# 修士学位論文

# MEG II 実験背景事象抑制に向けた DLC-RPC 検出器の開発

令和5年2月3日

専 攻 名 物理学専攻

学籍番号 217S111S

氏 名 高橋 真斗

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

現在の素粒子物理学は標準模型と呼ばれる枠組みによって記述されているが、ニュートリノ振動現象など標準模 型では説明できない現象が発見されており、標準模型を超える物理の存在が強く示唆されている。標準模型を超え る新たな物理を検証する手段の一つとして、荷電レプトンフレーバーを破る  $\mu o e\gamma$  崩壊を MEG II 実験では探 索している。MEG II 実験では背景事象を積極的に同定するための検出器を新たに導入する。この検出器の役割は ミューオンの輻射崩壊を起源とする背景ガンマ線を同定するために、同時に放出される 1-5 MeV の陽電子を検出 することである。検出器はターゲットのビーム上流側と下流側の二箇所に設置されるが、上流側の検出器は大強度 かつ低運動量のミューオンビームが通過する中で低エネルギーの陽電子を検出する必要があるため、厳しい開発要 請が課せられる。検出器は、ミューオンビームへの影響を抑えるために低物質量であること、ミューオンビームが 通過することから高いレート耐性と放射線耐性を持つこと、背景事象を同定するために陽電子に対して高い検出 効率と時間分解能、直径 20 cm の検出器サイズが要求されている。上流側の検出器の候補として、Diamond-Like Carbon を高抵抗電極に使用した Resistive Plate Chamber (DLC-RPC)の開発を本研究で行っている。本研究では DLC-RPC 検出器の放射線耐性を評価するために高速中性子と X 線を使用した劣化試験を実施した。加えて、先行 研究で行われた大強度のミューオンビーム照射試験の結果を基に改良した新型電極の開発を行った。劣化試験の結 果、今回の  $\mathcal{O}(100)~{
m mC/cm^2}$ の照射量では5.3%の精度の範囲内で検出器性能の悪化は確認できなかった。また、 検出器自体への影響として電極へのフッ素の蓄積を確認することができたが、フッ素の蓄積による検出器への影響 は現時点で確認されなかった。新型電極を用いた DLC-RPC の開発に関して、製造上の問題点から DLC-RPC の ギャップの平坦性を確保することができず、安定に動作させることができなかった。一方で、最も良く動作した状 況において、ある1層のみでの動作で 46% の検出効率が得られたため、上記問題点を全て改善することで上流側 RDC への要求を満たすことが可能であることを示した。

# 目次

第1章	序論	1
第2章	$\mu  ightarrow e\gamma$ 崩壊探索	3
2.1	標準模型における $\mu$ 粒子 ...................................	3
2.2	cLFV 過程	4
2.3	$\mu  ightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験	5
第3章	MEG II 実験	6
3.1	信号事象と背景事象	6
3.2	実験装置....................................	8
3.3	予想される実験感度....................................	17
第4章	上流側輻射崩壊同定用検出器の開発	19
4.1	上流側輻射崩壊同定用検出器への開発要請....................................	19
4.2	Resistive Plate Chamber (RPC)	20
4.3	先行研究における DLC-RPC 検出器の開発	24
4.4	本研究における開発課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
第5章	DLC-RPC 検出器の放射線耐性	32
5.1	上流側 RDC への放射線耐性の要求....................................	32
5.2	劣化試験でのプロトタイプ検出器のセットアップ	33
5.3	高速中性子を用いた DLC-RPC 検出器の劣化試験	35
5.4	X 線を用いた DLC-RPC 検出器の劣化試験	41
5.5	X 線二次電子分光法による電極の表面調査	45
5.6	まとめ	51
第6章	高レート耐性を実現するための新型電極の開発	52
6.1	高レート耐性を実現するための電極の製作....................................	52
6.2	電極開発における問題点	52
6.3	新型電極を用いた DLC-RPC 検出器の動作試験	55
6.4	まとめ	61
第7章	結論	62
7.1	結論	62
7.2	今後の展望....................................	63

謝辞

引用文献

<u>v</u>

64 67

## 第1章

# 序論

我々の身の周りの物質を構成する最小の要素は素粒子と呼ばれている。素粒子標準模型は素粒子とその間に働く 相互作用を記述した理論であり、電弱スケールの範囲内の物理を正しく記述することが実験的に確かめられている。 一方で、1990年代に発見されたニュートリノ振動現象 [1,2] などの物理現象は現在の標準模型では説明することの できない現象であり、標準模型を超える物理の存在が強く示唆されている。

標準模型ではニュートリノの質量をゼロと仮定しているため、レプトンのフレーバー量子数は保存量となる。こ のことからレプトンのフレーバー混合は禁止されており、このことをレプトンフレーバー保存と呼ぶ。しかし、先 に述べたニュートリノ振動現象は中性レプトン間でのレプトンフレーバー保存を破る現象であり、荷電レプトン間 でも同様にレプトンフレーバー保存を破る現象が発見されることが期待されている。このような現象は荷電レプト ンフレーバーの破れ (charged Lepton Flavour Violation; cLFV)と呼ばれ、未だ発見には至っていない。

 $\mu \to e\gamma$ 崩壊は cLFV 現象の一つであり、標準模型ではこのような崩壊過程は禁止されている。一方で、標準模型を超える新物理モデル理論では観測可能な崩壊分岐比を予言しており、発見されれば確実な新物理の証拠となる。 現在、 $\mu^+ \to e^+\gamma$ 崩壊の崩壊分岐比の上限値は MEG 実験により  $4.2 \times 10^{-13} (90\% \text{ C.L.})$  と与えられている [3]。 MEG II 実験では、ビーム強度の増大と全ての検出器の分解能の向上、背景事象を積極的に同定するための検出器を導入することにより、前身の MEG 実験を一桁上回る感度での  $\mu^+ \to e^+\gamma$ 崩壊探索を行う。

MEG II 実験における主要な背景事象は偶発的背景事象であり、異なる親粒子から生成される背景陽電子と背景 ガンマ線が偶発的に信号事象と似たような運動学的特徴を持つ事象である。MEG II 実験では、ミューオンの輻射 崩壊 ( $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$ )を起源とする背景ガンマ線を積極的に同定するための検出器を、ビーム軸上のターゲット上流 側と下流側の二箇所に導入する。この検出器は、ミューオンの輻射崩壊によって背景ガンマ線と同時に生成される 陽電子を検出することで背景ガンマ線を同定する。また、上流側に導入される検出器は大強度 ( $1 \times 10^8 \mu^+/s$ )か つ低運動量 (28 MeV/c)のミューオンビームが通過するため、いくつかの開発要請が課せられている。その開発要 請として、ミューオンビームへの影響を抑えるために低物質量であること、ミューオンビームが通過することから 高いレート耐性と放射線耐性を持つこと、ミューオンの輻射崩壊から来る背景ガンマ線を同定するために同時に生 成される陽電子に対して高い検出効率と時間分解能を持つこと、検出器のサイズは直径 20 cm であることが挙げら れる。これらの要請を達成可能な検出器の候補として、Diamond-Like Carbon を高抵抗電極に使用した Resistive Plate Chamber (DLC-RPC)の開発を先行研究 [4, 5] では行ってきた。

先行研究 [4] において、DLC-RPC が物質量、検出効率、時間分解能に関する要請が実現可能であることが示さ れた。また、先行研究 [5] において、DLC-RPC が 1 MHz/cm<sup>2</sup> のレート耐性を有することを示し、レート耐性の向 上に向けて、検出器性能の悪化を引き起こす高抵抗電極での電圧降下を抑えるために電極構造の改良と開発が行わ れた。本研究では、先行研究でこれまで行われていなかった上流側 RDC への要請の一つである、DLC-RPC の放 射線耐性について調査した。また、先行研究 [5] で改良が行われた、新型電極構造を有する DLC-RPC の開発と動 作試験についても本研究で行った。本稿ではこれらの研究開発について記述する。 本修士論文の構成は次の通りである。

初めに、第2章で $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索を行う動機や、cLFV 過程を伴う事象を探索している実験の現状について まとめ、第3章で MEG II における信号事象や背景事象、実験装置についてまとめる。第4章では本研究で開発 を行っている上流側輻射崩壊同定用検出器の開発要請をまとめて、Resistive Plate Chamber (RPC)の検出器技術 と先行研究で行われてきた DLC-RPC の開発について紹介する。第5章では、DLC-RPC の放射線耐性を評価す るために、高速中性子とX線を使用した劣化試験を行った結果について述べる。第6章では、先行研究において DLC-RPC のレート耐性を向上するために設計された新型電極の開発状況について述べる。最後に、第7章で結論 と今後の展望について述べる。

## 第2章

## $\mu \to e\gamma$ 崩壊探索

本章では MEG II 実験で探索を行っている  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊について述べる。

### 2.1 標準模型における *µ* 粒子

現在の素粒子物理学は標準模型と呼ばれるクォークとレプトンのゲージ理論に基づいている。標準模型では、電磁気力、弱い力、強い力の3つの基本的な相互作用を統一的に記述しており、O(100) GeV の電弱スケールまでの物理を正しく記述することが実験的に確かめられている。

標準模型は図 2.1 に示すように、物質を構成する 12 種類のフェルミオン、相互作用を媒介する 4 種類のゲージ 粒子、ヒッグス粒子で構成されており、この中でミューオンは第 2 世代に属する荷電レプトンである。ミューオン は電子よりも質量が大きく不安定であり、表 2.1 に示すような崩壊モードで崩壊する。



図 2.1: 標準模型における素粒子 [6]



表 2.1: 標準模型でのミューオンの崩壊モード

図 2.2:  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊のファインマンダイアグラム

### 2.2 cLFV 過程

標準模型ではニュートリノの質量をゼロと仮定していることから、レプトンのフレーバー量子数は保存量となる。 一方で、ニュートリノ振動現象が発見されたことにより[1,2]、ニュートリノが質量を持ち、レプトンのフレーバー 量子数が破れていることが示された。これは、荷電レプトン間においても中性レプトンと同様にフレーバー量子数 を破るような現象が存在すること示唆しているが、その存在は未だ発見されていない。

 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊は荷電レプトンフレーバーの破れ (charged Lepton Flavor Violation; cLFV)を伴う物理過程の1つである。この崩壊は標準模型においては強く禁止されているが、ニュートリノ振動の寄与を考慮すると図2.2aのような過程を通して起こり得る。この場合の崩壊分岐比は次のように計算される[10,11]。

$$\mathcal{B}(\mu \to e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$
(2.1)

ここで、 $\alpha$  は微細構造定数、 $U_{ij}$  はレプトン混合行列 (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列)  $\Delta m_{ij}^2$  はニュートリノ質量の二乗差、 $M_W$  はウィークボソンの質量である。標準模型にニュートリノ振動の寄与を加えた式 (2.1) では、ニュートリノの質量が小さいことから  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊の崩壊分岐比は厳しく制限されており、現在の技術では 観測不可能である。一方で、大統一理論 [12] やシーソー機構 [13, 14] を超対称性に導入した標準理論を超える物理においては、図 2.2b のように重い新粒子の媒介を仮定することで観測可能な崩壊分岐比 ( $\mathcal{O}(10^{-12} - 10^{-14})$ )を 予言しており [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]、 $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊が発見されれば新物理の確実な証拠となる。

## 2.3 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験

cLFV を伴うミューオンの崩壊の探索について、最新の結果を表 2.2 にまとめる。また、図 2.3 にこれまでに行われてきた cLFV を伴う 3 つの崩壊モード、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 、 $\mu \rightarrow eee$ 、 $\mu N \rightarrow eN$ の探索結果をまとめる。現在の  $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の崩壊分岐比の上限は MEG 実験によって 4.2 × 10<sup>-13</sup> (90% C.L.) で与えられている [3]。

崩壊モード	崩壊分岐比の上限値(90% C.L.)
$\mu^+ \to e^+ \gamma$	$4.2 \times 10^{-13}$ [3]
$\mu^+ \to e^+ e^+ e^-$	$1.0  imes 10^{-12}$ [23]
$\mu^+ \to e^+ \gamma \gamma$	$7.2  imes 10^{-11}$ [24, 25]
$\mu^+ \to e^+ \nu_\mu \bar{\nu}_e$	$1.2  imes 10^{-2}$ [26]
$\mu^-{\rm Au} \to e^-{\rm Au}$	$7 \times 10^{-13}$ [27]
$\mu^+e^-\times\mu^-e^-$	$8.3  imes 10^{-11}$ [28]

表 2.2: cLFV を伴うミューオンの崩壊探索の最新結果



History of CLFV experiments with muons

図 2.3: 過去の cLFV を伴うミューオンの崩壊の探索結果 [29]

## 第3章

## MEG II 実験

MEG II 実験は世界最大強度を誇る直流ミューオンビームを使用した  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊探索実験である。この章では、初めに  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊探索における信号事象と背景事象について述べる。続いて探索をするための実験装置について紹介し、最後に実験の探索感度について議論する。

### 3.1 信号事象と背景事象

#### 3.1.1 信号事象

 $\mu^+ 
ightarrow e^+ \gamma$ 崩壊は図 3.1a に示すような単純な二体崩壊であり、放出されるガンマ線と陽電子が次のような運動学的特徴を持つ。

- ガンマ線と陽電子はどちらもミューオンの質量の半分である 52.8 MeV のエネルギーを持つ。
- ガンマ線と陽電子は逆方向に放出される
- ガンマ線と陽電子は同時刻に放出される

このような信号事象の数 $N_{
m sig}$ は次のような式で表される。

$$N_{\rm sig} = R_{\mu^+} \times T \times \Omega \times \mathcal{B} \times \epsilon_{\gamma} \times \epsilon_e \times \epsilon_{\rm s} \tag{3.1}$$

ここで、 $R_{\mu^+}$  はミューオンの静止レート、T は測定時間、 $\Omega$  は検出器の立体角、 $\mathcal{B}$  は  $\mu \to e\gamma$  崩壊の崩壊分岐比、  $\epsilon_{\gamma}, \epsilon_e$  はそれぞれガンマ線検出器と陽電子検出器の検出効率、 $\epsilon_s$  は解析の効率である。



図 3.1: MEG II 実験における信号事象と偶発的背景事象の特徴



(a) 100% 偏極したミューオンの Michel 崩壊 で生成される陽電子のエネルギー分布。(a)  $\cos \theta_e = 0$ ; (b)  $\cos \theta_e = 1$ ; (c)  $\cos \theta_e = -1$ 



AIF、破線は RMD によって生成される背景 ガンマ線のエネルギー分布、実線は AIF と RMD の和を示している。

図 3.2: MEG II 実験における偶発的背景事象のエネルギー分布 [11]

#### 3.1.2 背景事象

MEG II 実験における主要な背景事象は偶発的背景事象と呼ばれるものであり、これは図 3.1b に示すように、異なる親粒子から生成された背景ガンマ線と背景陽電子が偶発的に信号事象と同じような特徴を持つ事象である。 偶発的背景事象の数 N<sub>acc</sub> は次のような式で表される。

$$N_{\rm acc} \propto R_{\mu^+}^2 \times \Delta E_{\gamma}^2 \times \Delta E_e \times \Delta p_{e^+} \times \Delta \Theta_{e^+\gamma}^2 \times \Delta t_{e^+\gamma} \times T$$
(3.2)

ここで、 $E_{\gamma}$ はガンマ線のエネルギー、 $p_{e^+}$ は陽電子の運動量、 $\Theta_{e^+\gamma}$ は陽電子とガンマ線がなす角、 $t_{e^+\gamma}$ は陽電子とガンマ線の時間差であり、 $\Delta$ はそれぞれの測定量の分解能を表す。

#### 偶発的背景事象の起源

背景陽電子の発生源となるのはミューオンの Michel 崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu_e \bar{\nu}_\mu$ )によるものであり、表 2.1 に示すように ほぼ 100% の崩壊分岐比を持つ。Michel 崩壊で生成される陽電子の微分崩壊幅は以下の様に与えられる [11]。

$$\frac{d^2\Gamma(\mu^{\pm} \to e^{\pm}\nu\bar{\nu})}{dxd\cos\theta_e} = \frac{m_{\mu}^5 G_F^2}{192\pi^3} x^2 \left[ (3-2x) \pm P_{\mu}\cos\theta_e (2x-1) \right]$$
(3.3)

ここで、 $m_{\mu}$  はミューオンの質量、 $G_F$  はフェルミ結合定数、x はミューオンの質量の半分で規格化された電子のエネルギー( $x = 2E_e/W_{e\mu}, W_{e\mu} = (m_{\mu}^2 + m_e^2)/(2m_{\mu})$ )、 $P_{\mu}$  はミューオンの偏極、 $\theta_e$  はミューオンの偏極方向と電子の運動量方向のなす角を表す。また、図 3.2a に 100% 偏極されたミューオンの Michel 崩壊で生成される陽電子のエネルギー分布を示す。図 3.2a の(a)の分布では 52.8 MeV 付近で有限な大きさを持つ分布となっており、陽電子の発生頻度は式 3.2 に示すように陽電子検出器のエネルギー分解能  $\Delta E_e$  に比例する。

