

ガス検出器読み出し ASIC の開発と性能評価

(Development and performance evaluation of readout ASIC
for gas detector)

理学研究科

数物系専攻

柿花 愛恵

概要

2020 年 Belle II 実験が実験を行っている SuperKEKB 加速器で世界最高記録である루미ノシティ $2.40 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。加速器の設計値は $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であるため更に頻度が高くなっていくことが必至である。ビーム衝突が高頻度化すると、実験で用いられるガス検出器の読み出し回路に対する要求も高くなる。具体的には検出頻度が増えることによる消費電力の増加への対策、放射線耐性、信号の頻度耐性などがある。これらの要求を満たしつつ現在と同様のダイナミックレンジや時間分解能を持つ回路の開発が求められる。特に、ここに挙げた2つの特性は、飛跡検出器としては、それぞれエネルギー損失測定の精度、荷電粒子の位置分解能つまり運動量分解能に直結する性能であり、重要なものである。

今回は、BelleII 実験で用いられている中央飛跡検出器(CDC)の読み出し回路として開発されているASICのASD (Amp-Shaper-Discriminator)とDAC (Digital Analog Converter)について評価しており、その現状について報告する。

評価の仕方についてはテストパルスやチェンバーを用いた動作の確認や現在 CDC で使われている回路との比較などで行った。テストパルスやチェンバーでオシロスコープでの出力の確認、ゲインの測定、閾値の設定についてなどについて設計通りに動いていることを確認した。また、クロストークが起きていることが確認されたがクロストークが起き始める印加電圧を現在 CDC で使われている回路と比較すると高くなっているのでクロストークは起きにくくなっていることが分かった。

最後に CDC と同じ構造の多線式比例計数管で宇宙線による試験を行い、CDC の重要な役割である飛跡の再構成が可能であることを確認した。デジタル出力のデータを取得し、信号の時間情報からドリフト時間を計算し、飛跡の再構成ができた。

目次

第 1 章 Belle II 実験.....	6
1.1 Belle II 実験の概要	6
1.2 SuperKEKB 加速器	6
1.3 Belle II 測定器	7
第 2 章 中央飛跡検出器 (CDC)	15
2.1 現行の読み出し回路	15
第 3 章 CDC の読み出し回路のアップグレード.....	18
3.1 アップグレードの動機	18
第 4 章 ASIC の評価	20
4.1 ASIC 評価用基板	20
4.2 テストパルスでの動作	20
4.3 ワイヤーチェンバーでの動作	25
4.4 多線式比例計数管での動作	27
第 5 章 まとめ.....	38

図目次

表目次

第 1 章 Belle II 実験

1.1 Belle II 実験の概要

Belle II 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行われている電子・陽電子衝突型円形加速器実験である。7GeV の電子と 4GeV の陽電子を衝突させ、B 中間子と反 B 中間子を大量に対生成し、その稀崩壊の探索、CP 対称性の破れの測定、標準理論で起こらない崩壊様式の探索などを目的としている。[1]

Belle II 実験の前身である Belle 実験は 1999 年から 2010 年まで行われた。2001 年には B 中間子と反 B 中間子の CP 対称性の破れを発見し、小林・益川理論が正しいことが示され、小林・益川両氏はノーベル物理学賞を受賞した。その後、当時の世界最高記録であるルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成したが、より高統計データを得るためにアップデートされた Belle II 実験が計画された。

2016 年に検出器を搭載していない Phase1 運転が始まり、2018 年に崩壊点検出器以外をインストールした Phase2 運転を経て、2019 年から全ての検出器をインストールした物理ランの Phase3 運転が行われている。2021 年 6 月にはルミノシティ $3.12 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成した。[2][3]

1.2 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は Belle II 実験で用いられている加速器で全体図を図 1 に示す。周長が約 3 km のトンネル内に 7GeV の電子リングと 4GeV の陽電子リングがある。電子と陽電子が入射器で生成され、電子は直接、陽電子はダンピングリングを経てそれぞれのリングに入射し、衝突点で衝突する。Belle 実験の KEKB 加速器をアップグレードしたもので KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティである $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目指している。[4]

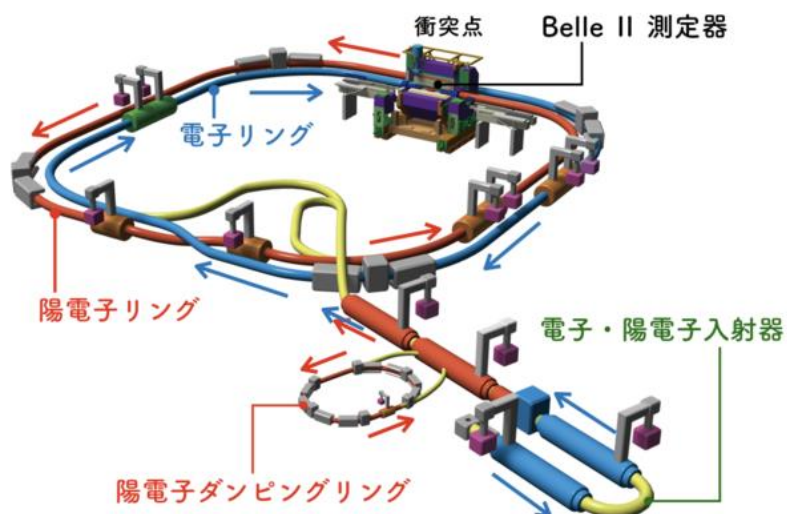


図 1.1 SuperKEKB 加速器全体の模式図(出展 KEK)

1.3 Belle II 測定器

物理事象の測定は Belle II 測定器で行われる。加速器の改良によるルミノシティの増加により観測する物理事象だけではなくビームバックグラウンドの頻度も増加する。他にも新物理を観測するために粒子の識別能力や検出効率の向上など Belle II 測定器は Belle 測定器から改良が加えられている。

Belle II 検出器の全体図を図 2 に示す。構成する検出器を中心にある衝突点のビームパイプに近いものから順番に説明していく。

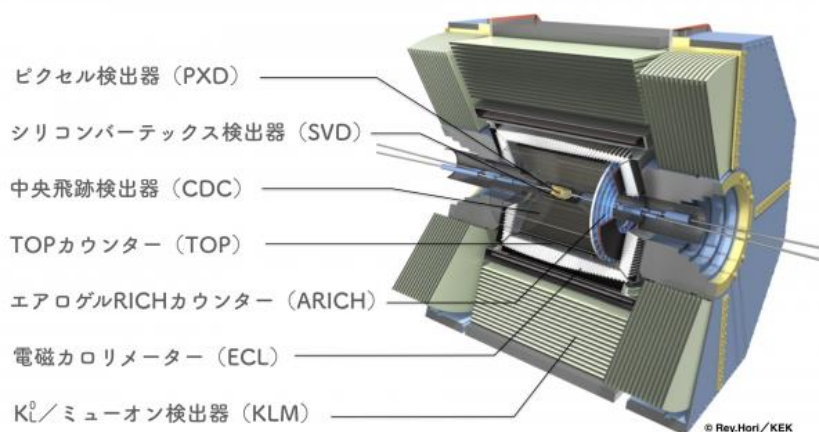


図 1.2 Belle II 測定器の全体図

一番内側は崩壊点を精密測定するための六層からなる崩壊点検出器で、内側二層はピクセル検出器(PXD)で外側六層はシリコンバーテックス検出器(SVD)である。PXD は DEPFET (Depleted P-channel Field effect transistor : P-チャンネル空乏層型電界効果トランジスタ)と呼ばれるピクセル検出器で電荷を運ぶものがない空乏層を荷電粒子が通過し、はじき出された電子数に比例する電流を読み出すことでどのピクセルをどれだけのエネルギーを落として通過したかの情報を得ることができる。ビームパイプの中心から一層目を 1.4 cm、二層目を 2.2 cmのところに設置し、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のピクセルが合計で約 800 万個設置されている。[5]



図 1.3 PXD の模型図[5]

SXD は Belle 測定器と同じ仕組みの DSSD (Double-Sided Silicon Detector)が使われている。シリコン基板に Belle II 測定器の ϕ 方向に n 型半導体、それに直行するように p 型半導体をそれぞれ分割して配置し、両方の情報から二次元の位置情報を割り出すことができる。Belle 実験に比べて PXD が追加され、B 中間子の崩壊点をよりよく捉えるために SXD の外側の半径が 88.0 mmから 135 mmと広がったことにより位置測定精度が約 2 倍向上する。[1][6]

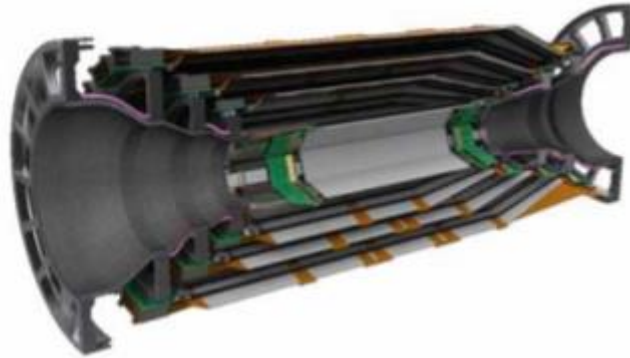


図 1.4 SVD の断面図[6]

崩壊点検出器の外側には位置情報と運動量情報を収集し、トリガー信号を出す中央飛跡検出器(CDC)がある。CDC は多線式比例計数管で $30\mu\text{m}$ の金メッキタングステンでできたセンスワイヤー14336 本と $126\mu\text{m}$ のアルミニウム合金でできたフィールドワイヤー42240 本を円筒の中心軸方向に張り、内部はヘリウムとエタンの混合ガスで満たされている。荷電粒子が CDC を通過する時にガス分子がイオン化し、そのイオンが移動するときの電場の変化を電気信号として得ることで粒子の飛跡や粒子の種類の情報を得ることができる。次の粒子識別装置が変更したことにより大型になり検出層も増え、粒子識別性能が向上した。またセンスワイヤーをフィールドワイヤーで囲んだセルのサイズが小さくなったことにより最大のドリフト時間も短くなりヒットレートとオキュパンシーを減らすことができるようになった。[1][8] 図 1.5 と図 1.6 は CDC のワイヤーの配置図を表している。図 1.5 の実線は z 軸に平行なワイヤーで点線は z 軸に対してプラスとマイナスの角度を持ったステレオワイヤーである。このステレオワイヤーが z 軸方向の位置情報を表す。

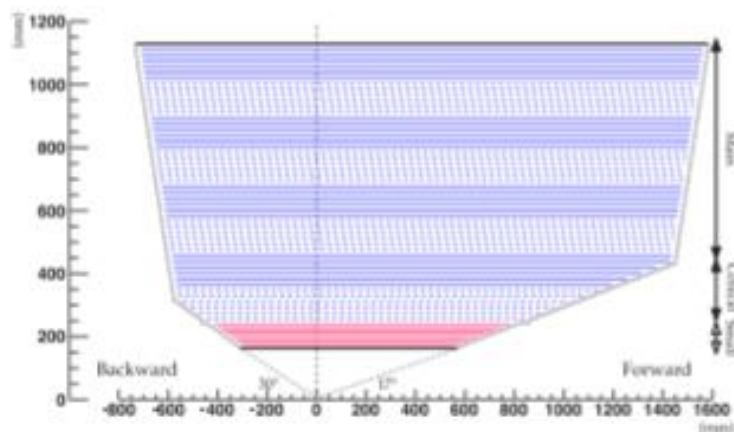


図 1.5 CDC の半断面図[8]

