

ミューオン・電子転換過程探索実験 DeeMe で使用する  
MWPC のためのワイヤー間放電試験と  
HV 制御システムの開発

HV discharge tests of MWPC wires and development of  
a HV control system for the MWPC  
used in the DeeMe experiment  
searching for muon-electron conversions

理学研究科

数物系専攻

竹崎 優斗



## 概要

ミューオン・電子転換過程探索実験 DeeMe は、Japan-Proton Accelerator Research Complex (以下 J-PARC) 物質生命科学実験施設 (MLF) のミューオン科学実験施設で計画されており、charged Lepton Flavor Violation (以下 cLFV) 過程である  $\mu$ - $e$  転換過程 ( $\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)$ ) を探索する実験である。cLFV 過程は、標準理論では禁止されているが、超対称性大統一理論等の他の多くの理論では、現在の実験による分岐比の上限値である  $10^{-13}$  の数桁下での存在が期待されている。DeeMe では、J-PARC の円形加速器 RCS からの高純度な大強度パルス陽子ビームを活用することにより、 $2 \times 10^7$  s の測定時間で、現在の実験による分岐比の上限値を上回る  $10^{-14}$  の単一事象感度を実現することを目指している。

DeeMe では、パルス陽子ビームが標的に入射することにより発生する大量の荷電粒子 (プロンプトバースト) の後に、マイクロ秒オーダーで遅延して出てくる単色の電子を探索する。プロンプトバーストによって検出器には一パルス当たり  $2 \times 10^8$  個の荷電粒子が到来し、これが検出器に入射してしまうと飽和を起こしてしまうため、遅延電子の測定が出来なくなる。そのため、プロンプトバーストの影響を抑える検出器の開発が必要である。この要求を叶えるような検出器として、アノードワイヤーとポテンシャルワイヤーを小さい領域に交互に配置した、Micro-cell MWPC が開発された。バースト時にアノード-ポテンシャル間の電圧差を無くし、ゲインを小さく抑える HV Switching 技術も開発され、バーストの影響を減らすことが可能となっている。

本論文では、DeeMe MWPC に関する下記の二つの項目について、研究・開発成果を述べる。

1. Micro-cell MWPC では、高い動作電圧 ( $\sim 1450$  V) と狭いワイヤーピッチ故の放電現象が多発していた。MWPC の安定運転を目指すためには、ワイヤー間放電現象についての理解が必要である。そのために、数種類のワイヤーピッチのサンプルを作成し、放電試験を行った。これにより、HV Switching やビームによる影響がない状態であれば、安定運転するにあたって余裕のある構造であることが判明した。
2. DeeMe では、MWPC に印加する電圧源として、iseg 社製の電源を採用している。iseg 社電源の特徴として、過電流が流れてから Trip までの時間の短さと、PC による詳細なコントロールが可能なが挙げられる。DeeMe 実験で、iseg 社電源を使用した安定的な電圧制御を行うために、Web ベースの HV 制御システムを Python を用いて作成した。また、iseg 社電源の簡単な性能試験も同時に行った。

# 目次

1	序章	10
1.1	標準理論	10
1.2	ミューオン・電子転換過程	13
1.3	$\mu$ - $e$ 転換過程による信号とバックグラウンド	14
2	$\mu$ - $e$ 転換過程探索実験 DeeMe	16
2.1	一般的な $\mu$ - $e$ 転換過程探索実験の手法	16
2.2	J-PARC	17
2.3	DeeMe 実験	18
2.4	RCS からのパルス陽子ビーム	20
2.5	陽子標的兼ミューオン静止標的	21
2.6	大立体角 2 次ビームライン (H ライン)	23
2.7	信号とバックグラウンド	24
2.8	DeeMe 実験における課題	26
3	DeeMe 実験で使用する Micro-cell MWPC とワイヤー間放電試験	27
3.1	MWPC	27
3.2	ガス配合比率	28
3.3	DeeMe 実験における MWPC デザイン	28
3.4	HV Switching	31
3.5	ワイヤーサポート	33
3.6	連続放電現象	35
3.7	放電試験	37
3.8	実験準備	38
3.9	セットアップ	42
3.10	放電試験結果	44
3.11	連続運転	47
3.12	沿面放電試験	47
3.13	放電試験結論	50
3.14	逆 HV Switching	50
3.15	最終版 MWPC	51
4	DeeMe 実験で使用する MWPC のための HV 制御システムの開発	53
4.1	iseg 社製電源 NHS	53
4.2	シリアル通信	55
4.3	iseg SCPI Controller	56
4.4	Raspberry Pi	56
4.5	Python	57
4.6	Tornado	58
4.7	iseg Control Application	59
4.8	trip time 設定	62

4.9	iseg firmware アップデート . . . . .	64
4.10	実験現場でのセットアップ . . . . .	64
4.11	NIM module 化 . . . . .	66
5	結論	68
付録 A	server.py	70
付録 B	form.html	74
付録 C	iseg.py	78

## 図目次

1	標準模型	10
2	レプトン間の遷移	11
3	ニュートリノ振動を考慮したミュオン・電子転換過程のファインマンダイアグラム	11
4	終状態に光子を含む過程のファインマンダイアグラム	13
5	終状態に光子を含まない過程のファインマンダイアグラム	13
6	$\mu$ LFV のエネルギースケール $\Lambda$ とモデルパラメータ $\kappa$ に対する $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊と $\mu$ - $e$ 転換の感度依存性	13
7	DIO 電子スペクトル	15
8	一般的な $\mu$ - $e$ 転換過程探索実験の方法	16
9	Mu2e 実験	17
10	COMET 実験	17
11	J-PARC の全体図	18
12	J-PARC MLF ミュオン実験施設	19
13	DeeMe 実験の概略	19
14	RCS 内のバケツ内の様子	21
15	グラフィット製回転標的	22
16	$\mu^-$ と原子核の波動関数の重なりの違い	22
17	H ラインの全体図	24
18	H ラインのアクセプタンスの運動量依存性	24
19	パルス陽子ビームの時間構造と DeeMe の信号探索時間	25
20	シミュレーションにより期待される運動量スペクトラム	26
21	ガス検出器に印加する電圧と増幅率の関係性	27
22	Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> の比率の違いによるゲインの違い	28
23	磁気スペクトロメータ用電磁石 PACMAN	29
24	Micro-cell MWPC Prototype I	29
25	空間電荷効果の様子	30
26	MWPC 内のワイヤー構造	30
27	Prototype I での出力 (final condition の 1/10)	31
28	Prototype I での出力 (final condition)	31
29	HV Switching	32
30	GARFIELD 計算による等電界強度線図	32
31	GARFIELD 計算による電界プロファイル	33
32	Micro-cell MWPC Prototype II	33
33	ワイヤーサポート	34
34	ワイヤーサポートとワイヤーの図	34
35	沿面加工のイメージ	35
36	パッシェンの法則による、放電電圧と電極の間隔の関係 (Ar)	37
37	アナログ電源	38
38	狭いピッチの実現方法	39

39	実際に張ったワイヤー	39
40	密閉容器	39
41	0.5mm サンプルのワイヤーピッチ	40
42	0.6mm サンプルのワイヤーピッチ	40
43	0.7mm サンプル (1) のワイヤーピッチ	41
44	0.7mm サンプル (2) のワイヤーピッチ	41
45	定規によるキャリブレーションの様子	42
46	ガス配管の仕組み	43
47	ガスシステム	43
48	実際のガス配管	43
49	放電の様子 (放電前)	44
50	放電の様子	44
51	放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =50:50)	46
52	放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (全てのガス配合)	46
53	ワイヤーサポートとワイヤー 拡大図	48
54	ワイヤーサポートでの沿面放電の様子 (放電前)	48
55	ワイヤーサポートでの沿面放電の様子	49
56	新 HV Switching	50
57	final MWPC	51
58	final MWPC 中身	52
59	iseg 社製の電源 (NHS 6230p)	53
60	NHS 6230p の主な仕様	53
61	Inhibit ピンへの接続	54
62	シリアル通信ソフト (cutecom)	55
63	SCPI Controller	56
64	Raspberry Pi B+	57
65	GPIO ピンの配置	57
66	Raspberry Pi B+ の主な仕様	57
67	python 構文の例 (日付取得及び入力値を返すプログラム)	58
68	Web フレームワーク Tornado の構造	59
69	iseg application system	60
70	iseg application system (trip 時)	60
71	データ取得間隔測定	61
72	ログ情報	61
73	trip time 測定セットアップ	62
74	電源を trip させたときに見える波形	62
75	trip time	63
76	trip time 設定に対する測定値の比	63
77	trip time を 300 ms→500 ms へと変更し trip させた時の trip 波形	64
78	図 77 の状態からもう一度 trip させた時の trip 波形	64
79	trip time (firmware アップデート後)	64
80	Artek 社製 HV Switching 回路	65
81	Artek 回路時のセットアップ	65

82	Behlke 社製 HV Switching 回路 . . . . .	66
83	Behlke 回路時のセットアップ . . . . .	66
84	Raspberry Pi を動作させるための NIM モジュール (内部) . . . . .	67
85	Raspberry Pi を動作させるための NIM モジュール (正面) . . . . .	67
86	5 V 定電圧回路 (12 V→5 V) . . . . .	67



## 表目次

1	代表的な荷電レプトン・フレーバー探索実験 . . . . .	12
2	SiC 標的と C 標的での統計量の違い . . . . .	23
3	気体に対する定数 A、B[12] . . . . .	36
4	0.5 mm 間隔でのワイヤー-SUS プレート間での放電電圧と必要電圧 . . . . .	37
5	放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =50:50) . . . . .	44
6	放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =60:40) . . . . .	45
7	放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =70:30) . . . . .	45
8	ワイヤーサポート上での放電電圧 . . . . .	49
9	最終版 MWPC の主な構造 . . . . .	51

# 1 序章

物質の構成と、物理現象の法則を説明するための標準理論が、多くの物理学者の手によって長い年月をかけて作られ、実証されてきた。標準理論、または素粒子物理学においての、近年の大きな話題としては、所謂物質の質量を説明するための粒子である、ヒッグス粒子の発見 (2012 年) が挙げられる。ピーター・ヒッグスによって 1964 年に提唱され、大型ハドロン衝突型加速器 LHC によって存在が実証された。このように、標準理論にはまだ不十分な部分が存在し、物理学者達によって日々研究が行われている。中でも、稀な崩壊だと考えられている過程を探索することは、量子補正による効果により、加速器では「直接」生成できないような大きな質量の新粒子について迫ることが出来るため、重要である。

このような、素粒子物理学において注目されている稀な現象として、荷電レプトン・フレーバー非保存 (cLFV) 過程というものが存在する。これは、標準理論の一部である、荷電レプトン間での転換現象を指す。中でも、ミュオンと電子間の転換現象、ミュオン・電子転換過程が、これまで様々な研究グループによって探索されてきた。

本章では、新物理への鍵となる荷電レプトン・フレーバー非保存過程への導入から、その一つであるミュオン・電子転換過程についての物理について述べる。

## 1.1 標準理論

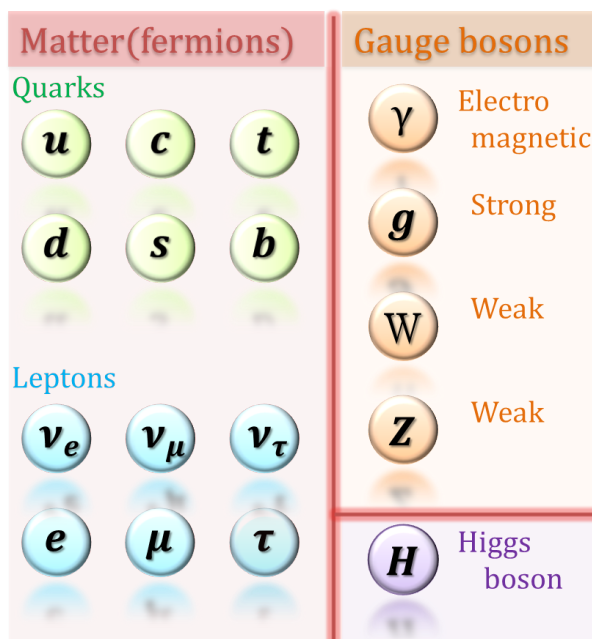


図 1 標準模型

図 1 は標準理論 (標準模型) の構成する要素の概略である。物質を構成するクォークとレプトン、それに加えて力を媒介するゲージ粒子より構成され、素粒子物理学を分かり易く説明するものとして現在広く知られている。標準理論で禁止されている反応として、cLFV (charged Lepton Flavor Violation) と呼ばれるものがある。これは、レプトン数と呼ばれる量子数の保存則を破るような反応である。レプトンは第一世代の電子 ( $e$ )、第二世代のミュオン ( $\mu$ )、第三世代のタウ ( $\tau$ ) の三

種類の荷電レプトンと、それぞれに対になる中性レプトン、 $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  の 3 種類の合計 6 種類、加えてその反粒子たちから成る。このレプトンそれぞれにレプトン数という量子数を付与する。この量子数は、粒子の性質を表すものの一つであり、レプトンに + 1、反レプトンに - 1、非レプトンに 0 をそれぞれ与える。また、これらはレプトンの種類によって 3 つに分けられ、それぞれ電子レプトン数、ミューレプトン数、タウレプトン数と呼ばれる。標準理論では、このレプトン数はそれぞれの世代で保存するとされている。例として、式 (1) 自由空間でのミューオンの崩壊過程である、Michel 崩壊を考えてみる。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1)$$

左辺、右辺それぞれについて、電子レプトン数とミューレプトン数を考えてみると両辺で一致するのは明らかであろう。逆に、反応の前後でレプトン数が保存しないような過程、つまりはレプトン数非保存過程というものがあると、これは「標準理論を越える」ということを意味する。しかし近年、ニュートリノに関しては、振動現象が発見され、レプトン数保存は成立しないことが判明した。また、クォークに関しても、小林・益川理論により、世代を跨いで混合することが知られている。この流れより、荷電レプトンにおいてもレプトン数非保存が起こるのではないかと推測されている。この、荷電レプトンにおけるレプトン数非保存過程のことを、cLFV と呼ぶ。レプトン間の遷移を図 2 に示す。ところで、標準模型でも、ニュートリノ振動を介して cLFV が存在することが理論的にありえる。図 3 に反応のダイアグラムを示した。

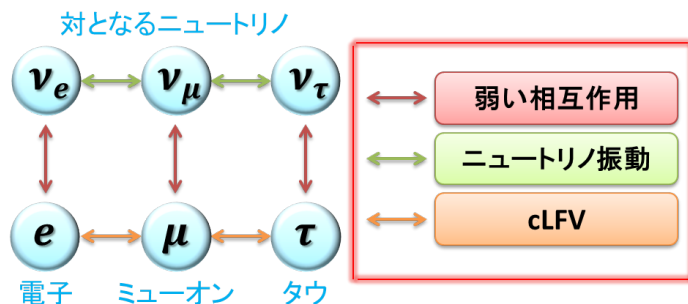


図 2 レプトン間の遷移

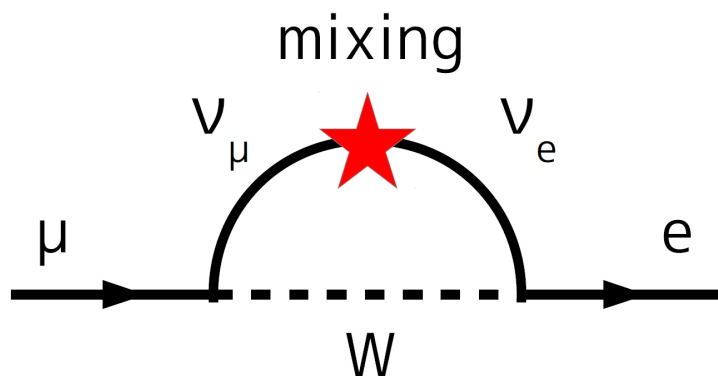


図 3 ニュートリノ振動を考慮したミューオン・電子転換過程のファインマンダイアグラム

このように、仮想的に W ボソンを放出、吸収という過程を考えれば、cLFV は存在するわけであるが、この過程の反応確率は  $\sim 10^{-50}$  程であると予測されている。 $10^{-50}$  となれば、最新の技術を駆使したとしても観測は不可能である。

標準理論では cLFV が禁止されているわけであるが、他の理論でもそうであるかという、その答えは否である。現在の実験による分岐比の上限値は  $\sim 10^{-13}$  程度であるが、例えば、ニュートリノの質量、つまりはニュートリノ振動を説明するために考えられているシーソー機構と、超対称性とを組み合わせた理論では、 $10^{-13} \sim 10^{-15}$  の分岐比で cLFV がある可能性が高いと期待されている。その他、余剰次元、リトルヒッグスなどの多くのモデルで、現在の実験上限値の数桁下で cLFV の可能性が示唆されている。このように、cLFV は、理論的に十分可能であると期待されており、且つ実験結果の解釈が容易なため、新物理探索の方法として優れている。

cLFV 探索は、今まで様々な実験によって行われてきた。表 1 に、代表的な cLFV 探索実験での探索崩壊モード、分岐比の上限値を示した。ミュオンに限らず様々な粒子を利用した cLFV 探索実験が行われている。

崩壊モード	分岐比の上限値	実験名等	文献
$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$	$< 5.7 \times 10^{-13}$	MEG	PRL110 (2013)201801
$\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$	$< 1.0 \times 10^{-12}$	SINDRUM	NPB299 (1988)1
$\mu^- + Au \rightarrow e^- + Au$	$< 7 \times 10^{-13}$	SINDRUM II	EPJC47 (2006)337
$\mu^- + Ti \rightarrow e^- + Ti$	$< 4.3 \times 10^{-12}$	SINDRUM II	PLB317 (1993)631
$\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm\gamma$	$< 4.4 \times 10^{-8}$	BaBar	PRL104 (2010)021802
$Z^0 \rightarrow \mu^\pm\tau^\mp$	$< 1.2 \times 10^{-5}$	DELPHI	ZPC73 (1997)243
$K_L^0 \rightarrow e^\pm\mu^\pm$	$< 4.7 \times 10^{-12}$	BNL E871	PR181 (1998)5734
$D^0 \rightarrow e^\pm\mu^\mp$	$< 8.1 \times 10^{-7}$	BaBar	PRL93 (2004)191801
$B^0 \rightarrow e^\pm\mu^\mp$	$< 6.4 \times 10^{-8}$	CDF	PRL102 (2009)201801

表 1 代表的な荷電レプトン・フレーバー探索実験

代表的なミュオン崩壊による cLFV (以下  $\mu$ LFV と記述する) として、 $\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)$  と  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  を考える。違いとして挙げられるのは、前者は終状態に光子を含まない過程、後者は光子を含む過程である、ということである。 $\mu$ LFV の実効ラグランジアンは、式 (2) で記述できる

$$\mathcal{L} = \frac{m_\mu}{(\kappa + 1)\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma^{\nu\rho} e_L F_{\nu\rho} + \frac{\kappa}{(1 + \kappa)\Lambda^2} \bar{\mu}_L \gamma^\nu e_L \bar{q}_L \gamma_\nu q_L \quad (2)$$

$\Lambda$  はエネルギースケール、 $\kappa$  は、第一項と第二項の比である。第一項は、終状態に光子を含むプロセス (図 4) であり、実光子として外部へ放出されれば  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊に、仮想光子として原子核に結合すれば  $\mu$ - $e$  転換となる。第二項は終状態に光子を含まない 4 点結合相互作用 (図 5) を表し、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊では観測できない。よって、 $\kappa$  は、 $\mu$ LFV を説明するモデルによって異なる値をとりうることになる。このようなモデルによる違いを、図 6 に示す。 $\mu$ LFV によって  $10^3$  TeV ものエネルギースケールの物理を観測可能であることが分かる。また、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊探索と  $\mu$ - $e$  転換探索の両方を行うことにより、 $\mu$ LFV について深く理解していくことが重要である。

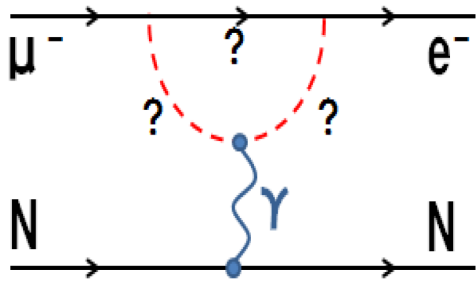


図4 終状態に光子を含む過程のファインマンダイアグラム

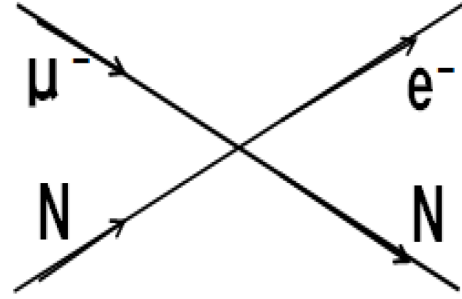


図5 終状態に光子を含まない過程のファインマンダイアグラム

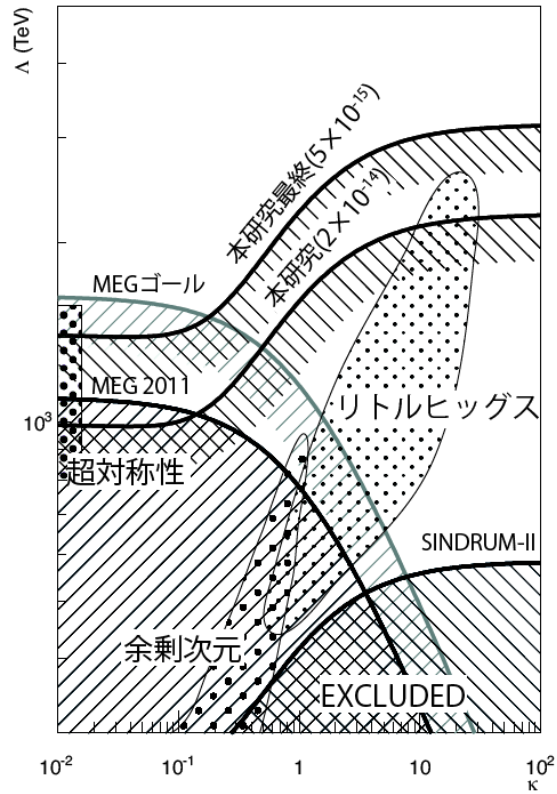


図6  $\mu$ LFV のエネルギースケール  $\Lambda$  とモデルパラメータ  $\kappa$  に対する  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊と  $\mu$ - $e$  転換の感度依存性

## 1.2 ミューオン・電子転換過程

ある物質中で  $\mu^-$  が静止すると、 $\mu^-$  は物質中の原子核のクーロン場に束縛され、ミュオニック原子を形成する。束縛された  $\mu^-$  は、ミュオン捕獲特性 X 線と呼ばれる放射線を出しながら、基底状態である 1s 軌道へと遷移する。ミュオニック原子中の  $\mu^-$  はその後以下の三つの過程を辿る。

$$\text{Decay In Orbit (DIO)} \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3)$$

$$\text{Muon Capture (MC)} \quad \mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1) \quad (4)$$

$$\mu\text{-}e \text{ 転換} \quad \mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z) \quad (5)$$

ここで、 $A$ 、 $Z$  はそれぞれ、ミューオンを束縛している物質の原子量、原子番号を示している。DIO (式 (4)) は、自由空間上でのミューオンの崩壊である Michel 崩壊と同様の反応であり、崩壊定数は  $\alpha_f = 0.452 \times 10^6 /s$  である。電子が放出されるため、バックグラウンド源となる。一方、MC (式 (5)) の崩壊定数は、 $\mu^-$  と原子核の波動関数の重なりに依存する。Fermi&Teller の  $Z$  則より、原子核への捕獲速度は原子核電荷に比例するため、崩壊定数は物質の原子番号に依存する。物質として炭素 (C) を考えると  $\alpha_c = 0.0388 \times 10^6 /s$ 、ケイ素 (Si) を考えると  $\alpha_c = 0.8712 \times 10^6 /s$  である。結果として、ミューオニック原子上でのミューオンの寿命  $\tau$  は、式 (7) から式 (7) のように導かれる。

$$N = N_0 e^{-(\alpha_f + \alpha_c)t} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha_f + \alpha_c} \quad (7)$$

ここで、 $N$  は  $t$  秒後に残っている  $\mu^-$  の数、 $N_0$  は  $t=0$  の時の  $\mu^-$  の数である。これより、自由空間で  $\tau=2.197 \mu s$ 、物質中の場合は C、Si の時それぞれで  $\tau=2.02 \mu s$ 、 $\tau=0.754 \mu s$  となり、物質中の方が (見かけの) 寿命は短くなる。また、ミューオニック原子の持つ  $1 \mu s$  オーダーの寿命は、 $\mu-e$  転換過程探索実験のデザインの元となる。 $\mu-e$  転換過程 (式 (5)) は、MC と同じく原子核との反応であるため、確率は原子核の波動関数との重なりに依存する。そのため、 $\mu-e$  転換過程の分岐比は、MC に対する比として定義されており、表 1 のように様々な結果が得られている。

### 1.3 $\mu-e$ 転換過程による信号とバックグラウンド

$\mu-e$  転換過程により生成される電子は、ミューオニック原子の寿命により「遅延」しており、エネルギー的に「単色」である。 $\mu-e$  転換過程により生成される電子のエネルギー  $E_{\mu e}$  は、以下の式 (9) で表される。

$$E_{\mu e} = m_\mu - E_b - E_{rec} \quad (8)$$

$$(E_{rec} \approx \frac{(m_\mu - E_b)^2}{2m_A}) \quad (9)$$

ここで、 $m_\mu$  はミューオンの質量、 $E_b$  はミューオニック原子の束縛エネルギー、 $E_{rec}$  は原子核の反跳エネルギー、 $M_A$  は原子核の質量である。ただし、 $E_{rec}$  は式 (9) で表され、極めて小さい値をとる。 $E_b$  の値は、ミューオンを束縛する原子核、つまりは標的の種類によって異なる。これを踏まえて計算すると、C 原子標的で  $E_{\mu e} = 105.06 \text{ MeV}$ 、Si 原子標的で  $E_{\mu e} = 104.91 \text{ MeV}$  となる。これに対し、ミューオニック原子内の原子核は、反跳によって運動量保存則を保障してくれるため、DIO により放出される電子のエネルギーは最大  $E_{\mu e}$  まで到達する。図 7 に、Czarnecki らにより、原子核の反跳、及び原子軌道に束縛されたミューオンの相対論的な効果等を考慮して計算された DIO スペクトルを示す。Si、C 共に  $E_{\mu e}$  近傍で急激に減少しており、十分な運動量分解能を持った測定器を用いることによって、 $\mu-e$  転換電子と DIO 電子の区別が可能である。

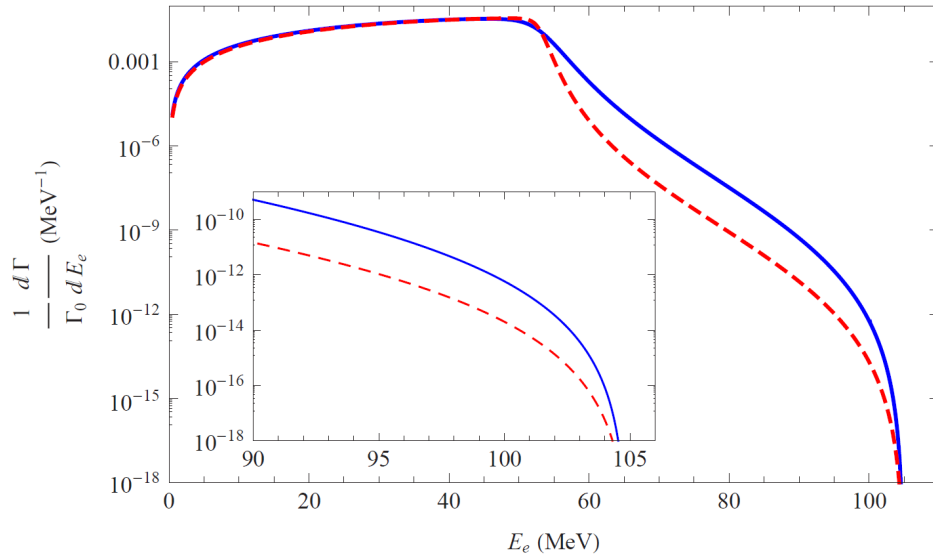


図7 Czarnecki らにより計算された DIO 電子スペクトル。ミュオニック C 原子からのものを赤線、ミュオニック Si 原子からのものを青線で示す。

他のバックグラウンドとしては、即発電子バックグラウンドや宇宙線によるものが考えられる。即発電子とは、陽子ビームが標的に入射した際に発生する大量の荷電粒子（即発 2 次粒子）のうち、シグナルである  $E_{\mu e}$  と同じエネルギーを持った電子のことである。ビームのタイミングに同期して発生するため、次章で説明するようなパルス陽子ビームを使用することにより、シグナルである「遅延電子」と区別することが出来る。ただし、パルス陽子ビームのタイミングとは別に遅延電子が出てくるタイミングで陽子が標的に入射してしまうと、即発電子がバックグラウンドとなり得る。この陽子はアフタープロトン (AP) と呼ばれている。 $\mu$ - $e$  転換過程を精度よく探索するためには、AP が少ない高純度のパルス陽子ビームを使用することが必要となる。