一方で、背景ガンマ線の発生源は以下の二つがある。

• Michel 崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu_e \bar{\nu}_\mu$ ) 由来の陽電子が飛行中に検出器を構成する物質中の電子と対消滅を引き起こすこ とによってガンマ線が放出される事象 (Annihilation In Flight; AIF)



図 3.3: E<sub>2</sub> >48 MeV の背景ガンマ線の発生源の割合 [29]

• ミューオンの輻射崩壊 ( $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$ )によって高エネルギーのガンマ線が放出される事象 (Radiative Muon Decay; RMD )

これらの背景ガンマ線のエネルギー分布を図 3.2b に示す。AIF、RMD どちらの場合においても 52.8 MeV 付近 で発生頻度が落ちる分布となっており、背景ガンマ線の発生頻度は式 3.2 に示すようにガンマ線検出器のエネル ギー分解能の二乗  $\Delta E_{\gamma}^2$  に大まかにスケールする。また、MEG 実験および MEG II 実験において背景ガンマ線は 図 3.3 のような割合で生成される。3.2.3 節で述べるように、MEG II 実験ではドリフトチェンバーの物質量を前身 の MEG 実験より減少させているため AIF 由来の背景ガンマ線の発生が抑制されている。そのため、RMD 由来の 背景ガンマ線の削減がより重要となっており、3.2.5 節に述べるようなこれらを積極的に同定するための検出器を新 たに導入することで背景事象をより強力に削減する。

信号事象数が式 3.1 に示すようにミューオンの静止レート  $R_{\mu^+}$  に比例するのに対し、偶発的背景事象数は式 3.2 のように  $R^2_{\mu^+}$  に比例する。そのため、ミューオンの崩壊数  $R_{\mu^+} \times T$  が同じ場合  $R_{\mu^+}$  が高い方が背景事象数が多 くなってしまうため、MEG II 実験では断続的に高レートとなるパルスミューオンビームではなく直流ミューオン ビームを使用している。

#### 物理的背景事象

ミューオンの輻射崩壊 ( $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$ ; RMD) で 2 つのニュートリノがほとんどエネルギーを持たず、放出され るガンマ線と陽電子が反対方向に放出された場合も信号事象と似た運動学的特徴を持ち、 $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊探索の背景 事象と成り得る。こういった事象を物理的背景事象と呼ぶ。RMD に由来する物理的背景事象の数  $N_{\rm RMD}$  は偶発的 背景事象と異なり、ミューオンのビームレート  $R_{\mu^+}$  に比例する。前身の MEG 実験では  $N_{\rm RMD}$  は  $N_{\rm acc}$  の 10 倍 以上少なかったため [3]、 $N_{\rm acc} \propto R_{\mu^+}^2$  という関係より  $N_{\rm RMD} \propto R_{\mu^+}$  と比較して、 $R_{\mu^+}$  が MEG 実験より大きな MEG II 実験では偶発的背景事象が物理的背景事象よりも更に支配的になる。

#### 3.2 実験装置

MEG II 実験はスイスにあるポール・シェラー研究所 (Paul Scherrer Institut; PSI) で行われている。図 3.4 に MEG II 実験を構成する検出器の全体像を示す。PSI の陽子サイクロトロンによって生成されたミューオンビーム は中心にあるミューオン静止ターゲットで静止して崩壊する。ミューオンの崩壊によって生成された陽電子とガン マ線をターゲットを囲むように配置された検出器によって検出する。陽電子の検出器は陽電子スペクトロメータに よって行われ、ガンマ線の検出は液体キセノン検出器が行う。また、MEG II 実験ではミューオンの輻射崩壊由来 の背景ガンマ線を積極的に同定するために輻射崩壊同定用検出器を新たに導入する。



図 3.4: MEG II 実験を構成する検出器

3.2.1 ビームライン

3.1.2 節で述べたように偶発的背景事象数を抑制するために直流ミューオンビームを使用する必要がある。そのため、MEG II 実験では PSI にある 28 MeV の表面ミューオンビームを利用する。

#### ミューオンの生成

Cockcroft-Walton 加速器で陽子を生成、加速し、陽子を 72 MeV まで加速するサイクロトロンに入射する。その後、加速された陽子をメインリングの陽子サイクロトロン(図 3.5)に入射し 590 MeV まで加速する。この陽子サイクロトロンの強度は電流値で 2.2 mA であり、世界最大強度を誇る。また、加速器の周波数は 50.93 MHz であり、陽子の一次ビームは 19.75 ns の周期を持つ。

加速された陽子ビームを厚さ 4 cm のグラファイトターゲットに当てることによりパイオンを生成し、生成したパイオンがターゲット表面で  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  崩壊を起こすことで表面ミューオンを取り出す。このパイオンの崩壊は 2 体崩壊であるため、ミューオンの運動量は 28 MeV/c 付近となり、完全に偏極した ( $P_\mu = -1$ )ものとなる。しかし実際にはビーム輸送中に崩壊するミューオンも存在することから、MEG 実験ではその偏極は $P_\mu = -0.86 \pm 0.02 (\text{stat})^{+0.05}_{-0.06}$  と測定された [31]。また、パイオンの寿命は 26 ns、ミューオンの寿命は 2.2 µs であり、陽子サイクロトロンの周期である 19.75 ns よりも十分に大きいことから、ミューオンビームは直流として振る舞う。このようにして得られる表面ミューオンビームは、図 3.6 の左部分に示される  $\pi$ E5 のビームラインに輸送される。



図 3.5: PSI の陽子サイクロトロン [30]



図 3.6: πE5 ビームラインと MEG II 検出器へのビーム輸送システム [29]

#### ミューオンの輸送

 $\pi$ E5 ビームラインを通過したミューオンビームは、図 3.6 の中央部分に示されるビーム輸送システムによって MEG II 検出器内のミューオン静止ターゲットへ輸送される。輸送システムは 2 つの四重極磁石 (Triplet I, II) ウィーンフィルタ(Separator), Beam Transport Solenoid(BTS)で構成されている。ウィーンフィルタではミュー オンビーム中に含まれる不純物を取り除く。また、BTS ではミューオンビームの絞り込みを行う。ミューオンの ビームレートは Triplet II と BTS の間に設置されたコリメータ付近で測定され、この地点でのミューオンのビー ムレートは最大で 2 × 10<sup>8</sup>  $\mu^+$ /s である。ビームレートは  $\pi$ E5 ビームライン中にあるスリット (FS41–FS43)の幅 で調節する。BTS の手前の位置でのミューオンビームの運動量は先述の通り約 28 MeV/c である。ミューオン静 止ターゲットでの静止効率が最大となるように、BTS 中に設置された厚さ 300 µm の Mylar degrader (放射長の 0.105% の物質量)によってその運動量を約 21 MeV/c まで落とした上で MEG II 検出器内部へ輸送される。第4 章で後述するように、本研究で開発する DLC-RPC 検出器は MEG II 検出器の入り口付近、ミューオンビームが通 過する位置に設置されるため、DLC-RPC 検出器を導入した際はこの degrader の厚みは小さくなる。



図 3.7: ミューオン静止ターゲット [29]

#### 3.2.2 ミューオン静止ターゲット

ミューオン静止ターゲットには次のような要請が課せられる。

- ミューオンを高い効率で静止させることが出来ること
- 陽電子の多重クーロン散乱や飛行中対消滅、制動放射を最小限に抑えるために低物質量であること
- 崩壊点の不定性を抑えるために位置と形状が安定であること

前身の MEG 実験ではターゲット形状の経年変化が陽電子の放出角の測定の系統誤差の要因となり、崩壊分岐比の 上限値に不定性を与えた。

MEG II 実験では、ターゲットによる崩壊分岐比上限値への不定性を改善するため、リアルタイムでターゲット の位置や形状を測定する。図 5.7a に MEG II 実験で使用されるミューオン静止ターゲットである。ターゲット上に はマーキングがなされており、CCD カメラでマーキングを撮影し位置を再構成することによってターゲットの形状 や位置をモニターする。

#### 3.2.3 陽電子スペクトロメータ

陽電子スペクトロメータは以下の3つの装置から構成される。

- 陽電子検出器内に勾配磁場を形成する COBRA 電磁石
- 陽電子の飛跡を検出し、運動量と放出角を測定する円筒一体型ドリフトチェンバー
- 陽電子の時間を測定する陽電子タイミングカウンター

#### COBRA 電磁石

COBRA 電磁石は中心で 1.27 T、両端では 0.49 T の勾配磁場を形成する超伝導磁石である [29]。この勾配磁場 によって、図 3.8a に示すように信号領域付近のエネルギーを持つ陽電子が放出角に依らず一定の回転半径を持って 運動する。また、図 3.8b に示すように、ミューオンビーム軸に垂直に放出された陽電子が検出層から素早く排出さ れるように設計されている。

#### 円筒一体型ドリフトチェンバー (Cylindrical Drift CHamber; CDCH)

陽電子飛跡検出器は、陽電子の飛行中対生成を抑えるために物質量を抑制することが要請されている。そのため、図 3.9 に示すような全長 1.91 m の円筒一体型のドリフトチェンバー(Cylindrical Drift CHamber; CDCH)を MEG II 実験では採用する [29]。CDCH は約 2000 本のセンスワイヤーと約 10000 本のフィールドワイヤーを用い



(a) 信号領域付近の陽電子は放出角度に弱く依存した一定の回転半径の軌道を取る



(b) 放出角がミューオンビーム軸と垂直な陽電 子も速やかに排出される

図 3.8: COBRA 電磁石の形成する勾配磁場の概念 [3]。図中の検出器模式図は MEG 実験時のもの。



図 3.9: 円筒一体型ドリフトチェンバー [29]

て、9層の検出層を構成している。各層のセンスワイヤーは6°から8°の角度を付けて互い違いに配置されるステレオ構造となっており、長手方向の位置再構成を可能にしている。また、物質量を抑えるためにHe:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>=90:10の混合ガスを使用している。ただし、安定な運用の為に酸素を0.5%、イソプロパノールを1.5%添加する[32]。

#### 陽電子タイミングカウンター (pixelated Timing Counter; pTC)

陽電子タイミングカウンター (pixelated Timing Counter; pTC) は図 3.10 に示すように上流側と下流側の 2 つ のモジュールに分かれており、各モジュールにそれぞれ 256 個、計 512 個の細分化されたシンチレーションカウン ターから構成されている [29]。一つのシンチレーションタイルは図 3.11 に示すように、長さ 12 cm、高さ 4 cm ま たは 5 cm、厚み 5 mm となっておりシンチレータの両端に 6 個のシリコン光検出器 (SiPM)を直列に接続した構 造となっている。このように、シンチレーションカウンターを細分化することで各シンチレータでのヒットレート を抑え、高いレート耐性を実現している。加えて、信号領域付近の陽電子が平均して 9 つのタイルを通過すること により、複数のシンチレーションカウンターでの時間測定を可能としている。これによって、80 ps である単体のシ ンチレーションカウンターの時間分解能から、全体でおよそ 35 ps の性能を達成する。

#### 3.2.4 液体キセノンガンマ線検出器(Liquid Xenon calorimeter; LXe)

ガンマ線のエネルギー、位置、時間は 900L の液体キセノンを用いた液体キセノンシンチレータで検出する [29]。668本の光電子増倍管(PMT)と 4092 個の SiPM を用いて、液体キセノンのシンチレーション光を読み出 す(図 3.12)。シンチレーション光の分布からガンマ線の入射位置と時間を再構成し、読み出されたシンチレーショ







600 mm

(b) 陽電子タイミングカウンターの模式図 [29]

図 3.10: 陽電子タイミングカウンター



図 3.11: 陽電子タイミングカウンターにおける 2 種類のシンチレーションタイルの写真 [29]。左側:反射材を巻か れた高さ40mmのタイル。右側:反射材を巻きつける前の高さ50mmのタイル。

ン光の光量を足し合わせることでエネルギーを再構成する。

#### 3.2.5 輻射崩壊同定用検出器

MEG II 実験では、ミューオンの輻射崩壊 ( $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$ ; RMD) 由来の背景ガンマ線を積極的に同定するために 輻射崩壊同定用検出器 (Radiative Decay Counter; RDC) を新たに導入する。RMD によって信号領域付近 ( $E_{\gamma} >$ 48 MeV)の背景ガンマ線が生成されるとき、それに伴って放出される陽電子(RMD 陽電子)の大半が 1-5 MeV のエネルギーを持つ。低エネルギーの RMD 陽電子は COBRA 電磁石の傾斜磁場によって図 3.13 の赤実線で示す ようにミューオンビーム軸上を飛行する。RDC の役割は、この RMD 陽電子を COBRA 領域の両端で検出するこ とで RMD からの背景ガンマ線を同定することである。RMD 陽電子は上流側に 52%、下流側に 48% が飛来する。 そのため、ビーム軸上、ターゲットの上流側と下流側の2箇所に導入する。

RMDからの背景ガンマ線を同定するために必要なのは時間情報である。図 3.14 はシミュレーションによ る RDC での陽電子検出とLXe でのガンマ線検出の時間差を示しており、赤色のヒストグラムは偶発的背景事象、 青色のヒストグラムは  $\mu^+ o e^+ \gamma$  信号事象に対応する。 RMD から来る陽電子とガンマ線は同時に生成されるた め、その時間差分布にピークが生じる。また、 RDC には RMD 陽電子だけでなく Michel 崩壊由来の陽電子も入射 するが、図 3.15 に示すように Michel 崩壊由来の陽電子のエネルギーは RMD 陽電子のものに比べて高エネルギー のものが多いため、エネルギーを測定することでこれらの陽電子は区別することができる。ただし、4.1節で後述す るように、上流側 RDC は物質量を抑える必要があるためエネルギーの測定はできず、時間情報のみを測定する。



図 3.12: 液体キセノンガンマ線検出器の内部 [29]。左側の側面に敷き詰められている四角形のセンサーが SiPM で、右奥の側面の丸いセンサーが PMT である。



図 3.13: RDC による輻射崩壊同定原理。ターゲットでミューオンが輻射崩壊をした場合の背景ガンマ線と RMD 陽電子の飛行経路の例をそれぞれ黄実線と赤実線で示している。

#### 下流側 RDC

図 3.16 に下流側 RDC の模式図を示す。前方に設置された 12本のプラスチックシンチレータで陽電子の時間を 測定し、後方に設置した 76 個の LYSO 結晶カロリメータによって陽電子のエネルギーを測定する。

また、下流側 RDC はミューオンビームを用いたエンジニアリングランで LXe の高エネルギーガンマ線と時間的 に一致した陽電子を測定することにより RMD の同定能力を実証している。図 3.17 は LXe で高エネルギーガンマ 線を検出した事象について、RDC での陽電子検出と LXe でのガンマ線検出の時間差分布を示しており、ピーク が RMD 事象に対応する。同定した RMD 事象の割合は LXe で 48 MeV 以上のガンマ線が検出された事象のうち の 26.6(4)% であり、シミュレーションから期待される値(27.2(4)%)と一致している [33]。



図 3.14: シミュレーションによる RDC と ガンマ線検出器の検出時間差 [29]。赤色: 偶発的背景事象、青色:  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  信号 事象に対応。



(a) 下流側 RDC の模式図 [29]。前方に時間測 定用のプラスチックシンチレータ、後方にエ ネルギー測定用の LYSO 結晶がある。



図 3.15: シミュレーションによる RDC で 検出される陽電子のエネルギー分布 [29]。 赤色:  $E_{\gamma} > 48$  MeV の時の RMD 陽電子、 青色: Michel 陽電子に対応。



(b) 下流側 RDC の写真。手前に見えるのがプ ラスチックシンチレータ

図 3.16: 下流側 RDC の模式図と写真



図 3.17: エンジニアリングランで測定された RDC での陽電子検出と LXe でのガンマ線検出の時間差分布 [34]。黒 色: LXe で高エネルギーガンマ線が検出された事象での時間差分布、赤色:LYSO 結晶カロリメータで測定された陽 電子のエネルギーが 8 MeV 以下の事象のみの時間差分布。



図 3.18: WaveDREAM ボードの簡略化した回路図 [29]

#### 上流側 RDC

上流側の RDC は本研究で開発を行っている検出器である。この検出器は、大強度( $1 \times 10^8 \mu^+/s$ )かつ低運動量 (28 MeV/c)のミューオンビームが通過する。加えて、通過するビームへの影響を最小限に抑えつつ RMD 陽電子 を検出する必要があるため非常に厳しい開発要請が課せられる。第4章で詳細を記述する。