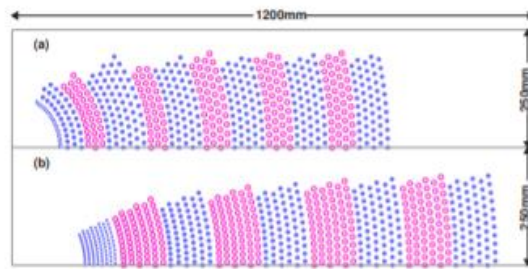


図 1.6 CDC のセンスワイヤーの配置の比較[8]

粒子識別装置は CDC の外側にある TOP カウンター(TOP)と円筒の端を覆うエアロゲル RICH カウンター(ARICH)からなり、 π 中間子と K 中間子の識別効率の向上を目的としている。TOP は石英輻射体と光検出器からできている。荷電粒子が石英輻射体を光速で通過するとチェレンコフ光を放出する。それを石英輻射体内で全反射させ光検出器まで到達させる。荷電粒子の種類によって入射角度と速度が異なるので光検出器に到達した位置と時間を 50ps 以下の時間分解能で計測することで粒子の識別を行う。この時間情報を用いることでバックグラウンド粒子の除去が可能になった。[1][9]

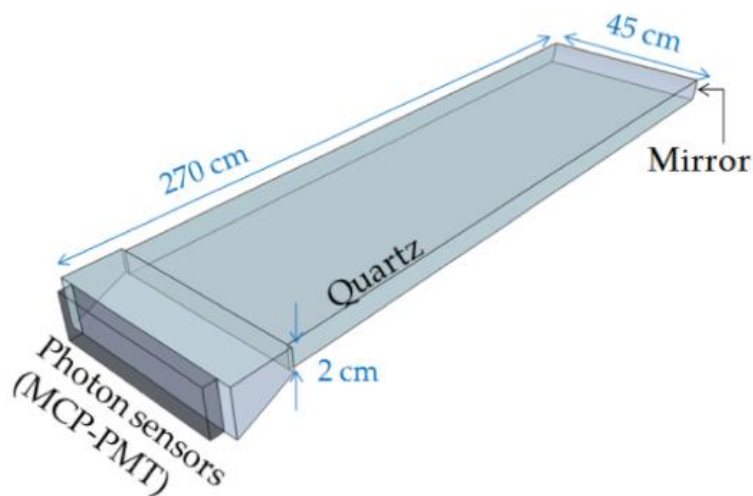


図 1.7 TOP カウンターの概形 [9]

ARICH は入射軸に対して垂直にエアロゲル輻射体と光検出器が設置されたもので、屈折率が異なる 2 層のエアロゲル輻射体で発生するチェレンコフ光を光検出器でリングイメージを測定する。Belle 測定器と比較すると誤って識別する確率が 1/5 になり装置も小型化したため他の測定器の大型化を可能にした。[1]

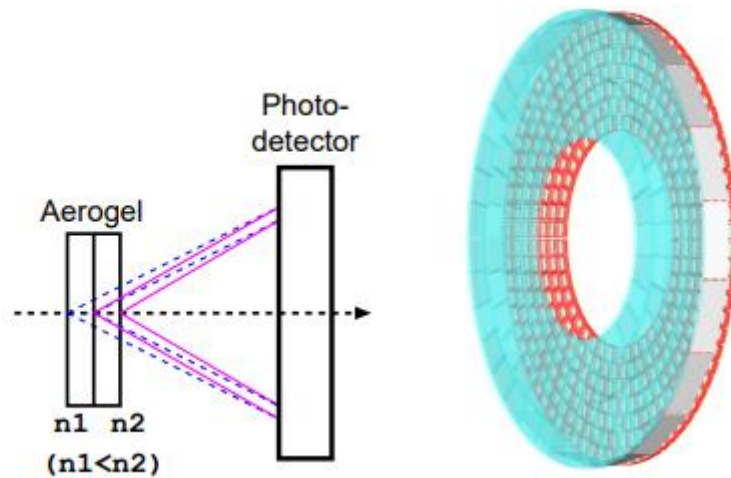


図 1.8 ARICH の原理と概形 [3]

TOP 電磁の外側にエネルギーを測定する電磁カロリメーター(ELC)がある。重い物質中に数十 MeV 以上の電子・陽電子や光子を入射すると光子が電子・陽電子の対生成を、電子・陽電子は制動放射を起こすので電磁シャワーが形成される。そのシャワー全体を出力信号に使う全吸収型が ELC で使われている。検出器には CsI(Tl) 結晶が用いられ、読み出しには磁場中で変化しないシリコン PIN フォトダイオード (PIN-PD) が Belle 測定器と同様に用いられている。しかし、バックグラウンドの頻度が Belle 実験よりも多くなってしまうために読み出し信号が重なる頻度が高くなる。そこで 2MHz のサンプリング周波数で動作する 18bit の ADC を用いて検出エネルギーに加え信号パルスのタイミングを求めるデジタル信号処理を行うエレクトロニクスが導入することで信号の重なりに対応している。これらの情報によりトリガーのタイミングと一致しないものを取り除くことができ、ビームバックグラウンドによるシャワーが物理事象に残る数が $1/7$ に減らすことができる。[1] [10]

図 1.9 は ELC 部分の断面図を示している。検出可能な範囲は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ となっている。

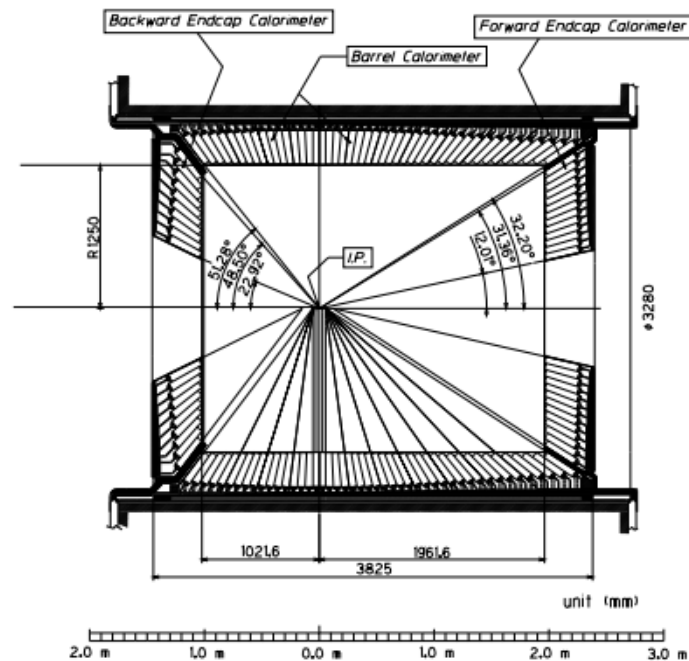


図 1.9 ELC の概形 [10]

K_L^0 ミューオン検出器 (KLM) は入射軸を囲むバレル KLM とバレル部の蓋を塞ぐようなエンドキャップ KLM からなる最外層にある検出器で、 μ 粒子の同定や K_L^0 の検出を行う。 μ 粒子は物質中で電磁相互作用で電離損失するのみで散乱はあまり大きくないが、荷電ハドロンには強い相互作用もあるので多重散乱が大きくなるので CDC と KLM での軌跡から μ 粒子を判定する。 K_L^0 は検出器内では反応しないが鉄の核子との相互反応により荷電粒子が発生し、その粒子を検出して判定する。約 4.7 cm の鉄板を約 4.4 cm の間隔でバレル KLM は 15 層、エンドキャップ KLM は 14 層重ね、その間に検出器が設置されている。検出器は Resistive Plate Counter (RPC) というガスチェンバーの一種が使われている。Belle 実験のときは検出器にガラスが使われていたが、バックグラウンドが増加することにより検出をしない不感時間が増えてしまうためバレル部の内側二層とエンドキャップ KLM にプラスチックシンチレータが採用されるようになった。[11]

上で説明した検出器によって得られたデータをデータ収集システムによって収集される。Belle II 実験の検出器はオキュパンシーを低くするために検出要素が高精細化し、CP の破れのより詳細な研究のためにピクセル検出器が新たに追加された。そのため 1 イベントあたりのデータは 1 MB を超え、トリガーレートも最大で 30 kHz と予想されているので 1 秒間で 30 GB のデータ量を収集することになる。この膨大なデータ量を収集するためのシステムの全体像を図 1.9 に示す。トリガーシステムから受け取ったトリガー信号を全システムで共通なクロックと共に各検出器に分配される。それぞれの検出器で得られたデジタル信号は高速光データ転送システム Belle2link で COPPER に送られ、40 台の PC に集められる。このデータはイベントビルディングし高次トリガーへ送られる。PXD は他に比べてデ

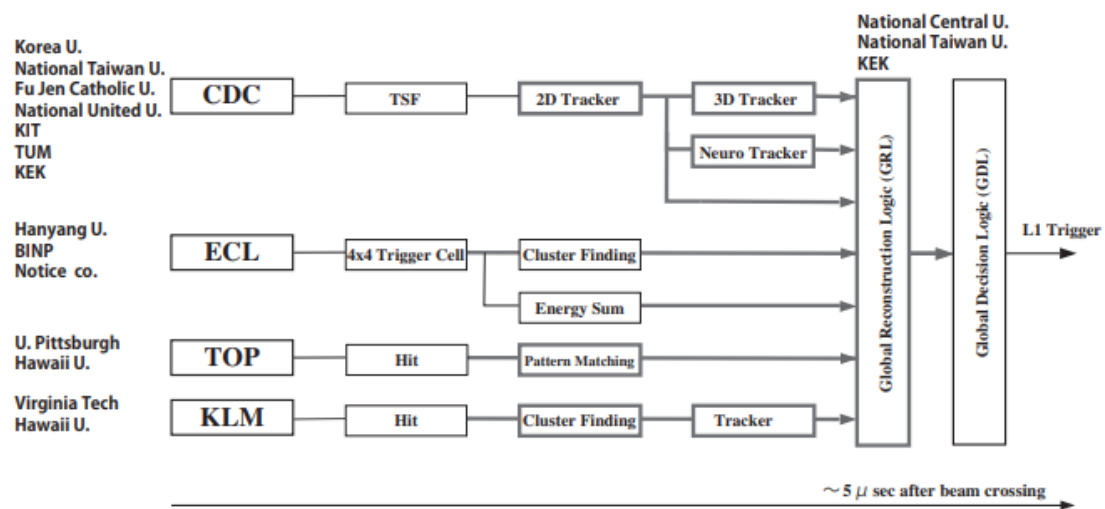


図 1.10 トリガーシステムの概略 [13]

