

# 修士論文

J-PARC における  $\Lambda$  共鳴状態の探索実験に向けた  
チェレンコフ検出器と Glass GEM の開発

Development of Cherenkov Detector and Glass GEM  
for experimental search for  $\Lambda^*$  resonance at J-PARC

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
原子核物理研究室

嶋崎開斗  
Kaito Shimazaki

2025 年



# J-PARCにおける $\Lambda$ 共鳴状態の探索実験に向けた チェレンコフ検出器と Glass GEMの開発

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核物理研究室

嶋崎 開斗

## 1. 新たな共鳴状態 $\Lambda(1665)$ の探索実験 (J-PARC E72 実験)

クォーク模型は、多くのハドロンの基底状態および励起状態の質量や量子数を統一的に記述することに成功している。一方で、近年ではより複雑なクォーク構成を持つエキゾチックハドロンが注目を集めている。その候補として挙げられているのが、Crystal Ball 実験 [1] により  $\Lambda\eta$  生成閾値近傍に存在が示唆されている新たな共鳴状態である。Crystal Ball 実験では、 $\Lambda\eta$  閾値近傍 (1664–1685 MeV) において、 $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応の全断面積、微分断面積、および終状態  $\Lambda$  の偏極度が測定された。このエネルギー領域にはスピン・パリティが  $J^\pi = 1/2^-$  の  $\Lambda(1670)$  共鳴状態が存在するため、微分断面積の角度分布は平坦になることが予想される。しかし、実験結果は 1667–1676 MeV の狭い範囲において 2 次関数的な振る舞いを示し、P 波以上の未知の共鳴状態の存在を示唆する結果が得られた。複数の理論研究により、この新たな共鳴状態はスピン  $J = 3/2$  を持ち、さらに従来のクォーク模型では説明が困難であることから、エキゾチックハドロン的一种である可能性が指摘されている。以降、この共鳴状態を  $\Lambda(1665)$  と呼ぶ。J-PARC E72 実験は、この  $\Lambda(1665)$  のスピン・パリティを決定することを目標とし、2025 年 11 月に実施した。Crystal Ball 実験では、測定された  $\Lambda$  の偏極度の統計が乏しく、パリティが決定できていなかったことを踏まえ、E72 実験では、Crystal Ball 実験の 100 倍の統計量 ( $\sim 3 \times 10^5$ ) を取得した。

E72 実験では、 $K^-$  ビームを液体水素標的に照射することで  $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応を測定し、 $\Lambda(1665)$  の存在を高統計で確立するとともに、そのスピン・パリティを決定する。実験セットアップの様子を、図 1 (A) に示す。 $K^-p$  反応により生成された荷電粒子は、Hyperon Time Projection Chamber (HypTPC) により飛跡を再構成し、周囲のプラスチックシンチレータ (HTOF) により反応イベントを同定する。また、上流側には BAC 検出器を設置し、ビーム中の  $\pi$  粒子を識別・除去する。さらに、液体水素標的に反応しなかった  $K^-$  ビームイベントを除去し、トリガーレートを削減するために、下流には KVC 検出器を設置した。本実験に使用した

KVC の実際の写真を図 1 (B) に示す。本論文では、E72 実験の主軸となる KVC、および次世代 HypTPC に向けた薄型 Glass GEM の開発について述べる。

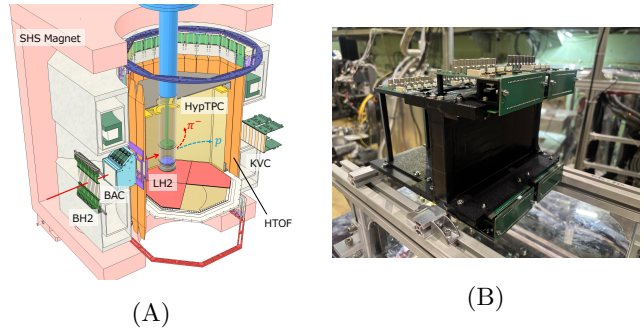


図 1: (A)E72 実験のセットアップの模式図。(B)Kaon Veto Cherenkov 検出器の写真

## 2. Kaon Veto Cherenkov 検出器の開発

E72 実験では、液体水素標的に反応しなかった  $K^-$  ビームイベントを除去し、トリガーレートを削減するために、Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) を用いた。KVC は閾値型のチェレンコフ検出器であり、ラディエータとして石英ガラス、読み出しに MPPC を使用した。石英ガラスの屈折率が 1.46 であることから、ビーム粒子である  $K^-$ 、 $\pi^-$  粒子と、 $\Lambda$  崩壊によって生成される陽子を識別することができる。図 2 に示すように、KVC は E72 実験に向けた開発の過程において、合計 3 度のテスト実験を実施し、検出効率および平均光量の評価を行った。またそれに伴い、KVC は ver. 1 から ver. 4 に至るまで改良を繰り返した。KEK PF-AR テスト実験では、2 GeV/c の電子ビームを用いて、KVC (ver. 1,2) の性能評価を行った。結果として、KVC (ver. 1,2) は 2 GeV/c の電子ビームに対して 99.9% の効率が得られ、十分な性能を有していることが確認された。またシミュレーションにより、E72 本実験と同様の 735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対しても十分な性能を発揮することが予想されていた。しかしながら、その後行われた E73 パラサイト実験では、735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対して、KVC (ver. 1) の検出効率が 50% 以下まで大きく低下してしまった。これは、ガラスと被覆材であるテフロンシート間の空気層に光が取り込まれたことが原因だと考えられる。この結果を受け、石英ガラスの厚みおよびガラス表面の境界条件を

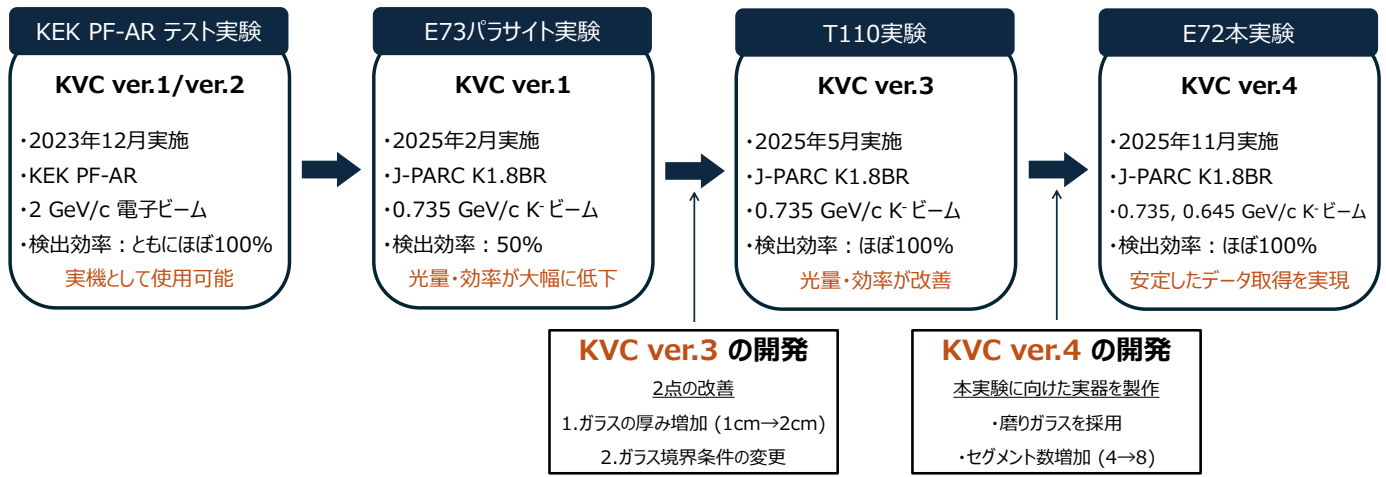


図 2: KVC の各バージョンにおけるテスト実験と開発の流れ

セグメントごとに変更した KVC (ver. 3) を開発し、再び 735 MeV/c の  $K^-$  ビームを用いたテスト実験 (T110 実験) を行った。実験の結果、石英ガラスの厚み増加によるチェレンコフ光量の増加、および磨りガラス加工の導入によってガラス境界での光の乱反射が促進されたことにより、KVC (ver. 3) の平均光量が大幅に増加し、検出効率も 99.6%以上を達成することを確認した。その後、E72 本実験に用いる実機として、磨りガラスを採用した KVC (ver. 4) を開発し、本実験に臨んだ。本実験においても、KVC (ver. 4) は 99.6%以上の検出効率を達成し、安定したデータの取得に成功した。

また、これら一連の実験結果について、Geant4を用いたシミュレーションによる再現性の検証を行った。

### 3. 薄型 Glass GEM の開発

現在の HypTPC はドリフト電子の増幅部として Gas Electron Multiplier (GEM) を採用している。しかし、その平面度の悪さに起因する放電の影響により、レート耐性が  $10^6$  Hz に限られてしまうという課題がある。そこで、本論文ではレート耐性を  $10^7$  Hz まで上げることを目指し、図 3 (A) に示す、絶縁層にガラスを用いた薄型 Glass GEM を開発した。絶縁層をガラスにすることで、耐放電性、および平面度の改善による放電率の抑制が期待される。さらに、これまでに開発されてきた Glass GEM は厚さが  $570 \mu\text{m}$  であったが、本論文では株式会社 NSC との共同開発により、世界初となる  $100 \mu\text{m}$  厚を実現した。

開発した Glass GEM に対して相対増幅率の測定を行った。実験では、ドリフト電子を発生させるための  $\beta$  線源として  $^{90}\text{Sr}$  を使用し、GEM からの信号を測定した。相対増幅率の測定結果を図 3 (B) に示す。図から分かるように、GEM への印加電圧の増加に伴い、測定した信号の波高が指数関数的に増加している。この結果は、薄型 Glass GEM を用いた電子増幅に世界で初

めて成功したことを示している。

さらに、YAG レーザーを用いた絶対増幅率の測定を試みた。しかしながら、増幅率の解析結果は  $10^1$  オーダーと非常に低く、信号の取得が可能であったという実験事実と矛盾する結果となった。この原因として、YAG レーザー照射による電離メカニズムが単一エネルギー線源による一次電離とは異なることが挙げられる。そのため、絶対増幅率の測定には、 $^{55}\text{Fe}$  等の単一エネルギー線源が必要であることが明らかとなった。<sup>1)</sup>

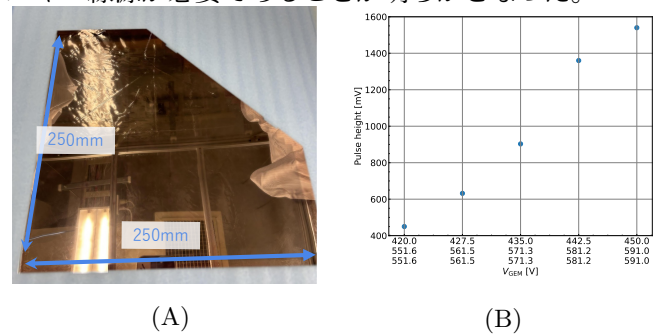


図 3: (A) 厚さ  $100 \mu\text{m}$  の薄型 Glass GEM の実際の写真。(B) Glass GEM の相対増幅率

### 6. まとめ

本論文では、E72 実験のための KVC 検出器の開発、および将来実験のための Glass GEM の開発を行った。KVC の開発では、ラディエータである石英ガラスの厚み増加、および磨りガラス加工の導入が、平均光量と検出効率の向上に対して有効な改良であることが明らかとなり、E72 本実験においても KVC は 99.6%以上の検出効率を達成した。一方で Glass GEM の開発では、 $100 \mu\text{m}$  厚の薄型の Glass GEM の開発、および電子増幅に世界で初めて成功した。 $^{90}\text{Sr}$  線源を用いた相対増幅率の測定に成功したが、YAG レーザーを用いた絶対増幅率の測定では解析方法に課題が残り、 $^{55}\text{Fe}$  等の単一エネルギー線源が必要であることが明らかとなった。

[1] A. Starostin *et al.*, Phys. Rev. C **64**, 055205 (2001).

1)  $^{55}\text{Fe}$  で測定を試みたが、強度不足により信号の取得ができなかった。



# 目次

第 1 章	新たな共鳴状態 $\Lambda(1665)$ の探索実験 (J-PARC E72 実験) . . . . .	1
1.1	エキゾチックハドロン . . . . .	1
1.2	先行研究: Crystal Ball 実験 . . . . .	3
1.3	エキゾチックハドロン候補である $\Lambda(1665)$ 共鳴状態の探索 . . . . .	5
1.3.1	$\Lambda(1665)$ のスピン・パリティの決定方法 . . . . .	6
1.4	実験セットアップ . . . . .	9
1.4.1	J-PARC K1.8BR ビームライン . . . . .	9
1.4.2	K1.8BR 実験エリア . . . . .	10
1.4.3	$K^-p \rightarrow \Lambda\eta$ 反応測定に向けたトリガー条件 . . . . .	11
1.4.4	その他の検出器 . . . . .	16
1.5	E72 実験の取得データの概要 . . . . .	20
第 2 章	Kaon Veto Cherenkov 検出器の開発 . . . . .	23
2.1	電子ビームを用いた KEK PF-AR での試験 . . . . .	25
2.2	$K^-$ ビームを用いた J-PARC での試験 . . . . .	27
2.2.1	セットアップ . . . . .	27
2.2.2	回路構成 . . . . .	28
2.2.3	測定条件 . . . . .	29
2.2.4	解析方法 . . . . .	30
2.2.5	E73 パラサイト実験による、KVC (ver. 1) の性能評価の結果 . . . . .	33
2.2.6	検出効率、平均光量低下の考察および KVC (ver. 3) の開発 . . . . .	35
2.2.7	T110 実験による、KVC (ver. 3) の性能評価の結果 . . . . .	39
2.2.8	光量増加の考察および本実験に向けた KVC (ver. 4) の開発 . . . . .	40
2.2.9	E72 本実験の結果 . . . . .	43
2.3	Geant4 を用いたシミュレーション . . . . .	47
2.3.1	KVC のジオメトリ設定 . . . . .	47
2.3.2	光学パラメータの設定 . . . . .	47
2.3.3	パラメータ調節の流れ . . . . .	51
2.3.4	KEK PF-AR・E73 パラサイト・T110 実験における再現性の検証と考察 . . . . .	52

2.3.5	磨りガラス条件における再現性の検証と考察	55
第3章	大型・薄型 Glass GEM の開発	57
3.1	Hyperon Time Projection Chamber (HypTPC)	57
3.2	大型・薄型 Glass GEM の開発	64
3.2.1	Gas Electron Multiplier (GEM) の概要	64
3.2.2	Glass GEM 開発の目的と流れ	65
3.3	Glass GEM の相対増幅率と放電率の評価	69
3.3.1	実験セットアップ	69
3.3.2	測定結果及び考察	71
3.4	Glass GEM の絶対増幅率の評価	73
3.4.1	実験セットアップ	73
3.4.2	絶対増幅率の解析手法	74
3.4.3	絶対増幅率の解析結果	77
3.4.4	YAG レーザーを用いた増幅率測定の課題	78
第4章	本研究のまとめと今後の展望	81
4.1	本研究のまとめ	81
4.1.1	Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) の開発	81
4.1.2	大型・薄型 Glass GEM の開発	82
4.2	今後の展望と課題	83
参考文献		88

# 目次

1.1 クォーク模型によるハドロンの負パリティ励起状態での質量の理論値と実験値の比較	2
1.2 Crystal Ball 実験で測定された $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$ の微分断面積	4
1.3 $S = -1$ の共鳴状態に対するクォーク模型による質量予測	5
1.4 $\Lambda(1665)$ における $Pd\sigma/d\Omega$ の角度分布	8
1.5 J-PARC K1.8BR ビームラインの概略図	10
1.6 E72 実験のセットアップの模式図	11
1.7 BHT および BH2 検出器の模式図	12
1.8 チェレンコフ光における粒子ごとの運動量と屈折率の関係	13
1.9 BAC の模式図	13
1.10 HTOF の 3次元モデル図	14
1.11 $\Lambda\eta$ 終状態かつ $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ の崩壊モードを選択した際の飛跡の例	15
1.12 BLC セル構造の模式図	17
1.13 CVC 検出器の写真	19
1.14 SAC および SFV 検出器の模式図	19
1.15 各運動量における $K^-$ ビーム粒子数の分布	21
1.16 $\Lambda\eta$ 生成収量と、 $\Lambda$ 偏極度測定における統計誤差の見積もり	22
1.17 TPC により検出された $\Lambda$ 粒子の崩壊の飛跡の様子	22
2.1 KVC の写真および模式図	23
2.2 KVC の各バージョンにおけるテスト実験と開発の流れ	24
2.3 KVC (ver. 1,2) の模式図	25
2.4 KVC (ver. 1,2) の検出効率と平均光量	26
2.5 E73 パラサイトおよび T110 実験のセットアップ	27
2.6 MPPC の写真と SUM 回路の回路図	28
2.7 KVC の回路構成の模式図	29
2.8 各閾値に対するノイズレートの測定結果	29
2.9 T110 実験における btot および Tracking 条件	32
2.10 LED を用いて測定した KVC の ADC 分布	33

2.11 E73 パラサイト実験において、運動量 735 MeV/c の $K^-$ ビームを用いた際の KVC (ver. 1) における平均光量の解析結果	34
2.12 E73 パラサイト実験において、 $K^-$ ビームを用いた際の検出効率の解析結果	35
2.13 ガラス – 空気境界における光の挙動の模式図	36
2.14 無加工の石英ガラスと、磨りガラスの比較	38
2.15 白色塗料の反射率および実際の写真	38
2.16 各セグメントに赤色光を照射した際の写真	41
2.17 KVC (ver. 3) における、 $^{90}\text{Sr}$ および $K^-$ を入射させた際の比較	42
2.18 KVC (ver. 4) の写真および模式図	43
2.19 ビームトラックおよび KVC の $x$ 軸上の位置	45
2.20 シミュレーションに用いた KVC のジオメトリ	47
2.21 シミュレーションに用いた MPPC の量子効率	48
2.22 シミュレーションに用いた石英ガラス屈折率の波長依存性	49
2.23 Geant4 unified モデルにおける反射成分の概念図	50
2.24 KEK PF-AR 実験に対するシミュレーションの結果	53
2.25 E73 パラサイト実験、および T110 実験 (セグメント 4) に対するシミュレーションの 結果	54
2.26 T110 実験 (セグメント 4) に対するパラメータ再調整の結果	55
2.27 T110 実験 (セグメント 2) に対するパラメータ調整の結果	56
2.28 T110 実験 (セグメント 2) に対するシミュレーションと実験におけるヒストグラムの 比較	56
3.1 HypTPC の展開図	57
3.2 ガスベッセルの模式図および写真	58
3.3 フィールドケージの写真	59
3.4 ターゲットホルダーの写真	60
3.5 ゲーティンググリッドの写真および動作原理の模式図	61
3.6 GEM の写真	62
3.7 HypTPC にインストールされた GEM の写真	62
3.8 読み出しパッドの写真	63
3.9 GEM の穴径と構造を示した模式図	66
3.10 AIST、および NSC によって開発された Glass GEM	67
3.11 Glass GEM の製造過程と穴の形の模式図	67
3.12 6 分割された GEM と抵抗チェーンの模式図	68

3.13 テストチェンバーの写真	70
3.14 相対増幅率・放電率評価実験のセットアップ図	70
3.15 Glass GEM を用いて得られた信号のプロット	71
3.16 Glass GEM の相対増幅率と波高分布	72
3.17 Glass GEM の放電率	72
3.18 絶対増幅率評価試験のセットアップ図	74
3.19 種電子数とレーザーエネルギー密度の関係	75
3.20 レーザー強度、および面積評価の様子	76
3.21 各電圧値における GEM 信号	77
3.22 Glass GEM の増幅率と、従来のフォイル GEM による増幅率との比較。	78
3.23 ガス中の TMA 濃度と電離量の関係	79

# 表目次

1.1 SHS マグネットの基本スペック	16
1.2 BLC1 および BLC2 の主な仕様と性能	18
1.3 各ビーム運動量における取得データの概要	20
2.1 KVC 各バージョンの仕様と性能評価実験のまとめ	24
2.2 KVC テスト実験における測定条件の概要	30
2.3 KVC ヒット選択条件および $K^-$ イベント選択条件の概要	31
2.4 各チャンネルにおける one photon gain の値	34
2.5 KVC (ver. 3) の各セグメントでの境界条件の概要	39
2.6 各セグメントにおける境界条件と平均光量の解析結果 (735 MeV/c $K^-$ )	39
2.7 E72 本実験における KVC (ver. 4) 性能評価の結果	44
2.8 KVC の $x$ 軸位置とビーム運動量の対応関係	46
2.9 KVC 各バージョンの仕様と性能評価実験のまとめ (再掲)	51
2.10 KEK PF-AR 実験におけるシミュレーションパラメータの設定	52
2.11 磨りガラス条件におけるシミュレーションパラメータの設定	55
3.1 HypTPC で用いる GEM の特性	65
3.2 従来のプラスチック GEM、AIST 製 Glass GEM、NSC 社製 Glass GEM の特性値の比較。	68
3.3 NSC 社製 Glass GEM における各セグメントの絶縁抵抗値	69
3.4 増幅電子数の計算に用いる定数の値	77

# 第1章 新たな共鳴状態 $\Lambda(1665)$ の探索実験 (J-PARC E72 実験)

本論文では、新たな共鳴状態  $\Lambda(1665)$  の探索実験 (J-PARC E72 実験) に向けた Kaon Veto Cherenkov 検出器の開発、および将来の大強度実験に向けた大型・薄型 Glass GEM の開発について論じる。本章では、J-PARC E72 実験の物理的背景として、エキゾチックハドロンや  $\Lambda(1665)$  共鳴状態、ならびにそのスピン・パリティの決定方法について述べる。次に、E72 実験の実験セットアップについて説明する。

E72 実験は、2025 年 11 月に J-PARC K1.8BR ラインにて実施された。本実験では、過去の Crystal Ball 実験で観測された  $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応の微分断面積に見られる特徴的な角度分布に着目することで、 $\Lambda\eta$  閾値近傍に存在が示唆されている幅の狭い新しい共鳴状態  $\Lambda(1665)$  の存在を検証する。特に、この共鳴状態のスピンおよびパリティを決定することが、E72 実験における重要な目標の1つであるため、本章では  $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応における微分断面積および終状態  $\Lambda$  の偏極度測定を通じたスピン・パリティの決定手法について詳述する。

以下では、まずエキゾチックハドロンについて述べた後、Crystal Ball 実験の結果を概観し、 $\Lambda(1665)$  共鳴状態の存在が示唆される背景について述べる。その後、E72 実験において  $\Lambda(1665)$  のスピン・パリティをどのように決定するかについて説明する。

## 1.1 エキゾチックハドロン

ハドロンとは、宇宙を構成する基本粒子の1つであるクォークが、強い相互作用によって結合した複合粒子の総称であり、これまでに約 400 種類のハドロンが発見されている [1]。この多様なハドロンの性質を体系的に説明し、分類するために、M. Gell-Mann [2] および Z. Zweig [3] によって、それぞれ独立にクォーク模型が提案された。クォーク模型では、アップ ( $u$ )、ダウン ( $d$ )、ストレンジ ( $s$ ) の3種類のフレーバーを持つクォークを基本自由度とし、ハドロンはこれらのクォークが結合して構成される状態として記述される。ハドロンのうち、3つのクォークから構成されるものはバリオンと呼ばれ、1つのクォークと1つの反クォークから構成されるものはメソンと呼ばれる。

クォーク模型は、多くのハドロンの基底状態および励起状態の質量や量子数を統一的に記述することに成功している。図 1.1 に示すように、ハドロンの負パリティ励起状態に関して、クォーク模型による理論値と実験値を比較すると、多くの共鳴状態において両者は良い一致を示して

いる。

一方で、いくつかの状態においては、クォーク模型による予測と実験結果との間に顕著な差異が存在する。その代表例が、 $\Lambda$  バリオンの最も軽い負パリティ励起状態である  $\Lambda(1405)$  である。 $\Lambda(1405)$  は、クォーク模型では他の励起状態と同程度の質量が予測されるにもかかわらず、実験的には理論値よりも約 100 MeV 低い質量を持つことが知られている。この差異は、 $\Lambda(1405)$  が単純な三つの構成子クォークからなる状態ではなく、より複雑な内部構造を持つことを示唆している。具体的には、 $\bar{K}N$  と  $\pi\Sigma$  のチャンネル結合を考慮した解析により、 $\bar{K}N$  が緩やかに束縛したハドロン分子状態である可能性が指摘されている [4, 5, 6]。このような描像は、クォーク模型では説明が困難であった  $\Lambda(1405)$  の質量や性質を自然に理解できる点で注目されている。

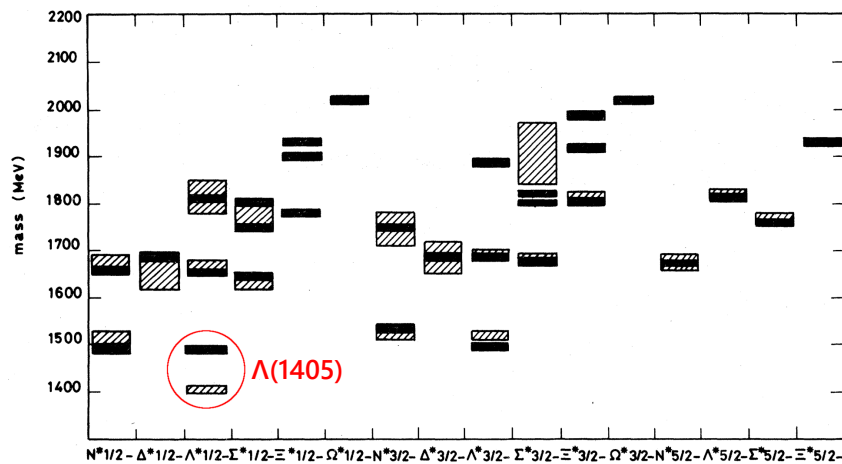


図 1.1: クォーク模型によるハドロンを負パリティ励起状態での質量の理論値 (黒い四角) と実験値 (斜線の入った四角) の比較図 [7]。実験値における斜線の幅は、共鳴状態の崩壊幅を表している。赤い丸で囲んだ  $\Lambda(1405)$  では、実験結果よりも 100 MeV ほど重い理論値となっている。

このように、クォーク模型の描像では十分に説明できない内部構造を持つハドロンは、エキゾチックハドロンと総称される。エキゾチックハドロンは、従来の  $qq$  (メソン) や  $qqq$  (バリオン) といった構成に加え、ハドロン分子状態や多クォーク状態など、より複雑な自由度を含む可能性が議論されている。

量子色力学 (QCD) においては、ハドロンが全体としてカラー中性であれば、テトラクォークやペンタクォークといった多クォーク状態の存在は原理的に許されている。しかしながら、これまでに観測されてきた多くのハドロンはクォーク模型で説明可能な構造を持つものが大半であり、なぜエキゾチックな構成を持つ状態に限られた数しか観測されていないのかは、ハドロン形成の機構を理解する上で重要な未解決問題である。

このような背景のもと、クォーク模型では説明が困難な共鳴状態を精密に測定し、そのスピン・パリティを明らかにすることは、エキゾチックハドロンを理解を深める上で極めて重要であ

る。次節では、 $\Lambda\eta$  閾値近傍に存在が示唆されている新しい共鳴状態  $\Lambda(1665)$  について、過去の実験結果および理論的研究を概観する。

## 1.2 先行研究：Crystal Ball 実験

Crystal Ball 実験 [8] では、 $\Lambda\eta$  閾値近傍 (1664–1685 MeV) において、 $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応の全断面積、微分断面積、および終状態  $\Lambda$  の偏極度が測定された。このエネルギー領域には、スピン・パリティが  $J^\pi = 1/2^-$  である良く知られた  $\Lambda(1670)$  共鳴状態が存在する。 $\Lambda(1670)$  は  $S$  波共鳴であるため、その寄与が支配的な場合、微分断面積の角度分布は平坦になることが予想される。

しかしながら、図 1.2 に示すように、測定された微分断面積には、色付けされた約 10 MeV の狭いエネルギー領域において、 $\cos\theta$  に対して 2 次関数的な角度依存性が顕著に現れている。この振る舞いは  $S$  波成分のみでは説明が困難であり、 $P$  波以上の寄与を持つ未知の共鳴状態の存在を示唆している。また、 $\Lambda\eta$  終状態の微分断面積として観測されていることから、この共鳴状態のアイソスピンは  $I = 0$  でなければならない。以降、本論文では、この幅の狭い新しい共鳴状態の候補を便宜的に  $\Lambda(1665)$  と呼ぶ。

この結果に対して、複数の理論的解析が行われている。ANL-OSAKA グループによる Dynamical Coupled-Channels Model を用いた解析 [9, 10] では、 $J^\pi = 3/2^+$  の  $P$  波共鳴状態が微分断面積に見られる 2 次関数的構造を生み出すと説明されている。一方、Liu および Xie らによる Effective Lagrangian Model に基づく解析 [11, 12] では、 $J^\pi = 3/2^-$  の  $D$  波共鳴状態が同様の角度分布を再現すると報告されている。

このように、Crystal Ball 実験の結果に基づき、 $\Lambda(1665)$  の存在を支持する複数の理論的予測が示されている。しかしながら、そのパリティについては各研究グループで結論が異なっており、現時点では大きな不確実性が残されている。この不確実性の主な要因として、Crystal Ball 実験では終状態  $\Lambda$  の偏極度が測定されているものの、統計量が十分でなかった点が挙げられる。

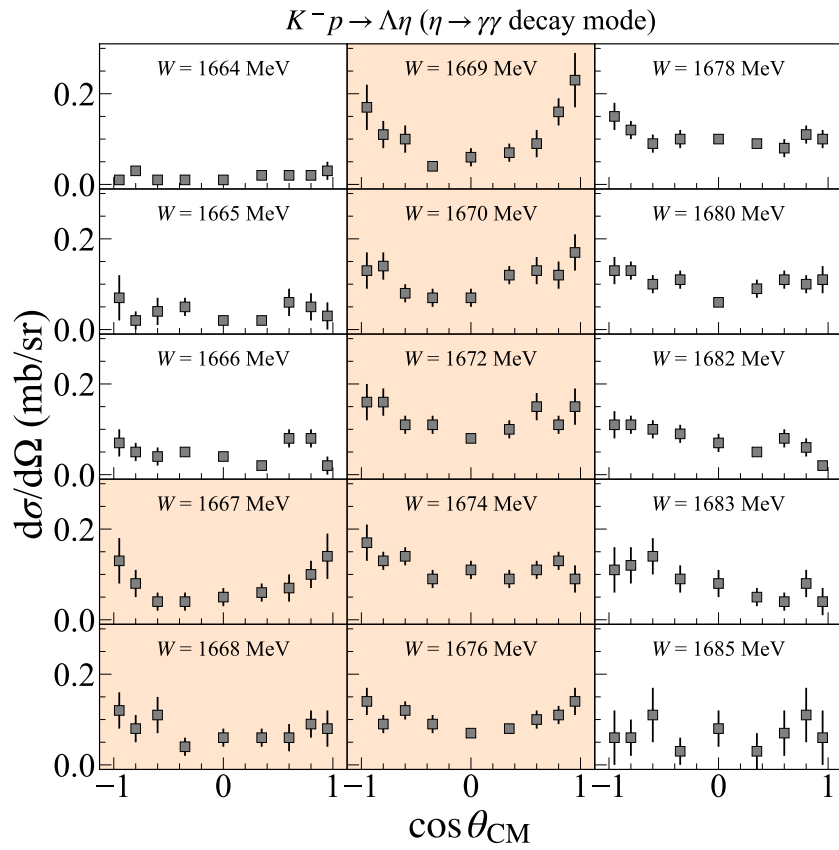


図 1.2: Crystal Ball 実験 [8] で測定された  $K^- p \rightarrow \Lambda \eta$  反応の微分断面積。図中の  $W$  は  $K^- p$  系の衝突エネルギーを表している。

クォーク模型による  $S = -1$  の共鳴状態に対する質量予測を図 1.3 に示す。図中の bar は理論値を、box は実験値を表している。赤線は  $\Lambda(1665)$  の想定される質量を示しており、 $\Lambda^*$  のスピンの場合  $3/2$  の場合に注目すると、 $P$  波共鳴 (図 1.3(A))、 $D$  波共鳴 (図 1.3(B)) のいずれにおいても、クォーク模型の理論値と対応する状態は存在しない。

このことから、 $\Lambda(1665)$  は 3 つの構成子クォークからなる通常のバリオンとは異なる構造を持ち、エキゾチックハドロンである可能性が示唆される。これまでに報告されているエキゾチックハドロンの候補である  $\Lambda(1405)$  や  $X(3872)$  が、仮にハドロン分子状態であるとすれば、それらはいずれも  $S$  波共鳴に対応する。一方で、 $\Lambda(1665)$  は  $P$  波あるいは  $D$  波共鳴に対応する点で、既存のエキゾチックハドロンとは異なる性質を持つ新しい状態である可能性がある。

Shi および Zou らは、文献 [13, 14] において  $\Lambda(1665)$  のエキゾチック性について議論している。これらの研究では、 $\Lambda(1665)$  が従来の 3 クォーク模型では質量や励起構造を十分に説明できないことから、meson-baryon 相互作用による動的生成の重要性が指摘されている。このことは、 $\Lambda(1665)$  に 5 クォーク成分が混在する可能性を示唆しており、エキゾチックな内部構造を持つ状態である可能性がある。