## 2 $\mu$ - $e$ 転換過程探索実験 DeeMe

J-PARC RCS からのパルス陽子ビームを活用したミュオン・電子転換過程探索実験、DeeMe 実験が、大強度陽子加速器施設 J-PARC で計画されている。

ミュオン・電子転換過程探索実験は、COMET や Mu2e 等、大きな研究グループによっても研究が計画されている、稀崩壊現象探索実験である。その中でも DeeMe 実験は、他の実験よりも短い期間で、現在の実験上限値を超えることを目標としている。大阪大学、大阪市立大学、KEK (高エネルギー加速器研究機構) が中心となり、可能な限り早い実験開始を目標として、現在、検出器やデータ取得・解析等、全ての準備を進めている段階である。

本章では、DeeMe 実験に関して、その独創性や、施設の情報、探索シグナル等について説明する。

### 2.1 一般的な $\mu$ - $e$ 転換過程探索実験の手法

$\mu$ - $e$  転換過程探索実験の一般的な方法を図 8 に示す。

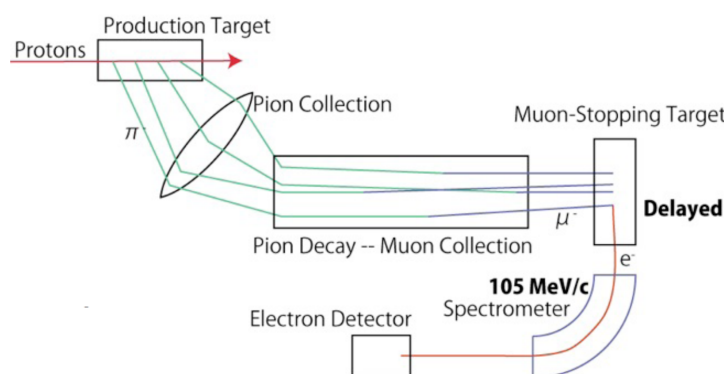


図 8 一般的な  $\mu$ - $e$  転換過程探索実験の方法

最初に、パルス陽子ビームを陽子標的に入射し、 $\pi^-$  を生成する。この  $\pi^-$  を電磁石等を用いて収集し、 $\mu^-$  に崩壊するのを待ち、実験室まで導いてミュオン静止標的に静止させる。 $\mu^-$  が静止することによって出来たミュオニック原子から出てくる単色 ( $\mu$ - $e$  転換シグナルのエネルギー) の遅延電子をビームラインで引き出し、その運動量を精密に測定する、という流れである。図 8 を見て分かる通り、陽子標的とミュオン静止標的は別々の場所に存在する。このような手法を用いた代表的な  $\mu$ - $e$  転換過程探索実験として、Mu2e 実験と COMET 実験がある。

Mu2e (Muon-to (2)-electron conversion experiment) 実験は、米国フェルミ加速器研究所 (FNAL) で計画されている実験である。図 9 は Mu2e 実験の概略図であり、全長約 25 m である。図 9 の左から、8 GeV まで加速したパルス陽子ビームをタングステン標的に入射し  $\pi^-$  を生成、 $\mu^-$  に崩壊させる。S 字型ソレノイドによって必要な運動量の  $\mu^-$  を選別し、内部のコリメータによって高エネルギーの負電荷粒子や、正電荷粒子等を除去していく。輸送されてきたミュオンをミュオン静止標的 (アルミニウム箔) に静止させて電子を発生させ、トラッカーにより軌道、カロリメータによりエネルギーを測定することで  $\mu$ - $e$  転換を探索していく。 $6 \times 10^{-17}$  の単一事象感度で  $\mu$ - $e$  転換過程を探索することが最終到達目標であり、2019 年に物理測定開始、2020 年に最初の結果を出す予定である。



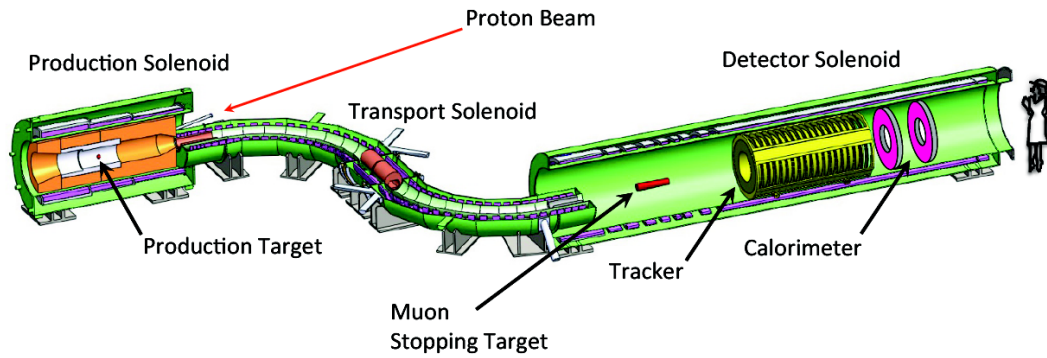


図9 Mu2e 実験

COMET (COherent Muon to Electron Transformation search) 実験は、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロンホールで計画されている実験であり、Phase-I (図 10 左) と Phase-II (図 10 右) が計画されている。Phase-II では、J-PARC のメインリングからの陽子ビームを  $\pi^-$  生成標的に入射し、発生した  $\pi^-$  をソレノイド磁場で捕獲する。 $\pi^-$  は、180 度弯曲ソレノイドから構成されるミュオン輸送部内でミュオンに崩壊し、ミュオン静止標的まで輸送される。この弯曲ソレノイド内では、低エネルギーの  $\mu^-$  のみを選別し輸送することが出来る。ミュオン静止標的に静止した  $\mu^-$  から発生した電子は、また別の 180 度弯曲ソレノイドからなる電子輸送部で 105 MeV 領域のものだけ選択され、検出器に輸送される。最終的に、ストローガス飛跡検出器と電磁カロリメータによって、運動量とエネルギーを測定し、 $\mu-e$  転換を探索していく。 $3 \times 10^{-17}$  の単一事象感度で  $\mu-e$  転換過程を探索することが最終到達目標であり、2017 年より Phase-I 実験の開始を予定している。

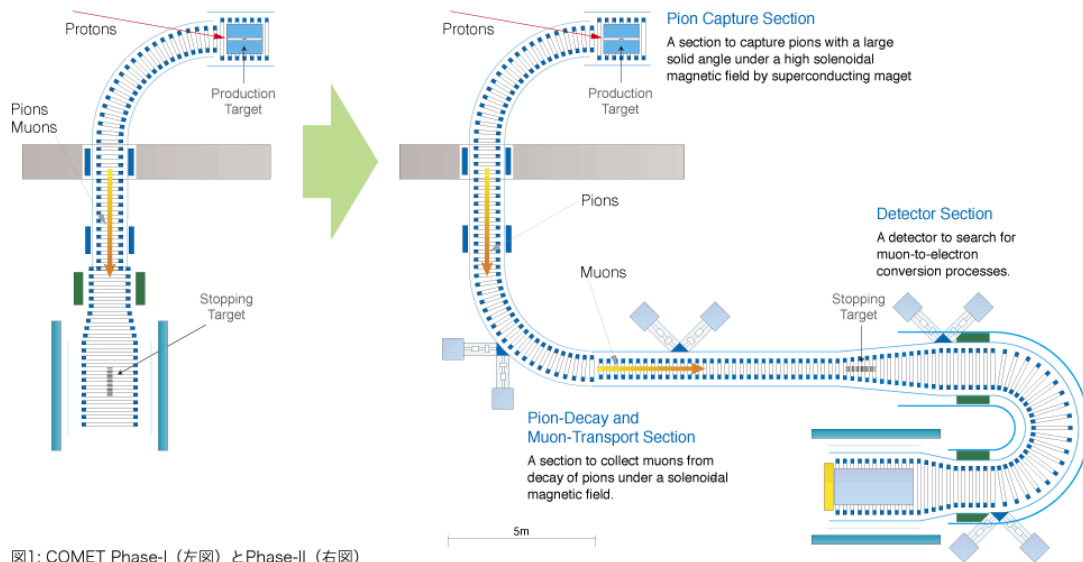


図1: COMET Phase-I (左図) とPhase-II (右図)

図 10 COMET 実験 (左が Phase-I、右が Phase-II)

## 2.2 J-PARC

J-PARC (Japan-Proton Accelerator Research Complex) は、素粒子物理、原子核物理等の他に物質科学や生命科学等、物理を含んだ幅広い分野の最先端研究が行われている大強度陽子加速器施設

設である。最大の特徴は、リングを周回する世界最高クラスの陽子 (1 MW) ビームから生成された中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノ等の多彩な二次粒子ビームを利用できることである。J-PARC は、330 m の直線加速器 LINAC、周長 350 m の円形加速器 RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)、周長 1600 m の円形加速器 MR (Main-Ring) の三種類の加速器と、4 種類の実験施設により構成される。図 11 にその概観を示す。



図 11 J-PARC の全体図

LINAC では、最初に負水素イオンが作られる。最大 50 Hz のパルス運転で、このエネルギーを 400 MeV まで加速し、RCS へと送り出す。また、400 MeV まで加速させた負水素イオンを超伝導 LINAC ビームラインへと送ることにより、さらに最大 600 MeV まで加速し、核変換実験施設へと送ることが可能である。LINAC より送られた負水素イオンは、RCS 入射部に置かれた荷電変換用炭素薄膜により、電子を二つ剥ぎ取られ陽子ビームとなり RCS へと入射する。入射した陽子ビームは、高周波加速空洞により加速されながら、約 20 ms 間で RCS 内を 15000 回程周回する。この速さ故に RCS は 25 Hz のビームを射出可能となる。陽子は最終的に 3 GeV まで到達し、その後 MLF (物質・生命科学実験施設) 及び MR へと送られる。割合にして、取り出される陽子ビームの 92% が MLF で利用される。MR へと入射した陽子は、約 2 秒間で 32 万回リングを周回し、最終的に 50 GeV まで加速される。加速された陽子は、ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設へと送られる。

RCS からのビームを利用する物質・生命科学実験施設で、ミュオン・電子転換過程探索実験 DeeMe が計画されている。

### 2.3 DeeMe 実験

「J-PARC RCS からのパルス陽子ビームを活用したミュオン・電子転換過程探索実験」、通称 DeeMe (Direct electron emission from Muon-electron conversions) 実験が、MLF の H ライン (現在建設中) で予定されている。図 12 は、MLF 内にあるミュオン実験施設であり、標的とそこから伸びる 4 つのビームラインを表している。また、DeeMe 実験の概略を図 13 に示した。

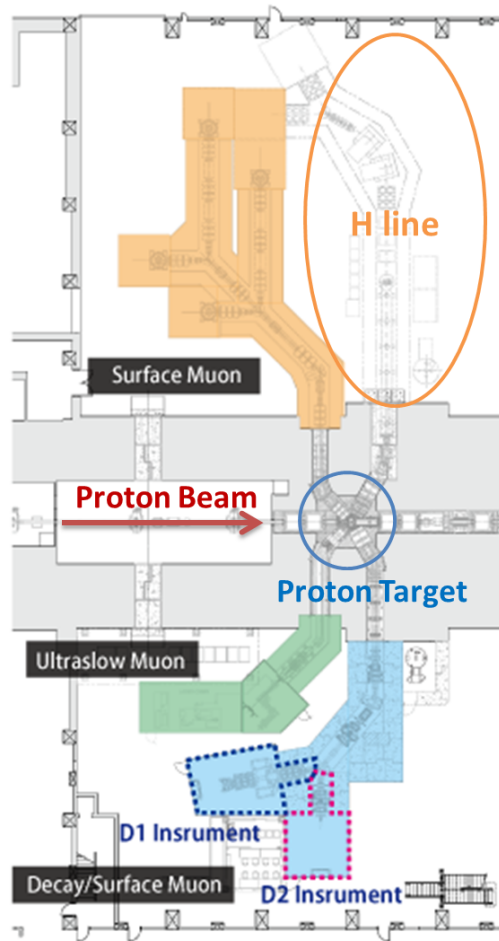


図 12 J-PARC MLF ミューオン実験施設

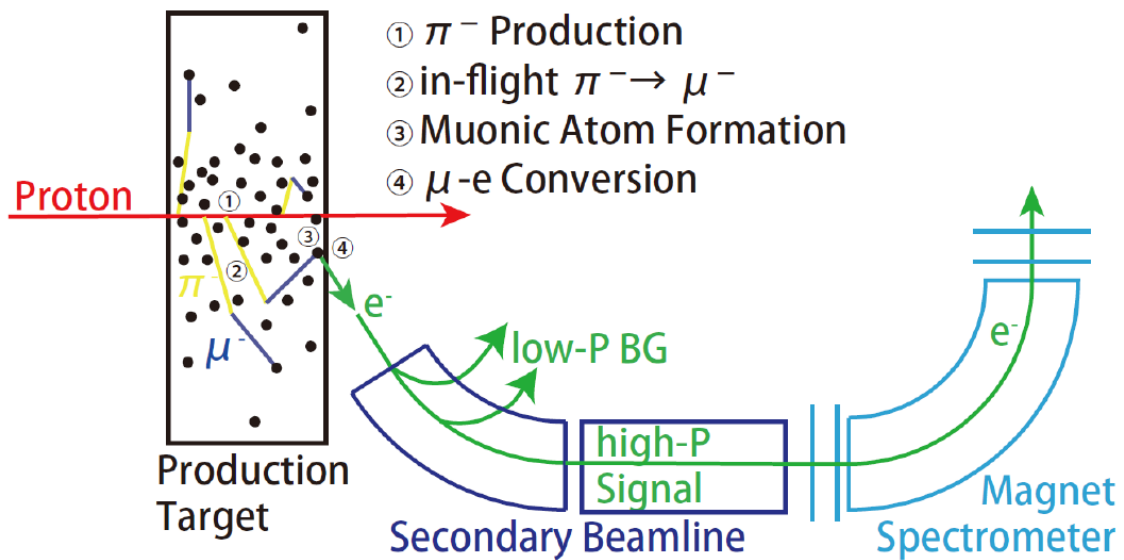


図 13 DeeMe 実験の概略

DeeMe 実験の独創的な点として、陽子標的とミュオン静止標的を一つにまとめているところが挙げられる。

通常は、陽子標的内で強い相互作用によって生成された  $\pi^-$  を標的外で収集し、最終的に  $\mu^-$  を

生成するのであるが、ここで陽子標的付近での現象を考えてみる。 $\pi^-$  が標的内で静止した場合、すぐ原子核に捕獲されてしまい、 $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$  崩壊をすることは叶わない。しかし、標的内で静止せず、標的外に出て標的近傍で崩壊を起こし、 $\mu^-$  を生成することが可能である。この、飛行中に崩壊 (in-flight 崩壊) して出来る  $\mu^-$  は cloud  $\mu^-$  と呼ばれ、過去の経験より物理実験に十分な量が存在することが知られている。これを考慮すると、陽子標的内に存在する低エネルギー  $\pi^-$  の中には、標的内で in-flight 崩壊し、 $\mu^-$  を生成するものが含まれることが期待できる。さらに、ここで生まれた  $\mu^-$  は、標的内で静止し、 $\mu$ -e 転換現象を起こす可能性が考えられる。このようにして、一つの標的内で、陽子ビーム入射  $\rightarrow \mu$ -e 転換電子生成までを行い、この電子を探索する方法を、ダイレクトエミッション法と呼ぶことにする。

このダイレクトエミッション法を評価するための実験が、2009年に J-PARC MLF のミュオン実験施設内 D2 ビームラインで実施された。ビームの運動量を 40 MeV/c に設定し、パルス陽子ビームから遅延して出てくる電子数を測定したところ、グラファイト (C) 標的中に静止した際の  $\mu^-$  の寿命と無矛盾な時間スペクトルが得られた。その収量は、Geant4 シミュレーションを用いたモンテカルロ計算と、誤差 20% 以内で一致した。この実験より、J-PARC RCS の最大ビーム強度 1 MW の陽子ビームをシリコンカーバイド (SiC) 回転標的に入射した場合、標的内には、 $1.6 \times 10^{10}$  /s のミュオン原子が生成されると期待された。この収量は、世界のビーム強度を誇る PSI で得られる  $\mu^-$  収量の約 1000 倍の量に相当する。

このように、標的内で生成されたミュオン原子からの電子を、2 次ビームラインを用いて輸送し、磁気スペクトロメータによってその運動量を測定する、というのが DeeMe 実験の方法である。

## 2.4 RCS からのパルス陽子ビーム

RCS には 2 つの「バケツ」というものが存在する。図 14 に RCS 内のバケツの様子を示した。バケツ、とは、陽子加速のための高周波電場が生成する進行方向の安定領域のことである。LINAC からの陽子ビーム (元は負水素イオン) は、RCS の周期開始時、25 Hz の速さでこのバケツに収納され、RCS 内を周回する (ビームの長さは、進行方向の長さとして速度を考慮し時間で表現される)。入射されるビームは 500  $\mu$ s 以下の長さであり、Micro pulse と呼ばれる。この収納されたビームの塊のことをバンチと呼び、DeeMe では 2 バンチのビームを使用する。1 バンチあたりの長さは 200 ns であり、2 つのバンチの間は 600 ns 離れている。

取り出し部分には取り出しキッカー電磁石とセプタム電磁石が設置されている。取り出しキッカーは 2 バンチの間だけ励磁され、RCS 内の陽子が全て取り出されると直ちにオフになる。この取り出し方法を、「速い取り出し」と呼び、理論的には取り出し後のリングに陽子は残らないようになっている。しかし、AP が存在する可能性があるため、こちらについても議論が続いている。

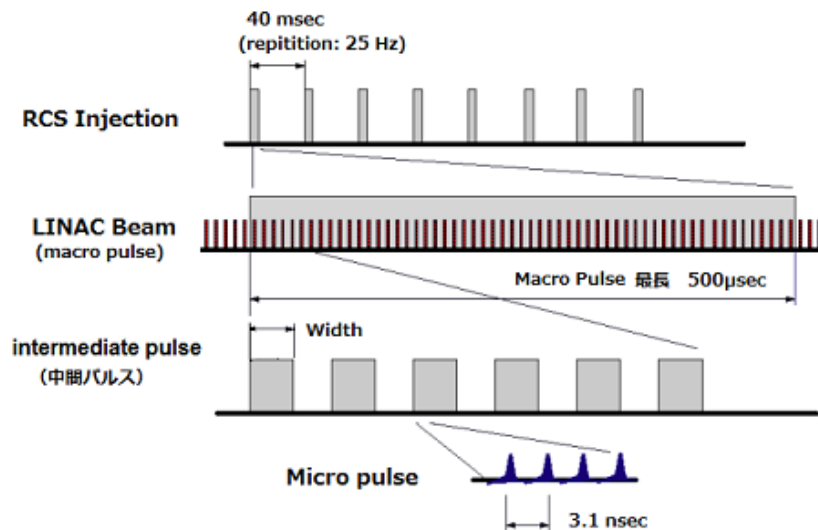


図 14 RCS 内のバケツ内の様子。1 パンチ分の図である。

## 2.5 陽子標的兼ミューオン静止標的

2014 年 9 月より、ミューオン実験施設で使用されている標的はグラファイト (C) 製回転標的になっている。実際のターゲットの写真を図 15 に示した。しかし DeeMe では、将来この回転標的の材質を、シリコンカーバイド (SiC) に置き換えることを予定している。その理由として、ミューオニック原子中の  $\mu^-$  が原子核と反応する (MC、または  $\mu^-e$  転換を起こす) 確率が、 $\mu^-$  と原子核の波動関数の重なりに依存するためである。その他は DIO を起こしてしまう。図 16 に、C と SiC それぞれでの、 $\mu^-$  と原子核の波動関数の重なりのグラフを示した。

C 原子標的の場合、この重なりが少なく、ミューオニック原子中の  $\mu^-$  の 8% しか原子核と反応しない。対して、Si 原子ではこれは 67% であり、この違いは明らかである。SiC 標的を考えた場合、Fermi&Teller 則 (1.2 章) より、SiC 標的中のミューオニック原子の 7 割は Si ( $Z=14$ ) 原子核により捕獲され、残り 3 割は C ( $Z=6$ ) 原子核により捕獲される。つまり、総合的に SiC 標的中で原子核と反応するのは  $(70\% \times 67\% + 30\% \times 8\%) = 49\%$  となり、C 原子標的の場合の 6 倍の改善となる。他の要素として、ミューオニック原子中の  $\mu^-$  の寿命を考慮した場合、C 原子標的の中では  $2 \mu\text{s}$ 、SiC 標的の中では  $0.76 \mu\text{s}$  であるため、DeeMe の探索開始時間 (2.7 参照) である 2 パルス目入射後の 300 ns 後の生存率を考えると、C 原子標的の場合の方が SiC 標的の場合よりも 1.5 倍統計量が多くなる。しかし、低エネルギーミューオンの収量を考えると、逆に SiC 標的の場合の方が C 原子標的の場合よりも 1.7 倍統計量が多くなる。従って、最終的には C 原子標的よりも SiC 標的の方が DeeMe に有利であることが分かる。以上のことを表 2 にまとめた。



図 15 グラファイト製回転標的

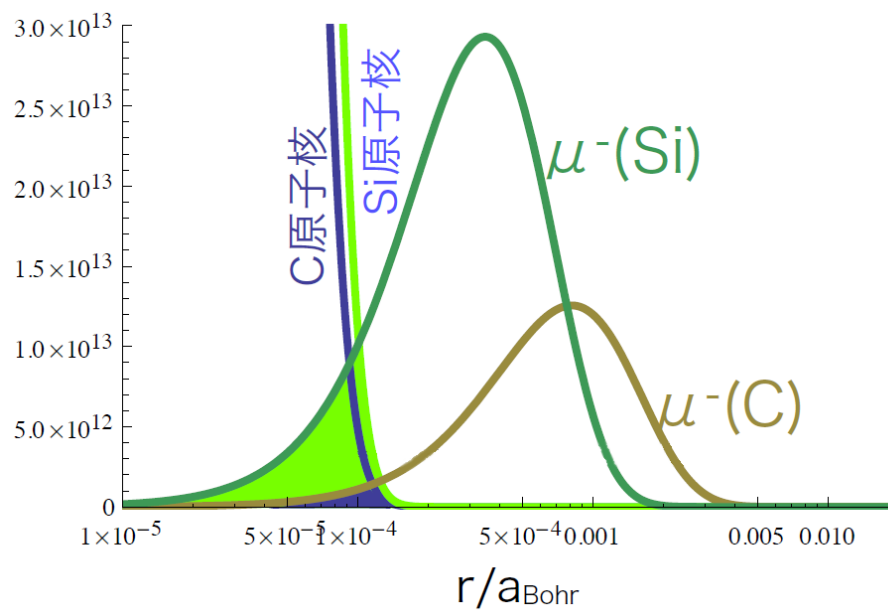


図 16  $\mu^-$  と原子核の波動関数の重なりの違い

	SiC 標的	C 標的
原子核との反応率	49%	8%
300 ns 後 (探索開始時間) での生存率 (SiC 標的で 1 とする)	1	1.5
低エネルギーミュオンの収量 (C 標的で 1 とする)	1.7	1

表 2 SiC 標的と C 標的での統計量の違い

ところで、標的として、Ti ( $Z=22$ )、Au ( $Z=79$ ) もよく使用されているが、これらを使わない理由として、1 MW 陽子ビームに対する熱的耐性がないことが挙げられる。その点、カーバイド系の物質は融点が高いため耐熱性がある。TiC 標的も考えることが出来るが、Ti 原子によるミュオニック原子内の  $\mu^-$  の寿命は 300 ns 程度になってしまい、300 ns 後の統計量が少なくなってしまう。また、Ti 原子を經由した  $\mu-e$  転換シグナルのエネルギーは  $\sim 104.4$  MeV 程であり、C からの DIO により出てくる電子のエネルギー 105.06 MeV との差が SiC ( $\mu-e$  転換シグナルのエネルギー : 105.6 MeV) に比べて大きくなってしまい、シグナルが DIO による電子に埋もれてしまう。以上のような理由からも SiC が選択された。

## 2.6 大立体角 2 次ビームライン (H ライン)

陽子標的兼ミュオン静止標的より出てくる電子を輸送するのが 2 次ビームラインであり、H ラインの DeeMe での役目である。図 17 に、標的から磁気スペクトロメータに繋がる H ラインの全体図を示す。陽子ビームが入射した標的中では、ミュオニック原子からの MC や DIO 等によって大量の荷電粒子が発生するが、その荷電粒子の瞬間的な計数率は  $10^{14}$  Hz にも達する。そのため、標的近傍に検出器を置くことは困難である。そこで、H ラインを用いて、低エネルギー電子等を排除し、目的の ( $\mu-e$  転換によって出てくる電子の持つ) エネルギー近傍の電子のみを取り出すことが必要となる。

H ラインの特徴は大きく 2 つ挙げられる。1 つ目は、大口径ソレノイドレンズによる大きな立体角である。110 msr 以上の大立体角を達成している。H ラインポートの構造的な立体角は 120 msr 強であるため、ほぼ損なわず利用出来ていることが分かる。2 つ目は、運動量アクセプタンスにある。図 18 にその運動量依存性を示す。最終的な半値幅は 10 MeV/c 程で、85–120 MeV/c の電子を輸送することが可能である。2.7 章で後述するが、105.6 MeV より高いエネルギー領域には、 $\mu-e$  転換シグナルや DIO シグナルが無いいため、高いエネルギー領域を監視することにより、アフタープロトン起源のバックグラウンドの量を見積もることが出来る。

