

令和 2 年度 修士論文

J-PARC E16 実験 GEM 飛跡検出器の
トリガー信号回路改良

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻
クォーク物理学研究室

学籍番号 M191882

近藤 丈仁

2021 年 2 月 18 日

指導教員 志垣 賢太 教授
主査 志垣 賢太 教授
副査 植村 誠 准教授

概要

原子核内部のような高密度媒質中では、自発的に破れたカイラル対称性が部分的に回復していると考えられており、回復の兆候は軽いベクトル中間子の質量スペクトルの変形として観測されると予想されている。J-PARC E16 実験は、30 GeV pA 反応を用いて生成する軽いベクトル中間子の質量スペクトルを電子陽電子対崩壊チャンネルで測定する。E16 は、磁場中の荷電粒子の飛跡検出に、電子増幅部に Gas Electron Multiplier (GEM) を使用した、GEM 飛跡検出器 (GTR) を用い、5 kHz/mm² の高い計数率耐性と、100 μm の優れた水平方向の位置分解能を実現すべく開発を行ってきた。GTR は位置を検出する読出回路の他に、トリガ用信号を供給する回路 GTR-ASD を備える。GTR-ASD は、GEM の電子増幅時に生じる電荷を読み出してトリガ用信号を供給するフロントエンド回路基板で、基板上の ASIC に Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) 回路を実装してある。

本研究では、GTR がビームを受けるための GTR-ASD の改良を行なった。これまで GTR-ASD は β 線・ γ 線・ π 中間子ビーム・電子ビームの GTR への照射試験で正常に動作してきた。E16 の検出器調整実験期間として 2020 年 5 月に大強度陽子ビームを初めて受けるにあたり、本研究で複数枚の GTR-ASD を扱うために電源・ソフトウェアの改良を行なった結果、データ取得を行うことに成功した。それとともにビームタイムには、高強度陽子ビームに誘発され GTR-ASD の動作が度々止まることが判明した。これは GEM の放電の影響により、GTR-ASD の ASIC チップ内でラッチアップ現象が起きているためと推測される。スケジュール上、GTR チェンバーの再開発による放電頻度低減は難しかったため、本研究では GTR-ASD の放電耐性の向上に取り組んだ。GTR-ASD 基板上に以前から実装してある放電保護チップの種類を変更した上で、²⁴¹Am からの α 線を GTR チェンバーに当てて GEM を放電させることで、チップを変更した GTR-ASD の試験を行なった。変更後には、数回の放電の間動作を続けることがわかり効果はありつつも、放電が集中したチャンネルは再起不能になった。そのため、放電保護機能を強化すべく、GTR-ASD を放電から保護するための追加の基板を製作した (下図)。新規基板を介して GTR チェンバーと GTR-ASD を接続して線源での信号試験を行い、トリガモジュールへの信号の出力ができていることを確認した。また、テストパルス入力時の GTR-ASD のアナログ波形の変化を確認し、以前と同様の波形が得られていることを確認した。以上より新規基板を追加した際にも、ラッチアップ様の現象の抑制が期待でき、さらに信号を正常に読み出すことができることから、2021 年初頭予定の 2 度目の検出器調整実験期間に向けて、新規基板を接続した GTR-ASD を GTR に搭載して、GTR を E16 スペクトロメータ内に組付けた。

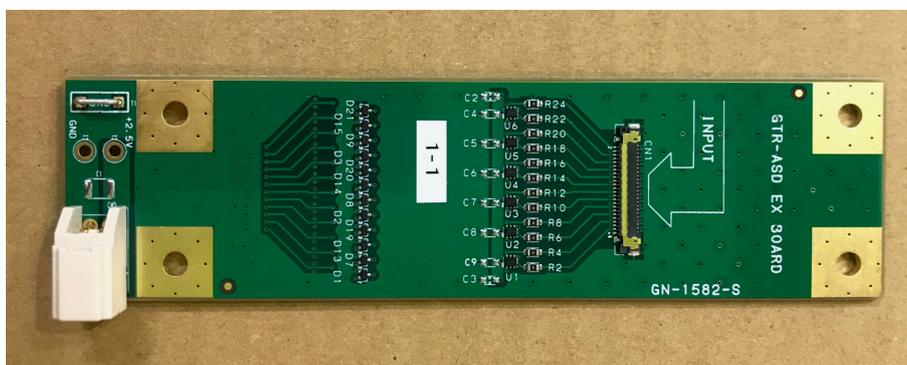


図 1 GTR-ASD を放電から保護するために製作した新しい回路基板。

目次

第 1 章	序論	5
第 2 章	研究背景	7
2.1	ハドロンの質量獲得機構	7
2.2	軽いベクトル中間子とその質量	8
2.3	先行実験 KEK-PS E325 実験	9
2.4	J-PARC E16 実験の目的	10
第 3 章	実験装置	12
3.1	J-PARC E16 実験	12
3.2	GEM 飛跡検出器 (GTR)	17
第 4 章	GTR-ASD の改良	27
4.1	GTR-ASD 基板の制御ソフトウェアの複数枚用への改良	27
4.2	安定電源電圧の分配	27
4.3	議論	30
第 5 章	GTR-ASD の対放電性能の強化	32
5.1	放電対策と本研究	32
5.2	Run 0a の放電時の現象と現象から推測されること	33
5.3	放電保護回路の検討	34
5.4	対放電保護基板の設計・製作	40
5.5	対放電保護基板追加時の性能測定	42
5.6	GTR-ASD と対放電保護基板の取付治具製作	44
5.7	対放電保護基板の電源分配基板	45
5.8	議論	46
第 6 章	結論	49
付録		51
A	遅い制御用のソフトウェア	51
B	対放電保護基板上の抵抗値のスキャン	51
謝辞		54

目次

1	GTR-ASD を放電から保護するために製作した新しい回路基板。	1
2.1	6つのクォークについての、QCD 真空中での質量とヒッグス真空中での質量 ([1] から引用)。	7
2.2	W. Weise の計算 [2] による、クォーク凝縮の期待値の絶対値の温度密度依存性 [3]	8
2.3	静止している軽いベクトル中間子の質量のバリオン密度依存性 [4]。	9
2.4	KEK-PS E325 実験の Cu 標的からの $\phi \rightarrow e^+e^-$ の質量スペクトルにおいて、excess が見られた $\beta\gamma$ 領域 [5]。	10
2.5	KEK-PS E325 の結果を基にした E16 の pCu シミュレーションによる、 ϕ 中間子の質量スペクトルとフィット。	11
2.6	E16 の p+Cu シミュレーションでの ϕ 中間子の超過分の割合の $\beta\gamma$ 依存性	11
3.1	E16 実験のセットアップ。	13
3.2	E16 実験の Run 0 でのセットアップ。	13
3.3	J-PARC の鳥瞰図	14
3.4	高運動量ビームラインとハドロンホールの平面図 (画像提供: KEK [6])	14
3.5	標的の写真。	15
3.6	HBD の読出回路の写真。	17
3.7	GTR の構造。	18
3.8	電磁石中に設置した GTR(Run 0a、2020 年 6 月時点)。	19
3.9	GEM と MWPC のゲインの、レート依存性 [7]	19
3.10	GEM の増幅率と放電確率の電圧依存性。	20
3.11	GEM を重ねた際の性能。	20
3.12	GTR300 mm 角の GEM への高電圧供給系と GTR-ASD の回路図。	22
3.13	GTR の GEM への高電圧について、電流電圧を監視するダッシュボード。	22
3.14	GTR チェンバーへのビーム照射時の抵抗の時間変動。	23
3.15	TRK-APV カード。	23
3.16	トリガー用の GEM 読出回路 GTR-ASD の概念図。	24
3.17	GTR-ASD の写真。	25
3.18	GTR-ASD へ送る遅い制御のための信号。	25
3.19	GTR の遅い制御用の基板。	26
4.1	GTR-ASD の発振の様子。	28

4.2	安定電圧分配基板の簡易回路図。このような回路を途中で分岐して4つの端子へ供給する。	29
4.3	製作した安定電圧分配基板。	30
4.4	GTR-ASD の出力するダブルパルス。	30
5.1	放電と GEM や回路の損傷確率の関係と本研究での取組。	33
5.2	クランプ電圧のイメージ図。	35
5.3	バイアス電圧が低くなり GTR-ASD が使用できなくなった 1SS362FV の配線。	35
5.4	放電保護チップの回路図。	36
5.5	1SS362FV の試験セットアップの写真。1SS362FV チップと電源ケーブルをはんだ付けた GTR-ASD 基板。	36
5.6	チェンバーの放電時の波形。	38
5.7	GTR チェンバーの放電による GTR-ASD の放電保護能力試験。	38
5.8	GTR チェンバーの放電による GTR-ASD の試験時の放電時の典型的な波形。	39
5.9	GTR-ASD 用の対放電保護基板の回路図。	40
5.10	対放電保護基板のノイズ波形。	41
5.11	GTR-ASD ASIC 試験基板。	42
5.12	対放電保護基板追加時の GTR-ASD の波高測定セットアップ。	43
5.13	放電保護のための追加の基板の有無での波高の比較。	43
5.14	GTR フレーム上に GTR-ASD と対放電保護基板を搭載した写真。	45
5.15	対放電保護基板の電源分配基板。	46
5.16	Run 0b に向けて FM 電磁石内にインストールした GTR。	47
A.1	遅い制御のプログラムで生成する波形。	52
B.2	GTR チェンバーの放電による抵抗の試験。	53
B.3	波高の抵抗値依存性。	53

表目次

5.1	^{55}Fe 線源からの γ 線を照射した GTR チェンバーを接続した際の GTR-ASD アナログモニタ端子の波高。	44
-----	---	----

第 1 章

序論

原子核内部のような高密度媒質中では、自発的に破れたカイラル対称性が部分的に回復していると考えられており、回復の兆候は軽いベクトル中間子の質量スペクトルの変形として観測されると予想されている。過去の実験 KEK-PS E325 実験は、 $pA \rightarrow \rho/\omega/\phi + X$ ($A=C, Cu$) 反応からの軽いベクトル中間子の崩壊 $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$, $\phi \rightarrow K^+K^-$ の質量スペクトルを測定し、 $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$ の質量スペクトルの軽いベクトル中間子のピークの低質量側での収量の超過を観測した。J-PARC E16 実験は、KEK-PS E325 実験で見られたピーク下部の超過について、軽いベクトル中間子をより多く、精度良く、多核種 (CH_2 , C , Cu , Pb) の標的で測定を行うことで、より系統的な研究を行う。この物理学的背景についての詳細を 2 章で述べ、特に E16 の物理学的目的と目標を 2.4 節で述べる。

E16 が開発してきた検出器について、3 章で述べる。E16 は 2020 年 5 月から 6 月に陽子ビームを受けての検出器調整実験期間 Run 0a を行ない、2021 年初頭に 2 度めの検出器調整 Run 0b を予定している。E16 の目標を達成するために必要な、E16 スペクトロメータを構成するそれぞれの検出器について説明し、その中で本研究で電子回路の改良を試みる、GEM 飛跡検出器 (GTR) の働きについて特に詳しく説明する。GTR は、電子増幅部に Gas Electron Multiplier (GEM) を使用した検出器である。5 kHz/mm² の高い計数率環境下で、100 μm の優れた水平方向の位置分解能と、垂直方向 400 μm の精度で、磁場中での荷電粒子の 2 次元的な通過位置を測定するために用いる。100、200、300 mm 角の 3 機の GTR チェンバーで 3 点の位置を測定する。GTR で検出する 3 点とシリコンストリップ検出器 (SSD) で検出する水平方向の通過位置 1 点を合わせて合計 4 点の位置から、磁場中での荷電粒子の飛跡を再構成して、運動量を測定する。GTR は検出器最下層に組み付けた 2 種類の読出しストリップで電子を収集し、その X ストリップ、Y ストリップに生じる電荷の波形を TRK-APV 基板で読み出す。シミュレーションデータの解析と電子ビームのテスト実験において、上記の水平方向の位置分解能を得られることが分かっている。

GTR の 300 mm 角のチェンバーは、TRK-APV の他に、トリガ用信号を供給する回路 GTR-ASD を備える。GTR-ASD は、GEM による電子増幅時に GEM 上に生じる正の電荷を読み出して、それをトリガ用信号として読出回路系に供給するフロントエンド回路基板である。この基板によって、GTR はトリガーを出力することができる。GTR-ASD 基板中の ASIC の中に Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) 回路を実装しており、これまで 1 枚の GTR-ASD の制御や読出に成功してきた。本研究 4 章では、多数基の GTR がビームを受けるための GTR-ASD の改良を行なった。これまでの GTR-ASD1 枚用の、電源とソフトウェアの改良を行い、Run 0a 実験期間のデータ取得を行なった。

Run 0a 実験期間に E16 スペクトロメータは初めての大強度陽子ビームを受けた。この際、陽子ビームが大強度になると GTR-ASD の動作が度々止まることが判明した。これまで GTR-ASD は、 β 線、 γ 線、 π 中

間子ビーム、電子ビームの GTR への照射試験で正常に動作してきたのに対し、1 取出あたり 1×10^{10} 個の 30 GeV/c 陽子ビームでは、度々動作を止めてしまった。ビーム終了後に α 線源を GTR チェンバーに照射することで誘起した GEM の放電でも、GTR-ASD の動作停止は再現され、放電が原因であることを確認した。他の実験のガス検出器の読出回路の開発にならい、E16 実験の GTR-ASD の改良を行ない、GTR-ASD の対放電耐性向上による動作停止頻度の低減を図った。この内容を 5 章で述べる。

第 2 章

研究背景

はじめに、カイラル対称性の部分的回復による質量スペクトル変形の測定の重要性について説明する。前提となる知識についてのまとめから始め、理論的背景に触れつつ、実験の現状を説明する。ハドロン質量の起源について探る、J-PARC E16 実験について、その目的と先行研究について述べる。

2.1 ハドロンの質量獲得機構

素粒子の標準模型では、クォークは 2 段階の自発的対称性の破れによって質量を獲得する。1 つ目のヒッグス機構は、電弱相互作用の対称性の自発的破れによってヒッグス場が 0 でない真空期待値を持つことによって粒子が質量を得るというものである。2 つ目は、カイラル対称性の自発的破れによるものである。カイラル対称性の自発的破れは、強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) から計算される、クォーク凝縮という量が 0 でない真空期待値を持つようになることで引き起こされる。

図 2.1 は、クォーク 6 種類それぞれが、ヒッグス真空中で獲得する質量と、それに QCD 真空中で獲得

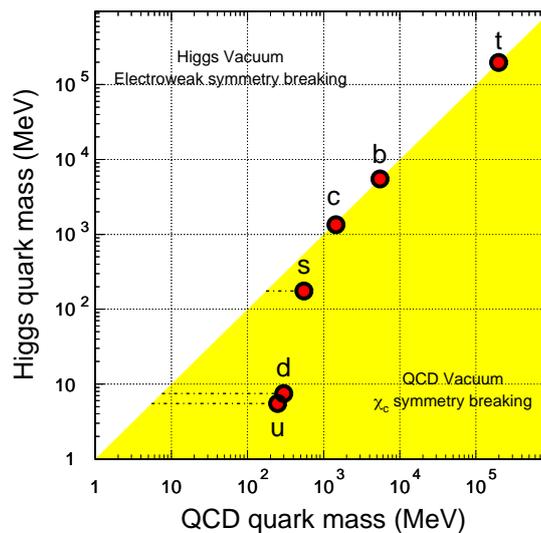


図 2.1 6 つのクォークについての、QCD 真空中での質量とヒッグス真空中での質量 ([1] から引用)。

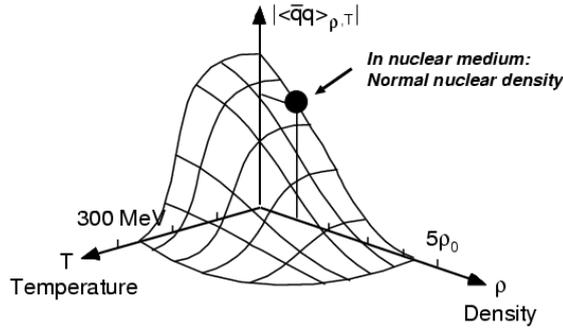


図 2.2 W. Weise の計算 [2] による、クォーク凝縮の期待値の絶対値の温度密度依存性 [3]

する質量を合わせた構成子クォーク質量を表したものである [1,8]。ヒッグス機構によって獲得する質量は裸のクォークの質量とも呼ばれ、ヒッグス場との結合によって生じている質量である。QCD の持つ性質であるクォーク単体を取り出すことができないという閉じ込めの効果のためにクォーク単体の質量は直接測定することができないが、クォークのカイラル対称性によって獲得している質量は、QCD に基づく理論計算によって見積もられている。

構成子クォークは、軽いクォーク (u, d, s) がハドロンを構成する際に、「バリオンはクォーク 3 つから、メソンはクォーク・反クォーク対からなる」というときのクォークのことである。構成子クォークはただの裸のクォークではなく、真空中に凝縮したクォーク・反クォークの対との相互作用によりさらに質量を獲得しており、軽いクォークの場合、図 2.1 のようにヒッグス質量と比較して大きな質量 (u/d クォークは $300 \text{ MeV}/c^2$ 、 s クォークは $500 \text{ MeV}/c^2$) を獲得している。クォーク反クォークの対はカイラル対称性が自発的に破れることにより真空中に凝縮し、その真空期待値 $\langle \bar{q}q \rangle$ が 0 でないことは、カイラル対称性の破れ具合を表す [3]。 $\langle \bar{q}q \rangle$ はクォーク凝縮と呼ばれ、その絶対値 $|\langle \bar{q}q \rangle|$ はカイラル対称性の破れのオーダーパラメータである。軽いクォークによって構成されるハドロンの質量の多くは、構成子クォークがこのように獲得する質量によって占められている。

2.2 軽いベクトル中間子とその質量

図 2.2 は、W. Weise の計算 [2] による、カイラル対称性の破れの秩序変数 $|\langle \bar{q}q \rangle_{\rho,T}|$ の、温度と密度への依存性を表したものである。原子核密度中 ($\rho = \rho_0$) や高温媒質中 ($T \gg 0$) では、真空中 ($T = 0$ かつ $\rho = 0$) と比較して $|\langle \bar{q}q \rangle_{\rho,T}|$ の値が小さくなっている。これはカイラル対称性の自発的破れが部分的に回復していることを示す。軽いクォークは凝縮したクォーク反クォーク対と相互作用して質量を獲得していることを考えると、原子核密度中でその質量が変化していると考えられる [3]。

電気的に中性な軽いベクトル中間子 (本論文では単に軽いベクトル中間子と表記する) である $\rho^0(770)$, $\omega(782)$, $\phi(1020)$ 中間子 (本論文では ρ, ω, ϕ と表記する) は、精密に質量の変化を測定するために良い対象である。軽いベクトル中間子はレプトン (電子、 μ 粒子) の対への崩壊チャンネルを持つ。強い相互作用をしないレプトンをプローブとすることで、原子核媒質中での強い相互作用による散乱が無い状態で検出できるため、崩壊前の軽いベクトル中間子の質量の情報を調べられる。

理論的にも様々な計算がなされている。図 2.3 は、参考文献 [4,9] による QCD 和則という QCD の有効理論による計算で、静止する軽いベクトル中間子の質量の密度依存性を求めたものである。この計算で

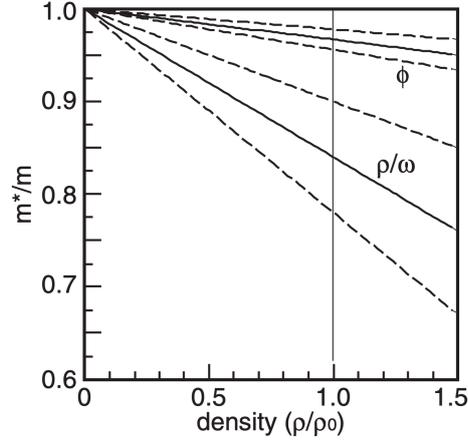


図 2.3 静止している軽いベクトル中間子の質量のバリオン密度依存性 [4].

