

修士論文

$\Lambda p$  散乱実験に向けた次世代 MPPC 読み出し回路と  
データ収集系の開発

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻

倉田 綸太郎

2024 年

## 概要

我々の物質世界を構成する原子核は、核子間にはたらく相互作用である核力によって成り立っていることから、核力に関する研究は理論と実験の双方から盛んに行われてきた。中間子交換モデルによって中遠距離における引力がよく記述される一方で、1 fm より短い距離に存在する強い斥力芯の起源はいまだに解明されておらず、現在は現象論的に扱うことで豊富に存在する NN 散乱の実験データを再現している。斥力芯の存在するような領域は核子どうしが重なり合うような近距離であることから、クォークレベルでの相互作用が大きく寄与していると考えられており、その理解のためには、 $u$ 、 $d$  クォークに他のクォークを加え、拡張された核力としてのバリオン間相互作用を調べるのが重要である。

ここで、 $s$  クォークを含むハイペロンと核子 (YN) およびハイペロン同士 (YY) の相互作用を解明することは、バリオン間相互作用の理解を深めるための大きな手がかりとなる。YN 相互作用の中でも特に  $\Lambda N$  相互作用は、 $\Lambda$  ハイパー核研究や、ハイペロンの出現が予想されている中性子星内部の理解のためにも重要である。

我々はこの 2 体の  $\Lambda N$  相互作用の決定のために、SPRing-8 と J-PARC において高統計の  $\Lambda p$  散乱実験を計画している。これらの実験では、液体水素標的を円筒形に囲う検出器群である CATCH とスペクトロメーターを用いて、粒子の終状態を測定し、そこから運動学を解くことで粒子の再構成および散乱事象の同定を行う。CATCH 検出器群においては、約 5000 本のシンチレーションファイバーのシンチレーション光を半導体光検出器である MPPC を用いて読み出すことで、粒子の 3 次元での飛跡およびエネルギー損失を測定する。現行の MPPC 読み出し回路では、Hold と呼ばれる信号が入力されたタイミングでの波高を読み出すことで ADC 情報を取得している。この回路のトリガーレイテンシーは 175 ns 程度であるのに対して、実験のトリガーから作られる Hold 信号の生成には 300 ns 程度の時間がかかってしまうため、現在は整形回路の時定数を最大の 175 ns に設定した上で、さらに 20 m のケーブルを用いて信号を遅らせることで Hold のタイミングを間に合わせている。これは、信号の波高が小さくなる上にその S/N を悪化させることにもなるため、エネルギー測定が重要である CFT では好ましくない。

このような問題点を克服するため、国産の新たな MPPC 読み出し回路である YAENAMI と、これを 4 枚搭載した 32ch の MPPC 読み出しモジュール RAYRAW が開発された。YAENAMI はデジタイザーを搭載しており、波形サンプリングによって ADC 情報を取得することができる。本研究では、この新たに開発された MPPC 読み出し回路が、CFT の読み出しで求められるエネルギー測定に関する性能を満たしているかの評価を行った。CFT で検出される粒子は陽子または  $\pi$  であり、ほとんどが MIP である  $\pi$  のエネルギー損失がほぼ一定であるのに対して、陽子は MIP の数倍から 10 倍以上のエネルギーを落とす。そのため、CFT の MPPC 読み出しにおいては MIP を分離しながら、それに対して 10 倍以上のエネルギーが測定できることが求められる。また、実験本番においては、CFT ファイバー 1 本あたりの最大入力レートは 10 kHz 程度になると見積もられており、この環境下で回路が安定的に動作していることは絶対要件である。本研究では、RAYRAW がこれらの要求を満たしているか、宇宙線および LED を用いて評価を行った。宇宙線を用いた評価では、回路のゲイン設定を変えながらデータの取得を行い、ゲインが 16 倍のときに MIP の 10 倍まで、ゲインを 8 倍まで落とすと MIP の 25 倍以上までのエネルギー範囲を測定できるという結果が得られた。いずれの設定においても、MIP のピークは十分識別可能であり、エネルギー測定に関する要求を満たしていることが示された。LED を用いた評価では、MIP の光量を再現するように調整した LED を、Clock Generator および  $\beta$  線源  $^{90}\text{Sr}$  を用いて作ったランダムパルスによって光らせ、擬似的に高レート入力環境を再現するこ



とで回路の動作の安定性を評価した。LED を光らせるレートを 500 Hz–5 MHz まで段階的に変えていったところ、現行の読み出し回路で見つかった回路が信号を出力しなくなるという問題は起きないことが確認できた。また、ADC の平均値も 50 kHz までは一定であったことからゲインの安定性も確認できた。これらの評価結果から、RAYRAW は CFT を読み出す際にエネルギー測定的面から求められる性能を十分に満たしているという結果が得られた。

先に述べた SPring-8 における  $\Lambda p$  散乱実験 (HYPS 実験) は 2025 年 4 月からのデータ取得を目指しており、我々は現在その実験準備を進めている。HYPS 実験では、 $\Lambda$  の運動量が 300–600 MeV/c という領域での  $\Lambda p$  散乱の全断面積および微分断面積の測定を目的としている。2.5 年間のデータ取得を通して、全断面積は約 7%、微分断面積は散乱角度ごとに約 15% の精度で導出できると見積もっており、これらのデータを提供することで不定性の大きい現在の  $\Lambda N$  相互作用の理論モデルに大きな制約を与えることができると考えている。

本研究では、HYPS 実験のデータ収集システム (DAQ) および実験用ネットワークの構築も行い、この DAQ を用いたコミッショニングを通して、各検出器の動作確認および DAQ システムの性能の確認を行った。DAQ システムの構築にあたり、まず実験用ネットワークの構築を行なった。HYPS 実験で使用する DAQ はネットワーク分散型であり、各フロントエンドモジュールのデータは全てネットワーク経由で送受信されるため、DAQ プロセスでは非常に多くのデータがやり取りされることになる。これを踏まえ、DAQ 専用のネットワークを用意した。また、トリガーや Busy、イベント同期用のタグなども専用のモジュールを用いてネットワークで送受信されるため、そのための回路および LAN ケーブル等の敷設も行い、DAQ に関するすべての操作を 1 台の PC から行える環境を構築した。2024 年 11 月に行なったコミッショニングでは、構築した DAQ を用いて各検出器の信号を正常に読み出せていることが確認できた。また、トリガーレートを変化させることでシステム効率の評価を行った。その結果、4 kHz 以下のトリガーレートでは、実験の計画段階で想定されていた 90% 以上の DAQ 効率を達成することに成功した。

# 目次

概要	ii
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の理論・実験研究	1
1.2 $\Lambda_p$ 散乱実験	4
1.2.1 CATCH 検出器群	4
1.2.2 HYPs 実験	7
1.2.3 J-PARC E86 実験	9
1.3 本論文の構成	9
第 2 章 CFT に用いる MPPC 読み出し回路	11
2.1 CFT のシンチレーションファイバーの読み出し	11
2.1.1 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)	11
2.2 現行の MPPC 読み出し回路 (VME-EASIROC)	12
2.2.1 EASIROC	13
2.2.2 VME-EASIROC ボード	16
2.2.3 VME-EASIROC ボードの持つ課題	18
2.3 次世代 MPPC 読み出し回路 RAYRAW	18
2.3.1 YAENAMI ASIC	18
2.3.2 RAYRAW ボード	22
第 3 章 RAYRAW ボードの性能評価	25
3.1 YAENAMI および RAYRAW ボードに求められる性能	25
3.2 YAENAMI ASIC の 1 光子分離能力の評価	27
3.2.1 評価方法	27
3.2.2 評価結果	28
3.3 RAYRAW ボードの性能評価	30
3.3.1 宇宙線を用いたダイナミックレンジの評価	31
3.3.2 高レート入力に対する回路の耐性の評価	34
3.4 RAYRAW に関する評価結果	37
第 4 章 HYPs 実験	38
4.1 実験概要	38
4.2 SPring-8 と LEPS ビームライン	40
4.3 実験セットアップ	41
4.3.1 レーザーシステム	41

4.3.2	Tagger . . . . .	42
4.3.3	LEPS スペクトロメーター . . . . .	43
第 5 章	データ収集システム (DAQ) および実験用ネットワークの構築	50
5.1	実験用ネットワーク . . . . .	50
5.2	DAQ システム . . . . .	52
5.2.1	フロントエンド . . . . .	53
5.3	構築した DAQ を用いたコミッショニング . . . . .	55
5.3.1	各検出器の応答 . . . . .	56
5.3.2	DAQ システムのレート耐性 . . . . .	58
第 6 章	まとめと今後の展望	63
	謝辞	65
	参考文献	67

# 目次

1.1	先行実験 (J-PARC E40) で取得した $\Sigma^{\pm}p$ 散乱の微分断面積、およびそのデータを基にアップデートされた Chiral EFT による理論計算 . . . . .	3
1.2	$\Lambda p$ 散乱の全断面積および微分断面積の理論計算 . . . . .	4
1.3	CATCH の 3D モデル図。液体水素標的は CATCH 最中心部に設置される (赤い矢印が貫いている空間)。液体水素標的を円筒型に囲うように、内側から CFT、BGO カロリメーター、PiID カウンターの順で検出器が配置されている。 . . . . .	5
1.4	CFT の写真 [12]。写真下部の黒い部分には各ファイバーの端面が来ており、MPPC をネジ止めに取り付けられるようになっている。実験で使用する際には、写真の状態から 90 度回転した状態 (写真下部が上流側、写真上部が下流側になる) で設置される。 . . . . .	6
1.5	$\phi$ 層 (左) と $uv$ 層 (右) の模式図 [12]。 $\phi$ 層と $uv$ 層を交互に組み合わせることで、粒子の位置情報を 3 次元で取得することができる。 . . . . .	6
1.6	HYPS 実験の実験セットアップ . . . . .	8
1.7	HYPS 実験における CATCH での反応の模式図。 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ 反応によって生成された $\Lambda$ 粒子が、標的内の別の陽子と散乱される。生成された $\Lambda$ 粒子の運動量は、前方のスペクトロメーターで $K^+$ の運動量を解析することで標識化される。 . . . . .	8
1.8	E86 実験の実験セットアップ [11]。 $\Lambda$ 粒子は $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応により生成する。下流側のスペクトロメーターでは、 $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ によって崩壊した $\pi^+$ を検出する。 . . . . .	9
2.1	CFT で使用する MPPC 基板の写真 (左)。1 mm $\times$ 1 mm の MPPC が 32 個配置されている。読み出し面にネジで固定することでファイバーの端面と MPPC が密着するようになっている (右)。 [12] . . . . .	12
2.2	EASIROC のブロックダイアグラム。MPPC から入力された信号は、ゲインの異なる 2 系統の回路 (HighGain、LowGain) によって整形・増幅が行われ、外部から入力された Hold 信号のタイミングでの波高情報が出力される。また、HighGain 系統には時間情報取得のために時定数の短い Shaper と Discriminator が存在しており、そのデジタル出力を含めた 3 種類の信号が EASIROC から出力される。MPPC からの信号入力部に接続されている 8bit の DAC を使用することで、MPPC のゲインを微調整することができる。 [13] . . . . .	13
2.3	Input DAC を用いた MPPC のバイアス調節回路。Input DAC を使用することで、MPPC の実効的なバイアス電圧 $V_{OP}$ をチャンネルごとに調節することができる。 . . . . .	14
2.4	Hold 信号によるピーク Hold の例。黄色が Hold 信号、青色が Slow Shaper 直後のアナログ信号、紫色が HighGain output である。適切なタイミングで入力された Hold 信号により、アナログ信号の最大波高が保持されていることがわかる。 . . . . .	15
2.5	VME-EASIROC ボードの写真。MPPC 信号の入力部をピンクで、EASIROC チップを水色で、FPGA を赤で、Ethernet ポートを黄色で囲んでいる。 . . . . .	17
2.6	YAENAMI ASIC のブロックダイアグラム [14] . . . . .	19
2.7	YAENAMI ASIC の ASD 部の構成 [14] . . . . .	20

2.8	MPPC BIAS DAC の設定値と出力電圧の関係。基板にテスターを当てて測定した。 . . . . .	20
2.9	YAENAMI ASIC の評価基板。MPPC の信号は、画像左からマイクロ同軸ケーブルで入力される。YAENAMI の出力は FPGA に入力され、LAN ポートから PC に送られる。[14] . .	22
2.10	RAYRAW ボードの画像。入力部をピンク、出力部を黄色の枠で囲った。画像左から入力された 32ch の MPPC 信号は、8ch ずつ YAENAMI ASIC で整形増幅され ADC および TDC 情報として FPGA に入力される。FPGA 内では 32ch の ADC および TDC 情報が 1 つのイベントデータとしてまとめられた後、SiTCP を通じて PC に送信される。Trigger 入力や busy 出力は、画像右下の NIM I/O を通じて行われる。また、FPGA に入力された YAENAMI の Comparator output は LVDS 信号に変換されて画像中央下からも出力されている。MPPC バイアス用電源も搭載しており、画像左下から出力される。 . . . . .	23
2.11	MPPC バイアス用電源の設定値と出力電圧。横軸が、SlowControl で設定した DAC の値である。テスターを用いて測定した。 . . . . .	24
3.1	Bethe-Bloch の式で求めた、CFT のファイバーあたりのエネルギー損失と粒子のエネルギーの関係。赤色が陽子、青色が $\pi$ である。 . . . . .	26
3.2	先行実験で測定された、散乱粒子の CFT におけるエネルギー損失とその粒子のエネルギーの相関図。赤線で囲まれた領域が $\pi$ である。[16] . . . . .	26
3.3	YAENAMI ASIC 評価時のセットアップ。Clock Generator から出力された NIM 信号を TTL 信号に変換し LED を光らせた。また、Clock Generator から出力される NIM 信号をトリガーに使用した。 . . . . .	27
3.4	YAENAMI で取得した典型的な MPPC の波形データ。取得した波形を重ね書きしている。正と負の両極性の信号を受けられるように、ベースラインは ADC の中点である約 500ch になっている。 . . . . .	28
3.5	ShapingTime を変えた時の 1 光子分離能。Shaping Time を長くすることで、波形の変化が緩やかになり、ADC 分布の光子ピークがより分かれていることがわかる。 . . . . .	29
3.6	ShapingTime を変えた時の 1 光子分離能。Shaping Time が長くなるにつれて S/N が向上していることがわかる。 . . . . .	30
3.7	CFT 試作機の画像。図中央の白い部分がシンチレーションファイバーであり、その端面は図下部の黒い筐体部に固定されている。 . . . . .	31
3.8	宇宙線を用いたエネルギー測定可能範囲の評価におけるセットアップ。 . . . . .	32
3.9	回路のゲインを変化させた時の、ADC 分布。各波形の最大値を ADC として使用している。 . . . . .	32
3.10	LED を大光量で光らせた時の波形の様子。910 チャンネル前後で ADC が飽和してしまっていることがわかる。 . . . . .	33
3.11	回路のゲインを変化させたときの最大測定可能エネルギーの様子 . . . . .	33
3.12	高レート入力に対する耐性の評価におけるセットアップ。MIP の光量を再現するように調整した LED を、Clock Generator および $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}$ を用いて作ったランダムパルスによって光らせ、高レート入力環境を擬似的に再現した。 . . . . .	34
3.13	MIP の光量を再現するように調整した LED を 500 Hz で光らせた時の波形データ。MPPC に入力される光量が十分に大きいため、LED の光っているタイミングではペDESTAL の信号は存在しない。 . . . . .	35
3.14	LED を光らせるレートを 500 Hz から 5 MHz まで変化させて行った時の回路の応答効率。5 MHz という高レートの入力に対しても 100 % の応答を示していることがわかる。LED のレートは、500 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz、500 kHz、1 MHz、2 MHz、3 MHz、5 MHz である。 . . . . .	35

3.15	信号入力レートに対する回路のゲインの応答。LED のレートは、500 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz、500 kHz、1 MHz、2 MHz、3 MHz、5 MHz である。 . . . . .	36
4.1	HYPS 実験で予想される $\Lambda$ 粒子の運動量ごとの $\Lambda p$ 散乱の微分断面積の測定精度。カイラル有効場理論による理論予想を一緒に示している。 . . . . .	39
4.2	HYPS 実験で予想される $\Lambda p$ 散乱の全断面積の測定精度。過去実験による測定結果を破線で示している。また、カイラル有効場理論による理論予想も示している。 . . . . .	39
4.3	SPring-8 の概要図。電子は線型加速器 (SACLA) で 8 GeV まで加速されて蓄積リングに投入される。[17] . . . . .	40
4.4	SPring-8 のビームラインマップ。ビームラインごとに使用する放射光の波長は異なり、幅広い分野の研究が行われている。[18] . . . . .	40
4.5	HYPS 実験の実験セットアップの概略図 . . . . .	41
4.6	レーザーシステムの概要図。レーザーハッチ内に設置された光学ミラー (図中 4、5) は PC から制御することができ、蓄積リング内でのレーザー入射位置を調整することができる。[19] より改変 . . . . .	42
4.7	Tagger による散乱電子のエネルギー測定の概略図。蓄積リングを周回する電子は、直線部でレーザーと逆コンプトン散乱を起こす。散乱によりエネルギーを失った電子は直後の偏向電磁石で大きく内側に曲げられ、Tagger によってそのエネルギーが測定される。[20] . . . . .	42
4.8	Tagger の概略図。110 セグメントのシンチレーションファイバーで構成される TAG-SF によって散乱電子の通過位置が測定される。[20] . . . . .	43
4.9	LEPS スペクトロメーターの概略図。 $(\gamma, K^+)$ 反応によりビーム進行方向に飛び出した荷電粒子は、LEPS スペクトロメーターによってその運動量と質量が測定される。時間測定および飛跡測定用の検出器のほか、バックグラウンドである $e^\pm$ を除去するためのトリガーカウンターが設置されている。 . . . . .	44
4.10	チェレンコフ光発光閾値の運動量依存性 . . . . .	45
4.11	SAC の概略図。黒紙によって遮光された箱の内部には Silica Aerogel のシート (Radiator) が 2 枚設置されており、壁面には反射材が貼られている。チェレンコフ光は、箱の上下に 2 つずつ設置されたファインメッシュ型の PMT で検出する。[20] . . . . .	46
4.12	SDC1 のワイヤー構造。1 本のセンスワイヤーの周りを 6 本のフィールドワイヤーで囲むハニカム構造になっている。シールドワイヤーとフィールドワイヤーに負の電圧を印加することで、センスワイヤーからフィールドワイヤーに向かう電場が発生し、荷電粒子が通過した際に電子のドリフトが起きる。センスワイヤーの間隔は異なるが、SDC2、3 もハニカム構造である (ただし X” 層は存在しない)。[20] . . . . .	47
4.13	LEPS スペクトロメーター下流の俯瞰図。電磁石の出口には飛跡検出器である SDC2、3 があり、 $e^\pm$ VETO カウンターはその直後に設置されている。また、最下流には飛行時間を測定するために TOF が設置されている。[20] . . . . .	48
4.14	TOF の概略図。ビームの通過領域以外に $x$ 方向の隙間が生まれないう、セグメント同士は互い違いに設置されている。本論文執筆時に設置されているセグメントを赤枠で囲んだ。また、緑色と水色では使用されているシンチレーターおよび PMT が異なる。 . . . . .	49
5.1	HYPS 実験用のネットワーク (hypsnet) の概略図。hypsnet は DAQ ネットワーク、Monitor ネットワーク、User ネットワークの 3 つのサブネットワークから構成されており、srv-hyps がそのサーバーを担っている。 . . . . .	51
5.2	MTM-RM システムによるトリガーおよびモジュール Busy 管理システムの概要図 . . . . .	53

5.3	コミッショニングで使したトリガーのダイアグラム。T0 と TOF の Coincidence 信号を、SAC と $e^\pm$ VETO の信号で VETO することで、バックグラウンドである $e^\pm$ によるイベントを除去している。 . . . . .	56
5.4	T0 の ADC と TDC のヒストグラム。T0 はプラスチックシンチレーターの両面を PMT で読み出している。ADC と TDC の取得にはそれぞれ CAEN V792 と HUL HR-TDC を用いている。 . . . . .	56
5.5	SDC2 の各レイヤーごとのヒットパターン。粒子の電荷に対応する 2 つのピークが見える。赤線は、適当な TOT の値でカットをかけた場合を表している。TDC 情報の取得には HUL MH-TDC を用いている。 . . . . .	57
5.6	TOF(Segment20 Down) の ADC と TDC、および TOF 全体のヒットパターン。ADC の取得には CAEN V792 を、TDC の取得には HUL HR-TDC を用いている . . . . .	57
5.7	CFT の $\phi$ 層と $uv$ 層のヒットパターン。VME-EASIROC で取得した TDC を用いている。 .	58
5.8	典型的な Busy 信号の様子。黄色が VME-EASIROC、青色が HUL Scaler、緑が DAQ 全体の Busy である。また、ピンク色は、クレート Busy と呼ばれる、同じクレートに設置されている複数枚の HUL の Busy の OR 信号である。 . . . . .	59
5.9	DAQ システム効率のトリガーレート依存性。測定結果を黒でプロットした。また、青線はシステム全体の dead time を $15 \mu\text{s}$ とした時に予測される Efficiency。 . . . . .	60
5.10	Tagger の TDC 情報を取得している HUL(MH-TDC) のワードサイズ分布。表 5.3 で示した典型的なワード数である 27 のカウントが 1 番多いが、その分布は広がっており 100 ワード以上のイベントも存在している。 . . . . .	61
5.11	データ取得中に確認された、非常に長い Busy の様子。緑色で表示されているシステム全体の Busy 信号が約 $180 \mu\text{s}$ と、表 5.3 に示した各モジュールの典型的な busy と比べて非常に長く出力されている。 . . . . .	62

# 表目次

1.1	CFT の各層におけるファイバーの本数 . . . . .	7
2.1	CFT の読み出しに使用する MPPC S10362-11-050P の仕様 . . . . .	12
2.2	CFT に使用しているシンチレーションファイバー Kuraray SCSF-78M の仕様 . . . . .	12
2.3	EASIROC の主な回路パーツの概要 . . . . .	16
2.4	YAENAMI のゲインおよび整形時定数のまとめ . . . . .	21
3.1	RAYRAW の性能評価でを使用した MPPC S13360-135PE の仕様 . . . . .	31
4.1	LEPS スペクトロメーターを構成する検出器の概要 . . . . .	44
4.2	ドリフトチェンバーの基本情報 . . . . .	47
4.3	TOF カウンターの種類と基本情報 . . . . .	49
5.1	hypsnet の仕様 . . . . .	51
5.2	各検出器とフロントエンドの対応表 . . . . .	55
5.3	フロントエンドモジュール 1 台あたりの典型的な 1 イベントあたりのデータサイズおよび Busy。ワードは HDDAQ で使用されているデータの単位であり、1 ワードは 32 bit である。 . . . . .	55



# 第1章

## 序論

### 1.1 物理的背景

#### 1.1.1 バリオン間相互作用の理論・実験研究

我々の世界を構成する原子核は、バリオンの1種である陽子と中性子によって構成されている。核子(N)と呼ばれる陽子と中性子の間にはたらく相互作用である核力に関する研究はこれまで盛んになされており、 $\sim 1$  fm より近距離では強い斥力として、それより遠距離では引力としてはたらくことがわかっている。遠距離での引力については、豊富に存在する  $pp$  散乱や  $np$  散乱といった NN 散乱の実験データに基づき中間子交換モデルによってよく記述される。一方で、近距離での斥力に関する理解は不十分であり、中間子交換モデルでは現象論的に扱うことで NN 散乱の実験データを再現している。斥力芯の存在する  $\sim 1$  fm より近距離は核子同士が重なり合うような距離であることから、核子を構成しているクォーク同士の相互作用が斥力に大きく寄与していると考えられているが、 $u$  クォークと  $d$  クォークのみから構成される NN 系では得られる情報は限られている。そのため、核力をクォークの描像から理解するためには、 $u$ 、 $d$  クォーク以外のクォークも含んだ拡張された核力であるバリオン間相互作用を調べるのが重要である。ここで、 $u$ 、 $d$  クォークに、それらの次に質量が軽いクォークである  $s$  クォークを加えた場合を考えると、これらの質量が同じであると近似したとき、クォークすなわちフレーバーの入れ替えに対する対称性である SU(3) フレーバー対称性が成り立つ。これら3つのクォークを用いて構成されるバリオンは

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

と表現され、スピンの  $1/2$  である 8 重項とスピンの  $3/2$  である 10 重項に分類される。このうち、8 重項に属するバリオン間同士の相互作用は

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

という6つの既約表現によって表される。この中で、NN 系の相互作用が含まれているのは **27** と **10\*** のみであり、それ以外の4つの多重項は、SU(3) フレーバー対称性によって新たに出現する項である。したがって、 $s$  クォークを含むバリオンであるハイペロン(Y)と核子の間にはたらく YN 相互作用や、ハイペロン同士にはたらく YY 相互作用を調べることは、バリオン間相互作用の理解を深めるために不可欠である。

これまで YN 相互作用は、ハイペロンを含む原子核であるハイパー核を用いて研究されてきた。ハイペロンの中で最も軽い  $\Lambda$  粒子は電氣的に中性であり、またバリオンレベルでのパウリ排他律を受けないため、原子核内部に深く束縛される。この  $\Lambda$  粒子は原子核内で 30 MeV 程度の深さの引力ポテンシャルを感じるということがわかっている。このような  $\Lambda$  ハイパー核の精密分光研究による原子核構造研究と精密な少数多体系研究が協力することで、 $\Lambda N$  相互作用に関する研究が進められてきた。すなわち、 $\Lambda N$  相互作用モデルを用いて  $\Lambda$  ハイパー核の少数厳密計算を行い、この計算結果と実験データを比較することで  $\Lambda N$  相互作用モデルにフィードバックす

るという手法を用いてきた。これは多体系から 2 体力を抜き出すという方法であり、それに伴う困難もあるため、 $\Lambda$  と核子の 2 体系から  $\Lambda N$  相互作用を求めることが望まれていた。

$\Lambda$  が核子の次に軽いこと、また、核子との相互作用が引力的であることから、非常に高密度な環境である中性子星の中心部では、中性子のフェルミエネルギーが高くなることで真っ先に  $\Lambda$  が出現されると予想されている。このハイペロンの出現は中性子星の状態方程式を軟化させることから、その最大質量は約  $1.4M_{\odot}$  と予想されてきた。ところが、この予想を上回る約  $2M_{\odot}$  の質量を持つ重い中性子星の存在が 2010 年に報告され [1][2]、高密度領域における既存の  $\Lambda N$ (YN) 相互作用の理解が不十分であることが判明した。現在、ハイペロンパズルと呼ばれるこの問題の解決の糸口として  $\Lambda$  粒子を含む 3 体力 ( $\Lambda NN$  力) が示唆されており、大強度陽子加速器施設 J-PARC やアメリカの Jefferson 研究所では重い  $\Lambda$  ハイパー核を用いて  $\Lambda NN$  力を調べる実験が計画されている。この多体力の効果を正確に抽出するためには、先ほど述べたように  $\Lambda N$  の 2 体系から  $\Lambda N$  相互作用が精密に決定されている必要があり、そのためにも  $\Lambda p$  散乱実験は必要不可欠である。

これまで 2 体の YN 相互作用は、Nijmegen モデルに代表される中間子交換模型や、クォークの自由度を取り入れた Quark Cluster Model(QCM) を基に構築されてきた。近年では、カイラル対称性を取り入れたカイラル有効場理論 (Chiral EFT) の YN セクターへの拡張によって、新しい枠組みでの理論計算が構築されてきている。Chiral EFT における YN 相互作用は、擬スカラー中間子の交換と短距離での相互作用を表すコンタクトタームを用いて記述されており、コンタクトタームの決定には Low-Energy Constants(LEC) と呼ばれるパラメーターを決定する必要がある。この LEC は実験データをフィットすることによって求められるため、精密な YN 相互作用モデルの構築のためには高統計・高精度な YN 散乱の実験データの存在が重要となる。

しかし、YN 散乱の実験データは、実験データが豊富に存在する NN 散乱に比べて非常に限られており、その統計量も非常に乏しい。その理由としては、ハイペロンの寿命が 0.1 ns 程度と非常に短いことが挙げられる。YN 散乱のためにはハイペロンをビームとして使用する必要があるが、その寿命の短さゆえに散乱を起こす前に崩壊してしまうということがあるため、ハイペロンの散乱実験は困難である。これまでに行われてきた YN 散乱実験には、1960 年代のバブルチェンバーを用いた実験や、シンチレーションファイバーをアクティブ標的として用いた KEK-PS E251 実験、E289 実験が挙げられる [3][4][5]。これらの実験では、散乱事象に関連する全ての粒子の飛跡を画像として記録するイメージング手法が取られており、その応答の遅さにより入射ビームレートが制限されていたことなどから、その統計量は多くても数 100 イベント程度と限られていた。このような状況を打破すべく、我々はイメージングを使用しない新たな  $Yp$  散乱実験の手法を考案した。この手法では、液体水素標的を円筒形に囲む CATCH 検出器群およびスペクトロメーターを用いて粒子の飛跡やエネルギー、運動量といった散乱の終状態を測定し、それを用いて運動学を解くことで散乱事象の同定を行う。我々のグループは、2018 年から 2020 年にかけてこの手法を用いた高統計の  $\Sigma^{\pm}p$  散乱実験 (J-PARC E40) を成功させ、 $\Sigma^{\pm}p$  散乱の微分断面積を 10% 以下の精度で導出した [6][7][8]。図 1.1 に、この実験で取得したデータおよびそのデータをもとにアップデートされた Chiral EFT による計算を示す。現実的な YN 相互作用モデルの確立のためには、このような、実験によって高精度なデータを取得し、そのデータをフィードバックすることで理論をアップデートする、というプロセスが重要である。

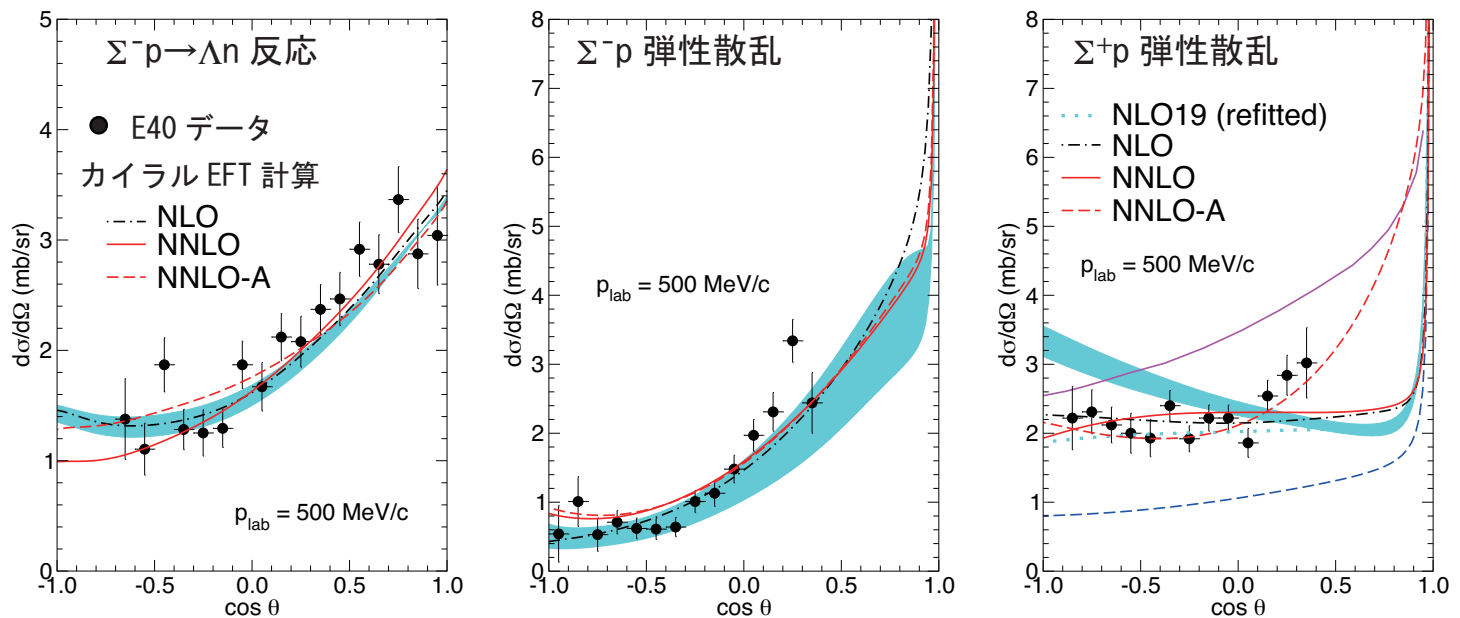
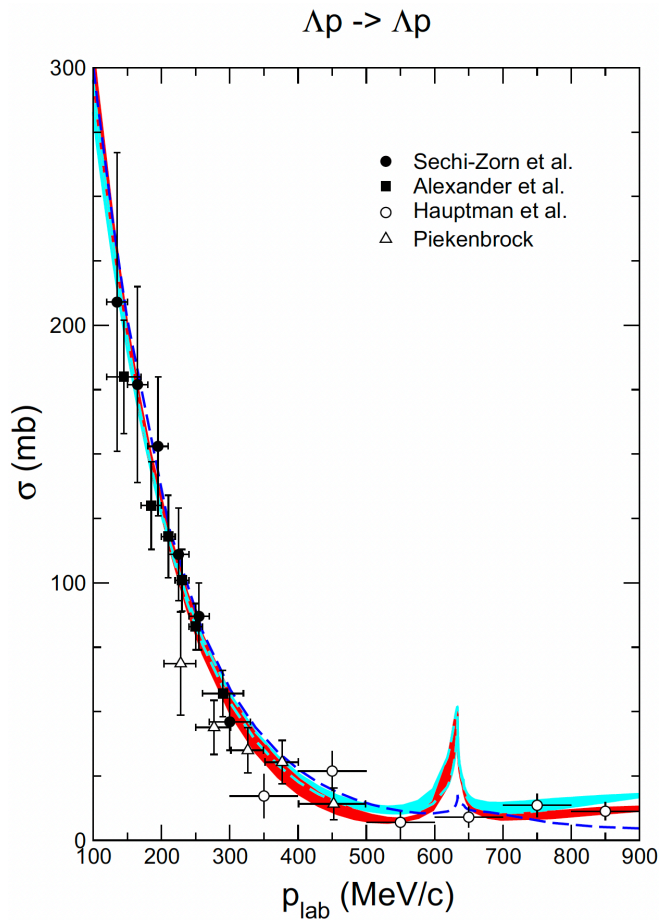


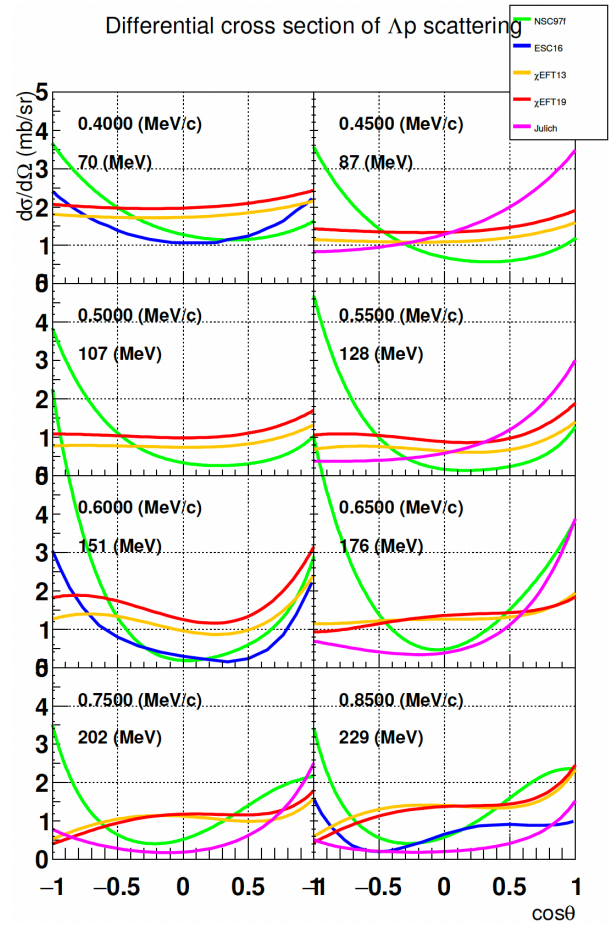
図 1.1: 先行実験 (J-PARC E40) で取得した  $\Sigma^\pm p$  散乱の微分断面積、およびそのデータを基にアップデートされた Chiral EFT による理論計算

J-PARC E40 実験で確立した実験手法は、 $\Lambda p$  散乱に対しても用いることができるため、 $\Lambda N$  相互作用に関する研究を大きく進めることができると我々は考えている。 $\Lambda p$  散乱の断面積の測定データは限られており、特に  $400 \text{ MeV}/c$  より高運動量の領域での断面積測定は 1 つの実験しか行われていない。また、微分断面積に関するデータは報告されていない。こうしたデータを基に構築されている現在の理論モデルによる、 $\Lambda p$  散乱の全断面積および微分断面積の理論計算を図 1.2 に示す。全断面積のデータのみを用いて構築されているため、微分断面積に関する計算はモデルごとに大きく異なっており、現在の  $\Lambda N$  相互作用はモデル間に大きな不定性が存在していることがわかる。近年、CLAS コラボレーションによって  $\Lambda p$  散乱の全断面積の測定結果が新たに報告された [9] が、理論に強い制約をかけるにはより多くの高精度なデータが必要である。

