

COMET 実験用ストロー飛跡検出器の
読み出し回路の開発

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻
久野研究室
岡本慧太

平成 27 年 3 月 4 日

概要

ミューオン電子転換過程探索実験（COMET 実験）は荷電レプトンフレーバーの破れの検証を通して素粒子物理学の標準模型を越える物理を探索する実験である。標準理論では、ミューオン電子転換過程の分岐比は 10^{-54} 程度で観測不能なほど小さいが、標準理論を越える物理を考えると、その分岐比は 10^{-14} 程度と観測可能な大きさになる。つまり、ミューオン電子転換過程を観測できれば、標準理論を越える物理を強く示唆することとなる。

COMET 実験では、ミューオニック原子から放出される特徴的な運動量を持った電子を観測することによりミューオン電子転換過程を同定する。ミューオン電子転換過程の背景事象であるミューオニック原子からの崩壊電子があり、この電子の運動量分布はミューオン電子転換過程由来の電子の運動量の近傍まで広がる。背景事象とミューオン電子転換過程由来の信号を識別するために高運動量分解能を備えたストロー飛跡検出器を用いる予定であり、この読み出し回路には、真空フィードスルーの数を最小化できること、パイルアップ事象を識別できること、ストローチューブトラッカーの位置分解能を制限しない時間分解能であること、ミューオン電子転換過程由来の信号の電荷量を識別可能なこと、高い放射線耐性と磁場耐性などが要求される。また、ミューオン電子転換過程由来の信号の電荷量を具体的に見積もるために、宇宙線を用いてストロー飛跡検出器による MIP 測定を行った。その結果 MIP による信号の電荷は 0.8 pC から 5 pC のレンジに 95%含まれていることがわかった。

そのような要求を満たす独自の読み出し回路、ROESTI(Read Out Electronics of Straw Tube Instruments)の開発を進めている。ROESTI プロトタイプは既に関済されており、それらに対する要求を満たしているのかの試験を行った。具体的には、ノイズ、ダイナミックレンジ、クロストーク、時間分解能の評価試験および、通信速度試験を行った。その結果、ダイナミックレンジ以外の項目は要求を満たしていることが分かった。ROESTI プロトタイプのダイナミックレンジは 6 fC から 600 fC であり、ストロー飛跡検出器の信号を識別することができないことがわかった。

ROESTI の電源回路に用いるスイッチングレギュレータ等の素子には放射線や磁場耐性がないものがあると報告されており、放射線耐性試験と磁場試験を行った。放射線耐性試験では中性子照射試験とガンマ線耐性試験を行った。それらの耐性試験を通して、次期バージョン ROESTI に搭載する素子を決定した。FPGA などの半導体からなるチップは、中性子などによりビット反転が起こる SEU と呼ばれる現象が起こる。ROESTI と Artix-7 評価ボードをビームターゲットとし中性子を照射を行い、SEU の影響とその対策を考えた。

以上の結果を踏まえ次期バージョン ROESTI のデザインを行った。次期バージョン ROESTI では ASD の直後にアッテネータ、DRS4 位相補正用 ADC、ディップスイッチ、20 ピントリガーコネクタ、が新たに搭載され、その一方で、FPGA 以外のメモリは除外除去される。また、FPGA は Spartan-6 から Artix-7 へ変更する。ROESTI プロトタイプからの以上の変更により、ストローチューブトラッカーの信号の 95%を識別、DRS4 の出力波形の位相補正、Phase-I トリガーシステムとの通信、トリガーラインを介するファームウェアのダウンロードが可能になる。スイッチングレギュレータは、磁場により影響があり、磁場が特定のレギュレータ表面に対し垂直にかかる場合電圧変換効率が 60%まで低下するため、今後も放射線耐性と磁場磁場耐性を併せ持つものを探すべきであるが、実機として使用可能な性能は達成できる見込みである。

目次

第 1 章 序論	8
1.1 はじめに	8
1.2 物理的背景	8
1.2.1 荷電レプトンフレーバー非保存過程	8
1.2.2 理論的な予測値	9
1.2.3 ミューオン電子転換過程	12
1.3 COMET 実験 [3]	12
1.3.1 ミューオン電子転換過程探索の原理	12
1.3.2 実験装置	13
第 2 章 ROESTI	21
2.1 実験的要求	21
2.1.1 ストローチューブトラッカー	21
2.1.2 ストローチューブトラッカーの読み出し回路に対する要求	21
2.2 ROESTI	23
2.3 実験的要求の再考	24
2.3.1 ストローチューブトラッカーを用いた荷電粒子測定試験	26
2.3.2 ROESTI に対する要求のまとめ	34
第 3 章 ROESTI プロトタイプ評価	35
3.1 電圧印加試験	35
3.2 パターンコレクション	35
3.3 基本性能試験	38
3.3.1 ノイズ	38
3.3.2 ダイナミックレンジと線形性	38
3.3.3 クロストーク	41
3.3.4 時間分解能	43
3.3.5 通信試験	48
3.3.6 ここまでの結果のまとめ	51
3.4 ストローチューブトラッカーとの接続試験	53
3.4.1 目的	53
3.4.2 線源 Fe-55 を用いた信号の読み出し試験	53
3.4.3 宇宙線を用いた MIP による信号の読み出し試験	54
第 4 章 放射線耐性試験と磁場試験	59
4.1 磁場試験とビーム試験の概要	59
4.2 磁場試験	59
4.2.1 磁場試験のセットアップと測定方法	60
4.3 中性子照射試験	61

4.3.1	九州大学タンデム加速器で行った中性子照射試験	61
4.3.2	神戸大学海事科学部タンデム加速器で行った中性子照射試験	70
4.4	ガンマ線照射試験	76
4.4.1	セットアップ	76
4.4.2	ガンマ線照射試験の結果	76
4.4.3	耐性試験まとめ	77
第 5 章	次期バージョン ROESTI	79
5.1	ROESTI プロトタイプの問題点	79
5.2	次期バージョンのデザイン	79
第 6 章	考察と今後	82
第 7 章	まとめ	83

目 次

1.1	SM の枠内で $\mu \rightarrow e\gamma$ が起こるときのファインマンダイアグラム。	9
1.2	SUSY の枠内でミュオン電子間の cLVF のファインマンダイアグラム。	10
1.3	SUSY-GUT SU(5) モデルのミュオン電子転換過程分岐比の予測値 [1]。	11
1.4	SUSY-Seesaw 模型で予測される分岐比 [1]。	11
1.5	青は DIO 由来の電子の運動量スペクトルで赤はミュオン電子転換過程由来の電子の運動量スペクトル。	13
1.6	J-PARC の全体図。	14
1.7	建設中の COMET 実験用ビームラインの概念図。	14
1.8	Phase-I のビームラインの概念図。	15
1.9	Phase-I で円筒形ドリフトチェンバーを設置した概念図。	16
1.10	Phase-II のビームラインの概念図。	17
1.11	Phase-II ビームラインの下流付近の様子。	17
1.12	左図は RCS とメインリングのバンチ構造、右図はパルスビームと時間窓の概念図。	18
1.13	セグメント化された電磁カロリメーターの設置の様子。	20
2.1	ストローチューブトラッカーの側面の概念図。 5 つのステーションから構成される。	22
2.2	ステーションの概念図。	22
2.3	ステーションの概念図。 X 軸方向と Y 軸方向のストローチューブから構成される 4 層構造である。	23
2.4	ROESTI の全体像。	25
2.5	ROESTI の信号処理の流れ。	25
2.6	デ이지チェーン接続時データ転送の概念図。 まず PC 側の ROESTI1 のデータから PC へデータ転送を行う。 ROESTI1 のデータ転送が終わると、ROESTI2 は ROESTI1 を介し、PC へデータ転送を行う。 更に、ROESTI2 がデータ転送を終えると、ROESTI3 が ROESTI2 と ROESTI1 を介し、PC へデータを転送する。 更にその転送が完了すると、ROESTI1 が PC へデータを転送する。 以上の流れを繰り返す。	26
2.7	左図はストローチューブトラッカーのガスゲインを測定したセットアップの全体像。 右図は、左図の中央付近の拡大図で、ウィンドウの上に Fe-55 を置いた様子。	28
2.8	左図が Fe-55 を用いたガスゲイン測定のブロック図である。 右図はストローチューブトラッカーの断面図。 図中のチャンネル 15 を使用して、ガスゲインの測定を行った。	28
2.9	Fe-55 線源を用いたときのストローチューブトラッカーの典型的な信号の波形。	29
2.10	線源 Fe-55 を用いて、アノードワイヤーに 2000 V の電圧を印加したときの電荷の分布。	29
2.11	ストローチューブトラッカーのゲインカーブ。	29
2.12	ベータプロッホの式によるエネルギー損失の様子 [5]。	30
2.13	宇宙線を用いた MIP 測定のセットアップの様子。 写真中央付近の黒いものがシンチレータである。	31
2.14	左図はストローチューブトラッカーの断面図。 チャンネル 15 から 12 を用いてデータを取っている。 右図がその様子のブロック図である。	32

2.15	ストーローチューブの印加電圧が 2000 V のときの宇宙線の典型的な波形。	32
2.16	各チャンネルの電荷の分布図。緑はガウシアンでノイズ由来と考えられる電荷、赤はランダム分布で MIP 由来と考えられる電荷を、それぞれフィッティングしている。図 2.14 左図のチャンネル 15 から 12 の順に、この図中のチャンネル 0 から 3 に対応している。	33
3.1	製作した ROESTI に対し、改造を行った箇所。	36
3.2	DRS4 の動作原理 [9]。	37
3.3	チャンネル 1 のベースライン。データは FULL モードで取得しており、横軸は DRS4 のキャパシタのアドレスに対応する。	37
3.4	左図はパターンコレクション前の波形データ。右図はパターンコレクション後の波形データ。目視でも、波形が滑らかになっていることが分かる。データは ROI モードで取得した。	37
3.5	左図はノイズ測定の設定アップの概念図。右図はその実際の様子。	39
3.6	左図は入力信号が無いときの DRS4 内のキャパシタの ADC 値の分布の一例。ここではチャンネル 0 の 106 番目のキャパシタの分布を例に出した。この分布をガウシアンでフィッティングし、その標準偏差の値をこのキャパシタの揺らぎと定義した。右図は、入力信号がない時、チャンネル 15 内の全キャパシタの揺らぎの分布。ADC 値を mV に変換してある。この分布の平均値をチャンネル 15 のノイズの大きさと定義した。全 16 チャンネルに対して、同様のことを行う。	39
3.7	各チャンネルのノイズの分布。	39
3.8	ダイナミックレンジを測定した時の設定アップの概念図。	41
3.9	左図は 300 fC 入力時の波形。右図は 300 fC の入力電荷に対する波高の分布の一例。ここではチャンネル 1 を例として示している。	41
3.10	改造前の ROESTI の入力電荷に対する出力波形のプロット。400 fC 程度でサチュレーションを起こしていることが分かる。	42
3.11	DRS4 のオフセット電圧を決めている部分。赤丸の枠内の電圧を上下させることで、DRS4 のオフセット電圧を変更することができる。	42
3.12	左図は入力電荷に対する ROESTI の出力波形の波高のプロット。右図は ROESTI のゲインの入力電荷依存性。左図を微分したものに相当する。	43
3.13	チャンネル 10 のみに 600 fC 与えた際の、全チャンネルの様子。1 イベント毎だとクロストークの影響は目視では確認できない。	44
3.14	閾値を越えるタイミングを 200 ns に合わせて、1000 イベントの取得波形を重ね描きした 2 次元ヒストグラム。チャンネル 8, 9, 11 ではクロストークの影響を目視でも確認できる。	45
3.15	左図はチャンネル 10 のみに 600fC の電荷をを与えたときに、クロストークの影響を受けるチャンネル 9 の平均波形。右図はフィッティングした 1 次関数と ADC 値の差分のプロット。クロストークの影響を表す。赤線は ADC 値の分布の $\pm 2\sigma$ を表す。	45
3.16	1 次関数と ADC 値の差分の分布図。	46
3.17	チャンネル 10 のみに 600 fC 与えた際の、クロストークの影響。	46
3.18	時間分解能測定を行った設定アップの概念図。	48
3.19	左図は、リファレンスチャンネルである ch0 の波形で、右図は 300 ns のディレイを掛けた ch1 の様子である。	48
3.20	ディレイ時間が 0 ns のときの時間差分布。	49
3.21	ディレイ時間が 100 ns のときの時間差分布。	49
3.22	ディレイ時間が 200 ns のときの時間差分布。	49
3.23	ディレイ時間が 300 ns のときの時間差分布。	49

3.24	左図は、10 MHz のサイン波を入力しフィッティングしている様子。右図は左図の 256 ns 付近の拡大図。フィッティングしたサイン波と、時間方向にズレていることが分かる。	49
3.25	キャパシタの時間方向のズレの一例。例としてチャンネル 0 の全キャパシタがどのように時間方向にズレているのかを示している。	50
3.26	時間校正後のディレイ時間が 0 ns のときの時間差分布。	50
3.27	時間校正後のディレイ時間が 100 ns のときの時間差分布。	50
3.28	時間校正後のディレイ時間が 200 ns のときの時間差分布。	50
3.29	時間校正後のディレイ時間が 300 ns のときの時間差分布。	50
3.30	時間分解能のディレイ時間依存性。青が時間校正前で、赤が時間校正後を表す。	51
3.31	通信試験の様子。	52
3.32	通信試験のセットアップの様子。ROESTI1 の外部トリガーの生成の方法や、ディレイなどは、ダイナミックレンジのデータを取得した場合と同様である。	52
3.33	通信速度の様子。緑はデジチェーン接続しなかったとき、青は 2 枚の ROESTI をデジチェーン接続したとき、黄色は 3 枚の ROESTI をデジチェーン接続したときを、それぞれ表す。	52
3.34	線源 Fe-55 を用いた ROESTI 接続試験のセットアップの概念図。	54
3.35	左図は、ROESTI とストローチューブトラッカの接続の様子。右図は接続された ROESTI から見た線源の位置と ROESTI のチャンネルの対応関係の概念図。チャンネル 0 はストローチューブには繋がっていない。	55
3.36	左図は、ストローチューブのアノードワイヤーの印加電圧が 1700 V で線源 Fe-55 を用いたときの典型的な波形。右図は、典型的なノイズの様子。	55
3.37	Fe-55 を用い、アノードワイヤーの印加電圧 1675 V のときの波高分布。	56
3.38	アノードワイヤーの印加電圧 1700 V で他の条件は図 3.37 と同じ。	56
3.39	アノードワイヤーの印加電圧 1725 V で他の条件は図 3.37 と同じ。	56
3.40	アノードワイヤーの印加電圧 1750 V で他の条件は図 3.37 と同じ。	56
3.41	宇宙線中の MIP を用いた ROESTI 接続試験のセットアップの概念図。	57
3.42	印加電圧 1700 V のときの宇宙線による典型的な信号波形。	57
3.43	アノードワイヤーに対する印加電圧 1675 V	58
3.44	アノードワイヤーに対する印加電圧 1700 V	58
3.45	アノードワイヤーに対する印加電圧 1725 V	58
4.1	PHITS による Phase-I 実験の中性子とガンマ線の線量の PHITS によるシミュレーション。左図は中性子の線量表し、右図はガンマ線の線量を表す。	60
4.2	磁場試験のセットアップ。写真左側の 2 つは左から順に、A, C の評価ボード。中央付近の縦に並んだ 2 つは上から順に、B, D の評価ボード。最も右側に設置されているものが ROESTI である。	62
4.3	磁場試験のセットアップの概念図。	62
4.4	MRI 磁石と磁場試験部材。磁場の方向は紙面裏から表である。	63
4.5	左上図は $\vec{B} \perp X - Z$ 平面、右上図は $\vec{B} \perp Y - Z$ 平面、左下図は $\vec{B} \perp X - Y$ 平面をそれぞれ表す。黒は現バージョン ROESTI に搭載されている LTM10503(A)、赤は LMZ31503(B)、緑は LTM4624(C)、青は LTM8023(D) をそれぞれ表す。	64
4.6	ダミーロードの抵抗値を 5 Ω に変更したときの A と D の様子。黒は A、青は D を表す。左図は $\vec{B} \perp X - Y$ 平面、右図は $\vec{B} \perp X - Z$ 平面をそれぞれ表す。	64
4.7	中性子照射試験で使用した Artix-7 の評価ボード。	65
4.8	9 MeV の重水素を炭素ターゲットに入射させた時の中性子ビームエネルギースペクトル [15]。	66

4.9	ターゲットに対する配置図。Artix-7 と ROESTI はそれぞれターゲットからそれぞれ約 13 cm と 18.5 cm の位置にある。	67
4.10	図中の赤点がビーム軸の中心を表す。主な素子の中心からの距離が記してある。	67
4.11	「壊れたファイル」と「正常なファイル」の総和の時刻変化。赤点は「壊れたファイル」を表し、青点は「正常なファイル」を表す。	70
4.12	上図は波高、下図はノイズの時刻変化を表す。	71
4.13	図 4.12 の拡大図。黒点は壊れたファイルの時刻を表し、緑の線は再ダウンロードの時刻を表す。	71
4.14	ノイズレベルが自ずと正常な状態に戻った例外的なイベント付近の様子。	72
4.15	左図はノイズレベルが自ずと正常な状態に戻った例外的なイベントの様子。右図は、ビーム試験終盤にノイズレベルが常に上昇していた ch12 の波形の様子。	72
4.16	実験室での波高とノイズレベルの時間変化の様子。赤点はチャンネル 0 から 7、青点はチャンネル 8 から 15 を表す。	73
4.17	Artix-7 のビットエラーの様子。上図は「デルタファイル」が生成された時刻と、その総数のプロット。下図は「デルタビット」の総数と時刻のプロット。	73
4.18	中性子照射試験のベリリウムターゲット周りの、レギュレータとスイッチの配置図。	74
4.19	神戸大学海事科学部タンデム加速器で行った中性子照射試験の結果。最も上のプロットの青と緑は順にレギュレータの V_{ps} , V_{in} を表す。真ん中の青と緑は順にレギュレータの V_{out} , V_{load} を表す。最も下のプロットはスイッチの出力電圧を表す。	75
4.20	ガンマ線照射試験の様子。写真中の右側にある円筒状の中からガンマ線が等方的に放射される。	76
4.21	スイッチのセットアップ。ファンクションジェネレータで矩形波を入力する。矩形波がハイの状態の時のみ、2.5 V の電圧を出力し、それ以外の状態では 0V の出力で、出力電圧をロガーを用いて記録している。	77
4.22	上図の青、緑はそれぞれ現バージョン ROESTI に搭載されているレギュレータ LMZ10503 の V_{ps} , V_{in} で、赤とピンクはそれぞれ LTM8023 の V_{ps} , V_{in} である。真ん中の図の青、緑はそれぞれ LMZ10503 の V_{out} , V_{load} で、赤、ピンクはそれぞれ LTM8023 の V_{out} , V_{load} である。紫は出力電圧の上限値の 3.6 V を示している。下図はスイッチの出力電圧のプロットである。全てのプロットの横軸はグレイで、描かれている水色の縦線は、20 Gy を表す。 . . .	78
5.1	次期バージョン ROESTI のフロアプラン	80
5.2	次期バージョン ROESTI の基板図	81

表 目 次

2.1	ストローチューブトラッカーの仕様。	21
2.2	印加電圧とガスゲイン。	29
2.3	MIP 由来の電荷の頻出度。	31
2.4	ROESTI に対する要求。	34
3.1	改造前の印加電圧試験の結果。直流電源に表示されている値を記載している。 $V_{2.5}$, $I_{2.5}$, V_5 , I_5 , W/ch 順に、2.5 V 電源に印加された電圧値、2.5 V 電源に流れた電流値、5.0 V 電源に印加された電圧値、5.0 V 電源に流れた電流値、1 チャンネル当たりの消費電力を示す。括弧内の値はファームウェアをダウンロードした後の各値を示す。電流の上限値は 1.0 V であり、“limit”と記している箇所は、直流電源の電圧の上限値に達したことを示す。B はファームウェアをダウンロードすることができなかった。	36
3.2	改造後の印加電圧試験の結果。直流電源に表示されている値を記載している。 $V_{2.5}$, $I_{2.5}$, V_5 , I_5 , W/ch 順に、2.5 V 電源に印加された電圧値、2.5 V 電源に流れた電流値、5.0 V 電源に印加された電圧値、5.0 V 電源に流れた電流値、1 チャンネル当たりの消費電力を示す。括弧内の値はファームウェアをダウンロードした後の各値を示す。	38
3.3	各チャンネルのノイズの大きさ。	39
3.4	クロストークの結果。単位は全て [mV] である。“<”は上限値を表している。	47
3.5	ROESTI 基本性能のまとめ。	53
4.1	磁場試験の結果のまとめ。	61
4.2	主な素子が受けた中性子量。BC はビームカレントを表す。	68
4.3	2 つのビームカレントの間での、ファイルの違い。括弧内の値は中性子のレートを表す。	70
4.4	2 つのビームカレントの間での、ファイルの数やビットの差の違い。	74
4.5	中性子照射試験の素子の結果のまとめ。○ は中性子照射による挙動の変化が見られなかったもの。△ は中性子照射による挙動の変化がみられたが、挙動が変化した要因が中性子なのかガンマ線なのか明確にわかっていないもの。	74
4.6	磁場試験の結果のまとめ。○ は安全率 10 の範囲内で問題なく動くもので、△ は 20 Gy まで動作するが、安全率 10 範囲内で正常に動作しなくなるもの。	77
4.7	耐性試験のまとめ	77

第1章 序論

1.1 はじめに

素粒子物理学の枠組みにおいて、標準模型は高い精度で実験と一致することが確認されている理論である。2012年には、標準模型で予言される最後の粒子であるヒッグス粒子が実験的に発見された。一方、標準模型では説明のつかない現象もいくつか発見されている。その一例として、ニュートリノ振動と呼ばれる中性レプトンであるニュートリノが別の世代へと遷移する現象が挙げられる。ニュートリノ振動現象では、中性レプトンである3世代のニュートリノ（電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ）が、物質中を移動する間に互いにその状態を遷移する現象で、これはニュートリノの質量がゼロではないことで引き起こされる。標準模型ではニュートリノは質量ゼロの粒子として組み込まれていたにも拘らず、ニュートリノ振動現象は標準模型では説明がつかなかった。このような現象を観測することは、標準模型を内包するような物理を探索する上で非常に重要である。

ニュートリノ振動現象は、より抽象的には中性フレーバー非保存過程（以下 nLFV）と呼ばれる。nLFV の発見により、荷電レプトンフレーバー非保存過程（以下 cLFV）の存在が大きく疑われることになった。荷電レプトンフレーバー非保存過程とは、素粒子反応の前後において荷電レプトンのフレーバーが変化する現象である。cLFV 探索は、長い間行われているが、現在に至っても未だに発見されていない。近年、ミューオンの大量生成が比較的容易になったという背景もあり、cLFV の中でもミューオンが電子に遷移する cLFV が注目されている。特に、発見が有力視されている cLFV の1つが、ミューオン電子転換過程である。ミューオンが原子に捕獲されると、ミューオンはあたかも電子のようにその軌道上を周回し、そのような原子をミュオニック原子と呼ぶ。ミュオニック原子の軌道上のミューオンが電子となって放出される稀崩壊過程で、未だに発見されていない。ニュートリノの質量に有限の値を仮定することでその分岐比が得られるが、その値は 10^{-54} であり、実験では検出不可能なレベルである。その一方で、標準模型を越えるいくつかの物理模型では、その分岐比は 10^{-15} 程度まで上昇し、実験的に検出可能である。つまり、ミューオン電子転換過程を実験的に検出することは、標準模型を越える物理模型の存在を示唆する。我々はミューオン電子転換過程の発見を目指す実験（COMET 実験）を始動予定である。本章では、本研究の物理的な背景と COMET 実験について述べる。

1.2 物理的背景

1.2.1 荷電レプトンフレーバー非保存過程

荷電レプトンフレーバー非保存過程とは、素粒子反応の前後において荷電レプトンのフレーバーが変化する現象である。この過程を実験によって実証することは、標準模型（Standard Model; SM）を超えた物理（Beyond the SM; BSM）、特に、超対称性模型（Supersymmetry; SUSY）の有効な検証手段の一つであると考えられており、近年、多くの素粒子物理学者から注目を集めている。1947年に Hincks と Pontecorvo によって歴史上初の cLFV 探索実験が行われて以来、現在までに数多くの cLFV 探索実験が行われてきたが、未だ実験による発見には至っていない。しかし、探索の感度は、10年に2桁という割合で進歩している。ミューオンを用いた cLFV 過程探索実験は、分岐比の上限値は他の cLFV 探索実験のものに比べて2桁程小さく、高精度な実験である。その理由は、ミューオンの崩壊過程には強い相互作用による過程が含ま

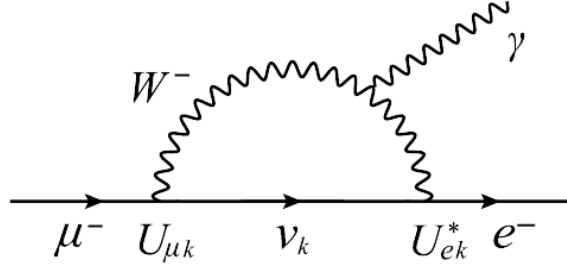


図 1.1: SM の枠内で $\mu \rightarrow e\gamma$ が起こるときのファインマンダイアグラム。

れないため、 π^0, K_L^0, K^+ のようなハドロンの cLFV 過程探索実験に比べてバックグラウンドの影響が小さいという点と、比較的軽い粒子であるため技術的に生成しやすく、大強度のミューオンビームを実現できるという点が挙げられる。理論的な側面からは、SM と BSM のそれぞれで予言される、ミューオン・電子間 cLFV 過程の分岐比には約 40 桁の大きな開きがある。さらに、SM 由来 cLFV 過程の検出は、その分岐比の小ささから極めて困難であるため、cLFV 過程が発見されれば、BSM の発見を直接意味する。以上から、ミューオンを利用した cLFV 過程探索実験は、BSM 探索において最も有望な手法の一つであると言える。

1.2.2 理論的な予測値

この節では、ミューオン電子転換過程の理論的な予測値についてのいくつかの理論を紹介する。

ニュートリノの質量を含む SM

本来 SM ではニュートリノの質量はゼロであるとされていたが、ニュートリノ振動の発見に伴い、ニュートリノは有限の質量を持つことが証明された。それを受けて、SM 内のニュートリノ質量は修正を迫られた。その修正によって、cLFV は SM でも起こりえることがわかる。図 1.1 は、SM の枠内で $\mu \rightarrow e\gamma$ が起こるときの代表的なファインマンダイアグラムであり、ニュートリノ振動を介して、ミューオンが電子へと遷移していることがわかる。ニュートリノの質量が非常に小さいことからこの分岐比 Br は非常に小さい。以下の様にして、分岐比の上限値を求めると

$$Br(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{\alpha}{2\pi} \left| \sum_k U_{ek}^* U_{\mu k} \frac{m_{\nu k}^2}{m_W^2} \right| < 10^{-54} \quad (1.1)$$

k はレプトンフレーバー、 $U_{ek}, U_{\mu k}$ は MNS ニュートリノ混合行列成分、 $m_{\nu k}$ はニュートリノ質量、 m_W は W ボゾンの質量である。この計算結果の通り、SM 枠内ではニュートリノの質量を盛り込んでも、分岐比の上限値は 10^{-54} と非常に小さく、実験では無視することができる。

超対称性模型

超対称性模型 (SUSY) とは、ボソンとフェルミオンの入れ替えに対応する新しい対称性を取り入れた素粒子模型であり、cLFV 過程に大きな寄与を与えることが良く知られている。レプトンに対応する SUSY 粒子であるスレプトンの質量行列は、

$$m_i^2 = \begin{pmatrix} m_{\tilde{e}\tilde{e}}^2 & \Delta m_{\tilde{e}\tilde{\mu}}^2 & \Delta m_{\tilde{e}\tilde{\tau}}^2 \\ \Delta m_{\tilde{\mu}\tilde{e}}^2 & m_{\tilde{\mu}\tilde{\mu}}^2 & \Delta m_{\tilde{\mu}\tilde{\tau}}^2 \\ \Delta m_{\tilde{\tau}\tilde{e}}^2 & \Delta m_{\tilde{\tau}\tilde{\mu}}^2 & m_{\tilde{\tau}\tilde{\tau}}^2 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

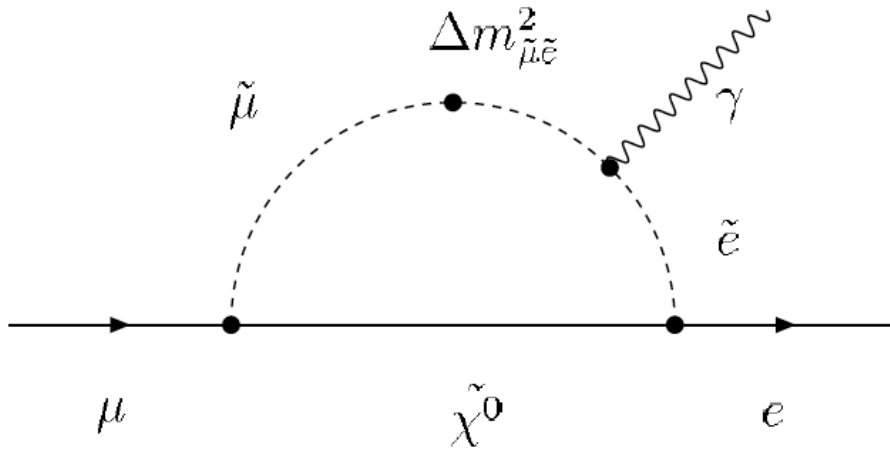


図 1.2: SUSY の枠内でミュオン電子間の cLFV のファインマンダイアグラム。

で与えられ、このうちの非対角成分が cLFV 過程に関係する。最小限の SUSY 模型では荷電レプトン混合は、それに対応するスレプトン混合を通して引き起こされる。図 1.2 はミュオンと電子の混合過程を表した SUSY ダイアグラムの例である。スレプトン混合行列である Δm_{ij}^2 によってスミューオン ($\tilde{\mu}$) からスエレクトロン (\tilde{e}) への転換が起きている。また $\tilde{\chi}^0$ は中性フェルミオンの SUSY 粒子 (ニュートラリーノ) を意味する。現在、スレプトン質量行列の非対角成分に値を与える 2 つの SUSY シナリオが提唱されており、ひとつを SUSY-GUT 模型、もう一つを SUSY-Seesaw 模型と呼ぶ。

SUSY-GUT 模型 [1]

SUSY-GUT (Super Symmetric Grand Unification Theories) 模型とは、大統一理論 (Super Symmetric Theories) に超対称性の拡張を行った模型である。SUSY-GUT 模型は、GUT スケールと呼ばれる 10^{16} GeV から低エネルギー領域まで下げるとスレプトン質量行列に非対角成分が生じることで、cLFV 過程が起こる。図 1.3 は SUSY-GUT SU(5) で予言されているミュオン電子転換過程の分岐比である。図 1.3 中の m_{eR} は右巻きスエレクトロンの質量で、 μ は SUSY 模型において、ヒッグスとヒッグシーノの質量を決定するパラメータである。 $\tan\beta$ は SUSY 模型における 2 つのヒッグスの真空期待値の比を表すパラメータである。現在の実験感度では、この分岐比の上限値に達していないが、我々の COMET 実験が目標とする 10^{-17} の感度においては十分期待できる。

SUSY-Seesaw 模型 [1]

SUSY-Seesaw 模型は、右巻きの重いニュートリノの存在を予言することで知られている。この模型では SM と同様に、ニュートリノ振動からスレプトン混合が導出されるため、cLFV が期待される。 $\tilde{\mu} - \tilde{e}$ 間のスレプトン混合に対しては、太陽ニュートリノ振動に対応する $U_{\mu e}$ と、大気ニュートリノ振動に対応する $U_{\tau e}, U_{\tau \mu}$ による 2 つの寄与が考えられる。SUSY-Seesaw 模型から 予測される $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の分岐比は 1.4 の通りである。図 1.4 中の $M_{\nu 2}$ は第 2 世代に右巻きニュートリノのマヨラナ粒子である。SUSY-GUT 模型の場合と同様に 10^{-17} の感度を達成することで、現在の上限値を越えた領域を探索することができる。

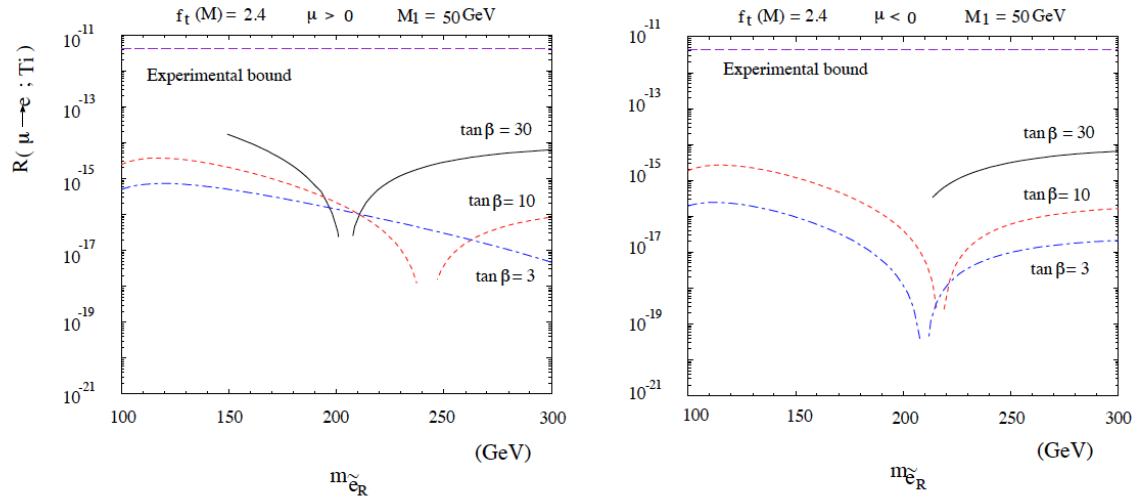


図 1.3: SUSY-GUT SU(5) モデルのミュオン電子転換過程分岐比の予測値 [1]。

$\mu \rightarrow e\gamma$ in the MSSMRN with the MSW large angle solution

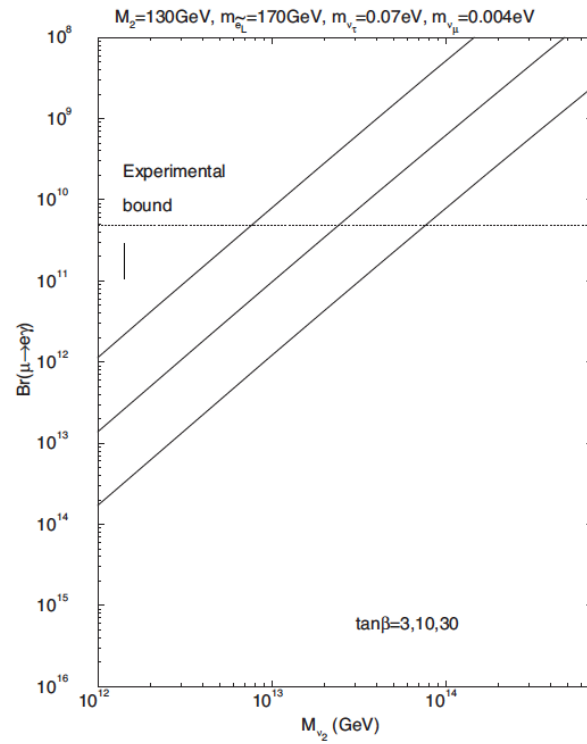


図 1.4: SUSY-Seesaw 模型で予測される分岐比 [1]。

1.2.3 ミューオン電子転換過程

ミューオンが物質中で静止すると、ミューオンは原子核に捕獲されて、電子のように軌道上を周回するミュオニック原子が形成される。 μ^- は X 線を放射しながら励起状態から 1s 基底状態に遷移し、その後通常のミューオン崩壊 (Decay in Orbit; DIO)

