

修士論文

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

Construction of a BGO Calorimeter System
for the Σp scattering experiment

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

池田迪彦

平成 28 年

概要

二つの核子の間に働く相互作用は、豊富な核子-核子弾性散乱のデータを基に遠距離においては中間子交換モデルによりよく理解されている。しかし、核子と核子が重なるような近距離で生じる斥力については、その起源が理解されておらず、核子を構成するクォーク間の相互作用に踏み込んだ議論が必要である。核力の理解のためには、核力を u, d, s クォークを含む $SU_f(3)$ 対称性に基づくバリオン間力に拡張して理解することが有効である。

バリオン間力の中で、我々は ΣN 相互作用に着目している。特に、 $\Sigma^+(uus)$ はアイソスピンの大きさが 1 であるため 2 つの u クォークのスピンの向きが同じ向きになり、 Σ^+p の相互作用を考える時、互いの u クォークのうち少なくとも 1 組が同じスピン、カラーをもつ割合が高くなる。このとき、クォークレベルでのパウリ斥力が強く働くと考えられている。よって、 Σ^+p 相互作用からクォークレベルのパウリ効果を検証することができる。

しかし、ハイペロンの寿命は非常に短い ($\sim 10^{-10}$ s) ために直接的な散乱実験が非常に難しく、過去に行われた Σp 散乱実験では同定事象が数十イベントにとどまっており、 ΣN 相互作用の議論をするには実験データが不足している。

我々は、新たな手法を用いて Σp 弾性散乱の微分断面積を高統計で決定することを目的に、J-PARC E40 実験を計画している。この実験は、 π ビームを 10^7 Hz という大強度で液体水素標的に入射し、 (π^\pm, K^+) 反応により Σ^\pm 粒子を生成、標的中の陽子と弾性散乱を起こす事象として 10000 イベントの同定を目指すものである。E40 実験では、入射 Σ の運動量ベクトルと、散乱陽子の飛跡と運動エネルギーを測定することで、弾性散乱の運動学との一致から散乱事象の同定を行う。散乱 Σ を直接測定する必要がないことが実験上の利点となる。この実験のため、我々は飛跡検出器 CFT と BGO カロリーメータによって構成される散乱陽子検出器群を新たに開発してきた。

BGO カロリーメータは、CFT の外側を覆うように配置される大型の ($30 \times 25 \times 400$ mm³) シンチレーションカウンタである。BGO カロリーメータで検出する対象は 160 MeV までの連続したエネルギーの散乱陽子であり、40-400 kHz の高計数率下で 80 MeV に対して 3% (σ) のエネルギー分解能が要求される。本研究の目的は、この要求を満たした読み出しシステムを開発し、全チャンネル (22 本) に実装して動作させることで、カロリーメータシステムの構築を完了することである。

BGO のシンチレーション光は光電子増倍管 (PMT) で読み出す。BGO 結晶のシンチレーション光は時定数が 300 ns と長く、高計数率下においてパイルアップを起こす確率が高くなり、QDC による PMT 出力の電荷量測定ではエネルギー情報が得られない。そこで、我々は数十 ns 毎に電圧のサンプリングを行う Flash ADC による波形読み出し法をとることにした。Flash ADC で信号を記録し再構成するためには、短い間隔でサンプリングする必要があるが、1 イベントのデータサイズが膨張するというデメリットがある。安易にデータサイズを増やすことは、記憶媒体への懸念を生むだけでなく、Flash ADC モジュールからのデータ転送に要する時間を増大させ、データ取得系を律速する。そのため、PMT の出力信号を積分回路に通して整形することで、粗いサンプリング間隔 (数十 ns) の少ないサンプリング数 (70 サンプル程度) で波形を再構成する読み出しシステムを開発した。記録した波形データからオフライン解析により、信号の波高情報を取得する。

Flash ADC として CAEN V1724 を使い、また、その前段に用いるアナログ回路を設計・製作して読み出しシステムを試作した。このアナログ回路には、波形再構成のための整形回路と

Gain 調整のための増幅回路、そしてデータ量削減のための Veto スイッチを実装した。Veto スイッチは TTL 信号の入力により、回路出力のベースラインの制御を行い、V1724 の Zero Suppression 機能と組み合わせてデータ量の削減を試みる機構である。30 ns 間隔でサンプリングを行い、チャンネルあたり 33 word(66 samples) のデータを取得することで十分に波形の再構成が行えることがわかった。

想定する高計数率下で PMT(定格 900 V) を安定に動作させるためには、印加電圧を低く抑える必要があることがわかっている。PMT を安定に動作させ、かつ目標のエネルギー分解能を達成できる印加電圧を決定するために、東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター (CYRIC) にて、77.8 MeV 陽子ビームを、ビームレートを 1 kHz -700 kHz の範囲で変えて BGO カロリーメータに直接照射する実験を行った。結果として印加電圧 700 V の時に PMT の Gain 降下の影響が見られたが、600 V まで下げることで PMT の動作は十分に安定し、450 kHz のビームレートに対してエネルギー分解能 1.3%(σ) を達成した。また、波形解析においては、40 kHz の計数率下で 99 % の効率で波高情報を得られた。また、77.8 MeV 陽子ビームを銅のディグレーダーによりエネルギーを下げた BGO カロリーメータに入射することにより、波高とエネルギーの対応点を 4 点取得した。その結果、波高とエネルギーの関係は、ある程度高いエネルギーについてはほぼ線形であることがわかった。また、低エネルギー領域における非線形な関係は現象論的に取り扱い、波高とエネルギーの較正式を決定した。較正式の評価として、CH₂ を標的に陽子ビームを用いて *pp* 散乱実験を行い、データとシミュレーションの比較を行ったところ、10 MeV 以上に対して 0.4 MeV 以下の精度で一致する結果が得られた。

試作開発機を用いたテストにより、十分な性能があると判断した読み出しシステムを、E40 実験で使用する実機システムに実装し、カロリーメータシステム全体を構築した。E40 実験に用いる BGO カロリーメータは総数 22 本である。これらを E40 実験で使用する実機架台に設置した上で、全チャンネル分の実機回路を製作し、読み出し系の構築を行った。この組み上げた実機システムについて、検出器性能及び DAQ の試験を行った。

¹³⁷Cs 線源由来の 662 keV γ 線を用いた測定により、すべてのチャンネルで 15%(σ) のエネルギー分解能を達成した。エネルギー分解能が $\sqrt{1/E}$ に比例すると仮定すると、80 MeV において 1.4% の分解能を達成することが期待される。また、検出光量の照射位置による依存性を全ての個体について 2 cm の間隔で取得した結果、最大で 5% の差異が見られ、この補正が必須であることがわかった。

E40 実験の DAQ システムにおいて、BGO カロリーメータは 1 つの独立したフロントエンドとしてデータ取得を行い、全体システムから配布されたイベントタグにより同期を図る。BGO カロリーメータ全チャンネルの読み出しには V1724 を 3 台を用いるため、各モジュールの読み出しを分散してデータ転送を高速化した上で、イベント同期のとれたフロントエンドを構築した。E40 実験で実際にフロントエンドが受け取るトリガーを模したランダムトリガーを生成し、DAQ 効率を測定した。DAQ 効率は request 信号の数に対する accept 信号の数である。その結果、5 kHz のトリガーレートに対して 98% の効率を得られ、想定トリガーレートにおいて十分な効率で動作することを確認した。

以上により E40 実験環境下における BGO カロリーメータの読み出しシステムの開発と、実機システムの構築に成功した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	バリオン間相互作用	1
1.2	過去に行われた Σ 陽子散乱実験	4
1.3	J-PARC E40 実験	4
	1.3.1 散乱事象の同定方法	5
	1.3.2 CATCH システムの開発状況	8
1.4	本研究の目的	11
第 2 章	BGO カロリーメータ読み出しシステムの開発	12
2.1	カロリーメータシステムの構想	12
	2.1.1 要求性能	12
	2.1.2 BGO シンチレータ	13
2.2	読み出し方法の概略	13
2.3	プロトタイプシステム	15
	2.3.1 プロトタイプの特徴	15
	2.3.2 陽子ビームを用いた性能評価	16
	2.3.3 サンプルング間隔の決定	18
	2.3.4 実機への改良	18
2.4	構築した読み出しシステム	19
	2.4.1 Flash ADC	19
	2.4.2 光電子増倍管	20
	2.4.3 アナログ回路	20
2.5	波高情報の取得	26
	2.5.1 テンプレート波形によるフィッティング	26
	2.5.2 テンプレート波形の作成	28
2.6	線源を用いたエネルギー分解能の評価	28
2.7	LED を用いたレート耐性の見積もり	30
2.8	陽子ビームを用いた評価実験	34
	2.8.1 セットアップとコンディション	34

2.8.2	エネルギー分解能	34
2.8.3	高計数率下における安定性	35
2.8.4	Veto スイッチの動作確認	40
2.8.5	波形取得時間	42
2.8.6	波形のエネルギー依存性	43
2.9	まとめ	45
第 3 章	波形解析	46
3.1	イベントタイミング	46
3.2	アルゴリズム	46
3.3	波形データを用いた解析効率の見積もり	54
3.3.1	成否判定	56
3.3.2	各操作による検出効率	57
3.3.3	検出効率の EV、Time Gate 依存性	59
3.4	陽電子ビームを用いた波形についての評価	61
3.5	まとめ	64
第 4 章	エネルギー較正法	65
4.1	BGO 結晶の発光量	65
4.2	ディグレーダーを用いたエネルギーの較正	66
4.3	pp , pC 散乱実験におけるエネルギーの較正	69
4.3.1	セットアップ	69
4.3.2	散乱イベントの波形分布	70
4.3.3	測定値とエネルギーの対応	73
4.3.4	較正曲線の評価	78
4.4	まとめ	82
第 5 章	実機の製作と評価	83
5.1	実機システムの構成	83
5.2	ハードウェア	83
5.2.1	実機架台	83
5.2.2	全チャンネルアナログ回路	88
5.2.3	恒温槽	90
5.3	DAQ	94
5.3.1	E40 実験における DAQ	94
5.3.2	BGO 全チャンネルの読み出し方法	96
5.3.3	イベント同期	99
5.3.4	V1724 の記録範囲の設定	100
5.3.5	時間情報の補正	101

5.4	全システムの評価	105
5.4.1	検出光量の位置依存性	105
5.4.2	エネルギー分解能	108
5.4.3	時間分解能	109
5.4.4	DAQ 効率	112
5.5	まとめ	114
第 6 章	まとめ	115
謝辞		117
参考文献		119

図目次

1.1	Lattice QCD によって計算されたフレーバー基底のバリオン間ポテンシャル	3
1.2	J-PARC E40 実験の全体セットアップ図	5
1.3	E40 実験で測定する Σp 散乱事象の模式図	7
1.4	シミュレーションで見積もられた ΔE 分布	7
1.5	CATCH の全体図	8
1.6	完成した CFT の写真	9
1.7	BGO カロリーメータの写真	10
1.8	77.8 MeV 陽子ビームを BGO カロリーメータに直接照射したときの波高分布	10
2.1	生信号と積分回路出力の概念図	15
2.2	陽子ビーム照射実験のセットアップ図	16
2.3	プロトタイプシステムにおける 77.8 MeV 陽子のスペクトル	17
2.4	エネルギー分解能のサンプリング間隔依存性	18
2.5	PMT の写真	20
2.6	製作したアナログ回路の機能を示すチャート図	20
2.7	宇宙線を検出したときの BGO カロリーメータの信号波形	21
2.8	BGO カロリーメータの読み出し用アナログ回路の回路図	22
2.9	Veto スイッチの解説図	24
2.10	アナログ回路のテストパルスに対する応答	25
2.11	スイッチング信号入力に対する応答	26
2.12	テンプレート波形によるフィッティングのチャート	27
2.13	テンプレート波形の作成	29
2.14	開発機で取得した ^{137}Cs 線源からの γ 線の波高分布	30
2.15	LED を用いた PMT のレート耐性試験のセットアップ図	31
2.16	LED 信号のフィッティングの様子	31
2.17	LED を用いて測定した PMT の gain 降下の様子	32
2.18	LED を用いて見積もった PMT の gain 降下	33
2.19	開発機で取得した 77.8 MeV 陽子ビーム直接照射時の波高分布	35

2.20	ビームレート 700 kHz における波高分布	36
2.21	PMT の gain 降下のビームレート依存性の評価	37
2.22	各 PMT 印加電圧のときの gain の安定性	39
2.23	ビーム照射中に行った Veto スイッチの動作確認	41
2.24	波形解析のタイムゲートと解析精度の関係	43
2.25	波形解析のタイムゲート	43
2.26	テンプレート波形のエネルギー依存性	44
3.1	イベントタイミングの定義	47
3.2	波形解析のチャート図	48
3.3	取得した波形とその差分波形の例	49
3.4	操作 2 によるテンプレート波形フィッティングの成功例	50
3.5	操作 3 による残差波形 2 の作成	51
3.6	操作 4 によるテンプレート波形フィッティングの成功例	52
3.7	操作 5 によるテンプレート波形フィッティングの成功例	53
3.8	波形データの抽出範囲	54
3.9	解析アルゴリズムの検出効率の調べ方	55
3.10	波形解析の検出効率の定義	56
3.11	操作 1 による EV 分布	57
3.12	波形解析の検出効率の見積もり	60
3.13	陽子と陽電子のテンプレート波形	61
3.14	信号の間隔と解析の精度の相関を求める手順	62
3.15	信号の間隔と精度の相関	63
4.1	ディグレーダーを用いた測定のセットアップ図	66
4.2	ディグレーダーを用いた測定のデータとシミュレーションから得られた分布図	67
4.3	ディグレーダーを用いた測定データのエネルギー較正とその残差	68
4.4	pp 散乱の概念図	69
4.5	pp , pC 散乱実験のセットアップ図	70
4.6	pp , pC 散乱事象の波形	71
4.7	pp , pC 散乱実験の波高分布	72
4.8	2 つの BGO カロリーメータの波高分布の相関	72
4.9	検出光量の位置依存性	73
4.10	測定量とエネルギーの関係の概略図	74
4.11	45° 方向 pp 散乱のイベントセレクト	77
4.12	pp , pC 散乱の波形データとシミュレーションから作成した較正曲線	78

4.13	データとシミュレーションの比較による較正曲線の評価	79
4.14	較正式に一次曲線を用いた場合の波高相関の残差	80
4.15	較正式のパラメータを変えた場合の波高相関の残差	81
5.1	BGO 架台の設計図	84
5.2	BGO カロリーメータの配置図	85
5.3	BGO 架台の断面図	85
5.4	BGO 結晶を覆う反射材と遮光材	86
5.5	BGO 架台の下半分の写真	86
5.6	BGO 架台に設置した写真	87
5.7	実機回路の 1 ボードの写真	88
5.8	実機回路 1 ボードの 2 つチャンネル間のクロストーク	89
5.9	IKDBOX の写真	89
5.10	実機回路におけるスイッチングの応答	90
5.11	検出光量の温度依存特性測定の設定アップ図	91
5.12	BGO の検出光量と温度の関係	92
5.13	実験室での恒温槽の安定性	93
5.14	恒温槽内における BGO の発光量安定性	93
5.15	word 数と VME-バス通信による転送にかかる時間の関係	97
5.16	word 数と optical link による転送にかかる時間の関係	98
5.17	3 台の V1724 の読み出しの概略図	98
5.18	3 台の V1724 のイベント同期の概略図	99
5.19	E40 実験における V1724 のデータ取得タイミング	101
5.20	トリガー入力と Local Trigger Out のタイミング差	102
5.21	Local Trigger Out による補正	103
5.22	V1724 のトリガー処理と外部出力の関係のパターン	104
5.23	Local Trigger Out と CLK_OUT を用いた時間情報の補正	104
5.24	検出光量の位置依存特性測定時の z 軸の定義	105
5.25	検出光量の位置依存性	106
5.26	662 keV におけるエネルギー分解能の位置依存性	107
5.27	全チャンネルの 662 keV におけるエネルギー分解能	108
5.28	時間分解能測定の設定アップ	109
5.29	波形データをフィッティングして得られたピーク中心の時間 分布	110
5.30	波高対ピーク時間の補正前と補正後の二次元ヒストグラム	111
5.31	E40 実験の環境下における DAQ 効率	113

表目次

1.1	ΣN 間のポテンシャルをフレーバー基底で記述したもの	2
2.1	代表的な無機シンチレータの特性	14
2.2	開発機の非反転増幅回路の抵抗値と増幅率	23
2.3	低電圧駆動時のエネルギー分解能	38
2.4	ディグレーダーの厚さとビームエネルギー	44
3.1	各コンディションにおける、各操作による検出効率	58
5.1	各温度センサーのチャンネルの種類と設置位置	91
5.2	温度の時間変動度合	94
5.3	時間差から計算した時間分解能	110
5.4	時間情報の補正を施したピーク時間の分布から求めた時間分解能	111

第 1 章

序論

1.1 バリオン間相互作用

バリオンとは、3つのクォークによって構成されるフェルミオンで、陽子や中性子(核子)に代表される。核子と核子の間に働く核力と呼ばれる相互作用は、遠距離で引力で、近距離においては強い斥力といった特徴を持っている。この引力と斥力の均衡により、核子は原子核という束縛状態を形成し、この物質世界を成り立たせている。この核力を正確に理解することは、自然科学において重要なテーマであり、古くから盛んに研究されてきた。遠距離における核力は、豊富な核子-核子(NN)散乱のデータを基に、one boson exchange(OBE)モデルによって、よく記述されている。しかし、近距離における強い斥力(斥力芯)の起源は未だに良く理解されておらず、OBEモデルでは現象論的に取り扱っている。

核力の起源はクォーク間に働く強い相互作用であるため、核子の波動関数が重なるような近距離(<1 fm)においては、お互いを構成するクォーク間に直接働く相互作用に踏み込んだ議論をする必要がある。クォーク間に働く相互作用を考慮して核力を統一的に理解するためには、 u, d クォークのみから構成される核子に、 s クォークを含むハイペロンを加えた $SU_f(3)$ フレーバー空間に拡張してバリオン間力として調べるのが重要である。

アイソスピンの交換についての対称性を仮定したアイソスピン $SU(2)$ 空間を考える。核子 2 個の系はアイソスピンの合成により、

$$2 \otimes 2 = 3 \oplus 1$$

というアイソスピン 3 重項と 1 重項に対応する 2 つの規約表現で分類され、同一の規約表現内では同一の相互作用が働くと考えられる。この $SU(2)$ 対称性は、実際に良い近似で成り立っていることが知られている。アイソスピンの対称性と同様に、フレーバー (u, d, s) の対称性を仮定することで、これをハイペロンを含めた $SU_f(3)$ 対称性に拡張して同様に議論することができる。 $SU_f(3)$ フレーバー空間において、バリオンは $J^p = \frac{1}{2}^+$ の 8 重項と $J^p = \frac{3}{2}^+$ の 10 重項に分類される。このうち 8 重項に属するバリオン 2 個の系は、

$$8 \otimes 8 = 27 \oplus 10 \oplus 10^* \oplus 8_s \oplus 8_a \oplus 1$$

という 6 つの規約表現に分類される。このうち、(27) 重項と (10*) 重項は、それぞれ 2 核子系の 3 重項と 1 重項が含まれる項で、それ以外は $SU_f(3)$ 空間に拡張することで新たに現れ

る項である。クォーク描像に基づく理論予測では、この新たに現れた項は、近距離における非常に強い斥力や引力など核子間のみでは現れなかった現象を示すとされている。これらの項を含めバリオン間力を調べることは、クォーク描像に基づいて核力を理解する上で非常に重要となる。

強い相互作用を記述する QCD においては、バリオンを形成するような低エネルギー領域では非摂動的な計算が不可欠であるため、QCD から核力を取り扱うのは難しい。しかし、近年では計算手法と計算機の発展に伴い、格子上に場の理論を設定して数値計算を行う Lattice QCD シミュレーションによって、QCD からバリオン間のポテンシャルを導出することができるようになった。図 1.1 に Lattice QCD によって計算された S-wave に対応するフレーバー基底でのバリオン間ポテンシャルを示す。NN 相互作用に対応する (27) 重項と (10*) 重項と比べて、 $SU_f(3)$ 対称性に拡張したことにより現れるチャンネルでは大きく異なる振る舞いをしていることが確認できる。(8s) 重項と (10) 重項は、クォークレベルのパウリ効果を受けるチャンネルで、近距離において強い斥力を生じる。対して (1) 重項は、唯一近距離で引力を生じるチャンネルである。

バリオン間力のポテンシャルは、表 1.1 に表される 6 つのフレーバー基底のポテンシャルの線形結合によって表される。ここでは、例として ΣN に関するバリオン間ポテンシャルを表 1.1 に示す。 ΣN のチャンネルはアイソスピン I の大きさによって分類される。 $\Sigma N (I = \frac{3}{2})$ のバリオン間力のポテンシャルは、spin-singlet となる (27) 重項と、spin-triplet となる (10) 重項の 2 つのポテンシャルの重ね合わせで記述される。(10) 重項は、パウリ効果により強い斥力芯を示すチャンネルで、spin-triplet に属しているため、spin-singlet に属する (27) 重項と比べてバリオン間力のポテンシャルに 3 倍の寄与をする。そのため、 $\Sigma N (I = \frac{3}{2})$ のチャンネルは強い斥力を示すことが予想される。一方で、 $\Sigma N (I = \frac{1}{2})$ は 4 つのポテンシャルの重ね合わせで記述され、どれか 1 つのポテンシャルの振る舞いが強調されることはないと考えられている。

実験的にバリオン間のポテンシャルを調べるのに最も有効な方法は、2 体のバリオンの散乱実験を行うことである。 $\Sigma N (I = \frac{3}{2})$ に対応する $\Sigma^+ p$ 散乱においては、斥力芯の取り扱いの違いから、OBE モデルとクォークモデルとの間で散乱角度 90° における散乱微分断面積が大きく異なる。したがって、 $\Sigma^+ p$ 散乱の散乱角度 90° における微分断面積を測定することにより、核力における斥力芯の起源の一つと考えられるクォーク間におけるパウリ効果の存在を検証を行うことができると考えられる。また、 $\Sigma N (I = \frac{1}{2})$ に対応する $\Sigma^- p$ 弾性散乱の微分断面積を測定することにより、定量的にまだ調べられていない ΣN 相互作用をアイソスピンで分けて系統的に調べることができる。

表 1.1: ΣN 間のポテンシャルをフレーバー基底で記述したもの。

チャンネル	spin-singlet	spin-triplet
$\Sigma N (I = \frac{1}{2})$	$\frac{1}{\sqrt{10}} [3(8s) - (27)]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} [(8a) - (10^*)]$
$\Sigma N (I = \frac{3}{2})$	(27)	(10)

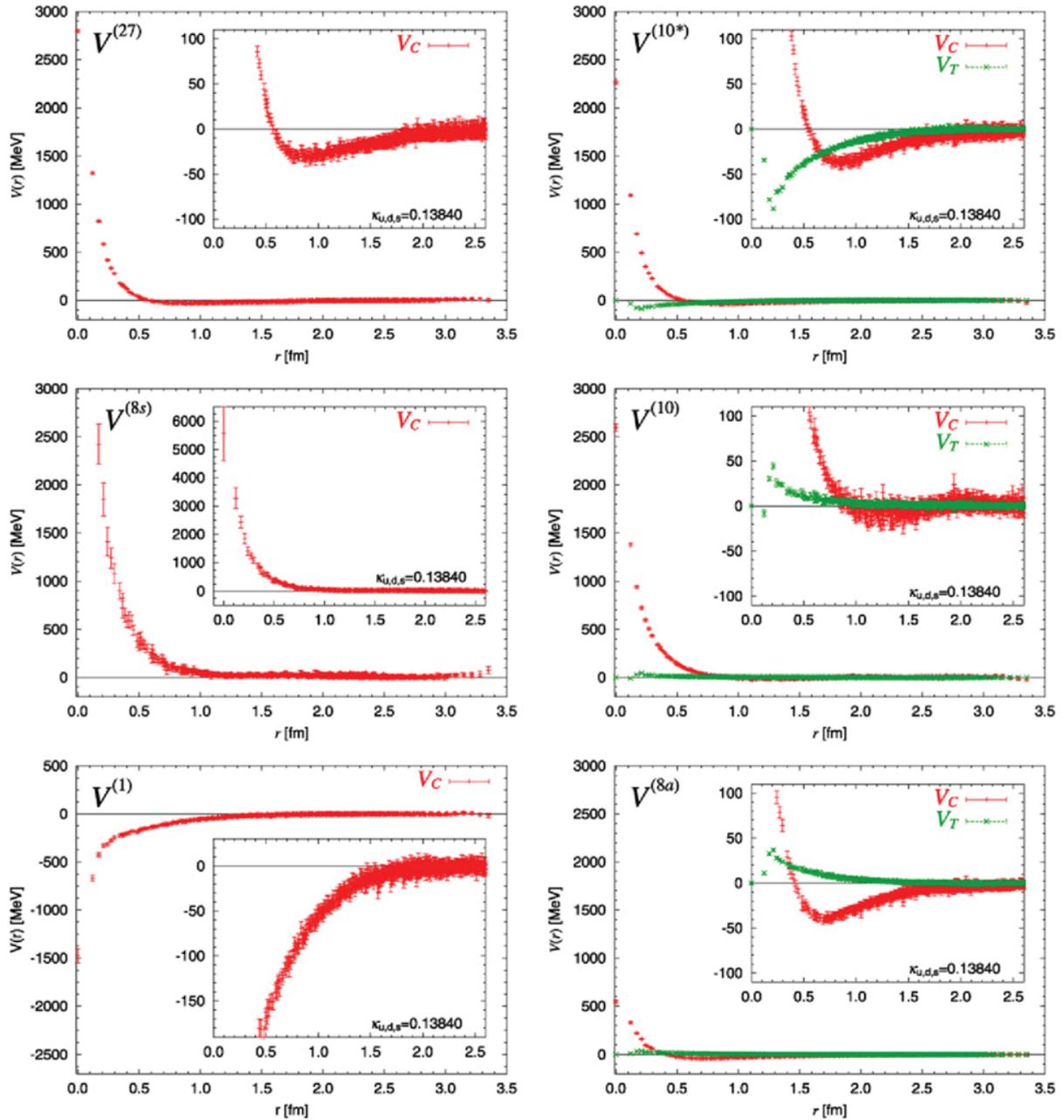


図 1.1: Lattice QCD によって計算されたフレーバー基底のバリオン間ポテンシャル。 $V^{(27)}$ などのチャンネルは、各多重項に対応するポテンシャルを表している。 π の質量を 469 MeV として計算して得られたポテンシャルである。[3]

1.2 過去に行われた Σ 陽子散乱実験

ハイペロンと核子の散乱実験のデータは核子と核子のそれと比べて極めて少ない。その理由はハイペロンの寿命が非常に短く、生成されたハイペロンが崩壊前に散乱を起こす事象が稀にしか起こらないためである。この場合、実験的に散乱事象を捉えるには、ハイペロンが崩壊するまでの数 cm 間に起こす散乱過程を画像として記録することが有効な手段となる。その例として、1960 年代にはバブルチェンバーを用いた散乱実験 [4] が行われた。この実験ではハイペロンの生成をタグできなかつたため、ランダムに画像を記録するしかなかった。また、バブルチェンバーは一度泡を形成してから安定状態に戻るまでに時間を要するために、ビーム強度を低く抑えなければならない。この制限の中効率よくハイペロンを生成するために、最もハイペロンの生成断面積の大きい Stopped K^- 反応が用いられた。これにより、生成されたハイペロンは低い運動量 (200 MeV/c 程度) に制限され、低い運動量領域におけるデータのみが取得された。

1990 年代から 2000 年代初頭にかけて、 ΣN 相互作用の研究のために、 $\Sigma^{\pm}p$ 散乱の高い運動量領域での微分断面積を測定する実験が KEK-PS で行われた [5][6][7]。この実験では、バブルチェンバーの実験で生じた問題を克服するために、シンチレーションファイバー (SciFi) のアクティブ標的と kaon spectrometer を用いた。Sigma は $\pi^{\pm}p \rightarrow K^{\pm}\Sigma^{\pm}$ 反応で生成するため、散乱 K^{\pm} を kaon spectrometer で検出することによって Σ の生成をタグしてデータを収集することができた。その結果、 Σ の運動量で 350 MeV/c から 750 MeV/c までの領域において Σp 弾性散乱のデータを取得することに成功した。しかし、SciFi の読み出しを担う Image Intensifier Tube (IIT) に用いられた蛍光物質の崩壊時定数が数 μs と長く、イメージの重なりを避けるために π ビームの強度が 200 k/spill に制限された。また、SciFi アクティブ標的内に含まれる炭素原子核の存在が、核内核子との弾性散乱による Σ の生成や、生成した Σ との散乱事象によるバックグラウンドを生み出していた。また、それらの画像データから人の目による選別で散乱事象として正しく同定するには、 Σ の飛跡が 5 mm 程度必要で、それ以下の飛跡のデータは切り捨てる結果となった。以上の理由でこの実験における Σp 散乱の統計量は 30 イベントにとどまった。

このように、過去にも ΣN 相互作用の研究のための実験は行われてきたが、実験的な難しさから統計量は低いままである。

1.3 J-PARC E40 実験

我々は新しい測定手法を用いた Σp 弾性散乱実験、J-PARC E40 実験 [8] を計画しており、過去の実験でかなわなかった高統計での微分断面積の決定を目指している。E40 実験では Σp 弾性散乱事象の同定において、画像としてのデータ取得は行わず、カウンターから得られるエネルギーと軌跡の情報から運動学により反応の再構成を行う。過去の実験では、使用できるビームレートがイメージング検出器によって制限されていたが、E40 実験では検出器がカウンターのみとなるため、20 M/spill (1 spill = 2 s) の高強度 π ビームを用いて行う予定である。また、生成及び散乱標的として液体水素標的を用いることで、過去の実験で生じていた炭素原子核由来のバックグラウンドの存在しないデータを取得する。E40 実験で導入する手法は、液

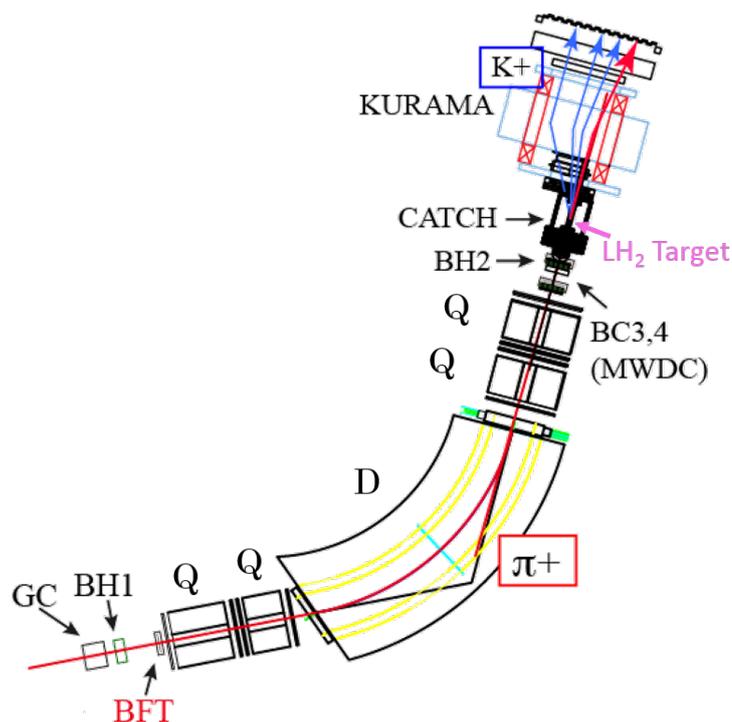


図 1.2: J-PARC E40 実験の全体セットアップ図。 π ビームは標的上流のビームラインスペクトロメータで、散乱 K^+ は下流のスペクトロメータで、それぞれの運動量を測定する。

体水素標的中で $\pi^\pm p \rightarrow K^+ \Sigma^\pm$ 反応により Σ を生成し、さらにこの Σ が標的中で陽子と散乱した事象を、その散乱陽子を捉えることで運動学から同定するというものである。E40 実験では、この手法により 10^4 イベントの高統計で Σp 弾性散乱の微分断面積を決定することを目標としている。

1.3.1 散乱事象の同定方法

E40 実験は J-PARC K1.8 ビームラインにて、液体水素を標的に、その前後のスペクトロメータと標的を囲う散乱陽子検出器群によって構成されるセットアップで行われる。実験全体のセットアップを図 1.2 に示す。 π ビームの運動量ベクトルを、標的上流の QQDQQ マグネットと位置検出器群から成るビームラインスペクトロメータにより測定する。散乱 K^+ の運動量ベクトルは、標的下流の D マグネット (KURAMA) と位置検出器群から成る後方スペクトロメータにより測定する。これらの運動量ベクトルから、生成された Σ の運動量ベクトルが求められる。一方、散乱陽子検出器群は、 $\Sigma p \rightarrow \Sigma' p'$ によって標的から放出される散乱陽子の飛跡とエネルギーを測定し、生成 Σ の運動量ベクトルと組み合わせることで散乱事象を同定する。以下ではこの同定方法について説明する。

散乱陽子検出器群は、CATCH (Cylindrical Active Tracker and Calorimeter for Hyperon proton scattering) と称される E40 実験のために新規開発する検出器群であり、CFT (Cylindrical Fiber Tracker) と BGO カロリメータで構成される。CFT は標的を囲う円筒形のファイバートラッカーで、散乱陽子の三次元飛跡を測定できるため、生成 Σ の運動量ベクトルと組み合わせることで、散乱角 θ を求めることができる。BGO カロリメータはその外側に

設置されており、CFT を突き抜けてきた散乱陽子の運動エネルギーを測定する。これら標的周りの検出器と測定する粒子を模式図で図 1.3 に示す。 Σp 弾性散乱は、スペクトロメータによる $\pi^\pm p \rightarrow K^+ \Sigma^\pm$ 反応の測定で運動量がわかっている Σ 粒子と、標的中の静止している陽子との二体の弾性散乱である。始状態がわかっている二体の弾性散乱においては、運動学から散乱角度と散乱陽子の運動エネルギーは 1 対 1 に対応する。さて、CATCH システムによって測定される物理量は、散乱陽子の飛跡から求まる散乱角 θ と、CFT と BGO カロリメータで測定される運動エネルギー $E_{p' \text{measured}}$ である。この二つの量を測定した散乱陽子が Σp 弾性散乱によるものならば、 $E_{p' \text{measured}}$ は、散乱角度 θ から運動学を解いて計算される散乱陽子の運動エネルギー $E_{p' \text{calc}}$ と一致するはずである。言い換えると、次のように Σp 弾性散乱事象の同定を行うことができる。評価基準 ΔE を以下で定義する。

$$\Delta E = E_{p' \text{calc}} - E_{p' \text{measured}} \quad (1.1)$$

散乱事象が起こった場合は $\Delta E = 0$ となるため、この量を評価することで散乱事象を同定する。E40 実験において予想される ΔE 分布を図 1.4 に示す。他のプロセスで放出された陽子を検出した際にも $\Delta E = 0$ 付近の値をとり、バックグラウンドとなることがある。バックグラウンドの主要因となるのは、 Σ の崩壊粒子と陽子との散乱事象である。これらのバックグラウンド事象についても運動学を解くことにより、 ΔE から同定することができる。図 1.4 に示す ΔE 分布はこの方法でバックグラウンド事象を抑制して見積もっている。 ΔE 分布から事象同定を行う際、 $\Delta E = 0$ に立つピークを選ぶ。このピークの幅が細いほど事象として選ぶ幅を狭くすることができ、S/N は良くなる。そのためには、 ΔE を求めるのに必要な測定量を精度よく計る必要があるため、各検出器の精度への要求が決まる。

また、標的から放出される粒子には、陽子だけではなく、 Σ の崩壊やビームを起因とする π 粒子が多く含まれる。陽子と π を識別するために、CFT で測定されたエネルギー損失と、BGO カロリメータで測定されたエネルギーの二次元相関 (ΔE -E 法) を用いる。更に、BGO カロリメータの外側に設置する PiID カウンターによって、より厳しく識別することができる。

以上の同定方法により、E40 実験ではカウンターの動作限界まで入射ビーム強度を上げ、高統計で Σp 散乱断面積を測定できると期待される。

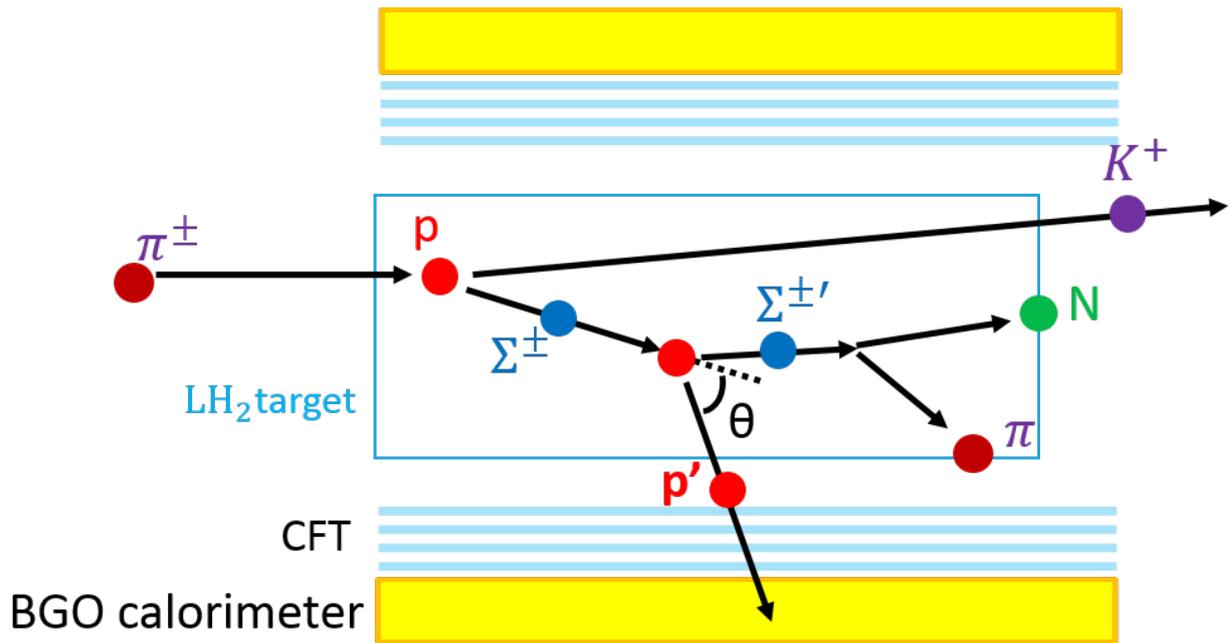


図 1.3: E40 実験で測定する Σp 散乱事象の模式図。

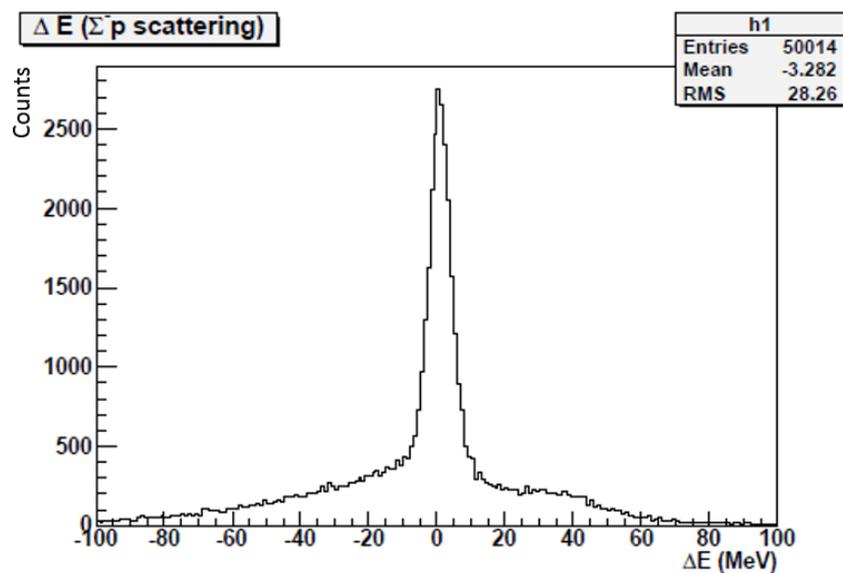


図 1.4: シミュレーションで見積もられた ΔE 分布 [10]。バックグラウンド事象は抑制している。 ΔE は、 $\Delta E = E_{p'calc} - E_{p'measured}$ で定義される量で、測定した散乱角度 θ から運動学を解いて計算される散乱陽子の運動エネルギー $E_{p'calc}$ と、CFT と BGO カロリーメータを用いて測定した運動エネルギー $E_{p'measured}$ の一致から散乱事象の同定を行う。

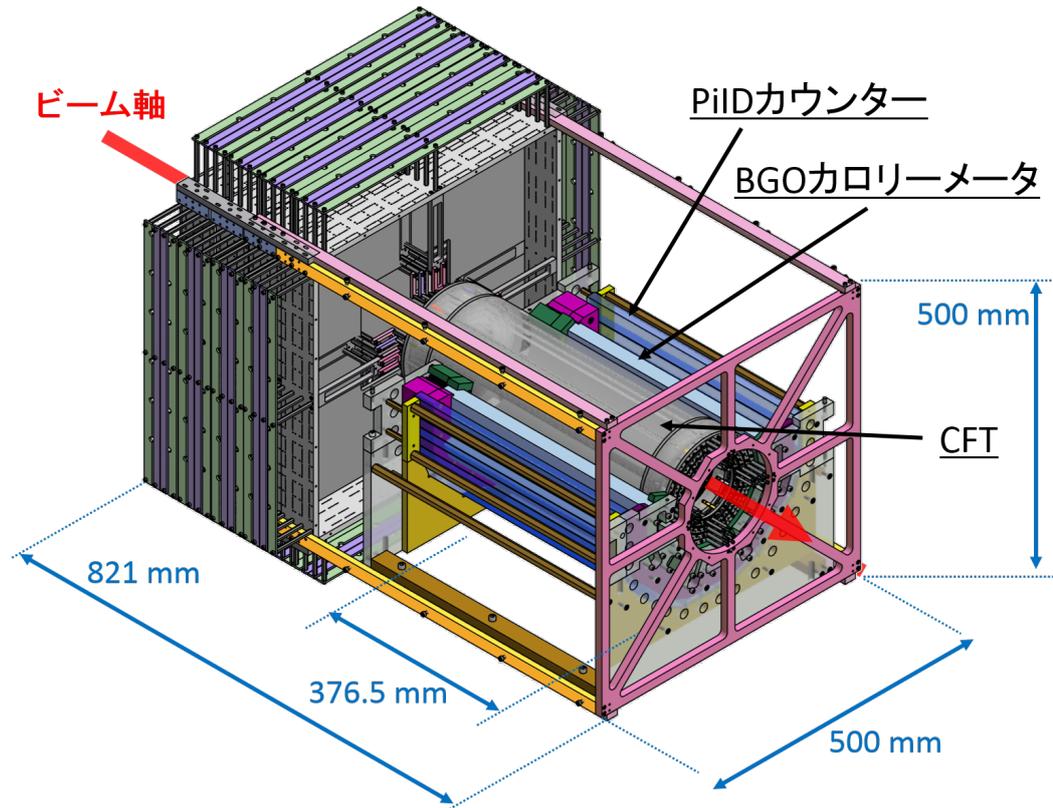


図 1.5: CATCH の全体図。円筒型の飛跡検出器 CFT の外側を BGO カロリメータが取り囲み、更に外側に PiID カウンターが配置される。図中のスケールは、全体のサイズを表しており、376.5 mm は BGO カロリメータのアクセプタンス領域のビーム軸方向の長さである。

1.3.2 CATCH システムの開発状況

本節では、E40 実験のために新規開発している CATCH システムの開発状況を説明する。CATCH システムとは、散乱陽子検出器群及びその読み出しシステムのことを指す。開発は並列に進行しており、本論文に関わる BGO カロリメータ以外については執筆時点での開発状況を記す。BGO カロリメータについてのみ、ここでは本研究以前の状況を述べるものとする。図 1.5 に CATCH の全体図を示す。

CFT (Cylindrical Fiber Tracker)

CFT は円筒形のファイバートラッカーで、液体水素標的を囲い、ターゲットから放出される荷電粒子の飛跡を再構成する。CFT は全 8 層の多重構造をしており、合計で 5000 本弱のシンチレーションファイバーから成り、その 1 本ずつを半導体光検出器 MPPC で読み出す。CFT の層には、ファイバーが円筒軸方向と平行に直線に張られた Φ 層と、円筒に添うように 1 周の螺旋を巻いて張られた UV 層がある。 Φ 層と UV 層は交互に配置されており、ヒット情報を組み合わせることにより荷電粒子の次元の位置を測定してトラッキングを行う。

CFT を構成するシンチレーションファイバーの読み出しは 1 本 1 本を個別の MPPC で行

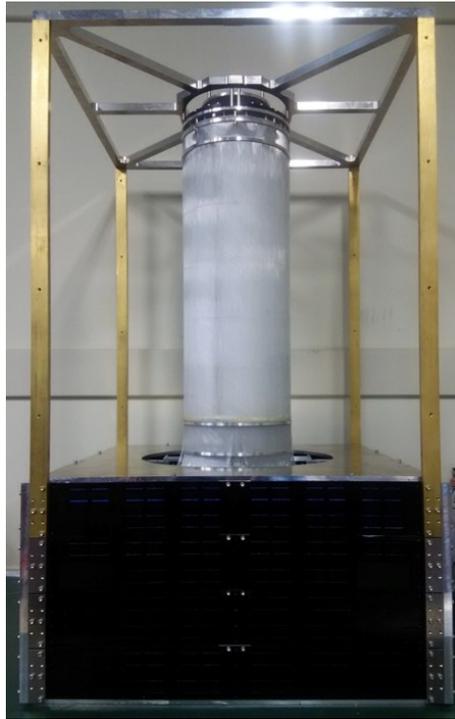


図 1.6: 完成した CFT の写真。

うため、そのチャンネル数は膨大となる。これに対応する多チャンネルの MPPC の読み出し回路として、VME-EASIROC が開発された [16]。VME-EASIROC は、MPPC の制御を行う ASIC である EASIROC チップを用いて、64 ch の MPPC について ADC と TDC のデータを取得する。ファイバーを含めた時間分解能として、 $1.2 \pm 0.1 \text{ ns}$ (σ) という結果が得られている。

CFT の製作は完了し、読み出し試験も行われた。図 1.6 に完成した CFT の写真を示す。E40 実験における CFT に関する準備は既に整っている。

BGO カロリメータ

BGO カロリメータは CFT の外側を囲って配置される BGO シンチレーションカウンターであり、散乱陽子の運動エネルギーを測定する。1 本あたり $30 \times 25 \times 400 \text{ mm}^3$ のサイズで、シンチレーション光は光電子増倍管によって読み出す。BGO カロリメータの写真を図 1.7 に示す。E40 実験では BGO カロリメータを 22 本用いる。シンチレータの発光量の情報を取得する際、光電子増倍管からの出力を電荷積分型の ADC である QDC で測定する方法がよく用いられる。しかし、E40 実験環境下では BGO カロリメータのシングルスレートは平均で 40 kHz、最大で 400 kHz と予想されており、長い減衰時間 (300 ns) により信号のパイルアップがしばしば起こるため、QDC による測定は適さない。そこで、積分回路と、数十 ns 毎に入力電圧を記録する Flash ADC を用いた読み出しを行い、オフライン解析によりパイルアップ信号を分離して、各信号の波高情報を取得する方法を採用した。

BGO カロリメータの要求性能は、80 MeV 陽子に対して 3% (σ) である。この要求は BGO カロリメータの分解能が、図 1.4 に示した ΔE 分布の分解能へ与える影響を考慮して決められた [17]。読み出し方法の試験を兼ねて、東北大学サイクロトロンラジオアイソトープ



図 1.7: BGO カロリーメータの写真。

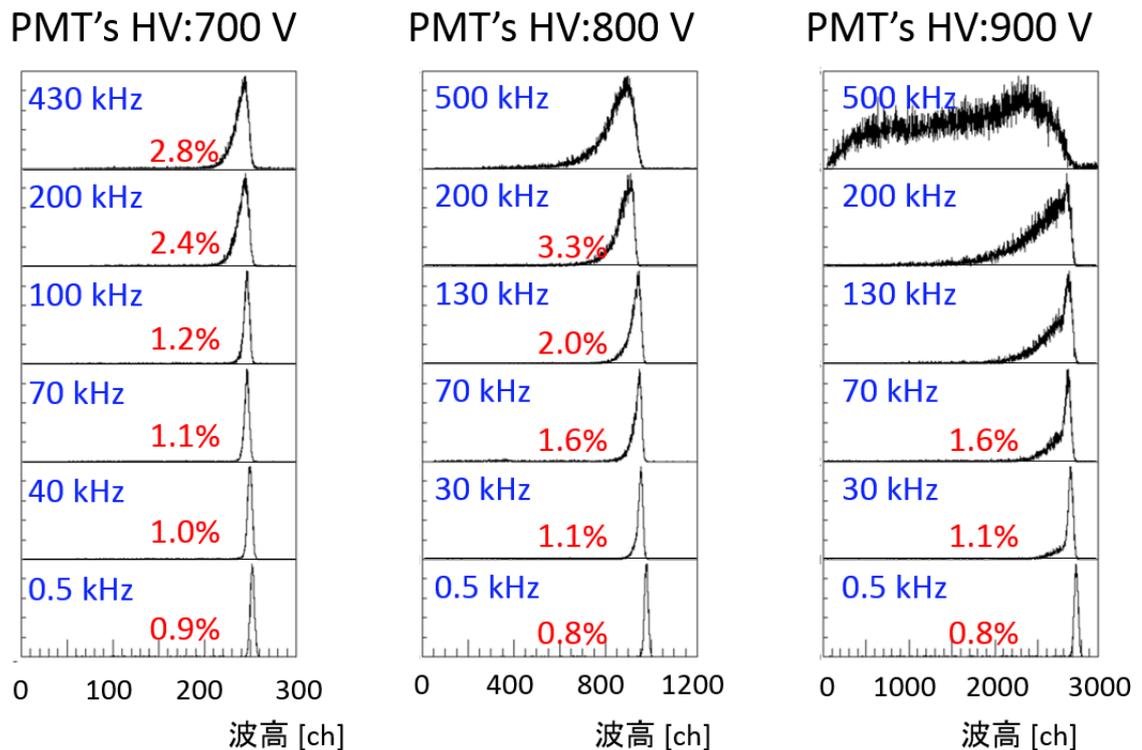


図 1.8: 77.8 MeV 陽子ビームを BGO カロリーメータに直接照射したときの波高分布。青い文字は陽子ビームのレート、赤い文字はエネルギー分解能 (σ) を表している。ビームレートが高いときに光電子増倍管の gain 降下によるものと考えられる分布の歪みが確認できる。使用した光電子増倍管の定格電圧は 900 V であり、印加電圧を下げると gain 降下を抑制できることが確認できる。

センター (CYRIC) にて、77.8 MeV の陽子ビームを直接照射する実験を行った。その結果得られた波高分布を図 1.8 に示す。結論として、パイルアップのない低レートの環境下では、約 80 MeV の陽子に対してエネルギー分解能 1% (σ) 以下という十分な性能を示すことができたが、高レートの環境下では、光電子増倍管の gain 降下が原因と考えられる分布の歪みが確認でき、分解能の悪化が見られた。また、この gain 降下は光電子増倍管の印加電圧を低くして出力電流を下げることで、ある程度抑制できることも確認できた。

