

修士論文

小型原子炉ニュートリノ検出器における
バックグラウンド除去のための波形弁別法の
研究

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻
澤村慶幸

平成24年

概要

近年、原子炉ニュートリノ振動実験の検出技術を利用した小型の原子炉ニュートリノ検出器の開発が世界中で活発化してきている。小型の検出器を開発することで、原子炉の中心から数十メートルといった原子炉に近い地点に検出器を設置することができる。ニュートリノは、その貫通性が高い性質を利用し、原子炉の運転状況を監視するといった応用的な利用において期待されている。この技術は遮蔽することのできないニュートリノの検出によるためプルトニウムの違法な生産を監視することができ、核不拡散につながるものである。以上の点から国際原子力機関（IAEA）からも注目されている研究である。

東北大学では2006年に高速実験炉常陽において約1tの液体シンチレータ検出器でニュートリノ検出を試みた。しかし、この実験ではデータ収集期間が短く、またバックグラウンドが多く統計的に有意にニュートリノを検出することができなかった。常陽での実験の主要な問題点として地上での測定であったためバックグラウンドとなる宇宙線起源の高速中性子事象が多い点、液体シンチレータの劣化により長期測定ができなかった点などがまとめられている。常陽での実験を踏まえ、2010年から高速中性子除去のための波形弁別に特化した原子炉ニュートリノ検出器の開発を行っている。

本研究では波形弁別によるバックグラウンド除去能力向上のための改良として特に液体シンチレータ中の酸素濃度モニタリング、波形テール部の分解能向上、解析法の最適化を行っており、この三点の研究について記述する。

目次

概要	1
第1章 序論	1
1.1 原子炉ニュートリノ検出	1
1.1.1 原子炉ニュートリノ	1
1.1.2 原子炉ニュートリノ検出原理	5
1.2 小型ニュートリノ検出器による原子炉モニター開発の背景	9
1.2.1 代表的な小型原子炉ニュートリノ検出器実験	9
1.3 東北大学における小型ニュートリノ検出器の開発	12
1.3.1 常陽実験	12
1.3.2 ニュートリノ検出器の改良	15
第2章 小型ニュートリノ検出器構造	18
2.1 小型ニュートリノ検出器構造	18
2.1.1 改良検出器の構造	18
2.2 液体シンチレータ	21
2.2.1 常陽検出器の液体シンチレータからの改良点	21
2.3 光電子増倍管	23
2.4 データ収集システム	25
2.4.1 Flash Analog to Digital Converter	25
2.4.2 本研究でのデータ取得	25
2.4.3 Trigger logic	25
2.5 窒素バブリングの改良	26
2.5.1 バブラーの改良	27
2.5.2 バイアル測定セットアップ	29
2.5.3 液体シンチレータ循環用ポンプ	30
2.5.4 温度計と配管圧力計	30
2.5.5 気中及び液中の酸素濃度計	31
2.5.6 チューブの酸素透過性試験	31
2.5.7 バイアル測定におけるデータ取得回路	33
2.5.8 酸素濃度測定	34
2.5.9 バイアル測定における高速中性子事象データ取得	35
第3章 事象再構成	39
3.1 波形再構成	39
3.1.1 波形テール部補正	39

3.2	エネルギー較正	44
3.3	事象位置再構成	46
第4章	ニュートリノシミュレーション	47
4.1	Geant4	47
4.2	KAPST	47
4.3	ニュートリノシミュレーション	48
第5章	バックグラウンド	51
5.1	シングルバックグラウンド	51
5.2	遅延同時計測バックグラウンド	53
5.2.1	Accidentalバックグラウンド	53
5.2.2	Correlatedバックグラウンド	53
5.3	バックグラウンドデータ	55
5.3.1	高速中性子	57
第6章	ニュートリノセクション解析	59
6.1	解析変数とカット条件	59
6.1.1	Δ Time	60
6.1.2	Multiplicity	60
6.1.3	波形弁別法における変数	65
6.1.4	Energy と Δ Vertex	72
6.2	ニュートリノセクション解析のまとめ	74
6.2.1	解析変数のカット条件のまとめ	74
6.2.2	波形解析の評価	76
第7章	ニュートリノ検出能力	77
7.1	目的	77
7.2	各波形弁別法における解析結果	77
7.3	S/N Study	82
第8章	まとめと今後	84
8.1	まとめ	84
8.2	今後	84
付録A	改良検出器の解析におけるコントロールプロット	86
付録B	Accidentalバックグラウンド除去方法のMCスタディによる評価	88
B.1	宇宙線事象同定方法	88
B.1.1	Buffer層用液体シンチレータ候補	88
B.1.2	Buffer層用液体シンチレータ候補の特性	88
B.2	結果	93
付録C	データ取得用マイコンセットアップ	95

目 次

1.1	^{235}U の核分裂過程[1]	2
1.2	典型的な原子炉における主な核の核分裂頻度 (緑: ^{239}Pu , 黒: ^{235}U , 赤: ^{238}U , 紺: ^{241}Pu) [13]	3
1.3	典型的な原子炉における主な核種の 1 分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布 (緑: ^{239}Pu , 青: ^{235}U , 赤: ^{238}U , 紫: ^{241}Pu) [13]	4
1.4	$\bar{\nu}_e$ の検出原理 (逆 β 崩壊)	5
1.5	(a) は観測される反電子ニュートリノのエネルギー分布、(b) はニュートリノフラックス、(c) は反応断面積を表す。	6
1.6	SONGS 実験の検出器 [9]	11
1.7	高速実験炉常陽内の検出器配置 [12]	12
1.8	KASKA プロトタイプ検出器の断面図 [12]	13
1.9	異種放射線で励起されたスチルベン中のシンチレーション波形の時間特性 (時間 0 で同じ強度に規格化) [27]	16
2.1	改良検出器のデザイン	19
2.2	改良検出器の様子	19
2.3	プソイドクメンベースのガドリニウム入り液体シンチレータの経年変化 [17]	21
2.4	pseudocumene の構造式	22
2.5	PPO の構造図	22
2.6	光電子増倍管 (R5912) の寸法図	24
2.7	光電子増倍管 (R5912) とアクリルハウジング	24
2.8	FADC で取得した波形データ (左図が 1 倍波形、右図が 10 倍波形)	25
2.9	改良検出器の測定回路	26
2.10	窒素バブリングの改良の模式図	27
2.11	改良型バブラー	28
2.12	液体シンチレータ及び窒素の循環の様子	28
2.13	波形弁別能力測定用バイアル	29
2.14	バイアルの圧力試験	29
2.15	バイアルと 2 インチ PMT	29
2.16	バイアルセットアップ	29
2.17	液体シンチレータ循環用ポンプ	30
2.18	ポンプ電源周波数制御用インバータ	30
2.19	温度計と圧力計と溶存酸素濃度計センサー部	30
2.20	チムニー用気中酸素濃度計 (左図はセンサー部、右図は本体)	31

2.21	液中溶存酸素濃度計	31
2.22	チューブ素材による液体シンチレータ中の酸素濃度評価のセットアップ	32
2.23	バイアル測定用回路図	33
2.24	チムニー用気中酸素濃度計設置の様子（蓋の検出器実装へ向けた試験の様子）	34
2.25	^{252}Cf の崩壊図 [24]	35
2.26	Double Gate 法の Gate の定義	35
2.27	左図が時間と液体シンチレータ中酸素濃度、右図が時間とチムニー内部酸素濃度	36
2.28	エネルギーと TailQ/TotalQ の相関（左図が ^{60}Co 、右図が ^{252}Cf ）	37
2.29	左上図は ^{252}Cf の電荷分布、右上図は ^{60}Co でエネルギースケールを決定した分布、左下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Efficiency Curve（赤は酸素濃度 3.8 mg/l 、黒は酸素濃度 0.2 mg/l ）	37
2.30	酸素濃度と発光量の関係	38
2.31	酸素濃度と高速中性子 Cut Efficiency の関係	38
3.1	FlashADC における 1 波形データ（左図が取得波形データ、右図が反転させた波形データ）	40
3.2	任意の 1 波形（左図は 1 倍の波形、右図は 10 倍の波形）	40
3.3	任意の 1ch における Clock Generator を用いた平均波形比較（黒は 1 倍波形、赤は 10 倍波形）	41
3.4	任意の 1ch における Clock Generator を用いた平均波形比較（黒は 1 倍波形、赤は Amp モジュールによる Gain と遅延を補正した 10 倍波形）	41
3.5	テール部を補正した任意の 1 波形	43
3.6	左図がテール部補正無の平均波形、右図がテール部補正有の平均波形	43
3.7	^{60}Co の崩壊図 [24]	44
3.8	^{60}Co （赤線）と BG（黒線）のエネルギー分布	45
3.9	^{60}Co データから BG データを差し引きした分布	45
4.1	逆 β 崩壊反応のファインマンダイアグラム	48
4.2	逆 β 崩壊の反応断面積（左図が微分反応断面積、右図が全反応断面積）	49
4.3	ニュートリノシミュレーションの結果（左上図が先発信号の Energy 分布、右上図が後発信号の Energy 分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差の分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布）	50
4.4	ニュートリノシミュレーションにおけるエネルギー分布とエネルギー Threshold の関係（左図が先発信号と後発信号のエネルギーの相関、右図が先発信号と後発信号のエネルギー Threshold による Cut Efficiency）	50
5.1	改良検出器におけるシングルバックグラウンドと $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布（赤がシングルバックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーション）	52
5.2	改良検出器におけるシングルバックグラウンド Rate とエネルギー Threshold の関係	52

5.3	高速中性子バックグラウンドの模式図	54
5.4	左上図が先発信号のエネルギー分布、右上図が後発信号のエネルギー分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布（青が Correlated バックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーション）	56
5.5	左上図が先発信号のエネルギー分布、右上図が後発信号のエネルギー分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布（青が Correlated バックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーション）	58
6.1	左上図は ΔTime の分布（黒は高速中性子事象、赤は Accidental バックグラウンド事象）。左下図は ΔTime の上限値を変化させた際の Accidental バックグラウンドの Cut Efficiency のグラフ。右下図は ΔTime のカット値による Enhance。	60
6.2	二つの中性子からなるマルチ事象概念図	61
6.3	MP の定義（左図は Correlated バックグラウンド、右図は Accidental バックグラウンド）	62
6.4	上段が Post time、中段が Pre time、下段が $E_{\text{threshold}}$ 。左がニュートリノ inefficiency、中央が DoubleGate 法による Enhance 値 $\times (1 - \text{inefficiency})$ 、右図が χ^2/NDF による Enhance 値 $\times (1 - \text{inefficiency})$	63
6.5	Double Gate 法の Gate の定義	65
6.6	左図が StartT に対する Cut Efficiency、右図が StartT に対する Enhance 値	66
6.7	左図が TailT に対する Cut Efficiency、右図が TailT に対する Enhance 値	67
6.8	左図が EndT に対する Cut Efficiency、右図が EndT に対する Enhance 値	67
6.9	左図が先発信号における TailQ/TotalQ 分布（黒が Correlated バックグラウンド、赤が Accidental バックグラウンド）、右図が後発信号における TailQ/TotalQ 分布（黒が Correlated バックグラウンド、赤が Accidental バックグラウンド）	68
6.10	左図が TailQ/TotalQ のカットラインに対する Cut Efficiency、右図が TailQ/TotalQ のカットラインに対する Enhance 値	68
6.11	Enegy が 6 MeV の γ 線参照波形の各 bin の期待値と σ （左図がテール部補正無、右図がテール部補正有）	69
6.12	左図は StartT に対する Cut Efficiency、右図は StartT に対する Enhance 値。	70
6.13	左図は EndT に対する Cut Efficiency、右図は EndT に対する Enhance 値。	70
6.14	左図は先発信号の χ^2/NDF 分布、右図は後発信号の χ^2/NDF 分布（黒は高速中性子の後発事象、赤は高速中性子の先発事象）	71

6.15	左図が χ^2/NDF のカットラインに対する Cut Efficiency、右図が χ^2/NDF のカットラインに対する Enhance 値	71
6.16	左図は E_p の下限値と Δ Vertex の相関の一例。右図は左図の最大値付近の拡大 ($E_p < 6.3[\text{MeV}]$ 、 $E_d < 9.0[\text{MeV}]$)	73
6.17	左上図は Δ Vertex の Cut Efficiency、左下図は左上図の拡大。右上図は Δ Vertex の Enhance、右下図は右上図の拡大。	73
6.18		76
7.1	テール補正有の Double Gate 法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)	80
7.2	信頼水準 2σ でのニュートリノ観測にかかる測定日数と原子炉熱出力の関係	83
A.1	テール補正無の Double Gate 法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)	86
A.2	テール補正無の χ^2 検定法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)	87
A.3	テール補正有の χ^2 検定法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)	87
B.1	Buffer 層用液体シンチレータ候補の電荷分布	89
B.2	Buffer 層用液体シンチレータ候補の相対光量	90
B.3	Buffer 層用液体シンチレータ候補の発光波形	91
B.4	ターゲット液体シンチレータと Buffer 層用液体シンチレータ候補の分離比較	92
B.5	ニュートリノシミュレーションと宇宙線ミュオン事象におけるエネルギーと TailQ/TotalQ の相関	93
B.6	ニュートリノシミュレーションと宇宙線ミュオン事象における Efficiency	94
C.1	使用した 8bit マイコン (Japanino)	95
C.2	信号増幅用アンプ回路図	96
C.3	信号増幅用アンプ回路の写真	96

表 目 次

1.1	中性子捕獲断面積 [25]	7
1.2	Rovno 実験及び SONGS 実験の小型原子炉ニュートリノ検出器の能力値 [5]	9
1.3	世界の小型原子炉ニュートリノ検出器の特徴 [9]	10
1.4	常陽実験における原子炉ニュートリノのイベントセレクションの結果 (括弧内の数値は efficiency)[12]	14
2.1	検出器各部特徴	20
2.2	改良検出器の液体シンチレータ組成	21
2.3	pseudocumene の特性	22
2.4	常陽実験検出器と改良検出器の液体シンチレータの特性	22
2.5	各 PMT の印加電圧と取り付け位置	23
2.6	光電子増倍管 (R5912) の仕様	23
2.7	各モジュールの型番	26
2.8	チューブ素材による液体シンチレータ中の酸素濃度評価 [32]	31
2.9	バイアル測定における各モジュールの型番	33
2.10	バイアル測定用回路各パラメーター設定	33
2.11	DoubleGate 法の定義 (波形ピーク位置を 0 nsec)	36
3.1	検出器におけるアンプ回路の増倍率及び時間差の定数	42
3.2	2 インチ PMT におけるアンプ回路の増倍率及び回路における時間差の定数	42
3.3	^{60}Co の特性	44
3.4	事象位置再構成後の分解能評価	46
6.1	マルチ事象における信号の組み合わせ	62
6.2	MP 評価の際のカット条件	63
6.3	DoubleGate 法の定義 (波形ピーク位置を 0 nsec)	65
6.4	DoubleGate 法のプレセレクション	66
6.5	DoubleGate 法の最適値	68
6.6	参照波形作成に用いたデータに適用したカット条件	69
6.7	χ^2 検定の最適値	71
6.8	Double Gate 法 (テール補正有) の Energy と ΔVertex の最適値	73
6.9	解析変数の最適値	74
6.10	MP に関するパラメータの最適値	74
6.11	各波形弁別法の Fit 範囲の最適値 (ピークを 0 [nsec] と定義)	74

6.12 各波形弁別法の Energy 及び Δ Vertex の最適値	75
7.1 以前の解析結果 [33]	77
7.2 Double Gate 法における解析結果	78
7.3 Double Gate 法 (テール補正有) における解析結果	78
7.4 χ^2 検定法における解析結果	79
7.5 χ^2 検定法 (テール補正有) における解析結果	79
7.6 解析手法別結果	81