第2章 中央飛跡検出器 (CDC)

2.1 現行の読み出し回路

現在の CDC は時間分解能が 1 ns 以下でアナログ出力の波形サンプリングは分解能 10 bit で 30 MSPS 以上の性能が求められている。また、CDC は ECL と粒子識別システムに囲まれているために、信号読み出しのための電子回路を物理的に設置する場所が限られている。さらに Belle 実験に比べてチャンネル数が約 1.7 倍になりルミノシティも増加しているため単位時間あたりの読み出しデータの量が増加しているのでデータを送るスピードもより高速である必要がある。そのために信号読み出しのための電子回路は検出器の近くにある必要があり強磁場・高放射能な環境にもある程度耐える必要がある。

このような条件を満たす様に開発された BelleII CDC 用の読み出し電子回路である RECBE を図 2.1 に示す。RECBE 1 枚あたり CDC のセンスワイヤー 48 本分の信号を読み、CDC 全体で 300 枚使われている。サイズは ECL か粒子識別システムとの隙間で最も狭い箇所が約 200mm であるため $200\text{ mm} \times 170\text{ mm}$ となっている。

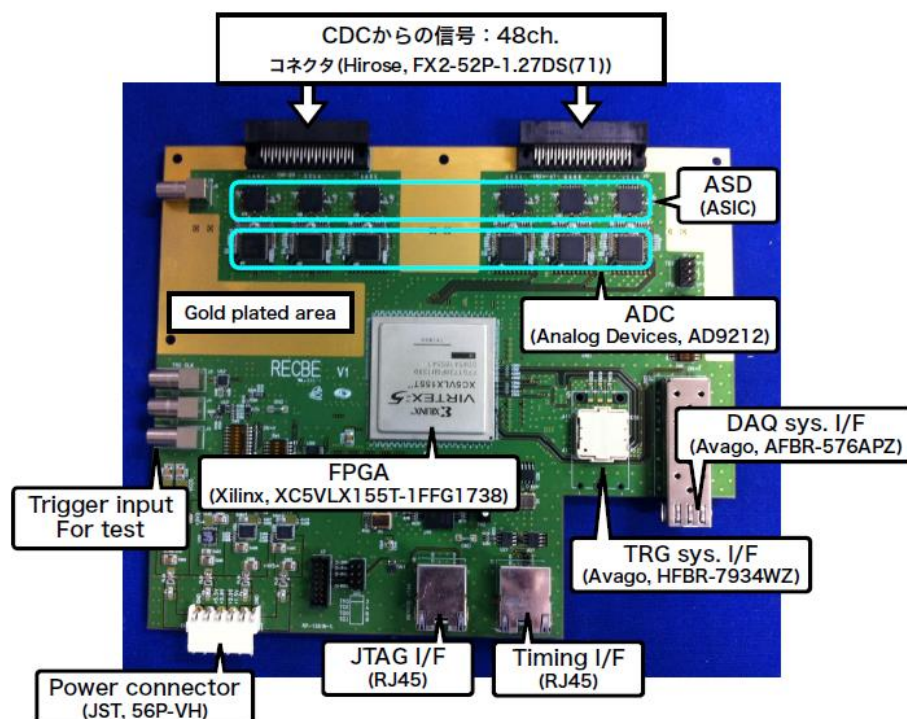


図 2.1 現行の読み出し回路 RECBE

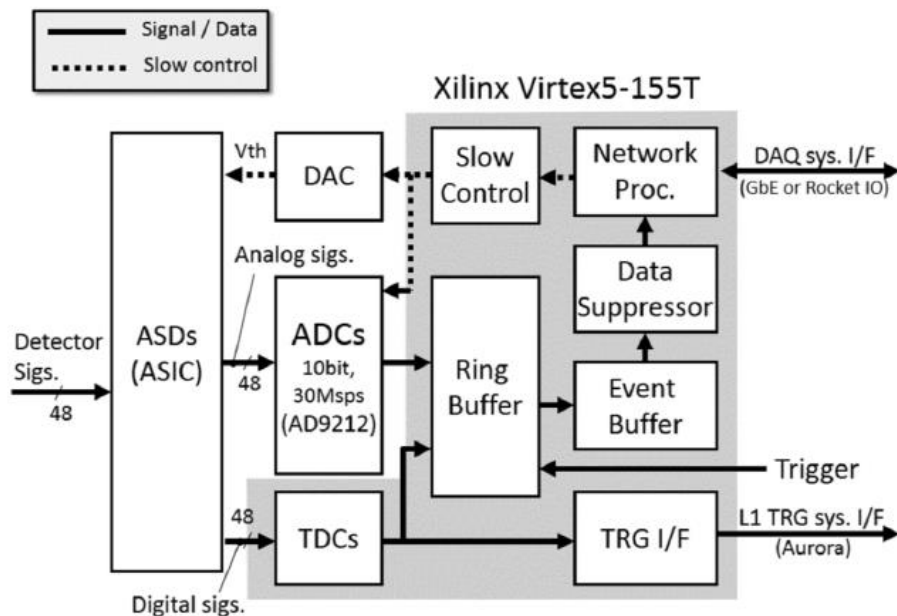


図 2.2 RECBE のブロックダイアグラム[14]

図 2.2 は RECBE のブロックダイアグラムである。信号の流れとしてはアナログ信号処理とデジタル信号処理に分かれている。

まず CDC からの信号が ASD に入力される。ASD は Amp-Shaper-Discriminator の略で信号を増幅や波形形成、波高弁別、AD 変換などを行う。この ASD は RECBE 用に開発されたものであり、1 チップあたり 8 チャンネル分の入力が可能で RECBE 1 枚に 6 チップ搭載されている。入力された信号は波形サンプリングをするためのアナログ出力とドリフト時間を測定するためのデジタル出力に分かれる。アナログ出力は ASD と同じで 1 チップあたり 8 チャンネル分の入力可能な ADC に入力され、デジタル信号に変換される。

もう一方のデジタル出力は TDC に送られる。基準となる 1 個と 48 チャンネルの 1 つ 1 つの情報に対応する 48 個の合計 49 個のカウンターが存在し、カウントの基準との差により時間の計測が行なわれている。

ただし基準となるトリガーからの信号は ADC や TDC の各チャンネルの信号よりも後に来る。そのため ADC や TDC からの信号をリングバッファで遅らせることによりトリガーが反応しているイベントであるかどうかを判別している。

短時間の間に複数回のトリガー信号が来ることがある。このとき 1 回 1 回データ処理や伝送を行なっていると時間がかかり記録できないイベントが発生してしまう。それを避けるためイベントバッファでデータを一時的に保存し、後でデータ処理や伝送を行なうことができる。

イベントバッファから送られてきたデータを有効なものだけを選択し、トリガーとなるカウンターと TDC のカウンターの差を計算し閾値を超えた ADC を足し上げることにより

データサプレッサーでデータ圧縮を行なう。最後にネットワークプロセッサで DAC システムと外部 PC へデータを送という流れになっている。

第3章 CDC の読み出し回路のアップグレード

3.1 アップグレードの動機

2021 年 6 月、SuperKEKB は世界最高ルミノシティ $3.12 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成した。加速器の設計値は $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ であるため更に頻度が高くなっていくことが考えられる。ビーム衝突が高頻度化すると、実験で用いられるガス検出器の読み出し回路に対する要求も高くなる。具体的には検出頻度が増えることによる消費電力の増加への対策、放射線耐性、信号の頻度耐性などがある。これらの要求を満たしつつ現在と同様のダイナミックレンジや時間分解能を持つ回路の開発が求められる。

3.2 アップグレードの内容

アップグレードをするために試作用のチップがつくられており、今回は 2021 年 1 月に試作された ASD チップについて述べる。図 3.1 と図 3.2 はそれぞれ今回用いる読み出し回路と ASD1ch あたりの構成の概要である。

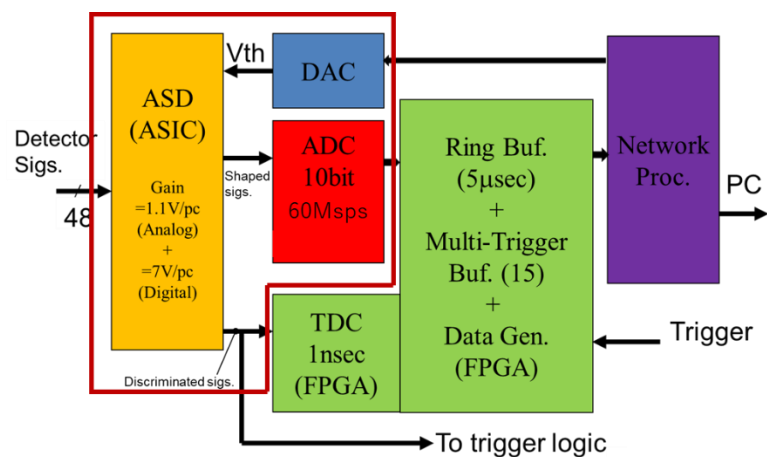


図 3.1 試作されている読み出し回路

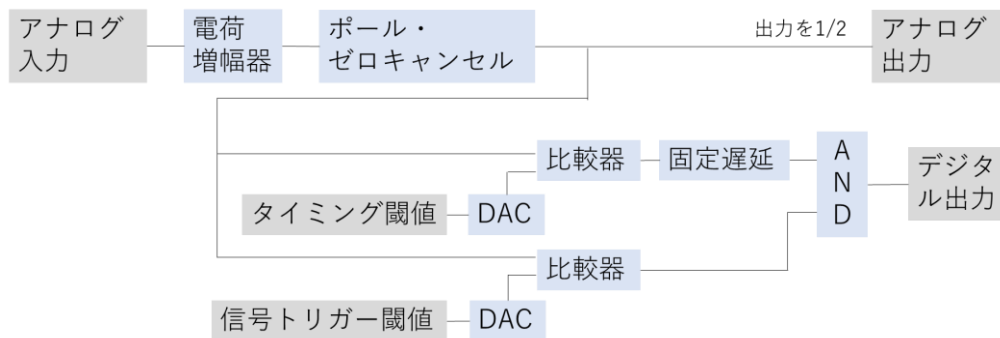


図 3.2 ASD 1ch あたりの構成

変更点の 1 つ目は消費電力を減らすために ASD のチップの中に DAC とフラッシュ ADC が含まれるようになった。更に、フラッシュ ADC は先行研究により消費電力が 1/8 程度になっている。ただし今回実験に用いている ASIC のチップはフラッシュ ADC に問題があり動作していない。ただし特別な後処理をしていることにより動いていることは確かめられている。