私が研究に着手した段階では、カロリメータシステムの開発状況としては、読み出し方法の構想がまとまったところであり、波高情報からエネルギーへの較正方法は確立していなかった。本研究により、カロリメータシステムの構築に成功した。現時点では、E40 実験におけるカロリメータシステムはデータ取得系を含めて準備が整っている。

PiID カウンター

PiID カウンターは、BGO カロリメータの外側に設置されるプラスチックシンチレータで、読み出しのために溝が掘られ波長変換ファイバーが埋め込まれており、それを MPPC で読み出す。検出する粒子は BGO カロリメータを突き抜けた粒子で、主に π である。ターゲットから放出された陽子は、CFT と BGO カロリメータで全エネルギーを測定出来ていなければならないので、PiID カウンターを鳴らしたイベントは破棄する。東北大学電子光物理学研究センターにおいて、反電子ビームを用いた性能評価実験が行われた。その結果、30 kHz のビームレート環境下で検出器の Efficiency として 99% という十分な結果が得られている。

CATCH システム全体

本論文は、結論として BGO カロリメータシステムの構築の完了を報告するものであり、CFT と PiID カウンターの開発が完了しているため、現時点で CATCH システム全体としての動作を試みる段階にある。我々は、完成した CFT と BGO カロリメータ及び PiID カウンターにより CATCH システムを構築し、システム全体の性能評価実験を平成 29 年 1 月に東北大学 CYRIC にて実行する。この実験により CATCH システムの動作及び性能を確かめた後、この検出器群を J-PARC へと移動し、E40 実験を遂行するための最終準備へとりかかる予定である。

1.4 本研究の目的

J-PARC E40 実験では、散乱陽子のエネルギーを測定するために BGO カロリメータを設置する。E40 実験のデザインから、この BGO カロリメータに要求されるエネルギー分解能は 3% (σ) である。また、BGO カロリメータは、40 kHz-400 kHz の高計数率下に晒されることが想定され、この環境下において、パイルアップ信号の分離を行いつつ、要求されるエネルギー分解能を達成しなければならない。

先行研究により、積分回路と Falsh ADC を使ったパイルアップ分離方法は、低計数率下においてはエネルギー分解能として十分な性能を示していた。しかし、高計数率下においても分解能を維持する読み出しシステムを開発することが求められる。読み出しシステムに求められる事柄は、第一に、高計数率下で信号のパイルアップを分離し、要求されるエネルギー分解能を達成することである。そして第二に、BGO カロリメータが E40 実験のデータ取得系を律速することのないよう、転送時間を考慮してデータ量の最適化を行うことであり、第三に、測定した量からエネルギーへと較正する方法を提案し、カロリメータシステムとして 5 – 160MeV 程度の範囲でエネルギーの測定を行えるようにすることである。

本研究の目的は、これらを満たした読み出しシステムを開発し、全チャンネル (22 本) に実装して動作させることで、カロリメータシステムを完成させることである。

第 2 章

BGO カロリーメータ読み出しシステムの開発

この章では、E40 実験で使用する散乱陽子検出器群 CATCH において、散乱陽子の運動エネルギーの測定を担う BGO カロリーメータシステムの読み出しシステムの開発について記述する。カロリーメータシステムとして E40 実験において晒される環境と要求される性能を基に、これに適応した読み出しシステムの構想、構築、及びその性能評価を行った。

2.1 カロリーメータシステムの構想

本研究では、カロリーメータシステムを構築するが、このシステムは E40 実験のデザイン及び環境に適したものでなければならない。カロリーメータが晒される環境として、検出する荷電粒子のエネルギーとそのレート、及び読み出しシステムがあげられる。この章では、カロリーメータに課せられた要求性能を満たす読み出しシステムの開発を推し進める。

2.1.1 要求性能

カロリーメータは標的を囲って配置することで、標的からの散乱陽子を検出する。以下に E40 実験のデザイン及び環境から、カロリーメータシステムへ要求される要素をまとめる。

シンチレーション結晶

直方体のシンチレーション結晶をビーム軸を中心に円形に並べて配置し、ビーム軸方向に光検出器を取り付けて発光量を読み出す。ビーム軸方向に長さ 400 mm の大型の結晶が求められ、かつ最大約 160 MeV と予想される散乱陽子を静止させられるだけの物質質量が必要である。

シングルレート耐性

E40 実験で標的に入射する π ビームのレートは平均 10^7 Hz であるが、J-PARC のビーム構造には問題があり、瞬間的にはその 10 倍程度に跳ね上がることがある。高レートビームを用いた実験では必然的に標的周りの検出器のシングルレートも高くなる。見積もられる平均レートに対して 99% 以上の効率でエネルギー情報を取得する必要がある。さらにその 10 倍の環境下でも 90% 以上の効率が求められる。

読み出し速度

Σ 粒子の生成によるデータ取得系のトリガーレートは約 1 kHz と見積もられているが、この値はシミュレーションで得られたもので不定性が残るため、DAQ システムにはその 5 倍を要求している。したがって、カロリメータの読み出し系に対しても、5 kHz 以下のトリガーレートに対して 99% 以上の効率が要求される。

エネルギー分解能

上の要求項目すべてを満たした上で、80 MeV の陽子について 3% (σ) のエネルギー分解能が要求される。

カロリメータシステムはこれらを全て達成することが求められる。先行研究により、BGO シンチレーション結晶がカロリメータとして採用された。この BGO の特徴を考慮した上で、残り 3 項目の達成を目指して読み出しシステムの開発に着手した。

2.1.2 BGO シンチレータ

BGO とはビスマスジャーマネイトの略称であり、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ の組成式で表される単結晶である。この BGO 結晶は無機シンチレータに分類される。荷電粒子は無機シンチレータに入射すると、その運動エネルギーを結晶中の電子に与えて価電子帯から伝導体へ押し上げるため、電子と正孔の対が大量に生まれる。これらの対は独立に、もしくはゆるく結合した状態 (励起子) で基底状態に遷移できる配位まで瞬時に移動する。その後、電子が基底状態へ遷移する際可視光を放出するため、光検出器によりこれを計数することで、荷電粒子が結晶中で落としたエネルギーを測定する。また、基底状態へ遷移する前の電子の励起状態の半減期によって、シンチレーション光の時間特性が決まる。シンチレータとしての特性には他にも、密度、発光量などがある。これらの特性を他の代表的な無機シンチレータとともに表 2.1 に示す。

E40 実験で用いるカロリメータとして必要な特性は、80 MeV の陽子に対して 3% (σ) のエネルギー分解能、及び結晶として標的を囲うためにビーム軸方向に 400 mm の長さ、160 MeV 程度までの陽子を止めるための物質質量が必要である。また、潮解性がある結晶を用いると、結晶の保護のために数 mm 厚のアルミニウムなどを巻く必要があり、特に低エネルギーの散乱陽子は無視できないエネルギー損失を起こしてしまう。以上のことを総合的に考慮し、 $30 \times 25 \times 400 \text{ mm}^3$ の BGO 結晶が採用された [17]。この BGO シンチレーションカウンターは基本的には 1 本で散乱陽子のエネルギーを検出する。よって、この 1 本の BGO シンチレーションカウンターからなるエネルギー測定用検出器が、BGO カロリメータである。

なお、BGO のシンチレーション光の減衰時間は 300 ns とされているが、60 ns の減衰時間の発光特性も混ざっており、発光量の比としては全体の 10% を占めることが知られている [11]。

2.2 読み出し方法の概略

BGO 結晶のシンチレーション光は時定数が 300 ns と長く、シングルレートが高い環境下だとパイルアップを起こす確率が高くなる。読み出した信号の幅が $1 \mu\text{s}$ とするとパイルアップ事象の起こる確率は、E40 実験で予想されている平均的なシングルレート (40 kHz) について

表 2.1: 代表的な無機シンチレータの特性 [15]

結晶	密度 [g/cm ³]	絶対光収率 (光子/MeV)	減衰時間 [ns]	備考
BGO	7.13	8 200	300	
NaI(Tl)	3.67	38 000	230	潮解性あり
CsI(pure)	4.51	2 000	2 (35%) 20 (65%)	やや潮解性あり 遅発成分あり

4 % 程度、J-PARC のビーム構造のために瞬間的に跳ね上がる最大シングルレート (400 kHz) では約 33 % と、それぞれパルス間隔がポアソン分布に従うと仮定して見積もった。BGO の発光量を QDC を用いて測定すると、パイルアップイベントはエネルギー情報を失っていることになる。また、パルス間隔がポアソン分布と仮定したシングルレート 40 kHz の環境下において、ある信号が検出されてから次の信号が検出されるまでの間隔が 250 ns 以上となる確率は、約 99% と見積もった。

我々はパイルアップイベントを弁別してエネルギー情報を得るために、Flash ADC による波形読み出し方法をとることにした。Flash ADC は一般に数 ns ~ 数十 ns 間隔で入力信号の電圧を AD 変換してサンプリングする。使用する上でのデメリットはデータサイズの肥大化であり、これを抑制するためにサンプリング数をパイルアップの弁別に必要な分だけに制限する必要がある。その上でエネルギー分解能の要求を満たさなくてはならない。

BGO の読み出しシステムに求められる性能をまとめる。

エネルギー分解能

80 MeV 陽子について 3% (σ) を実際の環境下 (シングルレート 等) で達成する。

パイルアップ事象の分離

Flash ADC でサンプリングすることによりオフラインで信号波形を分離する。平均的なシングルレートの環境下で 99% 以上の効率で正確な波高情報を得るために、間隔が 250 ns 以上のパイルアップ事象を分離する。

データ量の軽減

Flash ADC によるサンプリング点を必要最小限とする。

BGO カロリーメータの読み出しシステムはこれら 3 つの要素を同時に達成しなくてはならない。PMT からの出力信号からエネルギー情報を得るまでの読み出し方法の指針は次の通りである。

1. PMT からの信号を積分回路に通して立ち上がりをなまらせる。
2. 数十 ns 間隔の粗いサンプリングで波形データを取得する。
3. 取得した波形データにテンプレート波形によるフィッティングを行い、信号波形を弁別しそれぞれの波高情報を得る。
4. 波高情報からエネルギー情報を得る。

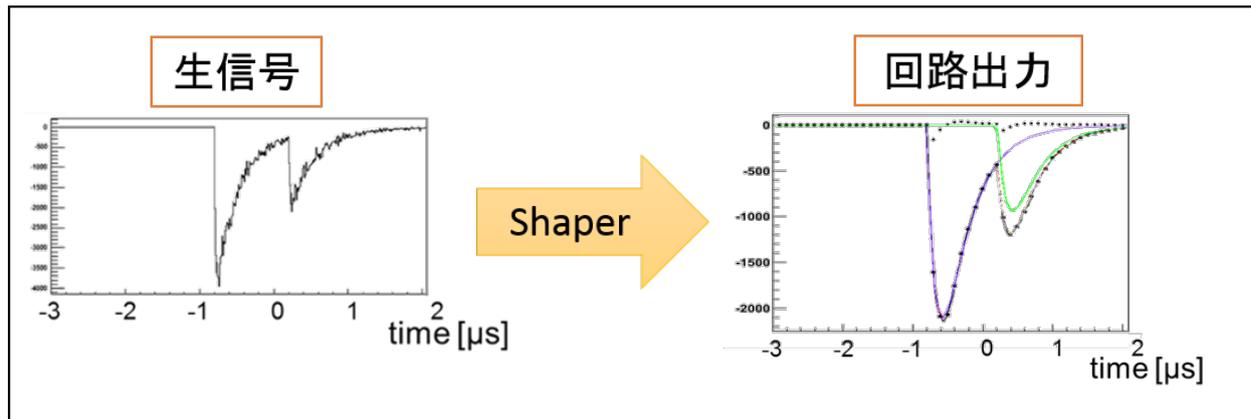


図 2.1: 生信号と積分回路出力の概念図。右の図の黒い点がサンプリングするデータ点であり、テンプレート波形をフィッティングすることで点数の少ない点から波形を再構成する。

図 2.1 に生信号となませた後の信号の概念図を示す。

我々はこの指針に従い開発を行ってきた。開発において行うことは主に次の点である。

- 積分回路を持つアナログ回路の製作
- 波形解析アルゴリズムの開発
- サンプリング間隔及びデータサイズの最適化
- 読み出しシステムの評価

この章では、BGO カロリメータの読み出しシステムの開発についてまとめる。なお、ここでは BGO カロリメータ 1 本についての開発及び評価について記述し、実機システムを全チャンネルに実装した時の評価は第 5 章で詳しく記述する。

2.3 プロトタイプシステム

先行研究により、読み出し方法を実現するためのプロトタイプが作られた。この節では、このプロトタイプシステムの評価及び課題について述べる。

2.3.1 プロトタイプの特徴

プロトタイプシステムで読み出す BGO 結晶は実機として導入した 24 本から選択した 1 本である。シンチレーション光の読み出しには光電子増倍管 (浜松ホトニクス H11934-100) を採用し、片側の端面にオプティカルグリスを介して接続した。PMT で読み出した信号はアナログ回路でスムージングし、Flash ADC (Struck Innovative Systeme SIS3302) によりサンプリングを行った。また、高レート下での gain 降下を抑えるためにブースター電源を導入し、PMT の増幅段最終 3 段の電圧安定化を図った。生信号をスムージングする積分回路の時定数は 120 ns で、Flash ADC によるサンプリングは 10 ns 間隔で 10 μ s の間を行った。

2.3.2 陽子ビームを用いた性能評価

プロタイプシステムの評価のために、2014年9月に東北大サイクロトロンRIセンターにて77.8 MeV 陽子ビームをBGOに直接照射する実験を行った。

セットアップ

図2.2に実験セットアップを示す。陽子ビームを直接照射するためにビーム窓の直後にBGOを配置した。BGOを固定している台は外部からリモートで動かすことが可能で、ビーム照射中にビーム軸から退避させることができる。BGOがビーム軸にないときは下流に配置したプラスチックシンチレータにビームが当たり、これを計数することでビームレートをモニターした。

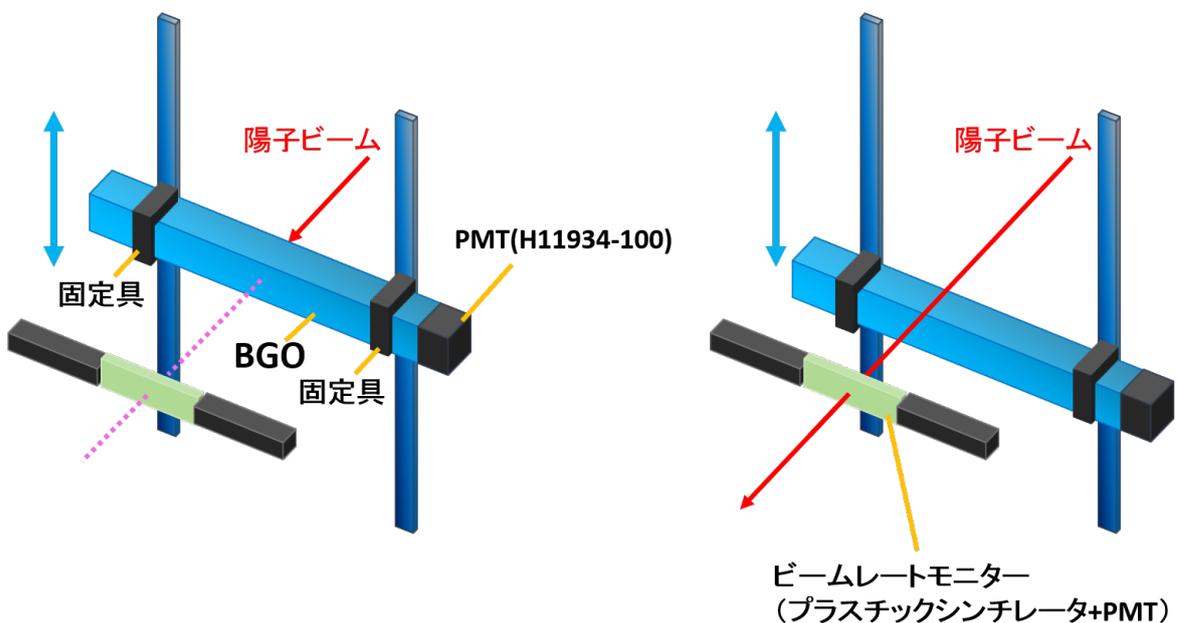


図 2.2: 陽子ビーム照射実験のセットアップ図。左は BGO 直接照射時、右はビームレートモニター時である。遠隔操作で上下させられるフレームに BGO を固定している。遠隔操作は座標入力で行うため、ビームレートモニターの前後において BGO の位置合わせを適時目視で行う必要はない。そのため、ビーム照射中に BGO への直接照射とビームレートモニターを切り替えることができる。

コンディション

先に述べたが、E40 実験においては、非常に高いシングルレートで BGO が発光すると予想されている。したがって、同様以上のシングルレートのコンディションで、システムの応答を調べる必要がある。

BGO のシングルレートが高いと PMT が gain 降下を起こす可能性があるが、PMT の印加電圧を下げて出力電流を小さくすることでこれを抑制できると期待される。この実験のコンディションは以下の通りである。

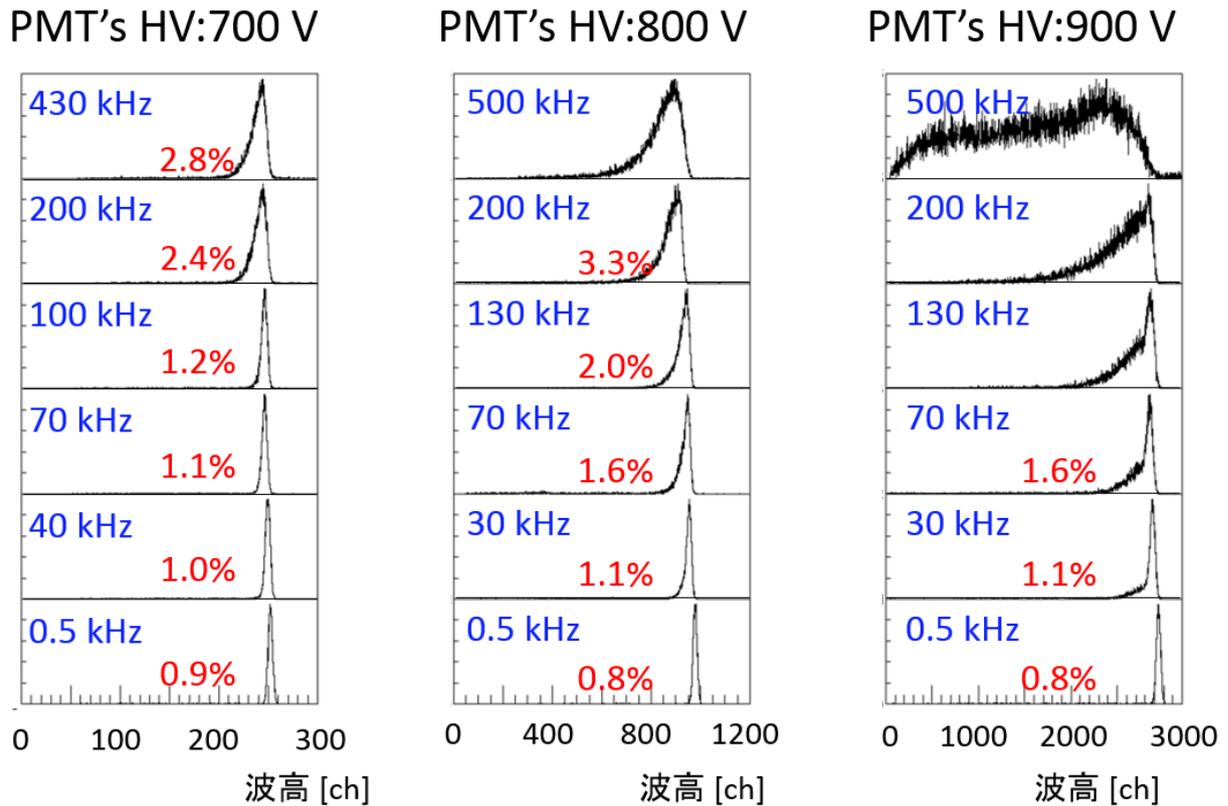


図 2.3: それぞれのコンディションにおける 77.8 MeV 陽子のスペクトル。図中の数字はビームレートと分解能 (σ) の値に対応する。高レートで生じる gain 降下は PMT の印加電圧を低く設定すると抑制される。

ビームレート 1 kHz - 500 kHz

PMT の印加電圧 700, 750, 800, 850, 900 V

結果

取得した波形データにテンプレート波形によるフィッティングを行い、波高情報を取得した。波高情報の取得については、節 2.5 にて述べる。

最適な印加電圧を求める指標として、各コンディションでエネルギー分解能を求めた。図 2.3 に各コンディションでのエネルギー分解能を示す。パイルアップが生じないような低計数率下においては 1% 以下の分解能を達成しており、要求を十分に満たしている。一方、高計数率下においては分解能の悪化がみられ、この傾向は PMT の印加電圧が高いほど顕著である。これは高計数率下においては PMT の gain 降下が生じているためと考えられる。

ビームレートに依らずに要求分解能 (3% (σ)) を達成するためには、PMT の印加電圧を 700 V 以下に下げることがわかった。

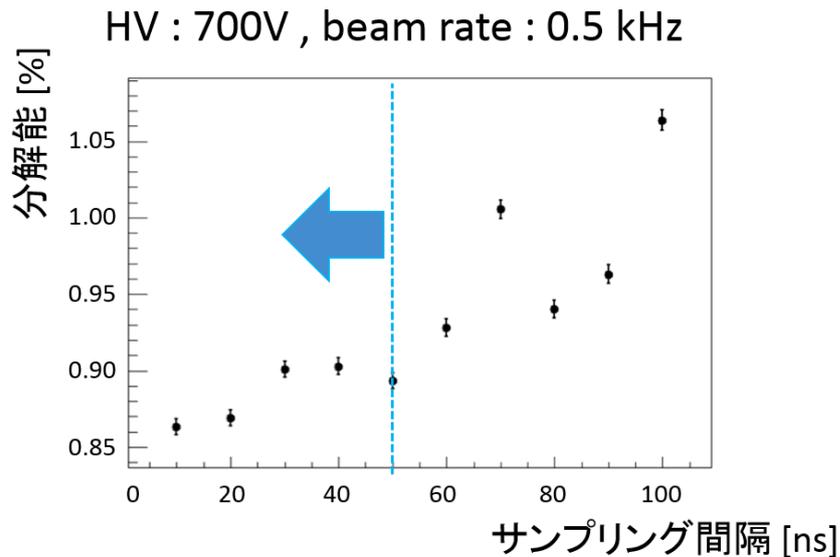


図 2.4: エネルギー分解能のサンプリング間隔依存性。

2.3.3 サンプリング間隔の決定

Flash ADC により 10 ns 間隔で波形データを取得し、テンプレート波形によるフィッティングにより波高情報を取得する手法により、BGO カロリメータは低計数率下において十分なエネルギー分解能を達成することがわかったが、データ量の削減の観点から Flash ADC のサンプリング間隔は可能な限り粗くしたい。サンプリング間隔を粗くすることで、波形の再構成の精度が低くなり、エネルギー分解能が悪化する懸念がある。エネルギー分解能を悪化させない程度のサンプリング間隔を調べるため、0.5 kHz で陽子ビームを照射した波形データのデータ点を間引き、数十 ns のサンプリング間隔の擬似データを作成した。この擬似データについてテンプレート波形フィッティング法による解析を行い、エネルギー分解能を比較した様子を図 2.4 に示す。サンプリング間隔を粗くするほどエネルギー分解能が悪化する傾向が見られるが、50 ns 以下の間隔ならば十分なエネルギー分解能を達成することが期待できる。

Flash ADC モジュールによっては 50 ns の間隔でサンプリングする仕様はないかもしれない。波形の再構成の観点から考えると、このテンプレート波形フィッティング法による波高情報の取得には、信号の立ち上がり部分の認識が重要である。このプロトタイプシステムにおいて、立ち上がり時間は 150 ns 程度であり、50 ns 間隔で丁度 3 点のサンプリングとなる。よって、信号の立ち上がりのサンプルを 3 点取得することで、十分な精度で波形の再構成が可能であると結論づけた。

2.3.4 実機への改良

テンプレートフィッティング法によりエネルギー情報が得られることが確かめられたのは大きな成果である。パイルアップがない低レート下では 1% 以下の分解能を達成しており、波形

解析によりパイルアップの分離ができるので高レート下でもこの分解能の達成が望まれる。しかし、PMT の gain 降下により高レート下ではエネルギー分解能の悪化が見られた。対策として PMT の印加電圧を下げるのが有効であることが確かめられたが、可能ならばさらに低い電圧でのオペレーションも試行する必要があるといえる。また、印加電圧を下げることで PMT の gain が小さくなるので (700 V での gain は 900 V の約 1/10)、後段で増幅する必要がある。また、信号の立ち上がり部分を 3 点以上取得することにより、波形の再構成は十分な精度で行えると期待される。

以上により BGO の読み出しシステムは、プロトタイプシステムに回路増設等の改良を加えることで完成することが見込まれた。

2.4 構築した読み出しシステム

プロトタイプの評価実験から改善点を見出し、実機へと実装すべく開発した読み出しシステムである。まず、使用する Flash ADC の選定が最初に行われた。この Flash ADC でサンプリングすることを念頭にアナログ回路の設計を行った。

2.4.1 Flash ADC

E40 実験に使用する Flash ADC には CAEN V1724 を採用した。以下に V1724 の主な特徴を記す。

- 2.25 V の入力レンジ、14 bit の分解能
- チャンネルごとに 16 bit の DAC によるオフセット調整
- 32.2 ~ 100 MS/s のサンプリングレート
- チャンネルごとに閾値を決められる Zero Suppression 機能
- 512k sample/ch、独立読み書き可能なマルチイベントバッファ
- 最大転送速度 80 MB/s の Optical Link によるデータ読み出し、slow control
- 複数モジュール間の CLK の同期が可能

V1724 はバッファリングが可能で、データ転送中に dead time を生じない。そのため、1 イベントのデータサイズについてはその転送時間にさえ気を配り、想定されるトリガーレートにおいて平均化した時間間隔より早い転送時間であれば、原理的に V1724 自身は dead time を生じない。データ取得についての詳細は第 5 章に記述する。50 ns 以下の間隔でサンプリングすることで十分な精度の波形再構成が見込まれることが、プロトタイプシステムの評価よりわかっているため、V1724 のサンプリング間隔を最も粗く設定し、30 ns 間隔で波形を取得することとした。

任意の時間幅の波形データのみを取得する機能を V1724 は有しているが、トリガー入力のタイミングをその時間幅に含めなければならない。E40 実験のトリガーシステムは、イベントタイミングからトリガータイミングは 10 μ s 以上遅れて入力される。したがって、Zero Suppression 機能を活用して不要なタイミングの波形データをバッファリングしないようにする。

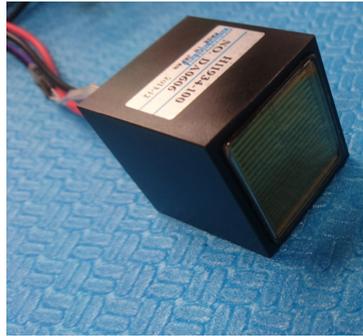


図 2.5: BGO の読み出しに採用した PMT。浜松ホトニクス R11934-100。30 mm 角型メタルパッケージ。

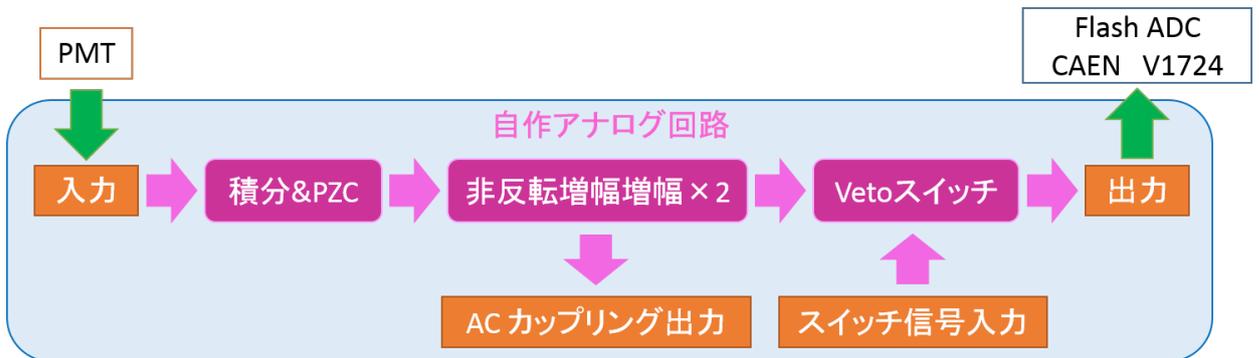


図 2.6: 製作したアナログ回路の機能を示すチャート図。PMT からの信号を積分 PZC を通して整形し、二段の非反転増幅により増幅する。増幅された信号は Veto スイッチと AC カップリング出力へと送られる。Veto スイッチはスイッチ信号入力がない場合、そのまま出力へと信号を通す。スイッチ信号入力がある場合は信号線を接地させ、信号を出力しない。

これらの V1724 の仕様及び設定事項を考慮して、エネルギー情報を取得する BGO カロリメータの読み出しシステムの開発を進める。

2.4.2 光電子増倍管

BGO 結晶が発するシンチレーション光は光電子増倍管 (以後 PMT) によって検出する。先行研究により、MPPC による読み出しも検討されたが、エネルギーの高い領域で MPPC の検出光子数が飽和して線形性が失われることから PMT が採用された。採用した PMT は浜松ホトニクス H11934-100 である。図 2.5 にこの PMT の写真を示す。PMT の有感領域は $23\text{ mm} \times 23\text{ mm}$ で、BGO の端面の約 66 % を覆っている。定格電圧は 900 V で、カタログに記載されている典型的な gain は 8.4×10^6 である。

2.4.3 アナログ回路

プロトタイプシステムから改良を加えて、より E40 実験に適した機能を持つアナログ回路を製作した。製作したアナログ回路の設計思想は次の通りである。

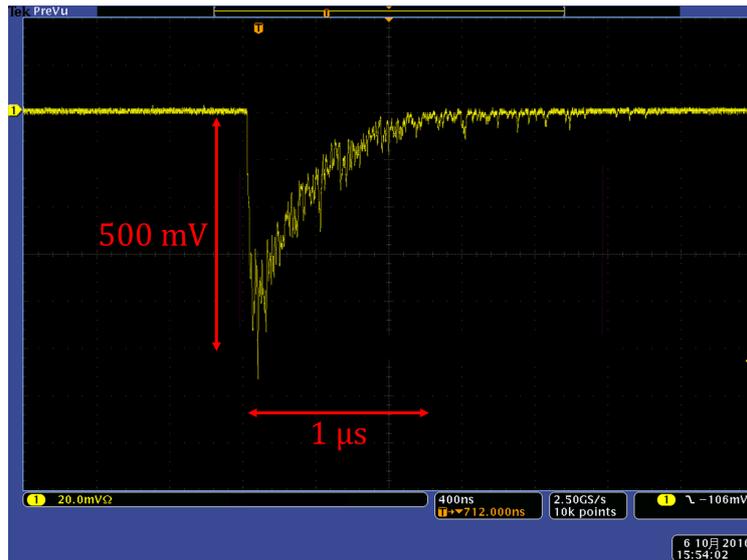


図 2.7: 宇宙線を検出したときの BGO カロリメータの信号波形。これは、PMT の出力波形であり、アナログ回路へ入力される。

積分とポールゼロキャンセレーション

立ち上がり時間を積分回路で 100 ns 程度になませ、その間を 3 点程度でサンプリングする。ポールゼロキャンセレーション (PZC) 回路により立下り時間を短くすることで、オフライン解析において波形分離能力の向上を目指す。間隔が 250 ns 以上のパイルアップ信号を全て検出ができれば、シングルレート 40 kHz の環境下で、99% の効率で波高情報を取得できる期待される。

増幅

PMT を低い電圧で動作させることで低下する gain を補う単純な二段の非反転増幅回路を設ける。Flash ADC によってデータ取得をするのでオペアンプのオフセット電圧を気にする必要はない。

Veto スイッチ

V1724 の Zero Suppression 機能を用いて不要なタイミングの波形データを取得しないようにする。Veto 信号入力中はアナログスイッチにより、入力信号を GND に導通させ、ベースラインを元より上げることにより、Zero Suppression の閾値を超えないようにする。

アナログ回路の機能はこの 3 点である。また、検出器のテスト時にセルフトリガーを生成するために discriminator で閾値をかけられるように、AC カップリング出力も実装した。図 2.6 にチャート図を示す。

始めに、アナログ回路への入力信号となる、BGO カロリメータを PMT で読み出した信号波形を図 2.7 に示す。BGO の崩壊定数に比べて PMT の時定数が十分短いため、短いパルスが連続的に重なり合った波形となっている。

積分と PZC は受動素子のみで構成し、増幅段と完全に分けている。非反転増幅の増幅率は、160 MeV 程度の陽子が入射したときの波高が、V1724 のダイナミックレンジ 2.25 V に収まるように増幅率を調整する。開発機の増幅率については、陽子ビームを当てる実験を行う前

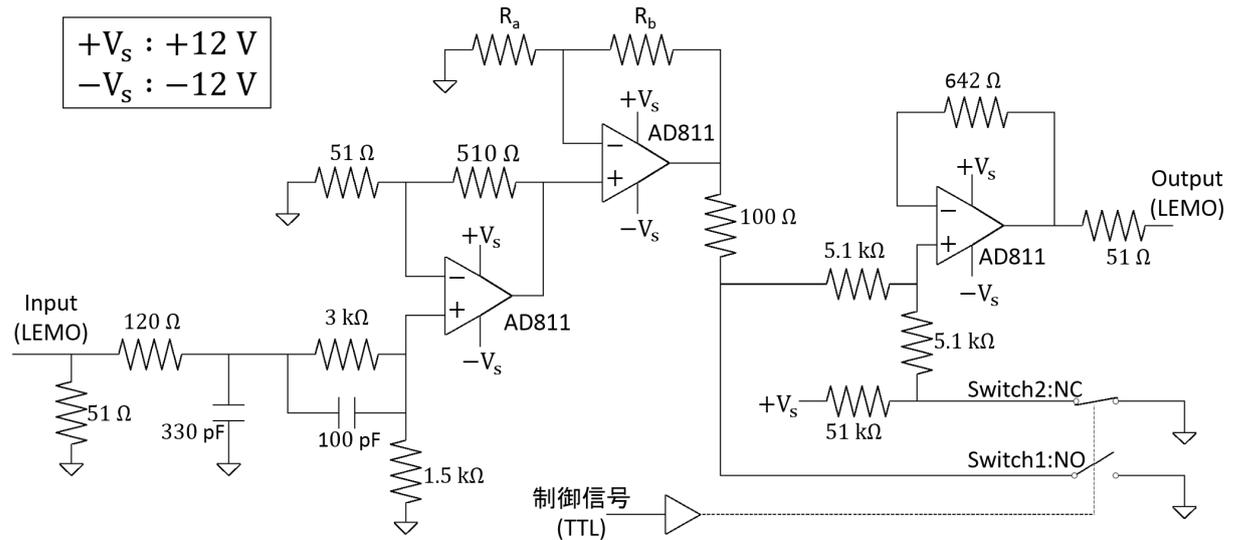


図 2.8: 設計・製作した BGO カロリメータの読み出し用アナログ回路の回路図。まず、PMT の出力は LEMO ケーブルで伝送するため、 51Ω で終端する。次に積分回路で波形をなまらせ、PZC 回路で波形を短くしている。その後二段の非反転増幅回路で増幅するが、増幅率は 3 パターン用意した (表 2.2 参照)。非反転増幅より後ろはすべて Veto 処理のための回路であり、図 2.9 を用いて後程解説する。出力も LEMO ケーブルで伝送する。

に、 ^{137}Cs 線源を用いて 662 keV の γ 線の波高を取得し、波高対エネルギーが線形だと仮定して増幅率を決定した。非反転増幅回路を形成するオペアンプには AD811 を使用した。AD811 の特徴を以下に上げる。

- 120 MHz 帯域幅 (増幅率 2 倍の時): 3 dB
- 35 MHz 帯域幅 (増幅率 2 倍の時): 0.1 dB
- スルーレート: $2,500 \text{ V}/\mu\text{s}$

積分回路を通した後に増幅するため、オペアンプへの入力波形の周波数成分は数 MHz のオーダーが主体となる。AD811 は 10 MHz 以下の周波数に対しては十分安定した動作が見込まれ、増幅に問題はない。立ち上がり時間が 100 ns 程度なので、スルーレートにも十分な余裕がある。これらの仕様は $\pm 15 \text{ V}$ 動作に対して規定されているが、 $\pm 5 \text{ V}$ 動作に対する仕様でも十分な性能を期待できる。そこで、将来 NIM クレートからの電源を利用することも考慮に入れて、 $\pm 12 \text{ V}$ で動作させる設計とした。また、PMT のオペレーション電圧のスタディのために、開発機にはトグルスイッチを取りつけて、二段目の非反転増幅のゲインを 3 段階で変更できるようにした。図 2.8 に回路図を示す。

トグルスイッチによって切り替えられる二段目の非反転増幅回路の増幅率と実装した抵抗器の抵抗値の値を表 2.2 に示す。どの増幅率についても安定して動作することを確認した。

次に、Veto スイッチについて解説する。Veto スイッチを実現するために、アナログスイッチ ADG453 を使用した。この IC の特徴は以下の通りである。

- 4 つの独立な SPST (単極単投) スイッチを内蔵
- ロジック・ロー・レベル入力に対してターンオンのスイッチ 2 つ、反転しているスイッ

表 2.2: 非反転増幅回路の抵抗値と増幅率

R_a	R_b	gain
280 Ω	560 Ω	+3.0
180 Ω	1000 Ω	+6.6
51 Ω	680 Ω	+14.3

チ 2 つ

- 小さいオン抵抗: 4 Ω
- 高速なスイッチング時間 $t_{on} = 70$ ns、 $t_{off} = 60$ ns

スイッチングの制御は TTL 信号で行うことができる。アナログスイッチを実装する位置として、当初は増幅前を考えていた。しかし、必ず生じるアナログスイッチのスイッチングノイズを非反転増幅回路で増幅してしまい、スイッチング後の出力信号のベースラインが大きく揺らいでしまうことがわかった。よって、アナログスイッチは非反転増幅後に実装することとした。非反転増幅後の信号を Veto するために、

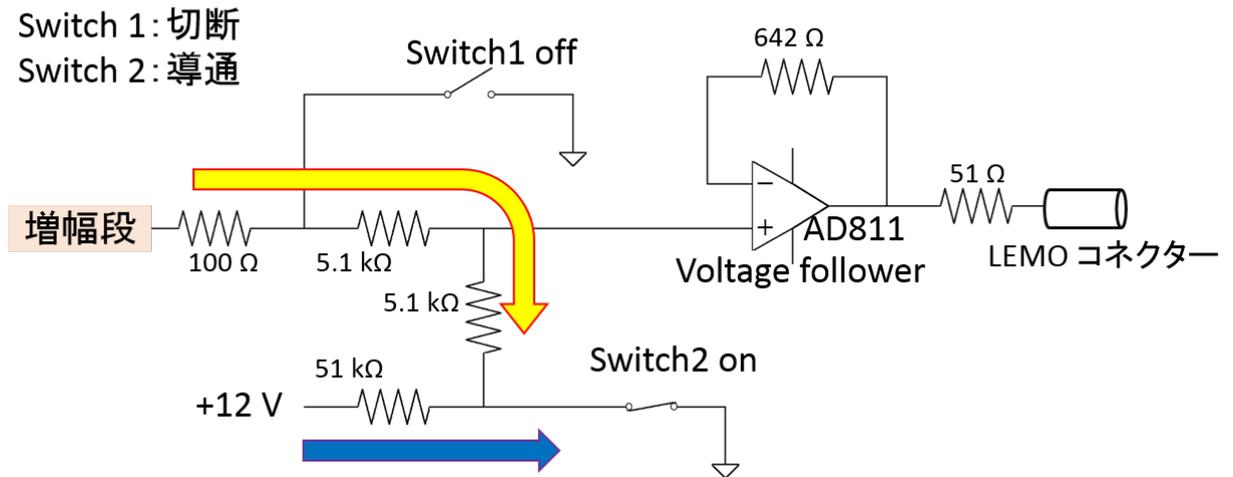
操作 1 信号ラインを GND に接続する。

操作 2 ベースラインを上げる。

という 2 つの操作を行う。操作 1 だけでは、漏れ信号が Zero Suppression の閾値を超える危険がある。そのため、操作 2 によって大きな信号に対しても元のベースラインを超えないようにする。

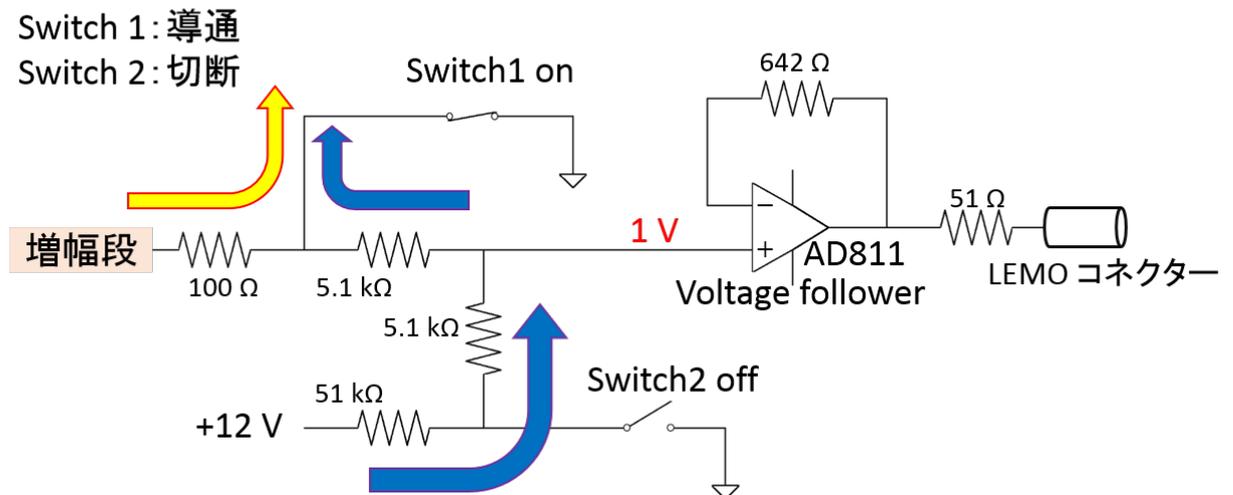
アナログスイッチを使った Veto の仕方について、周辺の回路を描いた図 2.9 を用いて解説する。Switch1 と Switch2 の On/Off の切り替えは同時に行う。通常時を DAQ mode、Veto 中を rest mode と名付けた。図中の +12 V は IC 駆動用の定圧電源である。Switch が On 時の抵抗値はカタログ値では 4 Ω とされている。増幅段はオペアンプの出力なので、rest mode 時には GND との間に抵抗を挟めないと電流が大きくなる。しかし、この抵抗値が大きすぎると DAQ モード時の Switch1 の容量と有意な時定数をもつ積分回路を形成してしまい、出力波形が変化してしまう。この抵抗については、オペアンプの出力電流と波形への影響を考えて 100 Ω に決めた。rest mode 時、定圧電源からの電流をなるべく抑えるためには大きめの抵抗によって抵抗分割する必要があるが、出力側は 51 Ω で終端したい。そこで、Voltage follower を用いることで、このスイッチ機構と出力の終端抵抗についてを切り離すことにした。また、定圧電源の抵抗分割については、抵抗値が大きすぎるとスイッチングしてからベースラインが落ち着くまでの時間が長くなるという問題が生じた。このベースラインの安定にかかる時間と電流値の抑制とを考えて合計約 60 k Ω となるように決めた。

DAQ mode



(a) DAQ mode の図。Switch1 を切断し、信号を Voltage follower の入力へ送る。また、Switch2 を導通させることで、定圧電源の電圧は GND と 51 k Ω の抵抗を挟むのみとなり、Voltage follower の入力には影響しない。

rest mode



(b) rest mode の概念図。Switch1 を導通し、増幅後の信号ラインを GND と接続する。また、Switch2 を切断することで、抵抗分割により Voltage follower の入力に 1 V 程度の定常電圧がかかる。

図 2.9: Veto スイッチの解説図。黄色い矢印は信号の流れる方向を示しており、青矢印は定圧電源からの電流を表している。

テストパルスを用いて、製作したアナログ回路の応答を調べた。積分及び PZC 回路の応答と Veto スイッチの応答について以下で解説する。なお、非反転増幅回路は設計通りの応答を示していた。

図 2.10 に積分及び PZC 回路の応答を示した。波高に対して 10% の高さからピークまでの時間が 90 ns であり、30 ns 間隔で 3 点のサンプリングが適う設計通りの応答がみられた。一方、ピークから波高の 10% まで減衰する時間が 370 ns で、PZC 回路を含めない時 880 ns だったことから、信号幅を半分以下に短くできている。

続いて、Veto スイッチの応答を図 2.11 に示す。DAQ mode から rest mode へ切り替えの際、TTL 信号が High レベルになってから 100 ns 後に回路出力のベースラインが上昇しはじめ、その 200 ns 後にはリーク信号（最大 160 MeV 程度の陽子を想定）が元のベースラインを超えなくなる。rest mode から DAQ mode へと戻す際、TTL 信号が Low レベルになってから 100 ns 後に回路出力に応答があり、ベースラインが跳ね上がっている。スイッチングによるノイズと考えられるが、正の方向であるためデータ取得時に問題にならない。TTL が Low レベルになってから 300 ns 後に元のベースラインから 5 mV 以内の範囲に落ち着き、ベースラインが完全に回復するまでには 5 μ s 程度を要する。5 mV の変化はエネルギーに換算すると 0.5 MeV 程度であり、低エネルギーの陽子の測定に影響がでるが、スイッチングタイミングを記録しベースラインを補正をすることが可能である。

以上により、プロトタイプシステムから発展させたアナログ回路の設計・製作が完了した。本章では今後、この回路を用いた読み出しシステムの評価について記述する。また、PMT のオペレーション電圧を定めることで、非反転増幅回路の増幅率を決定する。

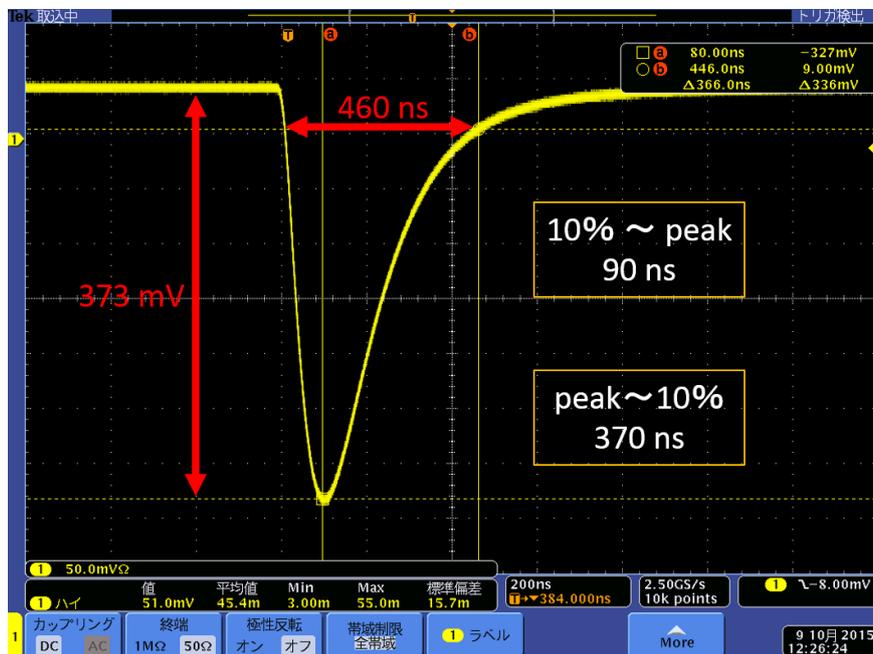


図 2.10: アナログ回路に時定数 300 ns で減衰するテストパルスに入力したときの応答。

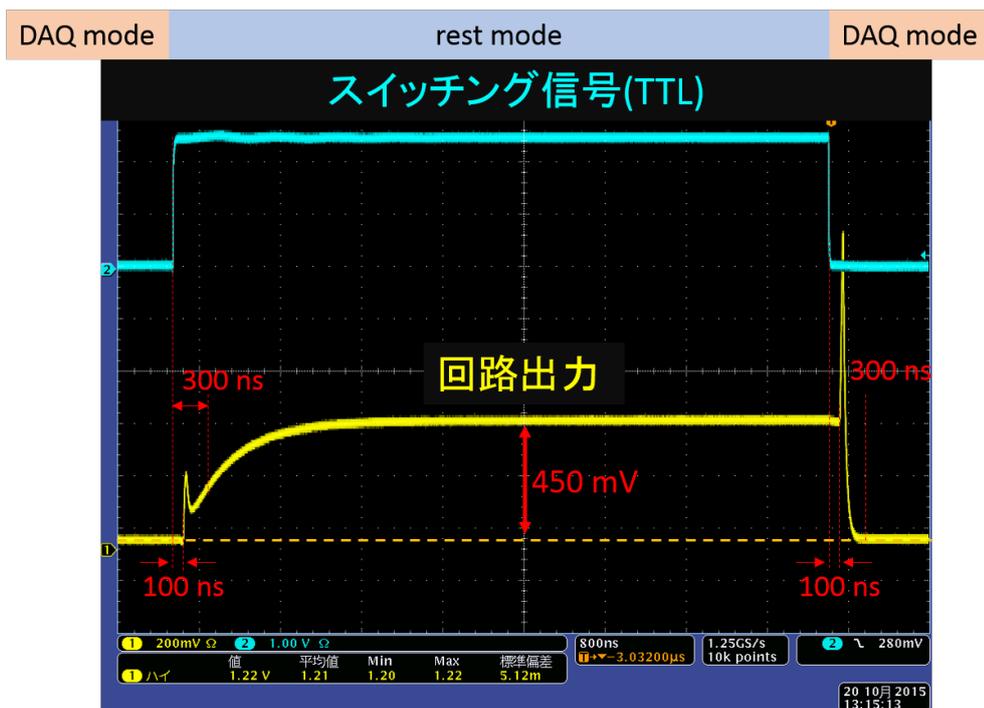


図 2.11: スwitching信号入力に対する応答。6.5 μ s の時間幅の TTL 信号を入力し、DAQ mode から rest mode へ切り替え、再び DAQ mode に戻している。

2.5 波高情報の取得

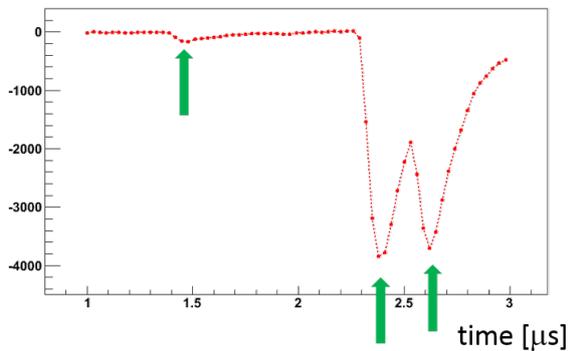
V1724 で取得した波形データから波高情報を取得するテンプレート波形によるフィッティングについて説明する。

