

シグマ陽子散乱実験のための
汎用FPGAモジュールを用いた
トリガーシステムの開発

大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻

星野 寿春

平成31年2月4日

概要

シグマ・陽子散乱実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速度施設（J-PARC）のハドロン実験施設で現在行われている。本実験では、 π 中間子ビームを用いて液体水素標的に照射し $\pi^\pm p \rightarrow K + \Sigma^\pm$ 反応にてシグマハイペロンを生成し、液体水素標的内の陽子とシグマハイペロンの散乱を行い、散乱事象として 10000 イベントという高統計精度での $\Sigma^\pm p$ の微分散乱断面積の測定を目標とする実験である（J-PARC E40 実験）。理論によって予想されている $\Sigma^+ p$ チャンネルにおいてクォークレベルでのパウリ効果による非常に大きな斥力芯が予想され、この斥力の大きさを実験的に定量的に決定する。

本研究では、J-PARC E40 実験のトリガーシステムの開発とその評価を行った。トリガーシステムの要請として時間制限があった。シグマハイペロンと陽子の散乱事象を検出するためにファイバー飛跡検出器（CFT）、BGO カロリメータ、シンチレーション検出器から構成される散乱陽子検出器群（CATCH）を用いる。CATCH では、散乱事象の同定を行うために散乱陽子の飛跡並びにエネルギーを測定する必要がある。エネルギー情報を取得する方法としてアナログ信号の波高を取得を行う ADC がある。CFT で ADC を測定するためには、従来よりもトリガーの遅延を短くしなければならなかった。その遅延を実現するために検出器のある実験エリア内でトリガー生成を行う必要があった。また、実験エリア内でトリガー生成を行うためにはビームが出ている間に扱えるように遠隔操作によって信号を操作する必要があった。これらを実現するために、FPGA を用いた汎用回路によりトリガーシステムを構築を行い、2018 年の 6 月に J-PARC の K1.8 ビームラインにおいて構築したトリガーシステムを用いて一部のデータ取得を無事行なった。

2018 年の 6 月に J-PARC で行った実験では、多くの時間検出器や飛跡検出器、トリガー検出器があり、その検出器から得られる信号のデータ読み出しやトリガー用の信号を生成を行った。それらの信号の中で汎用 FPGA モジュールである HUL Trigger というモジュールへ入力される信号についてまとめた。また、その信号を用いてトリガー信号を生成するための回路を FPGA にプログラミングを行った。FPGA 回路では、J-PARC E40 実験の Σp 散乱用のトリガーに加え、検出器の較正用のトリガーの出力を可能にした。トリガーを生成するために FPGA の内部の信号を NIM レベルで出力できるようにしており、実験時にはその出力を利用し、内部信号のタイミング調整を行った。生成したトリガー信号が CFT の ADC を取得できること確認した。

実験で得られたデータよりトリガー用の検出器である SAC の検出効率を求め想定通りに動作していることを確かめた。本実験のトリガーに運動量と角度の選択を行うモジュールである Matrix Trigger がある。Matrix Trigger は検出器の信号で設定したヒットパターンがあるときにトリガー信号を出力する。その検出器の信号のコインシデンスを行う点で信号幅を決めるための解析と、検出器のヒットパターンの解析を行った。そこから得られた結果から、2019 年に J-PARC で行われる予定の実験時にトリガーレートの削減と、 Σ の量が 8 % 改善されるという結果を得た。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	バリオン間相互作用	1
1.2	ΣN 相互作用	2
1.3	ΣN 散乱実験	3
1.4	本研究の目的	4
第 2 章	J-PARC における Σp 散乱実験	6
2.1	大強度陽子加速器施設 J-PARC	6
2.1.1	加速器について	6
2.1.2	ハドロン実験施設	7
2.1.3	K1.8 ビームライン	8
2.2	J-PARC E40 実験の概要	9
2.3	実験セットアップ概要	9
2.4	二体の運動学による散乱事象の同定方法	11
2.5	K1.8 ビームラインスペクトロメータ	12
2.5.1	時間計測用検出器	12
2.5.2	飛跡計測用検出器	14
2.6	LH ₂ 標的	16
2.7	散乱陽子検出器群	17
2.8	KURAMA スペクトロメータ	19
2.8.1	時間計測用検出器	20
2.8.2	飛跡計測用検出器	21
2.8.3	トリガー検出器	24
2.9	2019 年参加予定の検出器	26
2.10	トリガー概要	27
2.11	Level 1 Trigger	28
2.11.1	HUL Trigger	29
2.11.2	Matirx Trigger	29
2.12	Level 2 Trigger	30
2.12.1	Mass Trigger	31
2.13	Data Acquisition system	31
2.13.1	Hadron DAQ	31

第 3 章	HUL Trigger の開発と評価	32
3.1	HUL Trigger の開発	32
3.1.1	HUL Trigger 開発の背景	32
3.1.2	HUL Trigger 概要	32
3.1.3	HUL Trigger までの入力信号	34
3.1.4	FPGA への実装内容	35
3.1.5	HUL Trigger の入出力まとめ	42
3.1.6	HUL Trigger まとめ	43
3.2	トリガー信号の生成	43
3.2.1	HUL Trigger 内トリガー信号の様子	44
3.2.2	Matrix Trigger でのトリガー信号の様子	46
3.2.3	Final timing でのトリガー信号の様子	47
3.2.4	トリガー生成の結果	48
第 4 章	SAC の検出効率	50
4.1	SAC の検出効率	50
第 5 章	Matrix Trigger の評価と改善	52
5.1	Matrix の Pattern の評価	52
5.2	Matrix の Pattern の再考	59
5.3	Matrix のコインシデンスゲートの評価	64
第 6 章	まとめ	75
	謝辞	77

目 次

1.1	u, d, s の 3 つのクォークで記述されるバリオン 8 重項	1
1.2	各理論モデルから得られる $\Sigma^+ p(I = \frac{3}{2})$ の散乱微分断面積	3
1.3	各理論モデルから得られる $\Sigma^- p(I = \frac{1}{2})$ の散乱微分断面積	3
2.1	J-PARC 施設全体図	6
2.2	ハドロン実験施設全体図	8
2.3	K1.8 ビームライン	9
2.4	実験セットアップの概略図	10
2.5	標的内での Σp 散乱の概要図	11
2.6	K1.8 ビームラインスペクトロメータ	12
2.7	BH1 の概念図	13
2.8	BH2 の概念図	14
2.9	BFT の設計図	15
2.10	BC3、4 のワイヤー構造	16
2.11	LH ₂ 標的の設計図	16
2.12	CATCH の 3D モデル	17
2.13	CFT の写真	18
2.14	KURAMA スペクトロメータのセットアップ	19
2.15	index	20
2.16	TOF の全体図とアクリルセグメント	21
2.17	SFT-X の概念図	22
2.18	SFT-UV の概念図	22
2.19	SDC1 の概念図	23
2.20	SDC2 の概念図	23
2.21	SDC3 の概念図	24
2.22	SAC の概要図	25
2.23	SCH の概要図	26
2.24	トリガーシステムの概要図	27
2.25	Level 1 Trigger の概要図	28
2.26	MatrixTrigger への入力信号の回路図	30
3.1	HUL の写真	33
3.2	HUL Trigger への入力信号の生成過程概要図	34
3.3	FPGA の記述内容概要図	36

3.4	モジュール記号のまとめ	38
3.5	FPGA の入力と Region1 のブロック図	38
3.6	Region2 のブロック図	39
3.7	Region3 のブロック図	40
3.8	Region4 のブロック図	41
3.9	HUL Trigger への入力まとめ	42
3.10	HUL Trigger の出力まとめ	43
3.11	トリガータイミングの様子示した部分で HUL Trigger の FPGA 設計回路での位置	44
3.12	HUL Trigger の FPGA の Beam と PiBeam のプローブ点とその信号のコインシデンスの様子を表すオシロスコープの画像	45
3.13	HUL Trigger で FPGA の内部信号でプローブを行った点とその信号のコインシデンスの様子	45
3.14	HUL Trigger で FPGA の BH2_K のプローブを行った点と BH_K の信号のコインシデンスの様子を表すオシロスコープの画像	46
3.15	Matrix モジュールでのコインシデンスの様子	47
3.16	Level 3 Coin の Final timing のコインシデンスの様子	48
3.17	CFT のアナログ信号とトリガー信号	49
5.1	Σ 粒子を選んだ時の SCH と TOF のセグメントの二次元相関。	52
5.2	SCH が、TOF がセグメントの時の SFT のヒットパターン	53
5.3	m_2 の分布。	54
5.4	K を選んだ時の Missing Mass の分布。	54
5.5	K を選んだ時の MissingMass で $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/c^2$ の範囲を選んだ時の運動量分布	55
5.6	Matrix Pattern 適応前後での運動量分布とその比	56
5.7	Matrix の運動量選択領域と、 K 中間子を選んだときの $p(\pi, K)X$ の Missing Mass 分布で Σ の領域を選んだときの分布	56
5.8	Matrix Trigger を適用していないときの正電荷の粒子の運動量と角度の二次元相関	57
5.9	Matrix Trigger を適用したときの正電荷の粒子の運動量と角度の二次元相関。	57
5.10	正の荷電粒子を選択したときと、その中で Matrix Trigger を解析的に適用したときの $p(\pi, K)X$ の Missing Mass X 分布	58
5.11	Matrix Pattern を適用したときの電荷が正の粒子の Missing Mass 分布と電荷が正の粒子の Missing Mass 分布の比。	58
5.12	Matrix Pattern を適用したときの電荷が正の粒子の Missing Mass 分布と電荷が正の粒子の Missing Mass 分布の比と別のデータで散乱 K を選んだときの $p(\pi, K)X$ を計算したものをスケール	59
5.13	SCH、TOF を 1 つずつ選んだときの Missing Mass と Matrix Pattern を満たしたものを全て足したときの Missing Mass	60
5.14	Matrix Trigger のパターンを満たす全ての SCH と TOF の組の R1 の分布	61

5.15 Matrix Trigger のパターンを満たす全ての SCH と TOF の組の R1 の分布 に Σ 粒子のカウントの重み付けをしたヒストグラム	61
5.16 $R1 > \text{ratio}$ を満たすときの Σ の Efficiency	62
5.17 $R1 > 30\%$ を満たす SCH と TOF の組み合わせ。	62
5.18 2018 年の時と新しい Matrix Pattern を適応した時の SFT のセグメント . .	63
5.19 現状と新しい Matrix Pattern を適用し電荷が正の粒子を選んだときの Missing Mass 分布と電荷が正の粒子を選んだときの Missing Mass 分布の比と別のデータで散乱 K を選んだときの $p(\pi, K)X$ を計算したものをスケールしたヒストグラム	64
5.20 Matrix に参加している検出器の時間分布	65
5.21 TOF の時間分布で 25ns~35ns の領域で cut を行なった時の SCH、SFT の時間分布	66
5.22 Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比	67
5.23 Σ が生成されたときの、Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比 . .	68
5.24 Matrix Trigger に参加している検出器の粒子ごとの時間分布	69
5.25 $R1 > 30\%$ の選別を行ったときの Matrix Trigger の Accept の割合	70
5.26 新しい Matrix Pattern のための SFT のセグメント選別を行ったときの Matrix Trigger の Accept の割合	70
5.27 Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比。2018 年のパターンのときと新しいパターンのときのそれぞれの比。	71
5.28 Matrix Trigger と L1、L1 と DAQ Efficiency の関係とそれぞれの線形近似	72
5.29 新しいパターンを適応させ、コインシデンスの時間幅を狭めていったときの Σ の Efficiency	73

表 目 次

1.1	フレーバーの多重項の基底で記述した ΣN のポテンシャル	2
2.1	KURAMA スペクトロメータの検出器まとめ。	19
2.2	各検出器の読み出しモジュール	31
3.1	HUL の基本仕様	34
3.2	FPGA 内のレジスタで制御可能なモジュール	37
3.3	Region2_1~3 の定義	40
4.1	SAC の Efficiency の選別条件	51

第1章 序論

1.1 バリオン間相互作用

クォーク3個で構成された粒子のことをバリオンという。陽子や中性子といった粒子もバリオンである。陽子と中性子は核子と呼ばれ、原子核を構成しており、宇宙には原子核からできた多くの物質が存在している。核子間に働く力のことを核力といい、この相互作用の性質を理解することは重要である。よって現代までに実験的・理論的に多くの研究が行われてきた。核力は、多くの核子-核子 (NN) 散乱実験から 1 fm より離れた中・遠距離では引力であり、1 fm 以下では斥力である (斥力芯) ということがよく知られている。引力である中・遠距離では one boson exchange (OBE) モデル [1] によりよく記述できている。しかし、OBE モデルでは近距離での斥力を表現できておらず現象論的に取り扱っている。

核力はクォーク間に働く強い相互作用に由来している。核子同士が重なるほどの近距離での相互作用についてはクォークレベルで考えることは自然である。核力についてさらに深い理解を得るためには、 u, d クォークから構成される核子系の $SU_f(2)$ から、 s クォークを含んだ $SU_f(3)$ に拡張して考えることが必要である。NN 系では、アイソスピン空間においてアイソスピンの合成から、 $I = 1$ の 3 重項と、 $I = 0$ の 1 重項の既約表現が得られる。

$$2 \otimes 2 = 3 \oplus 1 \quad (1.1)$$

$SU_f(3)$ 対称性ではバリオンはスピン $1/2$ の 8 重項とスピン $3/2$ の 10 重項が得られる。バリオン 8 重項を図 1.1 に示す。

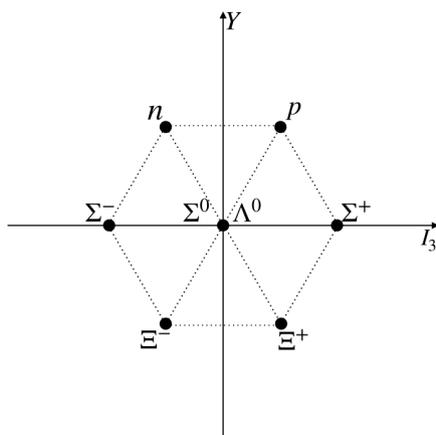


図 1.1: u, d, s の 3 つのクォークで記述されるバリオン 8 重項。横軸はアイソスピンの第 3 成分 I_3 であり、縦軸はハイパーチャージ Y で、バリオン数とストレンジネスの和である。

8重項の2つのバリオンの系を考えることで

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

という6つの既約表現が得られる。NN相互作用での3重項と1重項はそれぞれ(27)と(10*)に含まれる。つまり、現在わかっているNN相互作用は部分的なものであり、他の項を調べることは核力の理解について重要である。つまり、(27)と(10*)以外の項に含まれる、sクォークを含んだバリオンであるハイペロン(Y)と核子の相互作用であるYNや、YY相互作用について調べることが必要である。

バリオン間相互作用を記述する理論モデルの代表的なものとして、Nijmegen one boson exchange (Nijmegen OBE) モデル [2] と Kyoto-Niigata resonating-group method (Kyoto-Niigata RGM) モデル [3] がある。Nijmegen OBE モデルでは、SU(2) から $SU_f(3)$ へ拡張しており、遠距離における引力については中間子の交換、近距離においては現象論的に取り扱っている。一方、Kyoto-Niigata RGM モデルでは、遠距離では同様に中間子の交換によって記述されるが、近距離では quark-cluster model (QCM) によりクォーク間の相互作用を考慮しており、クォーク間のパウリ効果やグルーオンの交換に基づいて記述している。QCM ではグルーオンの交換時に起こるカラー磁気相互作用やクォーク間のパウリの排他律に基づいて計算している。Kyoto-Niigata RGM モデルでは、(10) 項とまた (8_s) 項においてクォークレベルのパウリ効果による斥力芯が核力よりも非常に強く現れると予想している。

1.2 ΣN 相互作用

2体のバリオンの相互作用を調べるのに、実験的にもっとも直接的な方法は散乱実験である。バリオン間のポテンシャルは6つの既約表現により、それぞれのフレーバーの基底ポテンシャルの足し合わせで表される。 ΣN のポテンシャルは表 1.1 のように表せる。 $I = 3/2$ の時が $\Sigma^+ p$ に対応している。 $SU_f(3)$ に拡張したモデルである、Nijmegen OBE モデルと Kyoto-Niigata RGM モデルでの $\Sigma^{\pm} p$ の散乱微分断面積を計算したものが図 1.2、1.3 である。図中の NSC が Nijmegen OBE モデル、fss2 が Kyoto-Niigata RGM モデルに対応した計算モデルである。fss2 はクォーク描像に基づき自然に強い斥力を予言する理論であり、NSC が現象論的な斥力芯とメソンの交換に基づく理論である。Kyoto-Niigata RGM モデルではクォークレベルのパウリの排他律から強い斥力が生じることが予想されている。これは、Nijmegen OBE モデルでは、表現されておらず $\Sigma^+ p$ の散乱断面積にて3倍程度の違いが生じる。以上より、 $\Sigma^+ p$ の散乱微分断面積を求めることでクォーク間に生じるパウリ効果、 $\Sigma^- p$ の散乱微分断面積を求めることで $SU_f(3)$ に拡張した中間子交換モデルの検証を行うことができる。つまり、 Σp 散乱実験を行うことは、陽子中性子のみでは確認できないバリオン間の相互作用への理解を深める上で非常に重要である。

表 1.1: フレーバーの多重項の基底で記述した ΣN のポテンシャル

バリオン間ポテンシャル	spin-singlet	spin-triplet
$\Sigma N(I = \frac{1}{2})$	$\frac{1}{\sqrt{10}}[3(8_s) - (27)]$	$\frac{1}{\sqrt{2}}[(8) - (10^*)]$
$\Sigma N(I = \frac{3}{2})$	(27)	(10)

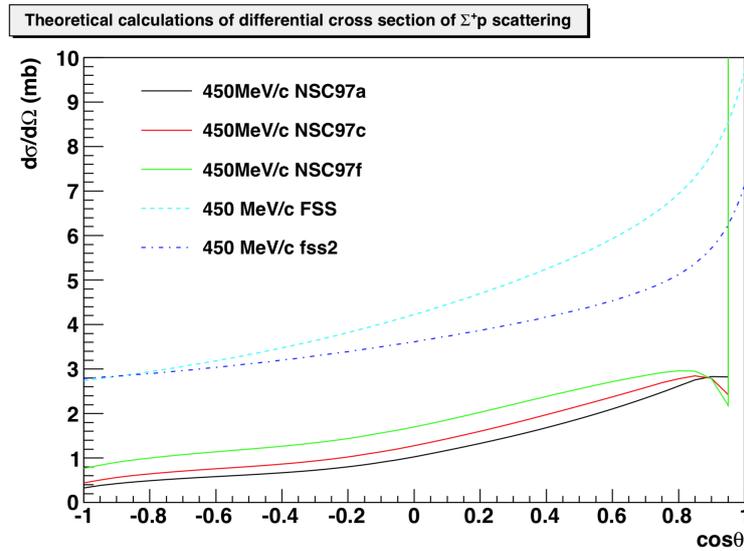


図 1.2: 各理論モデルから得られる $\Sigma^+p(I = \frac{3}{2})$ 散乱微分断面積。図中の NSC が Nijmegen OBE モデル、fss2 が Kyoto-Niigata RGM モデルに対応した計算モデルである。クォーク間相互作用の考慮の違いから、予想される値が大きく異なっている。

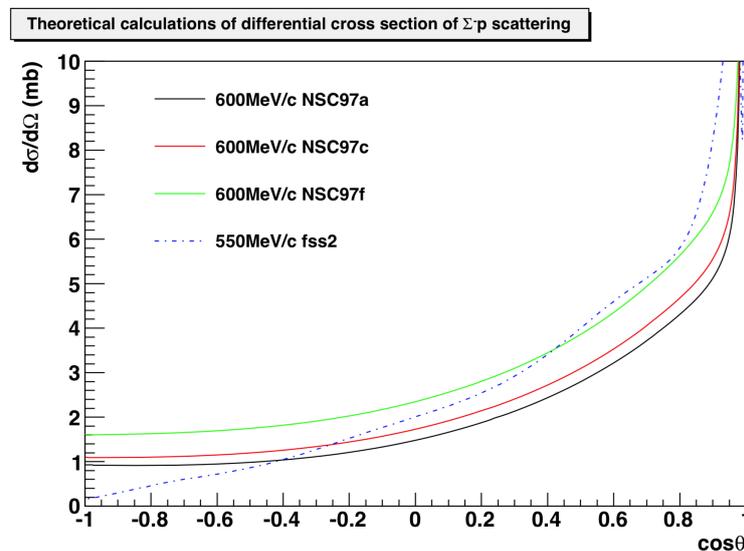


図 1.3: 各理論モデルから得られる $\Sigma^-p(I = \frac{1}{2})$ の散乱微分断面積。図中の NSC が Nijmegen OBE モデル、fss2 が Kyoto-Niigata RGM モデルに対応した計算モデルである。

1.3 ΣN 散乱実験

NN 散乱実験は数多く行われているのに対して、 ΣN の散乱実験はまだまだ少ない。それは、 Σ の寿命が $\tau \sim 10^{-10} s$ と短いために散乱を行うための Σ を生成してもすぐに崩壊

してしまうからである。過去に行われた ΣN 散乱実験では散乱事象を記録できるように画像で保存し、散乱に関係した粒子を解析によって求める手法を取っていた。現在までに行われた ΣN 散乱実験は以下のようなものがある。

1960 年代に行われた低エネルギー領域での $\Sigma^\pm p$ 散乱実験は CERN で行われた [4]。この実験では 1.38 ~ 1.80 GeV/c の Σ と陽子の散乱微分断面積を測定した。 Σ 生成の反応としては、式 (1.3) を利用している。



イメージング手法を用い、バブルチェンバーによって散乱の飛跡を引きそれを写真で記録する仕組みを利用している。バブルチェンバーでは、一度検出してから次のイベントを取れるようになるまでに制限があり、ビームレートを押さえざる得なかった。飛跡を読み取ることで散乱事象の同定を行っている。その飛跡の同定のための条件として Σ や反跳陽子の飛跡長で 1.0 mm 以上が必要にだったために散乱のイベントは Σ^- で 406、 Σ^+ で 121 イベントとなり、散乱の角度あたりの事象数は数十イベントとなった。

次に 1990 年代に KEK で行われた実験として E251、E289 実験がある [5, 6, 7]。 Σ の運動量領域では、300~750 GeV/c であり、1960 年代の実験よりも高い運動量領域において散乱微分断面積の測定を行った。この実験ではシンチレーションファイバーを使用したアクティブターゲットの SCIFI によって散乱粒子の飛跡の再構成を行った。この実験では、SCIFI に用いたファイバーでの崩壊定数の長さによりビームレートが 0.1 M/spill (1spill ~ 2 s) の π ビームを使用している。この実験のトリガーは 16/spill となっている。このビームレートにより Σ 粒子は 180000 個識別し、散乱事象では 776 個、断面積の使用としては 30 イベントであった。これは SCIFI からくるバックグラウンドの影響があった。

このように過去 Σ 陽子散乱実験での散乱事象として同定を行えたイベントの量は少なくなっている。これは Σ の寿命が $\tau \sim 10^{-10} s$ と短いために散乱を行うための Σ を生成してもすぐに崩壊してしまうからである。また、それぞれの過去の実験では機器の要請からビームのレートを抑える必要があった。私が参加する J-PARC E40 実験では 0.5 ~ 0.7 GeV/c の運動量領域での Σp 散乱実験を行う。新たな散乱の同定手法によりビームのレートを 20 M/spill (1 spill = 2 s) で実験を行うことができる。これは先に紹介した実験の 200 倍のビームレートであり、これまでの実験に比べて 100 倍の 10000 イベントの散乱事象の同定を目標としている。詳しくは 2 章で述べる。

1.4 本研究の目的

本研究では、 $\Sigma^\pm p$ の微分散乱断面積の測定を行う J-PARC E40 実験のトリガーシステムの開発とその評価を行った。トリガーシステムの要請として時間制限があった。 $\Sigma^\pm p$ 散乱事象の同定を行うために散乱陽子の飛跡並びにエネルギーの測定を散乱陽子検出器群 (CATCH) で行う。散乱陽子検出器群 (CATCH) はファイバー飛跡検出器 (CFT)、BGO カロリメータ、シンチレーション検出器から構成される。エネルギー情報の測定は CFT と BGO で行う。エネルギー情報を取得する方法としてアナログ信号の波高を取得を行う ADC がある。CFT で ADC を使用するためには、従来よりもトリガーの遅延を短くしなければならなかった。その遅延を実現するために検出器のある実験エリア内でトリ

ガー生成を行う必要があり、ビームが出ている間に調整できるように遠隔操作によって信号を操作する必要があった。これらを実現するために、汎用 FPGA 回路を用いたトリガーシステムを構築を行い、2018 年の 6 月に構築したトリガーシステムを用いて一部のデータ取得を行なった。さらに、実験で得られたデータよりトリガー用の検出器である SAC の検出効率を求め想定通りに動作していることを確かめた。データ取得時に、大強度ビームの使用により、トリガーレートが高くなった。トリガーレートを減少させるため運動量や角度の選択を行うトリガーマジュールである Matrix Trigger の評価を行い改善点について考察した。

第2章 J-PARCにおける Σp 散乱実験

J-PARC E40 実験で使用するビームライン検出器、トリガーシステムの概要、DAQ システムについてこの章で述べる。

2.1 大強度陽子加速器施設 J-PARC

2.1.1 加速器について

J-PARC[8, 9] とは Japan Proton Accelerator Research Complex の略称で、世界最高クラスの大強度陽子加速器を有する研究施設である。素粒子や原子核分野から物質や生物学まで広い分野の研究が行なわれている。J-PARC は茨城県東海村に位置し、日本原子力研究機構 (JAEA) と高エネルギー研究所 (KEK) の共同で運営を行なっている。施設全体図を図 2.1 に示す。

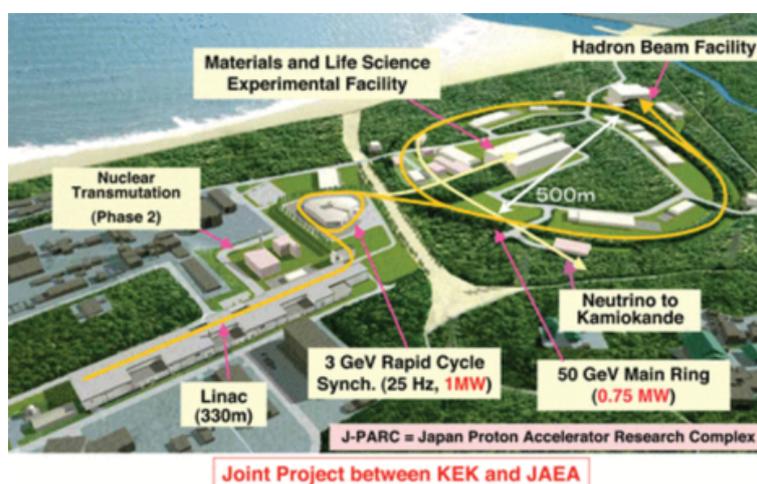


図 2.1: J-PARC 施設全体図

線形加速器の Linac 1 つと、シンクロトンである Rapid-Cycling Synchrotron 略称 RCS、Main Ring Synchrotron 略称 MR という 3 つの加速器がある。

Linac は、第一段階の加速器で陽子を 400 MeV まで加速し、RCS に入射ビームを供給する。Linac で加速する粒子は H^- である。そして、第二段階の加速器が RCS で、シンクロトンである。RCS では陽子 3 GeV まで加速することができる。RCS へのビームの入射は、多重入射法 (multi-turn injection) によって行われる。これはリングを周回する周期よりも長い時間にわたってビームを積み重ねて入射するもので、バンチあたりのビーム強

度を増すために行われる。RCS では、Linac からの H^- ビームとの合流点を設け、そこに荷電変換用の炭素フォイルを置くことにより H^- から電子を剥ぎ取って陽子にする。

最後に第三段階のシンクロトロン加速器である MR がある。これは陽子を 50 GeV まで加速することができるが、現在は 30 GeV で運転している。MR は約 1.6 km の周長を持つ 3 回対称のリングである。長さ 116 m の直線部が 3 箇所あり遅い取り出し機器等が設置されている。通常、RCS から取り出されるビームのうち 95 % 以上は MLF に、それ以外が MR に送られる。MR 行きのビームは長さ 230 m のビーム輸送系を通して MR に入射される。遅い取り出し (Slow Extraction、SX) によって取り出される陽子ビームはハドロン実験施設に送られ、素粒子・原子核実験に用いられる。一方、速い取り出し (Fast Extraction、FX) によって取り出される陽子ビームはニュートリノビームラインに送られて、ニュートリノビームの生成に用いられる。

遅い取り出しは、ハドロン実験施設にビームを供給する。MR から取り出された陽子ビームはビーム輸送系を通してハドロン実験施設の最上流部に設置された T1 標的と衝突し、K 中間子や π 中間子などの二次粒子を生成する。これらを用いて実験を行う。遅い取り出しは、ビーム軌道上に非線形磁場があるときにビームが不安定になり振幅が増大することを利用した取り出し方法で、共鳴取り出しとも呼ばれる。その増大した振幅がより大きいものからりんごの皮剥きのように周回軌道を外れていきビームとなる。J-PARC E40 実験は、ハドロン実験施設の中の K1.8 ビームラインにおいて行われる。

2.1.2 ハドロン実験施設

2.1.1 節でも述べたが、J-PARC には加速器を利用した様々な研究施設がある。MLF やニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設である。その中で Σp 散乱実験である J-PARC E40 実験が現在行われているのがハドロン実験施設である。ハドロン実験施設の全体図を図 2.2 に示す。