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e \quad (1.3)$$

または、原子核捕獲反応、

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1) \quad (1.4)$$

を経る。この式中の A, Z はミューオンの静止した原子核の質量数及び原子番号である。その一方でニュートリノを伴わない過程、

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z) \quad (1.5)$$

をミューオン電子転換現象と呼ぶ。この過程の初期状態のミューオンレプトン数は 1 で終状態では 0 であるため、cLVF 過程と言える。なお、原子核が一旦励起状態に至るか、直接基底状態に至るかの 2 つの場合があるが、後者の場合の方が多く、コヒーレント捕獲と呼ぶ。この過程の分岐比は原子核捕獲に対して、以下の様に定義される。

$$Br(\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)) \equiv \frac{\Gamma(\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z))}{\Gamma(\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1))} \quad (1.6)$$

この定義式の Γ は崩壊幅を表している。cLVF 過程であるので、上述のように SM では強く制限されているが、SUSY-GUT, SUSY-Seesaw のような BSM ではその分岐比は 10^{-15} 程度まで上昇することが予測されている。

1.3 COMET 実験 [3]

我々が計画している COMET 実験は茨城県東海村にある J-PARC 行われる予定であり、その目的は、ミューオン電子転換過程をより高い精度で測定することである。実験は COMET 実験 Phase-I と Phase-II の 2 段階に分けて行う予定である。Phase-I は 2016 年、Phase-II は 2020 年始動予定である。目指す実験感度は Phase-I では 10^{-15} 、Phase-II では 10^{-17} であり、Phase-II の実験感度は先行実験である SINDRUM I 実験 [4] の 1 万倍を目標としている。

1.3.1 ミューオン電子転換過程探索の原理

ミューオン電子転換過程が起こると、ミュオニック原子は特定のエネルギーを持った電子を放出する。そのエネルギー $E_{\mu e}$ はミューオンの質量 m_μ 、ミュオニック原子中の 1s 軌道の束縛エネルギー B_μ 、原子への反跳エネルギー E_{rec} 、原子核質量 M_A を用いて、以下の様に表すことができる。

$$E_{rec} \sim \frac{m_\mu - B_\mu}{2M_A} \quad (1.7)$$

$$E_{\mu e} = m_\mu - B_\mu - E_{rec} \sim m_\mu - B_\mu \quad (1.8)$$

E_{rec} は他のものと比べて極めて小さく無視できる。束縛エネルギー B_μ は原子核によって異なるため、電子のエネルギー $E_{\mu e}$ も原子核に依存する。COMET 実験ではミューオン静止表的にはアルミニウムを用いる予定であり、 $E_{\mu e} = 105.0$ MeV となる。ミュオニック原子から放出される電子のエネルギースペクト

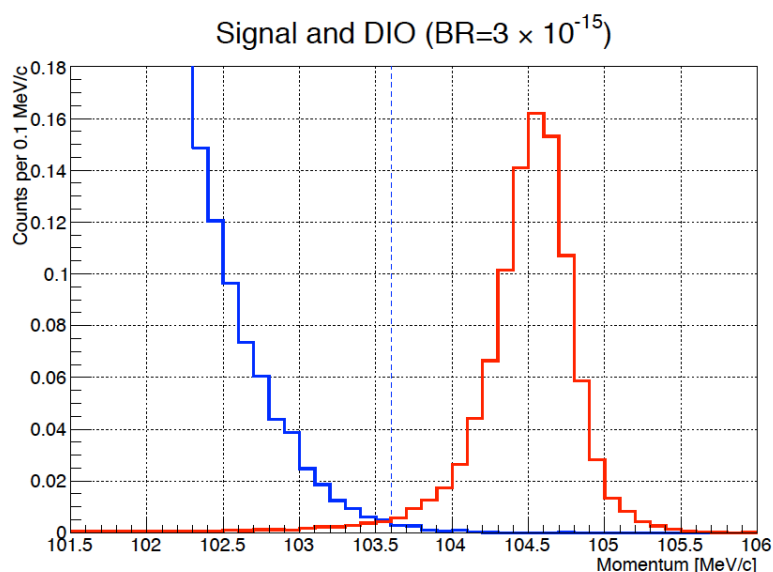


図 1.5: 青は DIO 由来の電子の運動量スペクトルで赤はミュオン電子転換過程由来の電子の運動量スペクトル。

ルを測定し、105 MeV 付近に有意なピークが観測できればミュオン電子探索過程は発見されたということになる。しかし、観測したいミュオン電子探索過程の背景事象によって観測は非常に難しくなる。その背景事象は上述の DIO であり、図 1.5 のように DIO によって放出される電子のエネルギーの最大値は $E_{\mu e}$ に接近する。ここで、図 1.5 はミュオン電子転換の分岐比を 10^{-15} と仮定したシミュレーション結果である。DIO は SM の枠内の事象であり、ミュオン電子転換過程と比べて極めて発生頻度が高い。このような状況の中で、ミュオン電子転換過程と背景事象を識別するためには、105 MeV 付近で高い運動量分解能を持つ検出器が必要である。

1.3.2 実験装置

J-PARC の全体図を図 1.6 に示す。J-PARC では世界最大強度の 1 MW の陽子ビームの生成が可能であり、中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノといった二次ビームを生成することができる。陽子はまず Linac により 400 MeV まで加速し、次に RCS(Rapid Cycling Synchrotron) と呼ばれるシンクロトロン加速器で 3GeV まで加速される。その後、陽子の一部は物質生命科学施設 (Material Science Experimental Facility) に転送されるが、残りはメインリングに入射され、再び加速される。現在は 30 GeV まで加速可能である。メインリングからハドロン実験施設に入射され、COMET 実験はこの施設で実験を行う予定であり、現在図 1.7 のような COMET 実験用の新しいビームラインが建設されている。

COMET 実験 Phase-I

上述の様に COMET 実験は Phase-I と Phase-II の 2 段階に分かれており、Phase-I では先行実験である SINDRUM II の 100 倍の実験感度を達成することを目指している。ミュオン電子転換過程の現在の上限値は、SINDRUM II によるものであり、その実験感度の 100 倍の実験感度を達成できれば、自ずと上限値の更新またはミュオン電子転換過程の発見を意味する。また、Phase-I では新たに建設されるビームの詳細な測定を COMET 実験の測定器を用いて行い、ビーム起源のバックグラウンドを定量的に見積もり、

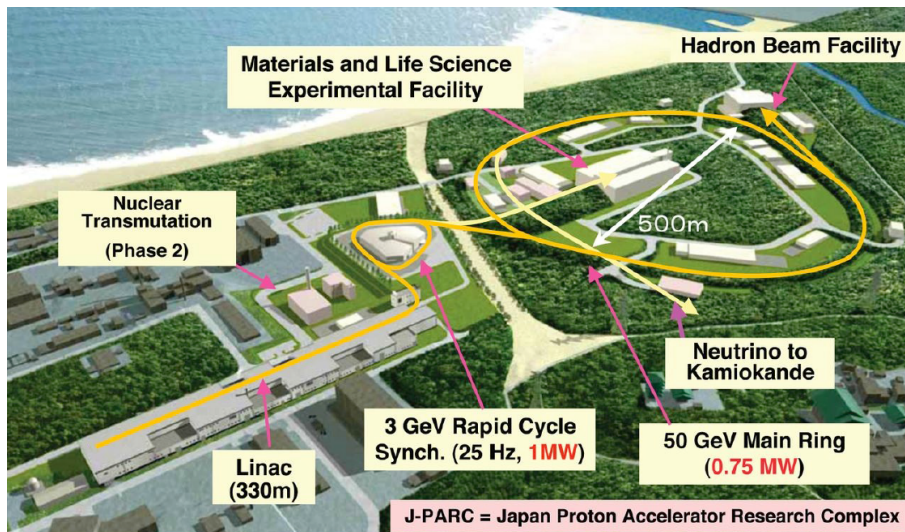


図 1.6: J-PARC の全体図。

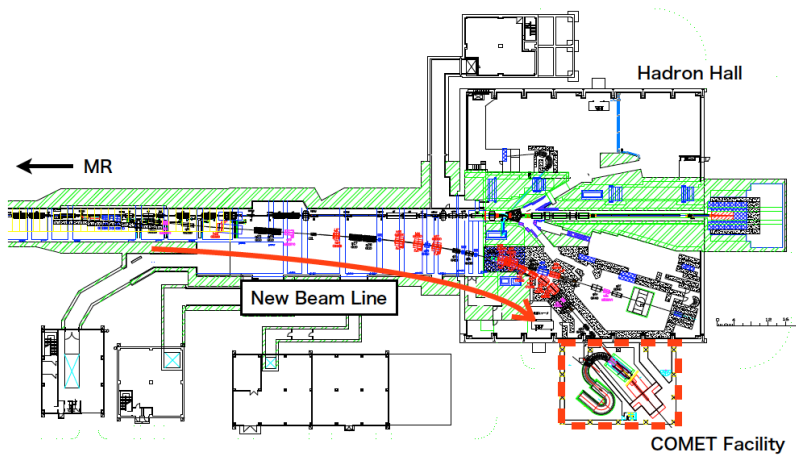


図 1.7: 建設中の COMET 実験用ビームラインの概念図。

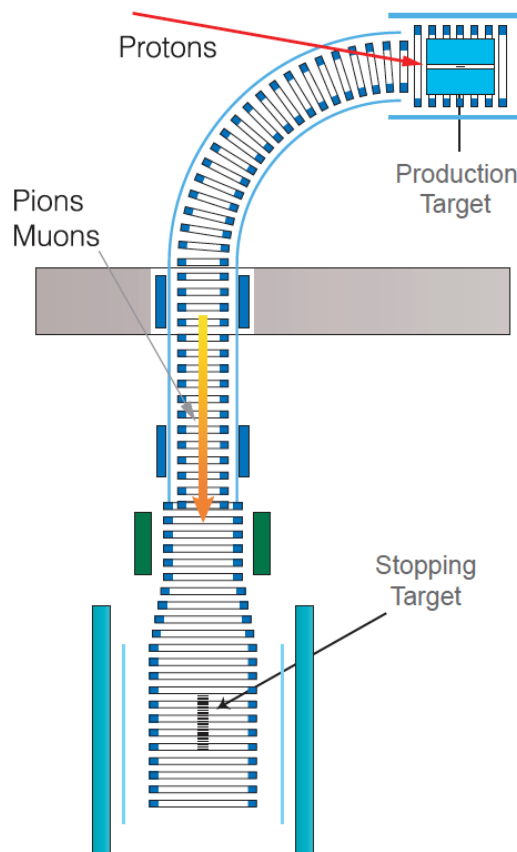


図 1.8: Phase-I のビームラインの概念図。

Phase-II に活かす予定であり、Phase-II に対しても非常に重要である。

Phase-I の概要図は図 1.8 の通りである。ミュオン輸送は Phase-II について述べる節で詳しく述べるが、まずパルス陽子ビームはパイオン生成標的に入射し、生成されたパイオンはミュオンに崩壊しながら輸送される。輸送ソレノイドによって輸送途中に 90 度曲がり、ミュオン静止標的であるアルミニウムに至る。その静止標的は図 1.9 のように円筒形ドリフトチェンバーに囲まれている。パイオン生成標的からミュオン静止ターゲットまでの距離は、後述する Phase-II よりも短いため、比較的多くのビーム由来の背景事象が混入する。背景事象は 2 つに分類することができる。1 つ目は、直接ビームに由来するものであり、2 つ目は静止標的から放出されるものである。後者は円筒形ドリフトチェンバーを用いたミュオン電子転換過程の探索と同時に行うことができる。その一方で前者は、円筒形ドリフトチェンバーでは不十分であり、Phase-II で使用予定のストロー飛跡検出器と電磁カロリメータのプロトタイプを用いて、ビームそのものの研究を行う。

COMET 実験 Phase-II

COMET 実験 Phase-II は上述の通り、2020 年に実施予定であり、Phase-I の実験感度の 100 倍である 10^{-17} の実験感度を目指す。Phase-II の全体像は図 1.10 の通りである。ビームを長く輸送することによりビーム由来のバックグラウンドを Phase-I よりも軽減することができ、パルス陽子ビームの強度を上げることが可能となる。

Phase-II 実験の測定器は、背景事象を抑えるソレノイドスペクトロメータと検出器群を備える。パルス

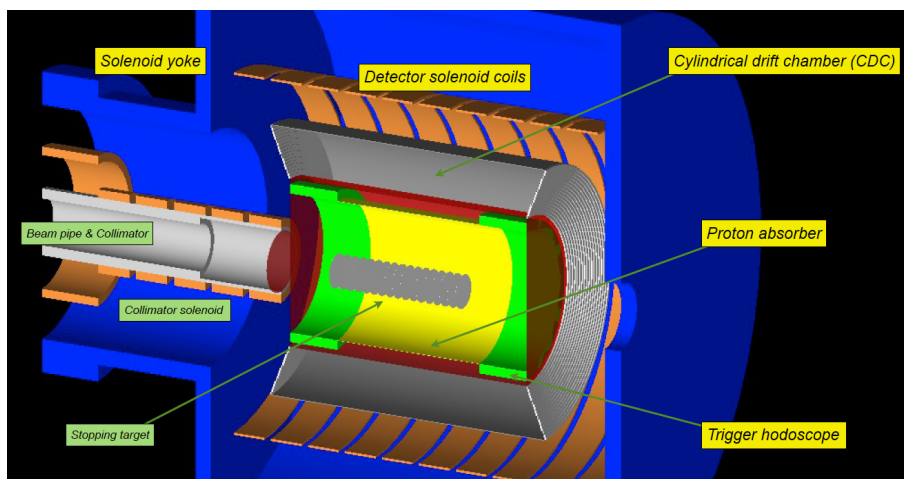


図 1.9: Phase-I で円筒形ドリフトチェンバーを設置した概念図。

陽子ビームはパイオン生成標的に照射され、そこで生成されたパイオンはミュオン輸送ソレノイドを通過しながらミュオンに崩壊する。その間に 90 度湾曲ソレノイドを 2 度経ることにより粒子の電荷と運動量毎に軌道が異なるため、最適な運動量のみを選別可能となる。更に、コリメータを利用することにより背景事象を抑える。図 1.11 のように、コリメータ後方にはミュオン静止標的ソレノイド、スペクトロメータソレノイド、検出器ソレノイドが続く。上述の様に、ミュオンはアルミニウム製のミュオン静止標的に静止し、ミュオン電子転換過程を生じると 105 MeV の電子を放出する。ソレノイドスペクトロメータで更に検出器に至る粒子の運動量に閾値を設けてある。最下流にはストロー飛跡検出器と電磁カロリメータが設置されており、運動量とエネルギーを測定することでミュオン原子が放出した電子の信号を検出する。

パルス陽子ビーム

ミュオン電子転換過程の探索には、高い統計精度が必要であり、そのためには大強度ビームが必要である。またビーム由来の背景事象を抑えるため、ビーム照射時間と測定時間を分離させることが望ましい。それらを実現するには、バンチごとに分かれたパルス状のビームが必要である。まずメインリングで陽子を 8 GeV に加速し、遅い取り出しにより ~ 2 s かけてハドロン施設へ輸送する。ここで 8 GeV にする理由は、反陽子の生成とビームバンチ間に存在する残留陽子を最小限に抑えるためである。陽子のエネルギーが 10 GeV を越えると反陽子生成率が急増してしまう。その一方で 8 GeV より低いエネルギーは曲がりやすいため、残留陽子を抑えやすいが、ビームエミッタンスが大きくなってしまう。

バンチ構造は RCS のバケット 2 つのうちの 1 つを使用し、メインリングでは 9 つのバケットの内の 4 つが図 1.12 左図のように 100 ns 長のバンチで埋められる。バンチが実験装置に入射して暫くは装置内がビーム起源の背景事象によって満たされる。図 1.12 右図中の Prompt Particle がそれを表している。ミュオン原子の寿命は 880 ns であり、その背景事象を避けるために測定には測定時間窓を設け、測定時間窓はビーム照射後の 700 ns - 1100 ns の間であり、次のバンチは 1.17 μ s 後に設定されている。測定時間窓中に陽子がパイオン生成ターゲットに入射すると、測定精度が下がるため、上述のように残留陽子の割合は極力低くする必要があり、現在の目標値は 10^{-9} である。

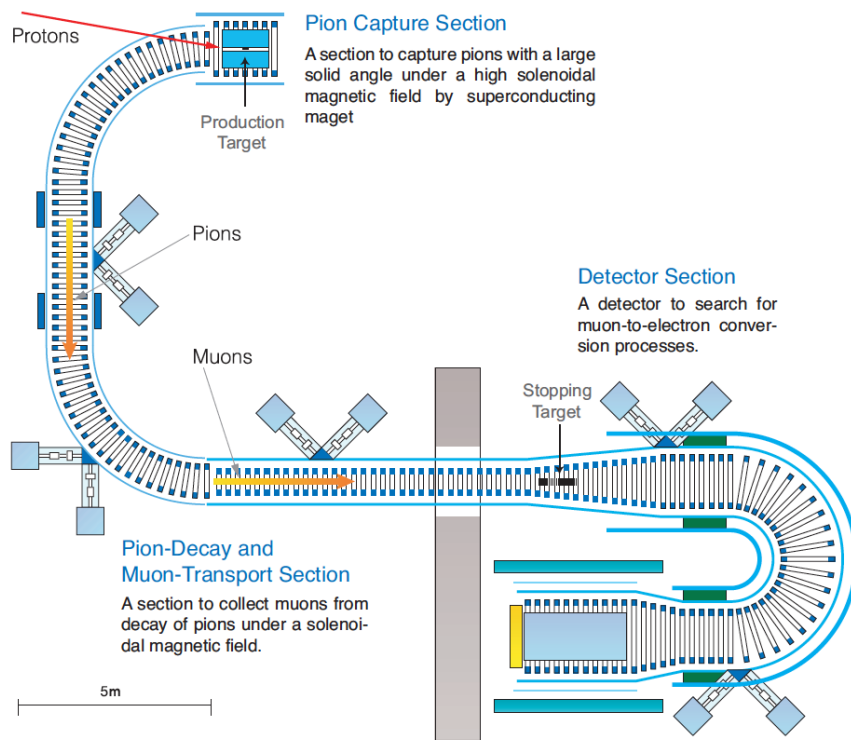


図 1.10: Phase-II のビームラインの概念図。

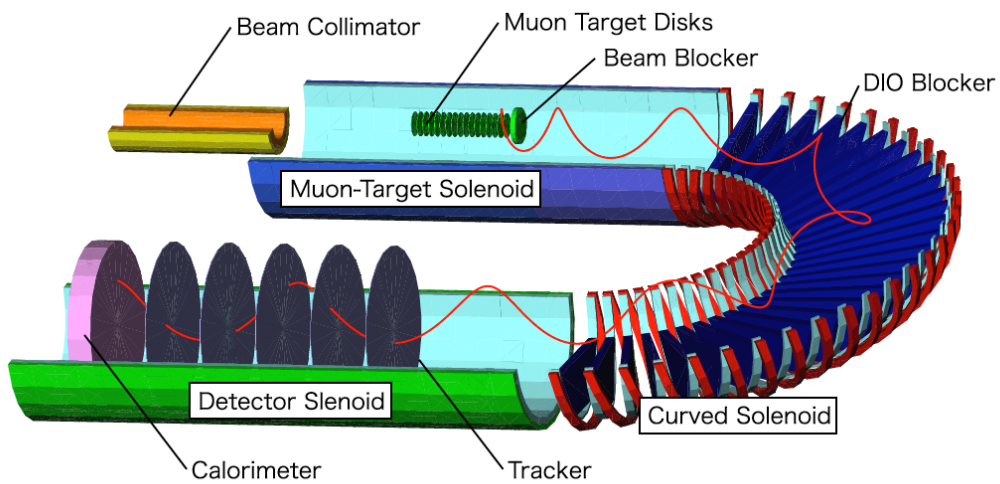


図 1.11: Phase-II ビームラインの下流付近の様子。

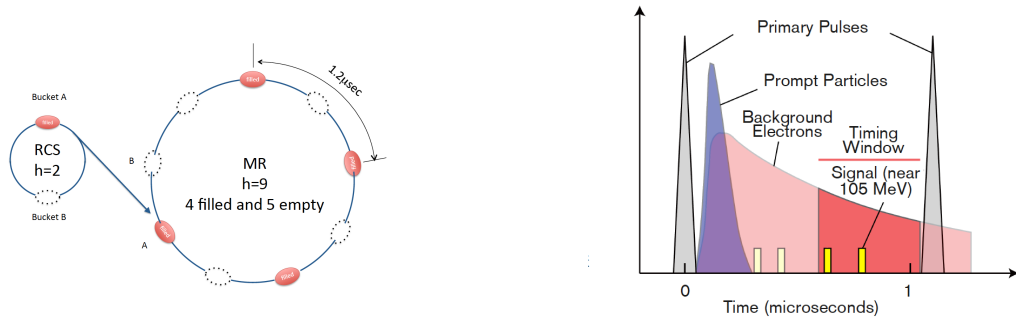


図 1.12: 左図は RCS とメインリングのバンチ構造、右図はパルスビームと時間窓の概念図。

パイオン生成標的とソレノイド

パイオン生成標的は、メインリングから取り出された 8 GeV 陽子から低運動量の負電荷パイオンを大量に生成するようにデザインされている。高いパイオン生成効率を実現するため、その材質には高い質量数が求められる。Phase-I 及び Phase-II 実験で計画されているビーム強度を考慮して、装置の放射化や熱シールド装置のコストを最小限に抑える材料として、Phase-I 実験では IG-43 グラファイトの使用が計画されている。

パイオン生成標的はパイオン捕獲ソレノイド中に設置される、標的周りにはソレノイド方向に 5 T の強磁場がかけられており、可能な限り多くのパイオンを捕獲する。磁場はパイオン輸送ソレノイドの方向に進むにつれて弱くなり、接続部分では 3 T となる。この磁場勾配によりパイオンの運動量方向をソレノイド軸方向に収束させることができる。

ミュオン輸送ソレノイドとミュオンビームコリメータ

捕獲ソレノイドから出てくるパイオンは輸送ソレノイドへ入射する。輸送ソレノイドに要求されることは主に 3 つある。1 つめは、全てのパイオンがミュオンに崩壊するために必要な長さを持つこと、2 つめは、静止標的にとって最適な運動量 40 MeV/c のミュオンに対する輸送効率が高いこと、そして 3 つめは、静止標的前のミュオン崩壊による背景事象を抑えるため、75 MeV/c 以上の運動量を持つミュオンを除去できることである。曲がったソレノイド中を通る荷電粒子のらせん軌道の中心は以下の式のように D ドリフトする。

$$D = \frac{1}{qB} \left(\frac{s}{R} \right) \frac{p_L^2 + \frac{1}{2}p_T^2}{p_L} \quad (1.9)$$

$$= \frac{1}{qb} \left(\frac{s}{R} \right) \left(\frac{p}{2} \right) \left(\cos \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right) \quad (1.10)$$

ここで、 q は荷電粒子の電荷、 B はソレノイド軸方向の磁場、 s, R はそれぞれ曲がった経路長とその曲率半径を表し、その角度 $\theta_{bend} = \frac{s}{R}$ である。 p_L, p_T はそれぞれ粒子の運動量 p の縦方向と横方向の成分で、 θ はそれらのピッチ角を表す。電荷の正負が異なると、上下のドリフト方向が逆になるため、これを利用して、負電荷ミュオンのみを取り出せる。そのため、ミュオンビームコリメータを設ける。ただし、最適な運動量 p_0 及び、ピッチ角 θ_0 を持つ負電荷ミュオンも式 1.10 により、軌道中心がソレノイドが離れてしまうので、以下の磁場 B_{comp} を垂直方向に掛けることで補正する。

$$B_{comp} = \frac{1}{qr} \frac{p_0}{2} \left(\cos \theta_0 + \frac{1}{\cos \theta_0} \right) \quad (1.11)$$

ミュオン静止標的

ミュオン静止標的は検出器部ソレノイドの中央に位置する。ミュオンの静止効率及び、信号電子が後方のソレノイドスペクトロメータに移動するときのアクセプタンスを最大にし、その際電子が損失するエネルギーが最小になるように設計されている。静止標的には高い原子量 Z を持つ材料を用いることはできない。ミュオン原子の寿命は Z の増加とともに短くなる一方、ビーム起源の背景事象を避けるために、上述の通り時間窓が必要である。そのため、880 ns の寿命を持つ $Z=13$ のアルミニウムが適している。

静止標的の形状は円形の平坦な薄膜プレートで、半径 100 mm で厚さは 200 μm である。Phase-I 実験では 17 枚を円筒形ドリフトチェンバー内部に設置する予定である。

ソレノイドスペクトロメータ

標的の下流のソレノイド内部に存在する粒子には、静止標的を外れて侵入してくるミュオンや、静止標的から発生する DIO 電子が未だに多く含まれている。ソレノイドスペクトロメータは式 1.10 の原理や、最適なソレノイドとコリメータを用いることで 80 MeV/c 以下の運動量の粒子を除去することができる。これにより、下流に位置するストロー飛跡検出器と電子カロリメータの計数率を効果的に下げてパイルアップ事象を抑える。

ストロー飛跡検出器

詳しくは第 2 章で述べるので、ここでは簡単に触れておくだけにする。ストロー飛跡検出器は COMET 測定器の最下流に位置しており、1 T の磁場中に設置される。ストロー飛跡検出器は荷電粒子の通過した位置を測定する。その位置情報から飛跡を再構成し、磁場中の荷電粒子の曲率半径を求めることにより、運動量を特定する。105 MeV 付近で高い運動量分解能が要求されており、そのために様々な工夫がなされている。

電磁カロリメータ

電磁カロリメータの主な役割は、ストロー飛跡検出器と併せた粒子の識別と、トリガーの生成である。ストロー飛跡検出器は高い運動量分解能をもつが、運動量の情報だけでは粒子の識別はできない。そのため、電磁カロリメータで粒子のエネルギーを測定することにより粒子の識別が可能となる。電磁カロリメータは検出器ソレノイドの最下流を覆うように、セグメント化された無機結晶シンチレータを図 1.13 敷き詰める。セグメント化して図 1.13 のように設置することにより荷電粒子の位置の測定も行うことができ、ストロー飛跡検出器と併せた測定器としても利用できる。また、大量の荷電粒子が短時間の間に検出器部分に入射するため、パイルアップ事象を分離するためにもセグメント化は重要である。

電磁カロリメータは、自身が測定した粒子のエネルギーの値から、COMET 測定器全体に対してトリガーを生成する。そのトリガー信号により全ての COMET 測定器は、そのタイミングで記録した値をデジタル化し記録を行う。トリガーの生成効率は実験の精度に大きく影響するため、電磁カロリメータにとって最も重要である。トリガーを生成するかの判断を迅速に行うことが必要であり、エネルギーだけでなく、時間情報に対しても高い測定性能が求められる。

電磁カロリメータは 105 MeV において高いエネルギー分解能や、高い位置分解能を達成するためにはサンプリング型ではなく全吸収型カロリメータである必要がある。そのため、COMET 実験用電磁カロリメータには無機結晶シンチレータを用いる。現在無機結晶シンチレータには LYSO を用いる予定である。シンチレータとは、内部で荷電粒子が相互作用により損失するエネルギーを吸収し、それに比例した光子を出力する物質である。LYSO は放射長が長いため、入射する電子が作る電磁シャワーが小さくなり、高い位置分解能が得られる。

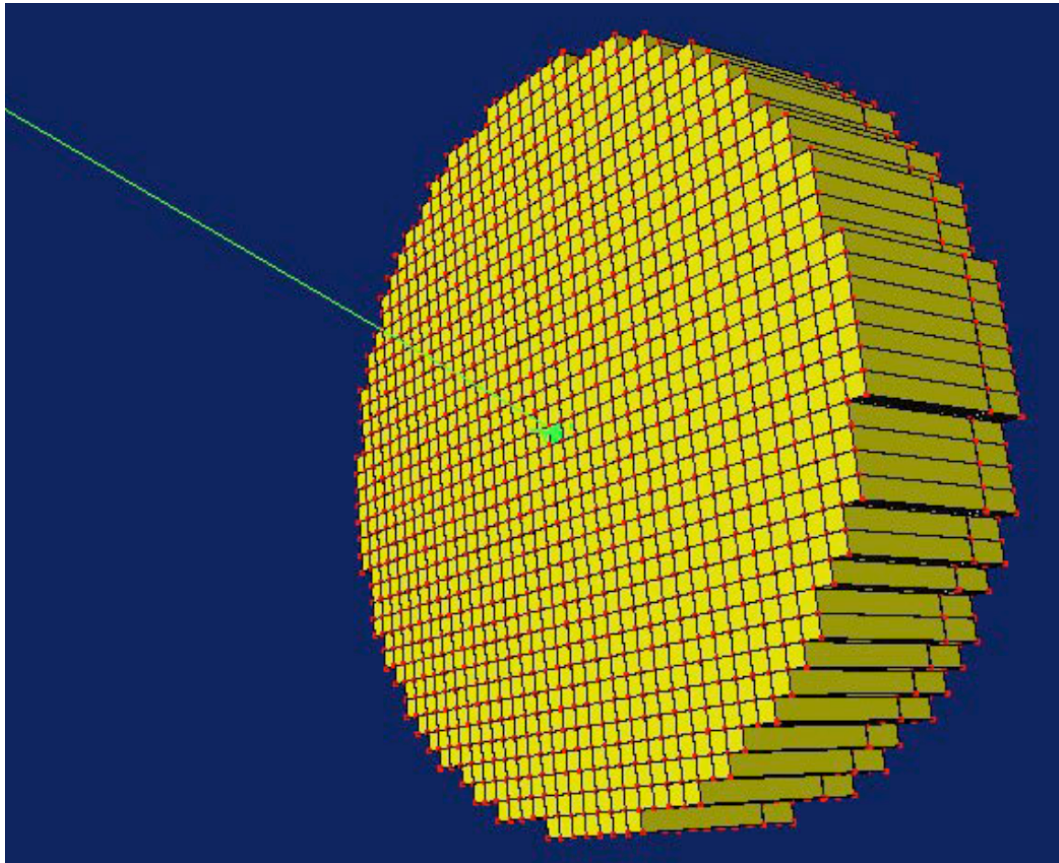


図 1.13: セグメント化された電磁カロリメーターの設置の様子。

結晶で発生する光子を測定するためには光子検出器が必要であり、光電子増倍管 (PMT) とよばれるものがよく用いられる。PMT は $10^5 - 10^7$ と高いゲインを持つが、ソレノイドによる 1T の高磁場中の安定動作は、その構造上期待できない。そのため、高磁場中でも安定動作が可能なシリコン半導体である APD (Avalanche Photo Diode) を光検出器として用いる。

第2章 ROESTI

2.1 実験的要求

2.1.1 ストローチューブトラッカー

COMET 実験では、背景事象とミューオン電子転換過程由来の信号を識別するために、105 MeV で 200 keV/c 以下の運動量分解能を持つ検出器が必要である [3]。その要求を満たすために、高い運動量分解能を備えたストローチューブトラッカーと呼ばれるガス飛跡検出器を用いる。ストロー飛跡検出器は図 2.1 のように、5つのステーションから構成される。図 2.2、図 2.3 のように、1つのステーションは X 軸方向 2層と Y 軸方向 2層のストローチューブから成る層構造になっており、1層当たり約 100本のストローチューブで構成される。ストローチューブ間を真空にすることや、その材質に厚さ 20 μm 以下のマイラーを用いることにより、多重散乱を極力減少させて、105 MeV で 200 keV/c 以下という高い運動量分解能を実現する。ストローチューブトラッカーの仕様は表 2.1 にまとめておく。

表 2.1: ストローチューブトラッカーの仕様。

ストローチューブの直径	9.75 mm
ストローチューブの厚さ	$\leq 20 \mu\text{m}$
ストローチューブの長さ	0.6 m から 1.2 m
チャンネル数	~2000ch
位置分解能	~100 μm
ドリフト速度	~5 cm/ μsec
ガスの種類	Ar : C ₂ H ₆ = 50 : 50
気圧	1 気圧

2.1.2 ストローチューブトラッカーの読み出し回路に対する要求

ストローチューブトラッカーの読み出し回路に対する要求として以下に示す5つが挙げられる。

1. ストローチューブトラッカーの位置分解能を制限しない時間分解能を備えていること。
2. パイルアップ事象を識別可能であること。
3. ミューオン電子転換過程由来の電子による信号を識別できること。
4. 真空フィードスルーの数を最小化できること。
5. 高い放射線耐性と磁場耐性を備えていること。

ストローチューブトラッカーに必要な位置分解能は上記のように 100 μm であり、ガス中の電子のドリフト速度は 5 cm/ μsec 程度である。この位置分解能を制限しないためには、ドリフト速度に揺らぎが無いと仮