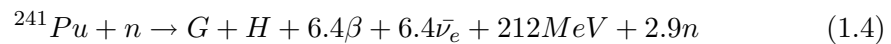
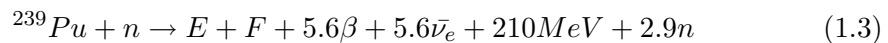
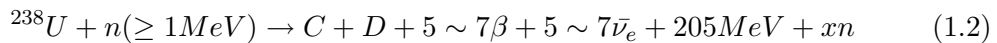
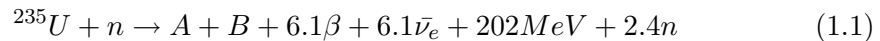
第1章 序論

1.1 原子炉ニュートリノ検出

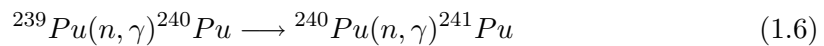
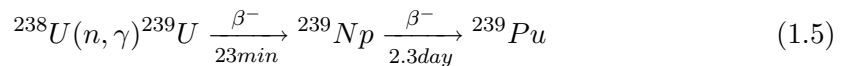
原子炉は安定的なニュートリノ供給源であり、ニュートリノの性質を測定するための多くの原子炉ニュートリノ実験が行われている。また、その技術を応用した原子炉モニターの開発（詳細は1.2.1節参照）が世界中で行われている。本節で原子炉ニュートリノの発生機構及び検出原理について説明する。

1.1.1 原子炉ニュートリノ

原子炉に使用される核燃料中の主な核分裂性核種には ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu がある。原子炉の核分裂性核は中性子を吸収して核分裂を起こし、2~3個の中性子と2個の原子核を生成する。さらに原子核は β 崩壊によって5~7個の反電子ニュートリノを放出する。例として典型的な原子炉における主な核の核分裂頻度を図1.2、主な核種の1分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布を1.3に載せる[13]。 ^{235}U の崩壊から反電子ニュートリノ生成までの模式図を図1.1に示す。また以下にその反応式を示す。ここでA~Hは同位体の核分裂後に生成される原子核である。



これらの反応で、発生した中性子は次の核分裂に使用されるか次のように反応して核燃料の物質のために使用される。



^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu の核分裂によって放出されるエネルギーは約200 MeVである。1回の核分裂によって放出されるエネルギーは、

$$1.6 \times 10^{-16}[\text{kJ/MeV}] \times 200[\text{MeV}] = 320 \times 10^{-16}[\text{kJ}] \quad (1.7)$$

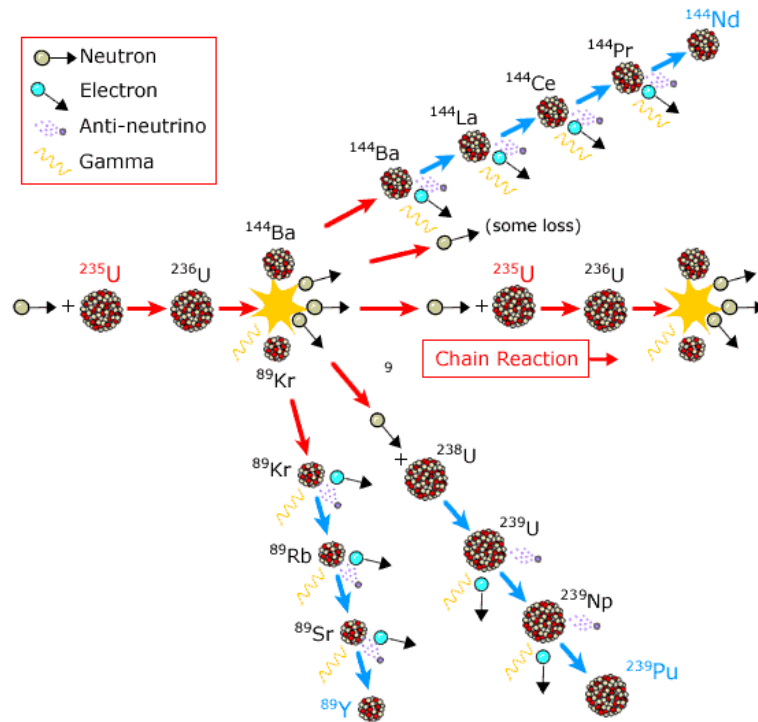


図 1.1: ^{235}U の核分裂過程[1]

となる。ここで $1\text{ MeV}=1.6\times 10^{-16}\text{ kJ}$ である。熱出力 3 GWth の軽水炉を例とした場合、1秒あたりの核分裂回数は、

$$\frac{3[\text{GWth}]}{320 \times 10^{-16}[\text{kJ}]} = 9.3 \times 10^{19}[\text{/sec}] \quad (1.8)$$

一度の核分裂で約6個の反電子ニュートリノが発生するので1秒あたり 5.7×10^{20} 個の反電子ニュートリノが炉心から放出されている。

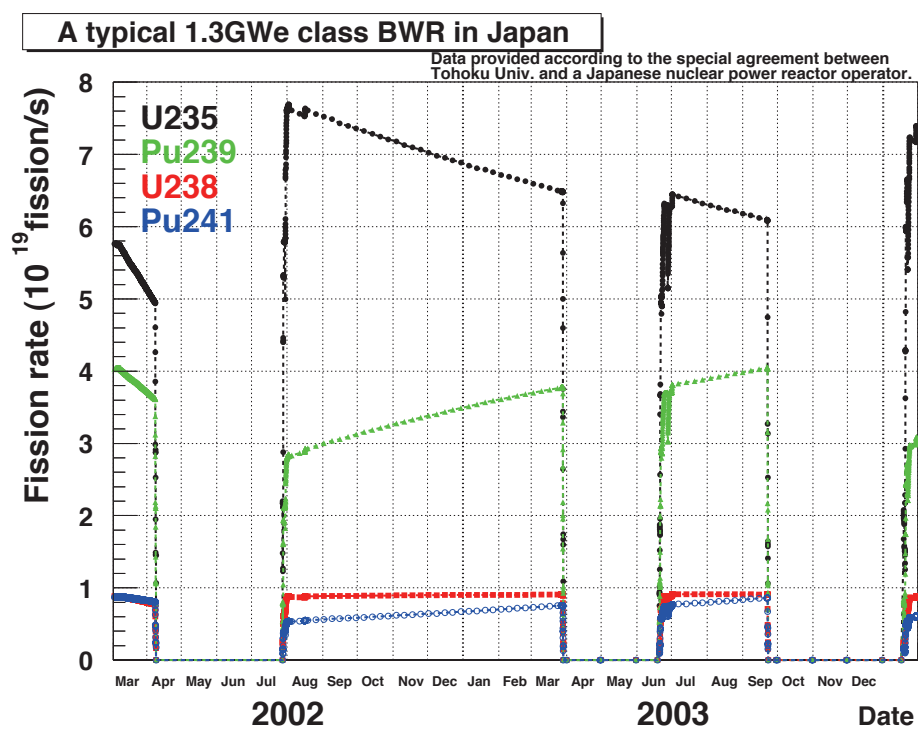


図 1.2: 典型的な原子炉における主な核の核分裂頻度 (緑:²³⁹Pu, 黒:²³⁵U, 赤:²³⁸U, 紺:²⁴¹Pu) [13]

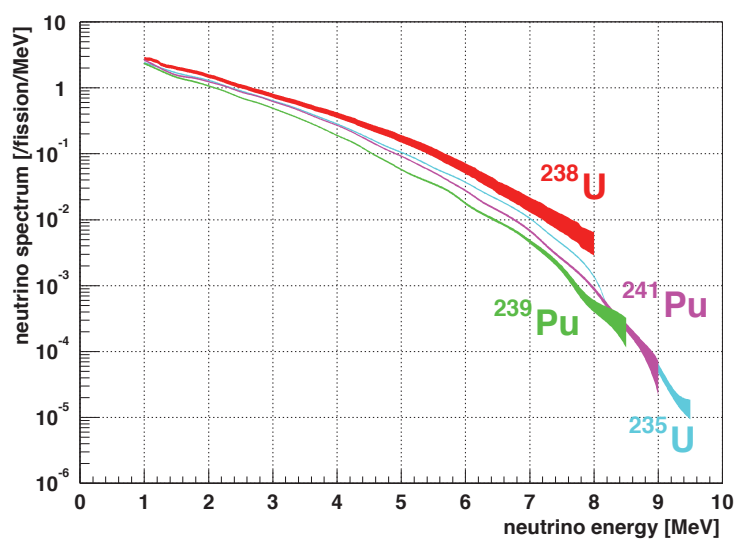


図 1.3: 典型的な原子炉における主な核種の 1 分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布 (緑:²³⁹Pu, 青:²³⁵U, 赤:²³⁸U, 紫:²⁴¹Pu) [13]

1.1.2 原子炉ニュートリノ検出原理

原子炉ニュートリノの検出原理として本研究で使用している Gd 入り有機シンチレータと逆 β 崩壊を用いた遅延同時計測法について以下に記載する。

1.1.2.1 逆 β 崩壊

有機シンチレータは自由水素を多く含み、ニュートリノとの逆 β 崩壊反応を起こしやすい。内での逆 β 崩壊反応を用いた検出原理の模式図を図 1.4 に示す。検出器内部では逆ベータ崩壊によって陽電子と中性子が生成される。そして陽電子由来の γ 線と Gd の中性子捕獲事象の γ 線が発生する。

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (1.9)$$

逆 β 崩壊反応の閾値は 1.8 MeV で全反応断面積は放出される陽電子のエネルギー $E_e^{(0)}$ と運動量 $p_e^{(0)} = \sqrt{E_e^{(0)2} - m_e^2}$ を使って次の式で表される。

$$\sigma_{\nu p}^{(0)} = \frac{2\pi^2}{1.7152m_e^5\tau_n} E_e^{(0)} p_e^{(0)} = 9.5 \times 10^{-48} E_e^{(0)} p_e^{(0)} [\text{m}^2] \quad (1.10)$$

ただし m_e は陽電子の質量、 τ_n は中性子の寿命を意味する。

検出器で観測される $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布を図 1.5 に示す。ニュートリノ事象反応頻度はニュートリノフラックス (図 1.5 の (b)) と反応断面積 (図 1.5 の (c)) に比例する。観測される反電子ニュートリノのエネルギー分布 (図 1.5 の (a)) は 4 MeV 付近にピークを持つ。

prompt signal

$$E_{\text{prompt}} = E - 1.8 \text{ MeV} (\text{threshold}) + 2m_e (1.0 \text{ MeV})$$

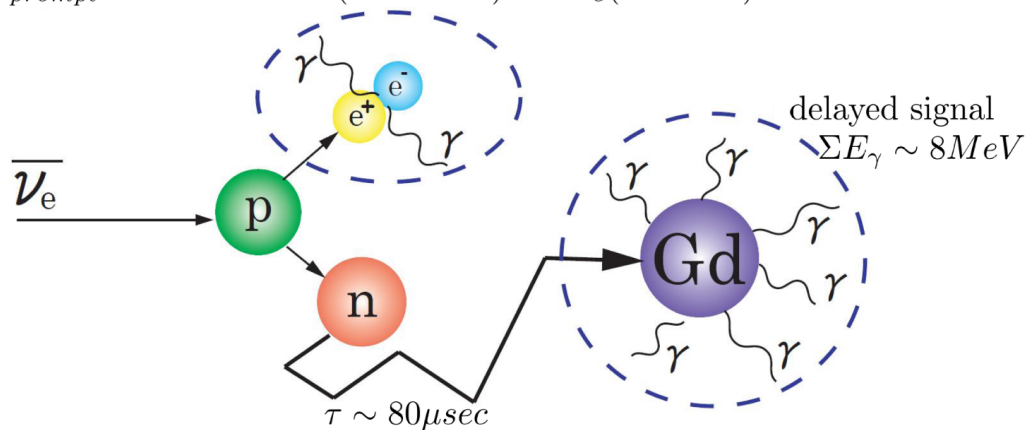


図 1.4: $\bar{\nu}_e$ の検出原理 (逆 β 崩壊)

本研究における検出器に使用している体積 0.198 m^3 の液体シンチレータ中の自由陽子数 N_p (詳細は 2.2 節) は、

$$N_p = 5.29 \times 10^{28} [\text{個}/\text{m}^3] \times 0.198 [\text{m}^3] = 1.05 \times 10^{28} [\text{個}] \quad (1.11)$$

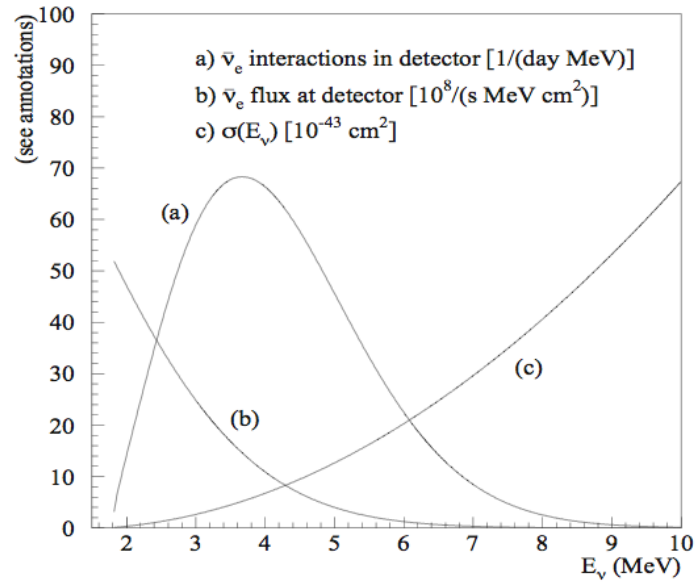


図 1.5: (a) は観測される反電子ニュートリノのエネルギー分布、(b) はニュートリノフラックス、(c) は反応断面積を表す。

である。熱出力 3 *GWth* の軽水炉を想定した場合、反応断面積 $\sigma_{\nu p}^{(0)}$ (炉心からの距離 $L=25\text{m}$) と 1 日あたりに放出されるニュートリノ頻度 $R_{\bar{\nu}_e} = 5.7 \times 10^{20}$ の積をとると予想される検出器内の反応頻度は

$$\text{Neutrino rate}(E_{\bar{\nu}_e}) = N_p \times \frac{\sigma_{\nu p}^{(0)}}{4\pi L^2} \times R_{\bar{\nu}_e} \times 86400[\text{sec/day}] = 591[\text{/day}] \quad (1.12)$$

と求まる。

1.1.2.2 遅延同時計測法

遅延同時計測法とは逆 β 崩壊反応で発生する粒子によって起こる特徴的な信号をもとにニュートリノ事象を識別する方法である。特徴的な信号とは以下に説明する先発信号と後発信号であり、これらの信号とその時間差を利用する。

• 先発信号

逆 β 崩壊の陽電子由来の信号が先発信号となる。中性子の反跳エネルギーはほとんど無視できるので、陽電子からの信号は反電子ニュートリノのエネルギーから逆 β 崩壊の閾値 (1.8MeV) を引き、対消滅で γ 線になった質量 (1.022MeV) を足したものになる。

$$E_{prompt} = E_{\bar{\nu}_e} - 1.8MeV(threshold) + 1.0MeV(annihilation) \quad (1.13)$$

$$\sim E_{\bar{\nu}_e} - 0.8MeV \quad (1.14)$$

• 後発信号

検出器では中性子捕獲断面積の大きいガドリニウムを配合した有機シンチレータを用いている。中性子捕獲断面積は表 1.1 に示した。(1.9) の反応で生成された中性子は有機シンチレーター中の陽子と衝突しながら、減速して熱中性子となった後はガドリニウムに吸収され、全エネルギー約 8MeV の複数の γ 線になって放出される。このとき放出するエネルギーは環境 γ 線バックグラウンド (詳細は 5 節参照) のエネルギーよりも大きく観測しやすい。

表 1.1: 中性子捕獲断面積 [25]