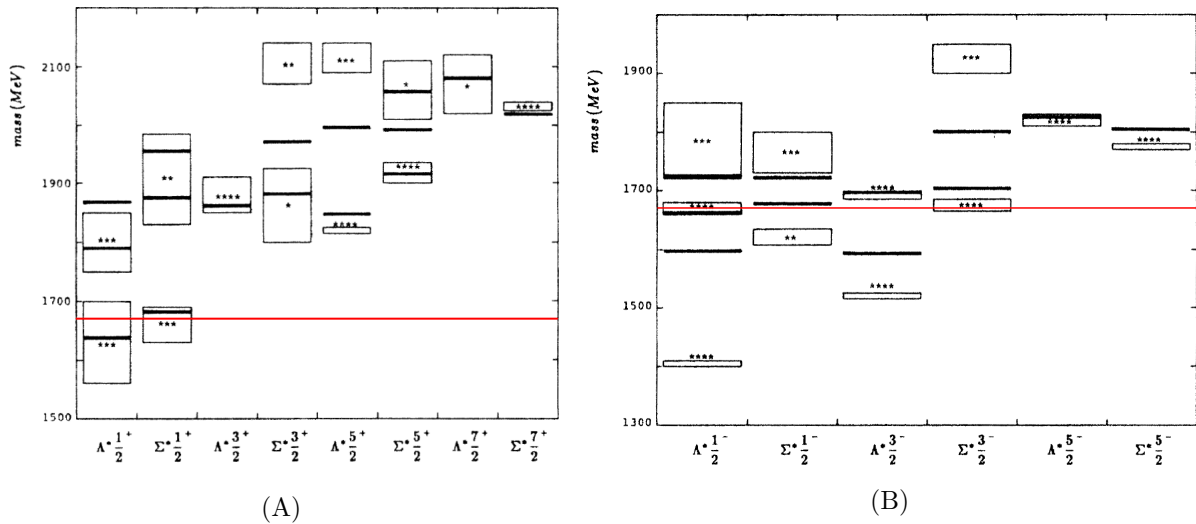


図 1.3:  $S = -1$  の共鳴状態に対するクォーク模型を用いた質量の理論値 [15]。bar は理論値、box は実験値を表している。(A) は正パリティの共鳴状態、(B) は負パリティの共鳴状態の場合を示している。

### 1.3 エキゾチックハドロンの候補である $\Lambda(1665)$ 共鳴状態の探索

J-PARC E72 実験では、エキゾチックハドロンの候補である  $\Lambda(1665)$  のスピン・パリティを決定することを目的としている。本実験では、 $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応を測定し、 $\Lambda(1665)$  を探索する。その手法は以下の通りである。

## 衝突エネルギー $W$ の高精度測定

K1.8BR ビームラインスペクトロメータを用いて、 $K^-$  ビームの運動量を測定し、衝突エネルギー  $W$  を高精度で決定する。

## 終状態 $\Lambda\eta$ の同定

$\Lambda \rightarrow \pi^- p$  と崩壊した時の  $\pi^- p$  の飛跡を HypTPC で検出して  $\Lambda$  を再構成し、質量欠損法を用いて  $\eta$  を同定する。

## スピンの決定

微分断面積  $d\sigma/d\Omega$  の角度分布を測定し、共鳴状態のスピンを決定する。

## パリティの決定

終状態  $\Lambda$  の偏極度  $P_\Lambda$  を測定し、 $P_\Lambda d\sigma/d\Omega$  の角度分布からパリティを決定する。

第 1.2 章でも説明したように、Crystal Ball 実験で測定された  $\Lambda$  の偏極度の統計が乏しいために、 $\Lambda(1665)$  のパリティが決定されていない。そのため、 $K^-$  ビーム運動量の binning を 2 MeV/c 刻みに設定し、そのうえで  $\Lambda$  の偏極度  $P_\Lambda$  に対する統計誤差を  $\delta P_\Lambda \sim 0.05$  程度に抑えることで、パリティを決定する。この目標を達成するために、E72 実験では過去の Crystal Ball 実験と比較して 100 倍の統計量 ( $\sim 3 \times 10^5$ ) を取得した。

本節および次節では、まず  $\Lambda(1665)$  のスピン・パリティの決定方法について述べた後、トリガー条件や検出器等の実験セットアップについて説明する。

### 1.3.1 $\Lambda(1665)$ のスピン・パリティの決定方法

J-PARC E72 実験では、 $K^- p \rightarrow \Lambda\eta$  反応を用いて  $\Lambda(1665)$  のスピン・パリティを決定することを目的としている。本節では、そのための実験的手法について述べる。

擬スカラー中間子 ( $0^-$ ) とスピン 1/2 の核子との散乱を考えると、散乱振幅は spin-nonflip 成分  $f$  と spin-flip 成分  $g$  に分解される。軌道角運動量を  $l$ 、相対運動量を  $k$  とすると、これらは次式で与えられる [16]：

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{k} \sum_l \left[ (l+1)T_{l+1/2,l} + lT_{l-1/2,l} \right] P_l(\cos\theta), \\ g &= \frac{1}{k} \sum_l \left[ T_{l+1/2,l} - T_{l-1/2,l} \right] e^{i\phi} \sin\theta \frac{dP_l(\cos\theta)}{d\cos\theta}. \end{aligned} \quad (1.3.1)$$

ここで  $T_{J,l}$  は T 行列、 $P_l$  はルジャンドル多項式である。標的核子が偏極していない場合、終状態バリオンの偏極度  $P$  および微分断面積  $d\sigma/d\Omega$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{2 \operatorname{Im}(fg^*)}{|f|^2 + |g|^2}, \\ \frac{d\sigma}{d\Omega} &= |f|^2 + |g|^2. \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

なお、ここで定義される偏極度  $P$  は、散乱平面の法線方向に対する成分を表している。以下

では、式 (1.3.2) を用いて、P 波共鳴および D 波共鳴のそれぞれの場合について、 $\Lambda(1665)$  の微分断面積および偏極度の角度分布を考察する、簡単のため、以下の二つの状態のみを考慮する：

- $J^\pi = 1/2^-$  の  $\Lambda(1670)$  共鳴状態
- 探索する  $J = 3/2$  の  $\Lambda(1665)$  共鳴状態

また、T 行列のラベルは、 $T_{l,2I,2J}$  と表記し、それぞれの状態を以下のように表す。

- $\Lambda(1670)$  :  $T_{S01}$  ( $l = 0, I = 0, J = 1/2$ )
- $\Lambda(1665)$  (P 波共鳴) :  $T_{P03}$  ( $l = 1, I = 0, J = 3/2$ )
- $\Lambda(1665)$  (D 波共鳴) :  $T_{D03}$  ( $l = 2, I = 0, J = 3/2$ )

### P 波共鳴の場合 ( $J^\pi = 3/2^+$ )

この場合、散乱振幅は以下のように表される；

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{k} (T_{S01} + 2T_{P03} \cos \theta), \\ g &= \frac{1}{k} T_{P03} e^{i\phi} \sin \theta. \end{aligned} \quad (1.3.3)$$

これを用いると、微分断面積の角度分布は

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{1}{k^2} (A + B \cos \theta + C \cos^2 \theta), \\ A &= |T_{S01}|^2 + |T_{P03}|^2, \\ B &= 2 (T_{S01} T_{P03}^* + T_{P03} T_{S01}^*), \\ C &= 3|T_{P03}|^2. \end{aligned} \quad (1.3.4)$$

となる。これより、P 波共鳴成分の寄与により、微分断面積の角度分布に  $\cos^2 \theta$  に依存する項が現れることがわかる。したがって、微分断面積の角度分布において  $\cos^2 \theta$  成分の存在を調べることで、P 波共鳴である  $\Lambda(1665)$  の存在を確認することができる。また、 $P d\sigma/d\Omega$  の角度分布は次式で表される。

$$P \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{2}{k^2} \text{Im} [T_{S01} T_{P03}^* + 2|T_{P03}|^2 \cos \theta] \sin \theta. \quad (1.3.5)$$

この角度分布は  $\sin \theta$  に比例するため、グラフは図 1.4 (A) のように、ノードを持たない形になると考えられる。したがって、測定された角度分布にノードがない場合には、パリティが正であると決定できる。

## D 波共鳴の場合 ( $J^\pi = 3/2^-$ )

この場合、散乱振幅は以下のように表される。

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{k} \left[ T_{S01} + T_{D03} \left( \frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right) \right], \\ g &= -\frac{3}{k} T_{D03} e^{i\phi} \sin \theta \cos \theta. \end{aligned} \quad (1.3.6)$$

これを用いて、微分断面積は

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{1}{k^2} (A + C \cos^2 \theta), \\ A &= |T_{S01}|^2 + |T_{D03}|^2 - (T_{S01} T_{D03}^* + T_{D03} T_{S01}^*), \\ C &= 3 (T_{S01} T_{D03}^* + T_{D03} T_{S01}^* + |T_{D03}|^2). \end{aligned} \quad (1.3.7)$$

これより、D 波共鳴成分および S 波と D 波の干渉項の寄与により、微分断面積は角度に依存しない項と  $\cos^2 \theta$  に依存する項から構成されることがわかる。

また、 $P d\sigma/d\Omega$  の角度分布は、次式で表される：

$$P \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{k^2} \text{Im} \left[ T_{S01} T_{D03}^* + |T_{D03}|^2 (3 \cos^2 \theta - 1) \right] \sin \theta \cos \theta. \quad (1.3.8)$$

この角度分布は  $\sin \theta \cos \theta$  に比例するため、グラフは図 1.4 (B) に見られるように  $\theta = \pi/2$  でノードを持つ形になる。したがって、測定された角度分布にノードがあった場合は、パリティが負であると決定できる。

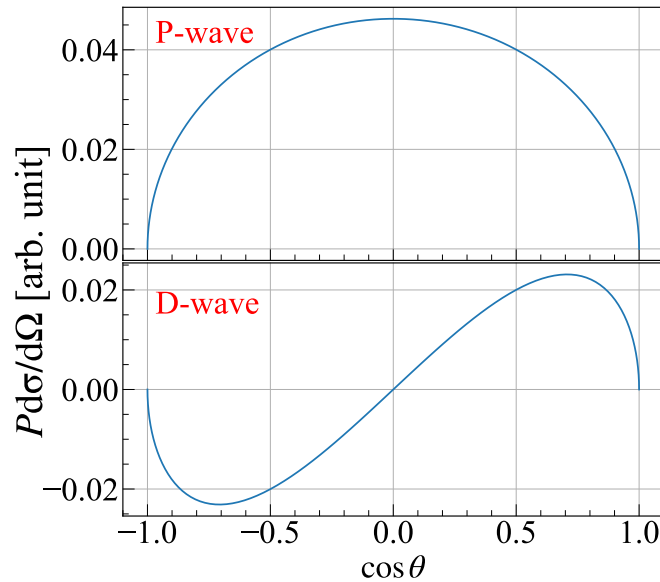


図 1.4:  $\Lambda(1665)$  における  $P d\sigma/d\Omega$  の角度分布。上のパネルの P 波共鳴の場合はノードを持たない。一方、下のパネルの D 波共鳴の場合は  $\cos \theta = 0$  でノードを持つ。

以上より、微分断面積の角度分布からスピン  $3/2$  を決定し、さらに  $P d\sigma/d\Omega$  の角度分布にノードが存在するか否かを調べることで、 $\Lambda(1665)$  のパリティをモデル非依存に決定することが

可能である。実験的には、偏極した  $\Lambda$  粒子の崩壊  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  における陽子の崩壊角分布を測定することで  $P d\sigma/d\Omega$  を求める。 $\Lambda$  静止系において散乱平面の法線方向を基準軸とした陽子の放出角  $\theta_p$  の分布は、

$$\frac{d^2N}{d\Omega d\cos\theta_p} \propto \frac{d\sigma}{d\Omega} (1 - \alpha_\Lambda P \cos\theta_p) \quad (1.3.9)$$

で与えられる。ここで  $\alpha_\Lambda$  は  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  崩壊における非対称度パラメータである。したがって、崩壊角分布の前後非対称成分は  $P d\sigma/d\Omega$  に比例し、その角度依存性を調べることで  $P d\sigma/d\Omega$  の角度分布を求めることができる。

## 1.4 実験セットアップ

本節では、E72 実験のセットアップについて述べる。はじめに、実験を行った J-PARC K1.8BR ビームライン、および HypTPC 周辺の検出器配置について概観する。続いて、E72 実験で用いられたトリガー条件と、それに関わる検出器について詳しく説明した後、トリガー条件に関与しない、その他の検出器について述べる。

### 1.4.1 J-PARC K1.8BR ビームライン

E72 実験は、J-PARC K1.8BR ビームラインにおいて実施された。図 1.5 に J-PARC K1.8BR ビームラインの概略を示す。本ビームラインでは、J-PARC の 50 GeV シンクロトロン (MR) で加速された 30 GeV の陽子ビームを T1 ターゲットに入射させることにより、 $K$  中間子や  $\pi$  中間子などの二次ビームを生成する。

生成された二次ビームは、双極電磁石および四重極電磁石によって集束・偏向され、実験エリアまで輸送される。ビームライン途中には静電セパレータ (ES) が設置されており、ビーム進行方向に対して垂直な方向 ( $y$  方向) に 200–300 kV/10 cm の強い電場を印加することで、同一運動量を持つ粒子を質量の違いに基づいて分離する。

さらに、ES の前後に配置されたコレクションマグネット (CM) と組み合わせることで、選別したい粒子の軌道を中央に調整し、質量スリット (MS1) を用いて不要な粒子を除去することが可能である。これらの装置によって目的の二次粒子を効率的に選別した後、選別されたビームは D3 マグネットによって K1.8BR 実験エリアへと導かれる。

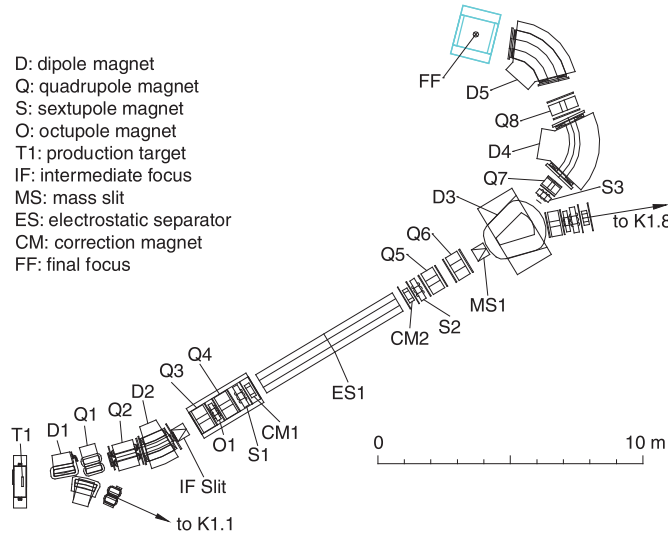


図 1.5: J-PARC K1.8BR ビームラインの概略図 [17]。

## 1.4.2 K1.8BR 実験エリア

図 1.6 (A) に、K1.8BR 実験エリアにおけるビーム輸送部分の拡大図を示す。E72 実験では  $K^-$  ビームを用いるが、ビーム粒子の  $\pi/K$  比は約 7 と大きいため、前節で述べた ES および CS によって  $\pi$  中間子と  $K$  中間子を完全に分離することは困難である。そのため、ビームライン上流に設置された Beam Hodoscope Tracker 検出器 (BHT) と、下流の Beam Hodoscope 検出器 (BH2) との間の飛行時間を用いて粒子の識別を行う。また、 $K^-$  の運動量は、ビームライン上に設置された 2 つのドリフトチェンバー (BLC1、BLC2) を用いて  $\delta p/p \sim 1 \times 10^{-3}$  の精度で測定する。さらに、この運動量から静止標的における反応の衝突エネルギー  $W$  は次式で与えられる。

$$W = \sqrt{\left(\sqrt{p_K^2 + m_K^2} + m_p\right)^2 - p_K^2}. \quad (1.4.1)$$

ここで、 $p_K$  は  $K^-$  ビームの運動量、 $m_K$  は  $K^-$  の質量、 $m_p$  は陽子の質量である。このときの衝突エネルギー  $W$  の精度は  $\delta W/W \sim 2 \times 10^{-4}$  となる。さらに、ビームライン最下流には CVC、SAC3、SFV 検出器が設置されており、BH2 と CVC の間の飛行時間を測定することでビーム運動量の絶対値の較正を行う。

図 1.6 (B) に、SHS マグネット内部に設置された HypTPC 周辺のセットアップの模式図を示す。図中の灰色の部分にはヘルムホルツ型の超伝導双極電磁石である Superconducting Hyperon Spectrometer (SHS) マグネットを表しており、その周囲のピンク色の部分はヨークである。E72 実験のメイン検出器である 3 次元飛跡検出器 Hyperon Time Projection Chamber (HypTPC) は SHS マグネット内部に設置され、1 T の磁場中で使用する。HypTPC 内部で反応・生成された粒子は、周囲に配置された HTOF によって検出し、反応イベントを同定する。HTOF は

HypTPC を囲うように設置されており、全 34 セグメントで構成されている。さらに、SHS マグネットの上流および下流には、それぞれ Beam Aerogel Cherenkov 検出器 (BAC) と Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) が設置されている。BAC ではビーム粒子中の  $\pi$  粒子と  $K$  粒子の識別が行われ、KVC では標的で反応しなかった  $K^-$  ビームイベントをトリガーレベルで除去する役割を担っている。各検出器の詳細については、以下の節で述べる。

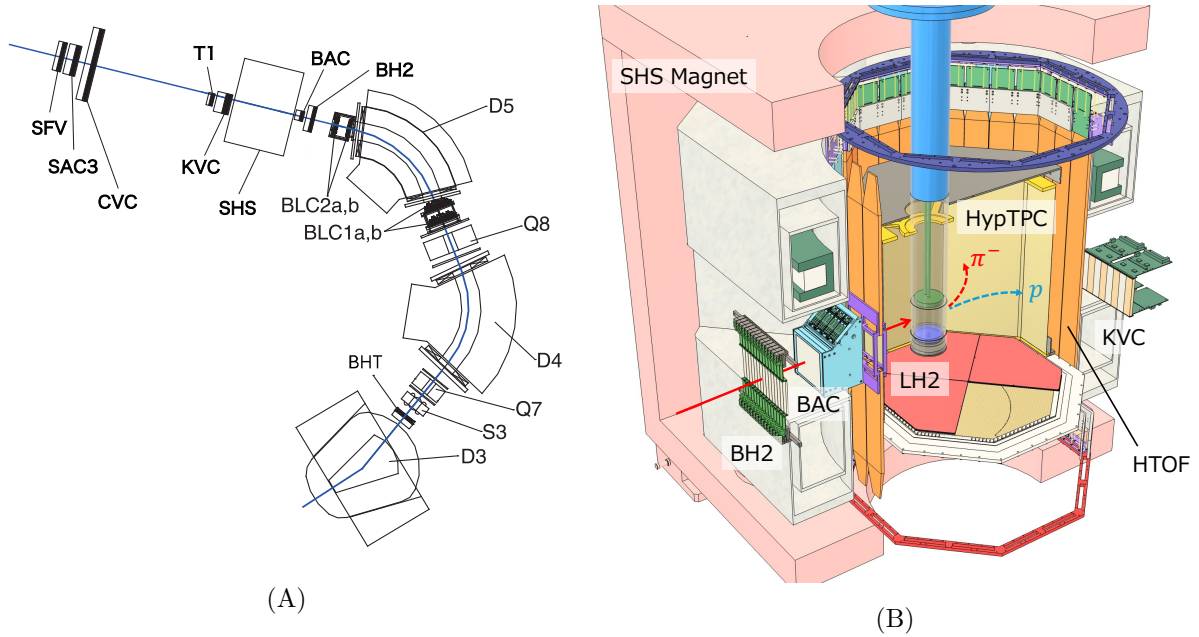


図 1.6: E72 実験のセットアップの模式図。(A) は全体像、(B) は HypTPC 周辺の様子を示す。

### 1.4.3 $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$ 反応測定に向けたトリガー条件

E72 実験では  $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応を測定するため、以下のトリガー条件を採用している。

$$\text{BHT} \times \text{BH2}(\text{seg.4-10}) \times \overline{\text{BAC}} \times \text{HTOF Mp2 or Forward proton} \times \overline{\text{KVC}} \quad (1.4.2)$$

以下に、それぞれのトリガー条件および検出器についての詳細を説明する。

#### BHT $\times$ BH2 (ビームイベント選択)

BHT 検出器および BH2 検出器を用いて、ビームイベントの選択を行う。図 1.7 に、BHT および BH2 の模式図を示す。BHT と BH2 はいずれもプラスチックシンチレーション検出器であり、BHT は 63 セグメント、BH2 は 15 セグメントから構成されている。光検出には浜松ホトニクス社製の MPPC(S13360-3050VE) が使用されている。なお、ビーム軸付近を通過する粒子のイベントを選択するため、BH2 には中心付近のセグメント 4-10 でのヒットを要求している。

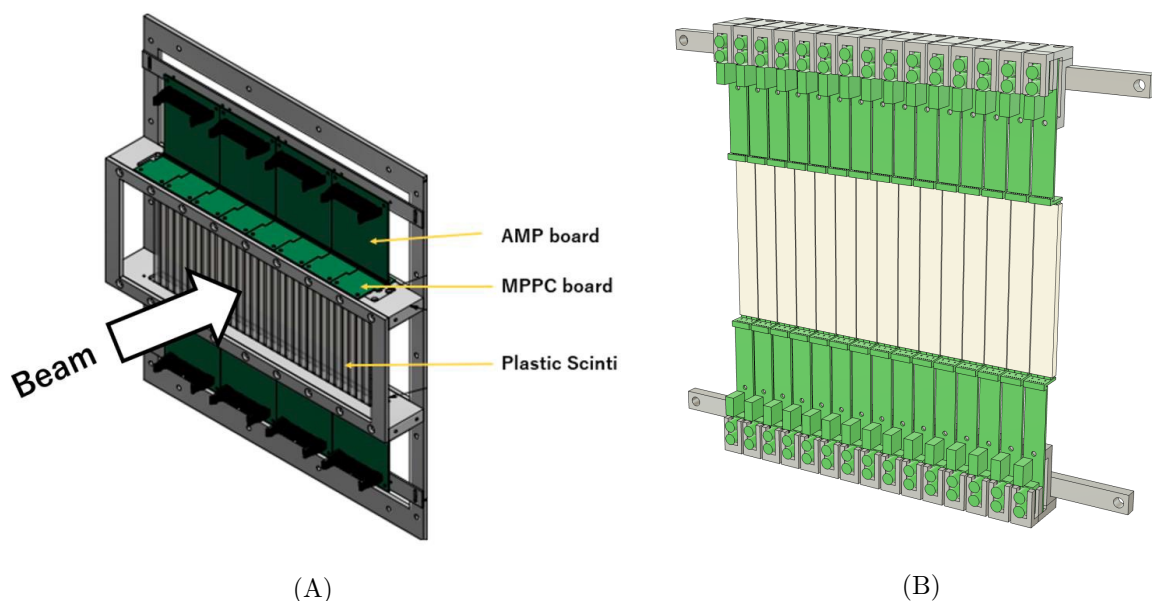


図 1.7: BHT および BH2 検出器の模式図。(A) は BHT、(B) は BH2 検出器を示す。

### BAC ( $K^-$ ビームイベント選択)

前述したように、E72 実験にて用いるビームは、 $\pi/K$  比が約 7 と大きく、ビーム中には多数の  $\pi^-$  粒子が混入している。そのため、ビーム粒子中の  $K^-$  粒子と  $\pi^-$  粒子を識別し、目的となる  $K^-$  ビームを効率よく選択するため、SHS マグネット上流の Beam Aerogel Cherenkov 検出器 (BAC) を用いる。

BAC は閾値型のチェレンコフ検出器であり、ラディエータとして面積が  $115 \times 115 \text{mm}^2$ 、厚さが 10 mm、屈折率が  $n = 1.115$  のシリカエアロゲルを使用している。この屈折率の場合、図 1.8 に示すように、E72 実験のビーム運動量範囲においては  $\pi$  粒子はチェレンコフ光を放出する一方で、 $K$  粒子はチェレンコフ光を発しない。したがって、BAC を用いることで  $\pi^-$  粒子を識別し、トリガーレベルで除去することが可能となる。BAC の構造を図 1.9 に示す。BAC では、3 層構造のエアロゲルラディエータを採用している。ラディエータ内で生成されたチェレンコフ光は、パラボラ形状のアルミマイラー製反射材によって集光され、上部に配置された MPPC に導かれる。光検出には、浜松ホトニクス社製の MPPC (S13361-6050AE-04) を用いている。

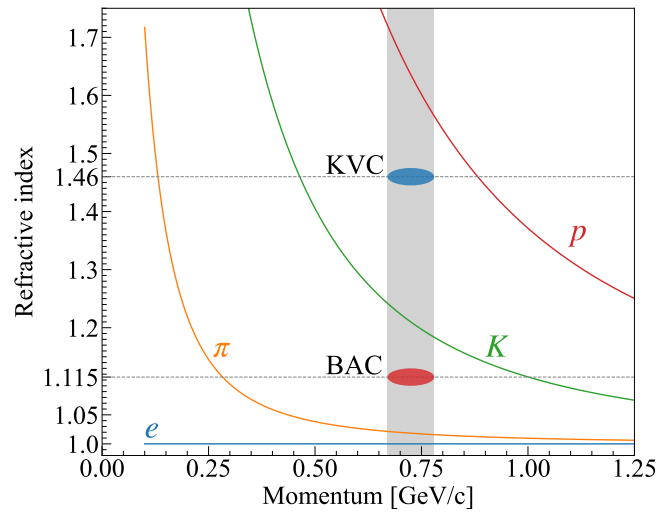


図 1.8: 各粒子ごとの屈折率 ( $= 1/\beta$ ) のプロット。本実験のビーム運動量領域をグレーで示している。また、BAC と KVC の屈折率及び注目する運動量に対応する部分には点を打っている。

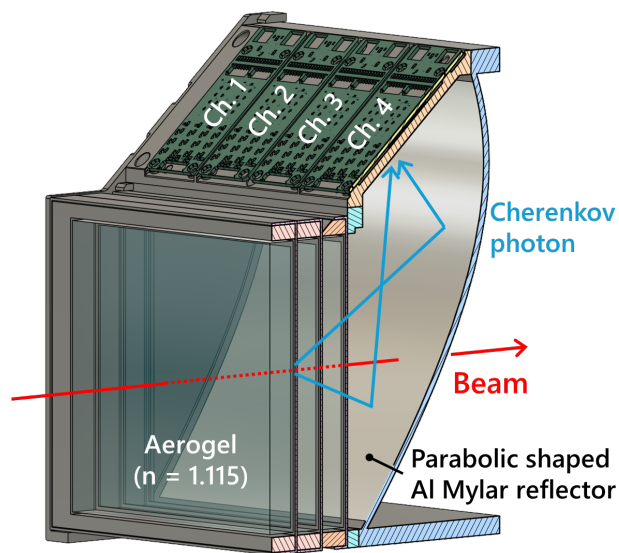


図 1.9: BAC の模式図。

### HTOF Mp2 or Forward proton ( $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$ 反応選択)

標的で反応が起きたことを識別するため、プラスチックシンチレータである Hyperon Time of flight (HTOF) の情報を用いる。前述したように、HTOF は HypTPC を囲うように設置されており、全 34 セグメントで構成されている。シンチレータには、時間応答が高速な EJ-232 [18] を使用しており、有効面積は、 $1000 \times 70 \text{ mm}^2$ 、中央部分の厚さは 10 mm である。一方、両端のそれぞれ 100 mm の領域にはシンチレータ本体にテーパ加工が施されており、端面の断面積が  $35 \times 4 \text{ mm}^2$  となるよう設計されている。この形状により、光の集光効率および読み出し効率の向上が図られている。

信号の読み出しには両側読み出し方式を採用しており、各端面には有感面積が  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  の MPPC (S13360-3060PE) を 8 個配置している。これにより、シンチレーション光を効率良く検出するとともに、時間情報の高精度化を実現している。図 1.10(A) に示すように、HTOF は正八角形状に配置され、各辺に 4 セグメントずつ設置されている。また、図 1.10(B, C) に示すように、上流側にはビーム通過のためのビーム窓が設けられている。HTOF は全体で 34 セグメントから構成されており、HypTPC を取り囲む形で配置されている。また、HTOF の典型的な時間分解能は、約 130 ps である [19]。

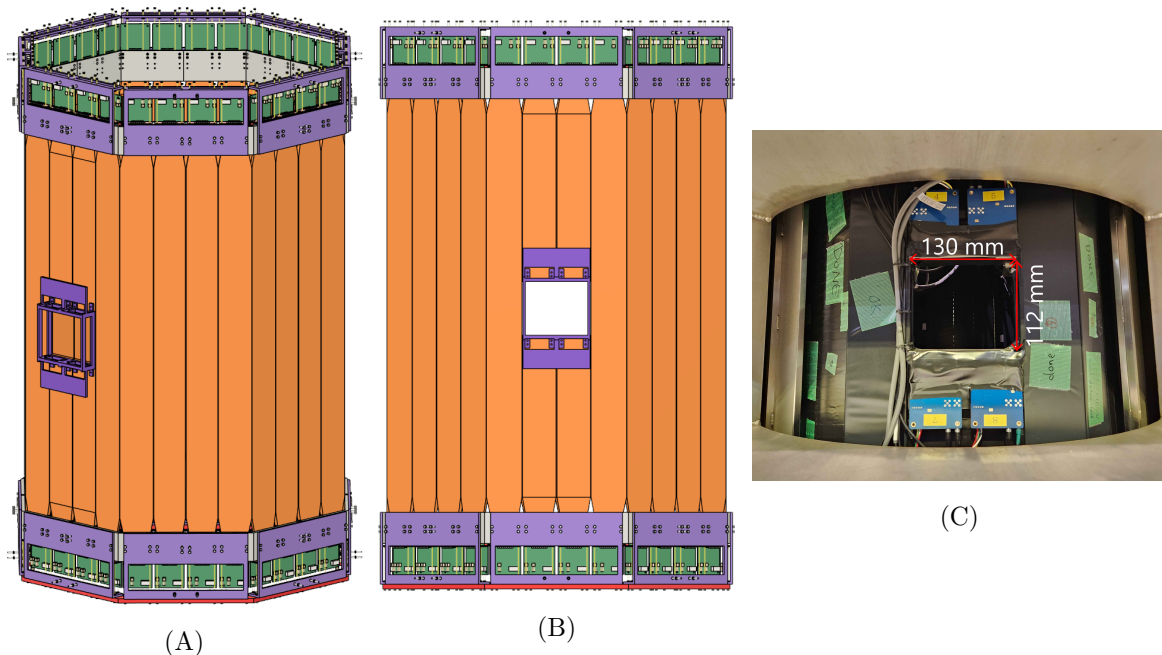


図 1.10: (A) HTOF 全体の 3 次元モデル図。(B) HTOF を上流側から見たモデル図。(C) 実際の上流側ビーム窓部分の写真。

HTOF に対して本実験では、トリガー条件として HTOF Mp2 トリガーと Forward proton トリガーの OR を取っている。HTOF Mp2 トリガーとは、HTOF 全 34 セグメントのうち、2 つ以上のセグメントで信号が検出されることを条件とするトリガーである。これは、図 1.11 (A) に

示すように、 $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応において  $\Lambda$  の崩壊 ( $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ ) によって生成された陽子および  $\pi^-$  粒子が HTOF に到達し、2つのセグメントで信号が検出されることを利用したものである。しかし、図 1.11 (B) に示すように、 $\pi^-$  が HTOF に到達しなかった場合に、 $\Lambda$  生成のイベントを取り逃す可能性がある。この取り逃がしを防ぐために用いられるのが、Forward proton トリガーである。

Forward proton トリガーは、 $\Lambda$  崩壊 ( $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ ) によって生成された陽子が、標的前方に集中して飛ぶ特性を利用したものである。 $K^-$  ビームは、1 cm 厚の HTOF 中で約 2 MeV のエネルギーを損失するのに対し、 $\Lambda$  崩壊由来の陽子はより大きなエネルギー損失を示す。そのため、前方 HTOF において  $\Delta E$  の大きな事象を選択することで、陽子入射イベントを識別できる。

これらのトリガー条件により、標的で  $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  が起きたイベントを選択することができる。

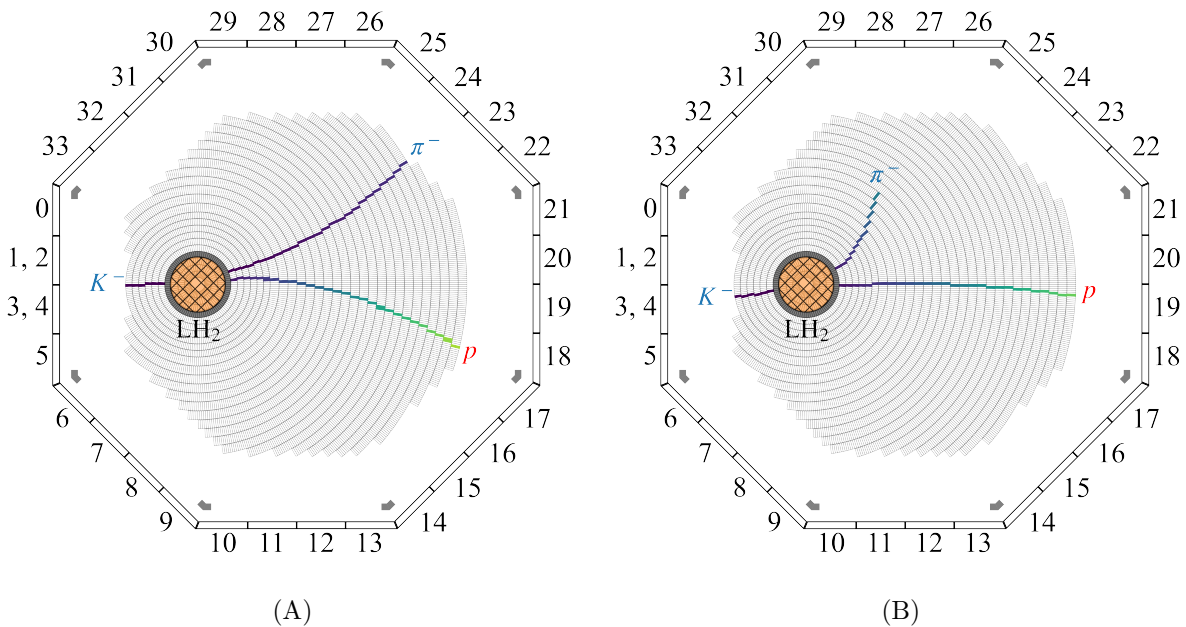


図 1.11:  $\Lambda\eta$  終状態かつ  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  の崩壊モードを選択した際の飛跡の例。周囲に取り囲むようにして配置されているのが HTOF であり、HTOF のセグメント番号も同時に表示している。(A) HTOF の Multiplicity が 2 のときの飛跡の例。(B) HTOF の Multiplicity が 1 のときの飛跡の例。飛跡の色は読み出し pad に到達した時間情報 ( $y$  座標) を示す。