### 3.2.6 トリガーとデータ取得

#### 波形デジタイザー

MEG II 実験では高レート測定に伴って生じる信号のパイルアップが問題となる。そのため、オフライン解析で パイルアップを取り除くために波形情報を全て取得する。波形デジタイザーとして使用されるのは DRS4 である [35]。アナログ入力は 950 MHz の bandwidth (-3 dB) まで対応可能であり、最大 5 GSPS のサンプリング周波数 でデータを記録できる。

#### WaveDREAM ボード

MEG II 実験では前身の MEG 実験に比べて信号チャンネル数が増大する。また、LXe や pTC、下流側 RDC の 光センサーとして新たに導入される SiPM は PMT よりゲインが低く、電気的な信号増幅が必要となる。そこで基 本的なトリガーや DAQ の機能を統合した WaveDREAM ボードが新たに開発された。WaveDREAM ボードの簡 略化した回路図を図 3.18 に示す。このボードは 2 チップの DRS4 を搭載しており、1 つのボードで 16 チャンネル の信号読み出し、波形取得を行うことができる。また、0.5–100 倍まで対応可能な可変増幅器と信号波形の整形回 路(ポール・ゼロ・キャンセレーション)が実装されている。

#### トリガー

MEG II 実験では波形情報を全て取得するためデータサイズが膨大なものとなる。データサイズを抑制するために次の3つのトリガー条件を用いている。

- ・ ガンマ線のエネルギー
- 陽電子とガンマ線の時間差

#### • 陽電子とガンマ線のなす角

ここで、陽電子飛跡検出器である CDCH の信号速度は長いドリフト時間によって制限されて遅いため、陽電子とガンマ線の情報は pTC と LXe で検出された情報のみからオンラインでイベントを再構成する。また、RDC の情報はトリガー条件に使用されない。

### 3.3 予想される実験感度

表 3.1 に 2020 年までに行われたエンジニアリングランによって調べられた検出器性能を前身の MEG 実験、 MEG II 実験のデザイン値と比較したものをまとめる。また、これらの検出器性能から予想される  $\mu \to e\gamma$  崩壊の 探索感度を図 3.19 に示す。

[33] では下流側 RDC を導入し、RMD 由来の背景ガンマ線を同定することにより  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊探索感度が 8% 向上することが示された。図 3.19 には上流側 RDC の寄与は考慮されていない。4.1 節で述べるように、上流 側 RDC では陽電子のエネルギーを測定しないため、下流側 RDC に比べて RMD 由来のガンマ線の同定能力は小 さくなり、探索感度への寄与も小さくなる。しかし、上流側と下流側の RDC の情報を組み合わせることによって、 探索感度の向上は単純な和ではなくさらに大きくなることが見込まれている。これは片方の RDC に RMD 陽電子 が検出された場合に、もう片方の RDC では RMD 陽電子は検出されないという相関があるためである。

	MEG 実験	MEG II design	MEG II updated
$e^+$ の運動量分解能 $\sigma_{p_{e^+}}$ ( keV/c )	380	130	100
$e^+$ の角度分解能 $\sigma_{ heta_{e^+}}$ (mrad)	9.4	5.3	6.7
$\gamma$ のエネルギー分解能 $\sigma_{E_\gamma}$ ( % ) $(w < 2  ext{ cm})/(w > 2  ext{ cm})$	2.4 / 1.7	1.1 / 1.0	1.7 / 1.7
$\gamma$ の位置分解能 $\sigma_{x_\gamma}$ ( mm )	5	2.4	2.4
$e^+$ と $\gamma$ の時間分解能 $\sigma_{t_{e^+\gamma}}$ ( ps )	122	84	70
$e^+$ の検出効率 $\epsilon_{e^+}$ (%)	30	70	65
$\gamma$ の検出効率 $\epsilon_\gamma$ (%)	63	69	69

表 3.1: MEG II 実験で期待される検出器性能 [34]



図 3.19: MEG II 実験で予想される探索感度 [33]。黒線: ミューオン静止レート  $R_{\mu^+} = 7 \times 10^7 \mu^+/s$ 、赤線:  $R_{\mu^+} = 3.5 \times 10^7 \mu^+/s$ 

## 第4章

## 上流側輻射崩壊同定用検出器の開発

本章では、上流側輻射崩壊同定用検出器(RDC)への開発要請と上流側 RDC として開発する Diamond-Like Carbon を高抵抗電極に用いた Resistive Plate Chamber (DLC-RPC)について議論する。4.1 節で MEG II 実験で の上流側 RDC への開発要請を議論する。4.2 節で RPC の構造や動作原理についてまとめ、4.3 節で先行研究で行 われた MEG II 実験の上流側 RDC としての DLC-RPC の開発についてまとめる。先行研究の詳細は [4, 5, 36] の 3 編の修士論文を参照されたい。最後に 4.4 節で本研究における開発課題を議論する。

### 4.1 上流側輻射崩壊同定用検出器への開発要請

3.2.5 節で述べたように、RDC の役割はミューオンの輻射崩壊 ( $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$ ; RMD)から放出される信号領域 付近のエネルギーを持った背景ガンマ線を同定するために、同時に放出される 1–5 MeV の低エネルギーを検出す ることである(図 3.13)。上流側 RDC はターゲットの手前側のミューオンビーム軸上に設置される。そのため、検 出器は大強度( $1 \times 10^8 \mu^+/s$ )かつ低運動量(28 MeV/c)のミューオンビームが通過する環境下で低エネルギーの RMD 陽電子を検出する必要がある。加えて、上流側 RDC はビームライン中に設置される関係で、ビームライン のロングシャットダウン期間以外は容易に取り出すことが出来ず、ビームタイムとして想定される 30 週間以上の安 定動作が求められる。また、通過するミューオンビームに与える影響を抑える必要があるが、図 4.1 に示すように RMD 陽電子の上流側 RDC 設置位置での分布は、ミューオンビームと同様な中心付近で最も多い分布であるため、 検出器中心部分に穴をあけることはできない。よって、検出器によってミューオンビームへ影響を与えないように 物質量を抑えること、大強度のミューオンビームに対応できる高いレート耐性や放射線耐性、背景事象同定のため に十分な時間分解能や高い検出効率が要求される。下記に上流側 RDC への開発要請をまとめる。

- 1). 放射長 X<sub>0</sub> の 0.1% 以下の物質量
- 2).  $10^8 \mu^+$ /s (中心で 4 MHz/cm<sup>2</sup>) のミューオンビームへのレート耐性
- 3). 大強度ミューオンビーム環境下で 30 週間以上の運転を継続できる放射線耐性
- 4). 90% 以上の陽電子検出効率
- 5). 1 ns 以下の時間分解能
- 6). 直径 20 cm の検出器サイズ

物質量の要請からエネルギーの測定は困難であるため、下流側 RDC とは異なり時間情報のみを測定する。これら の要請を満たすことのできる検出器の候補として、過去にシンチレーションファイバーと SiPM を組み合わせた検 出器 [37] や半導体検出器が検討されたが、いずれも上記の要請を満たすことができなかったため、実現には至らな かった。本研究ではこれらの開発要請を全て満たすことのできる検出器として、Diamond-Like Carbon を高抵抗電 極に使用した Resistive Plate Chamber (DLC-RPC)を開発する。



図 4.1: シミュレーションよる上流側 RDC 設置位置での RMD 陽電子とミューオンビームの分布 [37]。RMD 陽電 子は  $\sigma = 2.8$  cm、ミューオンビームは  $\sigma = 2.0$  cm の広がりを持つ。



図 4.2: 単層 RPC の模式図

## 4.2 Resistive Plate Chamber (RPC)

本節では、従来型の Resistive Plate Chamber (RPC)の構造や基本的な動作原理について述べる。

#### 4.2.1 RPC の動作原理

RPC はガス検出器の一種であり、高抵抗の素材を用いた電極を平行に配置した構造を持ち、ガスで満たされた電 極間に高電圧を印加することで動作する。最も基本的な単層 RPC の構造を図 4.2 に示す。放射線がガスギャップ を通過することでガスが電離し、生成された電離電子・イオン対がガスギャップ間の強電場によってアバランシェ を起こす。アバランシェによって増幅された信号は最終的に高抵抗電極、絶縁体を挟んだ外側に位置する読み出し 電極へ誘起される。

#### 4.2.2 RPC 内でのガス増幅プロセス

RPC での信号の増幅プロセスは他のガス検出器と同様に、強い電場を印加することによって電離電子が加速され、それが他のガス分子と衝突する。その際に電子が十分に加速されていれば、衝突によってガス分子を電離して 二次電子を生成する。この二次電子も強電場によって加速され同様のことを繰り返し、その連鎖によってアバラン



図 4.3: IMONTE[38] によってシミュレートされた RPC ガス中における Townsend 係数  $\alpha$  と吸着係数  $\eta$  の電場依存性 [39]。(図は [40] より引用)

シェを引き起こす。このアバランシェ増幅のプロセスは、Townsend 係数  $\alpha$  と吸着係数  $\eta$  を用いて理解される。位置 z のアバランシェ中に n 個の電子のクラスターが存在する時、位置  $\delta z$  で n+1 個の電子のクラスターに成長す る確率は  $n\alpha\delta Z$  と表される。この Townsend 係数  $\alpha$  は、ガスの圧力やガス内部の電場の強さに依存し、電子のクラ スターを成長させる係数として定性的に理解できる。一方、吸着係数  $\eta$  は、ガスの電気陰性度によって決まり、ク ラスター内の電子がイオンと再結合してクラスターの成長を抑制する係数として理解できる。図 4.3 にこれらの係数の関係を IMONTE[38] でシミュレートした結果を示す。電離電子数の平均値を  $\bar{n}$  とするとき、アバランシェの 成長は以下の式によって表される。

$$\frac{d\bar{n}}{dz} = (\alpha - \eta)\,\bar{n} \tag{4.1}$$

Townsend 係数 α と吸着係数 η の差が実効的な増幅確率となり、これらの値が場所に依存しない場合はアバラン シェは指数関数的に成長する。しかし実際には、後述するストリーマーや空間電荷効果の存在によって指数関数的 な振舞いからは大きく外れる。

ストリーマー

アバランシェ増幅によって増幅された電子のクラスターが大きくなると、クラスター内で発生する紫外線が増幅 プロセスに関わるようになる。このような現象は増幅率が10<sup>8</sup>を超えると発生するようになり、この閾値のこと を Raether limit[41]、この状態のことをストリーマーと呼ぶ。ストリーマー形成のプロセスを図4.4 に示す。スト リーマー形成のプロセスにおいて二次電子は、紫外線がガス分子を電離したり高抵抗電極に当たることで生成され る。図4.4 内の模式図では前者の場合を示している。

#### 空間電荷効果

アバランシェによる電子はアノードに向かってドリフトする。この時、正イオンは電子に比べて重くドリフト速度が遅いため、電子の時間スケールで見ると正イオンはその場で滞留しているように見える。この滞留している正 イオンの作り出す電場によって、図 4.5 に示すようにアバランシェが発生している地点における電場を弱め、電子の増幅を抑制する。この効果を空間電荷効果(Space charge effect)と呼ぶ。空間電荷効果によって、電子はスト



図 4.4: ストリーマー形成のプロセス [42]。a) アバランシェの全電荷が Raether limit に近い場合、一次アバラン シェの近くにある電気力線は一次アバランシェの方に曲がり始める。b) 一次アバランシェで発生した紫外線が一次 アバランシェの近くに二次電子を生成する。二次電子が曲げられた電気力線によって一次アバランシェに向かって 動き、二次アバランシェを形成する。c) 二次アバランシェの形成を繰り返すことで、ストリーマーを形成する。



図 4.5: 空間電荷効果の模式図 [43]

リーマーが発生する直前の  $10^7 - 10^8$  程度の増幅率で増幅が飽和するため、ストリーマーを押さえた動作が可能に なる。また、空間電荷効果は数 mm の広いギャップを持つ RPC よりも、数百  $\mu$ m の狭いギャップを持つ RPC で強 く確認できる。

4.2.3 RPC の構成と運用

オペレーションモード

RPC には下記の2つのオペレーションモードが存在する。

- ストリーマーモード
- アバランシェモード

ストリーマーモードは 1980 年代に RPC が考案されてから [44]、アバランシェモードが発見される 1990 年代まで 主に使用されてきた。ストリーマーモードの RPC はアルゴンベースのガスで動作され、電子の増幅率が 10<sup>8</sup> 以上 になることでストリーマーを積極的に発生させる。この場合、ガスゲインが非常に大きく、10–1000 pC の大きな 電荷が誘起されるため、プリアンプなどを使用せずに読み出しを行えるという利点がある。一方で、4.2.4 節で述べ るように、ストリーマーモードの RPC の検出器性能はアバランシェモードに劣るため、近年では用いられない。

#### 4.2 Resistive Plate Chamber (RPC)



アバランシェモードの RPC はフロンガス (R-134a,  $C_2H_2F_4$ )をベースに動作される。フロンガスは電気陰性 度が高く、先述した空間電荷効果によるガス増幅の飽和現象が強く表れるため、増幅率がストリーマーの発生す る  $10^8$  以下となり、アバランシェのみでの運用が可能となる。ストリーマーモードに比べると誘起される信号が 1-10 pC 程度と小さいため、高い増幅率のプリアンプが必要になる。

#### RPC のガス構成

ストリーマーモードの RPC ではアルゴンベースのガスにクエンチャーとしてイソブタンや二酸化炭素などの炭 化水素系のガスを加えたガス構成が用いられることが多かった。アルゴンガスは紫外線が発生しやすく、ストリー マーを発生させやすいことが知られている。

アバランシェモードの RPC ではフロンガスをベースとしたガスにイソブタンと SF<sub>6</sub> を加えたガス構成が用いら れることが多い。フロンガスや SF<sub>6</sub> ガスは電気陰性度が高く、増幅率を安定させることができる。また、フロンガ スはアルゴンのおよそ 2.5 倍の密度があるため、放射線が通過した際に電離される電子が多く、検出効率の面で優 れている。さらに、電子のドリフト速度もアルゴンに比べて高速であるため、時間分解能の向上にも寄与している。 一方、イソブタンはストリーマー発生につながるアバランシェからの紫外線を吸収する効果を持つため、ストリー マーを抑制するためのクエンチャーとして用いられる。

#### RPC のギャップ構成

RPC にはシングルギャップ型とマルチギャップ型の大きく分けて二種類のギャップ構成がある。

シングルギャップ型の RPC は図 4.2 のように、数 mm のギャップ 1 つからなる RPC である。ATLAS 実験や ALICE 実験などにおけるミューオントリガーシステムなどで利用されている [45, 46]。このことから、トリガー RPC と呼ばれることが多い。

マルチギャップ型の RPC は図 4.6 のように、数百 µm のギャップが 4–10 層に積層された構造をしている。高 電圧を最も外側に位置する電極に印加することで、各ガスギャップに均等に電圧が印加される。信号の増幅はそ れぞれのギャップで起こり、各層の信号の和が読み出し電極に誘起される。4.2.4 節で述べるように各層のギャッ プ間隔が狭いため、時間分解能が非常に良い。STAR 実験や ALICE 実験をはじめとするハドロン実験分野での Time-of-flight (TOF)検出器として利用されている [47, 48]。このことから、タイミング RPC と呼ばれることが 多い。

#### 4.2.4 RPC の検出器性能

#### 検出効率

RPC の検出効率は高抵抗電極のギャップ間の距離とギャップ数に依存し、ギャップ間の距離が大きいほど、また はギャップ数が多いほど検出効率は高くなる。アバランシェの増幅率はドリフト距離が長いほど大きくなるため、 ギャップ間の距離が大きいほど電離によって生じた電子が検出するのに十分な大きさの信号となるまで十分に増幅 され、検出効率が上がる。実際に数 mm のギャップ間隔を持つトリガー RPC では、90–95% 程度の検出効率を達 成している。また、ギャップ数を多くすることでも検出効率は上がり、n 層に積層した場合の検出効率  $\epsilon_n$  は単層で の検出効率  $\epsilon_1$  を用いて次のように近似できる [39]。

$$\epsilon_n = 1 - \left(1 - \epsilon_1\right)^n \tag{4.2}$$

#### 時間分解能

RPC の時間分解能は高抵抗電極のギャップ間の距離とギャップ数に依存し、ギャップ間の距離が小さいほど、またはギャップ間の数が多いほど時間分解能は向上する。ギャップ間の距離が小さくなるとアバランシェの距離が短くなり、信号として読み出せるほど十分な増幅が行える初期電離電子の生成位置の幅が小さくなるため、ドリフト距離のふらつきが小さくなる。したがって、ギャップ間の距離を小さくすると時間分解能は良くなる。また、ギャップ数が増えると時間分解能が良くなることも知られている。ただし、最も大きな信号の生じたタイミングで決まるため、単純に 1/√n では改善しない。

時間分解能を良くしたい場合は、先述のようにギャップ間の距離を小さくする必要があるが、式 4.2 の関係より、 積層することで狭いギャップにおける検出効率の低さという欠点をカバーすることができる。実際のタイミング RPC においても、数百μm 程度の狭いギャップを積層することで高い時間分解能と検出効率を両立している。

