

修士論文

シンチレーションファイバーを用いたハイパー核実験用
飛跡検出器及びアクティブ標的の開発

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

大橋和真

令和 5 年

概要

宇宙の物質世界を構成する核をなすのは *up* クォークと *down* クォークから構成される核子 (中性子および陽子) である。核子間に働く核力を解明するためにこれまでに多くの核子散乱実験がなされ、核力は核子同士が重なるくらいの距離である ~ 1 fm より近距離では強い斥力を持ち、それより距離が離れていくと引力となる性質が明らかとなっている。遠距離での引力部分は中間子交換モデル (OBE) でうまく説明することができる一方で近距離における斥力は現象論的な斥力芯を取り入れたり、重いベクトル中間子の交換で記述しようとしているが十分な理解には至っていない。核力が斥力を示すのは核子と核子が重なり合う程度の近距離において、核子の内部構造であるクォークの寄与が働いてくるためであると予想されている。そのため短距離での核力の起源を本質的に理解するには核力からクォークの自由度を拡張したバリオン間相互作用を調べることが重要である。つまり、SU(3) フレーバー対称性が比較的成り立つ *up*, *down*, *strange* まで含んだバリオン間の相互作用を調べることは、核力を含むバリオン間力をクォークから理解する手がかりとなる。

こういった背景をうけバリオン間相互作用を明らかにするため、J-PARC では現在 Ξ ハイパー核分光実験 (J-PARC E70) の準備が進められている。また将来実験として Λp 散乱実験 (J-PARC E86) が計画されている。本研究では E86 実験で飛跡検出器として用いられるシンチレーションファイバー検出器と E70 実験で標的として用いられるアクティブ標的の開発を行った。

Λp 散乱実験は J-PARC に新設される K1.1 ビームラインで行われる予定である。我々のグループが 2019 年に行った Σp 散乱実験 (J-PARC E40) で確立したハイペロン散乱実験の手法 [1] を継承して Λp 散乱の微分断面積およびスピン観測量を測定する計画である。基本的なセットアップは E40 実験と同様であるが、E40 実験では高レートビーム環境下でのビームトラッキング分離能力やパイルアップによって検出効率が低下することが問題となっていた。これらを改善するために E86 実験では、ビームラインスペクトロメーター下流の飛跡検出器をドリフトチェンバーからシンチレーションファイバー検出器に置き換える予定である。

開発したシンチレーションファイバー検出器 (Beamline Fiber Tracker - Downstream, BFT-D) は 0.75 mm ϕ のシンチレーションファイバーを俵積みで 256 本並べた層を 1 層として 6 層 (X,X',U,U',V,V') 並べた飛跡検出器である。各層の tilt angle は XX' 層が 0° 、UU' 層が -45° 、VV' 層が 45° となっており、飛跡を 3 次元で再構成することができる。本研究の先行研究 [2] では XX' 層の製作が行われたが、設計に問題があったため製作が困難であった。XX' 層ではファイバー固定用フレームのピッチ間隔がファイバー径と同じ 0.75 mm であった。この設計では、フレームにファイバーを通す際に隙間がなくファイバーに力を入れて通さざるを得ず、ファイバーが折れてしまったり傷がついてしまう事象が多く発生していた。本研究では XX' 層の設計をもとにファイバー固定用フレームのピッチ間隔を 0.77 mm に変更するなどのいくつかの設計変更を行い UU',VV' 層の設計および製作を行った。これらの変更により UU',VV' 層では XX' 層で発生していた製作上の問題を解決し、製作を完了することができた。

その後全層の性能を確かめるため東北大学電子光理学研究センターにおいて性能評価実験を行った。BFT-D の各層に要求される項目としては位置分解能 $\sigma_{pos} < 0.14$ mm, 時間分解能 $\sigma_{time} < 3.3$ ns, 一層での検出効率 $\epsilon > 96\%$ である。性能評価の結果、位置分解能は X:0.107 mm, X':0.120 mm, U:0.100 mm, U':0.099 mm, V:0.083 mm V':0.074 mm となり、全層で要求を満たした。しかし XX' 層は位置分解能に位置によるばらつきがあり、局所的に悪化している領域が存在していることが明らかとなった。UU',VV' 層では位置分解能のファイバーごとのばらつきはほとんど確認されず、高い精度で製作が行えたと考えられる。時間分解能は全層で 0.9 ns となり要求を満たした。検出効率は X:99.5%, X':95.6%, U:99.8%, U':99.7%, V:99.6%, V':99.7% という結果であった。製作が困難であった X' 層は要求性能 96% を満たさなかったが、それ以外の層は高い検出効率であり問題なかった。このように初めに製作された XX' 層では性能が十分ではなかったが、本研究で製作した

UU',VV' 層では要求性能を十分に満たすことを確認し本研究で BFT-D の設計と製作方法を確立することができたといえる。

もうひとつのテーマである Ⅲ ハイパー核分光実験 (J-PARC E70) は (K^- , K^+) 反応を用いた Missing Mass 法によるハイパー核の分光実験であり, 新設した高分解能磁気スペクトロメータである S-2S とアクティブファイバー標的 (Active Fiber Target, AFT) の導入により Missing Mass 分解能 2 MeV という高分解能での分光実験を目指している。AFT は直径 3 mm のシンチレーションファイバーから構成され, ファイバー内の炭素を標的とする。ファイバーは xx',yy' を 1 セットとして 9 セット並べた計 864 本からなり, ファイバー両端から信号を読み出すため総読出し ch 数は 1728ch となる。AFT を標的として導入することでイベントごとに AFT 内でのエネルギー損失を直接測定することができ, 標的内でのエネルギーストラグリングによる分解能の悪化を小さく抑えることが可能となる。これにより, 標的を厚くすることで収量を増やしつつもエネルギーストラグリングの影響を小さくすることで高分解能の分光実験が実現される。

本研究では,AFT の実機製作と 2023 年 6 月に行われた E70 実験のコミッショニングランで取得したデータを用いた性能の評価を行った。実機製作においては BFT-D の製作方法を踏襲して製作を行い, AFT を完成させることができた。コミッショニングランのデータを用いた性能評価では AFT でのエネルギー補正を行うことで Missing Mass 分解能が 2.2 MeV となることが確認された。目標となる分解能である 2 MeV には到達しなかったが, 目標にほぼ迫る値となり AFT のエネルギー補正が正常に機能することが確かめられた。また収量増加のためには高いレートでビームを照射することが必要となるため, 検出効率のレート依存性についても評価を行った。ビームを 38 k/spill, 300 k/spill, 1 M/spill, 1.5 M/spill と変化させていくと 1 M/spill から検出効率が大幅に低下した。これはレートの増加によって AFT の読出し回路に MPPC から大きな電流が流れることで ASIC の動作が数 10~100 μ s 停止して信号の検出が行えなくなることが原因だと考えられる。MPPC の増幅率を抑制するため, バイアス電圧を 0.3 V 低くしてレート依存性を同様に調査すると改善がみられた。しかしビームレート 1M/spill において一番検出効率の低い層での検出効率は約 45% となり, 正常な検出効率である 99% 程度まで回復することはなかった。今後は高ビームレートでの検出効率をより低いバイアス電圧でも調べ, 適切なバイアス電圧設定を探ることが必要となる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	物理的背景	1
1.1.1	バリオン間相互作用	1
1.1.2	ハイペロン-核子 (YN) 散乱実験	2
1.1.3	Ξ ハイパー核研究	4
1.2	シンチレーションファイバー検出器	6
1.2.1	シンチレーションファイバー	6
1.2.2	Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)	7
1.2.3	MPPC 読出し回路	8
1.3	論文の構成	10
第 I 部	飛跡検出器 Beamline Fiber Tracker Downstream (BFT-D)	11
第 1 章	Λp 散乱実験 (J-PARC E86)	12
1.1	実験概要	12
1.2	実験セットアップ	13
1.2.1	K1.1 Spectrometer	13
1.2.2	Target + CATCH 検出器群	14
1.2.3	SKS Spectrometer	15
1.3	本研究の目的	15
第 2 章	BFT-D の概要	16
2.1	開発の目的	16
2.2	開発の流れ	17
2.3	要求性能	17
2.4	デザイン	19
2.4.1	全体の構成	19
2.4.2	設計の改良	21
第 3 章	BFT-D の製作	24
3.1	製作方法	24
第 4 章	性能評価実験	32
4.1	目的	32
4.2	実験セットアップ	32
4.3	評価項目	34
4.4	データ収集系	35

第 5 章	解析	36
5.1	パラメーター作成	36
5.2	光量	40
5.3	ヒットパターン	42
5.4	時間分解能	44
5.5	Multiplicity	48
5.6	クラスタリング	49
5.7	トラッキング	52
5.8	検出効率	59
5.9	位置分解能	62
第 6 章	運動量分解能のシミュレーション	64
第 7 章	まとめと今後の展望	66
第 8 章	付録	67
8.1	BFT-D チャンネルアサイン	67
8.2	MPPC のシリアル番号とブレイクダウン電圧	70
第 II 部	アクティブ標的 Active Fiber Target (AFT)	72
第 1 章	Ⅲ ハイパー核生成実験 (J-PARC E70)	73
1.1	実験概要	73
1.2	実験セットアップ	74
1.2.1	K1.8 Spectrometer	74
1.2.2	Active Fiber Target	75
1.2.3	S-2S Spectrometer	76
第 2 章	アクティブファイバー標的 Active Fiber Target(AFT)	77
2.1	開発の目的	77
2.2	デザイン	78
第 3 章	AFT の製作	82
3.1	製作方法	82
第 4 章	AFT の性能評価	88
4.1	J-PARC E70 コミッショニング	88
4.2	評価項目	88
4.3	パラメータ作成	90
4.3.1	エネルギー校正	90
4.3.2	TDC から時間への変換	92
4.4	ヒットパターン	97
4.5	Multiplicity	99
4.6	検出効率の電圧, ビームレート依存性	101
4.7	クラスタリング	103
4.8	エネルギーキャリブレーション	108

4.9	Missing Mass 分解能	115
第 5 章	まとめと今後の展望	120
参考文献		122

目次

1.1	バリオン 8 重項とバリオン 10 重項	
	I_3 はアイソスピン z 成分, S はストレンジネス量子数	1
1.2	格子 QCD 計算によるバリオン間相互作用ポテンシャル	
	緑と赤はそれぞれ π の質量を $1014 \text{ MeV}/c^2$, $835 \text{ MeV}/c^2$ として計算している.	2
1.3	J-PARC E40 実験のセットアップと概念図 [1]	3
1.4	KISO イベント	4
1.5	IBUKI イベント	4
1.6	エマルジョン実験から得られた $\Xi^- - ^{14}\text{N}$ における Ξ^- の束縛エネルギー (左)[8]	
	いくつかの理論模型における理論計算から求めた束縛エネルギー (右)	5
1.7	KEK E224(左)[9], BNL E885(右)[10] で得られた Missing Mass スペクトル	5
1.8	異なる 4 つの理論模型で予想される ^{12}Be スペクトル [11]	6
1.9	Beamline Fiber Tracker	7
1.10	Cylindrical Fiber Tracker[12]	7
1.11	1ch のみの MPPC[13]	8
1.12	タイリングされた多チャンネル MPPC[13]	8
1.13	EASIROC のブロックダイアグラム [14]	8
1.14	VME-EASIROC のブロックダイアグラム [14]	9
1.15	VME-EASIROC の画像	10
1.1	E86 実験の概略図	12
1.2	E86 実験のセットアップ	13
1.3	標的と CATCH 検出器群の概略図	14
2.1	E40 実験におけるビームラインスペクトロメータのセットアップ	16
2.2	BFT-D の開発の流れ	17
2.3	K^0 生成反応と主なバックグラウンドとなる multi π production	18
2.4	BC3,4 と BFT-D のファイバー径ごとの Vertex 分解能 [2]	18
2.5	BC3,4 と BFT-D のファイバー径ごとの Missing Mass 分解能 [2]	18
2.6	BFT-D の全体図	20
2.7	BFT-D の各部と連結方法	20
2.8	ファイバーガイドフレーム	21
2.9	使用した MPPC アレイ	21
2.10	設計を変更したファイバーガイドフレーム	
	旧 XX' 層の設計ではピッチが 0.75 mm であったが, 新たな設計では 0.77 mm となっている.	22
2.11	新旧ファイバーの比較 上が XX' 層で用いたもの 下が新たに購入し UU',VV' 層の製作に用いたもの	23

3.1	サポートフレームと BFT-D VV' 層フレーム	25
3.2	ファイバーの張り方	25
3.3	XX' 層でのファイバーを通す手順	26
3.4	ファイバーを読み出し面に通す工程	27
3.5	ファイバー固定の様子	28
3.6	ファイバーにテンションをかける前後の比較 右半分がテンションがかかっており, 左半分はかかっていない状態	29
3.7	読出し面から出ているファイバーを 2mm 程度に切断したもの	30
3.8	読出し面とファイバーをオプティカルセメントで固定後エポキシ樹脂で保護	30
3.9	読出し面を紙やすりで研磨していく時の様子	30
3.10	読出し面の研磨完了後の様子	30
3.11	完成した UU' 層と VV' 層	31
4.1	実験セットアップの模式図	32
4.2	実際の実験セットアップの写真	33
4.3	XXX 配置	33
4.4	XUV 配置	33
4.5	BFT-D の位置を変化させることで位置スキャンを行う. $V_{op} = 58.5 \text{ V}$, $V_{th} = 3.5 \text{ p.e.}$ の時のデータ取得点を表している.	34
4.6	XUV 配置でのデータ取得点	35
4.7	データ収集系 T2×T3 をトリガーとし VME-EASIROC を用いて読出しを行った.	35
5.1	V 層セグメント 90 番でのペDESTAL 付近の ADC 分布 ピークフィッティングから 1p.e. に対応する Gain を求める.	36
5.2	各層でのセグメントと TDC の 2 次元相関 X' 層と V 層で TDC のない ch が存在しているがこれは実験時ケーブルの不良でデータが取 得できていなかった ch である.	37
5.3	各層での TDC 分布	38
5.4	V 層, セグメント 90 番での TDC フィッティングの様子	39
5.5	TDC 分布を時間分布に変換した Time 分布	39
5.6	$V_{th} = 3.5 \text{ p.e.}$ を固定したまま平均光量を変化させたときの検出効率	40
5.7	$V_{op} = 58.5 \text{ V}$, $V_{th} = 3.5 \text{ p.e.}$ の時の光量分布 各層で 256 セグメントある光量分布を足した分布をガウス分布でフィットしている.	41
5.8	$V_{op} = 58.5 \text{ V}$, $V_{th} = 3.5 \text{ p.e.}$ の時のセグメントと平均光量の二次元相関 XX' 層では平均光量のばらつきが大きく, 光量が減少しているセグメントが複数あることが 分かる.	41
5.9	平均光量の V_{op} 依存性	42
5.10	有感領域の中心付近でのヒットパターン	43
5.11	ビーム位置を変化させた複数のランを足したデータでのヒットパターン ビーム位置が変化したデータが足されているため複数の山の構造が見られる.	43
5.12	Time Over Threshold(TOT) の概念図 波高が低い (青) と TOT は小さくなり, 波高が高い (橙) と TOT が大きくなるというように TOT と ADC には相関が存在する.	44

5.13	Pulse Hight Correction のためのフィッティング TOT と Time の 2 次元プロットを行った後 x 方向の各ビンで中心値を求める. この中心値を 通るようにフィッティングで $f(\text{TOT})$ のパラメーターを決定する. 緑線は bin における y の 中心値とエラーを表し, 赤線はフィッティング関数 $f(\text{TOT})$ である.	45
5.14	TOT と Time の二次元相関 (PHC 補正前)	46
5.15	TOT と PHC 後の時間分布 (CTime) の二次元相関 TOT と CTime では図 5.14 のような相関がなくなっていることがわかる.	46
5.16	時間分解能のフィッティング	47
5.17	時間分解能の V_{op} と V_{th} 依存性	48
5.18	ビーム位置 $x = 0$ での Multiplicity X' 層は Multiplicity=0 が多くヒットが検知できていないセグメントが多い.V 層における Multiplicity=0 の割合が高いのは抜けチャンネルによるものでファイバー起因ではない. . . .	49
5.19	Cluster の概念図 ClusterSize は 1 クラスターの中に含まれる Hit 数, NLayer はある層にクラスターがいくつ あるかを表す量である.	50
5.20	各層での NLayer	51
5.21	各層での Cluster Size	51
5.22	Total PhotoElectron	52
5.23	Tracking の概念図	53
5.24	1 イベントに対して再構成されたトラック数 (NTrack)	54
5.25	1 トラックの再構成に参加したヒット数 (NHit)	54
5.26	フィッティングにおける χ^2 分布	55
5.27	x_0, u_0 の分布	55
5.28	u_0 と x_0 の相関	56
5.29	1 イベントに対して再構成されたトラック数 (NTrack)	57
5.30	1 トラックの再構成に参加したヒット数 (NHit)	57
5.31	フィッティングにおける χ^2 分布	57
5.32	トラッキングから得られたパラメータ u_0 と v_0 の相関	58
5.33	トラッキングから得られたパラメータ x_0 と y_0 の相関	58
5.34	BFT-D 全体の Beam Profile と Tracking Efficiency の位置依存性 赤色の実線で囲われた領 域は BFT-T の有感領域であり, 点線の交点は各ランでのビーム中心の位置を表している. . .	59
5.35	Tracking から予想される Hit セグメントと実際の Hit セグメントの関係	60
5.36	Tracking から予想される Hit セグメントと実際の Hit セグメントとの残差分布	60
5.37	$V_{op}=58.5$ V, $V_{th}=3.5$ p.e での検出効率	61
5.38	検出効率の電圧依存性	62
5.39	tracking 位置と hit 位置の残差分布 XXX 配置でビーム位置が $x = 0$ という条件のデータでの解析結果である.	63
6.1	Geant4 上での K1.1 ビームラインのセットアップ 左図は生成標的位置から π ビームを打ち出しているイベントディスプレイ 右図は左図における赤枠の領域を拡大したもの	64
6.2	Geant4 で計算した BFT-D 材質を変えた時の運動量分解能シミュレーション 凡例 1 列目が BFT-D1, 2 列目が BFT-D2 の材質を表す. 3 列目は各組み合わせにおける運 動量分解能である.	65

8.1	XX' 層のファイバーセグメントの並び	67
8.2	XX' 層 チャンネルアサイン 1~4	68
8.3	XX' 層 チャンネルアサイン 5~8	68
8.4	UU' 層の MPPC 位置のアサイン	69
8.5	UU' 層 チャンネルアサイン	69
8.6	VV' 層の MPPC 位置のアサイン	70
8.7	VV' 層 チャンネルアサイン	70
8.8	用いた MPPC のブレイクダウン電圧	71
1.1	J-PARC E70 実験の概略図	73
1.2	ESC08 模型をもとにした $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応の励起スペクトル. 黒線は理論計算で色付きの線は実験での分解能を考慮したスペクトルである.	74
1.3	J-PARC E70 実験のセットアップ 図は [17] より	74
1.4	AFT の写真	76
2.1	AFT の概念図	78
2.2	検出器全体としての構造 紙面手前から奥にビームが通過する	79
2.3	ファイバーを固定するための部品	79
2.4	AFT 全体の写真 各ファイバーの両端は読出しのため黒アクリル部に固定されている.	80
2.5	AFT の標的部分 写真上部から下部に向かってビームが通過する.	80
2.6	シンチレーション光の読出しに用いられる MPPC	81
2.7	MPPC を配置した基板	81
3.1	ファイバーの通し方	83
3.2	すべてのファイバーを張り終えた AFT	84
3.3	エポキシ樹脂を接着している様子 接着剤が垂れないように立てて作業を行った	85
3.4	読出し面の研磨前と研磨後の比較 上側が研磨後 下側が研磨前である.	86
3.5	すべての読出し面の研磨が終了した AFT	86
3.6	完成した AFT にブラックライトを照射している写真	87
4.1	K1.8 ビームラインに設置された S-2S スペクトロメータと検出器群	88
4.2	1 層目 x 層上側の読出しのセグメント 8 番の ADC 分布 (HighGain) ペDESTAL と MIP が形成するピークの位置をガウス関数によるフィッティングで決定し差分 から $\text{Gain}_\pi = 1442.1 \text{ ch}$ と求められる.	90
4.3	1 層目 x 層上側の読出しのセグメント 8 番の ADC 分布 (LowGain) HighGain と同様の手順で $\text{Gain}_\pi = 95.0 \text{ ch}$ と決定された.	91
4.4	1 層目 x 層セグメント 8 番における DeltaE HighGain ペDESTAL のピークが 0 に立ち, π の MIP ピークが 1 に立つようにスケールされたことが分 かる. HighGain における ADC の取得上限が DeltaE~2 であるため, 2 以上のデータは存在 しない	91
4.5	1 層目 x 層セグメント 8 番における DeltaE LowGain HighGain と同様であるが, LowGain ではゲインが低いため DeltaE が高いところまで取得 できる.	92
4.6	1 層目 x 層上側の読出しの TDC 分布 横軸はセグメント数で縦軸には TDC をプロットして いる. 赤の実線で示した領域の y 軸射影が図 4.7 である.	92

4.7	1 層目 x 層セグメント 8 番上側の読出しの TDC 分布 TDC のピークが 3 つ確認されどのピークが真の Hit での TDC タイミングがわからない. . .	93
4.8	AFT の Event Display 上のヒストグラムは xx' 層, 下のヒストグラムは yy' 層を表し, 色で DeltaE の大きさを表示 している.	94
4.9	各層で ADC が最も大きいセグメントの TDC を選ぶ. 濃いオレンジが真のヒットで薄いオレンジがクロストークとなっている.	95
4.10	1 層目 x 層において最も ADC の大きかった Hit における TDC ADC が大きかった時の TDC のみがフィルされているためクロストーク成分が除去され一つ のピークのみが確認された.	95
4.11	図 4.10 のセグメント 8 番を y 軸に射影したヒストグラム 真の Hit タイミングをフィッティングから求めることができ, Peak=720.1 ch のように決まる. . .	96
4.12	1 層目 x 層における Time 分布 真の Hit タイミングは Time=0 付近にピークが立っておりクロストーク成分はそこから遅れ てピークを形成している.	96
4.13	図 4.12 のセグメント 8 番を y 軸に射影した Time 分布	97
4.14	AFT 位置でのビームプロファイル 赤線で囲まれた領域が AFT の有感領域である.	97
4.15	最上流 (1 層目) の xx'yy' 層における MeanTime 分布 赤実線の領域が MeanTimeCut の範 囲となる.	98
4.16	最上流 (1 層目) の xx'yy' におけるヒットパターン 青色:TimeCut のみでのヒットパターン 赤色:TimeCut と DeltaECut を施したヒットパターン	99
4.17	最上流 (1 層目) の x 層における DeltaE HighGain と MeanTime の相関 MeanTimeCut に 加え, DeltaE > 0.2 を選ぶことで赤線の領域に内にあるイベントが Hit とみなされる.	100
4.18	最上流 (1 層目) の xx' 層, yy' 層それぞれの Multiplicity 依積みの構造上 2 にピークが立って いる. 全体のイベント数と Multiplicity=0 の比率から計算した Efficiency も計算し, xx' 層 では 99.12%, yy' 層では 99.96% となった.	100
4.19	HV original での Efficiency のビームレート依存性 左図は xx' のペアプレーンごとの Efficiency, 右図は xx' のペアプレーンごとの Efficiency. 点の色はレートに対応している. 黒点:38 k/spill, 赤点:300 k/spill, 緑点:1 M/spill, 青点:1.5 M/spill	102
4.20	8 層目 y' の ADC HighGain とヒットパターン 上図が ADC HighGain と segment の相関, 下図がヒットパターン (赤線:38k/spill, 青線:1.5M/spill)	102
4.21	layer32(8 層目 y') のセグメント 8 番の ADC HighGain ペデスタルが非常に細くなっている. これは高レートによって EASIROC に大きな電流が流れ込んだときに発生する現象である. 正常に動作している際は図 4.2 のようになる.	103
4.22	HV original -0.3 V での Efficiency のビームレート依存性 黒:38 k/spill, 緑:1 M/spill, 青:1.5 M/spill	103
4.23	ADC HighGain と ADC LowGain の相関 すべてのチャンネルでの ADC 分布を足して表示 している. マゼンタの領域付近では ADC HighGain がサチュレーションしている. サチュ レーションしているかどうかのスレッシュホールドには ADC=3200 ch(赤線) を選んだ.	104
4.24	ClDeltaE の算出方法	105
4.25	TimeCut のみを行ったときの NCluster xx', yy' でそれぞれ 1 クラスターを形成すると期待 されるため, NCluster=18 が最多となつてほしい	106

4.26	TimeCut のみを行ったときの Cluster Size クロストークが形成する NCluster=1 が非常に多くなっている.	106
4.27	TimeCut のみを行ったときの 1 クラスターが落とすエネルギー (Cluster DeltaE) $\Delta E < 0.2$ の領域にクロストーク成分が多く存在し, 正常にクラスタリングできていない.	106
4.28	TimeCut に加え ClDeltaECut を行った NCluster AFT の層数 36 の半分である 18 が最多となっており, クロストークイベントをカットすることができた.	107
4.29	TimeCut に加え ClDeltaECut 行った Cluster Size 依積みの構造から 2 にピークが立っておりもっともらしい	107
4.30	TimeCut に加え ClDeltaECut を行った Cluster DeltaE 赤線より小さい領域の ClDeltaE を持つクラスターはカットされている.	107
4.31	形成された Cluster DeltaE を全層ですべて足した Cluster DeltaE Sum の分布 独自単位 DeltaE を用いているが, AFT 内でのエネルギー損失に対応する量である.	108
4.32	J-PARC E70 実験のセットアップ	109
4.33	S-2S で再構成されたトラックの χ^2 分布 $\chi^2 \leq 5$ のイベントを選ぶ	110
4.34	$E_{spec.}^{Loss}$ と E_{AFT}^{Loss} の相関 緑線は x 軸の各ビンを y 軸に射影した際の中心値とエラーを示している. マゼンタの線は, 緑線の分布に対しエネルギーキャリブレーション関数をフィッティングしたもの	111
4.35	$E_{spec.}^{Loss}$ と E_{AFT}^{Loss} の相関の射影	111
4.36	エネルギーの単位に変換した E_{AFT}^{Loss} と $E_{spec.}^{Loss}$ の相関 赤線は $E_{spec.}^{Loss} = E_{AFT}^{Loss}$ となる線を表している.	112
4.37	Energy Loss Correction 前後での比較 補正前 $\sigma = 2.13$ [MeV], 補正後 $\sigma = 1.36$ [MeV] である.	113
4.38	Beamthrough での DeltaE	114
4.39	Missing Mass 分布の計算方法 Missing Mass 分解能を調べるため入射粒子と散乱粒子の運動量に対し運動量分解能の分だけガウス分布で広がりを持たせる. さらに AFT のエネルギーストラグリングの効果を取り入れることで Missing Mass 分解能の広がり进行评估する.	116
4.40	Bethe-Bloch の式をもとに計算したポリスチレンでのエネルギー損失 $1.4 \text{ GeV}/c$ と $1.8 \text{ GeV}/c$ の K でのエネルギー損失をそれぞれ赤点と青点でプロットしている.	117
4.41	Missing Mass 分布 各条件ごとにガウス分布でフィットし Missing Mass 分解能を算出している. Case1 以外の分布は Case1 のイベント数で規格化している. また散乱 K^+ の散乱角度 $\theta_{K^+} < 7^\circ$ を満たすイベントを選んでいる.	118

表目次

4.1	XXX 配置で取得したデータ	34
4.2	XUV 配置で取得したデータ	34
5.1	各 V_{op} , V_{th} での時間分解能の値	48
5.2	V_{op} ごとに計算した各層の検出効率	62
5.3	各層の残差分布の標準偏差	63
6.1	材質ごとに算出した運動量分解能	65
1.1	K1.8 Spectrometer の検出器群	75
1.2	S-2S Spectrometer の検出器群	76
2.1	スペクトロメータの運動量分解能から見積もられる $\Delta E_{strag.}$	77
4.1	解析に用いたランと条件 (単位 運動量:GeV/c, レート:/spill, HV:V)	89
4.2	各層での MPPC の印可電圧 (HV original)	89
4.3	1.4 GeV/c π, K における σ_{AFT} , $\sigma E/E$, エネルギー損失	115
4.4	Missing Mass 分布の算出に用いたパラメーターの組み合わせと Missing Mass 分解能 (Res.) ΔE_{beam} , $\Delta E_{scat.}$ はそれぞれ σ_{beam} , $\sigma_{scat.}$ を FWHM に変換したものである. 表中のすべての値は FWHM で表記されており, ΔE_{beam} , $\Delta E_{scat.}$, Res., の単位は MeV である.	118

第 1 章

序論

1.1 物理的背景

1.1.1 バリオン間相互作用

宇宙の物質世界を構成する核をなすのは *up* クォークと *down* クォークから構成される核子 (中性子および陽子) である。核子間に働く核力を解明するために多くの核子散乱実験がなされ、核力は核子同士が重なるくらいの距離である ~ 1 fm より近距離では強い斥力を持ち、それより距離が離れていくと引力となる性質が明らかとなっている。遠距離での引力部分は中間子交換モデル (OBE) でうまく説明することができる一方で近距離における斥力は現象論的な斥力芯を取り入れたり、重いベクトル中間子の交換で記述しようとしているが十分な理解には至っていない。核力が斥力を示すのは核子と核子が重なり合う程度の近距離では、核子の内部構造であるクォークの寄与が働いてくるとからであると予想されている。そのため短距離での核力の起源を本質的に理解するには核力からクォークの自由度を拡張したバリオン間相互作用を調べることが重要である。SU(3) フレーバー対称性が比較的成り立つ *up*, *down*, *strange* まで含んだバリオン間の相互作用を調べることは、核力を含むバリオン間力をクォークから理解する手がかりとなる。

up, *down*, *strange* クォークの 3 つでバリオンを構成すると、

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1 \quad (1.1)$$

というように 10 重項 (スピン 3/2) と 8 重項 (スピン 1/2) に分類される。(図 1.1)

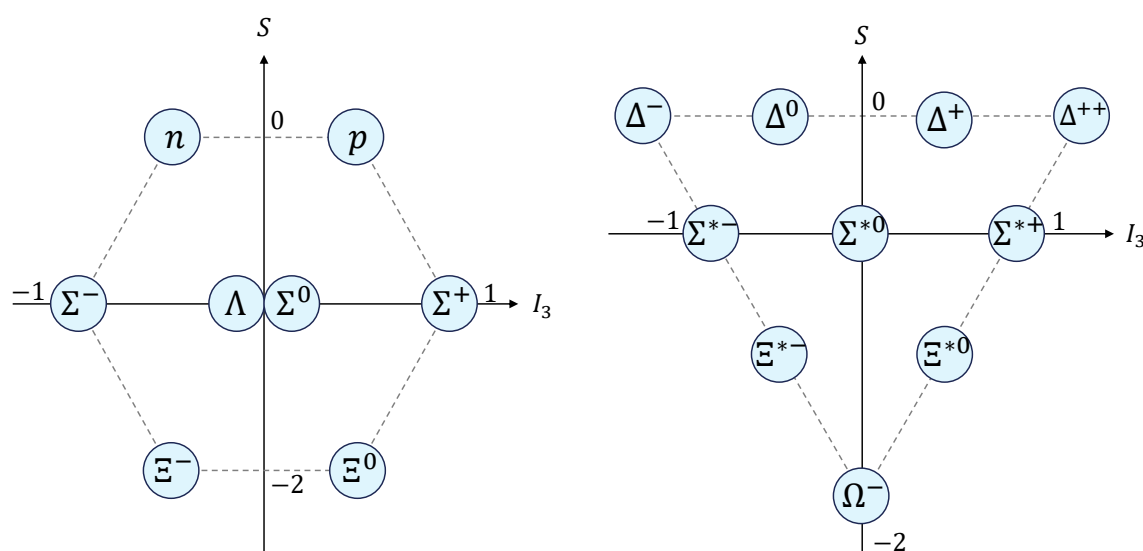


図 1.1: バリオン 8 重項とバリオン 10 重項

I_3 はアイソスピン z 成分, S はストレンジネス量子数

この 8 重項に属するバリオン間相互作用は

$$8 \otimes 8 = 27 \oplus 10^* \oplus 10 \oplus 8_s \oplus 8_a \oplus 1 \quad (1.2)$$

という 6 つの既約表現に分解することができる。核子同士の相互作用は 27 重項と 10^* 重項に含まれるが、残りの多重項はストレンジクォークを含んだハイペロン-核子間力およびハイペロン-ハイペロン間力で初めて現れる。これらの相互作用ポテンシャルは格子 QCD によってフレーバー SU(3) の極限で計算され図 1.2 のようになっている。ストレンジネスクォークが入ったことで新たに現れる $V^{(8s)}$, $V^{(10)}$ では近距離で強い斥力が働き、 $V^{(1)}$ では斥力芯を持たない強い引力となるなど、核力では見られなかった新たな性質が出現する。

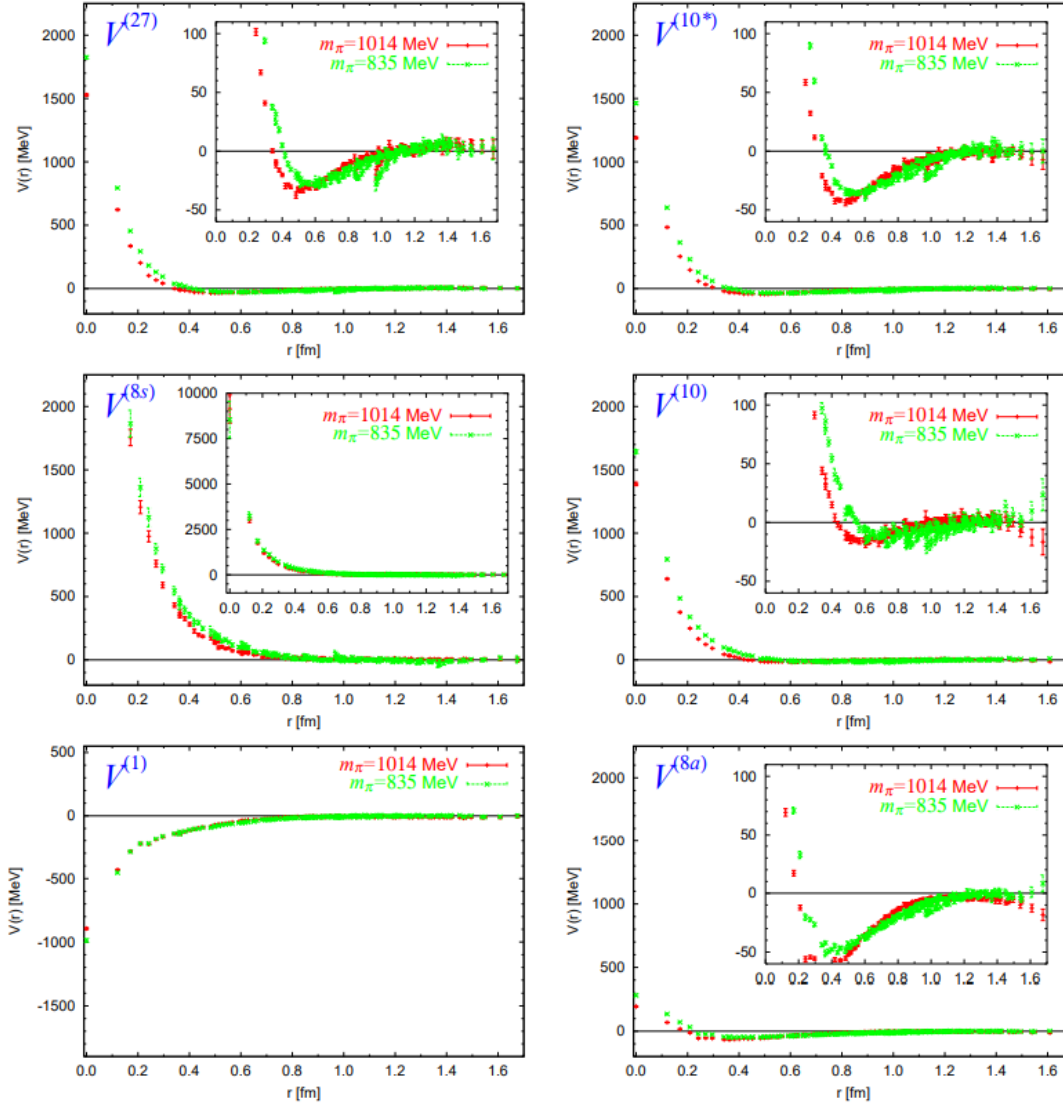


図 1.2: 格子 QCD 計算によるバリオン間相互作用ポテンシャル

緑と赤はそれぞれ π の質量を $1014 \text{ MeV}/c^2$, $835 \text{ MeV}/c^2$ として計算している。

1.1.2 ハイペロン-核子 (YN) 散乱実験

核力を核子-核子散乱実験で明らかにしたのと同様に、バリオン間相互作用を直接明らかにするにはハイペロンと核子の散乱データが非常に有用である。しかしハイペロンの寿命は 10^{-10} 秒程度であるため、散乱実験を行おうとしても散乱前に崩壊してしまうため困難とされてきた。そのためバリオン間相互作用の解明にはハイペロンを原子核に束縛させたハイパー核の構造を調べることで相互作用情報を引き出すという手法が取られてきた。これまでには KEK やブルックヘブン国立研究所 (BNL), J-PARC といった実験施設で π , K^- を用いたハイパー核研究が盛んに行われてきた。

しかし近年では、ハイパー核を含めた原子核における多体効果が原子核の記述の上で大きな影響を与えるこ

とが分かってきている．この多体効果と 2 体相互作用を切り分けるには二体力を散乱実験で調べ、散乱データから導かれた二体力を用いて原子核を理論的に記述できるようにすることが必須である．

これまでに行われた散乱実験には 1960 年代の水素バブルチェンバー実験やシンチレーションファイバーのアクティブ標的を用いた KEK-PS E251 実験や E289 実験などがある.[3] [4] [5]

1960 年代のバブルチェンバー実験では K^- ビームを液体水素で満たされたバブルチェンバーに入射し、散乱に関連するすべての粒子の飛跡を画像で記録することで散乱事象を同定する方法がとられていた．しかしバブルチェンバーの応答が遅いためビーム強度を上げると飛跡が重なり合ってしまうという問題や 1 イベント取得したあとのデッドタイムが長いという問題があり入射ビームの強度に制限がかかっていた．さらにハイペロンの生成を同定するためのトリガーがなかったためランダムトリガーでデータの取得を行っており、効率的なデータ収集が実現しなかった．このため同定された散乱事象は Σp や Λp のチャンネルでそれぞれ数 100 イベントにとどまった．またできる限り収量を増やすため生成断面積の大きい Stopped K^- を用いたことで運動量領域が 200 MeV/c 以下のデータが集中的に収集された．

KEK-PS で行われた E251 実験や E289 実験は $(\pi^\pm, K^\pm)$ 反応を用いた $\Sigma^\pm p$ 散乱実験である．この実験ではシンチレーションファイバーを Σ 生成と Σp 散乱の標的とするアクティブ標的として用い飛跡を画像として取得した．これにより Σ 生成事象をトリガーレベルで同定できるようになった．しかしシンチレーションファイバーの読出しにかかるデッドタイムや炭素の quasi-free 反応で生成された Σ の運動量が計算できないなどいくつかの理由で統計数は 30 イベント程度となり問題の解決には至らなかった．

KEK-PS の実験以降に YN 散乱実験での大きなアップデートはなく、高統計の YN 散乱データが強く望まれていた．そこで 2018 年から 2019 年にかけて新たに開発された検出器群と液体水素標的を用いることで従来の YN 散乱実験の困難を克服し、高統計での YN 散乱実験を可能する J-PARC E40 実験が行われた．J-PARC E40 実験のセットアップを図 1.3 に示す．

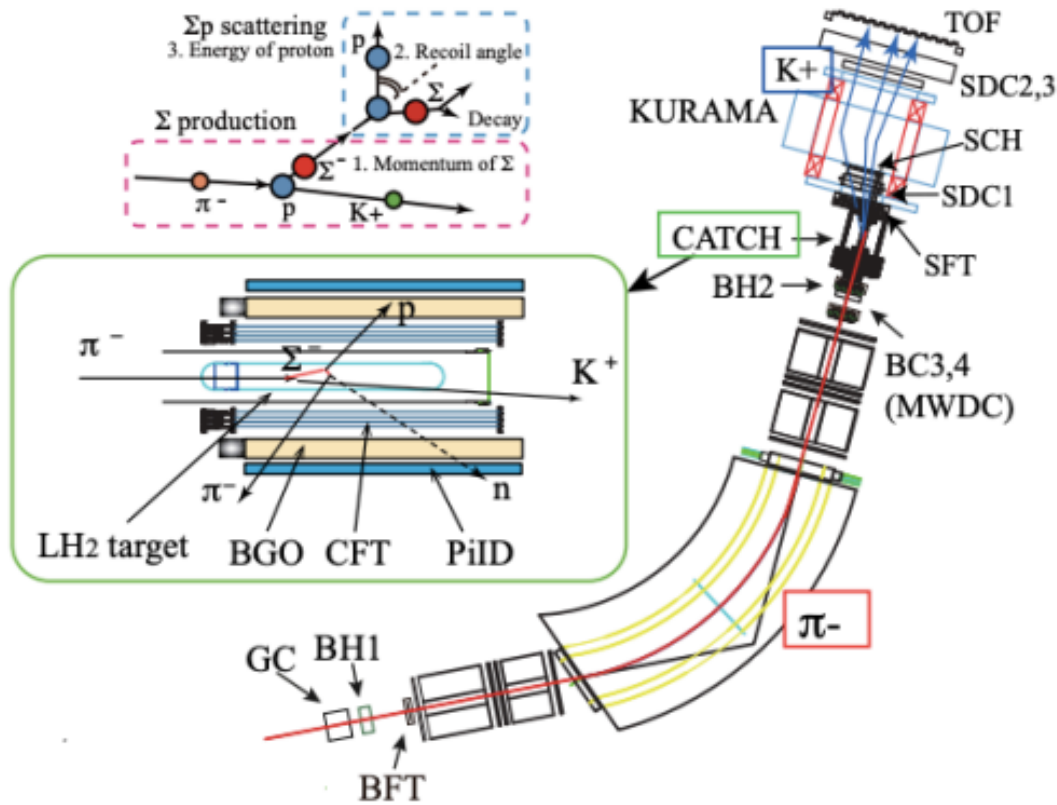


図 1.3: J-PARC E40 実験のセットアップと概念図 [1]

この実験では $\pi^+(1.4 \text{ GeV}/c)$ または、 $\pi^-(1.32 \text{ GeV}/c)$ を液体水素標的に照射し $\Sigma^\pm$ の生成を行う．そして生成された $\Sigma^\pm$ が液体水素標的内の陽子と散乱する事象を捉えることで Σp 散乱実験を行う． Σ 生成事象や散

乱事象の同定には KURAMA スペクトロメーターと標的を囲むように設置された CATCH 検出器群から検出された粒子の運動量と飛跡を用いた運動学計算によって行われた。この方法は従来の YN 散乱実験で用いられていたイメージング法を行わないことでビーム強度を大幅に上げることができ、20M/spill(1spill~2 s) の高強度ビームを用いた YN 散乱実験に成功した。これにより Σ^+p チャンネルでは 440~800 MeV/c の運動量領域で約 2400 イベント、 Σ^-p チャンネルでは運動量領域 470~850 MeV/c で約 4500 イベントの散乱事象を同定し、それぞれの微分断面積の測定に成功した。

J-PARC E40 実験に続き、我々の研究グループでは J-PARC ハドロンホール拡張後の K1.1 ビームラインにおいて Λp 散乱実験 (J-PARC E86) を行うことを計画している。第 1 部では J-PARC E86 実験のために開発したビーム粒子の飛跡検出器である Beamline Fiber Tracker Downstream(BFT-D) の開発について説明する。

1.1.3 Ⅲ ハイパー核研究

Ⅲ ハイパー核に関する研究は原子核乾板を用いた実験と (K^-, K^+) 反応を用いた分光実験の主に 2 種類の実験から行われてきた。

原子核乾板 (エマルジョン) 実験では、ダイヤモンド標的に K^- を照射することで Ξ^- 粒子を生成し標的の下流にある原子核乾板中で Ξ^- を静止させる。これにより Ⅲ ハイパー核が生成され、その後は崩壊で生じたフラグメントの 2 つの Λ ハイパー核が弱崩壊する。この過程は荷電粒子であれば原子核乾板内に飛跡を残すため、飛跡の長さや角度などの情報を用いて生成された Ⅲ ハイパー核の質量を求めることで相互作用についての情報を引き出すことができる。

原子核乾板実験である KEK-PS E373 では、 $\Xi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}_{\Lambda}^{10}\text{Be} + {}_{\Lambda}^5\text{He}$ という反応である KISO イベント [6] が発見された。この事象では、 $\Xi^- - {}^{14}\text{N}$ の Ⅲ ハイパー核 (${}_{\Xi}^{15}\text{C}$) が発見され、 Ξ^- 粒子の束縛エネルギーは ${}_{\Lambda}^{10}\text{Be}$ が基底状態か励起状態かの不定性により $B_{\Xi} = 1.03 \pm 0.18$ MeV または 3.87 ± 0.21 MeV であると測定された。さらに、J-PARC E07 実験からは IBUKI イベント [7] $\Xi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}_{\Lambda}^{10}\text{Be} + {}_{\Lambda}^5\text{He}$ において Ξ の束縛エネルギーは $B_{\Xi} = 1.27 \pm 0.21$ MeV とはじめて一意に測定された。

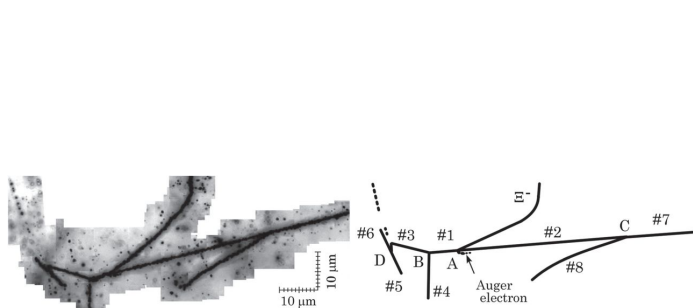


図 1.4: KISO イベント

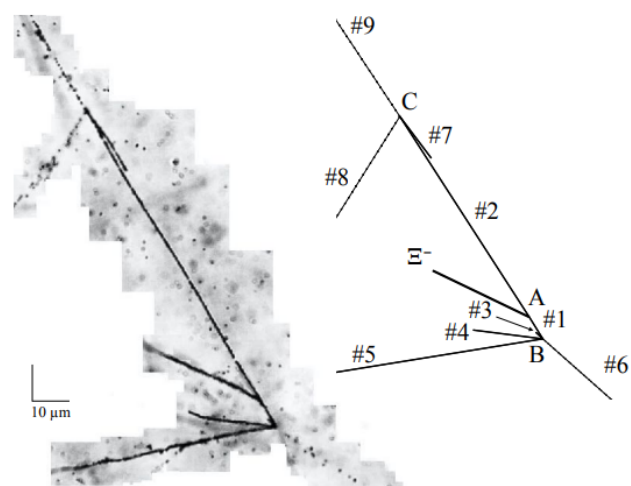


図 1.5: IBUKI イベント

このようにエマルジョン実験からは Ⅲ ハイパー核のイベントを観測することができ、ほかにも数イベントで ${}_{\Xi}^{15}\text{C}$ が発見されている。図 1.6 にはエマルジョン実験で得られた ${}_{\Xi}^{15}\text{C}$ の束縛エネルギーを示す。これから Ξ が p 軌道の状態が $B_{\Xi} \sim 1.2$ MeV と分かり、さらに深い s 軌道状態の存在が示唆されている。次のステップとしてこれらの状態を分光実験から明らかにすることが待ち望まれている。

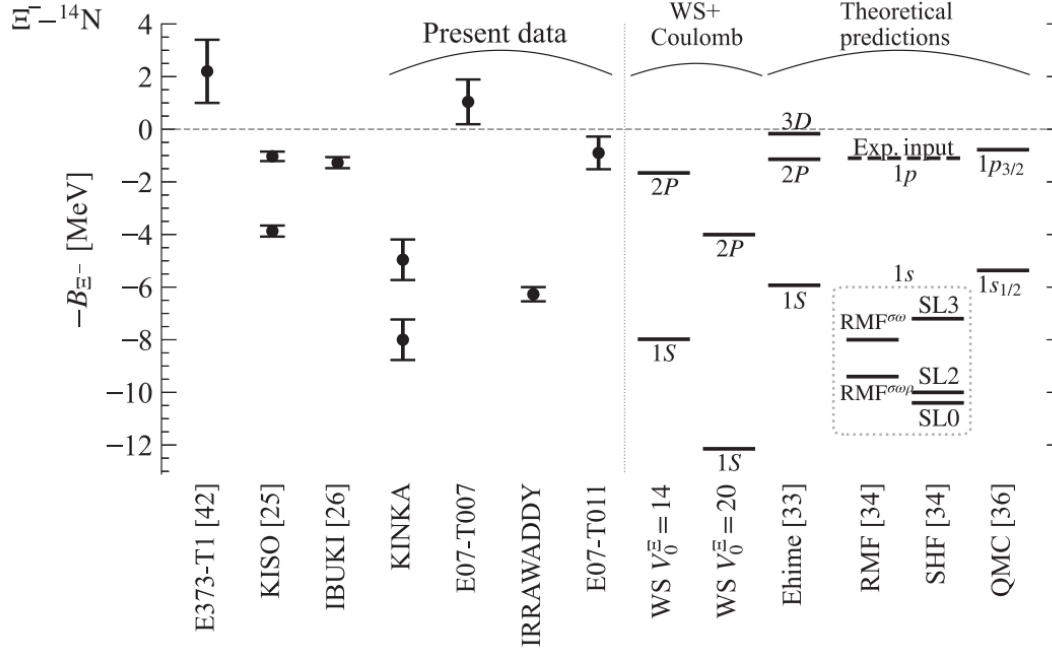


図 1.6: エマルジョン実験から得られた $\Xi^- - {}^{14}\text{N}$ における Ξ^- の束縛エネルギー (左)[8]
いくつかの理論模型における理論計算から求まった束縛エネルギー (右)

一方 (K^-, K^+) 反応を用いた分光実験については, KEK E224 実験 [9] や BNL E885 実験 [10] がある. これらの実験では ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応を用いて $\Xi^- - {}^{11}\text{B}$ の束縛系 (${}_{\Xi}^{12}\text{Be}$) の探索が行われ, 図 1.7 の Missing Mass スペクトルが得られた.

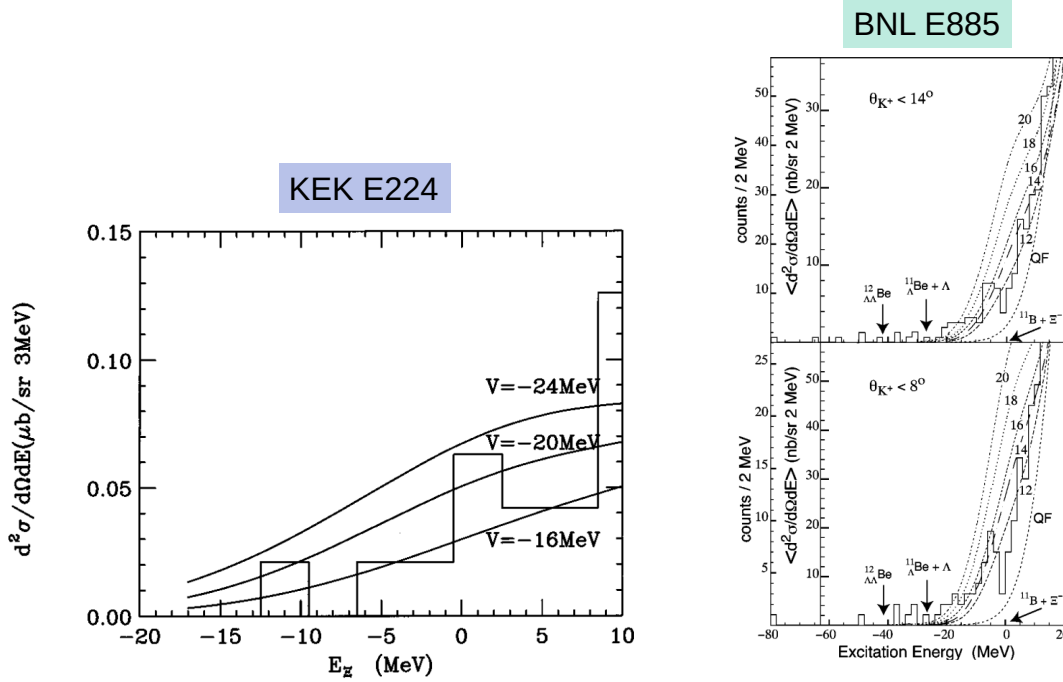


図 1.7: KEK E224(左)[9], BNL E885(右)[10] で得られた Missing Mass スペクトル

それぞれスペクトルにおけるエネルギー分解能は 22 MeV, 14 MeV(FWHM) であり, 束縛領域における統計量は 3 イベント, 42~67 イベントであった. こういった統計量の少なさと分解能の悪さから, 過去の分光実験では Ξ ハイパー核における束縛状態のピーク構造を観測するには至らなかった. しかしながら ΞN 相互作用における Ξ の 1 体ポテンシャルの深さ V_0^Ξ は,

- KEK-E224 : $V_0^\Xi < 20 \text{ MeV}$

- BNL-E885 : $V_0^\Xi \sim 14$ MeV

と見積もられた。

このように Ξ ハイパー核における研究はエマルジョン実験と分光実験の主に 2 つの方法で行われてきたが、 Ξ ハイパー核の束縛状態の束縛エネルギーや自然幅の決定にはいまだ至っていない。これらの情報は Ξ ハイパー核における引力の強さや $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ 相互作用の転換幅の決定に非常に重要であるため、Missing Mass スペクトルを高分解能で取得することで、不定性の大きい理論模型に対して強い制限をかけることができる。

現在準備中の J-PARC E70 実験では $^{12}\text{C}(K^-, K^+)_{\Xi}^{12}\text{Be}$ 反応を用いて Ξ ハイパー核を生成し Missing Mass スペクトルの測定を行い、ハイパー核のピーク構造を明らかにすることを目指している。この実験で予想される励起スペクトルを異なる 4 つの理論模型 NHC-D, Ehime, ESC04d, ESC08a を用いて計算すると図 1.8 となる。

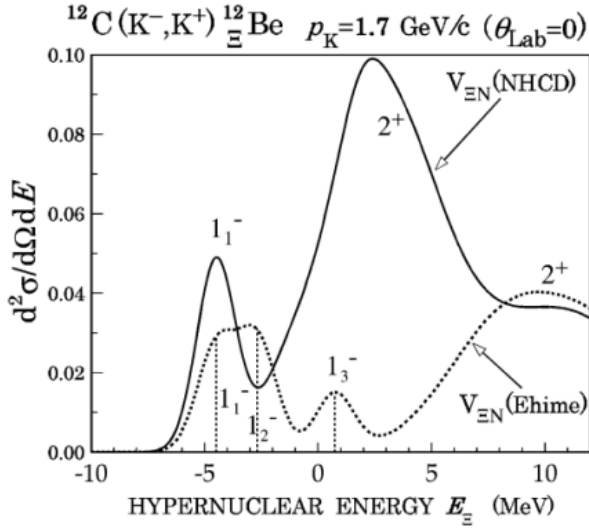


Figure 6: DWIA spectra with NHC-D and Ehime.

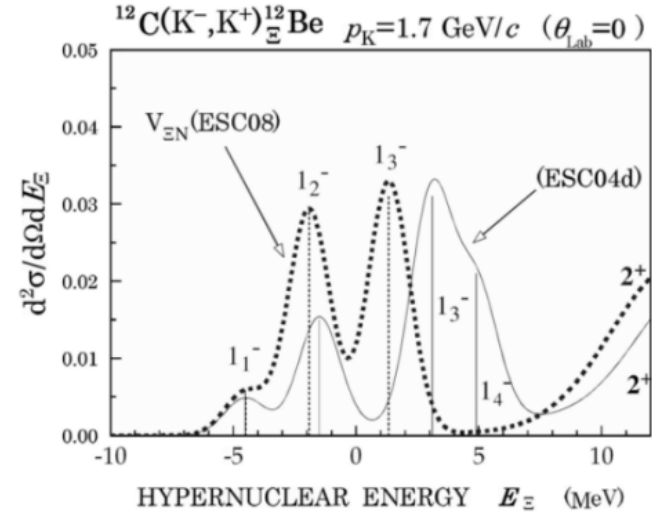


Figure 7: DWIA spectra with ESC04d and ESC08a.

図 1.8: 異なる 4 つの理論模型で予想される $_{\Xi}^{12}\text{Be}$ スペクトル [11]

最もピーク構造が複雑となっている ESC08a でのスペクトルを仮定するとピークの分離には Missing Mass 分解能が 2 MeV という高分解能での測定が必要となる。高分解能を実現するために本研究ではアクティブ標的 Active Fiber Target を用いた標的内でエネルギー損失補正や、新たなスペクトロメーターの導入を行っている。

1.2 シンチレーションファイバー検出器

本研究ではシンチレーションファイバーを用いたビーム粒子の飛跡検出器とアクティブ標的の開発を行った。本章ではこれらの検出器に共通する検出器の動作原理や読出しに用いる機器について説明する。

1.2.1 シンチレーションファイバー

シンチレーションファイバーはプラスチック製の光ファイバーの一種でありコアが蛍光剤入りのポリスチレン樹脂、クラッドがメタクリル系樹脂という多重構造となっている。そしてシンチレーションファイバーは放射線が通過すると発光しその光が端面まで効率的に伝搬するという性質がある。この性質を利用して隙間なくシンチレーションファイバーを並べた層を 1 層並べることで単純な位置検出器として用いたり、複数並べることで飛跡検出器として用いるといった利用法がある。このようなシンチレーションファイバー検出器としては J-PARC K1.8 Beamline でのビーム粒子の位置検出に用いる Beamline Fiber Tracker(BFT) や J-PARC

E40 実験における散乱粒子飛跡検出器である Cylindrical Fiber Tracker(CFT) がある。

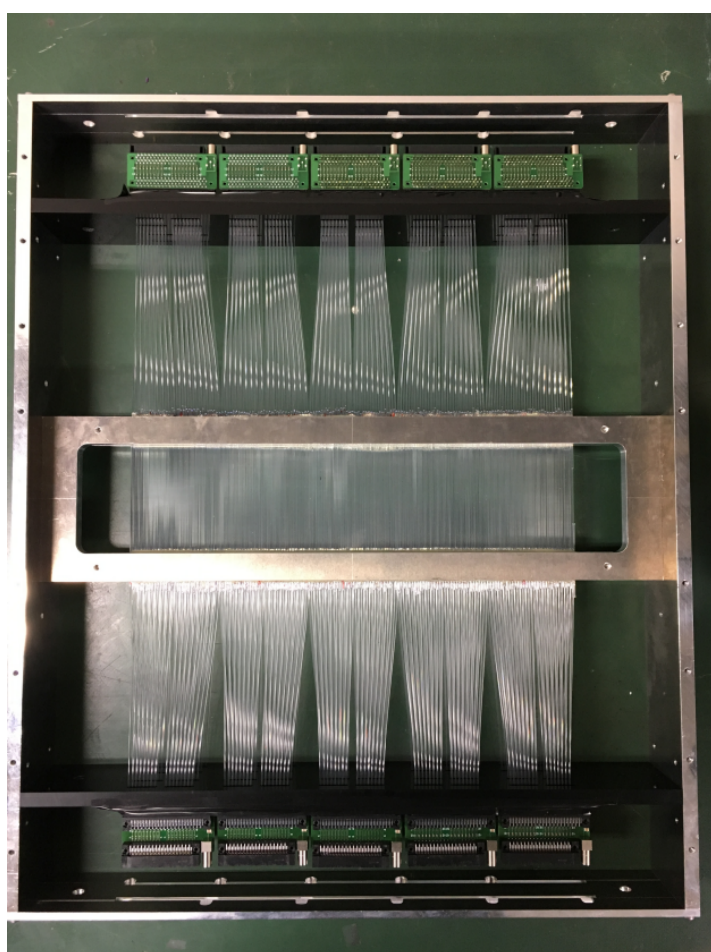


図 1.9: Beamline Fiber Tracker



図 1.10: Cylindrical Fiber Tracker[12]

本研究で開発した BFT-D は、ファイバーの層を 6 層並べることでビーム粒子の飛跡を検出する検出器である。

一方でシンチレーションファイバー自体を実験標的として用いる方法があり、アクティブ標的と呼ばれている。アクティブ標的では、シンチレーションファイバー内に存在する ^{12}C 原子核を標的とする。このとき標的の内を通過するビーム粒子や散乱粒子は、シンチレーションファイバー内でシンチレーション光を発生させるため、反応点や飛跡の情報を得ることができる。またシンチレーション光はシンチレーションファイバーで落としたエネルギーと相関を持っているため、標的内でのエネルギー損失を求めることも可能である。これにより標的内でのエネルギー損失のふらつき (エネルギーストラグリング) を計測して補正することで、原子核反応をより正確に再構成することができる。このようなアクティブ標的として本研究で開発した検出器が AFT である。

1.2.2 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)

MPPC は浜松ホトニクス社で製品化された SiPM(Silicon Photonmultiplier) と呼ばれる半導体素子である。具体的には APD(Avalanche Photon Diode) というフォトダイオードをマルチピクセル化して 2 次元的に並べたものである。そして各々の APD をガイガーモードで動作させることで光子を 1 個ずつ測定できるというものである。MPPC は 55V 程度の低電圧で動作し、高増倍率 ($\sim 10^6$)、高検出効率、優れた時間分解能を持つという特徴がある。

また原子核分野における読出し素子としては磁場の影響を受けないという利点もある。従来の光子計測には光電子増倍管が用いられてきたが、その動作原理から磁場の影響を受けてしまう。それに対し MPPC は磁場の影響を受けないため、スペクトロメーターといった強力な磁場源の近くでも動作させることが可能である。

加えて, MPPC は 1ch あたり 1mm 程度の受光面しか占有しないためファイバーの読出しに適しており本研究におけるシンチレーションファイバー検出器のような多チャンネル検出器の読出しにはよく用いられる.

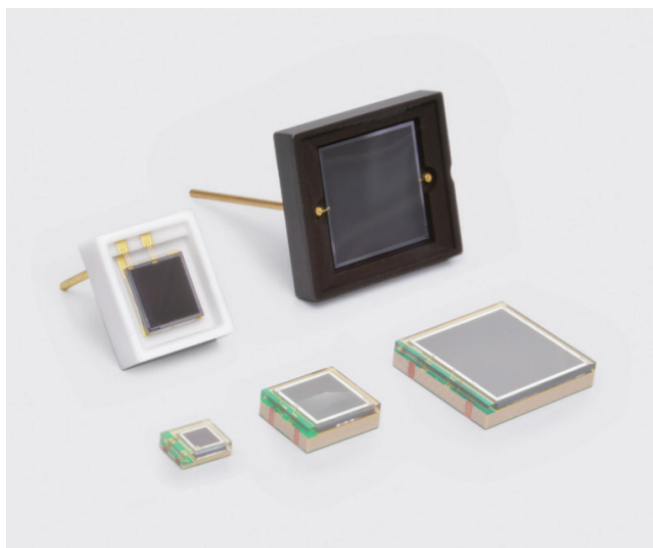


図 1.11: 1ch のみの MPPC[13]

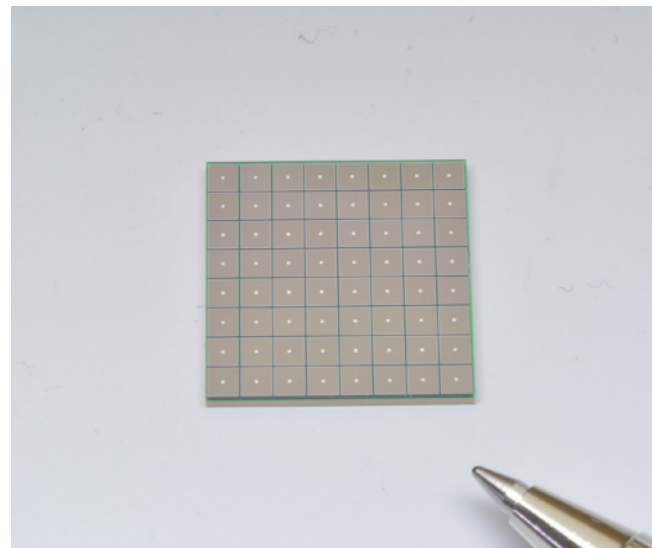


図 1.12: タイリングされた多チャンネル MPPC[13]

1.2.3 MPPC 読出し回路

■ EASIROC chip

EASIROC はフランスの OMEGA/LAL/IN2P3 グループが開発した ASIC(Extended Analogue Silicon PM Integrated Read Out Chip) で EASIROC チップは 1 枚で 32ch の MPPC の読出しを行うことができる. EASIROC のブロックダイアグラムを図 1.13 に示す.