2 つ目は信号を判別する閾値が二つ(ダブルスレッシュホールド)になっているという点である。図 3.3 は閾値が一つの場合と二つの場合を表している。閾値が一つの場合、本物の信号かどうかを判断するために閾値はバックグラウンドなどのノイズよりも大きい必要がある。しかし、閾値が高いと信号の立ち上がりから閾値よりも大きくなる時間が信号の大きさによって異なってしまう。そこで閾値を二つにし、高い方(High level)は一つの時と同じように信号かどうかを判断するために使い、低い方(Low level)は信号を読むタイミングを決めるために使う。こうすることで閾値が一つの時よりも信号の大きさによるタイミングのずれをなくすることができる。3 つ目はアナログで出力する際に出力が 1/2 になっている。このことにより入力に対する出力の変化が分かる範囲が広がる。

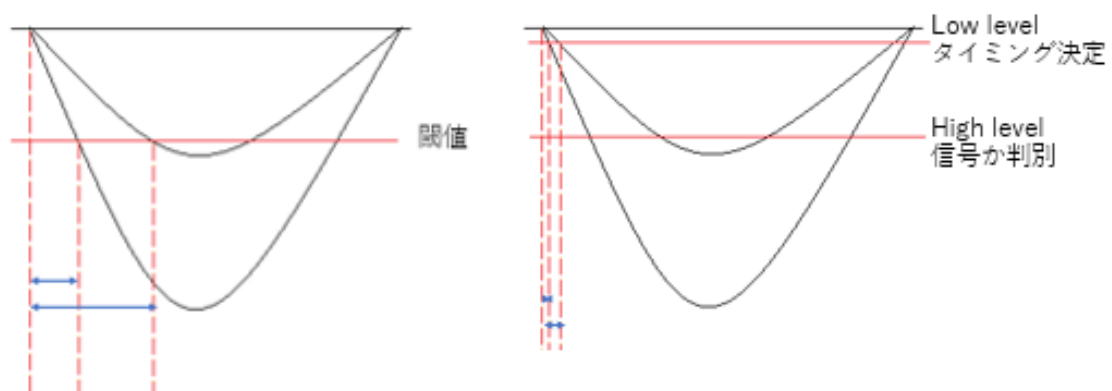


図 3.3 閾値が一つ(左)のときと二つ(右)のとき

第 4 章 ASIC の評価

4.1 ASIC 評価用基板

図 4.1 に ASIC を評価するために使用した基板を示す。ASD のアナログ用電源電圧とデジタル用電源電圧に 3.3 V と 1.2 V が使われている。入力は ch0 ～ ch7 まで合計 8 ch あり、出力はデジタルは入力と同じ 8 ch であるがアナログはポジティブとネガティブの二種類に分かれている。アナログが出力する ch は PC から操作が可能である。

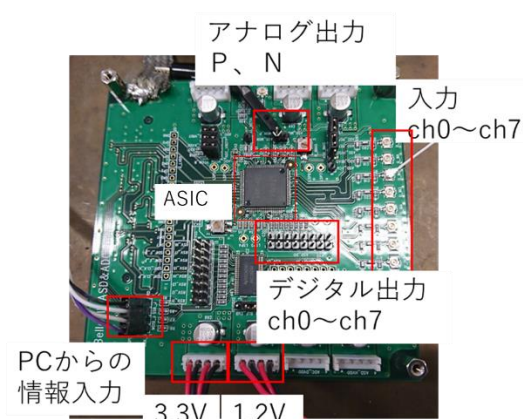


図 4.1 ASIC 評価用基板

4.2 テストパルスでの動作

まず ASIC が動作するかどうかと現行の読み出し基板との比較をテストパルスからの信号を用いて確認を行った。テストパルスは図 4.2 のような周波数が 1 kHz で Leading が 2.5 ns 、Trailing が 500 μ s のものを使い、入元に 1 pF のコンデンサをつなぐことで 1 V の信号が 1 pC に対応するようにしている。



図 4.2 テストパルス

図 4.3 はテストパルスを入力したときの信号をオシロスコープで見たものである。水色の線は入力のテストパルス、黄色はアナログ出力のポジティブ、赤色はネガティブ、緑色はデジタル出力を表している。ここでポジティブは入力信号と同じ極性を持ち、ネガティブは入力信号を反転した極性を持っている。

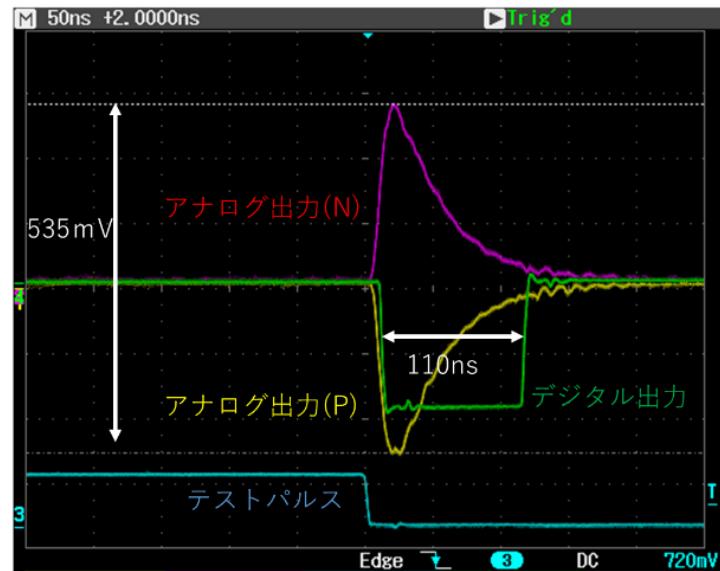


図 4.3 テストパルスを入力したときの信号

アナログ信号のポジティブとネガティブの信号の差を計測することで波高値が得られる。図 4.4 は横軸を入力した電荷量、縦軸は波高値を表し、オレンジ色の点が現行の CDC で使われているもの、青色が新しい ASIC を用いたものを表している。新しい ASIC のチップでも電荷の増幅は現行のものと変わらず $1\text{V} / \text{pC}$ であるが新しいチップではアナログ出力の信号が半分になるように設定されているため線形部分の傾きは現行のものに比べて約半分になったが増幅限界となる入力電荷が大きくなり、入力電荷に対する応答が線形となる範囲は 2 倍となった。

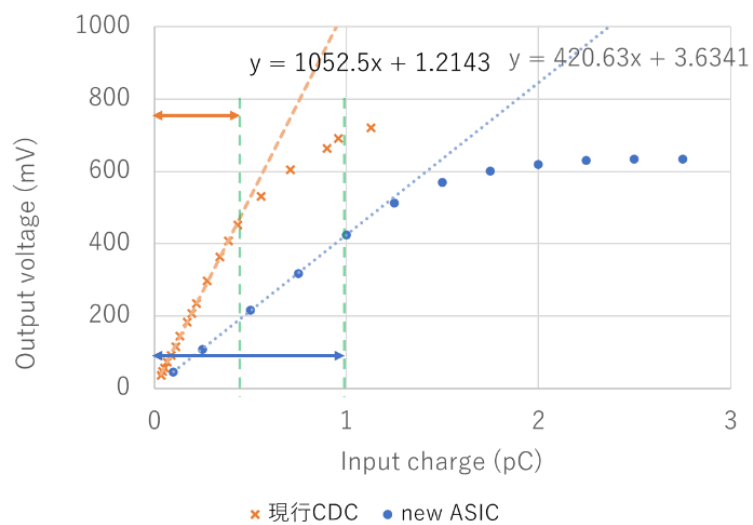
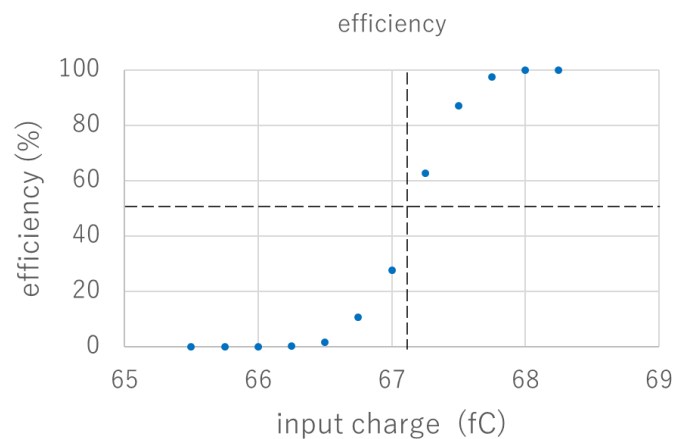


図 4.4 入力電荷と出力される波高値の関係

次に入力電荷を変化させデジタル出力が検出される回数をカウンターで計測した。図 4.5 の上側は入力電荷に対してテストパルス 1 kHz のうちどれだけデジタル出力を検出しているかを示している。検出する確率が 50%になるときの入力電荷とその時に設定している閾値の関係を図 4.5 の下側で示している。この関係は線形になっていて傾きは訳 1 V/pC になっているのでチップの増幅と一致している。

このことによりアナログ出力とデジタル出力に関して設計通りに動いていることが分かった。



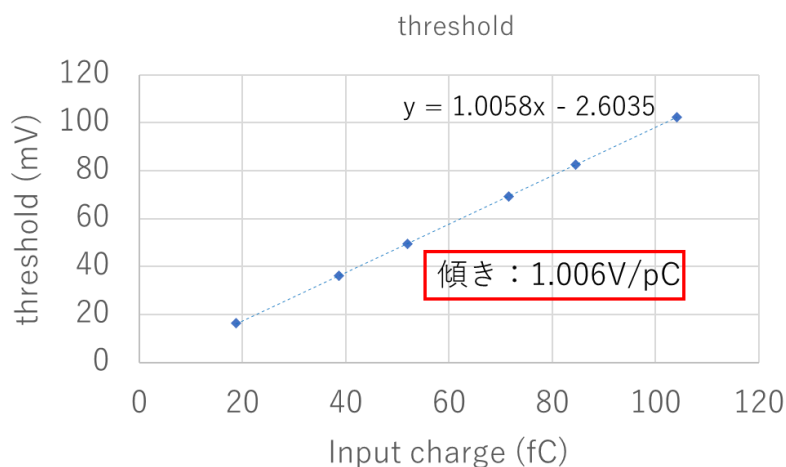


図 4.5 入力電荷に対する検出効率(上)と入力電荷と閾値(下)

また図 4.5 の上の図の幅の広がりにはノイズを表す。そのため入力電荷の変化によるデジタル出力を検出している回数の変化を図 4.6 に示す。このとき変化の様子は正規分布のような形をとる。オレンジ色の現在の回路では幅の σ は 0.33 fC であった。また、青色の新しい ASIC によるプロットもオレンジ色とほぼ同じ形をしている。つまりノイズに関してはあまり大きな変化がなかったことが分かった。