は、真空中から原子核密度に移るにつれ質量が軽くなっていくことを予言している。0 でない密度中では格子 QCD での計算が困難となるため様々な有効理論による計算により、様々な質量スペクトルの変形のモデルが提唱されている [3]。

2.3 先行実験 KEK-PS E325 実験

J-PARC E16 実験の直接の先行研究にあたる KEK-PS E325 実験について、その実験結果を説明し、実験方法を概説する。

KEK-PS E325 実験は、KEK の 12 GeV Proton Synchrotron (PS) が供給する 12 GeV/c 陽子ビームを原子核標的 (C, Cu) に当てて生成するベクトル中間子について、その崩壊粒子対 $\phi \rightarrow e^+e^-$, $\rho/\omega \rightarrow e^+e^-$, $\phi \rightarrow K^+K^-$ を、特に原子核中での崩壊が多く測定されるような運動学変数の領域で、測定するために設計された実験である [10]。 $\rho, \omega \rightarrow e^+e^-$ の測定では、以下の式

$$\frac{m(\rho)}{m(0)} = 1 - k \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)$$

(ρ は密度) のような質量スペクトルが原子核中で実現されていたとするモデルを用い、Cu 標的において $k = 0.092 \pm 0.002$ という値を得た [11]。 $\phi \rightarrow e^+e^-$ で測定された質量スペクトルを、図 2.4 に示す。左の図が C 標的、右が Cu 標的での結果である。Cu 標的での測定では、 ϕ 中間子の質量 ($1019 \text{ MeV}/c^2$) のピークの質量の小さい側で、真空中でのスペクトル形状から予測される質量スペクトルからの超過が見られた。

$$\frac{m(\rho)}{m(0)} = 1 - k_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right), \quad \frac{\Gamma(\rho)}{\Gamma(0)} = 1 + k_2^{\text{tot}} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)$$

(ρ は密度) のような質量スペクトルを仮定したモデルでは、Cu 標的において $k_1 = 0.034^{+0.006}_{-0.007}$, $k_2^{\text{tot}} = 2.6^{+1.8}_{-1.2}$ という値を得た [5]。KEK-PS E325 では以上のように、 $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$ の質量スペクトルは変形して、その質量は軽くなるという結果を得ている。

ただし、Jefferson Laboratory CLAS-g7 実験の γN 反応で生成される $\rho \rightarrow e^+e^-$ の測定では、 k の 95% 上限値を 0.053 [12] としており、KEK E325 の結果とは全く異なる [13] ため、さらなる測定によって

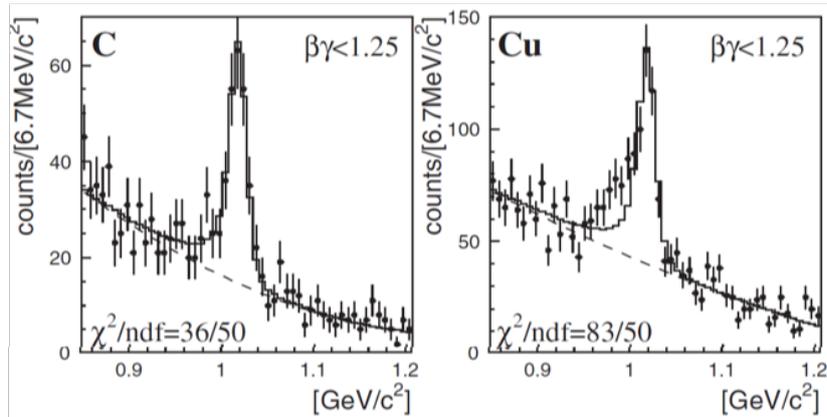


図 2.4 KEK-PS E325 実験の Cu 標的からの $\phi \rightarrow e^+e^-$ の質量スペクトルにおいて、excess が見られた $\beta\gamma$ 領域 [5]。

KEK-PS E325 実験、CLAS-g7 実験の結果の確立と、他の実験の結果を含めた統一的な理解が目指されている。

2.4 J-PARC E16 実験の目的

前節の通り、KEK-PS E325 実験は有限密度中における $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$ で、質量のシフトとして、質量スペクトルの変形を測定した。J-PARC E16 実験の目標は、

$$pA \rightarrow \rho/\omega/\phi + X$$

反応で生成される軽いベクトル中間子 ρ, ω, ϕ 中間子が崩壊してできる e^+e^- 対の質量スペクトルを良い質量分解能で、KEK-PS E325 実験より高統計に (ϕ 中間子を 2×10^5 個)、測定することである。その目的は統計量の増加により質量スペクトル変形の核種依存性・運動量依存性を測定できるようにすることで、有限密度中でのクォーク凝縮と質量の関係を系統的に研究することである。核種依存性や運動量依存性などを測定することで、様々な理論予測と比較することができるようになる [3]。

そのために J-PARC E16 実験は、原子核標的にエネルギー 30 GeV/c の陽子ビームを入射して軽いベクトル中間子 (ρ, ω, ϕ 中間子) を生成し、その質量スペクトルを電子陽電子対崩壊チャンネルで、大統計かつ精密に測定する。E16 は、先行実験 KEK-PS E325 実験の 100 倍の約 10^5 個の ϕ 中間子の質量スペクトルを、約 2 倍改善した $5 \text{ MeV}/c^2$ の質量分解能で測定するために、実験装置群を設計・開発してきた。100 倍の統計量は、

- 12 GeV/c から 30 GeV/c へのビームの高エネルギー化によって生成断面積を 2 倍に
- 約 10^9 protons/1.8 s から 1×10^{10} protons/2 s へのビームの大強度化によって照射陽子率を 10 倍に
- 検出器のアクセプタンスを 5 倍に

することで、合計 $2 \times 10 \times 5 = 100$ 倍とし、達成する計画である。約 $5 \text{ MeV}/c^2$ の質量分解能は、1.7 T の強磁場中で、 $100 \mu\text{m}$ の位置分解能を 2 種類の飛跡検出器で達成することで、実現を目指している。

E16 の検出器群が上記の性能を達成できたと仮定するシミュレーションによって、図 2.5 のような質量スペクトルを得ることを期待している。これは、E325 のフィット結果 [5] のような質量スペクトルが原子

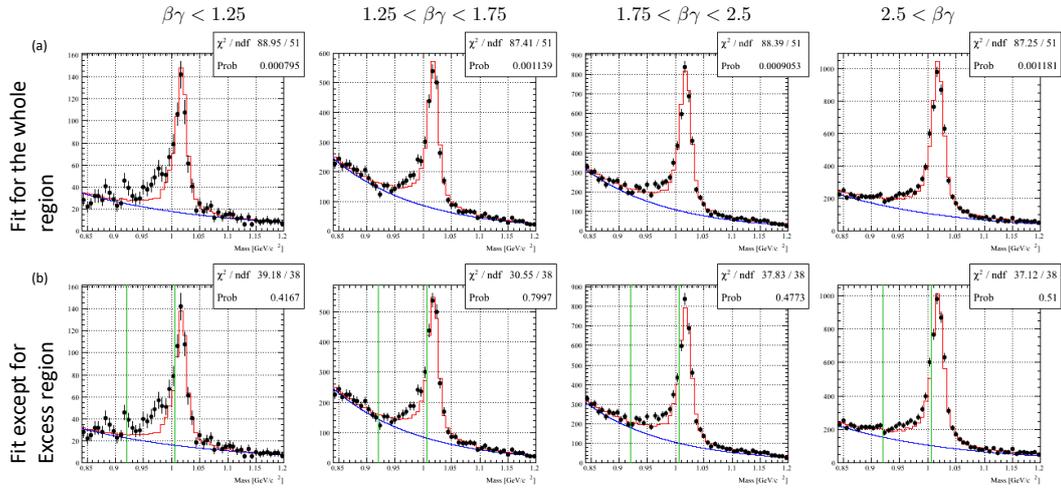


図 2.5 KEK-PS E325 [5] のパラメータを基にした、E16 の pCu シミュレーションによる、 ϕ 中間子の質量スペクトルとそのフィット [14]。フィットする際に、超過がある質量範囲の値を含めた図 (a) と、除いた図 (b) である。

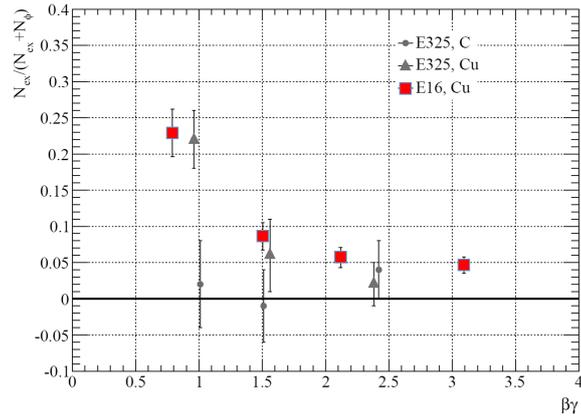


図 2.6 E16 の p+Cu 反応のシミュレーションで得た ϕ 中間子質量スペクトルをフィットして得た、フィットからの超過分の全 ϕ 中間子に占める割合 $\left(\frac{N_{\text{ex}}}{N_{\text{ex}} + N_{\phi}}\right)$ についての $\beta\gamma$ 依存性 [14]。

核中で実現されていた際に、Run 1 の Cu 標的で 15 000 個の ϕ 中間子が測定できたと仮定したシミュレーションによる質量スペクトルとそのフィット結果である [14]。フィットにおいて、表示している全質量領域を用いたフィットの χ^2 の値を示すのが図 2.5 (a) で、E325 で超過が見られた質量領域を除いてフィットした時の χ^2 値とフィット関数を示すのが図 (b) である。E325 の結果を基にしたシミュレーションであり、 $\beta\gamma$ が大きい領域から小さい領域に向けて、次第に超過分が大きくなっていく様子が見て取れる。そのフィットからの超過分の収量を $\beta\gamma$ 領域ごとに示したのが図 2.6 である [14]。KEK-PS E325 では低い $\beta\gamma$ 領域でのみ超過を確認したが、KEK-PS E325 実験の質量スペクトル変形のモデル [5] を仮定した際には、E16 実験で目指す統計量と質量測定の精度の良さのために、 $\beta\gamma$ 領域の変化に応じて超過収量に変化していく様子を見ることを期待できる。

第 3 章

実験装置

本章では、第 3.1 節で J-PARC E16 実験の概要と目標、実験装置概要について、また、第 3.2 節で実験装置の一つであり本論文で改良を行なった GEM 飛跡検出器の詳細について記述する。

3.1 J-PARC E16 実験

J-PARC E16 実験は、J-PARC Main Ring からの大強度陽子ビームを、ハドロン実験施設に設置した原子核標的に照射し、そこから出てくる粒子を E16 スペクトロメータで測定する。E16 実験のスペクトロメータは、生成粒子中から電子・陽電子を同定するために、ガス中でのチェレンコフ光の検出器と、電磁カロリメータを備え、荷電粒子の運動量を測定するための、電磁石と飛跡検出器を備える。これらの検出器の役割を概説し、各検出器について説明する。

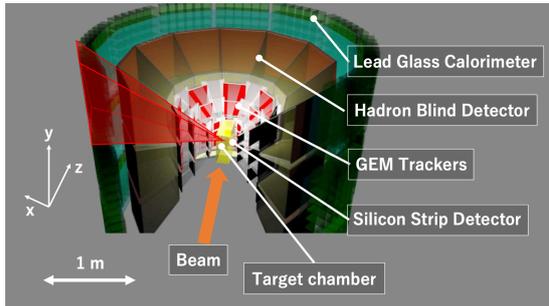
KEK-PS E325 実験の 100 倍の ϕ 中間子のデータを取得するために、増強した陽子ビームを使用する。さらに、E16 ではバックグラウンド粒子となるハドロンが、生成した ϕ 中間子の崩壊電子・陽電子とともに電子の 100 倍の数、検出器を通過すると見積もられている。そのために E16 の検出器が高い計数率耐性と、高い粒子識別検出性能を実現できるよう、検出器群の開発を行ってきた。

高い計数率に耐えつつ、約 $5 \text{ MeV}/c^2$ の質量分解能を実現するために、約 1.7 T の強い電磁石と位置検出精度 $100 \mu\text{m}$ の飛跡検出器を用いる。飛跡検出器はシリコン飛跡検出器 1 台と、GEM 飛跡検出器 3 台である。

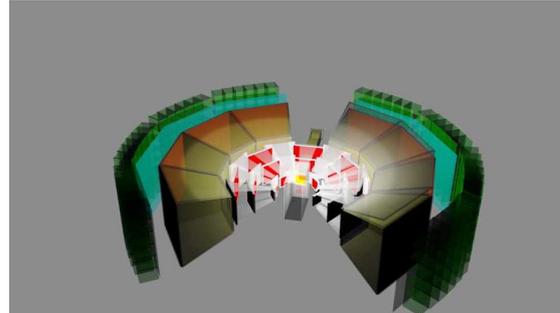
バックグラウンド粒子の中から電子を選別するのが、Hadron Blind Detector (HBD) と鉛ガラスカロリメータ (LG) である。GTR と HBD と LG が出力する信号をトリガーモジュールに入力し、トリガーモジュールはその信号を用いてトリガーを発行する。この際、電子が検出された確率の高いイベントに対して選択的にトリガーを発行する。このことによって、計数率高く取得され続けるデータの中から、電子のデータを良い効率で取得できる [14]。

図 3.1 は、E16 実験の予定する検出器のセットアップである。Run 2 と呼ぶ実験期間にフル検出器セットアップでの実験を予定している。Run 1 ではその約 3 分の 1 のセットアップで Run2 での上段下段を省略した中段のみのセットアップである。Run 0a/b ではさらに限られたセットアップである。

E16 実験は、2020 年の 5 月から 6 月に、J-PARC ハドロンホールの高運動量陽子ビームラインにて、Run 0a と呼ぶ検出器調整ランを行なった [16]。5 月に開始した高運動量陽子ビームラインの初めてのビーム調整運転に引続いて E16 は Run 0a 実験期間を行い、E16 の実験装置のデータを収集することに成功した。また、Run 0b として、2 度めの検出器調整ランを 2021 年 2–3 月に行う。



(a) Run 2 で予定するセットアップ。

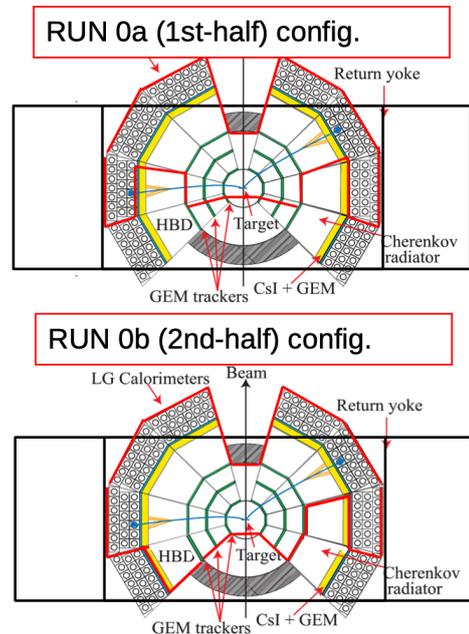


(b) Run 1 で予定するセットアップ

図 3.1 E16 実験のセットアップ ([14, 15] から引用)。(a) 図で赤の実線で囲まれた領域を 1 モジュールと数え、各モジュールは、標的から外側に向かって順に SSD、GTR、HBD、LG である。



(a) Run 0a でのセットアップ。写真左奥にあるのが FM 電磁石と検出器であり、右手前から陽子ビームを入射する。



(b) Run 0a, b でのセットアップ。

図 3.2 E16 実験の Run 0 でのセットアップ。

3.1.1 ビーム

E16 実験は運動量 $30 \text{ GeV}/c$ の陽子を原子核標的に衝突させて、その衝突で生じる荷電粒子を測定する。 $30 \text{ GeV}/c$ 陽子は、加速器によって作り出され、陽子ビームとして標的に照射される。先行実験 KEK-PS E325 実験では、KEK 12 GeV 陽子シンクロトンからの陽子ビームを利用して実験を行なった。J-PARC E16 実験が利用するビームは、KEK-PS E325 実験と比較して約 10 倍の強度である、1 取出あたり 1×10^{10} protons であり、各陽子の運動量が $30 \text{ GeV}/c$ となるビームである。



図 3.3 大強度陽子加速器施設 J-PARC の鳥瞰図 (画像提供：J-PARC センター [17])

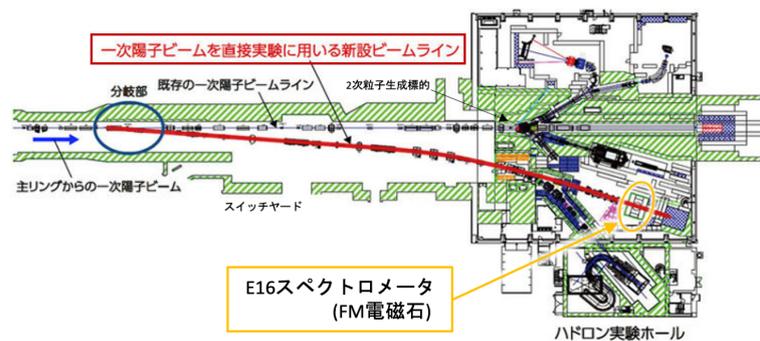


図 3.4 高運動量ビームラインとハドロンホールの平面図 (画像提供：KEK [6])

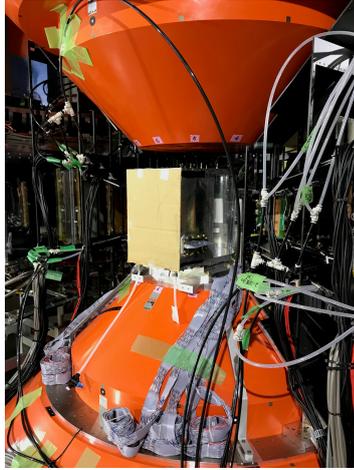
J-PARC 加速器

J-PARC センター (大強度陽子加速器施設、Japan Proton Accelerator Research Complex) は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が、茨城県東海村の JAEA 原子力科学研究所内に建設した、加速器群と実験施設群の呼称である。

図 3.3 は、J-PARC の鳥瞰図である。J-PARC は図中の 3 つの加速器を持ち、上流から順にリニアック、3 GeV シンクロトロン、50 GeV シンクロトロン (Main Ring; MR) である。MR は 3 GeV シンクロトロン から陽子ビームを受け取って加速し、30 GeV/c の陽子を出力することができる。E16 実験はこの 30 GeV/c 陽子ビームをハドロン実験施設に建設した高運動量陽子ビームラインへと取り出して利用する [14]。

高運動量陽子ビームライン

高運動量陽子ビームラインは、ハドロンホールに設置したビームラインである。図 3.4 は、1 次陽子ビ-



(a) ターゲットチェンバー。中に標的が入っている。左手前から陽子ビームが入射する。保護のために一時的に段ボールがかぶせてある。



(b) ターゲットチェンバーの外から撮影した標的の写真。写真中の右手前から左奥への方向でビームが入射し3枚の標的を通過する。Run 0 では右から、銅、炭素、銅の順に配置している。

図 3.5 標的の写真。

ムラインとハドロン実験施設の平面図である。スイッチヤード1次ビームラインの分岐部にはランバートソン電磁石が設置してあり、高運動量陽子ビームラインと2次粒子生成標的へ向かうビームラインとに分岐される。高運動量陽子ビームラインは2020年5月に初めてのビームを出射し、5月にビーム調整運転を行なった。高運動量陽子ビームラインは、2秒間かけての「遅い取り出し」1回あたり、 1×10^{10} 個の陽子を供給することができる。

MRで1.4秒間かけて30 GeV/cまで加速されてMR内を周回する陽子は、MRに設置された電磁石群により2秒間かけて少しずつ削り出され（「遅い取り出し」）、ハドロンホールへ向かうスイッチヤード1次ビームラインに送り出される。遅い取り出しでは、5.52秒に1回の頻度で取り出しを繰り返す[14]。E16実験はこのビームを標的に照射する際の標的からの放射線に耐えられる検出器を製作する必要がある。

標的

原子核標的である炭素と銅の薄膜を、FM電磁石中心のターゲットチェンバー中に設置する。図3.5はRun 0aでの標的の写真である。図3.1.1のように、銅の80 μm 薄膜2枚と、炭素の400 μm 薄膜1枚をビーム軸に沿って200 mm ずつ離して配置する[14]。これらの標的の厚みの合計は計0.2%相互作用長に相当し、 1×10^{10} 個の陽子が2秒間照射されている間、標的で10 MHzの相互作用が起きると計算されている[14]。

3.1.2 FM電磁石

2450 Aの電流で、中心部で1.7 Tの磁場を発生させる。 ϕ 中間子の質量分解能6.4 MeV/cを達成するためには $\int \vec{B} \times d\vec{l}$ の精度が0.1%必要でそのためには \vec{B} の誤差が0.1%ならば良く、現在までに \vec{B} の誤差が0.13%以下の精度を達成している[18]。

3.1.3 シリコンストリップ検出器 (SSD)

シリコンストリップ検出器 (Silicon Strip Detector; SSD) は、荷電粒子が引き起こすイオン化現象で生じる電子を半導体シリコン内に作った帯状の電極 (ストリップ) で検出し、荷電粒子の通過したストリップを検出する装置。どのストリップを通過したかという情報から 1 次元的な位置を測定できる。高レート下での飛跡再構成のために GTR を補うべく導入された。

3.1.4 GEM 飛跡検出器 (GTR)

ガス電子増幅器 (GEM) を用いて、荷電粒子の通過した位置の 2 次元座標を検出する装置である。SSD と GTR の位置情報を合わせて、荷電粒子が通った飛跡を再構築し、その飛跡の曲がり具合と磁場の情報から、その荷電粒子の運動量を計算する。詳しくは 3.2 節で説明する。

3.1.5 Hadron Blind Detector (HBD)

Hadron Blind Detector (HBD) は CF_4 中で高速な荷電粒子が引き起こすチェレンコフ光を、CsI を蒸着した金の GEM 1 枚と銅の GEM 2 枚を用いて検出する装置である。PHENIX 実験で実用化され粒子種を識別する検出器として用いられた [19]。また、E16 は、PHENIX 実験から製作技術を学び、PHENIX 実験で開発された HBD を基に E16 のための HBD の開発を行ってきた。

E16 の HBD では、チェレンコフ光放射体、兼、電子増幅ガスとして、ほぼ大気圧程度の CF_4 ガスを用いる。高速な荷電粒子がガス中を通過する際、荷電粒子はチェレンコフ光を放出する。 CF_4 ガスに大気中からの水や酸素が混入すると、測定したい波長領域の光が吸収されてしまうため、高い気密性が要求される。 CF_4 は屈折率が約 $1 + 620 \times 10^{-6}$ 程度で空気より僅かに大きい程度である。電子と比べて重い π 中間子などのハドロンは、同じ運動量でも速度は遅いため、 CF_4 中を通過する際にチェレンコフ光を放射しにくい。このチェレンコフ光の放出のされ方の違いによって、粒子種を識別する。放出され CsI 表面に到達したチェレンコフ光は、金製の GEM 表面に蒸着された CsI (ヨウ化セシウム) から光電効果によって電子を叩き出す。叩き出された電子を 3 枚の GEM が増幅し、それを読出パッドで検出する。読出パッドに集まった電子の電荷を 3.2.5 節で述べる RD51-APV 基板に入力し、RD51-APV 基板はその波形データを収集する。