#### レート耐性

RPC のレート耐性は主に高抵抗電極の抵抗率で決まる。アバランシェの発生位置では増幅した電子が高抵抗電極 を流れることにより局所的に電圧降下が生じ、ギャップ間の実効的な電場が弱くなる。高抵抗電極の抵抗率が小さ い、もしくは高電圧供給部同士の距離が短い場合は電子が高抵抗電極を早く流れるようになるため、電場が元の状 態に戻る時間が短くなり、レート耐性が向上する。通常の RPC の高抵抗電極電極に用いられるガラスの体積抵抗 率は  $10^{13}$  Ω cm 程度であり、この抵抗率では 1 kHz/cm<sup>2</sup> 程度までのレート耐性しか持たない。ガラスにアルカリ土 類元素の酸化物を添加し体積抵抗率を  $10^8 - 10^9$  Ω cm 程度まで下げることで、およそ 100 kHz/cm<sup>2</sup> までのレート 耐性を持つ RPC が開発されている [49]。

### 4.3 先行研究における DLC-RPC 検出器の開発

上流側 RDC のための DLC-RPC は [4] で開発が始められた。本節では、本研究に先行して行われた [4, 5, 36] についてまとめる。特に、[5] で研究された、DLC-RPC のレート耐性について議論する。

#### 4.3.1 高抵抗電極に Diamond-Like Carbon を用いた RPC の開発

先行研究 [36] において、従来のガラスやベークライトを電極に使用した RPC で見られた、レート耐性や物質量な どの問題を改善するために、Diamond-Like Carbon (DLC)を電極に使用した新たなデザインの RPC、DLC-RPC が開発された。



図 4.7: DLC の構造の模式図 [50]

DLC は主に炭素からなる高抵抗薄膜素材で、下記のような2つの化学結合が混在しているアモルファスカーボンである(図4.7)。

- グラファイト構造と同様の sp<sup>2</sup> 結合: 自由電子が含まれるため電気伝導性を持つ。
- ダイアモンド構造と同様の sp<sup>3</sup> 結合:自由電子が含まれないため絶縁性を持つ。

また、DLC には次のような特徴がある。

- ・ 成膜時に膜厚などを調節することで 10 kΩ/sq から 1000 MΩ/sq 程度の広範囲の表面抵抗率が調節可能
- ポリイミドに対して高い付着力を持つ
- 物理的・化学的に安定

[36] で開発された DLC-RPC は、スパッタリング技術で DLC をポリイミドフォイルに成膜して高抵抗電極を形成 している。また、ガスギャップを確保するためにフォトリソグラフィ技術によって電極上にスペーサーを形成して いる。

検出器性能は、時間分解能は数十ns、単層での検出効率は10%、3層に積層して30%検出効率を示した。

#### 4.3.2 上流側 RDC のための DLC-RPC の設計

前節で述べた DLC-RPC は実用に至る状態では無いものの、その物質量が削減可能であることが確認できたため、先行研究 [4] において上流側 RDC に向けた DLC-RPC の開発が始められた。

#### 検出器デザイン

4.1 節で述べた上流側 RDC に課せられている開発要請の内、物質量を  $0.1\% X_0$  に抑制することを実現するため に、RPC の高抵抗電極に DLC をスパッタリングした厚さ  $50 \mu m$  のポリイミドフォイルを用いる。この DLC の 膜厚は 100 nm 以下の厚みであり、物質量はほぼ無視できる\*<sup>1</sup>。また、信号の読み出しには厚さ 30 nm 以下のアル ミ薄膜を用いる。これまでに述べた検出器素材とその物質量を表 4.1 についてまとめる。電極を積層することで検 出効率を向上させるが、物質量の要請からポリイミドフォイル 5 枚が上限である。この場合、図 4.8 に示すように 4 層まで積層することができる。

電極への高電圧の供給方法とスペーサーは [36] で開発された DLC-RPC の特徴を引き継いでいる。高電圧の 供給方法は絶縁体であるポリイミドを挟んで配置された各層の DLC 電極にそれぞれ +HV と -HV を供給する。 図 4.8 中の +HV (-HV)の部分に共通の電圧を印加することで、各層で均一な電圧差を供給できる。このように

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup> 炭素が多く含まれているポリイミドが厚み 50 μm で 0.0175% X<sub>0</sub> の物質量であり、同じく炭素でできている DLC の厚みはポリイミド の 1/500 であるため物質量はほぼ無視できる。



表 4.1: 検出器素材とその物質量

図 4.8: 超低物質量 DLC-RPC の模式図

することで1層分の電圧を用意すればよく、従来のマルチギャップ型 RPC よりも低い電圧での運用が可能となる。 各層に均一な電圧差を供給するのではなく、逆に異なる電圧を印加することも可能であり、もしある層が放電など の損傷で動作不能になったとしても残りの3層のみで動作を継続するということも可能となる。

ギャップの間隔を制御するスペーサーは、従来型の RPC では釣り糸を用いることが多いが、本研究で開発する DLC-RPC はポリイミドフォイルの機械的強度が弱いことから電極の平坦性が損なわれる。そのため、この検出器 ではフォトリソグラフィ技術を用いたピラーをスペーサーとして用いる。フォトレジストを用いたピラーの形成の 流れを図 4.9 に示す。ピラーは直径 400 µm 程度で 2.5 mm ピッチでドット上に配置され、ピラー付きの電極に上 から少しの圧力をかけることでギャップの平坦性を確保する。

#### プロトタイプ検出器の製作

DLC を高抵抗電極に用いた 3 cm 角の大きさのプロトタイプ検出器が製作された。本研究における放射線耐性評価(第5章)はこのプロトタイプ検出器を用いて行う。

電極の製作にあたり、デュポン社 [51] のカプトンシートに、DLC をスパッタリングした。スパッタリング作業 についてはビースパッタ社 [52] に依頼した。

DLC の境界付近は放電を起こしやすいことが知られている。これは、境界付近では DLC が一様には付着せず境 界面に凹凸ができるため、その周辺で電場が歪むためであると考えられている。DLC の境界保護の為にレイテック 社 [53] に依頼し、25 µm 厚のフォトレジストを境界部分に被せた。

スペーサーとして上で述べたフォトレジストで形成するピラーを用いる。高さ 384 μm、直径 400 μm のピラーを 2.5 mm ピッチで格子状に DLC 電極上に配置した。こちらのピラー形成もレイテック社\*<sup>2</sup>に依頼した。このように して完成した高抵抗電極とピラーの写真を図 4.10 に示す。

<sup>\*2 2022</sup> 年 7 月 1 日に社名変更、現 TRENG F プロダクツ株式会社





図 4.10: 完成した高抵抗電極とピラー([5] より引用)

製作した電極の性能評価の結果より、上流側 RDC に対する要請のうち次の 3 つが実現可能であることが示された [4]。

- 0.1% X<sub>0</sub> 以下の物質量
- ・ 90% 以上の陽電子検出効率
- 1 ns 以下の時間分解能

#### 4.3.3 ミューオンビームを使用したプロトタイプ検出器のレート耐性の評価

先行研究 [5] において、4.3.2 節で述べたプロトタイプ検出器のレート耐性の評価が実際のミューオンビームを使用して行われた。

#### DLC-RPC 検出器のレート耐性

RPC のレート耐性は 4.2.4 節で述べたように、主に高抵抗電極の抵抗率と高電圧供給部同士の距離で決まる。高 レート環境下では、ギャップに流れる大電流が高抵抗電極内を流れることで電圧降下が生じるため実効的に印加さ れる電圧が小さくなり、ガス増幅率が低下する。これにより、検出効率や時間分解能といった検出器性能が悪化す ることが RPC におけるレート耐性の問題となっている。電圧降下を小さくするためには抵抗率を小さくすること



図 4.11: DLC-RPC の高電圧供給ラインの間を流れる電流の概念図



図 4.12: ミューオンビームを使用したビーム試験でのプロトタイプ検出器の構造 [5]

が有効である一方、抵抗率を小さくすることは放電を頻発させる危険性もある。そのため、放電を抑えた動作が可 能な範囲内で抵抗率を下げる必要がある。

本研究で開発する DLC-RPC の場合、図 4.11 のように電流が DLC の表面を流れる。この時に、高抵抗電極で生じる電圧降下は次のように表される [5]。

$$\nabla^2 \delta V(x,y) = Q_{\text{mean}}(V_{\text{eff}}) \cdot f(x,y) \cdot \rho_S \tag{4.3}$$

ここで、 $\delta V(x,y)$ は電圧降下、 $Q_{\text{mean}}$ はアバランシェによる平均電荷量、 $V_{\text{eff}}$ は実効的な印加電圧、f(x,y)はヒットレート、 $\rho_S$ は表面抵抗率を表す。

ここで $(x,y) = (x_1,y_1)$ に高電圧供給の導電体が配置されている場合、 $\delta V(x_1,y_1) = 0$ という境界条件が成立する。電流が流れる距離は高電圧供給の導電体までの距離になる。すなわち、高電圧を供給する導電体の配置が電圧降下に大きな影響を及ぼす。

#### プロトタイプ検出器のセットアップ

DLC-RPC のセットアップを図 4.12 に示す。先述したように高電圧供給構造が電圧降下の境界条件を決める。電 極への高電圧供給は導電性テープを使用し、図 4.12a の様に配置し、カソード(-HV)側は GND に落とし、ア ノード(+HV)側が正の高電位となるようにした。導電性テープでの放電を防ぐために上からカプトンテープで保 護した。このとき、検出器としての有感領域は 13 mm×23 mm となる。

28



図 4.13: MIP 陽電子に対する検出効率の動作電圧依存性 [5]

#### MIP 陽電子に対する応答

ミューオンの崩壊によって生成される MIP 陽電子に対して測定を行い、図 4.13 に示すような検出効率の電圧依存性が得られた。単層の DLC-RPC で動作電圧 2750 V の時に MIP 陽電子に対して 60% の検出効率が得られた。

#### 高レートミューオンビーム照射中の応答

レート耐性を評価するために、高レートミューオンビーム中でどれだけの電圧降下が生じており、どの程度の検 出効率が見込まれるかを評価した。電圧降下の大きさは、高レートミューオンビーム中で測定された波高分布と、 低レート環境下で測定された MIP 陽電子とミューオンの波高分布を比較することで見積もった。中心でのビーム レートが1MHz/cm<sup>2</sup>、DLC-RPC の動作電圧 2750 V の時の波高分布と低レート環境下で測定された MIP 陽電子・ ミューオンの波高分布との比較を図 4.14 に示す。

波高分布の比較により、中心でのビームレートが 1 MHz/cm<sup>2</sup> のとき、電圧降下の大きさは 100–150 V と評価された。このとき、図 4.13 から MIP 陽電子の検出効率は 50% 程度を達成しており、式 4.2 から 4 層に積層することで 90% の検出効率を達成できる見込みである。したがって、プロトタイプ検出器は 1 MHz/cm<sup>2</sup> のレート耐性を有していると結論付けられた。

#### 4.3.4 レート耐性向上と大型化の為の高抵抗電極の開発

前節での測定結果より、レート耐性を向上させるためには電圧降下を抑える必要がある。電圧降下は高電圧供給 間の距離  $\ell_{pitch}$  の 2 乗に比例し、表面抵抗率  $\rho_S$  に比例するため、これらのパラメータを高レート環境下でどの程 度の電圧降下まで許容できるかを踏まえた上で検討する必要がある。図 4.13 より、100 V の電圧降下までは許容可 能であり、電圧降下を 100 V 以下に抑えるには、高電圧供給の距離を 1 cm、表面抵抗率を 10 M $\Omega$ /sq. にする必要 がある。

高電圧供給の距離 ℓ<sub>pitch</sub> を 1 cm にするために、図 4.15 のように高電圧供給ラインをストリップ状に配置する。 このようにすることで高電圧供給間の距離を小さくできるだけでなく、検出器の大型化が可能になる。導電スト リップは DLC 上へクロムと銅をスパッタリングすることで形成する。導電体が剥き出しになっていると放電が発 生しやすくなることが予想されるため、図 4.16 のようにフォトレジストを用いた絶縁カバーでクロムのストリップ を覆う。ここで、導電ストリップと絶縁カバーのパラメータは、位置合わせの精度、不感領域となる割合から検討



図 4.14: 中心でのビームレート 1 MHz/cm<sup>2</sup> のときの高レート試験で得られた波高分布と MIP 陽電子・ミューオン の波高分布との比較 [5]



図 4.15: 高電圧供給ラインをストリップ状に配置する模式図 [5]

した。導電ストリップのクロムの幅を 50 µm、絶縁カバーの幅を 200 µm とし、このときの不感領域の割合は 2.1% と計算された。

表面抵抗率  $\rho_S$  は高いときは大きな電圧降下を引き起こしレート耐性を低下させるが、逆に低すぎる場合は放電の電流をクエンチ出来ないため、検出器の安定動作が出来なくなる。20–30 MΩ/sq. での安定な動作に成功しているが、1 MΩ/sq. 以下では放電が頻発し安定運転に成功していない。従ってその間の 10 MΩ/sq. での試験が必要になる。

DLC は加熱することによって表面抵抗率が不可逆的に減少することが知られている。そのため、意図的にある温度で加熱することで表面抵抗率 ρ<sub>S</sub> を精度良くコントロールする。

#### 4.3.5 電極サンプルの製作

先行研究 [5] において設計された新型電極の製作工程は次の通りである。


図 4.16: 導電ストリップと絶縁カバーの模式図。[5] を改変。

- 1). 50 µm 厚のポリイミドフィルムに DLC をスパッタする
- 2). 高電圧供給用の Cr+Cu をスパッタする
- 3). DLC の境界保護とストリップ保護の為に 25 µm 厚のフォトレジストを取り付ける
- 4). スペーサーとしてフォトレジストで形成されるおよそ 400 µm のピラーを取り付ける
- 5). DLC の表面抵抗率を調整するために電極のアニーリングを行う

先行研究 [5] の段階で(1)の工程まで完了している。(4)のレジストの熱硬化時の加熱で、表面抵抗率  $\rho_S$  が目 標値である 10 M $\Omega$ /cm<sup>2</sup> になるように DLC スパッタリングを依頼した。

### 4.4 本研究における開発課題

先行研究 [4] において、上流側 RDC に対する要請のうち次の3 つが実現可能であることが示された。

- 1). 0.1% X<sub>0</sub> 以下の物質量
- 4). 90% 以上の陽電子検出効率
- 5). 1 ns 以下の時間分解能

また、先行研究 [5] において、下記のことが調査された。

- 2). プロトタイプ検出器は1MHz/cm<sup>2</sup>のレート耐性を有する
- 6). 直径 20 cm の大型化に向けて、電圧降下を抑制するために高電圧供給構造の設計と製作を行った。

上流側 RDC に対する要請のうち、放射線耐性の要請については現在未調査である。そのため本研究では、次の ことについて調査を行う。

- DLC-RPC 検出器の放射線耐性
- [5] で設計された、ストリップ状の高電圧供給構造を持つ新型電極の製作と動作試験

# 第5章

# DLC-RPC 検出器の放射線耐性

2022 年 6 月に神戸大学の高速中性子照射施設、2022 年 9 月に KEK Platform-C の X 線発生器を使用してプロ トタイプ検出器の劣化試験を行った。本章では、劣化試験の結果について述べる。

## 5.1 上流側 RDC への放射線耐性の要求

4.1 節で述べたように上流側 RDC は、MEG II 測定器の中に導入すると運転期間中は容易に取り出すことができない。そのため、約 30 週間の運転期間中に渡り、大強度(4 MHz/cm<sup>2</sup>)かつ低運動量(28 MeV/c)のミューオン ビームが通過する環境で検出器性能を維持することが重要である。

### 5.1.1 放射線照射の大量照射による従来型の RPC の劣化

本研究で開発を行っている DLC-RPC は放射線耐性に関しては過去に調査されていない。一方で、ガラスを高抵 抗電極に使用した従来型の RPC に関しては、CBM 実験 [54]、CMS 実験 [55] や ALICE 実験 [56] など、いくつ かの実験グループによって放射線の照射による劣化が報告されている。従来型の RPC における劣化の影響は、電 極表面上への堆積物やガスの汚染によるダークカレントの増加が挙げられる。