現在我々は、SPRing-8 および J-PARC において  $\Lambda p$  散乱実験を計画している。これらの実験では、先行実験で確立した実験手法と同様の手法を用いて散乱事象の同定を行う。広い運動領域における  $\Lambda p$  散乱の全断面積および、これまでデータの存在していない微分断面積を測定し、そのデータを理論にフィードバックすることで、不定性の大きい現在の  $\Lambda N$  相互作用に強い制約を与えることができる。次節では、CATCH 検出器群の説明とともに、これらの  $\Lambda p$  散乱実験の概要について述べる。



(a)  $\Lambda p$  散乱の全断面積の測定データと Chiral EFT による理論計算 [10]



(b) 運動量領域ごとの  $\Lambda p$  散乱の微分断面積の理論計算 [11]

図 1.2:  $\Lambda p$  散乱の全断面積および微分断面積の理論計算

## 1.2 $\Lambda p$ 散乱実験

前節で述べた背景を受け、我々は大型放射光施設 SPring-8 と大強度陽子加速施設 J-PARC にて  $\Lambda p$  散乱実験を計画している。本節では、まず  $\Lambda p$  散乱実験で用いる検出器群である CATCH 検出器群についてその目的や構成について述べた後、SPring-8 と J-PARC での  $\Lambda p$  散乱実験について、それぞれの実験概要について述べる。

### 1.2.1 CATCH 検出器群

CATCH(Cylindrical Active Tracker and Calorimeter for Hyperon proton scattering) は、ハイペロン-陽子散乱実験のために開発された検出器群であり、液体水素標的と、それを円筒状に囲う 3 種類の検出器 (CFT、BGO カロリメーター、PiID カウンター) から構成されている。CATCH の概略図を図 1.3 に示す。



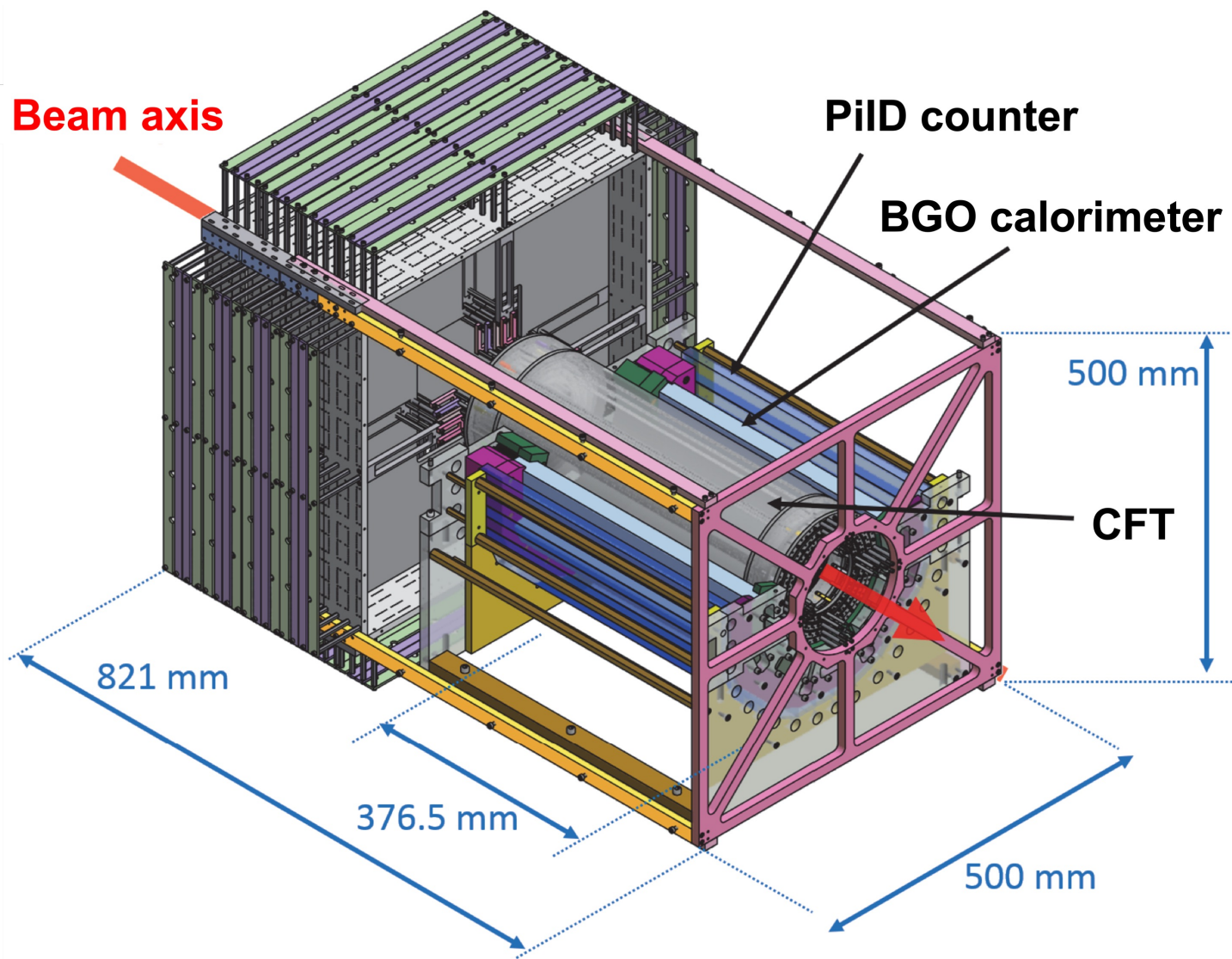


図 1.3: CATCH の 3D モデル図。液体水素標的は CATCH 最中心部に設置される (赤い矢印が貫いている空間)。液体水素標的を円筒型に囲うように、内側から CFT、BGO カロリメーター、PiID カウンターの順で検出器が配置されている。

液体水素標的にビームを入射することで生成される  $\Lambda$  粒子が、標的中の別の陽子と散乱することで  $\Lambda p$  散乱事象が起きる。CATCH 検出器群で標的を囲うことで、側方に飛び出した粒子 (反跳陽子、散乱した  $\Lambda$  粒子等の崩壊に由来する陽子、および  $\pi^-$  など) の 3D トラッキングやエネルギー損失の測定を行うことができる。これらの情報とスペクトロメーターシステムの情報を組み合わせることにより、 $\Lambda p$  散乱事象の同定を行うことができる。

以下に、それぞれの検出器の概要を述べる。

- **CFT(Cylindrical Fiber Tracker)**

CFT は、標的から飛び出した荷電粒子のトラッキングおよびエネルギー損失の測定を行うための円筒形のシンチレーションファイバー検出器である。直径 0.75 mm のシンチレーションファイバーが使用されており、ファイバーが円筒に沿う方向に張られている  $\phi$  層と、螺旋状に張られている  $w$  層を交互に組み合わせた計 8 層で構成されている。CFT の写真を図 1.4 に、 $\phi$  層と  $w$  層の模式図を図 1.5 に示す。



図 1.4: CFT の写真 [12]。写真下部の黒い部分には各ファイバーの端面が来ており、MPPC をネジ止めで取り付けられるようになっている。実験で使用する際には、写真の状態から 90 度回転した状態 (写真下部が上流側、写真上部が下流側になる) で設置される。

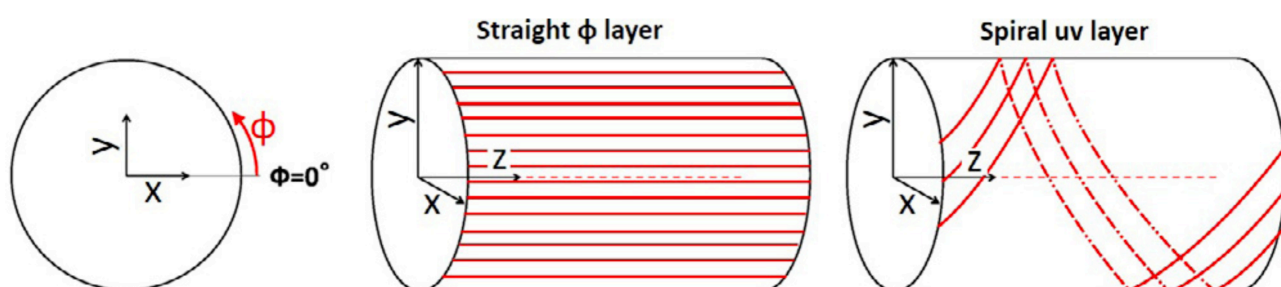


図 1.5:  $\phi$  層 (左) と  $uv$  層 (右) の模式図 [12]。 $\phi$  層と  $uv$  層を交互に組み合わせることで、粒子の位置情報を 3 次元で取得することができる。

各層のファイバーは依積みの構造になっており、ファイバーの総本数は 4932 本である。表 1.1 に各層のファイバー数を示す。それぞれのファイバーの片端には半導体光検出器である MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) が取り付けられており、荷電粒子が通過した際に発生するシンチレーション光は MPPC によって電気信号に変換される。後述する専用の読み出しボードでこの信号を読み出すことで、粒子のトラッキングやエネルギー損失の測定を行うことができる。

表 1.1: CFT の各層におけるファイバーの本数

層の名前	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$u 1$	$v 2$	$u 3$	$v 4$
ファイバー本数	584	692	800	910	426	472	510	538

- **BGO カロリメーター**

BGO カロリメーターは、CFT を囲うように配置された 24 セグメントの BGO 結晶で構成される無機シンチレーション検出器である。1 セグメントの大きさは 400 mm(L)×30 mm(W)×25 mm(H) であり、それぞれのセグメントは遮光のためにブラックシートで覆われている。組成が  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  で表される BGO は、原子番号が大きく高密度なため阻止能が高いため、150 MeV 程度の高エネルギーの陽子を静止させてそのエネルギーを測定することができる。BGO カロリメーターを用いて測定した反跳陽子や  $\pi$  の運動エネルギーと、それらの CFT 内におけるエネルギー損失の相関を取ることで、陽子と  $\pi$  の粒子識別を行うことができる。シンチレーション光は、結晶の片端に取り付けた光電子増倍管 (PMT) を用いて読み出される。BGO のシンチレーション光の減衰時間は 300 ns 程度と長く、高レート環境下では信号がパイルアップする可能性が高くなるため、Flash ADC を用いて波形情報を記録する。

- **PiID カウンター**

PiID カウンターは、CATCH 最外層に設置されているプラスチックシンチレーターであり、BGO カロリメーターを囲うように配置された 32 セグメントから構成される。 $\Lambda$  粒子の崩壊に由来する  $\pi^-$  は、BGO カロリメーターでエネルギーを落とし切らずに突き抜けて来るため、PiID カウンターを用いることで CATCH によって検出された粒子が  $\pi^-$  であるかどうかを判別することができる。1 セグメントの大きさは 400 mm(L)×30 mm(W)×15 mm(H) であり、BGO と同様にセグメントごとにブラックシートで遮光されている。それぞれのシンチレーターには波長変換ファイバーが埋め込まれており、ファイバーの片端には MPPC が取り付けられている。この MPPC は、CFT と同様の読み出しボードを使用して読み出される。

## 1.2.2 HYPS 実験

HYPS 実験は、2025 年 4 月から 2027 年 7 月にかけて SPring-8 BL33LEP ビームラインで行われる  $\Lambda p$  散乱実験である。実験の概要図を図 1.6 に示す。

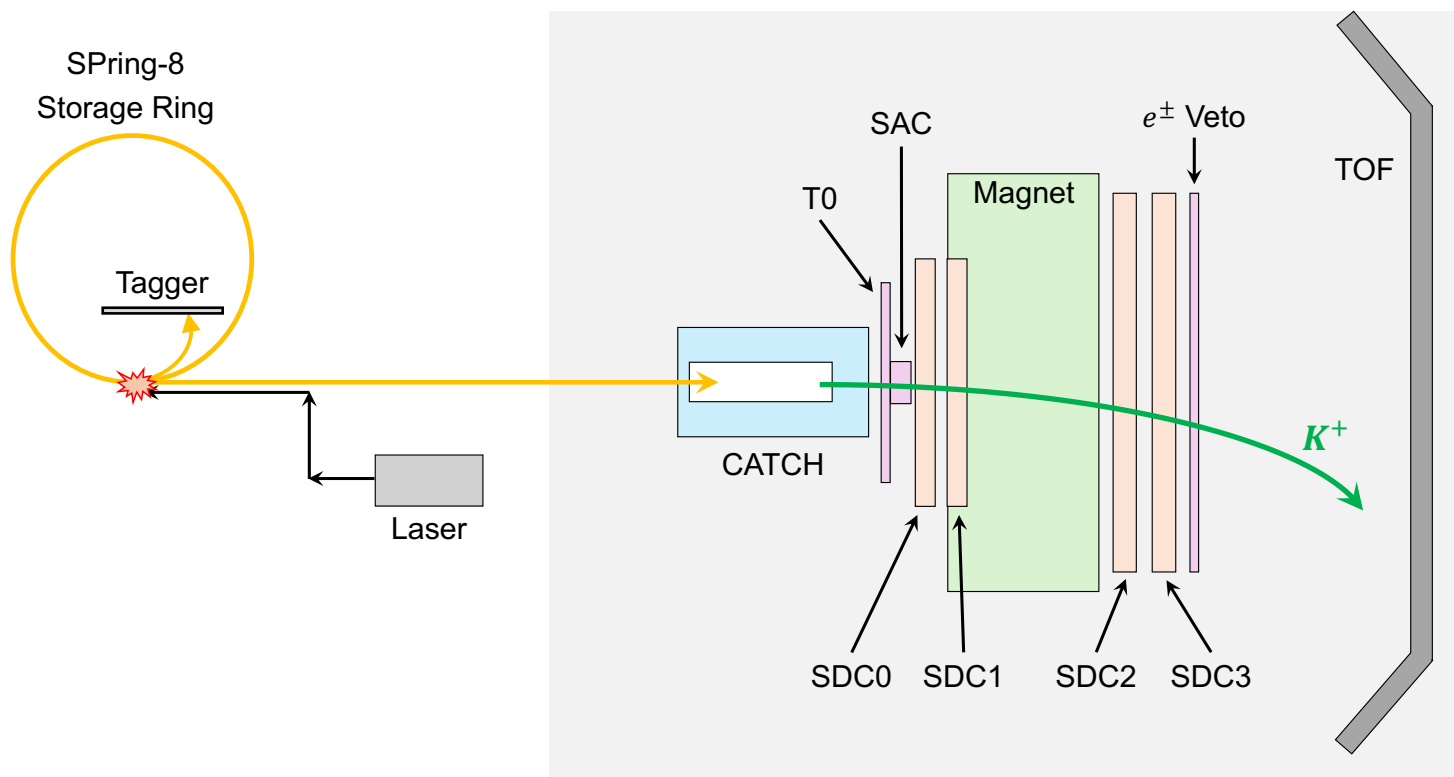


図 1.6: HYPS 実験の実験セットアップ

SPring-8 BL33LEP ビームラインでは、SPring-8 の電子蓄積リングに 355 nm のレーザーを入射し逆コンプトン散乱を起こすことで、 $E_\gamma = 1.5 - 2.4 \text{ GeV}/c$  の  $\gamma$  線を得ることができる。HYPS 実験では、この  $\gamma$  線を液体水素標的に入射することで電磁生成反応  $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$  を用いて  $\Lambda$  ビームを生成する。この生成した  $\Lambda$  が標的内の陽子と散乱する事象を CATCH 検出器群で検出することで、 $\Lambda p$  散乱の微分断面積および全断面積を測定することができる。図 1.7 に CATCH での反応の模式図を示す。この実験では、 $p_\Lambda = 300 - 600 \text{ MeV}/c$  という広い運動量領域において数千の  $\Lambda p$  散乱イベントを測定し、15% 程度の統計精度でその微分断面積を導出することを目的としている。HYPS 実験の詳細については、第 4 章で説明する。

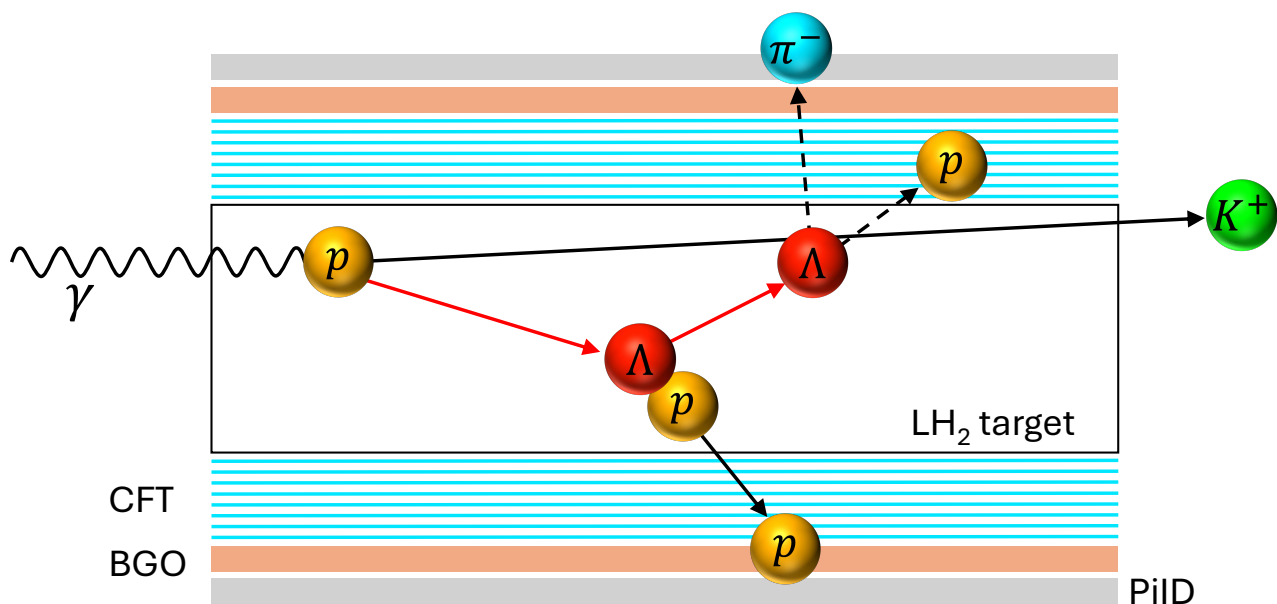


図 1.7: HYPS 実験における CATCH での反応の模式図。 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$  反応によって生成された  $\Lambda$  粒子が、標的内の別の陽子と散乱される。生成された  $\Lambda$  粒子の運動量は、前方のスペクトロメーターで  $K^+$  の運動量を解析することで標識化される。



### 1.2.3 J-PARC E86 実験

J-PARC E86 実験は、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我々が計画している、偏極  $\Lambda$  粒子を用いた  $\Lambda p$  散乱実験である。実験のセットアップを図 1.8 に示す。

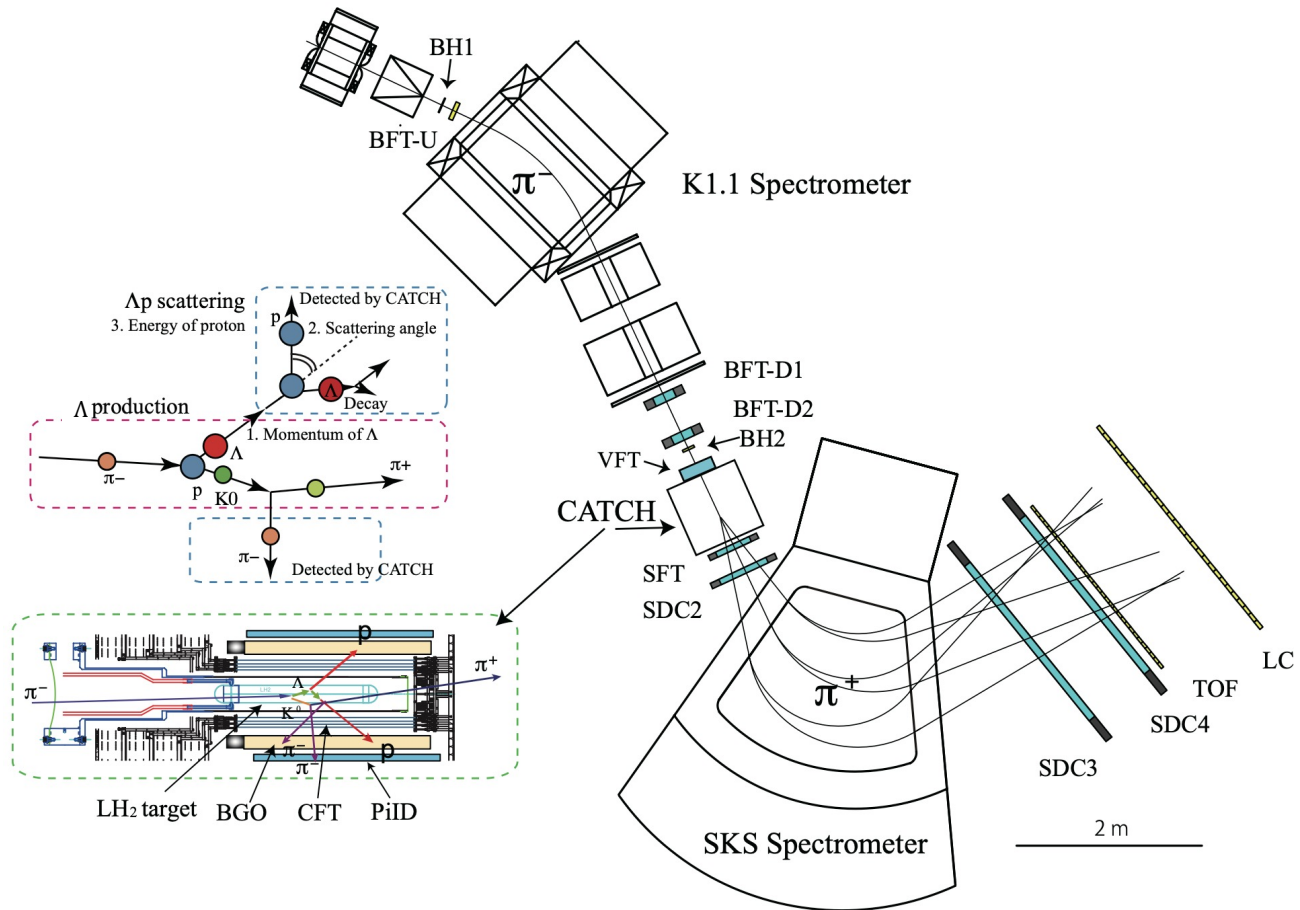


図 1.8: E86 実験の実験セットアップ [11]。 $\Lambda$  粒子は  $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$  反応により生成する。下流側のスペクトロメーターでは、 $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  によって崩壊した  $\pi^+$  を検出する。

E86 実験では、運動量が  $p_{\pi^-} = 1.05 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^-$  ビームを液体水素標的に入射し、 $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$  反応によって  $\Lambda$  ビームを標的中で生成する。 $p_{\pi^-} = 1.05 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^-$  を用いる利点として、以下の 2 つがあげられる。

1.  $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$  反応による  $\Lambda$  粒子の生成断面積が最大である
2.  $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$  反応によって生成された  $\Lambda$  粒子が  $(\pi^-, K^0)$  反応平面に対してほぼ 100% 偏極しており、スピン観測を測定することができる

J-PARC E86 実験では  $\Lambda$  粒子の運動量が  $400\text{--}800 \text{ MeV}/c$  での微分断面積と  $\Lambda$  の偏極分解能および減偏極を測定する。

## 1.3 本論文の構成

本研究では、CATCH 検出器群の CFT および PiID カウンター等の MPPC 読み出しに使用する次世代読み出しボード (RAYRAW) の性能評価を行った。また、HYPS 実験のデータ収集 (DAQ) システムの構築とその評価も行なった。

はじめに、第 2 章では現行の MPPC 読み出しボード (VME-EASIROC) および新たに開発された RAYRAW ボードについて、その構成や基本的な性能について述べる。第 3 章では、LED と宇宙線を用

いて行なった RAYRAW の性能評価の結果および考察について述べる。

また、第 4 章では HYPS 実験の概要および使用する検出器について述べた後、第 5 章では HYPS 実験に向けて構築した DAQ システムと実験用ネットワーク、およびそれを用いて行ったコミッショニングと DAQ の性能評価について第 5 章で述べる。最後に、第 6 章では RAYRAW と DAQ システムの性能評価結果を踏まえたまとめと、今後の展望について述べる。

## 第 2 章

# CFT に用いる MPPC 読み出し回路

CATCH 検出器群の円筒形ファイバー検出器 (CFT) の読み出し回路として、現在、VME-EASIROC モジュールを用いている。この VME-EASIROC モジュールは、J-PARC での先行実験 (E40) で使用され実績がある回路といえる。実際に SPring-8 での HYPS 実験では、CFT の読み出しにこの VME-EASIROC モジュールを使用する。一方で、VME-EASIROC モジュールには特有の弱点も存在する。その代表的な弱点は、ADC 測定におけるトリガーレイテンシーが非常に短いことである。これを克服するために、新しい MPPC 読み出し用 ASIC の開発プロジェクトが始動し、波形読み出しを用いた新しい MPPC 読み出し回路の開発を進めている。本章では、現行の VME-EASIROC モジュールの機能を概観するとともに、その問題点をまとめる。その上で、新しい読み出し回路である YAENAMI ASIC、およびそれを用いた読み出しモジュール RAYRAW の特徴をまとめる。

## 2.1 CFT のシンチレーションファイバーの読み出し

### 2.1.1 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)

1 章で述べたように、CFT はおよそ 5,000 本のシンチレーションファイバーから構成される円筒型の位置検出器である。それぞれのファイバーの読み出しには浜松ホトニクス社製の Multi Pixel Photon Counter(MPPC) を使用している。MPPC は、一片の長さが数 10 $\mu\text{m}$  程度の Avalanche Photo Diode (APD) がピクセル上に敷き詰められたマルチピクセル光検出器である。それぞれの APD が 10<sup>6</sup> 程度の増幅率を持つため、MPPC は優れたフォトカウンティング能力を有している。

同じ光検出器である Photo Multiplier Tube (PMT、光電子増倍管) と比べると、

- 磁場の影響を受けにくい
- 低電圧で動作 (30 V – 60 V)
- チャンネル単価が安い

といった利点を持つ。また、有効受光面のサイズが数 mm 四方と非常にコンパクトであるため、CFT のように高集積化された検出器の読み出しに非常に適している。

一方で、MPPC は温度変化に敏感であり、容易に増倍率が変わりうるため、恒温層等を用いて周囲の温度を一定に保ったり、温度に応じて印加電圧を変化させるなどの注意が必要である。

CFT の読み出しには、浜松ホトニクス社製の MPPC である S10362-11-050P を使用している。表 2.1 に S10362-11-050P の仕様を示す。高い増幅率を持ちつつ、光子検出でダイナミックレンジが比較的広い 400 ピクセルの MPPC を用いている。また、CFT で使用しているシンチレーションファイバーである Kuraray SCSF-78M の仕様を表 2.2 に示す。Kuraray SCSF-78M の発するシンチレーション光の強度は 450 nm で最大となるため、最大感度波長が 440 nm である S10362-11-050P を使用することで効率的に光子を計測するこ

とができる。なお、CFTに取り付ける際は S10362-11-050P が 32 個配置された MPPC 基板を用いている (図 2.1)。読み出し面にネジで固定することで、ファイバーの端面と MPPC が密着するようになっている。

表 2.1: CFT の読み出しに使用する MPPC S10362-11-050P の仕様

有効受光面サイズ	1 mm × 1 mm
ピクセルピッチ	50 μm × 50 μm
ピクセル数	400
開口率	61.5 %
推奨動作電圧	70 ± 10 V
増倍率	7.5 × 10 <sup>5</sup>
最大感度波長	440 nm
最大検出効率	50 %

表 2.2: CFT に使用しているシンチレーションファイバー Kuraray SCSF-78M の仕様

ファイバー径	0.75 mm
ファイバー形状	円形、マルチクラッド
減衰時間	2.8 ns
最大発光波長	450 nm

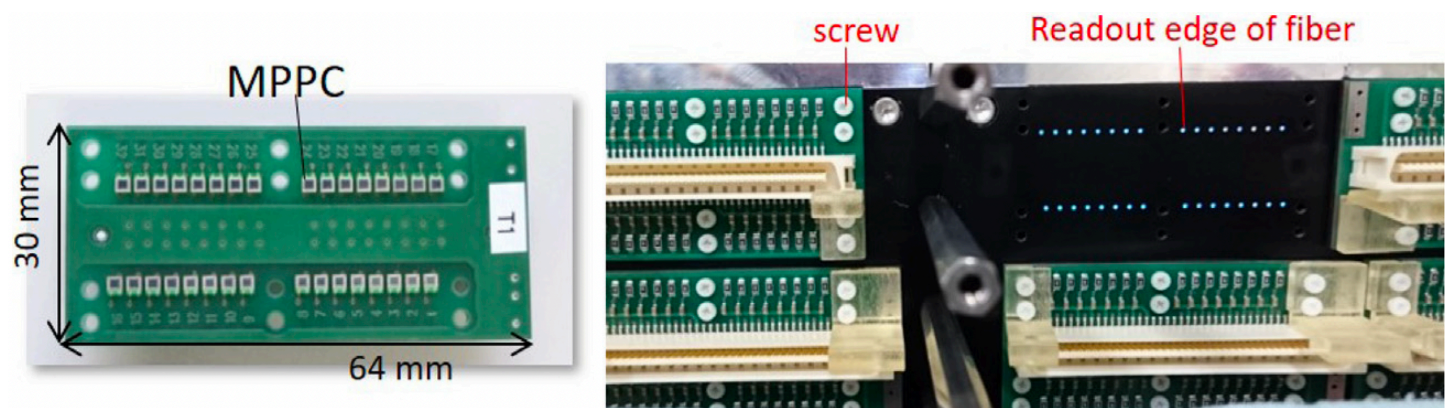


図 2.1: CFT で使用する MPPC 基板の写真 (左)。1 mm × 1 mm の MPPC が 32 個配置されている。読み出し面にネジで固定することでファイバーの端面と MPPC が密着するようになっている (右)。 [12]

## 2.2 現行の MPPC 読み出し回路 (VME-EASIROC)

本節では、現在 CFT や PiID カウンターの読み出しに使用されている、MPPC 読み出し専用の ASIC である EASIROC と、それを 2 枚搭載した 64ch の MPPC 読み出しモジュールである VME-EASIROC ボードについて述べる。

## 2.2.1 EASIROC

EASIROC は、フランスの OMEGA/IN2P3 によって開発された MPPC 読み出しのための ASIC であり、1 チップあたり 32ch の MPPC を読み出すことができる。EASIROC の 1 チャンネルに対する回路のブロックダイアグラムを図 2.2 に示す。

MPPC から入力された信号は、ゲインの異なる 2 系統の回路 (HighGain、LowGain) によって整形・増幅が行われ、外部から入力された Hold 信号のタイミングでその波高情報が保持されそれぞれ出力される。また、HighGain 系統には時間情報取得のために時定数の短い Shaper と Discriminator が存在しており、そのデジタル出力を合わせた 3 種類の信号が EASIROC から出力される。MPPC の信号入力部には 8bit の DAC が接続されており、チャンネルごとに MPPC のゲインを微調整することができるようになっている。以下に、ブロックダイアグラムの各部分について、MPPC 信号の入力部 (図 2.2 左側) から順に説明する。

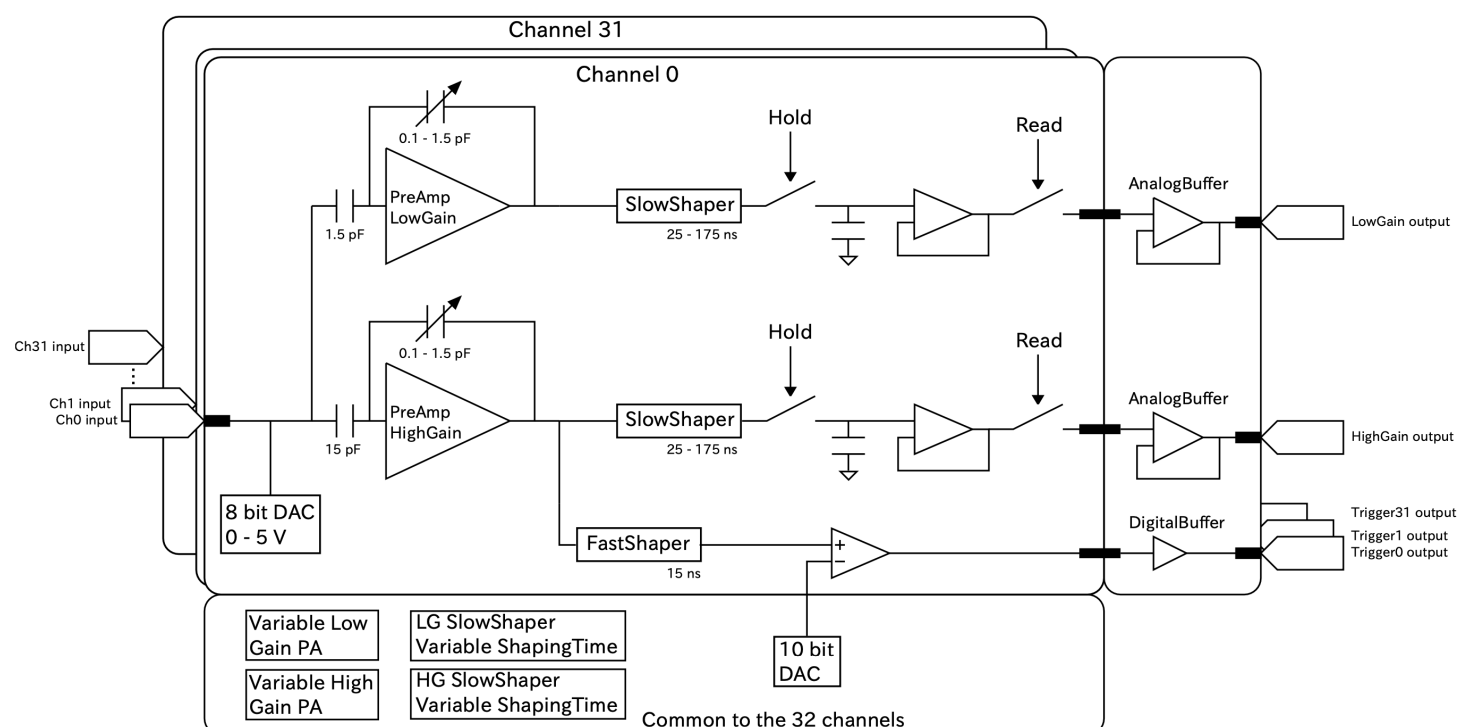


図 2.2: EASIROC のブロックダイアグラム。MPPC から入力された信号は、ゲインの異なる 2 系統の回路 (HighGain、LowGain) によって整形・増幅が行われ、外部から入力された Hold 信号のタイミングでの波高情報が出力される。また、HighGain 系統には時間情報取得のために時定数の短い Shaper と Discriminator が存在しており、そのデジタル出力を含めた 3 種類の信号が EASIROC から出力される。MPPC からの信号入力部に接続されている 8bit の DAC を使用することで、MPPC のゲインを微調整することができる。[13]

### • InputDAC

Input DAC は、MPPC 信号の入力部に接続されている 8 bit、5 V の DAC である。EASIROC は正極性の信号入力に対応する回路であるため、Input DAC は図 2.3 のように MPPC に対して順バイアスがかかる役割を持つ。Input DAC を調節することで、外部電源から複数の MPPC に対して同じ電圧が印加されている

場合でも、MPPC のゲインを個別に調整することができる。

ここで、実際に MPPC に印加されるバイアス電圧  $V_{OP}$  は、外部電源による印加電圧  $V_{Ext.}$  と Input DAC を用いて次のように表すことができる。

$$V_{OP} = V_{Ext.} - 0.02 \cdot (\text{Input DAC}) \text{ [V]} \quad (2.1)$$

なお、0.02 は DAC Slope と呼ばれる Input DAC を 1ch 変えた時の変化電圧のことであり、20 mV/ch である。

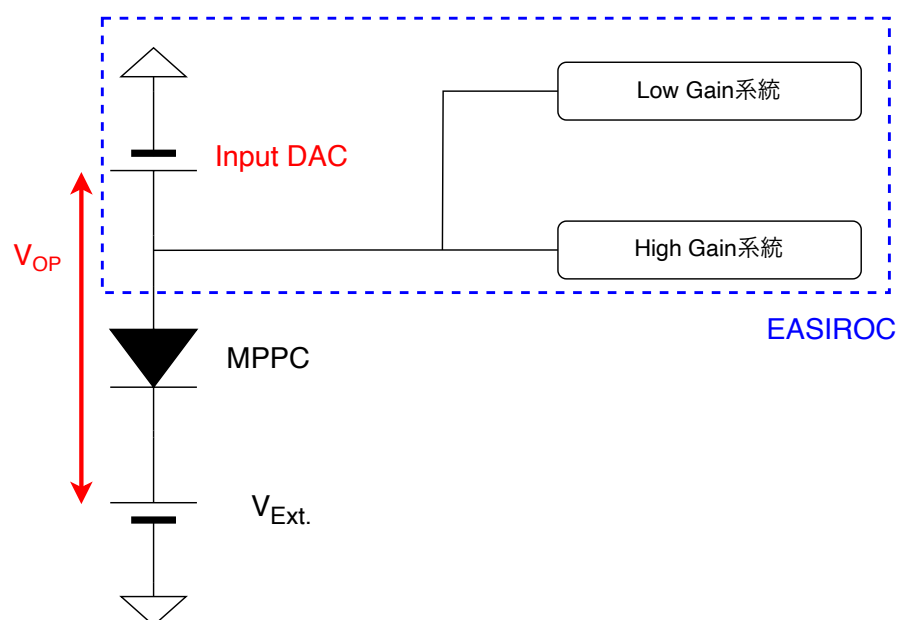


図 2.3: Input DAC を用いた MPPC のバイアス調節回路。Input DAC を使用することで、MPPC の実効的なバイアス電圧  $V_{OP}$  をチャンネルごとに調節することができる。

