

Belle II 中央飛跡検出器の新型読み出し回路の性能評価
(Evaluation of the New Readout Circuit for the Belle II Central
Drift Chamber)

権守歩斗

2024 年 1 月 25 日

概要

素粒子物理学には標準模型と呼ばれる理論が存在し、この理論は CP 非対称性や質量起源をよく説明するという一定の成果を見せた。しかし標準模型は消えた反物質の謎や暗黒物質などを説明することができない。素粒子物理学の更なる発展のため、標準模型では説明のつかない現象、新物理の発見を目的として行われている実験の 1 つに、Belle II 実験がある。

Belle II 実験は、茨城県つくば市に所在する高エネルギー加速器研究機構で行われている実験である。同実験では電子ビーム・陽電子ビームをそれぞれ 7 GeV・4 GeV まで加速して衝突させ、衝突後に生成された B 中間子対の崩壊過程を観測することで、新物理の発見を目指している。Belle II 実験には 7 つの検出器を用いている。その内の 1 つが、本論文で主に触れる中央飛跡検出器である。中央飛跡検出器は、生成された荷電粒子の飛跡とエネルギー損失を測定する。中央飛跡検出器の読み出し回路は、クロストークと呼ばれる雑音の削減などを目的としてアップグレードが進められている。本論文では、この改良版読み出し回路が実用に耐える性能を有しているかの性能評価を行った。

まずは改良版読み出し回路に用いられている ASIC について、2 つある出力の利得をそれぞれ測定した。加えて、ASIC のクロストーク波高を測定し、現行版と比較した。結果、利得は設計値と異なる値となった。一方出力が線形となる入力領域は現行版の 3 倍近く広がった。クロストーク波高は、現行版と比較し 10 倍以上小さくなった。

また、改良版読み出し回路をテスト用のワイヤーチェンバに繋げてのビームテストが行われた。このビームテストの測定データからチェンバに入射したビームの飛跡を再構成し、位置分解能を導出した。現行版読み出し回路についても同様の測定を行い、両者の位置分解能を比較することで、改良版の性能を評価した。現行版読み出し回路と改良版読み出し回路の位置分解能はそれぞれ $82 \mu\text{m}$ 、 $128 \mu\text{m}$ となり、改良版は現行版と比較して位置分解能が悪化してしまう、という結果となった。読み出し回路の位置分解能による CDC の運動量分解能への寄与を吟味すると、運動量 1 GeV における運動量分解能は 0.37% から 0.39% へ悪化する計算となった。

目次

概要	2
1 序論	4
2 Belle II 実験	5
2.1 Belle II 実験の目的と概要	5
2.2 SuperKEKB 加速器	5
2.3 Belle II 実験の検出器	6
2.4 Belle II 実験の現状と今後のアップグレード	11
3 ガス検出器	12
3.1 CDC の動作原理	12
3.2 物理量の測定	15
3.3 現行版 CDC 読み出し回路	15
4 改良版 CDC 読み出し ASIC の性能評価	18
4.1 読み出し ASIC アップグレードの目的・内容	18
4.2 改良版 CDC 読み出し ASIC	20
4.3 改良版 CDC 読み出し ASIC の性能評価	20
4.4 考察	27
5 飛跡の再構成を通じた改良版 CDC 読み出し回路の性能評価	31
5.1 測定セットアップ	31
5.2 測定データの解析手順	33
5.3 性能評価結果	41
6 まとめ	50
謝辞	51
参考文献	53
付録	54

1 序論

Belle II 実験は、新物理の探索を目的として、茨城県つくば市に所在する高エネルギー加速器研究機構で行われている実験である。Belle II 実験の検出器・中央飛跡検出器 (CDC) について、読み出し回路の改良計画が進んでいる。読み出し回路の改良の主目的は、今後のルミノシティの増加を見据えたクロストークの抑制である。本研究では、改良後の回路を実際に Belle II 実験へと投入できるか確認するため、性能評価試験を行う。まずは改良版読み出し回路内の新型 ASIC について、そのアナログ出力、デジタル出力の性質を評価する。加えて、ASIC のクロストークについても測定する。続けて、読み出し回路全体についてビームテストが行われたため、そのデータを解析し、位置分解能を求める。このビームテストは、現行版・改良版読み出し回路について可能な限り条件を揃えて測定されている。両者の測定結果を比較することで改良版読み出し回路の性能を評価する。性能評価項目を表1に示す。

2章では、前提知識として、Belle II 実験とその加速器・検出器について説明する。3章では、中央飛跡検出器についてより詳細な解説を行った後、現行版 CDC 読み出し回路の性能について触れる。4章では、改良版 CDC 読み出し ASIC について性能を評価し、その結果について述べる。5章では、改良版 CDC 読み出し回路と現行版読み出し回路を用いたビームテストの結果について述べる。6章では、4章、5章の結果についてまとめた上で、今後の展望について簡潔に述べる。

表1: 性能評価項目

ASIC	現行版 ASD	新 ASIC(設計値)
アナログ出力のゲイン	1.1 V/pC	1.02 V/pC
アナログ出力の線形領域	< 0.4 pC	< 1.2 pC
デジタル出力のゲイン	7.5 V/pC	1.02 V/pC
デジタル出力の線形領域	-	< 1.2 pC
クロストーク	入力 7 pC, 出力 100 mV	-
読み出し回路	現行版回路 (目安)	改良版回路
位置分解能	100 μm (CDC)	-

2 Belle II 実験

本章では、Belle II 実験の概要並びに、当実験にて用いられている加速器、検出器の紹介を行う。

2.1 Belle II 実験の目的と概要

Belle II 実験は、茨城県つくば市に所在する高エネルギー加速器研究機構において、素粒子物理学の発展の一翼を担う実験である。素粒子物理学には標準模型と呼ばれるモデルがあり、素粒子の運動や相互作用をある程度正しく記述している。この標準模型の立証に寄与したのが、Belle II 実験の前身であり、1999 年から 2010 年まで稼働した Belle 実験である。標準理論で記述できる現象の 1 つに、「CP 対称性の破れ」がある。CP 対称性の破れとは、平易に言えば粒子の運動を記述する理論と反粒子の理論に違いがある、ということである。Belle 実験は、 $B^0-\bar{B}^0$ の干渉効果を通じて時間的 CP 対称性の破れを観測し、小林・益川によって 1973 年に提案された標準理論の 6 元模型への拡張（当時）による CP 対称性の破れの記述が正しいことを証明した。

一方で、標準模型では説明のつかない観測事実（新物理）が既に知られている。そこで Belle II 実験では、電子を 7 GeV、陽電子を 4 GeV に加速して衝突させ、衝突後の生成物、特にボトムクォークを含む中間子 (B 中間子) の崩壊を観測している。B 中間子の崩壊を通じて、CP 非対称性のより詳細な測定をはじめとする、崩壊における新物理の探索を行うことを目的としている。

2.2 SuperKEKB 加速器

Belle II 実験では、SuperKEKB という電子・陽電子加速器を用いて実験を行っている。加速器の性能を表す指標の一つにルミノシティがあり、以下の関係式が成立する。

$$Y = L\sigma$$

Y : 単位時間あたりの反応回数, L : ルミノシティ, σ : 反応断面積

SuperKEKB におけるルミノシティは、主に以下の量に依存する [1]。

$$L \propto I_{\pm}(\beta_{y\pm}^*)^{-1}$$

I : ビーム電流

β_y^* : 衝突点での垂直方向のベータ関数 (ビームの広がりを表す関数)

\pm はそれぞれ、陽電子、電子に対するパラメータであることを表す。

SuperKEKB は、図1右部に示されるように、電子と陽電子に角度をつけて衝突させるナノビーム方式を採用している。ナノビーム方式により、 β_y^* を Belle 実験の加速器 (KEKB) の数十分の一に抑えること、ビーム電流を KEKB の 2 倍に増加させることを目標としている。[2,3]

SuperKEKB の模式図は図2の通りである。電子ビームは、photo-RF gun により生成し、線形加速器で 7 GeV まで加速したのち、メインリングに入射する。陽電子は電子をタングステン標的に衝突させることで生

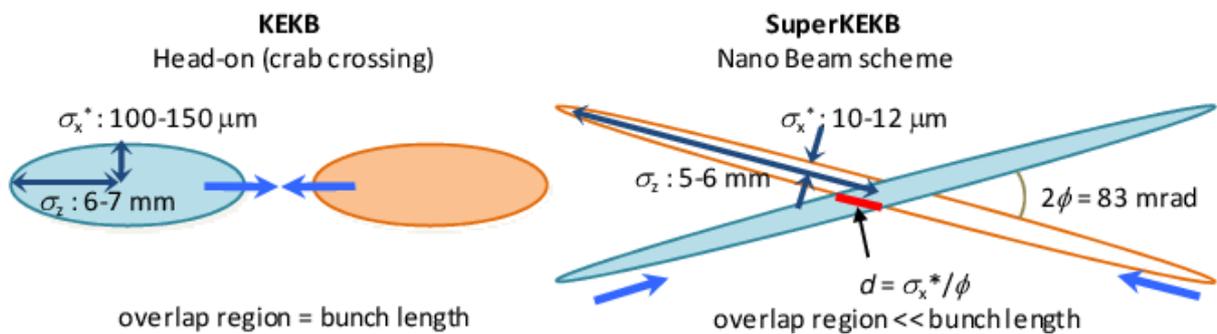


図1: 左が KEKB、右が SuperKEKB(ナノビーム方式) のビームの形状。ビームを正面衝突させるのではなく、細く絞った上で角度をつけて衝突させることで、衝突点における y 軸 (紙面に垂直) 方向のビーム幅が抑制されている。[1]

成し、陽電子ダンピングリングで運動量の方向を均一化したのち、4 GeV まで加速されてメインリングに入射する。加速後の電子・陽電子のエネルギーは非対称になっており、その衝突により生成される B 中間子は電子の進行方向にローレンツブースト (ブーストファクターは $\beta\gamma = 0.28$) する。このローレンツブーストにより、中性 B 中間子を用いた時間依存の CP 非対称度測定が可能となる。[3]

2.3 Belle II 実験の検出器

Belle II 実験では、衝突後の粒子の運動量やエネルギー損失をなど測定し、粒子を同定するために、図3にあるように 7 種類の検出器を用いている。

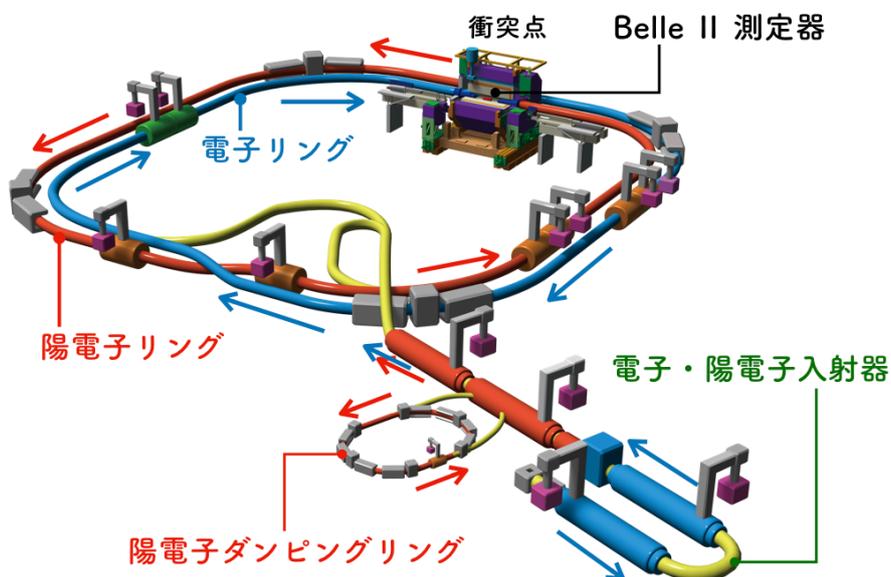


図2: SuperKEKB [4]

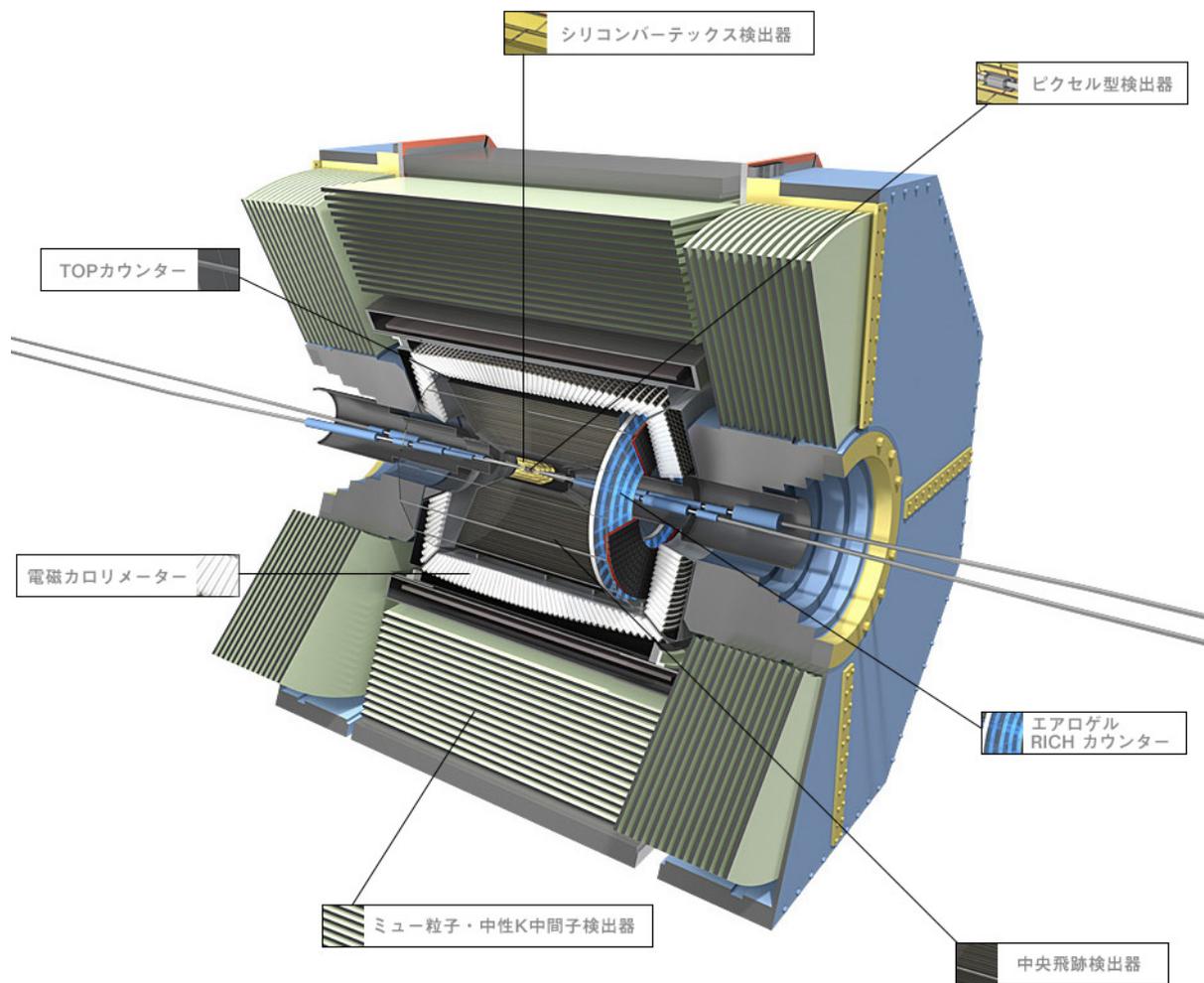


図3: Belle II 実験の検出器の断面図。図中左奥から電子を、右手前から陽電子を入射する。[5]

2.3.1 崩壊点検出器

崩壊点検出器 (VXD, VerteX Detector) は、生成粒子の崩壊位置を測定する、全 6 層からなる半導体検出器である。また、生成粒子がローレンツブーストしていることを用いて、崩壊の時間情報を測定することもできる。Belle II 実験では崩壊点検出器として、ピクセル型の PXD(PiXeL Detector) とストリップ型の SVD(Silicon Vertex Detector) という、2 種類のシリコン半導体検出器を用いている。[3]

- ピクセル型シリコン崩壊点検出器 (PXD)

PXD は、全長 174 mm、半径 14 mm、22 mm の 2 層からなる DEPFET (DEpleted Field Effect Transistor) というピクセル型シリコンセンサーを用いた半導体検出器で、Belle II 実験から新たに用いられている。DEPFET の模式図を図4に示す。DEPFET 空乏層を荷電粒子が通過すると電子-正孔対が生成されるが、このうち電子は半導体 FET 直下に形成された「内部ゲート」と呼ばれる箇所 (図4, "internal gate") に集められる。この状態の FET のソース・ゲート間に電圧を印加すると、内部ゲートに集まった電子量に応じてゲート電圧が影響を受けるので、ソース・ドレイン間の電流として信号を読み出すことができる。PXD で用いている DEPFET センサーは $75 \mu\text{m}$ 厚であり、 $50 \mu\text{m} \times (55-85) \mu\text{m}$ のピクセルサイズをもつ。[2,3]

- ストリップ型シリコン崩壊点検出器 (SVD)

SVD は、内径 39 mm、外径 135 mm の 4 層からなる両面シリコンストリップ検出器 (DSSD, Double-Sided Silicon Detector) と呼ばれる半導体検出器である。DSSD の模式図を図5に示す。センサーの厚みは $300 \sim 320 \mu\text{m}$ であり、n 型ストリップ・p 型ストリップ間に逆電圧を印加することでセンサー内部を完全空乏化する。空乏層を荷電粒子が通過することで生成された電子 (正孔) を検出器表面の n 型 (p 型) ストリップで検出することにより、荷電粒子の通過位置について二次元の情報を収集することができる。ストリップの読み出しピッチは、最内層で最も狭く、 $r-\phi$ 方向に $50 \mu\text{m}$ 、ビーム軸方向に $160 \mu\text{m}$ である。[2,3,7]

2.3.2 飛跡検出器

- 中央飛跡検出器 (CDC)

中央飛跡検出器 (Central Drift Chamber, CDC) は内径 160 mm、外径 1130 mm のガス検出器の一種である。Belle II 実験において、CDC は以下の 2 つの測定を行う:

- 荷電粒子の飛跡の測定、それによる運動量の測定

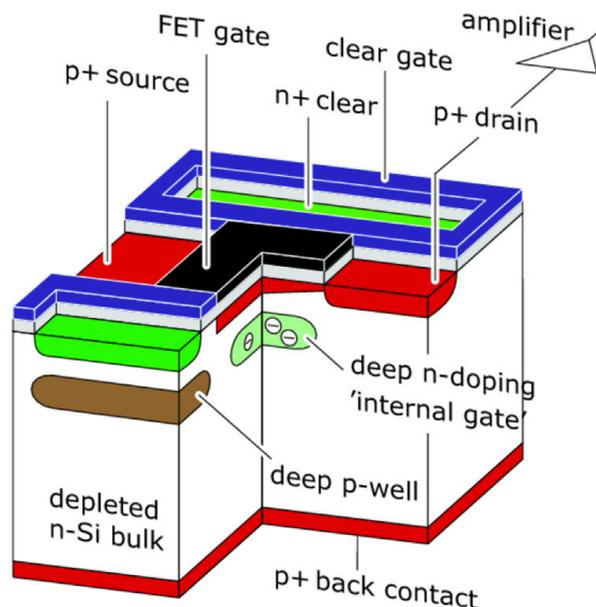


図4: ピクセル型検出器の断面図。図中薄緑部が内部ゲート。[6]

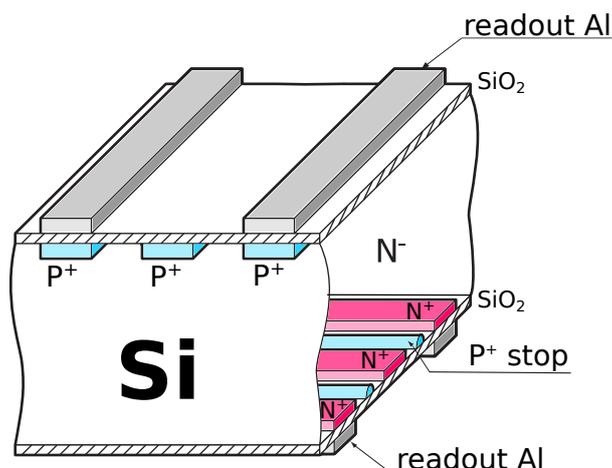


図5: DSSD の断面図

– 荷電粒子のエネルギー損失を用いた粒子識別

また、CDC の出力をトリガー信号の作成に用いている (トリガー信号とは、Belle II 実験の全ての検出器が保持した信号を記録するために読み出す合図となる信号のことである)。CDC を含むガス検出機の動作原理については、3章で詳しく述べる。[2,3]

2.3.3 粒子識別器

粒子識別器 (PID, Particle IDentification detector) は、荷電粒子の種類を識別する検出器である。粒子識別器では、まず荷電粒子の速度を測定する。速度を測定することで、CDC で測定した運動量と合わせて粒子の質量を決定することができる。これにより、粒子の識別を行うことができる。Belle II 実験では2種類の検出器、TOP カウンタ (TOP, Time-Of-Propagation counter) とエアロゲル RICH カウンタ (ARICH, Aerogel Ring-Imaging CHerenkov counter) を用いており、主に K 中間子と π 中間子の識別を行なっている。これら2つの検出器は、どちらもチェレンコフ光を用いている。

- TOP カウンタ (TOP)

TOP カウンタは、輻射体として石英を用いた粒子識別器の一種である。TOP カウンタは、全方位を精密に研磨した幅 450 mm、厚さ 20 mm、長さ 2.6 m の石英輻射体の末端に約 30 ps の時間分解能を有するマイクロチャンネルプレート型光電子増倍管 (MCP-PMT, Micro Channel Plate PhotoMultiplier) が備え付けられた構造をしており、発生したチェレンコフ光は図6に示すように石英内で全反射を繰り返し MCP-PMT に到達する。チェレンコフ光の放射される角度 (チェレンコフ角) は、図6にあるように入射粒子の速度に依存し、これによりチェレンコフ光の伝播時間 (Time-Of-Propagation) や検出位置に違いが生じる。従ってこの伝播時間や位置を精密に測定することで、荷電粒子の種類を識別することができる。[2,3]

- エアロゲル RICH カウンタ (ARICH)

ARICH はエアロゲル輻射体を用いた粒子識別器の一種である。エアロゲルに荷電粒子が入射することにより、チェレンコフ光が円錐状に発生する。光検出器を平面上に並べてこのチェレンコフ光を検出すると、像は円形 (ring-image) となる。この円の半径はチェレンコフ角に依存するため、チェレンコフ角

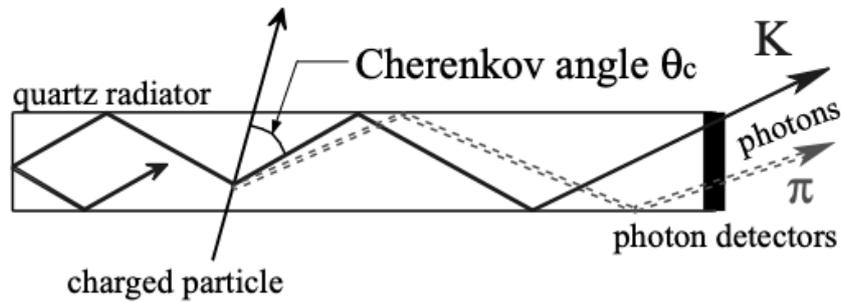


図6: TOP カウンタの模式図。光子が検出器に到達するまでの経路長 (\propto 時間) がチェレンコフ角 θ_c に依存している。[3]

より粒子の速度を測定することができる。図7のように、輻射体として屈折率の異なる2種類のアロゲルを前後に貼り合わせることで、輻射体を厚くし発生する光子数を増やしつつ、チェレンコフ光の広がりを抑制し円錐の角度分解能を向上させている。[2,3]

2.3.4 電磁カロリメータ

- 電磁カロリメータ (ECL)

電磁カロリメータ (ECL, Electromagnetic CaLorimeter) は、タリウムを添加したヨウ化セシウム結晶をシンチレータとして用いた検出器である。CsI(Tl) 結晶の形状は角錐台であり、平均断面積は $6 \times 6 \text{ cm}^2$ 、全長は 30 cm である。この全長は CsI(Tl) 結晶の放射長の 16.1 倍に相当する。ECL は、衝突により生成される電子・光子のエネルギーを測定する。また、光子の測定を介して、 π_0 や η といった粒子を同定することができる。これらの役割を達成するため、ECL は、 20 MeV から 4 GeV という広いエネルギー領域において、光子のエネルギーを精密に測定する必要がある。Belle II 実験においては、バレル部に 6,624 個、エンドキャップ部に 2,112 個と計 8,736 個もの ECL が用いられており、衝突の