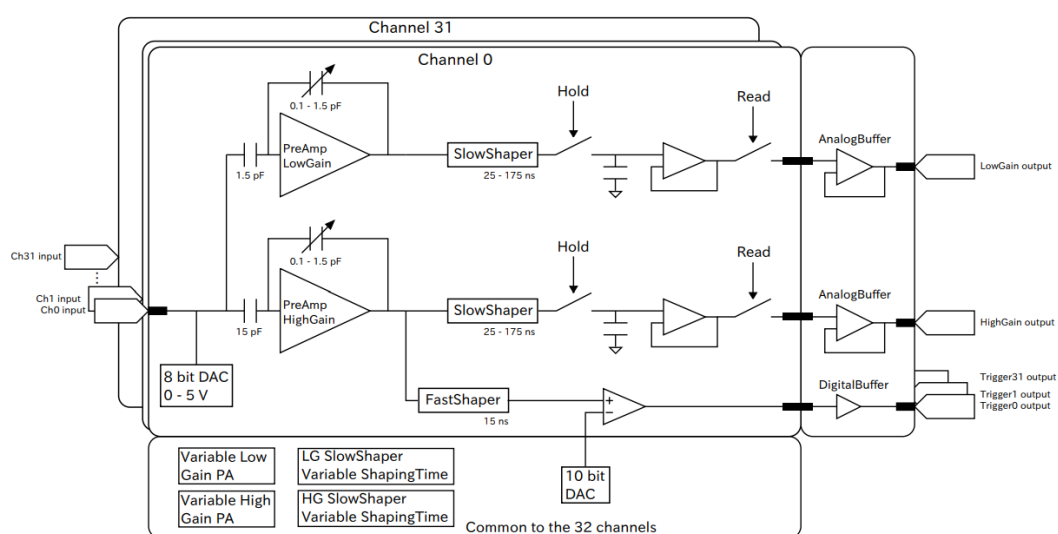


図 1.13: EASIROC のブロックダイアグラム [14]

ダイアグラムの入力に近い順に各部分について説明する. MPPC 入力には Input DAC と呼ばれる 8 bit, 5 V の DAC がつながっており, InputDAC の電圧を変化させることで MPPC のバイアス電源を個別に調整することができるようになっている. これによりゲインが微妙に異なる MPPC に対し出力のゲインを一定にするよう調整することが可能である. ただし MPPC に印可されるバイアス電源 V_{MPPC} と Input DAC の関係は $V_{MPPC} = V_{bias} - 0.02 \text{ V} \cdot (\text{Input DAC})$ となる.

そして MPPC からの電圧の入力信号は 1.5 pF と 15 pF のコンデンサによって 2つの Pre Amp(HighGain, LowGain) に 1:10 で分割されて送られる. HighGain と LowGain のというゲインの異なる 2系統の Pre Amp

はそれぞれ増幅率を 10~150, 1~15(どちらも 15 段階) に変えることができる. HighGain に送られた信号は波高測定用の Slow Shaper と時間測定用の Fast Shaper に分割される. ただし Slow Shaper は時定数 25 175 ns であり, 一方で Fast Shaper は時定数 15 ns の波形整形回路である. そして Low Gain に入力された信号はそのまま Slow Shaper に送られる.

HighGain 側 Fast Shaper の後段には Discriminator が配置されており, threshold を超えるとデジタル信号を出力する. この Discriminator の threshold(V_{th}) は 32ch すべてで共通である.

Slow Shaper で整形された信号は外部から入力された Hold 信号のタイミングで電圧をホールドし, その時の電圧を LowGain Output と HighGain Output として出力する. 入力する Hold 信号は EASIROC の Slow Shaper の波高が最大となるタイミングに合わせる必要がある. これが早すぎたり遅すぎたりすると, ピークホールドできずに正確な波高測定ができない.

■ VME-EASIROC Module

VME-EASIROC Module は東北大学で開発された EASIROC チップを 2 枚搭載した 64ch の ADC と TDC の読出しを行う読出し回路である. VME-EASIROC のブロックダイアグラムを図 1.14 に示す.

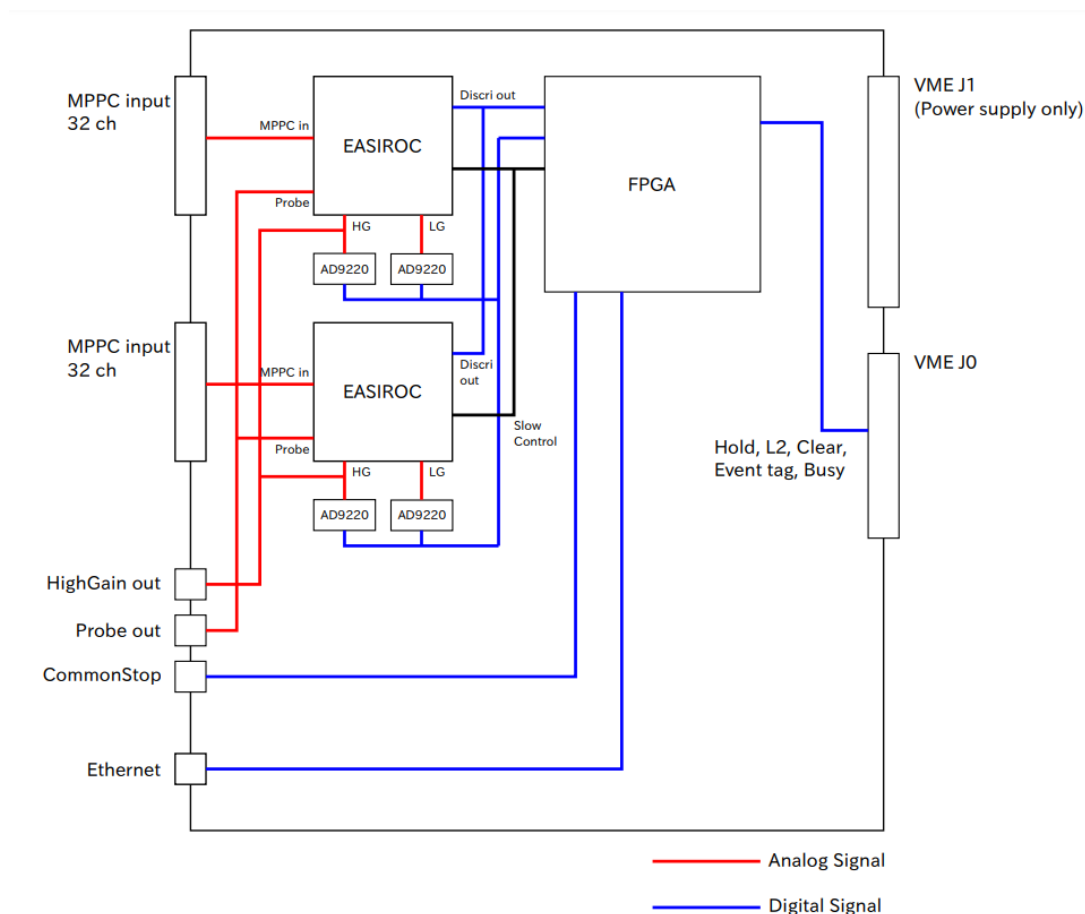


図 1.14: VME-EASIROC のブロックダイアグラム [14]

MPPC の信号は EASIROC チップによって信号の整形増幅と波形弁別が行われ, LowGain Output, HighGain Output, discriminator の信号として出力される. LowGain Output と HighGain Output の波高は VME-EASIROC Module に搭載された ADC に送られ, デジタルデータは FPGA である Artix 7 に送られることで波高検出型の ADC としての動作を行う. さらに EASIROC からのディスクリ出力信号も FPGA に送られ, FPGA に実装されている depth 16bits/ch のマルチヒット TDC で時間情報の取得を行う. このように収集されたデータは SiTCP を用いて PC へ送られる.

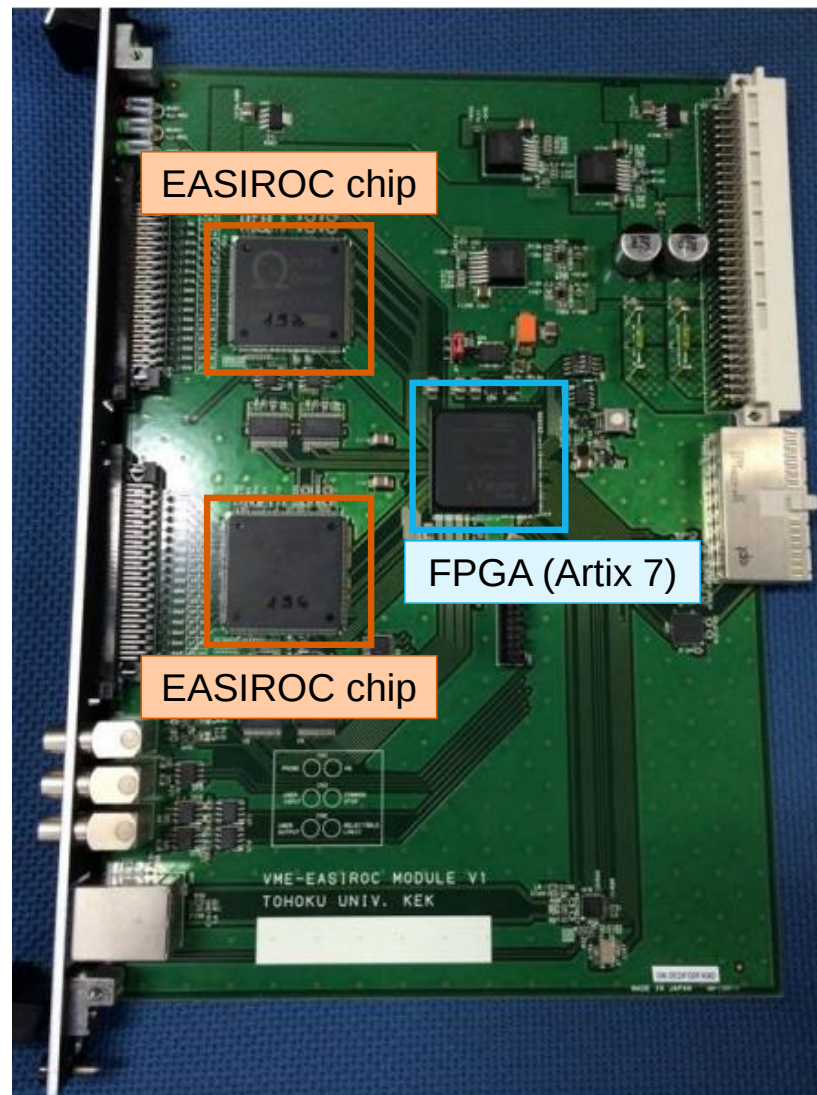


図 1.15: VME-EASIROC の画像

1.3 論文の構成

本論文は 2 部構成になっている。第一部は J-PARC で行われる予定である Λp 散乱実験 (J-PARC E86) に向けて開発したビーム粒子飛跡検出器 Beamline Fiber Tracker について述べる。第二部では J-PARC での Ξ ハイパー核分光実験 (J-PARC E70) で用いられるアクティブ標的 Active Fiber Target について述べる。第一部・第二部いずれも初めに実験の概要を説明し、検出器開発の目的を述べる。その後両検出器の製作方法を述べ、性能評価実験の概要や性能評価の結果を述べる。最後に性能評価を受けてのまとめと今後の展望を述べるという順で進める。

第 I 部

飛跡検出器 Beamline Fiber Tracker Downstream (BFT-D)

第 1 章

Λp 散乱実験 (J-PARC E86)

1.1 実験概要

J-PARC E86 実験では J-PARC において新設される予定である K1.1 ビームラインを用いて、偏極 Λ 粒子を陽子と散乱させる Λp 散乱実験を行うことが計画されている。この実験の目的は偏極 Λ の運動量領域 0.4 GeV/c $\sim$ 0.8 GeV/c において、微分断面積およびスピン観測量として偏極分解能と減偏極の測定を行い YN 相互作用のデータを得ることである。ビームには運動量 1.05 GeV/c、ビームレート 30 M/spill の π^- を用いる。そして π^- を液体水素標的内の陽子と反応させて $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応を起こし、 Λ ビームを生成する。この運動量での π^- ビームを用いる利点は二つある。

- $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応の生成断面積が 1.05 GeV/c において最大になる点
- 生成される Λ ビームが (π^-, K^0) 反応平面に対しほぼ 100% 偏極することで、スピン観測量の測定が可能となる点

本実験の概略図を以下に示す。まずビームである π^- を液体水素標的に照射し、 $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$ 反応によって Λ ビームを生成する。この際 Λ ビームの生成同定には反応で生じる $K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$ の 2 粒子を要求する。 π^- については標的を囲むように設置された CATCH 検出器群で測定を行い、 π^+ については標的下流に設置される SKS Spectrometer で測定する。さらにその後の Λp 散乱については散乱粒子を CATCH 検出器群で測定し運動学計算を行うことで散乱事象の同定を行う。

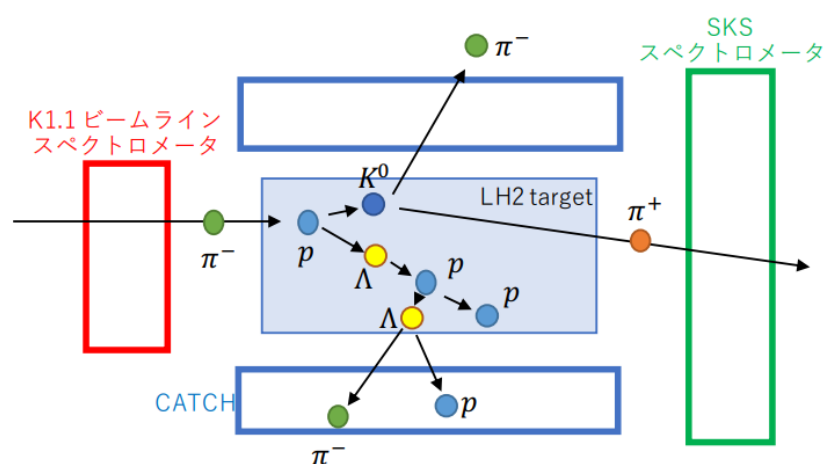


図 1.1: E86 実験の概略図

1.2 実験セットアップ

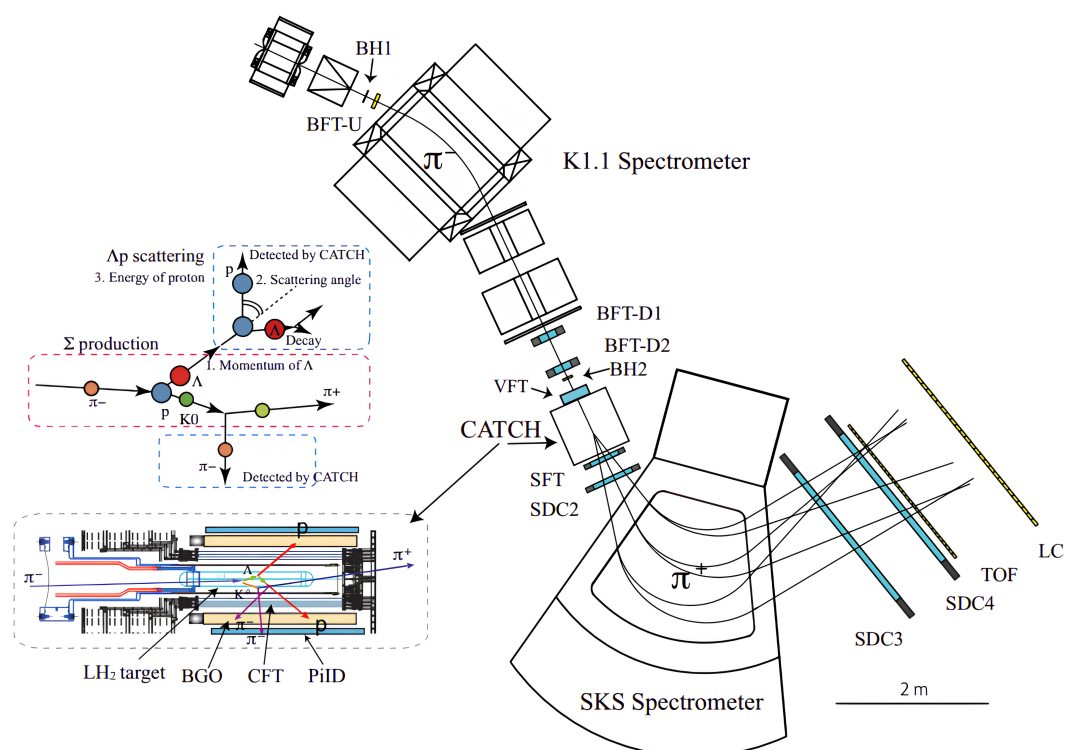


図 1.2: E86 実験のセットアップ

実験セットアップを図 1.2 に示す. セットアップは大きく 3 つの部分に分かれている.

1. K1.1 Spectrometer
2. Target + CATCH 検出器群
3. SKS Spectrometer

ここからは各部分について説明する.

1.2.1 K1.1 Spectrometer

K1.1 ビームラインでは π , K をビームとして用いることができる. これらは二次粒子であるためビーム粒子の運動量にばらつきが存在したり, π ビームに対しわずかに K が混入してしまったりすることが起こる. そのため K1.1 Spectrometer を用いて 1 粒子ごとに運動量を測定し, 他種粒子の混入を防ぐため飛行時間を用いたオフラインでの粒子選別を行う.

- **BH1, BH2 (Beam Hodoscope)**

BH1, BH2 は時間分解能の良い時間計測用のプラスチックシンチレーターを用いた検出器である. K1.1 Spectrometer の最上流と BFT-D2 の下流に設置され, 粒子の飛行時間を用いてオフラインでの粒子選別を行う.

- **BFT-U (Beamline Fiber Tracker Upstream)**

BFT-U は Dipole 磁石の上流でのビーム粒子の水平位置を計測する飛跡検出器である. BFT-U は, 直径 1mm のシンチレーションファイバーを 320 本俵積みにした 2 層構造 (XX') であり, ファイバー両側を MPPC で読み出すことで粒子の通過位置を検出する.

- **BFT-D (Beamline Fiber Tracker Downstream)**

BFT-D は K1.1 Spectrometer の磁石下流でのビーム粒子の飛跡を検出する飛跡検出器である。本研究で開発した検出器であり、直径 0.75mm のシンチレーションファイバー 1 層あたり 256 本俵積みにした層を 6 層 (X,X,U,U',V,V') 持ち、UU' 層、VV' 層はそれぞれ 45 度と-45 度の tilt angle を持つことで 3 次元での飛跡を再構成する。

1.2.2 Target + CATCH 検出器群

本実験では標的として液体水素標的を用い、その周りを囲むように CFT(Cylindrical Fiber Tracker), BGO カロリメーター, PiID カウンターの 3 つの検出器からなる CATCH(Cylindrical Active Tracker and Calorimeter for Hyperon proton scattering) 検出器群が配置される。CATCH 検出器群では Λp 散乱事象で発生した散乱粒子のエネルギーや運動学計算のための散乱角度の測定、粒子識別といった役割がある。CATCH 検出器群の概略図を図 1.3 に示す。

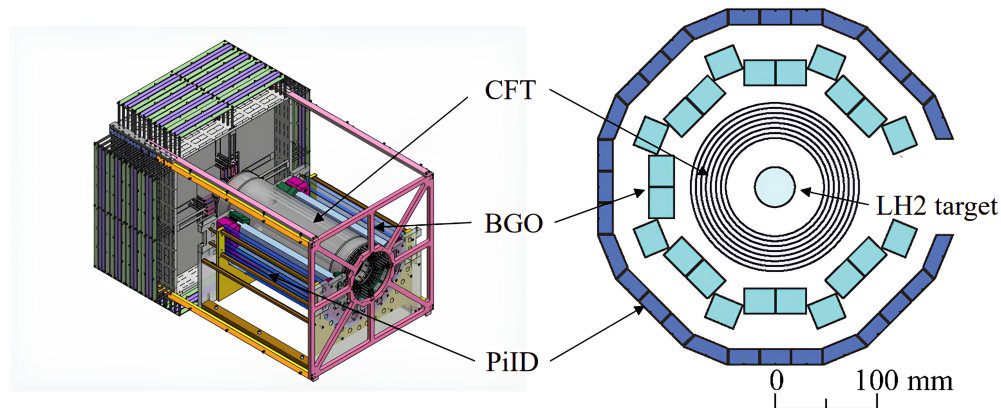


図 1.3: 標的と CATCH 検出器群の概略図

- **CFT(Cylindrical Fiber Tracker)**

Λ 生成の同定や散乱事象の運動学計算のために必要となる、 π^- や陽子の飛跡とエネルギー損失を測定する検出器である。CFT は計 8 層からなる円筒型のシンチレーションファイバー検出器であり、直径 0.75 mm のシンチレーションファイバーが 4932 本から構成される。8 層の内 4 層はビーム軸と並行にファイバーが張られた Φ 層、残り 4 層はビーム軸に沿ってらせん状にファイバーが張られた U,V 層となっており、各層は俵積みの構造になっている。シンチレーション光はファイバー端から MPPC を用いて読み出され、光量の情報から散乱粒子のエネルギー損失を計算する。

- **BGO カロリメーター**

BGO は、組成 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ からなるゲルマニウム酸ビスマスと呼ばれる結晶を用いたシンチレーターである。原子番号が大きく密度の高い結晶のためエネルギー損失が大きく粒子のエネルギー測定に適している。この BGO を CFT の外側に囲むように置くことで反跳陽子や π^- の運動エネルギー測定を行う。この時、陽子は BGO 内で全エネルギーを落として止まるが、 π^- は全エネルギーを落とさずに通過してしまうものもあるため、 π^- の運動エネルギーを測定することはできない。BGO からのシンチレーション光は光電子増倍管を用いて読み出されるが、BGO は信号の減衰時間が 300 ns 程度と長いため、信号のパイルアップを分離するため Flash ADC(CAEN V1724) を用いて波形が記録される。

- **PiID カウンター**

PiID カウンターは 32 セグメントからなるプラスチックシンチレータで、粒子が BGO を貫通したかで通過粒子が π であるか識別する検出器である。各セグメントのシンチレータには波長変換ファイバーが埋め込まれており、この光を MPPC で読み出す。

1.2.3 SKS Spectrometer

SKS Spectrometer は標的より後方に位置する散乱粒子 π^+ の運動量を測定するスペクトロメータである。1 台の双極子磁石、5 台の位置検出器、2 台のトリガー用カウンターで構成される。

- **SFT(Scattered Fiber Tracker)**

散乱粒子の飛跡トラッキングのために標的後方に設置されるシンチレーションファイバー検出器である。鉛直方向には直径 1 mm のシンチレーションファイバーを並べた x 層とそれに対しそれぞれ tilt angle -45° , 45° の u,v 層からなり、これらの層は直径 0.5 mm のシンチレーションファイバーで構成される。

- **SDC2(Scattered Drift Chamber)**

E40 実験の際に用いたドリフトチェンバーであり、x,x',u,u',v,v' の計 6 層からなる飛跡検出器である。x,x' 層は鉛直方向にワイヤーが張られているのに対し、u,u' 層と v,v' 層の tilt angle はそれぞれ -15° , 15° である。

- **SDC3, SDC4**

SDC2 と同じように x,x',u,u',v,v' の計 6 層からなるドリフトチェンバーである。u,u' 層と v,v' 層の tilt angle はそれぞれ -30° , 30° であり v,x,u,v',x',u' の順で並べられている。

- **TOF(Time Of Flight)**

TOF カウンターは 32 セグメントで構成されるプラスチックシンチレータでビームラインスペクトロメータに設置されている BH2 との時間差から粒子の飛行時間を測定することができる。測定した飛行時間 (Time Of Flight) を用いて同じ運動量を持つ粒子の識別を行う。

- **LC(Lucite Cherenkov)**

LC は Lucite と呼ばれる屈折率 1.49 をもつアクリル樹脂を用いたチェレンコフカウンターであり、バックグラウンドとなる陽子を除去する。

1.3 本研究の目的

本研究ではビームトラッキング用ファイバー検出器、BFT-D の設計および開発を行った。はじめに、第 2 章では先行研究で行われた BFT-D の要求性能やデザインについて確認したのち先行研究からのデザインの改良点を述べる。3 章では確立された製作方法についてまとめ、4 章では製作した BFT-D をビームを用いて行った性能評価実験の結果を説明する。さらに 5 章では Geant4 を用いたシミュレーションで BFT-D をビームラインに設置した際に運動量分解能がどの程度悪化するか見積もった。最後に 6 章では性能評価実験からの結果を踏まえたまとめと今後への展望を述べる。

第 2 章

BFT-D の概要

2.1 開発の目的

BFT-D は高レート環境下でのビームトラッキング分離能力の改善を目的として開発された。計画されている Λp 散乱実験は我々のグループが以前に J-PARC K1.8 ビームラインで行った Σp 散乱実験 (J-PARC E40) をもとにセットアップが決定されている [1]。E40 実験のビームラインスペクトロメータのセットアップを図 2.1 に示す。E86 実験との大きな違いは飛跡検出器として用いられていたドリフトチェンバーである BC3, BC4 がファイバー検出器である BFT-D に置き換わっていることである。E40 実験では K1.8 ビームラインで 20 M/spill という環境で実験を行っていたが, E86 実験では K1.1 ビームラインで 30 M/spill と以前より高いビームレートでの実験が計画されている。しかしながら, E40 実験において BC3, BC4 を用いたビームトラッキングでは 20% の割合で 1 イベントに対し複数トラックが再構成されてしまうことが起こっていた。これはドリフトチェンバーのセンスワイヤー間隔が 3 mm であるためドリフト時間のために数 10ns 程度のタイムゲートをとる必要があることに起因している。さらに悪いケースとして, 複数粒子が同一のワイヤーセルに入射することでヒット情報が失われてしまうこともあった。ビームレートが高くなる E86 実験ではこの問題を解決する必要があるため, ファイバー 1 本あたり検出領域が 0.75 mm でありタイムゲートを数 ns とすることでシンチレーションファイバーを用いた飛跡検出器の開発に取り組んだ。

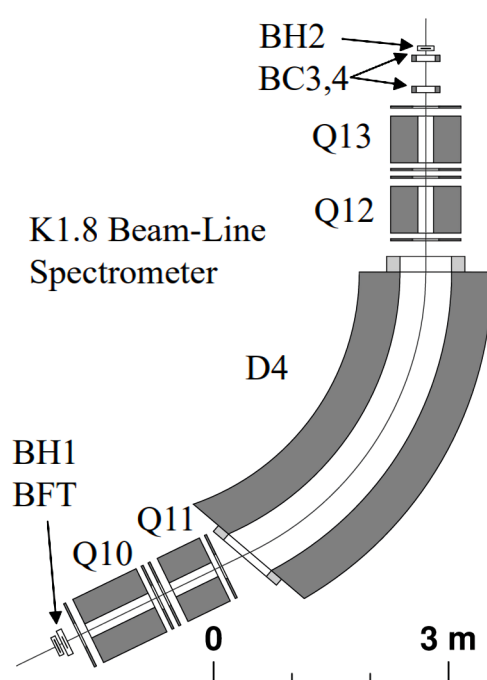


図 2.1: E40 実験におけるビームラインスペクトロメータのセットアップ

2.2 開発の流れ

本研究は先行研究を引き継いでいるため、開発の流れを示すとともに本研究と先行研究 [2] の研究内容を明確にする。BFT-D の開発の流れは図 2.2 である。

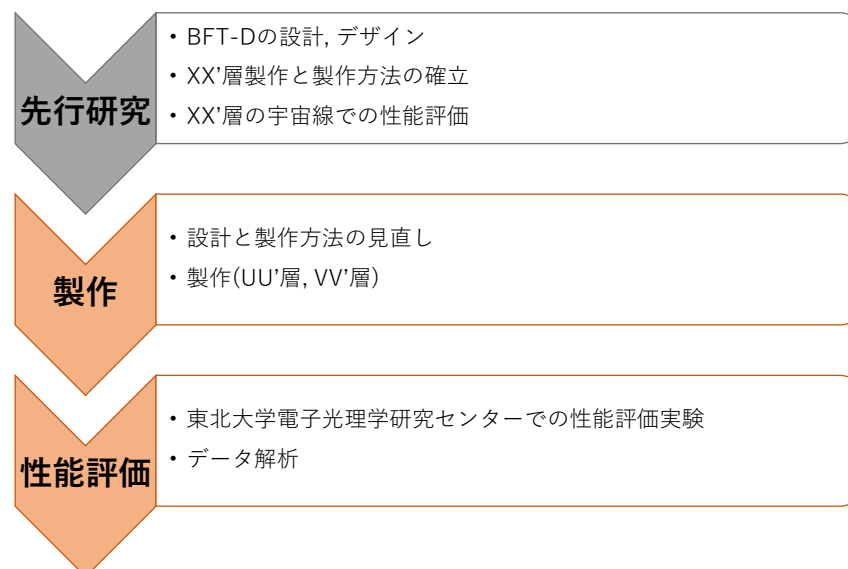


図 2.2: BFT-D の開発の流れ

先行研究 [2] では実験予定である J-PARC K1.1 ビームラインを再現したシュミレーションを用いて要求性能を算出し、それらを満たすように BFT-D の設計を行った。BFT-D 計 6 層のうち XX' 層については先行研究で実際に製作することで製作方法を検討し、宇宙線を用いての性能評価実験が行われた。これにより XX' 層は要求性能を満たすことが明らかになった。しかし設計に問題があり製作が困難であったため、より高い性能を出すことができないと結論付けられた。

本研究では XX' 層の製作方法や性能評価の結果を踏まえ、残りの UU' 層と VV' 層を設計や製作方法の変更を行ったうえで製作した。また完成した 6 層すべてに対し東北大学電子光理学研究センターでビームを用いた性能評価実験を行った。

2.3 要求性能

ここでは先行研究 [2] で得られた BFT-D に対する要求性能について説明していく。BFT-D に対して課せられている要求性能は以下の 4 つである。

■ 位置分解能 $\sigma_{pos} < 0.14$ mm

$\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応における Λ 生成の同定には π^- と π^+ の invariant mass から K^0 を同定する方法が一般的である。 π^+ は前方の SKS スペクトロメーターで運動量解析を行うが、 π^- は CATCH 検出器を突き抜けてしまうため得られるのは π^- の方向のみの情報である。このため π^- の運動エネルギーを測定できず、invariant mass を計算することができない。これを解決するため、E40 実験のバイプロダクトを用いて $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ イベントを同定するための解析手法が確立された [15]。解析は以下の手順で行われる。

1. K^0 の生成を仮定して π^+ と π^- の invariant mass が K^0 の質量となるように π^- の運動量を決定する。

2. 得られた π^- の運動量と測定した π^+ の運動量から K^0 の運動量を再構成する.
3. $\pi p \rightarrow K^0 \Lambda$ の missing mass を計算する.
4. missing mass が Λ の質量となっているイベントを選択する.



図 2.3: K^0 生成反応と主なバックグラウンドとなる multi π production

しかし上記の解析では K^0 の生成を保証できず, 図 2.3 右側のような複数 π 生成イベントがバックグラウンドとして混入してしまう. これは両反応で終状態が同じであるため, 上記解析を適用することができるからである. このバックグラウンド除去のためには vertex distance cut と呼ばれる K^0 の飛行距離によるカットを適用する. $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応では生成された K_s^0 が寿命をもつため数 cm 飛行してから崩壊する一方, 複数 π 生成反応 $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ p$ では反応点が 1 点となる.

このようにして vertex distance cut を施すことでバックグラウンドを除去を行う. しかし現実には vertex 分解能によって飛行距離がばかされることで複数 π 生成イベントを K^0 生成反応と間違えることでバックグラウンド除去が不十分になったり, 逆に K^0 生成反応を複数 π 生成反応と間違えることで Λ の収量が低下したりすることが起こる. このため vertex 分解能が実用上十分となる性能を持ち BFT-D が vertex 分解能を悪化させないことを確認する必要がある. 図 2.4, 図 2.5 にそれぞれシュミレーションで BFT-D の vertex 分解能と missing mass 分解能を示す. 参考に BC3, BC4 での値もプロットしている.

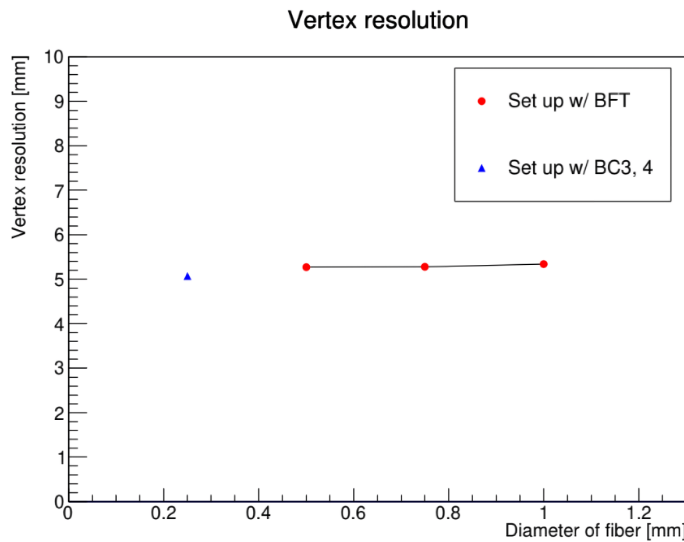


図 2.4: BC3,4 と BFT-D のファイバー径ごとの Vertex 分解能 [2]

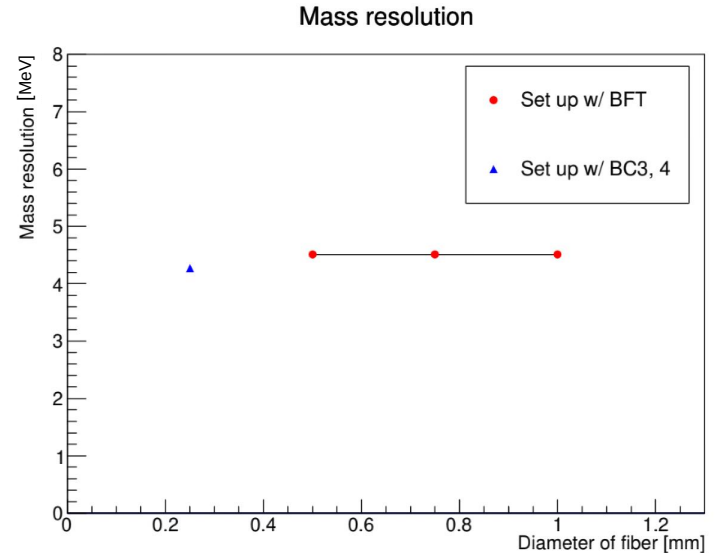


図 2.5: BC3,4 と BFT-D のファイバー径ごとの Missing Mass 分解能 [2]

図 2.4 を見るとファイバー直径を 0.5 mm, 0.75mm, 1.0 mm と変化させていっても, vertex 分解能はほぼ変化せず BC3, BC4 セットアップの時と比較すると差は ~ 0.2 mm 程度の悪化である. この値から BFT-D セットアップの時は BC3, BC4 セットアップの時に比べ vertex distance cut において $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ の生存率が 1 $\sim$ 2% 程度少なくなると見積もられた [2]. しかしながら, BC3, BC4 から BFT-D への変更でトラッキング能力が向上することによる得のほうが大きいと考えられ, BFT-D への変更は実験に対し有利な方向に働く

といえる。またファイバー径の変化によって vertex 分解能がほぼ変化しなかった要因は、CFT の角度分解能と CFT のサポートフレームによる multiple scattering の効果が vertex 分解能を支配しているからということが別のシミュレーションから判明している。さらに Missing Mass 分解能についてもどのファイバー径でもほぼ変化せず、BC3, BC4 セットアップから比べて 0.1 MeV の悪化で解析に大きく影響はない。したがって BFT-D のファイバー直径は 0.5 mm, 0.75mm, 1.0 mm のうちいずれでも問題がない。そしてファイバー直径が 1.0 mm の時の位置分解能は下式より算出され、この値を位置分解能の要求性能とする。この計算の際は BFT-D は依積みの構造であることを考慮し、1.0 mm の半分の 0.5 mm のファイバーが張ってあると考える。

$$\sigma_{pos} = \frac{1.0/2}{\sqrt{12}} = 0.14 \text{ mm}$$

■ 時間分解能 $\sigma_{time} < 3.3 \text{ ns}$

時間分解能の要求性能は、BFT-D がビームバンチごとに粒子を区別可能とするという要求から決定された。E40 実験でのビームバンチごとの間隔は 20 ns であったが、BC3 や BC4 のドリフト時間は約 35 ns であった。この長いドリフト時間のために、各ビームバンチごとの粒子が混ざり TDC のバックグラウンドとして存在していた。一方上流で飛跡検出を行っているファイバー検出器 BFT については時間分解能が 1 ns 程度であり、 $\pm 6 \text{ ns}$ をタイムゲートとしていた [16]。これはビームバンチ間隔 20 ns より短いため、バンチごとに粒子を分離することが可能であった。BFT-D では $\pm 3\sigma_{time}$ のタイムゲートをビームバンチ間隔 20 ns より短くするという要求から、時間分解能の要求は以下となる。

$$\begin{aligned} \sigma_{time} &< \frac{20 \text{ ns}}{6} \sim 3.3 \text{ ns} \\ \sigma_{time} &< 3.3 \text{ ns} \end{aligned}$$

■ セグメント当たりのレート $R < 1.0 \text{ MHz}$

セグメント当たりのレートは読み出しに用いる回路 (VME-EASIROC) の制限から課されているものである。BFT-D は X, X', U, U', V, V' の 6 層構成であるが、U, U' 層や V, V' 層の tilt angle の決定にはこのセグメント当たりのレートを考慮する必要がある。ビームプロファイルによって tilt angle ごとに 1 ファイバーあたりのレートは変化するため、これが 1.0 MHz を超えないよう設計する。

■ 一面での検出効率 $\varepsilon > 96\%$

計画されている A_p 散乱実験では、ビームの tracking efficiency を 99% 以上とすることを目標としている。ビームラインスペクトロメータ下流では飛跡検出として BFT-D を 2 台を用いた計 12 層でトラッキングを行う。E40 実験の解析から 12 層のうち 10 層でヒット位置を検出できれば、正しく飛跡を再構成することができる。したがって各層で要求される検出効率 ε は下式を満たす必要がある。

$$\sum_{n=10}^{12} {}_{12}C_n \varepsilon^n (1 - \varepsilon)^{12-n} > 0.99$$

上式を満たす最小の ε を計算すると $\varepsilon = 0.96$ となり、要求性能は $\varepsilon > 96\%$ となる。

2.4 デザイン

2.4.1 全体の構成

はじめに BFT-D 全体の構成を図 2.6 に示す。

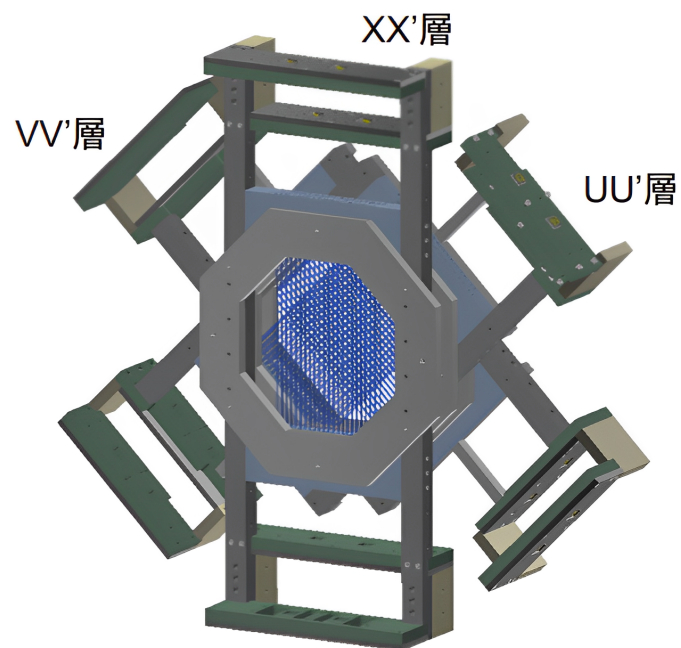


図 2.6: BFT-D の全体図

検出器は2層1組となったXX'層, UU'層, VV'層の3つの部分から構成される。XX'層, UU'層, VV'層はそれぞれ 0° , -45° , 45° の tilt angle を持ち, 組み上げる際に干渉しないように異なる設計となっている。図 2.7 のように, XX'層, UU'層, VV'層の間はアルミ製のベースプレートと呼ばれる部品で固定され, 各層の相対位置を固定する設計となっている。図 2.7 には性能評価実験で XY ステージ上に自立させるためのアルミフレームがあるが, 実際にはビームラインとの固定や BFT-D1 と BFT-D2 との固定にもベースプレートを用いてビームラインに設置される予定である。

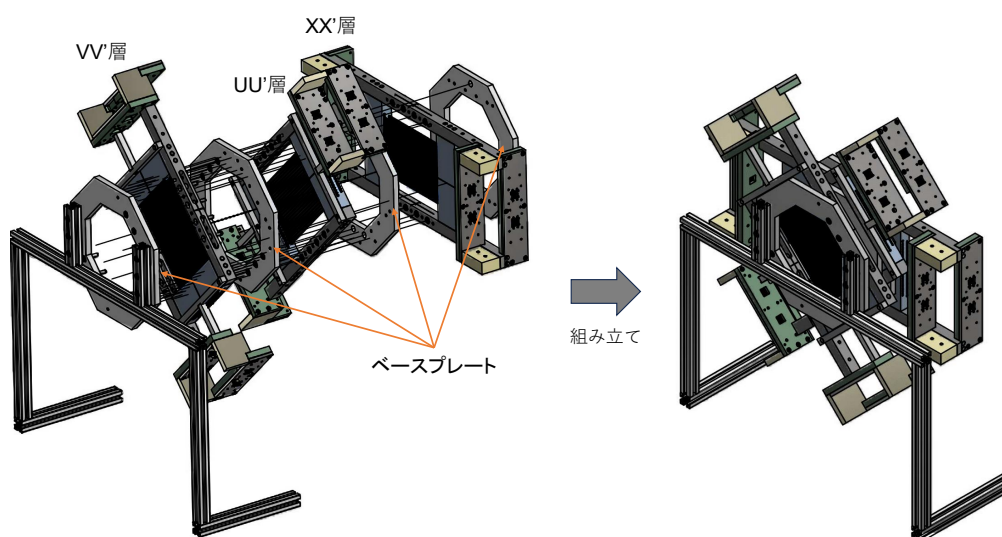


図 2.7: BFT-D の各部と連結方法

各層では 0.75 mm 直径のシンチレーションファイバーが俵積み状に 256 本並べられ, 全層で $256 \times 6 = 1536$ 本のシンチレーションファイバーが用いられている。有感領域の両端ではファイバーがファイバーガイドフレーム (図 2.8) と呼ばれるアルミフレームの穴に通される。これによりファイバーが規定の位置に固定される。

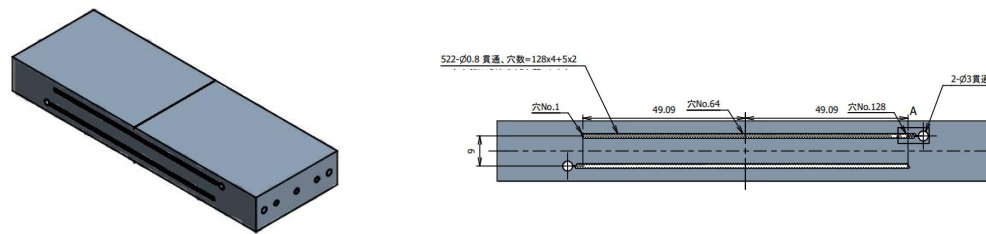


図 2.8: ファイバーガイドフレーム

シンチレーション光は各ファイバーの片端面に MPPC を取り付けることで光子計数を行う。この際読み出し面をコンパクトにするため MPPC として 8×8 の MPPC アレイ (浜松ホトニクス社 S14826(ES1), 図 2.9) を用いる。この MPPC は 1 つのアレイの有感領域が $1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$, ピクセルピッチが $50 \mu\text{m}$ というスペックのものである。さらに MPPC からの信号の読み出しには VME-EASIROC を用いるが, 現在開発中の CIRASAME と呼ばれる読み出し回路も使用できる設計としている。

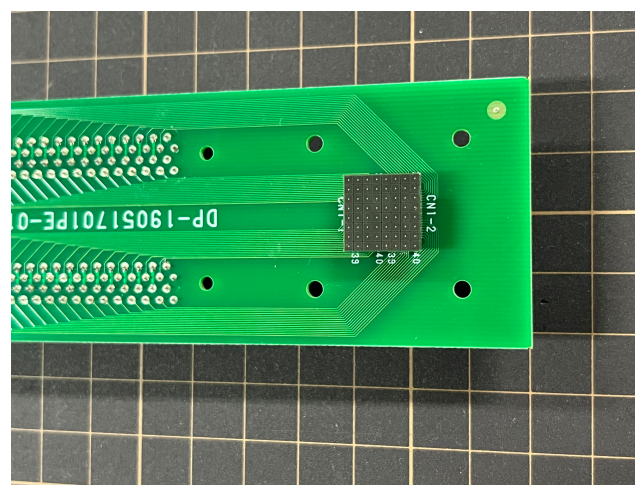


図 2.9: 使用した MPPC アレイ

2.4.2 設計の改良

先行研究では XX' 層, UU' 層, VV' 層の全層の設計と XX' 層の製作と性能評価を行った。XX' 層の製作と性能評価の結果から先行研究の設計にいくつか問題があることが判明した。

以下に先行研究からの設計の変更点を示す。製作を行った UU' 層と VV' 層については設計に加え製作方法も変更を行っているが, これについては後述する。(製作の章を参照されたい。)

■ ファイバーガイドフレーム

先行研究での設計の一番の問題点はファイバーガイドフレームにファイバーを通すことが困難であったことである。これによってファイバーガイドフレームに力をいれてファイバーを通す必要がありファイバーに無理な力がかかってクラック、折れが発生していた。また製作の際にファイバーをすべて通した後おもりで吊るし、テンションをかけてまっすぐにする工程があったがファイバーガイドフレーム内に隙間がほとんど存在していなかったため、おもりを吊るしてもファイバーが全く動かずファイバーがたわんだままとなっていた。これにより、XX'層は検出効率が大幅に低下しているファイバーが存在していた。

この問題の原因はファイバーガイドフレームの穴のピッチがファイバーと同じ 0.75 mm となっていたことである。原理的には問題がない設計であるが、現実にはファイバー径はすべての箇所でも 0.75 mm ではない。これを解決するため、ファイバーガイドフレームの穴のピッチを 0.75 mm から 0.77 mm にすることで余裕を持った設計に変更した。(図 2.10)

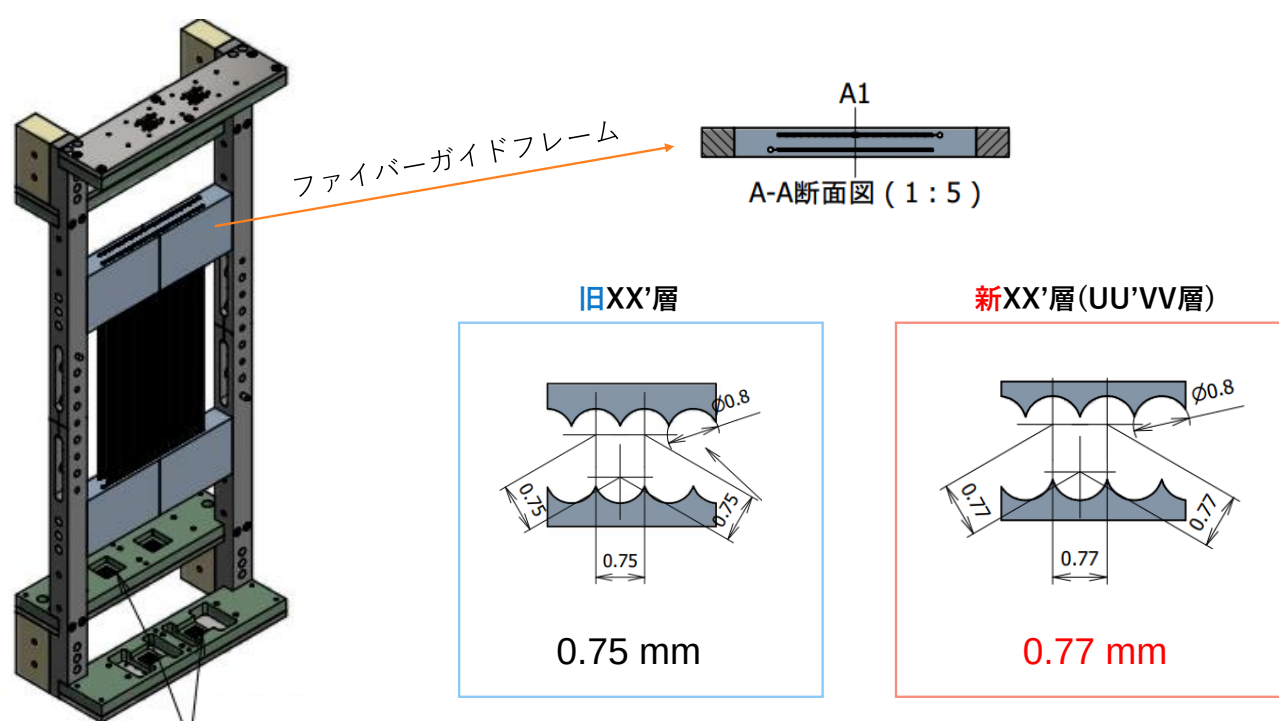


図 2.10: 設計を変更したファイバーガイドフレーム

旧 XX' 層の設計ではピッチが 0.75 mm であったが、新たな設計では 0.77 mm となっている。

ファイバーガイドフレームは全層で共通の設計であるので、今回新たに製作した UU' 層と VV' 層はこの設計となっている。また現在制作し直している XX' 層についてもこの設計となっている。実際にこの設計に変更することで、ファイバーが通しにくいということが無くなり XX' 層で問題になっていたファイバーのクラックや折れは無くなった。

■ ファイバーの変更

XX' 層製作時に用いたファイバーは 0.75 mm のシンチレーションファイバーであったが、ロールにまかれている状態で何年か保管されたものを使用した。長期間の保管によってファイバーが自然な状態で曲がっていた。ファイバーはまっすぐに張られていないと俵積みの構造からずれ、検出効率の低下やトラッキングの不定性を生むためそういったファイバーはなるべく排除したい。そのため、新たにファイバーがロールにまかれておらずまっすぐになっている状態の物を購入し製作に用いた。

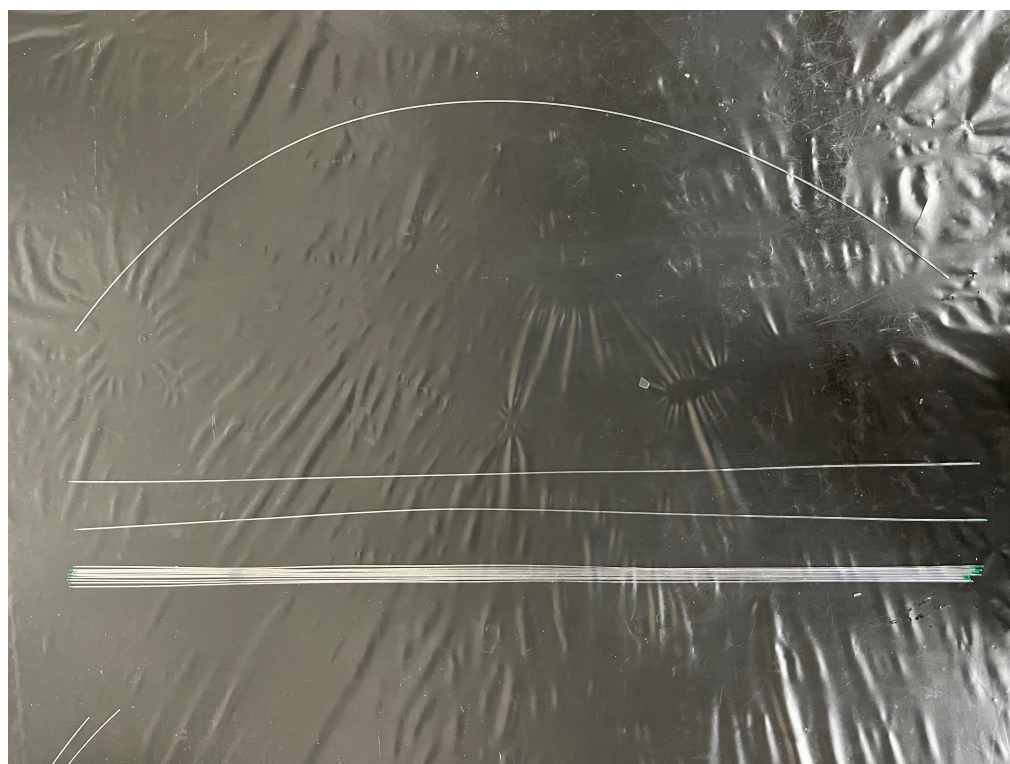


図 2.11: 新旧ファイバーの比較 上が XX' 層で用いたもの 下が新たに購入し UU',VV' 層の製作に用いたもの

第 3 章

BFT-D の製作

本章では先行研究での製作方法からの改良点や UU', VV' 層の製作方法についてまとめる。製作方法は UU' 層で確立し VV' 層も同様の製作方法で製作した。このため本章では VV' 層での製作過程についてのみ取り扱う。

3.1 製作方法

例として VV' 層では、フレームの組み立てを行い、V 層のファイバーを張り、ファイバーの固定を行ったあと、もう片方の層である V' 層のファイバーを張り、ファイバーの固定を行う。そして最後に VV' 層のすべての読み出し面の研磨を行い、VV' 層は完成といった手順でそれぞれ製作を行っている。

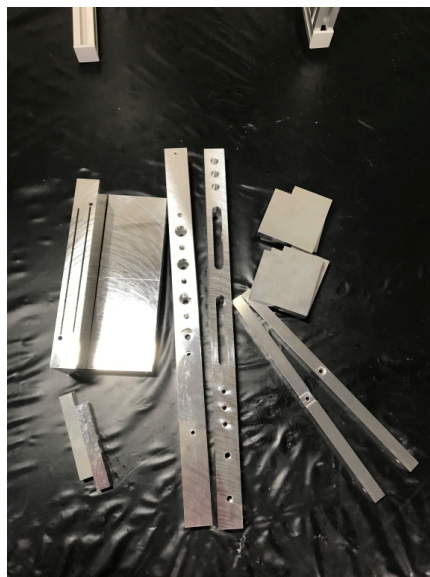
1. フレームの組み立て
2. ファイバーを張る
3. ファイバーの固定
4. 読み出し面の製作

1. フレームの組み立て

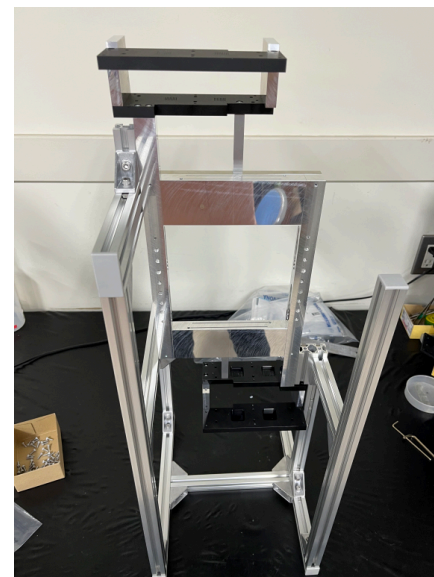
BFT-D の製作を始めるにあたりまず検出器と自立させるためのフレームの組み立てを行った。図 3.1(a) は製作の際に VV' 層を自立させるためのフレームである。図 3.1(b) は VV' 層の検出器自体のアルミフレーム類である。図 3.1(c) は部品をすべて組み立てた後の写真である。この状態まで組み立てが完了したらファイバーを張る工程に移る。実際に組み立てたフレーム類は図 3.1 に示す。



(a) 検出器支持用のフレーム



(b) BFT-D VV' 層のアルミフレームと
ファイバーガイドフレーム

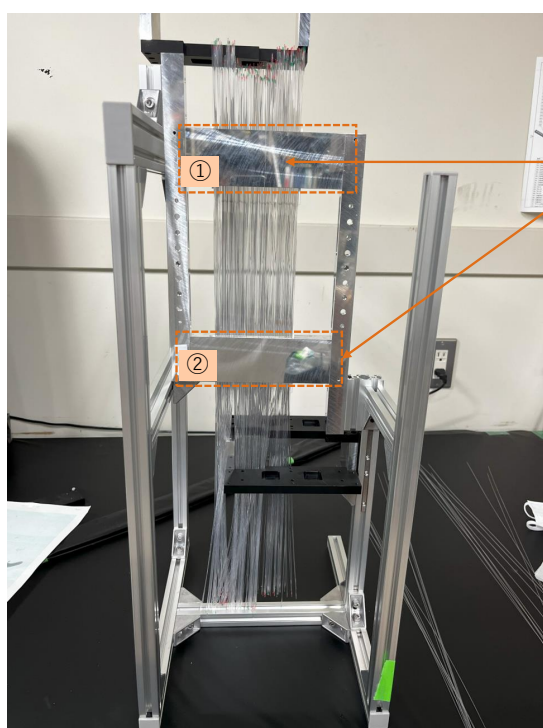


(c) 組み立て後のフレーム

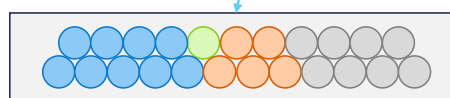
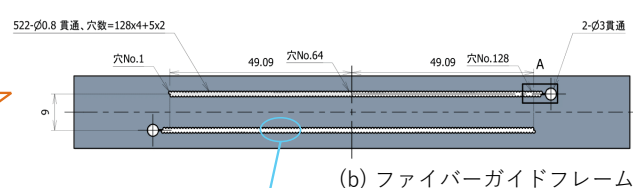
図 3.1: サポートフレームと BFT-D VV' 層フレーム

2. ファイバーを張る

初めに V 層のファイバーをファイバーガイドフレームに一本ずつ通していく作業を行う。ファイバーの張り方を図 3.2 に示す。まず上下にあるファイバーガイドフレーム (図 3.2(a) 内の①, ②) にファイバーを通していく。このとき上下のファイバーガイドフレーム内での既定の穴にファイバーを通す必要がある。そのためには図 3.2(c) のようにファイバーを通したい箇所だけに穴が開くようにする必要があったため、通したい穴のみに穴が開くように 3D プリンターで製作した治具を用いて他の穴を埋めるということを行った。(図 3.2(c)) 1 つの穴にファイバーを通し終わり次の穴にファイバーを通すときは治具を一度抜き、既定の場所に差しなおすことで穴の開いている位置を変えてファイバーを通していくことを行った。



(a) V層のファイバーを張っている様子



青:ファイバーが張ってある場所
緑:ファイバーを張る場所
橙:ファイバー治具で穴を埋めている場所

図 3.2: ファイバーの張り方

また製作の際の改善点を示す。XX' 層の製作の際は図 3.3 のように読出し面に通してからファイバーガイドフレームにファイバーを通す方式をとっていた。しかしながらこの方法では、ファイバーガイドフレームに対し垂直にファイバーを通すことができず、ファイバーガイドフレームとファイバー間に摩擦を生じながらファイバーを通すことになってしまっていた。これによりファイバーのクラッドを削ってしまったり、ファイバーが曲がっていることでファイバーガイドフレームでほかのファイバーに力が加わり通しにくくなっていた。そのため UU' 層, VV' 層ではまず上下のファイバーガイドフレームのみにファイバーを通し、その後読出し面にファイバーを通す方法に変更した。すなわち、図 3.3 において、② → ③をすべてのファイバーで行った後①を行うという手順である。

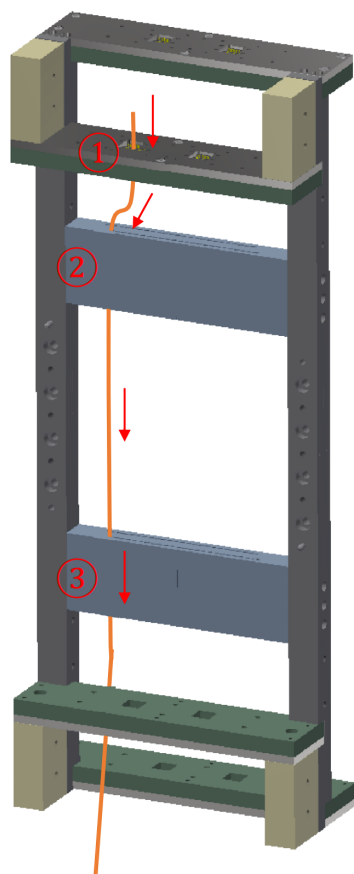
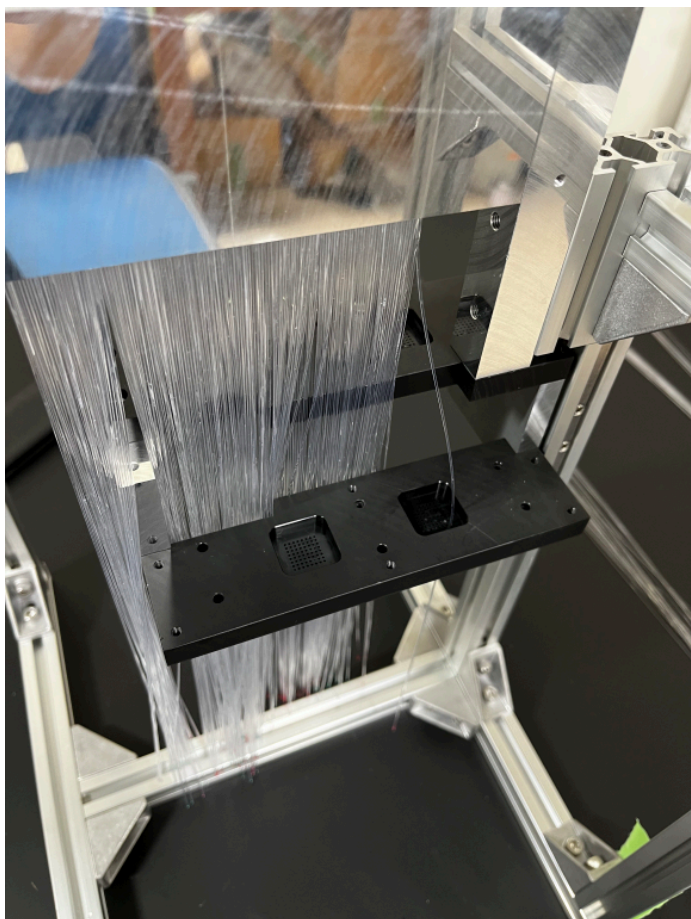
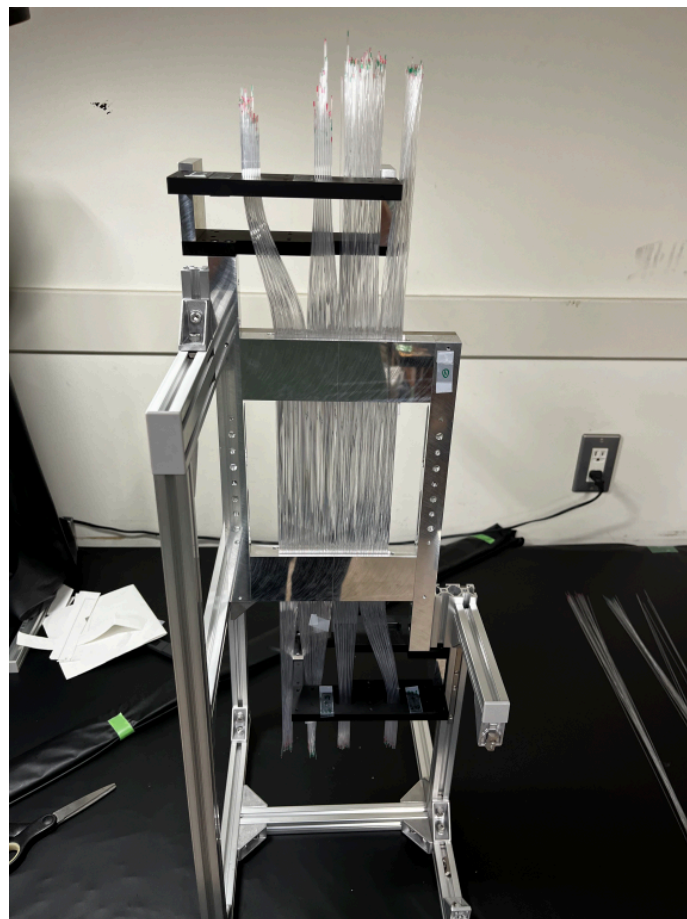