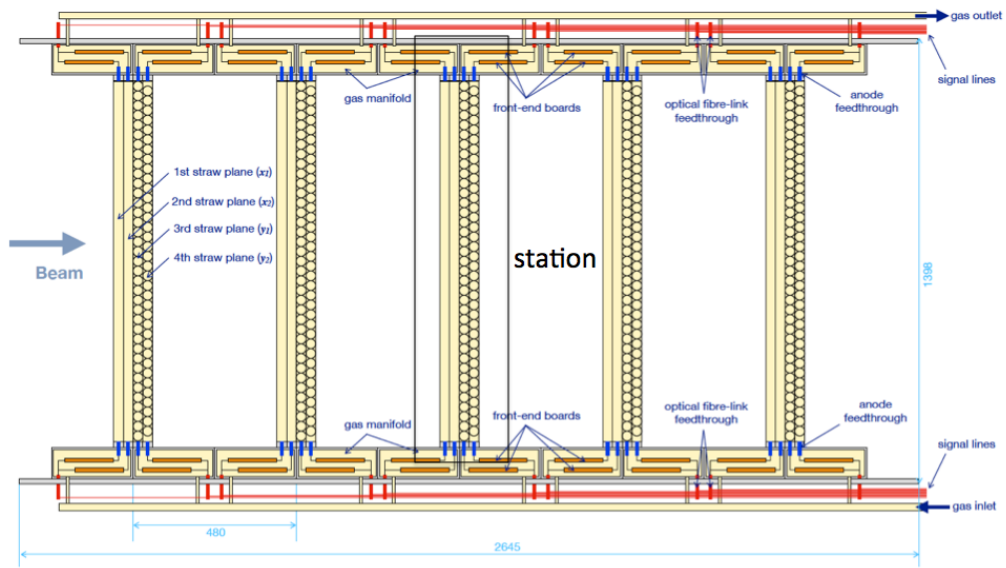


図 2.1: ストローチューブトラッカーの側面の概念図。5つのステーションから構成される。

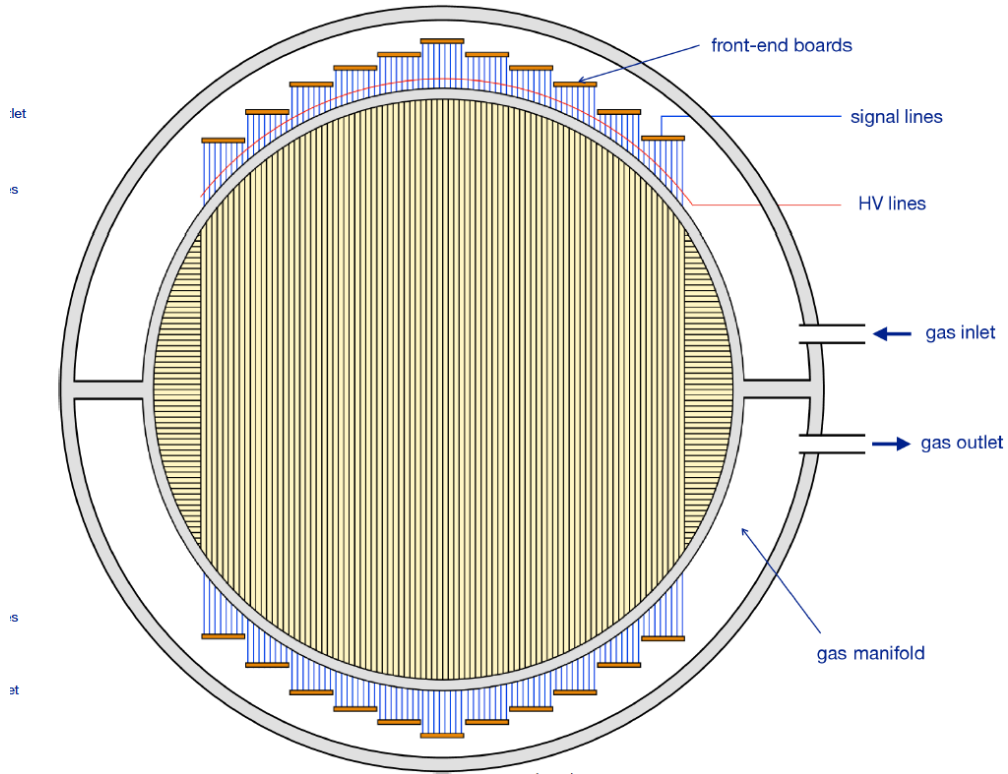


図 2.2: ステーションの概念図。

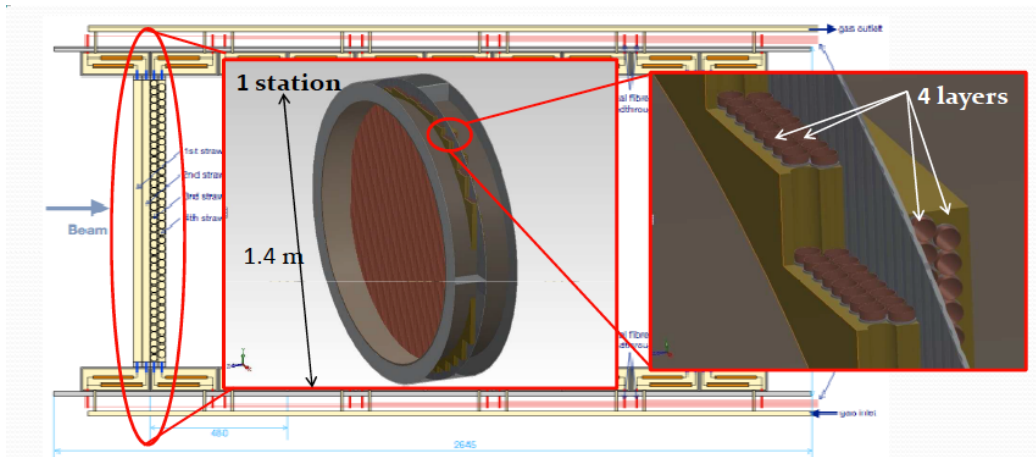


図 2.3: ステーションの概念図。X 軸方向と Y 軸方向のストローチューブから構成される 4 層構造である。

定すると、ストローチューブトラッカーの読み出し回路は 2 ns 以下の時間分解能を備えていることが要求される。

第 1 章で述べたように、COMET 実験装置全体でパイルアップ事象を極力軽減させようとはしているが、完全に無くすことは困難であり、読み出し回路を使ってパイルアップ事象を判別できることが必要である。例えば、読み出し回路にパイルアップ識別能力がなく、ADC 値の積分値しか記録できなければ荷電粒子がストローチューブ内部で損失したエネルギーを正しく見積もることができない。

COMET 実験の検出器は基本的に真空中に設置され、ストローチューブトラッカーも例外ではない。読み出し回路はストローチューブトラッカーと接続されるガスマニホールド内部に設置される予定であり、ガスを流し続ける予定であるが、真空フィードスルーを通したケーブルを介してデータを PC に転送する必要がある。COMET 実験では読み出し回路が百数十枚設置される予定であり、それら 1 つ 1 つのデータを直接 PC に転送した場合数百という真空フィードスルー用の穴が必要になり、ガスマニホールドの小型化が難しくなる。そのため真空フィードスルーを可能な限り少なくすることが要求されている。ミュオン電子転換過程由来の電子が生成する信号は、読み出し回路のダイナミックレンジに含まれていることが要求される。詳しくは後述するが、ミュオン電子転換過程由来の電子が生成する電荷量はランダウ分布に従うことが予測でき、その 95%以上がストローチューブトラッカーの読み出し回路のダイナミックレンジに入ることが要求値とする。

第 1 章で述べたように、ストローチューブトラッカーは、1 T の磁場中に設置される。読み出し回路もそのような環境で正しく動作する必要がある。また、COMET 実験では、中性子とガンマ線が発生することがシミュレーションにより予測されており、それらに対する耐性を備えている必要がある。第 4 章でも述べるが、Phase-I 実験が 100 日間のビームタイムだとすれば、90 度ソレノイド直後の中性量とガンマ線量の総量はそれぞれ $\sim 10^{11}$ neutron/cm², ~ 20 Gy と予測されており、そのような環境下で正常に動作することが求められる。

2.2 ROESTI

上記の要求を基に読み出し回路の開発を進めており、プロトタイプ自体は既にできている。(図 2.4) この開発は段階的に進めており、物理的な要求である上記の 1 から 4 を満たすことを目標にプロトタイプはデザインされている。その読み出し回路は ROESTI(Read Out Electronics of Straw Tube Instruments) と名付けられている。

ROESTI プロトタイプの手号の流れを図 2.5 に示す。入力された手号は、フロントエンド部で I-V 変換、パルス整形処理を行い、波形デジタルイザーではフロントエンド部の出力のサンプリングを行う。FPGA では、データサブレス等を行い、SFP コネクタを介しイーサネット経由で PC へデータ転送を行う。

フロントエンド部は、Belle-II 実験で開発された ASIC である ASD(Amp Shaper Discriminator)[16] を用いている。ASD は全 8 チャンネルを搭載しており、増幅率は 1.1 V/pC であり、アナログ出力とデジタル出力を搭載しており、デジタル出力はディスクリミネート出力である。現在のファームウェアではディスクリミネート出力を用いることにより、ヒットチャンネルを決定している。16 チャンネルの内の 1 チャンネルでもヒットがあればデータを取得する。

波形デジタルイザーには、PSI で開発されたアナログメモリである DRS4[9, 10] と ANALOG DEVICES 社製 ADC(AD9637)[11] を用いる。DRS4 は 1024 個のキャパシタが搭載されており、それらが各時刻の波高に比例した電荷を蓄える。動作原理などは第 3 章で述べる。ADC には、DRS4 の電荷を 40 MSPS のサンプリングレートで読み出しデジタル化を行う。このように波形を記録することにより、パイルアップイベントの識別が可能になる。

FPGA には Xilinx 社の Spartan-6(XC6SLX150T-2FG(G)676) を用いている。FPGA では、データサブレス等を行う。また SiTCP[12] が実装されており、ROESTI と PC 間の通信をイーサネット経由で行うことを可能にしている。上述の通り SFP コネクタが搭載されており、光ケーブルを介して PC と通信を行う。ROESTI は 1 T の磁場中に設置されることを想定して、PC との通信には光ケーブルを用いている。

現段階では未実装であるが、将来的には真空フィードスルーの数を減らすために、デイジーチェーン接続を行う予定であり、そのことを想定して、SFP コネクタを 2 つ実装している。図 2.6 のように複数個の ROESTI があり、PC と通信を行いたい場合、従来は各 ROESTI が直接 PC にアクセスするしかなかったが、デイジーチェーン接続が実現できれば、ROESTI どうしを数珠つなぎすることで、PC と直接アクセスするものは 1 つだけで十分になる。それによって真空フィードスルーの数の軽減が可能になる。

上述の通り FPGA 内に SiTCP と呼ばれるモジュールを実装することでイーサネット通信を実現している。サンプリングデータの転送には TCP 通信を利用する。TCP 通信とは、やりとりを行う送信側と受信側のコネクションを確立してから転送を行う通信である。TCP 通信の転送速度は 1 Gbps となっている。読み出し回路の初期化や設定は UDP 通信を利用する。UDP 通信とは、やりとりを行う送信側と受信側のコネクションを確立せずにデータパケットを送る通信である。したがって UDP 通信を利用する際にはデータパケットが正しく届いたかどうかの確認を行う必要がある。

ROESTI プロトタイプは以上のような機能を備えており、入力波形を取得し、それを PC に転送することができる。

2.3 実験的要求の再考

ROESTI プロトタイプの手設計が行われた時点のストローチューブトラッカーと現在のものではデザインが異なっている。具体的には、以前のストローチューブトラッカーのストローチューブは、直径が 5 mm であったのに対し、上述したように現在のバージョンでは、直径が 9.75 mm である。その変更に伴い荷電粒子によって生成される電荷量も変化することが予測される。ストローチューブの直径が 5 mm の時、 105 MeV の電子によって生成されるガス増幅後の最小電荷量は 16 fC 、平均電荷量は 480 fC と予測されており、ROESTI もその値に合わせて設計がなされている。ストローチューブの直径が 9.75 mm の場合に、 105 MeV の電子により生成されるガス増幅後の電荷を見積もり、ROESTI のダイナミックレンジに対する要求を明確にする必要である。

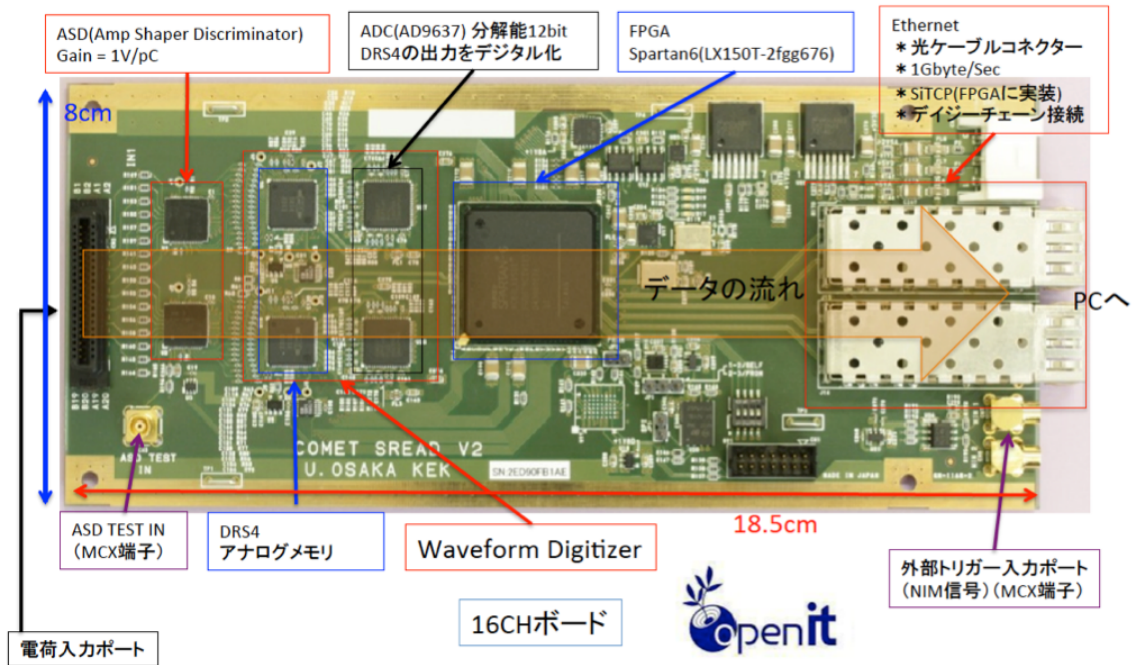


図 2.4: ROESTI の全体像。

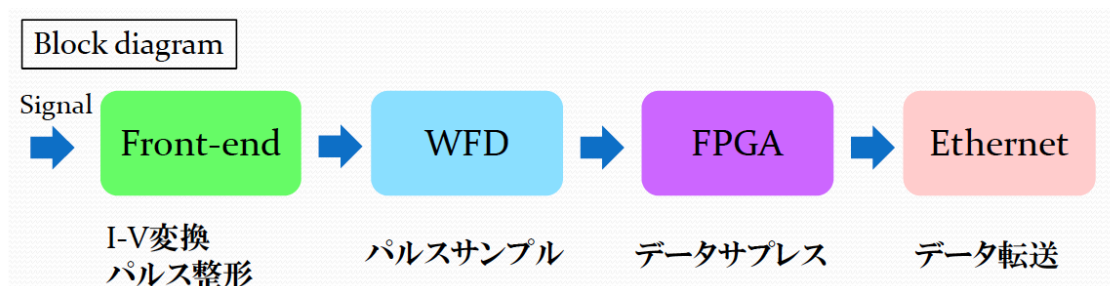


図 2.5: ROESTI の信号処理の流れ。

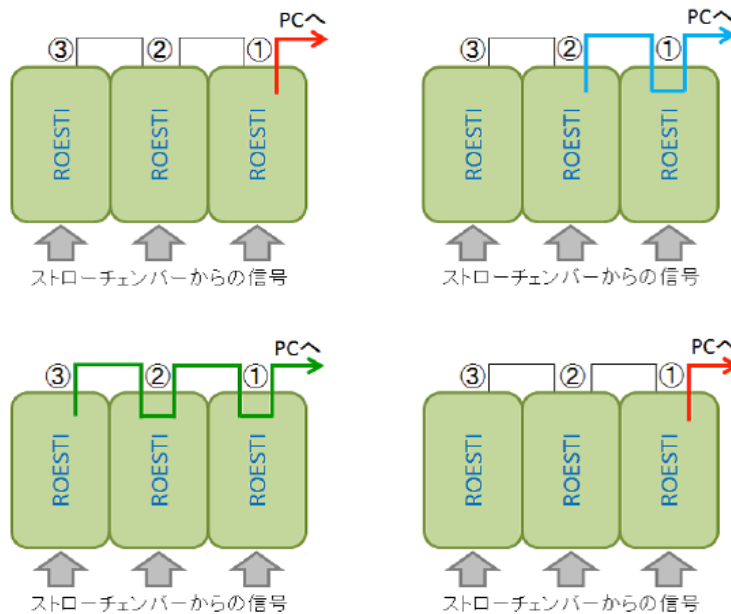


図 2.6: デイジーチェーン接続時データ転送の概念図。まず PC 側の ROESTI1 のデータから PC へデータ転送を行う。ROESTI1 のデータ転送が終わると、ROESTI2 は ROESTI1 を介し、PC へデータ転送を行う。更に、ROESTI2 がデータ転送を終えると、ROESTI3 が ROESTI2 と ROESTI1 を介し、PC へデータを転送する。更にその転送が完了すると、ROESTI1 が PC へデータを転送する。以上の流れを繰り返す。

2.3.1 ストローチューブトラッカーを用いた荷電粒子測定試験

ストローチューブトラッカーのガスゲイン測定

ガスゲイン測定を行い、ガス増幅率を求めることにより、ストローチューブトラッカーの信号の電荷から荷電粒子が生成した 1 次電子の総数を求めることができ、荷電粒子がストローチューブ内部で損失したエネルギーを求めることが可能になる。詳しくは後述するが、105 MeV の電子により生成されるガス増幅後の電荷量を見積もるために、宇宙線中の荷電粒子が生成する信号を用いる。その結果の妥当性を確かめるためには、宇宙線中の荷電粒子がストローチューブ内部で損失したエネルギーを見積もる必要がある。以上のような理由でガスゲイン測定を行った。

ストローチューブトラッカーのガス増幅の原理は、比例計数管と同様である。アノードワイヤーがストローチューブの中心軸になっており、それを囲むチューブがカソードとなる。アノードワイヤー付近は強い電場がかかっており、荷電粒子は加速される。そのときに電子雪崩が発生し、ガス増幅が起こる。ストローチューブトラッカーのガスゲイン測定では線源 Fe-55 を使用する。Fe-55 は、安定同位体である Fe-56 よりも中性子が 1 つ少ない放射性同位体で、電子捕獲によって Mn-55 になる。Fe-55 は、この反応により外側の殻から電子が遷移するときに Mn の $K\alpha$ 線に相当する 5.9 keV の特性 X 線が生じる。5.9 keV の特性 X 線がストローチューブ内に入射すると、Ar 原子と反応して、Ar 原子から 2.7 keV の電子が放出される。電子を放出した Ar 原子は励起状態になる。さらに、励起状態から基底状態にエネルギー準位が落ちる時に、特性 X 線を放出する。その特性 X 線によって、85%程度の確率で自己電離を起こし、Ar 原子は 3.2 keV の電子を放出する。残りの 15%程度の確率では、特性 X 線による自己電離を起こさず、特性 X 線は検出器の外へ逃げる。つまり、85%程度の確率で Ar 原子から計 5.9 keV の電子、15%程度の確率で計 2.7 keV の電子が放出される。

この測定では、ストローチューブ内は Ar : C₂H₆ = 50 : 50、1 気圧の混合ガスで満たした。Ar の W 値は

26.3 eV で、 C_2H_6 の W 値は 24.4 eV であり、放射線が各ガスに対して落とすエネルギーが分圧に比例するので、5.9 keV の特性 X 線によって、ガス中で生成される電子の総数 N_0 と、電荷の総量 Q_0 は以下の様に表せる。

$$N_0 = \frac{5.9 \times 10^3}{(26.3 \times 0.50) + (24.4 \times 0.50)} \sim 232 \quad (2.1)$$

$$Q_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times N_0 = 3.6 \times 10^{-17} [C] \quad (2.2)$$

ガスゲインは以下の様に定義する。

$$\text{ガスゲイン} \equiv \frac{\text{ストローチューブトラッカーによってガス増幅された電荷量}}{Q_0} \quad (2.3)$$

式 2.2 のように、 Q_0 の値を我々は知っているのでストローチューブトラッカーによって増幅された電荷量を測定すればガスゲインを知ることができる。

以上を踏まえガスゲイン測定を行った。既に直径 9.75 mm のストローチューブを用いたプロトタイプ [3] を使用した。このプロトタイプは基本的には実機と同様の構造をしているが、性能評価のため、X 軸方向 3 層 16 本、Y 軸方向 3 層 16 本の合計 32 本のストローで構成されている点のみ異なる。セットアップは図 2.7、2.8 の通りで、Fe-55 線源を用いた。ストローチューブ内は Ar : C_2H_6 = 50 : 50、1 気圧の混合ガスで満たされている。線源をストローチューブトラッカーのウィンドウの上に置いて、1 イベントあたり 1000 点のサンプリングを行うオシロスコープを用いて信号を読み出した。なおオシロスコープはセルフトリガーモードに設定している。ストローチューブのアノードワイヤーの印加電圧を 1700 V、1800 V、1900 V、2000 V、2100 V、2150 V と変更して、それぞれの印加電圧に対して 1500 イベントの波形データをオシロスコープで読み出し、ネットワークを介し PC でデータを取得した。

アノードワイヤーに 2000 V の電圧を印加したときの典型的な波形は図 2.9 の通りであり、ダブルピークのようなものが確認できた。ストローチューブトラッカーとオシロスコープのインピーダンス整合を取っていない為、反射が起きていることが予測される。

波形のピークは 500 番目付近で固定されており、0 番目から 300 番目の点の平均電圧をベースラインと定義し、ベースラインと電圧値の差分を足し合わせることで、波形の時間による積分値を求めた。なお波形が最小値を取る 50 点前から 200 点後までの 250 点を積分領域と定義している。オシロスコープのデータには時間情報が含まれており、横軸を時間情報に変換した上で積分を行った。その積分値を、オシロスコープの終端抵抗である 50Ω で割ることで、電荷 [C] に変換した。得られた電荷分布は図 2.10 の通りである。5.9 keV の特性 X 線によるピークをガウシアンでフィッティングして、その中央値をガス増幅された電荷量、標準偏差の値を増幅された電荷の誤差と考えた。 Q_0 の揺らぎを無視した場合、電荷量の誤差を Q_0 で割った値は、ガスゲインの誤差と考えることができる。よって、電荷量の誤差を Q_0 で割った値をガスゲインの誤差としている。それぞれの印加電圧のガスゲインは表 2.2 の通りでストローチューブのアノードワイヤーの印加電圧が 2000 V に対するガスゲインは 2.2×10^4 であり、ゲインカーブは図 2.11 のようになった。ストローチューブトラッカーのゲイン測定の印加電圧は 1700 V から 2100 V までであり、このような領域ではガスゲインは指数関数の印加電圧乗に比例することが予測される。図 2.11 は、指数関数でフィッティングしている。そのときのカイ 2 乗の値は 1.1 でフィッティングできていることを示しており、ゲインカーブは妥当、つまりそれぞれの印加電圧に対するガスゲインは妥当であることがわかる。また、フィッティングの結果から、印加電圧 V を用いてストローチューブトラッカーのガスゲインは以下のように表せる。

$$\text{ガスゲイン} = \exp(4.0 \times 10^{-3} \times V + 2.1) \quad (2.4)$$

宇宙線の MIP を用いたストローチューブトラッカーの電荷量測定

本節では、105 MeV 付近の電子がストローチューブに入射した場合にどの程度の電荷が ROESTI に入力されるのかを見積もることが目的である。

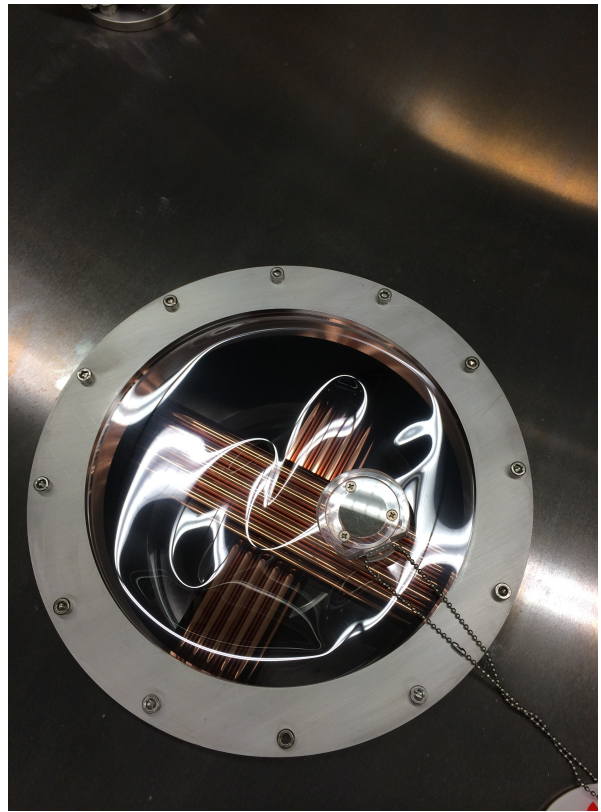
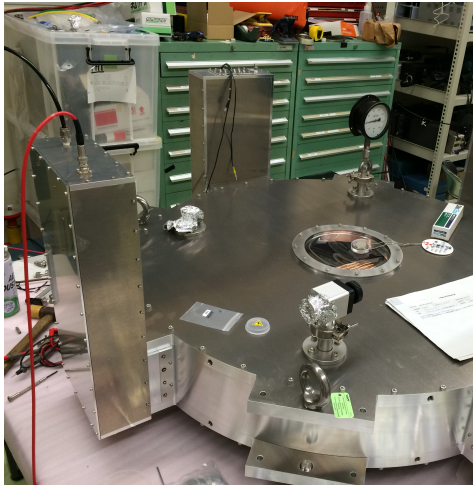


図 2.7: 左図はストローチューブトラッカーのガスゲインを測定したセットアップの全体像。右図は、左図の中央付近の拡大図で、ウィンドウの上に Fe-55 を置いた様子。

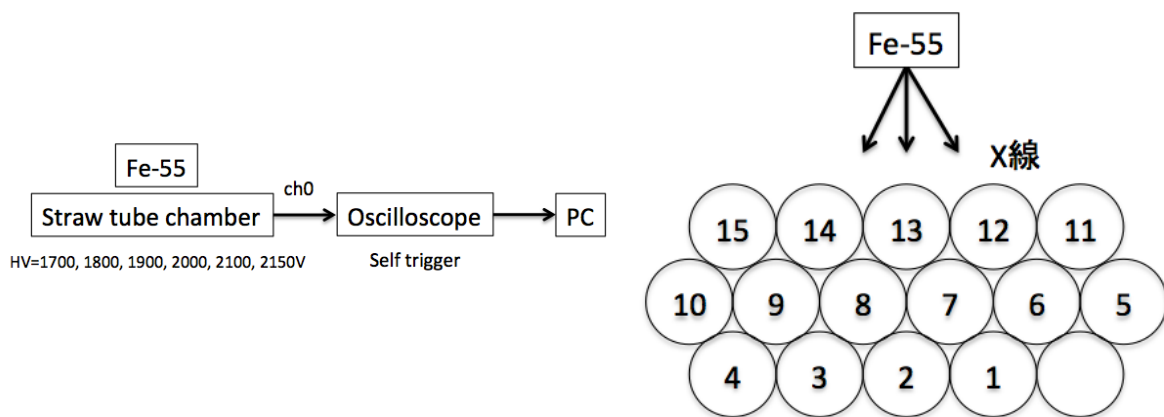


図 2.8: 左図が Fe-55 を用いたガスゲイン測定のプロック図である。右図はストローチューブトラッカーの断面図。図中のチャンネル 15 を使用して、ガスゲインの測定を行った。

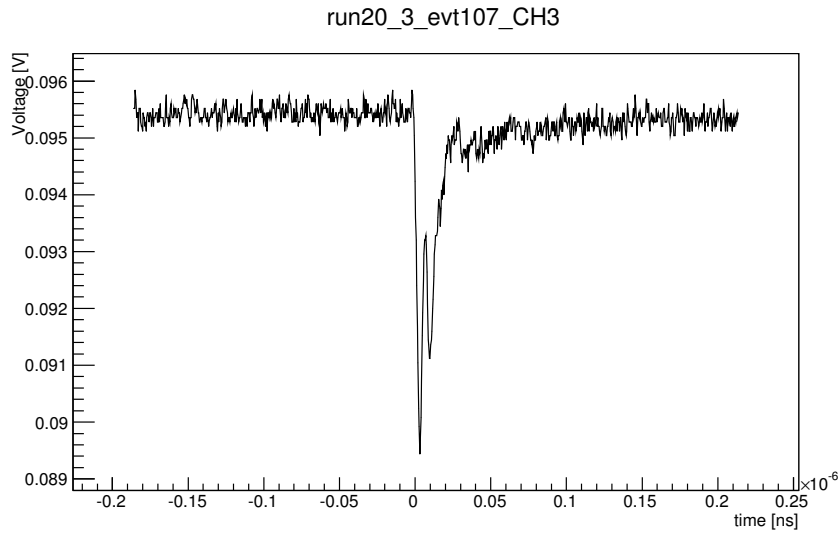


図 2.9: Fe-55 線源を用いたときのストローチューブトラッカーの典型的な信号の波形。

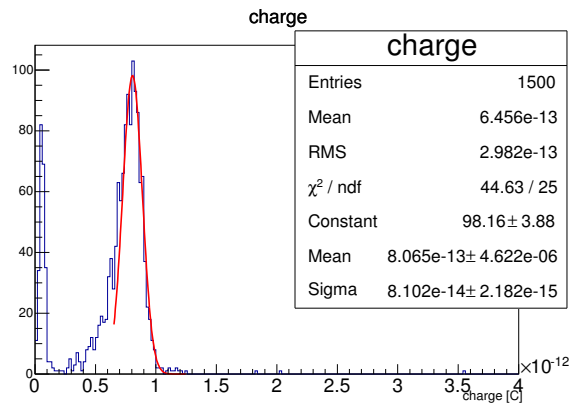


図 2.10: 線源 Fe-55 を用いて、アノードワイヤーに 2000 V の電圧を印加したときの電荷の分布。

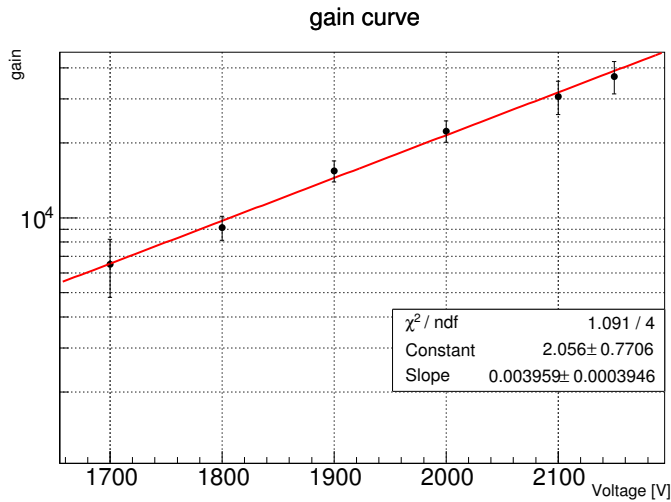


表 2.2: 印加電圧とガスゲイン。

印加電圧	ガスゲイン
1700V	0.65×10^4
1800V	0.91×10^4
1900V	1.5×10^4
2000V	2.2×10^4
2100V	3.1×10^4
2150V	3.6×10^4

図 2.11: ストローチューブトラッカーのゲインカーブ。

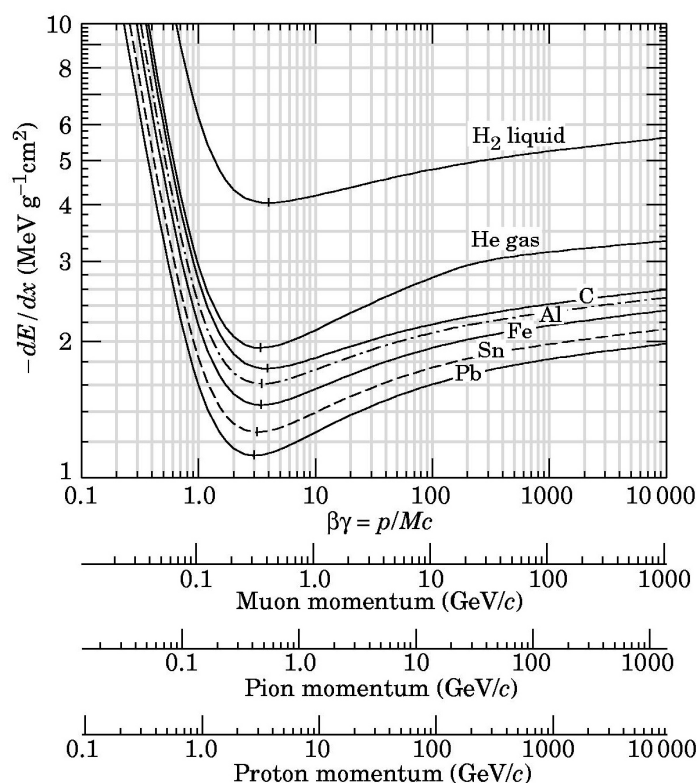


図 2.12: ベーテブロッホの式によるエネルギー損失の様子 [5].