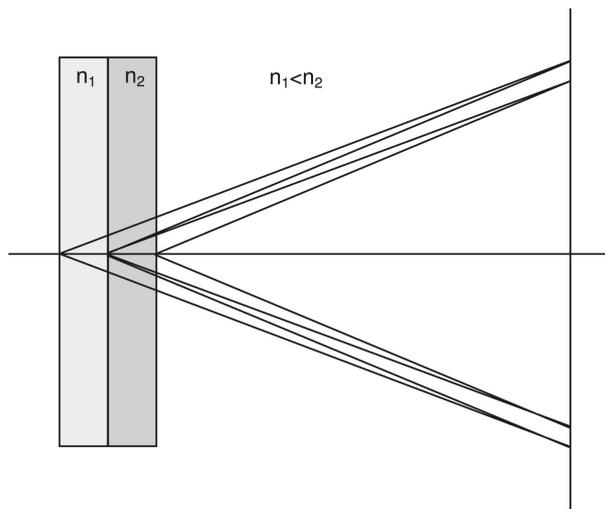


図7: ARICH の模式図。図中左側の灰色部分がエアロゲル輻射体、右側の縦線が光検出器。2 種類の輻射体を用いることで、チェレンコフ光の広がりが抑制されている。[2]

重心系から見た立体角の 90% をカバーしている。[2,3]

2.3.5 ミュー粒子・中性 K 中間子検出器

- 中性 K_L 中間子・ミュー粒子検出器 (KLM)

中性 K_L 中間子・ミュー粒子検出器 (KLM, K_L and Muon detector) は、 K_L^0 中間子の測定、ミューオンの識別を目的とした検出器である。KLM として、エンドキャップ部には光検出器とプラスチックシンチレータを、バレル部には RPC(glass-electrode Resistive Plate Chambers) というガス検出器を用いている。 K_L は KLM 内部で、強い相互作用によりハドロンシャワーを起こす。一方ミューオンは他の物質との相互作用によるエネルギー損失が少ないため、KLM を通過していく。これらを観測することで、 K_L の運動量方向を測定し、またミューオンを識別することができる。[2,8,9]

2.4 Belle II 実験の現状と今後のアップグレード

Belle II 実験は、2 段階の試運転を経て本測定へと移行した。Phase I 運転は加速器のコミッショニング、調整と真空焼きだしを目的とした運転で、その間、測定器設置予定場所における放射線量の測定を行った。Phase I 運転は 2012 年 2 月から 6 月まで稼働した。Phase II 運転は加速器の衝突調整を目的とした運転であり、VXD 以外の検出器を導入して物理データの取得も行った。Phase II 運転は 2018 年 3 月から 7 月まで稼働した。以上の 2 段階を経て、VXD を設置し、実際に B 中間子の崩壊を測定する Phase III 運転が、2019 年 3 月より開始した。[10]

Belle II 実験は今後、加速器の高輝度化を進め、より多くのデータ収集を目指していく。図8は、今後の瞬間ルミノシティと積分ルミノシティの目標値を示したグラフである。SuperKEKB/Belle II は、更なる高輝度化に備え、2022 年夏から 2024 年 1 月まで運転を停止し、その間加速器や検出器の大幅な改良を進めている。[12]

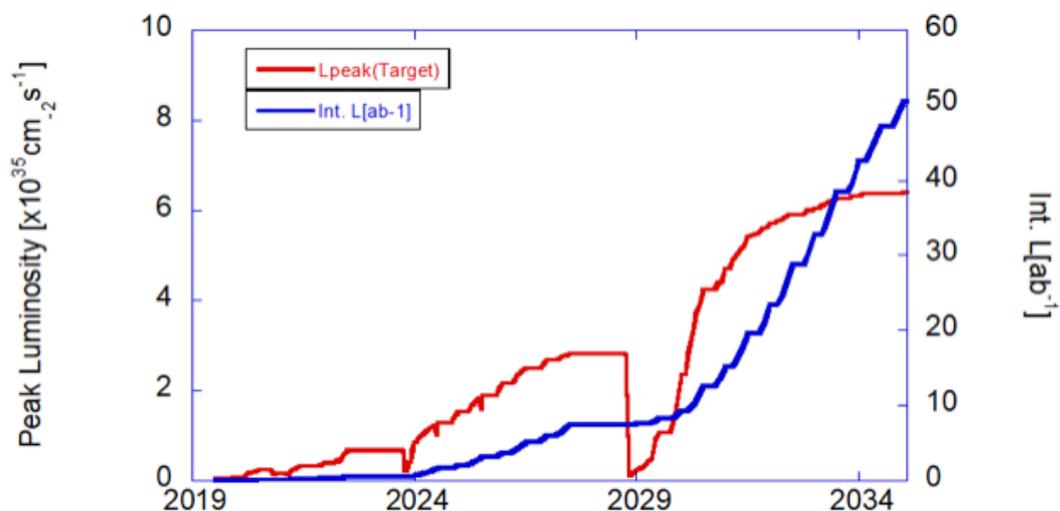


図8: 瞬間ルミノシティ (赤線) と積分ルミノシティ (青線) の目標値 [11]。

3 ガス検出器

本章では、中央飛跡検出器 (CDC) ならびにガス検出器について、より詳細な解説を行う。

CDC は He(50%)-C₂H₆(50%) 混合ガスで満たされたドリフトチェンバである。CDC 内部には、アルミニウム製のフィールドワイヤー、金メッキを施されたタングステン製のセンスワイヤーという 2 種類のワイヤーが存在する。フィールドワイヤーは接地されており陰極に、センスワイヤーは高電圧が印加されており陽極に対応する。図9に示されるように、CDC 内部には同心円状に 56 層、全 14,392 本のセンスワイヤーが張られている。Belle II 実験において CDC は、荷電粒子の飛跡を測定することで運動量を測定し、エネルギー損失を測定することで粒子識別を行う。また、各衝突事象に対して、トリガー信号の生成も行っている。[3,13]

3.1 CDC の動作原理

CDC を含むガス検出器は、その内部に封入されたガスとの相互作用を通して荷電粒子を検出する。本節では、荷電粒子の検出プロセスについて説明する。

3.1.1 荷電粒子と物質との反応

物質中を通過する荷電粒子は、周辺の分子を電離・励起させ、電子と陽イオンや光子を生成する。この過程で荷電粒子はエネルギーを失い、徐々にその速度を落としていく。物質中での荷電粒子のエネルギー損失を表す式として、下に記すベーテ・ブロッホの式 [15] がある。

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

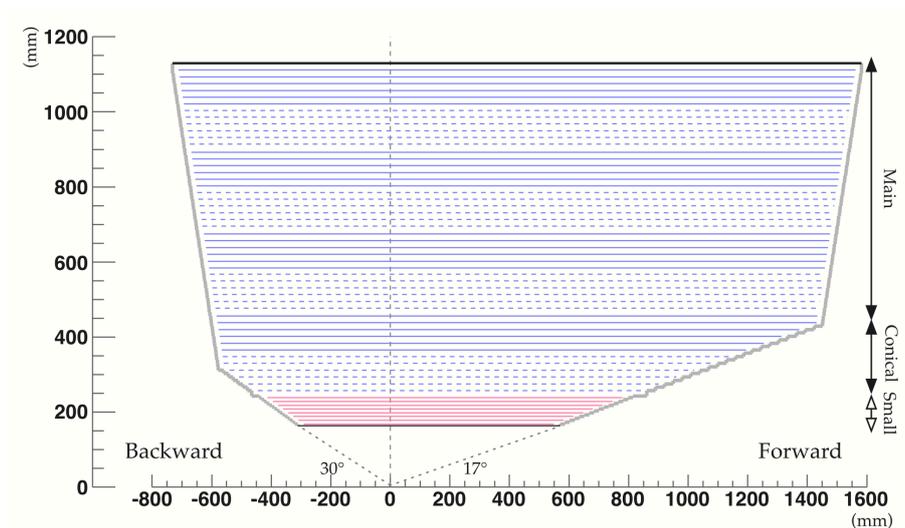


図9: Belle II 実験におけるセンスワイヤーの配置図。ピンクはスモールセル部分。実線が axial ワイヤー、点線が stereo ワイヤー (axial ワイヤー、stereo ワイヤーについては3.2.1節で述べる)。[14]

N_A : アボガドロ数

r_e, m_e : 古典電子半径、電子質量

z : 荷電粒子の電荷

Z, A : 物質の原子番号、質量数

β, γ : 荷電粒子の速度 ($= v/c$)、ローレンツファクタ ($= 1/\sqrt{1-\beta^2}$)

W_{\max} : 1 回の衝突における荷電粒子から電子へのエネルギー移行の最大値

I : 平均励起エネルギー

$\delta(\beta\gamma)$: 密度効果補正項

Belle 実験における運動量とエネルギー損失の関係を、粒子毎にグラフ化したものが図10である。運動量とエネルギー損失の両者を測定することで粒子の種類を絞り込むことができる。

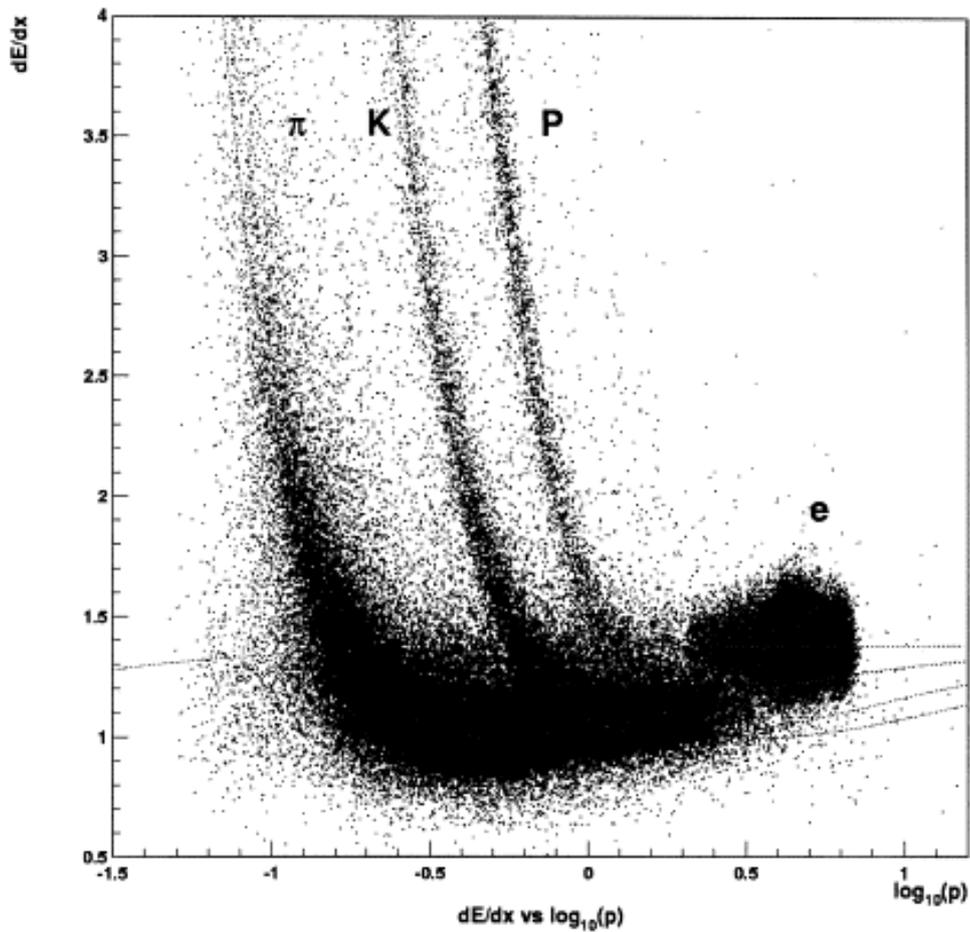


図10: Belle 実験における荷電粒子毎のエネルギー損失と運動量の関係 [16]

3.1.2 電子のドリフト

荷電粒子の電離により発生した電子(一次電子)は、高電圧の印加されているセンスワイヤーへ向けて移動する。[3]

電離後の電子や陽イオンがワイヤーの形成する電場に従って移動することをドリフトという。電子が電場に沿って加速され、十分なエネルギーを得ると、この電子が更に別のガス分子を電離・励起させる。すると新たに発生した電子(二次電子)や光子も他の分子を電離させ、鼠算的に電子が増えていくこととなる。これを電子雪崩という。図11は、電子雪崩の過程を図示している。ワイヤー周辺の電場はワイヤーからの距離に反比例するため、電子雪崩が起こるほどの大きな電場が発生するのはワイヤーの直近(典型的には $50 \mu\text{m}$)に限られる。[17,18] 電子雪崩により電子が増加し、ある一定の量を超えてしまうと、放電が発生してしまう。放電を防ぐために、ワイヤーチェンバやドリフトチェンバにはクエンチガスと呼ばれるガスが用いられる。クエンチガスは、ガス分子の励起によって発生した光子を吸収することで電子雪崩を抑制している。Belle II CDC では C_2H_6 がこの役目を果たす。[17] 最終的にワイヤーに発生する電流は、電荷の移動、つまり電磁誘導によるものである。電子雪崩はセンスワイヤー周辺で起きるため、電子の移動による電流への寄与は非常に小さい。電流の大部分は、電子雪崩により発生した陽イオンがフィールドワイヤーへ移動する際の電磁誘導により発生する。[18] CDC は、この電流を信号として出力する。以上をまとめた、荷電粒子によって CDC から信号が発生するまでのプロセスは以下の通りである。

1. 荷電粒子がガス分子を電離する。
2. 発生した電子がセンスワイヤーへ向かってドリフトする。
3. 電場に沿って加速された電子が電子雪崩を起こす。
4. 電子雪崩によって発生した陽イオンがフィールドワイヤーへ移動する。
5. 電磁誘導により、ワイヤーに電流が発生する。

この電流を測定することで、CDC 内部を通過した荷電粒子を検出することができる。

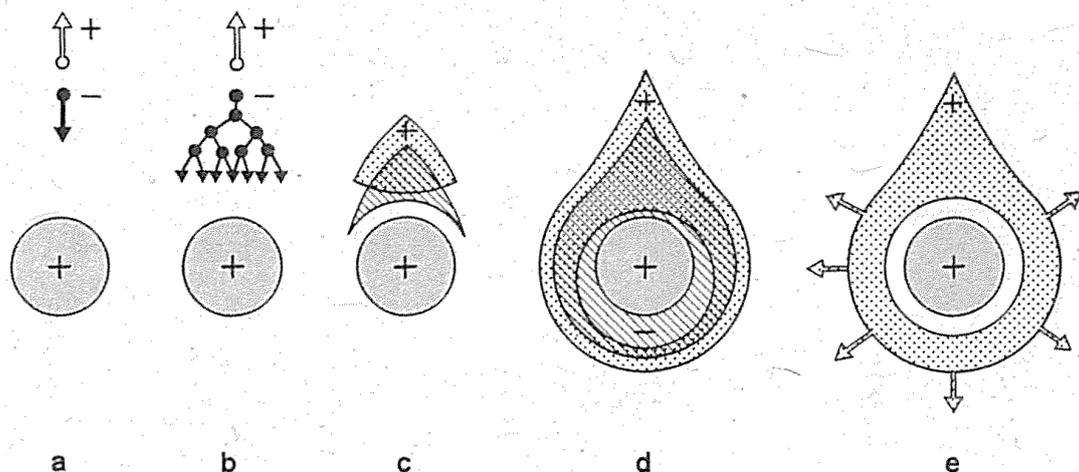


図11: センスワイヤー周辺での電子雪崩の発生図。電子の方が陽イオンより速くドリフトするため、電荷分布は雫状になる。[19]

3.2 物理量の測定

3.2.1 運動量の測定

ワイヤーに発生した信号の時間情報を用いて、荷電粒子の飛跡を再構成する。以下に、ビームに垂直な方向の粒子の飛跡の再構成方法を示す:

1. 信号の時間情報から、荷電粒子によって電離された電子のドリフト時間を求める。
2. ドリフト時間をドリフト距離に変換する。
3. 信号の発生したワイヤーに対し、そのワイヤーを中心としてドリフト距離を中心とする円を描く。
4. 全ての円に接する曲線を描く。この曲線が飛跡となる。

CDC 内部には、ビーム軸と平行に 1.5 T の磁場が印加されている。荷電粒子は、この磁場により螺旋を描きながら CDC を通過していく。この螺旋運動の曲率は、荷電粒子の運動量によって決定される。したがって、信号の時間情報から飛跡を再構成すると、飛跡の曲率から荷電粒子の運動量を求めることができる。

センスワイヤーがビームに平行な axial ワイヤーのみであると、ビームに垂直な 2 次元方向の飛跡しか得ることができない。そこで Belle II CDC では、図9に示されるように、stereo ワイヤーという、ビームと平行ではない斜め方向の角度をつけたワイヤーを併用している。stereo ワイヤーの存在によりビームに平行な方向の飛跡の情報を測定することができ、3 次元の飛跡を再構成することができる。

3.2.2 エネルギー損失の測定

CDC では、センスワイヤーの電圧を適切な値 (約 2.3 kV) に保ち、またクエンチガスを用いることで、検出される信号波高がエネルギー損失 (\propto 一次電子数) に比例するように調整されている。これにより、信号波形から荷電粒子のエネルギー損失を測定でき、粒子の同定へと役立てることができる。

3.3 現行版 CDC 読み出し回路

CDC 読み出し回路には、信号の波形を出力する ADC(Analog to Digital Converter) と、信号の時間情報を出力する TDC(Time to Digital Converter) の 2 出力が存在する。荷電粒子の飛跡やエネルギー損失を正確に測定するために、ADC は 10 ビット、31.75 MHz の波形サンプリング周波数を、TDC は 1 ns の時間分解能を有する。14,392 本あるセンスワイヤーの信号を読み出すために、1 枚につき 48 チャンネルを有する回路を 300 枚使用している。また、Belle 実験と比較するとルミノシティ・読み出しチャンネル数双方が上昇し、バックエンドコンピュータへのより高速なデータ送信が要求されるため、FPGA(Field Programmable Gate Array, 集積回路の一種) を用いてこれを実現している。加えて、高輝度化による放射線や、検出器付近に印加されている強力な磁場の下でも、信号の取得、送信を正常に行うことができるよう回路の素子を選定している。[13]

3.3.1 現行版読み出し回路の構成

現行版 Belle II CDC 読み出し回路の実際の画像を図12に、ブロックダイアグラムを図13に示す。CDC の信号は、図13にあるように、まずは波形整形・弁別器 (ASD, Amplifier Shaper Discriminator) に入力する。ASD によって増幅・整形されたアナログ信号やデジタル信号は、A/D コンバータ (ADC)、FPGA を介して

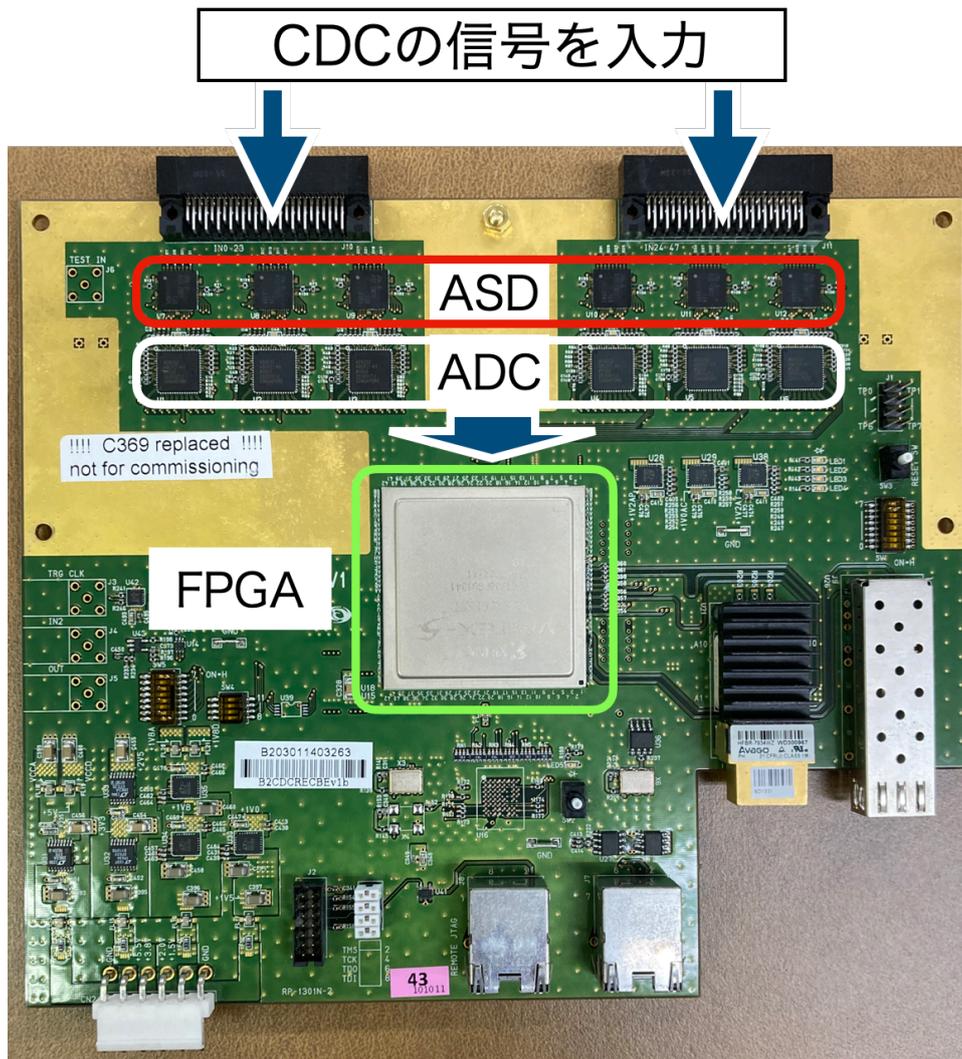


図12: 現行版読み出し回路。

トリガーシステム (TRG, TRiGger) やデータ収集システム (DAQ, Data AcQuisition) に送信している。

3.3.2 現行版読み出し ASIC の性能

Belle II CDC の信号の読み出しには、素粒子原子核研究所エレクトロニクスシステムグループと共同で開発した ASIC(Application Specified Integrated Circuit, 集積回路の一種) を用いている。この ASIC は、前述した ASD の役割を果たす。ASD ASIC1 チップ当たり 8 チャンネルの入出力が存在し、各チャンネルには 1 つの入力と 2 つの出力を持つ。ASD ASIC への入力として、CDC からの信号である電荷を直接受け取っている。また 2 つの出力は、入力信号を増幅、整形して出力するアナログ波形出力と、増幅、整形された波形に対し閾値を切って得られるデジタル出力である。デジタル出力の閾値は 16 ビットの整数で設定しており、設定値がそのまま mV 単位での閾値となる。ベースラインは 3800 mV である。ADC(Analog Devices, AD9212) は ASD ASIC アナログ波形出力を受け取り、 $2 V_{pp}$ の範囲を 1024 分割することで、10 ビットのデジタル信号として記録している。現行版 ASIC は Belle II 実験の Phase III 運転開始から 2022 年 6 月まで、記録・解析

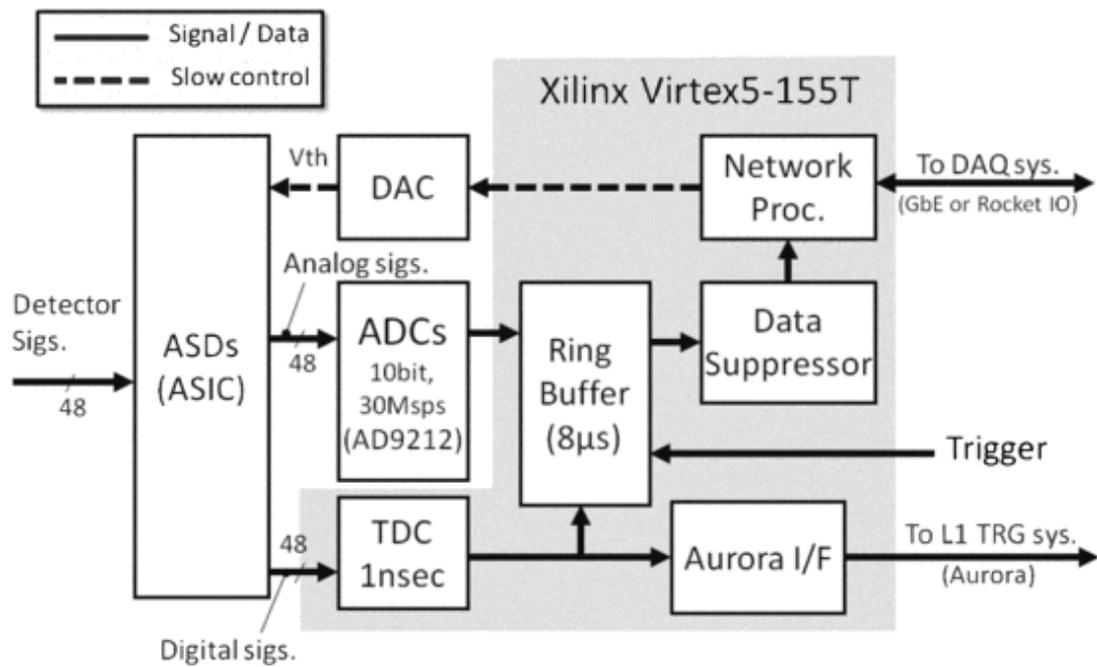


図13: 現行版読み出し回路のブロックダイアグラム [13]。

に支障を来たすことなく動作している。

4 改良版 CDC 読み出し ASIC の性能評価

本章では、前章で触れた CDC 読み出し ASIC のアップグレード計画と、改良版 ASIC の性能評価試験の結果について記載する。

4.1 読み出し ASIC アップグレードの目的・内容

CDC 読み出し回路は、2022 年 6 月の運転終了時点までは問題なく動作している。今後運転を続ける中で、下に述べるような改善が見込める。

- クロストーク波高の抑制
クロストークとは、あるチャンネルに信号を入力した際に、別のチャンネルからも信号が発生してしまう現象のことを指す。クロストークにより、荷電粒子が通過していない箇所に飛跡を検出してしまう、偽飛跡という現象が発生する。現在のルミノシティ $3.81 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ではこの偽飛跡は問題にならない。しかし今後ルミノシティを上昇するにつれ偽飛跡が増加すると、偽飛跡と真の飛跡とを区別できなくなり、トリガーの性能が悪化する、という問題が生じる。[20]
- 省電力化
回路の消費電力を抑えることはコストダウンに繋がる。現行版 ASD ASIC と ADC の消費電力は 1 チャンネルあたりそれぞれ 34 mW、100 mW である。[21, 22]