E16 実験の HBD と PHENIX 実験の HBD の相違点の一つに、GEM の読出によるトリガー送出が可能という点がある。3.2.6 節の GTR-ASD と同様に、増幅最終段の GEM の、読出パッドと対面する面に生じる電荷を、HBD-ASD 基板 [15] で読み出す。信号の波高が閾値を超えた時にデジタル信号をトリガーマジュールへ送出し、他の検出器の信号と合わせたトリガーを使用することで、大量の π^\pm 中間子の中から電子 (e^\pm) を簡易的に素早く見分けて、電子を含む可能性の高いイベントのデータを収集することができる。図 3.6 は HBD の読出回路の写真である。GTR と比較してスペースに余裕があるため、HBD-ASD は ASIC ではなく、ディスクリート IC で製作された。



図 3.6 HBD の読出回路の写真。中央のコの字型の基板が HBD-ASD 基板、左右に 2 つ下に 1 つ接続しているのが RD51-APV 基板、左上についているのが高電圧分割基板である。

3.1.6 Lead Glass カロリメータ (LG)

鉛ガラスカロリメータ (Lead-Glass calorimeter; LG) は、鉛ガラスシンチレータ内で生じる電磁シャワーからの光を光電子増倍管で検出し、その光量で粒子種を識別する装置である。LG 単体性能について電子検出効率 90% とする際に π 中間子除去率 95% を、高レート環境下で達成するために設計されている [20]。

3.2 GEM 飛跡検出器 (GTR)

2次元位置検出器である GEM 飛跡検出器 (GEM Tracker; GTR) について説明し、最後に本論文で解決を目指す内容について述べる。

GTR の原理と構造について説明する。GTR は ガス電子増幅器 (Gas Electron Multiplier; GEM) を用いて、荷電粒子の通過した 2 次元的位置を検出する装置である [21]。図 3.7 は、GTR1 基の概要図である。荷電粒子が GTR チェンバー中を通過する際に、Drift gap で GTR チェンバー中の Ar/CO₂(70:30) ガス分子をイオン化して、イオン ((CO₂)⁺, Ar⁺) と電子が生じる。Drift gap の Drift 電場によって、電子は GEM1 に引き寄せられ、また、Ar⁺ イオンの電荷は (CO₂)⁺ イオンへと移っていく。Drift Gap からドリフトしてきた電子は、GEM の穴に引き寄せられ、GEM の穴の強い電場によって、電子の数を増幅する。3 枚重ねた GEM で 3 段の増幅で約 4000–12000 倍 [22] の個数に増幅された電子は、2次元ストリップ基板に吸収され、各ストリップと接続している回路基板 TRK-APV 基板に入力される。TRK-APV 基板がその電荷を増幅した波形を収集することで、その電荷量と位置を測定する。

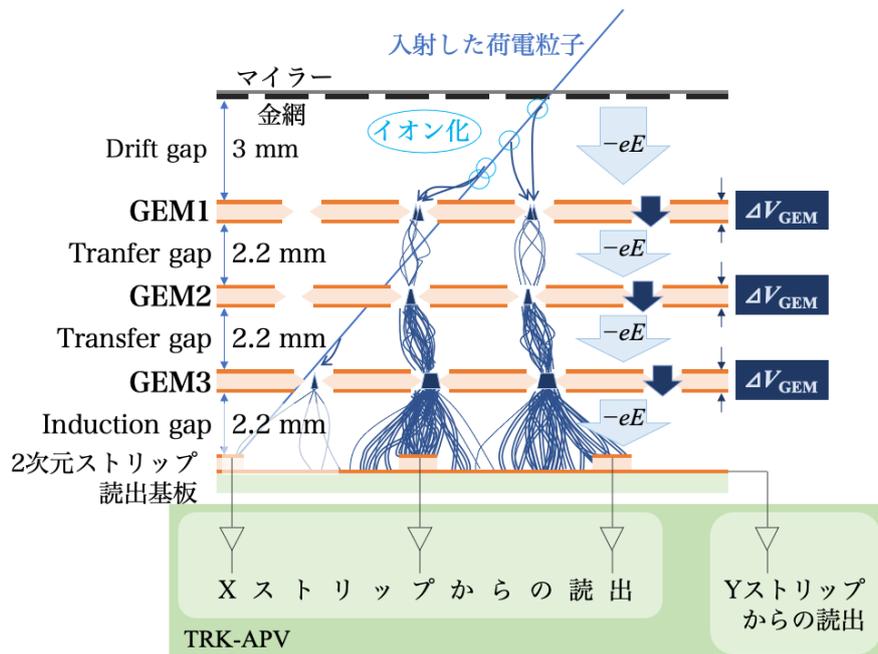


図 3.7 GTR の構造。

GTR には、 5 kHz/mm^2 の高いレート耐性と、 $100 \mu\text{m}$ の優れた水平方向の位置分解能を実現することが求められている。 $100 \mu\text{m}$ は、SSD と GTR3 基を合わせて $5 \text{ MeV}/c^2$ の質量分解能を達成するために必要な値である [14]。これまでの研究で、電子ビームを利用したテスト実験において、水平方向 $100 \mu\text{m}$ の精度で荷電粒子の飛跡を検出できることが分かっている [14]。

GTR チェンバーの写真が図 3.8 である。FM 電磁石中に GTR を 3 機設置してある。このような 3 機セット 1 モジュールとして、Run 0a では 6 モジュール、Run 0b では 8 モジュールの GTR を FM 内に設置してデータを収集した。右側の赤い FM 電磁石の中心磁極に標的が設置してあり、そこから左へ飛んでいく粒子の飛跡を検出するのが図中のモジュールの GTR である。右から、 100 mm 、 200 mm 、 300 mm 四方程度の正方形のチェンバーである。

3.2.1 GEM

ガス電子増幅器 (Gas Electron Multiplier; GEM) は、1997 年に Fabio Sauli が発明した検出器要素である [23]。それ以前のガス検出器と比較して高いレート耐性を持つ、Micro-Pattern Gas Detectors (MPGD) の 1 つであり、以前のガス検出器 Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC) や Drift Chamber と比較して、高いレートでもゲインが安定しており [7]、高いレート耐性を持つ。図 3.9 は、GEM と MWPC のゲインのレート依存性を示しており、GEM は 1 MHz/mm^2 でもゲインが低下しないことがわかる。GEM はこれまで、高エネルギー物理実験のための粒子検出器を中心に開発・利用されており、その他にも様々な装置に応用され始めている [24]。

GTR にとって重要な先行する検出器として、COMPASS 実験の GEM 検出器がある。COMPASS 実験は高ルミノシティで GEM を用いた最初の実験であり、CERN の SPS 加速器からのビームを用いた

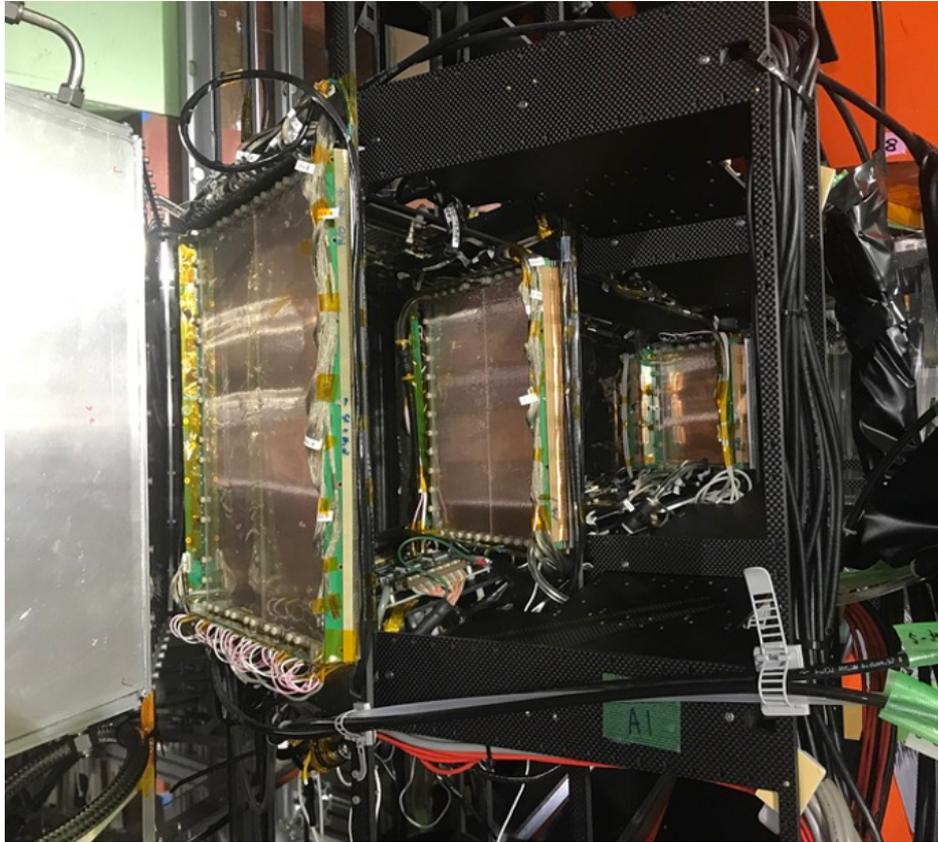


図 3.8 電磁石中に設置した GTR(Run 0a、2020 年 6 月時点)。

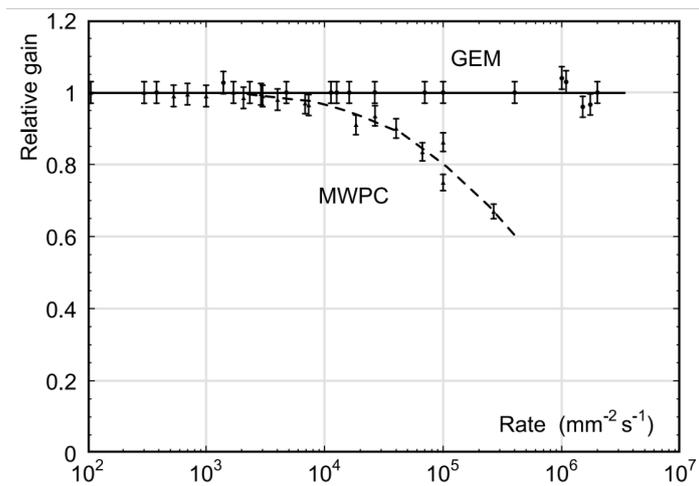


図 3.9 GEM と MWPC のゲインの、レート依存性 [7]

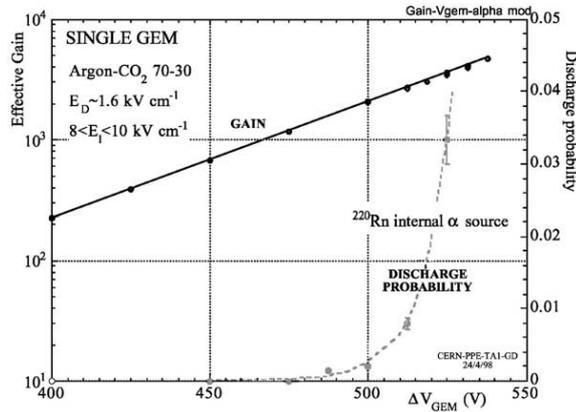


図 3.10 1 枚の GEM での電圧と放電確率の印加電圧依存性。[27]。

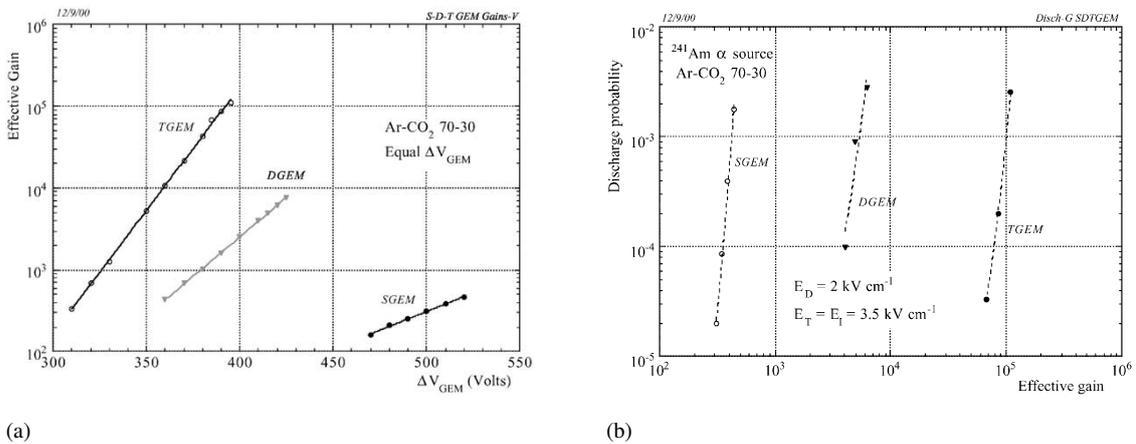


図 3.11 GEM を重ねた際の性能 [27]。SGEM, DGEM, TGEM はそれぞれ GEM 1, 2, 3 枚重ねを表す。(a) 増幅率の電圧依存性。(b) 増幅率と放電確率の関係。

固定標的実験である [25]。COMPASS 実験の $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の GEM を用いた飛跡検出器は、ビームパイプ付近での高い粒子通過レート 25 kHz/mm^2 の放射線を受けながら、 $70 \mu\text{m}$ の位置測定精度でのデータ収集を達成している [26]。

E16 でもビーム下流のビームパイプに最も近いチェンバーが受ける荷電粒子の通過レートは高く、 5 kHz/mm^2 であり、これは上記の COMPASS の 25 kHz/mm^2 より低いレートであるため、E16 実験の GTR もこの計数率への耐性があることを期待している [14]。

3.2.2 GEM の性能の電圧依存性と放電

GEM の性能を考える上で重要な指標は、GEM による電子の増幅率と GEM の放電率、GEM の放電伝播確率であり、GEM に印加する電圧に依存する。図 3.10 は GEM1 枚での電子増幅率（ゲイン）と放電確率の、GEM 表裏の電位差 ΔV_{GEM} 依存性を示している [27]。 ΔV_{GEM} を高くするとゲインは上がるが、500 V 周辺から放電確率も高くなる。ゲインを高くしながら放電の頻度を抑えるために、GEM を検出器に使う際には複数枚重ねることで ΔV_{GEM} を低く運用する。図 3.11 中の SGEM、DGEM、TGEM はそれ

ぞれ、1枚、2枚、3枚重ねの GEM のことで、図 3.2.2 はゲインの ΔV_{GEM} 依存性、図 3.2.2 は、ゲインと放電確率の関係である。SGEM に対して、それを 2枚、3枚重ねた DGEM、TGEM は低い ΔV_{GEM} で、より高いゲインを達成している。このように複数枚の GEM で複数段の増幅を行うことで、放電確率低く高いゲインで検出器を運用することができる。

放電は、GEM 自身や読出回路、高電圧回路に損傷を与えることがある。放電を繰り返す間に表裏の銅が融けて飛び散り穴の表裏を導通させるほか、絶縁体が焦げるなどして、GEM の表裏を導通させてしまうことがある。表裏が導通してしまった GEM は電圧をかけることが出来ないため、使用不可能となる。また放電の際には GEM の表裏が構成するコンデンサに高電圧がかかっていたことで蓄えられていた電荷が、一度に放出される。そのため高電圧回路に大きな電荷が流れ込み瞬間的な電圧の変動が起きるため、回路に損傷を与えることがある。

GEM 表裏の放電とともに他の GEM や読出回路との間での放電が引き起こされることがあり、これは放電伝播 (discharge propagation) と呼ばれる。この放電伝播は読出回路へ大きな電荷や高い電圧を与えるので、読出回路へ損傷を与えることがある。

放電や放電伝播による GEM や回路の損傷は、GEM の実用初期から開発上の課題となっており、COMPASS 実験の GEM 検出器において放電のメカニズムと対策 [27] について研究がなされた。GEM は表裏の銅とそれに挟まれたカプトンでコンデンサを構成しており静電容量を持つ。放電する際にはそのコンデンサに充電された電荷が一度に解放される。一回の放電で解放される電荷量を減らすために、GEM を分割して、かつ、放電時の電流を小さくするために抵抗を挿入している。COMPASS においては $300 \times 300 \text{mm}^2$ の GEM を 12 分割して用いている。

以上をまとめると、GEM 検出器では、GEM を重ねることで多段階の増幅を行い放電頻度を抑えて、また、放電の際の損傷を小さくするために、GEM を小さく分割し容量を小さくしつつ、高電圧供給回路に抵抗を挿入するという対策がなされている。

3.2.3 GTR の GEM と高電圧

E16 の GEM と、高電圧供給回路について、GEM 検出器における GEM の放電緩和策を踏まえながら述べる。3.2.2 節で述べた通り、GEM の放電は、GEM や周辺回路に損傷を与える。そのため、放電の頻度、エネルギーを抑えられるように GTR も設計、開発が行われてきた。

E16 実験の GTR は、GEM を 3枚重ねて電子の増幅に用いる。E16 の GTR においては、 $100 \times 100 \text{mm}^2$ の GEM は分割無し、 $200 \times 200 \text{mm}^2$ の GEM はストリップ状に 4 分割、 $300 \times 300 \text{mm}^2$ の GEM はストリップ状に 12 分割 (1, 2 枚目) または 24 分割 (3 枚目) している。このことで GEM の容量を抑え、放電のダメージを抑える。

放電を繰り返すうちに、放電時の熱や衝撃のために、GEM の表裏が完全に導通してしまい、ゲインが低くなったり使用不能になることがある。ある 1 ストリップが導通してしまった際にも、その他の GEM にかかる電圧が低くなりすぎないように GEM を分割した各ストリップと電圧分割抵抗の間に抵抗 $R_{\text{protection}}$ が入れている。この抵抗値を大きくしすぎると、放電時にそのエネルギーを逃がせなくなることがあるため、この抵抗値 ($R_{\text{protection}}$) をこれより大きくすることによって電圧分割抵抗の低下を抑えることはできない。そのため過去の他の実験 [27] の値を参照して抵抗値を定めてきた。その他、E16 の GTR においては検出器の歪みによる放電が起きており、それらについてはこれまでの検出器開発 [22, 28] で対処された。

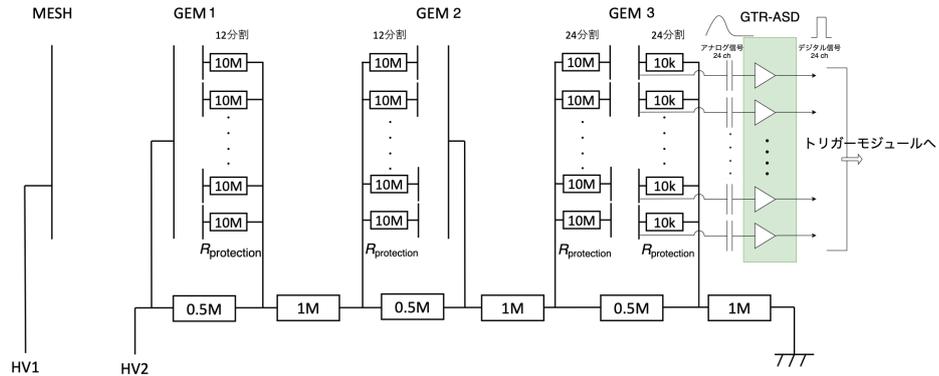


図 3.12 GTR300 mm 角の GEM への高電圧供給系と GTR-ASD の回路図。[22] の図を改変。

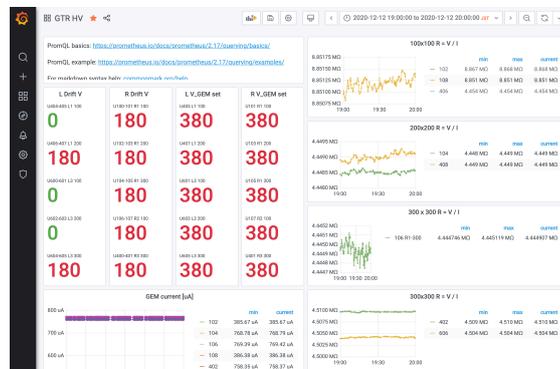


図 3.13 GTR の GEM への高電圧について、電流電圧を監視するダッシュボード。

3.2.4 GEM の高電圧の電流の監視

前節で述べたように、GEM は表裏が完全に導通してしまうことによりゲインが低くなったり使用不能になることがある。そのような時には、GEM に電圧を印加するための抵抗の値が小さくなり電流が小さくなるので、その監視に電流を見るのが良い。運用時には電圧・電流値を取得して、電流が異常に増加していないかを監視する。異常に増加している GEM があればその GEM の電圧を高くしてゲインを確保する、もしくは運用不能と判断して電圧を落とす必要がある。本論文の主題とは離れるが、本研究でこの監視ツールの構築を行なったので説明する。

GTR で GEM に高電圧を印加するために使用しているのは、iseg HV modules を搭載した Wiener Mpod [29] クレートである。Wiener Mpod クレートは、snmp (Simple Network Management Protocol) によって電流と電圧の値を送り返す機能を持っている。この電流電圧の値のデータを、Prometheus と snmp_exporter ([30]) を用いて Mpod から収集し、Grafana [31] にてグラフを表示し、監視した。図 3.13 は、電圧、電流、抵抗の値を Grafana によって表示したダッシュボードである。

図 3.2.4 のようなスパイク状の電流値の上昇が起きている時刻には、大量の粒子の増幅または放電があったことが推測できる。また、図 3.2.4 のように抵抗値が階段状に低下した場合には、GEM の表裏が導通したために GEM に高電圧を印加するための抵抗鎖の抵抗値が下がったことが推測される。この場合、導通