### $\overline{\text{KVC}}$ (ビームスルーイベント除去)

E72 実験で使用する  $K^-$  ビームの中には、液体水素標的と反応しない粒子も多く存在する。このビームスルーイベントを除去し、トリガーレートを削減する役割を持つのが、SHS マグネット後方に設置された Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) である。KVC は閾値型チェレンコフ検出器であり、ラディエーターとして屈折率 1.46 の石英ガラスを用いている。この屈折率の場

合、図 1.8 に示すように、E72 実験で扱うビーム運動量範囲ではビーム粒子である  $\pi$  および K 粒子がチェレンコフ光を発する一方、 $\Lambda$  崩壊 ( $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ ) で前方に放出する陽子は発光しない。したがって、KVC を用いることで、標的で反応しなかったビームスルーイベントを除去することができる。なお、KVC の後方にはトリガーカウンターとして、有効面積  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  のシンチレーション検出器 (T1) が設置されている。KVC の詳細な設計等は第 2 章にて述べる。

#### 1.4.4 その他の検出器

ここでは、トリガー条件に直接関与しない検出器について説明する。なお、E72 実験において中心的な役割を果たす HypTPC、および液体水素標的の詳細な設計については、第 3.1 章にて述べる。

### Superconducting Hyperon Spectrometer (SHS) マグネット

SHS マグネットは、HypTPC を磁場中で動作させるための磁場を生成する超伝導双極電磁石である。SHS マグネットは半径 500mm の円形コイル 2 つが 500mm の間隔で配置された超伝導ヘルムホルツコイル型の双極電磁石であり、その基本スペックを表 1.1 に示している。E72 実験では、HypTPC を内部に設置した状態で 1T の磁場をかけて運用する。

表 1.1: SHS マグネットの基本スペック [20]。

最大中心磁場	1.5 T
コイル直径	1000 mm
導体	$\phi$ 0.77 mm、Cu/SC = 2.4、PVA 絶縁
冷却方式	2 台の GM 冷凍機による伝導冷却
巻き数 (設計値)	7400 / コイル (78 × 96)
巻き数 (実際値)	7266 (上) / 7264 (下)
コイル長さ	23.4 km/コイル
動作電流 (設計値)	99.9 A
全インダクタンス (設計値)	103.1 H/コイル
	233.5 H (ヘルムホルツ、ヨークなし)
	251.6 H (ヘルムホルツ、ヨークあり)
全インダクタンス (実際の巻き数での計算値)	231.3 H (ヨークあり)
重量	10 t

## Beam line chamber (BLC1,BLC2)

BLC1 および BLC2 は、K1.8BR ビームラインに設置されたビームトラッキング用の平面型ドリフトチェンバーであり、入射  $K^-$  ビームの運動量を高精度で測定する役割を担っている。図 1.6 (A) に示すように、両検出器は D5 マグネットを挟む形で配置されており、磁場によるビームの偏向と飛跡情報を組み合わせることで、ビーム運動量を  $\delta p/p \sim 1 \times 10^{-3}$  の精度で決定する。

BLC1 は D5 マグネットの上流側に、BLC2 は下流側に設置されており、それぞれ BLC1a/BLC1b、BLC2a/BLC2b から構成されている。センスワイヤには直径  $12.5 \mu\text{m}$  の金メッキタングステンワイヤ（レニウム 3% 添加）を、ポテンシャルワイヤには直径  $75 \mu\text{m}$  の銅-ベリリウムワイヤを使用している。レイヤー構成は  $UU'VV'UU'VV'$  の 8 層構成であり、 $U$  および  $V$  層ではワイヤがビーム軸に対して  $\pm 45^\circ$  傾けて配置されているため、ビームの 2 次元位置情報を取得することが可能である。各層には 32 本のセンスワイヤが張られており、1 台あたり 256 チャンネルの読み出しを行っている。読み出された信号は、BLC に直接接続されたアンプ・シェイパ・ディスクリミネータ (ASD) ボードによって整形・増幅され、ロジック信号として出力される。その後、LVDS-ECL 変換回路を経由して TDC に入力される構成となっている。

BLC のセル構造の模式図を図 1.12 に、BLC1 および BLC2 の主な仕様および性能を表 1.2 に示す。

### BLC1/2

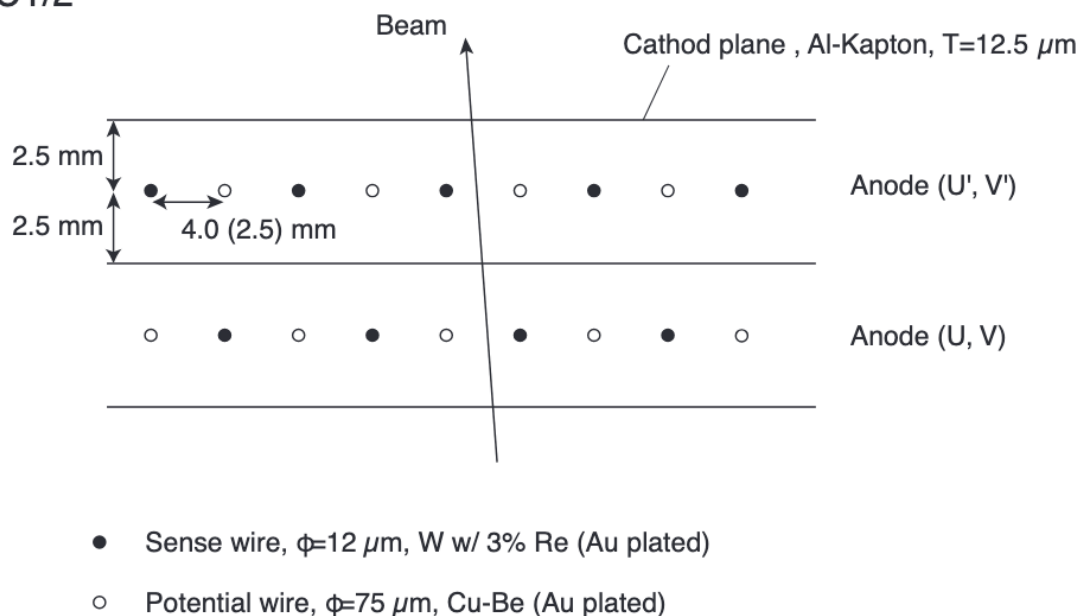


図 1.12: BLC セル構造の模式図。

表 1.2: BLC1 および BLC2 の主な仕様と性能

	BLC1	BLC2
設置位置	D5 磁石上流	D5 磁石下流
構成	BLC1a + BLC1b	BLC2a + BLC2b
チェンバー間距離	300 mm	275 mm
検出器形式	平面型ドリフトチェンバー	
レイヤー構成	UU'VV'UU'VV' (8 層)	
ワイヤ傾斜角	$\pm 45^\circ$	
有効領域	$256 \times 256 \text{ mm}^2$	$160 \times 160 \text{ mm}^2$
ガス組成	Ar : Isobutane : Methylal = 76 : 20 : 4	
位置分解能	$\sim 150 \mu\text{m}$	
検出効率	$> 99\%$	
運動量分解能	$\delta p/p \sim 1 \times 10^{-3}$	

## CVC/SAC3/SFV 検出器

図 1.6 (A) に示すように、ビームライン最下流には CVC、SAC3、SFV 検出器が設置されている。CVC と BH2 は約 15 m 離れており、この間の飛行時間を用いてビーム運動量の絶対値較正が行われる。また、SAC および SFV は、CVC に対するトリガーカウンターとして使用されている。

CVC はプラスチックシンチレーション検出機であり、シンチレータとして EJ-200 を用いている。その外観写真を図 1.13 に示す。本実験では、図中に示すセグメントのうち中心付近の 8 セグメントのみを使用している。各セグメントの有効面積は  $100 \times 1500 \text{ mm}^2$ 、厚さは 30 mm である。シンチレータの上下には、光検出のために浜松ホトニクス社製の光電子増倍管 (H6410) が取り付けられている。

SAC3 および SFV の模式図を図 1.14 に示す。SAC3 はチェレンコフ検出器であり、ラディエータとして屈折率  $n = 1.028$ 、厚さ 120 mm のシリカエアロゲルを用いている。また、読み出しには光電子増倍管 (R6681) を使用している。SFV はプラスチックシンチレーション検出器であり、 $400 \times 200 \text{ mm}^2$  の有効面積を持つ。読み出しには光電子増倍管 (H3167) を使用している。CVC のトリガー条件としては、SAC3 と SFV の OR を取っている。



図 1.13: CVC 検出器の実際の写真。本実験では、中央付近の 8 セグメントのみを用いた。

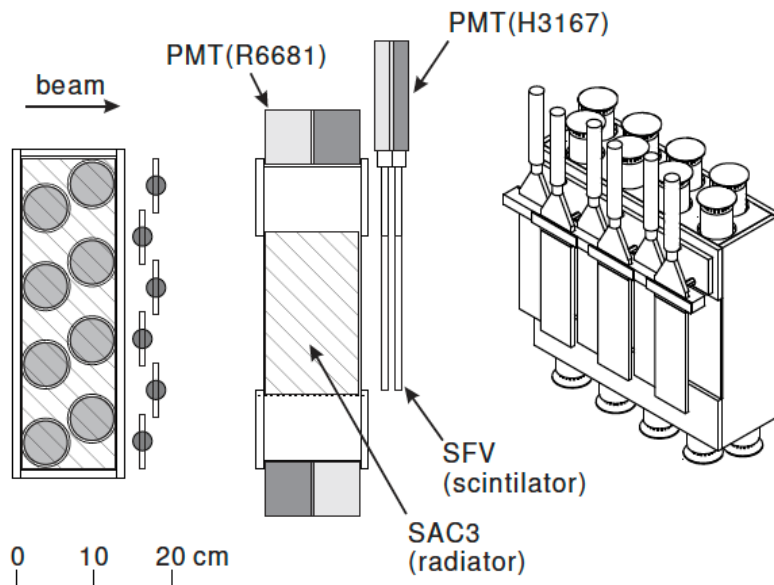


図 1.14: SAC および SFV 検出器の模式図。

## 1.5 E72 実験の取得データの概要

E72 実験は 2025 年 11 月に実施され、約 240 時間にわたってデータ取得を行った。 $\Lambda$  生成のためのビームデータ取得の概要を表 1.3 に示す。本実験では、11 点のビーム運動量においてデータ取得を行い、各運動量における  $K^-$  ビーム粒子数の分布を図 1.15 に示す。この図では、実線が実際に取得したデータの分布、点線が取得予定だった統計をもとにした分布を表している。図に示すように、多くの運動量点において当初予定していた程度のデータ取得を達成した。一方で、900 MeV/c 付近の運動量領域では十分なデータ取得が行えなかったため、この領域については 2026 年 4 月のビームタイムにおいて追加取得を行う予定である。

表 1.3: 各ビーム運動量における取得データの概要

ビーム運動量 [MeV/c]	データ取得時間 [hour]	$K^-$ 強度 [ $\times 10^3$ /spill]	$\pi^-$ 強度 [ $\times 10^3$ /spill]	DAQ Efficiency	合計 $K^-$ 粒子数 [ $\times 10^7$ ]
645	4.62	17	320	0.86	5.76
665	4.99	19	284	0.86	6.99
685	7.87	27	360	0.82	15.0
715	26.69	30	250	0.83	51.4
735	57.32	33	200	0.74	102.0
755	18.53	36	180	0.80	46.8
790	7.87	33	120	0.83	18.7
814	7.25	36	112	0.81	18.4
842	2.91	37	89	0.82	7.42
870	2.25	36	88	0.82	5.61
933	7.89	35	115	0.81	18.9

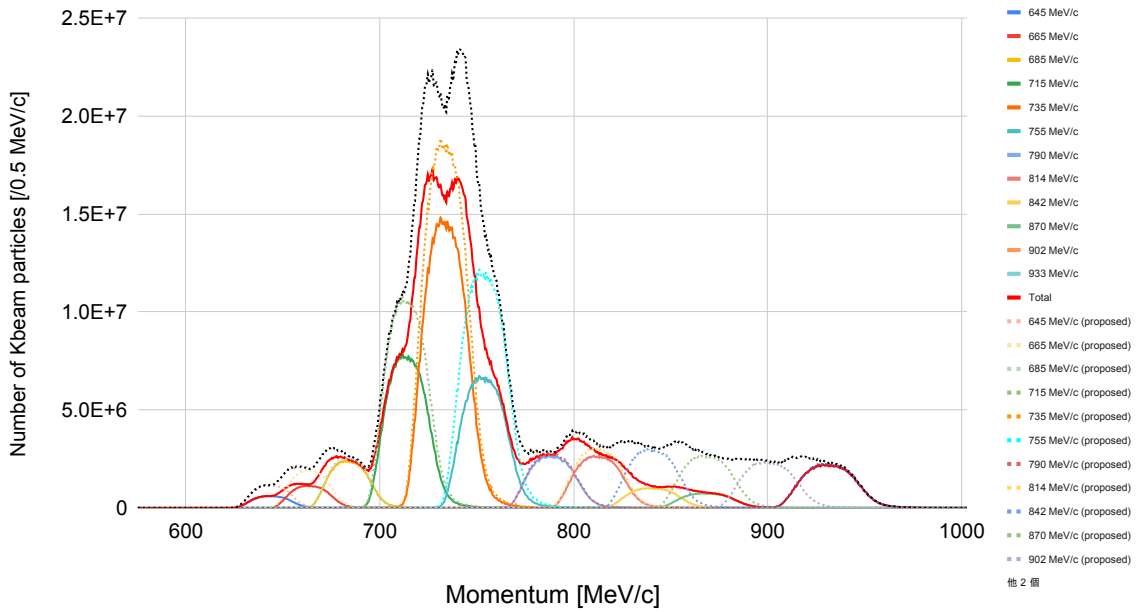


図 1.15: 各運動量における  $K^-$  ビーム粒子数の分布実線が実際に取得したデータの分布、点線が取得予定だった統計をもとにした分布を表している。

さらに、本実験で取得したデータを基に、 $K^-p \rightarrow \Lambda\eta$  反応における  $\Lambda\eta$  生成イベント数の見積もりを行った。各ビーム運動量における  $\Lambda\eta$  生成収量の見積もり結果を図 1.16 (A) に示す。図に示すように、 $\Lambda\eta$  閾値近傍である  $p_{K^-}^{\text{Lab}} \sim 735 \text{ MeV}/c$  付近において最も多くのイベント数が期待されており、本実験で約  $O(10^5)$  イベント規模の  $\Lambda\eta$  反応データが取得可能であることが分かる。

また、得られる  $\Lambda\eta$  生成収量を用いて、 $\Lambda$  偏極度測定における統計誤差の見積もりを行った。その結果を図 1.16 (B) に示す。図に示すように、イベント数の多い運動量領域では  $\Lambda$  偏極度の統計誤差は  $\Delta P_\Lambda \sim 0.02$  程度に抑えられることが期待される。このことから、本実験により  $\Lambda(1665)$  共鳴状態のスピン・パリティ決定に必要な偏極測定を十分な統計精度で行えることが示唆される。

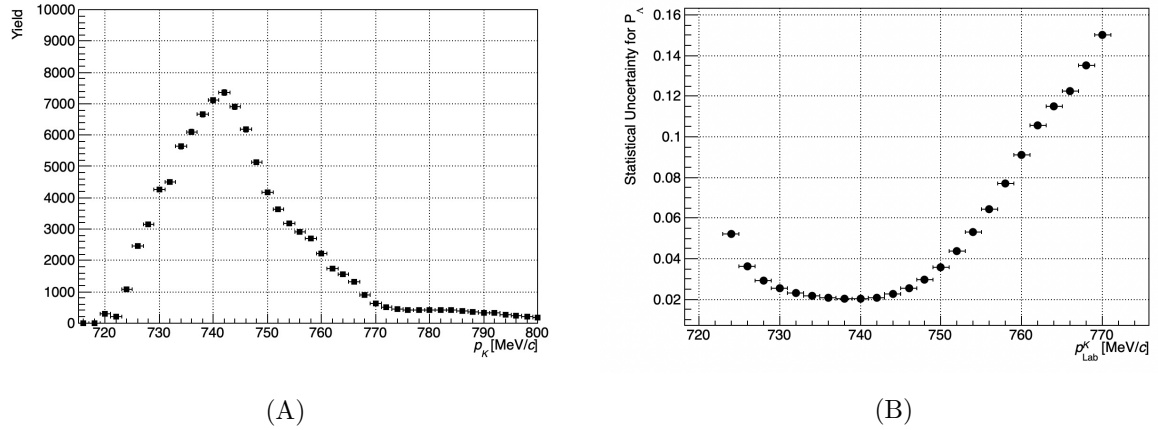


図 1.16: (A) 本実験でのデータ取得に基づいた  $\Lambda\eta$  生成収量の見積もり。(B)  $\Lambda\eta$  生成収量に基づいた、 $\Lambda$  偏極度測定における統計誤差の見積もり。

$\Lambda$  生成データ取得では、図 1.17 に示すように、HypTPC を用いて  $\Lambda$  粒子の崩壊 ( $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ ) により前方方向へ放出された陽子の飛跡を検出できていることを確認した。

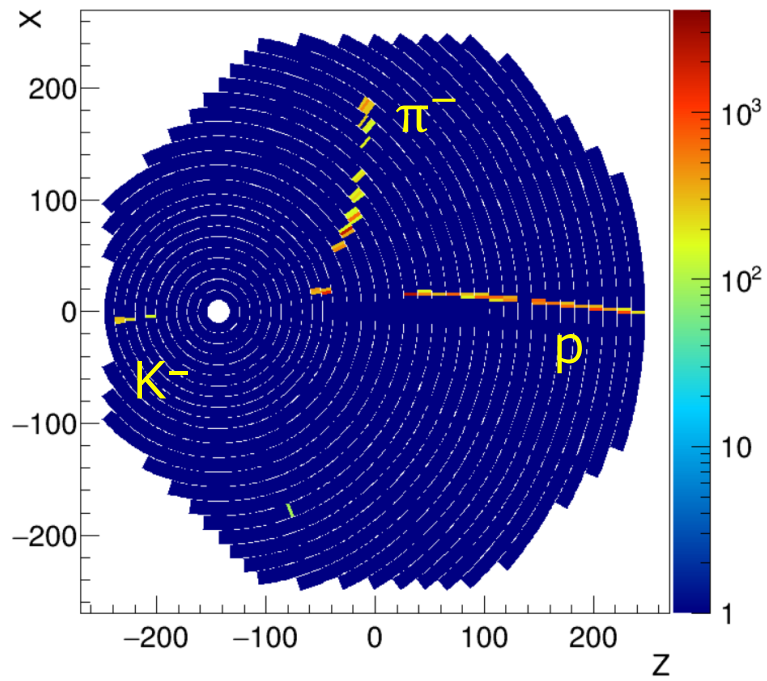


図 1.17: TPC により検出された  $\Lambda$  粒子の崩壊の飛跡の様子。

## 第2章 Kaon Veto Cherenkov 検出器の開発

前章で述べた通り、E72 実験では液体水素標的で反応しなかった  $K^-$  ビームのイベントを除去し、トリガーレートを削減するために、HypTPC の後方に Kaon Veto Cherenkov (KVC) を設置する。KVC は閾値型のチェレンコフ検出器であり、ラディエータとして屈折率 1.46 の石英ガラスを用いることで、ビーム粒子である  $K^-$ 、 $\pi^-$  粒子と、 $\Lambda$  崩壊によって生成された陽子を識別することができる。図 2.1 (A) には、KVC のラディエータである石英ガラス部分の写真を示している。図に示すように、石英ガラスの側面にはテフロンシート等の被覆材が巻かれている。この構造から、図 2.1 (B) に示すように、ガラス内部で発生したチェレンコフ光はガラス境界で乱反射を起こし、ガラス上下に配置された MPPC (S13360-6050VE) によって検出される。また、セグメント間での光漏れを防ぐため、各セグメントの境界部にはブラックテープが貼付されている。

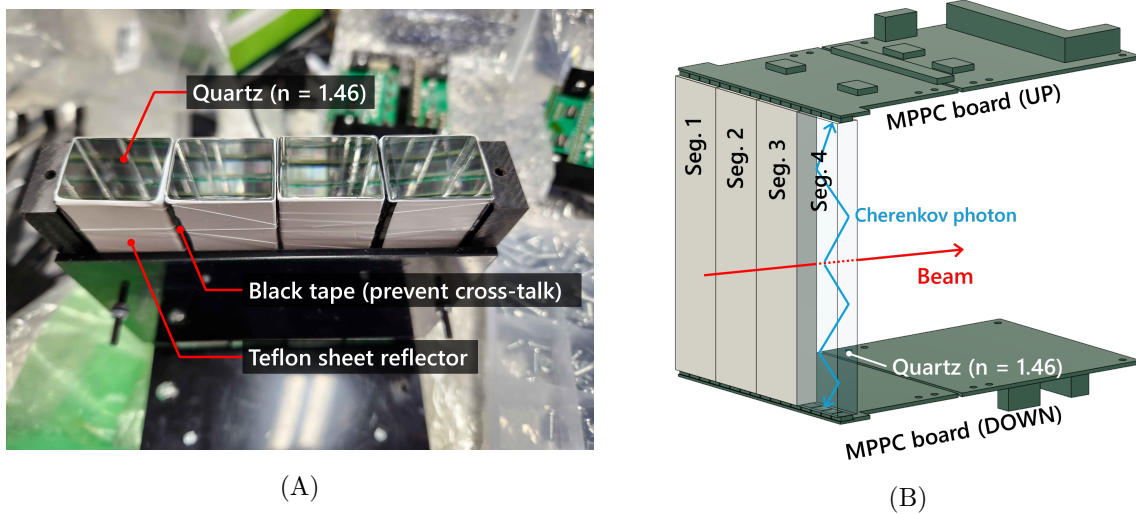


図 2.1: (A)KVC のラディエータ部分の写真。(B)KVC の模式図。

KVC は E72 実験に向けた開発の過程において、合計 3 度のテスト実験を実施し、検出効率および平均光量の評価を行った。またそれに伴い、KVC は ver. 1 から ver. 4 に至るまで改良を繰り返した。本章では、これら一連のテスト実験および E72 本実験の結果を通して、各バージョンにおける開発の経緯と性能について、時系列に沿って述べる。

ここで、内容の混乱を避けるために、KVC 各バージョンの仕様と各テスト実験について、以下の表 2.1 にまとめる。また、一連のテスト実験および E72 本実験の内容を時系列に沿ってまとめたものを、図 2.2 に示す。

表 2.1: KVC 各バージョンの仕様と性能評価実験のまとめ

ver.	ガラス厚	ガラス表面の加工	被覆材	性能評価実験	ビーム粒子・運動量
1	1 cm	なし	テフロン	KEK PF-AR (第 2.1 章)	$e^-$ (2 GeV/c)
				J-PARC K1.8BR E73 パラサイト実験 (第 2.2.5 章)	$K^-$ (735 MeV/c)
3	2 cm	Seg. 1: なし	マイラー	J-PARC K1.8BR T110 実験 (第 2.2.7 章)	$K^-$ (735 MeV/c)
		Seg. 2: 磨りガラス	テフロン		
		Seg. 3: なし	白色塗料		
		Seg. 4: なし	テフロン		
4	2 cm	磨りガラス	テフロン	E72 本実験 (第 1 章)	$K^-$ (645, 735 MeV/c)

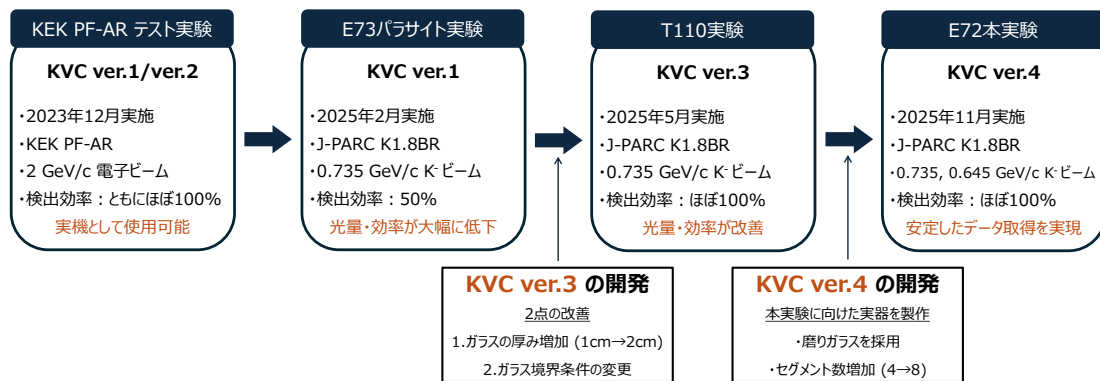


図 2.2: KVC の各バージョンにおけるテスト実験と開発の流れ

まず第 2.1 章では、先行研究 [21] を参考に、KVC (ver. 1,2) の開発および KEK PF-AR における電子ビームを用いたテスト実験の結果について述べる。これらの実験から、2 GeV/c の電子ビームに対しては ver. 1, ver. 2 のいずれにおいても 99.9%以上の検出効率を得られ、検出器として十分な性能を有することが確認された。しかしながら、その後 J-PARC K1.8BR ラインにおいて  $K^-$  ビームを用いて実施した KVC (ver. 1) のテスト実験 (E73 パラサイト実験) では、検出効率が 50% 以下まで大きく低下し、 $K^-$  ビームに対して十分な性能を発揮できないことがわかった。この結果を受け、第 2.2.7 章では、石英ガラスの厚みおよびガラス表面の境界条件をセグメントごとに変更した KVC (ver. 3) の開発と、 $K^-$  ビームを用いた再実験 (T110 実験) について述べる。その結果、石英ガラスの厚み増加、および磨りガラス加工の導入により平均光量が大幅に増加し、検出効率も 99.7% に達することが確認された。最後に第 2.2.9 章では、T110

実験の結果を踏まえて磨りガラスを用いた KVC (ver. 4) を新たに開発し、E72 本実験に適用した結果について述べる。結果として、E72 本実験においても安定してほぼ 99.6% の検出効率を得られ、本実験に必要なデータ取得が可能であることが確認された。

また、その後の第 2.3 章では、これら一連の実験結果について、Geant4 を用いたシミュレーションによる再現性の検証を行う。

## 2.1 電子ビームを用いた KEK PF-AR での試験

KVC (ver. 1,2) は、図 2.3 に示すように、厚さ 1 cm(ver. 1) もしくは 2 cm(ver. 2) の石英ガラスを 4 枚用いて構成されている。また ver. 2 では、石英ガラス端面全体を MPPC で覆うため、ver. 1 の 2 倍の MPPC ボードを使用している。

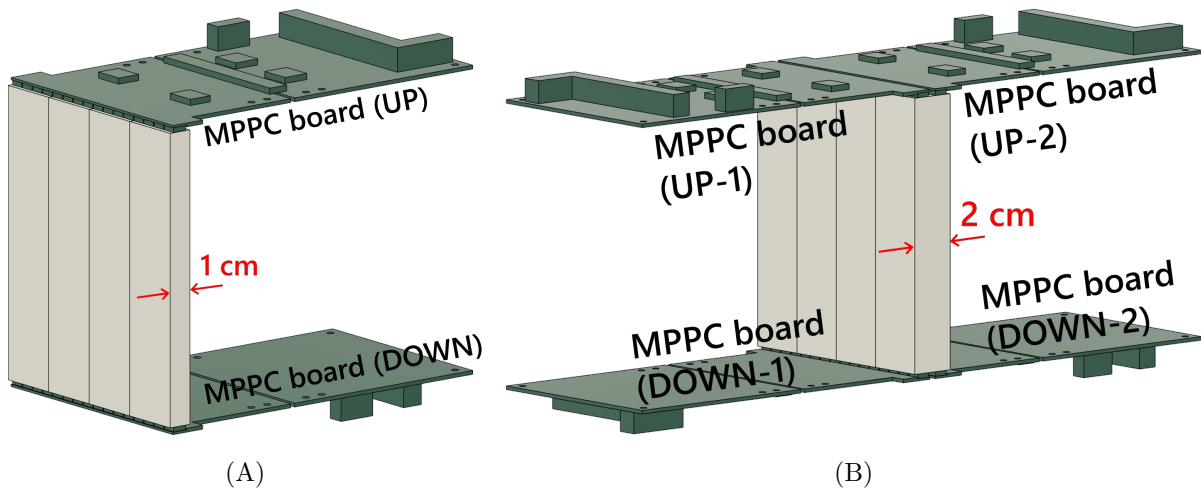
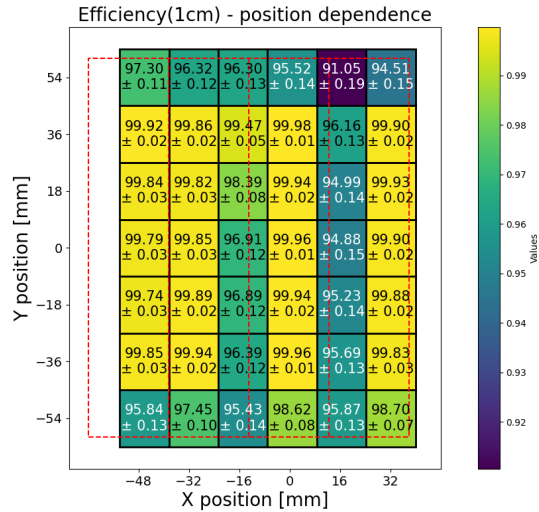
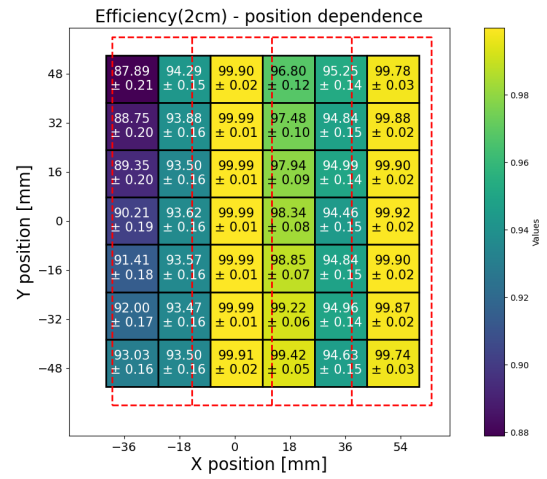


図 2.3: KVC (ver. 1,2) の模式図。(A) がガラス厚 1 cm の ver. 1、(B) がガラス厚 2 cm の ver. 2 を示す。

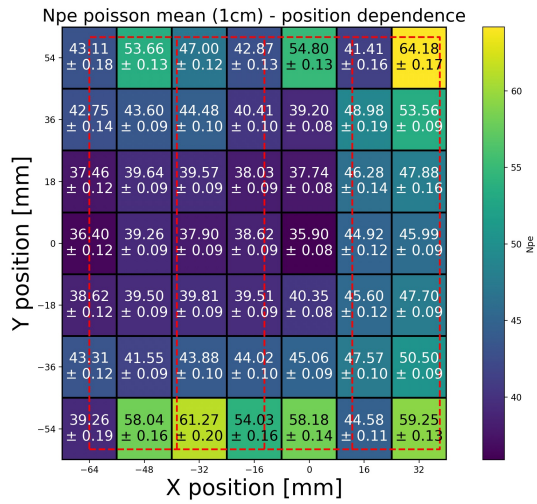
文献 [21] で報告されている通り、KEK PF-AR のテストビームラインにおいて、2.0 GeV/c の電子ビームを利用した性能評価実験が行われている。このテスト実験では、電子ビームを KVC のさまざまな位置に入射させ、検出効率と平均光量の位置依存性を測定した。その結果、図 2.4 に示すように、セグメント境界を跨がないビームスポットでは 99.9% 以上の検出効率を得られた。また平均光量についても、ver. 1 では 40~60 光子、ver.2 では 90~140 光子と、十分な光量が得られていることが確認された。



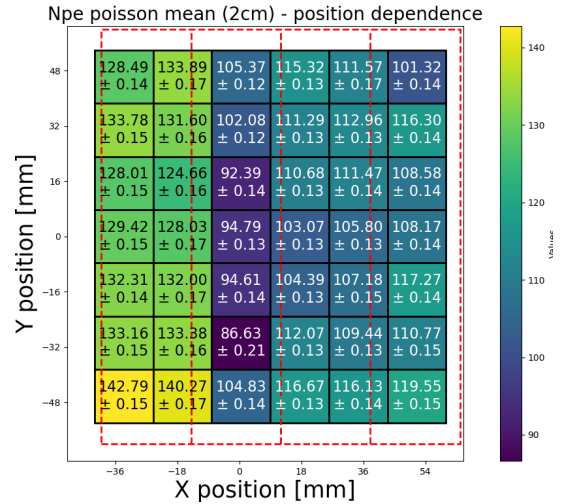
(a) 検出効率 (1 cm)



(b) 検出効率 (2 cm)



(c) 平均光量 (1 cm)



(d) 平均光量 (2 cm)

図 2.4: (A)KVC (ver. 1) での検出効率。(B)KVC (ver. 2) での検出効率。ビームスポットがセグメント境界を跨ぐ場合に効率が少し低下しているが、それ以外の領域ではほぼ 99.9%以上の検出効率が得られている。(C)KVC (ver. 1) の平均光量。(D)KVC (ver. 2) での平均光量。

## 2.2 $K^-$ ビームを用いた J-PARC での試験

前節で述べた KEK PF-AR におけるテスト実験は電子ビームを用いたものであり、 $K^-$  ビームを用いる E72 実験とは測定条件が大きく異なる。そのため、J-PARC K1.8BR ラインにおいて、2025 年 2 月に E73 パラサイト実験、同年 5 月に T110 実験と、2 度にわたる  $K^-$  ビームを用いたテスト実験を実施した。さらに、これらの結果を踏まえ、2025 年 11 月に E72 本実験に臨んだ。本節では、これら一連の J-PARC での試験について、実験セットアップ、回路構成、測定条件、解析方法といった共通事項をまとめて述べた後、各試験における結果と考察を時系列に沿って示す。