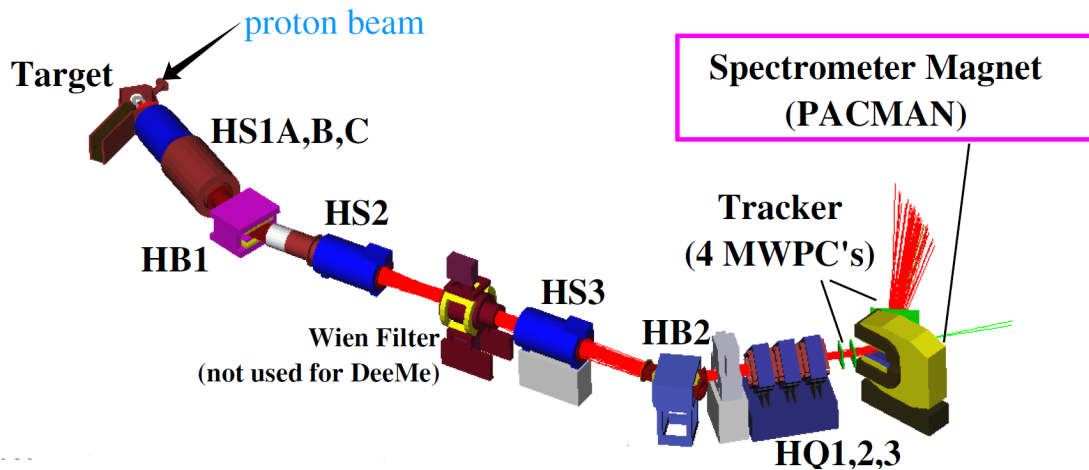


図 17 H ラインの全体図

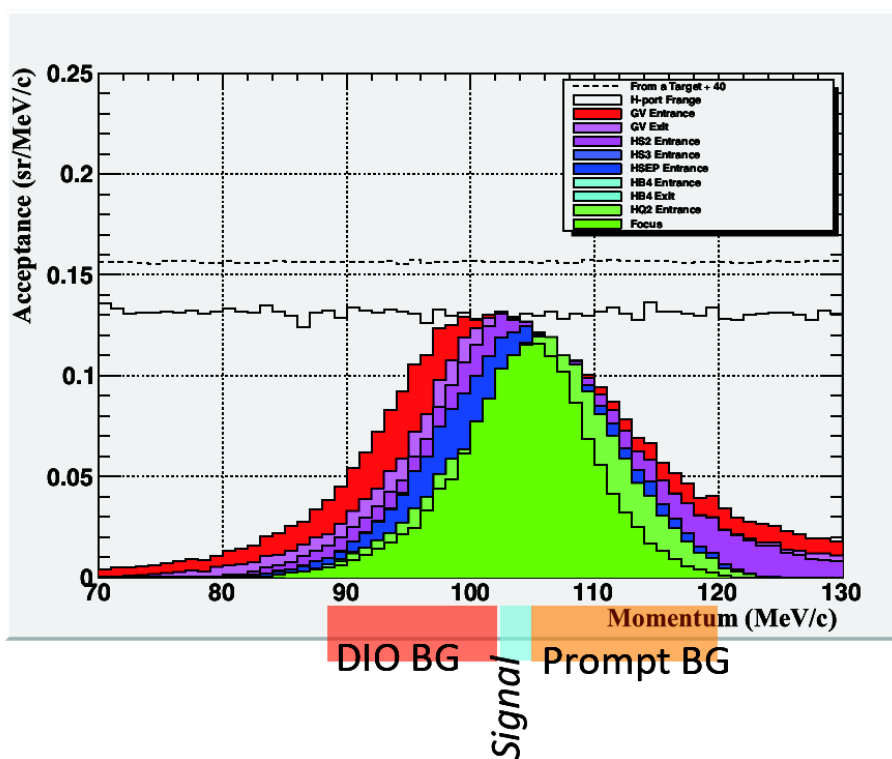


図 18 H ラインアクセプタンスの運動量依存性 (G4Beamline シミュレーションより)。破線がターゲット出口、赤が H ライン第 1 ベンド (HB1) 出口、一番小さい形の緑が H ライン出口。

## 2.7 信号とバックグラウンド

DeeMe の信号探索領域について、図 19 に示す。



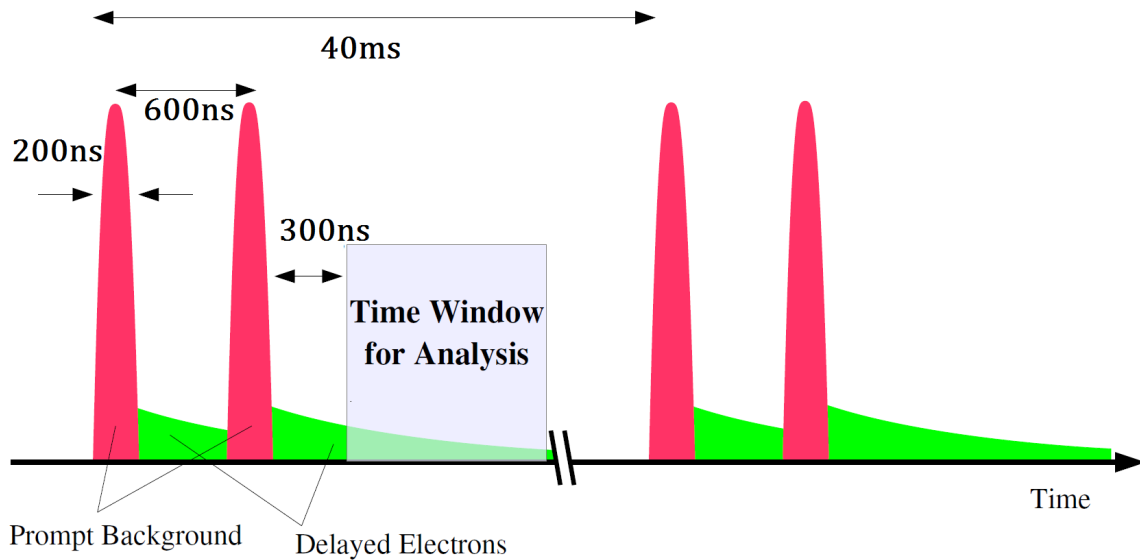


図 19 パルス陽子ビームの時間構造と DeeMe の信号探索時間

陽子標的にビームが衝突した際、標的内では大量の荷電粒子が発生する。これをプロンプトバーストと呼んでいる。検出器には、200 ns のパルス陽子ビーム当たり  $2 \times 10^8$  個の荷電粒子が到来することが、テスト実験と Geant4 シミュレーションより分かっている。図 19 上の赤い塊が、プロンプトバーストによる荷電粒子を表している。この量は、検出器を飽和させるため、次に述べる通り、実験デザインを考えるにあたって重要となる。

2 バンチのパルス陽子ビームが、バンチ間 600 ns、25 Hz で標的に入射する。シグナルである  $\mu$ - $e$  転換電子は  $\mu$ s オーダーの寿命を持っているため、探索開始は一バンチ目のパルスから 1  $\mu$ s 後となる。測定時間の長さは、最初は 2  $\mu$ s とされていたが、後に説明するように議論の途中である。図 20 は、シミュレーションによって期待されるシグナルとバックグラウンドの運動量スペクトラムである。ビーム強度 1 MW、 $2 \times 10^7$  s のビームタイム、分岐比  $3 \times 10^{-14}$ 、 $R_{AP} = 10^{-19}$  としている。なお、 $R_{AP}$  は、全陽子数と AP 数の比で定義されている。

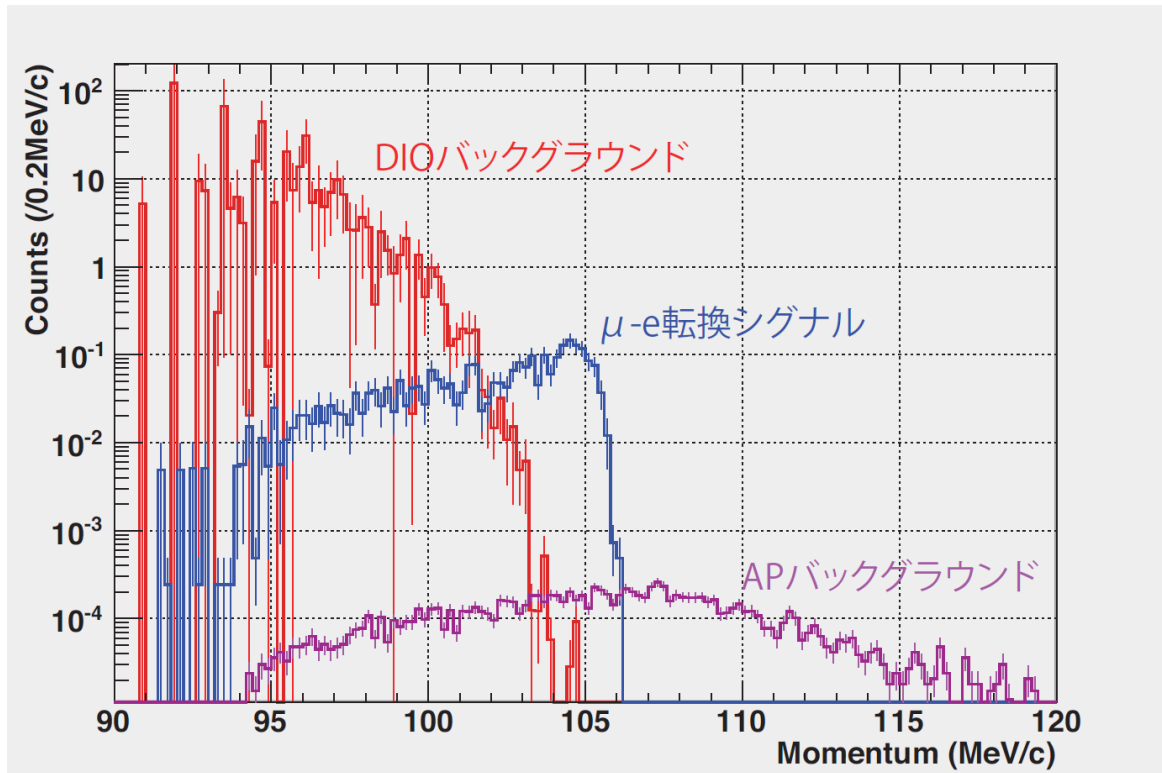


図 20 シミュレーションにより期待される運動量スペクトラム (ビームタイム:  $2 \times 10^7$  s、分岐比  $3 \times 10^{-14}$ 、 $R_{AP} = 10^{-19}$ )

$\mu$ - $e$  転換信号が単色であるにもかかわらず、低運動量側にテールを引いているのは、標的内でのエネルギー損失の影響である。DIO によるバックグラウンドを低くするために、信号領域は  $102 \sim 105.6$  MeV/ $c$  とする。これは、標的表面から 4 mm の深さまでの領域で発生した電子を探索することに相当する。また、AP バックグラウンドの運動量が広い領域に渡っていることから、高い運動量領域の AP 数を測定することで AP 数を見積もることが可能であることが分かる。

## 2.8 DeeMe 実験における課題

DeeMe 実験で十分な成果を残すための課題として、以下のようなものが挙げられる。

- DeeMe 実験の要求を満たす検出器及び周辺機器の開発 (位置検出器、磁気スペクトロメータにおける電磁石関連)
- データ取得システム (DAQ)
- バックグラウンド見積り等のための実験シミュレーション、及び本実験におけるバックグラウンド測定方法の確立

私は検出器に関する開発を行った。具体的には、

- MWPC 内に張られたワイヤー間放電試験
- MWPC に印加する電圧源制御

である。次章より、詳しい内容を記す。

### 3 DeeMe 実験で使用する Micro-cell MWPC とワイヤー間放電試験

序章で述べたように、DeeMe 実験には、パルス陽子ビーム入射後の遅延電子を検出するような位置検出器が必要である。プロンプトバーストの影響を避け、その後十分な感度を持つような検出器として、Micro-cell MWPC が開発された。Micro-cell MWPC は、通常の MWPC とは違い、内部のワイヤーピッチを非常に狭くした構造を持っているが、その構造に付随する問題として放電問題が存在する。

本章では、DeeMe の MWPC 開発の歴史と、放電試験について述べる。

#### 3.1 MWPC

DeeMe 実験では、位置検出器として MWPC を用いる予定である。MWPC とは、Multi Wire Proportional Chamber (多線式比例係数箱) のことである。1968 年に Charpak により発明された。密閉容器の中に多数のアノードワイヤーが張られ、それを挟み込むようにカソード面が配置された構造となっている。密閉容器内にガスを流入し、アノードワイヤーに高電圧をかけ、アノード-カソード間に大きい電圧差を生じさせることで使用する。印加電圧の大きさにより、MWPC 内で起こる現象は図 21 のように変化する。

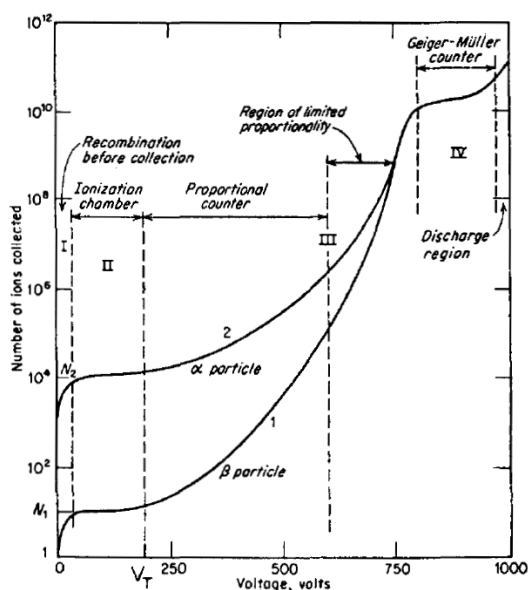


図 21 ガス検出器に印加する電圧と増幅率の関係性 [10]。あくまで一例であり、ガス等の条件によりグラフは変化する。

MWPC は、図 21 内の”Proportional counter”領域 (比例領域) で使用される。MWPC 内を荷電粒子 (電離放射線) が通過すると、イオン化によって電子-イオン対が発生する。低い電圧領域では、この電子-イオン対はかけられた電圧の生成する電場によって運ばれていく (drift する) だけであるが、高い電圧領域で使用した場合、アノードワイヤー付近には高電場領域が生成されている。この領域に入った電子は、電場によって自身のエネルギーを上げていき、そのエネルギーがガスを電離させるに足り得る値まで上昇すると、ガスを電離させ電子-イオン対を生成する。これを繰り返すことにより、最初に生成された電子-イオン対から多数の電子-イオン対が生成される。これをガス増幅という。増幅された電子をアノードワイヤーに集め信号とする、もしくはイオンをカソー

ド面に集め信号とすることによって、高い出力を得ることが出来る。

### 3.2 ガス配合比率

DeeMe 実験では、MWPC 内に満たすガスとして Ar (アルゴン) と  $C_2H_6$  (エタン) を採用している。信号の元となる電子や正イオンは、MWPC 内に入射した荷電粒子が、Ar 原子内の電子を叩き出すこと (電離) により発生する。そのため、ガスに求められるのは、電離に必要なエネルギーが低いことである。また、振動励起状態や回転励起状態等がない単原子分子である希ガスが主に使用される。Ar が脱励起するとき、特性 X 線を放出する。この X 線がカソード表面に衝突すると、光電効果により電子が出てくる。この電子は電場により加速されまた Ar を電離させる、という様に、連続した現象が起きてしまう。 $C_2H_6$  は、X 線を吸収し、回転や振動に利用するため、連続電離現象を防ぐエンチ材として作用する。以上より、Ar の比率が大きい方が、ガスゲインは大きくなる事が分かる。図 22 に、Ar: $C_2H_6$  の比率の違いによるゲインの違いを示した。ただし、ワイヤー-カソード面間のギャップは 2.4 mm である。

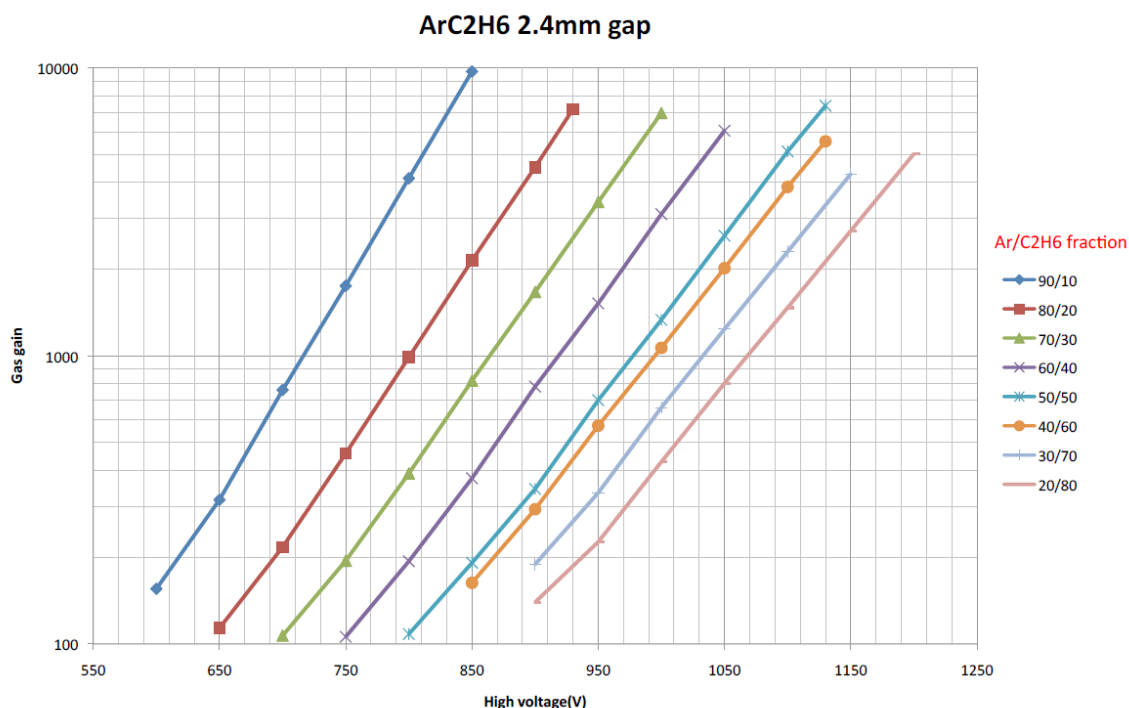


図 22 Gas gain vs. High Voltage (V) の Ar: $C_2H_6$  の比率の違いによる違い (ワイヤー-カソード面間のギャップ: 2.4 mm)

### 3.3 DeeMe 実験における MWPC デザイン

DeeMe では、ターゲット内で生成された電子等の荷電粒子をビームラインを通して輸送し、最終的に磁気スペクトロメータによって運動量測定を行う。この磁気スペクトロメータでは、飛跡検出器を用いるが、多重散乱を低減するためにガスワイヤーチェンバー、MWPC を選択した。磁場をかけるための電磁石は PACMAN と呼ばれる、カナダの TRIUMF で使用していたものを使う予定である。



図 23 磁気スペクトロメータ用電磁石 PACMAN

MWPC の構造を考える際、前述したプロンプトバーストの存在を考慮しなくてはならない。検出器に、パルス陽子ビームの一パルス (200 ns) 当たり  $2 \times 10^8$  個の荷電粒子が到来する現象である。ヒットレートに換算すると、10 GHz/mm<sup>2</sup> に値する。これが検出器に入射した場合、通常の検出器では、飽和を起こしてしまい、その後来るであろう遅延電子の検出が不可能となる。そのため、プロンプトバーストを減らす構想、またはプロンプトバーストに耐えうる検出器の開発、のどちらかを行わなければいけないことになる。

最初の段階では、DeeMe は即発電子キッカーを導入する構想であった。即発電子キッカーは、二次ビームラインに置かれ、即発荷電粒子の量を削減するためのキッカーである。つまりは、プロンプトバーストを減らす方法を採用していた。このキッカーによって、バーストを  $10^{-4}$  減らすことが出来ると期待されていた。しかし、それでも  $10^4$  オーダーの荷電粒子がチェンバーへと到達する計算であるため、それに耐えうる MWPC の開発もまた必要であった。この要求を満たす MWPC として、Micro-cell MWPC が開発された。図 24 は、最初に開発された Prototype I である。

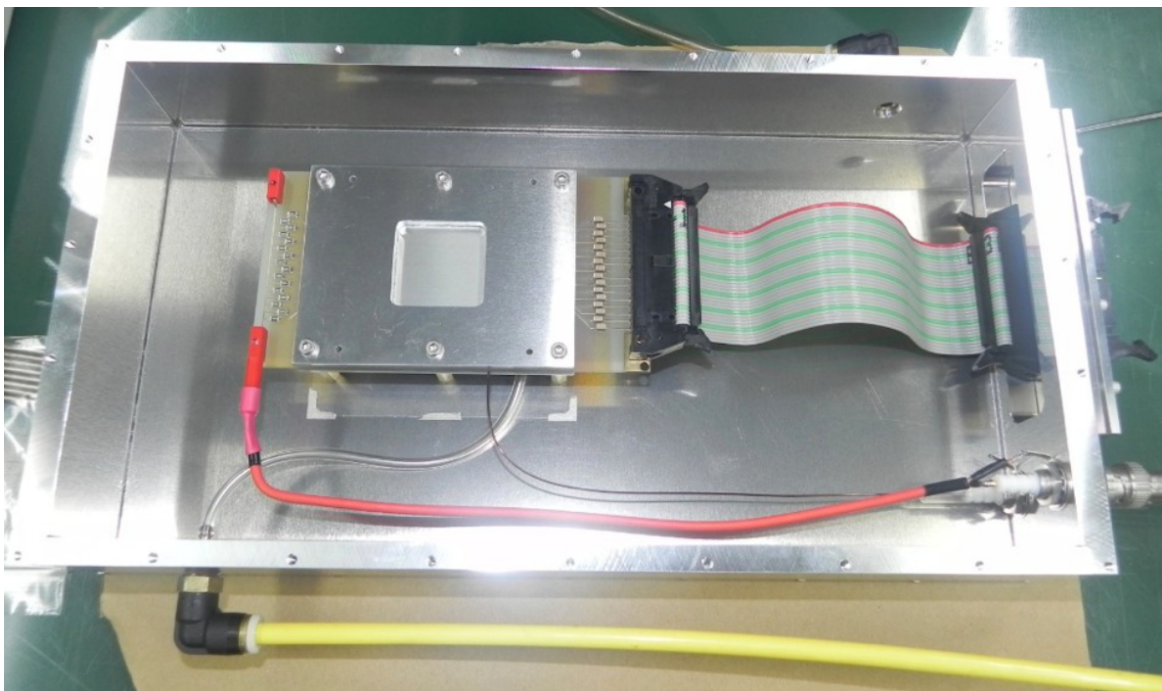


図 24 Micro-cell MWPC Prototype I

特徴的なのは、内部のワイヤー構造である。MWPC の開発をするにあたって、空間電荷効果が重要となっていた。空間電荷効果の様子を図 25 に示す。荷電粒子の通過によって発生した大量のイオンが、ワイヤーを囲ってしまい、印加電圧が低く見えることでゲインが低下してしまう現象である。この現象を防ぐために考えられたワイヤー構造を図 26 に示した。

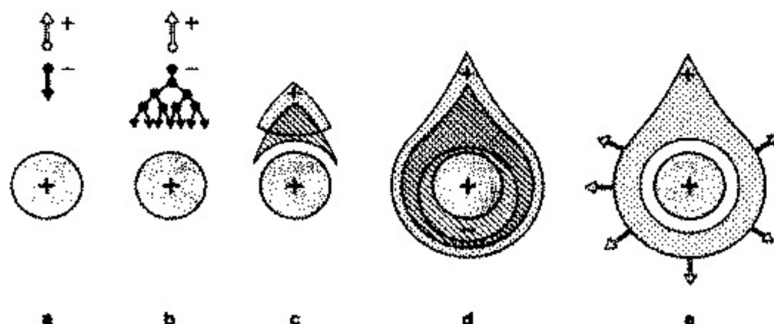


図 25 空間電荷効果の様子

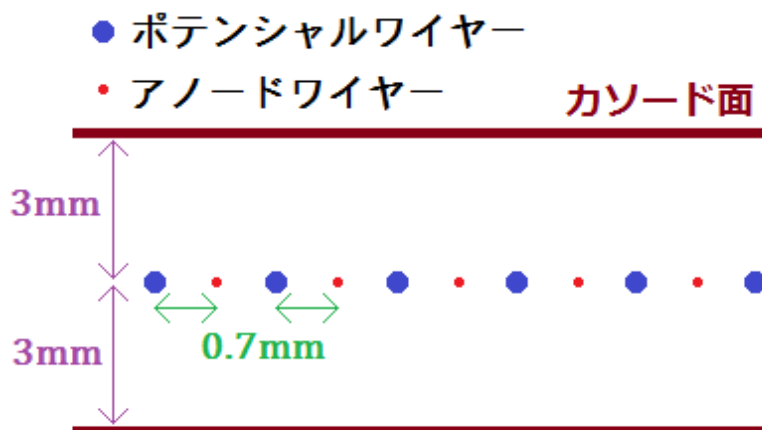


図 26 MWPC 内のワイヤー構造

アノードワイヤーとポテンシャルワイヤーの 2 種類のワイヤーが、非常に狭い間隔で並べられている。こうすることで、発生したイオンが速やかにポテンシャルワイヤーに吸われ、空間電荷効果による影響を低減することが出来る。また、狭い空間にワイヤーを多数張ることで、バーストの影響を複数のワイヤーに拡散させる効果も期待された。

このようにして、Micro-cell MWPC が完成した。しかし、キッカー無しの方が都合が良かったため、キッカー無しの条件に似た、ハイレートビームでの実験が大阪熊取にある京都大学原子炉実験施設 (KURRI) で行われた。理由としては、導入に多大な費用と時間がかかることが挙げられる。実験の結果、このままではチェンバーが飽和してしまうことが判明した。図 27、28 にその時の出力を示す。

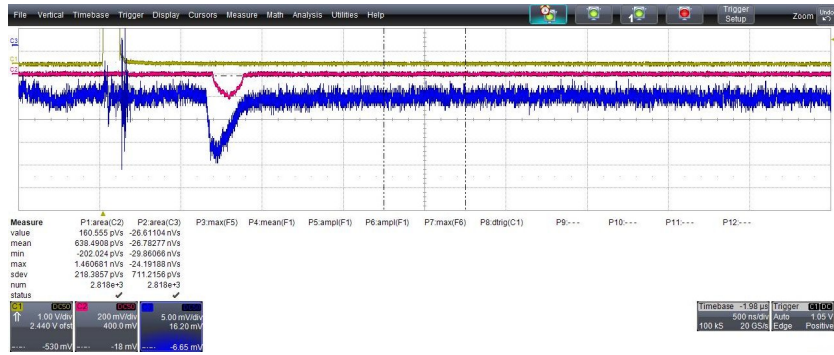


図 27 Prototype I での出力 (1/10 of final condition)。5 mV/div, 500 ns/div。青: MWPC の波形 (アンプ無し)、赤: PMT の波形、黄: ビームトリガー。

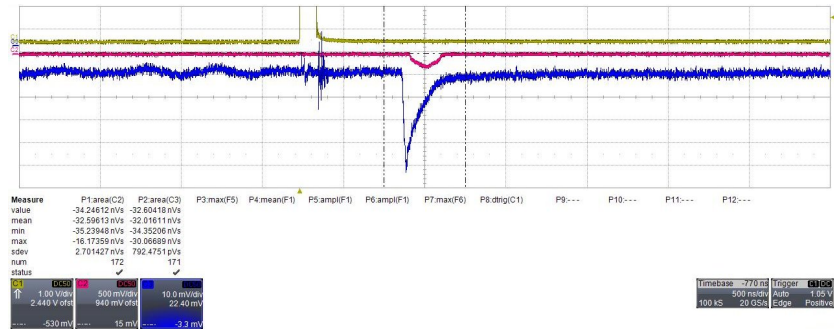


図 28 Prototype I での出力 (final condition)。10 mV/div, 500 ns/div。青: MWPC の波形 (アンプ無し)、赤: PMT の波形、黄: ビームトリガー。

final コンディションの 1/10 での出力と、final コンディションでの出力を比べると、空間電荷効果等の影響で出力が落ちていることは明確である。

### 3.4 HV Switching

空間電荷効果の影響を無くすために、プロンプトキッカーに変わる HV Switching 方式が考案された。HV Switching の概念図を図 29 に示す。

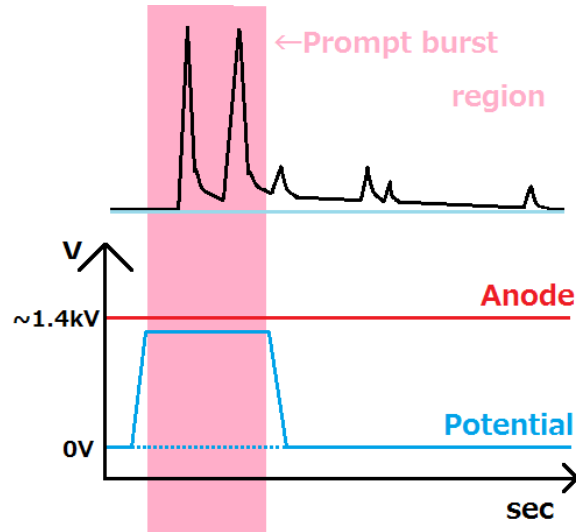


図 29 HV Switching

バーストの間、アノード、ポテンシャル間の電圧差を無くすことで、MWPC のゲインを可能な限り低くする手法である。最初のアイデアとしては、アノードに印加する電圧を下げることで、ゲインを下げるというものであったが、Micro-cell MWPC の構造を踏まえたシミュレーションの結果、ポテンシャルワイヤーの電位をアノード印加電圧まで上げることで同様の効果が得られることが分かった。且つ、必要な回路作成の容易さやノイズ等の理由より、ポテンシャルのスイッチングが採用された。図 30、31 は、ワイヤーにかかる電圧の違いによる等電界強度線図と、電界プロファイルである。ポテンシャルワイヤーに、アノードワイヤーと同等程の電圧をかけることで、電場勾配が緩くなっていることが分かる。ここで、GARFIELD はガス検出器シミュレーションプログラムである。

