

2023年度 卒業論文

EIC 加速器 ePIC 実験における
高時空間分解能測定に向けた
新型 LGAD 検出器性能評価系の設計及び
読出回路の性能評価

広島大学理学部物理学科
クォーク物理学研究室
学籍番号 B203376
松谷 奏

指導教員 志垣 賢太 教授
主査 志垣 賢太 教授
副査 深澤 泰司 教授

2024年2月8日

概要

電子イオン衝突型加速器 (EIC) ePIC 実験とは、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にて、2032 年に運用を開始する実験計画である。この実験では、荷電粒子の飛行時間を測定し粒子識別に利用する Time of Flight (TOF) は、ビーム軸横方向において 35 ps と 30 μ m の時間、位置分解能を必要とする。この高時空間分解能を満たす検出器として新型のシリコン型半導体検出器である AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD) 検出器を採用する。AC-LGAD 検出器は、高電場で電子雪崩を起こす増幅層を電極の下に薄く配置することで優れた時間分解能を実現する。また、電極直下に絶縁層を導入する交流結合により、電極の細密化とほぼ 100 % の有感領域を両立させ、電極間の電荷共有によって優れた位置分解能を実現する。

本研究では、この AC-LGAD 検出器について時間分解能の性能評価を行うため、実験系の設計及び読出回路の性能評価を行った。第一段階として、AC-LGAD の情報を得るために必要な集積回路 (ASIC) の応答時間の揺らぎについて評価した。結果は 42 ps であり、 α 版としては充分である。また、今後 β 線源を用いる時間分解能評価を計画しており、データの取得効率を考慮したセットアップの詳細をシミュレーションを用いて議論した。

目次

第1章 序論	3
1.1 素粒子物理学	3
1.1.1 標準模型	3
1.1.2 強い相互作用	4
1.1.3 量子色力学	4
1.2 研究動機	4
1.3 研究目的	5
第2章 研究背景	6
2.1 EIC 加速器	6
2.2 ePIC 実験と ePIC 検出器	7
2.3 TOF	7
2.3.1 AC-LGAD	8
2.3.2 ASIC	9
第3章 AC-LGAD の性能評価に向けた実験系の設計	10
3.1 AC-LGAD 性能評価	10
3.1.1 AC-LGAD 時空間分解能の性能評価方法	10
3.1.2 広島大学における AC-LGAD の性能評価方法	11
3.2 シミュレーションによる評価系の設計	11
3.2.1 Geant4	11
3.2.2 放射線源について	11
3.2.3 多重クーロン散乱の考慮	13
3.2.4 仮想空間実験セットアップ	15
3.2.5 シミュレーション結果及びセットアップ案	16
第4章 集積回路 (ASIC) の応答時間揺らぎの評価	18
4.1 ASIC の性能評価	18
4.1.1 EICROC0	18
4.1.2 応答時間の揺らぎ (Time Jitter)	18
4.1.3 評価方法	19
4.1.4 実験セットアップ	20
4.2 EICROC0 の jitter 性能評価結果	21
第5章 結論	24

謝辞 25

参考文献 25

第1章 序論

1.1 素粒子物理学

素粒子物理学とは、物質の最小単位である素粒子の性質や素粒子間の相互作用を加速器実験や宇宙観測、理論的探求に基づいて研究する学問分野である。[1]

まず初めに、本研究の分野について基礎的事項を説明する。

1.1.1 標準模型

物理の標準模型は、素粒子物理学における基本的な理論的枠組みである。この理論には17種類の素粒子とその間にはたらく3種類の基本相互作用がある。素粒子のうち12種類はクォーク、レプトンと呼ばれる物質粒子であり、4種類は素粒子間の相互作用を伝えるゲージ粒子である。また、物質粒子とWボソン、Zボソンに質量を与えるヒッグス粒子がある。[2]



図 1.1: 素粒子の標準模型 [2]

1.1.2 強い相互作用

3種類の基本相互作用とは、「電磁相互作用」、「弱い相互作用」、「強い相互作用」である。この中でも「強い相互作用」は本研究の動機に大きくつながる。強い相互作用は量子色力学 (Quantum Chromodynamics QCD) という量子場の理論によって記述される。また、強い相互作用を媒介する粒子はグルーオンである。

相互作用	記号	名前	電荷	スピン	質量
電磁相互作用	γ	光子	0	1	0
弱い相互作用	W	W粒子	± 1	1	80.43 GeV
	Z	Z粒子	0	1	91.19 GeV
強い相互作用	g	グルーオン	0	1	0
	H^0	ヒッグス粒子	0	0	124.9 GeV

図 1.2: 3種類の相互作用とそれを媒介する粒子 [3]

1.1.3 量子色力学

量子色力学 (QCD) とは、ゲージ理論という種類の理論である。ゲージ理論とは、空間の各点で場に対して施す局所変換 (ゲージ変換) に対してラグランジアンが変化しない (ゲージ対称性) 理論のことである。ここで、素粒子の一種クォークには色荷 (カラー) と呼ばれる内部自由度を持つ。例えば、陽子や中性子の構成要素は以下のように表すことができる。QCDはこのカラー内部自由度に基づくゲージ理論である。[2]

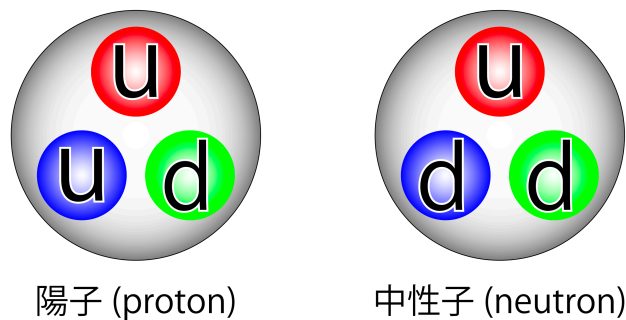


図 1.3: 陽子・中性子の構成要素 [2]

1.2 研究動機

この研究をするにあたって一番の物理的動機は、EIC 加速器を利用して得られるさまざまな情報から核子の内部構造を明らかにし、質量起源を突き止めることにある。

1.3 研究目的

本研究の目的は、1)AC-LGADにおける適応読出回路 (ASIC) の性能評価を行い、2) 放射線源、レーザー、ビーム等を利用して AC-LGAD+ASIC の性能評価を行い、3)EIC-ePIC 実験に導入可能な AC-LGAD+ASIC に高度化していくことである。

今回は、1) と 2) の導入である、AC-LGAD の信号を読み出す集積回路 (ASIC) の応答時間の揺らぎについて評価し、放射線源での AC-LGAD の性能評価系の設計を行うことを目的とした。

第2章 研究背景

2.1 EIC 加速器

Electron Ion Collider(EIC) とは、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に建設予定の世界初の偏極電子イオン衝突型加速器の名称である。EIC は円形加速器であり、その周長は約 3.86 km である。この加速器は 2032 年に運用を開始する予定である。

EIC では、高エネルギーの偏極電子ビームを偏極陽子や原子核に衝突させる。この衝突により、高エネルギー密度の物質状態が生成され、粒子の内部構造の精密な 3D スナップショットを生成することができる。この実験では、物質の構造・質量・スピンを詳細に調査することが可能である。[4]