荷電粒子は、ガス中の原子内部の電子とのクーロン力による相互作用により、エネルギーを損失する。クーロン力による相互作用と量子効果を考慮したエネルギー損失は、ベーテブロッホの式で記述される。それによれば、図 2.12 のように質量の約 3 倍から 4 倍程度の運動量を持つ荷電粒子は最もエネルギーを損失しにくく、更にそれ以上の運動量を持つ場合もエネルギー損失はほぼ変わらない。このような荷電粒子は Minimum Ionizing Particle (以下 MIP) と呼ばれる。宇宙線は数 GeV のエネルギーを持っているものが最も多く、そのほとんどが MIP である。COMET 実験で観測したい 105 MeV 付近の電子も MIP であり、宇宙線と同程度のエネルギーをストローチューブ内部で損失する。つまり、MIP により生成される電荷の分布を測定すれば、105 MeV の電子により生成される電荷を見積もることができる。その性質を利用して、105 MeV 付近の電子がストローチューブに入射した場合にどの程度の電荷が ROESTI に入力されるのかを見積った。

セットアップは図 2.13、図 2.14 の通りで、ストローチューブトラッカーの上下にシンチレーターを設置した。ストローチューブのアノードワイヤーの印加電圧は 2000V、ストローチューブ内部は 1 気圧の Ar : C₂H₆ = 50 : 50 の混合ガスで満たしている。ガスゲインのデータを取得した時と同様、信号の読み出しにはその時と同じオシロスコープを用いた。宇宙線の MIP を用いた電荷量測定では、オシロスコープを外部トリガーモードに設定し、上下の 2 つのシンチレーターの出力のコインシデンスを取ることでトリガーを生成した。オシロスコープで波形を読み出し、ネットワークを介し PC でデータを取得している。取得した典型的な波形は、図 2.15 の通りである。

ガスゲイン測定の時と同様の解析方法で、オシロスコープで読み出した波形は、電荷に変化し、その分布を求めた。それはランダウ分布に従うことが予測されるため、測定されたガス増幅された電荷の分布をランダウ分布を用いてフィッティングを行った。



図 2.13: 宇宙線を用いた MIP 測定のセットアップの様子。写真中央付近の黒いものがシンチレータである。

電荷の分布図は、図 2.16 の通りである。この解析ではイベントセレクションをしていないため、0 C 付近にノイズのピークが見えており、ガウシアンでフィッティングしている。MIP がストローチューブを通り抜けたときに損失するエネルギーはランダウ分布に従うことが予測されるため、MIP 由来と考えられる電荷はランダウ分布でフィッティングしている。それぞれのチャンネルの最確値 (MPV) は 1.2 pC から 1.3 pC 程度でチャンネル間で大きな差異は見られず、ガスゲインも全チャンネルで同程度であるということが言える。ガウシアン標準偏差の値をノイズの大きさ、ランダウ分布の最確値を信号の大きさとそれぞれ定義した場合、チャンネル 0 から 3 の S/N 比はそれぞれ、23, 20, 18, 19 であり、全てのチャンネルで ~ 20 の S/N 比が得られた。

ランダウ分布によるフィッティングから得られた各チャンネルのパラメータの平均値を取得し、その値をパラメータに持つランダウ分布を MIP による平均電荷分布と考えると、各電荷は表 2.3 のような頻出度であり、電荷の 95% 程度は 800 fC から 5 pC の範囲内に入っている。この結果から、ROESTI は 95% のデータの取得率が要求値であるので、0.8 pC から 5 pC の電荷が識別可能であることが要求される。ストローチューブトラッカー単体の試験も不定性が残っており、今後詳細な評価を行う必要がある。

表 2.3: MIP 由来の電荷の頻出度。

電荷	割合
0.8 pC 以下	0.20%
0.9 pC 以下	1.5%
1 pC 以下	5.3%
2 pC 以下	71%
3 pC 以下	87%
4 pC 以下	93%
5 pC 以下	95%
7 pC 以下	96%
9 pC 以下	98%

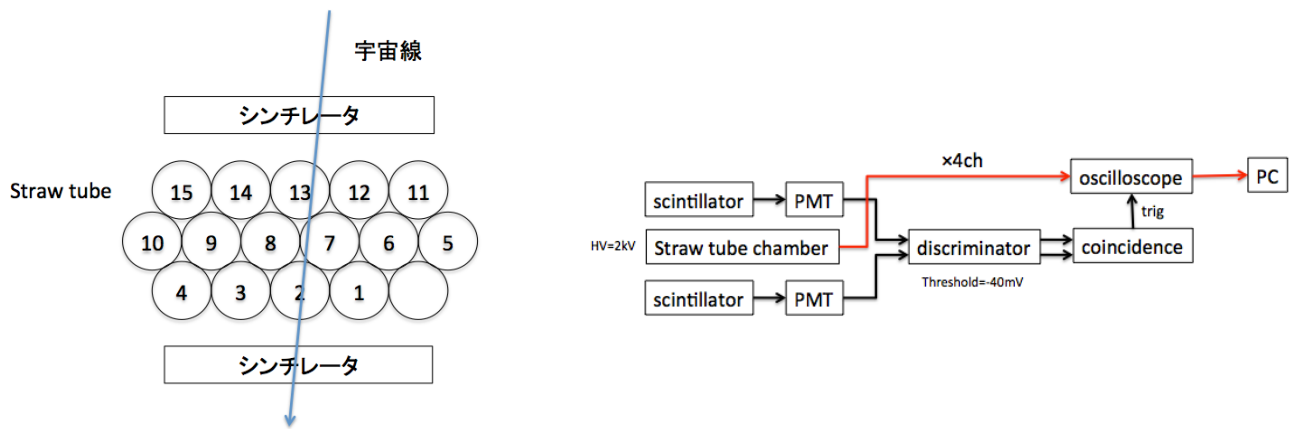


図 2.14: 左図はストローチューブトラッカーの断面図。チャンネル 15 から 12 を用いてデータを取っている。右図がその様子のブロック図である。

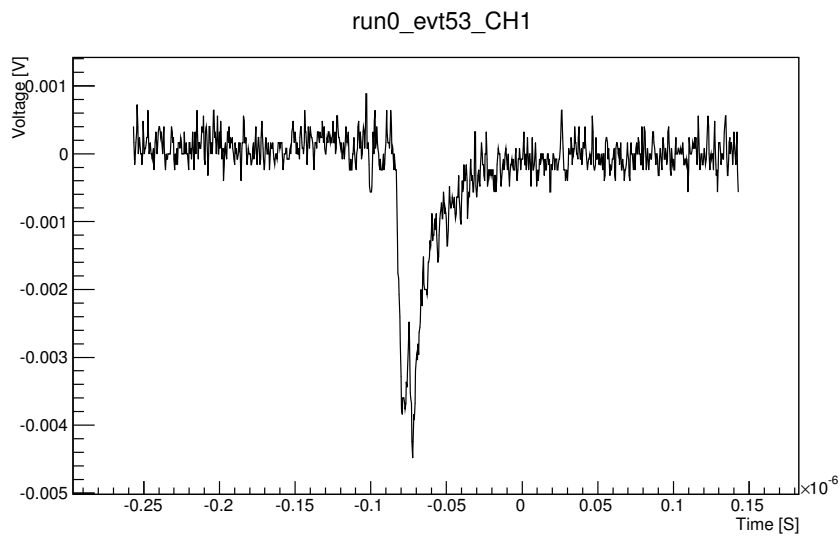


図 2.15: ストローチューブの印加電圧が 2000 V のときの宇宙線の典型的な波形。

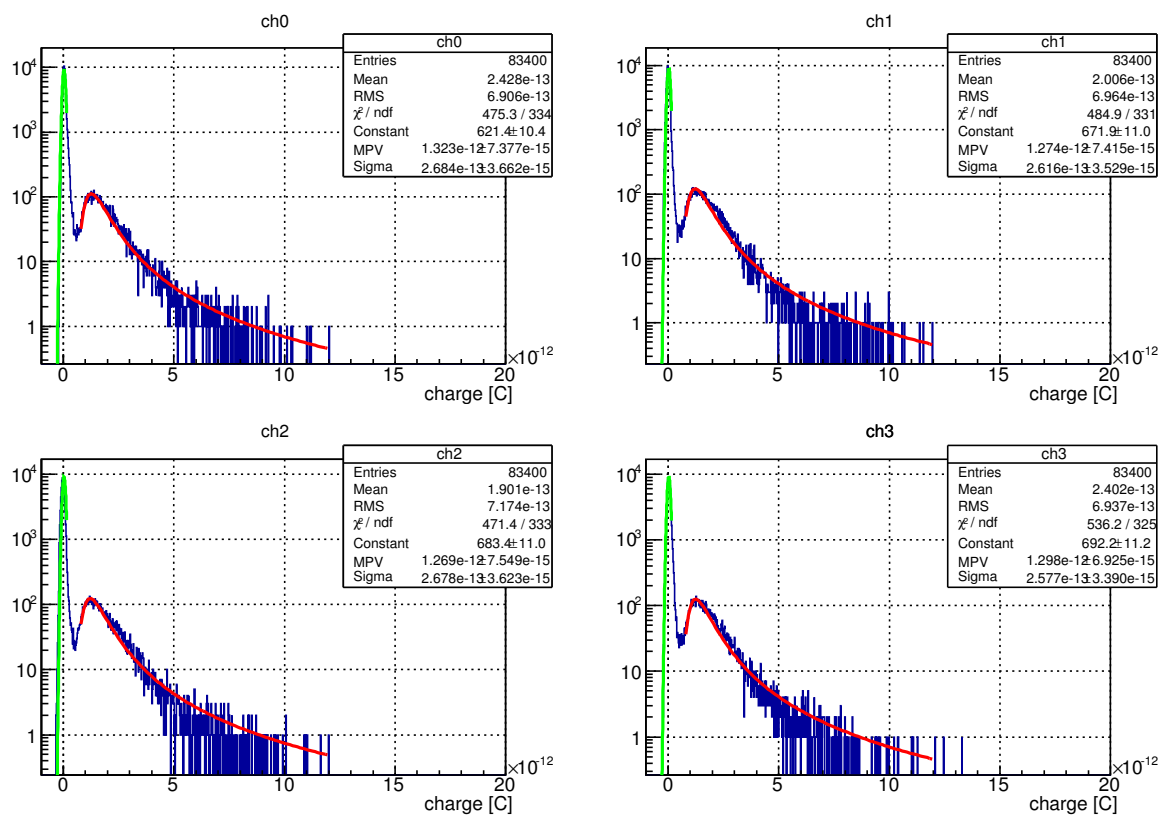


図 2.16: 各チャンネルの電荷の分布図。緑はガウシアンでノイズ由来と考えられる電荷、赤はランダウ分布で MIP 由来と考えられる電荷を、それぞれフィッティングしている。図 2.14 左図のチャンネル 15 から 12 の順に、この図中のチャンネル 0 から 3 に対応している。

2.3.2 ROESTI に対する要求のまとめ

上記のダイナミックレンジの再考を踏まえ ROESTI に対する具体的な要求を表 2.4 に改めてまとめておく。

表 2.4: ROESTI に対する要求。

項目	要求
ノイズ	$S/N > 8$
時間分解能	$\leq 2 \text{ ns}$
ダイナミックレンジ	800 fC-5 pC
磁場耐性	1 T 下で正常動作。
ガンマ線耐性	$\sim 20 \text{ Gy}$ のガンマ線が照射されても正常動作。
中性子耐性	$\sim 10^{11} \text{ neutron/cm}^2$ の中性子が照射されても正常動作
真空フィードスルーの最小化	
パイルアップ事象を識別可	

第3章 ROESTIプロトタイプ評価

本章では、ROESTIプロトタイプのデバッグ、基本性能の評価、ストロチューブトラッカーとの接続試験について述べる。評価項目としては、ノイズ、ダイナミックレンジ、クロストーク、時間分解能、通信試験であり、それらの性能は要求を満たしているのかどうかを確認した。その後、実際にストロチューブトラッカーと ROESTI プロトタイプを接続し、信号が正しく読み出せるのかどうか確認した。

3.1 電圧印加試験

ROESTI 基本性能評価の前に、回路そのものの動作確認試験を行った。プロトタイプ基板5枚に対し、電圧を印加して電流の様子を調べた。プロトタイプ基板には A, B, C, D, E と名前を付けた。表 3.1 にその結果を示す。この結果より 5 枚中 B, E の 2 枚に過電流状態が確認された。この 2 枚に対し調査を行ったところ、DRS4 が発熱していることがわかった。そのような状況から DRS4 周辺のバグを予測し、図 3.1 の箇所の改造をし詳細調査を行った。FPGA に電源を投入した際、初期状態としてリセットピン (図 3.1 左) が LOW の状態であれば DRS4 はリセットされる。しかし、チップの個性により必ずしも LOW にはならないということがわかった。そこで電源投入時に強制的にリセットをかけられるよう改造を行った。具体的には、図 3.1 左図中の青枠内の抵抗 R21 を取り除いた。また、図 3.1 右図の緑の枠内の IO_L1P_HSWAPEN_0 は FPGA のピンの状態の基準であり、IO_L1P_HSWAPEN_0 が LOW ならば、すべてのピンの内部プルアップ抵抗がイネーブルになる [13]。図 3.1 右図中の IO_L1P_HSWAPEN_0 はグランドと繋がっており、常に LOW の状態であり、DRS.RESET に対してもプルアップが作用し、LOW の状態になりにくくなっている。よって、図 3.1 右図中の緑の枠内の R117 を取り除き、IO_L1P_HSWAPEN_0 をハイインピーダンスの状態にしておくことにより、プルアップ抵抗をオフにした。この改造の結果、電流の様子は表 3.2 のようになり、正常に動作するようになった。またこの結果をもとに電力の計算を行った。1 チャンネル辺りのファームウェアダウンロード前の電力消費の上限値を 0.3 W/ch とすると、改造前には 0.328 W/ch であった B は、改造後は 0.15W/ch となり正常に動作していることがわかる。

以降の評価は改造後のものを対象に行った。FPGA のファームウェアは既に開発されたものを利用した [17]。

3.2 パターンコレクション

DRS4 は図 3.2 のように、1024 個のスイッチドキャパシタが並列に接続されており、図中の赤線のスイッチが順繰りに閉じる。スイッチが閉じているキャパシタには、入力してくる波形の高さに比例した電荷が蓄えられ、スイッチが閉じた各時刻における波高に比例した電荷が蓄えられる。つまり波形をサンプリングしたことになる。トリガーが入力されると、波形の記録をストップして、ADC によって各キャパシタの電荷の読み出しが行われる。読み出しは図 3.2 中の青線部分によって行われる。図 3.2 中の青線部分にも赤線の入力部分同様にスイッチがあることがわかる。青線のスイッチも赤線と同様にスイッチが順繰りに閉じ、スイッチが閉じたキャパシタの電荷が ADC によって読み出される。そのスイッチが閉じる順番には 2 つのモードがある。1 つめは FULL モードと呼ばれるもので、先頭のキャパシタのスイッチから順に閉じていき、ADC はその順番で電荷を読み出す。2 つめは ROI モードと呼ばれるもので、トリガーが入力されサン

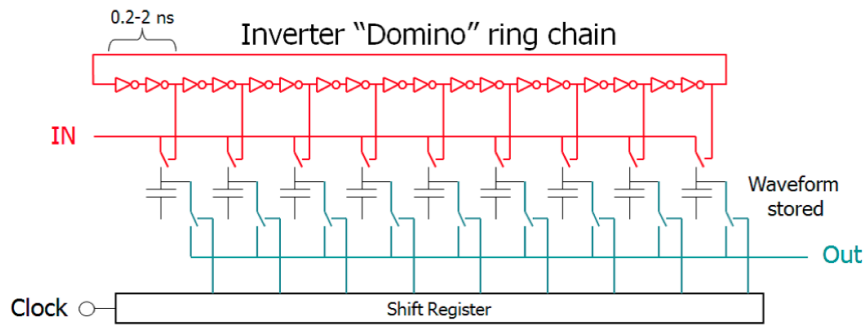


図 3.2: DRS4 の動作原理 [9]。

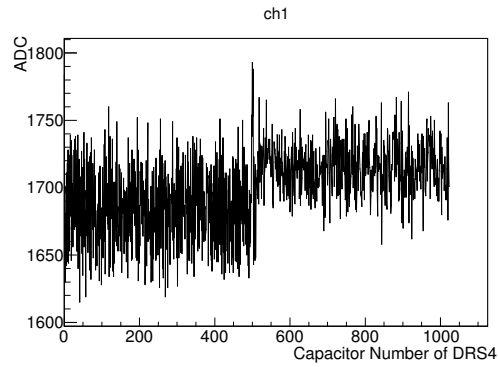


図 3.3: チャンネル 1 のベースライン。データは FULL モードで取得しており、横軸は DRS4 のキャパシタのアドレスに対応する。

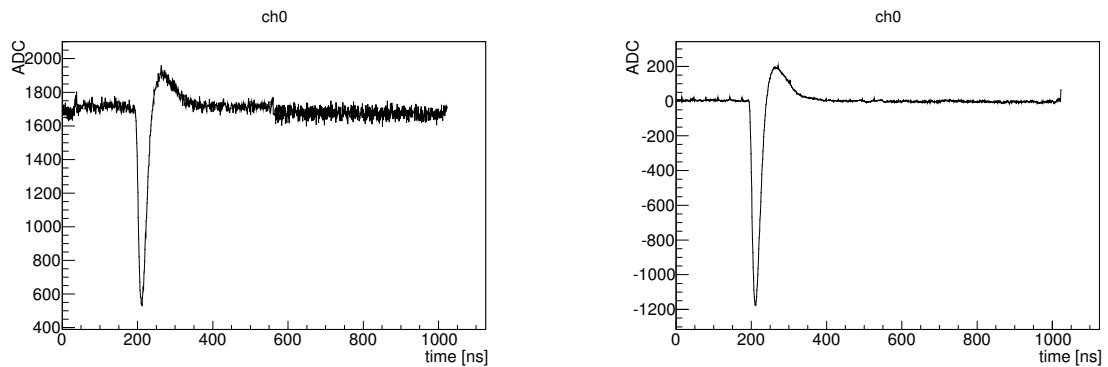


図 3.4: 左図はパターンコレクション前の波形データ。右図はパターンコレクション後の波形データ。目視でも、波形が滑らかになっていることが分かる。データは ROI モードで取得した。

表 3.2: 改造後の印加電圧試験の結果。直流電源に表示されている値を記載している。V_{2.5}, I_{2.5}, V₅, I₅, W/ch 順に、2.5 V 電源に印加された電圧値、2.5 V 電源に流れた電流値、5.0 V 電源に印加された電圧値、5.0 V 電源に流れた電流値、1 チャンネル当たりの消費電力を示す。括弧内の値はファームウェアをダウンロードした後の各値を示す。

	V _{2.5}	I _{2.5}	V ₅	I ₅	W/ch
A	2.50 (2.50)	0.131 (0.421)	5.00 (5.00)	0.201 (0.508)	0.0833 (0.225)
B	2.50 (2.50)	0.375 (0.421)	5.00 (5.00)	0.306(0.703)	0.154 (0.285)
C	2.50 (2.50)	0.132 (0.421)	5.00 (5.00)	0.274 (0.676)	0.106 (0.277)
D	2.50 (2.50)	0.337 (0.431)	5.00 (5.00)	0.314 (0.431)	0.151 (0.202)
E	2.50 (2.50)	0.131 (0.425)	5.00 (5.00)	0.299 (0.700)	0.114(0.285)

3.3 基本性能試験

ROESTI プロトタイプの基本性能表か試験を行った。パターンコレクションを施したデータを用いて、ノイズ、ダイナミックレンジ、クロストーク、時間分解能の評価を行った。また、SiTCP による通信試験も行った。これらの性能が要求を満たしているのかどうかを確認することが目的である。

3.3.1 ノイズ

ノイズに対する要求である「最小電荷量での S/N 比が 8 以上であること」を満たすことであり、この要求はゲインにも依存するが、まずはノイズの評価を行った。その結果を次期バージョン ROESTI のデザインに反映させることが目的である。

セットアップは図 3.5 の通りで、ROESTI には電源用ケーブルと光ケーブルを接続してある。取得したデータは光メディアコンバータを介し、PC へと転送される。なお、ROESTI の設定は、ベースライン取得モード、FULL モードである。ベースライン取得モードとは、FPGA 内部で ~ 10 Hz のトリガーを生成し、ベースラインを取得するモードである。

図 3.6 左図のように、入力信号がない状態で、各チャンネル毎に 1024 個のそれぞれのキャパシタにおけるベースラインの分布をガウシアンでフィッティングし、標準偏差の値を揺らぎをキャパシタ毎の揺らぎとした。1024 個全体の揺らぎの平均値を、そのチャンネルのノイズの大きさと定義した。ROESTI プロトタイプの電荷入力ポートと ASD の間には、第 2 章の図 2.4 ではチップ抵抗が上から下に向かって 16 個は位置されており、電荷入力ポートとチップ抵抗は導通している。その上から下へ向かってチャンネル 0 からチャンネル 15 と定義している。その結果、図 3.7 のように全チャンネルのノイズの大きさは、1.3 mV であり、チャンネル間の RMS 値は ~ 0.013 mV となり、1%以下のばらつきであった。詳細な数値は、表 3.3 の通りである。S/N 比の評価は次節で行う。

3.3.2 ダイナミックレンジと線形性

前章で述べたように ROESTI は、800 fC から 5 pC の電荷の電荷を識別できる必要があり、ROESTI プロトタイプがその要求を満たしているのかどうかを測定した。

セットアップは図 3.8 の通りで、ファンクションジェネレータの 2 つのチャンネルを用いて周波数 1 kHz の矩形波を出力し、片方のチャンネルは、2 pF のキャパシタへ入力し、電圧から電荷へ変換して ROESTI の全 16 チャンネルへ入力した。オシロスコープを用いて、キャパシタの直前の電圧を測定し、静電容量とその電圧の積を取って入力電荷を求めた。他方のチャンネルはトリガー用の出力で、ディスクリミネー

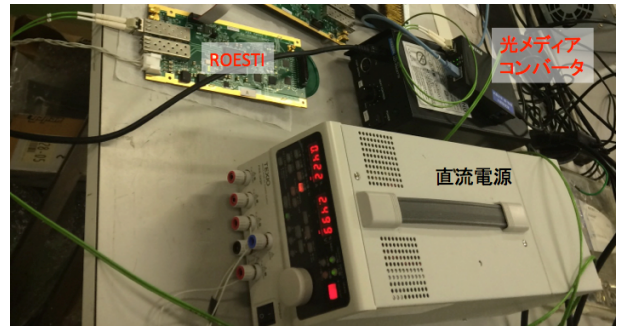
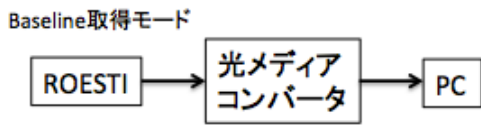


図 3.5: 左図はノイズ測定のセットアップの概念図。右図はその実際の様子。

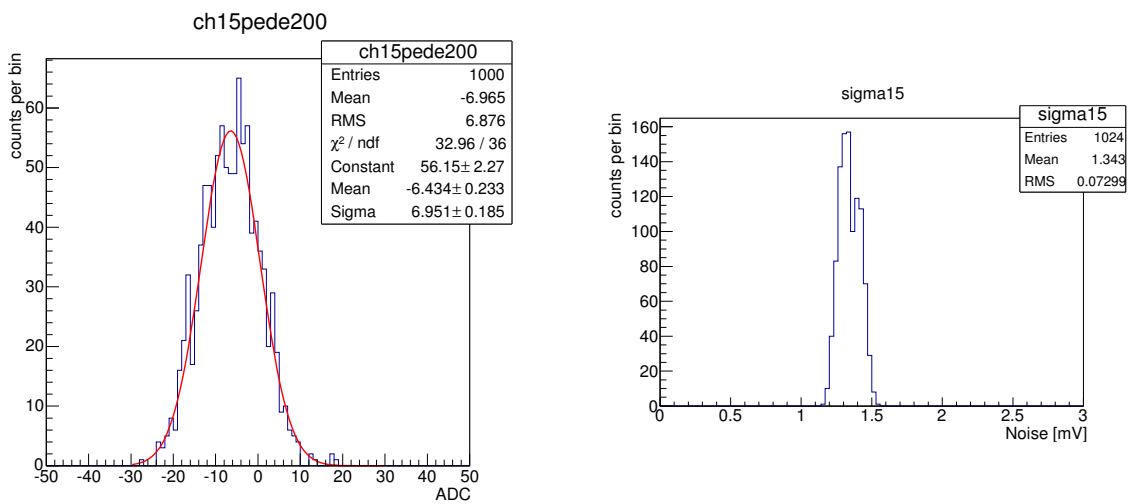


図 3.6: 左図は入力信号が無いときの DRS4 内のキャパシタの ADC 値の分布の一例。ここではチャンネル 0 の 106 番目のキャパシタの分布を例に出した。この分布をガウシアンでフィッティングし、その標準偏差の値をこのキャパシタの揺らぎと定義した。右図は、入力信号がない時、チャンネル 15 内の全キャパシタの揺らぎの分布。ADC 値を mV に変換してある。この分布の平均値をチャンネル 15 のノイズの大きさと定義した。全 16 チャンネルに対して、同様のことを行う。

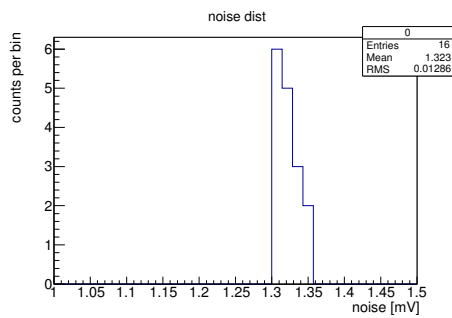


図 3.7: 各チャンネルのノイズの分布。

表 3.3: 各チャンネルのノイズの大きさ。

チャンネル	ノイズ [mV]	チャンネル	ノイズ [mV]
ch0	1.33	ch8	1.31
ch1	1.31	ch9	1.34
ch2	1.31	ch10	1.34
ch3	1.31	ch11	1.32
ch4	1.32	ch12	1.32
ch5	1.32	ch13	1.31
ch6	1.31	ch14	1.31
ch7	1.31	ch15	1.34

タ、ゲートジェネレータ、ROESTI という順番で接続している。ファンクションジェネレータのトリガー用の出力は TTL 信号であり、ディスクリミネータで NIM 信号に変換した。現 FPGA ファームウェアでは ROESTI の外部トリガーはデータ取得のタイミング調整が必要であり、ユーザーが適宜ディレイを掛ける必要があり、ゲートジェネレータで 550 ns のディレイをかけて、その出力を ROESTI に入力している。ゲートジェネレータが出力する矩形波の時間幅は 100 ns としている。そのときの波形の一例は図 3.9 左図に示す通りである。

0 ns から 150 ns の波形の平均値と 150 ns から 350 ns での波形の最小値の差分の分布をガウシアンでフィッティングし、その中央値を波高と定義した (図 3.9 右図)。波形のピークの位置は外部トリガーのディレイの時間によって決まり、このセットアップではピークの位置は常に 250 ns 付近とわかっている。

入力電荷を変えながら波高値を求めたところ、図 3.10 の通りで、400 fC 程度でサチュレーションを起こしてしまうことが判明した。上述のように、ROESTI は 800 fC から 5 pC 程度までの電荷を識別できる必要があり、ROESTI プロトタイプでは、MIP 由来の電荷のほとんどを識別することができない。現在のストローチューブの直径は 9.75 mm であるが、第 2 章で述べた通り、以前のものの直径は 5 mm で、それに合わせてデザインしてあることが原因だと考えられる。

その結果を踏まえ、ROESTI の回路のパラメータを変えることで、DRS4 のオフセット電圧を上昇させて、ダイナミックレンジを広げることを試みた。ROESTI には、DRS4 が 2 つ搭載されており、それぞれのオフセット電圧は 2.5 V の電源を抵抗分割することで与えられる。具体的には、図 3.11 の赤色枠内の点がチャンネル 8 からチャンネル 16 を担当する DRS4 のオフセット電圧に対応する箇所であり、DRS4 のオフセット電圧は図 3.11 内の R61 と R62 の比率で決まる。R61 と R62 の初期値はどちらも 1.8 k Ω で、ファームウェアを FPGA にダウンロードする前の DRS4 のオフセット電圧をテスターで測定すると 1.2 V 程度で、ファームウェアをダウンロードするとオフセット電圧は 0.85 V 程度となった。DRS4 の許容入力電圧は 0.1 V から 1.5 V と決められており、ファームウェアをダウンロードした後のオフセット電圧はその範囲内の値である必要がある [9]。以上のことを踏まえ、(R61,R61)=(820 Ω ,2.4 k Ω) と抵抗値を変更した。そうすると、ファームウェアをダウンロードした後のオフセット電圧は 1.4 V であった。

以上の改造を行いダイナミックレンジを調べた。セットアップと解析方法は、改造前と同様である。プロットの各点には誤差として、波高分布をガウシアンでフィッティングしたときの標準偏差の値を付けている。結果は、図 3.12 左図のようになり、改造前は ~ 400 fC でサチュレーションを起こしていたが、改造後は 600 fC まで識別できるようになった。300 fC までの範囲で、直線でフィッティングによって得られたパラメータから 16 fC の入力電荷に対する波高は 17 mV で、その時の S/N 比は ~ 13 で要求を満たしており、ノイズを含め、要求を満たしていることがわかった。

線形性の評価は図 3.12 左図を微分することにより行った。具体的には隣り合った点どうしを 1 次関数でフィッティングを行い、その傾きをそれらの中点のゲインと定義した。図 3.12 中の隣り合った 2 点 ($Q_1, h_1 \pm \Delta h_1$), ($Q_2, h_2 \pm \Delta h_2$) 結ぶ直線の傾き *gain* とその誤差 $\Delta gain$ を考える。

$$gain = \frac{h_1 - h_2 \pm \sqrt{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2}}{Q_1 - Q_2} \quad (3.1)$$

$$\Delta gain = \frac{\sqrt{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2}}{Q_1 - Q_2} \quad (3.2)$$

波高の誤差が入力電荷に依存しないと考えると、式 3.2 より隣り合った 2 点の間隔が狭い程、ゲインの誤差は大きくなるのがわかる。100 fC 以上の入力電荷に対しては 100 fC 刻みの入力電荷でデータを取っている一方で、50 fC 以下では、入力電荷の値を平均 10 fC 刻みで変えている。つまり、図 3.12 中の 50 fC 以下のプロットは隣り合った点どうしの間隔が狭いため、誤差が大きいと考えられる。ゲインの結果は図 3.12 右図の通りで、300 fC 辺りから徐々にゲインが下がり、600 fC 程度でサチュレーションを起こし、ゲインが 0 付近になっていることがわかる。ゲインが 1 以上に保たれている領域を、線形性が保たれている領域と定義すると、その範囲は 6 fC から 300 fC 程度までで、それよりも大きい入力電荷に対するゲインは徐々に小さくなっていく。しかし入力電荷に対し、波高がどのように変化するかをフィッティングなどを用

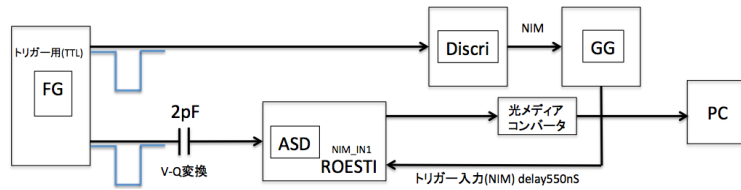


図 3.8: ダイナミックレンジを測定した時のセットアップの概念図。

いて、予め調べておけば非線形の領域においても入力電荷がわかるので問題ない。

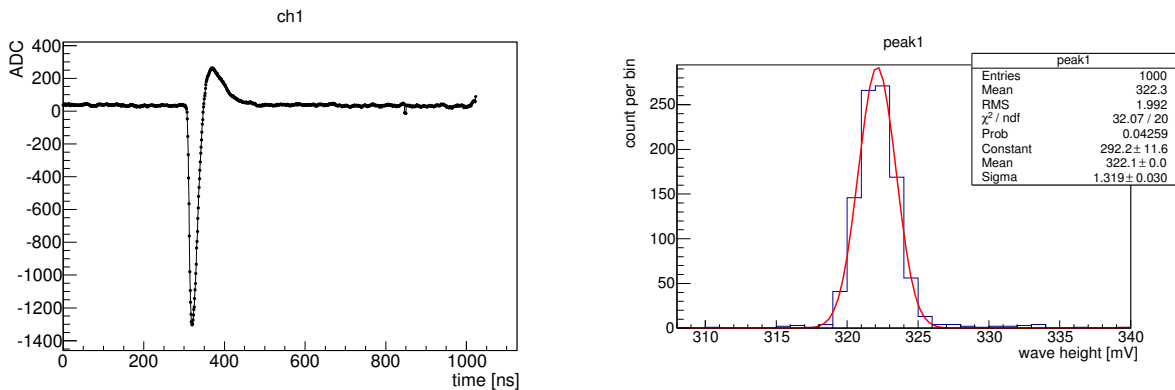


図 3.9: 左図は 300 fC 入力時の波形。右図は 300 fC の入力電荷に対する波高の分布の一例。ここではチャンネル 1 を例として示している。

3.3.3 クロストーク

ROESTI プロトタイプにおいて、クロストークに対する要求は、「ノイズの大きさと同等かそれ以下であること」である。クロストークを測定するにあたりセットアップは、ダイナミックレンジの測定時のものと基本的に同じである。唯一異なる点は、ダイナミックレンジ測定の設定アップでは、全 16 チャンネルに等しい電荷量を入力したが、この測定では、ある 1 チャンネルのみに電荷を入力し、その際に電荷を入力与えられていないチャンネルはどのような振る舞いをするのかを測定した。例えば、チャンネル 10 のみに 600 fC の電荷を与えた際の全チャンネルの振る舞いの様子は図 3.13 に示す通りである。

電荷を入力したチャンネルの波高の 50% を閾値に設け、それを越えるタイミングを 200 ns に合わせて、図 3.14 のように全チャンネルで波形の重ね描きした。ジッターの影響でイベント毎に、波形は時間方向に数十 ns 程度の揺らぎがある。その影響を取り除くために、閾値を越えるタイミングを 200 ns に合わせている。それぞれのキャパシタの ADC 値の分布をガウシアンでフィッティングすることにより中心値を求めた。その中心値をプロットし、図 3.15 左図のように 30 ns から 180 ns のレンジで 1 次関数でフィッティングした。DRS4 の特性により、ベースラインが僅かに傾くことを考慮したためである。図 3.15 左図の場合、30 ns から 180 ns の 150 ns の間に ADC 値で 1 程度、つまり 0.24 mV 程度の傾きである。ADC 値=1 次関数+クロストークの影響と考え、つまり、クロストークの影響は図 3.15 右図のように ADC 値とフィッティングした 1 次関数の差分で表せると予測できる。そして図 3.16 のように 0 ns から 300 ns の区間の ADC 値と 1 次関数の差分の分布のピーク付近を、ガウシアンでフィッティングしてその標準偏差の値を取得しておく。クロストークの影響が表れると考えられる 180 ns から 300 ns の区間で、 2σ の範囲外に 3 点以上連続で存在すればクロストークの影響があると判定し、図 3.15 右図の最小値と 30 ns から 300 ns の平均値の差

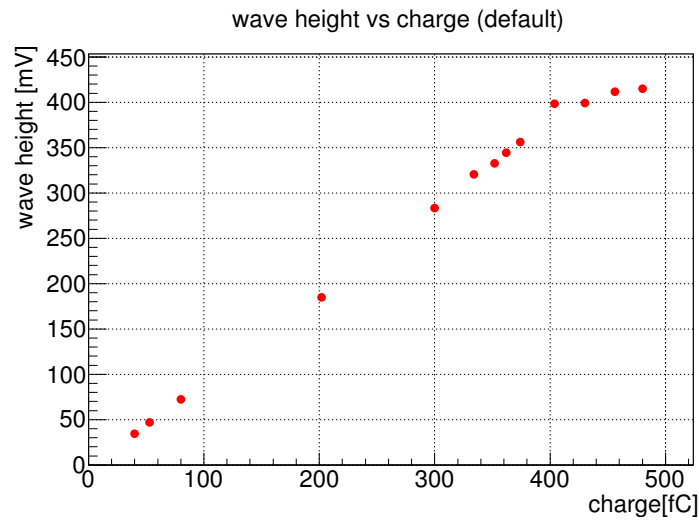


図 3.10: 改造前の ROESTI の入力電荷に対する出力波形のプロット。400 fC 程度でサチュレーションを起こしていることが分かる。

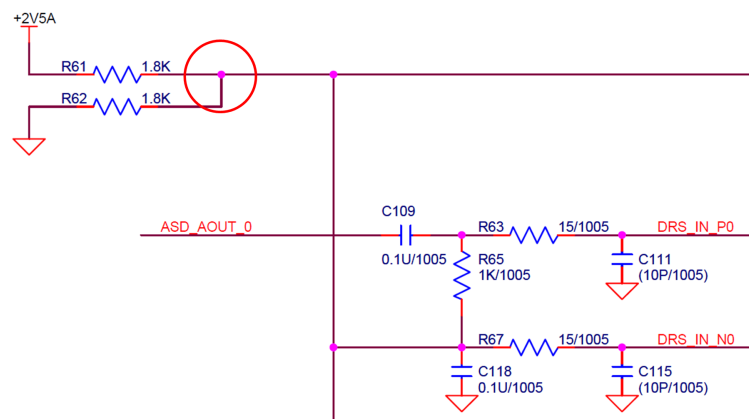


図 3.11: DRS4 のオフセット電圧を決めている部分。赤丸の枠内の電圧を上下させることで、DRS4 のオフセット電圧を変更することができる。

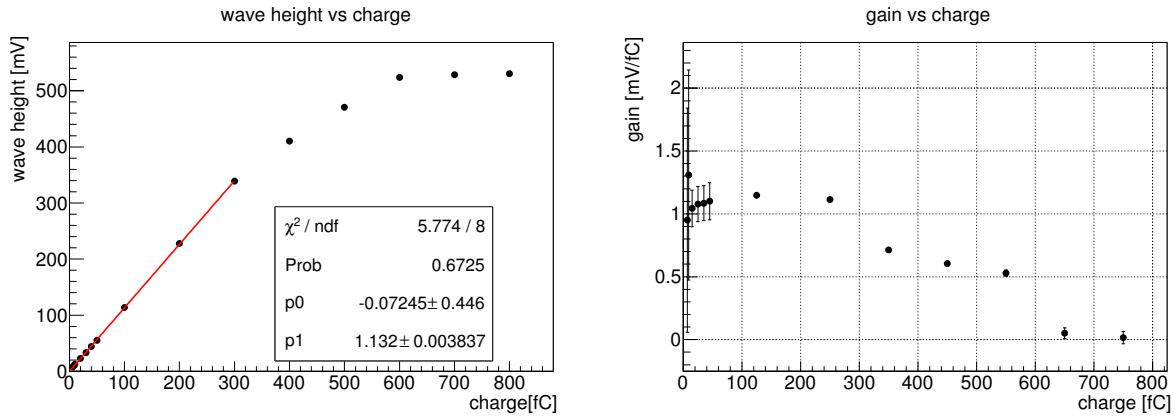


図 3.12: 左図は入力電荷に対する ROESTI の出力波形の波高のプロット。右図は ROESTI のゲインの入力電荷依存性。左図を微分したものに相当する。

分をクロストークの影響の大きさと定義した。仮に、クロストーク等の影響がなかった場合、 2σ の範囲外に 3 点連続で点が存在する確率は $9.4 \times 10^{-3}\%$ と考えられ、「 2σ の範囲外に 3 点以上連続で存在すればクロストークの影響があると判定」という条件を加えている。以上のことより、図 3.15 の場合、ADC 値で 6 程度、つまり 1.5mV 程度のクロストークの影響を受けたことになる。

チャンネル 10 のみに 600 fC の電荷を与えたときの結果は、図 3.17 の通りで、チャンネル 10 の両隣であるチャンネル 9 とチャンネル 11 が、その他のチャンネルと比べてクロストークの影響を大きく受けていることが分かる。最も影響が大きいチャンネル 11 で、1.8 mV でノイズの大きさと同等であり、要求を満たしている。また電荷を入力したチャンネルと異なるチップではクロストークの大きさの影響は 0.2 mV であり、クロストークの影響は無視できるほど小さい。