図 3.3: XX' 層でのファイバーを通す手順

ファイバーを読み出し面に通している様子と読み出し面に通し終わった様子を図 3.4 に示す。



(a) ファイバーを1本ずつ読み出し面に通していく様子



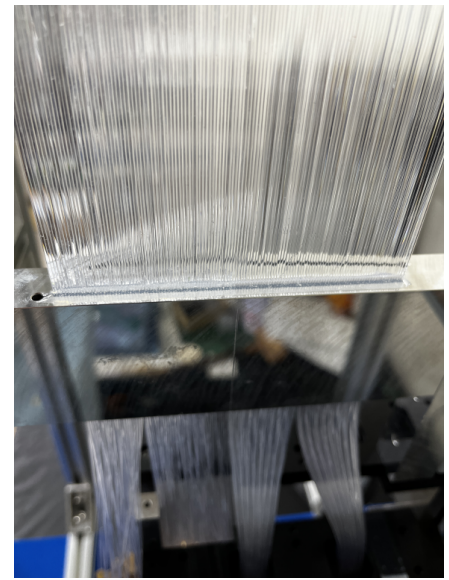
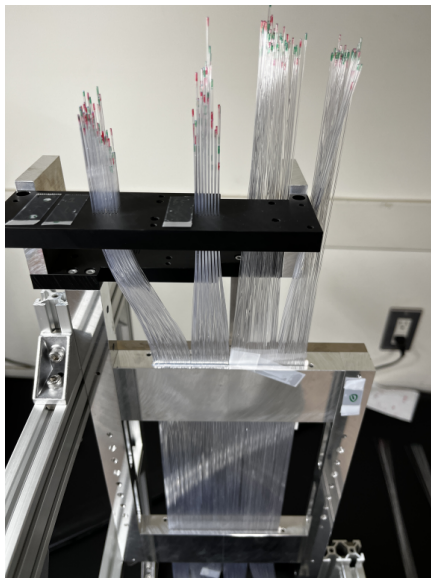
(b) V層のファイバーが全て通され、読み出し面にも通された様子

図 3.4: ファイバーを読み出し面に通す工程

3. ファイバーの固定

ファイバー固定の手順は以下の通りである。

1. 読み出し面に近いほうのファイバーガイドフレームとファイバーを固定する。(図 3.5(a)) この際ファイバーガイドフレームとファイバーを内部で接着するために粘性が低い接着剤であるオプティカルセメントでまず固定した。その後エポキシ樹脂の接着剤でファイバーガイドフレームからファイバーが出る両端を接着し、固定の強度を高める。
2. ファイバーの端に 55g の錘を吊るしテンションをかける。(図 3.5(b))
3. テンションをかけたままもう片方のファイバーガイドフレームとファイバーを固定する。(図 3.5(c))
4. フレームをひっくり返し同様の手順を残りの半分でも行う。



(a) ファイバーガイドフレームとファイ (b) ファイバーを一本ずつおもりをつる (c) テンションをかけたまま、ファイ
バーをエポキシ樹脂で接着している写真 しテンションをかけている写真 バーをフレームに固定している写真

図 3.5: ファイバー固定の様子

UU' 層, VV' 層は上記のような製作方法をとった。XX' 層製作の際にはファイバーにおもりをつけテンションをかけた後、おもりを外して固定を行っていた。これは、ファイバーにテンションをかけたまま固定するとフレームに応力がかかり続けることでフレームが歪み、ファイバーの張りが緩んでしまうことを懸念してのことであった。しかしながら再設計後の UU' 層および VV' 層について、構造解析を行ったところファイバーにテンションをかけたまま固定してもフレームはゆがまないことが分かったため、ファイバーをよりまっすぐ固定できるこの方法を採用した。また、XX' 層ではファイバーは非常に強い力で引っ張らなければファイバーガイドフレームに通せなかったことから、55g のおもりを吊るしてもファイバーが動かずテンションをかける役割を果たしていなかったと考えられる。対して UU' 層と VV' 層では設計の変更されたファイバーガイドフレームを用いたため、ファイバーはまったく力をかけなくてもファイバーガイドフレームを通すことができた。よって、おもりを吊るしテンションをかける工程が機能したと考えられる。図 3.6 にファイバーにテンションをかける前後の比較を示す。テンションが掛かっていない左半分に対しテンションのかかっている右半分はファイバーの並びがそろっていることが見て取れる。

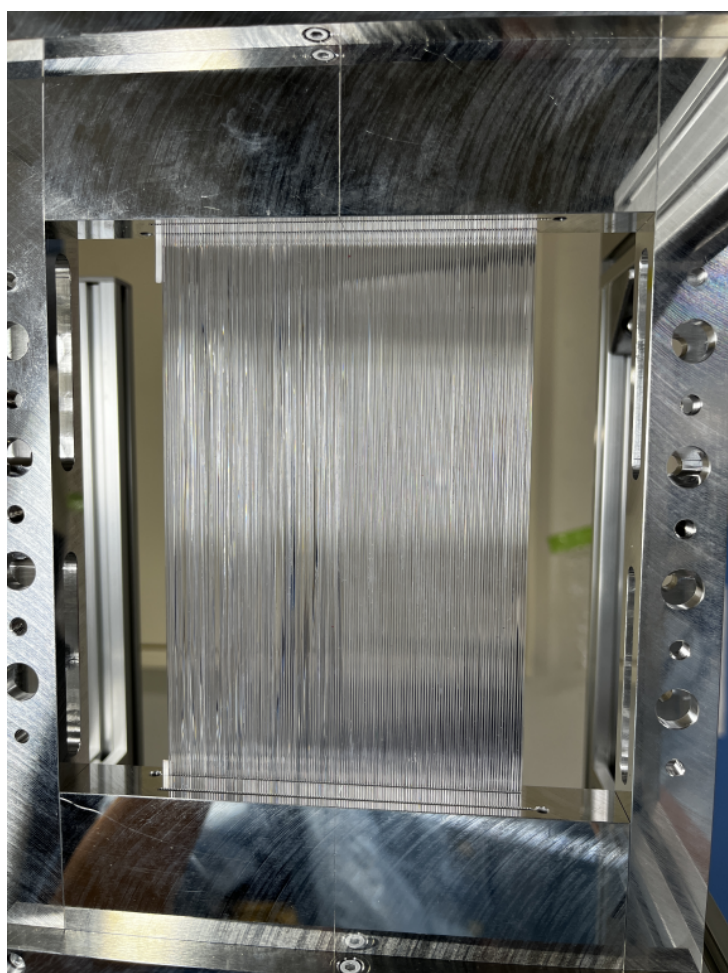


図 3.6: ファイバーにテンションをかける前後の比較
右半分がテンションがかかっており、左半分はかかっていない状態

4. 読み出し面の研磨

ファイバーの固定後は読み出し面の製作を行った。シンチレーションファイバーはファイバーの端面の処理で光量が減少する。なるべく多くの光量を得るため、やすりでファイバー端面の研磨を行った。

まずは図 3.7 のように読み出し面から出ているファイバーをすべて 2mm 程度に切る。このときシンチレーションファイバーは読み出し面のアクリル板の穴に通っているだけなので粘性の低い光学セメントを用いて固定した。さらに、この後の研磨の際にファイバーが折れてしまわないようにエポキシ樹脂で保護する。この様子は図 3.8 である。

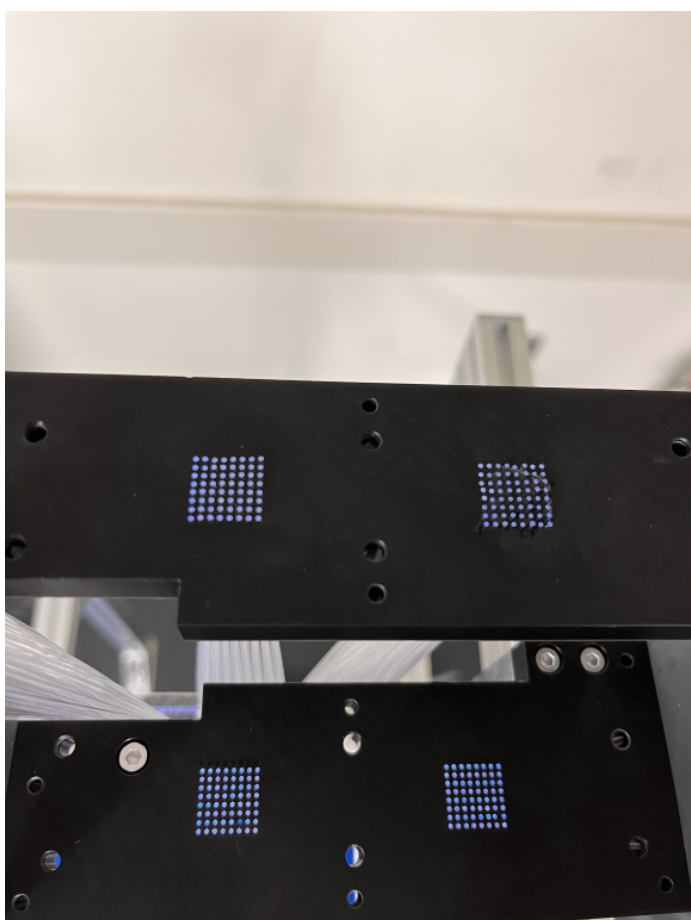


図 3.7: 読出し面から出ているファイバーを 2mm 程度に切断したもの

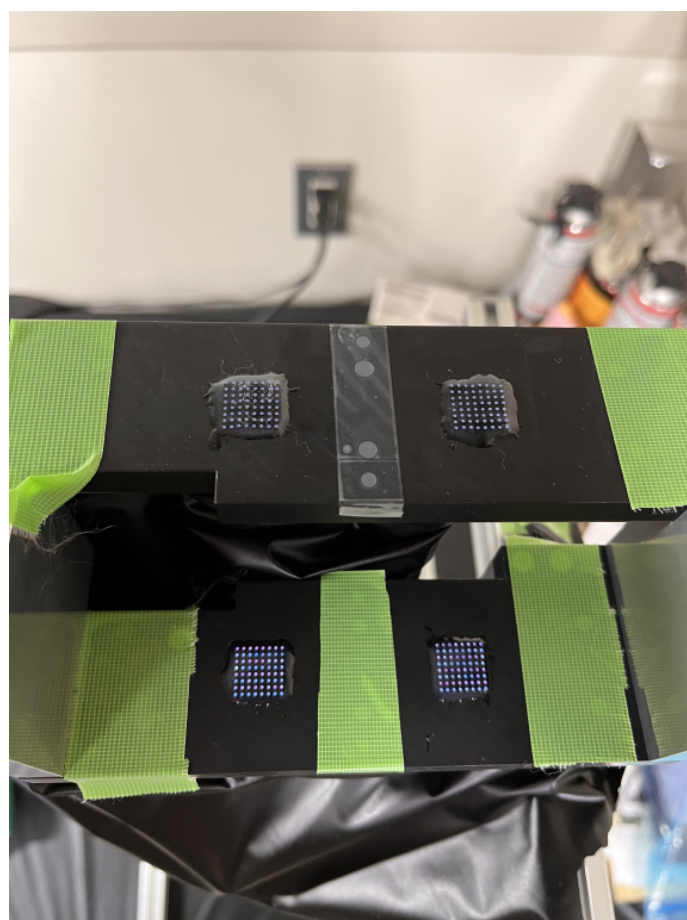


図 3.8: 読出し面とファイバーを光学セメントで固定後エポキシ樹脂で保護

これで研磨の準備が整ったため、研磨を行っていった。研磨は紙やすりを用いて #120, #240, #1000, #1500, #2000 の順でやすりがけしていく。紙やすりは耐水のものを使い水で適宜読出し面を濡らしながら研磨を行っていった。研磨中の様子を図 3.9, 研磨後の読出し面を図 3.10 に示す。最後に以上の工程を経て完成した UU' 層と VV' 層を図 3.11 に示す。



図 3.9: 読出し面を紙やすりで研磨していく時の様子

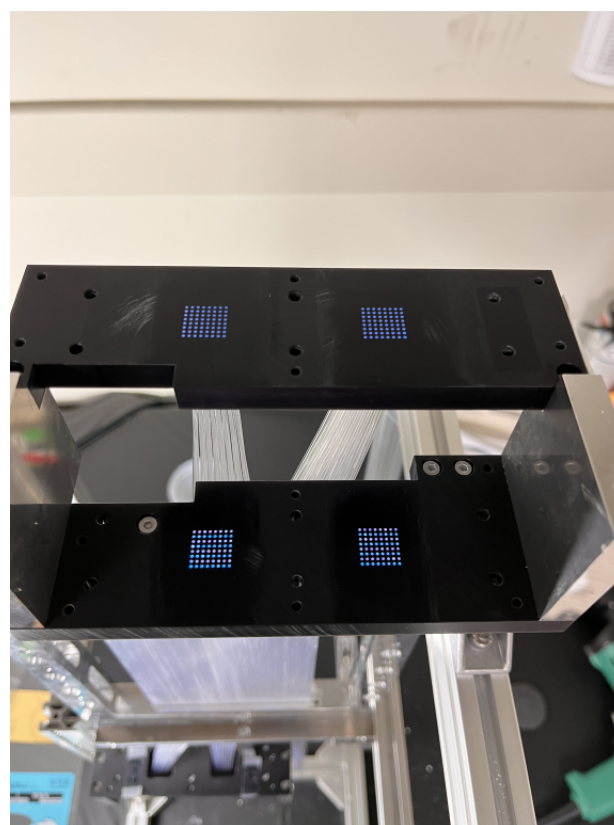
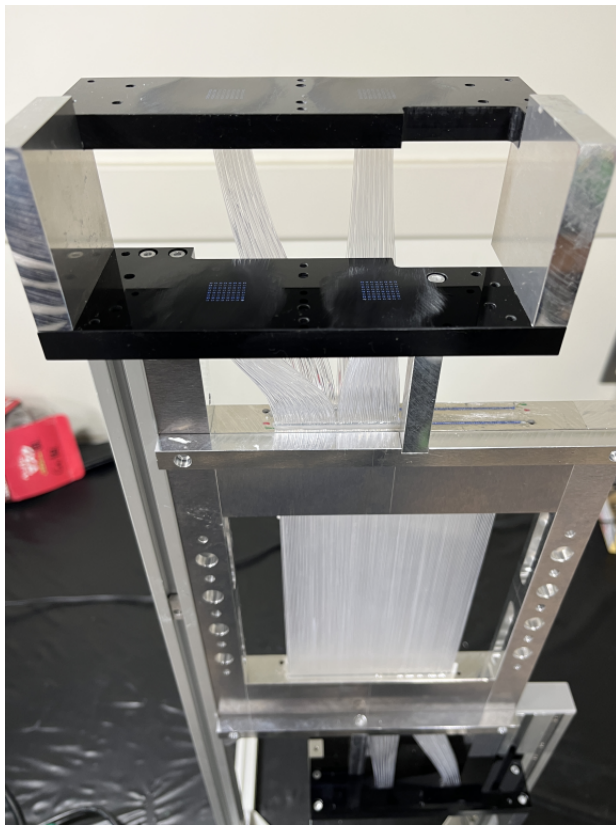
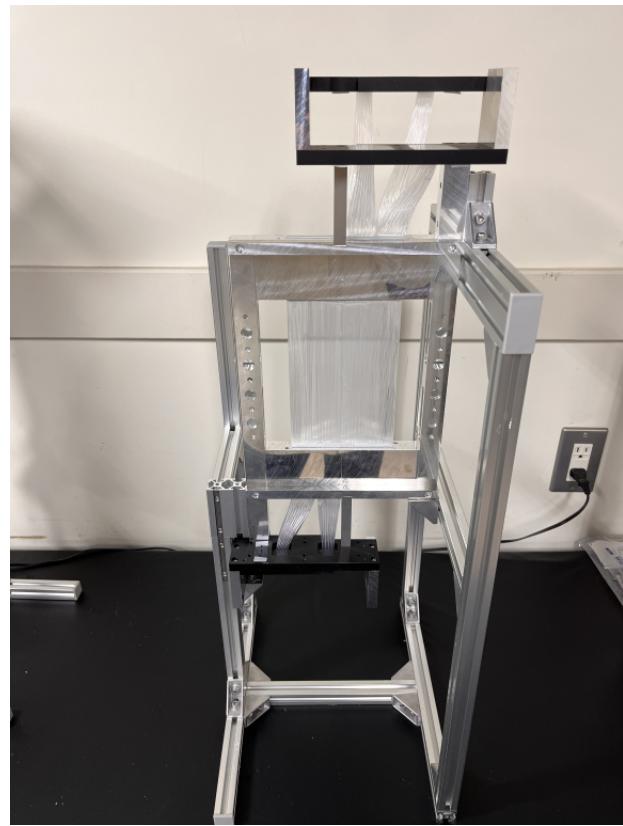


図 3.10: 読出し面の研磨完了後の様子



(a) 完成した UU' 層



(b) 完成した VV' 層

図 3.11: 完成した UU' 層と VV' 層

第 4 章

性能評価実験

4.1 目的

本実験の目的は製作した BFT-D の各層の基本的な性能を評価することである。東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) においてビームを用いた時間分解能や検出効率の MPPC 電圧 (V_{op}) 依存性や TDC の threshold(V_{th}) 依存性の評価を行った。

4.2 実験セットアップ

この実験は東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) の GeV- γ 照射室にて行った。GeV- γ 照射室には、 23° ビームラインと 30° ビームラインの 2 つのビームラインがある。今回は 23° ビームラインを用いて 1 GeV/ c の陽電子を BFT-D に照射した。

セットアップの模式図を図 4.1 に、実際の写真を図 4.2 に示す。BFT-D のほかにトリガーカウンターとして T1, T2, T3 の 3 台と Λ_p 散乱実験に向け開発中の BH1(Beam Hodoscope 1) が設置されている。また T3 の下流にはパラサイトで実験している検出器も設置されている。BFT-D は XY ステージ上に設置されているため、ビームに対しての相対的な位置を変えることができる。今回用いているビームは BFT-D の有感領域よりも狭いため、BFT-D の全セグメントに対してビームを照射するために XY ステージでビームの当たる位置を変更しながら実験を行った。

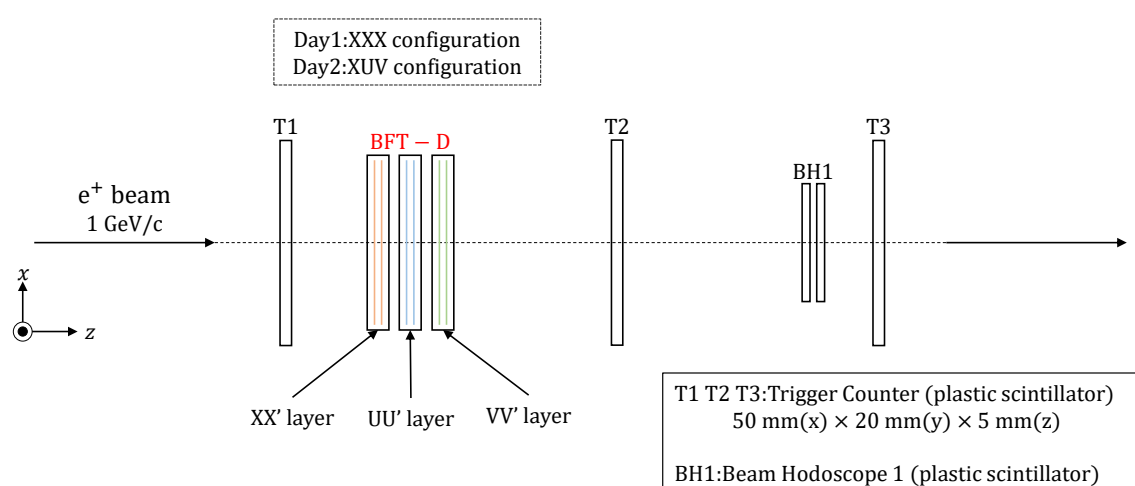


図 4.1: 実験セットアップの模式図

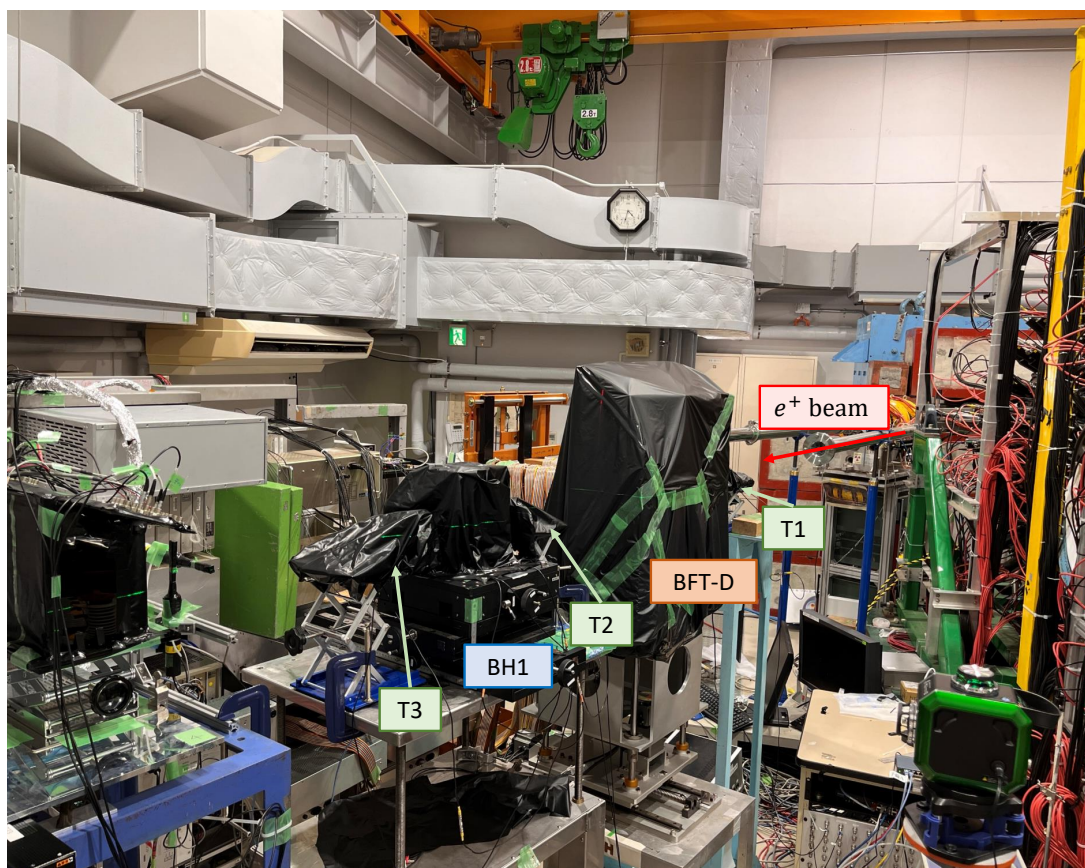


図 4.2: 実際の実験セットアップの写真

実験は2日間にわたって行い、1日目はBFT-Dの全層の tilt angle を 0° にした XXX 配置で実験し、2日目は本来の設計である XUV 配置で実験した。それぞれの配置は図 4.3, 図 4.4 のようになっている。

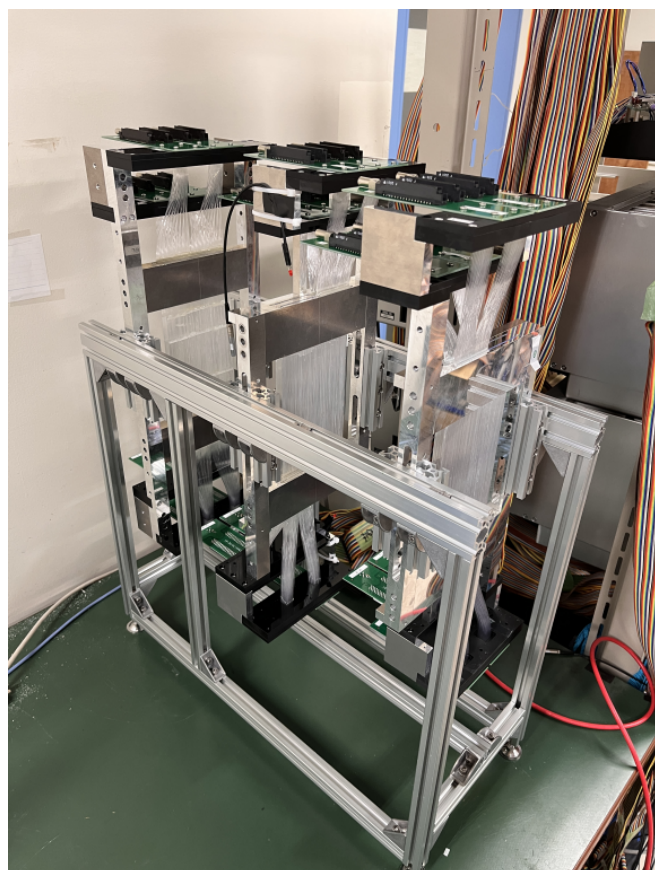


図 4.3: XXX 配置

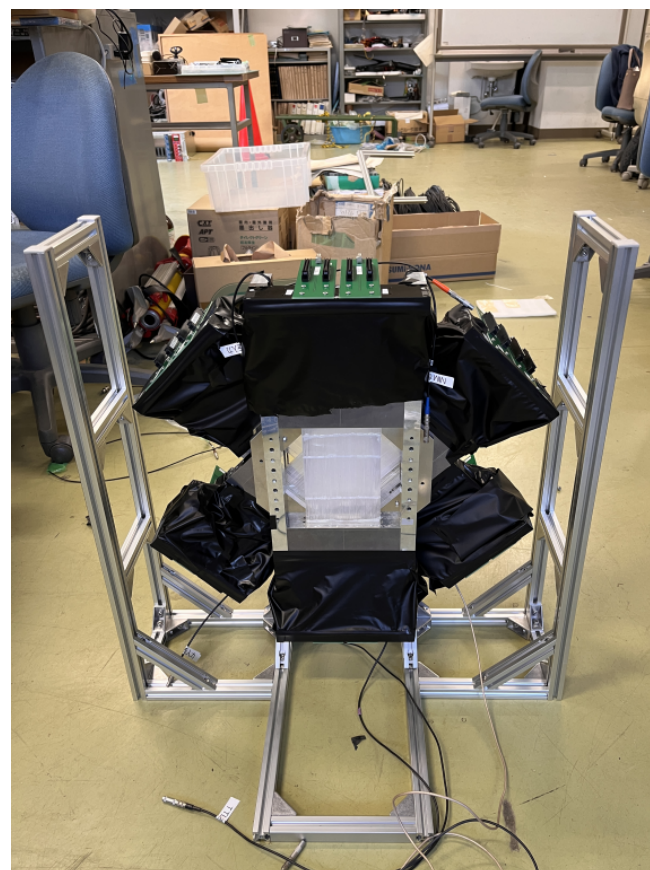


図 4.4: XUV 配置

すべての層の tilt angle が 0° である XXX 配置では BFT-D の時間分解能や位置分解能の基本的な性能の評価に加え、2次元トラッキングを用いた検出効率の評価を行った。また XUV 配置では3次元トラッキングを

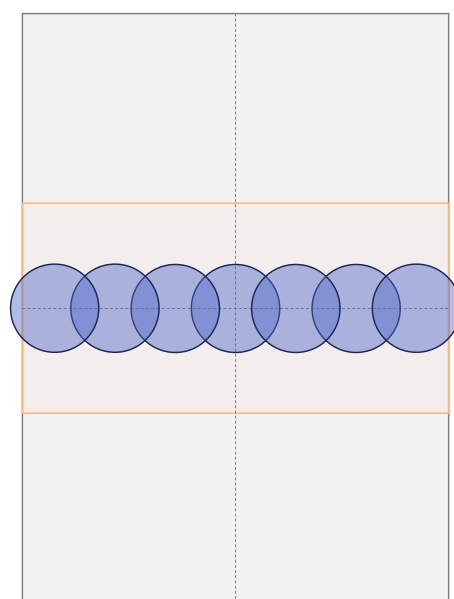
行い, 6 面でのトラッキング性能の評価を行った.

4.3 評価項目

光量, 時間分解能, 検出効率, 位置分解能が要求性能を満たしているか評価した.

表 4.1: XXX 配置で取得したデータ

V_{op} [V]	V_{th} [V]	x [mm]	y [mm]	step [mm]
58.5	3.5	-48~48	0	12
58.5	2.5	-24~24	0	24
58.5	4.5	-24~24	0	24
57.5	2.5	-24~24	0	24
57.5	3.5	-24~24	0	24
57.5	4.5	-24~24	0	24
59.5	2.5	-24~24	0	24
59.5	3.5	-24~24	0	24
59.5	3.5	-24~24	0	24



x: -48~48 (12 mm step)
y: 0 mm

図 4.5: BFT-D の位置を変化させることで位置スキャンを行う.

$V_{op} = 58.5$ V, $V_{th} = 3.5$ p.e. の時のデータ取得点を表している.

表 4.2: XUV 配置で取得したデータ

V_{op} [V]	V_{th} [V]	x [mm]	y [mm]	step [mm]
58.5	3.5	-30~30	-20~20	x:30, y:20

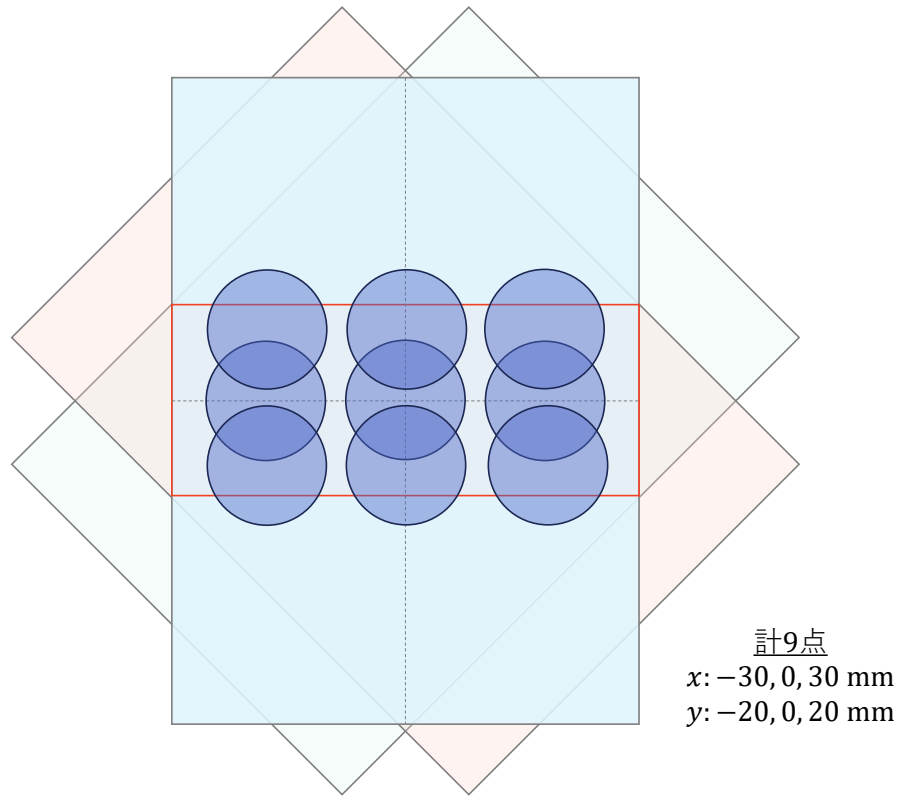


図 4.6: XUV 配置でのデータ取得点

4.4 データ収集系

データ収集系は図 4.7 のようになっている。トリガーは HUL Module を用いて $T2 \times T3$ の信号を作成し、この信号は Master Trigger Module に送られる。さらにトリガーは VME クレートに取り付けられた Receiver module に送られ、そこから読出しに用いているすべての VME-EASIROC Module へ送られる。また各 VME-Module からの Busy 信号は Receiver Module を通して Master Trigger Module へ送られ、他の検出器の Busy 信号とともに管理される。BFT-D に取り付けられた MPPC 信号は計 24 台の VME-EASIROC Module に送られ、ADC と TDC の取得を行う。

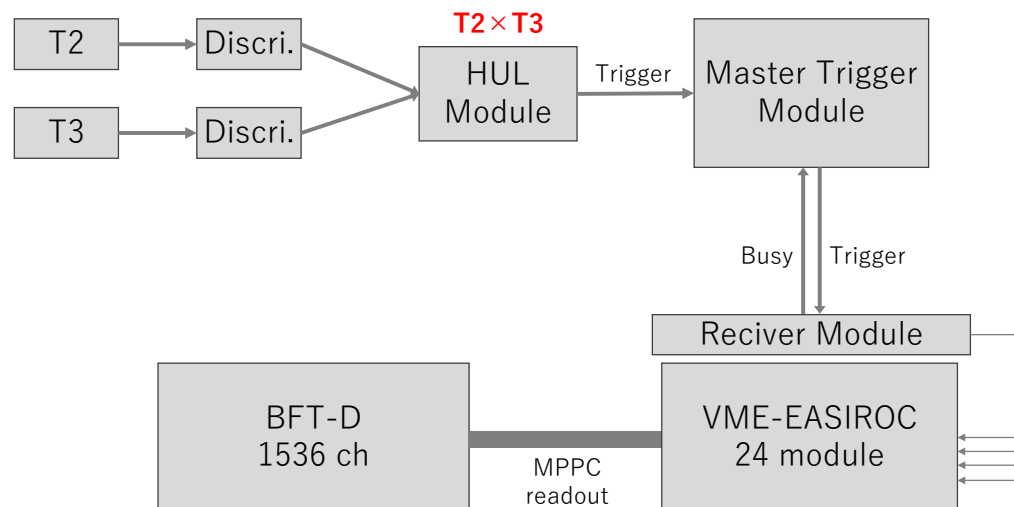


図 4.7: データ収集系 $T2 \times T3$ をトリガーとし VME-EASIROC を用いて読出しを行った。

第 5 章

解析

5.1 パラメーター作成

光量の算出や時間分解能の算出には 1 p.e. に対応する Gain や TDC のヒットタイミングを求める必要がある。これらのパラメーターは V_{op} や V_{th} ごとに変化するため、実験条件ごとにパラメーター作成を行った。この章では実験条件が $V_{op} = 58.5$ V, $V_{th} = 3.5$ p.e. でのパラメーター作成についてのみ説明する。

■ ゲイン調整

取得した ADC は MPPC の個体差やバイアス電圧の微妙な差によって各チャンネルごとに a ゲインが異なる。また後述の解析において光子数で光量の評価をするため、1 photoelectron(p.e.) に対応するゲインを決定した。各チャンネルでの 1 p.e. に対応するゲインは以下の式にしたがって決定する。

$$\text{Gain} = 1 \text{ p.e. peak(ch)} - \text{pedestal peak(ch)} \quad (5.1)$$

このようにして求められた 1 p.e. の Gain を用いて光子数 (Number of Photoelectron, NPE) を下式から求める。

$$\text{NPE [p.e.]} = \frac{\text{ADC[ch]} - \text{pedestal[ch]}}{\text{Gain[ch]}} \quad (5.2)$$

Gain 決定の際の例として V Layer segment 90 番の pedestal 付近の ADC 分布を図 5.1 に示す。

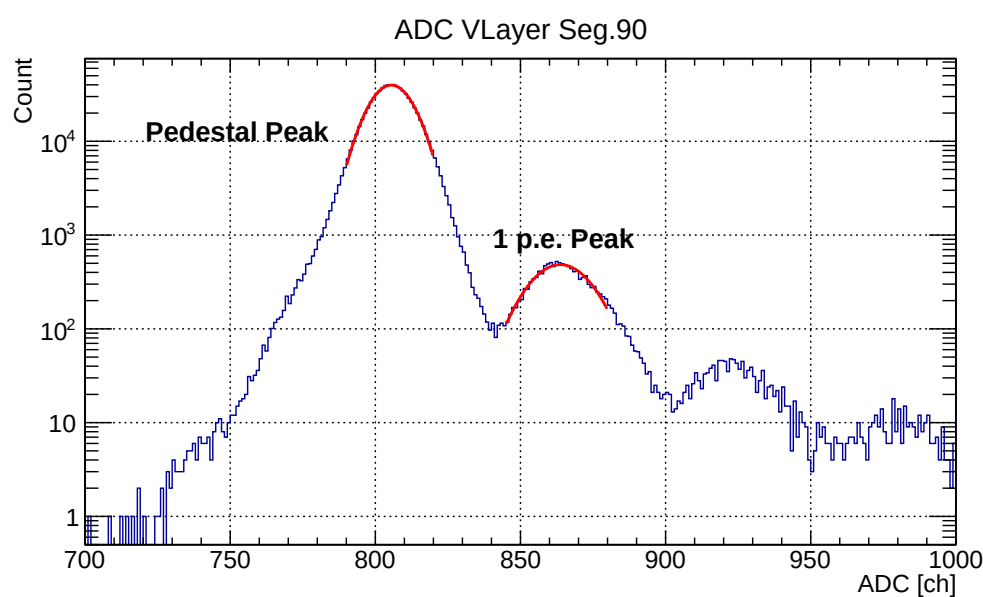


図 5.1: V 層セグメント 90 番でのペデスタル付近の ADC 分布
ピークフィッティングから 1p.e. に対応する Gain を求める。

pedestal と 1 p.e. の peak をそれぞれガウス関数でフィットすることでピーク位置を決定し、式 5.1 をもとにゲインを決定する。これを全チャンネルで行うことで 1 p.e. に対応するゲインを導出した。ただし pedestal のピークが太く 1 p.e. と分離できていないようなチャンネルに対しては、同じ MPPC で算出された平均のゲインを用いている。

さらに今回は MPPC のオペレーション電圧 (V_{op}) として 57.5 V, 58.5 V, 59.5 V でのデータを取得したため、それぞれのデータについても同様にゲインを決定している。

■ TDC から時間への変換

TDC のチャンネルを時間に変換するためのパラメーター作成を行った。時間分解能の評価やタイムゲートの設定のためには TDC を時間情報に変換する必要がある。TDC 分布をピークフィッティングすることでピーク位置を決定し、

$$\text{Time[ns]} = (\text{TDC[ch]} - \text{TDC Peak[ch]}) \times -1[\text{ns/ch}] \quad (5.3)$$

のような変換を行うことで TDC を時間情報 (Time) に変換することができる。

$V_{op} = 58.5$ V, $V_{th} = 3.5$ p.e. でのセグメントと TDC の二次元相関は図 5.2 となっていた。これを Y 軸方向に射影すると図 5.3 となる。ヒットタイミングに対応するピークが TDC 630~640 ch に立っていることが見て取れる。

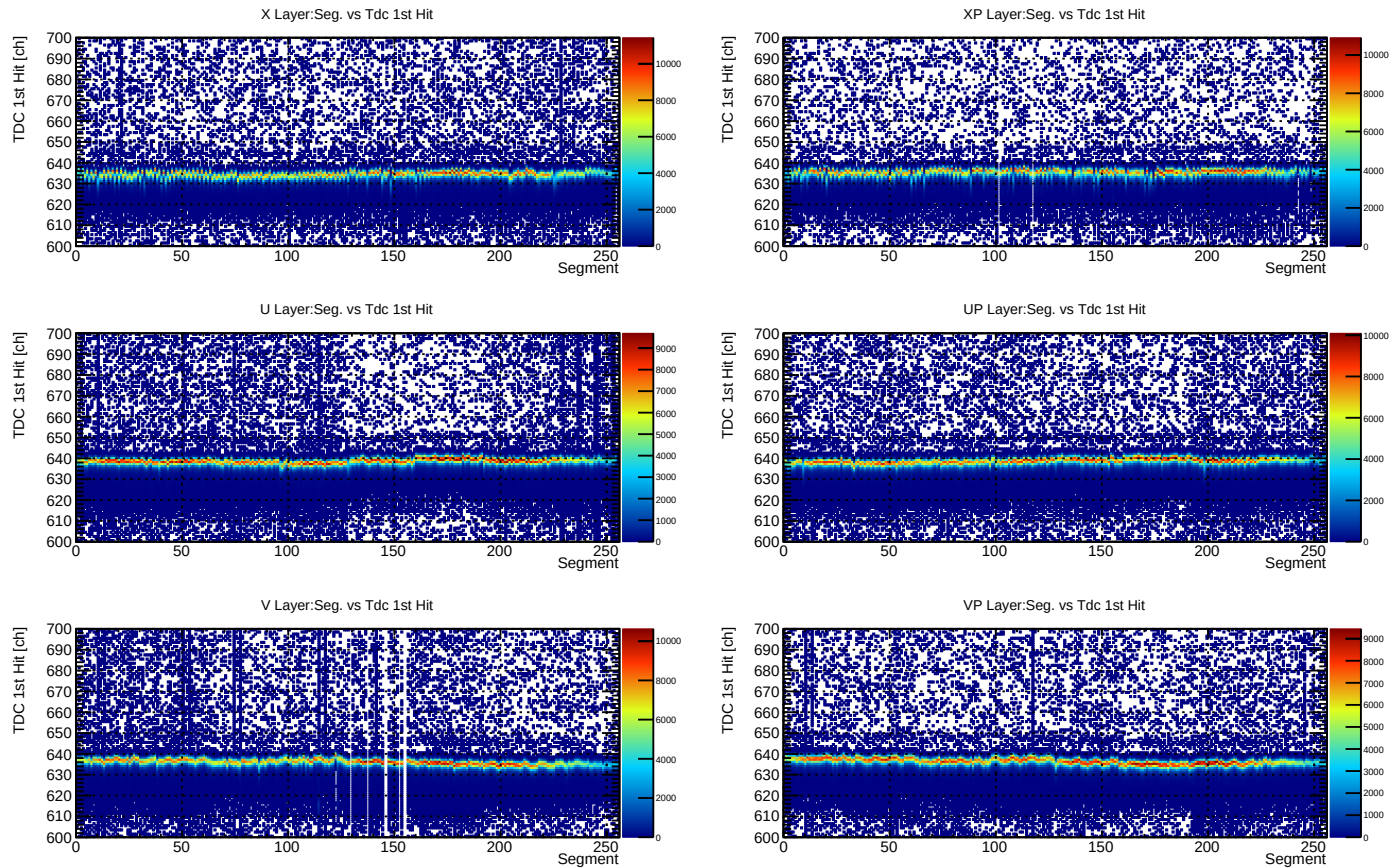


図 5.2: 各層でのセグメントと TDC の 2 次元相関

X' 層と V 層で TDC のない ch が存在しているがこれは実験時ケーブルの不良でデータが取得できていなかった ch である。

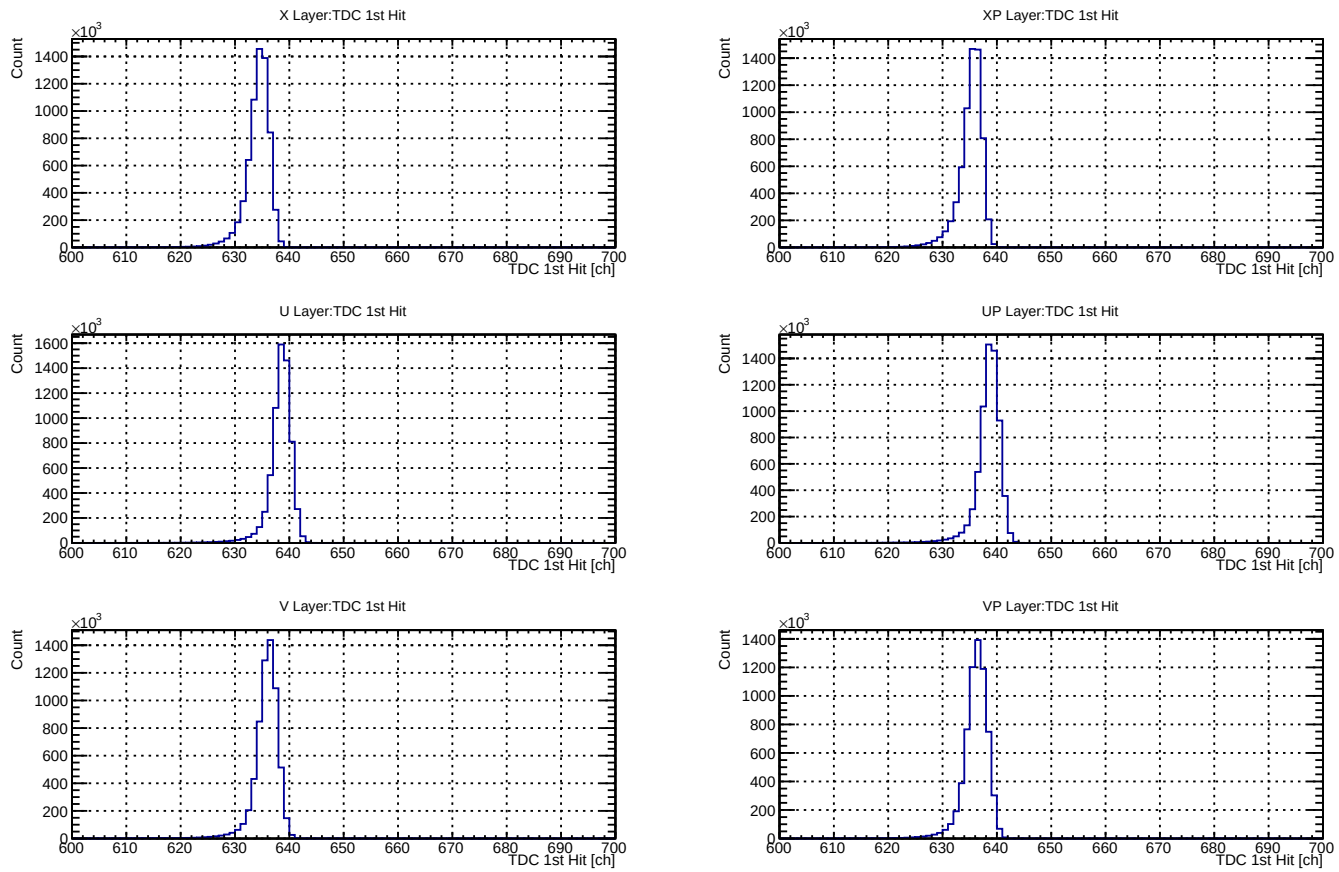


図 5.3: 各層での TDC 分布

図 5.2 からわかるように TDC のピーク位置は各セグメントごとに異なるため、このフィッティングを全セグメントに行い TDC のピーク位置を決定した。例として V Layer segment 90 番での TDC のフィッティングの様子を図 5.4 に示す。このようにして TDC の ch から時間情報に変換したものを図 5.5 に示す。この分布では Time=0 にピークが立っており正しく時間に変換がすることができている。

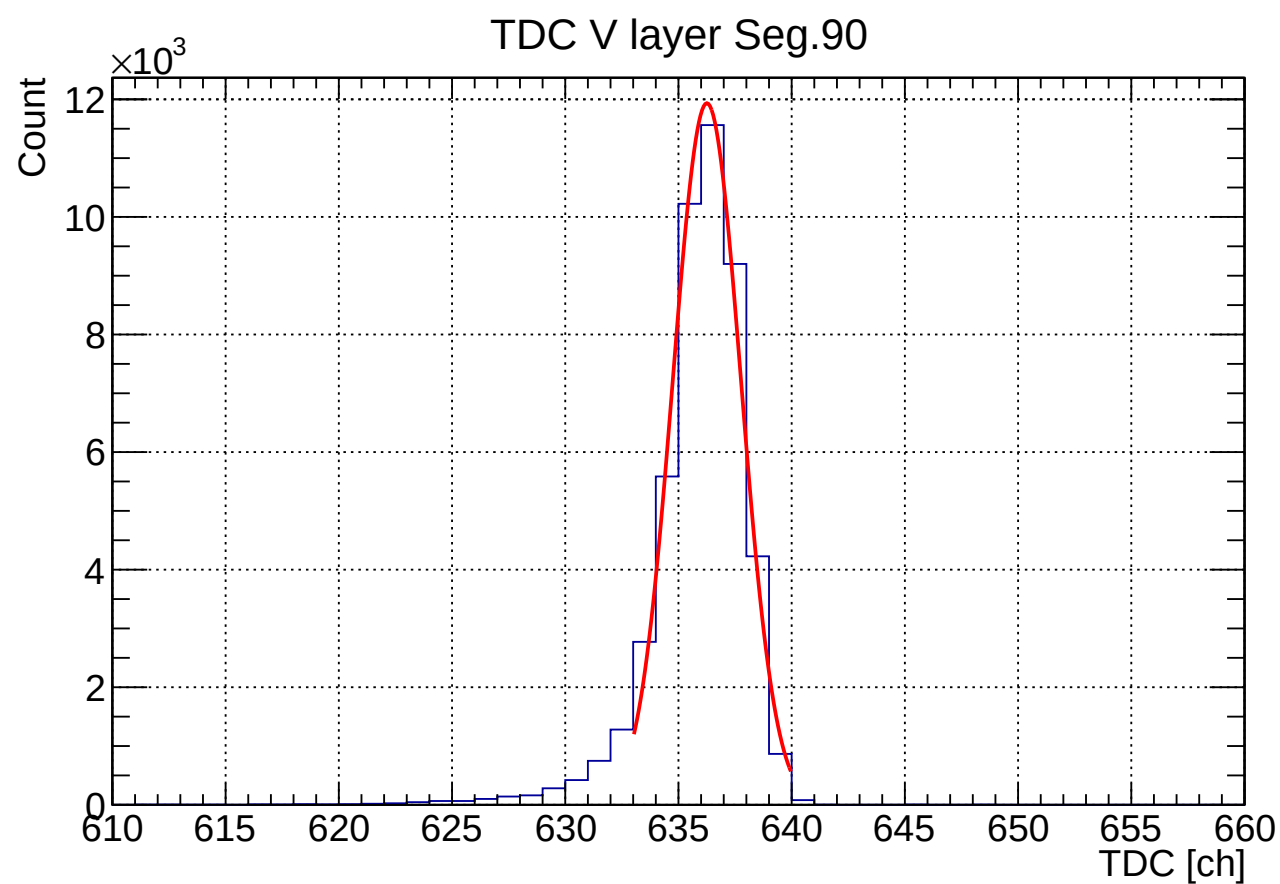


図 5.4: V 層, セグメント 90 番での TDC フィッティングの様子

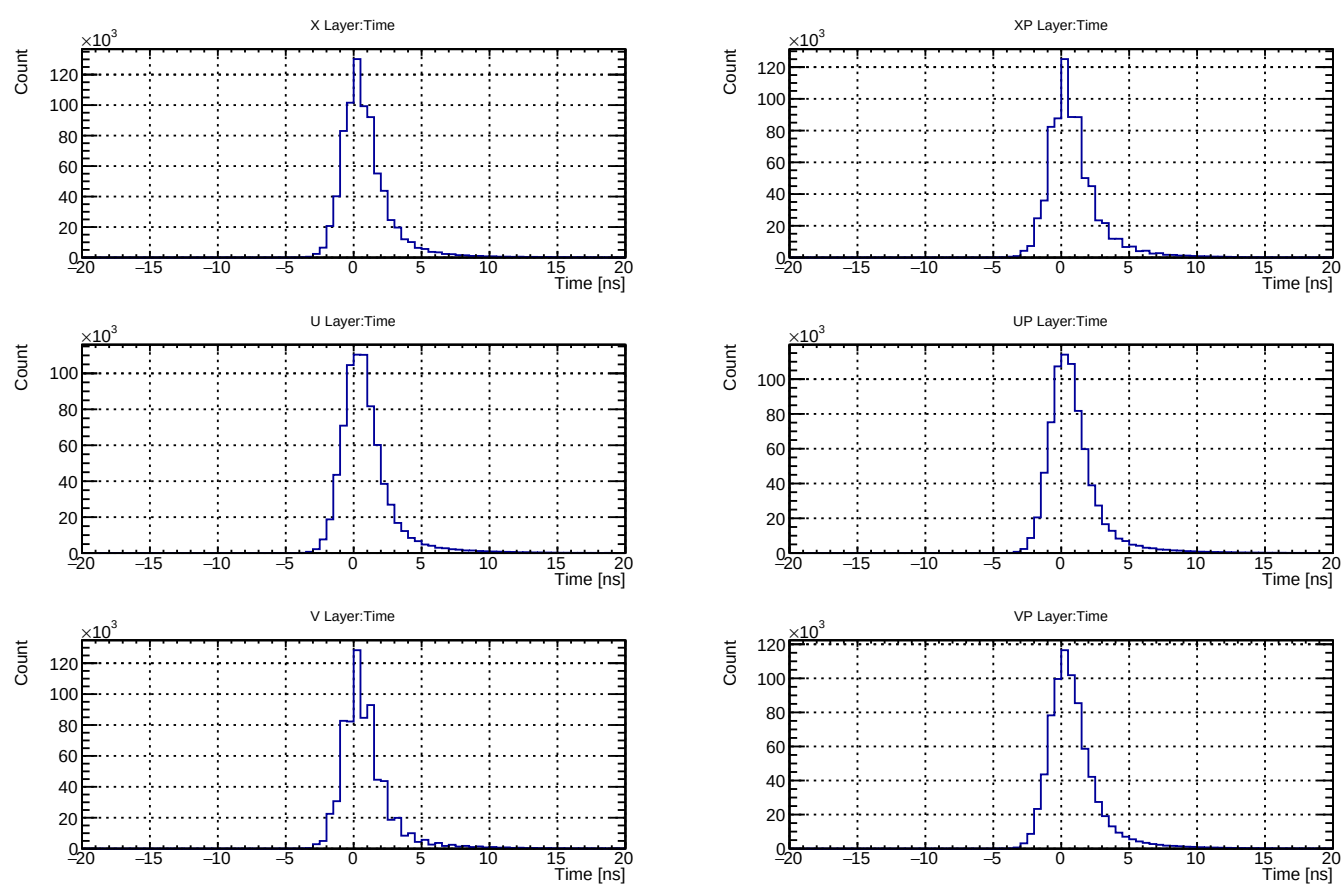


図 5.5: TDC 分布を時間分布に変換した Time 分布

5.2 光量

BFT-D の要求性能に光量は存在していないが、各層での検出効率が 96% 以上であるという要求から具体的な値を導くことができる。要求光量の算出のため以下の条件を課す。

- シンチレーションファイバーからのシンチレーション光の光量がポアソン分布に従うとする。
- V_{th} を 3.5 p.e. に設定する。

V_{th} を 3.5 p.e. に固定したまま平均光量 (ポアソン分布の平均値 λ) を変化させていった時の検出効率がどのように変化するかを図 5.6 に示す。このグラフから、検出効率が 0.96 を超える最小の平均光量は 8.1 p.e. であると算出された。

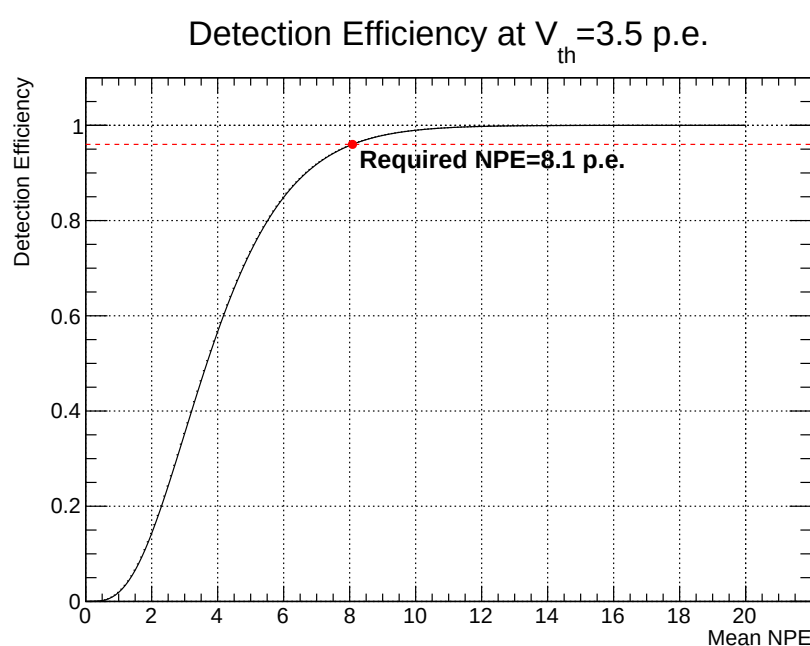


図 5.6: $V_{th} = 3.5$ p.e. を固定したまま平均光量を変化させたときの検出効率

したがって各層での検出効率が 96% 以上であることが要求されるとき必要な平均光量は 8.1 p.e. 以上となる。ここで各層の光量分布を図 5.7 に示す。光量分布をガウス分布でフィッティングし、得られた中心値を平均光量として算出している。いずれの層においても約 14 p.e. 程度の平均光量があり要求性能を満たしていることが確認できた。層全体の平均では要求性能を上回っていることが確認できたが、セグメントごとに製作の精度で平均光量のばらつきがあると考え各セグメントに対し同様の解析を行った。結果を図 5.8 に示す。

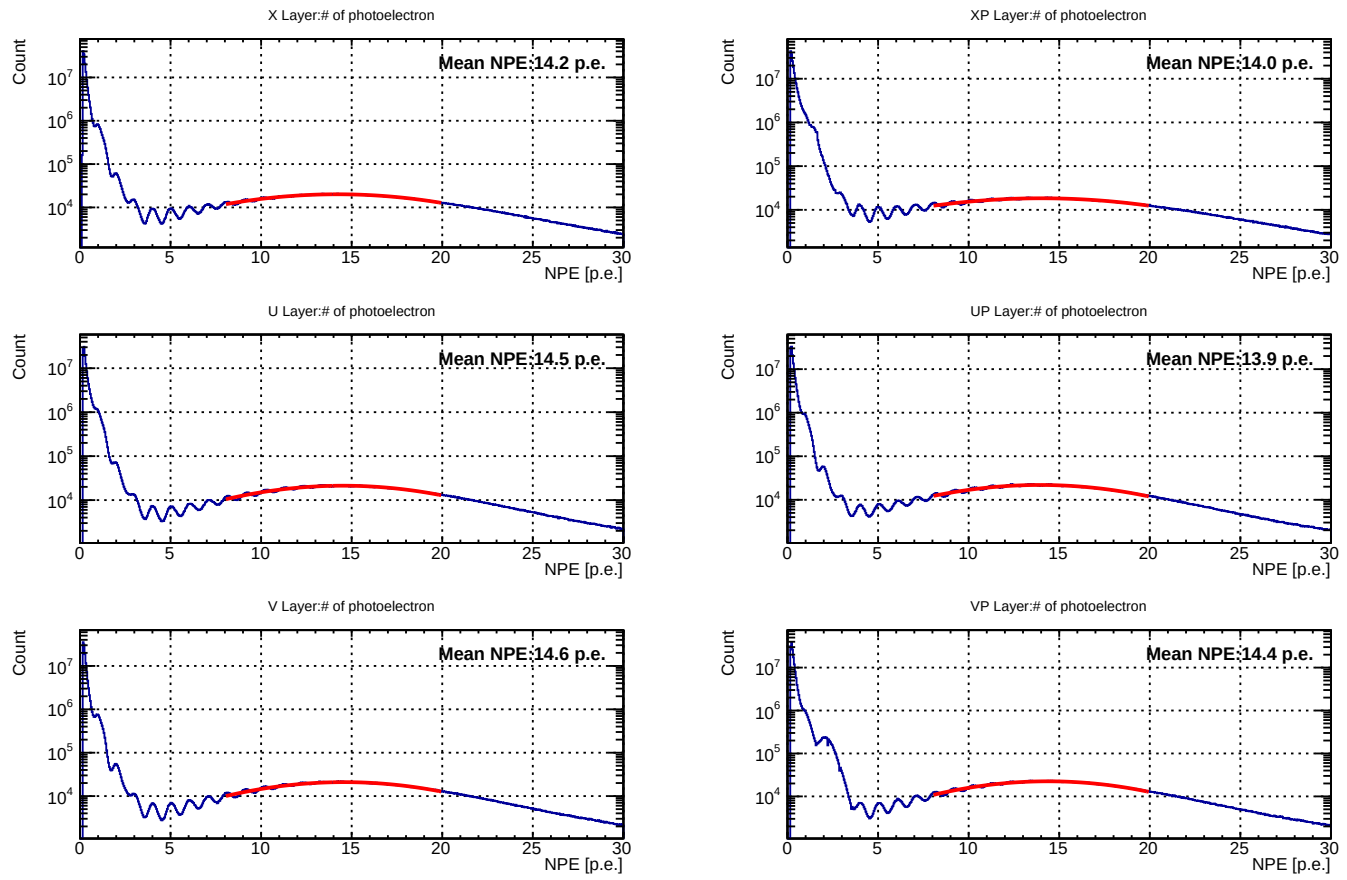


図 5.7: $V_{op} = 58.5 \text{ V}$, $V_{th} = 3.5 \text{ p.e.}$ の時の光量分布
各層で 256 セグメントある光量分布を足した分布をガウス分布でフィットしている。