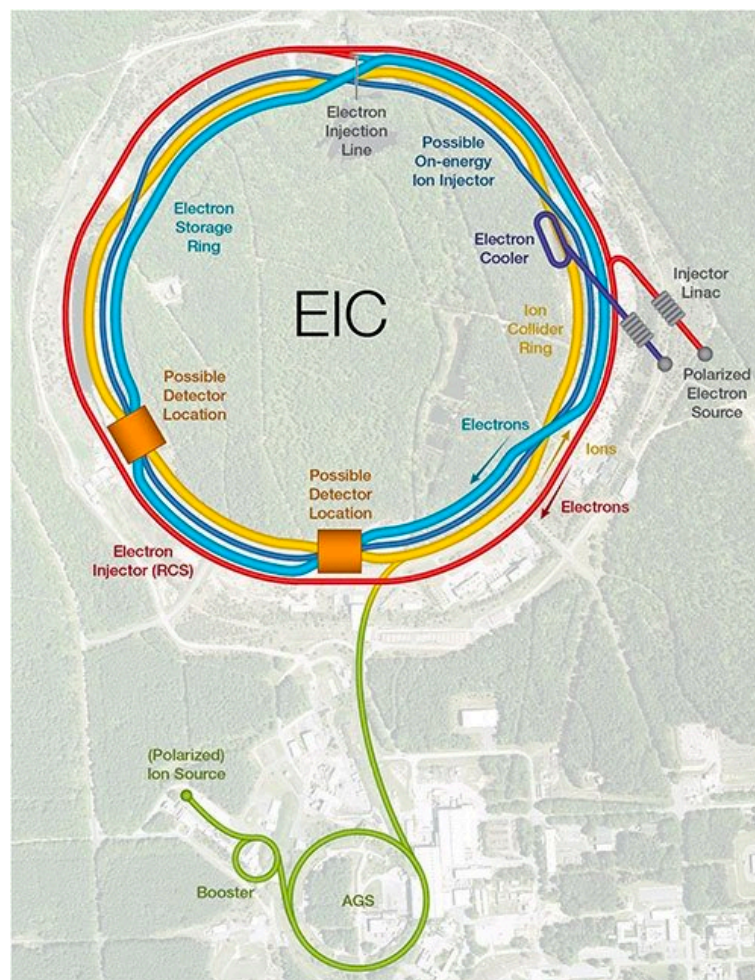


図 2.1: EIC 加速器の概要図及び外観 [5]

2.2 ePIC 実験と ePIC 検出器

electron Proton/Ion Collider 実験とは、EIC 加速器の電子-原子核衝突点に建設される ePIC 検出器を利用して核子の内部構造や、スピンについての物理を探索する実験である。The ePIC Collaboration には 2024 年 1 月時点で 24 か国、171 の研究機関が参加しており、広島大学も 2022 年より参加している。広島大学は ePIC 検出器のうちバレル部の Time of Flight (TOF) の開発を行う。[6]

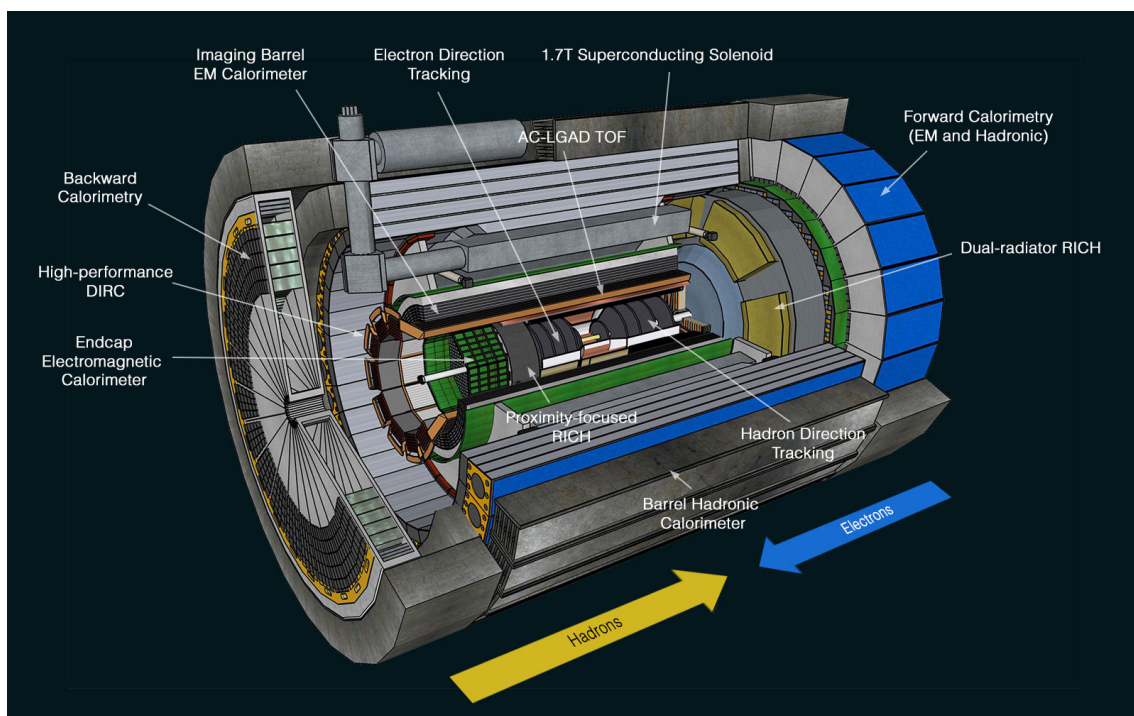


図 2.2: ePIC 検出器のデザイン [4]

2.3 TOF

TOF (Time of Flight) は、物体や粒子がある距離を移動するのにかかる時間を測定する手法や装置である。

高エネルギー物理学や素粒子物理学において、粒子の速度やエネルギー、運動量などを測定するために TOF 検出器が使用される。加速器で生成された粒子が検出器に到達するまでの時間を測定することで、粒子の性質や挙動を詳細に調べることができる。

TOF において重要なのは時間情報である。そのため、TOF に採用する検出器は時間分解能が良くないといけない。また、粒子の飛跡の再構成を行うために粒子の位置を正確に測定する必要があるため、高い位置分解能も必要である。

ePIC 実験においてバレル部の TOF に要求されている性能は、35 ps の時間分解能と 30 μ m の位置分解能である。この高時空間分解能を満たす検出器を採用する必要がある。

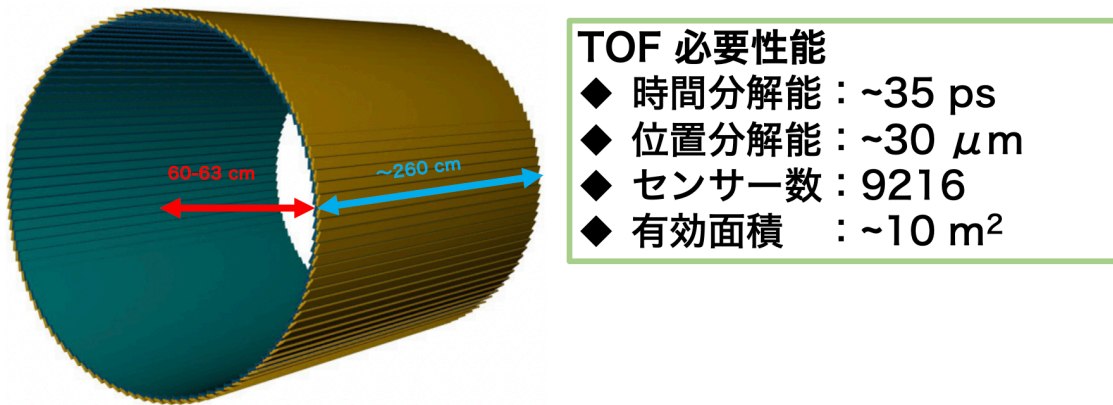


図 2.3: ePIC 実験における Barrel TOF 設計デザインとその必要性能 [8]

2.3.1 AC-LGAD

AC-LGAD(AC-coupled Low Gain Avalanche Detector) 検出器は、高電場で電子雪崩を起こす増幅層を電極の下に薄く配置することで優れた時間分解能を実現する。また、電極直下に絶縁層を導入する交流結合により、電極の細密化とほぼ 100% の有感領域を両立させ、電極間の電荷共有によって優れた位置分解能を実現する。この二つの特徴から、AC-LGAD は 35 ps の時間分解能と 30 μm の位置分解能を併せ持つ検出器であるため、TOF 検出器に採用する。