2.5.1 テンプレート波形によるフィッティング

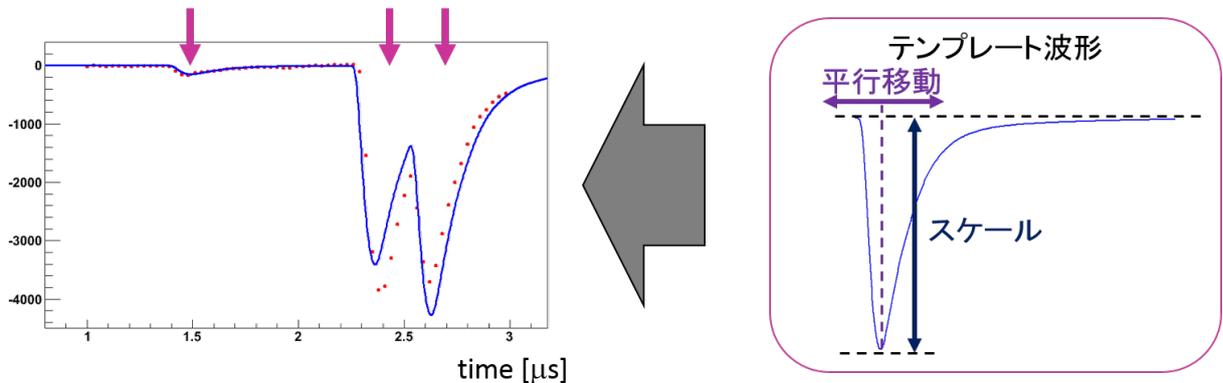
トリガータイミングの信号からエネルギー情報を取得するためには、パイルアップ信号を分離する必要がある。アナログ回路を通して整形された信号は概ね同一の波形で、高さのみが異なる信号に変換され、Flash ADC V1724 で記録される。生信号の電荷量は検出したエネルギーの情報を持つが、アナログ回路を通して整形することにより出力波形の波高がエネルギー情報を持つ。整形されたパイルアップ信号はテンプレート波形を重ね合わせた形になるため、オフライン解析でこれを分離しそれぞれの波高を求める。オフラインで行う波形解析のアルゴリズムについては第3章で詳しく説明する。信号の波形はその波高のみがエネルギー情報を持ち、ある程度以上のエネルギーについては形が変わらないと仮定する。波高対エネルギーの校正については第4章で述べる。

テンプレート波形は高さ 1 の波形であり、フィッティングパラメータはピークの位置と高さ方向のスケールである。テンプレート波形によるフィッティングの概略図を図 2.12 に示す。BGO カロリメータによるエネルギー測定について、V1724 で取得した波形データは、全てテンプレート波形によるフィッティングで得られた波高情報で議論する。

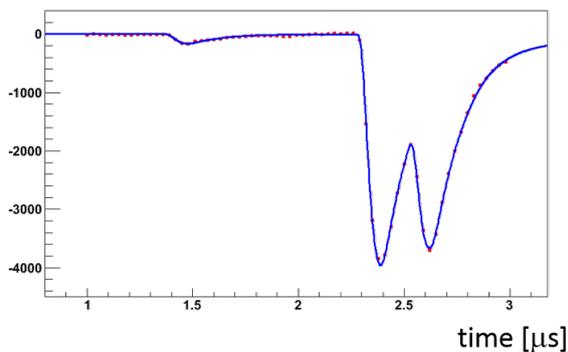
1. 波形データから信号を探す。



2. 見つけた信号の数だけテンプレート波形を重ねた関数を用意する。



3. それぞれのテンプレート波形のx軸の位置と高さスケールをパラメータにフィッティングを行う。



4. フィッティング結果から波高情報を取得する。

図 2.12: テンプレート波形によるフィッティングのチャート。取得した波形データから信号波形をサーチし、見つけた数だけテンプレート波形を重ねた関数を生成する。初期値には見つけたそれぞれの信号の x 軸の位置（時間）とおおよその波高を入力し、ROOT のフィッティングアルゴリズム (minuit) によりフィッティングを行う。このフィッティング結果から、予め知っているトリガータイミング周辺に信号が検出されたならば、その信号の波高パラメータをイベントの波高情報として使用する。

2.5.2 テンプレート波形の作成

テンプレート波形は、パイルアップのないイベントの波形を抽出して作成する。いくつかの波形データのサンプルから平均的な波形を作りたいが、波形データをただ重ねるだけでは信号波形の幅が広がってしまう。これは V1724 の特性上、10 ns 間隔でサンプリングを行うと、その時間情報に 20 ns の不定性を持つためである。このことを考慮に入れて、テンプレート波形を作成する。

まず、以下の手順でテストテンプレート波形を作成する。

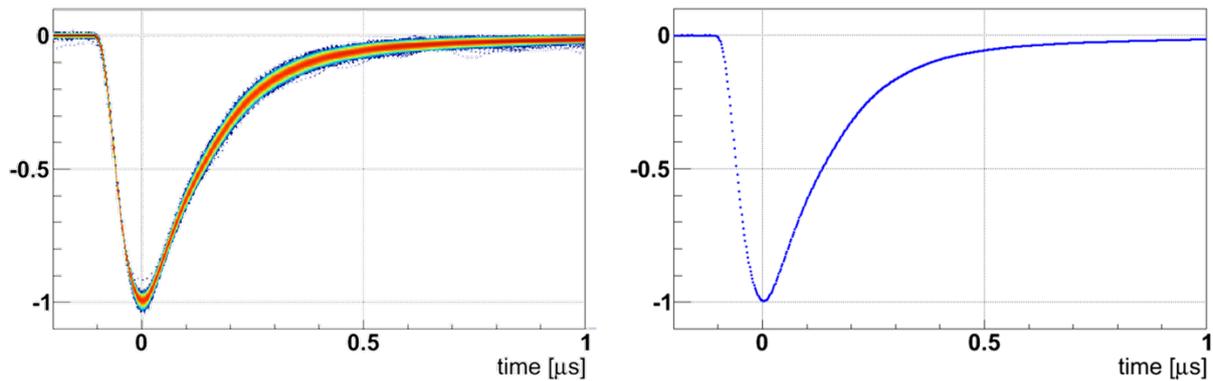
1. 信号が 1 つだけ検出されたイベントを選択する。
2. 波高が同程度のイベントを選択する。
3. ある閾値を設けて、交差した点でタイミングのあったイベントを選択する。
4. 選択したイベントの波形データを重ね合わせる。
5. 高さを 1 にスケールする。

このテストテンプレート波形は、トリガー入力の不定性を除去して重ね合わせたため、形としてはとても良くできている。しかし、10 ns 間隔でサンプリングしているタイミングのあっている波形を重ね合わせただけなので、点と点の間の補間ができない。これを補間し、V1724 のサンプリングよりも細かい間隔でテンプレート波形を決定するために、テストテンプレート波形の元となった波形データについて以下の処理を行う。

1. 信号が 1 つだけ検出されたイベントを選択する。
2. テストテンプレート波形によるフィッティングを行う。
3. フィッティング結果の波高から、波高を 1 にスケールする。
4. フィッティング結果のピーク位置から、時間情報を補正して二次元ヒストグラムに詰める。(図 2.13(a) 参照)
5. 作成した二次元ヒストグラムを時間についてスライスし、それぞれの時間での波高の平均を求める。(図 2.13(b) 参照)
6. 上の結果をプロットする。

2.6 線源を用いたエネルギー分解能の評価

製作したアナログ回路を含む読み出しシステムを評価するために、 ^{137}Cs 線源からの γ 線を用いてエネルギー分解能を評価した。信号の処理としては、PMT からの信号をアナログ回路の入力に接続し、出力を Flash ADC V1724 の入力に繋いだ。また、AC カップリング出力を discriminator に接続してトリガーを生成した。Flash ADC で取得した波形データは、宇宙線の波形データから作成したテンプレート波形によりフィッティングを行い波高情報に変換した。取得した波高分布を図 2.14 に示す。662 keV の γ 線に対応するピークが見受けられる。取得したデータには、662 keV の γ 線とコンプトン散乱によるバックグラウンドのイベントが混ざっているために、ピークの左側に構造があると考えられる。このバックグラウンドの形を二次関数で仮定し、二次関数とガウス関数でフィッティングを行った。エネルギー分解能は以



(a) 時間情報を補正し高さを 1 にスケールした信号波形を詰めた二次元ヒストグラム。\$x\$ 軸についてスラッシュし、\$y\$ 軸に射影した分布についてガウス関数でフィッティングを行い、その中心値をとった。

図 2.13: テンプレート波形の作成。

下のようにバックグラウンドに依らないガウス関数のパラメータで定義する。

$$\text{エネルギー分解能} = \sigma / \text{Mean} \quad (2.1)$$

PMT の印加電圧を定格の 900 V にして測定したエネルギー分解能は、 $10.2 \pm 0.1 \%$ であった。一方で、プロトタイプシステムの評価実験の結果から、700 V 以下での動作を目指しているため、印加電圧 700 V についても測定した結果 $10.5 \pm 0.1 \%$ であった。誤差は、フィッティングの誤差からくる統計誤差である。印加電圧を下げると僅かながら分解能が悪化するという結果であるが、これは γ 線の信号と回路由来のノイズの比 (S/N) が悪化するためだと考えられる。

以上により得られた 662 keV の γ 線のエネルギー分解能から 80 MeV 陽子に対するエネルギー分解能を見積もる。PMT で検出される光子数 N の揺らぎがポアソン分布に従うと考えると、エネルギー分解能は $1/\sqrt{N}$ に比例する。また、BGO 結晶に入射した荷電粒子の種類に依らず、結晶におけるエネルギー損失とシチレーション光の発光量が比例し、アナログ回路を通した後の波高もこれに比例していると仮定する。すると、陽子の 80 MeV のエネルギー損失に対するエネルギー分解能は、662 keV の γ 線にエネルギー分解能から次のように見積もられる。

$$\text{エネルギー分解能 (80 MeV proton)} = \text{エネルギー分解能 (662 keV } \gamma\text{ray)} \times \sqrt{\frac{0.662}{80}} \quad (2.2)$$

式 2.2 から見積もられたエネルギー分解能は、PMT の印加電圧が 900 V のとき 0.93% (σ)、700 V のとき 0.95% (σ) である。要求分解能は 3% (σ) であるため、十分に要求を満たすと期待される。この見積もりに使用した仮定がどの程度正しいかは現段階ではわからないため、あくまで参考値として扱う必要があるが、実際にはエネルギーの決まった陽子ビームを直接照射することで、80 MeV 陽子に対するエネルギー分解能を測定するしかない。陽子ビーム照射実験については節 2.8 で述べるが、簡単に行える測定ではないため、実験室で行える測定からの見積もりは重要である。

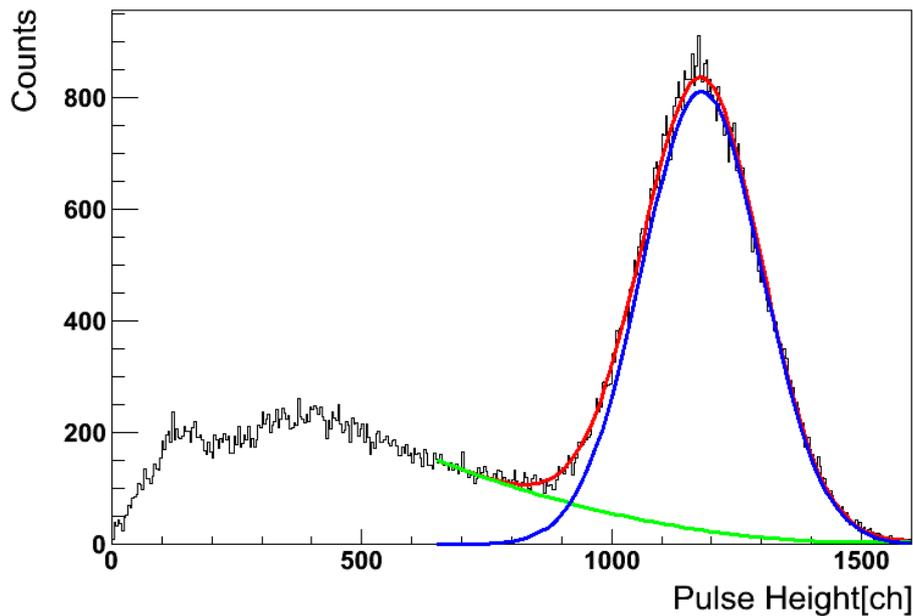


図 2.14: 開発した読み出しシステムにより波高情報を取得した、 ^{137}Cs 線源からの γ 線の分布。横軸はテンプレートフィッティングにより得た波高で、縦軸はカウント数である。二次関数（緑線）とガウス関数（青線）を重ね合わせた関数（赤線）フィッティングした。

2.7 LED を用いたレート耐性の見積もり

プロトタイプシステムの評価実験により、PMT の印加電圧は 700 V でも要求性能を満たしているが、高計数率下での gain 降下も生じていることがわかっている。PMT の印加電圧をどこまで下げれば gain 降下の懸念がなくなるのかは、陽子ビームを照射する実験をする前にある程度の予測を立てることができる。

ランダムに照射される陽子ビームに晒される BGO 結晶が放つシンチレーション光と同じ環境を実験室で作るのは難しいので、ある程度似た環境を LED を用いて作ることにした。まず、LED 端子にパルス電圧を入力して発光させたとき、BGO 結晶のシンチレーション光のように 300 ns 時定数で特徴づけられるような発光をさせることはせず、トータルの発光量と発光している時間を合わせることにした。例えば、80 MeV 陽子が入射した時に PMT で検出されるトータルの光量は、PMT 出力の電圧の積分値に対応する。LED の発光量と PMT との距離を調節して、PMT で検出されるこの積分値に合わせることで、80 MeV 相当の発光イベントを起こす。一方で、PMT の gain 降下が起こる環境はパイルアップが生じるほどの高計数率下である。LED1 つでパイルアップ環境を作り出すのは困難で、パイルアップしていなくても発光間隔が短すぎると常に同じ発光量を保証することはできない。そこで、LED をもう 1 つ用意して高レートでランダムに発光させることにし、その環境下においた低レートで一定の発光量で光る LED の発光イベントだけを調べることにした。実験セットアップ図を図 2.15 に示す。

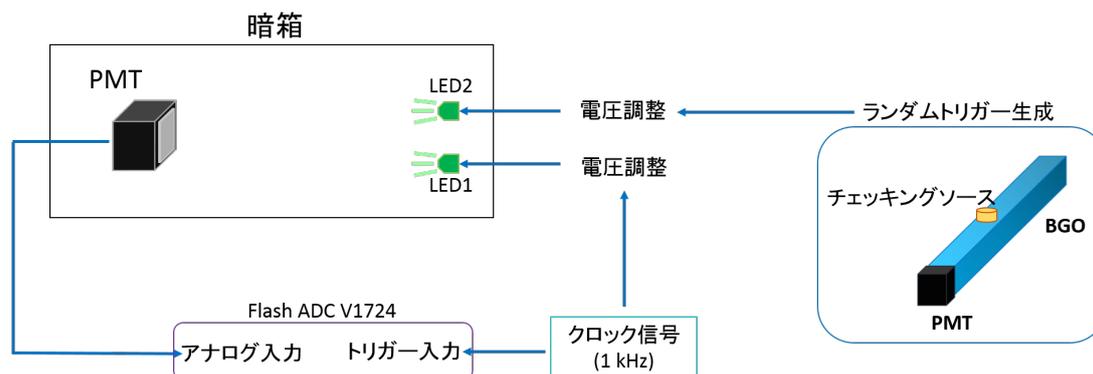


図 2.15: LED を用いた PMT のレート耐性試験のセットアップ図。暗箱の中に PMT を設置し、少し離れたところに LED を 2 つ置いた。LED1 は 1 kHz のクロックトリガーのタイミングで 80 MeV 相当の光量が PMT で検出される程度に発光する。このクロックトリガーを V1724 に入力し、このタイミングの PMT 出力を記録する。LED2 は、ランダムトリガーにより発光する。その発光量は PMT で検出される光量にして 50 MeV 相当か 100 MeV 相当に調整可能である。ランダムトリガーは、BGO 結晶のそばにチェックングソースを置き、PMT の出力に低い電圧で閾値を設けて生成した。LED2 の発光レートはチェックングソースの距離で調節し、このレートを擬似的に BGO が置かれるシングルレート環境とみなす。

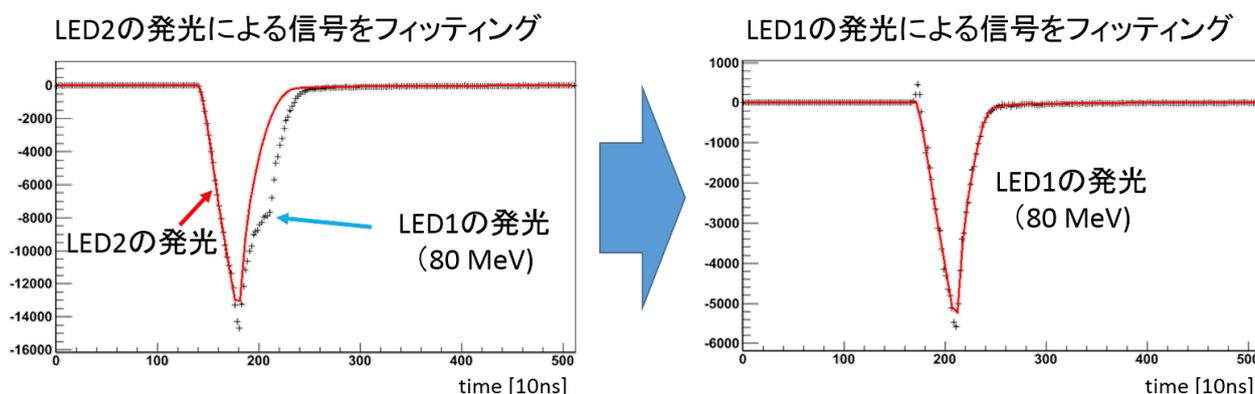


図 2.16: LED 信号のフィッティングの様子。波高情報が欲しいのは LED1 の発光による信号の方で LED2 の発光によるパイルアップイベントは分離しなくてはならない。トリガーは LED1 の発光タイミングで入力しているのもので、それより前に検出された信号をプログラムで探し、LED2 のテンプレート波形でフィッティングし、元の波形データから LED2 の発光による信号分を差し引くことで LED1 の発光による信号だけを残す。LED1 の発光による信号は LED1 のテンプレート波形を用いてフィッティングし、波高情報を得る。これにより、パイルアップの有無にかかわらず LED1 の発光量だけを監視することができる。

LED の発光イベントは V1724 によって波形を取得し、テンプレート波形によるフィッティングで波高情報に直した。入力している電圧が違うことから、2 つの LED の発光の仕方は若干異なる。波形解析を容易にするために、LED1 の発光直前 300 ns 前から直後 4 μ s は LED2 の発光を veto した。図 2.16 にテンプレート波形によるフィッティングの様子を示す。

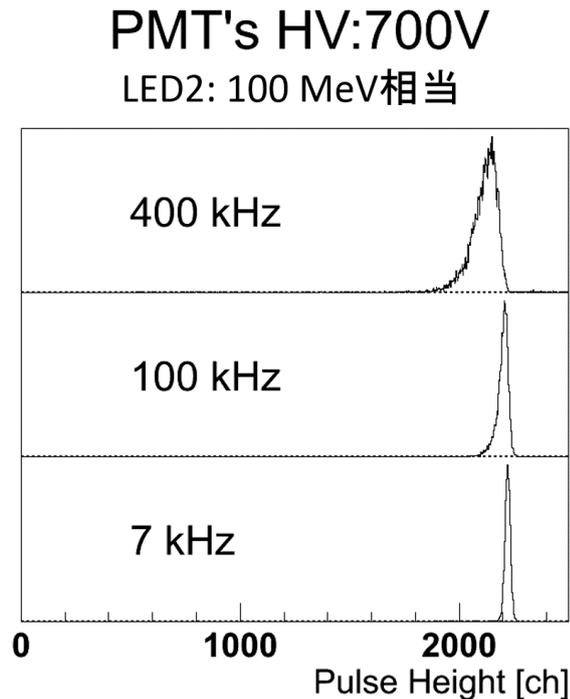


図 2.17: LED を用いて測定した PMT の gain 降下の様子。LED1 の発光による信号の波高分布である。PMT の印加電圧は 700 V で、LED2 の発光量は 100 MeV 相当に設定している。図中に示した数字は LED2 の発光レートであり、高計数で光るほど LED1 の波高分布の形は低い方へ尾を引く。

LED2 の発光レートを変更して、BGO のシングルレートを擬似的に再現することで、その環境下での LED1 の発光量の安定性を以て gain 降下の有無を判断する。波高分布のピークを非対称ガウス関数でフィッティングし、その非対称の σ を誤差棒として示している。図 2.17 に示すように、PMT が gain 降下を起こすと、通常通り増幅しきれなかった信号が現れ、波高分布は低い方に尾を引く。よって、gain 降下は非対称な誤差棒により確認できる。図 2.18 にレート対 gain の測定結果を示す。高レートになるほど中心値が下がる傾向は、定常的な gain 降下を表している。

LED の発光量の設定は、実際にはマージンをとって書いてある相当量よりも大きくしてある。基本的には、50 MeV 相当の光量に対して高計数率下で gain 降下が抑制されていれば十分であり、それは PMT の電圧は 650 V 以下で達成できると見込まれる。一方で、100 MeV 相当の光量に対しては 650 V の動作では 400 kHz 周辺で若干 gain 降下を起こしているが、600 V で動作させた時はとてもよく安定している。以上のことから、陽子ビーム照射テストを行うにあたり、PMT の印加電圧を 600 V より下げる必要はないと判断する。なお、節 2.4.3 で示したテスト機の増幅率は 3 パターンあり、これは PMT の印加電圧が 600、650、700 V のときに適した増幅率となっている。

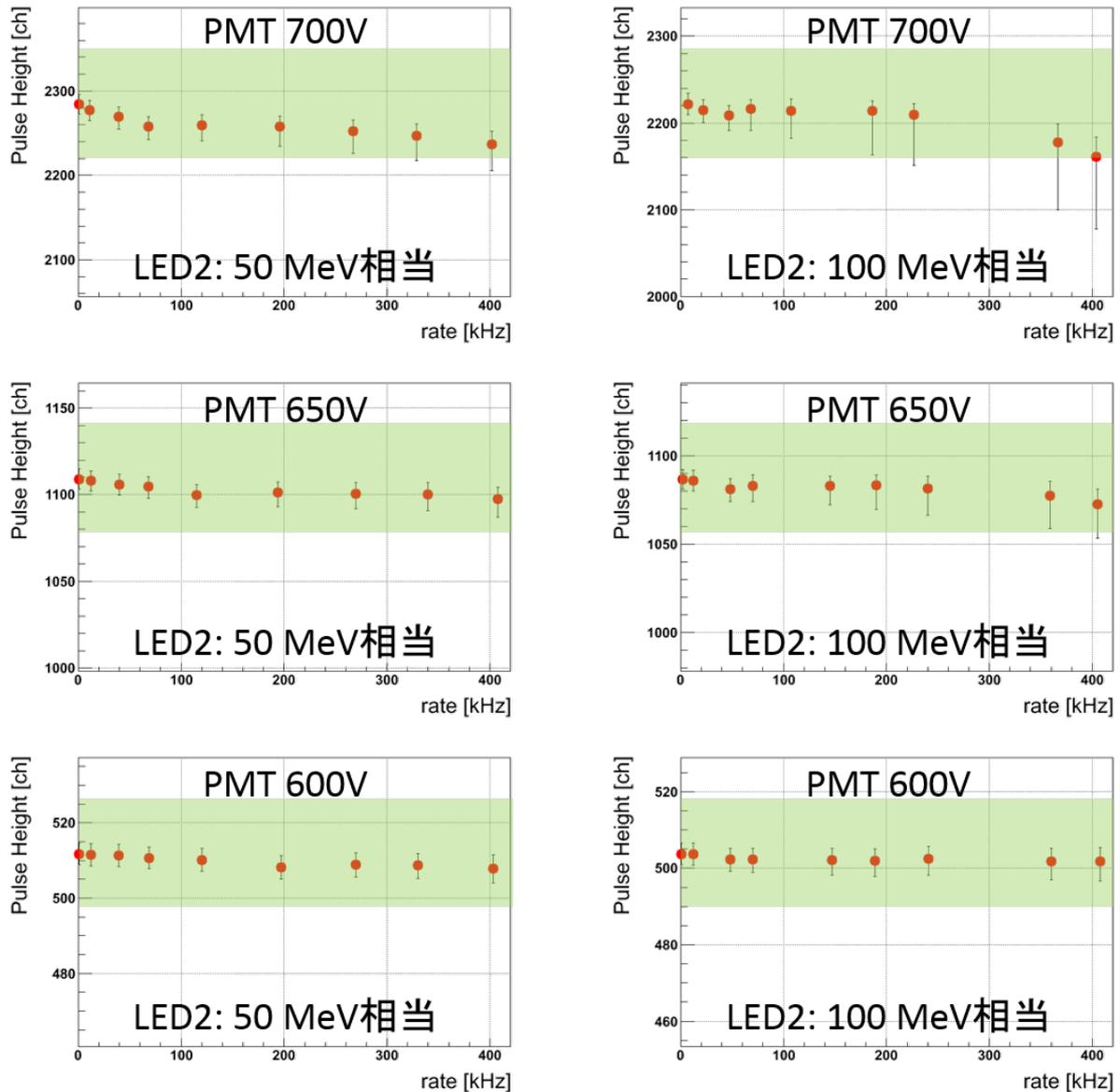


図 2.18: LED を用いて見積もった PMT の gain 降下。テンプレートフィッティングを用いて得られた波高の分布を左右非対称なガウス関数でフィッティングを行い、中心値を赤い点、ガウス関数の σ を誤差棒で表している。緑の領域は各グラフのコンディションの 1 kHz の点から $\pm 3\%$ の領域を覆ったものである。

2.8 陽子ビームを用いた評価実験

プロトタイプシステムと同様に読み出しシステムの評価をするために、平成 27 年 12 月に東北大サイクロトロン RI センターにて 77.8 MeV 陽子ビームを BGO 結晶に直接照射する実験を行った。前述のプロトタイプシステムの評価実験の結果から、PMT の印加電圧を 700 V 以下に下げ、高計数率下で PMT の gain 降下を抑制する必要があるとわかった。今回の測定では、この gain 降下を十分抑制したうえで、要求されるエネルギー分解能を達成するかを調べた。

2.8.1 セットアップとコンディション

検出器の配置は図 2.2 と同様である。BGO カロリーメータをビーム軸から退避し、後方のプラスチックシンチレータでビームレートを測定したのちに、リモートで BGO カロリーメータをビーム軸へ移動し、BGO 結晶に陽子ビームを直接照射する。ビームの照射位置は照射面の中央である。この実験では、製作したアナログ回路を含む読み出しシステムの評価と、PMT のオペレーション電圧の最適化を目的としている。実験のコンディションは以下の通りである。

ビームレート 1, 30, 50, 110, 150, 200, 260, 350, 450, 550, 700 kHz

PMT の印加電圧 600, 630, 650, 700 V

スイッチの動作確認 ビームレート 700 kHz、PMT の印加電圧 600 V

開発機のアナログ回路に PMT 630 V の gain に最適化させた増幅率は用意していなかったため、650 V 用の増幅率で対応した。

2.8.2 エネルギー分解能

読み出しシステムとしての評価として、低計数率下でのエネルギー分解能を評価した。パイルアップのない波形データから 77.8 MeV 陽子 (静止) のテンプレート波形を作成し、フィッティングによる波形解析を行った。PMT の印加電圧が 700 V、ビームレートが 1.5 kHz のコンディションにおいて得られた波高分布を図 2.19 に示す。

この波高分布から得られたエネルギー分解能は、1.0% (σ) であった。したがって、パイルアップがない環境下で PMT を 700 V で駆動した時、製作したアナログ回路を含む読み出しシステムの 77.8 MeV 陽子に対するエネルギー分解能は 1.0% (σ) である。節 2.6 で見積もったエネルギー分解能は 0.95% (σ) であり、今回の実験の結果は、実験室で立てた予想と概ね一致した。この読み出しシステムは 77.8 MeV 陽子に対しても十分にエネルギー分解能の要求を満たすことがわかった。

図 2.19 の 2 つの赤い点線で囲われた領域はピークから $\pm 5\sigma$ の領域を表しており、この領域に含まれるカウント数は全体の 93.5% である。ピークに含まれないイベントはビームエネルギーを BGO 結晶で全てを損失しなかったイベントと捉えることができ、6.5% に及ぶ。先行研究によると、これらのイベントはビーム陽子が BGO 結晶中の原子核と反応し、中性子が

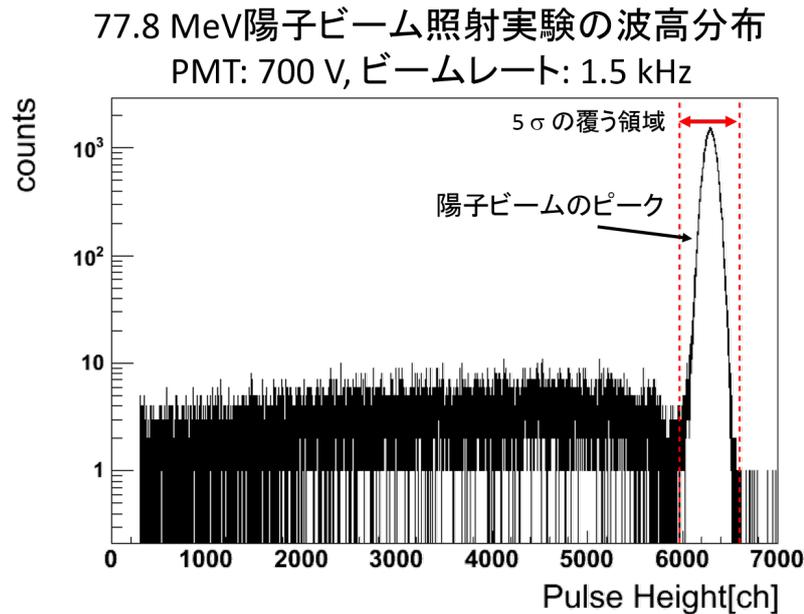


図 2.19: 77.8 MeV 陽子を BGO カロリメータに直接照射し、自作したアナログ回路を通し Flash ADC で取得した波形データからテンプレート波形によるフィッティングによって得られた波高分布。ここでは波形解析の閾値として 300 ch 以上を要求している。77.8 MeV の陽子が BGO 結晶中で全エネルギーを損失したとみられるピークが 6300 ch 付近に見られる。このピークをガウス関数でフィッティングし、 $\pm 5\sigma$ が覆う領域とその他の領域で分けたところ、カウント数の比率はピークから $\pm 5\sigma$ の領域が 93.5%、その他の領域が 6.5% であった。

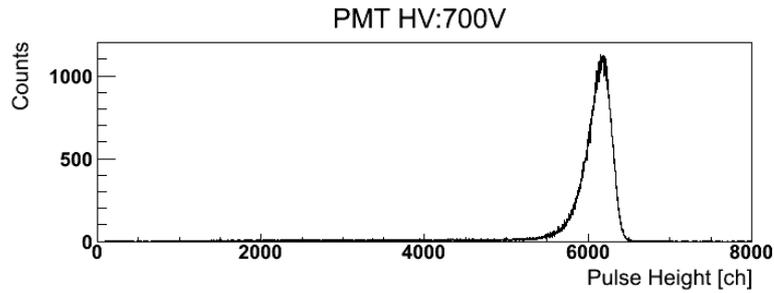
ビームのエネルギーの一部をもって結晶外へ出るために生じるものと理解されており、シミュレーションによるとそれらの割合は 6.3% である。今回の測定では、低エネルギー領域で僅かに、トリガー生成及び波形解析のための閾値によって切り捨てられているイベントがあるが、概ねこのシミュレーション値と一致しており、確からしい。

同じビームレートについて、PMT の印加電圧を 650 V、600 V とした時のエネルギー分解能も 1.0% (σ) という結果が得られた。以上により、低計数率下に置いて、PMT の印加電圧 600 から 700 V の間でエネルギー分解能に差は見受けられず、要求を十分に達成する結果となった。

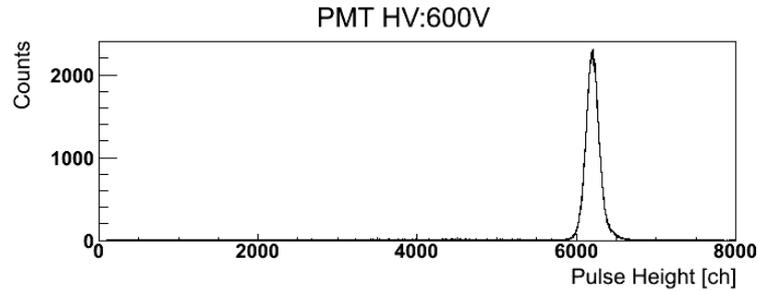
2.8.3 高計数率下における安定性

低計数率下におけるエネルギー分解能が十分に要求を満たすことがわかったので、次に高計数率下における gain 降下について調べた。ビームレート 700 kHz で BGO 結晶に直接照射したときの波形データについて、テンプレート波形によるフィッティングで得られた波高分布を図 2.20 に示す。PMT の印加電圧が 700 V のときと 600 V の時の波高分布の形から、高計数率下で生じる gain 降下は PMT の電圧を下げることで抑制できることがわかる。

波高分布のピークの太さと歪み具合から PMT の gain 降下について議論する。図 2.20(a) に示すような左右非対称のピークの特徴を議論するためにガウス関数でフィッティングするのは不適當である。したがって、ピークの太さの指標として半値全幅を求める。また、正規分布



(a) PMT の印加電圧 700 V、ビームレート 700 kHz のときの波高分布。



(b) PMT の印加電圧 600 V、ビームレート 700 kHz のときの波高分布。

図 2.20: ビームレート 700 kHz における波高分布。PMT の印加電圧が 700 V と 600 V のヒストグラムを見比べると、700 V のときは波高の低い方に尾を引いており、gain 降下によるものと考えられる。一方でこの傾向は 600 V のときほとんど見受けられない。

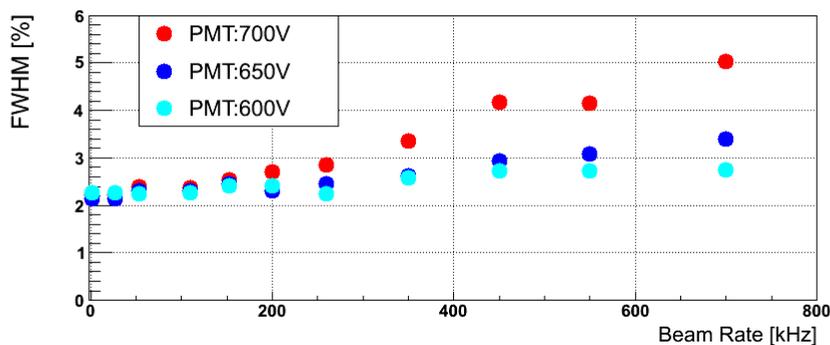
からの歪み具合として、歪度を用いる。歪度は、データ個数 n 、 i 番目のデータ x_i 、データ全体の平均値 \bar{x} 、標準偏差 σ を用いて次の式 2.3 で表される。

$$\text{歪度} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 / \sigma^3 \quad (2.3)$$

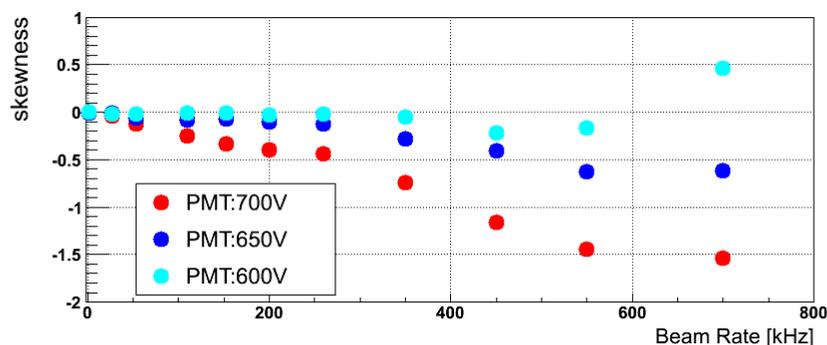
分布が左右対象であるとき歪度は 0 となり、分布が左側に尾を引く形をしていると歪度は負の値をとり、右側に尾を引く形だと歪度は正の値を持つ。したがって、gain 降下により左側に尾を引く形の分布は負の歪度を示すことが期待される。

図 2.19 に示した通り、波高分布はビームレートに関係なくピーク以外の領域に構造を持つ。これらを含めて歪度を計算した場合、平均値から離れた値によって歪度が大きくなる。ピークの見え目よりもこれらピーク外の構造と平均値の差が歪度に大きく寄与し、この影響を取り除かなければピークの形の議論ができない。そこで、この構造はピーク中心に比べて 1% にも満たないことが見て取れることから、波高分布のヒストグラムについて、ピークの 1% 以下の度数を持つ Bin は無視して歪度を計算することとした。各コンディションにおける波高分布の半値全幅と歪度の分布を図 2.21 に示す。

波高分布の半値全幅はビームレートが高くなるほど広がる傾向があるが、これは PMT の印加電圧を下げるほど抑えられ、BGO カロリメータが晒されると予想される 500 kHz 以下では 650 V と 600 V について大きな差が見受けられない。波高分布の歪度については、ビームレートが高いほど歪度は大きな負の値をとり、この傾向も印加電圧を下げるほど抑えられてい



(a) 波高分布の半値全幅のビームレート依存性。



(b) 波高分布の歪度のビームレート依存性。

図 2.21: PMT の gain 降下のビームレート依存性の評価。波高分布の半値全幅と歪度から低レート時の正規分布の差を評価する。ビームレートが上がると、波高分布の幅が広がり歪度が負の方向に大きくなる傾向がみられる。この傾向は PMT の印加電圧が大きいほど顕著である。また、ビームレートを 700 kHz まで上げると、幅が狭い 600 V の場合では歪度が正の値を示している。

る。歪度においても 500 kHz 以下で、650 V と 600 V については大きな差異は見られない。

一方で、半値全幅の評価だけでは PMT の gain の安定性を保証するには不十分である。BGO カロリメータが高計数率下に晒されているとき、定常的に gain 降下を起こしている状態である可能性があるためだ。定常的に gain が安定していることを確認するために、各ビームレートに対する波高分布の中心値のグラフを図 2.22 に示す。PMT の印加電圧が 700 V のとき、ビームレートが高いほどピークの中心値が下がっているのが確認できる。この傾向は 650 V においても僅かに見受けられ、630 V と 600 V では見られない。以上より、630 V 以下で PMT を動作させることで十分な gain 安定性を保証できることがわかった。

gain が安定している PMT の印加電圧 600 V と 630 V のときのエネルギー分解能を表 2.3 に示す。高計数率下でも安定したエネルギー分解能を保っており、想定する最大レートより少し高い 450 kHz の環境下で 1.3% のエネルギー分解能を達成した。

PMT の gain 降下以外にビームレートが高いときに分解能を悪化させる要因を考察する。高計数率下では、波形解析においてパイルアップイベントの間隔が短いと分離できず、直前の信号のテイルに重なっている分、大きい信号と認識してしまうことが起こる。そのため、図

表 2.3: 低電圧駆動時のエネルギー分解能 (σ) [%]

Beam Rate [kHz]	PMT:630 V	PMT:600 V
50	1.0	1.0
110	1.1	1.1
350	1.3	1.1
450	1.3	1.3
550	1.4	1.3
700	1.5	1.4

2.20(b) のように、PMT の gain 降下が十分に抑制されていると波高分布のピークは高い方に僅かにテイルを引く傾向が見えると考えられる。また、パイルアップイベントの分離ができた場合でも、直前の信号のテイル部分のふらつきが、後方の信号の波高認識に影響してくる。そのため、PMT の gain 降下が抑制されている場合でも、ビームレートが高いときにエネルギー分解能に若干の悪化が見られると考えられる。波形解析の効率等については第3章で述べる。

以上により、ビームレートを変えて陽子ビームを BGO カロリメータに照射した実験から、PMT の gain 降下を十分抑制できる印加電圧を 630 V 以下と定めた。このときの 450 kHz の環境下におけるエネルギー分解能は 1.3% (σ) であり、高計数率下においても要求 (3%) を十分に満たす結果が得られた。

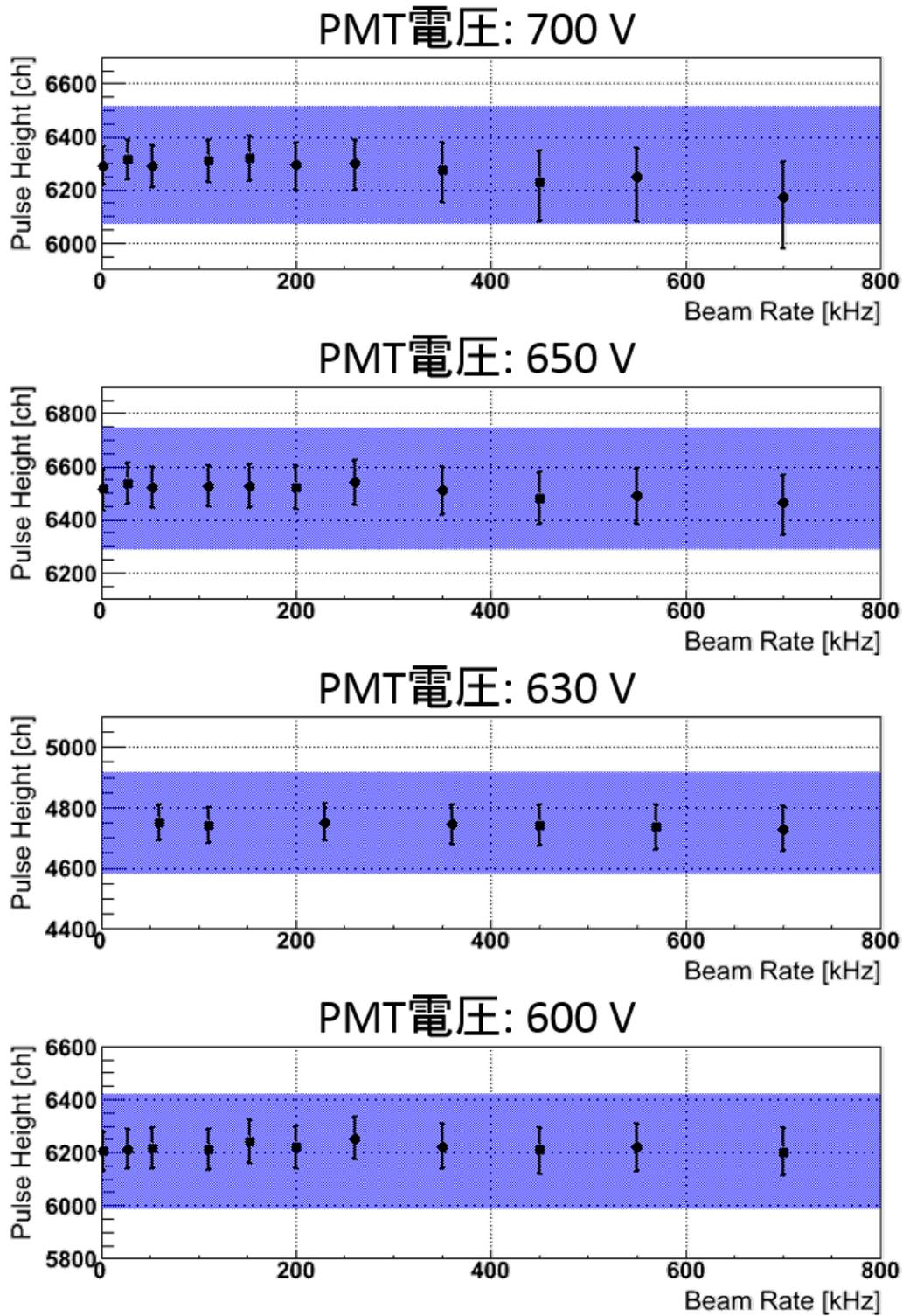


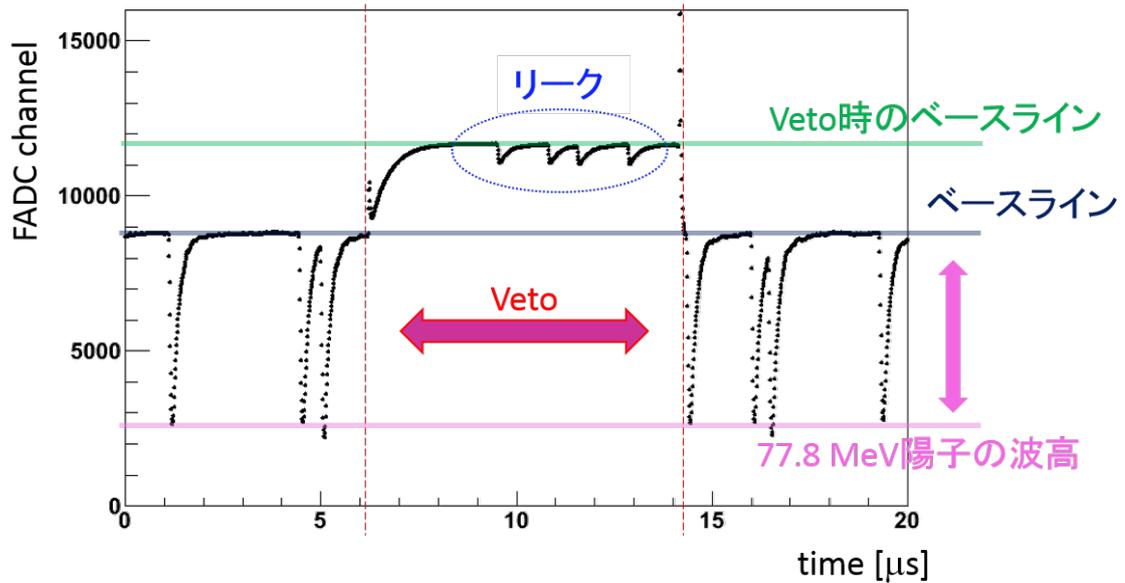
図 2.22: 各 PMT 印加電圧のときの gain の安定性。横軸はビームレート、縦軸は波高である。黒点はテンプレート波形フィッティングにより得られた波高分布のピーク値であり、誤差棒はここでは半値幅を表している。青い領域は要求分解能である分解能 3% (σ) のガウス関数の半値幅を表している。したがって、定常的な gain 降下の影響も考慮し、誤差棒を含めて青い領域に収まることを要求する。この要求には 650 V 以下で動作させることで 700 kHz のレートまで達成できている。

2.8.4 Veto スイッチの動作確認

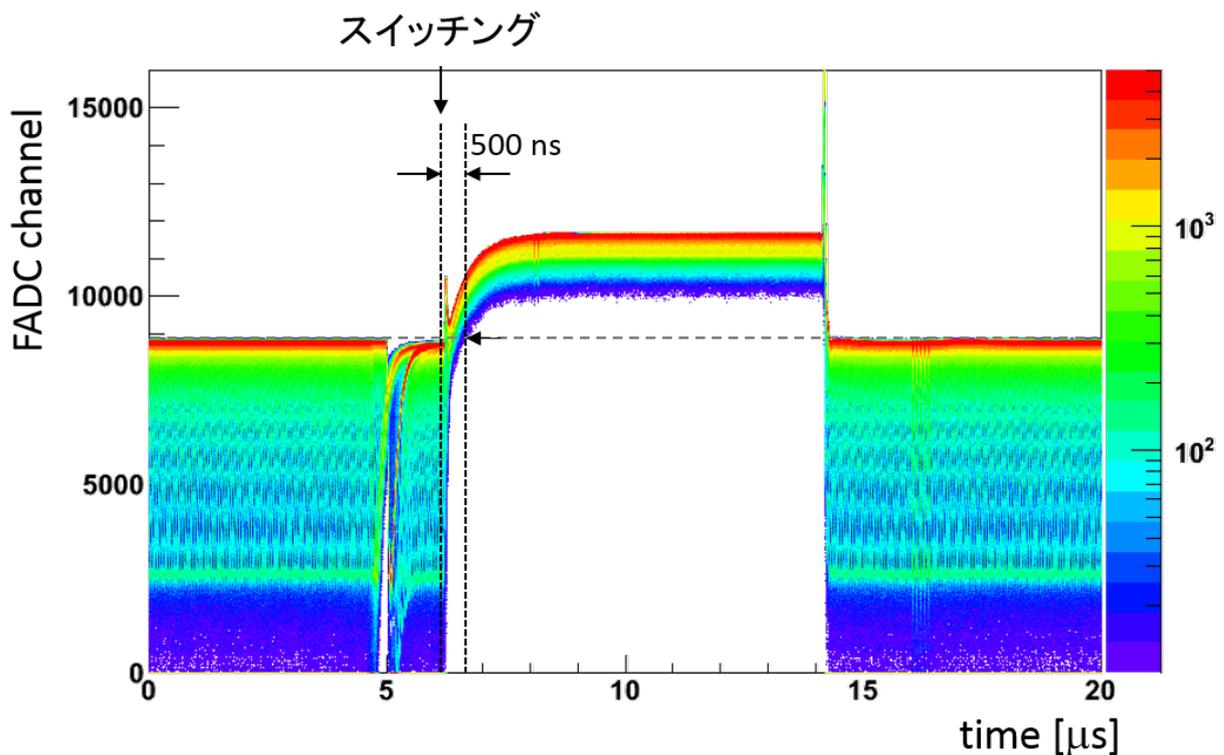
PMT の印加電圧が 600 V にして、77.8 MeV の陽子ビームを 700 kHz で BGO カロリメータ直接照射している最中に、アナログ回路に設置した Veto スイッチのテストを行った。照射中に行ったのは、Veto 中の漏れ信号の大きさを確認するためである。トリガー信号を受け付けてから $1 \mu\text{s}$ 後に約 $8 \mu\text{s}$ 幅の Veto 信号をアナログ回路に入力した。このときの回路の応答を V1724 で記録したグラフを図 2.23 に示す。ビーム照射中にスムーズに rest mode へ切り替えられ、リーク信号はベースラインを超えないことから Zero Suppression によりデータ点の削減ができることを確認した。

設計時の思想では BGO カロリメータで検出される最大のエネルギーが 160 MeV 程度の波高を想定し、rest mode への切り替えから 300 ns 後には十分にベースラインが上がると思っていた。しかし、実際には他の信号とパイルアップを起こす可能性があるため、原理的には電圧のピークは非反転増幅回路の飽和電圧まで大きくなりえる。一方で、陽子ビームは 50 ns 周期のバンチ構造を持っており、同じバンチで輸送された複数の陽子が BGO カロリメータで検出されると、分離不可能なパイルアップ信号となる。PMT の線形性を仮定すると、ほぼ同時に全てのエネルギーを BGO 結晶内で損失した陽子が N 個あった場合、その波高は 1 つの陽子の波高の N 倍になる。アナログ回路の仕様上、4 個以上の陽子が同時に入ると増幅率が飽和するはずで、700 kHz のビームレートコンディションにおいて図 2.23(b) のリーク中の波高から稀に生じているとみられる。したがってこの図から、増幅率が飽和するほどの大きな信号であっても、rest mode への切り替えから 500 ns 後には元のベースラインを超えなくなることがわかった。

