

ガスを用いた飛跡検出器用読み出し ASIC の性能評価

(Performance evaluation of readout ASIC for tracking gas detector)

理学研究科

数物系専攻

楠本 泰徳

概 要

KEK で行われている Belle II 実験では SuperKEKB 加速器で電子と陽電子を加速して衝突させ素粒子反応を起こしている。その生成される増大は素粒子反応をとらえる測定装置が Belle II 測定器である。2022 年 6 月 Belle II 実験中に SuperKEKB 加速器で世界最高記録であるルミノシティ $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 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。ビームの衝突頻度が高くなっていくと、Belle II 測定器で用いられているガス検出器である中央飛跡検出器 (CDC) の読み出し回路に対する要求も高くなる。具体的には荷電粒子の検出頻度が高くなることによる消費電力の増加の対策、放射線耐性、信号の頻度耐性などである。これらの要求を満たしたうえで現在使用されているもの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。本研究では、開発された 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。

評価はテストパルスやチェンバーを用いた動作確認などを行った。評価項目は、読み出し回路の温度耐性、クロストークの評価、ダブルスレッショルドの動作確認、宇宙線の飛跡の再構成である。ASIC の温度耐性についてサーモコントローラーを用いて温度が高くても設計通りに動作することを確認した。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は十分に小さく起きにくくなっていることが分かった。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。また、ダブルスレッショルドについては機能していることは確認できたが、ダブルスレッショルドによる分解能の向上は本実験のセットアップでは確認できなかった。

目次

概 要 -----	1
第 1 章 Belle II 実験 -----	5
第 1 節 Belle II 実験の概要 -----	5
第 2 節 SuperKEKB 加速器 -----	5
第 3 節 Belle II 測定器 -----	6
第 2 章 中央飛跡検出器(CDC) -----	13
第 1 節 現行の読み出し回路 -----	13
第 3 章 CDC の読み出し回路のアップグレード -----	15
第 1 節 アップグレードの動機 -----	15
第 2 節 アップグレードの予定 -----	15
第 3 節 アップグレードの内容 -----	15
第 4 章 ASIC の評価 -----	17
第 1 節 消費電力 -----	17
第 2 節 温度耐性 -----	18
第 3 節 クロストーク -----	20
第 4 節 宇宙線の飛跡の再構成 -----	24
第 5 節 ダブルスレッシュヨルド -----	28
まとめ -----	36
謝辞 -----	37
参考 -----	38

図目次

図 1.1	SuperKEKB 加速器全体の模式図(出展 KEK).....	6
図 1.2	Belle II 測定器の全体図.....	6
図 1.3	ピクセル検出器.....	7
図 1.4	SVD の断面図[6]	8
図 1.5	CDC の半断面図[8].....	9
図 1.6	CDC のセンスワイヤーの配置の比較[8]	9
図 1.7	TOP カウンターの概形[9]	10
図 1.8	ARICH の原理と概形[3].....	10
図 1.9	ELC の概形[10]	11
図 1.10	データ収集システムの全体図[12]	12
図 2.1	現行の読み出し回路 RECBE.....	13
図 2.2	RECBE のブロックダイアグラム[14]	14
図 3.1	試作されている読み出し回路	15
図 3.2	ASD 1 チャンネルあたりの構成	16
図 4.1	ASIC 評価用基板.....	17
図 4.2	電源の写真	17
図 4.3	テストパルスの波形(左)とサーモコントローラー(右)	18
図 4.4	それぞれの温度における波高値の応答.....	19
図 4.5	閾値の温度変化	19
図 4.6	クロストークの概略図	20
図 4.7	ch0 のクロストーク	21
図 4.8	ch1 のクロストーク	21
図 4.9	ch2 のクロストーク	22
図 4.10	ch3 のクロストーク	22
図 4.11	ch4 のクロストーク	23
図 4.12	ch6 のクロストーク	23
図 4.13	多線式比例計数管の全体図(左)とセル(右)	24
図 4.14	実験のセットアップと ADC ボード	25
図 4.15	デジタル出力の波形データ	26
図 4.16	宇宙線の飛跡と拡大図	27
図 4.17	ドリフト時間とドリフト距離の関係	28
図 4.18	ダブルスレッシュホールドの説明図.....	28
図 4.19	ダブルスレッシュホールドの動作確認のオシロスコープの写真	29
図 4.20	ダブルスレッシュホールドの動作確認.....	30

図 4.21	Reduced χ^2 分布.....	31
図 4.22	6 回目の Fit	32
図 4.23	繰り返し 5 回目と 6 回目の x-t 関数の変化のドリフト時間依存性	32
図 4.24	残渣のドリフト時間依存性.....	33
図 4.25	残渣分布	33
図 4.26	各スレッシュホールドのドリフト時間に対する位置分解能	34
図 4.27	Low level に対する σ とエラー	35

第 1 章 Belle II 実験

第 1 節 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。7 GeV の電子と 4 GeV 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、標準模型では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、まれにしか起こらない素粒子反応を測定するチャンスを増加させ、粒子・反粒子の非対称、新粒子の探索、暗黒物質などの標準模型を超えた新しい現象の研究のため、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。2022 年 6 月にはルミノシティ $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。[2][3]

第 2 節 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 1.1 に示す。周長が約 3 km のトンネル内に 7 GeV の電子リングと 4 GeV 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。衝突させた電子と陽電子から 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行っている。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]

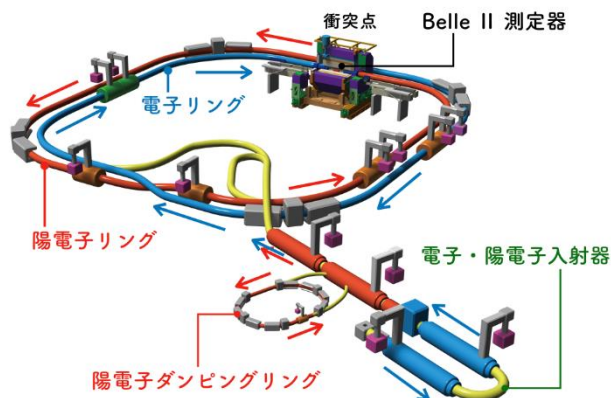


図 1.1 SuperKEKB 加速器全体の模式図(出展 KEK)

第3節 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 1.2 に示す。以下に、構成してい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。

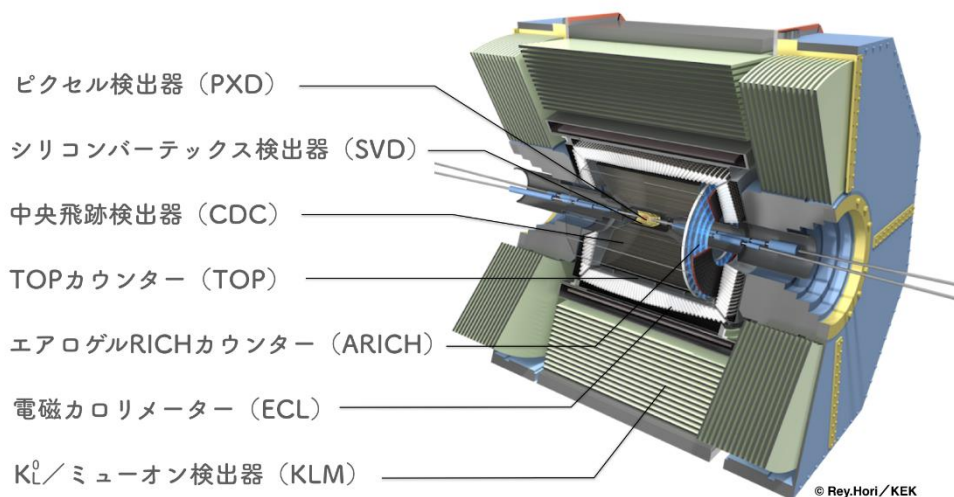


図 1.2 Belle II 測定器の全体図

一番内側に設置されている検出器は、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あり、内側二層はピクセル検出器(PXD)、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、半導体内の空乏層と呼ばれる電荷を運ぶものがない層を荷電粒子が通過すると電子-正孔対が生成され、電子が内部ゲートとよばれる領域に集められる。空乏層の外の外部ゲートから電圧をかけ、内部ゲートに集められた電子の数に比例した電流を、読み出すことで、荷電粒子がそのピクセルを通過した位置とともに、電流の大きさからその粒子がピクセルに落としていったエネルギーの情報も得られる。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 ピクセル検出器

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 倍向上した。[1][6]

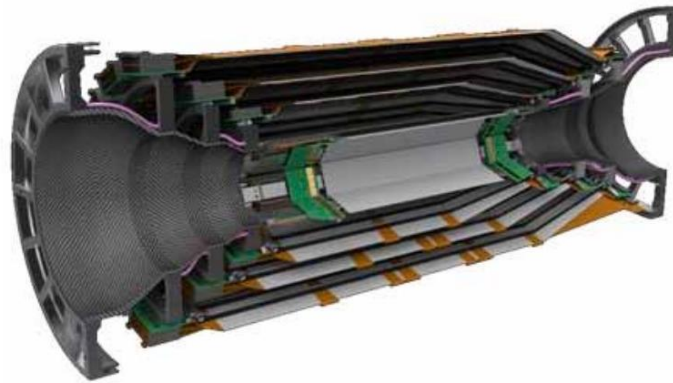


図 1.4 SVD の断面図[6]

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直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ の金メッキタングステンでできたセンスワイヤー14336 本と直径 $126\text{ }\mu\text{m}$ のアルミニウム合金でできたフィールドワイヤー42240 本を円筒の中心軸に沿った方向に張り、センスワイヤー 1 本を 8 本のフィールドワイヤーが台形状に取り囲むセル構造を形成している。CDC 内部にはヘリウムとエタンを 50 : 50 で混合したガスを流している。荷電粒子が CDC を通過する時にガス分子が電離され、センスワイヤーに収集される電子がセンスワイヤー近傍で起こす電子雪崩によって大量のイオンを発生させる。そのイオンが移動するときのアノードワイヤーに誘起される電荷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。次に述べる粒子識別装置が変更されたことにより、CDC も大型になり検出層も増え、粒子識別性能が向上した。またセルのサイズを小さくした層を導入し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][7][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により、荷電粒子が CDC 内を通過する際の z 軸方向の位置情報を得られる。