また、AC-LGAD には 3 種類あり、pixel, pad, strip 型があるが、Barrel TOF では strip 型を採用する。

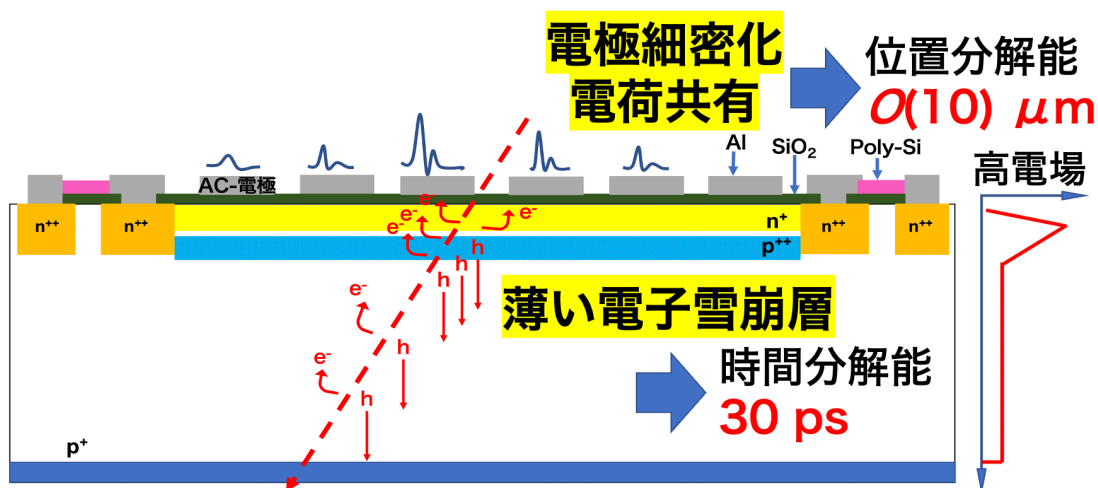


図 2.4: AC-LGAD の構造 [9]

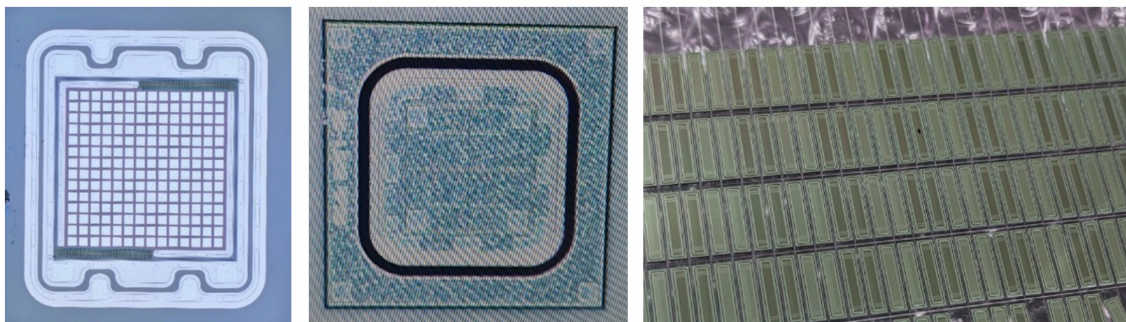


図 2.5: AC-LGAD の種類。左から pixel, pad, strip type[9]

2.3.2 ASIC

ASICとは、Application-Specific Integrated Circuit の略で、特定のアプリケーションや用途に合わせて設計された集積回路のことである。AC-LGAD の性能評価において本実験ではEICROC0というASICを用いる。EICROCは到達時間 (Time of Arrival) と振幅 (Amplitudes) を出力する。このASICもTOFの時間分解能に大きく関わるため性能評価をする必要がある。本研究ではEICROC0というASICを使用しているが、これは開発版であり、将来的にはさらに高度化されたASICを用いる。

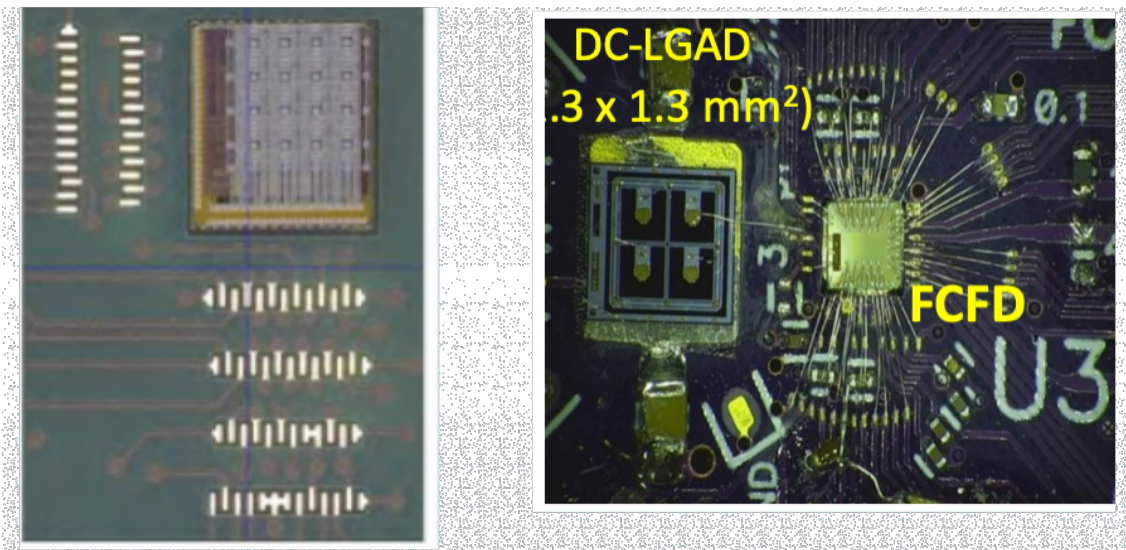


図 2.6: EICROC0 の概形 (左) と現在並行して開発中の FCFDv0 という ASIC(左)[6]

第3章 AC-LGADの性能評価に向けた実験系の設計

3.1 AC-LGAD 性能評価

3.1.1 AC-LGAD 時空間分解能の性能評価方法

広島大学に国内で唯一 AC-LGAD 及びその ASIC の実機を確保しテストベンチを構築した。AC-LGAD を性能評価するにあたって、いくつか方法がある。

- 放射線源による性能評価

放射線源から発生する β 線を利用し、 β 線の放射線上に AC-LGAD と評価対象よりも良い時間分解能を持つ検出器を設置することで、飛跡距離と到達時間から時間分解能を測定する手法。この方法では最小電離粒子 (MIP) を基準に考えることができる。また、線源をセンサー上部に設置し測定が開始できるため実験環境の構築が容易である。しかし、放射線はある方向にきまって放射されるわけではなく、あらゆる角度に放射されるため、 β 線の飛跡距離を制御することが難しいという問題点もある。

- 赤外線 (IR) レーザーによる性能評価

放射線源と違って一方向に定めて放射することが可能なのでレーザーの距離を調節することができる。したがって、時間分解能に加え位置分解能の評価も可能である。また時間分解能に影響するノイズとして、タイムウォーク、タイムジッター、電荷収集ノイズ (ランダウノイズ) があるが、ランダウノイズは MIP のエネルギー損失が一様でないことから LGAD 特有に発生するノイズで、MIP ではない IR レーザーには寄与しないことから、時間分解能が良くなる。しかしながら、研究コストはかなり高価であり、実験環境構築が容易でないところが問題点として挙げられる。

- テストビームによる性能評価

最も正確で信頼性のある性能評価方法。放射線源と同様に MIP が利用できる。学校の研究室では不可能であり、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行っているテストビームも常時稼働しているわけではないため、頻繁に行える評価方法ではない。

3.1.2 広島大学における AC-LGAD の性能評価方法

2023年夏にKEKの中村 浩二助教のもとへ訪問し、実際にAC-LGADの性能評価を行なっている環境を見学し、AC-LGADの性能評価を行なった。KEKでは放射線源赤外線レーザーを用いて性能評価を行った。

広島大学では2024年3月より、放射線源による時間分解能評価を行う。放射線源はSr-90を用いる。また、将来は放射線源に加えてレーザーも導入予定であり、より精密な性能評価を可能にする。さらに、外部施設にてテストビームを用いて性能評価を行う予定である。