電極表面上への堆積物については、特にフッ素の堆積が確認されている。これは RPC の動作ガス( $C_2H_2F_4/SF_6/i-C_4H_{10}$ )にフッ素が含まれていることが原因であると考える。フッ素の生成源となっているのは R134a ( $C_2H_2F_4$ ) と SF<sub>6</sub> である。R134a は電離によって炭素とフッ素の結合が切れることによりフッ素を生成するが、R134a は安定であるため、炭素とフッ素の結合は切れにくい。一方で、SF<sub>6</sub> に関しては下記のような反応を通してガス増幅時にフッ素原子を生成しやすいことが知られている [57]。

$$SF_6 + e^- \to SF_6^{-*} \tag{5.1}$$

$$\mathrm{SF}_6^{-*} \to \mathrm{SF}_5^- + \mathrm{F} \tag{5.2}$$

また、ガス増幅時に生成されたフッ素が水と反応してフッ化水素が生成され、ガスが汚染される [58,59]。

電極上への堆積物によるダークカレントの増加が不可逆なものであるのに対し、ガスの汚染によるダークカレントは汚染されたガスをクリーンなガスに置換することによって減少することが確認されている[57]。

ここに挙げたような劣化が DLC を高抵抗電極に使用した RPC においても同様に確認できるのか、他に DLC 特 有の劣化が見られないかを調査する必要がある。

#### 5.1.2 MEG II 実験で想定される放射線照射量

本研究では、放射線耐性を評価するために高速中性子照射施設とX線発生器を使用した劣化試験を行った。そこで、高速中性子とX線の照射によって単位面積あたりに流れた電荷量をMEGII実験のミューオンビームによって単位面積あたりに生じる電荷量と比較することで、MEGII実験でどの程度の運用時間に相当する照射量なのかを評価する。

MEG II 実験の行われている  $\pi$ E5 ビームラインのミューオンビームによる放射線照射量  $Q_{\mu^+}$  は、低運動量ミューオンによるガス増幅時の平均電荷量  $Q_{\text{mean}}$  とミューオンビームのビームレート f (中心で 4 MHz/cm<sup>2</sup>) と運転期間 T (30週間)を用いて次の様に計算できる。

$$Q_{\mu^+} = Q_{\text{mean}} \times f \times T \tag{5.3}$$

ここで、低運動量ミューオンによるガス増幅時の平均電荷量  $Q_{\text{mean}}$  は実際のミューオンビームラインを用いて測定 されている [5]。4.3.4 節で述べたように電圧降下は 100 V まで許容できるため、電圧降下が 100 V の時の低運動 量ミューオンによる平均電荷量は  $Q_{\text{mean}} \sim 3 \, \text{pC}$  となる。MEG II 実験で運用した際に想定される放射線照射量は

$$Q_{\mu^+} = 3 \,\mathrm{pC} \times 4 \,\mathrm{MHz/cm^2} \times 30 \,\text{Bl} \sim 218 \,\mathrm{C/cm^2} \tag{5.4}$$

となる。 $\mathcal{O}(100)$  C/cm<sup>2</sup> の照射量が想定され、DLC-RPC 検出器は非常に厳しい環境で運用される。

放射線耐性を評価するために劣化試験を行うにあたって、加速劣化試験によって MEG II 実験のミューオンビー ムラインに相当する照射量を得ることは困難である。理由は、MEG II 実験の行われている πE5 ビームラインの ミューオンビームは世界最大強度であるため、他のミューオンビームラインを使用してもビームレートで上回るこ とができない。また、その他の粒子を使用して πE5 ビームライン以上のビームレートが得られたとしても、発生 する電荷量はレート耐性で制限される。他にも、RPC のガス増幅は 4.2 節で述べた空間電荷効果によって抑制さ れ、低運動量ミューオンの信号の大きさは既に飽和しているため、ガスギャップ中で初期電子数を多く生成する粒 子を照射したとしても電荷量で大きく上回ることができない。そこで、本研究においてはビームテスト期間中に DLC-RPC への可能な限りの照射を行い、その段階での劣化を調査する。

# 5.2 劣化試験でのプロトタイプ検出器のセットアップ

劣化試験では 4.3.2 節で製作したプロトタイプ検出器を用いた。DLC-RPC 電極は高速中性子照射劣化試験と X 線照射劣化試験では異なるサンプルを用いた。プロトタイプ検出器の構造はそれぞれの照射劣化試験で同じである。 図 5.1 にプロトタイプ検出器の構造を示す。高電圧供給の配置は、導電性テープを図 5.1a のように配置し、カソー ド(-HV)側は GND に落とし、アノード(+HV)側に正の電圧を印加した。また、導電性テープは放電を防ぐた めにカプトンテープで保護した。この時検出器の有感領域は 19.5 mm×26.0 mm となる。高電圧供給は CAEN 社 の高電圧 NIM モジュール(N1471A)を使用し、放射線照射中の電圧値と電流値を継続的にモニターした。DLC 電極の表面抵抗率は、カソード側が 15 MΩ/sq.、アノード側は 47 MΩ/sq.(高速中性子照射劣化試験)と41 MΩ/sq. (X線照射劣化試験)と測定された。

信号の読み出しには幅約 10 mm、長さ約 40 mm のストリップ状に切り出した Goodfellow 社製 [60] のアルミ蒸 着ポリイミドを用いた。ストリップの両端から信号を読み出し、増幅率が 38 dB の増幅器によって増幅される。増 幅された信号は波形デジタイザー (DRS4) を用いて、サンプリング速度 2.5 GSPS で波形を取得した。

図 5.2 に組み上げたプロトタイプ検出器の模式図と写真を示す。チェンバー内部のガス組成は、R134a/SF<sub>6</sub>/i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>=(94/1/5)% とした。











(b) 模式図を上から見た時の写真



(c) 模式図を下から見た時の写真





図 5.3: タンデム静電加速器の外観。赤丸で囲んでいる部分が本研究で使用したビームライン。

### 5.3 高速中性子を用いた DLC-RPC 検出器の劣化試験

2022 年 6 月中旬から 7 月にかけて、神戸大学海事科学部にあるタンデム静電加速器を使用して高速中性子照射 劣化試験を行った。

### 5.3.1 神戸大学海事科学部タンデム静電加速器

タンデム静電加速器の外観を図 5.3、概略図を図 5.4 に示す。今回使用したタンデム静電加速器は セシウムス パッタ負イオン (SNICS–II) と RF 放電 Rb 電荷交換型負イオン源 (Alphatross–Rb CX)の二種類のイオン源を 有する。本実験では SNICS–II の負イオン源に Tid<sub>2</sub> の陰極を取り付けた。イオン源から放出された陰イオン  $d^-$  は 図 5.5 に示す加速器本体に到達する。加速器の両端は GND となっており、中央の高電圧ターミナルは +1.5 MV に維持されている。加速器に到達した  $d^-$  は電場によって高電圧ターミナルまで加速される。ターミナル中には窒 素ガスが  $10^{-2}$  Pa 程度流れており、加速された  $d^-$  が窒素分子と電荷ストリッピング反応を起こし  $d^+$  に変換され る。電荷が正に変換されたことで加速器入射口からターミナルに加速されたときとは逆方向の力を電場から受け、 3 MeV まで加速されながら出口へと到達する。加速器を経て加速された  $d^+$  は二連磁気四重極レンズで収束、偏向 電磁石によって目的のビームラインへ送られる。

本研究で使用したビームラインは M15 ビームラインであり、終端に Be ターゲットが取り付けられている。 3 MeV に加速された *d*<sup>+</sup> が Be ターゲットに衝突することで以下の <sup>9</sup>Be(*d*, *n*)<sup>10</sup>B 反応が起き、高速中性子が生成される。

$${}^{9}\text{Be} + d \to {}^{10}\text{B} + n + 4.36\,\text{MeV}$$
 (5.5)

この反応で生成される中性子のエネルギー分布を図 5.6 に示す。

5.1.2 節で述べたように、中性子照射中に単位面積あたりに流れた電荷量によって照射量を評価するが、ここで見ている電荷は中性子によるものではなく、中性子によって反跳された原子核の電離によるものである。中性子が検出器に入射する際に、検出器のチェンバー窓に使用しているポリイミドに含まれる原子核と弾性散乱を起こし、弾き出された反跳原子核がガスギャップ中でエネルギーを落とす。



図 5.4: タンデム静電加速器の概略図 [61]。本実験を行ったのは、M15 ビームラインである。



図 5.5: タンデム静電加速器の本体 [61]



図 5.6: *d* 入射エネルギー 3.0 MeV における <sup>9</sup>Be(*d*, *n*)<sup>10</sup>B 反応の 0–153° までの中性子エネルギー分布 [62]



(a) 中性子発生点

(b) チェンバーの設置位置

(c) セットアップを上から見た写真

図 5.7: 高速中性子照射劣化試験でのプロトタイプ検出器の設置位置



図 5.8: ベータ線を用いた性能評価の測定セットアップ

### 5.3.2 高速中性子照射劣化試験セットアップ

図 5.7 に高速中性子照射劣化試験でのプロトタイプ検出器の設置位置を示す。図 5.7a 内の赤丸で囲まれた位置に Be ターゲットが設置されており、ここが高速中性子の発生点となる。今回は高速中性子の照射量を可能な限り多く するため、図 5.7b, 5.7c に示すように検出器をターゲットに可能な限り近づけた。このときの中性子発生点とプロ トタイプ検出器の有感領域の距離はおよそ 2.5 cm であった。

5.2 節で述べたように、高速中性子を照射している間は電圧値と電流値のモニターを行い、中性子の照射量を評価 する。また、中性子照射中のプロトタイプ検出器の波高分布の変化を調査するために、<sup>90</sup>Srのベータ線を用いた性 能評価を照射期間中に6回行った。性能評価の測定セットアップの模式図を図 5.8 に示す。中性子照射中に中性子 に対する信号を取得しなかったのは、エレクトロニクスの損傷を避けるためである。

ビームの安定性を確認するためにビーム電流の測定も行った。荷電粒子が金属ターゲットに入射すると粒子の電 荷が持ち込まれるため、金属ターゲットに電流計を接続することで単位時間に流れ込む電荷量としてビームの電流 を測定した。このとき、ターゲット中の電子との衝突の結果生成された自由電子の一部がターゲットから放出され、 入射電荷量を多く見積もってしまう。この二次電子放出を防ぐために、ターゲットの前方に負のバイアス電圧をか



図 5.9: Faraday cup の回路図 [61]



図 5.10: πE5 で測定された中性子フラックス [63]。図中の pos.B) がおおよそ上流側 RDC が導入される位置になる。

けた電極を配置してビーム電流を正確に測定できるようにしている。このビーム電流を正確に測定する金属ター ゲットを Faraday cup と呼ぶ。その回路図は図 5.9 に示す。

### 5.3.3 中性子のフラックス

MEG II 実験環境下ではビームライン上流側から中性子が飛来する。図 5.10 に MEG II 実験のビームグループに よって測定された πE5 ビームラインの中性子フラックスを示す。上流側 RDC の導入される位置はおおよそ図 5.10 中の pos.B) になり、中性子フラックスは 11.0 n/sr/µC である。5.3.1 節で述べたように、中性子からの反跳原子核 の電離による電荷量の比較からミューオンの照射による影響を見積もるが、タンデム静電加速器によって照射され る高速中性子のフラックスを算出することで、ミューオンだけでなく πE5 ビームラインにおける中性子による影響 を見積もる。この場合の照射量は、同じ放射線源であるため、今回の中性子照射劣化試験における中性子フラック スを算出して単純に比較する。

図 5.11 に式 5.5 の反応におけるビーム軸に対して 0 度方向の中性子生成数を示している。本実験で使用する  $d^+$ のエネルギーは 3 MeV で固定であるため、図 5.11 の赤の曲線を参考にして、ビーム軸に対して 0 度方向に発生する中性子数は  $3.81 \times 10^8 / \text{sr}/\mu\text{C}$ となる。したがって、プロトタイプ検出器の有感領域に入射される中性子のフラックスは、有感領域と中性子発生点の距離 L = 2.5 cm、有感領域の面積  $S = 1.95 \text{ cm} \times 2.60 \text{ cm}$ 、ターゲット電流



図 5.11: d 入射エネルギーと<sup>9</sup>Be(d, n)<sup>10</sup>Be 反応による 0°方向の中性子生成数の関係 [64]

 $I = 1 \mu A$ とすると次のように求められる。

Flux = 
$$\frac{3.81 \times 10^8 / \text{sr}/\mu\text{C} \times \text{I} \times \text{S}}{L^2}$$
  
=  $\frac{3.81 \times 10^8 / \text{sr}/\mu\text{C} \times 1 \,\mu\text{A} \times 1.95 \,\text{cm} \times 2.60 \,\text{cm}}{2.50 \,\text{cm} \times 2.50 \,\text{cm}} = 3.1 \times 10^8 \,\text{Hz}$  (5.6)

よって、中性子の単位面積当たりの入射レートは 61 MHz/cm<sup>2</sup> と見積もられ、πE5 における中性子フラックスと比 較して遥かに大量の照射が行われる。

### 5.3.4 高速中性子照射劣化試験の結果

#### 高速中性子照射中のプロトタイプ検出器の応答

図 5.12 に中性子照射中にモニターした電圧値と電流値、また積算電荷量を示す。中性子照射中のプロトタイプ検 出器の動作電圧は 2700 V とし、動作中の電流値は図 5.12b に示すように 1.8–2.3 µA 程度の電流値が HV モジュー ルで確認された。図 5.12b に青矢印で示した時間に放電が起きて検出器が動作しなくなったため、検出器内部の清 掃を行い、緑矢印で示した時間にベータ線を用いた性能評価を行った。図 5.13 にはビーム電流の推移を示してお り、最大値である 1 µA のビーム電流が出力され続けている。なお、ビーム電流を測定するモジュールのデータ容 量の関係より、およそ 7–8 時間おきにビームを停止している。ビーム停止中はプロトタイプ検出器の動作電圧は 2500 V としており、HV 電流値の推移でおよそ一定の間隔で電流値が 0 µA となっているのはこれが原因である。

図 5.12b に示した電流値の推移を見ると、ビームの停止前後で照射中に流れる電流値のベースラインが 10% 以 上変化しているタイミングがあることが分かる。図 5.13 にビーム電流の推移を示しているが、HV モジュールに流 れた電流値の変化とビーム電流の変化は対応していないことが分かる。一方で、放電やベータ線の性能評価などを 行ったタイミングで電流値のベースラインが変化している。放電が起きた際は検出器内部の清掃を行う必要がある ため、DLC-RPC のギャップ間隔などの検出器内部の状況が大きく変化する。ベータ線の性能評価などを行う場合、 検出器を中性子照射時の設置から動かす必要があり、その際に検出器内部の状況や設置状況に変化が生じる可能性 がある。そのため、ビーム停止前後のベースラインの大きな変動は電流値変化は検出器のアラインメントやチェン バー内部状況の変化によるものであると考えられる。

図 5.12c より高速中性子照射劣化試験での単位面積当たりの総照射量は約 162 mC/cm<sup>2</sup> となった。この照射量は、5.1.2 節で算出した MEG II 実験で想定される照射量よりも 3 桁低い照射量となった。



(b) 中性子照射中に HV に流れた電流値。緑矢印はベータ線を用いた性能評価を行ったタイミング。青矢印は放電によってチェンバー内の清掃を行ったタイミング。黄矢印はチェンバーの設置位置の再調節を行ったタイミング。



(c) 中性子照射による積算電荷量の推移



図 5.13: 中性子照射中のビーム電流

### ベータ線を用いたプロトタイプ検出器の性能評価

高速中性子照射期間にベータ線を用いたプロトタイプ検出器の性能評価を6回行った。図 5.14 に、動作電圧が2750 Vのときのベータ線に対する波高分布を示す。結果から、1-2回目の測定(図 5.14 中の黒線(1回目)と灰線(2回目))は他の測定と波高分布の形状にズレが見られるが、これは図 5.2b に示した信号読み出し電極の設置位置が1-2回目の測定では固定されていなかったため、信号読み出し線の位置の不定性によって分布のズレが生じていると考えられる。3-6回目の測定(図 5.14 中の赤線(3回目) 黄線(4回目) 緑線(5回目) 青線(6回目))では、波高分布の平均値は 6.4% で一致した。

高速中性子照射劣化試験の結果より、162 mC/cm<sup>2</sup> の照射量では 6.4% の精度の範囲内で検出器性能の悪化は見られなかった。

# 5.4 X線を用いた DLC-RPC 検出器の劣化試験

2022 年 9 月から 10 月にかけて、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)の Platform-C にある X 線発生器を使用 して X 線照射劣化試験を行った。

### 5.4.1 高エネルギー加速器研究機構 Platform-C X 線発生器

X 線発生器はリガク社製 [65] の SA-HFM3 3kW XG を使用した。外観を図 5.15、基本的な仕様を表 5.1 に示 す。X 線発生器は銅ターゲットを使用したもので、出力される X 線は銅ターゲットの特性 X 線である 8 keV のエ ネルギーを持つ。X 線はモノクロメーターを通して単色化された後、直径 1 cm の円筒コリメーターを通って出力 される。

### 5.4.2 X線照射劣化試験セットアップ

図 5.16 に X 線照射劣化試験でのプロトタイプ検出器の設置位置を示す。X 線の照射量を可能な限り多くするため、図 5.16a, 5.16b のように検出器を X 線出力口に可能な限り近づけた。