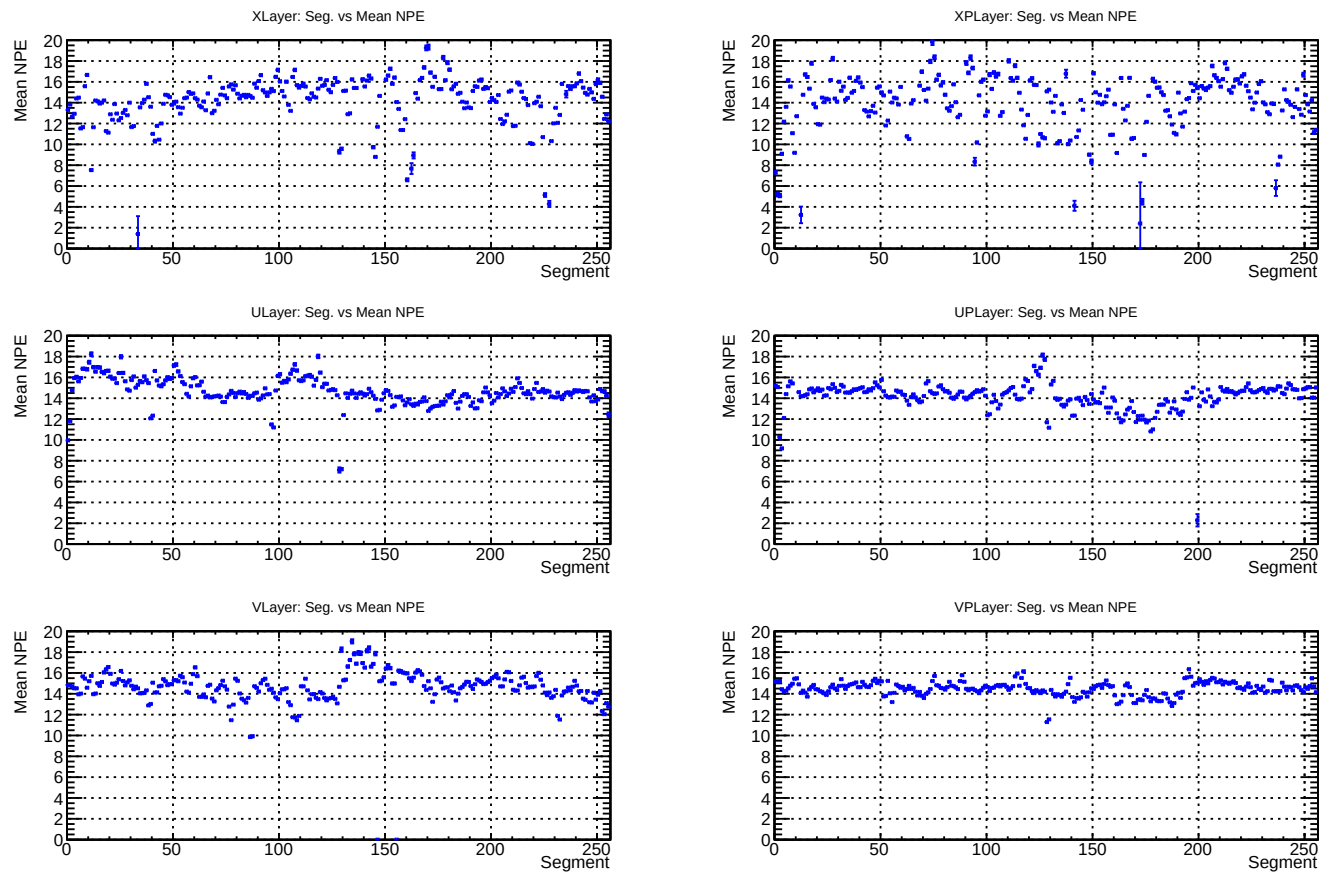


図 5.8: $V_{op} = 58.5 \text{ V}$, $V_{th} = 3.5 \text{ p.e.}$ の時のセグメントと平均光量の二次元相関
XX' 層では平均光量のばらつきが大きく、光量が減少しているセグメントが複数あることが分かる。

製作方法の確立されていなかった XX' 層についてはセグメントごとの平均光量のばらつきが大きく、大きく光量が落ちているセグメントがあることも確認できた。これは、XX' 層で顕著であったファイバーのクラックや折れが原因であると考えられる。一方で設計や製作方法を見直した UU', VV' 層については光量が大きく落ちているセグメントは少なく、光量のばらつきも小さくなっている。

また V_{op} と V_{th} を変化させていった場合の平均光量のグラフを図 5.9 に示す。各点で表されている値は全層の平均値をとったものをプロットしている。

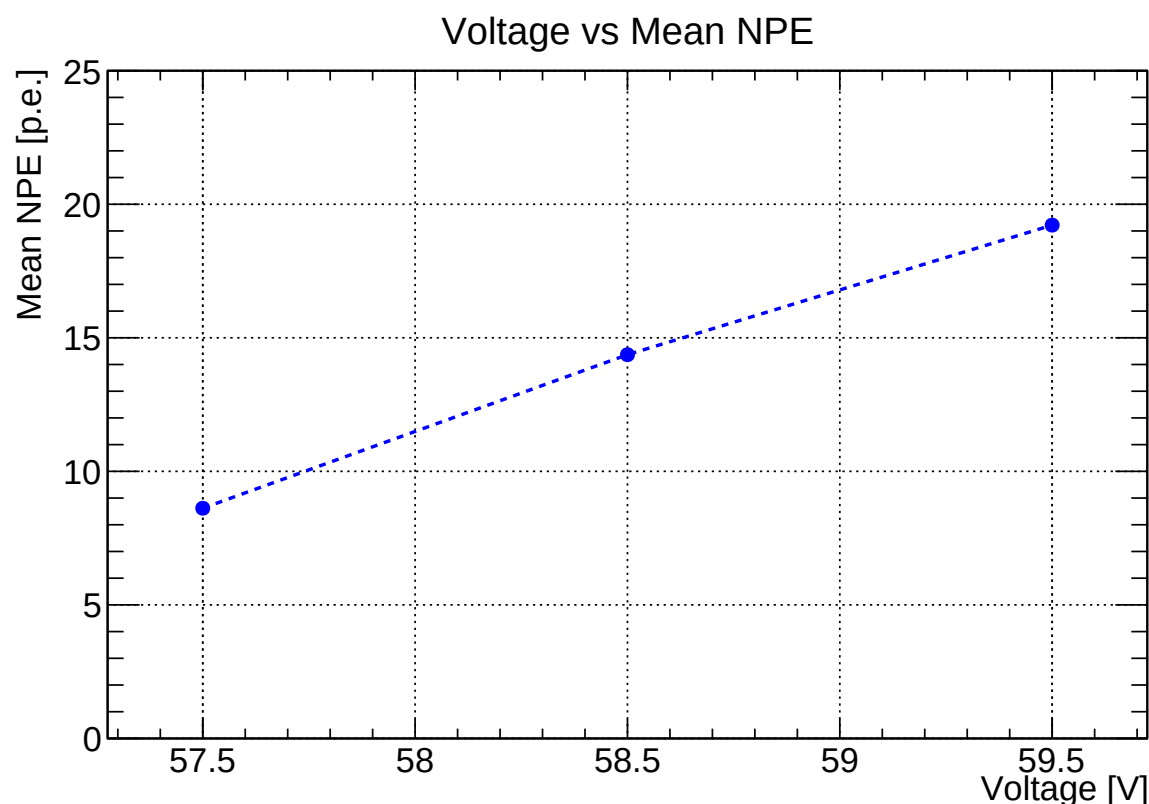


図 5.9: 平均光量の V_{op} 依存性

高レート環境下で使用することを考えるとなるべく V_{op} を下げることが望ましいが V_{op} を 57.5 V まで下げてしまうと平均光量が要求される光量である約 8 p.e. 程度まで低下してしまうことが確認された。また実際に V_{op} を下げると検出効率が低下することも確認しており、これについては後述の検出効率の章で述べる。

5.3 ヒットパターン

ヒットパターンを確認することでチャンネルアサインや動作が正常かを確認する。TDC を時間に変換した値である Time が $-5 < \text{Time [ns]} < 5$ を満たすイベントはヒットであるとしてヒットパターンを確認する。XXX 配置においてビーム位置 $x = 0$ でビームを照射したときのヒットパターンは図 5.10 となる。

図 5.11 は $V_{op} = 58.5$ V, $V_{th} = 3.5$ p.e. の条件でビーム位置を変化させた複数のランのヒットパターンを重ねて表している。そのため図 5.11 ではヒットパターンに複数の山が存在する。

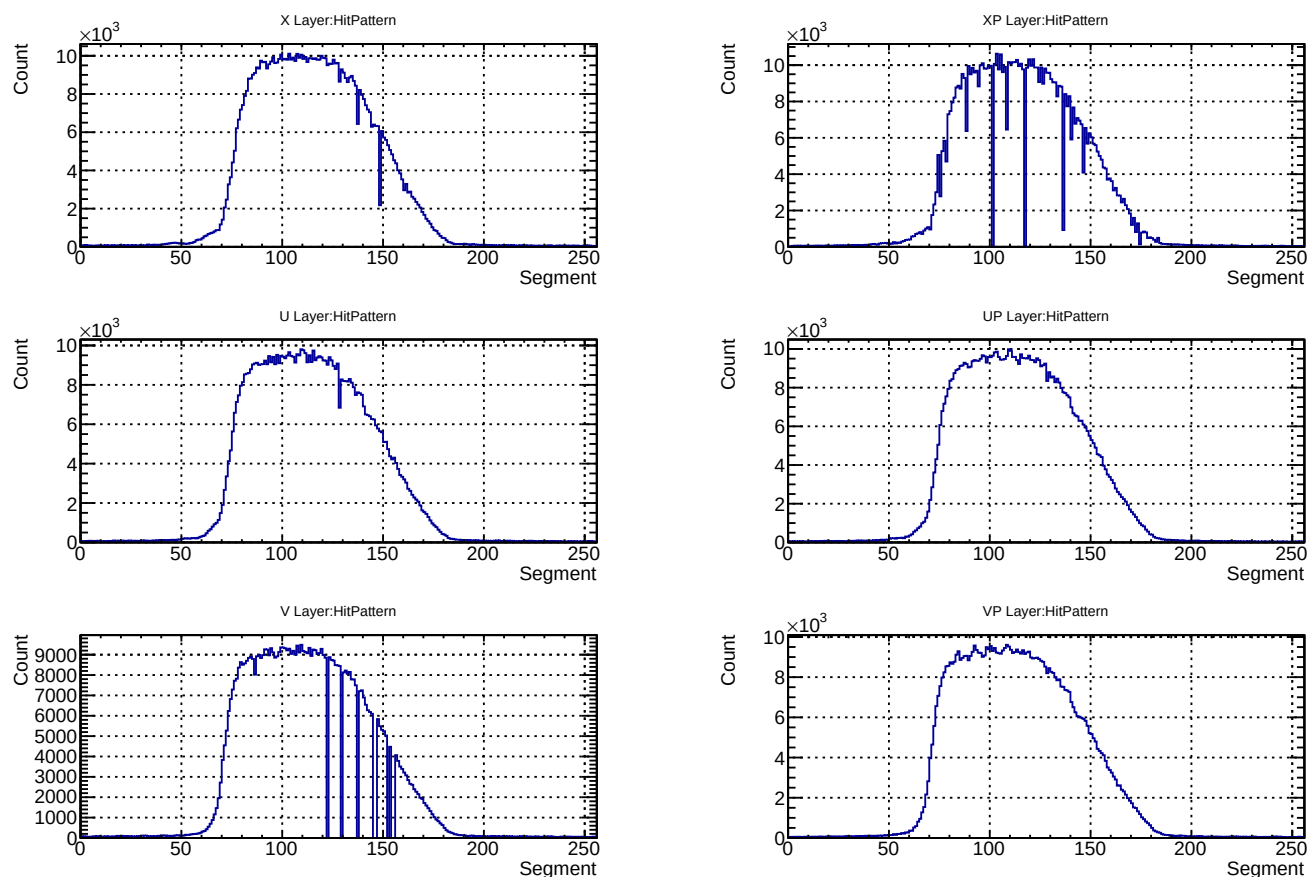


図 5.10: 有感領域の中心付近でのヒットパターン

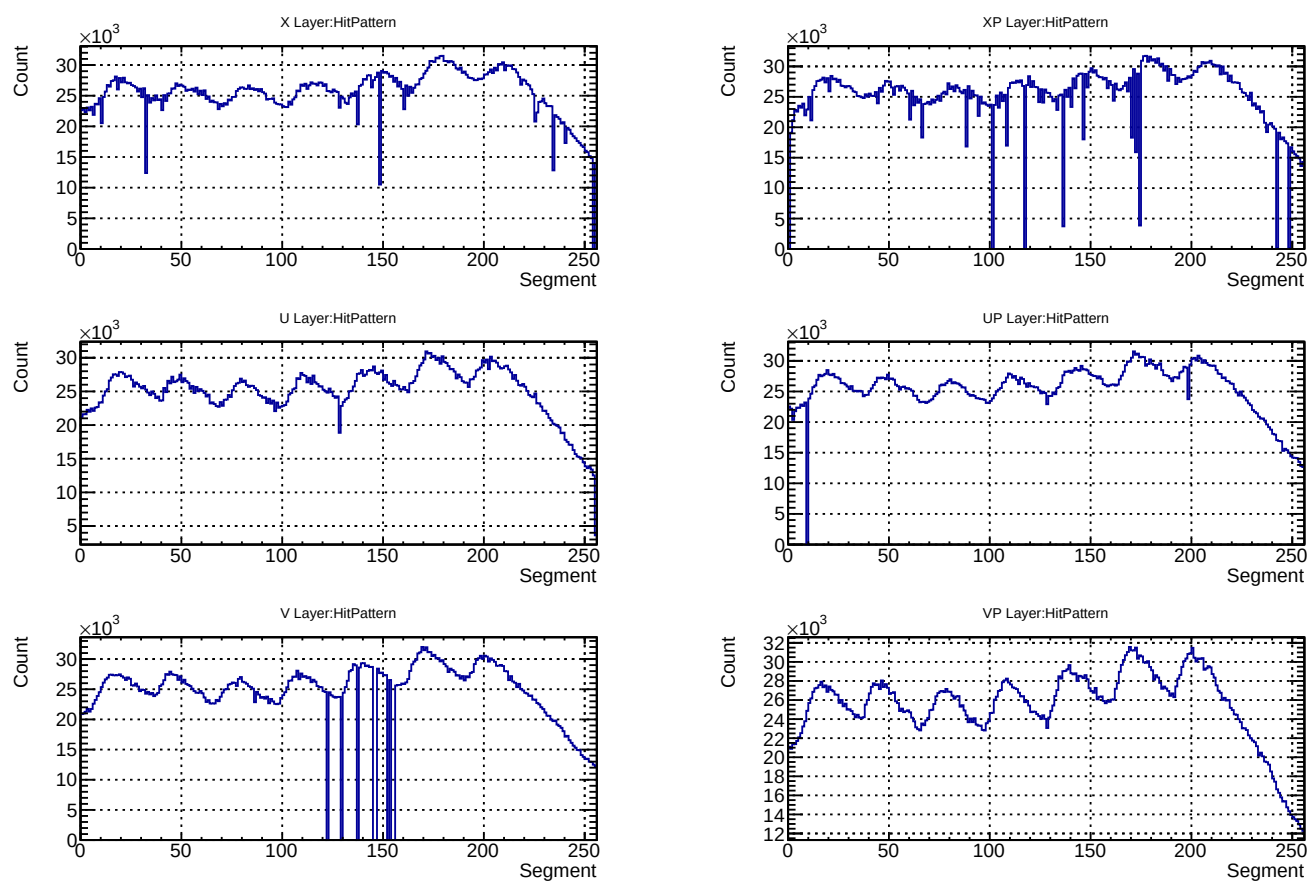


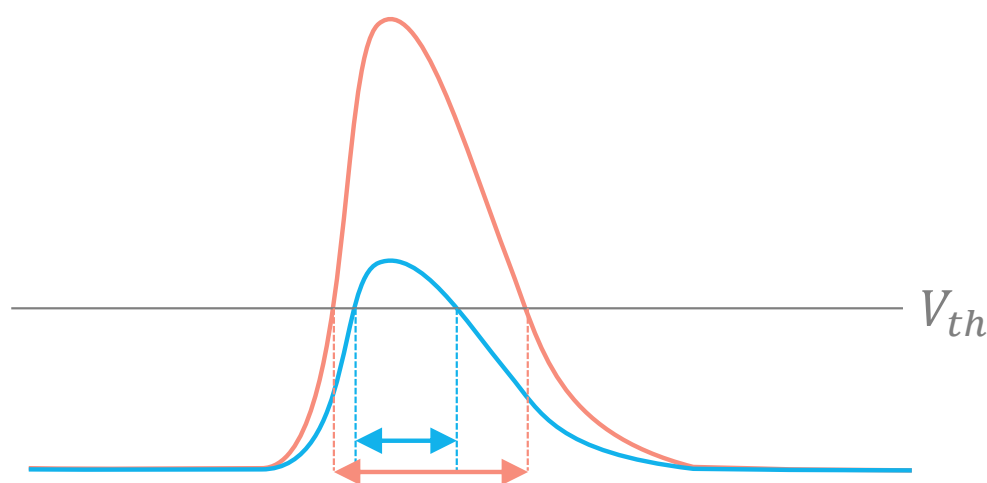
図 5.11: ビーム位置を変化させた複数のランを足したデータでのヒットパターン
ビーム位置が変化したデータが足されているため複数の山の構造が見られる。

X' 層と V 層においてカウントがゼロとなっているセグメントは、実験に用いたケーブルの接触不良によっ

て ADC と TDC のデータが取得できていなかったため抜けチャンネルとなってしまった。また X,X' 層で局部的にカウント数が減少しているセグメントはファイバーにひびが入っていたり折れてしまっていると考えられ、正常にヒットを検知できていない。一方でこういったヒットを検知できないファイバーは、U,U',V,V' 層では大幅に減少している。

5.4 時間分解能

パラメーター作成の章で TDC のタイミングをフィッティングで求め、時間情報 Time に変換した。しかし図 5.5 のように Time 分布は左右対称となっておらず、これは ADC の波高に応じて TDC のタイミングが変化することに起因する。ADC の波高と相関のある量として Time Over Threshold(TOT) がある。これは図 5.12 のように波形が threshold を上回っている時間のことであり、波高が高ければ TOT の値が大きく波高が低ければ TOT の値が小さくなる。



Time Over Threshold

図 5.12: Time Over Threshold(TOT) の概念図

波高が低い (青) と TOT は小さくなり、波高が高い (橙) と TOT が大きくなるというように TOT と ADC には相関が存在する。

したがって、あるセグメント (V 層 seg.90) の TOT と Time の 2 次元相関 (図 5.13) を見ると相関があることが見て取れる。これを相関をなくすように補正することで時間分解能を向上させることができる。各セグメントごとにこの相関は若干異なるため全セグメントにおいて以下の手順を行う。

1. セグメントごとに TOT と Time の 2 次元相関をプロットする。
2. TOT 方向の各 Bin について中心値とエラーを計算する。(図 5.13 緑色のプロット)
3. $f(TOT) = \frac{C_1}{\sqrt{TOT - C_2}} - C_3$ の関数系でフィットし、パラメーター C_1, C_2, C_3 を求める。
4. 補正後の時間 CTime を以下のように決め、相関を補正する。

$$CTime[ns] = Time - f(TOT)$$

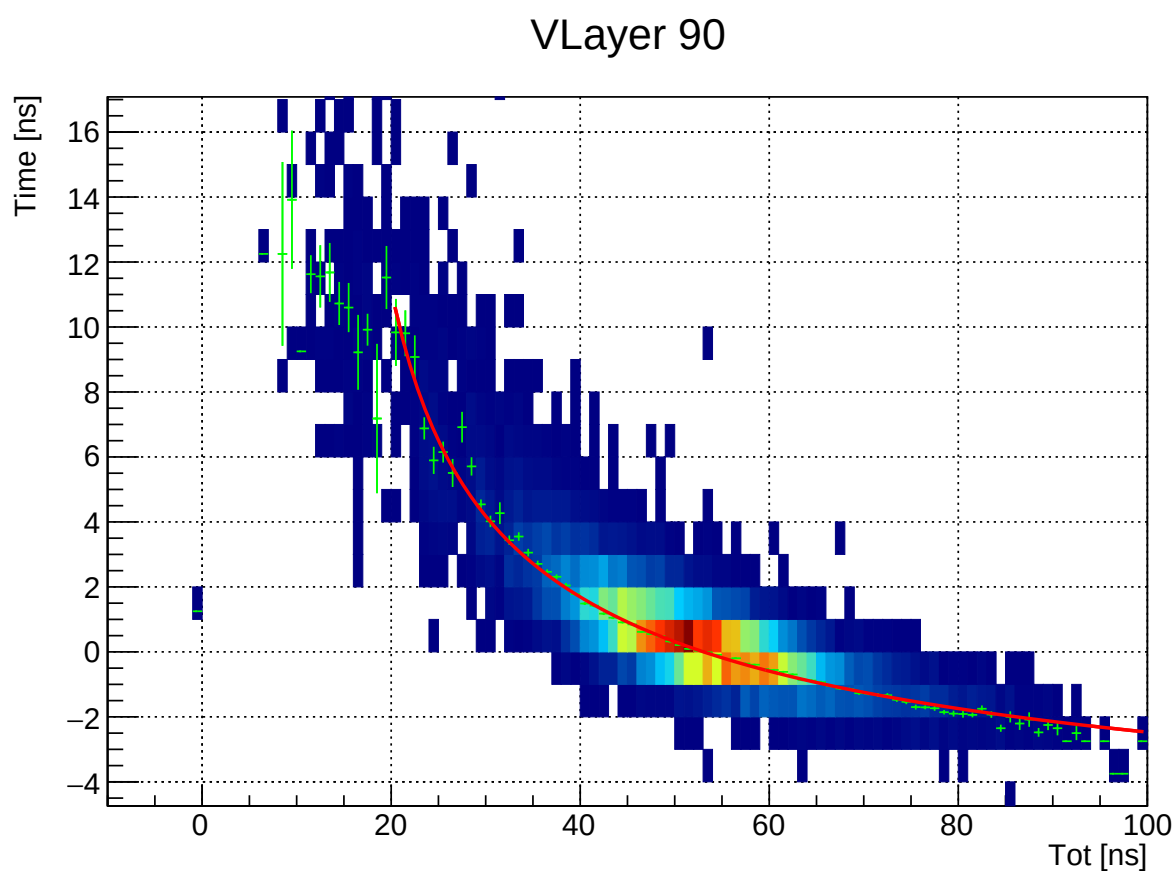


図 5.13: Pulse Hight Correction のためのフィッティング

TOT と Time の 2 次元プロットを行った後 x 方向の各ビンで中心値を求める．この中心値を通るようにフィッティングで $f(\text{TOT})$ のパラメーターを決定する．緑線は bin における y の中心値とエラーを表し，赤線はフィッティング関数 $f(\text{TOT})$ である．

補正前の各層ごとの TOT と Time の 2 次元相関 (256 セグメントの総和) は，図 5.14 のように相関を持っているが，補正後の時間分布 CTime は図 5.15 のように相関がなくなっている．

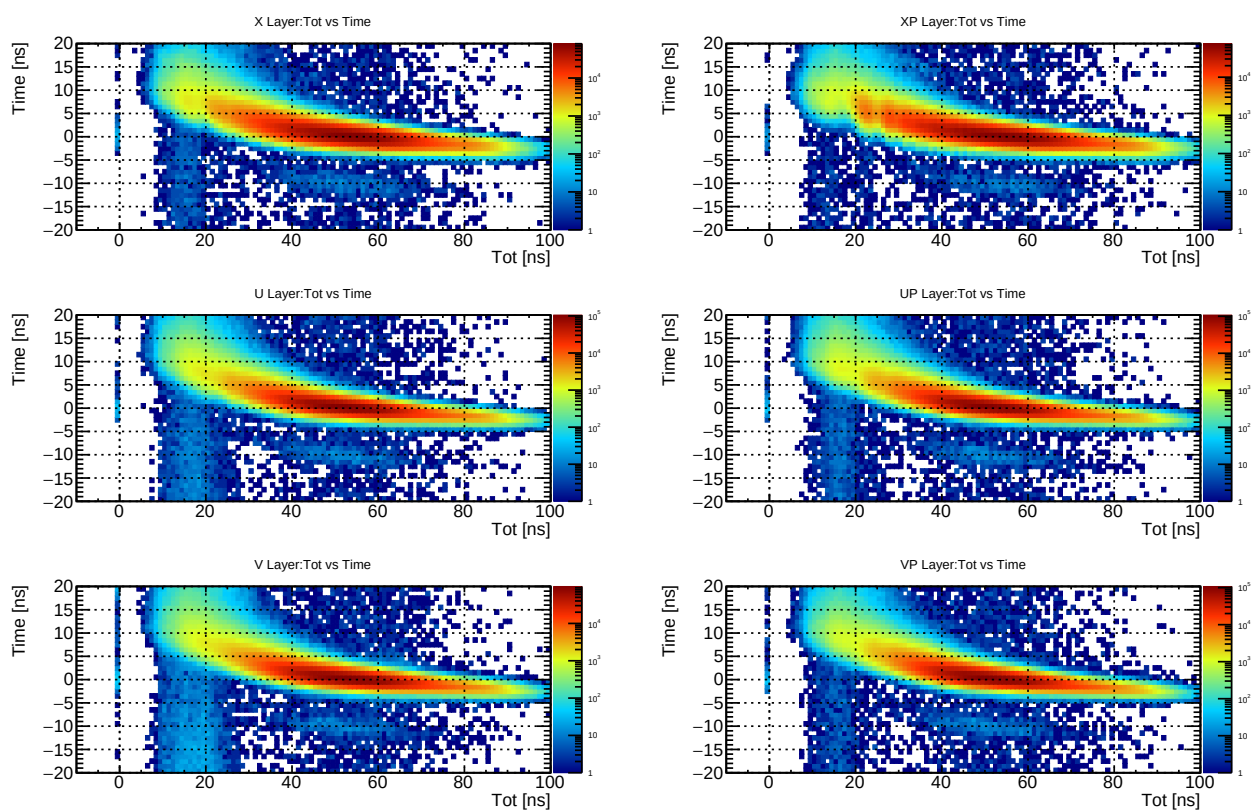


図 5.14: TOT と Time の二次元相関 (PHC 補正前)

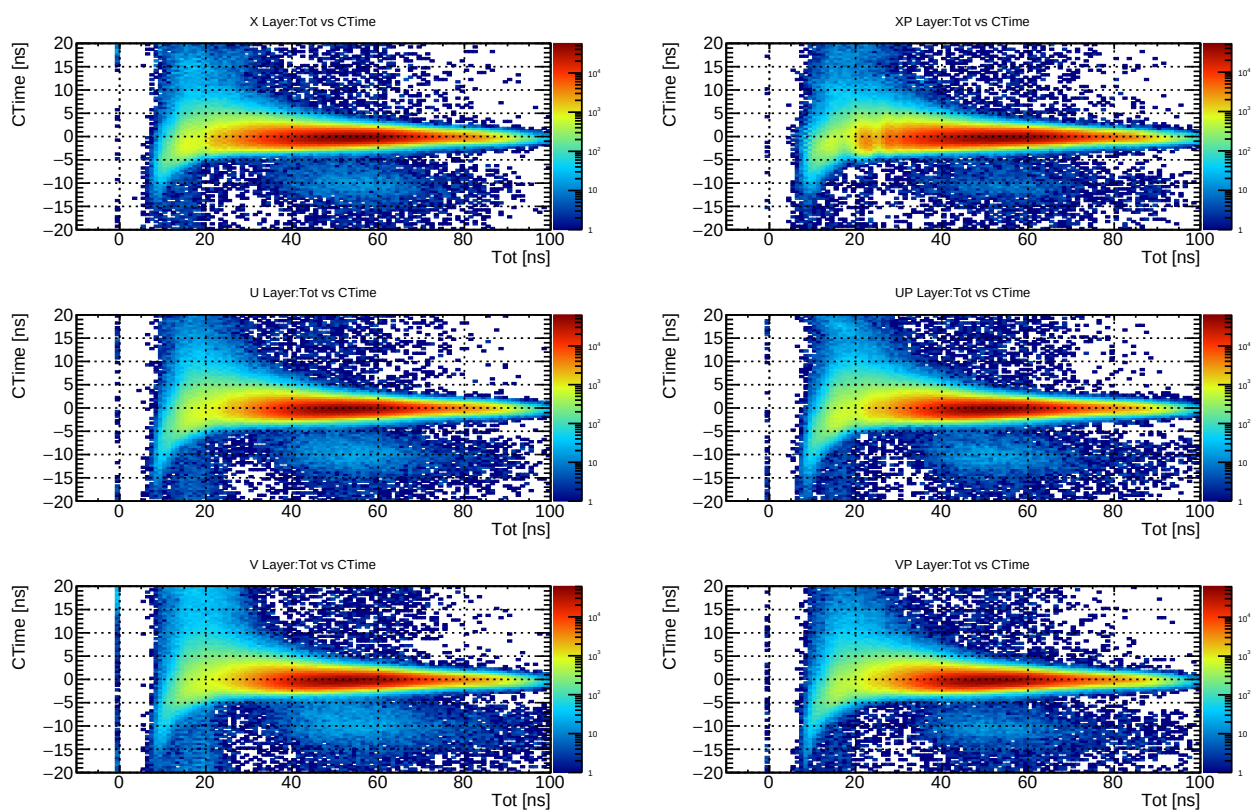


図 5.15: TOT と PHC 後の時間分布 (CTime) の二次元相関

TOT と CTime では図 5.14 のような相関がなくなっていることがわかる。

図 5.15 を y 軸方向に射影した各層ごとの CTime 分布は図 5.16 のようになった。これをガウス分布でフィットすることで時間分解能を算出した。

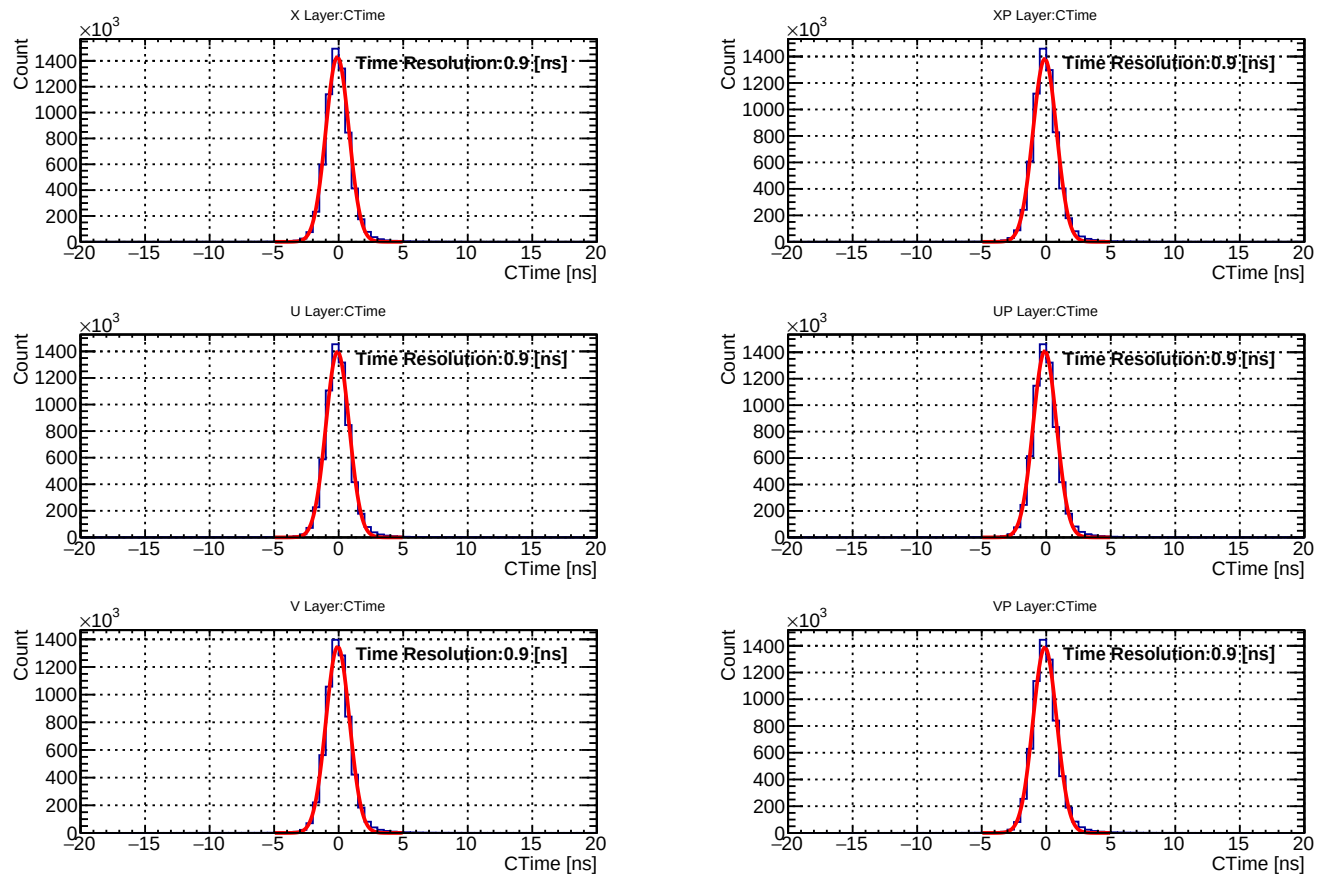


図 5.16: 時間分解能のフィッティング

時間分解能は V_{op} , V_{th} ごとに算出し、全層の時間分解能の平均値を図 5.17 に示している。また具体的な値は表 5.1 にまとめた。時間分解能は V_{op} で変化し、 V_{op} を上げるほど時間分解能が改善していくことが分かった。一方 V_{th} を 2.5 p.e.~4.5 p.e. と変化させていってもほとんど時間分解能は変化しなかった。BFT-D に対する時間分解能の要求は 3.3 ns であったため、いずれの V_{op} , V_{th} の組み合わせでも要求を満たすことが明らかとなった。

E40 実験で用いられていたファイバー検出器 BFT の時間分解能も約 1 ns であったことを考えると妥当な結果であるといえる。また BFT でのタイムゲートが ± 6 ns であったことを考慮すると、BFT-D のタイムゲートも同程度となると考えられる。このタイムゲートはビームバンチ間隔 20 ns より短いため、ビームバンチごとに粒子を分けるには十分な時間分解能である。

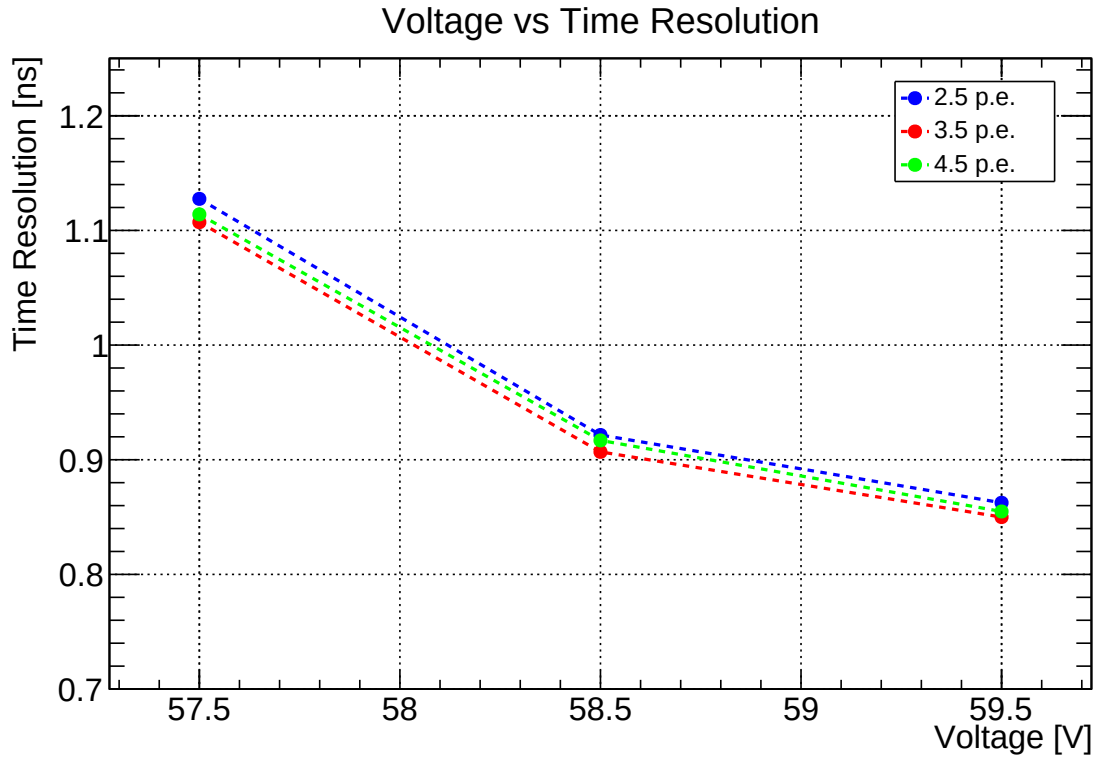


図 5.17: 時間分解能の V_{op} と V_{th} 依存性

表 5.1: 各 V_{op} , V_{th} での時間分解能の値

V_{th} [p.e.]	$V_{op} = 57.5$ V	$V_{op} = 58.5$ V	$V_{op} = 59.5$ V
2.5	1.12	0.92	0.86
3.5	1.10	0.91	0.85
4.5	1.11	0.92	0.85

5.5 Multiplicity

1 層あたりのヒット数である Multiplicity についても算出した。本検出器は俵積みになっているため Multiplicity は 2 が最大になると考えられ、手前の 2 つのファイバーの間をすり抜けたり Hit を検知できないファイバーが存在したりすると Multiplicity=0 または 1 などにカウントされる。図 5.18 はビームが $x = 0$ の時のデータに対し Multiplicity を解析したものである。

明らかに X' 層は他の層と異なり Multiplicity=0 が多く、ヒットを検知できていないことが分かる。また Multiplicity=3 の割合も高くなっているのは、ファイバーがたわんでいるため隣のファイバーと少し重なっているなどして余計にヒットしているからであると考えられる。V 層には Multiplicity=0 の割合が他層に比べて高いが、これは抜けチャンネルによるものでファイバーがヒットを検知できていないからではない。

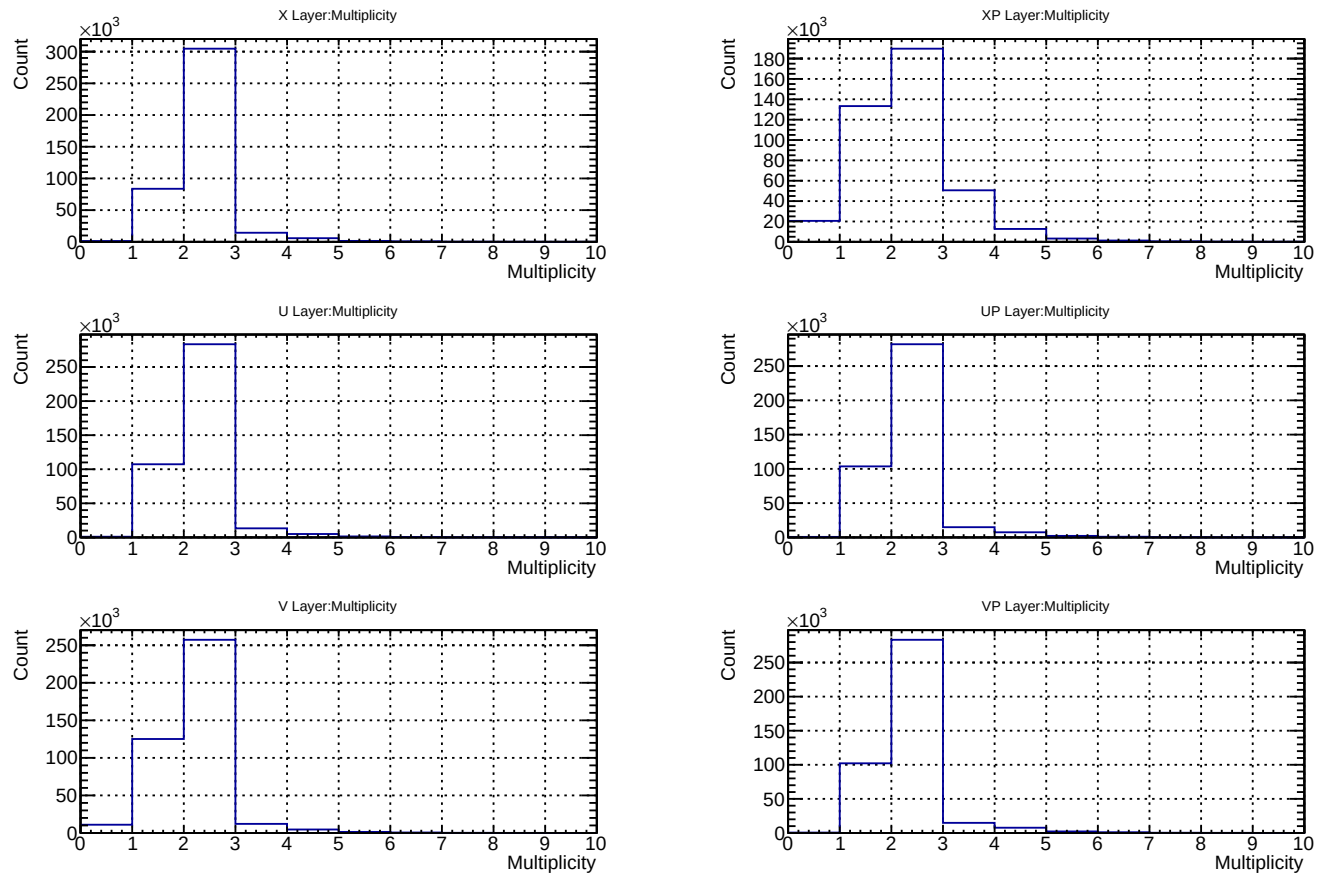


図 5.18: ビーム位置 $x = 0$ での Multiplicity

X' 層は Multiplicity=0 が多くヒットが検知できていないセグメントが多い.V 層における Multiplicity=0 の割合が高いのは抜けチャンネルによるものでファイバー起因ではない.

5.6 クラスタリング

クラスタリングとは複数の Hit を一つのクラスターとしてまとめて扱う処理である. BFT-D は俵積みの構造でファイバーが並べられているため基本的には隣あうファイバー 2 本が Hit するため, これらをまとめて 1 クラスターとして扱う. 図 5.19 にクラスターの概念図を示す.

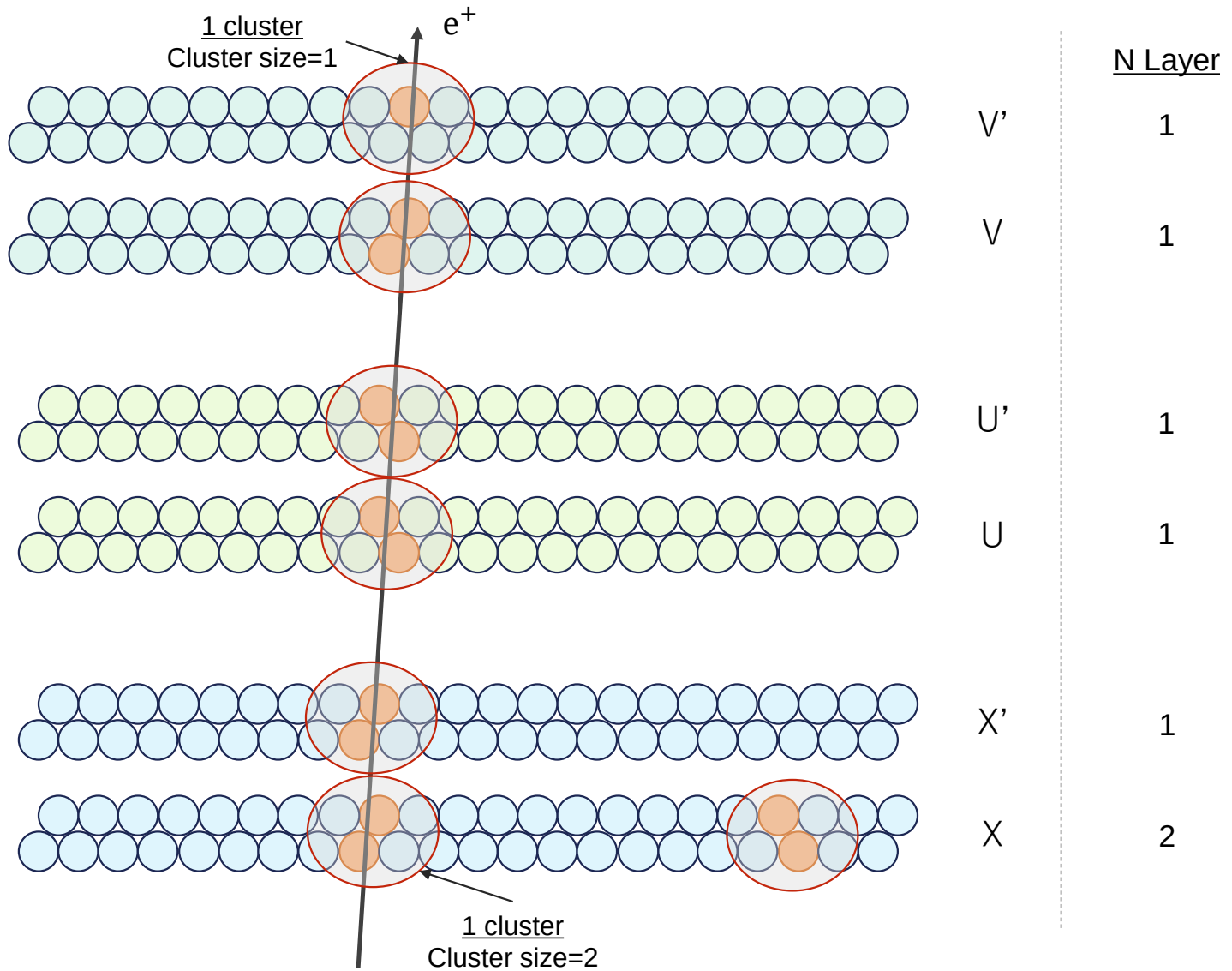


図 5.19: Cluster の概念図

ClusterSize は 1 クラスターの中に含まれる Hit 数, NLayer はある層にクラスターがいくつあるかを表す量である。

クラスタリング処理の際, クラスターは以下の条件をすべて満たすとクラスターが形成される。

- ADC と TDC のあるセグメントを Hit とする。
- Cluster の中で最も 0 に近い CTime が $-5 < \text{CTime} < 5$ の範囲にある (TimeCut)
- 複数 Hit あれば, Hit セグメントが隣り合っている。
- クラスターに Hit を加える際, 隣り合う Hit との時間差が 8ns 以下となる。

このように形成したクラスターがもっともらしいか確かめるため, NLayer(図 5.20) と ClusterSize(図 5.21) の二つの量について調べた。NLayer は図 5.19 に示したように 1 層にクラスターがいくつ形成されているかを表す量であり, ClusterSize は 1 クラスターの中に Hit をいくつ含むかという量である。

図 5.19 のように 1 粒子のみが通過するようなイベントに対しては NLayer=1 が最も多くなるはずである。実際に NLayer のプロットを見ると, 1 が最多となっておりもっともらしいといえる。また 2 粒子通ったイベントやクロストークの影響によって NLayer=2 となるイベントもわずかに存在している。

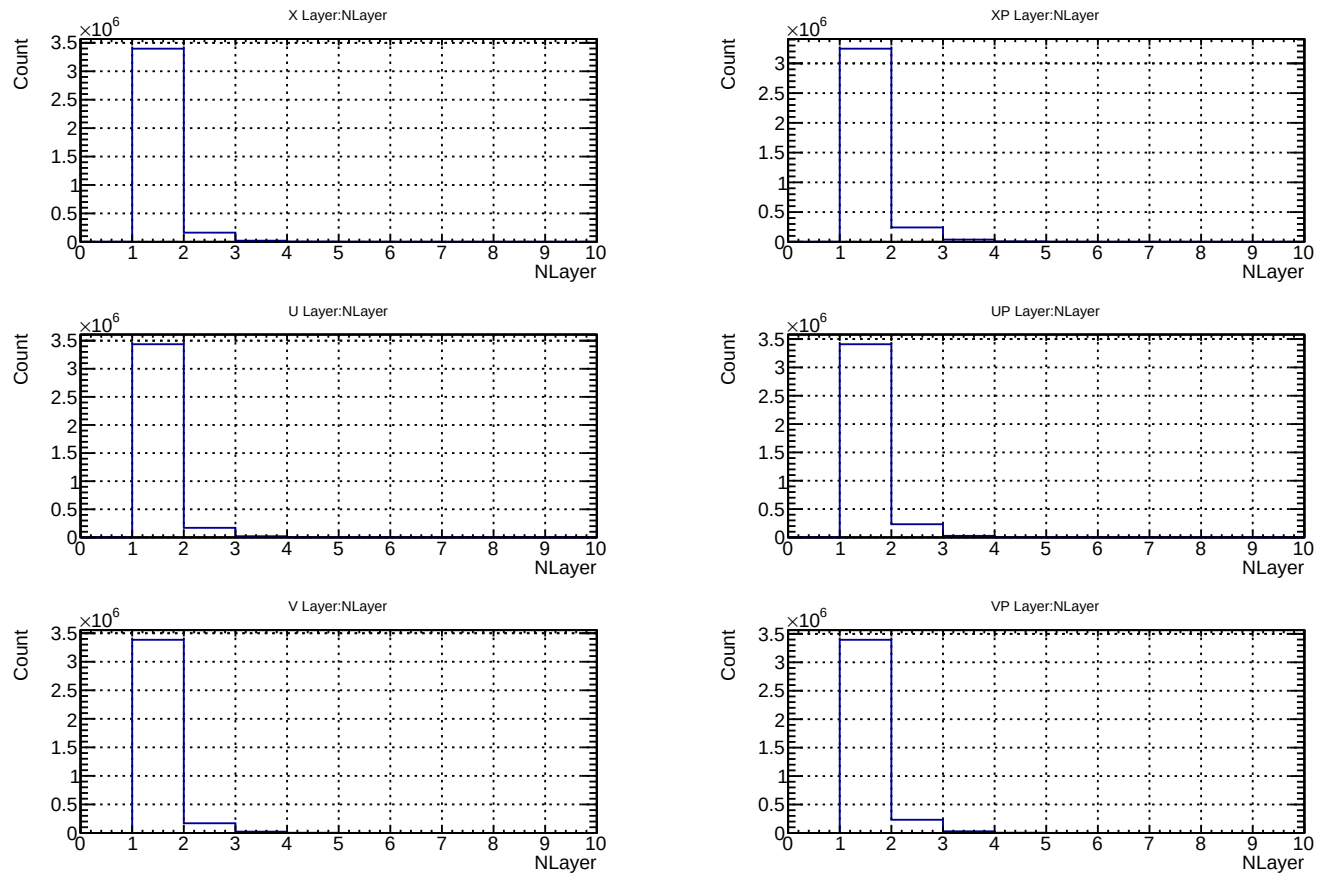


図 5.20: 各層での NLayer

また ClusterSize についても図 5.21 に示す. ClusterSize は依積みの構造から ClusterSize=2 が最多となっており, その次に ClusterSize=1 が多くなっている.

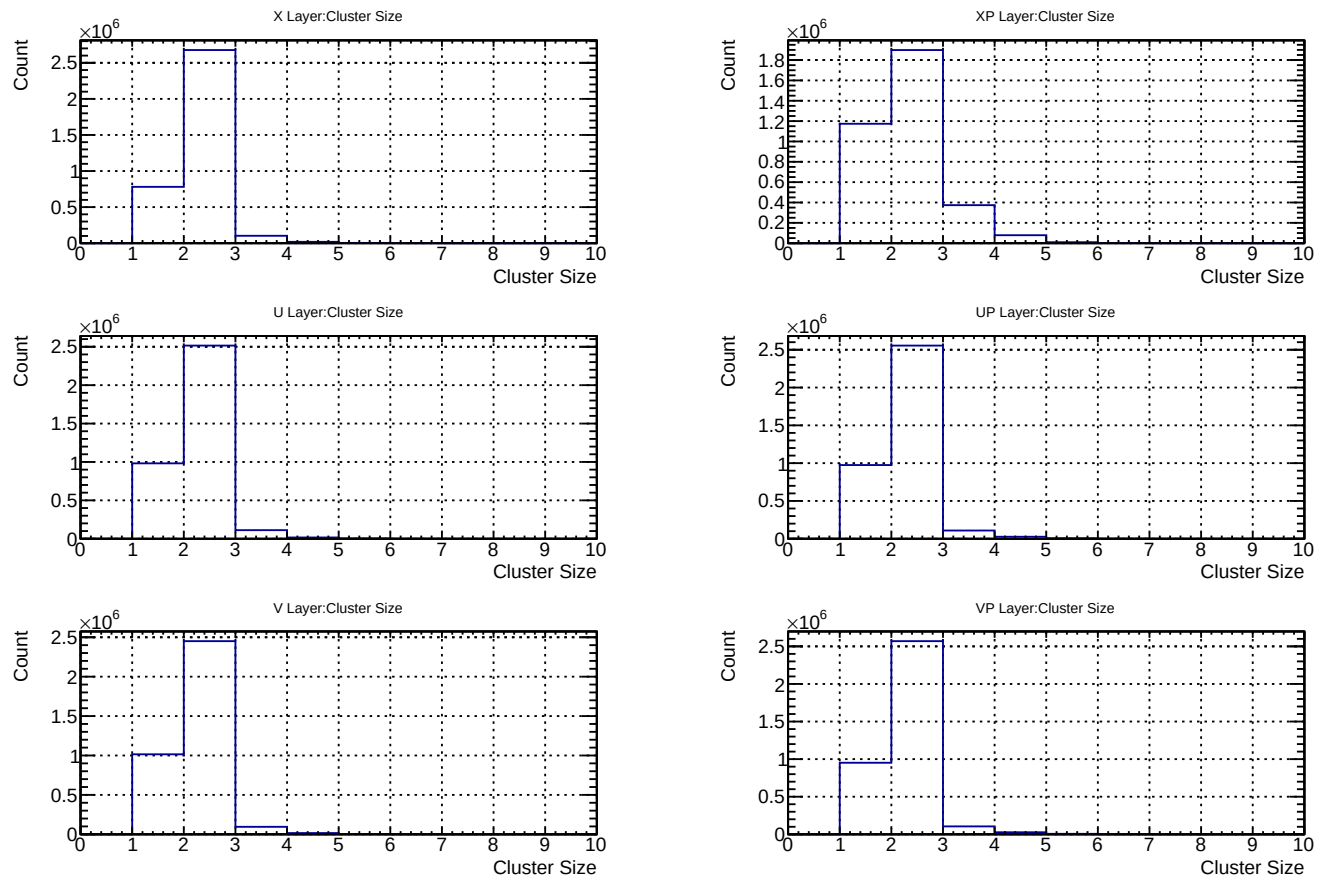


図 5.21: 各層での Cluster Size

1Cluster がもつ合計の光子数を total photoelectron と呼ぶ. この量は粒子が通過したファイバーの path length に対応する量となる. 1 ファイバーあたり 14 p.e 程度を落とすことが平均光量の章で明らかとなったため, その 2 倍程度の total photoelectron が最多となるのは検出器の構造からのもっともらしいといえる.

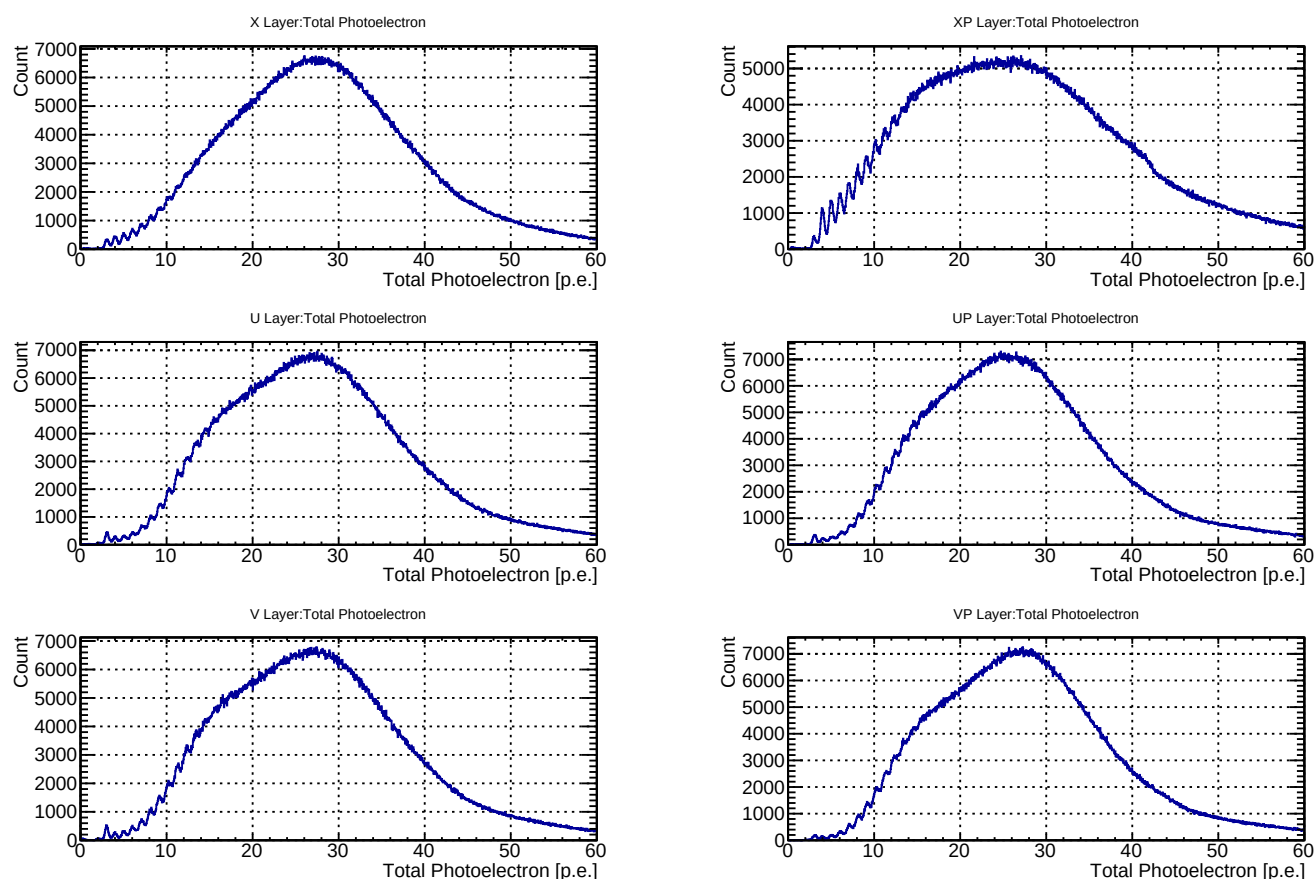


図 5.22: Total PhotoElectron

5.7 トラッキング

BFT-D の検出効率や位置分解能を調べるため全層の tilt angle を 0° にした XXX 配置と UU' 層と VV' 層をそれぞれ tilt angle -45° , 45° とした XUV 配置でトラッキングを行った.

■ 2 次元 Tracking

XXX 配置では, ある z においてヒットした x 位置のみの情報が得られ y に関する情報は得ることができない. すなわち, 図 5.23 のように各層でのクラスターの位置から最大 6 組の (x, z) の組である (x_i, z_i) についての情報を得ることができる. ただし i は層番号で $i = 1 \sim 6$ である.

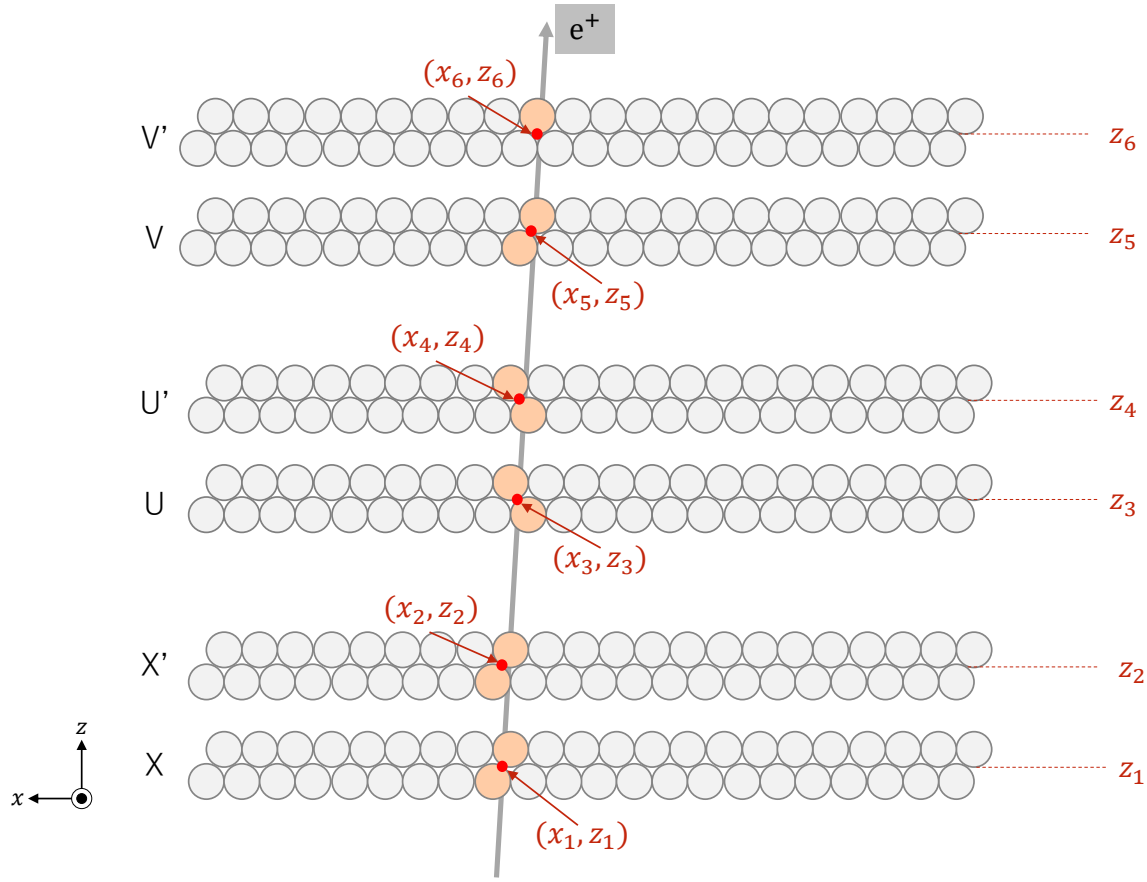


図 5.23: Tracking の概念図

このときこれらのヒットに対するトラックは1次関数で表すことができ, 下式のようになる.

$$x = u_0 z + x_0 \quad (5.4)$$

ただし x_0 は $z = 0$ での x 位置である.