以上により、ビーム照射中にアナログ回路の Veto スイッチのテストを行い動作を確認した結果、想定通りの性能を有する結果が得られた。



(a) V1724 で取得した Veto スイッチのテストの波形。77.8 MeV 陽子が rest mode 中にリーク信号として検出されているのが確認できる。



(b) V1724 で取得した Veto スイッチのテスト波形 10 万イベントを二次元ヒストグラムに詰めたもの。信号のパイルアップが多く生じる環境下にあっても、rest mode 中に元のベースラインを超えることはない。また、rest mode への切り替えの際、ベースラインが上昇しきっていない時に信号が検出されると元のベースラインを超えることがあるが、切り替えから 500 ns 後には全く超えなくなる。

図 2.23: ビーム照射中に行った Veto スイッチの動作確認。横軸は時間、縦軸は Flash ADC V1724 の ADC チャンネルを表している。V1724 のサンプリング間隔は 10 ns である。

2.8.5 波形取得時間

前節では、Veto スイッチの挙動を確認した。Veto スイッチと V1724 の Zero Suppression 機能と組み合わせることにより、データ取得を行う時間幅を自由に設定できる。この節では、データ取得を行う時間幅を決定する。

図 2.10 に示した通り、アナログ回路を通した信号の幅は 500 ns 弱であり、テンプレート波形によるフィッティングで波高情報を得るには、この 500 ns の範囲を取得すれば十分である。一方で、波高情報を知りたい信号より前に別の信号が検出されていた場合、双方の信号について同時にテンプレート波形によるフィッティングをすることで、別の信号による波高情報への影響を排除したい。このパイルアップ事象の間隔が短いと、波形解析においてどうしても分離出来ないイベントとなるが、パイルアップ事象の間隔がある程度長く、波形解析で分離できる状況においては、調べたい信号の波高情報を正確に取得したい。そのために、調べたい信号以前において、どれだけの時間の波形情報が必要かを調べる。

十分な精度の波形解析に必要なタイムゲートの決定のために、波形データを解析する際、指定した時間範囲外のデータを無視して波形解析を行った。77.8 MeV 陽子ビームを直接照射した波形データは、1 イベント 5.12 μs のタイムゲートで、トリガータイミングはほぼ中央に設定していた。したがって、トリガータイミングの前方は 2.5 μs 間取得している。タイムゲートは、トリガータイミングの後方は 500 ns 後までを指定し、前方を 0.5-2.5 μs の間で変化させた。同じ波形データについてタイムゲートのみを変更して波形解析を行うことで、時間幅と解析精度の関係を求める。波形解析の精度の指標として、波形解析によって得られたトリガータイミングの信号の波高が、77.8 MeV のピークに対応するイベント数を比べる。比較対象として、最大の時間幅に設定した 3 μs 間の場合を基準にするため、3 μs 間の波形データをから得られた波高分布のピークをガウス関数でフィッティングし、 $\pm 3\sigma$ で覆う範囲を 77.8 MeV ピークに対応する範囲とした。ビームレート 50 kHz、PMT の印加電圧 600 V のコンディションについて、この範囲に含まれるイベント数を各解析範囲について調べ、3 μs の場合のイベント数で割った値で評価した結果を図 2.24 に示す。横軸は、トリガータイミング後方の 500 ns を含むタイムゲートの値で、縦軸は 77.8 MeV 陽子として認識された相対的な数である。

図 2.24 から、タイムゲートが狭いほどテンプレート波形によるフィッティングによって取得した波高情報の精度が落ちていることがわかる。これは、タイムゲートより前に検出された信号を分離できないために生じるものと考えられる。タイムゲートを 1.7 μs 以上に広くとったときは、3 μs のときとの比較で 99% 以上の安定した精度を示している。この結果から図 2.25 に示すように、少々のマージンをとって、2 μs のタイムゲートを設けることに決定した。タイムゲートより以前に検出された信号は、トリガータイミングから 1.5 μs 以上離れている。77.8 MeV 陽子の波形データから作ったテンプレート波形は、1.5 μs 後にはピークの 0.5% まで減衰しているため、トリガータイミングに有意な影響は及ぼさないと考えらえる。

なお、波形解析については第 3 章にてアルゴリズムを解説する。

V1724 のサンプリング間隔は 30 ns であるため、1 イベントにつき 33 word (66 sample) のデータ取得によって約 2 μs のタイムゲートを実現し、十分な精度で波高情報の取得が可能だと期待される。

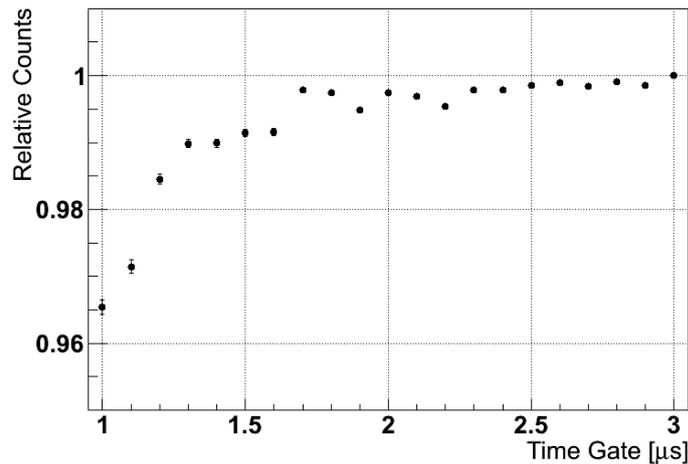


図 2.24: 波形解析のタイムゲートと解析精度の関係。横軸は波形解析のタイムゲートで、縦軸は波形解析のタイムゲートを $3 \mu\text{s}$ とした場合のピークカウントを 1 とした相対計数である。

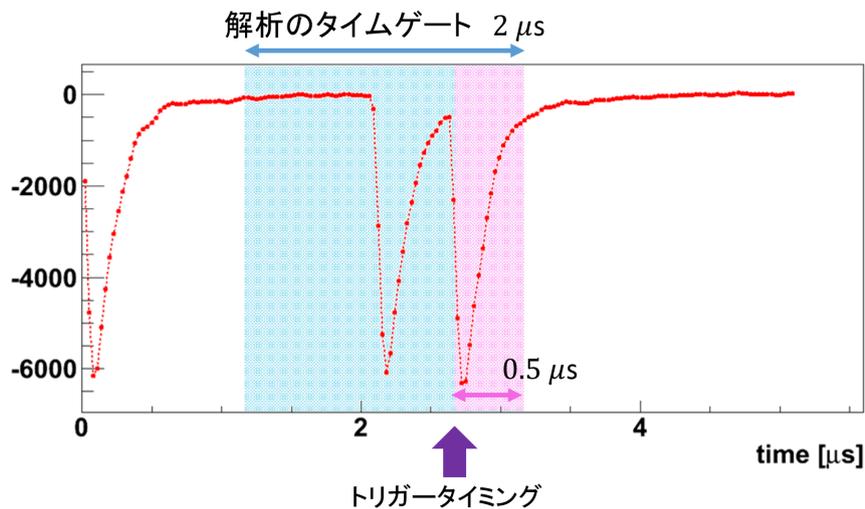


図 2.25: 波形解析のタイムゲート。77.8 MeV 陽子ビームを 50 kHz で照射した時の波形データに、トリガータイミングと解析のタイムゲートを示した。

2.8.6 波形のエネルギー依存性

77.8 MeV の陽子ビームでテンプレート波形を作成しテンプレートフィッティングを行ったが、このテンプレート波形がいつも同じ形とは限らない。同じ BGO 個体でも温度によって時定数が増えることが報告されている。したがって、温度が違う環境で取得した同じエネルギーの陽子の波形でも、その形に若干の差異がある。一方で、温度環境が同じであっても、BGO で損失したエネルギーによっても波形が異なるか調べる必要がある。波高とエネルギーの関係については後程述べるが、ここでは線形であると仮定して概ねのエネルギーで考える。エネルギーの異なる陽子の波形を取得するため、ビーム軸上に銅のディグレーダーを設置して

表 2.4: ディグレーダーの厚さとビームエネルギー

ディグレーダーの厚さ	ビームエネルギー
なし	77.8 MeV
3.5 mm	57.9 MeV
6.3 mm	36.3 MeV
8.2 mm	12.5 MeV

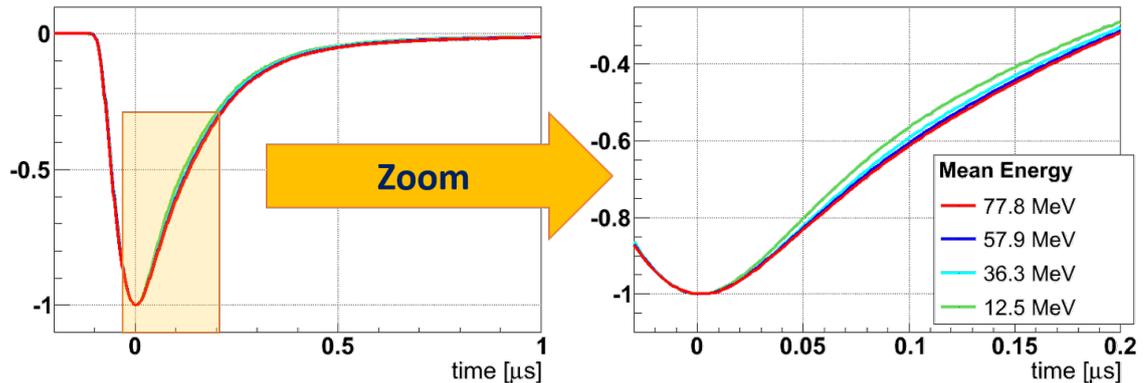


図 2.26: テンプレート波形のエネルギー依存性。ピークから約 200 ns 後方までの波形にエネルギーによって若干の差異が確認できる。

BGO への入射エネルギーを減衰させた。表 2.4 は、使用したディグレーダーの厚さと、ベータプロットの公式から計算したディグレーダーを通り抜けた陽子ビームのエネルギーの平均値を示している。

この 4 つのコンディションで取得した波形データからそれぞれテンプレート波形を作成した。このテンプレート波形を図 2.26 に示す。エネルギーが低いとき、テンプレート波形は若干細くなることがわかった。波形が細くなる原因としては、BGO 結晶の発光特性における減衰時間 300 ns の成分と減衰時間 60 ns の成分の比が、エネルギー損失によって異なることが考えられる。なお、BGO 結晶における陽子のエネルギー損失とその発光量との関係は第 4 章で議論するが、入射陽子のエネルギーが 10 MeV 以下のような低い領域では、この関係は非線形であることが報告されている。

この波形の違いにより波高の読み違いが生じる。例えば、ビームエネルギーの平均が 12.5 MeV の波形データをフィッティングするとき、その波形データ自身から作ったテンプレート波形と、ビームエネルギー 77.8 MeV の波形データから作ったテンプレート波形を用いたとを比較すると、前者の方が約 3% 大きい波高情報が得られた。ただ、この違いが常に一定の比率であるならば、あるテンプレート波形によるフィッティングの結果としての波高情報を得ることで、エネルギー情報に変換する手立てを確立しさえすればよい。

2.9 まとめ

E40 実験に置いて散乱陽子のエネルギー測定を担う BGO カロリーメータの読み出しシステムの開発を行った。想定される高計数率下において生じるパイルアップ信号を分離するために、Flash ADC により波形データを収集し、テンプレート波形によるフィッティングで波高情報を取得する方法を採用した。この読み出しシステムのために、Flash ADC CAEN V1724 を使用し、積分増幅及び Veto 機能を持ったアナログ回路の設計・開発機の製作を行った。

製作した開発機について、陽子ビームを用いた評価実験を行い、高計数率下 (450 kHz) に置いても 80 MeV 陽子に対して 1.3% のエネルギー分解能を達成し、要求分解能 (3%) を十分に適う結果を得た。また、使用する PMT は、高計数率下においても印加電圧を 630V 以下にすることで安定動作することがわかった。Veto スイッチは、V1724 の Zero Suppression 機能と合わせて運用することでデータ量を削減することが目的で、適当なタイミングで TTL 信号による制御で DAQ mode から rest mode へと切り替えることで、データ量を調節する。スイッチング後は 500 ns 以内に rest mode へと完全に切り替わることが確認され、自由にデータ取得のタイムゲートの設定が可能なシステムとなった。このタイムゲートについては、ビームレート 50 kHz の波形データにおける波形解析の精度を調べることで、2 μ s 幅に決定した。

以上より、BGO カロリーメータの読み出しシステムの開発機は、要求に対して十分な性能を示した。また、1 イベントあたり 2 μ s 間の波形データを 30 ns 間隔で取得することで十分に波形の再構成が可能であることがわかり、データ量としては、各チャンネル 1 イベントあたり 33 word (66 samples) に抑制することができた。

第 3 章

波形解析

この章では、テンプレート波形フィッティング法を用いた波形解析について述べる。Flash ADC で取得した $2 \mu\text{s}$ 間の波形データから、記録されたパルス信号の数を導出し、テンプレート波形でフィッティングすることで見つけた全ての信号の波高情報と時間情報を取得する。その中から、時間情報による選別を行うことで、欲しいイベントの波高情報を抽出する。この波形解析手法を確立し、 pp , pC 散乱実験の波形データを用いることで、抽出効率を見積もった。

3.1 イベントタイミング

E40 実験で使用する V1724 によるデータ取得において、エネルギー情報を求めたい信号が検出されるタイミングと、データ取得を決定するタイミングは異なる。E40 実験におけるトリガーは Σ 粒子の生成による 1st level trigger と、データ収集を決定する 2nd level trigger がある。E40 実験における DAQ 及びトリガーについては節 5.3.1 で記述する。V1724 に入力されるトリガーは 2nd level trigger であるが、エネルギー情報を求めたい散乱陽子の信号は 1st level trigger のタイミングで検出される。図 3.1 に示すように、V1724 による波形データの取得は、1st level trigger タイミング周辺の $2 \mu\text{s}$ 間 ($-1.5 \mu\text{s} - +0.5 \mu\text{s}$) に設定して行う。取得した波形データから、この 1st level trigger のタイミングに検出される信号を抽出するためにタイムゲートを設ける。このタイムゲート内で検出した信号のことをイベントタイミング信号と呼ぶことにする。波形解析では、このタイムゲートの幅を指定し、イベントタイミング信号の波高を求める。

3.2 アルゴリズム

波形解析の目的は、イベントタイミングに検出された信号の波高を読み取ることである。そのために、取得した波形データについて、パイルアップ信号の分離を行い必要な波高情報を精度よく読み取る波形解析アルゴリズムが必要である。この波形解析アルゴリズムについて解説する。

Flash ADC V1724 で取得した波形データは 30 ns 間隔で 70 点前後のサンプル数である。この波形データから荷電粒子が入射した信号を抽出し、テンプレート波形でフィッティングを行う。この操作には、信号のサーチ、テンプレート波形によるフィッティング、及びフィッ

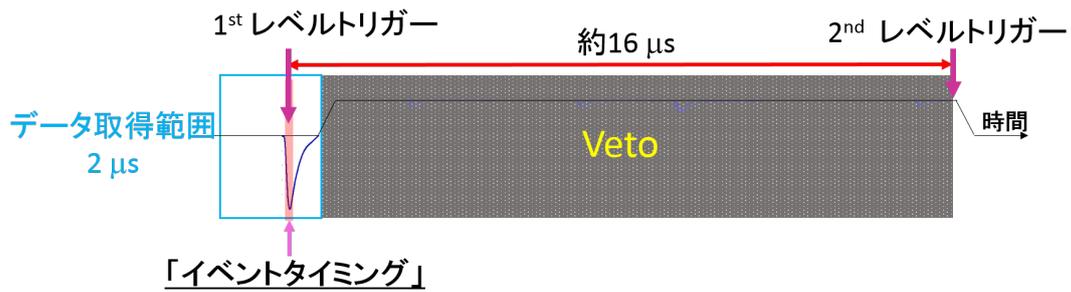


図 3.1: イベントタイミングの定義。1st level trigger のタイミングで検出される信号をイベントタイミング信号と呼ぶ。

タイミングの判定が含まれる。

パイルアップ信号を分離するにあたり、波形データから信号の数を正確に読み取ることは非常に重要である。2 μs 間の波形データのパイルアップ信号をすべて認識できなければ、誤った波形を仮定したフィッティングを行うことになり、イベントタイミングの信号の波高を読み違えてしまう。しかし、ピークが含まれずテイルの部分だけが記録範囲に入る信号も多く、そのような信号の波形についてはピーク時間がわからないため、テンプレート波形によるフィッティングでは完全に形を再現できない。だが、波形解析の目的はあくまでイベントタイミングの信号の波高情報を得ることであるため、他のパイルアップ信号について正しい波高や時間情報を得る必要はない。したがって、テンプレート波形によるフィッティングの成否判定は、イベントタイミングの信号の波高測定精度によって行う。

信号サーチの方法をいくつか用意し、正確なフィッティングを行えなかったと判定した場合は別のサーチ方法によって信号を探す。フィッティングの成否判定は、イベントタイミングに検出された信号の立ち上がり部分の3点の残差の二乗和を使用する。もちろん、イベントタイミングに信号が検出されなかった場合は、失敗判定となる。なお、イベントタイミングのデータ点がベースラインと変わらない値であり、信号がないと判断される場合は、信号サーチは行わない。成否判定については、節 3.3.1 で述べる。図 3.2 に波形解析のチャート図を示す。なお本節では、信号波形が負の方向のパルスであるため、このパルスについて、負の方向に急激に変化する部分を「立ち上がり」、正の方向に急激に変化する部分を「立下り」と定義する。



図 3.2: 波形解析のチャート図。イベントタイミングの信号の波高が正しく読まれたと判断するまで、最大 4 回のフィッティングを試みている。それぞれの操作については本文中で説明する。

図 3.2 中の操作番号について以下に詳説する。解説図で示す波形データは pp , pC 散乱事象をシングルレート 700 kHz で取得したデータである。また、PMT のオペレーション電圧は 600 V である。イベントタイミングは横軸の 1.5-1.7 μs の範囲と指定している。

操作 1

信号のサーチ方法として最も簡単なのは、取得した波形に閾値を設けて信号の立ち上がりを探す方法であるが、信号幅以内にパイルアップした信号を分離することができない。そこで、取得した波形データから、各サンプリング点と次のサンプリング点の差をとり作成した差分波形を用いる。この差分波形は、図 3.3 に示すように、取得波形において信号が立ち上がるタイミングで鋭く上がった波形となる。このように、差分波形は信号幅が短いため、閾値を設けて信号の立ち上がり部分を探すことで、多くの場合は全ての信号を探し出すことができる。また、サンプリングした最初の点がベースラインより明らかに浮いていたら、記録範囲より前にピークのある信号が検出されていると判断し、その信号もフィッティング関数に加える。フィッティング関数は、見つけ出した信号の分のテンプレート波形を加えたものとなり、信号の数え落としがなければよくフィッティングができ、波高情報を取得することができる。

一方この方法では、信号の立下りの部分にパイルアップした信号がある場合、その立ち上がり方が緩やかになるため、差分波形におけるピークが小さくなり閾値を超えられず発見できな

操作1

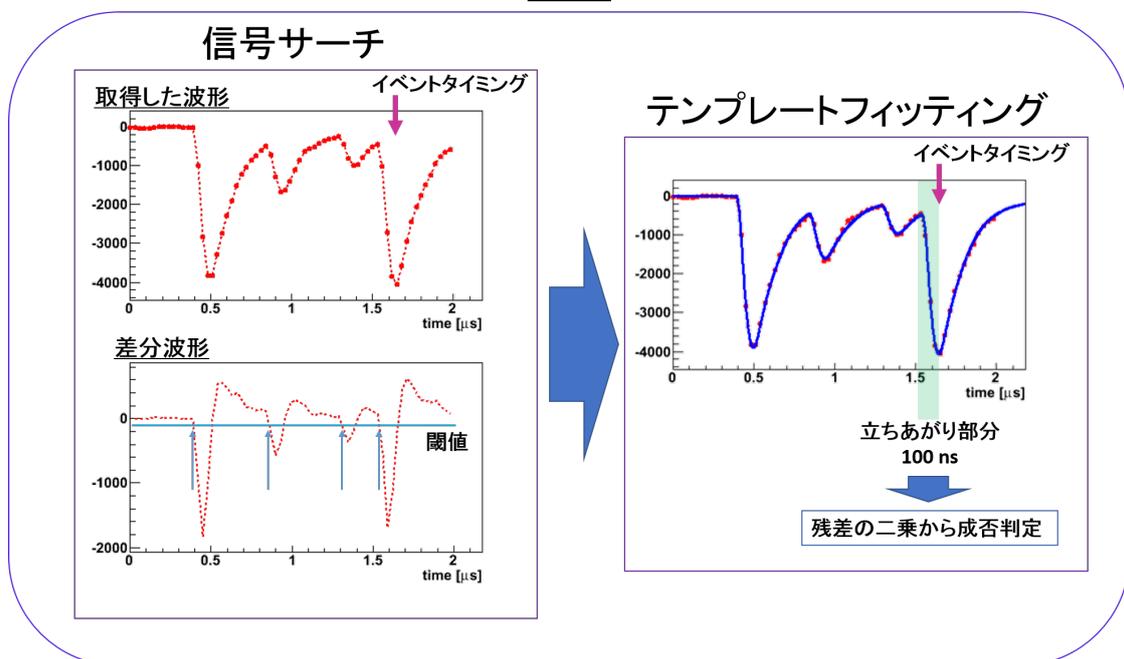


図 3.3: 取得した波形とその差分波形の例。取得した波形データから差分波形のグラフを作成し、閾値を設けて信号を探す。差分波形は信号の立ち上がり時に大きな負の値を持つため、それを探す。信号の立下り時は差分波形は正の値を持ち緩やかに減衰していく。この方法で見つけ出した信号に対してテンプレート波形によるフィッティングを行う。イベントタイミングの信号がよくフィッティングされているのかどうかは、イベントタイミング周辺に見つかった信号の立ち上がり部分 100 ns 間に含まれる 3 点の残差の二乗から判定する。

いことがある。信号の数え落としは主にこのような原因で起こるが、フィッティングに失敗した場合数え落とした信号を探すために、フィッティング関数と取得波形の残差を表すグラフを作成する。

操作2

操作1でフィッティングに失敗した場合、その残差のグラフ(残差波形1)を作成し、閾値を設けて大きな残差があるタイミングを探す。もし、数え落としていた信号がある場合、その立ち上がり部分が残差波形1に見つかるはずである。閾値を超えた残差が見られた場合、その周辺に数え落とした信号があると判断し、操作1で用意したフィッティング関数に見つけた数だけテンプレート波形を加える。

図3.4にこの操作によってフィッティングに成功した例を示す。取得波形の右端の数点はベースラインから離れており、記録範囲より後方に信号があると考えられるが、フィッティングに加える必要はないためフィッティング範囲から除外した。フィッティング範囲内に確認できる信号は4つあるが、そのうちイベントタイミングの直前にある信号は比較的小さく、操作1による信号サーチでは見落としてしまっている。その結果、イベントタイミング信号をよくフィッティングすることができなかつた。操作1によるフィッティングに失敗したため残差波

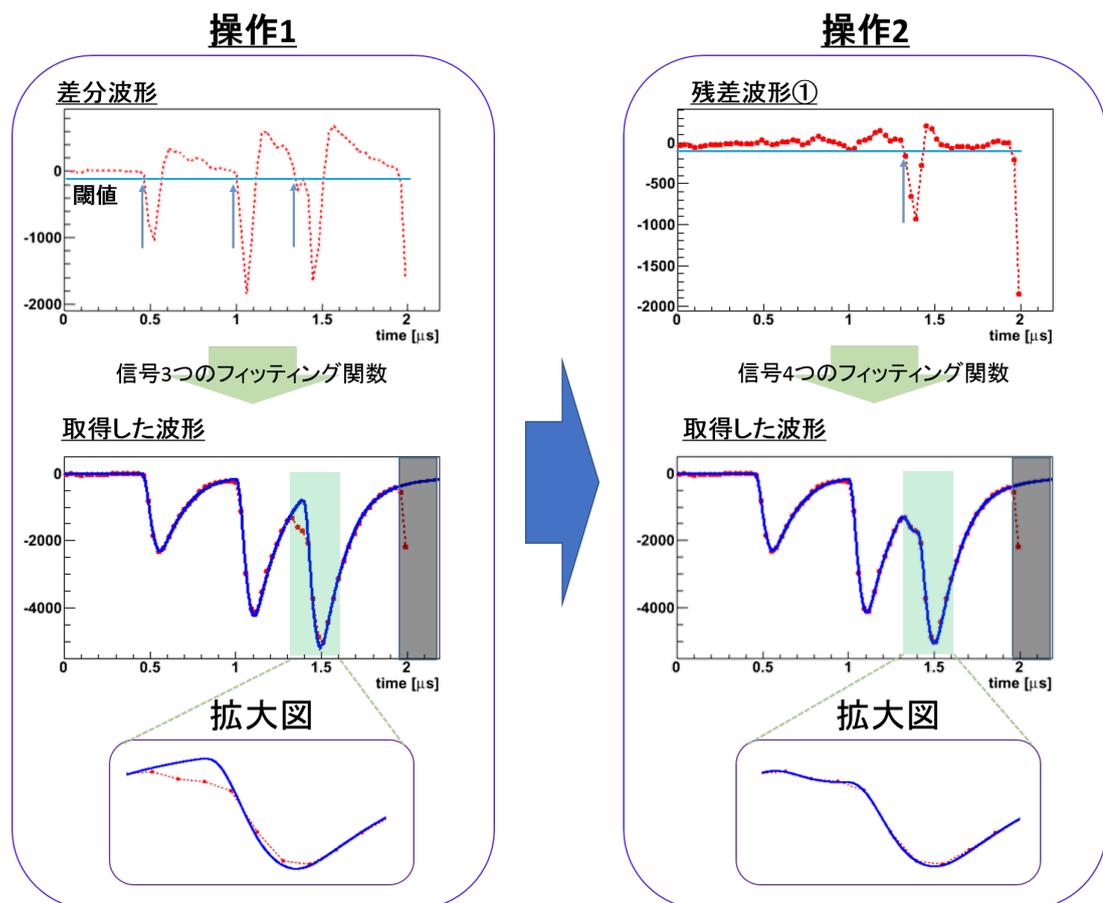


図3.4: 操作2によるテンプレート波形フィッティングの成功例。図中の取得した波形の赤い点はサンプリング点、青い滑らかな線がフィッティング関数である。

形を作成し、操作 2 を行った。残差波形に閾値を設けて信号をサーチしたところ、操作 1 で見落としていたイベントタイミング直前の信号を認識し、これを加えてフィッティングを行った。操作 1 と操作 2 によるフィッティングの違いを拡大図で示している。フィッティング範囲の全ての信号を認識したことで、操作 2 ではよくフィッティングできていることがわかる。

この操作でフィッティングに失敗した場合は、操作 3 に移行する。

操作 3

操作 2 までにイベントタイミングの信号がよくフィッティングできなかった場合、その直前直後にパイルアップしている信号を分離できていないと考えられる。そこで、操作 3 ではイベントタイミングから 500 ns 以上以前に記録されている分離が容易なパイルアップ信号を引きはがす操作をする。この操作は、操作 4 操作 5 においてイベントタイミングの直前直後のパイルアップ信号の分離を行うための準備である。

操作 3 の様子を図 3.5 に示す。操作 1 及び操作 2 によってイベントタイミング信号をよくフィッティングできていない。操作 3 では、イベントタイミングの 500 ns までの範囲で信号のサーチとフィッティングを行いそのフィッティングした関数を元の取得した波形データから引く。これにより、イベントタイミング周辺の信号サーチをより細かく行うことができる。操作 3 により、イベントタイミング周辺以外の影響を取り除いた残差波形 2 を作成した。

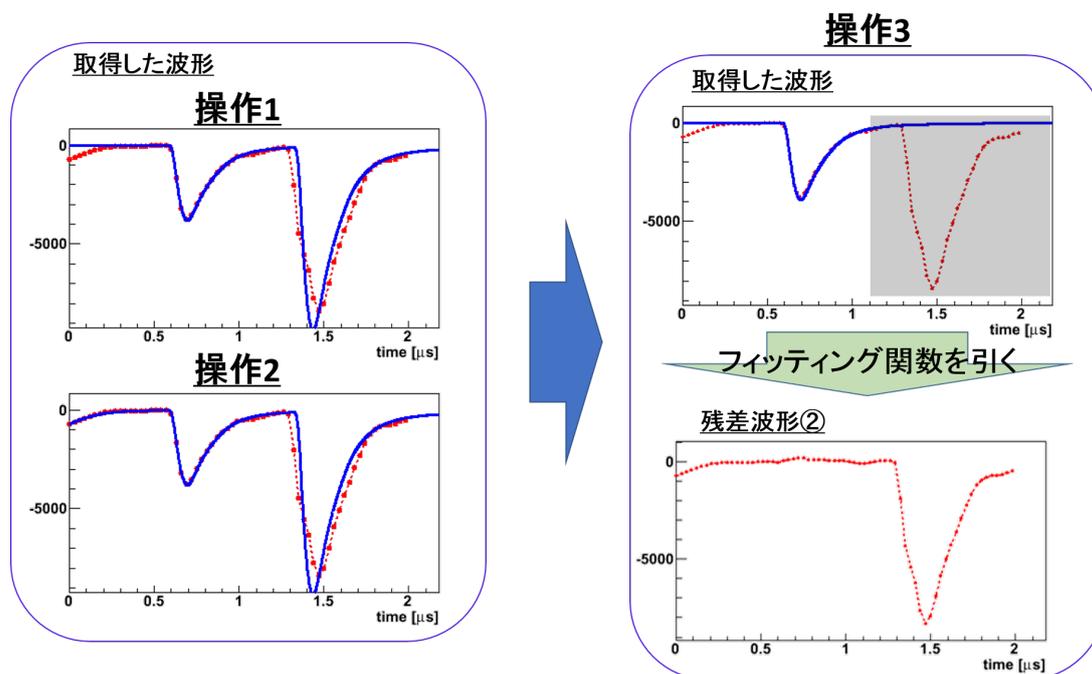


図 3.5: 操作 3 による残差波形 2 の作成。イベントタイミングは 1.5-1.7 μs の範囲と指定している。

操作4

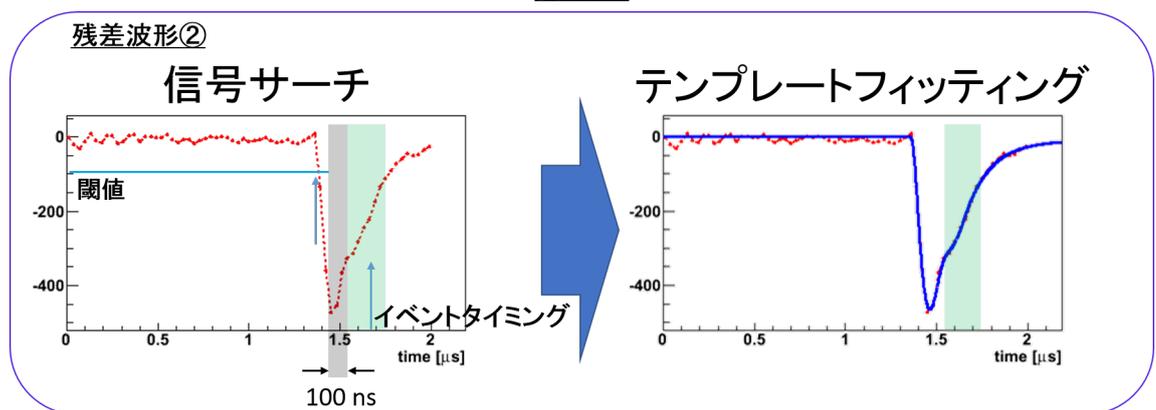


図 3.6: 操作 4 によるテンプレート波形フィッティングの成功例。イベントタイミングの信号のピークの位置は緑の範囲に記録されることが期待される。

操作 4

操作 3 で作成した残差波形 2 からイベントタイミング信号の直前にパイルアップ信号があるかを調べるため、残差波形 2 について閾値による信号サーチを行う。このとき閾値を超えたタイミングが、明らかにイベントタイミングの信号が記録されているべき時間より以前だった場合、パイルアップ信号があると判断する。また、イベントタイミングには信号があるとしてフィッティング関数を用意し、フィッティングを行う。

この操作によるフィッティングの成功例を図 3.6 に示す。イベントタイミングの信号のピークの位置は緑の範囲に記録されることが期待されるため、立ち上がり時間を考慮して、そのさらに 100 ns 前方まではイベントタイミングの信号の立ち上がりが検出される可能性がある。そのため、残差波形 2 について、その前方までに対して閾値による信号サーチを行う。図中では、閾値を超える信号の立ち上がりを見つけたため、これとイベントタイミングの信号の 2 つの信号のパイルアップとしてテンプレート波形フィッティングを行っている。

操作5

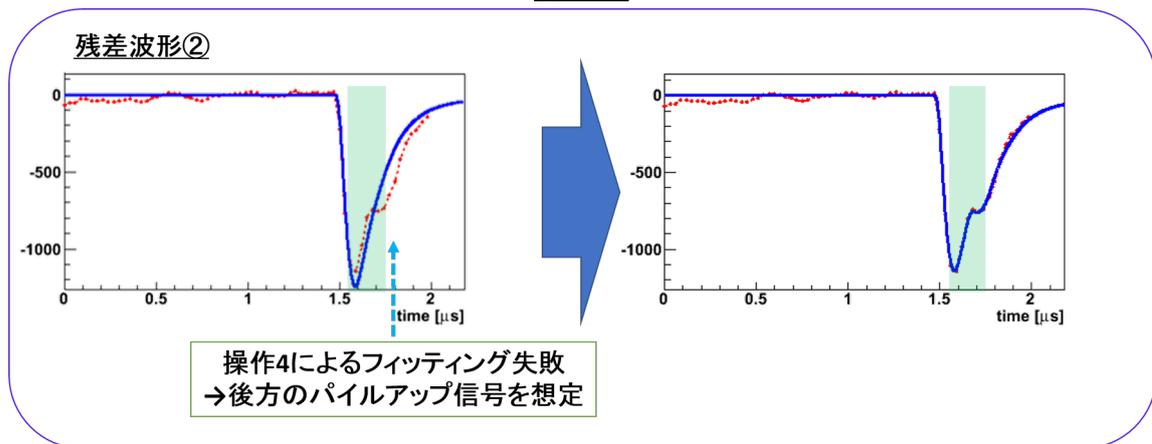


図 3.7: 操作 5 によるテンプレート波形フィッティングの成功例。

操作 5

操作 4 でもよくフィッティングできなかつた場合、数え落としのパイルアップ信号はイベントタイミング信号の直後にあると判断し、イベントタイミングとその直後にパイルアップ信号のフィッティング関数によりフィッティングを行う。

この操作によるフィッティングの成功例を図 3.7 に示す。操作 4 では、イベントタイミング直後のパイルアップ信号を見つけられず、1 つのテンプレート波形でフィッティングを行っている。そのため、後方のパイルアップ信号に引っ張られる形でフィッティング関数がデータ点とずれて失敗判定となる。そこで、イベントタイミング直後にパイルアップ信号があると判断させ、イベントタイミングとその直後に 2 つの信号があるとしてテンプレート波形フィッティングを行うと、よくフィッティングできている。

操作 6

ここまでの操作でフィッティングがうまくいかない場合、イベントタイミングに信号がそもそも検出されていないか、間隔の短いパイルアップ信号が分離できていない可能性が高い。間隔が 100 ns 以下のあまりにも短いパイルアップ信号同士は、たとえ認識できても、それぞれの波高を正しく読み取ることは困難である。したがって、操作 5 までに成功しなかつた場合は、波形解析によりイベントタイミングに信号は見つからなかつたとする。

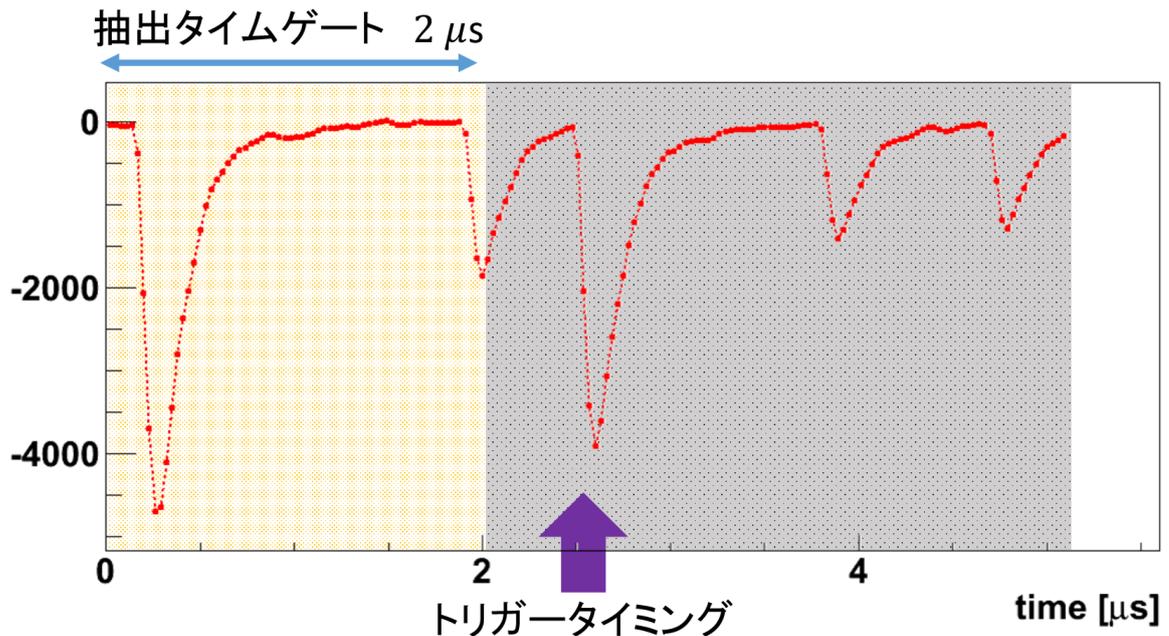


図 3.8: 検出効率を求めるときの波形データの抽出範囲。波形データは $5 \mu\text{s}$ 間取得しているが、トリガータイミングより後は必ずトリガータイミング信号の影響があるため、無関係な前方の $2 \mu\text{s}$ 間の波形データを抽出する。

3.3 波形データを用いた解析効率の見積もり

前節の波形解析アルゴリズムの検出効率を求める。これには、実データにテンプレート波形をテスト波形として加えて、テスト波形が正しく取り出せるかを調べる、という方法を用いた。実データには、 77.8 MeV の陽子ビームを CH_2 ターゲットに入射し、 pp , pC 散乱事象を BGO カロリーメータで検出した波形データを使用する。この波形データには、約 77 MeV までのあらゆるエネルギーの陽子に対応する波形が混在している。BGO カロリーメータのシングルレートは $40 \text{ kHz} - 700 \text{ kHz}$ のコンディションで取得しており、それぞれの環境下で検出効率を求める。あるエネルギーの陽子の検出効率の求めるために、次に手順でテスト波形の用意と、波形解析を行う。

1. ビーム照射中の波形データのイベントタイミング前の $2 \mu\text{s}$ 間を抽出する。(図 3.8 参照)
2. テスト波形として、ある波高のテンプレート波形を、ある時間に用意する。
3. 抽出した波形データにテスト波形を重ね合わせた波形データを作成する。
4. 作成した波形データについて波形解析を行う。

テスト波形の波高は、検出効率を調べたい陽子のエネルギーに対応させる。あるエネルギーの陽子の波高の中心値は、ここでは陽子のエネルギーと波高の関係が線形であると仮定し、 77.8 MeV 陽子の波高の中心値から、エネルギーの比を取って決定する。全体のエネルギー

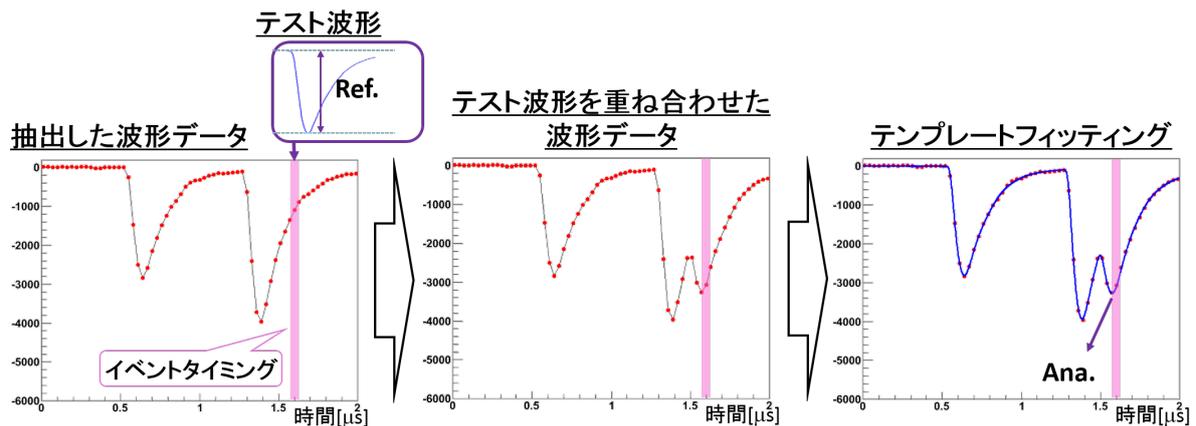


図 3.9: 解析アルゴリズムの検出効率の調べ方。抽出した波形データはシングルレート 700 kHz のコンディションである。抽出した波形データにイベントタイミングを設定してテスト波形を重ねた波形を作成する。このとき重ねたテスト波形の波高を Ref. とする。作成した波形データを解析し、イベントタイミングの信号の波高を取得する。波形解析により取得した波高を Ana. とする。

分解能には、測定器自身もつエネルギー分解能と波形解析による誤差が含まれる。全体のエネルギー分解能を考慮するために、テスト波形の波高に測定器のもつエネルギー分解能による不定性をもたせた。測定器のエネルギー分解能は 80 MeV について 1.0% (σ) であり、 $1/\sqrt{\text{Energy}}$ に比例するとして、あるエネルギーにおける分解能を $1.0 \times \sqrt{80/\text{Energy}} \%$ (σ) とした。

時間情報については、V1724 のサンプリング間隔は 30 ns となっているため、テスト波形を重ねる位置についても一様乱数で 30 ns の不定性を持たせ、サンプリング点についての不定性を再現する。

抽出したデータにテスト波形を重ね、波形解析を行う様子を図 3.9 に示す。重ねたテスト波形の波高 Ref. は、エネルギー分解能の不定性を持たせる前の値である。波形解析によって得られた波高を Ana. とし、イベントごとに Ana./Ref. を計算する。この Ana./Ref. 分布の一例を図 3.10 に示す。

波形解析による検出効率を次のように定義する。

$$\text{efficiency} = \frac{\text{3}\sigma\text{以内の精度で抽出されたイベント数}}{\text{テスト波形を重ねて解析した全イベント数}} \quad (3.1)$$

パイルアップ信号を分離できなかった場合などにより、イベントタイミングに信号を見つけられなかった、もしくは波高を大きく読み間違えたイベントの割合が inefficiency となる。

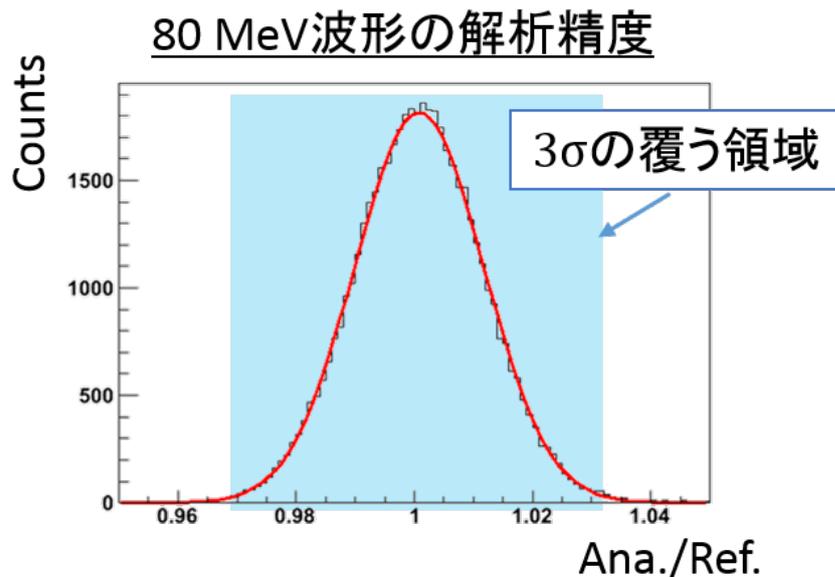


図 3.10: シングルレート 40 kHz の環境下における、80 MeV の信号の Ana./Ref. 分布。ガウス関数でフィッティングし、青色の領域はその 3σ で覆う領域を示している。想定分解能による不定性と波形解析による不定性とで膨らんだ分布となっているが、この σ は 1.0% と、ほとんどが想定分解能による幅となっている。

3.3.1 成否判定

節 3.2 では、波形解析のアルゴリズムにおいて、フィッティングの成否判定を立ち上がりの残差の二乗和で行うことを述べた。判定に使う値は、各波形データについてベースラインのふらつきを調べ、ベースラインのふらつき (σ) 及び足した点の数で規準化している。次の式で決まる値を EV (Evaluation Value) と定義する。

$$EV = \frac{\text{立ち上がり 3 点の残差の二乗和の平均}}{\text{ベースラインのふらつき } (\sigma)} \quad (3.2)$$

この EV からフィッティングの成否判定を行うが、テスト波形にテンプレート波形を使用しているため、テスト波形をフィッティングしたときの残差は、実データの場合に比べて小さくなる。シングルレート 40 kHz の波形データを用いて調べた操作 1 による EV 分布を図 3.11 に示す。

この EV 分布から、波高や時間情報からフィッティングに成功したと考えられるイベントの 99% 以上が含まれる領域を選ぶことで、成否判定に用いる EV を、テスト波形については 10 程度とし、実データについては 200 を用いることに決めた。なお、5 MeV 以上読み間違えた場合、EV の値は 300 以上を示すことが見込まれるため、カット条件として十分である。検出効率を求める際にはテスト波形を用いるため、ここでは成功判定の EV を 10 程度とするが、節 3.3.3 において検出効率の EV 依存性について議論する。

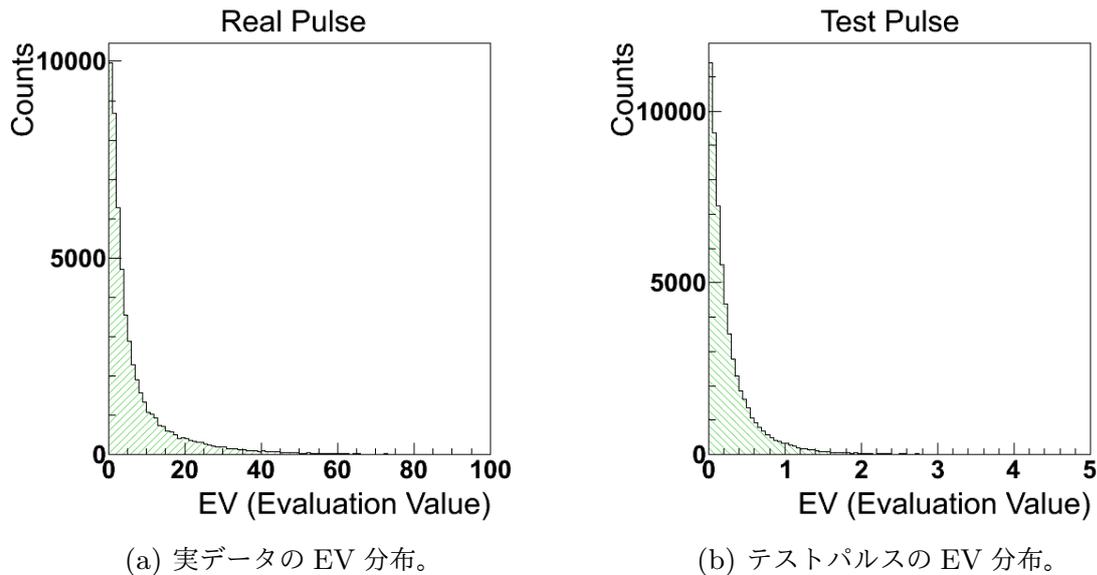


図 3.11: 操作 1 による EV 分布。

3.3.2 各操作による検出効率

波形解析は、節 3.2 で示した通り、成功と判定されるまで最大 4 回のフィッティングを試行する。操作 1 のみにとどまらず、操作 5 まで行うことで、どれだけ検出効率を上げられるかを調べた。イベントタイミングのタイムゲートを ± 25 ns、成功判定を $EV < 8$ とし、5 MeV 及び 80 MeV 相当の波高のテストパルスを重ねた 10 万イベントの波形データを解析した。各操作において成功判定が行われた割合と、その操作での検出効率、及び全体に対する検出効率を表 3.1 に示す。ある操作での検出効率とは、その操作で成功判定を受けたイベントのうち、精度よく波高を読み取れた割合であり、式 3.2 の分子に含まれる割合にあたる。また、全体に対する検出効率とは、全解析イベントのうち、その操作で成功判定を受け、精度よく波高を読み取れた割合である。

低計数率下においては、非常に高い検出効率を示しており、80 MeV については約 99% である。この検出効率は計数率が高くなるほど悪化する傾向にある。各操作については、低計数率下ではほとんどが操作 1 によるフィッティングで成功判定を受け、操作 2 以降による全体検出効率は 1% 強にとどまった。一方で、700 kHz のような高計数率下では、操作 1 による成功判定は 73% まで低下しており、14% が操作 2 以降で成功判定を受けた。操作 2 以降による全体検出効率は 12% まで上がり、特に操作 5 が 9% と大きい割合を示した。検出目標が 80 MeV の場合では操作 4 の割合は総じて小さいが、検出目標が 5 MeV と波高が小さいときは割合が大きくなり、700 kHz においては操作 4 による全体の検出効率は 5% 弱である。

全体の傾向として、操作 1 で成功判定を受けた場合は高い精度で波高を読み取れていることがわかった。また、操作 2 以降については、成功判定を受けたとしても読み取った波高の精度は操作 1 ほど高くないものの、計数率が高いときほどその役割が増していることから、非常に有用であると言えるだろう。

(a) Rate:40 kHz, Test Pulse:5 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	97.63%	99.01%	96.66%
操作 2	0.04%	72.0%	0.03%
操作 4	0.42%	79.81%	0.33%
操作 5	1.09%	76.37%	0.83%
全操作	99.18%	98.66%	97.86%

(b) Rate:40 kHz, Test Pulse:80 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	97.96%	99.47%	97.4%
操作 2	0.11%	88.79%	0.10%
操作 4	0.01%	84.62%	0.01%
操作 5	1.52%	88.38%	1.35%
全操作	99.61%	99.29%	98.90%

(c) Rate:150 kHz, Test Pulse:5 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	92.47%	97.75%	90.40%
操作 2	0.21%	71.84%	0.15%
操作 4	1.55%	82.73%	1.28%
操作 5	2.87%	71.61%	2.05%
全操作	97.09%	96.69%	93.88%