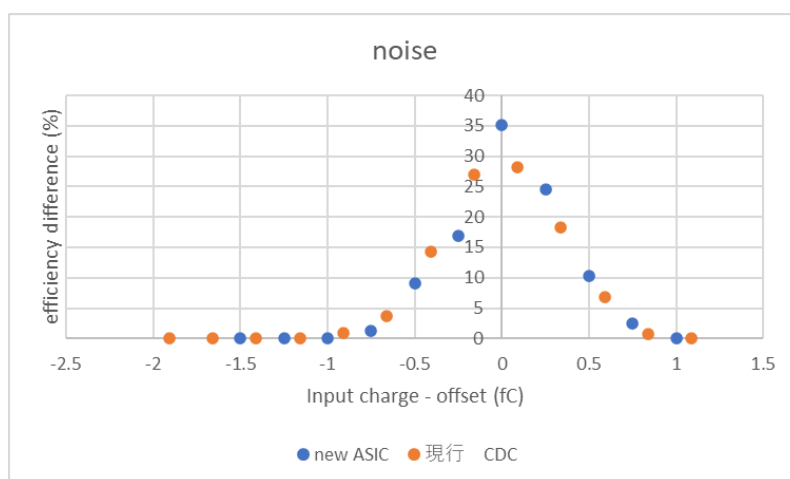


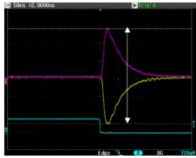
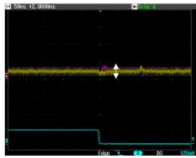
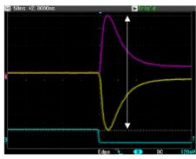
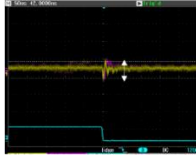
図 4.6 ノイズの比較

クロストークは回路の信号線が平行となっているときに 信号線がコンデンサのような容量を持つようになり一方の信号線からもう一方の信号線に電流が流れてしまうことがある。この電流が疑似信号となり実験のデータ、特に時間情報に影響を与えることがあるので小さい方がよいものである。以下はクロストークについて調べた。

入力の ch1 に入力を行い、アナログ出力の ch0 からの信号をオシロスコープで確認する

とクロストークが起きていることが分かった(表 4.1)。これをデジタル出力の回数で調べると図 4.7 のようになり、クロストークを二種類に分けられるようになった。一つ目は赤枠で囲まれているもので ch0 と ch1、ch6 と ch7 でそれぞれ隣の ch 同士でクロストークが起きている。二つ目は青枠で囲んだものである入力 ch に対してそれ以外の ch でクロストークが同じような電荷量を入力したときに起きている(ただし、赤枠に含まれる入力 ch0 に対する出力 ch1 と入力 ch1 に対する出力 ch0 は除く)。しかし、これらは後に述べるチェンバーを用いて現行のものと比較した結果より、現行のものよりも小さいものではないかと考えられる。

表 4.1 クロストークの関係

ch1への 入力電荷	ch1への出力	ch0への出力
入力電荷 1pC	 418mV	 8.75mV
入力電荷 5pC	 664mV	 19.1mV

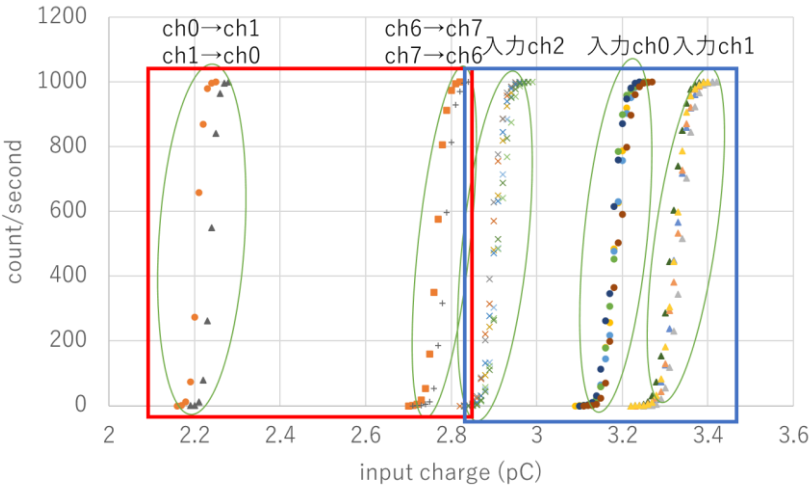


図 47 デジタル出力で見たクロストーク

4.3 ワイヤーチェンバーでの動作

次にワイヤーチェンバーを使って動作確認を行った。使用したワイヤーチェンバー図 4.7 のような $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の直方体で中心にワイヤーが 1 本張られている。線源には ^{55}Fe 、ガスは $\text{Ar}/\text{CH}_4 = 90/10$ の P-10 を用いている。この時のオシロスコープでみた信号の様子を図 4.9 に示す。黄色はアナログ出力のポジティブ、赤色はネガティブ、水色の線はデジタル出力を表している。また、オレンジ色の線はアナログ出力のポジティブとネガティブの差を計算したもので波高値を表している。



図 4.8 ワイヤーチェンバーと線源

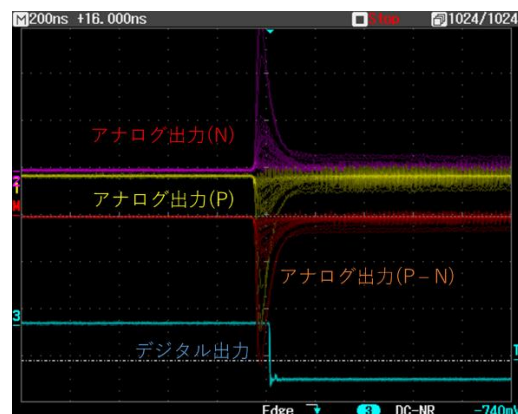


図 4.9 ワイヤーチェンバーからの信号を入力したときの信号

ワイヤーチェンバーの印加電圧を変化させながら波高値の測定を行った。その時の結果をオレンジ色が現行の CDC で使われている回路、青色を新しい ASIC を用いたもので図 4.10 に示す。横軸は印加電圧、縦軸は波高値を対数軸で表している。ワイヤーチェンバーの場合、波高値は増幅限界まで印加電圧に対して指数関数的に増加していくのでグラフは対数軸のとき線形になっているように見える。オレンジ色のものに対して青色のものを同じ印加電圧で比較したとき設定通り半分程度になっている。

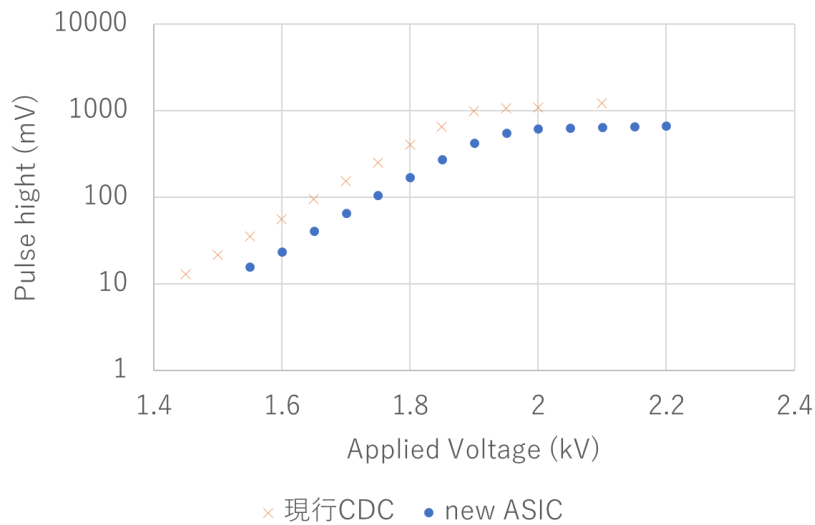


図 4.10 波高値の印加電圧依存性

閾値を現在の CDC で設定されている閾値と同じ約 20 mV に設定してデジタル出力の数を数えた(図 4.11)。上の図はテストパルスではクロストークが確認されなかったチャンネルを用いている。青色の枠で囲まれた入力と出力のチャンネルが同じとき信号の立ち上がり方は同じになるように設定されているので青色の新しい ASIC でもオレンジ色の現在の CDC のチップでも印加電圧が 1.5 kV のところで立ち上がるようになっている。赤色の枠で囲まれたクロストークは入力チャンネルの両隣の出力チャンネルののみで確認され、新しい ASIC は現行のものよりもカウントし始める印加電圧が高くなっていた。つまり同じ印加電圧の場合クロストークは小さくなっていると考えられる。また、テストパルスでクロストークが確認された ch0 を入力チャンネルとした場合(図 4.11 下)、信号の立ち上がり方は 1.5 kV で同じであったが、クロストークは隣の出力チャンネルだけでなく、他のチャンネルでも確認された。この時のクロストークをカウントし始める印加電圧は入力チャンネルである ch0 から遠くなるほど大きくなっている。入力チャンネルの隣の ch1 でのクロストークをテストパルスでクロストークが起きていないチャンネルでのクロストークと比較すると印加電圧が低い時では大きくなっているがそれでも現行のもの以下であった。

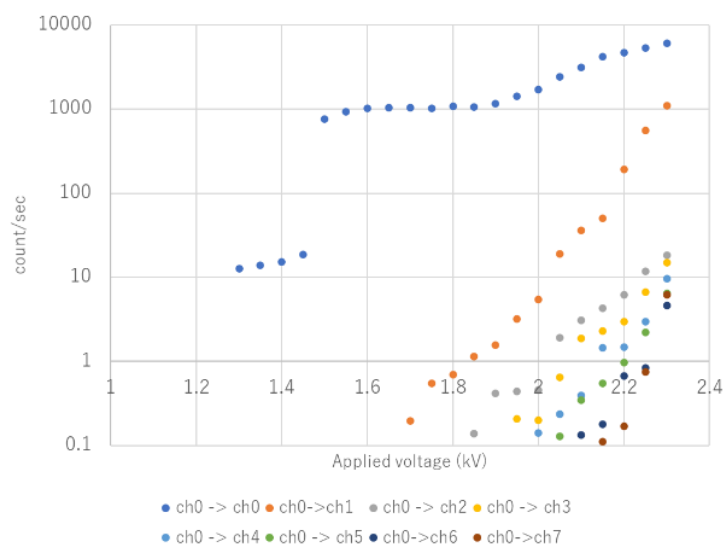
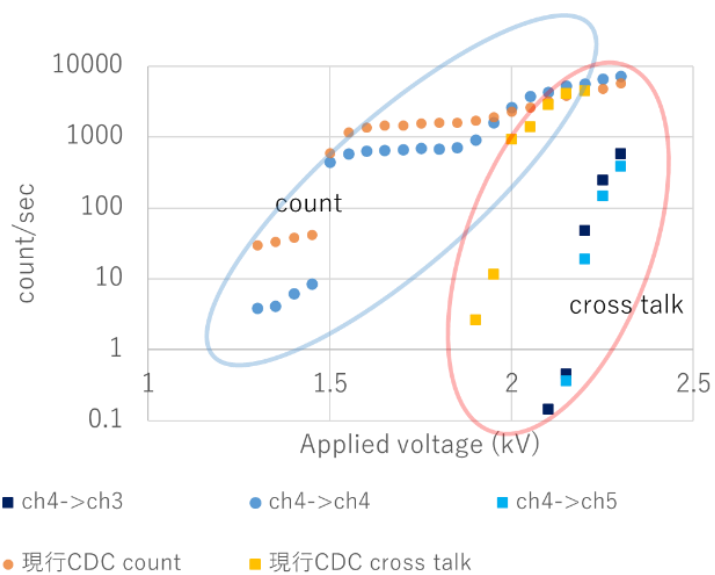


