

BelleII CDC 用読み出しボードの性能評価
(Performance Estimations for readout board of CDC in Belle II)

理学研究科
物理学専攻
大木 賢祥

目次

第 1 章	序論	5
第 2 章	Belle II 実験について	6
2.1	Belle II 実験の概要	6
2.2	SuperKEKB 加速器	6
2.3	BelleII 測定器	7
第 3 章	中央飛跡検出器 (CDC) の読み出しボードのアップグレード	13
3.1	現行の読み出しボード (RECBE)	13
3.2	アップグレードの動機と内容	14
3.3	アップグレードのスケジュール	16
第 4 章	単チャンネル入力器を用いた ASIC のアナログ出力のリニアリティー	18
4.1	方法	18
4.2	結果	19
4.3	まとめ	20
第 5 章	ビームテスト	21
第 6 章	読み出しボードの分解能解析	26
6.1	方法	26
6.2	考察	33
6.3	まとめ	34
第 7 章	クロストークの解析	36
第 8 章	評価のまとめ	40
第 9 章	謝辞	41

図目次

1	SuperKEKB 加速器全体図	6
2	BelleII 測定器全体図 [5]	7
3	PXD の模型図 [6]	8
4	SVD の模型図 [7]	8
5	CDC の断面図 [10]	9
6	TOP の模型図 [11]	9
7	ARICH の原理と概形 [13]	9
8	ECL の概形 [14]	10
9	データ収集システムの全体 [17]	11
10	データ収集システムの全体 [17]	12
11	現行の読み出し回路 RECBE	13
12	RECBE のブロックダイアグラム [18]	14
13	閾値が一つの時 (左) と二つの時 (右)	15
14	RAPID	15
15	RAPID	16
16	RAPID 性能 [19] を一部改編	16
17	プロトタイプ	17
18	波形	18
19	信号入力図	18
20	信号入力回路	18
21	疑似的に 1ns の波形を得る仕組み	19
22	ch1 のゲイン	20
23	全チャンネルのゲイン	20
24	テストビームライン	21
25	ビームの詳細と到来方向	22
26	チェンバーの詳細図	22
27	チェンバーの図。なお同時にボードに電圧が正しく印加できているかを確認している	23
28	ビームテストのセットアップ	23
29	メディアコンバーター。オプティカルファイバーの情報を LAN ケーブルに変換している。	24
30	オプティカルファイバー同士の変換を行っている。	24
31	ボードから PC へのデータの読み出し方法	25
32	解析のフローチャート	26
33	(TDC のタイミング)-(トリガータイミング) の分布。offset は引いた後のものである。	26
34	チェンバの ch とレイヤー	27
35	イベントプレセクションを通過する例	27
36	x-t カーブの中心がずれている様子 各図はそれぞれレイヤーの x-t カーブである。	28
37	fitting の時点で wire-alignment を導入し、x-t カーブの中心がより 0 に近づいていることが 分かる。	29
38	1 回目と 5 回目の x-t カーブの比較	29
39	1 回目の residual 分布	30

40	5 回目の residual 分布	30
41	プロトタイプ v2 の 5 回目の resolution	31
42	プロトタイプ v2 の 5 回目の resolution	31
43	現行版ボードの 5 回目の resolution	32
44	現行版ボードの 5 回目の resolution	32
45	レゾリューションのまとめ	33
46	trigger-timing の mod16 の分布	33
47	真の値と、記録された値の関係	33
48	trigger-timing の精度の影響	34
49	ASIC の内部図	36
50	セットアップ模式図	36
51	クロストーク	37
52	クロストークの種類分け	37
53	アナログクロストークと入力電荷の関係	38
54	デジタルクロストーク 1 と入力電荷の関係	38
55	デジタルクロストーク 2 と入力電荷の関係	38
56	偽ヒット数	39
57	B e l l e II CDC の x-t カーブ [25]	39
58	性能評価項目	40

概要

本研究では、高エネルギー加速器研究機構（KEK）で行われている、BelleII 実験におけるアップグレードに伴う、測定器の読み出しボードの性能を評価した。

BelleII 実験は電子ビームと陽電子ビームを衝突させ、衝突後の崩壊過程を詳細に観測することで新物理の発見を目指している。

同実験は素粒子反応の回数を多くすることを目標として、現在進行中である。

言い換えると、高輝度化、すなわちルミノシティ（単位時間あたりに素粒子反応が起きる回数を反応断面積で割ったもの）を高くすることを目標としている。

今回研究で扱った測定器は CDC（中央飛跡検出器; Central Drift Chamber）であり、生成された荷電粒子の飛跡の情報から運動量とエネルギー損失を測定している。

今回の高輝度化に向けたアップグレードについて、改善目的は 4 点ある。

1. クロストーク（あるチャンネルに信号が入った際に他のチャンネルにも本来ない信号が入ってしまう）の割合が増えてしまうため、その改善
2. 現在の読み出しボードの放射線耐性寿命がそろそろ到来するため、よりよいチップへの変更
3. 電源ケーブルでの電圧降下による誤動作を防ぐため、用いる ASIC の消費電力の軽減
4. より正確に波形情報を得るため、モジュール（ADC）のサンプリング周波数の増加

試作ボードを段階的に制作しており、動作試験と性能評価を行った。

特に、2024 年 11 月 6 日から 12 日にかけて KEK の ITDC（測定器開発センター）にて検出器との接続試験としてビーム照射をし、位置分解能を測定した。

これらによる性能評価について詳細を述べる。

また、これらを確認している際に偽ヒットを生じる原因となるクロストークについて、新たな発見があったためその点についても述べる。

第1章 序論

本研究では、高エネルギー加速器研究機構で進行中の BelleII 実験における CDC の読み出しボードのアップグレードの性能評価を行った。

素粒子・高エネルギー実験は新しい物理法則の発見を目指している。

素粒子実験ではある単位時間に注目する素粒子反応がおきる回数 (Y) に注目する。

反応の起きる度合いは物理法則で決まるが、その反応の起きる度合いは反応断面積 (σ) という値であらわされる。これは反応ごとに異なる。

素粒子反応が起きる回数はこの反応断面積に比例する。この比例定数をルミノシティ (L) と呼ぶ。

従い、次の式が成り立つ。

$$Y = L \times \sigma \quad (1)$$

BelleII 実験では現在もルミノシティを目標値である $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目指して調整中である。

本論文では検出器の中で、生成された荷電粒子の飛跡の情報から運動量とエネルギー損失を測定している検出器、CDC のアップグレードについて述べる。CDC はガスドリフトチェンバーである。

実験の高輝度化に耐えるため、検出器のアップグレードが必要となる。

CDC 本体の問題点は、エイジングエフェクトとルミノシティの増加によるガス増幅のゲインの低下が無視できなくなることが示唆されている。エイジング効果とは長時間放射線を照射した際、イオン化したガスや不純物が再結合して形成される高分子化合物が付着し、その化合物の付着により、ゲインの低下・ノイズの増加・放電などが起こるものである。[1]

この原因究明及び対処については現在も議論中であるため、本論文では深くは取り上げないが、CDC 内の酸素濃度が低ければゲインが戻っていることから、酸素濃度に関係しているのではないかと考えられている。

CDC の読み出しボードについて、現在 4 つの問題点、改善点がある。

1. クロストーク（あるチャンネルに信号が入った際に他のチャンネルにも本来ない信号が入ってしまう）の割合が増えてしまうため、その改善
2. 現在の読み出しボードの放射線耐性寿命がそろそろ到来するため、よりよいチップへの変更
3. 電源ケーブルでの電圧降下による誤動作を防ぐため、用いる ASIC の消費電力の軽減
4. より正確に波形情報を得るため、モジュール（ADC）のサンプリング周波数の増加

本アップグレードで、試作ボードを段階的に制作しており、動作試験と性能評価を行った。

特に、2024 年 11 月 6 日から 12 日にかけて KEK の ITDC（測定器開発センター）にてビーム試験を行った。これらによる性能評価について詳細を述べる。

本論文では、2 章で BelleII 実験の各検出器の役割についても述べ、3 章で CDC の読み出しボードについて詳細に述べた後、4 章で動作試験として、単チャンネル入力器を用いた ASIC の ADC のリニアリティについて述べ、6 章でテストワイヤーチェンバーとの接続試験について述べた後で 7 章で接続試験結果の解析手法及びその結果について述べ、8 章にて偽ヒットを生じる原因となるクロストークについて新たにわかったことを記載する。

第2章 Belle II 実験について

2.1 Belle II 実験の概要

BelleII 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で進行中の電子・陽電子衝突実験である。7GeV の電子と 4GeV の陽電子を衝突させ、B 中間子を大量に対生成し、その崩壊過程を詳細に観測することで CP 対称性の破れの測定や標準模型で説明できない新物理の発見を目指している。[2] 2016 年に検出器を搭載しない Phase1 運転が始まり、2019 年には全ての検出器が搭載されて Phase3 運転を現在まで行っている。なお 2024 年 12 月 27 日に自身の持つ世界最高記録であるルミノシティ $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。[3]

2.2 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は BelleII 実験で用いられている検出器である。SuperKEKB 加速器は 2016 年に試運転を開始し、2019 年に本格的な物理解析のための運転を開始した。

全体図を下図に示す。

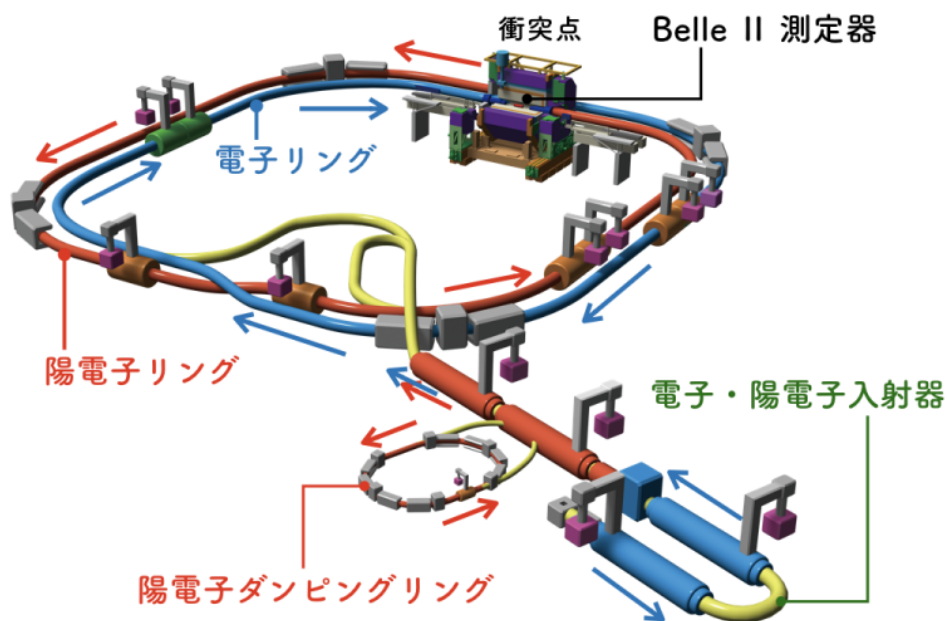


図1 SuperKEKB 加速器全体図

電子及び陽電子ビームはそれぞれ入射器で生成され、指定のエネルギーまで加速された後リングに入射される。陽電子ビームはダンピングリングを経由した後リングに入射される。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 10 倍のオーダーのルミノシティである $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指して現在も調整中である。

2.3 BelleII 測定器

物理現象の測定は BelleII 測定器で行われる。崩壊過程により生じる粒子の運動量やエネルギー損失等を測定し、粒子をタギングするために 7 種類の検出器を用いている。全体図を下图に示す。

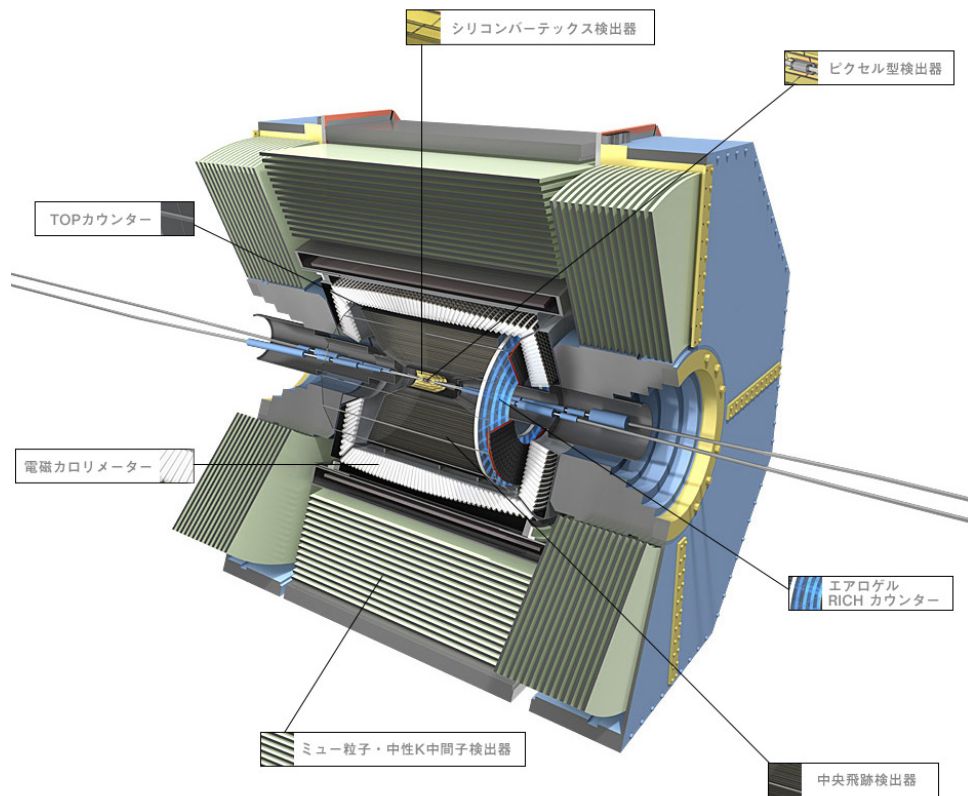


図2 BelleII 測定器全体図 [5]