(d) Rate:150 kHz, Test Pulse:80 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	93.84%	98.79%	92.70%
操作 2	0.46%	85.19%	0.39%
操作 4	0.03%	97.06%	0.03%
操作 5	4.07%	86.16%	3.51%
全操作	98.40%	98.21%	96.63%

(e) Rate:350 kHz, Test Pulse:5 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	83.00%	94.97%	78.83%
操作 2	0.59%	69.22%	0.41%
操作 4	3.49%	78.49%	2.74%
操作 5	5.36%	63.57%	3.41%
全操作	92.44%	92.37%	85.38%

(f) Rate:350 kHz, Test Pulse:80 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	86.04%	97.54%	83.93%
操作 2	1.20%	80.23%	0.97%
操作 4	0.13%	88.80%	0.11%
操作 5	7.77%	85.04%	6.61%
全操作	95.14%	96.29%	91.61%

(g) Rate:700 kHz, Test Pulse:5 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	67.27%	91.25%	61.38%
操作 2	1.46%	68.36%	1.00%
操作 4	5.65%	81.82%	4.63%
操作 5	8.46%	61.00%	5.16%
全操作	82.84%	87.12%	72.16%

(h) Rate:700 kHz, Test Pulse:80 MeV

操作 No.	成功判定率	検出効率	全体効率
操作 1	73.40%	95.36%	70.00%
操作 2	2.80%	77.32%	2.17%
操作 4	0.29%	67.37%	0.20%
操作 5	11.15%	82.97%	9.25%
全操作	87.64%	93.11%	81.60%

表 3.1: 各コンディションにおける、各操作による検出効率。成功判定率は、全解析イベントのうち、その操作で成功判定を受けたイベントの割合である。検出効率は、その操作で成功判定を受けたイベントのうち、精度よく波高を読み取れた割合である。全体効率は、全解析イベントのうち、その操作によって精度よく波高を読み取れた割合である。

3.3.3 検出効率の EV、Time Gate 依存性

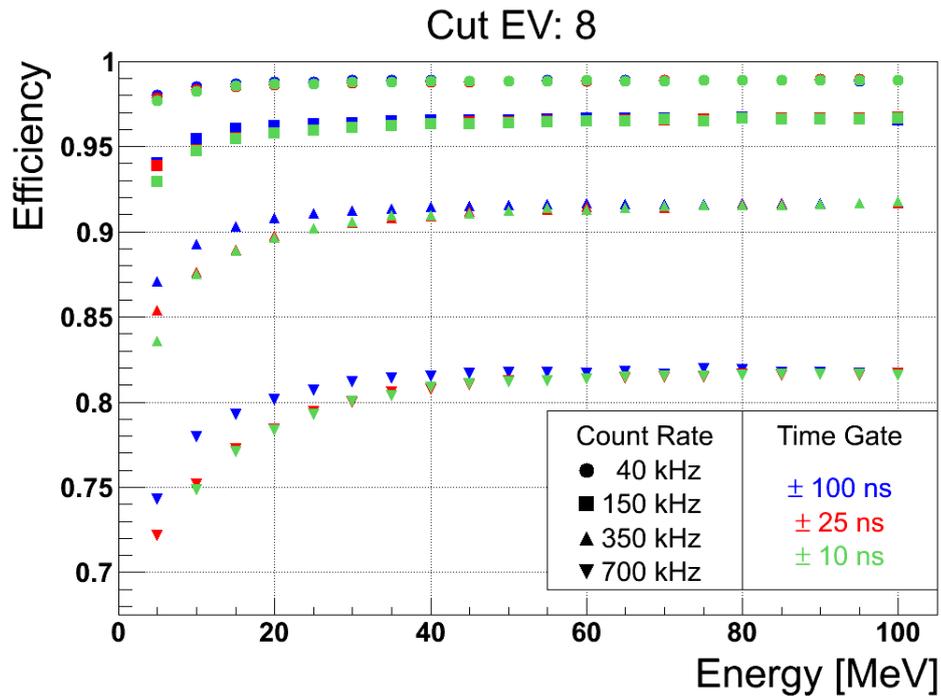
イベントタイミングのタイムゲートと、成功判定の EV によって、波形解析の検出効率が変わるのかを調べた。タイムゲートは狭くするほど S/N が向上し、タイムゲート内にアクシデンタルに検出される目標以外の信号を取り除くことができる。EV については、基本的には大きくするほど検出効率が上がることが期待されるが、大きくしすぎるとフィッティングに失敗した事象を成功と判定する事象が増え、結果的に検出効率を損ねる可能性がある。

この2つのパラメータを複数用意し、検出目標のエネルギー 5 MeV ごとの波高について検出効率を求めたものを図 3.12 に示す。

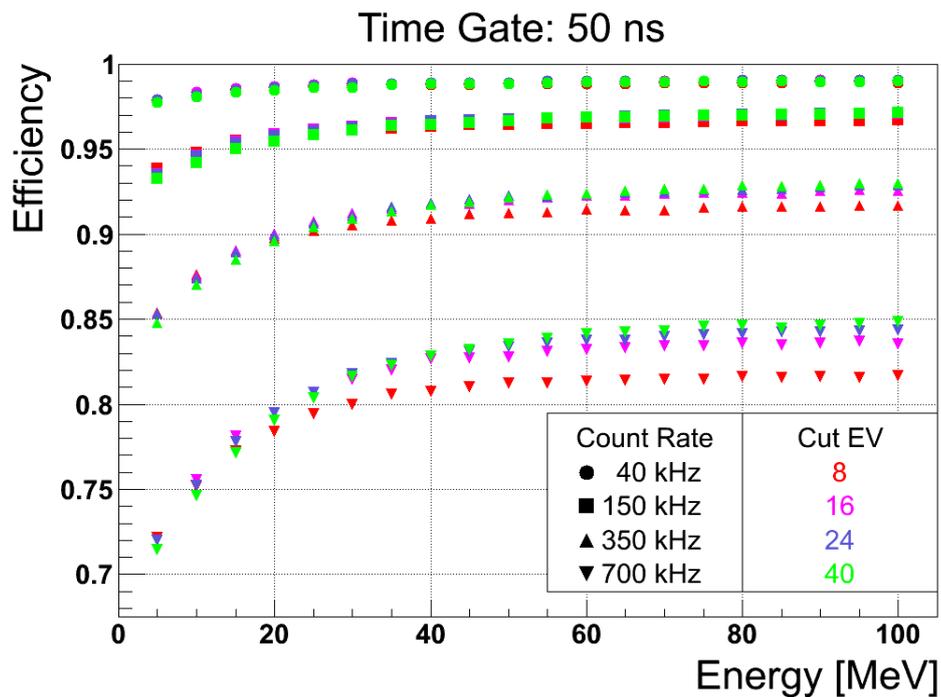
調べた範囲では、これら二つのパラメータによって検出効率の傾向は僅かに異なる結果となった。イベントタイミングのタイムゲートに関しては、高計数率下、低エネルギーの波形に対して、僅かな検出効率の悪化がみられるのみである。S/N の向上のためにはタイムゲートは狭くした方が良い。したがって、イベントタイミングが数 ns の精度で決まるならば、タイムゲートは ± 10 ns とするのがよいだろう。一方で、EV の Cut 条件を緩めることによって、高計数率下においては検出効率が上がることが確かめられた。この傾向は、高計数率下、高エネルギーの波形に対して顕著であり、低エネルギー側では僅かに悪化する方向になる。高計数率下では、前方の信号ふらつきの影響を受けて EV が大きくなっていると考えられる。図 3.12(b) では EV=24 と 40 では、あまり差が無いように見えるため、低エネルギー側での検出効率の悪化を抑えるためにも、EV=24 程度に定めるのが妥当だろう。

全体の傾向としては、E40 実験の平均レート 40 kHz の環境下で、20 MeV 以上の陽子については約 99% のイベントを正確に解析できることが示された。また、瞬間的にビームレートとともに BGO カロリーメータのシングルレートが跳ね上がることがあるが、平均の約 3 倍である 130 kHz の環境下でも 96% の効率で解析できている。シングルレートが高いほど効率が下がるのは、信号がパイルアップする確率が上がり、すべてを認識できなくなることが増えるためと考えられる。エネルギーが低いところで効率が悪化するのは、相対的に小さい信号はパイルアップ信号に埋められると認識が困難なことと、前方のパイルアップ信号のテイルのふらつきの影響を大きく受けるためと考えられる。

今回検出効率の導出に使用した波形データは、あくまでも入射している粒子が全て陽子であり、検出される散乱事象を起こす陽子ビームは 50 ns 周期のバンチ構造を持っていることから、E40 実験の環境下で同様の検出効率で波形解析を行える保証はない。したがって実際の実験での検出効率は、その環境下の波形データを取得して調べる必要があるだろう。



(a) イベントタイミングのタイムゲートによる検出効率の違い。色の異なる点は、イベントタイミングのタイムゲートの違いを表している。



(b) フィッティングの成否判定値による検出効率の違い。色の異なる点は、成否判定に用いたEVの違いを表している。

図 3.12: 波形解析の検出効率の見積もり。横軸はテスト波形の波高に対応するエネルギーで、縦軸は式 3.2 で定義した検出効率である。図中に示したグラフの中で、点の形が同じものは使用した波形データが同じである。4 種類の異なる形の点をもつグラフでは、計数率のコンディションが異なる。また、PMT の印加電圧は全て 600 V である。

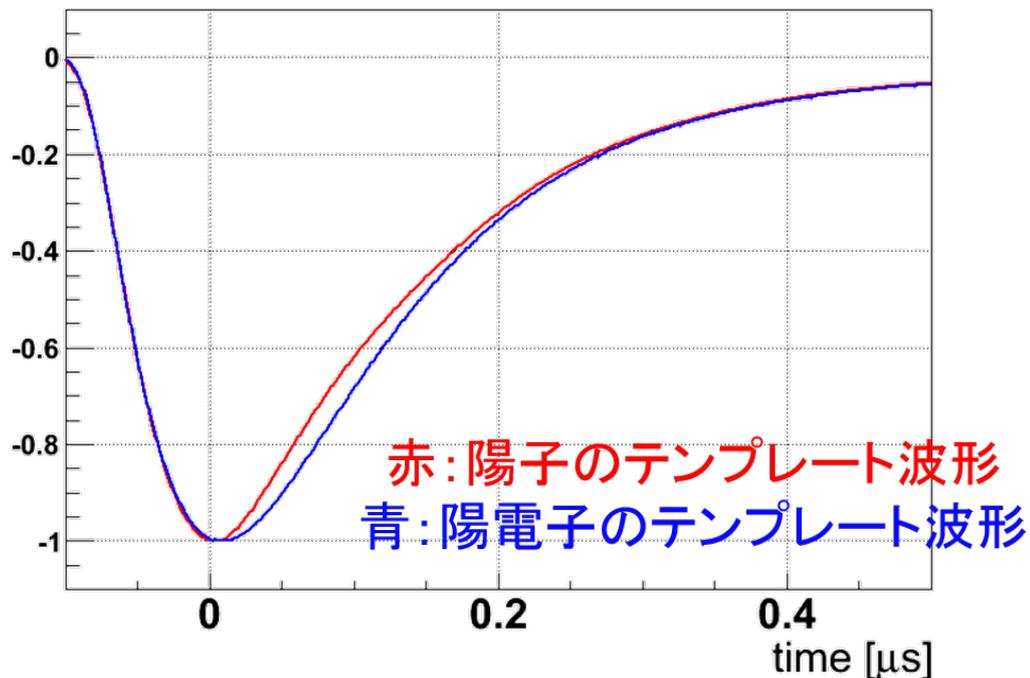


図 3.13: 陽子と陽電子のテンプレート波形。

3.4 陽電子ビームを用いた波形についての評価

標的を囲うカロリメータには目標の Σp 散乱由来の陽子以外に、 Σ の崩壊 ($\Sigma^\pm \rightarrow n\pi^\pm$, $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$, $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$) や π ビームを起因とした陽子や π が入射する。イベントタイミングに検出される信号は陽子によるものと期待し、陽子のテンプレート波形によりフィッティングする。一方で、イベントタイミング以外の信号については、陽子以外の粒子であることも多い。節 2.8.6 で示したように、BGO に落としたエネルギーによって波形が若干異なることがわかったが、入射粒子の種類による依存性も調べる必要がある。

陽子以外の荷電粒子の波形を取得するため、東北大学電子光理学研究センターにおいて、陽電子ビームを直接照射する実験を行った。この実験では、波形を取得するためだけに BGO カロリメータをビーム軸最下流に設置し、入射陽電子のエネルギーと照射位置についての情報は取得していない。取得した陽電子の波形データから、80 MeV 程度の波形のみを抽出し、テンプレート波形を作成した。エネルギーは波高と比例すると仮定して、 ^{137}Cs 線源由来の 662 keV の γ 線の波高から大雑把に求めたものである。陽電子のテンプレート波形を、電子のテンプレート波形と重ねて図 3.13 に示す。2 つの波形はピークとなる時間で揃えて描画しており、ピーク後約 200 ns 間の波形が異なることがわかった。陽子と陽電子ビームを照射したときの違いとして、陽子は BGO 結晶で静止し、陽電子ビームは結晶を突き抜けることがあげられる。節 2.8.6 に示した陽子のエネルギーによる波形の違いは、単位長さあたりのエネルギー損失に依存するためと考えられる。粒子が結晶を突き抜けた場合は、静止直前で短い距離で大きなエネルギー損失をするという過程がなく、これが陽子と陽電子の波形の差の原因だと考えられる。

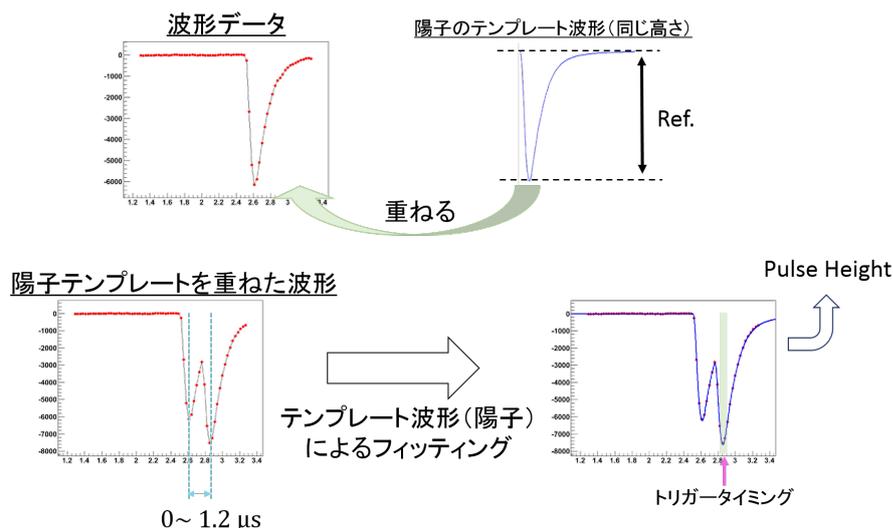
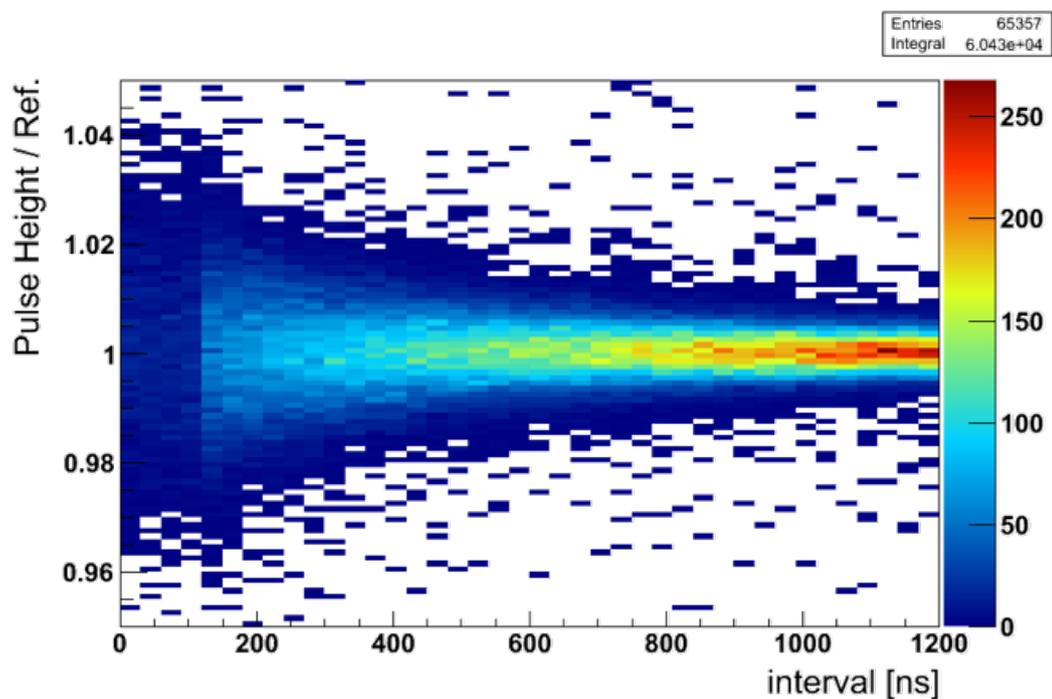


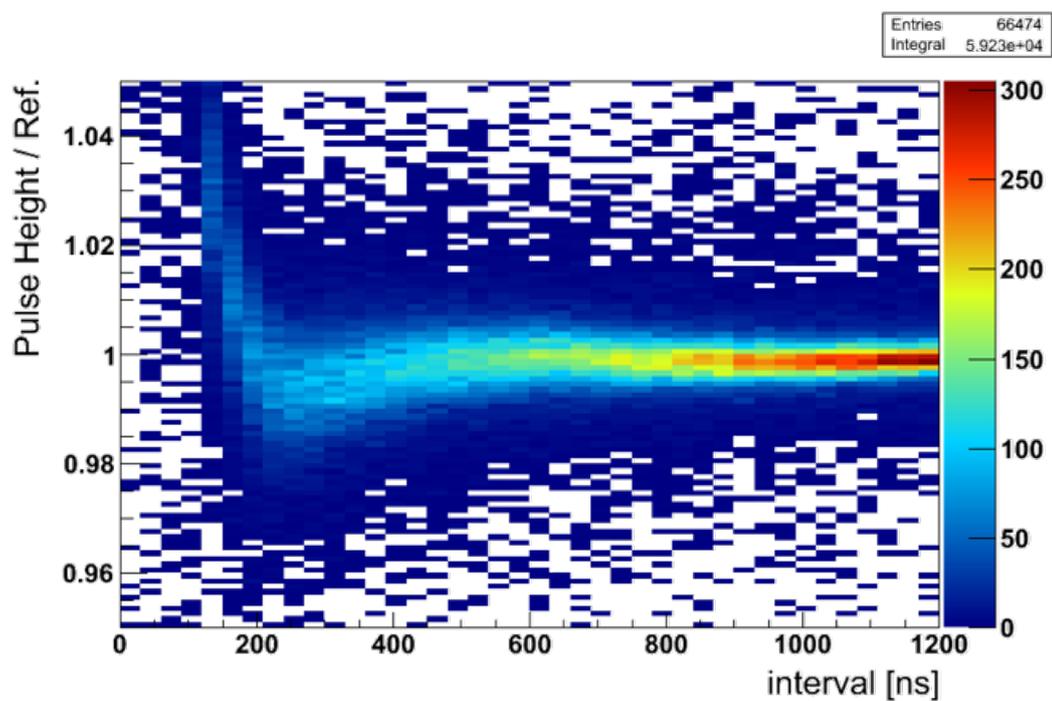
図 3.14: 信号の間隔と解析の精度の相関を求める手順。信号が 1 つ検出された波形データに、同じ波高の陽子のテンプレート波形をテスト波形として重ね、波形解析によりテスト波形を抽出する。信号の間隔を変えて行うことで、パイルアップ間隔と解析精度の相関を求める。

陽子と陽電子の波形の違いによって波形解析にどの程度の影響があるのかを見積もる。全ての信号波形について陽子のテンプレート波形を用いてフィッティングを行うため、イベントタイミングより以前に検出された信号が異なる形をしているならば影響を考える必要がある。ある信号が前方に検出されたとき、同じ高さの陽子はどの程度影響を受けるのかを、図 3.14 に示す方法で見積もる。陽子もしくは、陽電子の信号が 1 つ検出されている波形データを抽出し、その信号の後方 $0\text{--}1.2\ \mu\text{s}$ にテスト信号波形を重ねた波形データを作成する。重ねるテスト信号波形は陽子のテンプレート波形で、その高さ Ref. は、前方の信号の高さと同じ値に合わせている。作成したパイルアップ波形を陽子のテンプレート波形によりフィッティングを行い、テスト信号の Pulse Height を取得する。2 つの信号の間隔と Pulse Height/Ref. で評価する精度の相関を図 3.15 に示す。間隔は $30\ \text{ns}$ ずつずらして重ねた。陽子の波形に陽子のテンプレート波形を重ねた場合の図 3.15(a) では、特に相関は見られず、 $200\ \text{ns}$ 以上間隔があいていると、前の信号の影響をほとんど受けずに波高情報を取得できることがわかる。一方で、陽電子の波形に陽子のテンプレートの波形を重ねた場合の図 3.15(b) では、波形の異なるところと overlap する $200\ \text{ns}$ 以下の間隔だと波形情報は大きく読み違えてしまう。しかし、 $200\ \text{ns}$ 以上の間隔があいていると 1% 程度の影響で済んでおり、 $500\ \text{ns}$ 以上離れることで、ほとんど影響が見られなくなることがわかった。

図 3.15(b) に示した二次元相関を x が $200\ \text{ns}$ 以上のプロットを y 軸に射影すると、約 98.4% が $y=0.97\text{--}1.03$ の範囲に含まれている。したがって、波形の異なる信号が検出されていても、その影響は小さく、 $200\ \text{ns}$ 以上間隔があいていれば、エネルギーを 3% 以上読み間違える割合は、1.6% 以下に抑えられる。E40 実験で予想される平均レート $40\ \text{kHz}$ において、パルス間隔がポアソン分布に従うと仮定すると、信号の間隔が $200\ \text{ns}$ 以上になる事象の割合は 99.2% を占めることから、エネルギーを 3% 以上読み間違える割合は 3% 以下であるといえる。



(a) 陽子の波形に陽子のテンプレート波形を重ねた場合。



(b) 陽電子の波形に陽子のテンプレート波形を重ねた場合。

図 3.15: 信号の間隔と精度の相関。

3.5 まとめ

Flash ADC V1724 で取得した $2 \mu\text{s}$ 間の波形データから、波高情報を取得する波形解析手法を確立した。波形解析は、波形データから信号をサーチし、ROOT のアルゴリズムを用いたテンプレート波形によるフィッティングにより波高情報を取得する。波形解析において、取得したタイムゲート内で BGO が検出した信号を全て認識することが重要であるため、信号をサーチする方法を数パターン含んだアルゴリズムを構築した。このアルゴリズムは、イベントタイミングの信号についてよくフィッティングできるまで、信号サーチとフィッティングパターンを試みることで、波形解析の精度の向上を目指した。

pp , pC 散乱実験により取得した波形データを用いて波形解析の抽出効率を求めた結果、E40 実験の平均レート 40 kHz の環境下で、 20 MeV 以上の陽子については約 99% のイベントを正確に解析できることが示された。また、平均の約 3 倍である 130 kHz の環境下でも 96% の効率を示している。実際の実験における解析効率を求める際は、実験環境下で取得された波形データについて同様の方法で調べる必要があるだろう。また、陽電子ビームを直接照射して得られた波形は、陽子の波形と比べてピークから 200 ns 程度後ろでの波形に差異があることがわかった。この波形の差異はパイルアップ信号の間隔が 200 ns 以内と狭いときに大きく影響するが、 200 ns 以上離れている信号波形については、エネルギーを 3% 以上読み間違える割合は 1.6% 以下である。したがって、粒子の種類に依らず、E40 実験の平均レート下においては、 97% 以上のイベントタイミングの陽子のエネルギー情報を、十分な精度で取得することが期待できる。

第 4 章

エネルギー較正法

この章では、文献と実際に行った実験データから、BGO カロリメータのエネルギー較正法を提案する。

4.1 BGO 結晶の発光量

本研究では BGO シンチレーション結晶を用いてきた。その発光量とエネルギーの関係について、過去の文献を参照する。BGO シンチレータについて、V.V. Avdeichikov によって軽い入射イオンによる発光量とエネルギーの関係が調べられた [12]。V.V. Avdeichikov は 3-15 MeV/nucleon の運動エネルギーの入射 ^1H 、 ^2H 及び ^3H に対して BGO シンチレータの発光量を取得し、次の式でフィッティングを行った。

$$L(E, A, Z) = a_0 + a_1 \times \left[E - a_2 AZ^2 \ln \left(\frac{E + a_2 AZ^2}{a_2 AZ^2} \right) \right] \quad (4.1)$$

ここで、 L は発光量、 E はエネルギー、 A は入射イオンの質量数、 Z は入射イオンの原子番号である。 (a_1, a_2, a_3) はフィッティングパラメータである。この式は、J.B. Birks によって提案されたクエンチング効果を考慮した現象論的な発光量とエネルギー損失の関係 [14] から、D.Horn が CsI(Tl) シンチレータの重いイオンに対する応答を調べた際に導き議論している [13]。各フィッティングパラメータの次元と量は以下の通りである。発光量を何かしらの測定値 [ch] で表している。

a_0 [ch] エレクトロニクスから決まるオフセット

a_1 [ch/MeV] シンチレーション効率やエレクトロニクスから決まる Gain

a_2 [MeV] クエンチング効果によるファクター

Avdeichikov によると [12]、測定とフィッティング結果は非常によく一致しており、式 4.1 が低エネルギーの入射陽子の発光量を表すのに有効であることを示している。本研究では、BGO の発光量は波高に変換して処理している。この関係が線形であるならば、式 4.1 を波高とエネルギーの較正式として利用できると期待できる。

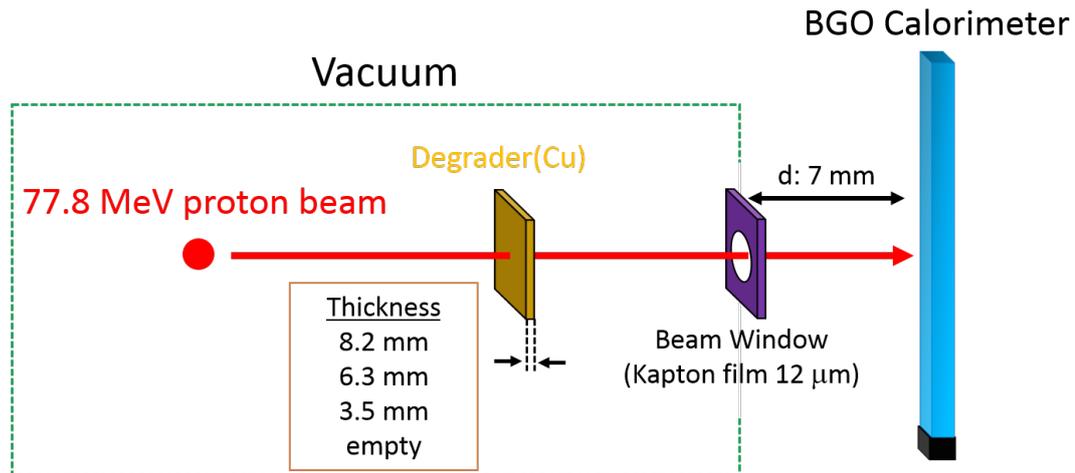


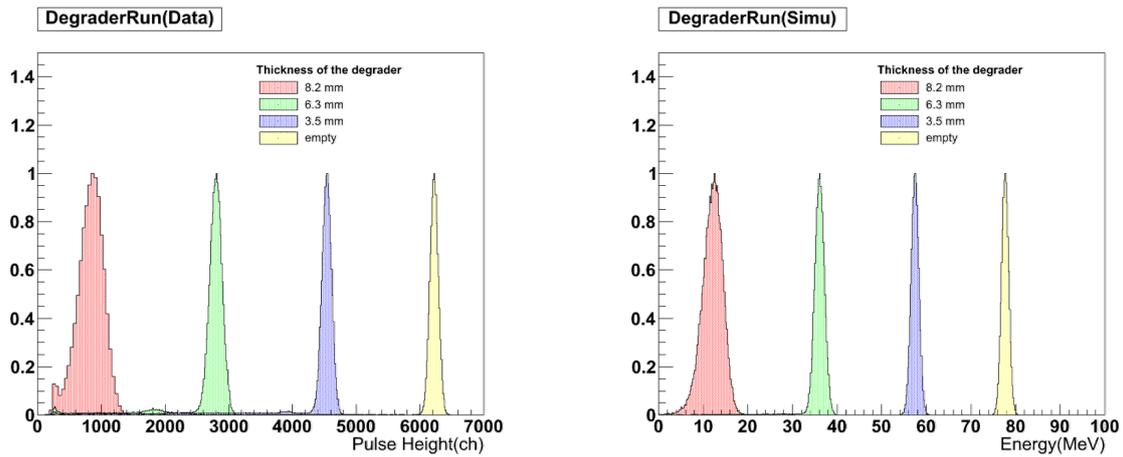
図 4.1: ディグレーダーを用いた測定のセットアップ図。77.8 MeV の陽子ビームは真空中で銅板に入射し、突き抜けた後ビーム窓を通して空気中に置かれている BGO カロリーメータに入射する。銅板は厚みの違う 3 つを用意し、銅板を入れなかった場合も含めて 4 つのコンディションで測定を行った。ビーム窓のカプトン膜は $12 \mu\text{m}$ と非常に薄い。また、ビーム窓と BGO カロリーメータの入射面との距離は 7 mm である。

4.2 ディグレーダーを用いたエネルギーの較正

平成 27 年 12 月、東北大学サイクロトロン RI センターにて、77.8 MeV 陽子ビームを BGO カロリーメータに直接照射する実験を行った際、BGO カロリーメータの上流に銅のディグレーダーを設置して、異なるエネルギーについての測定も行った。このときの実験セットアップを図 4.1 に示す。読み出しは節 2.8 と同様であり、取得した波形データから波形解析により取得した波高情報について議論する。

ディグレーダーは厚さ 3.5、6.3、8.2 mm の 3 つを用意し、ディグレーダー無しの場合も含めて 4 つのコンディションで波形データを取得し、テンプレート波形によるフィッティングにより波高情報を得た。各コンディションにおける波高分布をスケールして並べたものを図 4.2(a) に示す。ディグレーダーが厚いほど波高が小さくなる様子がわかる。これらの波高に対応するエネルギーの値を調べるため、ディグレーダーを突き抜けた陽子ビームの運動エネルギーを Geant4 シミュレーションにより見積もった。シミュレーションでは、ビームエネルギー分布の中心値を求めるために、電磁相互作用によるエネルギー損失のみを考慮している。シミュレーションで得られた BGO に入射する陽子ビームのエネルギー分布を図 4.2(b) に示す。銅板の厚みの精度は $50 \mu\text{m}$ よりは良いため、銅板の厚みからくるビームエネルギーの系統誤差は 100 keV 以内である。

図 4.2 に示した分布それぞれについて、最頻値をガウス関数によるフィッティングで求めた。シミュレーションで求めたエネルギーと、データから求めた波高の対応が 4 点とれたので、このプロットを図 4.3(a) に示す。また、この 4 点からエネルギー較正曲線を求めた。エネルギー較正曲線は、測定した量である波高を横軸にして縦軸に物理量であるエネルギー値にとるのが一般的であるが、文献にある式でフィッティングするために、ここでは横軸をエネル



(a) ディグレーダーを用いた測定の波高分布。(b) ディグレーダーを用いた測定のシミュレーションで見積もったエネルギー分布。

図 4.2: ディグレーダーを用いた測定のデータとシミュレーションから得られた分布図。コンディションの違う分布を並べて表示するために、縦軸をスケールして分布の最大値が 1 になっている。

ギーとした。エネルギーと発光量の関係式を、発光量と波高の線形性を仮定し、エネルギーと波高の較正式として使用する。式 4.2 に較正曲線の式を記す。

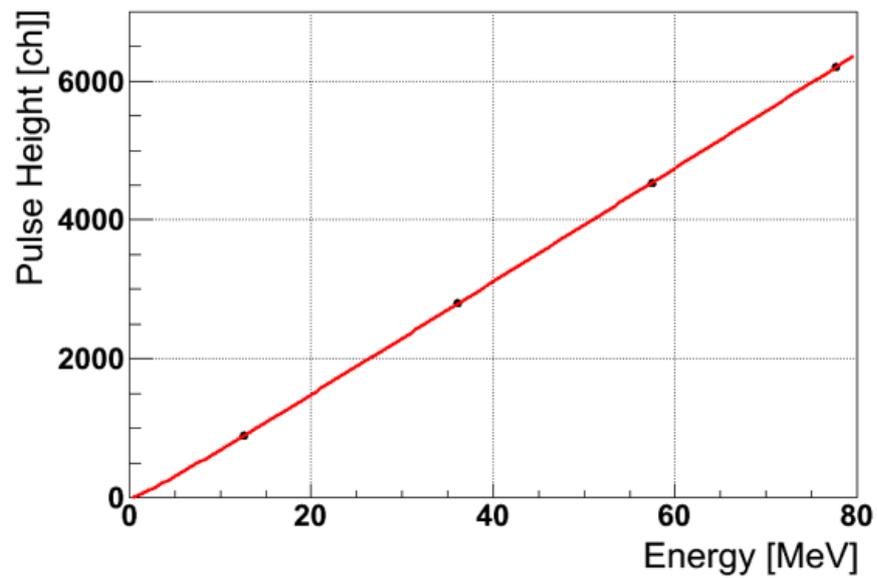
$$\text{Pulse Height [ch]} = a \times \left\{ \text{Energy[MeV]} - b \times \ln \left(\frac{\text{Energy[MeV]} + b}{b} \right) \right\} \quad (4.2)$$

波高情報にオフセットはないので、この式は原点を必ず通る。式中の a, b をパラメータとしてフィッティングを行った結果を図 4.3(a) に重ねて描いている。フィッティング結果は $a = 82.76 \pm 0.03[\text{MeV}/\text{ch}]$ 、 $b = 0.566 \pm 0.008[\text{MeV}]$ となった。また、フィッティングした較正曲線とグラフの 4 点との残差を図 4.3(b) に示す。データ点 (x, y) について、較正曲線 $f(x)$ との残差を

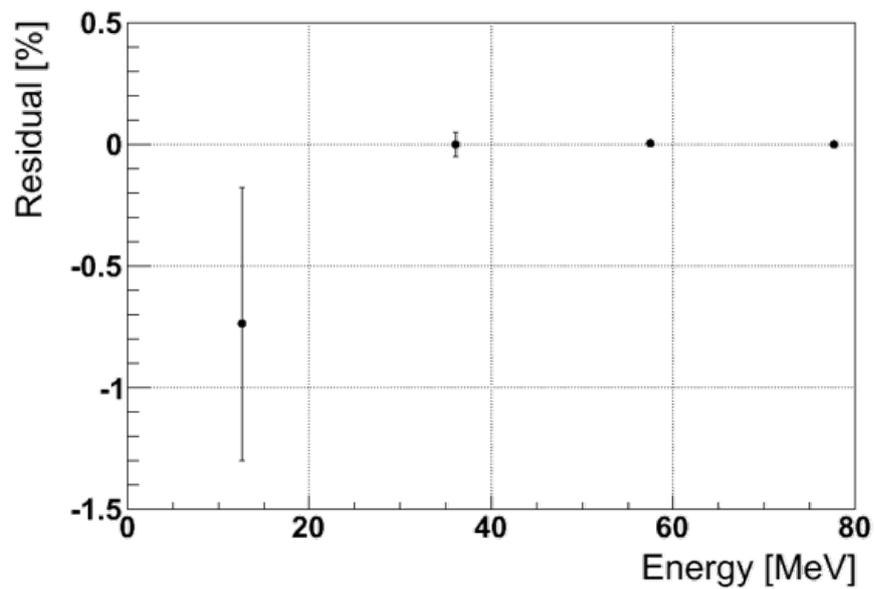
$$\text{Residual [\%]} = \frac{y - f(x)}{y} \quad (4.3)$$

と定義した。

図 4.3 に示した式 4.2 によるフィッティングはうまくいっている。特に 35 MeV 以上の 3 点については 0.1% の精度である。一方で 4 点という少ない点の中、エネルギーの最も低い点で誤差が大きことから、低エネルギー側での較正には不安が残る。



(a) ディグレーダーを用いた測定から得られた波高と、シミュレーションから得られたエネルギーを対応させたプロット。赤い線は式 4.2 でフィッティングで得られた較正曲線である。フィッティング結果は $a = 82.76 \pm 0.03[\text{MeV}/\text{ch}]$ 、 $b = 0.566 \pm 0.008[\text{MeV}]$ となった。



(b) フィッティングで得られたエネルギー較正式とプロット点との残差。縦軸の残差は相対値となっている。

図 4.3: ディグレーダーを用いた測定データのエネルギー較正とその残差。

4.3 pp , pC 散乱実験におけるエネルギーの較正

平成 27 年 12 月、東北大学サイクロトロン RI センターにて、77.8 MeV 陽子ビームを CH_2 ターゲットに照射して pp , pC 散乱実験を行った。この実験の目的は pp , pC 散乱事象を BGO カロリーメータで捉えることで、シミュレーションと比較してエネルギー較正を行うことと、様々なエネルギーの波形データを取得することである。

4.3.1 セットアップ

pp , pC 散乱を起こすための陽子標的及び炭素標的として、厚さ $200 \mu\text{m}$ の CH_2 ターゲットを採用した。 pC 散乱では入射粒子である陽子に対して標的粒子の炭素原子核の質量が大きいいため、標的原子核はほとんど反跳せず、入射粒子が運動エネルギーをほぼそのままに散乱する。一方で、 pp 散乱では、入射粒子と標的粒子が同じ質量であるため、散乱した入射粒子である陽子と反跳した標的粒子である陽子が放出される。

pC 散乱による散乱陽子は、ほぼビームエネルギーを持つため、これを BGO カロリーメータで検出してエネルギー較正に利用する。 pp 散乱で放出される 2 つの陽子のエネルギーと角度の関係は、二体の粒子の運動を考えることで運動学的に一意に決まる。図 4.4 に pp 散乱の概念図を示す。

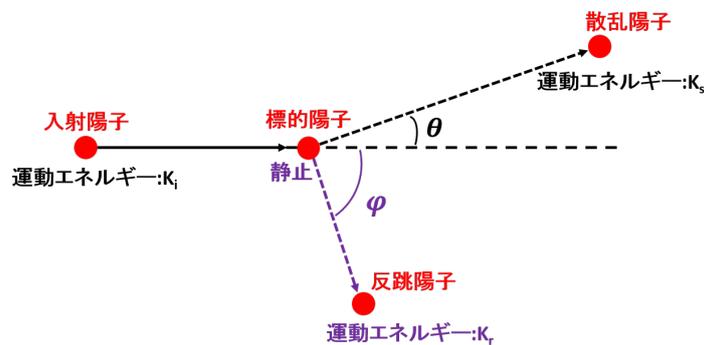


図 4.4: pp 散乱の概念図。

入射陽子の運動エネルギーを K_i 、散乱陽子と反跳陽子の運動エネルギーをそれぞれ K_s 、 K_r とする。また、入射陽子の進む方向と、散乱陽子の進む方向が成す角度を θ 、反跳陽子の進む方向が成す角度を ϕ とすると、これらの物理量は次の関係式で表される。

$$K_s + K_r = K_i \quad (4.4)$$

$$K_s = K_i \cos^2 \theta \quad (4.5)$$

$$K_r = K_i \cos^2 \phi \quad (4.6)$$

入射陽子の運動エネルギーが K_i わかっているとすると、散乱陽子もしくは反跳陽子の運動エネルギーか角度のどれか 1 つでもわかれば、ほかの 3 つの物理量はこれらの式から導出できる。

pp , pC 散乱実験のセットアップを図 4.5 に示す。読み出しは節 2.8 で用いた測定系を構築して行った。この実験で測定できるのは、BGO カロリーメータ 2 本による検出光量と時間情報のみである。データ取得系のトリガーは pC 散乱及び pp 散乱によるイベントが 1 : 3 程度に混ざるように構築した。 pC 散乱トリガーとしては、2 本の BGO カロリーメータそれぞれのチャンネルの、アナログ回路の AC カップリング出力をディスクリミネーターに接続し、60 MeV 程度の波高に閾値を設けて生成した。 pp 散乱トリガーは、2 チャンネルそれぞれの AC カップリング出力に 2 MeV 程度の波高で閾値を設け、そのコインシデンスを要求して生成した。生成されたトリガーをそれぞれ適度にプリスケalerを用いて間引くことで、 $pC : pp = 1 : 3$ 程度になるようトリガーを構築した。また、プリスケalerする前のトリガー信号を VME スケaler CAEN V830 で計数することで、BGO カロリーメータのシングルスレートをモニターした。

この実験で測定したコンディションは、シングルスレートの 40 kHz-700 kHz、PMT の印加電圧は 700 V、650 V、600 V である。

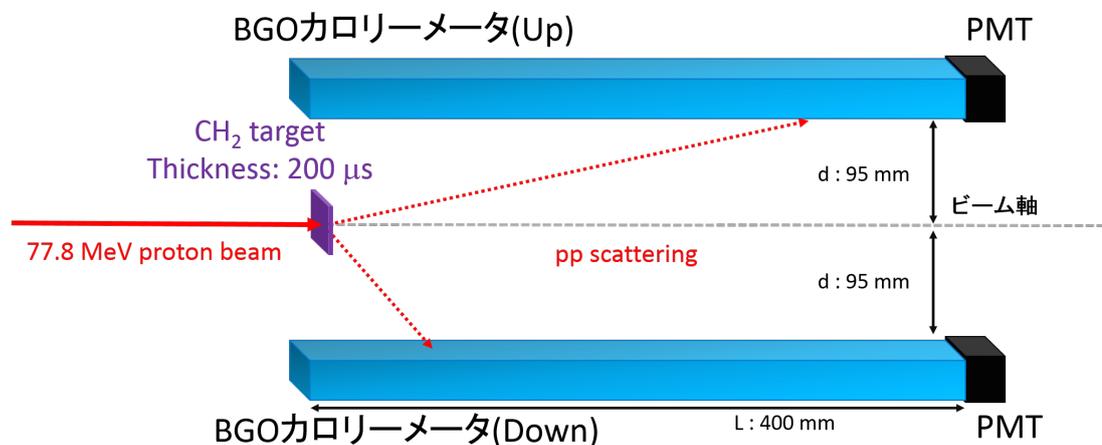
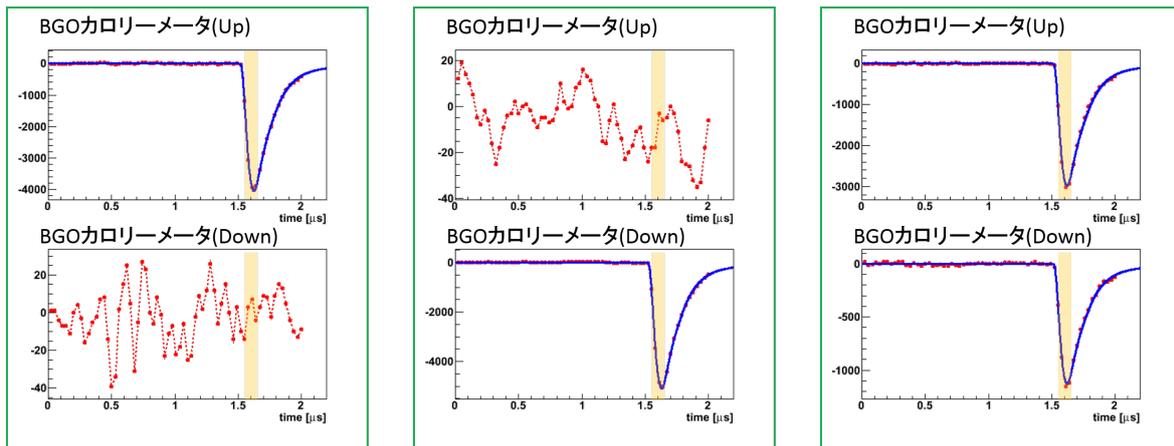


図 4.5: pp , pC 散乱実験のセットアップ図。ビーム軸に厚さ $200 \mu\text{m}$ の CH_2 ターゲットを設置し、その下流側に BGO カロリーメータ 2 本をビーム軸を挟むように設置した。ビーム軸と BGO カロリーメータの距離は 95 mm で、2 本はビーム軸に対して対称に置いた。実際には BGO 結晶を支えるための架台があるが、図中では省略している。

4.3.2 散乱イベントの波形分布

取得した波形データからテンプレート波形フィッティングにより波高情報を得る。トリガー段階での pp 散乱事象の同定には、2 本の BGO カロリーメータへの同時ヒットを要求する。もちろん、2 つの pC 散乱がほぼ同時に起こり、それぞれが BGO カロリーメータで検出される事象もある。一方で、 pC 散乱事象の同定には、片方の BGO カロリーメータのみへのヒットを要求するが、 pp 散乱により放出された陽子の片方だけが検出される事象もある。これらのイベントを時間情報から弁別することは困難だが、互いの波高情報により分けることはある程度可能である。また、ここでは事象同定を厳しく行う必要はない。

取得した波形データについて波形解析を行い、トリガータイミングの信号の波高と時間情報



(a) BGO(Up) が pC 散乱事象を捉えた波形。BGO(Down) のトリガータイミングには信号は検出されていない。

(b) BGO(Down) が pC 散乱事象を捉えた波形。BGO(Up) のトリガータイミングには信号は検出されていない。

(c) 2 本の BGO が pp 散乱事象を捉えた波形。BGO(Up)、BGO(Down) 両方のトリガータイミングに信号を検出している。

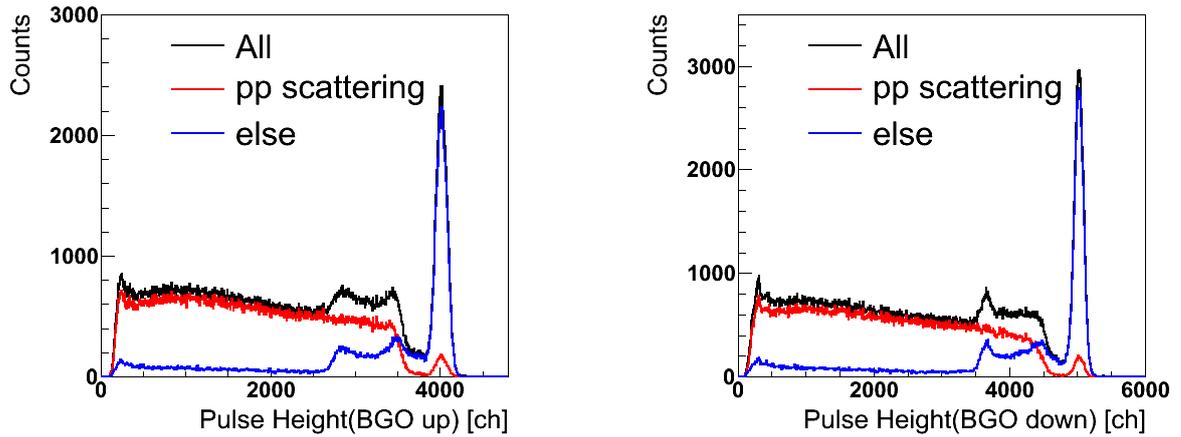
図 4.6: pp , pC 散乱事象の波形

を取得した。 pC 散乱事象では片方のチャンネルで約 77.8 MeV のエネルギーの陽子の信号が検出されることが期待される。トリガータイミングに pC 散乱を検出したと考えられる波形データを図 4.6(a), 4.6(b) に示す。 pp 散乱事象の信号は、2 チャンネルで同時に検出され、そのエネルギー値の合計が約 77.8 MeV になると期待される。トリガータイミングで pp 散乱事象を検出したと考えられるイベントの波形データを図 4.6(c) に示す。

トリガータイミングの範囲を図中の 1.55-1.65 μs の 100 ns 幅に設定した波形解析によって得られたトリガータイミングの信号の波高分布を図 4.7 に示す。2 チャンネルともにトリガータイミングで信号が検出された場合を pp 散乱とし、片方のみ検出されたときと色分けしている。

図 4.7 に示した片方のみ検出された場合の波高分布からは、 pC 散乱に対応するピークが確認できる。ピーク以外の領域は、 pp 散乱事象のもう一方の陽子が検出されなかったイベントか、 pC 散乱事象イベントだが BGO 結晶中で全エネルギーを損失しなかったイベントと考えられる。全エネルギーを損失しない原因としては、BGO 結晶中の中性子と反応して一部のエネルギーが持ちだされる事象と、陽子が BGO の端のほうに斜めに入射し、全エネルギーを落とす前に突き抜けた事象が考えられる。一方、 pp 散乱事象と判断されるイベントの波高は低いところから高いところまでなだらかに分布している。 pC 散乱に対応するピークと同じ波高のイベントはもう片方のチャンネルでも偶然同じタイミングで検出された pC 散乱の事象と考えられる。これら 2 つのチャンネルの波高分布を二次元ヒストグラムで図 4.8 に示す。波高とエネルギーが概ね線形の対応であると考え、色の濃い斜めの帯は pp 散乱で放出された陽子 2 つがそれぞれ別 BGO カロリメータですべてのエネルギーを損失したイベントと考えることができ、そのエネルギーの合計はビームエネルギーの 77.8 MeV に近い値であると期待される。

これらの取得した波形分布とその相関から、エネルギー情報の取得を試みる。



(a) BGO カロリメータ (Up) で検出された信号の波高分布。

(b) BGO カロリメータ (Down) で検出された信号の波高分布。

図 4.7: pp , pC 散乱実験の波高分布。シングルスレート : 40 kHz。

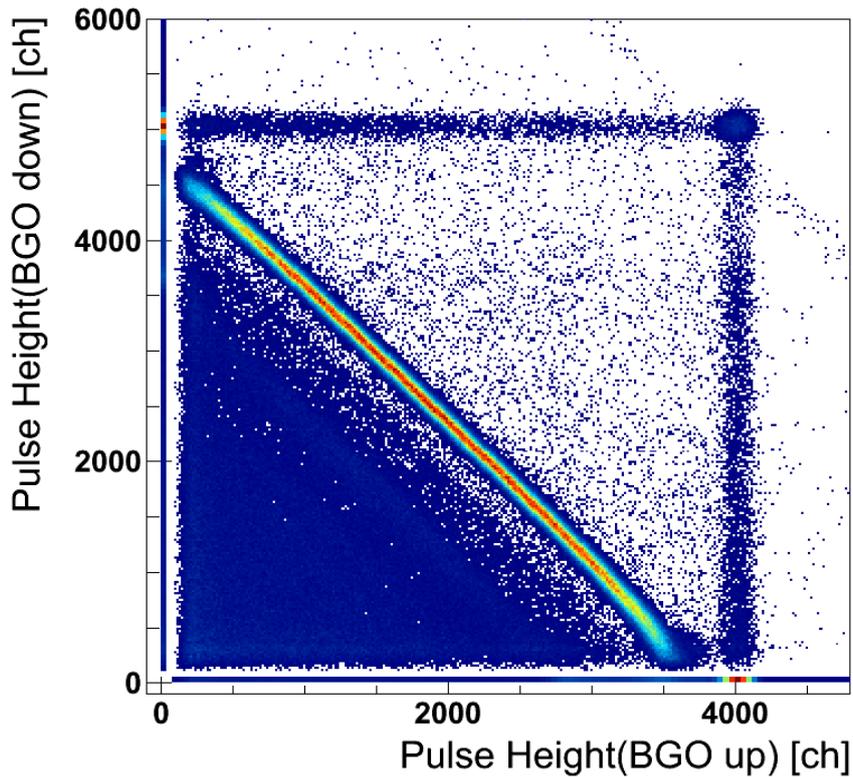


図 4.8: 2つの BGO カロリメータの波高分布の相関。シングルスレート ; 40 kHz。横軸が BGO カロリメータ (Up)、縦軸が BGO カロリメータ (Down) である。 pp 散乱事象と考えられる右肩下がりの帯が確認できる。 pC 散乱と思われる点が、 $x = 0$ と $y = 0$ の領域それぞれに確認できる。なお、 $x > 0$ かつ $y > 0$ の領域の二次元ヒストグラムと $x = 0$ または $y = 0$ の領域の二次元ヒストグラムはそれぞれ別のビン幅を持っていて、その度数と色の対応は異なる。