3.2 シミュレーションによる評価系の設計

本実験では、シミュレーションによるAC-LGADの性能評価実験のためのセットアップの構築案を考察した。このシミュレーションを行う目的は、放射線源から出る β 線の経路長の制限とデータ取得効率の最適化である。本実験では、まず物質と電子の相互作用によって発生する多重クーロン散乱について考察し、経路長を制限するために設置するコリメータの直径を導出し、シミュレーションによってそのデータの取得効率を算出した。

3.2.1 Geant4

Geant4とはCERN(欧州原子核研究機構)で開発された、高エネルギー物理学、核物理学、医療物理学、宇宙線物理学などの分野で広く使用される、高度なシミュレーションツールキットである。Geant4ではさまざまな種類の粒子の運動を追跡し、物質中での相互作用や衝突、放射線の生成などをシミュレーションすることができる。
[12]

3.2.2 放射線源について

AC-LGADの時間分解能を評価するにあたって β 線を放射するSr-90という放射線源を利用する。Sr-90は安定同位体よりも中性子過剰であり、 β 不安定核の放射性同位体であるため、 β -線を放射しY-90を経てZr-90と遷移する。

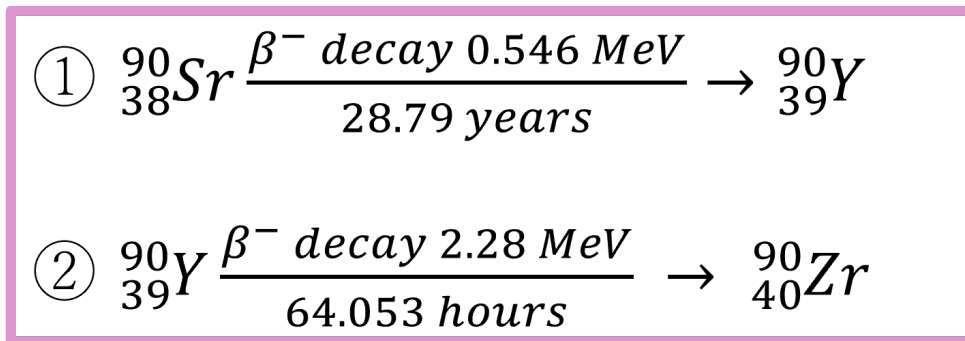


図 3.1: Sr-90 の遷移過程

JAEA 303

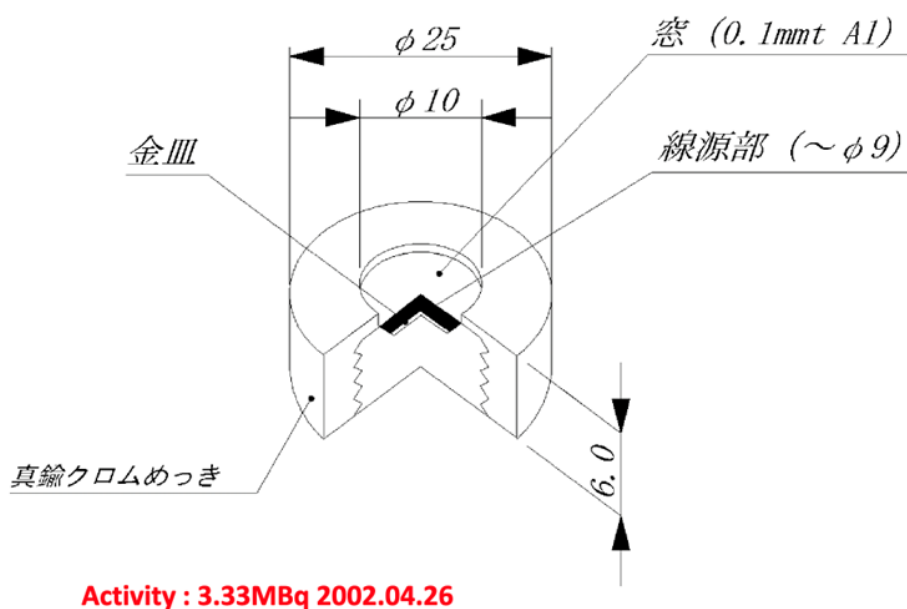


図 3.2: 広島大学で利用する放射線源

また、図 3.1 より、Geant4 にて放射線として出てくる電子のエネルギー分布をシミュレーションで導出した。

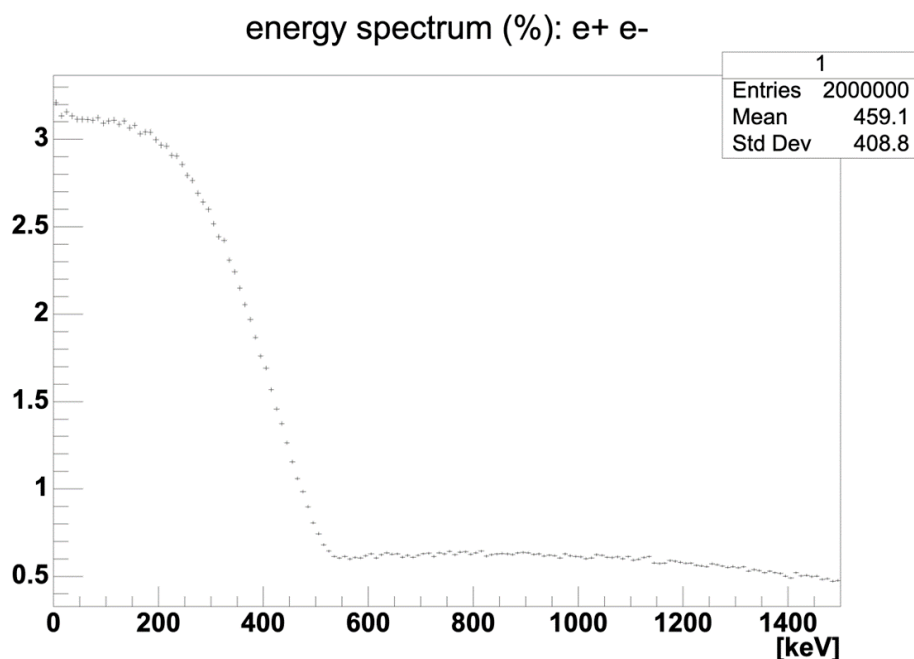


図 3.3: Sr-90 の放射線のエネルギー分布

3.2.3 多重クーロン散乱の考慮

多重クーロン散乱は、高エネルギー粒子が物質中を通過する際に受けるクーロン力による散乱の現象のことである。この現象は、粒子が物質中の原子核や電子と相互作用することによって生じる。多重クーロン散乱による荷電粒子が物質を通過した直後の位置と角度の変位の確率分布は統計的にガウス分布で近似することができ、その幅は以下の式で与えられる。[13]

$$\theta_0 = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0}\right) \quad (3.1)$$

ただし、 β はローレンツ因子、 c は光速、 p は荷電粒子の運動量、 z は荷電粒子の電荷数、 x は散乱体の長さ、 X_0 は散乱体の放射長である。

今回は、以下の3種類の物質の多重クーロン散乱を見積もった。Alは放射線源の窓に採用されており、Si,G10はAC-LGADを通過する時に関わる物質である。

物質	放射長	密度	厚さ
Si	9.37 cm	2.33 g/cm ³	0.001 cm
Al	8.897 cm	2.70 g/cm ³	0.001 cm
G10	17.87 cm	1.80 g/cm ³	0.001 cm

図 3.4: 多重クーロン散乱を考慮する物質

これらのパラメータを式 3.1 に代入すると結果は次のようになった。

物質	θ_0 (energy = 0.549 MeV)	θ_0 (energy = 2.28 MeV)
Si	9.57°	2.30°
Al	9.85°	2.37°
G10	6.65°	1.60°

図 3.5: 多重クーロン散乱の計算結果

この結果から、多重散乱を考慮したセットアップの構築をする。具体的には、この散乱をした電子も検出するような直径の穴を開けたコリメータを設置することで検出効率をできるだけ上げたセットアップを考える。