### 2.2.1 セットアップ

E73 パラサイト実験および T110 実験では、検出器のセットアップは同一である。これらの実験における検出器セットアップを、図 2.5 に示す。ビーム上流側から順に、T0、BAC、SAC、KVC、BH2 を固定台上に設置した。T0 カウンターは、これらのテスト実験においてのみ使用したシンチレーション検出器であり、ビーム粒子の通過時刻を与えるために用いている。また、図に示されている Scattering Aerogel Counter (SAC) は、 $\Sigma N$  カスプの精密分光実験 (J-PARC E90 実験) 向けに開発された検出器であるため、本論文ではその詳細については扱わないこととする。

なお、E72 本実験における検出器のセットアップについては、第 1.4 章を参照されたい。

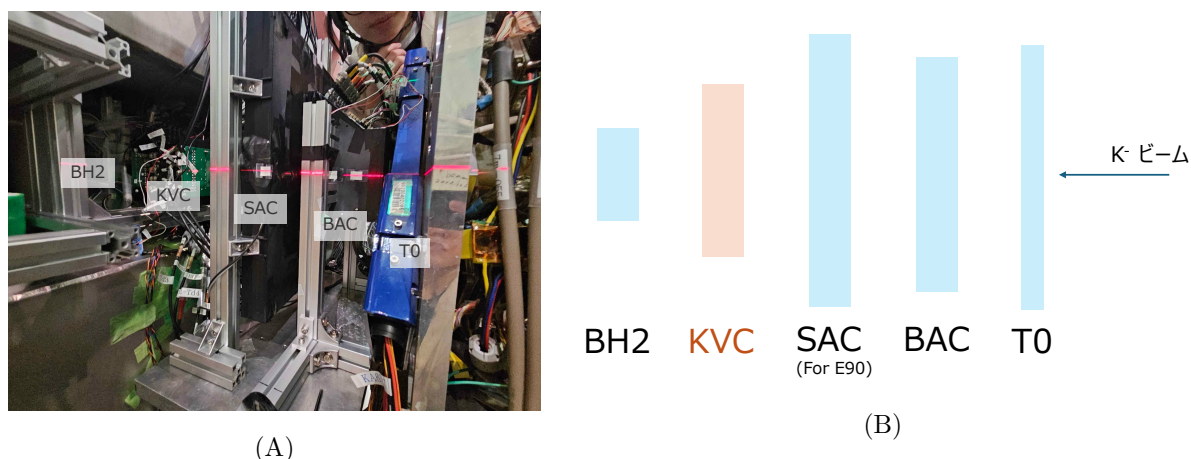


図 2.5: E73 パラサイトおよび T110 実験のセットアップ。(A) が実際の写真、(B) が模式図を示す。

## 2.2.2 回路構成

図 2.6 (A) に示すように、KVC に用いる MPPC ボード (S13360-6050VE) には 16 チャンネルの読み出し口が設けられており、1 セグメントの石英ガラスに対して 4 チャンネルが設置される。これら 4 チャンネルの MPPC の信号は、図 2.6 (B) に示す SUM 回路によって加算され、1 つの信号として出力される。

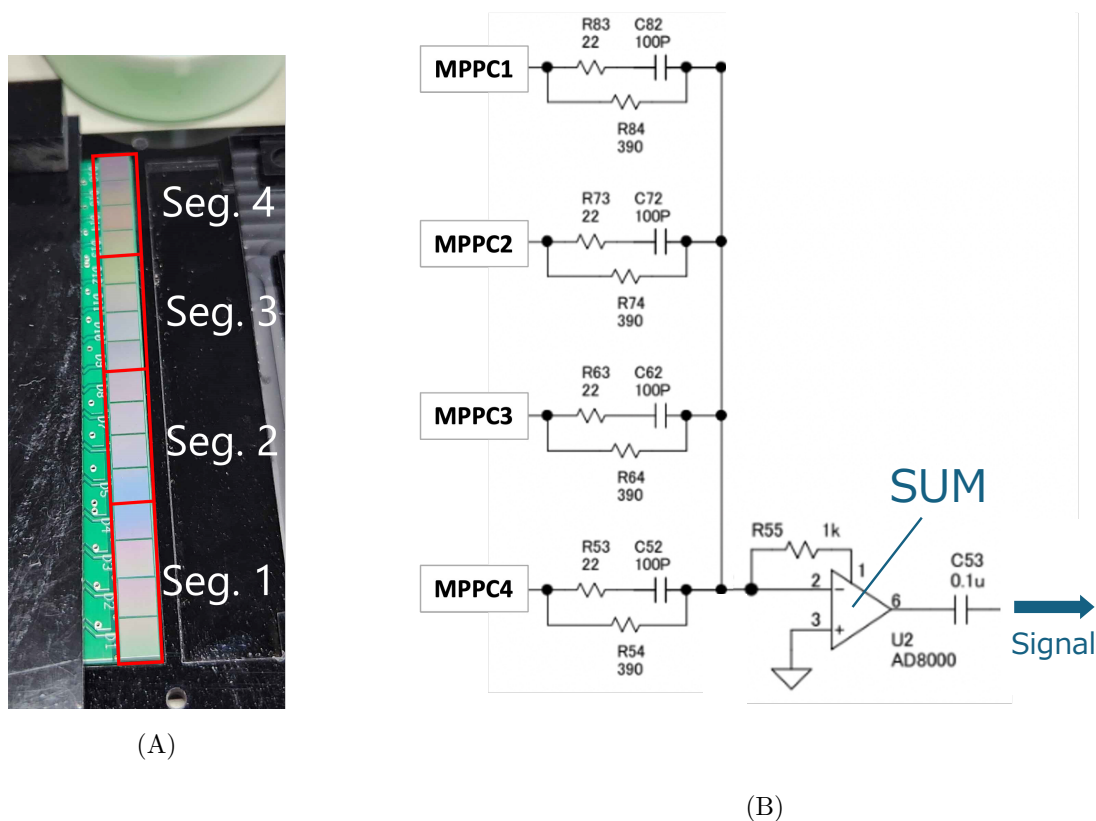


図 2.6: (A)MPPC ボードの写真。1つのセグメントに対して、4チャンネルの読み出し口が設置されている。(B)MPPC の SUM 回路の回路図。4つの MPPC の信号を加算し、1つの信号を出力している。

この設計に基づき、テスト実験における KVC の回路構成を以下の図 2.7 に示す。図にみられるように、ADC の取得データについては、各 MPPC ボードからの個別信号に加え、アナログミキサにより加算された各セグメントにおける SUM 信号を取得している。一方で TDC については、各セグメントの SUM 信号のみ取得している。なお、KVC (ver. 4) ではセグメント数が 8 本に増えるが、回路構成と取得データの内容は同様である。

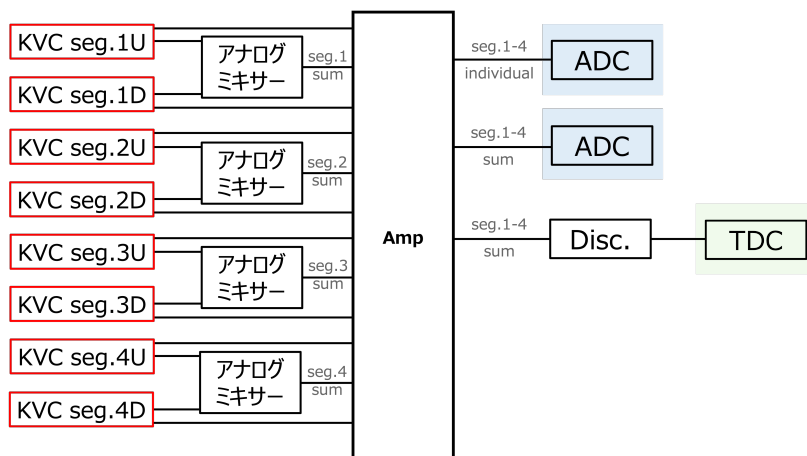


図 2.7: KVC の回路構成の模式図。ADC は、各 MPPC ボードからの個別信号に加え、アナログミキサーにより加算された各セグメントにおける SUM 信号を取得している。一方で TDC は、各セグメントの SUM 信号のみ取得している。

### 2.2.3 測定条件

テスト実験および本実験に向けて、ディスクリミネータの閾値 ( $V_{th}$ ) の調整を行った。調整のため、7 種類の閾値を設定し、各セグメントそれぞれについてノイズレートを測定した。図 2.8 に、各実験における測定結果を示す。なお、MPPC にはオペレーション電圧として 58 V を印加している。この電圧値は、前節で述べた KEK PF-AR における電子ビームを用いた実験の結果を基に、安定した動作と十分な性能が得られる条件として設定したものである。

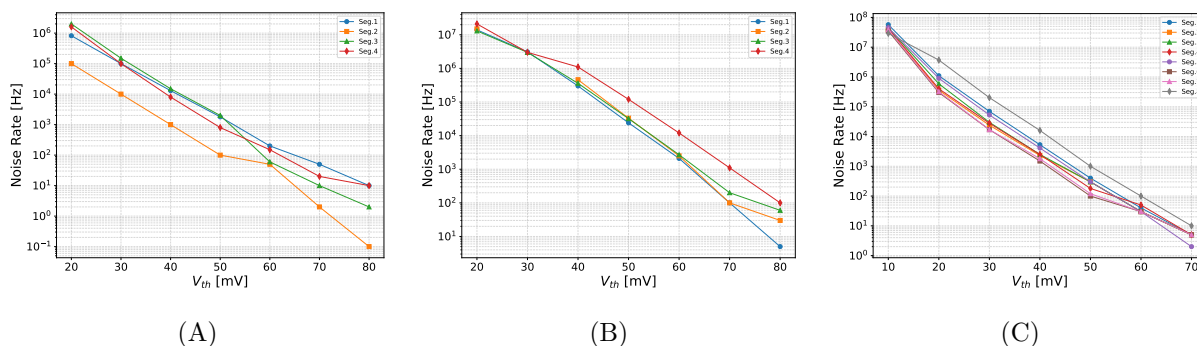


図 2.8: 各閾値に対するノイズレートの測定結果。(A)E73 パラサイト実験、(B)T110 実験、(C)E72 本実験の結果を示す。いずれも MPPC には 58 V の電圧を印加している。

これらの結果に基づき、決定した閾値の値、およびビーム粒子・運動量、MPPC への印加電圧等の測定条件を以下の表 2.2 に示す。E72 本実験では、メインの運動量である 735 MeV/c に加え、低運動量条件として 600 MeV/c 付近でのデータ測定を行う。そのため、テスト実験においても同様に 735 MeV/c および 600 MeV/c の条件でデータを取得した。

表 2.2: KVC テスト実験における測定条件の概要

実験名	KVC	ビーム粒子	ビーム運動量	$V_{th}$	MPPC HV
E73 パラサイト実験	ver. 1	$K^-$	735 MeV/c	40 mV (Seg. 1)	58–62 V
				35 mV (Seg. 2–4)	
		$K^-$	600 MeV/c	40 mV (Seg. 1)	58–59 V
				35 mV (Seg. 2–4)	
T110 実験	ver. 3	$K^-$	735 MeV/c	50 mV (All Seg.)	57–58 V
		$K^-$	600 MeV/c	50 mV (All Seg.)	58 V
E72 本実験	ver. 4	$K^-$	735 MeV/c	50, 60, 70 mV (All Seg.)	56–58 V
		$K^-$	645 MeV/c	50 mV (All Seg.)	58 V

## 2.2.4 解析方法

テスト実験および本実験のデータを用いて、KVC の検出効率と平均光量を評価する。これらの解析方法は、すべての実験において基本的なコンセプトが共通しているため、本節においてまとめて説明する。

### 検出効率の評価方法

E73 パラサイト実験における検出効率  $\varepsilon$  は、次式により定義される。

$$\varepsilon = \frac{\overbrace{T0 \times BH2}^{\text{KVC ヒット選択}} \times \text{KVC} \times \overbrace{BAC \times SAC}^{\text{K}^- \text{ イベント選択}}}{T0 \times BH2 \times \overline{BAC} \times \overline{SAC}} \quad (2.2.1)$$

この式では、ビームが KVC に入射したイベントを選択するために、KVC 上流の T0 カウンターおよび下流の BH2 カウンターのヒットを要求している。また、 $K^-$  ビームのイベントを選択するために、BAC と SAC には Veto 条件を課している。

T110 実験および E72 本実験においても、「KVC にヒットしたイベントの選択」および「 $K^-$  ビームイベントの選択」を行うという基本的なコンセプトは共通である。以下の表 2.3 に、これらの選択条件をまとめて示す。

表 2.3: KVC ヒット選択条件および  $K^-$  イベント選択条件の概要

実験名	KVC ヒット選択条件	$K^-$ イベント選択条件
E73 パラサイト実験	$T0 \times BH2$	$\overline{BAC} \times \overline{SAC}$
T110 実験	$T0 \times BH2 \times \text{Tracking}$	$\text{btof} < -4.0 \text{ ns} \times \overline{BAC} \times \overline{SAC}$
E72 本実験	$BH2 \times T1$	$\text{btof} < -3.0 \text{ ns} \times \overline{BAC}$

表にみられるように、T110 実験と本実験では、btof (beam time of flight) および Tracking の情報を用いている。以下に、これらの条件の詳細について述べる。

- **btof (beam time of flight) :**

btof とは、ビームライン上流に設置された BHT カウンターから T0 カウンターまでの飛行時間を指す。図 2.9 (A) に示すように、btof の分布には、ビーム中に含まれる  $K^-$  および  $\pi^-$  粒子に対応するピークが明確に分離して観測される。このうち、おおよそ  $-5.0 \text{ ns}$  にピークを持つ成分が  $K^-$  粒子のイベントに対応するため、本解析では  $\text{btof} < -4.0 \text{ ns}$  の条件を課して  $K^-$  ビームイベントを選択した。

- **Tracking 条件 :**

Tracking 情報は、ビームライン上流に設置された BLC (Beam Line Chamber) から得られる。図 2.9 (B) に示すように、このトラッキング情報を用いることで、KVC が設置されている位置における粒子の通過位置を再構成することができる。この通過位置情報に基づき、図中の赤い長方形で示した領域を通過したイベントのみを選択することで、ビームが実際に KVC を通過したイベントをより厳密に抽出した。なお、1つのセグメントの有効面積が  $120 \times 26 \text{ mm}^2$  であるのに対し、Tracking 条件では  $66 \times 12.5 \text{ mm}^2$  のより小さな領域を選択している。

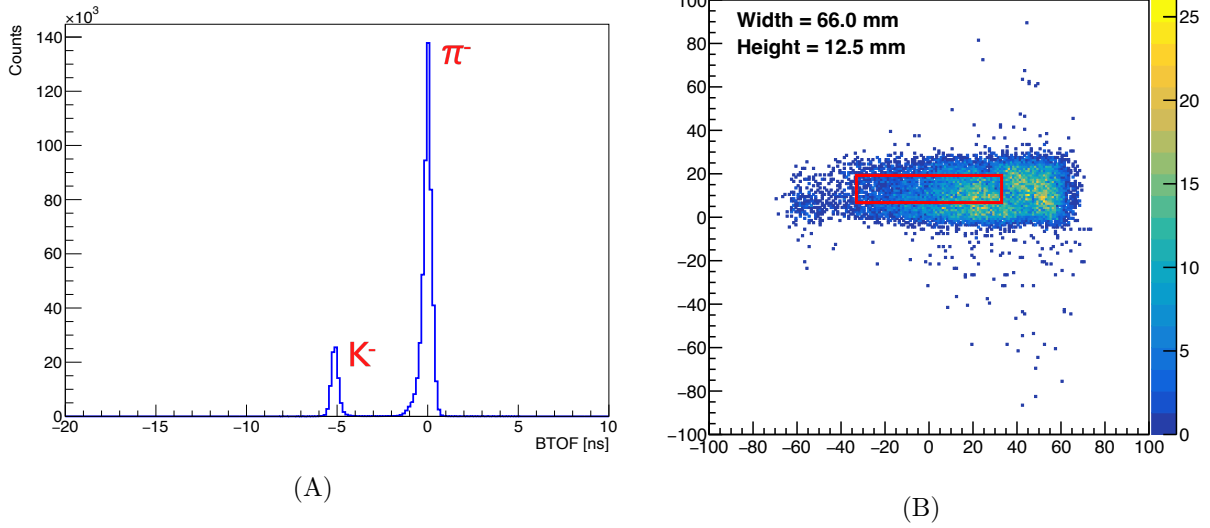


図 2.9: (A) btof の分布。2つのピークはそれぞれ  $K^-$ 、 $\pi^-$  粒子のイベントに対応しており、 $K^-$  粒子のイベントを選択するため、 $\text{btof} < -4.0$  ns のカット条件を課している。(B) セグメント 2 における Tracking 条件の様子。赤い長方形で囲った領域を通過したイベントを選択している。

### 平均光量の評価方法

KVC が検出した光量の平均値 ( $N_{\text{p.e.}}$ ) は、ADC 情報を用いて評価する。ADC 値と平均光量の対応は、次式で与えられる。

$$N_{\text{p.e.}} = \frac{\text{ADC} - \text{Pedestal}}{\text{One photon gain}} \quad (2.2.2)$$

One photon gain とは 1 光子に相当する ADC 値であり、ADC 値と光量に対応づけるための値である。One photon gain は、KVC 内部に設置された LED 光源から微弱な光を照射することで測定する。このとき、図 2.10 に示すように、0 光子、1 光子、2 光子... に対応する複数のピーク構造を持つ ADC 分布が得られる。これらのピークは入射光子数の違いに対応しており、式 2.2.3 に示すガウス関数を用いて分布全体をフィッティングすることで、隣接するピーク間の間隔を求めることができる。なお、式中の  $C_i$  はフィッティングパラメータであり、このうち  $C_3$  が隣接するピーク間隔、すなわち 1 光子に相当する ADC 値 (one photon gain) に対応する。

$$f(x) = \frac{c_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_1}{c_2}\right)^2\right] + \sum_{i=1}^n \frac{c_{i+4}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_1 - i \times c_3}{\sqrt{i+1} \times c_4}\right)^2\right]. \quad (2.2.3)$$

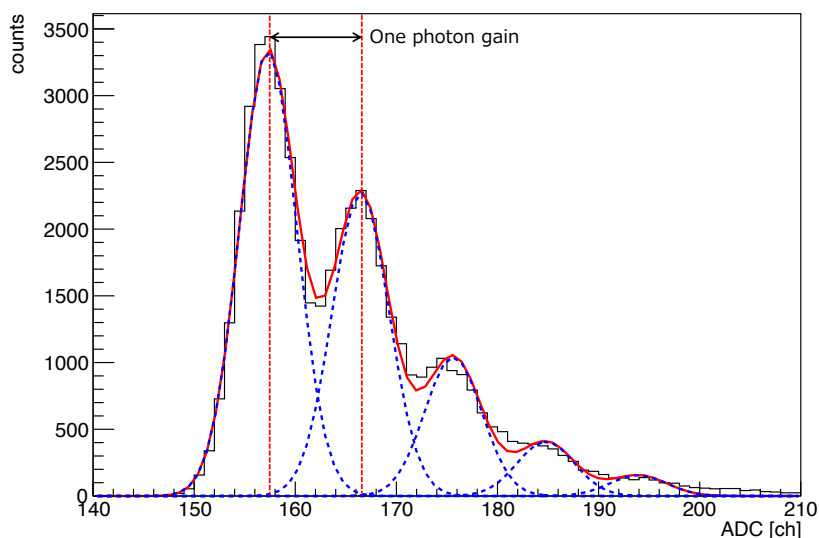


図 2.10: LED を用いて測定した KVC の ADC 分布。複数のピークはそれぞれ、0 光子、1 光子、2 光子... に対応しており、これらのピークの間隔が One photon gain として求められる。

また、ADC にはオフセット成分が含まれており、ADC 値の零点が 0 光子に対応していないため、0 光子に対応するペDESTAL 位置を用いて補正を行う。平均光量の評価の際には、検出効率の算出と同様に、各検出器のヒット条件や Veto 条件を課すことで、 $K^-$  ビームが KVC を通過したイベントのみを選択した。

これらの解析方法をもとに次節では、各実験における解析結果、および考察を述べる。

## 2.2.5 E73 パラサイト実験による、KVC (ver. 1) の性能評価の結果

E73 パラサイト実験では、KVC (ver. 1) の性能評価を行った。本節では、平均光量と検出効率の解析結果について述べる。

### 平均光量の解析結果

平均光量の評価に用いた one photon gain の値を、表 2.4 に示す。ここでは、MPPC への印加電圧を 58 V とし、1 つのチャンネルに対して、4 つの MPPC それぞれで測定した one photon gain の平均値を用いている。式 2.2.4 を用いて、運動量 735 MeV/c の  $K^-$  ビームを用いた際の ADC 値を光量に変換すると、図 2.11 (A) に示すような光量分布が得られる。この分布をポアソン分布でフィッティングすることにより平均値を求めた結果、各セグメントにおける平均光量は、図 2.11 (B) のように求められる。図に示すように、各セグメントでの平均光量はおよそ 7~9 光子程度まで低下している。

表 2.4: 各チャンネルにおける one photon gain の値。MPPC への印加電圧は 58V であり、各チャンネルに対して、4 つの MPPC における値の平均値を示している。

セグメント	up	down
1	12.37	12.38
2	12.14	12.14
3	12.95	12.91
4	14.02	14.02

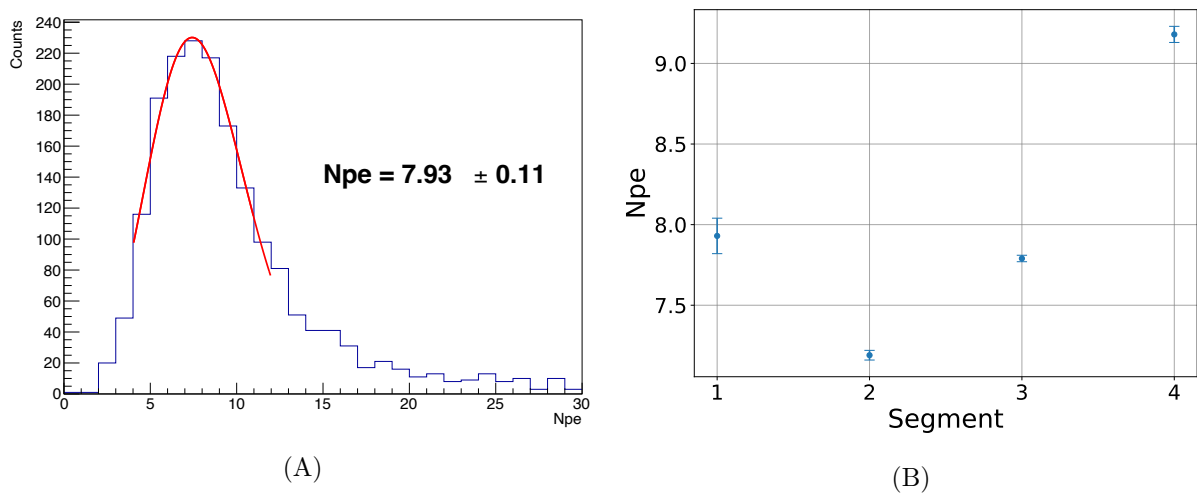


図 2.11: E73 パラサイト実験において、運動量 735 MeV/c の  $K^-$  ビームを用いた際の KVC (ver. 1) における平均光量の解析結果。MPPC への印加電圧は 58 V である。(A) はセグメント 1 における光量分布。(B) は各セグメントでの平均光量の解析結果を示している。

### 検出効率の解析結果

図 2.12 に、各印加電圧における検出効率の解析結果を示す。すでに表 2.2 に示したように、運動量 735 MeV/c では MPPC 電圧を 58 V から 62 V まで変化させて測定を行い、運動量 600 MeV/c では、58 V および 59 V の 2 点でデータを取得した。実験当時は、KVC (ver. 1) は  $K^-$  ビームに対して 99.6% の検出効率を実現すると予想されていた。しかしながら、図に示すように、オペレーション電圧の 58 V では、検出効率は 50% 以下と非常に低い値となっている。MPPC への印加電圧を上げることで検出効率は向上するものの、62 V においても 90% を下回っている。

これにより、KVC (ver. 1) は、735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対して、十分な性能が得られないことが明らかとなった。

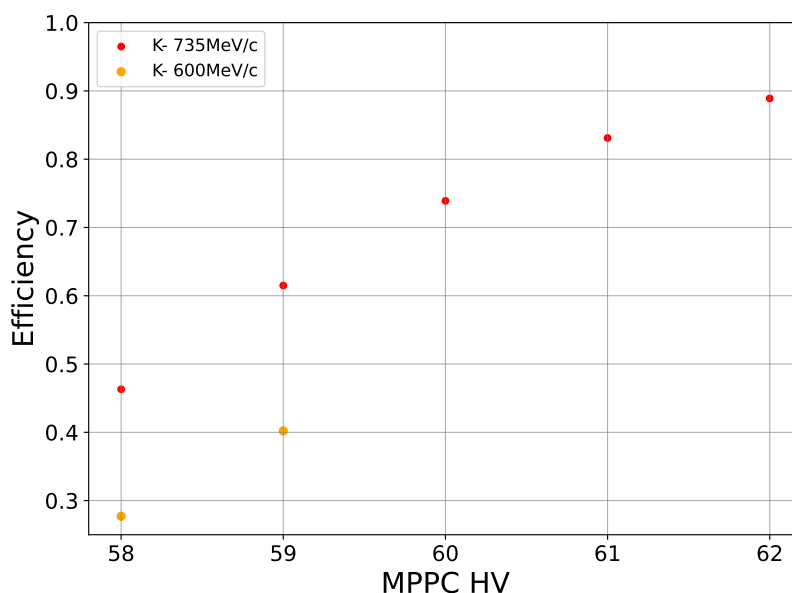


図 2.12: E73 パラサイト実験において、 $K^-$  ビームを用いた際の検出効率の解析結果。青色のプロットが運動量 735 MeV/c、橙色のプロットが 600 MeV/c での検出効率を示している。

## 2.2.6 検出効率、平均光量低下の考察および KVC (ver. 3) の開発

ここでは、前節で述べた KVC (ver. 1) の検出効率および平均光量の低下の要因について考察し、その結果を踏まえて新たな改良を施した KVC (ver. 3) の開発について述べる。

### 検出効率および光量低下の考察

すでに第 2.1 章で述べた通り、KVC (ver. 1) は、2 GeV/c の電子ビームに対しては 99.9%以上の検出効率を実現していた。また、文献 [21] にて考察されている通り、チェレンコフ光の発生数を求めるフランク-タムの式から、 $K^-$  ビームに対しても 99.6%以上の検出効率を実現すると予想されていた。しかしながら、735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対しては、平均光量が大きく低下し、検出効率も 50%以下まで低下した。

この原因として、図 2.13 に示すように、ガラス内部で発生したチェレンコフ光が、テフロンシートによって十分に乱反射されず、ガラスとシートの間にある薄い空気層へ取り込まれることで、光損失が生じていた可能性が考えられる。

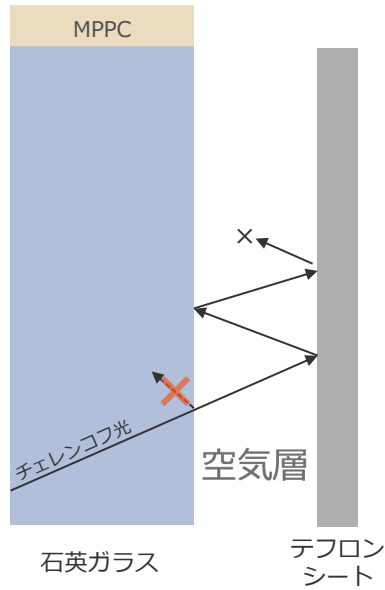


図 2.13: ガラス – 空気境界における光の挙動の模式図。ガラス境界に到達したチェレンコフ光は全反射を起こさず、空気層に取り込まれることで光損失が生じている。

前述した通り、石英ガラスにはチェレンコフ光を乱反射させる目的でテフロンシートを巻いている。しかし、テフロンシートは手巻きによって施工されているためその精度には限界があり、ガラスとシートの間には空気層が生じてしまう。以下では、このガラスと空気層の境界におけるチェレンコフ光の振る舞いについて考察する。

屈折率 1.46 の石英ガラスと空気との境界における全反射角、および運動量 735 MeV/c の  $K^-$  に対するチェレンコフ角は、それぞれ次式で与えられる。

$$\theta_{\text{全反射}} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{空気}}}{n_{\text{ガラス}}}\right) = \arcsin\left(\frac{1.00}{1.46}\right) \approx 43.2^\circ. \quad (2.2.4)$$

$$\theta_{\text{チェレンコフ for } K^-} = \arccos\left(\frac{1}{n\beta}\right) \approx 34.4^\circ. \quad (2.2.5)$$

この結果から、運動量 735 MeV/c の  $K^-$  ビームにおけるチェレンコフ角は、ガラス – 空気境界における全反射角に達していないことがわかる。したがって、図 2.13 に示すように、ガラス境界に到達したチェレンコフ光は全反射を起こさず、空気層へと取り込まれてしまう。これが光損失の要因となり、結果として平均光量の減少および検出効率の低下を引き起こしていると考えられる。

一方で、2 GeV/c の電子ビームの場合を考えると、チェレンコフ角は次式で与えられる。

$$\theta_{\text{チェレンコフ for } e^-} = \arccos\left(\frac{1}{n\beta}\right) \approx 46.8^\circ. \quad (2.2.6)$$

この角度はガラス – 空気境界における全反射角よりも大きいため、ガラス境界に到達した光は全反射を起こし、空気層へ取り込まれることなく MPPC へ到達する。このため、KEK PF-AR のテスト実験においては、KVC (ver. 1) で十分な光量が得られていたと考えられる。

以上の結果から、KVC (ver. 1) は 735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対して十分な性能を発揮できず、さらなる改良が必要であることが明らかとなった。この結果を踏まえ、石英ガラスの厚みを増すとともに、一部セグメントのガラス表面に加工を施した KVC (ver. 3) の開発を行った。

## 新たな改良を施した KVC (ver. 3) の開発

すでに考察したように、KVC (ver. 1) では、石英ガラスとテフロンシートの間になぜか空気層が存在していたため、チェレンコフ光の一部がその空気層に取り込まれ、結果として光損失が生じていた可能性がある。この問題を解決するべく、以下の 2 点の改良を行った。

### 1. 石英ガラスの厚みを 1 cm から 2 cm へ増加

1 つ目の改良は、1 cm であった石英ガラスの厚みを 2 cm へ増加させたことである。この改良により、以下の 2 点の改善が予想される。

- **チェレンコフ光発生数の増加：**

チェレンコフ光の発生数はラディエータの厚さに比例する。したがって、厚さを 1 cm から 2 cm へと 2 倍にすることで、チェレンコフ光の発生数も増加し、平均光量の向上が予想される。

- **ガラス内部での反射回数の減少：**

ガラス内部で発生したチェレンコフ光は、ガラス境界面で反射しながら MPPC に到達する。厚みが 2 倍になると、光が MPPC に到達するまでに必要な反射回数が減少し、その分だけ光損失が抑制されるため、平均光量の増加が見込まれる。

### 2. 石英ガラス表面への加工

2 点目の改良として、一部のセグメントにおいて石英ガラスの境界条件を変更した。KVC (ver. 3) は、ver. 1、ver. 2 と同様に 4 枚の石英ガラスで構成されており、各セグメントにおいて被覆材の変更やガラス表面への加工を施すことで、それぞれ異なる境界条件を設定した。以下に、その詳細について述べる。

- **セグメント 1：マイラーシート被覆：**

セグメント 1 では、被覆材としてマイラーシートを使用した。マイラーシートはテフロンシートと光反射の原理が異なり、テフロンシートが拡散反射であるのに対して、マイラーシートは鏡面反射となる。この反射特性の違いにより、チェレンコフ光の損失低減が予想さ

れる。

• **セグメント 2 : 磨りガラス加工 :**

セグメント 2 には、磨りガラス加工を施した。ガラスの表面に微細な傷をつけることで、ガラス内部のチェレンコフ光が境界面で乱反射することを期待した。図 2.14 には無加工の石英ガラスと磨りガラス加工を施したガラスを並べており、磨りガラスの場合は光が乱反射し、白く見えることがわかる。なお、磨りガラス加工は、韓国の AEC 社 [22] に依頼した。

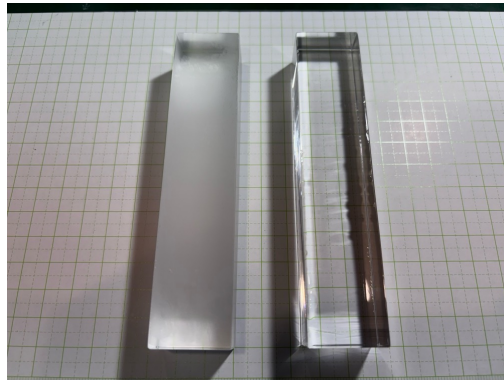
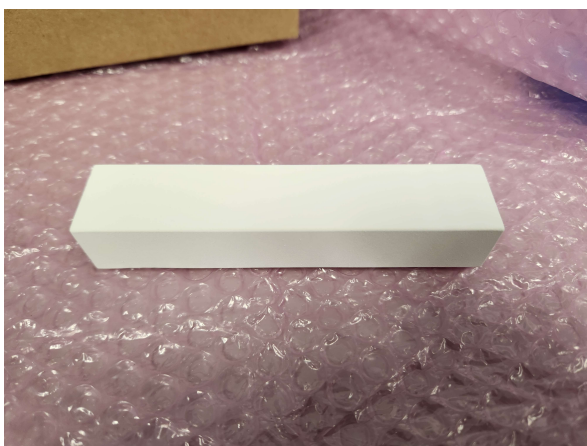