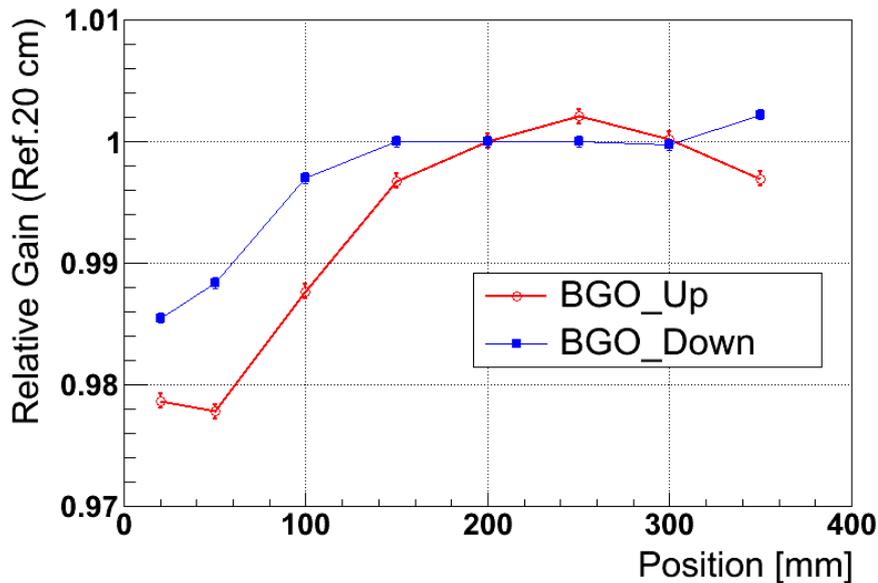


図 4.9: 検出光量の位置依存性。 pp , pC 散乱実験に使用した 2 本の BGO カロリーメータについて、 ^{137}Cs 線源由来の γ 線のピークに対応する Gain を照射位置を変えて測定した。横軸は γ 線照射位置の PMT からの距離で、縦軸は Position $z = 200$ mm のときを 1 としたときの相対 Gain である。

4.3.3 測定値とエネルギーの対応

この実験で測定できるのは、BGO の検出光量とその時間情報のみであり、陽子のヒット位置はわからない。 pp 散乱の場合、検出される陽子の運動エネルギーから、式 4.6 を用いてその角度が求まるので、BGO カロリーメータのどこに入射したかを知ることができる。しかし、現時点ではエネルギーの較正に関する情報はない。また、使用した BGO カロリーメータの検出光量はその照射位置による依存性があることがわかっている。図 4.9 に ^{137}Cs 線源由来の γ 線を用いて調べた検出光量の位置依存性を調べた結果を示す。横軸の Position は PMT を取りつけ付けた面からの距離を表してしており、この方向を z 方向と定義した。BGO カロリーメータの z 方向の大きさは 400 mm で、真ん中の $z = 200$ mm における検出光量を基準とする。また、測定は生信号の電荷量を QDC により取得して行った。この位置依存性は、予め測定しておくことで補正することができる。

pp 散乱及び pC 散乱により飛び散った陽子が、BGO カロリーメータで損失するエネルギー及び、その照射位置を Geant4 シミュレーションにより見積もることができる。シミュレーションは pp 散乱と pC それぞれについて別々に行う。 pp 散乱ではその微分断面積は考慮せず、検出される 2 つの陽子のエネルギーとその位置だけを見積もる。ここでは、電磁相互作用によるエネルギー損失のみを計算するので、平均的には式 4.6 に記した運動学とベーテブロッホの式からも計算することができる。 pC 散乱については、その微分断面積を考慮することで、BGO カロリーメータに入射する位置と検出されるエネルギー分布を見積もった。引用した文献値 [18] は 79.8 MeV の陽子ビームを炭素標的に照射して得られた微分断面積である。ここ

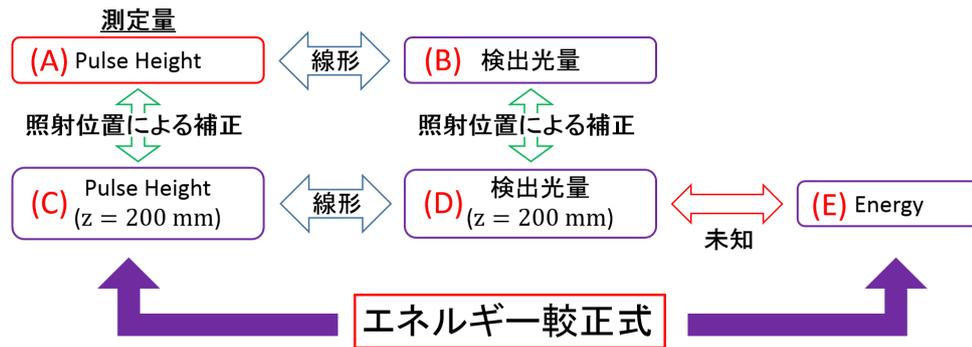


図 4.10: 測定量とエネルギーの関係の概略図。図中のアルファベット (A)-(E) は本文中で使用
する略記号である。照射位置の依存性が含まれる Pulse Height(A) 及び検出光量 (B) は、照
射位置がわかればそれぞれ $z = 200 \text{ mm}$ における値、(C) 及び (D) へと補正できる。

までで1つずつのイベントについて照射位置と BGO で損失したエネルギーが得られた。この
エネルギー量を PMT による検出光量に換算する際、BGO カロリーメータの分解能による不
定性を持たせ、照射位置による検出光量への依存性を加えた。エネルギー分解能は 77.8 MeV
陽子について 1.0% で、 $1/\sqrt{E}$ に比例するとした。

データとシミュレーションから波高とエネルギーの対応を求める。

対応を求める量の関係

BGO カロリーメータで取得した情報は、波形解析による波高という量として扱う。この波
高は BGO の検出光量と単純な比例関係にあると仮定する。波高とエネルギーの対応を
求めるにあたり、測定量とエネルギーの関係を図 4.10 に示した。検出光量と波高を比例関係とす
ることで、照射位置に依る補正は検出光量についてと波高についてどちらにでも同様に行うこと
ができる。また、検出光量の絶対値を求める必要がないため、便宜的にスケールした値を用い
て相対値のみで議論する。エネルギーの較正を行うにあたり、求める波高とエネルギーの対応
は図 4.10 の (C) \leftrightarrow (E) である。測定データ及びシミュレーションから情報を得て、次の2つ
の対応点を決める。

1. pC 散乱による波高分布のピークを中心値とそのエネルギーの対応
2. pp 散乱の散乱角 45° の波高とそのエネルギーの対応

(C) \leftrightarrow (E) の対応を求める際、(C) \leftrightarrow (D) 及び (D) \leftrightarrow (E) の対応を経ている。(C) \leftrightarrow (D)
は比例関係のため、(D) \leftrightarrow (E) がエネルギー較正における非線形な対応を決める。検出光量
は便宜的に扱う量なので、(C) \leftrightarrow (D) の比例係数を自由に決める。このとき、エネルギー較正
(C) \leftrightarrow (E) の対応を求めるということは、(D) \leftrightarrow (E) の対応を求め、その相対値で議論する
ということになる。2つの対応点を求める際、(C) \leftrightarrow (D) の比例係数 ((A) \leftrightarrow (B) も同様)
は同じ値でなければならないことから、以下に記述する順番で対応を求めた。

pC 散乱のピーク中心

pC 散乱による散乱陽子の信号の波高は、図 4.7 に示した青い分布のピークに対応する。このピークをガウス関数でフィッティングし、測定値としての中心値を得た。この分布について照射位置による補正はできず、得られた量は図 4.10 における (A) である。位置情報を得ていないデータについて (A) \leftrightarrow (C) の変換を行うことはできない。よって、対応する (C) の分布をシミュレーションによって再現する。

まず、(A) のピークに対応するエネルギーをシミュレーションから見積もったところ、得られたエネルギー分布のピーク中心値は 76.8 MeV であった。このピークに対応する (D) 分布を適当なファクターをかけてつくり、図 4.9 の実測した位置依存性を用いて照射位置の補正を加えた (B) の分布から、そのピーク中心値を得る。この (B) のピークの中心値と (A) のピークの中心値の対応を (A) \leftrightarrow (B) 及び (C) \leftrightarrow (D) の比例係数として決定する。これにより、(C) の分布の中心値を求めることができ、76.8 MeV おける (C) \leftrightarrow (E) の対応点を取得できた。

45° 方向 pp 散乱

pp 散乱では、そのエネルギーと散乱角度に 1 対 1 の対応があるため、エネルギーがわかれば検出光量の位置依存性は補正可能である。だが、この pp 散乱の測定データから取得した波高情報だけでは対応するエネルギーも照射位置も決まらず、エネルギーと波高の対応点を求めるのは困難である。

しかし、45° 方向 pp 散乱については次のように見積もることができる。まず、波高とエネルギーの較正式について、スケールファクター以外は 2 つの BGO カロリーメータで同じだと仮定する。このとき、2 つのチャンネルで得られた波高の値について、それぞれのチャンネルの pC 散乱のピークとの比が同じ値になるならば、それらは同じエネルギーを表すことになる。

式 4.6 からわかる通り、片方の陽子が 45° 方向に進んでいる場合、もう片方の陽子は -45° 方向に進んでおり、両者の運動エネルギーは同じである。2 つの陽子はそれぞれ別の BGO カロリーメータに入射するが、2 本の BGO カロリーメータはビーム軸に対して対称に置かれているため、BGO 結晶で静止する陽子のエネルギー損失のプロセスに平均的に差異は生じない。BGO カロリーメータが検出する陽子のエネルギーはシミュレーションにより 38.0 MeV と見積もった。

さて、ターゲットから 45° 方向へ飛ぶ散乱陽子は $z = 300$ mm 付近に当たる。図 4.9 からわかる通り、この位置では検出光量の位置依存性が小さい。このとき、位置依存性の補正前の波高情報は、補正後 ($z = 200$ mm 相当) の波高情報と同様に扱うことができる。そして、線形を仮定しているエネルギー値は、いわば pC 散乱のピークとの相対波高であるため、2 つのチャンネルが同じ相対波高であるとき、その陽子は同じエネルギーであると期待できる。したがって、相対波高が同じ領域だけを選ぶことで、位置依存性に対する補正を行った波高分布 (C) から、45° 方向の散乱イベントをセレクトすることができる。図 4.11(a) に、セレクトする領域を示した。この領域の幅は pC 散乱のピークの $\pm 1\%$ である。セレクトした領域における各チャンネルの波高分布を図 4.11(b) 及び 4.11(c) に示す。2 チャンネルともに pp 散乱によるものと考えられるピークが確認できる。このピークをガウス関数でフィッティングしてそ

の中心値を求めた。これにより、(C) の分布の中心値を求めることができ、38.0 MeV おける (C) ↔ (E) の対応点を取得できた。

較正曲線

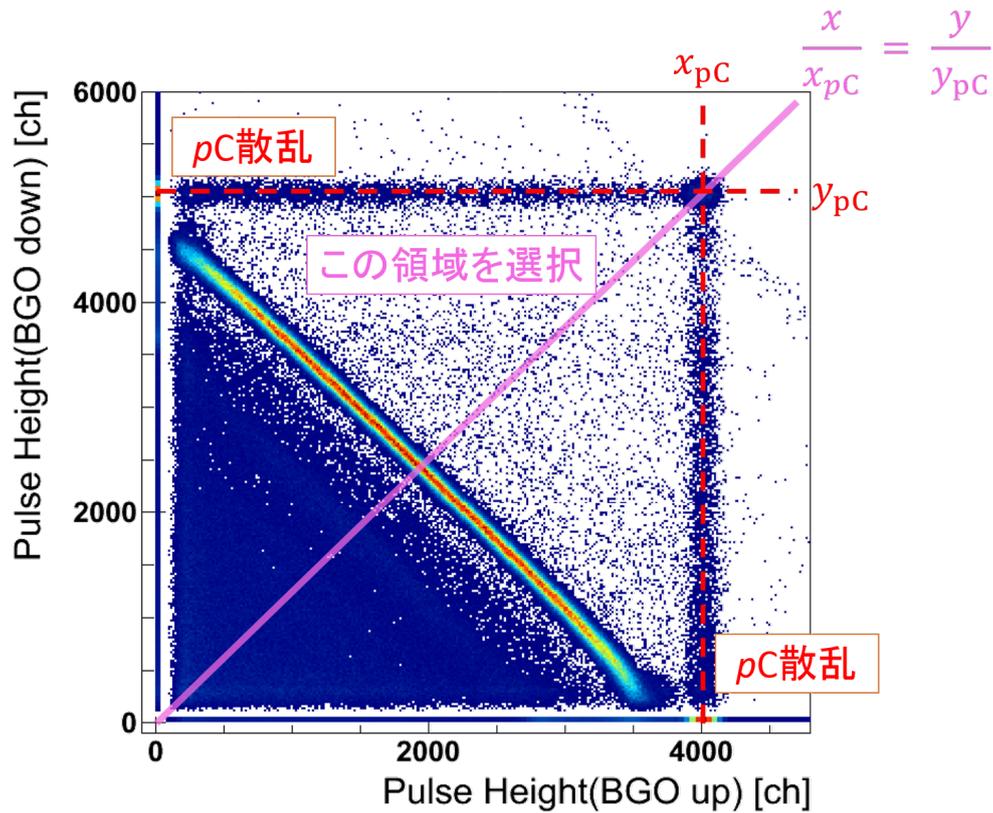
これらの2点は、照射位置とエネルギーの不定性のある程度取り払って考えることができたが、他の対応点を取るのには難しい。よって、この2点から式4.2で表される較正式を一意に決めることにした。パラメータ a, b をそれぞれ以下に記す。また、式4.2に示した較正式を再掲する。

$$\text{Pulse Height [ch]} = a \times \left\{ \text{Energy [MeV]} - b \times \ln \left(\frac{\text{Energy [MeV]} + b}{b} \right) \right\}$$

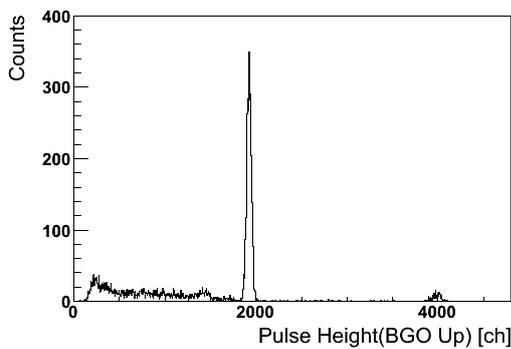
$$\text{BGO カロリメータ (Up)} \quad a = 54.37[\text{MeV/ch}], b = 0.713[\text{MeV}]$$

$$\text{BGO カロリメータ (Down)} \quad a = 68.10[\text{MeV/ch}], b = 0.549[\text{MeV}]$$

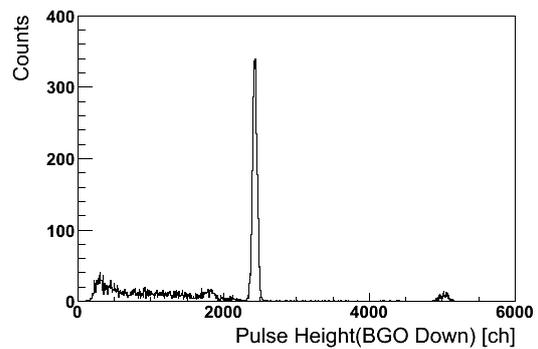
図4.12にこのパラメータで表される較正曲線と、比較として2点を通る直線を重ねて示した。較正に使った2点を直線で結ぶと原点を大きく逸れることが確かめられ、低エネルギー領域におけるクエンチング効果による発光量の非線形性の影響が表れていると言える。ここで得られた較正式の有効性は次の節で議論する。



(a) 2つのBGOカロリメータの波高分布の相関からの pp 散乱イベントの選択。赤い破線はどちらかが pC 散乱を捉えたと考えられるイベントが検出された領域である。マゼンタの実線はこの2本の交点と原点とを繋ぐ線を引き、両軸を pC 散乱のピークの値でスケールしたときに $y = x$ に乗る領域である。この領域を 45° 方向の pp 散乱とする。



(b) (a)において $45^\circ pp$ 散乱イベントとして選んだ領域を x 軸に射影したヒストグラム。BGOカロリメータ(Up)で検出された信号の波高分布。



(c) (a)において $45^\circ pp$ 散乱イベントとして選んだ領域を y 軸に射影したヒストグラム。BGOカロリメータ(Down)で検出された信号の波高分布。

図 4.11: 45° 方向 pp 散乱のイベントセレクト。

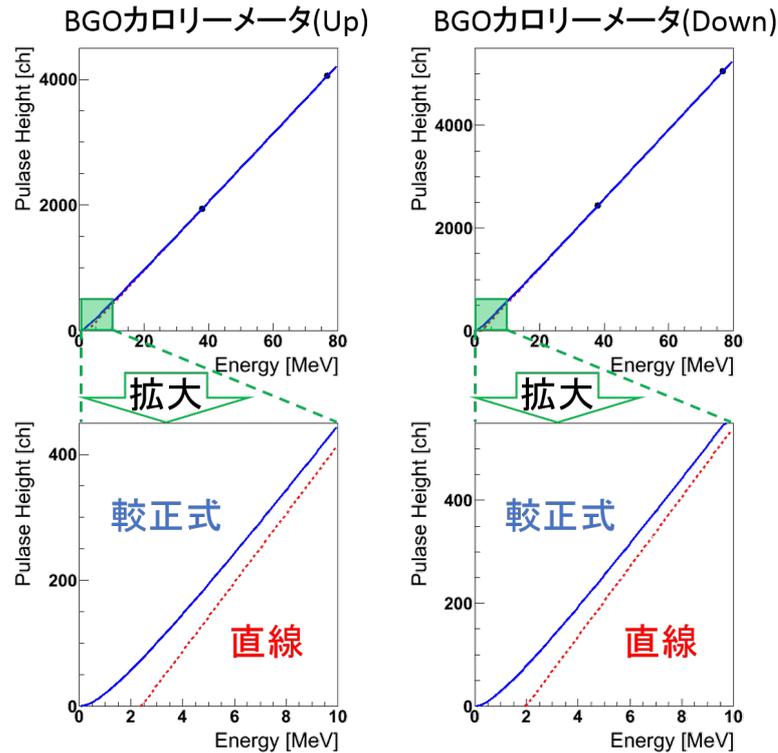
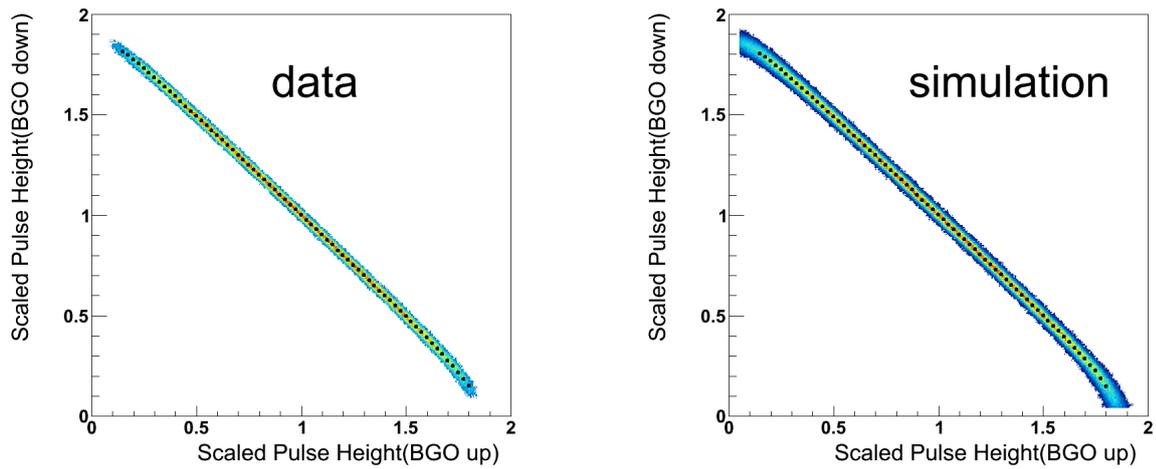


図 4.12: pp, pC 散乱の波形データとシミュレーションから得られた 2 点の対応から作成した較正曲線と 2 点を結ぶ直線。

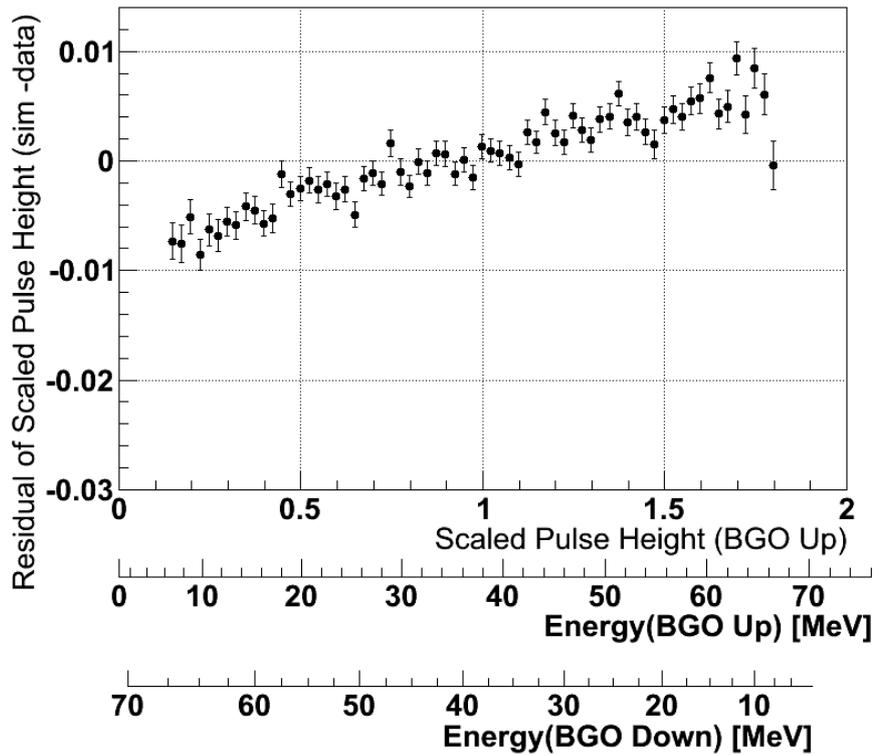
4.3.4 較正曲線の評価

前節で得られた較正曲線の評価するために、 pp, pC 散乱の実験データをシミュレーションで再現して比較する。比較する対象には図 4.8 にもみられる pp 散乱イベントによる波高分布の二次元相関を用いる。まず、縦軸と横軸をスケールする。前節で較正曲線を決定する仮定で 45° 方向の pp 散乱を選択した方法を用いて、この波高を 1 として波高情報をスケールする。スケールするファクターとしては、 pC 散乱のピークを用いるという方法も考えられるが、位置とエネルギー両方の不定性があるデータのため補正が容易ではない。且つ、 pC 散乱は前方方向への散乱が多数を占めており、検出光量の散乱陽子入射位置による不定性がより一層大きくなってしまふ (図 4.9 参照)。一方で、 45° 方向の pp 散乱事象で放出された陽子は、その運動学から図 4.9 で示した横軸の 300 mm 周辺に入射する。この周辺では検出光量が比較的安定しており位置による検出光量の不定性を取り除いて考えらえる。よって、前節で対応をとった 2 点のうち、 45° 方向の pp 散乱による点を信頼した。 pp 散乱のスケールした波高の相関を図 4.13(a) に示す。また、前節で得られた較正式を用いたシミュレーションで生成した波高データを、同様にしてスケールした相関を図 4.13(b) に示す。それぞれの相関図中にある黒点は、横軸についてスライスして縦軸に射影し、その中心値を求めたものである。この点同士の差を見ることで、較正式によるデータの再現性を確かめる。この差を図 4.13(c) に示す。また、図 4.12 に描いた、求めた 2 点を通る一時曲線を較正式とした場合の波高相関の差異を図 4.14 に示す。



(a) pp 散乱のスケールした波高の相関図。スケールファクターは 45° 方向の pp 散乱の波高値である。図中の黒点は、散布図をスライスして得た中心点である。

(b) シミュレーションで再現した pp 散乱のスケールした波高の相関図。スケールファクターは 45° 方向の pp 散乱の波高値である。図中の黒点は、散布図をスライスして得た中心点である。



(c) 2つのBGOカロリメータで検出された波高相関の残差。シミュレーションにより得られた中心値からデータにより得られた中心値を引いた値である。横軸には、BGOカロリメータ(Up)が検出したスケールした波高をとっているが、評価している較正式から求まるエネルギーの値も重ねて示した。また、もう片方のBGOカロリメータ(Down)が検出するエネルギー値も示しており、この対応はシミュレーションによって得た。

図 4.13: データとシミュレーションの比較による較正曲線の評価。

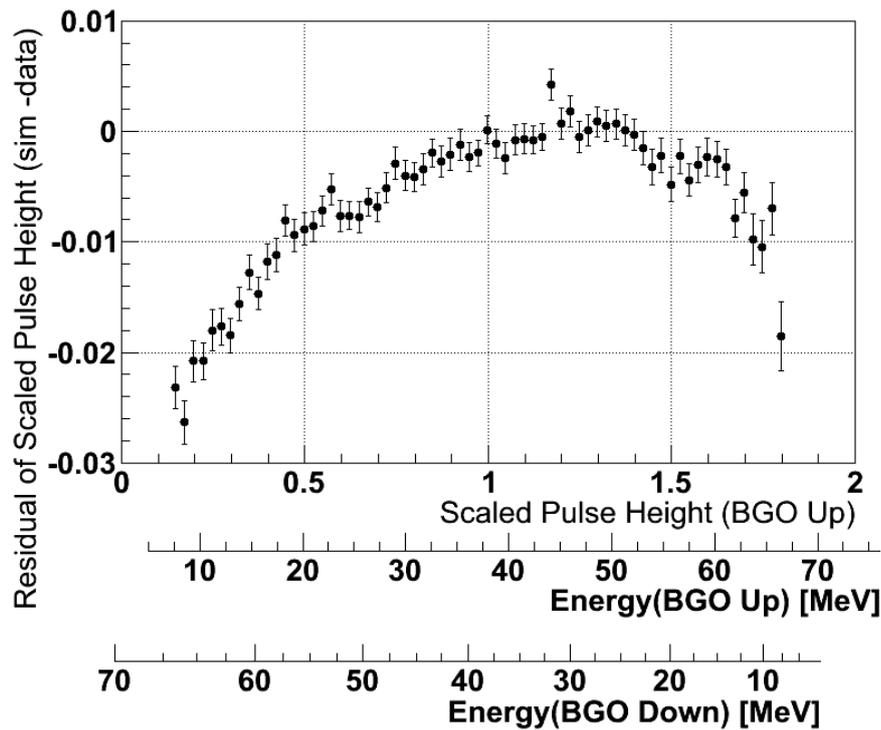


図 4.14: 較正式に一次曲線を用いた場合の波高相関の残差。

図 4.13(c) 及び、図 4.14 を比較して議論する。この 2 つのグラフにおいては、横軸の値が 1 から離れるほど、片方の BGO カロリーメータが検出した陽子のエネルギーは小さくなる。また、縦軸のスケールされた波高は単純にエネルギーに換算することができないが、縦軸の 0.01 は大雑把に 0.8 MeV 程度に対応する。式 4.2 による較正式を用いた場合、10 MeV 以上のエネルギー範囲において、低エネルギー領域における非線形性を考慮した較正式では 0.8 MeV 程度の精度で再現できている。一方で、較正式が一次曲線の場合は、両端が大きく下がった形をしており、低エネルギー領域をよく再現できていないことがわかる。これにより、式 4.2 によるエネルギー較正は有用だといえる。

式 4.2 におけるパラメータ b は、低エネルギー領域を再現するのに重要であるため、このパラメータを変えてシミュレーションを行い、データと比較する。節 4.2 でディグレーダーを用いた測定を行い、別の BGO カロリーメータについてのパラメータ b を得ている。 pp , pC 散乱に使用した 2 本の BGO カロリーメータについても、この b が同じであると仮定して、 45° 方向の pp 散乱の 1 点からパラメータ a も決定することで較正曲線を決定した。図 4.15(a) に、この較正曲線を使用してシミュレーションを行い、波高分布を比較した様子を示す。BGO カロリーメータ両方ともが 15 MeV 以上の陽子を検出したときは、シミュレーションとデータにほとんど差異がなく、よく再現できている。15 MeV 以下においては若干の差異があることが確認できる。エネルギーの低い領域で、シミュレーションがデータより波高を低く見積もっているということは、パラメータ b が小さいためと考えられる。そこで、他にもいくつかの b について同様の操作を行ったところ、 $b = 0.6$ のとき最もよくデータを再現できた。 $b = 0.6$ の場合の波高分布を比較を図 4.15(b) に示す。10 MeV 以上の範囲で非常によく一致している。

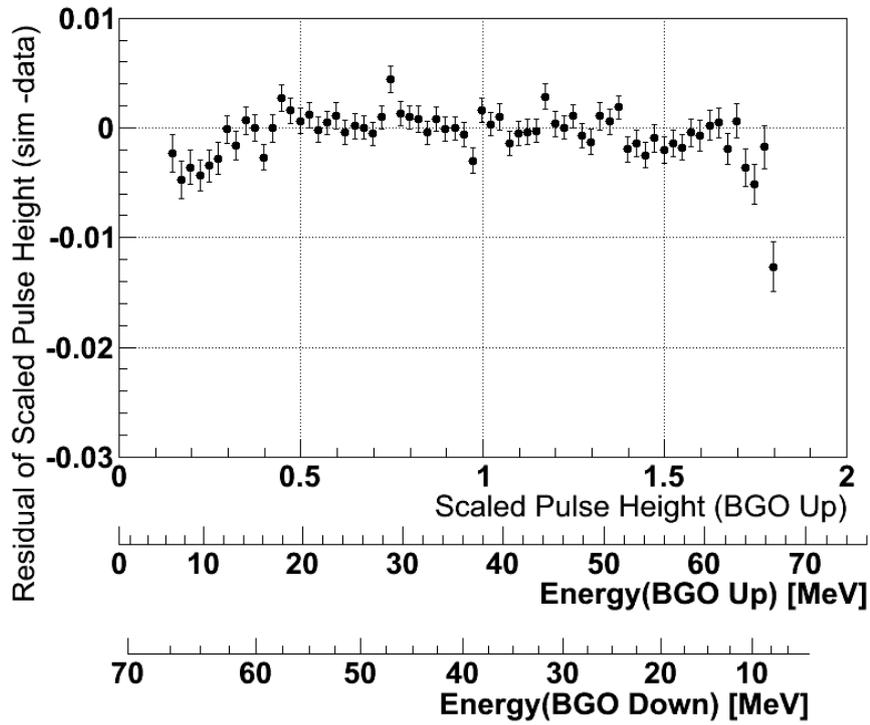
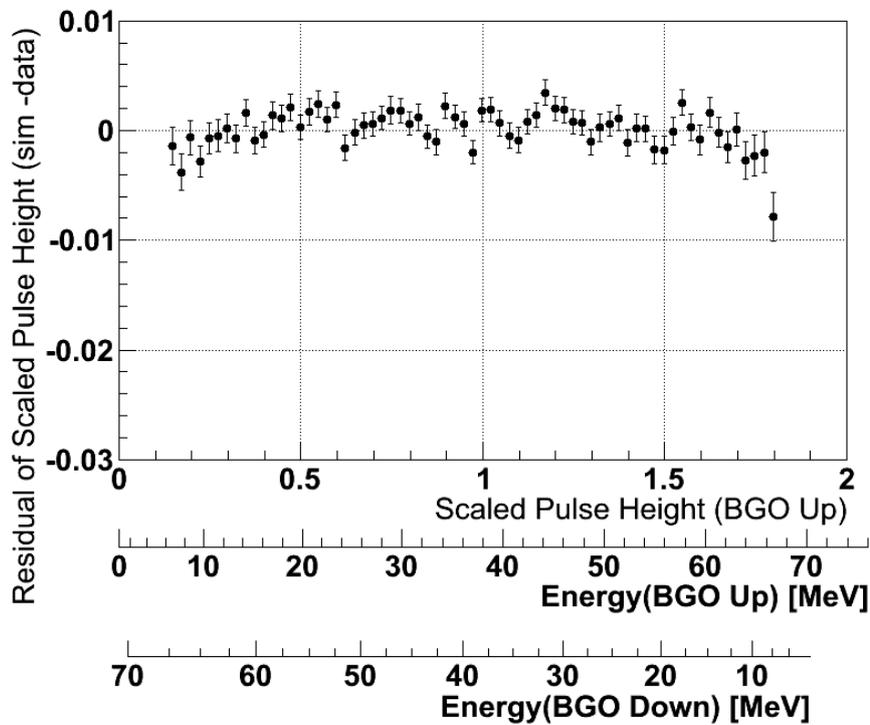
(a) $b = 0.566$ を用いた場合。(b) $b = 0.6$ を用いた場合。

図 4.15: 較正式のパラメータを変えた場合の波高相関の残差。

以上により、10 MeV 以上に対して約 0.4 MeV 以内の精度で較正可能な較正曲線を求めることができた。しかし、散乱データから決定したパラメータからでは 0.8 MeV の精度の較正曲線しか得られず、その残差の分布から、さらに低いエネルギー領域ではより悪化すると予想される。データから較正曲線を得るには、 pC 散乱の対応を厳密に決める必要がある。しかし、式 4.2 による較正式は非常に有用であり、最低でも精度のいい対応点が 2 点あればエネルギー較正を行うことができることがわかった。

4.4 まとめ

BGO カロリメータは 160 MeV までの任意のエネルギー値を測定することが求められているため、エネルギーと波高の較正を行うことが不可欠である。そこで、BGO シンチレータのエネルギーと発光量の対応を記した文献を引用し、ディグレーダーを使用した測定データと pp , pC 散乱のデータを使用して、エネルギーと波高の較正式の決定を試みた。決定するエネルギー較正式のパラメータは、低エネルギー領域で支配的になる非線形の要素と、それよりも高いエネルギーで支配的になる線形の要素を司る。特にこの非線形性を表すパラメータの決定を精度よく行うには、低エネルギーにおける波高との対応点が必要となる。複数の方法で決定したエネルギー較正式の評価を、シミュレーションとデータを比較することによって行った結果、最も良いもので 10 MeV 以上の陽子について 0.4 MeV 以内の精度であった。また、エネルギー較正式を一意に決定するには、入射陽子のエネルギーと、照射位置がわかっているときの波高との対応を 2 点決定する必要がある。

第 5 章

実機の製作と評価

この章では、開発した BGO カロリーメータの読み出しシステムを実装した、E40 実験のためのカロリーメータシステム全体の構築について述べる。実験室にて、BGO カロリーメータを実機架台へ設置し恒温槽内で動作させたときの応答を調べ、DAQ システムの調整を行った。これらの結果を踏まえ、E40 実験における実用性についての結論を述べる。

5.1 実機システムの構成

構築した BGO カロリーメータシステムを、大きく次の 2 つ要素に分けて述べることとする。

ハードウェア

BGO 結晶と PMT、設置する実機架台、及び全てを覆う恒温槽。恒温槽内の温度をモニターする温度ロガー。第 2 章で述べた開発したアナログ回路の実機。

DAQ

V1724 等による読み出し処理システム。ハードロンホールで使用されている DAQ システムに BGO カロリーメータシステムを組み込む。

全てを複合してカロリーメータシステムと称する。BGO 結晶 1 本についての読み出しシステムの開発は第 2 章で述べた。E40 実験で使用する BGO 結晶は 22 本であるが、実機架台は 24 本で標的を 360 度を覆う設計となっている (図 5.2 参照)。また、本論文では述べないが 24 本全てを使用して行う実験も計画されていることから、実機架台に設置されている BGO カロリーメータの総数は 24 として扱う。

5.2 ハードウェア

5.2.1 実機架台

BGO カロリーメータは標的を覆う CFT の更に外側に配置する。図 5.1 に BGO 架台の設計図を示す。標的や他の検出器は描画していないが、標的と CFT はこの架台の内側に配置されており、標的からの散乱陽子は CFT を突き抜けて BGO カロリーメータへと入射する。ビーム入射方向から見た BGO の配置を図 5.2 に示す。24 本の BGO 結晶を用いて、標

的周りの 360 度を覆っている。このうち 2 本は、E40 実験において、この後方に設置される KURAMA スペクトロメータの散乱 K^+ に対するアクセプタンスに含まれる領域となるため、設置しない予定である。

架台に設置されている BGO カロリーメータをビーム軸に対して側面からみた断面図を図 5.3 に示す。BGO 結晶は両端の支え台のみにより固定されており、PMT は上流側にある。BGO と PMT はオプティカルグリスにより光学的に接続されるが、PMT のビーム軸方向の位置固定は架台外面のネジによって PMT を押し込むことで行う。押し込みすぎると結晶や PMT の光電面を破損させる恐れがあるが、接触が弱すぎると PMT の集光量が減ってしまうため注意が必要である。BGO 結晶は、反射材として $11\ \mu\text{m}$ のアルミフォイルと、遮光用の $100\ \mu\text{m}$ のブラックシートで覆われている。図 5.4 に BGO を反射材と遮光材で包む様子を示す。PMT を取りつける面は写真の奥側の端面である。アルミフォイルはメンディングテープで止め、同じ面でブラックシートをブラックテープで止めて遮光するため、1 つの面だけ若干物質量が多くなる。この面を標的とは逆側を向くように配置することで、散乱陽子が通過する物質をなるべく薄くした。また、BGO 結晶の外側に、BGO 結晶を突き抜けた π を捉えるための PiVeto カウンターを設置する。

架台は下部ユニット、上部ユニット、そして 2 つの側面ユニットに分かれており、それぞれのユニットに BGO カロリーメータを設置したのちに合体する。図 5.5 に下部ユニットに BGO カロリーメータを設置した写真を示す。この写真はビーム上流側から見ており、PMT からの配線が伸びている。全ユニットに BGO カロリーメータを設置し、架台を合体した写真を図 5.6 に示す。

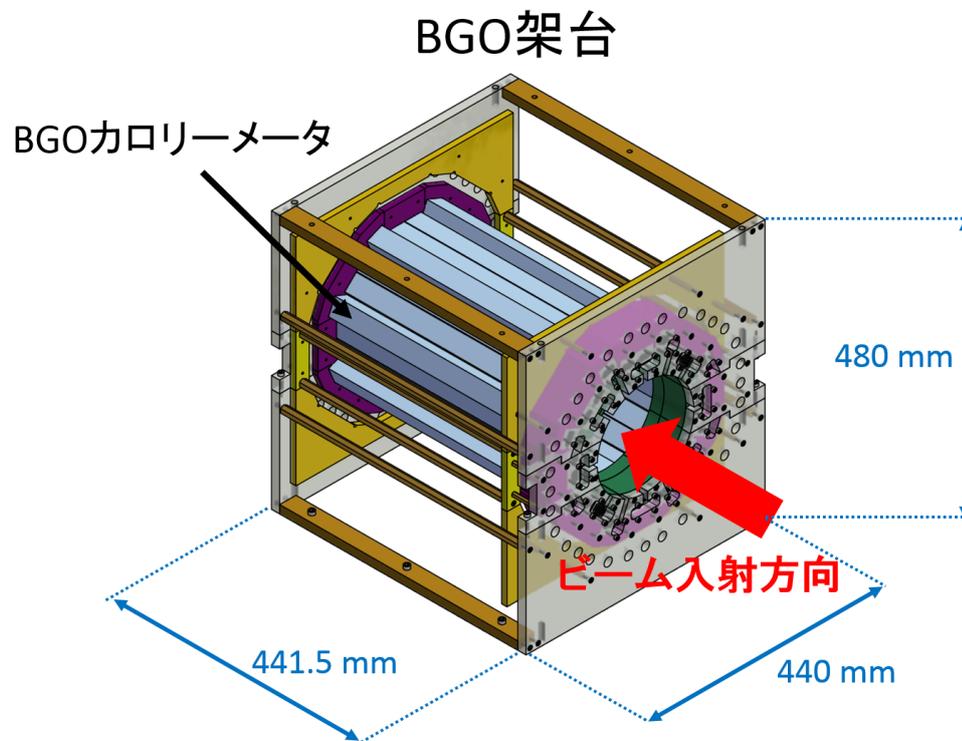


図 5.1: BGO 架台の設計図。この架台は標的及び CFT を取り囲んで配置される。

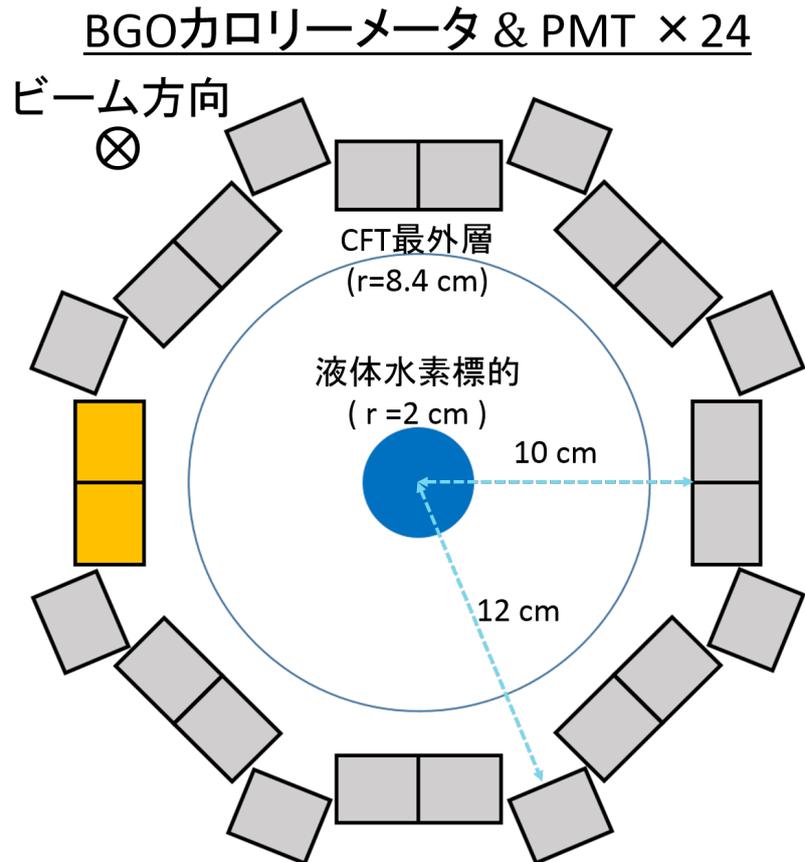


図 5.2: BGO カロリメータの配置図。図 5.1 をビーム入射方向から見ている。左端の色が違う二本は、E40 実験において、KURAMA スペクトロメータの散乱 K^+ に対するアクセプタンスに含まれるため、取り払う。

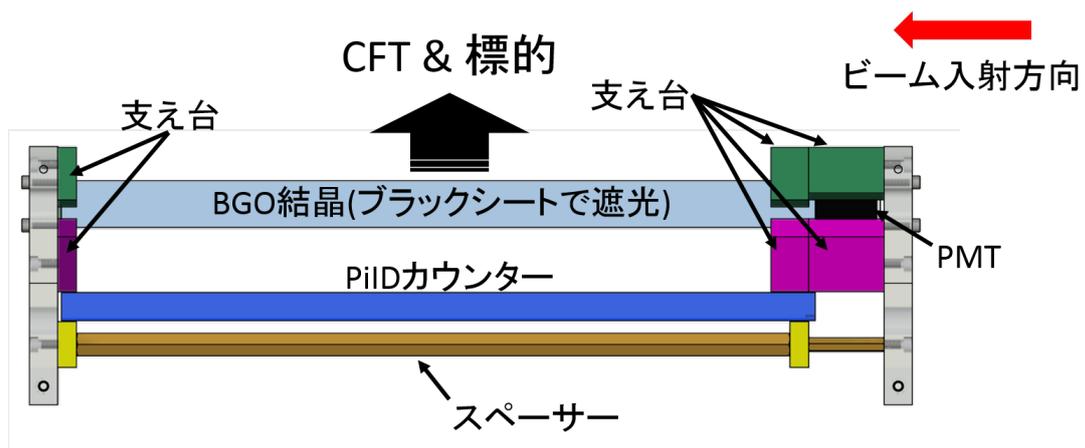


図 5.3: BGO 架台の断面図。ある 1 本についてのみ描画している。BGO 結晶は両脇の支え台のみによって固定されている。



図 5.4: BGO 結晶を覆う反射材と遮光材。アルミフォイルで包んだ BGO 結晶を PMT を取り付ける面と反対からみた写真。アルミフォイルはメンディングテープで止め、ブラックシートも同じ面でブラックテープで止めて包んでいる。

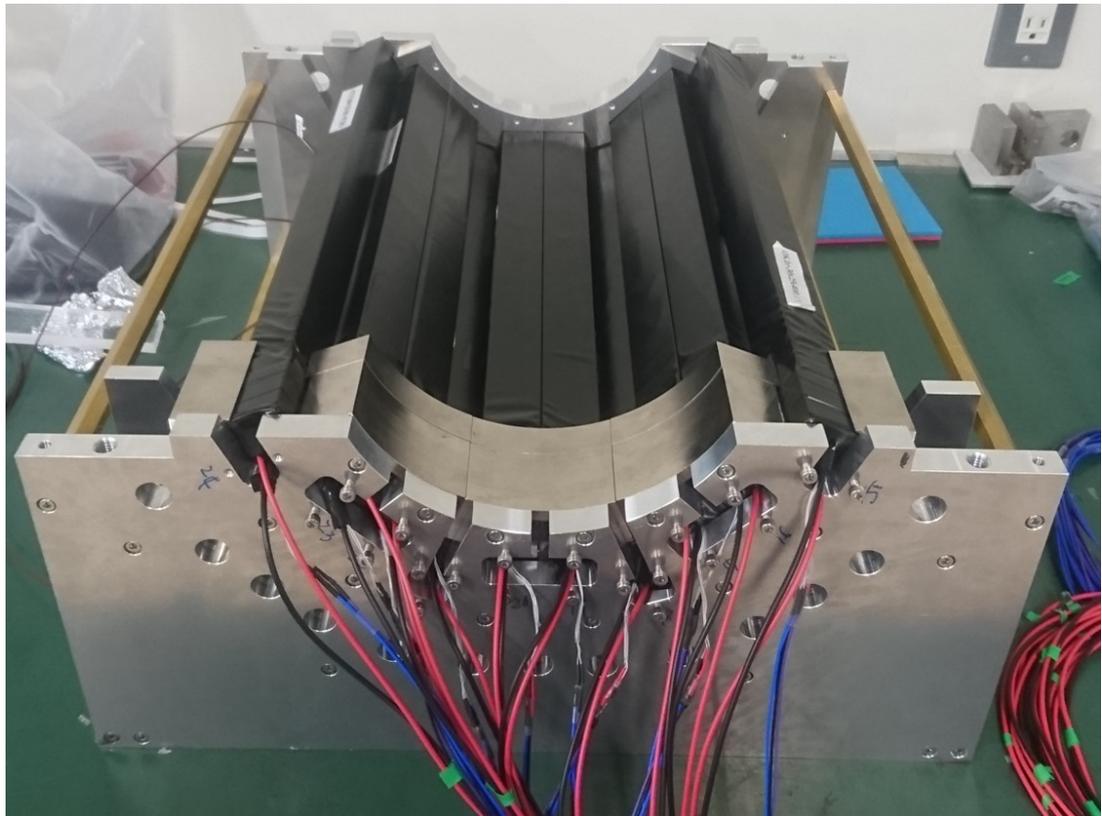


図 5.5: BGO 架台の下半分の写真。PMT 側から見ており、PMT の HV ケーブルや信号線が伸びている様子が見える。

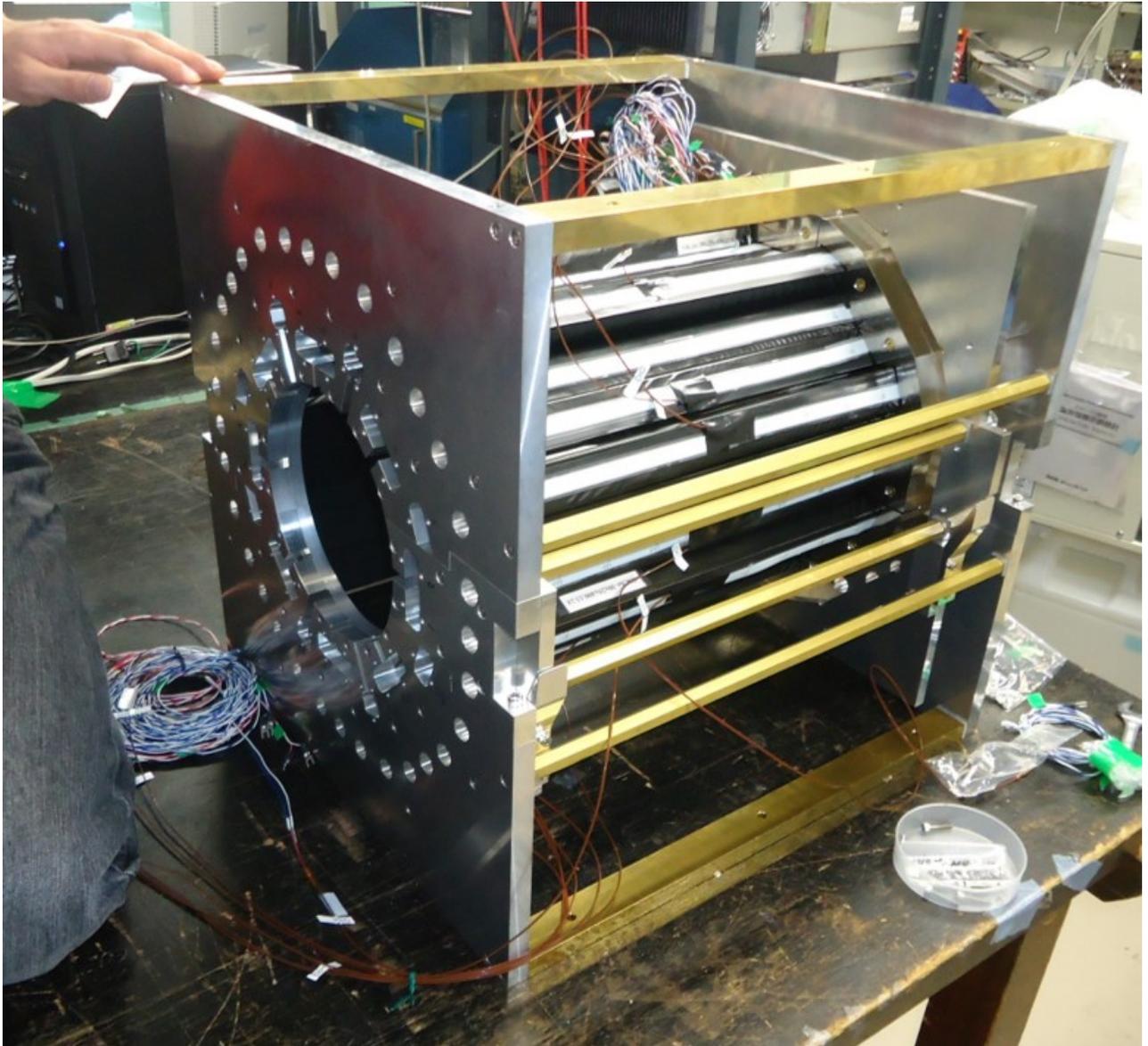


図 5.6: BGO を架台に設置した写真。

5.2.2 全チャンネルアナログ回路

開発したアナログ回路を全チャンネル分用意した。使用するアナログスイッチが IC 1 つで 2 チャンネル分を補える入出力を持っているため、1 ボードに 2 チャンネルずつ実装することにした。スイッチングは全チャンネル同時に行うため、このスイッチングによるクロストークを気にする必要はない。実機回路 1 ボードの特徴を以下に記す。