3.2.4 仮想空間実験セットアップ

本実験ではコリメータを AC-LGAD の前後および PMT の前に設置し、 β 線の経路長をできるだけ直線に制限した時の検出効率 (AC-LGAD に入射した β 線が PMT に入射する割合) と、AC-LGAD での多重クーロン散乱を考慮して AC-LGAD を通過した β 線以外を取り除くコリメータを設置し、検出効率を導出する 2 種類のシミュレーションをおこなった。前者をセットアップ 1、後者をセットアップ 2 とする。

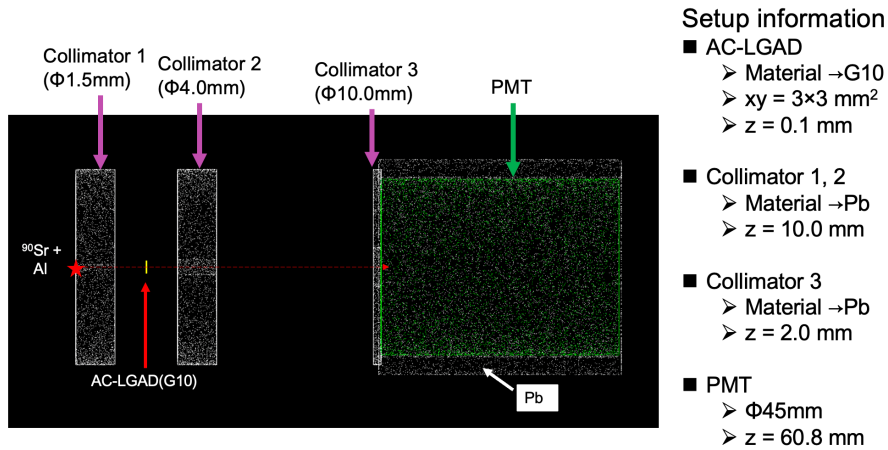


図 3.6: 仮想空間実験セットアップ 1

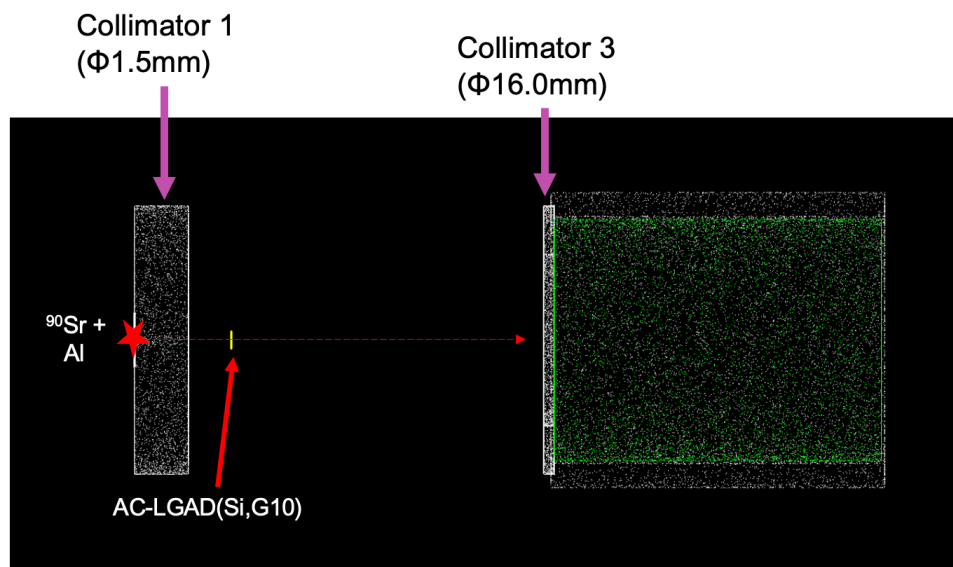


図 3.7: 仮想空間実験セットアップ 2。その他の条件はセットアップ 1 と同様

3.2.5 シミュレーション結果及びセットアップ案

今回は実際に使用する放射線源が最大2.28MeVの β 線を放射することより、2.28MeVの電子を放射線状にランダムに10000個入射させた。検出効率は以下ようになった。

Setup	Entered in AC-LGAD	Entered in PMT	Detection rate
1	1227	285	27%
2	1323	1022	77%

表 3.1: 各セットアップにおける検出効率

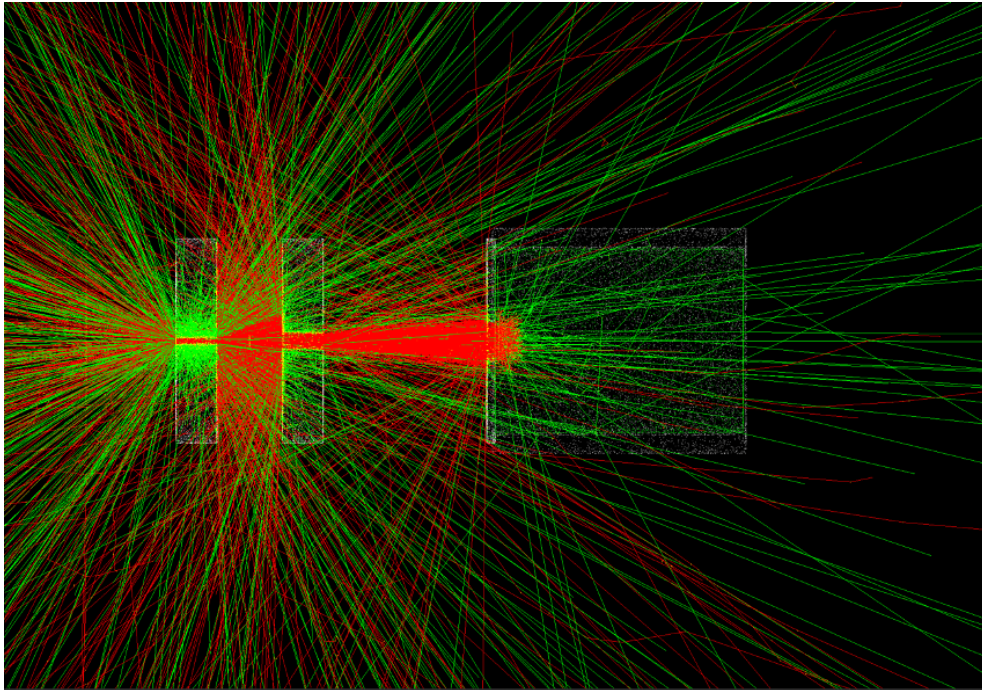


図 3.8: 仮想空間実験セットアップ1でのシミュレーション結果。赤線が放射している電子を表している。

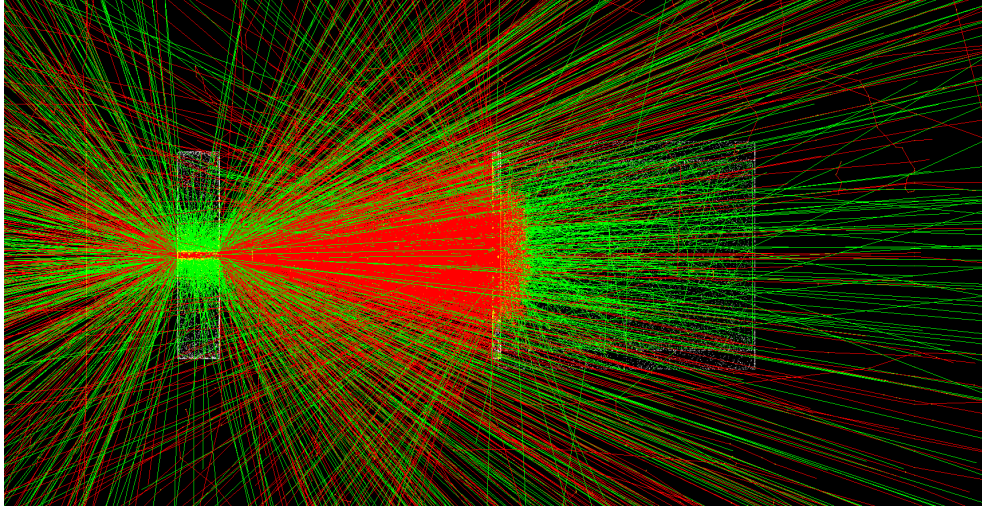


図 3.9: 仮想空間実験セットアップ2でのシミュレーション結果。セットアップ1よりも多く PMT に入射していることがわかる

これよりセットアップ2のほうが検出効率が高いことがわかった。コリメータを一つ多く設置しており、PMT 前のコリメータの穴も小さいセットアップ1の検出効率が悪いのは当然ではあるが、重要な点はセットアップ2を採用した時の経路長のずれによる時間分解能測定の正確性である。セットアップ2は多重クーロン散乱の計算結果をもとに構築しているので AC-LGAD に入射しなかった β 線が PMT に入射する可能性は低いとしているが、その検証は出来ていない。卒業研究までに十分信頼性のある情報を得られることができなかったため考察及び実際に構築するセットアップ案を作成することができなかった。