具体的なアップグレードの内容は以下の 3 点である。

- ダブルスレッシュヨルド機能の搭載
ダブルスレッシュヨルド機能とは、波高弁別器の信号に対する閾値 (スレッシュヨルド) を 2 つ設定することである。クロストークのような雑音によるヒットを減らすためには、閾値をよりベースラインから遠くに設定する必要がある。ところが信号が発生してからピークに達するまでの時間は有限時間であるため、図14に示すように、波高によってその信号が閾値をまたぐタイミングに差が生じる。これをタイムウォークと呼び、閾値がベースラインから離れるほど大きくなってしまふ。閾値を 2 つ設定することで図15のように、ベースラインから遠い方の閾値で雑音を落としつつ、近い方の閾値でタイムウォークによる時間情報の悪化を抑制することが可能となる。
- ASD 機能、ADC 機能を一枚のチップに統一
読み出し回路上の ASD ASIC と ADC チップを 1 枚の ASIC に統一する。これにより、回路の消費電力を削減できると考えられる。先行研究によると ASIC 一枚 (8 チャンネル) での消費電力は 205.6 mW [23]、つまり 1 チャンネルあたり 25.7 mW である。これは現行版の ASD と ADC を合わせた消費電力 134 mW の約 1/5 である。
- クロック周波数の高速化
現在 31.75 MHz である周波数を、約 2 倍の 62.5 MHz に上昇させる。これにより、エネルギーの分解能を向上させられる可能性がある。[13]

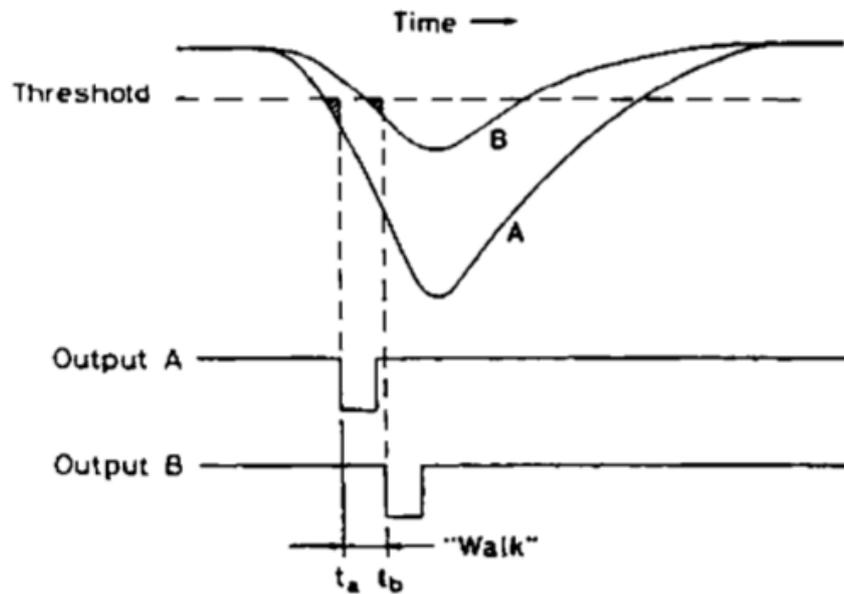


図14: タイムウォークの模式図。信号が発生してから閾値を越えるまでの時間は波高に依存する。この差は閾値がベースラインから遠いほど大きくなってしまふ。[17]

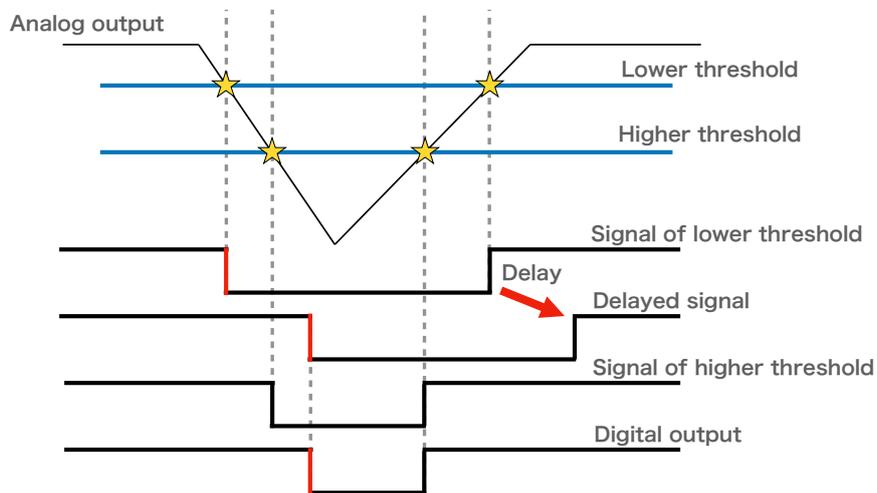


図15: ダブルスレッシュホールド機能の模式図。図上部の波形に対し2つの閾値 (Lower threshold, Higher threshold) を設定し、それぞれがデジタル信号 (Signal of lower threshold, Signal of higher threshold) を発する。ここで、Lower threshold に由来する信号に遅延をかける (Delayed signal)。Delayed signal と Signal of higher threshold のコイシデンスを取ったものが最終的な出力 (Digital output) となるが、遅延をかけたことにより、この信号の時間情報は Lower threshold に由来するもの (赤縦線) となっている。

4.2 改良版 CDC 読み出し ASIC

ASD と ADC を 1 枚にまとめた改良版 ASIC を 2019 年に製造した。ASIC の ASD 部分の 1 チャンネルのダイアグラムを図16に示す。図16上段の電荷増幅器 (Charge Sensitive Amplifier, CSA) で波形を増幅し、波形整形器 (SHaPer, SHP) で波形を整形する。整形された波形を、一方では S2D(Single-ended TO Differential converter) で差動信号に変換した上で ADC に入力した。他方は図16下段の波高弁別器に入力した。S2D はバッファとしても機能し、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。本論文では 0.7 倍に設定した。波高弁別器は 2 つの比較器 (ToF, TRIG) を持ち、両者の出力のコインシデンスを取ることでダブルスレッシュホールドを実現している。波高弁別器の閾値は 3.3 V を 10 ビットで区切って設定でき、ベースライン (0 V) には設定値 511 が対応する。ADC は、ベースライン ± 1.2 V の範囲を 10 ビットでデジタル化して出力する。

4.3 改良版 CDC 読み出し ASIC の性能評価

ASIC の基本的な性能であるゲインを、アナログ出力、デジタル出力の双方に対し測定した。加えて、アップグレードの目的の一つであるクロストークについて、その波高を測定し、現行版と比較した。性能評価試験のセットアップを図17に、このセットアップの写真を図18に示す。ASIC には波形生成器によるテストパルスを入力し、FPGA を介して各出力を PC に記録した。テストパルスの形状は 100 Hz の矩形波である。また ADC のクロックとして 62.5 MHz の矩形波を入力した。アナログ出力のゲインを測定する際には、テストパルスとクロックは同期している。デジタル出力のゲインとクロストーク波高を測定する際には、上記の 2 つに

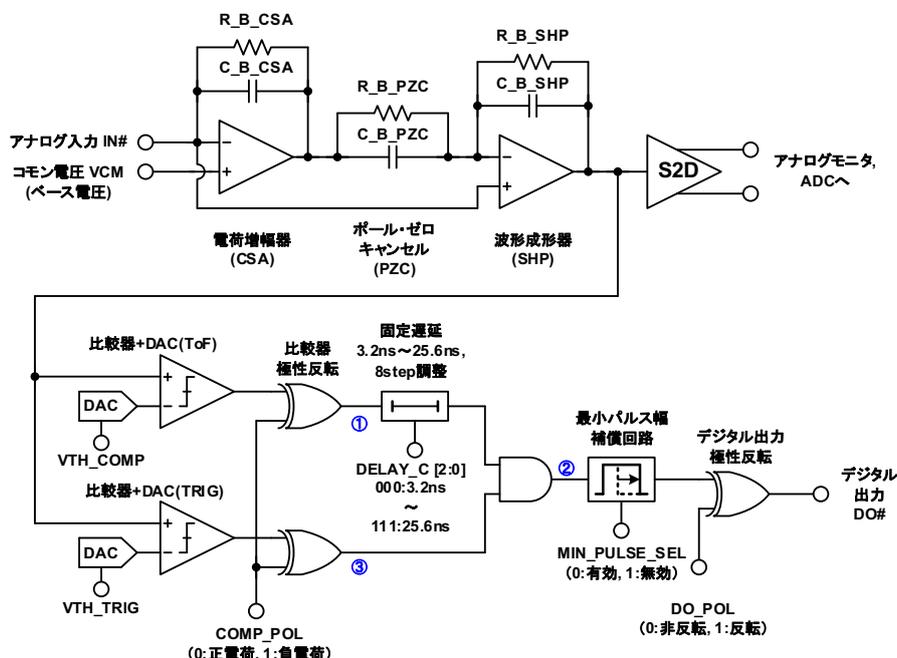


図16: ASIC の ASD 部分の 1 チャンネルのダイアグラム。上段が入力の増幅・整形、下段が波高弁別器の機能を果たす。[24]

加えて、データ記録用のトリガーとして 100 Hz の矩形波を入力した。このとき、クロック信号とトリガー信号とは同期しているが、テストパルスとは同期していない。ASIC の設計値を表2に示す。

4.3.1 アナログ出力のゲイン

読み出し ASIC に電荷を入力すると、アナログ出力として図19のような波形が出力される。この波形は、入力電荷が十分小さいうちは電荷に比例しながら波高が増加する。入力電荷が表2の線形領域を超えると波高が頭打ちとなり、立ち下がりに長い時間を要するようになる。波高が入力電荷と比例している領域において、そ

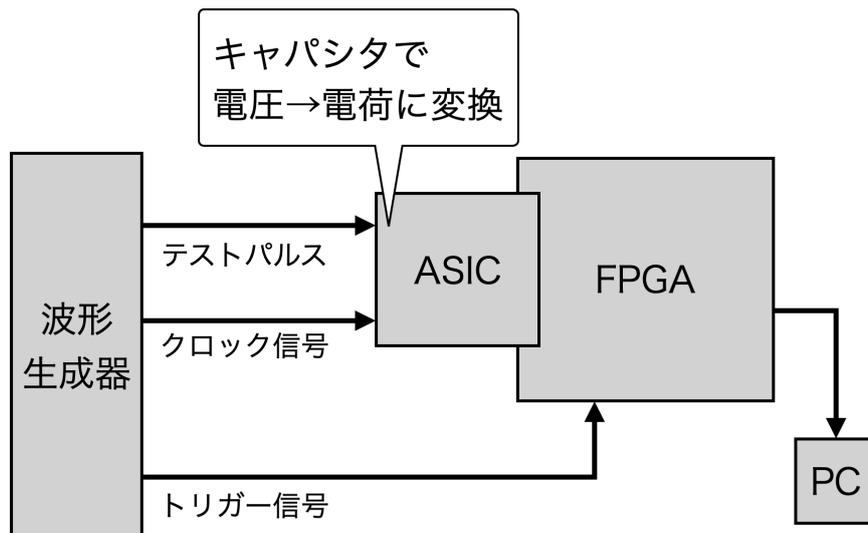


図17: 実験セットアップのダイアグラム

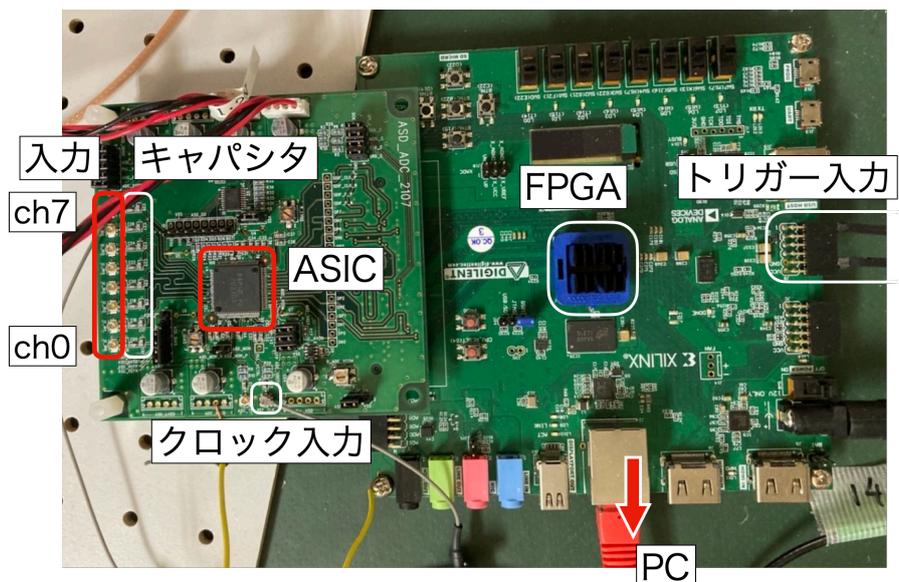


図18: 性能評価に用いた ASIC テストボード。

表2: 読み出し ASIC のアナログ・デジタル両出力の設計性能

	設計値
ゲイン	$1.02 \pm 0.02 \text{ V/pC}$
線形領域	$< 1.2 \text{ V/pC}$

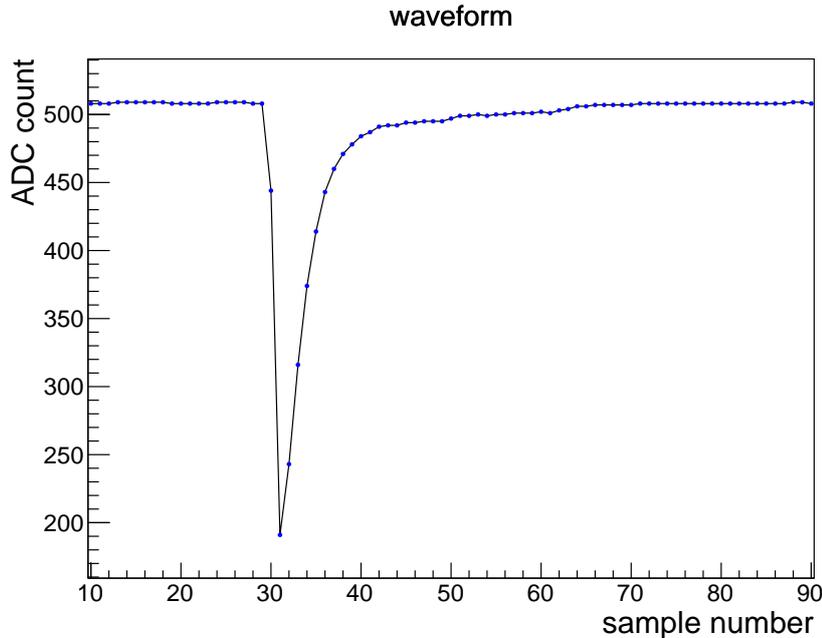


図19: 読み出し ASIC のアナログ出力波形。横軸 1 サンプルは 16 ns 間隔。

の比をアナログ出力のゲインとして測定し、測定結果を設計値と比較した。ここで、ADC のサンプリング間隔はサンプリング周波数の逆数 $1/62.5 \text{ MHz} = 16 \text{ ns}$ だが、16 ns は信号のタイムスケールと比較すると粗く、信号波形を正確に記録することができない。そこで、あるチャンネルにある電荷を入力した際の出力波高は、次のような工夫をして求めた。

1. 波形の測定

前述のように、アナログ出力について測定する際には、テストパルスとクロックを同期させている。そこで、テストパルスをクロックに対して 1 ns ずつ遅延させながら、ADC で処理された ASD のアナログ出力を記録した。これにより、図20のように、擬似的に 1 ns 間隔での波形サンプリングを行ったことになる。各遅延毎に 10,000 回の測定を行った。

2. 各遅延毎の波高の決定

10,000 個の波形それぞれに対して、ADC カウントの最小値を抽出した。この最小値をヒストグラムに詰め、ヒストグラムの最頻値をそのセットアップの波高 (に対応する ADC カウント) とした。

3. 入力チャンネル、入力電荷に対する波高の決定

手順2において求めた遅延毎の ADC カウントのうち、最小となる ADC カウントを選んだ。例えば図21では、ADC カウント 232 を選ぶこととなる。この ADC カウントとベースライン (511) との差を

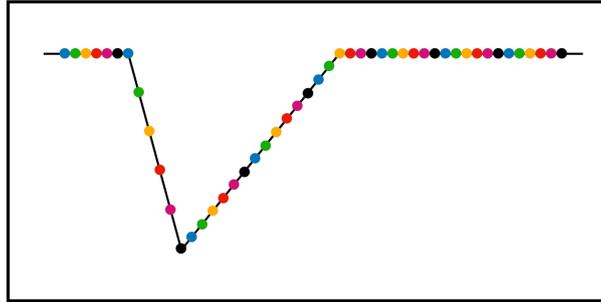


図20: 遅延をかけることで、擬似的に 1 ns 間隔での波形サンプリングを行う様子の模式図。遅延をかけずに波形を測定することは、この図のある 1 色の点しか測定しないことを意味する。波形とサンプリングクロックを同期させておくと、一方に遅延をかけることで全ての色の点を測定でき、より精密に波形をサンプリングすることができる。

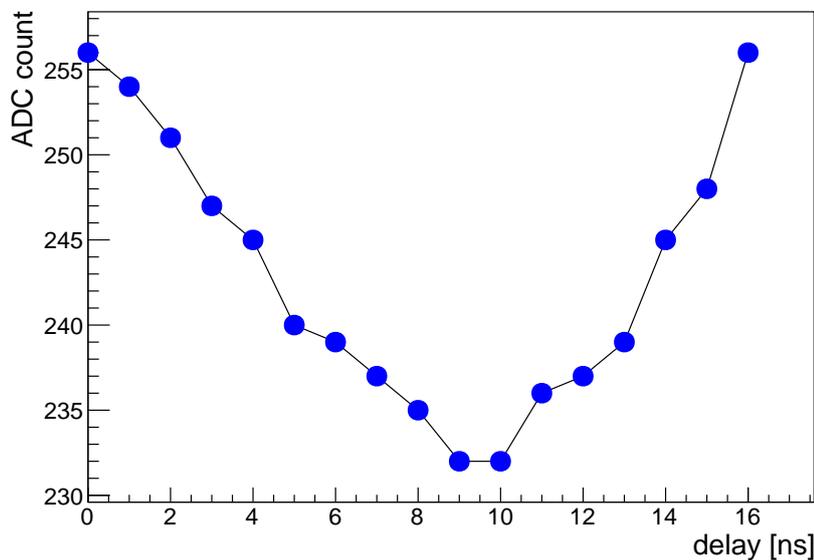


図21: 入力チャンネル 0、入力電荷 1.3 pC における遅延と波高 (に対応する ADC カウント)。遅延が 9, 10 ns である時の ADC カウント 232 を用いて、この入力チャンネル・入力電荷における波高を計算する。

取り、電圧に換算することで波高を求めた。換算には次の式を用いた。

$$(511 - [\text{ADC count}]) \times \frac{2.4 \text{ mV}}{1024} \times \frac{1}{0.7}$$

2.4 mV/1024 はベースライン ± 1.2 mV を 10 ビットでデジタル化していることに対応する。
1/0.7 は図16の S2D の倍率に対応する。

波高の各点における誤差には、最小となる ADC カウントのヒストグラムの標準偏差を用いた。なお、ADC カウントが最小となる遅延の値が複数ある場合は、それらのヒストグラムの標準偏差のうち、最大値を採用した。例として、図21のセットアップに対して誤差を計算する。ADC カウントが最小とな

るのは遅延が 9, 10 ns となるときであったため、図22a, 22bに示すそれぞれのヒストグラムを確認する。各ヒストグラムの標準偏差は 1.874, 1.908 であるため、これらのうち大きい方を選び、誤差は ADC カウントにして 1.908 とした。誤差も波高と同様に、 $(\text{ヒストグラムの標準偏差}) \times \frac{2.4 \text{ mV}}{1024} \times \frac{1}{0.7}$ として電圧に換算した。

チャンネル 0～チャンネル 7 の 8 チャンネルに対して、入力電荷は 0.5 pC から 2.0 pC まで 0.1 pC 刻みで、遅延は 0 ns から 16 ns まで 1 ns 刻みで測定した。

各チャンネルの入力電荷-出力波高の関係を図23に示す。フィッティングには ROOT [25] の TFit を用いた。ゲイン、ベースラインの誤差は TFit で計算した結果である。図23より、入力電荷 < 1.1 pC の領域では波高は入力電荷に比例しており、それ以上の領域では波高の増加が抑えられていることが読み取れる。全てのチャンネルについてのゲインを図24にまとめた。8 つのチャンネルのゲインの平均値は 0.71 V/pC であり、設計値より小さくなった。

4.3.2 デジタル出力のゲイン

読み出し ASIC のデジタル出力として、図25のような波形が発生する。この波形のように、デジタル出力が Low となる現象をヒットと定義する。ここで、アナログ波形の頂点が閾値付近に存在すると、信号の電氣的雑音によって、同じ測定条件でも波高が閾値を上回る場合と下回る場合がある。そこで、同じ測定条件の下で 10,001 回測定を行い、デジタル出力の検出効率を以下のように定義した。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{デジタル出力にヒットした回数}}{\text{全測定回数 (=10,001)}}$$

入力電荷を固定し閾値を変化させることで、図26のような閾値に対する検出効率のグラフを描くことができる。このグラフの立ち上がりを求めることで、入力電荷と閾値を対応させることができる。具体的な方法は次の通りである。まず、検出効率が 0.5 を上回り 0.5 に最も近い点と、0.5 を下回り 0.5 に最も近い点の 2 点を選ぶ。続けてこの 2 点間を直線で結び、直線上で検出効率が 0.5 となる点を求める。この点の横軸の値を、入力電荷に対応する波高として決定する。閾値は前述の通り 3.3 V を 10 ビットで分割する形で設定しているため、こ

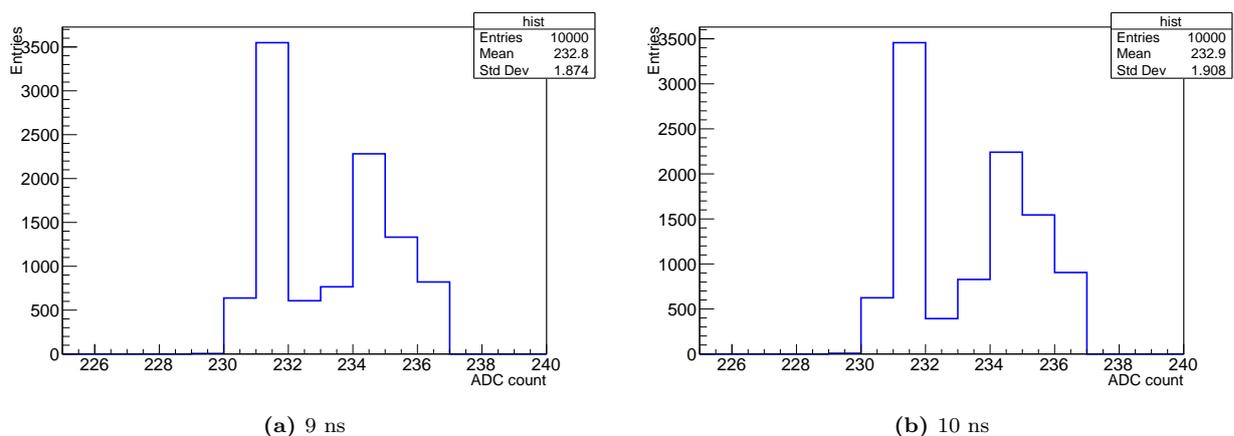


図22: 入力チャンネル 0、入力電荷 1.3 pC、遅延 9, 10 ns における手順2で触れたヒストグラム。10 ns のヒストグラムの標準偏差 (Std Dev) の方が大きいため、その値 1.908 を誤差 (に対応する ADC カウント) として採用する。