崩壊点に近い順に概要を述べていく。

- 崩壊点検出器 (VDX)

崩壊点検出器は崩壊点を精密測定するための崩壊点検出器である。6 層からなり、内側 2 層のピクセル型検出器 (PXD) と外側 4 層のシリコンバーテックス検出器 (SVD) によって構成される。PXD は電界効果型トランジスタと呼ばれるピクセル検出器で空乏層を荷電粒子が通過すると、はじき出された電子が内部ゲートに集められ、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取り出すことで、荷電粒子がそのピクセルを通過した位置とともに、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を得ることができる。[6]



図3 PXD の模型図 [6]

シリコンバーテックス検出器はシリコンにビームに垂直な方向 (ϕ 方向) に n 型半導体のストリップが、ビームに平行な方向 (z 方向) に沿って p 型半導体のストリップが刻まれている。これらの情報から二次元の位置情報を割り出すことができる。[7]

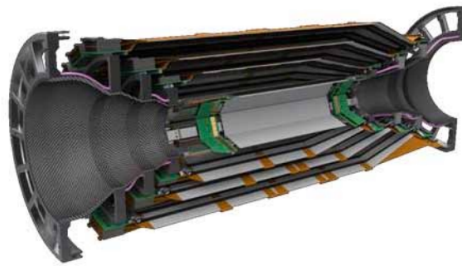


図4 SVD の模型図 [7]

- 中央飛跡検出器 (CDC)

CDC は崩壊点検出器の外側にある検出器である。位置情報と運動量を収集し、トリガー信号を出す役割がある。トリガーについては後述する。

この検出器は多線式比例計数管で $30\ \mu\text{m}$ の金メッキタンゲステン・センスワイヤー 14336 本と、 $126\ \mu\text{m}$ のアルミニウム合金・フィールドワイヤー 42240 本、全部で 56576 本のワイヤーが貼られており、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 のワイヤーを通過するときにガス分子がイオン化し、センスワイヤーに印加された高電圧が作る電場に沿って加速される。電荷が来るまでの時間からドリフト距離を算出し、電荷の大きさによりエネルギー損失を算出することができる。[8][9]

下に CDC の半断面図を示す。実線と点線は z 軸に平行なワイヤーとステレオワイヤーである。このステレオワイヤーにより z 軸方向の位置情報がわかる。[10]

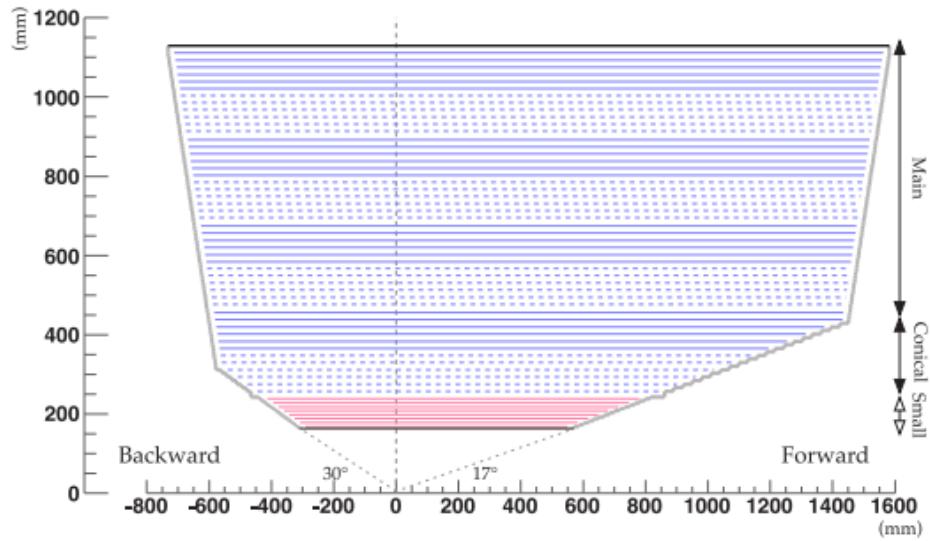


図5 CDCの断面図 [10]

- TOP カウンター (TOP)

TOP カウンターはチェレンコフ光の到達時間の差異を用いて粒子識別を行う検出器である。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。それを高精度に研磨された側面と集光鏡によって内部反射させ、単面に取り付けた光検出器で検出している。[11]

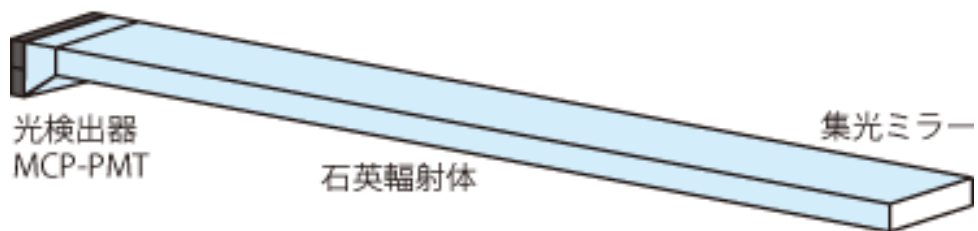


図6 TOPの模型図 [11]

- エアロゲル RICH カウンター (ARICH)

ARICH は荷電 π 粒子と荷電 K 中間子の識別を行う検出器である。入射軸に対して垂直に搭載したエアロゲル輻射体と光検出器により構成されている。広がり角度を精度良く読み取ることで荷電 π 粒子と荷電 K 中間子の識別を行っている。[11][12]

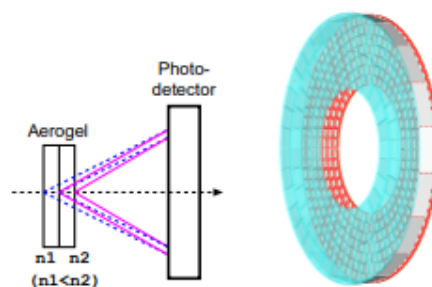


図7 ARICHの原理と概形 [13]

- 電磁カロリメーター (ECL)

ECL はエネルギー測定をするための検出器である。重い物質に数十 MeV 以上のエネルギーを持つ光子や電子・陽電子が入射すると、光子からの電子・陽電子対生成と電子もしくは陽電子からの制動放射により、多数の電子・陽電子及び光子の集団、すなわち電磁シャワーが形成されることを用いてもとのエネルギー測定を行う。

検出器には CsI (T₁) が用いられ、読み出しには磁場中で変化しない特性があるシリコン PIN フォトダイオード (PIN-PD) が用いられている。

2MHz のサンプリング周波数で動作する 18bit の ADC を用いてタイミングの情報を得ることができる。これらによりトリガーとタイミングが一致しないヒットを除くことができ、ビームバックグラウンドによるシャワーの数を 1/7 に減らすことができる。検出範囲は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ である。[14]

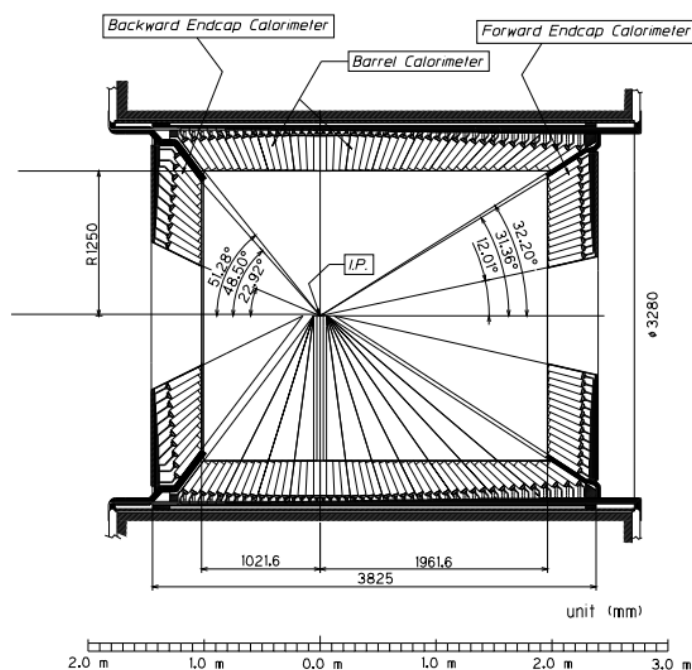


図8 ECL の概形 [14]

- K_L^0 ミューオン検出器 (KLM)

KLM は μ 粒子の同定や K_L^0 粒子の検出を行うための検出器である。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。 μ 粒子は物質中で電磁相互作用により電離損失をするのみであるため散乱はあまり大きくないが、荷電ハドロンは強い相互作用もするため多重散乱が大きくなる。この差を利用して CDC 等の飛跡と KLM 検出器の飛跡とのマッチングから荷電粒子が μ 粒子かどうかの同定を行うことができる。 K_L^0 粒子も KLM まで到達する可能性があり、この粒子は検出器内で反応しないため通過をとらえることはできないが、鉄内で核子との相互作用で発生した荷電粒子を検出することにより、 K_L^0 粒子を検出することができる。[15]

- トリガーシステム

以上の検出器により得られたデータをデータ収集システムにより収集する。BelleII 実験では 1 イベント当たりのデータは 1MB を超え、トリガーレートも最大で 30 kHz と見積もられているため 1 秒間に 30GB という膨大なデータ量を収集することとなる。[16]

トリガーシステムから受け取ったトリガー信号は加速器をもとに作られた全システムで共通となるクロックとともに各検出器のフロントエンド電子回路に分配される。それぞれの検出器で得られたデジタル信号は光速

光データ転送システム Belle2link を用いて共通読み出しモジュール COPPER に送られる。送られたデータは 40 台の PC に集められ、部分的にイベントビルディングし、再度それを集めて全イベントビルディングを行い高次トリガー (HLT) に送られる。

ピクセル検出器 PXD のデータ量は他の検出器と比較して大きいので、HLT で再構成された粒子の飛跡を用いて信号が発生するピクセルを予測し、その部分だけのデータを送信することでデータ量の削減を図っている。

データ収集システムの全体図を下图に示す。

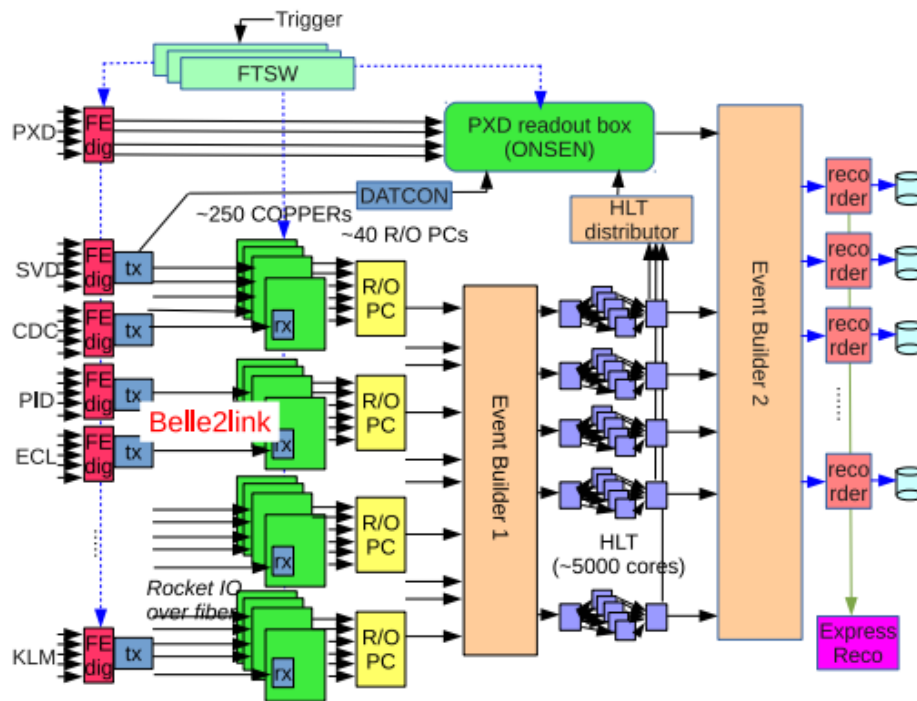


図9 データ収集システムの全体 [17]

データを収集するためには求めている物理事象かどうかを判別するトリガーシステムが必要となる。サブトリガーとして使用されるのは CDC, ECL, TOP, KLM である。このうち物理事象にたいするトリガー判定は主に CDC と ECL のサブトリガーを用いて行われる。このトリガーは独立している。TOP サブトリガーは主に事象の発生時間をより精密に求めるために用いられ、KLM サブトリガーは μ 粒子の同定により、CDC と ECL を組み合わせて使用される。

BelleII 実験では各サブトリガーからサマリー情報に加え、CDC による荷電粒子の電荷や運動量情報、ECL によるクラスター位置とエネルギー情報等の詳細情報も最終判断の材料として GRL(Global Reconstruction Logic) に送られる。[17]

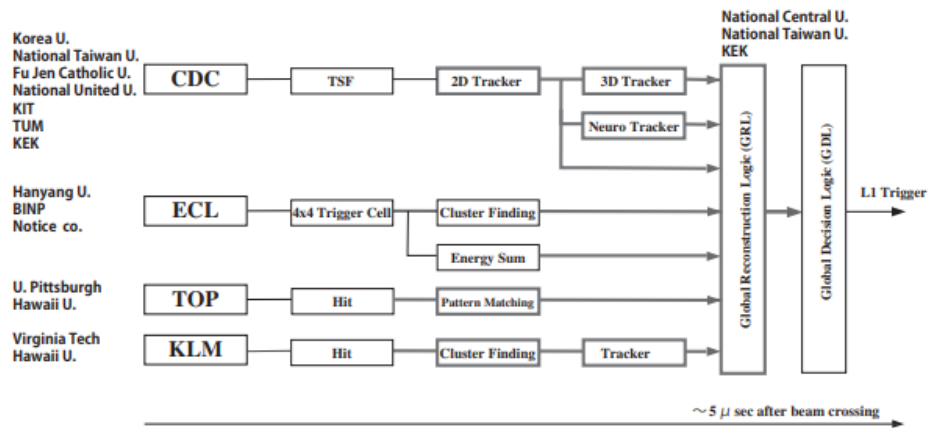


図10 データ収集システムの全体 [17]