Element	Q value [MeV]	Abundance [%]	cross section [b]
^1H	2.2	99.985	0.3326 \pm 0.0007
^{155}Gd	8.536	14.80 \pm 0.05	60900 \pm 500
^{157}Gd	7.937	15.65 \pm 0.03	254000 \pm 800
Gd average			48800 \pm 400

$$E_{delayed} = \Sigma E_{\gamma} \sim 8MeV \quad (1.15)$$

• 先発信号と後発信号の時間差

後発信号と先発信号の時間差はガドリニウムの濃度に依存するが一般的に平均数十 μsec である。 ρ_H は水素原子の密度、 ρ_{Gd} はガドリニウム原子の密度、 σ_H は水素原子の中性子捕獲断面積、 σ_{Gd} はガドリニウムの中性子捕獲断面積とした場合、先発信号から後発信号までの中性子捕獲時間 Δt は、

$$\Delta t = \frac{\Delta t_H^{KamLAND} \times \frac{\rho_H^{KamLAND}}{\rho_H}}{1 + \frac{\rho_{Gd}}{\rho_H} \times \frac{\sigma_{Gd}}{\sigma_H}} \quad (1.16)$$

で示される。ここで、 $\rho_H^{KamLAND}$ は 6.6×10^{22} /ml、 $\Delta t_H^{KamLAND}$ は $211.4 \mu\text{sec}$ であり、KamLAND グループによって測定された値である。[13]

本研究で使用している有機シンチレータの組成から計算した理論値は $79.1 \mu\text{sec}$ である。

これら先発信号と後発信号の2種類の信号及びその時間差を用いてニュートリノ事象候補とする。

1.2 小型ニュートリノ検出器による原子炉モニター開発の背景

ニュートリノはその反応断面積の小ささから物質と非常に反応しにくい粒子である(図 1.5 の(c) 参照)。そのため検出も難しい。しかし、その貫通力により壁を通して原子炉内部の反応を測定することができる。この特徴から小型ニュートリノ検出器の原子炉モニター利用が注目されている。近年では原子炉ニュートリノ振動実験の検出技術を利用した小型原子炉モニターの R & D が世界中で行われており、炉心から 20~30 m の距離で使用できる 1 t 程度のシンプルな検出器でリアルタイムの原子炉の ON-OFF を監視できることが期待される。これはゲリラ運転によるプルトニウム生産を防ぐための遠隔監視が期待でき、国際原子力機関 (IAEA) の安全保障制度に役立つため非常に注目されている。

1.2.1 代表的な小型原子炉ニュートリノ検出器実験

代表的な小型原子炉ニュートリノ検出器実験はロシアの Rovno 実験とアメリカの SONGS 実験である。表 1.2 に検出器の概要とその実験結果を記載する。これらの実験ではニュートリノ事象が確認され、小型ニュートリノ検出器実験の可能性が注目されることとなる。SONGS 実験の検出器模式図を図 1.6 に示す。これらの実験を契機として世界中で小型ニュートリノ検出器の R&D が盛んに行われている。各国の取り組みを表 1.3 に記載する。

表 1.2: Rovno 実験及び SONGS 実験の小型原子炉ニュートリノ検出器の能力値 [5]

Experiment	Power [GW]	mass [ton]	Distance [m]	Depth [mwe]	Detector	$\bar{\nu}_e$ rate [/day]	バックグラウンド rate [/day]
Rovno	0.44	0.43	18		Gd scinti.	909 ± 6	149 ± 4
SONGS	3.64	0.64	24.5	10	Gd scinti.	564 ± 14	105 ± 9

表 1.3: 世界の小型原子炉ニュートリノ検出器の特徴 [9]

グループ	国	主要検出技術
SONGS	アメリカ	Gd loaded liquid Scintillator
Nucifer	フランス	Gd loaded Scintillator
DANSS	ロシア	Segmented Plastic Scintillator + Gd film
Angra	ブラジル	Gd doped Water Cerenkov
Tohoku Univ.	日本	Gd loaded liquid Scintillator
PANDA	日本	Segmented Plastic Scintillator + Gd film
Niigata Univ.	日本	Gd doped Plastic Scintillator

小型ニュートリノ検出器の実用に向けて IAEA から以下の要求がなされている。

- 独立性
- 低コスト
- 小型
- 安全性

ニュートリノ観測に成功した実験ではニュートリノ以外の信号を極力減少させるためにシールドを使用し地下での測定を行っている。シールドとは検出器の周りに設置し、ターゲット層に到達するバックグラウンドを減少させるものである。中性子に対しては主に水やパラフィンなどを用いる。また環境 γ 線に対しては主に鉛などを用いる。地下で測定を行う理由は宇宙線によるバックグラウンドを減少させることである。しかし、シールドを用いると検出器はサイズが大きくなり構造も複雑化し、建設費も高額になる。また地下測定である場合は設置に多額の費用がかかる。原子炉モニターとして普及させるにあたり、検出器のサイズ及び費用は課題となる。IAEA の要求を考慮し実用に向けたシールドの軽減及び地上測定といった低コスト化やシンプル化の R&D が必要である。

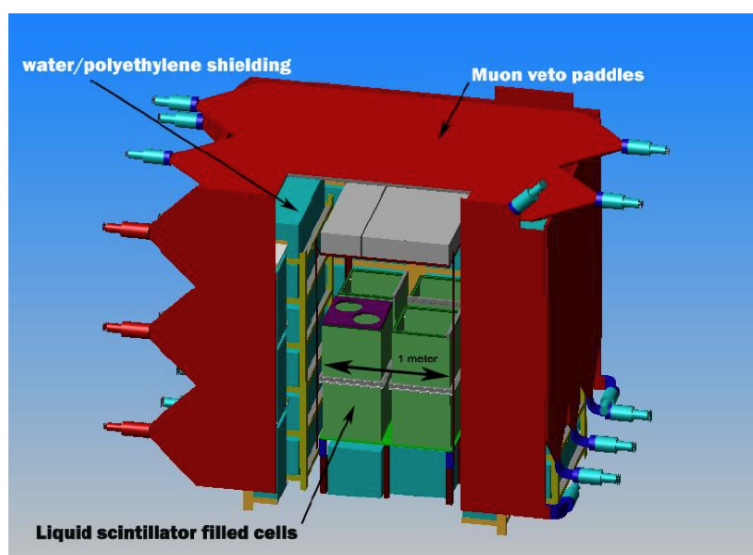


図 1.6: SONGS 実験の検出器 [9]

1.3 東北大学における小型ニュートリノ検出器の開発

1.3.1 常陽実験

東北大学において2006年から小型ニュートリノ検出器開発が行われている。初期に常陽実験が行われており、これは原子炉ニュートリノ振動実験KASKAのプロトタイプを利用した実験である[12]。この実験は茨城県にある高速実験炉常陽において炉心から24.3 m離れた地上にニュートリノ検出器を設置しニュートリノ検出を試みた(図1.7)。高速実験炉常陽とは茨城県東茨城郡大洗町にある高速実験炉である[6]。常陽の熱出力は140 MW $_{th}$ である。また、常陽の稼働サイクルは出力が60日間で停止が2~3週間であり、短いサイクルでONとOFFのデータを取得し比較できることが特徴である。

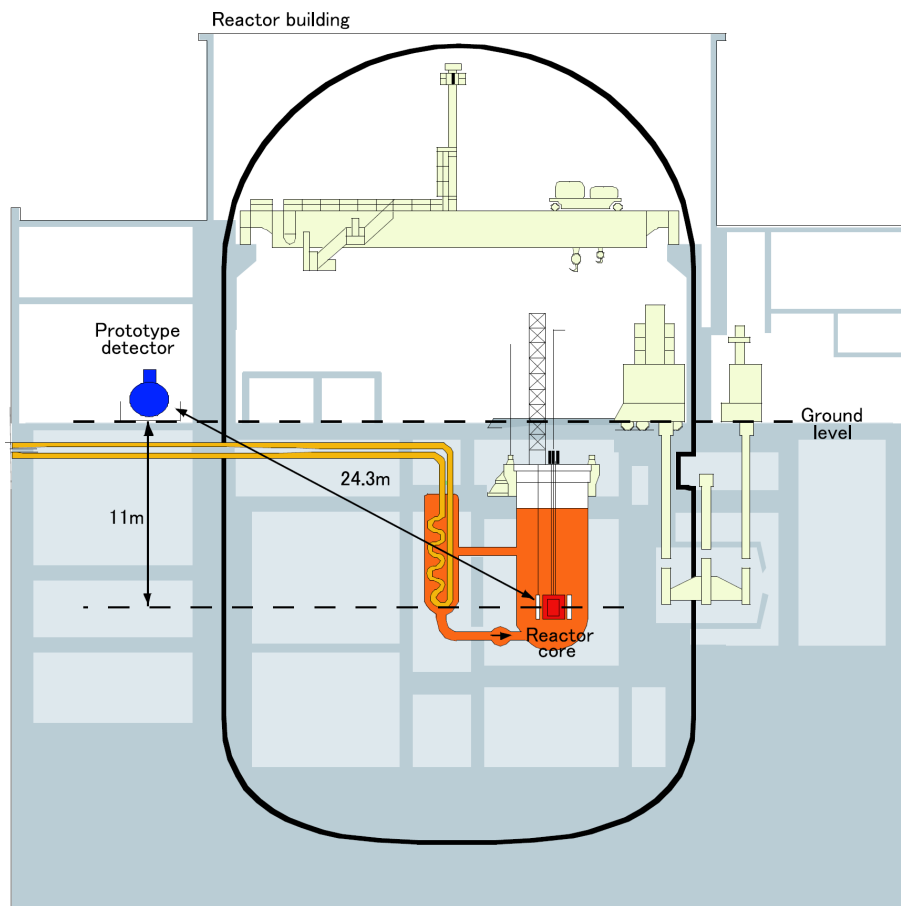


図 1.7: 高速実験炉常陽内の検出器配置 [12]

常陽実験の検出器構造を図1.8に示した。0.7tのGd入り液体シンチレータをニュートリノターゲットとして用いており、その構成はBC521 11.2%、Pseudocumene 12.6%、Paraol 850 76.3%、PPO 1.52 g/l、bis-MSB 0.2 g/lであった。このシンチレータを用いて、さらに宇宙線 VETO カウンターおよびパラフィンと鉛のシールドを設置し、2007年末までのデータ取得を行った。Live Time としてONデータは38.9日、

OFF データは 18.5 日間得ることができた。表 1.3.1 は常陽実験のニュートリノイベントセクション後の結果を示している [12]。測定された ON データと OFF データから 1 日あたりに見積もられるニュートリノ事象は $1.20 \pm 1.24 / \text{day}$ であり、検出器内で逆 β 崩壊反応を起こすニュートリノ数は $162 / \text{day}$ と見積もられているため、検出効率は 0.74 % である。また、モンテカルロシミュレーションにより期待されるニュートリノ事象数は $0.494 \pm 0.063 / \text{day}$ であり期待値と測定値は誤差内で一致したが、ニュートリノの有意な反応数は観測できなかった。

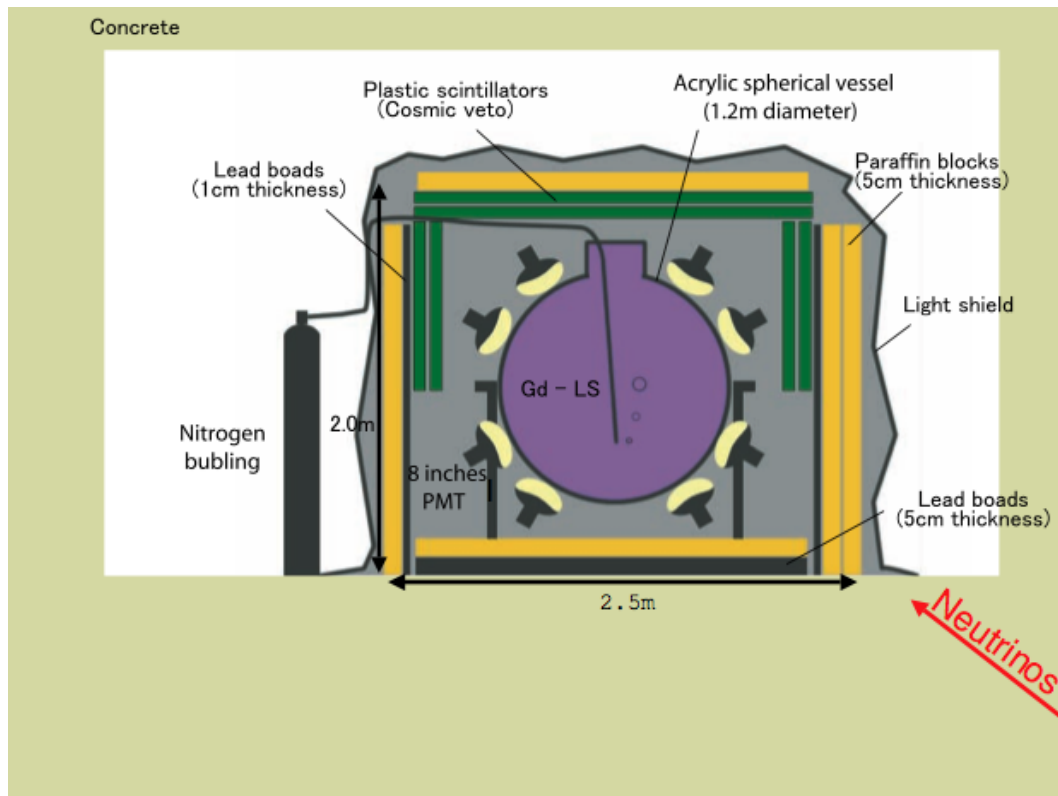


図 1.8: KASKA プロトタイプ検出器の断面図 [12]

表 1.4: 常陽実験における原子炉ニュートリノのイベントセレクションの結果 (括弧内の数値は efficiency)[12]

	Reactor-ON rate [/day]	Reactor-OFF rate [/day]	$\Delta(\text{ON-OFF})$ [/day]
total Data	19.0 ± 0.70	17.2 ± 0.98	1.8 ± 1.2
accidental Data	2.34 ± 0.25 (0.123)	1.74 ± 0.33 (0.101)	0.60 ± 0.41 (0.33)
Correlated events (total - accidental)	16.2 ± 0.74 (0.85)	15.5 ± 1.0 (0.90)	1.20 ± 1.24 (0.67)
Neutrino MC	-	-	0.494 ± 0.063

常陽実験で明らかになった課題点は、

- 地上測定のため宇宙線の核破碎反応により生成される高速中性子事象が多い点。
- 検出器内の事象位置を再構成する性能が低い点。
- 液体シンチレータの経年劣化が大きく長期間の測定ができなかった点。

の3つが挙げられている。そこで、常陽実験後の改良として

- 液体シンチレータの構成を変え、経年劣化に強く波形弁別能力の高いものに改良する。
- Flash ADC (詳細は2.4.1節参照)を導入し、波形弁別を行うことで高速中性子事象を排除する。
- 検出器構造を2層化し、動径方向の事象位置再構成能力を高める。

の3つを行ってきた。

1.3.2 ニュートリノ検出器の改良

東北大学では2010年より常陽検出器の改良型検出器の製作を開始している。シンプルな構造にするために地上測定かつシールド不使用を目指す。地上測定かつシールド不使用という条件ではバックグラウンドが多くなるが、解析で大きく除去することを目指す。

改良型検出器は常陽実験での課題である高速中性子バックグラウンド(詳細は5.3.1節)を考慮し、高速中性子を除去する波形弁別に特化した試験的検出器である。

1.3.2.1 波形弁別の原理

ニュートリノ事象と類似した事象に高速中性子事象がある。遅延同時計測法を用いた後に先発信号と後発信号との時間差、及びそれらのEnergyはニュートリノ事象と高速中性子事象において同様の振る舞いをする。しかし、先発信号はニュートリノ事象では陽電子であり、高速中性子事象では反跳陽子となる。したがって高速中性子事象を除去する方法として中性子線と γ 線の波形の違いを用いた波形弁別法(Pulse Shape Discrimination)(以下PSD)が有効である。