#### ● PreAmp

EASIROC には、PreAmp のゲインが異なる 2 つの回路系統 (HighGain、LowGain) が存在している。PreAmp のゲインは HighGain 側が 10 から 150、LowGain 側が 1 から 15 となっており、それぞれ 15 段階で調節することができる。

#### ● Slow Shaper

Slow Shaper は、PreAmp によって増幅された信号の整形を行う。その時定数は可変であり、25 ns から 175 ns まで 25 ns 刻みで変えることができる。Slow Shaper の後ろには、Hold 信号が入力されたタイミングでの電圧を維持する回路が存在しており、ここで保持された電圧が HighGain output および LowGain output として出力される。Hold 信号は、アナログ信号の波高が最大となるタイミングで入力する必要がある、このタイミングがずれていると正確な波高測定ができなくなってしまう。実際の運用においては、実験のトリガーから作られる Hold 信号のタイミングに合うように Shaping time を長くする必要がある。Shaping time を長くすると波高が下がるため、S/N の面から望ましくないが、現在は最も時定数の大きい 175 ns で運用している。

#### ● Hold

Slow Shaper の後段には、Hold 信号が入力されたタイミングでの電圧を維持する回路が配置されている。ここで保持された電圧が HighGain output および LowGain output として出力され、ADC 情報として使用



されることになる。したがって、Hold 信号はアナログ信号の波高が最大となるタイミングで入力される必要があり、このタイミングがずれていると正確な波高測定が行えなくなってしまう。図 2.4 に Hold 信号によるピーク Hold の典型的な例を示す。

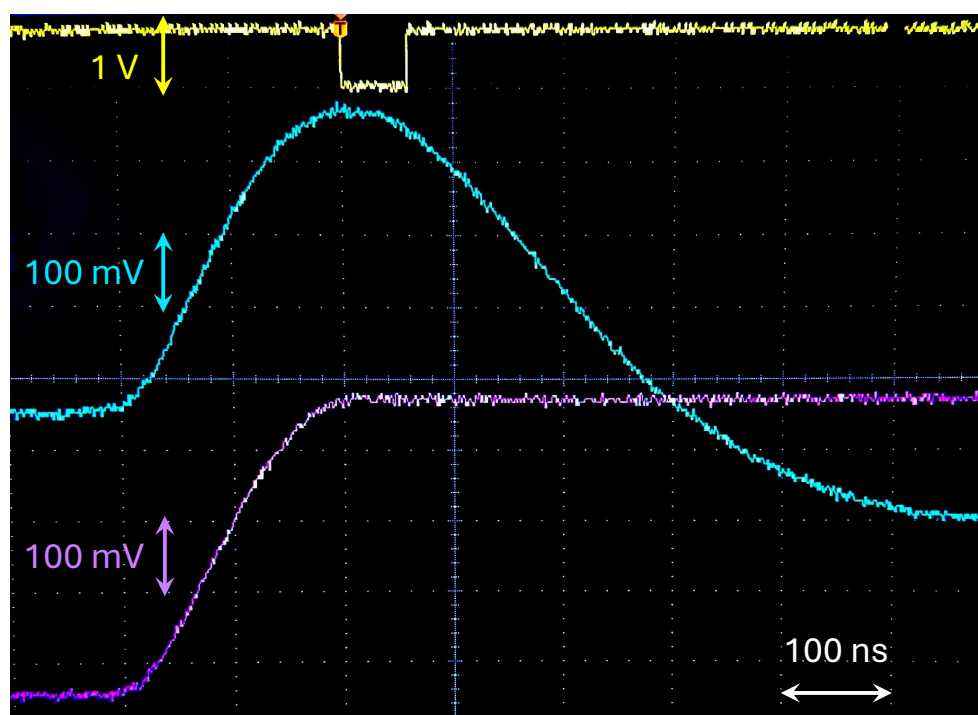


図 2.4: Hold 信号によるピーク Hold の例。黄色が Hold 信号、青色が Slow Shaper 直後のアナログ信号、紫色が HighGain output である。適切なタイミングで入力された Hold 信号により、アナログ信号の最大波高が保持されていることがわかる。

### ● Fast Shaper

HighGain 側の PreAmp で増幅されたアナログ信号は、Slow Shaper だけではなく、波高弁別を行うための回路系統にも分配される。Fast Shaper はこの系統に設置されている Shaper であり、時定数が 15 ns で固定である。Fast Shaper の後段には Discriminator が接続されており、このデジタル出力が TDC 情報として使用される。なお、Discriminator の Threshold 電圧  $V_{th}$  はチップ内の全チャンネル (32ch) で共通である。

ここまで述べてきた、EASIROC チップを構成する主な回路パーツの概要について表 2.3 にまとめる。Fast Shaper の時定数は 15 ns で固定されているが、それ以外のパラメータである

- Input DAC の設定値
- PreAmp のゲイン
- Slow Shaper の時定数
- Discriminator の  $V_{th}$

は、全て Slow Control によって書き換えることができる。そのうち、Input DAC はチャンネルごとに個別に設定することができる。

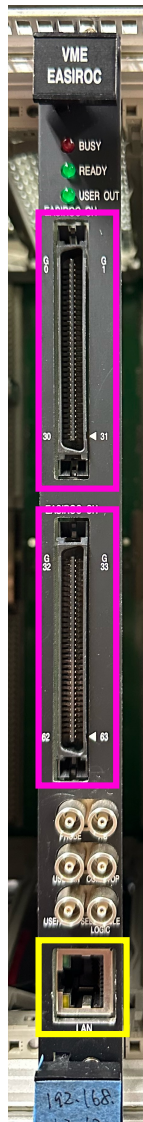
表 2.3: EASIROC の主な回路パーツの概要

回路パーツ		役割	設定可能範囲	設定ステップ	個別設定 or 32ch 共通
Input DAC		バイアス調整	0 - 5 V	20 mV	個別設定
PreAmp	High Gain	信号増幅	10 - 150	10	32ch 共通
	Low Gain		1 - 15	1	32ch 共通
Slow Shaper	High Gain	信号整形	25 - 175 ns	25 ns	32ch 共通
	Low Gain		25 - 175 ns	25 ns	32ch 共通
Fast Shaper		信号整形	15 ns (固定)	-	-
Discriminator $V_{th}$		波高弁別	1.1 - 2.4 V	1.3 mV	32ch 共通

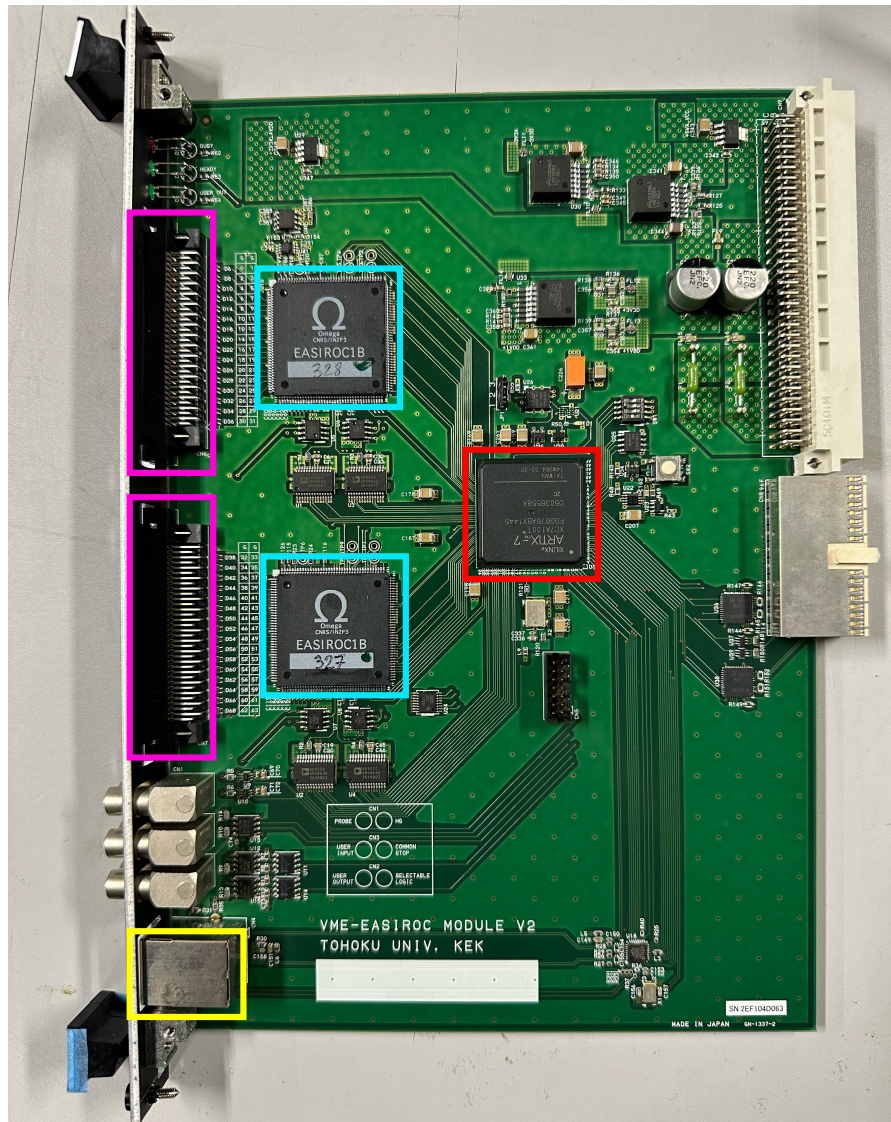
## 2.2.2 VME-EASIROC ボード

VME-EASIROC ボードは、J-PARC での  $\Sigma p$  散乱実験の向けて東北大学で開発された多チャンネル MPPC のための読み出しボードである。2 枚の EASIROC チップに加えて、データ処理を行うための FPGA やデータ通信用の Ethernet ポート、信号入出力用の NIM I/Oなどを搭載しており、64ch の MPPC を読み出すことができる汎用的なモジュールになっている。ボードの写真を図 2.5 に示す。





(a) フロントパネル



(b) 回路部 (側面部分)

図 2.5: VME-EASIROC ボードの写真。MPPC 信号の入力部をピンクで、EASIROC チップを水色で、FPGA を赤で、Ethernet ポートを黄色で囲んでいる。

フロントパネルから 32ch ずつ入力された MPPC からの信号は、EASIROC チップによって整形増幅および波高弁別が行われ、

- LowGain output
- HighGain output
- Discriminator output

の 3 種類の信号がチャンネルごとに出力される。デジタル出力である Discriminator output は、下流に設置された FPGA(Artix7) に直接接続されており、FPGA 内に実装されている depth が 16bits/event、LSB が 1 ns の MultiHit-TDC で処理される。一方、アナログ出力である LowGain output および HighGain output はそれぞれ A/D コンバーターによってデジタル化された後、FPGA に入力されることで波高検出型の ADC として動作する。こうして処理された ADC および TDC 情報は、Event Header や Event Number、Spill Number 等の情報を含む 1 つのイベントデータとしてまとめられ、SiTCP を用いて PC に送られる。

### 2.2.3 VME-EASIROC ボードの持つ課題

VME-EASIROC の 1 番の課題として、トリガーレイテンシーの短さが挙げられる。2.2.1 で述べたように、EASIROC では MPPC のアナログ信号がピークとなるタイミングで Hold 信号を入力しないと正しい波高測定が行うことができない。Hold 信号は実験のトリガーによって作られるが、トリガーは複数の検出器の信号を組み合わせて作られるため、その生成には時間がかかる。実際、SPring-8 での HYPS 実験では、約 300 ns ほどの時間がかかっている。しかし、EASIROC 自身のトリガーレイテンシーは 175 ns 程度しかないため、現在は 20 m のケーブルを用いたアナログディレイを使用することで Hold のタイミングが間に合うようにしている。これらの長いケーブルの使用と長い Shaping time は波高測定の S/N を悪化させる原因となっている。

他にも、高レートなどによって入力される電荷が大きくなった時に、恐らく Input DAC が動作しなくなることで信号が出力されなくなってしまうという問題も見つかっている。このため、チャンネルあたりの信号入力は 500 kHz 以下にする必要がある。また、EASIROC の生産は既に終了しているため、現在 VME-EASIROC を新しく入手することはできない。さらに、後継機種である CITIROC も ADC の測定にはピーク Hold を用いるため、トリガーレイテンシーの問題を解決することはできない状況である。修理や交換が容易であったり、将来的に安定的に使用できる点を考慮すると、海外製ではなく国産の ASIC であることが望ましい。

## 2.3 次世代 MPPC 読み出し回路 RAYRAW

上で述べたような VME-EASIROC の持つ課題を解決すべく、国産の MPPC 読み出し ASIC およびそれを用いた汎用読み出しモジュールの開発プロジェクトが進行している。このプロジェクトは、高速かつ高効率な汎用データ収集系の開発を行う SPADI Alliance のタスクフォースとして立ち上げられており、回路の開発を主導する KEK E-sys グループの他、このモジュールの導入を検討している我々の実験グループや、京都大学 (T2K) などのコラボレーションとなっている。

本節では、現在開発が行われており、本研究で私が評価を行った YAENAMI ASIC および RAYRAW ボードについて、その機能や特徴について述べる。

### 2.3.1 YAENAMI ASIC

YAENAMI ASIC は、KEK E-sys グループによって開発された国産の MPPC 読み出しのための ASIC であり、1 チップで 8ch の MPPC を読み出すことができる。EASIROC の長所であった、

- 利得や時定数の可変性
- 個別のバイアス調整機能
- Slow Control による回路パラメーターの制御
- 個別のコンパレーター出力

といった点を継承しつつ、その構成や機能面の見直しを行った ASIC になっている。図 2.6 に YAENAMI のブロックダイアグラムを示す。

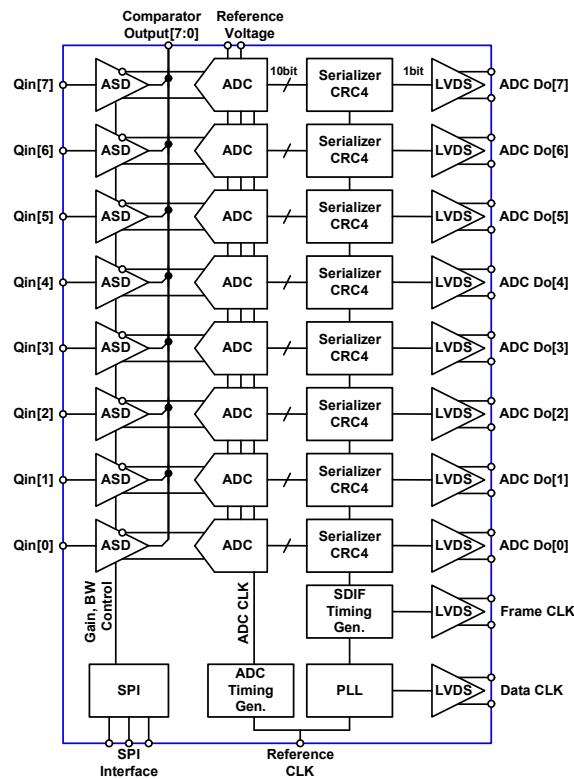


図 2.6: YAENAMI ASIC のブロックダイアグラム [14]

MPPC から YAENAMI に入力された信号は、ASD によって整形および増幅が行われ Analog output と Comparator output の 2 種類の信号に変換される。デジタル信号である Comparator output はチャンネルごとにそのまま出力される。一方、Analog output は後段に設置された 10 bit の ADC によってデジタル化された後、差動信号として出力される。この ADC のサンプリングレートは最大 100 MS/s であり、ASD によって整形増幅が行われた MPPC の信号を 10 ns のサンプリング間隔で波形として取得することができる。デジタル化は常にサンプリングを行っており、Hold 信号は必要なくなるため、VME-EASIROC の 1 番の弱点であったトリガーレイテンシーの短さを解決することができる。

次に、YAENAMI の各チャンネルの入力信号に対する ASD 部のダイアグラムを図 2.7 に示す。MPPC からの信号入力部には Slow Control で変更可能なバイアス調整用の DAC が接続されており、チャンネルごとに MPPC のゲインを調整することができるようになっている。EASIROC では入力信号の極性が正に固定されていたが、YAENAMI では正と負の両極性の入力を受けられるようになっている。MPPC から入力された信号は、初段の電荷増幅器 (VGA) によって増幅および電圧信号への変換が行われ、さらに後段の Shaper によって整形および増幅が行われる。EASIROC では、High Gain と Low Gain という 2 つの回路系統によって整形増幅が行われていたが、YAENAMI では 1 つの回路系統しか存在せず、Shaper の出力が ADC と TDC の系統に分配される構成になっている。ADC 系統に分配された信号は差動信号に変換され、デジタル化に入力される。Slow Control を介して ASIC 内の特定の 1ch を選ぶことで、そのチャンネルの整形増幅後の信号の様子をプローブを用いてモニターできるようになっている。TDC 系統には Comparator が設置されており、波高弁別されたデジタル信号が出力される。EASIROC と同様、VGA や Shaper のゲインや時定数、Comparator の閾値電圧は Slow Control を介して変更することができるようになっている。

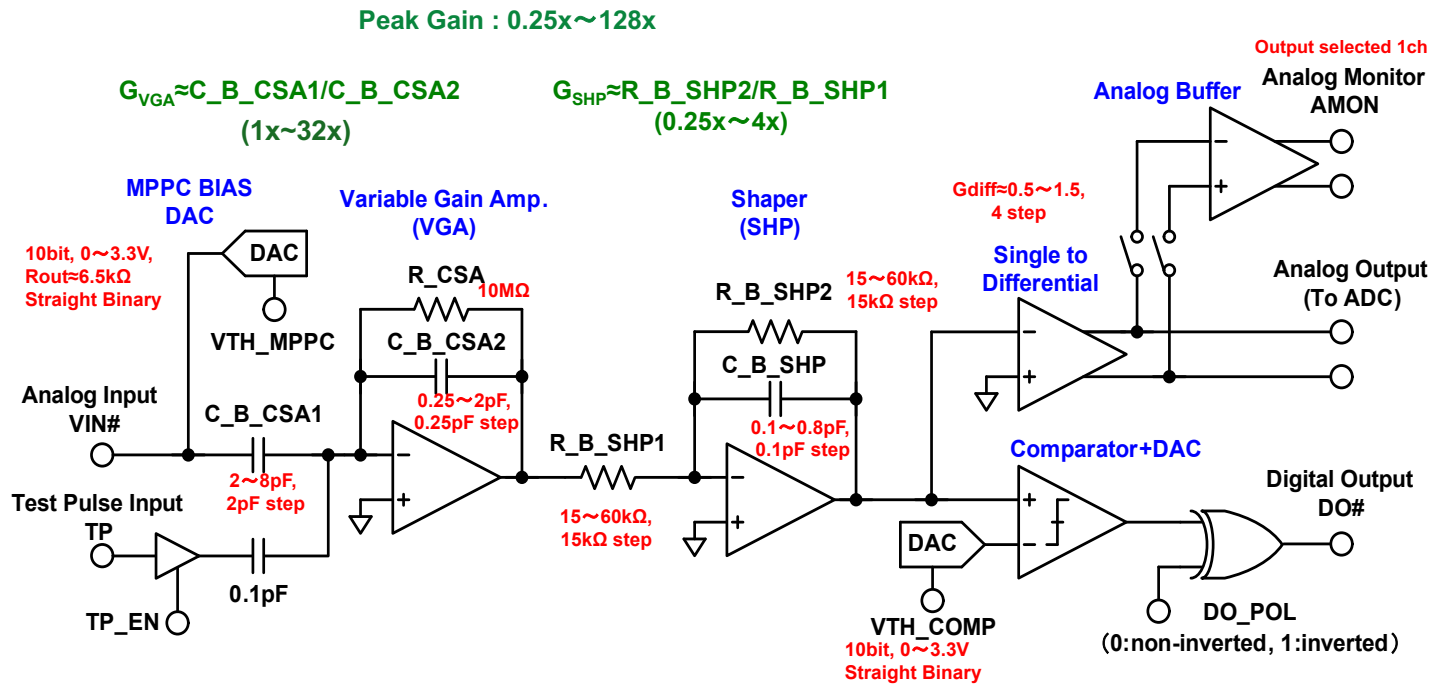


図 2.7: YAENAMI ASIC の ASD 部の構成 [14]

### ● MPPC BIAS DAC

MPPC からの信号入力部に接続された 10 bit の DAC であり、EASIROC と同様この値を調整することで MPPC に印加されるバイアス電圧を個別に調節することができる。LSB は約 3.2 mV であり、DAC の値は Slow Control を介して変更可能である。図 2.8 に、テスターを用いて測定した結果を示す。

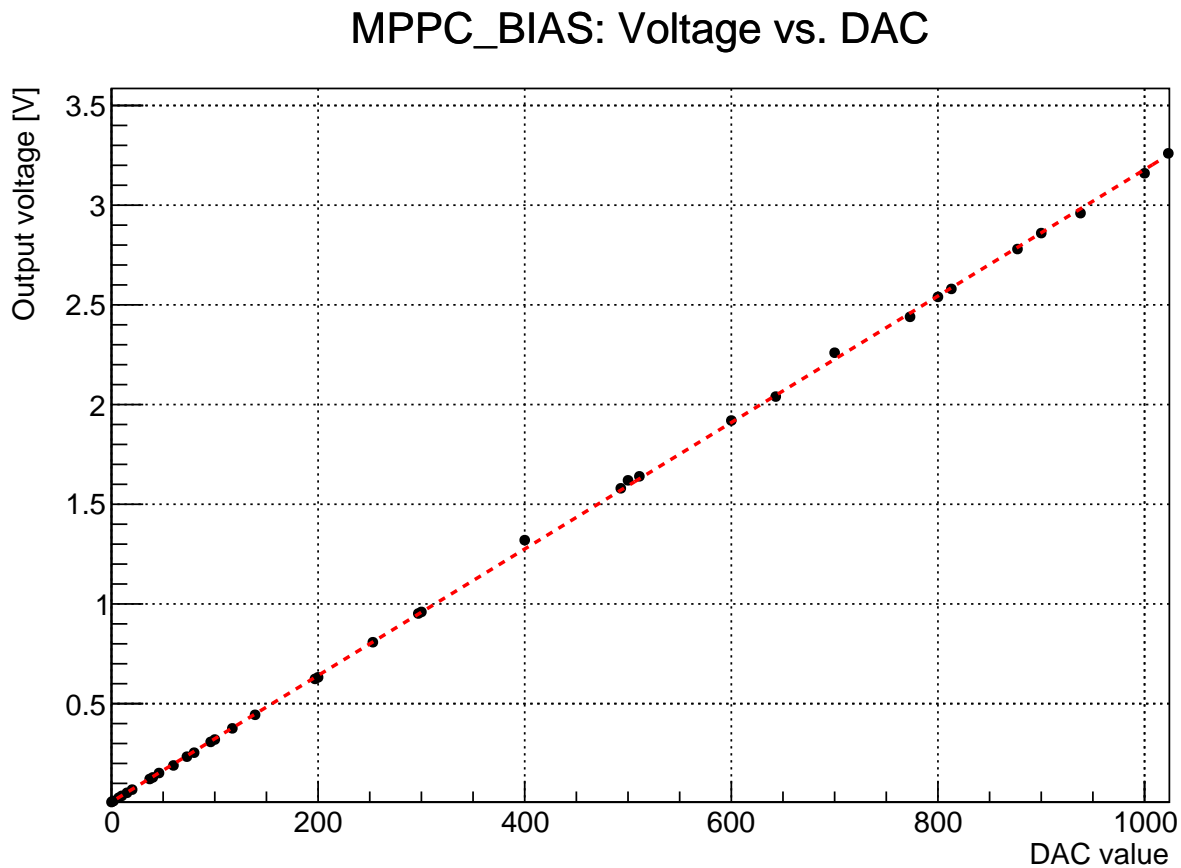


図 2.8: MPPC BIAS DAC の設定値と出力電圧の関係。基板にテスターを当てて測定した。



- **Variable Gain Amplifier(VGA)**

YAENAMI に入力された信号は、ASD の初段に設置されている電荷増幅器 VGA によって、増幅および電圧信号への変換が行われる。VGA には 2 つのコンデンサー (C\_B\_CSA1、C\_B\_CSA2) と 1 つの抵抗 (R\_CSA) が接続されており、そのうちコンデンサーについてはその接続数を Slow Control を介して変更することができる。ここで、C\_B\_CSA1 の静電容量を  $C_1^{VGA}$ 、C\_B\_CSA2 の静電容量を  $C_2^{VGA}$  とすると、VGA の増幅率  $G_{VGA}$  は

$$G_{VGA} = \frac{C_1^{VGA}}{C_2^{VGA}} \quad (2.2)$$

で表されるため、コンデンサーの接続数を調整することで、増幅率を任意の値に設定することができる。VGA で設定可能なゲインは  $G_{VGA} = 1-32$  である。

- **Shaper**

VGA によって増幅された信号、後段に設置された Shaper によってさらに整形および増幅が行われる。Shaper には、2 つの抵抗 (R\_B\_SHP1、R\_B\_SHP2) およびコンデンサー (C\_B\_SHP) が接続されており、VGA と同様にこれらの接続数は Slow Control を介して変更可能である。ここで、R\_B\_SHP1 の抵抗値を  $R_1^{SHP}$ 、R\_B\_SHP2 の抵抗値を  $R_2^{SHP}$ 、C\_B\_SHP の静電容量を  $C_1^{SHP}$  とすると、SHP の増幅率  $G_{SHP}$  と時定数  $\tau_{SHP}$  はそれぞれ以下のように表される。

$$G_{SHP} = \frac{R_2^{SHP}}{R_1^{SHP}} \quad (2.3)$$

$$\tau_{SHP} = \frac{C_1^{SHP} \times R_1^{SHP} \times R_2^{SHP}}{R_1^{SHP} + R_2^{SHP}} \quad (2.4)$$

したがって、抵抗とコンデンサーの接続数を調整することで、時定数および増幅率を任意の値に設定することができる。Shaper で設定可能なゲインは  $G_{SHP} = 0.25-4$ 、時定数は  $\tau_{SHP} = 0.75-24$  ns である。ただし、 $G_{SHP}$  は  $C_1^{SHP}$  の影響を受けるため、実際にはこれを下回ることになる。

VGA のゲインと組み合わせることで、YAENAMI 全体のゲインは  $G_{YAENAMI} = 0.25-128$  となる。表 2.4 に、YAENAMI のゲインおよび時定数をまとめる。

表 2.4: YAENAMI のゲインおよび整形時定数のまとめ

	ゲイン	整形時定数 [ns]
VGA	1 - 32	-
Shaper	0.25 - 4	0.75 - 24
YAENAMI	0.25 - 128	0.75 - 24

- **Comparator**

VGA と Shaper によって整形増幅が行われた信号は、Comparator によって波高弁別が行われる。Comparator の閾値は Slow Control によって変更可能であり、LSB は約 3.3 mV である。また、Comparator はその極性も Slow Control によって変更可能であるため、正と負の両極性の信号入力に対応している。

YAENAMI ASIC 単体の性能評価は、図 2.9 に示す評価基板を用いて行った。左側が ASIC の評価ボードであり、MPPC からの信号は  $\mu$ .FL コネクタ経由で同軸ケーブルを用いて入力される。また、右のボードに

は FPGA が搭載されており、取得したデータの転送、および YAENAMI のレジスタ制御はこの FPGA を介して行われる。PC との通信は右下の LAN ポートを通じて行う。

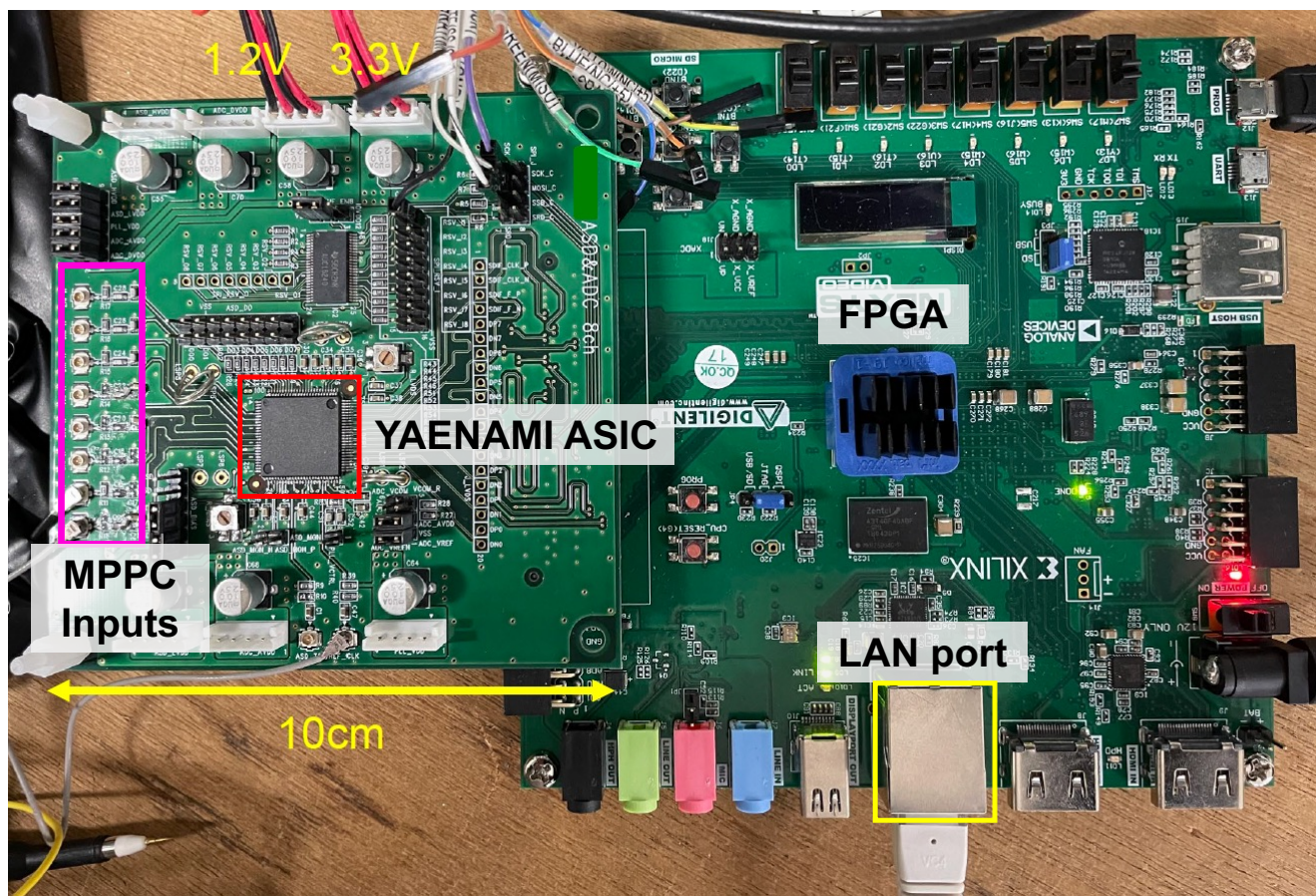


図 2.9: YAENAMI ASIC の評価基板。MPPC の信号は、画像左からマイクロ同軸ケーブルで入力される。YAENAMI の出力は FPGA に入力され、LAN ポートから PC に送られる。[14]

### 2.3.2 RAYRAW ボード

後に 3 章で述べるように、YAENAMI の単体の評価をテストボードで行った後に、より実用的な読み出し回路として、RAYRAW ボードが開発された。RAYRAW ボードは、YAENAMI を 4 枚搭載した 32ch の MPPC 読み出しモジュールである。4 枚の YAENAMI の他、ADC や TDC のデータ処理を行うための FPGA、トリガーや busy の入出力を行うための NIM I/O、MPPC バイアス用の電源等を搭載している。データ転送には VME-EASIROC と同様に SiTCP を使用するが、将来的には連続読み出し型のデータ収集にも対応できるように、10 GbE が利用可能な SFP+ ポートが使用されている。RAYRAW ボードの写真を図 2.10 に示す。



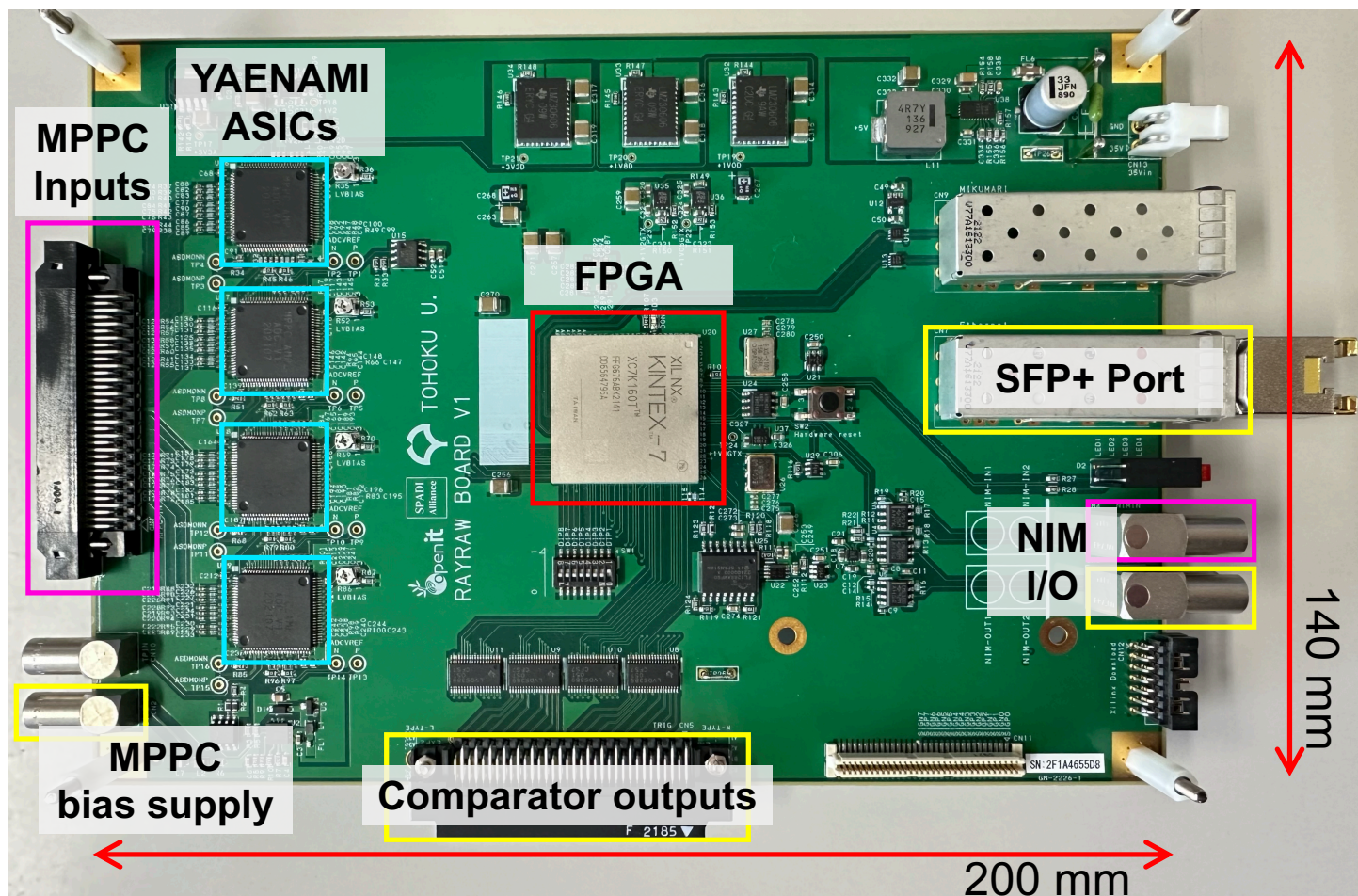


図 2.10: RAYRAW ボードの画像。入力部をピンク、出力部を黄色の枠で囲った。画像左から入力された 32ch の MPPC 信号は、8ch ずつ YAENAMI ASIC で整形増幅され ADC および TDC 情報として FPGA に入力される。FPGA 内では 32ch の ADC および TDC 情報が 1 つのイベントデータとしてまとめられた後、SiTCP を通じて PC に送信される。Trigger 入力や busy 出力は、画像右下の NIM I/O を通じて行われる。また、FPGA に入力された YAENAMI の Comparator output は LVDS 信号に変換されて画像中央下からも出力されている。MPPC バイアス用電源も搭載しており、画像左下から出力される。