第3章 中央飛跡検出器 (CDC) の読み出しボードのアップグレード

3.1 現行の読み出しボード (RECBE)

現在の CDC は時間分解能が 1 ns 以下でアナログ出力のサンプリングは分解能 10bit で 30MSPS 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、読み出しボードが設置できる場所が限られている。また最大トリガーレートは 30 kHz となるため、データ送信速度も光速である必要がある。また、読み出しボードはディレイを少なくするため検出器の近くにある必要がある。従い、強地場・放射能耐性が高くある必要がある。

このような条件を満たすように開発された BelleIICDC 用の読み出しボード RECBE を下図に示す。RECBE1 枚当たり CDC のセンスワイヤー 48 本分の信号を読むことができ、CDC 全体で 300 枚使われている。サイズは ECL もしくは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 mm×170 mm となっている。

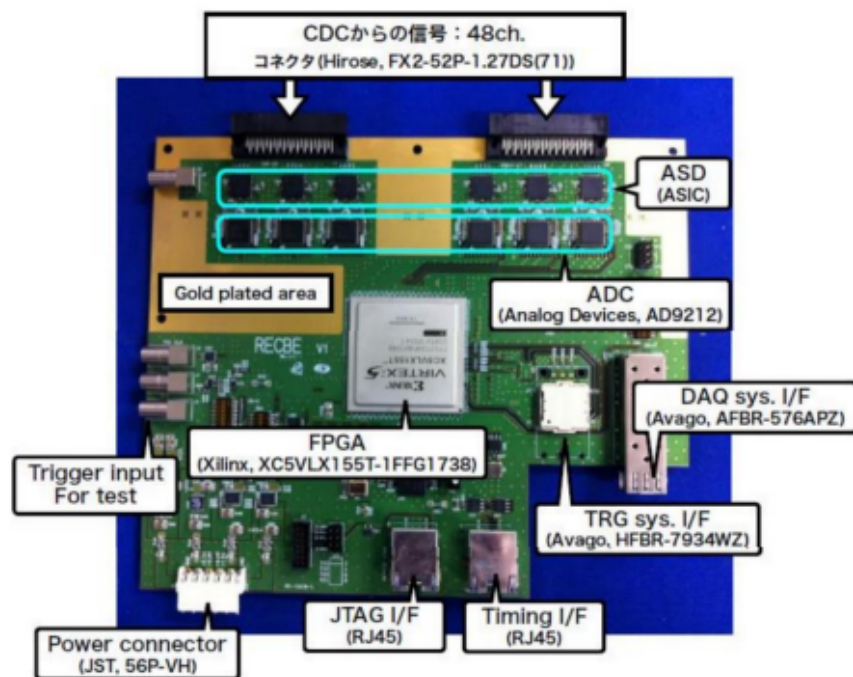


図 11 現行の読み出し回路 RECBE

また、RECBE のブロックダイアグラムを下図に示す。

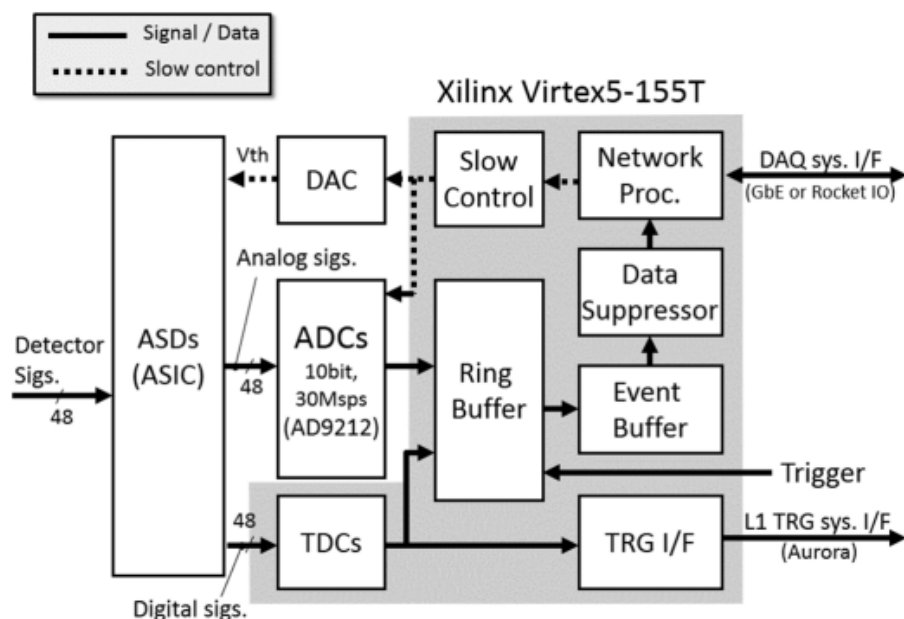


図 12 RECBE のブロックダイアグラム [18]

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-Discriminater の略で信号を増幅や波形整形、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 チップ当たり 8 チャンネル分の入力が可能で RECBE1 毎に 6 チップ搭載されている。入力された信号は波形をサンプリング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 チップ当たる 8 チャンネル分の入力可能な ADC(Analog-to-Digital Converter) に入力され、デジタル信号に変換される。

他方のデジタル出力は TDC(Time-to-Digital Converter) に送られる。基準となる一つのカウンタと 48 チャンネルそれぞれの情報に対応する 48 チャンネルの合計 49 個のカウンタが存在する。基準となるカウンタとそれぞれのカウンタの差をとることで時間の計測を行っている。

しか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くる。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。また、短時間の間に複数回のトリガー信号が来ることがあるが、1 回ごとにデータ処理や伝送を行うと時間がかかり、記録できないイベントが発生してしまう。この状況を避けるために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うことが可能である。

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選択し、トリガーとなるカウンタと TDC のカウンタ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 ヘデータを送信するという流れとなっている。

3.2 アップグレードの動機と内容

2024 年 12 月に SuperKEKB 加速器は世界最高ルミノシティ $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。[3] 加速器の目標値は $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であるため、さらに頻度が高くなっていくことが必至である。ビーム衝突頻度が高くなると、実験で用いられるガス検出器の読み出しボードに対する要求も高くなる。こ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。

現行版の CDC の読み出しボードには、現在 4 つの問題点、改善点がある。

1. クロストーク（あるチャンネルに信号が入った際に他のチャンネルにも本来ない信号が入ってしまう現象。の割合が増えてしまい真の飛跡と偽飛跡が区別できなくなりトリガーの性能を落とすことにつながってしまう。その改善
2. 放射線耐性寿命がそろそろ到来するため、よりよいチップへの変更
3. 電源ケーブルでの電圧降下による誤動作を防ぐため、用いる ASIC の消費電力の軽減
4. より正確に波形情報を得るため、モジュール（ADC）のサンプリング周波数の増加

1については後述する ASIC を用いることで、7章にて確認する。

クロストークを抑制するために重要な、ダブルスレッシュリッド機能について述べておく。下図に閾値が一つの場合と二つの場合を示す。閾値が一つしかない場合、本物の信号であることを見分けるにはバックグラウンドなどのノイズよりも大きい値を設定しなければならないが、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。閾値を2つ儲けることにより、タイミングを決定したのちに、信号かどうかを判別することができるため、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。

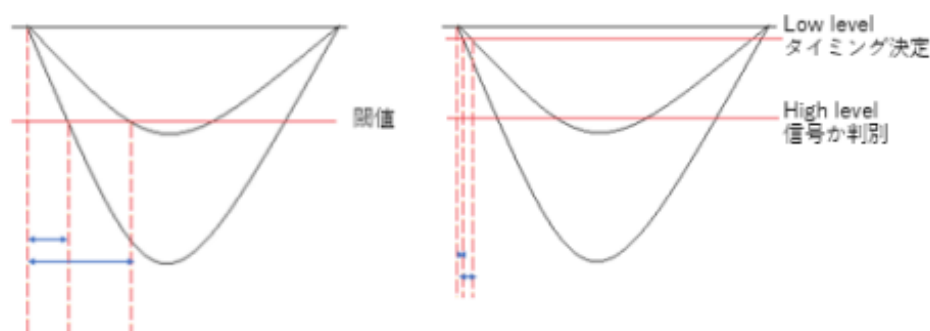


図 13 閾値が一つの時 (左) と二つの時 (右)

また、2については放射線耐性の満足のために、チップの選定及びガンマ線の照射試験が2024年3月28日～31日まで行われ、主要なパーツについては1 kGyの要求を満たしている。

3については現行版 ASD ASIC と ADC の消費電力は1cあたり34 mW, 100 mWである[[21] ことに対し、プロトタイプボードで用いられる ASIC の消費電力は先行研究によると8chで205.6 mWとなり、1chで25.7 mWとなっている。これは冷却システムへの負荷の軽減も同時に期待できる。[22]

この ASIC は KEK の宮原氏により開発され、「RAPID」と名づけられている。増幅器、波形整形機と ADC が一つのチップに入っている。

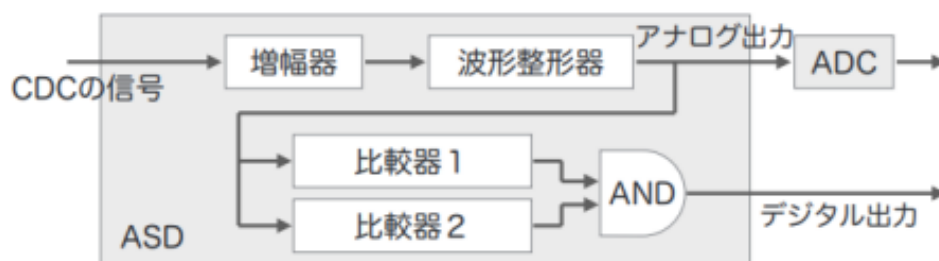


図 14 RAPID

また、ASD の最終過程としてアナログ出力の際に倍率を変更することができる。その倍率は0.5倍、0.7

倍、1.0 倍、1.65 倍の 4 つの中から選ぶことができる。本論文での実験では 0.7 倍を選択している。



図 15 RAPID

またその基本的な性能評価は先行研究にて実施されている。[19]

項目	設計値	プロトタイプv1での 測定値	現行版ASD
アナログ出力のゲイン	0.9 V/pC	0.71 V/pC	1.1 V/pC
アナログ出力の線形領域	<1.2 pC	<1.1 pC	<0.4 pC
デジタル出力のゲイン	1.02V/pC	0.92 V/pC	7.5 V/pC
デジタル出力の線形領域	<1.2 pC	<1.2 pC	

図 16 RAPID 性能 [19] を一部改編

3.3 アップグレードのスケジュール

RAPID については全数試験が予定されている。読み出しボードについてはすでにプロトタイプが 2 つ作成されており、今回のビームテストの後、最終バージョンのデザインを経て大量生産を予定している。

プロトタイプ v1 からプロトタイプ v2 への変更点は形状を CDC へのインストールに適した形とした点及び高速通信と放射線耐性の向上を目的としたモジュールの交換である。回路の変更は行っていない。

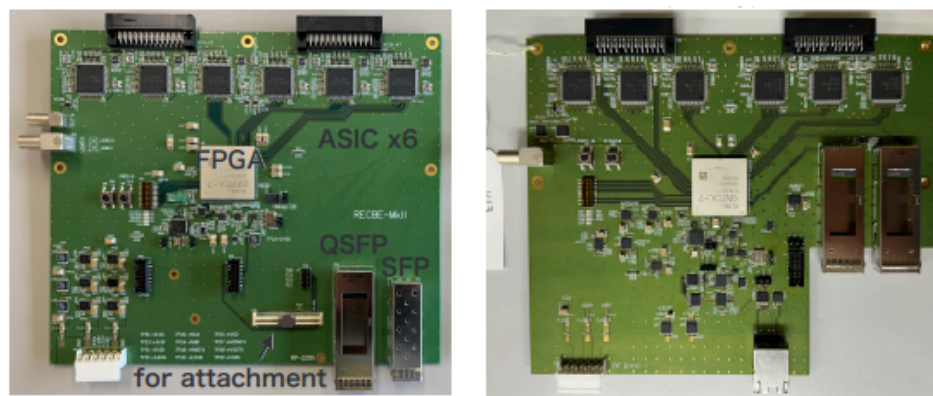


図 17 プロトタイプ

実際の CDC へのインストールは 2026 年から 2027 年が目途となっている。

第4章 単チャンネル入力器を用いた ASIC のアナログ出力のリニアリティー

先行研究にて読み出しボードに搭載した場合の ASIC の基本性能はすでに測定されている [19] が、アナログ出力のリニアリティーについて設計値と乖離しているためプロトタイプ v2 で再測定した。