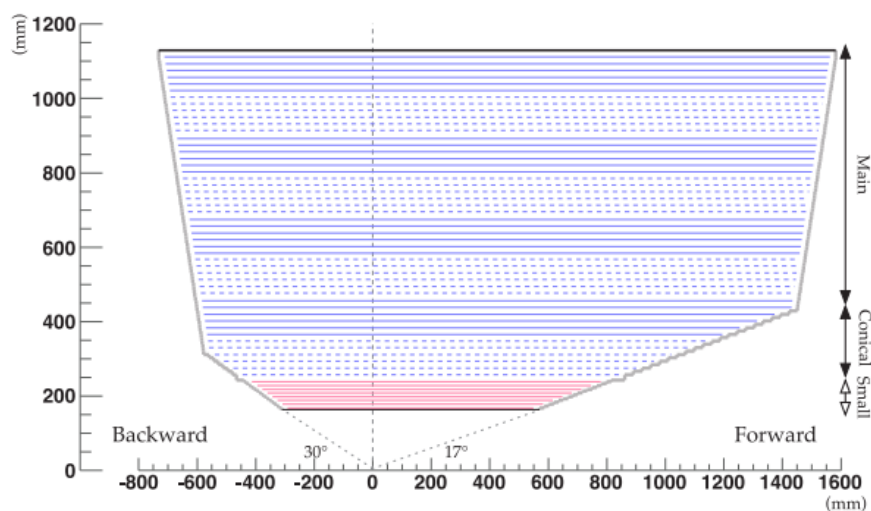


図 1.5 CDC の半断面図[8]

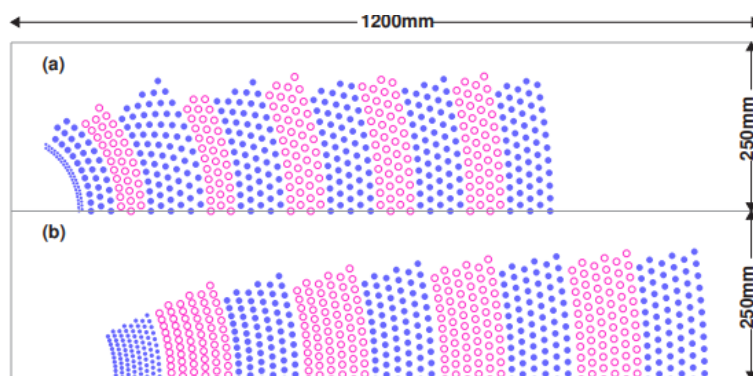


図 1.6 CDC のセンスワイヤーの配置の比較[8]

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チェレンコフ光の入射角度と伝播速度が異なるので光検出器に到達した位置と時間を 50 ps 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り、より精度が向上した。[1][9]

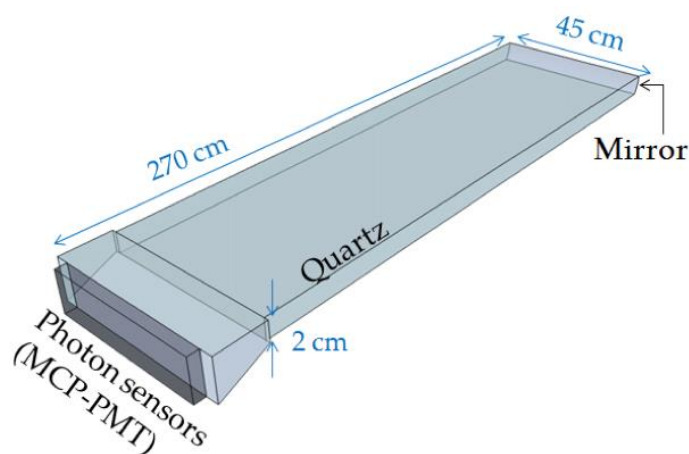


図 1.7 TOP カウンターの概形[9]

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]

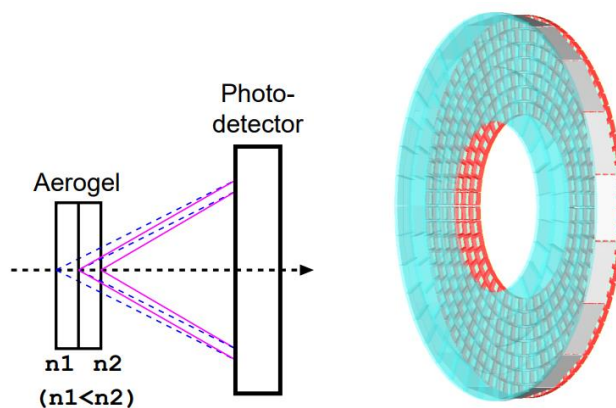


図 1.8 ARICH の原理と概形[3]

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(ECL)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繰り返して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 ECL 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検出効率が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ったために読み出し信号が重なる頻度が高くなる。そこで 2 MHz のサンプリング周波数で動作する 18 bit 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を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を $1/7$ に減らすことができる。[1] [10] 図 1.9 は ECL 部分の断面図を示している。検出可能な範囲は、ビーム軸に対する角度 θ に対して $17^\circ < \theta < 150^\circ$ となっている。

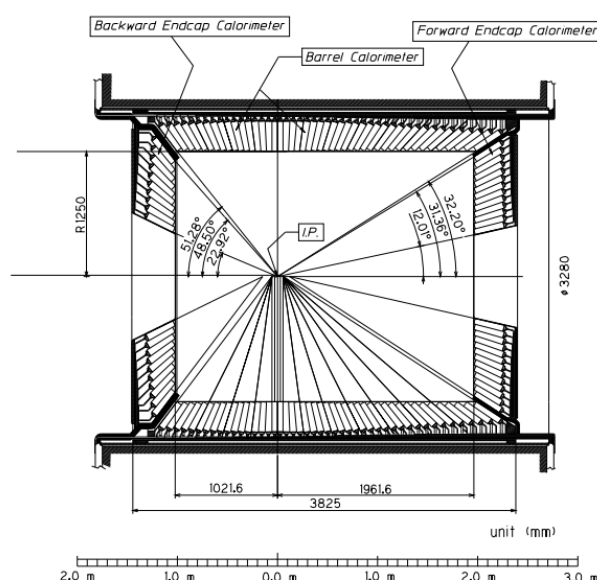


図 1.9 ELCの概形[10]

K_0^L 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_0^L の検出を行う。 μ 粒子は物質中で電磁相互作用により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ことにより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_0^L は検出器内では検出器の物質と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 実験のときは全ての層の検出器にガラス RPC 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 全層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全ての検出器で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 30kHz 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 1.10 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 は他に比べてデータ量が多いので COPPER は使わずに高次トリガーで再構成された粒子の飛跡から信号が発生するピクセルを予想しその部分のデータだけを読んでいる。これらのデータを高速 RAID システムに記録している。

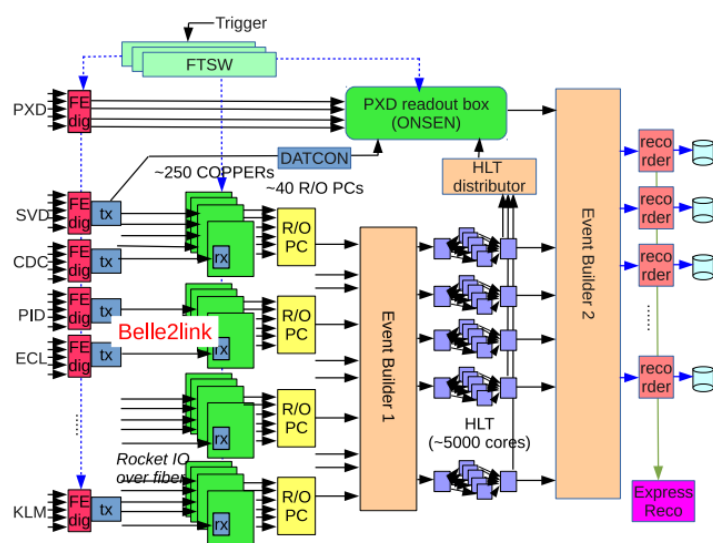


図 1.10 データ収集システムの全体図[12]

第2章 中央飛跡検出器(CDC)

第1節 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 200 mm であるため $200\text{ mm} \times 170\text{ mm}$ となっている。

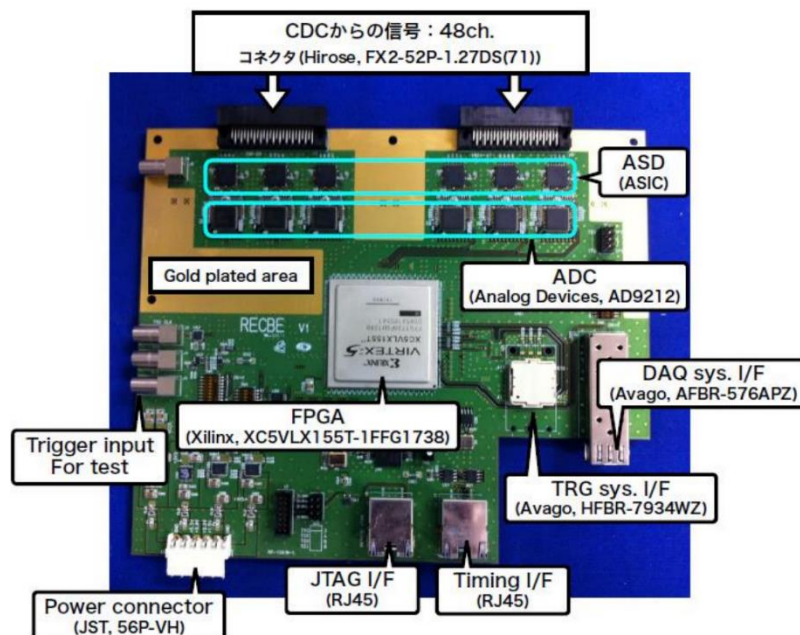


図 2.1 現行の読み出し回路 RECBE

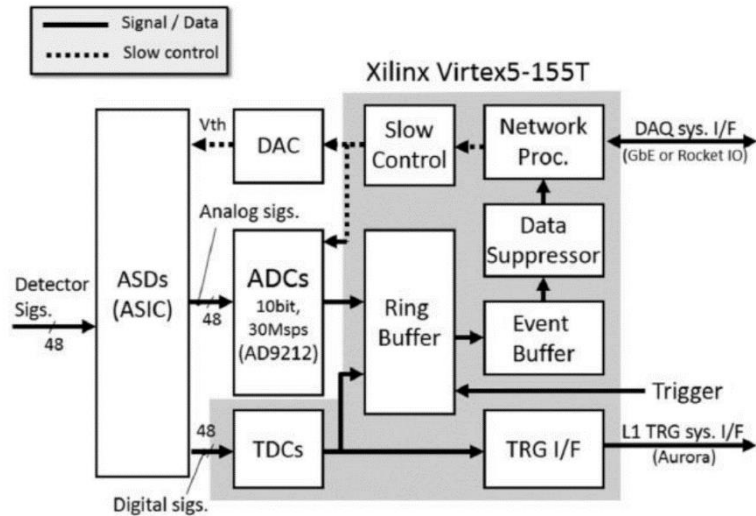


図 2.2 RECBE のブロックダイアグラム[14]