今後の研究では、3月に実際にセットアップを構築した上で時間分解能の評価を行い、データ取得効率と時間分解能の最適セットアップを探索していく。

第4章 集積回路 (ASIC) の応答時間揺らぎの評価

4.1 ASIC の性能評価

ASIC の応答時間の揺らぎは、検出器の時間分解能に影響する。本研究では ePIC 実験に採用される AC-LGAD に適用することを目的とした ASIC の実機を確保したため、その応答時間の揺らぎについて評価した。

4.1.1 EICROC0

EICROC0 は ePIC 実験における AC-LGAD の情報を得るために必要な条件を満たすことを目標に作成された ASIC の一つである。EICROC0 は計 16 チャンネルからなり、1 チャンネルごとにそれぞれの信号到達時間 (Time of Arrival) と信号振幅 (Amplitudes) を得ることができる。(図 4.1)

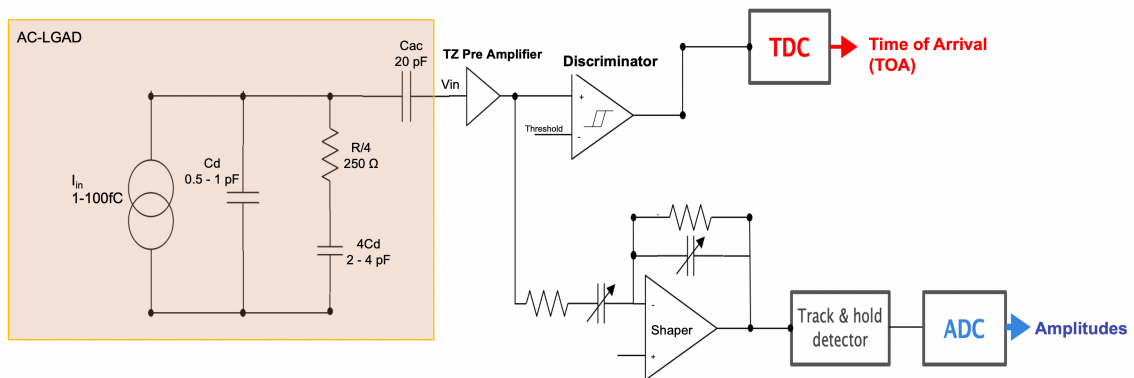


図 4.1: EICROC0 の 1 チャンネルの回路図 [11]

4.1.2 応答時間の揺らぎ (Time Jitter)

EICROC0 の時間分解能を σ_x , 異なる信号の振幅に対して時間応答が異なる場合に発生する到達時間のずれ (Time Walk) を σ_{tw} , 信号のノイズや信号の到達時間に依存する応答時間の揺らぎ (Time Jitter) を σ_j とすると、時間分解能は式 4.1 で表される。

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{tw}^2 + \sigma_j^2} \quad (4.1)$$

ここで、TimeWalkについては閾値を信号の最大振幅の50%とすると時間分解能の影響をほとんど無視することができる。したがって、本実験では σ_{tw} は無視して考える。TimeJitterは信号の振幅、ノイズ、到達時間に依存しており、以下の式で表される。[10]

$$\sigma_j = \frac{Noise}{\frac{Signal}{Risetime}} = \frac{\sigma_{noise}}{\left| \frac{Signal}{t_{rise}} \right|} \quad (4.2)$$

上式において σ_{noise} はノイズの大きさ、 $Signal$ は信号の最大振幅を表す。また、 t_{rise} は立ち上がり時間であり $t_{rise} = t_{90\%Signal} - t_{10\%Signal}$ と定義する。

本実験ではこの応答時間の揺らぎについて評価を行う。

4.1.3 評価方法

式4.2よりjitterを測るためには、EICROC0の信号の到達時間(TOA)及び振幅の情報が必要である。また、ノイズの大きさは図4.2のように信号の揺らぎの大きさを測定する。

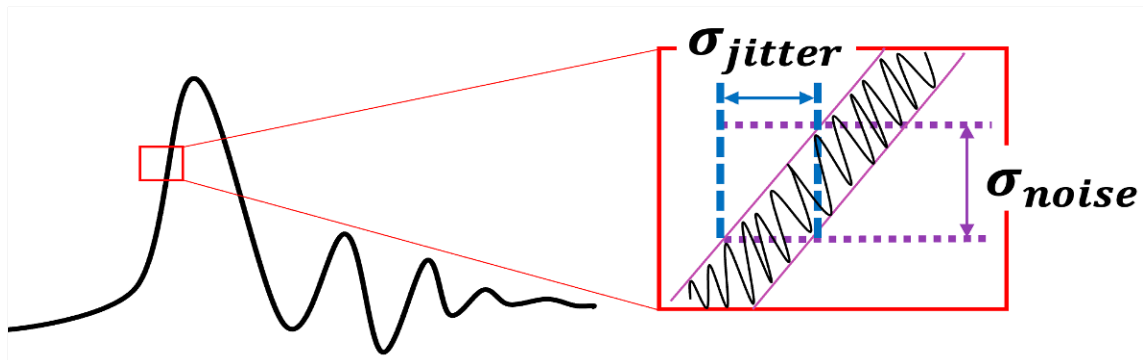


図 4.2: ノイズの大きさ

本実験はEICROC0のjitter性能評価であるため、回路図4.1で記したAC-LGADからの信号入力ではなく、EICROC0 Charge Injection Systemを利用した一定の電荷を注入してEICROC0からの信号を得る。また、オシロスコープで得られた信号の生データを可視化させ、時間と振幅情報をCSVファイルとして出力し、解析を行う。

4.1.4 実験セットアップ

前述(4.1.3)した性能評価をするために、本実験では以下のようなセットアップを構築した。HV電源(図4.3左)でInterface boardに3.3 Vの電圧をかけ、PCよりコマンドで注入電荷の電荷量、注入回数、注入するチャンネルを決定し実行する。コマンド実行後、EICROC0からの信号をオシロスコープに出力し、データを取得することができる。