図 4.11 信号とクロストークのカウント

4.4 多線式比例計数管での動作

CDC の重要な役割は飛跡の再構成を行うことである。飛跡の再構成ができれば時間情報を正しく読めていることが分かる。そこで CDC と同じ構造である多線式比例計数管で宇宙線による試験を行った。



図 4.12 多線式比例計数管の全体図(左)とセル(右)

図 4.12 は試験を行った多線式比例計数管の全体図とセルを示している。サイズは $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 200\text{ cm}$ で図 4.12 の右側のように 9×9 の 81 本のワイヤーが張られているこのうち赤色の丸はセンスワイヤーを、青色の丸は、フィールドワイヤーを示し 22 個のセルができるようになっている。内部は P-10 ガスで満たされている。多線式比例計数管の上下には光電子増倍管と約 60 cm のシンチレータをつなげたシンチレーション検出器が設置されている。実験を行う全体のセットアップを図 4.13 に示す。今回使用しているチップではフラッシュ ADC 部分は動いていないのでその代替の ADC として 1 秒間に 1 Gsampling の書き込みが可能な DRS4 を用いている。宇宙線が到来した時、多線式比例計数管からの信号が ASIC 評価用ボードに入力され比較器を通してデジタル出力が出力される。同様に多線式比例計数管の上下にある二つのシンチレーション検出器が検出した信号はディスクリミネータを通して評価用ボードからの特定のチャンネルからの信号とコインシデンスをとる。コインシデンスがとられたものをシンチレーション検出器二つと多線式比例計数管を宇宙線が通過したというトリガーとし、このときの評価用ボードからの信号を ADC ボードにアナログ入力を行い TCP でデータを収集している。

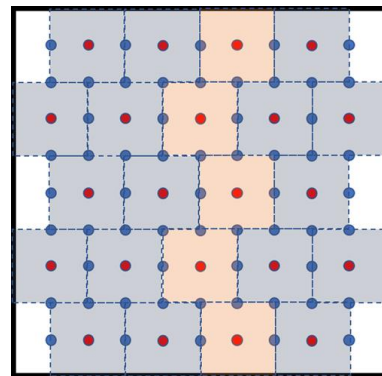
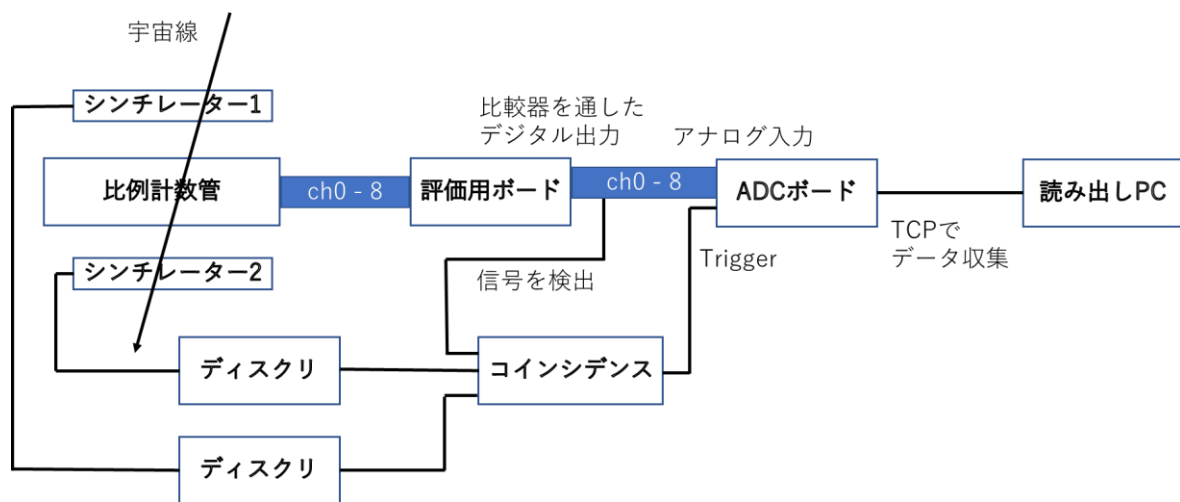


図 4.13 実験のセットアップ(上)と ADC ボード(左下)と使用したセル(右下)

多線式比例計数管に 2100 V の電圧を印加した。図 4.13 の右下の赤色のセルの部分からの信号を評価用ボードに送るようにした。上の段から評価用ボードの ch0、ch2、ch4、ch6、ch7 に入力を行い、そのデジタル出力を ADC ボードの ch0～ch5 に入力する。この ADC ボードは 1ch あたり 1024 のメモリを持ち、1 秒間に 1 Gsampling を取るので 1 回のトリガーで 1024 ns 間の信号を受け取る。デジタル出力を ADC ボードに入力し、そこで得られたデータからデジタル出力の形状を再現したものを図 4.14 に示す。左上から右に向かって ADC ボードの ch0、ch1、ch2、…と続き、全部で 8ch 分の情報が記録されている。ただし、ch5 から ch7 は今回データが入力されていないためほぼ一定の値をとっている。

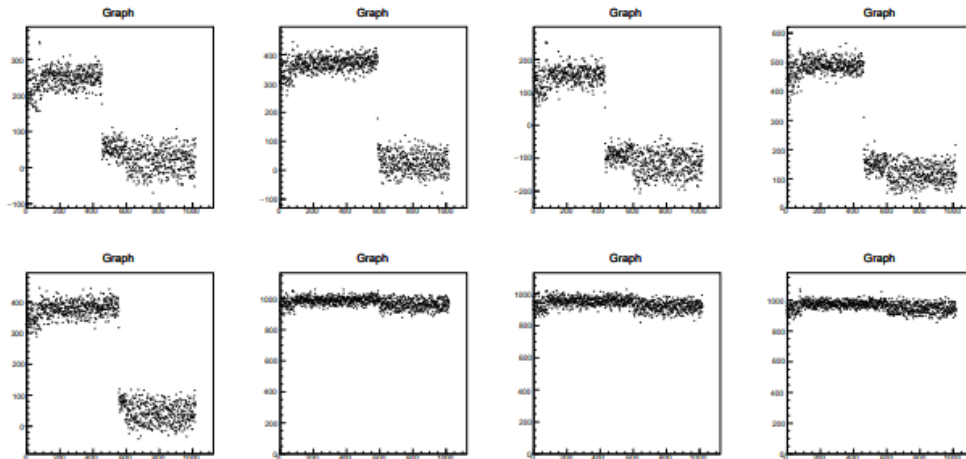


図 4.14 デジタル出力の再現

デジタル出力の波形から一段下がっている時刻に宇宙線らしきの信号が来ていることがわかる。このときの時刻を測定する。縦軸の電荷量がある値よりも下がったときの時刻情報を取得し、チャンネルごとに全イベントでどの時刻で宇宙線らしき信号が来始めているかの分布を取り、結果を図 4.15 に示す。おおよそ時刻が 370 ns から 750 ns の範囲で信号を検出していることがわかった。また、1 イベント 1 チャンネルあたりに何回検出しているかを計測すると大半は 1 回であったが、2 回以上検出していることもあった。これはノイズなど宇宙線とは違うものも検出していると考えられる。そこで一度電荷量がある値よりも下がった時刻から電荷量がある値よりも上がった時刻（上がらなかった場合最後の時刻）、つまり信号を検出している時間の長さを測定し、宇宙線の信号ではないと思われるものを除くことにした。信号の長さの分布は図 4.16 に示されている。この分布から信号の長さが 50 ns より短いものをノイズと考え、図 4.15 の分布から除いたものを図 4.17 に示す。このときの 1 イベント 1 チャンネルあたりの検出回数が 2 回以上になるものは減りはしたものの数回残っていた。最後に分布の多さから宇宙線を検出し始める時間は 370 ns から 750 ns の間だと考えられるのでその範囲だけに絞り分布を表示すると全てのイベントで 1 イベント 1 チャンネルあたりの検出回数が 1 回になった。以下はこれらのイベントを宇宙線の信号として考える。

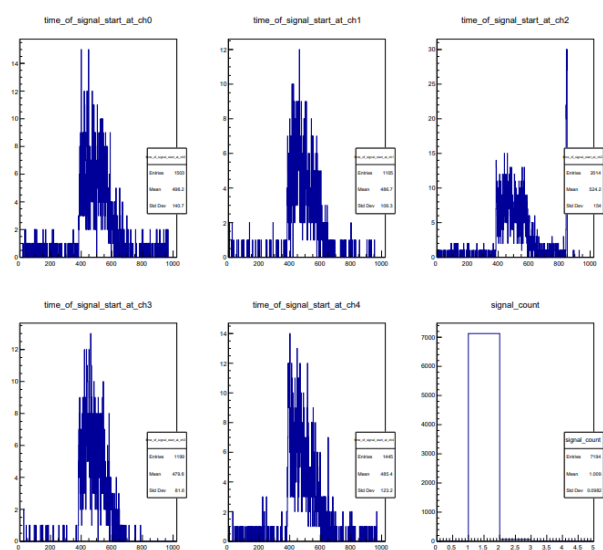


図 4.15 信号を検出した時間の分布とカウント(1)