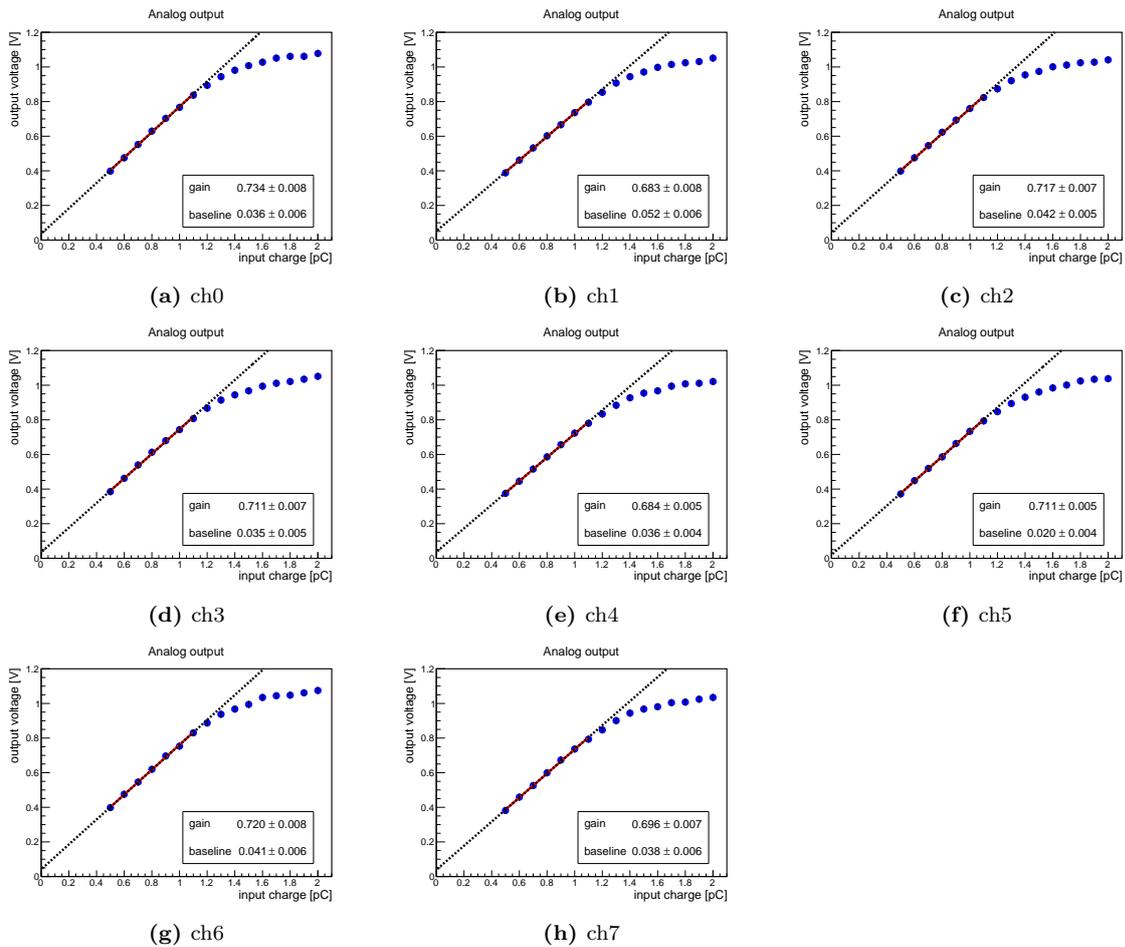


図23: 入力電荷とアナログ出力波高の関係

の関係をjいて電圧に変換することができる。こうしてデジタル出力についても、入力電荷と波高弁別器に入力された信号の波高とを対応づけることができる。両者の比をデジタル出力のゲインとして測定し、設計値と比較した。設計値は表2に示されたアナログ出力と同様である。チャンネル0～チャンネル7の8チャンネルに対して、入力電荷は0.1 pCから最大1.8 pCまで0.1 pC刻みで測定した。チャンネルによっては入力1.8 pCになるまでに閾値が下限の0カウントまで到達するため、その時点で測定を打ち切った。

各チャンネルの入力電荷と出力電圧の関係を図27に示す。各点には波形弁別器0.5カウント分の誤差が付与されている。フィッティングにはROOTのTFitを用いた。ゲイン、ベースラインの誤差はTFitで計算した結果である。図27より、入力電荷 < 1.2 pCの領域では波高は入力電荷に比例していることが読み取れる。アナログ出力と異なり、入力電荷が1.2 pCを超えると、波高がより高くなる結果となった。全てのチャンネルについてのゲインをまとめたのが図28である。8つのチャンネルのゲインの平均値は0.92 V/pCであり、設計値より小さくなった。

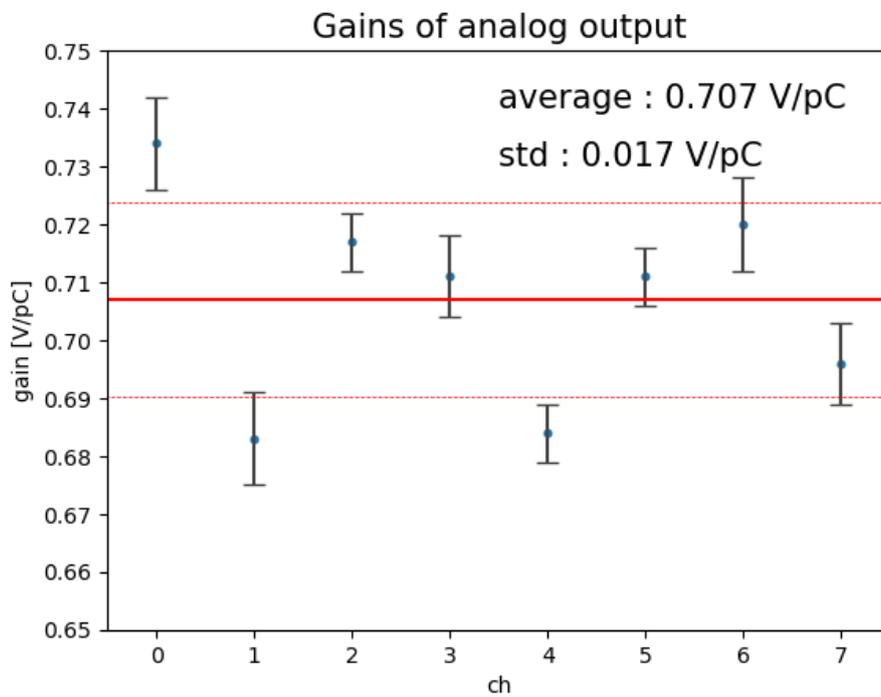


図24: 各チャンネルのアナログ出力のゲイン。誤差は TFit により計算したもの。赤線が全チャンネルの平均値、破線が8つのデータの標準偏差に対応する。

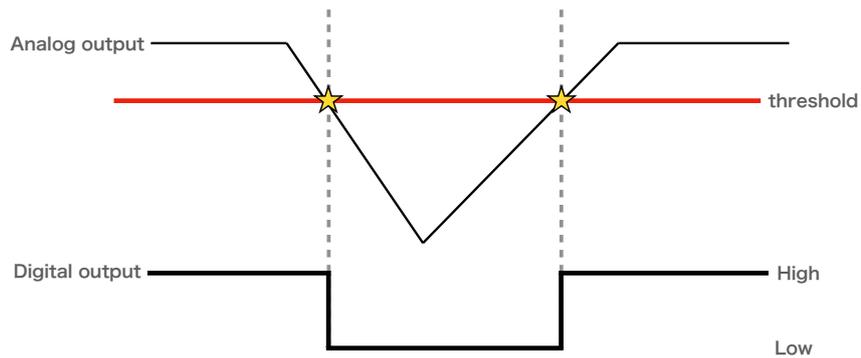


図25: 読み出し ASIC のデジタル出力波形の模式図 (下)。アナログ波形が閾値を越えている間、デジタル出力は Low となる。

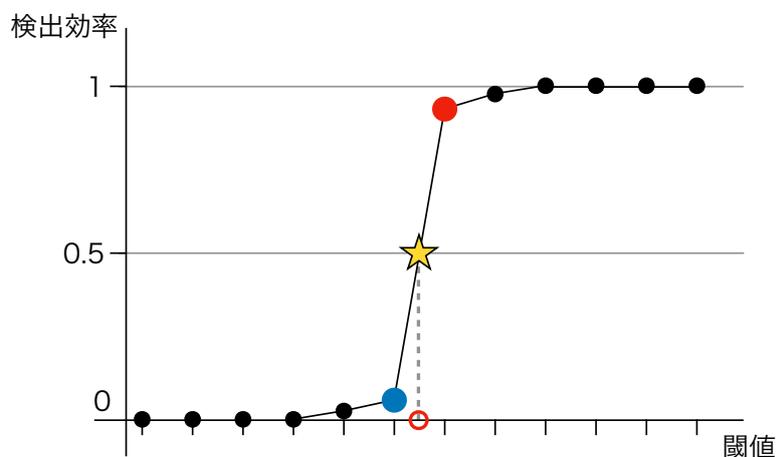


図26: 閾値に対する検出効率のグラフの模式図。検出効率が 0.5 を上回り 0.5 に最も近い点 (赤点) と、0.5 を下回り 0.5 に最も近い点 (青点) を選び、両者を直線で結ぶ。この直線と 検出効率 = 0.5 を示す直線との交点 (星印) を求める。この交点が入力電荷に対応する閾値 (赤丸) となる。

4.3.3 クロストーク波高

クロストーク波高の測定は、デジタル出力のゲイン測定と同様に行った。つまり、クロストークの検出効率を閾値毎に測定し、図26と似たグラフを描くことでクロストークの波高を決定した。今回は、チャンネル0に電荷を入力した際の、チャンネル1～チャンネル7の7チャンネルからのクロストーク出力を測定した。チャンネル0への入力電荷は1 pC から5 pC まで1 pC 刻みで、また10 pC から50 pC まで10 pC 刻みで、計10種類の入力電荷に対して測定した。

チャンネル0の入力電荷と他のチャンネルに現れるクロストーク電圧の関係を図29に示した。入力 < 5 pC と > 10 pC とでクロストークの発生源が異なる。入力 < 5 pC のクロストークはデジタル出力に、入力 > 10 pC のクロストークはアナログ出力に由来する。チャンネル0への入力50 pC に対するチャンネル1のクロストーク電圧は～50 mV である。チャンネル2～7のクロストークは、チャンネル0への入力50 pC の時にも、たかだか～15 mV である。

4.4 考察

改良版 ASIC の性能評価結果を表3に示す。

ゲインについて、アナログ出力、デジタル出力ともに設計値より小さな値となった。設計値との差異が生じる原因としては、プロセスばらつき (製造時に生じる各構成要素の特性の差異) や、寄生容量 (回路の構造により設計段階では意図せぬ箇所に導体-絶縁体-導体がこの順で並び、コンデンサの役割を果たしてしまうこと)、が考えられる [26]。ゲインのチャンネル依存性は設計値以内となっている。また、線形領域外で、デジタル出力が上方向にシフトする現象が確認された。これは波高弁別器が正常に動作する入力電圧領域に制限があるた

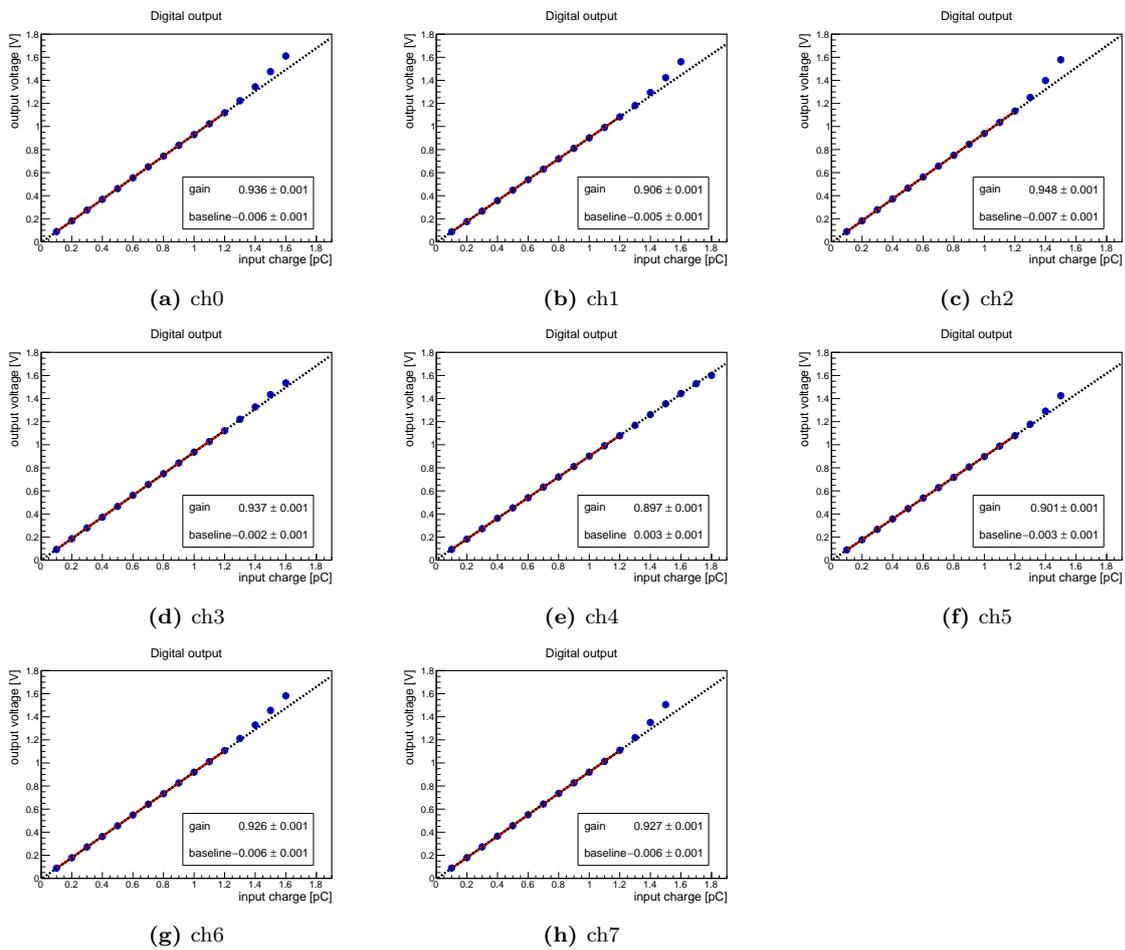


図27: 入力電荷とデジタル出力電圧の関係。各点には波形弁別器 0.5 カウント分の誤差が付与されている。

表3: 性能評価項目

ASIC	現行版 ASD	新 ASIC(設計値)	新 ASIC(測定値)
アナログ出力のゲイン	1.1 V/pC	1.02 V/pC	0.71 V/pC
アナログ出力の線形領域	< 0.4 pC	< 1.2 pC	< 1.1 pC
デジタル出力のゲイン	7.5 V/pC	1.02 V/pC	0.92 V/pC
デジタル出力の線形領域	-	< 1.2 pC	< 1.2 pC
クロストーク	入力 7 pC, 出力 100 mV	-	入力 50 pC, 出力 50 mV

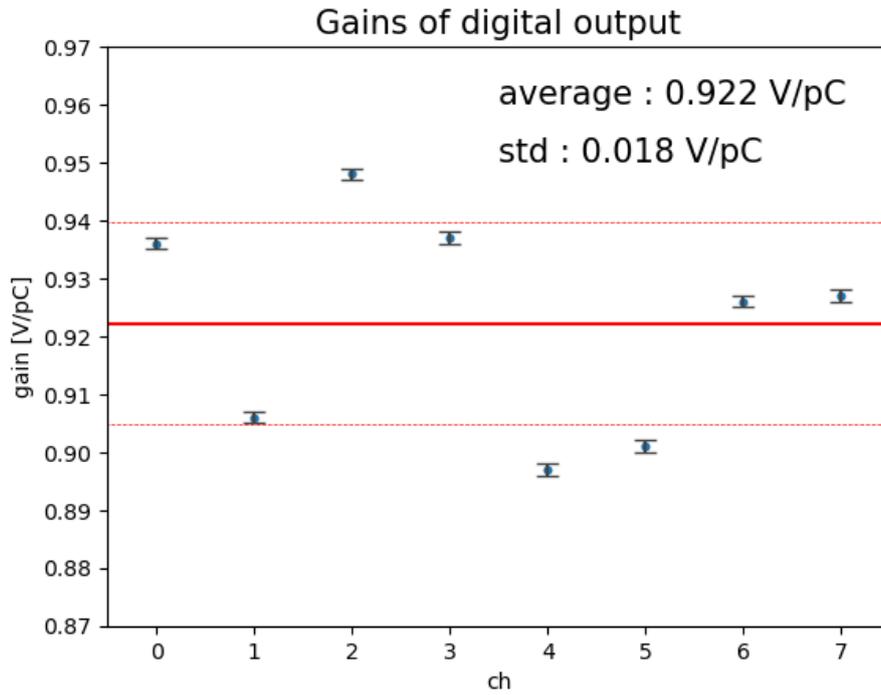
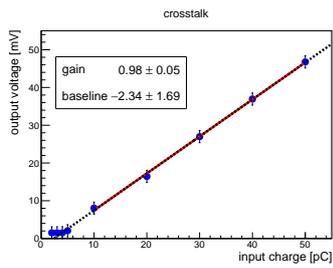


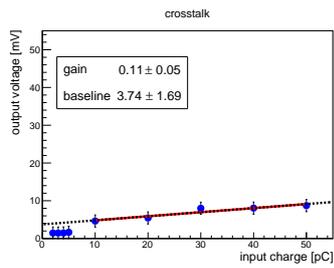
図28: 各チャンネルのデジタル出力のゲイン。誤差は TFit により計算したもの。赤線が全チャンネルの平均値、破線が8つのデータの標準偏差に対応する。

めである [26]。

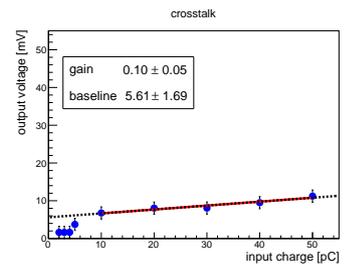
クロストーク出力について、出力が波高弁別器 1 カウント (~ 3.3 mV) よりも十分大きな領域では、入力電荷に比例することが言えた。入力 50 pC に対し出力 50 mV という値 (入出力比 1 mV/pC) は、現行版の入力 7 pC、出力 100 mV (入出力比 14 mV/pC) [27] と比較して 10 倍以上改善されている。チャンネル 0 に入力を与えた際に、チャンネル 1 のクロストーク出力が他のチャンネルより大きくなることより、クロストークは隣接するチャンネル間で発生しやすいことが推測される。



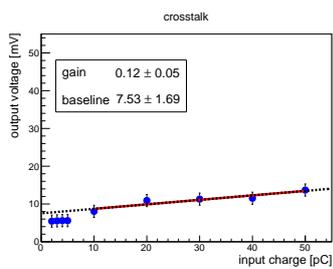
(a) ch1



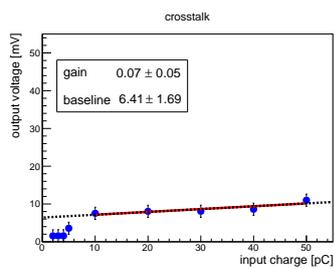
(b) ch2



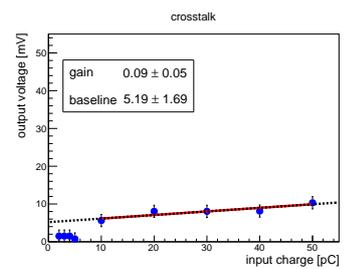
(c) ch3



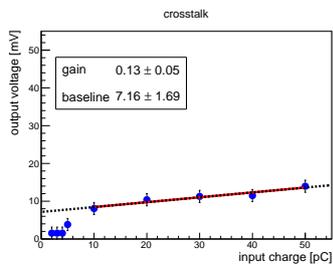
(d) ch4



(e) ch5



(f) ch6



(g) ch7

図29: チャンネル0の入力電荷とクロストーク電圧の関係。各点には波形弁別器 0.5 カウント分の誤差が付与されている。

5 飛跡の再構成を通じた改良版 CDC 読み出し回路の性能評価

本章では、新しく開発した ASIC を実装した改良版 CDC 読み出し回路の性能評価試験と、その結果について述べる。性能評価試験として、2022年11月15日に高エネルギー加速器研究機構 Proton Factory Advanced Ring (PF-AR) 南棟のテストビームラインで、電子ビームによるテストが行われた。[28] 信号の読み出しには、改良版読み出し回路 (RECBE-MkII) と現行版読み出し回路 (RECBE) の双方を用いた。両者の測定結果を比較して、RECBE-MkII の性能が Belle II 実験での実用に足りるか評価した。著者は本実験には参加しておらず、測定データを用いた解析のみを行った。

5.1 測定セットアップ

図30は、本測定を行った PF-AR の写真である。ここに図31のようなセットアップを組み、測定を行った。各々の詳細を下に記す。

- ドリフトチェンバ

本実験では、図32のドリフトチェンバを使用した。このチェンバは、13.5 cm × 13.5 cm × 49.5 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製のセンスワイヤー 44 本を図33のように張った。センスワイヤーには 2.37 kV の電圧を印加した。図33の青枠は1つのセルを表し、このセルのサイズは 15 mm × 15 mm である。セルの頂点並びに各辺の中点には、アルミニウム製のフィールドワイヤーが張られている。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 μm で、どちらも Belle II CDC と同じである。[3]

- ガス

チェンバ内部を充填するガスは Belle II CDC と同じ He(50%)-C₂H₆(50%) 混合ガスである。混合ガスは、流速 20 cc/min で流入させた。

- 読み出し回路

チェンバからの信号を読み出す回路として RECBE-MkII と RECBE を用いた。図34が RECBE-MkI

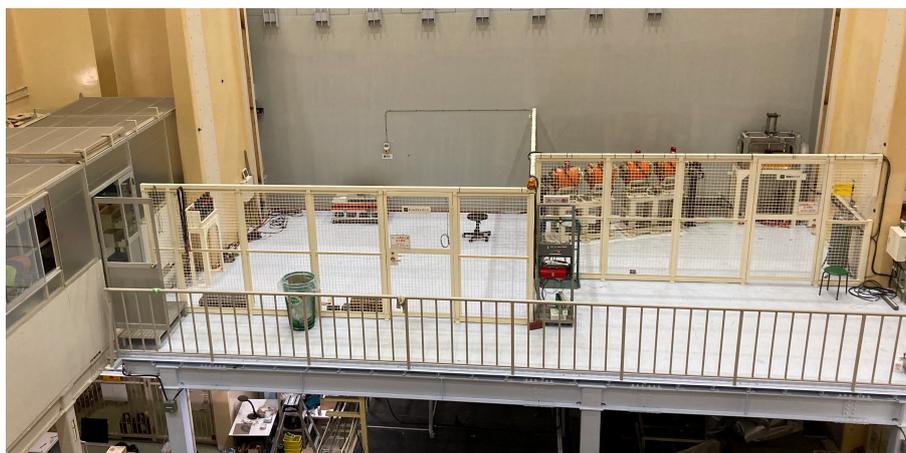


図30: PF-AR の南棟のテストビームライン。

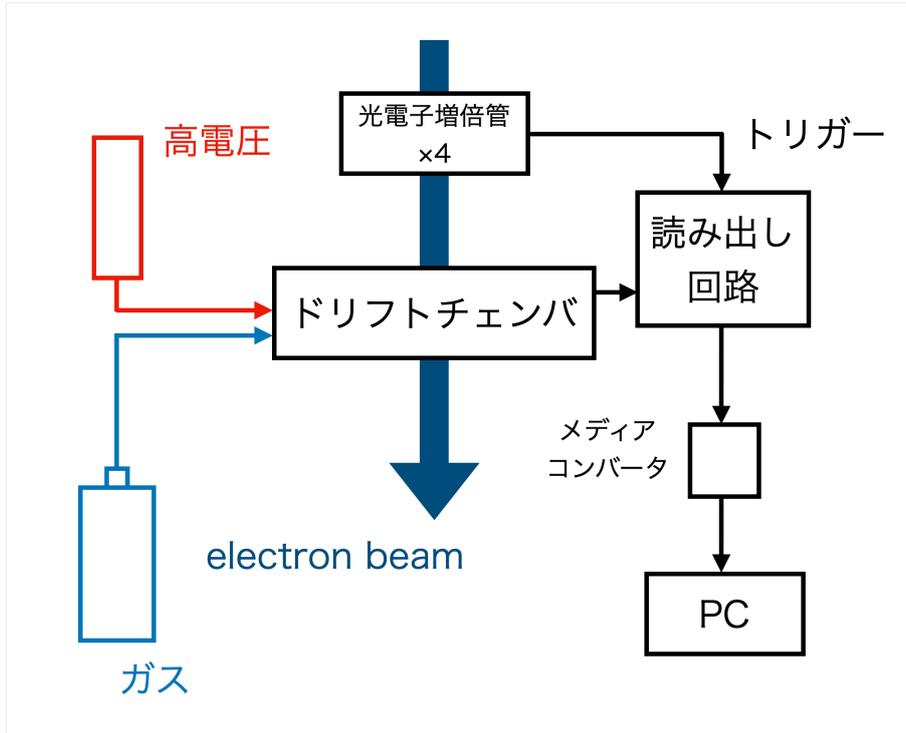


図31: 測定セットアップ (模式図)