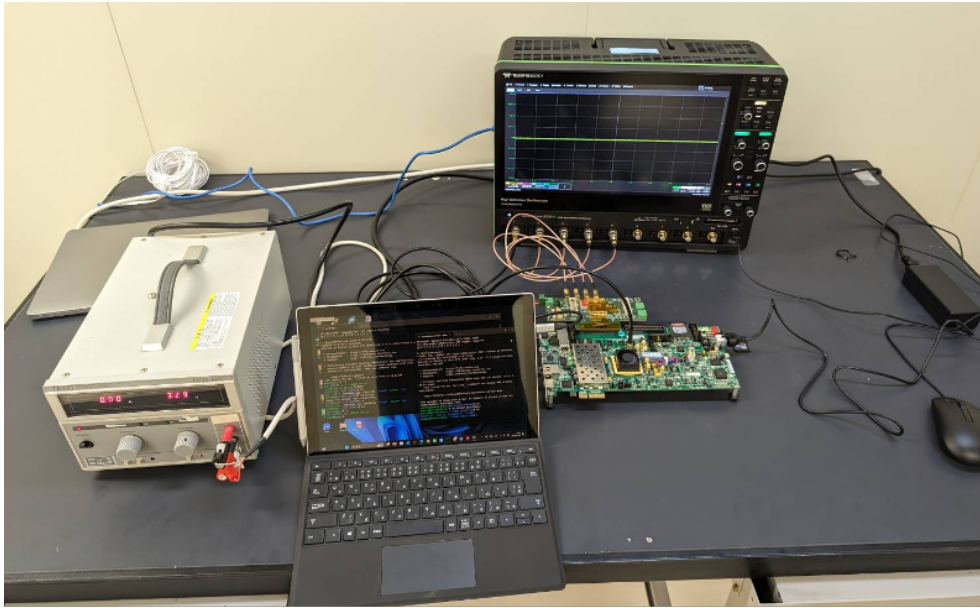


図 4.3: EICROC0 の jitter 性能評価セットアップ

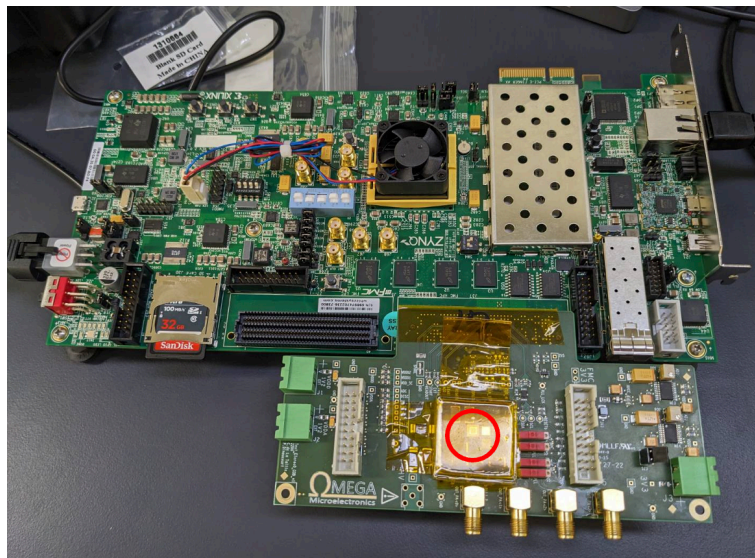


図 4.4: EICROC0 Test board(凸部分)+ Interface board(上) 及び EICROC0(赤丸内)

4.2 EICROC0 の jitter 性能評価結果

EICROC0 の Time jitter は以下のようになった。

<i>injectionCharge</i>	<i>MaxAmplitude[mV]</i>	<i>Timejitter[ps]</i>
0(Max)	197	42.0
30(Middle)	148	53.3
55(Min)	51	81.5

表 4.1: 注入電荷量における最大振幅と Time jitter

表 3.1 より注入電荷量を最大にした場合、Time jitter は $42ps$ となった。ここで、EIC ePIC 実験において AC-LGAD ASIC の要求性能と比較すると、jitter の要求性能を満たせていない。[11] しかし、EICROC0 はプロトタイプの前段階であり α 版の ASIC であるため、この値は向上していく見通しである。

- EIC-ePIC 実験における AC-LGAD ASIC の要求性能
 - pixel size: $0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$
 - low power consumption $< 2 \text{mW/channel}$
 - low jitter 20ps
 - low noise 1mV/channel
 - sensitivity to low charge (2fC)