図 5.14: 動作電圧 2750 V のときのベータ線に対する波高分布



<sup>(</sup>a) X 線発生器の外観

(b) X 線発生器本体

図 5.15: X 線照射劣化試験に使用したリガク社製の SA-HFM3 3kW XG



表 5.1: X 線発生器 SA-HFM3 3kW XG の基本的な仕様

 ターゲット
 銅

 管電圧
 20-60 kV

 管電流
 2-30 mA



(a) チェンバーの設置位置

(b) X 線出力口と検出器の位置関係

図 5.16: X 線照射劣化試験でのプロトタイプ検出器の設置位置

X 線照射劣化試験においても高速中性子照射劣化試験と同様に照射中の電圧値と電流値のモニターを行い、X 線の照射量を評価する。基本的なセットアップは高速中性子照射劣化試験の時と同じであるが、X 線照射劣化試験ではエレクトロニクスへの影響を考慮する必要が無いため、X 線に対するプロトタイプ検出器の信号をトリガー閾値を 50 mV とし、セルフトリガーによって取得した。また、X 線照射劣化試験の前後にベータ線を用いた性能評価を行い、照射前後の波高分布の変化を評価した。この時のセットアップは図 5.8 と同じである。

### 5.4.3 プロトタイプ検出器の X 線に対する応答

X 線照射中に X 線に対する信号を取得し続ける。そのため、初めにプロトタイプ検出器の X 線に対する応答を 調べた。図 5.17 に、X 線発生器の出力を最小(20kV,2mA)にしたときの X 線に対する信号の動作電圧依存性 を示す。動作電圧を高くするにつれて波高が大きい事象が増え、250 mV 付近にピークが発生する。このピーク は、4.2.2 節で述べた空間電荷効果によってガス増幅が飽和することによって発生していると考えられる。図 5.18 に、X 線発生器の管電圧を 50 kV、プロトタイプ検出器の動作電圧を 2800 V にしたときの X 線に対する信号の管 管電流依存性を示す。X 線の出力は管電流に比例する。X 線の出力が増えるにつれて波高分布のピークが小さくな り、波高の小さいイベントが増える。これは、X 線のレートが増えることによって電圧降下が生じ、DLC-RPC の ギャップ間に印加されている実効的な電場が小さくなり、ガスゲインが低くなったことが原因と考えられる。



図 5.17: X 線に対する異なる動作電圧での波高分布。X 線発生器の出力は 20 kV、2 mA。



図 5.18: X 線に対する異なる管電流での波高分布。X 線発生器の出力は 50 kV、プロトタイプ検出器の動作電圧は 2800 V

### 5.4.4 X 線照射劣化試験の結果

### X線照射中のプロトタイプ検出器の応答

図 5.19 に X 線照射中にモニターした電圧値と電流値、また積算電荷量を示す。X 線照射中のプロトタイプ検出 器の動作電圧は 2700 V としており、X 線を出力していないときの待機電圧は 2000 V とした。動作中の電流値は 図 5.19b に示すように 1.18–1.23 µA 程度の電流値が HV モジュールで確認された。中性子照射劣化試験の時とは 異なり、照射期間中に放電やベータ線を用いた性能評価で検出器のセットアップを変更する必要が無かったため、 セットアップの変化による不定性はここでは無視できる。一方で、電流値に非常に多くのスパイクが見られ、放電 が多発している。

図 5.19b に示す電流値の推移を見ると、X 線の照射を開始してから時間と共に電流値が増加していく傾向が見え る。また、電流値のベースラインが突然上昇、もしくは下降するという傾向も確認できる。図 5.20 に示した9月 24 日の電流値の推移について、電流値が突然変化する前後の波高分布を調べる。変化する前後の X 線に対する波 高分布を図 5.21 に示す。ここで、各図中の番号と色は対応している。図 5.21 に示した波高分布の比較から、電流 値がおおよそ等しいとき波高分布もおおよそ一致している。一方で電流値が異なる場合、電流値が高いときの波高 分布の方が波高の高い事象が増えている。5.4.3 節で議論したように、プロトタイプ検出器のガスゲインが高くなる と波高の高いイベントが増えるため、ここでの電流値の変化は検出器のガスゲインが変化することで生じているこ とが分かる。検出器のガスゲインが変化する原因は放電などの衝撃によるガスギャップの変化が考えられる。電流 値の変化は放電と共に生じるため、放電などの衝撃でガスギャップが広がる、もしくは狭くなり、検出器の応答が 変化しているのでは無いかと考える。

図 5.19c より、X 線照射劣化試験での単位面積当たりの総照射量は局所的に 272 mC/cm<sup>2</sup> となった。ここで注意 点として、現時点で X 線発生器のビームプロファイルは不明であるため、コリメーターのサイズから有感領域内の 直径 1 cm の範囲に照射されていると仮定している。また、直径 1 cm の照射範囲を仮定しているため、実際に単位 面積当たり 272 mC/cm<sup>2</sup> の電荷量が測定されたわけではなく、局所的にはそれに相当する電荷量が流れていると評 価している。X 線照射劣化試験の結果からも、中性子照射劣化試験と同様に MEG II 実験で想定される照射量より も 3 桁低い照射量となった。

図 5.22 に、X 線照射劣化試験の前後に取得した動作電圧 2700 V のときのベータ線に対する波高分布を示す。そ れぞれの波高分布の平均値は 5.3% で一致した。そのため、X 線照射劣化試験においても 272 mC/cm<sup>2</sup> 相当の照射 量で検出器性能の悪化は見られなかった。

### 5.5 X線二次電子分光法による電極の表面調査

5.1.1 節で述べたように、従来型の RPC において、放射線の照射により電極上に付着物が生じることが報告され ている。今回行った照射劣化試験においても同様に付着物が生じるかを確認するため、走査型 X 線二次電子分光装 置(X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS)を使用して電極の表面の元素組成を分析した。表面調査は、図 5.24 に示すアルバック・ファイ社製 [66]の PHI X-toolを使用して、高速中性子を照射した電極サンプル、X 線を照射 した電極サンプル、これまでに一度も使用したことのないサンプル計 3 つについて行った。また、高速中性子照射 劣化試験に使用したサンプルについては、アノード側の有感領域と不感領域に位置する 2 箇所について表面の元素 組成を分析した。X 線照射劣化試験に使用したサンプルについては、アノード側の放電跡が多く確認された部分、 カソード側の有感領域と DLC-RPC 電極の外側の領域に位置する 3 箇所について元素組成を分析した。

図 5.25–5.30 に表面分析の結果を示す。また、表 5.2 に各サンプルの表面元素割合を示す。高速中性子を照射し たサンプルと照射していないサンプルの表面にある元素組成を分析した結果を比較すると、照射によってフッ素が 新たに付着していることが分かる。また、有感領域と不感領域を比較すると有感領域の方がフッ素の付着割合が多 い。これは、5.1.1 節で述べたように、ガス増幅の電離によってフッ素が生成されると考えると、よりガス増幅の起 こっている有感領域でフッ素が多く発生する。放電が起きた箇所でもっともフッ素の付着割合が多くなっているの も、同様の原因であると考えられる。また、アノード側とカソード側のフッ素付着割合を比較すると、アノード側 の有感領域では 6–7% 程度になったのに対し、カソード側は 3–5% 程度とアノード側に比べて 30–50% 程少なく なった。アノード側の電極は中性子照射劣化試験と X 線照射劣化試験で別のサンプルを使用しているのに対し、カ ソード側は同じサンプルを使用している。そのため、カソード側への放射線照射量はアノード側より多くなるが、







(c) X 線照射による積算電荷量の推移

図 5.19: X 線照射中の検出器の状態



図 5.20: 9/24 の X 線照射中の電流値の推移。図中の矢印の位置の波高分布を図 5.21 で比較している



図 5.21: HV 電流値が変化する前後の波高分布の比較。図 5.20 中の矢印の色と波高分布の色は対応しており、 図 5.20 中の矢印の位置での波高分布を示している。



図 5.22: X 線照射劣化試験前後に取得した動作電圧 2700 V のときのベータ線に対する波高分布



図 5.23: XPS に使用したアルバック・ファイ 社製の XPS, PHI X-tool



図 5.24: 表面調査を行った DLC-RPC の電極 サンプル。左側の大きなサンプルがアノード 電極。右側の小さな 3 つのサンプルがカソー ド電極

フッ素の付着量はアノード側より少なかった。このことから、フッ素の付着には極性の依存性があると考えられる。 これは、ガスギャップ間でアバランシェはカソードからアノードに向かって成長するため、アノード近辺では電子・ イオン対の生成量が多いためと考えられる。電極表面にフッ素が付着するという結果は、5.1.1節で述べた従来型の RPC で確認された劣化と整合性のある結果となった。

今回の照射試験では、X 線発生器の出力の情報が得られなかったため、電流値の変動が検出器のガスゲインの変化によるものか、X 線発生器の出力の変化によるものか切り分けることができなかった。そのため、5.1.1 節で述べたダークカレントが X 線照射中に存在していたかどうか判別できなかった。一方で、電極表面の元素分析により、 DLC-RPC においても従来型の RPC と同様にフッ素の生成・付着が確認された。このことから、さらなる照射によって電極表面へのフッ素の付着、ガスの汚染によるダークカレントの増加が起こることが予想される。特に後者によるダークカレントの増加を抑えるために、フッ素に汚染されたガスの置換を短期間で十分に行えるようなガスフロー構造の最適化が必要となる。



図 5.25: 一度も使用したことのない電極サンプル



図 5.26: 高速中性子を照射した電極サンプルの有感領域



図 5.27: 高速中性子を照射した電極サンプルの不感領域



図 5.28: X 線を照射した電極サンプルの放電跡の確認された領域



図 5.29: 電極サンプルのカソード側の有感領域



図 5.30: 電極サンプルのカソード側の不感領域

Electrode sample	C1s(%)	N1s(%)	O1s(%)	F1s(%)	Si2p(%)
Non-irradiation	79.03	3.19	17.78	_	_
Neutron irradiation ( active region )	76.06	_	15.22	7.37	1.35
Neutron irradiation (inactive region)	72.82	3.02	19.72	1.53	2.91
X-ray irradiation ( anode discharge point )	67.63	_	15.52	14.51	2.35
Cathode active region	74.82	_	17.22	5.89	3.68
Cathode inactive region	81.20	_	15.72	_	2.37

表 5.2: 各電極サンプルの元素組成割合

# 5.6 まとめ

MEG II 実験では  $\mathcal{O}(100)$ , C/cm<sup>2</sup> の照射量が想定される。そのため、プロトタイプ検出器を用いて高速中性子・X 線照射劣化試験を行い、高速中性子の照射によって約 162 mC/cm<sup>2</sup> の照射量、X 線の照射によって約 272 mC/cm<sup>2</sup> 相当の照射量が得られた。

照射劣化試験において得られた知見は下記の通りである。

- 高速中性子照射劣化試験中のベータ線に対する応答より、6.4%の精度の範囲内で検出器性能の悪化は見られ なかった。
- X 線照射劣化試験中の X 線に対する応答より、5.3%の精度の範囲内で検出器性能の悪化は見られなかった。
- 放射線の照射により、電極上にフッ素が付着することが確認できた。
  - フッ素の付着割合はガス増幅の大きさに依存している。
  - フッ素の付着割合はアノード側の方がカソード側に比べて多い。
  - ガス増幅の行われない領域ではフッ素の付着は見られなかった。

フッ素の付着への対策として、ガスフロー構造を最適化し、フッ素に汚染されたガスの置換を短期間で十分に行え るようにする必要がある。

一方で、今回の照射試験では、X 線発生器の出力の情報が得られなかったため、電流値の変動が検出器のガスゲインの変化によるものか、X 線発生器の出力の変化によるものか切り分けることができなかった。そのため、5.1.1 節で述べたダークカレントが X 線照射中に存在していたかどうか判別できなかった。

フッ素の蓄積から、さらなる照射によってダークカレントが発生する可能性があり、またダークカレントによっ て検出器の動作上どういった問題があるのかは調査する必要があると考える。

# 第6章

# 高レート耐性を実現するための新型電極の 開発

# 6.1 高レート耐性を実現するための電極の製作

4.3.4 節で述べたように、先行研究 [5] でレート耐性を向上させるための新しい構造を持つ DLC-RPC 電極の設 計と製作が行われてきた。

高レート耐性を達成するために必要なのは、

- 表面抵抗率が低いこと
- 高電圧供給同士の距離が短いこと

の2つである。これは電圧降下によって検出器性能が悪化するのを抑制する為に、電圧降下を小さく抑えるために 必要である。ただし、表面抵抗率が低すぎるとDLC-RPCの安定動作ができなくなり、高電圧供給同士の距離が短 過ぎると不感領域が多くなる。設計パラメータは4.3.4節で述べたように[5]において議論されており、表面抵抗 率を10 MΩ/sq.、高電圧供給同士の距離を1 cm とした。

今回、実際に行った電極の製作工程は次の通りであり、概略図を図 6.1 に示す。

- 50 µm 厚のポリイミドフィルムに DLC をスパッタする
- 高電圧供給用の Cr+Cu をスパッタする
- DLC の境界保護とストリップ保護の為に 25 µm 厚のフォトレジストを取り付ける
- スペーサーとしてフォトレジストで形成されるピラーを取り付ける

### 6.2 電極開発における問題点

新型電極を開発する上でピラー形成に関して大きな問題が生じた。4.3.2 節で製作した DLC-RPC 電極には 384 µm の高さのピラーを取り付けた。ここで、ピラーの形成に使用されている Dupont 社製 [51] Pyralux ドライ レジスト素材が製造中止となり、代替素材が必要となった。ソルダーレジストの一種を代替素材として、新型電極 の製作を行ったが、これまで使用されていたレジスト素材と異なり、300 µm 以上の高さのレジストを形成すること が困難であった。図 4.9 に示す露光・現像作業によってピラーを形成するが、高さのあるピラーを形成する際にレ ジストの中程が過剰に現像されることで図 6.2 に示すように傾斜が発生してしまっている。300 µm 以上の高さでは そのほとんどが傾いてしまい、350 µm ではピラーの形成が出来なかった。



(a) ポリイミドフィルムに DLC をスパッタする



(c) 導電体に絶縁カバーを取り付ける



(b) DLC 上に Cr+Cu の導電パターンを形成する



(d) DLC 上に直径 400 µm のピラーを 2.5 mm 間隔で形 成する

図 6.1: 新型電極の製造工程



図 6.2: 過剰な現像により傾いたピラー

### 6.2.1 新しいピラーの設計と製作

6.2 節の問題より、高いピラーを形成することが出来ない。しかし、ピラーの高さは DLC-RPC においてギャッ プ間隔を担保するものであるため、均一に形成される必要がある。また、十分な検出効率を得るためにも高いピ ラーが必要となる。そこで、図 6.3 に示すような設計を行った。4.3.2 節で製作した DLC-RPC 電極は 384 µm の 高さのピラーを電極の片面に形成しているが、新しいレジスト素材では高いピラーを形成できないため、両側の電 極に 200 µm 程度の低いピラーを形成し、それらを正確なアラインメントで向き合わせて積み重ねることで、合計 400 µm 程度の広いギャップを実現する。

実際に製作された新型電極サンプルを図 6.4 に示す。電極両面に直径 400 μm、高さ 160 μm のピラーが 2.5 mm 間隔で形成されている。設計値では 200 μm のピラーを形成する予定だったが、50 μm のレジストを重ねて貼り合 わせる際に押し潰されて設計値よりも低いピラーになっている。図 6.4 で DLC 電極の左側部分から Cr+Cu で形成



図 6.3: 先行研究 [4] でのピラー形成と新しいピラー形成の比較



図 6.4: 新しく製作された電極



図 6.5: 電極を実際に組み上げた写真。赤矢印の位置にピラーが積み重なっている。

した導電体で電圧供給を行う。左側の導電体から DLC 電極上に幅 50 µm の導電ストリップが形成されており、実 際に電気的な接続ができていることを確認した。表面抵抗率はカソード側は  $20 \,\mathrm{M}\Omega/\mathrm{sq.}$ 、アノード側は  $12 \,\mathrm{M}\Omega/\mathrm{sq.}$ と測定された。図 6.4 の DLC 電極部分の上下に穴が形成されているが、これらは検出器のアセンブリを際のネジ 穴とアラインメントの役割を持つ。この穴はレーザー加工によって施され、その精度は 20 µm 以下である。図 6.5 に実際に組み上げた写真を示す。向かい合わせになったピラーが積層されている様子が分かる。実際に作成した電 極を用いて動作試験を行った。