4.1 方法

下図の入力回路に電圧を入力すると、単チャンネル入力器（キャパシタ）を経てアナログ出力として下記のような波形が出力される。

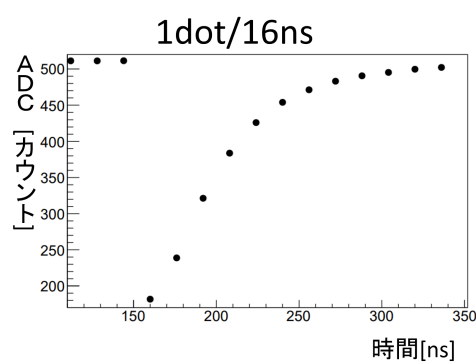


図 18 波形

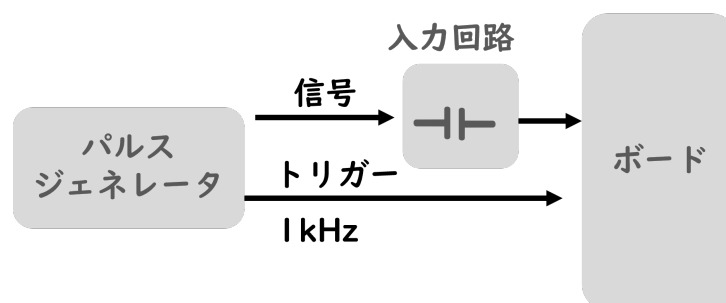


図 19 信号入力図



図 20 信号入力回路

キャパシタの静電容量は 1 pF のものを用いている。

ここでピークとなる ADC 値を各電圧ごとにとり、その比をアナログ出力のゲインとして測定し、設計値と比較した。

ADC のサンプリング間隔は 16 ns となるが、tdc のサンプリング間隔と比較して短く、ピークタイミングとその波高を探すことが難しい。

そこで、あえてテストパルスと読み出しボードのクロックを同期せずに同じテストパルスを 1 万イベント入力し、各イベントの TDC の持つスレッシュホールドを超えた時刻を用いることで、疑似的に 1ns 間隔で波形を得ることができる。

参考図を下図に示す。

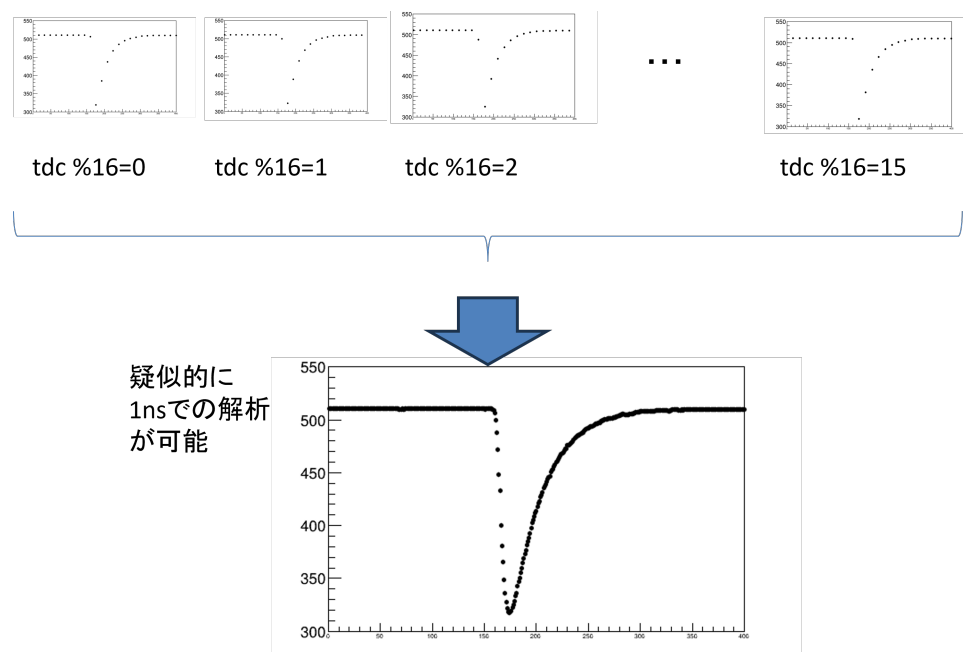


図 21 疑似的に 1ns の波形を得る仕組み

得たゲインは最後に電圧に変換した。変換式は次の式を用いた。

$$(\text{gain}[\text{count/pC}]) \times \frac{2.4 \text{ V}}{1024} \times \frac{1}{0.7} \quad (2)$$

途中の 2.4 V/1024 はベースラインの $\pm 1.2 \text{ V}$ を 10bit でデジタル化していることに対応する。

最後の 1/0.7 は先述した、ASD の最終工程でかけられる 0.7 を取り除いたものである。

4.2 結果

ch0 での電荷 vs ADC カウントグラフは下図のようになった。

なお、下図に上記式で変換後のゲインも記載してある。

ADC [カウント] プロトタイプv2の結果

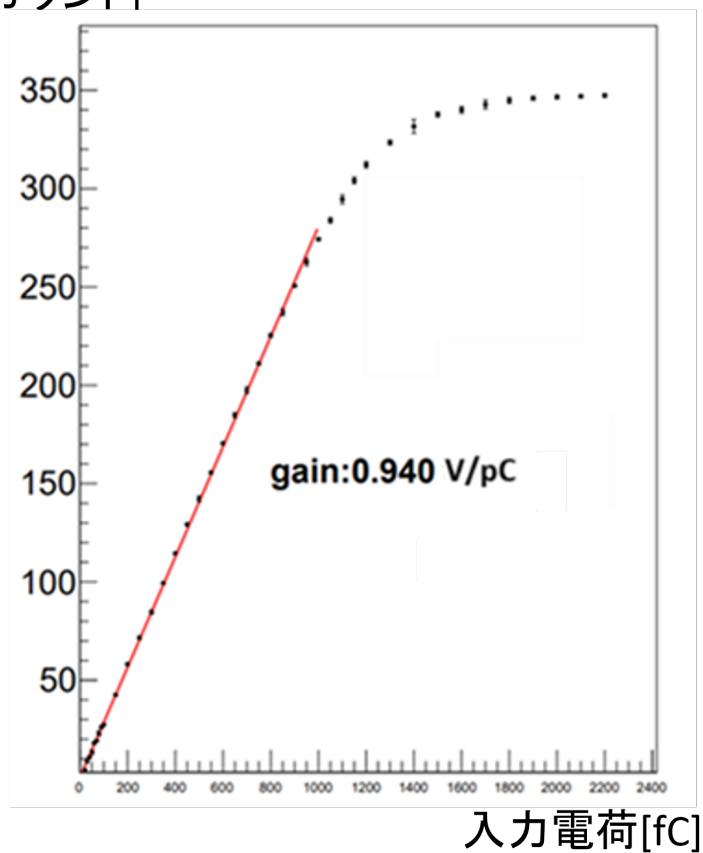


図 22 ch1 のゲイン

同様に ch1 から 7 までのゲインも求めた。

4.3 まとめ

ch0 から ch7 までのゲインを下図に記載した。

ch	0	1	2	3	4	5	6	7	平均	標準偏差
ゲイン[V/pC]	0.94	0.92	0.88	0.93	0.95	0.92	0.97	0.93	0.93	0.03
線形領域	<1 pC	<1 pC	<1 pC	<1 pC	<1 pC	<1 pC	<1 pC	<1 pC		

図 23 全チャンネルのゲイン

8 つのチャンネルのゲインの平均値は 0.93 V であり、おおむね設計値通りとなった。

また、線形領域は < 1.0 V となった。

ゲインは先行研究 [19] と異なる値となったが、ボードにおける回路の変更はプロトタイプボード v1 と v2 の間にはないため、改良を示すものではない。一方で現在のプロトタイプボードではゲインが、おおむね設計値通り動作することが確認できた。

第5章 ビームテスト

本章では 2024 年 11 月 6 日から 13 日にかけて行われた、ビームテストについて概略を述べる。

プロトタイプボードと現行版 RECB E の両方を用いて、テストビームを当てる。その両方の測定結果を比較して、プロトタイプボードの性能が Belle II 実験での実用に足りるか評価した。テストビームは高エネルギー加速器研究機構の PF-AR 南棟の測定器開発試験のためのテストビームラインを用いた。[23]



図 24 テストビームライン

テストでは 3.0GeV の電子ビームを使用した。

テストビームの到来方向について、下図に示す。

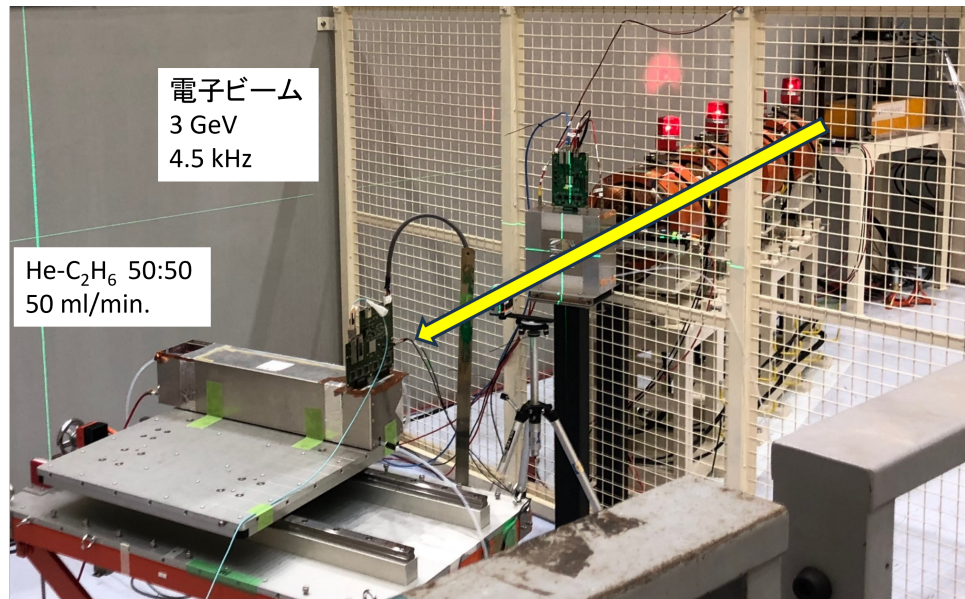


図 25 ビームの詳細と到来方向

本実験ではドリフトチェンバを使用した。用いたドリフトチェンバーは $13.5\text{ cm} \times 13.5\text{ cm} \times 49.5\text{ cm}$ のアルミニウム製の直方体の形状をしている。チェンバの内部には、金メッキを施したタングステン正のセンスワイヤー 44 本を貼っている。センスワイヤーには 2400 V の電圧を印加している。

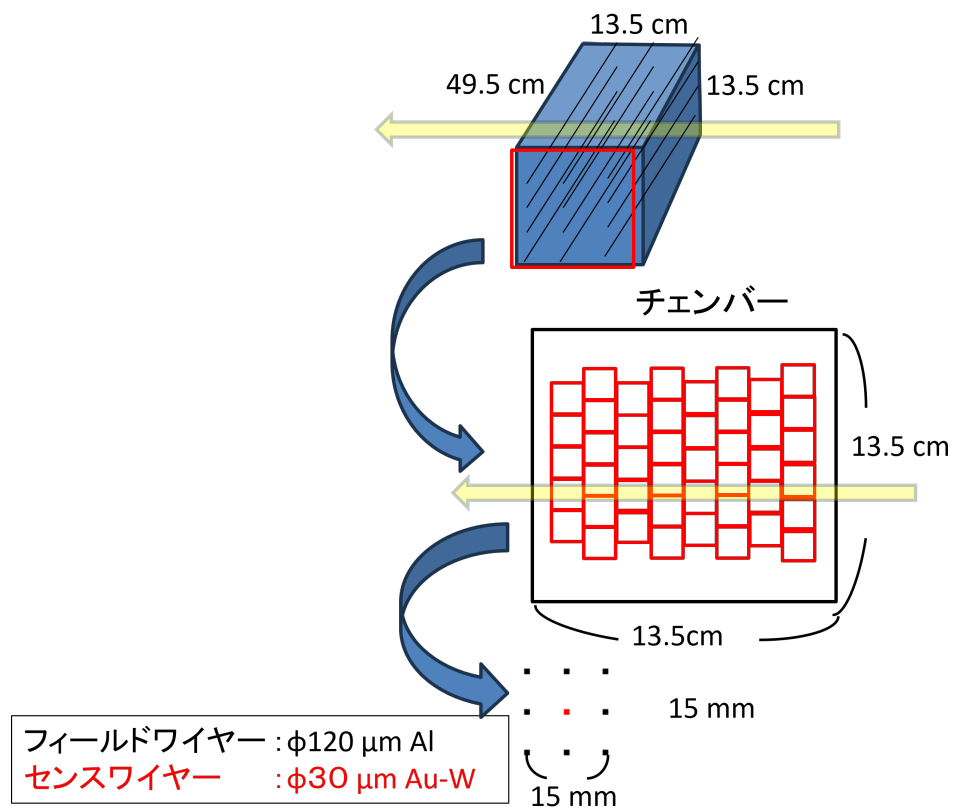


図 26 チェンバーの詳細図

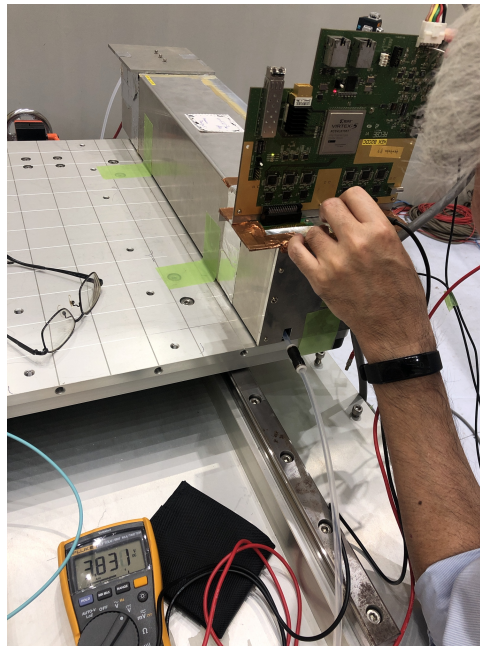


図 27 チェンバーの図。なお同時にボードに電圧が正しく印加できているかを確認している

ドリフトチェンバーにはセンスワイヤーを中心とした 15 mm の正方形の頂点および各辺の midpoint にフィールドワイヤーが貼られている。センスワイヤー、フィールドワイヤーの直径はそれぞれ $30,126\mu\text{m}$ となっており、BelleII の CDC と同じように作られている。