有機シンチレータにおいて観測される発光波形は励起粒子の種類に依存することが一般に知られている。波形弁別(PSD)とは、この性質を用いて同じエネルギーを検出器に付与した異種の粒子間の弁別を行うことである。

スチルベン結晶やいくつかの有機シンチレータは異種の放射線で励起される遅い成分の相対値が大きく異なるため波形弁別に適している。図1.9はアルファ粒子、高速中性子(反跳陽子)および γ 線(高速電子)に対してスチルベンで観測されたシンチレーション光の違いを示している。このようなシンチレータでは中性子と γ 線のように発光波形の違いによって放射線を弁別することが可能である。

しかし、実際の測定において検出器のサイズが波形弁別に大きく影響する。一般に検出器のサイズが大きくなると光子計測のタイミングにずれが生じ、波形弁別が難しくなる。

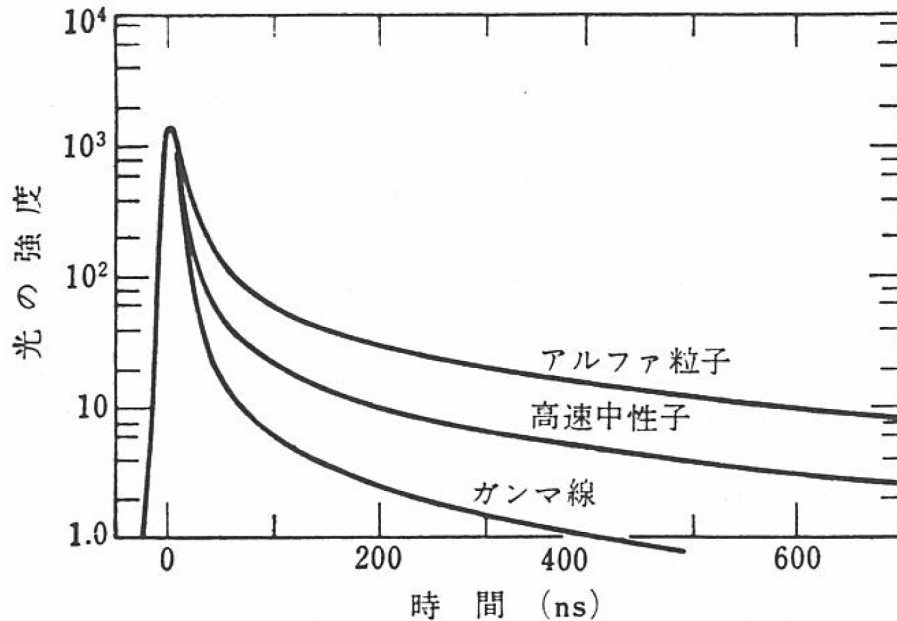


図 1.9: 異種放射線で励起されたスチルベン中のシンチレーション波形の時間特性 (時間0で同じ強度に規格化) [27]

1.3.2.2 ニュートリノ検出器の改良目標

改良の後も未だにニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が多い状況である (詳細は 7.2 節参照)。

将来的に出力 3 GWth の原子炉の炉心から 20~30 m の距離で測定時間 1 日以内でのニュートリノ検出を目標としている。本研究では現在の検出器サイズでの PSD によるバックグラウンド除去能力の評価を目標としている。波形解析をはじめとする解析手法や検出器の更なる改良を行い、バックグラウンド除去の再評価を行った。

高速中性子除去には波形弁別法 (詳細は 1.3.2.1 参照) が有効であると考えられるが、波形弁別法において課題になるのは

- 液体シンチレータの酸素濃度と波形弁別能力
- FlashADC における波形テール部分解能
- 解析法

である。これらの課題に対して本研究では

- 液体シンチレータの酸素濃度及び波形弁別能力のモニタリング

- FlashADC における波形テール部の分解能を向上させるための波形テール部補正
- ニュートリノ検出器の感度を向上させるための解析法の最適化

を行い、ニュートリノ検出性能の向上を試みた。

本研究では液体シンチレータの酸素濃度及び波形弁別能力を確認した後、東北大学の実験室でのバックグラウンドを測定し、波形テール部補正、解析法の最適化を行った。第2章では検出器のセットアップについて説明し、ここで液体シンチレータのモニタリングの取り組みに触れる。第3章では取得したデータからの事象再構成とともに波形テール部補正の説明をする。ニュートリノ検出能力に用いたニュートリノシミュレーションについて第4章、東北大学で実際に測定したバックグラウンドについて第5章で言及する。第6章でニュートリノ事象識別に用いる変数のカット条件の最適化を行い、第7章で本研究で用いている検出器のニュートリノ検出能力を評価する。

第2章 小型ニュートリノ検出器構造

2.1 小型ニュートリノ検出器構造

2.1.1 改良検出器の構造

常陽実験での課題点を踏まえて検出器の改良が行われている。その構造を図 2.1 に示す。改良点として、以下の4点の開発が重点的に行われている。

- 波形弁別能力の付与
PSD 能力のある液体シンチレータおよび波形情報のデータ収集ができる Flash ADC を用いる。
- 検出器の二層化
検出器を二層化することで事象位置再構成能力を向上する。また、外側の層を水で構成することにより、主に検出器の外から飛来してくる高速中性子を遮蔽することができる。
- 遠隔無人運転
Online Monitor により観測者が検出器の近くにいない状態でも観測できることを目指す。
- 安定な液体シンチレータ
経年劣化の小さい液体シンチレータにすることで、数年程度の安定的な測定を目指す。

また、常陽実験では検出器の外側にパラフィンおよび鉛ブロックのシールドを設置し、さらに上部に宇宙線 veto カウンターを設置しているが、これらを設置しないことで安価で容易に設置できる検出器を目指し改良を行っている。シールドなどを用いないことで増加したバックグラウンドは解析によって除去することを目指す。

検出器ではニュートリノターゲットとして 199 リットルの液体シンチレータを用いている。外側の球体は常陽実験で用いた直径 120cm のアクリル球を再利用しており、その内側に直径 75cm のガラスフラスコを入れた二層構造となっている。検出器の特徴を表 2.1 にまとめる。ガラスフラスコを用いることで、アクリルでは耐性がなく実現できなかった PSD 能力の高いプソイドクメン主体の液体シンチレータの利用が可能となった。ガラスフラスコはナイロン被覆ワイヤーで保持し、外側の水の層では水道水の循環を行っている。液体シンチレータは窒素ボンベにて bubbling を行っている。光電子増倍管 (PMT) は浜松ホトニクス製の 8inchPMT を 16 本使っており、安全のためにオイルパンを下部に設置した。PMT とオイルパンは常陽実験のときのものを再利用した。また、検出器全体をブラックシートで 2 重に覆うことで全体を遮光している。

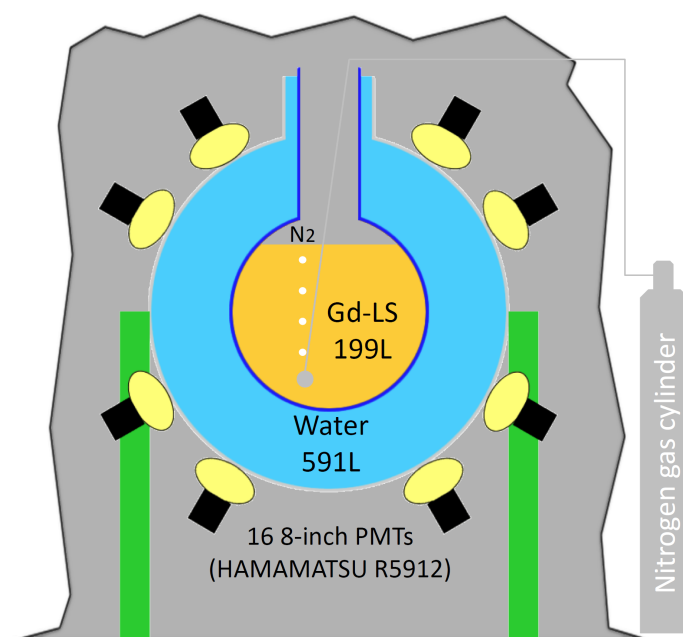


図 2.1: 改良検出器のデザイン

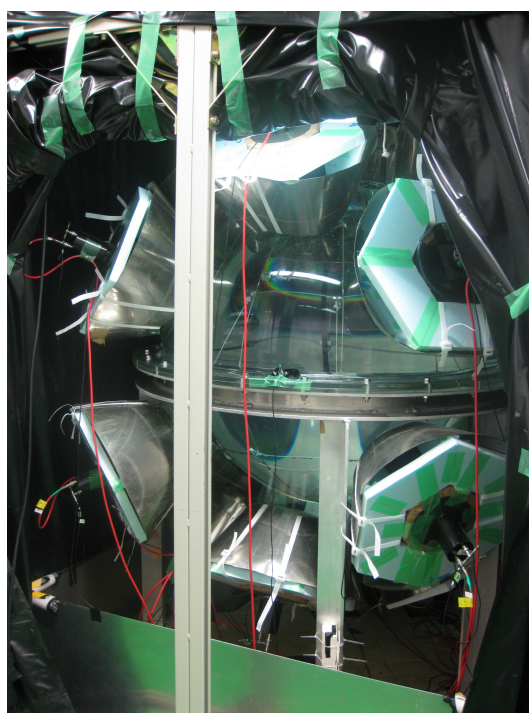


図 2.2: 改良検出器の様子

表 2.1: 検出器各部特徴

検出器部位	説明
外側アクリル球直径 [cm]	120
内側ガラスフラスコ直径 [cm]	75
8 inch PMT [本]	16
液体シンチレータ総量 [l]	199
水総量 [l]	591

2.2 液体シンチレータ

2.2.1 常陽検出器の液体シンチレータからの改良点

液体シンチレータは、溶質 (発光剤) と溶媒 から成っている。溶質には弱い極性を持つ 2,5-ジフェニルオキサゾール (以下 PPO、図 2.5) を用いる。表 2.2 は改良検出器の液体シンチレータの物質構成を示している。

BC521 はサンゴバン社製の市販の Gd を含む液体シンチレータである。プソイドクメンの構造式はベンゼン環を持ち、常陽実験で使用したイソパラフィンオイルに比べてガドリニウムに対して安定性が得られ、長期測定に対応できる液体シンチレータが期待できる。図 2.3 は Daya Bay 実験でガドリニウム入り液体シンチレータの経年変化を調べたものを表している [17]。図 2.4 にプソイドクメンの構造式を、表 2.2.1 にプソイドクメンの特性を示す。

プソイドクメンを用いた液体シンチレータは常陽実験と比較して光量が増加している。またプソイドクメン主体の液体シンチレータは高速中性子事象を排除するための波形弁別の能力が高いという特徴がある。改良検出器の液体シンチレータの特性を表 2.4 に記載する。

表 2.2: 改良検出器の液体シンチレータ組成

物質	改良検出器
BC521	4.99w%
Pseudocumene	95.01w%
PPO	2.85g/l

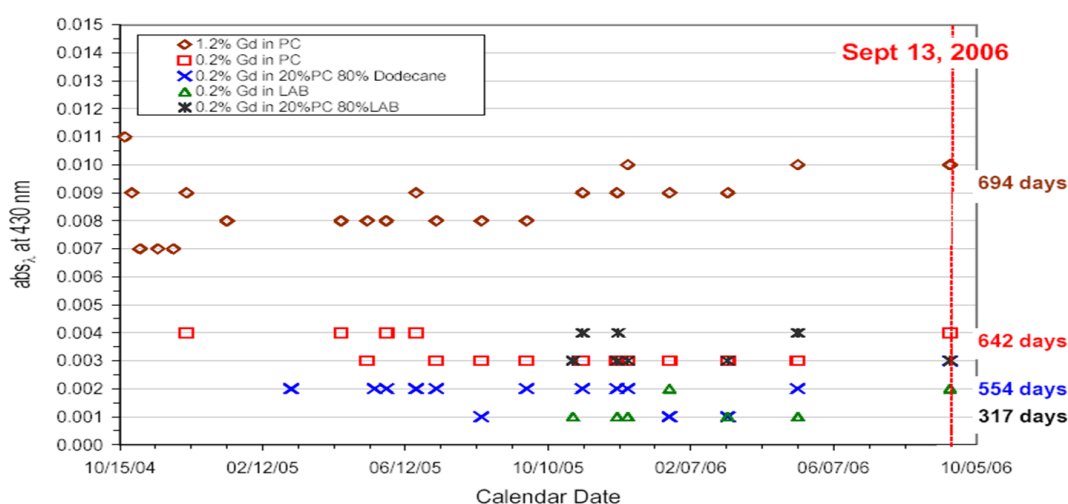


図 2.3: プソイドクメンベースのガドリニウム入り液体シンチレータの経年変化 [17]

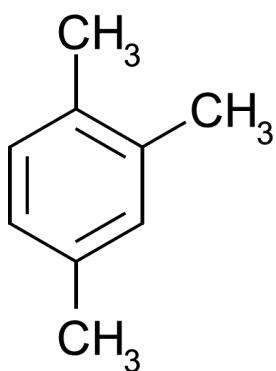


図 2.4: pseudocumene の構造式

表 2.3: pseudocumene の特性

分子量	120.2 g/mol
密度	0.88 g/cm ³
引火点	54

表 2.4: 常陽実験検出器と改良検出器の液体シンチレータの特性

	常陽実験 [12]	改良検出器
密度 (20) [g/cm ³]	0.838±0.0001	0.882
H/C ratio	1.9346	1.33
Number of Protons [/m ³]	6.22×10 ²⁸	5.29×10 ²⁸
Light yield [photons/MeV]	9400[16]	12500
Gd concentration [w%]	0.05	0.025
Neutron capture time [μsec]	46.4	79.1

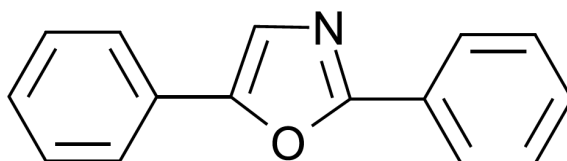


図 2.5: PPO の構造図

2.3 光電子増倍管

シンチレーション光の測定には 16 本の 8 インチ光電子増倍管（浜松ホトニクス R5912、以下 PMT）を用いる。図 2.6 と表 2.6 に 8 インチの PMT の寸法概要と仕様を示す。PMT はアクリル製のハウジングに入れられており、透明のシリコンゴム（信越科学工業；型番 KE-103）で固定されている。アクリルハウジングと PMT の写真を図 2.7 に示す。これらはアクリル球表面に設置されている。PMT の取り付け位置は表 2.5 に記載した。また、アクリル球の表面積に対して光電面は 11.4% に相当する。

PMT の内部では電子が移動している。その電子の軌道は磁気の影響を受けやすい。地球上には地磁気があり、その影響を受けて PMT のゲインは減少し、1p.e. のピーク幅は広がる。これを防ぐために、PMT は磁場を遮蔽する効果を持つ μ メタルで包んでいる。ここで使用する μ メタルは Kamiokande 実験で使用されていたものである。PMT の印加電圧は表 2.5 に記載する。印加電圧は各 PMT の gain がおよそ 10^7 となるように調整した。

表 2.5: 各 PMT の印加電圧と取り付け位置

PMTch	印加電圧 [V]	ϕ	θ	PMTch	印加電圧 [V]	ϕ	θ
1	-1240	33.3	0	9	-1420	147.7	45
2	-1220	33.3	90	10	-1440	147.7	135
3	-1300	33.3	180	11	-1500	147.7	225
4	-1180	33.3	270	12	-1700	147.7	315
5	-1260	66.6	45	13	-1440	113.4	0
6	-1700	66.6	135	14	-1480	113.4	90
7	-1500	66.6	225	15	-1380	113.4	180
8	-1500	66.6	315	16	-1460	113.4	270