これらのパラメータを決定するためには, 以下のような線形のフィッティングを行えばよい. まず下式の量を定義する. ただし $\sigma_i = 0.75/2\sqrt{12} \sim 0.1$ mm はトラッキングに用いる Hit 位置の標準偏差である. ファイバー径は 0.75 mm であるがクラスタリングによってその半分の分解能があるため, $\sigma_i = 0.75/\sqrt{12}$ からさらに 2 で割っている.

$$A = \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2} \quad (5.5)$$

$$B = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (5.6)$$

$$C = \sum_i \frac{z_i}{\sigma_i^2} \quad (5.7)$$

$$D = \sum_i \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \quad (5.8)$$

$$E = \sum_i \frac{x_i z_i}{\sigma_i^2} \quad (5.9)$$

$$F = \sum_i \frac{z_i^2}{\sigma_i^2} \quad (5.10)$$

$$(5.11)$$

これらを用いると, 式 5.4 の u_0, x_0 は以下のように求めることができる.

$$u_0 = \frac{EB - CA}{DB - A^2}, \quad x_0 = \frac{DC - EA}{DB - A^2} \quad (5.12)$$

このようにしてパラメーター u_0, x_0 を決定しトラッキングすることで任意の z における x を算出することができる。今回のトラッキングの解析では、トラッキングに用いる Hit が 5Hit または 6hit であるイベントに対してのみトラッキングを行っている。

トラッキングの質を評価する量である以下について評価を行った。

- NTrack : 1 イベントに対し再構成されたトラック (飛跡) 数
- NHit : 1 トラックを再構成するのに参加したクラスター数
- χ^2 : 最小二乗法によるフィッティングから求められた reduced χ^2

例として図 5.23 では NTrack = 1, NHit = 6 となる。今回は Trackig の条件に 5Hit 以上を課しているため、全 6 層のうち 2 層以上クラスターが形成されずに Hit 位置を特定できなかった場合 NTrack = 0 となる。ビームを有感領域の中心に照射したランについての上記の量を図 5.24, 図 5.25, 図 5.26 に示す。NTrack はほとんどが 1 に分布していて 1 イベントに対し 1 トラックのみ再構成されている。これは、ビームレートが高くないことを考慮すると妥当な結果である。さらに以下の式を用いて Tracking Efficiency を算出した。

$$\text{Tracking Efficiency}[\%] = \frac{(\# \text{ of total event} - \# \text{ of 0 track event})}{\# \text{ of total event}} \times 100 \quad (5.13)$$

結果は 99.7% となり, XXX 配置における中心付近の Tracking Efficiency は問題ないことが分かった。

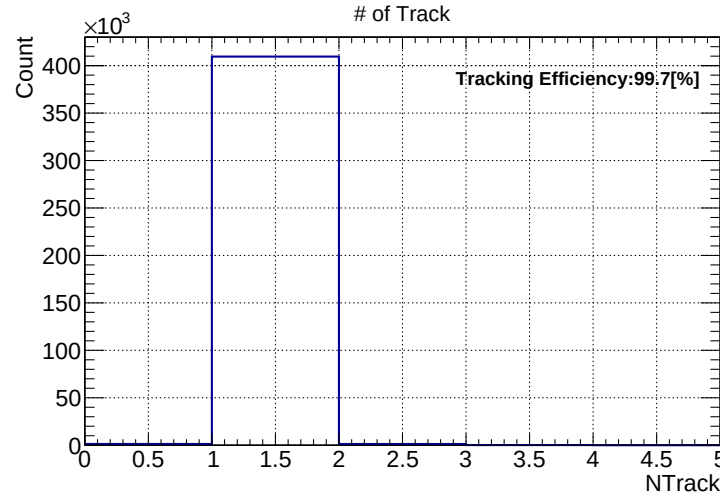


図 5.24: 1 イベントに対して再構成されたトラック数 (NTrack)

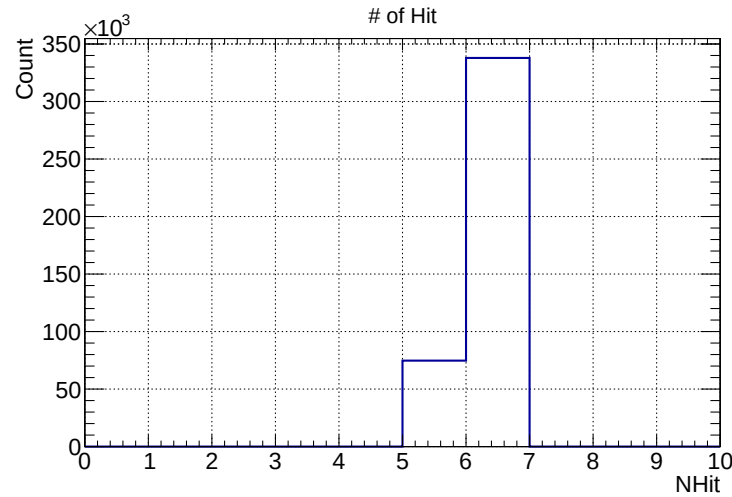


図 5.25: 1 トラックの再構成に参加したヒット数 (NHit)

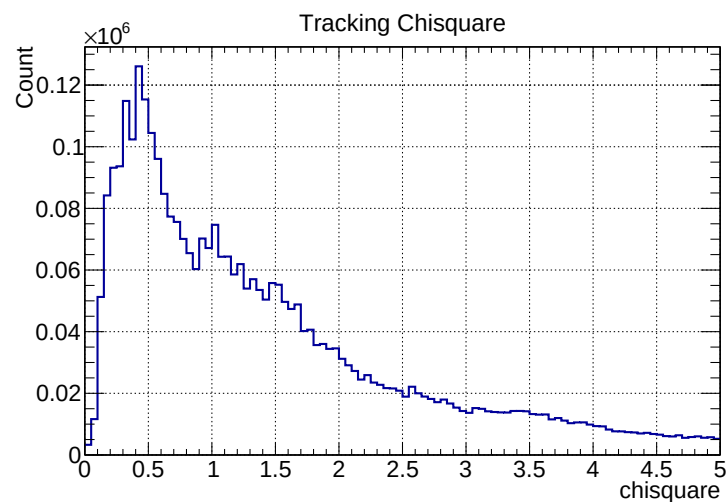
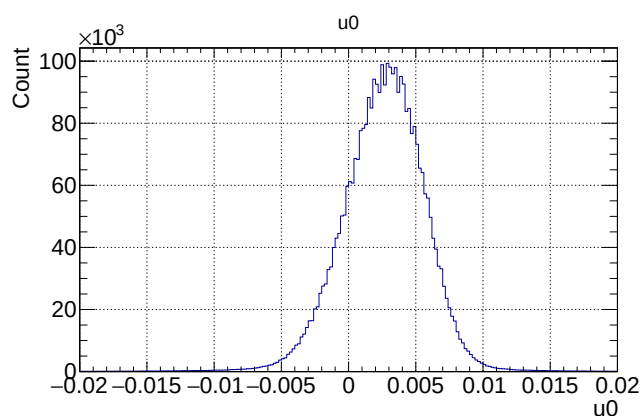
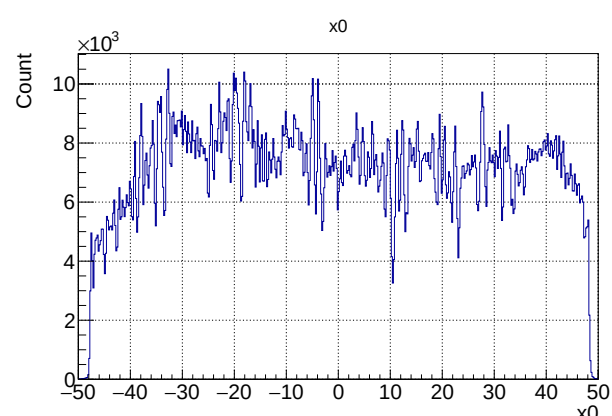


図 5.26: フィッティングにおける χ^2 分布

さらに前述のフィッティングから計算された u_0, x_0 は図 5.27 となった。ただし図 5.27 はビーム中心を -48 mm から 48mm まで、12 mm 刻みに変化させて行ったランをすべて足して解析したものである。 x_0 はビーム位置を変えてとっていることから複数のピーク構造が確認でき、 u_0 は中心が 0 から少しずれた場所にピークを持つことが確認できた。 u_0 が 0 にピークをもたないのは、BFT-D を設置する際にビームに対し垂直に設置できていなかったことに起因すると考えられる。しかし BFT-D を基準に考えれば少しの傾きを持ったビームが照射されていると考えられるため、解析上の問題はない。



(a) u_0 の分布



(b) x_0 の分布

図 5.27: x_0, u_0 の分布

また図 5.28 に x_0 と u_0 の 2 次元相関を示す。 x_0 と u_0 の相関を見ると複数の筋の構造が見られる。これはクラスターから算出されるヒット位置が離散的であるうえ、ビームがほぼ傾きを持っていないため全層でヒット位置がほぼ同じ場所となり再構成される傾きが離散的な分布となることに起因すると考えられる。

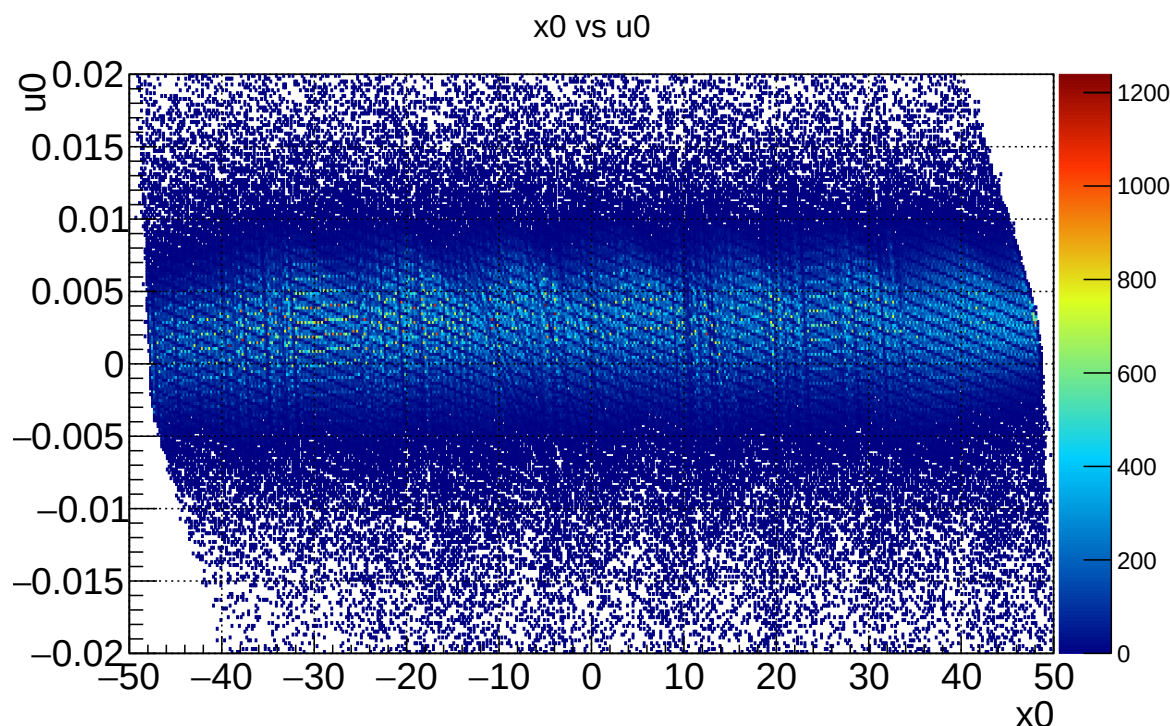


図 5.28: u_0 と x_0 の相関

■ 3 次元 Tracking

UU' 層と VV' 層を傾けた XUV 配置では x, y 方向両方の情報を得られるため 3 次元のトラッキングが可能となる. このとき任意の場所 z での x, y は以下の式から求めることができる.

$$x = u_0 z + x_0$$

$$y = v_0 z + y_0$$

この式で決定すべきパラメータは u_0, x_0, v_0, y_0 であり, これらを最小二乗法で決定することでトラックを再構成する. この際フィッティングに用いることができる点は最大でも 6 点であるため, フィッティングの自由度は 1 または 2 となる. 3 次元 Tracking の解析においても, 2 次元 Tracking と同様に 5Hit または 6Hit のイベントに対してのみトラッキングを行っている.

2 次元 Tracking と同様に Ntrack(図 5.24), NHit(図 5.30), χ^2 分布 (図 5.31) について評価を行った. 評価はビーム中心を有感領域の中心に当てているランについて行った. また, Tracking Efficiency は 99.1% と算出され問題なくトラッキングが行われていることを確認した. Nhit は 2 次元 Tracking と同じような割合で NHit = 5 が含まれており, 6 層のうち検出効率の低い層によって Hit が失われてしまっている. χ^2 分布は, 自由度 1 と 2 の分布を NHit = 5 と NHit = 6 の割合で重ね合わせた分布となる. 概形は自由度 2 の χ^2 分布となっているが特定の値にピークが形成されている. ファイバーによるヒット位置が離散的であることからそこから導かれるトラックとの残差が特定の値となり χ^2 が特定の値になりやすくなっていると考えられる.

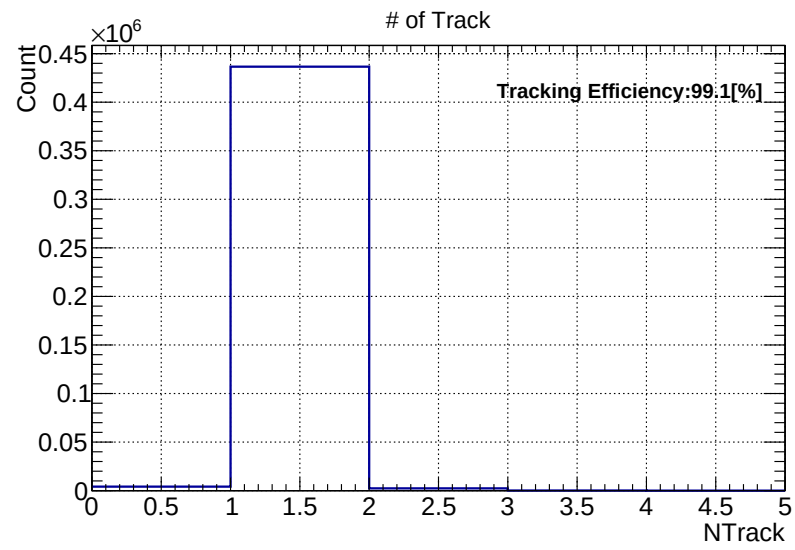


図 5.29: 1 イベントに対して再構成されたトラック数 (NTrack)

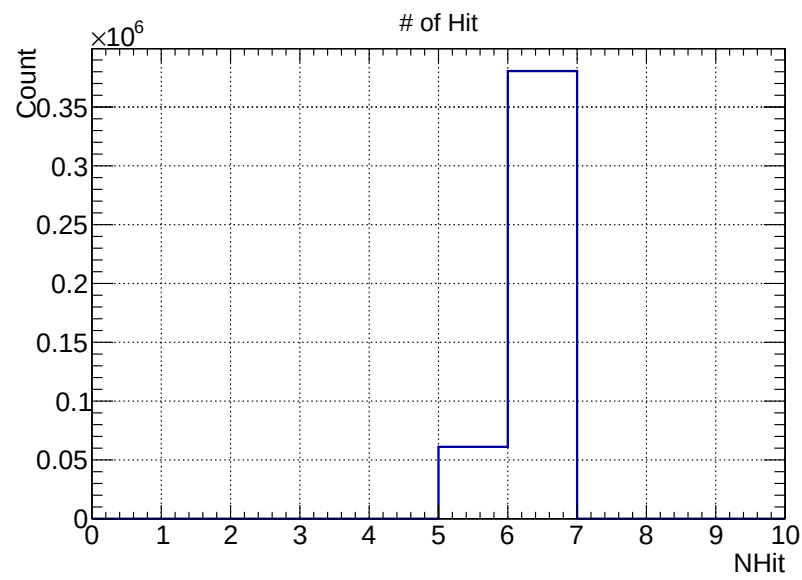


図 5.30: 1 トラックの再構成に参加したヒット数 (NHit)

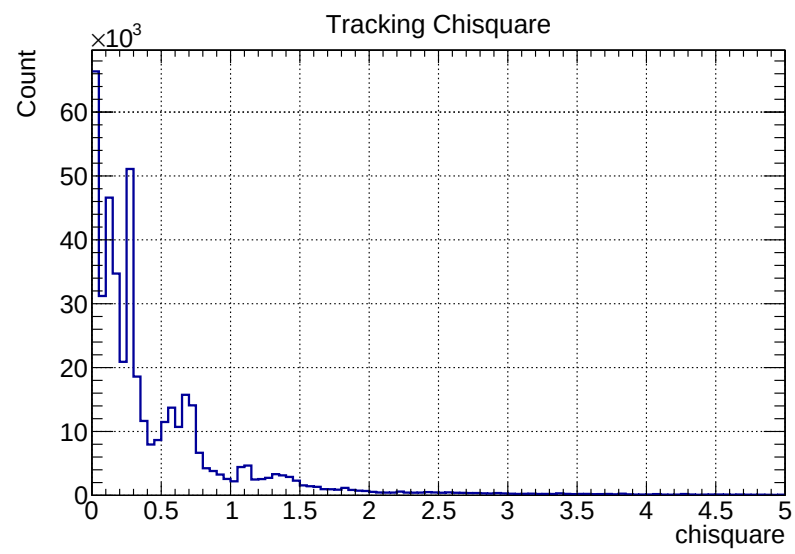


図 5.31: フィッティングにおける χ^2 分布

u_0 と v_0 の相関 (図 5.32) と x_0 と y_0 の相関 (図 5.33) についても確認した. u_0 と v_0 の相関については 2 次

元 Tracking と同様に複数の筋状の構造が確認されたが、ビームの傾きを正常に再現していると考えられる。

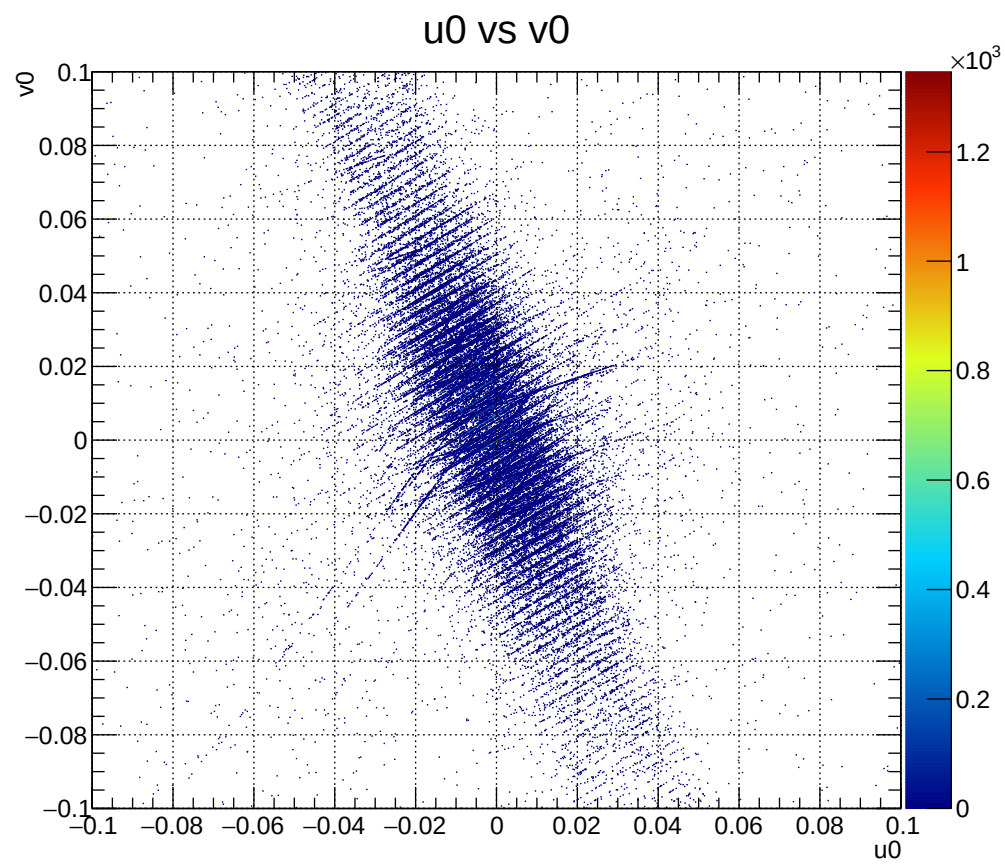


図 5.32: トラッキングから得られたパラメータ u_0 と v_0 の相関

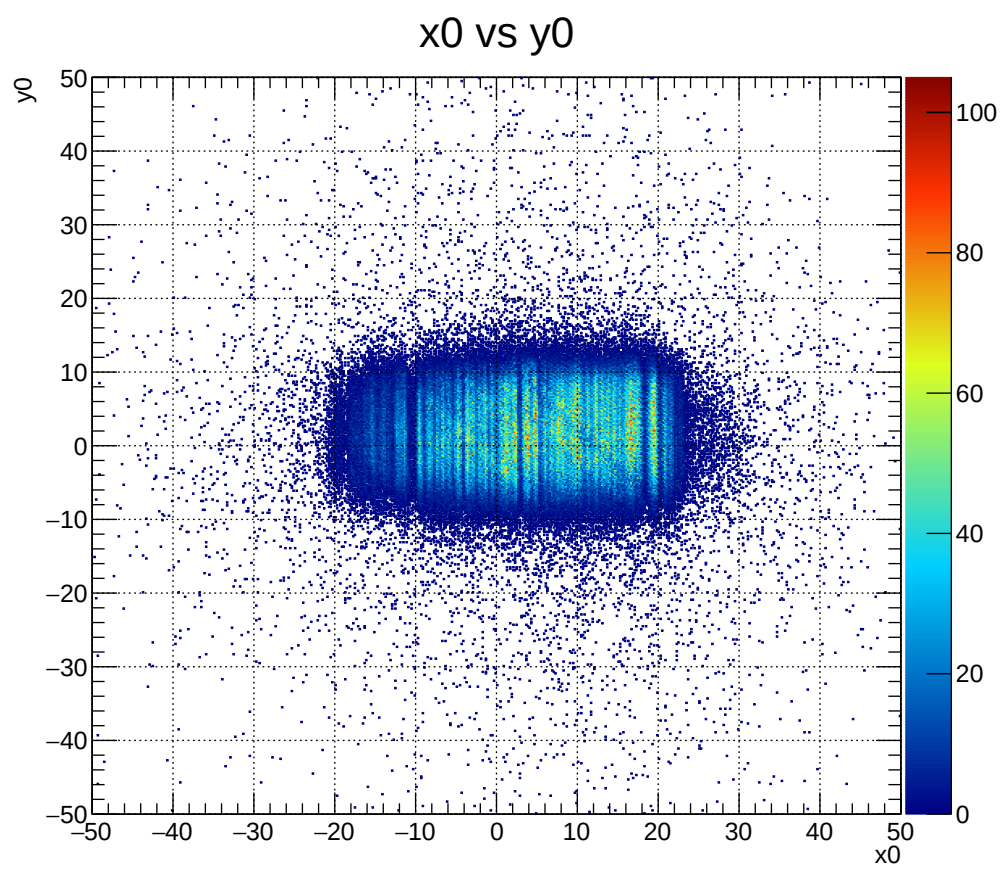


図 5.33: トラッキングから得られたパラメータ x_0 と y_0 の相関

また、XUV 配置ではビームの位置を変化させてデータを取得している。具体的には x 位置が (-30 mm, 0 mm, 30 mm), y 位置が (-20 mm, 0 mm, 20 mm) の組み合わせで計 9 点でのデータを取得している。各ランでの再構成されたトラックから導かれる Beam Profile を一つのヒストグラムに足し合わせたものが図 5.34(a) である。ヒストグラムに描かれた点線の交点がビーム中心になるようにビームを照射しており図 5.34(a) では各ランごとに z 軸をイベント数で規格化している。Intensity が減少している斜めの構造は V 層の抜けチャンネルや U 層の光量の低いファイバーなどの影響で、縦の構造は XX' 層のファイバー折れやクラックによってヒットを検知できていない影響によるものである。現在の解析では 5 層または 6 層でトラッキングを行っているため影響が大きくなってしまっているが、Hit を検知できないファイバーがあると検出効率の低下につながるため改善が必要である。図 5.34(b) には各ランごとに Beam Profile を色分けして表示し、同時に算出した Tracking Efficiency の値を示した。Tracking Efficiency の絶対値は X,V 層の抜けチャンネルの影響があるため正確に評価はできないが、場所による位置依存性があることが明らかとなった。ここで算出しているのは Tracking Efficiency であり、正確な検出効率の位置依存性については検出効率の章で議論する。

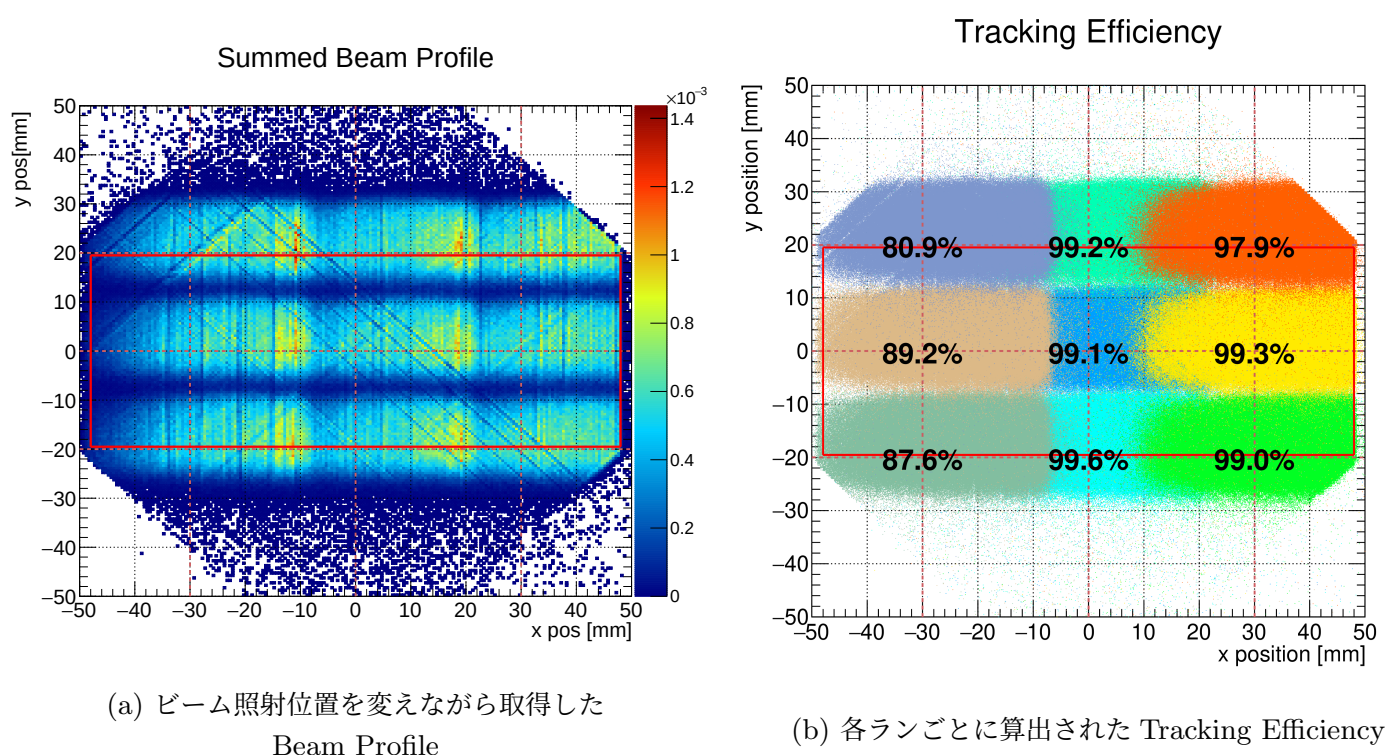


図 5.34: BFT-D 全体の Beam Profile と Tracking Efficiency の位置依存性

赤色の実線で囲われた領域は BFT-T の有感領域であり、点線の交点は各ランでのビーム中心の位置を表している。

5.8 検出効率

ここでは各ファイバーでの検出効率を算出することで、層全体としての検出効率を評価し要求性能を満たすか評価する。各ファイバーでの検出効率の算出にはトラッキングがより正確な XXX 配置でのトラッキングを用い、以下の手順で算出する。例として X 層のファイバーの検出効率を算出するとする。

1. トラッキング

XXX 配置でトラッキングを行う。この際求めたい層 (X 層) の Hit 位置はトラッキングに参加させない。またもっともらしいイベントを選別するため、X 層以外の 5 層 (X' 層 V' 層) でヒットがあるイベントを用いる。

2. 実際のヒット位置を確認する

まずトラッキングにより検出効率を求めたい層である X 層での予想される Hit セグメント (Seg.track) を算出する. 次に予想される Hit セグメントの周辺に実際の Hit があるかどうか確認することで, 実際に Hit したかを判別する.(図 5.35) 実際の Hit 位置と予想される Hit 位置のずれをどれだけ許容するかは実際の Hit 位置と予想される Hit 位置の残差分布から決定する. 残差分布は X 層で図 5.36 のようになっている. この分布をガウス関数でフィッティングすることで残差分布の σ は $\sigma = 0.55$ segment であることがわかった. これをもとに Tracking の不定性を考慮し, Seg.track を中心に 5σ の範囲に実際の Hit があればこの予想される Hit セグメントは Hit したとみなす.

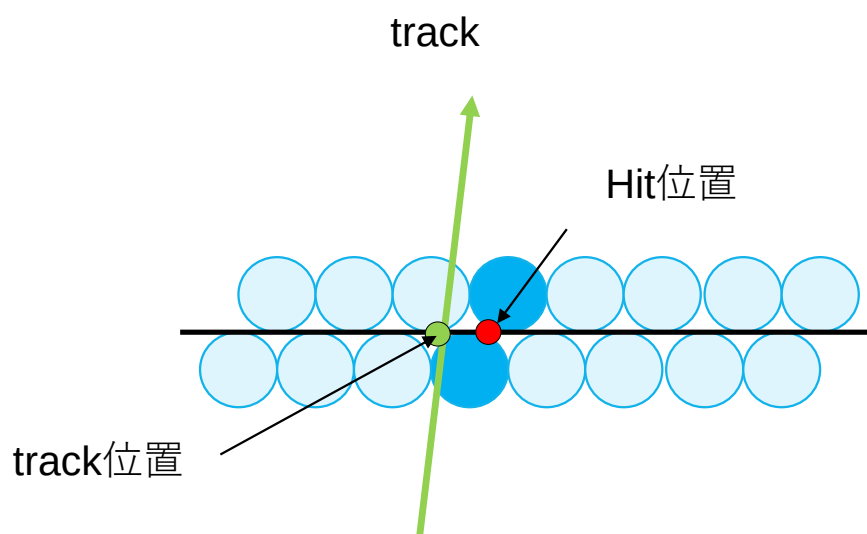


図 5.35: Tracking から予想される Hit セグメントと実際の Hit セグメントの関係

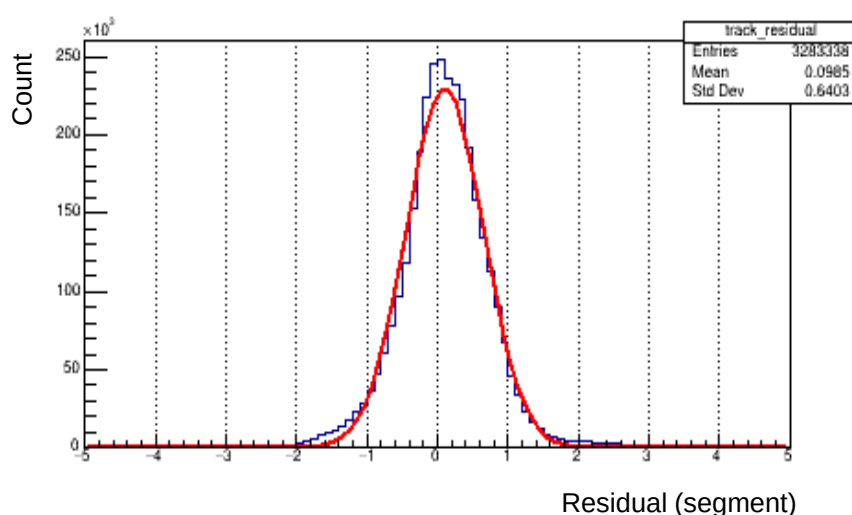


図 5.36: Tracking から予想される Hit セグメントと実際の Hit セグメントとの残差分布

3. 検出効率の計算

手順 1 からトラッキングをもとに Seg.track を求めることができ, 手順 2 からその Seg.track に Hit したかどうかの判定を行うことができる. 検出効率の算出にはラン内の全イベントに対し, この手順を行う. すると例として, セグメント 100 番を考えると Tracking からセグメント 100 番に Hit すると予想されるイベント数 ($N_{predicted}$) と実際にセグメント 100 番の $\pm 5\sigma$ の範囲に Hit があったイベント数 (N_{Hit}) が分かる. これらを

用いてセグメント 100 番の検出効率 $\varepsilon_{seg.100}$ は

$$\varepsilon_{seg.100} = \frac{N_{Hit}}{N_{predicted}} \quad (5.14)$$

と求めることが出来る．これはセグメント 100 番に関してであったが同様の手順で全セグメントに対して検出効率の算出を行うことができる．

上記の手順で求めた検出効率を図 5.37 に示す．ただし、解析から X' 層:101,107 V 層:129,137,145,146,152,154,155 は抜けチャンネルであることが分かっている．

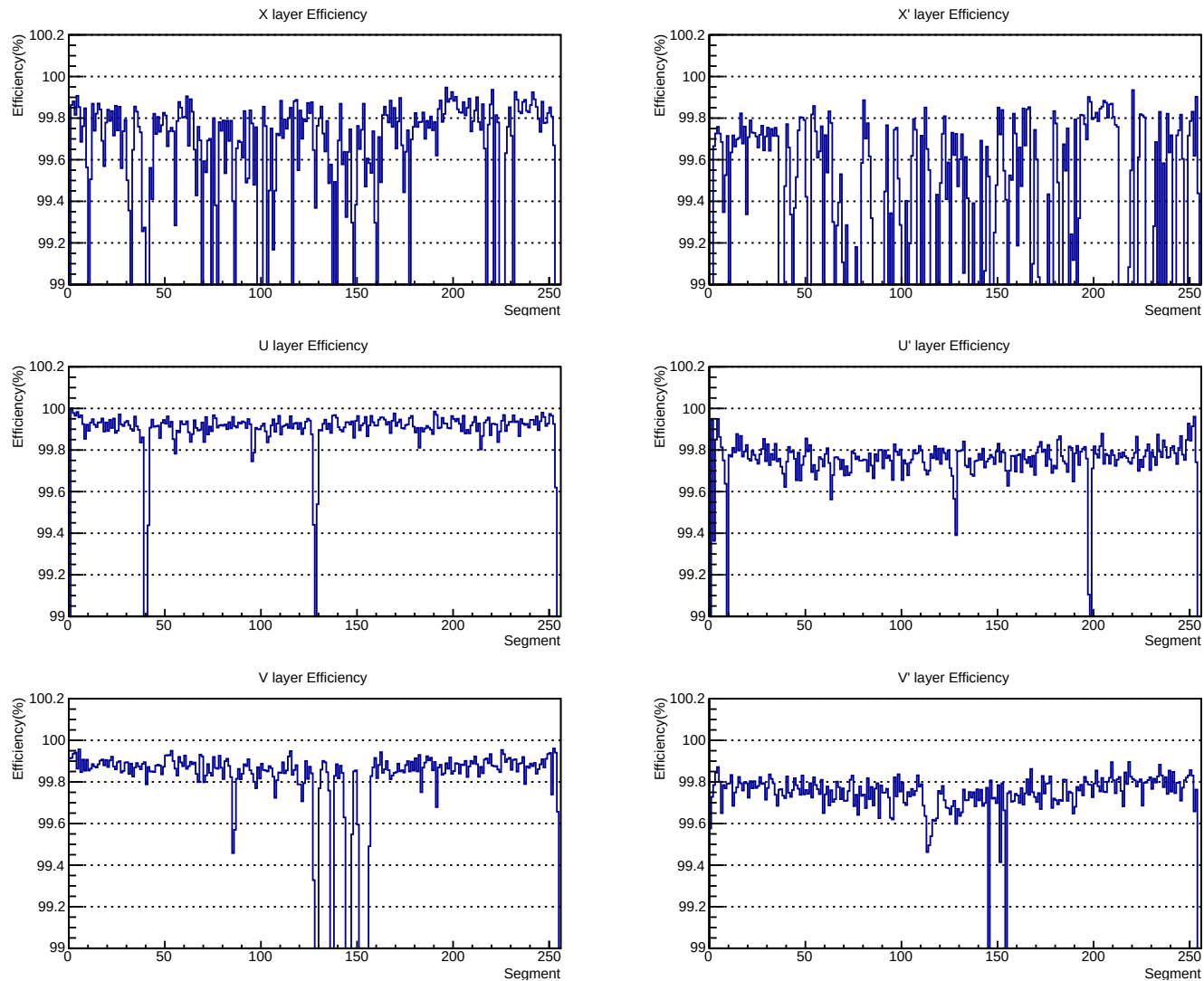


図 5.37: $V_{op}=58.5$ V, $V_{th}=3.5$ p.e での検出効率

最初に製作した X,X' 層は検出効率が大きく落ちてしまっているセグメントが多いが、その他の層ではほとんどのセグメントで検出効率が 99.8% を達成している．しかし設計や製作方法の改善後である U,U',V,V' 層でも検出効率が落ちているファイバーがいくつか存在している．これは本検出器はファイバーが細いため注意を払って製作しても、不用意にファイバーが折ってしまうといったことが起こるためである．

さらに検出効率は V_{op} によって変化する考えられるため、 V_{op} について 57.5 V, 59.5 V での評価も行った.(図 5.38) ただし各層での検出効率を計算する際には、有感領域端での検出効率の低下の効果を取り除くため両端 20bin ずつと抜けチャンネルになっているセグメントは計算に含んでいない．図 5.38 では各層の検出効率を算出し、赤線は XX' 層の検出効率の平均、青線は UUVV' 層の検出効率の平均を計算しプロットしている．また各層での検出効率と電圧依存性は表 5.2 に示す．

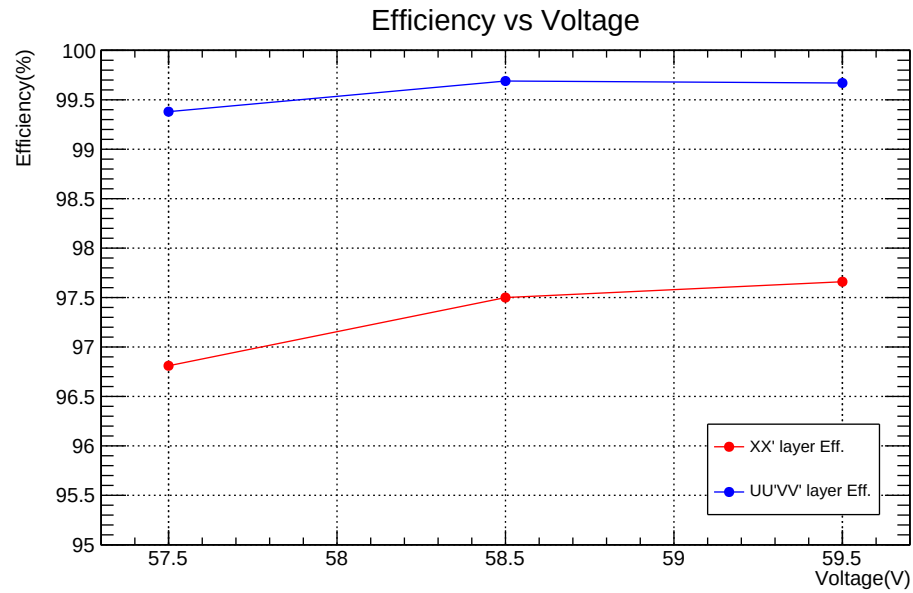


図 5.38: 検出効率の電圧依存性

表 5.2: V_{op} ごとに計算した各層の検出効率

Efficiency [%]	57.5 V	58.5 V	59.5 V
X layer	99.1	99.5	99.5
X' layer	94.5	95.6	95.9
U layer	99.4	99.8	99.8
U' layer	99.4	99.7	99.7
V layer	99.3	99.6	99.5
V' layer	99.4	99.7	99.7

5.9 位置分解能

はじめに、各層での位置分解能を調べるために必要なトラッキング位置と実際のヒット位置の残差分布を求める。解析に用いたデータは XXX 配置, ビーム位置 $x = 0$ のランである。XUV 配置が本来の BFT-D の配置であるが 3 次元トラッキングにおけるフィッティングの自由度が 1 または 2 でありトラックの不定性が大きいと考え、XXX 配置での 2 次元トラッキングを用いた。残差分布を図 (図 5.39) に示すとともに、分布をガウス分布フィットすることで残差分布の標準偏差を求めた。結果は表 5.3 に示す。X' 層はこれまでの解析からもわかっているように他の層と比較すると性能が出ていないことがわかる。単純には $0.75/2\sqrt{12} \sim 0.108$ mm 程度の分解能を持つはずである。X' 層の Tracking の精度が悪いためその後ろにある UU' 層のトラッキングにも不定性が生じ σ が 0.1 mm 程度の残差分布となり、さらに X' 層から離れた VV' 層では σ が 0.08 mm 程度となっている。しかしながら位置分解能の要求性能 $\sigma_{pos.}$ は 0.14 mm 未満であったことからもっとも性能の悪い X' 層においても要求性能は満たし、UU', VV' 層では余裕をもって要求性能を満たしているといえる。ただし、XX' 層は局所的な性能の悪化がこれまでの解析からも確認されているため、特定の位置では要求性能を満たしていない可能性は高い。

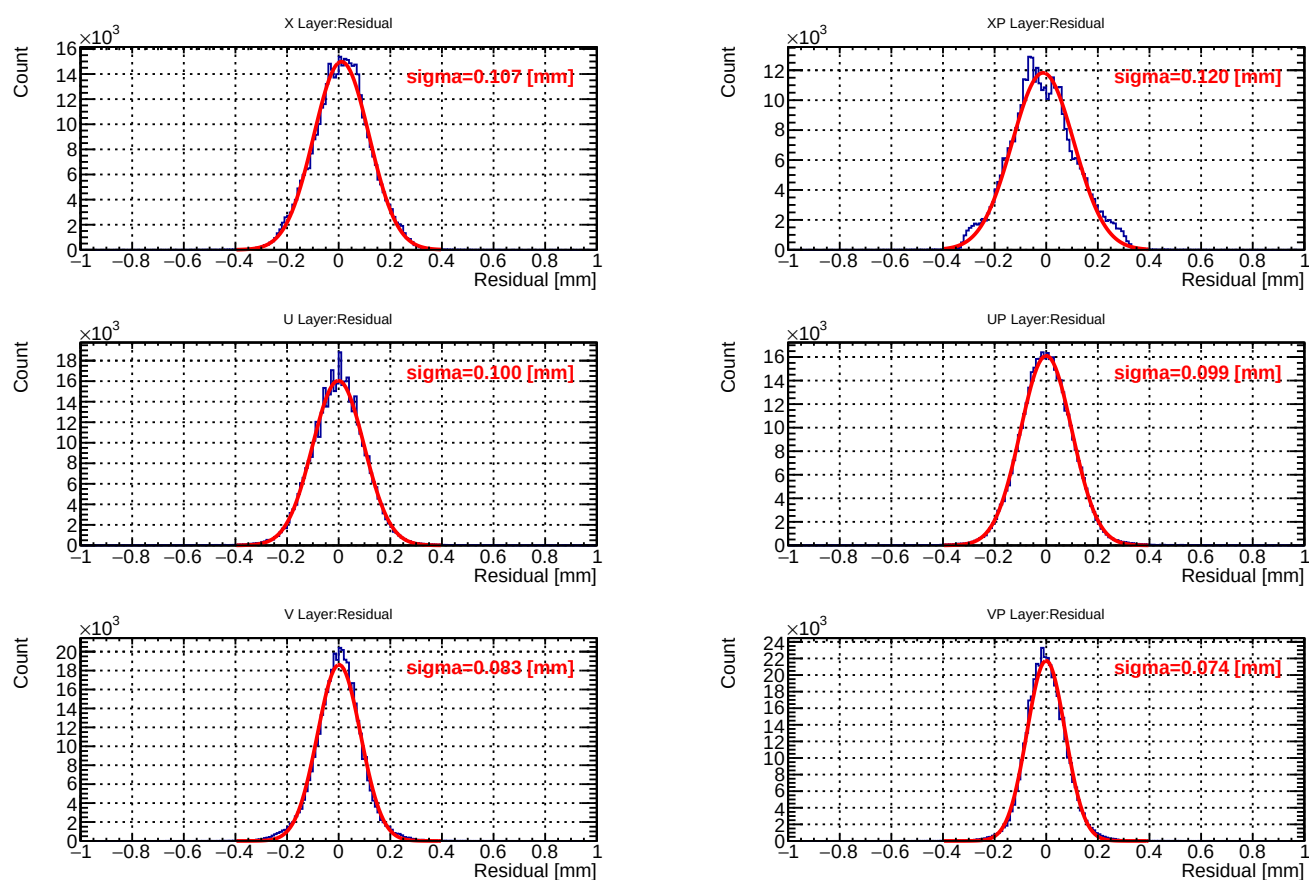


図 5.39: tracking 位置と hit 位置の残差分布
XXX 配置でビーム位置が $x = 0$ という条件のデータでの解析結果である。

表 5.3: 各層の残差分布の標準偏差

Layer	Residual [mm]
X	0.107
X'	0.120
U	0.100
U'	0.099
V	0.083
V'	0.074

第 6 章

運動量分解能のシミュレーション

E86 実験のセットアップは 1 章で示した図 1.1 のようになっており, BFT-D を 2 台並べ 12 層を用いてトラッキングを行う. 上流側に設置される BFT-D は BFT-D1, その下流に設置される BFT-D は BFT-D2 と呼ばれており, E40 実験ではドリフトチェンバー BC3, BC4 が設置されていた.

ドリフトチェンバーから BFT-D に置き換えることで時間分解能や位置分解能の向上が見込まれる. しかしビーム上に置かれる物質がガスからシンチレーターという密度の高い物質になることで, Multiple scattering の効果が大きくなることが予想される. Multiple scattering の効果が大きくなると運動量の再構成の精度が悪化し運動量分解能の悪化につながる.

このような運動量分解能の悪化を定量的に評価するため, Geant4 で K1.1 ビームラインの検出器群を再現することで運動量分解能の算出を行った. Geant4 上での K1.1 ビームラインのセットアップは図 6.1 である. J-PARC K1.1 ビームラインにおいて 2 次ビームを生成するための生成標的の位置から π ビームを打ち出している.

1.1 GeV/c の π^- を入射させ, BFT-D1, BFT-D2 を構成する物質を Ar Gas かシンチレーターのいずれかにすることでドリフトチェンバーを用いたときとの運動量分解能の変化を確かめる.

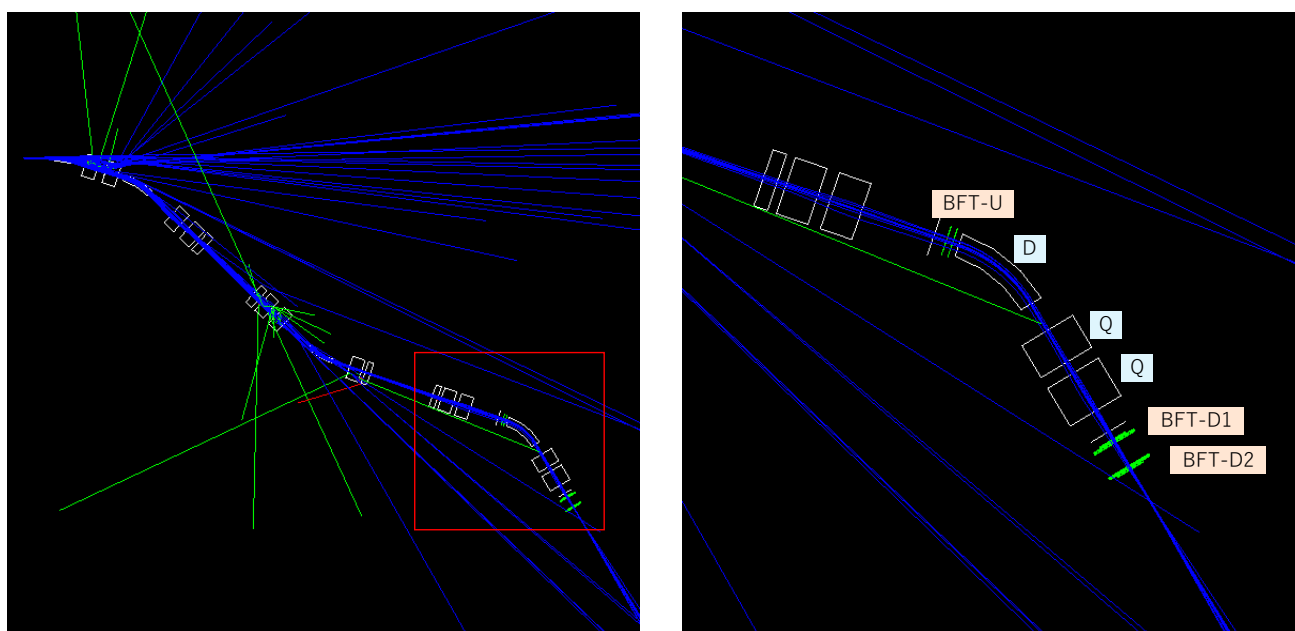


図 6.1: Geant4 上での K1.1 ビームラインのセットアップ

左図は生成標的位置から π ビームを打ち出しているイベントディスプレイ

右図は左図における赤枠の領域を拡大したもの

図 6.2 は Geant4 上で入射した運動量 p_{beam} と K1.1 スペクトロメーターで再構成された運動量 $p_{calc.}$ の差 $\Delta p = p_{beam} - p_{calc.}$ をプロットしている. ただし, BFT-D1 と BFT-D2 のそれぞれの材質の組み合わせごと

に色分けしている．凡例には各組み合わせごとに求めた Δp 分布の σ から運動量分解能 σ/p_{beam} を表示している．また結果を表にまとめたものを表 6.1 に示す．

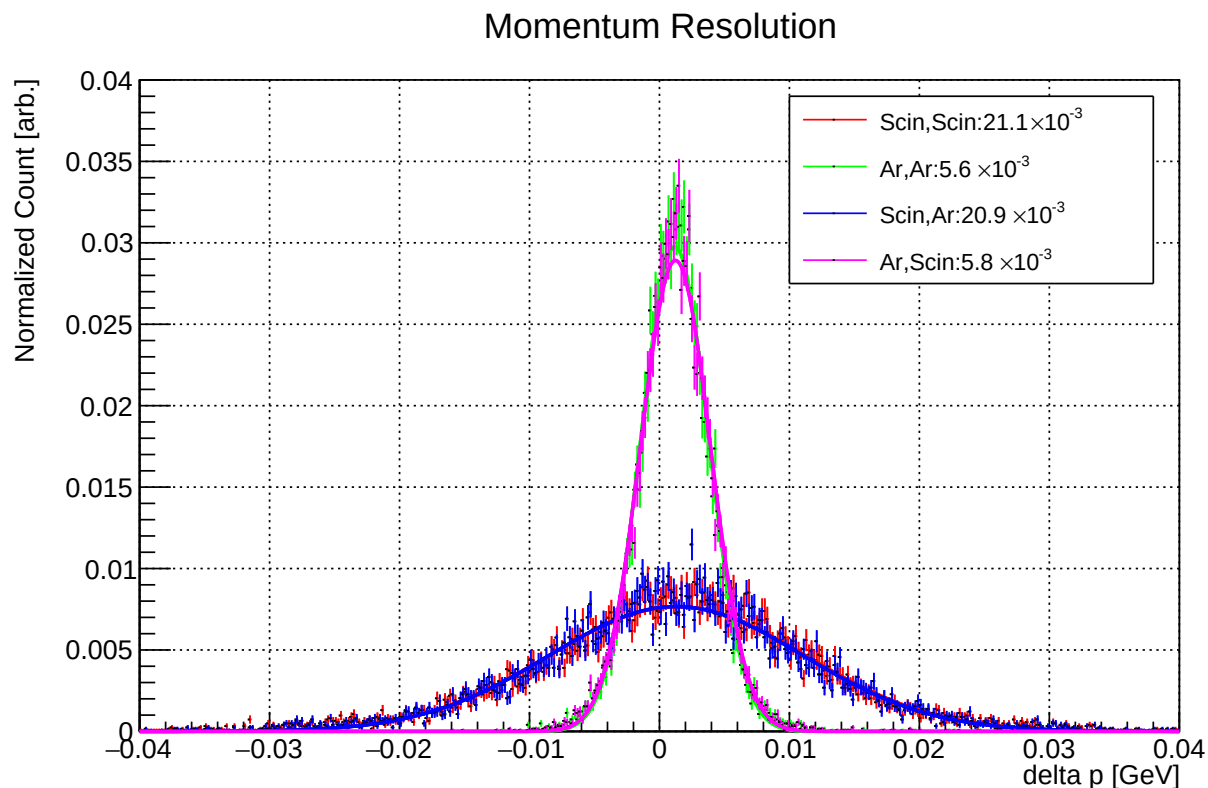


図 6.2: Geant4 で計算した BFT-D 材質を変えた時の運動量分解能シミュレーション
凡例 1 列目が BFT-D1, 2 列目が BFT-D2 の材質を表す．3 列目は各組み合わせにおける運動量分解能である．

表 6.1: 材質ごとに算出した運動量分解能

BFT-D1	BFT-D2	運動量分解能 (σ)	備考
シンチレーター	シンチレーター	2.1×10^{-2}	E86 の setup
Ar Gas	Ar Gas	5.6×10^{-3}	ドリフトチェンバーを再現
シンチレーター	Ar Gas	2.1×10^{-2}	上流を置き換え
Ar Gas	シンチレーター	5.8×10^{-3}	下流を置き換え

これらの結果から BFT-D1 の材質をシンチレーターにするとドリフトチェンバーのセットアップより大幅に運動量分解能が悪化することが分かった．一方で BFT-D2 はシンチレーターに置き換えてもほぼ運動量分解能は悪化しなかった．

Multiple Scattering が BFT-D1 で起こると BFT-D2 は散乱によって曲げられたビームの向きを検知することになり，再構成されるトラックは曲げられたものとなり，運動量の再構成の際に誤った運動量を再構成してしまう．すなわち全 12 層あるうちの上流の層で Multiple Scattering が起こるほどトラックは本来のビームの向きを再現しなくなる．このため BFT-D1 をシンチレーターにしたセットアップでは運動量分解能が悪化した．

しかし BFT-D2 をシンチレーターとしても BFT-D2 の位置にドリフトチェンバーを再現したセットアップからは運動量分解能がほとんど悪化しておらず，問題ないセットアップとなっている．

以上のことから当初は BFT-D1, BFT-D2 の全 12 層をビーム粒子のトラッキングに用いる予定であったが，BFT-D1 の位置には Multiple Scattering の少ないドリフトチェンバーを用い，BFT-D2 の位置には予定通り BFT-D を設置するセットアップとするのが最適であると考えられる．

第 7 章

まとめと今後の展望

ストレンジネス核物理の目的のひとつはバリオン間相互作用を研究することでクォークから核力を理解することである。バリオン間相互作用においてハイペロン-核子相互作用は少ない散乱データから理論モデルが構築されてきたことから、相互作用の不定性はいまだ大きい。このような状況を打開するために我々の実験グループでは Σp 散乱実験を行い、新たにハイペロンの散乱実験の手法を確立した。これに続き Λp 散乱実験 (J-PARC E86) を行うことで更なるハイペロン-核子相互作用についての実験データを取得することを計画している。これにより不定性の大きい理論模型に制限をかけることができ、バリオン間相互作用の更なる理解につながると考えられる。

計画されている Λp 散乱実験では 20 M/spill という高いレートでの実験を予定している。20 M/spill 環境下ではこれまでビーム粒子の飛跡検出に用いられていたドリフトチェンバーでは時間分解能の問題から 1 イベントに複数トラックが再構成されてしまう。この問題を解決するため我々のグループではシンチレーションファイバーを用いた飛跡検出器 Beamline Fiber Tracker Downstream (BFT-D) の開発を行った。

BFT-D の設計や製作方法は先行研究 [2] で研究され 6 層 (XX', UU', VV') のうち XX' 層については製作と性能評価が行われた。しかし XX' 層では初めに製作したこともあり、設計や製作方法には改善の余地があり XX' 層では十分な性能が出ていなかった。そのため本研究では先行研究であげられた改善点について設計と製作方法から改善を図り、残りの UU', VV' 層の製作を行った。

次に完成した BFT-D のビームを用いた性能評価実験を行った。先行研究から要求される性能は時間分解能 $\sigma_{time} < 3.3$ ns, 検出効率 $\varepsilon > 96\%$, 位置分解能 $\sigma_{pos} < 0.14$ mm である。時間分解能は全層の平均で 0.91 ns となり要求を満たしていることが確認された。検出効率は X' 層が 95.6%, X' 層以外の平均は 99.7% となり, X' 層のみ要求を満たさなかった。加えて X 層においても局所的に検出効率が低下していることが分かっている。位置分解能については残差分布で X:0.107 mm, X':0.120 mm, U:0.100 mm, U':0.099 mm, V:0.083 mm, V':0.074 mm となった。全層で要求を満たしたが, XX' 層ではヒットを検知できないセグメントが存在することでトラッキングが再構成できない場所が存在する問題がある。これに対し, 全項目において UU', VV' 層は要求を十分に満たすことが確認されたため XX' 層についても設計と製作方法を本研究で開発したもので行うことで UU', VV' 層と同様の性能が発揮できると考えられる。

このように本研究では BFT-D の開発を行い、設計と製作方法の改善を行い製作した UU', VV' 層では十分に性能を満たすことを確認した。また、現在本研究で開発した設計と製作方法で XX' を新たに製作している。製作途中ではあるものの、製作の精度としては UU', VV' 層と同程度の物となっている。今後は現在製作している XX' 層の性能評価を行い要求性能を満たすかどうか確認する予定である。

第 8 章

付録

8.1 BFT-D チャンネルアサイン

先行研究 [2] から引用した XX' 層と製作した UU',VV' 層のチャンネルアサインを以下に残す.