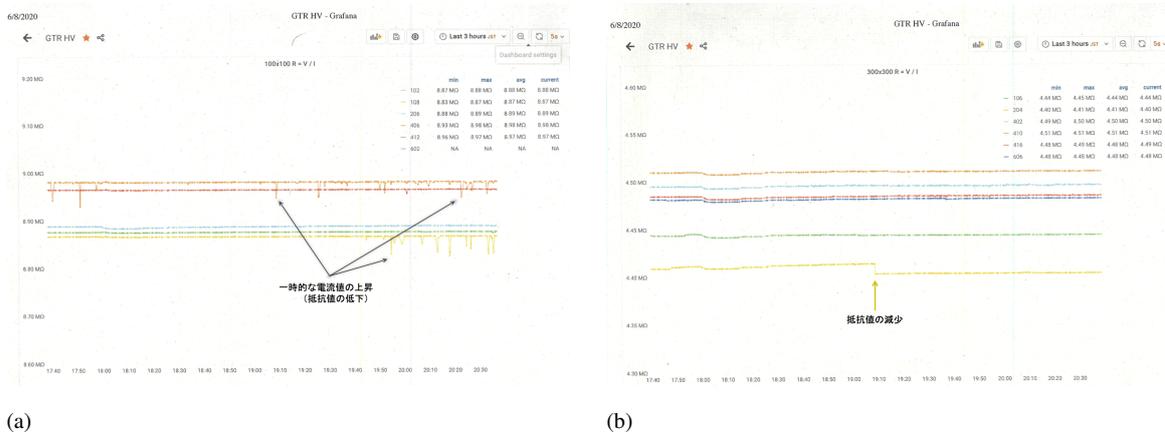


図 3.14 GTR チェンバーへのビーム照射時の、 $R (= |V/A|)$ の時間変動。(a) は 100 mm 角チェンバー、(b) は 300 mm 角チェンバーでの例。(b) のような抵抗値の減少があった際には、そのチェンバーのゲインを考え直す。

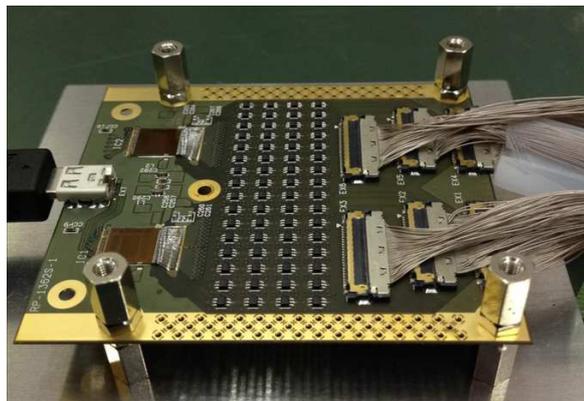


図 3.15 GTR の読出ストリップの波形読出しに用いる TRK-APV カード。右側に 6 束出ているケーブルでチェンバーと接続する。左側に挿している micro-HDMI ケーブルで、SRS モジュールと接続する。写真は参考文献 [14] から引用。

したストリップのある GEM において、GEM への印加電圧が下がることから、GEM のゲインが下がっていることが予想できる。そのために、そのチェンバーの電圧を上げゲインを回復させるか、電圧を上げずにチェンバーの安全を確保するか、判断しながら運用した。

3.2.5 読出回路

GTR の読出ストリップの波形読出しには、APV25 チップと Scalable Readout System (SRS) を用いる。APV25 チップは、元は CMS 実験のシリコン飛跡検出器用に開発された。その後 CERN RD51 グループによって RD51-APV カードに実装され、MPGD に利用されてきた実績がある。E16 では HBD の読出回路として RD51-APV カードを用いている。E16 の GTR の波形読出しは、物質量少なく小さく集積して APV25 チップを搭載するカード、TRK-APV カードを開発して、GTR の波形読出しに用いる。図 3.15 は、TRK-APV カードの写真である。

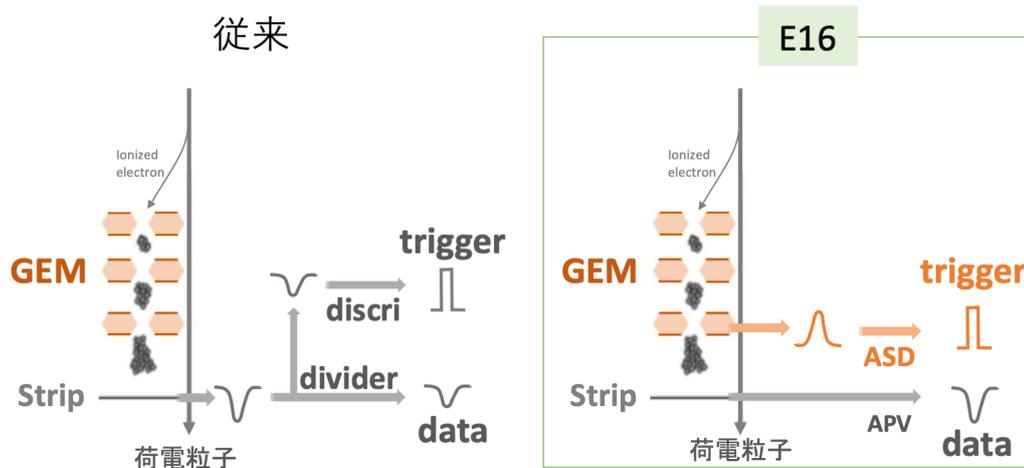


図 3.16 トリガー用の GEM 読出回路 ASD の概念図。左図は通常の方法、右図は E16 実験の GTR と HBD が採用した読出方法である。図は GTR の場合である。[15] の図を改変して引用。

SRS はコンピュータと通信し、APV25 の制御、APV25 からのデータ収集を行う。SRS は APV25 によって読出した波形をコンピュータへ送信する。

3.2.6 トリガー用の信号読出回路

GTR 300 mm 角チェンバー (GTR300) は、その中の GEM の 3 枚目 (GEM3) の読出回路側の面 (GEM3 裏) から電荷を読み出し、トリガーマジュールへ信号を送る、トリガー用フロントエンド読出回路 GTR-ASD 基板を持つ。ASD は Amplifier-Shaper-Discriminator の頭文字語である。GEM について、GEM に生じる電荷を信号に使える可能性が従来から示唆されており [24]、従来から GEM の性能評価時に使用されているものを、E16 では実験時の読出回路として実装したものである。図 3.16 は、E16 の GTR における ASD の概念図である。E16 の GTR と HBD はこの GEM フォイルからの読出によって、信号強度を小さくせずにかつチャンネル数を削減して、トリガーのための信号を出力することができる。GTR では GTR-ASD 基板がその読出回路である。図 3.12 のように、24 分割された GEM の各ストリップから電荷を読み出し、24 チャンネルの信号を出力する。高い集積度で ASD 機能と検出器群外部からのスレッシュホールド変更機能を実現するために、ASD 回路は ASIC 内に実装されており、E16 が開発し現在使用している ASIC は GOTAP ASIC v2 と名付けられている。テストパルス端子からの矩形波入力によるテスト電荷入力での、波高の線形性が確かめられており、検出器の静電容量を 2 nF とした時、3.6 mV/fC である [32, p.33]。図 ?? は GTR-ASD の写真である。4 つの GOTAP ASIC v2 チップが載っており、1 チップあたり 6 チャンネルずつを処理する。左側に接続されている KEL-XSL ケーブルでチェンバーと接続し、右側のフラットケーブルで制御基板やトリガーマジュールと接続する。右下の端子は電源ケーブルと接続している。

GTR-ASD 基板では、外部から図 3.18 のような信号 (レジスタ) を送って ASIC チップ内のスイッチや閾値の値を制御できる。CH1S0, CH1S1, ..., CH2S0, ..., CH6S7 の計 48 ビットの信号を送る。この信号を各基板に送り出すために使用するのが図 3.19 の Mezzanine-B 基板と Raspberry Pi である。1 組の Mezzanine-B 基板と Raspberry Pi を使用することで、最大 4 枚の GTR-ASD 基板を扱える。

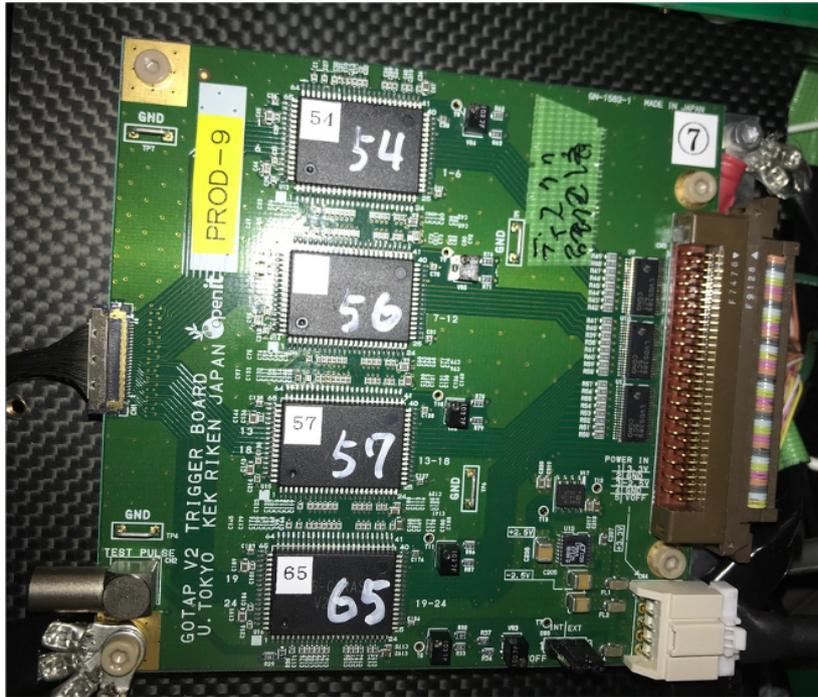


図 3.17 GTR-ASD の写真。

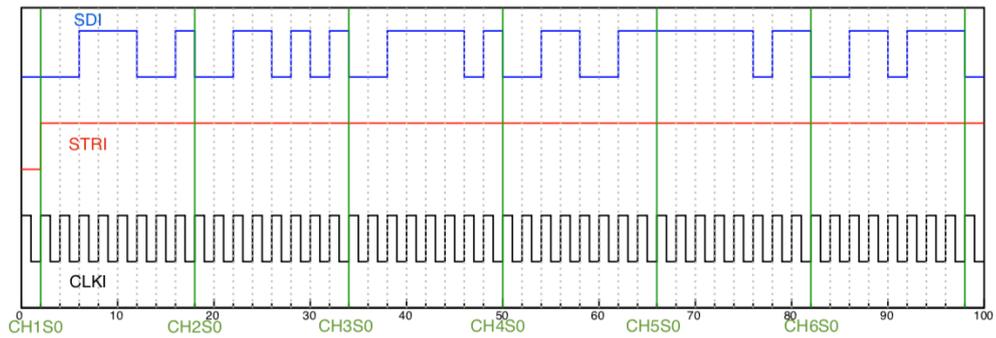


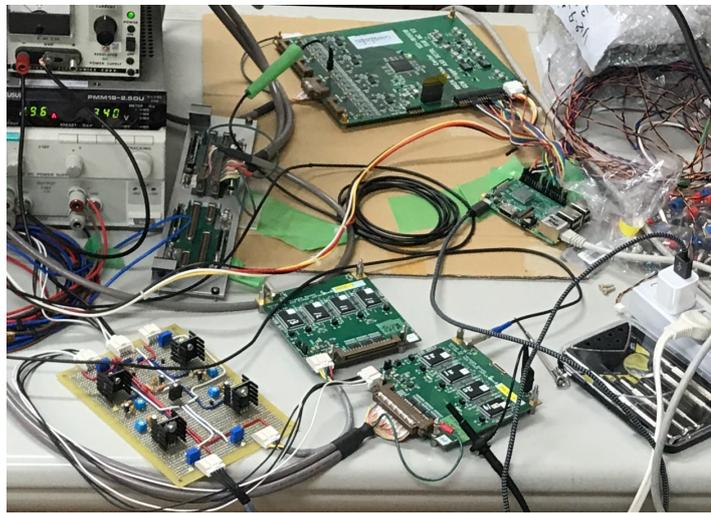
図 3.18 GTR-ASD へ送る遅い制御のための信号。

Mezzanine-B は以下のことができるように設計されている。

- 1 台の Raspberry Pi からのデジタル信号を受け取り、各 GTR-ASD 基板へと振り分ける。
- GTR-ASD 基板を制御するためのデジタル信号を、4 枚の GTR-ASD 基板それぞれに送る。
- 1 枚の GTR-ASD 基板あたり 1ch のアナログ信号を、4 枚の GTR-ASD 基板から受け取り、それぞれアナログモニター端子から出力する。



(a) Mezzanine-B 基板。



(b) Raspberry-Pi と Mezzanine-B、GTR-ASD を実験室で接続して試験する様子。

図 3.19 GTR の遅い制御用の基板。

第 4 章

GTR-ASD の改良

前章で述べた GTR-ASD について、以下のような課題が主に有った。

- GTR-ASD 制御用ソフトウェアが基板 1 枚用である。→ 複数枚用への改造を行う。(4.1 節)
- 多数枚の GTR-ASD の電源の、電圧調整と分配→ 安定な電源電圧を分配しつつ、FM 電磁石外から調整するための基板を作成する。(4.2 節)
- 放電とともに動作を止める問題。→ 放電しても大きな電荷が ASIC の入力端子に流れ込まないようにする回路を挿入する。(5 節)

それぞれへの対処についての詳細を、各節で述べる。放電対策については次章で述べる。

4.1 GTR-ASD 基板の制御ソフトウェアの複数枚用への改良

これまで使用してきた GTR-ASD の制御ソフトウェアは、1 枚の GTR-ASD を制御してきた。ビームタイムには、Run 0a で 6 枚、Run 0b で 8 枚の GTR-ASD を制御することが必要になっていたためソフトウェアの改良を行なった。

2 組の Mezzanine-B 基板と Raspberry Pi があれば、Run 0a、Run 0b で必要な 6、8 枚の GTR-ASD 基板を制御できるため、8 枚の GTR-ASD 基板を制御できるようにすれば良い。

ソフトウェアに必要な開発は、以下の 2 つであった。

- 各 GTR-ASD 基板を以前と同様に制御できること。
- 各 GTR-ASD 基板ごとに異なる各チャンネルのパラメータを設定できること。

開発したソフトウェアについての詳細は A 節に載せた。

4.2 安定電源電圧の分配

複数枚の GTR-ASD に電源電圧を供給するための電源分配基板の製作について述べる。Run 0a で 6 枚の、Run 0b で 8 枚の GTR-ASD 基板を使用する際に、回路収納スペースの都合上これらの基板へ 4 台の定電圧電源モジュールから電源を供給する必要があったため、電源分配基板を製作した。

GTR-ASD には、トリガー用信号がダブルパルス様になり、酷い時には発振する問題が知られていた。テストパルスや検出器の信号を GTR-ASD に入力すると、GTR-ASD がデジタル信号の生成を繰り返し止



図 4.1 GTR-ASD テスト基板での発振の様子。上の緑の線がトリガー用デジタル信号出力の波形、下の青の線がアナログ端子の出力の波形、赤のステップ状の線が入力しているテストパルスと同期した信号波形である。

まらなくなることがあった。発振は以下のような仕組みで起ることが想定される。

1. アナログ電圧が GTR-ASD の閾値を上回ると GTR-ASD はトリガー用デジタル信号を出力する。
2. 出力時に電源電圧または $V_{\text{offset, external}}$ が揺れる。
3. 電源電圧の揺れの影響で再度信号電圧が閾値電圧を超える (1 へ戻る)

図 4.1 が GTR-ASD テスト用基板での発振の様子を示す波形である。このようなトリガー用信号の On/Off を繰り返す GTR-ASD は、オシロスコープのプロブで閾値電圧を測定すると閾値電圧も揺れる。GTR-ASD 基板は可変抵抗の抵抗値で閾値電圧を上下させることができる。この閾値の変化とともにアナログ出力波形に現れる波形の揺れの時間が変わることでも分かっており、閾値を超えた瞬間に出力電圧を変化させるデジタル回路の動作が、閾値電圧の揺れまたは信号波形の揺れにつながっている可能性がある。この電源電圧がデジタル動作の動作にもなって揺れる度合いが以前より酷くならないようにしながら分配基板を製作する必要があった。

GTR-ASD の電源は全長約 20m のケーブルにより供給することになっている。ケーブルには 0 でない抵抗があり、長いケーブルの大きな抵抗は電流の変動による電圧降下の変動を大きくし、電源電圧の揺れにつながる。この電源電圧の変動の原因となる、IC チップから見たときの電源側のインピーダンスを最低限に抑えたい。発振を悪化させないためにはできる限りケーブル長を短く、GTR-ASD 基板の近くで電圧を生成すると良いが、それと同時に電圧値を外部から調整できるようにしたい。GTR-ASD は GTR チェンバーと数十 cm の距離で接続するために GTR フレーム上に設置して使用する。GTR フレーム上にその電源分配基板を置くと一度 GTR を組み付けた後に電圧の調整ができなくなってしまう。そのため、定電圧電源モジュール近くではなく、電源ケーブル途中のできる限り GTR-ASD に近いところとして、FM 電磁石横にて電源電圧を生成することとした。ここから GTR-ASD までは約 7m の電源ケーブルで配線できる。

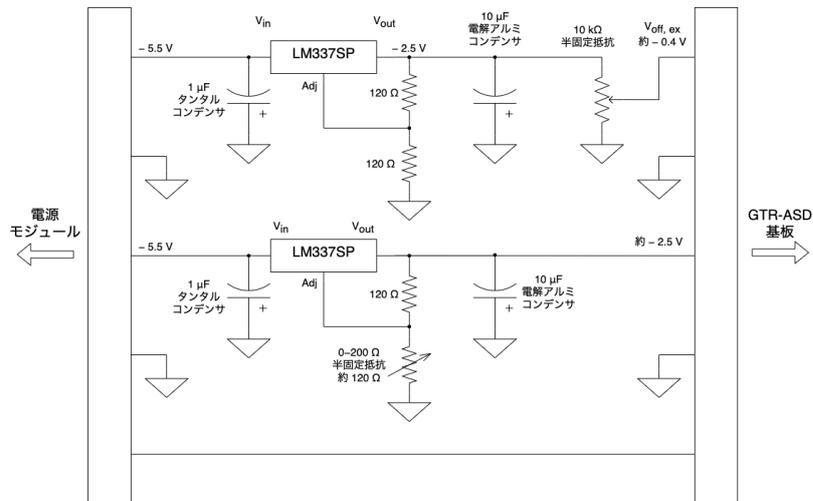


図 4.2 安定電圧分配基板の簡易回路図。このような回路を途中で分岐して 4 つの端子へ供給する。

GTR-ASD は 2 つの電源電圧 (+3.3 V、-2.5 V) と 1 つの閾値調整電圧 ($V_{\text{offset, external}} \approx -0.4 \text{ V}$ 程度) を必要とし、このうち、負の電源電圧 -2.5 V と $V_{\text{offset, external}}$ には、電源ケーブルからの GTR-ASD 基板への入力電圧を、直接 ASIC の電源と参照電圧として使用している。

4.2.1 電源電圧分配基板の製作

負の変電圧用のレギュレータ (型番 LM337SP) を使用した図 4.2 のような回路を設計した。V_{out} の約 -2.5 V は、GTR-ASD と分配基板間のケーブルによる電圧損失を考慮してやや高めの値に設定し、GTR-ASD 基板上で -2.5 V になるようにする。そのために半固定抵抗でレギュレータの出力電圧を調整できるようにしてある。また、 $V_{\text{off, ex}}$ の約 -0.4 V を供給する線は、レギュレータの出力ではなく抵抗分圧で電圧を調整するようにしてある。これは $V_{\text{off, ex}}$ の端子に流れる電流が小さく、電圧の変動には効かないと推測できるためである。

製作した基板の写真が図 4.3 である。ユニバーサル基板で製作し、レギュレータの発熱のためにヒートシンクを 2 つずつ取り付けてある。また、電圧を調整する際のプローブでの接触のためにピンも取り付けてある。

4.2.2 発振の確認

電源電圧基板を製作後、実験現場で使用する長さの電源ケーブルを接続し、ダブルパルスが出力されるか、発振が起きるかを確認した。ダブルパルスは出力されるが、図 (b) のようにノイズでも閾値を越してしまうほど閾値が低くなっている時、またはプローブを接続している時のみ出力され、実験で使用する接続で適切に閾値を設定すればダブルパルスを生じない事がわかった。