600 fC 入力時のクロストークの評価の全結果は表 3.4 に示す通りである。最も影響を受けた場合でクロストークの影響の大きさは 2.0 mV であり、ノイズの分布の 1.5σ 程度であり問題ない。解析によってクロストークの影響なしと判断されたチャンネルは、上限値はとして図 3.16 の 2σ の値を記している。

3.3.4 時間分解能

ROESTI の時間分解能に対する要求は「時間分解能が 2 ns 以下であること」であり、その要求を満たしているのかどうかの評価を行った。時間分解能測定を行ったセットアップは図 3.18 の通りであり、ファンクションジェネレータのトリガー用の出力と、リファレンスチャンネルの出力は同期している。複数のチャンネル間で閾値を越えるタイミングの測定を行うときに、時間的な基準となるチャンネルをリファレンスチャンネルと呼ぶ。図 3.19 のようにリファレンスチャンネルに対して、その他のチャンネルには、ファンクションジェネレーターでディレイを掛けて電荷を入力する。今回の測定では、チャンネル 0 からチャンネル 7 のリファレンスチャンネルをチャンネル 0、チャンネル 8 からチャンネル 15 のリファレンスチャンネルをチャンネル 8 としている。波高の 50% を閾値として設定して、リファレンスチャンネルとディレイチャンネル間で閾値を越える時間差の分布を調べた。この測定ではディレイ時間を 0 ns, 100 ns, 200 ns, 300 ns と変化させて、その時の時間差分布を調査した。

得られた時間差分布は図 3.20 から図 3.23 の通りである。時間差分布をガウシアンでフィッティングして、そのときの標準偏差 σ の値を時間分解能と定義すると、リファレンスチャンネルに対してディレイ時間 0 のときの時間分解能は 0.11 ns である。しかし、ディレイ時間を大きくすると、図 3.21 から図 3.23 のように、徐々に分布の形が崩れ、ガウシアンではフィッティングできなくなる。今までは「DRS4 はのサンプリ

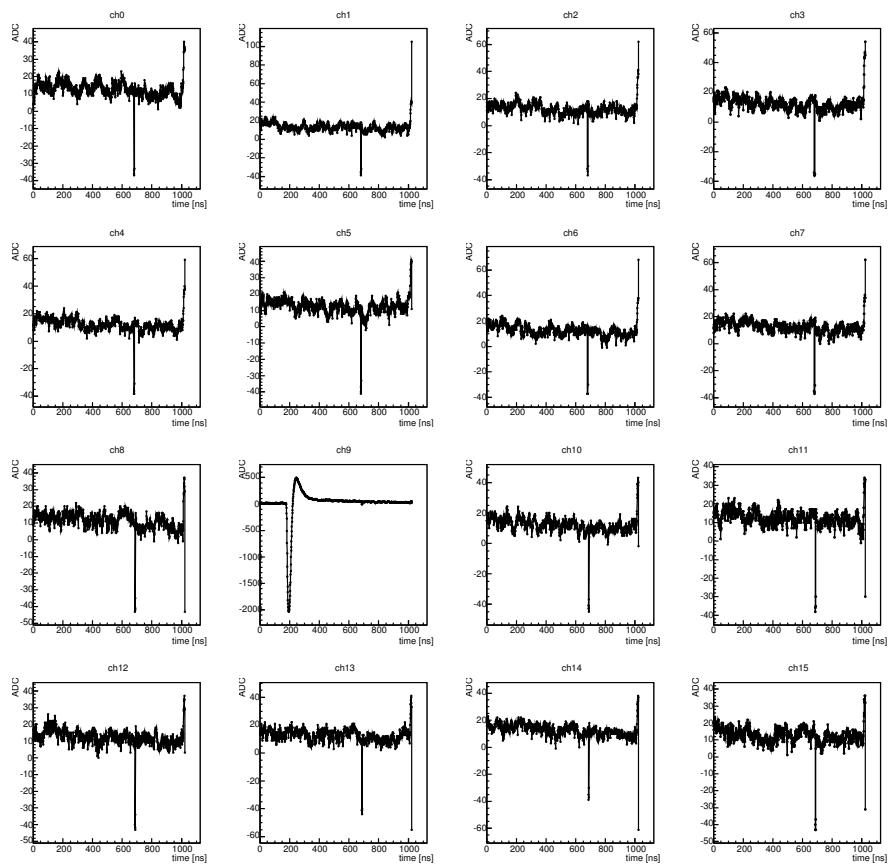


図 3.13: チャンネル 10 のみに 600 fC 与えた際の、全チャンネルの様子。1 イベント毎だとクロストークの影響は目視では確認できない。

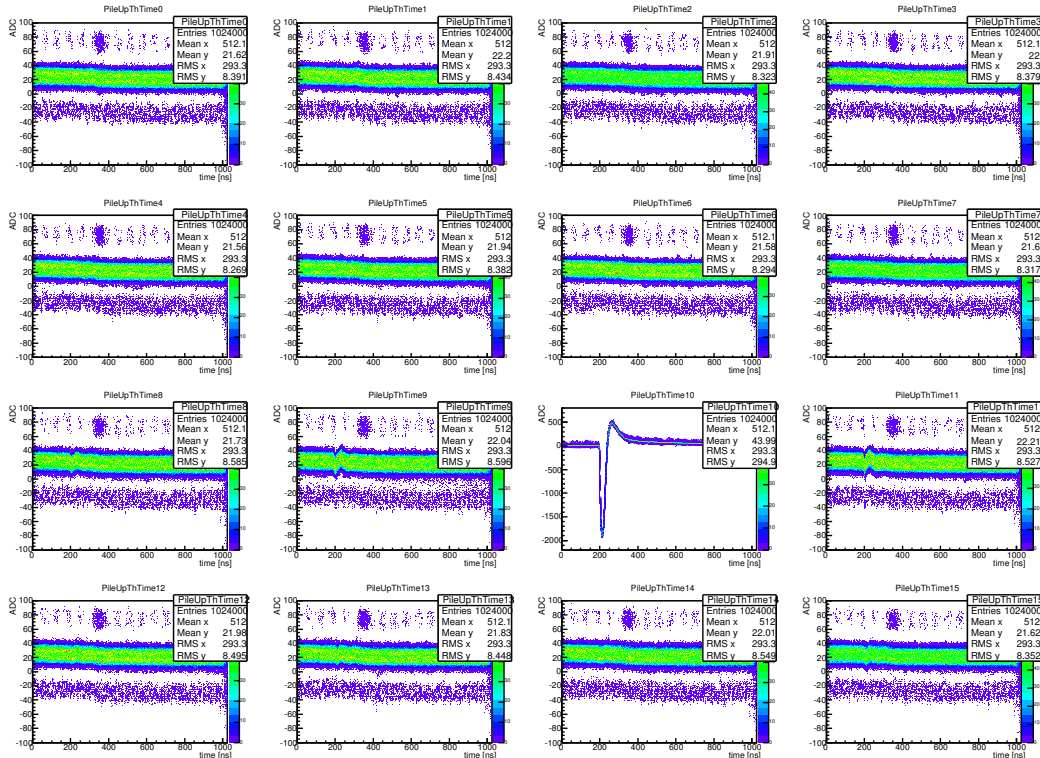


図 3.14: 閾値を越えるタイミングを 200 ns に合わせて、1000 イベントの取得波形を重ね描きした 2 次元ヒストグラム。チャンネル 8, 9, 11 ではクロストークの影響を目視でも確認できる。

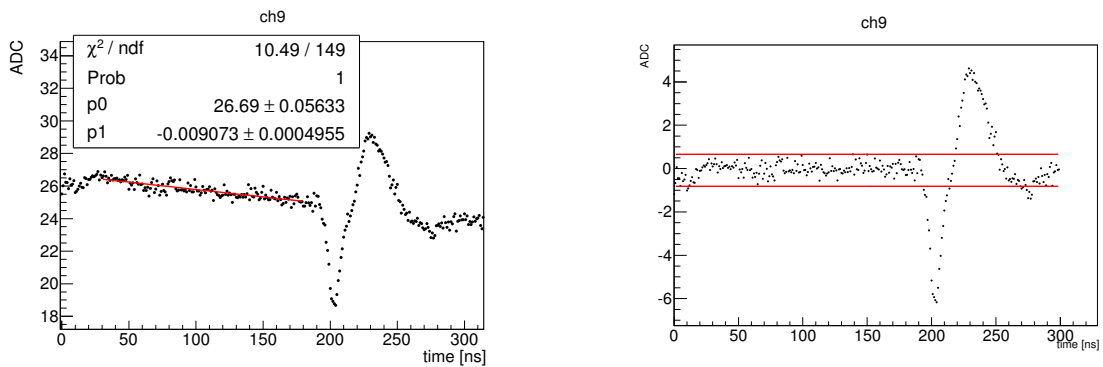


図 3.15: 左図はチャンネル 10 のみに 600fC の電荷をを与えたときに、クロストークの影響を受けるチャンネル 9 の平均波形。右図はフィッティングした 1 次関数と ADC 値の差分のプロット。クロストークの影響を表す。赤線は ADC 値の分布の $\pm 2\sigma$ を表す。

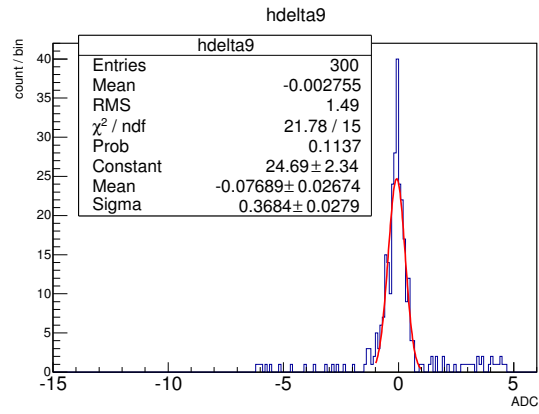


図 3.16: 1 次関数と ADC 値の差分の分布図。

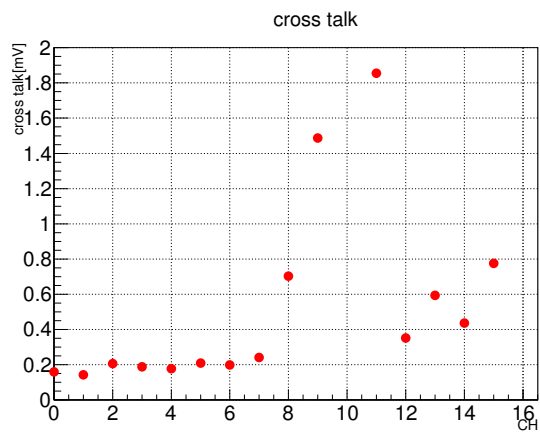


図 3.17: チャンネル 10 のみに 600 fC 与えた際の、クロストークの影響。

表 3.4: クロストークの結果。単位は全て [mV] である。”<”は上限値を表している。

input ch \ ch	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7
ch0		1.9	0.60	0.36	0.49	0.55	0.48	0.62
ch1	1.8		1.5	0.73	0.55	0.58	0.58	0.73
ch2	0.95	1.5		1.5	0.45	0.64	0.65	0.84
ch3	0.72	0.69	1.5		0.89	0.62	0.63	0.83
ch4	0.81	0.78	0.50	0.76		1.9	0.73	0.87
ch5	0.86	0.76	0.61	0.58	1.6		1.7	0.85
ch6	0.93	0.88	0.72	0.76	0.64	1.6		2.0
ch7	0.88	0.87	0.78	0.75	0.58	0.59	1.8	
ch8	0.80	0.73	0.93	0.70	0.64	0.65	0.80	0.85
ch9	0.34	< 0.12	< 0.13	< 0.13	< 0.14	< 0.12	< 0.12	0.28
ch10	< 0.15	< 0.14	< 0.19	< 0.16	< 0.13	< 0.13	< 0.15	< 0.15
ch11	< 0.15	< 0.11	< 0.18	< 0.14	< 0.15	< 0.14	< 0.13	< 0.17
ch12	< 0.13	< 0.15	< 0.15	< 0.13	< 0.15	< 0.17	< 0.15	< 0.16
ch13	< 0.15	< 0.16	< 0.15	< 0.15	< 0.14	< 0.15	0.29	< 0.15
ch14	< 0.19	< 0.14	< 0.16	< 0.16	< 0.13	< 0.17	< 0.15	< 0.15
ch15	0.67	0.55	< 0.64	0.62	0.53	0.56	0.59	0.56
input ch \ ch	ch8	ch9	ch10	ch11	ch12	ch13	ch14	ch15
ch0	< 0.089	< 0.085	< 0.074	< 0.093	< 0.073	< 0.087	< 0.085	0.18
ch1	< 0.14	< 0.16	< 0.16	< 0.13	< 0.16	< 0.14	< 0.13	< 0.15
ch2	< 0.11	< 0.12	< 0.12	< 0.14	< 0.11	< 0.14	< 0.13	< 0.14
ch3	< 0.14	< 0.15	< 0.15	< 0.15	< 0.14	< 0.14	< 0.14	< 0.17
ch4	< 0.13	< 0.14	< 0.13	< 0.15	< 0.15	< 0.12	< 0.16	< 0.13
ch5	< 0.12	< 0.13	< 0.10	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.12	< 0.15
ch6	0.35	< 0.13	< 0.13	< 0.13	< 0.12	< 0.12	< 0.15	< 0.15
ch7	0.57	0.31	< 0.14	< 0.12	< 0.11	< 0.13	< 0.12	< 0.16
ch8		1.7	0.88	0.87	0.91	0.78	0.75	0.94
ch9	1.7		1.6	0.60	0.49	0.65	0.55	0.87
ch10	0.70	1.5		1.9	0.35	0.60	0.44	0.77
ch11	0.69	0.69	1.6		0.88	0.60	0.61	0.93
ch12	0.69	0.71	0.63	0.71		1.7	0.69	0.86
ch13	0.68	0.77	0.59	0.52	1.4		1.6	0.89
ch14	0.80	0.90	0.64	0.70	0.67	1.5		2.0
ch15	0.72	0.71	0.61	0.61	0.71	0.69	1.5	

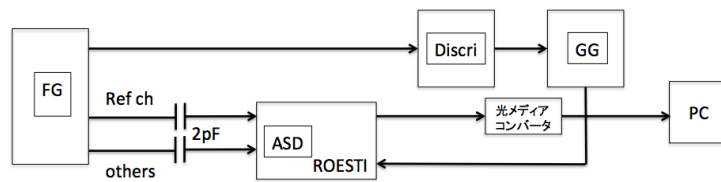


図 3.18: 時間分解能測定を行ったセットアップの概念図。

ングの間隔は必ず 1 ns である」という仮定の下に波形を描き、解析を行っていたが、実際には、各キャパシタは固有の時間のズレを持っており、それを校正する必要がある。上記の時間差分布の形が崩れるのは、この各キャパシタによる時間のズレだと考えられるため、時間校正を行い、再度評価を行った。

ROI モードの ROESTI に 10 MHz の周波数のサイン波を入力しセルフトリガーモードで、そのデータを取得した。セルフトリガーモードとは ASD が出力するディスクミネート出力をトリガーとするモードである。その波形データをサイン波で図 3.25 左図のようにフィッティングし、そのサイン波と各点の時間方向のズレを取得しておき、各点に対し、取得しておいたズレの分、時間方向にシフトさせることにより、時間の補正をかける。ROI モードでは、DRS4 のキャパシタ番号が時系列に並んでいる訳ではないが、トリガーがかかってサンプリングが止まったキャパシタの番号が記録されており、オフライン解析で、波形の各点がどのキャパシタに対応しているのかを知ることができる。図 3.25 右図は実際にキャパシタが時間方向にどのように、ズレているのかを表している。波形データをプロットする際には、それぞれの点に対応するキャパシタの時間方向のズレの分だけその方向へシフトさせる。

以上のような時間校正を行った上で、上述と同様の方法で時間分解能を調べた。校正後の時間分解能は図 3.26 から図 3.29 の通りであり、校正前と比べて時間分解能は良くなっていることが分かる。ディレイ時間が 0 ns, 100 ns, 200 ns, 300 ns の順に、時間分解能は 0.093 ns, 0.28 ns, 0.57 ns, 0.81 ns であり、要求値を満たす。以上の結果のまとめは図 3.30 に示す通りである。

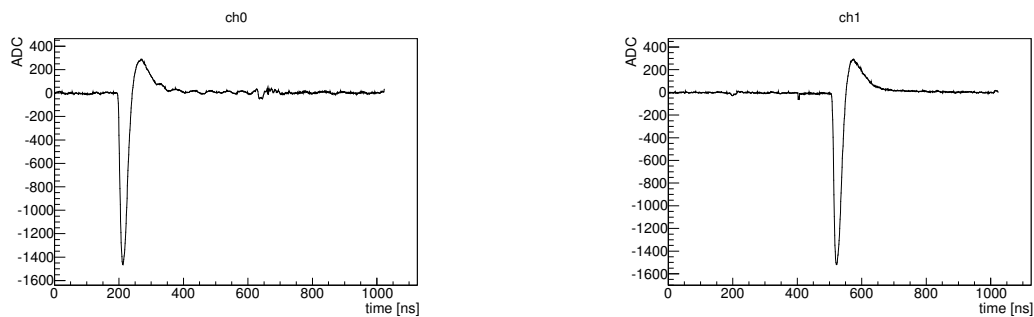


図 3.19: 左図は、リファレンスチャンネルである ch0 の波形で、右図は 300 ns のディレイを掛けた ch1 の様子である。

3.3.5 通信試験

通信試験の測定では、SiTCP を用いた ROESTI と PC 間の通信速度の測定と、デージーチェーン接続が原理的に可能かどうかの試験を行った。ストローチューブトラッカーは前述の通り、~ 2000 チャンネル持ち、ストローチューブトラッカーと接続した ROESTI の全てを直接 PC と接続すると、フィードスルーの数は百数十になる。ROESTI に対する要求の 1 つに「フィードスルーの数の最小化」があり、それを実現するためには、デージーチェーン接続が不可欠であり、その接続方法が原理的に可能なかどうかの試験を

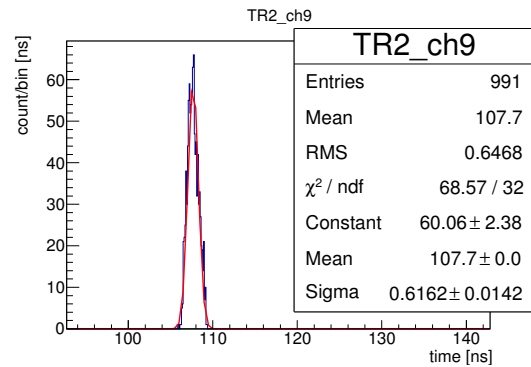
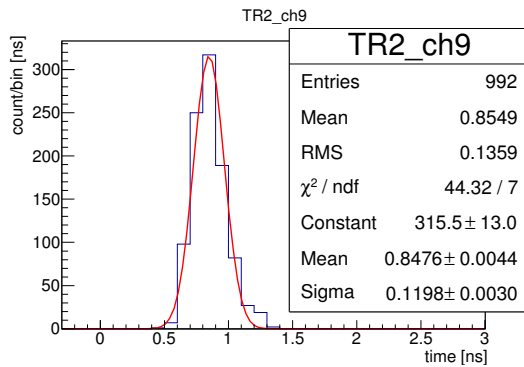


図 3.20: デイレイ時間が 0 ns のときの時間差分布。 図 3.21: デイレイ時間が 100 ns のときの時間差分布。

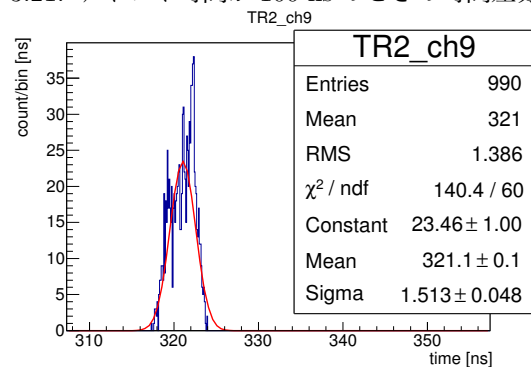
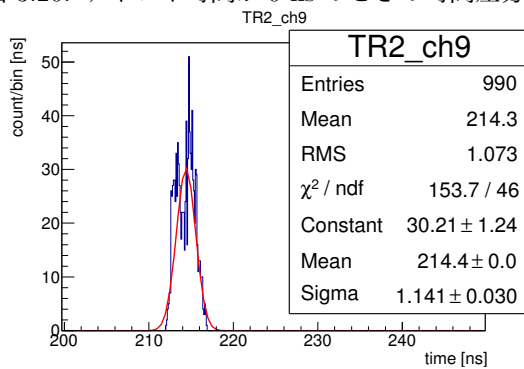


図 3.22: デイレイ時間が 200 ns のときの時間差分布。 図 3.23: デイレイ時間が 300 ns のときの時間差分布。

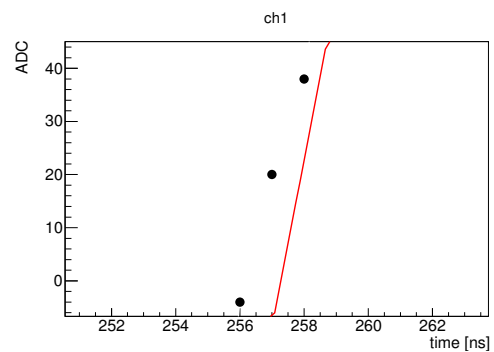
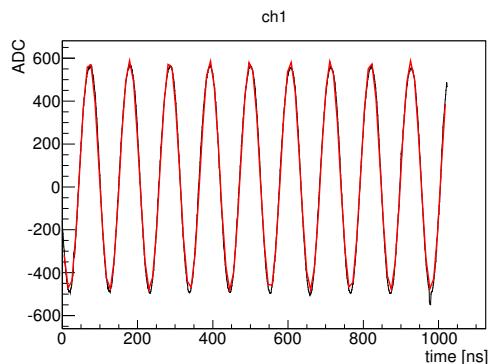


図 3.24: 左図は、10 MHz のサイン波を入力しフィッティングしている様子。右図は左図の 256 ns 付近の拡大図。フィッティングしたサイン波と、時間方向にズレていることが分かる。

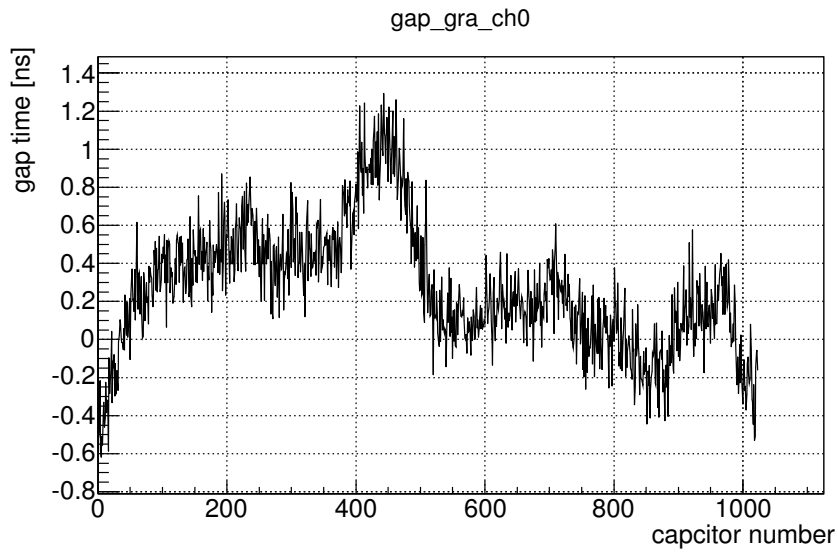


図 3.25: キャパシタの時間方向のズレの一例。例としてチャンネル 0 の全キャパシタがどのように時間方向にズレているのかを示している。

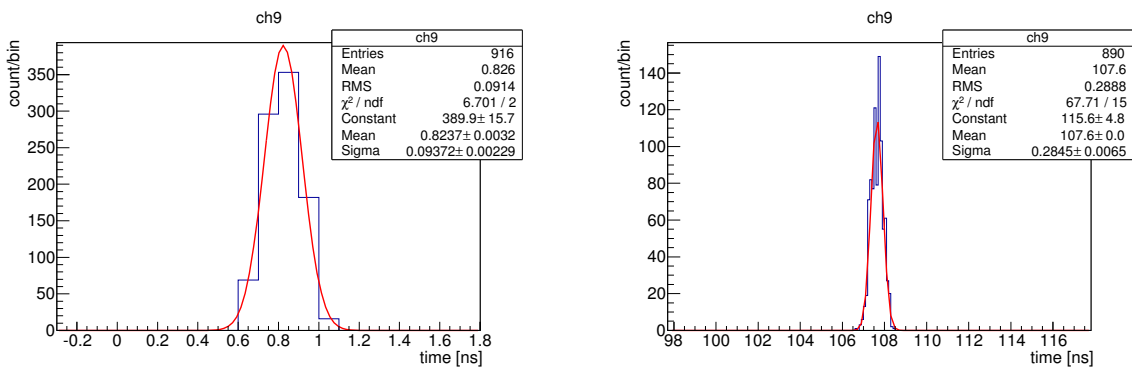


図 3.26: 時間校正後のディレイ時間が 0 ns のときの時間差分布。 図 3.27: 時間校正後のディレイ時間が 100 ns のときの時間差分布。

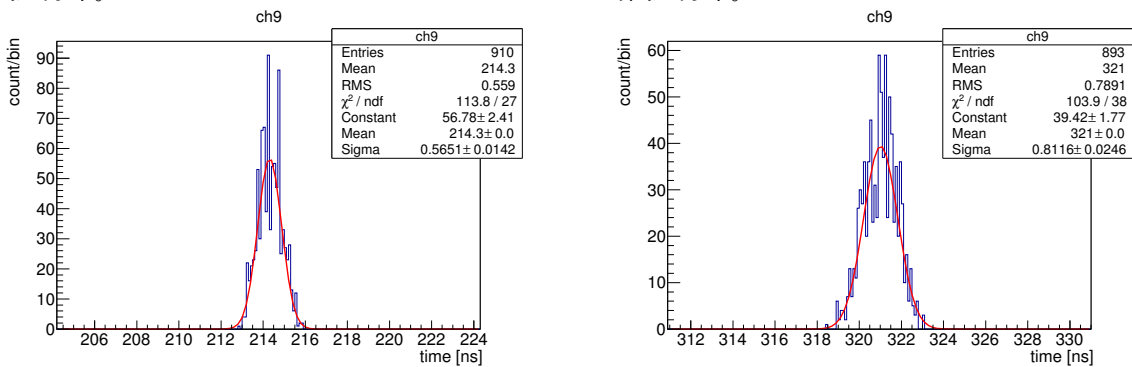


図 3.28: 時間校正後のディレイ時間が 200 ns のときの時間差分布。 図 3.29: 時間校正後のディレイ時間が 300 ns のときの時間差分布。

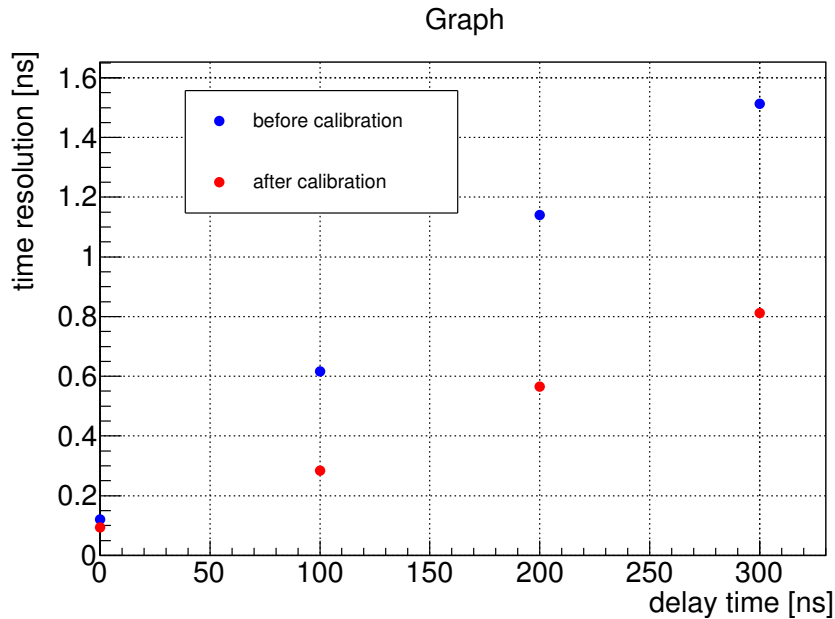


図 3.30: 時間分解能のディレイ時間依存性。青が時間校正前で、赤が時間校正後を表す。

行った。

通信試験のセットアップは図 3.31、図 3.32 の通りで、図 3.32 中の ROESTI1 に波形を電荷を入力する。ROESTI2 と ROESTI3 には、転送されるデータをそのまま出力するようなファームウェアがダウンロードした。ROESTI1 は ROESTI2 に波形データを転送し、ROESTI2 は ROESTI3 へ転送、ROESTI3 はその波形データを光メディアコンバータを介して PC へ転送した。データ転送に要する時間を PC で計測しており、データサイズをその時間で割ることで転送速度を計算した。理想的にはデータ転送速度はトリガーレートに比例するはずであり、ROESTI1 に入力するトリガーレートを変化させた時の転送速度がどのように変化するかを調べた。

結果は図 3.33 の通りであり、デジチェーン接続をしなかった場合、2つの ROESTI をデジチェーン接続をした場合、3枚の ROESTI をデジチェーン接続した場合の全てで 860 Mbps の通信速度が出ることがわかった。SiTCP の転送速度の上限値は 950 Mbps である [18]。通信システム試験に用いた PC の性能の違いなどの環境の違いにより転送速度が 950 Mbps に届かなかったことが考えられるが速度としては十分であった。いづれにせよ、デジチェーン接続による通信速度の制限はかからず、原理的にデジチェーン接続は可能であることがわかった。

以上のような結果から、ハードウェア的にはデジチェーン接続は可能なことが判った。つまり、適切なファームウェアを開発することで、ROESTI はデジチェーン接続が可能になり、真空フィードスルーの数の最小化が実現できることが考えられる。

3.3.6 ここまでの結果のまとめ

本章のここまできをまとめる。本章では ROESTI プロトタイプノイズ、ダイナミックレンジ、クロストーク、時間分解能、通信試験の評価を行った。ノイズに対する要求は「最小電荷量の S/N 比が 8 以上であること」であり、結果は S/N=13 であった。よって要求を満たす。ダイナミックレンジに対する要求は「800 fC から 5 pC の電荷を識別できること」であり、測定結果は 6 fC から 600 fC であったため、要求を満たさない。クロストークに対する要求は「クロストークの影響が以下であること」である。測定結果は、その影響はノイズレベル以下であり、要求を満たす。時間分解能に対する要求値は「時間分解能が 2 ns 以下」

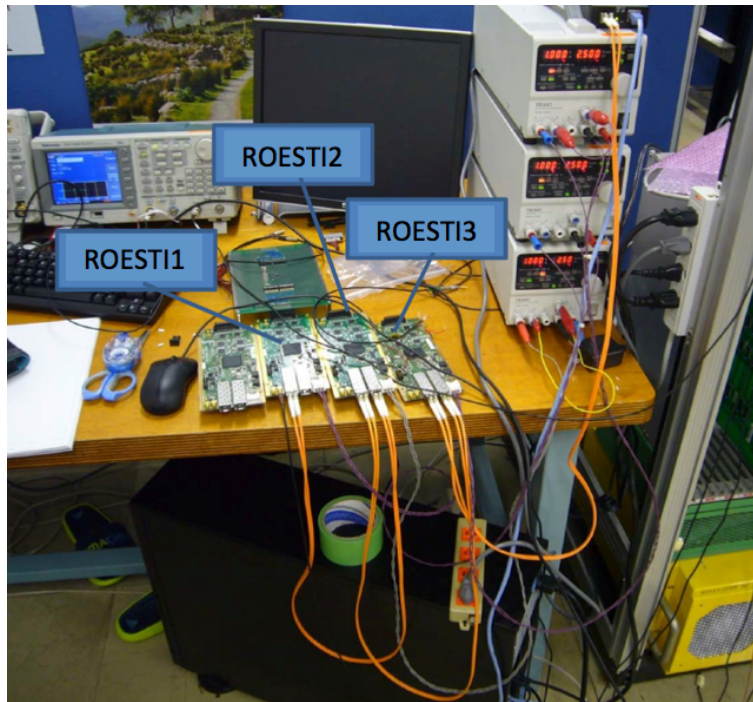


図 3.31: 通信試験の様子。

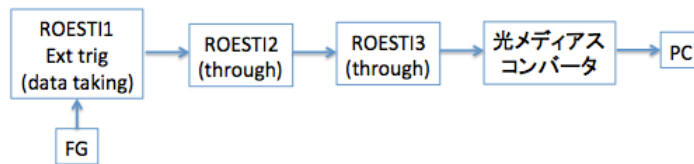


図 3.32: 通信試験のセットアップの様子。ROESTI1 の外部トリガーの生成の方法や、遅延などは、ダイナミックレンジのデータを取得した場合と同様である。

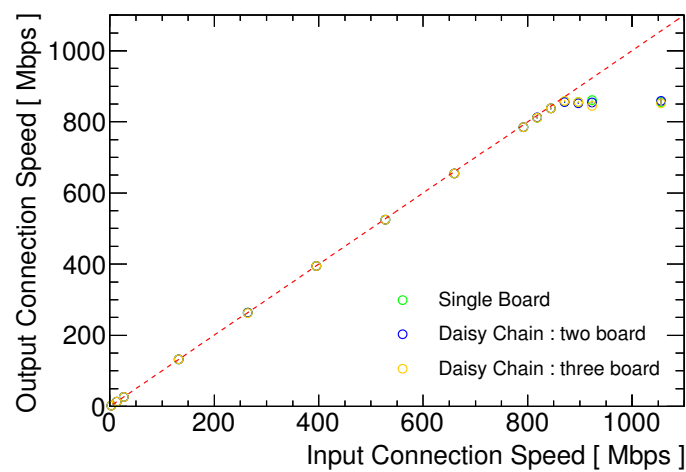


図 3.33: 通信速度の様子。緑はデージーチェーン接続しなかったとき、青は 2 枚の ROESTI をデージーチェーン接続したとき、黄色は 3 枚の ROESTI をデージーチェーン接続したときを、それぞれ表す。

である。測定の結果は、時間分解能は 0.81 ns 以下であり、要求を満たす。通信試験の要求値は「デジタイゼーション接続による通信速度の制限がかからないこと」であり、その要求を満たす。以上のことを表 3.5 にまとめておく。

表 3.5: ROESTI 基本性能のまとめ。

評価項目	要求	結果
ノイズ	最小電荷量付近の S/N 比が 8 以上	S/N=13
ダイナミックレンジ	800 fC から 5 pC	6 fC から 600 fC
クロストーク	ノイズレベル以下	ノイズレベル以下
時間分解能	2 ns 以下	0.81 ns 以下
通信試験	デジタイゼーション接続をして 900 Mbps	860 Mbps

3.4 ストローチューブトラッカーとの接続試験

ROESTI とストローチューブトラッカープロトタイプとの接続試験を行った。試験項目は、Fe-55 線源を用いた場合の信号の読み出し試験と宇宙線を用いた MIP の信号の読み出し試験であり、それぞれの場合でストローチューブトラッカーが出力する信号を正しく読み出せるのかどうかの評価を行った。

3.4.1 目的

この試験までは、ファンクションジェネレータによって矩形波を生成し、それをキャパシタを通すことで電荷に変換した、言わば仮想的な波形を ROESTI に入力したものを対象に評価を行っていた。ROESTI は本来、ストローチューブトラッカーの信号を読み出すために、開発されたものであるが、検出器によって生成された信号を問題なく読み出すことができるのかどうかは、今まで確かめられていなかった。この試験では、ストローチューブトラッカーによって生成された信号を ROESTI が正しく読み出すことができるのかどうかを確かめることが目的である。