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、波形整形、波高弁別を行う。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、増幅、波形整形された後、波形サンプリングをするためのアナログ出力と波高弁別に分けられ、波高弁別がされた後、ドリフト時間を測定するためのデジタル出力が出力される。アナログ出力は ASD と同じく 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、デジタル値に変換される。

もう一方のデジタル出力は TDC に送られる。RECBE の入力 48 チャンネルの 1 つ 1 つの情報に対応する 48 個と、基準となる 1 個の合計 49 個のカウンターが存在し、基準とのカウント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 を足し上げることで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 DAQ システムと外部 PC へデータを送る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

第1節 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 $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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。

第2節 アップグレードの予定

アップグレードのこれまでと予定は、2021 年 1 月までにチップのデザインと開発がなされた。この 1st version のチップを評価する。本研究はこの評価の一部である。評価の後、48 ch のボードを用意してビームテストを行う。ビームテストではエネルギー損失やボードのファームウェアなどを確認する。その後、必要があれば 2nd version のチップを作ってもう一度ビームテストを行う。ここまでで 2023 年度の予定である。その後、実機用ボードの大量生産と全数検査を行い、予定通りであれば 2026 年度に入れ替えとなる。

第3節 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。

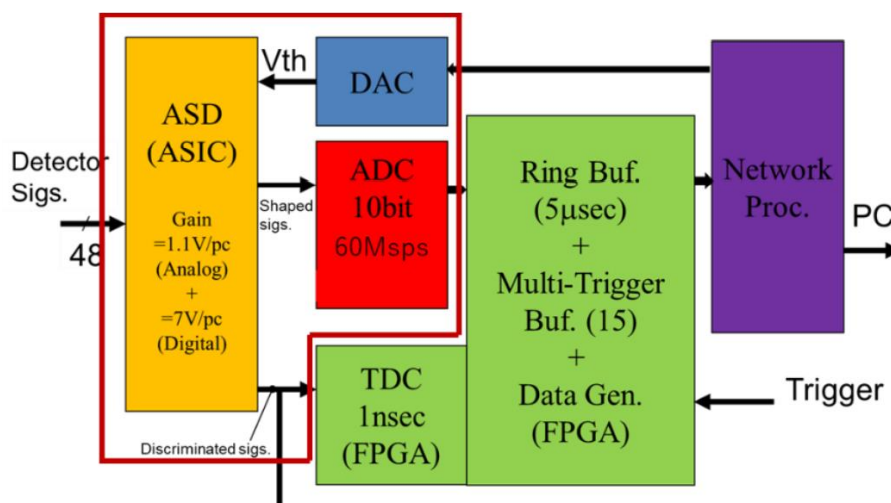


図 3.1 試作されている読み出し回路

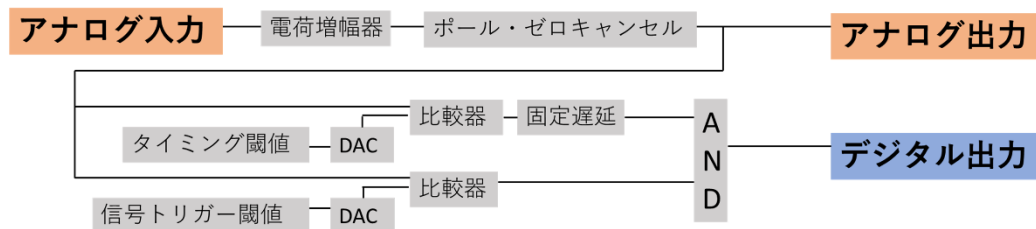


図 3.2 ASD 1 チャンネルあたりの構成

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。これにより読み出しボード製作時に取り付けるチップが少なくなり機械的故障のリスクが減少した。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。

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。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別するために使い、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(ダイナミックレンジ)が広がる。

第4章 ASIC の評価

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 チャンネルあり、出力は、デジタルは入力と同じ 8 チャンネル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 任意の 1 ch に設定することが可能である。

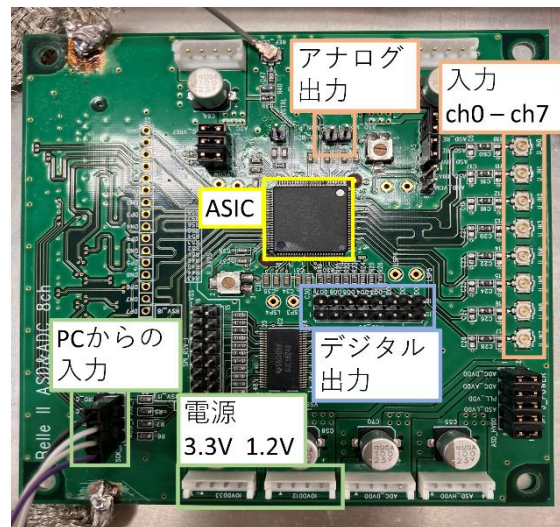


図 4.1 ASIC 評価用基板

第1節 消費電力

開発された ADC 部分を含む ASIC の消費電力が、現在 CDC で使用されているものと比べて低減されているかを確認した。現行の ADC の消費電力は約 800 mW であり、目標値は現行の消費電力の 1/5 ～ 1/10 で、160 mW ～ 80 mW である。

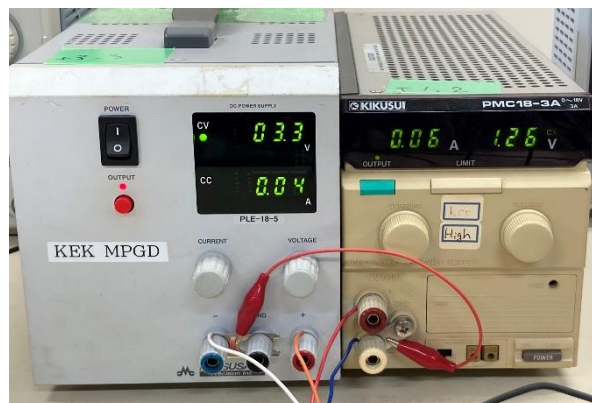


図 4.2 電源の写真

図 4.2 は、ASIC への電源の写真である。写真の左が 3.3 V の電源、右が 1.26 V の電源である。それぞれに併記されている数値が電流の値である。それぞれ 0.04 A 、 0.06 A である。左右それぞれで電力を計算すると、0.132 W、0.0756 W である。これを合計した 205.6 mW が新しい ASIC の消費電力である。この数値は目標の値より大きい値ではあるが、現行の 1/4 まですで低減できており、冷却システムへの負荷を軽減することができると考えられる。

第 2 節 温度耐性

ASIC の温度耐性を測定する。ASIC を使用する CDC 検出器が設置される場所は Belle II 検出器の中でも中央に近い位置であり、Belle II 検出器の稼働中は CDC 検出器自身を含めて周りの検出器からの排熱が存在する。開発された ASIC がその排熱に対して、温度耐性があるかどうかを測定した。

発振器からの同じ二つのテストパルスをオシロスコープと ASIC 評価用基盤のアナログ入力に接続し、アナログ出力の信号やデジタル出力の波高値をオシロスコープへ入力した。ASIC をオシロスコープや発振器に繋いだまま温度を変化させられるサーモコントローラーに入れて、使用環境に近い温度に変化させてアナログ出力・デジタル出力の温度変化を測定した。

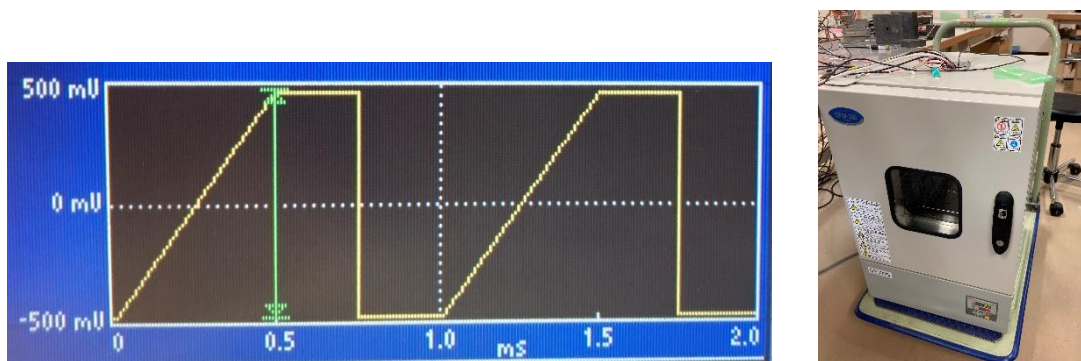


図 4.3 テストパルスの波形(左)とサーモコントローラー(右)

図 4.3 の左はテストパルスの波形を示している。テストパルスは繰り返し 1 kHz、波形の Leading 部分の立ち上がり時間が 2.5 nsec、Trailing 部分の立ち下がり時間が 500 μ sec であり、テストパルスの入力に 1 pF のコンデンサーを入れることで 1 V が 1 pC に対応するようにした。ASIC への入力パルスの入力電荷に対して、アナログ出力は波高値の、デジタル出力は閾値の温度変化を測定した。図 4.4 と図 4.5 にそれぞれアナログ出力・デジタル出力の結果を示した。