ただし、閾値を調整しない時やグラウンド線の接続の変更によるグラウンド電圧の変化によって、発振が再発することがあるため、発振の防止にはさらなる取組が必要である。

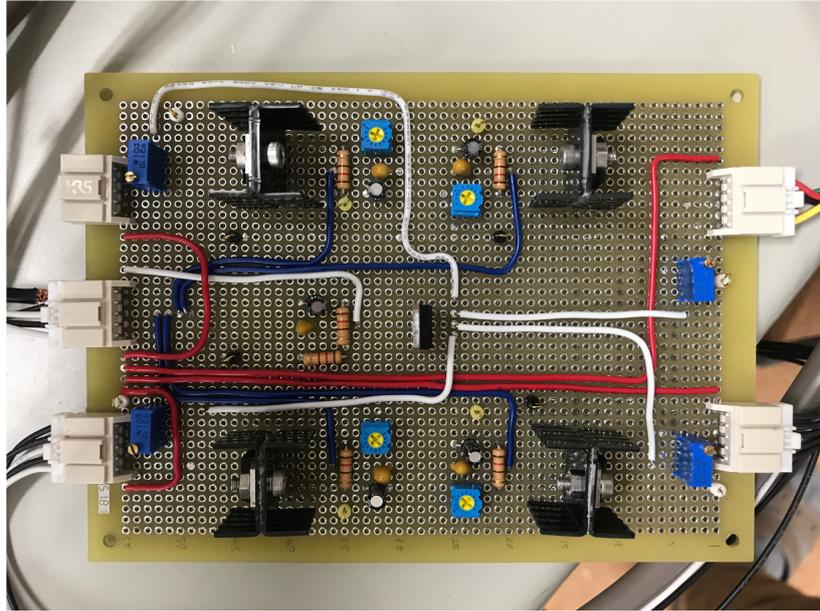


図 4.3 製作した安定電圧分配基板。

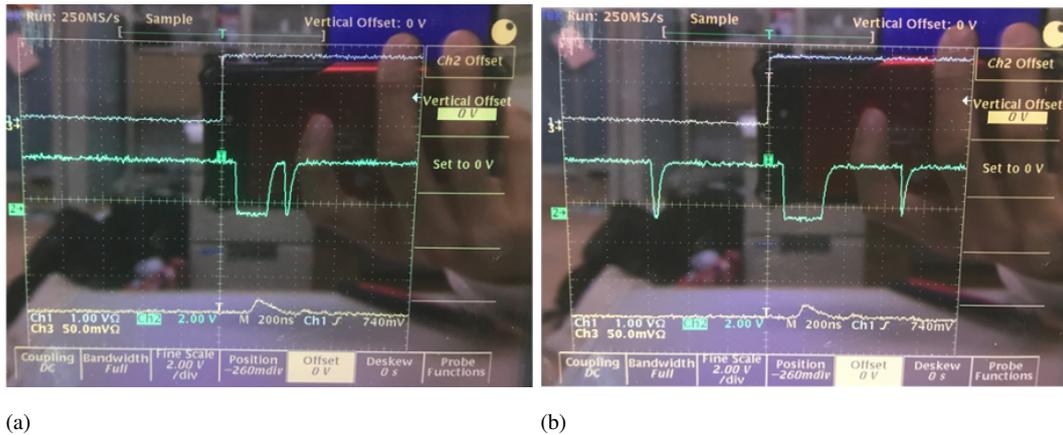


図 4.4 GTR-ASD の波形。上からテストパルス、デジタル波形、アナログモニター波形である。本文中で述べるようにダブルパルスが生じている。

4.3 議論

以上のように、電源分配基板を 3 枚の基板への電源供給に使用できることが確認できた。実験現場のノイズ状況で閾値を調整した後は発振を起こさないものの、オフセット電圧の変化などで、発振が再発することもあったため、今後の抜本的な対策が必要である。

今後 Run 0b 終了後に GTR-ASD 基板の回路の再設計を行う場合に、検討すると良い事項は以下である。

- 基板上での負の電源生成
- 電源インピーダンスの低減

- 閾値電圧の揺れが上記で解決されるか、また別の問題を引き起こさないかの確認

電源分配基板によって各 GTR-ASD 基板の電源電圧を細かく調整して供給できるようになったが、基板から遠く長いケーブルを介して電源を供給するために、GTR-ASD の電源電圧の 10 mV 精度での調整は不可能であった。電源ケーブルには平常時約 0.5 A ほどの電流が流れ、電圧降下は約 100 mV 起きていたが、検出器側の接続の変更などにより一度設定した電源電圧がわずかに変わることもあった。このことは設定した閾値が有効でなくなることに繋がり、なくしたいものである。そのため、GTR-ASD 基板を再設計する場合には、正の電源電圧 +2.5 V と同様に、負の電源電圧も基板上で生じさせることが望まれ、そのことにより精密な電源電圧を供給したい。それとともに ASD の電流量の変動と電源ケーブルの抵抗値が電源電圧の揺れを引き起こしていた場合には、電源電圧の揺れから広がる閾値電圧の揺れとそれによる発振を低減させられる可能性が考えられる。

発振を引き起こすのはデジタル回路動作時の各電圧のゆらぎである。これが電源電圧のゆらぎに起因している場合には電源インピーダンスを下げることで対策が可能である。電源インピーダンスを下げるためのバイパスコンデンサは既に ASIC や低電圧差動信号ドライバチップの電源端子周辺に実装してある。このコンデンサを追加することでさらなる電源インピーダンスの低減が図れる箇所がある可能性がある。特に、もしノイズを発している素子や端子が特定できた場合には、バイパスコンデンサの追加とともに電源用のチップ型のフェライトビーズ (小さなコイル) を追加することで、基板への高周波なノイズの流出を防ぐことも考えられる。また、ボルテージフォロワの出力を負の電源電圧 -2.5 V に用いることで、インピーダンスを下げて電源電圧の揺れが収まるか調べることも有用な可能性がある。ボルテージフォロワは、入力電圧と同じ電圧をインピーダンス低く出力する、オペアンプを負帰還で用いた回路である。オペアンプが別の機構で発振を引き起こすので回路定数の調整が必要であるが、GTR-ASD 基板の再設計を行う場合には導入を検討して良い回路であると考えられる。以上のように、発振への対処には今後の課題が残されている。

しかしながら閾値電圧を設定した後には発振は生じにくいので、検出器使用時の苦勞を伴うものの、Run 0a/b 実験期間で使用できるものとなった。

第 5 章

GTR-ASD の対放電性能の強化

2020 年 6 月のビームタイム (Run 0a) で使用した GTR-ASD は、ビームラインに大強度のビームが来ている際、頻繁に動作が止まるという現象が起きた。そのために、GTR に定格電圧を印加したままでの GTR をトリガーに利用してのデータ収集が困難となった。今後のデータ収集のために放電時の GTR-ASD の動作停止が起きないようにしないための回路の開発を行なった。

本章の構成を述べる。まず本章で行なう放電対策の位置づけを述べ (5.1)、Run 0a から推測される放電時の挙動と、チェンバーで放電が起きた際の現象の理解 (5.2) を述べる。動作を停止する挙動を抑えるための回路の検討 (5.3) とその回路を実現した対放電保護基板の作成 (5.4) を述べ、その基板の性能評価の結果、Run 0b の GTR-ASD では対放電保護基板を GTR に搭載することに決めた (5.5) ことについて述べる。そして、対放電保護基板を GTR に搭載し利用するためのその取付治具の製作と取付について 5.6 節で、電源分配基板について 5.7 節で述べる。最後に 5.8 節で、GTR-ASD と GTR の、放電対策についての今後の議論を行う。

5.1 放電対策と本研究

本節では、GEM 検出器における放電対策の中での本章の取組、Run 0a から Run 0b にかけて行なった GTR-ASD 基板の放電対策の位置付けについて述べる。読出回路や GEM の損傷確率と、その要因の関連性について図 5.1 に示した。読出回路の損傷は、読出回路と接続した電極に放電が伝播することによって引き起こされることが多い。E16 の GTR-ASD もその伝播した放電によって、損傷していることが推測される。回路の損傷と書くのは、一時的な動作の停止と再起不能な破壊を合わせて考えている。本研究では放電頻度低減や放電伝播確率の低減のための研究は今後の課題とし、放電保護回路の性能強化によって GTR-ASD 基板対放電性能の強化に取り組むこととした。今後考えられる対策については、5.8 節で述べる。

本章の内容は、その Run 0a 終了後から Run 0b に向けての GTR の再インストールまでに行なった、読出回路 GTR-ASD の放電耐性強化が主であり、Run 0b までの放電ダメージ緩和が目標であった。期間の短さと限られた ASIC チップの数から、GTR-ASD 基板の再設計・再実装やそのための素子のパラメタスタディを行うための時間を取ることが出来なかったため、限られた選択肢で放電対策を行なった。この際重視したのは、以下の項目である。

- これまで通りの性能での波形読出

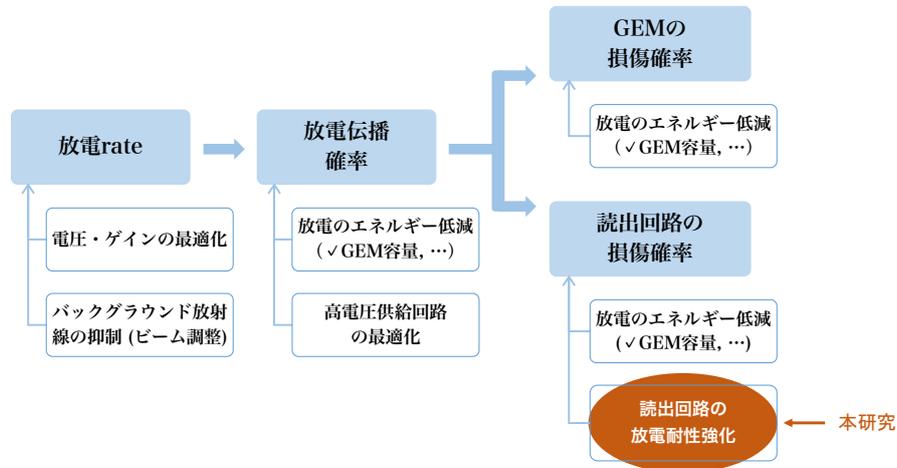


図 5.1 放電と GEM や回路の損傷確率の関係と本研究での取組。

- 放電による一時停止頻度の低下
- これまで通りの配線
- Run 0b インストールまでの対処の迅速さ

そのため、放電耐性の向上が完全でなくとも、これまでよりも十分向上していることが重要で、十分向上した放電耐性を持ちながら波形読出が正常に行えていればインストールを行うこととしていた。

5.2 Run 0a の放電時の現象と現象から推測されること

1 取出あたり 5×10^9 protons 以上の大強度陽子ビームを標的に照射している時に、GTR の GEM に対して定格電圧である $\Delta V_{\text{GEM}} = 380 \text{ V}$ を印加すると、前方の GTR チェンバーに取り付けている GTR-ASD は、数回の取出に 1 回程度の頻度で、動作を止めることがあった (取出は、5.52 秒に 1 回で 1 回の取り出しでのビーム照射時間は 2 秒間)。Run 0a では、ビーム強度を低く保つこと、GTR-ASD からの信号をトリガー条件から外すことや、検出効率は低くなるものの GTR の GEM への印加電圧を低くして放電頻度を下げることによって、APV による波形データの収集を問題なく行う事ができた。しかし今後の物理データ収集で dead time 短くデータ収集を続けるためには GTR-ASD の一時的動作停止の頻度を下げることが急務である。

Run 0a で見られた GTR-ASD の動作停止は、GTR-ASD の ASIC を構成するトランジスタで、ラッチアップが起きていたと考えると説明できる。ラッチアップとはトランジスタに大きな電流または電圧が入り、それを引き金として IC チップに大電流が流れて、一度電流が流れ始めるとその状態で維持される現象である。ラッチアップが起きている場合の一般的な対処として、ラッチアップを引き起こしている回路の電源を落とした後に、電源を再投入するというものがある。GTR-ASD の場合も、GTR-ASD の電源を供給している安定電圧電源の、電源を切った後に電源を再投入することで復帰することがわかった。このことから、GTR-ASD の動作停止はラッチアップによると想定する。

ラッチアップの発生を抑えるためには、信号端子から入る大電流、大電圧を抑えることで、ゲート端子の電圧が電源端子を超えないようにすることである。そのために、ダイオードによって、電流をグラウン

ドや電源端子に逃がすことによる対策を考える。

5.3 放電保護回路の検討

GTR-ASD はもともと、放電から回路を保護するための回路を搭載してきた。しかしその回路による放電吸収能力が十分でないために、ラッチアップが起きてしまっていると考えられる。そのため、より放電吸収能力の高い回路を GTR-ASD に搭載することを考える。この際、Run 0b までの時間は短く、ピン配置が異なる多数の放電保護チップをテスト用基板上で用いて試験してからの Run 0b 用の基板製造は困難であったため、信号読出性能を劣化させないと期待できる 2 つのチップを搭載した、試験基板兼 Run 0b での放電保護基板となるような基板を製造することとして検討を行なった。

アナログフロントエンド回路で放電の電荷や電圧を吸収するためによく用いられているのは、ダイオード・チップバリスタ（特殊なコンデンサ）・RC 回路である。これらは、静電気放電 (Electric Static Discharge; ESD) 保護用チップとして発売されている。このうち、チップバリスタと RC 回路はグラウンドと信号電極の間に静電容量や抵抗を追加してしまう。グラウンドと信号電極の間の静電容量は、高速な信号を歪めてしまう可能性がある。それらに対してダイオードは、1 pF 程度の端子間容量の製品が選択可能なので、電荷を測定したい GTR-ASD に都合が良い。GTR-ASD でこれまで使用してきた ESD 保護用ダイオードは、On Semiconductor NUP4114 である。本研究では Run 0b までの放電保護のために、詳細なパラメータチューンが必要となりうるチップバリスタ・RC 回路は検討しなかった。また、コイルを用いてのローパスフィルタの挿入も考えられるが、GTR は最大 1.7 T の磁場中で運用するため、コイルも検討しないものとした。今後、詳細な回路試験が可能な場合には、APV カードの対放電保護回路を参考にしての RC 回路の導入や、より静電容量の大きな対放電保護ダイオードを用いた対放電保護、抵抗や対放電保護ダイオード多段による対放電保護を検討することができる。

本節の検討で導入を決めた回路素子は、以下である。それぞれについて以下で述べる。

- ダイオード 1SS362FV
- 過渡電圧抑制ダイオード SP3004
- 20 Ω の抵抗 KTR03EZPF20R0

5.3.1 東芝 ダイオード 1SS362FV

GTR-ASD がこれまで使用してきた ESD 保護用ダイオード NUP4114 は、内部にツェナーダイオードを持つ。ESD 保護用ダイオードは、放電吸収後に一時的にクランプ電圧と呼ばれる電圧を維持する。NUP4114 のクランプ電圧は、ツェナーダイオードの逆電圧相当の電圧で 10 V 程度である。このクランプ電圧は、ASIC の電源電圧 (3.3 V, -2.5 V) より大きいため、このクランプ電圧から ASIC の電源電圧の範囲 (-2.5 - +3.3 V) 内まで電圧を落とすことができるよう、ダイオード (TOSIHBA 1SS362FV) を回路に追加することとした。1SS362FV チップは動作開始までの時定数が短いダイオードを搭載しており、静電容量は標準値で 0.9 pF である。検出器やデカップリング・コンデンサの容量、約 2000 pF、1000 pF と比較して十分小さいと考えた。

まず試験の初めに図 5.3 の回路を検討したが、この回路は使えないことが分かった。これは ASIC の信号線にはバイアス電圧 (約 +1.0 - +1.5 V) がかかっているためである。バイアス電圧はグラウンドに対して

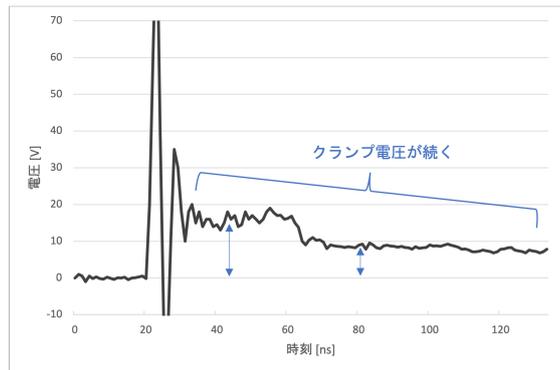


図 5.2 クランプ電圧のイメージ図。放電した際の放電保護チップの被保護端子の電圧の典型的な波形を描いたものである。この図で 30 ns 以降に 10 V 前後の電圧が残っており、これがクランプ電圧。

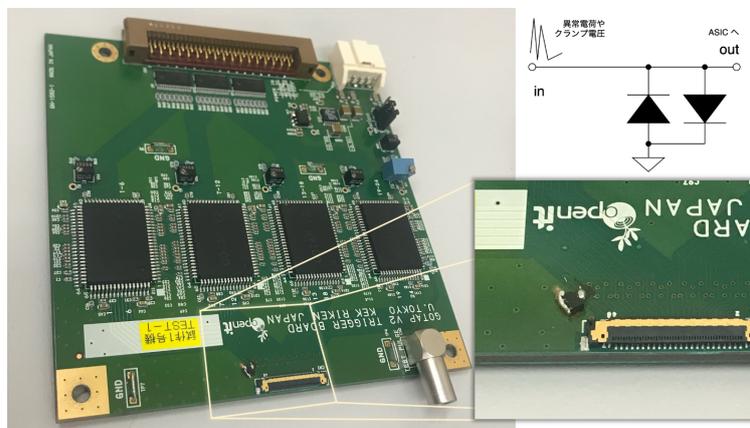


図 5.3 バイアス電圧が低くなり GTR-ASD が使用できなくなった 1SS362FV の配線。

高い電位であり、これは図中右のダイオードに対して順電圧となりグラウンドへと電流が流れる。このために ASIC はバイアス電圧を維持できず、ASIC が働かなくなるためであった。この接続を試したことで、バイアス電圧を保つことができるような回路を持つ素子で放電保護を行うのが良いことがわかった。

次にバイアス電圧を保つことができる回路として、図 5.3.1 のような回路を考えた。この回路は、信号線にかかるバイアス電圧が +1.0~+1.4V であることから、グラウンドに対して電位が高く、グラウンド-信号線間のダイオードに対して逆電圧がかかるので、ダイオードに電流はほとんど流れず、バイアス電圧を保つことができる。異常電荷やツェナーダイオードのクランプ電圧を 2.5 V 端子へ逃すことができると考え、この回路を試した。

5.3.2 Littelfuse 過渡電圧抑制ダイオード SP3004

GTR-ASD がこれまで使用してきた耐放電保護用ダイオードは、On Semiconductor NUP4114 であった。下に述べる他の検出器の読出基板で、NUP4114 から Littelfuse 過渡電圧抑制ダイオード (Transient Voltage Suppressor Diode; TVS ダイオード) SP3004 に変更し問題なく動いたという例があったので、それらにならい SP3004 の導入を試みる。SP3004 は図 5.3.1 のような回路図を持つ放電保護チップである。

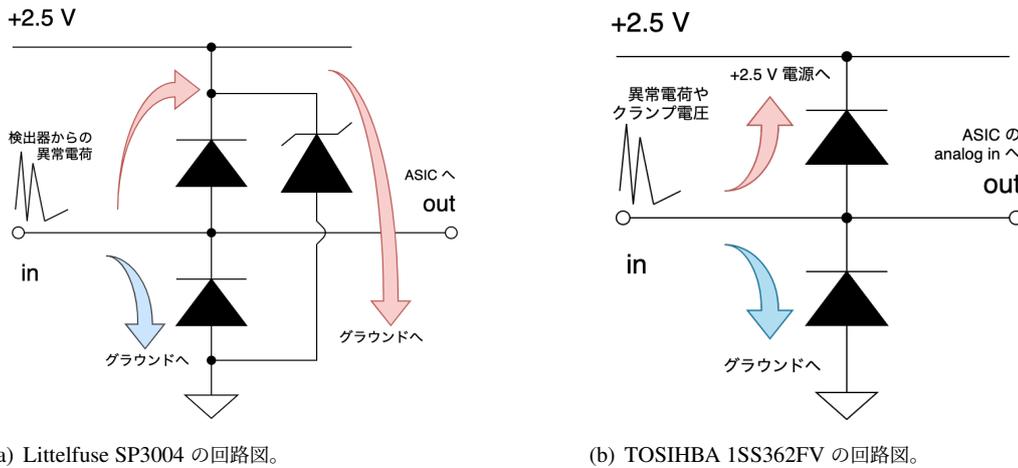


図 5.4 放電保護チップの回路図。



図 5.5 1SS362FV の試験セットアップの写真。1SS362FV チップと電源ケーブルをはんだ付けした GTR-ASD 基板。

信号線 (SP3004 チップの入力端子兼出力端子) の電圧が電源電圧より高くなると、図中上のダイオードには順電圧がかかり電流が流れ、さらに信号線の電圧が高くなるとツェナーダイオードの降伏電圧に到達し、ツェナーダイオードは短絡のように振る舞って電流をグラウンド端子に流す。このようにして対放電保護を行なう。SP3004 も 1SS362FV と同様、静電容量が小さい素子である。

SP3004 を導入した先行する検出器が 2 つある。1 つ目として、ATLAS Small Wheel 検出器の MPGD の一種の導入による性能向上のための読出回路 VMM ASIC の開発がある。VMM ASIC 基板上的放電保護回路に On Semiconductor NUP4114 を使用すると問題があり、SP3004 へと変更すると問題が解消されたことが報告された [33, p.19]。先行例の 2 つ目に ALICE の GEM-TPC がある。GEM-TPC で読出に用いる SAMPA ASIC 搭載基板上的対放電保護チップについて、納期の影響で同様の NUP4114 から SP3004 への変更を行なった後も放電試験に耐え [34, 35]、また検出器に接続しての実用に耐えている [36]。そのため、GTR-ASD への SP3004 の導入を検討する。元々 GTR-ASD に搭載してある NUP4114 と同じピ

ン配置であるため NUP4114 を取り外して SP3004 に搭載しなおすことができ、この基板で放電試験を行なった。

5.3.3 抵抗

GEM 検出器の回路の対放電保護のために読出回路への抵抗の挿入が有効であることが示唆されている [37, 38]。回路への抵抗の挿入は、その値によっては S/N を悪くする。本来ならば GTR-ASD 基板上に抵抗を挿入できる端子を用意し、GTR に ^{55}Fe からの γ 線を照射しその信号の抵抗値依存性を測定して最適値を決めることが有効と考えるが、簡易的にブレッドボードで行なった測定 (B 節) で、 $20\ \Omega$ ならば波高が 10% も小さくならないだろうことを確認し $20\ \Omega$ の抵抗を追加することとした。