図左から入力された MPPC の信号は、YAENAMI ASIC によって、8ch ずつ整形増幅およびデジタイズ処理が行われる。YAENAMI から出力された 2 種類の信号は、ボード中央にある FPGA に直接入力される。そのうち、ADC によってデジタイズされた Analog output は、FPGA 内の Firmware により、事前に指定された時間窓のデータのみが抽出され ADC 情報として処理される。この Firmware には、depth が 16hits/event、LSB が 0.83 ns の MultiHit-TDC が実装されており、Comparator output はこの MultiHit-TDC によって処理される。こうしてチャンネルごとに処理された ADC および TDC 情報は、32ch のデータが 1 つのイベントデータとしてまとめられ、SiTCP を用いて PC に送られる。

現在の Firmware では、J-PARC で用いられている Hadron DAQ に必要な EventTag や Spill Number 等の入力を受けることができないため、送信されるデータに含まれているイベント情報は、ローカルカウンター、ADC、TDC の 3 種類のみである。また、Comparator output は LVDS 信号に変換され図中央下から常に出力されており、トリガーに使用したり、TDC を外部のモジュールで取得することができるようになっている。

さらに、RAYRAW には 8bit の MPPC バイアス用の電源 (MAX1932[15]) も搭載されており、その値も Slow Control によって変更することができるようになっている。その出力電圧は 40 V–70 V であり、LSB は約 11 mV である。図 2.11 にテスターを用いて測定した結果を示す。DAC の設定値に応じて、出力電圧が線形に変化していることがわかる。

## Max1932: Voltage vs. DAC

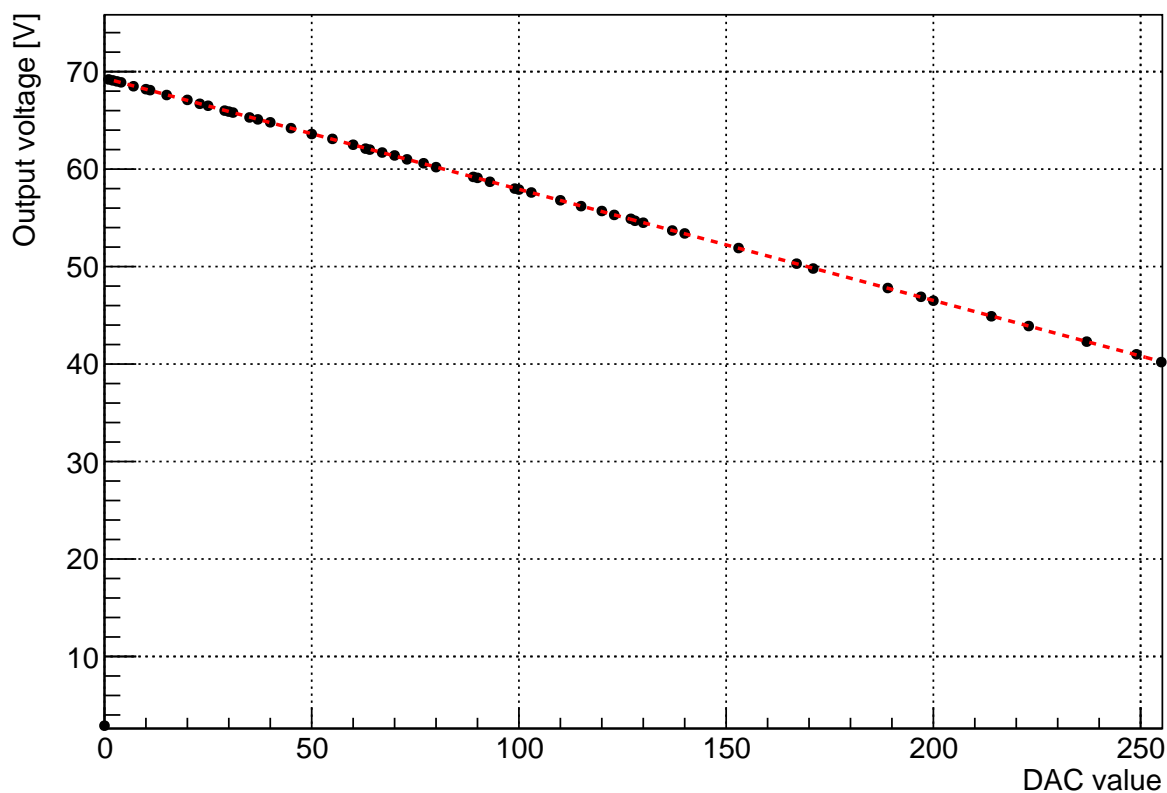


図 2.11: MPPC バイアス用電源の設定値と出力電圧。横軸が、SlowControl で設定した DAC の値である。テスターを用いて測定した。

本節の冒頭で述べたように、RAYRAW ボードの開発は SPADI-Alliance のタスクフォースとして進行中である。このコラボレーションの中で、YAENAMI ASIC の開発が KEK E-sys グループによって、また、FPGA の Firmware の開発が京都大学の T2K グループによって行われた。RAYRAW のデザインおよび設計は我々のグループが行っており、MPPC からの信号入力部には現在 VME-EASIROC モジュールで用いているものと同じコネクタを使用するなど、J-PARC での  $\Lambda p$  散乱実験への導入も見越したものになっている。

私は、このコラボレーションの中で、YAENAMI および RAYRAW の性能評価を担当した。RAYRAW の性能評価では、コラボレーターによって開発された Firmware を使用しており、実検出器の MPPC 信号を読み出すことで、その動作の確認とともに性能評価を行った。次章では、本研究を通して行ったこれらの性能評価について述べる。



## 第3章

# RAYRAW ボードの性能評価

本章では、本研究で私が行った YAENAMI ASIC および RAYRAW ボードの性能評価について述べる。

### 3.1 YAENAMI および RAYRAW ボードに求められる性能

MPPC は 1 光子の検出が可能な光検出器であり、その読み出し回路においてはいかに S/N が良い状態で 1 光子を識別できるかが非常に重要である。本研究ではまず、YAENAMI がこの要求を十分に満たすことができるかの評価を行った。一方で、CATCH 検出器群の CFT のシンチレーション光を読み出す場合は、フォトカウンティング能力の代わりに広いエネルギー測定範囲が求められる。 $\Lambda p$  散乱実験では、散乱粒子の CFT におけるエネルギー損失  $dE$  と、BGO カロリメータで測定したその粒子の全エネルギー  $E$  の相関を用いた  $\Delta E$  法を用いることで CATCH を通過した粒子 ( $\pi$  または陽子) の識別を行う。図 3.1 に示すように、 $\pi$  はほとんどが最小電離粒子 (MIP) で  $dE$  がほぼ一定であるのに対して、陽子が落とすエネルギーは大きく、特に低エネルギーの場合には MIP の 10 倍以上になるため、可能な限り広いエネルギー範囲を測定できることが求められる。さらに、粒子のエネルギーが大きくなるほど両者のエネルギー損失は近づくため、その状態でも  $\pi$  と陽子が識別できることが必要である。ここで、先行実験である J-PARC E40 実験で実際に取得されたデータでの  $dE$ - $E$  の相関を図 3.2 に示す。粒子の全エネルギー (横軸) が低い領域を見ると、CFT における陽子のエネルギー損失 (縦軸) は  $\pi$  の約 10 倍となっていることがわかる。

これらのことから、CFT の読み出しにおいて、RAYRAW には MIP 粒子を分離しながらその 10 倍以上のエネルギーを測定できることが要求される。本来であれば陽子ビームを用いたビーム試験を行うことが望ましいが、本研究では宇宙線を用いてその評価を行った。

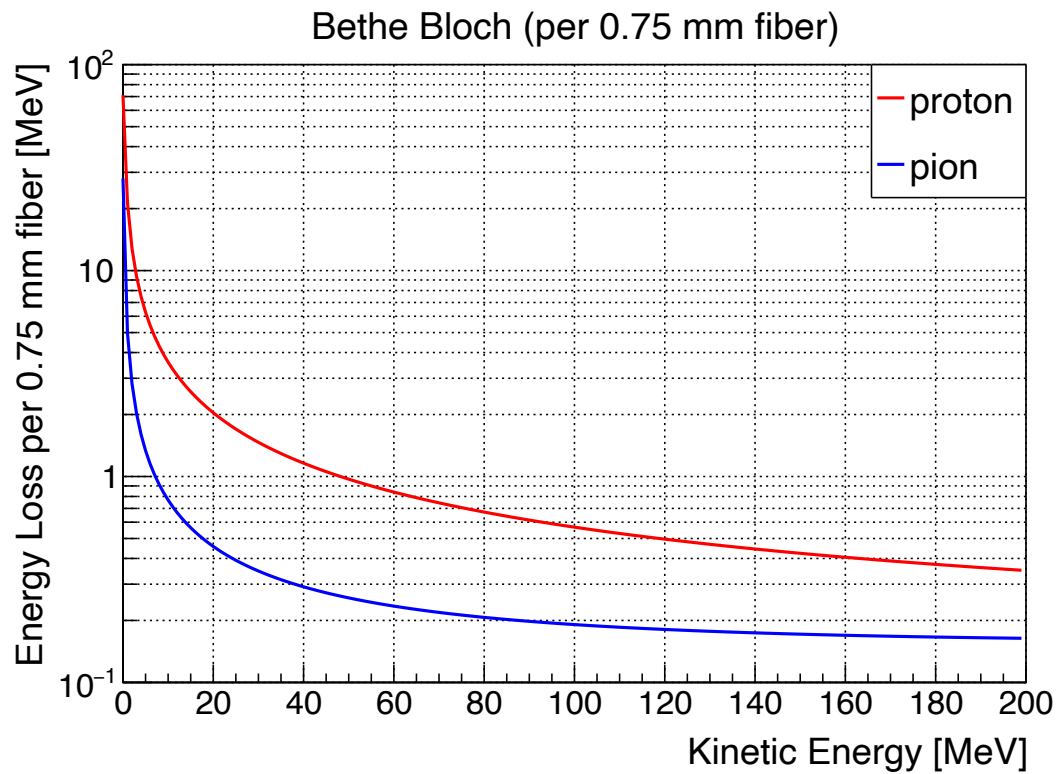


図 3.1: Bethe-Bloch の式で求めた、CFT のファイバーあたりのエネルギー損失と粒子のエネルギーの関係。赤色が陽子、青色が  $\pi$  である。

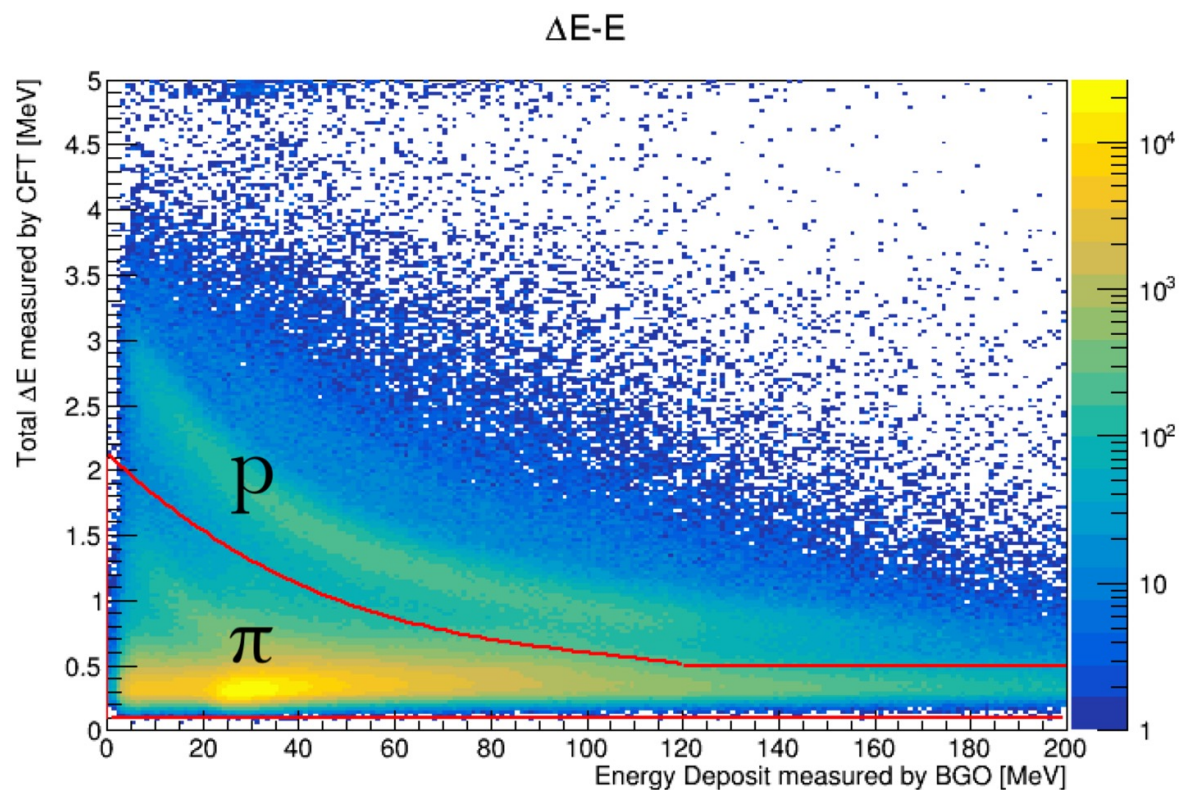


図 3.2: 先行実験で測定された、散乱粒子の CFT におけるエネルギー損失とその粒子のエネルギーの相関図。赤線で囲まれた領域が  $\pi$  である。[16]

また、 $\Lambda p$  散乱実験における CFT のファイバー 1 本あたりのレートは最大で 10 kHz 程度と予想されており、そのレートでは回路が安定的に動作していることが求められるため、その評価も行った。VME-EASIROC で

は、信号のレートが 500 kHz 以上となり回路への入力電荷が増えたときに信号が出力されないという問題が見つかっていたため、この問題が解決しているかも併せて評価した。

YAENAMI ASIC 単体の評価には、2.3.1 で述べた評価基板を使用した。この基板では、50 MHz のサンプリング周波数で波形情報を取得した。RAYRAW ボードの評価にあたっては、過去の研究で製作されていた CFT の試作機に MPPC を取り付け、その信号を読み出した。RAYRAW のサンプリング周波数は、75 MHz であった。

## 3.2 YAENAMI ASIC の 1 光子分離能力の評価

まず初めに、YAENAMI ASIC が、1 光子の測定に対して十分な性能を持っているかの評価を行った。

### 3.2.1 評価方法

評価時のセットアップを図 3.3 に示す。Clock Generator から出力される NIM 信号を TTL 信号に変換し、それを Attenuator で減衰させた信号で LED を光らせることで、MPPC に微小光を入力した。トリガーには、同じ Clock Generator から出力された NIM 信号を使用した。使用した MPPC は浜松ホトニクス社の S13360-1375PE であり、OverVoltage は 5.2V でオペレーションを行った。1 光子の検出を行えるよう、回路のゲインを高くして測定を行った。図 3.4 に YAENAMI で取得した典型的な MPPC の波形データを示す。サンプリングは 50 MHz で行った。正と負の両極性の電荷を読み出せるように、ベースラインはおおよそ ADC の中点になるように設定されている。

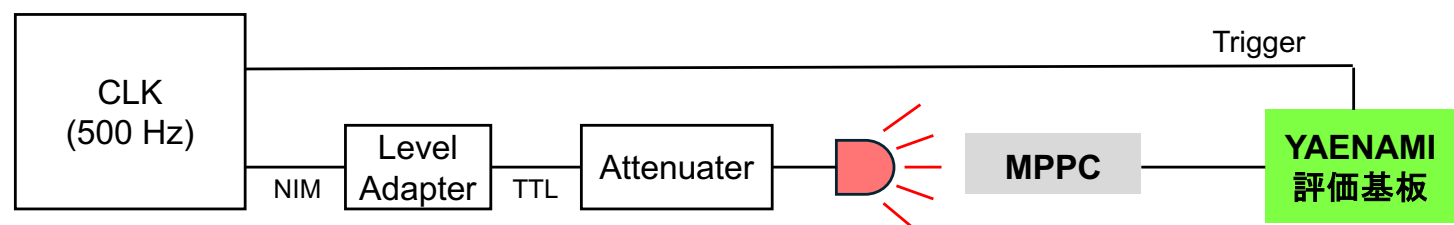


図 3.3: YAENAMI ASIC 評価時のセットアップ。Clock Generator から出力された NIM 信号を TTL 信号に変換し LED を光らせた。また、Clock Generator から出力される NIM 信号をトリガーに使用した。

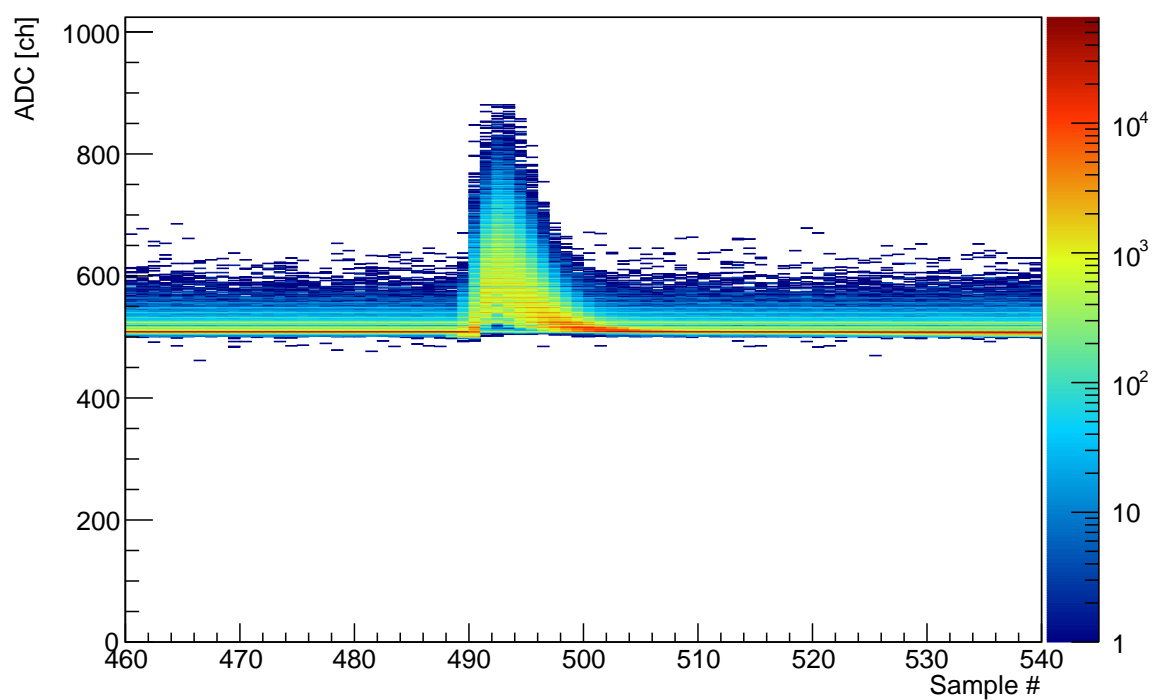


図 3.4: YANENAMI で取得した典型的な MPPC の波形データ。取得した波形を重ね書きしている。正と負の両極性の信号を受けられるように、ベースラインは ADC の中点である約 500ch になっている。

### 3.2.2 評価結果

図 3.5 に、取得した波形データおよび ADC を数個示す。なお、ADC の値は波形のピーク値ではなく、サンプリングされている各点の ADC の値を足し合わせたものを使用している。Shaping time を長くすることで、波形の立ち上がりが緩やかになっている。また、光子数に対応するピークがより綺麗に分離されていることがわかる。

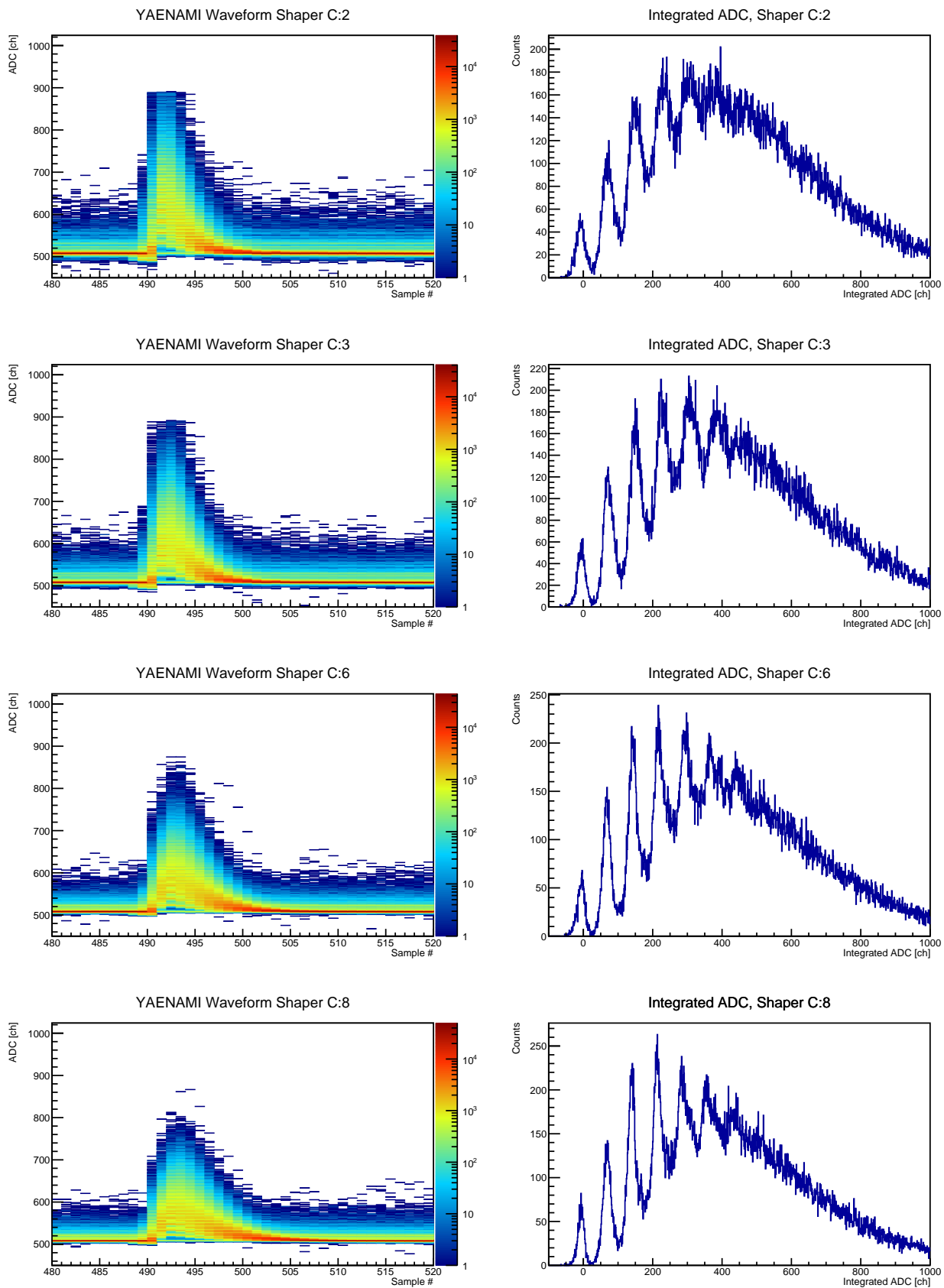


図 3.5: ShapingTime を変えた時の 1 光子分離能。Shaping Time を長くすることで、波形の変化が緩やかになり、ADC 分布の光子ピークがより分かれていることがわかる。

ここで、回路の持つ光子分離能を評価するため、1 光子分離能を以下のように定義する。

$$\text{1p.e. separation power} = \frac{\mu_{1\text{p.e.}} - \mu_{\text{pedestal}}}{\sigma_{\text{pedestal}}} \quad (3.1)$$

$\mu$  と  $\sigma$  は、ADC のヒストグラムにおいて、ペDESTAL と 1p.e. に対してガウス関数でフィッティングを行って得られたパラメーターであり、 $\mu_{\text{pedestal}}$  と  $\mu_{1\text{p.e.}}$  はそれぞれペDESTAL と 1p.e. の mean の値、 $\sigma_{\text{pedestal}}$

はペDESTALの $\sigma$ のことである。図 3.6 に、Shaping time を変化させていった時の 1 光子分離能を示す。Shaping time が長くなるにつれて 1 光子分離能、すなわち S/N が向上していることがわかる。この結果を受け、RAYRAW の性能評価では Shaper のコンデンサの接続数を最大である 8 として Shaping time を長くした。一方で、抵抗の接続数はどちらも 1 としゲインは 1 倍とした。これは、RAYRAW でエネルギー測定範囲の評価を行う際に、可能な限り測定可能範囲を広げたいからである。

### Shaping Time vs. 1p.e. separation power

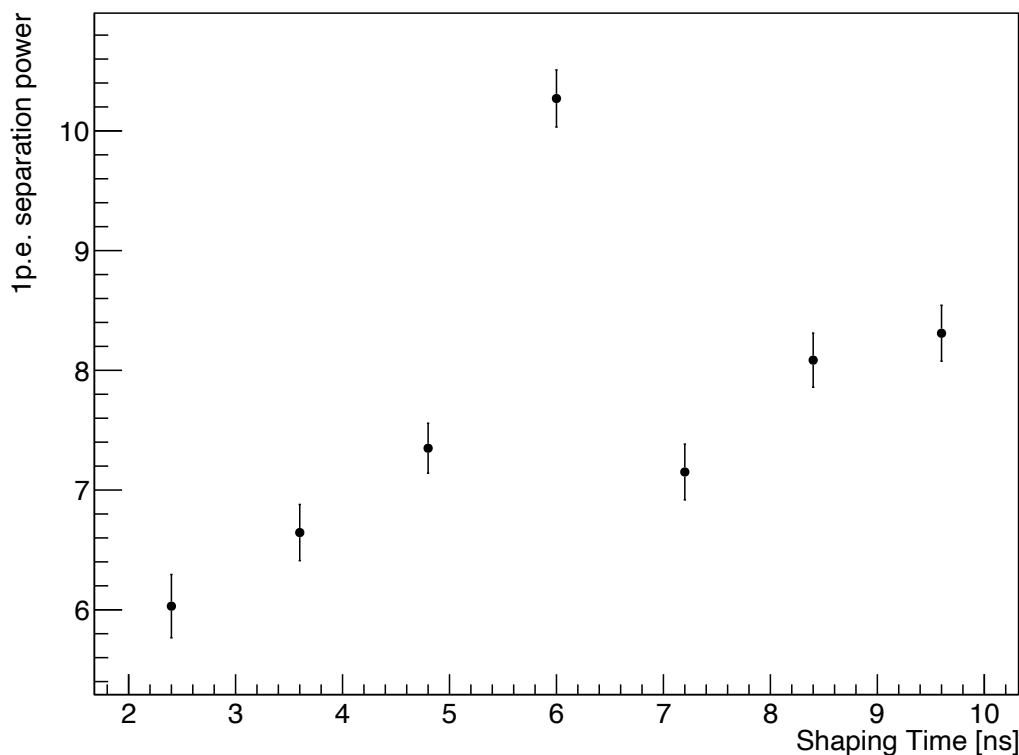


図 3.6: ShapingTime を変えた時の 1 光子分離能。Shaping Time が長くなるにつれて S/N が向上していることがわかる。

### 3.3 RAYRAW ボードの性能評価

前節では、評価基板を用いて YAENAMI ASIC 単体の基本性能の評価について述べた。本節では、YAE-NAMI ASIC を 4 枚搭載し、32ch の MPPC を読み出すことのできる RAYRAW ボードの性能評価について述べる。2.3 で述べたように、RAYRAW ボードは 4 枚の YAENAMI ASIC の他に、FPGA や NIM I/O、MPPC バイアス電源等を搭載しており、ビームテストでの評価を見据えた汎用読み出しボードとなっている。そのため、MPPC を検出器に接続しその応答を調べることで評価を行った。本研究で使用した検出器は、過去の研究で製作されていた CFT 試作機である。この試作機は  $\phi$  層と  $uv$  層が 1 層ずつ張られた 2 層構造になっており、本研究では  $\phi$  層のうちの 32ch を使用した。図 3.7 に CFT 試作機の写真を示す。MPPC は、ファイバー読み出し面である画像下部の黒い部分に接続した。MPPC は浜松ホトニクス社の S13360-1350PE を使用した。その仕様を表 3.1 に示す。本研究では、56.37 V でオペレーションを行った。



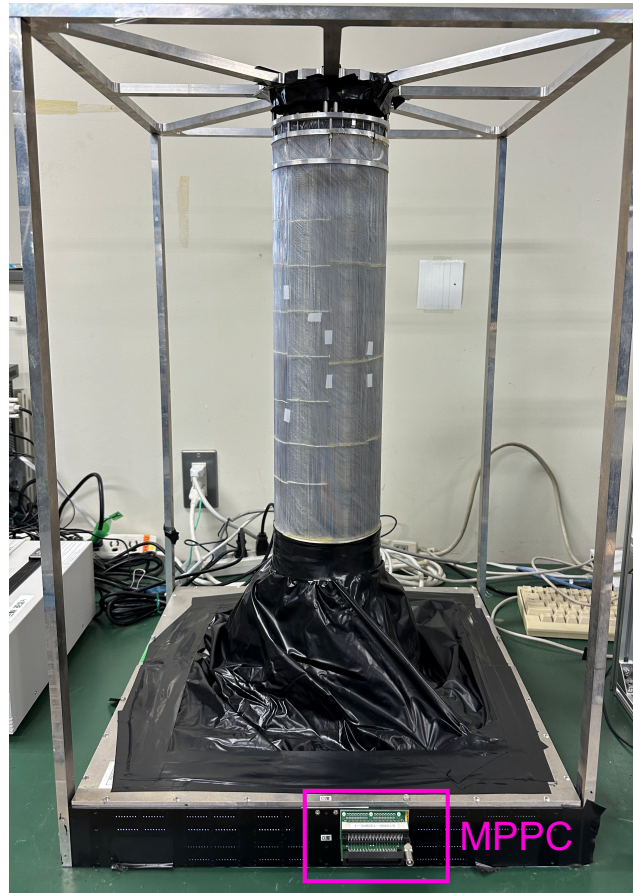


図 3.7: CFT 試作機の画像。図中央の白い部分がシンチレーションファイバーであり、その端面は図下部の黒い筐体部に固定されている。

表 3.1: RAYRAW の性能評価で使用した MPPC S13360-135PE の仕様

有効受光面サイズ	1.3 mm × 1.3 mm
ピクセルピッチ	50 μm
ピクセル数	667
開口率	74 %
推奨動作電圧	56 ± 5 V
増倍率	1.7 × 10 <sup>6</sup>
最大感度波長	450 nm
最大検出効率	40 %

### 3.3.1 宇宙線を用いたダイナミックレンジの評価

本章の冒頭で述べたように、CATCH では CFT でのエネルギー損失を利用して陽子と  $\pi$  の識別を行うため、MIP のピークを十分に分離しながら、それに対して最低で 10 倍以上のエネルギーを測定できることが要求される。本評価にあたっては陽子ビームを使用することが望ましいが、本研究では宇宙線を用いることでその評価を行った。評価時のセットアップを図 3.8 に示す。

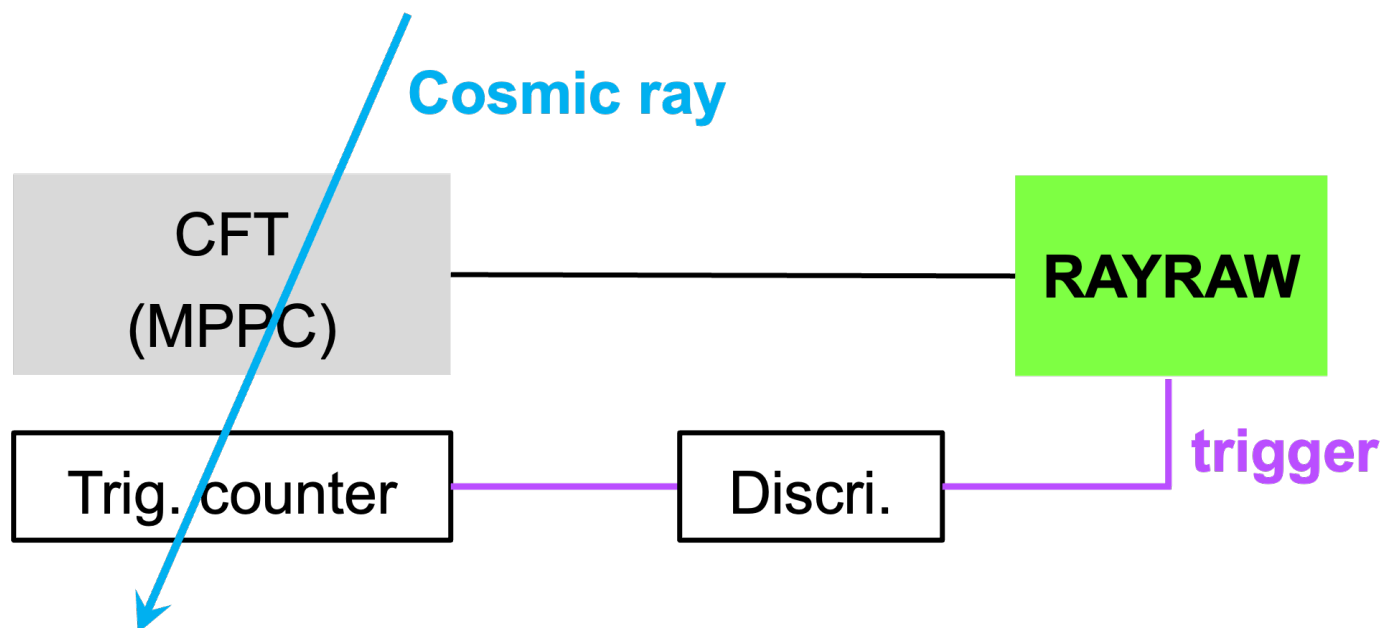


図 3.8: 宇宙線を用いたエネルギー測定可能範囲の評価におけるセットアップ。

本評価では、回路のゲイン設定を変えた複数の宇宙線データを取得し、それぞれの設定における MIP 粒子の分離能力とエネルギー測定可能範囲の評価を行った。先に述べたように、Shaper のゲインと Shaping time は固定し、VGA のゲインを調整することで回路全体のゲインを調整した。図 3.9 にそれぞれの設定における ADC の分布を示す。

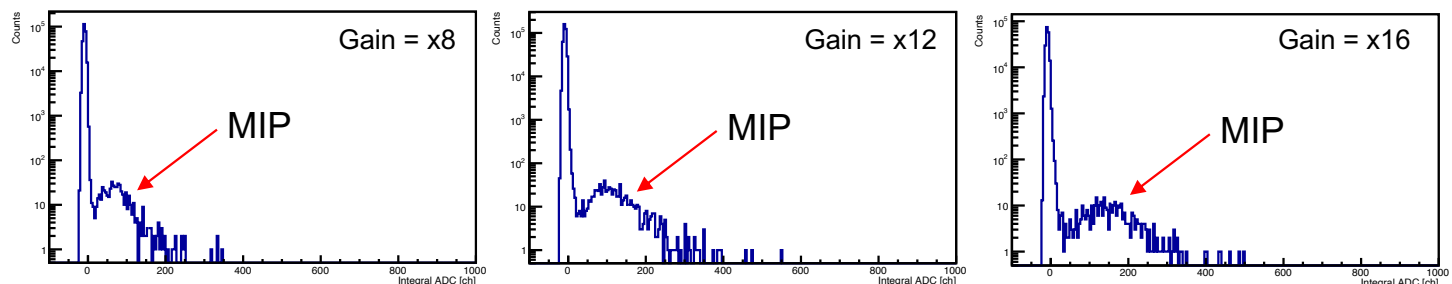


図 3.9: 回路のゲインを変化させた時の、ADC 分布。各波形の最大値を ADC として使用している。

ここで、RAYRAW が測定できるエネルギーを MIP のエネルギーに対して評価するために、ダイナミックレンジを以下のように定義した。

$$E_{\text{Max}} = \frac{\text{ADC}_{\text{Max}} - \text{ADC}_{\text{pedestal}}}{\text{ADC}_{\text{MIP}} - \text{ADC}_{\text{pedestal}}} \quad (3.2)$$

$\text{ADC}_{\text{pedestal}}$  はペDESTALの ADC におけるチャンネル、 $\text{ADC}_{\text{MIP}}$  は、3.9 に示した ADC 分布の MIP に対応するピークをガウス関数でフィットしたときに得られた mean の値である。また、 $\text{ADC}_{\text{Max}}$  は、RAYRAW の ADC における最大有効チャンネルを表している。YAENAMI の ADC は 10 bit であるが、前段のアンプが飽和してしまうためそのチャンネルをフルに使用することはできず、図 3.10 に示すように 910 ch 前後が最大となる。今回は、一律で 910 ch を用いた。この計算を用いて評価した、各ゲイン設定における RAYRAW のダイナミックレンジを図 3.11 に示す。