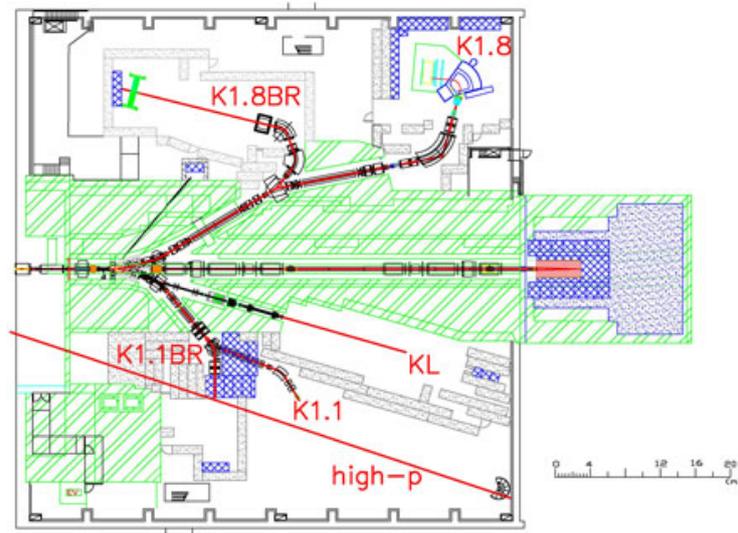


図 2.2: ハドロン実験施設全体図。

ハドロン実験施設では、Linac、RCS、MR で加速されてきた陽子を金でできている T1 標的に照射することで様々な二次ビームを生成する。生成した二次ビームを配置された各ビームライン電磁石やスリットの設定を行うことで、反陽子や π 中間子、 K 中間子を選択し使用することができる。ビームラインは J-PARC E40 実験が行われる K1.8 ビームラインをはじめ、K1.8BR、KL 等がある。また現在 HighP と呼ばれるビームラインが建設されている。

2.1.3 K1.8 ビームライン

K1.8 ビームラインは、最大運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ の K^- 中間子ビームを使用することを目的として建設された。全体図を図 2.3 に示す。K1.8 ビームライン上には、偏向を行うための双極電磁石 (D : dipole magnet) とフォーカスやデフォーカスを行う四重極電磁石 (Q : quadrupole magnet)、最大 $\pm 750 \text{ kV}$ の高電場をかけることで荷電粒子を選ぶための静電セパレータ (ESS1、2) が置かれている。また、それらに加えて、D2 の下流にある中間像 (Intermediate Focus) スリットの IFH と IFV、ESS1 や ESS2 の下流にある Mass Slit 1、2 (MS1、2) 及び Momentum Slit (MOM) で水平方向や鉛直方向でスリットの開閉を行うことでより高精度で運動量や粒子の選択を行う。

J-PARC E40 実験は、K1.8 ビームラインで行われ二次ビームとして π^- 中間子ビームを $1.32 \text{ GeV}/c$ 、 π^+ 中間子ビームを $1.4 \text{ GeV}/c$ の運動量で、強度を 20 MHz/spill (1 spill = 2 s) という大強度 π^\pm ビームを使用する。また、図 2.3 の右上部分にある MS2 の下流から検出器を設置し K1.8 ビームラインスペクトメータ、標的 (Experimental target) 下流に双極子マグネットである KURAMA マグネットを設置し、実験を行う。

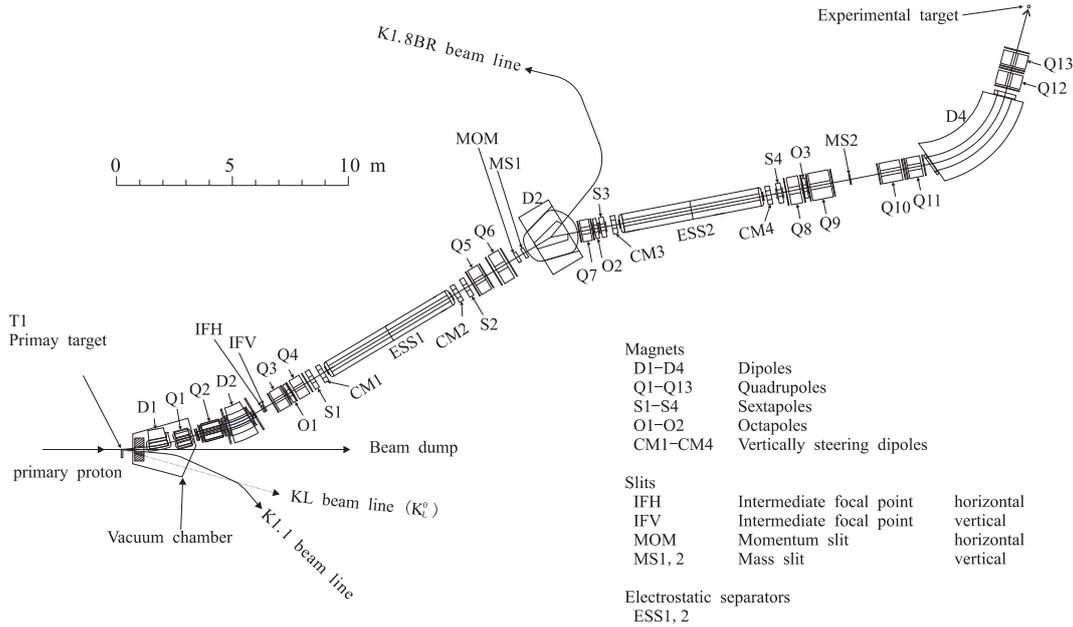


図 2.3: K1.8 ビームライン。

2.2 J-PARC E40 実験の概要

J-PARC E40 実験は、新しい測定手法を用いて、 Σp 散乱実験 [10] を計画し、2018 年 6 月に $\Sigma^- p$ 散乱の一部のデータ取得、2019 年 2、3、4 月に $\Sigma^+ p$ 散乱実験のデータ取得を予定している。新しい手法とは、従来の Σp 散乱実験ではイメージング手法を用いて Σ と p が散乱を起こしたことを同定していたが、J-PARC E40 実験では、散乱陽子の飛跡と全エネルギーを測定し、二体散乱の運動学を解くことで同定を行う。イメージング手法ではバブルチェンバーや蛍光物質の時定数が数が長く、一度ある事象を記録してから次の事象を計測できるようになるまでに長い時間を要していた。しかし、本実験ではビーム強度が 200 倍にでき、 Σ 生成に用いる π^\pm ビームを 20 MHz/spill (1 spill = 2 s) の強度で行う。また、標的には液体水素 (LH_2) を使用することで、過去の実験の KEK-PS E251、E289 で生じたバックグラウンドをなくすることができる。この手法を用いて、我々は $\Sigma^- p$ と $\Sigma^+ p$ 、さらに $\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$ の荷電交換反応の散乱微分断面積を高統計精度で測定することを目標としている。

2.3 実験セットアップ概要

$\Sigma^\pm p$ 散乱の断面積を求めるための実験セットアップを図 2.4 に示す。

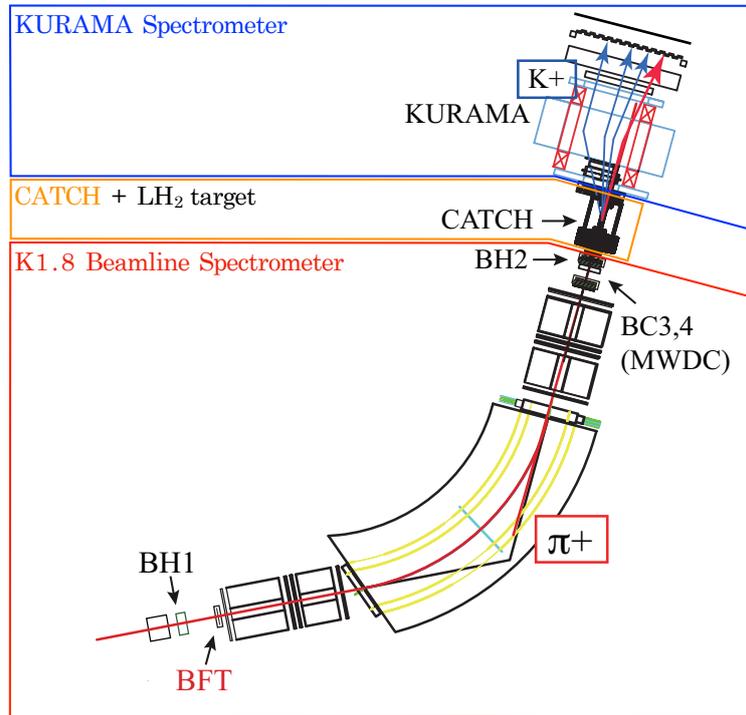


図 2.4: 実験セットアップの概略図。上流から K1.8 ビームラインスペクトロメータ、LH₂ 標的、CATCH、KURAMA スペクトロメータである。

実験セットアップは主に、円柱状の LH₂ 標的の周りとその前後に分けられる。LH₂ 標的の上流が K1.8 ビームラインスペクトロメータ、下流が双極偏向磁石である KURAMA マグネットを用いた KURAMA スペクトロメータ、LH₂ 標的を円筒状に囲むようにできたのが散乱陽子検出器群の CATCH (Cylindrical Active Tracker and Calorimeter for Hyperon proton scattering) である。J-PARC E40 実験において用いる Σ 生成反応と、測定する Σp 散乱は以下の式 (2.1)、(2.2) で表される。また、LH₂ 標的内での反応の概略図を図 2.5 に示す。



Σ^{\pm} 生成反応の π^{\pm} を K1.8 ビームラインスペクトロメータで、 K^{+} を KURAMA スペクトロメータで測り、生成された Σ^{\pm} で散乱された陽子である式 (2.2) の p' は CATCH で測定する。

2.4 二体の運動学による散乱事象の同定方法

J-PARC E40 実験において用いる Σ 生成反応と、測定する Σp 散乱の LH₂ 標的内での概略図を図 2.5 に示す。

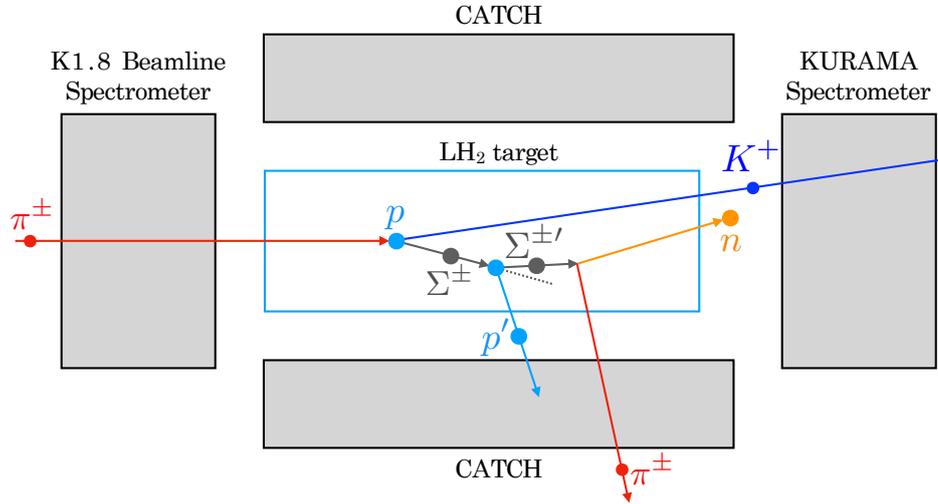


図 2.5: 標的内での Σp 散乱の概略図。LH₂ を Σ 生成用の陽子標的とするとともに、 Σ の散乱相手の陽子標的にも使用する。

J-PARC E40 実験では、K1.8 ビームライン スペクトロメータ で π ビームを検出する。式 (2.1) のように π^\pm ビームを LH₂ 標的内の陽子に照射し、 Σ^\pm を生成する。さらに生成した Σ^\pm と LH₂ 標的内の陽子と散乱させる。散乱された K^+ 運動量を KURAMA スペクトロメータを用いて測定する。式 (2.1) の π^\pm と K^+ から Σ の運動量 (\mathbf{P}_Σ) を求める。式 (2.2) での散乱陽子である p' の飛跡と全エネルギーを CATCH を用いて測定する (E_{exp})。二体の弾性散乱の運動学を用いると、 Σ と p が散乱を起こした場合の散乱された p' のエネルギー (E_{calc}) は散乱角度を θ とすると式 (2.3) ように表わせる。

$$E_{\text{calc}} = \frac{2m_p |\mathbf{P}_\Sigma|^2 \cos^2 \theta}{\left(\sqrt{|\mathbf{P}_\Sigma|^2 + m_\Sigma^2} + m_p \right)^2 - |\mathbf{P}_\Sigma|^2 \cos^2 \theta} \quad (2.3)$$

m_Σ 、 m_p はそれぞれ Σ と p の静止質量である。この E_{calc} と測定した E_{exp} から式 (2.4) の ΔE を得る。

$$\Delta E = E_{\text{calc}} - E_{\text{exp}} \quad (2.4)$$

測定した反応が仮定した反応であれば場合は $\Delta E = 0$ となり、この ΔE を評価することで Σp 散乱事象の同定を行う。

この 2 体の運動学を利用して散乱事象を同定する方法の利点は 2 つある。1 つは、1 章でも述べたようにイメージング手法のためのバブルチェンバー等からくる一度ある事象を記録してから次の事象をビームの強度制限をなくすことができ、検出器の制限までビーム強度をあげられることである。2 つ目は、 Σ を直接測定を必要としないため、過去の実験で行っていた Σ の飛程の長さの制限が必要ないため、捨ててしまうイベントを少なくすることができる。

2.5 K1.8 ビームラインスペクトロメータ

K1.8 ビームラインスペクトロメータの全体図を図 2.6 に表す。

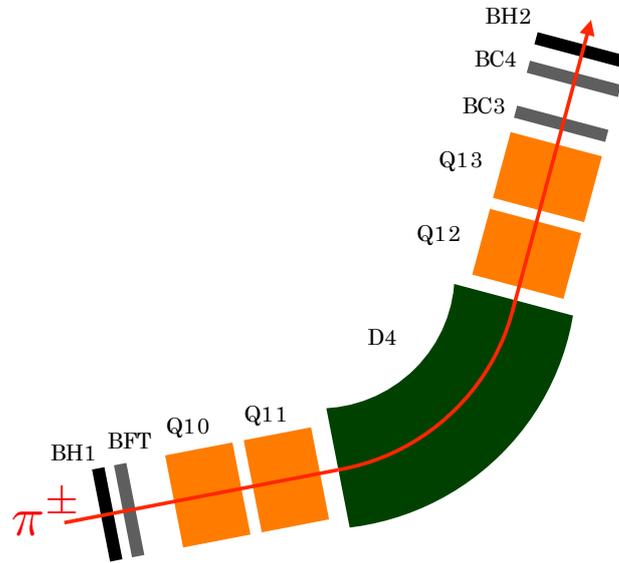


図 2.6: K1.8 ビームラインスペクトロメータ。標的上流にある、 π^\pm ビームの運動量分析を行う。

K1.8 ビームラインスペクトロメータは、K1.8 ビームラインの最下流にあり、 π^\pm ビームの運動量分析を行う。各ビーム粒子毎に測定を行う。K1.8 スペクトロメータは、四重極電磁石 4 台 (Q10、Q11、Q12、Q13) と双極偏向磁石 1 台、計 5 台の電磁石と、その前後にある時間計測を行う Beam Hodoscope 1, 2 (BH1, 2)、飛跡検出を行う Beam Fiber Tracker (BFT)、Beam Chamber 3, 4 (BC3, 4) を置いた構成になっている。BH2 以外の検出器は K1.8 ビームラインに常設である [11]。荷電粒子であるビームをローレンツ力を利用し磁石で曲げることで、運動量を測定する。

時間計測検出器の BH1 と BH2 は粒子の飛行時間を求め、粒子識別を行う。また、電磁石前でのビーム粒子の位置を BFT、電磁石後のビーム粒子の位置を BC3, 4 で測定し飛跡を再構成することでビーム粒子の運動量を得る。以下に検出器の詳細を述べる。

2.5.1 時間計測用検出器

BH1

MS2 のすぐ下流に位置しプラスチックシンチレータ (Saint-Gobain BC-420) を 11 個セグメント状に並べた検出器である。概念図を図 2.7 に示す。各セグメントはビーム方向に対して垂直な面に並んでおり、不感領域を無くするために隣同士のセグメントは 1mm の

オーバーラップを持たせた配置になっている。ビームが高強度のときに中心での計数率が大きくなるため中心のセグメントほど幅が狭くなっている。シンチレーション光は上下の端からアクリルライトガイドを通して光電子増倍管 (PMT: Photo-Multiplier Tubes) (HPK H6524MOD) で読み出す。全読み出しチャンネル数は 22 ch である。

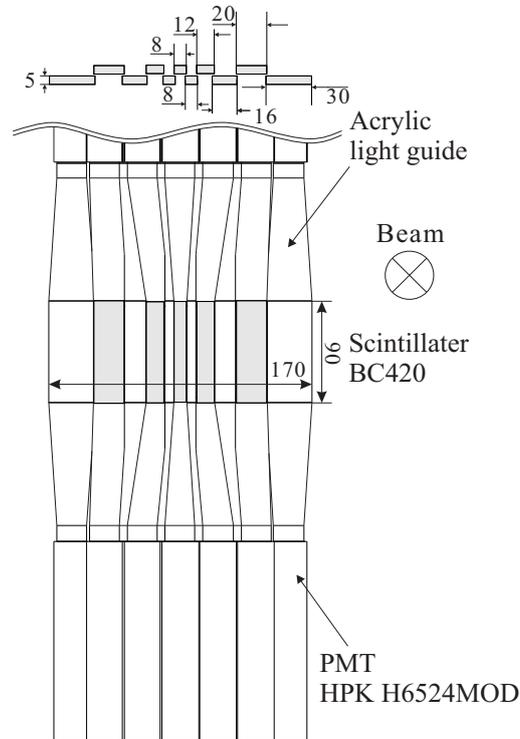


図 2.7: BH1 の概念図。

BH2

プラスチックシンチレータ (Saint-Gobain BC-420) を 8 個セグメント状に並べた検出器である。概念図を図 2.8 に示す。各セグメントはビームに対して垂直な面に並んでおり、隣同士のセグメントにオーバーラップはない。ビームが高強度の時に中心での計数率が大きくなるため中心のセグメントほど幅が狭くなっている。シンチレーション光は上下の端からアクリルライトガイドを通して PMT (HPK R9880U-110MOD) で読み出す [12]。全読み出しチャンネル数は 16 ch である。

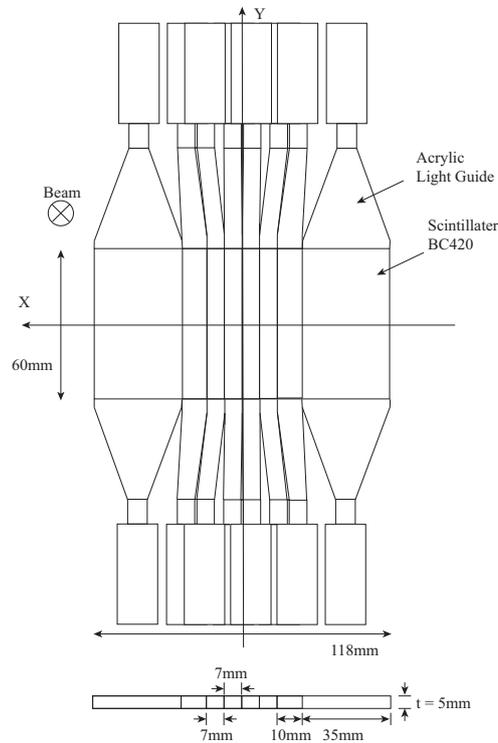


図 2.8: BH2 の概念図。

2.5.2 飛跡計測用検出器

BFT

J-PARC E40 実験のために開発された検出器で、直径 1 mm シンチレーティングファイバー (Kuraray SCSE-78MJ) を鉛直方向に立てて水平方向に 160 本並べ、ビームに対して垂直な 2 つの面を持つ。その 2 面は不感領域をなくすために互い違いに重ね合わせた構造をしている [13]。図 2.9 に BFT の設計図を示す。BFT は Q10 マグネットのすぐ上流に位置し、この位置ではビームは水平方向に広がっている。BFT は K1.8 ビームラインスペクトロメータで最上流の飛跡検出器であり、QQDQQ の上流でビームの水平方向の位置情報のみを取得する。ファイバーは半導体光検出器 (MPPC : Multi-Pixel Photon Counter) で読み出す。全読み出しチャンネル数は 320 ch である。

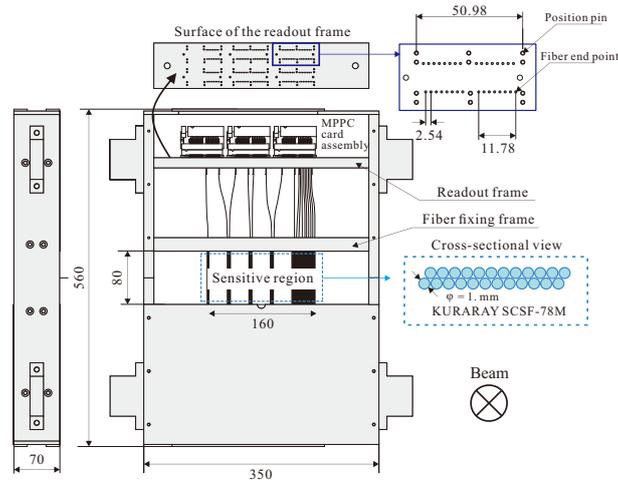


図 2.9: BFT の設計図。

BC3, 4

BC3 はビーム上流から x, x', v, v', u, u' 、BC4 は u, u', v, v', x, x' のそれぞれ 6 面で構成された Multi-Wire Drift Chamber (MWDC) である。 u 面にあるワイヤーは x 面に対して、 -15° 、 v 面では x 面に対して、 $+15^\circ$ を傾けてある。直径 $15 \mu\text{m}$ のアノード (陽極) ワイヤーが 3 mm の間隔で 64 本張られている。ポテンシャルワイヤーはアノードワイヤー間の中心である 1.5 mm の距離で張られている。 x' は x に対してワイヤーを 1.5 mm ずらして張られている。 uu', vv' についても同様である。カソード (陰極) はアラミドフィルムの表面にグラファイトの層を印刷したものである。アノード面とカソード面の距離は 2 mm である。BC3, 4 のワイヤー構造を図 2.10 に示す。BC3, 4 はガス検出器であるので、ある特定のガスを満たして使用する。ガスは、Ar (76%)、iso- C_4H_{10} (20%)、Methylal (4%) を混合して使用する。荷電粒子であるビームが検出器に入射した際、ガス分子がイオン化し電子がアノードワイヤーに集められることで信号が得られる。上記のようなガスを混合する理由として、ビーム粒子によるアノードワイヤーのスパッタリングを防ぐことや、イオン化した電子がガスの原子の電子の電子軌道を遷移させることによって生じた X 線を吸収させる役割がある。読み出しは、Amplifier Shaper Discriminator (ASD) チップを搭載したカードがついており、そこからデジタル信号が出力される。ASD チップは ATLAS 実験のガスチェンバーのために開発されたものである [14]。

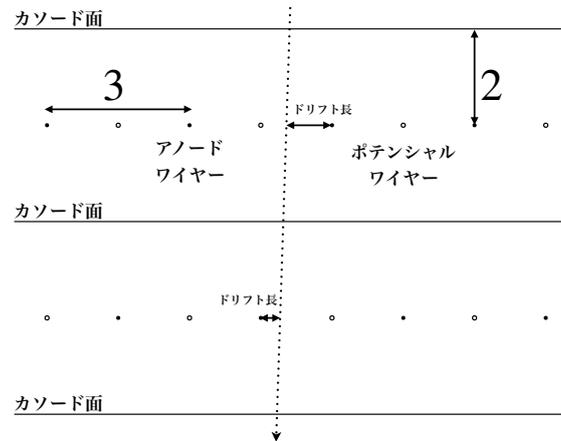


図 2.10: BC3, 4 のワイヤー構造

2.6 LH_2 標的

Σ^\pm 生成のための陽子標的と、生成 Σ^\pm と散乱させるための陽子標的のために LH_2 を用いる。設計図を図 2.11 に示す。標的の大きさは、直径 40 mm でビーム方向に 300 mm の長さで円筒状の容器に LH_2 を満たして使用する。標的は、実験中冷凍機によって冷却し続ける。

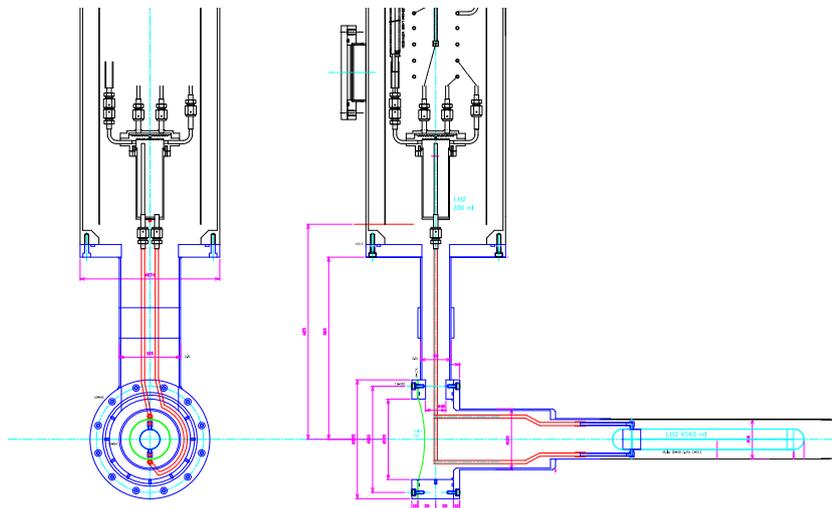


図 2.11: LH_2 標的の設計図。

2.7 散乱陽子検出器群

散乱陽子検出器群はその読み出し系を含めて CATCH システムと呼び、J-PARC E40 実験のために新たに開発された [15][16][17]。図 2.12 に CATCH システムの 3D モデルの図を示す。CATCH システムは LH_2 標的を円筒状に囲むように作られており、3つの検出器からなっている。一番 LH_2 標的に近いところにあるのが、シンチレーティングファイバーからなる Cylindrical Fiber Tracker (CFT) である。次に、BGO 結晶を用いて作られた BGO カロリメータ。一番外側にプラスチックシンチレータ検出器である PiID カウンターとなっている。式 (2.2) で散乱された陽子 p' の飛跡を CFT で、その全エネルギーを BGO カロリメータで測定を行う。また粒子識別のために、CFT でのエネルギー損失 (ΔE) と BGO カロリメータで測定したエネルギー (E) を用いた $\Delta E - E$ 法と、粒子ごとの飛程の違いから PiID カウンターのヒットの有無を利用する。以下に各検出器の詳細を述べる。

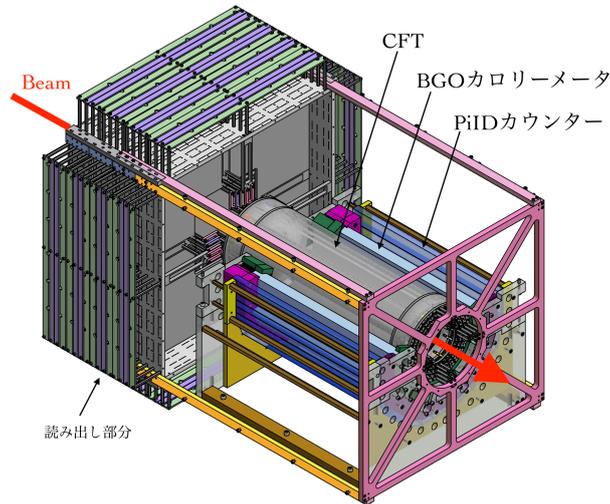


図 2.12: CATCH の 3D モデル。BGO カロリメータと PiID は下半分のみ描かれている

CFT

CFT は散乱陽子の飛跡測定を行うため、シンチレーティングファイバー (Kuraray SCSF-M78NN) を 4932 本並べた検出器である (図 2.13)。直径 0.75 mm のシンチレーティングファイバーを、ビームと平行な方向である Φ 方向に円筒状に並べた層が 4 層、らせん状に並べた U, V 層がそれぞれ 2 層ずつあり、計 8 層からなる。 Φ, U, V は交互に重なっており、それらのヒット情報から三次元の飛跡再構成を行う。

CFT を構成するファイバーから信号を 1 つ 1 つ MPPC を用いて読み出す。読み出しのチャンネル数は、ファイバーの数と同じ 4932 ch である。この多大なチャンネルを読み出すためのモジュールとして、VME-EASIROC が開発された。VME-EASIROC は、1 ボードで多くのチャンネルの MPPC の制御並びに信号処理を行うため MPPC 読み出しに特化した ASIC である EASIROC チップを使用している。1 ボードあたり、64 ch の MPPC

から得られる信号の ADC、TDC を取得することができる。VME-EASIROC の ADC はピークホールド型であり、外部より適切なタイミングで Trigger 信号を入力することで波高がホールドされ、その信号の高さをデジタル情報に変換して測定する。

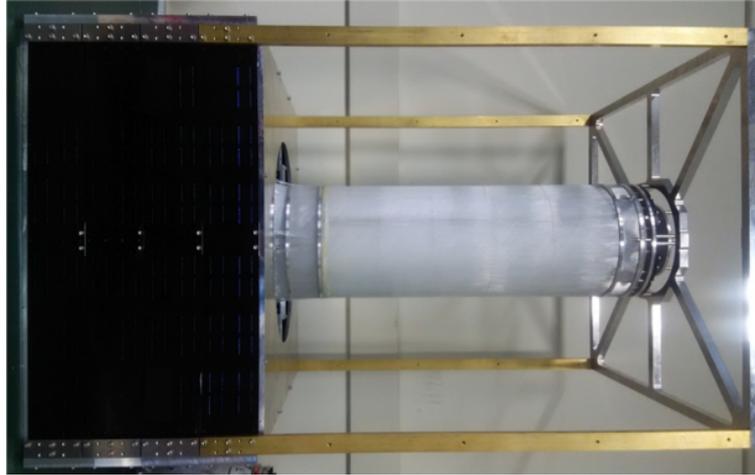


図 2.13: CFT の写真。

BGO カロリメータ

BGO カロリメータは、CFT の外側を囲んで配置された BGO 結晶を用いた検出器である。散乱陽子の運動エネルギーを測定する。結晶は、 $30 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ のものを 22 本使用する。CATCH のフレームには 24 本装着できるが、標的で反応してできた K^+ の散乱方向の 2 本分を取り除いている。信号読み出しは PMT (HPK H11934-100) を用いる。また、データの読み出しは Flach ADC を用いる。結晶から得られる信号の減衰時間が長いため、J-PARC E40 実験のような 10 MHz のビームレートでは、BGO のシングルレートが平均 40 kHz 、最大で 400 kHz になると考えられ、パイルアップが生じる。パイルアップの分解のため波形取得が行える Flash ADC を用いる。