本実験で得られた各電荷量ごとの生データのプロットを記す。赤線は最大振幅を記録した際の振幅と時間を表している。

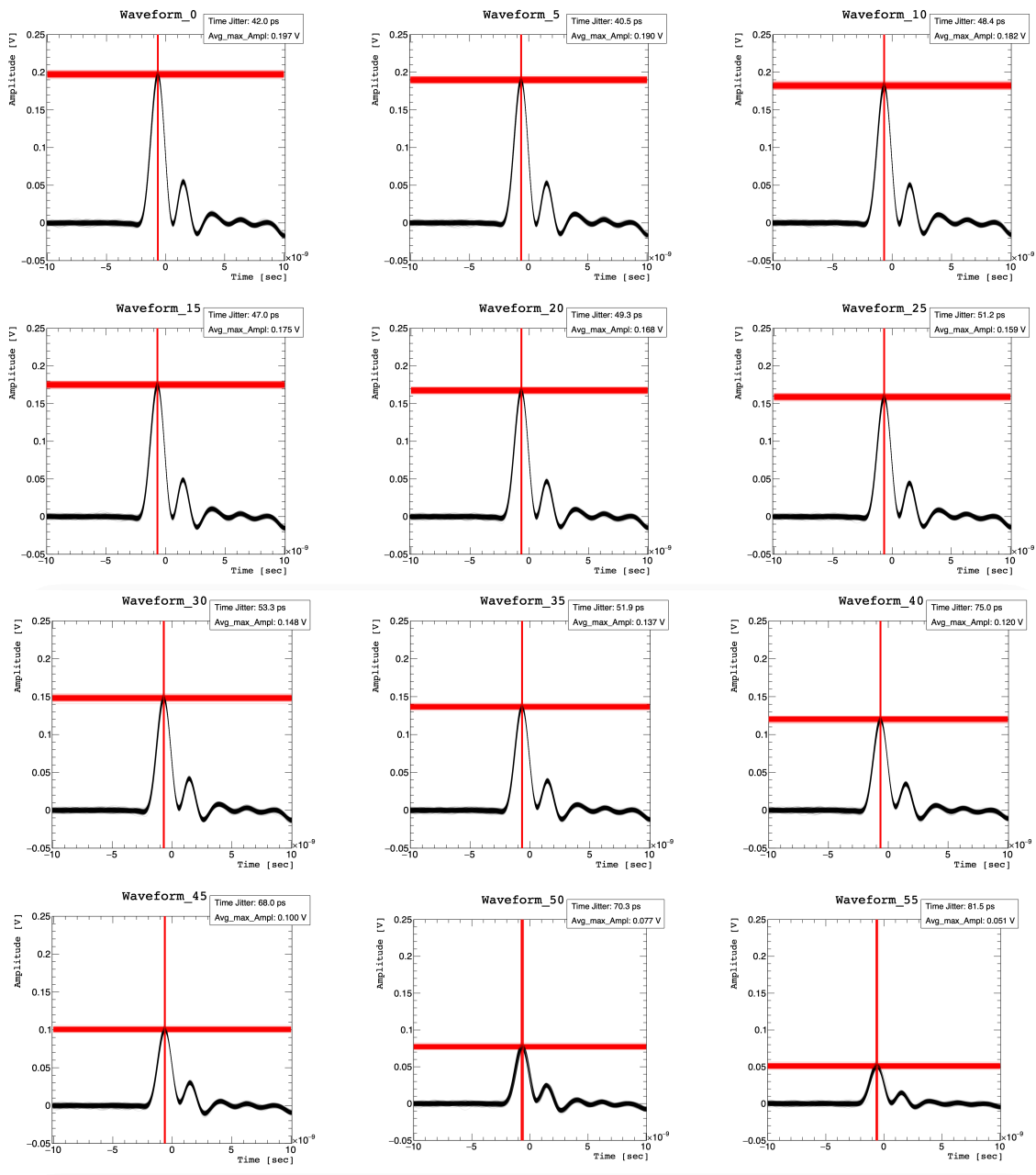


図 4.5: EICROC0 の Timejitter

次に、各注入電荷量による最大振幅と jitter について以下のようになった。

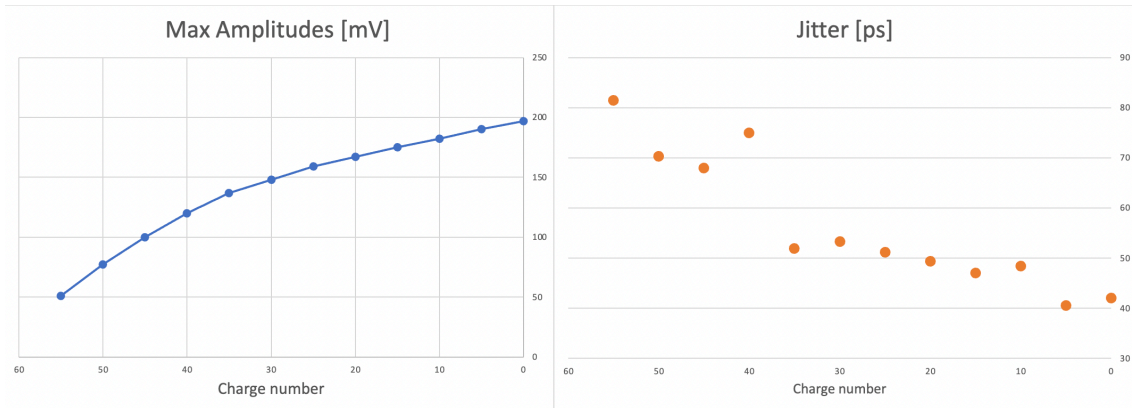


図 4.6: 各注入電荷量における最大振幅と Time jitter

ここで、横軸の Charge number というのは、EICROC0 Charge Injection System における注入電荷量を表しており、0 が最大電荷量、63 が最小電荷量となっている。具体的な数値は本実験では得られることができなかったが、EICROC Project Team の報告によると、 $[24.91 \text{ fC} \rightarrow 0.505 \text{ fC}]$ の電荷が注入されていることがわかっている。[11]

しかし、この電荷量は使用している EICROC0 Test board に依存している可能性もあるため、同じ電荷量が注入されているかどうかは不明である。この注入電荷量の決定は今後の課題の一つである。

図 4.6 より、注入電荷と最大振幅、Time jitter には強い相関があり、jitter に関しては多少ばらつきがあるものの注入電荷量が大きいほど jitter の値も良い傾向にある。これは式 4.2 より立ち上がり時間が小さく、最大振幅の値が大きい時、jitter が小さくなることがわかる。図 4.5 の波形を見ると注入電荷量が大きいほど鋭く高いピークがみられる。実際、立ち上がり時間に関しては顕著な変化は見られなかったが、最大振幅の差が Time jitter に大きく影響していると考えられる。

第5章 結論

本研究では、EIC 加速器を利用して核子の内部構造を探るための重要な実験である EIC-ePIC 実験において、粒子識別検出器の一つである Time of Flight(TOF) に採用される、AC-LGAD (AC-coupled Low Gain Avalanche Detector) 検出器の性能評価に向けた実験系の設計およびその信号を読み出す ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) の性能評価を行った。

2024年3月に広島大学にて AC-LGAD+EICROC0 の性能評価環境の構築が完成し EICROC0 のみではなく AC-LGAD の時間分解能についても性能評価を行なっていく予定である。本来は卒業期間までに AC-LGAD の評価系を設計することが目標の一つであったが、間に合わなかった。しかし、これは失敗ではなく、今回考慮したことは全て実際にセットアップを組み立てる際にも必要な情報となるので、今回の結果を踏まえて最適なセットアップを構築していくことが次の課題である。

ASIC の応答時間揺らぎ評価については最大値電荷注入した際の応答時間揺らぎが 42 ps というひとつの結果を得ることができた。また、注入電荷量による依存性も観測することができた。これは ASIC の性能評価における一つの大事な過程で、現在はこの解析をもとに、EICROC0 の 16 チャンネル全てのデータ解析を行っている。今後は全てのチャンネルでの応答時間揺らぎの評価や最大振幅の比較をしていくことが課題となってくる。

検出器開発は、新しい物理を知る上でとても大切なことであり、なくてはならないものである。全ての検出器が必要な高性能を満たし実験が始まったときには、これまで解明されてこなかった質量起源やスピンの謎、グルーオンなどの核子の内部構造についてより深い情報が得られることを期待している。2032年の実験開始に向けて、これからも本研究を続けていき、より良い検出機の開発に努めていく。

謝辞

本研究の実施および論文の完成にあたり、多くの方々からご支援をいただきました。この場を借りて心から感謝の意を表したいと思います。

まず第一に、指導教員である志垣賢太教授に深く感謝申し上げます。志垣教授には自分が3年の時からお世話になっており、「Hi-サイエンティスト養成プログラム」の自由課題研究でクォーク物理学に興味を持ち声をかけさせていただいたところ快く受け入れてくださり、未熟な私にたくさんのご指導、ご助言をいただきました。志垣教授のおかげで自分の興味を持った分野での研究を進めることができました。また、国際学会や研究出張の機会をたくさん設けてくださいました。これらの機会は今後の研究活動においてとても大きな財産となることを確信しています。

また、WPIの八野哲特任助教にも感謝の意を表したいと思います。八野特任助教は本研究のメインテーマであるePIC実験BrrrelTOF検出器の副責任者であり、私に身につけるべき知識や検出器開発の最新状況、実験環境など提供していただき、私の研究活動を大きく支えてくれました。また、データ解析の手助けやそのフィードバックには心から感謝しています。

さらに、この研究室に興味を持つきっかけをくださったM2の副田さんをはじめ多くの先輩方にも感謝いたします。初めてこの研究室にお世話になったのが3年で、まだなにも専門的なことどころか基礎的な知識もない中で、初歩的などころから原子核物理について教えてくださいました。また、一緒に広島市内でお酒を飲んだり、麻雀やカラオケなどで息抜きのお場を与您とくださり本当にありがとうございました。

同期のみんなにも感謝を伝えたいです。いつも他愛もないことを話したり、夜遅くまで一緒に作業・勉強したりでこの一年でとても仲良くなれたと思います。特に院試終わりのもつ鍋は過去一で美味しかったです。また、3年のときに一緒にこの研究室に来てくれた山内君にはとても感謝しています。これからもよろしく願います。山口准教授、本間准教授、三好助教をはじめ、KEKの中村助教やRIKENの後藤さんなど、この2年間でたくさんの方に支えられて研究を進めることができました、本当にありがとうございました。最後に、この4年間定期的に連絡をくれてこの大学生活を支えてくれた家族にも感謝を伝えます。初めの2年間は勉学に集中したいという理由でアルバイトをしないことを受け入れてくれました。また、自分の良い報告に対していつもすごいと褒めてくれてとても嬉しかったです。妹弟も勉強や部活での報告が嬉しいと同時に刺激になりました。いつもありがとう。

参考文献

- [1] 素粒子物理学とは, 近畿大 (2024.2.10 閲覧) https://www.phys.kindai.ac.jp/education/what_is_physics/elementary_particle_physics.html
- [2] クォーク・グルーオン・プラズマの物理 実験室で再現する宇宙の始まり, 秋葉康之 著, 共立出版
- [3] 原子核物理学, 永江知文 長宮正治 共著, 裳華房
- [4] Electron-Ion Collider (EIC), Brookhaven National Laboratory <https://www.bnl.gov/eic/>
- [5] Electron-Ion Collider Achieves Critical Decision 1 Approval, July 6, 2021 <https://www.energy.gov/science/articles/electron-ion-collider-achieves-critical-decision-1-approval>
- [6] EIC Japan/asia meeting report <https://indico.phys.sinica.edu.tw/event/88/>
- [7] EIC Yellow Report, Nucl. Phys. A 1026 (2022) 122447 <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2022.122447>
- [8] AC-LGAD Detectors for Spatial and Timing Measurements at EIC https://www.ictp-saifr.org/wp-content/uploads/2023/05/yezhenyu_POETIC_20230505.pdf
- [9] K. Nakamura et al., JPS Conf. Proc. 34, 010016 (2021) <https://journals.jps.jp/doi/pdf/10.7566/JPSCP.34.010016>
- [10] LGAD2023.pdf <https://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~hara/LGAD2023.pdf>
- [11] Status and Plan on EICROC, eRD112/LGAD Consortium Meeting, Jun 6, 2023 https://indico.bnl.gov/event/19528/contributions/76533/attachments/47836/81223/EICROC0_Progress_report_eRD112_20230_06_06.pdf
- [12] Geant4 <https://geant4.web.cern.ch/>

- [13] H. Bichsel, D. Grooms, S. Klein, “27. Passage of Particles through Matter 1”, Corpus ID: 8104407 <https://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-passage-particles-matter.pdf>