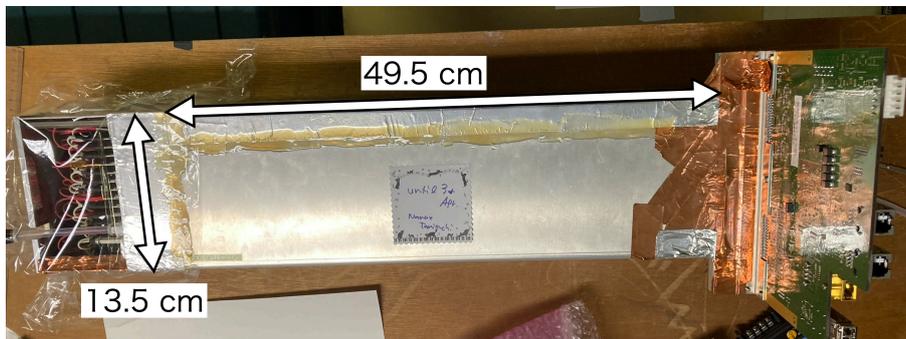


図32: ドリフトチェンバ。チェンバ内部には図中横方向にワイヤーを張った。図中縦方向にビームを入射した。図中右の緑色の板が読み出し回路。

I の写真である。現行版読み出し回路である RECBE については、3.3節で説明した。RECBE-MkII には、4章で触れた ASIC を 6 枚実装している。RECBE-MkII の設定は次の通り。

- 1 イベントあたりのサンプル数：127
- 閾値の設定値：508
ベースラインから 9.9 mV に対応する。
- デジタル出力のゲイン：0.92 V/pC

RECBE の設定は次の通り。

- 1 イベントあたりのサンプル数：33
- 閾値の設定値：3750

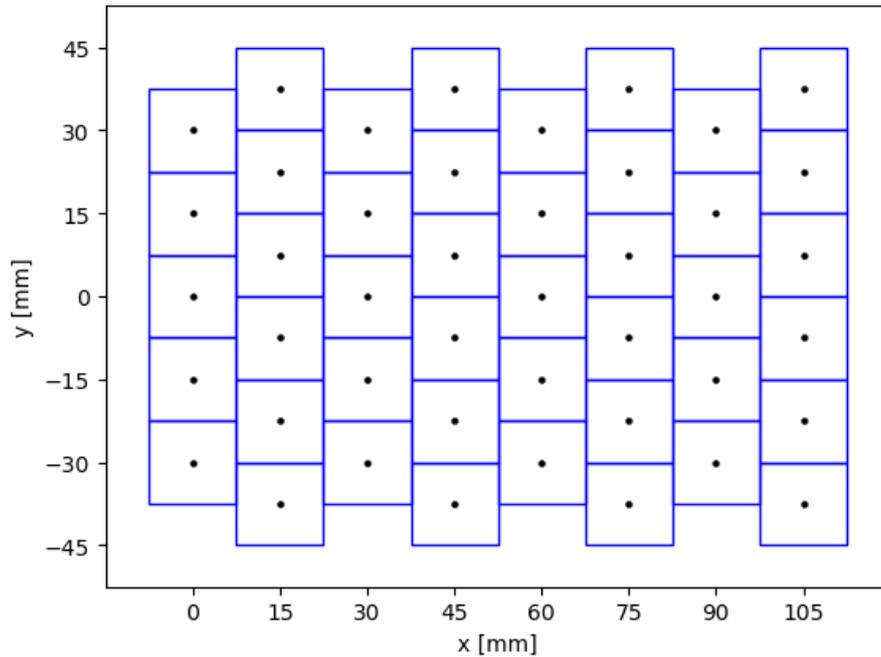


図33: チェンバ内のワイヤー配置。青枠が1つのセルを、黒点がセンスワイヤーを表す。

ベースラインから 50 mV に対応する。

– デジタル出力のゲイン : 7.5 V/pC

- 電子ビーム

PF-AR では高エネルギーの電子が周回している。この電子をワイヤー標的に衝突させることでガンマ線を発生させ、ガンマ線を更にコンバータに衝突させることにより、リングから電子を取り出すことができる [30]。ビームは実験室に取り込まれた後、図35に示す4つの四重極磁石によって絞られ、標的に照射される。今回使用したビームのエネルギーは3 GeV である。

- トリガー

実験室にある四重極磁石の前後に、図36のように2つずつ、計4個のプラスチックシンチレータと光電子増倍管 (PMT, PhotoMultiplier) が設置されている。PMT の信号をディスクリミネーターでデジタル信号に変換し、コインシデンスを取ってトリガー信号とした。

- 高電圧電源

実験中、ワイヤチェンバの陽極ワイヤーには 2.37 kV の高電圧を印加した。電源装置として、図37のサトウ電子の MODEL HV-02 を使用した。

RECBE、RECBE-MkII に対して、それぞれ 100,000 イベントずつ測定した。

5.2 測定データの解析手順

本節では、測定データを用いて読み出し回路の性能を定量的に導出するまでの手段について説明する。

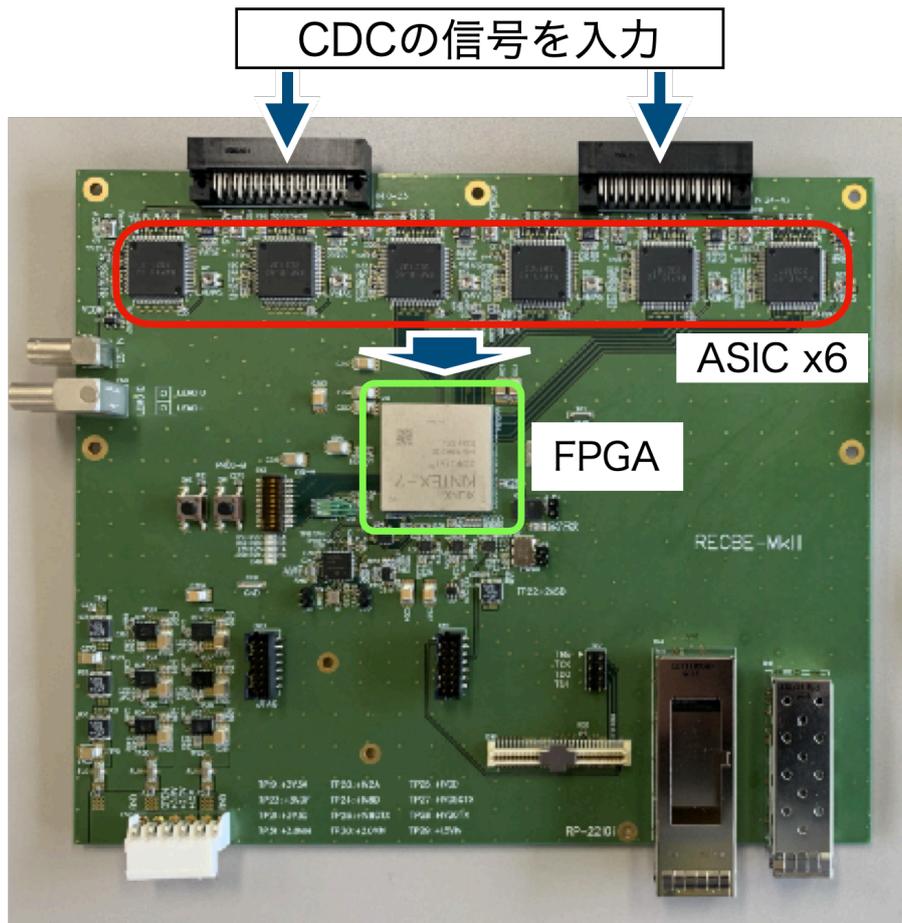


図34: RECBE-MkII。上部から CDC の信号を入力する。図上部の黒いチップが改良版 ASIC [29]。

5.2.1 測定データのフォーマット

読み出し回路は、各イベント毎に図38に示す情報を記録している。ADC については、4.2節で述べた。また、1 GHz のリングカウンタが動作している。このリングカウンタが示す値は 1 ns 毎に 1 ずつ増加していき、クロックのような役目を果たす。TDC は、デジタル出力にヒットが生じると、そのタイミングのリングカウンタの値を記録する。この値が記録されるのは、波形が閾値を越えた後の最初のクロック信号のタイミングである。それ以外のクロック信号のタイミングでは、TDC の値は 0 を記録する。加えて、トリガー信号が発生したタイミングのリングカウンタの値も記録している。

5.2.2 解析のフローチャート

図39の手順により飛跡の再構成を行った。手順の詳細を以下に述べる。手順3～手順8を 5 回繰り返した。この繰り返しを以後、Iteration と呼ぶ。

1. 時間情報のオフセットの決定

荷電粒子により電離された電子のドリフト時間は、TDC ヒットとトリガー信号のタイミングとの差を取れば求まるように思われる。しかし、トリガー信号には遅延がかけられているため、これがオフセッ



図35: 4つ並べられた四重極磁石。図右側がビームの上流。左右にPMTが設置されている。

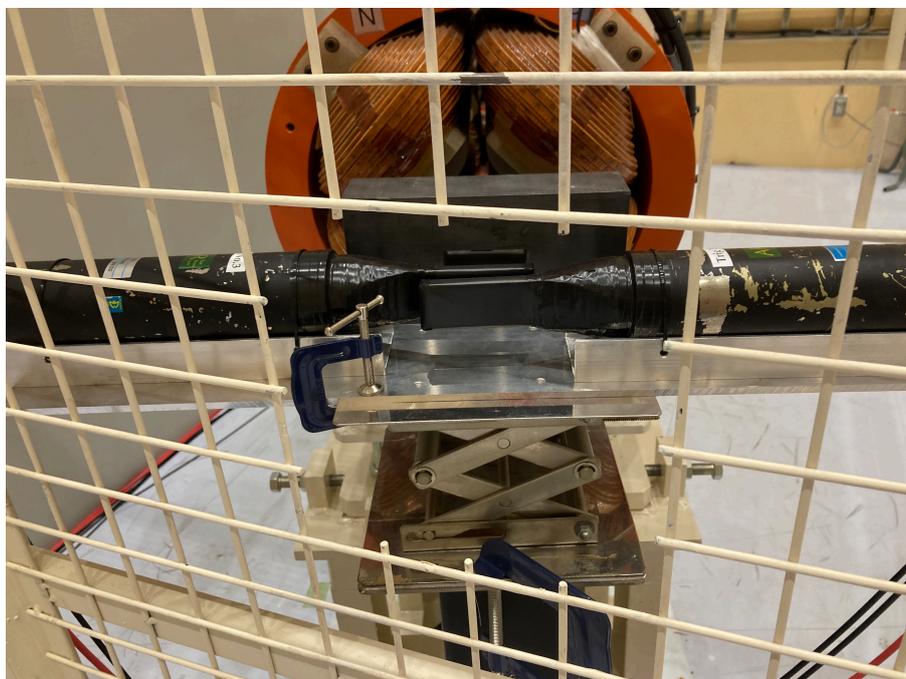


図36: 四重極磁石の下流側のプラスチックシンチレータとPMT

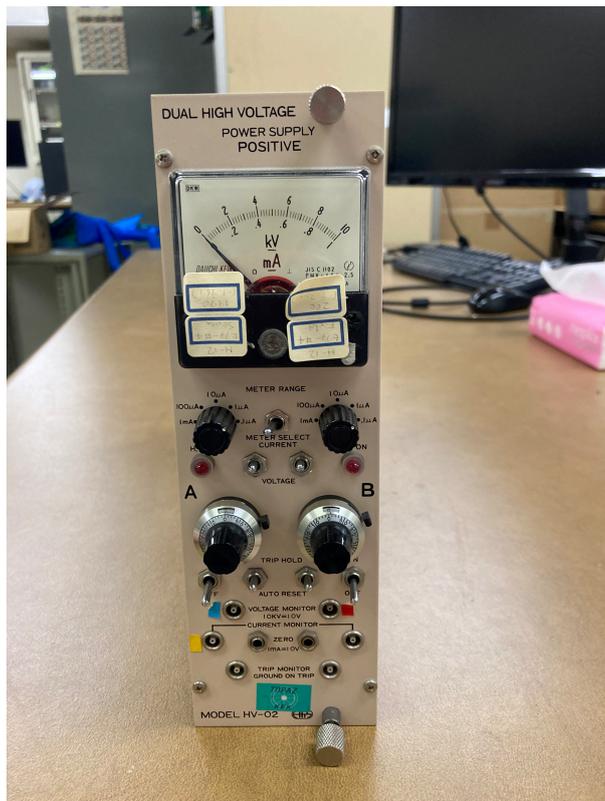


図37: 高電圧の印加に用いた電源装置

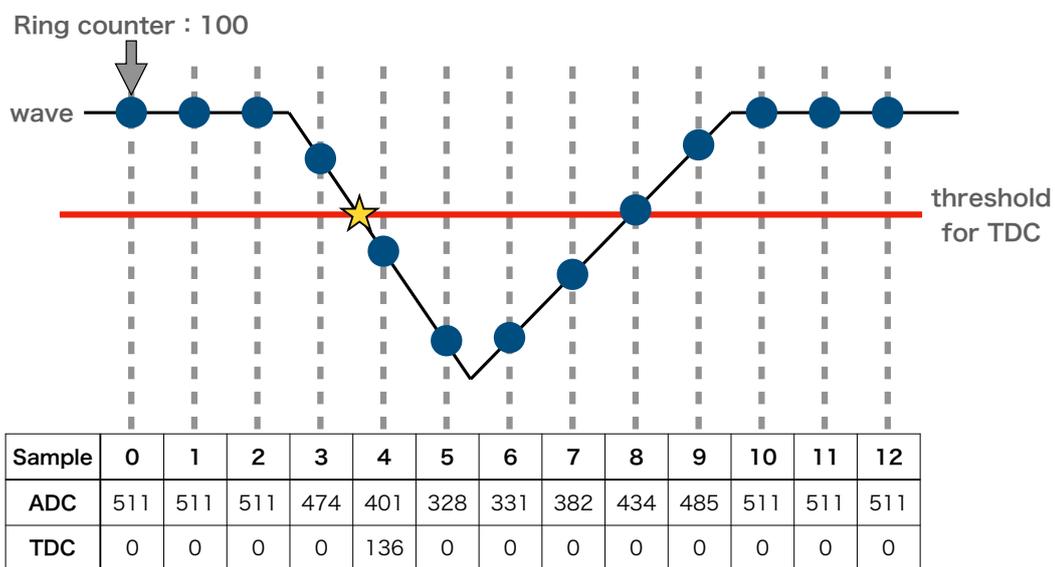


図38: イベントディスプレイ。ADC は波形を、TDC は波形が閾値を (図中上から下に) 越えたタイミングの時間情報を記録する。

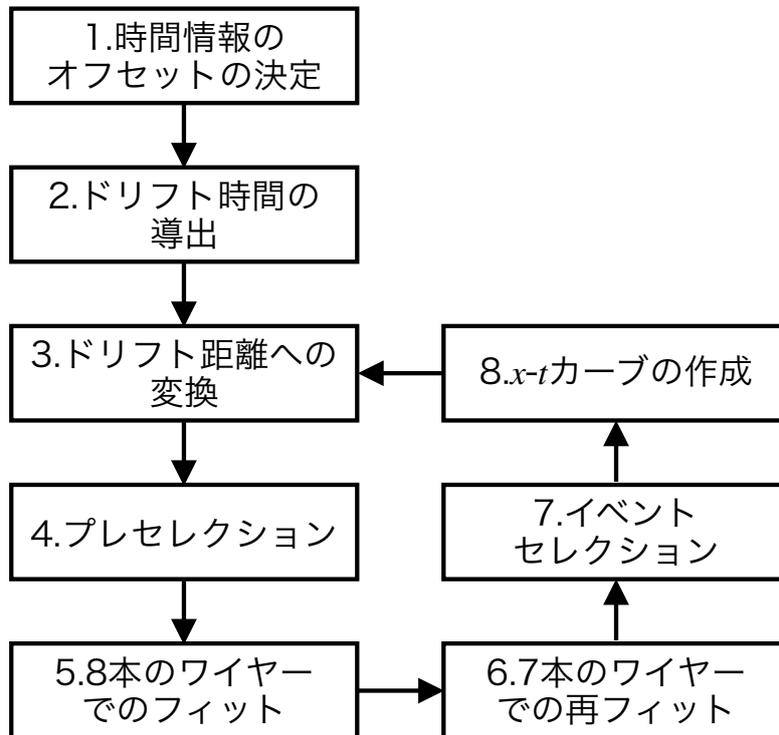


図39: 解析のフローチャート

トとなっている。最初の TDC ヒットのタイミングからトリガータイミングを引いた値のヒストグラムを作成したものが図40である。

図40のヒストグラムに対して、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。

2. ドリフト時間の導出

前項の方法により求めた時間情報のオフセット値を用い、ドリフト時間を、

$$(\text{TDC ヒットのタイミング}) - (\text{トリガータイミング}) - (\text{オフセット})$$

のようにして求めた。

3. ドリフト距離への変換

求めたドリフト時間を手順8で求める関数に代入してドリフト距離へと変換した。この関数は Iteration の度に更新されるが、初期設定は $x [\text{mm}] = 0.027 t [\text{ns}]$ とした。初期設定は Garfield のシミュレーションから決定した。[31]

4. プレセクション

飛跡の再構成を行うにあたって、以下を仮定する。

- 1 度のイベントにおいて、チェンバを通過する荷電粒子は 1 つだけである。
- 荷電粒子の飛跡は直線である。

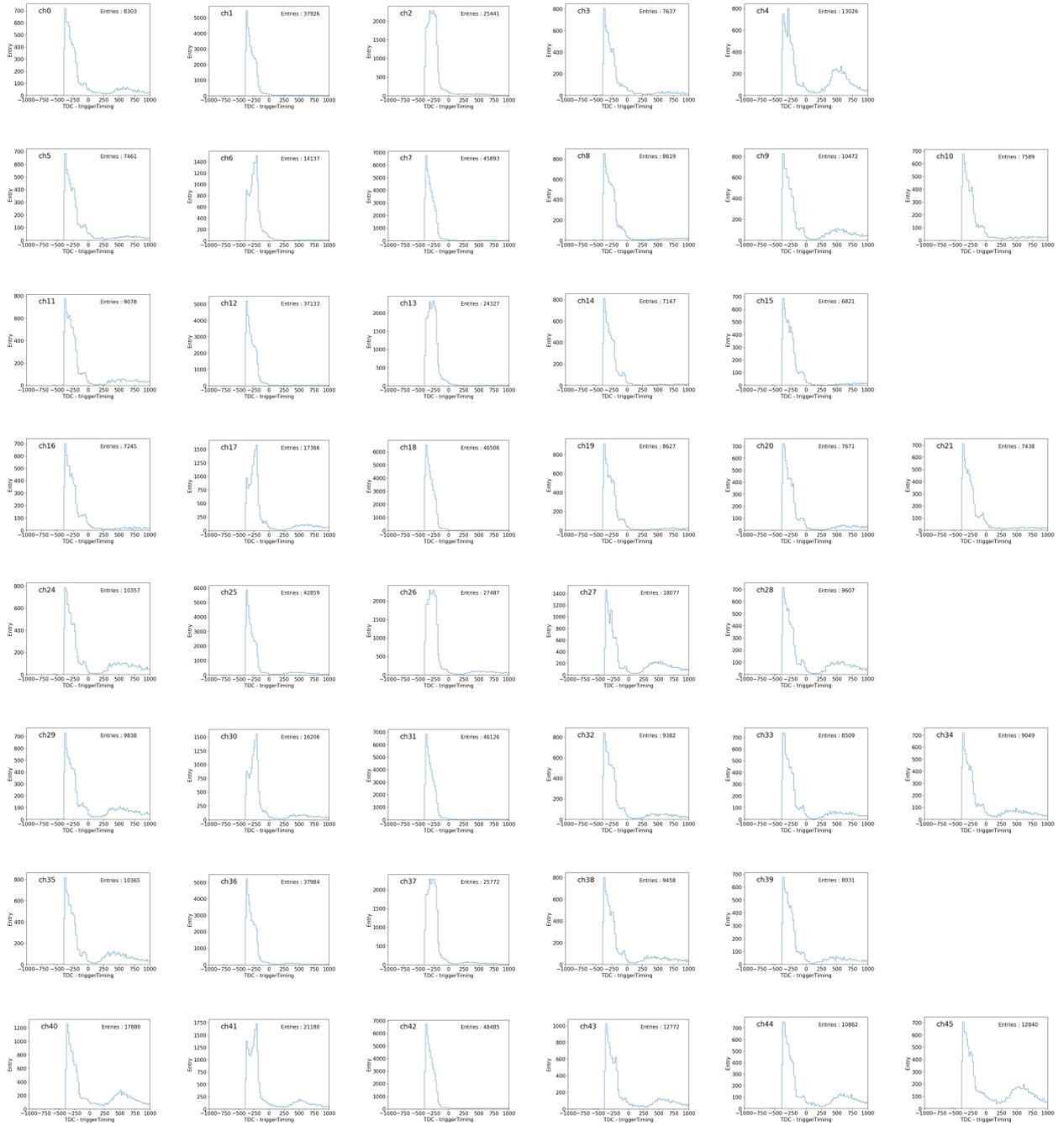


図40: RECBE-MkII 各チャンネルのTDC-トリガータイミングの分布

チェンバの8レイヤ全てに、1個ずつのヒットがあるイベントを選定し、その他のイベントを除外して解析を行った。具体的な例を挙げると、図41aは選定条件を満たすが、図41b, 41c, 41dのイベントは条件を満たさないため、解析において除外した。さらに、全てのワイヤーヒットに対して、ドリフト距離が正であるという条件を課した。

5. 8本のワイヤーを用いた飛跡のフィット

荷電粒子の飛跡は、理想的には、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した円(ドリフトサークル)を描いたとき、これら全ての円に接する直線となる。飛跡をドリフト距離から再構成するために、式1のように評価関数を設定した。

$$\text{Eval}(a, b) = \sum_{i=0}^7 \text{res}_i^2 = \sum_{i=0}^7 \left(r_i - \frac{|ax_i - y_i + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \right)^2 \quad (1)$$

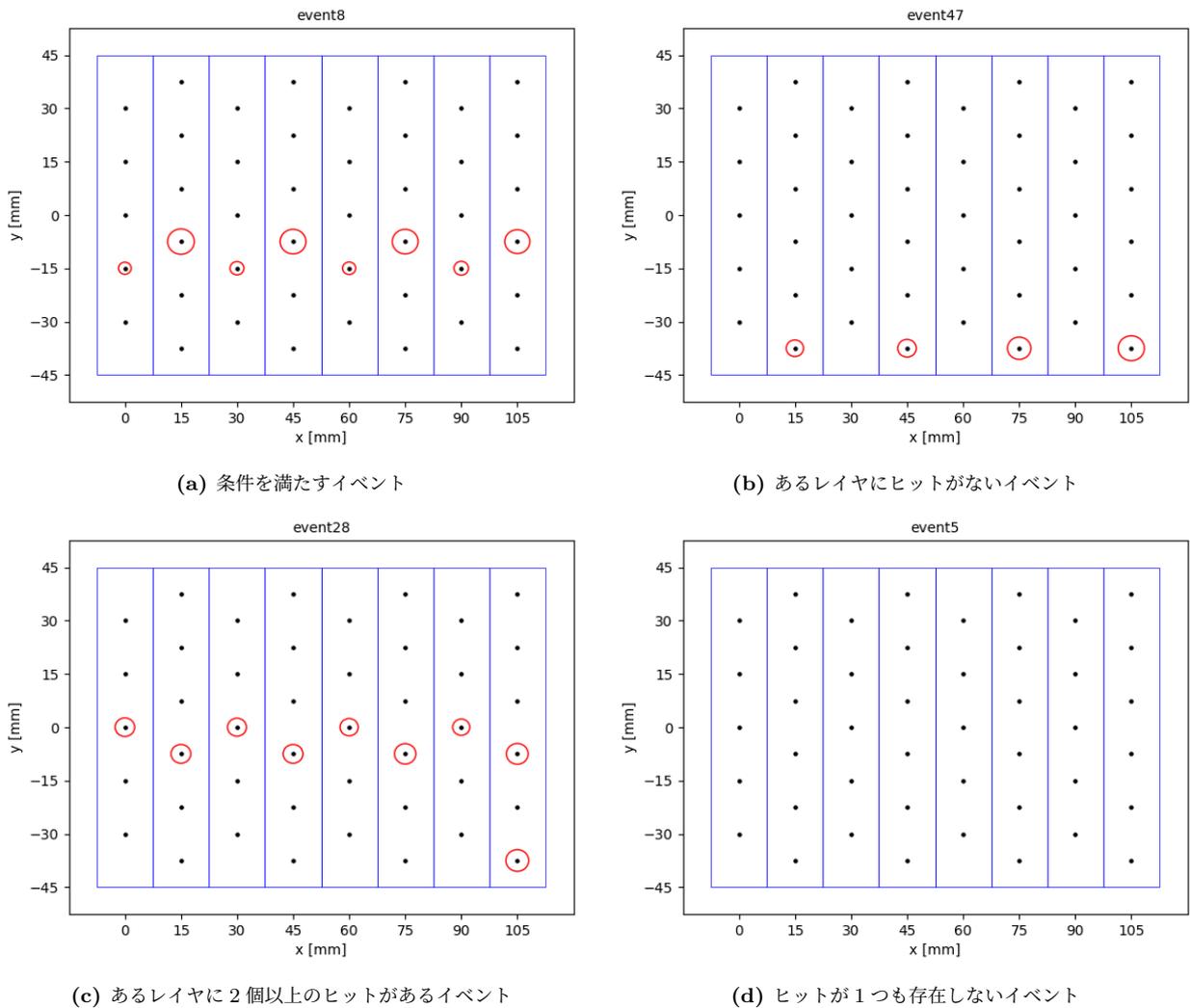


図41: ワイヤーヒットによるプレセクション。(a)のみを解析に用いる。

x_i, y_i : i 番目のワイヤーの (図33における) 座標
 r_i : i 番目のワイヤーのドリフト距離
 a, b : (図33の座標系における) 直線 $y = ax + b$ の傾き、切片
 res_i : i 番目のワイヤーの残差 (RESidual, 5.2.3節で触れる)