PiID カウンター

PiID カウンターは、プラスチックシンチレータを 34 本円筒状に並べた検出器である (散乱 K^+ が通る領域の 2 本は外す)。PiID カウンターは、BGO カロリメータで止まらず通過してくる粒子の検出を行う。散乱陽子検出の際のバックグラウンドの一つとして Σ 粒子が崩壊してできる π がある (式 (2.5))。

$$\Sigma^\pm \rightarrow n + \pi^\pm \quad (2.5)$$

この π は BGO カロリメータでエネルギーを落としきらず、PiID カウンターまで届く。つまり、PiID カウンターにヒットがある場合は π と粒子識別される。また、散乱陽子でも BGO カロリメータを突き抜けるものもあり、CFT、BGO カロリメータで全エネルギーが測定できない陽子は破棄する。プラスチックシンチレータには、波長変換ファイ

バーのための溝が掘られており、そこに波長変換ファイバーを通しそのファイバー端から MPPC で読み出しを行う。

2.8 KURAMA スペクトロメータ

KURAMA スペクトロメータは LH₂ 標的の下流の、 Σ^\pm 生成時の散乱 K^+ の運動量測定を行う。KURAMA スペクトロメータのセットアップを図 2.14 に示す。

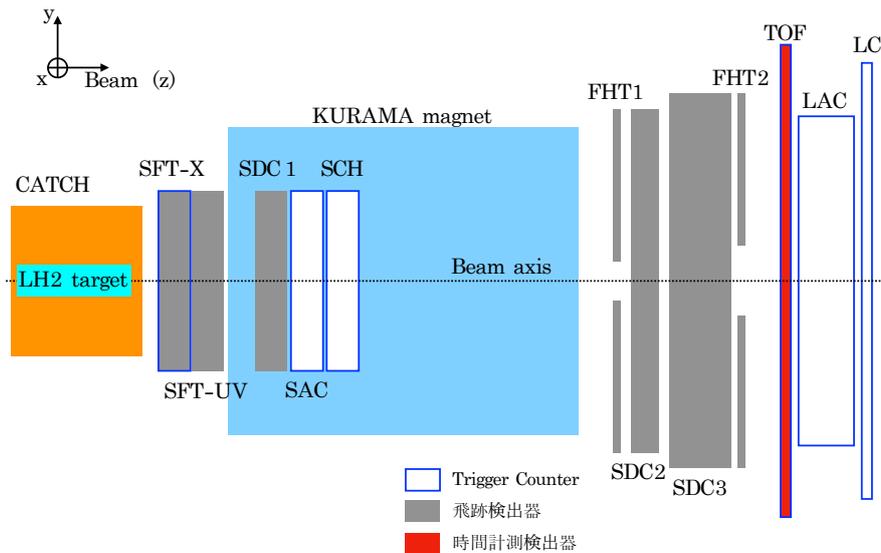


図 2.14: KURAMA スペクトロメータのセットアップ。CATCH-LH₂ 標的以降が KURAMA スペクトロメータである。

KURAMA スペクトロメータは KURAMA マグネットの前後やまたその中に、時間計測検出器 1 台と、飛跡検出器 6 台そしてトリガーカウンタ 2 台から構成される。検出器を以下の表 (2.1) にまとめる。

表 2.1: KURAMA スペクトロメータの検出器まとめ。

用途	名前	種類
時間検出器	TOF	プラスチックシンチレータ検出器
飛跡検出器	SFT	シンチレーティングファイバー検出器
	SDC1, 2, 3	ドリフトチェンバー
	FHT1, 2	プラスチックシンチレータ検出器
トリガーカウンタ	SAC	チェレンコフ検出器
	SCH	プラスチックシンチレータ検出器

時間検出器、飛跡検出器、トリガーカウンタの順に述べる。時間計測を行い飛行時間を求めるために用いるのは TOF である。

散乱粒子の飛跡再構成を行うためのシンチレーティングファイバーを使用した SFT と MWDC でできた SDC1, 2, 3 がある。また大強度ビームを使用することから SDC1, 2, 3 のビーム領域は不感にしており、その領域を覆うように多セグメント化されたプラスチックシンチレータ検出器の FHT1, 2 が配置されている。

トリガー用の検出器としてエアロゲルを輻射体にした SAC がある。多セグメント化されたプラスチックシンチレータ検出器の Scattering Charge Hodoscope (SCH) の検出器がある。

オンライン解析での粒子識別では、チェレンコフ検出器の信号の有無によって識別を行う。チェレンコフ検出器の運動量閾値と屈折率の関係を粒子ごとに図 2.15 に示す。

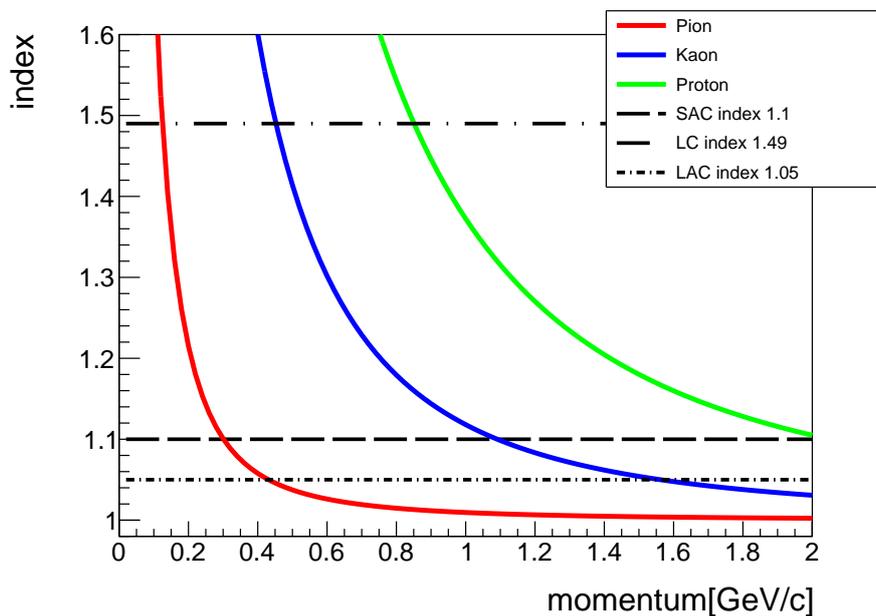


図 2.15: チェレンコフ検出器の運動量閾値と屈折率の関係を粒子ごとに計算した図。

KURAMA スペクトロメータでは、解析で飛跡検出器によって得られる位置情報からルンゲ-クッタ法を用いて飛跡再構成する。飛跡の再構成で、運動量と飛行距離を求めることができ、それらと time-of-flight を用いて粒子の質量を計算し粒子識別を行う。各検出器の詳細を以下に述べる。

2.8.1 時間計測用検出器

TOF

SDC3、FHT2 のすぐ後ろにある検出器で、24 個のセグメントからなるプラスチックシンチレーション検出器である。1 つのセグメントは 80 mm × 1800 mm × 30 mm の大きさである。セグメント間で不感領域を無くすために、5 mm のオーバーラップを持つように互い違いに並べている。シンチレータの両端からアクリルライトガイドを通して PMT

で信号を読み出している。J-PARC E40 実験では、10 MHz の大強度ビームを使用するために、ビームの通る領域にアクリルを入れ不感にしている。 π^- ビームは 14、15、16 番目のセグメントをアクリルにしている。 π^+ ビームでは 2、3、4、5、6、7 番目のセグメントにアクリルにして測定を行う。こうして PMT (HAMAMATSU H1945) で起こる過電流による電圧降下や PMT の故障を防ぐ。TOF の全体写真とアクリルセグメントを図 2.16 に示す。

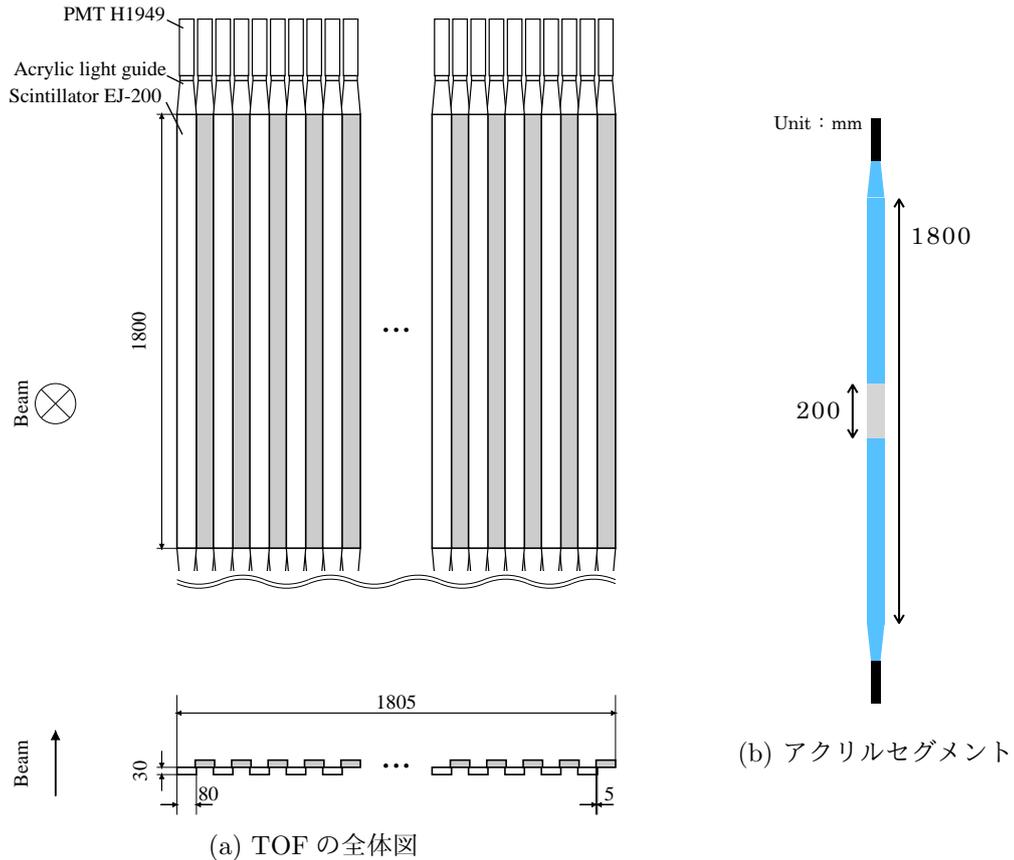


図 2.16: TOF の全体図とアクリルセグメント。

2.8.2 飛跡計測用検出器

SFT

SFT は KURAMA スペクトロメータ最上流の飛跡検出器で KURAMA マグネットのエンドガードに設置されている。BFT と同様の構造をした、SFT-X 層と X のファイバーに対して、 $+45^\circ$ 傾けた U 層と -45° 傾けた V 層をもつ SFT-UV 層からなっている。それぞれの構造について、図 2.17 と 2.18 に示す。SFT-X は BFT とファイバー構造は同じで、直径 1 mm のシンチレーティングファイバーを 256 本並べた 2 つの面を持つ。また、不感領域をなくすために互い違いに重ね合わせた構造をしている。SFT-X はトリガーカウンタとしても用いられる。SFT-UV は、直径 0.5 mm のシンチレーティングファイバーを張っ

ている。SFT-U のファイバー数は 960 本であるが、読み出し信号の数は 320 チャンネルである。SFT-UV は図 2.18 にもあるように 3 本分を 1 つの MPCC を使って読み出している倂積み構造をしている。SFT-UV それぞれに読み出しは 320 ch あり、SFT の全ての読み出しの数は $256 + 256 + 320 + 320 = 1152$ チャンネルの読み出し数を持つ。

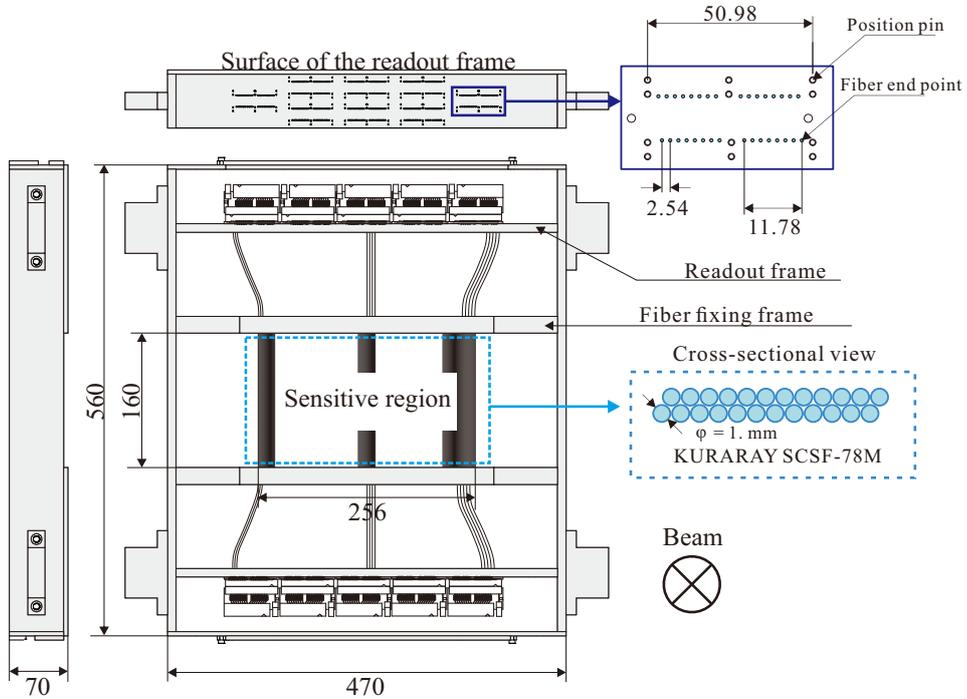


図 2.17: SFT-X の概念図。

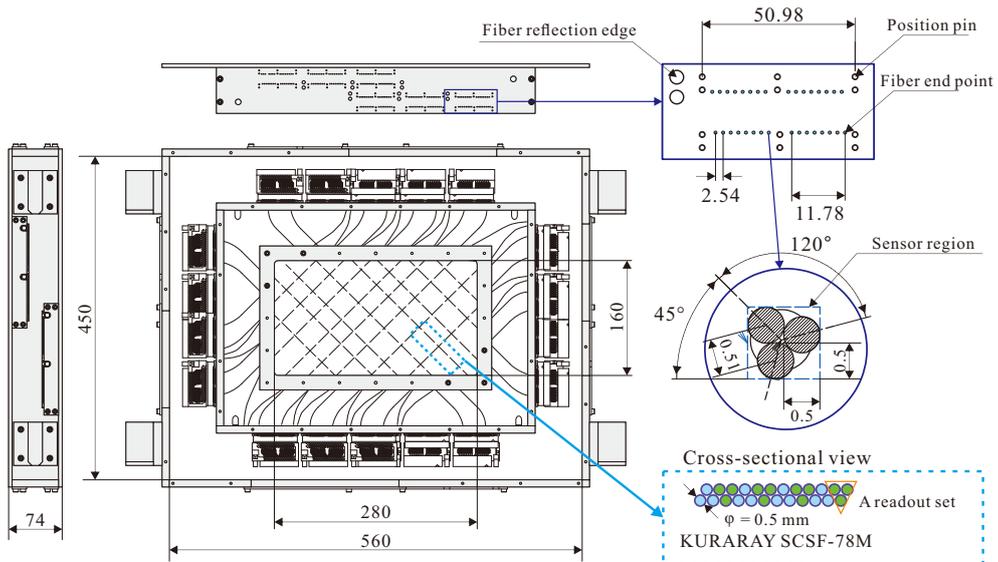


図 2.18: SFT-UV の概念図。

SDC1

SDC1 は、SFT の下流にあり KURAMA マグネットの中に位置している。 u, u', v, v', x, x' の 6 面で構成された MWDC である。 u 面は x 面に対して、 -15° 、 v 面は x 面に対して、 $+15^\circ$ 傾けてある。アノード（陽極）ワイヤーが 6 mm の間隔で 64 本張られている。SDC1 はポテンシャルワイヤーを六角形の形に張られたハニカム構造を導入した MWDC である（図 2.19）。 x' は x に対してワイヤーを 3 mm ずらして張られている。 u, u', v, v' についても同様である。

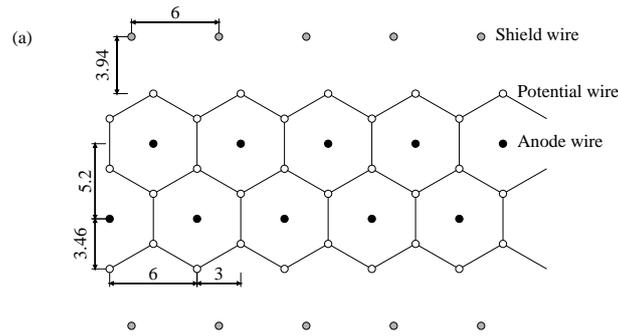


図 2.19: SDC1 の概念図。

SDC2

SDC2 は、KURAMA マグネットの下流にある MWDC である。 x, x', y, y' の 4 層を持つ。アノードワイヤーが 9 mm 間隔で張られ、 x と x' は 4.5 mm ずらして張られている。有感領域は $1186.5 \text{ mm} \times 1186.5 \text{ mm}$ である。SDC2 はポテンシャルワイヤーが六角形に張られたハニカム構造を持った MWDC である（図 2.20）。SDC2 は各層の読み出しが 128 で計 512 の読み出しチャンネルを持つ。大強度ビームを使用する J-PARC E40 実験では、ビームの通過領域で過電流によるワイヤーおよび検出器の損傷を防ぐため、HV をかけず不感にしている。

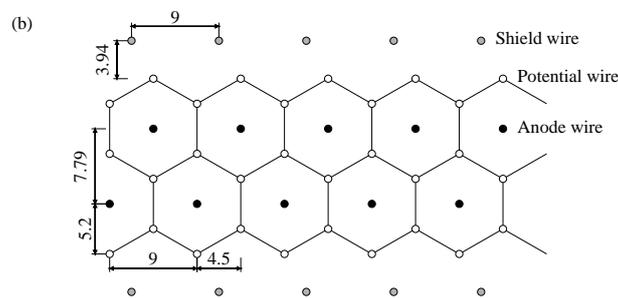


図 2.20: SDC2 の概念図。

SDC3

SDC3 は、SDC2 の下流にある MWDC である。 x, x', y, y' の 4 層を持つ。アノードワイヤーは 20 mm 間隔で張られており、 x と x' は 10 mm ずらして張られている。有感領域は、1800 mm × 1280 mm である (図 2.21)。SDC3 は SDC2 と同様な構造を持つ MWDC である。SDC3 は x, x' が各 96、 y, y' 層が各 64 で、計 320 の読み出しチャンネルを持つ。

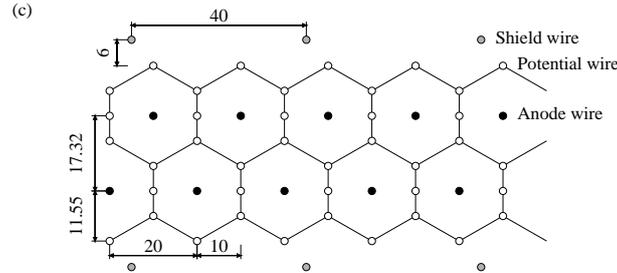


図 2.21: SDC3 の概念図。

5

FHT1、2

FHT1、2 は SDC2、3 でビーム領域を不感にした x ワイヤの部分をカバーするために作られたプラスチックシンチレーション検出器である。FHT1 は SDC2 の上流、FHT2 は SDC3 の下流に位置している。FHT1 は 2 mm × 6 mm × 550 mm の大きさのセグメントが 2 mm のオーバーラップを持ちながら互い違いに 96 個並んでおり、ビームの上側と下側にある。互い違いに並んだ上流側と下流側で 2 層で位置を測定行う。FHT2 は 128 チャンネルで FHT1 と同様な構成である。FHT1、2 ともにセグメント化されたプラスチックシンチレータに溝を作り、そこに波長変換ファイバーを通して MPPC で読み出しを行う。FHT1 は計 194、FHT2 は 256 の読み出しチャンネルを持つ。

2.8.3 トリガー検出器

SAC

SAC は、SDC1 の下流にあり、KURAMA マグネットの中に位置している。輻射体に屈折率 $n = 1.1$ のエアロゲルを用いたチェレンコフ検出である。J-PARC E40 実験で用いる π^\pm ビームの運動量は 1.32 と 1.4 GeV/c であるので、屈折率と運動量閾値の関係の図 2.15 より π はチェレンコフ光を出し、考えらる散乱 K^+ の運動量領域ではチェレンコフ光を出さず π の veto を行う検出器として用いる [18]。検出器の構造上ビームの通過領域を空けた形をしている。エアロゲルは 4 つの部屋に分けて詰めている (図 2.22)。そのため、PMT を 12 本用いているが、部屋ごとに信号を足して、4 チャンネル分のみをデータとして取得している。

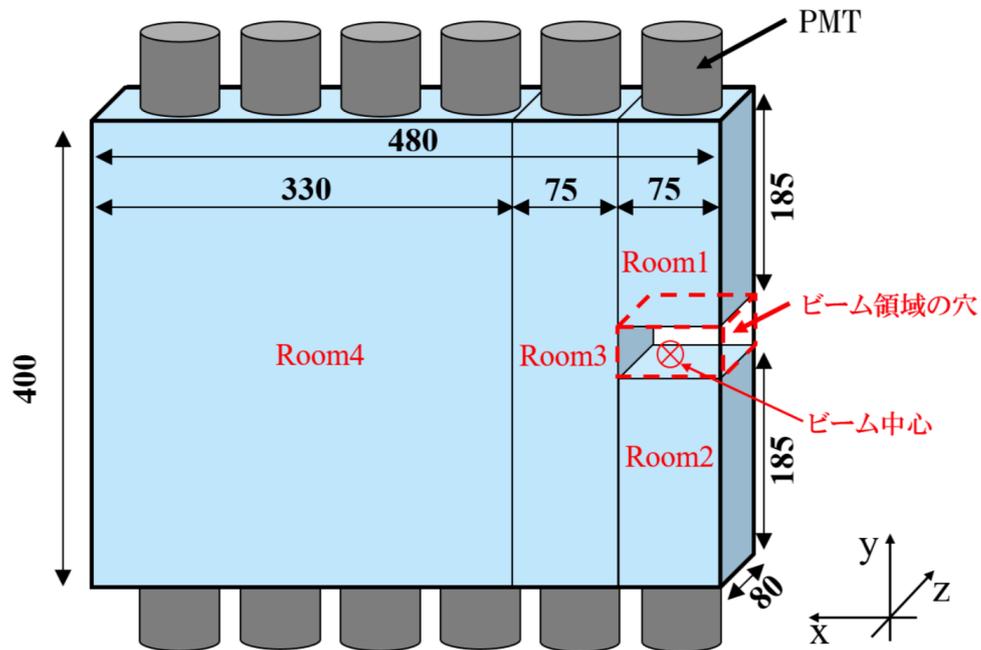


図 2.22: SAC の概要図。

SCH

SCH は、SAC の下流で KURAMA マグネットの中にあるプラスチックシンチレータを用いたトリガー用の検出器である [19]。セグメント化されており、1 セグメントは $11.5 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ のサイズであり、セグメントが 1 mm のオーバーラップを持ちながら互い違いに並べられている (図 2.23)。有感領域は $673 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ である。読み出しは MPPC (HAMAMATSU S10362-11-100P) を用いる。

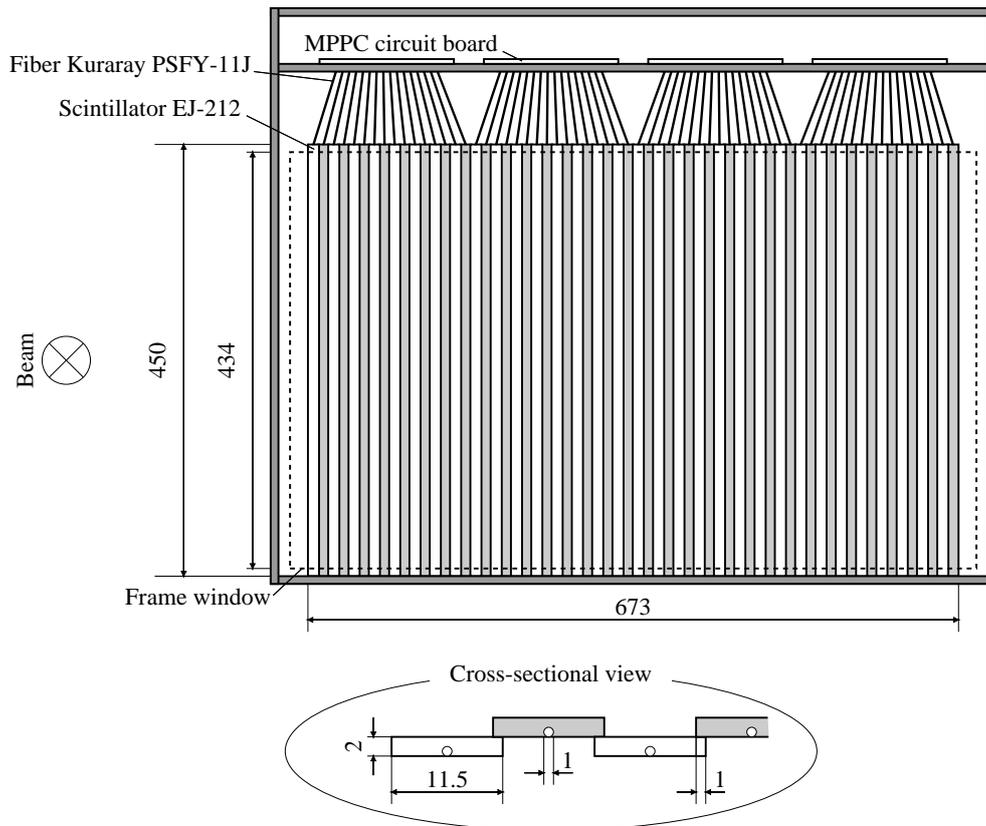


図 2.23: SCH の概要図。

2.9 2019 年参加予定の検出器

2018 年の実験では参加していなが、2019 年の実験では導入予定の検出器をまとめる。

LAC

LAC は、TOF と LC の間に位置するトリガーカウンターである。2019 年の実験より導入予定で、index が 1.05 のエアロゲルを用いており高い運動量の π を veto することを目標としている。次の実験では、 $\Sigma^+ p$ 散乱のデータを取得予定であり、 π^+ ビームを用いる。 π^+ ビームは Σ 生成時にできる K^+ と電荷が同じであるため大量のバックグラウンドになると予想される。そのため、LAC の導入を検討している。ビームが通過する側では読み出しを行わず中の反射板をブラックシートで覆っている。PMT (Hamamatsu R1584-01) で 15 チャンネル読み出す。

LC

LC は TOF の下流で、KURAMA スペクトロメータ最下流に位置するトリガーカウンターである。屈折率 $n = 1.49$ のアクリルを輻射体としたチェレンコフ検出器である。セグメ

ント化されており、28 セグメントを上下 PMT (Hamamatsu H1949) で読み出している。

2.10 トリガー概要

J-PARC E40 実験では、大強度 π ビームを使用しており、ビーム強度は 20 M/spill(1 spill \simeq 2 s) になる。E40 実験では式 (2.1) の π ビームを K1.8 ビームラインスペクトロメータの時間検出器である BH2 を用いて検出し、さらに散乱 K^+ であるとする信号を KURAMA スペクトロメータにある検出器信号の組み合わせでトリガの生成を行う。トリガーロジックは大きく分けて二段階となっている。信号の組み合わせで作ったトリガー信号を Level 1 Trigger (L1) という。また、ハードウェア上で簡易な解析を行いトリガー信号を作るものを Level 2 Trigger (L2) とする。

L1、L2 の信号を管理しているモジュールが Master Trigger Module (MTM) である。DAQ の部分 (2.13 節) において詳細を述べるが、J-PARC K1.8 ビームラインでは、検出器ごとや、ADC、TDC ごとにデータの読み出しであるフロントエンドがある。フロントエンド全てに Trigger 信号を配布、DAQ の Busy を管理し、イベントごとの対応をとるためのイベントタグの発行等を行なっているのが MTM である。

L1、L2 の信号は各フロントエンドでは次のような機能を持つ。L1 は各検出器の読み出しモジュールで ADC データ取得用のゲート信号や TDC の基準時間を生成するとともにエンコードを開始する信号であり、L2 はデータ読み出しを開始する信号となっている。すなわち、L1 と L2 の両方の信号があることでデータ取得を行なっている。トリガーシステムの概要を図 2.24 に示す。

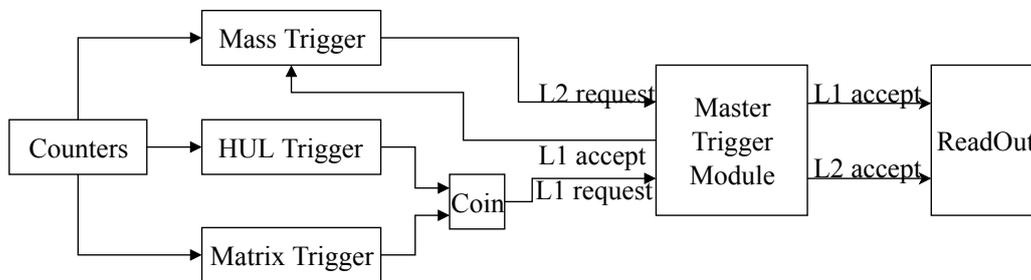


図 2.24: トリガーシステムの概要図。

L1 の信号を作っているものの中には、検出器の信号をデジタル信号にしたものと、二つのモジュールから得られる信号である。一つは、汎用 FPGA モジュールである Hadron Universal Logic Module (HUL) [20] を用いた HUL Trigger である。もう一つは、セグメント化された検出器を 3 つ用いて磁場中を通り抜けた荷電粒子の軌道から信号のヒットパターンを利用して運動量を選ぶ Matrix Trigger (Mtx Trigger) である。L2 では、セグメント化された検出器を 2 つ用いて磁場中を通り抜けた荷電粒子の TOF をハードウェアでデジタル化し、粒子の質量によって生じる時間差を利用し粒子識別を行う Mass Trigger (MsT) を用いている。