抵抗としては、放電耐性のある抵抗を選択した。通常のチップ抵抗では放電を繰り返すうちに抵抗値が変化してしまい放電を直接受ける箇所への使用には向かないため、サージ対策専用の抵抗を使うのが良いことが知られており [35]、参考文献 [35] の調査にならない ROHM KTR03EZPF シリーズの $20\ \Omega$ のもの KTR03EZPF20R0 を導入した。実際、 $100\ \Omega$ のただの $1.6\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$ のチップ抵抗に対し、 $900\ \text{V}$ で充電した $1\ \text{nF}$ のコンデンサを 3 回放電させてみると、 $200\ \Omega$ 程度となっており、使えないことが分かった。それに対して KTR03EZPF20R0 は数十回の $1\ \text{nF} \times 1000\ \text{V}$ の放電の後にも $20\ \Omega$ を示した。そのため、KTR03EZPF20R0 を用いて基板を製作し、試験を行なった。

5.3.4 チェンバーでの放電時の挙動の試験

GTR チェンバーの放電による GTR-ASD の動作と、放電保護チップ候補の 1SS362FV、SP3004 を用いての放電保護力の試験結果を述べる。Run 0a ビームタイム中に見られた放電とそれによると思われる GTR-ASD の動作停止を再現することを試みた。

チェンバーを放電させるために、 α 線源である ^{241}Am を利用した。 β, γ 線と比較して α 線はイオン化力が強く、1 つの α 線が多数の分子をイオン化し、多数の電子・イオン対を生じさせる [39] ため、放電を引き起こしやすい。図 5.6 はチェンバーの放電時の波形である。チェンバーとオシロスコープを接続し、その際、チェンバーからの端子を LEMO に変換する基板と、アテニューエータ ($-47\ \text{dB}$ の減衰) とを介して、接続した。最大の波高が約 $-670\ \text{V}$ で、その前後数 μs 秒の間、いくつかの小さな波形が見える。このような波形が GTR-ASD に入力されていると推測される。

図 5.3.4 は、チェンバーの放電時の GTR-ASD の動作を見る試験のセットアップである。GTR チェンバーには、 ArCO_2 ガスを $200\ \text{mL}/\text{min}$ の流量で流し、 $\Delta V_{\text{GEM}} = 390\ \text{V}$ 、 $\Delta V_{\text{drift}} = 270\ \text{V}$ ($E_{\text{drift}} = 900\ \text{V}/\text{cm}$) を印加した。

^{241}Am を GTR チェンバーの前に配置し、GTR チェンバー中の GEM を放電を誘発した際に、GTR-ASD のアナログモニター端子では図 5.8 のような波形が見られる。瞬間的に大きな電圧が出た後に、GTR-ASD アナログモニターの出力する最大電圧まで下がって維持されて、その後、電圧が下がっていく。そのような放電の中で大きな音が出る放電の際には、GTR-ASD の動作停止が起き、オフセット電圧は動作していた時の値 (約 $-1.48\ \text{V}$) からずれる。動作停止時の電圧値には幅があり、 $-0.7 - -0.6\ \text{V}$ 程度であった。GTR-ASD の電源を一度切るまでその電圧が継続し、電源を再投入すると、正常動作時のオフセット電圧に戻った。なお、この際 GTR-ASD の電圧は、 $V_{\text{off, in}} = -0.4\ \text{V}$ 、 $V_{\text{pre}} = -0.65\ \text{V}$ 、 $V_{\text{ref}} = -1.4\ \text{V}$ であった。

実験室での放電試験では、ラッチアップと推測される電源の再投入で再始動するような動作停止の他に、

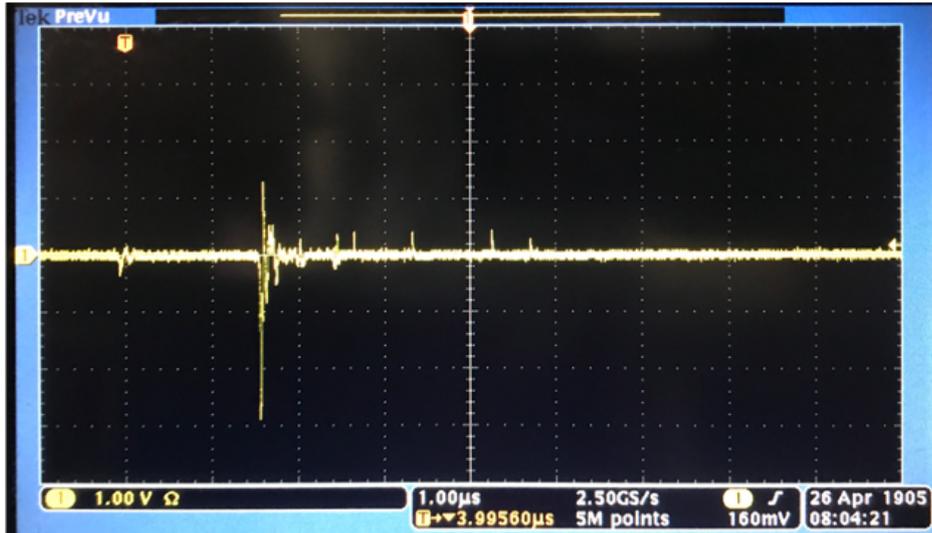
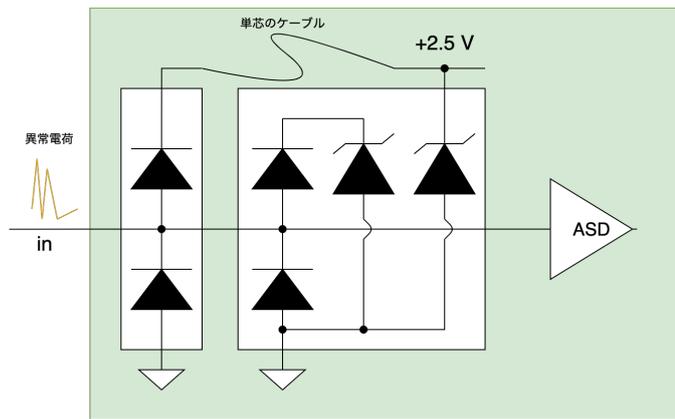


図 5.6 チェンバーの放電時の波形。チェンバーを、 -47 dB のアテニューエーターを介してオシロスコープと接続し、観察した。約 -670 V の波形と、その前後数 μ s に小さいいくつかの波形が見える。

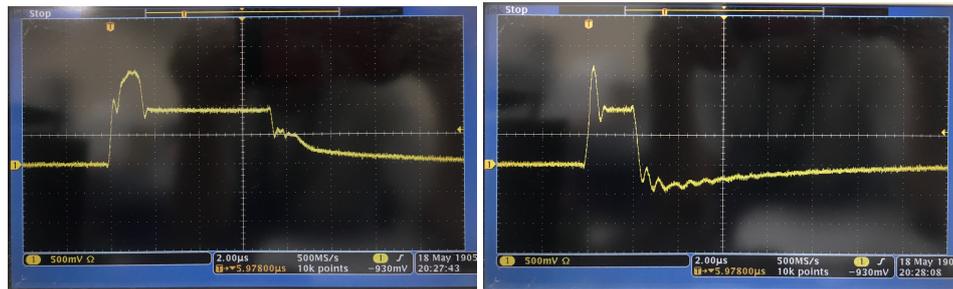


(a) チェンバーの放電による試験のセットアップ。放射線源をチェンバーの前に設置し、チェンバー内の GEM の放電を誘起した。



(b) 1SS362FV の試験セットアップの回路図。

図 5.7 GTR チェンバーの放電による GTR-ASD と放電保護チップ、抵抗の試験セットアップ。GTR-ASD の放電保護チップの性能を調べるために、放電保護チップをはんだ付けした GTR-ASD 基板と、抵抗を信号線に直列に入れるための回路を置いた。



(a)

(b)

図 5.8 GTR チェンバーの放電による GTR-ASD の試験時の放電時の典型的な波形。

制御信号の再送信で再始動するような動作の停止もあった。これは激しい放電により、ASIC 上のレジスタのリセット信号を入力してしまうためと見られる。

1SS362FV の放電保護効果

試験の結果、チェンバーの放電において、1SS362FV チップを図 5.3.4 の回路図で図 5.5 のように接続することによって、放電時の挙動は 1SS362FV 接続前と変わらず、音が出るような放電があったときには、電源の再投入で再始動する動作停止が主に引き起こされ、数回制御信号の再送信で再始動する動作停止が引き起こされた。

この試験を行なった日の 1SS362FV を接続したチャンネルでの音のなる放電では、毎回動作停止を引き起こしており、1SS362FV の効果は確認できなかった。

ただし 1SS362FV を接続した位置が、クランプ電圧を生じる放電保護ダイオードよりチェンバー側であり ASIC から遠いため、効果が出なかった可能性もある。

SP3004 の放電保護効果

前述の、基板上の NUP4114 チップを SP3004 へ取り替えた GTR-ASD (SP3004 版) を用いて、SP3004 の放電保護効果の NUP4114 版との比較試験を行なった。 $\Delta V_{\text{GEM}} = 400 \text{ V}$ 、 $\Delta V_{\text{drift}} = 270 \text{ V}$ ($E_{\text{drift}} = 900 \text{ V/cm}$) を印加している GTR チェンバーに、SP3004 版を接続し、 ^{241}Am からの α 線を照射した。

NUP4114 版 GTR-ASD では音の聞こえる放電では照射している間、音の聞こえる放電 50 回ほどに耐えた。それに対し、通常では 390 V より高い電圧は印加しないので、通常の実験室でのチェンバーへの電圧印加では生じないような大きな音の放電が 3 回起きた。そのうち 1 回は動作を続け、2 回はリセットがかかる (制御信号の再送信で復帰する) 動作停止が起きた。また、これらの放電を繰り返すうちに、1 チャンネルは再起不能な破壊に陥った。

試験を行った日のその GTR チェンバーの印加電圧において、音のする放電では NUP4114 版 GTR-ASD では毎回動作停止していたのに対し、SP3004 版 GTR-ASD では電源の再投入で再始動する動作停止は起きなかった。そのため、NUP4114 版 GTR-ASD に対して、SP3004 版 GTR-ASD はラッチアップの防止効果が以前より向上していることが期待できる。

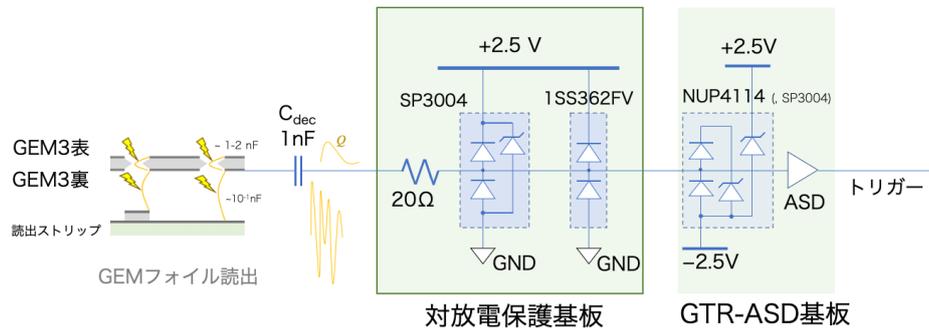


図 5.9 GTR-ASD 用の対放電保護基板の回路図。

5.4 対放電保護基板の設計・製作

対放電保護素子の試験基板、兼、Run 0b での対放電保護用追加回路として、対放電保護基板を製作した。5.3 節で検討した素子の 1SS362FV で良い放電保護効果を得るためには、寄生インダクタンス少なく小さい抵抗で電源やグラウンドへ接続されている必要があり、5.3.4 節での試験は単芯ケーブルの長さなどにより放電保護効果が十分発揮できなかった可能性がある。また、Run 0b で GTR-ASD を放電から保護する必要があり、そのためには 1 基板あたり全 24 チャンネルを保護する必要がある。そのため、回路素子の放電保護能力を試験しつつ、Run 0b にも使用できる基板を製作することとし、ASIC を載せた GTR-ASD の新規基板の製造ではなく、GTR-ASD の外部に取り付けるプロトタイプ回路として対放電保護基板を製作した。

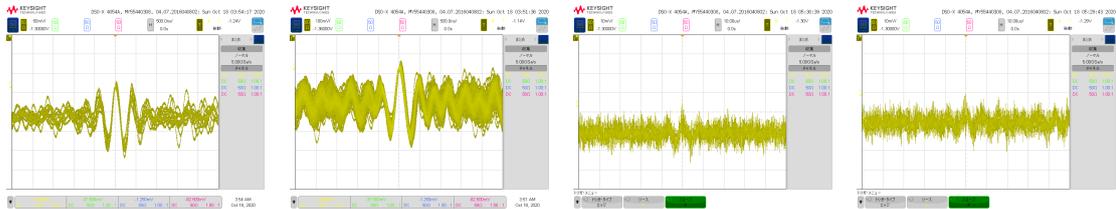
5.4.1 対放電保護基板設計

5.3 節の検討により、対放電保護基板には 1SS362FV と、SP3004、 20Ω の抵抗を搭載することに決めた。これらを搭載する基板の設計について記述する。1 チャンネルについての回路図を図 5.9 に示す。両ダイオードチップは、信号線に対して並列に接続するので、試験の結果によっては外すこともできる。

基板は GTR フレーム上に配置する必要があるため、小さく作る必要がある。GTR-ASD、対放電保護基板と他 GTR 構成要素のフレーム上での配置を検討した結果、可能な大きさは $30 \times 110 \text{ mm}$ であった。この面積で GTR-ASD の全 24 チャンネルに図 5.9 の回路を実現するためには基板片面のみの部品の実装では不可能で、基板の両面に交互にチャンネルを配置することとした。また、省スペースでの配線のために、表面と裏面に主だった配線と部品の実装を行いつつ、基板内部の 2 層に電源の層とグラウンドの層を作り合計 4 層の 4 層基板を製作することとした。

配線について、チャンネル順序を以前と変えないために、表と裏に入力・出力端子を取り付けることとし、ケーブルのチャンネル 1 同士が同じ向きで入出力できるようにした。

電源ノイズの低減と放電時の電荷供給のために、バイパスコンデンサを導入することとした。バイパスコンデンサとは、電源経路のノイズを基板内部に入れられないため、また、IC チップのノイズを基板上に広げないために、グラウンド-直流電源間を接続するコンデンサである。バイパスコンデンサを電源近くに配置することで、電源ノイズ流入防止効果が期待でき、また、ダイオード周辺に配置することでダイオードからの急激な電荷を吸収することを期待した。



(a) バイパスコンデンサ無し、表面。V_{pp} = 220 mV (b) バイパスコンデンサ無し、裏面。V_{pp} = 130 mV (c) バイパスコンデンサ有り、表面。V_{pp} = 30 mV (d) バイパスコンデンサ有り、裏面。V_{pp} = 32 mV

図 5.10 バイパスコンデンサ有/無時の、対放電保護基板のノイズ波形。バイパスコンデンサが無い基板では表面を通るチャンネルと裏面とでノイズ波高 (V_{peak-to-peak}) が異なった。

5.4.2 バイパスコンデンサとノイズ波高

バイパスコンデンサの有無でのノイズ波高を比較した。ノイズ波形を図 5.10 に示す。GTR の実験現場へのインストール時と同じケーブルを用いて、対放電保護基板を GTR チェンバーの GEM3 裏と GTR-ASD に接続した。バイパスコンデンサ無しの対放電保護基板接続時は V_{peak-to-peak} = 130–220 mV、有りのときは V_{peak-to-peak} = 30–32 mV で、ノイズはバイパスコンデンサをはんだ付けした時のほうが小さい。そのためバイパスコンデンサを基板にはんだ付けして、以降使用した。

対放電保護基板の表面を通るチャンネルと裏面を通るチャンネルとでノイズの波高が異なった (図 5.10 の説明文中参照)。対放電保護基板は表裏を半分ずつの 12 チャンネルずつが走っており、それらに対しての基板内の電源層・グラウンド層の揺れの影響は異なりうる。バイパスコンデンサは電源層とグラウンド層を接続しているため、基板に電源ケーブルから入ってくる電源ノイズをバイパスコンデンサで防ぐことが出来、表裏ともノイズが抑えられたことが考えられる。

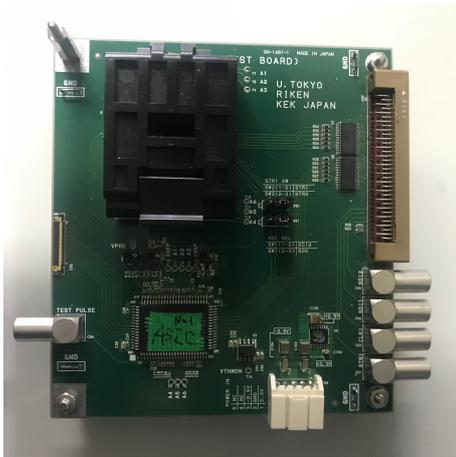
5.4.3 対放電保護基板の全チャンネル試験

完成した対放電保護基板について、チャンネル同士の短絡や切断が無いことを確認するために、全チャンネルの試験を行なった。

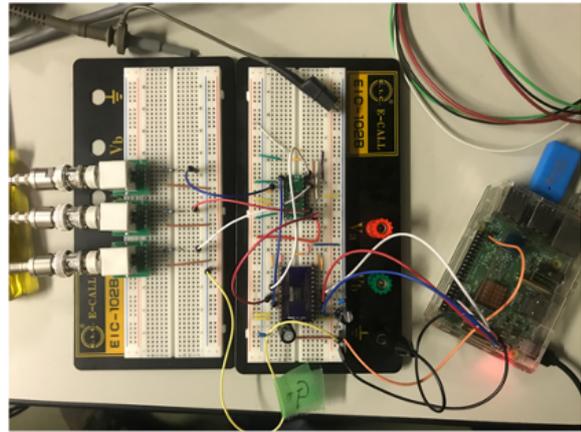
初めに、短絡を試験するために、対放電保護基板の、チャンネル-グラウンド間、また、チャンネル-電源端子 (+2.5 V) 間の抵抗をテスターで測定し、絶縁されていることを確認した。

次に信号線の導通を確認した。対放電保護基板 1 チャンネルに、テストパルスで検出器の正常動作時相当の電荷 20 fC を入力し、その出力端子を実験現場へインストールする GTR で用いる KEL XSL ケーブルで GTR-ASD 基板の入力端子と接続し、GTR-ASD 基板のアナログモニター端子でのパルス波高を確認した。全チャンネルについて、切断はなく正常に信号を通過させることができ、80 mV の波高の波形が観測できた。また、テストパルスでの信号波高試験と同時に、チャンネル同士の短絡や異常なクロストークが無いことを確認するために、テストパルスを入力しているチャンネルの 1 つ隣と、2 つ隣のチャンネルの波高も確認した。それらのチャンネルは、測定時のノイズ波高である 30 mV 未満であった。

また、放電後の絶縁も確認した。-900 V で充電した 1 nF のコンデンサを、基板の信号線に 10 回放電させた後も、抵抗値に変化はなく、信号も他のチャンネルと同様に読み出すことができた。



(a) GTR-ASD テストボード。基板上部の黒い箱に ASIC チップを 1 つ入れて、ASIC チップの制御・動作を試験するための基板。



(b) Raspberry Pi からの信号を GTR-ASD の遅い制御用信号へ変換する基板。

図 5.11 GTR-ASD ASIC 試験基板。

5.5 対放電保護基板追加時の性能測定

テストパルスで入力した信号と、検出器で入力した信号とで GTR-ASD のアナログモニター波形の波高の波高を測定した。

信号波高がノイズに対して小さくなると、信号を弁別できなくなる可能性があったため、波高が低下していないことが重要である。信号波高の低下の恐れのある回路の変更として、以下のことが挙げられる。対放電保護基板の、信号線のパターンとグラウンドの層がコンデンサを構成していること、同様に信号線のパターンと電源電圧の層がコンデンサを構成していること、追加した素子の容量成分と抵抗成分による信号の歪み、また、信号の同軸ケーブル (KEL 株式会社 XSL ケーブル) の延長による寄生容量成分がふえたことである。検出器からの信号を入力して大きくは変化していないことが分かっていたが正確に見積もるために、テストパルスで試験を行ない、5.5.1 節にその結果を記した。また、5.5.2 節に、検出器を用いて行なった波高測定の結果を記した。

対放電保護基板を製造した目的である放電耐性についても、試験を行って評価することが望ましかったが、検出器を α 線で放電させての放電耐性試験は GTR チェンバーを壊してしまったためにスケジュール上、実施が難しかった。また、コンデンサの放電での再現を試みると、グラウンドの揺れによると思われる別の動作停止を引き起こしてしまうために、ラッチアップ様の症状を再現できなかった。これらを理由に放電耐性の変化は調べられなかった。ただ、コンデンサの放電では、制御信号を再度送ると動き出したので、コンデンサによる放電でチャンネルが壊れないための耐性は以前と同様にあることが確かめられた。

5.5.1 テストパルスでの波高測定

テストパルスを用いて、以前と同等な波形の処理が行うことができるかどうかを試験した。試験は、図 5.12 のようなセットアップで行なった。この際、 $C_{\text{detector}} = 0$ で測定した。