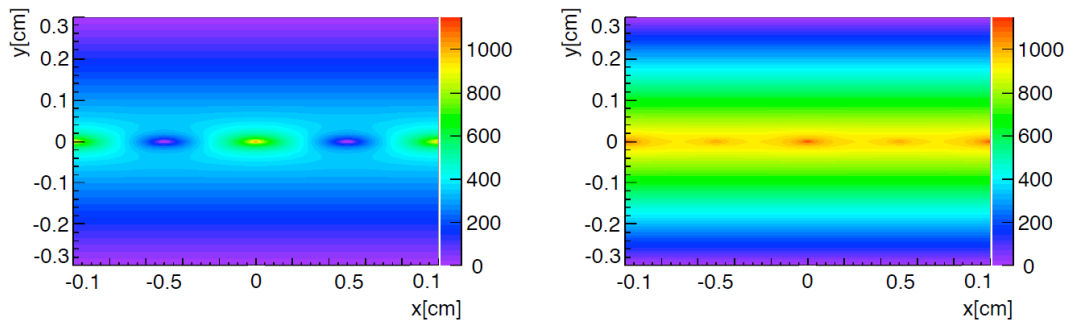


図 30 GARFIELD 計算による等電界強度線図。左 : Anode wire 1150 V、Potential wire 0 V



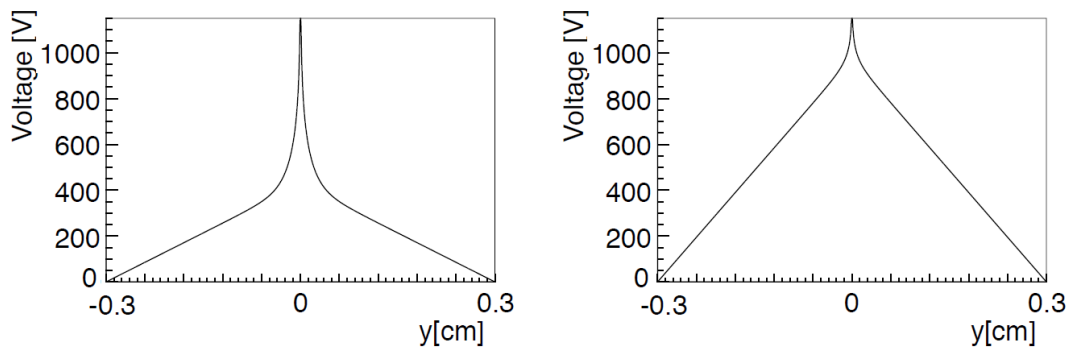


図 31 GARFIELD 計算による電界プロファイル。左 : Anode wire 1150 V、Potential wire 1000 V

アノード-ポテンシャル間  $\ll$  アノード面-カソード面の場合、アノード-ポテンシャル間の電圧差がゲイン決定に支配的ということが分かった。これによって、ポテンシャル HV Switching の形が完成した。

このアイデアを踏まえ完成した Prototype II を図 32 に示す。

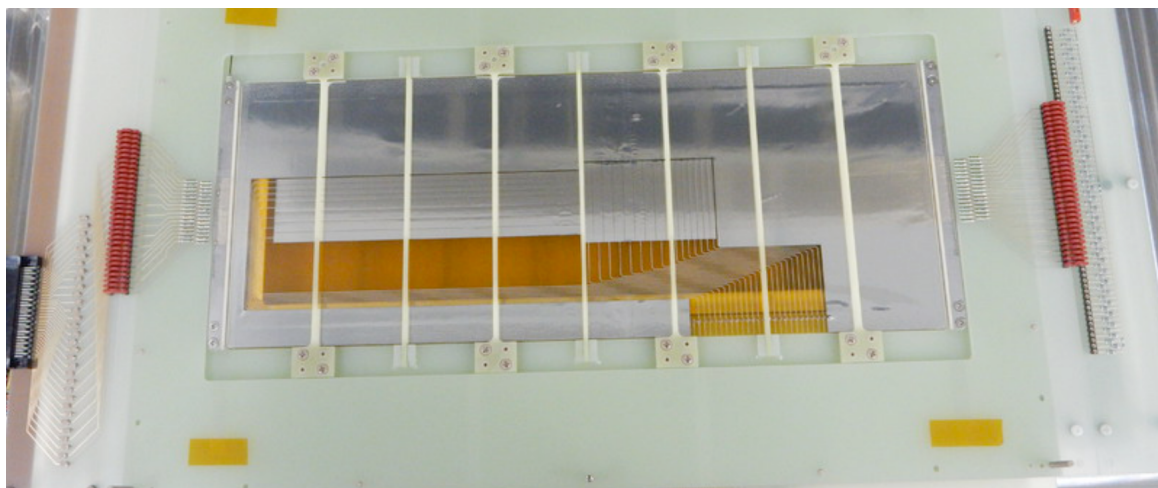


図 32 Micro-cell MWPC Prototype II

内部のワイヤーは、長さ 300 mm、ワイヤーピッチ 0.5 mm、ワイヤー-カソード面間距離 3 mm であり、ワイヤー径はアノード 15  $\mu\text{m}$ 、ポテンシャル 50  $\mu\text{m}$  である。また、ここからカソードストリップ読み出しも導入された。

これを用いて、2014 年 8 月に KURRI でビームテストが行われた。そこで、ワイヤー間放電により安定運転が厳しいという結果が得られた。放電により、電圧印加が止まる上、ワイヤーが切れる現象が多発してしまうためである。そのため、ワイヤー間放電についての理解の必要性が議論され始めた。

### 3.5 ワイヤーサポート

ワイヤーサポートは、MWPC 内のワイヤーが静電引力によって引き寄せられ、放電の原因となってしまうのを防ぐためのサポートである。図 32 のように、一つ、ないし複数のワイヤーサポートを用いて、ワイヤーの横移動を制限している。図 33、34 はワイヤーサポートとその構造の図である。

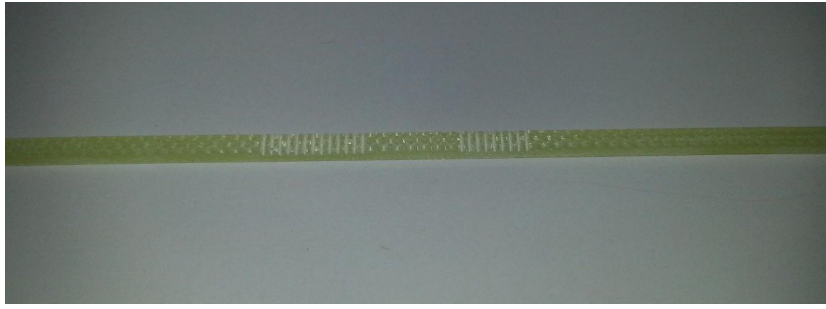


図 33 ワイヤーサポート

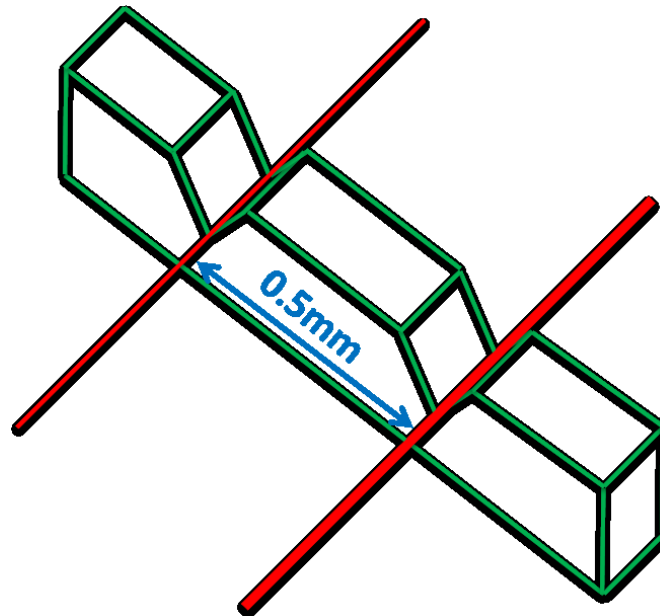


図 34 ワイヤーサポートとワイヤーの図

ワイヤーサポートを MWPC に導入するに当たって考えなければいけない問題として、沿面放電がある。沿面放電とは、絶縁体 (今の場合は G-10) の表面に沿って流れる放電のことである。これを防ぐために沿面放電加工というものが存在する。沿面放電を起こす可能性が一番高いのは沿面距離が最も小さいところであり、この場合、図 34 の 0.5mm 部分である。その側面に、丸く溝を掘ることで、沿面距離を稼ぐ加工である。図 35 に沿面加工のイメージ図を示した。沿面加工のデメリットとして、ワイヤーサポートにかかる費用が増えることが挙げられる。

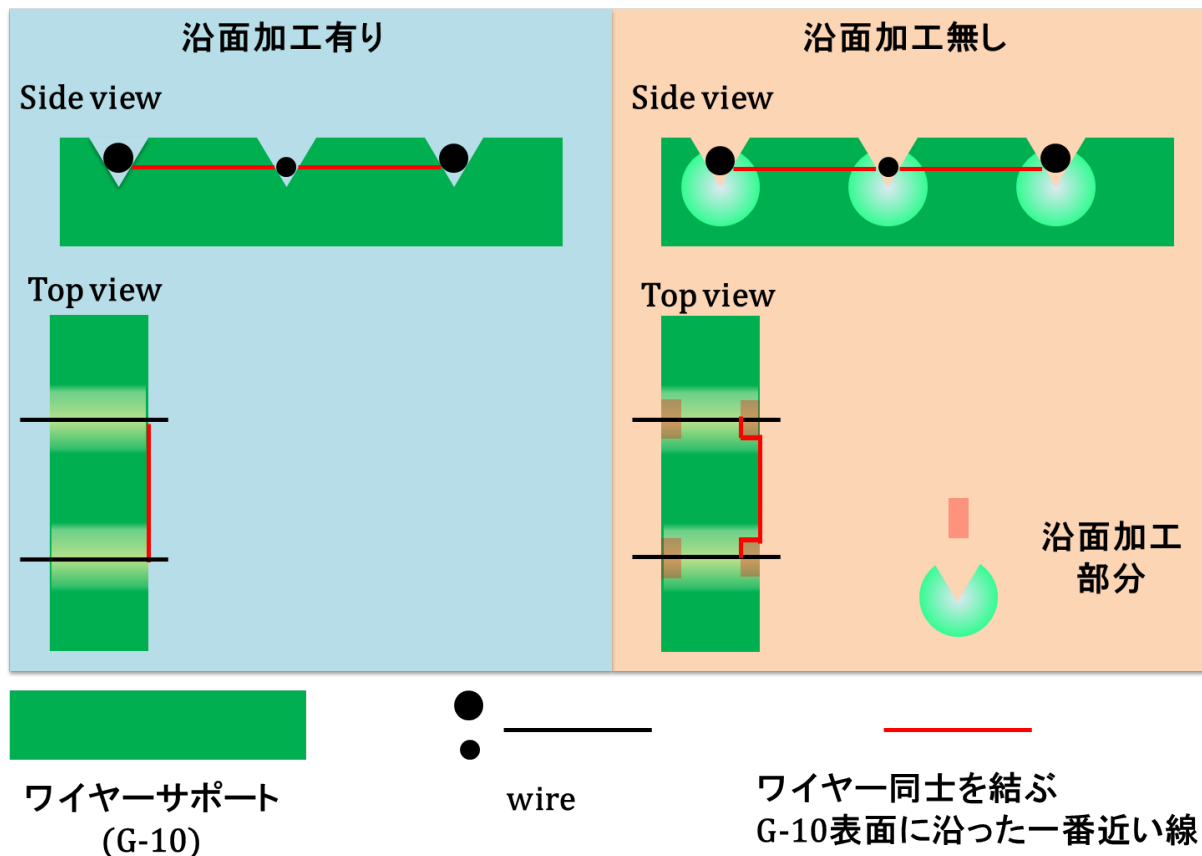


図 35 沿面加工のイメージ

### 3.6 連続放電現象

連続放電は、主に 2 つの作用によって引き起こされる。一つ目は、電子による気体の電離作用である。ある距離だけ離れた電極間に電圧差を作った時、気体中に存在する電子（宇宙線による電離が起源）はその電圧差の作る電場によって加速される。電圧差が非常に大きい時、加速された電子は気体中に存在する分子を電離させる。これが繰り返され、電子数が増えることによって連続放電へとなる。この時、距離  $dx$  だけ  $n$  個の電子が飛んだときに増える電子の数  $dn$  は

$$dn = n\alpha dx \quad (10)$$

で表される。ここで、 $\alpha$  は一つの電子が  $dx$  だけ移動する間に気体分子と衝突する数であり、衝突電離係数と呼ばれる。 $\alpha$  は理論的に、

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (11)$$

と与えられる。ここで、 $A$ 、 $B$  は気体による定数、 $p$  は気体の圧力、 $E$  は電場である。

二つ目は、電離によって発生した正イオンが電場によって加速され、陰極に衝突した際、そのエネルギーによって陰極から電子を叩き出す作用である。この電子を 2 次電子と呼び、電子  $n$  個が陰極に衝突した時に出てくる 2 次電子数を  $\gamma n$  としておく。これにより発生した電子は、また電場によって加速される。

ここで、一つ目の作用と二つ目の作用の繰り返しを考えてみる。陰極付近より、一つの電子が陽極へと移動を開始したとする。この時、電子が陽極に辿り着くまでに出来る電子数を考える。

$x = 0$  での電子の数を  $n_0$ 、電極間の距離を  $d$  として式 (10) を  $n$  について解くと、

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (12)$$

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^d \alpha dx \quad (13)$$

$$\ln n - \ln n_0 = \ln e^{\alpha d} \quad (14)$$

$$n = n_0 \exp(\alpha d) \quad (15)$$

となる。 $n_0 = 1$  の時、電子は最終的に  $\exp(\alpha d)$  個になるので、出来る正イオン数は  $(\exp(\alpha d) - 1)$  個となる。よって、この正イオンが全て陰極に辿り着いた場合、2次電子数は  $\gamma (\exp(\alpha d) - 1)$  個となる。この2次電子数を  $n_1$  とし、これを”源”とした今の過程をもう一周考えると、次に出来る正イオン数は  $n_1 (\exp(\alpha d) - 1)$  個であり、2次電子数は  $\gamma n_1 (\exp(\alpha d) - 1)$  個となる。これを  $n_2$  としておく。この繰り返しを考えていくと、最終的な”電子”の数は、最初の電子を加えて  $(1 + n_1 + n_2 + \dots)$  個になる。これはつまり、 $\left[ \{\gamma (\exp(\alpha d) - 1)\}^0 + \{\gamma (\exp(\alpha d) - 1)\}^1 + \{\gamma (\exp(\alpha d) - 1)\}^2 + \dots \right]$  個となるので、公比  $\gamma (\exp(\alpha d) - 1)$  の無限等比級数となる。この電子数が発散すれば電子が増え流れ続ける、つまりは放電となるので、境界として公比  $\gamma (\exp(\alpha d) - 1) = 1$  の時を考える。式  $\gamma (\exp(\alpha d) - 1) = 1$  で、

$$\gamma (\exp(\alpha d) - 1) = 1 \quad (16)$$

$$\alpha d = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (17)$$

式 (11) を代入して、

$$A p d \exp\left(-\frac{B p}{E}\right) = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (18)$$

$$\frac{B p}{E} = \ln \frac{A p d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} \quad (19)$$

$V = E d$  より

$$V = \frac{B p d}{\ln \frac{A p d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (20)$$

が導き出される。ここで  $\gamma$  は陰極等による定数であり、 $A$ 、 $B$  は  $E/p$  のある範囲ではほぼ一定であることが実験的に分かっている。つまり式 (20) は、放電電圧が (電極間の距離  $\times$  気体の圧力) に依存することを示す。これをパッシュェンの法則と呼ぶ。こうして、正イオンによる電離等は無視して考えたが、放電電圧と電極間の距離の関係が導き出せた。いくつかの気体について、その  $A$ 、 $B$  の値を表 3 示す。

気体	$A[\text{m}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$	$B[\text{V}\text{m}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$	$E/p$ の範囲 $[\text{V}/\text{mPa}]$
Ar	8.63	132	75~451
He	2.1	57.9	23~188
Ne	3.3	83.5	75~301
Xe	18	248	150~602

表 3 気体に対する定数  $A$ 、 $B$ [12]

また、 $\gamma$  に関しても測定がされている [12]。これを参考にして  $\gamma = 0.1$  とすると、Ar について 図 36 が得られる。ガス圧が高すぎると、気体分子間の距離が狭すぎるせいで、分子を励起出来るエネルギーまで電子が加速されないため放電電圧は高くなる。逆にガス圧が低すぎると、気体分子が少なくなり、電離が起こりにくくなるため、放電電圧は高くなる。

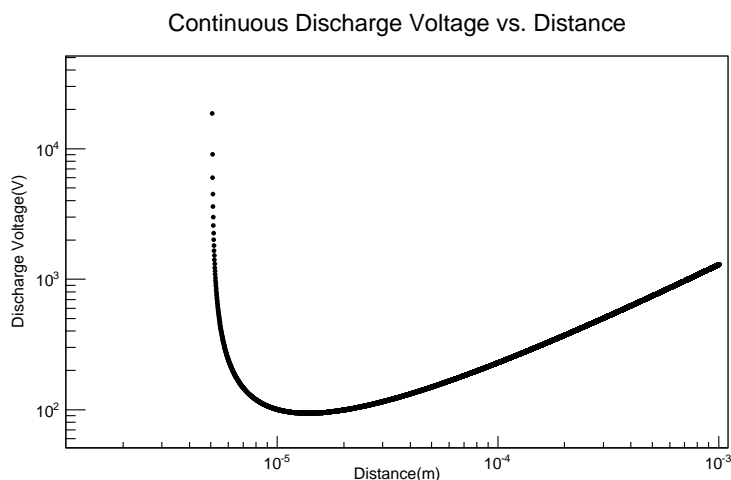


図 36 パッシュェンの法則による、放電電圧と電極の間隔の関係 (Ar)。 $\gamma = 0.1$ 、圧力  $p =$  大気圧/2 を仮定している。

### 3.7 放電試験

DeeMe 実験で使用する MWPC 内に張られているワイヤー間での、放電に関する試験を行った。また、ワイヤーサポートに沿面放電加工が必要かどうかという試験も行った。元々、MWPC を作成するにあたり、ワイヤーと SUS (ステンレス) プレート間での放電電圧は調べられていた (表 4)。

ワイヤーピッチ [mm]	放電電圧 [V] (0.5 mm のみ実測値、他は推定値)	必要電圧 (Gain $\approx$ 10 <sup>4</sup> )[V]
0.5	1400	1350
0.6	1680	1400
0.7	1960	1430
0.8	2240	1450

表 4 0.5 mm 間隔でのワイヤー-SUS プレート間での放電電圧と必要電圧

0.5 mm から 0.8 mm のものを記載しているが、実際に測定されたものは、0.5 mm 幅だけである。他の値は、ワイヤーピッチと放電電圧が比例しているものと考えて導き出したものである。最初はこの値を参考にしていたが、Prototype II の 0.5 mm 幅において、1400 V に満たない時点で放電を起こし trip してしまう現象が多発していた。この事実と、次の理由により、放電試験の必要性が出てきた。まず第一に、表 4 の結果は、ワイヤー間の放電現象を計測したものではないということ。第二に、ふたつの関係性が比例関係であるというのが憶測であること。パッシュェンの法則によると、最低値を持つ 2 次関数のような形になっていることが分かる。このグラフ上での比例関係の位置に、チェンバー内のワイヤー状態があるかどうかの疑問が出ていた。また、ワイヤーピッチを広げるということは、同じゲインを得るために電圧差をより大きくする必要があることが

GARFIELD による計算で分かっていた。これらの理由から、改めてワイヤーピッチと放電電圧の関係性を探り、DeeMe 実験の MWPC 開発を進める、というのが、今回の実験の目的である。

### 3.8 実験準備

実験を行うにあたり使用したものは以下である。

- ワイヤー (レニウムタングステン)2 種 15  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$
- G-10 ボード (実機で使われるワイヤー台と同じ素材)
- 密封容器 (市販のタッパーをシール材で密封したもの)
- ガス ( $\text{Ar}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ )
- アナログ電源 (図 37)
- その他ガス配線等接続に必要なもの



図 37 アナログ電源

G-10 板を加工し、ワイヤーの様子を観察し易いように、放電が起こるであろう箇所が円形に切り取られた状態になるようにする。図 38 のような手法で、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、それぞれの厚さの物を挟み、固定する。そうして出来た空間に、ワイヤーを張った。ワイヤーには、寄らないようにテンションをかけている。且つ、張ったワイヤーの長さを 1 cm にしているので、ワイヤーの寄りはないと考える。図 39 は、実際に張ったワイヤーである。0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm それぞれについて作成、さらに最も興味のある 0.7 mm については二サンプル作成したため、合計で四つのサンプルが完成した。図 40 の様に電圧線をつけた後、密閉容器に入れ、シール材でガス漏れのないようにした。

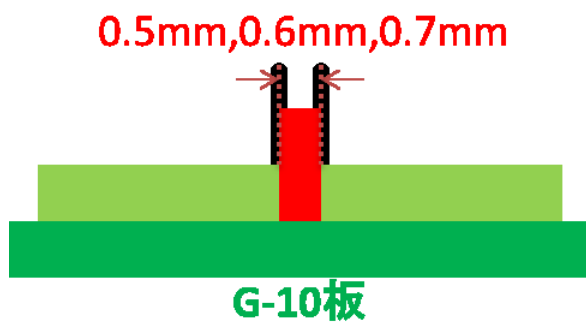


図 38 狭いピッチの実現方法

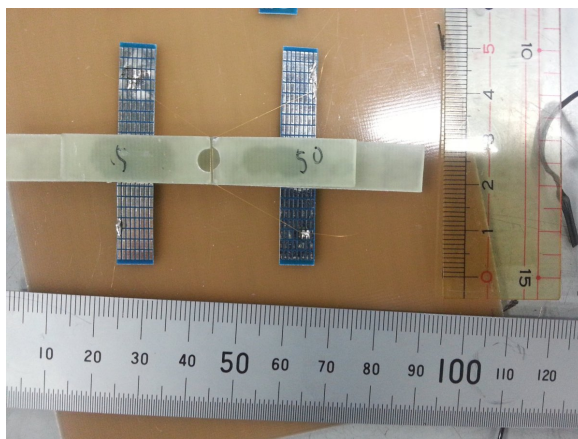


図 39 実際に張ったワイヤー



図 40 密閉容器

図 41、42、43、44 は、それぞれのワイヤーピッチを CCD カメラによって測定した写真である。ワイヤ - ピッチを測るために、図 45 のように定規を使用したキャリブレーションを行った。