L1、L2 の詳細について以下にまとめる。

2.11 Level 1 Trigger

Level 1 Trigger に参加している検出器は上流から、BH2 (図 2.8)、SFTX (図 2.17)、SAC (図 2.22)、SCH (図 2.23)、TOF (図 2.16) の 5 つの検出器である。TOF の信号からは高い閾値を設定した TOF-HighThreshold (TOF-HT) という信号を使用している。これら 5 つの検出器を用いて式 2.1 の π ビームと散乱 K^+ のタグ付けを検出器の信号の組み合わせのみで行う。MTM に入るまでの L1 の概要を図 2.25 に示す。

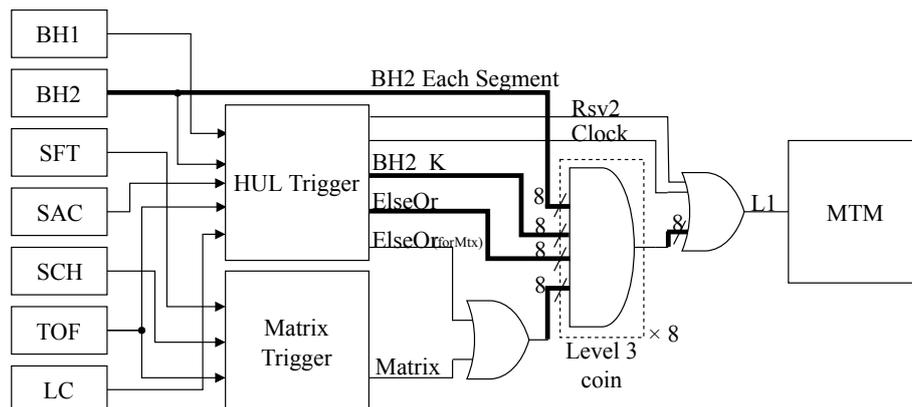


図 2.25: Level 1 Trigger の概要図。

HUL Trigger では、BH2.K という信号を作成している (詳細は 3.1 節)。この信号は HUL Trigger 内で生成した (π, K) 反応をタグするための信号である。Matrix Trigger は Σ 粒子生成の K^+ の運動量領域を通る検出器のセグメントのヒットパターンから得られる信号を出力する。 (π, K) 反応のための L1 ($L1_{(\pi,K)}$) は、上記の HUL Trigger から得られる BH2.K と Matrix、さらに BH2 からの得られる信号のコインシデンスによって得られる。 $L1_{(\pi,K)}$ の定義は (式 2.6) のようになる。

$$L1_{(\pi,K)} \equiv BH2 \times BH2.K \times Matrix \quad (2.6)$$

式 (2.6) での BH2 信号のタイミングを Final Timing という。これにより J-PARC E40 実験での全ての検出器の読み出しの基準時間となるタイミングを決定する。

$L1_{(\pi,K)}$ を生成していると同時に ADC や TDC の較正や検出器の評価のための付加的な L1 ($L1_{\text{ElseOr}}$) を生成できるようになっている。HUL Trigger で $L1_{\text{ElseOr}}$ のための信号を ElseOr という。 $L1_{\text{ElseOr}}$ の定義を (式 2.7) に示す。

$$L1_{\text{ElseOr}} \equiv BH2 \times \text{ElseOr} \quad (2.7)$$

$L1_{(\pi,K)}$ と $L1_{\text{ElseOr}}$ を作っているコインシデンスモジュールを Level3 coin という。Level 3 coin には、BH2 のセグメントごとの信号と、HUL Trigger から得られる BH2 のセグメントごとに対応する BH2.K、ElseOr、ElseOr と Matrix Trigger の信号の OR の 4 つの信号をコ入力している。これらの信号のうち 3 つの信号がある時に同期信号を出力する設定にしている。 (π, K) 反応が起こったとされる時は、BH2、BH2.K、Matrix によって L1 が生成される。付加的なトリガーの時は BH2、ElseOr、ElseOr の三つの信号により L1 が

生成される。高計数率のビームを使用することへの対策として、BH2 での信号を OR を取らず、Level 3 coin を BH2 のセグメントごとにしており、BH2 のセグメントの数の計 8 個作っている。また、Level 3 coin の出力と HUL Trigger から Clock 信号等の出力の OR が L1 request として MTM に入力される。HUL Trigger、Matrix Trigger の順で入力されている信号やその詳細について述べる。

2.11.1 HUL Trigger

HUL Trigger は、Field Programable Gate Arrey (FPGA) チップを搭載している OpenIt で開発された HUL (Hadoron Universal Logic module) に Trigger 用の回路をプログラミングしたものである。詳細は、3.1 節に示す。ネットワーク内ならどこからでもレジスタの変更を行うことができるようになっており、遠隔操作が行える。HUL Trigger では、散乱データ取得用のトリガー信号として BH2_K という信号を出力している。Beam と K 散乱が起こったとされる検出器の組み合わせでできる KScat という信号のコインシデンスからなっている。Beam と KScat の定義を式 (2.8) と (2.9) に表す。

$$\text{Beam} \equiv \text{BH2} \quad (2.8)$$

$$\text{KScat} \equiv \text{TOF} \times \overline{\text{SAC}} \times \overline{\text{TOF-HT}} \quad (2.9)$$

この他に、Trigger 信号としては ElseOr と呼ばれるその他の Trigger 信号を出力できるようになっている。また実験準備や Pedestal 測定用に ExtraLine、Clock といった信号の ON/OFF を行えるようになっている。それらの記述はレジスタの制御によって可能となる。E40 の $\Sigma^{\pm p}$ 散乱実験の L1 は HUL Trigger での BH2_K、ElseOr と MtxTrigger の信号を用いて L1 を生成している。次に Mtx Trigger について詳細を述べていく。

2.11.2 Matirx Trigger

MtxTrigger は、KURAMA スペクトロメータの検出器である SFT-X、SCH、TOF を用いて、それぞれの検出器のヒットパターンによって、電荷並びに運動量を選択しトリガー信号を生成するトリガーロジックである。MtxTrigger に入力されている信号は図 2.26 のようになっている。

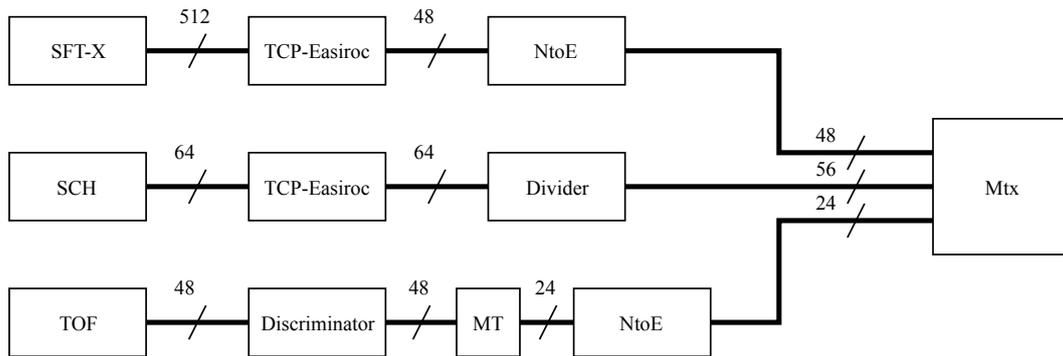


図 2.26: MatrixTrigger への入力信号の回路図

MtxTrigger は、HUL を用いて作られている。HUL Controller に HUL Mezzanine card を 2 枚つけたものを使用している。HUL の FPGA に Matrix Trigger 用の回路をプログラミングしている。Matrix Trigger には内部で 2DMatrix (2DMtx) と 3DMatrix (3DMtx) の 2 種類がある。2DMtx は SCH と TOF のセグメントのヒットパターンでトリガー用の信号を出す。3DMtx は SFT-X、SCH、TOF を使用してトリガー用の信号を生成している。

J-PARC E40 実験では、2DMtx はビームの veto 用に使用しており、ビームに対応する SCH-TOF のセグメントのヒットの組み合わせがあった時に信号をつくる。また、3DMtx では、SFT-X、SCH、TOF のセグメントのヒットパターンに一致したときにトリガー用の信号をつくる。Matrix Trigger の出力はこの 2D Mtx の NOTAND と 3D Mtx の AND で生成される。式 (2.10) に定義を示す。

$$\text{Matrix Trigger} \equiv 3D \text{ Mtx} \times \overline{2D \text{ Mtx}} \quad (2.10)$$

Matrix Trigger は FPGA で回路を生成しているため、2, 3D Mtx のパターンについてはパラメータファイルを読み込む形となっており変更可能である。

SFT-X は XU と XD でそれぞれ 24 ch にまとめ、計 48 ch で参加している。まとめ方としては、SFT-X の XU は 256ch あり、32ch の束で 8 個の TCP-EASIROC ボードで読み出している。1 ボード 32 ch の中で 11, 11, 10 ch の OR にして 3 ch 分 NIM 出力している。全ボードで計 24 ch 分を ECL 信号に変換 (NtoE) し Matrix Trigger に入力されている。XD においても同様に 24 ch の信号を作っている。SCH はビームが通る領域は Mtx に参加せずに 9-64 セグメントの計 56 ch が Mtx に参加している。TOF は全セグメントの 24 ch 分参加している。3D Mtx のパターンは合計で、 $2 \times 24 \times 56 \times 24 = 64512$ パターンが考えられる。この中から Σ 生成に関わる K の運動領域を満たすヒットパターンの時にトリガー信号を生成し、Level 3 coin で BH2、BH2_K 信号と同期を取ることで L1 を生成する。

2.12 Level 2 Trigger

Level 2 Trigger は MassTrigger によって生成される信号である。L2 は、L1 によって各フロントエンドでエンコードを行なったデータをデータ記録用の PC に転送を開始させる信号でもある。L1 でエンコードを開始した際に、MassTrigger で Trigger 条件を満たす

信号がない場合は Clear と呼ばれる信号を出力することで、エンコード中のデータを消す (Clear)。MassTrigger は、L2 と Clear を出力するようになっている。

2.12.1 Mass Trigger

MassTrigger で用いる検出器は、SCH と TOF である。この 2 つの検出器の全てのセグメント飛行時間を計算する。SCH の 64 セグメントの信号を入力し、また TOF の 24 セグメントを入力している。それぞれ TDC は Multi Hit TDC ベースであり、その全てのパターンにおいて検証を行い設定した TOF-SCH の時間幅に信号がある際 L2 信号を出力する。現在、デコードからパターンの検証までの時間は $3 \mu\text{s}$ となっており、信号があった場合や $3 \mu\text{s}$ 以内の検証で信号がなかった場合に L2 が出力され、その時間内に検証が終了し TimeGate 内に信号がない場合も $3 \mu\text{s}$ 待つ Clear 信号が出力されようになっている。

2.13 Data Acquisition system

DAQ とは、Data Acquisition system の略称である。各実験によって DAQ は異なり、J-PARC E40 実験では K1.8 ビームラインで使用されている HadronDAQ (HDDAQ) を使用した。読み出しのモジュールとしては KEK-VME や、COPPER、HUL の LR-MH-TDC、HR-TDC を使用して構成されている。

2.13.1 Hadron DAQ

Hadron DAQ は、各検出器ごとに読み出しのフロントエンドがある。表 2.2 に各フロントエンドの機器について記す。それらのフロントエンドからネットワーク経由でデータの転送や、トリガー信号の通信を行なっている。各フロントエンドから得られたデータは、EventBuilder (EB) という PC によってイベントごとにまとめられる。得られたデータは Event Distributir (ED) によってデータの記録を行う Recorder (RD) や Online 解析を行う OnlineAnalyzer 等に転送される。これらの DAQ コンポーネントは Controller によって MESSAGE を介して操作される。

表 2.2: 各検出器の読み出しモジュール。

Detector	読み出しモジュール
BH1, 2, TOF	VME v792, HUL HR-TDC
BFT, SCH	TCP EASIROC
BC3, 4, SDC1	COPPER
SAC, TOF-HT, LC SFT, SDC2,3	HUL LR-MH-TDC
CFT, FHT1, 2, PiID	VME EASIROC
BGO	CAEN v1724, HUL LR-MH-TDC

第3章 HUL Triggerの開発と評価

2018年の6月に実験を行い、データ取得に伴ってトリガー生成を行なった。本章では、そのトリガー生成の一旦をになっているHUL Triggerの開発並びに、その実験時でのトリガー生成のためのタイミング調整の結果、また取得したトリガーに用いた検出器であるSACの評価を行う。

3.1 HUL Triggerの開発

3.1.1 HUL Trigger開発の背景

HULを用いてトリガー生成を行ったのかというと、J-PARC E40実験の最重要検出器のCFTを使用する上での要請である。概要でも述べたがCFTの全ファイバーから得られる信号の波高情報を取得を行うためにADCのデータが必要であった。CFTの読み出しモジュールであるVME Easirocでは、入力信号の波高をトリガー信号のタイミングでホールドすることでデータ取得を行う仕組みになっているため、検出器からのアナログ信号をトリガー信号生成の間遅らせる必要がある。しかしCFTの読み出しはおよそ5000チャンネルあり、またそのアナログ信号を遅らせるケーブルに20 m (100 ns)という制限があった。また、VME Easirocでは、信号の波形整形の時間を50 ns~175 nsに変更できる仕様になっている。それらを合わせて、最大で275 ns以内にトリガーを生成しなければならなかった。J-PARCのK1.8ビームラインで行われた従来の実験において、Trigger生成はビームラインのエリアではなく、そこから離れた計測室でNIM回路を組み生成していた。エリアから計測室までは往復にかかる時間は500 ns程度あり、従来の方法ではADCの取得を行うことができなかった。データ取得を行うためには、エリア内でトリガーを作成しなければならなかった。エリア内でトリガー生成を行うということは、ビームが出ている間は放射線のためエリアに入ることができないため、信号間のタイミングの調整をエリア内で行うことができない。エリア内でトリガーの調整が可能にするためネットワーク経由で遠隔操作可能なHULを用いている。トリガーを早く作ること、また遠隔操作を行えるということからJ-PARC E40実験ではHULを用いたTrigger回路を使用した。HUL Triggerを用いたトリガーの生成はK1.8ビームラインにおいて初めてであり、詳細を以下に述べる。

3.1.2 HUL Trigger概要

HUL Triggerは、Field Programmable Gate Arrey (FPGA) チップを搭載しているOpenItで開発されたHULにTrigger用の回路をプログラミングしたものである。HUL Triggerの写真を図3.1に示す。



(a) HUL Trigger の側面



(b) HUL Trigger の全体

図 3.1: HUL Trigger の写真

FPGA とは、ハードウェア言語を用いて電子回路を記述し、その内容をチップに書き込むことができるものである。特徴としては、何度も書き換え可能であるということである。また、同期回路にするためにクロック同期させて使用するという点がある。また、FPGA の基本構造として記憶素子とその間をつなぐスイッチ状のものがああります。そのスイッチは 0、1 の信号によって ON/OFF を行えるようになっており、それらのスイッチを切り替えることで FPGA の回路動作を AND から OR 等に変更できるようにした点をレジスタと呼び、FPGA に信号を送ることによりあらかじめ設計していた範囲において変更して使用することができる。HUL では、SiTCP という規格を用いることでイーサネットを通したネットワーク通信を行うことができる。SiTCP を利用することで、ネットワーク内ならどこからでもレジスタの変更を行うことができるようになっており、遠隔操作が行える。図 3.1 の HUL Trigger は、HUL Controller モジュールの上に HUL Mezzmin カードを 2 枚載せている。これらのモジュールとカードの組み合わせの基本的な仕様を表 3.1 にまとめる。

表 3.1: HUL の基本仕様。

入力	68ch	NIM 4 ch (HUL Controller) . 差動線 64 ch (HUL Controller) 差動線の種類は、LVDS, ECL, PECL, LVPECL
出力	68ch	NIM 4 ch (HUL Controller) . 差動線 64 ch (HUL Mezzanim) 差動線の種類は、LVDS
LAN	RJ45 のイーサネットコネクタ。1 Gbps までの TPC/IP 通信をサポート。	
FPGA	Kintex 7 160T-1	
内部 Clock	400 MHz	
基本規格	VME 6U	

入力は 68 ch あり、NIM レベルで LEMO 形状のものが 4 つ (NIMIN1~4) あり。コネクタでいわゆる 32 ch のハーフピッチコネクタが 2 つ付いている。それは差動線で 64 ch 分である 68 極コネクタ (KEL 8831E-068-170L-F) が 2 つがある。入力の差動線対応信号として、-4V から +5V までサポートしており、LVDS をはじめ、ECL、PECL、LVPECL 信号が使用できる。出力は 68 ch あり、NIM レベルで LEMO 形状のものが 4 つ (NIMOUT1~4) あり。これもハーフピッチコネクタ 32 ch が 2 つ、差動線で 64 ch 分である 68 極コネクタ (KEL 8831E-068-170L-F) が 2 つがある。出力の差動線は、LVDS 信号のみという仕様制限がある。多くの入出力が差動線となっており、HULTrigger の前後に差動変換のモジュールが必要となっている。

3.1.3 HUL Trigger までの入力信号

各検出器の HUL Trigger に入力されている信号の詳細について述べる。HUL Trigger に接続されている検出器のまとめを図 3.2 に示す。

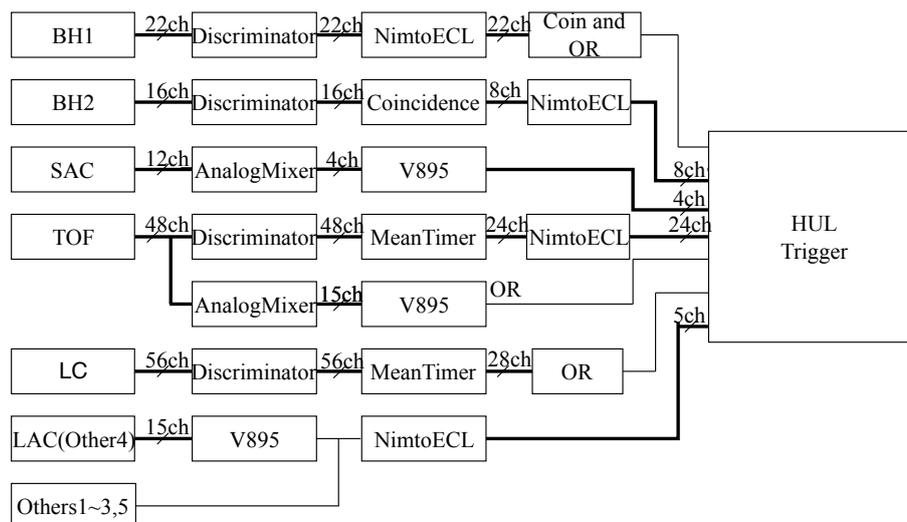


図 3.2: HUL Trigger への入力信号の生成過程概要図。

BH1 の信号はトリガーのロジックには参加していないが入力されている。ビームの条件を BH1 と BH2 のコインシデンスにする予定だったためである。しかし、実験での Trigg のタイミング合わせの際、大幅に時間が遅れていたため参加させることを断念した。

BH2 はまず検出器からの信号を Discriminator に、次に Coincidence モジュールによって、PMT の up 信号と down 信号のコインシデンスをとっている。この時、down の方の信号を 10 遅らせており、down の信号によってトリガーのタイミングが決まるようにしている。そして、BH2 の各セグメントの信号がこの時点で同じタイミングになるようにケーブルを用いて調整している。コインシデンス後に NIM To ECL (NtoE) 変換モジュールにより差動変換し、HUL Trigger に 8 ch 入力されている。つまり、HUL に入力されている時点で BH2 の各セグメントの信号は同じタイミングになっている。

SAC は Room ごとに PMT から得られるアナログ信号を足し合わせてから Discriminator に通してデジタル信号に変化させている。Discriminator として使用しているのが VME Caen V895 (V895) であり、アナログ信号を LVDS の差動線にして出力する。HUL Trigger には、この LVDS 信号を 4ch 入力している。SAC の信号は V895 に入力前にタイミング調整を行っており、HUL Trigger に入力される前に Room ごとの信号 Timing は揃っている。

TOF は up と down の検出器のアナログ信号を Discriminator に通しデジタル信号に変換し、それらの信号を MeanTimer と呼ばれる 2 つの入力信号の平均時間を出力するモジュールを使ってセグメントごとの信号に変換する。全てのセグメント信号を NtoE を用いて差動線に変換し、HUL Trigger に 24 ch 分入力されている。

HULTrigger には、TOF から得られる信号として TOF-HT が入力されている。TOF から得られるアナログ信号を Divider によって分けて、その信号を 2 つないし 4 つまとめて 1、2 セグメント分を Analog Mixier により 1 つの信号にし、高く設定した閾値の Discriminator を通してデジタル変換している。この Discriminator には V895 を使用しており、V895 にはデジタル信号の OR を NIM レベルで出力できるので、その信号を HUL Trigger の NIMIN3 に入力している。そして、2018 年の実験にはトリガーロジックとして参加していないが LC も入力されている。

LC は、MeanTimer で平均時間の信号を各セグメントごとに作るころまでは TOF と同じであるが、それらの信号を NIM モジュールの 50 chOR を用いて、28ch を 1 つの信号にし HUL Trigger の NIMOUT2 に入力されている。

また 2019 年から参加が考慮されている LAC は V895 を用いてデジタル信号に変換、LAC の全読み出しである 15 ch 分の NIM レベル OR を NtoE で差動線に変換し HUL Trigger に入力している。

LAC は初期の HUL Trigger には参加予定の検出器ではなかったが、FPGA の回路設計の段階で追加に信号を組み込めるように作った Others という信号入力の Other4 に入力した。

3.1.4 FPGA への実装内容

HUL Trigger に入力された信号は、FPGA 内にプログラミングした回路によってトリガー用の信号生成を行う。FPGA 内のプログラミング回路の概要を図 3.3 に示す。

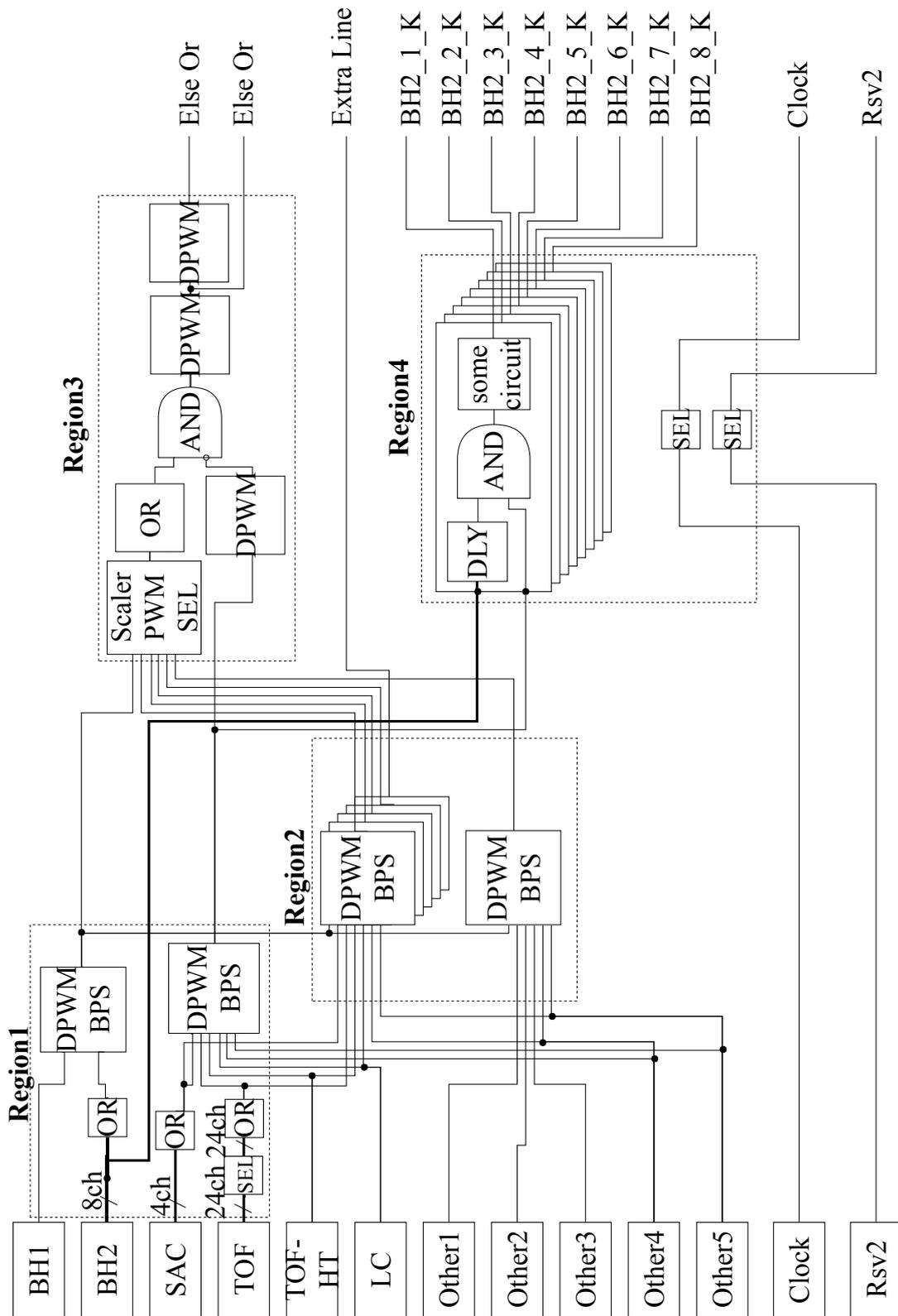


図 3.3: FPGA の記述内容概要図。

FPGA 内にプログラミングした回路は、大きく分けて 4 つの部分からなり、Region1~4 とする。Region1 は BH1 と BH2 で Beam という信号の定義と、KScat という信号の定義を行なっている。Region2 では主に else_or 信号を作っている。Region3 では else_or の調整を行う。Region4 では BH2_K を作っている部分である。それぞれの Region はレジスタ制御可能なモジュールかたできている。その仕様を表 3.2 にまとめる。検出器から得られた信号を AND や OR、またネットワーク経由で操作が可能なレジスタである Delay (DLY)、Delay and Pulse Width Moderator (DPWM)、Preset Scaler (PS)、Bit Pattern Selector (BPS)、Selector (SEL)、また FPGA 内の Clock の 1 周期分の信号を出力する Edge Detector や固定長の信号幅に変える Pulse Width Changer (PWC) と呼ばれるモジュールからなっている。そして各 Region の要所に ProbePoint (PP) という NIMOUT の 1~4 でのみ出力可能な点があり、PP から信号を出力しトリガー信号生成のためのタイミング調整を行えるようになっている。

表 3.2: FPGA 内のレジスタで制御可能なモジュール。

モジュール	仕様
DLY	信号の遅延を行う。2.5 ns~40 ns の範囲で遅延が変更可能。
DPWM	信号の遅延と信号幅の変更。 遅延は DLY と同じ仕様で、信号幅は 2.5 ns~77.5 ns の領域で変更可能。
PS	設定値分の 1 のプリスケールを行う。 設定値は 1~16777215 の範囲で設定可能。
BPS	入力された信号を AND、NOTAND または不使用で選択可能。 選択を行った論理でコインシデンスをとった信号を出力する。
SEL	信号の ON/OFF を行う。
PP	NIMOUT1~4 から PP の信号を出力可能。