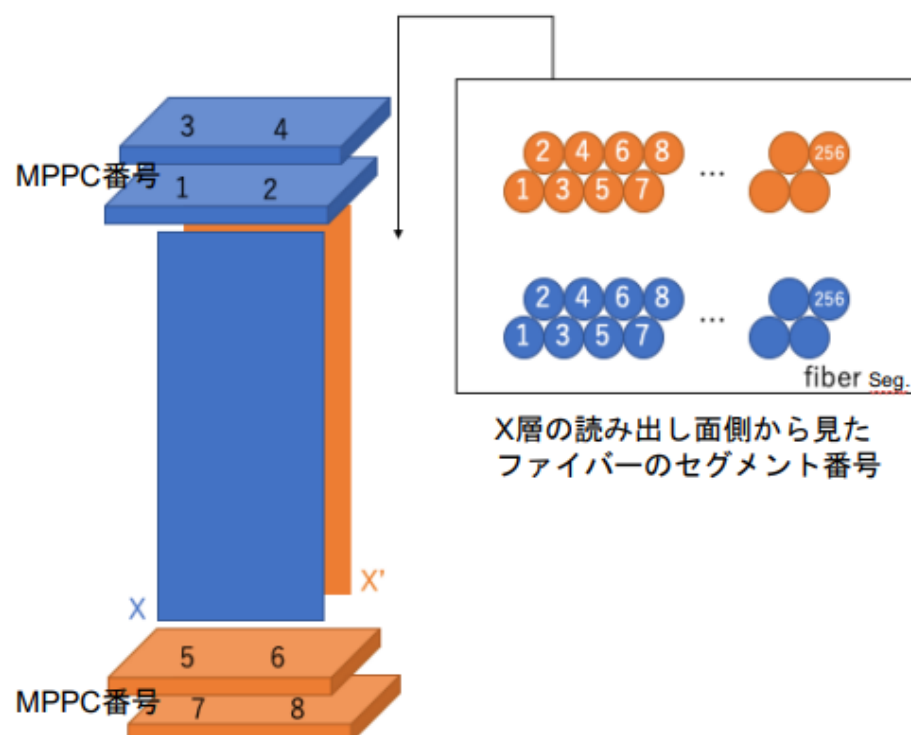


図 8.1: XX' 層のファイバーセグメントの並び

MPPC 1							
15	31	47	63	79	95	111	127
13	29	45	61	77	93	109	125
11	27	43	59	75	91	107	123
9	25	41	57	73	89	105	121
7	23	39	55	71	87	103	119
5	21	37	53	69	85	101	117
3	19	35	51	67	83	99	115
1	17	33	49	65	81	97	113

MPPC2							
143	159	175	191	207	223	239	255
141	157	173	189	205	221	237	253
139	155	171	187	203	219	235	251
137	153	169	185	201	217	233	249
135	151	167	183	199	215	231	247
133	149	165	181	197	213	229	245
131	147	163	179	195	211	227	243
129	145	161	177	193	209	225	241

MPPC3							
16	32	48	64	80	96	112	128
14	30	46	62	78	94	110	126
12	28	44	60	76	92	108	124
10	26	42	58	74	90	106	122
8	24	40	56	72	88	104	120
6	22	38	54	70	86	102	118
4	20	36	52	68	84	100	116
2	18	34	50	66	82	98	114

MPPC4							
144	160	176	192	208	224	240	256
142	158	174	190	206	222	238	254
140	156	172	188	204	220	236	252
138	154	170	186	202	218	234	250
136	152	168	184	200	216	232	248
134	150	166	182	198	214	230	246
132	148	164	180	196	212	228	244
130	146	162	178	194	210	226	242

図 8.2: XX' 層 チャンネルアサイン 1~4

MPPC 5							
113	97	81	65	49	33	17	1
115	99	83	67	51	35	19	3
117	101	85	69	53	37	21	5
119	103	87	71	55	39	23	7
121	105	89	73	57	41	25	9
123	107	91	75	59	43	27	11
125	109	93	77	61	45	29	13
127	111	95	79	63	47	31	15

MPPC6							
241	225	209	193	177	161	145	129
243	227	211	195	179	163	147	131
245	229	213	197	181	165	149	133
247	231	215	199	183	167	151	135
249	233	217	201	185	169	153	137
251	235	219	203	187	171	155	139
253	237	221	205	189	173	157	141
255	239	223	207	191	175	159	143

MPPC7							
114	98	82	66	50	34	18	2
116	100	84	68	52	36	20	4
118	102	86	70	54	38	22	6
120	104	88	72	56	40	24	8
122	106	90	74	58	42	26	10
124	108	92	76	60	44	28	12
126	110	94	78	62	46	30	14
128	112	96	80	64	48	32	16

MPPC8							
242	226	210	194	178	162	146	130
244	228	212	196	180	164	148	132
246	230	214	198	182	166	150	134
248	232	216	200	184	168	152	136
250	234	218	202	186	170	154	138
252	236	220	204	188	172	156	140
254	238	222	206	190	174	158	142
256	240	224	208	192	176	160	144

図 8.3: XX' 層 チャンネルアサイン 5~8



図 8.4: UU' 層の MPPC 位置のアサイン

U layer側																U' layer側																							
U-1								U-2								MPPC								U'-1								U'-2							
1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	121	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	121
2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	82	90	98	106	114	122	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	82	90	98	106	114	122
3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91	99	107	115	123	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91	99	107	115	123
4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100	108	116	124	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100	108	116	124
5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	85	93	101	109	117	125	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	85	93	101	109	117	125
6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	86	94	102	110	118	126	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	86	94	102	110	118	126
7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	87	95	103	111	119	127	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	87	95	103	111	119	127
8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128
U-3								U-4																U'-3								U'-4							
192	184	176	168	160	152	144	136	256	248	240	232	224	216	208	200									185	177	169	161	153	145	137	129	249	241	233	225	217	209	201	193
191	183	175	167	159	151	143	135	255	247	239	231	223	215	207	199									186	178	170	162	154	146	138	130	250	242	234	226	218	210	202	194
190	182	174	166	158	150	142	134	254	246	238	230	222	214	206	198									187	179	171	163	155	147	139	131	251	243	235	227	219	211	203	195
189	181	173	165	157	149	141	133	253	245	237	229	221	213	205	197									188	180	172	164	156	148	140	132	252	244	236	228	220	212	204	196
188	180	172	164	156	148	140	132	252	244	236	228	220	212	204	196									189	181	173	165	157	149	141	133	253	245	237	229	221	213	205	197
187	179	171	163	155	147	139	131	251	243	235	227	219	211	203	195									190	182	174	166	158	150	142	134	254	246	238	230	222	214	206	198
186	178	170	162	154	146	138	130	250	242	234	226	218	210	202	194									191	183	175	167	159	151	143	135	255	247	239	231	223	215	207	199
185	177	169	161	153	145	137	129	249	241	233	225	217	209	201	193									192	184	176	168	160	152	144	136	256	248	240	232	224	216	208	200

図 8.5: UU' 層 チャンネルアサイン

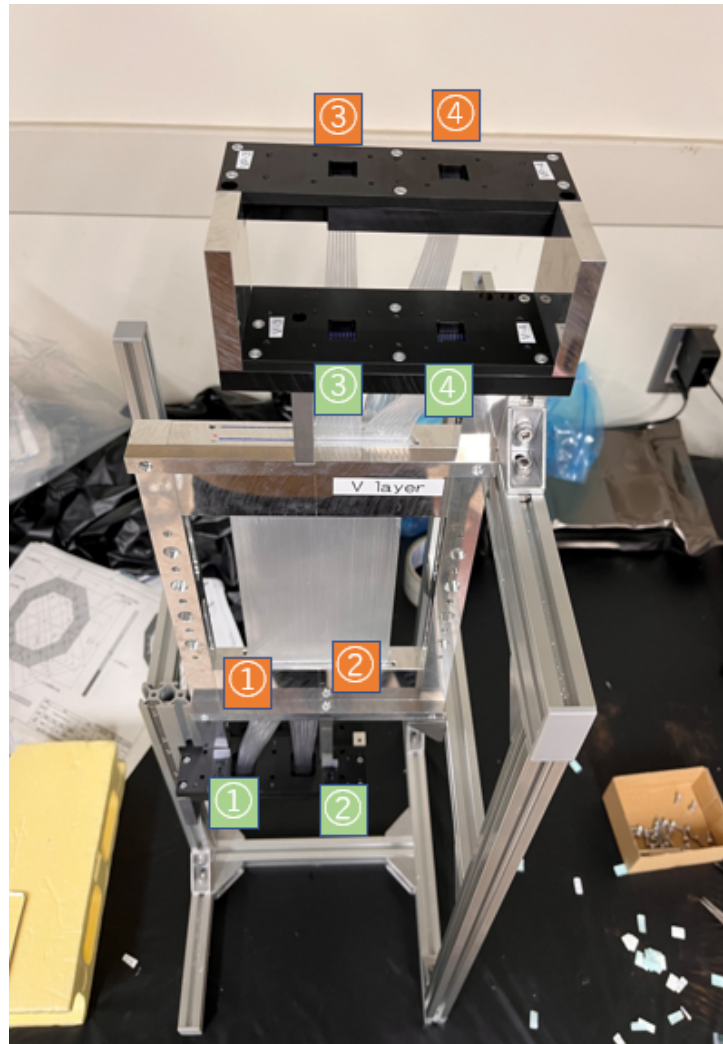


図 8.6: VV' 層の MPPC 位置のアサイン

V layer側																V' layer側																							
V-1								V-2								MPPC								V'-1								V'-2							
57	49	41	33	25	17	9	1	121	113	105	97	89	81	73	65	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	64	56	48	40	32	24	16	8	128	120	112	104	96	88	80	72
58	50	42	34	26	18	10	2	122	114	106	98	90	82	74	66	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	63	55	47	39	31	23	15	7	127	119	111	103	95	87	79	71
59	51	43	35	27	19	11	3	123	115	107	99	91	83	75	67	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	62	54	46	38	30	22	14	6	126	118	110	102	94	86	78	70
60	52	44	36	28	20	12	4	124	116	108	100	92	84	76	68	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	61	53	45	37	29	21	13	5	125	117	109	101	93	85	77	69
61	53	45	37	29	21	13	5	125	117	109	101	93	85	77	69	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	60	52	44	36	28	20	12	4	124	116	108	100	92	84	76	68
62	54	46	38	30	22	14	6	126	118	110	102	94	86	78	70	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	59	51	43	35	27	19	11	3	123	115	107	99	91	83	75	67
63	55	47	39	31	23	15	7	127	119	111	103	95	87	79	71	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	58	50	42	34	26	18	10	2	122	114	106	98	90	82	74	66
64	56	48	40	32	24	16	8	128	120	112	104	96	88	80	72	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	57	49	41	33	25	17	9	1	121	113	105	97	89	81	73	65
V-3								V-4																V'-3								V'-4							
136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	248	256									129	137	145	153	161	169	177	185	193	201	209	217	225	233	241	249
135	143	151	159	167	175	183	191	199	207	215	223	231	239	247	255									130	138	146	154	162	170	178	186	194	202	210	218	226	234	242	250
134	142	150	158	166	174	182	190	198	206	214	222	230	238	246	254									131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	211	219	227	235	243	251
133	141	149	157	165	173	181	189	197	205	213	221	229	237	245	253									132	140	148	156	164	172	180	188	196	204	212	220	228	236	244	252
132	140	148	156	164	172	180	188	196	204	212	220	228	236	244	252									133	141	149	157	165	173	181	189	197	205	213	221	229	237	245	253
131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	211	219	227	235	243	251									134	142	150	158	166	174	182	190	198	206	214	222	230	238	246	254
130	138	146	154	162	170	178	186	194	202	210	218	226	234	242	250									135	143	151	159	167	175	183	191	199	207	215	223	231	239	247	255
129	137	145	153	161	169	177	185	193	201	209	217	225	233	241	249									136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	248	256

図 8.7: VV' 層 チャンネルアサイン

8.2 MPPC のシリアル番号とブレークダウン電圧

ELPH での性能評価実験の際に用いた MPPC のシリアル番号とブレークダウン電圧を示す。

serial	Vop	cable No.
427	54.54	U-1
514	54.66	U-2
512	54.68	U-3
515	54.69	U-4
519	54.71	UP-1
520	54.73	UP-2
521	54.74	UP-3
513	54.74	UP-4
510	54.75	V-1
517	54.76	V-2
426	54.76	V-3
518	54.80	V-4
468	54.81	VP-1
509	54.81	VP-2
489	54.83	VP-3
508	54.87	VP-4

図 8.8: 用いた MPPC のブレイクダウン電圧

第II部

アクティブ標的 Active Fiber Target (AFT)

第 1 章

Ⅲ ハイパー核生成実験 (J-PARC E70)

1.1 実験概要

本実験の目的は J-PARC K1.8 ビームラインにおいて、 $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応を用いた Missing Mass 法により Ⅲ ハイパー核の精密分光実験を行うことである。図 1.1 に本実験の概略図を示す。

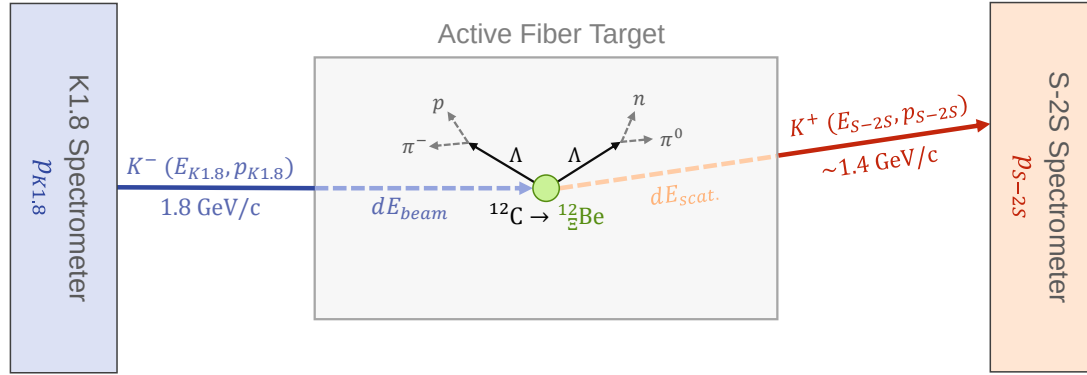


図 1.1: J-PARC E70 実験の概略図

ビームとして 1.8 GeV/c の K^- を入射し、ポリスチレン製であるシンチレーションファイバー内の炭素 ^{12}C と反応することで ^{12}Be を生成させる。この $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応によって生成されるハイパー核の質量 M_{HYP} はミッシングマス法から、

$$M_{HYP} = \sqrt{E_{HYP}^2 - p_{HYP}^2} \quad (1.1)$$

$$= \sqrt{(E_{K^-} + M_{target} + E_{K^+})^2 - p_{K^-}^2 - p_{K^+}^2 + 2p_{K^-}p_{K^+}\cos\theta} \quad (1.2)$$

と表される。ここで M_{target} は標的の原子核の質量、 p_{K^-}, E_{K^-} はビーム粒子の運動量とエネルギー、 p_{K^+}, E_{K^+} は散乱粒子の運動量とエネルギー、 θ は散乱角を表す。 M_{target} も標的原子核が ^{12}C であることから既知であり、 E_{K^-}, E_{K^+} については p_{K^-}, p_{K^+} から算出できるためハイパー核の質量を決定するためには、 p_{K^-}, p_{K^+} を測定すればよい。

入射 K^- の運動量 p_{K^-} はビームラインスペクトロメーターである K1.8 Spectrometer で測定し、散乱 K^+ の運動量 p_{K^+} は S-2S Spectrometer で測定する。また、標的内でのエネルギー損失 $dE_{beam}, dE_{scat.}$ をアクティブファイバー標的 Active Fiber Target(AFT) で測定することで、K1.8 Spectrometer と S-2S Spectrometer でそれぞれ測定した $p_{K1.8}, p_{S-2S}$ とのずれを補正する。

ここで図 1.2 に ESC08 模型をもとに算出された $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応の励起スペクトルを示す。ただし各色では実験分解能を変化させた時のスペクトルをそれぞれ示している。図 1.2 を見ると、異なる準位を分解するには、Missing Mass 分解能 2 MeV が必要となることがわかる。

このように E70 実験ではエネルギー分解能 2 MeV という高分解能での分光実験を実現するために以下の対策を行っている.

- 運動量分解能が $\Delta p/p = 6 \times 10^{-4}$ (デザイン値, FWHM) である S-2S Spectrometer の導入
- AFT を用いた, 標的内でのエネルギーロスの補正

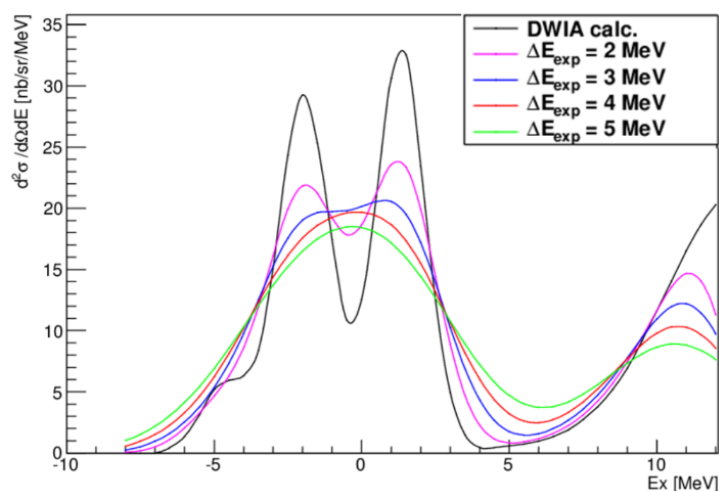


図 1.2: ESC08 模型をもとにした $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応の励起スペクトル. 黒線は理論計算で色付きの線は実験での分解能を考慮したスペクトルである.

1.2 実験セットアップ

実験セットアップは図 1.3 のとおりである.

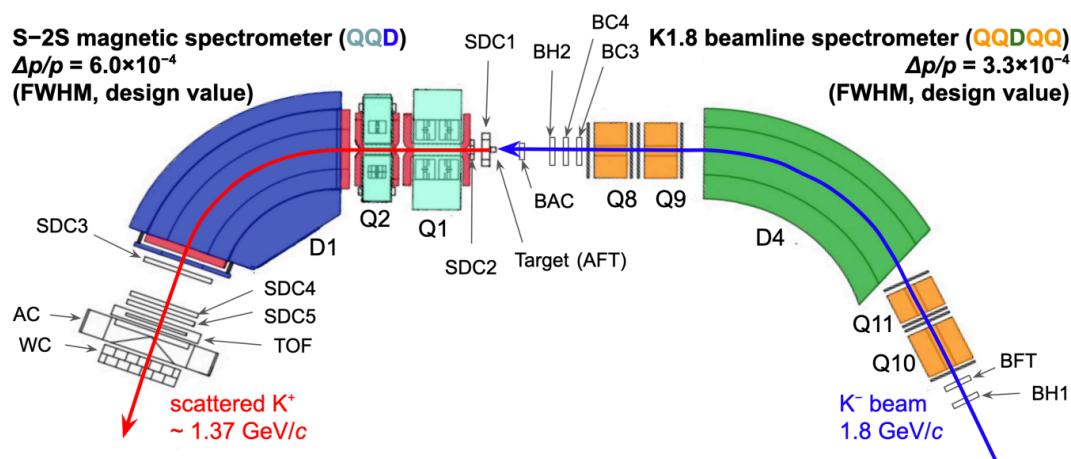


図 1.3: J-PARC E70 実験のセットアップ 図は [17] より

入射粒子である 1.8 GeV/c の K^- はターゲットより上流の K1.8 Spectrometer で運動量を測定し, シンチレーションファイバーで構成された Active Fiber Target(AFT) 内の ^{12}C と反応を起こし Ξ ハイパー核を生成する. 散乱粒子である K^+ は, ターゲット下流の S-2S Spectrometer で運動量を測定する.

1.2.1 K1.8 Spectrometer

K1.8 Spectrometer は QQDQQ の構成の電磁石と 2 台の飛跡検出器 (tracker) と 3 台のトリガー用カウンターからなるスペクトロメータで, 入射粒子である K^- の運動量を測定する. 運動量分解能のデザイン値は

$\Delta p/p = 5 \times 10^{-4}$ (FWHM) となっている. K1.8 Spectrometer の検出器の具体的な種類と役割は表 1.1 に示す.

表 1.1: K1.8 Spectrometer の検出器群

検出器	種類	役割
Beam Hodoscope 1(BH1)	plastic scintillator hodoscope	trigger
Beamline Fiber Tracker(BFT)	plastic scintillation fiber tracker	tracker
Beamline Chamber 3, 4(BC3, BC4)	drift chamber	tracker
Beamline Hodoscope2(BH2)	plastic scintillator hodoscope	trigger
Beamline Aerogel Cherenkov(BAC)	aerogel Cherenkov counter	trigger

K1.8 ビームラインは 2 次粒子のビームラインであるため, 同運動量の K^- 粒子に π^- が混入してしまう. これらを分離するため, BH1 と BH2 の間の飛行時間から粒子識別を行う. さらにターゲット直前で K^- であることを保証するために BAC($n=1.05$) が光っていないことも要求する. すなわち, K1.8 Spectrometer においては $BH1 \times BH2 \times \overline{BAC}$ トリガーを用いることで K^- トリガーを作ることができる. 運動量の測定は QQDQQ 電磁石の上流と下流にそれぞれ設置されている BFT と BC3,BC4 から再構成される飛跡を用いて運動量を計算する.

1.2.2 Active Fiber Target

本実験における実験標的は図 2.1 のようにシンチレーションファイバーを俵積みに配置したアクティブ標的で, 標的内でのエネルギー損失の測定と反応の選別を行う. 実際に製作した AFT を図 1.4 に示す. J-PARC E70 実験ではミッシングマス分解能 2 MeV(FWHM) という高分解能を達成しなくてはならないため, 標的内でのエネルギーストラグリングによる分解能の悪化を小さく抑える必要がある. このためには標的を薄くすることがもっとも簡単であるが, これでは収量の減少が原因で統計的に十分なイベントを集めることができなくなってしまう. そこで十分な収量を得られるほど標的を厚くしたまま, エネルギーストラグリングによる分解能の悪化を減少させるため, 標的内でのエネルギー損失を測定し補正するというアクティブ標的が開発された.[18][19] また, アクティブ標的を用いることで標的内でのトラックや反応点がわかることからイベントの選別に用いることができるという利点もある.

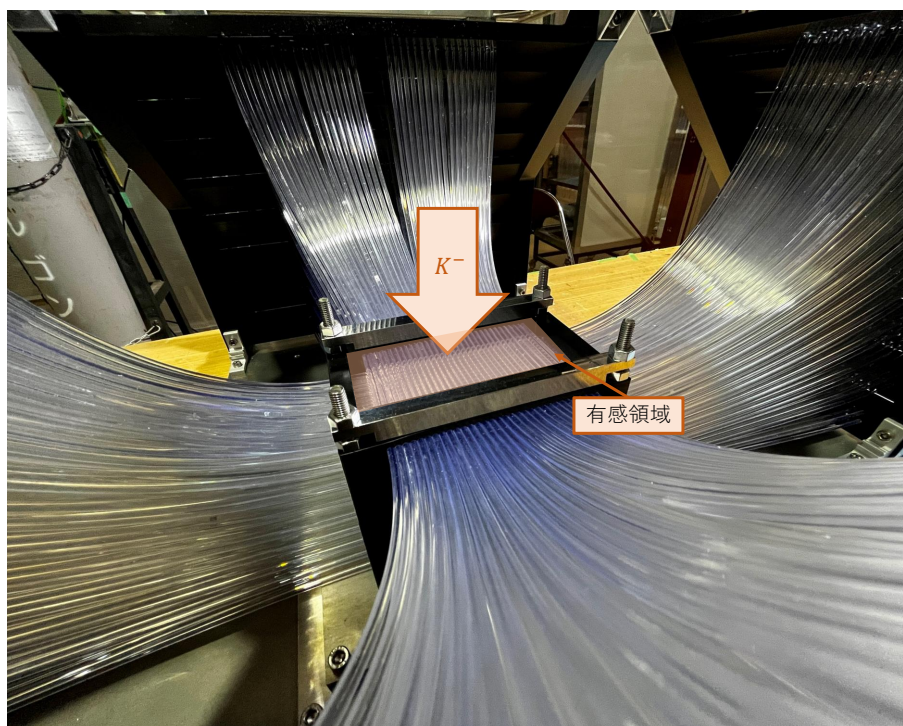


図 1.4: AFT の写真

1.2.3 S-2S Spectrometer

S-2S Spectrometer は QQD の構成の電磁石と 5 台の飛跡検出器と 3 台のトリガー用カウンターからなるスペクトロメータで、散乱粒子である K^+ の運動量を測定する。運動量分解能のデザイン値は $\Delta p/p = 6 \times 10^{-4}$ (FWHM) となっており、S-2S 電磁石は J-PARC E70 実験から導入されたものである。

S-2S Spectrometer の検出器と役割を表 1.2 に示す。

表 1.2: S-2S Spectrometer の検出器群

検出器	種類	役割
Scattered Drift Chamber 1~5(SDC1~5)	drift chamber	tracker
Aerogel Cherencov(AC)	aerogel Cherencov	trigger
Time OF Flight(TOF)	plastic scintillator wall	trigger
Water Cherencov(WC)	water Cherencov wall	trigger

散乱粒子の運動量の再構成は、SDC1 ~ SDC5 までの 5 台のドリフトチェンバーから得られる粒子の飛跡をもとに QQD 磁石での粒子の曲率を計算することで行う。また粒子識別用に、AC, TOF, WC が用意されており、 K^+ の識別には $\text{TOF} \times \overline{\text{AC}} \times \text{Matrix2D}$ のイベントを選ぶ。ただし Matrix2D-1 とは、BH2, TOF, WC のヒット位置の相関からオンラインレベルでトラックを選別できる信号を FPGA から生成したものである。

よって K1.8 Spectrometer でビーム粒子が K^- であり、S-2S Spectrometer で散乱粒子が K^+ であることを要求するためには、

$$\text{BH1} \times \text{BH2} \times \overline{\text{BAC}} \times \text{TOF} \times \overline{\text{AC}} \times \text{Matrix2D}$$

となるイベントを選べばよい。しかし、トリガーレートに余裕があればより制限の緩い $\text{BH1} \times \text{BH2} \times \text{TOF}$ のようなトリガーでデータを取得することができ、パイプロダクトで他のチャンネルを解析できる。そのため、実際に物理データ取得の際に適用するトリガーは現在検討中である。

第2章

アクティブファイバー標的 Active Fiber Target(AFT)

本章では, AFT が開発された目的や AFT に要求される性能, 具体的なデザインを先行研究をもとに紹介する.

2.1 開発の目的

J-PARC E70 実験では, $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応を用いた Missing Mass 法により Ξ ハイパー核精密分光を 2 MeV(FWHM) のエネルギー分解能で行うことが計画されている. 生成される Ξ ハイパー核の Missing Mass は前章 式 1.2 でも示したように,

$$M = \sqrt{(E_{K^-} + M_{\text{target}} + E_{K^+})^2 - p_{K^-}^2 - p_{K^+}^2 + 2p_{K^-}p_{K^+}\cos\theta}$$

と表される. また, エネルギー分解能 ΔM は,

$$\Delta M = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial p_{K^-}}\right)^2 \Delta p_{K^-}^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial p_{K^+}}\right)^2 \Delta p_{K^+}^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \theta}\right)^2 \Delta \theta^2 + (\Delta E_{\text{strag.}})^2} \quad (2.1)$$

となる. ここで, Δp_{K^-} は K1.8 Spectrometer, Δp_{K^+} は S-2S Spectrometer の運動量分解能, $\Delta \theta$ は 2 つのスペクトロメータから決まる角度分解能であり, $\Delta E_{\text{strag.}}$ は標的内でのエネルギー損失のふらつき (energy struggling) となっている. エネルギー分解能 2 MeV という高分解能の精密分光を行うためには, 式 2.1 の各項を小さくする必要がある. このため高運動量分解能の S-2S Spectrometer の導入と, アクティブファイバー標的を用いたエネルギー損失補正から Δp_{K^+} と $\Delta E_{\text{strag.}}$ を小さくすることでエネルギー分解能 2 MeV を達成しようとしている.

次に, $\Delta M = 2$ MeV となる $E_{\text{strag.}}$ の値を見積もる. このときスペクトロメータの現実的な値を仮定する.

- K1.8 Spectrometer の運動量分解能 (FWHM): $\Delta p/p = 1.0 \times 10^{-3}$
- S-2S Spectrometer の運動量分解能 (FWHM): $\Delta p/p = 6.0 \times 10^{-4}$

表 2.1 に式 2.1 の各項と算出される $\Delta E_{\text{strag.}}$ を示す.

$\left(\frac{\partial M}{\partial p_{K^-}}\right)^2 \Delta p_{K^-}^2$	$\left(\frac{\partial M}{\partial p_{K^+}}\right)^2 \Delta p_{K^+}^2$	$\left(\frac{\partial M}{\partial \theta}\right)^2 \Delta \theta^2$	$(\Delta E_{\text{strag.}})^2$
$(1.67 \text{ MeV})^2$	$(0.74 \text{ MeV})^2$	$(0.04 \text{ MeV})^2$	$(0.9 \text{ MeV})^2$

表 2.1: スペクトロメータの運動量分解能から見積もられる $\Delta E_{\text{strag.}}$.

すなわち, 標的内でのエネルギー損失のふらつきは 0.9 MeV 以下である必要がある [20]. 標的内でのエネ

ルギー損失のふらつきは標的を薄くすることで小さくすることができるが、標的厚さ 2.79 g/cm^2 の場合でも $\Delta E_{strag.} = 1 \text{ MeV}$ となる [18]. しかしながら三ハイパー核の生成断面積は数 10 nb/sr と小さいため、薄い標的では十分な統計量が得られない. そのため標的を厚くして十分に統計量を得ることができ、エネルギー損失補正のふらつきも小さくすることができる AFT の開発を進めている.

2.2 デザイン

AFT は 3 mm 径のシンチレーションファイバーを図 2.1 のように x 方向に俵積みにした xx' 層 ($32 \text{ 本} \times 2$) と y 方向に俵積みにした yy' 層 ($16 \text{ 本} \times 2$) のセットを z 方向に 9 セット重ねた構造をしておりハイパー核の生成はシンチレーションファイバー内の炭素で行われる. 合計ファイバー数は 864 本 となり、ファイバーの両側で読出しを行うため合計 ch 数は 1728ch となる.

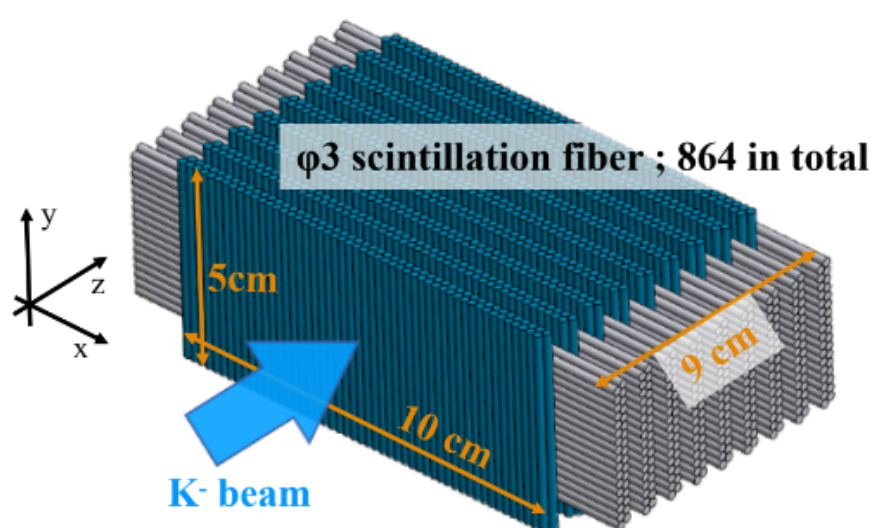


図 2.1: AFT の概念図

図 2.1 のような構造を実現するため、検出器全体としての構造は図 2.2 のようになっている. ファイバーの両端はアルミ製のベースプレート (図 2.2 灰色の部分) に固定された読出し部分につながっており、MPPC で読出しを行う. 有感領域においてファイバーを俵積み 9 層分並べるために図 2.3 のような部品をベースプレートに固定しこの穴にファイバーを通していくことで隙間がすべて埋まりファイバーの位置を固定することができる設計になっている.

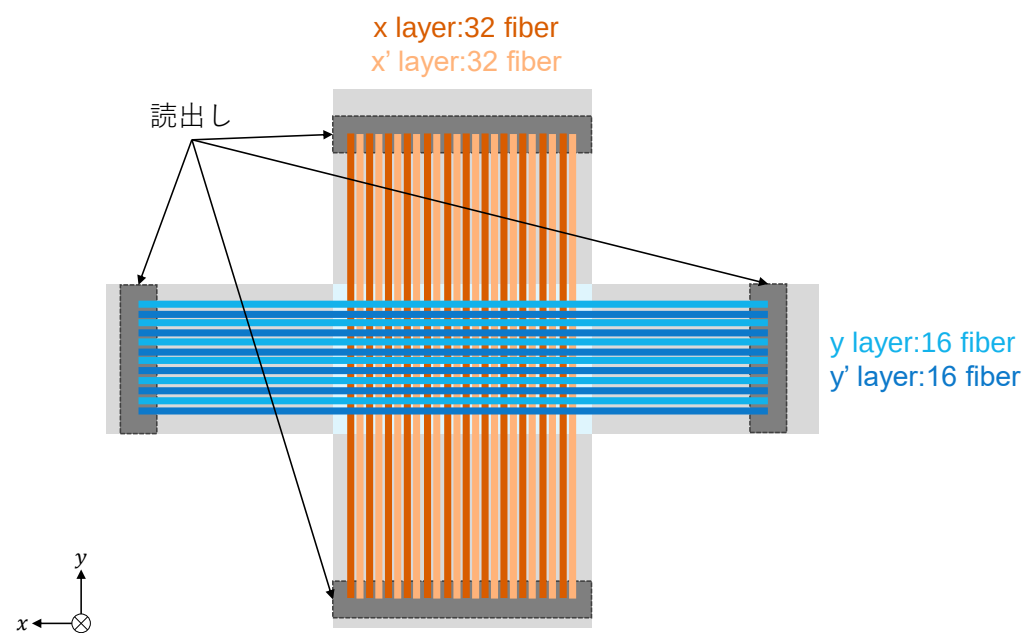


図 2.2: 検出器全体としての構造 紙面手前から奥にビームが通過する

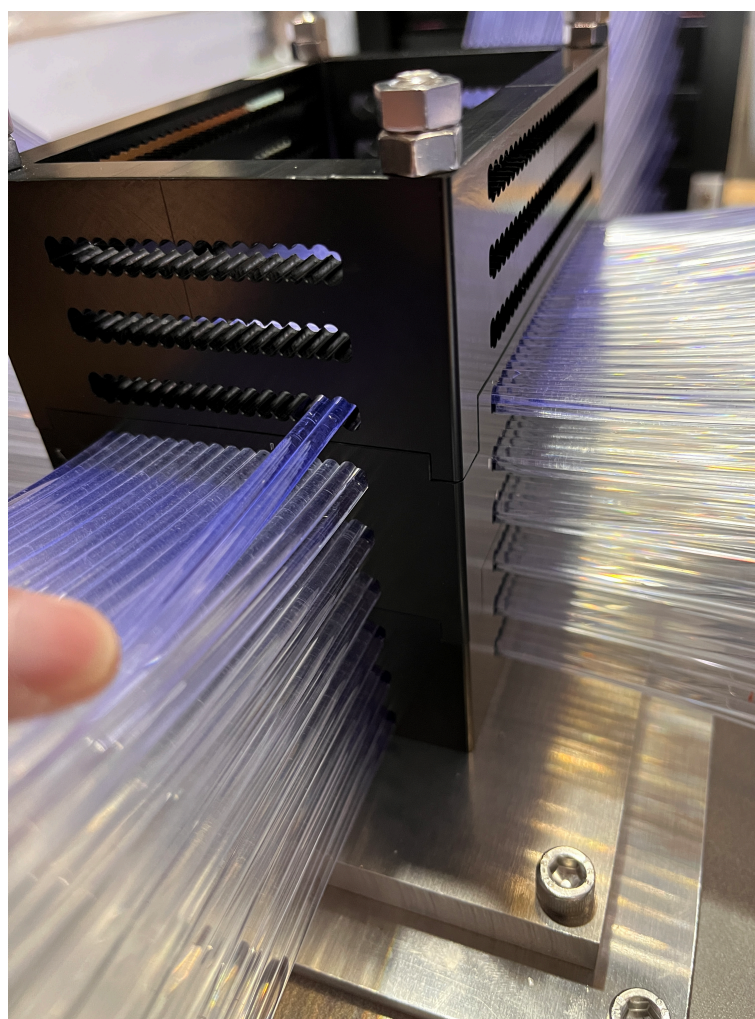


図 2.3: ファイバーを固定するための部品

製作された AFT は図 2.4 や図 2.5 のようになっている.



図 2.4: AFT 全体の写真 各ファイバーの両端は読出しのため黒アクリル部に固定されている.



図 2.5: AFT の標的部分 写真上部から下部に向かってビームが通過する.

シンチレーション光の読出しには浜松ホトニクス社製 MPPC S13360-3075PE を使用する. この MPPC は受光面のサイズが $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, ピクセルピッチ $75\text{ }\mu\text{m}$, 開口率 82% というスペックとなっている.(図 2.6)

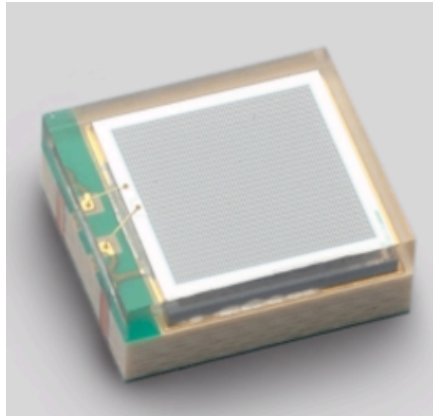


図 2.6: シンチレーション光の読出しに用いられる MPPC

また, 読出し部分は図 2.4 のようになっているため, 形状に合わせて MPPC を配置した MPPC 基板 (図 2.7) を読出し部分に固定することでシンチレーション光を検出する.

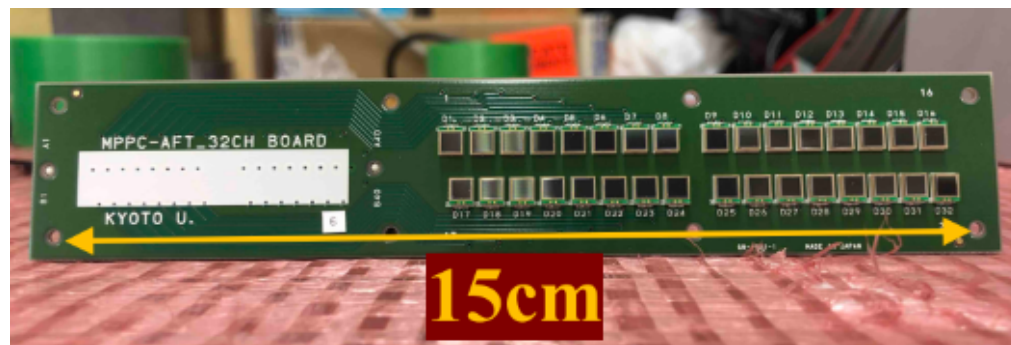


図 2.7: MPPC を配置した基板

第 3 章

AFT の製作

E70 実験に向けて AFT の実機製作を行った。製作方法は、ファイバー検出器として実績のある K1.8 ビームラインでの BFT や本研究第 1 部で製作を行った BFT-D などと基本的には同じである。しかし AFT で用いるファイバーは直径 3mm であるため若干の製作方法の変更を行い製作した。

3.1 製作方法

1. ファイバーを張る

図 3.1 のように、ベースプレートやファイバーガイド、読出し面などを組み立てたのちにファイバーを張っていく。手順は以下である。

1. 読出し面の黒色のアクリル板にはファイバーを通す穴が開けられているため、ここにファイバーをはじめに通す。
2. 有感領域となる部分を覆うファイバーガイドには図 2.3 のような穴が開いているため、既定の位置に通す。
3. さらに、そのままファイバーを通していき反対側の読出し面の穴にも通す。

これを最下層となる 9 層目の yy' 層から行い、 yy' 層が通し終わったら 9 層目の xx' 層を通すという手順ですべての層でファイバーを張っていく。

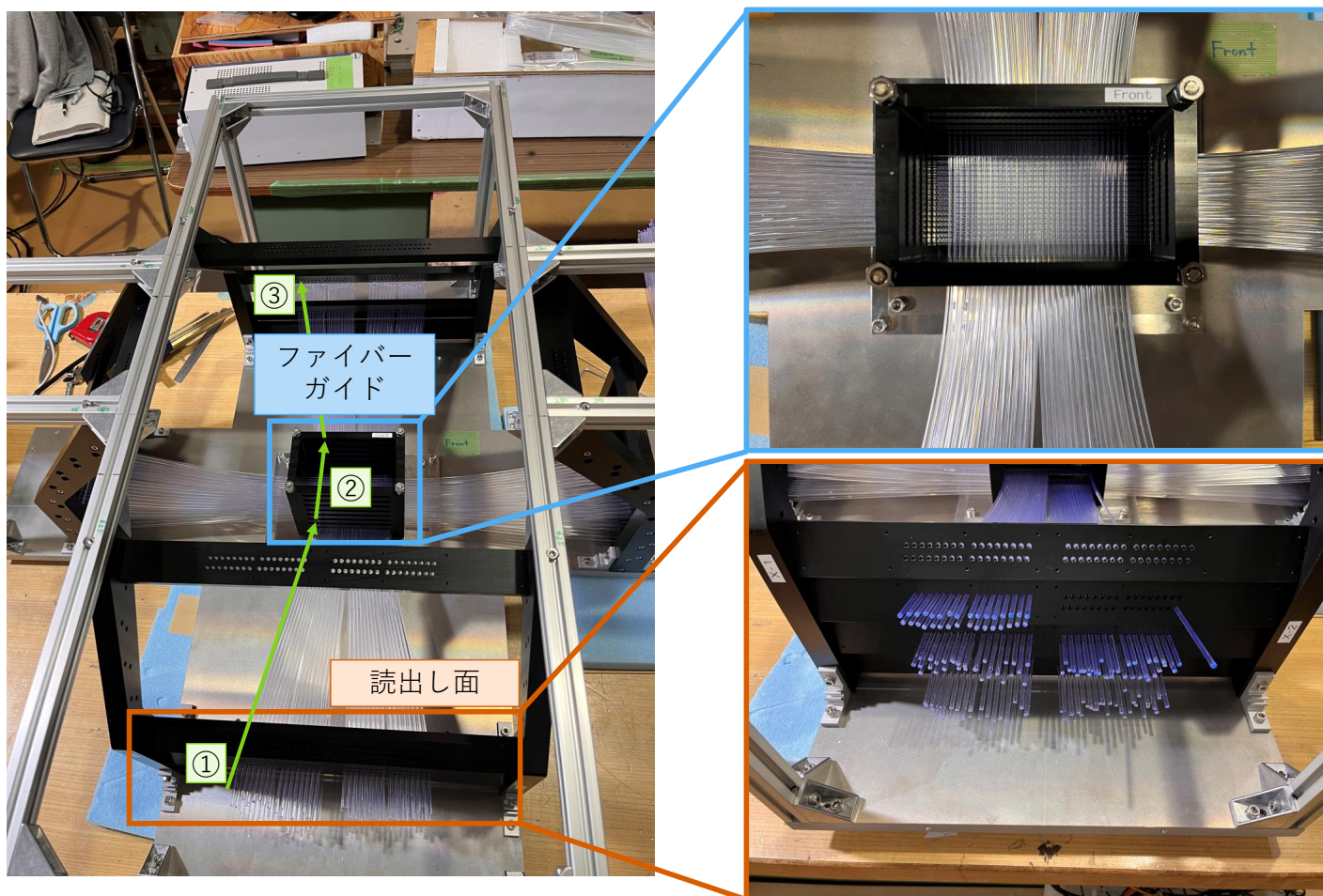


図 3.1: ファイバーの通し方

このようにしてファイバーをすべて張り終えれば図 3.2 のようになる。

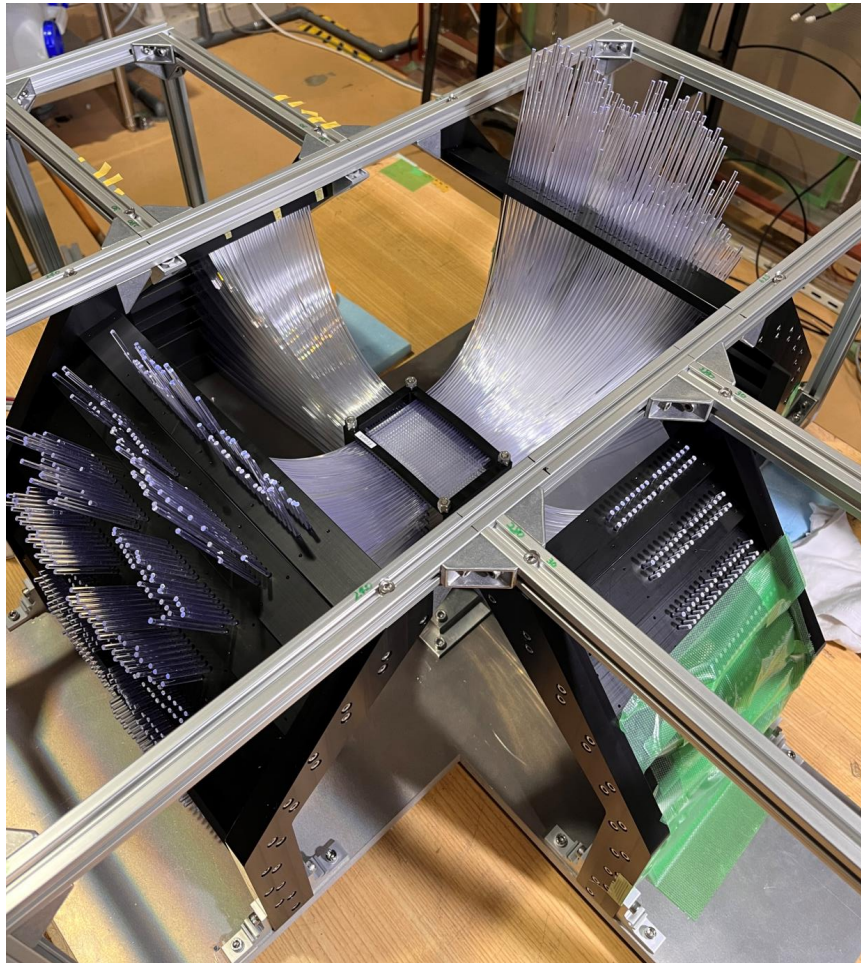


図 3.2: すべてのファイバーを張り終えた AFT

2. ファイバーの固定

AFT においてファイバーは読出し面とファイバーガイドで固定されている。ファイバーガイド部は穴に隙間なくファイバーが敷き詰められているため、 xx' 層であれば x 方向は動かなくなっているが、図 3.1 の緑の矢印方向には動いてしまう。このため、読出し面の穴からファイバーが抜けてしまうことが発生するのでファイバーと読出し面を接着剤で固定する必要がある。まずは、張り終えたファイバーの両端が長すぎるため、適当な長さに切断する。AFT においても BFT-D の時と同様に粘性の低い光学セメントで固定するという方法を取り、後の研磨の工程でファイバーやフレームが痛まないようにエポキシ樹脂で保護を行った。光学セメントやエポキシ樹脂は重力方向に流れていくので、接着したい面を上にして AFT を立てて作業を行うことで固定を行った。(図 3.3)

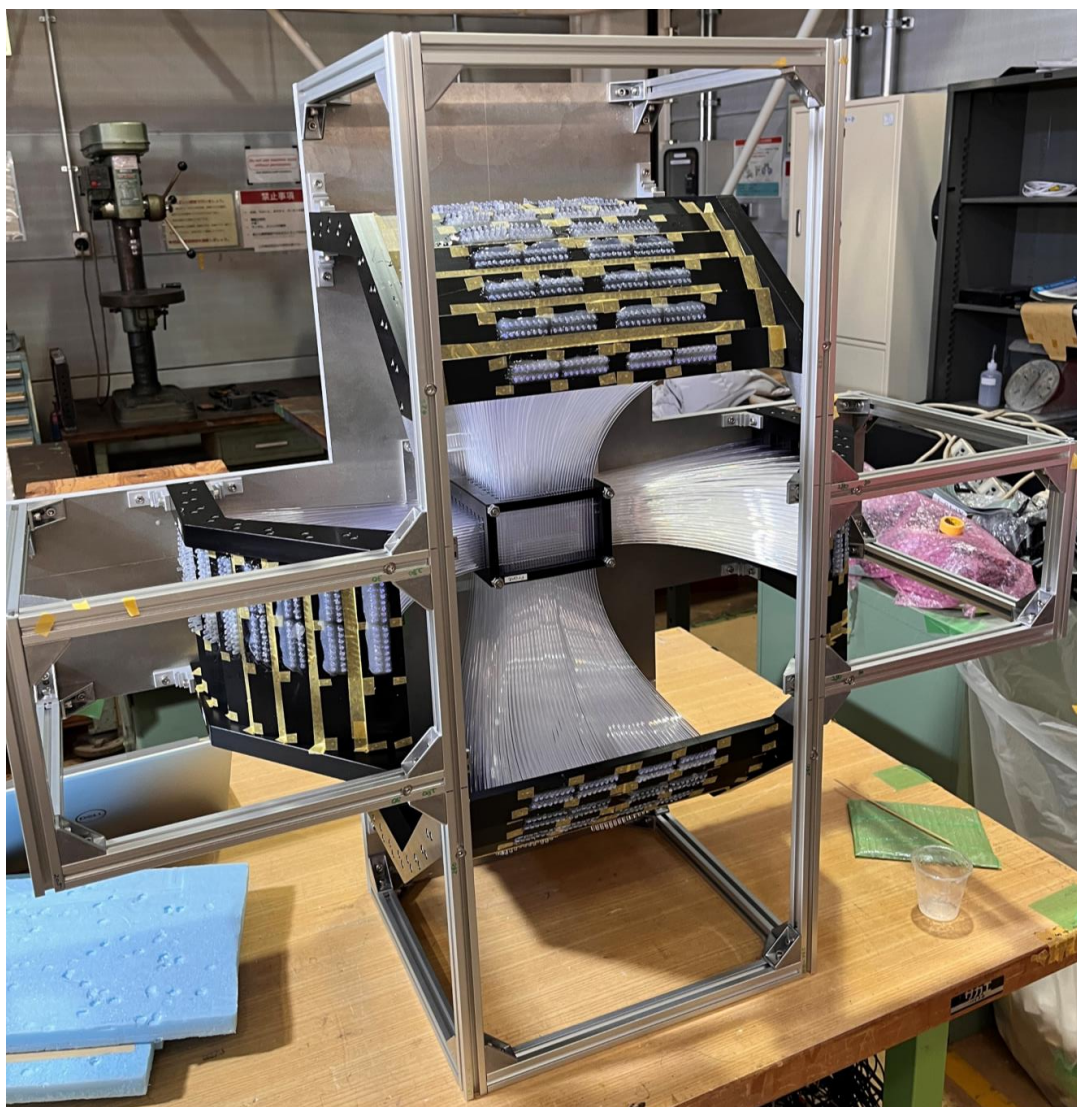


図 3.3: エポキシ樹脂を接着している様子
接着剤が垂れないように立てて作業を行った

3. 読出し面の製作

固定後は読出し面の研磨を行った。耐水紙やすりで、目を細かくしながら研磨を行い最終的に#2000 番まで研磨を行った。研磨の初めの番目の荒いときの研磨にはインパクトドライバーの先に#120 などのやすりを取り付け、電動でやすりがけを行った。また、紙やすりでのやすりがけを行ったのちはアクリル用液体研磨剤 (アクリサンデー) を布に塗布してファイバー端面を研磨し、仕上げを行った。図 3.4 に研磨前と後の比較の写真を示す。

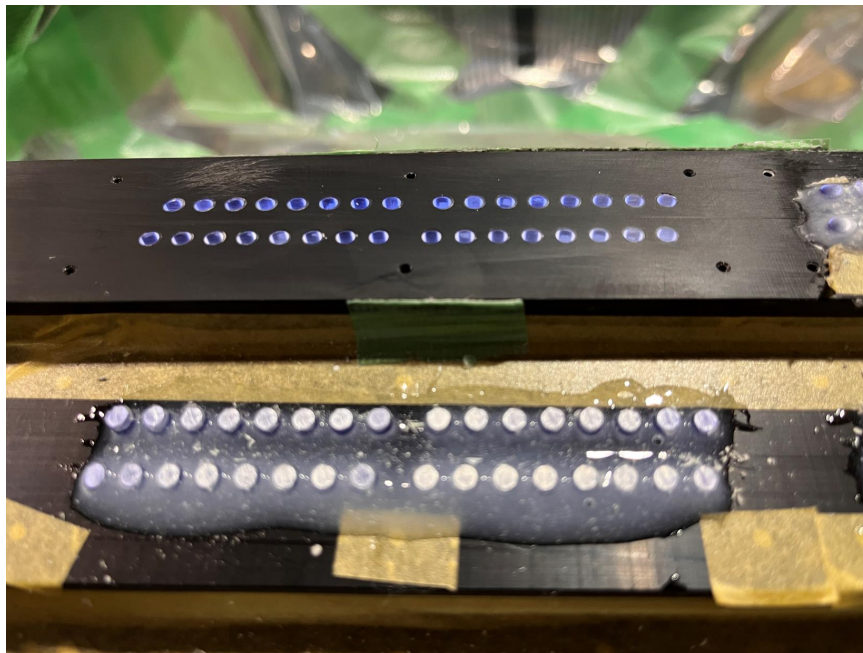


図 3.4: 読出し面の研磨前と研磨後の比較
上側が研磨後 下側が研磨前である。

このようにして、すべての読出し面を研磨し終わったら図 3.5 になった。



図 3.5: すべての読出し面の研磨が終了した AFT

完成した AFT にブラックライトを当てると、図 3.6 のようにファイバー内を光が伝搬していき読出し面に到達することで光っている様子が確認できた。

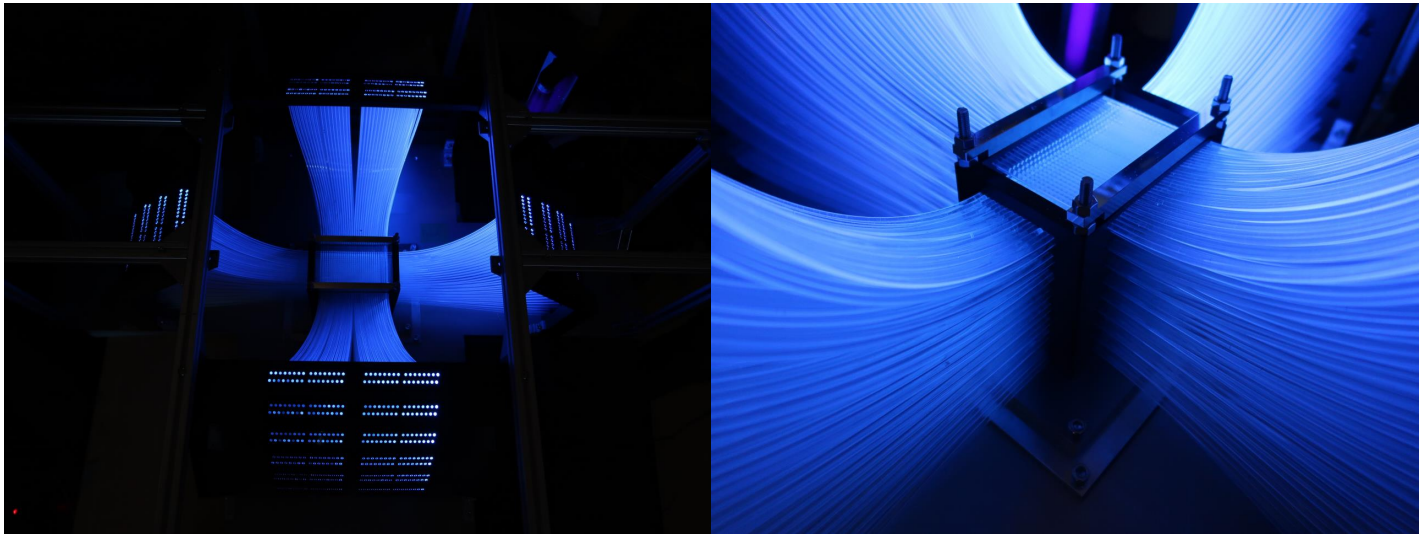


図 3.6: 完成した AFT にブラックライトを照射している写真

第 4 章

AFT の性能評価

4.1 J-PARC E70 コミッショニング

2023 年 6 月 J-PARC K1.8 ビームラインにて E70 実験のコミッショニングランを行った。セットアップは、フィジックスランでのセットアップと同様 (図 1.3) であり、図 4.1 のように検出器がインストールされている。

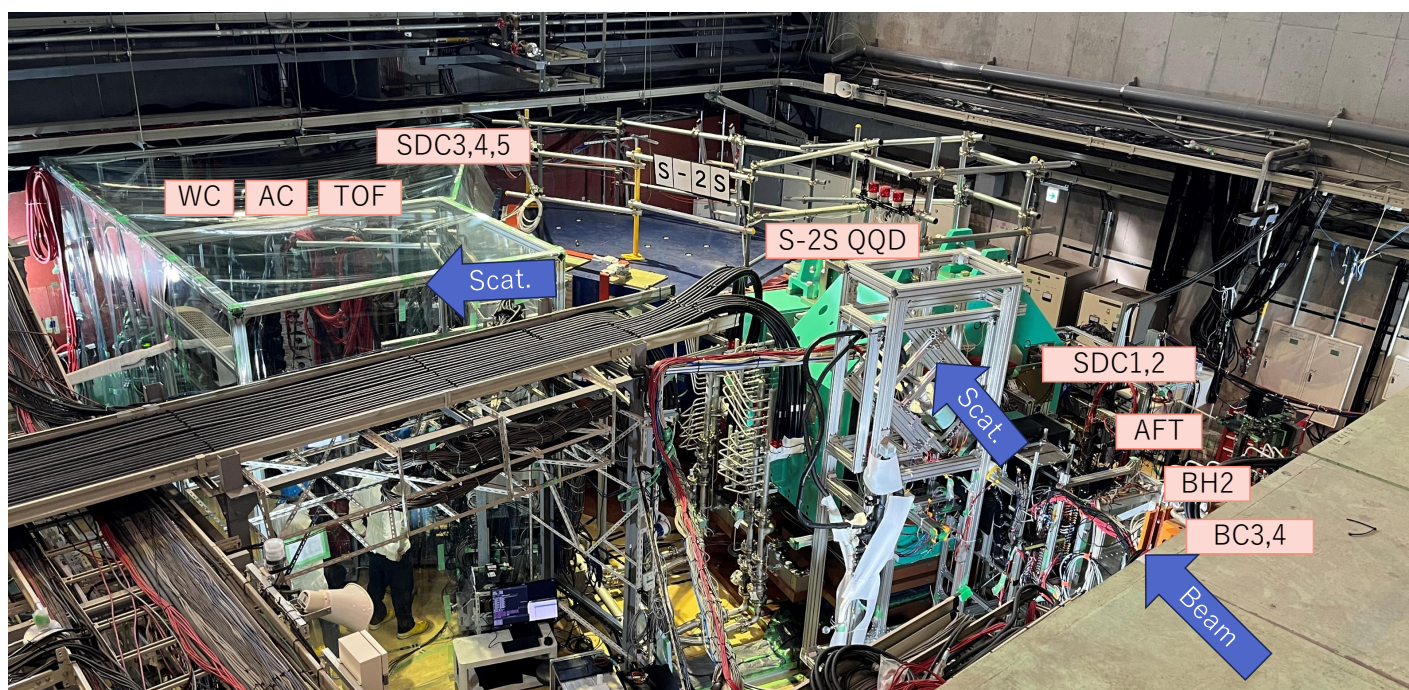


図 4.1: K1.8 ビームラインに設置された S-2S スペクトロメータと検出器群

このコミッショニングランでは新たに K1.8 ビームラインに導入された S-2S スペクトロメータや AFT, 各検出器の動作確認やキャリブレーションなどを目的としたデータを取得した。

4.2 評価項目

各検出器において様々な解析を行うためのデータを取得したが、今回の AFT の解析においては表 4.1 の条件のデータを用いた。

表 4.1: 解析に用いたランと条件 (単位 運動量:GeV/c, レート:/spill, HV:V)

Run#	粒子	運動量	レート	トリガー	HV	備考
70169	π	-1.8	300 k	Beam	orig.	-
70171	π	-1.8	38 k	Beam	orig.	-
70172	π	-1.8	38 k	Beam	-0.3	-
70173	π	-1.8	38 k	Beam	-0.03	-
70175	π	-1.8	1.5 M	Beam	orig.	-
70176	π	-1.8	1.5 M	Beam	-0.3	-
70178	π	-1.8	1 M	Beam	orig.	-
70179	π	-1.8	1 M	Beam	-0.3	-
70254	K	1.4	10 k	Beam $\times$ TOF	Y:-0.3	BT w/o AFT, IFH narrow
70257	π	1.4	100 k	Beam $\times$ TOF	Y:-0.3	BT w/o AFT
70324	K	1.4	11 k	Beam $\times$ TOF	Y:-0.3	BT w/ AFT, IFH narrow
70326	π	1.4	100 k	Beam $\times$ TOF	Y:-0.3	BT w/ AFT
70333	π	-1.8	91 k	Beam	Y:-0.3	defocus

ここで HV の Orig. とは以下の電圧設定 (表 4.2) で, MPPC の降伏電圧から +3V させたものである. ch ごとにばらつきがあるものの, この設定においては 1 photon gain $\sim$ 15 ch となっている.

表 4.2: 各層での MPPC の印可電圧 (HV original)

Layer	HV original(orig.) [V]
X1-3	58.65
Y1-3	58.67
X4-6	58.86
Y4-6	59.10
X7-9	59.28
Y7-9	59.61

また, EASIROC において TDC threshold は DAC code という値で設定を行う. マルチヒット TDC の Depth である 16Hit がすべて埋まらない程度には高く設定する必要があることや, 実験前のノイズレベルを考慮して DAC code は Baseline -100 という設定とした. この threshold についても ch ごとにばらつきがあるものの光子数では 3 $\sim$ 4 p.e., ch 数ではペDESTALから 60 ch 程度で threshold にかかる設定となっている.

これらのデータを用いて以下項目について評価を行った.

- 解析に必要な基本的なパラメーターの作成 (#70333) とクラスタリング処理
- AFT のレート耐性と HV 依存性 (#70169 $\sim$ #70326)
- AFT の光量をエネルギーに変換するエネルギーキャリブレーション (#70254 $\sim$ #70326)
- エネルギー補正の性能とスペクトロメーターの運動量分解能から見積もられる Missing Mass 分解能

4.3 パラメータ作成

4.3.1 エネルギー校正

AFT はマルチチャンネルのファイバー検出器であるため、チャンネルごとに増幅率のばらつきが存在している。そのため全チャンネルに対しゲインの導出の後にエネルギー校正を行う。今回読出しに用いた EASIROC モジュールは、ADC を 2 つのゲインで同時に取得することができる HighGain ADC と LowGain ADC の両方が存在する。二つのゲインで取得された ADC はどちらも後ほどの解析で用いるため、LowGain と HighGain の両方に対しエネルギー校正を行う必要がある。HighGain と LowGain の ADC の両方に対してエネルギーに対応する値”DeltaE”を以下のように導入し変換を行う。

$$\text{DeltaE} = \frac{\text{ADC [ch]} - \text{pedestal peak [ch]}}{\text{MIP}_{\pi} \text{ peak [ch]} - \text{pedestal peak [ch]}} = \frac{\text{ADC [ch]} - \text{pedestal peak [ch]}}{\text{Gain}_{\pi} \text{ [ch]}} \quad (4.1)$$

この変換は各 ch において π ビームが落とすエネルギーがほぼ最小電離 (MIP) であることを利用して、 π ビームのエネルギー損失を 1 とするものである。ADC ch を DeltaE に変換するには各チャンネルにおいて、 π が MIP の時に落とすエネルギーに対応する ADC のピークである $\text{MIP}_{\pi} \text{ peak [ch]}$ とペデスタルのピーク位置 $\text{pedestal peak [ch]}$ の情報が必要である。このため図 4.2(HighGain) や図 4.3(LowGain) のように、全チャンネルにおけるペデスタルと MIP ピークの位置をガウス関数によるフィッティングで得た。

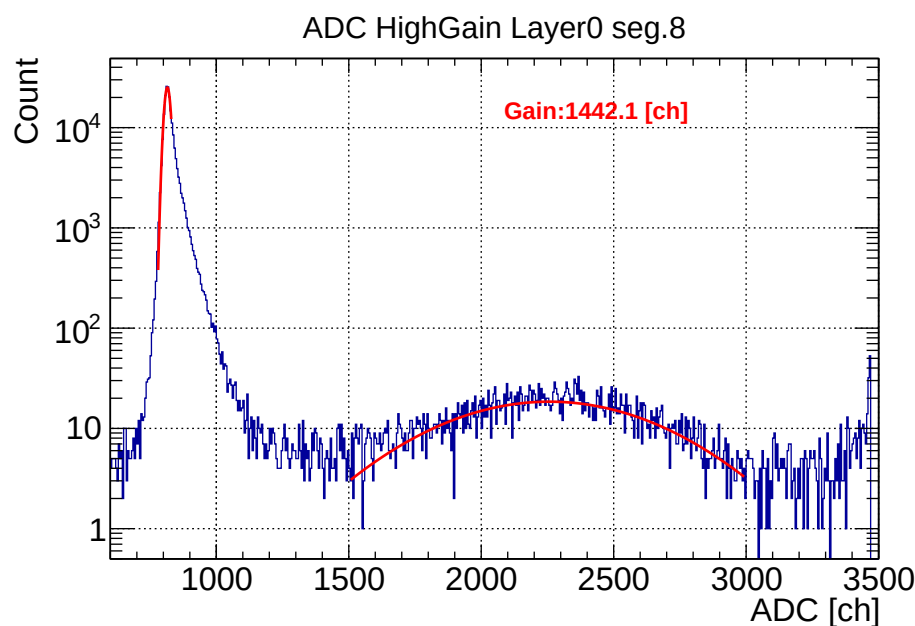


図 4.2: 1 層目 x 層上側の読出しのセグメント 8 番の ADC 分布 (HighGain)

ペデスタルと MIP が形成するピークの位置をガウス関数によるフィッティングで決定し差分から $\text{Gain}_{\pi} = 1442.1 \text{ ch}$ と求められる。

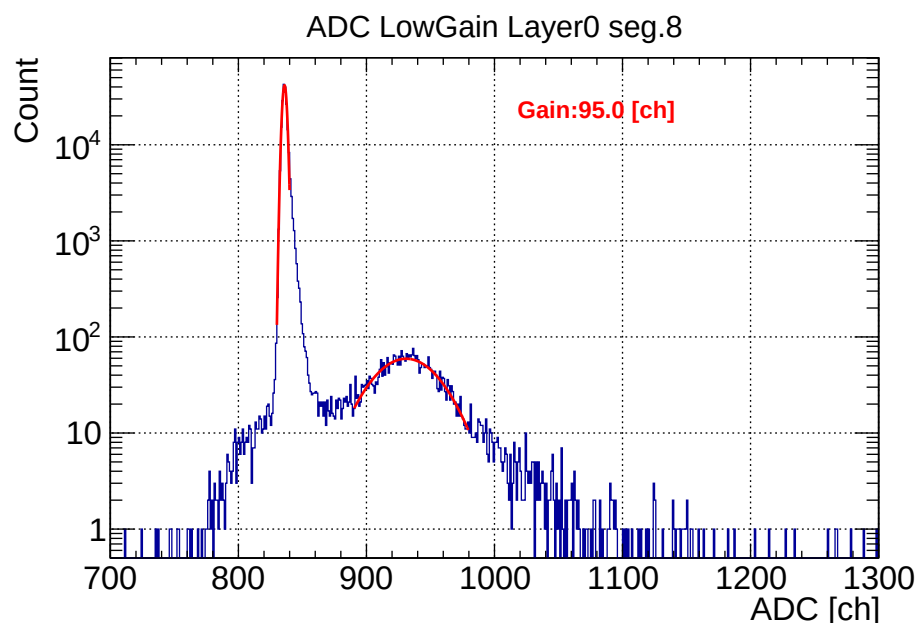


図 4.3: 1 層目 x 層上側の読出しのセグメント 8 番の ADC 分布 (LowGain)

HighGain と同様の手順で $\text{Gain}_\pi = 95.0 \text{ ch}$ と決定された。

このような手順で全チャンネルの HighGain と LowGain の ADC について Gain_π を求めることで, DeltaE を算出することができる。

AFT は 1 つのファイバーに対して上側 (Up) と下側 (Down) の両端で読出しを行うため, 1 ファイバーについての DeltaE は両端の読出しでの DeltaE の相乗平均 (式 4.2) をとり算出することとする。

$$\text{DeltaE} = \sqrt{\text{DeltaE}_{\text{Up}} \times \text{DeltaE}_{\text{Down}}} \quad (4.2)$$

ここで $\text{DeltaE}_{\text{Up}}$, $\text{DeltaE}_{\text{Down}}$ はそれぞれ上側, 下側の読み出しでの DeltaE の値である。

このようにして算出した, 1 層目の x 層セグメント 8 番での DeltaE HighGain と DeltaE LowGain の値をそれぞれ図 4.4, 図 4.5 に示す。MIP での π が落とすエネルギーに対応するピークが 1 に立っており, 正しく変換が行われていることが分かる。

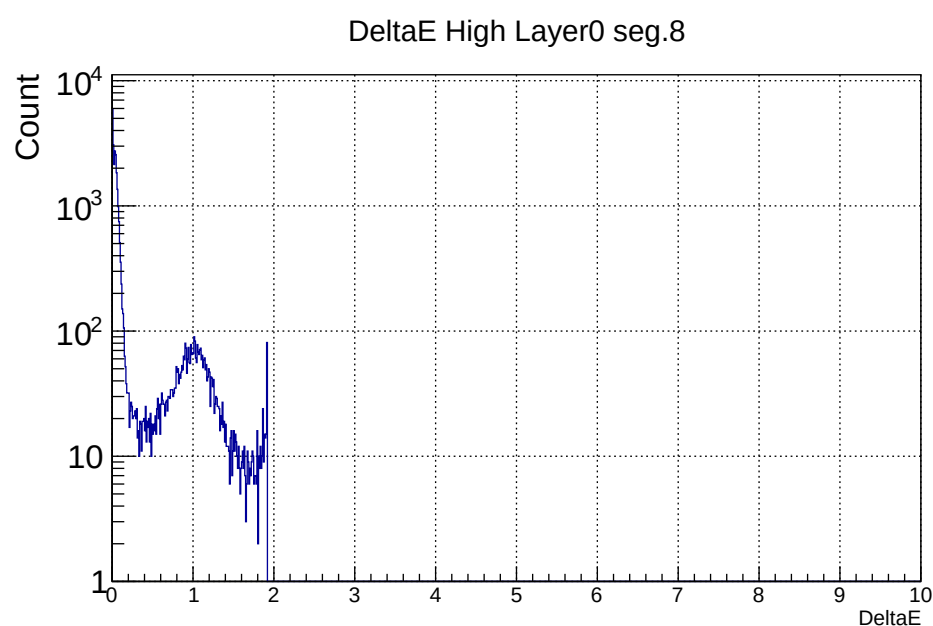


図 4.4: 1 層目 x 層セグメント 8 番における DeltaE HighGain

ペDESTALのピークが 0 に立ち, π の MIP ピークが 1 に立つようにスケールされたことが分かる。HighGain における ADC の取得上限が $\text{DeltaE} \sim 2$ であるため, 2 以上のデータは存在しない

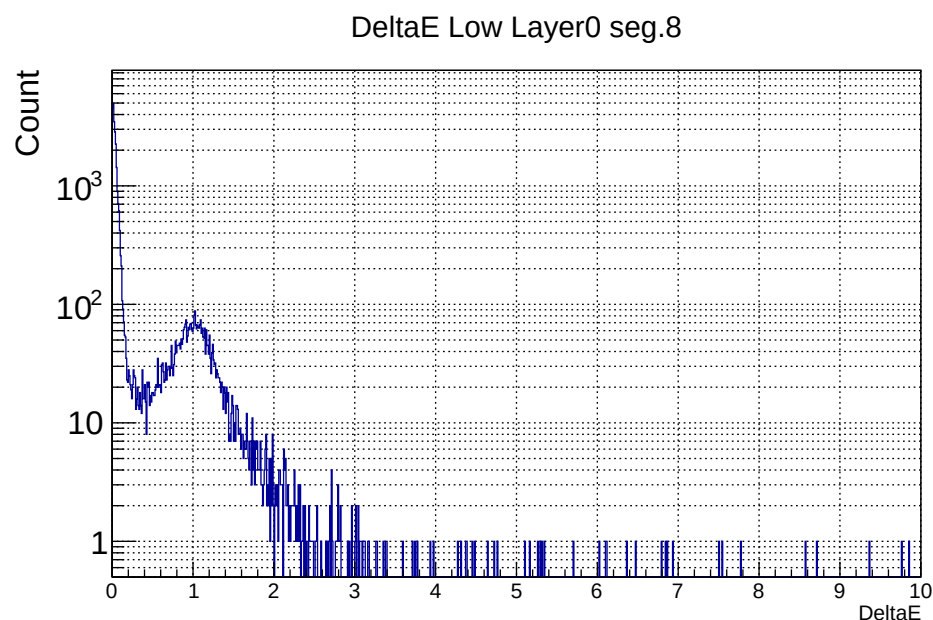


図 4.5: 1 層目 x 層セグメント 8 番における DeltaE LowGain

HighGain と同様であるが, LowGain ではゲインが低いため DeltaE が高いところまで取得できる.