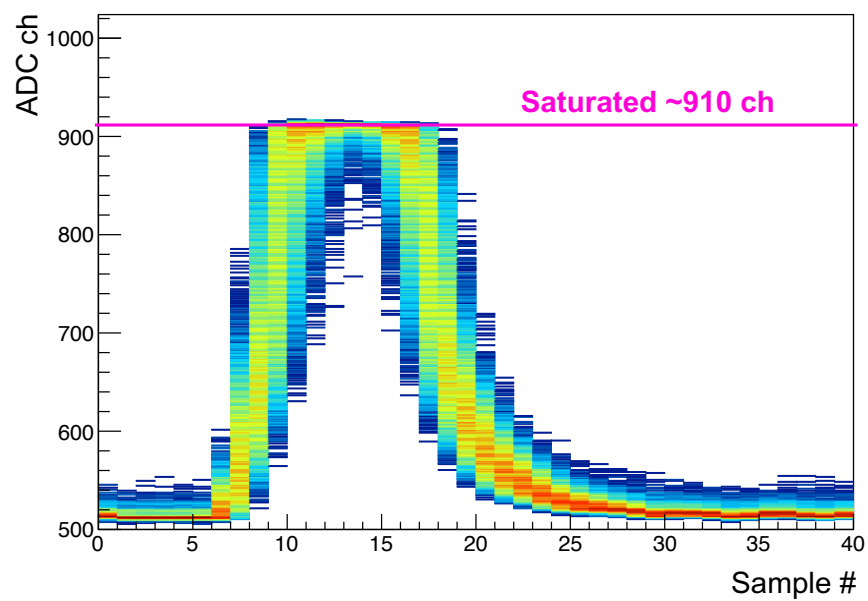


図 3.10: LED を大光量で光らせた時の波形の様子。910 チャンネル前後で ADC が飽和してしまっていることがわかる。

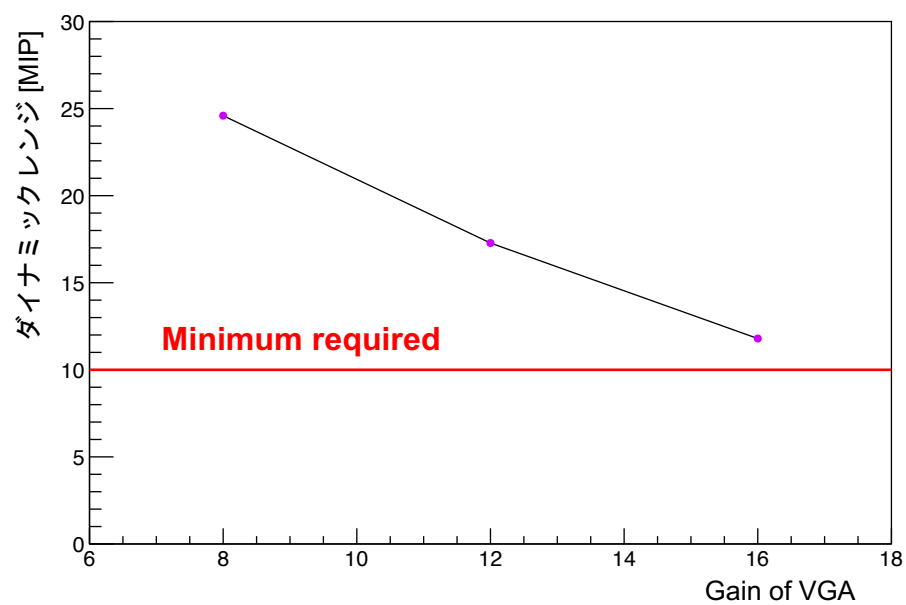


図 3.11: 回路のゲインを変化させたときの最大測定可能エネルギーの様子

回路のゲインを 16 倍にまで下げることで、MIP の 10 倍までのエネルギーを測定できることがわかった。さらに、そこからゲインを下げっていくことで MIP の約 25 倍までも測定できることがわかった。また、どの設定においても ADC の分布で MIP のピークがしっかりと識別できており、エネルギー測定の際は CFT を読み出す際の要求を十分に満たしていることがわかった。

### 3.3.2 高レート入力に対する回路の耐性の評価

$\Lambda_p$  散乱実験における CFT のファイバー 1 本あたりのレートは最高で 10 kHz 程度になると予想されており、このレートでの信号入力に対して回路が安定的に動作していることが求められる。CFT を通過する粒子の大半は最小電離粒子 (MIP) である  $\pi$  であるため、本評価では高レートの MIP に対する応答を調べ、回路の安定性を評価した。また、2.2 で述べたように、現行の読み出し回路では入力信号のレートが数 MHz 程度となり回路への入力電荷が増えたときに回路の応答が止まり、出力がベースラインに張り付くという問題が見つまっているため、入力信号のレートを 500 Hz から 5 MHz の間で段階的に変化させることで、この問題が解決しているかも併せて評価した。LED を光らせるレートは、500 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz、500 kHz、1 MHz、2 MHz、3 MHz、5 MHz の 9 段階で変化させた。評価時のセットアップを図 3.12 に示す。

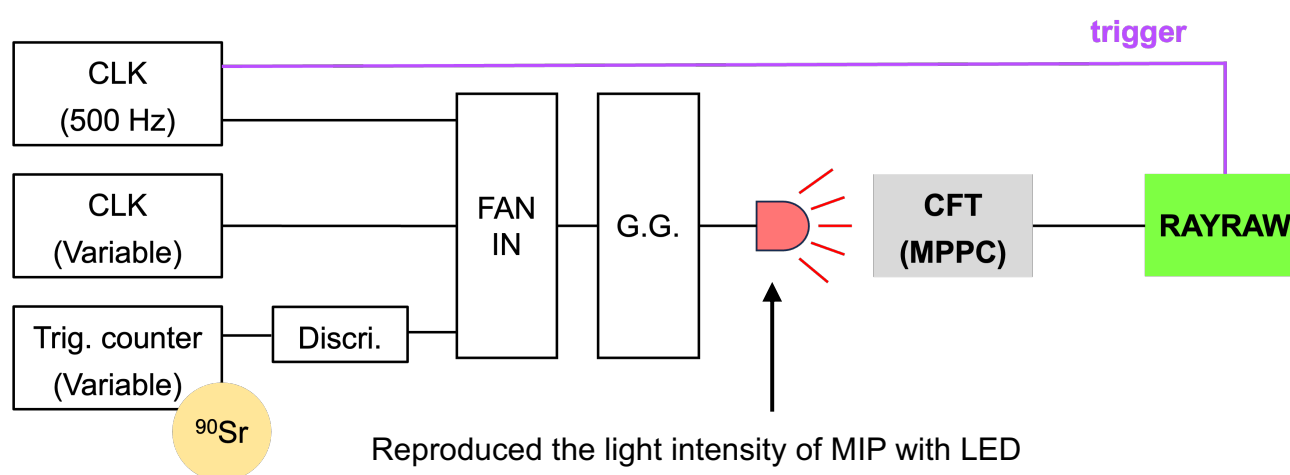


図 3.12: 高レート入力に対する耐性の評価におけるセットアップ。MIP の光量を再現するように調整した LED を、Clock Generator および  $\beta$  線源  $^{90}\text{Sr}$  を用いて作ったランダムパルスによって光らせ、高レート入力環境を擬似的に再現した。

本評価ではまず、宇宙線のデータを元に、MIP の光量を再現するよう LED の光量を調節した。この LED を Clock Generator および  $\beta$  線源  $^{90}\text{Sr}$  を用いて作ったランダムパルスで光らせることで、MIP 粒子が高レートで入力する環境を擬似的に再現し評価を行った。ここで、回路の応答効率を以下のように定義する。

$$\text{Efficiency} = 1 - \frac{N_{\text{pedestal}}}{N_{\text{total}}} \quad (3.3)$$

$N_{\text{total}}$  は取得した全イベント数、 $N_{\text{pedestal}}$  は取得したイベントのうち、LED が光っているタイミングでベースラインが出力されていたイベントの数である。図 3.12 に示したように、本評価でのセットアップでは、RAYRAW は 500 Hz のクロックトリガーでデータを取得しており、LED もこのクロックで必ず光るようになっている。今、LED の光量は十分に大きいため、取得する波形は図 3.13 に示すように、LED が光っているタイミングではベースラインが存在しないはずであるが、もし回路が高レート入力に耐えきれず応答を停止してしまった場合は、ベースラインが出力される。したがって、取得した全イベント数のうち LED が光っているタイミングでの波高値がベースライン、すなわちペデスタルであった割合を調べることで、回路の応答が停止していたかを知ることができる。LED を光らせるレートを変えていったときの回路の応答効率を図 3.14 に示す。

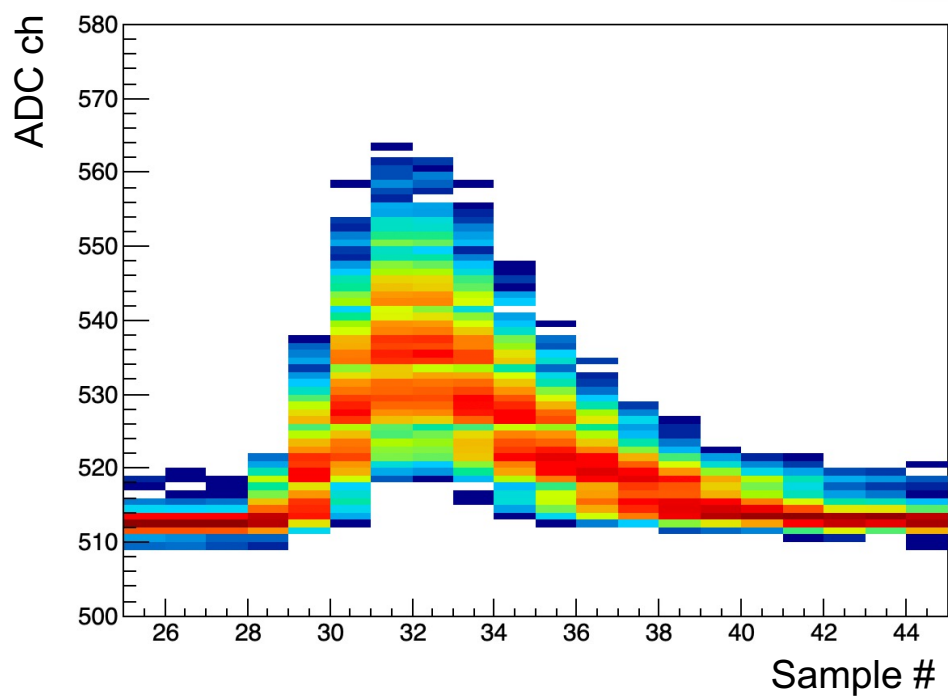


図 3.13: MIP の光量を再現するように調整した LED を 500 Hz で光らせた時の波形データ。MPPC に入力される光量が十分に大きいため、LED の光っているタイミングではペDESTALの信号は存在しない。

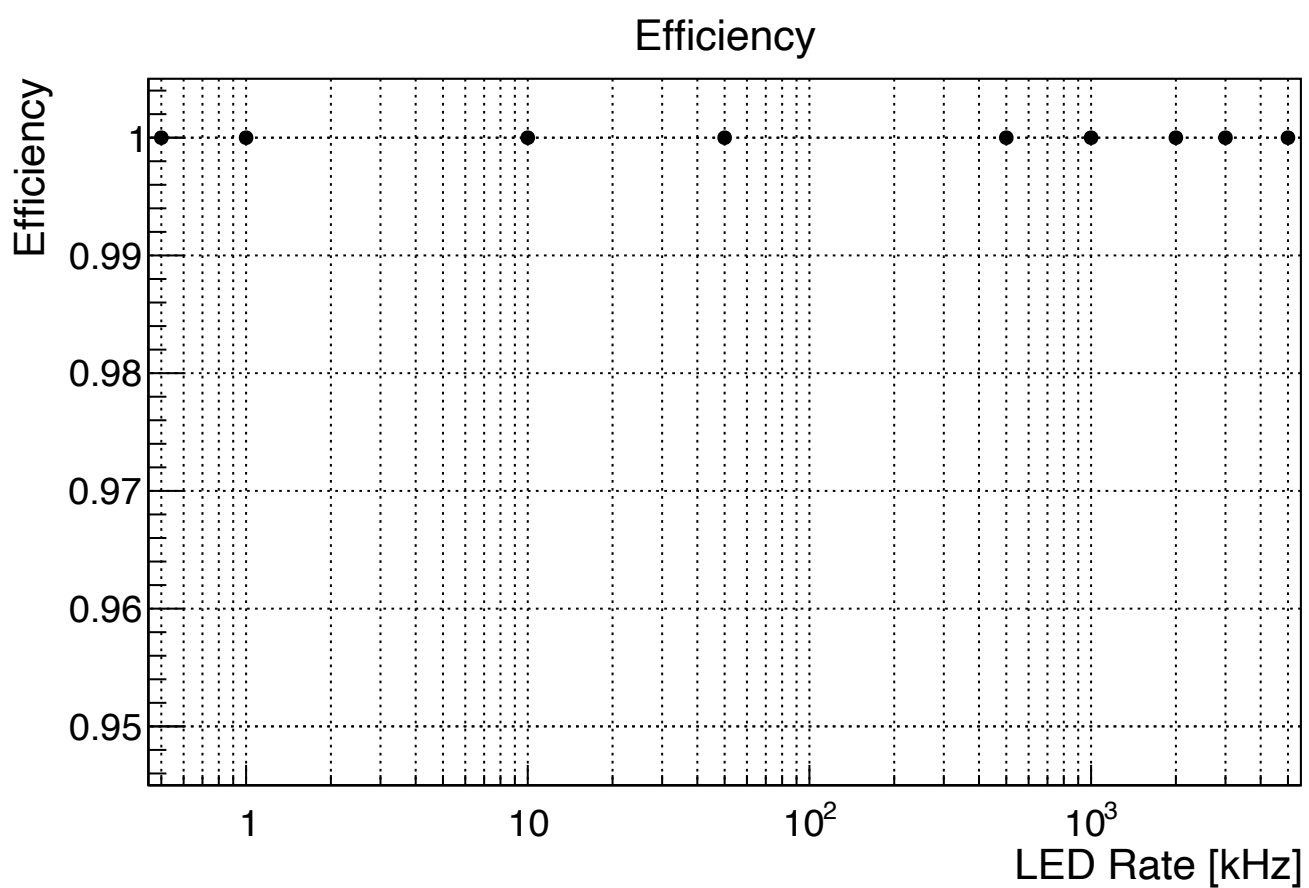


図 3.14: LED を光らせるレートを 500 Hz から 5 MHz まで変化させて行った時の回路の応答効率。5 MHz という高レートの入力に対しても 100% の応答を示していることがわかる。LED のレートは、500 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz、500 kHz、1 MHz、2 MHz、3 MHz、5 MHz である。

MIP 相当の電荷が 5 MHz という高レートで入力される環境においても、回路の応答が停止することはなく正常に機能していることがわかった。これは、ファイバー 1 本あたりの最大レートが 10 kHz 程度と予想されている CFT の運用においては十分な性能である。

また、各レートごとの回路のゲインの安定性の評価も行った。入力信号のレートが大きくなると、回路に入力される電荷が増え、より多くの電流が回路に流れることになる。YAENAMI の信号入力部には MPPC バイアス調整用の DAC が接続されているが、ここに大電流が流れこむと DAC の電圧が上昇することになるため、実効的に MPPC に印加されるバイアス電圧が下がることになる。すなわち、入力レートによって MPPC のゲインが変動するという現象が起きることになる。

ゲインの安定性の評価は、以下に示す計算を用いて行った。縦軸は、そのレートにおけるペDESTALからの相対的な ADC チャンネルの平均値であり、回路のゲインの安定性を示している。以下に示すようにすべてのイベントに対して、最も波高が高かったピーク ADC のペDESTALからの相対値を求め、その平均値を求めた。

$$ADC_{ave.} = \frac{\sum(ADC_{Peak} - ADC_{pedestal})}{N_{event}} \quad (3.4)$$

$ADC_{Peak}$  は、1 つのイベントでの波形の最大値すなわちピーク ADC の値、 $ADC_{pedestal}$  はペDESTALの ADC の値、 $N_{event}$  は、取得したデータ数であり、 $ADC_{ave.}$  は、各イベントにおけるピーク ADC のペDESTALからの相対値の平均を表している。いま、MPPC には LED を用いてほぼ一定の光量を入力しているため、DAC の電圧変動によるゲインの変動がなければ、 $ADC_{ave.}$  は、入力信号のレートに依らず一定の値を取るはずである。この式を用いた評価結果を図 3.15 に示す。

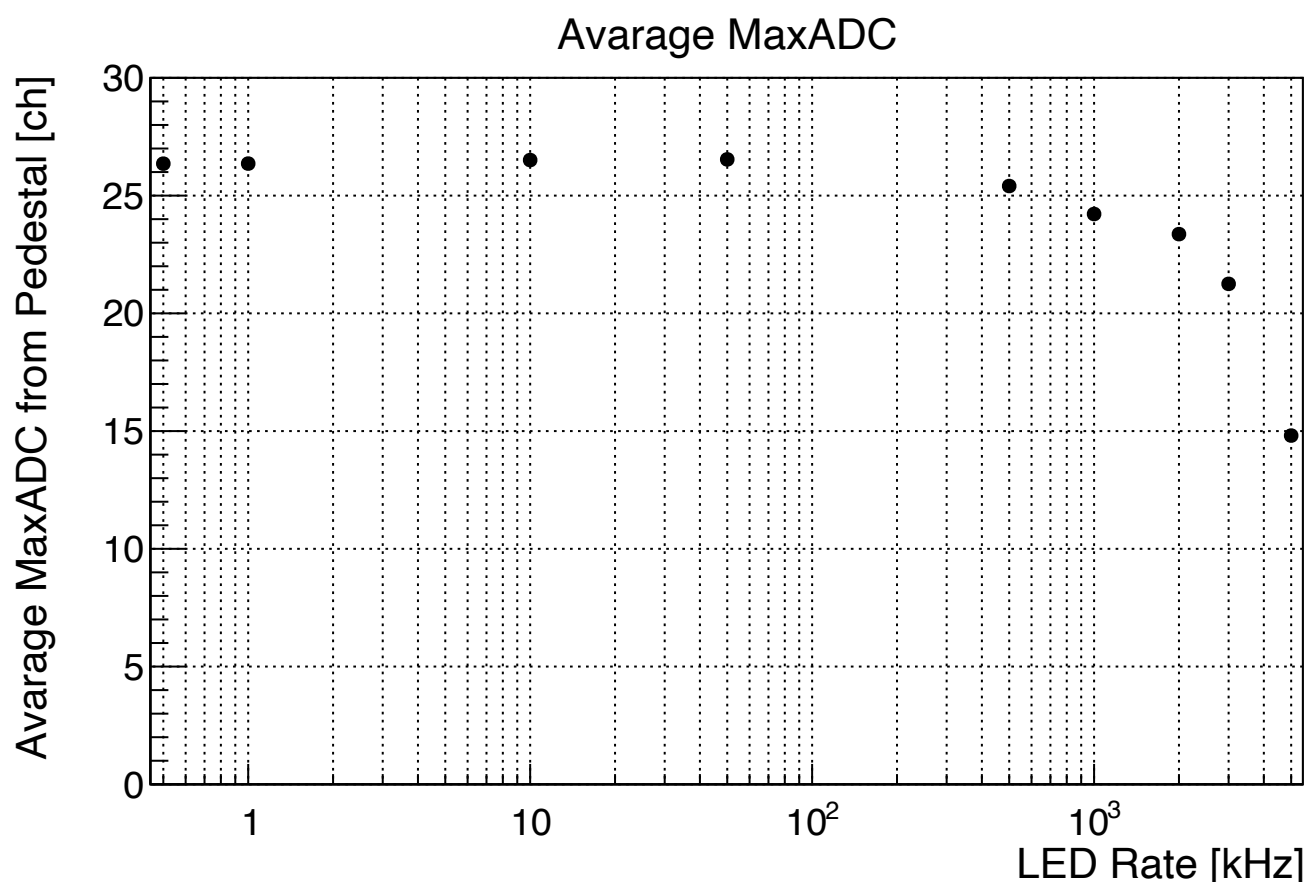


図 3.15: 信号入力レートに対する回路のゲインの応答。LED のレートは、500 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz、500 kHz、1 MHz、2 MHz、3 MHz、5 MHz である。

この評価により、50 kHz の入力レートまでは、回路のゲインが変動せず一定であることがわかった。CFT で想定されているファイバー一本あたりの信号レートは最大でおよそ 10 kHz であるので、その読み出しに問題なく使用できることがわかった。一方で、500 kHz 以上の入力レートにおいては、ゲインが低下していることがわかる。この評価で使用している MPPC 基板には、MPPC を過電流から保護するための保護抵抗が

MPPC に対して直列に取り付けられている。この保護抵抗の大きさは  $10\text{k}\Omega$  であり、この抵抗に電流が流れ電圧降下が起きることで、外部から MPPC に印加している電圧が実質的に下がってしまうことでこのゲイン低下が起きていると考えている。これを確認するために、今後は保護抵抗を外すもしくは短絡させた状態で同様のテストを行い、その原因を明らかにする必要があるが、CFT の読み出しに使用するという観点においては、要求を満たしており、実用上の問題がないことがわかった。今後の評価によって、ゲイン低下の原因が保護抵抗であることが明らかになれば、ビームライン上に設置され高レート環境にさらされるようなシンチレーションファイバー検出器の読み出しも RAYRAW で行うことができると考えている。

### 3.4 RAYRAW に関する評価結果

回路のゲインを変えながら、宇宙線を用いてそのエネルギー測定可能範囲および、その時の MIP 分離能力について評価を行った。その結果、回路のゲイン設定が 16 倍より小さい設定を用いれば、MIP 粒子を識別しながらその 10 倍以上のエネルギーを測定可能であることがわかった。また、MIP の光量を再現するように調整した LED を高レートで光らせることによって、回路のレート耐性の評価も行った。レートを  $500\text{Hz}$  から  $5\text{MHz}$  まで変化させながら測定を行った結果、どのレートにおいても回路の応答が止まることはなく、現行の読み出し回路である EASIROC で見つかっていた問題が解決されていることがわかった。また、 $50\text{kHz}$  までの環境においては、測定された ADC のペDESTAL に対する相対値も一定でありゲインの変動は起きなかった。CFT で想定されている最大の信号入力レートは  $10\text{kHz}$  程度であることから、ゲインの安定性という面においても CFT の読み出し回路として実用上問題ないことがわかった。これらの評価の結果から、RAYRAW はエネルギー測定の点において  $\Delta p$  散乱実験での CFT の読み出しに用いるための十分な性能を持っているという結論を得ることができた。

## 第4章

# HYPS 実験

本章では、SPring-8にて行なわれる  $\Lambda p$  散乱実験である HYPS 実験について述べる。

### 4.1 実験概要

HYPS 実験は、我々のグループが SPring-8 で行う  $\Lambda p$  散乱実験であり、2025 年 4 月からのデータ収集を目指している。

$\Lambda N$  相互作用は  $\Lambda$  ハイパー核や中性子星など  $\Lambda$  粒子を含んだバリオン多体系を研究するための基盤であり、これまでは  $\Lambda$  ハイパー核のエネルギー構造から調べられてきた。しかし、 $\Lambda$  を含んだ 3 体力 ( $\Lambda NN$  力) が重いハイパー核の構造や中性子星を支えるために重要な役割を果たしていると指摘されている。この  $\Lambda NN$  3 体力を  $\Lambda$  ハイパー核から抽出するためにも、その基盤となる  $\Lambda N$  2 体力は  $\Lambda$  と陽子の 2 体系から導出することが待ち望まれており、そのために  $\Lambda p$  散乱実験は不可欠である。理論的にはカイラル有効場理論による  $YN$  相互作用の構築が進んでおり、この相互作用モデルを確立するためにも、HYPS 実験で詳細な微分断面積のデータを提供する予定である。

本実験は、SPring-8 BL33LEP ビームラインで生成される高エネルギーの光子ビームを用いて行われ、 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$  反応を用いて液体水素標的中で  $\Lambda$  を生成する。この  $\gamma$  線は Tagger システムによってエネルギーが標識化されているため、スペクトロメーターシステムを用いて  $K^+$  を同定しその運動量を解析することで、水素標的中で生成された  $\Lambda$  の運動量も標識化することができる。J-PARC などの荷電ビーム ( $\pi^-$  や  $K^-$ ) を使用する場合は、終状態が  $K^0$  や  $\pi^0$  などの中性粒子となるため、その同定が比較的難しい。これに比べ、 $\gamma$  ビームを用いた場合は終状態の粒子は同定手法が確立している  $K^+$  であり、ほとんどバックグラウンドなく  $\Lambda$  の生成を同定することができ、これが実験的な利点となる。本実験で標識化できる  $\Lambda$  の運動量は 300–600 MeV/c である。これらの  $\Lambda$  が液体水素標的中を飛行する際に、別の陽子と散乱する事象を、標的を円筒形に取り囲んだ CATCH 検出器群を用いて検出する。先程、 $\gamma$  ビームの利点を述べたが、一方で、光生成による  $\Lambda$  生成断面積は数  $\mu\text{b}$  と、ハドロン反応の断面積の 1/100 程度である。この弱点を補うため、HYPS 実験は 2.5 年間という長期にわたるデータ収集を予定している。光子ビームのビーム強度を 2 MHz と仮定すると、2.5 年間のデータ収集を通して  $10^7$  の  $\Lambda$  を標識化できると見積もっている。これらの運動量が標識化された  $\Lambda$  粒子から、数 1000 イベントの  $\Lambda p$  散乱事象を検出する。図 4.1 と図 4.2 に、本実験で最終的に予想している微分断面積及び全断面積の測定精度を示す。一緒に示しているカイラル有効場理論による理論予想は、2 つの異なるパラメータセットでの理論計算であり、本実験ではこれらを区別するのに十分な精度が得られると考えている。

SPring-8 の高輝度化計画 (SPring-8 II) に伴い、この実験を実施できるのは 2027 年 8 月までに限られているため、現在、急ピッチで実験準備を進めている。2024 年 6 月より、J-PARC から必要な検出器の移設を始め、2024 年 11 月現在では必要な検出器の大部分のインストールが完了している。また、本実験を行

う SPring-8 BL33LEP ビームラインでこれまで使用されていた ADC、TDC などの読み出しモジュールを、J-PARC で使用している高速モジュールに置き換えることで、データ収集システムも一新した。私は読み出しシステムの構築を中心となって手がけた。第 4 章では、HYPS 実験で使用する検出器の概要を説明し、第 5 章で構築したデータ収集システムについて述べる。

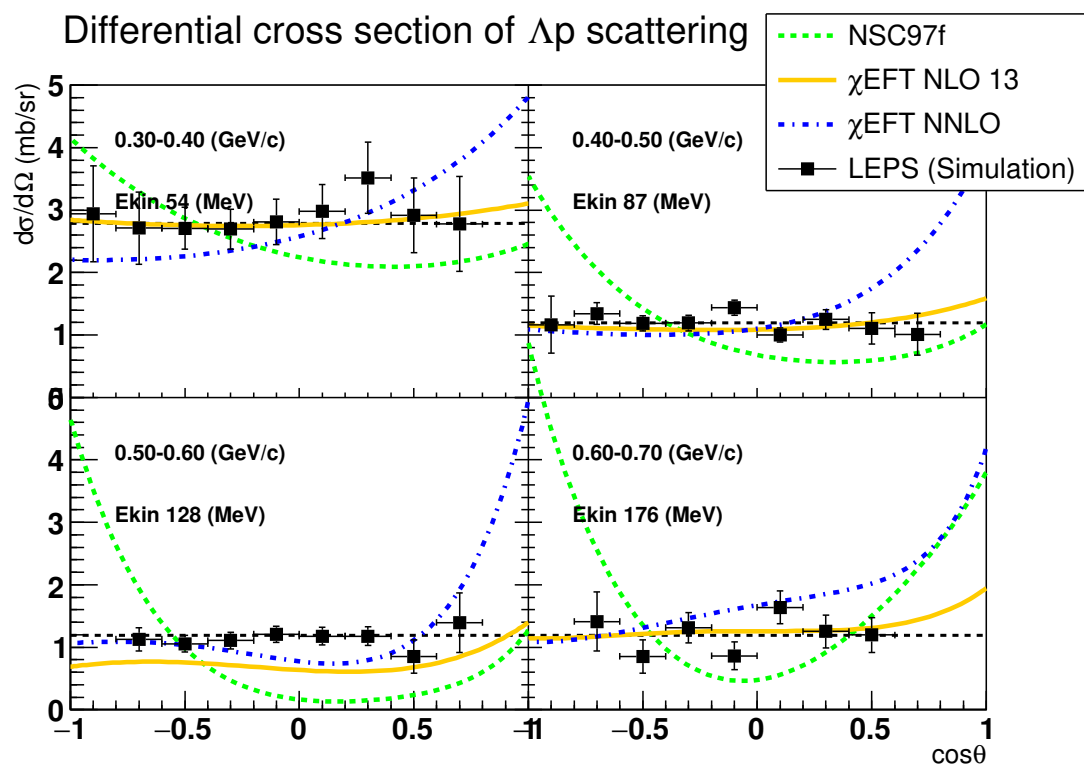


図 4.1: HYPS 実験で予想される  $\Lambda$  粒子の運動量ごとの  $\Lambda p$  散乱の微分断面積の測定精度。カイラル有効場理論による理論予想を一緒に示している。

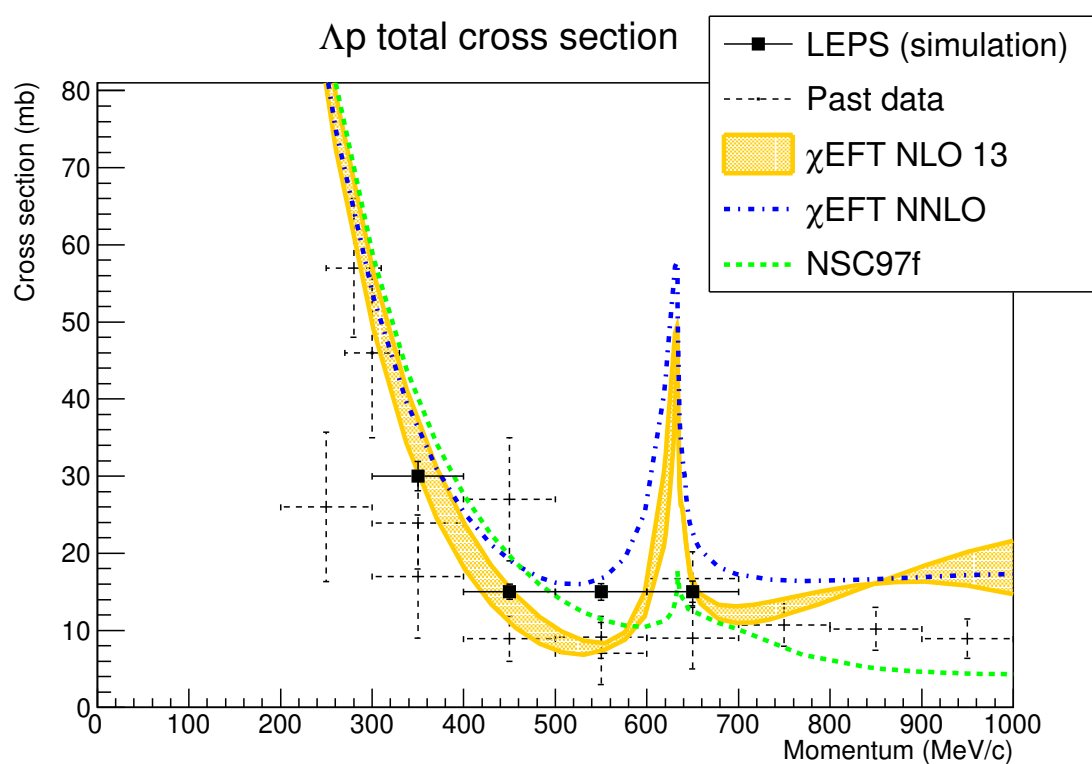


図 4.2: HYPS 実験で予想される  $\Lambda p$  散乱の全断面積の測定精度。過去実験による測定結果を破線で示している。また、カイラル有効場理論による理論予想も示している。



## 4.2 SPring-8 と LEPS ビームライン

SPring-8 は、兵庫県にある世界最大の放射光施設であり、基礎研究から応用研究、産業利用まで放射光を用いた幅広い研究が行われている。放射光の光源となる電子蓄積リングは直径約 500 m、周長 1436 m であり、周回している電子のエネルギーは 8 GeV である。SPring-8 という名前は **Super Photon ring-8 GeV** に由来している。図 4.3 に SPring-8 の概要図を示す。電子銃から打ち出された電子は、線型加速器によって 8 GeV まで加速され、蓄積リングに投入される。リング内の各所には偏向電磁石や挿入光源が設置されており、これを用いて発生させた放射光が図 4.4 に示す様々なビームラインに取り出され、使用される。

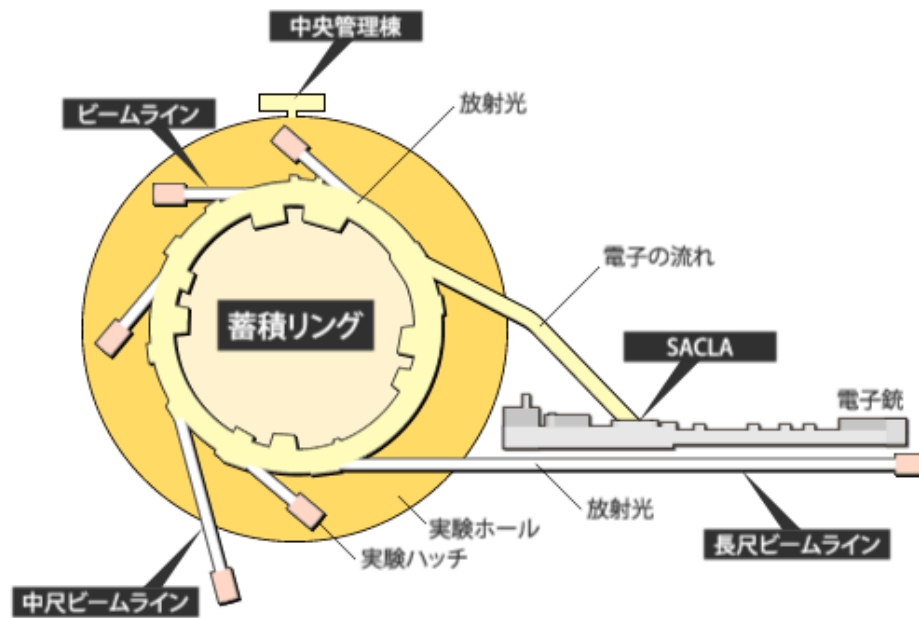


図 4.3: SPring-8 の概要図。電子は線型加速器 (SACLA) で 8 GeV まで加速されて蓄積リングに投入される。 [17]

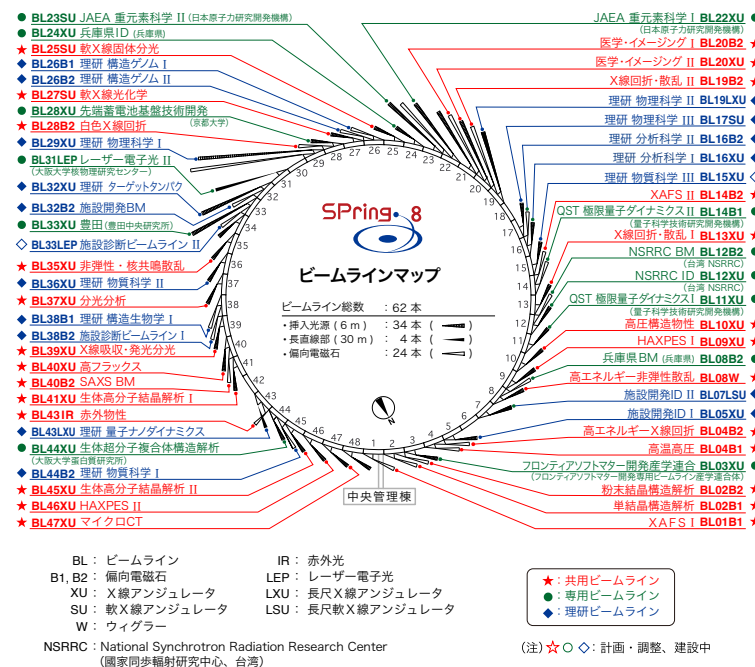


図 4.4: SPring-8 のビームラインマップ。ビームラインごとに使用する放射光の波長は異なっており、幅広い分野の研究が行われている。 [18]

SPring-8の大部分のビームラインが放射光を使用するものであるのに対して、HYPS 実験を行う BL33LEP ビームラインでは、蓄積リングに紫外線レーザーを直接打ち込み電子と逆コンプトン散乱させることで得られる GeV オーダーの  $\gamma$  線を使用する。このビームは Laser Electron Photon(LEP) ビームと呼ばれることから、BL33LEP ビームラインは LEPS ビームラインと呼ばれることも多い。以降、本論文では BL33LEP ビームラインのことを LEPS または LEPS ビームラインと呼ぶ。これまで、LEPS では光反応を用いたハドロン研究が行われてきており、実験やビームラインの整備は、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の LEPS グループが中心になり行われてきた。

### 4.3 実験セットアップ

実験セットアップの概略図を図 4.5 に再掲する。本実験のセットアップは、蓄積リング内にレーザーを打ち込むためのレーザーシステム、逆コンプトン散乱によって得られた  $\gamma$  線のエネルギーを測定するための Tagger、液体水素標的から飛び出した粒子のトラッキングおよびエネルギー測定を行うための CATCH、および散乱粒子の運動量および質量の測定を行うための LEPS スペクトロメーターの 4 つに分けられる。