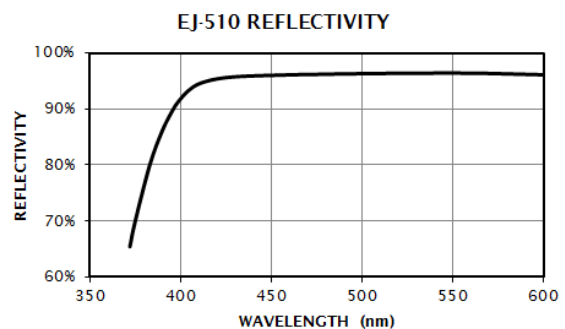
図 2.14: 無加工の石英ガラス (右) と磨りガラス (左) の比較。磨りガラスでは光が乱反射するため白く見えている。

• **セグメント 3 : 白色塗料加工 :**

セグメント 3 には、白色塗料 (Eljen EJ510 [23]) をガラス表面に塗布した。2.15 (A) が実際の写真である。図 2.15 (B) に示すように、この塗料は 400 nm 以上の波長領域において、90% 以上の反射率を誇る。さらに、スプレーを用いて塗料の塗布を行うことで、ガラスと塗料の間に空気層が形成されることを防いでいる。加工は、株式会社ジーテック [24] に依頼した。



(A)



(B)

図 2.15: (A) 実際の写真。スプレーを用いて塗料の塗布を行うことで、ガラスと塗料の間に空気層が形成されることを防いでいる。(B) 白色塗料 (Eljen EJ510) の光反射率。

• セグメント 4：加工なし：

セグメント 4 には、新たな加工は施さず、KVC (ver. 1,2) と同様にテフロンシートを石英ガラスに巻いて使用した。

以上に述べた KVC (ver. 3) における加工内容を、表 2.5 にまとめて示す。次節では、この KVC (ver. 3) を用いて実施した T110 実験の結果を基に、その性能評価について述べる。

表 2.5: KVC (ver. 3) の各セグメントでの境界条件の概要

セグメント	被覆材	ガラス表面への加工	石英ガラスの厚さ
Seg.1	マイラーシート	なし	2 cm
Seg.2	テフロンシート	磨りガラス加工	2 cm
Seg.3	白色塗料	なし	2 cm
Seg.4	テフロンシート	なし	2 cm
KVC (ver. 1)	テフロンシート	なし	1 cm

## 2.2.7 T110 実験による、KVC (ver. 3) の性能評価の結果

735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対する、各セグメントにおける平均光量  $N_{p.e.}$  および検出効率の解析結果を表 2.6 に示す。表に示すように、すべてのセグメントにおいて、ver. 1 と比較して光量が大幅に増加していることが確認された。特に、最も光量が多かったのは磨りガラス加工を施したセグメント 2 であり、次いで白色塗料加工を施したセグメント 3 であった。

また、検出効率も ver. 1 に比べて大きく向上し、すべてのセグメントで 99.7%以上の検出効率を実現した。

表 2.6: 各セグメントにおける境界条件と平均光量の解析結果 ( $K^-$ , 735 MeV/c)

セグメント	被覆材	ガラスの表面加工	ガラス厚	反射特性	$N_{p.e.}$	検出効率
Seg.1	マイラー	なし	2 cm	全反射	42.7	99.8%
Seg.2	テフロン	磨りガラス	2 cm	乱反射	86.7	99.7%
Seg.3	白色塗料	なし	2 cm	乱反射	62.2	99.7%
Seg.4	テフロン	なし	2 cm	全反射	50.9	99.7%
KVC (ver. 1)	テフロン	なし	1 cm	全反射	~ 8	46.3%

600 MeV/c のデータに関しては、ビーム中の  $K^-$  粒子の数が少なく、検出効率を評価するために必要な統計量を得ることができなかった。

## 2.2.8 光量増加の考察および本実験に向けた KVC (ver. 4) の開発

前節の結果から、KVC (ver. 3) ではすべてのセグメントにおいて、平均光量が KVC (ver. 1) と比べて大幅に増加していることが確認された。本節では、各セグメントにおいて光量が増加した要因について考察するとともに、これらの結果を踏まえて、本実験に用いる KVC (ver. 4) の開発について述べる。

### 光量増加に関する考察

#### 全反射型：セグメント 1,4 に関する考察

まず、セグメント 1 およびセグメント 4 は、それぞれマイラーシートおよびテフロンシートを被覆材として用いたセグメントである。これらのセグメントでは、KVC (ver. 1) と同様に、シートと石英ガラスの間にわずかな空気層が存在しうするため、ガラス境界において発生したチェレンコフ光は、空気層との界面で全反射を起こし、MPPC に到達すると予想される。T110 実験の結果、これらのセグメントにおいては、ver. 1 と比較して平均光量が大幅に増加していることが確認された。

この光量増加の要因としては、第 2.2.6 節で述べたように、石英ガラスの厚みを 1 cm から 2 cm に増加させたことによる (1) チェレンコフ光の発生数の増加、および (2) ガラス内部での反射回数の減少が挙げられる。さらに、チェレンコフ光の発生数が増加することで、全反射条件が満たされない場合であっても、部分反射によって MPPC に到達する光子数が増加した可能性も考えられる。実際、セグメント 4 は境界条件が KVC (ver. 1) と同一であるにもかかわらず、石英ガラスの厚みを 2 倍にただけで平均光量が大きく増加していることが確認されている。この結果は、石英ガラスの厚みを増加させることが、境界条件の違いに依らず、光量向上に対して非常に有効な改良であることを示している。

一方で、すでに第 2.2.6 章で考察したように、735 MeV/c の  $K^-$  ビームの場合、チェレンコフ角はガラス - 空気境界における全反射角に達しない。そのため、チェレンコフ光の一部は空気層へ取り込まれ、光損失が生じる。このことが、セグメント 1 および 4 において、後述する乱反射型セグメントと比較して光量の増加が抑えられた要因であると考えられる。

#### 乱反射型：セグメント 2,3 に関する考察

次に、セグメント 2 およびセグメント 3 は、それぞれ磨りガラス加工および白色塗料 (スプレー) 加工を施した、乱反射型の境界条件を有するセグメントである。これらの加工では、ガラス表面に直接処理を施すことで、光が空気層へ取り込まれることを防ぎ、ガラス表面での乱反射

を生じさせる設計となっている。T110 実験の結果、これらのセグメントでは、全反射型のセグメント 1 および 4 を上回る顕著な光量増加が確認された。磨りガラス加工を施したセグメント 2 では平均光量が約 86.7 光子と最も高く、白色塗料スプレー加工を施したセグメント 3 においても約 62 光子の高い光量が得られている。

この大幅な平均光量の増加の要因として、ガラス内部のチェレンコフ光が設計意図どおり、ガラス境界で乱反射を起こし、空気層に取り込まれることによる光損失が抑制されたことが考えられる。

これらの考察の正当性を示す根拠として、以下の 2 つの測定が挙げられる。

#### • 各セグメントに赤色光を照射した際の様子

図 2.16 に、KVC (ver. 3) の各セグメントに赤色光を照射した際の様子を示す。図に示すように、平均光量の多いセグメント 2 および 3 では、赤色光が乱反射し、セグメント全体が赤く見えていることが確認できる。特に、磨りガラス加工を施したセグメント 2 では、他のセグメントと比べてより強く赤色を呈している。これらの様子は、乱反射型の境界条件を有するセグメント 2 および 3 で顕著な光量増加が確認された結果と一致している。

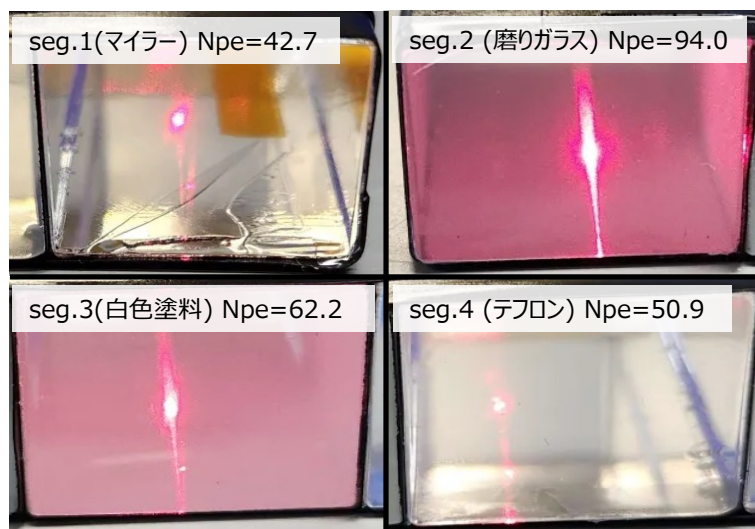


図 2.16: 各セグメントに赤色光を照射した際の写真

#### • 各セグメントに $^{90}\text{Sr}$ を当てた際の最大波高

図 2.17 (A) は、KVC (ver. 3) の各セグメントに  $^{90}\text{Sr}$  を照射した際の最大波高を示している。図に示すように、最大波高は全反射型のセグメント 1 および 4 において大きな値を示しており、図 2.17 (B) に示す T110 実験における平均光量の結果とは逆の傾向が見られる。

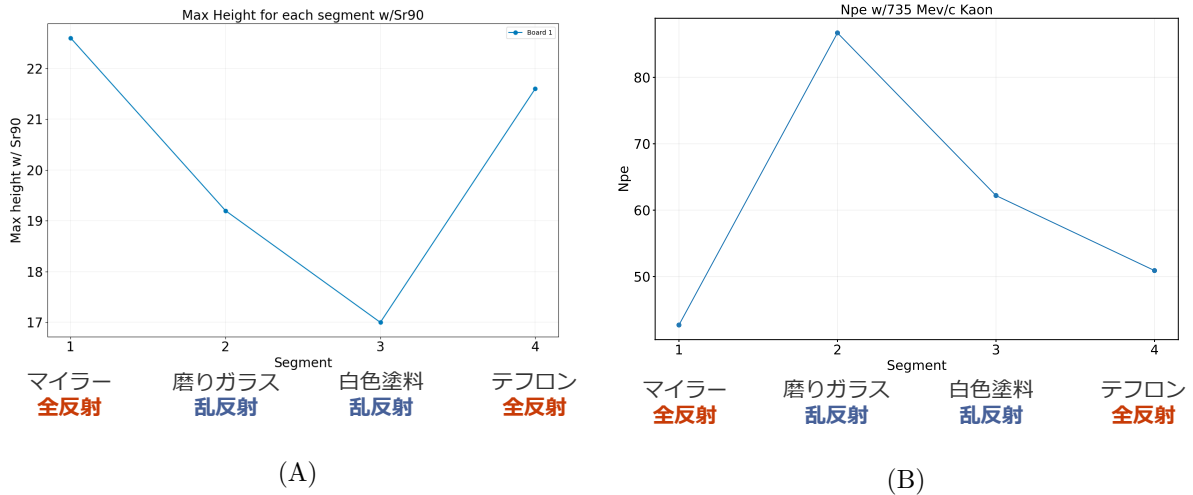


図 2.17: KVC (ver. 3) における、 $^{90}\text{Sr}$  および  $K^-$  を入射させた際の比較。(A) は  $^{90}\text{Sr}$  を当てた際の最大波高。(B) は 735 MeV/c の  $K^-$  を入射させた際の平均光量を示す。

$^{90}\text{Sr}$  を用いた最大波高の測定は、およそ 2 MeV の電子を入射させている場合と等価であると考えられる。このときのチェレンコフ角は、次式で与えられる。

$$\theta_{\text{チェレンコフ for } e^-} = \arccos\left(\frac{1}{n\beta}\right) \approx 45.6^\circ. \quad (2.2.7)$$

これは、式 2.2.4 にて求めた、ガラス - 空気境界における全反射角である  $43.2^\circ$  を上回っており、ガラス内部のチェレンコフ光はガラス境界で全反射することがわかる。これにより、全反射型のセグメント 1 および 4 にて多くの光が MPPC に到達し、セグメント 2 および 3 を上回る光量が得られたと考えられる。この結果は、ガラス境界での光の振る舞いに関する考察の妥当性を支持するものである。

## 検出効率に関する考察

表 2.6 に示すように、すべてのセグメントにおいて 99.7% 以上の検出効率が得られた一方で、0.2~0.3% 程度のわずかな低下も確認された。この低下の要因としては、 $K^-$  粒子の崩壊が挙げられる。KVC 上流に設置された SAC から KVC までは、およそ 200 mm の距離がある。この SAC と KVC の間における  $K^-$  粒子の崩壊確率は、 $K^-$  の寿命を用いて次式から見積もることができる。

$$1 - P(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\beta c \gamma \tau}\right) \approx 3.6\%. \quad (2.2.8)$$

$$\begin{cases} x = 0.2 \text{ m} \\ \beta = 0.83 \\ \gamma = 1.79 \\ \tau = 12.38 \times 10^{-9} \text{ s} \end{cases}$$

この崩壊によって生成された  $\mu^-$ 、 $\bar{\nu}_\mu$ 、および  $\pi$  粒子が前方に飛行し、KVC では検出されない一方で、KVC 下流の BH2 にヒットした場合には、KVC の検出効率を低下させる要因となると考えられる。

以上の解析結果および考察から、石英ガラスの厚み増加に加えて、ガラス表面に磨りガラス加工を施した乱反射型の境界条件が、735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対して最も高い光量を実現することが明らかとなった。これらの結果を踏まえ、次節で述べる E72 本実験に向け、最も光量が多かった磨りガラスを採用した KVC (ver. 4) を新たに開発した。

## E72 本実験に向けた KVC (ver. 4) の開発

KVC (ver. 4) の模式図および実際の写真を以下の図 2.18 に示す。KVC (ver. 4) では、磨りガラス加工を施した石英ガラスを 8 枚使用している。1 つのセグメントの面積が  $120 \times 26 \text{ mm}^2$  であるため、8 セグメント全体の有効面積は  $120 \times 208 \text{ mm}^2$  となる。また、石英ガラスの厚みはいずれのセグメントにおいても 2 cm である。

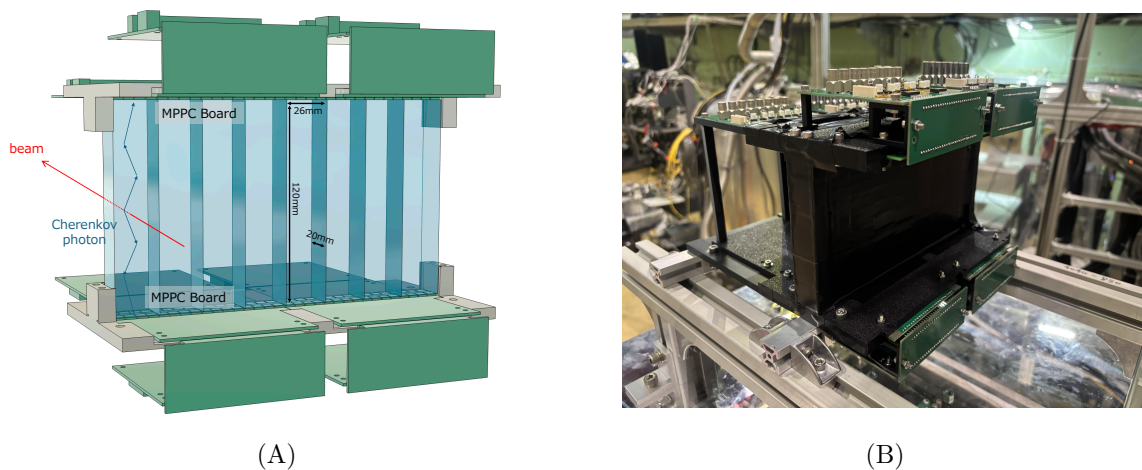


図 2.18: (A) KVC (ver. 4) の模式図。(B) KVC (ver. 4) の実際の写真

### 2.2.9 E72 本実験の結果

735 MeV/c および 645 MeV/c の  $K^-$  ビームに対する検出効率および平均光量の解析結果を、表 2.7 に示す。なお、平均光量の解析については、one photon gain の値を 58 V においてのみ取得していたため、58 V の条件に限って解析を行った。

表に示すように、735 MeV/c の運動量においては、いずれの閾値および印加電圧においても、99.6%以上の検出効率が得られている。また、平均光量は 8 セグメントにおける光量の合計として評価しており、いずれの閾値条件に対しても約 130 光子と十分な光量が得られていることが確認された。また、645 MeV/c の運動量に対しては、印加電圧を 58 V、閾値を 50 mV に設定した際、99.7%の検出効率と、106 光子程度の光量を得ることができていた。

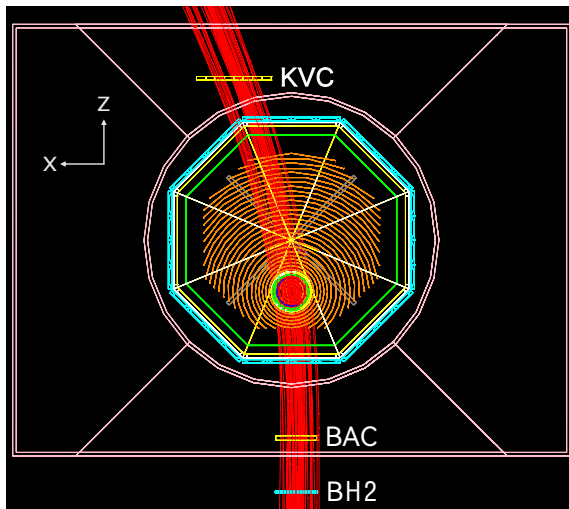
これらの結果に基づき、E72 本実験では MPPC の印加電圧を 58 V、ディスクリミネータの閾値を 50 mV に設定し、データ取得を行った。シミュレーションでは、ビーム粒子のうち 71.8% が KVC にヒットし、それによりトリガーレートが削減されると予想されていた。実際の本実験では、ビーム粒子の 72.9% が KVC にヒットしていることが確認され、E72 実験は当初の想定どおり、安定してデータ取得を進めることができた。

表 2.7: E72 本実験における KVC (ver. 4) 性能評価の結果

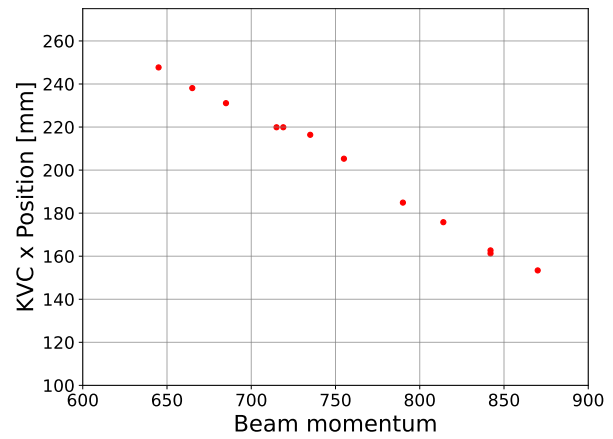
粒子	運動量	MPPC HV	$V_{th}$	$N_{p.e.}$	検出効率
$K^-$	735 MeV/c	58 V	50 mV	128.4	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	58 V	60 mV	129.2	99.8%
$K^-$	735 MeV/c	58 V	70 mV	128.2	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	57 V	50 mV	—	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	57 V	60 mV	—	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	57 V	70 mV	—	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	56 V	50 mV	—	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	56 V	60 mV	—	99.7%
$K^-$	735 MeV/c	56 V	70 mV	—	99.6%
$K^-$	645 MeV/c	58 V	50 mV	106.6	99.7%

また、本実験では、KVC を SHS マグネット後方に設置した。そのため、図 2.19 (A) に示すように、 $K^-$  ビームはマグネット磁場によって曲げられた軌道を描き、KVC に入射する。このとき、ビーム軌道の曲率半径は運動量に反比例するため、ビーム運動量の変化に応じて KVC の  $x$  軸方向の位置を調整する必要がある。そこで、KVC を設置する架台に 1 次元ムーバーを導入し、 $x$  軸方向の位置をリモートで調整可能な機構を設けた。この機構を用いることで、各ビーム運動量に対して KVC の  $x$  軸上の位置を最適化し、ビームが KVC の中央に入射するよう調整を行った。各ビーム運動量に対して設定した KVC の  $x$  軸上の位置を、表 2.8、および図 2.19 (B) に示す。

以上より、KVC は複数回にわたる改良とテスト実験を経て性能が向上し、E72 本実験においては安定して動作もと、想定通りのデータ取得を達成した。



(A)



(B)

図 2.19: (A)Geant4 でシミュレーションした  $K^-$  ビームの飛跡 (赤線)。 (B)E72 本実験における、各ビーム運動量における KVC の  $x$  軸上の位置。

表 2.8: 各ビーム運動量に対して設定した KVC の  $x$  軸方向の位置

ビーム運動量 [MeV/c]	KVC の $x$ 軸位置 [mm]
933	124.0
870	153.4
842	162.7
842	161.3
814	175.8
790	184.9
755	205.3
735	216.4
719	219.9
715	219.9
685	231.1
665	238.1
645	247.7

## 2.3 Geant4 を用いたシミュレーション

本節では、これまでに述べた一連のテスト実験に対して、Geant4 を用いたシミュレーションによる再現性の検証を行う。まず、シミュレーションを行うための KVC のジオメトリや、光学パラメータの設定について述べた後、実験結果を再現するためのパラメータ調節の流れを説明する。その後、KEK PF-AR 実験、E73 パラサイト実験、T110 実験のそれぞれについてパラメータ調節の結果を述べる。

### 2.3.1 KVC のジオメトリ設定

シミュレーションに用いた KVC のジオメトリを、以下の図 2.20 に示す。図中の黄色線は石英ガラス、青線は MPPC を示している。石英ガラスは、実機構造を反映して、1 mm のテフロンシート、およびブラックシートで覆っている。また、ガラスとテフロンシートの間には 0.2 mm の空気層を設定した。

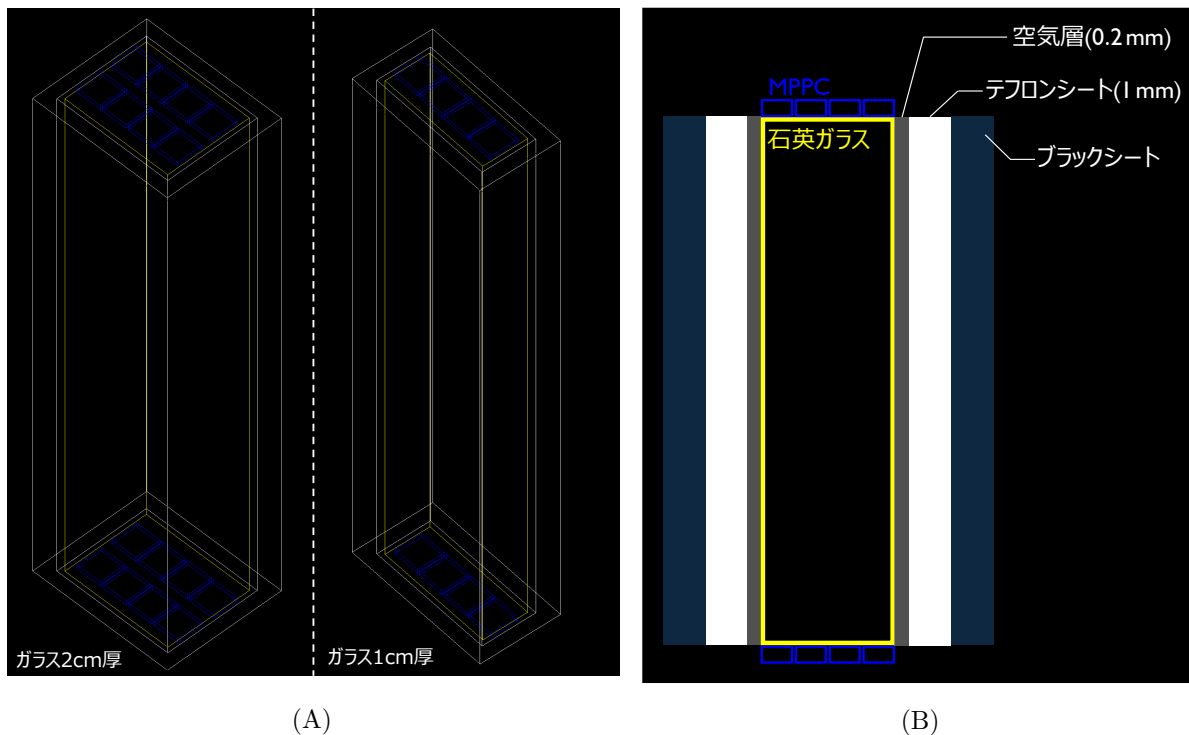


図 2.20: (A) シミュレーションに用いた KVC のジオメトリ。(B) ジオメトリ断面の模式図

### 2.3.2 光学パラメータの設定

検出器内におけるチェレンコフ光の発生および、光の伝搬・反射挙動を正しく再現するため、各構成要素に対して屈折率や反射特性などの光学パラメータを設定した。以下では、MPPC、石

英ガラス、およびテフロンシートに対する設定について述べる。

## MPPC

MPPC 読み出し部の量子効率、は、浜松ホトニクス社が公開しているデータとして、以下の図 2.21 を参照した [25]。図より、KVC の実機に用いた MPPC(S13360-6050VE) の有効感度領域を 320 nm~900 nm と設定し、MPPC に到達した光子については、この量子効率に基づく確率でヒット判定を行った。

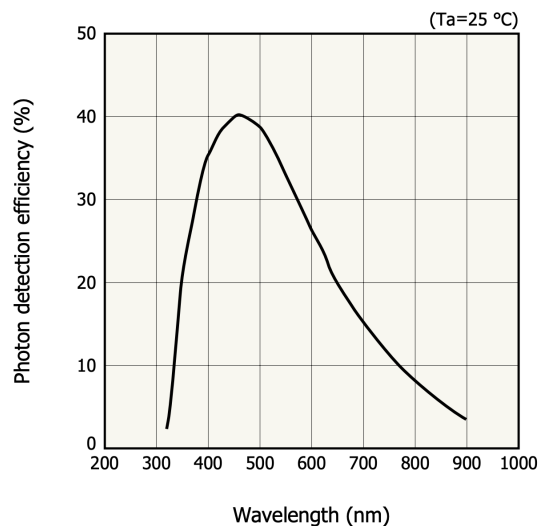


図 2.21: シミュレーションに用いた MPPC(S13360-6050VE) の量子効率

## 石英ガラス

ビーム粒子を照射した際、石英ガラス中でチェレンコフ光が発生するため、ガラスの屈折率はシミュレーションの結果に大きく影響する重要なパラメータである。屈折率の波長依存性は、シグマ光機株式会社が公開しているデータシート [26] を参考にした。設定に用いた屈折率の波長依存性を、以下の図 2.22 に示す。

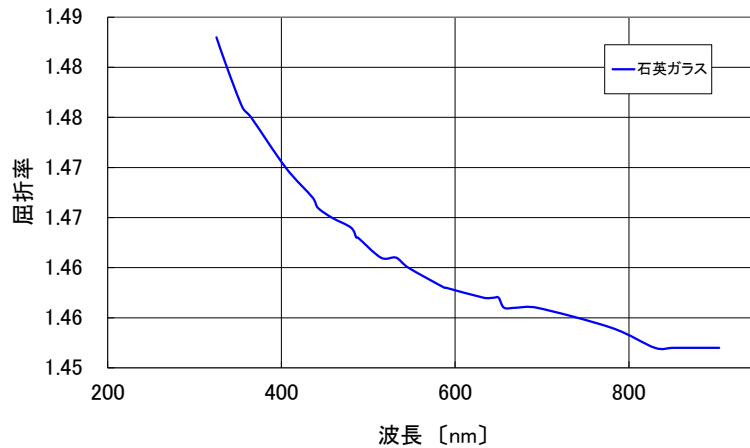


図 2.22: シミュレーションに用いた石英ガラス屈折率の波長依存性

また、ガラス – 空気境界における光の反射および透過挙動を正しく再現するため、ガラス境界での光学表面 (optical surface) の反射特性を設定した。Geant4 では、境界面における光の振る舞いを記述するために、Type, Finish, Model の 3 つのパラメータを指定する必要がある。以下では、各設定項目の詳細について述べるとともに、本論文において石英ガラスに対して採用した設定について説明する。

- **Type :**

Type は、境界面を挟む二つの媒質の光学的性質を定義するパラメータであり、Geant4 では主に dielectric.dielectric および dielectric.metal が用意されている。前者は誘電体同士の境界を表し、屈折率に基づくフレネル反射および屈折が自動的に計算される。一方、後者は金属表面などを想定した設定であり、透過を伴わない反射が記述される。

本論文で対象とする石英ガラスおよび空気はいずれも誘電体であるため、ガラス – 空気境界の物理状況を正しく反映する設定として dielectric.dielectric を採用した。この設定により、全反射条件を含む屈折および反射挙動が屈折率に基づいて自然に再現される。

- **Model :**

Model とは、境界面における反射および散乱の物理モデルを指定するパラメータである。Geant4 では、主に glisur モデルおよび unified モデルが用意されている。glisur モデルは比較的単純なモデルであり、表面の粗さを 1 つのパラメータで近似的に扱う。一方、unified モデルでは、図 2.23 に示すように、鏡面反射 (specular spike)、表面粗さに起因する鏡面反射成分 (specular lobe)、後方散乱 (backscatter)、拡散反射 (Lambertian) といった複数の反射成分を独立に設定することができる。

本研究では、ガラス表面における光の反射挙動をより柔軟かつ現実的に再現するため、

unified モデルを採用した。このモデルを用いることで、実機の応答を再現するためのパラメータ調整が可能となり、シミュレーション結果と実験結果との比較検討を行う上で有利である。

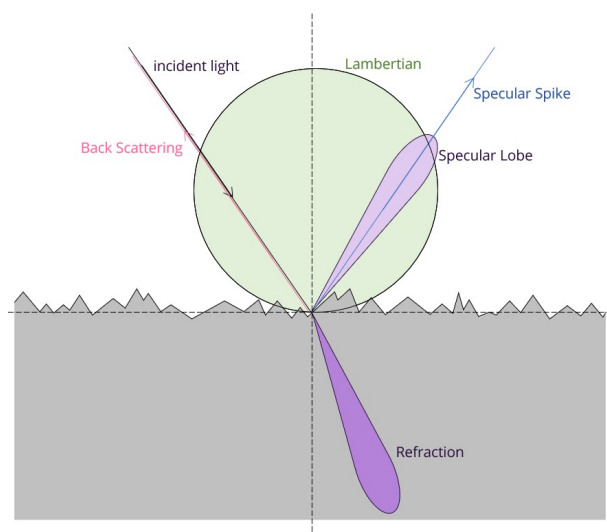


図 2.23: Geant4 の unified モデルにおいて定義される各反射成分の概念図 [27]。入射光に対して、鏡面反射成分 (specular spike)、表面粗さに起因する鏡面反射成分 (specular lobe)、後方散乱 (backscatter)、および拡散反射 (Lambertian) が独立に定義されている。

- **Finish :**

Finish は、境界面の微視的な表面状態を指定するパラメータであり、代表的な設定として polished および ground が存在する。polished は理想的に平滑な鏡面を仮定する設定であり、反射角は幾何学的な鏡面反射条件に厳密に従う。一方、ground は表面に微小な粗さを持つ状態を表し、反射角に広がりを持たせることで拡散的な反射を表現する。

実際の石英ガラス表面は、完全な鏡面ではなく、加工や取り扱いに起因する微視的な凹凸を有している。そのため、本論文では表面粗さの影響を考慮する目的で Finish として ground を選択した。この設定では、表面粗さパラメータ  $\sigma_\alpha$  を用いて、表面を構成する微小表面 (facet) の法線方向のばらつきを表現することで、反射角の分布幅を制御することが可能である。さらに、この  $\sigma_\alpha$  は、unified モデルにおける specular lobe 反射成分に対して、反射角のばらつきを決定する主要なパラメータとなっており、 $\sigma_\alpha$  が大きいほど、specular lobe 反射はより広い角度分布を持つ。

## テフロンシート

石英ガラスと同様に、テフロンシートにおいても、空気層と接する境界での光の反射挙動が検出器全体の光収集効率に影響を与える。そのため、テフロンシートについても Geant4 の光学表

面 (optical surface) を定義し、反射特性の設定を行った。

テフロンシート表面は、実際には完全な鏡面ではなく、材料固有の微視的な粗さを有している。この点を考慮し、石英ガラスの場合と同様に、Finish として ground を設定した。これにより、表面粗さに起因する拡散的な反射成分をシミュレーションに取り入れている。テフロンは高い反射率を持ち、光が多方向に散乱される特性を有するため、乱反射成分を重視した反射特性の設定を行った。具体的には、specular spike、specular lobe、backscatter の各成分をそれぞれ一定値として設定し、specular spike を 0.2、specular lobe を 0.2、backscatter を 0.02 とした。残りの反射成分は Lambertian 反射として割り当てることで、テフロン表面における拡散反射の寄与を表現した。また、 $\sigma_\alpha$  の値は 0.2 で固定した。

### 2.3.3 パラメータ調節の流れ

これまでに述べたジオメトリおよび光学パラメータを用いて、テスト実験結果を再現するためのパラメータ調節を行った。本論文では、再現性の検証として、シミュレーションによって得られた光量分布と実験データにおける光量分布との統計的な一致を評価する。以下では、この再現性の基準に基づき、2つの測定についてシミュレーション結果との比較を行う。ここで、以降の説明を明確にするため、第 2 章の冒頭にて示した KVC 各バージョンの仕様と各テスト実験の情報をまとめたものを、以下の表 2.9 に再掲する。

表 2.9: KVC 各バージョンの仕様と性能評価実験のまとめ (再掲)

ver.	ガラス厚	ガラス表面の加工	被覆材	性能評価実験	ビーム粒子・運動量
1	1 cm	なし	テフロン	KEK PF-AR (第 2.1 章)	$e^-$ (2 GeV/c)
				E73 パラサイト実験 (第 2.2.5 章)	$K^-$ (735 MeV/c)
2	2 cm	なし	テフロン	KEK PF-AR (第 2.1 章)	$e^-$ (2 GeV/c)
3	2 cm	Seg. 1: なし	マイラー	T110 実験 (第 2.2.7 章)	$K^-$ (735 MeV/c)
		Seg. 2: 磨りガラス	テフロン		
		Seg. 3: なし	白色塗料		
		Seg. 4: なし	テフロン		
4	2 cm	磨りガラス	テフロン	E72 本実験 (第 2.2.9 章)	$K^-$ (600,735 MeV/c)