3.4.2 線源 Fe-55 を用いた信号の読み出し試験

セットアップの概念図は図 3.34 の通りで、線源をストローチューブトラッカーの上に置き、その信号を ROESTI を用いて読み出す。ストローチューブに封入したガスは Ar : C₂H₆ = 50 : 50 の混合ガス 1 気圧である。この測定では、ROESTI はセルフトリガーでデータを取得している。なお、ROESTI とストローチューブトラッカーの接続の様子は図 3.35 の通りである。

解析では、ストローチューブトラッカーの出力波形の波高の分布を求めた。セルフトリガーモードでは、どれか 1 つチャンネルでも、閾値を越えれば全てのチャンネルのデータを取るよう設定されており、ヒットチャンネルとそれ以外のデータが混在している。典型的な信号波形は図 3.36 左図、典型的なノイズは図 3.36 右図の通りである。ROESTI のセルフトリガーモードでは、波形のピークの位置が常に 250ns 付近にあることが分かっており、0 ns から 150 ns の間の ADC 値の標準偏差の値をノイズの大きさ、平均値をベースラインとし、150 ns から 400 ns の区間の最小値とベースラインの差分を波高と定義した。150 ns から 400 ns の範囲でノイズの大きさの 3 倍の範囲外に 20 点以上存在して、400 ns から 600 ns の範囲でノイズレベルが ADC 値で 50 以下であれば、ヒットチャンネルと判定し、そのようなチャンネルのみを解析の対象とした。ASD は信号の立ち上がりに 20 ns 要することが知られており、測定したい信号の時間幅は最低

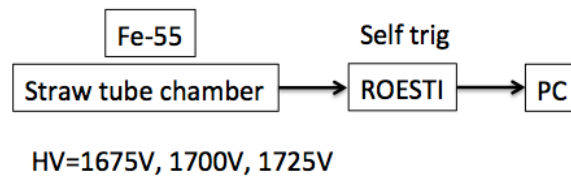


図 3.34: 線源 Fe-55 を用いた ROESTI 接続試験のセットアップの概念図。

20 ns 間はノイズに対し有意であるあると考えた。また、セルフトリガーでは波形のピークの位置が 200 ns 付近に位置することも分かっており、本来ならば、400 ns から 600 ns はノイズレベルと一致するはずである。しかし、この測定では図 3.36 右図のような、ノイズが見えていた。このようなノイズは、ヒットチャンネルと判定される条件の 1 つである「150 ns から 400 ns の範囲でノイズの大きさの 3 倍の範囲外に 20 点以上存在」を満たしており、別の条件を加える必要がある。そこで、400 ns から 600 ns の範囲でノイズレベルが ADC 値で 50 以下という条件を加え、ヒットチャンネルを選別した。

結果は図 3.37 から図 3.40 の通りで、順にアノードワイヤーの印加電圧が 1675 V, 1700 V, 1725 V, 1750 V に対応する。これらは、全てチャンネル 13 の波高の分布である。

解析によって、ノイズはできるだけ取り除いたが、完全に除去できた訳ではなく、ノイズによるピークが 0 付近に立っている。信号によるピークはアノードワイヤーの印加電圧を上げる程、大きくなることが確認できる。また、ROESTI はストローチューブトラッカーの信号を読み出せるということがわかった。

図 3.38 で求めた通り、アノードワイヤーに 1700 V を印加して線源 Fe-55 を用いたときの波高分布では、ADC 値で 1440 にピークがあり、310 fC 程度の入力電荷に対応する。増幅される前の電荷は 3.6×10^{-17} [C] であることは分かっているので、ガスゲインは 8.6×10^3 と求まる。前述した通り、同様の条件でオシロスコープを使って信号を読み出した場合、ガスゲインは 6.5×10^3 である。オシロスコープを用いて信号の読み出しを行ったときには、反射のようなものが見えており、高い精度での測定はできなかったことが原因で、2 つの測定方法の間でガスゲインの値に差異が生じていると考えられるが、原因は明確にはわかっておらず、今後詳しく調査する必要がある。

3.4.3 宇宙線を用いた MIP による信号の読み出し試験

次に宇宙線を用いた MIP による信号の読み出し試験を行った。セットアップは図 3.41 の通りである。ストローチューブトラッカーの上下にシンチレーターを設置し、それらのコインシデンスを取ることで、ROESTI のトリガーとしている。MIP の典型的な波形は図 3.42 に示す通りである。ストローチューブに封入しているガスなどは前節の場合と同じであり、1 気圧の Ar : C₂H₆ = 50 : 50 の混合ガスを用いた。またヒットチャンネルの選別などの解析も、前節と同様の方法で行っている。結果は図 3.43 から図 3.45 の通りで、順にアノードワイヤーの印加電圧が 1675 V, 1700 V, 1725 V, 1750 V に対応する。図 1.32 から図 1.35 では、全てチャンネル 13 の波高の分布を載せた。アノードワイヤーの電圧を上げるほど、信号の波高が大きくなり、S/N 比が良くなることが判る。ADC 値 0 付近にはノイズによるピーク、1800 付近には DRS4 のサチュレーションによるピークがそれぞれ立っている。

アノードワイヤーの印加電圧が 1700 V で線源 Fe-55 を用いたとき、5.9 keV の電子によるピーク付近をガウシアンでフィッティングするとその中心値は ADC 値で 1440 であった。アノードワイヤーの印加電圧が 1700 V のときの宇宙線による信号の波高分布をとランダム分布、ノイズによる 0 付近のピークをガウシアンでフィッティングを行い、MIP の S/N 比を求めた。第 2 章の MIP 測定の時と同様に、ランダム分布の最確値を信号、ガウシアン標準偏差 σ をノイズと定義した。そうするとアノードワイヤーの印加電圧 1700 V における S/N 比は 9.4 と求まった。第 2 章で求めた行った MIP 測定では 2 kV における S/N 比は

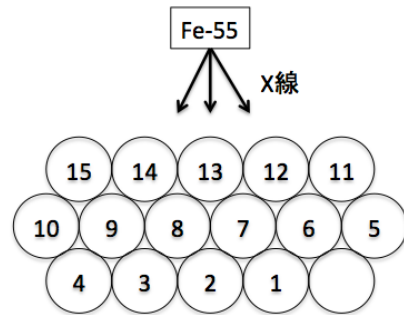
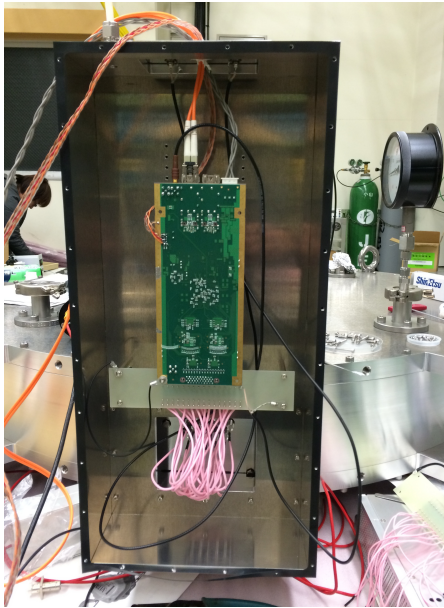


図 3.35: 左図は、ROESTI とストローチューブトラッカーの接続の様子。右図は接続された ROESTI から見た線源の位置と ROESTI のチャンネルの対応関係の概念図。チャンネル 0 はストローチューブには繋がっていない。

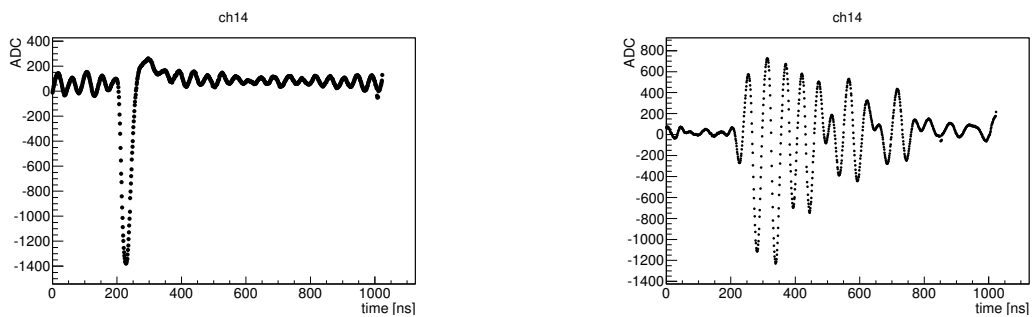


図 3.36: 左図は、ストローチューブのアノードワイヤーの印加電圧が 1700 V で線源 Fe-55 を用いたときの典型的な波形。右図は、典型的なノイズの様子。

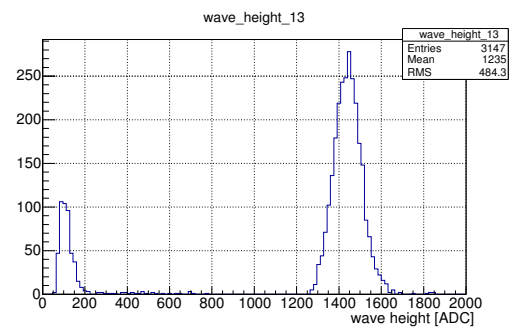
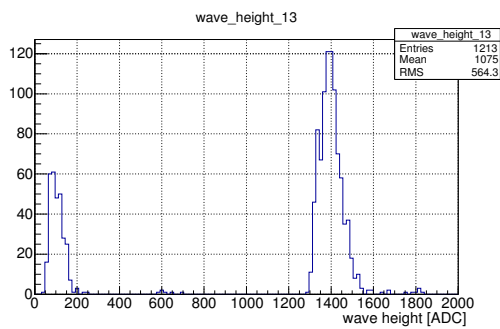


図 3.37: Fe-55 を用い、アノードワイヤーの印加電圧 1675 V のときの波高分布。 図 3.38: アノードワイヤーの印加電圧 1700 V で他の条件は図 3.37 と同じ。

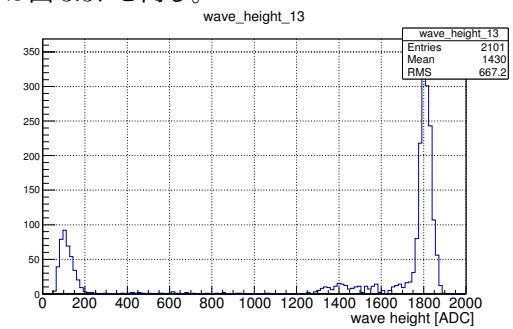
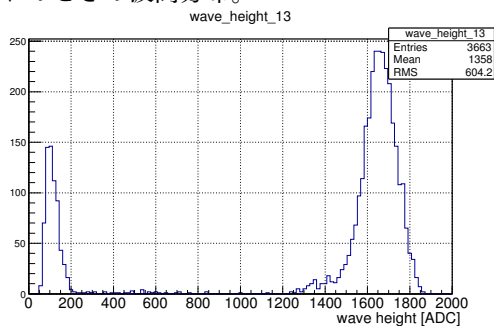


図 3.39: アノードワイヤーの印加電圧 1725 V で他の条件は図 3.37 と同じ。 図 3.40: アノードワイヤーの印加電圧 1750 V で他の条件は図 3.37 と同じ。

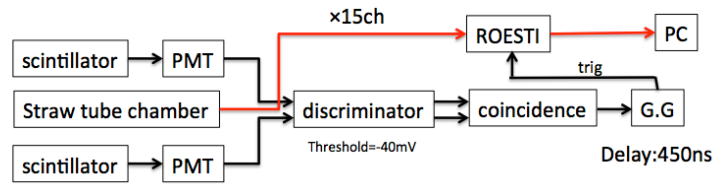


図 3.41: 宇宙線中の MIP を用いた ROESTI 接続試験のセットアップの概念図。

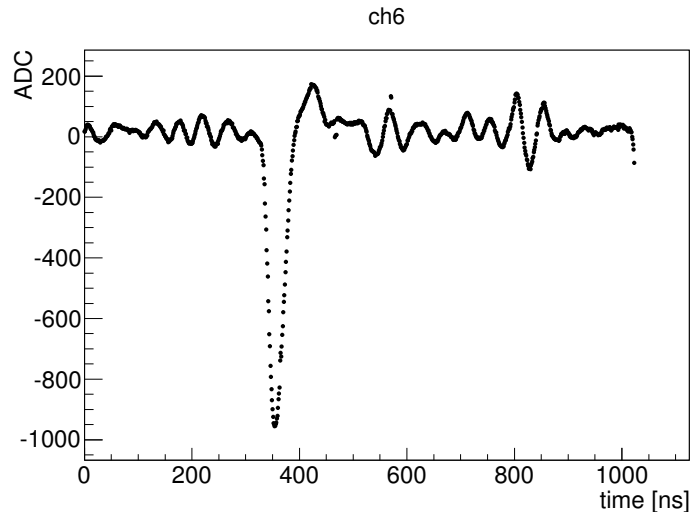


図 3.42: 印加電圧 1700 V のときの宇宙線による典型的な信号波形。

～20 であり、測定したガスゲインを用いると 1700 V における S/N 比は～6 になることが予測できる。以上のことより、ROESTI の S/N 比はオシロスコープを用いて信号を読み出したときよりも S/N 比は良いことが予測される。

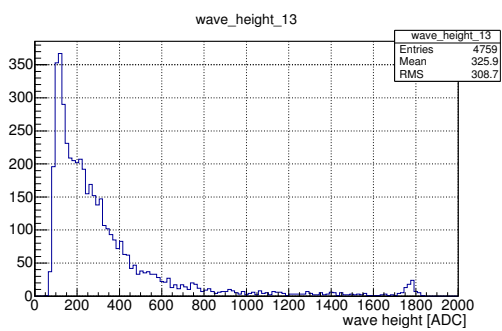


図 3.43: アノードワイヤーに対する印加電圧 1675 V

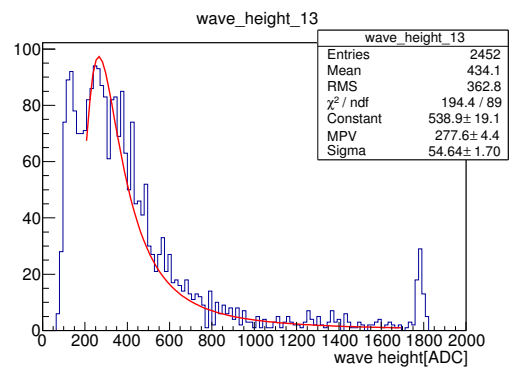


図 3.44: アノードワイヤーに対する印加電圧 1700 V

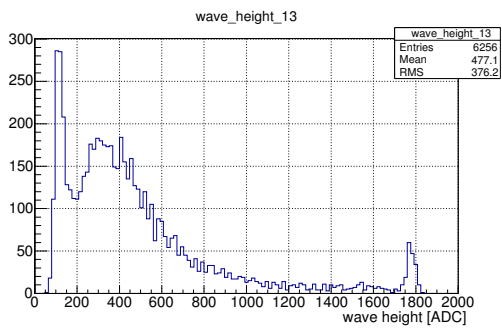


図 3.45: アノードワイヤーに対する印加電圧 1725 V

第4章 放射線耐性試験と磁場試験

4.1 磁場試験とビーム試験の概要

第2章で述べたように、ROESTIは1 Tの磁場中に設置され、中性子やガンマ線などの放射線が照射されるような環境で動作する必要がある。この章では、その要求を満たすかどうかの調査、更にそれらに対する耐性を持つ回路素子を選定することが目的である。

ROESTIの電源には5系統の電圧が必要があるが、それぞれ別個に供給すると電源回路部のみで面積が大きくなってしまいサイズの問題が生じる。さらに、供給のために必要なケーブル数、フィードスルー数なども多くなってしまう。また、ROESTIが設置される予定の場所ではガスを循環させる予定であるが、極力発熱の少ないものを用いる必要がある。そこで、これらの問題を解決すべくスイッチングレギュレータの利用を考えている。しかし、スイッチングレギュレータは一般的に内部にインダクタを持っており、磁場中で正しく動作しないものがあるということが報告されており、その調査が必要である。次期バージョンROESTIに搭載するスイッチングレギュレータの候補を4種類挙げており、それらを磁場中で動作させ、その挙動を調査し磁場耐性のあるものとならないものの選別を行うために、高エネルギー加速器機構超伝導低温工学センターにて2014年12月15日と16日に磁場試験を行った。また、磁場中のROESTIの挙動の調査も同時に行った。

PHITS[14]による放射線量計算によるとCOMET実験Phase-Iでは、大量の中性子とガンマ線が図4.1のように発生することが予測されている。90度ソレノイド直後の中性子とガンマ線のレートは共に、 $\sim 10^5$ Hz/cm²と予測されている。Phase-I実験のビームタイムを100日間であると仮定すると、中性子とガンマ線の総量は $\sim 10^{11}$ /cm²であり、ガンマ線の総量は ~ 20 Gyとなる。

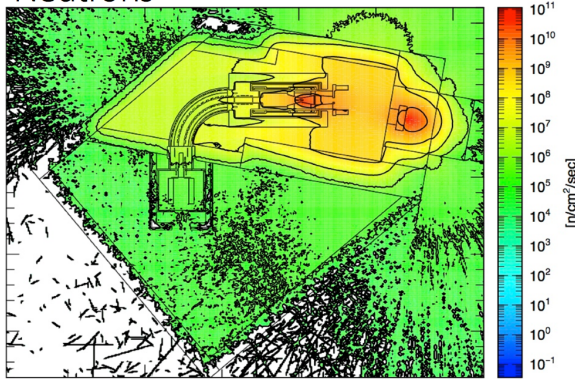
半導体で構成されるFPGAは中性子などの放射線によって、内部メモリでビット反転が起これ、ソフトウェアを起こしてしまう現象を起こすことが知られている。そのような現象はSingle Event Upset(以下SEU)と呼ばれている。上述のような放射線環境下でSEUによってどのような影響があり、どの程度の頻度で起こるのかを見積もり、その対策を考えることは必須である。この調査及び、レギュレータ等の素子の中性子耐性を調査することを目的として中性子照射試験を2回実施し1回目は2014年10月23日から同年10月25日に九州大学タンデム加速器にて行った。FPGA電圧シーケンス調整用のスイッチ(Texas Instruments社TPS27081ADDCR)、と上述した磁場試験の結果から磁場耐性に関する要求を満たすと判断されたスイッチングレギュレータの中性子耐性の調査を行うために、2015年1月9日から同年1月16日に渡り、神戸大学海事科学部タンデム加速器にて2回目の中性子照射試験を行った。

回路素子はものによってはガンマ線を照射させ続けることによって損傷を受け、壊れてしまうことがあるという報告がある。そこで、上記試験に加え、レギュレータ等の素子のガンマ線耐性、ROESTIの挙動調査を目的としてガンマ線照射試験を2015年1月6日から同年1月14日の期間に高崎量子応用研究所にて行った。

4.2 磁場試験

上述の通り、COMET実験ではストローチューブトッラカーとROESTIは1Tの磁場中に設置される予定であり、磁場中でROESTIは正しく動作する必要がある。特にスイッチングレギュレータは一般的に内

Neutrons



Gamma

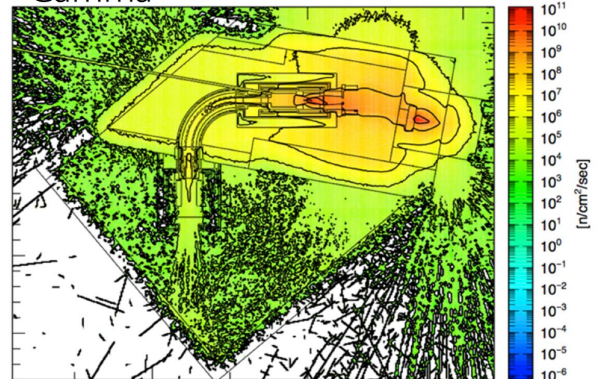


図 4.1: PHITS による Phase-I 実験の中性子とガンマ線の線量の PHITS によるシミュレーション。左図は中性子の線量表し、右図はガンマ線の線量を表す。

部にインダクタを持っているため、磁場中で正しく動作しないものがあるということが報告されており、調査が必要である。これらの調査のため、2014 年 12 月 15 日、16 日に高エネルギー加速器機構超伝導低温工学センターにあり超伝導 MRI 磁石を用いた磁場耐性試験を行った。

4.2.1 磁場試験のセットアップと測定方法

ROESTI は ASD のデジタル出力や FPGA において 3.3 V、1 V の電源を必要としており、スイッチングレギュレータを用いてそれらに電圧を与える。ROESTI のスイッチングレギュレータに対する要求として以下の 2 点が挙げられる。それらの素子に必要な 3.3 V、1 V を出力できる点、極力コンパクトなものである点である。これらを考慮し、以下の 4 種類を候補として選択した。

- A) LMZ10503(Texas Instruments 社)
- B) LMZ31503(Texas Instruments 社)
- C) LTM4624(Linear technology 社)
- D) LTM8023(Linear technology 社)

1 つめの候補 A は ROESTI プロトタイプに搭載されているものである。それぞれのレギュレータの評価ボードを用意し、それらを用いて磁場中動作試験を行った。図 4.2 と図 4.3 にセットアップを示す。入力電圧 5 V を直流電源から各レギュレータに与え、レギュレータの出力にダミーロードとして 10 Ω の負荷をかけた。レギュレータの出力は 3.3 V に設定した。直流電源の出力直後、レギュレータの入力直前、レギュレータの出力直後、ダミーロードの入力直前の 4 点の電圧をデータロガーを用いて記録している。直流電源とレギュレータ間、レギュレータとダミーロード間を結ぶケーブルの長さはどちらも 5 m で、ケーブル内部の電圧降下を考慮して上記の 4 点で記録した。

図 4.2 のように X 軸、Y 軸、Z 軸を定義し、図 4.4 のように X-Y 平面、X-Z 平面、Y-Z 平のそれぞれに対して垂直な方向に磁場をかけて、磁場中での挙動を測定した。磁場の強さは磁石中心から離れるに連れ弱くなり、中心付近が最も磁場が強く磁場は ~1.6 T である。磁石は図 4.4 に示す通りであり、磁場の方向は紙面裏側から表側である。図 4.4 の円筒状の磁石の写真手前側であれば磁場は弱くなる。その性質を利用して、磁石中でレギュレータと ROESTI を置く位置を移動させ、磁場の強さを変化させた場合の挙動も

調査した。この間 ROESTI には、テストパルス用電荷入力端子へ矩形波を入力し続けており、波形データを取得した。データロガーを用いて記録した電圧値と電流値を用いて電圧変換効率の評価を行った。図 4.3 に示す通り、電源の出力電圧を V_{ps} 、レギュレータに印加される電圧を V_{in} 、電源とレギュレータを結ぶケーブルに流れる電流を I_{in} 、レギュレータの出力電圧を V_{out} 、ダミーロードに印加される電圧を V_{load} 、レギュレータとダミーロードを結ぶケーブル間に流れる電流を I_{out} 、ダミーロードに用いた抵抗値を R とそれぞれ定義する。なお、 I_{in} 、 V_{out} は直流電源に表示される値を用いている。以上の様に定義すると、レギュレータの入力電力 W_{in} と出力電力、電圧変換効率 P_{eff} はそれぞれ以下の様に表せる。

$$P_{eff} = 100 \times \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (4.1)$$

$$W_{in} = I_{in} \times V_{in} \quad (4.2)$$

$$W_{out} = \frac{V_{load}}{R} \times V_{out} = \frac{V_{load} \times V_{out}}{R} \quad (4.3)$$

以上を用いて、各レギュレータの磁場中における電圧変換効率を調べた。ROESTI には第 2 章と同様の方法で電荷を入力し、波形データを取り続け、データに異常がないかどうかを調査した。

結果は図 4.5 の通りである。左上図は $\vec{B} \perp X - Z$ 平面、右上図は $\vec{B} \perp Y - Z$ 平面、右下図は $\vec{B} \perp X - Y$ 平面をそれぞれ表し、黒は A、赤は B、緑は C、青は D をそれぞれ表す。C は X-Y 平面に対して垂直な方向に 1T 以上の磁場をかけたときには出力電圧が 4.1V になり、そもそも ROESTI では使用不能であることがわかった。D は、あらゆる条件の下で高い電圧変換効率を保っており、磁場による影響が小さいと言える。B は、出力電圧がサチュレーションを起こしており、磁場の影響を受けやすいことがわかる。以上の結果から最も磁場の影響を受けにくいものは D で、その次は A である。

次に A と D にのみ、10 Ω のダミーロードの抵抗を並列接続することで、見かけ上の抵抗値を 5 Ω に変更して、電圧変換効率を調査した。A と D は 10 Ω 以外の負荷に対しても、高い電圧変換効率を測定することが目的である。その結果は図 4.6 の通りで、10 Ω の負荷の場合と明確な違いは見られなかった。測定したあらゆる条件の下で D は高い電圧変換効率を示し、D が最も磁場の影響を受けにくいことが分かった。 $\vec{B} \perp X - Y$ の条件下で、A の電圧変換効率は 60% 程度まで低下するが、出力電圧はあらゆる状況で正常であり、D の次に磁場の影響を受けにくいということが分かった。その結果は表 4.1 にまとめている。ROESTI で取得した波形データを解析し、ノイズレベルと波高を求め、磁場がかかっていない状況と比較を行った。その結果、ROESTI に磁場をかけていない状況と有意な差異は認められなかった。また、磁場試験中に電圧がかからなくなるなどのハードウェア的な以上は見られず、磁場中で正しく動作を行うことが確認できた。

表 4.1: 磁場試験の結果のまとめ。

	型番	磁場耐性
A	LMZ10503(Texas Instruments 社)	Δ
B	LMZ31503(Texas Instruments 社)	\times
C	LTM4624(Linear technology 社)	\times
D	LTM8023(Linear technology 社)	\circ

4.3 中性子照射試験

4.3.1 九州大学タンデム加速器で行った中性子照射試験

上記の通り、2014 年 10 月 23 から同年 10 月 25 日に九州大学タンデム加速器にて中性子照射試験を行った。このビーム試験のビームターゲットは ROESTI と次期バージョン ROESTI に搭載する予定の Artix7

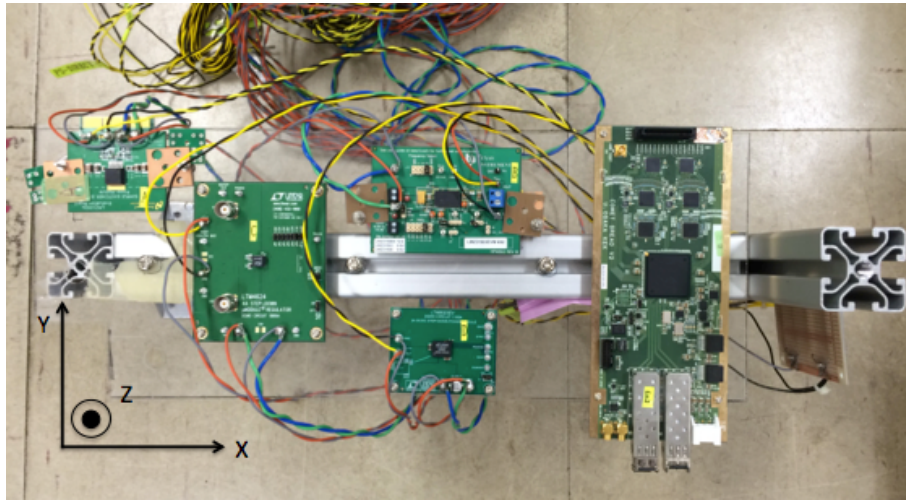


図 4.2: 磁場試験のセットアップ。写真左側の2つは左から順に、A, C の評価ボード。中央付近の縦に並んだ2つは上から順に、B, D の評価ボード。最も右側に設置されているものが ROESTI である。

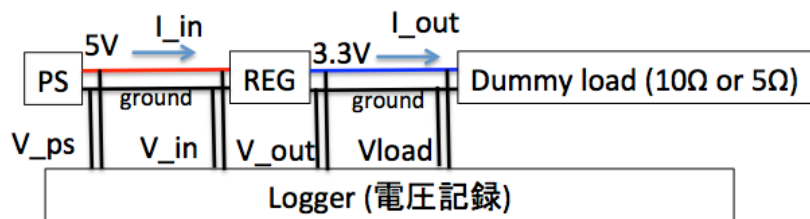


図 4.3: 磁場試験のセットアップの概念図。

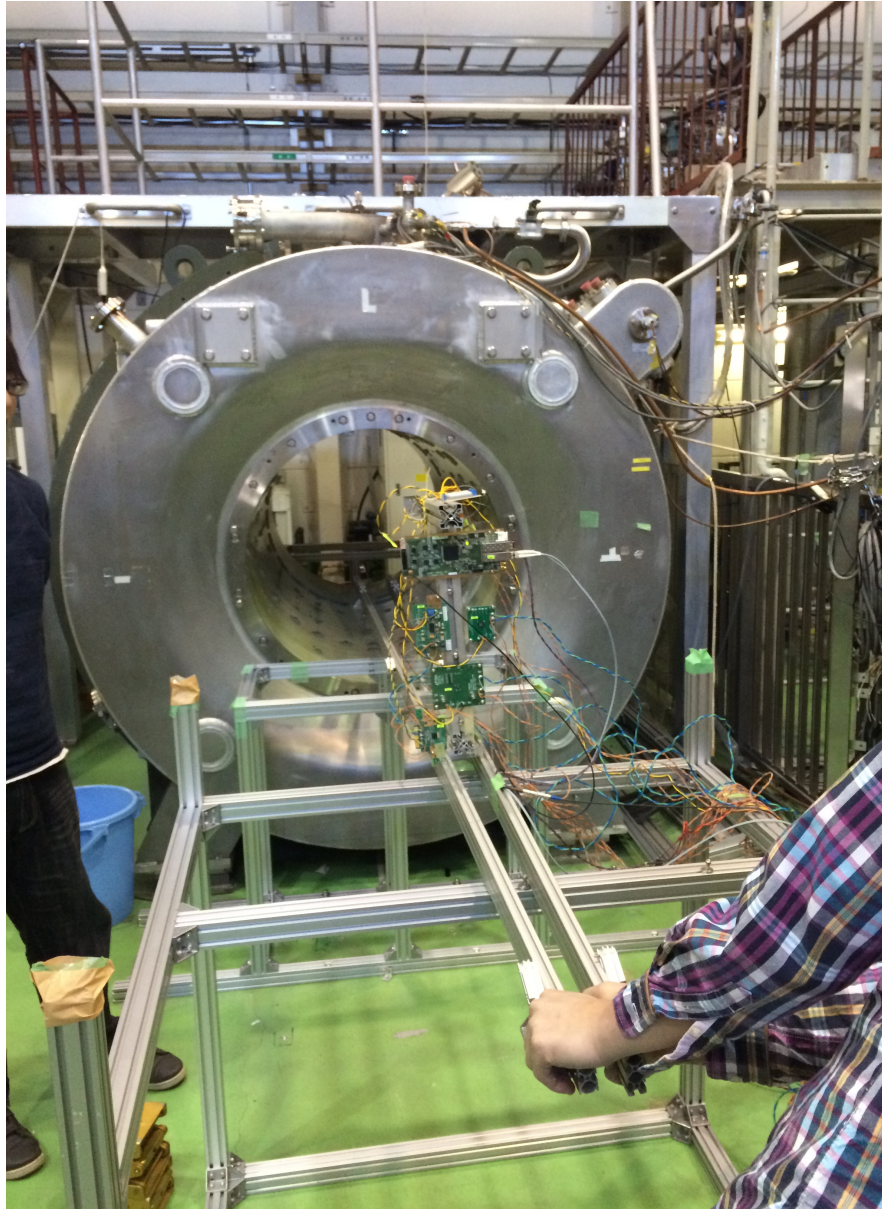


図 4.4: MRI 磁石と磁場試験部材。磁場の方向は紙面裏から表である。

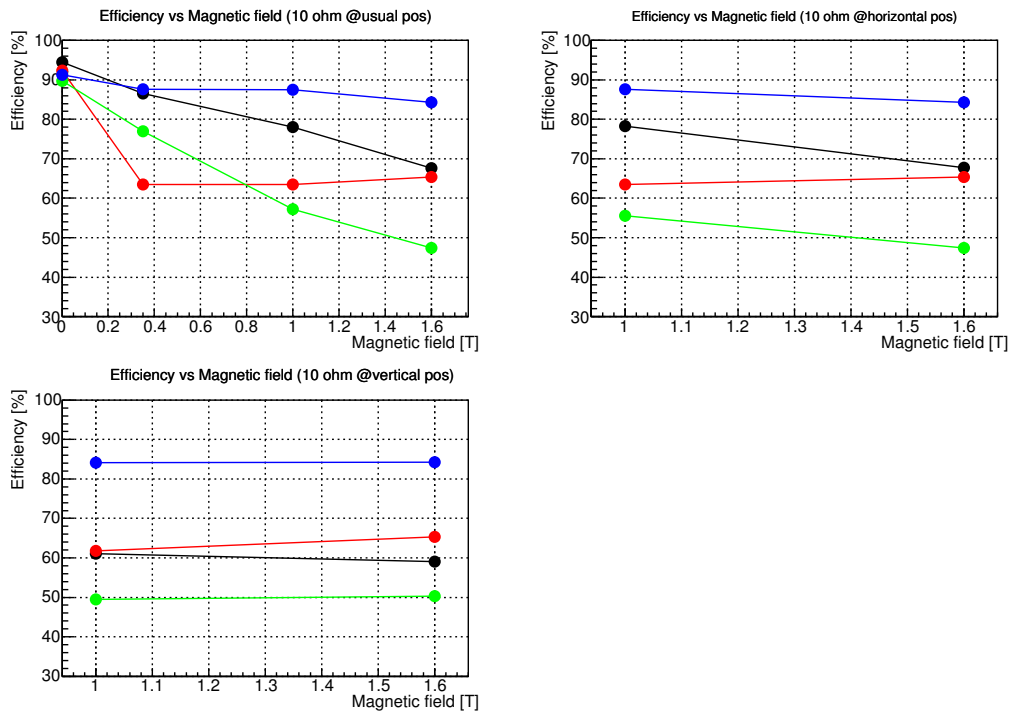


図 4.5: 左上図は $\vec{B} \perp X - Z$ 平面、右上図は $\vec{B} \perp Y - Z$ 平面、左下図は $\vec{B} \perp X - Y$ 平面をそれぞれ表す。黒は現バージョン ROESTI に搭載されている LTM10503(A)、赤は LMZ31503(B)、緑は LTM4624(C)、青は LTM8023(D) をそれぞれ表す。