4.3.2 TDC から時間への変換

AFT においても様々な解析を行うにあたって時間情報 Time が必要となる. TDC を時間に変換するには, Hit イベントでの TDC タイミング (True Timing Peak) の情報を用いて以下の式から算出する. ただし True Timing Peak は, TDC 分布のピークをフィッティングすることで求める.

$$\text{Time [ns]} = (\text{TDC [ch]} - \text{True Timing Peak [ch]}) \times -1 \text{ [ns/ch]} \quad (4.3)$$

読出しには EASIROC を用いているため, TDC の 1 ch は 1 ns に対応する. AFT は各層で両側の読出しであるが, 1 層目の x 層について時間分布をみると図 4.6 になり, 赤実線で示した領域の y 軸射影は図 4.7 となっている.

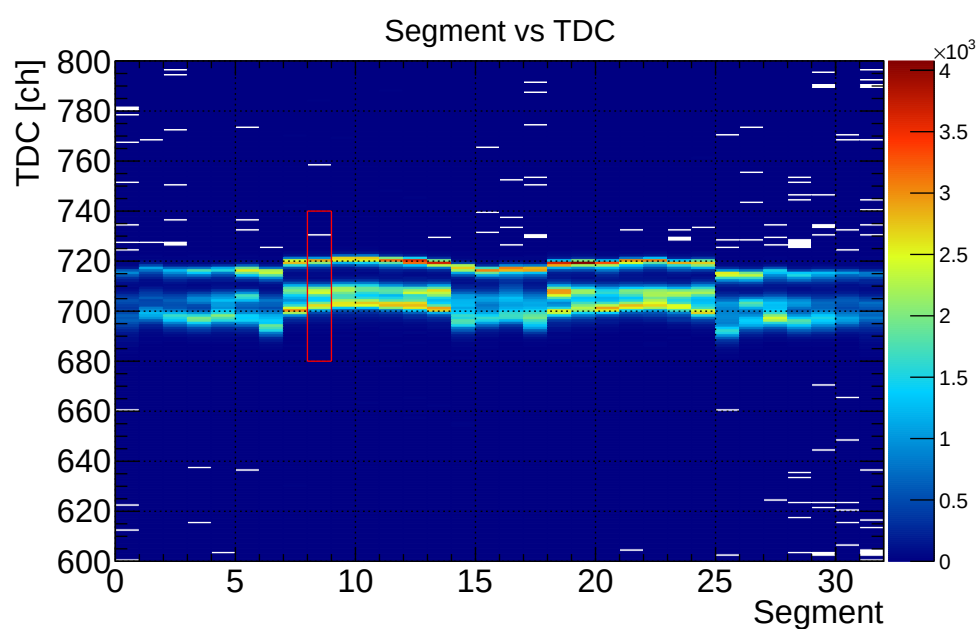


図 4.6: 1 層目 x 層上側の読出しの TDC 分布 横軸はセグメント数で縦軸には TDC をプロットしている. 赤の実線で示した領域の y 軸射影が図 4.7 である.

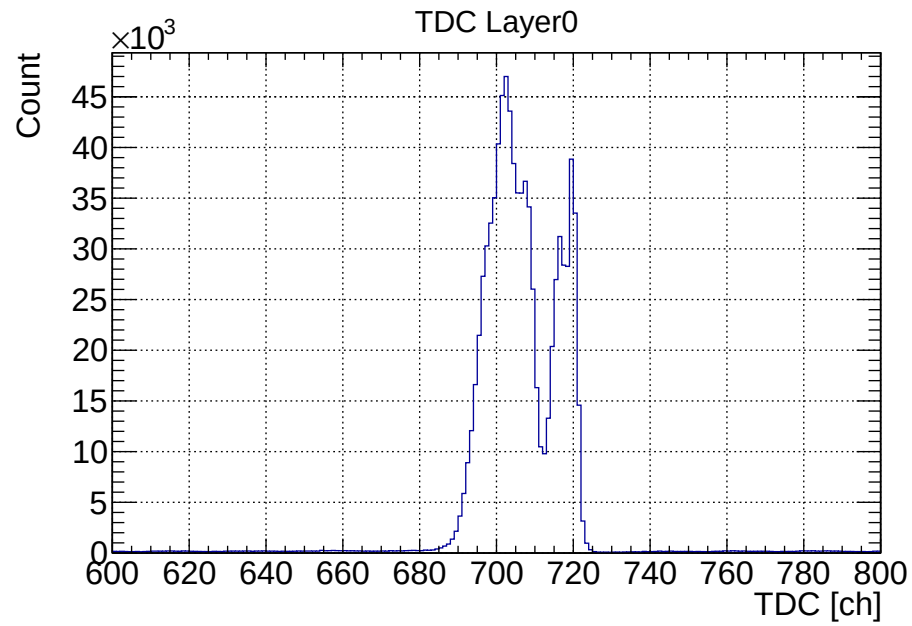


図 4.7: 1 層目 x 層セグメント 8 番上側の読出しの TDC 分布

TDC のピークが 3 つ確認されどのピークが真の Hit での TDC タイミングがわからない。

図 4.7 を見ると本来であれば TDC のピークは 1 つとなるはずであるが, 3 つのピークが確認された。真の Hit タイミングが不明である。この 3 本のピークのうち 2 本はクロストークが形成していると考えられる。図 4.8 にイベントディスプレイを示すが, 粒子が通過したファイバーの周辺のファイバーや何セグメントか離れたファイバーにおいて DeltaE の非常に小さい ADC が存在している。この原因は明らかにならなかったが, 読出しに用いているフラットケーブルや EASIROC 回路内での電氣的なクロストークではないかと考えている。

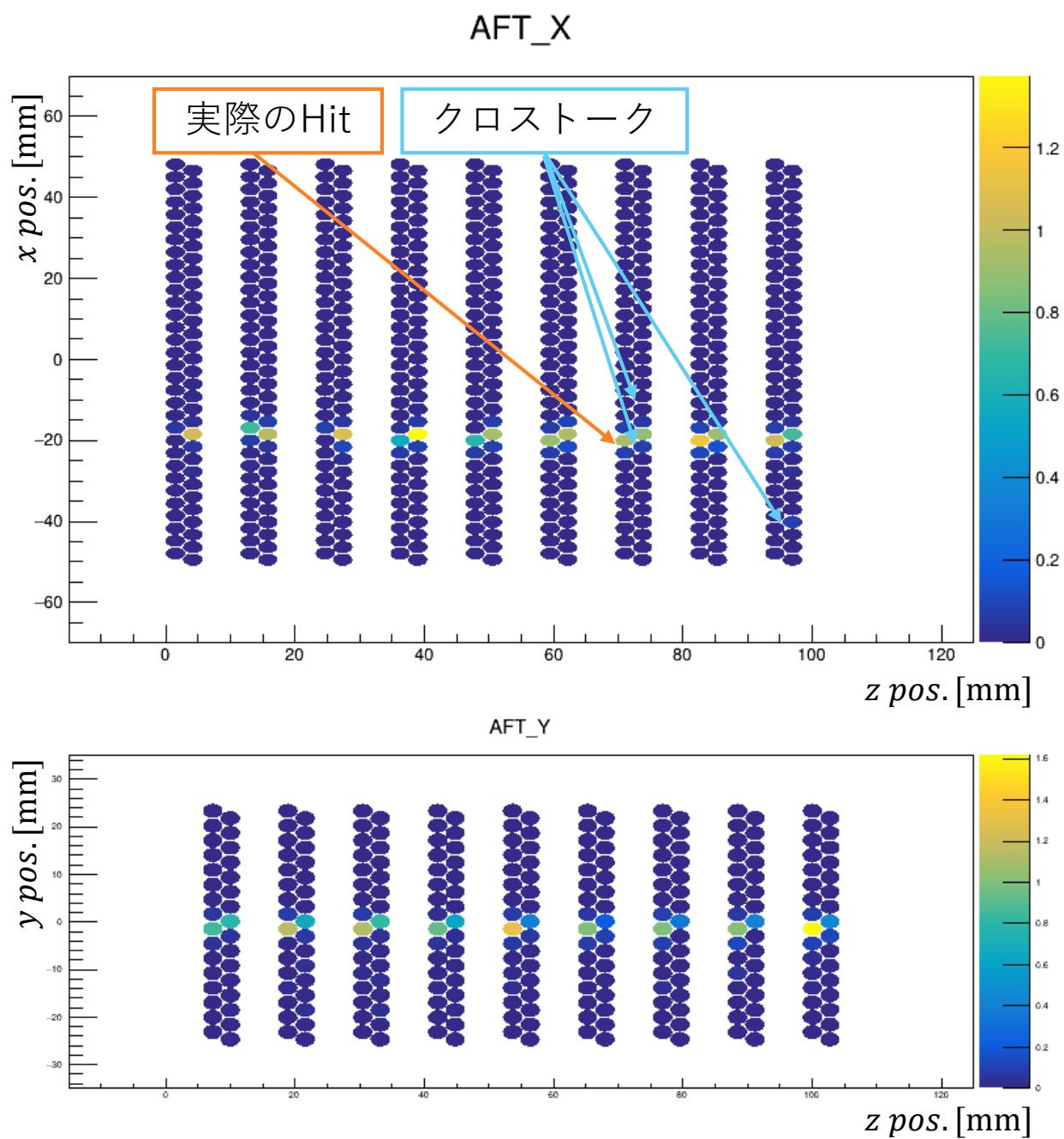


図 4.8: AFT の Event Display

上のヒストグラムは xx' 層, 下のヒストグラムは yy' 層を表し, 色で DeltaE の大きさを表示している.

しかし時間情報に変換するためにはクロストークではない本物のイベントだけを選ぶ必要がある. そこで真の Hit による TDC とクロストークによる TDC を分けるために, 各層の中で最も ADC が大きかったヒットの TDC を選んだ.(図 4.9)

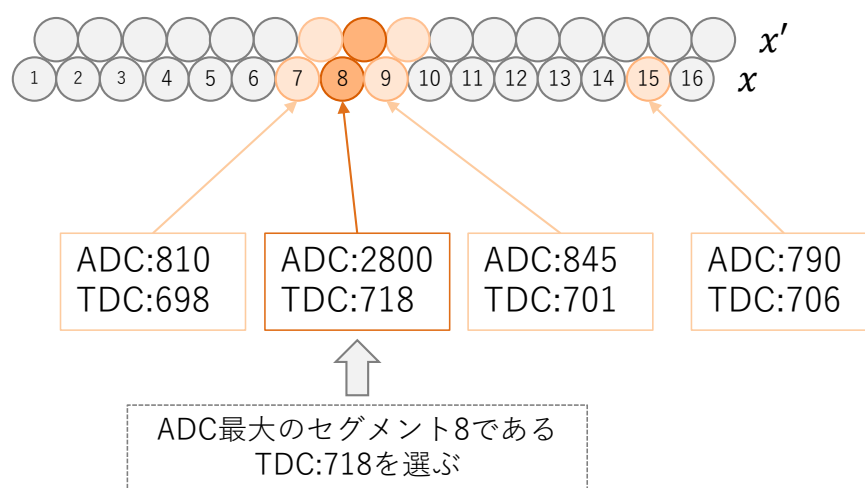


図 4.9: 各層で ADC が最も大きいセグメントの TDC を選ぶ.

濃いオレンジが真のヒットで薄いオレンジがクロストークとなっている.

このようにして選んだ TDC をプロットしたグラフが図 4.10 である. また, 赤実線の範囲で囲まれたセグメント 8 番での y 軸に射影したヒストグラムを図 4.11 に示す. ADC が大きかった時の TDC のみがフィルされているためクロストーク成分が除去され, ピークが一つとなっている.

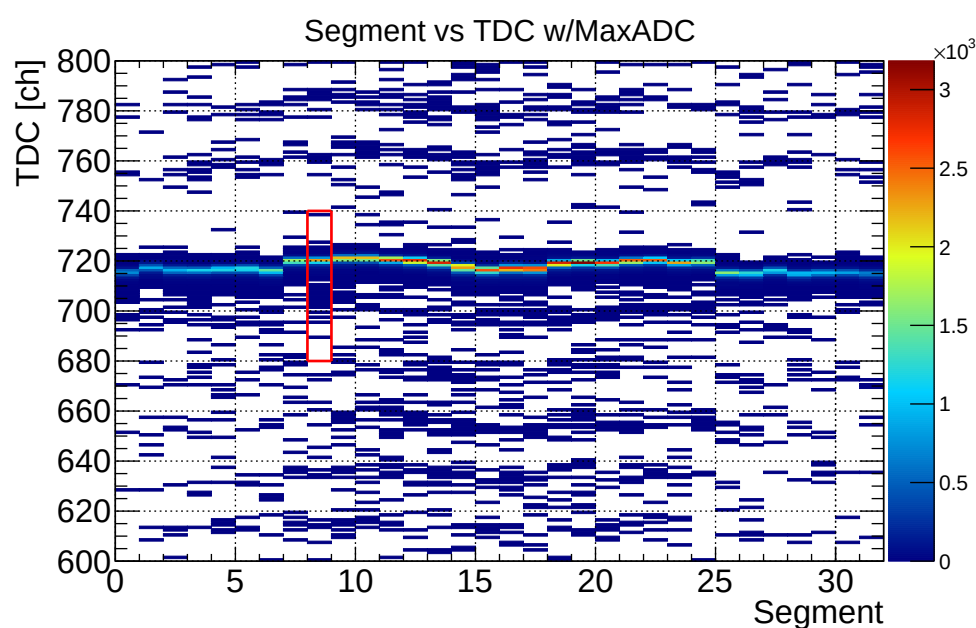


図 4.10: 1 層目 x 層において最も ADC の大きかった Hit における TDC

ADC が大きかった時の TDC のみがフィルされているためクロストーク成分が除去され一つのピークのみが確認された.

図 4.10 の赤線の領域を選んで y 軸に射影したものを図 4.11 に示す. この分布ではピークが一つとなり, Hit イベントに対応する TDC ピークのみが現れることがわかる. ピークをガウス分布でフィッティングすることで式 4.3 の True Timing Peak の値を得ることができる. 図 4.10 では, True Timimng Peak = 720.1 ch と決定された.

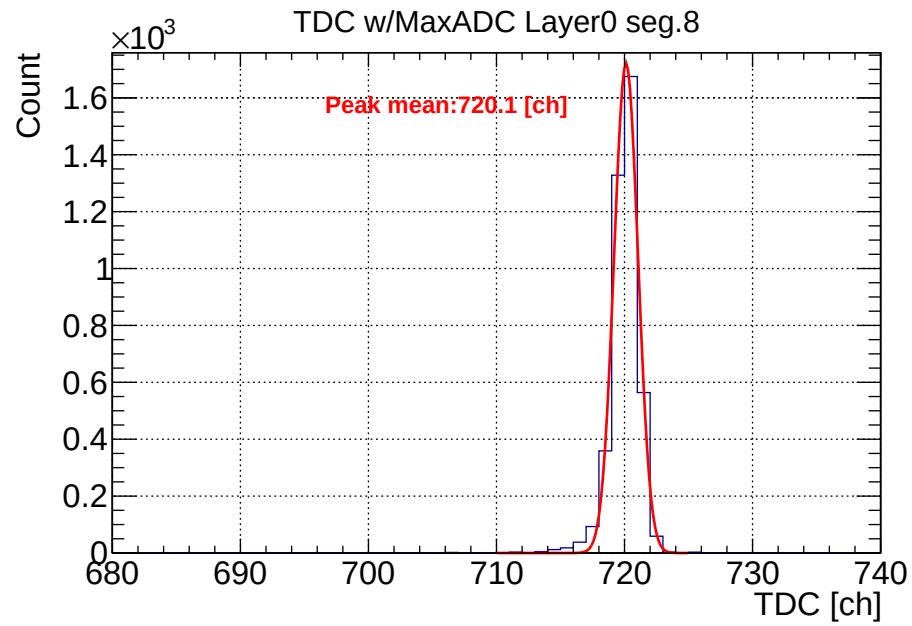


図 4.11: 図 4.10 のセグメント 8 番を y 軸に射影したヒストグラム
 真の Hit タイミングをフィッティングから求めることができ, Peak=720.1 ch のように決まる.

図 4.10 で行ったフィッティングを全セグメントで行うことで TDC を Time に変換したものが図 4.12, 図 4.13 である. TDC 分布を時間分布に変換したことで真の Hit によるピークは 0 付近に分布していることが分かる. クロストーク成分は約 10 ns と約 20 ns 遅れてピークを形成している.

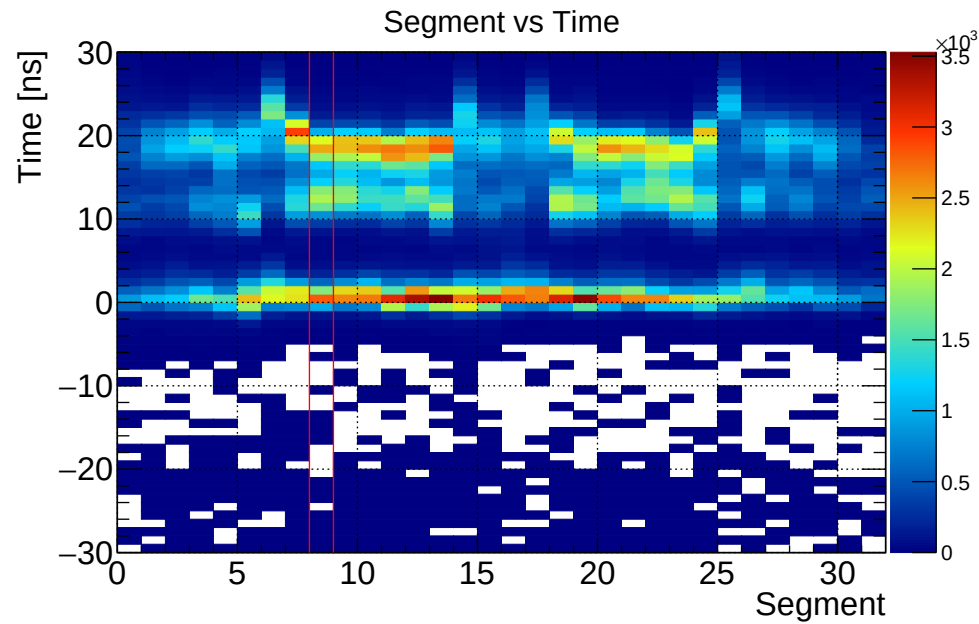


図 4.12: 1 層目 x 層における Time 分布
 真の Hit タイミングは Time=0 付近にピークが立っておりクロストーク成分はそこから遅れてピークを形成している.

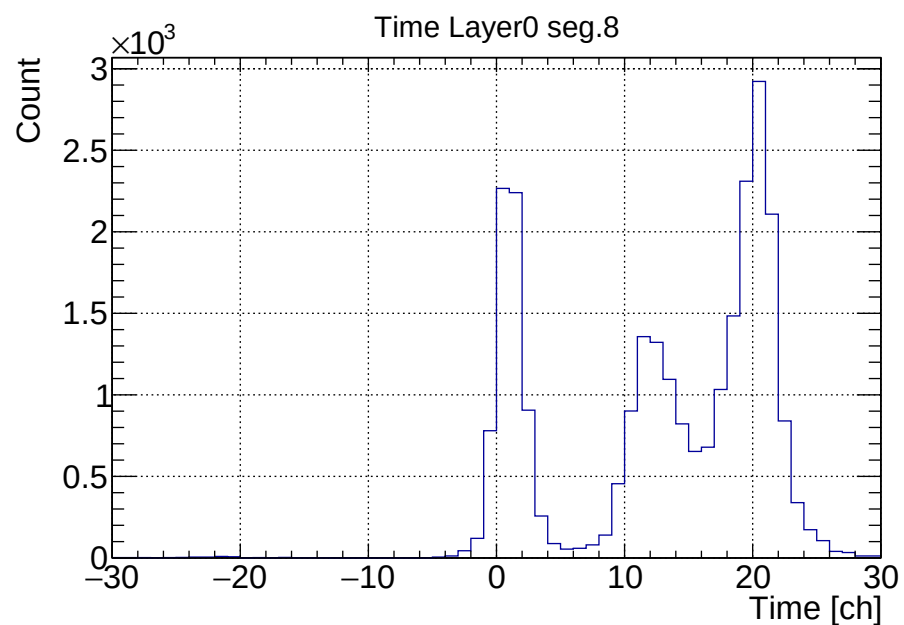


図 4.13: 図 4.12 のセグメント 8 番を y 軸に射影した Time 分布

4.4 ヒットパターン

1.4 GeV/c の K^+ を AFT に照射したラン (#70324) でヒットパターンを見ることで AFT が正常に動作しているか確認する。このランにおいて AFT 上流の BC3, BC4 で再構成されたトラッキングから求めた AFT 位置における Beam Profile は図 4.14 となっている。

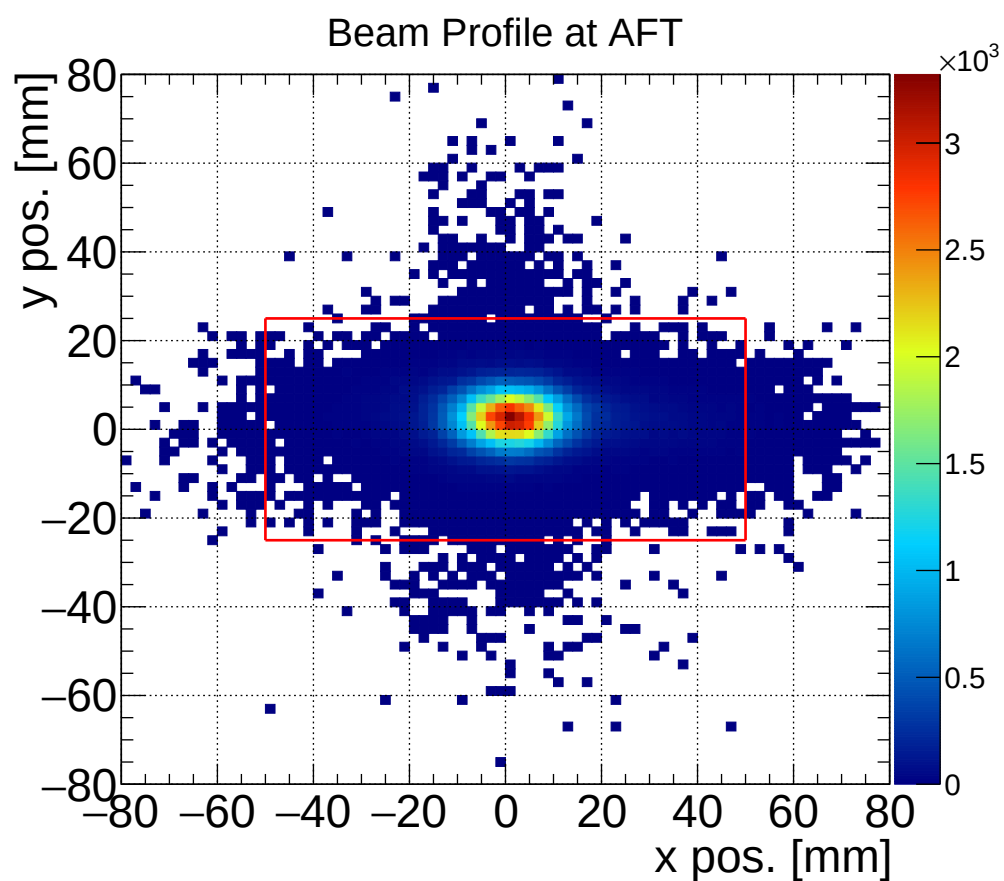


図 4.14: AFT 位置でのビームプロファイル
赤線で囲まれた領域が AFT の有感領域である。

前章の Time 分布からみたように真のイベントを選ぶためには Time でカットをかける必要がある．しかし Time は 1 ファイバーの両端の読出しに対してそれぞれ存在するため，以下のように MeanTime を定義する．

$$\text{MeanTime} = \frac{\text{Time}_{up} + \text{Time}_{down}}{2} \quad (4.4)$$

これは 1 ファイバーの上側と下側の時間情報である Time_{up} と Time_{down} の相加平均をとったものである．1 組目の xx',yy' 層について算出された MeanTime 分布は図 4.15 となり， $-5 \text{ ns} < \text{MeanTime} < 5 \text{ ns}$ を MeanTimeCut と定義する．MeanTimeCut のみを施した際のヒットパターンは図 4.16 青線のようにっており，ビームプロファイルから予想されるヒットパターンと異なる．

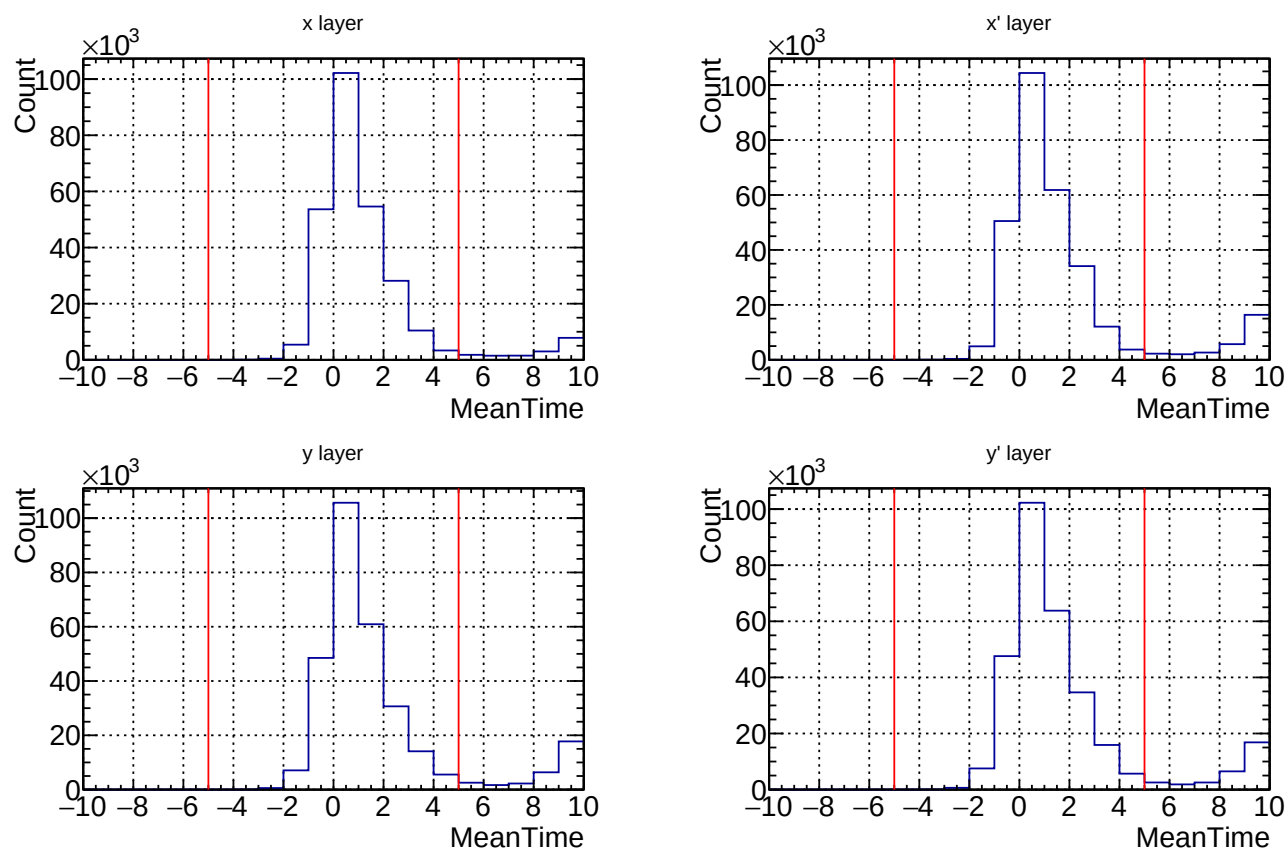


図 4.15: 最上流 (1 層目) の xx',yy' 層における MeanTime 分布
赤実線の領域が MeanTimeCut の範囲となる．

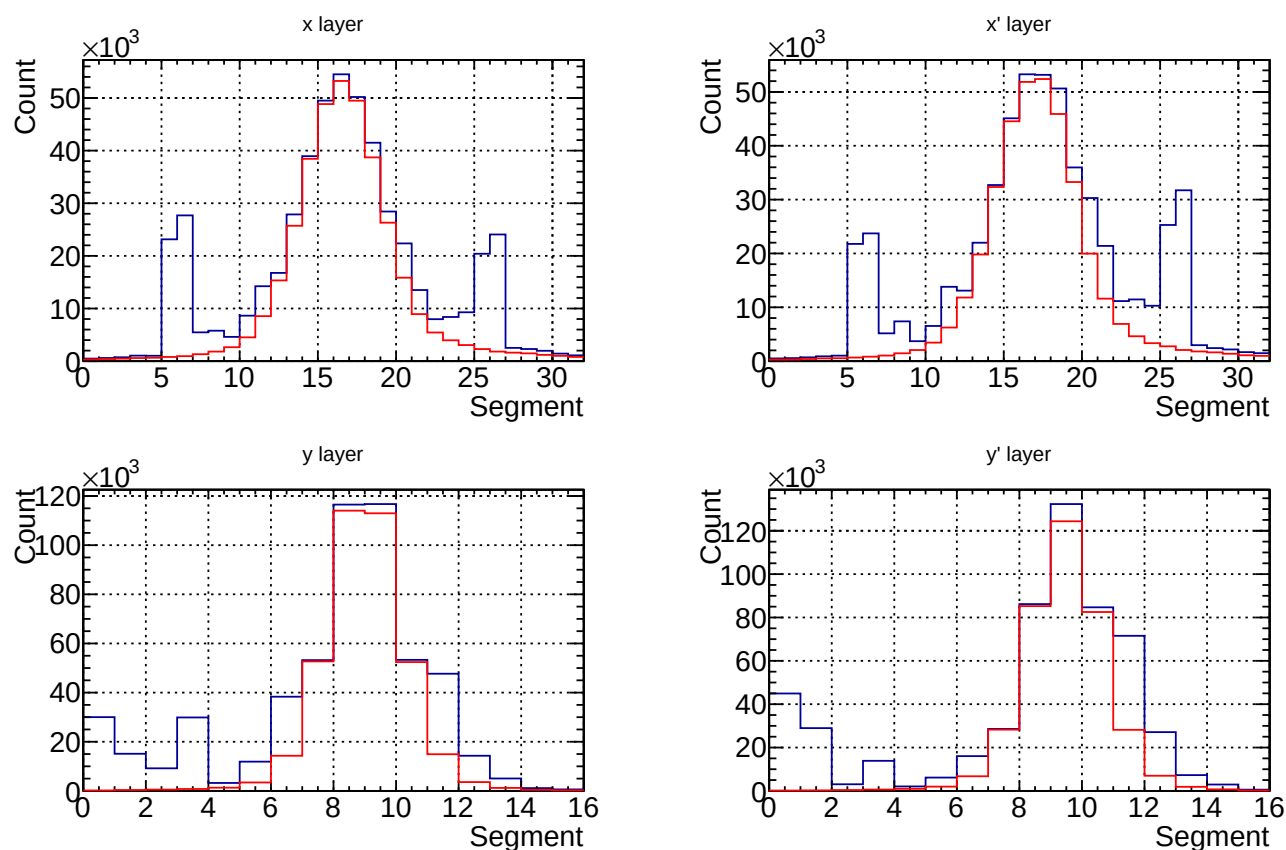


図 4.16: 最上流 (1 層目) の xx' yy' におけるヒットパターン

青色: TimeCut のみでのヒットパターン

赤色: TimeCut と DeltaECut を施したヒットパターン

ここでさらにカット条件として DeltaECut を導入する. 図 4.17 を見るとわかるように, TimeCut の範囲中にペDESTAL 付近の信号が多く存在している. これが原因で図 4.16 の青線ではヒットパターンにおいて異常なピークを形成している. これはクロストークと考えられる DeltaE の小さい信号が TimeCut 領域内に混入してしまうことに起因すると考えられ, この信号を切るために $\Delta E > 0.2$ を要求する. これにより図 4.17 の赤線領域が選ばれる. 赤線領域を選択した際のヒットパターンは図 4.16 赤線で示されている.

これらのカットにより本来のヒットパターンを再現し, Hit イベントのみを選択するには TimeCut と DeltaECut が必要であるということが明らかとなった.

4.5 Multiplicity

前述した MeanTimeCut と DeltaECut を満たす Hit について Multiplicity を計算した. 用いたランはヒットパターンでの解析と同様, 1.4 GeV/c の K^+ (#70324) である. 1 層目の xx' , yy' のそれぞれのペアプレーンごとに算出した Multiplicity を図 4.18 に示す.

また, Multiplicity から Efficiency を定義することができ, Efficiency は式 4.5 で定義される.

$$\text{Efficiency} = \frac{\# \text{ of event} - \# \text{ of 0 hit event}}{\# \text{ of event}} \quad (4.5)$$

例として xx' 層では x 層にも x' 層にも Hit がなかった (Multiplicity=0) イベント数を # of 0 hit event とし, 全イベント数を # of event として計算する. 図 4.18 には計算した Efficiency も同時に表記している.

図 4.18 では 1 層目 xx' , yy' での multiplicity は 2 にピークが立っており, 俵積みの構造の検出器であることからもっともらしい. また Multiplicity=0 というように粒子を検知できなかったイベントはほとんど存在せず, xx' 層では 99.12%, yy' 層では 99.96% と高い検出効率であった.

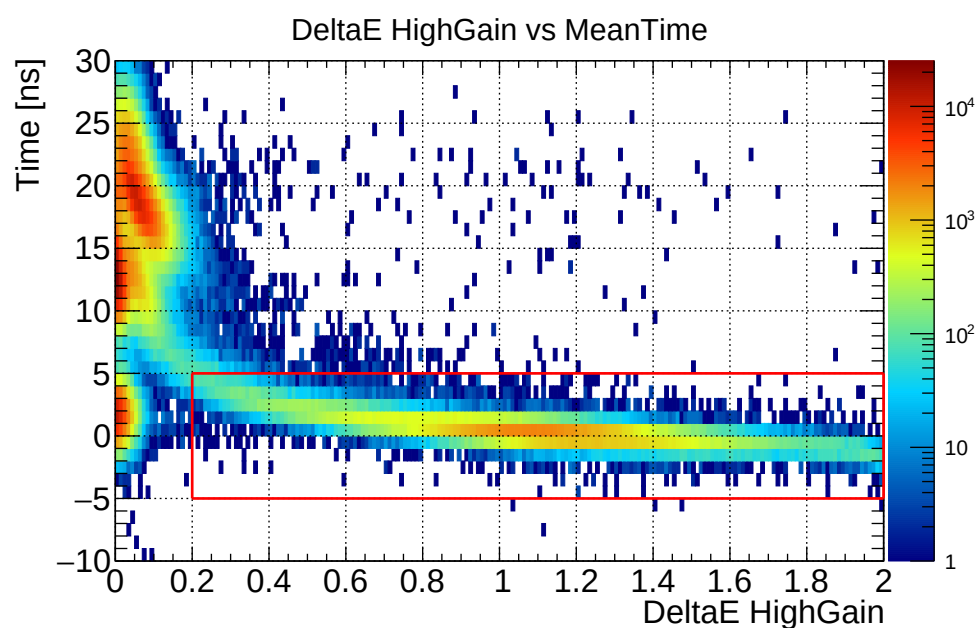


図 4.17: 最上流 (1 層目) の x 層における DeltaE HighGain と MeanTime の相関
MeanTimeCut に加え, DeltaE > 0.2 を選ぶことで赤線の領域に内にあるイベントが Hit とみなされる.

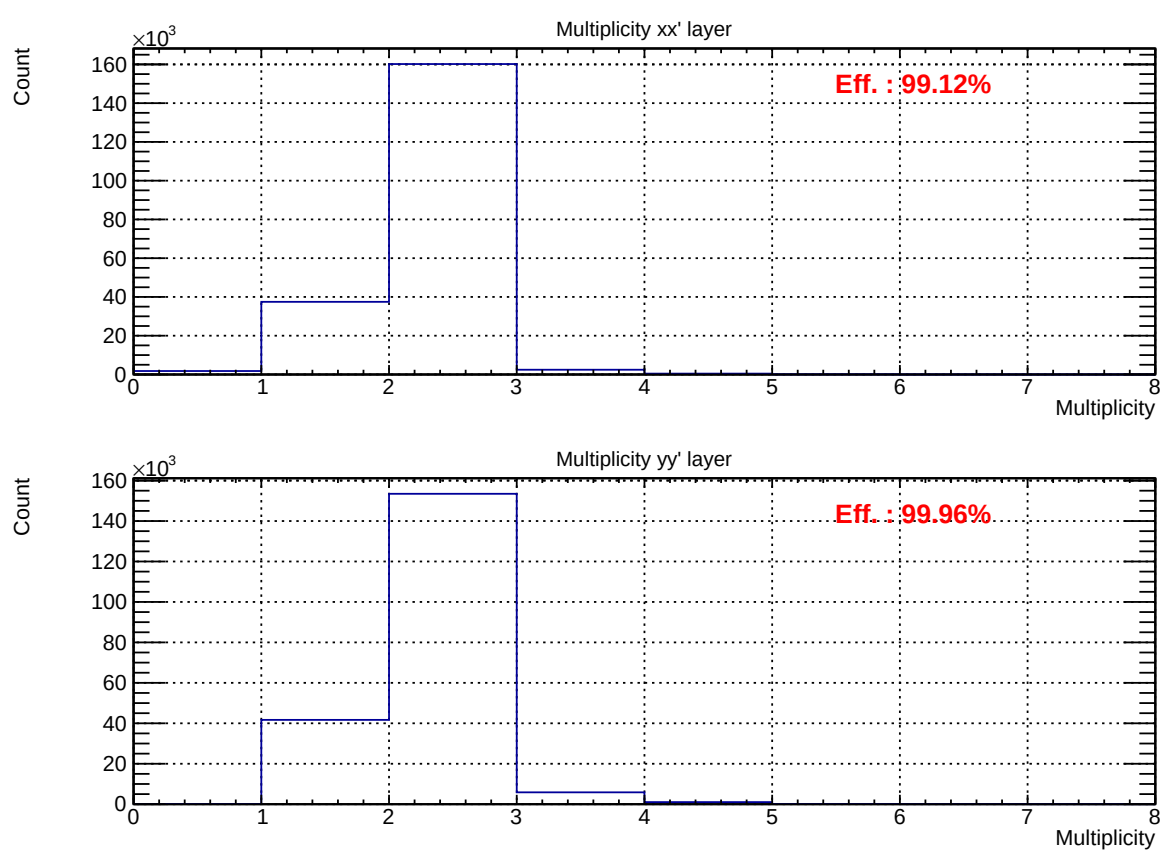


図 4.18: 最上流 (1 層目) の xx' 層, yy' 層それぞれの Multiplicity
依積みの構造上 2 にピークが立っている.
全体のイベント数と Multiplicity=0 の比率から計算した Efficiency も計算し, xx' 層では 99.12%, yy' 層では 99.96% となった.

4.6 検出効率の電圧, ビームレート依存性

前章では TimeCut と DeltaECut による Event Selection を行うことで真の Hit event のみを選別することができた。この章では Multiplicity から各ペアプレーンごとに Efficiency を計算し, Efficiency のレート依存性, 電圧依存性を評価した。解析には 1.8 GeV/c の π で電圧とビームレートを変更した #70169~#70179 を用いた。これらのデータに対し各ペアプレーンごとの Efficiency を計算することで, Efficiency のレート依存性, 電圧依存性を調べた。図 4.19 には HV 設定が original の時にレートを 38 k/spill, 300 k/spill, 1 M/spill, 1.5 M/spill と変化させたときの Efficiency を示す。

レート依存性に着目すると xx' 層では 1 M/spill, yy' 層では 300 k/spill までは全層で 99% 前後の Efficiency が出ていることが分かる。しかし, レートを上げていくと Efficiency が大幅に低下し yy' 層では xx' 層に比べ低いレートでも Efficiency の低下が起こっている。この Efficiency の原因は読出し回路である EASIROC モジュールがレートに耐えられていないことである。図 4.20 に最も Efficiency 低下の大きかった yy' 層 8 層目を構成する y' 層の ADC 分布とヒットパターンを示す。図 4.20 のヒットパターンを見ると 38 k/spill と 1.5 M/spill のヒットパターンは同じ形状になることが期待されるがそうっておらず, 特にビームが当たっているセグメント 7 番から 11 番付近はほぼヒットを検知できていない。また, ヒットを検知できていないセグメントの ADC 分布をみると, ペDESTAL が非常に細くなっていることが見て取れる。セグメント 8 番の ADC 分布 (図 4.22) を見てみると, 確かにペDESTAL に鋭いピークが立ち正常に動作していない。

これは高レート環境下で EASIROC に対し大きな電流が流れ込んだ際の振る舞いであると以前に EASIROC を用いた実験からわかっている。おそらく InputDAC が動作しなくなることで MPPC の信号が数 10 μ s にわたって全く検出できなくなり, ベースラインが GND レベルに張り付く現象が起きるため, ADC のペDESTAL が非常に細くなるということが起こると考えられる。さらにこの現象が起きているときは数 10~100 μ s のデッドタイムが発生し, ADC も TDC も取得できなくなり Efficiency が大幅に低下する。

また xx' 層と yy' 層で Efficiency が低下するレートが異なるが, これはビームプロファイルに起因するものだと考えられる。ビームプロファイルは図 4.14 であったので, x に比べ y のほうが 1 ファイバーあたりのレートが高く, この現象がより低いビームレートでも発生すると考えられる。

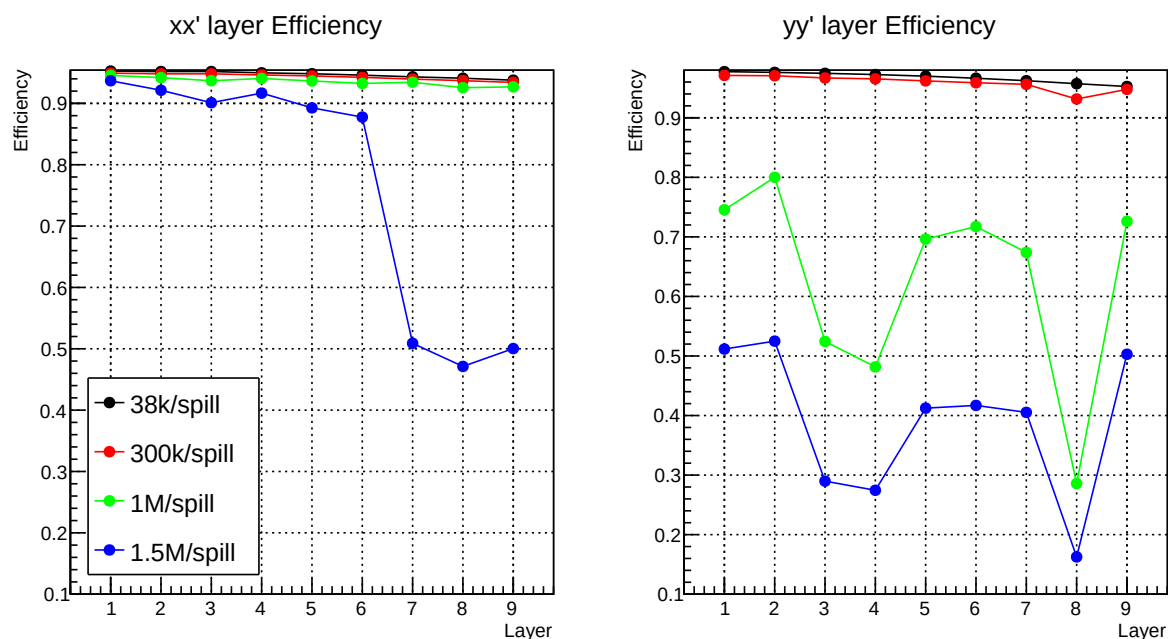


図 4.19: HV original での Efficiency のビームレート依存性

左図は xx' のペアプレーンごとの Efficiency, 右図は yy' のペアプレーンごとの Efficiency. 点の色はレートに対応している.

黒点:38 k/spill, 赤点:300 k/spill, 緑点:1 M/spill, 青点:1.5 M/spill

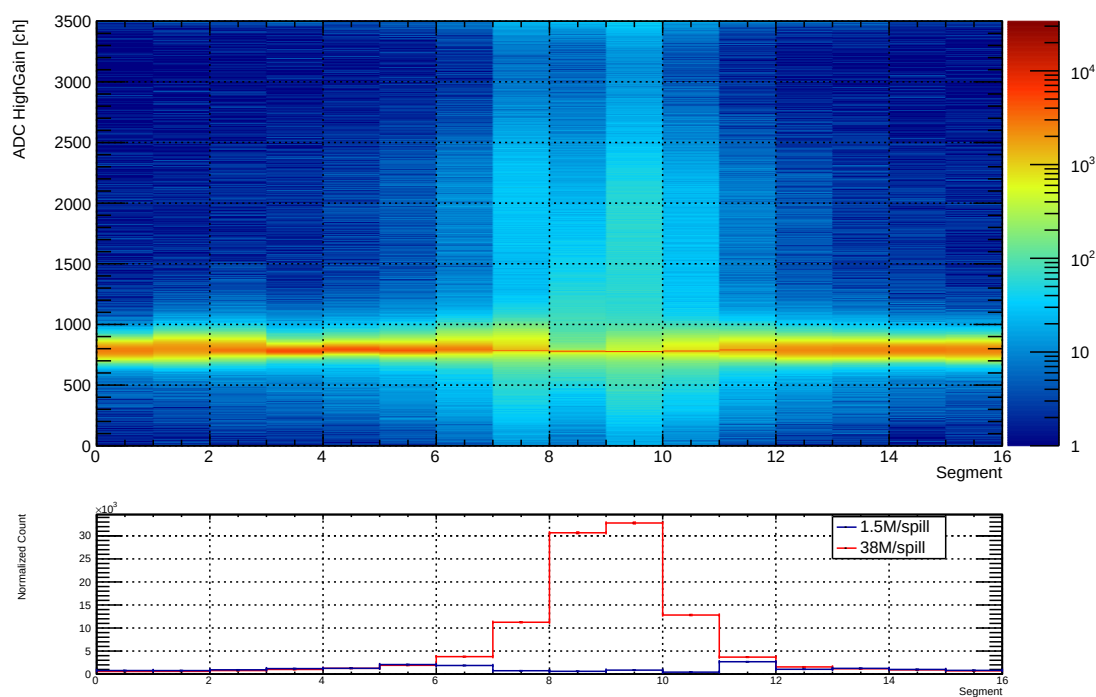


図 4.20: 8 層目 y' の ADC HighGain とヒットパターン

上図が ADC HighGain と segment の相関, 下図がヒットパターン (赤線:38k/spill, 青線:1.5M/spill)

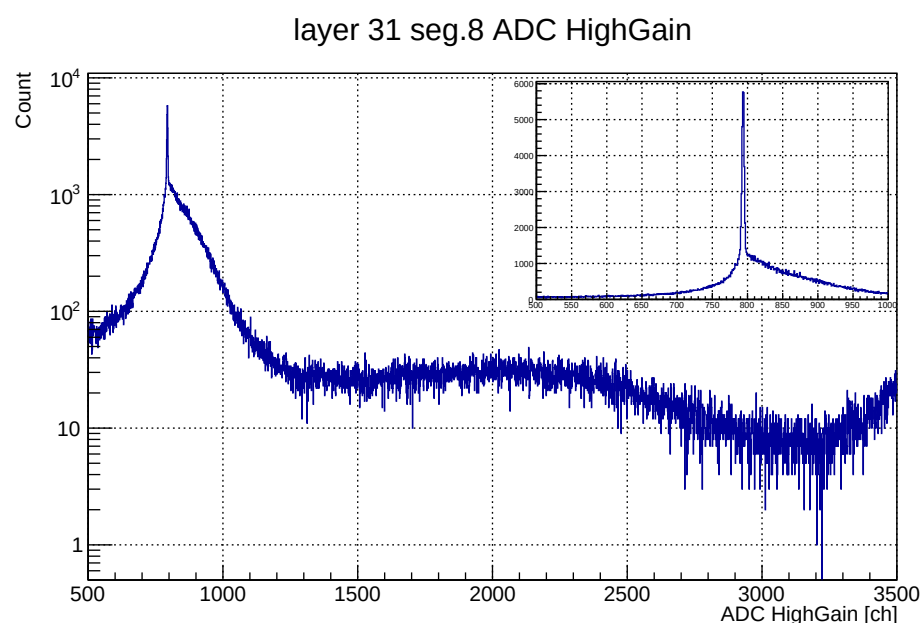


図 4.21: layer32(8 層目 y') のセグメント 8 番の ADC HighGain

ペDESTALが非常に細くなっている. これは高レートによって EASIROC に大きな電流が流れ込んだときに発生する現象である. 正常に動作している際は図 4.2 のようになる.

HV を original から 0.3 V 下げたランでの Efficiency は図 4.22 に示す. 電圧を下げたことで全体的に Efficiency の低下が抑えられ, xx' 層については 1 M/spill でも問題なく動作することがわかる. しかしながら yy' 層では 1 M/spill で Efficiency の低下が発生してしまっており, 現状の電圧設定ではレート耐性が十分ではないことが判明した. 今後は電圧をさらに下げるなどして対策を講じることが必要となる.

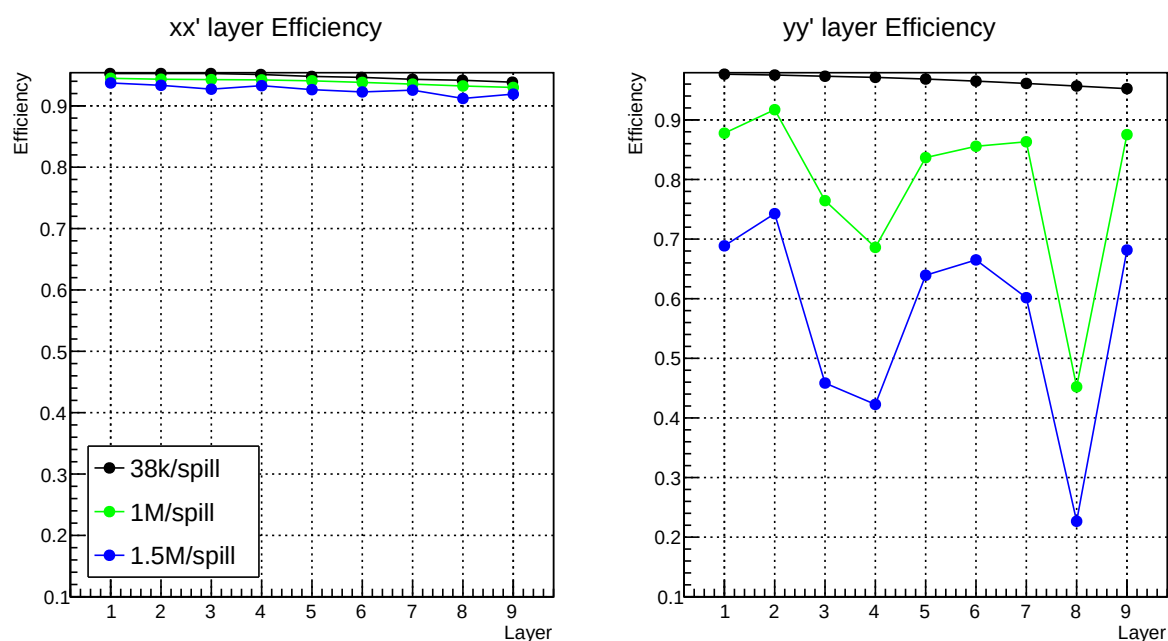


図 4.22: HV original -0.3 V での Efficiency のビームレート依存性

黒:38 k/spill, 緑:1 M/spill, 青:1.5 M/spill

4.7 クラスタリング

AFT は xx' 層と yy' 層で一組になった俵積みの構造をしていることからこれらをまとめて 1 層として扱い, クラスタを形成するクラスタリング処理を行う. これにより, 各クラスタでの DeltaE を求めることで

AFT 内で落としたエネルギーについての情報が得られるようになる。

■ Cluster における DeltaE(CIDeltaE)

ここまでの解析では DeltaE HighGain を Cut に用いるのみであったが、エネルギー損失を計算するには DeltaE の値がエネルギー損失に対応しているので、正確な算出を行う必要がある。前章で定義した DeltaE には、ADC HighGain から算出される DeltaE HighGain と ADC LowGain から算出される DeltaE LowGain が存在する。DeltaE HighGain は図 4.4 で見たように、DeltaE $\sim$ 2 程度までしかデータを取得することができない。また ADC HighGain においては ch 数が大きくなると、ADC ch と光量の線形性が悪くなり正しいエネルギー損失を再構成できないという問題もある。

実際に ADC HighGain と LowGain の相関を見ると図 4.23 のようになっており、ADC HighGain はマゼンタの領域付近ではサチュレーションしている。ただし図 4.23 はすべてのチャンネルでの相関を足しているため、読出しの EASIROC チップの個体差によってサチュレーションポイントは異なる。しかし今回の解析ではすべての読出しチャンネルにおいて、ADC HighGain=3200 ch をサチュレーションしているかどうかの判別の閾値として選んだ。

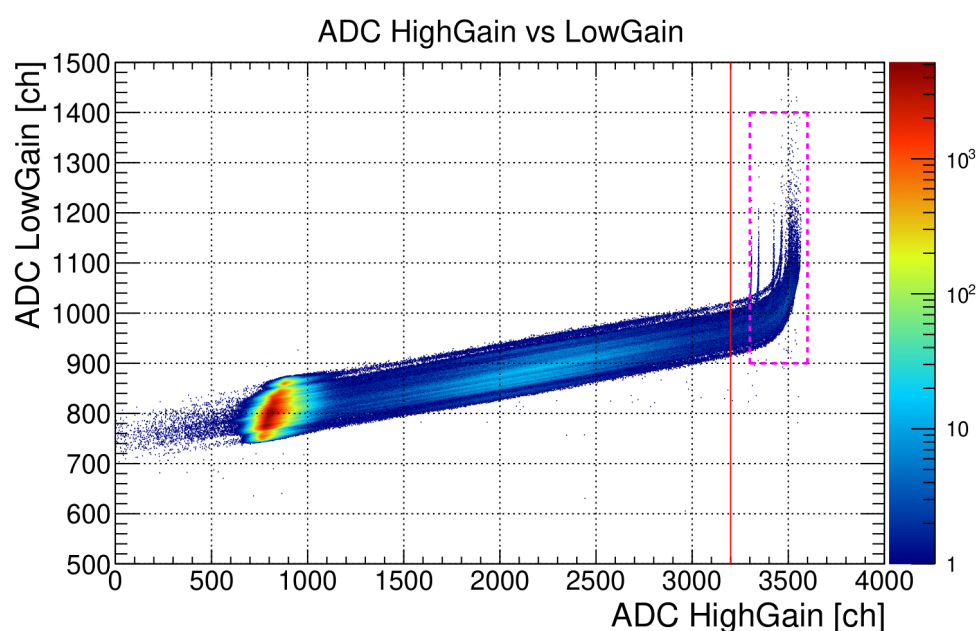


図 4.23: ADC HighGain と ADC LowGain の相関 すべてのチャンネルでの ADC 分布を足して表示している。

マゼンタの領域付近では ADC HighGain がサチュレーションしている。サチュレーションしているかどうかのスレッシュホールドには ADC=3200 ch(赤線)を選んだ。

したがってクラスターの DeltaE(CIDeltaE) は具体的には図 4.24 のように計算される。

1. クラスターの各要素である Hit に対して ADC HighGain が saturation しているか確認する。

図 4.24 で x 層の Hit は Up 側, Down 側どちらの読出しでも ADC HighGain は 3200 ch を超えておらず Saturation していない。このため x 層の DeltaE は ADC HighGain から算出した DeltaE HighGain:1.36225 を用いる。一方で x' 層の Hit は Down 側が 3454 ch で 3200 ch を超え, saturation している。

2. Saturation している場合は LowGain から算出した DeltaE LowGain を用いる。

x' 層の Hit は Down 側で saturation しているので、正しく DeltaE が算出できている DeltaE LowGain:1.97665 を用いる。

3. 最終的なクラスターの DeltaE(CIDeltaE) は各 Hit で正しく算出が行えている DeltaE を用いる

今回であれば ClDeltaE は $1.36225(x \text{ 層}) + 1.97665(x' \text{ 層}) = 3.3389(\text{ClDeltaE})$ となる。

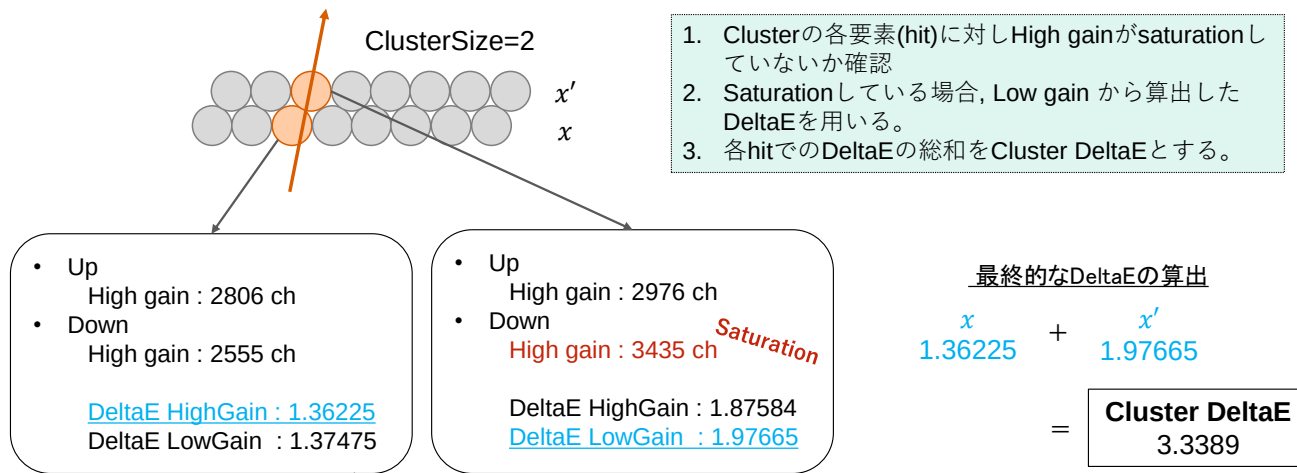


図 4.24: ClDeltaE の算出方法

■ クラスタリングの際に用いるカット条件

はじめにクラスターを形成する条件として以下を課し, クラスタリングを行った。

- Up と Down の両方のチャンネルで ADC と TDC のあるセグメントが Hit となる。
- 複数 Hit あれば, Hit セグメントが隣り合っている。
- 隣り合うセグメントの時間差が 10ns を超えない。
- ClTime が $-5 < \text{ClTime} < 5$ の範囲にある。(ClTimeCut)

ここで ClTime とは以下のような量で, クラスターを形成している Hit の Time の平均をとったものである。ただし Clsize はクラスターを形成している Hit 数を表す。

$$\text{ClTime} [\text{ns}] = \left(\sum_{n=0}^{\text{clsize}} \text{Time}_n \right) \times \frac{1}{\text{Clsize}} \quad (4.6)$$

この ClTime が $-5 \text{ ns} < \text{ClTime} < 5 \text{ ns}$ を満たすかどうかのカットを ClTimeCut と呼ぶ。ClTimeCut のみをかけた時のクラスタリングに関する量である以下をそれぞれ図に示す。

- NCluster: 全 18 層でいくつのクラスターが形成されたかを表す量 (図 4.25)
- ClusterSize: 1 クラスター内にヒットがいくつを含むかを表す量 (図 4.26)
- Cluster DeltaE: 1 クラスターが AFT 内で落とした DeltaE (図 4.27)

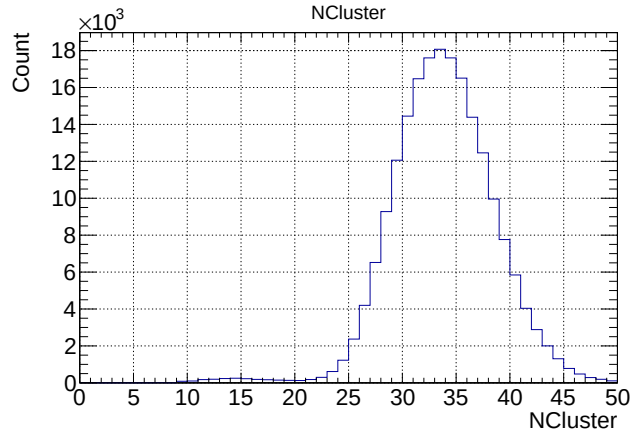


図 4.25: TimeCut のみを行ったときの NCluster



図 4.26: TimeCut のみを行ったときの Cluster Size

xx', yy' でそれぞれ 1 クラスターを形成すると期待されるが、クロストークが形成する NCluster=1 が非常に多いため、NCluster=18 が最多となっており、Cluster Size=1 が非常に多い。

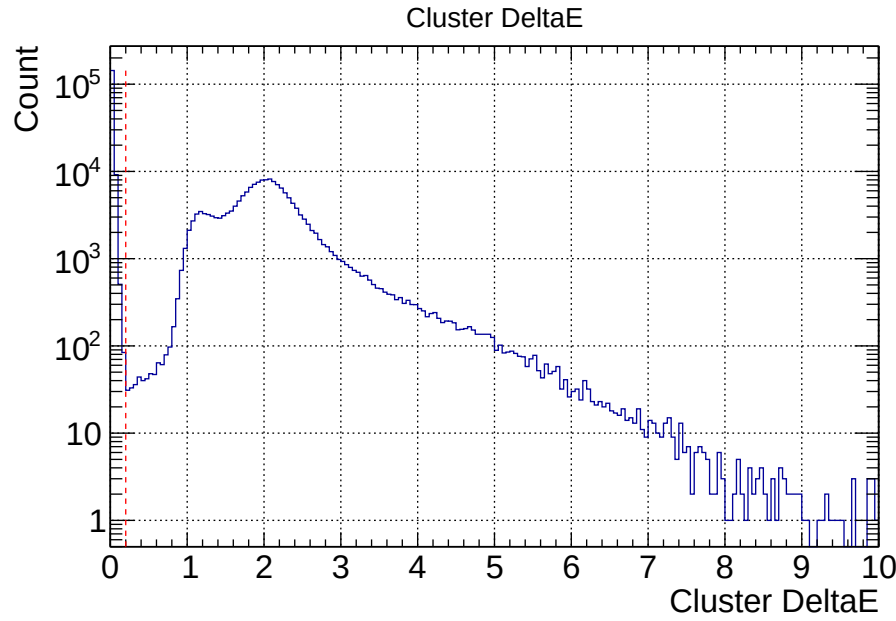


図 4.27: TimeCut のみを行ったときの 1 クラスターが落とすエネルギー (Cluster DeltaE) DeltaE < 0.2 の領域にクロストーク成分が多く存在し、正常にクラスタリングできていない。

NCluster は全ペアプレーン数である 18 が最多となるはずであるが、36 が最多となっている。ClusterSize についても俵積みの構造から 2 が最多となると予想されるが 1 が最多となっている。また図 4.27 をみると、粒子が通過したクラスター以外にエネルギーが非常に低いクラスターが多く分布していることが分かる。さらにクラスターの Hit を 1 イベントごとに確認してみると、正しいクラスター以外にクロストークが ClusterSize=1 でクラスターを形成していることが分かった。このように TimeCut のみでクラスタリングを行うと、正常なイベントに加えクロストークイベントが混入してしまう。

そのため、ClDeltaE に対してもカット条件

$$0.2 < \text{ClDeltaE} \quad (4.7)$$

を課すこととし、ClDeltaECut と呼ぶ。ClDeltaECut を課した後の NCluster, ClusterSize, Cluster DeltaE をそれぞれ図 4.28, 図 4.29, 図 4.30 に示す。図 4.28 を見ると AFT の層数 36 の半分である 18 が最多となっており、クロストークイベントをカットすることができたといえる。図 4.29 では ClDeltaECut 前は ClusterSize=1 が最多となっていたが、その割合も減少し ClusterSize=2 が最多となっている。これは俵積み

の構造上もっともらしい. また, 図 4.30 から正しく DeltaE が 0.2 以下のイベントがカットされていることがわかる.