この評価関数は、ワイヤー-飛跡間の距離とドリフト半径の差を二乗し、ヒットのあったワイヤーについて足し上げたものである。この関数は必ず0以上の値を取り、その値が0に近ければ近いほど再構成の精度が良いと言える。そこで iMinuit [32] という Python のライブラリを用いて評価関数を最小化し、飛跡を再構成した。評価関数を最小化する a, b によって決定される直線を飛跡とした。

6. 7本のワイヤーを用いた飛跡の再フィット

読み出し回路の性能評価には、各ワイヤーの残差 (5.2.3節で触れる) を用いる。残差を求めるために注目するワイヤー (以下、テストワイヤーと呼ぶ) を含めて再構成を行うと、読み出し回路の性能を過大評価してしまう。この問題を回避するために、テストワイヤーを除いた7本のワイヤーで飛跡を再構成し、この飛跡を用いて残差を求めた。

再フィットを行うにあたり、ドリフト距離の小さなワイヤーにおいて、再構成された飛跡がドリフトサークルの上下どちらを通るか正しく決定できないという問題が生じる。この問題を回避するため、8本のワイヤーでのフィット結果からこの上下の情報を抽出し、評価関数に変更を加えた。具体的には、式1に現れるドリフト距離 r_i に符号をつけた。

7. イベントセレクション

飛跡が適切に再構成された、すなわち評価関数が最小化されたワイヤーのみを用いて $x-t$ 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。この上限値は Iteration によって異なる。理由は後述する。

8. $x-t$ カーブの作成

手順6で決定した飛跡から、飛跡-ワイヤー間の距離 (DOCA, Distance Of Closest Approach) を決定する。DOCA に符号をつける場合、正であればワイヤーは飛跡の上部 (図33における y 軸正方向) にあることを、負であれば下部にあることを表す。こうして求めた DOCA とドリフト時間を散布図に詰め、フィッティングすることにより、新たなドリフト距離とドリフト時間の関係を表す関数を得ることができる。この関数を $x-t$ カーブと呼ぶ。

$x-t$ カーブとして、五次および一次関数を切り替える関数を用いた。今回の測定においてはチェンバ内部に磁場を印加していないため、チェンバのセル内部で電子がドリフトする様子は、DOCA の正負によらず対称だと考えられる。よって、 $x-t$ カーブの作成にあたり、DOCA の絶対値を取ることで正負の区別を取り払った。フィットする代表点として、ドリフト時間を 10 ns 毎に区切り、各時間毎に DOCA の絶対値の平均値を選んだ。なお、ドリフト時間が短い点は、

- 飛跡がワイヤーの上下どちらを通るか、誤って再構成する可能性が高い
- ドリフト時間の決定において、タイムウォーク等の信号の遅延の影響が大きい
- 隣のセルで飛跡がセルの端を通過しており、再構成の精度が悪い

といった要因により、再構成の精度が悪化してしまう [33]。そのため、ドリフト時間 < 20 ns の点はフィットにおいて除外した。ここで得られた関数が、次の Iteration でドリフト時間をドリフト距離に変換する関数となる。

5.2.3 性能評価に用いる指標

読み出し回路の性能を評価する指標として、位置分解能を採用した。位置分解能の決定には、各ワイヤーのドリフト距離と DOCA との残差 (= ドリフト距離 - DOCA) の分布を用いる。残差分布をガウシアンでフィットし、ガウシアン標準偏差を位置分解能とみなすのだが、ここでワイヤチェンバの2つの特性に注意しなければならない。1つ目は、電子のドリフト距離が DOCA より長くなってしまふことである。ワイヤチェンバを通過した荷電粒子はその飛跡に沿って電子の電離を引き起こす。しかし、この電離が離散的に起こるため、図42に示すように、電子のドリフト距離は DOCA より長くなってしまふ。これにより、残差分布は正方向にテイルを持つ。この影響は DOCA が小さいほど顕著である。2つ目は、セルの端における電場の非等方性である。セルの中心(センスワイヤー近傍)では電場は等方的であるものの、セルの形状が正方形であるため、セルの端に向かうにつれ、縦横方向と斜め方向での電場の様子が相異なってしまう。これにより、残差分布の裾が広がってしまう。この影響は DOCA が大きいほど顕著である。以上の2つの理由により、DOCA が小さすぎても大きすぎても位置分解能が悪化してしまう。そこで、DOCA を 1 mm 毎に区切って DOCA 毎の残差分布を作成し、この分布を再度ガウシアンでフィッティングした。こうして得られたガウシアンの標準偏差のうち、最小となるものを位置分解能とした。

5.3 性能評価結果

5.3.1 RECBE-MkII の各 Iteration における解析結果

図43は、1回目と5回目の Iteration において8本のワイヤーで再構成した飛跡の一例である。図43の2枚を比べると、5回目の Iteration の方が正確に飛跡を最高瀬雨していることが見て取れる。これは、Iteration が進むことでドリフト距離をドリフト時間に変換する関数の較正が進んだためだと考えられる。再構成を行なったイベントに対して、iMinuit によって最小化された評価関数の値のヒストグラムが図44である。序盤の Iteration においては、ドリフト時間をドリフト距離に変換する関数の較正が進んでいないために、最小化された評価関数のピークも ~ 10 と、後の Iteration と比べて大きな値となっている。そこで評価関数に対する上限値も、Iteration 毎に変更を加えている。参考として、各 Iteration でのプレセクション、イベントセクションを通過したイベント数、評価関数の上限を表4に示す。各 Iteration 毎の $x-t$ カーブを図45に、

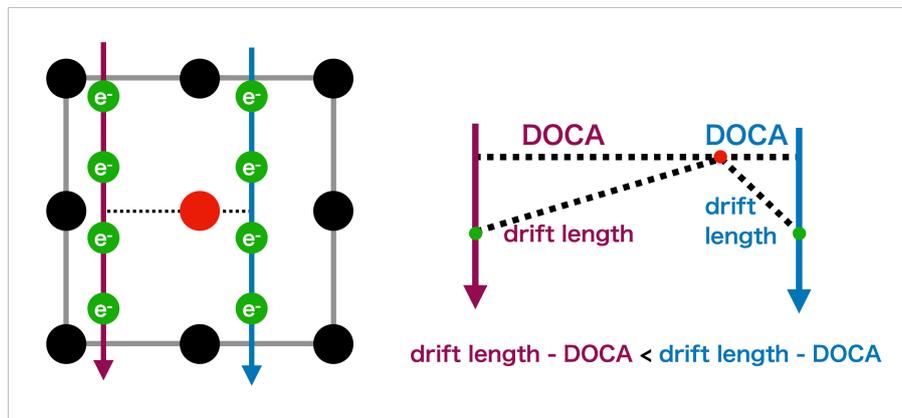
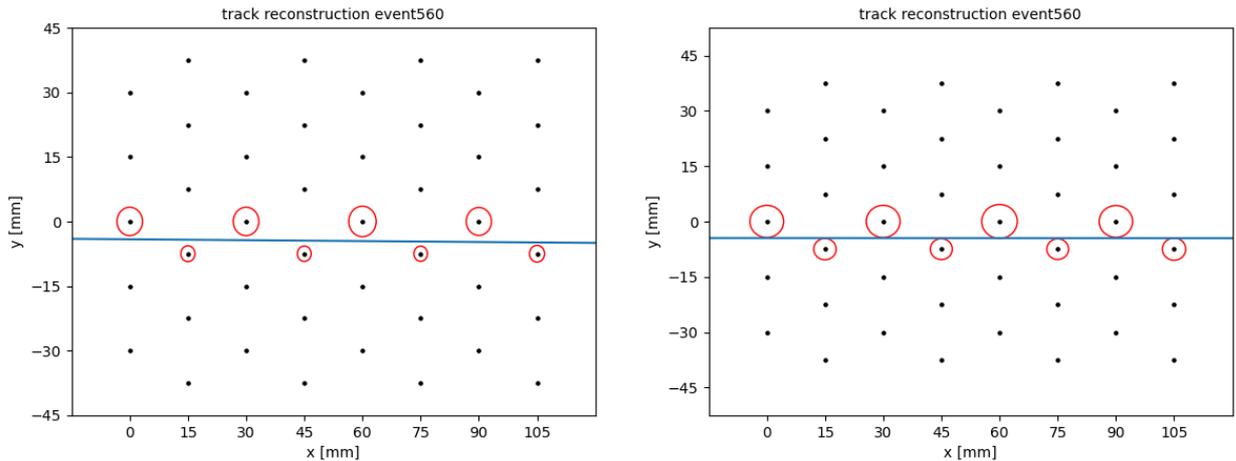


図42: 電子のドリフト距離が DOCA より長くなることを示した模式図。この影響は、DOCA が小さいほど大きくなる。



(a) RECBE-MkII の、1 回目の Iteration において再構成した飛跡 (b) RECBE-MkII の、5 回目の Iteration において再構成した飛跡

図43: 再構成した飛跡

表4: RECBE-MkII の各 Iteration におけるセレクション通過イベント数

Iteration	1	2	3	4	5
全測定回数	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
プレセレクション通過イベント数	28,198	28,301	28,257	28,306	28,297
イベントセレクション通過イベント数	27,809	27,619	26,283	26,875	26,829
評価関数の上限	15	3	1	1	1

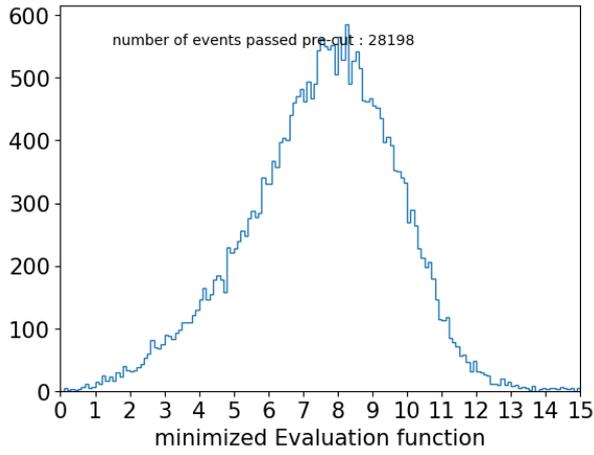
そのフィッティングを図46に示す。各 Iteration における残差 (= ワイヤーのドリフト距離 - DOCA) の分布、ならびにこの分布をフィットしたガウシアンは図47のようになった。ここで、DOCA を 1 mm 毎に区切り、DOCA 毎の残差分布を作成した。DOCA 毎のガウシアン標準偏差をグラフ化したものが図48である。図48より、RECBE-MkII の位置分解能は 4 回目の Iteration における値 $128 \mu\text{m}$ と求めた。

5.3.2 RECBE の解析結果

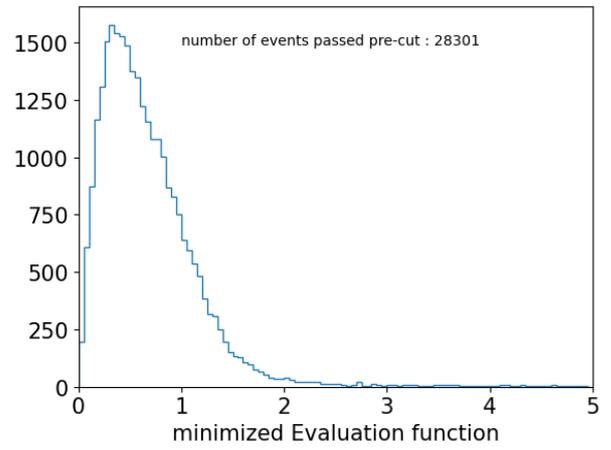
RECBE の測定データについても RECBE-MkII と同様の解析を行った。解析における各プロットは付録に添付した。5 回の Iteration を行い、残差分布を DOCA で区切った際の DOCA 毎の標準偏差が最小となったのは 4 回目の Iteration であった。4 回目の Iteration における DOCA 毎の標準偏差のグラフを図49に示す。これより、RECBE の位置分解能は $82 \mu\text{m}$ である。

5.3.3 考察

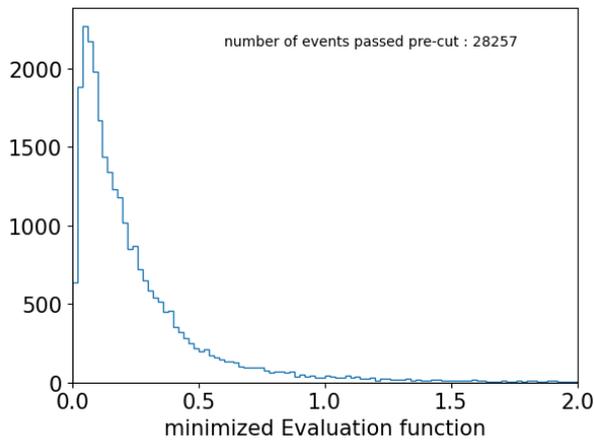
改良版読み出し回路の位置分解能は $128 \mu\text{m}$ となり、現行版読み出し回路の位置分解能 $82 \mu\text{m}$ より大きな値となった。この差の一因として、改良版読み出し回路の方が実効的な閾値が高く、タイムウォークにより時間分解能が悪化していることが考えられる。5.1節に示した読み出し回路の閾値とデジタル出力のゲインから、閾値を電荷に換算する。すると改良版は $\frac{9.67 \text{ mV}}{0.92 \text{ V/pC}} = 11 \text{ fC}$ 、現行版は $\frac{50 \text{ mV}}{7.5 \text{ V/pC}} = 6.7 \text{ fC}$ となり、実効的な閾値は改良版の方が高い。



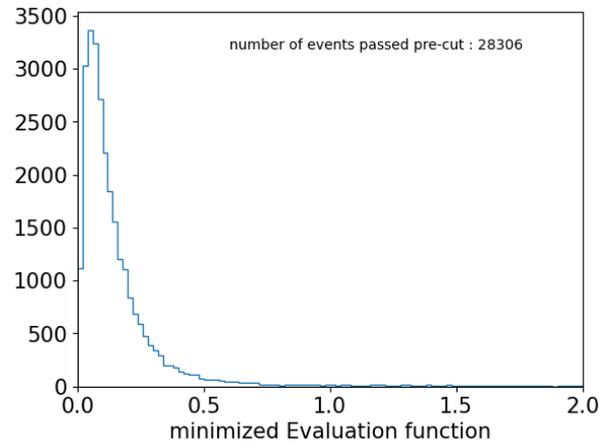
(a) 1回目



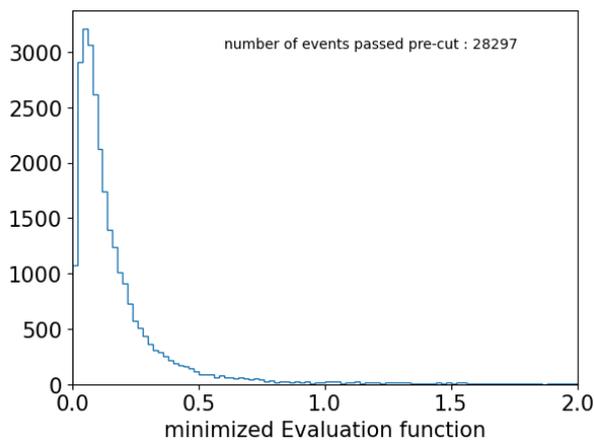
(b) 2回目



(c) 3回目

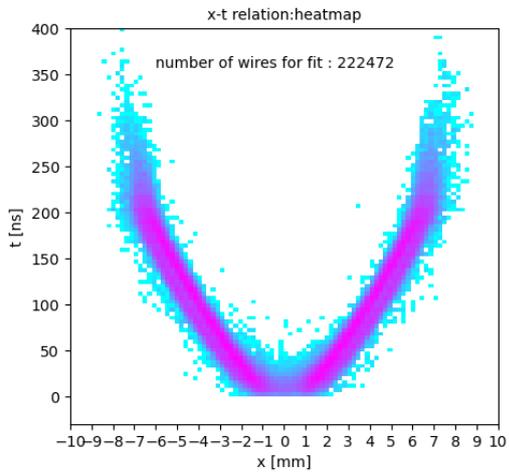


(d) 4回目

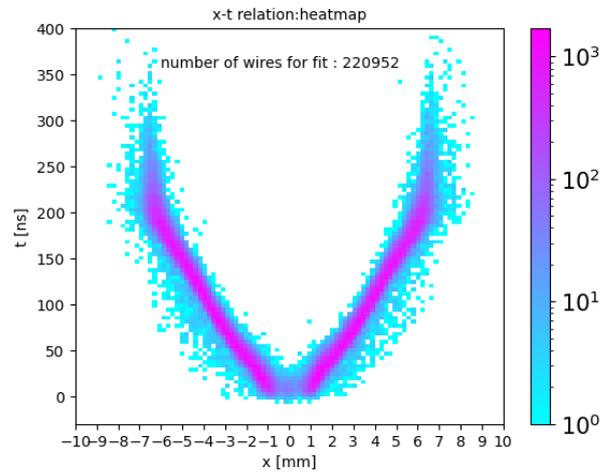


(e) 5回目

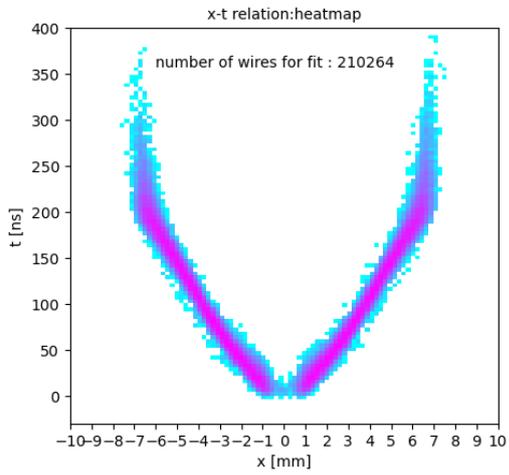
図44: RECBE-MkII の各 Iteration における最小化された評価関数の分布



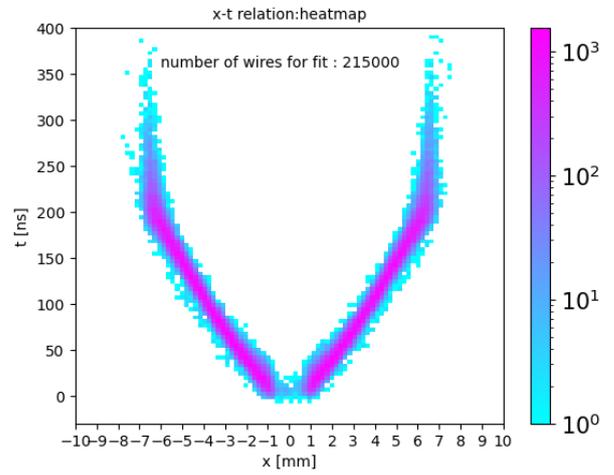
(a) 1 回目



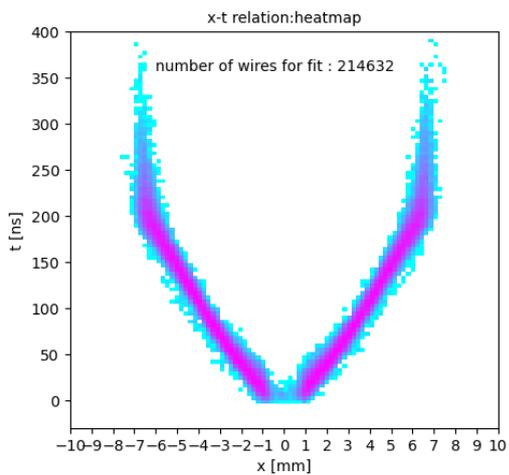
(b) 2 回目



(c) 3 回目

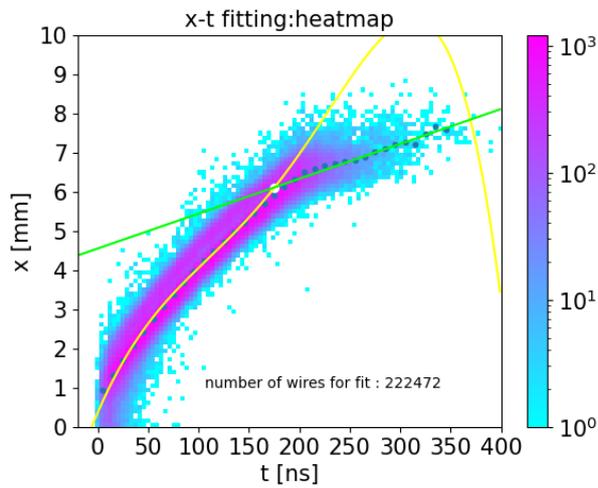


(d) 4 回目

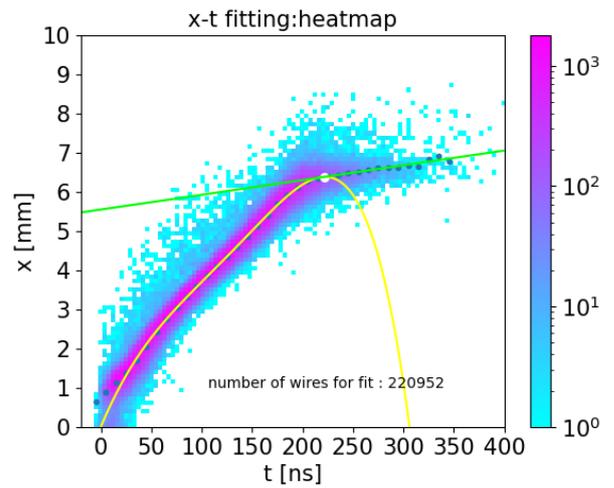


(e) 5 回目

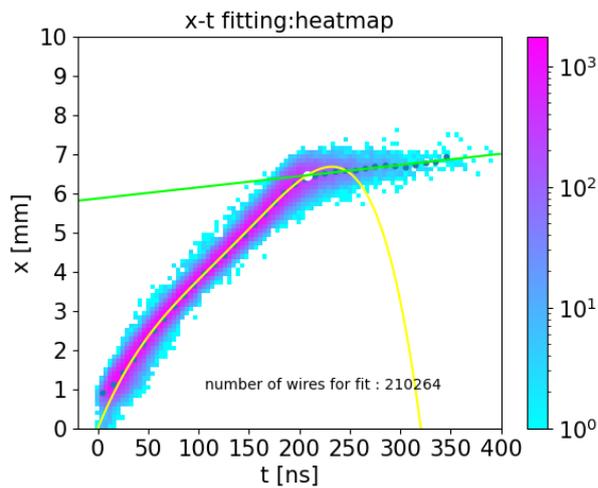
図45: RECBE-MkII の各 Iteration における $x-t$ カーブ