本節では、それぞれの役割や構成について詳しく述べる。なお、CATCH 検出器群に関する説明は 1.2 を参照されたい。

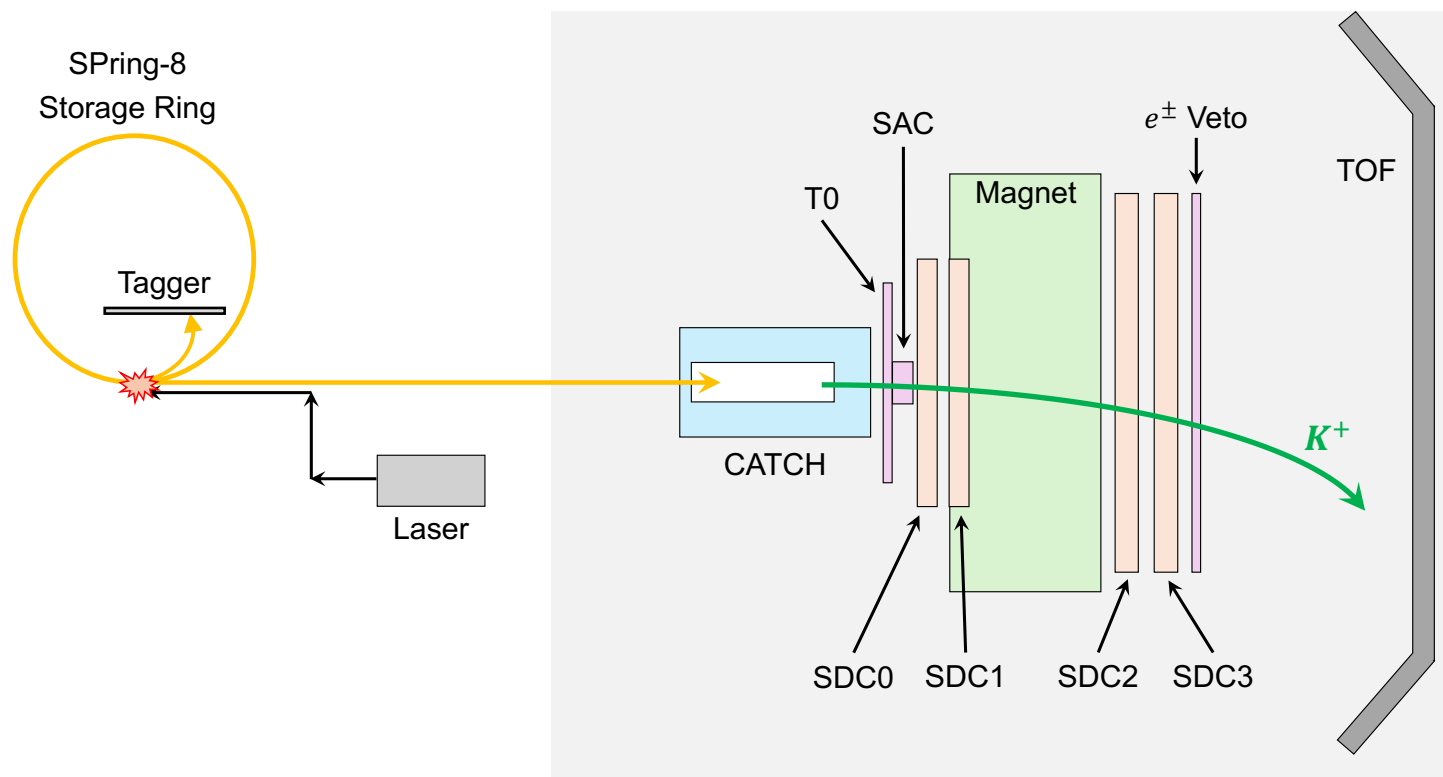


図 4.5: HYPS 実験の実験セットアップの概略図

#### 4.3.1 レーザーシステム

LEPS ビームラインでは、SPring-8 の電子蓄積リングに紫外線レーザーを直接打ち込み、電子と逆コンプトン散乱を起こすことで高エネルギーの  $\gamma$  線を得ることができる。図 4.6 にレーザーシステムの概要図を示す。レーザーシステムは、CATCH 検出器群やスペクトロメーターの設置されている実験ハッチから約 30 m 上流にあるレーザーハッチ内に設置されている。本実験では、波長が 355 nm の準連続レーザーを使用する。レーザー光は、ハッチ内に設置された機器によって光学調整され、36 m 先で蓄積リング内の直線部に入射される。レーザーハッチ内に設置されている光学ミラー (図中 4、5) はステッピングモータを使用しており、レーザー

の入射位置 (水平および鉛直方向) を PC から調整することができる。

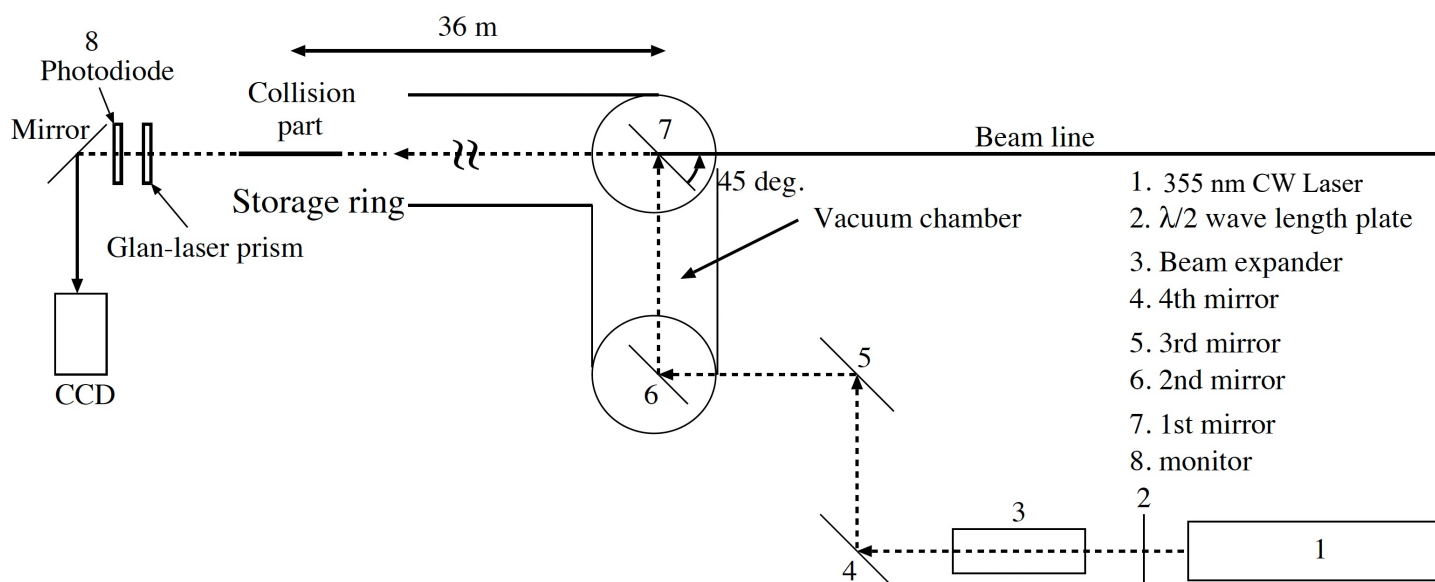


図 4.6: レーザーシステムの概要図。レーザーハッチ内に設置された光学ミラー (図中 4、5) は PC から制御することができ、蓄積リング内でのレーザー入射位置を調整することができる。[19] より改変

### 4.3.2 Tagger

Tagger システムは、電子蓄積リングの内側に設置されているシンチレーション検出器群であり、逆コンプトン散乱により生成された  $\gamma$  線のエネルギーを測定するために用いられる。

前述のレーザーシステムによって蓄積リング内に入射されたレーザーは、図 4.7 に示すように 2つの偏向電磁石の間の直線部で電子と散乱を起こす。蓄積リングを周回している電子のエネルギーは  $E_e = 8 \text{ GeV}$  であるが、レーザーと逆コンプトン散乱を起こした場合はその分エネルギーを失うため、直後の偏向電磁石によってリング内側に大きく曲げられ周回経路を外れる。こうして曲げられた電子の通過位置を測定することにより、この電子のエネルギー  $E_{e'}$  がわかるため、生成された  $\gamma$  線のエネルギー  $E_\gamma$  を以下のように求めることができる。

$$E_\gamma = E_e - E_{e'} \quad (4.1)$$

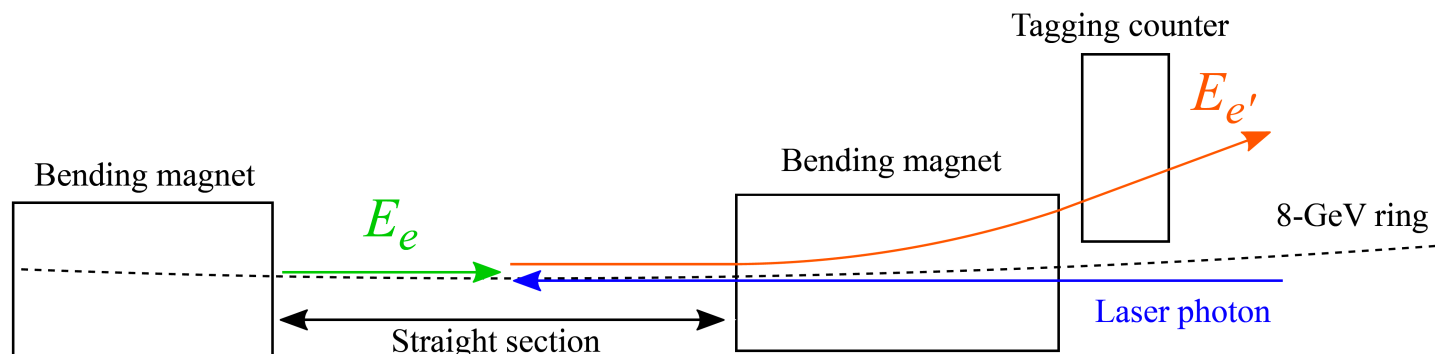


図 4.7: Tagger による散乱電子のエネルギー測定の概略図。蓄積リングを周回する電子は、直線部でレーザーと逆コンプトン散乱を起こす。散乱によりエネルギーを失った電子は直後の偏向電磁石で大きく内側に曲げられ、Tagger によってそのエネルギーが測定される。[20]

図 4.8 に Tagger の概略図を示す。Tagger はシンチレーションファイバー部 (TAG-SF) とプラスチックシ

ンチレーター部 (TAG-PL) から構成されている。

#### ■ TAG-SF

TAG-SF は、散乱電子の通過位置を測定するための検出器であり、TAG-SFF と TAG-SFB の 2 層からなる。それぞれの層は 55 セグメントから構成されている。ここで、1 セグメントとは断面積が  $1 \text{ mm}^2$  のシンチレーションファイバー 6 本を束ねたものであり、マルチアノード型の PMT (HAMAMATSU R5900-00-M4, H6568-10) を用いて読み出している。TAG-SFF の不感領域をカバーするため、TAG-SFB は  $x$  方向に 5 mm ずらして配置されている。

#### ■ TAG-PL

TAG-PL は、TAG-SF の後方に設置されている 10 セグメントからなるホドスコープである。10 本のプラスチックシンチレーターは不感領域を生まないように互い違いに配置されており、その重なりは 2.7 mm である。1 つのセグメントの大きさは  $7.4 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$  であるが、蓄積リングに一番近いセグメントのみ横幅 ( $y$ ) が 5.5 mm となっている。TAG-SF と TAG-PL のコインシデンスをトリガーに組み込むことで、X 線や電磁シャワーによって TAG-SF が光ってしまったイベントを抑制することができる。

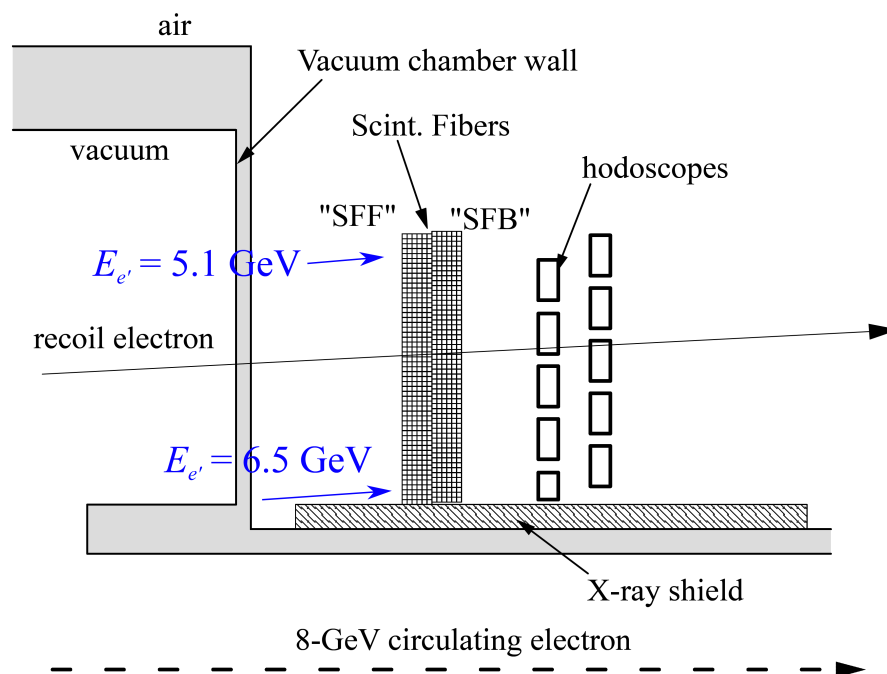


図 4.8: Tagger の概略図。110 セグメントのシンチレーションファイバーで構成される TAG-SF によって散乱電子の通過位置が測定される。[20]

Tagger は蓄積リングの真空パイプの外に設置されており、その位置の関係上、測定できる散乱電子のエネルギー範囲は  $E_{e'} = 5.1 - 6.5 \text{ GeV}$  となる。これは LEP ビームのエネルギーでは  $E_\gamma = 1.5 - 2.9 \text{ GeV}$  に対応する。しかし、本実験で使用する波長が 355 nm のレーザーではコンプトンエッジが 2.4 GeV であるため、標識化される LEP ビームのエネルギー範囲は  $E_\gamma = 1.5 - 2.4 \text{ GeV}$  となる。

#### 4.3.3 LEPS スペクトロメーター

レーザーシステムと Tagger によりエネルギー標識化され実験ハッチまで輸送されてきた LEP ビームは、CATCH 中心部に設置された液体水素標的に入射される。標的内で  $(\gamma, K^+)$  反応によって生成された荷電粒子は、前方の LEPS スペクトロメーターによって運動量の測定と粒子識別が行われる。図 4.9 に LEPS スペ

クトロメーターの概略図を、表 4.1 にスペクトロメーターシステムを構成する各検出器の概要を示す。ここからは、それぞれの検出器の詳細について、ビームライン上流から順番に説明する。

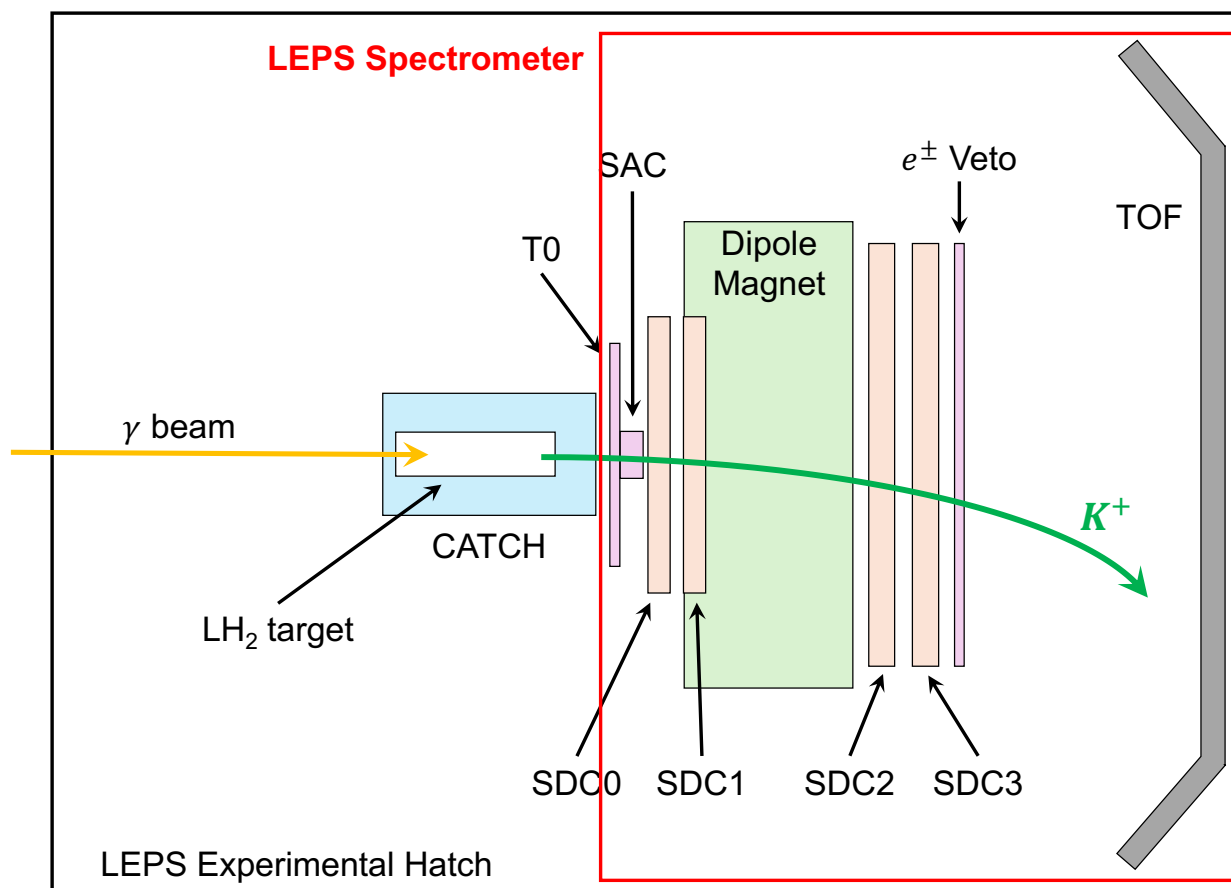


図 4.9: LEPS スペクトロメーターの概略図。(γ, K<sup>+</sup>) 反応によりビーム進行方向に飛び出した荷電粒子は、LEPS スペクトロメーターによってその運動量と質量が測定される。時間測定および飛跡測定用の検出器のほか、バックグラウンドである e<sup>±</sup> を除去するためのトリガーカウンターが設置されている。

表 4.1: LEPS スペクトロメーターを構成する検出器の概要

検出器名	タイプ	役割	有感領域 $x$ [mm] × $y$ [mm]
T0	プラスチックシンチレーター	時間測定、トリガー	172 × 600
SAC	エアロジェルチェレンコフカウンター	トリガー (VETO)	120 × 110
SDC0	ドリフトチェンバー	飛跡測定	560 × 150
SDC1	ドリフトチェンバー	飛跡測定	600 × 300
SDC2	ドリフトチェンバー	飛跡測定	2000 × 800
SDC3	ドリフトチェンバー	飛跡測定	2000 × 800
e <sup>±</sup> VETO	プラスチックシンチレーター	トリガー (VETO)	185 × 40
TOF カウンター	プラスチックシンチレーター	時間測定、トリガー	80 × 1800

## T0

T0 は、LEPS スペクトロメーターの最上流に設置されたプラスチックシンチレーターであり、荷電粒子が通過したタイミングの計測を行うとともに、T0 にヒットがあったことをトリガー段階で要求することで、標

の中で生成された荷電粒子を選択する。

粒子が T0 を通過した時刻  $t_0$  と TOF を通過した時刻  $t_1$  の時間差から粒子の飛行時間 (Time of Flight) を測定することができる。この情報とトラッキングから求められた粒子の飛行距離  $L_{track}$  を用いることで、以下の関係から粒子の質量を再構成することができる。

$$\beta = \frac{L_{track}}{c(t_1 - t_0)} \quad (4.2)$$

$$m^2 = \left( \frac{p}{\beta c} \right)^2 (1 - \beta^2) \quad (4.3)$$

散乱粒子の質量測定では、加速器の RF 信号を時間基準として用いる方が分解能が向上することが知られており、T0 は逆コンプトン反応を起こした電子の RF バンチを同定するためにも使用される。

### SAC (Scattered Aerogel Cherenkov counter)

T0 の直後には、屈折率が 1.03 である Silica Aerogel を使用したチェレンコフカウンターが設置されている。図 4.10 に、チェレンコフ光の発光閾値と入射粒子の運動量の関係を示す。

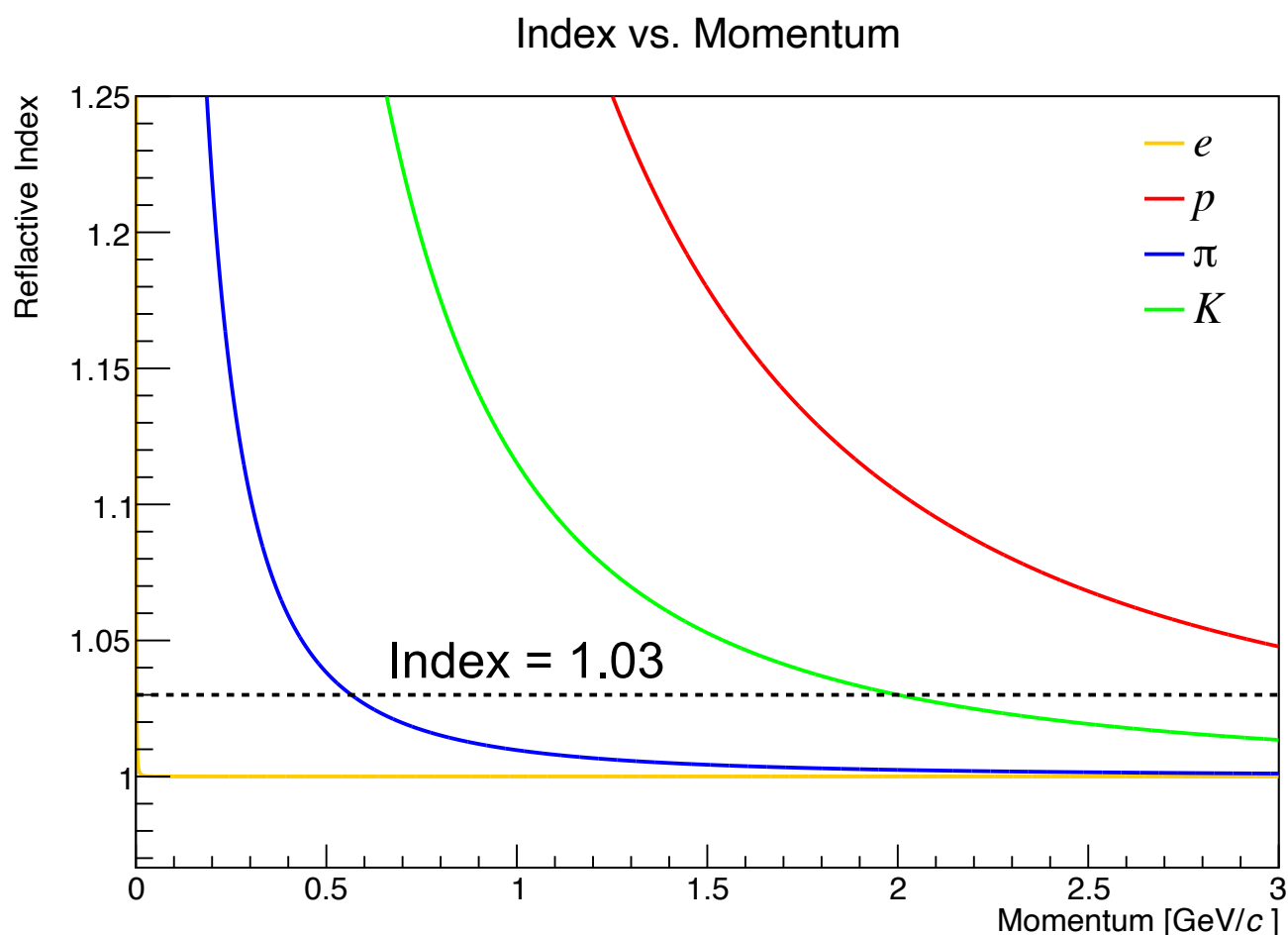


図 4.10: チェレンコフ光発光閾値の運動量依存性

$e^\pm$  は非常に低運動量でも発光するため、SAC を VETO 信号として使用することで、バックグラウンドとなる標的中での  $e^\pm$  対生成イベントをトリガーレベルで除去することができる。なお、ハドロン反応で生成された荷電粒子を全て検出することが望ましいが、この SAC では高運動量の  $\pi$  ( $p_\pi \geq 0.57 \text{ GeV}/c$ ) を除去することになる。

SAC の概略図を図 4.11 に示す。箱のサイズは  $120 \text{ mm} (x) \times 150 \text{ mm} (y) \times 60 \text{ mm} (z)$  であり、黒紙で遮光されている。また、その上下にはチェレンコフ光を読み出すためにファインメッシュ型の PMT (Hamamatsu



H6614-01) が 2 つずつ設置されている。箱の内部には、 $110\text{ mm } (x) \times 110\text{ mm } (y) \times 25\text{ mm } (z)$  の Silica Aerogel シートが 2 枚設置されている。また、PMT 設置部を除いて箱内部には反射材が貼られている。

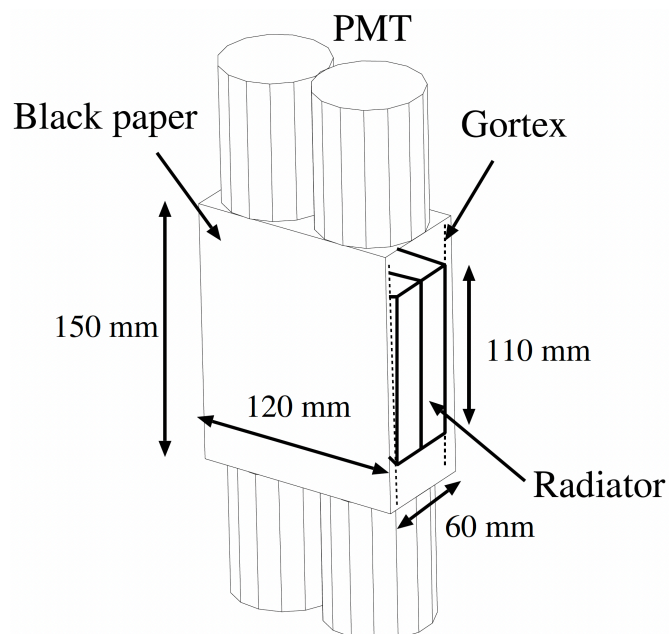


図 4.11: SAC の概略図。黒紙によって遮光された箱の内部には Silica Aerogel のシート (Radiator) が 2 枚設置されており、壁面には反射材が貼られている。チェレンコフ光は、箱の上下に 2 つずつ設置されたファインメッシュ型の PMT で検出する。[20]

### SDC0, 1, 2, 3 (Scattered Drift Chamber)

双極電磁石の入口と出口には、飛跡検出器であるドリフトチェンバーが 2 つずつ設置されている。これまで LEPS ビームラインでは、標的付近に設置された Silicon Strip Detector(SSD) と 3 つのドリフトチェンバー (SDC1, 2, 3) を用いて粒子の飛跡を測定していた。しかし、HYPS 実験では CATCH がビーム方向に長く、標的が双極電磁石から離れることになるため、SSD より大きなアクセプタンスを持つ飛跡検出器を使用する必要がある。そこで我々は、過去に J-PARC K1.8 ビームラインで使用されていたドリフトチェンバーを SDC0 として BL33LEP ビームラインに移設した。

SDC0 は 4 層、SDC1 は 6 層、SDC2 および SDC3 は 5 層から構成されており、それぞれの層ではワイヤーの張られている位置や角度が異なっている。各ワイヤーの信号は Amplifier Shaper Discriminator(ASD) を通してデジタル信号に変換され、タイミング情報として記録される。このタイミング情報とジオメトリーを用いて粒子の通過位置を求めることで、荷電粒子の飛跡を 3 次元で再構成することができる。

各ドリフトチェンバーの基本情報を表 4.2 に、SDC1 のワイヤー構造の概略図を図 4.12 に示す。

表 4.2: ドリフトチェンバーの基本情報

名前	層	センスワイヤー情報				有感領域 $x \times y$ [mm <sup>2</sup> ]	層の順番 (上流から)
		傾き *	本数	ギャップ [mm]	直径 [ $\mu$ m]		
SDC0	X (X')	0°	112	5.0	1.25	560 × 200	X, X', U, U'
	U (U')	+15°	112	5.0	1.25		
SDC1	X (X')	0°	48	12	25	600 × 300	X'', V, U', U, X', X
	U (U')	+45°	48	12	25		
	V	-45°	48	12	25		
	X''	0°	48	12	25		
SDC2	X (X')	0°	104	20	30	2000 × 800	V, U', U, X', X
	U (U')	+30°	78	20	30		
	V	-30°	79	20	30		
SDC3	X (X')	0°	104	20	30	2000 × 800	V, U', U, X', X
	U (U')	+30°	78	20	30		
	V	-30°	79	20	30		

\*  $x - y$  平面における  $y$  軸との角度を表しており、ビームに乗って時計回りが + である。

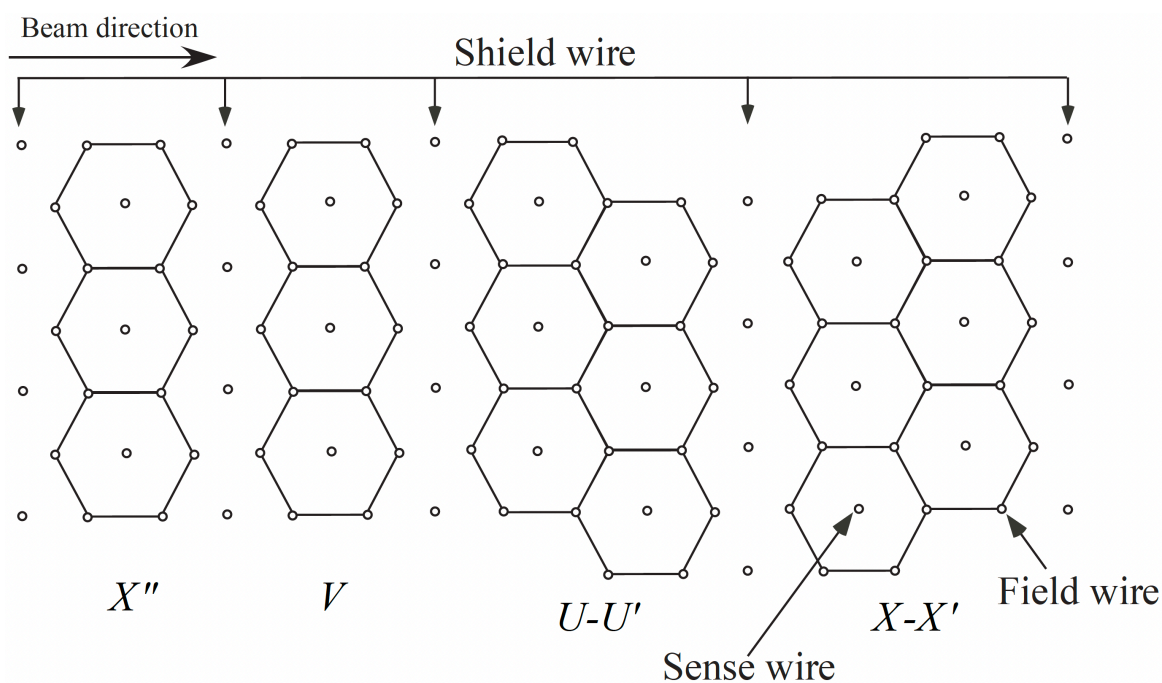


図 4.12: SDC1 のワイヤー構造。1 本のセンスワイヤーの周りを 6 本のフィールドワイヤーで囲むハニカム構造になっている。シールドワイヤーとフィールドワイヤーに負の電圧を印加することで、センスワイヤーからフィールドワイヤーに向かう電場が発生し、荷電粒子が通過した際に電子のドリフトが起きる。

センスワイヤーの間隔は異なるが、SDC2、3 もハニカム構造である (ただし X'' 層は存在しない)。[20]

## 双極電磁石

散乱粒子が双極電磁石内の磁場によって曲げられることで、その運動量を解析することができる。LEPS ビームラインに設置されている双極電磁石の開口部の大きさは、135 cm(W)×55 cm(H) であり、 $z$  方向の長さは 60 cm である。中心磁場は 0.7 T であり磁場は鉛直上向きであるため、 $\Lambda$  粒子の同定に必要な  $K^+$  は、ビームに乗って右側に曲げられることになる。そのため、後述の TOF は  $K^+$  が飛んでくる領域をカバーできることを最優先に設置した。

## $e^\pm$ VETO カウンター

$e^\pm$  VETO カウンターは、SDC3 の直後、ビームの高さに設置されている  $x$  方向に長いプラスチックシンチレーターである。図 4.13 にスペクトロメーター下流の俯瞰図を示す。 $\gamma$  線から対生成された  $e^\pm$  は  $\gamma$  線の進行方向に放出されるため、磁場で曲げられた後もビーム平面上に局所化する。したがって、この検出器の信号でトリガーを VETO することで、 $e^\pm$  の対生成イベントをトリガーレベルで除去することができる。シンチレーション光は、シンチレーターの両端に接続されたファインメッシュタイプの PMT (Hamamatsu H6614-70MOD) で読み出す。

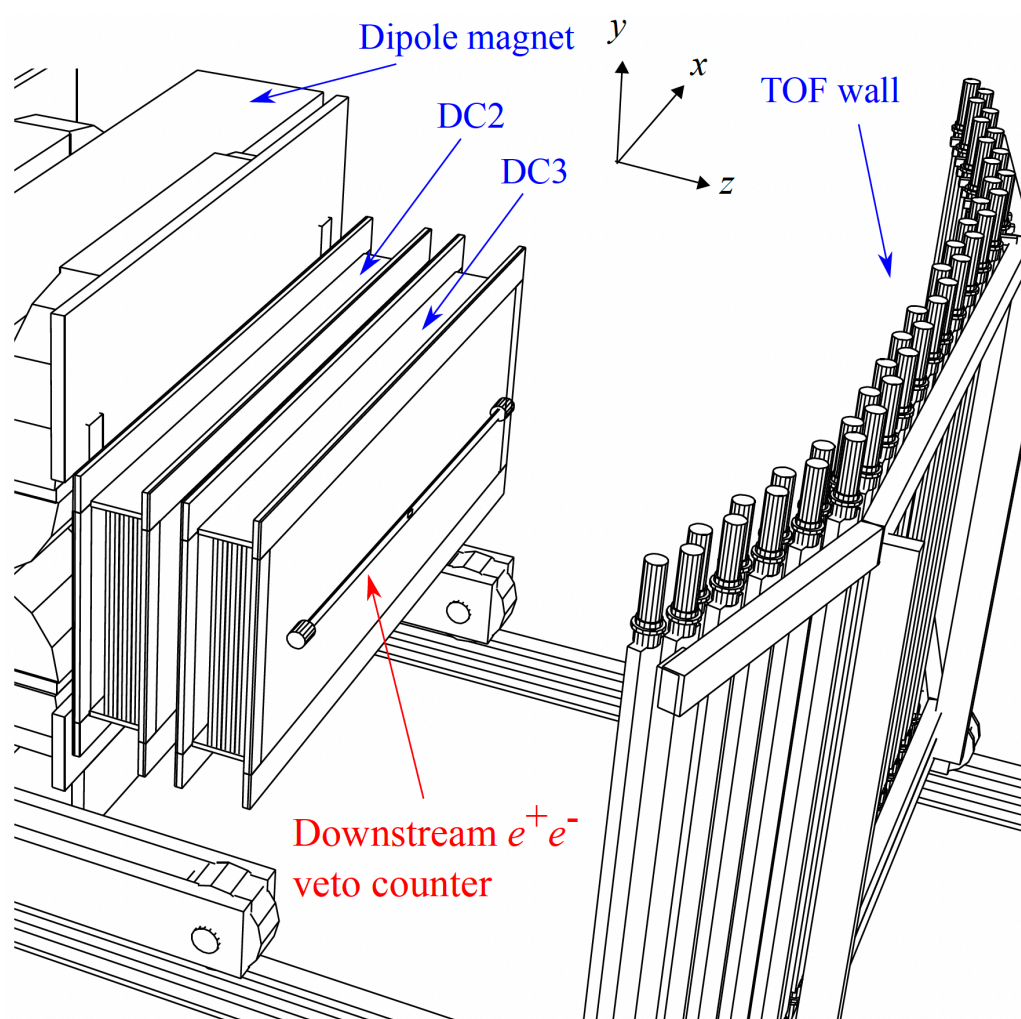


図 4.13: LEPS スペクトロメーター下流の俯瞰図。電磁石の出口には飛跡検出器である SDC2、3 があり、 $e^\pm$  VETO カウンターはその直後に設置されている。また、最下流には飛行時間を測定するために TOF が設置されている。[20]

## TOF

スペクトロメーターシステムの最下流に設置されているプラスチックシンチレーターであり、散乱粒子の飛行時間の測定のために用いる。



もともと BL33LEP ビームラインには 40 本の TOF が設置されていたが、別実験で使用するためにその大部分は移設されていた。そのため、過去に J-PARC の実験で使用されていたものを新たに移設した。なお、本論文執筆時のセグメント数は 32 セグメントであるが、増設を行い最終的には 48 セグメントになる予定である。