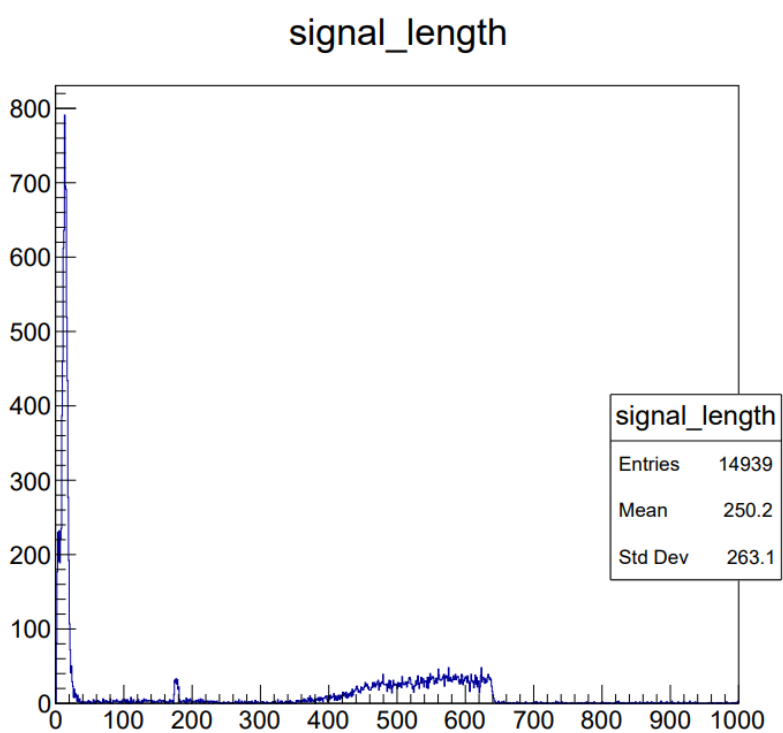


図 4.16 信号の長さ

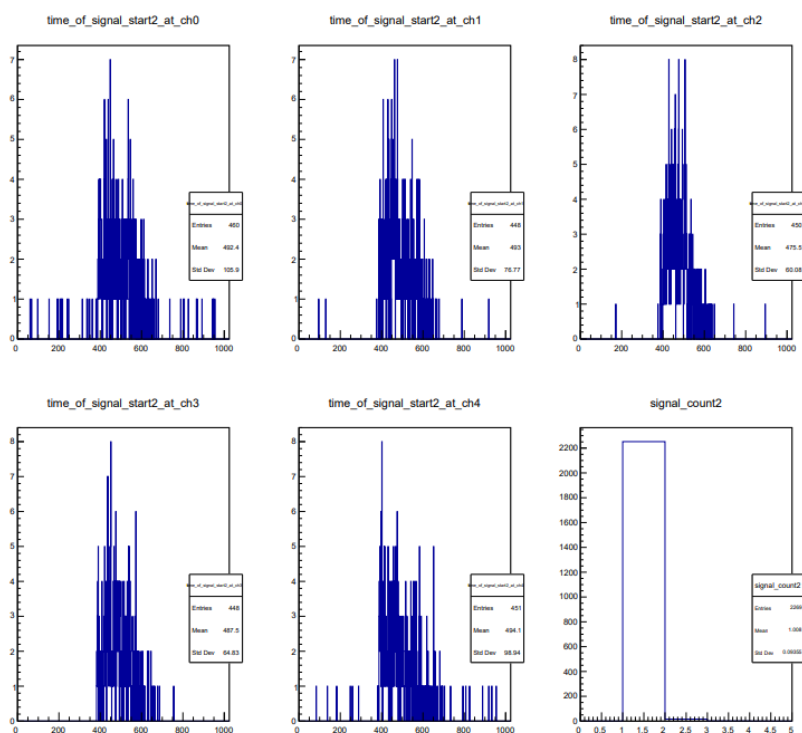


図 4.17 信号を検出した時間の分布とカウント(2)

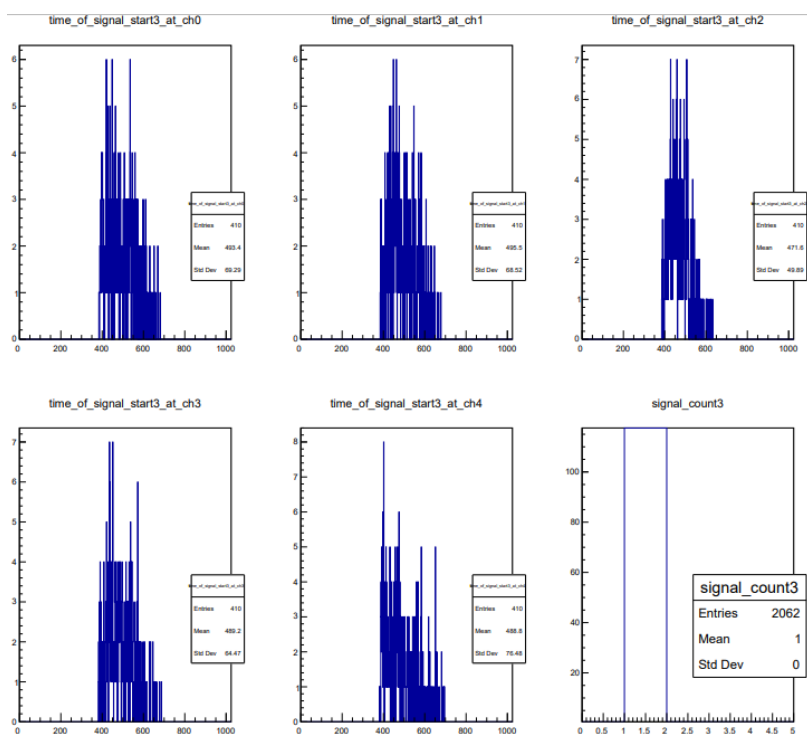


図 4.18 信号を検出した時間の分布とカウント(3)

現在、宇宙線の信号の条件として

- ・ 370 ns から 750 ns の時刻の間に信号の検出が始まる
- ・ 50 ns 以上検出し続ける
- ・ 1 イベント 1 チャンネルあたりの検出回数が 1 回

のものとしている。さらに 5ch 全てにこの条件に当てはまるものを考える。宇宙線の信号を検出し始める時刻の分布は 370 ns なのでこの時刻のものはワイヤーからの距離が 0 となる位置に宇宙線が通過したと考えられる。そこで宇宙線の信号を検出し始める時刻から 370 ns を引いたものを電子のドリフト時間 T とする。ドリフト速度を仮に $p-10$ の典型的なドリフト速度である $3.3 \text{ cm}/\mu\text{s}$ とするとドリフト距離 D は $D = T * 0.033 [\text{mm}]$ と表される。宇宙線の飛跡の再構成を行うために多線式比例計数管の断面を再現し、ワイヤーからの距離が D となるような円を描いた(図 4.19)。宇宙線はこの円を接するような直線となるはずである。

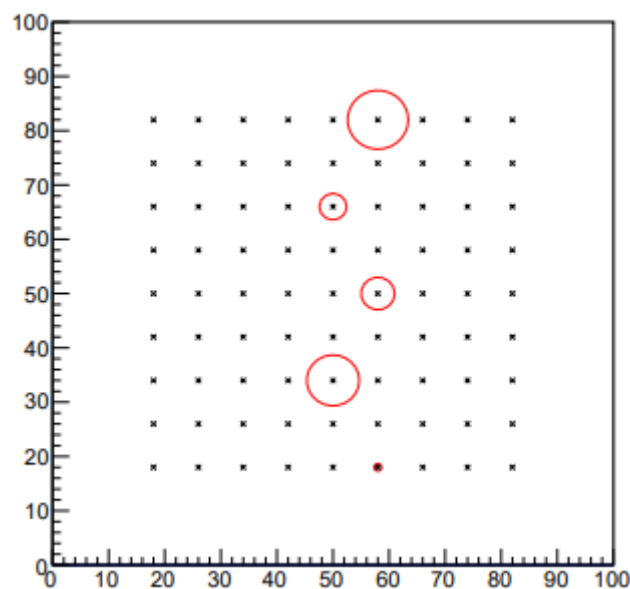


図 4.19 多線式比例計数管の断面の図とドリフト距離

多線式比例計数管の断面の図に描いた円に接する直線である飛跡を求める。飛跡は円の右か左のどちらか一方に接しているはずである。そこで $\{ \text{ch0, ch1, ch2, ch3, ch4} \} = \{ \text{左, 左, 左, 左, 左} \}, \{ \text{左, 左, 左, 左, 右} \}, \{ \text{左, 左, 左, 右, 左} \}, \dots, \{ \text{右, 右, 右, 左, 右} \}, \{ \text{右, 右, 右, 右, 左} \}, \{ \text{右, 右, 右, 右, 右} \}$ のような 5 つの点が一番近くを通る一次関数を $2^5 = 32$ 通り求めた。ただし、一次関数の傾きが大きくなりすぎてフィットができなくなることを防ぐために図の x 軸と y 軸を入れ替えて計算している。求めた一次方程式のワイヤーと同じ高さでの x 座標とワイヤーの x 座標の距離を D' とすると ($D \cdot$

$D')^2$ を計算し、32 通りの中で 5 チャンネル分の合計が一番小さくなるものを飛跡として仮定する。

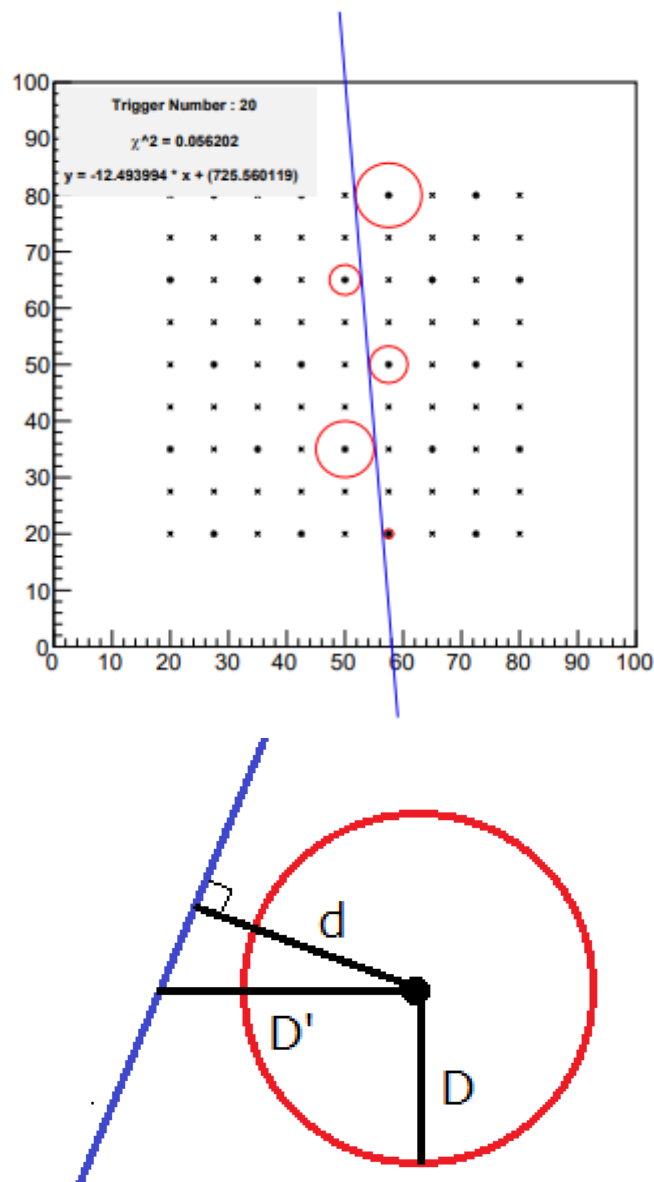


図 4.20 飛跡の再構成と拡大図

また飛跡と仮定した一次関数とワイヤーの距離を d とする。飛跡との接点が左側にあるものをマイナス側、右側にあるものをプラス側としたドリフト距離とドリフト時間の関係を図 4.21 に示す。大半のプロットは V 字の形になっているが一部外れているものもあるが、この外れているものは飛跡のフィットがうまくいっていないものである。そのため飛跡となる一次関数を選ぶ際に使った $(D - D')^2$ を見る (図 4.22)。この分布から 10 以上のものをうまくフィットができていないものとして除いて図 4.23 にドリフト距離とドリフト時間