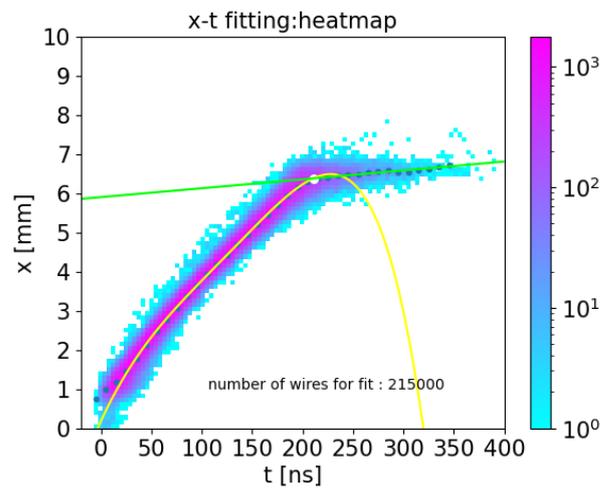
(a) 1 回目



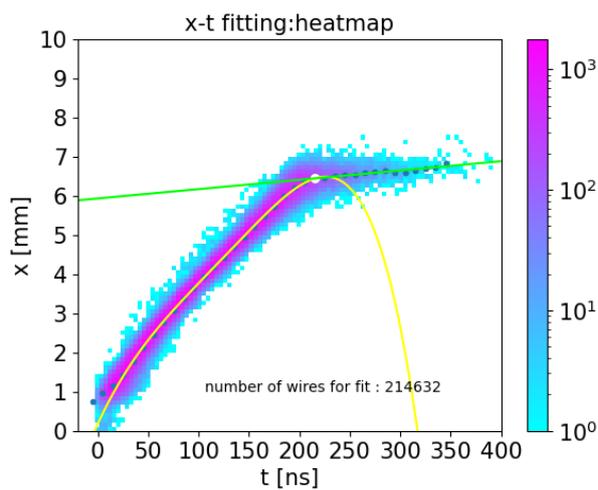
(b) 2 回目



(c) 3 回目

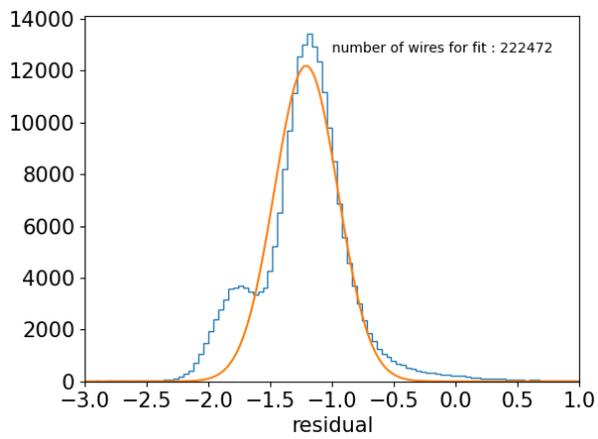


(d) 4 回目

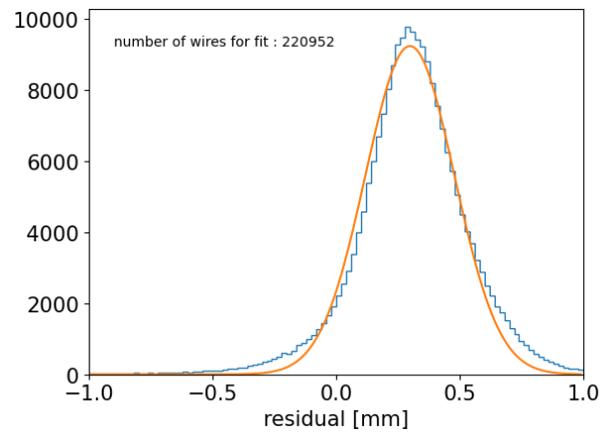


(e) 5 回目

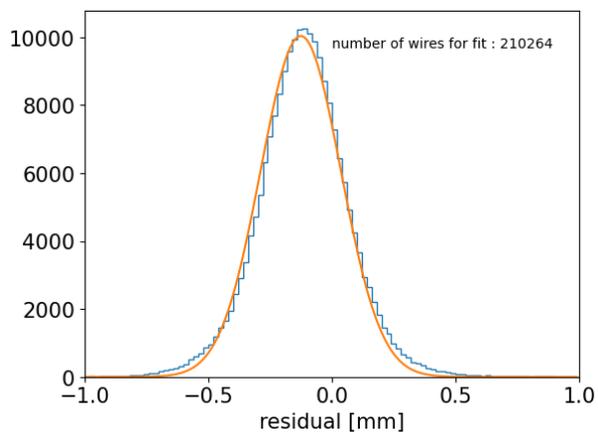
図46: RECBE-MkII の各 Iteration における $x-t$ カーブフィット結果。ドリフト時間を 10 ns 毎に区切り、各時間におけるドリフト距離の平均値を代表点としてフィットした。フィットする関数として、ドリフト時間が小さい領域では五次、大きい領域では一次となる関数を用いた。⁴⁵ スイッチング点は図の白丸で示した。



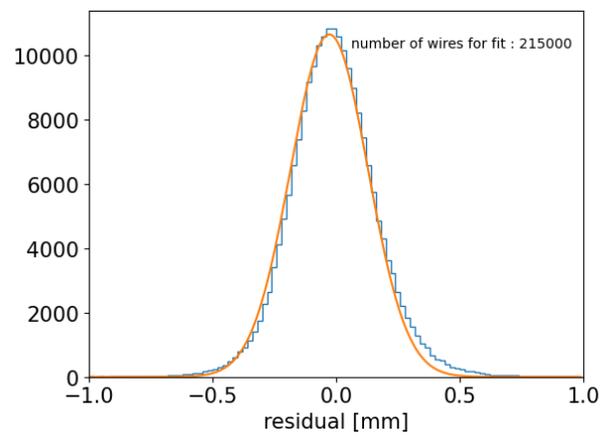
(a) 1 回目



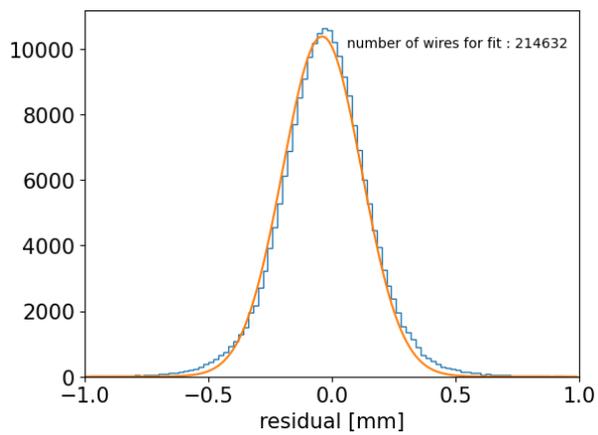
(b) 2 回目



(c) 3 回目

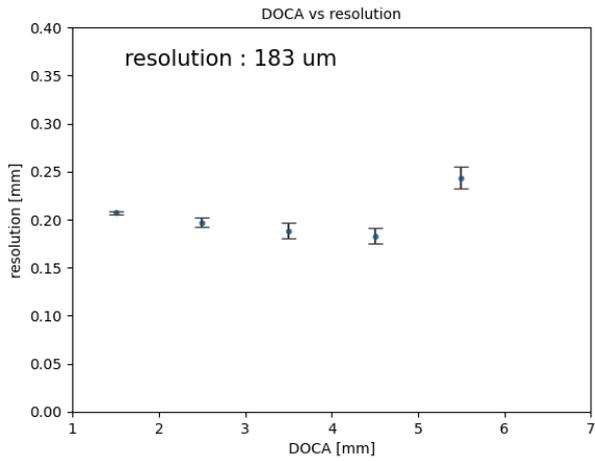


(d) 4 回目

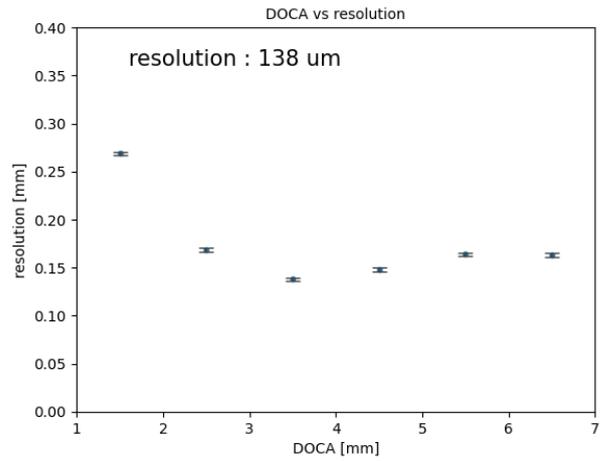


(e) 5 回目

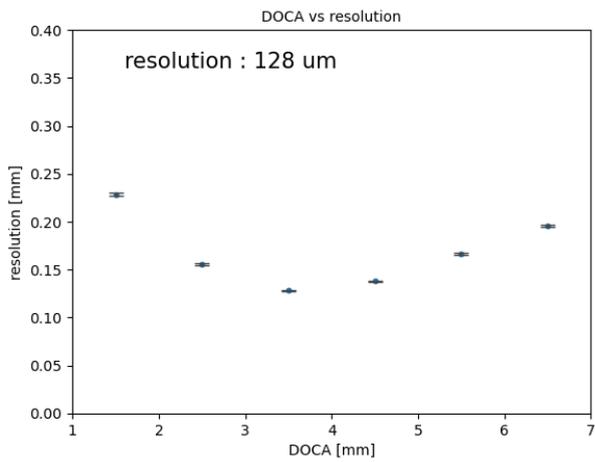
図47: RECBE-MkII の各 Iteration における残差分布



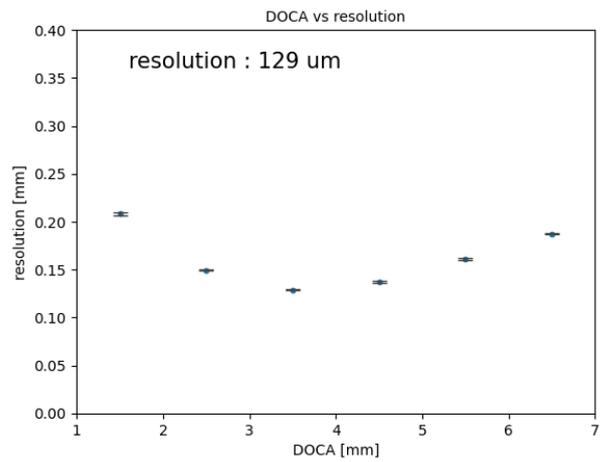
(a) 1回目



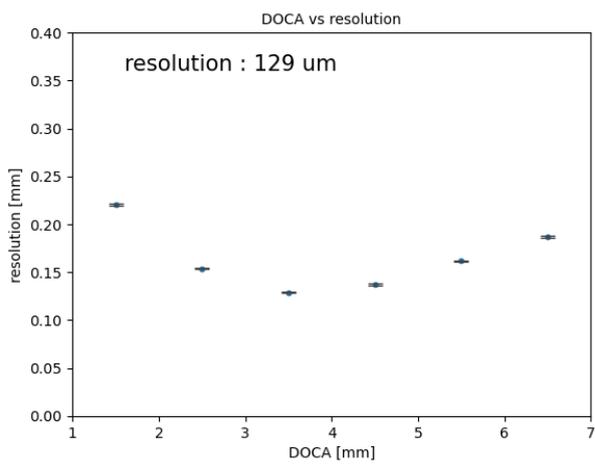
(b) 2回目



(c) 3回目



(d) 4回目



(e) 5回目

図48: RECBE-MkII の各 Iteration における DOCA 毎の標準偏差

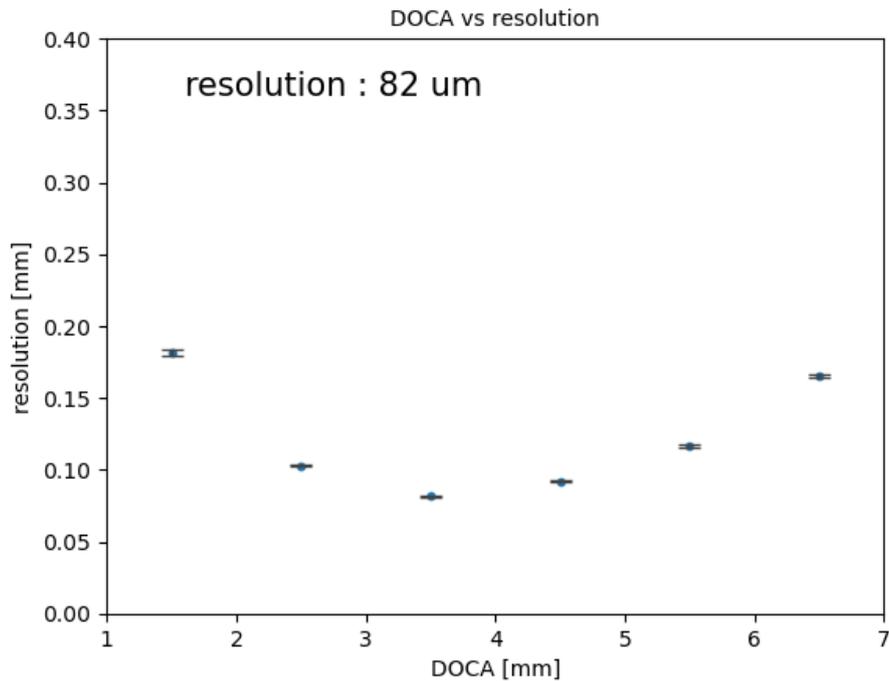


図49: RECBE の 4 回目の Iteration における DOCA 毎の標準偏差。

改良版読み出し回路の位置分解能 $128 \mu\text{m}$ は CDC の $r - \phi$ 方向の位置分解能 $100 \mu\text{m}$ [3] と比較しても悪化している。しかし、今回の解析においては以下の 3 点を考慮していない。

- チェンバの信号波高の違いにより生じる、タイムウォークのドリフト時間への影響
- ドリフトチェンバのワイヤー毎の特性
- 読み出し回路のチャンネル毎の特性

これらの影響を取り入れより精密に解析すれば、改良版回路の位置分解能は $128 \mu\text{m}$ より小さくなると考えられる。

位置分解能は、CDC の測定する (横) 運動量の分解能に寄与する。今回求めた改良版読み出し回路の位置分解能 $128 \mu\text{m}$ より運動量分解能を求め、CDC 実機の運動量分解能と比較した。その結果を示したものが図50である。図51に示すように、Belle II 実験において生成される荷電粒子の運動量は $\sim 1 \text{ GeV}/c$ である。そこで運動量 $1 \text{ GeV}/c$ における運動量分解能を比較すると、現行版回路は 0.37% 、改良版回路は 0.39% となった。

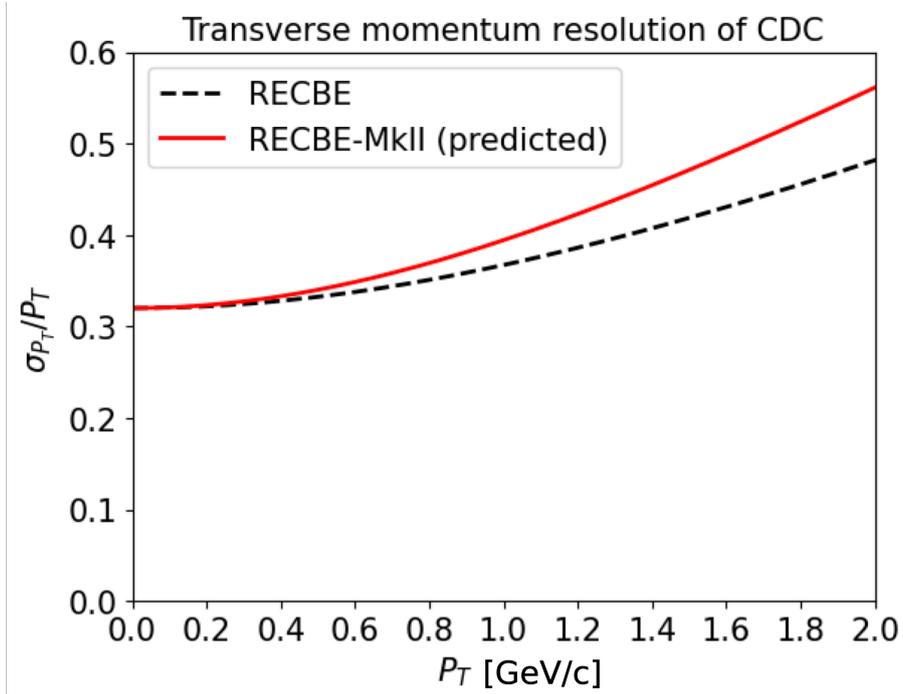


図50: 現行版読み出し回路と改良版読み出し回路での CDC 運動量分解能の比較。

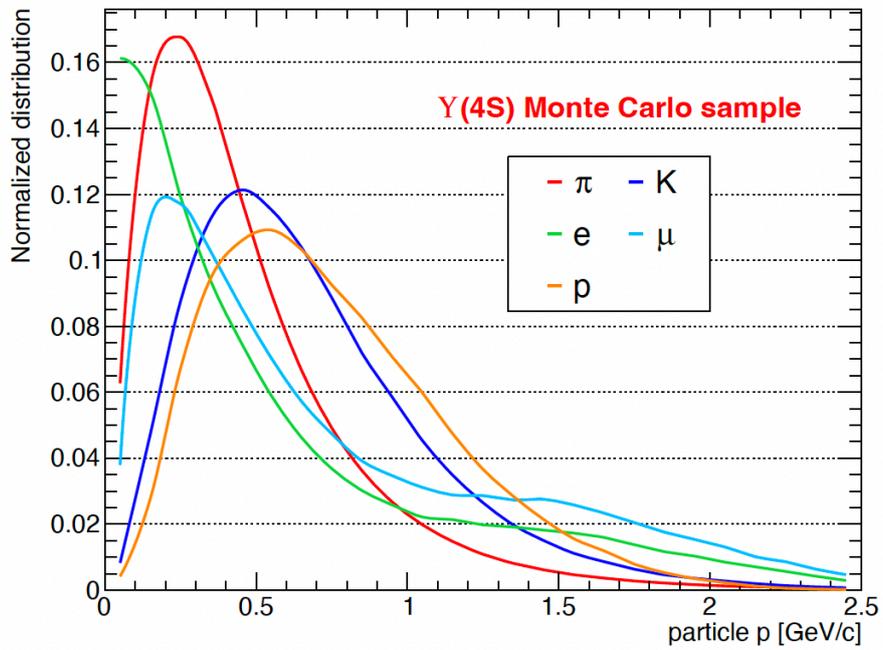


図51: Belle II 実験において生成される荷電粒子の運動量分布 [34]。

6 まとめ

本論文では、Belle II の中央飛跡検出器 (CDC) 読み出し回路の改良に伴い、改良版読み出し回路の性能評価を行った。性能評価結果を表5にまとめた。

まずは読み出し回路に使用している ASIC について、アナログ出力のゲイン、デジタル出力のゲイン、クロストーク波高について測定した。結果、ゲインについては両出力とも設計値 1.02 V/pC を下回った。これはプロセスばらつきや寄生容量によるものだと考えられている。一方、出力が線形となる入力領域は < 1.1 pC となり、現行版の < 0.4 pC から 3 倍近く広がった。クロストーク波高は現行版と比較して 1/10 以下となり、大幅に抑制することができた。

続けて、読み出し回路をワイヤーチェンバに繋ぎ、陽電子ビームの飛跡の再構成を介して回路の位置分解能を評価した。改良版読み出し回路の位置分解能 128 μm は、現行版の値 82 μm より悪化した。この結果の一因として、測定を行った際の正味の閾値の値が、改良版の方が大きかったことが挙げられる。また、今回の解析ではタイムウォークやチェンバのワイヤー依存性、回路のチャンネル依存性を無視していた。こういった効果を取り入れて詳細な解析を行えば、改良版回路の位置分解能はより良くなると考えられる。今回の測定結果をもとに CDC の運動量分解能を予測すると、荷電粒子の運動量 1 GeV/c では現行の値 0.37% から 0.39% に悪化した。

今後改めて性能評価を行う場合は、回路の閾値に細心の注意を払う必要がある。もし今後測定に参加することがあれば、改良版と現行版をより正確に比較するために、正味の閾値を可能な限り揃えて、より厳格な対照実験を行いたい。また今回の測定においては、設定ミスにより改良版読み出し回路のダブルスレッシュホールド機能を活用していない。ダブルスレッシュホールドの導入により閾値をベースラインに近づけることができ、位置分解能も良化すると考えられるため、この変化についても確認していきたい。

表5: 性能評価項目

ASIC	現行版 ASD	新 ASIC(設計値)	新 ASIC(測定値)
アナログ出力のゲイン	1.1 V/pC	1.02 V/pC	0.71 V/pC
アナログ出力の線形領域	< 0.4 pC	< 1.2 pC	< 1.1 pC
デジタル出力のゲイン	7.5 V/pC	1.02 V/pC	0.92 V/pC
デジタル出力の線形領域	-	< 1.2 pC	< 1.2 pC
クロストーク	入力 7 pC, 出力 100 mV	-	入力 50 pC, 出力 50 mV
読み出し回路	現行版回路 (目安)	改良版回路	改良版回路 (測定値)
位置分解能	100 μm (CDC)	-	128 μm

謝辞

3年間の修士課程は、様々な方に迷惑をかけ続けた日々だったように思われます。その中でも自分のような不出来な学生を支えてくださった皆様方に、今日この場を借りて感謝の言葉を述べさせていただきます。

指導教官である後田裕教授には、厳格に、しかし優しくご指導賜りました。もし指導教官が後田教授でなければ、自分が今日ここに立っていたかどうか怪しいと考えております。この3年間のことを思うと、後田教授にはいくら感謝しても足りることはございません。研究活動を進める中で、谷口七重准教授、中沢遊研究員には特段のご負担をおかけしたことと思われます。ご自身の時間を削りながらも、CDCについて一から十までご教授いただいたお二方に、格別の感謝を申し上げます。

続けて、解析手法についての的確なご助言を賜りました宇野彰二教授、各種機器のエキスパートとして細やかなご助言を賜りました宮原正也准教授、住澤一高氏、中村克朗助教、平時の研究活動から常にお心遣いを賜りました救仁郷拓人特任助教にも感謝の弁を述べさせていただきます。

加えて、一年間の休学が明けた後にも暖かく迎え入れてくださった学生の皆さんにも感謝申し上げます。Hanwook BAEさん、Zihan WANGさん、Yuxin LIUさん、Junewoo PARKさん、須藤裕人君、加藤臣之輔君、能丸理玖君、Shijie WANG君。皆さんのおかげで、半年余りの間挫折することなく研究を続けることができました。

最後に、自分を常に支えてくれた、両親の多大な献身に対して感謝を述べさせていただきます。

改めまして、本修士論文に関わり、支えてくださった全ての方々に感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Kyo Shibata. Status and schedule of SuperKEKB. *PoS EPS-HEP*, p. 38, 2011.
- [2] I Adachi, TE Browder, P Križan, S Tanaka, Y Ushiroda, Belle II Collaboration, et al. Detectors for extreme luminosity: Belle II. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 907, pp. 46–59, 2018.
- [3] Tetsuo Abe, I Adachi, K Adamczyk, S Ahn, H Aihara, K Akai, M Aloï, L Andricek, K Aoki, Y Arai, et al. Belle II technical design report. *arXiv preprint arXiv:1011.0352*, 2010.
- [4] KEK. SuperKEKB プロジェクト全体図-KEK | 高エネルギー加速器研究機構. <https://www.kek.jp/ja/imagearchive/12548/>, 03 2018. (Accessed on 07/21/2023).
- [5] BelleII 測定器 | Belle II. <https://belle2pb.kek.jp/Detector/>. (Accessed on 01/22/2024).
- [6] B Paschen, F Abudinen, K Ackermann, P Ahlburg, M Albalawi, O Alonso, L Andricek, R Ayad, V Babu, Y Bai, et al. Belle II pixel detector: Performance of final depfet modules. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 958, p. 162222, 2020.
- [7] ミクロン精度で位置測定. <https://www2.kek.jp/ja/newskek/2003/mayjun/svd.html>. (Accessed on 07/20/2023).
- [8] B.A. Shwartz. The belle II experiment. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, Vol. 260, pp. 233–237, 2015. The 13th International Workshop on Tau Lepton Physics.
- [9] 古井孝侑. Belle II ARICH 検出器のアップグレードに向けた光検出器 MPPC の研究 (Studies on MPPC photosensor for the upgrade of the Belle II ARICH detector). Master's thesis, 1 2020.
- [10] Guglielmo De Nardo, Dott Mario Merola, and Daniele Buono. Study of the $B \rightarrow \tau \nu$ decay with the Belle II experiment. p. 24.
- [11] Belle ii luminosity - belle ii - desy confluence. <https://confluence.desy.de/display/BI/Belle+II+Luminosity>. (Accessed on 12/26/2023).
- [12] 記者サロンを開催しました「SuperKEKB と Belle II の運転再開へ」-KEK | 高エネルギー加速器研究機構. <https://www.kek.jp/ja/topics/202312250900/>. (Accessed on 12/26/2023).
- [13] Tomohisa Uchida, Takashi Taniguchi, Masahiro Ikeno, Yoshihito Iwasaki, Masatoshi Saito, Shoichi Shimazaki, Manobu M. Tanaka, Nanae Taniguchi, and Shoji Uno. Readout electronics for the central drift chamber of the belle-ii detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 62, No. 4, pp. 1741–1746, 2015.
- [14] 谷口七重. Belle II CDC. 第 13 巻, pp. 241–246, 2014.
- [15] Particle Data Group, RL Workman, VD Burkert, V Crede, E Klempt, U Thoma, L Tiator, K Agashe, G Aielli, BC Allanach, et al. Review of particle physics. *Progress of theoretical and experimental physics*, Vol. 2022, No. 8, p. 083C01, 2022.
- [16] A Abashian, K Gotow, N Morgan, L Piilonen, S Schrenk, K Abe, I Adachi, JP Alexander, K Aoki, S Behari, et al. The Belle detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 479, No. 1, pp. 117–232, 2002.