それぞれのセグメントは、 $x$  方向に隙間が生まれないよう、 $z$  方向に対して互い違いになるように設置されている。ただし、ビームが通過する領域 ( $x = -10 \sim 10$  mm) は空けてある。図 4.14 に TOF の概略図を示す。現在設置されているセグメントを赤線で囲んだ。TOF カウンターに使用されている 2 種類のシンチレータについて、表 4.3 にまとめる。

表 4.3: TOF カウンターの種類と基本情報

	サイズ $x \times y \times z$ [mm]	PMT (Hamamatsu)	Segment 番号 (0 origin)	図中	備考
タイプ 1	80 × 1800 × 30	H1945	4 - 11	緑色	J-PARC より移設
タイプ 2	120 × 2000 × 40	H7195	12 - 35	水色	BL33LEP に既存

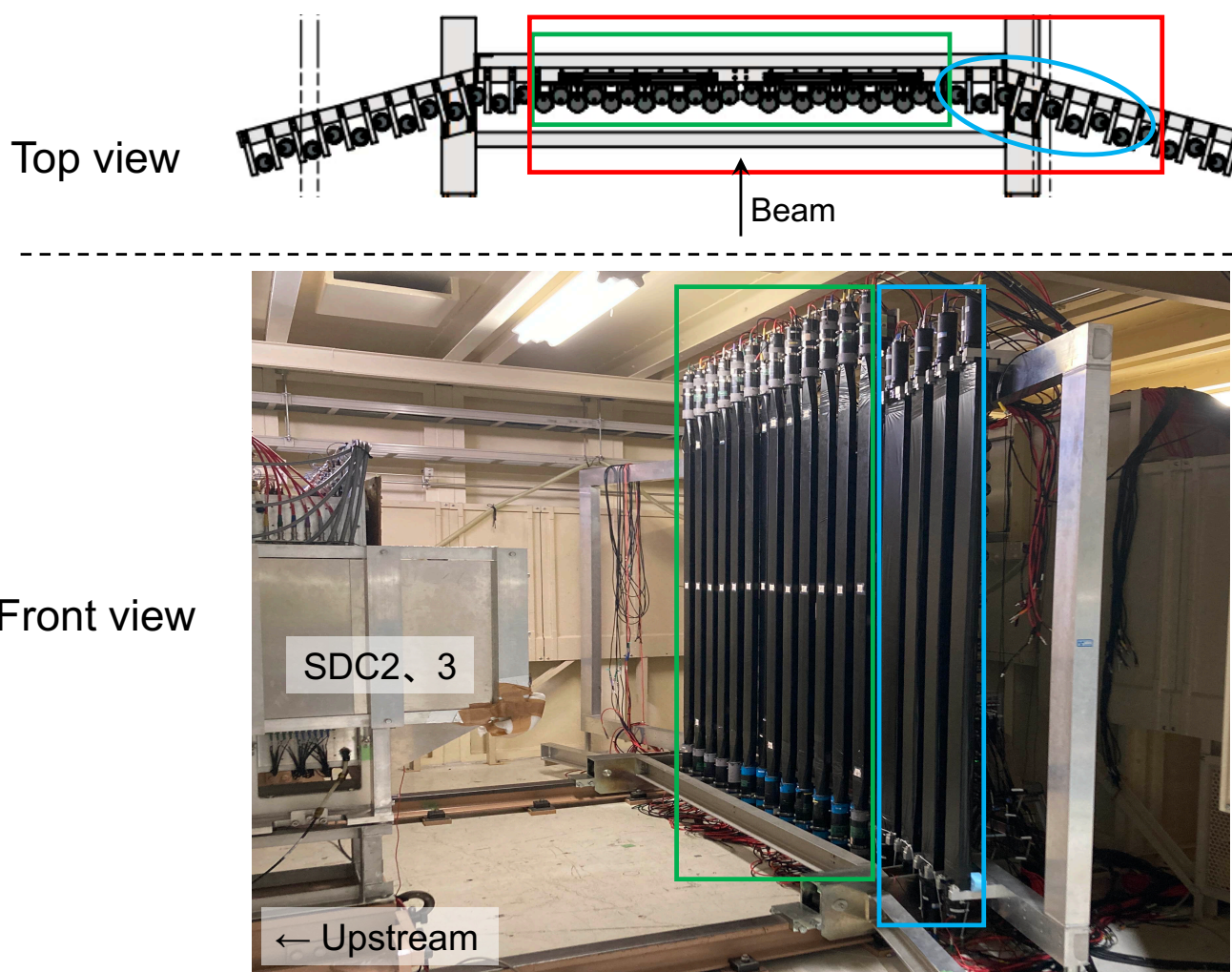


図 4.14: TOF の概略図。ビームの通過領域以外に  $x$  方向の隙間が生まれないよう、セグメント同士は互い違いに設置されている。本論文執筆時に設置されているセグメントを赤枠で囲んだ。また、緑色と水色では使用されているシンチレータおよび PMT が異なる。

## 第5章

# データ収集システム (DAQ) および実験用ネットワークの構築

4章で述べたように、我々は2025年4月からのデータ収集に向けてHYPS実験の準備を進めている。この実験準備のうち、データ収集システムおよび実験ネットワークの構築に関しては私が中心となって進めた。また、これまでLEPSビームラインで使用されてきたADCやTDCの読み出しモジュールを、J-PARCで使用している高速モジュールに置き換えることでデータ収集システムを一新した。

### 5.1 実験用ネットワーク

HYPS実験のデータ収集システム(DAQ)の構築にあたって、まず実験用ネットワークの構築を行なった。

詳しくは5.2節で述べるが、本実験ではネットワーク分散型のDAQであるHadron DAQ(HDDAQ)を使用する。HDDAQでは、各フロントエンドからのデータは全てネットワークを通じてEvent Builderに送信される。そのため、DAQプロセスが使用できる帯域の広さがDAQのシステム効率に大きな影響を与えることになる。このことを考慮して、実験ネットワークの構築にあたってはDAQとそれ以外の用途でネットワークを分けるようにした。

また、実験においては検出器の管理も非常に重要であるため、各検出器に印加する電圧の制御、電流値や温度といった検出器のコンディションのモニターを行うための専用ネットワークも用意した。さらに、これら以外の用途で使用できる汎用的なネットワークも用意し、HYPS実験のネットワークには3つのサブネットワークが存在する。

図5.1にHYPS実験の実験用ネットワーク(hypsnet)の概略図を、表5.1にその仕様を示す。

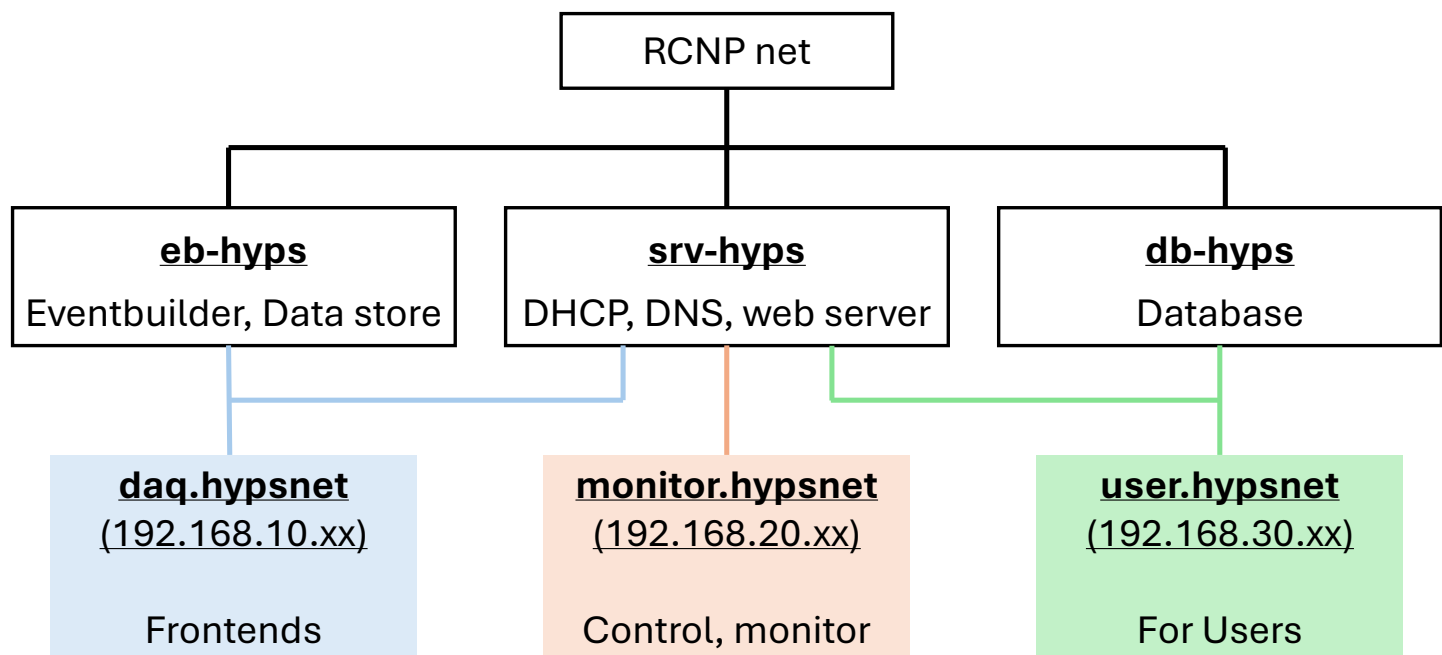


図 5.1: HYPs 実験用のネットワーク (hypsnet) の概略図。hypsnet は DAQ ネットワーク、Monitor ネットワーク、User ネットワークの 3 つのサブネットワークから構成されており、srv-hyps がそのサーバーを担っている。

表 5.1: hypsnet の仕様

ネットワーク名	サブネットアドレス	用途	通信速度
DAQ ネットワーク	192.168.10.0/24	DAQ 専用	10 Gbps (一部 1 Gbps)
Monitor ネットワーク	192.168.20.0/24	電圧制御、各種モニター	1 Gbps
User ネットワーク	192.168.30.0/24	汎用	1 Gbps

hypsnet は、DAQ ネットワーク、Monitor ネットワーク、User ネットワークの 3 つのサブネットワークから構成されている。DHCP サーバーおよび DNS サーバーは srv-hyps が担っており、これを介することで他のサブネットワークにアクセスできるようになっている。また、srv-hyps は外部のネットワークに接続されており、必要に応じて外部から hypsnet へアクセスすることもできる。srv-hyps に加えて、12 TB のローカルストレージが搭載されている eb-hyps、データベースシステムを担っている db-hyps もそれぞれ外部ネットワークに接続されており、記録されたデータは外部ストレージに直接転送できるようになっている。

以下に、それぞれのネットワークの役割について述べる。

### DAQ ネットワーク

DAQ 専用のネットワーク。サブネットアドレスは 192.168.10.0/24 である。各フロントエンドからのデータの吸い出しやイベントビルド、イベントデータのディスクへの書き込みといった一連の DAQ プロセスは全てこのネットワーク上で行われる。送受信されるデータ量が大きくなることが予想されるため、LAN ケーブルやスイッチングハブのほとんどには 10 Gbps に対応した機器を使用している。各モジュールからデータを吸い出すフロントエンド PC や DAQ の Controller など、DAQ に直接関係する機器が所属している。なお、DAQ システムの詳細については 5.2 節で述べる。



## Monitor ネットワーク

検出器の印加電圧の制御および検出器状態等をモニターするためのネットワーク。サブネットアドレスは、192.168.20.0/24 である。MPPC や PMT の HV モジュールに加え、電流値や温度といった各検出器のコンディションをモニターするロガーなどが所属している。これらのデータは db-hyps 内のデータベースに定期的に記録されている。また、HYPS 実験では DAQ 関係のモジュールが複数箇所に設置されているが、それらの状態 (LED ランプの点灯) はこのネットワークに所属する Web カメラを通じて行うことができる。

## User ネットワーク

特に用途は限定しておらず、汎用的に使用することのできるネットワーク。主な使用目的としては、取得したデータの確認や解析が挙げられる。サブネットアドレスは、192.168.30.0/24 である。

## 5.2 DAQ システム

HYPS 実験では、J-PARC ハドロン実験施設 (K1.8 ビームライン) で使用されているトリガー型の DAQ である Hadron DAQ(HDDAQ) を使用してデータ収集を行う。

HDDAQ はネットワーク分散型の DAQ となっており、各検出器の信号はフロントエンドモジュールによって ADC や TDC といったデジタル情報に変換された後、フロントエンド PC を介してネットワーク越しに Event Builder へ送られる。Event Builder は全てのフロントエンドから受け取ったデータを 1 つのイベントデータとして統合する役割を担っており、こうして統合されたイベントデータは Event Distributer を介し、データの記録を行う Recoder および取得したデータの表示や解析を行うための Online Analyzer に送信される。これらの DAQ プロセスの制御および監視は Message Daemon によって、データパスとは別のパスを介してネットワーク経由で行われている。

HDDAQ では、Master Trigger Module(MTM) と Receiver Module(RM) という専用のモジュールを用いることで、トリガーや busy の送受信もネットワーク越しに行うことができる。MTM は 2 本の LAN ケーブルを用いて、トリガー信号の送信および busy 信号の受信を RM との間で行う。RM は、VME-J0 バスを使用することで、各フロントエンドモジュールとトリガー信号および busy 信号の送受信を行う。MTM からはイベント同期を保証するための Event Tag および Spill Tag も送信されるようになっている。この Tag を利用することで、ノイズや減衰等による予期しないトリガーのずれを検知することができる。MTM-RM で送受信される信号は差動信号となっており、Trigger Repeater という専用のモジュールを使用することでさらに分配することができる。

HYPS 実験では、HDDAQ のこれらの特徴を活かし、フロントエンドの設置されている DAQ ラックを 3 箇所に分けて設置している。図 5.2 に、本実験の DAQ システムにおける、トリガーおよびモジュール busy の管理システムの概要図を示す。

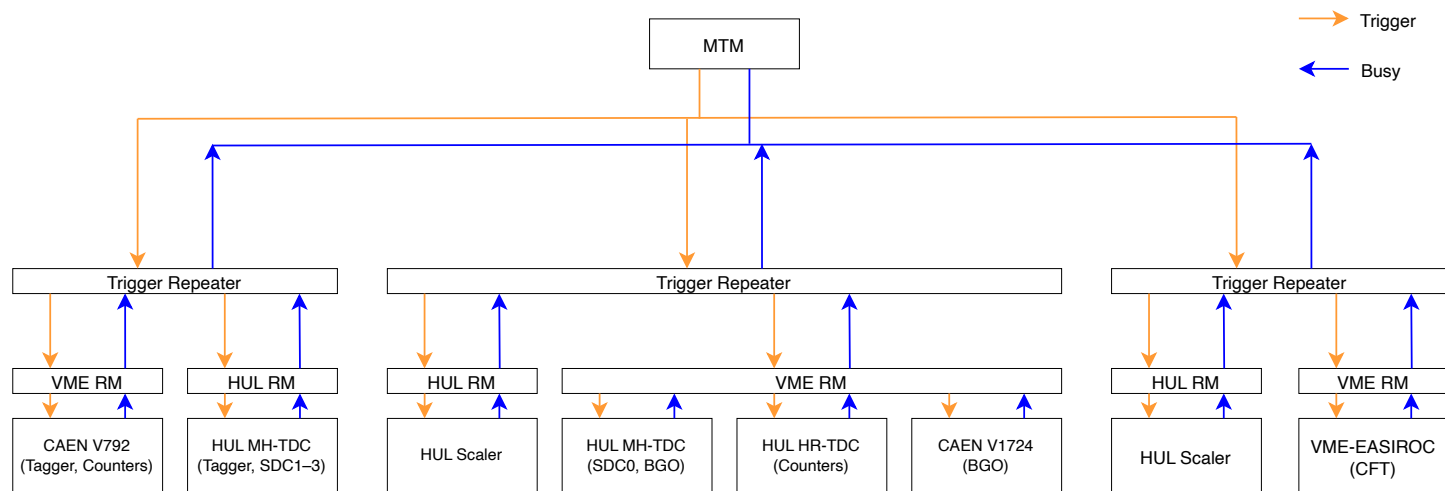


図 5.2: MTM-RM システムによるトリガーおよびモジュール Busy 管理システムの概要図

### 5.2.1 フロントエンド

各検出器の信号は、VME-EASIROC や ADC、TDC モジュールなどのフロントエンドモジュールに入力され、ADC や TDC といったデジタル情報に変換された後、フロントエンド PC によって読み出される。このフロントエンドモジュールとフロントエンド PC のことをまとめてフロントエンドと呼び、HDDAQ には検出器ごとに様々なフロントエンドが存在している。HYPS 実験では、主に VME フロントエンド、HUL フロントエンド、VME-EASIROC フロントエンドの 3 種類のフロントエンドを使用する。VME フロントエンドでは、VME Controller(On-Board PC) によって、同一クレート上のモジュールのデータが VME バス通信を使用して読み出され、EventBuilder に送信される。また、HUL フロントエンドおよび VME-EASIROC フロントエンドでは、フロントエンド PC によってモジュールごとのデータがソケット通信により収集され、EventBuilder に送信される。

以下に、HYPS 実験で使用するフロントエンドモジュールについて説明する。

#### CAEN V792

32 チャンネル、12 bit の QDC モジュールであり、カウンター検出器 (T0、SAC、 $e^{\pm}$ VETO、TOF) に使用する。ゲートが開いている間に検出器から入力された電荷の総量を ADC 情報として出力する。ゲート信号は、MTM から送信された Level 1 トリガーの幅やタイミングを Gate Generator で調整し、フロントパネルから入力する。VME フロントエンドに属しており、VME バス通信を介して VME Controller によって読み出される。A/D 変換の処理時間である約  $7 \mu\text{s}$  が典型的な dead time である。HYPS 実験では、3 台の V792 を使用し、これらを 1 台の VME Controller で読み出す。

#### CAEN V1724

8 チャンネル、14 bit の Flash ADC モジュールであり、サンプリングレートが  $100 \text{ MS/s}$  の Flash ADC モジュールである。ペDESTアルサプレッション機能を搭載しており、入力信号が設定閾値を超えた時にだけその波形情報が記録されるようになっている。Level 1 トリガーをトリガー信号としてフロントパネルから入力する。1024 イベント分のマルチバッファを搭載しており、バッファがフルにならない限りは dead time なく使用することができる。また、フロントパネルに Optical LINK コネクターを搭載しており、VME Controller を使用せずに PC で読み出すこともできる。HYPS 実験では使用する 3 台の V1724 モジュールのうち、VME Controller で読み出すのは 1 台であり、残りの 2 台は Optical LINK を使用して PC で読み出している。VME バスを利用した読み出しは比較的時間がかかるため、VME Controller で読み出すデータサ

イズをできるだけ小さくすることで、dead time が短くなるようにしている。

### HUL MH-TDC

J-PARC でのハドロン実験のために開発された Hadron Universal Logic(HUL) モジュールを用いた Common Stop 方式の TDC である。ドリフトチェンバー (SDC0-3) および BGO カロリメーターの TDC 情報の取得に使用する。1 イベントに対して最大 16hit を記録することが MultiHit-TDC(MH-TDC) であり、LSB は 0.83 ns である。Leading と Trailing エッジの両方を検出することができる。64 チャンネルの入力ポートを搭載しており、専用のメザニンカードを使用することで、最大 128 チャンネルの信号を読み出すことができる。Common Stop には、Level 1 トリガーを使用する。HUL の FPGA で処理されたデータは、SiTCP を通じてフロントエンド PC が中継することで EventBuilder に送信される。トリガーや busy の送受信は、HUL RM という専用のメザニンカードによって行われる。Dead time は数 100 ns 程度である。

### HUL HR-TDC

High-Resolution TDC(HR-TDC) は、MH-TDC よりも時間分解能の高い TDC であり、時間情報が重要であるカウンター検出器 (T0、SAC、 $e^{\pm}$ VETO、TOF) の時間情報の取得に使用する。MH-TDC と同様に、depth が 16hit/event の TDC であり、LSB は 0.94 ps である。Common Stop には Level 1 トリガーを使用する。HR-TDC の使用には、専用のメザニンカードが必要なため、1 つのモジュールで読み出せる最大のチャンネル数は 64 チャンネルである。Dead time は数 100 ns 程度である。

### HUL Scaler

HUL Scaler は、サンプリング周波数は 300 MHz である信号カウンターであり、トリガー信号やトリガーロジックに使用する信号を数えるために使用する。外部から入力した信号によりゲートが開いている間だけ信号のカウントを行い、リセット信号を入力することでカウント数は 0 に初期化される。Dead time は数 100 ns 程度である。

### VME-EASIROC

VME-EASIROC は、CATCH 検出器群の CFT と PiID カウンターの MPPC 信号を読み出すモジュールであり、ADC と TDC の両方を取得することができる。ADC は、外部から入力された Hold 信号のタイミングでの波高を読み出す波高検出型であり、ペDESTALサプレッション機能が搭載されている。また、TDC は depth が 16hit/event の MultiHit-TDC であり、LSB は 1 ns である。A/D 変換処理に時間がかかるため、dead time は約 15  $\mu$ s である。

ここで、各検出器で使用しているフロントエンドモジュールのの対応表を表 5.2 に示す。また、フロントエンドモジュールごとの、典型的な 1 イベントあたりのデータサイズと Busy の長さを表 5.3 に示す。1 イベントでの合計のデータサイズはおおよそ 11 kbyte である。

表 5.2: 各検出器とフロントエンドの対応表

検出器	ADC	TDC	チャンネル数
RF (加速器信号)	-	HUL HR-TDC	1
Tagger (SF)	-	HUL MH-TDC	110
Tagger (PL)	CAEN V792	HUL MH-TDC	10
CFT	VME-EASIROC	VME-EASIROC	4932
BGO	CAEN V1724	HUL MH-TDC	24
PiID	VME-EASIROC	VME-EASIROC	31
T0	CAEN V792	HUL HR-TDC	2
SAC	CAEN V792	HUL MH-TDC	4
SDC0	-	HUL MH-TDC	448
SDC1	-	HUL MH-TDC	288
SDC2	-	HUL MH-TDC	443
SDC3	-	HUL MH-TDC	443
$e^\pm$ VETO	CAEN V792	HUL HR-TDC	2
TOF	CAEN V792	HUL HR-TDC	80

表 5.3: フロントエンドモジュール 1 台あたりの典型的な 1 イベントあたりのデータサイズおよび Busy。ワードは HDDAQ で使用されているデータの単位であり、1 ワードは 32 bit である。

フロントエンドモジュール	台数	ワード数	データサイズ (byte)	Busy( $\mu$ s)
CAEN V792	3	60	240	7
CAEN V1724 (VME バス)	1	51	204	0
CAEN V1724 (Optical LINK)	2	96	384	0
HUL MH-TDC (Tagger)	1	27	108	< 1
HUL MH-TDC (SDC1)	2	20	80	< 1
HUL MH-TDC (その他)	12	12	48	< 1
HUL HR-TDC (TOF)	1	15	60	< 1
HUL HR-TDC (その他)	1	22	88	< 1
HUL Scaler	2	108	432	< 1
VME-EASIROC (CFT)	78	19	76	15
VME-EASIROC (PiID)	1	27	108	15
全モジュール合計	104	~2800	~11 kbyte	15

### 5.3 構築した DAQ を用いたコミッショニング

インストールした検出器の動作確認および、構築した DAQ の健全性の確認のため、2024 年 11 月にコミッショニングを行った。このコミッショニングでは、液体水素標的の代わりに CATCH 内に設置した厚さ約 3 cm のポリエチレン標的に  $\gamma$  ビームを照射した。 $(\gamma, K^+)$  反応を検出するために、以下のトリガーを使用し

た。また、図 5.3 にトリガーロジックのダイアグラムを示す。

$$T0 \otimes TOF \otimes \overline{e^\pm VETO} \otimes \overline{SAC} \quad (5.1)$$

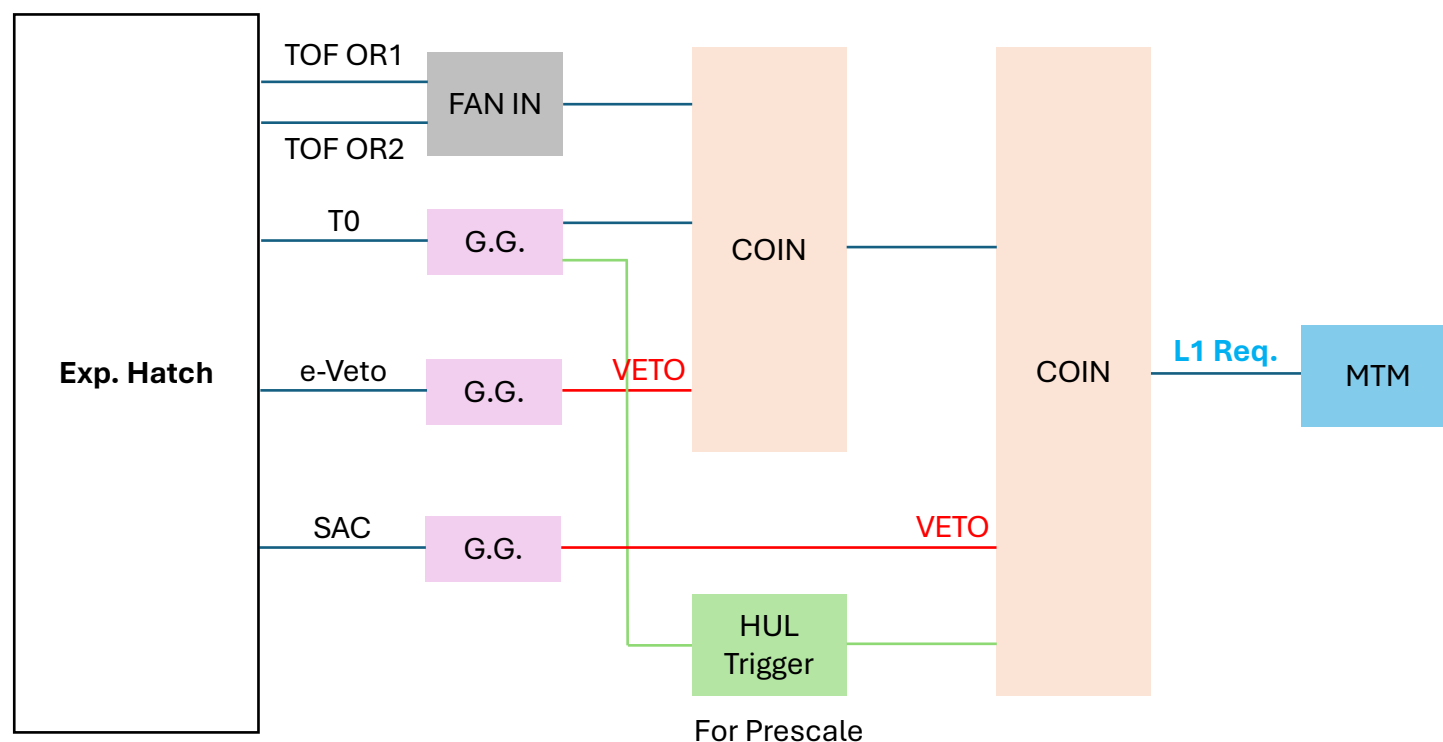


図 5.3: コミッシュニングで使したトリガーのダイアグラム。T0 と TOF の Coincidence 信号を、SAC と  $e^\pm$ VETO の信号で VETO することで、バックグラウンドである  $e^\pm$  によるイベントを除去している。

### 5.3.1 各検出器の応答

図 5.4 から図 5.7 に、コミッシュニングで取得したデータの一例を示す。5.2.1 で述べた全てのモジュールについて、正常にデータが取得できることが確認できた。

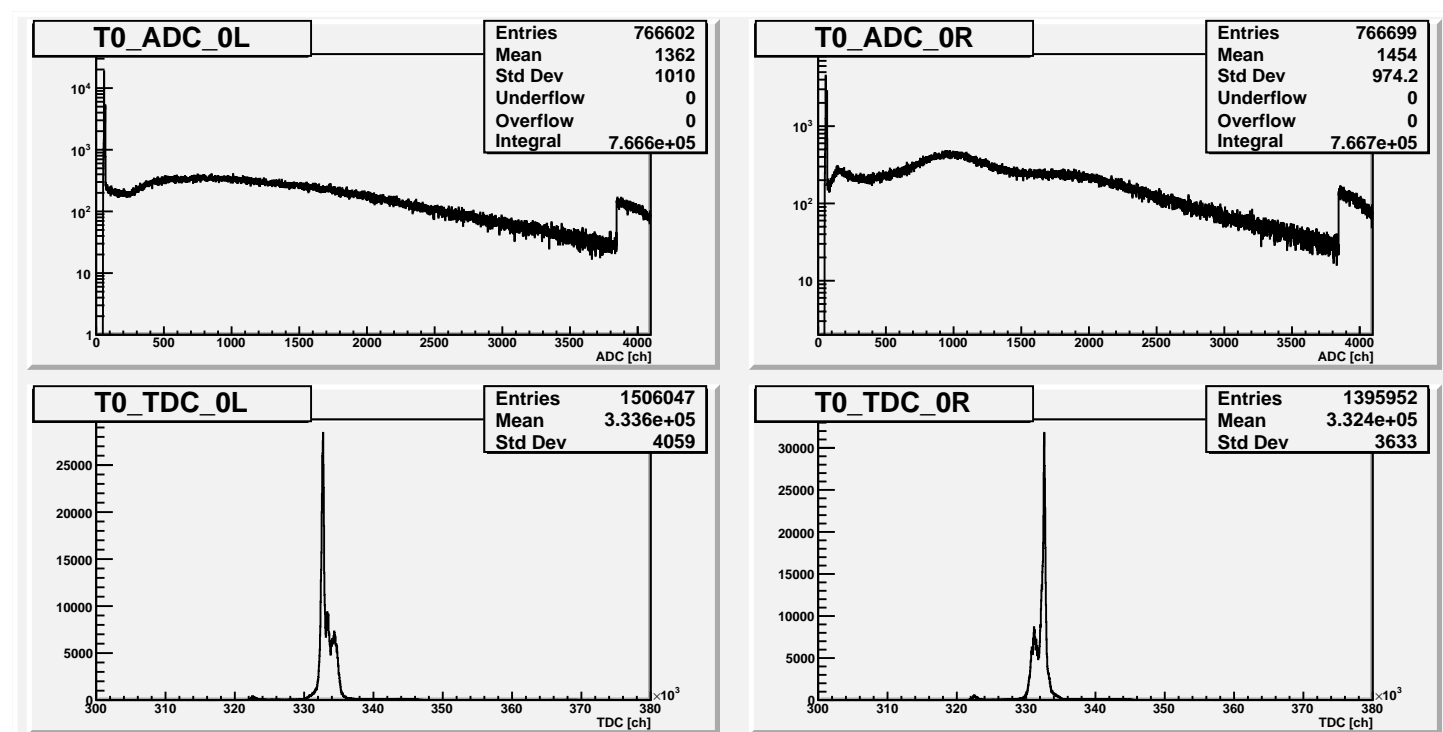


図 5.4: T0 の ADC と TDC のヒストグラム。T0 はプラスチックシンチレーターの両面を PMT で読み出ししている。ADC と TDC の取得にはそれぞれ CAEN V792 と HUL HR-TDC を用いている。

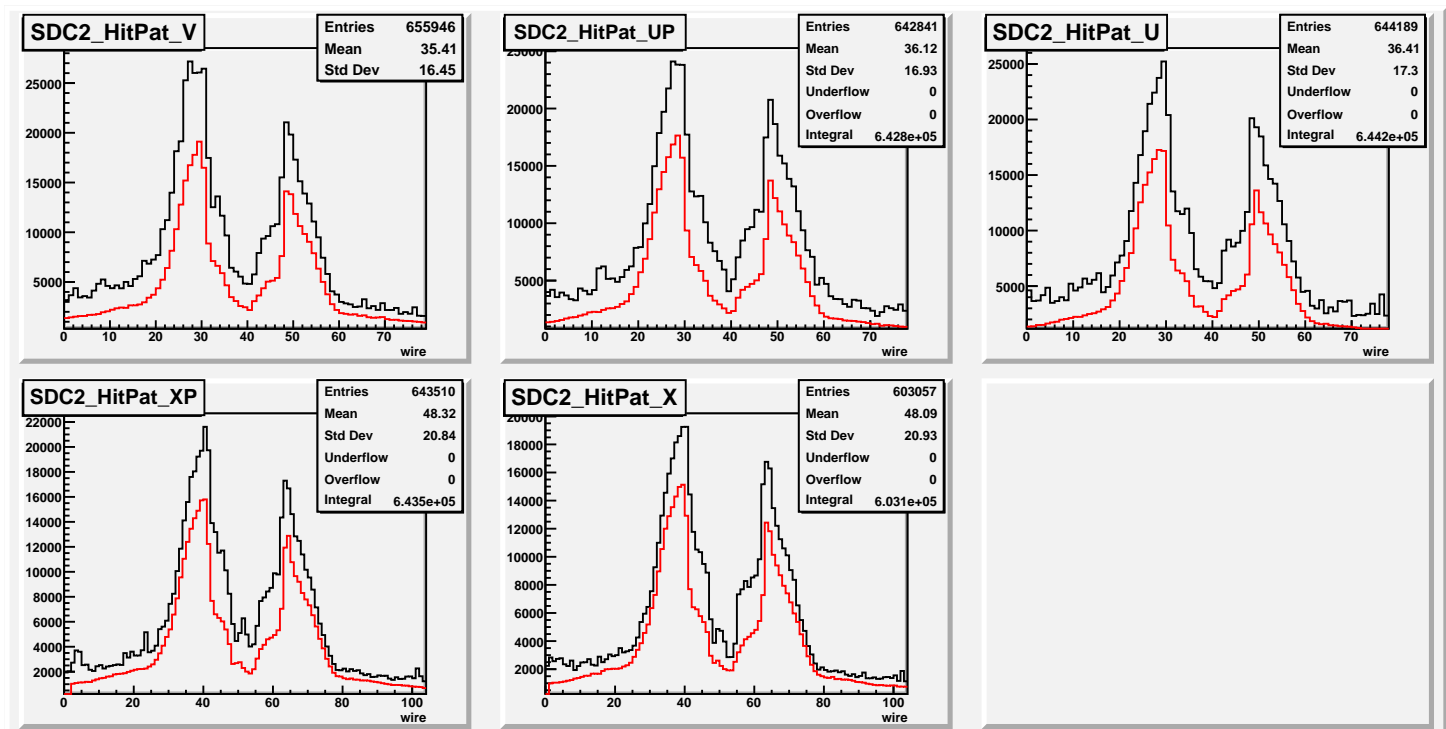


図 5.5: SDC2 の各レイヤーごとのヒットパターン。粒子の電荷に対応する 2 つのピークが見える。赤線は、適切な TOT の値でカットをかけた場合を表している。TDC 情報の取得には HUL MH-TDC を用いている。