各モジュールを図 3.4 のように表す。

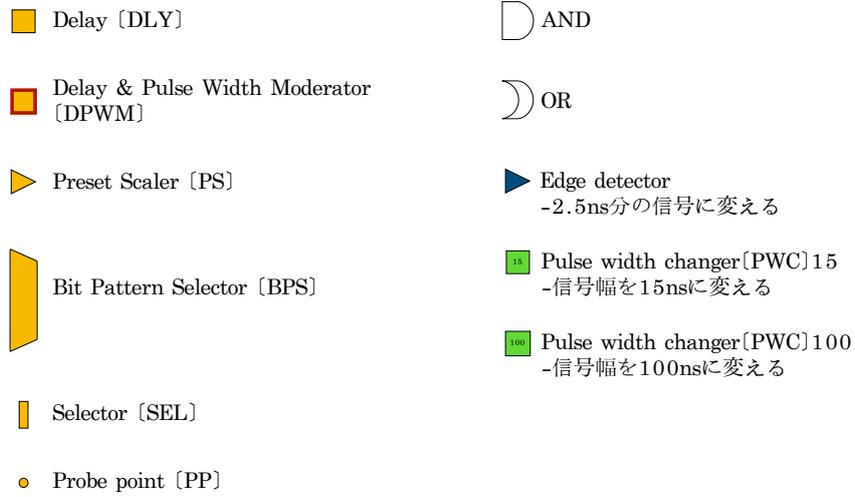


図 3.4: モジュール記号のまとめ。

この記号を用いて各 Region の回路を表し、詳細を述べる。

Region1

入力並びに Region1 をブロックダイヤグラムを用いると図 3.5 のようになる。

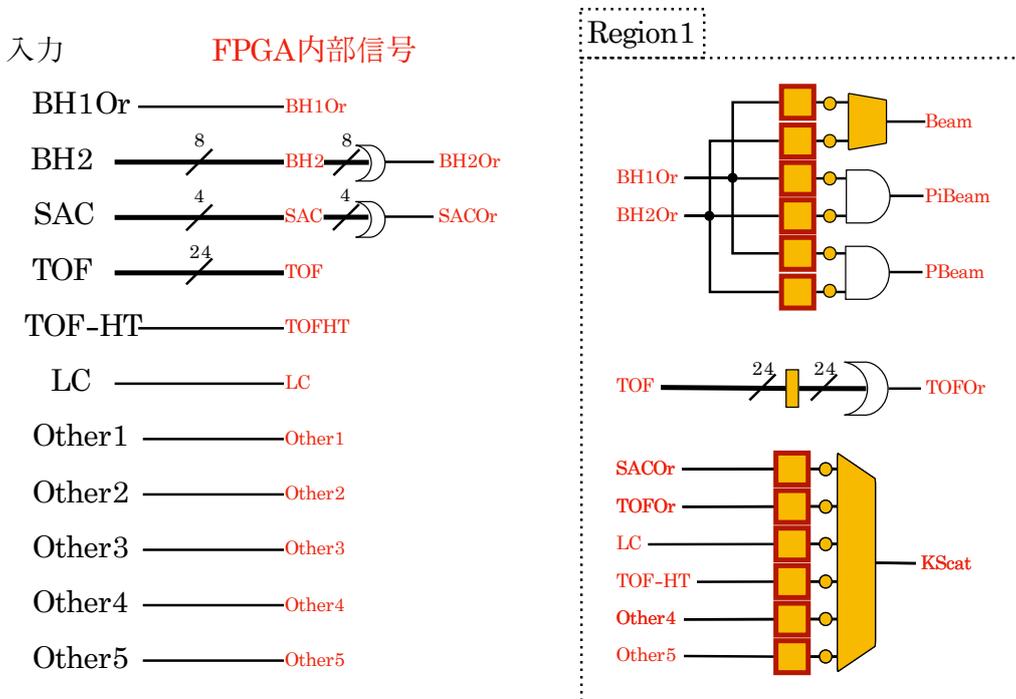


図 3.5: FPGA の入力と Region1 のブロック図。

図 3.5 において赤い文字で書いた信号線は FPGA 内部の信号線であり、同じ名前のものは繋がっている。Region1 では、BH1 と BH2 の信号を組み合わせ Beam という信号を定義できるようになっている。しかし、実際にタイミング調整を行なった際に BH1 の信号が遅かったために BPS には BH1 は不使用、BH2 のみの信号で Beam が定義されている (式 (2.8))。

トリガーとは別に Scaler 用に PiBeam、PBeam という信号を生成できるようになっている。TOF のセグメントごとの ON/OFF の SEL も Region1 に入っている。これは、E40 実験でのビームの高計数への対策の 1 つであり、計数率が著しく大きくなってしまった場合にビームが通るセグメントをトリガーから外せるようになっている。さらに、KURAMA スペクトロメータ上の検出器を用いて K 散乱を定義している信号である KScat を Region1 で作るようになっている。KScat を作るための BPS では、 π に対して信号を出す SAC を NOTAND、TOF を AND、TOF-HT を NOTAND で参加させている (式 (2.9))。

2018 年 6 月の実験では LC は信号が遅く間に合わなかったが、2019 年の Σ^+p 散乱実験では使用が検討されており、その場合 LC は AND とする。同じく使用が検討されている LAC は Other4 で NOTAND で L1 に参加となる。

Region2

Region2 では、付加的なトリガーである else_or の生成用の回路となっている。ブロック図を図 3.6 に示す。

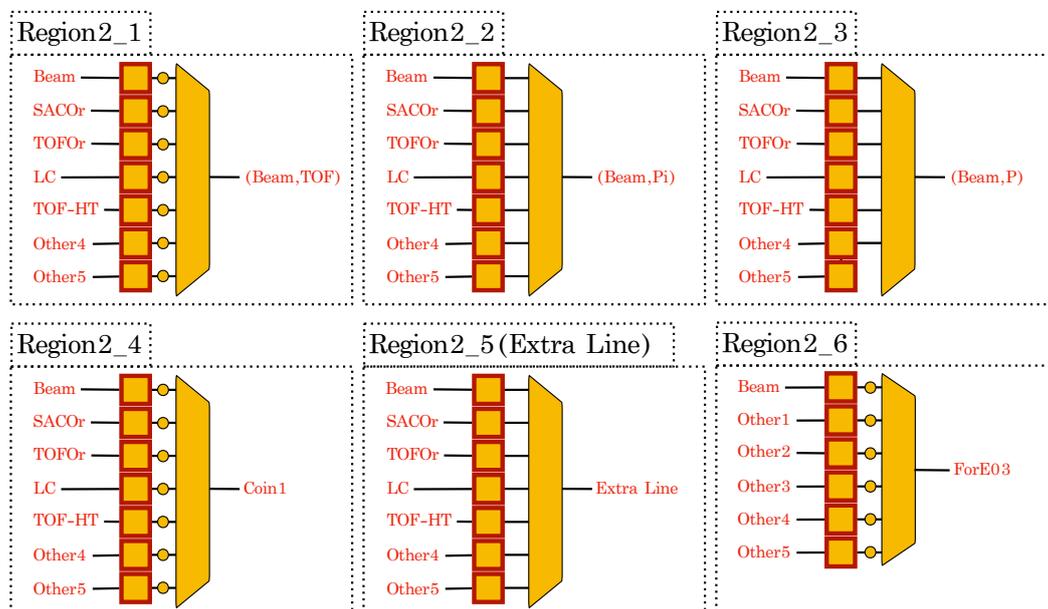


図 3.6: Region2 のブロック図

Region2 は Beam と SAC、TOF、TOF-HT、Other4,5 の DPWM とその出力の BPS という同じ構造の配線が 5 つある。さらに、Beam と Others の DPWM とその出力の BPS という配線を加え計 6 つの構造がある。それぞれ Region2.1~6 となっている。Region2.1~3 で

生成される信号名とその定義を表 3.3 にまとめる。Region2_1 は (Beam,TOF)、Region2_2 は Beam は (Beam,Pi)、Region2_3 は (Beam,P) として使用した。

表 3.3: Region2_1~3 の定義。

Region	定義
Region2_1	$(\text{Beam}, \text{TOF}) \equiv \text{Beam} \times \text{TOF}$
Region2_2	$(\text{Beam}, \text{Pi}) \equiv \text{Beam} \times \text{TOF} \times \text{SAC}$
Region2_3	$(\text{Beam}, \text{P}) \equiv \text{Beam} \times \text{TOF} \times \overline{\text{SAC}} \times \text{TOF-HT}$

Region2_4、Region2_6 は、予備のトリガー信号のラインであり、CATCH のキャリブレーション用の陽子ビーム使用時の (Beam,BGO) や E40 実験のコミッシュニング実験、今後実験が予定されている γ 線分光実験 (E03 実験) の試験用のトリガーラインとしてそれぞれ使用した。Region2_5 は Extra Line となっており、HUL Trigger より出力された後に、Level 3 Coin を通過せずに MTM の L1 に入力される OR のモジュールに繋がっている。これは、実験時において K1.8 ビームスペクトロメータでのマグネット調整を行う際に BH1 のみを Trigger として用いる時や、実験準備でのトリガー生成に用いられる。Region2 では、FPGA での回路制約より全てに PP を設定することはできなかった。そのため Region2_1,2_4,2_6 にのみ PP を設けた。トリガーのタイミング調整を行う際は Region2_1 か 2_4 で調整を行い、それで得た値を各部分のレジスタに反映させて使用した。

Region3

Region3 のブロック図を図 3.7 に示す。

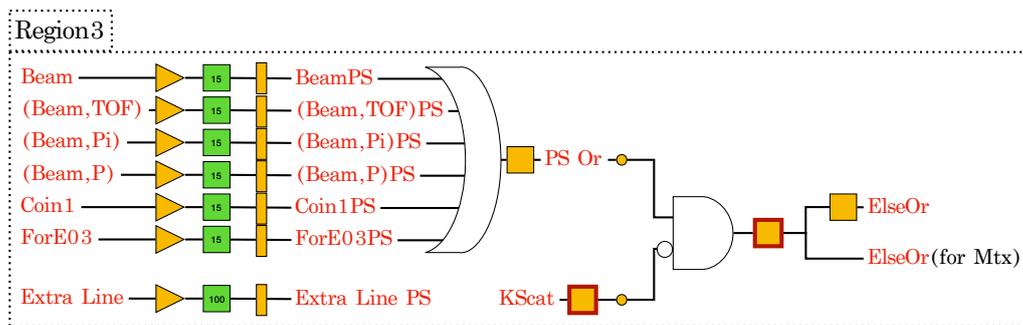


図 3.7: Region3 のブロック図。

Region3 では、Region1 で生成した Beam と Region2 で生成したその他の Trigger 信号を BH2.K の Trigger 信号に混ぜて取るために、上記の信号を PS を通じて実験時にビーム計数に応じてプリスケールを行えるようにしている。混ぜるトリガー選択を行えるように SEL で ON/OFF を行うことができる。その他のトリガー信号である ElseOr を生成する際 KScat と排他的処理を行なった。図の KScat の NOT と ElseOr の AND を取っている部分がそれであり Ksact が出力される時は ElseOr は出ない仕組みになっている。これ

は J-PARC E40 実験の目的である Σp 散乱実験を測定するため、 K 散乱だと考えられる信号の KScat を第一に測定行うためである。また HUL Trigger で BH2.K という信号が出たとき、ElseOr のトリガー信号が出たときで L2 の挙動が異なるため排他的にする必要があった。ElseOr には DPWM が 2 つ存在する。これは、Level 3 coin という BH2 と BH2.K、ElseOr、ElseOr と Matrix Trigger の OR で同期レベル 3 としているロジックのためである (2.11 節)。ElseOr と Matrix Trigger で OR を作る点でのタイミング調整を行うためのものと、Level 3 coin での ElseOr の信号のタイミング調整用として 2 つある。

Region4

Region4 のブロック図を図 3.8 に示す。

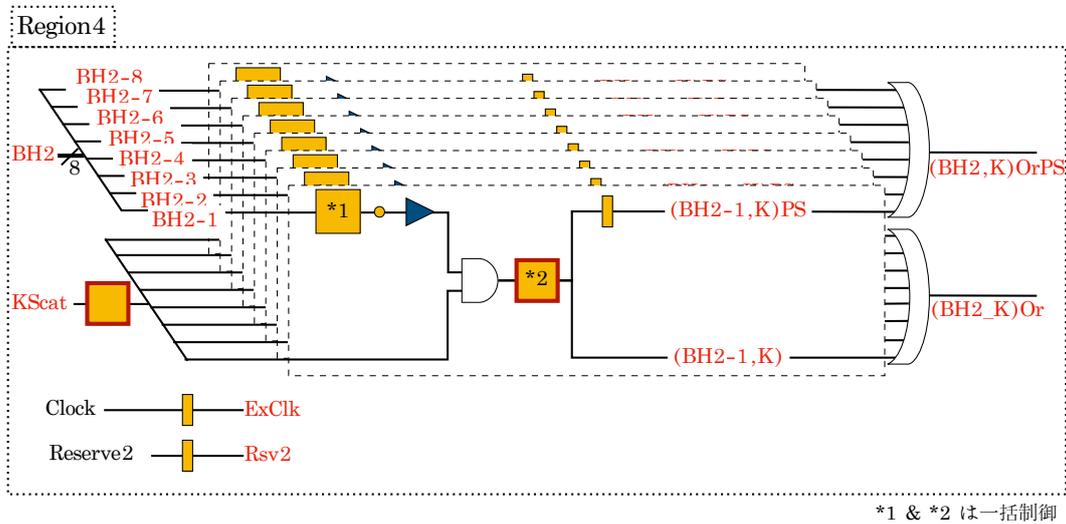


図 3.8: Region4 のブロック図。

Region4 は HUL Trigger において、最も重要な箇所である BH2.K トリガー信号を生成する。BH2.K 信号は 8 本分あり、BH2 の各セグメントごとの信号と Region1 で生成した KScat の信号を AND 回路を通して生成される。BH2 の信号は DLY の後 EdgeDetector によって 1 clock 分の信号幅に変換し、KScat と同期を取る。その後、DPWM で Level 3 coin のため信号調整と、SEL で ON/OFF できるようにし Trigger 用の信号としている。BH2 の各セグメントの DLY と BH2.K を作る AND の後ろの DPWM は全てのセグメントで同じ値が入っている。つまり 1 つのレジスタで制御されており、1 つのレジスタの変更を行うと BH2 の全セグメント分に反映される。BH2.K トリガー信号を BH2 の各セグメントで生成したのはビームの高計数対策である。BH2 では、ビームが 20 MHz/spill (1 spill = 2 s) でやってくるので高計数が予想され、BH2 の OR と KScat との AND を取ると TriggerRate が大きくなるのが予想されるのでセグメントごとに分けた。SEL 後の BH2.K のセグメントごとの FPGA 内部信号が Level 3 coin へ入力されている。BH2.K 信号の OR は SEL 前後ともに Scaler へ繋がっている。また、ペDESTAL測定用また、実験準備での Trigger 用の Clock や Reserve2 (Rsv2) といった信号用 SEL もあり、HUL Trigger

で ON/OFF できるようになっている。

3.1.5 HUL Trigger の入出力まとめ

FPGA 内には上記のように記述してありそれらの信号の入出力のまとめを図 OR 表に示す。MAIN とは、HULController の作動線入力の部分のことであり図 3.1 の (a) の赤枠上 2 つの部分である。上が MAINU で下が MAIND となっている。その下にあるのが NIMIN と NIMOUT である。MZN とは Mezzanim の差動線出力部分のことで図 3.1 の (a) の青枠上 2 つの部分である。上が MZNU で下が MZND となっている。HUL Trigger の入力のまとめを図 3.9 に示す。

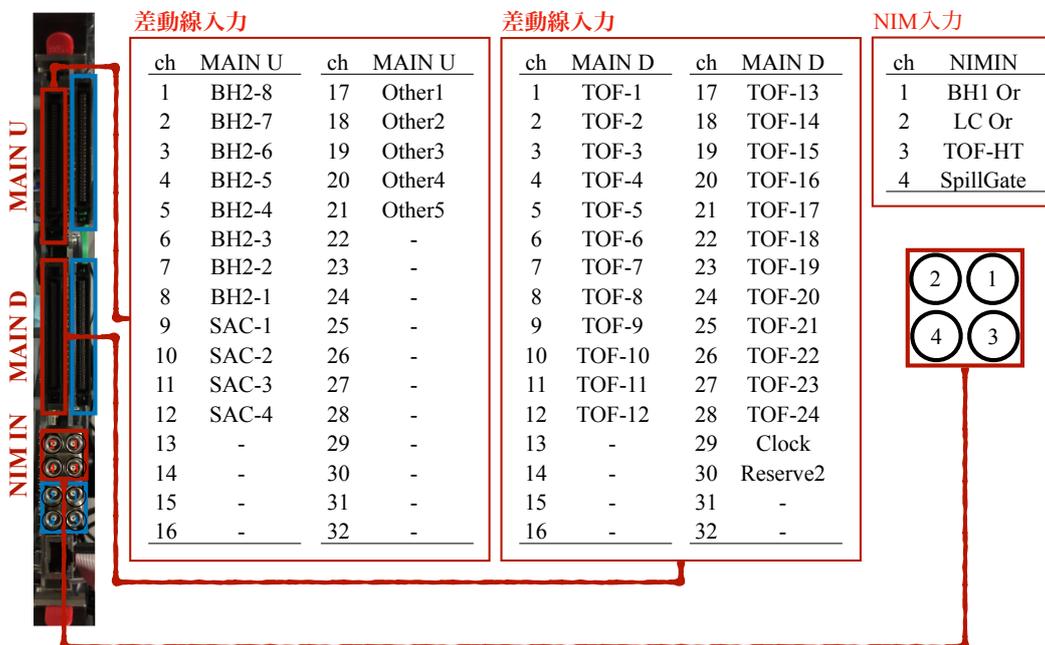


図 3.9: HUL Trigger への入力まとめ。全入力 68 ch の内 47 ch 分使用している。

HUL Trigger の入力のまとめを図 3.10 に示す。Trigger 生成に関わる信号は出力する前に Spill Gate と呼ばれる信号を同期をとっている。Spill Gate とは、ビームが出ている間に出力される信号のことで、この信号と同期を取る理由としてビーム出力時以外では Trigger 信号を出力しないようにすることである。この Spill Gate は Trigger 信号を設計中に同期モジュールを減らすことができるため HUL Trigger 内で同期をとっている。これにより、Trigger 生成に関わる時間を 5~10 ns 減らすことができている。NIMOUT の信号は Trigger 生成のためのタイミング調整に FPGA 内部の信号をみることに用いるため、信号線を繋げエリア外に伸ばしている。

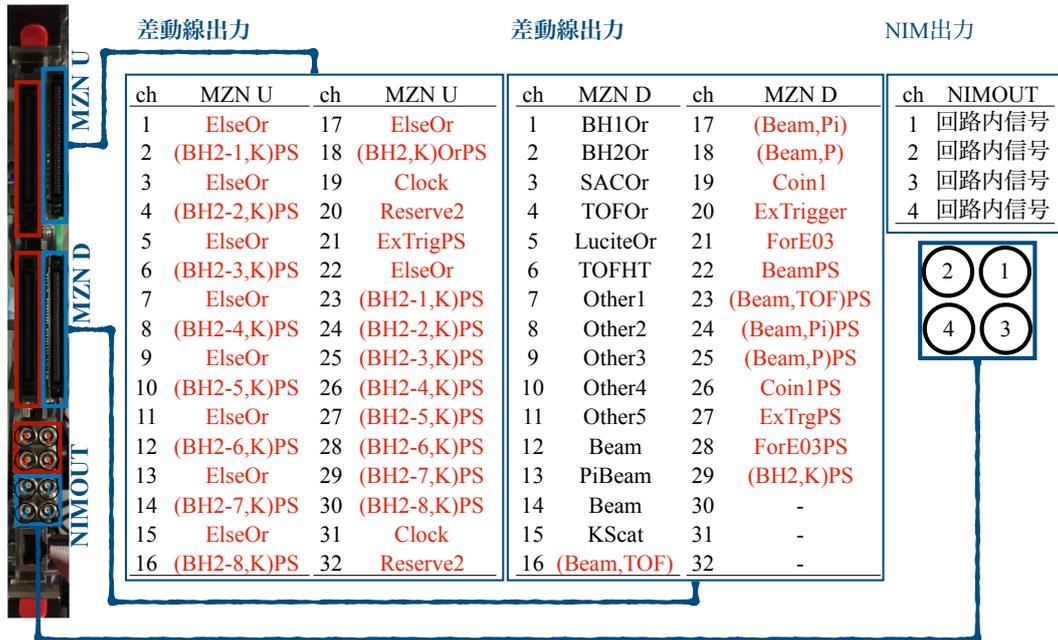


図 3.10: HUL Trigger への出力まとめ。全出力 68 ch の内 65 ch 分使用している。赤色で書かれた信号は SpillGate 信号とコインシデンスをとって出力している。

3.1.6 HUL Trigger まとめ

まとめると HUL Trigger には BH1、BH2、SAC、TOF の検出器から得られた信号をデジタル化し、各検出器のセグメントごとでタイミングを合わせて HUL Trigger に入力されている。HUL Trigger では、FPGA を用いて BH2_K 信号や、ElseOr の信号を作っており、またその他に実験準備や Pedestal 測定用に ExtraLine、Clock といった信号の ON/OFF を行えるようになっている。それらの記述はレジスタの制御によって可能であり、実験時においてネットワーク経由で遠隔操作可能である。また、Trigger 生成での時間を少しでも減らすためにモジュールを一つでも減らす工夫を行った。それによって作られた信号は、J-PARC E40 の $\Sigma^{\pm}p$ 散乱実験の L1 を生成に関係する BH2_K と ElseOr 信号である。本実験では、このように工夫を重ね HUL Trigger の開発を行った理由として CFT の波高情報の取得するためである。では、次に実験時での Trigger 生成の様子とその結果を述べる。

3.2 トリガー信号の生成

2018 年の 6 月に行われた J-PARC E40 実験において、実験に必要不可欠なトリガー信号の生成を行なった。トリガー生成では、HUL Trigger での NIMOUT の出力をエリア外へ伸ばしておき FPGA 内の信号をネットワーク制御により操作し、トリガーの生成を行なった。以下に信号調整時のオシロスコープの様子を以下に述べる。また、Matrix Trigger や Level 3 coin での信号の様子とともに生成の結果を以下に述べる。

3.2.1 HUL Trigger 内トリガー信号の様子

HUL Trigger では、レジスタによって NIMOUT の出力を Probe Point から出力を行うことができる。実験ではエリア内にある HUL Trigger の信号を見るために、NIMOUT に繋いだ 4 本のケーブルをエリアの外に伸ばしている。そこからオシロスコープで信号を見て、レジスタで遅延や信号幅の調整を行い、BH2_K や ElseOr の生成を行なった。図 3.11 の ①、②、③ での位置のタイミング調整を行なったときの信号の様子を以下に示す。

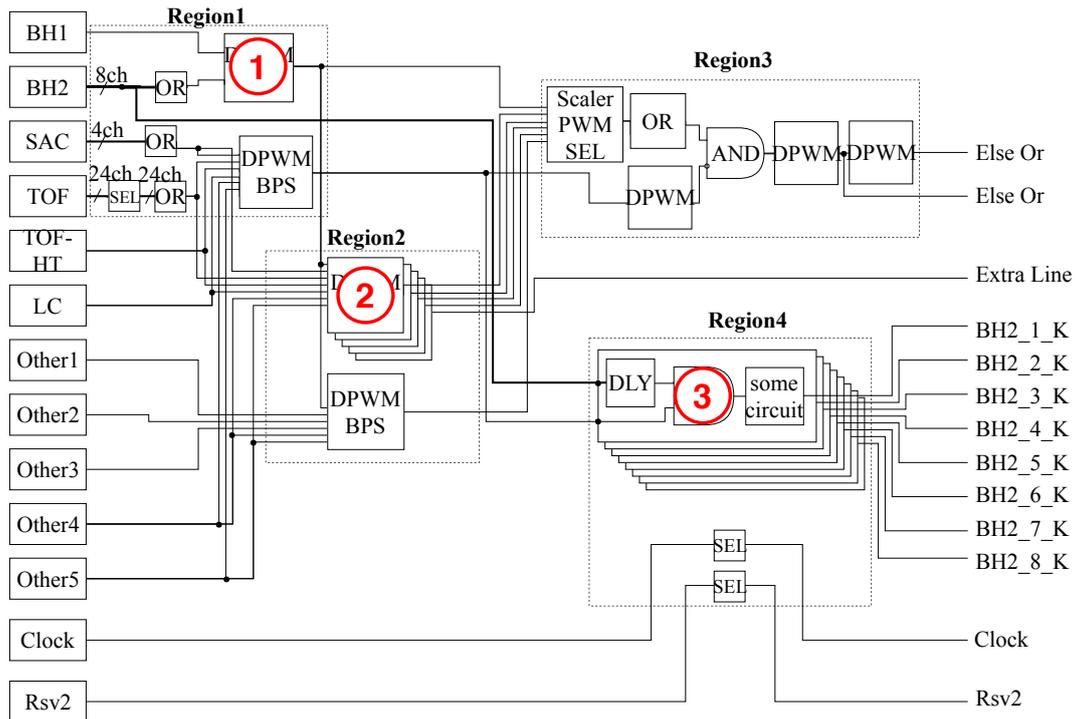


図 3.11: トリガータイミングの様子示した部分で HUL Trigger の FPGA 設計回路での位置。①、②、③ での位置のタイミング調整を行なった後の信号を以下に示す。① はビームの定義、② は K-Scat の定義、③ は BH2.K を作っているところである。

図 3.12 は、図 3.11 の ① で HUL Trigger 内で Beam という信号を定義している部分の各プローブ点の信号をオシロスコープの画像である。プローブ点の色はオシロスコープの信号の色に対応している。オシロスコープで BH1,2 の信号が上の 2 つで、BH1 の方が 5 ns ほど遅く、BH2 とコインシデンスが取れない。ここで、CFT の ADC を取得する必要があるため L1 の信号生成をなるべく早くしたいということから BH2 の信号を遅延させないようタイミング調整を行った。そのため BH1 と BH2 のコインシデンスをとることはできないため Beam の定義を BH2 のみで使用した。また、PiBeamn の定義を行う BH1 と BH2 の信号タイミングがしたの二つの信号である。この信号は Scaler で数えるため BH2 の信号を遅らせている。

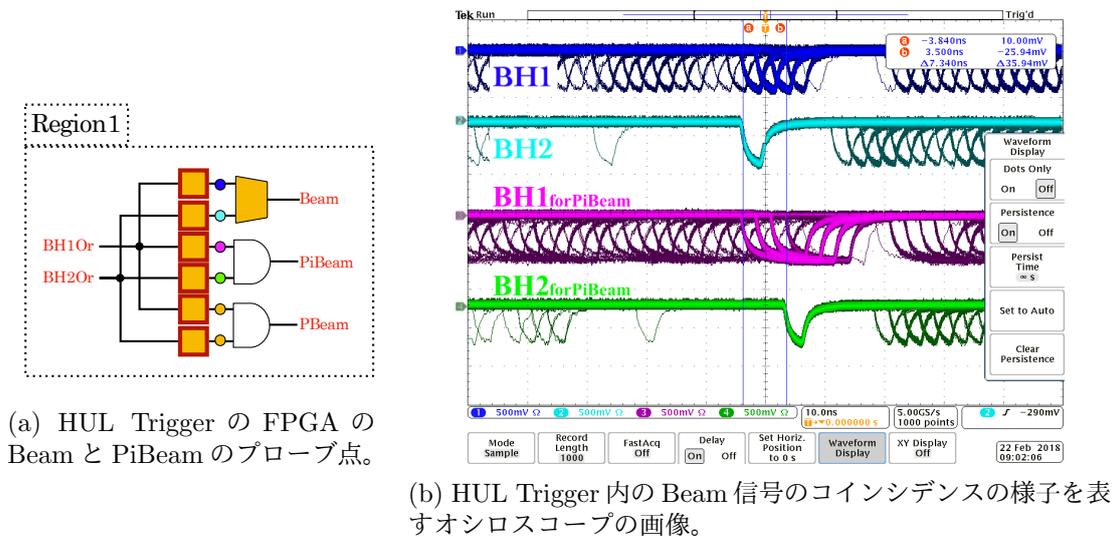


図 3.12: HUL Trigger で FPGA の内部信号でプローブを行った点とその信号のコインシデンスの様子。(a) プローブ点の色とオシロスコープの信号の色が対応している。(b) HUL Trigger 内の Beam 信号のコインシデンスの様子。BH1, 2 の信号が上の 2 つで、BH1 の方が 5 ns ほど遅く、BH2 とコインシデンスが取れない。

図 3.13 は、図 3.11 の ② で HUL Trigger 内で KScat を定義している部分の各プローブ点とその信号の出力をオシロスコープの画像である。

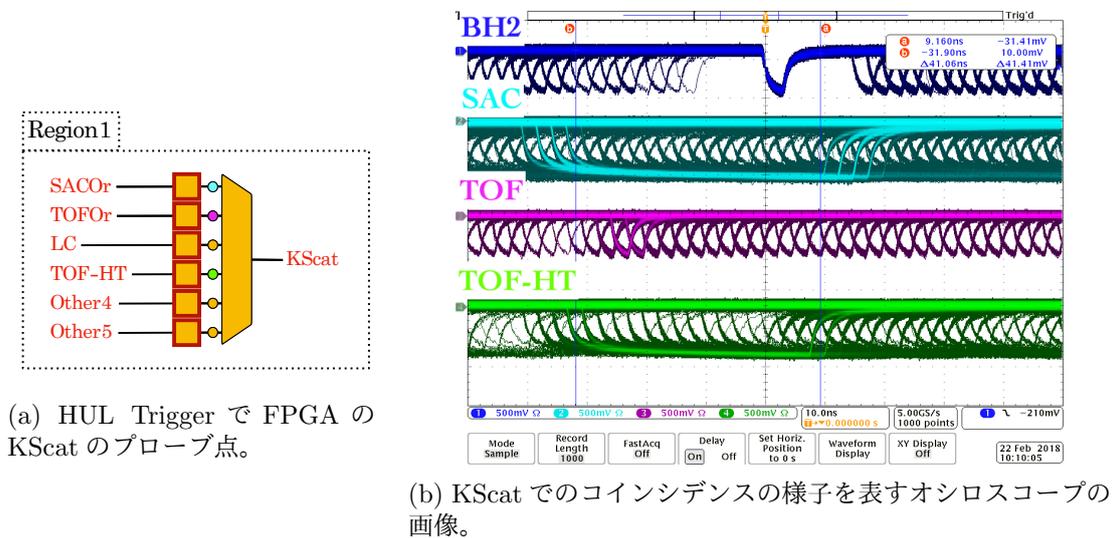


図 3.13: HUL Trigger の FPGA のプローブ点と。KScat でのコインシデンスの様子。(a) プローブ点の色とオシロスコープの信号の色が対応している。(b) AND で入力する TOF でタイミングを決めるために TOF が細く、SAC、TOF-HT は NOTAND で参加のため信号幅を広く取っている。

プローブ点の色はオシロスコープの信号の色に対応している。図 3.13 の (b) の BH2 の信号は、図 3.12 の Beam 用の BH2 の信号である。オシロスコープの信号で上から 2 つ目から順に SAC、TOF、TOF-HT となっている。LC の信号はこの KScat を作るコインシデンスで間に合わなかったためトリガーロジックに参加していない。TOF の信号で KScat のタイミングが決まるように信号幅を 2.5 ns にしており、残りの信号は NOTAND で参加のため信号幅を大きくして Veto のような形にしている。

図 3.14 は、図 3.11 の ③ で HUL Trigger 内で BH2_K を定義している部分の各プローブ点とその信号の出力をオシロスコープの画像である。BH2 の信号は、図 3.12 の Beam 用の BH2 の信号である。BH2_K の信号は BH2 セグメントごとにあるが、そのうちのセグメント 1 と KScat の信号のコインシデンス直前の信号である。ここでもう 1 つ確認として、BH2_K のレジスタは全てのセグメントで共通にしており、BH2_1 と BH2_2 の信号が同じ位置におり、同様な遅延、信号幅になっていることがわかる。