(a) 電極を組み上げたときの検出器内部の状態

(b) 検出器の外観

図 6.6: 検出器の組み立て

# 6.3 新型電極を用いた DLC-RPC 検出器の動作試験

### 6.3.1 検出器の組み立て

製作した新型電極を実際に組み上げた状態を図 6.6 に示す。DLC-RPC 部分の構造は図 4.8 で提案された設計と なっており、5 枚の電極を積み重ねる事で 4 層のギャップを形成している。また、高電圧供給や信号の読み出しは電 極を接着する基板に実装されている。一番外側に位置する電極は、DLC 電極と逆の面に読み出し電極としてアルミ 薄膜を蒸着している。このアルミ薄膜は図 6.7 に示すようにエッチングによってストリップ状に整形しており、ア ノード側とカソード側両方に 3 本ずつ読み出しストリップがある。また、アノード側とカソード側のストリップは 直交しており、有感領域内を 9 つの領域にセグメント化して読み出す。加えて、アノード側の読み出しストリップ とカソード側の読み出しストリップでストリップ幅を変えている。これは、実機の設計において読み出しストリッ プの幅をミューオンビームのレートによって調節しているため、実際にストリップ幅が異なった場合の信号読み出 しへの影響を調査するためである。

### 6.3.2 測定セットアップ

測定セットアップの概略図を図 6.8 に示す。4層の DLC-RPC にベータ線を入射し、その信号を取得した。実際 に得られた波形を図 6.9 に示す。信号の読み出しはアノード側のストリップ両端とカソード側のストリップ両端で、 計4チャンネルで読み出した。また、本検出器は各層ごとに独立に電圧を印加することが可能なため、一層ごとに ベータ線に対する応答を確認した。

### 6.3.3 新型電極の動作上の問題点

6.2.1 節で新しく作成した電極では問題が多くあり、安定動作が困難であった。

図 6.10 に示すように、読み出し電極の読み出し位置を変更したときの波高分布を図 6.11 に示す。波高分布が場所によって異なることからギャップが不均一であることが分かる。また、④については信号を確認できなかった。 これは、検出器を動作させる際にチェンバーのガス系統を大気圧に対して正圧で動作させており、DLC-RPC の電極は機械的強度が弱いことから、ガスフローの圧力によって電極が内側から押されて膨らむことでギャップ間隔が



(a) アノード側の読み出し電極

(b) カソード側の読み出し電極

図 6.7: 読み出し電極の構造。DLC-RPC ガスギャップの外側で読み出す。アノード側とカソード側でストリップ幅 が異なる。



図 6.8: 測定セットアップの概略図

広くなっていることが原因として考えられる。実際に、チェンバーのガス系統を大気圧に対して負圧で動作させる ことで解決する。

一方で、負圧で動作させることにより次に述べるような動作上の問題点が発覚した。

### 電極の平坦性の問題

6.2.1 節で述べたように、新しいレジスト素材を用いて高いピラーを形成するのが困難であった。そのため、今回 製作された電極においても、ピラーの高さの不均一性やピラーの傾きが生じていた。図 6.12 にレーザー顕微鏡で測 定したピラーの形状を示す。結果同一サンプル内で平均 20 µm 程度のばらつきがあると考えられる。ギャップが不 均一であると、ギャップ間隔の狭い領域で印加電圧が制限されてしまう。

### 表面抵抗率の低さ

今回製作した DLC 電極の表面抵抗率は 10–20 MΩ/sq. である。過去の研究から、表面抵抗率が 1 MΩ/sq. 程度の 低さであると、放電によって安定動作ができなくなり、20–30 MΩ/sq. であれば安定に動作出来ることが確認されて いる。10–20 MΩ/sq. での動作確認は行われていなかったが、電圧降下を抑制するために表面抵抗率を低い設定値 とした。その結果、ガスギャップ中の不純物による小さな放電が電極の抵抗値によってクエンチできず、安定動作 ができなかったと考えられる。



図 6.9: DLC-RPC で読み出されたベータ線の信号のイベントディスプレイ



図 6.10: 読み出し位置の変更

### 導電ストリップ上の絶縁カバーの設計パラメータ

図 6.13 にストリップ位置での放電を示す。導電ストリップが剥き出しになっている場合、放電が起こりやすくな るため、絶縁カバーによって保護するような構造になっているが、図 6.14 に示すように、絶縁カバー近辺は電場が 強くなっており、加えて、絶縁カバー近辺で起こったガス増幅は導電体である高電圧供給ストリップまでの距離が 短く、放電の電流が抵抗体によってクエンチしきれないと予想される。実際のベータ線を用いた測定においても、 ベータ線の照射位置を導電ストリップ近くにすると放電する、といった現象が確認されている。

また、放電が起こることによって、絶縁カバーが取り除かれたり、同時に導電ストリップも剥がれることがあっ



(c) ③における波高分布

図 6.11: 図 6.10 のそれぞれの位置における波高分布



図 6.12: レーザー顕微鏡で測定したピラーの形状



図 6.13: ストリップ位置での放電。写真を横切るように走っている薄い黄色の線が導電ストリップ上の絶縁カバー。 絶縁カバーの中に見える細い線が導電ストリップ。



図 6.14: 絶縁カバー上の電場構造。赤枠で囲んだ部分に絶縁カバーがある。

たため、絶縁カバーの厚みや幅といった設計パラメータを最適化する必要がある。

### 6.3.4 ベータ線を用いた性能評価

1つの層のみを動作させたときの、ベータ線に対する異なる動作電圧での波高分布を図 6.15 に示す。またこのと きの検出効率を図 6.16 に示す。先行研究 [4,5] で確認された応答と同じように、印加電圧を大きくすることで波高 分布にプラトーな領域が生じ、検出効率が上がる傾向が得られた。2500 V まで印加することで 46% の検出効率が 得られ、式 4.2 より十分な検出効率が得られていると考えられる。



図 6.15: 新型電極のベータ線に対する異なる動作電圧における波高分布。1層のみを動作させた場合



図 6.16: 新型電極のベータ線に対する検出効率の電圧依存性。1層のみを動作させた場合



図 6.17: 各層の動作状況。十分な動作が確認されたのは L2 のみであった。

# 6.4 まとめ

先行研究 [5] で設計・製造が行われた新型電極の動作試験を行った。新しいレジスト素材では高いピラーを形成 することが困難であったため、低いピラー同士を向かい合わせに配置するという新しい設計を行った。しかし、形 成されたピラーは非常に不均一で、平均 20 µm 程度のばらつきがあり、ギャップ間隔の狭い位置で印加電圧が制 限されてしまった。また、安定動作が行えなかった原因として、表面抵抗率の低さや、導電体である高電圧供給ス トリップを保護している絶縁カバーによって強められた電場によって放電のクエンチが出来なかったことが考えら れる。

上記のような問題点がある中で、最も良い状況では1層のみの動作で46%の検出効率を達成した。そのため、問題点を全て改善し、全ての層で同等の動作が実現できれば、上流側RDCへの要求性能を満たすことが可能である。 今後は、ピラーの不均一性を改善するために新しいレジスト素材の調査を行ったり、表面抵抗率や絶縁カバーな どの設計パラメータを最適化したりすることによって、検出器の安定動作を目指す。

# 第7章

# 結論

本章では、本稿の結論と今後の展望を述べる。

# 7.1 結論

本研究では MEG II 実験における背景事象を削減するために、超低物質量かつ高レート耐性を有する DLC-RPC の開発を行っている。MEG II 実験の偶発的背景事象と成り得るミューオンの輻射崩壊由来の背景ガンマ線を同定 するために、同時に生成される 1–5 MeV の陽電子を検出する。この検出器は、大強度かつ低運動量のミューオン ビームが通過する中で背景事象から来る陽電子を検出する必要があるため、下記の6つの要請が課せられている。

- 1). 放射長 X<sub>0</sub> の 0.1% 以下の物質量
- 2).  $10^8 \mu^+/s$  (中心で 4 MHz/cm<sup>2</sup>) のミューオンビームへのレート耐性
- 3). 大強度ミューオンビーム環境下で 30週間以上の運転を継続できる放射線耐性
- 4). 90% 以上の陽電子検出効率
- 5). 1 ns 以下の時間分解能
- 6). 直径 20 cm の検出器サイズ

先行研究 [4, 5] においてこれらの要請のうち、(1),(4),(5) について達成可能であることが示され、(2),(6) は電極構造の最適化によって達成が見込まれていた。本研究ではこれまで調査されていなかった(3) 放射線耐性の調査と (2) を達成するために先行研究 [5] で設計・製造された新型電極の開発を行った。(第4章)

高速中性子とX線を用いた照射劣化試験を行い、プロトタイプ検出器の放射線耐性を評価した。高速中性子の照 射により162 mC/cm<sup>2</sup> の照射量、X線の照射によって272 mC/cm<sup>2</sup> に相当する照射量が得られた。この段階の照射 量において、5.3%の精度の範囲内で検出器性能の悪化は見られなかった。一方で、電極表面の元素分析により、電 極上へのフッ素の蓄積が確認された。フッ素による影響は現段階で確認されていないが、さらなる照射によりダー クカレントが生じる可能性があるため、ガスフロー構造の最適化にすることでフッ素によって汚染されたガスの置 換を素早く行えるような構造を開発する必要がある。また、今回の照射試験で使用した電極と新型電極では高電圧 供給の構造が異なるため、新型電極において劣化が生じないかどうか調査する必要がある。(第5章)

プロトタイプ検出器のレート耐性を要求の4MHz/cm<sup>2</sup>まで向上させつつ、検出器の大型化を図るため、先行研 究 [5] で高抵抗電極の設計と製作が行われた。DLC-RPC において、ギャップ間隔を維持するためのスペーサーに フォトレジストを使用しているが、過去の製造で使用されていたレジスト素材が製造中止となっていた。代替の素 材としてソルダーレジストを使用したものの、高いスペーサーの形成が困難であったため、ピラー形成の構造を変 更した。製造された新型電極を用いた性能評価において、1層のみの動作で46%の検出効率が得られ、十分な性能 を発揮できると予想される。しかし、他の層においては放電により安定な動作が出来なかった。放電の原因として 考えられるのは下記の3点である。

- ピラーの高さのばらつきによって生じる電極の非平坦性
- 表面抵抗率が低いことにより、放電による大電流が抑制できない
- 導電ストリップを保護している絶縁カバーによる電場の歪み

1層のみでの試験において十分な検出効率が得られていたことから、今回確認された問題点を解決し安定動作が 可能になれば、上流側 RDC に課せられているレート耐性の要求も十分に達成可能であると見込まれる。(第6章)

### 7.2 今後の展望

#### 放射線耐性の研究

第5章で議論した放射線耐性試験では、先行研究[4]で製作されたプロトタイプ検出器を用いて、MEG II 実験 で想定される放射線照射量の3桁低い照射量までの劣化の影響が確かめられた。一方で、プロトタイプ検出器とは 異なる高抵抗電極構造を持つ電極において同様の影響が見られるか、さらなる照射量において新たな劣化の影響が 生じるかは現時点で不明である。そこで、新型電極の安定動作と基本的な性能評価が出来次第、放射線照射施設を 使用して長期照射を行い、劣化の影響や長期動作安定性を評価する予定である。

#### 高レート耐性を実現するための新型電極の開発

第6章で議論したレート耐性を向上させるための高抵抗電極の開発について、安定動作に向けた電極構造パラ メータの改良を行い、新型電極の製作と動作試験を完了させる。新型電極での安定な動作が確認できたら、この電 極を用いてレート耐性の評価を行う。6.3.4節で述べたように、1層での最も良い状況での結果から、全ての層の全 ての点で安定に動作できれば、上流側 RDC に対するレート耐性の要請は達成できる見込みである。

上記開発を今後引き続き行い、2024年物理ランでの MEG II 実験への検出器導入を目指す。

# 謝辞

はじめに、本研究に取り組む機会を与えて頂いた指導教員の越智敦彦准教授に深く感謝申し上げます。また、外部からの大学院進学にも関わらず私を暖かく迎え入れてくださった神戸大学粒子物理学研究室の皆様に深く感謝致します。博士前期課程の2年間は非常に多くの学びがあり、充実した時間を過ごすことが出来ました。

指導教員である越智敦彦准教授には、ガス検出器について基礎から親身にお教え頂きました。私がμ-PICの開 発から、MEG II 実験 DLC-RPC の研究に鞍替えしたいと我儘を申し上げた際も、快くお受けいただき誠に有難う ございました。研究においては、やはりガス検出器の専門家である越智先生の豊富な知識に畏怖と尊敬を覚え、私 も越智先生のようなガス検出器の専門家になりたいと、思ったり思わなかったりしています。また、私が特に意味 もなく越智 先生の居室を訪れたとしても邪険に扱わず、雑談に興じて頂き有難うございます。きっと博士前期課程 の2年間の内、半分程度は越智さんと会話をしていた時間だったのではないかと思ったり思わなかったりしていま す。授業の準備や採点、書類作業を早めに済ませる習慣を身に着けた方が良いですよ。あと、会議や授業がある前 日まで出張を予定しているのも避けた方が良いと思います。いつもギリギリを攻めたスケジューリングだと感じて います。教員向けにしか送られていない、RA 事前申請の連絡をなぜ共有して頂けなかったのですか?\*<sup>1</sup>私が博士 後期課程に進学する際には心機一転、余裕のある行動を心掛けて頂ければと思います。

研究室のスタッフの方々にも大変お世話になりました。藏重久弥 教授には研究室ミーティング中のコロキウムや アナログ回路ゼミでご指導頂き、知らないことは何も無いのではないかと思われる幅広い知識にいつも圧倒されて おりました。某大学の共同研究者の方から「藏重先生が高橋君のことを『頑張ってる』って言ってた」というお話 をお聞きし、歓喜に震えるとともに、より一層精進しなければならないと身の引き締まる思いでした。これからも 研究に励んで行きたいと思います。竹内康雄教授は1年の時の授業を担当して頂いたり、TAの業務でご一緒させ て頂く機会がございました。授業はオンラインでございましたが、非常に分かりやすい説明で物理への理解が深ま りました。また、TA の業務の際には、まだ神戸大に来たばかりで慣れていなかった私ではございますが、事前に 実験装置などについて詳しくご指導して頂き、誠に有難うございました。山﨑祐司 教授にはコロキウムの際などに ご質問・ご指摘を頂き、私がどういったところが理解できていないのか気付かされることが多くありました。TA の業務においてもお世話になりました。また山﨑先生が授業で使用されている計算機の管理を私が行っております が、度々、ネットワークなどの問題が発生しており申し訳ありません。身内賢太朗准教授には学会や発表の際にご 質問を頂くことがあり、発表に対する自身の理解を見つめ直すきっかけをよく与えてくださった気がします。他の 実験グループにも関わらず、よくお食事にお誘いいただき有難うございました。前田順平講師とは最近(2023年2) 月現在)研究室で雑談をさせていただく機会が増えたように感じます。ATLAS グループの学生たちの面倒見が良 く、少し羨ましく思います。RA 申請に関してご連絡を共有して頂き有難うございました。鈴木州 助教とはあまり 接点を持つことがございませんでしたが、作業の為に大学に宿泊した際にすれ違うことがあり、夜中に大学に一人 でいるという寂寥感が薄れ、勝手ながら助けられておりました。また、私の父が鈴木助教と過去に同僚であったと いう話をお聞きし、意外なところに縁があるのだなぁ、と思いました。父とは似てもにつかない息子ですが、博士

<sup>\*&</sup>lt;sup>1</sup> 後述するように、前田順平 講師から RA 申請に関する連絡の話を入手し、藏重久弥 教授と相談することで越智 准教授に催促し、締切後 にギリギリ事前申請を滑り込ますことは出来た。

後期課程に進学した際にはご迷惑でなければぜひ積極的に相互作用を行っていければと考えます。東野聡学術研究 員には、実験の際に備品や装置をよく貸して頂きました。SF6 をはじめとして、真空配管設備など、今思い返せば 私の研究の大部分は東野さんやダークマターグループからお借りしたもので成り立っており、もしお借りできてい なかったら、私は本研究を行うことができなかったと思います。本当に有難うございました。

秘書の吉田和美様、岡崎ちはる様、出張や物品の購入などが重なってしまう時期があり、お手数をお掛けしてし まいました。海外出張の手続きについては大変お世話になりました。有難うございました。どうぞ来年度からも宜 しくお願い申し上げます。

研究活動を行うにあたって他大学、他研究所の方々にもお世話になりました。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 坂下健准教授には測定器開発センター Platform-CのX線発生器利用を利用するにあたり、準備にご尽力 いただきました。KEK 西口創准教授には KEK での試験を行う際、突然のお願いだったにもかかわらず、KEK で のチェッキングソースの貸出し手続きを行って頂きました。KEK 外川学准教授、板橋浩介研究員には KEK での 試験の際にクリーンルームをお借りしました。突然のお願いだったにもかかわらず、快くご対応頂きまして誠に有 難うございました。