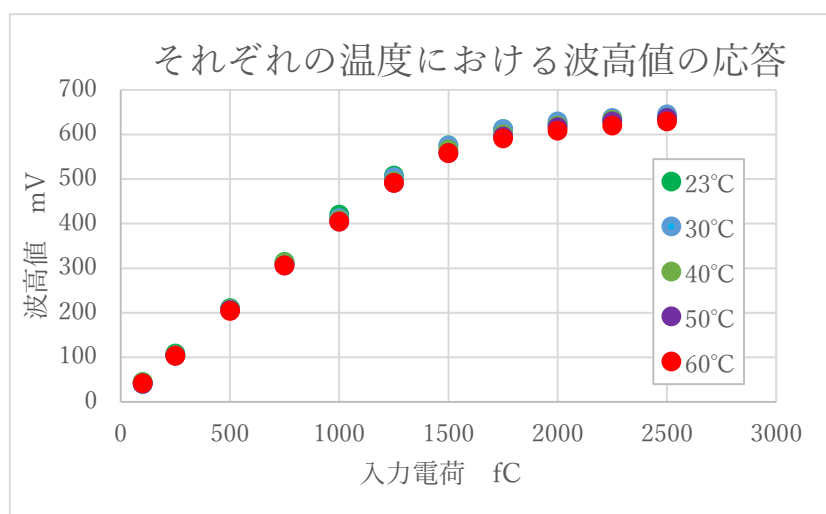


図 4.4 それぞれの温度における波高値の応答

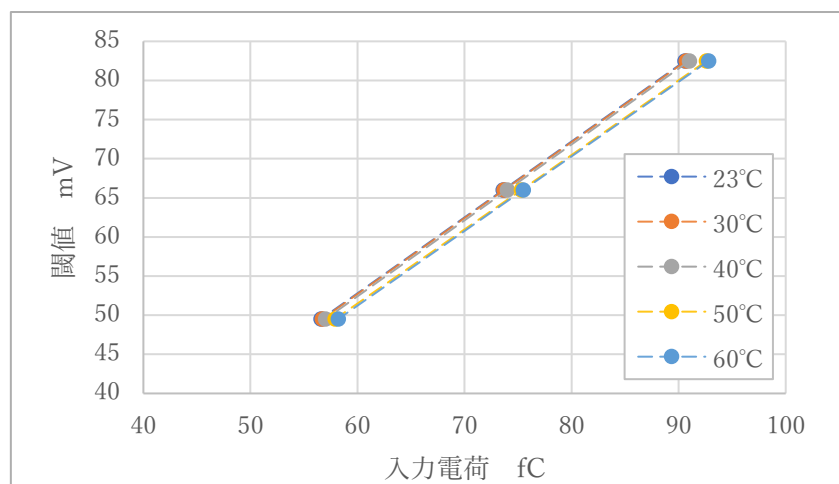


図 4.5 閾値の温度変化

図 4.4 は入力信号の電荷に対するアナログ出力の波高値を、温度を変えてプロットしたものである。図 4.4 を見ると、入力電荷が 1500 fC 程度までが出力の波高値も線形に応答している。ここまでがダイナミックレンジであり、室温 23°C と 30~60°C の温度では波高値の温度変化がほとんどないと言える。次に、図 4.5 は設定した閾値が 49.5, 66, 82.5 mV のとき、1 kHz の入力信号を、電圧すなわち入力電荷を変化させながら入力して、閾値を越えて出力される信号の数をカウントし、それが入力した信号の数の 50% を越えたときの電荷をプロットしたものである。図 4.5 のグラフを見ると、閾値の値は温度の変化に対してほとんど変化していない。また、温度が変化しても入力電荷に対する閾値が線形に変化していて、各温度のグラフの傾きが変化していないので、温度が変化しても閾値の性能に問題はない。以上の結果より、開発された ASIC は、温度変化に対する性能の変化は十分に小さく、Belle II 測定器の使用環境において問題のない性能を発揮できるものであると思われる。

第3節 クロストーク

クロストークとは回路の信号線と別の信号線がすぐ近くを通っている場合、一方の信号線に信号が入ったとき、二つの信号線がコンデンサーのようになり、もう一方の信号線に疑似信号が誘起されてしまう現象のことを指す。ASIC の実際の使用環境では、複数のセンスワイヤーの信号が入力されるため、ASIC でクロストークが発生して疑似信号が出力されてしまうと、時間情報に影響を与えてしまう。そのため、クロストークは小さいほうが良い。クロストークを測定するために、比例計数管に ^{55}Fe チェッキングソースから放射される X 線を照射して、ASIC の入力 ch の一つに接続し、比例計数管への印加電圧ごとに出力信号をカウントした。

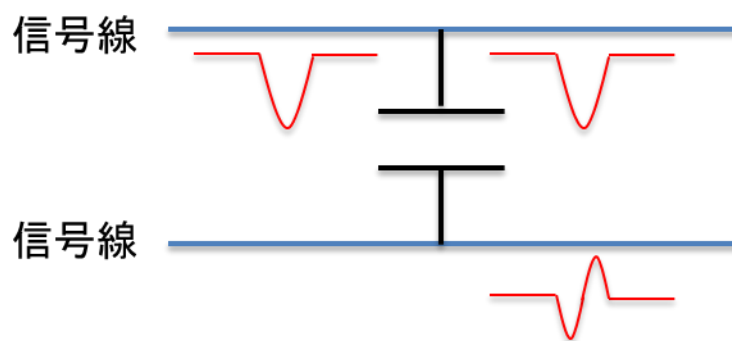


図 4.6 クロストークの概略図

比例計数管は、サイズが 3cm × 3cm × 20cm のものを使用。この比例計数管に不活性ガスであるアルゴン(Ar)とクエンチング用のメタン(CH_4)を 10%混合させたガスである P-10 ガスを流した。

比例計数管からの信号を評価用基板の入力のある 1ch に接続し、全チャンネルのデジタル出力のカウント数を 10 秒間測定し、印加電圧ごとの単位時間当たりのカウント数を比較した。この測定を入力 ch を変えて ch 0 から ch 6 まで繰り返した。ただし、ch5 は回路が不調で信号が出力されなかった。