1 つ目の測定は、KEK PF-AR 実験における KVC (ver. 1)、E73 パラサイト実験における KVC (ver. 1)、および T110 実験における KVC (ver. 3) のセグメント 4 である。これらの測定

では、石英ガラス表面に特別な加工は施されておらず、被覆材としてテフロンシートが用いられているという共通点を持つ。シミュレーションの流れとしては、まず KEK PF-AR 実験の結果を基準とし、石英ガラス表面における反射特性パラメータである specular spike、specular lobe、Lambertian 成分、および表面粗さパラメータ  $\sigma_\alpha$  を調節することで、実験結果の再現を試みる。これらのパラメータについてスキャンを行い、光量分布が最もよく一致する条件を決定した。次に、得られたパラメータを固定したまま、入射粒子を電子から  $K^-$  に変更することで、E73 パラサイト実験における測定結果の再現を試みた。さらに、石英ガラスの厚さを 2 cm に変更することで、T110 実験における KVC (ver. 3) セグメント 4 の測定結果についても、同一のパラメータ設定で再現可能であるかを検証した。

2つ目の測定は、E72 実験に向けて実機に採用した、磨りガラス加工を施した石英ガラスを用いた実験結果の再現である。この場合についても、1つ目の測定と同様に、石英ガラス表面における specular spike、specular lobe、Lambertian 成分および  $\sigma_\alpha$  のスキャンを行い、 $K^-$  ビームおよび  $\pi^-$  ビームの両方に対して、光量分布が実験結果と一致するかどうかを検証した。

### 2.3.4 KEK PF-AR・E73 パラサイト・T110 実験における再現性の検証と考察

KEK PF-AR 実験におけるパラメータ調節に用いた具体的な値を、表 2.10 に示す。石英ガラスの光学表面における specular spike および specular lobe は、0.00 から 0.40 まで変化させ、specular backscatter は 0.02 に固定した。また、表面の粗さパラメータである  $\sigma_\alpha$  については、0.00 から 0.10 まで変化させてシミュレーションを行った。これらの条件により、合計で  $5 \times 5 \times 11$  通りのスキャンを行った。KEK PF-AR 実験での測定条件を再現するため、1つのパラメータの組み合わせにつき、運動量 2 GeV/c の電子を入射させた。これにより得られた光量分布に対してガウス関数によるフィッティングを行い、平均光量を算出した。

表 2.10: KEK PF-AR 実験におけるシミュレーションパラメータの設定。石英ガラス表面の反射特性パラメータについて、表に示す値を用いてスキャンを行った。

パラメータ	設定値
specular spike	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
specular lobe	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
specular backscatter	0.02
$\sigma_\alpha$	0.00, 0.01, 0.02, $\sim$ 0.10

パラメータ調節の結果を、以下の図 2.24 (A) に示す。この図では、spike と lobe の代表的な組み合わせとして、(spike, lobe) = (0.0, 0.0), (0.1, 0.1), (0.2, 0.2), (0.3, 0.3), (0.4, 0.4) および

(0.3, 0.4), (0.4, 0.3) の場合について、平均光量を、 $\sigma_\alpha$  の関数としてプロットしており、青い点線で実験値との比較を示している。図からわかるように、spike および lobe の割合が増加するにつれて、平均光量も増加する傾向が見られる。

すでに前節で考察したように、運動量 2 GeV/c の電子を入射した場合、チェレンコフ光はガラス境界において全反射すると予想される。そのため、specular spike および specular lobe の成分が小さい場合には、Lambertian 成分、すなわち拡散反射の寄与が相対的に大きくなり、平均光量が実験値に比べて小さくなると考えられる。実験値と平均光量の値が最も近かったパラメータの組み合わせは、図中の赤い四角に示す、 $(\text{spike}, \text{lobe}, \sigma_\alpha) = (0.3, 0.4, 0.01)$  であった。このときの光量分布を図 2.24 (B) に示す。図中の青線は実験による値、赤線はシミュレーションによる値を示している。この図より、シミュレーションと実験における光量分布が高い精度で一致していることが分かる。なお、ヒストグラムでは縦軸のカウント数を正規化することで、統計量の違いによる影響を低減している。

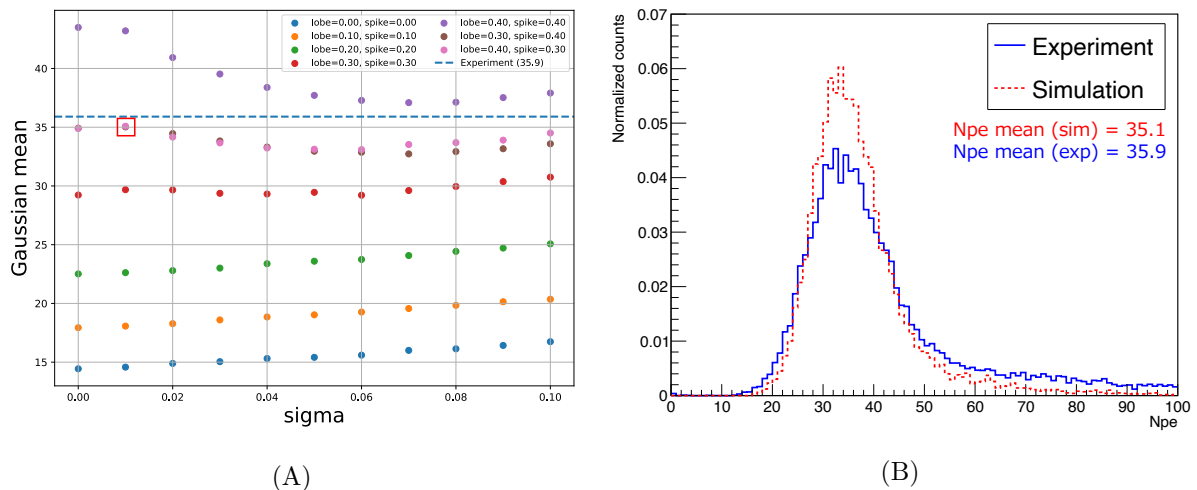


図 2.24: (A)KEK PF-AR 実験に対するパラメータ調節の結果。(B)KEK PF-AR 実験と光量分布が最も一致したパラメータでのヒストグラム比較。

このパラメータを固定したまま、入射粒子を電子から  $K^-$  に変更することで、E73 パラサイト実験における KVC (ver. 1) の性能について、その再現性を評価した。シミュレーションの結果を、図 2.25 (A) に示す。図からわかるように、シミュレーションと実験における光量分布は高い精度で一致している。E73 パラサイト実験当時においても、同様のシミュレーションを用いて、KVC (ver. 1) が  $K^-$  ビームに対して十分な性能を発揮できるかどうかの検討が行われていた。しかしながら、当時のシミュレーションには一部誤りがあり<sup>1)</sup>、平均光量および検出効率が過大評価されていた。本論文では、このシミュレーション上の誤りを修正することにより、

<sup>1)</sup> ビーム粒子の運動エネルギーを与えるべき箇所において全エネルギーを与えており、チェレンコフ光が過剰に生成されていた。

KVC (ver. 1) に  $K^-$  ビームを照射した際、光量が 10 光子以下まで低下し、検出効率も約 50% まで低下するという E73 パラサイト実験の結果を適切に再現できることを確認した。

さらに、石英ガラスの厚さを 1 cm から 2 cm に増加させることで、T110 実験における KVC (ver. 3) のセグメント 4 の性能について、その再現性を評価した。シミュレーションの結果を図 2.25 (B) に示す。図から分かるように、シミュレーションによって得られた光量は、実験における光量に比べて小さいことが確認された。この原因として、KVC (ver. 3) では新たに実機を製作しているため、石英ガラス表面の粗さなどの状態が KVC (ver. 1) とは異なっている可能性が挙げられる。その結果、これまでに用いたパラメータ  $(\text{spike}, \text{lobe}, \sigma_\alpha) = (0.3, 0.4, 0.01)$  では、T110 実験における測定結果を十分に再現できないと考えられる。そこで、このパラメータ設定を解除し、石英ガラスの specular spike および specular lobe を  $(\text{spike}, \text{lobe}) = (0.30, 0.40), (0.40, 0.40), (0.45, 0.45)$  と変化させて再度スキャンを行った。その結果、図 2.26 (A) に示す結果が得られた。図から分かるように、 $\sigma_\alpha$  の増加に伴って平均光量も増加しており、最も実験値に近かったパラメータは図中の赤い四角に示す  $(\text{spike}, \text{lobe}, \sigma_\alpha) = (0.3, 0.4, 0.11)$  であった。このときの光量分布を図 2.26 (B) に示す。同図より、シミュレーションと実験における光量分布が良く一致していることが確認された。このパラメータ変化においては、 $\sigma_\alpha$  が 0.01 から 0.11 へと増加していることから、KVC (ver. 3) に使用した石英ガラスは、KVC (ver. 1) に比べて表面粗さが大きかったと考えられる。

以上より、KEK PF-AR・E73・T110 実験において、本研究で用いたシミュレーションにより実験結果を高い精度で再現できることが明らかとなった。

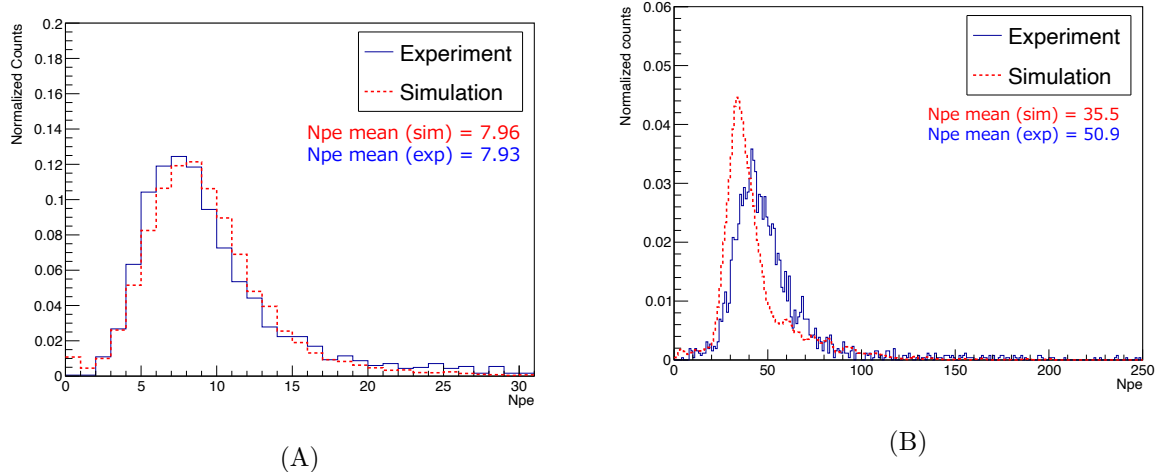


図 2.25: ガラスの光学表面パラメータを KEKAR と同様の  $(\text{spike}, \text{lobe}, \sigma_\alpha) = (0.3, 0.4, 0.01)$  に固定した際の、E73 パラサイト・T110 実験のシミュレーションの結果。(A) が E73 パラサイト実験に対するシミュレーションの結果、(B) が T110 実験 (セグメント 4) に対するシミュレーションの結果を示す。

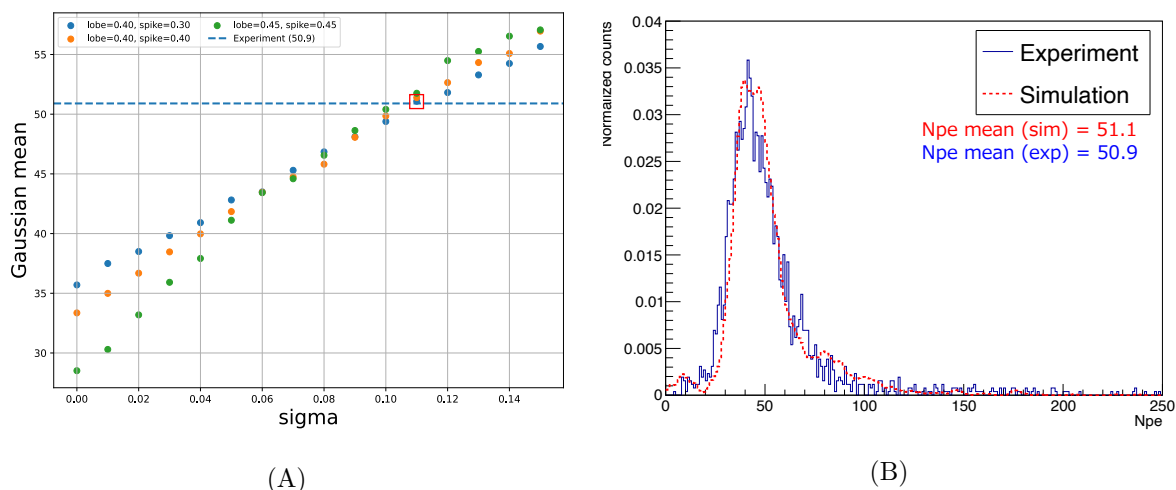


図 2.26: T110 実験 (セグメント 4) において、ガラスの光学表面パラメータを再び調整した結果。(A) がパラメータ再調節の結果。(B) が光量分布が最も一致したパラメータ (spike, lobe,  $\sigma_\alpha$ ) = (0.3, 0.4, 0.11) でのヒストグラム比較を示す。

### 2.3.5 磨りガラス条件における再現性の検証と考察

T110 実験のセグメント 2 における実験値を用いて、磨りガラス条件における再現性の評価を行った。パラメータ調節に用いた具体的な値を、以下の表 2.11 に示す。ガラス表面に磨りガラス加工が施されていることを表現するため、表面粗さパラメータ  $\sigma_\alpha$  の値を無加工ガラスの場合よりも大きく設定した。さらに、 $\sigma_\alpha$  の変化に伴って影響を受ける specular lobe 成分についても値を変化させ、光量分布の再現性を検証した。

表 2.11: 磨りガラス条件におけるシミュレーションパラメータの設定。T110 実験セグメント 2 の再現性評価のため、表に示す値を用いてパラメータスキャンを行った。

パラメータ	設定値
specular spike	0.0
specular lobe	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
specular backscatter	0.02 (ただし lobe = 1.0 の場合は 0.0)
$\sigma_\alpha$	0.30, 0.33, ..., 0.90

$K^-$  ビームに対するパラメータ調節の結果を図 2.27 (A) に、 $\pi^-$  ビームに対する結果を図 2.27 (B) に示す。この図では、各 specular lobe の値に対して、平均光量を  $\sigma_\alpha$  の関数としてプロットしている。図から分かるように、 $K^-$  および  $\pi^-$  ビームのいずれの場合においても、specular lobe の値が大きくなるにつれて平均光量が増加する傾向が見られる。一方で、 $\sigma_\alpha$  に対

しては、 $\sigma_\alpha = 0.50$  付近までは平均光量が増加するものの、それより大きい値では平均光量はほとんど変化しないことが明らかとなった。両粒子ビームにおいて、T110 実験セグメント 2 の測定結果と最も良く一致したパラメータは、図中の赤い四角で示した  $(\text{lobe}, \sigma_\alpha) = (1.0, 0.57)$  であった。このときの光量分布の比較を図 2.28 に示す。この図から分かるように、 $K^-$  および  $\pi^-$  ビームの両方において、シミュレーションと実験における光量分布が良く一致していることが確認された。

以上より、磨りガラス条件に対しては、specular lobe および  $\sigma_\alpha$  の値を十分大きくすることにより、実験結果を再現できることが明らかとなった。

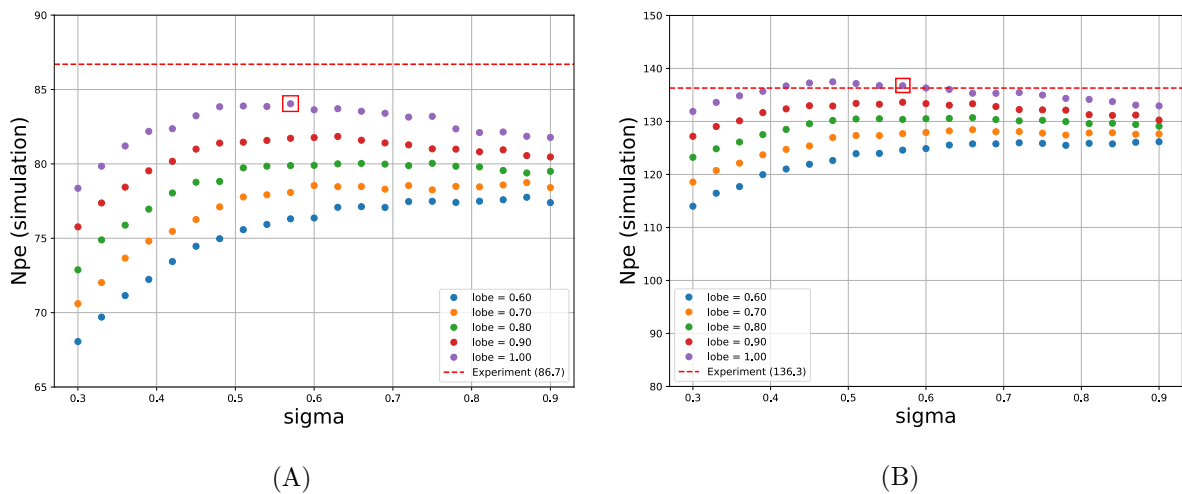


図 2.27: (A)T110 実験 (セグメント 2) の  $K^-$  ビームに対するパラメータ調節の結果。(B)T110 実験 (セグメント 2) の  $\pi^-$  ビームに対するパラメータ調節の結果。

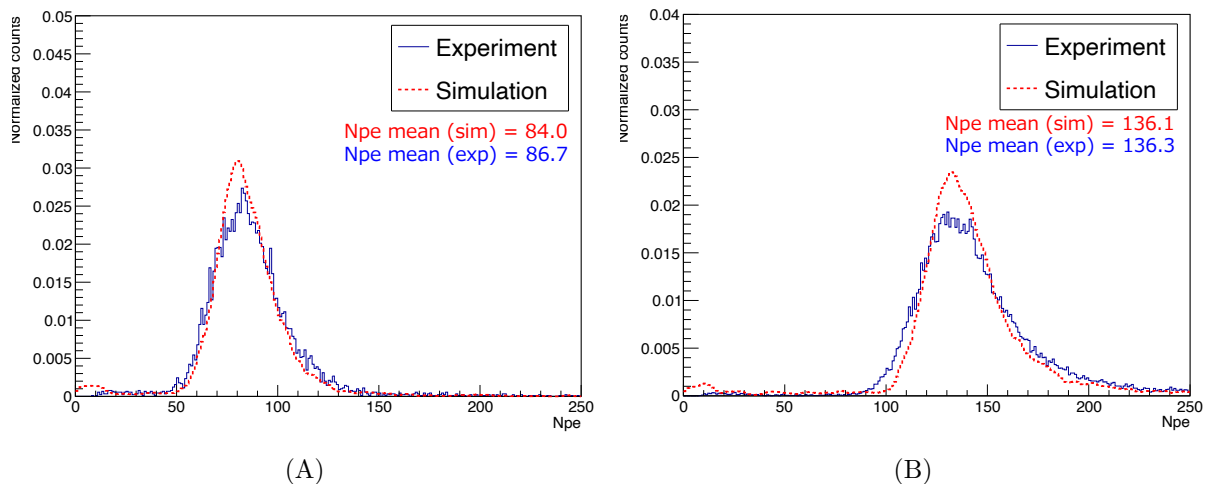


図 2.28: (A)T110 実験 (セグメント 2) の  $K^-$  ビームに対するシミュレーションと実験におけるヒストグラムの比較。(B)T110 実験 (セグメント 2) の  $\pi^-$  ビームに対するシミュレーションと実験におけるヒストグラムの比較。

## 第3章 大型・薄型 Glass GEM の開発

本章では、HypTPC を用いた将来実験に向けた Glass GEM の開発と、その性能評価について述べる。本研究では、株式会社 NSC と共同で世界初となる大型・薄型 Glass GEM を開発し、その Glass GEM を用いた電子増幅にも世界で初めて成功した。さらに、放電率および増幅率の測定を通して性能評価を行った。本章では、これらの結果についてまとめる。

### 3.1 Hyperon Time Projection Chamber (HypTPC)

Time Projection Chamber (HypTPC) は、荷電粒子の三次元飛跡検出を目的としたガス検出器であり、E72 実験においては、 $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  に代表されるハイペロン崩壊の再構成を目的として設計されている。HypTPC の主な特徴を以下に挙げる。

- 広いアクセプタンス ( $\sim 4\pi$ )
- 高いレート耐性 ( $\sim 1$  MHz)
- 1 T の磁場中での位置分解能が 0.25 – 0.3 mm
- $\Lambda$  の崩壊由来の  $\pi^-$  と陽子の運動量分解能が  $\delta p/p = 1-4\%$

図 3.1 に示すように、HypTPC は標的を有感領域内部に配置できる構造を有しており、これにより大きなアクセプタンスが実現されている。上記の特徴を実現させるための主要な構造について、以下に述べる。

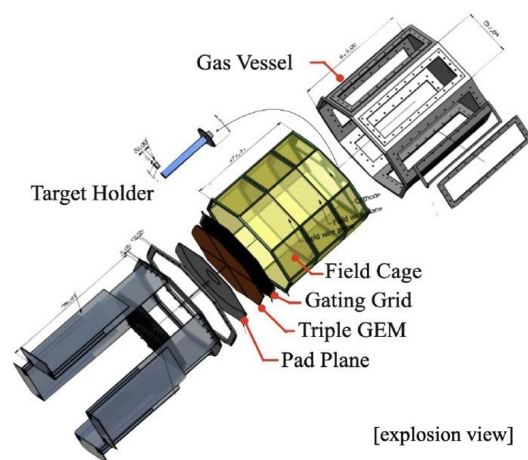
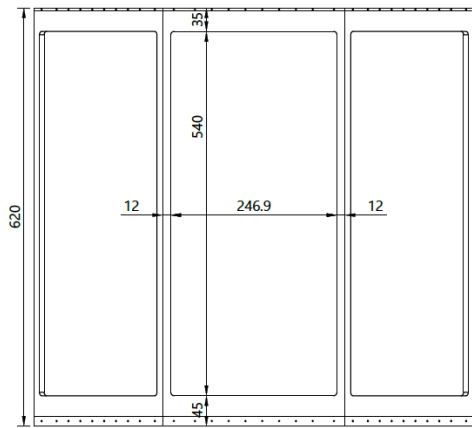


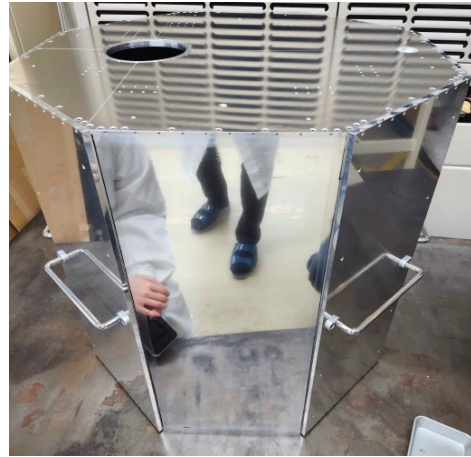
図 3.1: HypTPC の展開図

## ガスベッセル

先に述べた通り、HypTPCはガス検出器であり、その内部はP10ガス(Ar: 90% + CH<sub>4</sub>: 10%)で満たされている。これにより、低電圧下での高いガス増幅率や、より大きな拡散幅を得ることができる。ガスベッセルはこのP10ガスを検出器内部に閉じ込める役割を担う。その設計は図3.2に見られるように、左右のアルミフレーム幅は12 mm、上下のフレーム幅は35 mmと、細くなっている[21]。これは、一部の粒子がHTOFに到達する前にフレーム内部で止まってしまいイベントが損失してしまうことを防ぐためである。



(A)



(B)

図3.2: (A) ガスベッセルの図面。(B) 実際のガスベッセルの写真。正面の鏡のように反射している部分がアルミマイラー窓で、他の面には保護シールドが取り付けられている。実験中は保護シールドを外して使用する。

## フィールドケージ

フィールドケージは、カソード平面、フィールドストリップおよびターゲットホルダーから構成され、HypTPC 内部に一様な電場を形成するための部品である。図 3.3 に示すように、2 mm 幅のフィールドストリップ同士が  $0.5 \text{ M}\Omega$  のチップ抵抗で接続された構造になっている。この構造を用いることで、フィールドケージ全体に電圧を印加した際、チップ抵抗により電圧が段階的に降下し、電位が連続的に低下する。その結果、ドリフト領域において一様な電場を形成することが可能となる。E72 実験では、電場が  $130 \text{ V/cm}$  となるように印加電圧を調整して運用する。

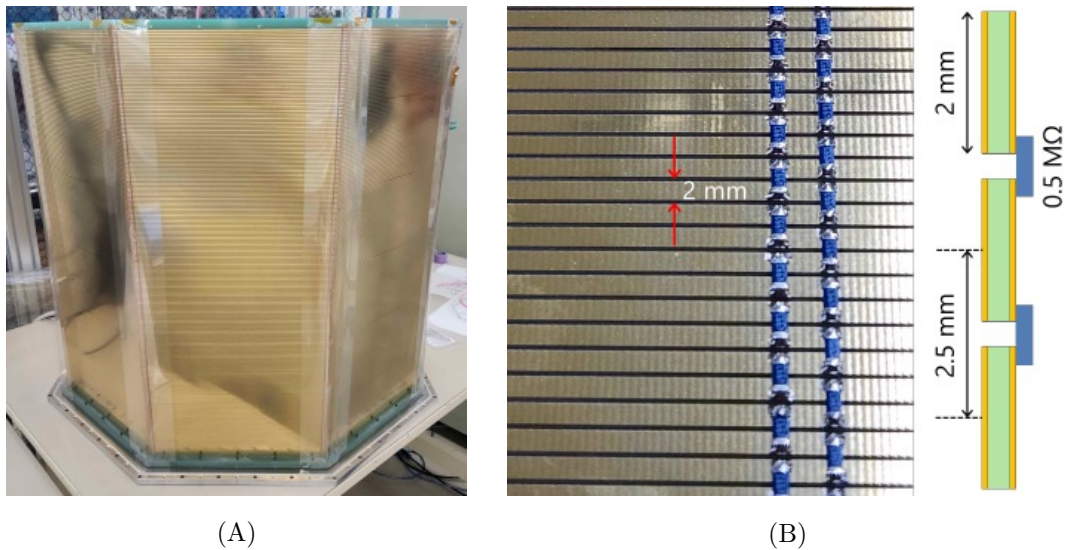
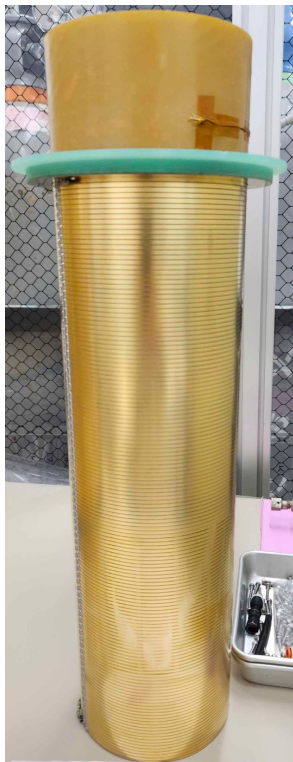


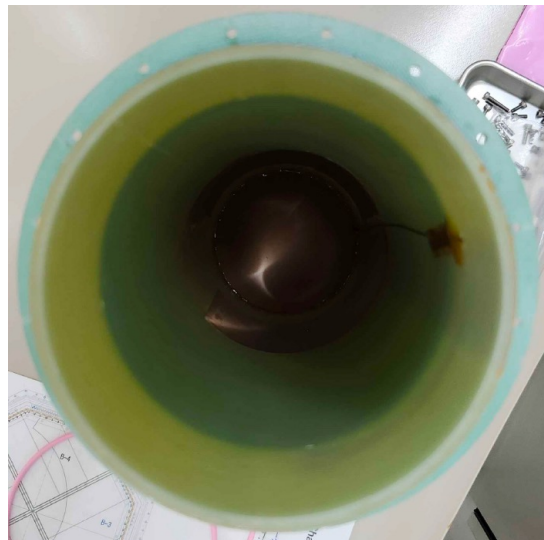
図 3.3: (A) HypTPC のフィールドケージの写真。(B) フィールドストリップとチップ抵抗部分の写真と模式図。

## ターゲットホルダー

前述した通り、HypTPC では標的を有感領域内に配置することで、広いアクセプタンスを得ている。ターゲットホルダーは HypTPC の中心から 143 mm 下流に設置されており、液体水素標的を外部から挿入可能な内径  $\phi$  107 mm の円筒形構造で設計した。基本フレームは G-10 素材で作られており、HypTPC 内部の一様な電場を乱さないように、フィールドケージと同様のフィールドストリップおよびチップ抵抗を用いた構造を有している。また、ビーム通過部分は G-10 フレームを取り除き、代わりに内側からアルミマイラーを貼り付ける構造とした。ターゲットホルダーの写真を、以下の図 3.4 に示す。



(A)



(B)

図 3.4: (A)、(B) ターゲットホルダーの写真

## ゲーティンググリッド

ゲーティンググリッドは、直径  $50\ \mu\text{m}$  の金メッキ Cu-Be ワイヤから構成され、荷電粒子がガス中で電離して生成するドリフト電子の通過を制御する役割を持つ。図 3.5 (A) に示すように、ワイヤ間隔は  $1\ \text{mm}$  で、後述する GEM の  $4.2\ \text{mm}$  上方に設置されている。

ゲーティンググリッドの各ワイヤには電圧が印加されており、印加電圧の極性を切り替えることで Gate open / Gate close の状態を作り出す。隣り合う 2 本のワイヤが同じ電圧に設定されている場合、Gate open 状態となり、ドリフト電子が通過して後段の GEM で電子増幅が行われる。一方、Gate close 状態では、隣接するワイヤに逆極性の電圧が印加され、不要なドリフト電子の通過を遮断することができる。この動作原理の模式図を、以下の図 3.5 (B) に示す。

このゲーティンググリッド機構は、HypTPC が高いレート耐性を実現する上で、極めて重要な役割を担う。

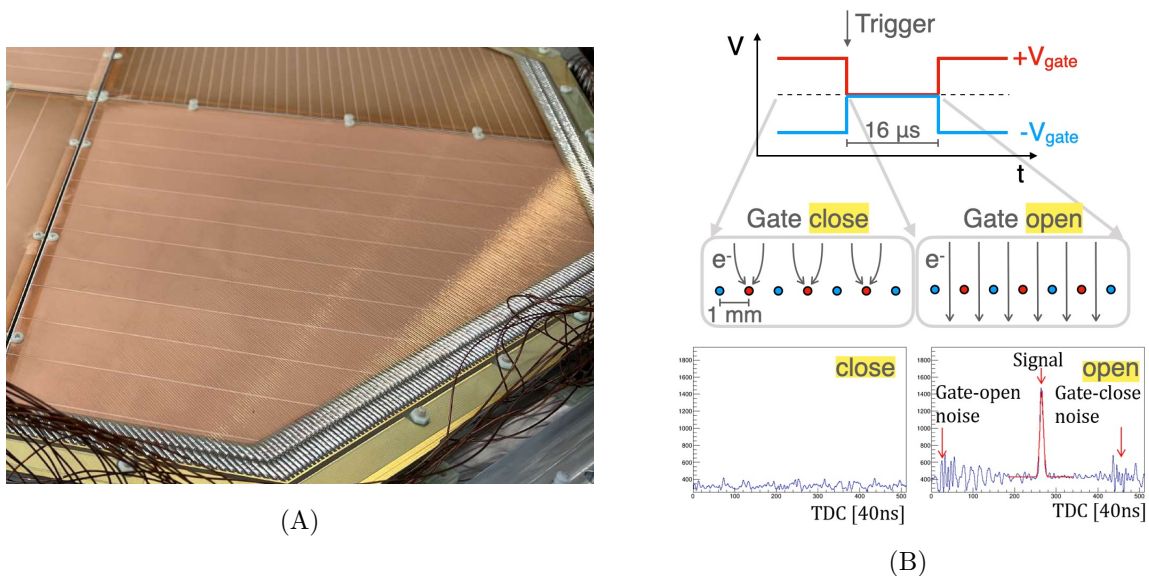


図 3.5: (A)GEM 上方に設置されたゲーティンググリッドの写真。(B)ゲーティンググリッドの動作原理を示した模式図。ワイヤに印加する電圧の極性を切り替えることで Gate open / Gate close の状態を作り、有感領域からのドリフト電子の通過を制御している。

## Gas Electron Multiplier (GEM)

GEM [28] は、図 3.6 (A) に示すように、カプトン等の薄い絶縁体の両面を銅電極で被覆し、無数の微細な穴を開けたものである。絶縁層の上下に強い電圧差をかけることにより、ゲーティンググリッドを通過したドリフト電子が GEM の穴内部の強い電場によって雪崩増幅を起こす。これにより、ドリフト電子を信号として検出することができるようになる。また、図 3.6 (B) にみられるように、HypTPC の内部で GEM は 3 層構造をとっている。これにより、高い増幅率が得られるだけでなく、電子増幅過程の中で生成された陽イオンがドリフト領域へ逆流するイオンバックフローを抑制することができる。イオンバックフローの抑制は、TPC 内部の電場の歪みを防ぎ、放電の発生を減らす上でも重要である。HypTPC にインストールした際の GEM の写真を、図 3.7 に示す。