東京大学の共同研究者の方々には非常にお世話になりました。大谷航准教授には学会や研究会の発表練習などで 多く助言を頂きました。神戸大学に特別講義にお越し頂いた際には、講義や談話会に本当は出席したかったのです が、運悪く私が PSI へ出張中だったため参加できず非常に悔しい思いでいっぱいです。それどころか、神戸大の MEG II 関係者(越智准教授、高橋)が全員出張で不在だったのは申し訳ありませんでした。岩本敏幸助教には MEG II コラボレーション参加のための手続きをしていただいたり、PSI への渡航のサポート等、大変お世話にな りました。内山雄祐特任助教には発表練習の際に鋭いご指摘を頂きました。来年度からは神戸大学に着任されると いうことで、私は MEG II 物理解析に知識があまりにも乏しいので非常にお世話になるかと思われますが、何卒よ ろしくお願い申し上げます。大矢淳史氏には DLC-RPC の開発を進めるにあたり助言を求めた際、お忙しいにも関 わらずご回答下さいました。また、ミーティング中には豊富な知識量に驚かされることも多々ありました。若干発 言が過激な部分があるのも面白いと思います。山本健介 氏は私が最もお世話になりました。何もかも至らなかった 私ですが、ミーティングや発表練習の際にたくさんの助言やご指摘を頂き、ほんの少しは成長できたかと思います。 山本 氏の積極的に質問を行う姿勢は私も見習っていきたいです。また、PSI での滞在中、休みの日に部屋にずっと 引き籠ろうとしていた私を引きずり出して、クリスマスマーケットに誘っていただき有難うございます。山本 氏と 京都で飲んだ"名物ばくだん"\*2の味は忘れません。山本 氏は毎日お酒を摂取している雰囲気があるため、体調にお 気を付け下さい。李維遠 氏には共同で研究に取り組んで下さっています。PSI でお会いしたときに筋トレ趣味で意 気投合し、PSI にあるジムで合同トレーニングを数回行ったものの、以降研究が忙しすぎて筋トレの"き"の字も出 なくなりましたね。これからも研究と筋トレを一緒に頑張っていけたら嬉しいです。

その他研究室の皆様にも大変お世話になりました。同期の金崎奎氏、中村竜也氏、中山郁香氏、丸元星弥氏、山 下翼氏。皆様々な研究を行っていたため、みんなの研究の話を聞くだけで良い刺激になりました。また、外部から 来て客観的に見て喧しい人種だとは思いますが、邪険にせず付き合って頂き有難うございました。金崎氏は、研究 でもなんでも卒なくこなしてしまう人だと感じており、いつも尊敬しています。修士二年でダークマター部屋に居 を構えてからは会話の頻度が減ってしまいましたが、帰宅のタイミングが一致したときは一緒に帰ってくれて有難 うございました。就活や研究等であった面白い話を帰宅途中の電車の中で聴くのが個人的には良い気分転換となり ました。中村氏は、私が修士二年の間、最もお世話になったといっても過言では無いと思う同期の一人です。修士 一年の時は席が隣で、研究や授業のことなどを相談させて頂きました。修士二年に上がってからは席が離れてしま いましたが、気分転換で雑談したり一緒にコンビニ行ってくれて有難うございました。中山氏は、いつも東野学術

<sup>\*&</sup>lt;sup>2</sup> JR 京都駅から徒歩3分にある、"京の大衆酒場 辰五郎"で飲んだ京都下町のカクテル"ばくだん"。赤ワインを焼酎とラムネで割った甘く て飲みやすいお酒で味の割に度数が高い。某ネットショップで税込1,498円。

研究員と研究しており、いつも忙しそうで大変だなぁ、と感じておりました。頻繁に会話を行ったというわけでは ないと思われますが、時々雑談をしたりつまらない話をしにいった際に話に乗ってくれて有難うございました。丸 元氏は、いつも前田さんと大変そうにしていた印象があります。色々話をした気がするのですが、修論執筆期間中 の大変そうな状況が印象深すぎて他のことは特に覚えていないです。山下氏は、同じ MPGD グループの一員とし て、μ-PIC 開発に取り組んでいました。同じグループではあったものの、あまり積極的に相互作用が行われていな かった気もしますが、一人でも頑張って研究を行い、CERN でちゃんと面白いデータを取って帰ってきたのは本当 にすごいと思います。同期の皆様、就職しても頑張ってください。大学で何か面白いことがあったら都度共有しま す。修士1年の大藤瑞乃氏、鐘海文氏、高木優祐氏、田路航也氏、濱田悠斗氏、森本晴己氏、山下智愛氏。頻繁 にちょっかいを出しに行ってしまい申し訳ありませんでした。しかし、なんだかんだ相手をしてくれるので大好き です。私は残念ながら卒業でなく博士後期課程に進学となるので、あと1年我慢して下さい。来年度からはもう少 し先輩らしくしたいと思います。学部4年生の泉尾翼氏、井上陸氏、片山舞氏、近藤達彦氏、中島大賀氏、生井 凌太 氏、西将汰 氏、樋口流雲 氏、水引龍吾 氏、光枝慈喜 氏、村田優衣 氏。未だに顔と名前が一致していない方が いらっしゃるのをお詫び申し上げます。先輩らしいことは何も出来ていないですが、極稀に頼ってくれる人がいる ことをうれしく思います。神戸大から出て行かれる方もいらっしゃるかと思われますが、もし進学されるようでし たらどうぞ引き続き宜しくお願い申し上げます。大学院研究生の馮敬晨 氏、張力 氏とは研究とはあまり関係ない雑 談をしています。最初はお互いに距離感を測り兼ねていたものの、同じソーシャルゲーム趣味を持っていたことを 知ったり、院生室でしょうもない遊びをしたりした影響か、最近話しかけてくれる機会が0から1程度に増えた気 がして嬉しいです(最大値100)。今後も積極的に相互作用していきましょう。

長くなりましたが最後に、研究の道へ進む私を嫌な顔一つせず支えてくださった家族に最大限の感謝を捧げます。 高橋 真斗
## 引用文献

- Fukuda, Y. et al., "Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos", *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998), 1562–1567, DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.1562.
- [2] Ahmad, Q. R. et al., "Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory", *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002), 011301, DOI: 10.1103/PhysRevLett. 89.011301.
- [3] Baldini, B.-Y. B., A.M., "Search for the lepton flavour violating decay  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  with the full dataset of the MEG experiment", *The European Physical Journal C* **76** (2016), 434–434, DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4271-x.
- [4] 大矢淳史,「MEG II 実験探索感度のさらなる向上を目指した超低物質量 RPC 検出器の開発」(2019).
- [5] 山本健介、「MEG II 実験背景事象削減に向けた超低物質量・高レート耐性 RPC の開発」(2021).
- [6] Quantum Diaries, "The Standard Model: a beautiful but flawed theory", https://www.quantumdiaries.org/2014/03/14/the-standard-model-a-beautifulbut-flawed-theory/.
- [7] Zyla, P. A. et al., "Review of Particle Physics", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2020** (2020), DOI: 10.1093/ptep/ptaa104, 083C01.
- [8] Crittenden, R. R. et al., "Radiative Decay Modes of the Muon", *Phys. Rev.* **121** (1961), 1823–1832, DOI: 10.1103/PhysRev.121.1823.
- [9] Bertl, W. et al., "Search for the decay  $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ ", Nuclear Physics B 260 (1985), 1-31, DOI: https://doi.org/10.1016/0550-3213(85)90308-6.
- [10] Bilenky, S. et al., "Lepton mixing,  $\mu \rightarrow e\gamma$  decay and neutrino oscillations", *Physics Letters B* **67** (1977), 309-312, DOI: https://doi.org/10.1016/0370-2693(77)90379-3.
- [11] Kuno, Y. and Okada, Y., "Muon decay and physics beyond the standard model", *Rev. Mod. Phys.* 73 (2001), 151–202, DOI: 10.1103/RevModPhys.73.151.
- [12] Georgi, H. and Glashow, S. L., "Unity of All Elementary-Particle Forces", *Phys. Rev. Lett.* 32 (1974), 438–441, DOI: 10.1103/PhysRevLett.32.438.
- [13] Yanagida, T., "Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos", *Progress of Theoretical Physics* 64 (1980), 1103-1105, DOI: 10.1143/PTP.64.1103.
- [14] Gell-Mann, M. et al., "Complex Spinors and Unified Theories", Conf. Proc. C 790927 (1979), 315–321.
- [15] Barbieri, R. and Hall, L., "Signals for supersymmetric unification", *Physics Letters B* 338 (1994), 212-218, DOI: https://doi.org/10.1016/0370-2693(94)91368-4.
- [16] Barbieri, R. et al., "Violations of lepton flavour and CP in supersymmetric unified theories", Nuclear Physics B 445 (1995), 219-251, DOI: https://doi.org/10.1016/0550-3213(95)00208-A.
- [17] Ciafaloni, P. et al., "Lepton flavour violations in SO(10) with large tan  $\beta$ ", Nuclear Physics B 458 (1996),

3-22, DOI: https://doi.org/10.1016/0550-3213(95)00552-8.

- [18] Hisano, J. et al., "Exact event rates of lepton flavor violating processes in supersymmetric SU(5) model", *Physics Letters B* **397** (1997), 357, DOI: 10.1016/S0370-2693(97)00244-X.
- [19] Hisano, J. et al., "Lepton-flavor violation in the supersymmetric standard model with seesaw-induced neutrino masses", *Physics Letters B* 357 (1995), 579-587, DOI: 10.1016/0370-2693(95)00954-J.
- [20] Hisano, J. et al., "Lepton-flavor violation via right-handed neutrino Yukawa couplings in the supersymmetric standard model", *Phys. Rev. D* 53 (1996), 2442–2459, DOI: 10.1103/PhysRevD.53.2442.
- [21] Hisano, J. and Nomura, D., "Solar and atmospheric neutrino oscillations and lepton flavor violation in supersymmetric models with right-handed neutrinos", *Phys. Rev. D* 59 (1999), 116005, DOI: 10.1103/ PhysRevD.59.116005.
- [22] Casas, J. and Ibarra, A., "Oscillating neutrinos and  $\mu \rightarrow e, \gamma$ ", Nuclear Physics B **618** (2001), 171-204, DOI: https://doi.org/10.1016/S0550-3213(01)00475-8.
- [23] Bellgardt, U. et al., "Search for the decay  $\mu \to e^+e^+e^-$ ", Nuclear Physics B **299** (1988), 1-6, DOI: https://doi.org/10.1016/0550-3213(88)90462-2.
- [24] Bolton, R. D. et al., "Search for rare muon decays with the Crystal Box detector", *Phys. Rev. D* 38 (1988), 2077–2101, DOI: 10.1103/PhysRevD.38.2077.
- [25] Grosnick, D. et al., "Search for the rare decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma \gamma$ ", *Phys. Rev. Lett.* **57** (1986), 3241–3244, DOI: 10.1103/PhysRevLett.57.3241.
- [26] Freedman, S. J. et al., "Limits on neutrino oscillations from  $\overline{\nu}_e$  appearance", *Phys. Rev. D* 47 (1993), 811–829, DOI: 10.1103/PhysRevD.47.811.
- [27] The SINDRUM II Collaboration, "A search for μ e conversion in muonic gold", Eur. Phys. J. C, 337-346, DOI: https://doi.org/10.1140/epjc/s2006-02582-x.
- [28] Willmann, L. et al., "New Bounds from a Search for Muonium to Antimuonium Conversion", *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999), 49–52, DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.49.
- [29] Baldini, A. et al., "The design of the MEG II experiment", *The European Physical Journal C* 78 (2018), 1–60, DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-5845-6.
- [30] Paul Scherrer Institut (PSI), <sup>r</sup> The PSI proton accelerator, https://www.psi.ch/en.
- [31] Baldini, B.-Y. B. E. e. a., A.M., "Muon polarization in the MEG experiment: predictions and measurements", *The European Physical Journal C* **76** (2016) , DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4047-3.
- [32] Chiappini, M., "Commissionig and preliminary performance of the MEG II drift chamber", in VCI2022 (2022).
- [33] Onda, R., "Suppression of  $\gamma$ -ray backgrounds for he highest sensitivity of  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  search in MEG II experiment", Ph.D. dissertation, The University of Tokyo (2021).
- [34] Baldini, A. M. et al., "The Search for  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  with  $10^{14}$  Sensitivity: The Upgrade of the MEG Experiment", *Symmetry* **13** (2021), DOI: 10.3390/sym13091591.
- [35] Ritt, S. et al., "Application of the DRS chip for fast waveform digitizing", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 623 (2010) , 486-488, DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.045, 1st International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics.
- [36] 小川圭将、「炭素スパッタを用いた積層型 Fast Timing RPC の開発」(2017).
- [37] Iwai, R., "Development and commissioning of MEG II Radiative Decay Counter", (2017).

- [38] Biagi, S., "Imonte, program to compute gas properties".
- [39] Riegler, W. et al., "Detector physics and simulation of resistive plate chambers", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 500 (2003a), 144-162, DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00337-1, NIMA Vol 500.
- [40] "Detector Physics of Resistive Plate Chambers", Ph.D. dissertation, Frankfurt U. (2003b) .
- [41] Raether, H., "Electron avalanches and breakdown in gases", (1964).
- [42] (Myon, S. and Peskov, V., Innovative Applications and Developments of Micro-Pattern Gaseous Detectors (2014), DOI: 10.4018/978-1-4666-6014-4.
- [43] Lippmann, C. and Riegler, W., "Space charge effects in Resistive Plate Chambers", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 517 (2004), 54-76, DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.08.174.
- [44] Santonico, R. and Cardarelli, R., "Development of resistive plate counters", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 187 (1981), 377-380, DOI: https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90363-3.
- [45] Aielli, G. et al., "Test and performances of the RPC trigger chambers of the ATLAS experiment at LHC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 533 (2004), 193-198, DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.026, Proceedings of the Seventh International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.
- [46] Arnaldi, R. et al., "A low-resistivity RPC for the ALICE dimuon arm", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 451 (2000), 462-473, DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00326-0.
- [47] Bonner, B. et al., "A single Time-of-Flight tray based on multigap resistive plate chambers for the STAR experiment at RHIC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 508 (2003), 181-184, DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01347-0, Proceedings of the Sixth International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.
- [48] Akindinov, A. et al., "Latest results on the performance of the multigap resistive plate chamber used for the ALICE TOF", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 533 (2004), 74-78, DOI: https://doi.org/10.1016/j. nima.2004.07.004, Proceedings of the Seventh International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.
- [49] Liu, Z. et al., "Novel low resistivity glass: MRPC detectors for ultra high rate applications", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 959 (2020), 163483, DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163483.
- [50] PCS Instruments, "The Science Behind Diamond like Coatings (DLCs)",
  - https://pcs-instruments.com/.
- [51] "DuPont", https:\www.dupont.com. [52]「株式会社ビースパッタ」,
- https:\www.be-sputter.co.jp.
- [53]「株式会社レイテック」, https:/www.raytech-inc.co.jp.
- [54] Bartos, D. et al., "Ageing studies of Multi-Strip Multi-Gap Resistive Plate Counters based on low resistivity

glass electrodes in high irradiation dose", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **1024** (2022), 166122, DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166122.

- [55] Aly, R. et al., "Aging study on Resistive Plate Chambers of the CMS Muon Detector for HL-LHC", Journal of Instrumentation 15 (2020), C11002, DOI: 10.1088/1748-0221/15/11/C11002.
- [56] Quaglia, L. et al., "Performance and aging studies for the ALICE muon RPCs", *Journal of Instrumentation* 16 (2021), C04002, DOI: 10.1088/1748-0221/16/04/C04002.
- [57] Phan, N. et al., "The novel properties of SF6 for directional dark matter experiments", *Journal of Instrumentation* **12** (2017), P02012, DOI: 10.1088/1748-0221/12/02/P02012.
- [58] Guida, R., "Gas mixture quality studies for the CMS RPC detectors during LHC Run2", in *RPC2022*, *CERN* (2022).
- [59] Rigoletti, G., "Measurements of fluoride production in Resistive Plate Chambers", in *RPC2022*, *CERN* (2022).
- [60] "Goodfellow Japan", https://www.goodfellow-japan.jp/jp/.
- [61] 神戸大学、「荷電粒子ビーム実験」、 http://www2.kobe-u.ac.jp/~taniikea/particlebeam.pdf.
- [62] Massey, T. N. et al., "Study of the Be(p,n) and Be(d,n) Source Reactions", *Journal of Nuclear Science and Technology* **39** (2002), 677-680, DOI: 10.1080/00223131.2002.10875190.
- [63] A.Baldini, F.-L. G. M. D. A. G., C.Bemporad, "Neutron backgorund measurements in the  $\pi E5$  area.".
- [64] Zuo, Y. et al., "Neutron Yields of Thick Be Target Bombarded with Low Energy Deuterons", *Physics Procedia* 60 (2014), DOI: 10.1016/j.phpro.2014.11.031.
- [65]「株式会社リガク」,

https://japan.rigaku.com/ja.

[66]「アルバック・ファイ株式会社」, https://www.ulvac-phi.com/ja/.