サイズ 3cm × 3cm × 20cm

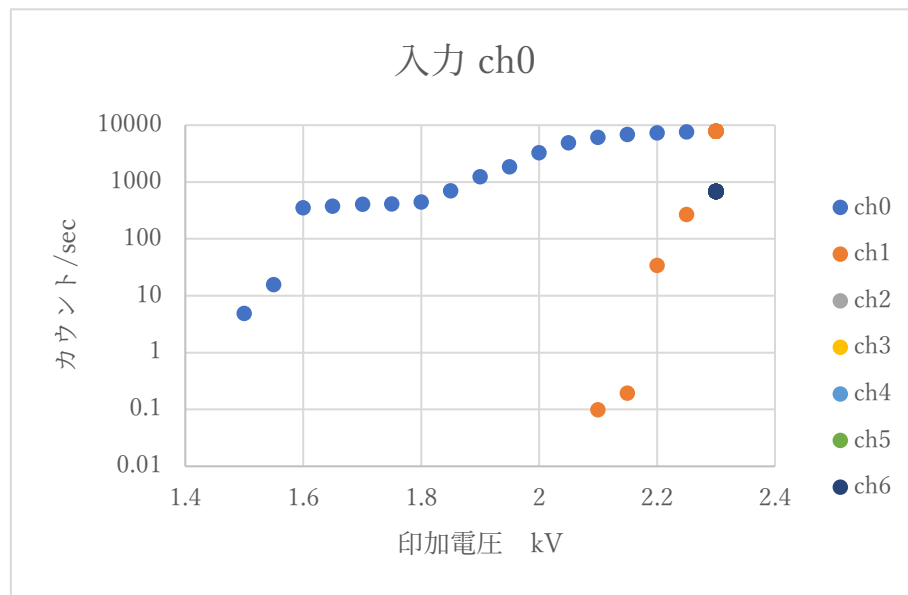


図 4.7 ch0 のクロストーク
入力 ch1

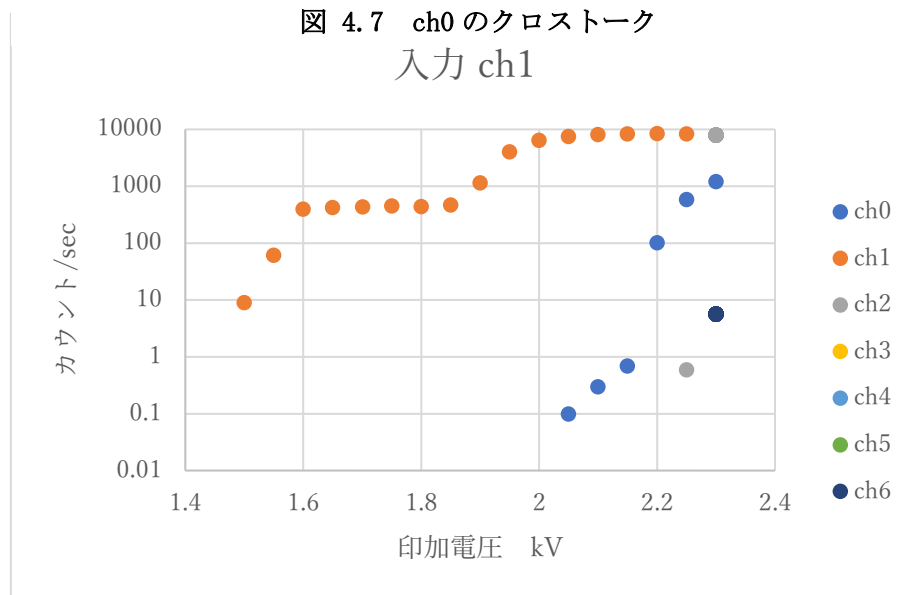


図 4.8 ch1 のクロストーク

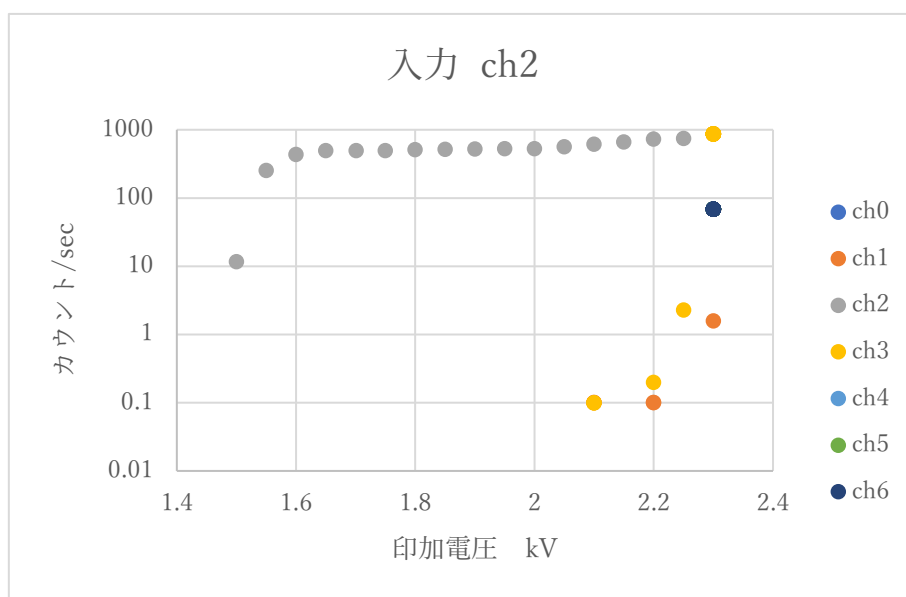


図 4.9 ch2 のクロストーク

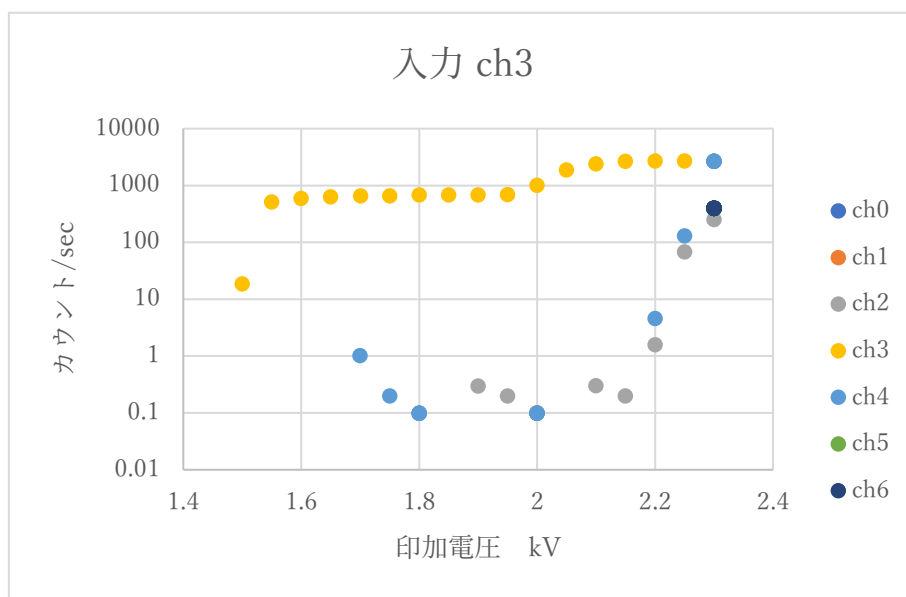


図 4.10 ch3 のクロストーク

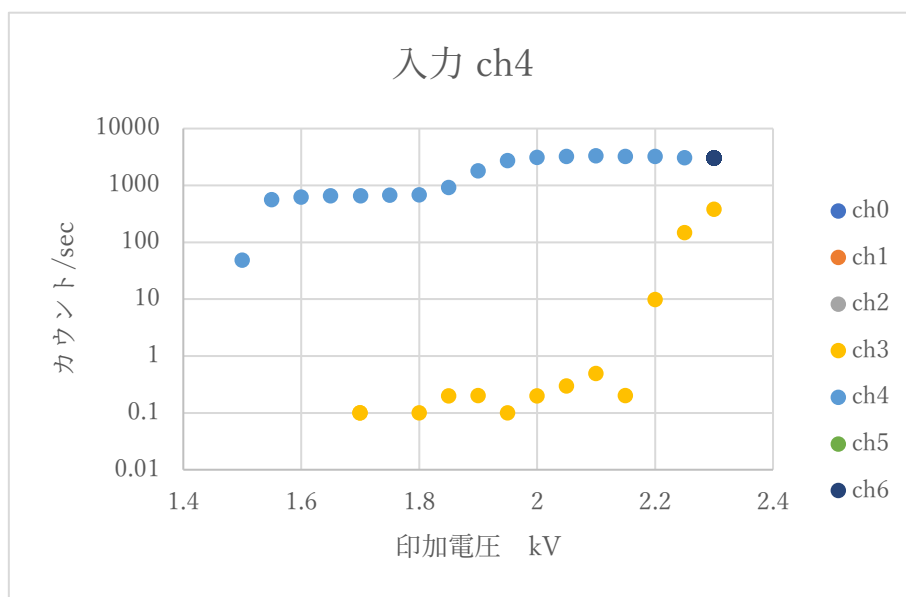


図 4.11 ch4 のクロストーク

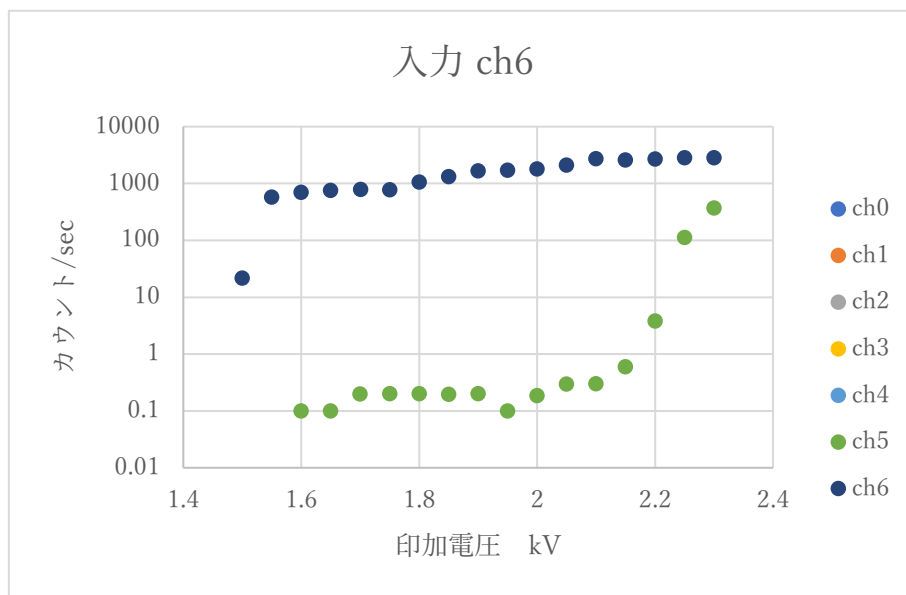


図 4.12 ch6 のクロストーク

図 4.7 から図 4.12 のグラフは、比例計数管への印加電圧に対する、一つの入力チャンネルに対する ch0 から ch6 までの出力の単位時間当たりのカウント数をプロットしたものである。各グラフにおいて、一番上にプロットされているデータは、各入力 ch と同じ ch の出力の 1 秒間当たりのカウント/sec であり、それ以外のデータがクロストークのデータである。クロストークは本来どの ch 間でも発生しうるが、クロストークが主に観測されているのは入出力が同じ

ch の隣の ch であり、それ以外の ch ではカウント数は非常に少ない。そのためここではクロストークとは隣の ch のことを指すことにする。AISC が実際に使用される環境とほぼ等しい波高値を得られる領域は印加電圧が 1.6 kV から 1.8 kV の範囲である。その範囲内において、クロストークの信号は、入力と出力が同じ ch の信号と比べて、多くても 0.2% 以下である。これは十分小さいので問題はないことが確認できた。

第 4 節 宇宙線の飛跡の再構成

CDC は荷電粒子の飛跡の再構成を行うことが目的である。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わかる。そこで ASIC を CDC と同じ構造の多線式比例計数管に繋いで宇宙線を測定し、出力されたデータから宇宙線の飛跡が再構成できるかを確認した。



図 4.13 多線式比例計数管の全体図(左)とセル(右)

図 4.13 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 cm × 10 cm × 200 cm、内部は図 4.13 の右図に示す通り、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検出を行うセンスワイヤーを、青色の丸は、電場を形成する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。各セルの大きさは 1.8 cm × 1.8 cm となっており、Belle II CDC のセルサイズとほぼ等しくなっている。内部には P-10 ガスを流す。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。図 4.13 の右の図

の赤いセルは ASIC に接続した 7 つのセルを示している。

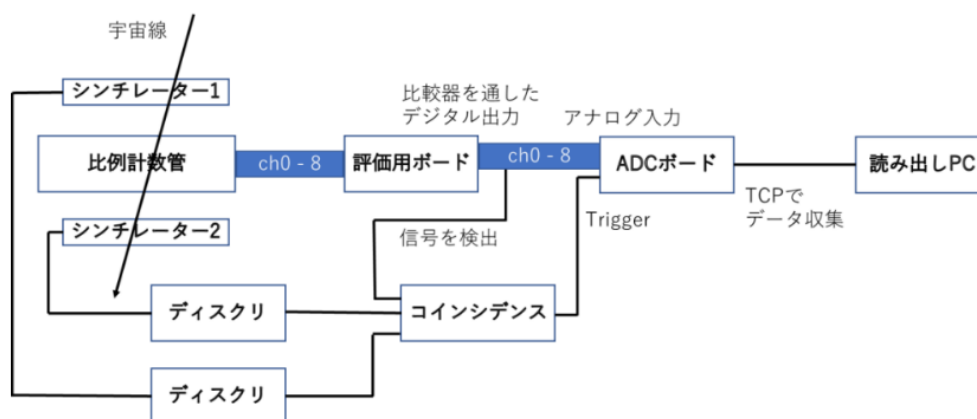


図 4.14 実験のセットアップと ADC ボード

実験を行う全体のセットアップを図 4.14 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わりの 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

多線式比例計数管には 2100 V の電圧を印加した。図 4.13 の右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、二段目の左が ch1、右が ch2、ch3、四段目の左が ch4、右が ch5、ch6 に入力を行い、そのデジタル出力を ADC ボードの ch0～ch6 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 4.15 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、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。

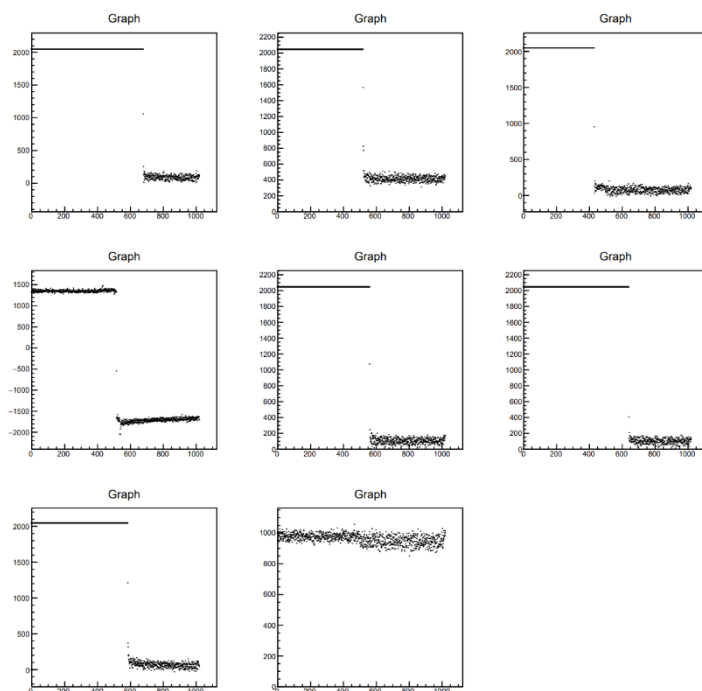


図 4.15 デジタル出力の波形データ

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。

宇宙線の信号の条件として、

- ・ 375 ns から 740 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
- ・ 上 2 つの条件が図 4.10 右の図の上から五段すべてに当てはまる