トリガーはテストビームラインに設置されている四重極磁石の両側にある PMT と鉛ガラスの情報を用いており、コインシデンスをとって得ている。

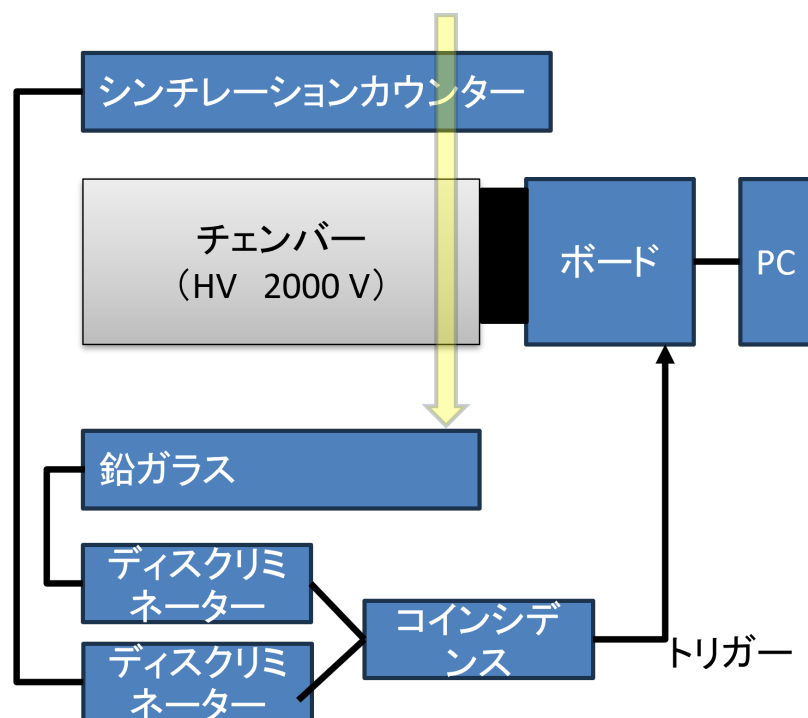


図 28 ビームテストのセットアップ

チェンバの内部を充填するガスは BelleIICDC と同じく $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6(50\%/50\%)$ である。本実験では 50 ml/分で流入させている。

また本論文では取り扱わないが、ガスとして p-10 ガスを使用してのデータテイキング、及び HV を変更してのデータテイキング、プロトタイプボードの ASIC の RC 回路の定数を変えての測定、スレッシュホールドを変えての測定もしている。

ここから測定時の様子とともに、読み出しボードのテストに用いた機器を紹介する。

読み出しボードの使用には、PC、メディアコンバーター、オプティカルコード変換ケーブルが必要である。



図 29 メディアコンバーター。オプティカルファイバーの情報を LAN ケーブルに変換している。



図 30 オプティカルファイバー同士の変換を行っている。

読み出しボードからの情報は、オプティカルファイバーを経由して、メディアコンバータにより LAN へ変換され、PC に接続されている。

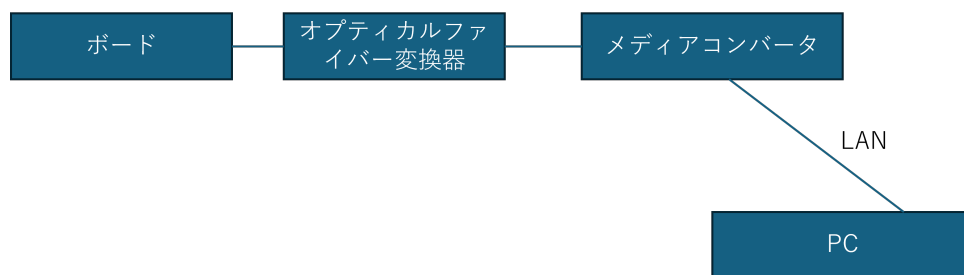


図 31 ボードから PC へのデータの読み出し方法

第6章 読み出しボードの分解能解析

ビームテストで得られたデータは、各 ch の ADC の値、TDC の値、trigger-timing の値である。
特に、TDC の値、trigger-timing の値を用いて位置分解能の解析を行った。

6.1 方法

先に解析のフローチャートを示す。途中でループとなっている箇所があるが、ここをイテレーションと呼ぶ。

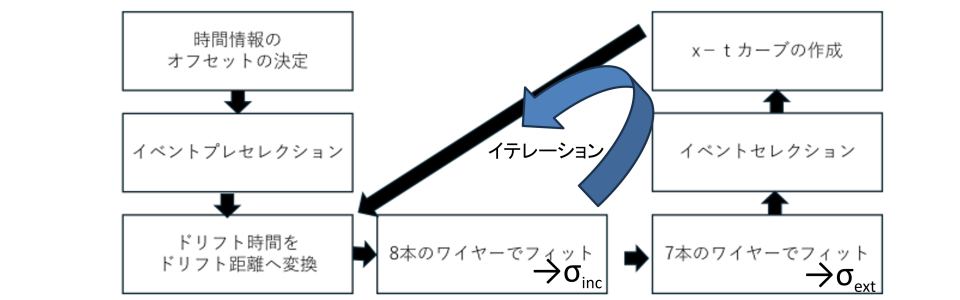


図 32 解析のフローチャート

●1 オフセットの決定

まず、(TDC のタイミング)-(トリガータイミング) をヒストグラムに詰める。詰めたものが下図となる。
このヒストグラムのピークに対して、エントリー数が 10 を超える最小のビンをオフセットとした。

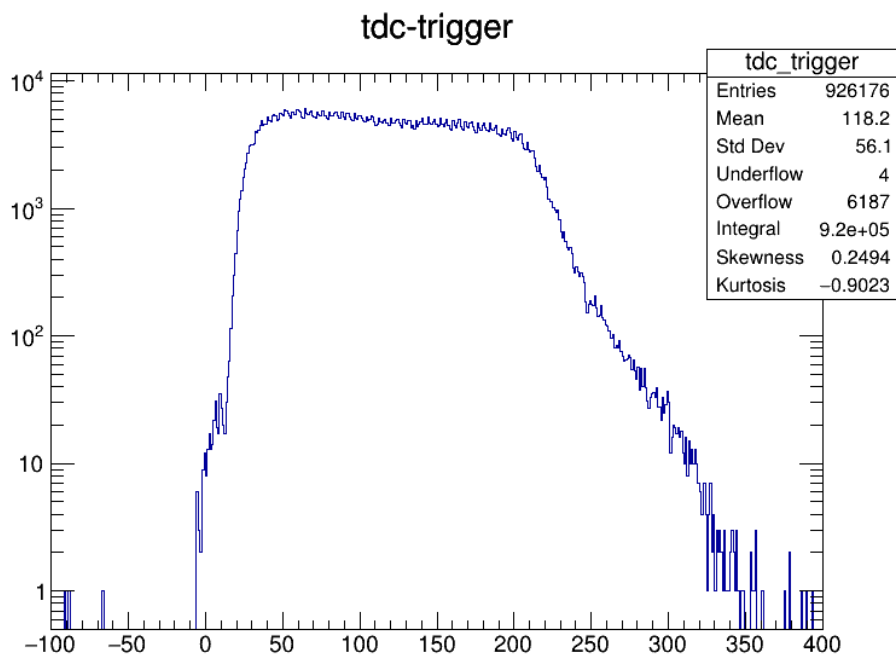


図 33 (TDC のタイミング)-(トリガータイミング) の分布。offset は引いた後のものである。

●2 イベントセクション続いて、イベントセクションを行う。

1 イベントにおいて、チェンバを通過する粒子は1つのみであること、飛跡は直線であることを仮定している。

チェンバのレイヤを縦方向に8つに分けたものとして定義する。(下図参照) 8つのレイヤー全てにひとつづつヒットがあるイベントを選択し、その他のイベントを除外して解析を行っている。また、すべてのワイヤーに対するヒットについてドリフト時間が正であるという条件を課している。

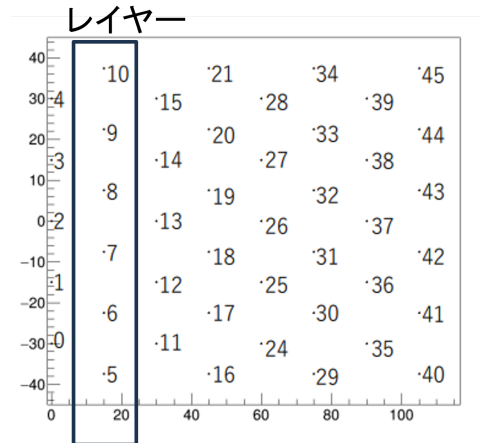


図 34 チェンバの ch とレイヤー

下図がこのイベントプレセクションを通過したイベントの例である。

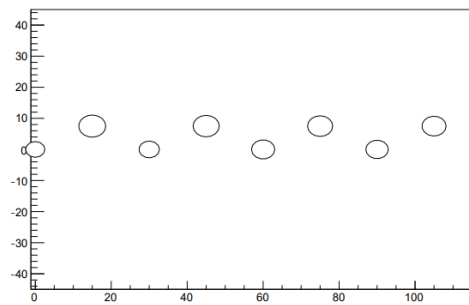


図 35 イベントプレセクションを通過する例

●3 ドリフト時間 → ドリフト距離への変換

ドリフト時間をドリフト距離へ変換する。初期値は $x[mm] = 0.027t[ns]$ としている。

●4 8本のワイヤーでの飛跡のフィット

続いて8本のワイヤーで飛跡のフィットを行う。荷電粒子の飛跡はヒットのあったワイヤーを中心にドリフト距離を半径とする円を描き、全ての円に接するような直線となる。

飛跡をドリフト距離から再構成するために評価関数 $\text{Eval}(a, b)$ を設定する。

すなわち

$$\text{Eval}(a, b) = \sum_{i=0}^7 \text{Res}_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Res}_i^2 = \left(r_i - \frac{|ax_i - y_i + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \right)^2 \quad (4)$$

$$(5)$$

とした。

この関数は必ず 0 以上の値を取り、0 に近ければ近いほど x - t の変換がうまくいっていることを意味する。CERN ROOT の TMinuit[24] を用いて評価関数を最小化し、飛跡を構成した。評価関数を最小化する a, b を用いて、 $y = ax + b$ の直線をこのイベントの飛跡とした。

●5 7 本でのワイヤでの飛跡のフィット読み出しボードの接続試験による性能評価では、各ワイヤの残差 (Residual) を用いる。これは、算出された飛跡とワイヤとの距離と、ドリフト距離の差である。この値が小さければ小さいほど Resolution が良いといえるのだが、あるワイヤ (ターゲットワイヤ) に対して評価する際に、そのワイヤの情報を含んだまま解析してしまうと、Resolution をよりよく評価してしまうことになる。

そこで、ターゲットとなるレイヤーの情報を抜いて 7 本のワイヤの情報で再フィットする。この時にドリフト距離が小さなワイヤについて、ワイヤの上下のどちらかを通ったかという情報を 8 本のフィッティングから持ってくる。7 本のワイヤでの飛跡を $y = ax + b$ とし、8 本でのワイヤでの飛跡を $y = \alpha x + \beta$ とした場合、その評価関数は

$$\text{Eval2}(a, b) = \sum_{i=0}^7 \text{Res}_i^2 \quad (6)$$

$$\text{Res}_i^2 = \left(r_i - \frac{ax_i - y_i + b}{\sqrt{a^2 + 1}} \right)^2 \quad (7)$$

$$(8)$$

とした。

●6 イベントセクション飛跡が適切に再構成されたイベントのみを使って x - t カーブを描画するため、評価関数の値に上限値を設定した。また、ドリフト時間がどのレイヤーに対しても 0 以上であることを条件にした。 x - t カーブがイテレーションを経て最適化されて行くために評価関数の値の上限はイテレーションごとに異なることになる。

●7 x - t カーブの作成

7 本のワイヤで決定した飛跡から、ワイヤとの距離 (DOCA, Distance Of Closest Approach) を求める。DOCA が正であればワイヤの上方向に飛跡があり、負であればワイヤの下方向にあることを示す。

DOCA について、チェンバーに磁場をかけていないため、上下の差は理想的にはないはずである。

しかしながら解析の際下図のように、左右のカーブの中心が $x=0$ の点に来ないことが判明した。

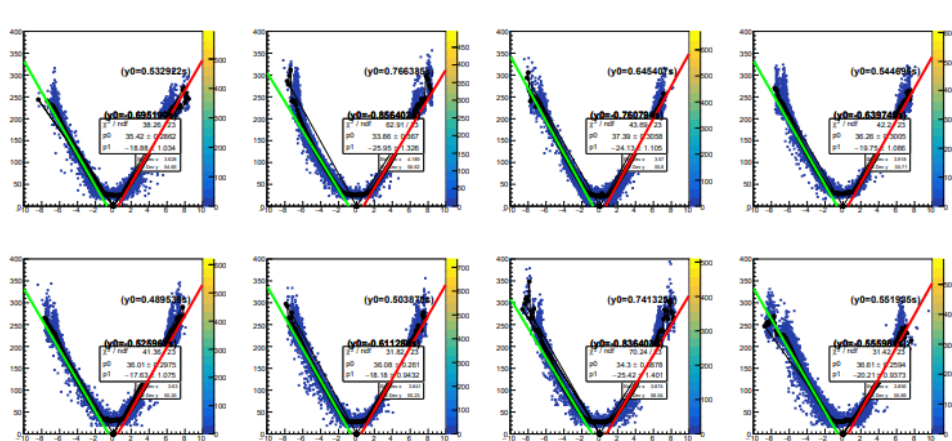


図 36 x - t カーブの中心がずれている様子 各図はそれぞれレイヤーの x - t カーブである。

このため、 y 方向に wire alignment をとることとした。[26] この補正は、レイヤーごとに違う値を取っている。今回の解析ではその値はそれぞれ、 $(-0.09, -0.07, -0.06, -0.04, -0.05, -0.05, -0.02)$ [mm] であった。