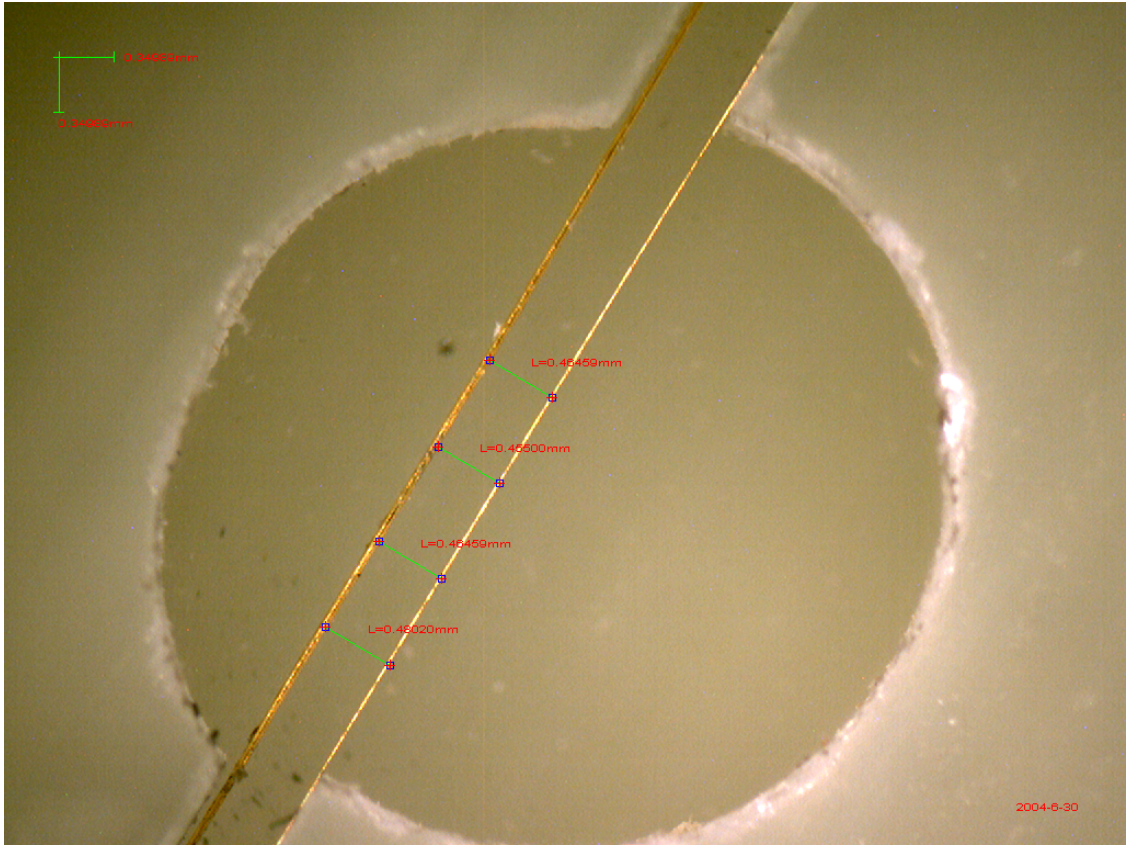


図 41 0.5mm サンプルのワイヤーピッチ

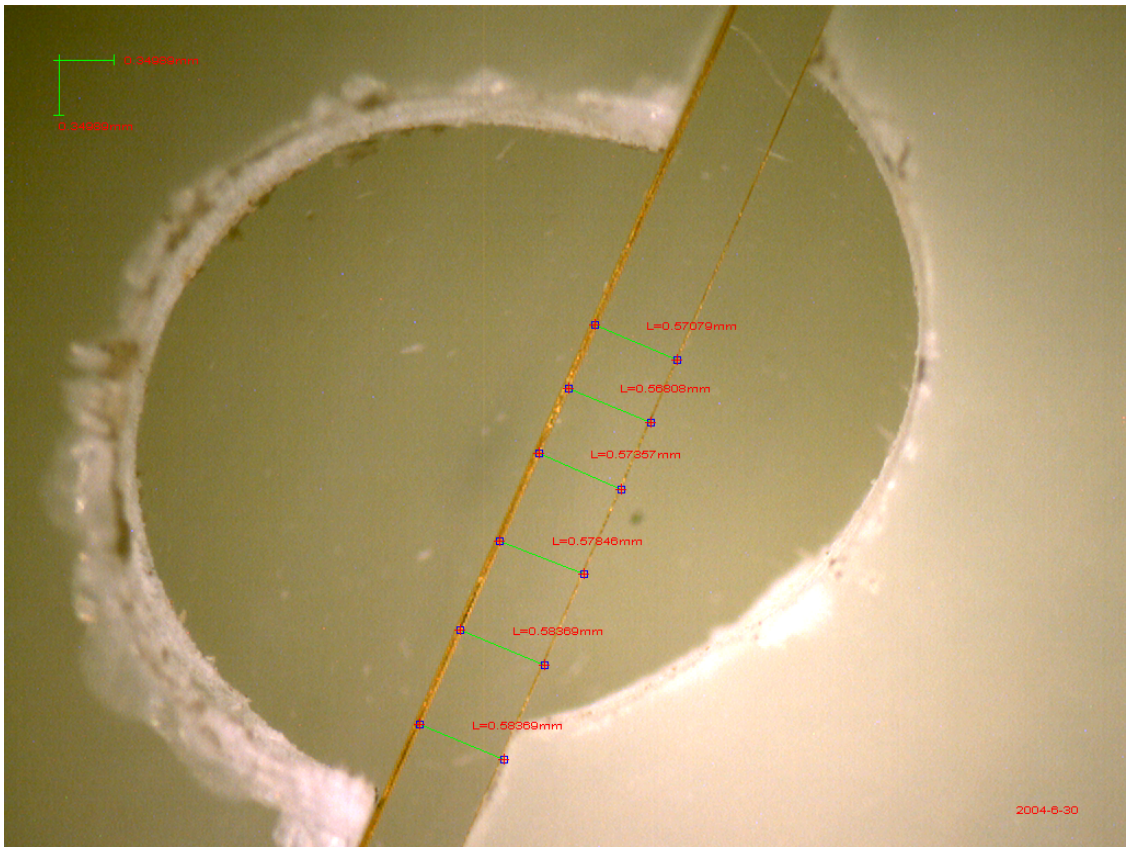


図 42 0.6mm サンプルのワイヤーピッチ



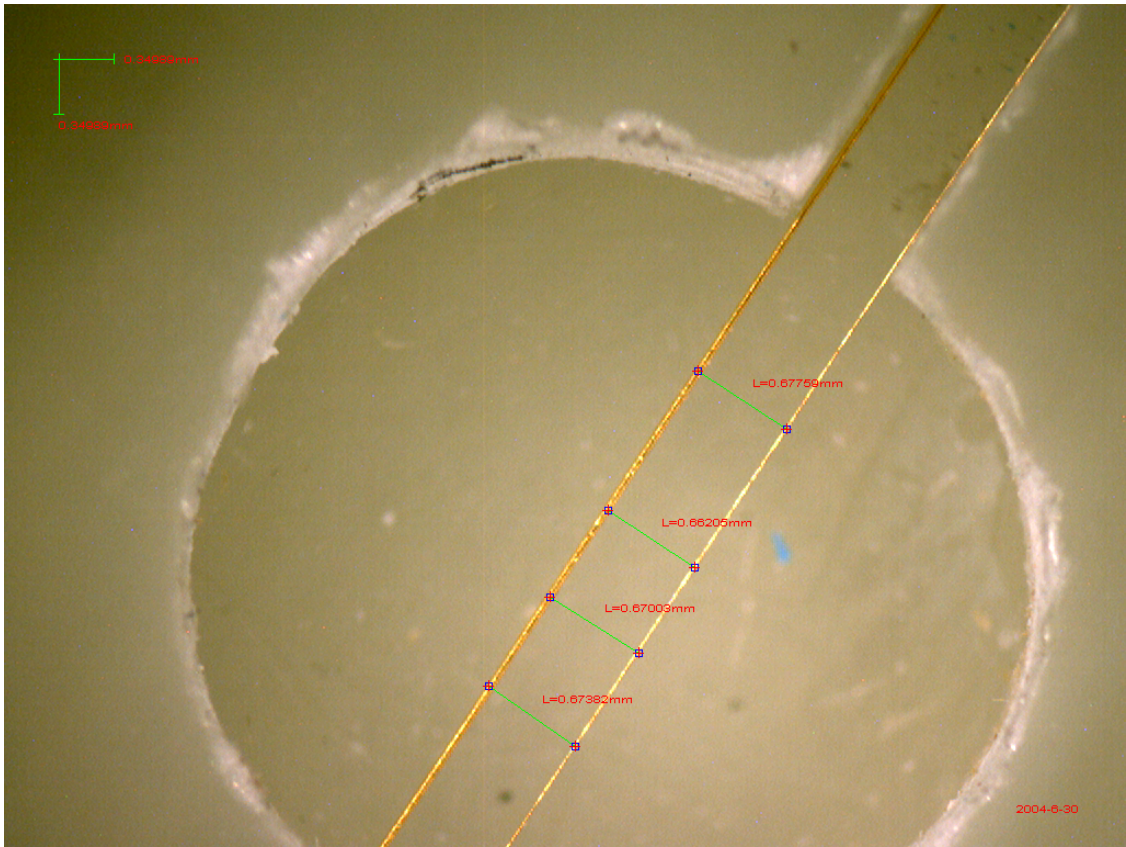


図 43 0.7mm サンプル (1) のワイヤーピッチ

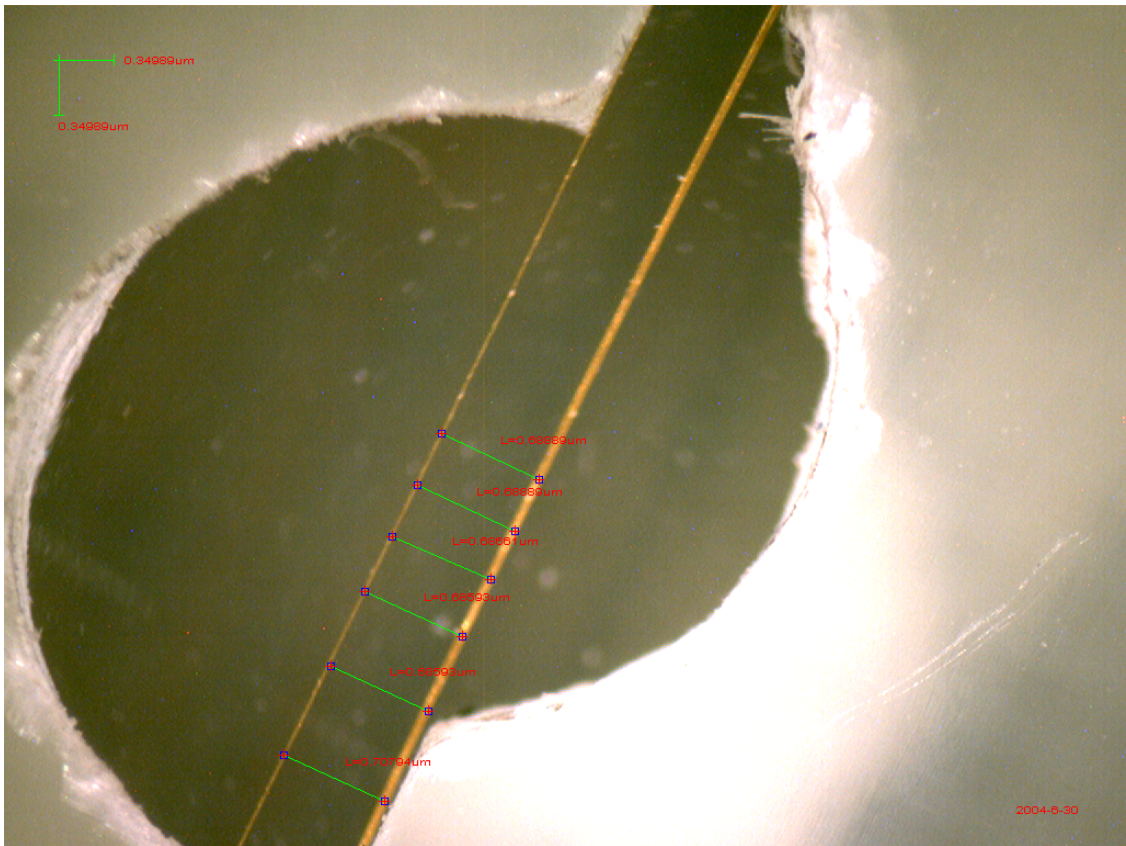


図 44 0.7mm サンプル (2) のワイヤーピッチ

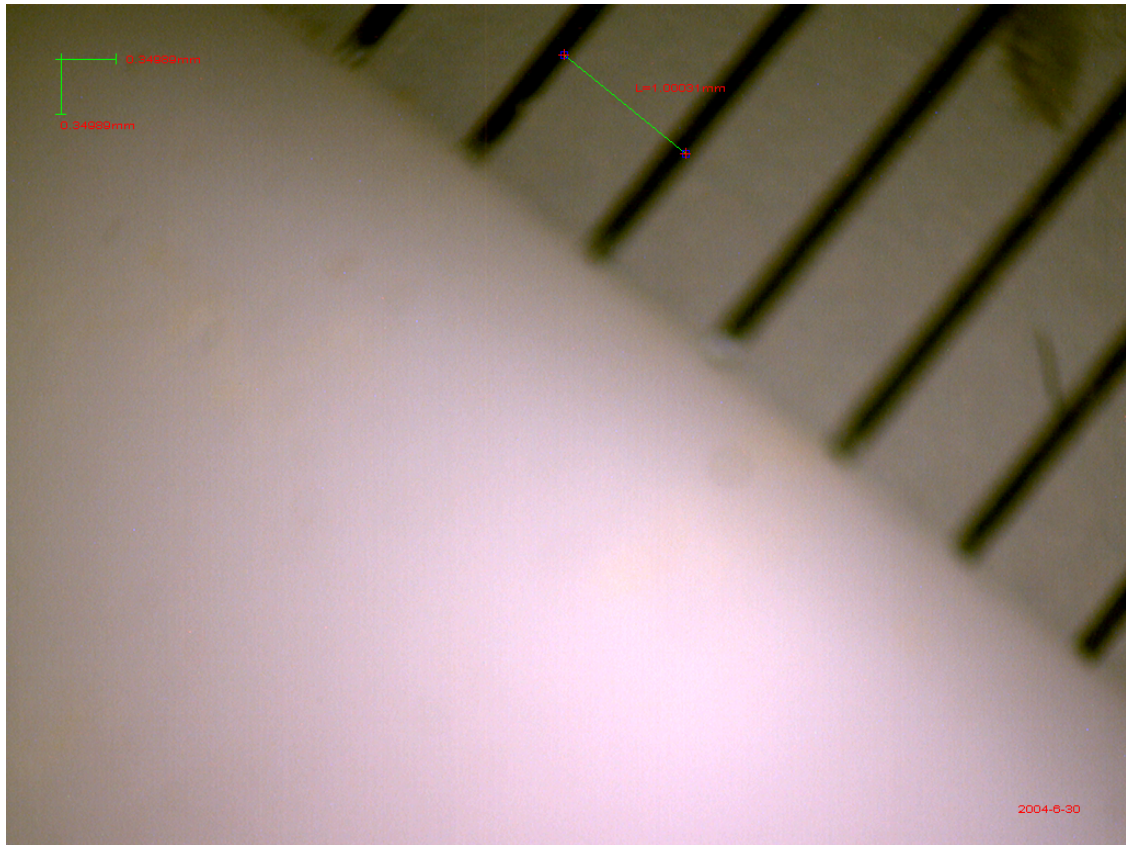


図 45 定規によるキャリブレーションの様子

### 3.9 セットアップ

ガス配管を図 46 のように行い、Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50,60:40,70:30 それぞれについて実験を行った。図 47 にガスを決めた量だけ供給するためのガスシステムを示した。図 48 に実際の配管を示した。効率良く順番に試験を行えるように、四つのサンプルを直列に繋ぎガス交換を行っている。

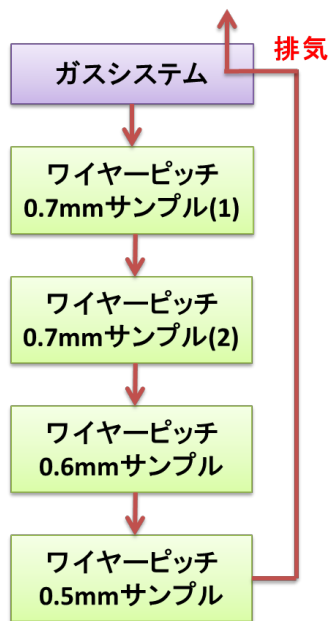


図 46 ガス配管の仕組み。正常に排気されているか確認するために排気ガスも一度ガスシステムを通して

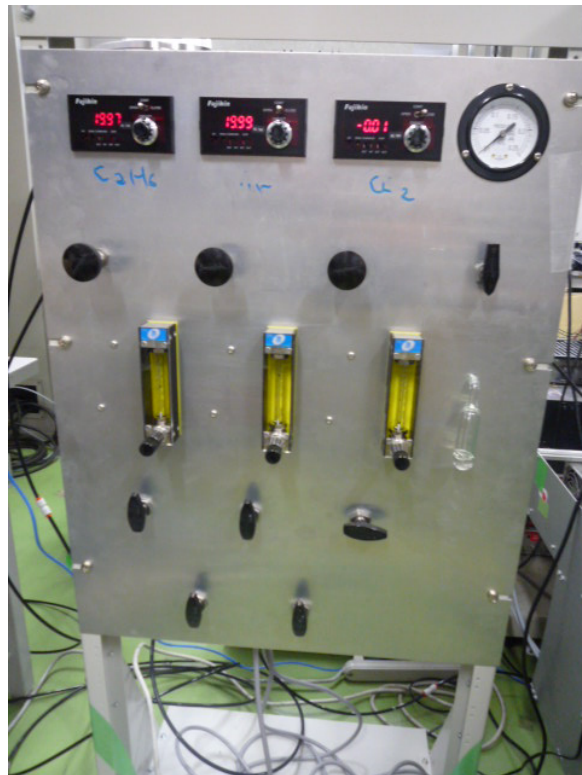


図 47 ガスシステム



図 48 実際のガス配管

ガスを流す時間については、タッパーの容量  $330 \text{ ml} \times 4 = 1320 \text{ ml}$  とガス流量  $20 \text{ cc/min}$  を考慮し、2 時間ほど余裕をもって流した。電圧をかける際には、ワイヤーに流れる電流値が急に変わらないよう、電流値をモニターしながら慎重に上げていくことが重要である。アナログ電源であり、電圧印加速度を一定に出来ないため、細心の注意を払った。

図 49、50 に、実際の放電の様子を示す。放電が起こると、数秒間放電が続いた後、電源がトリップを起こし電圧が下がる。ここでの観察から、これまで使用してきた図 37 の電源のトリップ速度(ここでは放電を起こしてから電圧印加が止まるまでの時間を指す)がとても長く、MWPC のワイヤー損傷の原因の一つであったことが伺えた。

放電試験を行っている途中で、ワイヤーが切れることは三つのサンプルに関しては無かったが、ワイヤーピッチ=0.662 mmのものに関しては、Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50の試験の途中でワイヤーが切れてしまったためデータは取得出来なかった。

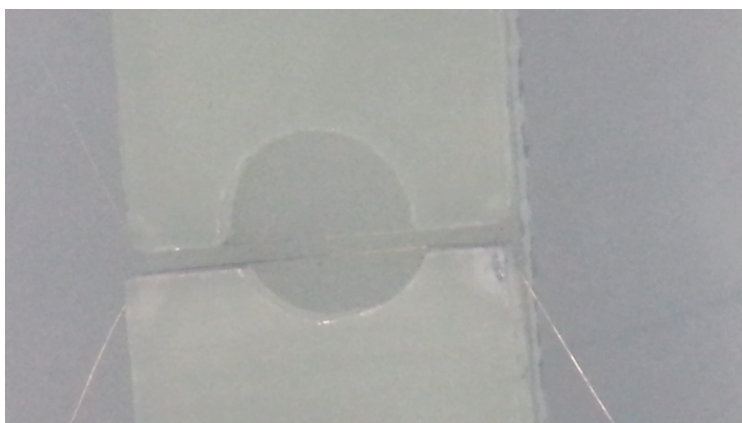


図 49 放電の様子 (放電前)

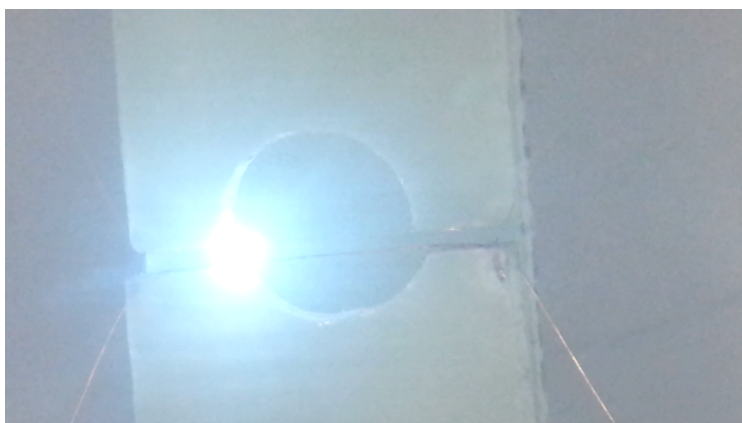


図 50 放電の様子

### 3.10 放電試験結果

放電試験の結果は以下の表のようになった。

ワイヤーピッチ [mm]	放電電圧 [V]					推定値
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	
0.465	1500.2	1350	1400.7	1410	1487	1300.9
0.568	1831	1430	1756	1600	1551.6	1590.6
0.662	1950.5	1850.2	1900.9	1850.7		1853.7
0.686	1850	1750	1890.3	1750	1820.4	1920.6

表 5 放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50)

ワイヤーピッチ [mm]	放電電圧 [V]				
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
0.465	1350.3	1380.5	1350.3	1350.4	1450.6
0.568	1450.1	1400	1450.5	1480.4	1550.4
0.662					
0.686	1750.1	1551	1551.3	1601.2	1550.2

表 6 放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=60:40)

ワイヤーピッチ [mm]	放電電圧 [V]						
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目
0.465	1400.6	1351	1330.5	1250.2	1200.7	1280	1251
0.568	1380	1451.3	1350	1400.7	1400.5		
0.662							
0.686	1500.5	1451.2	1521.7	1630	1550.9		

表 7 放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=70:30)

それぞれのワイヤーピッチに対する放電電圧を、試行回数順に並べている。3つの表はそれぞれガス混合比率を変化させた場合のものである。ガス混合比率が Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50 のものに関しては、ワイヤー-SUS プレート間での放電実験より推定された放電電圧をのせている。ワイヤー張りの工作精度、電圧印加速度の不定性、等の理由から、それぞれのガス配合において、放電電圧がまばらな値をとっていることが分かるが、概ねワイヤーピッチを広げると、放電電圧は上昇しているように見える。

グラフに表したものを図 51、52 に示す。

Discharge Voltage vs. Wire Pitch(Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50)

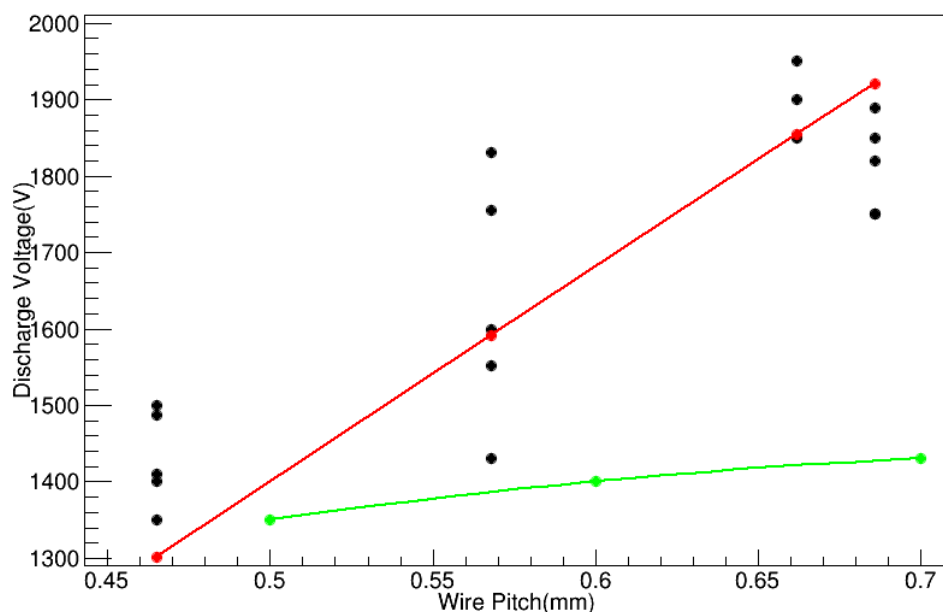


図 51 放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50)。赤線：推定される放電電圧、緑線：DeeMe で必要とされるゲイン ( $10^4$ ) を得るために必要な電圧

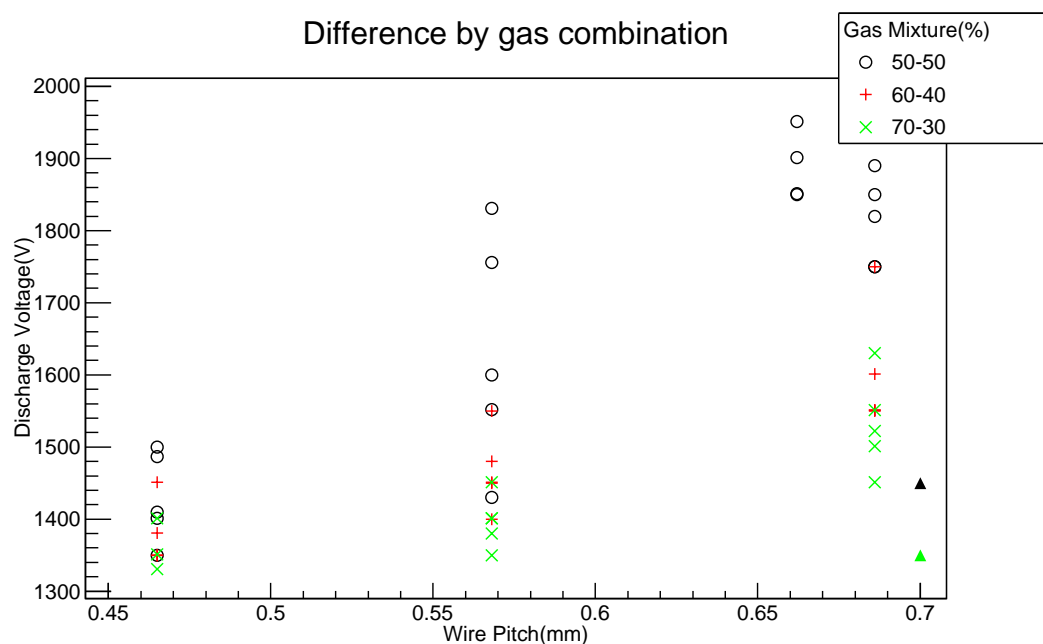


図 52 放電電圧 vs. ワイヤーピッチ (全てのガス配合)。黒：ガス配合 Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50、Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=60:40、緑：ガス配合 Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=70:30、の時をそれぞれ示している。

図 51 が、ガス配合比率 Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50 のみのグラフ、図 52 が全てのグラフを一つに表したものである。

図 51 の赤線は、推定されていた放電電圧である。概ねこれに従っているように見える。緑線は、DeeMe 実験で必要とされるゲイン ( $\sim 10^4$ ) を得るための電圧である。ここで、GARFIELD を用いて、静電引力によるワイヤーのたるみを計算した。ワイヤーピッチ 0.7 mm、ポテンシャルワイヤー：長さ 300 mm、テンション 80 g、アノードワイヤー：長さ 380 mm、テンション 30 g とい

う条件で、たるみが  $50 \mu\text{m}$  であることが計算された。ワイヤーピッチを狭くした場合、引力が大きくなるためこのたるみは大きくなる。これを考慮すると、 $0.5 \text{ mm}$ 、 $0.6 \text{ mm}$  では、左側、つまりワイヤーピッチが狭くなる方向に緑線 (必要電圧) を  $50 \mu\text{m}$  シフトした時、放電する可能性があることが分かる。しかし、 $0.7 \text{ mm}$  で考えると、同じようにシフトさせた時、放電電圧の測定値の最低ラインを考えても、 $200 \text{ V}$  程は余裕をもっていることが分かる。以上より、同じゲインを得ることが出来、分解能が十分であるならばワイヤーピッチを  $0.7 \text{ mm}$  にすることが、実験の安定的な運転に向けた最良の方法であることが分かった。

図 52 は、黒が  $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$ 、赤が  $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=60:40$ 、緑が  $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=70:30$  の時のプロットである。Ar の比率を上げていくと、放電電圧が下がっていくことが分かる。また、DeeMe で必要なゲイン ( $\sim 10^4$ ) を得るために必要な電圧をグラフ上に三角で示した。測定点と同様で、黒が  $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$ 、緑が  $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=70:30$  の点である。測定値の最低値と、三角点を比較した時、 $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=70:30$  は  $100 \text{ V}$  程の差しかなく、余裕がないように思える。対して、 $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$  を見てみると、 $300 \text{ V}$  程の余裕がある。よって、同じゲインを得る場合、ガス配合比率が  $50:50$  の方が安定的な運転に向いていることが分かった。

### 3.11 連続運転

次に連続運転可能が否かについて調べた。ワイヤーピッチ  $0.686 \text{ mm}$  のものを使用し、実際に DeeMe 実験で印加する電圧  $1450 \text{ V}$  (ワイヤーピッチ  $0.7 \text{ mm}$  時) よりも高く、測定結果では十分安定的だと判断された  $1600 \text{ V}$  を印加し、長時間安定して電圧がかかりつづけるか、つまりは放電による trip が起こらないかどうかを調べた。

結果、18 時間放電することなく、電圧はかかり続けた。放電電圧ぎりぎりまで上げたサンプルで、たとえ数分放電を起こさなくともしばらくすると急に放電が起きていたという経験則から、18 時間放電を起こさなかったというのは、安定して電圧がかかっているという結論に至った。

### 3.12 沿面放電試験

実機で使用するワイヤーサポート (図 33) と同じ物の一つ利用して、沿面放電試験を行った。図 53 は実際に張ったワイヤーである。少し  $0.7 \text{ mm}$  より幅が広めで、最も近いところで  $0.712 \text{ mm}$  である。図 54、55 に放電の様子を示す。

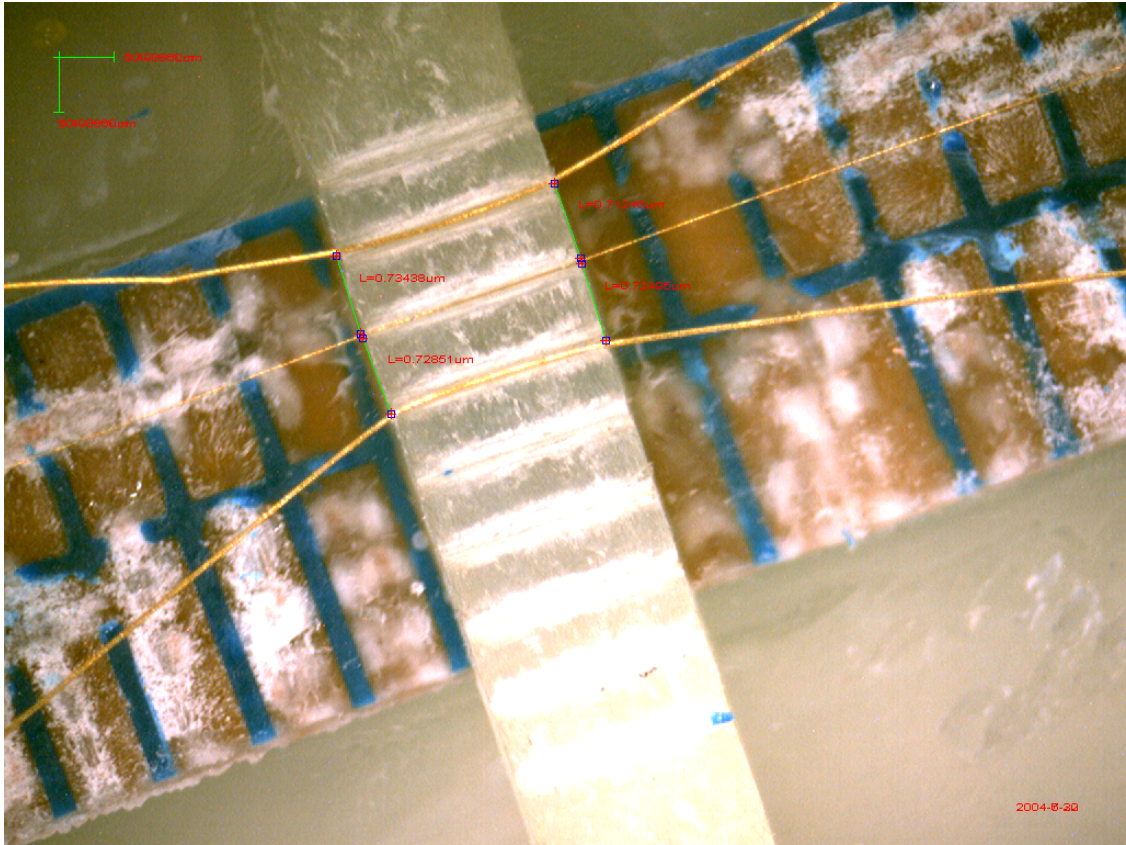


図 53 ワイヤーサポートとワイヤー 拡大図



図 54 ワイヤーサポートでの沿面放電の様子 (放電前)