のものとしている。この条件により、スパイクノイズではない、宇宙線によるものらしい信号が、全ての段で検出された事象を選択する。宇宙線の信号を検出し始める時刻の分布を見ると、分布の始まりは 420 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 420 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 3.0 cm/ μ s とするとドリフト距離 D は $D = T * 0.030$ [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。

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 $\{ \text{ch0, ch1, ch2, ch3, ch4} \dots \} = \{ \text{左, 左, 左, 左, 左} \dots \}, \{ \text{左, 左, 左, 左, 右} \dots \}, \{ \text{左, 左, 左, 右, 左} \dots \}, \dots, \{ \text{右, 右, 右, 左, 右} \dots \}, \{ \text{右, 右, 右, 右, 左} \dots \}, \{ \text{右, 右, 右, 右, 右} \dots \}$ のような 5 つから 7 つの点が一番近くを通る一次関数を $2^7 = 128$ 通り求めた。ただし、一次関数の傾きが発散す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' とし、各段での $(D - D')^2$ の合計を計算し、128 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。

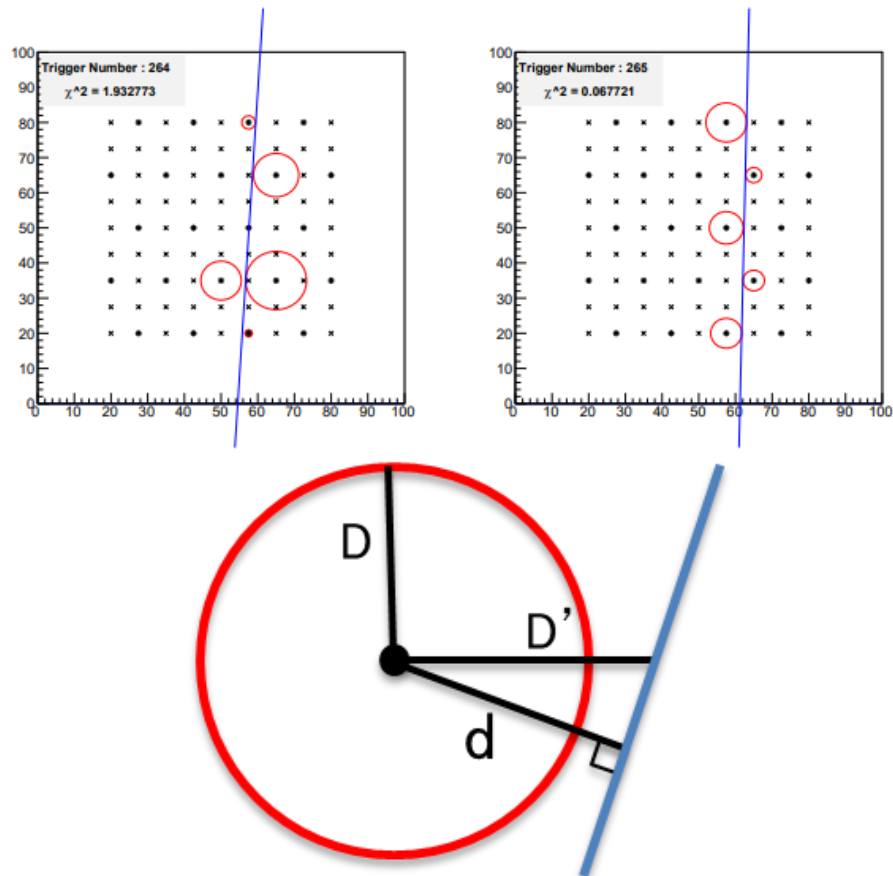


図 4.16 宇宙線の飛跡と拡大図

図 4.16 は宇宙線の飛跡を再構成したものである。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 4.17 に示す。

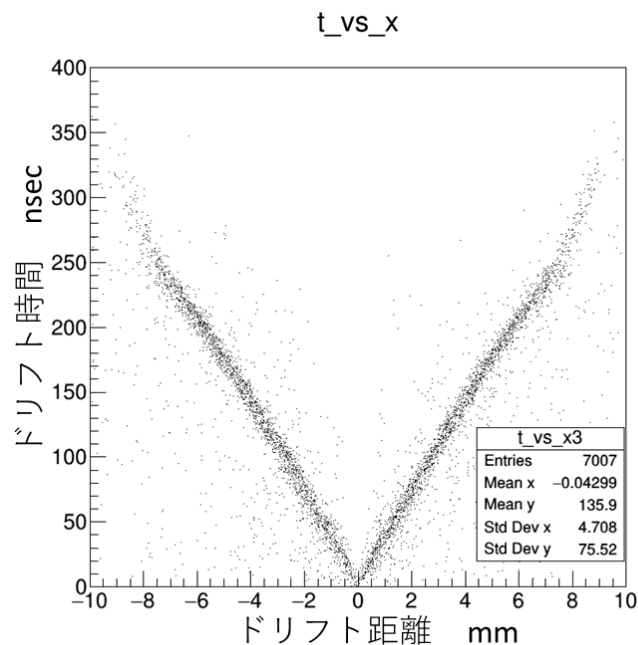


図 4.17 ドリフト時間とドリフト距離の関係

図 4.17 において、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。このときのドリフト速度は $3.3 \text{ cm}/\mu\text{sec}$ であった。これは既存の研究などと変わらない数値である。

第 5 節 ダブルスレッシュヨルド

ダブルスレッシュヨルドは、より良い時間分解能を得るために閾値を 2 つにして、閾値が 1 つのときよりも信号の大きさのずれをなくすものである。

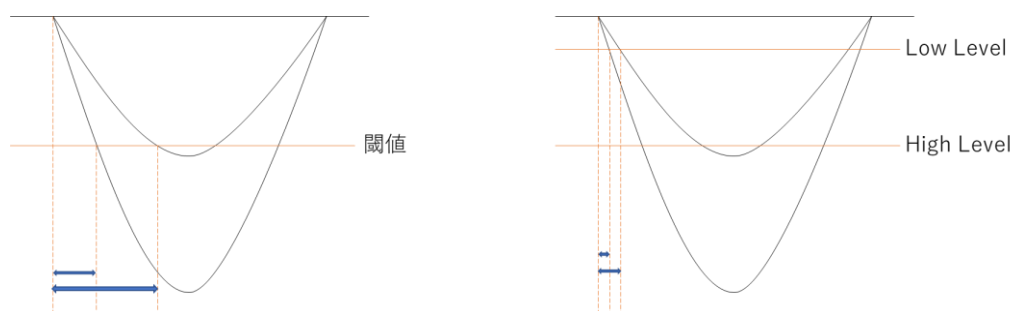


図 4.18 ダブルスレッシュヨルドの説明図

図 4.18 の左図は閾値が 1 つ、右図は閾値が 2 つである。本来であれば取得したいのは入力パルス波の立ち上がり開始の時間情報である。しかし入力のパルス波に対して閾値が 1 つだと、パルス波の立ち上がり時刻が同じでも波高値の違いによって、図 4.18 左図に示されている通り、取得できる時間情報に差が出てしまう。そこで、パルス波の波高値の違いによって生じる時間情報の差を小さくするためにダブルスレッショルドを導入した。ダブルスレッショルドは、図 4.18 の右図のように閾値を 2 つにして、Low level で時間情報を取得、High level でパルス波が目的の信号であるかどうかを判別している。High level で目的の信号と判別された信号の時間情報を出力している。こうすることでパルス波の波高値の違いによって生じる時間情報の差を小さくできる。

開発された ASIC は PC から閾値の High level と Low level を設定できる。今回の実験は High level と Low level を変更して、ダブルスレッショルドが動作しているかどうかと時間情報が良くなっているかを確認した。

動作確認として、立ち上がり部分に時間変化を持つテストパルスとオシロスコープを用いて入力信号と出力信号の時間差を測定し、Low level で時間情報が決定されていることと High level では時間情報が決定されていないことを試験した。図 4.18 を参照すると、Low level の値を大きくすると入力信号との時間差が大きくなり、小さくすると時間差が大きくなるはずである。また、High level の値を変化させても入力との時間差は変化しないはずである。これを試験した。図 4.19 は、入力信号と出力信号の時間差を測定しているオシロスコープの写真である。緑色の線が入力信号、水色の線が出力信号である。図中のカーソル（白色の破線と一点鎖線）で示される、それぞれの信号の波高が 50% に達した時刻をオシロスコープに入力された時刻とし、その時間差を測定した。図 4.20 はその結果を示したものである。