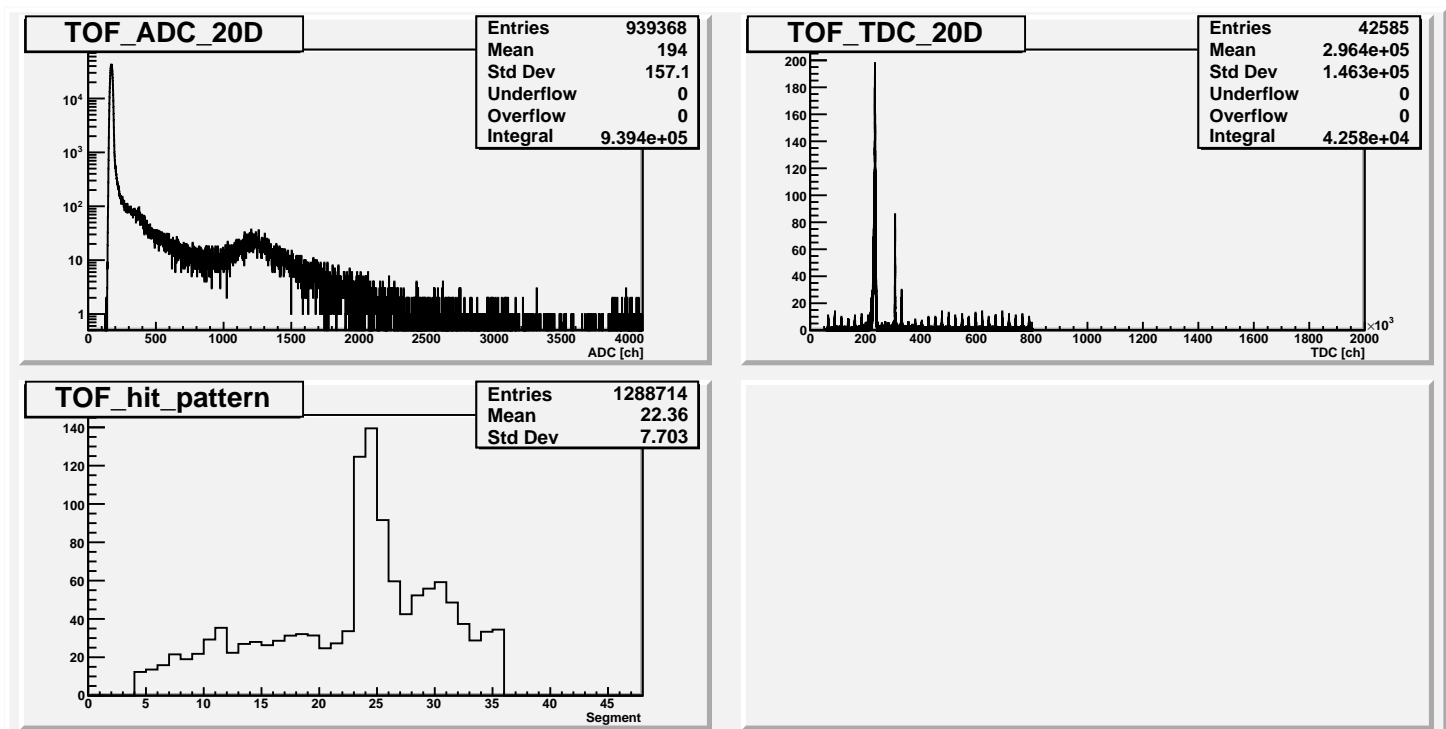
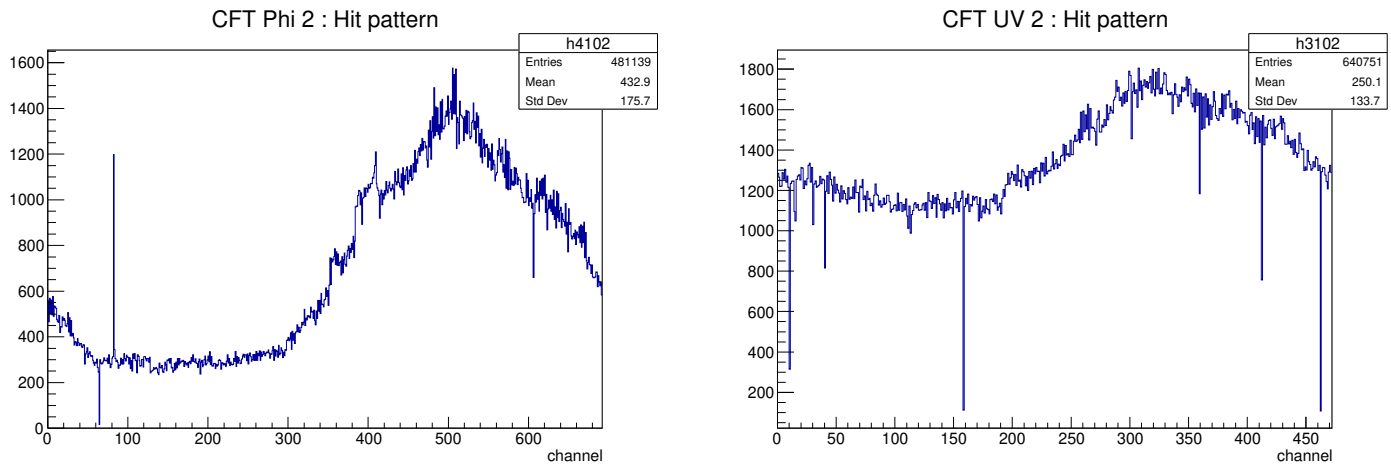


図 5.6: TOF(Segment20 Down) の ADC と TDC、および TOF 全体のヒットパターン。ADC の取得には CAEN V792 を、TDC の取得には HUL HR-TDC を用いている





(a)  $\phi$ 2 層のヒットパターン

(b)  $v$ 2 層のヒットパターン

図 5.7: CFT の  $\phi$  層と  $uv$  層のヒットパターン。VME-EASIROC で取得した TDC を用いている。

### 5.3.2 DAQ システムのレート耐性

DAQ システムのレート耐性を調べるために、トリガーレートを変えながらそのシステム効率を測定した。なお、この測定にあたっては、HUL 内に実装したプリスケalerを用いて  $T_0$  の信号をプリスケールし、これをトリガー回路の最終段でコインシデンスさせることで、トリガーレートの調整を行った。また、式 (5.1) のトリガー条件でのトリガーレートは 5 kHz 程度であったため、より高いトリガーレートでの測定も行えるように  $\overline{SAC}$  を除き、以下に示すトリガーを使用して測定を行った。

$$T_0 \otimes TOF \otimes \overline{e^{\pm}VETO} \otimes T_{0_{\text{prescaled}}} \quad (5.2)$$

ここで、このトリガー条件における典型的な Busy 信号の様子を図 5.8 に示す。各検出器の Busy 信号は、前述の MTM-RM システムによって MTM に集められ、その OR 信号が DAQ 全体の Busy となる。緑色で表示されている DAQ 全体の Busy は、黄色で表示されている VME-EASIROC によってほとんど決まっており、その長さは約 15  $\mu\text{s}$  である。

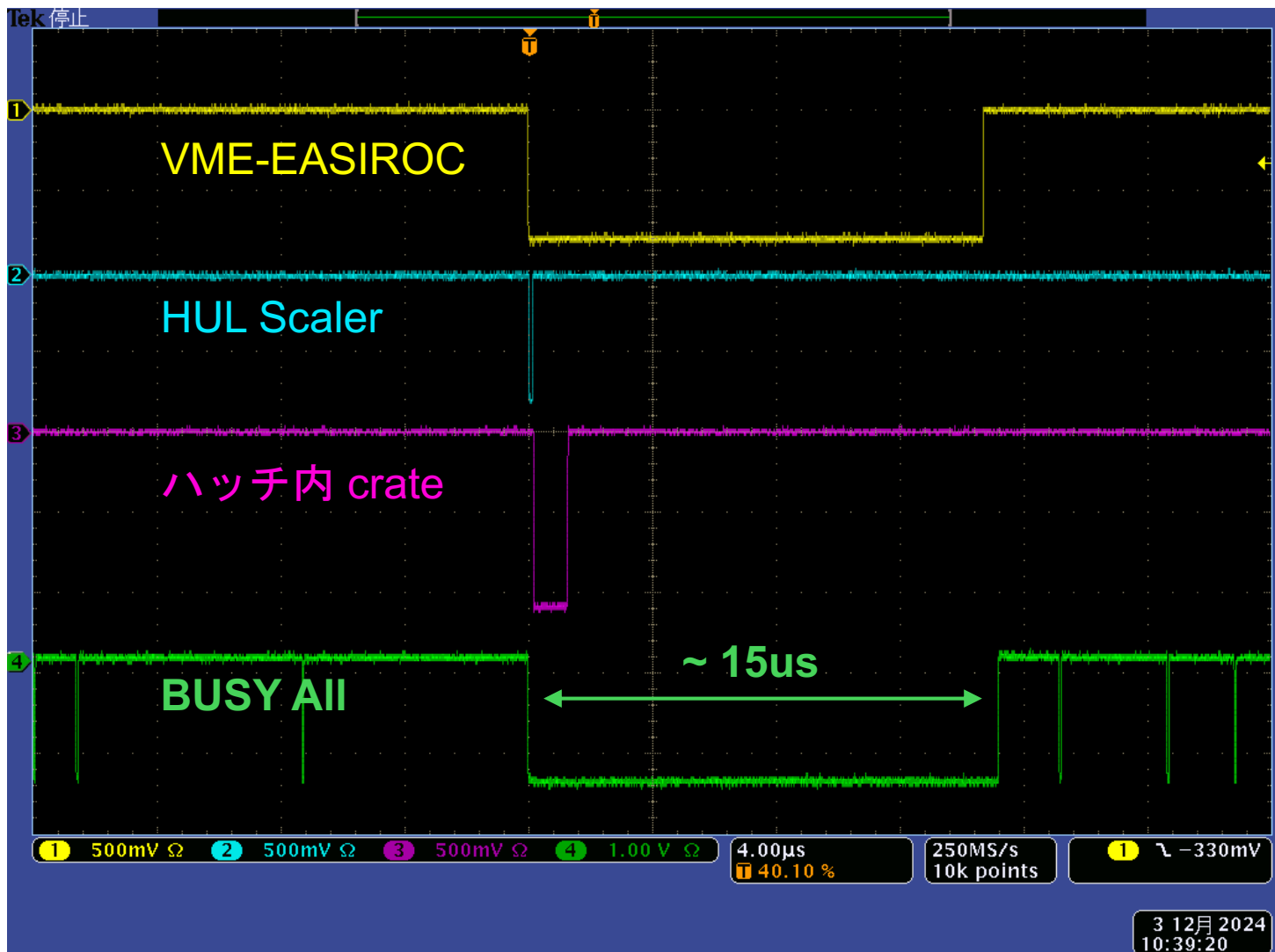


図 5.8: 典型的な Busy 信号の様子。黄色が VME-EASIROC、青色が HUL Scaler、緑が DAQ 全体の Busy である。また、ピンク色は、クレート Busy と呼ばれる、同じクレートに設置されている複数枚の HUL の Busy の OR 信号である。

DAQ のシステム効率は、以下のように定義することができる。

$$\text{Efficiency} = \frac{L1_{\text{accept}}}{L1_{\text{request}}} \quad (5.3)$$

ここで、 $L1_{\text{request}}$  は、MTM に入力されたトリガー信号の総数であり、 $L1_{\text{accept}}$  はそのうち DAQ が Busy 信号を出力しておらず実際にデータを取得することができた数である。また、DAQ 全体のデッドタイムが  $\tau$  であるとき、トリガーレートが  $f$  のときのシステム効率は以下のように計算することができる。

$$\text{Efficiency}_{\text{Predict}} = \frac{1}{1 + f_{\text{trig}} \tau} \quad (5.4)$$

図 5.9 に、実際に測定したデータを用いて式 (5.3) で計算したシステム効率、および DAQ のデッドタイムを 15  $\mu\text{s}$  と固定した場合に予測されるシステム効率を示す。

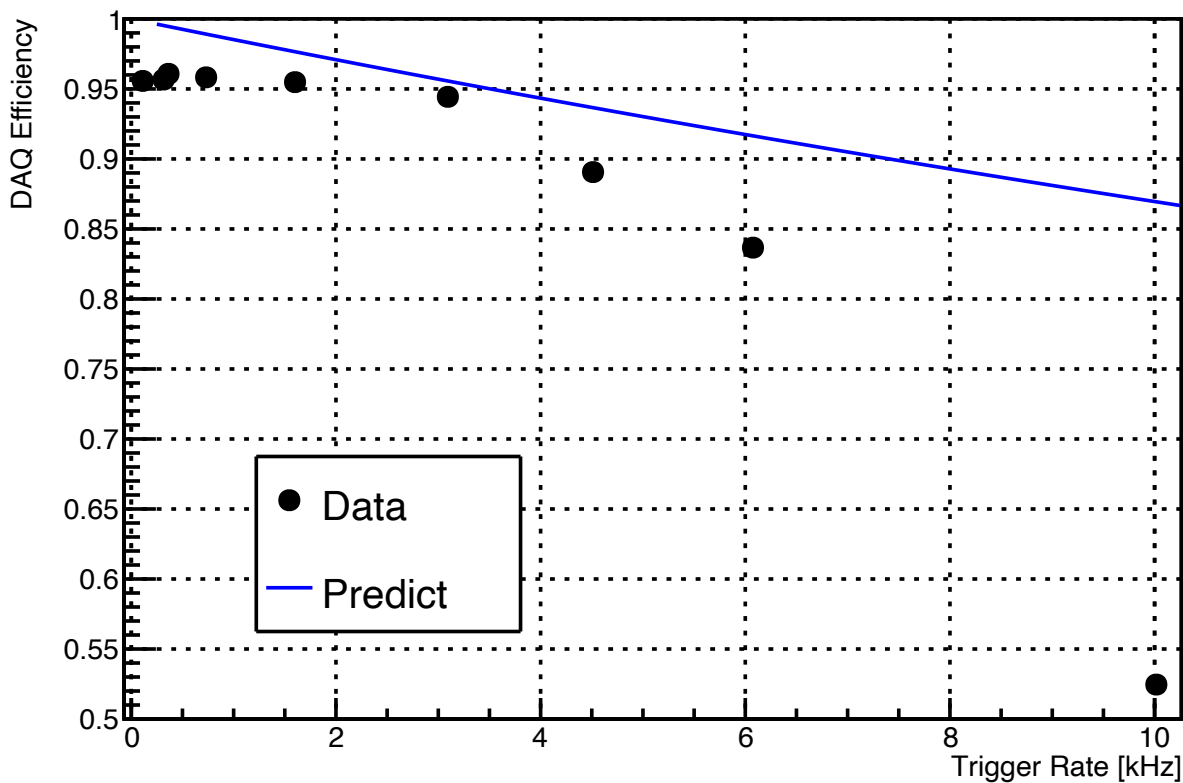


図 5.9: DAQ システム効率のトリガーレート依存性。測定結果を黒でプロットした。また、青線はシステム全体の dead time を  $15 \mu\text{s}$  とした時に予測される Efficiency。

今回構築した DAQ では、4 kHz 以下のトリガーレートにおいて、90% 以上のシステム効率を達成することに成功した。HYPS 実験で見積もられている  $10^7$  という  $\Lambda$  粒子の収量は、DAQ システム効率が 90% であることを想定して計算されているため、この DAQ システムは HYPS 実験の遂行に求められる性能を満たしているといえる。

一方で、4 kHz 以上のトリガーレートでは大きく効率が低下してしまうという問題点も存在している。今回、この原因の特定までは至らなかったが、PC のデータ処理が追いつかないことによるバックプレッシャーが大きな要因であると考えている。表 5.3 に示した典型的なデータサイズを用いて計算すると、トリガーレートが 1 kHz でのデータレートは 84 Mbps である。DAQ ネットワークの帯域は 10 Gbps であるから、その 1/100 も使っていないことになる。また、DAQ ネットワークの一部に使用されている 1 Gbps の帯域で考えても 1/10 以下しか使っていないことから、帯域の詰まっているとは考えにくい。

現在の DAQ システムにおいては、1 台の PC で 10 枚以上のモジュールを読み出しているフロントエンドがいくつか存在している。たとえば、HUL フロントエンドでは、18 台の HUL を 1 つの PC で読み出しており、また、5 つある VME-EASIROC フロントエンドのうち 4 つでは 18 枚の VME-EASIROC モジュールを 1 台の PC で読み出している。HDDAQ においては、読み出すモジュールの枚数分のフロントエンドプロセスが PC 内で立ち上がっているため、これらのフロントエンド PC の負荷は比較的大きくなっていると推測できる。また、HUL においては、定期的に膨大なワード数のデータを吐き出すモジュールが存在することをデータ取得中に確認している。その 1 例として、図 5.10 に、Tagger の TDC 情報を取得している HUL(MH-TDC) のワードサイズ分布を示す。ワード数の分布は、表 5.3 で示した典型的なワード数である 27 が最も多いが、その分布は広がっており 100 ワード以上のイベントも存在していることがわかる。MH-TDC はチャンネルごとに 1 つのトリガーに対して最大 16 ヒットまで記録できる仕様であるため、TDC の閾値が低くノイズ信号を引っ掛けてしまうような場合は、容易にその MultiHit depth が埋まってしまうデータサイズは大きくなる。

HUL(IP:40) datasize

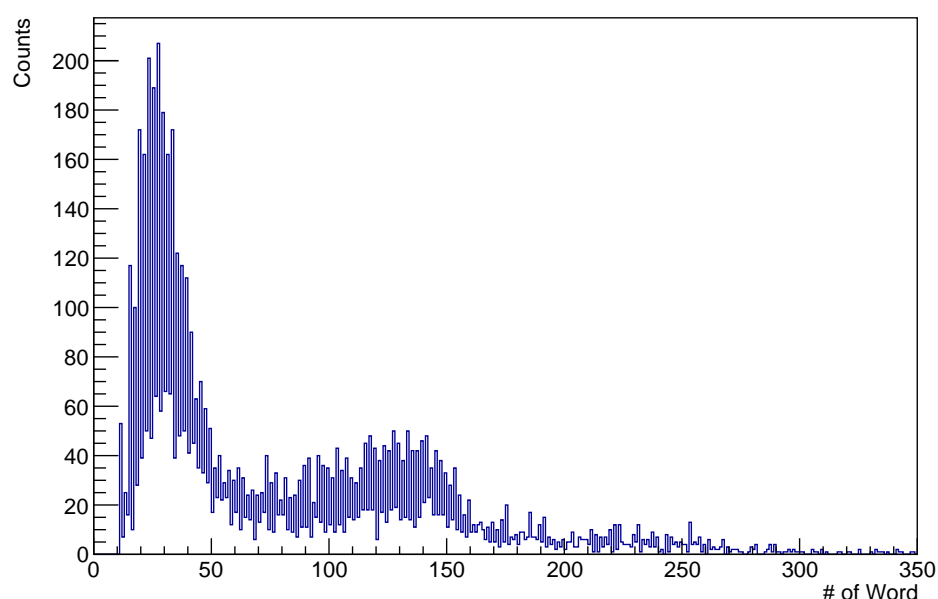


図 5.10: Tagger の TDC 情報を取得している HUL(MH-TDC) のワードサイズ分布。表 5.3 で示した典型的なワード数である 27 のカウントが 1 番多いが、その分布は広がっており 100 ワード以上のイベントも存在している。

このように、送られてくるデータサイズが大きかったり、読み出すモジュールの枚数が多い場合には PC の処理が追いつかなくなってしまう、バックプレッシャーが生まれる可能性が高くなると考えることができる。また、HYPS 実験ではスピルと呼ばれるビームのオンとオフが存在せず、トリガーが連続的にやってくるため、PC は常にデータ処理を行う必要があり、その点でも負荷は大きくなる。データ取得中には、図 5.11 に示すような 180  $\mu$ s ほどの非常に長い Busy 信号が出力されていることも確認されている。

今後は、使用してる PC の性能や処理能力、データ取得中の負荷などを確認し、必要に応じてフロントエンド構成の見直しを行うことでより高いシステム効率を達成できるようシステムを改良するとともに、2025 年 4 月からは物理データの収集を開始する予定である。

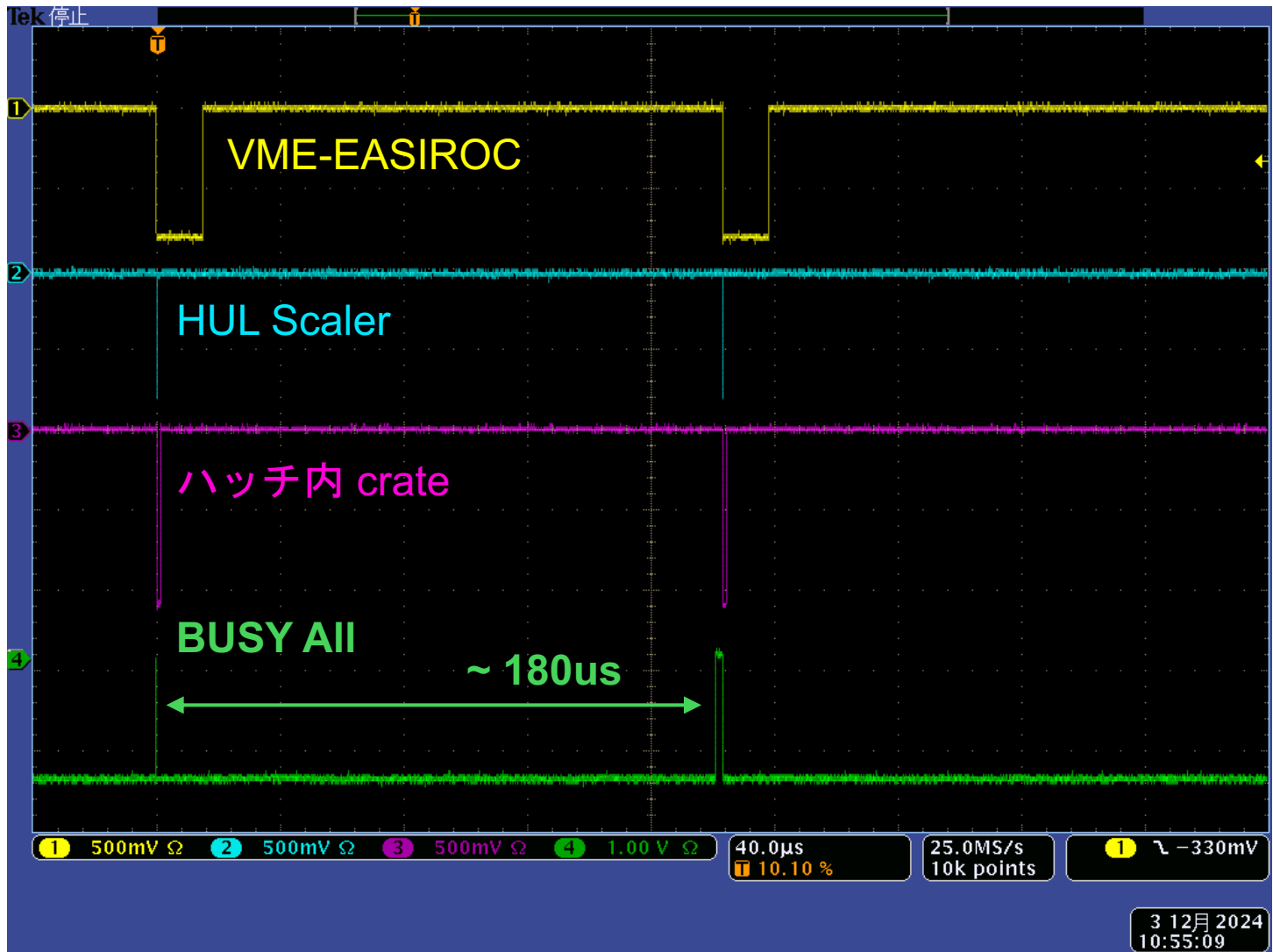


図 5.11: データ取得中に確認された、非常に長い Busy の様子。緑色で表示されているシステム全体の Busy 信号が約 180  $\mu$ s と、表 5.3 に示した各モジュールの典型的な busy と比べて非常に長く出力されている。

## 第6章

# まとめと今後の展望

我々の世界を構築する核力に関する研究は古くから盛んに行われており、遠距離における引力は中間子交換模型によってよく説明される。近距離における強い斥力芯の起源の解明は未だになされていないが、核子同士が重なり合うような距離であることから、クォークやグルーオン間に働く相互作用の寄与が大きいと考えられている。このように、核力をクォークの描像から理解するためには、 $u$ 、 $d$ クォーク以外のクォークを加えたものに核力を拡張し、NN系には存在しなかった相互作用を調べる必要がある。

こうしたバリオン間相互作用の理解を深めるために、比較的SU(3)フレーバー対称性の成り立つ $s$ クォークを加えたYNおよびYY相互作用の研究は重要である。その中でも、 $\Lambda$ ハイパー核の精密分光研究を通してその理解が進められてきた。一方で、 $\Lambda$ ハイパー核は多体系であり、多体力の中から2体の $\Lambda$ N相互作用を引き出すことは簡単ではないため、純粋な2体の相互作用は散乱実験により求めることが望まれている。

しかし、ハイペロンの寿命は0.1 nsと非常に短く核子との散乱が起きる前に崩壊してしまうことがあるため、その散乱実験は困難である。また、過去の実験では散乱の同定のために粒子の飛跡を画像として記録するイメージング手法を使用していたことによるビーム強度の制限なども相まって、YN散乱に関する実験データはNN散乱に対して非常に少なく、その統計も乏しいものとなっている。

このような現状を打破すべく、我々のグループはイメージング手法に頼らない $Yp$ 新たな実験手法を考案し、これを用いて高統計の $\Sigma^{\pm}p$ 散乱実験をJ-PARCにおいて成功させた。現在我々は、同様の手法を用いた $\Lambda p$ 散乱実験を計画しており、この実験では、これまで存在していない微分断面積のデータを取得する予定である。このデータを理論にフィードバックすることで、不定性の大きい現在の $\Lambda$ N相互作用理論モデルの精度を向上させることができると考えている。

この実験手法では、標的を円筒形に囲むCATCH検出器群を使用し、スペクトロメーターと合わせて散乱の終状態を測定する。この終状態から運動学を用いて粒子を再構成することで散乱事象の同定を行う。CATCHでは、約5000本のシンチレーションファイバーを用いて粒子の飛跡およびエネルギー損失の測定を行う。ファイバーにはMPPCが取り付けられており、専用の読み出しモジュールを用いてその読み出しを行う。現行のモジュールでは、外部から入力されたHold信号のタイミングでの波高を保持することでADC情報の取得を行っているが、回路自身のトリガーレイテンシーが、Hold信号の生成時間に対して短いため、現在は20 mのケーブルを用いて信号をアナログディレイさせることでそのタイミングの調整を行なっている。この最大の課題を克服するために、次世代のMPPC読み出し回路であるYAENAMIと、それを4枚搭載した32chのMPPC読み出しモジュールRAYRAWが開発された。

本研究では、この新しい読み出し回路が、CFTの求めるエネルギー測定に関する性能を満たしているかの評価を行った。CFTでは、粒子のファイバーでのエネルギー損失を利用して $\pi$ と陽子の識別を行う。ほとんどがMIP粒子でありエネルギー損失がほぼ一定である $\pi$ に対して、陽子が落とすエネルギーは大きく、低エネルギーの陽子はMIPの10倍以上のエネルギーを落とす。したがって、MIPを識別しながらその10倍以上のエネルギー範囲まで測定できることが読み出し回路には求められる。また、ファイバー1本あたりの信号



レートは最大で 10kHz 程度になると予想されており、このレートにおいて回路の動作が安定していることも要求される。これらの要求性能を満たしているかを、宇宙線および LED を用いて評価した。

宇宙線を用いた評価では、回路のゲインを 16 倍に設定した時に MIP の 10 倍までのエネルギーを測定できるという結果が得られた。また、ゲインを 8 倍にした場合には MIP の 25 倍のエネルギーを測定することもわかった。いずれの設定においても、MIP のピークは十分に識別可能であった。また、MIP の光量を再現した LED を、Clock Generator とランダムパルスを用いて光らせることで高レート入力環境の擬似的に再現し、回路のレート耐性を評価した。レートを 500 Hz から 5 MHz まで変化させながら測定を行った結果、現行の読み出し回路で見つかった、回路の信号出力が止まるという現象が起きないこと、また、50 kHz まではゲインが一定であることが確認できた。50 kHz 以上でのゲインの低下は、MPPC に直列に接続されている 10 k $\Omega$  という比較的大きい保護抵抗での電圧降下が原因だと考えている。

これらの評価結果より、RAYRAW は CFT の読み出しで求められるエネルギー測定に関する要求を十分に満たしていることがわかった。今後は、今回評価を行っていない時間分解能の評価を行うとともに、陽子ビームを用いた試験を行いその挙動を調べる予定である。また、保護抵抗を外した状態で再度高レート入力に対する評価を行い、ゲイン低下の原因の特定も行う。

本研究では、SPring-8 で行う  $\Lambda_p$  散乱実験 (HYPS 実験) のためのデータ収集システムおよび実験用ネットワークの構築も行った。使用する DAQ システムがネットワーク越しにすべてのデータの送受信を行うことを踏まえて、まず DAQ 専用のネットワークを構築した。また、トリガーや Busy といった信号のやり取りのための回路を含めた、読み出しシステムの構築を行った。

2024 年 11 月には、この DAQ を用いたコミショニングを行い、各検出器の信号が正常に読み出せていることを確認した。その上で、トリガーレートを変化させながら DAQ のシステム効率の評価を行った。評価の結果、4 kHz 以下のトリガーレートでは、実験計画時の想定である 90% 以上のシステム効率を達成することに成功した。一方で、4 kHz 以上のレートにおけるシステム効率が、システム全体の典型的な dead time から予測される効率よりも大きく低下してしまうということも明らかになった。この結果を受け、各フロントエンドモジュールの典型的なデータサイズから DAQ 全体のデータサイズを計算したところ、用意したネットワーク帯域の 1/10 以下であった。この計算と、現在のフロントエンドの構成においては 1 台で 15 枚以上のモジュールを読み出しているフロントエンド PC が複数存在していることを踏まえ、PC の処理が追いつかなくなることで、DAQ にバックプレッシャーを与えている可能性が高いと考えている。

今後は、使用している PC の性能や処理能力、データ取得中の負荷などを確認し、必要に応じてフロントエンドの構成を見直すことで、より高いシステム効率を達成できるようにシステムを改良するとともに、2025 年 4 月からは物理データの収集を開始する予定である。

# 謝辞

本論文を執筆にあたって、大変多くの方にお世話になりました。この場を借りて心より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。大学院からこの分野に飛び込み、右も左もわからない状態であった入学当初の私に対して、お忙しい合間を縫ってプログラミングやモジュールの使い方といった非常に基礎的なことから教えてくださった日々のことは今でも鮮明に覚えています。また、いつもギリギリになることが多い私のことをここまで指導していただいていることには感謝してもしきれません。これからもどうぞよろしくお願ひいたします。

田村裕和教授には、大学院の講義やハイパー核ゼミを通して原子核物理の面白さを教えていただきました。特に、ハイパー核ゼミで実験や物理の話をととても楽しそうにされている田村教授の姿は印象的で、自分もこれくらい物理や実験を楽しめるようになりたいといつも刺激をいただいています。

市川裕大准教授、金田雅司准教授には、普段のミーティングなどを通してご助言やご指導をいただきました。金田准教授には、サマーチャレンジを通して私がこの研究室に進学するきっかけをいただきました。ありがとうございます。

早川修平助教には、Analyzer や DAQ について 0 から丁寧に教えていただきました。そのおかげで、今ではソフトウェア、特に DAQ を触ることが楽しくて仕方ありません。また、SPring-8 での休日に連れて行っていただいた日帰りでの四国旅行はとても楽しい思い出です。

七村拓野助教には、特に HYPS 実験においてお世話になっています。これからの 2.5 年間の実験期間では、現場作業以外にも解析等で大変お世話になると思います。どうぞよろしくお願ひします。

鶴養美冬准教授、JAEA の山本剛史氏、藤田真奈美氏には、J-PARC 出張の際に大変お世話になりました。現場作業や検出器等の不明点を質問した際にはとても丁寧に教えていただき、理解を進めることができました。これからは、HYPS 実験のコラボレーターとしてもお世話になると思います、よろしくお願ひします。

京都大学の原田健志氏、江端健悟氏、岩井沙彩氏には E70 実験でお世話になりました。特に原田氏は、ビームタイムの 2 週間前に突然現場にやってきた何もわからない私を温かく迎えてくださり、ADC・TDC とはといったあまりにも基本的すぎる質問に対してもいつも丁寧に答えていただきました。いまの私が実験の現場を楽しめているのは、原田氏のおかげだと思っています。ありがとうございます。また、江端氏、岩井氏も含め、コンテナではいつも私のくだらない話に付き合ってくださいました。そのおかげで、実験の合間も含めてとても楽しい時間を過ごすことができました。

技術職員の梅津裕生氏には、HYPS 実験の検出器の架台の設計等を行っていただき、現場での組み立てや検出器のインストールも手伝っていただきました。ありがとうございます。また、秘書の高橋あゆみ氏には出張費の申請等、研究生活において様々なサポートをいただいています、ありがとうございます。

大学の先輩である、秋山タケル氏、梶川俊介氏、鎌田健人氏、水野柁哉氏、大浦文也氏、木野量子氏、石毛達大氏、成済秀氏、渡辺大護氏には、日々の研究生活やミーティングを通してたくさんの刺激をいただきました。特に、学部生時代に参加したサマーチャレンジからお世話になっている大浦氏、木野氏、そして居室が同じで入学時からいろいろサポートをしていただいている石毛氏には、大変お世話になっており、研究に限らず様々な相談をさせていただきました。みなさんのおかげで研究生活を楽しくても過言ではありません。

ん、ありがとうございます。

同期の今本亮氏、齋藤隆太氏は、常に頼れる友人です。今本氏には、定期的に行う様々な議論を通していつも新しい気づきをもらっています。齋藤氏の豊富な知識や非常に効率的な研究の進め方にいつも刺激をもらっています。これからもどうぞよろしくお願いします。

後輩の雨宮功来氏、洪雨寧氏、嶋崎開斗氏、高野然氏、遠山翔太氏、原谷あかり氏には、普段から他愛もない話に付き合っていていただき、楽しい時間を過ごさせてもらっています。ありがとうございます。

RAYRAW の性能評価にあたっては、SPADI-Alliance の皆様にお世話になりました。その中でも、特にKEK の本多良太郎准教授には、ミーティングや研究会等を通して様々な知識を学ばせていただきました。

また、RCNP のLEPS/LEPS2 グループの皆様には、HYPS 実験の準備にあたりたくさんの協力をいただいています。これからの実験期間でも、どうぞよろしく願いいたします。

その他にも、ここには書ききれないほどの多くの方々にお世話になりました。この場をお借りして、心から感謝申し上げます。

最後に、私の修士課程への進学を快く受け入れ、ここまで支えていただいた家族、祖父母に心から感謝いたします。これからも温かく、時には厳しく見守っていただけると幸いです。

# 参考文献

- [1] P. B. Demorest et al. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature*, 467: 1081–1083, 2010.
- [2] J. Antoniadis et al. A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary. *Science*, 340:1233232, 2013.
- [3] J.K. Ahn et al.  $\Sigma^+p$  elastic scattering in the region of  $300 \leq p_\Sigma \leq 600$  MeV/c with a scintillating fiber target. *Nucl. Phys. A*, 648:263–279, 1999.
- [4] Y. Kondo et al.  $\Sigma^-p$  elastic-scattering in the region of  $400 < p_\Sigma < 700$  MeV/c with a scintillating-fiber active target. *Nucl. Phys. A*, 676:371–387, 2000.
- [5] J.K. Ahn et al.  $\Sigma^+p$  elastic scattering cross sections in the region of  $350 \leq p_{\Sigma^+} \leq 750$  MeV/c with a scintillating fiber active target. *Nucl. Phys. A*, 761:41–66, 2005.
- [6] T. Nanamura et al. Measurement of differential cross sections for  $\Sigma^+p$  elastic scattering in the momentum range  $0.44 - -0.80$  GeV/c. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2022:093D01, 2022.
- [7] K. Miwa et al. Measurement of the differential cross sections of the  $\Sigma^-p$  elastic scattering in momentum range 470 to 850 MeV/c. *Phys. Rev. C*, 104:045204, 2021.
- [8] K. Miwa et al. Precise Measurement of Differential Cross Sections of the  $\Sigma^-p \rightarrow \Lambda n$  Reaction in Momentum Range 470–650 MeV/c. *Phys. Rev. Lett.*, 128:072501, 2022.
- [9] J. Rowley et al. Improved  $\Lambda p$  Scattering Cross Sections between 0.9 and 2.0 GeV/c as a Main Ingredient of the Neutron Star Equation of State. *Phys. Rev. Lett.*, 127:272303, 2021.
- [10] J. Haidenbauer, U.-G. Meißner, and A. Nogga. Hyperon-nucleon interaction within chiral effective field theory revisited. *The European Physical Journal A*, 56(91), 2020. doi: 10.1140/epja/s10050-020-00100-4.
- [11] K. Miwa et al. Measurement of the differential cross section and spin observables of the  $\Lambda p$  scattering with polarized  $\Lambda$  beam. [http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_1101/pdf/KEK\\_J-PARC-PAC2021-14.pdf](http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1101/pdf/KEK_J-PARC-PAC2021-14.pdf), 2020.
- [12] Y. Akazawa et al. Development and application of CATCH: A cylindrical active tracker and calorimeter system for hyperon-proton scattering experiments. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1029(11):166430, 2022. doi: 10.1016/j.nima.2022.166430.
- [13] 塩崎 健弘.  $\Sigma p$  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. 修士論文, 東北大学, 2015. URL [https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~db/human\\_resource/thesis/2009\\_B\\_2\\_M\\_1.pdf](https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~db/human_resource/thesis/2009_B_2_M_1.pdf).
- [14] 宮原 正也. MPPC 読み出し用汎用 ASIC の開発状況. 計測システム研究会 2021 スライド, 2021. URL <https://openit.kek.jp/workshop/2021/dsys/presentation/d3aiqp>.
- [15] ANALOG DEVICES. Max1932 datasheet. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX1932.pdf>, 2029. Accessed: 2025-01-24.
- [16] 坂尾 珠和.  $\pi^-p \rightarrow K^0\Lambda$  反応を用いた  $\Lambda p$  散乱実験手法の開拓. 修士論文, 東北大学, 2020. URL

- [https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~jparchua/share/news/210313\\_mthesis\\_sakao.pdf](https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~jparchua/share/news/210313_mthesis_sakao.pdf).
- [17] SPring-8. 放射光の原理. [http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/whats\\_sp8/whats\\_sr/generation\\_sr#sr](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/whats_sr/generation_sr#sr), 2024.
- [18] SPring-8. ビームラインマップ. [http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/whats\\_sp8/facilities/bl/map/](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/facilities/bl/map/), 2024.
- [19] M. Sumihama. Photon beam asymmetries for the  $p(\vec{\gamma}, K^+)\Lambda$  and  $p(\vec{\gamma}, K^+)\Sigma_0$  reactions at SPring-8/LEPS. 博士論文, 大阪大学, 2003. URL [https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/theses/dt\\_sumihama03.pdf](https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/theses/dt_sumihama03.pdf).
- [20] K. Mizutani.  $\phi$  photoproduction on the proton at  $E_\gamma = 1.5 - 2.9\text{GeV}/c$ . 博士論文, 京都大学, 2018. URL [https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/theses/dt\\_mizutani\\_18.pdf](https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/theses/dt_mizutani_18.pdf).