表 2.6: 光電子増倍管 (R5912) の仕様

Parameter	Minimum	Typical	Maximum
Cathode Quantum Efficiency at 420nm	-	22%	-
Supply Voltage for Gain 10^7	-	-1500V	-2000V
Anode Dark Current at 10^7 and 25 > 0.25 p.e.	-	50nA	700nA
Transit Time Spread at 10^7 gain (FWHM with 1 p.e. detection)	-	2.4ns	-
Anode Pulse Rise Time	-	3.8ns	-
Transit Time	-	55ns	-
Peak to Valley Ratio	-	2.5	-
After Pulse (100ns 16 μ s after Main Pulse)	-	2%	10%

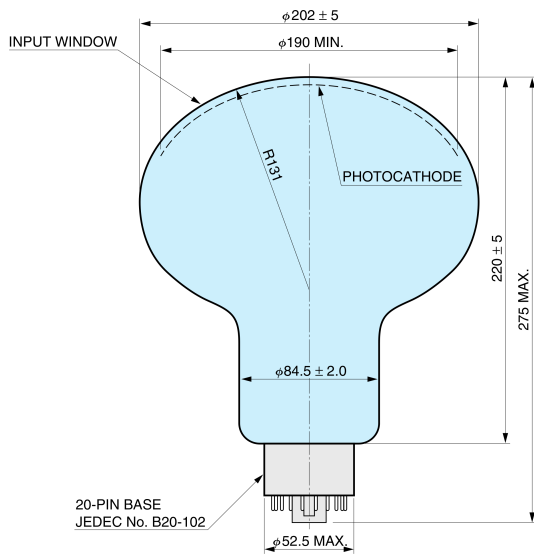


図 2.6: 光電子増倍管 (R5912) の寸法図

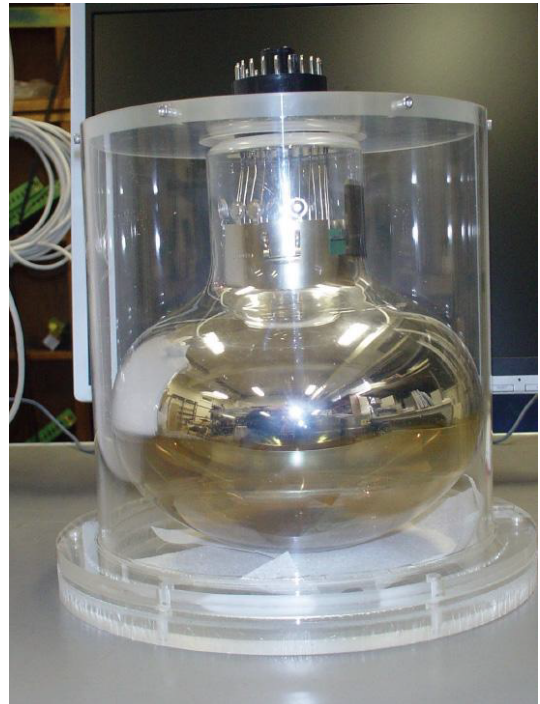


図 2.7: 光電子増倍管 (R5912) とアクリルハウジング

2.4 データ収集システム

本研究のデータ収集システムでは Flash Analog to Digital Converter(以下 FADC)を使うことで波形によるデータ解析を可能にしている。

2.4.1 Flash Analog to Digital Converter

FADC は CAEN 社製の v1721 を用いる。また Controller は CAEN 社製の v1718 である。この FADC は 8bit のデータ値を 500 MHz のサンプリングレートで取得することが可能であり、データ点は 2 nsec おきにとることができる。1 モジュールで 8ch のデータを同時にサンプリングすることが可能である。また、CAEN 社製の FADCv1721 の特徴として DeadTime がないことが挙げられる。しかしながら、これはプログラムや通信の制限がない場合であり、現状の検出器では ~ 400 Hz でデータを取得する際に約 35% が DeadTime となる。

2.4.2 本研究でのデータ取得

以前は 2 モジュールを用いて 16ch のデータ取得を行っていた。本研究では 4 モジュールを用いて 16ch の 1 倍の波形データと別の 16ch で 10 倍に増幅した波形データを取得している。10 倍波形データは 1 倍の波形のテール部を補正し、分解能を向上させるために用いられる(詳細は 3.1.1 節参照)。10 倍の波形データは 10 倍ゲインのアンプ回路を用いて取得している。図 2.8 に FADC で取得した波形データを示す。

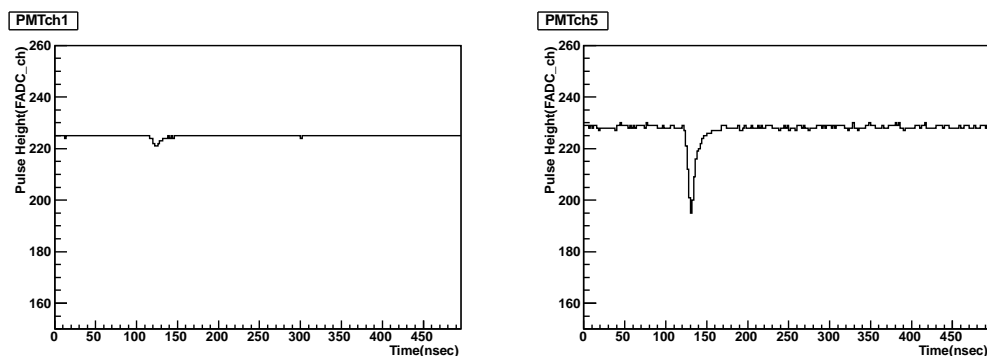


図 2.8: FADC で取得した波形データ (左図が 1 倍波形、右図が 10 倍波形)

2.4.3 Trigger logic

改良検出器のトリガー回路を図 2.9 に記載し、各モジュールの型番は表 2.7 に記載する。図 2.9 においてトリガー後 500 nsec にわたって veto をかけている。FlashADC はトリガー直前のデータを記録する仕様となっている。本研究ではトリガーから前 496 nsec のデータを取得し、波形のピークがトリガーから 300 nsec 程度前に位置する設定にしている。常陽実験では遅延同時計測法をハードウェアで行っていたため、デー

タを限定して取得できる一方で回路が複雑になっていた。改良検出器ではトリガーを16本のPMTの合計電荷量で決定し、データを取得する。データ量が多くなってしまいう一方でシンプルな回路で測定ができる利点がある。このデータをオフラインで遅延同時計測法を用いて解析を行う。

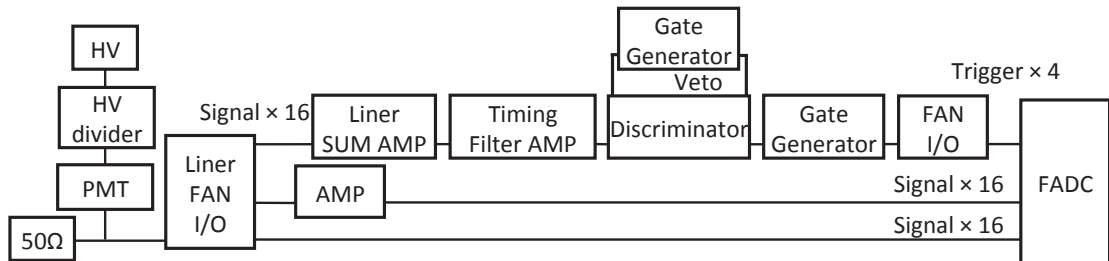


図 2.9: 改良検出器の測定回路

表 2.7: 各モジュールの型番

回路モジュール	製作会社	型番	PMTch
Liner FAN IN/OUT	LeCroy	428F	1~8
	CAEN	N625	9~16
Amp	REPIC	RPN-091	17~32
Logic FAN IN/OUT	LeCroy	429A	1~32
Timing Filter Amp	豊伸電子	NO15	1~16
Discriminator	豊伸電子	8037	1~16
Gate generator	豊伸電子	NO14	1~16
	海津製作所	NO290-064	1~16
Controller	CAEN	v1718	1~32
FADC	CAEN	v1721	1~16,25~32
FADC	CAEN	vx1721	17~24
HV	海津製作所	6600	1~16

2.5 窒素バブリングの改良

本研究で用いている検出器本体の液体シンチレータはバイアルサイズの波形弁別能力と検出器に実装した際の波形弁別能力が異なるという問題がある。この原因として検出器では窒素バブリングが十分に行われていない可能性が考えられた。液体シンチレータの窒素バブリングは酸素クエンチングを減少させ、PSD能力を向上させるという点で重要であるため、本研究では窒素バブリングの改良を行った。具体的にはバブラーの改良とポンプによる液体シンチレータの循環及び酸素濃度計を用いた液体シンチレータ中の酸素濃度変化を監視するシステムの増設を行った。また検出器外部で検

出器で実際に使用している液体シンチレータの波形弁別能力の測定を行えるようにしている。目標とする改良の模式図を図 2.10 に示す。

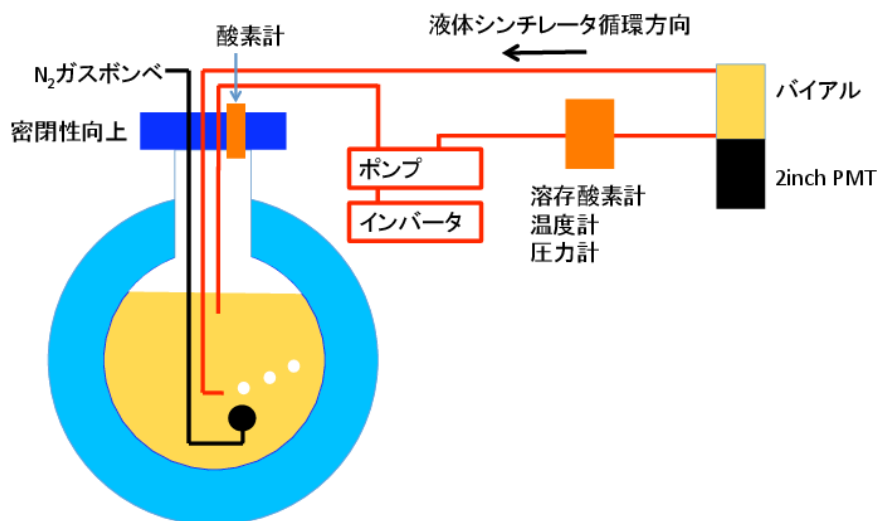


図 2.10: 窒素バブリングの改良の模式図

2.5.1 バブラーの改良

検出器では液体シンチレータ中の酸素クエンチングの影響を抑制するために窒素バブリングを行っている。以前のバブラーのセットアップはバブラーにガラスフィルター（セラミフィルター： $\phi 10 \times 180 \text{ mm}$ 、 $25 \times 20 \text{ mm}$ ）を使用している。取り付け方向が下向きであり、またバブラーの気孔径が約数十 μm であった。バブリングは行っていたが泡が主にバブラー直上のみを通過しており、局所的なバブリングに留まっている懸念があった。

本研究において窒素バブリングの効率化を目標とし、主に2点のバブラーの改良を行った。1点目の改良点はバブラーの気孔径の細小化である。二点目はポンプによる液体シンチレータの循環である。循環により微細な泡が検出器全体に行き渡るようにしている。

改良に使用したバブラーはテフロンボールフィルター（ 35ϕ ）である。気孔径は約 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ と以前のバブラーと比較して小さい。液体シンチレータの循環に用いるチューブには液体シンチレータ耐性の高いテフロンとナイロンを用いた。窒素を供給する黒いチューブは6-6 ナイロン製であり、直径は $3/8 \text{ inch}$ である。液体シンチレータ循環に用いているチューブは検出器内部ではテフロン製であり、検出器外部においては6-6 ナイロン製である。テフロンはガス透過性が高く外部からの酸素の混入が疑われるため、検出器外部ではナイロン製チューブを使用している（詳細は 2.5.6 節参照）。図 2.11 のようにチューブはバブラーが上を向くように配置している。チューブ同士の接続は PFA ユニオンエルボー（直径 $3/8 \text{ inch}$ ）、チューブとテフロンボールフィルターの接続には PFA メールエルボー（チューブ径 $3/8 \text{ inch}$ 、ボール側径 $1/4 \text{ inch}$ ）を使

用している。検出器内部で窒素及び液体シンチレータが循環している様子を図 2.12 に示す。本研究では窒素を 200 ml/min で液体シンチレータに供給している。

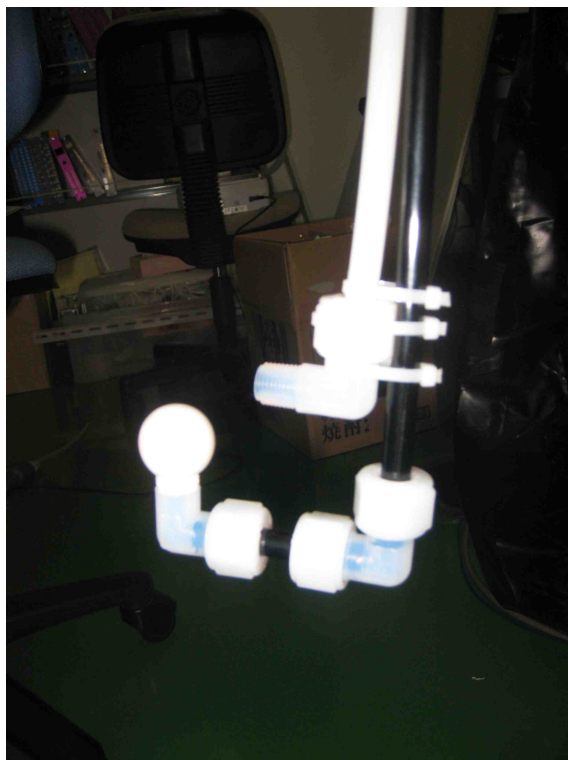


図 2.11: 改良型バブラー

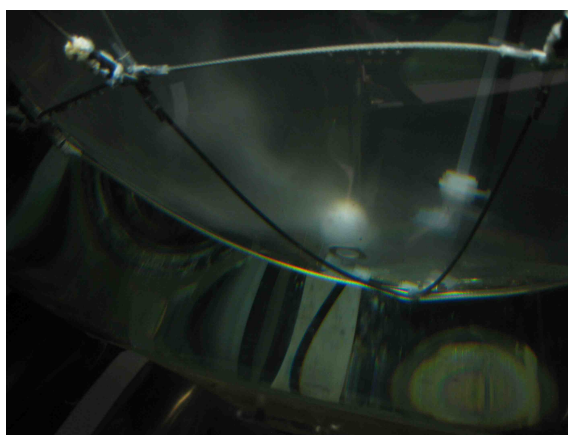


図 2.12: 液体シンチレータ及び窒素の循環の様子

2.5.2 バイアル測定セットアップ

検出器の外部で液体シンチレータの PSD 能力をモニターする装置を実装した。この装置は液体シンチレータが内部を循環する形状のバイアル（図 2.13：東北大学大学院理学研究科・理学部硝子機器開発・研修室製作）に 2 インチ PMT（浜松ホトニクス：H6410）を接着している。バイアルは水を用いた圧力試験を行っており（図 2.14）、4 kPa の圧力に耐えられることを確認した。PMT 及びバイアルをアクリルの箱に設置し、その外側をブラックシートで覆い遮光している（図 2.16）。検出器で使用している実際の液体シンチレータの PSD 能力を測定できる仕様となっている。

液体シンチレータ性能の評価方法は ^{252}Cf を用いて γ 線と高速中性子線の信号の波形の違いを観測する手法である。バイアルと 2 インチ PMT の間には空気層との屈折率の違いによる減光を抑制するためにオプティカルグリス（東芝シリコン：OKEN6262A）を塗布している。また液体シンチレータの漏洩に備え、装置を検出器の液体シンチレータ層より高い位置に設置し、直下にオイルパンを設置している。