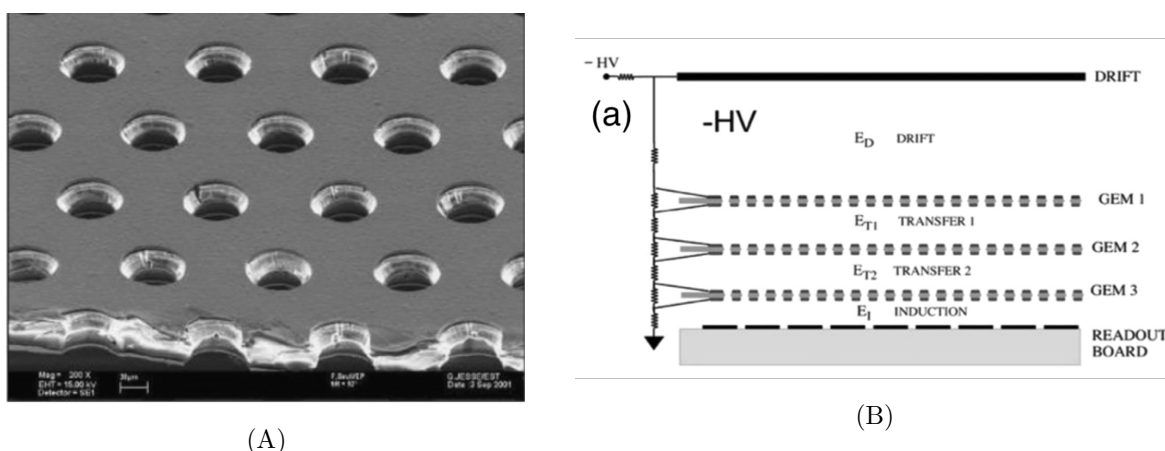


図 3.6: (A) 顕微鏡で見たときの GEM 表面の様子 [28]。(B)HypTPC 内部の GEM の模式図 [28]。3 層構造とすることでイオンバックフローが抑制され、TPC 内部の電場歪み、およびそれに起因する放電の発生を防いでいる。

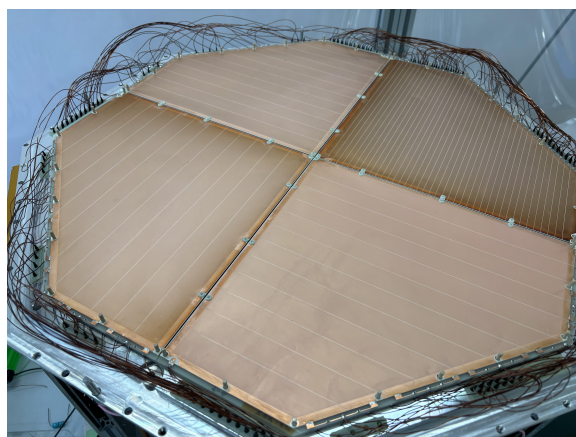


図 3.7: HypTPC にインストールされた GEM の写真

## 読み出しパッド

GEMによって増幅されたドリフト電子は、最終的に HypTPC 最下部の読み出しパッドに到達する。図 3.8 に示すように、パッドはターゲットを中心とした同心円状に配置されている。内側の 10 レイヤーは長さ 9 mm、幅 2.1–2.7 mm、外側の 22 レイヤーは長さ 12.5 mm、幅 2.3–2.4 mm となっている。合計で 5768 チャンネルの読み出し口を有しており、ドリフト電子が到達した  $xz$  平面上の位置を位置分解能 0.2–0.3 mm で測定することができる [19]。また、パッドに到達した信号の時間情報からドリフト電子が放出された  $y$  座標を算出でき、これにより 3 次元での飛跡検出が可能となる。

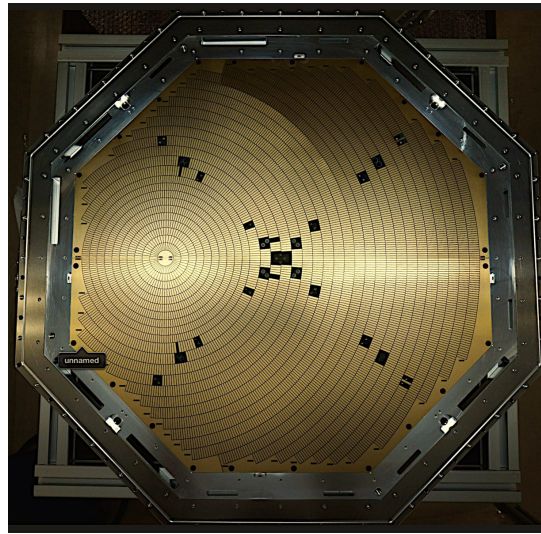


図 3.8: 読み出しパッドの写真。ターゲットを中心に同心円状に配置されている。

## 3.2 大型・薄型 Glass GEM の開発

本章では、世界初となる大型・薄型 Glass GEM の開発について述べる。最初に GEM の詳しい概要や、Glass GEM 開発の流れについて説明した後、相対増幅率や絶対増幅率の測定について述べる。

### 3.2.1 Gas Electron Multiplier (GEM) の概要

第 3.1 章でも述べた通り、GEM は薄い絶縁体の両面に銅電極を被覆したものであり、層の上下に強い電圧差をかけると、微細に開けられた穴の内部で電子の増幅を起こしている。E72 実験では、これを HypTPC の下層に組み込むことにより、信号の検出を可能にしている。

ここでは、まず一般的な GEM の利用例について概観し、続いて本章の主題である Glass GEM 開発の目的とその流れについて述べる。

#### 一般的な GEM の利用

GEM は HypTPC への利用に限らず、他の分野でも幅広く使われている。代表的なものとして、以下のものが挙げられる。

- **高エネルギー物理実験**：LHC (CMS, ALICE, COMPASS など) におけるミューオントラッカーや TPC 増幅部として広く採用され、高レート環境下での高効率トラッキングに利用されている [29, 30, 31]。
- **放射線イメージング**：ガス中で生成される電子雪崩の光信号を利用した高解像度イメージング技術が発展しており、医療用 X 線や中性子イメージングなどでの実用化が進んでいる [32]。

これらはいずれも、GEM が本来備えている優れた特性を活かすことで実現している応用例である。特に、次に挙げるような利点は、多くの検出器設計において大きなメリットとなっている。

- 多段で用いることにより、高い増幅率を得られること
- 高い位置分解能での 2 次元の読み出しが可能であること
- 少ない材料コストでの大型化が可能であること

このように、GEM はその優れた性能と柔軟性から、物理実験のみならず、放射線イメージング、医療応用といった様々な分野で重要な役割を果たしている。

### 3.2.2 Glass GEM 開発の目的と流れ

表 3.1 および図 3.9 は、現在 HypTPC に用いられている GEM の特性をまとめたものである。これらが示している通り、GEM の絶縁層には、ポリイミド (PI) や液晶ポリマー (LCP) といったプラスチック素材が用いられている。しかし、これらのプラスチック GEM には、レート耐性  $10^6$  Hz 程度に限られてしまうという課題がある [33]。このレート耐性低下の原因として、プラスチック材料の柔軟性により GEM がたわみ、それに伴って放電が生じることが挙げられる。J-PARC における将来実験では、K1.8 ビームラインにおける大強度実験や、K1.8BR ビームラインで  $\pi$  ビームを用いる実験において、より高いレート条件での運転が想定されている。このような高レート環境下で安定した動作を実現するためには、GEM のレート耐性を向上させることが将来実験を遂行する上で重要な課題となる。

そこで、レート耐性を  $10^7$  Hz まで上げることを目指し、絶縁層にガラスを用いた Glass GEM の開発を行った。この Glass GEM が従来のプラスチック GEM より優れた性能を発揮すると期待されている理由として、以下の点が挙げられる。

- Glass GEM は有機素材を含まないため、放電によって絶縁層が導通してしまうリスクが低く、耐放電性に優れる。
- ガラスはプラスチックに比べて堅牢な素材であるため、表面の微細な凹凸や GEM のたわみが改善され、電場の歪みを最小限に抑えることができる。

表 3.1: HypTPC で用いる GEM の特性。各特性値に関連する GEM の構造は図 3.9 を参照。

	50 $\mu\text{m}$ GEM	100 $\mu\text{m}$ GEM
絶縁体素材	ポリイミド (PI)	液晶ポリマー (LCP)
エッチング方法	Wet	Laser
銅の厚さ	4 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$
ピッチ ( $d$ )	140 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$
内径 ( $r$ )	$25 \pm 10$ $\mu\text{m}$	$35 \pm 10$ $\mu\text{m}$
外径 ( $R$ )	$55 \pm 5$ $\mu\text{m}$	$65 \pm 5$ $\mu\text{m}$

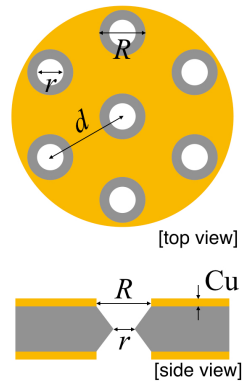


図 3.9: GEM の穴径と構造を示した模式図

Glass GEM の開発はすでに進展しており、図 3.10 (A) は、産業技術総合研究所 (AIST) によって開発された 10 cm 角、厚さ  $570 \mu\text{m}$  の Glass GEM である [34]。しかしながら、この Glass GEM を HypTPC に組み込むためには、以下の 2 点について改良が求められる。

- **大型化**： GEM を HypTPC に組み込むためには、一辺の長さを 25 cm まで大型化する必要がある。
- **薄型化**： イオンバックフロー抑制のために GEM を多層構造で運用する必要があり、その際、GEM に印加する電圧を抑えるために薄型化する必要がある。

この改良を実現するため、本研究では株式会社 NSC の協力を得て、一辺 25 cm、厚さ  $100 \mu\text{m}$  の大型・薄型の Glass GEM を開発した。<sup>1)</sup>この Glass GEM の実際の写真を、図 3.10 (B) に示す。また、NSC 社による Glass GEM の製造過程、および従来のプラスチック GEM、各 Glass GEM の特性をそれぞれ図 3.11 (A) と表 3.2 に示す。

<sup>1)</sup>NSC 社は GEM をはじめとする放射線検出器の製作実績は有していないものの、ガラスのケミカルエッチング技術に高い専門性を有しており、マイクロクラックの発生を極力抑えた薄膜ガラスの加工が可能である。実際、NSC 社が製作する厚さ  $50 \mu\text{m}$  程度のガラスは、マイクロクラックがほとんど存在しないため、曲げても破損しないという高い耐久性を示している。

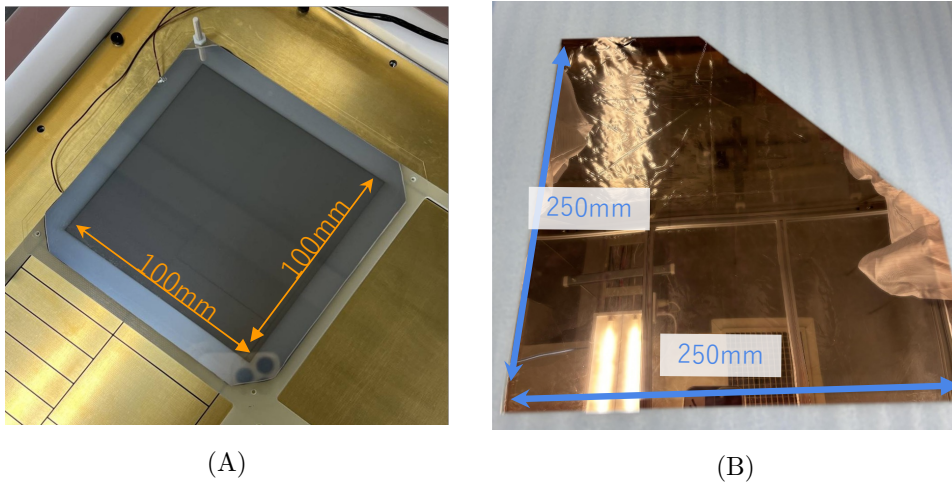


図 3.10: (A)AIST により開発された Glass GEM。 (B)NSC 社により大型・薄型化された Glass GEM。

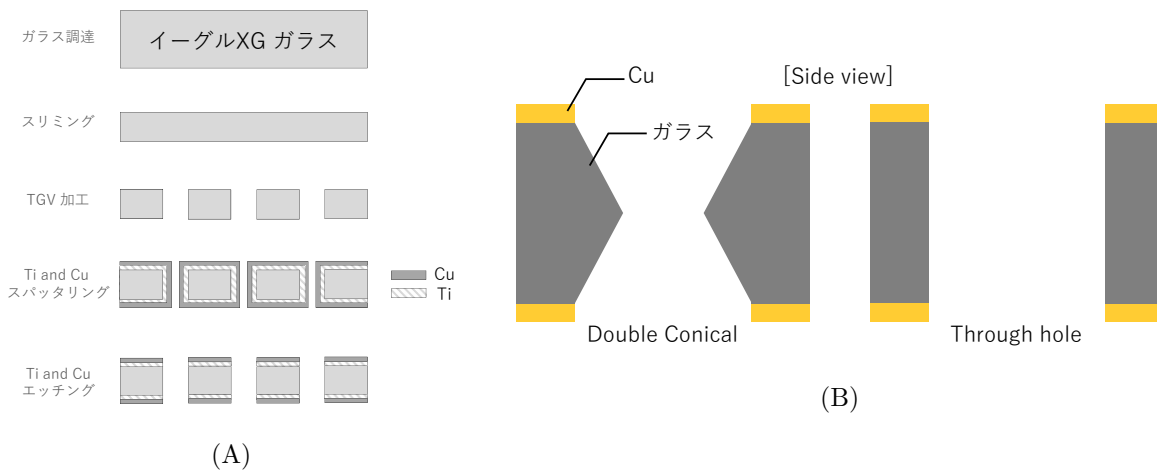


図 3.11: (A) 大型・薄型 Glass GEM の製造過程。 (B) 穴の形の模式図

表 3.2: 従来のプラスチック GEM、AIST 製 Glass GEM、NSC 社製 Glass GEM の特性値の比較。特性値に関連する GEM の構造は図 3.9 を、穴の形については図 3.11 (B) を参照。

	カプトン GEM	Glass GEM (AIST)	Glass GEM (NSC)
絶縁層の厚さ	50/100 $\mu\text{m}$	570 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
銅の厚さ	4/9 $\mu\text{m}$	3-4 $\mu\text{m}$	0.17 $\mu\text{m}$
穴の形	Double Conical	Through hole	Double Conical
内径 ( $r$ )	25/35 $\mu\text{m}$	170 $\mu\text{m}$	38 $\mu\text{m}$
外径 ( $R$ )	55/65 $\mu\text{m}$	170 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
ピッチ ( $d$ )	140/140 $\mu\text{m}$	280 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$

絶縁抵抗計を用いて、ガラス層の抵抗値を測定した。図 3.12 に見られるように、1 枚の GEM は 6 つのセグメントに分割されており、それぞれの GEM は 1 ~ 2 M $\Omega$  程度の抵抗チェーンで繋がれている。また、抵抗チェーンと GEM 電極の間には 105 M $\Omega$  の保護抵抗が挿入されている。これは、GEM が放電により導通してしまった際、GEM に大電流が流れることを防止するためのものである。

測定では、絶縁抵抗計からガラス層に対して 50 V の電圧を印加し、各セグメントにおける抵抗値を測定した。得られた結果を表 3.3 に示す。この表より、各セグメントにおいて 50 ~ 400 G $\Omega$  の抵抗値が得られていることがわかる。従来のプラスチック GEM では数百 G $\Omega$ 、AIST 製の Glass GEM では数百 M $\Omega$  程度の抵抗値が得られていたことを踏まえると、本研究で開発した Glass GEM は十分に高い絶縁抵抗を有していることがわかる。

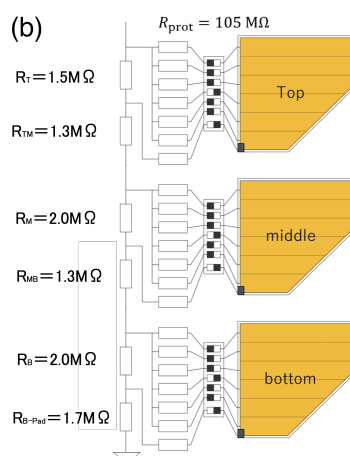


図 3.12: 6 分割された GEM と抵抗チェーンの模式図

表 3.3: NSC 社製 Glass GEM における各セグメントの絶縁抵抗値

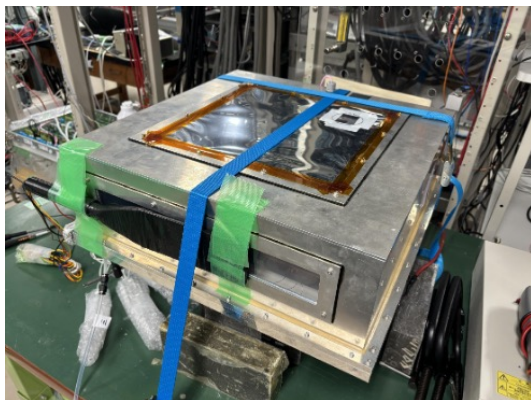
GEM segment	Top[GΩ]	Middle[GΩ]	Bottom[GΩ]
1	390	100	150
2	150	200	150
3	200	80	200
4	150	400	50
5	200	400	54
6	300	400	150

### 3.3 Glass GEM の相対増幅率と放電率の評価

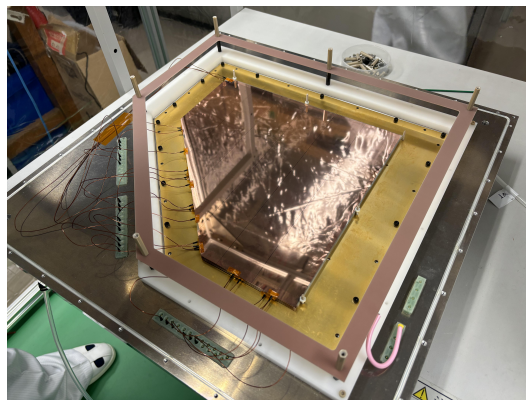
東北大学にて、NSC 社製の Glass GEM の性能評価として、小型の TPC を用いた相対増幅率および放電率の測定を行った。本節ではその測定方法と結果についてまとめる。

#### 3.3.1 実験セットアップ

実際に Glass GEM を用いて信号を取得するため、図 3.13 に示す、HypTPC の 1/4 サイズの小型チェンバー (テストチェンバー) を用いた。セットアップの様子を以下の図 3.14 に示す。テストチェンバー内は HypTPC と同様に P10 ガスで満たされており、その流量は図中の緑線で示されるガスラインにて制御されている。ガスラインに設置された Moisture sensor と Oxygen sensor は、チェンバー内部の湿度を監視する役割を持つ。これは、湿度レベルが Glass GEM の絶縁抵抗に影響を与えるためである。各 GEM の間隔は 2 mm、最上段の GEM とカソードの間隔は 90 mm で設定されている。また、TPC 内でドリフト電子を発生させるための  $\beta$  線源として  $^{90}\text{Sr}$  を使用し、この  $\beta$  線由来の信号を識別するために、チェンバー後方にトリガーカウンターを設置した。



(A)



(B)

図 3.13: (A) テストチェンバーの写真。HypTPC の 1/4 サイズとなっている。(B) テストチェンバーに組み込まれた Glass GEM の写真

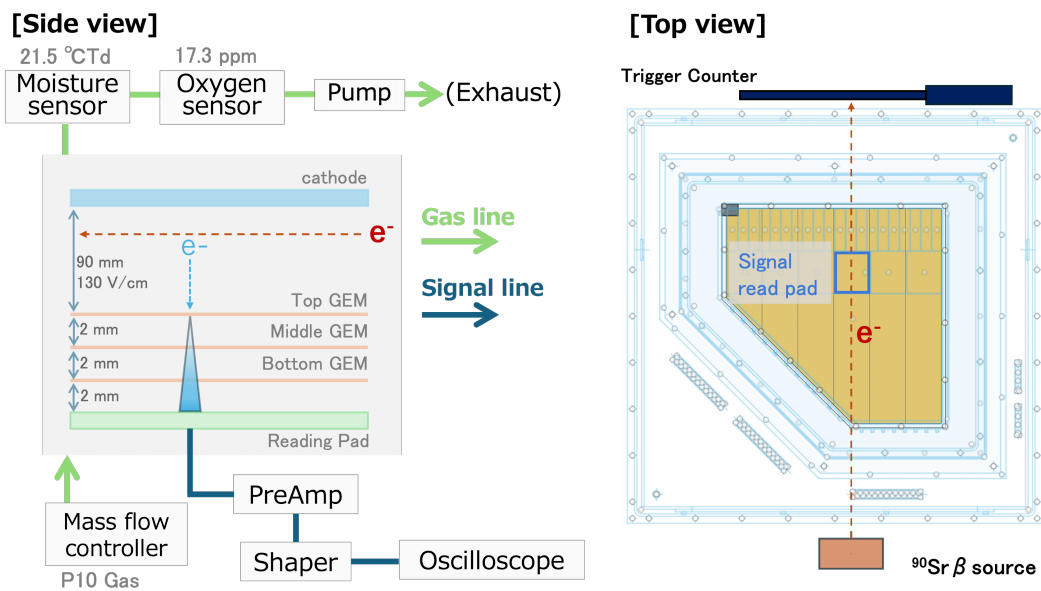


図 3.14: 相対増幅率・放電率評価試験のセットアップ図

### 3.3.2 測定結果及び考察

図 3.15 に示すように、本研究では厚さ  $100\ \mu\text{m}$  の大型・薄型 Glass GEM を用いた信号の取得に初めて成功した。ここで示す波形は、GEM から得られた信号の最大波高を測定し、100 イベントの平均値として求めたものである。なお本測定では、連続的な  $\beta$  線スペクトルから高エネルギー成分のみを選択し、最大波高が適切に取得されるよう、オシロスコープのトリガーレベルを調整して測定を行った。

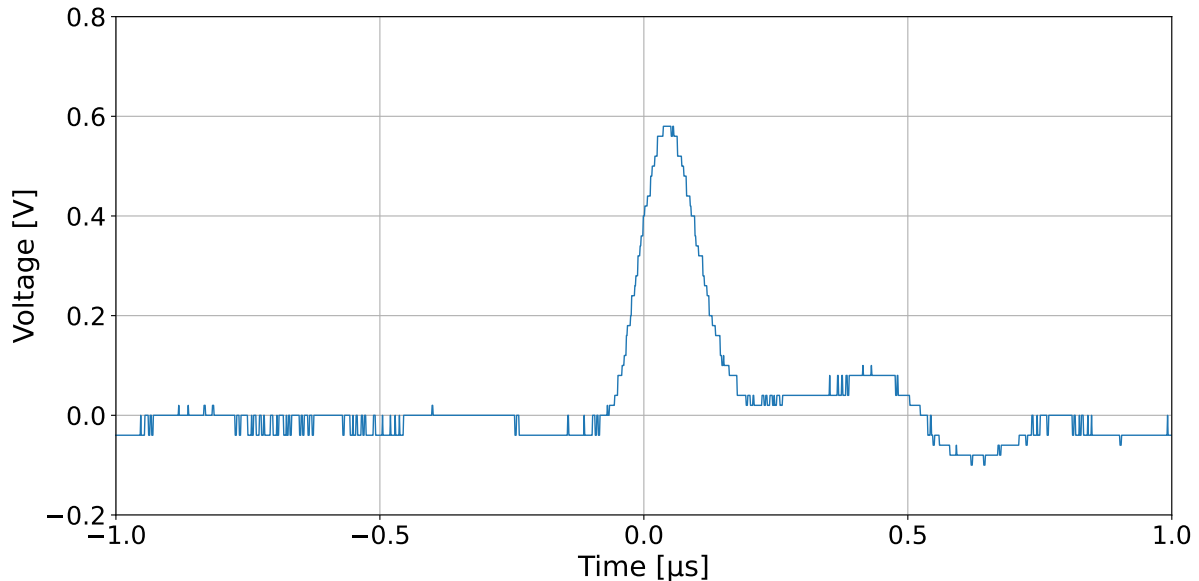


図 3.15: Glass GEM を用いて得られた信号のプロット。100 イベントの最大波高の平均を表している。

相対増幅率の結果を図 3.16 (A) に示す。相対増幅率の評価では、GEM に印加する電圧を変化させ、各電圧における最大波高を測定した。グラフから分かるように、印加電圧の増加に伴って波高は指数関数的に増加している。しかし、最も高い電圧値では、プリアンプの仕様により波高が飽和し、本来の指数関数的挙動よりも低い値として測定されている。また、図 3.16 (B) に、MCA(Multi-Channel Analyzer) を用いて測定した、波高分布を示す。青線がバックグラウンドの分布を、橙線が  $\beta$  線 ( $^{90}\text{Sr}$ ) を入射させたときの分布を示しており、 $\beta$  線入射時にはバックグラウンドには存在しない明瞭な信号成分が確認できる。

これらの結果は、大型・薄型 Glass GEM を用いた信号の取得に成功したことを強く裏付けるものである。

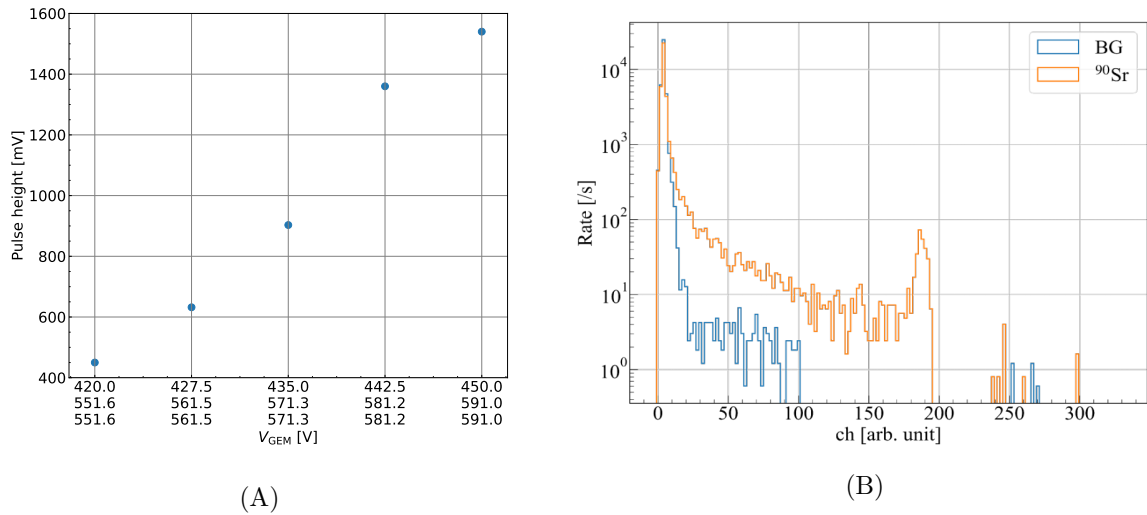


図 3.16: (A)Glass GEM の相対増幅率のグラフ。最も高い電圧では、プリアンプの仕様により、信号が飽和している。(B)MCA で測定した波高分布。青線がバックグラウンド、橙線が  $\beta$  線を入射させた時の分布となっている。

図 3.17 に、各電圧値での 1 分あたりの放電率を示す。図からわかるように、放電率は電圧値とともに増加し、最大値は 6 回/分であった。過去の J-PARC E42 実験では、放電率が 60 回/時に達した際に GEM が損傷してしまったと報告されており、それ以降は、放電率をその 1/10 である 6 回/時以下に抑えることを目標としている [19]。この観点から、本研究で試作した Glass GEM には、より低い放電率を実現するための改善が求められる。

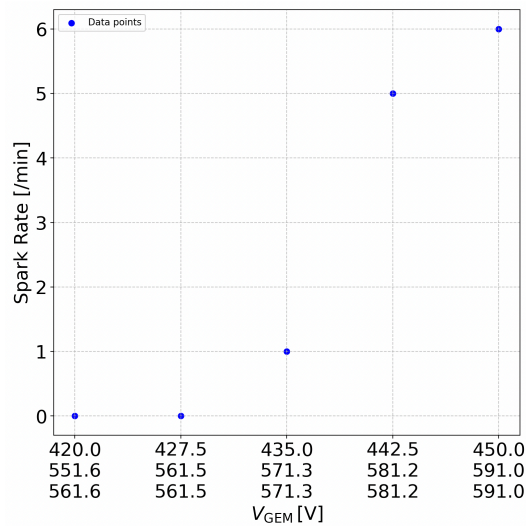


図 3.17: Glass GEM の放電率。各電圧において、1 分間の放電回数を測定した。

## 3.4 Glass GEM の絶対増幅率の評価

前節では、NSC 社と共同開発した大型・薄型 Glass GEM の相対増幅率について述べた。しかし、GEM の性能評価においては、単一エネルギー源を用いた絶対増幅率の測定が不可欠である。そこで本研究では、日本原子力研究機構（JAEA）にて、単一エネルギー源として YAG レーザーを用いた絶対増幅率の測定を実施した。

なお、後述するように、文献 [35] では、YAG レーザーを用いた電離電子数の算出にあたり、P10 ガスの純度として 99.9% および 99.9999% の 2 つの場合を仮定して議論が行われている。しかしながら本測定においては、テストチェンバー内の P10 ガス純度に関する情報はなかったため、文献と同様にガス純度を 99.9% および 99.9999% と仮定した上で、絶対増幅率の見積もりを行った。

しかしその後、YAG レーザーを用いた測定では、P10 ガスのガス純度に加えて、ガス中に含まれる微量不純物の種類や濃度が電離量に強く影響することが明らかとなった。<sup>2)</sup> このことから、文献 [35] と同様に P10 ガスの純度のみを仮定して増幅率を決定する手法には本質的な限界があり、本論文における絶対増幅率の算出にも大きな不確定性が含まれることが分かった。この点については、YAG レーザーによる電離メカニズムの詳細と併せて、第 3.4.4 章において詳しく議論する。

### 3.4.1 実験セットアップ

実験セットアップを図 3.18 に示す。前節と同様にテストチェンバーを用い、単一エネルギー源として YAG レーザーを使用した。使用した YAG レーザー発振器 [36] の主な仕様を以下にまとめる。

- メーカー：Litron Lasers
- レーザーシリーズ名：Nano SG 150-10
- 発振波長：266 nm
- 最大パルスエネルギー（266 nm）：約 15 mJ
- 繰り返し周波数：最大 10 Hz

テストチェンバー側面には透過率 90% のクォーツ窓が取り付けられており、この窓を通して波長 266 nm（4.66 eV）のレーザー光を入射させた。

---

<sup>2)</sup> Moisture sensor と Oxygen sensor によりガス内の水分量や酸素濃度を測定しているが、これらの値は電離電子の個数に影響しない。

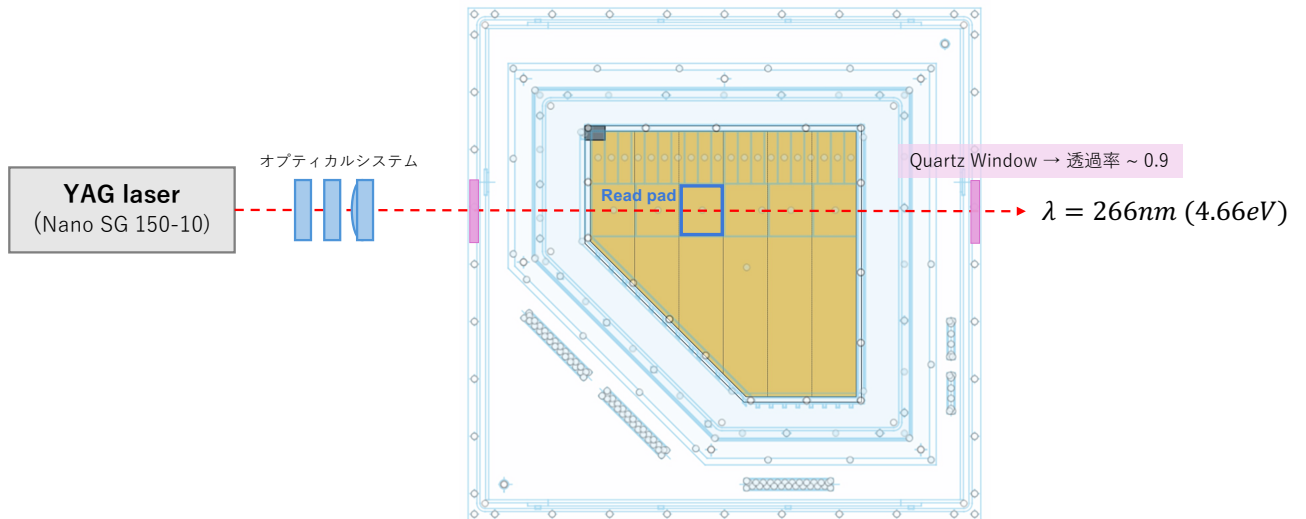


図 3.18: 絶対増幅率評価試験のセットアップ図

### 3.4.2 絶対増幅率の解析手法

絶対増幅率  $G_{\text{abs}}$  は以下の式で得られる。

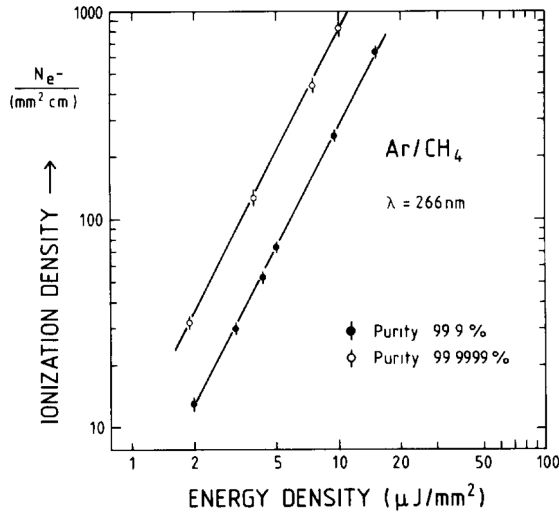
$$G_{\text{abs}} = \frac{N_{\text{amplified}} \text{ (増幅電子の数)}}{N_{\text{seed}} \text{ (種電子の数)}} \quad (3.4.1)$$