の関係を示した。そうすることで速度が $3.3 \text{ cm}/\mu\text{s}$ となる直線の付近にプロットできるようになった。

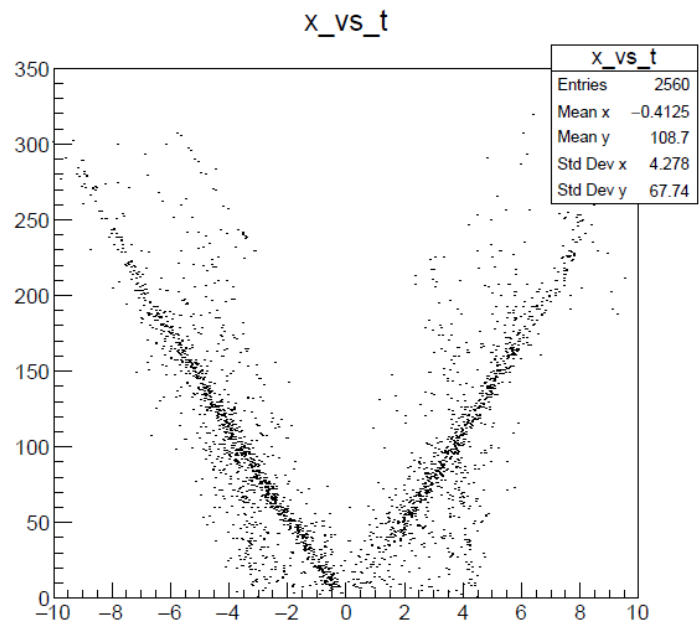


図 4.21 ドリフト距離とドリフト速度の関係

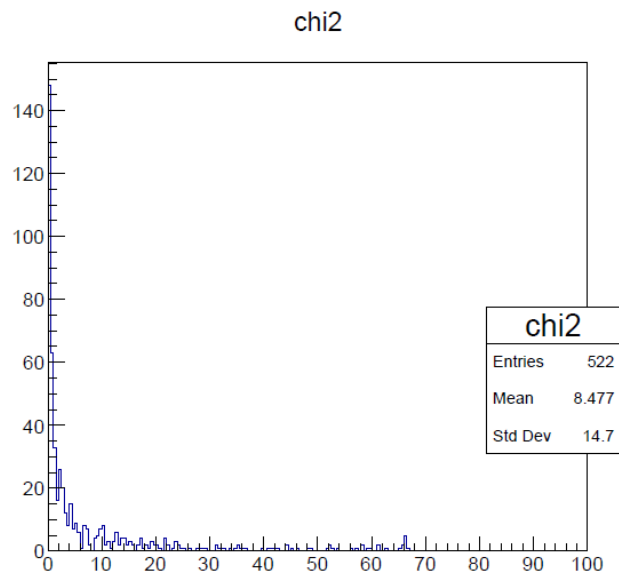


図 4.22 $(D - D')^2$ の分布

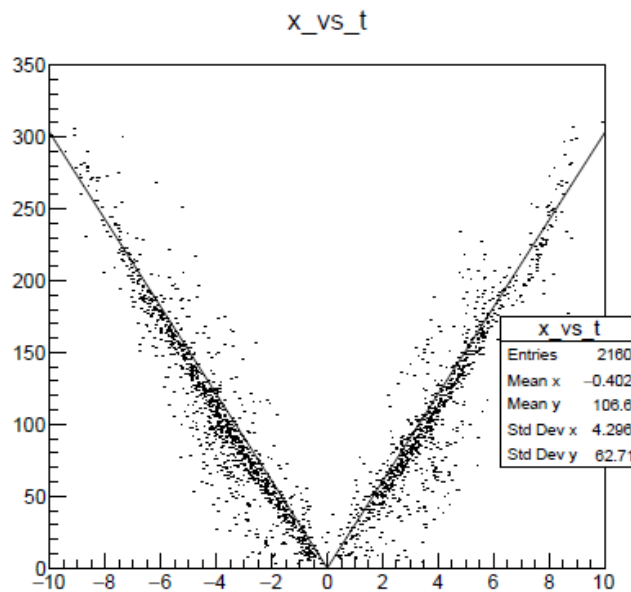


図 4.23 ドリフト距離とドリフト速度の関係(2)

これまではドリフト速度を $3.3 \text{ cm}/\mu\text{s}$ として仮定してきたが実際のドリフト速度に近づける作業をする。図 4.23 のような横軸ドリフト時間、縦軸をドリフト距離のプロットを作り、3 次関数の近似式を求め、ドリフト速度を計算する。次にこのドリフト速度を用いてドリフト距離を計算し、これまでの作業を繰り返すことにより、実際のドリフト速度に近づけていく。最終的にドリフト速度は

$$w = -2.184 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 1.007 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0.03518 \cdot T + 0.2233$$

となった。

この結果からデジタル出力の時間情報を正しく読めていることが分かった。

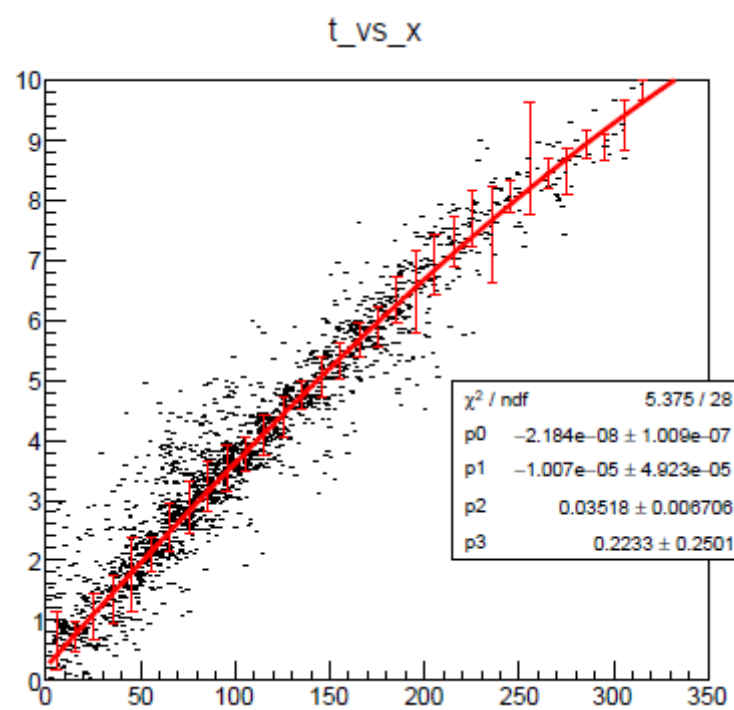


図 4.24 ドリフト速度の近似式

第5章 まとめ

本研究では Belle II 実験で用いられている CDC 用に開発されたガス検出器読み出し ASIC の ASD 部分と DAC 部分についての性能評価を行った。今回用いたチップは 2021 年の 1 月に開発されたもので ASD チップに先行研究により消費電力を小さくした ADC チップと DAC チップを一緒にすることにより更なる低消費電力化を目指したものである。また、アナログ出力を現在の半分にするこゝでダイナミックレンジを倍にしたり、ダブルスレッショルドにすることで波形の大きさによる検出時間の差を小さくなるように設計されている。

評価の仕方としてはテストパルスや比例計数管を用いて設計通りの動作をしているかを調べたり、現在 CDC で使われている回路の動作と比較を行ったりした。評価の結果としては信号の出力はオシロスコープ上で問題なく確認でき、ゲインはチップの増幅率 1 V/pC 、に対して約半分となった 0.421 V/pC となっていた。スレッショルドと DAC もスレッショルドの値の変化に対して検出し始める入力電荷も 1 V/pC で変化していた。またクロストークを現在の回路と比べると小さくなっていることが分かった。

最後に CDC と同じ仕組みである多線式比例計数管で宇宙線を用いた実験を行なった。デジタル出力から宇宙線の検出時間を測定し、飛跡の再構成ができることを確認した。このことにより時間情報を正しく読めていることを確認した。

今後の方針としては今回使用していないフラッシュ ADC やダブルスレッショルド、温度耐性などについて評価し、2026 年の CDC 全体のアップデートに向けて開発が進められている。

参考

- [1] 居波 賢二(2016) 「生まれ変わる Belle II 測定器による物理への挑戦」日本物理学会誌 71 巻 12 号<https://www.jstage.jst.go.jp/article/butsuri/71/12/71_820/_pdf/-char/ja>
- [2] 飯嶋 徹(2018) 「SuperKEKB/Belle II 実験の物理」日本加速器学会誌「加速器」 Vol.15, No.4<<https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F15%2Fp221-228.pdf>>
- [3] 西田 昌平(2019) 「Belle II Aerogel RICH 検出器の建設と運転」 高エネルギーニュース Vol.38 No.2 <<http://www.jahep.org/hepnews/2019/19-2-2-arich.pdf>>
- [4] 赤井 和憲・小磯 晴代(2018) 「SuperKEKB 加速器」日本加速器学会誌「加速器」 Vol.15 No.4< <https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F15%2Fp213-220.pdf>>
- [5] 高エネルギー加速器研究機構 (2012) 「シリーズ Belle II 【第 3 回】ピクセル型検出器」 <<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2012/11/14/1730/>>(2021/11/15 参照)
- [6] 森井 友子・樋口 岳雄(2016) 「Belle II シリコン崩壊点検出器」高エネルギーニュース Vol.35 No.2 < <http://www.jahep.org/hepnews/2016/16-2-2-BelleIISVD.pdf> >
- [7] 高エネルギー加速器研究機構 (2013) 「シリーズ Belle II 【第 4 回】中央飛跡検出器」 < <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2013/01/17/1630/#008921> >(2021/11/16 参照)
- [8] 谷口 七重(2014) 「Belle II CDC」高エネルギーニュース Vol.32 No.4 <http://www.jahep.org/hepnews/2013/13-4-3-BelleII_CDC.pdf>
- [9] 素粒子宇宙起源研究所(2014) 「第 7 回：TOP カウンター（Belle II 実験）」 <<https://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2014/04/22/spotlight07/>> (2021/11/16 参照)
- [10] 宮林 謙吉(2014) 「Belle II 電磁力ロリメーター（ECL）」高エネルギーニュース Vol.33 No.2 < <http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-2-6-BelleIIECL.pdf>>
- [11] 住澤 一高(2014) 「Belle II KLM」高エネルギーニュース Vol.33 No.1 < <http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-1-4-BelleIIKLM.pdf>>

[12]伊藤 領介・中尾 幹彦・山田 悟・鈴木 聡・今野 智之・樋口 岳雄(2014)「Belle II 実験のデータ収集システム」高エネルギーニュース Vol.33 No.3<<http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-3-2-BelleIIDAQ.pdf>>

[13]海野 祐士・岩崎 義仁・中澤 秀介「Belle II 実験 トリガーシステム」高エネルギーニュース Vol.34 No.2<<http://www.jahep.org/hepnews/2015/15-2-4-BelleIITrigger.pdf>>

[14]T. Uchida et al. " Readout Electronics for the Central Drift Chamber of the Belle-II Detector", IEEE Transactions on Nuclear Science (Volume: 62, Issue: 4, Aug. 2015)