- 1 ボードで 2 チャンネルの処理。
- 各チャンネル、入力・出力・セルフトリガー用 AC カップリング出力の 3 つの LEMO 端子。
- ボード共通の電源・スイッチング信号入力端子

図 5.7 に実機回路の写真を示す。

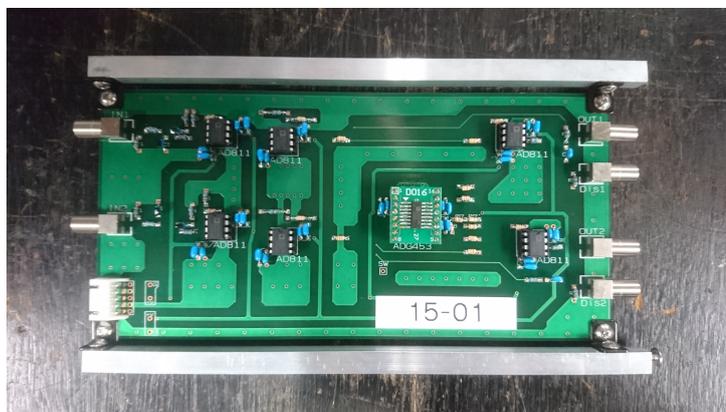
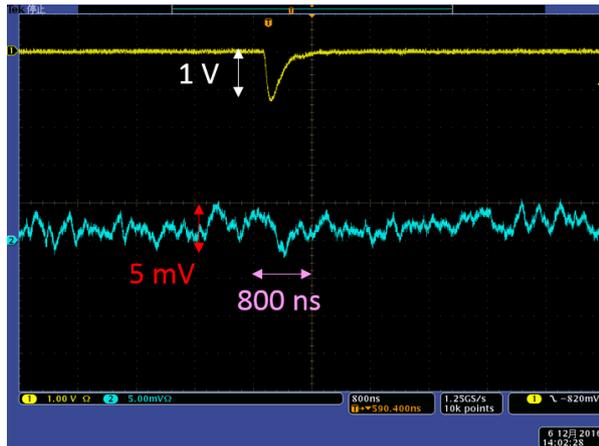


図 5.7: 実機回路の 1 ボードの写真。左が入力端子、右が出力端子となっている。IC の取り換えを容易にするために、ソケットを取りつけている。

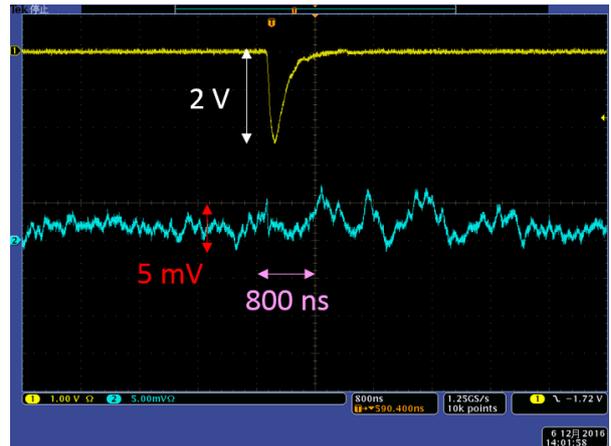
1 ボードに複数チャンネルを実装したことによりクロストークの懸念があるため、片方のチャンネルから出力信号の上限付近の出力があったときのもう片方のチャンネルの出力を調べた。図 5.8 にオシロスコープで撮影したクロストークの様子を示す。

一方の出力信号が大きいとき、もう一方の出力に確かな変動が見受けられる。しかし、最大出力として想定しているのは 2 V 程度であり、最大の影響は図 5.8(b) に見られる程度である。3 mV 程度の変動は、エネルギーに換算すると 500 keV 以下であり、無視できるレベルであると判断した。

この実機回路ボードを全チャンネル分用意し、収めるクレートを設計・製作した。図 5.9 に IKDBOX と称するこのクレートの写真を示す。IKDBOX 自体は電源機能を有しておらず、外部からの電源電圧をスイッチング信号と共に各ボードに振り分ける。スイッチング信号はクレート内部で 50 Ω でターミネーションしている。



(a) 一方の出力が 1 V 程度の場合、もう一方の出力には何の影響も見られない。

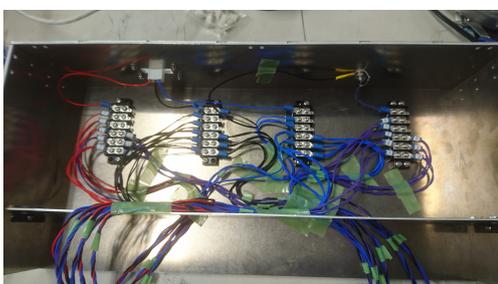


(b) 一方の出力が 2 V 程度の場合、もう一方の出力のノイズレベルが 2~3 倍になる程度の変動が見られる。

図 5.8: 実機回路 1 ボードの 2 つチャンネル間のクロストーク。チャンネル 1 (黄) から出力があったときのチャンネル 2 (青) の様子からクロストークを観察した。



(a) IKDBOX の前面の写真。上部に回路ボードを並べている、下部の端子は左側がスイッチング信号の入力で、右側が電源である。



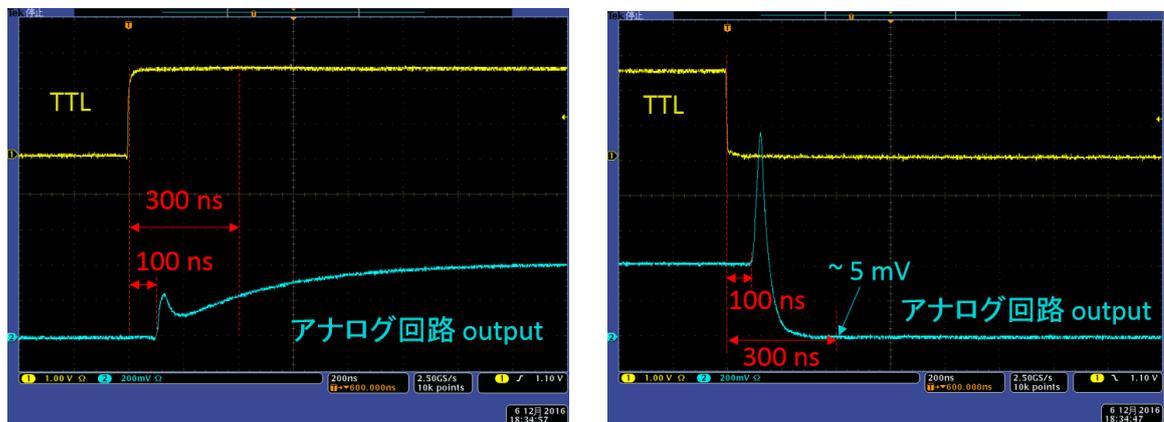
(b) IKDBOX の下部の内部の写真。電源電圧とスイッチング信号の Divider が配置されている。



(c) IKDBOX の背面の写真。下部で振り分けた電源及び信号線を各ボードに振り分けている。

図 5.9: IKDBOX の写真。PMT からの信号処理について、背面に入力端子があり、前面に出力端子がある構成となっている。

全チャンネル接続した状態で、スイッチングテストを行った。ある1チャンネルについてのスイッチング応答の様子を図5.10に示す。比較対象としてテスト回路にも同時にスイッチング信号を送り、応答を見たところ、ほとんど違いが見られなかった。



(a) rest mode への切り替えの様子。スイッチング信号が来てから 100 ns 後から応答が見られる。300 ns 後のベースラインは、160 MeV 程度の信号が来ても、元のベースラインの電圧を超えない値まで上がっている。

(b) DAQ mode への切り替えの様子。スイッチング信号が来てから 100 ns 後から応答が見られる。300 ns 後のベースラインは、元のベースラインとの差が 5 mV 程度まで戻っている。

図 5.10: 実機回路におけるスイッチングの応答。

全チャンネルについてこれらの応答に差異はなく、正常に動作していることを確認した。スイッチング時間及びベースラインの回復時間も想定内である。なお、rest mode から DAQ mode への切り替えの際、ベースラインが完全に回復する (1 mV 以内) まで 5 μ s 程度要するが、スイッチングのタイミングを知っていれば補正可能である。以上により、開発したテスト回路と同等の性能を持つ実機回路の製作を完了した。

5.2.3 恒温槽

BGO 結晶のシンチレーション光の強度は負の温度依存性を持つことが知られている。カロリメータシステムとして安定して荷電粒子のエネルギーを測定するには、結晶の温度を一定にするのが望ましい。そのため、E40 実験では BGO カロリメータの実機架台を覆う領域を室温程度の恒温槽に入れる。恒温槽とは、断熱された筐体装置内部のことを指しており、筐体内部の温度を調節する空調機には Apiste PAU-AR800S (PAU ユニット) を使用する。この精密空気発生装置の主な特徴を上げる。

温度制御精度	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
設定温度範囲	20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$
使用周囲温度	20 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$ (温度変化勾配: 1 $^{\circ}\text{C}$ 以内/1 h)

カタログ値通りの性能で恒温槽内の温度を一定に保つには、設置する温度及びその変化に気を付けなくてはならない。実際の実験では 22 $^{\circ}\text{C}$ に設定して運用する予定である。

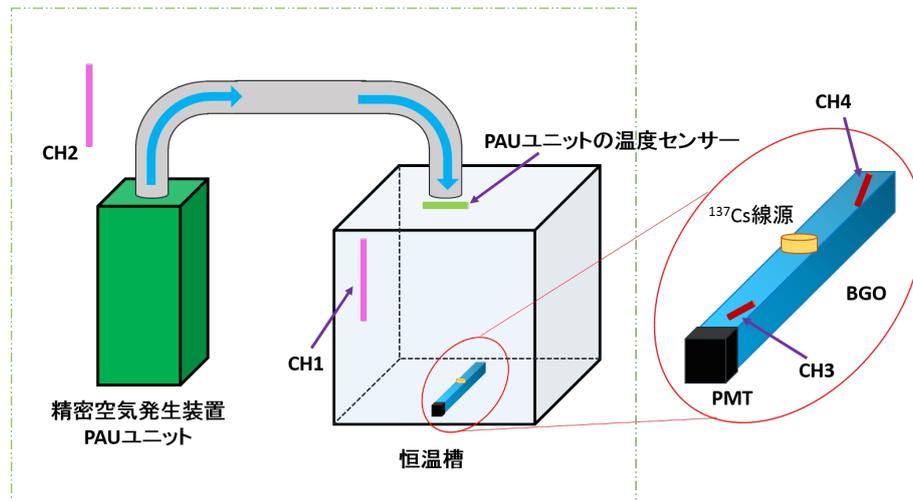


図 5.11: 検出光量の温度依存特性測定の設定アップ図。CH は温度センサーのチャンネルで、表にある通りの種類、配置である。¹³⁷Cs 線源は BGO の中央に置いた。

検出光量の温度依存性

恒温槽内に BGO カロリーメータ 1 本を設置し、¹³⁷Cs 線源を用いて検出光量の温度依存性を調べた。この測定の設定アップを図 5.11 に示す。温度測定には、温度センサーに白金抵抗 2 本と熱電対 2 本を用い、GRAPHTEC-midi LOGGER GL840 でデータを取得した。温度センサーのチャンネルとその種類、及び設置位置を表 5.1 に示す。

安定に稼働しているときは、PAU ユニットの温度センサーが示す温度と設定温度との差は 0.05°C 以下であった。

検出光量の温度依存の測定は、恒温槽の設定温度を 19-25 °C の間で変えて 1 度刻み計 7 点で行った。設定温度を変更後、恒温槽内にあるすべての温度センサーが示す値が安定してから ¹³⁷Cs 線源を用いたゲイン測定を行った。温度対 ¹³⁷Cs 線源由来の γ 線のピーク位置についての関係を各チャンネルごとに図 5.12 に示す。室温との関係はここでは必要ないために省いた。

表 5.1: 各温度センサーのチャンネルの種類と設置位置

表示チャンネル	温度センサー	設置位置
Preset	PAU ユニットの設定温度	
CH1	白金抵抗	恒温槽内
CH2	白金抵抗	恒温槽外
CH3	熱電対	BGO 側面・PMT 付近
CH4	熱電対	BGO 側面・先端

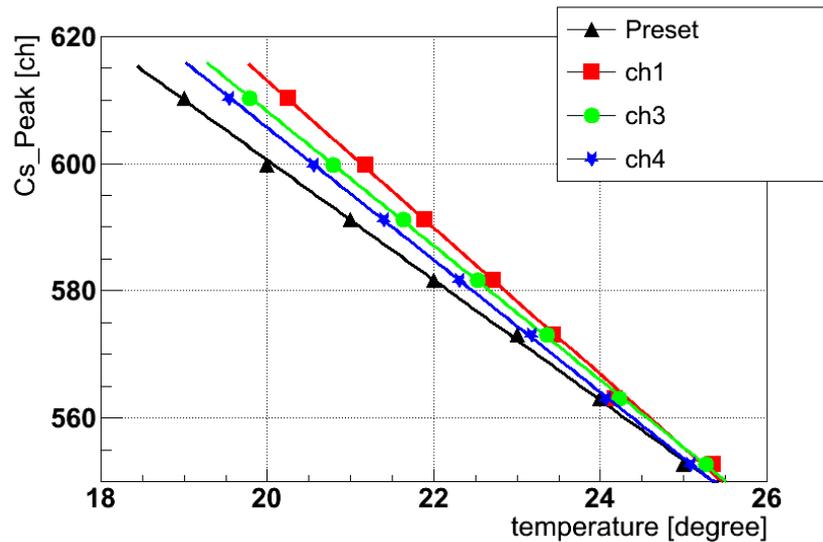


図 5.12: 各チャンネルで測定された温度と、その時の ^{137}Cs 線源由来の γ 線のピーク位置。

実際の実験では恒温槽の設定温度を 22 度付近で運用する予定で、22 度から温度が 1 度変わったときに約 1.8 % Gain が変動することがわかった。

以上から、恒温槽により温度を安定させることが BGO シンチレータを運用するにあたって非常に重要であることが確認された。実験中は恒温槽内及び BGO の温度をモニターする必要がある。

恒温槽内の温度の長期安定性

外気温の変化等により恒温槽内の温度が一定に保てない状況が起こり得るため、実際に運用する環境下における恒温槽内の長期安定性を調べる必要がある。エアコンによって空調されている実験室内で、恒温槽を設定温度 23°C で 45 時間運用した時の、恒温槽内の温度の安定性について図 5.13 に示す。また、同時に測定した BGO カロリメータの発光量の時間変動を図 5.14 に示す。発光量は ^{137}Cs 線源由来の 662 keV の γ 線を QDC を用いて測定し、そのピークを中心値として求めた。誤差棒はフィッティングの誤差である。図 5.13 及び図 5.14 において、横軸に示した時間は同時刻を基準としている。

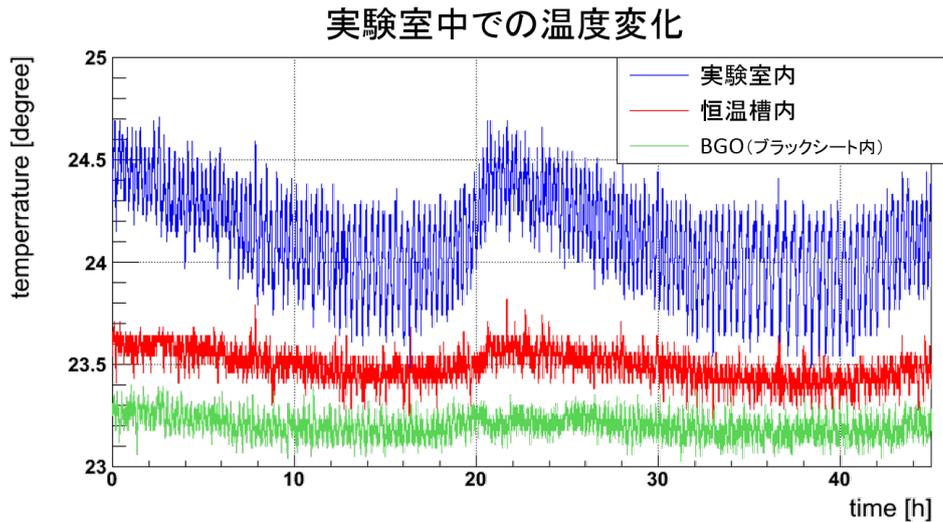


図 5.13: 実験室での恒温槽の安定性。エアコンを稼働した状態で 10 秒毎に 45 時間データを取得した。

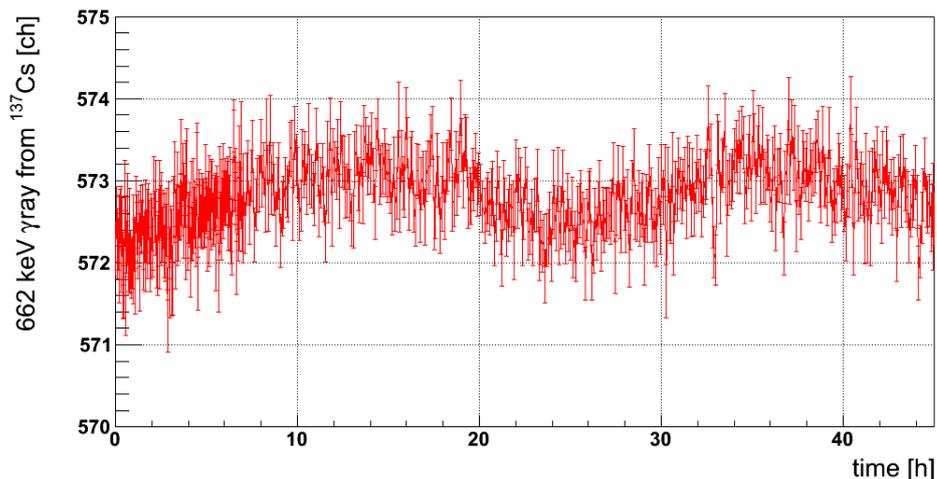


図 5.14: 恒温槽内における BGO の発光量安定性。 ^{137}Cs 線源由来の 662 keV γ 線を QDC を用いて 10 分毎に測定し、ピークを中心値を取得した。

室温の変動に引きずられて、恒温槽内と BGO に取り付けられた温度計の示す温度が変動しているのがわかる。その変動具合は室温に比べて小さく、特にブラックシート内にある BGO の温度は敏感な応答を示しているわけではない。室温において、短い周期の変動はエアコンの稼働によるものと考えられ、24 時間周期の変動は、昼夜による外界の温度変動の影響を受けていると考えられる。それぞれの変動度合を表 5.2 に RMS の値で示す。

表 5.2: 温度の時間変動度合

温度計の場所	平均値 [°C]	RMS [°C]
実験室内	24.12	0.229
恒温槽内	23.49	0.079
BGO	23.39	0.053

室温の変動が RMS で 0.2°C という安定した状態においては、恒温槽内の温度は性能通りの安定性を保っていることがわかった。BGO に取りつけている温度計は、遮光用ブラックシート内部にある為か、恒温槽内よりも揺らぎは小さい。このとき、BGO カロリーメータの発光量は 572.8 ± 0.5 であり、相対的な変動は 0.1% に収まっている。したがって、この恒温槽は BGO の発光量を十分に安定させることがわかった。

E40 実験を行うハドロンホール内では、CATCH を含む検出器群は空調により温度を保っているテント内に設置されるため、実験室と同様に安定した動作が期待される。

PAU ユニットが恒温槽内に送風する吹き出し口は恒温槽上部にあるが、恒温槽の幅は検出器の幅に比べて僅かに大きい程度で風通しが悪い。よって、恒温槽内でも温度勾配が生まれる懸念があるため、3 本中 2 本の割合で BGO 結晶に温度計を取り付け、実験中はモニターすることとする。

5.3 DAQ

BGO カロリーメータの読み出しシステムの開発において留意した点に、データ数の削減があった。実験で得られる総データ量を削減することも重要であるが、1 種類の検出器のデータ転送が他の検出器と比べて多くの時間を要することで、データ取得システムを律速しないようにすることが、効率よく高統計なデータを取得することにおいて重要となる。BGO カロリーメータの読み出しは Flash ADC で行うため、QDC などと比べて検出器の数に対するデータ量が多くなる。開発機におけるスタディから、アナログ回路の Veto スイッチと V1724 の Zero Suppression を用いたデータ量削減により、1 イベントにつき、1 チャンネルあたり 33 word のデータ量で読み出すシステムとすることを決め、全チャンネルに実装した。本節では、構築したカロリーメータシステムにおいて、実際に設定したデータ量における転送時間を調べ、想定されるトリガーレートでデータ取得が行えることを確認する。

5.3.1 E40 実験における DAQ

E40 実験を行う J-PARC K1.8 ビームラインで用いられる DAQ システムは、各検出器ごとに存在するフロントエンドによって独立に収集されたデータを、Event Bulider により統合してハードディスクへと保存する。この DAQ システムにおいて、各フロントエンドへのトリガー配布及びフロントエンド間のイベント同期は、Master Trigger Module (MTM) と Receiver Module (RM) を用いて行われる。V1724 を用いた BGO カロリーメータの読み出しも、このシステムに対応する必要がある。

Master Trigger Module (MTM) と Receiver Module (RM) の役割

Master Trigger Module はトリガー情報の管理とイベントタグの発行を行う NIM モジュールである。トリガーロジックにより生成された情報を受け付けて、2本の LAN ケーブルにより最大4つの Receiver Module へ分配する。また、イベントタグのための情報として、Spill Number と Event Number のカウンターを内部に持っており、Spill Number は SINC 信号受信時に、Event Number は L2 Trigger を受け付けたときにカウントアップする。Receiver Module へ分配する情報は、L1Trigger、L2Trigger、FastClear 信号及び、Spill Number と Event Number である。また、各 Receiver Module から送信される Busy 信号を統合する役割も持っている。

Receiver Module は VME クレートに挿入することで、KEK-J0-バスを介して同クレートに挿入された各回路モジュールと通信し、受け取ったトリガー信号の他のモジュールへの分配や、各モジュールの Busy 信号の OR の受信を行う。しかし、BGO カロリーメータのフロントエンドにおいて、読み出しを担う V1724 は KEK-J0-バスには対応していないため、この機能は使用できない。Receiver Module は、VME-バス の制御も可能であるため、BGO カロリーメータのフロントエンドについてはこちらを使用する。また、Receiver Module には、Complex Programmable Logic Device (CPLD) と Field Programmable gate array (FPGA) が搭載されており、VME-バスを制御している。V1724 には Multi Event Buffer が搭載されているが、未搭載のモジュールとシリアルに読み出すと活用できない。そのため、Receiver Module に搭載されている FPGA のファームウェアを書き換えることによって、イベントタグを Buffering する FIFO (First In First Out) を付け加えた。この FIFO の深さは十分深く設定し、Busy 信号を出す Buffering 数を VME-バスアクセスによって設定可能な仕様とした。

BGO カロリーメータのフロントエンドにおける Master Trigger Module 及び Receiver Module の役割は次の通りである。

Master Trigger Module

NIM 出力を利用して、V1724 のフロントパネルのトリガー入力端子へと NIM 信号を送ることによりトリガーの配布を行う。各モジュールの Busy 信号は、NIM モジュールによって OR した後に、外部 Busy として NIM 入力によって受け付ける。また、Receiver Module からの Busy 信号を統合する。

Receiver Module

イベントタグを受信し、VME Controller によって読み出す。自身の Busy 信号を Master Trigger Module へ送信する。

イベントの同期については 5.3.3 に記述する。

配布されるトリガー

E40 実験において、トリガーは Σ の生成によって引き起こされる。トリガーには 1st level trigger と 2nd level trigger があり、1st level trigger が Σ の生成のタイミングで発生し、 Σ 生成イベントかの判別をより厳しく行った後、2nd level trigger によりデータ取得を決定す

る。この 1st level trigger と 2nd level trigger の時間差は約 $16 \mu\text{s}$ と見込まれており、この間は新たなトリガーは受け付けないので、これ以上の時間の dead time が必ず生じることになる。通常、各検出器の測定に用いる ADC モジュールは、1st level trigger から $16 \mu\text{s}$ 間の入力を AD コンバージョンせずに保持し続けることは出来ない。すなわち、1st level trigger が入力されると、各モジュールはデータのコンバージョンを開始し、2nd level trigger の入力によってデータの転送を決定する。2nd level trigger が生成されなかった場合は clear 信号が入力され、コンバージョンされたデータを削除する。一方、Flash ADC V1724 は、常に数十 ns 間隔で ADC 値を取得し続けており、設定したタイムレンジのデータを Buffering している。そのため、2nd level trigger の入力によって、1st level trigger のタイミングのデータを取得することが可能である。

DAQ への要求

E40 実験において、2nd level trigger のレートはシミュレーションにより 1 kHz 程度と見積もられているが、マージンをとって 5 kHz のトリガーレートを想定したシステムを要求することにする。

5.3.2 BGO 全チャンネルの読み出し方法

実際の実験で使用する BGO の総数は 22 本で、この読み出しには Flash ADC CAEN V1724 が 3 台必要である。V1724 は VME クレー트에設置して動作させるが、Flash ADC の特性上 1 イベントあたりのデータ量が多いため、データ転送にかかる時間を考慮する必要がある。

V1724 が記録したデータを収集するために On Board CPU モジュールを用いる。On board CPU モジュールは、VME-バス通信によりクレート内のモジュールをコントロールし、データを収集するフロントエンドとなる。V1724 の Buffer に貯められたデータを、VME-バス通信で読み出したときの転送速度を測定した結果を図 5.15 に示す。開発機では 1 チャンネルあたり 33 word のデータ量を想定しており、これは V1724 の Zero Suppression 機能とアナログ回路の Veto スイッチ機構により達成できる。このとき、1 モジュールあたり 8 チャンネルの処理を行う V1724 が取得するデータ量は、header 等を加えると 1 event あたり最大で約 300 word となる。図 5.15 における各測定点を結んだ直線から、300 word の転送時間は約 $130 \mu\text{s}$ と読み取れる。V1724 の Buffer を活用し、読み出しに dead time が生じない時、理想的には最大で約 7.7 kHz のトリガーレートを受け付けることができる。しかし、V1724 は 3 台を VME-バス通信によりシリアルに読み出すと、3 倍の転送時間を要し、受け付けられるトリガーレートは最大で 2.6 kHz 程度になってしまう。シリアルに読み出すことにより、3 台の V1724 間のイベント同期が容易になるメリットがあるが、5 kHz のトリガーレートについて十分な効率でデータ取得を行うことが期待できないため、3 台ともを VME-バス通信でシリアルに読み出すことは避けたい。

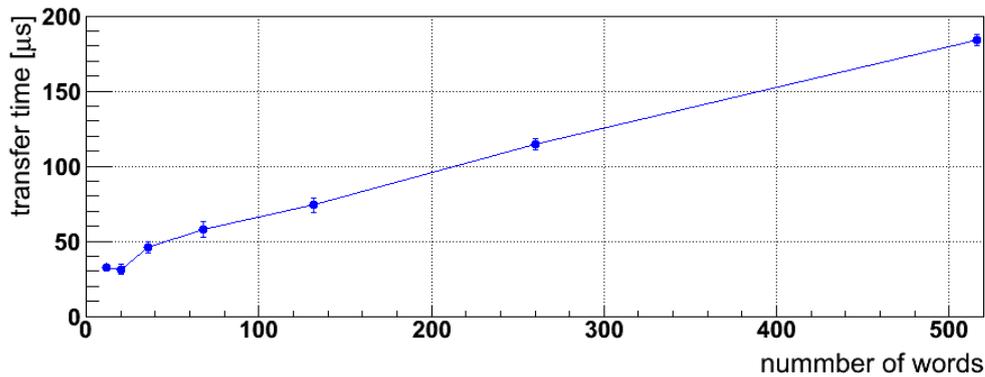


図 5.15: 読み出す word 数と VME-バス通信による転送にかかる時間の関係。

V1724 の読み出しには、Optical Link による方法もある。Optical Link では、V1724 のフロントパネルのコネクタに光学ファイバーケーブルを接続し、最大 80 MB/s でデータの読み出しや slow control を行うことができる。読み出し側の Optical Controller には PCIe カード A3818 を使用する。Optical Link を用いて読み出したときの転送時間を測定した結果を図 5.16 に示す。2 台の V1724 を 1 台ずつ順番に読み出した場合、1 台ずつの読み出し時間に個体差は見られず、シリアルに読み出す V1724 の台数分の時間がかかる。マルチスレッドで 2 台の V1724 を平行に読み出した場合、シリアルに 2 台を読み出すより早く、1 台のみを読み出すより遅いという結果が得られた。また、1 台の V1724 につき同じ word 数を読み出す場合、Optical Link により 2 台の V1724 を読み出す速度は、シリアルに読み出した場合でも、VME-バス通信により 1 台の V1724 を読み出す速度よりも速いことがわかった。

次節で記述するイベント同期のために、V1724 のうち少なくとも 1 台は On Board CPU を用いて VME-バス通信により読み出すことが望ましい。このことと、読み出し速度を考慮した結果、1 台を VME-バス通信で、残りの 2 台を Optical Link でそれぞれ読み出すことに決めた。Optical Controller を担うフロントエンド PC は、1 枚の PCIe カード A3818 により 2 台の V1724 を読み出すが、図 5.16 で示したように、転送時間を短くするには、2 台の V1724 それぞれを読み出すプログラムをマルチスレッドで実行する方法が有効である。しかし、この条件ではトリガーレートが上がってくると、Optical Link による通信にエラーが生じた。1 つのプログラムで 2 つの V1724 をシリアルに読み出した場合には、この不具合は生じなかった。どちらの方法であれ、全ての V1724 が同じ word 数を転送する時、VME-バス通信による読み出しが律速することには変わりはないため、Optical Link による 2 台の V1724 の読み出しはシリアルに行うことに決めた。この 3 台の読み出しの概略を図 5.17 に示す。

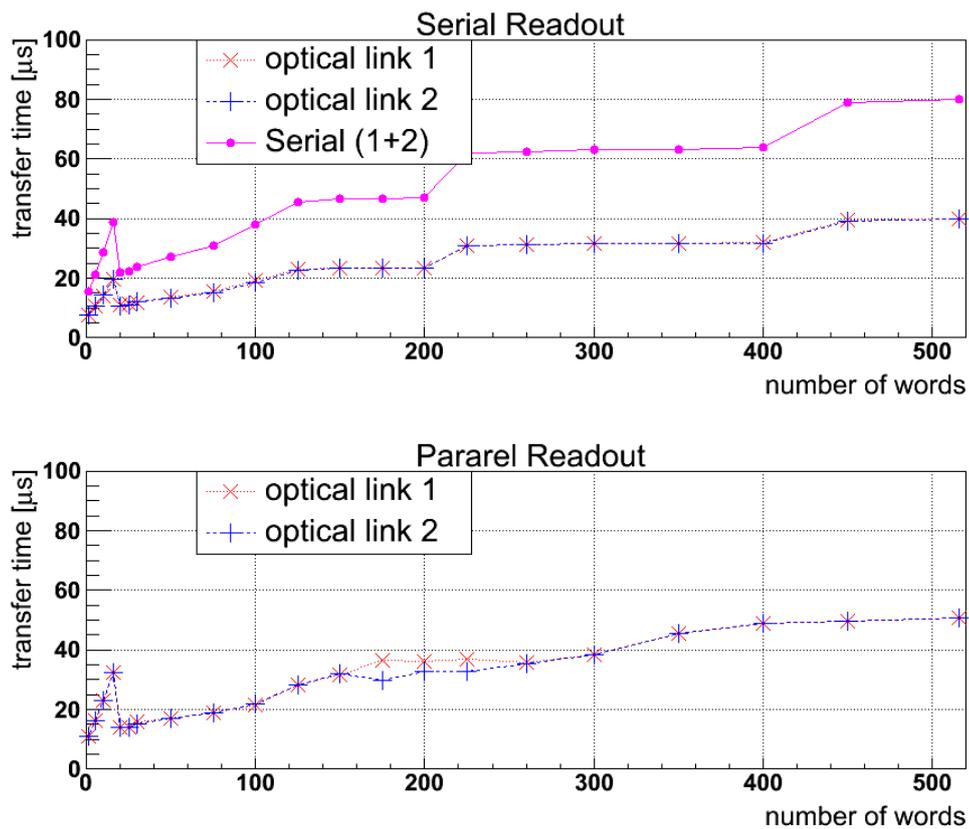


図 5.16: 読み出す word 数と optical link による転送にかかる時間の関係。上のグラフは 2 台の V1724 をシリアルに読み出した場合、下のグラフは 1 台ずつマルチスレッドで平行に読み出した場合である。

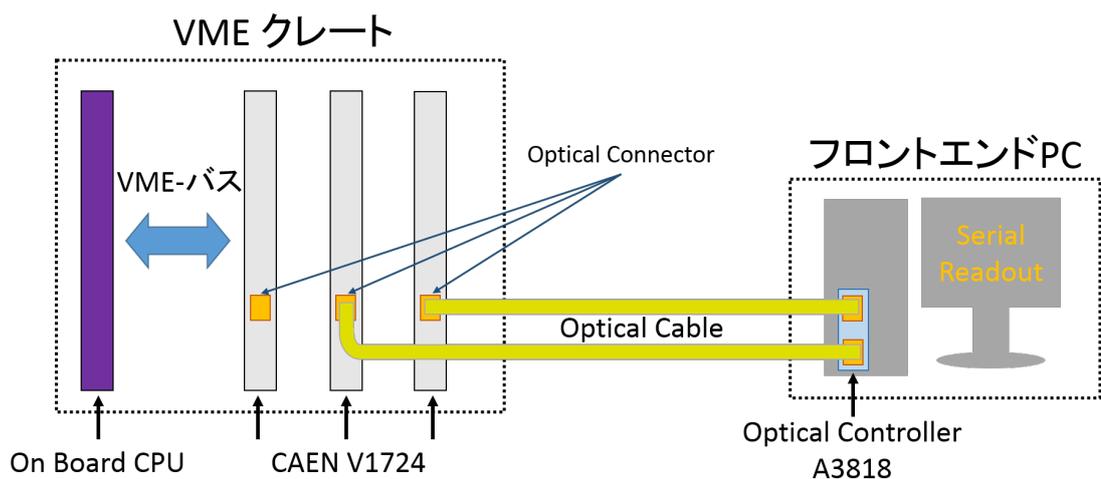


図 5.17: 3 台の V1724 の読み出しの概略図。1 台を VME-バス通信により On Board CPU モジュールで、残りの 2 台を Optical Link により Optical Controller を備えたフロントエンド PC でシリアルに読み出す。この図では Receiver Module が省略されている。

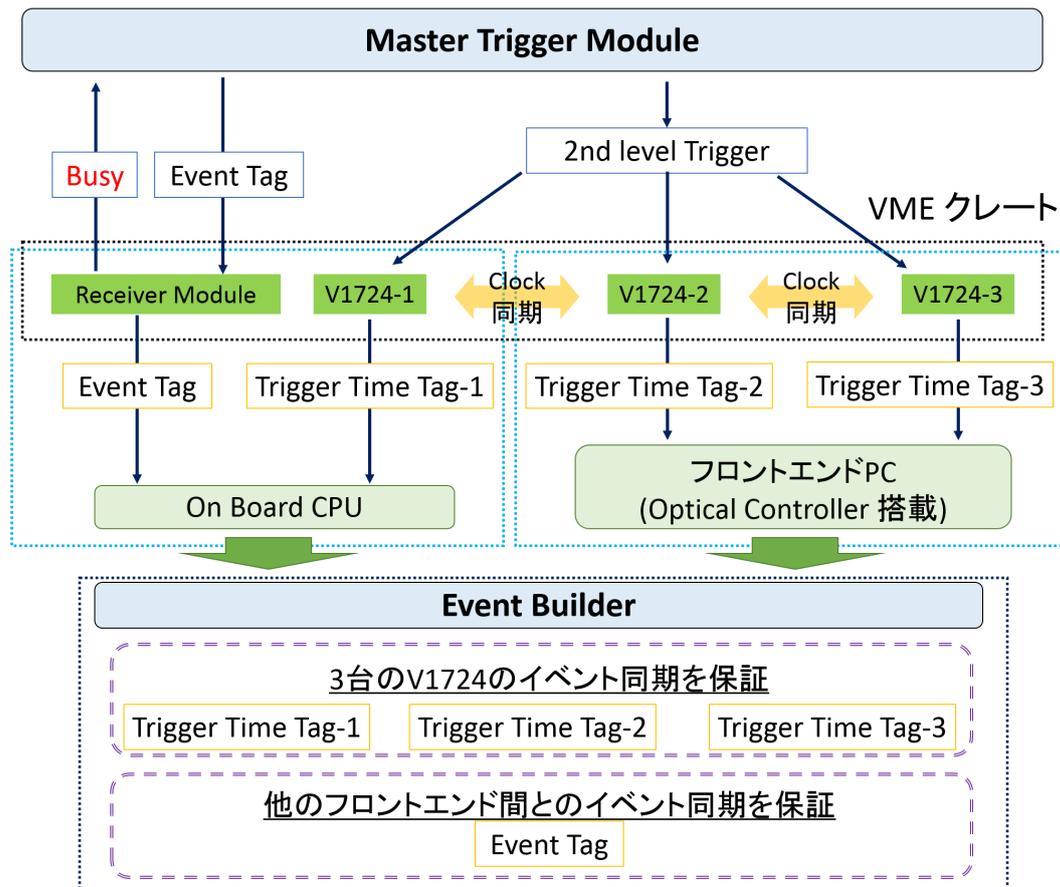


図 5.18: 3 台の V1724 のイベント同期の概略図。

5.3.3 イベント同期

複数台のモジュールを使用してデータを取得するとき、各モジュール間でイベントの同期が取れていることを保証できなければならない。節 5.3.1 で述べた通り、フロントエンド間の同期は Master Trigger Module と Receiver Module を用いて行う。Master Trigger Module はイベントタグ (Spill Number 及び Event Number) を発行し、Receiver Module へと分配する。Receiver Module が受信したイベントタグは、VME-バスの制御を行う VME Controller により読み出す。VME Controller は、Receiver Module から読み出したイベントタグを、他のモジュールから読み出したデータと統合する役割を持つ。このようにして、Master Trigger Module から発行されたイベントタグを統合することで、他のフロントエンドとイベントの同期を図る。

前節で述べた通り、V1724 は 3 台運用し、VME-バスにより読み出すのは 1 台のみである。

VME-バス通信で読み出す V1724 は、Receiver Module と共に On Board CPU によって読み出すことで、他のフロントエンドとイベントを同期する。一方、Optical Link で読み出す残りの 2 台の V1724 については、V1724 同士でイベント同期をとることで、BGO カロリメータのフロントエンドとしてイベント同期をすることにした。

V1724 で取得したデータの header には Trigger Time Tag というトリガーのタイミング情報が含まれる。この Trigger Time Tag は V1724 の内部クロックをカウントしている。したがって、V1724 の内部クロックを 3 台で同期することで、この Trigger Time Tag のカウントを同期することができる。V1724 同士のクロック同期はフロントパネルの LVDS 端子、CLK_IN と CLK_OUT を接続して行う。また、フロントパネルの LVDS I/O を介して Trigger Time Tag のカウントをリセットすることが出来る。これにより、3 台の V1724 の Trigger Time Tag のカウントは同期するため、取得したデータの header の値を監視することでイベントの同期を保証することが出来る。このイベント同期の概略図を図 5.18 に示す。各フロントエンドから収集したデータをイベントごとに統合する役目は Event Builder が担っている。

5.3.4 V1724 の記録範囲の設定

図 5.19 に示すように、V1724 による波形の記録範囲をトリガー入力から $16 \mu\text{s}$ 前の $2 \mu\text{s}$ 間のみにする。この記録範囲を実現するために、ユーザーが設定できる以下の項目を最適化した。設定できる量の単位は word であり、 $1 \text{ word} = 2 \text{ samples}$ の関係にある。

Buffer Size

V1724 は 1 ch あたり 2^{19} サンプルの Buffering が可能で、Buffering するイベント数を 2^n ($n=0-10$) に設定できる。このとき、1 イベントに 2^n サンプル ($n=9-19$) のサイズを割り当てられる。BGO のフロントエンドは、 $18 \mu\text{s}$ 間程度サンプリングをする必要がある。サンプリング間隔は 30 ns なので、1 イベントにつき 2^{10} サンプル ($= 30.72 \mu\text{s}$) に決定した。よって、Buffer の割り当ては $512 \text{ events} \times 512 \text{ words}$ (1024 samples) に設定する。

Post Trigger

V1724 がトリガー入力を受け付けてから、何サンプル後までを 1 イベントに含めるかを設定できる。ここでは 0 に設定するが、仕様上、実際にはトリガー後の数サンプルは取得する。

Custom Size

1 イベントのサイズを調整できる。ここで設定する値はサイズのみであり、取得するタイムゲートは必ずトリガータイミングを含み、Post Trigger の設定が反映されることで決まる。トリガー入力より $16 \mu\text{s}$ 前に生じるイベントタイミングを含めるために、Custom Size の設定を $293 \text{ words} = 17.49 \mu\text{s}$ とする。

Zero Suppression

Custom Size で設定した $17.49 \mu\text{s}$ 間のタイムゲートのうち、波形を取得したいのは最初の $2 \mu\text{s}$ である。イベントタイミング後 500 ns 後に Veto スイッチによりベースラインを上げることで、それ以降を記録しない。Zero Suppression の閾値は 1 MeV 程度に相当する波高に設定する。また、閾値を最初 (最後) に超えたサンプルの前 (後) のサンプルを、設定した word 数だけ記録範囲に含めることができる。もちろんこの記録範囲は Custom Size によって制限された範囲内に限られる。ここでは、前を $1.5 \mu\text{s}$ 、後ろを数 word に設定することで、イベン

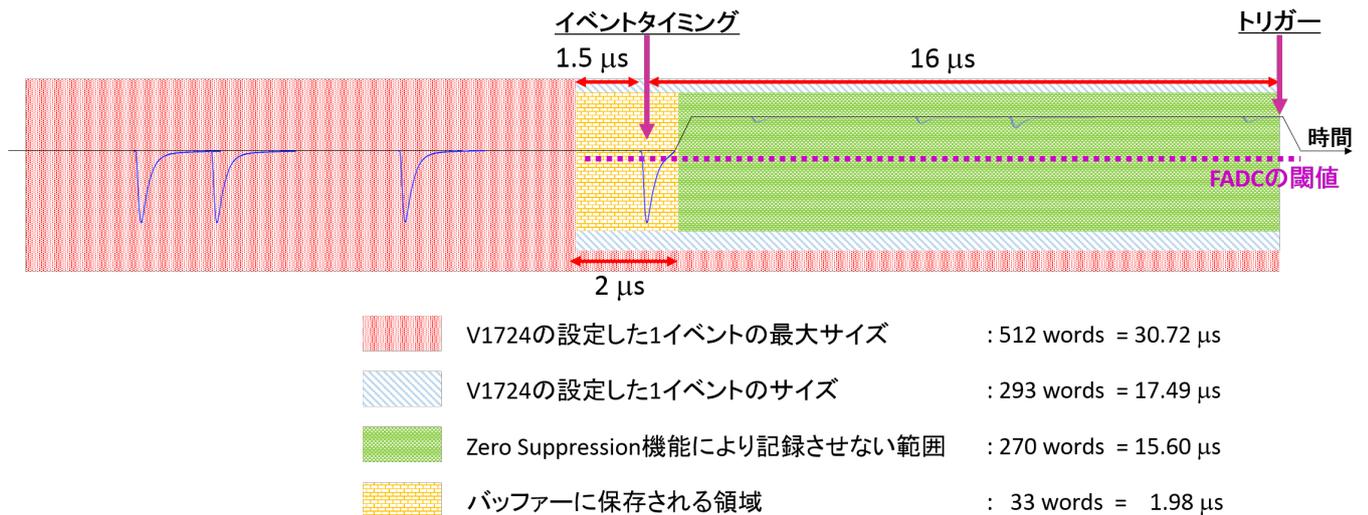


図 5.19: E40 実験における V1724 のデータ取得タイミング。トリガー入力から約 16 μ s 前の 2 μ s 間のみのデータを取得するために V1724 の設定を最適化した。

トタイミングに信号が検出された場合、必要な 2 μ s の波形データを記録する。

V1724 による記録の際、Zero Suppression 機能を用いた場合、Suppression された時間に関する情報を記述した Control word がデータの合間に差し込まれる。ここで設定した BGO のフロントエンドでは、1 ch あたり 33 words のデータに 3 words の Control word が加わり、1 モジュールごとに header として 4 word が加わるため、1 イベントあたり合計で 292 words となる。しかし、Zero Suppression を用いた記録量の制限は、毎回必ず同じ量になるとは限らず、イベントタイミング後にパイルアップ信号があると記録する量が増えることがある。一方で、2 μ s のタイムゲート内に閾値を超える信号が検出されない場合は、そのチャンネルは一切記録されない。したがって、1 イベントあたり 292 words という量は目安量となる。

5.3.5 時間情報の補正

V1724 のトリガークロックはサンプリングクロックの 2 倍の周期をもつ。即ち、30 ns 間隔でサンプリングするとき、トリガークロックは 60 ns 周期となる。したがって、トリガーを入力してから、V1724 内部で受け付けられるまでの時間に 60 ns の不確かさが存在する。つまり、取得した波形データにおいて、トリガータイミングの時間情報に 60 ns の不確かさが生まれるということになる。この不確かさを補正するためには、トリガー入力と、内部で受け付けられたタイミング情報を記録する必要がある。

V1724 にトリガークロックを出力する機能はないが、Local Trigger Out という LEMO 出力端子がフロントパネルに存在する。この出力は、トリガーを受け付けたときに NIM 信号を出力するが、サンプリングクロックと同期している。そのため、実際に内部で受け付けられたトリガーと Local Trigger Out には、サンプリングクロック 1 周期分のタイミング差が生じることがある。3 台の V1724 に同じトリガー入力を行った時、それぞれの Local Trigger Out の様子を図 5.20 に示す。オシロスコープによる表示は Local Trigger Out 1 の立下りを画面の中心にしている。Local Trigger Out 1 のタイミングを基準としたとき、トリガー入力

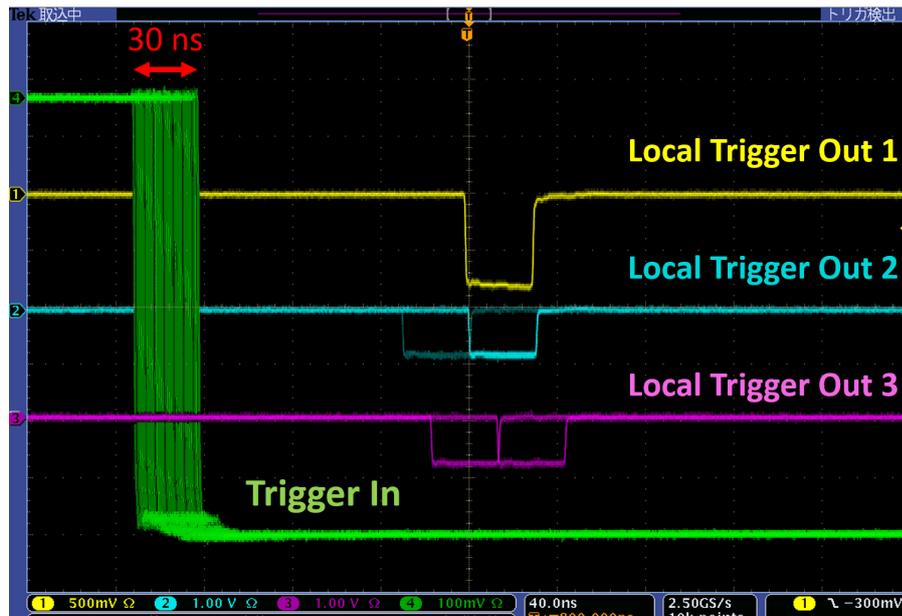


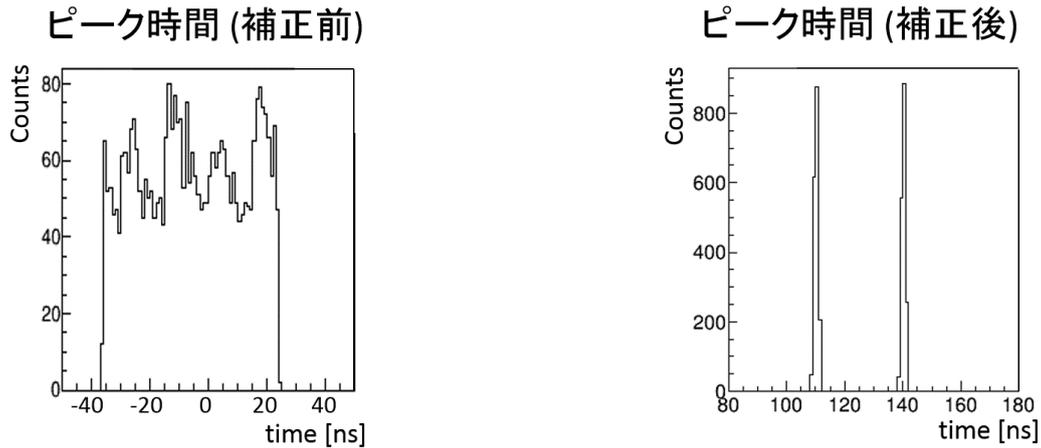
図 5.20: トリガー入力と Local Trigger Out のタイミング差をオシロスコープで表示した様子。Local Trigger Out 1 の立下りに同期して表示している。

のタイミングは 30 ns の不確かさを持っていることがわかる。また、他の 2 つの V1724 Local Trigger Out は 1 周期異なるタイミングで出力されることがある。これは、モジュール間で内部クロックを同期しているが、入力されるトリガーからみると、それぞれのクロックの位相に差があるためである。