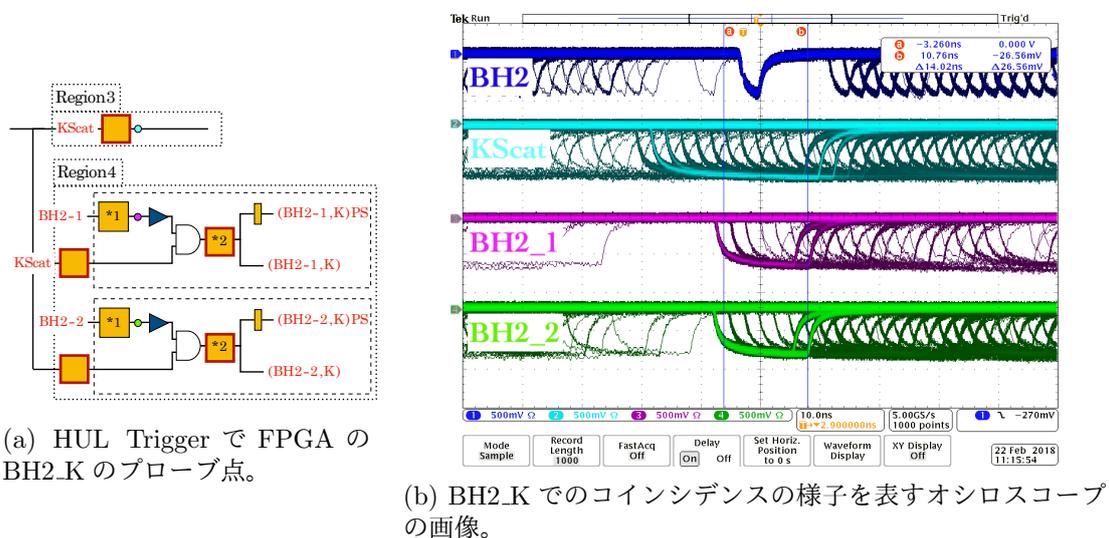


図 3.14: HUL Trigger で FPGA のプローブ点と BH.K でのコインシデンスの様子。(a) プローブ点の色とオシロスコープの信号の色が対応している。(b) BH2 のセグメント 1, 2 の信号を出力している。

3.2.2 Matrix Trigger でのトリガー信号の様子

Matrix Trigger の信号生成に関するタイミングのオシロスコープの画像を図 3.15 に示す。Matrix Trigger に参加している検出器は TOF と SCH、SFT の 3 つの検出器である。Matrix Trigger のモジュールでは入力されたセグメントごとにパターンを見ているが、それぞれの検出器の入力信号の OR を出力できるようになっている。オシロスコープでタイミングを調べたのはその信号の OR で見た。TOF を SCH、SFT より 20 ns ほど遅らせており、TOF でタイミングが決まるものが増えてきている。

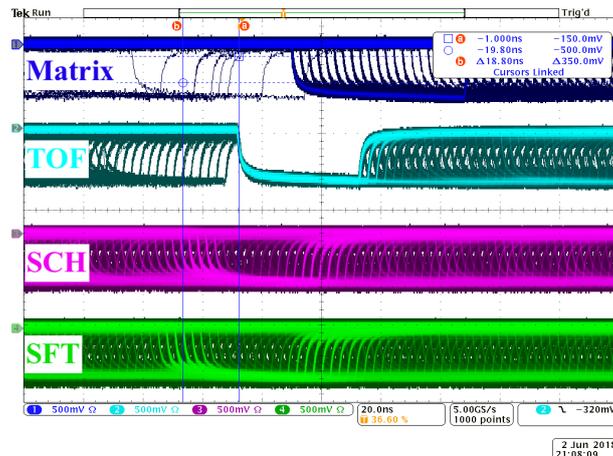
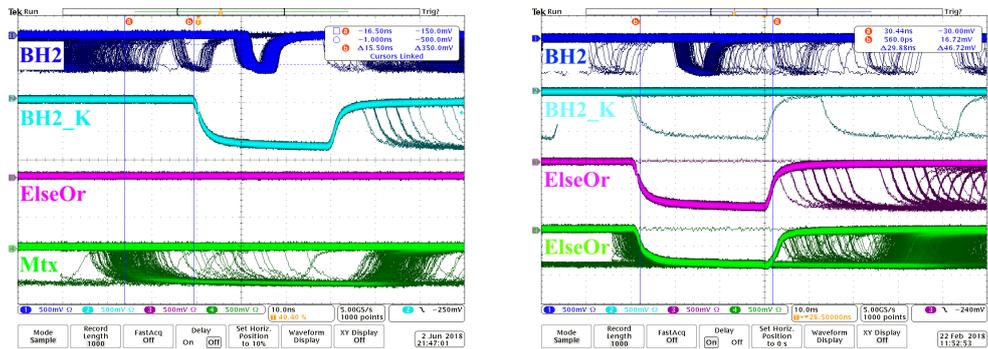


図 3.15: Matrix モジュールでのコインシデンスの様子。TOF の信号を 20 ns 送らせており TOF でタイミングで決まるものが多くなるようにしている。

3.2.3 Final timing でのトリガー信号の様子

Final timing とは、L1 の信号を生成する Level 3 Coin の部分での BH2 の検出器から得られる信号のタイミングのことである。Level 3 Coin の部分では、BH2 の検出器から得られた信号と HUL Trigger から得られた BH2_K、ElseOr および ElseOr と Matrix Trigger の OR 信号の 4 つを入力してコインシデンスレベル 3 の時に信号を出力するようにしているところである。これは、BH2 のセグメントごとに行われ、8 個ある。その内の 1 セグメントでのコインシデンスの様子を図 3.16 に示す。BH2 が検出器から得られた信号で、BH2_K、ElseOr は HUL Trigger から得られた信号である。オシロスコープの 1 番下の信号は Matrix Trigger と ElseOr の OR である。図 3.16 の (a) は BH2×BH2_K×Mtx のコインシデンスのオシロスコープの画像である。オシロスコープのトリガーを BH2_K にすることによって、Level 3 coin で BH2 の信号と BH2_K、Mtx の信号がコインシデンスを行えているのが見える。図 3.16 の (b) は BH2×ElseOr×ElseOr のコインシデンスのオシロスコープの画像である。オシロスコープのトリガーを上から 3 番目の ElseOr にすることによって、Level 3 coin で BH2 の信号と ElseOr と ElseOr と Matrix Trigger の Or 信号がコインシデンスを行えているのが見える。図 3.16 の (b) の 1 番下の信号では Matrix の信号が見えている。



(a) BH2×BH2_K×Mtx のコインシデンスのオシロスコープの画像 (b) BH2×ElseOr×ElseOr のコインシデンスのオシロスコープの画像

図 3.16: Level 3 Coin での Final timing のコインシデンスの様子

3.2.4 トリガー生成の結果

J-PARC E40 実験において CFT の ADC 信号を取得するために従来よりも早く Trigger 生成を行う必要があった。そのためには、エリア内で Trigger 生成を行う必要があり、ビームが出ている中のトリガータイミングの調整や、変更が行えるように遠隔で操作可能な汎用 FPGA モジュールである HUL を用いたトリガーの生成を行なった。実験時にトリガー生成を行い、得られたトリガーによってデータ取得を行なった。CFT での ADC を取得するためには、得られたアナログ信号に適切なタイミングでホールド信号であるトリガー信号を入力する必要がある。実験で生成したトリガー信号を CFT の読み出しモジュールである VME EASIROC に入力した際のトリガー信号である L1 と、アナログ信号並びにホールド信号の様子を図 3.17 に示す。図 3.17 からわかるように、CFT のアナログ信号のちょうどピーク点においてホールドされたホールド信号が得られているのがわかる。このことから汎用 FPGA モジュールによって構築を行なったトリガーシステムにより、CFT の ADC の取得が行うことができ、エネルギー情報を得ることができている。

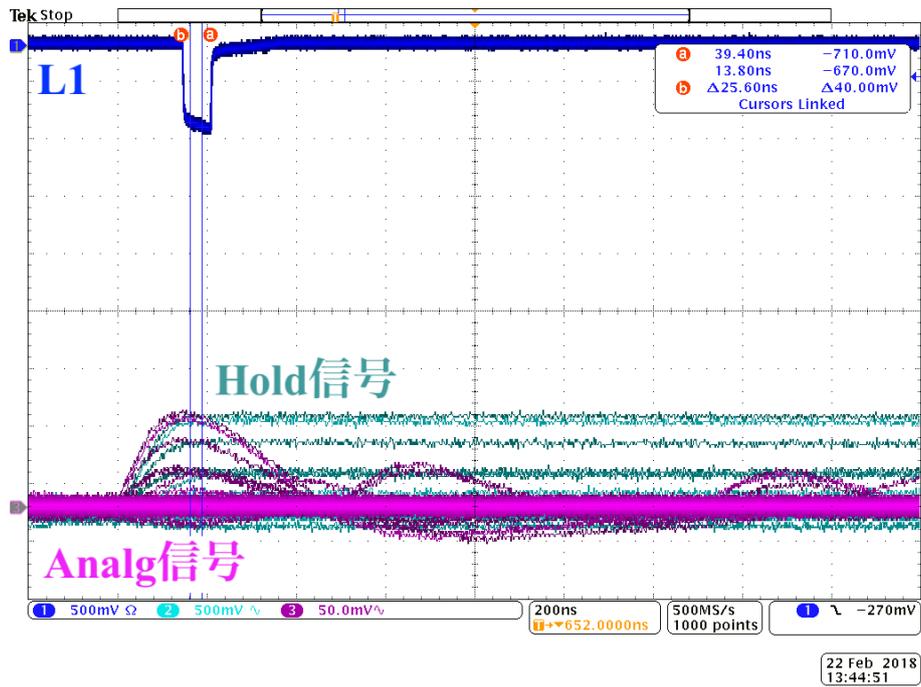


図 3.17: CFT のアナログ信号とトリガー信号。青がトリガー信号で紫がアナログ信号、薄緑が ADC を取得するために VNEEASIROC 内部でトリガー信号のタイミングでホールドが行われた信号

第4章 SACの検出効率

4.1 SACの検出効率

HUL Triggerに参加している検出器で、J-PARC E40 実験で用いた SAC について 2018 年の 6 月実験でのデータより性能評価を行うために検出効率を求めた。SAC は J-PARC E40 実験で初めて使用した検出器である。

J-PARC E40 実験のトリガーロジックでは、SAC を NOTAND で参加させている。そのため、BH2.K の Trigger で得られたデータでは SAC がなっていないということが前提になってくる。しかし、今回 HUL Trigger では生成した ElseOr という信号でその他の Trigger を混ぜてデータを取得している。今回は ElseOr の中で、BH2×TOF で得られたデータを用いて検出効率を求めることにした。

SAC の検出効率 (SAC_{eff}) を求める式を式 (4.1) に示す。

$$SAC_{\text{eff}} = \frac{\text{SAC のタイミングの信号があるイベント数}}{0.4 < p[\text{GeV}/c] < 0.9 \text{ の } \pi \text{ が SAC の領域を通過しているイベント数}} \quad (4.1)$$

分母の飛跡再構成によって SAC の領域を通過しているイベント数は以下のように数えた。飛跡の再構成では KURAMA スペクトロメータ上の飛跡検出器を用いた。飛跡の再構成を行うと 飛跡 (*track*) と運動量 (p) が得られる。本実験では粒子の質量の二乗 (m^2) を求めることで粒子識別を行う。実験的に得られた time-of-flight (*tof*) と、飛跡の再構成によって得られ *track*、光速 c を用いて β をまず求める (式 (4.2))。

$$\beta = \frac{\text{track}}{\text{tof} \times c} \quad (4.2)$$

この β と p より m^2 を式 (4.3) で求めることができる。

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

この m^2 から、 π の質量 $0.138 \text{ GeV}/c^2$ の二乗を含むように、 $-0.1 < m^2[\text{GeV}/c^2]^2 < 0.1$ でイベントの選別を行った。SAC に用いているエアロジェルの結晶でチェレンコフ光を出す π の運動量領域を選ぶため図 2.15 より $0.4 < p[\text{GeV}/c] < 0.9$ の領域を選んだ。

さらに、SAC の大きさは $400 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$ であるが、飛跡の通過点の分布から、SAC を確実に通過したものとするため $280 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ の大きさで選択した。分子に数えたのは、分母のイベントの中で SAC のタイミング情報があるものとした。ここで、今回用いた TDC は Multi-Hit TDC より、 π とその運動量で $0.4 < p[\text{GeV}/c] < 0.9$ を選んだ時を選んだ時に得られる SAC の時間分布にあるピークから $\pm 10 \text{ ns}$ の範囲にあるものを SAC のタイミング信号のあるものとした。これは、J-PARC のビームのバンチ構造をしているた

め、その信号を含まないようにするためである。分母分子での選別について以下の表 4.1 にまとめる。

表 4.1: SAC の Efficiency の Cut 条件

Cut Type	選別条件
粒子	π ($-0.1 < m^2 [\text{GeV}/c^2] < 0.1$)
運動量	$0.4 < p[\text{GeV}/c] < 0.9$
飛跡条件	飛跡通過点の分布から SAC 検出器の位置より狭い領域の 280 mm×360 mm
タイミング	TDC ピークの ± 10 ns 以内

上記の選別によって検出効率を計算した。結果として分母が 25137、分子が 24380 となった。二項分布により統計誤差をつけて検出効率は $96.98 \pm 0.11\%$ となった。SAC の製作段階では 98% の検出効率が得られており [18]、同様な結果が得られている。

第5章 Matrix Trigger の評価と改善

J-PARC E40 実験での L1 信号を生成している信号である Matrix Trigger の現状評価並びに 2019 年の実験に向けた改善点を本章で述べる。2018 年の実験において、DAQ Efficiency は約 84% で L1 信号が 14 k/Spill となっている。ビームの使用制限のある J-PARC E40 実験では Efficiency の改善は必要である。Matrix Trigger について 3D Matrix のパターンや Matrix Trigger を作る際の三つの検出器のコインシデンスゲートに関する解析を行い、トリガーレートの減少や Σ 粒子の収量について考察した。

5.1 Matrix の Pattern の評価

J-PARC E40 実験において 3D Mtx のパターンの評価を行う。まず 2018 年の 6 月の実験で使用したパターンについて調べた。Matrix Trigger は、KURAMA マグネットの磁場領域やその後方にある検出器のヒットパターンによって運動量や電荷、角度を選ぶことをオンラインレベルで行う仕組みである。図 5.1 は 2018 年に用いていたヒットパターンで Σ 粒子を選んだ時の SCH と TOF のセグメントの二次元相関である。図 5.1 は 2018 年に用いていたヒットパターンで Σ 粒子を選んだ時の SCH と TOF のセグメントの二次元相関である。

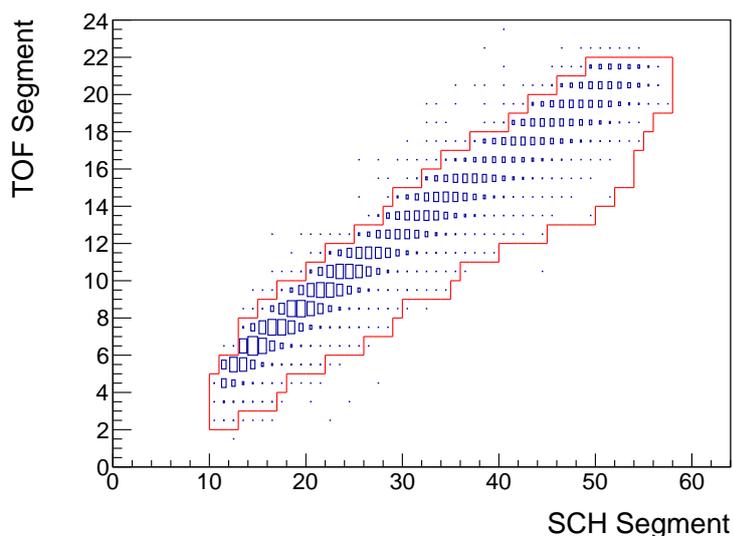


図 5.1: Σ 粒子を選んだ時の SCH と TOF のセグメントの二次元相関。赤い線の範囲が 2018 年に使用していたパターンでの SCH と TOF の使用セグメント範囲。

図 5.1 で赤い線の範囲が 2018 年に使用していたパターンでの SCH と TOF の使用セグメント範囲。図 5.2 が、SCH が 21 セグメント TOF が 9 セグメントの時の SFT のヒット分布を示す。青いヒストグラムが SCH-TOF のセグメントを選んだときのヒット分布。赤いヒストグラムが Σ を選んだ時の分布である。

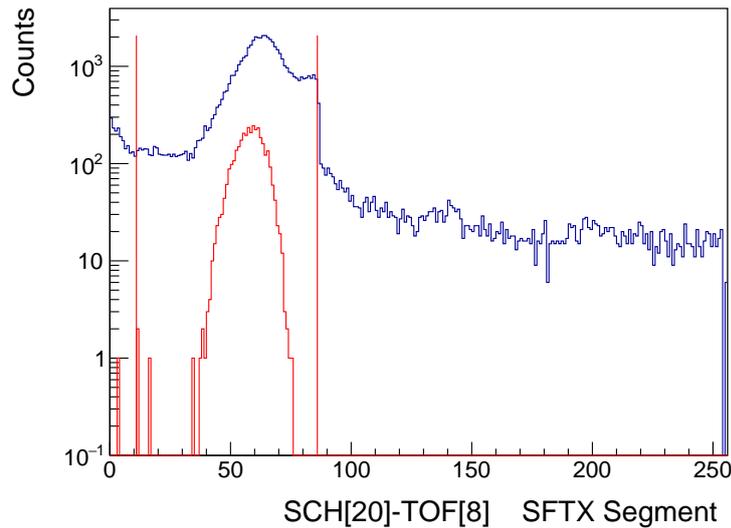


図 5.2: SCH が 21、TOF が 9 セグメントの時の SFT のヒットパターン。赤い棒で描かれた範囲の中が SFT の使用したセグメント。青いヒストグラムが SCH-TOF のセグメントを選んだときのヒット分布。赤いヒストグラムが Σ を選んだ時の分布。

まず、図 5.1、5.2 のように表せるパターンにおいて、選んでる運動量領域が正しいか調べるため Σ 生成に用いられた K の運動量分布を調べる。図 4.1 節で述べたように本実験では質量の二乗 (m^2) によって粒子識別を行う。実験的に得られた time-of-flight (tof) と、飛跡の再構成によって得られる飛跡 ($track$)、光速 c を用いてに β をまず求める (式 (4.2))。その β と運動量 (p) より m^2 を式 (4.3) で求めることができる。 m^2 で K^+ の領域である $0.15 < m^2[\text{GeV}/c^2]^2 < 0.35$ を選ぶことで散乱粒子が K のものを選ぶ。その上で Missing Mass 法によって Σ の質量領域である $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/c^2$ を選ぶことで実験で取得したい Σ を選ぶことができる。図 5.3 に実験測定時 m^2 の分布を示す。図 5.3 での赤い線の範囲が K の質量の領域で $0.15 < m^2[\text{GeV}/c^2]^2 < 0.35$ である。

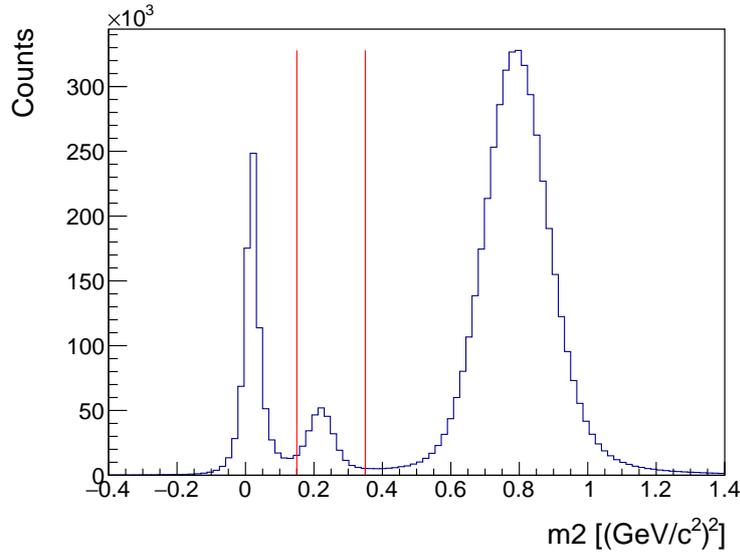


図 5.3: m^2 の分布。赤い線の範囲が K の質量の領域で $0.15 < m^2 < 0.35 [\text{GeV}/c^2]^2$ である。

図 5.4 に K の質量である $0.15 < m^2 [\text{GeV}/c^2]^2 < 0.35$ (図 5.3 の赤い線の内側の範囲) を選んだときの Missing Mass の分布を示す。

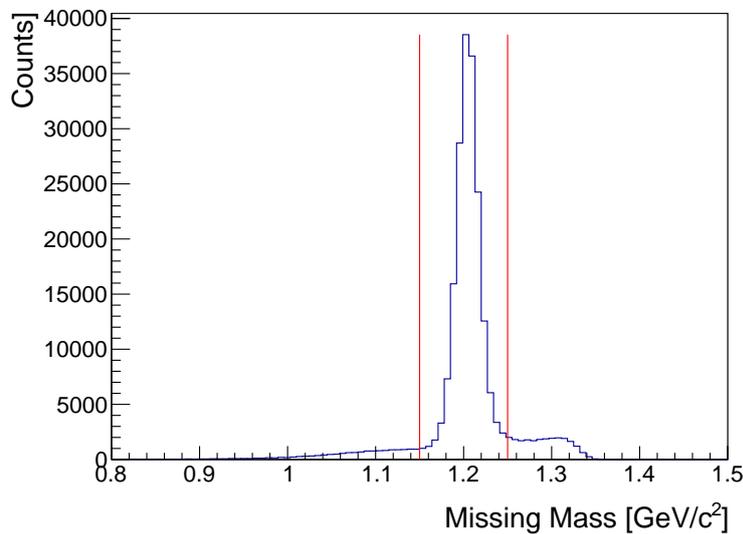


図 5.4: K の質量である $0.15 < m^2 [\text{GeV}/c^2]^2 < 0.35$ を選んだ時の Missing Mass の分布。赤い線の内側の領域 $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/c^2$ を生成された Σ とする。

図 5.3、5.4 の赤い線で囲まれた範囲を満たすイベントの運動量の分布は図 5.5 のようになる。

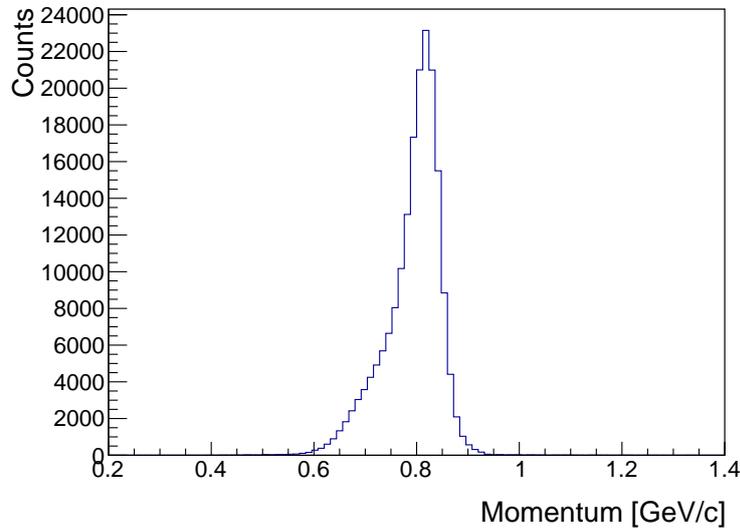


図 5.5: K の質量の領域で $0.15 < m^2 [\text{GeV}/c^2]^2 < 0.35$ 選んだ時の Missing Mass で $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/c^2$ の範囲を選んだ時の運動量分布。 $0.6 < p [\text{GeV}/c] < 0.9$ の領域であることがわかる。

図 5.5 より、 Σ 生成に用いられた K の運動量 (p) は $0.6 < p [\text{GeV}/c] < 0.9$ の領域であることがわかる。2018 年 6 月の実験で得られたデータから、Matrix Trigger のパターンによって選ばれている運動量領域を求める。Matrix Trigger が L1 に入っていないデータで解析を行った。飛跡の再構成によって KURAMA マグネットによって曲がる方向により電荷を選ぶことができる。Matrix Trigger ではパターンでも電荷を選ぶように設定しているため、正電荷のもの飛跡、運動量の分布をみた。電荷を選択した飛跡の運動量分布と、飛跡の通過点より得られる検出器のヒットセグメントの組み合わせから Matrix Pattern を満たした時の運動量分布を図 5.6 の (a) に示す。図 5.6 の (a) の青線が電荷が正の粒子の運動量分布であり、その中で実験で用いた Matrix Pattern をオフライン解析で適用したものの運動量分布が赤線である。図 5.6 の (b) で Matrix Pattern の適用したときの運動量分布を電荷が正の粒子の運動量分布で割ったとき、図 5.6 の (b) ような分布になる。

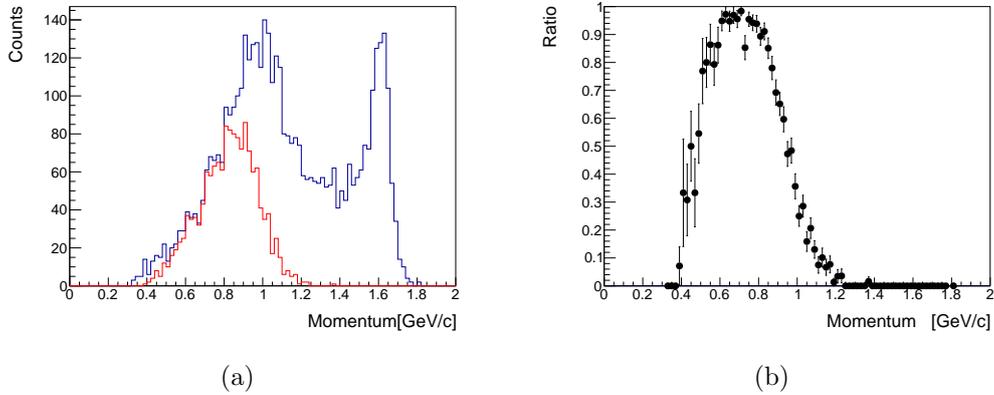


図 5.6: Matrix Pattern 適応前後での運動量分布とその比。(a) 青線が電荷が正の粒子の運動量分布であり、その中で実験で用いた Matrix Pattern をオフライン解析で適用したものの運動量分布が赤線。(b) Matrix Pattern を適用したときの電荷が正の粒子の運動量分布と電荷が正の粒子の運動量分布の比。

図 5.6 に、図 5.5 をスケールし、重ね書きすると、図 5.7 のようになる。

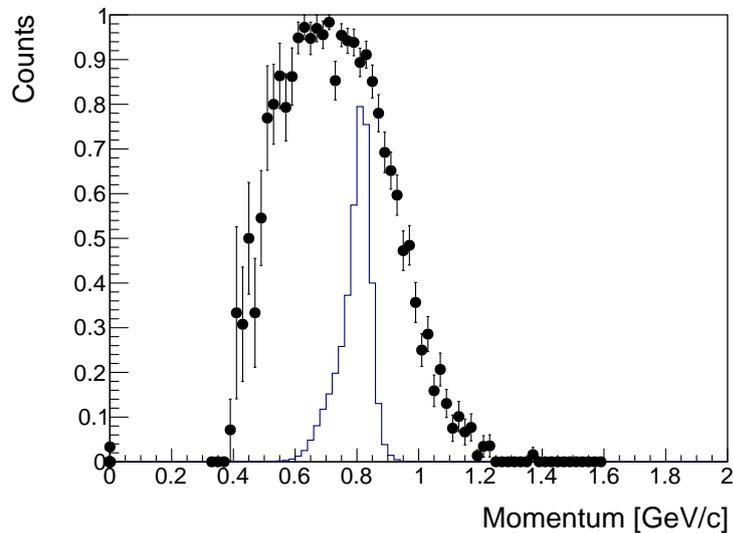


図 5.7: Matrix の運動量選択領域と、 K 中間子を選んだときの $p(\pi, K)X$ の Missing Mass 分布で Σ の領域を選んだときの分布

図 5.7 より運動量で見ると、運動量の高い領域において、検出効率が落ちているのがわかる。このことから、運動量だけでなく他の条件においても選んでいるの事を考え、角度と運動量の分布を見てみた。図 5.8 が正の電荷を選んだときの角度 (θ) と運動量の分布

