2024), DOI: [10.1140/epjc/s10052-024-12415-3](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12415-3).
- [6] 名取寛顕 「MEG 実験液体 Xe 検出器の為の光電子増倍管の開発と宇宙線を用いた研究」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 (2005).
- [7] Oya, A. “Search for $\mu \rightarrow e\gamma$ with the first year data of the MEG II experiment,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo (2023).
- [8] Ronzhin, A., Los, S., Martens, M. et al. “Study of timing properties of SiPMs at Fermilab,” in *2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC)*, 245–249 (2012), DOI: [10.1109/NSSMIC.2012.6551101](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2012.6551101).
- [9] Ieki, K., Iwamoto, T., Kaneko, D. et al. “Large-area MPPC with enhanced VUV sensitivity for liquid xenon scintillation detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **925**, 148–155 (2019), DOI: [10.1016/j.nima.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.02.010).
- [10] Ieki, K., Iwamoto, T., Kobayashi, S. et al. “Study on degradation of VUV-sensitivity of MPPC for liquid xenon scintillation detector by radiation damage in MEG II experiment,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **1053** (2023), DOI: [10.1016/j.nima.2023.168365](https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168365).
- [11] Mihara, S. “MEG liquid xenon detector,” in *Journal of Physics: Conference Series*, **308**: Institute of Physics Publishing (2011), DOI: [10.1088/1742-6596/308/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/308/1/012009).
- [12] Onda, R. “Suppression of γ -ray backgrounds for the highest sensitivity of $\mu \rightarrow e^+\gamma$ search in MEG II experiment,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo (2021).
- [13] A. Fukuda, K. S., R. Yamada “Development of MPPC with high sensitivity in NUV or VUV,” *IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detectors Symposium* (2022).

- [14] Andreev, V., Balagura, V., Bobchenko, B. et al. “A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **540**, 368–380 (2005), DOI: [10.1016/j.nima.2004.12.002](https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.12.002).
- [15] Sparkman, O. D., Penton, Z. E., and Kitson, F. G. “Chapter 4 - Mass Spectrometry Instrumentation,” in Sparkman, O. D., Penton, Z. E., and Kitson, F. G. eds. *Gas Chromatography and Mass Spectrometry (Second Edition)*, second edition edition, 89–148, Amsterdam: Academic Press (2011), DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373628-4.00004-6>.
- [16] 「一般社団法人 日本分析機器工業会」, <https://www.jaima.or.jp/>, Accessed: 2024-1-7.
- [17] Fukuda, Y., Hayakawa, T., Ichihara, E. et al. “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos,” (1998).
- [18] Kuno, Y. and Okada, Y. “Muon Decay and Physics Beyond the Standard Model,” (2001), DOI: [10.1103/RevModPhys.73.151](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.151).
- [19] Afanaciev, K., Baldini, A. M., Ban, S. et al. “A search for $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ with the first dataset of the MEG II experiment,” *European Physical Journal C*, **84** (2024b), DOI: [10.1140/epjc/s10052-024-12416-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12416-2).
- [20] Adam, J., Bai, X., Baldini, A. M. et al. “The MEG detector for $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ decay search,” *European Physical Journal C*, **73**, 1–59 (2013), DOI: [10.1140/epjc/s10052-013-2365-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2365-2).
- [21] Ritt, S. “The DRS chip: Cheap waveform digitizing in the GHz range,” in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **518**, 470–471 (2004), DOI: [10.1016/j.nima.2003.11.059](https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.059).
- [22] Kaneko, D. “The final result of $\mu \rightarrow e^+\gamma$ search with the MEG experiment,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo (2016).
- [23] Garutti, E. and Musienko, Y. “Radiation damage of SiPMs,” (2019), DOI: [10.1016/j.nima.2018.10.191](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.191).
- [24] 島田耕平 「MEG II 実験液体キセノン検出器用 VUV-MPPC の光子検出効率に関する研究」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 (2020).
- [25] 吉田圭佑 「MEG II 実験液体キセノン γ 線検出器の、大強度ミューオンビーム環境下での VUV-MPPC の光子検出効率の減少、及び検出器の安定性に関する研究」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 (2021).
- [26] 小川真治 「MEG II 実験のための真空紫外光に感度のある大型 MPPC を用いた高精細読み出し液体キセノンガンマ線検出器の開発」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 (2015).
- [27] “The MPI-Mainz UV/VIS Spectral Atlas of Gaseous Molecules of Atmospheric Interest,” <https://www.uv-vis-spectral-atlas-mainz.org/uvvis/>, Accessed: 2024-01-09.
- [28] 「浜松ホトニクス」, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja.html>, Accessed: 2024-01-09.
- [29] “eSource Optics,” <https://www.esourceoptics.com/index.html>, Accessed: 2024-01-09.
- [30] 久松康子 「MEG 液体キセノンカロリメータのための光電子増倍管の性能試験」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 (2004).