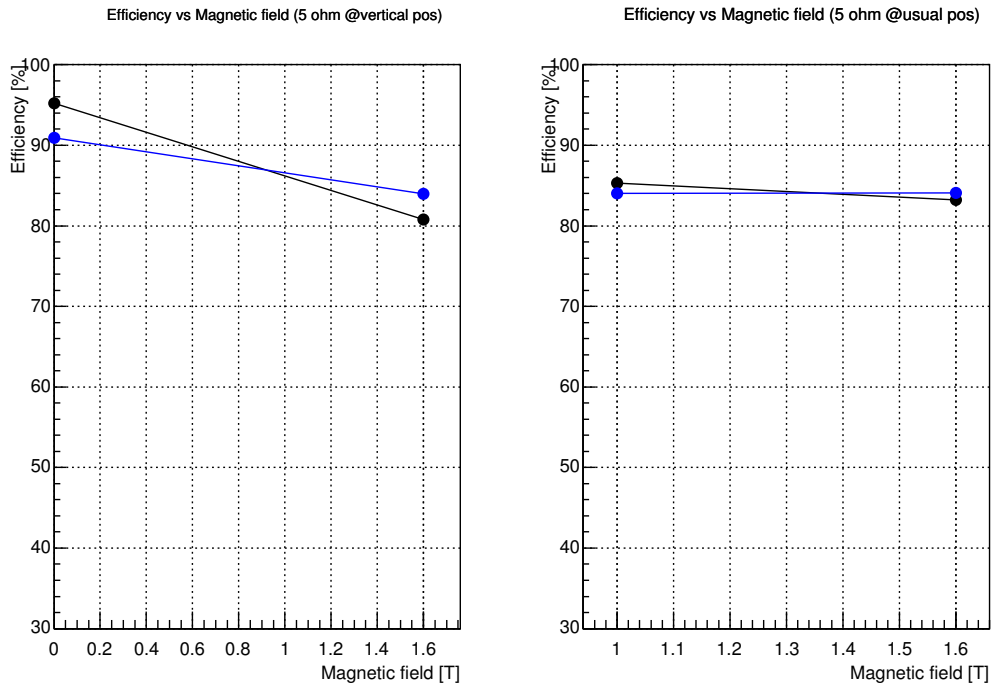


図 4.6: ダミーロードの抵抗値を 5Ω に変更したときの A と D の様子。黒は A、青は D を表す。左図は $\vec{B} \perp X - Y$ 平面、右図は $\vec{B} \perp X - Z$ 平面をそれぞれ表す。

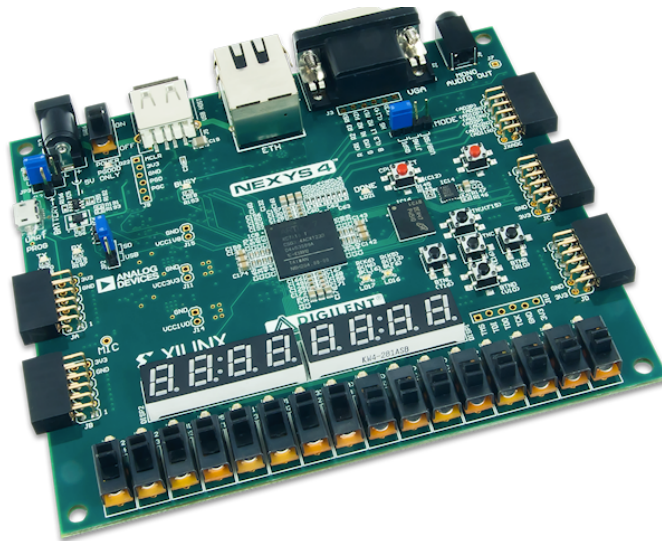


図 4.7: 中性子照射試験で使用した Artix-7 の評価ボード。

の評価ボード (図 4.7) であり、ビームターゲットに対し Phase-I 実験の 90 度ソレノイド直後で見積もられている中性子量より 10 倍程度多い $\sim 10^{12}$ / cm^2 の中性子を照射した。この測定では、SEU によってどのような影響があり、それはどの程度の頻度で起こるのかを見積もり、その対策を考えること、スイッチングレギュレータなどの素子の中性子耐性を調査することが目的であり、次期バージョン ROESTI に搭載する予定の Artix7 の評価ボード (図 4.7) と ROESTI に中性子を照射した。

セットアップ

九州大学タンデム加速器では水素の同位体である 9 MeV のエネルギーを持つ重水素をターゲットである炭素に入射させて、中性子ビームを発生させている。その時のエネルギーのスペクトルや角度依存性は、図 4.8 に示す通りである。照射実験は COMET 実験で使用予定の他の検出器部材 (CDC トリガー用 APD、カロリメーター用 MPPC、磁石用ダイオード) と共に行った。炭素ターゲット周りの配置図は図 4.9 の通りで、ビームの上流側から順に、MPPC, APD, Artix-7, ROESTI, ダイオードと設置した。本論文では、Artix-7 と ROESTI のみ述べる。Artix-7 の評価ボードと ROESTI は、それぞれターゲットから距離 7 cm と 18.5 cm の位置に配置されている。各ビーム照射部材にはアルミニウム箱、ニッケル箱、金箔の放射化ターゲットが貼ってあり、中性子照射終了後にそれらが放射するガンマ線を測定することで、ビームターゲットに照射された中性子量を見積もった。Artix-7 評価ボードは FPGA がビーム軸の中心になるように設置し、ROESTI はビームの中心が DRS4 と ADC の中点になるように設置した。(図 4.10)

Artix-7 には、その評価ボードに搭載されている LED を点滅させるファームウェアを実装した。Artix-7 はダウンロードしたコンフィギュレーションファイルと、ある時刻に FPGA 内部に記録されているファイルの状態の差分を取ることで、ビット反転などを検出する verify(read back) と呼ばれる機能を有している。7 秒-8 秒に 1 度の頻度で verify を行い、いつ SEU が起こったのかを検出した。SEU が起こった場合には、ファームウェアの再ダウンロードを行った。ROESTI は第 2 章と同様の方法で 1kHz の周波数で波形を入力し続け、外部トリガーモードでデータを取得した。PC と ROESTI の間で通信エラーが発生した場合、その都度ファームウェアを再ダウンロードを行い、データを取り続けた。

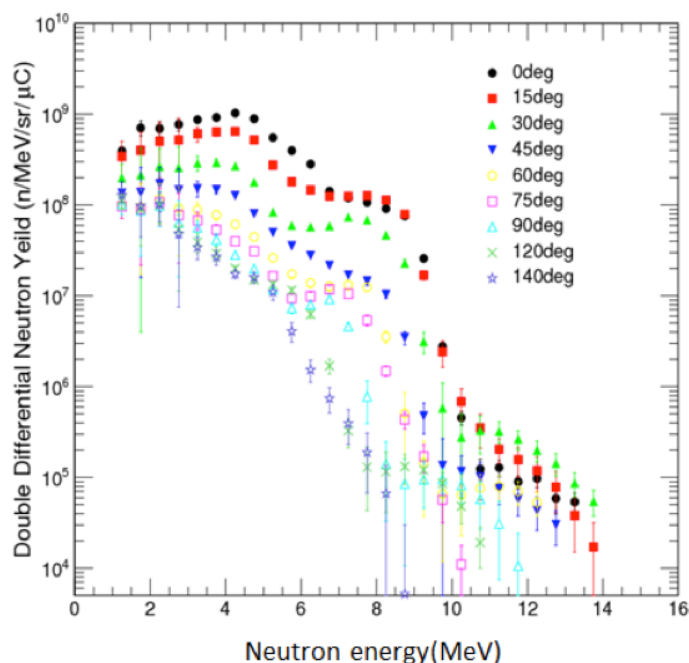


図 4.8: 9 MeV の重水素を炭素ターゲットに入射させた時の中性子ビームエネルギースペクトル [15]。

ランサマリー

このビーム試験では、ビームカレントを変えることにより中性子のレートを変更した。具体的には、ビームカレントが $0.6 \mu\text{A}$ 、 0.6nA の 2 つで測定を行った。この試験での、ビーム照射時間は 20.7 時間で、その内の 11.3 時間はビームカレントが $0.6 \mu\text{A}$ 、残りの 9.29 時間のビームカレントは 0.6nA である。 $0.6 \mu\text{A}$ のビームは 10 月 24 日 3 時 6 分に開始し、同日の 17 時 9 分に終了した。その間、ビームは出続けている訳ではなく、放射化ターゲットを取り出すために何度かビームを止めている。 0.6nA のカレントのビームは 10 月 24 日 20 時 55 分に開始し、翌日の 9 時 7 分に終了している。10 月 24 日 20 時 55 分から同日 21 時 19 分、10 月 24 日 22 時 43 分から同日 23 時 20 分の時間帯はビーム自体の不具合が確認されている。 $0.6 \mu\text{A}$ のビームカレントに対するビーム中心の中性子のレートは、ROESTI の位置で $\sim 1.8 \times 10^7 \text{ Hz/cm}^2$ で Artix-7 の位置で $\sim 3.3 \times 10^7 \text{ Hz/cm}^2$ であった。 0.6nA のビームカレントに対しては、 $0.6 \mu\text{A}$ の場合の $1/1000$ の中性子のレートになり、ROESTI の位置で $\sim 1.8 \times 10^4 \text{ Hz/cm}^2$ であり、Artix-7 の位置で $\sim 3.3 \times 10^4 \text{ Hz/cm}^2$ であった。ビーム試験を通した中性子量は ROESTI が $\sim 7.35 \times 10^{11} / \text{cm}^2$ で、Artix-7 は $\sim 1.34 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ である。図 4.8 の通り、ビームは角度により強度が異なる。各素子の中性子量及びレートを表 4.2 にまとめた。表 4.2 中のスイッチングレギュレータは、図 4.10 の reg1 と記してあるものが受けた中性子量である。

中性子がボードの表から入射する場合と、裏から入射する場合に SEU が起こる頻度の違いが報告されており、それぞれの 2 つの場合をビームカレント 0.6nA の時に Artix-7 評価ボードを用いて調査をした。

解析とその結果

ROESTI で取得したデータをデコードした際に、デコードできたファイルを「正常なファイル」と定義し、それ以外のファイルを「壊れたファイル」と定義した。図 4.11 は、正常なファイルと壊れたファイルの数の総数を時系列にプロットしたものである。上述したように、 $0.6 \mu\text{A}$ のビームは 10 月 24 日 3 時 6 分に開始し、同日の 17 時 9 分に停止している。 0.6nA のカレントのビームは 10 月 24 日 20 時 55 分に開始

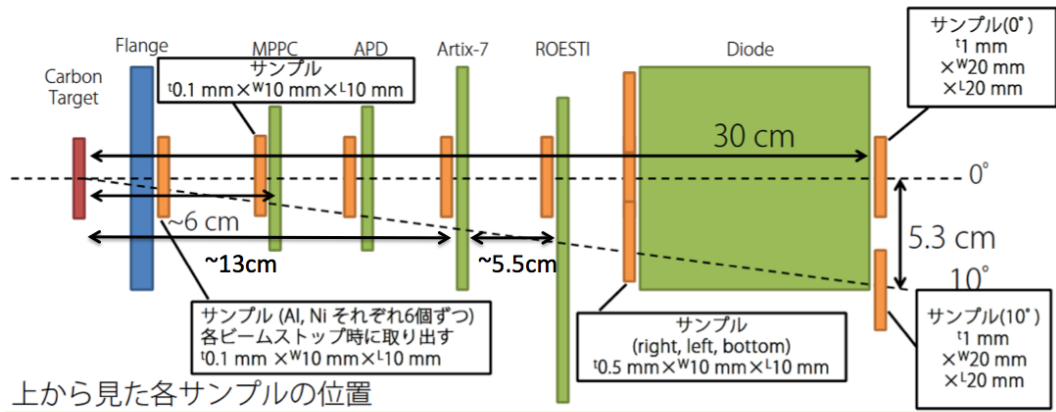


図 4.9: ターゲットに対する配置図。Artix-7 と ROESTI はそれぞれターゲットからそれぞれ約 13 cm と 18.5 cm の位置にある。

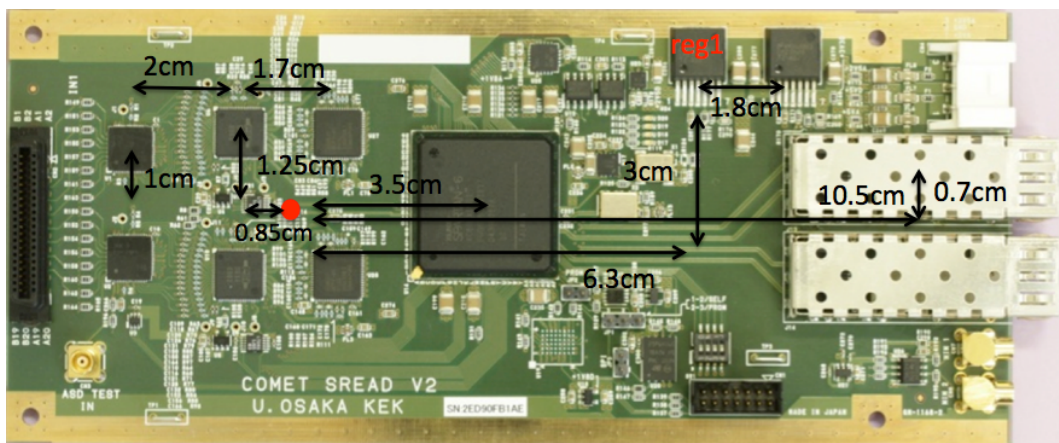


図 4.10: 図中の赤点がビーム軸の中心を表す。主な素子の中心からの距離が記してある。

表 4.2: 主な素子が受けた中性子量。BC はビームカレントを表す。

	BC=0.6 μ A 時の中性子のレート	BC=0.6 nA 時の中性子のレート	中性子の総量
中心	1.8×10^7 Hz/cm ²	1.8×10^4 Hz/cm ²	7.4×10^{11} /cm ²
ASD	1.5×10^7 Hz/cm ²	1.5×10^4 Hz/cm ²	6.0×10^{11} /cm ²
DRS4	1.6×10^7 Hz/cm ²	1.6×10^4 Hz/cm ²	6.7×10^{11} /cm ²
ADC	1.6×10^7 Hz/cm ²	1.6×10^4 Hz/cm ²	6.7×10^{11} /cm ²
FPGA	1.4×10^7 Hz/cm ²	1.4×10^4 Hz/cm ²	5.7×10^{11} /cm ²
レギュレータ	0.85×10^7 Hz/cm ²	0.85×10^4 Hz/cm ²	3.5×10^{11} /cm ²

し、翌日の9時7分に停止しており、目視でも両者の間での「壊れたファイルの増加率の違い」がわかる。上述の通り、ビームが思った通りの強度になっていない時間や、放射化サンプルを回収する為にビームを止めた時刻を差し引いた、正味のビーム照射時間を表 4.3 にまとめている。解析には、ビームが正常に動作している時間のもののみを使用した。正常なファイル」を対象に、中性子照射による波高やノイズの大きさの影響を調査した。波高やノイズの定義やそれらの求め方は第 2 章と同様である。これらの時間変化は図 4.12 に示す通りである。波高は目立った変化を示さなかったが、ノイズの大きさが突如上昇することが見られた。そのようなイベントと壊れたファイルの因果関係、ファームウェアを再ダウンロードした時刻の関係性を調べた。その結果は図 4.13 の通りである。緑の縦線はファームウェアをダウンロードし直した時刻、黒点は壊れたファイルの時刻を表している。ファームウェアの再ダウンロード時間の不定性の為、最大 60 秒程度のズレがある。ノイズレベルが上昇すると、自ずと正常なノイズの大きさに戻ることはなく、後にファイルが壊れるということがわかる。また、ファイルが壊れても、ファームウェアをダウンロードし直すことでノイズの大きさは正常に戻るということがわかる。ノイズの大きさが上昇した時刻付近を、全て調査すると、原則的には上昇したノイズの大きさはファームウェアをダウンロードし直さない限りは正常なノイズの大きさには戻らないことが分かった。しかし、例外的な現象が 1 イベントだけあった。そのイベントの周辺の様子は図 4.14 で、実際の波形の様子は図 4.15 左図の通りである。図 4.15 では 1 チャンネル分の波形しか掲載していないが、全チャンネルで同様のノイズが見られた。正常なイベントでは、ベースラインの位置は ADC 値で 0 付近にあるのに対して、このイベントではベースラインの位置が ADC 値で -100 から -200 にある。このような症状から、偶然電氣的なノイズが乗っていることなどが、原因として考えられるが、明確な原因は解っておらず、今後の厳密な調査が必要である。また、ビーム試験の終盤で、チャンネル 8-15 のノイズレベルが上昇していることが図 4.12 で確認できる。実際にそのイベントを確認した所、チャンネル 12 のみのノイズの大きさが常に上昇していた。このビーム試験では、PC と ROESTI の通信ができなくなった場合のみ、ファームウェアを再ダウンロードしていた。ビームカレントが 0.6 nA の時は、PC と ROESTI の通信が途切れることがなかったため、ファームウェアの再ダウンロードを行っていなかった。ビーム試験の後に、この測定で使用した ROESTI を使って、実験室でデータを取得した所、全チャンネルで異常は見られなかった。つまり、長時間ファームウェアの再ダウンロードを行わなかったために、このように長時間に渡り、中性子の影響によるノイズが乗り続けたと考えられる。

ビーム試験中に発生していたノイズの大きさの上昇や「壊れたファイル」が中性子によるものなのかを確かめるために、ビーム試験終了後、同様の試験を実験室でも行った。セットアップは中性子ビーム試験の時と同様で、その時の結果は図 4.16 の通りである。測定時間は 13 時間で 10 分に 1 度データを取得している。図 4.16 からわかる通り、波高、ノイズのどちらも目立った変化はなく安定していた。また、PC との接続が途切れるようなことも 1 度もなく、ファームウェアの再ダウンロードも行わなかった。デコードできない壊れたファイルもなかった。つまり、PC と ROESTI の通信が途切れたこと、ファイルが壊れたこと、ノイズレベルが上昇したことは中性子の影響であるということが考えられる。

以上の結果より ROESTI は中性子により影響を受けることが判明した。デコードできなかつたファイルが SEU によるものだと仮定すれば、FPGA が受ける中性子のレートが 1.4×10^7 Hz/cm² の場合と中性子のレートが 1.4×10^4 Hz/cm² の場合ではそれぞれ 0.9 分に 1 度と 112 分に 1 度のペースで SEU が起こることがわかった。上記のように、COMET 実験で想定されている中性子量は 90 度ソレノイド直後で $\sim 10^5$ Hz/cm² ということが見積もられており、ROESTI が設置されるストローチューブトラッカーのガスマニホール内部では $\sim 10^4$ Hz/cm² であることが見積もられている。SEU が発生する確率は中性子レートに比例すると仮定した場合、SEU は 100 分から 200 分に 1 度程度の頻度で発生することが予測される。ただし、SEU が発生し、ファイルなどに異常があってもファームウェアをダウンロードし直すことで、正常な状態に戻ることがわかっているため、定期的にファームウェアをダウンロードすれば、大きな問題にはならないことが予測できる。

また、中性子の影響でノイズの大きさが上昇することがあることがわかった。その場合も同様にファームウェアをダウンロードし直せば、正常な状態に戻ることわかっている。つまり、中性子により発生した問題はファームウェアをダウンロードし直すことで解決する。

ROESTI の主な素子が受けた中性子の総量やレートは表 4.3 の通りで、電圧がかからなくなるなどのハードウェア的な問題は発生しなかつたため、ROESTI プロトタイプに搭載されている素子は COMET 実験で発生することが予測される中性子量の環境でも問題無く動作すると考えられる。

Artix-7 評価ボードには、LED 点滅させるファームウェアを実装しておき、7 秒から 8 秒に 1 度のペースで verify を行い、verify が終わる度にファームウェアの再ダウンロードをするようにした。verify を行う度に、その時の FPGA の温度や、FPGA に記録されているビットファイルがコンフィギュレーションファイルと何ビット異なるかなどの情報が書き込まれたファイルが生成される。そのようなファイルでビットの差分が 0 ではないものを本論文では「デルタファイル」と定義する。また、FPGA に記録されているビットファイルとコンフィギュレーションファイルの差分を、本論では、「デルタビット」と定義する。SEU が起これば、「デルタビット」が 0 ビットではないことが予測され、「デルタファイル」の総数の時刻変化は図 4.17 上図に示す通りである。また、「デルタビット」の総数の時刻変化は図 4.17 下図に示す通りである。中性子のレートの違いによる挙動の差が目視で確認できる。詳しくは表 4.4 の通りである。

ファームウェアをダウンロードして、verify するのに要する時間は 7-8 秒程度で中性子のレートが高い程、その間に複数回の SEU が起きる可能性が高くなる。0.6 μ A のビームカレントの時の方が 0.6nA の時より、1 つの「デルタファイル」当たりの「デルタビット」の違いが多くなるのはその為であると考えられる。SEU 1 回に対して、1 ビットだけビット反転が起こると仮定すると、Artix-7 評価ボードの表から中性子が当たったときは、 3.3×10^7 Hz/cm² に対して、平均 4.7 秒に 1 回 SEU が発生し、 3.3×10^4 Hz/cm² に対しては、平均 56 分に 1 回 SEU が起こることが判り、前者は後者より、おおよそ 700 倍の頻度で SEU が発生する。前述のように ROESTI が設置されるガスマニホール内部では $\sim 10^4$ Hz/cm² と見積もられている。中性子のレートに SEU の頻度が比例すると仮定した場合、1 時間に 1 度程度の頻度で SEU は起こることが予測される。

中性子が評価ボードの表から当たった場合と裏から当たった場合の比較を行う。SEU が起こった回数の統計誤差のみを考慮すると、1 分間当たりに SEU が起こる頻度は表と裏でそれぞれ $1.8 \times 10^{-2} \pm 8.0 \times 10^{-3}$ SEU/min と $4.7 \times 10^{-2} \pm 1.3 \times 10^{-2}$ SEU/min であり、表から中性子が当たる方裏から当たるより SEU が有意に起きやすいことが判る。裏から当たる方が、表から当たるより、 2.6 ± 1.4 倍程度の頻度で SEU は起こることが予測され、COMET 実験でストローチューブトラッカー等に ROESTI を接続する際には、中性子の飛んでくる方向を考慮するべきである。

Artix-7 評価ボードの FPGA には 1.3×10^{12} /cm² 程度の中性子が当たったが、ハードウェアに異常は見られなかつた。

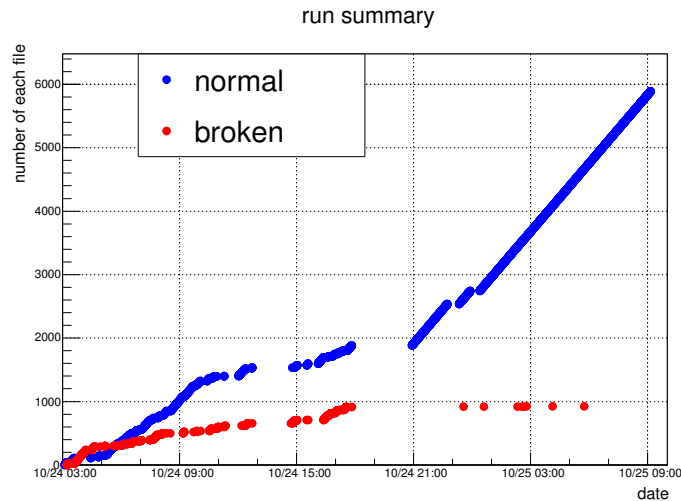


図 4.11: 「壊れたファイル」と「正常なファイル」の総和の時刻変化。赤点は「壊れたファイル」を表し、青点は「正常なファイル」を表す。

表 4.3: 2つのビームカレントの間での、ファイルの違い。括弧内の値は中性子のレートを表す。

ビームカレント	0.6 μA (1.8×10^7 Hz/cm ²)	0.6 nA (1.8×10^4 Hz/cm ²)
ビーム照射時間	687.3 分	557.5 分
「正常なファイルの数」	1273	3494
「壊れたファイルの数」	739	5
「壊れたファイル」の比率	37%	0.01%
「壊れたファイル」の頻度	1 回/0.9 分	1 回/112 分

4.3.2 神戸大学海事科学部タンDEM加速器で行った中性子照射試験

上記の通り 2015 年 1 月 9 日から同年 1 月 16 日神戸大学海事科学部で行った中性子照射試験を行った。神戸大学海事科学部タンDEM加速器では ~ 3 MeV のエネルギーを持つ重水素をターゲットであるベリリウムに入射させることにより、平均 ~ 4 MeV の中性子を発生させている。また中性子を生成に伴い、ガンマ線も発生する。ターゲット周りの配置図は図 4.18 の通りで、九州大学タンDEM加速器では試験できなかった素子の中性子耐性を調べた。具体的には、FPGA 電圧シーケンス用スイッチ (Texas Instruments 社 TSP27081ADDCR) とスイッチングレギュレータ LTM8023(D) である。それらのセットアップは磁場試験の時と同様であるが、同時に実験を行った他のグループとの兼ね合いでベリリウムターゲットからの距離が時刻によって変わっている。基本的に、他のグループが中性子ビームを使用しない深夜は、ベリリウムとレギュレータの距離は 56 mm で、日中は 130 mm の位置や 205 mm の位置である。1 月 15 日 20 時 13 分から翌日 10 時 21 分の間はガンマ線を遮蔽するために、ベリリウムとビームターゲットの間に厚さ 5 cm の鉛ブロックを置き、その時の挙動を調査した。深夜のビームカレントは ~ 1000 nA に対し、昼のビームカレントは平均 ~ 100 nA である。ビームカレントが 1000 ns の時、ベリリウムからの距離が 56 mm, 130 mm, 205 mm の位置に対するそれぞれの中性子のレートは 2.5×10^5 Hz/cm², 4.7×10^4 Hz/cm², 1.9×10^4 Hz/cm² である。

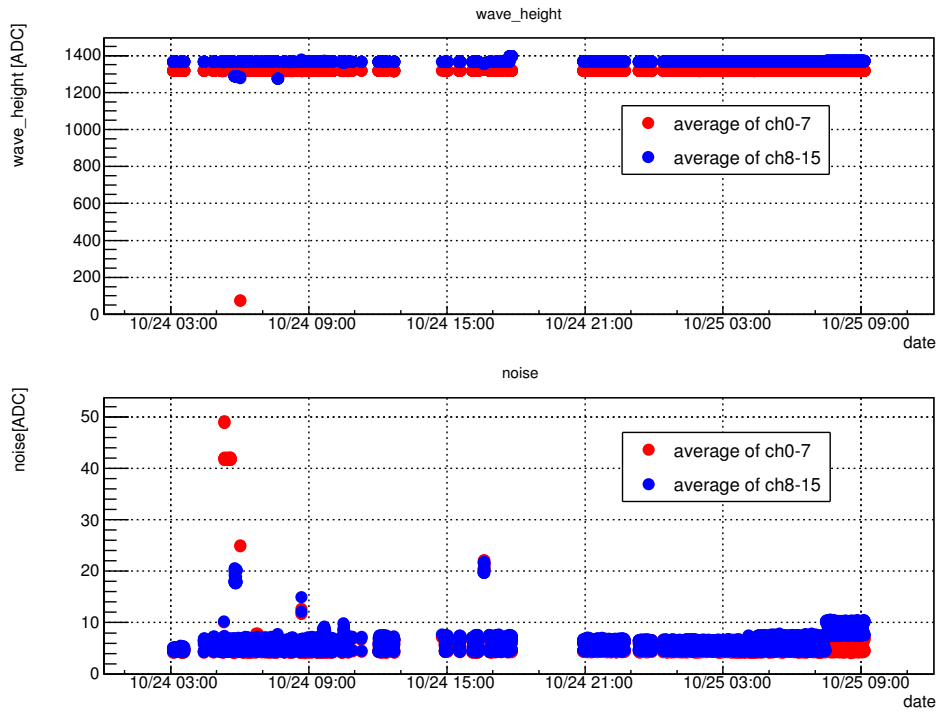


図 4.12: 上図は波高、下図はノイズの時刻変化を表す。

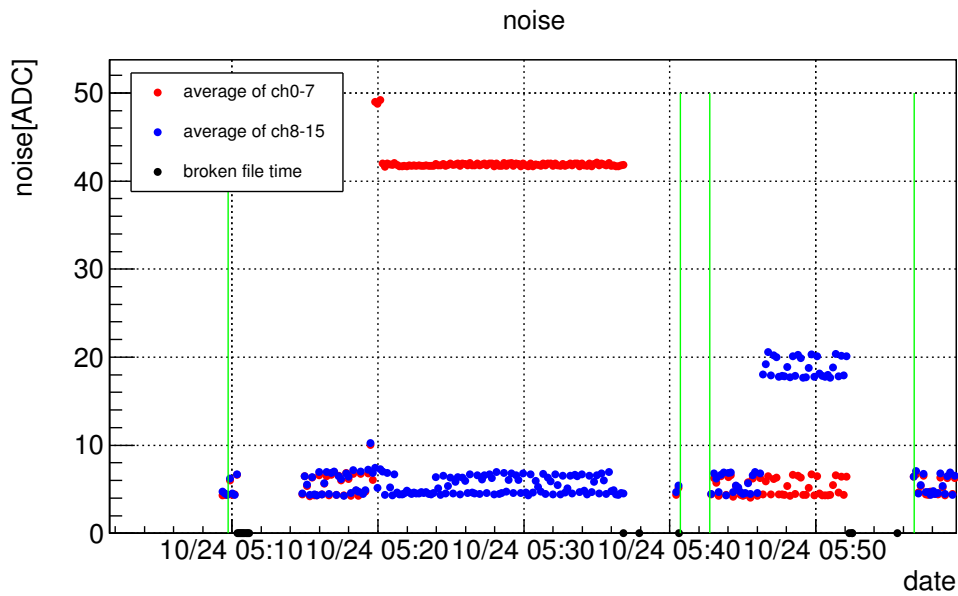


図 4.13: 図 4.12 の拡大図。黒点は壊れたファイルの時刻を表し、緑の線は再ダウンロードの時刻を表す。

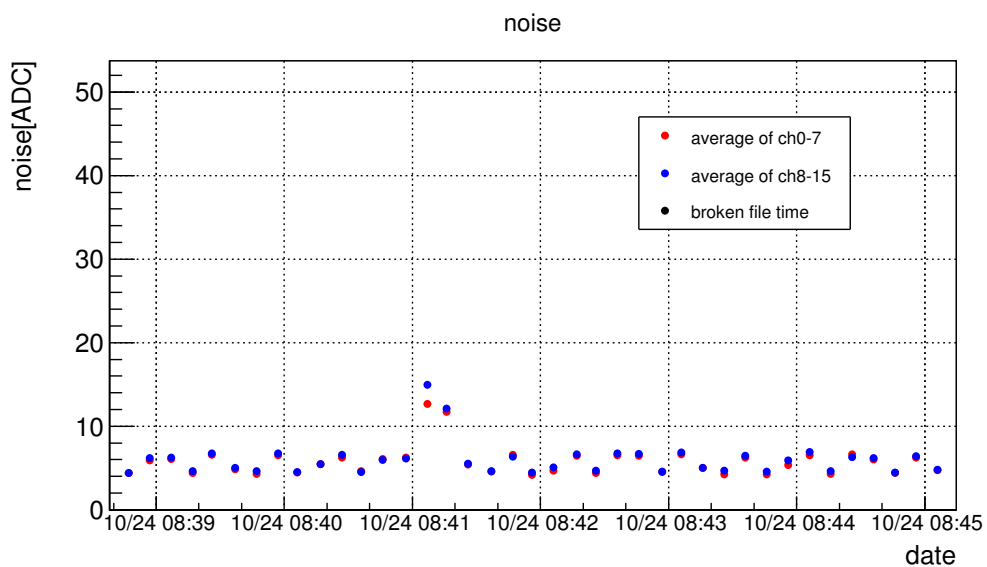


図 4.14: ノイズレベルが自ずと正常な状態に戻った例外的なイベント付近の様子。

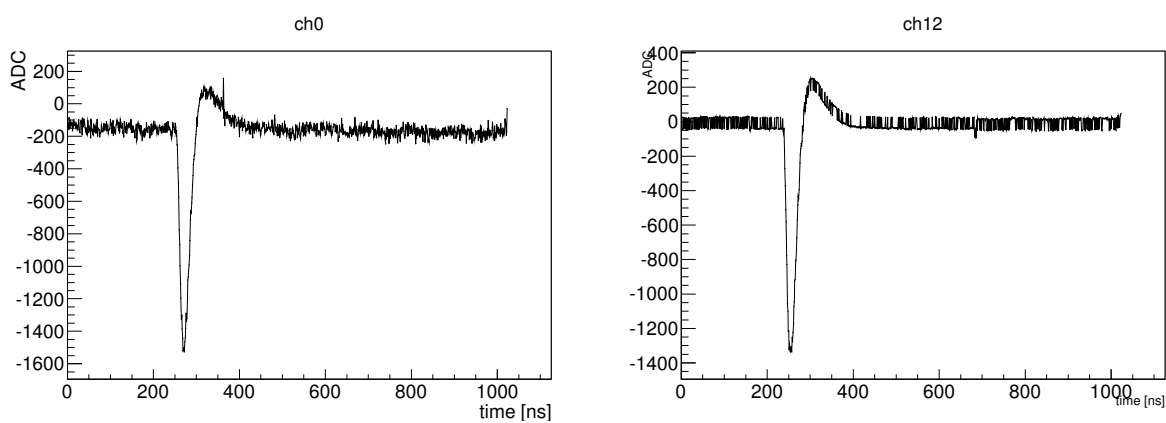


図 4.15: 左図はノイズレベルが自ずと正常な状態に戻った例外的なイベントの様子。右図は、ビーム試験終盤にノイズレベルが常に上昇していた ch12 の波形の様子。

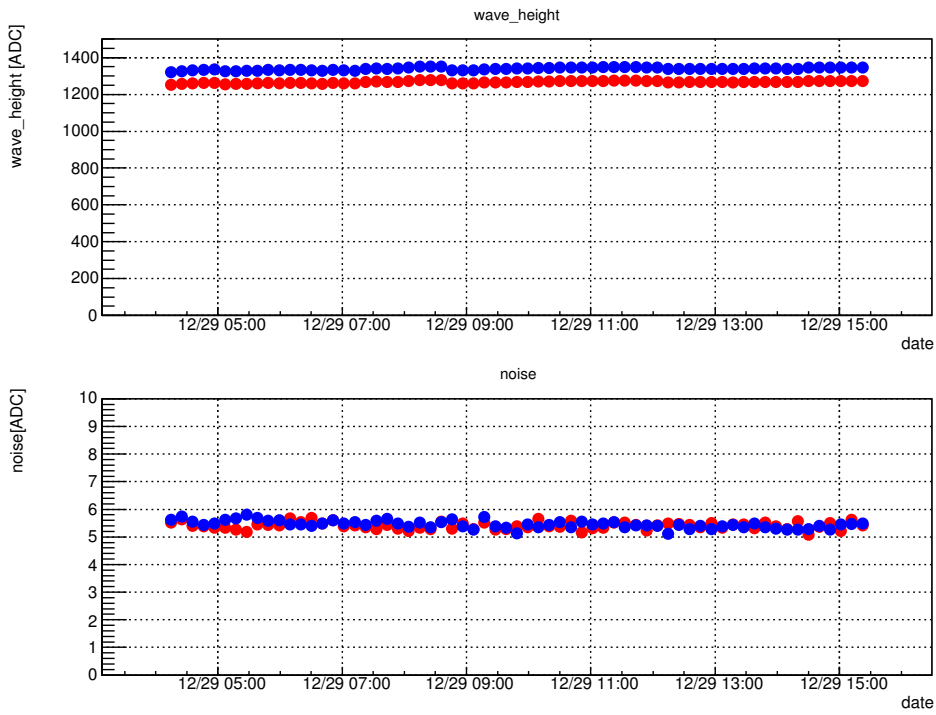


図 4.16: 実験室での波高とノイズレベルの時間変化の様子。赤点はチャンネル 0 から 7、青点はチャンネル 8 から 15 を表す。

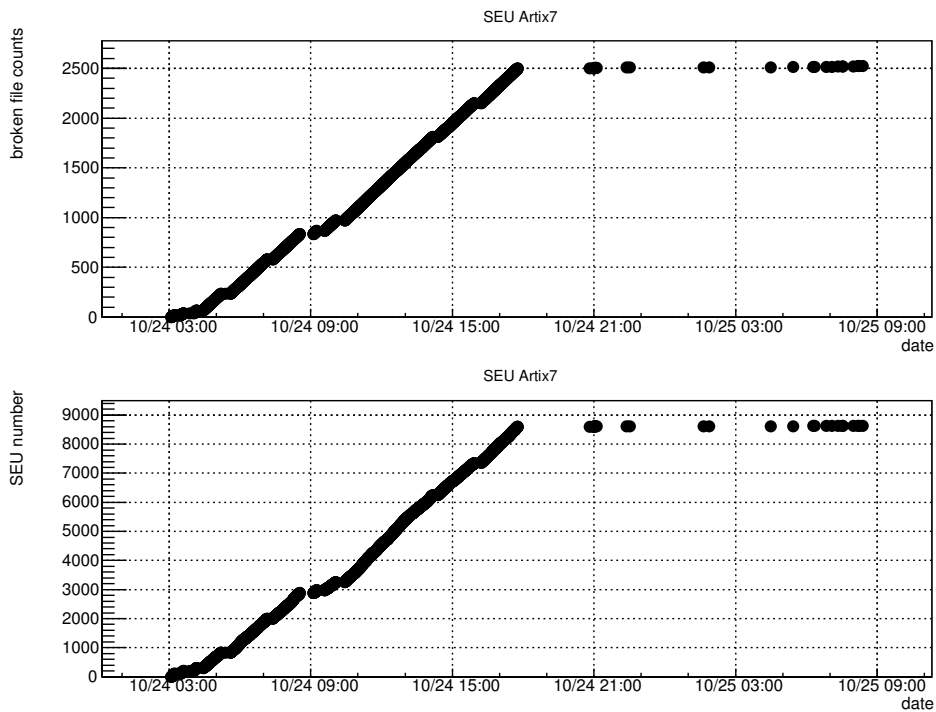


図 4.17: Artix-7 のビットエラーの様子。上図は「デルタファイル」が生成された時刻と、その総数のプロット。下図は「デルタビット」の総数と時刻のプロット。