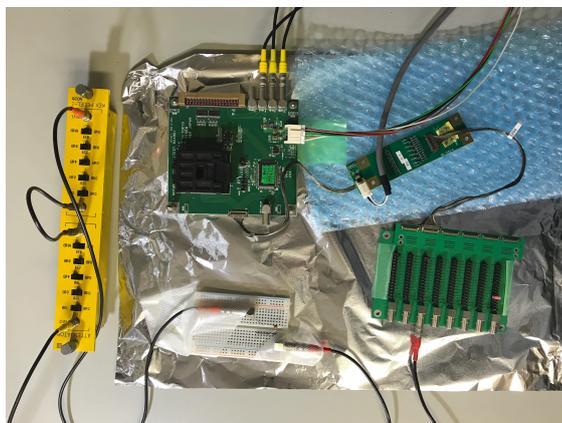


図 5.12 対放電保護基板追加時の GTR-ASD のテストパルスによる波高測定セットアップ。この写真の後にノイズ除去のため、基板同士のグラウンドをアルミホイルなどで接続させ、ブレッドボードをアルミホイルで覆うなどして、測定した。

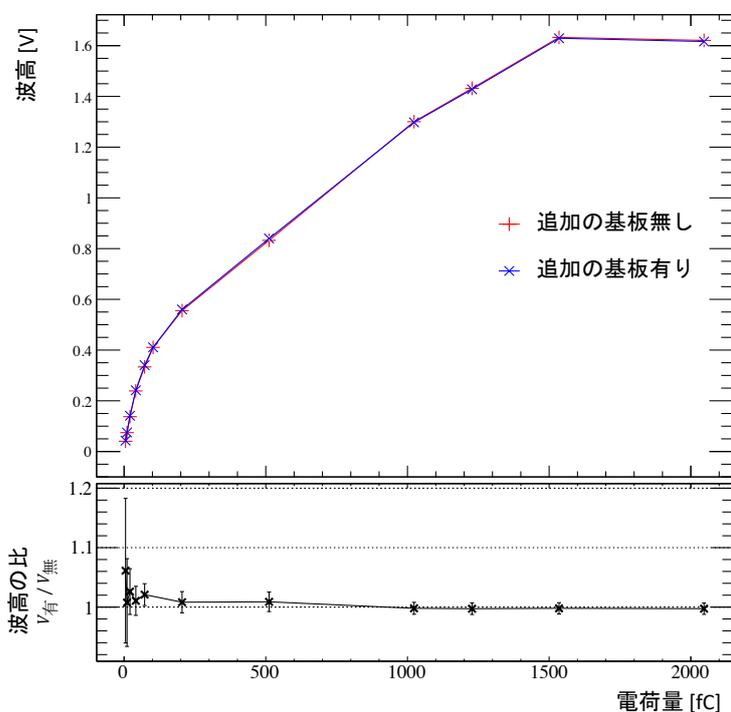


図 5.13 GTR-ASD にテストパルスで電荷を入力する際の放電保護のための追加の基板の有無での波高の比較。上図はそれぞれの波高を、下図は波高の比を表したものである。

表 5.1 ^{55}Fe 線源からの γ 線を照射した GTR チェンバーを接続した際の GTR-ASD アナログモニター端子の波高。

	オシロスコープ目視 での波高 [mV]	オシロスコープからの取得波形の ピーク波高の平均 [mV]
対放電保護基板 無	(2) 250 ± 50	(3) 215
対放電保護基板 有	(1) 250 ± 50	(4) 173

オシロスコープで取得した波形の、最高点とペDESTALの平均値の差を波高として解析し、その波高を示したのが、図 5.13 である。図上部の、波高の入力電荷依存性からは、増幅の線形性が保たれていないことが読み取れる*1。これは接続に使用したケーブルや基板上のパターンの影響と考えられるが、以前の GTR-ASD 単体での追加の基板無しでの接続でも生じているため、以前からの接続と比較した際の波形の変化を見ることとする。その波形の変化が、図下部の波高同士の比である。比は測定した全範囲で誤差の範囲で概ね 1 と一致しており、また、その誤差の程度は GTR チェンバーの出力する典型的な電荷量である 20 fC の周辺では、誤差を考慮して 0.9 以上の範囲に収まっている。

以上の試験は波高の低下の恐れを確認するために行なった試験であったが、波高が大きく低くなったような点は見られなかった。対放電保護基板を接続した GTR-ASD の波高は、GTR-ASD 単体での波高と比較して 1 倍で、これまでと変化なく正常に動作させることができていることがわかった。

5.5.2 チェンバーでの波高測定

実際の検出器に接続して、対放電保護基板を接続した GTR-ASD での信号読出試験を行なった。これは、テストパルスでの試験とともに、配線や検出器容量などのテストパルスで再現できていない回路要素がある状態での実際の検出器からの読出試験を行うことも重要であるからである。

GTR チェンバーが γ 線の放出する電子を増幅する際の GTR-ASD アナログモニター端子の波形を測定した。測定は、GTR チェンバーに ^{55}Fe 線源からの γ 線を照射して信号波高試験を行なった。スケジュールの都合により ArCO₂ ガスの流量が減っていく中で測定を行なったため*2、検出器のゲインが一定でないことが予想され、定量的な波高の変化の評価はできなかった。

ArCO₂ ガスの流量は 200 mL/min で始めて、1 時間後にバブラーの泡が出なくなるまで続けた。表 5.1 が測定結果である。(1)、(2)、(3)、(4) の順に測定し、(1) の 10 分後に (2)、(2) の約 1 時間後に (3)、(3) の 5 分後に (4) を測定した。

ガスの状態の変化によるゲインの変化が見込まれるため、定量的な波高の変化の見積もりはできないものの、最低でも対放電保護基板なしの時の波高と比較して 80% ($\approx 173/215$) の波高は確保できていることが分かった。

5.6 GTR-ASD と対放電保護基板の取付治具製作

製作した対放電保護基板を GTR フレームに取付けるための治具を製作した。以前の治具は GTR-ASD のみを固定できるようになっており、また、フレーム上の空間はアクセプタンス確保のために狭く低く限

*1 ASIC のテストパルス端子からの波形の入力では線形性は再現されている。

*2 本来このようなガスの流量が想定通りでない状態での高電圧印加は検出器を破壊するで行なってはならなかった。

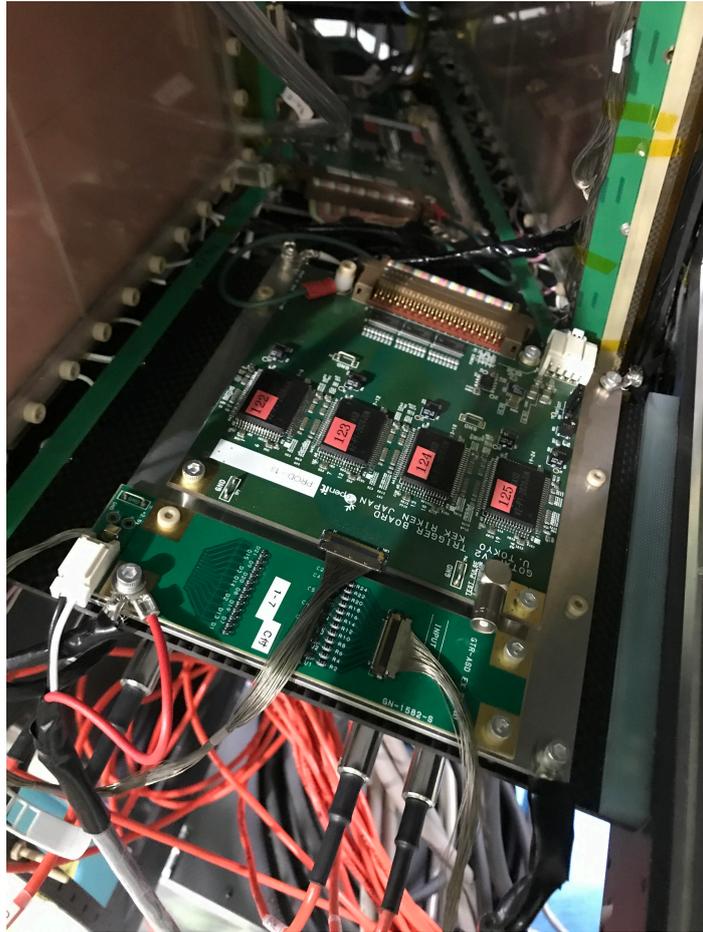


図 5.14 GTR フレーム上に GTR-ASD と対放電保護基板を搭載した写真。フレームの穴でアルミ板をフレームに固定し、アルミ板へ GTR-ASD と対放電保護基板を取り付ける。

られている。そのため、GTR-ASD と対放電保護基板両方を搭載できるような治具を製作した。

図 5.14 は、GTR を FM 電磁石内にインストールする前に実験ホールのクリーンテント内で GTR チェンバーのフレームへの組付と配線を行なった際の写真である。図のように、これまで通り薄く配置することで、GTR のアクセプタンス内に侵入しないように治具を設計し、取付作業を行なった。

5.7 対放電保護基板の電源分配基板

対放電保護基板は平常時には電流を流さないで、+2.5 V とグラウンドを電源端子に供給すれば良い。放電時には、電流が電源モジュールに行くと電源モジュールを損傷する可能性があり、また、電荷が早く逃げられるよう、ケーブルの途中で電源端子とグラウンド端子との間を 1000Ω の抵抗で接続することとした。ケーブル配線の都合で、右 4 モジュールと左 4 モジュールにこの基板 2 枚で電源を供給する。図 5.15 のような単純な基板で、4 枚の対放電保護基板へと電源を供給する。

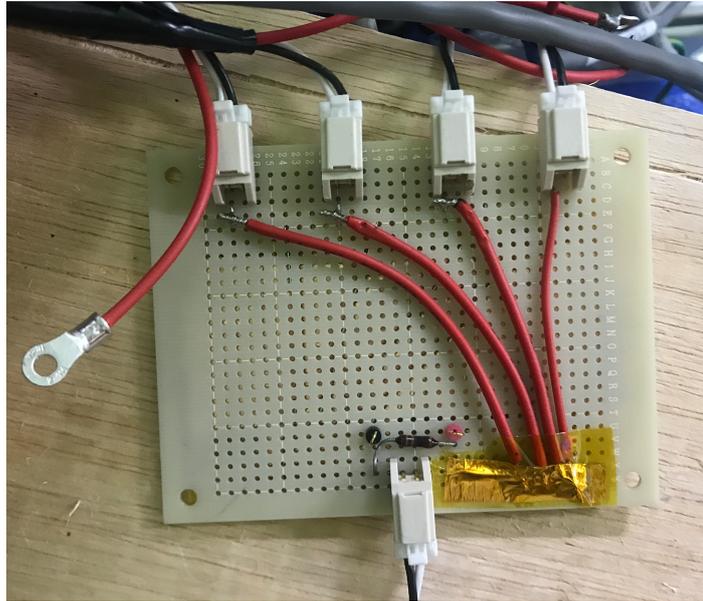


図 5.15 対放電保護基板の電源分配基板。

5.8 議論

本章で行なった放電対策について議論を行い、今後の展望を述べる。

本章で行なった放電対策は 5.1 節の通り、読出回路の放電耐性強化によって読出回路の損傷確率を下げるためのものであった。目標は、

- これまで通りの性能での波形読出
- 放電による一時停止頻度の低下
- これまで通りの配線
- Run 0b インストールまでの対処の迅速さ

であった。本研究で開発した対放電保護基板を GTR-ASD に外付けで追加することによる対放電保護能力の向上度合いについて、スケジュール上の都合から定量的な評価はできなかったものの、5.3.4 節の計測により、ラッチアップの防止には効果があることが推測される。また、対放電保護基板の追加は読出回路の動作を悪化させないことが 5.5 節で確かめられた。また配線(チャンネルの配置)は、これまでと同様になるよう、対放電保護基板を設計した。最後に、これらを GTR の実験現場へのインストールに間に合うように行うことが出来た。そのため、対放電保護基板を取り付けた GTR-ASD を GTR に搭載し、FM 電磁石内にインストールした。インストールした GTR の写真が図 5.16 である。このため、Run 0b の GTR-ASD は、これらの保護回路によって Run 0a より低い損傷度合いと回路の動作停止頻度が期待できる。

今後の展望として、Run 0b 後の GTR と GTR-ASD の放電対策が考えられる。2021 年初頭に行う予定の Run 0b での GTR の運用で、また、Run 1 までの α 線照射による放電試験で、GTR-ASD や GEM の放電耐性が十分でなかった場合に考えられる対策を記す。GTR での対策は、5.1 節の図 5.1 でも述べたように、高電圧供給回路の最適化、放電のエネルギー低減、さらなる読出回路の放電耐性強化で行えるもの

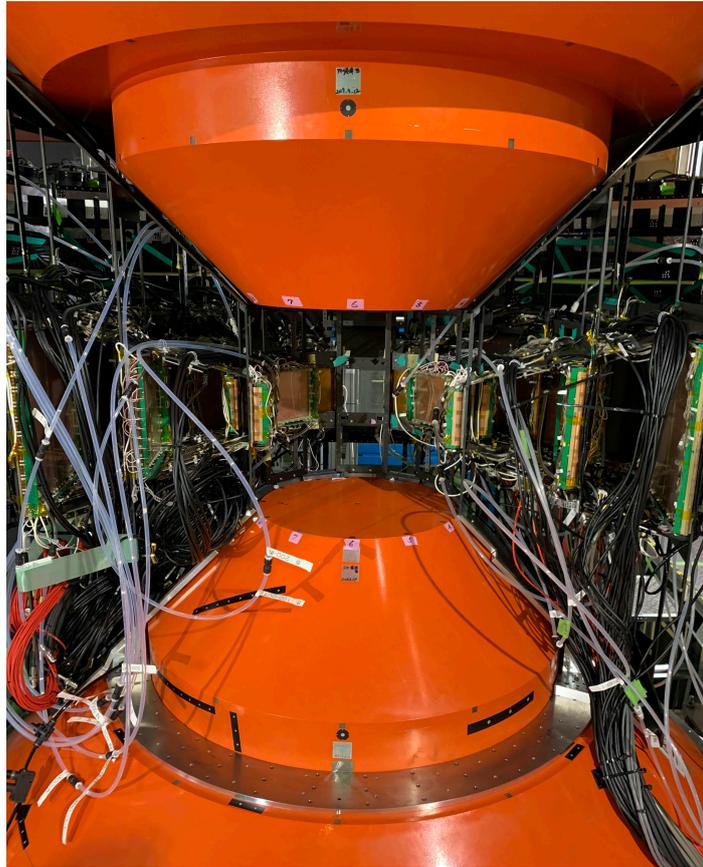


図 5.16 Run 0b に向けて FM 電磁石内にインストールした GTR。

である。GEM や読出回路の損傷確率を低くするための放電対策は、今後の Run 1 以降の GTR の安定運用のための課題の一つであり、今後 α 線源での試験を行なって、(GTR-ASD の動作停止以外にも) 放電による GEM や回路の損傷の度合いを定量的に調べ、Run 1 以降のデータ収集に GTR が耐えられることを確立する必要がある。

もし放電対策が必要な場合には、以下に述べるように、高電圧供給系の最適化による放電頻度と放電時の抑制、より強力な対放電保護回路を導入した新しい GTR-ASD の製作を行うことができる。

5.8.1 今後の GTR の GEM の放電緩和

Run 0b の完了を待つ必要があるが、GTR の GEM のさらなる放電緩和のための研究が必要となる可能性がある。

3.2.2 節で説明したように、GEM の放電については、COMPASS 実験のための研究 [26] がある。この論文が述べているのは、放電伝播を抑制するためには伝播している箇所と並列に接続されている静電容量をなくす、または小さくすることが重要ということである。また、近年は LHC 加速器の高輝度化へ向けての、Micro-Pattern Gas detectors を利用した検出器改良のための開発の成果が見られ、GEM 検出器としては ALICE TPC グループによる GEM-TPC [40]、CMS-GEM グループによるミュー粒子検出器 [37, 38, 41, 42] のための開発がある。これらの研究が述べているのは、GEM の放電の伝播 (discharge

propagation)を抑えるためには、高電圧供給系のケーブルを短くして放電伝播確率を小さくすること [40]、高電圧供給系や読出基板の読出チャンネルの $R_{\text{decoupling}}$, R_{drain} 抵抗値のチューニングによって信号波高は保ちつつ放電伝播確率を小さくすること [38, 42]、また、読出回路の対放電保護のためのチューニングによって読出回路の損傷確率が下げられる可能性があること [37, 38] である。読出回路のチューニングについては 5.8.2 で述べる。

高電圧の供給系のチューニングは、GEM が放電している箇所を突き止めその箇所の容量やケーブルなどによる寄生容量を抑えることで放電の伝播を抑制でき、放電の伝播時に解放される電荷を小さくすることができるというものである。E16 の GTR の場合、 ^{241}Am などの α 線源を用いての GEM の放電伝播とそれによる損傷についてはこれまで測定がなされていないため、放電頻度、放電伝播確率、放電による (GEM や回路の) 損傷確率を系統的に調べることが、Run 1/2 に向けては必要になるかもしれない。その際特に、どの GEM で、放電と放電伝播が起きているかを測定することがその後の対策のために重要である。GTR-ASD は GEM3 裏から読みだしており、GTR-ASD が動作を止めたり損傷を受けていることから、GEM3 の表裏や GEM3 裏と readout との間での放電によって損傷を受けている可能性が高いと考えるため、今後、第一に GTR-ASD のためのデカップリング・コンデンサの容量値を変えて放電頻度・放電伝播頻度を計測することを検討するのが良いと考える。その他に GEM3 裏の周辺で寄生容量としてあり得る、SHV ケーブル・読出基板へのケーブル長や、高電圧分割用基板上の寄生容量について、さらなる研究を行い、損傷確率の低減を図ることが可能であろう。

また、ビームハローによるバックグラウンド放射線を最小限にするための研究が現在行われているが、それをさらに進めることによって、GTR の放電の対処が可能かもしれない。

5.8.2 今後の GTR-ASD の放電対策

Run 0b でビームを受け、本研究による放電耐性強化では不十分だった場合、より大きな電荷の放電に対しても ASIC が耐えられるようにするために考えられる対策を記述する。

回路の放電保護のための回路のチューニングとしては、回路への抵抗の挿入が有効であることが示唆されている [37, 38]。回路への抵抗の挿入は、その値によっては読み出す信号の波形に影響があるので、GTR-ASD 基板上に抵抗を挿入できる端子を用意し、そこで平常時の信号と放電確率それぞれについての抵抗値のパラメータスキャンが有効と考える。

本研究でのダイオードチップは、数多くのダイオードを試験して選んだわけではなく、波形を歪ませないために静電容量ができる限り小さく、かつ、応答時間が短いものを選定した。これは時間的猶予がない Run 0b に向けて、波形を崩さず放電耐性が少しでも向上することを狙ったものであった。本研究での回路で放電保護能力が十分でない場合には、他の素子による回路を検討する必要がある。候補として考えられるのは、静電容量が大きくなりノイズを増やす可能性がありつつも対放電保護性能がより高いような、他のツェナーダイオード搭載の ESD 保護ダイオードチップ (他検出器の 3.3V 電源の IC のためには Semtech 3321ZA、Semtech 3321P [34]、SEMTEC uClamp 3311p [33] のような候補がある)、バリスタ、RC 回路、また、集積度が低いですが全く動作原理の異なるガス放電管などが考えられる。その際にはチップ形状やピン配置が SP3004 や 1SS362FV と異なるチップは、GTR-ASD や対放電保護基板に搭載できないので、それらを回路に組み込めるプロトタイプ基板を再度製作して試験を行うことが必要となる。

第6章

結論

J-PARC E16 実験は、30 GeV pA 反応で生成する軽いベクトル中間子の質量スペクトルを e^+e^- 対崩壊チャンネルで精度よく大統計で測定する。E16 実験が磁場中の荷電粒子の飛跡検出に用いる GEM 飛跡検出器 (GTR) は、水平方向の位置測定精度と高レート耐性を広い面積で実現する検出器である。GTR からトリガ用信号を出力するための回路 GTR-ASD について、データ取得期間に複数枚の GTR-ASD 基板をまとめて扱えるようにするための改良と、放電保護のための改良を行なった。

2020 年 5 月から 6 月の Run 0a データ取得期間開始までに、これまで 1 枚ずつ扱ってきた GTR-ASD 基板を複数枚扱えるようにすることが必要であった。本研究で 8 枚の GTR-ASD 基板を一度に使用するための改良を行ない、GTR-ASD 基板のテストを行なった上で、実験現場に導入した。Run 0a データ取得期間にはそれらの GTR-ASD は概ね想定通り動作した。今後、GTR-ASD の発振を抑えるための改良と負の電源電圧を基板上に実装することができれば実験時のより円滑な運用が可能となる。

Run 0a データ取得期間に概ね想定通り動作した GTR-ASD について、放電耐性に課題があることが判明した。GTR は Run 0a に初めて大強度陽子ビームを受けた際、GTR-ASD の ASIC 内のラッチアップと考えられる現象が起きることが判明した。後日の調査によって、その原因は GTR チェンバーの放電であることがわかった。GTR-ASD 基板の対放電保護能力を向上させるべく、GTR-ASD 回路の改良を行なった。他の実験のガス検出器の読出回路で効果があったとされる対放電保護チップを、GTR-ASD 基板上に既存の対放電保護チップと取り替えて搭載し、 α 線源を用いた GTR チェンバーの放電によって GTR-ASD の放電耐性を試験すると、動作停止を防止する効果を確認することができた。しかし放電した箇所の GEM ストリップを読み出しているアナログチャンネルが、数回の放電の後に損傷してしまった。そのためその放電保護チップを搭載した上で、さらに対放電耐性を強化できるような回路を実装した、対放電保護基板を GTR-ASD に追加で接続することとした。対放電保護基板を使用しての対放電保護効果の試験は完了しなかったが、信号の読み出しという点においては、アナログモニター波形の波高がこれまでと同様で、また、トリガモジュールへの信号の出力ができていることを確認できた。そのため、対放電保護基板と GTR-ASD 基板の全チャンネルの試験を行い、2021 年初頭予定の 2 度目の検出器調整実験期間である Run 0b 実験期間のために実験現場の E16 スペクトロメータに組み付けた。本研究で製作した対放電保護基板を導入したことによって、GTR-ASD は放電耐性が強化でき、GTR-ASD の動作停止は抑制することができる見込みである。そのため Run 0b 実験期間には、ビーム強度を上げた状態で GTR の電圧を上げてトリガを出力できるという本来の性能で運用することができる予定である。