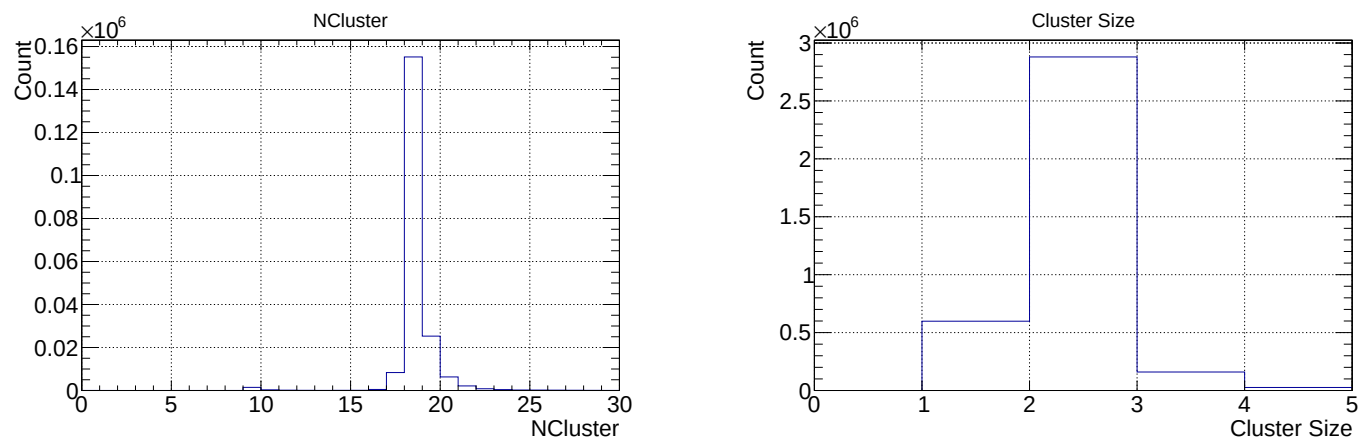


図 4.28: TimeCut に加え ClDeltaECut を行った NCluster
図 4.29: TimeCut に加え ClDeltaECut を行った Cluster Size

AFT の層数 36 の半分である 18 が最多となっており, 俵積みの構造から 2 にピークが立っておりもっともらしくクロストークイベントをカットすることができた. しい

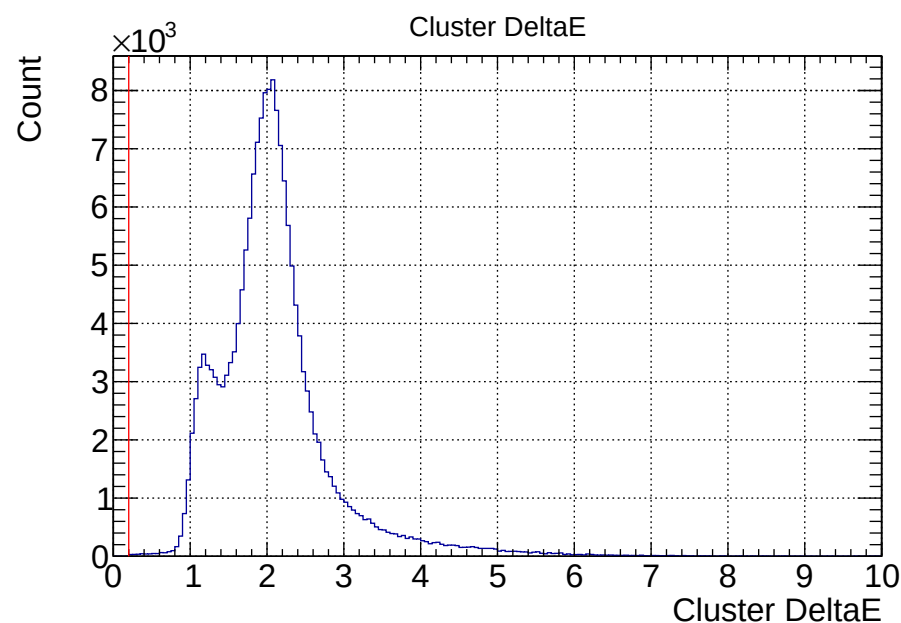


図 4.30: TimeCut に加え ClDeltaECut を行った Cluster DeltaE
赤線より小さい領域の ClDeltaE を持つクラスターはカットされている.

以上のことから最終的にクラスターの形成には以下の条件を課すこととした.

- Up と Down の両方のチャンネルで ADC と TDC のあるセグメントが Hit となる.
- 複数 Hit あれば, Hit セグメントが隣り合っている.
- 隣り合うセグメントの時間差が 10ns を超えない.
- ClTime が $-5 < \text{ClTime} < 5$ の範囲にある.(ClTimeCut)
- ClDeltaE が $0.2 < \text{ClDeltaE}$ を満たす.(ClDeltaECut)

■ AFT 内で落とした DeltaE

クラスタリングにより各層で Cluster DeltaE を求めることができるようになった。そのため 1 イベントごとに AFT 内で形成されたクラスターについてのすべての Cluster DeltaE の総和を求めることができ、これを Cluster DeltaE Sum と呼ぶ。Cluster DeltaE Sum の定義は以下である。

$$\text{Cluster DeltaE Sum} = \sum_{n=0}^{N_{\text{Cluster}}} (\text{Cluster DeltaE})_n \quad (4.8)$$

ただし $(\text{Cluster DeltaE})_n$ は n 番目のクラスターでの Cluster DeltaE である。この Cluster DeltaE Sum はエネルギーの単位に換算されていないが、AFT 内でのエネルギー損失に対応した量である。Cluster DeltaE Sum の分布は図 4.31 に示す

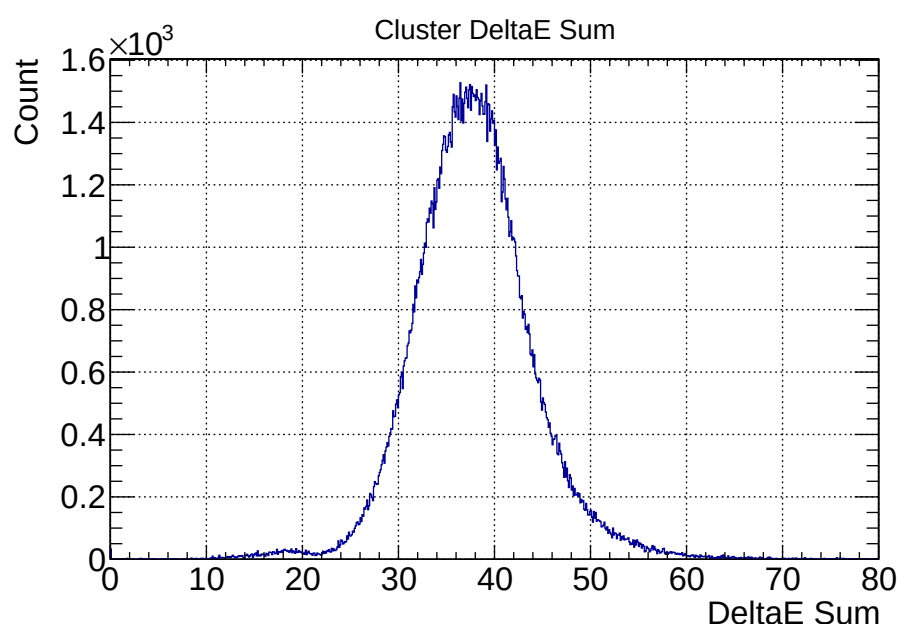


図 4.31: 形成された Cluster DeltaE を全層ですべて足した Cluster DeltaE Sum の分布
独自単位 DeltaE を用いているが、AFT 内でのエネルギー損失に対応する量である。

4.8 エネルギーキャリブレーション

本節ではこれまで用いていた単位 DeltaE をエネルギーの単位 MeV に変換することが目的である。本節以降の解析では AFT に加え、K1.8 スペクトロメーターや S-2S スペクトロメーターで測定された運動量を用いた複雑な解析となっているため、初めに解析の概要について述べる。

説明のため再度実験セットアップを示す。

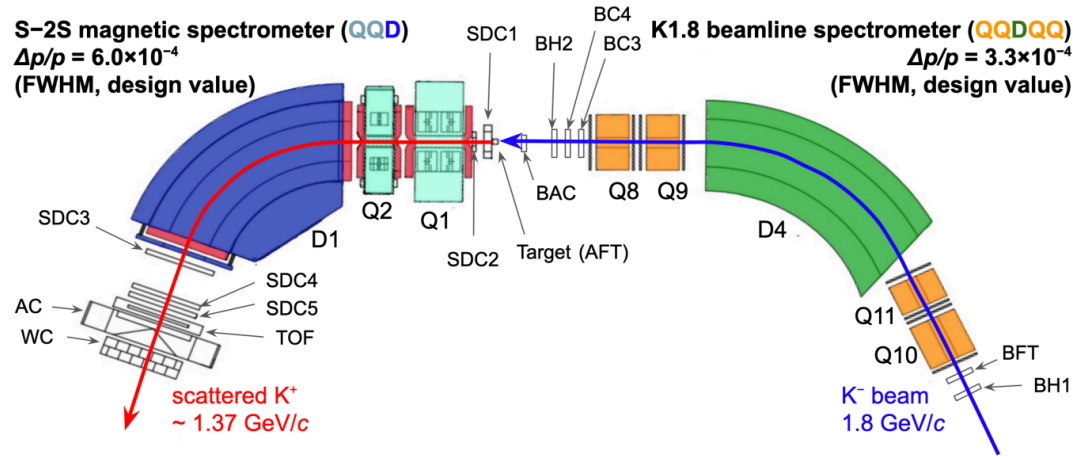


図 4.32: J-PARC E70 実験のセットアップ

エネルギーキャリブレーションでは標的に何も置かずにビームを S-2S スペクトロメーターに通したデータと、標的に AFT を置いてビームを S-2S スペクトロメーターに通したデータを用いて解析する。ビームの運動量 ($p_{K1.8}$) は K1.8 beamline spectrometer で測定し、標的通過後の粒子の運動量 (p_{S-2S}) は AFT 下流の S-2S magnetic spectrometer で測定される。ただし標的に何も置いていない場合は $p_{K1.8} \sim p_{S-2S}$ となる。標的として AFT を置いている場合は AFT 内でのエネルギー損失で運動量を失い、 p_{S-2S} は $p_{K1.8}$ より小さくなる。スペクトロメーターの通過粒子の質量を m とすると、K1.8 スペクトロメーターでの粒子のエネルギー $E_{K1.8}$ と S-2S スペクトロメーターでの粒子のエネルギー E_{S-2S} は以下のように表される。

$$E_{K1.8} = \sqrt{m^2 + p_{K1.8}^2} \quad (4.9)$$

$$E_{S-2S} = \sqrt{m^2 + p_{S-2S}^2} \quad (4.10)$$

標的として AFT を置いた時に発生するビーム粒子のエネルギー損失はスペクトロメーターの運動量を用いて

$$E_{spec.}^{Loss} = E_{K1.8} - E_{S-2S} = \sqrt{m^2 + p_{K1.8}^2} - \sqrt{m^2 + p_{S-2S}^2} \quad (4.11)$$

と見積もることができる。ただし $E_{spec.}^{Loss}$ はスペクトロメーターから見積もられるエネルギー損失である。

一方で、AFT 内でのエネルギー損失は AFT の光量から直接求めることができた。しかし用いていた単位は DeltaE でエネルギーの単位に変換されていない。これをエネルギーに変換するために、エネルギー校正曲線を作成する必要がある。詳細は後述するが、以下のような関係式における係数 $p_0 \sim p_3$ をフィッティングで求めることで関係式を導出しエネルギー校正曲線とする。ただし E_{AFT}^{Loss} は AFT から直接求めたエネルギー損失、 $E_{spec.}^{Loss}$ はスペクトロメーターから見積もられるエネルギー損失である。

$$E_{spec.}^{Loss} = f(E_{AFT}^{Loss}) = p_0 \cdot E_{AFT}^{Loss} + p_1 + p_2 \cdot \exp(p_3 \cdot E_{AFT}^{Loss}) \quad (4.12)$$

この式を用いることでイベントごとに AFT で算出された DeltaE をエネルギーの単位に変換し、直接エネルギー損失を求めることができる。以上が本節における解析の概要である。詳細は以下で述べる。

はじめに以下の条件でのデータについて解析を行った。

- 粒子, 運動量: K^+ , 1.4 GeV/c
- 標的: AFT
- トリガー: BH1 × BH2 × TOF

K1.8 Spectrometer での運動量を $p_{K1.8}$, S-2S Spectrometer での運動量を p_{S-2S} とする。このときスペクトロメーター群から求められる AFT 内でのエネルギー損失 $E_{spec.}^{Loss}$ は、式 4.14 から求めることができる。ただし

K^+ の質量を m_K とする.

$$E_{spec.}^{Loss} = E_{K1.8} - E_{S-2S} \quad (4.13)$$

$$= \sqrt{m_K^2 + p_{K1.8}^2} - \sqrt{m_K^2 + p_{S-2S}^2} \quad (4.14)$$

一方で実際に AFT から得られるエネルギー損失 E_{AFT}^{Loss} は, 全クラスターの DeltaE の総和である Cluster DeltaE Sum から求めることができる. これら二つのエネルギー損失は 1 イベントごとに算出することができ相関をもたずである. ただしもっともらしいイベントを選ぶために以下のカットを用いる.

- K1.8 Spectrometer と S-2S Spectrometer で再構成されたトラックが 1 つである.
- AFT の NCluster が NCluster=18 である.
- S-2S の χ^2 が 5 以下である.(図 4.33)
- AC でヒットが確認されていない. これは粒子が後方まで K^+ であることを保証するためである.

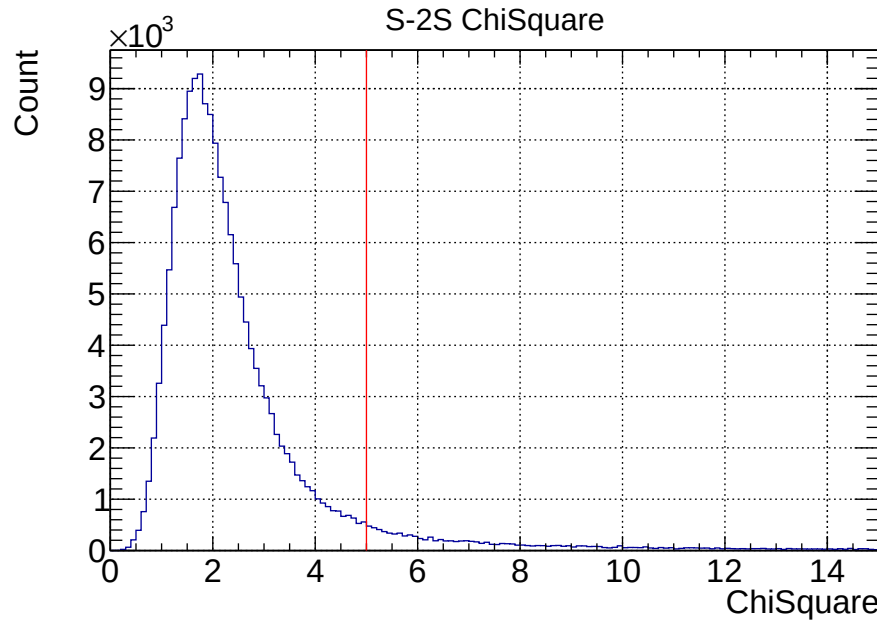


図 4.33: S-2S で再構成されたトラックの χ^2 分布
 $\chi^2 \leq 5$ のイベントを選ぶ

これらのカットを施したうえでスペクトロメータと AFT それぞれから算出された $E_{spec.}^{Loss}$ と E_{AFT}^{Loss} の分布をみると, 図 4.34 のようになっている. 二つの量 $E_{spec.}^{Loss}, E_{AFT}^{Loss}$ はどちらもエネルギー損失を表すため相関をもち, DeltaE からエネルギーに変換するエネルギーキャリブレーション関数を立てることができる. 関数系は下式を用い, x には DeltaE を入れることで GeV に変換する. ただし $p_0 \sim p_3$ はフィッティングから決定する.

$$f(x) = p_0 x + p_1 + p_2 \cdot \exp(p_3 x) \quad (4.15)$$

フィッティングには図 4.34 を用いる. ここでは x 軸である E_{AFT}^{Loss} の各ビンの y 軸射影分布から中心値とエラーを緑線に表示してある. この分布に対し関数 $f(x)$ (式 4.15) でフィッティングすることで, パラメータ $p_0 \sim p_3$ を決定した.

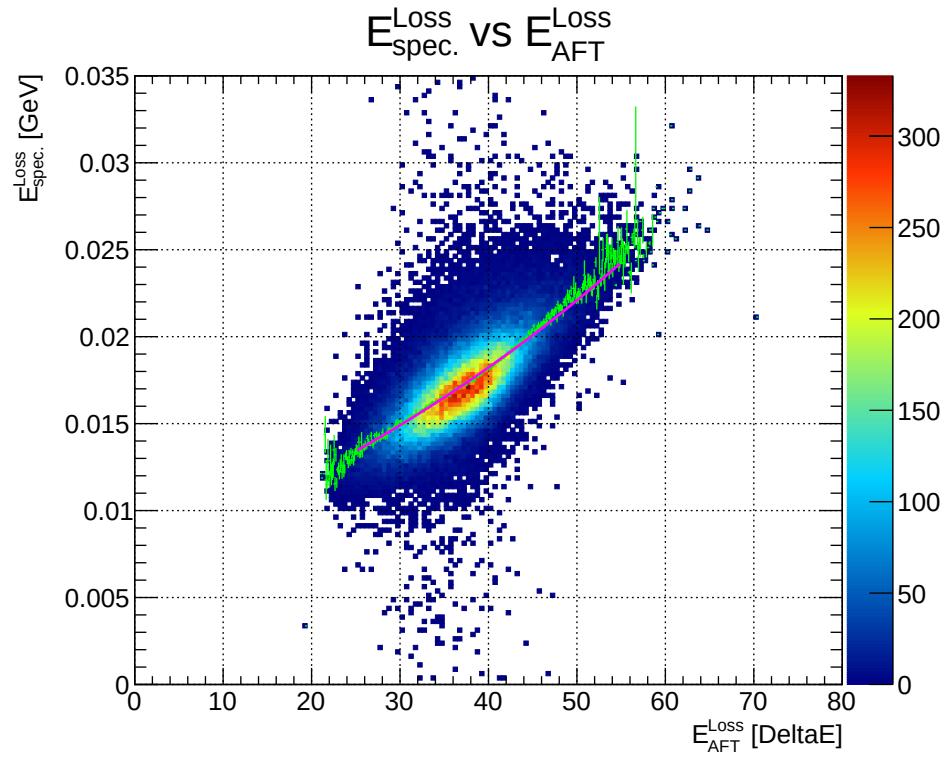


図 4.34: E_{spec}^{Loss} と E_{AFT}^{Loss} の相関

緑線は x 軸の各ビンを y 軸に射影した際の中心値とエラーを示している。マゼンタの線は、緑線の分布に対しエネルギーキャリブレーション関数をフィッティングしたもの

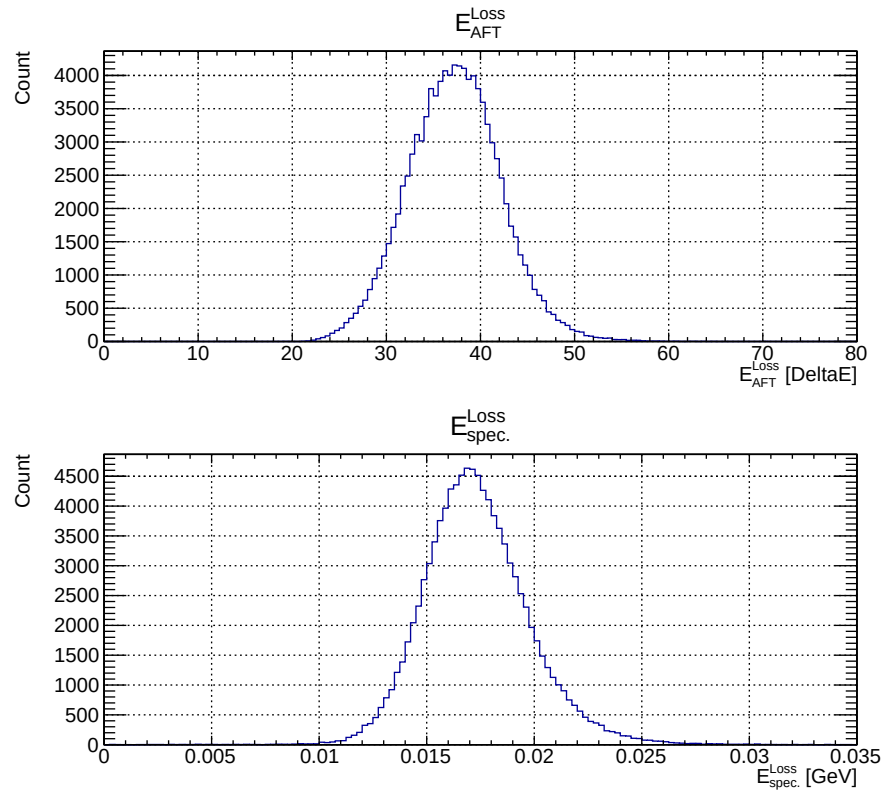


図 4.35: E_{spec}^{Loss} と E_{AFT}^{Loss} の相関の射影

フィッティングによりエネルギーキャリブレーション関数が求まったため、各イベントにおける E_{AFT}^{Loss} の単位を DeltaE からエネルギー (MeV) に変換することができる。エネルギーに変換後の E_{AFT}^{Loss} とスペクトロメータから算出されるエネルギー損失 E_{spec}^{Loss} の相関を図 4.36 エネルギーに変換された E_{AFT}^{Loss} と E_{spec}^{Loss} は、関数 $E_{spec}^{Loss} = E_{AFT}^{Loss}$ となることが期待される。実際に図 4.36 の分布は赤線であらわした関数 $E_{spec}^{Loss} = E_{AFT}^{Loss}$

上に乗っていることが確認された.

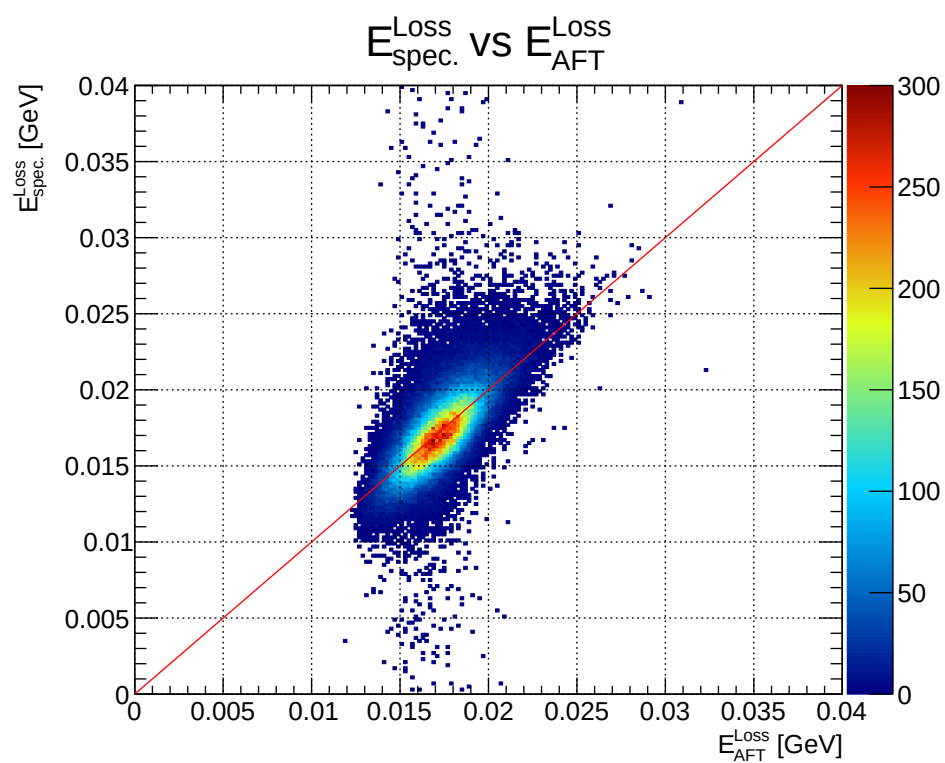


図 4.36: エネルギーの単位に変換した E_{AFT}^{Loss} と $E_{spec.}^{Loss}$ の相関
赤線は $E_{spec.}^{Loss} = E_{AFT}^{Loss}$ となる線を表している.

またエネルギー補正によってエネルギーのばらつきが小さくなることを確認する. エネルギー補正前の $E_{K1.8} - E_{S-2S}$ の分布とエネルギー補正後の $E_{K1.8} - E_{AFT}^{Loss} - E_{S-2S}$ の分布を図 4.37 に示す.

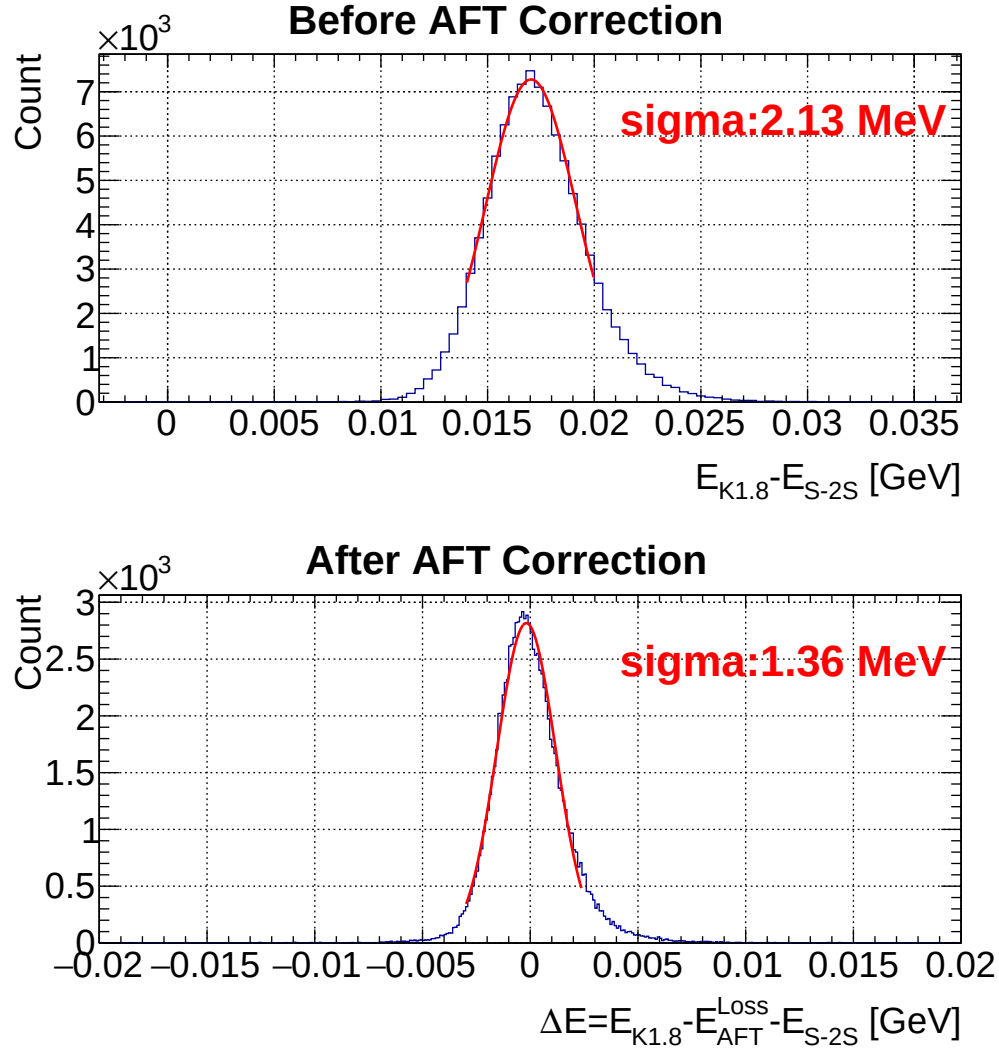


図 4.37: Energy Loss Correction 前後での比較

補正前 $\sigma = 2.13$ [MeV], 補正後 $\sigma = 1.36$ [MeV] である.

エネルギー補正前の分布は実際のエネルギー損失の分布であるランダウ分布をスペクトロメーター分解能のガウス分布で畳み込まれた分布となっている. エネルギー補正後の分布は $E_{spec.}^{Loss} - E_{AFT}^{Loss}$ を表しており, その広がり $\sigma_{w/AFT} = 1.36$ MeV であった. ここでエネルギー補正後の分布につくシグマ $\sigma_{w/AFT}$ は以下のような量から導かれる. ただし $\sigma_{K1.8}, \sigma_{AFT}, \sigma_{S-2S}$ はそれぞれ K1.8 スペクトロメーター, AFT, S-2S スペクトロメーターのエネルギー分解能を表す.

$$\sigma_{w/AFT} = \sqrt{\sigma_{K1.8}^2 + \sigma_{AFT}^2 + \sigma_{S-2S}^2} \quad (4.16)$$

$$= 1.36 \text{ MeV} \quad (4.17)$$

このエネルギー補正が十分かどうかは E70 実験で要求される $\Delta E_{AFT}(\text{FWHM}) = 0.9 \text{ MeV}$ と比較する必要がある. 今回のコミッショニングランでは以下の条件でのデータも取得している. これはスペクトロメーターの調整のために標的の AFT を外し, ビームをそのまま S-2S スペクトロメーターに通したランである.

- 粒子, 運動量: K^+ , 1.4 GeV/c
- 標的: なし (Beamthrough)
- トリガー: BH1 $\times$ BH2 $\times$ TOF

このデータでのエネルギー損失 $E_{K1.8} - E_{S-2S}$ 分布は図 4.38 のようになった. 標的に何も置いていないためエネルギー損失が 0 となるところにピークが立っている.

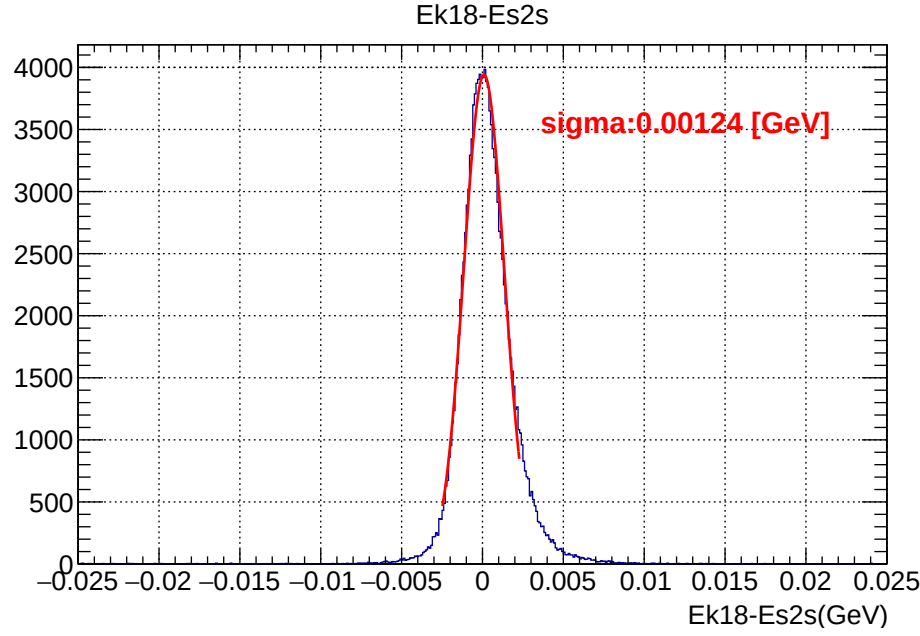


図 4.38: Beamthrough での DeltaE

この分布におけるシグマ $\sigma_{w/oAFT}$ は, $\sigma_{K1.8}, \sigma_{S-2S}$ で下式で表される.

$$\sigma_{w/oAFT} = \sqrt{\sigma_{K1.8}^2 + \sigma_{S-2S}^2} \quad (4.18)$$

$$= 1.24 \text{ MeV} \quad (4.19)$$

この表式を用いると, 式 4.17 は

$$\sigma_{w/AFT} = \sqrt{\sigma_{K1.8}^2 + \sigma_{AFT}^2 + \sigma_{S-2S}^2} \quad (4.20)$$

$$= \sqrt{\sigma_{w/oAFT}^2 + \sigma_{AFT}^2} \quad (4.21)$$

と書き直すことができ, σ_{AFT} についての表式を以下のように得る.

$$\sigma_{AFT} = \sqrt{\sigma_{w/AFT}^2 - \sigma_{w/oAFT}^2} \quad (4.22)$$

ここで式 4.17 と式 4.21 からそれぞれについての値を代入することで σ_{AFT} を計算した.

$$\sigma_{AFT} = \sqrt{(1.36)^2 - (1.24)^2} \quad (4.23)$$

$$= 0.56 \text{ MeV} \quad (4.24)$$

$$\Delta E_{AFT}(\text{FWHM}) = 1.31 \text{ MeV} \quad (4.25)$$

これにより, 1.4 GeV/c K^+ における AFT のエネルギーのふらつきを計算することができた. これは要求されている性能 $\Delta E_{AFT} = 0.9 \text{ MeV}$ には到達していないことが分かった. 算出された σ_{AFT} が最終的に Missing Mass 分解能にどう寄与してくるかは Missing Mass 分解能の章で議論する.

最後に AFT のエネルギー分解能を計算する. 図 4.37 における補正前の分布は AFT 内でのエネルギー損失の分布である. この分布のピークをガウシアンでフィットして中心値を得ると, Mean=17.3 MeV であった. ここから AFT のエネルギー分解能 σ_{AFT}/E は

$$\sigma E/E = \sigma_{AFT}/E \quad (4.26)$$

$$= 0.56/17.3 \quad (4.27)$$

$$= 0.032 \quad (4.28)$$

と求められた.

ここまでの解析で $1.4 \text{ GeV}/c \text{ } K^+$ に対する σ_{AFT} を導出することができたため, $1.4 \text{ GeV}/c \text{ } \pi^+$ についても同様の解析を行った. これは, 粒子の違いによって β が異なるため σ_{AFT} にも変化があるかどうか調べ, $1.4 \text{ GeV}/c \text{ } K^+$ での結果と一貫性を持っているか確認するためである. 用いたのは AFT を標的として置いた,

- 粒子, 運動量: π^+ , $1.4 \text{ GeV}/c$
- 標的: AFT
- トリガー: $BH1 \times BH2 \times TOF$

と標的なしの

- 粒子, 運動量: π^+ , $1.4 \text{ GeV}/c$
- 標的: なし (Beamthrough)
- トリガー: $BH1 \times BH2 \times TOF$

の条件でのデータである.

結果は σ_{AFT} が $\sigma_{AFT} = 0.53 \text{ MeV}$, エネルギー分解能が $\sigma E/E = 0.53/15.9 = 0.032$ となった. 粒子が π になったことでエネルギー損失が減少したが, エネルギー分解能としてはほとんど変化がなく一貫性のある結果となった.

表 4.3 に本章での解析の結果をまとめる.

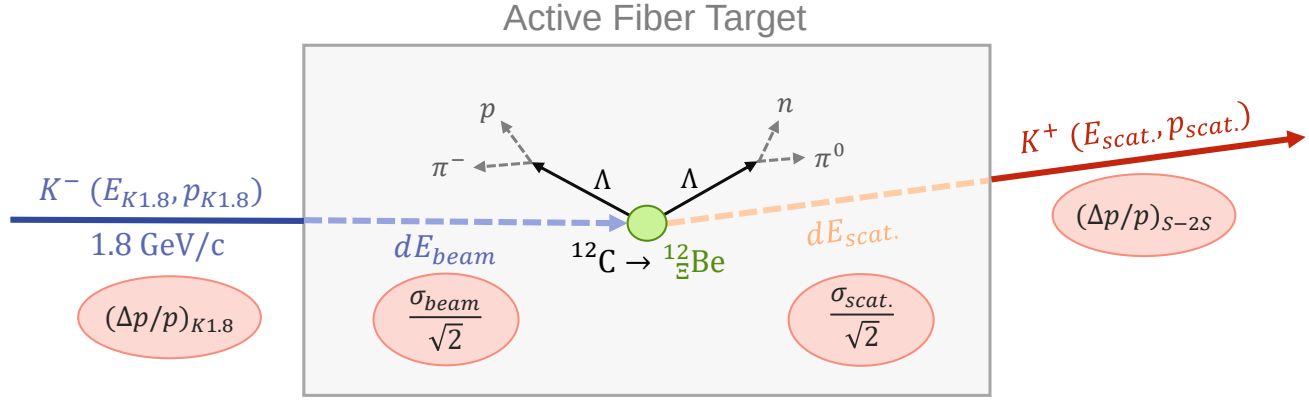
表 4.3: $1.4 \text{ GeV}/c \text{ } \pi, K$ における σ_{AFT} , $\sigma E/E$, エネルギー損失

	$\sigma_{AFT} \text{ [MeV]}$	$\sigma E/E \text{ [%]}$	エネルギー損失の最頻値 [MeV]
$1.4 \text{ GeV}/c \text{ } \pi$	0.53	3.2	15.9
$1.4 \text{ GeV}/c \text{ } K$	0.56	3.3	17.3

4.9 Missing Mass 分解能

前章で AFT のエネルギー損失のふらつき σ_{AFT} を求めた. 結果として求められる要求性能は満たすことができなかったが, 要求値からの悪化によってどの程度 Missing Mass 分解能が悪化するか見積もる. Missing Mass 分布は $K^- + {}^{12}\text{C} = {}^{12}_{\Xi}\text{Be} + K^+$ の運動学を用いたモンテカルロシミュレーションから計算する. この際 Ξ^- の Binding Energy は 3 MeV とし, 反応点は AFT の中心であるとする. Missing Mass 分布の手順は以下のようにして行う. 概念図を 4.39 に示す.

1. ビームとして K^- を入射させる. 運動量は中心値が 1.8 GeV で運動量分解能 $(\Delta p/p)_{K1.8}$ の広がりを持つ.
2. AFT 内で反応点までのエネルギーストラグリング (σ_{beam}) の分 K^- のビーム運動量に対し広がりを持たせる.
3. 反応点から AFT を出るまでのエネルギーストラグリング ($\sigma_{scat.}$) の分, 散乱粒子である K^+ の運動量に対して広がりを持たせる.
4. S-2S スペクトロメータで再構成される運動量は $(\Delta p/p)_{S-2S}$ の分解能であるためさらに K^+ の運動量に対して $(\Delta p/p)_{S-2S}$ の広がりを持たせる.



Missing Mass分布を計算する際のパラメーター

$$(\Delta p/p)_{K1.8}, \quad \frac{\sigma_{beam}}{\sqrt{2}}, \quad \frac{\sigma_{scat.}}{\sqrt{2}}, \quad (\Delta p/p)_{S-2S}$$

運動量分解能エネルギーストラグリングの効果を取り入れるため
それぞれガウス分布で乱数を振る

図 4.39: Missing Mass 分布の計算方法

Missing Mass 分解能を調べるため入射粒子と散乱粒子の運動量に対し運動量分解能の分だけガウス分布で広がりを持たせる。さらに AFT のエネルギーストラグリングの効果を取り入れることで Missing Mass 分解能の広がり进行评估する。

これまでの解析では 1.4 GeV/c の K^- に対して、AFT 内のエネルギーストラグリング σ_{AFT} を求めた。反応点は中心であることを考えると、散乱 K^+ に対し AFT 内でエネルギー損失の導出に用いる光量は AFT すべてを通過した光量の半分となると考えられる。ここで $K^- + {}^{12}\text{C} = {}^{11}\text{Be} + K^+$ 反応において K^+ の運動量は ~ 1.4 GeV であるから、 K^+ のエネルギーストラグリング $\sigma_{scat.}$ は $\sigma_{scat.} = \sigma_{AFT} = 0.56$ MeV としてよい。FWHM に直すと $\Delta E_{beam} = 1.31$ となる。

一方で入射粒子の K^- は運動量が 1.8 GeV/c であるため、エネルギーストラグリング σ_{beam} は K^+ のものとは異なる。前章の結果から K が 1.4 GeV/c で AFT を全層通過するとエネルギー損失は 17.3 MeV であった。 K が 1.8 GeV/c で AFT を全層通過した際のエネルギー損失は、1.4 GeV/c と 1.8 GeV/c においてシンチレーターでの $-dE/dx$ がどの程度変化するかから求められる。すなわち、 K が 1.8 GeV/c で AFT を全層通過した際のエネルギー損失は以下のように求められる。 $-\frac{dE}{dx}$ は Bethe の式 (図 4.40) から求め、シンチレーションファイバーの主成分であるポリスチレンのパラメーターを用いた。

$$(\text{Energy Loss})_{1.8 \text{ GeV/c}} = \frac{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{1.8 \text{ GeV/c}}}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{1.4 \text{ GeV/c}}} \times (\text{Energy Loss})_{1.4 \text{ GeV/c}} \quad (4.29)$$

$$= \frac{2.0}{2.01} \times 17.3 \text{ MeV} \quad (4.30)$$

$$\sim 17.2 \text{ MeV} \quad (4.31)$$

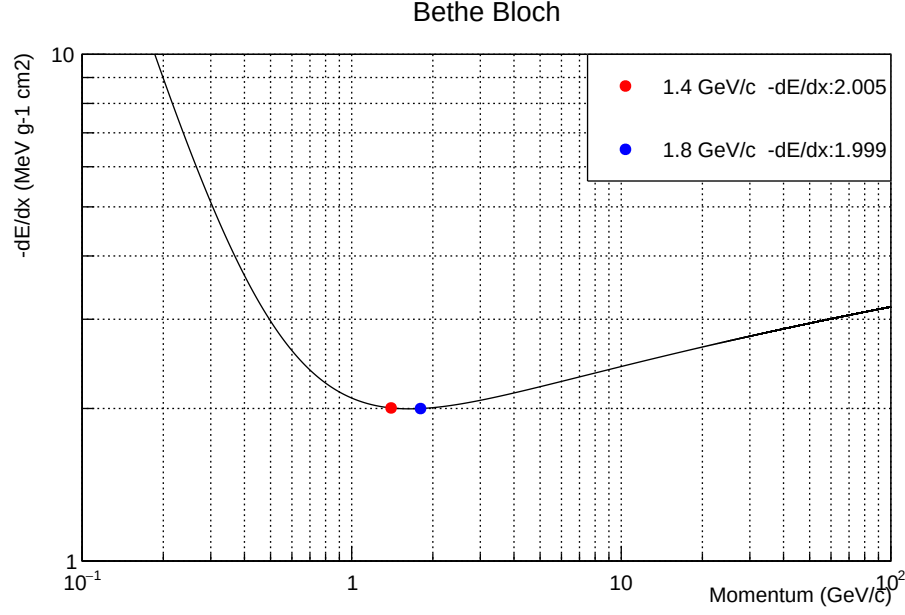


図 4.40: Bethe-Bloch の式をもとに計算したポリスチレンでのエネルギー損失 1.4 GeV/c と 1.8 GeV/c の K^- でのエネルギー損失をそれぞれ赤点と青点でプロットしている。

また前章の結果よりエネルギー損失によってエネルギー分解能はほとんど変化しないと考え、1.8 GeV/c においても $\sigma E/E = 3.3\%$ の値を用いた。すると K^- のエネルギーストラグリング σ_{beam} は、エネルギー分解能が 3.3% になるように決めることができる。

$$\sigma E/E = 0.033 \quad (4.32)$$

$$\sigma_{beam}/17.2 = 0.033 \quad (4.33)$$

$$\sigma_{beam} = 0.033 \times 17.2 \quad (4.34)$$

$$= 0.57 \text{ MeV} \quad (4.35)$$

$$\Delta E_{beam} = 1.34 \text{ MeV} \quad (4.36)$$

このようにして入射 K^- に対するエネルギーストラグリングは $\sigma_{beam} = 0.57 \text{ MeV}$, FWHM では $\Delta E_{beam} = 1.34 \text{ MeV}$ と求められた。

また現在までに E70 コミッショニングランデータでの運動量解析は他のコラボレーションメンバーによって行われており、[21] によると運動量分解能は $\Delta p/p = (p_{K1.8} - p_{S-2S})/p_{K1.8}$ は 2.6×10^{-3} (FWHM) である。この解析値を用いて K1.8 スペクトロメーターと S-2S スペクトロメーターそれぞれの運動量分解能を見積もる。簡単のため、 $(\Delta p/p)_{K1.8} = (\Delta p/p)_{S-2S}$ を仮定すると各スペクトロメーターの運動量分解能 $(\Delta p/p)_{spec.}$ は、

$$\sqrt{(\Delta p/p)_{K1.8}^2 + (\Delta p/p)_{S-2S}^2} = \sqrt{2}(\Delta p/p)_{spec.} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ (FWHM)} \quad (4.37)$$

となる。ここから K1.8 スペクトロメーターと S-2S スペクトロメーターの運動量分解能として $(\Delta p/p) = 1.8 \times 10^{-3}$ を得る。

Missing Mass 分解能は図 4.39 に挙げた 4 つのパラメーターによって決まるため、いくつかの組み合わせについて計算を行った。このとき用いたパラメーターの組み合わせを表 4.4 に、Missing Mass 分布を図 4.41 に示す。パラメーターの組み合わせは現状の解析値を用いている。

表 4.4: Missing Mass 分布の算出に用いたパラメーターの組み合わせと Missing Mass 分解能 (Res.) ΔE_{beam} , $\Delta E_{scat.}$ はそれぞれ σ_{beam} , $\sigma_{scat.}$ を FWHM に変換したものである. 表中のすべての値は FWHM で表記されており, ΔE_{beam} , $\Delta E_{scat.}$, Res., の単位は MeV である.

	$(\Delta p/p)_{K1.8}$	ΔE_{beam}	$\Delta E_{scat.}$	$(\Delta p/p)_{S-2S}$	Res.	条件
Case 1	1.0×10^{-3}	0.90	0.90	5.0×10^{-4}	1.98	デザイン値
Case 2	1.0×10^{-3}	1.34	1.31	5.0×10^{-4}	2.20	AFT 解析値
Case 3	1.8×10^{-3}	0.90	0.90	1.8×10^{-3}	3.81	スペクトロメータ解析値
Case 4	1.8×10^{-3}	1.34	1.31	1.8×10^{-3}	3.93	ともに解析値
Case 5	1.0×10^{-3}	1.34	1.31	2.0×10^{-3}	3.25	AFT 解析値 + S-2S 悪化

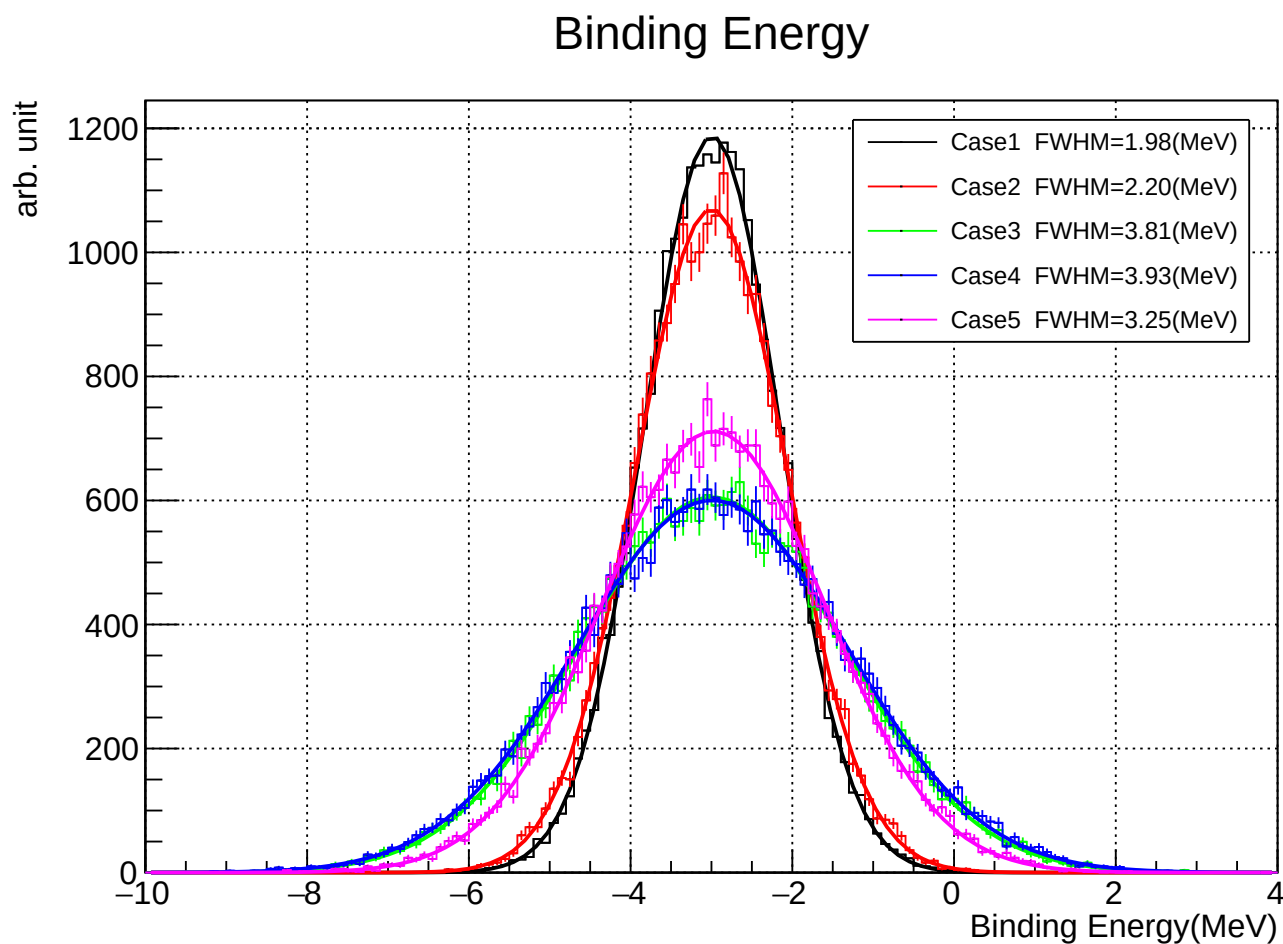


図 4.41: Missing Mass 分布 各条件ごとにガウス分布でフィットし Missing Mass 分解能を算出している. Case1 以外の分布は Case1 のイベント数で規格化している. また散乱 K^+ の散乱角度 $\theta_{K^+} < 7^\circ$ を満たすイベントを選んでいる.

Case1 と Case2 では, AFT のエネルギーストラグリングがデザイン値か現状の解析値かを比較している. AFT は現状の解析値であると Missing Mass 分解能は 2.20 MeV となり目標の 2 MeV と比べると少し悪化しているが目標にほぼ迫る値が期待できる結果となった.

Case1 と Case3 では, 現状のスペクトロメーターの運動量分解能とデザイン値の分解能の比較を行った. 現状の解析における運動量分解能では Missing Mass 分解能は 3.81 MeV となり, これも 2 MeV には到達していない. しかしこの結果をみると AFT のエネルギーストラグリングによる Missing Mass の分解能の悪化よりも, スペクトロメーターの運動量分解能の悪化のほうが Missing Mass 分解能に大きく影響を与えることがわかる.

このように現状の解析での Missing Mass 分解能は 2 MeV に到達しない結果となった. しかしスペクトロ

メーターの解析については解析中であることから運動量分解能には改善の余地がある．また AFT についてもペデスタル補正を行うことでエネルギー損失をより正確に決定するなどエネルギーストラグリングによる分解能の悪化を小さくすることは可能であると考えられる．

第 5 章

まとめと今後の展望

Ⅲ ハイパー核分光実験である J-PARC E70 では Missing Mass スペクトルの分解能 2 MeV(FWHM) での測定を目標とし、測定したピーク構造から ΞN 相互作用について情報を引き出そうとしている。高分解能の分光実験を実現させるため、Active Fiber Target(AFT) と呼ばれるアクティブ標的が開発 [18][19] された。AFT はシンチレーションファイバー内の炭素を標的とし、標的内でのエネルギー損失を補正することでエネルギーストラグリングによる分解能の悪化を小さくすることができる。

本研究では AFT の実機の製作と E70 コミッショニングランデータを用いた性能評価を行った。製作は BFT-D などと同様の製作方法で製作を行い、問題なく製作を完了することができた。コミッショニングランは物理ランと同様のセットアップで行われ、AFT の動作が正常か確認するとともにエネルギー補正が機能するかについて検証を行った。

解析の結果から AFT の基本的動作には問題がなかったが、何らかの原因で真のヒットの周辺のセグメントに TDC が正常なタイミングであるが ADC がペDESTAL 付近というクロストークイベントが混入してしまうことが分かった。この問題は適切なカットを用いることでヒットイベントのみを選ぶことで解決できた。また、現在用いている MPPC のバイアス電圧で 1.5 M/spill のビームレートという環境下で使用すると読出しのモジュールの問題でデータが取得できなく Efficiency が大幅に低下してしまうことも明らかとなった。このため高レート環境下でも正常に動作するバイアス電圧を探ることが今後の課題の一つである。

加えて AFT のエネルギー損失補正が機能するかも確認した。エネルギーキャリブレーションを行ったあと AFT のエネルギー分解能を算出し、モンテカルロシミュレーションから見積もられる Missing Mass 分解能を算出した。現状の解析方法や AFT のセットアップではスペクトロメーター群がデザイン値で動作しても Missing Mass 分解能は 2.2 MeV(FWHM) となり、2 MeV には届かない結果となった。AFT がもたらす Missing Mass 分解能の悪化は 0.2 MeV 程度で大きな問題とはならなかったが、改善の必要があることが分かった。この悪化の原因はデータ取得の際にペDESTAL が太くノイズが乗りやすいこと、解析におけるエネルギー損失の導出方法が十分でないといったことが挙げられる。ノイズ低減や解析手法の改善についても今後の課題である。またスペクトロメーター群の運動量分解能として現状の解析値を用い、AFT のエネルギー分解能についても現状の解析値を用いると Missing Mass 分解能は 3.93 MeV(FWHM) となった。Missing Mass 分解能にはスペクトロメーターの運動量分解能が大きく影響することから、運動量解析についても今後デザイン値を目標に改善していく必要がある。

謝辞

本論文は多くの方の多大なご協力、ご指導の下執筆することができました。ここで感謝を申し上げます。

指導教員である三輪浩司教授には、日頃から大変お世話になりました。私が原子核物理に興味を持ったのは三輪教授が開講されていた原子核物理 1 の授業がきっかけでした。非常にわかりやすい授業で原子核物理への興味を惹かれたのを覚えています。研究室に配属されてからは物理に関することはもちろん実験機器の使い方や解析のやり方まで多くのことをご指導いただきました。またミーティングの際には解析についての議論に付き合っただき、多くの助言をいただいたおかげでスムーズに研究を進めることができました。心から感謝申し上げます。

田村裕和教授にはハイパー核ゼミでストレンジネス核物理の基礎を教えてくださいました。ゼミではストレンジネス物理に関することから実際の実験手法など細かく教えていただき非常に勉強になりました。この基礎知識なしに研究を進めることはできなかったと思います。

市川裕大准教授や鶴養美冬准教授、早川修平助教、JAEA の山本剛史氏、藤田真奈美氏は J-PARC 出張の際には大変お世話になりました。初めての J-PARC で作業や実験での不明点がありましたが、一から丁寧に教えていただいたおかげですぐに慣れることができました。また京大の原田健志氏、江端健悟氏、高橋秀治氏、東工大の小堀匠氏には E70 実験準備の際にお世話になりました。原田健志氏には、E70 実験コミッショニングランに向けて準備を行う中で読出し回路やアナライザーなどの使い方を教えていただきました。また、J-PARC の実験を楽しく行えたのは江端健悟氏、高橋秀治氏、小堀匠氏との他愛もない会話のおかげでした。ありがとうございました。

別グループではありましたが中村哲教授、金田雅司助教、永尾翔氏には H-Lab ミーティングやワークショップなどを通してのご助言、ご指導をいただきました。感謝いたします。

技術職員の梅津裕生氏には BFT-D の設計や治具製作を行っていただきありがとうございました。BFT-D 本体からテスト実験の際の架台設計やファイバー治具の製作まで本研究で用いた部品のほとんどの設計を行っていただき大変助かりました。秘書の高橋橋あゆみ氏には、出張の際の旅費申請など生活面でのサポートをしていただきありがとうございました。

大学の先輩である秋山タケル氏、奥山和樹氏、梶川俊介氏、坂尾珠和氏にはミーティングなどの発表で刺激をいただき、勉強させていただきました。また、鎌田健人氏、大浦文也氏、木野量子氏には特に仲良くしていただき研究生活を楽しく過ごすことができました。鎌田健人氏には J-PARC で車を出していただいて昼食に行ったり、送迎していただいたりと特別にお世話になりました。大浦文也氏と木野量子氏は頼れる先輩でいつでも研究に関する相談に乗っていただき非常に助かりました。

同期の石毛達大氏、成済秀氏、宮田颯氏、渡辺大護氏とは同期として仲良くしていただきました。J-PARC 出張やコミッショニングランの準備で大変な時もありましたが、同期の存在が支えとなっていました。

後輩の今本亮氏、倉田綸太郎氏、齋藤隆太氏は多くの研究会やワークショップに出席したりと熱心に研究に取り組んでおり、研究に対する姿勢を学ばせていただきました。

最後に、修士課程修了まで支えていただいた家族に心から感謝いたします。今日に至るまで自らの選択に理解を示し、支えていただいたおかげで充実した大学生活を送ることができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Miwa et al. Measurement of the differential cross sections of the Σ^-p elastic scattering in momentum range 470 to 850 MeV/c. *Phys. Rev. C*, 104:045204, 2021.
- [2] 和田 俊輔. J-PARC での Λp 散乱実験に向けたビームトラッキング用ファイバー検出器の開発. Master's thesis, 東北大学, 2022.
- [3] J.K. Ahn et al. *Nucl. Phys. A*, 648(263-279.), 1999.
- [4] Y. Kondo et al. *Nucl. Phys. A*, 676(371), 2000.
- [5] Y. Kondo et al. *Nucl. Phys. A*, 761(41), 2005.
- [6] K. Nakazawa et al. The first evidence of a deeply bound state of Ξ - ^{14}N system. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2015(3):033D02, 03 2015.
- [7] S. H. Hayakawa et al. Observation of coulomb-assisted nuclear bound state of Ξ^- - ^{14}N system. *Physical Review Letters*, 126(6), 2021.
- [8] M Yoshimoto et al. First observation of a nuclear s-state of a Ξ hypernucleus, $^{15}_{\Xi}\text{C}$. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021(7):073D02, 07 2021.
- [9] T. Fukuda et al. Cascade hypernuclei in the (K^-, K^+) reaction on ^{12}C . *Phys. Rev. C*, 58:1306–1309, Aug 1998.
- [10] P. Khaustov et al. Evidence of Ξ hypernuclear production in the $^{12}\text{C}(K^-, K^+)_{\Xi}^{12}\text{Be}$ reaction. *Phys. Rev. C*, 61:054603, Mar 2000.
- [11] S. Sugimoto T. Motoba. *Nucl. Phys. A*, 835:223 – 230, 2010.
- [12] Akazawa Y. et al. Development and application of catch: A cylindrical active tracker and calorimeter system for hyperon-proton scattering experiments. <https://arxiv.org/pdf/2109.12236v2.pdf>.
- [13] 浜松ホトニクス社. Mppc とは — mppc (sipm). https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html.
- [14] 塩崎 健弘. Σp 散乱実験のための mppc 多チャンネル読み出しシステムの開発. Master's thesis, 東北大学, 2014. https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~db/human_resource/thesis/2009_B_2_M_1.pdf.
- [15] 坂尾 珠和. $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応を用いた Λp 散乱実験手法の開拓. Master's thesis, 東北大学, 2021.
- [16] Takuya Nanamura. *Differential cross section measurement and phase shift analysis for Σ^+p elastic scattering*. PhD thesis, Kyoto Univ., 2022.
- [17] 江端 健悟. Ξ ハイパー核分光のための機械学習を用いた運動量解析手法の開発. Master's thesis, 京都大学, 2022.
- [18] 越川 亜美. Ξ ハイパー核精密分光実験に向けたアクティブ標的の開発. Master's thesis, 京都大学, 2017.
- [19] 原田 健志. Ξ ハイパー核精密分光実験に向けた多チャンネル有感標的の開発. Master's thesis, 京都大学, 2019.
- [20] Nagae T. et al. Proposal for the next e05 run with the s-2s spectrometer.
- [21] harada Takeshi. High resolution missing-mass spectroscopy of $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ with s-2s and aft (j-parc e70). S-2S WorkShop スライド, 2023. <https://kds.kek.jp/event/46714/contributions/>

[238887/attachments/170480/224018/S2Sws_harada_20230819.pdf](#).