トリガー入力と Local Trigger Out の時間差を TDC V775 で測定することによって、イベントごとにトリガータイミング時間の補正を行う。V775 は Common Start モードで使用し、V1724 と同時にトリガー信号を入力する。V1724 にトリガー入力と同時に BGO の信号を模したテスト信号を入力し、テンプレート波形フィッティングによりそのピーク時間を取得した。このピーク時間は、V1724 にトリガーが入力されたタイミングを示しており、図 5.21(a) に示す分布となる。このピーク時間を、トリガー入力と Local Trigger Out の時間差によって補正すると、サンプリングクロックとのタイミング差が補正されるため、ピーク時間は図 5.21(b) に示すような 2 本のピークとなる。

図 5.22 に V1724 のトリガー処理と外部出力の関係のパターン図を示す。この図では、考慮する必要のない位相差や配線による遅延は描写していない。トリガークロックとサンプリングクロック及び内部トリガーは、外部に直接取り出すことのできない情報である。外部に出すことができる情報を用いて、トリガーが入力されてから、内部トリガーが生成されるまでのタイミング差 ΔT_0 を求める。Local Trigger Out の時間情報 ΔT_1 は、パターン 1 とパターン 2, 3 に分けられるように、トリガー入力のタイミングによって、 ΔT_0 もしくは $\Delta T_0 - 30$ ns の 2 通りの値を持つ。このため、5.21(b) に示すように Local Trigger Out を用いて補正した V1724 のトリガータイミングが、2 本のピークとなって現れる。イベントごとにトリガー入力のタイミングがどのパターンだったかを知るためには、トリガークロックの情報が必要となる。

V1724 では、モジュール同士のクロック同期を行うための CLK_OUT 出力を 60 ns 周期に設定可能である。この出力は、トリガークロックと不明な位相差があるだけで、トリガーク



(a) V1724 で取得したテストパルスのピーク時間。60 ns の不確かさを持っていることがわかる。なお、横軸に示した時間の絶対値に意味はない。

(b) 1724 で取得したテストパルスのピーク時間に Local Trigger Out による補正を行った。30 ns の間隔で 2 本のピークが立っている。なお、横軸に示した時間の絶対値に意味はない。

図 5.21: Local Trigger Out による補正

ロックを出力していることと変わらないため、CLK_OUT のタイミング情報を V775 を用いて記録する。CLK_OUT と Local Trigger Out との時間差 $\Delta T_2 - \Delta T_1$ は図 5.22 に示すように 3 パターンの値を持つ。実際に、 $\Delta T_2 - \Delta T_1$ を測定したところ、図 5.23(a) に示す通り、3 つのピーク構造を確認した。また、3 つのパターンも、図 5.23(b) に示した図 5.21(b) の分布と図 5.23(a) の分布の相関から確認できた。このようにして、V1724 のトリガータイミングの補正が可能となった。

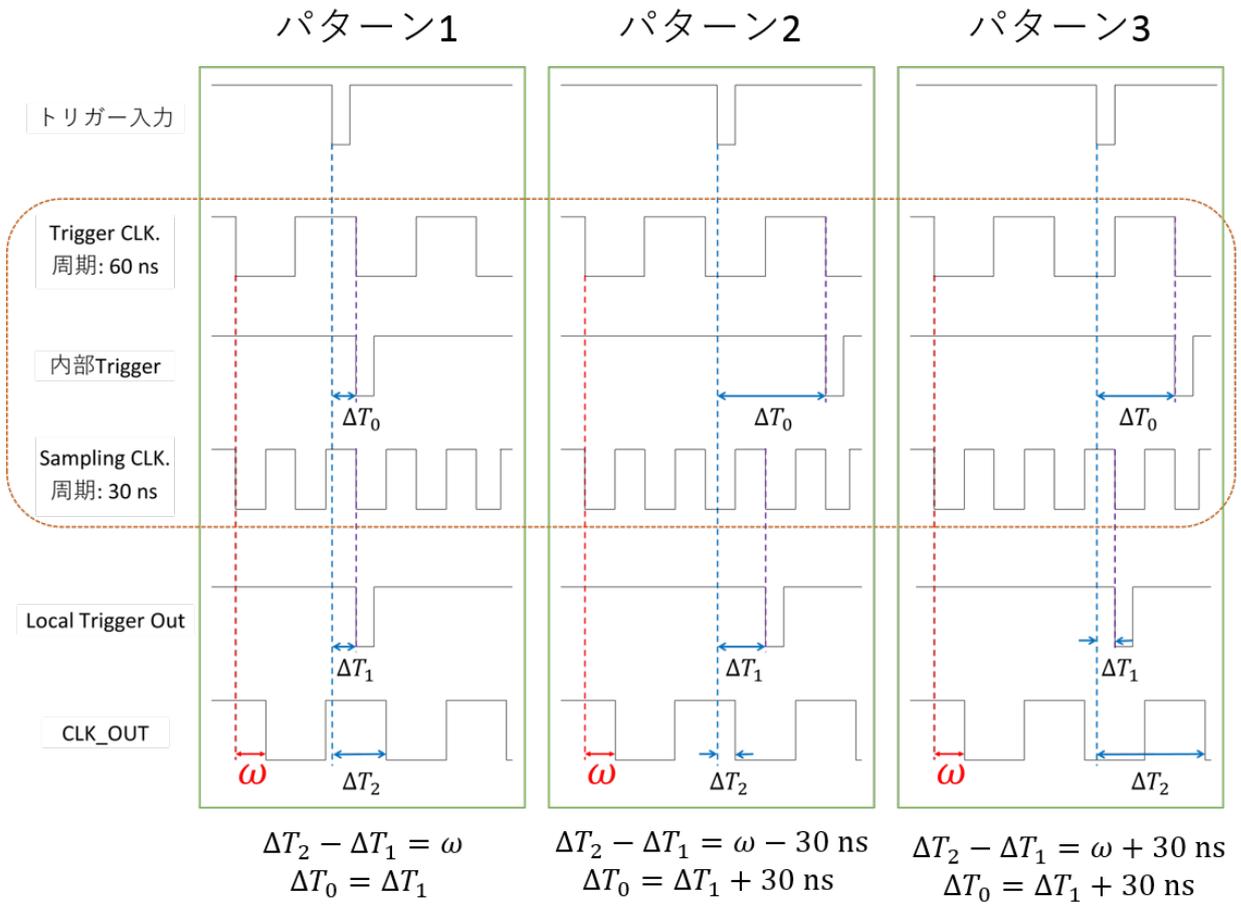
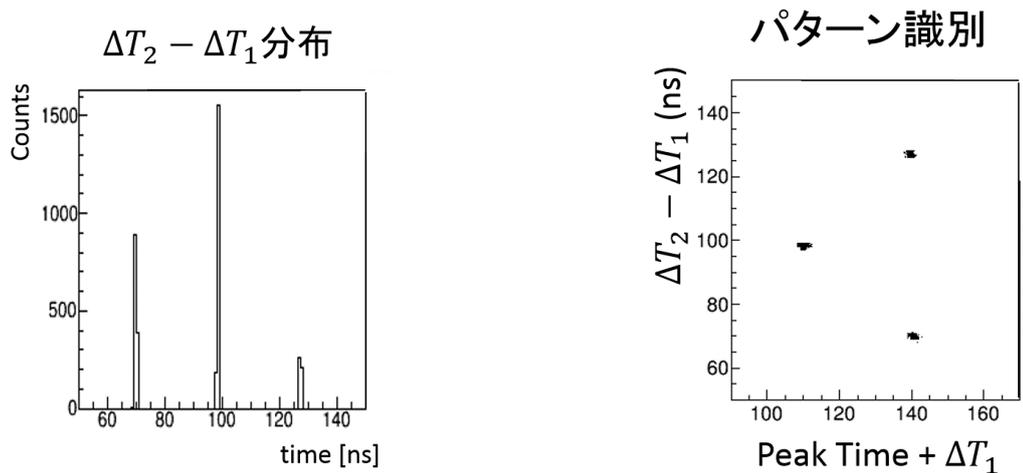


図 5.22: V1724 のトリガー処理と外部出力の関係のパターン。



(a) CLK_OUT が持つ情報は、 $\Delta T_2 - \Delta T_1$ の分布として用いられる。なお、横軸に示した時間の絶対値に意味はない。

(b) 時間情報を用いたパターン識別。図 5.21(b) の分布と 図 5.23(a) の分布の相関である。なお、横軸に示した時間の絶対値に意味はない。

図 5.23: Local Trigger Out と CLK_OUT を用いた時間情報の補正

5.4 全システムの評価

5.4.1 検出光量の位置依存性

この BGO 結晶を片側にのみ付けた PMT で読み出した場合、照射位置によって検出光量に数 % の差異が生じることは図 4.9 でも示した通りである。先行研究 [17] により、この効果は ^{137}Cs 線源由来の 662 keV の γ 線を用いた測定と 77.8 MeV の陽子ビームを用いた測定で確認されており、両者で見られる位置依存性に大きな差異はない。つまり、この位置依存性は入射粒子のエネルギーに依らず、結晶のあらゆる位置に入射する環境においては検出光量に数 % の誤差となって現れる。この位置依存性を補正しないことには目標としている分解能を達成することはできない。実際の実験では飛跡検出器によって BGO への入射位置の情報を得ることが可能で、その補正の効果も先行研究によって有効であることが確かめられている。そこで、全ての BGO カロリーメータについて検出光量の位置依存性を補正するため、 ^{137}Cs 線源を用いて測定を行った。

BGO の発光量は温度依存性を持っていることがわかっており、節 5.2.3 に測定結果を示した。この温度依存性の影響を排除するために温度を一定にした恒温槽内で ^{137}Cs 線源の位置だけを変えて、V792 を用いた QDC 測定を行った。線源の設置位置は即ち γ 線の照射位置であり、図 5.24 に示すように BGO と PMT の接する面を 0 とした z 軸の座標で表す。 γ 線の照射位置は実際のアクセプタンスとなる $z=40$ mm から 380 mm の間を 20 mm 刻みで変更し、この操作の前後で恒温槽内の温度及び BGO 結晶の温度に変化がないかモニターした。

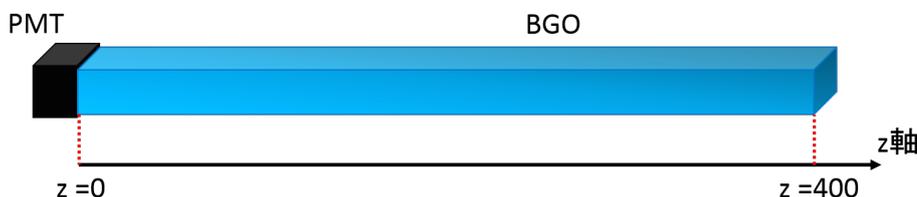


図 5.24: 検出光量の位置依存特性測定時の z 軸の定義。BGO の PMT 側の端を $z=0$ とし、逆の端を $z=400$ mm とした。BGO と PMT は恒温槽内に設置した。

各 BGO チャンネル、各照射位置で得られた ADC 分布についてそれぞれピーク中心値とエネルギー分解能を求めた。ピーク中心値、即ち検出光量の位置依存性を図 5.25 に、エネルギー分解能の位置依存性を図 5.26 に示す。それぞれの中心値及び分解能の誤差棒はフィッティングの誤差である。検出光量の位置依存性の特徴としては、PMT に近いほど小さく先端に向かうにしたがって大きくなる傾向にある BGO チャンネルが多い。逆の傾向を示すものもあるが、全体として 2% から 5% の位置依存性が認められる。一方でエネルギー分解能についてはほとんど位置依存性は見られず、PMT に近いところでわずかに悪化する程度である。以上により、検出光量の位置依存性のデータを得て、実際の実験で補正が可能となった。

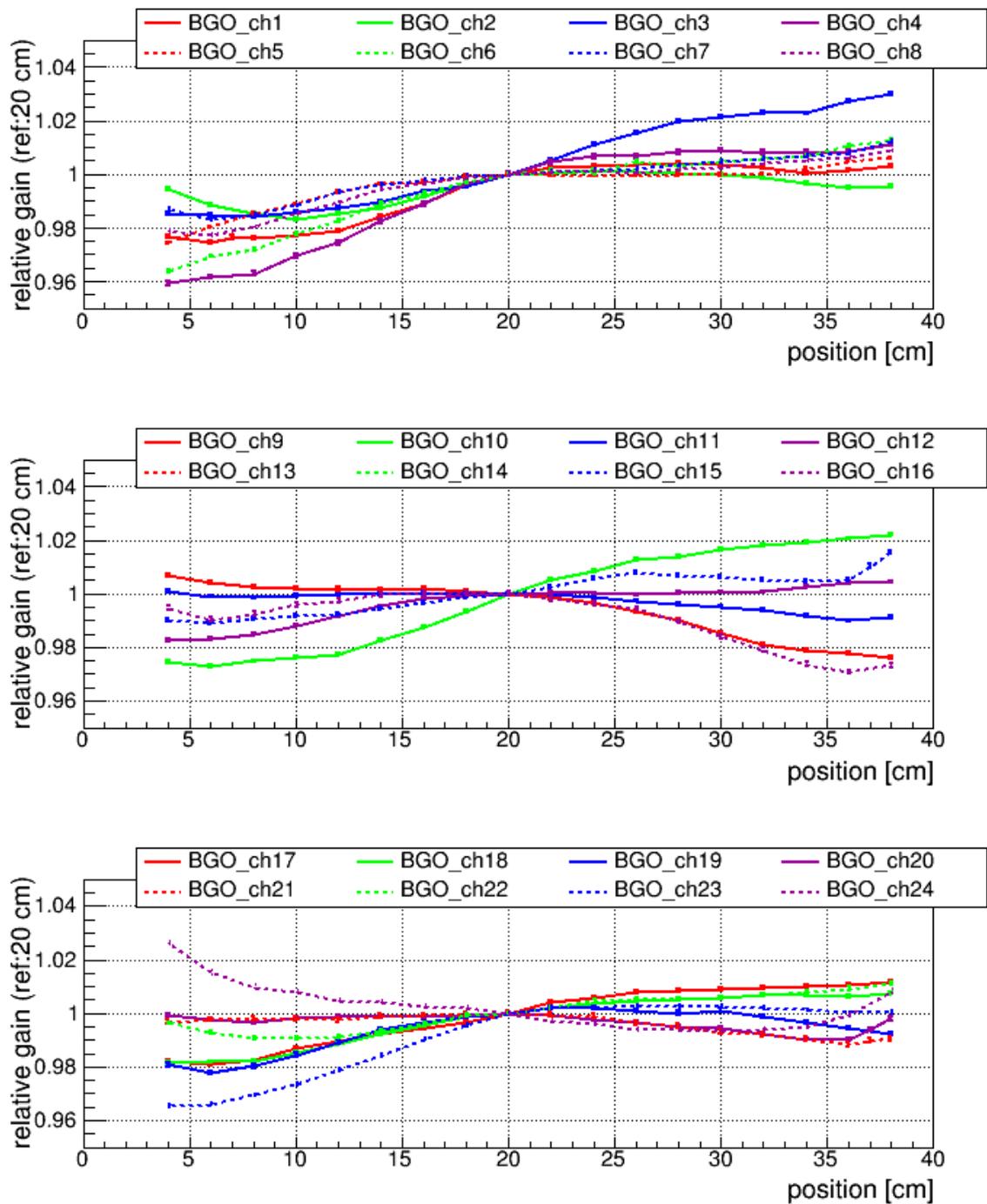


図 5.25: 検出光量の位置依存性。横軸は γ 線照射位置、縦軸は $z=200$ mm のときと比べた gain を示している。

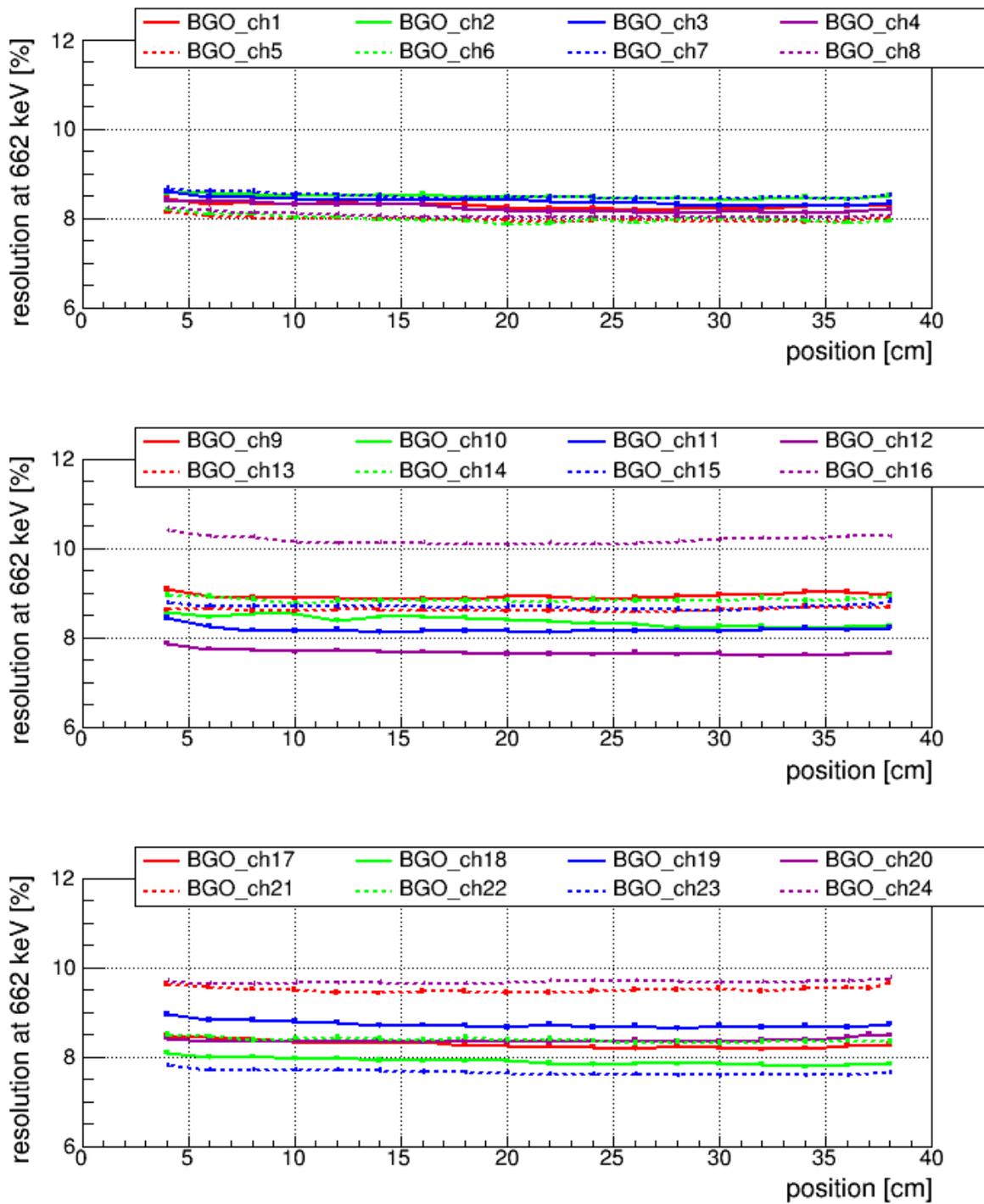


図 5.26: 662 keV におけるエネルギー分解能の位置依存性。横軸は γ 線照射位置、縦軸は分解能である。

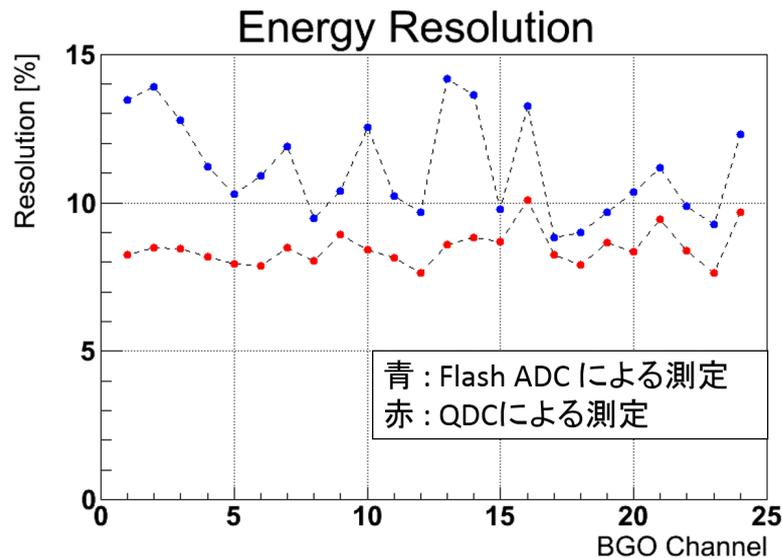


図 5.27: 全チャンネルの 662 keV におけるエネルギー分解能。

5.4.2 エネルギー分解能

第 2 章において開発機について行った方法で実機のエネルギー分解能を評価した。前節と異なり、Flash ADC で波形を取得しテンプレート波形フィッティング法により波高情報得て、エネルギー分解能を求めた。ただ、 ^{137}Cs 線源由来の γ 線は約 662 keV で、160 MeV までをダイナミックレンジとしている読み出しシステムにとって小さく、ノイズの影響も大きく受けてエネルギー分解能が悪化する。ノイズによるエネルギー分解能への影響は、エネルギーが大きいほど相対的に小さくなると考えられる。目標とする 80 MeV 陽子に対するエネルギー分解能を見積もるとき、ノイズによる影響はなるべく無視したい。それゆえに S/N を向上させるために PMT の印加電圧を 900 V に設定して測定を行った。測定結果を図 5.27 に示す。前節で QDC により測定した $z = 200$ mm におけるエネルギー分解能を重ねて示している。

全てのチャンネルについて、15% 以内のエネルギー分解能を得ることができた。節 2.6 に示したテスト機の分解能と比べると全体的にやや悪化している。この原因については、テスト機で評価した BGO カロリメータ (BGO Channel 11) の分解能が比較的よいという個性を持っている、もしくは実機架台へ設置した時の BGO 結晶と PMT の光学的な接触具合によるものと考えられる。QDC で評価したエネルギー分解能と比較すると、QDC で比較的悪い分解能を示していたチャンネルは今回の測定でも同じ傾向を示している。Flash ADC の測定でのみ比較的分解能が悪く見えるチャンネルは、二つの測定の前後で架台を入れ替える等の操作をしている。このことから、架台に設置した時の PMT の接触具合によるものと考えられ、設置する際に注意する必要があるだろう。

全チャンネルの分解能の評価としては、662 keV に対して 15% を達成している。節 2.6 で評価した時と同様に、80 MeV に対するエネルギー分解能を見積もると約 1.4% となり、要求分解能を十分満たしていることがわかった。

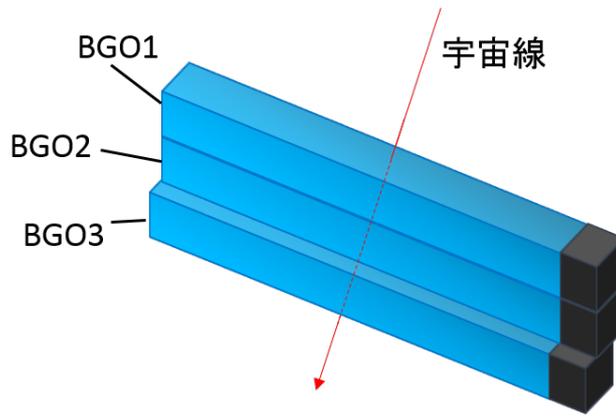


図 5.28: 時間分解能測定のためのセットアップ。実際には実機架台に載せた状態でデータ取得を行った。

5.4.3 時間分解能

システム全体の時間分解能を測定するために、3本のBGOカロリメータを縦に並べて宇宙線の測定を行った。トリガーは真ん中のBGO (BGO2) のヒットを discriminator の閾値により要求し、波形解析によって宇宙線が3本のBGOを通過したことを保証する。図 5.28 に実験セットアップを示す。

各チャンネルの時間情報は、テンプレート波形によるフィッティングで得たピーク位置である。3チャンネル相互の時間差の分解能を評価し、誤差伝搬の式から各チャンネルの時間分解能を求めた。

測定する3本のBGOの読み出しを1台のV1724で行った場合、時間差の計算において、トリガー入力に関するV1724内部での60 nsのばらつきを考慮する必要はない。また、この測定のセットアップでは、宇宙線が通り抜けた位置を選んでいない。しかし、宇宙線のエネルギー損失がMIPであることを仮定すると、各チャンネルの波高はBGOを通った距離に比例するため、波高から宇宙線の通り抜けた角度を絞ることができる。

図 5.29 に時間差の分布を示す。

これらの時間差の情報から、それぞれのBGOの時間分解能を導出する。式 5.1 は各時間差の定義である。

$$\begin{aligned}
 T_{12} &= \text{Peak of Time (BGO1)} - \text{Peak of Time (BGO2)} \\
 T_{23} &= \text{Peak of Time (BGO2)} - \text{Peak of Time (BGO3)} \\
 T_{31} &= \text{Peak of Time (BGO3)} - \text{Peak of Time (BGO1)}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

誤差の伝搬法則から各時間差の分解能は、各BGO固有の時間分解能を用いて式 5.2 で表される。

$$\begin{aligned}
 (\Delta T_{12})^2 &= (\Delta \text{Peak of Time (BGO1)})^2 + (\Delta \text{Peak of Time (BGO2)})^2 \\
 (\Delta T_{23})^2 &= (\Delta \text{Peak of Time (BGO2)})^2 + (\Delta \text{Peak of Time (BGO3)})^2 \\
 (\Delta T_{31})^2 &= (\Delta \text{Peak of Time (BGO3)})^2 + (\Delta \text{Peak of Time (BGO1)})^2
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

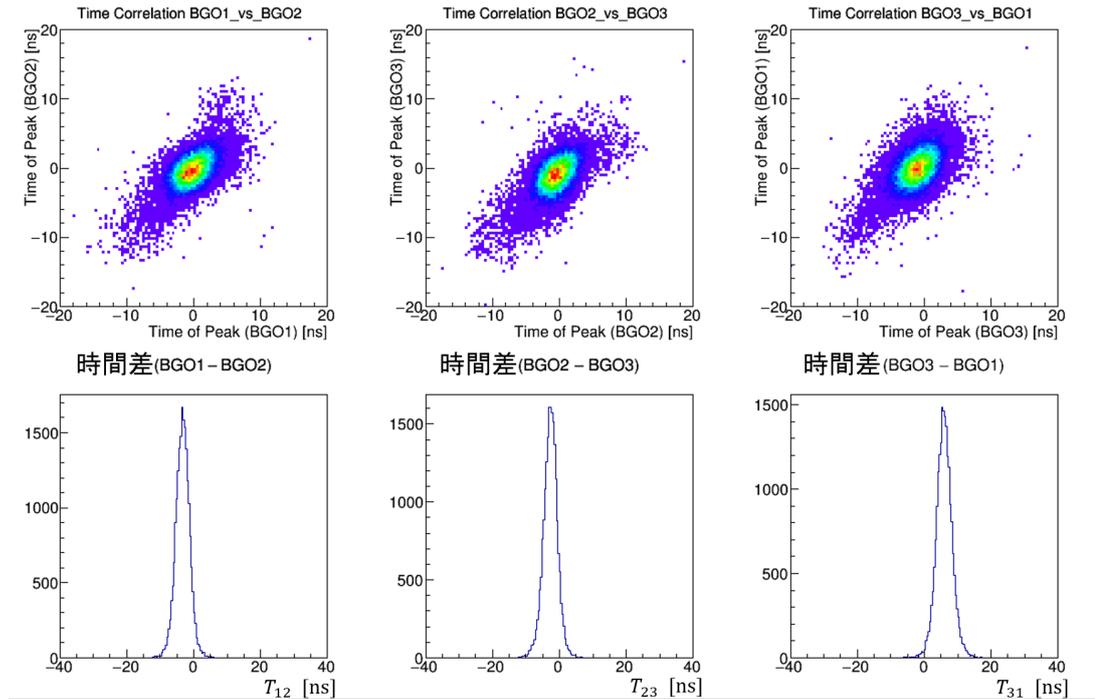


図 5.29: 波形データをフィッティングして得られたピーク中心の時間分布。各チャンネルの波高が一定以上あるイベントを選んでいる。上の散布図は BGO 二つの時間分布の相関を表している。中央に描かれるように平行移動しており、時間の絶対値に意味はない。下のヒストグラムは 2 つのチャンネルの時間差である。

この連立方程式を解くことで、式 5.3 で表される時間分解能が導き出される。

$$\begin{aligned}
 \Delta Peak\ of\ Time(BGO1) &= \sqrt{\frac{1}{2} \times \{ (\Delta T_{12})^2 - (\Delta T_{23})^2 + (\Delta T_{31})^2 \}} \\
 \Delta Peak\ of\ Time(BGO2) &= \sqrt{\frac{1}{2} \times \{ (\Delta T_{12})^2 + (\Delta T_{23})^2 - (\Delta T_{31})^2 \}} \\
 \Delta Peak\ of\ Time(BGO3) &= \sqrt{\frac{1}{2} \times \{ -(\Delta T_{12})^2 + (\Delta T_{23})^2 + (\Delta T_{31})^2 \}}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

求めた時間分解能を表 5.3 に示す。

一方で、測定する 3 チャンネルを 3 台の V1724 で 1 チャンネルずつ読み出したとき、構築した BGO カロリーメータシステムとしての時間分解能が求められる。トリガータイミングを

表 5.3: TOF から計算した時間分解能 (σ)

Channel	時間分解能 (σ)
BGO1	1.30 ± 0.01 ns
BGO2	1.27 ± 0.01 ns
BGO3	1.41 ± 0.01 ns

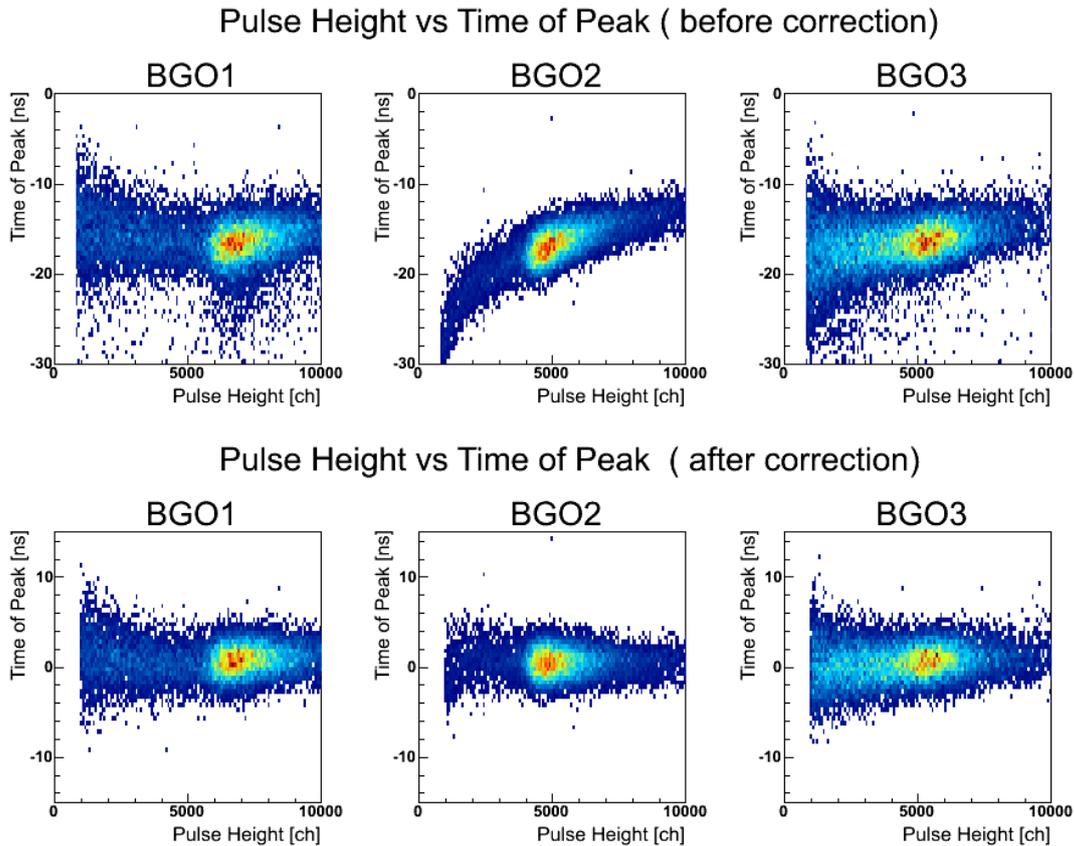


図 5.30: 波高対ピーク時間の補正前と補正後の二次元ヒストグラム。トリガータイミングを決めているのは BGO2 のため、波高によってトリガータイミングとピーク時間のタイミングの差に相関が生まれる。これについての補正値を求め、各チャンネルに適応した後の相関が下の 3 つのヒストグラムである。これら補正後の二次元ヒストグラムを y 軸にプロジェクションし、ガウス関数でフィッティングすることで時間分解能を求めた。

表 5.4: 時間情報の補正を施したピーク時間の分布から求めた時間分解能 (σ)

Channel	時間分解能 (σ)
BGO1	1.68 ± 0.01 ns
BGO2	1.42 ± 0.01 ns
BGO3	1.74 ± 0.01 ns

自分で決めている BGO2 について、波高対ピーク時間の相関に対して、ある程度波高が高いところで十分よく一致するように $1/\sqrt{\text{Pulse Height}}$ に比例する式でフィッティングを行い、補正を行った。この補正を BGO1 と BGO3 にも適用することで、BGO1 と BGO3 のピーク時間の分布を時間分解能とみることが出来る。波高対ピーク時間の補正の様子を図 5.30 に、時間分解能を表 5.4 に示す。BGO2 については参考値である。

以上より、このカロリメータシステムの時間分解能は 2 ns 以下であることが確かめられた。実際の E40 実験では、トリガータイミングと BGO のトリガーイベントのヒットのタイ

ミングには Time of Flight 分の不定性がある。時間分解能及び Time of Flight を考慮し波形解析で得られた信号のピーク時間にゲートを設けることで、S/N の向上が期待できる。

5.4.4 DAQ 効率

この節では、構築した DAQ システムについて、トリガーレートを変えてデータ収集効率を調べることで評価する。E40 実験ではトリガー決定に $16 \mu\text{s}$ の時間を要するため、トリガーが $16 \mu\text{s}$ 以内に連続することはない。E40 実験で想定されるトリガー環境を再現するために、 ^{60}Co 線源からの γ 線を BGO カロリメータで検出して得られたランダムなパルス信号に、 $16 \mu\text{s}$ の dead time を設けることで、ランダムトリガーを生成した。トリガーを受け付ける Master Trigger Module 以降のシステムは実際の実験と同じになるように設定した。

生成した E40 実験を想定したトリガーを用いて、DAQ 効率を調べる。V1724 は Buffering が可能なため、トリガー信号の間隔の平均が、1 イベントの平均的なデータ転送時間より短くならない限り、転送においては dead time を生じない。しかし、トリガー入力後 Veto スイッチによりベースラインが上がっている状態を、次のイベントの記録範囲に含めるわけにはいかない。トリガー入力後即座に Veto スイッチは解除され、DAQ mode へと移行するが、ベースラインの回復まで 500 ns を要する。このベースラインの回復までを、図 5.19 で示した記録範囲に含めないようにすると、トリガー入力後 $2 \mu\text{s}$ が dead time となる。したがって、トリガー入力後 $18 \mu\text{s}$ を Busy 処理する (Force Busy) システムとした。

転送時間を決めるのは 1 イベントの word 数であるため、Custom Size による設定により簡単に再現できる。しかし、実際には Custom Size で指定した範囲のサンプリングを終えた後、Zero Suppression による削減を行い、Control word を挿入する。この操作には有限な時間がかかるため、転送時間に含めて考慮する必要がある。E40 実験を想定した擬似データを次のように作成した。

- V1724 の各チャンネルの Zero Suppression の閾値を -500 mV 程度に設定する。
- Zero Suppression の閾値を超えたサンプルの前後 16 words ずつ取得するように設定する。
- トリガー信号を discriminator を用いて 40 ns 程度の幅の NIM 信号とし、V1724 の全 ch のアナログ入力に inputs する。

閾値を超えて記録されるのは NIM 信号を入力したタイミングのみであり、データサイズは 1 word となる。1 ch あたりのデータサイズは、NIM 信号入力の前後 16 words ずつを取得するため、33 words となる。このようにして、全 ch で $2 \mu\text{s}$ 間の波形データを取得することを想定した擬似データをトリガー信号から作ることができた。

3 台の V1724 を読み出すときの構成は、節 5.3.2 及び節 5.3.3 で述べた通りで、Receiver Module も同時に読み出す。また、時間情報を補正するために用いる TDC V775 を VME-バスで読み出す V1724 と同じクレートに配置してシリアルに読み出すか、別のクレートに設置して独立に読み出すかを検討するために、V775 の有無 2 パターンを試した。V775 は 32 イベントの Buffer を備えているため、V775 と V1724 をシリアルに読み出すとき、V775 の Buffer が先に Full になる。したがって、V775 を含めたフロントエンド全体の Buffer サイズが 32 となるため、Receiver Module の FIFO の深さを 32 に設定し、Busy 管理をする。V775 を読

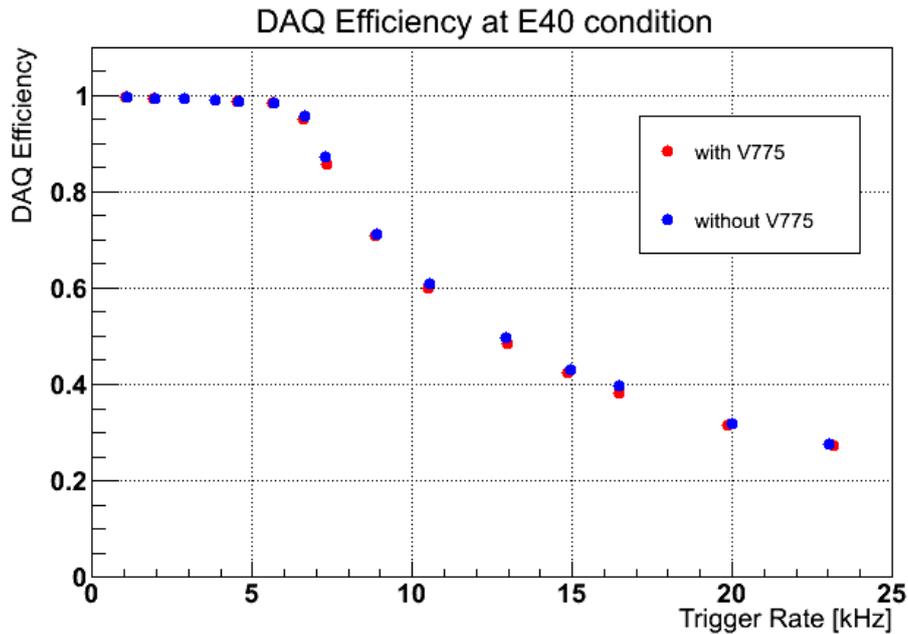


図 5.31: E40 実験の環境下における DAQ 効率。赤い点は V775 をシリアルに読み出した場合で、青い点は V775 を加えなかった場合。

み出しに加えた場合は、データ転送にかかる時間が僅かに増える。また、V775 はトリガーを受け付けるたびに AD コンバージョンによる Busy を生じるが、それよりも長い前述の Force Busy があるため影響しない。

2nd level trigger のレートに対する DAQ 効率の測定結果を図 5.31 に示す。DAQ 効率は、(転送されたイベント数) ÷ (2nd level trigger のイベント数) で評価している。

トリガーレート 6 kHz 以下において安定した効率を達成している。一方で、6 kHz 以上では DAQ 効率が悪化する傾向が見られる。これは、平均的なトリガー間隔が、データの転送時間よりも短くなるためだと考えられる。E40 実験で想定される 2nd level trigger のレートは 1 kHz 程度であり、マージンをとって 5 kHz までに耐えうる DAQ システムを要求している。5 kHz 以下において 98% 以上の効率を達成しており、V775 の有無は影響しない。この環境下で BGO カロリメータの DAQ システムは十分な効率で読み出すことが可能である。

5.5 まとめ

第2章に記述した読み出しシステムを実装した BGO カロリーメータシステムの実機を製作し、システム全体の評価を行った。

ハードウェアとして、全チャンネル（総数 24）の BGO 結晶及び PMT を実機架台に恒温槽内に設置した。また、開発したアナログ回路を全チャンネル分製作し、動作させるためのクレートを設計・組み立てを行った。ソフトウェアとしては、E40 実験で用いる DAQ システムに BGO カロリーメータの読み出しを構築した。

システムの評価としていくつかの測定を行った。まず、実機回路及びそれらを動作させるクレートに関しては、問題なく動作し、開発時と同じ性能をもった実機を製作することができた。エネルギー分解能、時間分解能については、E40 実験のカロリーメータシステムへの要求に適うものであるといえる結果が得られた。検出光量の照射位置依存性については、無視できない依存性が確認された。しかし、E40 実験では CFT によるトラッキングにより BGO への照射位置を決定できるため、 γ 線源を使って全 BGO について測定を行い、その測定データからこの依存性を補正可能とした。DAQ システムについては、トリガーレート 5 kHz 程度の環境下で約 98% の DAQ 効率を示しており、E40 実験において十分な性能を発揮できることを示した。

以上により、E40 実験への要求性能を十分に満たす BGO カロリーメータシステムが完成した。

第6章

まとめ

本研究では、シグマ陽子散乱実験 (J-PARC E40 実験) のための BGO カロリーメータシステムの構築を行った。本研究は、BGO カロリーメータの読み出しシステムの開発及びその評価と、全チャンネルへの実装及び評価の 2 つに分けられる。

BGO カロリーメータは $30 \times 25 \times 400 \text{ mm}^3$ のシンチレーション結晶で、PMT により読み出す。E40 実験において BGO カロリーメータは、約 160 MeV までのエネルギーの散乱陽子を検出する。E40 実験の要請から、BGO カロリーメータの性能として、40 kHz-400 kHz の高計数率下において、80 MeV に対して 3% (σ) のエネルギー分解能が要求される。BGO のカロリーメータの読み出しシステムとして、高計数率下において生じる信号のパイルアップを分離し、エネルギー情報を取得するために、積分回路と Falsh ADC を用いたテンプレート波形フィッティング法を採用した。この方法は、積分回路で整形した信号を Flash ADC で記録し、オフラインの波形解析により波高情報を取得するものである。Flash ADC として CAEN V1724 を用い、また、その前段に用いるアナログ回路を設計・製作して読み出しシステムを試作した。

東北大学 CYRIC において 77.8 MeV 陽子ビームを用いて、この読み出しシステムの評価を行ったところ、低計数率下におけるエネルギー分解能として 1.0%、450 kHz という高計数率下においても 1.3% を達成した。また、高計数率下において生じる PMT の Gain 降下によるエネルギー分解能へ影響は PMT の電圧を 630 V 以下で動作させることで抑制できることを確かめた。

波形解析の手法は、取得した波形データから記録されたパルス信号を認識し、テンプレート波形によるフィッティングを行うものである。パイルアップ信号を正しく認識できないと、正確な波高情報を得ることができない。そのため、数パターンのパルス信号をサーチするアルゴリズムを実装することで、波形解析の効率の向上を目指した。波形解析の効率を、CYRIC の実験で収集した pp , pC 散乱による波形データをランダムに抽出して用いる方法で調べたところ、シングルレート 40 kHz において約 99% の効率を達成した。

また、カロリーメータとしてエネルギー較正法はとても重要である。77.8 MeV 陽子ビームを銅のディグレーダーによりエネルギーを下げて BGO に入射することにより、波高とエネルギーの対応点を 4 点取得したところ、ある程度高いエネルギーについてはほぼ線形であることがわかった。較正式として、低エネルギー領域における非線形性も考慮した現象論的な式を導入した。 CH_2 を標的に陽子ビームを用いて行った pp 散乱実験のデータとシミュレーションを

比較することで、較正式を評価したところ、10 MeV 以上の領域で 0.4 MeV 以下の精度で一致する結果が得られた。

以上が読み出しシステムの開発と評価の結果である。E40 実験におけるカロリメータとして十分な性能を有していると判断できたので、全チャンネル (24 本) に実装し、カロリメータシステム全体としての評価を行った。

全チャンネルのエネルギー分解能の評価は ^{137}Cs 線源由来の 662 keV の γ 線を用いて行い、15% (σ) 以下を達成した。エネルギー分解能が $\sqrt{1/E}$ に比例すると仮定すると、80 MeV において 1.4% の分解能を達成することが期待される。また、BGO カロリメータの検出光量には、照射位置や温度の依存性がある。温度の依存性については、室温付近で 1 度の変化につき検出光量に約 1.8% の変動が確認された。したがって、BGO カロリメータは恒温槽内に設置し、温度を一定にすることが不可欠となる。室温付近でコントロールする恒温槽内の温度は、実験室内で 0.1°C (RMS) 以内の変動で抑えられており、実際の実験施設でも同様の安定性が期待できる。一方で、E40 実験においては飛跡検出器によるトラッキングから、BGO カロリメータへの照射位置がわかる。そこで、検出光量の位置依存性を、 γ 線源を用いて全 BGO について測定を行うことで、この依存性を補正可能とした。

DAQ システムとしては、3 台の V1724 を用いて BGO カロリメータのデータを収集する。データ収集のスピードを BGO カロリメータが律速しないよう、データ転送の高速化を図りつつ、イベント同期を行う読み出し系を構築した。この読み出し系の評価のために、E40 実験で実際にフロントエンドが受け取るトリガーを模したランダムトリガーを生成し、DAQ 効率を測定した。その結果、5 kHz のトリガーレートに対して 98% の効率が得られ、想定トリガーレートにおいて十分な効率で動作することがわかった。

以上により E40 実験環境下における BGO カロリメータの読み出しシステムの開発を完遂し、実機カロリメータシステムを完成させた。

謝辞

本論文の執筆にあたり誠に多くの方々にお世話になりましたこと、心より感謝申し上げます。

田村裕和教授には、研究室ミーティングにおきまして多くのアドバイスを頂きました。また、田村教授の講義により私は原子核物理に興味を湧き、本研究へと誘われ、非常に楽しい研究生活を送ることができました。深くお礼申し上げます。三輪浩司助教には、本論文における全てに於きまして大変なご助力を頂きました。本論文のテーマに始まり、各測定器の使い方やDAQの書き方、解析手法へのアドバイス等、枚挙に暇がありません。また、本研究の各局面において非常に細かい相談にも乗っていただきました。三輪助教のご助力なしには本論文の完成致しませんでした。深く感謝申し上げます。本研究のためにビームを利用させて頂きましたCYRICの皆様へ感謝申し上げます。

小池武志准教授にはJ-PARCへの出張中、よく晩御飯に連れて行って頂きました。小池准教授とともにした晩御飯は作業で疲れた身体にたまらないものでありました。また、休日には座禅へ連れて行って頂き、大変貴重な体験をさせていただきました。鵜養美冬専任講師には休憩時間に美味しいコーヒーを振る舞っていただきました。山本剛史博士研究員には、測定系のノウハウなど、夜中や土日に関わらずご助言を頂きました。ありがとうございました。

中村哲教授、永尾翔助教には研究室ミーティングにおいて多くのご助言をいただきました。金田助教には学部4年生時にオープンキャンパス準備においてROOTの使い方や解析手法など多くのことを教えて頂きました。国際学会へ行った際には特にお世話になりました。また、サマーチャレンジ等のティーチングアシスタントとして教える立場になる機会を頂き、大変多くの経験を積むことができました。誠にありがとうございました。

梅津技官には検出器架台におきまして大変お世話になりました。架台の完成なしに本研究の達成はございませんでした。ありがとうございました。

同じグループの先輩である赤澤雄也氏には、日々の研究生活において様々な助言を頂きました。また、ミーティング進行などグループとしてスムーズな研究生活を送れるよう尽力してくださいました。後輩である小澤祥太郎氏には、しばしばとりとめのない長話に付き合ってくださいました。同じく後輩である藤岡徳菜氏には、本研究への積極的な質問を頂き大変刺激になりました。ありがとうございました。

小椋裕氏とはJ-PARCで共に作業をしました。また、研究の気分転換にもよく付き合ってください、心地よい日々を送ることができました。富田翔子氏には、よく細々とした計算等の相談に乗ってもらいました。外山裕一氏とは、研究室での日々だけでなく学会へ共に参加する機会も多く、大変励みになりました。ありがとうございました。

研究室の先輩である佐々木侑輝氏、藤田真奈美氏、後輩の相田元氣氏、叶内萌香氏、竹内大貴、室井佑太氏には研究生活を大いに励まして頂きました。

最後に、私をここまで支えてくださった母と兄弟達に感謝を申し上げます。また、私が物理学を志すきっかけを下された父へ、最大の敬意と感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] M. M. Nagels et al., Phys. Rev.D15 (1977) 2547
- [2] T.A.Rijken et al., Nucl. Phys. A547 (1992) pp. 245C-254C
- [3] T. Inoue, HAL QCD Collaboration, Nucl Phys, A 881 (2012), p. 28-43.
- [4] F.Eisele, et al., H. Filthuth, W. Foehlich, V. Hepp, and Gunter Zech. Phys. Lett., Vol B37, (1971) pp. 204-206
- [5] J.K. Ahn et al. Nucl. Phys. A 648 (1999) pp. 263-279.
- [6] Y. Kondo et al. Nucl. Phys. A 676 (2000) 371
- [7] J.K. Ahn et al. Nucl. Phys. A 761 (2005) 41.
- [8] K.Miwa et al, Proposal for an experiment at the 50-GeV PS
 ” Measurement of the cross sections of Σp scatterings ” ,
http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1101/pdf/KEK_J-PARC-PAC2010-12.pdf
- [9] K. Miwa, Technical Design Report from E40 (2015)
http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~miwa9/E40/doc/doc_20150515_en.pdf
- [10] K. Miwa, Technical Design Report from E40 (2016)
http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~miwa9/E40/doc/doc_20160627_en.pdf
- [11] M. Moszynski, C. Gresset, J. Vacher and R. Odru. Nucl. Instr. and Meth. ,188, (1981) 403-409
- [12] V.V. Avdeichikov, L. Bergholt, M. Guttormsen, et al. Nucl. Instr. and Meth. A, 336 (1993), p. 381
- [13] D. Horn, G.C. Ball, A. Galindo-Uribarri, E. Hagberg, R.B . Walker, R. Laforest and J. Pouliot, Nucl. Instr. and Meth. A 320 (1992) 273
- [14] J.B Birks, The Theory and Practice of Scintillation Counting (Pergamon, 1964) 465.
- [15] Glenn.F.Knoll: ” RADIATION DETECTION and MEASUREMENT (Third Edition)” John Wiley Sons,Inc.(1999)
- [16] 塩崎 健弘. Σp 散乱実験のための MPPC 多チャンネル読み出しシステムの開発. Master’s thesis, 東北大学大学院, 理学研究科物理学専攻, 2014
- [17] 赤澤 雄也. シグマ陽子散乱実験のための散乱陽子検出器群の開発. Master’s thesis, 東北大学大学院, 理学研究科物理学専攻, 2013
- [18] M. Ieiri et al., Nucl. Instr. and Meth. A 257 , (1987) 253 .