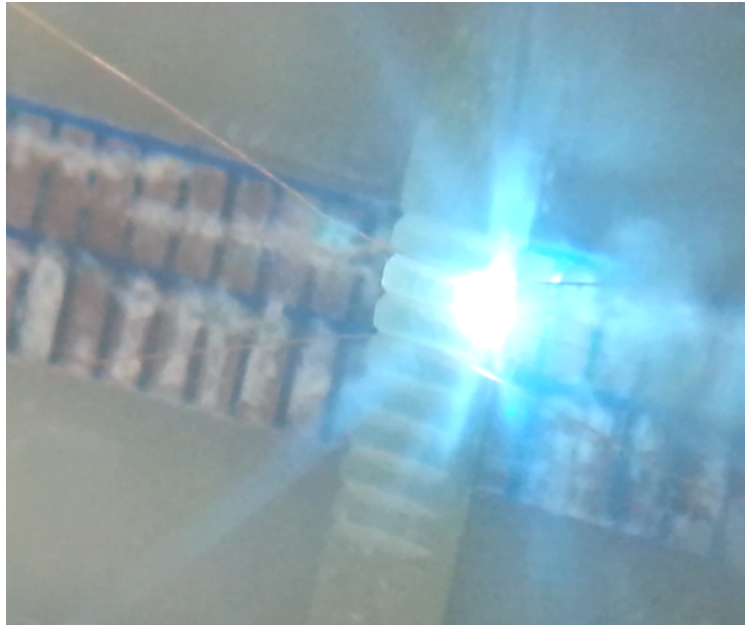


図 55 ワイヤースポートでの沿面放電の様子

結果は以下の様になった。

回数	放電電圧 [V]	備考
1	1970	1700 V まで上げるのに 20 分程かけている。1700 V で 1 時間半程放置。
2	1800	1000 V→1500 V まで速めに上げたが放電無し。
3	1680	1200 V→1600 V まで速めに上げたが放電無し。
4	1560	
5	1700	
6	1660	100 V/8 s 程度の速さで放電するまで上げたが放電無し。
7	1650	
8	1502	
9	1500	
10	1500	

表 8 ワイヤースポート上での放電電圧

表 8 より、回数を重ねると明らかに放電電圧が下がっていることが分かる。これは、図 54 を見ると分かるように、沿面放電によってワイヤースポート表面にすすのようなものが付着したことが原因だと考えられる。また、図 53、54 を改めて見ると、ワイヤが最も近いところで放電していることがすすより分かる。後日、このサンプルを再試験したところ、1650 V から 1700 V に上げる際に放電した。

回数を重ねると放電電圧が下がってしまっているが、一回目の結果を信用できると考えると、1700 V で安定して電圧がかかっており、尚且つ、1970 V まで耐えているため、0.7 mm ピッチの時の MWPC 印加電圧 1450 V にはかなりの余裕があると考えられる。よって、沿面加工無しでも十分な品質が得られると考えられたが、使用時間の蓄積によって耐電圧が下がる可能性が存在することと、沿面加工ありにするためのコストの二つを考えた結果、沿面加工済みのものを使用することとした。

### 3.13 放電試験結論

DeeMe 実験用 MWPC を開発するにあたって、内部のワイヤー間で起きる放電現象を理解するために、狭い間隔で張ったワイヤー間での放電試験を行った。結果、ワイヤーピッチ 0.7 mm、ガス配合 Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=50:50 の条件下では、低く見積もっても 1600 V は安定して印加可能であることが分かった。これは、0.7 mm ピッチの時に必要なゲイン ( $\sim 10^4$ ) を得るための電圧、1450 V から見て十分余裕があると言える。

また、別の実験として、MWPC 内でワイヤーの横移動を制限し、ワイヤーピッチが狭くなることを防ぐワイヤーサポート上での沿面放電試験を行った。結果、沿面放電を防ぐ加工が無いもので十分 1450 V は印加可能であることが分かった。しかし、回数を重ねることにより放電電圧が著しく低下していることから、安全策として沿面の加工済みのものを選択した。

この結果より、ワイヤーピッチ 0.7 mm での MWPC 製作が進行した。しかし、ビームテストでワイヤーピッチ 0.7mm の MWPC を使用したところ、放電は起こってしまった。その原因としては以下の様なものが考えられる。

- ワイヤーの工作精度の問題、及びワイヤーサポートに上手くワイヤーがフィットしておらず、予想していた 50  $\mu\text{m}$  以上のたるみが発生してしまっていること。
- MWPC 内には多数のワイヤーが張られているため、ワイヤー 2 本の場合と状況が違うということ。
- HV Switching により急激に電圧が変わってしまうこと。

放電問題によるワイヤー損傷を解決する策として、次章に出てくる「過電流が流れてから電圧が落ちるまでの時間が短い」電源が採用された。それによって、ワイヤー損傷は無くなったが、放電問題は残っていた。

### 3.14 逆 HV Switching

MWPC での放電の問題を解決するために、今までの HV Switching とは逆位相の HV Switching 方法が考案された。図 56 に、新しい Switching 方式を示した。

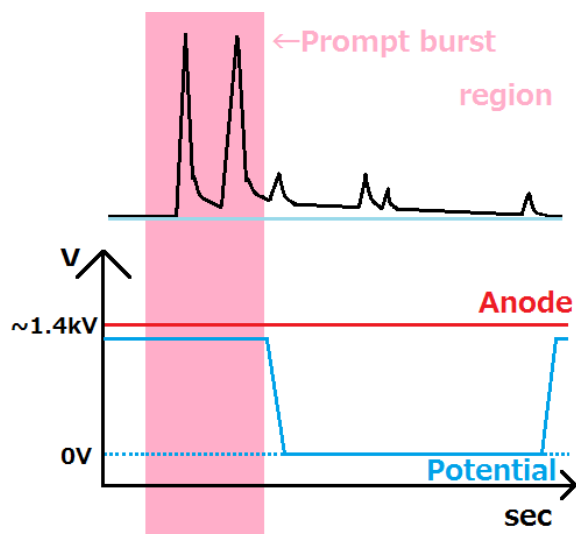


図 56 新 HV Switching

旧 HV Switching とは違い、通常時にアノード-ポテンシャル間の電位差を無くす方式である。アノード-ポテンシャル間に電位差を作って、MWPC を動作させる時間が短くなっている。例えば、現在試されているのはデータ取得時間 (電位差を作る時間)= $10 \mu\text{s}$  である。こうすることによって、 $10 \mu\text{s}$  の短い時間で放電が起きてしまっても、大きな放電へと成長することがなくなったと考えられている。実際、2015 年 11 月の MLF ビームテスト時、実験室でのテストに成功し、ビームを当てた状態でも長時間運転可能となった。

新たに発生した問題として、MWPC の動作時間が短くなったことによる、宇宙線バックグラウンド取得時間の減少が挙げられる。解決策として、動作時間  $10 \mu\text{s}$  を長くする、パルス陽子ビーム 25 Hz の間にいくつかのバックグラウンド用ゲートを入れる、等が考えられているが、放電問題、ワイヤーの熱による損傷問題等により、未だ議論中であり、テスト実験を行う予定である。

### 3.15 最終版 MWPC

表 9 に最終版 MWPC の構造を示す。図 57、58 は、最終版 MWPC である。X、Y 方向それぞれカソード読み出しの構造になっている。ただし、三、四台目はワイヤーピッチを  $0.75 \text{ mm}$  へと変更している。

wire pitch	0.7 mm
active region	250 mm × 200 mm
X readout	3 mm cathode strip, 5 × 16 チャンネル
Y readout	15 mm cathode strip, 16 チャンネル

表 9 最終版 MWPC の主な構造

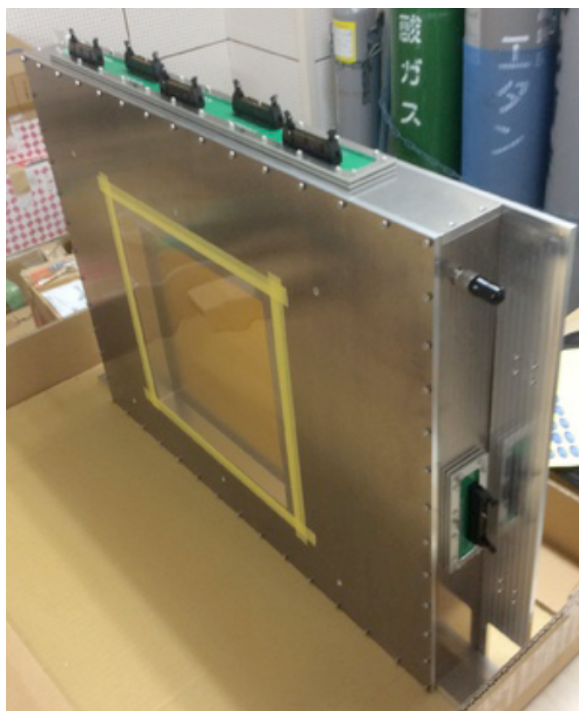


図 57 final MWPC

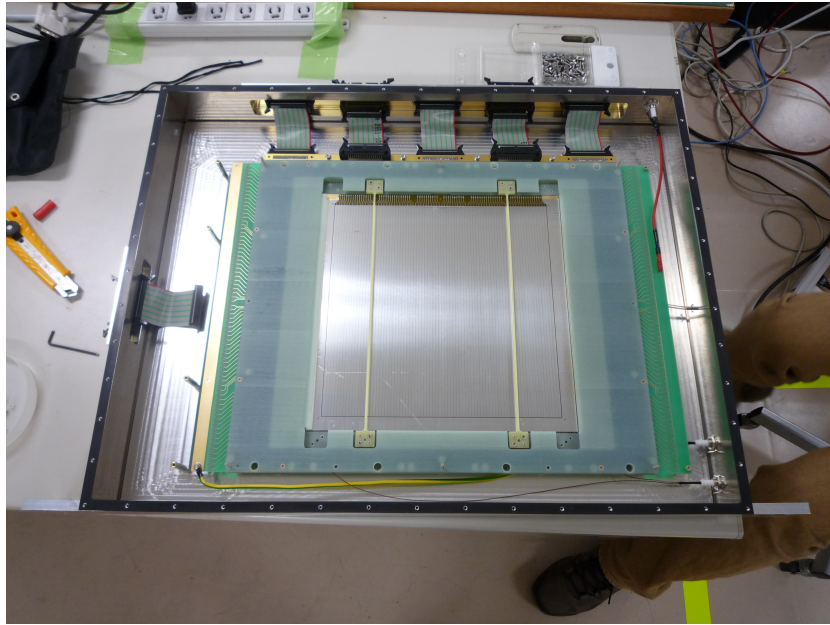


图 58 final MWPC 中身

## 4 DeeMe 実験で使用する MWPC のための HV 制御システムの開発

DeeMe 実験で使用する MWPC には、非常に繊細な電圧制御が求められる。それは、内部のワイヤーピッチの狭さ故の放電と、HV Switching の存在があるためである。そのため、DeeMe 実験の要求を満たした HV 制御システムを開発した。また、開発の途中で、iseg のハード的な問題を発見した。

本章では、DeeMe 実験で使用する電源をコントロールするシステム開発と、電源の性能試験について述べる。

### 4.1 iseg 社製電源 NHS

DeeMe 実験で使用される荷電粒子検出器 MWPC には、1 kV 以上の高電圧が印加される。高電圧により、MWPC 内のワイヤーが放電を起こしてしまうと、ワイヤーが損傷してしまう恐れがある。特に、放電の時間が長ければ長いほど、損傷が起こる可能性は高くなってしまふ。そのため、DeeMe 実験では、放電が起こってから（過電流が流れてから）電圧が落ちる (trip する) までの時間が短い電源を採用することにした。図 59 は、採用された iseg 社製の NHS という NIM モジュールである（以下、Iseg 電源と表記する）。また、主な仕様を表 60 に示した。



図 59 iseg 社製の電源 (NHS 6230p)

最大電圧 (設定分解能)	3 kV (10 mV)
最大電流 (設定分解能)	3 mA (5 nA)
電圧測定分解能	10 mV
電流測定分解能	3 $\mu$ A (> 20 $\mu$ A) 50 pA (< 20 $\mu$ A)
インターフェイス	USB,CAN

図 60 NHS 6230p の主な仕様

iseg 電源の特徴を以下に示す。

- 設定した電流値を超えてから trip するまでが速い (ハード的に最短の速さ < 1 ms)。
- 電圧値、電流値 (どこを過電流とするか)、電圧印加速度等、細かい設定を変更可能。
- USB 接続により、PC からの詳細なコントロールが可能。

iseg 電源には、制御出来るいくつかのパラメータが存在する。主なものを以下に示す。

#### Vset

電圧値。この値を目指して電圧は印加される。

#### Iset

通常は”Controlled Voltage Mode (CVmode)”であるが、電流の測定値が Iset を超えると”Controlled Current Mode (CCmode)”になる。

#### Voltage Ramp Speed

電圧の印加速度。Ramp down する時もこの値に従う。

#### kill enable/Disable

Cvmode から Ccmode へと移行した際に、“enable”ならばハード的に最短の早さで電圧を落とし、“disable”ならば“trip time”後に trip フラグが立ち、“trip action”で設定された挙動を示す。

#### trip action

trip フラグが立った後の挙動。

#### trip time

電流値が Iset を超えると“trip time”後に trip フラグが立つ。1~4095 ms の間で設定が可能。

また、“trip action”で選択出来る挙動を以下に示す。

#### none, flag event trip will be set after time out

trip したという情報は残すが、電圧はかけ続ける。

#### ramp down the channel high voltage

設定された Ramp Speed で電圧降下を始める。

#### switch off the channel without a ramp

Ramp Speed 関係なく、最速で電圧を落とす。

#### switch off the whole module

モジュール全体の電圧を最速で落とす。

#### disable the delayed trip function

設定全体を無効にする。

これらとは別に、モジュールで発生したイベントフラグというものもあり、trip フラグ、RampEnd フラグ、CCmode への移行を示すフラグ、等が存在する。

iseg には、Sub-D9 コネクタにより、外部から電圧印加を停止する信号を入れることが出来る。この入力を External Inhibit と呼ぶ。図 61 のように接続し、信号を入れることが出来る。Inhibit ピンは一つずつそれぞれのチャンネルと対応しており、設定することによって信号が入力された時に trip action と同じような挙動をさせることが出来る。



図 61 Inhibit ピンへの接続

## 4.2 シリアル通信

電気的な通信で相手方に 1 ビットずつデータを送信していく通信方法を、シリアル通信という。iseg 電源を制御するためには、図 62 のような、シリアル通信が可能なアプリケーションを利用する。

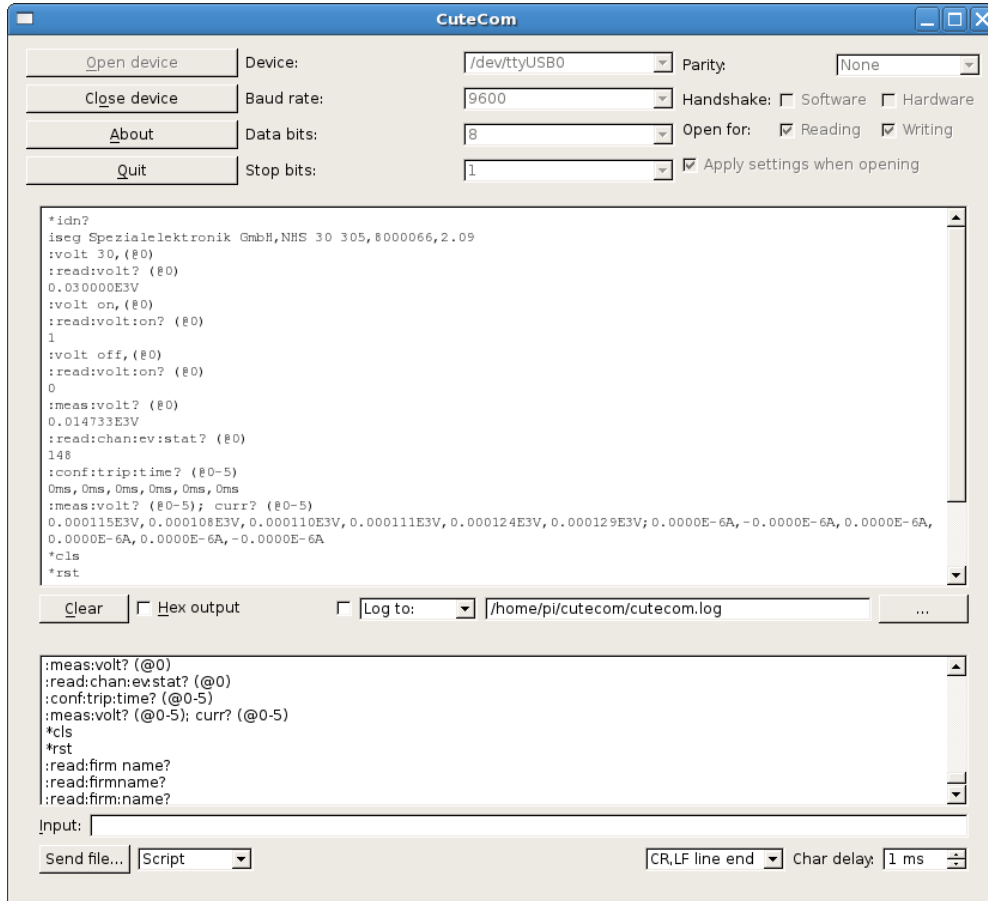


図 62 シリアル通信ソフト (cutecom)

例として送信出来る命令の例を以下に示す。

:VOLT 1000,(@0)

0 チャンネルの Vset を 1000 V に設定。

:CURR 1e-6,(@0-5)

0~5 チャンネルの Iset を 1  $\mu$ A に設定。

:VOLT ON,(@0,1)

0,1 チャンネルの電圧印加を開始する。

:MEAS:VOLT? (@0); :CURR? (@0)

現在の電圧、電流値を取得する (設定値ではなく、測定値)。

:READ:CHAN:EV:STAT? (@0)

0 チャンネルで立っているイベントフラグを 10 進数で取得。2 進数に変換することでイベントの確認が可能。

末尾にはてなマークがついている命令を送ると、iseg 電源側から返答がくるようになっている。

また、txt ファイルに命令文をまとめることで、一度に多くの命令を送ることも可能である。

### 4.3 iseg SCPI Controller

iseg 社製の、シリアル通信を利用した iseg 電源コントロール専用アプリケーションを図 63 に示した。感覚的に Vset や Iset を変更可能であり、リアルタイムに測定電圧、電流値、イベントを観測可能である。

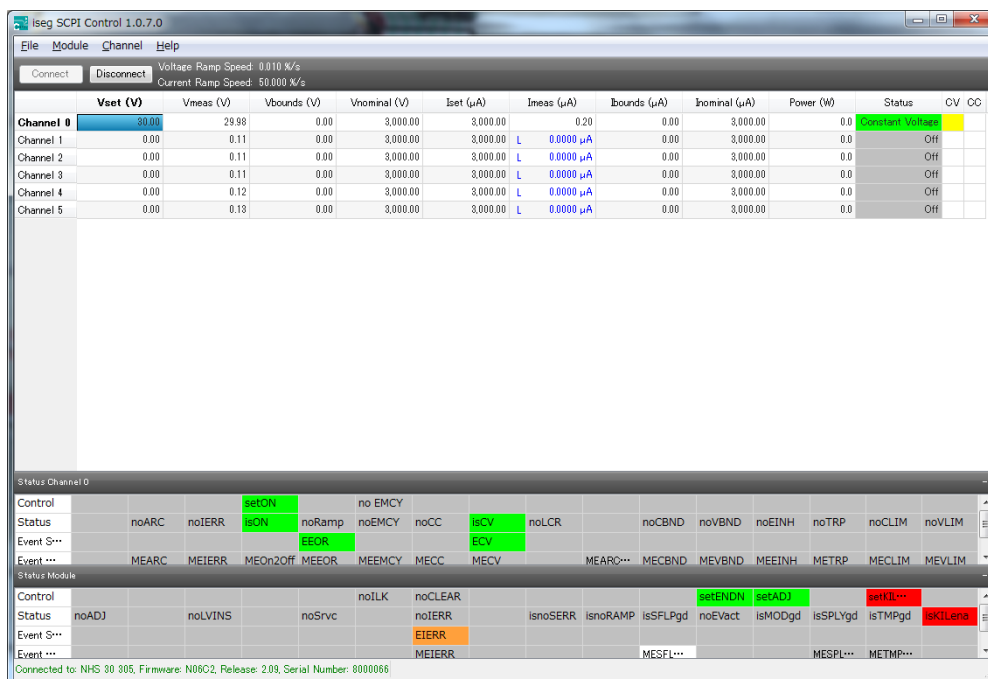


図 63 SCPI Controller

上半分が設定値や測定値の表示部分、下半分がイベント情報である。電圧印加時や trip 時にそれぞれの部分の色が変わっている。

購入当初はこちらのアプリケーションを利用していた。しかし、このアプリケーションは我々 DeeMe にとっては、以下のような使い辛い点が存在した。

- trip した後の挙動や trip time 等、細かい設定が変更出来ない (シリアル通信ターミナルを用いて別に命令を送る必要がある)。
- ログをとる機能や、その他細かい機能を追加するのが難しい (汎用性に乏しい)。

加えて、データ取得 PC とは独立したシステムを作成したいということで、このコントローラーとは別に、DeeMe 実験の要求に沿った iseg 電源制御システムを開発することにした。

### 4.4 Raspberry Pi

Raspberry Pi は、イギリスのラズベリーパイ財団によって開発されている、シングルボードコンピュータである。DeeMe 実験では、iseg 電源とコミュニケーションを取るための PC として、Raspberry Pi B+ (図 64) を採用した。主な仕様を表 66 に示す。基板上に、GPIO ピンと呼ばれる、デジタル信号入出力用ピンが合計 40 ピンついている。図 65 にそれぞれのピンの役割を示した。数字のみが書いてあるピンからは、3.3 V/0 V の On/Off デジタル信号を入出力可能であり、



TTL 信号として扱うことができる。

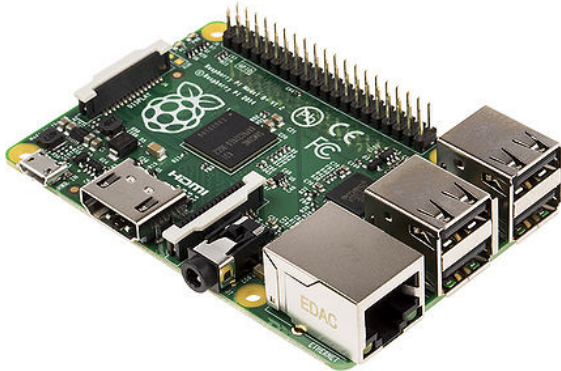


図 64 Raspberry Pi B+

Raspberry Pi Model B+		
+3.3V		+5V
SDA	2	+5V
SCL	3	GND
	4	14 TXD
GND		15 RXD
	17	18
	27	GND
	22	23
+3.3V		24
MOSI	10	GND
MISO	9	25
SCLK	11	8 CE0
GND		7 CE1
ID_SD		ID_SC
	5	GND
	6	12
	13	GND
	19	16
	26	20
GND		21
Low-level peripherals		

図 65 GPIO ピンの配置

core	ARM11
CPU クロック	700 MHz
メモリ	512 MB
大きさ	85 × 56 × 17 mm
電源	5 V/2 A (MicroUSB 接続)

図 66 Raspberry Pi B+ の主な仕様

## 4.5 Python

Python はプログラミング言語の一種である。C 等の言語に比べて読みやすく、簡単に少ないコード数でプログラムを作成可能な言語である。大規模なライブラリを所持しており、様々な用途で使用される。特徴として、ブロック構造の表現に括弧等を使わないということが挙げられる。プログラムの例を図 67 に示す。

```

#coding: utf-8

import datetime #日付、時間等を取得するモジュールのインポート

def test(message=None): #関数test() 引数はデフォルトでNone(何も入っていない)

    output = datetime.datetime.now() #今日の日付等を取得

    if message == None: #引数に何も入れなかった場合
        return "Today:" + str(output) #日付を返す

    else: #引数に何かしらを入れた場合
        output = "You input '" + str(message) + "'\n" + "Today:" + str(output) #出力する変数(output)を上書き
        return output #新しく作った値(output)を返す

if __name__=="__main__": #自分自身が直接呼び出された時に相当。この場合"python test.py"とした時に動作する。

    print test("Hello world!") #引数を入れた場合
    print ""
    print test() #引数を入れない場合

```




図 67 python 構文の例 (日付取得及び入力値を返すプログラム)

これに対して出力は、以下のようになる

```

You input 'Hello world!'
Today:2016-01-31 17:16:53.404663

Today:2016-01-31 17:16:53.404753

```

このように、インデントを用いてブロック構造を作るため、慣れれば視覚的に構造が理解し易くなっている。

ここで使用した if 文以外に

for "Num" in "List"

"List" (複数の要素を一つとして扱う収納箱の様な物) 中にある要素数だけ中の構文をループする。"Num" には "List" の要素が毎回入る。

while "不等号" "Num"

条件を満たしている間だけ中の構文をループする。+= (前の数に後ろの数を加える) とセットがよく使用される

等がよく使われる。

プログラムを走らせるためには、基本的にターミナル上で "python hogehoge.py" と入力するだけでよい。また、モジュールという概念があり、あるプログラム内にあるクラスや関数を他のプログラムに取り込む (import する) ことが容易である。多くの標準モジュールが用意されているため、Python の簡易なコードが生まれる。

## 4.6 Tornado

Tornado は FriendFeed によって開発された Python の Web フレームワークである。現在は Facebook に吸収され、オープンソース化されている。Tornado を使用することで、予め用意されたクラスの利用で、簡単な Web サーバ及び Web ページの作成が可能となる。また、WebSocket

通信の導入も比較的容易である。

WebSocket 通信は、ネットワーク用の通信規格の一つであり、Web サーバと Web ブラウザの双方向通信を実現している。WebSocket 通信は、サーバとブラウザが一度通信 (コネクション) を行った後、必要な通信をそのコネクション上で専用のプロトコルを用いて行う。他の方法と違い、コミュニケーションを取る度に新たにコネクションを張る必要が無くなるため、通信のロスが減るといったメリットがある。Internet Explorer や Mozilla Firefox 等、多数のブラウザで実装されている。

#### 4.7 iseg Control Application

DeeMe 実験に向けて、iseg 電源の詳細な制御が出来るようなアプリケーションを開発した。主に iseg.py と server.py、form.html の 3 つのファイル扱う、図 68 に構造図を示した。

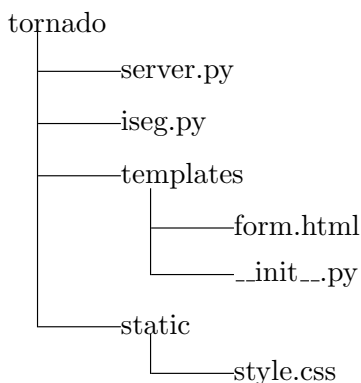


図 68 Web フレームワーク Tornado の構造

- server.py  
Web サーバを立ち上げ、form.html と相互に情報を交換する。
- iseg.py  
iseg とコミュニケーションを取る。
- form.html  
Web ページを構成する。server.py と相互に情報を交換する。

\_\_init\_\_.py は構造上必要なものであり、style.css は form.html で用いるスタイルシートである。プログラムを実行するとサーバが立ち上がり、Raspberry Pi の IP アドレスへとアクセスすると、WebSocket 通信がスタートする。