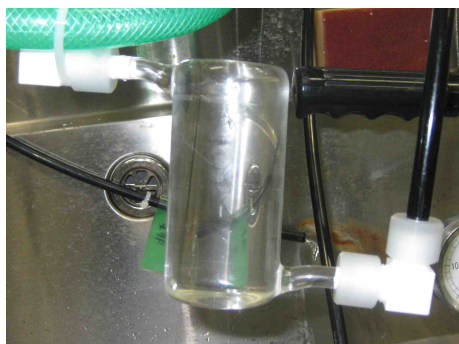


図 2.13: 波形弁別能力測定用バイアル



図 2.14: バイアルの圧力試験



図 2.15: バイアルと 2 インチ PMT



図 2.16: バイアルセットアップ

2.5.3 液体シンチレータ循環用ポンプ

検出器内部とパイアル内部における液体シンチレータ循環を行うポンプ（NIKUNI：型式 ISNPD02A）が図 2.17 である。またポンプ出力を制御するために電源周波数を制御できるインバータ（TOSHIBA：型式 VF S11）を接続している（図 2.18）。インバータにおいて電源の周波数 50 Hz を 20 Hz に変更して出力している。このためポンプのモーターの回転数が低下し、管内圧力を抑えることができる。



図 2.17: 液体シンチレータ循環用ポンプ 図 2.18: ポンプ電源周波数制御用インバータ

2.5.4 温度計と配管圧力計

ポンプ吐出口上部における配管中に K 型熱電対温度計及び圧力計を設置している。温度計は気中と液体シンチレータ中各 1 個設置している。温度計の値はデータロガー（GRAPHTEC：型式 GL200A）で取得している。検出器においては本体内部の液体シンチレータが気温より $1\sim 2^\circ\text{C}$ 低い傾向が観測されている。データ取得期間において液体シンチレータの温度は約 20°C で安定していた。配管に設置した圧力計は配管内の圧力を監視する目的がある。配管の圧力は 0.1 kPa 程度であり、配管及びパイアルの強度を超える負担はかかっていない。

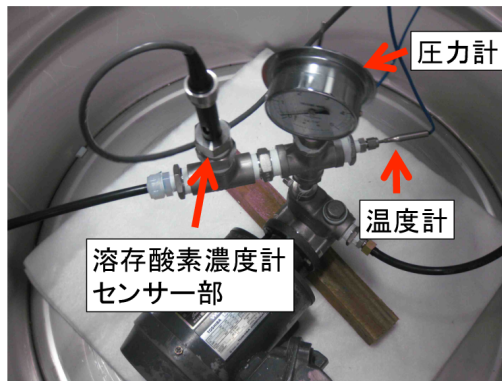


図 2.19: 温度計と圧力計と溶存酸素濃度計センサー部

2.5.5 気中及び液中の酸素濃度計

液体シンチレータ中の酸素濃度は検出器の波形弁別能力に関わる重要な要素である(詳細は 1.3.2.1 節参照)。以前は検出器内部における液体シンチレータの酸素濃度は測定することができなかったが、本研究のセットアップを用いて測定することができる。チムニーの気層部の測定は図 2.20 の酸素濃度計 (JIKO : 型式 JKO 02) を用いて測定する。液体シンチレータ中の測定は図 2.21 の溶存酸素濃度計 (セントラル科学 : 型式 UC-12SOL 型 (有機溶媒用)) をポンプ配管部に設置し測定する。溶存酸素濃度計はポーラログラフ方式 DO 電極を用いている。設置の様子は図 2.19 に示す。



図 2.20: チムニー用気中酸素濃度計 (左図はセンサー部、右図は本体)

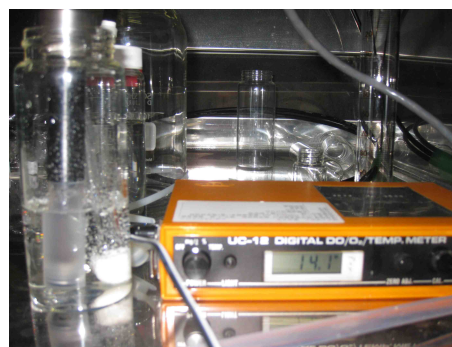


図 2.21: 液中溶存酸素濃度計

2.5.6 チューブの酸素透過性試験

ポンプが回転することによって液中酸素濃度が増加するという問題があった。テフロン製チューブから有機溶媒の臭いが感じられたことから、テフロン製チューブが空気中の酸素を取り込んでいる可能性が考えられた。そこでテフロンに比べ酸素透過率の低いナイロンのチューブとの比較を行った [32]。図 2.22 のセットアップを用いてチューブ部分を交換し、液体シンチレータ中の酸素濃度を比較した。測定は上部を開放したステンレス容器中で行っている。表 2.8 がこのときのセットアップにおける液体シンチレータ中の酸素濃度である。

表 2.8: チューブ素材による液体シンチレータ中の酸素濃度評価 [32]

素材	液体シンチレータ中酸素濃度 [mg/l]	O ₂ 透過率 [CC(STP)cm ² mm sec cm · Hg × 10 ¹⁰]
テフロン	2.5	59
66 ナイロン	1.5	1.6

この結果から本研究では検出器における空気に触れる部分のチューブをナイロンチューブへと変更した。

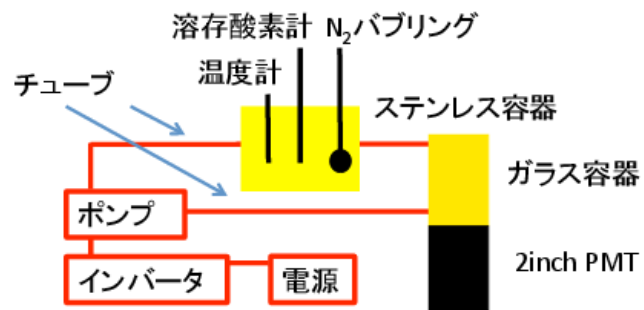


図 2.22: チューブ素材による液体シンチレータ中の酸素濃度評価のセットアップ

2.5.7 バイアル測定におけるデータ取得回路

現在使用している液体シンチレータの発光特徴を調べることが目的としてバイアル測定を行った。バイアル測定を用いる理由はサイズの大きい検出器と比べて光子のタイミングのずれや反射などの影響が小さく、純粋な液体シンチレータの能力を測定しやすいためである。本研究のセットアップを用いて検出器で実際に液体シンチレータをモニターしながら、波形弁別能力の測定を行うことを目標とした。

バイアル測定においても検出器同様の波形テール部の補正のため1倍と10倍の波形データを取得している。(詳細は3.1.1節参照)。この際に用いたデータ取得回路を図2.23に記載する。また回路内でのパラメーターについて表2.10に記載する。

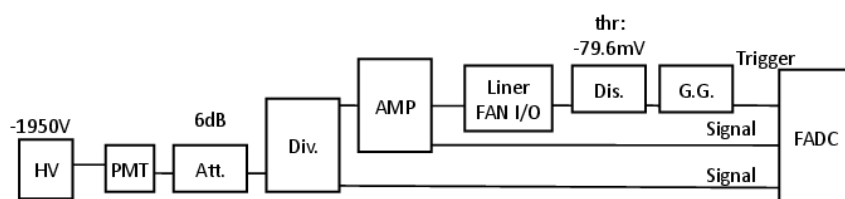


図 2.23: バイアル測定用回路図

表 2.9: バイアル測定における各モジュールの型番

回路モジュール	製作会社	型番
Liner FAN IN/OUT	CAEN	N625
Amp	REPIC	RPN-091
Discriminator	豊伸電子	8037
Gate generator	豊伸電子 海津製作所	NO14 NO290-064
FADC	CAEN	v1721
HV	REPIC	RPH-030

表 2.10: バイアル測定用回路各パラメーター設定

パラメーター	数値
High Voltage [V]	-1950
Threshold [mV]	-79.6
Attenuator [dB]	6

2.5.8 酸素濃度測定

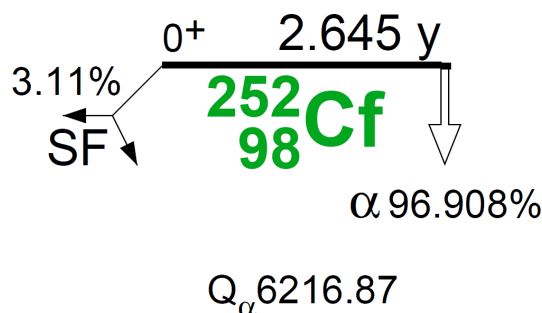
本研究では窒素バブラーの改良とともに液体シンチレータ中の酸素濃度の直接測定を行った。またチムニー酸素濃度計は図 2.24 のように設置し、チムニー内部の気層部分の酸素濃度測定を行っている。これはチムニー蓋部分の密閉性が弱いため外部から酸素がリークする可能性があり、その監視を行っている。蓋の密閉性の改善は今後の課題である。また溶存酸素濃度計をポンプ配管に図 2.19 のように設置し、配管中で液体シンチレータ中の酸素を直接測定している。



図 2.24: チムニー用気中酸素濃度計設置の様子 (蓋の検出器実装へ向けた試験の様子)

2.5.9 バイアル測定における高速中性子事象データ取得

バイアル測定には ^{252}Cf を中性子線源として用いる。 ^{252}Cf の崩壊図を図 2.25 に示す。 ^{252}Cf は自発核分裂の際に平均 3.76 個の中性子と平均約 8 本の γ 線を放出する。 ^{252}Cf を用いて液体シンチレータ中の中性子と γ 線の分離能力を測定した。また、同時に本研究で用いている液体シンチレータ中の酸素濃度と波形弁別能力の関係について調査した。

図 2.25: ^{252}Cf の崩壊図 [24]

PSD 能力については Double Gate 法 (詳細は 6.1.3.1 節参照) を用いて評価を行った。波形弁別法の詳細は 6.1.3.1 節において説明するが、ここで簡単に触れておく。ここで用いている波形弁別法は Double Gate 法と呼ばれ、図 2.26 のように波形に二つの異なる幅の Gate (Total Gate 及び Tail Gate) を定義し、波形における面積の比 ($\text{TailQ}/\text{TotalQ}$) を用いて粒子ごとの波形を区別する方法を用いた。

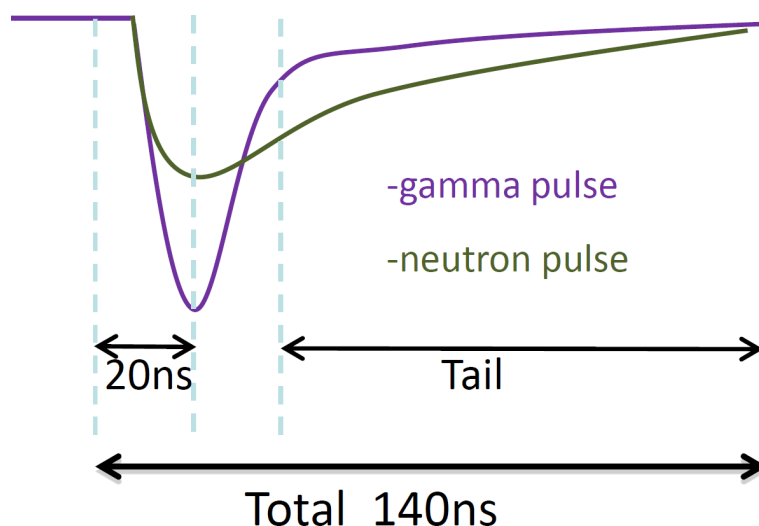


図 2.26: Double Gate 法の Gate の定義

バイアル測定と同時に酸素濃度の測定を行った。測定は酸素濃度が飽和した状態から窒素バブリングの量を徐々に減少させて行った。図 2.27 の左図に液体シンチレータ中の酸素濃度の関係を示す。また図 2.27 の右図に経過時間とチムニー内部酸素濃度を示す。測定約 30 時間経過の後にバブリングを完全に停止した。液体シンチレータ中の酸素濃度は低下しており、窒素バブリングは十分に行われていることを確認した。チ

ムニ-酸素濃度は液体シンチレータの酸素濃度と同様の振る舞いをしている。

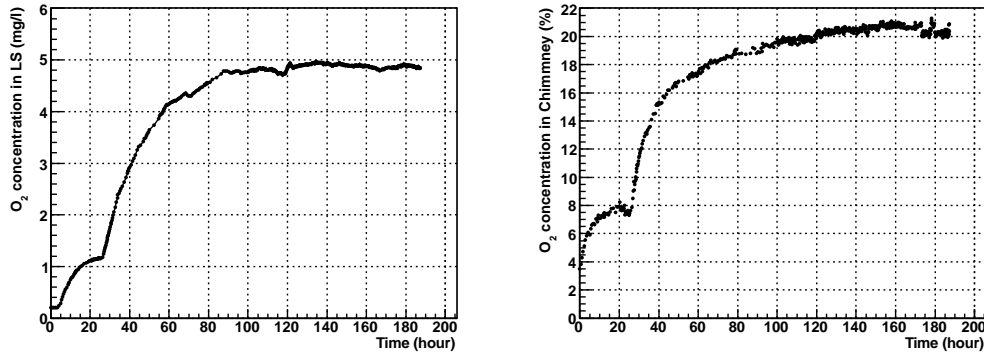


図 2.27: 左図が時間と液体シンチレータ中酸素濃度、右図が時間とチムニー内部酸素濃度

バイアル測定における ^{252}Cf の電荷分布を図 2.29 の左上図に示す。ここで赤は酸素濃度 3.8 mg/l 、黒は酸素濃度 0.2 mg/l である。液体シンチレータ中の酸素濃度が低下するほど電荷分布が大きくなっていくことが確認できる。また波形弁別には図 2.29 の右上図のエネルギースケールを fit し、同一エネルギー領域の事象で波形弁別能力を比較している。ここで用いた DoubleGate 法の定義を表 2.11 に記載する。またエネルギースケールに用いたファクターと酸素濃度の関係を図 2.30 に示す。この図から酸素濃度の低下とともに光量が増加することを確認した。

TailQ/TotalQ 分布では中性子線は γ 線と比べ大きい値をとる。図 2.28 の左図に ^{60}Co 、右図に ^{252}Cf のエネルギーと TailQ/TotalQ の相関図を示す。 ^{60}Co の分布は γ 線の分布のみがあり、 ^{252}Cf の分布には中性子線と γ 線の二つの帯が確認できる。TailQ/TotalQ 分布を図 2.29 の左下図に示す。 ^{252}Cf の TailQ/TotalQ 分布では二つのピークがあり、値の小さいほうのピークは γ 線事象、値の大きいほうのピークは中性子線事象と考えられる。酸素濃度低下に伴い中性子と γ 線の分離が向上する傾向が見られた。

表 2.11: DoubleGate 法の定義 (波形ピーク位置を 0 nsec)

パラメータ	値
Total Gate 開始時間 [nsec]	-20
Total Gate 終了時間 [nsec]	120
Tail Gate 開始時間 [nsec]	20

ニュートリノ事象は γ 線に対応する事象であるため、TailQ/TotalQ 分布において Mean 値の小さいほうのピークを残したい。TailQ/TotalQ でカットラインを決め、カットライン以下の分布の分布全体に対する割合を Cut Efficiency と呼ぶ。TailQ/TotalQ 分布から求めた液体シンチレータ中酸素濃度別 Cut Efficiency を用いて縦軸 γ 線 Cut Efficiency、横軸を高速中性子 Cut Efficiency とした Efficiency Curve を図 2.29 の右下図に示す。Efficiency Curve において γ 線を 99% 残す場合の中性子 Cut Efficiency の酸素濃度別分布を図 2.31 に示す。バイアル測定において溶存酸素濃度計の検出限界