これを加味し、最初のイテレーションでは再度4からやり直した。

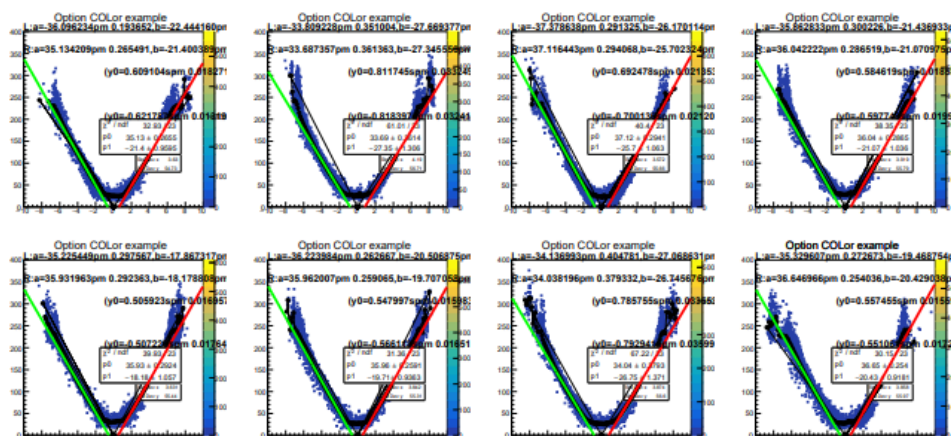


図 37 fitting の時点で wire-alignment を導入し、x-t カーブの中心がより 0 に近づいていることが分かる。

ドリフトタイム vs DOCA の 2 次元ヒストグラムを作成し、ドリフトタイムごとに平均値をとる。

平均値は、上で作成した 2 次元ヒストグラムから projection をとることによって取得した。

これを 5 次関数と 1 次関数が途中で切り替わる関数を用いてフィットする。この関数が次のイテレーションでの drift タイムと drift 距離を変換する関数となる。

フィッティングの条件を下記に示す。

1. 切り替わる点はレイヤーによって変えてもよいものとする。
2. 5 次関数と 1 次関数の切り替わりの際、値は連続となるようにする。
3. $t=0$ のときに $x=0$ とならなくてもよい。(固定しない)

イテレーションは 5 回実行した。1 回目と 5 回目の x-t カーブは下図のように異なっている。z 軸のレンジが変わっていることから、x-t の最適化が進んでいる様子が分かる。

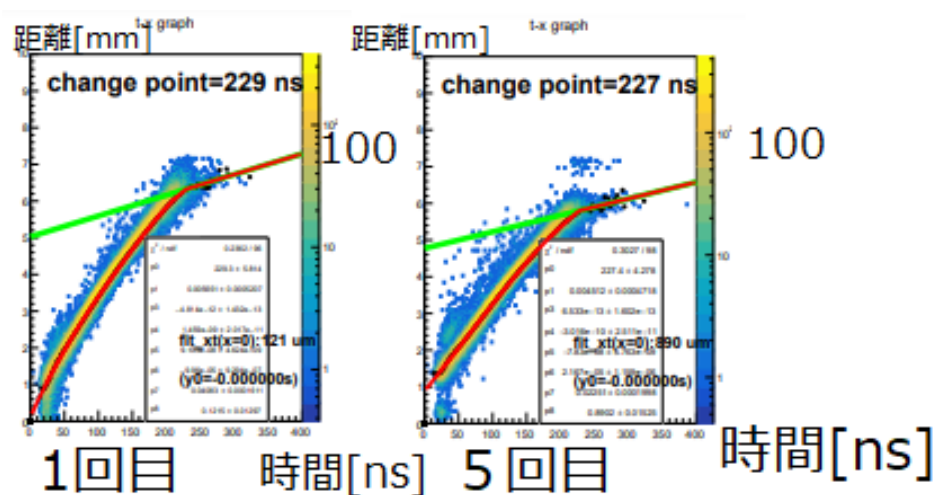


図 38 1 回目と 5 回目の x-t カーブの比較

5 回イテレーションを回し、residual を求め、DOCA ごとに分けて gauss-fit をした。この時の gauss 分布の標準偏差の値が、その DOCA での resolution (位置分解能) となる。

下図に1回目と5回目の各イテレーションでの layer0(=イベントディスプレイにてもっとも左のレイヤー)の residual 分布を示す。

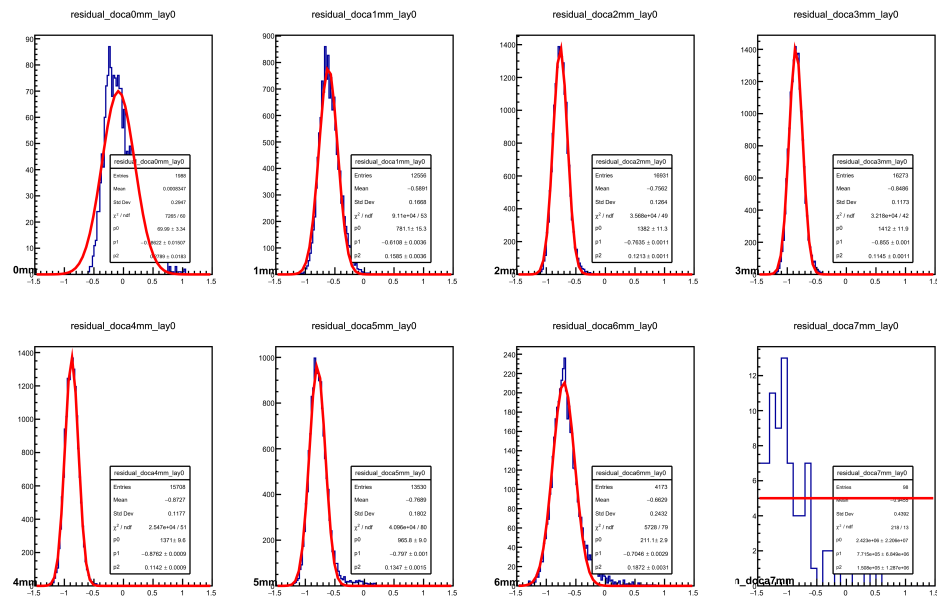


図 39 1 回目の residual 分布

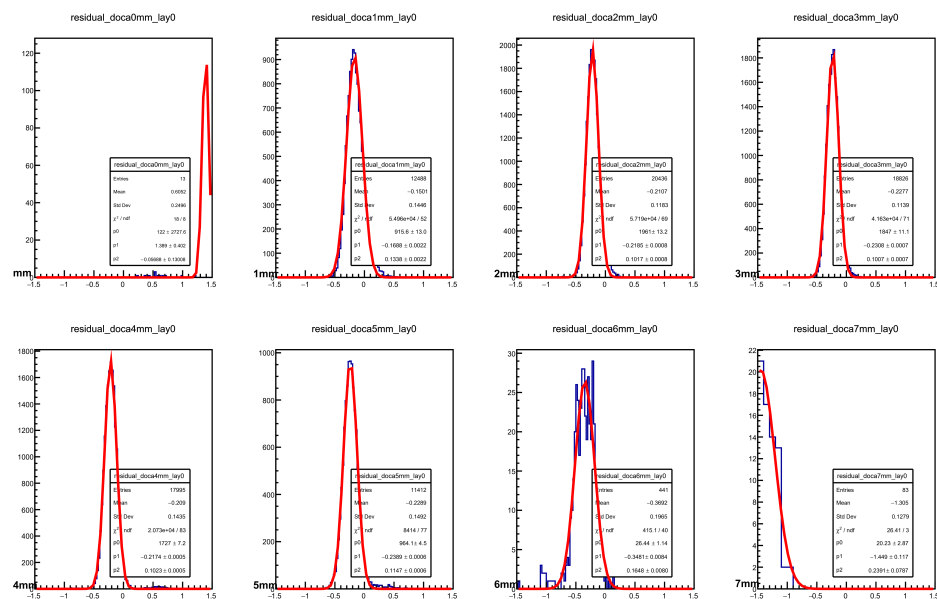


図 40 5 回目の residual 分布

この値がプロトタイプボード-チェンバーの接続試験の resolution の候補値となる。採用するの resolution は DOCA が 1mm 以上 5mm 以下の resolution で、値が最も良いものである。

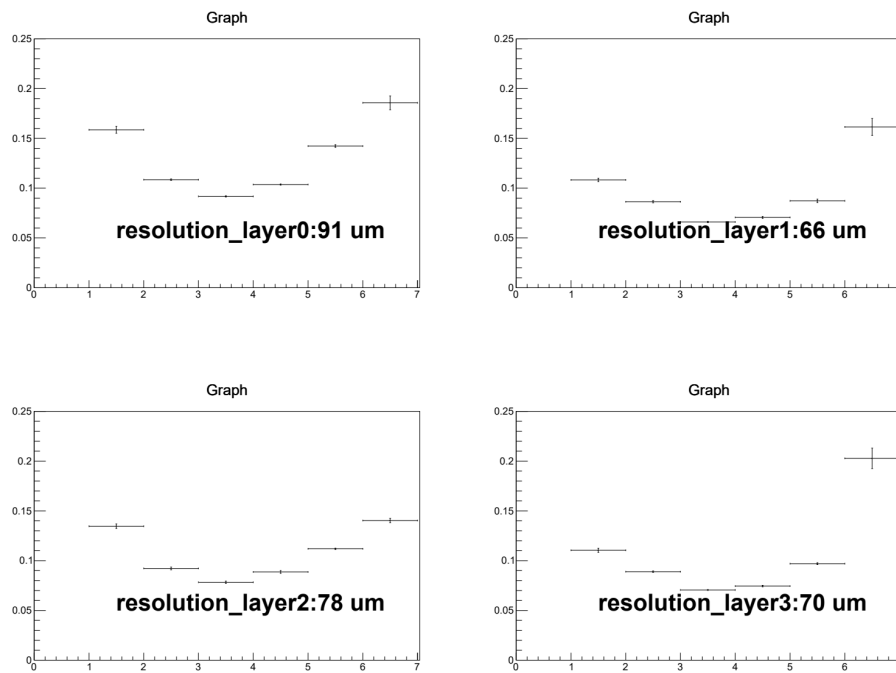


図 41 プロトタイプ v2 の 5 回目の resolution

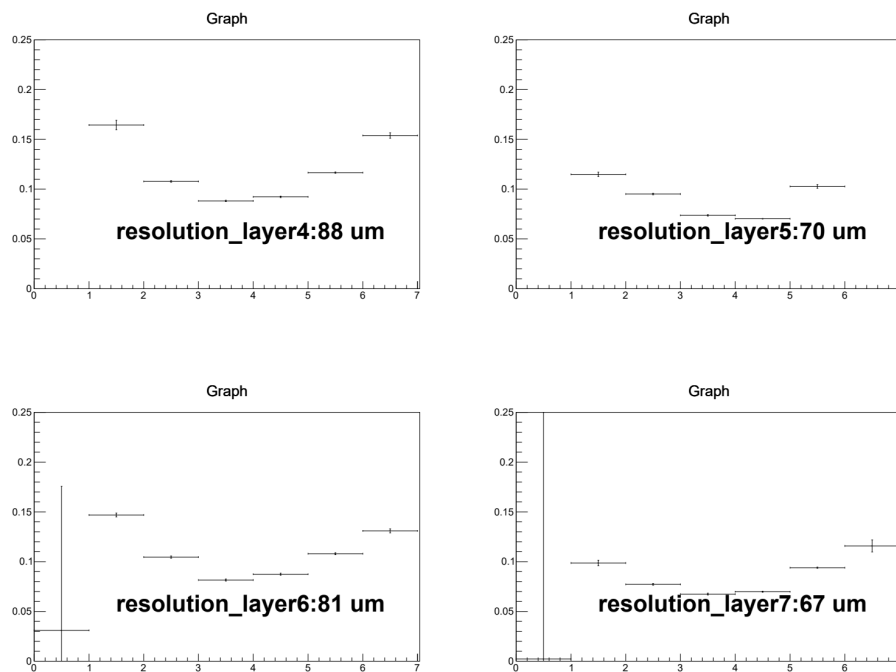


図 42 プロトタイプ v2 の 5 回目の resolution

同様にして recbe（現行版読み出しボード）でも解析を行った。こちらの解析でも wire alignment として同じ値を加味している。5 回目の recbe（現行版読み出しボード）の resolution を示す。