今後の課題として、Run 0b 後の GTR と GTR-ASD の放電対策が考えられる。GTR-ASD の放電対策としてラッチアップの防止効果は確認し、GTR-ASD のチャンネルの損傷の防止効果は、充電したコンデ

ンサによる多数回の放電に耐えることで確認できた。しかし、Run 1、Run 2 に向けて放電耐性が十分であるかどうかを定量的に見積もることはスケジュールと GTR-ASD の数の制限により実現できなかった。今後、 α 線照射によるチェンバーの放電試験や、充電したコンデンサの放電試験を行ない、GTR-ASD の放電保護能力について定量的に見積もって、GTR-ASD の放電耐性を確立することが必要となる。さらなる放電対策が必要な場合には、より強力な対放電保護回路を導入した新しい GTR-ASD の製作、高電圧供給系の最適化による放電頻度と放電時の抑制を行なうことが考えられる。また、GTR について、これまでバックグラウンド放射線のレートに対しての試験は行なってこなかった。これは Run 0b ビームタイムやその後の α 線照射による試験によって、放電による GEM や回路の損傷の度合いを定量的に調べ、Run 1 以降のデータ収集にむけての GTR の放電耐性を確立する必要がある。本研究と今後の放電対策により、GTR の高いバックグラウンド放射線耐性が実現できれば GTR への要請である高レート耐性と高精度の飛跡検出の両方が概ね実現されることとなり、E16 の GTR は $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$ を大統計で測定することができるようになる。今後の E16 の大統計データの解析によって軽いベクトル中間子の質量スペクトルの系統的な議論が可能となることによって、カイラル対称性の自発的破れによるハドロン質量生成機構の理解が進むことが期待される。

付録

A 遅い制御用のソフトウェア

4.1 節で説明した遅い制御のソフトウェアの内容を説明する。ソフトウェアに必要な開発要素を再掲すると、以下の2つである。

- 各 GTR-ASD 基板を以前と同様に制御できること。
- 各 GTR-ASD 基板ごとに異なる各チャンネルのパラメータを設定できること。
- `set_asd.py`
- `send_sd.py`
- `mycsvreader.py`
- `config_asd0.csv`, `config_asd1.csv`, `config_asd2.csv`, `config_asd3.csv`

ソフトウェアは、Raspberry Pi 上で動く 3 つの python スクリプトファイルからなり、`./set_asd.py` 4 で実行できる。設定パラメータを記述したファイルを 4 つあり、4 枚の GTR-ASD 基板それぞれのためのファイルである。Raspberry Pi が出す電圧を RPi.GPIO ライブラリで制御して、0.05 s ごとに HIGH/LOW を行き来するクロックを出しながら、0.1 s ごとに 1 bit を送る。8 bit × 24 ch を 4 枚の GTR-ASD のために 4 回繰り返す。

スクリプトの実行時引数は `./set_asd.py -h` で見られる。

B 対放電保護基板上の抵抗値のスキャン

本節では、対放電保護基板製作前の抵抗値スキャンについて述べる。図 B.2 は、信号波高の抵抗値依存性を測定する際に用いたセットアップである。チェンバーと GTR-ASD を直接接続した波高と、ブレッドボード上のすずメッキはんだ線や端子変換基板を経由して接続した波高、ブレッドボード上の抵抗や端子変換基板を経由して接続した波高を測定した。図 B.3 は、波高の抵抗値依存性を示したものである。ブレッドボードの有無という抵抗値以外に起因する 20 mV ほどの波高の低下が起きており、抵抗値と波高の関係の定量的な議論が難しい。また、この測定では実験現場でのノイズ環境を測定していない。そのため、保守的に 20 Ω なら 10% も波高は小さくならないはずだと考え、20 Ω の抵抗で対放電保護基板を製作した。

今後のための議論として、対放電保護基板上の抵抗を変更しての ^{55}Fe γ 線源での時間を掛けての波高測定と実験現場でのノイズ測定を行うことで、受け入れられる最大の抵抗値を見積もる事ができるはずである。それを基板上に実装することで抵抗による放電耐性を最大限高められる。

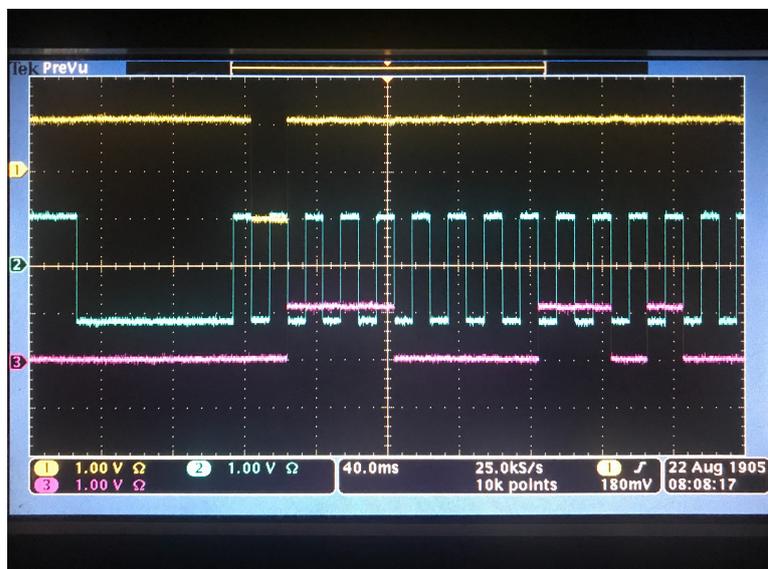


図 A.1 遅い制御のプログラムで生成する波形。



図 B.2 セットアップ (図 5.3.4 の再掲)。 ^{55}Fe γ 線源をチェンバーの前に設置し、チェンバーの GEM が放電するのを待った。GTR-ASD の放電保護チップの性能を調べるために、ブレッドボード上の回路で抵抗を接続した。

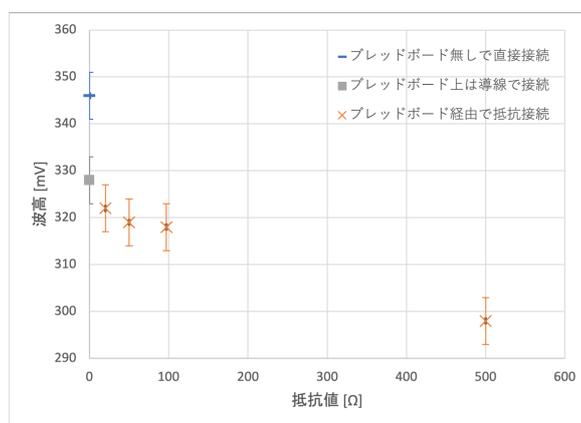


図 B.3 波高の抵抗値依存性。

謝辞

本研究を行うにあたりお世話になった方々にこの場をもって厚く御礼申し上げます。

まず、学部4年次からご指導いただきました志垣賢太教授には最大限の感謝を申し上げます。ご相談に伺うたびに的確なアドバイスをいただき、研究の道筋を示していただきました。その他にもこの難しい局面の中で私が研究を続けられるよう、この紙面を覆うほどの書き尽くせない支援をいただきました。副指導教員の山口頼人准教授には、GEM 検出器の自主ゼミに誘導していただく他、様々なことを頻繁にお話させていただきました。研究室の打合せでは、本間助教、三好助教、八野助教からご指摘を受けたことで気づいたことも多く、その後の研究の糧となりました。ありがとうございました。

E16 実験グループの皆様には、様々な場面でお世話になりました。ありがとうございました。E16 実験グループのスークスパーソンで、理化学研究所 放射線研究室で私の理研への出張を受け入れていただいた、四日市悟様は、私が E16 実験グループへ参加する頃から、研究を進めるための多くの助言とご支援をくださりました。出張の手配に始まり、計算機のセットアップ、データ保管やノートの記録方法まで、幅広い範囲で支援いただきました。高エネルギー加速器研究機構の小沢恭一郎様は、最初期に見学に向った際から、最後までずっとお世話になりました。私が何についての仕事をすると私と E16 ににとって良いのかを考えながら、研究の方向の可能性を様々に示してくださいました。度重なる発注や急な連絡・お願いを肅々とこなしていただきながら、私の取り組んだ仕事について示唆に富むコメントを毎度いただきました。同機構 青木和也様は、現場作業のスケジュール、学びの多い会話などでお世話になりました。特に回路のための部品の発注では大変なお手数をおかけしました。同機構 森野雄平様は、GTR-ASD の新規製造分・改造分の発注を行なっていただきました。京都大学の成木恵様は有水さんや緒形さんに作業を手伝っていただくための様々の手配をしていただきました。日本原子力研究開発機構 佐甲博之様は、私が作業上のミスに現場で慌てているところに優しく冷静に言葉をかけてくださり、落ち着いて安全な作業が行えました。同機構 佐藤進様は楽しくお話させていただきました。理化学研究所 放射線研究室の延與秀人室長には、理化学研究所の研修生として受け入れていただきました。同 菅野光樹様は、理研で HBD の仕事に取り組む私に、GEM・実験・クリーンルームでの作業・回路の試験などの基礎を、知識 0 を仮定して全て教えてくださいました。本研究での(特に GEM の)知識は、菅野様に教えていただいた知識があったからこそ調べることができました。テストパルスでの信号のオシロスコープでの波形取得のためのソフトウェアを利用させていただきました。同 中井恒様は、私が GTR の仕事に取り組むようになってからのほとんどの仕事について毎度意見をいただき、また、Run 0a のデータ収集では先頭を切って方針を見極めてくださいました。Run 0a にむけての GTR 建設作業中に GTR の回路を詳しく教えていただいたため、本研究を達成できました。GTR チェンバー接続時のオシロスコープの波形取得のためのソフトウェアを利用させていただきました。理化学研究所 高橋智則様は、データ収集系の準備をしていただきました。対放電保護回路、ASIC チップテスト基板の相談もさせていただきました。東京大学・高エネルギー加速器研究機構 小沢研

研究室 村上智紀様は、Run 0b に向けての GTR の建設作業の陣頭指揮はもちろん、対放電保護基板の製作時など、毎日の相談にいつも優しく一緒に考えてくださりました。本研究を進められたのは村上様のおかげです。京都大学 原子核・ハドロン物理学研究室 足利沙希子様は、初めて J-PARC に伺った頃から面倒を見ていただき、困った際の初動に困ってしまった際の突破力みたいなものを持った、現場作業の頼れる先輩でした。数多くの場面で手伝っていただきました。同研究室 市川真也様にも初めて J-PARC に伺った頃から面倒を見ていただきました。GTR-ASD の仕組みを詳しく解説していただき、また、Mezzanine-B のファームウェアの開発を行なっていただきました。同研究室 高浦雄大様・中須賀さとみ様には同期として仲良くしていただき、会話にとっても心救われました。高浦様には、私の辛い時就活の時など頻繁に優しい言葉をもらい、とても助けられました。中須賀様には、理研でも東海でも、電源ケーブルの作製など色々手伝ってもらいました。同研究室 有水大地様、緒形直輝様には、電源ケーブルの製作作業などを一緒に行なっていただき助かりました。皆さまと作業をする中で、協力して仕事を進めていくやり方を学びまして、今後の人生でも役立つと思います。ありがとうございました。

高エネルギー加速器研究機構 池野正弘様には、対放電保護基板の回路について、また、対放電保護基板の回路図・パターンについて、たくさん相談させていただいて、助言を頂きました。同機構 田中真伸様には、ASIC チップ内部の仕組みと、現象についてのあり得る解釈、あり得る対処について相談させていただいて、助言を頂きました。有限会社 ジー・エヌ・ディーの宮澤正和様には対放電保護基板のプリント基板製作・実装をお願いしました。迅速な仕事に助けられました。京都大学 同研究室 鈴木一輝様が残してくださった資料のおかげで迅速に GTR-ASD ASIC チップテストボードの利用ができました。東京大学 素粒子物理国際研究センター 森研究室 小林暁様は、一緒に作業していただき、資料の作成やなど学ぶことが多かったです。遅い制御プログラムの刷新による可読性・メンテナンス性の向上などの支援もいただきました。広島大学 高エネルギー物理学研究室 飯沼 昌隆様には、菊水の安定低電圧供給電源をお借りしまして、そのおかげで、5.5.1 の測定を完遂できました。理化学研究所 鈴木恵子様、高エネルギー加速器研究機構 栗原有起美様、同機構 末弘真由美様、同機構 J-PARC ユーザーズオフィスの皆様、広島大学 物理学プログラム事務室の皆様には、出張のための手続き、物品購入の手続き、荷物の発送や受取を毎度行なって頂きました。ありがとうございました。

研究室の学生の皆様には、相談・議論・雑談等々をさせていただきました。物理や周辺ツールについての理解を深めることができたのはもちろん、皆様との時間が心の支えでした。山川様、Raspberry Pi をお貸しいただきましたおかげで 5.5.1 の測定が行えました。頻繁に雑談に付き合ってくださいのも楽しかったです。同期の皆様、大矢元海さん、桐田勇利さん、柴田早由里さんには幾度も議論・相談に付き合ってください遊びに行ってくれたりして頭が上がりません。大学院は別でしたが同期の中部倫太郎さんにも宿舎で・電話で、頻繁にお話させていただいたことで心が保てました。ありがとうございました。

最後に友人の皆さま、家族に支えられて本研究を行うことができました。感謝。

ありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Schweda, X. Zhu, M. Bleicher, S. L. Huang, Horst Stoecker, N. Xu, and P. Zhuang. $\overline{D}D$ Correlations probing Thermalization in High-Energy Nuclear Collisions. In *36th International Symposium on Multiparticle Dynamics*, October 2006.
- [2] W. Weise. Nuclear aspects of chiral symmetry. *Nuclear Physics A*, Vol. 553, pp. 59–72, 1993.
- [3] Satoshi Yokkaichi. *In-Medium Mass Modification of Vector Mesons*, pp. 161–193. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [4] Tetsuo Hatsuda, Su Hounng Lee, and Hiroyuki Shiomi. QCD sum rules, scattering length, and vector mesons in the nuclear medium. *Phys. Rev. C*, Vol. 52, pp. 3364–3372, Dec 1995.
- [5] R. Muto, et al. Evidence for In-Medium Modification of the ϕ Meson at Normal Nuclear Density. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 98, p. 042501, Jan 2007.
- [6] J-PARC センター. ハドロン実験施設 | J-PARC | 大強度陽子加速器施設. <https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/hadron.html>, 2011. (2021 年 1 月 12 日参照).
- [7] P.A. Zyla, et al. Review of Particle Physics. *PTEP*, Vol. 2020, No. 8, p. 083C01, 2020.
- [8] S. Eidelman, et al. Review of particle physics. Particle Data Group. *Phys. Lett. B*, Vol. 592, No. 1-4, p. 1, 2004.
- [9] Tetsuo Hatsuda and Su Hounng Lee. QCD sum rules for vector mesons in the nuclear medium. *Phys. Rev. C*, Vol. 46, pp. R34–R38, Jul 1992.
- [10] K. Ozawa, et al. Observation of ρ/ω Meson Modification in Nuclear Matter. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 86, pp. 5019–5022, May 2001.
- [11] M. Naruki, et al. Experimental signature of medium modifications for ρ and ω mesons in the 12 GeV $p + A$ reactions. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, p. 092301, Mar 2006.
- [12] M. H. Wood, et al. Light vector mesons in the nuclear medium. *Phys. Rev. C*, Vol. 78, p. 015201, Jul 2008.
- [13] Ryugo S. Hayano and Tetsuo Hatsuda. Hadron properties in the nuclear medium. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 82, pp. 2949–2990, Oct 2010.
- [14] S. Yokkaichi, et al. Technical Design Report (TDR) for the J-PARC E16 (revised November 2016). Technical report, Facilities Impact and Finance Committee (FIFC) meeting by KEK IPNS, 2016.
- [15] 鈴木一輝. 電子対測定に用いるハドロンブライント検出器のためのトリガー用信号読み出しシステムの開発. Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科, 2019.
- [16] Tomonori Takahashi, et al. Data acquisition system in Run0 of the J-PARC E16 experiment. 22nd Virtual IEEE Real Time Conference <https://indico.cern.ch/event/737461/contributions/3735536/>, October 2020. (2021 年 2 月 3 日参照).
- [17] J-PARC センター. ハドロン実験施設 | J-PARC の各施設 | 大強度陽子加速器施設 J-PARC 「一般向け」. <https://j-parc.jp/public/Hadron/ja/facility.html>, 2011. (2021 年 1 月 12 日参照).
- [18] 藤井涼平. E16 実験におけるスペクトロメーター電磁石の磁場測定. Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科, 2019.
- [19] W. Anderson, et al. Design, Construction, Operation and Performance of a Hadron Blind Detector for the PHENIX Experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A*, Vol. 646, pp. 35–58, 2011.
- [20] 足利沙希子. 電子・陽電子対測定のための鉛ガラスカロリメータの開発. Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科, 2018.
- [21] Yusuke Komatsu, et al. Development of the gem tracker for the j-parc e16 experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 732, pp. 241–244, 2013.
- [22] 村上智紀. J-PARC E16 実験に向けた GEM 飛跡検出器の開発と建設. Master's thesis, 東京大学 理学系研究科, 2020.
- [23] Fabio Sauli. Gem: A new concept for electron amplification in gas detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 386, pp. 531–534, 2 1997.
- [24] Fabio Sauli. The gas electron multiplier (gem): Operating principles and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 805, pp. 2–24, 1 2016.
- [25] P. Abbon, et al. The COMPASS experiment at CERN. *Nucl. Instrum. Meth. A*, Vol. 577, pp. 455–518, 2007.
- [26] B. Ketzer, Q. Weitzel, S. Paul, F. Sauli, and L. Ropelewski. Performance of triple GEM tracking detectors in the COMPASS experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A*, Vol. 535, pp. 314–318, 2004. [Erratum: *Nucl. Instrum. Meth. A* 648, 293 (2011)].
- [27] S. Bachmann, A. Bressan, M. Capeáns, M. Deutel, S. Kappler, B. Ketzer, A. Polouektov, L. Ropelewski, F. Sauli, E. Schulte,

- L. Shekhtman, A. Sokolov. Discharge mechanisms and their prevention in the gas electron multiplier (GEM). *Nucl. Instrum. Meth. A*, Vol. 479, pp. 294–308, 2002.
- [28] Yusuke Komatsu. Development of GEM tracker for in-medium $\phi \rightarrow e^+e^-$ measurement. Master’s thesis, University of Tokyo, 2011.
- [29] W-IE-NE-R, Power Electronics GmbH. MPOD HV module | MPOD - LV/HV. <http://www.wiener-d.com/sc/power-supplies/mpod--lvhv/mpod-hv-module.html>. (2021 年 1 月 27 日参照).
- [30] Prometheus Authors. Prometheus - Monitoring system & time series database. <https://prometheus.io/>. (2021 年 2 月 2 日参照).
- [31] Grafana Labs. Grafana | Grafana Labs. <https://grafana.com/oss/grafana/>. (2021 年 2 月 2 日参照).
- [32] Yuki Obara. Development of the large GEM tracker and the trigger system for the J-PARC E16 experiment. Master’s thesis, University of Tokyo, 2014.
- [33] George Iakovidis and ATLAS Muon Collaboration. VMM ASIC. In *6th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD2019): La Rochelle, France, May 5-10, 2019*, 2019.
- [34] Christian Lippmann (ALICE Collaboration). Spark protection schem for SAMPa based ALICE TPC electronics. RD51 Mini-Week <https://indico.cern.ch/event/761831/contributions/3240134/>, December 2018. (2021 年 2 月 7 日参照).
- [35] Christian Lippmann (ALICE Collaboration). TPC readout overview. TPC Mini Workshop <https://indico.cern.ch/event/827540/#9-alice-readout-hardware>, July 2019. (2021 年 1 月 12 日参照).
- [36] Taku Gunji. private communication, 2020.
- [37] F. Ivone. Discharge mitigation strategies for the CMS GE1/1 Triple-GEM detectors. *Journal of Instrumentation*, Vol. 15, No. 05, pp. C05009–C05009, may 2020.
- [38] Jeremie Alexandre Merlin. Discharge and crosstalk mitigation for the GE21 system in CMS. RD51 Collaboration Ceeting and Topical Workshop on New Horizons in Time Projection Chambers <https://indico.cern.ch/event/889369/contributions/4040763/>, October 2020. (2021 年 2 月 3 日参照).
- [39] F. Sauli. Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. *Experimental techniques in high energy physics*, pp. 79–188, 5 1977.
- [40] L. Lautner, L. Fabbietti, P. Gasik, and T. Klemenz. High voltage scheme optimization for secondary discharge mitigation in gem-based detectors. *Journal of Instrumentation*, Vol. 14, p. P08024, 8 2019.
- [41] Jeremie Alexandre Merlin. *Study of long-term sustained operation of gaseous detectors for the high rate environment in CMS*. PhD thesis, University of Strasbourg, Apr 2016. Presented 25 Apr 2016.
- [42] Jeremie Alexandre Merlin. GEM stack optimization for GE21 and ME0 (cross-talk studies, discharge mitigation). RD51 Collaboration Meeting and Lectures <https://indico.cern.ch/event/911950/contributions/3879507/>, June 2020. (2021 年 2 月 3 日参照).