動作の仕組みは至って単純であり、Web ブラウザの方から何も命令が無ければ電圧値、電流値の取得を連続で行う。また、trip 等の iseg 電源ステータスを取得し、それに対する対処もされる。Web ブラウザから何かしらの命令 (電圧値の変更、電圧印加開始等) があった場合、それを遂行する。基本的には、この二つの動作を、可能な限りの速さで繰り返すのみである。

これを実現するために、Server.py 内でグローバルなリストを用意し、その中に Web ブラウザからの命令を格納するようにした。

リスト内に命令が何も無い場合：電圧値、電流値、ステータスの取得を行う。

リスト内に命令が何か有る場合：命令によってそれぞれ定義された処理をする。命令が処理された後、命令をリストから削除する。

これにより、常に iseg 電源の情報を取得しながら必要な命令を送るシステムの構築が可能になっ

た。server.py では、iseg 電源とコミュニケーションを取るために作成した iseg.py モジュールをインポートしてある。

iseg.py には、iseg と通信するための情報と、iseg に送る生の命令文が複数記述されている。iseg 電源と通信するには、接続した USB ポートの情報、通信速度・・・の情報が必要であり、ここに記載している。iseg 電源とコミュニケーションをとるためには、設定値変更、電圧印加、等の命令を送り、返答がある命令を送った場合は、その返答を読み取る。という 2 つのプロセスが必要である。iseg.py 内に、命令文と読み取り文をまとめた関数を作成しておくことで、一度に複数の処理を行い、値を返すことが出来るようにしている。既存の定義以外に追加したい時にも、他と同様に命令文を打ち込むだけなので、すぐに機能を広げることが出来る。

実際に作成した Web アプリケーションを図 69 に示す。アプリケーションは複数のテキストボックス、読み取った値の表示部分、操作ボタンで構成されており、form.html にソースコードがある。例えば、trip を起こすと、図 70 のようにアラートが出るようになっている。電圧値、電流値の取得間隔を測定 (図 71) したところ、1 回の取得当たり 460 ms かかっている。

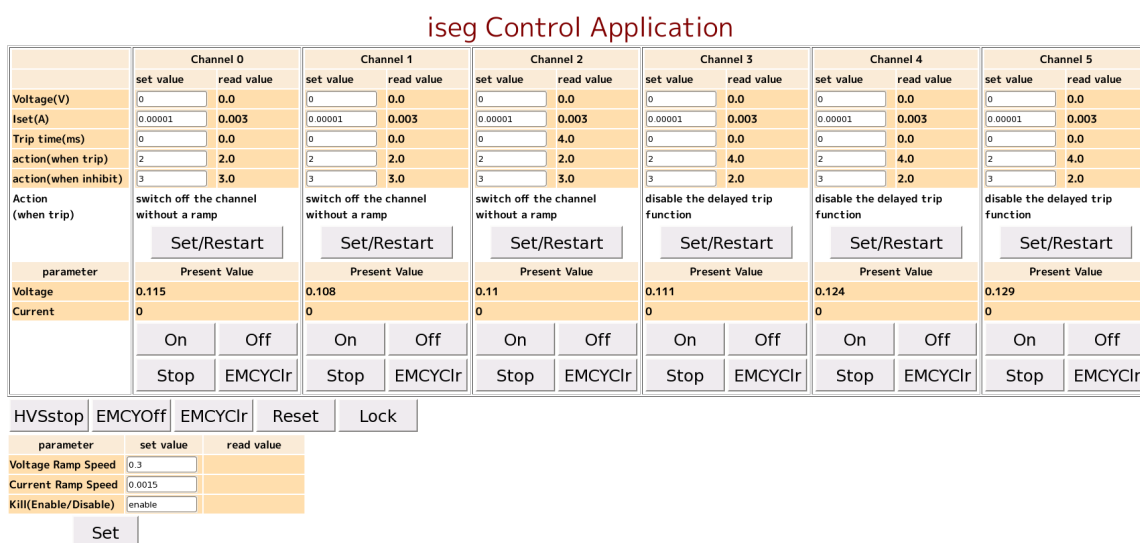


図 69 iseg application system

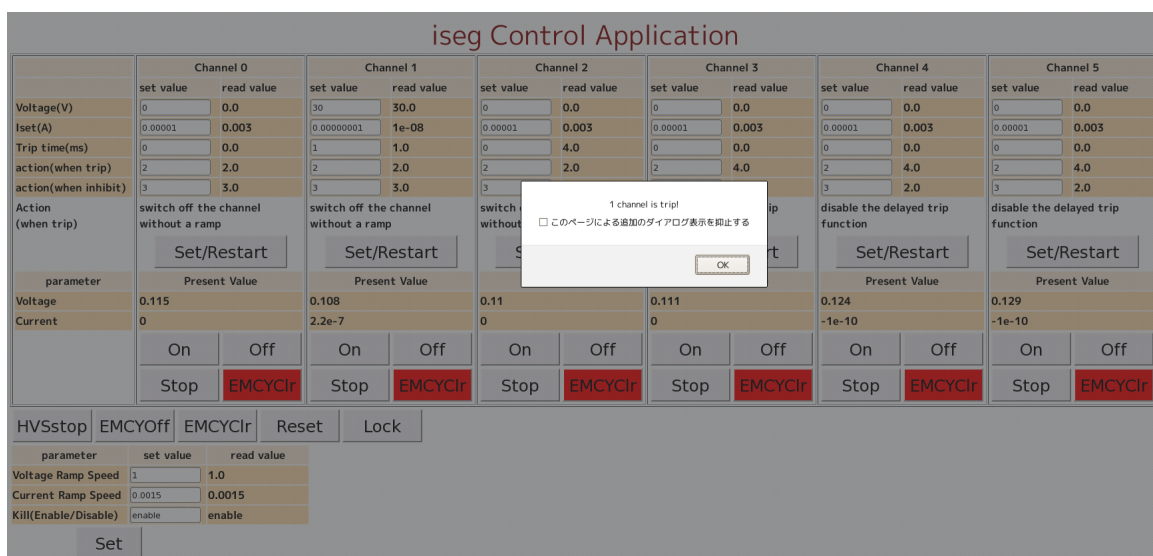


図 70 iseg application system (trip 時)

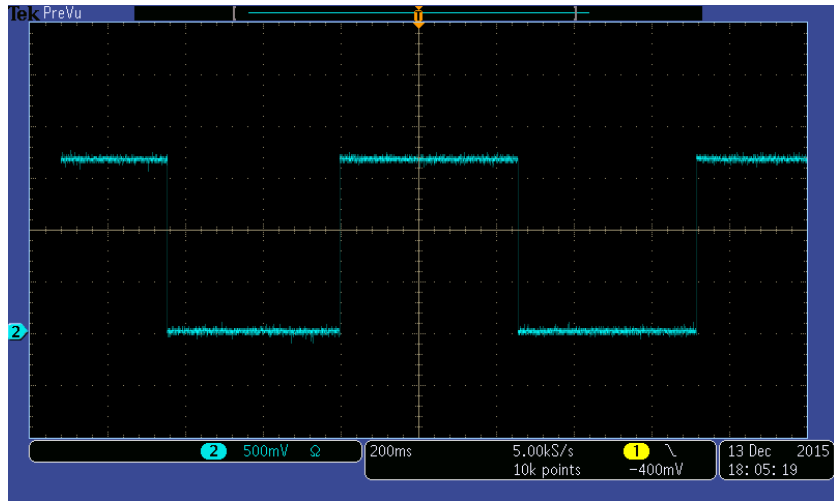


図 71 データ取得間隔測定

#### 4.7.1 log 機能

定期的な電圧値、電流値の取得、及び設定値の変更、放電等による trip の発生、等の情報をログとして残す機能をつけた。図 72 に、実際のログ情報を示した。出力する値は随時変更が可能である。また、電圧、電流の測定値の取得間隔も調整出来るようにしている。

```
[I 160131 18:18:17 server:31] log file name is : logdata/ISEG_20160131_1818.log
[I 160131 18:18:19 web:1825] 304 GET / (202.13.211.135) 498.83ms
[I 160131 18:18:32 server:31]
Change setting parameter
Voltage Ramp Speed(V/s) : 1.0
Current Ramp Speed(A/s) : 0.0015
Kill(Enable/Disable) : disable
[D 160131 18:18:35 server:27]
Voltage & Current @0-5 channel (Upper:Voltage Lower:Current):
0.000115E3V,0.000108E3V,0.000110E3V,0.000111E3V,0.000124E3V,0.000129E3V
0.0000E-6A,-0.0000E-6A,0.0000E-6A,-0.0000E-6A,-0.0000E-6A,-0.0000E-6A
[I 160131 18:18:36 server:31]
Change setting parameter @ channel 1
Voltage(V) : 30.0
Iset(A) : 1e-05
Trip time(s) : 0.0
Action(when trip) : 2.0
Action(when external inhibit) : 3.0
[I 160131 18:18:38 server:31] channel1 volt 0n
[D 160131 18:18:45 server:27]
Voltage & Current @0-5 channel (Upper:Voltage Lower:Current):
0.000115E3V,0.018003E3V,0.000110E3V,0.000111E3V,0.000124E3V,0.000129E3V
0.0000E-6A,0.00022E-3A,-0.0000E-6A,0.0000E-6A,-0.0000E-6A,-0.0000E-6A
[D 160131 18:18:52 server:27]
Voltage & Current @0-5 channel (Upper:Voltage Lower:Current):
0.000115E3V,0.024998E3V,0.000110E3V,0.000111E3V,0.000124E3V,0.000129E3V
0.0000E-6A,0.00022E-3A,0.0000E-6A,-0.0000E-6A,-0.0001E-6A,-0.0000E-6A
[I 160131 18:18:55 server:31]
Change setting parameter @ channel 1
Voltage(V) : 30.0
Iset(A) : 1e-08
Trip time(s) : 0.0
Action(when trip) : 2.0
Action(when external inhibit) : 3.0
[I 160131 18:18:55 server:31]
trip! @ 1channel
[D 160131 18:19:00 server:27]
Voltage & Current @0-5 channel (Upper:Voltage Lower:Current):
0.000115E3V,0.000108E3V,0.000110E3V,0.000111E3V,0.000124E3V,0.000129E3V
0.0000E-6A,-0.0000E-6A,0.0000E-6A,0.0000E-6A,-0.0000E-6A,-0.0000E-6A
--- ISEG_20160131_1818.Log All L45 (Fundamental)-----
```

図 72 ログ情報

## 4.8 trip time 設定

trip time 設定は、過電流が流れてから trip フラグが立つまでの時間設定である。Kill 設定を”disable”にしておくことで、電流値がすぐ正常に戻るような単発的な放電を無視することが出来る。DeeMe 実験的に当てはめると、MWPC 内での、ワイヤーに影響のないような単発放電を無視することが可能となる。この設定について、開発の途中で iseg 電源にハードウェア的な問題を発見した。

trip time の設定が正常に動作しているかを調べた。図 73 のような回路を組むことで、抵抗  $10\text{ k}\Omega$  の時、 $30\text{ V}$  で  $3\text{ mA}$  の電流が流れるようにし、Iset を  $3\text{ mA}$  にしておくことで trip を起こすようにした。実際オシロスコープで見える波形を図 74 に示す。

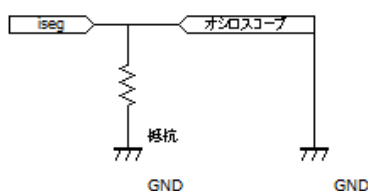


図 73 trip time 測定セットアップ

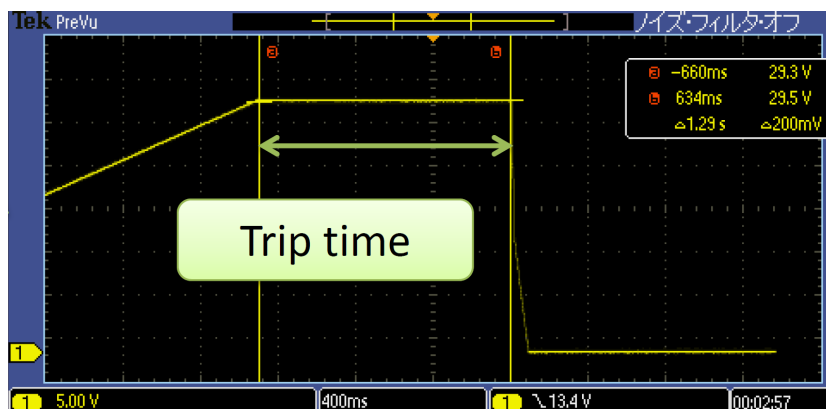


図 74 電源を trip させたときに見える波形

結果を図 75 に示した。赤線が正常に設定されている場合である。また、図 76 に、trip time 設定値に対する測定値の比を示した。全体的に、設定値よりも 20% 程落ちているのが分かる。

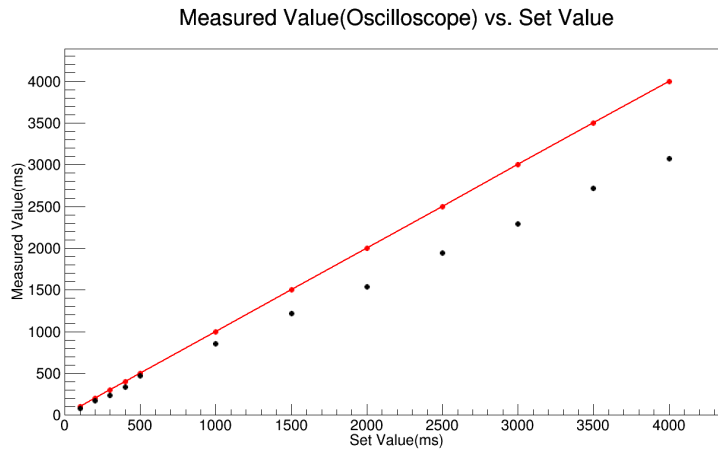


図 75 trip time

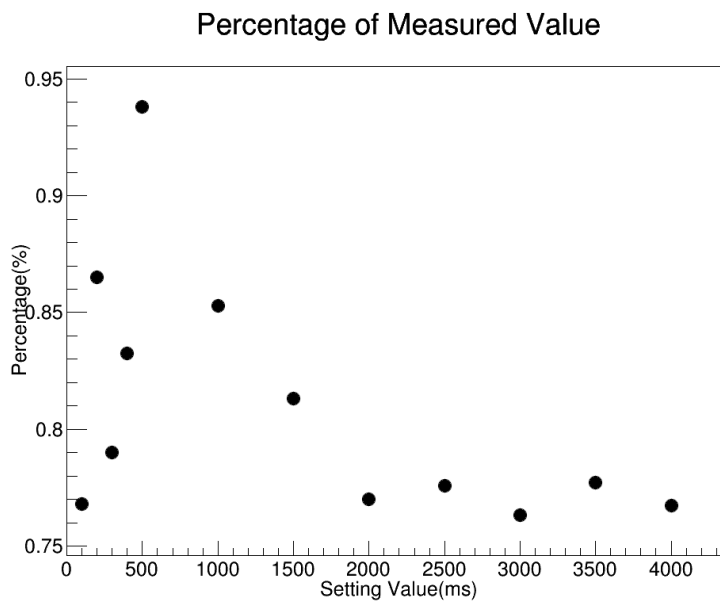


図 76 trip time 設定に対する測定値の比

また、この実験の過程で、trip time の設定値反映に遅延が存在することが分かった。例えば、あるタイミングで trip time=300 ms であったとする。その状態から「:conf:trip:time 500,(@0)」というコマンドを用いて、チャンネル0の trip time 設定を変更する。これにより、trip time の設定値は 300 ms から 500 ms に変更されたはずである。ところが、電圧印加をスタートし、trip を起こさせる (trip time 測定と同じセットアップで) と、図 77 のような出力が得られる。読み取ると 236 ms になっているが、これは前述した結果より、300 ms の設定時の値であることが分かる。つまり、trip time の設定が反映されていない。次に、この設定のまま変えずにもう一度電圧印加から trip という流れを行うと図 78 のような結果となる。読み取り値は 390 ms であるが、これは 500 ms 設定時の値である。このことから、trip time の設定は、一度電源が trip を起こさないと反映されないということが分かった。

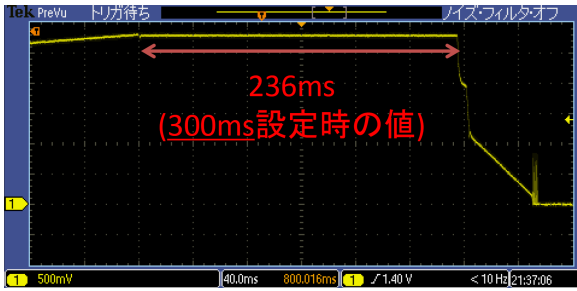


図 77 trip time を 300 ms→500 ms へと変更し trip させた時の trip 波形

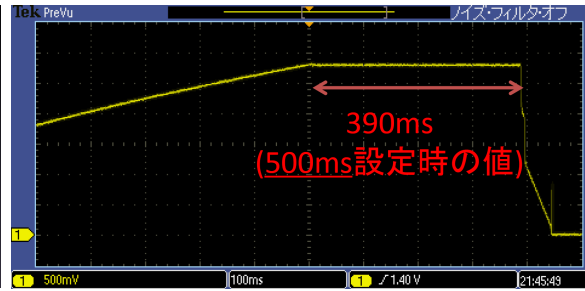


図 78 図 77 の状態からもう一度 trip させた時の trip 波形

#### 4.9 iseg firmware アップデート

これらの問題を改善するため、iseg 電源の firm ware のアップデートを行った。初期の段階での firmware は ver2.07 であり、最終的に ver2.09 までのアップデートを行った。

それぞれの改善点を以下に示す。

ver2.08... コントロールしていないチャンネルが trip を起こした後の状態になっている問題。

ver2.09...trip time の設定が遅延する問題、trip time の設定が綺麗に反映されない問題。

アップデート終了後、これらの問題をチェックしてみると、問題なく動作していた。(ver2.08 については、どのような条件の時に起こる問題なのかが判明していなかったため、100% 確認出来たわけではない。)

図 79 アップデート後に測定した trip time のグラフである。改善されているのが見て取れる。以上、iseg の不具合を発見したが、firmware のアップデートにより改善することが出来た。

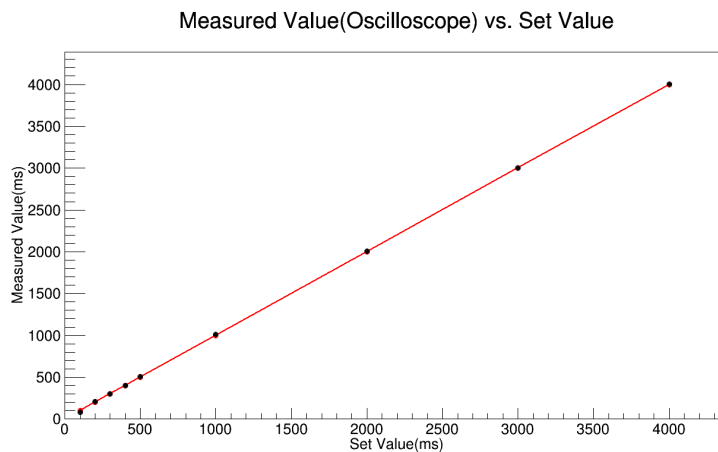


図 79 trip time (firmware アップデート後)

#### 4.10 実験現場でのセットアップ

MWPC では、アノードに DC1450 V を印加し、ポテンシャルの電圧は Switching をしている。どちらかが trip を起こした場合に、片方が電圧印加状態のままであると、どちらが trip したとしても MWPC にとってよくない。そのため、どちらかが trip した時にもう片方の電圧もオフにするという機構が必要である。ここでは、今まで行ったビームテストそれぞれの条件での、セット



アップについて説明する。

#### 4.10.1 Artek 回路時のセットアップ



図 80 Artek 社製 HV Switching 回路

旧 HV Switching 案は図 29 で示した方式である。HV Switching 回路は、Artek 社製 (図 80) であり、AC 電源より自らでスイッチング電圧を生成する。スイッチングしたい時間に合わせて TTL 信号によるゲートを作り、回路に入れることでスイッチングが実現出来る。この回路における問題として、独自の電源を持っているため、アノードワイヤー側、つまりは iseg 電源側でトリップが起きた際、Artek 回路側は放電を知る由がないことが挙げられる。そのため、Artek 側でスイッチングを停止するようなセットアップを外で行わなければならない。

図 81 のようなセットアップを行った。

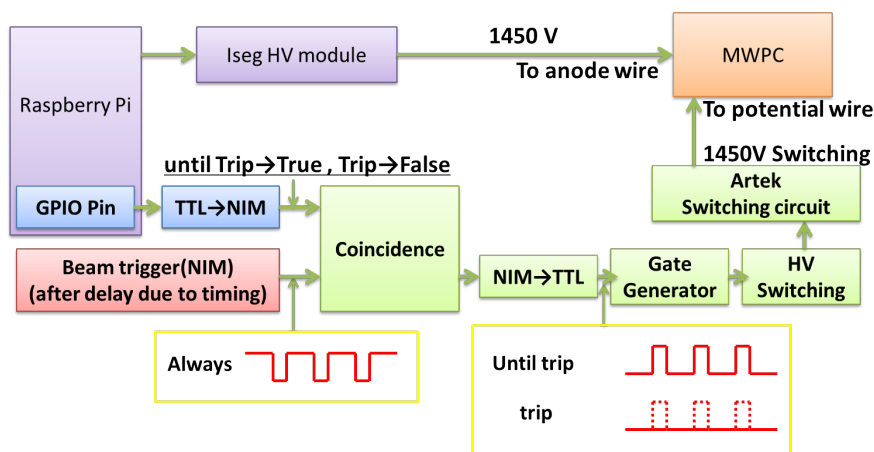


図 81 Artek 回路時のセットアップ

GPIO ピンからの信号を反転したものと、ビームによるトリガーのコインシデンスでゲートを作成しておき、iseg 電源がトリップしたことを Raspberry Pi 側で検知した後、GPIO ピンから信号を出し、それによってゲート信号が出力されるのを止める方式である。

#### 4.10.2 Behlke 回路時のセットアップ

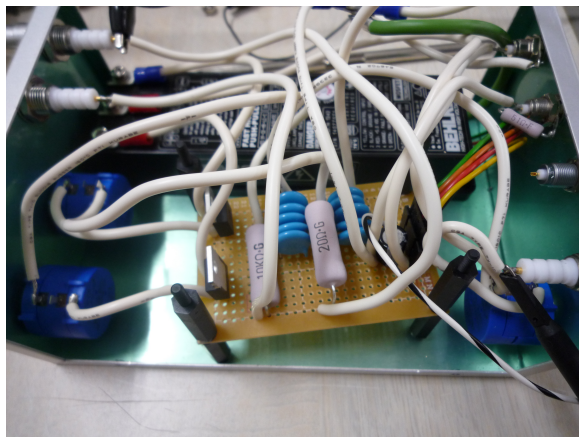


図 82 Behlke 社製 HV Switching 回路

新 HV Switching 案は図 56 で示した方式である。HV Switching 回路は、Behlke 社製 (図 82) であり、電源は iseg より供給している。Artek 回路と同様に、TTL 信号によるゲートで動作する。こちらの場合、電源を iseg 電源から取っているため、iseg 電源内での処理のみで HV Switching を停止することが可能である。セットアップを図 83 に示した。

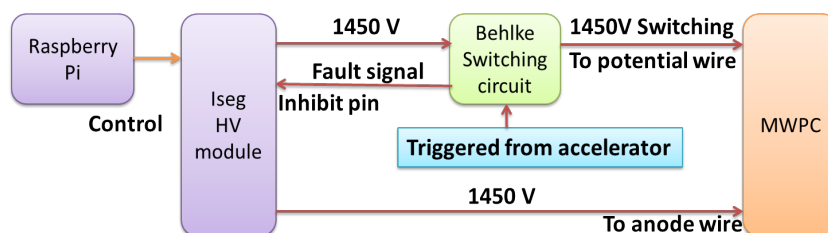


図 83 Behlke 回路時のセットアップ

iseg 電源では、trip action 設定により、一つのチャンネルがトリップした時に iseg 電源全体の電圧を一気に落とすことが可能であるため、この設定を用いている。しかし、ハード的な問題により、この設定が”生きている”時と”死んでいる”時があるため、Raspberry Pi 内のプログラムで「六チャンネルの内どれかがトリップした場合、全てのチャンネルを Off にする」という機能を追加し、もしもの場合の安全装置とした。また、Behlke 社の回路は、回路で熱等により異常があったとき Fault 信号を出すことができる。この Fault 信号を iseg 電源の対応する Inhibit ピンへと接続している。

#### 4.11 NIM module 化

Raspberry Pi を本番実験環境で効率よく使用するために、NIM モジュール化し、NIM クレータからの電源で動作するようにした。作成した NIM モジュールを図 84、85 に示す。



図 84 Raspberry Pi を動作させるための NIM モジュール (内部)



図 85 Raspberry Pi を動作させるための NIM モジュール (正面)

NIM クレートから 12 V を引き出し、荷電流時の対策として 12 V/24 V 用 2 A ヒューズを通した後、三端子レギュレータによる定電圧回路 (図 86) で Raspberry Pi に 5 V の電圧を供給している。

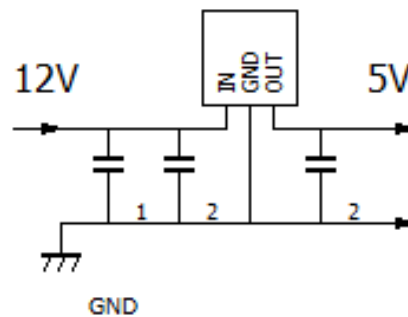


図 86 5 V 定電圧回路 (12 V→5 V)

- 三端子レギュレータ → 型番:L78S05CV (5 V 固定出力)
- コンデンサ 1 (アルミ電解コンデンサ)→ 型番 : UVK1V470MDD (47  $\mu$ F、定格電圧 35 V)
- コンデンサ 2 (積層セラミックコンデンサ)→ 型番 : RPER11H104K2M1A01A (0.1  $\mu$ F、定格電圧 50 V)

## 5 結論

DeeMe 実験では、パルス陽子ビームが標的に入射することにより発生するプロンプトバーストの影響等を避けるために、数百  $\mu\text{m}$  という非常に狭いワイヤーピッチを持つ Micro-cell MWPC を開発した。ところが、ワイヤーピッチが 0.5 mm である Prototype II をビームテストで稼働させてみたところ、放電による電圧印加停止及びワイヤー損傷によって、実験の安定的な運転が困難であることが判明した。これを受けて、ワイヤーピッチと放電電圧の関係性について改めて理解するために、複数のワイヤーピッチのサンプルを作成して放電試験を行った。結果、ワイヤーピッチ 0.7 mm、ガス配合  $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$ 、稼働電圧 1450 V(DeeMe 実験に必要なゲイン ( $\sim 10^4$ ) を得るための電圧) ならば、十分に安定的な運転が可能であることが分かったため、ワイヤーピッチ 0.7 mm での MWPC 開発が進められた。最終版の MWPC でもワイヤーピッチ 0.7 mm となっている。しかし、ワイヤー張りの工作精度、HV Switching の存在等の理由から、ワイヤーピッチ 0.7 mm でも放電が起きてしまっていた。そこで DeeMe 実験では、放電したとしても連続放電へと発展しないような今までとは逆位相の HV Switching システムを開発し、ビームテストでも安定運転に成功している。

また、DeeMe 実験では、過電流が流れてから trip するまでが速い iseg 社の電源を採用した。そこで、iseg 社製電源を制御するためのシステムを開発した。DeeMe 実験で要求されるようなログ機能、アラート機能等を作成し、ビームテストでも稼働させている。特定の挙動が必要となった際も、自作であるためすぐに機能を追加することが可能である。今後も、必要な機能が増える可能性があるため、その度プログラムに修正が必要である。また、開発の段階で iseg 社製電源のハード的なバグを発見したが、firmware の更新により修正することが出来た。