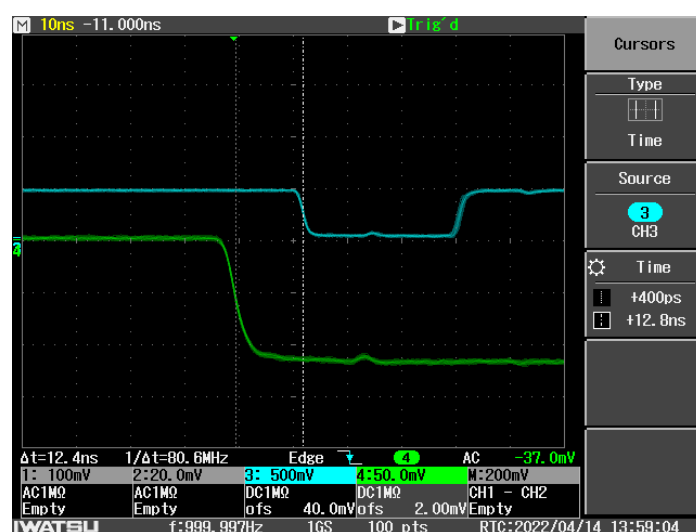


図 4.19 ダブルスレッショルドの動作確認のオシロスコープの写真

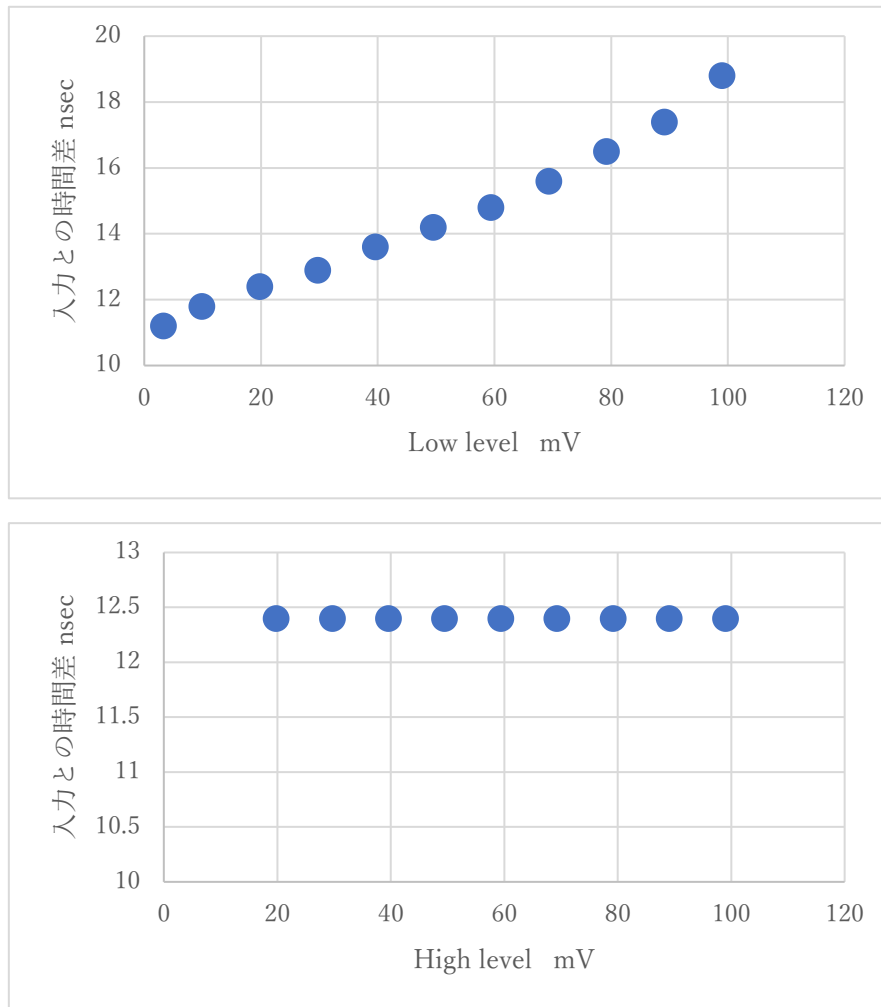


図 4.20 ダブルスレッショルドの動作確認

図 4.20 の上図は Low level を変化させたときの入力との時間差である。この時の High level は 99 mV である。上図を見ると Low level の変化に対して入力時間が変化している。また、下図は High level を変化させたときの入力との時間差である。この時の Low level は 19.8 mV である。下図を見ると High level の変化に対して入力時間が変化していない。これらのことからダブルスレッショルドは正常に動作していることが確認できた。

もう一つの試験として、ダブルスレッショルドによって時間情報が改善されているかを確認する測定した。

飛跡を再構成する際に、ドリフト速度は、時間の一次関数ではなく三次関数に比例すると仮定

し、以下の解析を行った。

1. 各時間データ T (ns) から、宇宙線の各ワイヤーからの距離 r (mm)を計算し、円として描画しその円に接するように宇宙線の飛跡を引く。最初は $r = v \cdot T$ で計算した。
2. 各ワイヤーと飛跡との距離 W を計算し、その絶対値と時間データ T を二次元ヒストグラムにプロットする。
3. 二次元ヒストグラムに三次関数を Fit して、ドリフト距離の関数 $f_1(T)$ を得る。
4. 円の半径 $r = f_1(T)$ と W を計算しなおして、 $\sigma = 0.2 \text{ mm}$, $\chi^2/NDF = \frac{\sum (|W| - f_1)^2}{\sigma^2 \cdot \text{Hit 数} - 2} \leq 8$ の条件で、残渣 $|W| - f_1(T)$ と時間 T を二次元ヒストグラムにプロットする。
5. 残渣と T のヒストグラムからドリフト時間に依存する残渣の標準偏差 σ_1 を得る。
6. σ_1, f_1 から $r = f_1(T)$ として、円の半径 r と $|W|$ を計算しなおして、 $\sigma = \sigma_1$, $\chi^2/NDF \leq 8$ の条件で、 $|W|$ と時間 T を二次元ヒストグラムにプロットする。
7. $|W|$ と T のヒストグラムに三次関数を Fit して、ドリフト距離の関数 $f_2(t)$ を得る。
8. $(f_2 - f_1)/f_1$ でドリフト距離の関数の収束を確認する。

以下 $r = f_2(T)$ として、 4. から繰り返して三次関数が収束することを期待した。

※4. と6. に関しては、 T を 50 ns づつ、0 ns から 250 ns まで5つの区間に区切って計算、プロットした。

以下の図は、 Low level = 12 (閾値電圧 39.6 mV に相当)で上記の解析を 6 回繰り返した結果である。どの Low level の値でもほぼ同じ結果になった。

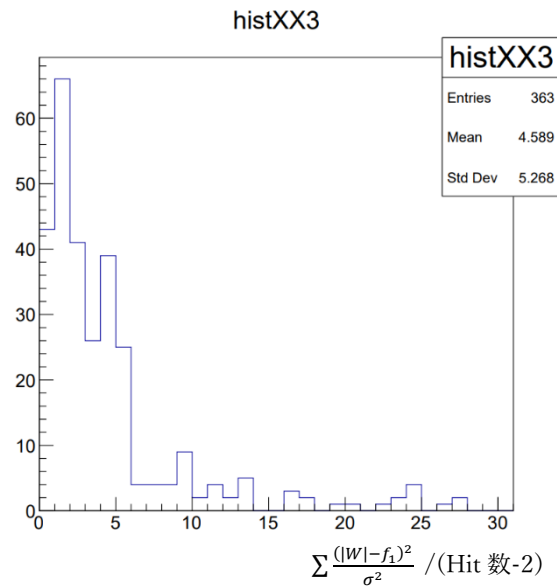


図 4.21 Reduced χ^2 分布

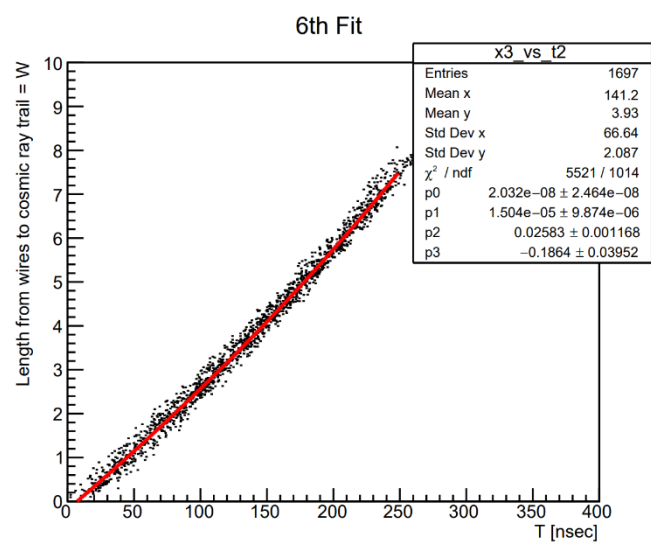


図 4.22 6回目の Fit

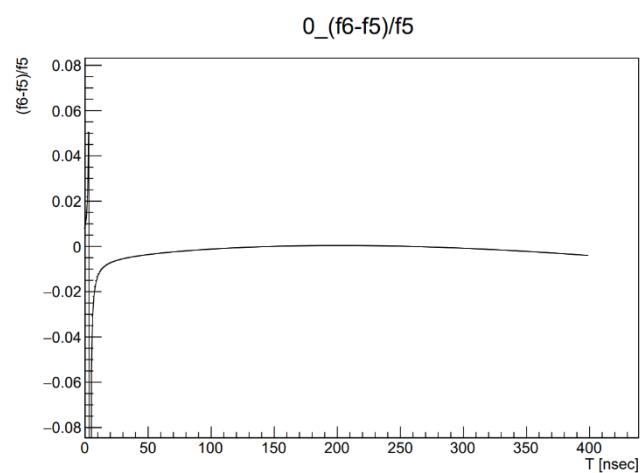


図 4.23 繰り返し5回目と6回目の x-t 関数の変化
のドリフト時間依存性

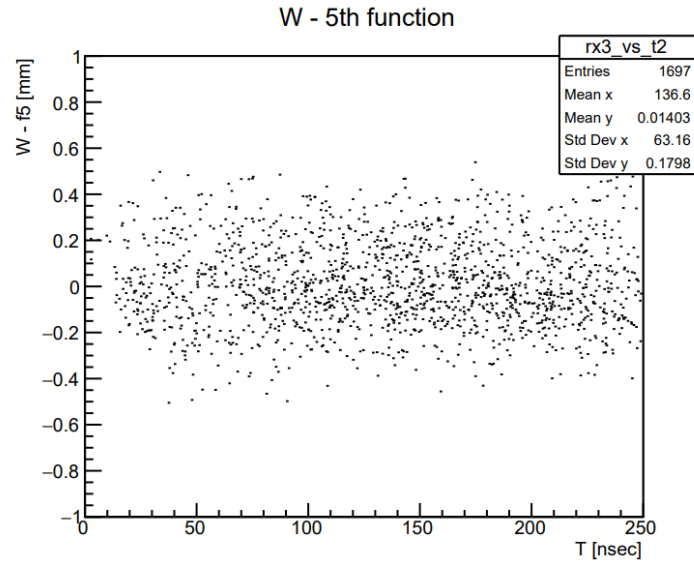


図 4.24 残渣のドリフト時間依存性

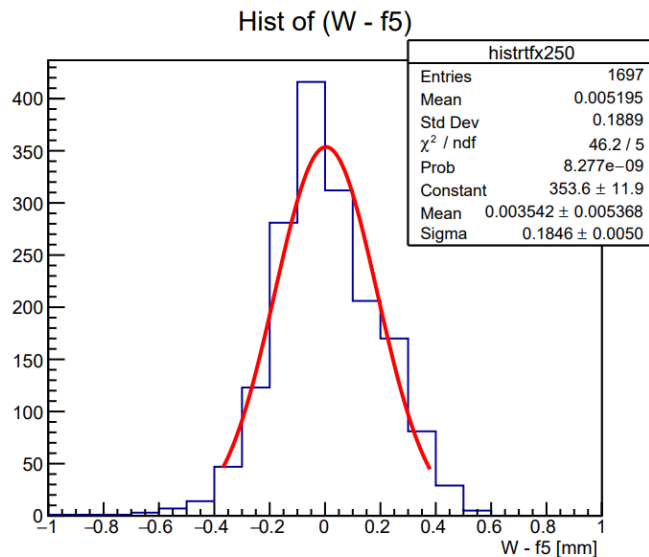


図 4.25 残渣分布

図 4.21 は解析 4.と解析 6.での χ^2/NDF のヒストグラムである。このヒストグラムの 8 以下のイベントのみをプロットしたものが図 4.22 である。図 4.22 は、解析 6. の条件で W と T をプロットして、三次関数を Fit したものである。T = 250 nsec までは Fit していないのは多線式比例計数管の一つのセルの大きさが 1.8cm で半径が 0.9 mm であり、隣のセルとの境界付近は電場が歪んでいるためその部分を解析から外しているためである。Fit についてはプロットされた各点のほぼ中心をとるように三次関数が Fit されているため、問題ないとした。図 4.23 のグラフは、解析 8. での結果である。T=0 付近を除いて f6 と f5 は 1 % 未満に収まっているため、上記の解析を 6 回行った時点で Fit 関数と σ は十分に収束したと判断した。図 4.24 は|W|-

f5 と T の二次元ヒストグラムであり、これを|W|-f5 に投影したのが図 4.25 である。

以下の数値が閾値電圧ごとの収束したドリフト距離の関数である。T の単位は ns である。

Vth = 13.2 mV の時

$$f = 3.26223 \times 10^{-9} \times T^3 + 2.35237 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.0249142 \times T - 0.100159$$