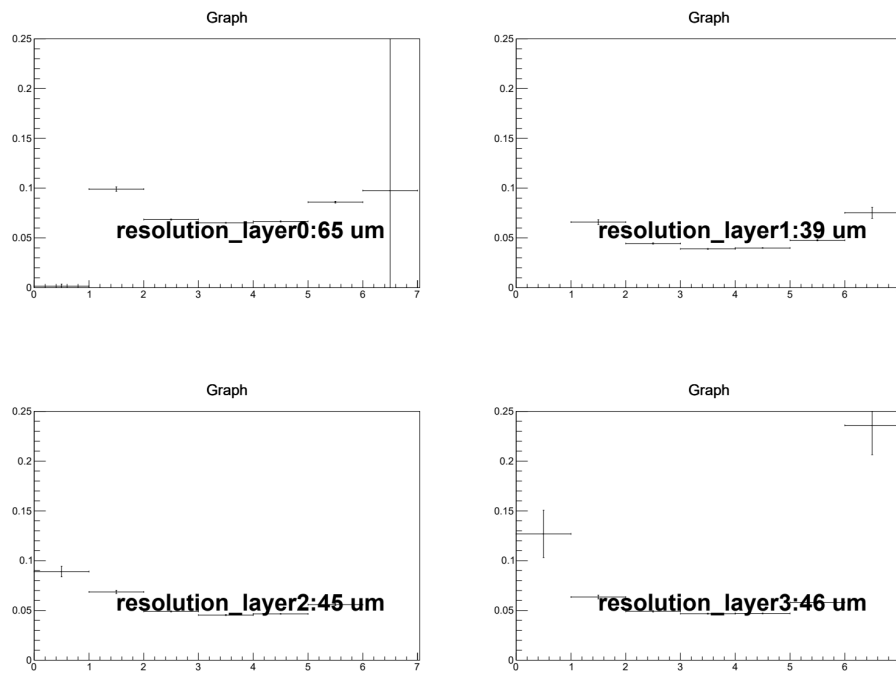


図 43 現行版ボードの 5 回目の resolution

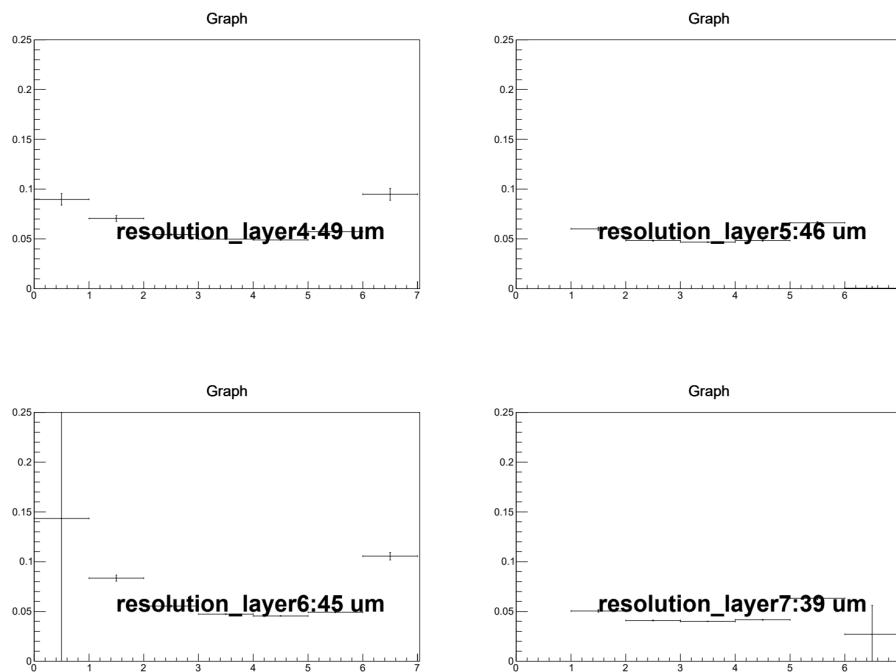


図 44 現行版ボードの 5 回目の resolution

以上の工程からプロトタイプボード-チェンバーの接続試験および RECBE(現行版読み出しボード) -テスト
チェンバーの接続試験における resolution を求めた。

まとめは下図に示す。

レイヤー	0	1	2	3	4	5	6	7
プロトタイプv2_位置分解能[um]	100	69	84	72	91	71	86	69
recbe(現行版)_位置分解能[um]	65	39	45	46	49	46	45	39

図 45 レゾリューションのまとめ

6.2 考察

現行版ボードよりも resolution は 1.72 倍悪くなった。これは、ボードを移行すると resolution が 1.72 倍悪くなることを示唆する。resolution が悪化した原因について考察する。

実験期間後に、実は trigger-timing が 8ns ごとにしかとれないことが分かった。これがもし、①一度 trigger-timing を取ったあとに 8ns とすることができないという意味であれば、trigger-timing の tdc の値に問題はない。一方で、②trigger-timing が来ているかどうかを 8ns ごとに確認するというものであれば、trigger-timing の tdc の値が 1ns の精度を持っていないことになり、結果に大きな影響を与える。まずこれがどちらであるかを確認した。

読み出しボードの TDC は先述したようにトリガーに関係なく動いている。そのため、trigger-timing の TDC の値はばらつきがあるはずである。もっと言えば、①の場合は trigger-timing の mod8(8 で割った時の余り)はおおむね均等になるはずであり、②の場合では trigger-timing の mod8 はどこかにのみ値が入る、もしくはどこかの値に鋭いピークが立つはずである。

下図が現行版ボード及びプロトタイプ v2 を用いて取得したイベントの trigger-timing の mod16 の分布である。

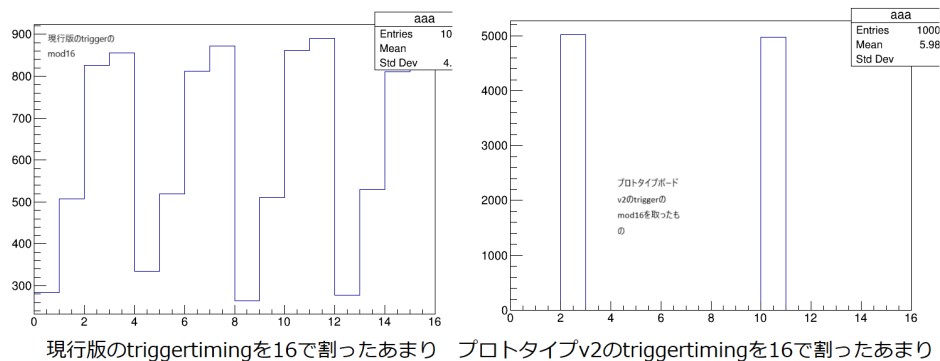


図 46 trigger-timing の mod16 の分布

従い、プロトタイプボードの v2 の trigger-timing は 8ns の精度しかなく、②であることが分かった。続いて、これによる triggertiming の真の値と、記録された値の関係を考察した。下図に対応表を示す。

真の値	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
データ上の値	82	82	82	90	90	90	90	90	90	90	90	98

図 47 真の値と、記録された値の関係

ここで記録された値が真の値よりも大きくなると考えた理由を述べる。ドリフト時間は (TDC のタイミング)-(トリガータイミング) から計算される。x-t グラフ上ではフィットしているように見えるが、その residual 分布は図 40 に示したように、負に寄っている。したがって、ドリフト時間がより小さくなっているイベントが相当数あることを示唆する。従い、記録された値は真の値よりも大きくなると考えた。

次にこのずれがどれほどの影響を与えるのかを考察した。

例として、標準偏差が 0.055 で、平均値が 0、高さが 10000 のガウス関数について、平均値を -0.022 ずつ 7 回ずらしたものを考える。7 回は、上の表で示した真の値と記録された値のずれが 0 ns から -7 ns までずれることに対応する。

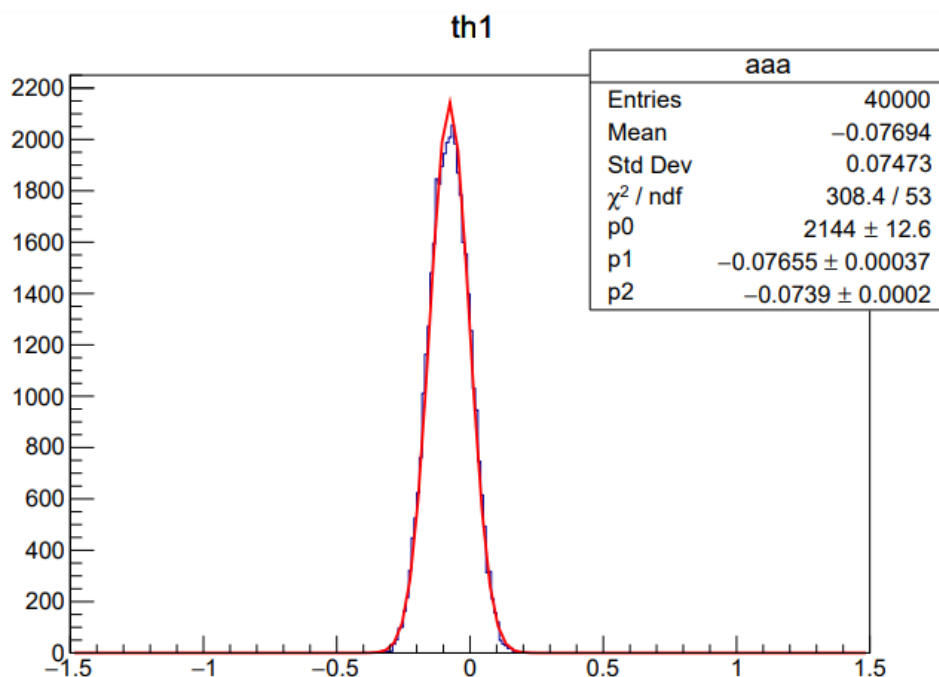


図 48 trigger-timing の精度の影響

すると、Gauss 分布は全て重なり、全体を Gauss 関数で fit した場合、標準偏差は 0.74 と 1.34 倍悪化した。また、今回は 0.022 ずつずれた値を取ったが、実際は 5 次関数のため一律ではずれていないことが考えられる。このことから、trigger-timing をきちんと取り直せば resolution は改善することが期待できる。

また当然ながら平均値も 0 からずれる結果となった。この結果は次回のイテレーションの x-t カーブにも、過少に出してしまう影響を与えることになる。

以上から、今回の条件でのデータテイキングは resolution の悪化を招き、かつ平均値もずらしてしまうという結果となってしまった。

6.3 まとめ

プロトタイプボードでは、resolution が 1.72 倍悪化する結果となった。これはボードの入れ替えをし、同じ設定でインストールすると CDC の分解能も同じだけ悪化してしまうことを意味する。

しかしその理由として、ボードの trigger-timing の記録の精度が 8 ns しかないこと、また 8 ns 経過ごとに 1 回記録するかしないかを決めていることを明らかにした。そしてそれは resolution 及び、xt カーブの値に無視できない影響を与えていることを明らかにした。

trigger-timing を 1ns の精度で受け取るようにすることは可能であるため、次回のビームテストではそのよ

うに設定し、再度 resolution を求めたい。

また、今回のビームテストでは先述したダブルスレッシュホールドをオンにせずに測定した際の値である。

また、読み出しボードの RC 回路の定数の変更もできるため、さらに位置分解能がよくなる期待もある。

第7章 クロストークの解析

プロトタイプボードではアナログ由来のクロストークはあることが分かっている。[19] 下記に ASIC の図を再掲するが、デジタル出力由来から回り込んでくるクロストークがないか気になった。

そこで、デジタル由来のクロストークの発生がないかを調査した。

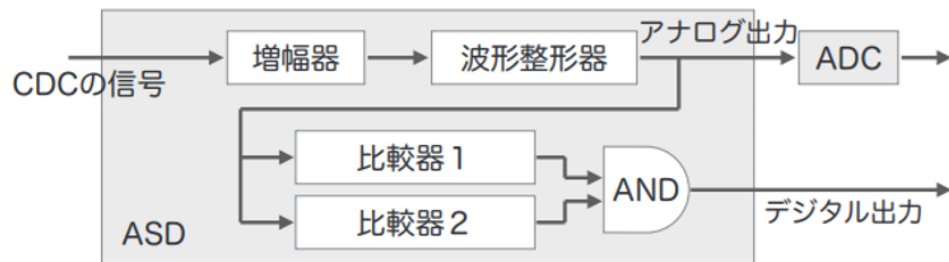


図 49 ASIC の内部図

下図のようにセットアップした。

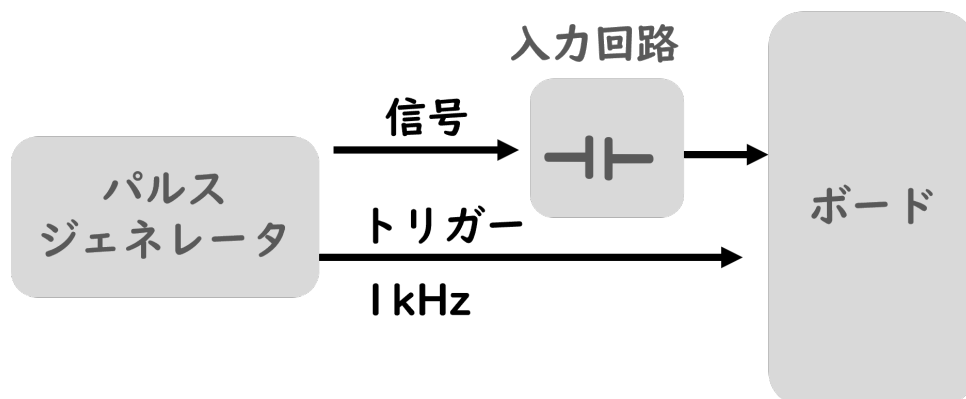


図 50 セットアップ模式図

4 章と同様の手法を用いて 1ns ごとの波形を得た。入力電荷を変えて、クロストークの特性を調べた。

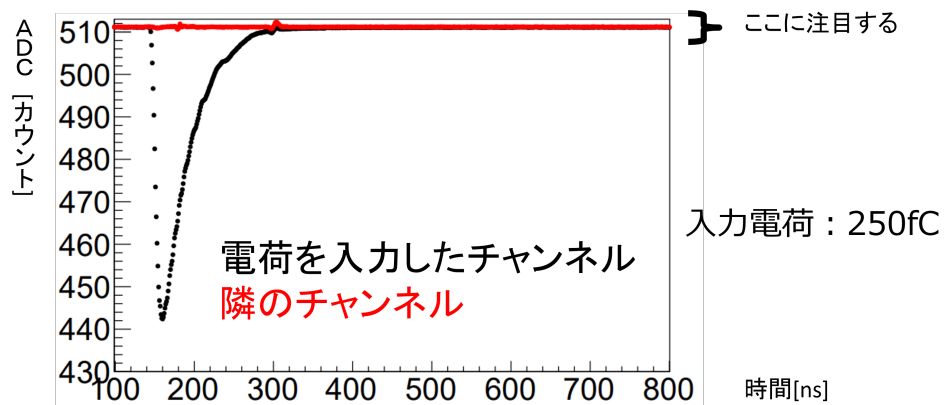


図 51 クロストーク

下図のように 3 種類のクロストークが見えた。

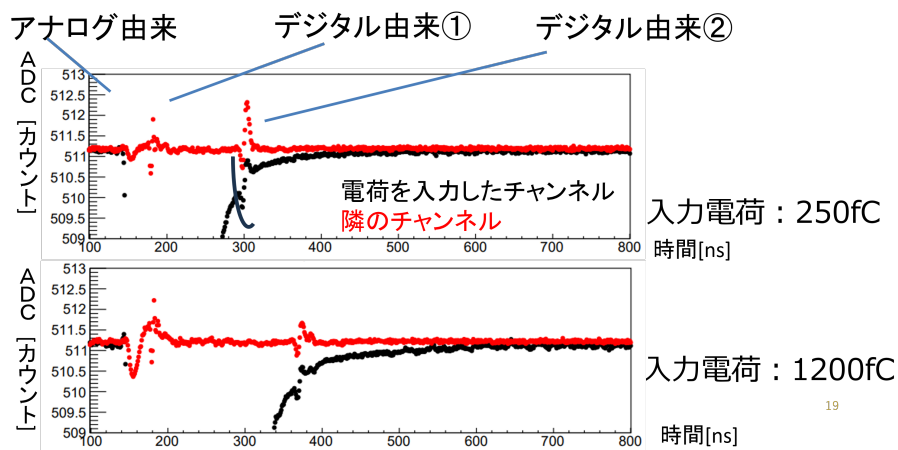


図 52 クロストークの種類分け

電荷を変えた場合のクロストークの波高について手の関係を調べた。またエラーバーは ADC のピーク時の波高について、ヒストグラムに詰めたものの標準偏差を指す。

● アナログクロストーク 1

アンプの線形領域を外れると、傾きが変わるという性質が見られた。この理由としてアンプの RC 回路のキャパシタンスの容量がオーバーしてしまい、余った電荷がアンプを電磁誘導的に揺らしてしまうことが考えられる。