である。

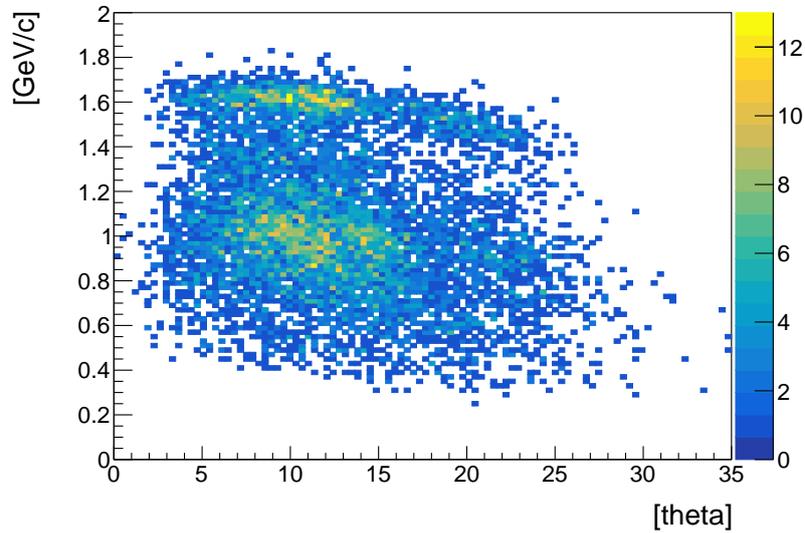


図 5.8: Matrix Trigger を適用していないときの正電荷の粒子の運動量と角度の二次元相関。

図 5.8 の内、解析的に Matrix Trigger を適応したときは、図 5.9 のようになる。

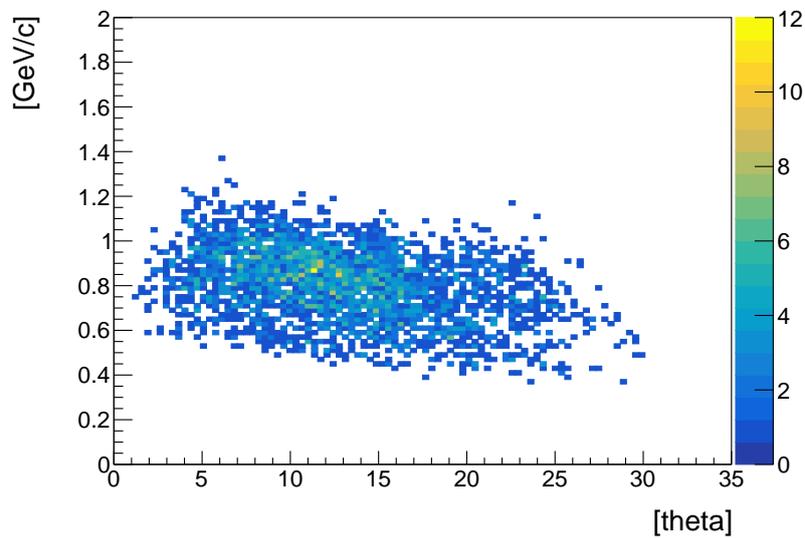


図 5.9: Matrix Trigger を適用したときの正電荷の粒子の運動量と角度の二次元相関。

これより、Matrix Trigger を適応した際には、運動量のみならず角度を選択していることがわかる。ここで、Missign Mass は散乱粒子の運動量と角度で得られるものなので、正の荷電粒子を選択したとき、その中で Matrix Trigger を解析的に適用したときの $p(\pi, K)X$

の Missing Mass X 分布を図 5.10 である。青いヒストグラムが正の荷電粒子を選んだときの Missing Mass 分布で、赤いヒストグラムが Matrix Trigger を適用したときの分布である。

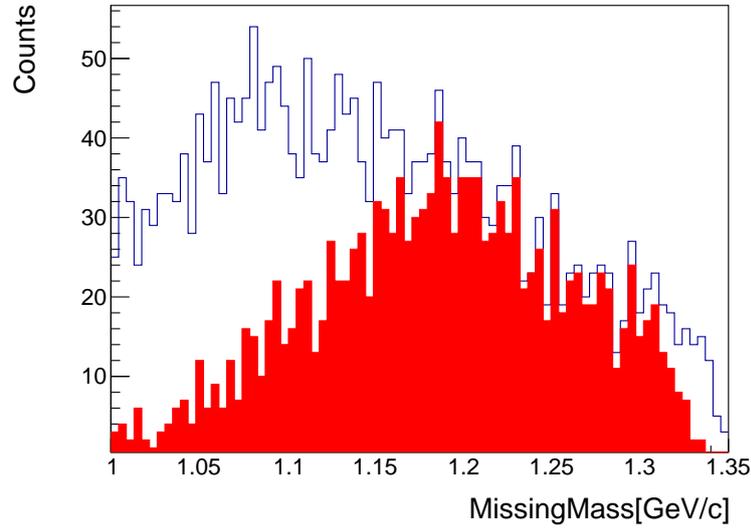


図 5.10: 青いヒストグラムが正の荷電粒子を選択したときで、赤いヒストグラムがその中で Matrix Trigger を解析的に適用したときの $p(\pi, K)X$ の Missing Mass X 分布

図 5.10 で赤いヒストグラム割る青いヒストグラムを行うと図 5.11 のようになる。

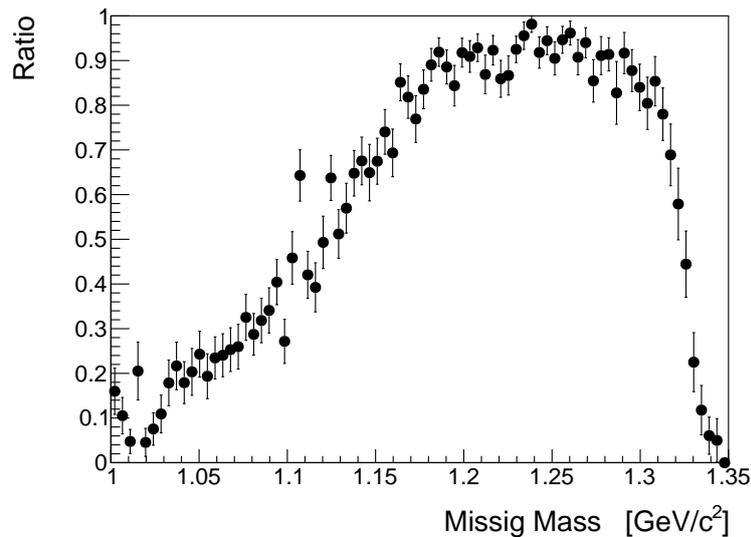


図 5.11: Matrix Pattern を適用したときの電荷が正の粒子の Missing Mass 分布と電荷が正の粒子の Missing Mass 分布の比。

図 5.11 に別のデータで散乱 K を選んだときの $p(\pi, K)X$ を計算したものをスケールし描くと図 5.12 のようになる。

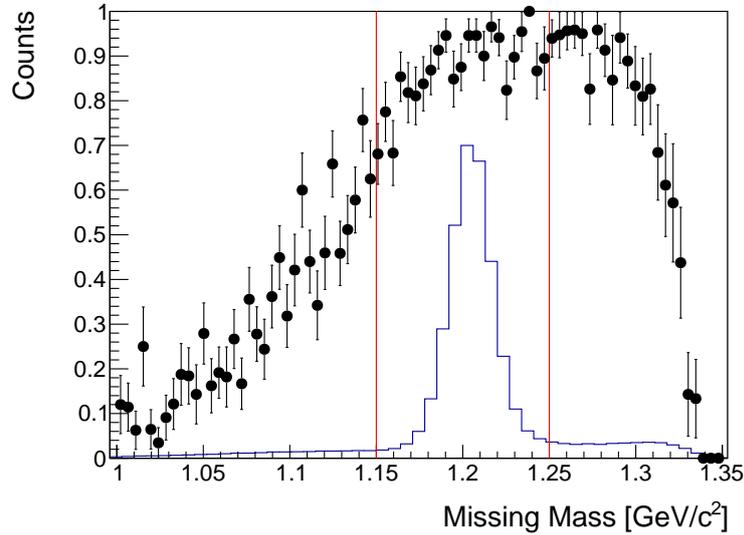


図 5.12: Matrix Pattern を適用したときの電荷が正の粒子の Missing Mass 分布と電荷が正の粒子の Missing Mass 分布の比と別のデータで散乱 K を選んだときの $p(\pi, K)X$ を計算したものをスケール。

図 5.12 より、 Σ の領域において、十分な効率があることがわかる。しかし、Missing Mass で $1.25 \text{ GeV}/c^2$ 以上の領域も選択していることがわかる。さらに、現在 L1 のトリガーレートは 14 k/spill であり、DAQ Efficiency は 84% となっており、収量を増幅させるにはレートを減少させ、DAQ Efficiency の回復の必要がある。そのため、次の節で Matrix Pattern の再考を行なった。

5.2 Matrix の Pattern の再考

ここでトリガーレートの減少を目的として、パターンの再考を行なった。トリガーレートへの影響は次節で述べる。Matrix Pattern を満たした Σ の数を 99% 落とさないことを目標に条件を課していき選別を行なった。基本的にヒットパターンのコンビネーションを減らす方向に進めた。本実験で用いた Matrix Trigger での $p(\pi, K)X$ の Missing Mass X 分布を調べると $1.2 \text{ GeV}/c^2$ より大きい部分にイベントがあるのがわかる。これは、式 (5.1) のような反応による K^+ であると考えられる。



この反応での Missing Mass は、 π^- と Λ の質量である $0.14 + 1.11 = 1.25 \text{ GeV}/c^2$ となる。このときの K^+ の運動量は低いものが多くなる。この反応を減らすため次のような条件を課して Matrix Pattern の選別を行った。まずある SCH、TOF のセグメントの組を

満たすときの Missing Mass 法で得られる分布で Σ の質量である $1.2 \text{ GeV}/c^2$ 前後である $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/c^2$ の領域と全体の比 (R1) を求める (式 (5.2))。

$$R1 = \frac{(a) \text{ の線の内側のイベント数}}{(a) \text{ の全体のイベント数}} \quad (5.2)$$

図 5.13 の (a) は SCH の 21 セグメント、TOF の 9 セグメントを通過した粒子の Missing Mass 分布である。そこに引かれた線の内側と全体の数を数えて R1 を求める。図 5.13 の (b) は Matrix Pattern を満たすものを足した Missing Mass の分布であり、図の線の内側の中のを母数としてこの数が 99 % 残るようにパターンを作る。R1 がある値以上になるようにし、99 % を下回らないような SCH と TOF のセグメントのパターンを選んだ。

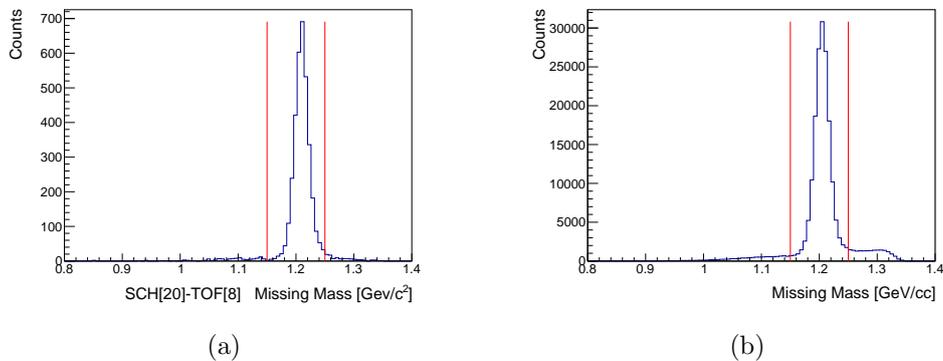


図 5.13: SCH、TOF を 1 つずつ選んだときの Missing Mass と Matrix Pattern を満たしたものを全て足したときの Missing Mass。(a) SCH の 21 セグメントと TOF の 9 セグメントを通過した K を選んだときの Missing Mass 分布。(b) Matrix Pattern を満たした K を選んだときの Missing Mass の分布。

R1 の選別値を決定するにあたり、R1 の分布を調べた。図 5.14 に R1 の分布を表す。Matrix Trigger のパターンを満たす全ての SCH と TOF の組の R1 の分布である。図 5.14 では、比が大きく分かれており、運動量の分布はどちらかによっていることがわかる。図 5.14 に各パターンでの $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/C^2$ を満たす Σ のカウント数で重み付けしたものの分布が図 5.15 に表す。図の赤い線は $1.15 \sim 1.25 \text{ GeV}/C^2$ を満たす Σ のカウント数から 99 をみたく値で 0.36 (36 %) ある。

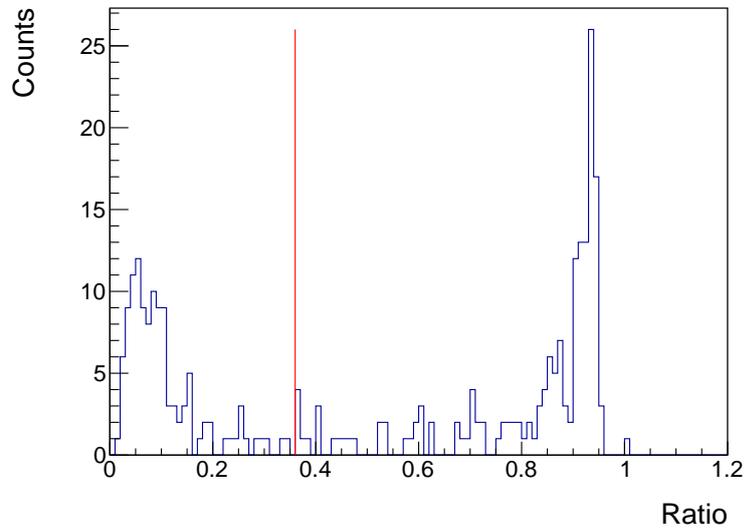


図 5.14: Matrix Trigger のパターンを満たす全ての SCH と TOF の組の R1 の分布

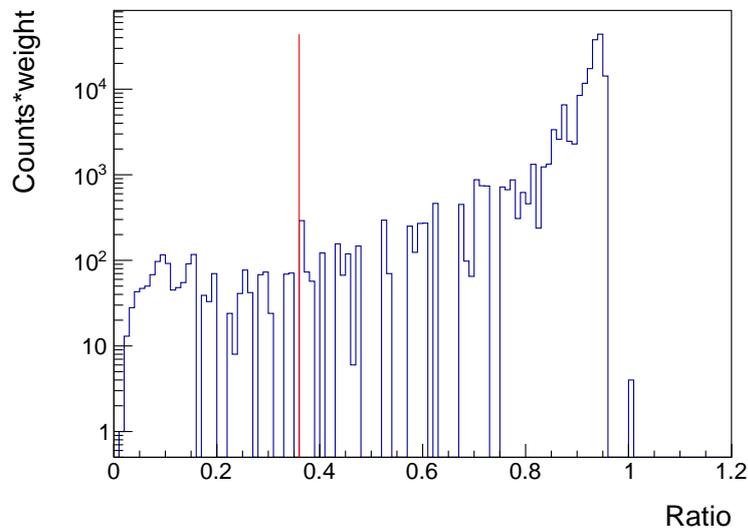


図 5.15: Matrix Trigger のパターンを満たす全ての SCH と TOF の組の R1 の分布に Σ 粒子のカウントの重み付けをしたヒストグラム

$R1 > \text{ratio}$ を満たすときの Σ の Efficiency を図 5.16 に示す。図 5.16 の 1 のときは、図 5.13 の (b) の赤い線の内側のイベント数である。ratio を 1~50 % に変化させた。 Σ の Efficiency が 99 % を下回らないのは ratio が 30 % のときである。36 % も満たすが、ここから Matrix Pattern での SFT の使用セグメントを減らすため、30 % にした。

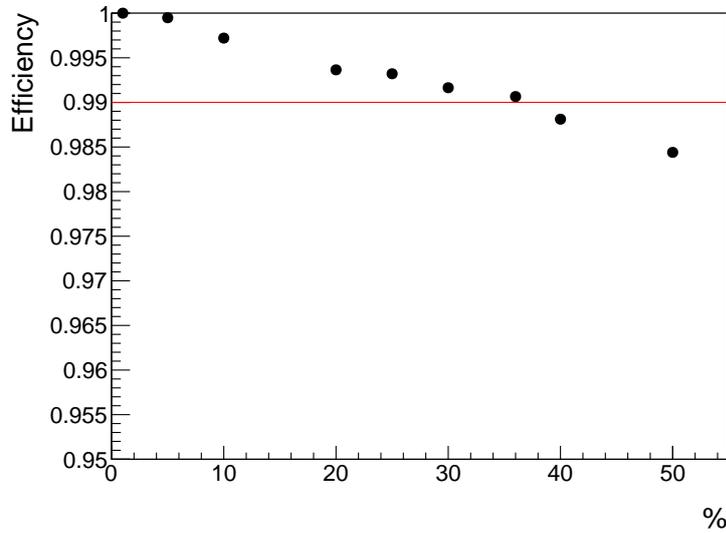


図 5.16: R1>ratio の選別において ratio を 1~50 %に変化させたときの Σ の Efficiency

R1 > 30 % のときの Matrix Pattern を図 5.17 に示す。

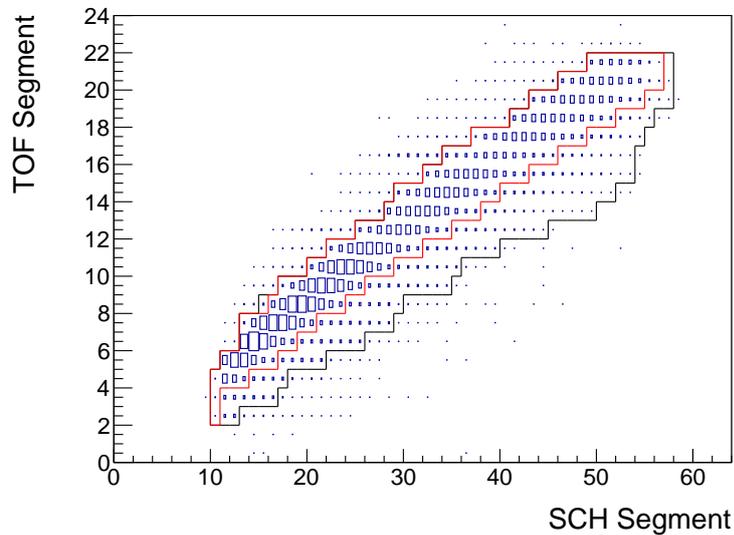


図 5.17: 赤い線が R1 > 30 % を満たす SCH と TOF のパターン。黒い線が 2018 年に実験で用いたパターン

赤い線が R1 > 30 % を満たす SCH と TOF のパターン。黒い線が 2018 年に実験で用いたパターンである。磁場の領域を荷電粒子が進むときに運動量の高い粒子の方が磁場であまり曲がらずに真っ直ぐ進むため TOF と SCH の二次元相関で (0, 0) と (64, 24) を結ぶ対角線上に近いほど運動量が大きくなる。これを考えると図 5.17 で減っている部分のほ

とんどは低運動量領域であることがわかる。これは、図 5.17 では新しい SCH と TOF の組み合わせの赤い四角では 2018 年の実験の Matrix Pattern の黒い四角より低運動量領域が少なくなっているのがわかる。

図 5.17 の赤線の中で、SFT のセグメント領域を減らしていく。はじめにあった Σ の数が 1000 より大きいときは 999/1000、1000 以下 100 より大きいときは 99/100、100 以下のときは 9/10 を下回らないところまで選別した。この条件にした理由として、全 Matrix Pattern において統計量が十分にあるわけではなかったため 99 %を残すために全パターン固定値の 999/1000 にしたとき、図 5.2 の 0 付近にあるようなイベントの影響でパターンによって SFT のセグメントを少なくできないものがあったためである。このためイベントごとに桁を落として選別を行った。この SFT の選別のみを行うと Σ の Efficiency は、0.997 であったので、ほとんど残せている。図 5.18 が SCH が 21 セグメントと TOF が 9 セグメントの時の SFT のセグメントヒットパターンであるが、 Σ を選んだ時の分布になっている。図 5.18 で赤線の範囲が新しいパターンで、黒い線のものが 2018 年の時のパターンである。

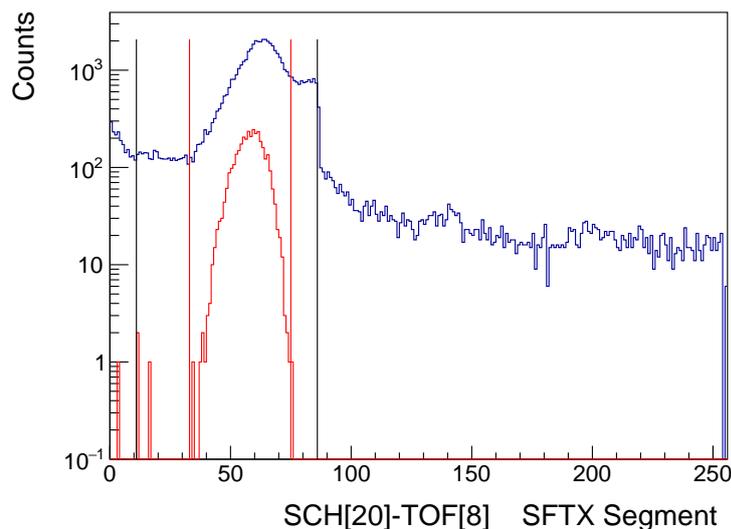


図 5.18: 2018 年の時と新しい Matrix Pattern を適応した時の SFT のセグメント。赤線の範囲が新しいパターンで、黒い線のものが 2018 年の時のパターンである。

これから得られた Matrix Pattern 内にある Σ は 2018 年の実験で用いたパターンの中にある Σ の内 99 %残すことができた。ここで、図 5.12 において、新しいパターンを適応したときの比を計算すると図 5.19 の赤点のようになる。新しいパターンにおいて、Missing Mass で $1.25 \text{ GeV}/c^2$ より大きい領域において落としていることがわかる。

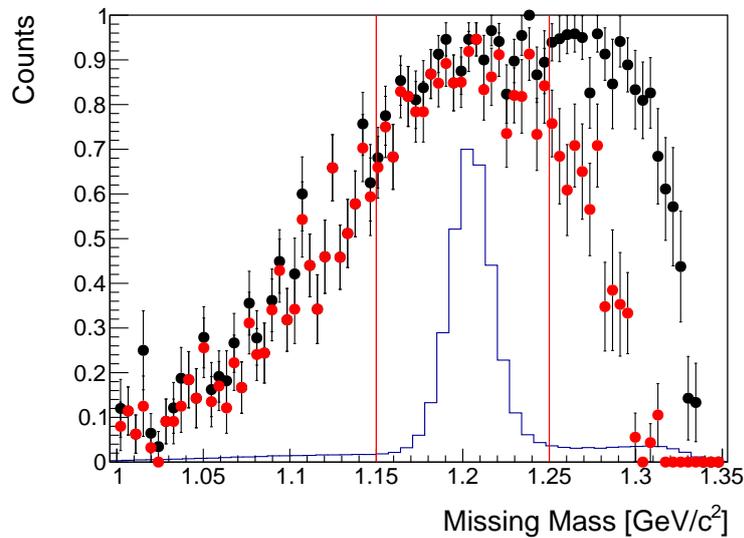


図 5.19: 現状と新しい Matrix Pattern を適用し電荷が正の粒子を選んだときの Missing Mass 分布と電荷が正の粒子を選んだときの Missing Mass 分布の比と別のデータで散乱 K を選んだときの $p(\pi, K)X$ を計算したものをスケールしたヒストグラム。黒い点が現状の Matrix Pattern で、赤い点が新しい Matrix Pattern である。

5.3 Matrix のコインシデンスゲートの評価

現在の Matrix Trigger では、50 k/spill のトリガーレートとなり大きすぎる。その原因として J-PARC のビームはバンチ構造によるアクシデンタルコインシデンスの可能性がある。Matrix Trigger の TOF、SCH、SFT の信号幅は現在図 3.15 からわかるように 35~40 ns となっている。これより、Matrix Trigger のコインシデンスゲートは 70~80 ns となる。このコインシデンスゲート幅の影響を調べるため、取得した TDC 情報を用いて解析を行い、コインシデンスのゲート幅を決定した。

まず取得したデータから Matrix Trigger に参加している検出器の SFT、SCH、TOF の 3 つの TDC を時間に較正し解析を行なった。トリガーでの状態と近づけるために、TOF は up と down の平均時間を計算して使用した。SCH、SFT は TDC ピークが 0 に立つようにし、時間分布にした。三つの検出器の時間分布を図 5.20 に示す。

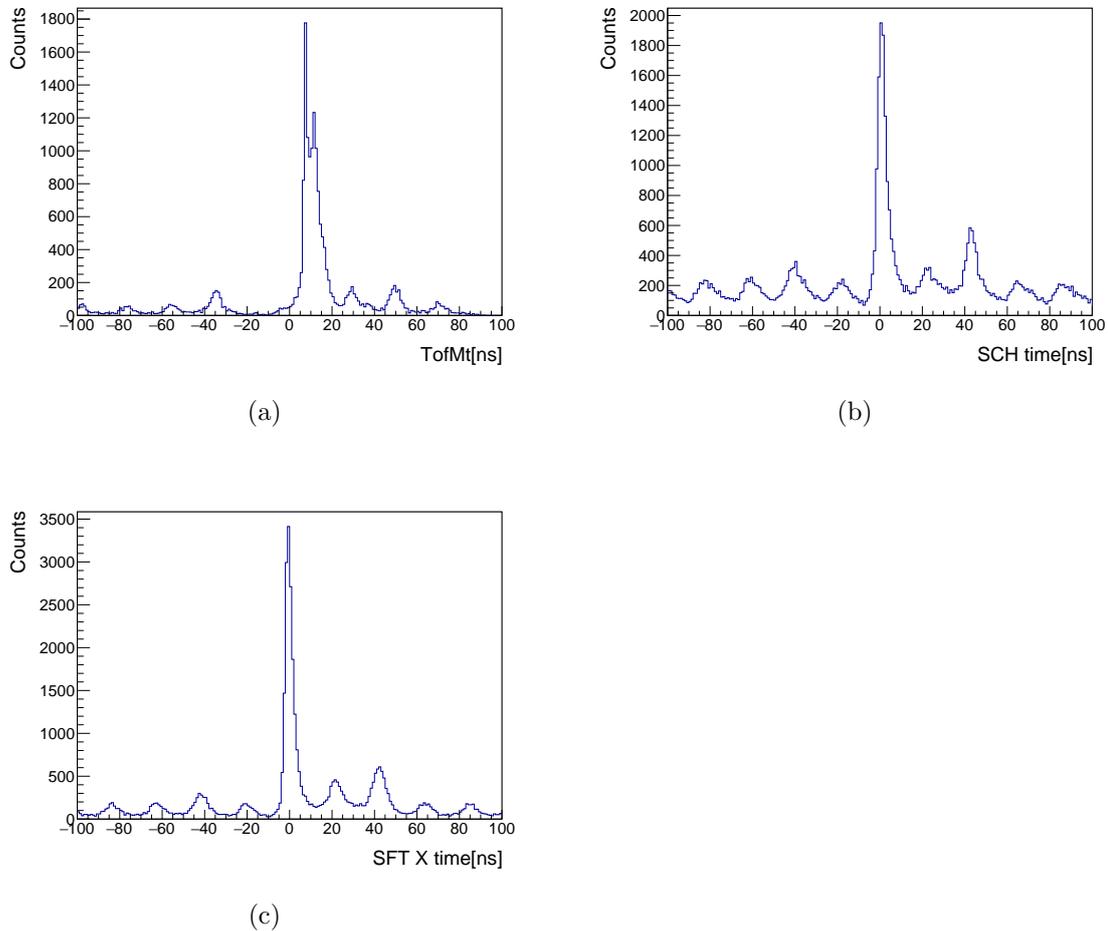
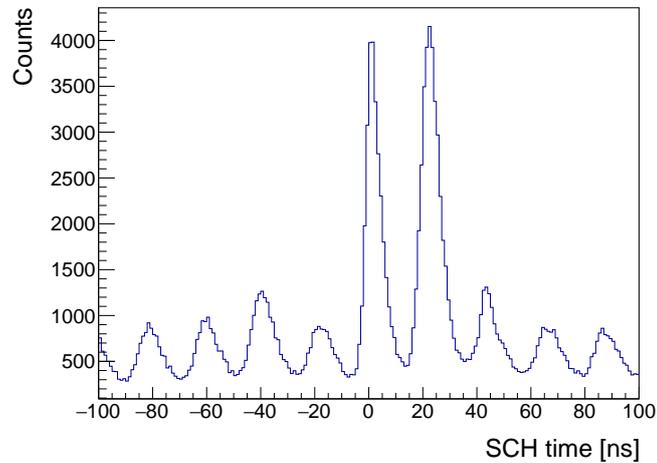
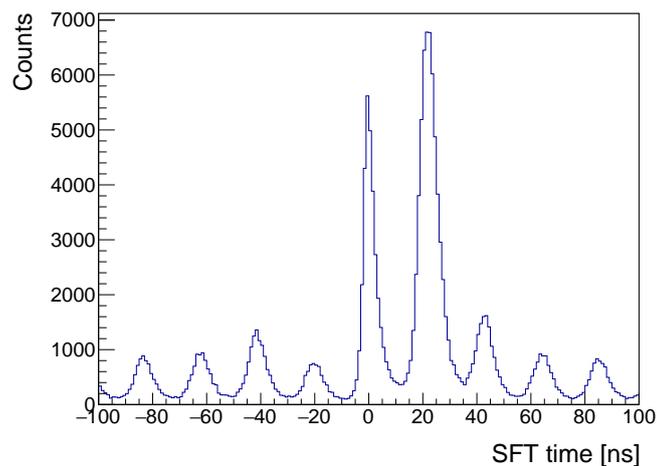


図 5.20: Matrix Trigger に参加している検出器の時間分布。(a) TOF の時間分布。(b) SCH の時間分布。(c) SFT の時間分布。

図 5.20 の (a) で TOF は粒子の違いにより時間に広がりをもつため 0~20 ns の範囲でピークが広がっている。図 5.20 の (b)、(c) はそれぞれ SCH、SFT の時間分布であり、TDC の分布のピークを 0 に合わせた。図 5.20 からわかるように各検出器の時間分布で約 20 ns 刻みにピークが見える。これがビームのバンチ構造である。まずバンチ間での影響を調べるために、TOF のバンチずれの領域を選んだ時の SFT、SCH の信号を見てみた。図 5.20 の (a) の TOF の時間分布で 25 ns~35 ns の領域を選んで SCH、SFT の時間分布を見てみた。(図 5.21)



(a)



(b)

図 5.21: TOF の時間分布で 25ns~35ns の領域で cut を行なった時の SCH、SFT の時間分布。(a) SCH の時間分布。(b) SFT の時間分布。

図 5.21 では、SCH、SFT の両方でバンチずれのピークが強調された。この内 0 ns 付近に見えるピークと 30 ns のピークの高さが同じくらいになっていることがわかる。これは、各検出器でバンチの異なる複数の粒子が来ていることになる。これにより、各検出器で観測される一つ一つの粒子では Matrix Pattern を満たすことはないが、バンチ違いで来た別の粒子とアクシデンタルコインシデンスが起きてしまい、本来 Matrix Trigger が出力されない運動量の粒子でも Trigger 信号を出力する可能性がある。このバンチずれが起きている箇所としては、図 3.15 の各検出器の信号幅広いということが考えられる。図 3.15 で