ここでは、種電子、増幅電子のそれぞれについて、文献 [35, 37] を参考に、その数の求め方を述べる。

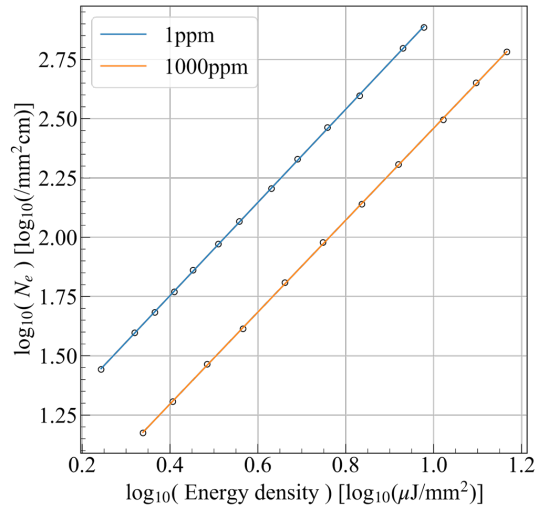
#### 種電子数の評価

文献 [35] によると、種電子密度は以下の式 3.4.3 に示されるレーザーのエネルギー密度から求めることができる。レーザー波長 266 nm の場合における、P10 ガス中の種電子密度とレーザーエネルギー密度の関係を図 3.19 に示す。

$$\text{エネルギー密度 } [\mu\text{J}/\text{mm}^2] = \frac{\text{レーザー強度 } [\mu\text{J}]}{\text{レーザー面積 } [\text{mm}^2]} \quad (3.4.2)$$



(A)



(B)

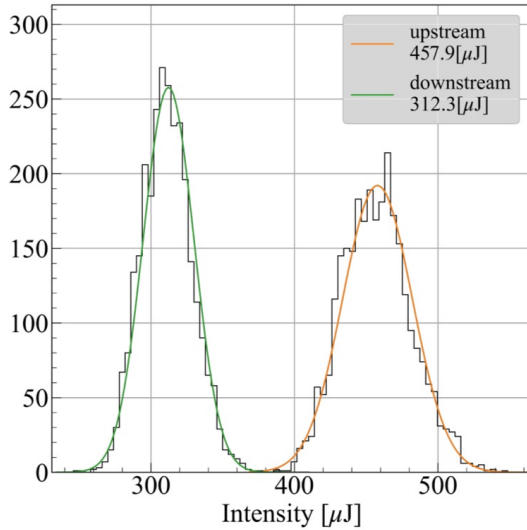
図 3.19: (A) P10 ガス中における種電子数とレーザーエネルギー密度の関係。2本の直線はそれぞれ、ガス純度が99.9%の時と99.9999%の場合を示す。文献 [35] より引用。(B) Pythonを用いて、(A) のグラフをプロットし直したもの。青線と赤線はそれぞれ、ガス中の不純度が1ppm,1000ppm の時を示している。

レーザー強度は、テストチェンバーの前後にレーザーパワーメータを設置することで測定した。図 3.20 (A) に示すように、入射側および出射側においてそれぞれ  $457.9 \mu\text{J}$  と  $312.3 \mu\text{J}$  が得られているが、エネルギー密度の計算においては、入射時のレーザー強度である  $457.9 \mu\text{J}$  のみを用いる。また、レーザーはテストチェンバーに入射する際に透過率 0.9 のクォーツ窓を通過するため、計算時には透過率を考慮して補正を行った。

レーザーの面積は、クォーツ窓に設置した方眼紙にレーザーを照射し、その像を画像解析することで求めた。図 3.20 (B) は、実際にレーザー照射の様子を示しており、レーザースポットは半径約 1.86 mm の円であることが分かった。

これらの値から、レーザーエネルギー密度は次のように求まる。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー密度 } [\mu\text{J}/\text{mm}^2] &= \frac{457.9 [\mu\text{J}] \times 0.9}{\pi \times (1.86)^2 [\text{mm}^2]} \\ &= 38.08 [\mu\text{J}/\text{mm}^2] \end{aligned} \quad (3.4.3)$$



(A)



(B)

図 3.20: (A) パワーメーターを用いて測定したレーザー強度の結果。橙色がチェンバー入射前、緑色が入射後の強度を表している。(B) レーザーが方眼紙に照射されている様子。画像解析により、レーザースポットは半径約 1.86 mm の円であることが分かった。

この値を用いることにより、図 3.19 から、種電子の数はそれぞれのガス純度のもとで以下のように求まる。

$$\begin{aligned}
 99.9 \% \text{ purity} & : N_{\text{seed}} = (1.779 \pm 0.167) \times 10^5 \\
 99.9999 \% \text{ purity} & : N_{\text{seed}} = (5.479 \pm 0.529) \times 10^5
 \end{aligned}
 \tag{3.4.4}$$

なお、計算時にはビームの強度と面積それぞれに 10% のエラーがあると仮定して誤差を算出した。さらに、図 3.19 から得られる種電子数は単位長さあたりの値であるため、最終的な種電子数を算出する際には、GEM の有感領域におけるレーザー照射方向の長さを掛けた。

### 増幅電子数の評価

文献 [37] を参考に、増幅電子数は式 3.4.5 を用いて算出した。表 3.4 に示す各定数の値から分かるように、この計算式において、解析によって求める必要があるのは分子項のみである。

$$N_{\text{amplified}} = \frac{QDC [V \times \mu s]}{e [\text{pC}] \times G_{\text{amp}} [V \times \text{pC}^{-1}] \times \text{shaping time} [\mu s]}
 \tag{3.4.5}$$

表 3.4: 増幅電子数の計算に用いる定数の値

Parameter	Value
e	$1.60 \times 10^{-7}$ [pC]
$G_{\text{amp}}$	0.84 [V $\times$ pC $^{-1}$ ]
Shaping time	200 ns

QDC 値は、GEM からの信号を積分することで得られる。以下の図 3.21 は、各印加電圧における GEM の信号を示している。波高が最も高い点を基準とし、赤点線で示している  $-0.5 \mu\text{s} \sim 1.0 \mu\text{s}$  の範囲を積分することで QDC の値を算出した。

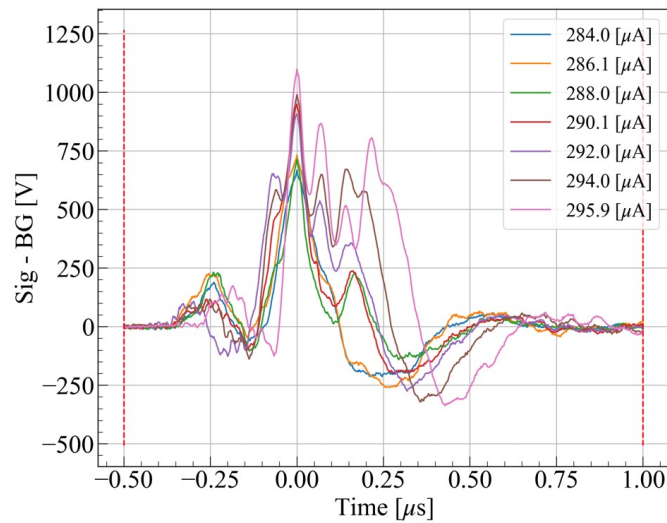


図 3.21: 各電圧値における GEM 信号の様子。赤点線で示した範囲を積分し、QDC の値を求めた。

### 3.4.3 絶対増幅率の解析結果

これまでに述べた手法に基づいて算出した絶対増幅率を、図 3.22 (A) に示す。横軸には 3 層の各 GEM に印加した電圧を、縦軸には算出された増幅率を対数スケールで示している。橙色の点はガス純度 99.9% の場合、青色の点は 99.9999% の場合に対応する。実際のガス純度はこれら 2 つの仮定の間にあると考えられることから、本研究で試作した Glass GEM の増幅率はおおよそ  $10^1$  のオーダーであると見積もられる。

比較のため、図 3.22 (B) には従来の  $50 \mu\text{m}$  フォイル GEM による増幅率を示す [37] (青点は P10 ガスの場合)。ただし、Glass GEM の厚さは  $100 \mu\text{m}$  であるため、同じ電場強度を実現するには印加電圧が約 2 倍必要となる点に注意が必要である。すなわち、Glass GEM に 500 V を印加した条件は、 $50 \mu\text{m}$  フォイル GEM における約 250 V の条件に相当する。

この点を踏まえて両者を比較すると、 $10^1$  オーダーの増幅率は従来のフォイル GEM と比べて極めて低いことが分かる。しかしながら、増幅率が  $10^1$  程度であるという結果は、Glass GEM を用いて実際に信号が取得できているという事実と矛盾する。このことから、この解析結果は Glass GEM の性能を示しておらず、解析方法に起因する問題を含んでいると考えられる。次節では、解析方法の問題点について考察するとともに、YAG レーザーを用いた絶対増幅率測定の課題点について述べる。

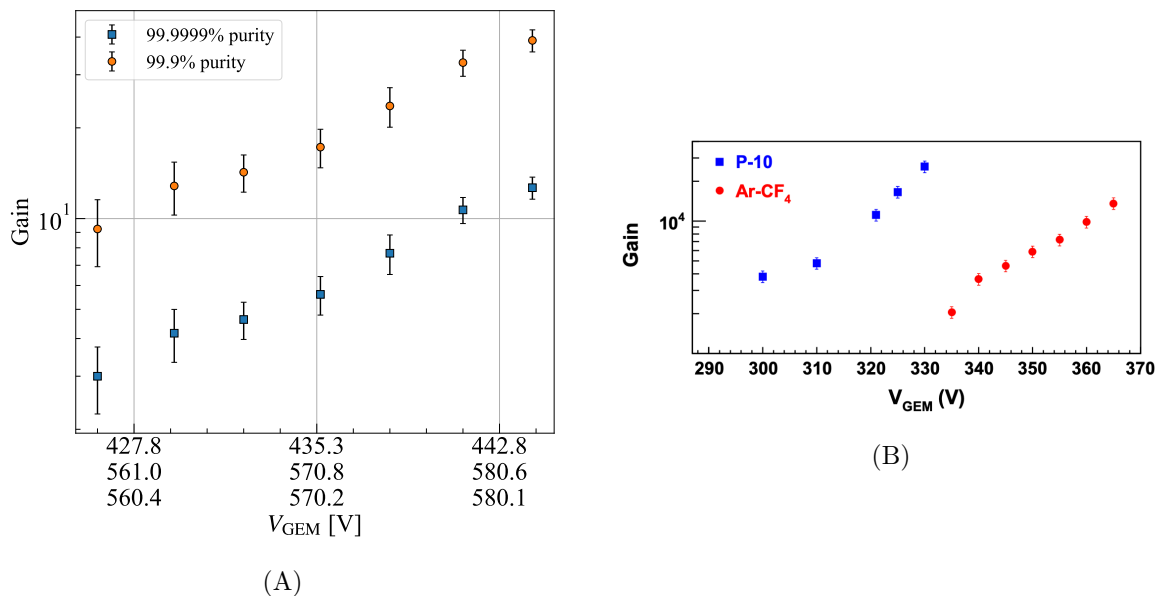


図 3.22: (A) 100  $\mu\text{m}$  Glass GEM の絶対増幅率。増幅率はガス純度 99.9% および 99.9999% の 2 条件を仮定して算出している。(B) 従来の 50  $\mu\text{m}$  フォイル GEM による増幅率。両者を比較する際には、厚さの違いにより同一電場を与えるための印加電圧が約 2 倍異なる点に注意が必要である。

### 3.4.4 YAG レーザーを用いた増幅率測定の課題

前節では、YAG レーザーを用いて厚さ 100  $\mu\text{m}$  の Glass GEM に対する絶対増幅率の見積もりを行った。しかしながら、その解析結果は  $10^1$  オーダーと非常に低く、Glass GEM を用いた信号の取得が可能であったという実験事実と矛盾する結果となった。この不一致の主な要因として、本解析における種電子数の算出方法が挙げられる。本節では、YAG レーザーを用いた場合の電離メカニズムに着目し、種電子数評価における課題点について考察する。

第 3.4.2 章にて述べた種電子数の算出では、図 3.19 に示すグラフをもとに種電子数を求めた。しかしながら、文献 [35] によれば、YAG レーザーによるガス中の電離は、荷電粒子や  $^{55}\text{Fe}$  などの単一エネルギー線源による一次電離とはその生成メカニズムが本質的に異なり、ガス中に含まれる不純物の種類やその濃度の影響を強く受けることが知られている。

以下では、YAG レーザーを用いた場合の電離メカニズムについて、その詳細を説明する。

### YAG レーザーを用いた場合の電離メカニズム

文献 [35] によれば、YAG レーザーによる電離は、P10 ガスそのものの一次電離ではなく、トリメチルアミン (TMA) やテトラメチルフェニレンジアミン (TMPD) をはじめとする ppm レベルの微量不純物が二光子吸収によって電離する過程に支配される。

実際、YAG レーザー (266 nm) の 1 光子エネルギーは 4.66 eV であり、Ar および CH<sub>4</sub> の電離エネルギー (それぞれ 15.8 eV、12.6 eV) には達しないため、2 光子を吸収しても P10 主成分の電離には至らない。一方、TMA の電離エネルギーは 8.5 eV と低く、レーザー 2 光子分のエネルギー (9.32 eV) を吸収することで電離が可能である。また、図 3.23 に示している通り、電離量が TMA 濃度に比例するという測定結果も報告されており、レーザー電離が不純物によって支配されることを裏付けている。

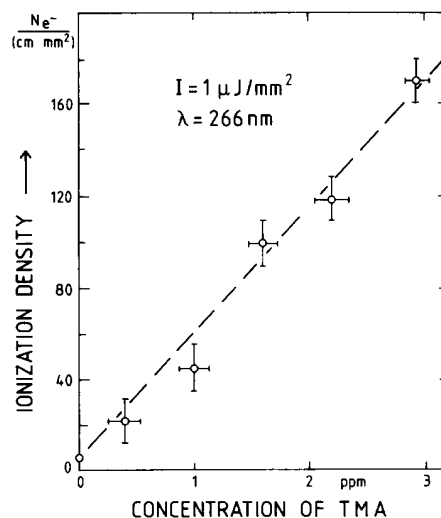


図 3.23: ガス中の TMA 濃度と電離量の関係。電離量は、TMA 濃度に比例することが報告されている。[35] より引用。

また、図 3.19 に示すように、二光子吸収による電離量はレーザーのエネルギー密度の二乗に比例するという、強い非線形性を示す。この非線形性により、レーザー焦点位置のずれやパルス強度の揺らぎ、さらにはガス中の不純物組成のわずかな変化が電離量に大きな影響を及ぼす。実際、図に示すグラフにおいても、ガス純度が 99.9% の場合よりも 99.999% の場合の方が電離量が大きくなるという一見矛盾した挙動が観測されているが、これは高純度ガスでも TMA など電離に寄与する不純物が必ずしも除去されず、逆に低純度ガスにはレーザー光を吸収するだけで電離には寄与しない不純物が多く含まれていることによるものである。

このように、二光子吸収過程に基づくレーザー電離は、荷電粒子や X 線による一次電離とは本質的に異なる性質をもち、特に種電子数の評価に大きな不確定性をもたらす。したがって、

本研究で行ったようにエネルギー密度から種電子数を一意に決定する手法は絶対増幅率を高精度に求めるには一定の限界が生じる。

したがって、ガス中の不純物の種類や濃度についての情報が得られていない状況において、文献 [35] と同様の手法で種電子数を算出するのは原理的に困難である。そのため、Glass GEM の絶対増幅率を正確に評価するためには、最終的には  $^{55}\text{Fe}$  (5.9 keV) などの単一エネルギー線源を用いた測定が不可欠である。<sup>3)</sup>

---

<sup>3)</sup> $^{55}\text{Fe}$  線源での測定を試みたが、線源の強度不足により信号の取得ができなかった。

## 第 4 章 本研究のまとめと今後の展望

本論文では、J-PARC E72 実験に向けた Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) の開発、および将来の大強度実験に向けた大型・薄型 Glass GEM の開発について述べた。本章では、これらの開発における成果を総括し、今後の課題と展望について述べる。

### 4.1 本研究のまとめ

#### 4.1.1 Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) の開発

E72 実験では、液体水素標的で反応しなかった  $K^-$  ビームイベントを除去し、トリガーレートを削減するために、Kaon Veto Cherenkov 検出器 (KVC) を用いた。KVC は閾値型のチェレンコフ検出器であり、ラディエータとして石英ガラス、読み出しに MPPC を使用した。KVC は E72 実験に向けた開発の過程において、合計 3 度のテスト実験を実施し、検出効率および平均光量の評価を行った。またそれに伴い、KVC は ver. 1 から ver. 4 に至るまで改良を繰り返した。KEK PF-AR テスト実験では、2 GeV/c の電子ビームを用いて、KVC (ver. 1,2) の性能評価を行った。結果として、KVC (ver. 1,2) は 2 GeV/c の電子ビームに対して 99.9% の効率が得られ、十分な性能を有していることが確認された。また、チェレンコフ光の生成数を計算するフランク=タムの公式による予想では、E72 本実験と同様の 735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対しても十分な性能を発揮することが予想されていた。しかしながら、その後行われた E73 パラサイト実験では、735 MeV/c の  $K^-$  ビームに対して、KVC (ver. 1) の検出効率が 50% 以下まで大きく低下してしまった。これは、ガラスと被覆材であるテフロンシート間の空気層に光が取り込まれたことが原因だと考えられる。この結果を受け、石英ガラスの厚みおよびガラス表面の境界条件をセグメントごとに変更した KVC (ver. 3) を開発し、再び 735 MeV/c の  $K^-$  ビームを用いたテスト実験 (T110 実験) を行った。実験の結果、石英ガラスの厚み増加によるチェレンコフ光量の増加、および磨りガラス加工の導入によってガラス境界での光の乱反射が促進されたことにより、KVC (ver. 3) の平均光量が大幅に増加し、検出効率も 99.6% 以上に達することを確認した。その後、E72 本実験に用いる実機として、磨りガラスを採用した KVC (ver. 4) を開発し、本実験に臨んだ。本実験においても、KVC (ver. 4) は 99.6% 以上の検出効率を達成し、安定したデータの取得に成功した。

また、これら一連の実験結果について、Geant4を用いたシミュレーションによる再現性の検証を行った。実験結果の再現のために、石英ガラスの光学表面における反射特性である、specular spike, specular lobe および表面の粗さパラメータである  $\sigma_\alpha$  の値を調節し、光量分布の再現性を検証した。まず、無加工の石英ガラスを用いた KEK PF-AR 試験、E73 パラサイト試験、および T110 実験（セグメント 4）について検討を行った。KEK PF-AR 試験の電子ビームを基準として反射パラメータを調節した結果、同一のパラメータ設定により  $K^-$  ビームを用いた E73 パラサイト試験の結果を良い精度で再現できることを確認した。一方で、石英ガラス厚さを 2 cm とした T110 実験（ver. 3）では、従来のパラメータ設定では光量が過小評価されることが分かり、実機間で石英ガラス表面状態が異なる可能性が示唆された。次に、T110 実験セグメント 3 において使用された磨りガラス加工を施した石英ガラスについて検討を行った。磨りガラス条件を表現するため、 $\sigma_\alpha$  を無加工ガラスの場合よりも大きく設定し、specular lobe の値と併せてパラメータスキャンを行った。その結果、 $K^-$  ビームおよび  $\pi^-$  ビームの両方に対して、(lobe,  $\sigma_\alpha$ ) = (1.0, 0.57) の条件において光量分布が実験結果と良く一致することを確認した。

#### 4.1.2 大型・薄型 Glass GEM の開発

現在の HypTPC はドリフト電子の増幅部として Gas Electron Multiplier(GEM) を採用している。しかし、絶縁層に用いられるプラスチック材料の柔軟性により、GEM のたわみや表面の凹凸が生じやすく、それに伴う放電の発生によってレート耐性が  $10^6$  Hz 程度に制限されるという課題がある。そこで、本論文ではレート耐性を  $10^7$  Hz まで上げることを目指し、絶縁層にガラスを用いた大型・薄型 Glass GEM を開発した。絶縁層をガラスにすることで、耐放電性、および平面度の改善による放電率の抑制が期待される。さらに、これまでに開発されてきた Glass GEM は厚さが  $570 \mu\text{m}$  であったが、本論文では株式会社 NSC との共同開発により、世界初となる  $100 \mu\text{m}$  厚を実現した。

Glass GEM に対して相対増幅率の測定を行った。実験では、ドリフト電子を発生させるための  $\beta$  線源として  $^{90}\text{Sr}$  を使用し、GEM からの信号を測定した。結果として、GEM への印加電圧の増加に伴い、測定した信号の波高が指数関数的に増加していたことから、薄型 Glass GEM を用いた電子増幅に世界で初めて成功したと結論づけた。

さらに、YAG レーザーを用いた絶対増幅率の測定を試みた。しかしながら、増幅率の解析結果は  $10^1$  オーダーと非常に低く、信号の取得が可能であったという実験事実と矛盾する結果となった。この原因として、YAG レーザー照射による電離メカニズムが単一エネルギー線源による一次電離とは異なることが挙げられる。そのため、絶対増幅率の測定には、 $^{55}\text{Fe}$  等の単一エネルギー線源が必要であることが明らかとなった。

## 4.2 今後の展望と課題

Glass GEM の開発における今後の展望と課題を、以下に述べる。

### $^{55}\text{Fe}$ 等の単一エネルギー線源を用いた絶対増幅率の測定

前述したように、本論文では YAG レーザーを用いて Glass GEM の絶対増幅率の測定を試みた。しかしながら、波長 266 nm の YAG レーザー光 1 光子が持つエネルギーは、P10 ガスの電離エネルギーには達しておらず、レーザー照射によって生成される種電子数はガス中に含まれる微量不純物の種類や濃度に強く依存する。その結果、レーザー照射によるガス原子の電離過程は、 $^{55}\text{Fe}$  等の単一エネルギー線源による一次電離とは本質的に異なるものであることが明らかとなった。

以上のことから、YAG レーザーを用いた手法では、Glass GEM の絶対増幅率を定量的に評価することは困難であると結論づけられる。したがって、今後は  $^{55}\text{Fe}$  等の単一エネルギー線源を用いた測定を行い、一次電離数が明確に定まる条件下で絶対増幅率を評価することが不可欠である。

### Garfield++ を用いた Glass GEM の動作シミュレーション

Garfield++ は、ガス検出器の電離過程、電子輸送、ガス増幅過程を微視的に扱うことが可能なシミュレーションソフトウェアであり、GEM における電子増幅率や電子軌跡の詳細な評価を行うことができる。特に、電場分布計算ソフトウェアと組み合わせることで、GEM の穴内部における電場構造を反映した現実的な増幅シミュレーションが可能である。Glass GEM は、絶縁層にガラスを用いることで高いレート耐性を実現することを目的として開発されているが、その一方で、誘電率や電荷蓄積特性の違いが増幅率や安定動作にどのような影響を与えるかについては、十分に理解されていない。そのため、Garfield++ を用いたシミュレーションにより、Glass GEM の増幅率を推定するとともに、穴径や穴形状、厚さといった幾何学的パラメータを変化させた場合の動作特性を推定することが重要となる。

これらのシミュレーション結果は、Glass GEM の増幅率を計算するだけでなく、今後の Glass GEM 開発においても重要な役割を果たすと期待される。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に支えられ、この修士論文を無事に完成させることができました。ここに深く感謝申し上げます。

指導教官の市川裕大准教授、早川修平助教には、学部生の時より、たくさんのご指導をいただきました。市川准教授には、Glass GEM の開発をはじめとして、多くの場面でご指導と助言をいただきました。初めは GEM について何も知らなかった私でしたが、市川准教授がいつも Glass GEM 開発の意義を熱弁してくださったことが、私の研究のモチベーションに繋がっていたと感じています。また、研究活動だけでなく、市川准教授には卒業後の進路についてもたくさんのお話をさせていただきました。特に、私の行っている研究活動が、私が趣味にしている音楽分野の発展にどのように貢献できるかを一緒に考えていただいた時間は、私が今後のキャリアを考える上で大きな転換点となりました。私は来年度から企業に就職しますが、市川准教授がハドロン物理に多大な情熱を持っていたように、自分の仕事に取り組んでいきたいと思っています。

早川修平助教には、KVC 検出器の開発や解析、また E72 実験の準備の際に多くの助言や支援をいただきました。私がまだ研究について何も知らなかった学部生の頃から今日に至るまで、早川助教はいつも私の疑問に丁寧に対応していただきました。そのおかげもあり、実験や解析の基礎的な知識を身につけることができたと感じています。また、約半年間にわたる E72 実験の準備では、大変な量の作業をこなしながら、常に私たちのことを見守って下さいました。実験準備は苦しい作業がありながらも、非常に楽しい時間でした。これも、早川助教がいつも学生と同じ目線で接してくれたからだと思います。2 人の指導教官に、最大限の感謝を申し上げます。

研究グループの先輩である齋藤隆太氏と、Haein Lee 氏には、常に先頭に立ち E72 実験を先導していただきました。齋藤氏の存在は、私が本研究グループへの配属を希望したきっかけでもありました。この私の判断は非常に正しく、結果として齋藤氏には、本論文にて述べたほぼ全ての内容に関して、つきっきりでお世話をさせていただきました。2 年半にわたり、常に頼れる先輩でいてくださり本当にありがとうございました。

Haein Lee 氏は、E72 実験のリーダーとして、実験グループをまとめていただきました。Haein 氏の明るい人柄のおかげで、現場はいつも穏やかな雰囲気にもまれていたように感じます。J-PARC での作業時は、いつも的確な指示を与えてくれるだけでなく、Haein 氏自身が高いバイタリティを持ち、多くの作業をこなすことで、常に私たちの手本となってくれました。心より感謝申し上げます。Haein 氏の日本語力が向上し、いつかこの文を読んでもくれることを願っています。

ます。

ストレンジネス核物理グループの教授である田村裕和教授と三輪浩司教授には、今日に至るまで多くの助言をいただきました。田村教授は、私が学部2年生の時の授業で、原子核実験の研究内容についてのお話をしてくださいました。その際、ご自身の研究についてとても楽しそうにお話しする姿が印象に残り、この研究室への配属を希望するようになりました。研究室配属後も、ハイパー核ゼミ等を通してハイパー核物理の基礎を教えていただくだけでなく、ミーティングの際も私の持っていない視点からの助言を多くいただき、とても勉強になりました。

三輪教授には、学部生の頃の原子核物理の授業をはじめとして、原子核分野に関する多くの知識を与えてくださいました。研究室に配属してからは三輪教授が混声合唱を趣味にしていると知り、一度は歌っている姿を拝見したかったのですが、それが叶うことなくここまで来てしまったのが心残りです。また、三輪教授はいつも穏やかで優しく、物理の話も音楽の話も両方できたことが嬉しかったです。今後、合唱の発表機会があればぜひ教えてください。2人の教授に、心より感謝申し上げます。

金田雅司准教授には、学生実験 TA やサマーチャレンジ TA 等の業務にて非常にお世話になりました。これらの業務を通じて、金田准教授は実験や物理の内容についてはもちろんですが、学生の進路相談に関しても非常に丁寧に対応されていると感じました。学生の持つ進路の悩みに対して、学生の目線に立って真摯にお話しされている姿を見て、私自身にとっても学びになることが多かったと感じています。改めて、感謝申し上げます。

JAEA の佐甲博之研究主幹には、Glass GEM 開発に関して多くの助言と支援をいただきました。Glass GEM の性能評価を行った東北大、および JAEA の試験では、佐甲研究主幹の冷静な助言のおかげで信号の取得を行うことができました。また、YAG レーザーを使用する際にも、その使い方について1から丁寧に教えていただいたおかげで、安全に実験に取り組むことができました。今後の Glass GEM 開発がこの調子でうまくいくことを願っております。ありがとうございました。

JAEA の山本剛史研究員および KEK の鶴養美冬准教授には、E72 実験における液体水素標的に関する作業にて、多大な支援をいただきました。特に実験直前時には、GEM 交換のために何度も標的システムの再インストールをさせてしまいましたが、(我々の前では)何も文句を言うことなく、作業に取り組んでいただきました。それだけでなく、鶴養准教授には寿司の差し入れをしてくださったり、当時金欠で苦しんでいた私に様々な食品を恵んでくれたりと、多くの温かい支援をいただきました。心より感謝申し上げます。

研究室の同期である雨宮功来氏、洪雨寧氏、高野然氏、遠山翔太氏、原谷あかり氏とは、切磋琢磨しながらも楽しい時間を過ごすことができました。特に、同じ研究グループの雨宮氏とは、約半年間に渡り東海村に住み込み、実験準備に取り組みました。同じ境遇の同期がいることは私

にとっても心強かった上にその同期が優秀でいてくれることが何よりも良い刺激になりました。今後はともに音楽業界に挑戦する仲として、これまで以上に切磋琢磨できる存在でいたいと思っています。そのほかの皆も、今後は違う舞台で活躍することになりますが、またみんなで集まれたらと思っています。ひとまずは修論執筆、お疲れ様でした！

大浦文也氏、木野量子氏、石毛達大氏をはじめとする諸先輩方には大変お世話になりました。皆さんと過ごす研究室生活はとても楽しく、離れるのが名残惜しいです。またみんなで集まって飲み会とダーツに行けることを楽しみにしています。ありがとうございました。

HypTPC コラボレーションのメンバーである中山雄介氏、佐々木瑠璃氏、足立哲平氏、Dahyun Choi 氏、Jaejin Lee 氏、Wooseung jung 氏とは、ともに実験準備作業を行い、無事に E72 実験のビームタイムを完遂することができました。特に中山氏、佐々木氏、足立氏とは、出張や旅行や飲み会を通してたくさんの思い出を作ることができました。学生最後の1年を、このTPC組のみんなで過ごせて本当に良かったと感じています。本当にありがとうございました。

また、東北大技術職員の梅津裕生氏や事務職員の高橋あゆみ氏、JAEA 秘書の梶みどり氏には、私の研究生生活を様々な面で支えていただきました。ここに深く感謝申し上げます。

さらに研究外では、東北大学学友会吹奏楽部 (特に打楽器パート)、東北大学軽音学部 Feelin'Free およびフォークソング研究会、東北大学ゴスペルサークル GO ∞ HIP の皆さんに最大限の感謝を申し上げます。皆さんと作った一つ一つの音楽が、私の中で輝かしい思い出として残っています。私はこれからも、音楽に全力で取り組んでいくつもりです。いつかまた、どこかの舞台で共演できることを願っています。

最後に、私の大学および大学院への進学に理解を示し、経済的支援を続けてくれた両親と、今日に至るまで弟を可愛がってくれた兄と姉に深く感謝いたします。家族の存在はいかなる時も私の精神的な支えでした。末っ子として甘やかされてきた人生でしたが、今後はこれまでに培ってきた知見や能力を活かして社会に貢献するだけでなく、お世話になった家族に恩返しできるように努めてまいります。

大学で過ごした6年間は、これまでの人生で最も輝かしいものでした。これまで私に関わっていただいた全ての方々に深く感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

2026年2月12日

嶋崎 開斗



J-PARC E72 実験、完遂！

## 参考文献

- [1] S. Navas *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **110**, 030001 (2024).
- [2] M. Gell-Mann, Physics Letters **8**, 214 (1964).
- [3] G. Zweig, An SU<sub>3</sub> model for strong interaction symmetry and its breaking; Version 1 (CERN-TH-401). See <https://cds.cern.ch/record/352337>.
- [4] Yuki Kamiya and Tetsuo Hyodo, Phys. Rev. C **93**, 035203 (2016).
- [5] Yuki Kamiya and Tetsuo Hyodo, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2017**, 023D02 (2017).
- [6] Takayasu Sekihara, Tetsuo Hyodo, and Daisuke Jido, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2015**, 063D04 (2015).
- [7] Nathan Isgur and Gabriel Karl, Phys. Rev. D **18**, 4187 (1978).
- [8] A. Starostin *et al.* (The Crystal Ball Collaboration), Phys. Rev. C **64**, 055205 (2001).
- [9] H. Kamano *et al.*, Phys. Rev. C **90**, 065204 (2014).
- [10] H. Kamano *et al.*, Phys. Rev. C **92**, 025205 (2015).
- [11] Bo-Chao Liu and Ju-Jun Xie, Phys. Rev. C **85**, 038201 (2012).
- [12] Bo-Chao Liu and Ju-Jun Xie, Phys. Rev. C **86**, 055202 (2012).
- [13] Jun Shi and Bing-Song Zou, Phys. Rev. C **91**, 035202 (2015).
- [14] B.S. Zou, Nuclear Physics A **914**, 454 (2013).
- [15] Simon Capstick and Nathan Isgur, Phys. Rev. D **34**, 2809 (1986).
- [16] Martin L. Perl, High Energy Hadron Physics. (1974).
- [17] Keizo Agari *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2012**, 02B011 (2012).
- [18] Eljen Technology, EJ-232 / EJ-232Q Plastic Scintillators. See <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-232-ej-232q>.
- [19] S. H. Kim, PhD thesis (2021).
- [20] J. K. Ahn *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **1047**, 167775 (2023).
- [21] R.J.Saito, Master's thesis (2025).
- [22] Ace Classical Engineering, Ace Classical Engineering 公式ウェブサイト. See <https://www.ace-quartz.com>.

- [23] Eljen Technology, EJ-510 Light Guide Adhesive. See <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-510>.
- [24] 株式会社ジーテック, 株式会社ジーテック公式ウェブサイト. See <http://www.ggg-tech.co.jp/index.html>.
- [25] 浜松ホトニクス, MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) S13360-6050VE. See [https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc\\_mppc-array/S13360-6050VE.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-6050VE.html).
- [26] シグマ光機株式会社, Optical Components. See [https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc\\_mppc-array/S13360-6050VE.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-6050VE.html).
- [27] R.Ueno, Master's thesis (2021).
- [28] Fabio Sauli, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **805**, 2 (2016).
- [29] Ilaria Vai *et al.* (CMS Muon Group), In Proceedings of the European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2019), 123 (2019).
- [30] ALICE TPC Collaboration, Journal of Instrumentation **16**, P03022 (2021).
- [31] B Ketzer *et al.* (COMPASS Collaboration), Triple gem tracking detectors for compass. Technical Report CERN-OPEN-2002-004 CERN (2002).
- [32] T. Fujiwara *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **850**, 7 (2017).
- [33] S. H. Kim, Y. Ichikawa, H. Sako, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **940**, 359 (2019).
- [34] T. Fujiwara, 日本中性子科学会誌「波紋」 **27**, 11–15 (2017).
- [35] G. Hubricht *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **228**, 327–333 (1985).
- [36] Rayture Systems Co., Ltd., Nano SG シリーズ製品ページ. See <https://www.rayture-sys.co.jp/product/nano%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%BA/nano-sg-%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%BA>.
- [37] H. Sako *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **763**, 65–81 (2014).