Vth = 19.8 mV の時

$$f = 4.21497 \times 10^{-8} \times T^3 + 7.76606 \times 10^{-6} \times T^2 + 0.0267294 \times T - 0.15606$$

Vth = 26.4 mV の時

$$f = 6.95002 \times 10^{-8} \times T^3 - 4.01451 \times 10^{-6} \times T^2 + 0.0279585 \times T - 0.194497$$

Vth = 39.6 mV の時

$$f = 2.03155 \times 10^{-8} \times T^3 + 1.50358 \times 10^{-6} \times T^2 + 0.0258254 \times T - 0.186362$$

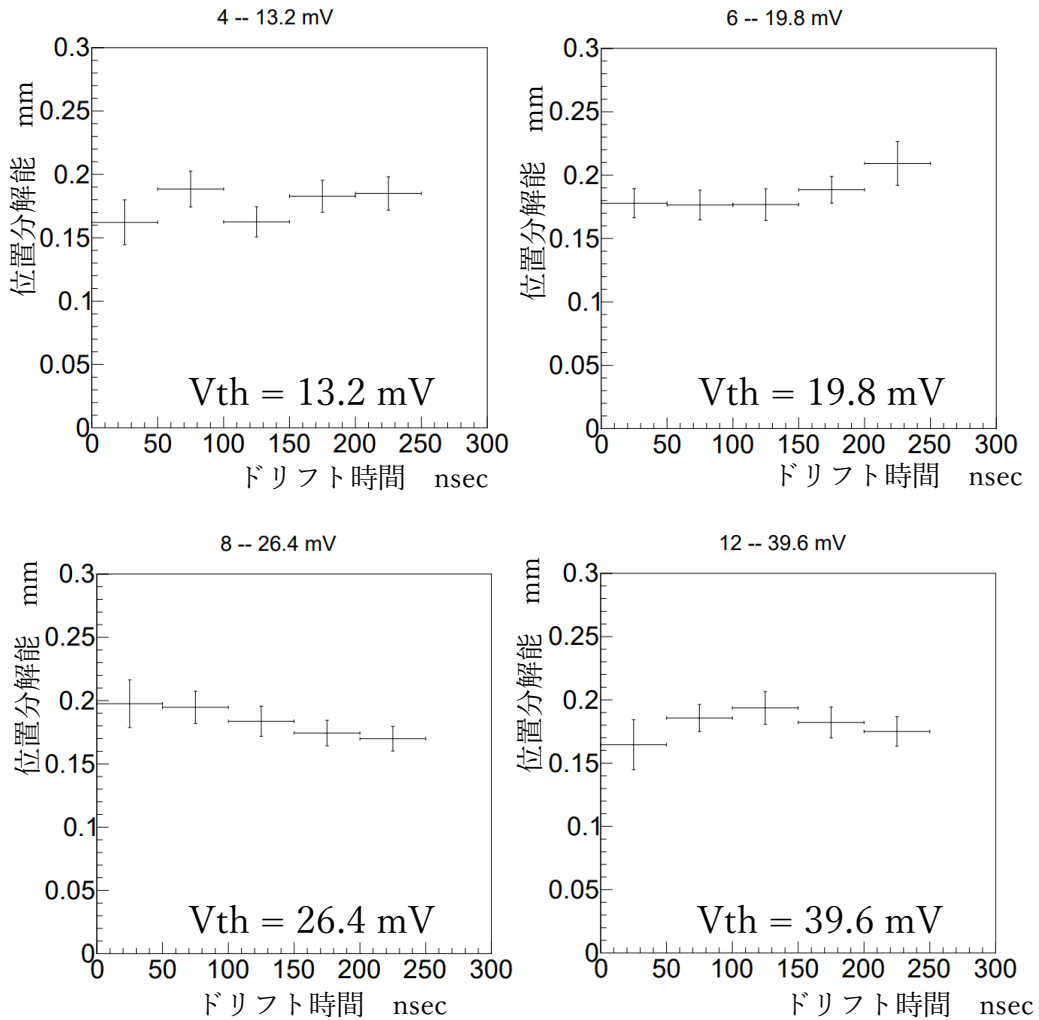


図 4.26 各スレッシュホルドのドリフト時間に対する位置分解能

図 4.26 は各スレッシュホールドのドリフト時間に対する位置分解能 σ を示したグラフである。左上から閾値電圧が、13.2 mV, 19.8 mV, 26.4mV, 39.6 mV のものを示している。それぞれのグラフを比べると、閾値電圧と閾値電圧に対する位置分解能の値は関係性が見られない。またそれぞれのグラフにおける、ドリフト時間に対する位置分解能も閾値電圧ごとに傾向が異なり、ドリフト時間と位置分解能の間に関係性が見られない。

下の図 4.27 は、各 Low level での $T < 250$ ns 全体の残渣分布の標準偏差 σ とそのエラーの値を示したものである。

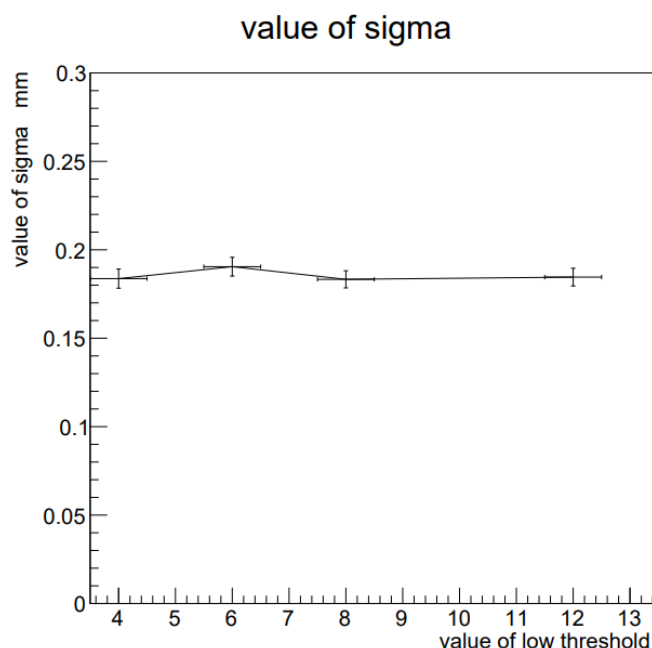


図 4.27 Low level に対する σ とエラー

図 4.27 を見ると、Low level の値が 6 のときだけ σ の値が大きいことがわかる。ただし、四つの値はエラーバーの範囲が重なっているためほぼ同じ値に収束したと判断した。しかし、ダブルスレッシュホールドによって時間分解能が良くなっていれば、Low level の値が小さいほど σ の値は小さくなるはずである。図 4.27 はそうになっていないため、今回の試験では時間分解能の改善は見られなかった。改善が見られなかった理由は、宇宙線が飛来する角度分布が広すぎたことが考えられる。今回の試験のセットアップでは多線式比例計数管と二つのシンチレータが平行に設置されているが、これでは計数管のワイヤー方向に対する天頂角が広すぎて、集められる電子の位置がワイヤー方向に延びてしまい、ワイヤーに垂直な平面内での電子対の生成密度が大きくなり、同時刻にワイヤーに到達する電子の数が増え、検出信号のパルス波の時間分解能の悪化が現れにくくなってしまう。これを防ぐためには、シンチレータ同士を 90 度回すなどして宇宙線の飛来する方向を真上付近からに限定するなどする必要があると思われる。

まとめ

本研究では Belle II 実験で使用されている 中央飛跡検出器用に開発されたガスを用いた飛跡検出器用読み出し ASIC 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とでダイナミックレンジを 2 倍まで広くし、ダブルスレッシュホールドを採用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。本研究では消費電力、温度耐性、クロストーク、ダブルスレッシュホールドの動作確認、ダブルスレッシュホールドによる位置分解能の向上を調べた。

評価の仕方は、テストパルスや比例計数管と線源を用いて設計通りの動作をしているかを調べた。評価の結果としては、消費電力は現在使用されているものと比べて低減できていることが確認できた。温度耐性については、アナログ出力・デジタル出力の閾値の両方で 60°C まで問題なく動作することが確認できた。クロストークは実機で使用する波高値において十分に小さいことが確認できた。ダブルスレッシュホールドは、タイミング閾値も信号トリガー閾値もともに正常に動作していることが確認できた。

また、CDC と同じ構造にデザインされた多線式比例計数管を使用して宇宙線を利用した実験を行った。先行研究と同じように宇宙線の飛跡の再構成ができることが確認できた。さらに、タイミング閾値に宇宙線の位置分解能が関係しているかを確認しようとしたが確認できなかった。実験の詳細を検討しなおしたうえで、実験のセットアップなどを見直す必要があると思われる。

今後は予定されているビームテストで問題がなければ、大量生産・全数検査が 2026 年度の CDC 全体のアップグレードに向けて進められる。

謝辞

3年間に渡り、熱心なご指導やご助言を賜りました宇宙・素粒子実験物理学研究室教授の中野英一氏、准教授の岩崎昌子氏に感謝申し上げます。研究に関わることから学会発表まで様々なことに有益なご助言を沢山頂きました。本当にありがとうございました。

本研究において、高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所の宇野彰二氏には多大なるご協力を頂きました。私の指導に多くの時間を割いて、装置のセットアップから、測定方法、評価方法などをご指導いただきましたこと、心より御礼申し上げます。

同じ研究室の加藤さん、井上くん、度会くん、大木くん、森政さん、山崎くんには研究の発表練習などに何度もお付き合い頂き、大変お世話になりました。

最後に、本研究に関わったすべての方々に心より感謝申し上げます。

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
- [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
- [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
- [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
- [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」(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
- [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
- [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)」(2021/11/16 参照)
- [10] 宮林 謙吉(2014)「Belle II 電磁カロリメーター (ECL)」高エネルギーニュース Vol.33 No.2
- [11] 住澤 一高(2014)「Belle II KLM」高エネルギーニュース Vol.33 No.1
- [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

[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

[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