わかるように現在 Matrix Trigger の各検出器の信号幅はおよそ 40 ns に設定しており、コインシデンス幅は 70~80 ns となっている。バンチずれで来る信号は 25ns 周期できているように見える。コインシデンスをとる時の信号幅を小さくすることでアクシデンタルコインシデンスを減らせるかどうかを考える。使用したデータのトリガーは、2018 年の実験で用いた Matrix Trigger のパターンを用いてデータ取得を行ったものを選んだ。Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比を図 5.22 に表す。1 は Gate を TDC の全時間幅にしたときである。Gate は ± 1 、5、10、15、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120 ns を調べた。これより、50 ns から大きく落ちていて、時間幅が $\pm 15 \sim 20$ ns で 60 % ほどになることがわかる。

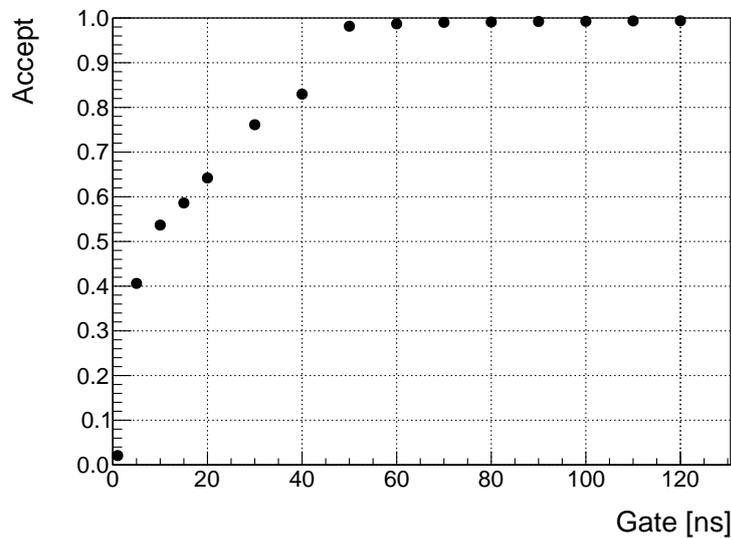
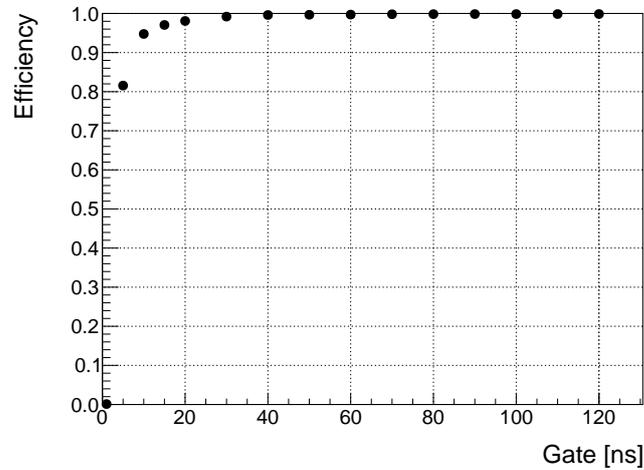
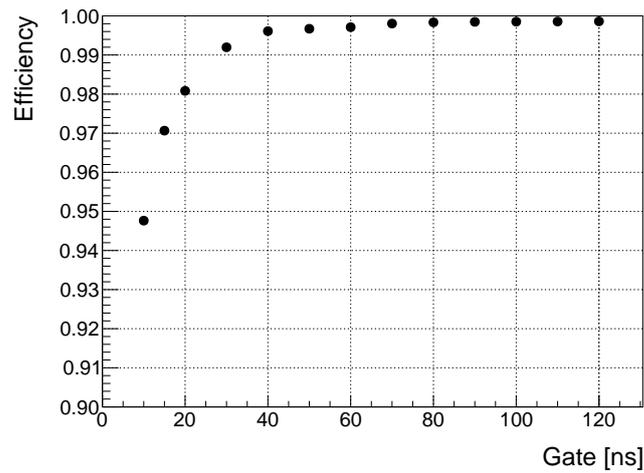


図 5.22: Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比。1 は Gate を TDC の全時間幅にしたときである。

このときに Σ 生成イベントの数がどのように変化していくか調べてみた。トリガーの数が減少しても J-PARC E40 実験でシグマの数が変化しては意味がない。そのため、上記の分母, 分子に Σ が生成されたという条件を課して Σ の数がどのように変化するかみてみた (図 5.23)。 ± 15 ns にしても 97 % の Σ が残ることがわかる。



(a)



(b)

図 5.23: Σ が生成されたときの、Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比。(a) 時間幅を 0~120 ns の範囲で変えたときの Σ の計数率の変化。(b) 時間幅を 0~120 ns の範囲で変えたときの Σ の計数率の変化で 0.90 以上の拡大図。

次に、粒子ごとにどのような時間幅で分布するのかを調べた。TOF と SCH の時間の差をとり、*tof* の計算を行う。*m2* で π 、*K*、*p* を選び、*K* を選んだ時のピークを 0 ns にして各粒子の分布をみた (図 5.24)。TOF 基準で見た時に 10 ns 程度広がって見える。つまり、解析ではコインシデンス幅は 10 ns は必要ということがわかる。実際には、このよう

に綺麗に見えるものばかりではないので、Trigger 生成レベルでは 10~20ns のコインシデンス幅が必要になると考えられる。

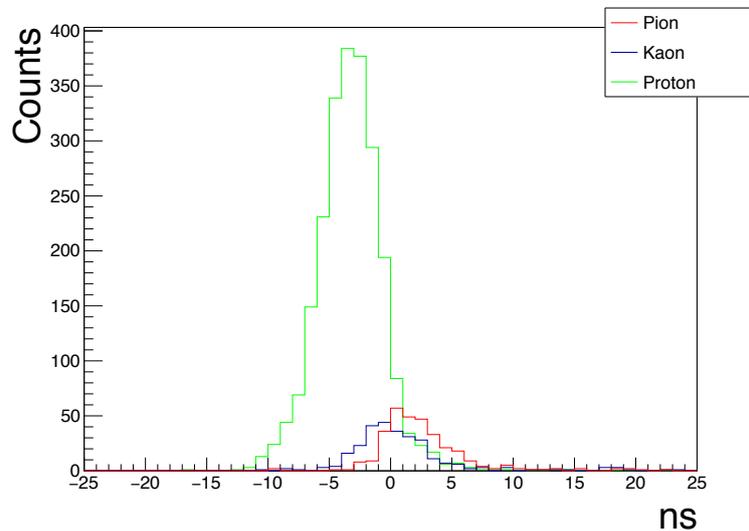


図 5.24: Matrix Trigger に参加している検出器の粒子ごとの時間分布。

ゲート幅の解析や、検出器間の粒子ごとの分布から Matrix Trigger を生成している検出器の信号の幅を 15~20 ns に変化することで Σ の収量を 97~98 %維持したままでトリガー数を 59~65 %にすることができる。再考したパターンにしてコインシデンス時間幅を減らすことを次に行った。まず、 $R1 > 30\%$ の選別を行ったときに Matrix の Trigger レートがどのように落ちているか調べた。図 5.25 が $R1 > 30\%$ の選別を行ったときの Matrix Trigger レートの Accept の割合である。黒い点が 2018 年のパターンのときの結果で、赤い点が新しいパターンの結果である。全体的に 8 割がけで落ちていることがわかる。

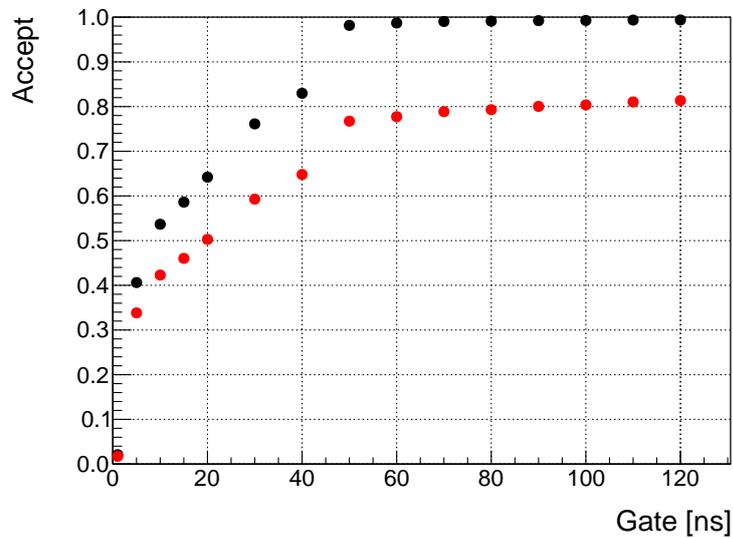


図 5.25: R1;30%の選別を行ったときの Matrix Trigger の Accept の割合。

また、SFT のセグメントの選別を行ったときの Matrix の Trigger レートがどのように落ちているか調べた。図 5.26 が SFT のセグメントの選別を行ったときの Matrix Trigger の Accept の割合である。黒い点が 2018 年のパターンでの結果で、赤い点が新しいパターンの結果である。これも全体的に 8 割がけで落ちていることがわかる。

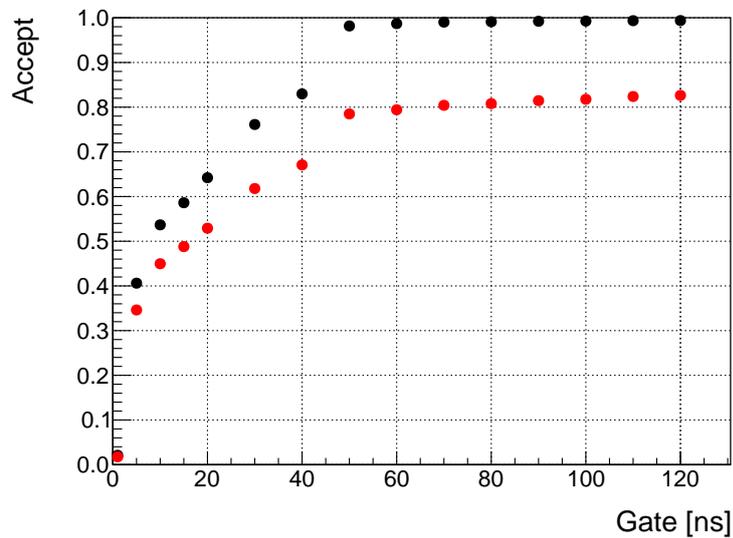


図 5.26: 新しい Matrix Pattern のための SFT のセグメント選別を行ったときの Matrix Trigger の Accept の割合。黒い点が 2018 年のパターンでの結果で、赤い点が新しいパターンの結果である。

新しい Matrix Pattern を用いたときの Matrix Trigger のレートは図 5.27 のようになると予想できる。図 5.27 の黒い点が 2018 年のパターンのときの結果で、赤い点が新しいパターンで解析した結果である。これにより、新しいパターンとコインシデンスゲートの解析により、コインシデンスゲートを 15~20 ns にすることで Matrix Trigger の Accept の計数を 38 ~ 42 % まで抑えることができる。

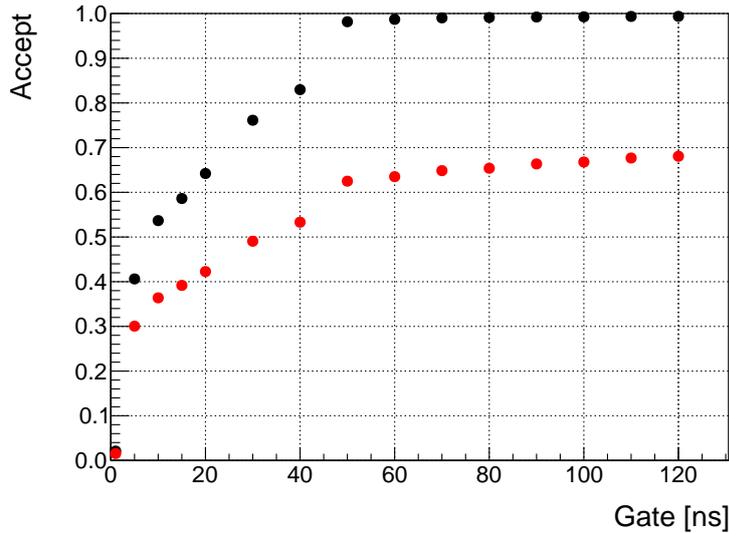


図 5.27: Matrix の Pattern のうちどれかのパターンで TOF、SCH、SFT の三つの検出器のセグメントの信号の時間分布にピークからある時間幅 (Gate) を持たせ、Gate の中に三つとも信号があるものの比。黒い点が 2018 年のパターンのときの比。赤い点が新しいパターンのときの比。

図 5.27 から Matrix Trigger の数を 40 % に減らすことができる。

この得られた結果より、トリガー数の変化とシグマの数について考察する。ビームの条件を実験で使用した 20 M/spill とする。まず Matrix Trigger と L1 の関係について考える。L1 の 1 spill あたりの数と Matrix Trigger の 1 spill あたりの数の相関は図 5.28 の (a) の黒点になっており、一次の関数で相関があるとみなせる。係数を a_1, b_1 とすると式 (5.3) のように表せる。

$$L1 \text{ [Counts/spill]} = a_1 \times \text{Matrix Trigger [Counts/spill]} + b_1 \quad (5.3)$$

Matrix Trigger の計数が落ちることで L1 の計数が下がることが考えられる。次に L1 と DAQ Efficiency の相関を見ると図 5.28 の (b) のようになる。これも同様に一次で相関があるとみなせる。係数を a_2, b_2 とすると式 (5.4) のように表せる。

$$\text{DAQ Efficiency} = a_2 \times L1 \text{ [Counts/spill]} + b_2 \quad (5.4)$$

新しい Pattern を適用し時間幅を狭めていったときの Matrix Trigger レート (Matrix (Gate)) を図 5.27 の赤点の値 (Accept (Gate)) に解析に用いていた 20 M/spill のと

きの値 (50 k/spill) をかけて減少したものを求める。

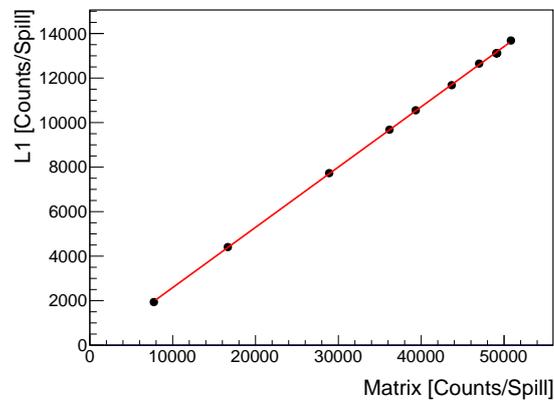
$$\text{Matrix (Gate) [Counts/spill]} = (50[\text{kCounts/spill}]) \times \text{Accept (Gate)} \quad (5.5)$$

次に、減少した Matrix (Gate) から、L1 のレート (L1 (Gate)) を求める。

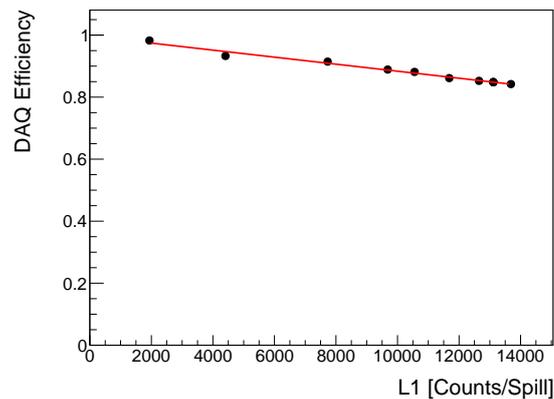
$$\text{L1 (Gate) [Counts/spill]} = \text{Matrix (Gate)} \times a1 + b1 \quad (5.6)$$

L1 (Gate) より得られる DAQ Efficiency (DAQ_{Eff}) は式 (5.4) より、式 (5.7) のように表せる。

$$\text{DAQ}_{\text{Eff}} = \text{L1 (Gate)} \times a2 + b2 \quad (5.7)$$



(a)



(b)

図 5.28: Matrix と L1、L1 と DAQ Efficiency の関係とそれぞれの線形近似。(a) Matrix Trigger と L1 の関係と線形近似。(b) L1 と DAQ Efficiency の関係と線形近似。

また、新しい Matrix Pattern にした時の Σ の Efficiency は 0.99 ($Pattern_{\Sigma}$) である。Gate を変えたときの Σ 粒子の Efficiency は、図 5.22 の値 ($Gate_{\Sigma}$) となる。DAQ Efficiency

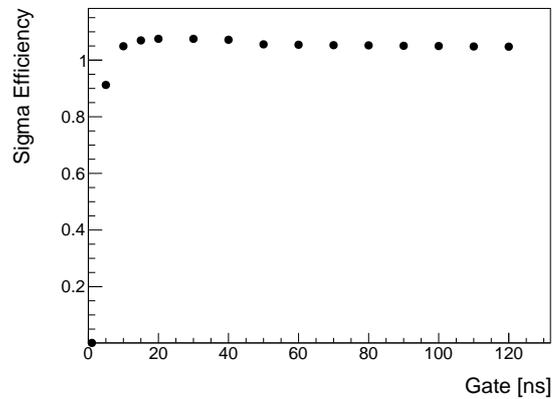
が変化したときに得られる Σ の数 (DAQ_{Σ}) は、2018 年の実験時での値を 1 とすると式 (5.8) のように表せる。(2018 年実験時の DAQ Efficiency は 0.84)

$$DAQ_{\Sigma} = \frac{DAQ_{Eff}}{0.84} \quad (5.8)$$

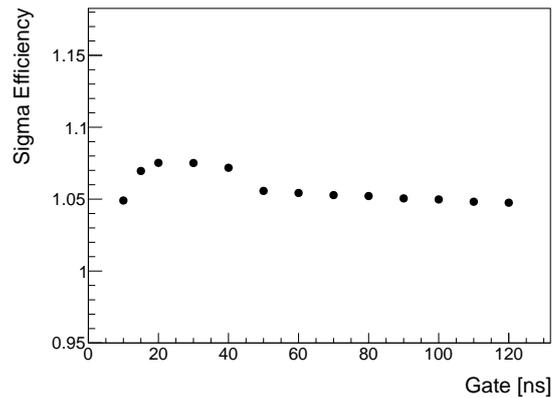
これらの関係式を用いて以下の式 (5.9) で Σ の Efficiency (Σ_{Effi}) を表せる。

$$\Sigma_N = Pattern_{\Sigma} \times Gate_{\Sigma} \times DAQ_{\Sigma} \quad (5.9)$$

式 (5.9) で時間幅を変えていったときの値を代入して描画すると図 5.29 のようになる。



(a)



(b)

図 5.29: (a) 新しい Matrix Pattern を適用しコインシデンスの時間幅を変えていったときの Σ_N の変化。(b) 新しい Matrix Pattern を適用しコインシデンスの時間幅を変えていったときの Σ_N の変化の 0.95 以上の拡大図。(1 は 2018 年の実験時の 20 M/spill のビームでの Σ の数と同じとき)

第 5. *MATRIX TRIGGER* の評価と改善5.3. *MATRIX* のコインシデンスゲートの評価

2019 年 2 月の実験において、ビームのレートを変えないで使用するとすると今回再考した Matrix Pattern を使用し時間幅 ± 20 ns にすることで最大で 7 ~ 8 % の Σ の収量の増加を望むことができる。

第6章 まとめ

本研究では、 Σ 陽子散乱実験（J-PARC E40 実験）のためのトリガーシステムの開発を行った。CATCH システムで $E - \Delta E$ 法での粒子識別に用いるためおよそ 5000 ch の読み出しを持つ飛跡検出器で CFT の ΔE の情報を持つ ADC データ取得を行う必要があった。このため 275 ns 以内にトリガーを生成しなければならなかった。さらに、20 M/spill (1 spill = 2 s) の大強度 π ビームを使用するため、トリガーレートが大きくなりその改善が必要であった。

トリガーシステムにおいては、時間制限から従来の測定室ではなく実験エリア内でトリガー信号を生成しなければならなかった。このため NIM 回路を用いたトリガーシステムに代わり、汎用 FPGA モジュールである HUL を用いた HUL Trigger の導入を初めて行った。HUL Trigger ではネットワーク内であればどこからでも操作することができ、遠隔操作が可能になった。このため検出器に一番近いエリア内でトリガー信号を作ることができた。HUL Trigger へ入力する信号の生成を実験現場にて行い、それらの信号を用いて HUL Trigger 内でトリガー用の信号を作るための回路のプログラミングを行った。HUL Trigger 内の回路においては、大強度ビームへの対策として、 (π, K) 反応が起きたというタグ付けをするための信号である BH2_K という信号を、BH2 の各セグメントごとに用意した。また、検出器の評価や、較正のために 5 種類のトリガー信号の ElseOr 信号を出力できるようにした。また、出来るだけ早いトリガー生成のためにモジュールを一つでも減らすために Spill Gate の HUL Trigger の中で処理した。2018 年の 1、2 月に J-PARC での実験でトリガー生成を行い、275 ns 以内にトリガー信号の生成を行うことができた。そのトリガーシステムを用いて、2018 年の 6 月に物理データ取得のための実験が J-PARC にて行われ、無事にデータ取得を行えた。この実験で得られたデータを用いて、初めて実験で用いられた検出器である SAC の検出効率を求めた。検出効率は 98 % となり、十分な性能が出ていることがわかった。

また、2018 年の実験において、トリガーレートが高く DAQ Efficiency が 84 % と低くなってしまった。その改善を行うため、運動量を選ぶトリガーである Matrix Trigger の評価を行った。このトリガーにおいて、アクシデンタルコインシデンスが起きていることを確かめ、コインシデンスの時間幅に関する解析を行い、検出器の信号幅を 15~20 ns にすることで、トリガーレートが 2/3 になるという結果が得られた。また、Matrix Trigger で用いている検出器のヒットパターンについて解析を行い、 Σ の領域である 1.15 GeV/c² ~ 1.25 GeV/c² で十分な Efficiency があることがわかった。さらに、パターンを新たに作り、そのパターンの適用と信号幅を 15~20 ns にすることでトリガーレートが 38~41 % に抑えることができ、2018 年の 6 月の 20 M/spill (1 spill = 2 s) に比べ Σ の生成量が 7 ~ 8 % 改善されるという結果を得た。

J-PARC E40 実験では、残りの物理データの取得を 2019 年の 2, 3, 4 月に行う予定であ

第 6. まとめ

り、その実験に向け有用な結果が得られた。

謝辞

この修士論文の執筆にあたり、多くの方々にお世話になりました。心より感謝申し上げます。

指導教官である阪口准教授には、毎週のミーティングで研究での助言のみならず、研究というものについての指導をしていただきました。ありがとうございました。本多さんには、トリガーマジュールの制作の上で、FPGA のことや、DAQ のことの多くを教えてくださいました。ありがとうございました。早川さんには、J-PARC で実験機器のことはもちろん研究に置いてよく尻を叩いていただきました。感謝しています。J-PARC での出張時にお世話になった、鷓養さん、山本さん、いつも空気を和ませてくれると共に E40 のための標的の準備等多くのことをしていただきました。ありがとうございました。東北大学の E40 のメンバーには、実験準備に置いて、共に協力して組み上げコミッションランから物理ランまで共に行うことができ、とても良い経験になりました。三輪さんには E40 の物理のこと、中田さんには E40 実験へ招いていただき感謝しています。藤岡さんには研究への姿勢の面で多くのことを学びました。僕の力が足りず多くのことで迷惑をかけてしまったことを詫びると共に感謝申し上げます。Hyper グループの先輩である中川さんには、TOF の PaluseHeightCorrection について教えていただきました。また、解析において自分が目指しているゴールを見失わないというとても大切なことを教えていただきました。ありがとうございました。同期のみんなには修士を楽しく過ごさせていただき感謝しています。赤石くんの研究へのブラックさは感嘆にも値するものがあり、僕は真似できません。同じく水越くんも、声、態度、横の大きさには、僕は真似できません。二人共、M1 の時から一緒にそれぞれの研究に励み、僕が頑張れたのは二人のおかげだと思います。ありがとうございました。研究室の皆様方には、BBQ や研究室旅行、飲み会、鍋で多くのお世話になりました。留学生のマスさんには僕の手くそな英語での会話によく付き合ってもらいました。ありがとうございました。書ききれない多くの方々にもお世話になりました。感謝申し上げます。最後に、大学院まで行かせて頂いた両親に深く感謝します。

参考文献

- [1] M. M. Nagels, T. A. Rijken, and J. J. de Swart, “Baryon-baryon scattering in a one-boson-exchange-potential approach. ii. hyperon-nucleon scattering,” *Phys. Rev. D*, vol. 15, pp. 2547–2564, May 1977. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.15.2547>
- [2] T. A. Rijken, V. G. J. Stoks, and Y. Yamamoto, “Soft-core hyperon-nucleon potentials,” *Phys. Rev. C*, vol. 59, pp. 21–40, Jan 1999. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.59.21>
- [3] Y. Fujiwara, K. Miyagawa, M. Kohno, and Y. Suzuki, “Faddeev calculation of the hypertriton using the SU_6 quark-model nucleon-nucleon and hyperon-nucleon interactions,” *Phys. Rev. C*, vol. 70, p. 024001, Aug 2004. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.70.024001>
- [4] F. Eisele, H. Filthuth, W. Föhlisch, V. Hepp, and G. Zech, “Elastic $\Sigma^\pm p$ scattering at low energies,” *Physics Letters B*, vol. 37, no. 2, pp. 204 – 206, 1971. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269371900530>
- [5] J. Ahn, B. Bassalleck, M. Chung, W. Chung, H. En’yo, T. Fukuda, H. Funahashi, Y. Goto, A. Higashi, M. Ieiri, M. Iinuma, K. Imai, Y. Itow, H. Kanda, Y. Kim, J. Lee, A. Masaïke, Y. Matsuda, I. Park, Y. Park, N. Saito, S. Mihara, Y. Shin, K. Sim, R. Susukita, R. Takashima, F. Takeutchi, P. Tlustý, S. Yamashita, S. Yokkaichi, and M. Yoshida, “ $\Sigma+p$ elastic scattering in the region of $300 \leq p\Sigma \leq 600$ MeV/c with a scintillating fiber target,” *Nuclear Physics A*, vol. 648, no. 3, pp. 263 – 279, 1999. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947499000287>
- [6] Y. Kondo, J. Ahn, H. Akikawa, J. Arvieux, B. Bassalleck, M. Chung, H. En’yo, T. Fukuda, H. Funahashi, S. Golovkin, A. Gorin, Y. Goto, M. Hanabata, T. Hayakawa, A. Ichikawa, M. Ieiri, K. Imai, M. Ishino, H. Kanda, Y. Kim, E. Kozarenko, I. Kreslo, J. Lee, A. Masaïke, S. Mihara, K. Nakai, K. Nakazawa, K. Ozawa, A. Sato, H. Sato, K. Sim, T. Tabaru, F. Takeutchi, P. Tlustý, H. Torii, K. Yamamoto, S. Yokkaichi, and M. Yoshida, “ $\Sigma - p$ elastic-scattering in the region of $400 < p\Sigma < 700$ MeV/c with a scintillating-fiber active target,” *Nuclear Physics A*, vol. 676, no. 1, pp. 371 – 387, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947400001913>

- [7] J. Ahn, H. Akikawa, J. Arvieux, B. Bassalleck, M. Chung, H. En'yo, T. Fukuda, H. Funahashi, S. Golovkin, A. Gorin, Y. Goto, M. Hanabata, T. Hayakawa, A. Ichikawa, M. Ieiri, K. Imai, M. Ishino, H. Kanda, Y. Kim, Y. Kondo, E. Kozarenko, I. Kreslo, J. Lee, A. Masaike, S. Mihara, K. Nakai, K. Nakazawa, K. Ozawa, A. Sato, H. Sato, K. Sim, T. Tabaru, F. Takeutchi, P. Tlustý, H. Torii, K. Yamamoto, S. Yokkaichi, and M. Yoshida, “ Σ^+ p elastic scattering cross sections in the region of $350 \leq P\Sigma^+ \leq 750$ MeV/c with a scintillating fiber active target,” *Nuclear Physics A*, vol. 761, no. 1, pp. 41 – 66, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037594740500998X>
- [8] Koseki, “Oho10_koseki_20100828.pdf.” [Online]. Available: <https://j-parc.jp/public/about/about/index.html>
- [9] S. Nagamiya, “Introduction to J-PARC,” *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2012, no. 1, 10 2012.
- [10] *Proposal for an experiment at the 50-GeV PS ”Measurement of the cross sections of Σp scattering”*. [Online]. Available: http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1101/pdf/KEK_J-PARC-PAC2010-12.pdf
- [11] T. Takahashi, “Experimental Apparatus in the Hadron Hall at J-PARC,” *Nuclear Physics A*, vol. 835, no. 1, pp. 88 – 95, 2010, proceedings of the 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037594741000182X>
- [12] M.Nakagawa, “J-PARC E10 実験用トリガーカウンターの性能評価,” Master’s thesis.
- [13] Y.Matsumoto, “J-PARC 大強度ビームトラッキング用ファイバー検出器の開発,” Master’s thesis.
- [14] O. Sasaki and M. Yoshida, “Asd ic for the thin gap chambers in the lhc atlas experiment,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 46, no. 6, pp. 1871–1875, Dec 1999.
- [15] Y.Akazawa, “Development and application of a cylindrical active tracker and calorimeter system for hyperon-proton scattering “catch ”,” Ph.D. dissertation.
- [16] Y.Ikeda, “シグマ陽子散乱実験のための BGO カロリメータシステムの構築,” Master’s thesis.
- [17] Y.Shiozaki, “ 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.
- [18] K.Kobayashi, “ Σp 散乱実験用エアロゲルチェレンコフ検出器の開発,” Master’s thesis.
- [19] K.Oue, “J-PARC E07 実験用 momentum trigger に用いるホドスコープ検出器の性能評価,” Master’s thesis.

-
- [20] R.Honda, “Hadron Universal Logic module 仕様書兼ユーザーガイド.” [Online].
Available: <http://openit.kek.jp/project/HUL/public/hul/userguide>