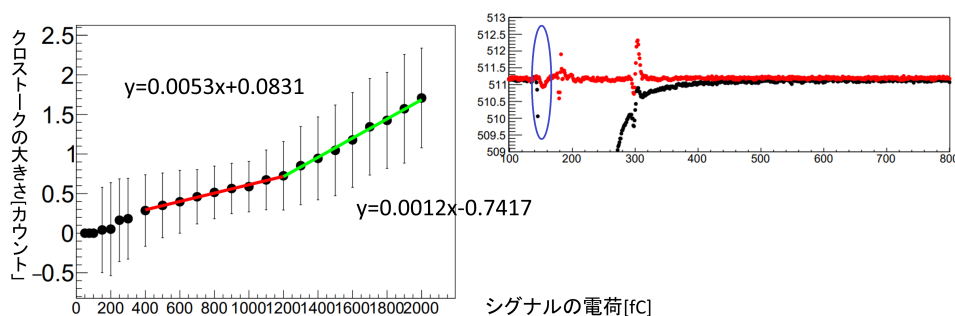


図 53 アナログクロストークと入力電荷の関係

● デジタルクロストーク 1

アナログ出力とデジタル出力が平行に走っているため、デジタル信号がアナログ信号に飛ぶことが考えられる。

電荷の大きさによらずほぼ同じタイミングで発生する。一つであれば、十分小さいため閾値でカットできる。複数ではどうなるかは後述する。

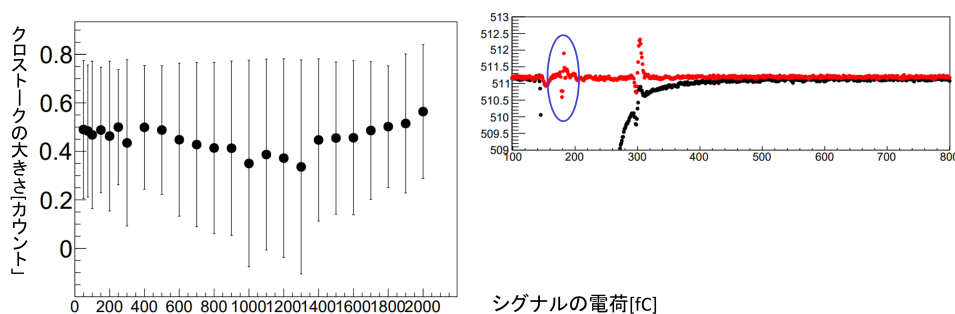


図 54 デジタルクロストーク 1 と入力電荷の関係

● デジタルクロストーク 2

電荷が大きい領域では優位な大きさのクロストークは見えなかった。閾値でカットすることが可能である。

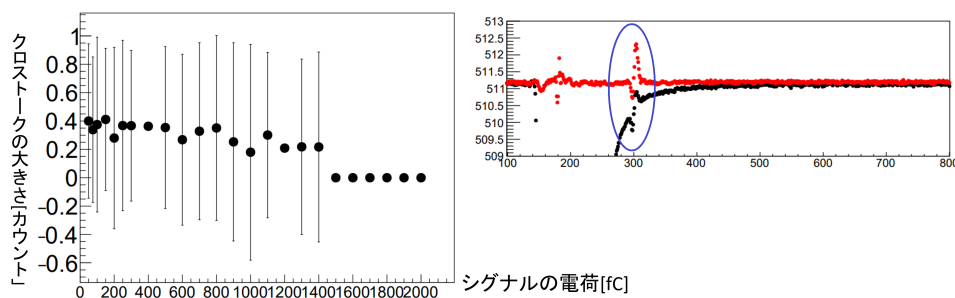


図 55 デジタルクロストーク 2 と入力電荷の関係

以上3種類のクロストークが見られたが、今回取り上げたいのはデジタルクロストーク 1 である。

信号のタイミングが複数のチャンネルで同時であればデジタルクロストークのタイミングもほぼ同時となるため、クロストークが大きくなってしまい、閾値を超え、偽ヒットが生まれてしまう可能性がある。

そこで同じ手法で入力するチャンネル数のみを変え、1000 イベント当たりの偽ヒットイベント数と入力チャンネル数の関係について下記にまとめた。

	偽ヒット数[イベント]
7つ入力	657
6つ入力	21
5つ入力	0

図 56 偽ヒット数

- まとめと考察

一つのチャンネルに 6 つ同時に信号が入った時に、そのデジタルクロストークが原因でまれに偽ヒットが発生することが分かった。

しかし 6 つ同時に信号が入る物理イベントは稀であるということが出来る。その理由は下に示す。

下に Belle II CDC の x-t カーブを示す。[25]

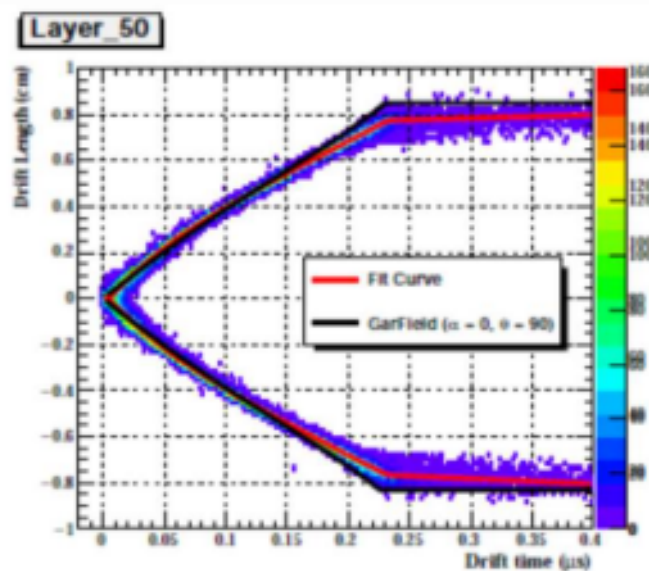


図 57 Belle II CDC の x-t カーブ [25]

6 つ同時に信号が入るということは、チェンバーのセル間の間を通るような信号ということになるが、x が十分大きな領域ではそのドリフトタイムのリニアリティーは失われている。この理由はセルの端における電場が等方的でなくなってしまうということである。

そのほかに想定できるものはアナログクロストークが由来となり発生する同時ヒットであるが、本 ASIC ではアナログクロストークの発生も抑えられているため、デジタルクロストークは問題にならないということが結論付けられる。

第8章 評価のまとめ

本論文では、Belle II CDC の読み出しボードのアップグレードのため、BelleII CDC プロトタイプボードについて性能評価を行った。

性能評価項目は ASIC の ADC のリニアリティーについて、テストワイヤーチェンバーとの接続試験について、及び搭載されている ASIC のデジタル出力由来によるクロストークの影響の有無である。

まずは ASIC の ADC のリニアリティーについて、 0.93 V/pC となりおおむね設計値通り動いていることが分かった。また、線形領域は 1.0 pC 未満という結果となった。

続いてテストチェンバーとの接続試験では位置分解能は $69 \mu\text{m}$ という結果となり、 1.72 倍悪化した。

しかしその理由として、trigger-timing が 8ns ごとにしか値を記録していないことを明らかにし、その影響について無視できないものであることを明らかにした。

trigger-timing を 1ns の精度で受け取るようにすることは可能であるため、次のビームテストではそのように設定し、再度 resolution を求めたい。

また、この値は先述したダブルスレッシュホールドをオンにせずに測定した際の値である。また、読み出しボードの RC 回路の定数の変更もできるため、さらに位置分解能がよくなる期待もある。

最後に、ASIC のデジタル出力由来によるクロストークの影響は、 8ch 中 6 つ以上のチャンネルにて同時ヒットが起こった場合、偽ヒットが生まれる可能性があるが、そのような物理的事象は稀と言えるため、問題にはならないことが分かった。

今後本ボードの性能評価として、HV を現在の 2400 V から変化させたとき及びダブルスレッシュホールドの効果、そして内部 RC 回路の定数を変えることでの位置分解能の評価が可能である。この変化についても確認していきたい。

ASIC	新ASIC (設計値)	新ASIC(測定値)	現行版ASD
アナログ出力のゲイン	0.9 V/pC	0.93 V/pC	1.1V/pC
アナログ出力の線形領域	$<1.2 \text{ pC}$	$<1.0 \text{ pC}$	$<0.4\text{pC}$
位置分解能		プロトタイプボードv2	現行版
位置分解能		$47 \mu\text{m}$	$80 \mu\text{m}$
デジタルクロストーク		6ch同時ヒットすると影響が出る可能性がある	

図 58 性能評価項目

第9章 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先生、教授の岩崎昌子先生に感謝申し上げます。特に中野先生には最後までお時間を頂き、感謝以外の言葉がございません。研究の方向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中澤遊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頂き、テストチェンバーのセットアップから、測定方法、評価方法などの議論にお付き合いいただき、ご指導いただきましたこと、心より御礼申し上げます。同じ研究室の森政さん、上村くん、吉田くん、木下くん、幸地くん、里見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。

参考文献

- [1] Yuki Nakamura, et al., He/iC₄H₁₀ (90/10) ガスによる COMET CDC のためのワイヤーエージング試験, 日本物理学会講演概要集 73.1 132-132
- [2] K E K 素粒子原子核研究所 「【特集】高ルミノシティ加速器/測定器で新しい物理法則を探す～Belle、Belle グループの取り組み」 (<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2017/09/belle2-intro/>) (Accessed 29 January.)
- [3] KEK., "SuperKEKB/Belle II Complete 2024 Operations" (<https://www2.kek.jp/ipns/en/news/7015/>) (Accessed 29 January.)
- [4] 赤井 和憲・小磯 晴代 (2018) 「SuperKEKB 加速器」 日本加速器学会「加速器」 Vol.15, No. 4, 2018
- [5] KEK., 「BelleII 測定器」 (<https://belle2pb.kek.jp/Detector/>) (Accessed 29 January.)
- [6] KEK., 「シリーズ Belle II 【第 3 回】ピクセル型検出器」 (<https://www2.kek.jp/ja/newsroom/2012/11/14/1730/>) (Accessed 29 January.)
- [7] 森井友子・樋口岳雄, 「Belle II シリコン崩壊点検出器 (SVD)」, 高エネルギーニュース Vol.35 97 ページ
- [8] KEK., 「シリーズ Belle II 【第 4 回】中央飛跡検出器」 (<https://www2.kek.jp/ja/newsroom/2013/01/17/1630/>) (Accessed 29 January.)
- [9] KEK. 素粒子原子核研究所, 「Belle II 実験 中央飛跡検出器 CDC のインストール完了」 (<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2016/10/belle2-cdc-installation/>) (Accessed 29 January.)
- [10] 谷口 七重, 「Belle II CDC」, 高エネルギーニュース Vol.32 241 ページ
- [11] KEK., 「粒子識別装置」, (<https://belle2pb.kek.jp/Detector/TOP-A-RICH/>) (Accessed 29 January.)
- [12] KEK., 「シリーズ Belle II 【第 1 回】 Belle II 測定器の新型粒子識別装置、エアロゲル・リングイメージングチェレンコフカウンター」 (<https://www2.kek.jp/ja/newsroom/2012/10/23/1430/>) (Accessed 29 January.)
- [13] 西田 昌平, 「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 58 ページ
- [14] 宮林 謙吉, 「Belle II 電磁カロリメーター (ECL)」, 高エネルギーニュース Vol.33 108 ページ
- [15] 住澤 一高, 「Belle II KLM」, 高エネルギーニュース Vol.33 27 ページ
- [16] 鈴木 聡・今野 智之・樋口 岳雄, 「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.33 196 ページ
- [17] 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.33 105 ページ
- [18] T. Uchida et al. "Readout Electronics for the Central Drift Chamber of the BelleII Detector", IEEE Transactions on Nuclear Science (Volume: 62, Issue: 4, Aug. 2015)
- [19] A.Gonnokami, "Evaluation of the New Readout Circuit for the Belle II Central Drift Chamber", 2024.
- [20] Shoichi Shimazaki, et al. "Front-end electronics of the Belle II drift chamber"
- [21] 山村 晴菜 「Belle II CDC 信号処理モジュールのアップグレードに向けた ADC 評価用基板の開発および性能評価」 (Performance evaluation of readout ASIC for tracking gas detector)
- [22] 楠本 泰徳 「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)
- [23] <https://itdc.kek.jp/testBeamLine/index.html> (Accessed 29 January.)
- [24] <https://root.cern.ch/doc/master/classTMinuit.html> (Accessed 24 February.)
- [25] Shoji Uno "Belle II CDC" <https://indico.cern.ch/event/1408681/contributions/6122492/>

attachments/2947960/5181092/BelleII_CDC_UNO.pdf(Accessed 29 January.)

[26] 中野先生とのパーソナルミーティング