程度の低い酸素濃度のとき、 γ 線を99%残すとして中性子を98%除去できる能力があることがわかる。この酸素濃度を維持し検出器の測定を行った。

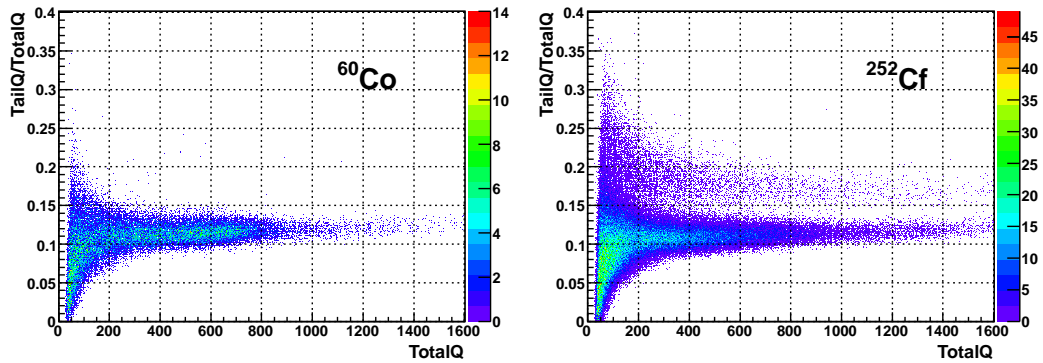


図 2.28: エネルギーと TailQ/TotalQ の相関 (左図が ^{60}Co 、右図が ^{252}Cf)

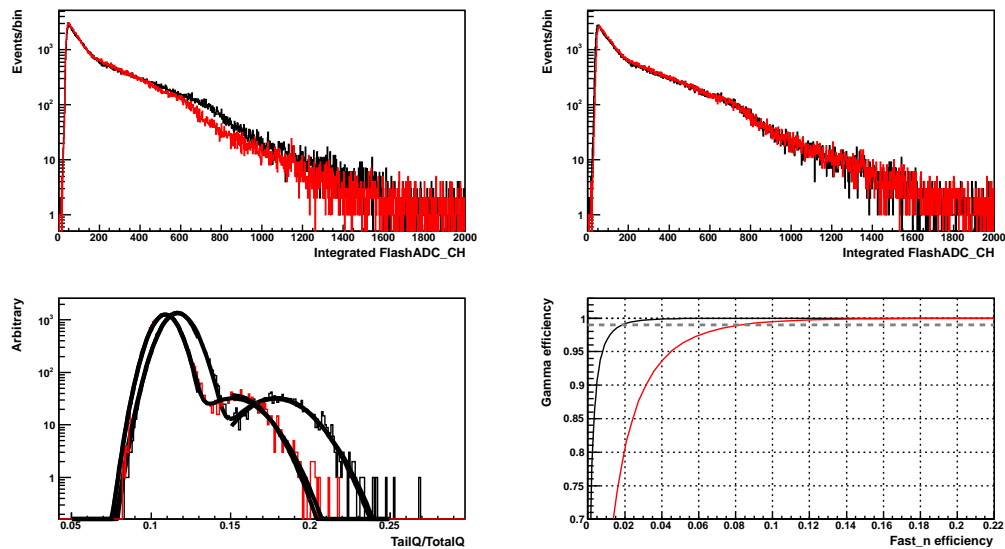


図 2.29: 左上図は ^{252}Cf の電荷分布、右上図は ^{60}Co でエネルギースケールを決定した分布、左下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Efficiency Curve (赤は酸素濃度 3.8 mg/l、黒は酸素濃度 0.2 mg/l)

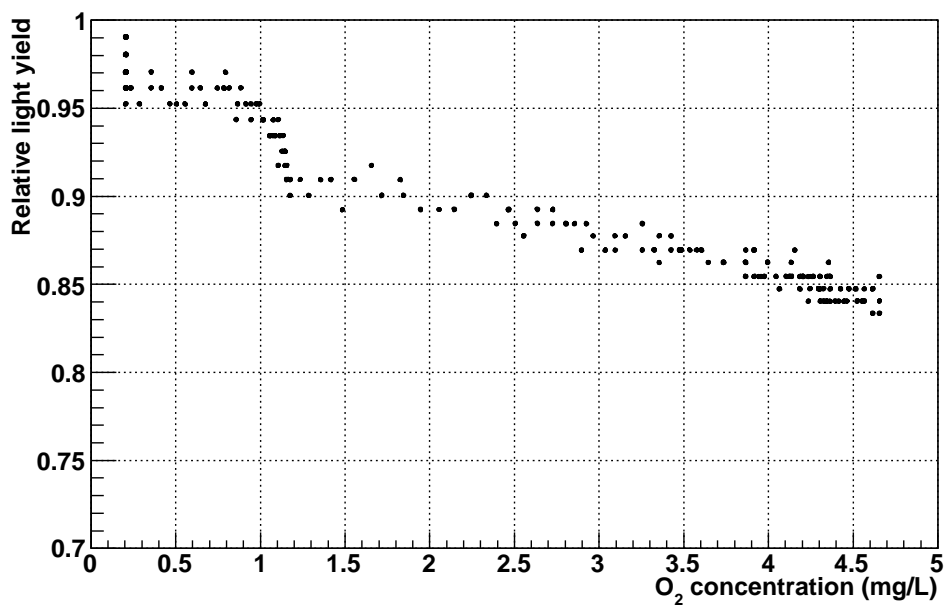


図 2.30: 酸素濃度と発光量の関係

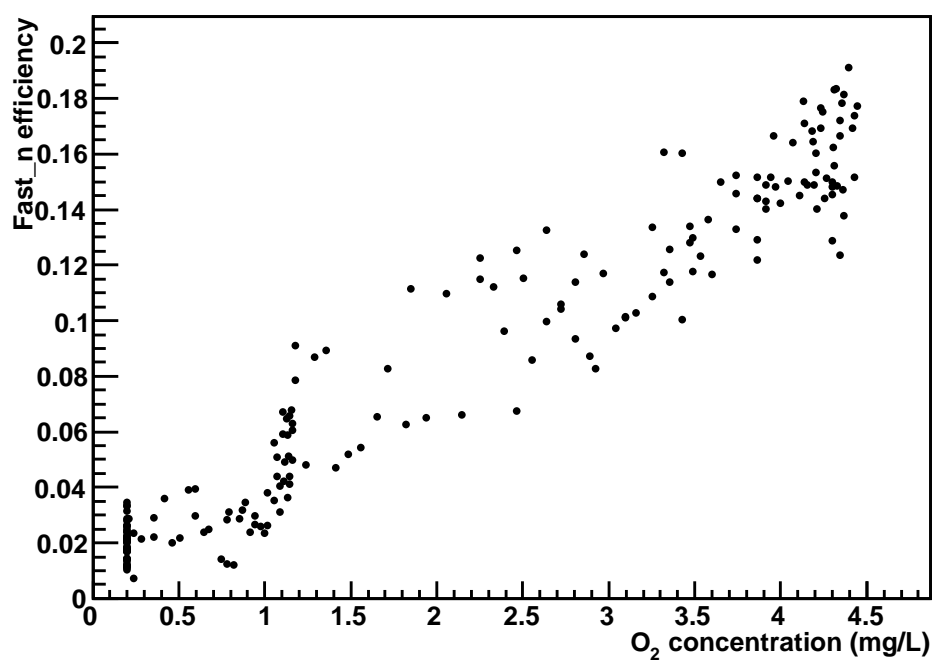


図 2.31: 酸素濃度と高速中性子 Cut Efficiency の関係

第3章 事象再構成

FlashADC で取得したデータから波形弁別法に用いる波形及び解析で用いるエネルギーなどの物理量を再構成している。

3.1 波形再構成

FlashADC においては図 3.1 の左図のように波形は負に出力される。この波形を反転させ正に出力した波形 (図 3.1 の右図) を用いて事象再構成を行う。FlashADC で取得した波形データのペDESTAL を求め、取得データの値を差し引き反転させる。ペDESTAL はデータ取得ウィンドウの 0 nsec から 30 nsec までの平均として定義している (496 nsec 中ピーク位置は 200 nsec 程度に集中している)。ペDESTAL を $Pedestal$ 、FlashADC で取得する波高データを PH とし、ペDESTAL の定義は式 3.1 で表される。ここで FlashADC は 2 nsec おきにデータを取得することを考慮している。また反転させた場合の波高を $PH_{inverse}$ とすると、反転後の波高は式 3.2 として表される。またこの波形を積分し、Charge としている。積分範囲は波形のピークから 20 nsec 前から 120 nsec 後までである。ピークピンを $Peak$ とすると Charge は式 3.3 で表される。ここで再構成した波形は PSD のために用いられる。

$$Pedestal = \frac{1}{15} \sum_1^{15} PH \quad (3.1)$$

$$PH_{inverse} = Pedestal - PH \quad (3.2)$$

$$Charge = \sum_{Peak-10}^{Peak+60} PH_{inverse} \quad (3.3)$$

3.1.1 波形テール部補正

波形を用いた粒子識別において波形テール部の情報は非常に重要である。しかし 8bit の FlashADC を用いて十数 MeV のエネルギーの波形データを取得するダイナミックレンジの設定では波形のテール部の波高が小さくなり波形情報の分解能も低下する。本研究において波形のテール部の分解能向上の取り組みを行った。増幅率 1 倍の波形 (図 3.2 の左図) と増幅率 10 倍の波形 (図 3.2 の右図) の二種類を作成し、それを規格化し重ね合わせるにより分解能の低下に対して補正を行った。破線は波形の接続位置であり、波形の赤い矢印部分を使用する。本研究では 8bit の FlashADC を用

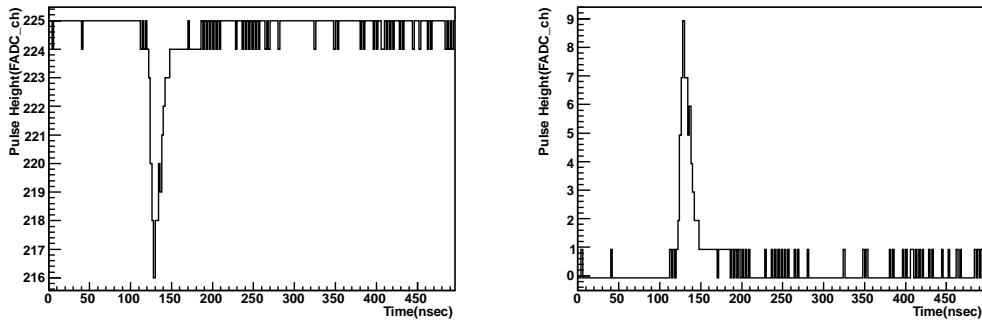


図 3.1: FlashADC における 1 波形データ (左図が取得波形データ、右図が反転させた波形データ)

いており、1V のダイナミックレンジが 256 分割の分解能である。しかしテール部に 10 倍の波形を用いることでダイナミックレンジを 2560 分割で見ていることと見なせるので約 11bit の FlashADC 相当の分解能が得られると考えられる。

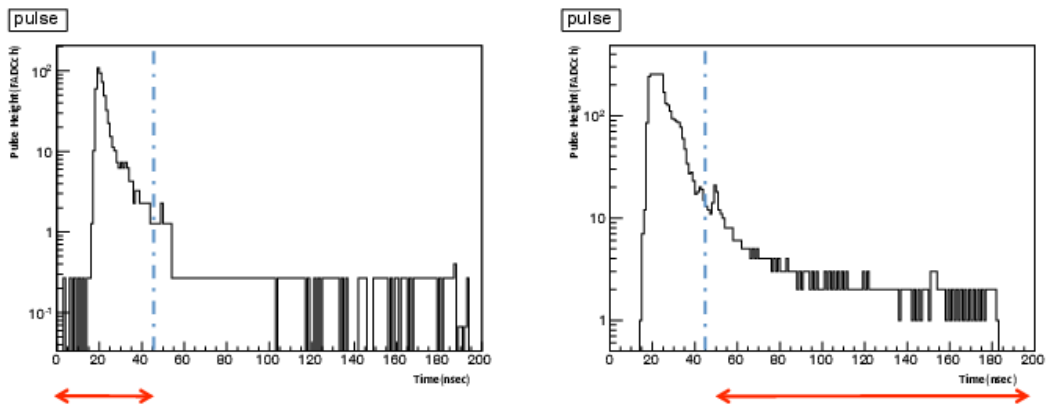


図 3.2: 任意の 1 波形 (左図は 1 倍の波形、右図は 10 倍の波形)

波形を合成するにあたり、アンプ回路のゲインの較正と回路の違いによる時間差を考慮しなければならない。本研究では Clock Generator を用いて AMP 回路の増倍率および回路の違いによる時間差を測定した。図 3.3 に任意の 1ch における Clock Generator を用いた平均波形を示す。ここで黒は 1 倍の波形である。赤は 10 倍の波形である。Amp モジュールによる Gain と遅延によって黒と赤は大きく異なる。図 3.4 は Gain と遅延を補正した波形である。

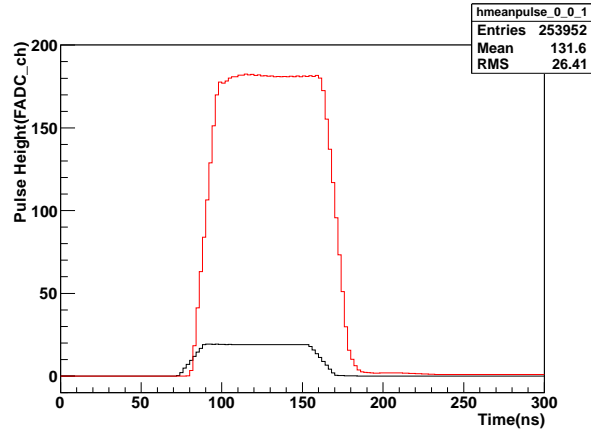


図 3.3: 任意の 1ch における Clock Generator を用いた平均波形比較 (黒は 1 倍波形、赤は 10 倍波形)

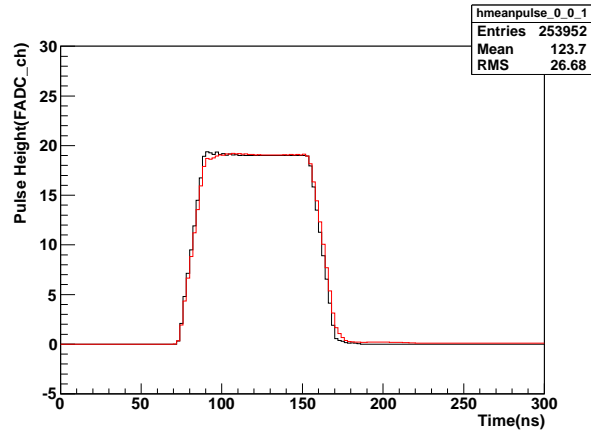


図 3.4: 任意の 1ch における Clock Generator を用いた平均波形比較 (黒は 1 倍波形、赤は Amp モジュールによる Gain と遅延を補正した 10 倍波形)

検出器及び2インチPMTの回路においてClock Generatorを用いたキャリブレーションを行った。キャリブレーションによって得られた定数を表3.1及び表3.2に記載する。

表 3.1: 検出器におけるアンプ回路の増倍率及び時間差の定数

PMT ch	増倍率	時間差 [nsec]
1	8.73	4
2	9.39	4
3	9.66	8
4	10.1	8
5	9.8	0
6	9.5	0
7	9.46	4
8	10.05	4
9	9.09	4
10	9.17	4
11	9.62	4
12	11.51	4
13	9.8	4
14	9.06	4
15	10.84	4
16	9.77	4

表 3.2: 2インチPMTにおけるアンプ回路の増倍率及び回路における時間差の定数

増倍率	時間差 [nsec]
9.5	4

波形を接続する位置は1倍波形の平均波形と10倍波形をキャリブレーション定数でスケールした後の平均波形を重ね合わせて一致している部分を採用した。テール部を補正した任意の1波形を図3.5に示す。本研究ではピーク位置から40 nsecで波形の接続を行っている。

テールの補正は各PMTで行っており、波形解析は16chの波形のピークを合わせて重ね合わせたSUM波形で行う。SUM波形の平均波形を図3.6に示す。左図がテール部補正無の平均波形、右図がテール部補正有の平均波形である。補正によりテール部のMeanのふらつきが小さくなり、RMSも小さくなっている。従って、テール部の波形の分解能が向上している傾向が見られる。本研究においては本章で行った波形再構成をもとに解析を行っていく。