## 謝辞

研究をするにあたってお世話になった方々への感謝の言葉を送ります。研究室の指導教員である清矢良浩教授、山本和弘准教授には、3年間大変お世話になりました。御二人の知識量に毎日驚きつつ、御指導いただいたことを吸収することで自分を高めていける環境が、とても嬉しく思っていました。また、分からないことがあったとしても、生徒と共に最後まで考えてくださるお姿には、いつも感銘を受けていました。勉学だけでなく、日々の生活の中で様々なことを学び、人間的にも成長出来たのではないかと思います。大阪市立大学名誉教授である奥沢徹先生にも、ミーティングや日々の研究の中で適切なアドバイスをいただきました。大変感謝しています。

DeeMe グループの方々にもお世話になりました。大阪大学の青木正治准教授には、ビームテストや実験を行う度に丁寧な御指導をしていただきました。実験グループの長として全体を取りまとめ、どんどんと先へ進めていく姿には尊敬の念を抱いております。KEK の名取寛顕氏、中津川洋平氏、大阪大学の Nguyen Duy Thong 氏、Nguyen Minh Truong 氏、長尾大樹君には、ビームテストや Meeting の議論の中で、アドバイスをたくさんいただきました。グループとして一つのものを進めていくことの面白さ、楽しさを教えてくださり、感謝しております。また、学会という研究発表の場は、人前が苦手であった自分にとって貴重な経験であり、そのような機会を与えてくださったことに感謝致します。

同研究室のOBである清水宏祐先輩、若松慶樹先輩には、先輩として優しく接していただいただけでなく、時には厳しい先輩として自分を正してくださいました。また、同期である金賢一君、手島菜月さん、後輩である原田潤君、古谷優子さん、東佑真君、井上翼君、森本史明君達のおかげで、楽しい研究室生活を送らせていただきました。優秀な方達ばかりで、自分が見劣りする環境の中、議論をするのは自分の成長にも繋がり大変有意義な研究室生活となりました。先生方含め、3年間で自分が精神的に成長出来たのは、この研究室のおかげであり、選んでよかったと心より思っています。学部生時代を合わせ計6年間共に語りながら、勉学を共にしてきた物理学科同期の友人達にも、6年間この大学でよかったと思わせていただいたことに対して、感謝の気持ちでいっぱいです。

最後に、6年間もの長い間、僕に大学での勉強の機会を与え、また、このような素晴らしい方々に出会わせてくれた両親に、感謝の言葉を送り、締めたいと思います。学生生活18年間、見守っていただきありがとうございました。

## 付録 A server.py

```
#coding: utf-8

import os
import tornado.ioloop
import tornado.web
import tornado.websocket
import tornado.log
#import templates.date
from tornado.ioloop import PeriodicCallback
from datetime import datetime
import iseg
import mail.iseg
import logging
import RPi.GPIO as GPIO
from tornado.options import define, options, parse_command_line

mode1 = True
mode2 = False
pinNum = 25

def writeVC(message): #log(Voltage & Current)
    message = "\nVoltage & Current @0-5 channel (Upper:Voltage Lower:Current):\n" + message
    logging.debug(message)

def writelog(message): #log(event)
    logging.info(message)
    print message

class IndexHandler(tornado.web.RequestHandler): #読み込む html ファイル
    @tornado.web.asynchronous
    def get(self):
        self.render("form.html")

class SendWebSocket(tornado.websocket.WebSocketHandler): #Web ソケット通信
    logC = 0
    trip_V = 0
    codeM = [] #命令を格納

    def open(self): #Web ページを開いた時
        #GPIO.output(pinNum,mode2)
        readOut = ["?", "?", "?", "?", "?"]
        for chNum in range(0,6):
            readOut = iseg.get_allvalue("@" + str(chNum) + ")")
            readOut.insert(0,str(chNum))
            out = ','.join(readOut)
            self.write_message(str(out))
        self.callback = PeriodicCallback(self._send_message, 20) #_send_message を 20ms 間隔で
        self.callback.start()

    def on_message(self, message): #html server
        self.codeM.append(message)

    def _send_message(self):
        if len(self.codeM) == 0: #制御命令なし
            for chNum in range(0,6):
                channel = "@" + str(chNum) + ")"
                stat = iseg.chan_ev_status(channel)
                if "13" in stat or "12" in stat: #trip or external inhibit error
```

```

    if self.trip_V == 0:
        #GPIO.output(pinNum,model)
        iseg.EMCY_off("@0-5") #全てのチャンネルをオフ
        if "13" in stat: #if trip
            writelog("\ntrip! @ " + str(chNum) + "channel")
            self.write_message(str(chNum) + ", channel is trip!")
            #mail_iseg.mail_iseg("channel " + str(chNum) + " Trip!")
        if "12" in stat: #if external inhibit error
            writelog("\nexternal inhibit error! @ " + str(chNum) + "channel")
            self.write_message(" , external inhibit error")
        self.trip_V += 1
    else:
        pass
    outMeas = iseg.getAllVC()
    self.logC += 1
    if self.logC < 15: #毎取得時にログファイルに書き込むと、情報量が多すぎるため抑制している
        logVC = "\n".join(outMeas)
        writeVC("\n" + logVC + "\n")
        self.logC = 1
    OnOff = iseg.getOnOff()
    outMeas.append(OnOff)
    outMeas = ', '.join(outMeas)
    self.write_message(outMeas)

else: #制御命令あり
    code = self.codeM[0]
    code = code.rstrip(',')
    code = code.split(",")
    channel = "@ " + code[0] + ")"
    if code[1] == "HVSstop": #未使用
        #GPIO.output(pinNum,model)
        self.codeM.pop(0)

    elif code[1] == "on": #電圧 On
        if self.trip_V == 1:
            self.write_message(str(code[0]) + " channel , please reset")
            self.codeM.pop(0)
        else:
            iseg.volt_on(channel)
            self.logC = 1
            writelog("channel" + code[0] + " volt On")
            self.codeM.pop(0)

    elif code[1] == "off": #電圧 Off
        iseg.volt_off(channel)
        print "channel" + code[0] + " volt Off"
        self.codeM.pop(0)

    elif code[1] == "EMCYOff": #緊急オフ
        # iseg.EMCY_off(channel)
        # print "channel" + code[0] + " EMCY Off"
        self.codeM.pop(0)

    elif code[1] == "EMCYClr": #Emergency フラグリセット
        iseg.EMCY_clr(channel)
        print "EMCY Clr"
        self.codeM.pop(0)

    elif code[1] == "stop": #電圧ストップ
        inNum = [0,0,0,0,0]
        inNum = iseg.get_allvalue(channel)
        getVC = iseg.get_vc(channel)

```

```

        inNum[0] = getVC[0]
        inNum.insert(0,channel)
        iseg.input_value(*inNum)
        out = ', '.join(inNum)
        self.write_message(str(out))
        self.codeM.pop(0)

elif code[1] == "reset": #全チャンネルのフラグ、設定のリセット
    iseg.reset()
    self.write_message(" All, channel reset.")
    #GPIO.output(pinNum,mode2)
    readOut = ["?", "?", "?", "?", "?", "?"]
    for chNum in range(0,6):
        readOut = iseg.get_allvalue("@ " + str(chNum) + ")")
        readOut.insert(0,str(chNum))
        out = ', '.join(readOut)
        self.write_message(str(out))
    self.trip_V = 0
    self.codeM.pop(0)

elif code[0] == "SetWhole": #全体に関わる設定値変更
    iseg.input_whole(*code)
    readWhole = ["?", "?", "?", "?"]
    readWhole = iseg.get_whole()
    out = ', '.join(readWhole)
    self.write_message(str(out))
    readM = "\nChange setting parameter" +
        "\nVoltage Ramp Speed(V/s) : " + readWhole[0] +
        "\nCurrent Ramp Speed(A/s) : " + readWhole[1] +
        "\nKill(Enable/Disable) : " + readWhole[2]
    writelog(readM)
    self.codeM.pop(0)

else: #それぞれのチャンネルの設定値変更
    read_ch = code[0]
    code[0] = channel
    iseg.input_value(*code)
    readOut = ["?", "?", "?", "?", "?", "?"]
    readOut = iseg.get_allvalue(channel)
    readOut.insert(0,read_ch)
    out = ', '.join(readOut)
    self.write_message(str(out))
    readM = "\nChange setting parameter @ channel " + read_ch +
        "\nVoltage(V) : " + readOut[1] +
        "\nIset(A) : " + readOut[2] +
        "\nTrip time(s) : " + readOut[3] +
        "\nAction(when trip) : " + readOut[4] +
        "\nAction(when external inhibit) : " + readOut[5]
    writelog(readM)
    self.codeM.pop(0)

def on_close(self): #Web ページを閉じたとき
    self.callback.stop()
    print "Session end"

#WebSocket 通信設定等
application = tornado.web.Application([
    (r"/", IndexHandler),
    (r"/ws", SendWebSocket),
],
    template_path=os.path.join(os.getcwd(), "templates"),
    static_path=os.path.join(os.getcwd(), "static"),

```



)

```
if __name__ == "__main__": #server.py を直接実行した時のみ実行
```

```
try:
    #GPIO.setmode(GPIO.BCM) #GPIO ピン使用設定
    #GPIO.setup(25, GPIO.OUT)
    #GPIO.output(pinNum,mode2)
    #ログ設定
    nowtime = datetime.today().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
    logfname="logdata/ISEG_" + nowtime + ".log"
    options.logging="debug"
    options.log_to_stderr
    options.log_file_prefix=logfname
    options.log_file_max_size=1000000
    parse_command_line()
    writelog("log file name is : " + logfname + "\n")
    application.listen(8888) #ポート番号
    print("Server is up ...")
    tornado.ioloop.IOLoop.instance().start()

except KeyboardInterrupt: #ターミナル等でのエラー時
    #GPIO.output(pinNum,mode2)
    #GPIO.cleanup()
    pass
```

## 付録 B form.html

```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <link rel="stylesheet" href="{{ static_url("style.css") }}" />
    <title>Iseg Control</title>
    <script type="text/javascript" src="http://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/1.8.3/jquery.min.js"></script>
    <script>
      var ip = "";
      function getIP(val){ip=val;}
      {%import commands%}
      getIP("{{commands.getoutput('wget -q -O - ipcheck.ieserver.net')}}")
      ip = "ws://" + ip + ":8888/ws";
      var ws = new WebSocket(ip);
      //var ws = new WebSocket("ws://hoge.hoge.local:8888/ws"); #hoge.hoge はホスト名
      var trip_action = [];
      trip_action[0] = "none,flag event trip will be set after time out";
      trip_action[1] = "ramp down the channel high voltage";
      trip_action[2] = "switch off the channel without a ramp";
      trip_action[3] = "switch off the whole module";
      trip_action[4] = "disable the delayed trip function";

      #開いた時
      ws.onopen = function(){
      };

      #サーバーから通信が来た時
      ws.onmessage = function(evt){
        var dataS = evt.data;
        var data = dataS.split(",");
        if(data.length == 2){ #アラートを出す
          alert(data[0] + data[1]);
        }else if(data.length == 24){ #電圧値、電流値、On/Off、Emergency フラグの有無
          for(var i = 0;i<6;i++){
            $("#CurValueV" + i).text(parseFloat(data[i].slice(0,-1)));
            $("#CurValueC" + i).text(parseFloat(data[i + 6].slice(0,-1)));
            if(data[i + 12] == "1"){
              document.getElementById("bu" + i + "2").style.backgroundColor = "red";
            }
            else if(data[i + 12] == "0"){document.getElementById("bu" + i + "2").style.backgroundColor =
"#EFEFEBF";}
            if(data[i + 18] == "1"){
              document.getElementById("bu" + i + "5").style.backgroundColor = "red";
            }
            else if(data[i + 12] == "0"){document.getElementById("bu" + i + "5").style.backgroundColor =
"#EFEFEBF";}}}
          else if(data.length == 3){ #全体の設定
            $("#readWhole0").text(data[0]);
            $("#readWhole1").text(data[1]);
            $("#readWhole2").text(data[2]);
          }
          else{ #それぞれのチャンネルの設定
            $("#read" + data[0] + "_0").text(data[1]);
            $("#read" + data[0] + "_1").text(data[2]);
            $("#read" + data[0] + "_2").text(data[3]);
            $("#read" + data[0] + "_3").text(data[4]);
            $("#read" + data[0] + "_4").text(data[5]);
            var tripNum = parseInt(data[4],10);
            $("#trip_actNum" + data[0]).html(trip_action[tripNum]);
          }
        }
      };
    </script>
  </head>
  <body>
  </body>
</html>
```

```

var set_alert = ["channel", "\nVoltage(V) = ", "\nIset(A) = ", "\nTrip time(s) = ", "\nAction(when trip) = ", "\nAction(when external inhibit) = "];
var set_alertWhole = ["", "\nVoltage Ramp Speed(V/s) = ", "\nCurrent Ramp Speed(A/s) = ", "Kill (Enable/Disable) = "]

```

```

function setValue(element){ #それぞれのチャンネルの設定ボタン
var id = parseInt(element);
var d = [id, "100", "1e-6", "0", "2", "3"];
for(var i = 0; i < 5; i++){d[i+1] = $("#input" + id + "_" + i).val();}
var alert_message = set_alert[0] + d[0] + ",Set Value is";
for(var i = 1; i < 6; i++){alert_message = alert_message + set_alert[i] + d[i];}
if(window.confirm(alert_message)){
ws.send(d);}else{alert("Cancel");}
}

```

```

function Volt_on(element){ #On ボタン
var id = parseInt(element);
ws.send(id + ",on,");}

```

```

function Volt_off(element){ #Off ボタン
var id = parseInt(element);
ws.send(id + ",off,");}

```

```

function Stop(element){ #Stop ボタン
var id = parseInt(element);
ws.send(id + ",stop,");}

```

```

function EMCYOff(){ #EMCYOff ボタン
ws.send("0,EMCYOff,");}

```

```

function EMCYClr(element){ #EMCYClr ボタン
var id = parseInt(element);
if(id == 6){id = "0-5"};
ws.send(id + ",EMCYClr,");}

```

```

function SetWhole(){ #全体の設定ボタン
var wo = ["SetWhole", "0.3", "0.0015", "enable"];
for(var i = 0; i < 3; i++){wo[i+1] = $("#SetWhole" + i).val();}
var alert_message = "Set Value is";
for(var i = 1; i < 4; i++){alert_message = alert_message + set_alertWhole[i] + wo[i];}
if(window.confirm(alert_message)){
ws.send(wo);}else{alert("Cancel");}
}

```

```

function Reset(){ #Reset ボタン
if(window.confirm("Do you reset all channels?")){
ws.send("0,reset,");}else{alert("Cancel");}
}

```

```

function HVSstop(){ #HVSstop ボタン
ws.send("a,HVSstop,");}

```

```

function ButtonLock(){ #Lock ボタン
for(var j = 0; j < 6; j++){
for(var i = 1; i < 6; i++){
document.getElementById("bu" + j + i).disabled = true;}}
for(var k = 0; k < 4; k++){
document.getElementById("bu" + k).disabled = true;}
document.getElementById("lock").onclick = ButtonUnLock;
document.getElementById("lock").value = "UnLock";
}

```

```

function ButtonUnLock(){ #UnLock ボタン

```

```

for(var j = 0;j<6;j++){
for(var i = 1;i<6;i++){
document.getElementById("bu" + j + i).disabled = false;}}
for(var k = 0;k<4;k++){
document.getElementById("bu" + k).disabled = false;}
document.getElementById("lock").onclick = ButtonLock;
document.getElementById("lock").value = "Lock";
}

</script>
</head>
<body>
<table border="1">
<caption>iseg Control Application</caption>
<tr><td>
<table style="width:180px"><tr bgcolor="#FAEBD7"><th></th></tr>
<tr bgcolor="#FAEBD7"><td></td></tr>
<tr class="ta"><td>Voltage(V)</td></tr>
<tr class="ta"><td>Iset(A)</td></tr>
<tr class="ta"><td>Trip time(ms)</td></tr>
<tr class="ta"><td>action(when trip)</td></tr>
<tr class="ta"><td>action(when inhibit)</td></tr>
<tr><td style="height:50px">Action<br>(when trip)</td></tr>
<tr><td style="height:50px"></td></tr></table>
<table style="width:180px">
<caption></caption><tr bgcolor="#FAEBD7"><th>parameter</th></tr>
<tr class="ta"><td>Voltage</td></tr>
<tr class="ta"><td>Current</td></tr>
<tr><td style="height:50px"></td></tr></table></td>

<script>
for(var chNum = 0;chNum <6;chNum++){
document.write("<td><table><tr bgcolor='#FAEBD7'><th colspan='2'>Channel " + chNum +
"/th></tr><tr bgcolor='#FAEBD7'><td>set value</td><td>read value</td></tr>");
var iseg_f = [0,1e-5,0,2,3];
var iseg = ["Voltage","Iset","Trip time","action(when trip)","action(when inhibit)"];
for(var i = 0;i <5;i++){
document.write("<tr class='ta'><td>
<input type='text' name='"+ iseg[i] + "' value='"+ iseg_f[i] + "' id='input" + chNum + "_" + i + "'
style='width:100px;height:18px;color:#000000'/>
</td><td style='width:120px'id='read" + chNum + "_" + i + "'></td></tr>");
}
document.write("<tr><td colspan='2' style='height:50px' id='trip_actNum" + chNum + "'></td></tr>
<tr><td colspan='2'>
<form name='button' action='#'>
<div align='center'><input type='button' class='button' id='bu" + chNum + "1' value='Set/Restart'
style='width:200px;height:50px' onclick='setValue(" + chNum + ")'/></div>
</form>
</td></tr>
</table><table style='height:20px'>
<tr bgcolor='#FAEBD7'><th colspan='2'>Present Value</th></tr>
<tr bgcolor='#FFDEAD'><td colspan='2' id='CurValueV" + chNum + "'></td></tr>
<tr bgcolor='#FFDEAD'><td colspan='2' id='CurValueC" + chNum + "'></td></tr>
<tr><td><form name='button' action='#'>
<input type='button' id='bu" + chNum + "2' class='button' value='On' onclick='Volt_on(" + chNum +
")'/></td>
<td><input type='button' id='bu" + chNum + "3' class='button' value='Off' onclick='Volt_off(" +
chNum + ")'/></td></tr>
<tr><td><input type='button' id='bu" + chNum + "4' class='button' value='Stop' onclick='Stop(" +
chNum + ")'/></td>
<td><input type='button' id='bu" + chNum + "5' class='button' value='EMCYClr' onclick='EMCYClr(" +
chNum + ")'/></td></tr>

```

```

</form></td></tr>
</table></td>”);
}
</script>

</tr></table>
<table><tr><td><input type='button' id='bu0' class='button' value='HVSstop' onclick='HVSstop()'/>
</td><td><input type='button' id='bu1' class='button' value='EMCYOff' onclick='EMCYOff()'/>
</td><td><input type='button' id='bu2' class='button' value='EMCYClr' onclick='EMCYClr(6)'/>
</td><td><input type='button' id='bu3' class='button' value='Reset' onclick='Reset()'/>
</td><td><input type='button' class='button' id='lock' value='Lock' onclick='ButtonLock()'/>
</td></tr></table>

<table style='width:450px'><tr bgcolor='#FAEBD7'><th>parameter</th><th>set value</th><th>read
value</th></tr>
<tr class='ta'><td>Voltage Ramp Speed</td><td>
<input type='text' name='rampV' value='0.3' id='SetWhole0' style='width:100px;height:18px;color:#000000' />
</td><td style='width:150px' id='readWhole0'></td></tr>

<tr class='ta'><td>Current Ramp Speed</td><td>
<input type='text' name='rampC' value='0.0015' id='SetWhole1' style='width:100px;height:18px;color:#000000' />
</td><td style='width:150px' id='readWhole1'></td></tr>

<tr class='ta'><td>Kill(Enable/Disable)</td><td>
<input type='text' name='kill' value='enable' id='SetWhole2' style='width:100px;height:18px;color:#000000' />
</td><td style='width:150px' id='readWhole2'></td></tr>

<tr><td colspan='2'>
<form name='button' action='#'>
<div align='center'><input type='button' class='button' id='buAll' value='Set' style='width:100px;height:50px'
onclick='SetWhole()'/></div></form></td></tr></table>
</body>

</html>

```

## 付録 C iseg.py

```
# coding: utf-8

#send_command() で改行、命令が入っている場合は命令を送ってその命令文の行を処理する

def send_command(command=None):
    if command is None:
        ser.write("\r\n")
    else:
        ser.write(command + "\r\n")
        ser.readline()

#get_value() で iseg からの返答を得る

def get_value():

    output = ser.readline()
    output = output.rstrip("\r\n")
    output_num = "ERROR"
    n = 1
    check_num = output.isdigit()
    check = False
    while check == False:
        if output == "" or output == None:
            break
        elif check_num == True:
            output_num = float(output)
            break
        else:
            n -= 1
            unit = output[n-1]
            check = unit.isdigit()
            if check == True:
                output_num = float(output[0:n])
    return output_num

import serial
import time
from datetime import datetime
from send import send_command, get_value

ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 9600, timeout = 2) #iseg と通信するためのパラメータ
Vnom = 3e3 / 100 #iseg 電源の最大電圧/100
Inom = 3e-3 / 100 #iseg 電源の最大電流/100

def cls():
    send_command("*cls")
    print "flag reset"

def reset(): #リセットする
    ser.write("\r\n")
    ser.read(100)
    ser.write("*rst\r\n")
    print ser.readline()
    ser.write("*cls\r\n")
    print ser.readline()
    channel = 0
    while channel < 6:
        V_meas = 11
```

```

while V_meas < 10:
    send_command("meas:volt? (@" + str(channel) + ")")
    V_meas = get_value()

print "channel " + str(channel) + " reset!"
channel += 1

print ""
ser.write("*rst\r\n")
print ser.readline()
ser.write("*cls\r\n")
print ser.readline()
print "\nReset Complete!\n"

def input_value(channel, sVoltage, sCurrent, sTripT, sTripAct, sInhibitAct):#Vset,Iset,trip time,trip action,inhibit action 入力
    send_command(":volt " + sVoltage + "," + channel)
    send_command(":curr " + sCurrent + "," + channel)
    send_command(":conf:trip:time " + sTripT + "," + channel)
    send_command(":conf:trip:act " + sTripAct + "," + channel)
    send_command(":conf:inh:act " + sInhibitAct + "," + channel)

def input_whole(mes,sRampV,sRampC,kill):#Voltage and Current ramp speed、kill enable/disable 入力
    sRampV = str(float(sRampV) / Vnom)
    send_command(":conf:ramp:volt " + sRampV)
    sRampC = str(float(sRampC) / Inom)
    send_command(":conf:ramp:curr " + sRampC)
    send_command(":conf:kill " + kill)

def volt_on(channel): #電圧 On
    send_command(":volt on," + channel)

def volt_off(channel):#電圧 Off
    send_command(":volt off," + channel)

def EMCY_off(channel):#Emergency オフ
    send_command(":volt emcy off," + channel)

def EMCY_clr(channel):#EMCY フラグクリア
    send_command(":volt emcy clr," + channel)

def get_vc(channel):#1 チャンネルの電圧電流の測定値を返す
    outGetvc = ["?", "?"]
    send_command("meas:volt? " + channel)
    outGetvc[0] = str(get_value())
    send_command("meas:curr? " + channel)
    outGetvc[1] = str(get_value())
    return outGetvc

def getAllVC():#全チャンネルの電圧電流の測定値を返す
    outGetvc = ["?", "?"]
    send_command("meas:volt? (@0-5)")
    outGetvc[0] = ser.readline()
    outGetvc[0] = outGetvc[0].rstrip("\r\n")
    send_command("meas:curr? (@0-5)")
    outGetvc[1] = ser.readline()
    outGetvc[1] = outGetvc[1].rstrip("\r\n")
    return outGetvc

def getOnOff():#On/Off,EMCY Off or not を返す
    send_command("read:volt:on? (@0-5); emcy? (@0-5)")

```

```

OnOff = ser.readline()
OnOff = OnOff.rstrip("\r\n")
OnOff = OnOff.split(";")
OnOff = ",".join(OnOff)
return OnOff

def chan_ev_status(channel):#1 チャンネルのイベントフラグを返す
    send_command(":read:chan:ev:stat? " + channel)
    get_stat = ser.readline()
    get_stat = get_stat.rstrip("\r\n")
    get_stat = format(int(get_stat),"b")
    get_stat = str(get_stat)
    stat_num = len(get_stat)
    out_stat = []
    while stat_num > 0:
        if get_stat[-stat_num] == "1":
            out_stat.append(str(stat_num - 1))
        else:
            pass
        stat_num -= 1

    return out_stat

def get_allvalue(channel):#1 チャンネルの Vset,Iset,trip time,trip action,inhibit action の設定値を返す
    a = ["?","?","?","?","?","?"]
    send_command(":read:volt? " + channel)
    a[0] = str(get_value())
    send_command(":read:curr? " + channel)
    a[1] = str(get_value())
    send_command(":conf:trip:time? " + channel)
    a[2] = str(get_value())
    send_command(":conf:trip:act? " + channel)
    a[3] = str(get_value())
    send_command(":conf:inh:act? " + channel)
    a[4] = str(get_value())
    return a

def get_whole():#Voltage and Current ramp speed、kill enable/disable の設定値を返す
    ab = ["?","?","?"]
    send_command(":read:ramp:volt? (@0)")
    ab[0] = str(get_value())
    send_command(":read:ramp:curr? (@0)")
    ab[1] = str(get_value())
    send_command(":conf:kill?")
    ab[2] = ser.readline()
    ab[2] = ab[2].rstrip("\r\n")
    if ab[2] == "0":
        ab[2] = "disable"

    elif ab[2] == "1":
        ab[2] = "enable"

    return ab

def close():
    ser.close()

```



## 参考文献

- [1] 青木正治, 「J-PARC RCS からのパルス陽子ビームを活用したミューオン・電子転換過程探索実験」, 高エネルギーニュース Volume 31, Number 3, p. 228-237 (2012)
- [2] M. Aoki et al., "the Experimental Search for  $\mu$ - $e$  Conversion in Nuclear Field at Sensitivity of  $10^{-14}$  with Pulsed Proton Beam from RCS (DeeMe)", J-PARC PAC Report, (2011)
- [3] M. Aoki et al., "the Experimental Search for  $\mu$ - $e$  Conversion in Nuclear Field at Sensitivity of  $10^{-14}$  with Pulsed Proton Beam from RCS (DeeMe)", J-PARC PAC Report, (2012)
- [4] H. Natori et al., "Development of a micro-cell MWPC for a muon-electron conversion search experiment at MLF H-line", 第 5 回 J-PARC/MUSE 成果報告会, 2013B0141, (2013)
- [5] Y. Nakatsugawa, "Search for muon to electron conversion at J-PARC MLF : Recent status on DeeMe" in *Proceedings of the 16th International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Beam Facilities, University of Glasgow, United Kingdom, Aug 25-30, 2014*
- [6] A. Czarneck et al., "Muon decay in orbit spectra for  $\mu$ - $e$  conversion experiments", Hyperfine Interactions Volume 210, p. 19-23, (2012)
- [7] 小関忠 「J-PARC 加速器の概要」, 高エネルギー加速器セミナー OHO, 大電流ビームを作る-J-PARC のビームコミッショニング- 1, (2010)
- [8] Y. Kuno et al., "A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: the COMET experiment" Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 022C01, (2013)
- [9] L. Bartoszek et al., "Mu2e Technical Design Report", arXiv:1501.05241, (2014)
- [10] F. Sauli, "Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers", Experimental techniques in high energy physics, p. 79-188, Addison-Wesley, 678p, (1987)
- [11] W. Blum et al., "Particle Detection with Drift Chambers", Springer, 448p, (2008)
- [12] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg. "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing" JohnWiley & Sons, Inc., 2nd edition, (1994)
- [13] R.Schnyder et al., "DC Breakdown in gases for complex geometries from high vacuum to atmospheric pressure" EPFL, n° 5962, (2013)
- [14] 清水宏祐, 「ミュー粒子・電子転換過程探索実験 DeeMe におけるアフタープロトン背景事象および単一事象感度の評価」, (2015)
- [15] 菊地祐介 et al., 「ダイバータにおける熱流制御とプラズマ材料相互作用」, プラズマ・核融合学会誌 Volume 90, No.8, p. 480-488, (2014)