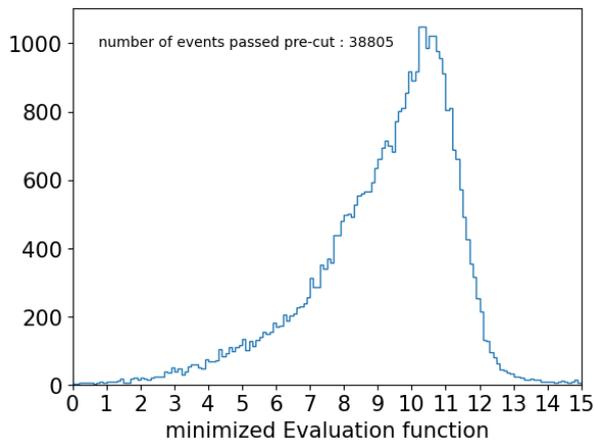
- [17] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. Springer-Verlag, 1987.
- [18] Fabio Sauli. Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers. *Geneva, Switzerland*, 1977.
- [19] Georges Charpak. Filet à particules. *Science Progrès Découverte*, Vol. 3441, pp. 8–15, 1972.
- [20] SuperKEKB 世界最高ルミノシティを今期も更新!-加速器研究施設. <https://www2.kek.jp/accl/topics/topics211224.html>, 12 2021. (Accessed on 08/03/2023).
- [21] Shoichi Shimazaki, Takashi Taniguchi, Tomohisa Uchida, Masahiro Ikeno, Nanae Taniguchi, and Manobu M Tanaka. Front-end electronics of the belle ii drift chamber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 735, pp. 193–197, 2014.
- [22] AD9212 (Rev. F). <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9212.pdf>, 9 2019.
- [23] 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. Master’s thesis, 2023.
- [24] 宮原正也. Belle II CDC 用 ASD+ADC 簡易仕様書, 6 2021.
- [25] ROOT: analyzing petabytes of data, scientifically. - ROOT. <https://root.cern/>. (Accessed on 12/27/2023).
- [26] 宮原正也. private communication.
- [27] 宇野彰二. Status and prospect of ASIC upgrade, 6 2020.
- [28] PF-AR (アドバンストリング) | KEK. <https://www.kek.jp/old/ja/Facility/IMSS/PF/PFAR/>. (Accessed on 12/27/2023).
- [29] E-sys 活動報告, 10 2022.
- [30] PF-AR 測定器開発テストビームラインで初ビーム-KEK | 高エネルギー加速器研究機構. <https://www.kek.jp/ja/topics/20220311-2/>. (Accessed on 01/19/2024).
- [31] 黒田有希奈. Belle II 実験の CDC のための He-CO₂-CF₄ 混合ガスの特性研究. Master’s thesis, 2022.
- [32] —iminuit 2.23.0 compiled with ROOT-v6-25-02-2017-gd0b406db5e documentation. <https://iminuit.readthedocs.io/en/stable/>. (Accessed on 12/27/2023).
- [33] 宇野彰二. private communication.
- [34] Bianca Scavino and on group. Tracking and vertexing in BELLE II. p. 040, 09 2019.

付録

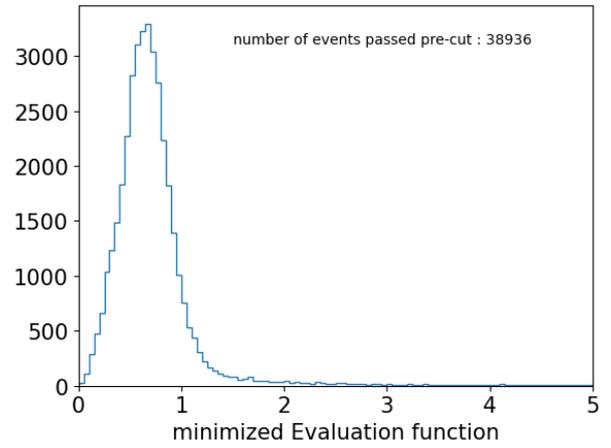
RECBE の解析結果

表6: RECBE の各 Iteration におけるセレクション通過イベント数

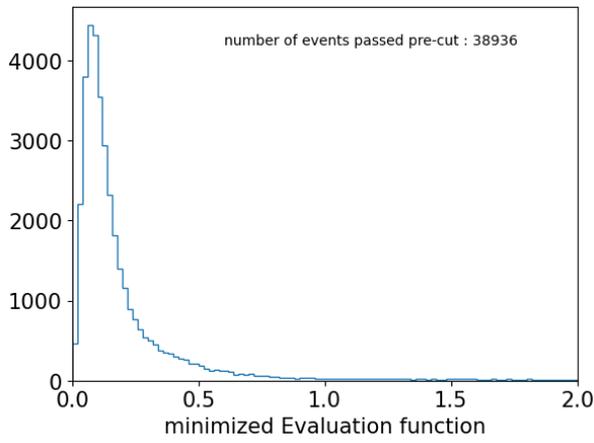
Iteration	1	2	3	4	5
全測定回数	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
プレセレクション通過イベント数	38,805	38,936	38,936	38,927	38,912
イベントセレクション通過イベント数	38,298	38,212	36,356	37,331	37,331
評価関数の上限	15	3	1	1	1



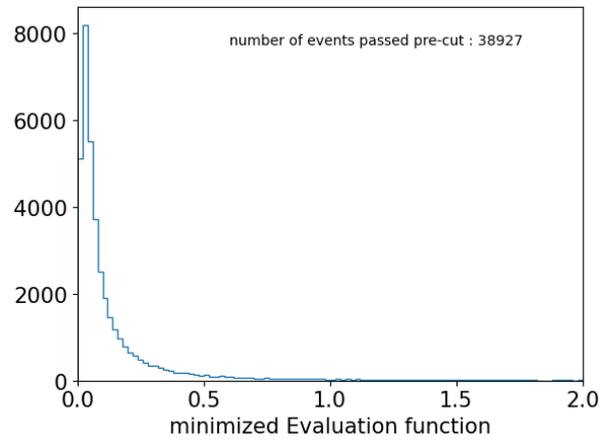
(a) 1回目



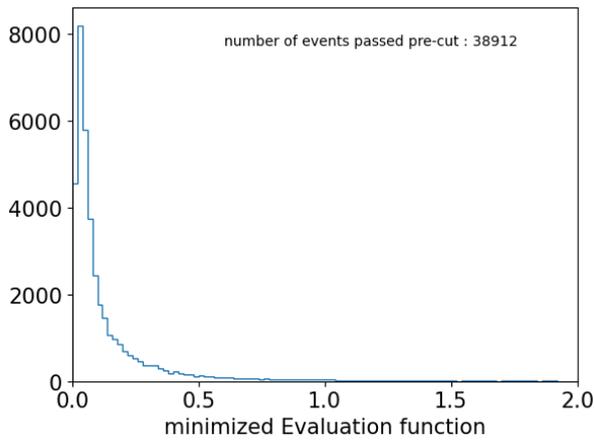
(b) 2回目



(c) 3回目

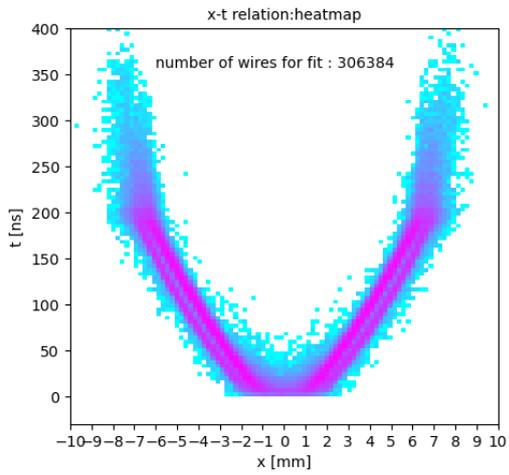


(d) 4回目

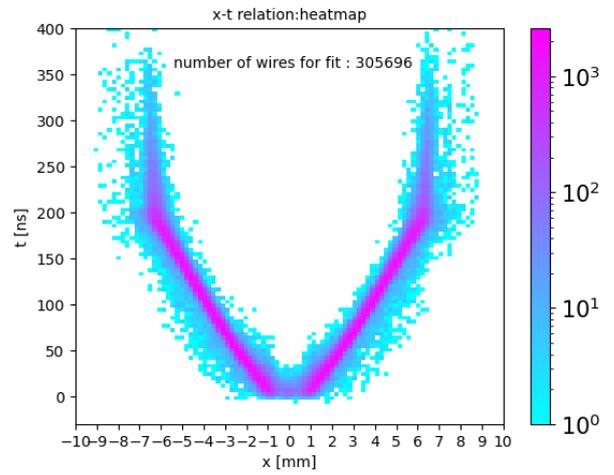


(e) 5回目

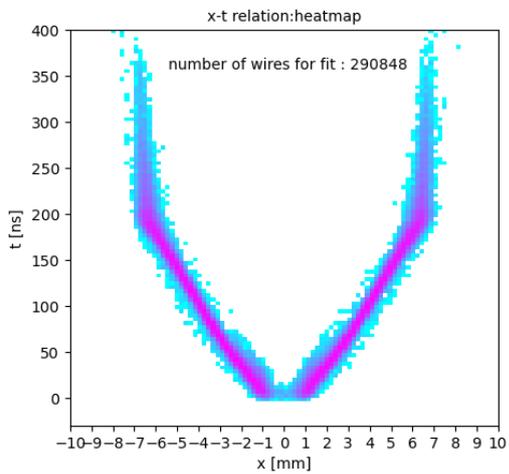
図52: RECBE の各 Iteration における最小化された評価関数の分布



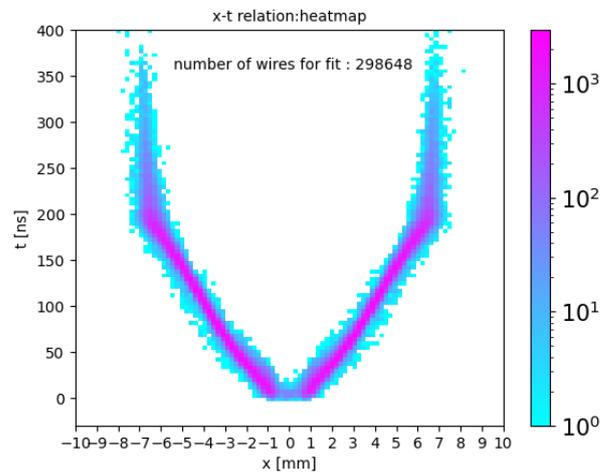
(a) 1 回目



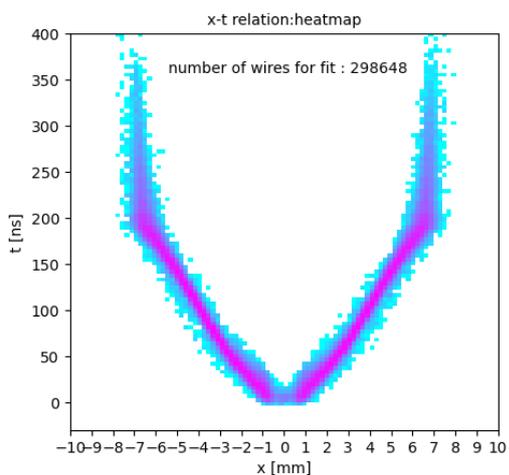
(b) 2 回目



(c) 3 回目

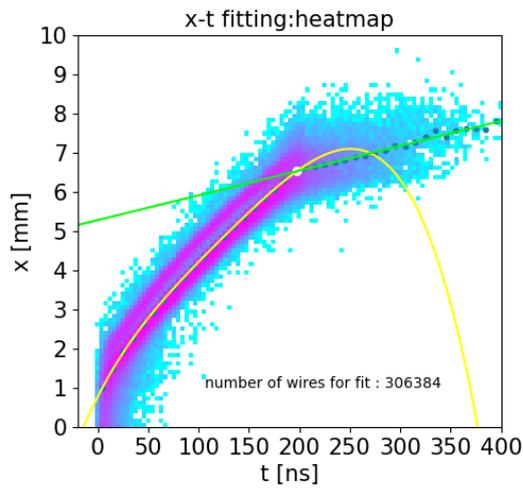


(d) 4 回目

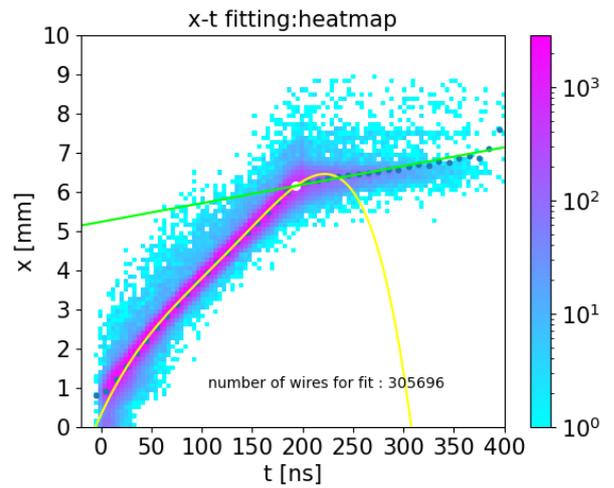


(e) 5 回目

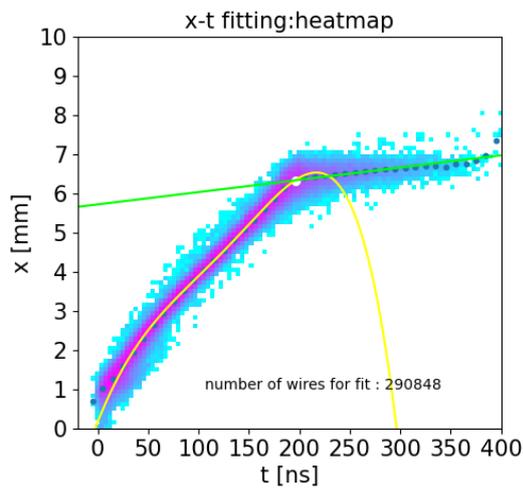
図53: RECBE の各 Iteration における $x-t$ カーブ



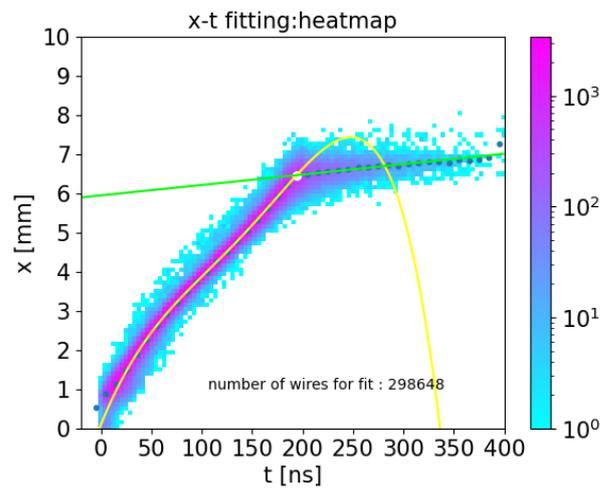
(a) 1 回目



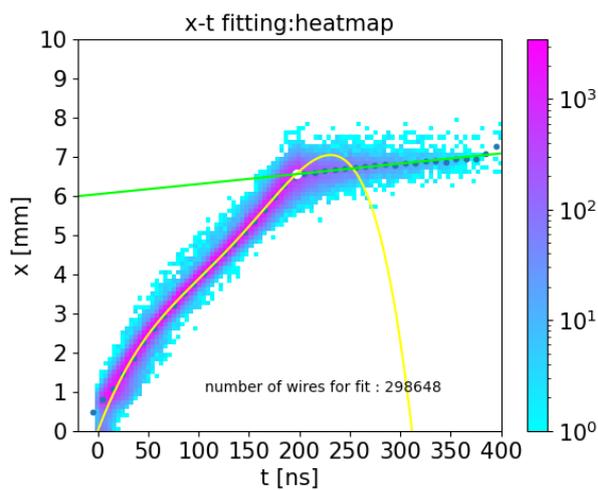
(b) 2 回目



(c) 3 回目

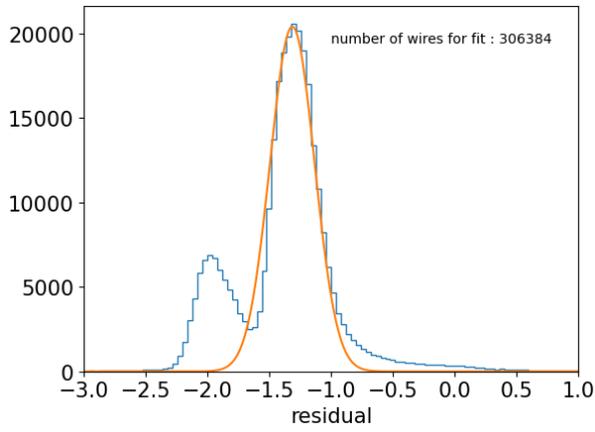


(d) 4 回目

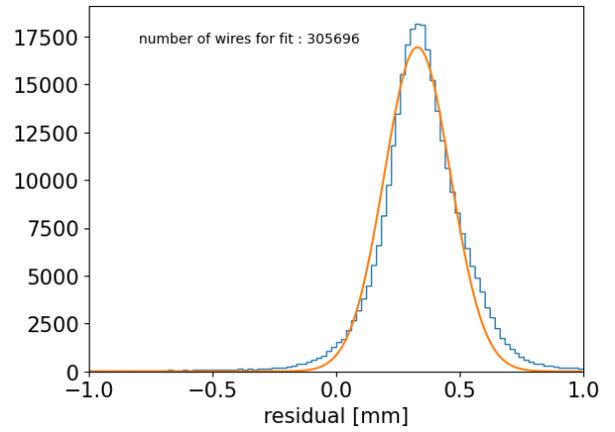


(e) 5 回目

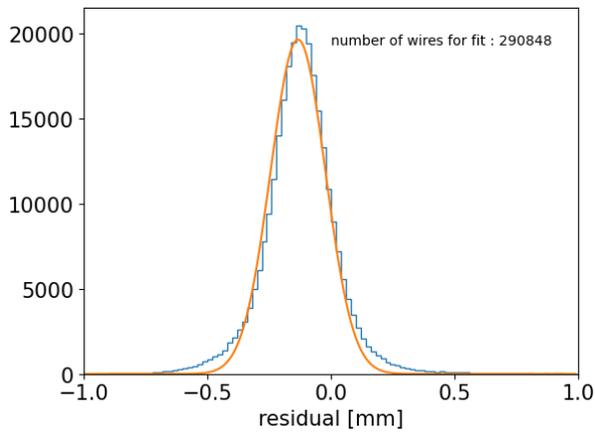
図54: RECBE の各 Iteration における $x-t$ カーブフィット結果。ドリフト時間を 10 ns 毎に区切り、各時間におけるドリフト距離の平均値を代表点としてフィットした。フィットする関数として、ドリフト時間が小さい領域では五次、大きい領域では一次となる関数を用いた。スイッチング点は図の白丸で示した。



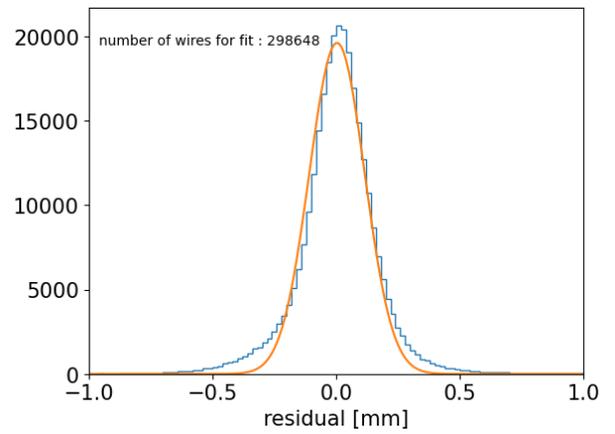
(a) 1回目



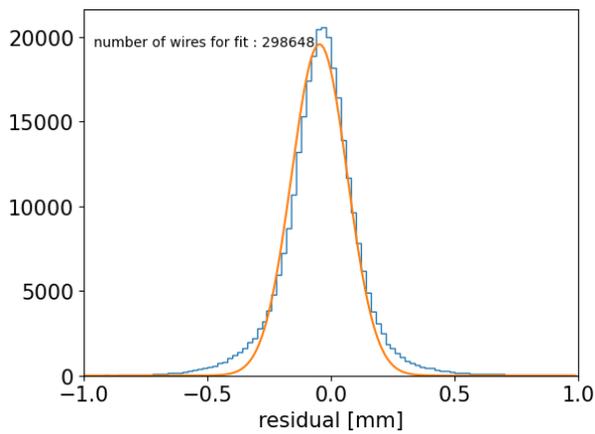
(b) 2回目



(c) 3回目

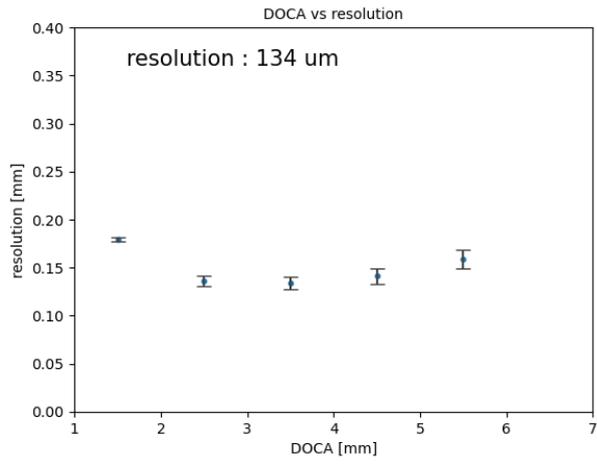


(d) 4回目

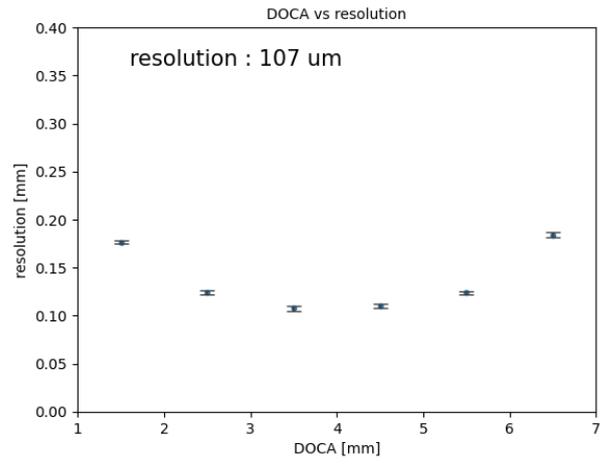


(e) 5回目

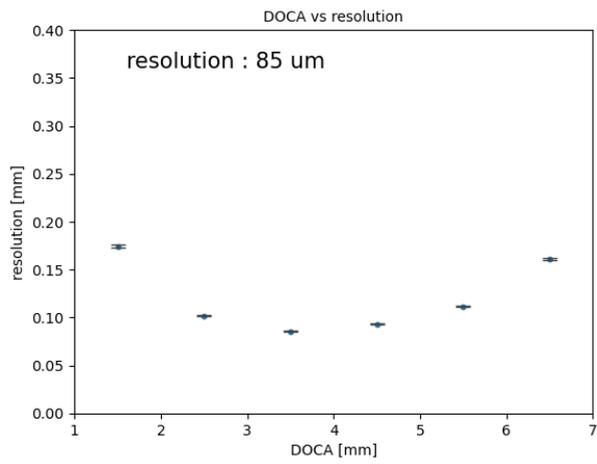
図55: RECBE の各 Iteration における残差分布



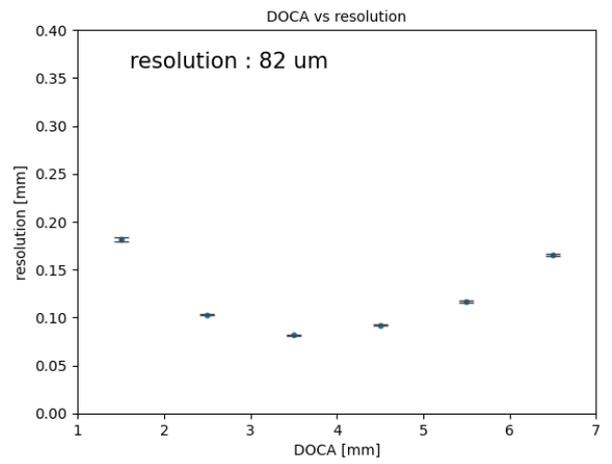
(a) 1 回目



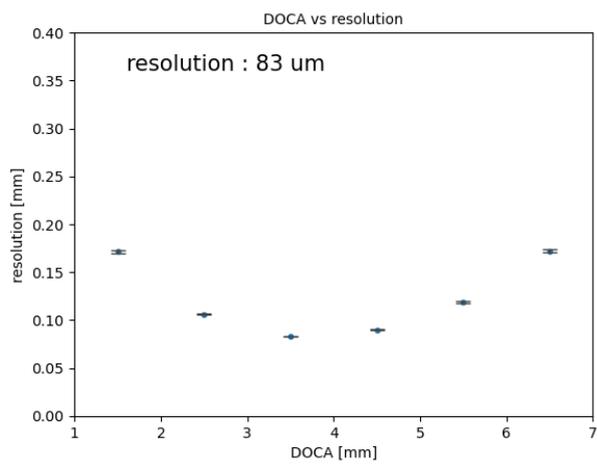
(b) 2 回目



(c) 3 回目



(d) 4 回目



(e) 5 回目

図56: RECBE の各 Iteration における DOCA 毎の標準偏差