表 4.4: 2つのビームカレントの間での、ファイルの数やビットの差の違い。

	0.6 μ A(表)	0.6 nA(表)	0.6 nA(裏)
ビーム照射時間	687.3 分	279.5 分	278 分
ファイル数	2496	4	13
ビットの違いの総数	8599	5	17
ファイル数/照射時間	1file/16sec	1file/70min	1file/21min
ビット数/照射時間	1bit/4.8sec	1bit/56min	1bit/16.3min

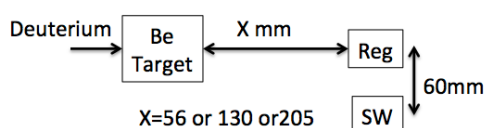


図 4.18: 中性子照射試験のベリリウムターゲット周りの、レギュレータとスイッチの配置図。

解析とその結果

その結果を図 4.19 に示す。最も上のプロットの青と緑は順にレギュレータの V_{ps} , V_{in} 、真ん中の青と緑は順にレギュレータの V_{out} , V_{load} 、 V_{out} , V_{load} 、最も下のプロットはスイッチの出力電圧をそれぞれ表す。上述の通り日中は深夜よりも中性子のレートが低く、レギュレータの出力電圧に目立った変化はないが、深夜は、レギュレータの出力電圧が上昇する様子が分かる。鉛を置きガンマ線を遮蔽した 1/15 日深夜から 1/16 日では、レギュレータの電圧に目立った変化はないため、レギュレータの電圧上昇は、ガンマ線照射寄与が大きいと考えられる。スイッチの出力は 0 V と 2.5 V を繰り返す様子が分かり、正しく動作していることがわかる。レギュレータとスイッチが受けた中性子の総量は $\sim 10^{11}$ Hz/cm² である。このような環境下においてもスイッチは正常に動作した。レギュレータは電圧上昇が見られるが、ガンマ線照射寄与が大きいと推測されるが、放射されたガンマ線量などが具体的にわかっていないため、レギュレータの電圧上昇が何によるものなのか明確には分かっておらず、今後詳細な解析が必要である。

表 4.5: 中性子照射試験の素子の結果のまとめ。○ は中性子照射による挙動の変化が見られなかったもの。△ は中性子照射による挙動の変化がみられたが、挙動が変化した要因が中性子なのかガンマ線なのか明確にわかっていないもの。

	型番	中性子耐性
A	LMZ10503(Texas Instruments 社)	○
スイッチ	TSP27081ADDCR(Texas Instruments 社)	○
D	LTM8023(Linear technology 社)	△
ROESTI		○

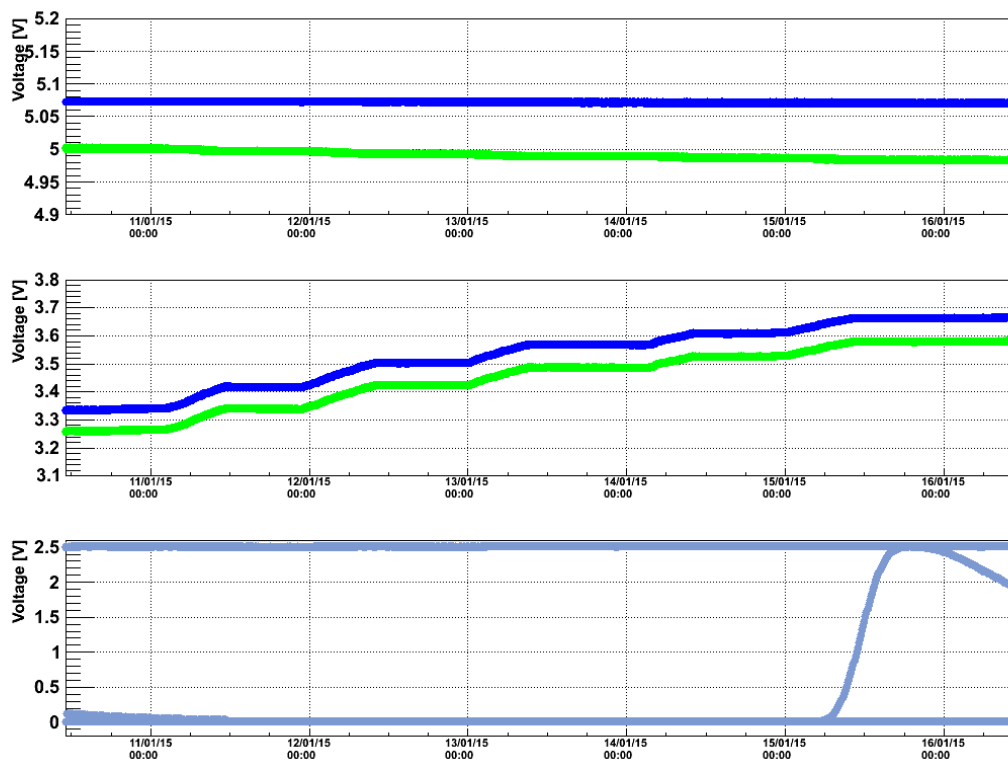


図 4.19: 神戸大学海事科学部タンデム加速器で行った中性子照射試験の結果。最も上のプロットの青と緑は順にレギュレータの V_{ps} , V_{in} を表す。真ん中の青と緑は順にレギュレータの V_{out} , V_{load} を表す。最も下のプロットはスイッチの出力電圧を表す。

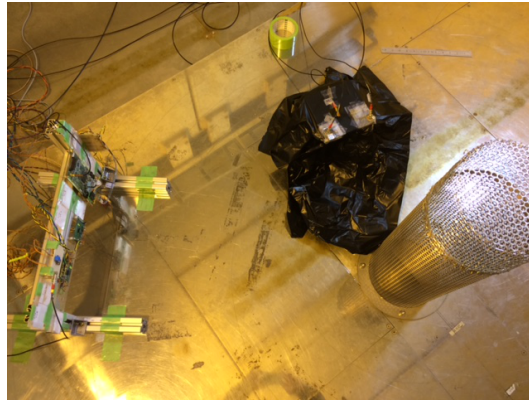


図 4.20: ガンマ線照射試験の様子。写真中の右側にある円筒状の中からガンマ線が等方的に放射される。

4.4 ガンマ線照射試験

上述の通り、PHITS による計算によると、COMET 実験 Phase-I のビームタイムが 100 日間だとすると、90 度ソレノイド直後でトータル 20 Gy 程度のガンマ線量が、見積もられている。レギュレータや ADC 等の素子はガンマ線に弱いものがあると報告されているため、ガンマ線を照射したときの素子の挙動を確かめ、最適なものを選定することが目的である。

4.4.1 セットアップ

上記の通り、2015 年 1 月 6 日から同年 1 月 14 日に高崎量子応用研究所にてガンマ線照射試験を行った。(図 4.20) ガンマ線照射試験では、磁場耐性があることが判った 2 つのレギュレータ LMZ10503(Texas Instruments 社)(A)、LTM8023(Linear technology 社)(D) と FPGA 電圧シーケンス調整用のスイッチ、ROESTI を対象にガンマ線の照射を行った。ガンマ線源とターゲットの距離を変えることによりガンマ線の強度を変えることができ、1 月 6 日から 1 月 13 の間では、ガンマ線源とターゲットの距離は 90 cm、強度は 6.5 Gy/hour で照射を行い、1 月 13 日の 10 時 38 分以降では、その距離は 60 cm であり、強度は 15 Gy/hour である。レギュレータのセットアップは磁場試験と同様(図 4.3)であり、図 4.3 中の V_{ps} , V_{in} , V_{out} , V_{load} をデータロガーを用いて記録した。ROESTI のセットアップは、第 3 章と同様で、ファンクションジェネレータで矩形波を生成し、ROESTI のテストパルスインプットへ入力し、データを取り続け、スイッチのセットアップは図 4.21 の通りで、電源からスイッチには 2.5 V の電圧を常に与えた。ファンクションジェネレータから 1 V の波高の矩形波を出力し、矩形波の電圧が 1V(High) の時のみスイッチはオンの状態で出力電圧は 2.5 V となる。矩形波が 0V(Low) の状態ではスイッチはオフの状態では出力電圧は 0 V である。

4.4.2 ガンマ線照射試験の結果

2 つのレギュレータをスイッチの結果は図 4.22 の通りで、磁場試験では最も最適と思われていた LTM8023(D) はガンマ線の照射によって、出力電圧が上がり続け ~ 450 Gy のガンマ線照射により壊れてしまうことがわかった。チップの許容入力電圧の上限値である 3.6 V を考慮すると、LTM8023(D) は ~ 70 Gy で使えなくなることになる。見積もられているガンマ線量の 10 倍の安全率を考えた場合、200 Gy までのガンマ線量に耐えられる必要があり、LTM8023(D) は要求を満たさないことがわかった。LMZ10503(A) は出力電圧に目立った変化はなく、要求を満たしていることがわかった。スイッチは ~ 600 Gy で、出力電圧が常に 2.5 V になっており、スイッチがオンの状態になっていないことがわかる。しかし、 ~ 200 Gy までは正常な動作

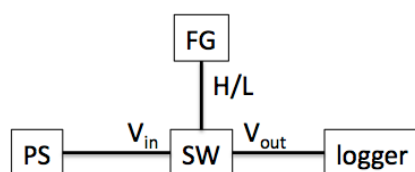


図 4.21: スイッチのセットアップ。ファンクションジェネレータで矩形波を入力する。矩形波がハイの状態の時のみ、2.5 V の電圧を出力し、それ以外の状態では 0V の出力で、出力電圧をロガーを用いて記録している。

表 4.6: 磁場試験の結果のまとめ。○ は安全率 10 の範囲内で問題なく動くもので、△ は 20 Gy までは動作するが、安全率 10 範囲内で正常に動作しなくなるもの。

	型番	ガンマ線耐性
A	LMZ10503(Texas Instruments 社)	○
D	LTM8023(Linear technology 社)	△
スイッチ	TPS27081ADDCR(Texas Instruments 社)	○
ROESTI		○

をしているため、要求を満たしていると考えられる。ROESTI は、 ~ 200 Gy 程度で PC と通信ができなくなった。具体的にどの素子が壊れたかは詳しく調査中であるが、今のところリニアレギュレータの電圧降下が確認されており、かつ他実験による調査の結果からも同様の挙動が確認されているため [19]、このレギュレータによるものだと考えている。以上の結果は表 4.6 にまとめておく。

4.4.3 耐性試験まとめ

本章で行った耐性試験の結果を表 4.7 にまとめておく。ROESTI、スイッチは基本的には問題ないことがわかり、スイッチングレギュレータに関しては A が最適だとわかった。

表 4.7: 耐性試験のまとめ

	型番	磁場耐性	中性子耐性	ガンマ線耐性
ROESTI		○	○	○
スイッチ	TPS27081ADDCR	-	○	○
A	LMZ10503	△	○	○
B	LMZ310503(Texas Instruments 社)	×	-	-
C	LTM8023(Linear technology 社)	×	-	-
D	LTM8023	○	-	×

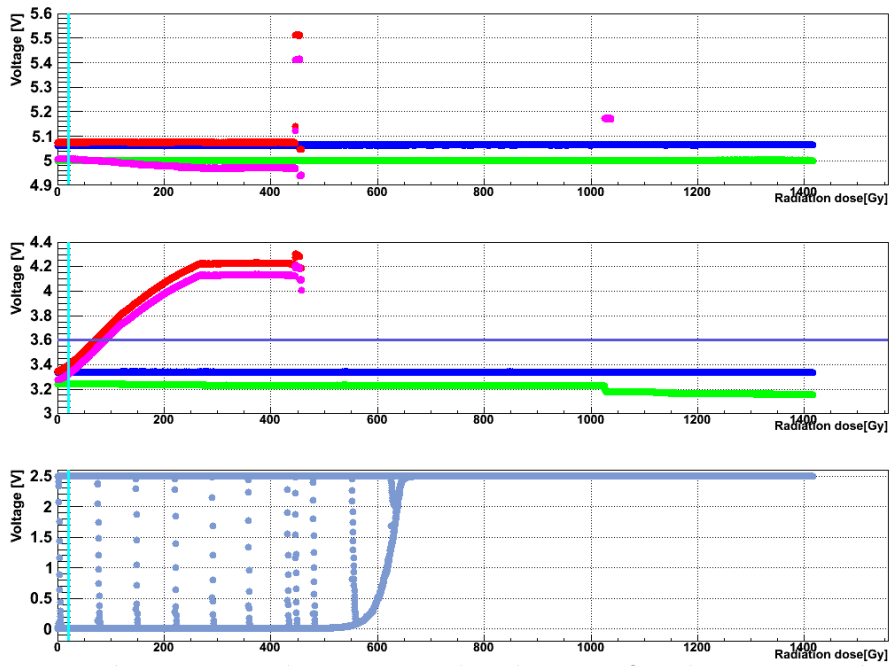


図 4.22: 上図の青、緑はそれぞれ現バージョン ROESTI に搭載されているレギュレータ LMZ10503 の V_{ps} , V_{in} で、赤とピンクはそれぞれ LTM8023 の V_{ps} , V_{in} である。真ん中の図の青、緑はそれぞれ LMZ10503 の V_{out} , V_{load} で、赤、ピンクはそれぞれ LTM8023 の V_{out} , V_{load} である。紫は出力電圧の上限値の 3.6 V を示している。下図はスイッチの出力電圧のプロットである。全てのプロットの横軸はグレーで、描かれている水色の縦線は、20 Gy を表す。

第5章 次期バージョン ROESTI

5.1 ROESTI プロトタイプの問題点

第3章で述べた通り DRS4 まわりの素子に関し、最新の ROESTI は 600 fC までの入力電荷しか識別することができないことがわかった。しかし、第2章で述べた通り、最新のストローチューブトラッカーは MIP に対して数百 fC から数 pC の電荷を出力することがわかり、最新の ROESTI プロトタイプでは MIP による信号のほとんどを識別することができないという問題点がある。

第4章の結果から放射線耐性環境磁場中で動作させるためには適切な素子を選択する必要があることもわかった。その他現状判明している問題点について以下に示す。ROESTI に搭載されている2つの DRS4 から出力される波形は波形の位相が完全には合っていない。全チャンネルに対して、同じタイミングで同じ波形が入力された場合、同じチップ内のチャンネル間では波形の位相は合っているが、異なるチップのチャンネル間では波形の位相がズレている。ストローチューブトラッカーを通過した荷電粒子の飛跡再構成を行う時などに、どのチャンネルが、どのタイミングで信号を出力したかの情報は非常に重要で、全てのチャンネル間の位相を合わせておく必要がある。

ROESTI プロトタイプのトリガー用コネクタは MCX を利用しており COMET 実験 Phase-I で想定されているトリガーシステム [3] が生成する信号の全てを受け取ることができないという問題がある。トリガーシステムと ROESTI はトリガー、クロック、パルス、ビジーの4種類の信号のやり取りを行う予定である。トリガーはその名の通り、ROESTI がどのタイミングで入力信号のデータを取得すべきなのかを決定する信号である。COMET 実験 Phase-I では百数十台の ROESTI が使われる予定であり、それらを同期する必要がある、トリガーシステムが生成する 40 MHz のクロックによって同期を取る。また、パルス波を各 ROESTI に入力することでタイミング調整を行う。FPGA が波形処理を行っている間に、次のイベントのトリガーが入力されると予期せぬ動作を起こすことがあり、最悪の場合 ROESTI がフリーズしてしまう。そのような事態を避けるために、FPGA が波形の処理を行っている間は、ROESTI からビジー信号を出し続けておき、トリガーの入力を一時的に受け付けないようにしておく。それらの信号には全て差動信号が予定でされており、1つの信号に対して2本の信号線が必要である。よって、トリガーシステムとの通信だけで8本の信号線が必要である。

また、複数の ROESTI に、同時にファームウェアをダウンロードすることができないという問題がある。上述のように COMET 実験では百数十台の ROESTI が使われる予定であり、1台ずつダウンロードするのは手間がかかり、非現実的であり、まとめてダウンロードできる機能も必要である。現バージョンでは FPGA に Xilinx 社の Spartan-6 シリーズを搭載しており、同社の ISE と呼ばれるツールでデザインやコンフィギュレーションなどを行っているが、Xilinx 社は 2012 年に Vivado と呼ばれる ISE に替わる新しいデザインツールを発表しており、ISE の新しいバージョンは今後発表しない予定である。7 シリーズ以上のものしか Vivado による動作が保証されておらず、今後のことを考慮すると FPGA の変更が必須である。

5.2 次期バージョンのデザイン

前節の問題点を踏まえた上で、次期バージョン ROESTI のデザインを行った。フロアプラン図 5.1 に示す。ASD と DRS4 の間にはアッテネーターを導入し ASD の出力を 1/10 にする。それによって実効的なダイナミックレンジを広げることでストローチューブトラッカーの信号の 95% は識別可能となる。ROESTI

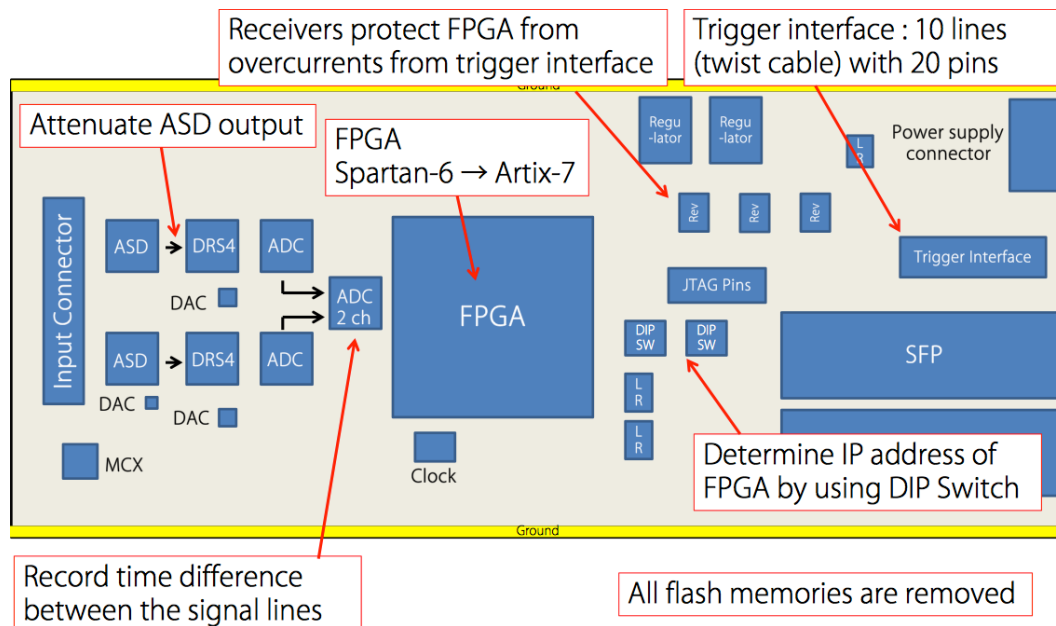


図 5.1: 次期バージョン ROESTI のフロアプラン

プロトタイプでは DRS4 の 8 チャンネルしか使用していないが、本来 DRS4 は 9 チャンネル持つており、その内の 1 チャンネルを 2 つの DRS4 の出力波形の位相補正に用いる。DRS4 の位相補正用チャンネルには常に矩形波などを入力しておき、その出力のデジタル化のために、2 チャンネル ADC を搭載し、2 チャンネル ADC 出力データを FPGA 内で処理することにより位相補正を行う。

電源用スイッチングレギュレータ、FPGA 電圧シーケンス調整用スイッチにはビーム試験と磁場試験から得られた候補のものを採用した。

トリガーコネクタは ROESTI プロトタイプでは MCX 端子だったが、次期バージョン ROESTI では 20 ピンコネクタ (KEL 社 8925(E)) に変更した。トリガーシステム用信号とファームウェアのダウンロードは、どちらも 4 つの信号を 1 つで処理できるようにした。それらは全て差動信号なので 16 本のピンが必要となる。残りの 4 ピンはデバッグを考慮した予備用である。

また、FPGA は Spartan-6 から Artix-7 に変更する。Spartan-6 よりも消費電力が少なくなる。Artix-7 では ECC と呼ばれるエラー修正機能がついており、SEU の影響を緩和できる可能性がある。以上に加え SiTCP 設定部およびファームウェア用メモリに変更を加えた。ROESTI プロトタイプにはこれらのメモリが FPGA 以外にも搭載されているが、中性子耐性を考慮し次期バージョン ROESTI では全て削除した。その代わりに次期バージョン IP アドレス設定にはディップスイッチを用いる予定で、新たに追加した。

以上のデザインを元に次期バージョン ROESTI の製作を進めている。現在次期バージョン ROESTI の製作を進めている。図 5.2 は現時点での基板配置図であり、詳細チェックを進めているところである。2015 年 3 月には完成予定であり、完成後は評価を進めて行く。

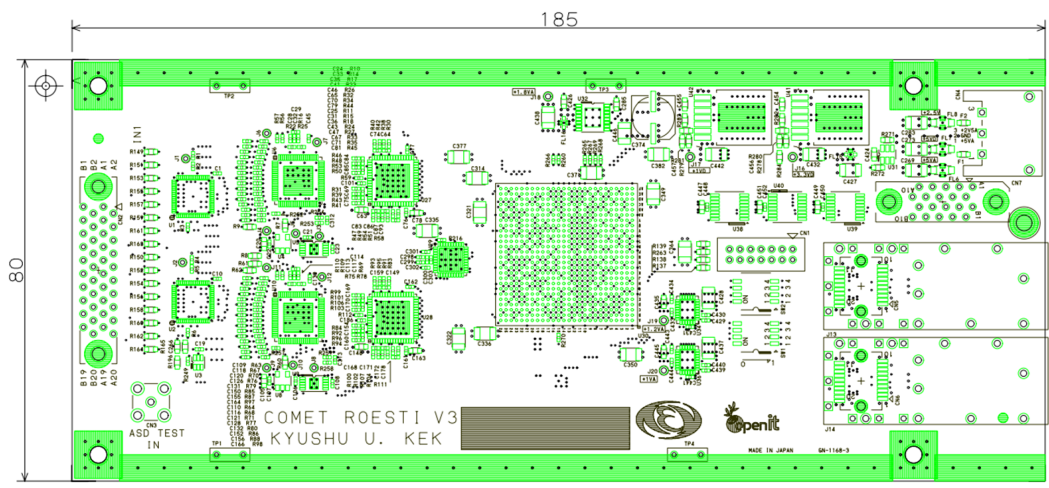


図 5.2: 次期バージョン ROESTI の基板図

第6章 考察と今後

第3章で述べた基本性能評価で要求を満たさなかった項目は、ダイナミックレンジのみであったが、次期バージョン ROESTI では ASD の後に搭載されるアッテネータにより、要求を満たすことが予測される。ファームウェアの開発が追いつかず、デジチェーン接続の機能を実装することができなかった。デジチェーン接続を可能にする実現するファームウェアの開発は今後の課題である。

磁場、中性子、ガンマ線の全てに完全に耐性を持つスイッチングレギュレータを探すことはできなかった。次期バージョン ROESTI に搭載される LMZ10503(A) は 1000 Gy のガンマ線照射と $10^{11}/\text{cm}^2$ の中性子照射を行っても、正常に動作し続けた。その一方で、1 T 以上の磁場をレギュレータの裏側から表側の向きにかけると、電圧変換効率が 60% まで下がった。COMET 実験では大きな問題にはならないと考えられるが、今後も磁場、中性子、ガンマの全てに対し完全に耐性を持つスイッチングレギュレータを探す予定である。中性子により SEU と思われる事象が発生したが、ECC と呼ばれる FPGA のエラー訂正機能を用いていないので、その機能を用いた場合には、中性子による影響がどのようになるのかの評価も行う必要がある。ガンマ線照射試験では 200 Gy で ROESTI と PC と通信ができなくなった。今の所、原因としてはリニアレギュレータが疑われている。今後詳細な評価が必要である。

次期バージョン ROESTI では 20 ピントリガーコネクタ、DRS4 の出力波形の位相補正、ASD の出力のアッテネータ、ディップスイッチ、など ROESTI プロトタイプにはなかったものを搭載する。それに伴い、ファームウェアの開発や、基本性能、放射線耐性、磁場耐性の評価を行う必要がある。現在、ROESTI にはデータサプレス機能が実装されておらず、ヒットチャンネル以外のデータも PC に転送を行っており、1 イベントのデータサイズは 32780 バイトである。Phase-I 実験では百数十枚の ROESTI が用いられる予定であり、トリガーレートを 1 kHz であると仮定し、100 日間データを取得したとすると、データの総量は ~ 30 ペタバイトとなる。データサプレスを用いなければ膨大なデータ量になってしまうことがわかる。そのため、ゼロサプレスと呼ばれるヒットチャンネルのみを PC へ転送するような機能を実装する必要がある。DRS4 のサンプリングレートは 0.5 GHz から 5GHz の間で可変である。サンプリングレートを落とすことによりデータ量を縮小することが可能であるが、それに伴い時間分解能の悪化が懸念される。現在のサンプリングレートである 1GHz の状態では、時間分解能は 0.81 ns 以下である。時間分解能がサンプリングレートに反比例すると仮定した場合、DRS4 のサンプリングレートが下限値である 0.5 GHz の時の時間分解能は 1.6 ns になり、要求を満たすことが分かる。つまり、DRS4 のサンプリングレートを下限値である 0.5 GHz に設定することによるデータサイズの縮小は可能だと予測される。

第7章 まとめ

COMET 実験ではミューオン電子転換過程の発見を目的としており、それを実現できれば標準模型を越えた物理の存在を示唆する。

信号の同定は 105MeV の電子を観測することで行う。しかし背景事象である DIO 由来の電子の運動量もその近傍まで広がっており、高い運動量分解能を持つストローチューブトラッカーを検出器として用いる。その読み出し回路には、ストローチューブトラッカーの位置分解能を制限しない時間分解能を持つこと、ストローチューブトラッカーの信号を識別できること、S/N 比が 8 以上であること、真空フィードスルーの数を最小化できること、高い放射線耐性と磁場耐性を持つこと、が要求される。以上の要求を満たすための独自の読み出し回路 ROESTI を開発中である。ROESTI プロトタイプに対して性能評価を行った。測定項目はノイズ、ダイナミックと線形性、クロストーク、時間分解能、通信試験であり、ダイナミックレンジ以外を除く全てで実験的要求を満たしていることがわかった。ダイナミックレンジの要求値は 0.8 pC から 5 pC である。それに対して、ROESTI プロトタイプは 0.6 pC までの電荷しか識別することができないことがわかった。

ROESTI プロトタイプと次期バージョン ROESTI に搭載するパーツの候補に対し、放射線照射試験と磁場試験を行った。磁場試験では、次期バージョン ROESTI のスイッチングレギュレータの候補と ROESTI プロトタイプの磁場中の挙動の調査を行い、磁場の影響を受けないレギュレータの選定を行った。その結果、ROESTI プロトタイプは 1T の磁場中では問題なく動作することがわかった。候補のレギュレータは、LTM8023(D)、LMZ10503(A) の順に磁場の影響を受けにくいことがわかった。その他のレギュレータは磁場の影響を受けやすく候補から除外した。

ROESTI プロトタイプと Artix-7 評価ボードを標的に九州大学タンデム加速器にて中性子照射を行った。ROESTI プロトタイプでは、中性子の影響と思われるノイズの大きさの上昇、「壊れたファイル」の発生、PC と通信不能、といった現象が起こった。 1.8×10^7 Hz/cm²、 1.8×10^4 Hz/cm² の中性子レートに対し、それぞれ、1 回/0.9 分、1 回/112 分の頻度で「壊れたファイル」は発生した。それらの現象はファームウェアの再ダウンロードにより正常な状態に戻ることがわかった。Artix-7 では 1.8×10^7 Hz/cm² のレートで表から中性子を照射したとき、1bit/4.8 秒の頻度でビットエラーが発生した。Artix-7 では 1.8×10^4 Hz/cm² のレートで表と裏から中性子を照射したとき、それぞれ 1bit/56 分、1bit/16.3 分の頻度でビットエラーが発生することがわかった。

FPGA 電圧シーケンス用スイッチとレギュレータ (A) を標的にし、神戸大学海事科学部タンデム加速器にて中性子照射を行った。中性子レートの高い深夜のみにレギュレータ (A) の出力電圧の上昇が見られたが、鉛をベリリウムターゲットを設置することによりガンマ線を遮蔽すると、電圧の上昇は見られなかった。以上のことから、レギュレータの電圧上昇はガンマ線によるものではないかと考えられる。スイッチには変化は見られなかった。

高崎量子応用研修所にてガンマ照射試験を行った。ターゲットは ROESTI プロトタイプ、レギュレータ (A)、レギュレータ (B)、スイッチである。レギュレータ (A) は 1000 Gy のガンマ線の照射を行っても、出力電圧に変化は見られなかったが、レギュレータ (B) はガンマ線の放射により出力電圧は上昇し続け、70 Gy で出力電圧が 3.6V を越えた。ROESTI プロトタイプは 200 Gy で PC との通信不能になった。スイッチは 600 Gy で正常に動作しなくなった。20 Gy に対する安全率 10 を基準に考えると、レギュレータ (A)、スイッチはガンマ線照射の影響を受けにくいということがわかった。その一方で、レギュレータ (B) は、スイッチはガンマ線照射の影響を受けることがわかった。以上の中性子放射試験と磁場試験の結果から、ス

スイッチングレギュレータ (A) を選択した。中性子耐性とガンマ線耐性に対する要求を完全に満たすレギュレータは見つからなかった。

以上の結果を基に次期バージョン ROESTI のデザインを行った。次期バージョン ROESTI では ASD の直後にアッテネータ、DRS4 位相補正用 ADC、ディップスイッチ、20 ピントリガーコネクタ、が新たに搭載され、その一方で、FPGA 以外のメモリは除外除去される。また、FPGA は Spartan-6 から Artix-7 へ変更する。ROESTI プロトタイプからの以上の変更により、ストローチューブトラッカーの信号の 95% を識別、DRS4 の出力波形の位相補正、Phase-I トリガーシステムとの通信、トリガーラインを介するファームウェアのダウンロードが可能になる。スイッチングレギュレータは、磁場により影響があり、磁場が特定のレギュレータ表面に対し垂直にかかる場合、電圧変換効率が 60% まで低下するため、今後も放射線耐性と磁場磁場耐性を併せ持つものを探すべきであるが、実機として使用可能な性能は達成できる見込みである。

謝辞

本論文の執筆引いては本研究を進めるにあたり多くの方々に助けて頂きました。この場を借りて感謝を申し上げます。

久野良孝教授には、このような研究の機会を与えて頂き感謝しております。常に前向きな姿勢に励まされました。青木正治准教授には授業等で実験や研究の基礎を教えて頂き、研究のヒントとなりました。佐藤朗助教には、資料作成の再にと鋭く厳しい意見を頂きました。長島順清先生、板橋隆久先生、小出義夫先生には日頃から広い分野の知識を教えて頂き、視野を拡げることができました。坂本英之先生には、研究のことや解析の技術を一から教えて頂き、とても助かりました。吉田学立先生には、研究から私生活のことまで相談に乗って頂きました。秘書の駒井順子さん、鳥越美月には出張の際にいつもお世話になりました。

StrEcal グループの方々にもお世話になりました。特に、上野一樹氏には感謝の気持ちを言い表せないほど、お世話になりました。睡眠時間を削りご指導して頂いて本当にありがとうございました。上野さんのお陰で、初めて「実験の面白さ」に気が付くことができました。山口博史氏にも、よく面倒を見て頂きました。僕の初歩的な質問にも、基本的には嫌な顔をせずに答えてくれました。濱田英太郎氏には、ファームウェアのことなどを教えて頂きました。西口創氏にはストローチューブトラッカーのことを教えて頂き、また実験のサポートもして頂きお世話になりました。その他、東城順治准教授をはじめとする九州大学の方々にはビーム試験を筆頭にいろいろな場面でお世話になりました。

またエレキグループの方々にも面倒を見て頂きました。内田智久氏、池野正弘氏、庄子正剛氏の回路のアドバイスにより何度も助けられました。

また久野研究室の同期の林央樹氏、Yahman 君には生活面で支えてもらいました。特に Yahman 君の頑張る姿に僕も感化されました。D1 の松本侑樹氏には研究の相談から釣りの相談までさせて頂きました。その他、M1 の河野君、長尾君、中沢君は研究室を明るく雰囲気してくれました。留学生のみなさん、B4、D の方々のみなさまのお陰で楽しい研究室生活を送ることができました。ありがとうございました。その他、学部時代にお世話になった神戸大学粒子物理研究室の方々もありがとうございました。

最後は両親へ。こんな不出来な僕ですが、今まで支えてくれて本当にありがとう。

参考文献

- [1] Muon Decay and Physics Beyond the Standard Model
- [2] ATLAS Muon Spectrometer MDT - Monitored Drift Tubes ASD Amplifier-Shaper-Discriminator
- [3] COMET Phase-I Technical Design Report 2014
- [4] A search for $\mu - e$ conversion in muonic gold
- [5] http://mxp.physics.umn.edu/s06/Projects/S06_ParticleShowerEnergy/theory.htm
- [6] Particle Detection with Drift Chambers
- [7] PARTICLE DETECTORS AT ACCELERATORS
- [8] 7 Series FPGAs Configuration User Guide
- [9] Stefan Ritt. Development of high speed waveform sampling asics. 2010
- [10] 9 Channel, 5 GSPS Switched Capacitor Array
- [11] Octal, 12-Bit, 40/80 MSPS, Serial LVDS, 1.8 V Analog-to-Digital Converter
- [12] 内田智久. SiTCP 説明書第 1.6 版 2014
- [13] Xilinx 社 Spartan-6 FPGA PCB デザインおよびピン配置ガイド
- [14] <http://phits.jaea.go.jp/indexj.html>
- [15] Y. Watanabe et al., private communication (2014)
- [16] Shoichi Shimazaki. Front-end electronics of the Belle II drift chamber 2013
- [17] 林達也. COMET 実験のためのドリフトチェンバー検出器のフロントエンド開発 2013.
- [18] Tomohisa Uchida. Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet
- [19] private communication with M.Ikeno