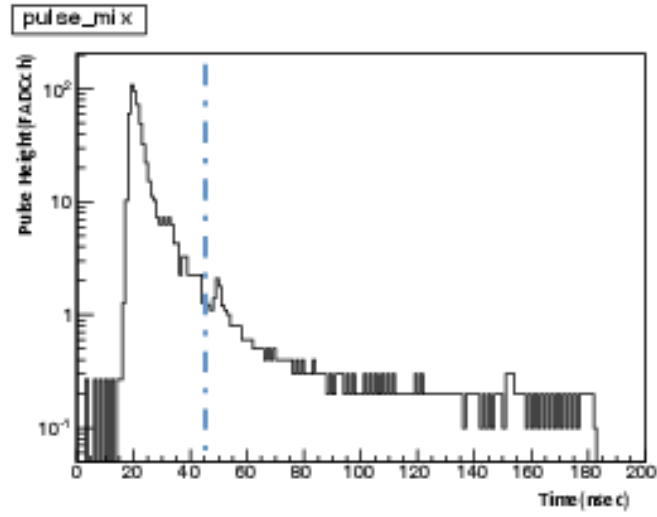


図 3.5: テール部を補正した任意の 1 波形

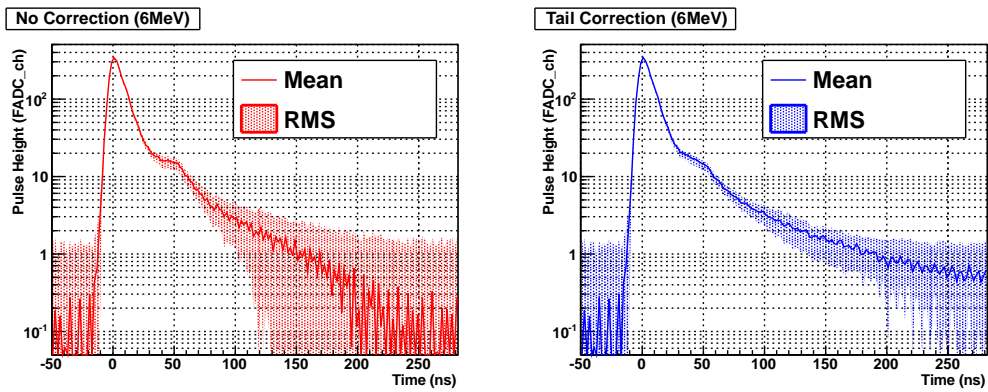


図 3.6: 左図がテール部補正無の平均波形、右図がテール部補正有の平均波形

3.2 エネルギー較正

各光電子増倍管の Charge の合計を粒子が検出器内で落としたエネルギー値に変換するためのエネルギー較正を行った。較正には ^{60}Co 線源を使用した。 ^{60}Co 線源は合計 2.5 MeV の γ 線を出す。 ^{60}Co の崩壊図は図 3.7 に記載し、使用した ^{60}Co 線源の詳細は表 3.3 に示す。 ^{60}Co 線源はテフロン製の容器に入れて検出器の上部から吊り下げ、検出器の中心に配置した。図 3.8 は ^{60}Co 線源を入れて取得したエネルギー分布とバックグラウンドのエネルギー分布である。図 3.8 の ^{60}Co データから BG データを差し引きしたヒストグラムが図 3.9 である。このピークは線源から放出された γ 線が検出器内で全てエネルギーを落とすことで形成される全吸収ピークである。表れているピーク部分をガウス分布でフィットし、その中心を 2.5 MeV とした。

その結果 2.5 MeV でのエネルギー分解能は約 10% であり、各エネルギーでの分解能 σ/\sqrt{E} は $15.8\% \sqrt{\text{MeV}}$ となり、常陽実験の $20\% \sqrt{\text{MeV}}$ に対し向上していることがわかる。これは液体シンチレータをプソイドクメン主体にしたことにより、光量が増加したためであると考えられる。

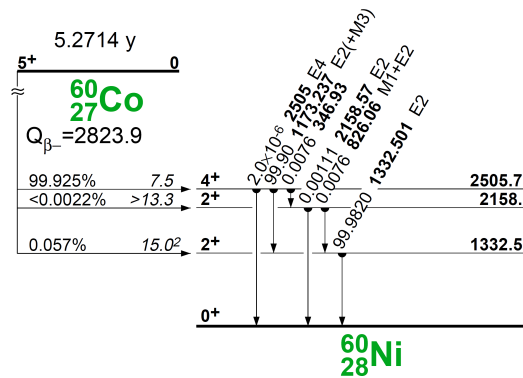


図 3.7: ^{60}Co の崩壊図 [24]

表 3.3: ^{60}Co の特性

半減期	5.2714[年]
放射能の量 (測定日)	0.76[kBq]
主要な放出 γ 線 エネルギー	2.506[MeV] (1.173+1.333)

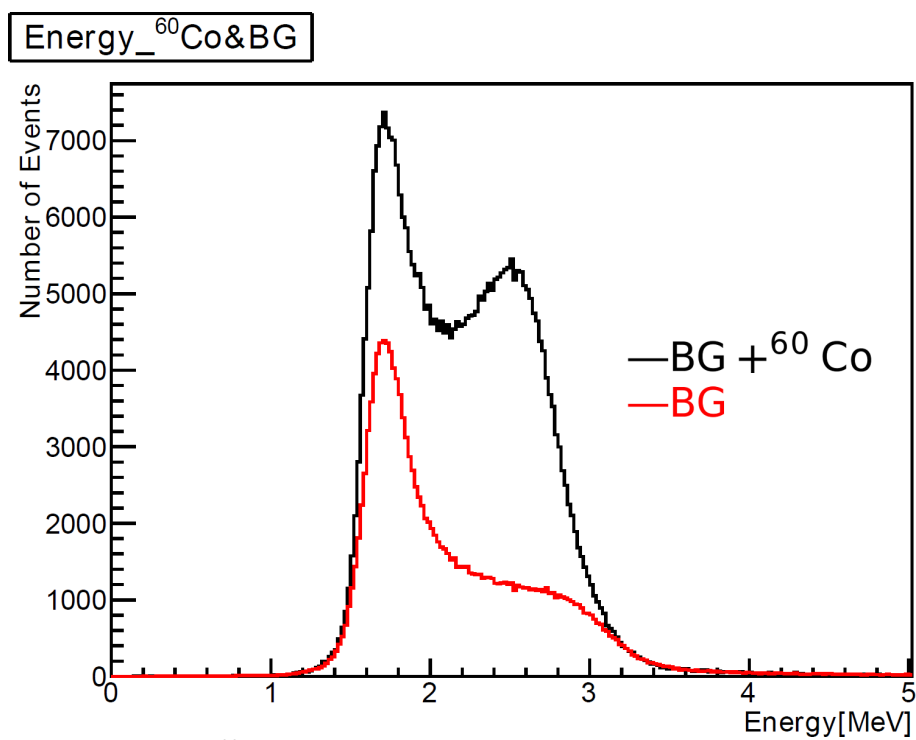


図 3.8: ^{60}Co (赤線) と BG (黒線) のエネルギー分布

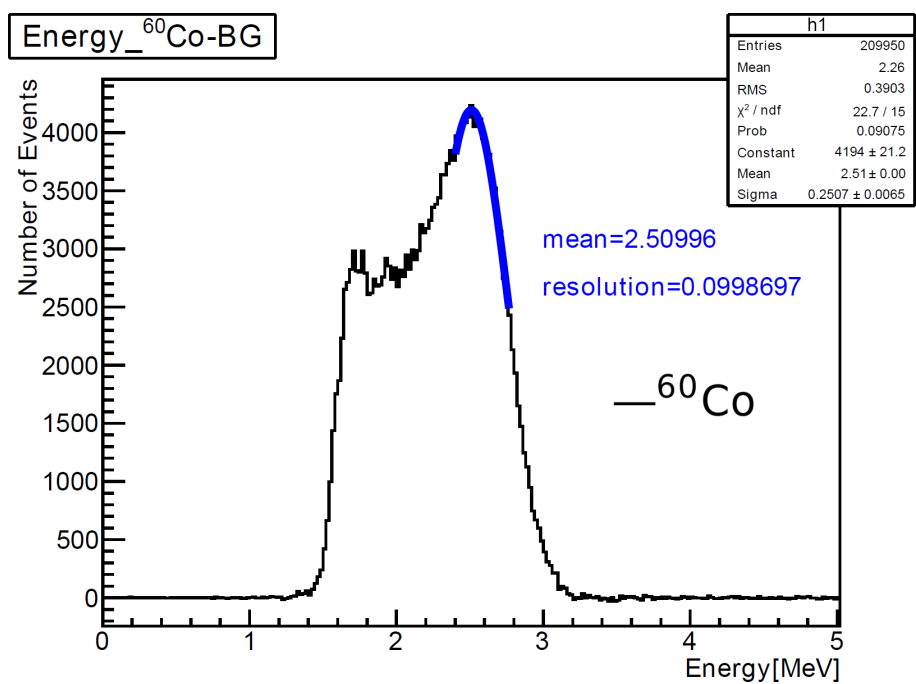


図 3.9: ^{60}Co データから BG データを差し引きした分布

3.3 事象位置再構成

事象位置は各々の光電子増倍管の電荷分布によって決定する。ここで検出器サイズが小さいため減衰長の影響は無視できるため予想される全光電子数に対する各々の光電子増倍管に入る光子数の比 R_i^{exp} は次のように表される。

$$R_i^{exp} = \frac{N_{photon} \times \Omega_i \times \exp(-\frac{L_i}{\tau})}{\sum_{i=1}^{16} N_{photon} \times \Omega_i \times \exp(-\frac{L_i}{\tau})} = \frac{\Omega_i}{\sum_{i=1}^{16} \Omega_i} \quad (3.4)$$

ここで i は光電子増倍管の番号、 Ω_i は事象位置からの光電子増倍管の光電面の立体角、 L_i は事象位置から光電面までの距離、 τ は液体シンチレータの減衰長、そして N_{photon} は事象位置の光子数である。事象位置は R_i^{exp} と観測率 R_i^{obs} を比較する事で求められる。観測率は光電子数に比例し、16本のPMTのキャリアレーション後の合計電荷を Q_i として次のように表される。

$$R_i^{obs} = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^{16} Q_i} \quad (3.5)$$

また事象位置再構成の χ^2 は次のように表せ、 χ^2 が最小値になる点が事象位置である。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{16} \frac{(R_i^{exp} - R_i^{obs})^2}{\sigma^2} \quad (3.6)$$

事象位置再構成の分解能をニュートリノシミュレーションによって評価した値を表3.4に記載する [23]。検出器中心を原点とした三次元極座標表示であり、水平方向の偏角を ϕ 、鉛直方向の偏角を θ 、動径を R としている。

表 3.4: 事象位置再構成後の分解能評価

	ϕ	θ	R
Resolution	33.4 [degree]	35.3 [degree]	5.3 [cm]

第4章 ニュートリノシミュレーション

本研究においてニュートリノの反応数やスペクトルを見積もるためにモンテカルロシミュレーションを使用する。改良検出器で取得したデータをもとにモンテカルロシミュレーションを調整し、検出器で取得したデータを再現している。

再現したシミュレーションの結果から見積もったニュートリノの量と東北大学の実験室で実際に取得したバックグラウンドデータを用いて検出器の性能を評価する。検出器で取得できるデータの再構成方法については [12] と [23] を参照していただきたい。

4.1 Geant4

シミュレーションには CERN が提供している Geant4 を使用する。本研究では Geant4 のバージョンは 4.9.0.p01 を使用する。Geant4 とは粒子 (光子) シミュレーションキットであり、高エネルギー分野で用いられている。Geant4 はオブジェクト指向の C++ ベースのシミュレータ開発用クラスライブラリで、測定データに基づいた粒子と物質の相互作用 (電磁相互作用、ハドロン相互作用、光学相互作用) が関数やデータベースとなって組み込まれている。Geant4 の特徴として以下の点が挙げられる。

- 様々な形状の物質を定義することができ、その配置も容易
- 時系列を考慮
- 光子、電子、重荷電粒子、中性子などを取り扱える
- 2D 表示 (OpenGL), 3D 表示 (VRML) 可能

このような特徴からユーザは C++ 言語を利用して独自のプログラムを作成して、物質の幾何学的配置、発生させる粒子の種類と位置と方向、そして物理プロセスを記述することができる。

4.2 KAPST

Geant4 を用いたプロトタイプのシミュレータの作成は東京工業大学で行われ、検出器の改良とともに東北大学にて改良が加えられた。作成したシミュレータは KASKA Prototype Detector Simulator Tokyo Tech (KAPST) と呼ばれる。KAPST での検出器の geometry はアクリル球、ガラスフラスコ、ガドリニウム入り液体シンチレータ、水、光電子増倍管の光電面、アクリルと光電子増倍管の光電面の間にいたシリコンゴムから成る。物理プロセスには Hadronic interaction process のために QGSP BIC HP を採用している。QGSP BIC HP とは、20 MeV 以下の低エネルギー範囲の中性

子物理から宇宙線ミュオンと検出器周りの物質との相互作用のような GeV スケールの高エネルギー範囲まで包含する。KAPST は荷電粒子の電離によって液体シンチレータ中で放出される光子の散乱などの物理過程を追っている。シミュレータには光電子増倍管に到達する光子の時間情報と光子数情報が蓄積される。この光子の情報をもとに検出器で取得できるデータを再現し解析に用いる。

4.3 ニュートリノシミュレーション

ニュートリノジェネレータは逆 β 崩壊反応後に放出される陽電子と中性子をシミュレートする。事象位置はターゲット層内及びバッファ層内に一様に発生させる。逆 β 崩壊反応のファインマン・ダイアグラムを図 4.1 に示す。

陽電子の散乱角 θ の分布は次の式で表される微分反応断面積 $d\sigma/d\cos\theta$ に従う [12]。

$$\left(\frac{d\sigma}{d\cos\theta}\right)^{(0)} = \frac{\sigma_0}{2} [(f^2 + 3g^2) + (f^2 - g^2)v_e^{(0)}\cos\theta] E_e^{(0)} P_e^{(0)} \quad (4.1)$$

ここで $P_e = \sqrt{E_e^2 - m_e^2}$ は陽電子の運動量、 $v_e = P_e/E_e$ は速度を意味する。 $f=1.0$ と $g=1.267$ はベクトル結合定数と擬ベクトル結合定数である。また $E_e^0 = E_\nu - \Delta$ ($\Delta = M_n - M_p$) である。ニュートリノのエネルギー分布は主な同位体である ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu からのニュートリノのエネルギー分布を平均したものである。図 4.2 は逆 β 崩壊の反応断面積を示す。左図は微分反応断面積を表し、右図は全反応断面積を表す。

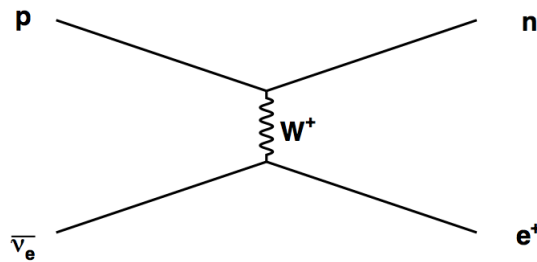


図 4.1: 逆 β 崩壊反応のファインマンダイアグラム

検出器におけるニュートリノシミュレーションによって得られた分布を図 4.3 に示す。ここで熱出力 3 GWth 、炉心からの距離 25 m と設定している。左上図が先発信号のエネルギー分布、右上図が後発信号のエネルギー分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差の分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布である。先発信号のエネルギーは観測されるニュートリノのエネルギー分布に依存した分布となる。また後発信号のエネルギー分布は 2 MeV 程度に水素による中性子捕獲事象のピークがあり、また Gd による中性子捕獲事象の分布が 10 MeV 程度まで確認できる。Gd による事象は γ 線が反応せずに外に出て行く事象があり、分布がピークにならない。ニュートリノシミュレーションとエネルギー Threshold の関係を図 4.4 に示す。左図が先発信号と後発信号のエネルギーの相関、右図が先発信号と後発信号のエネルギー

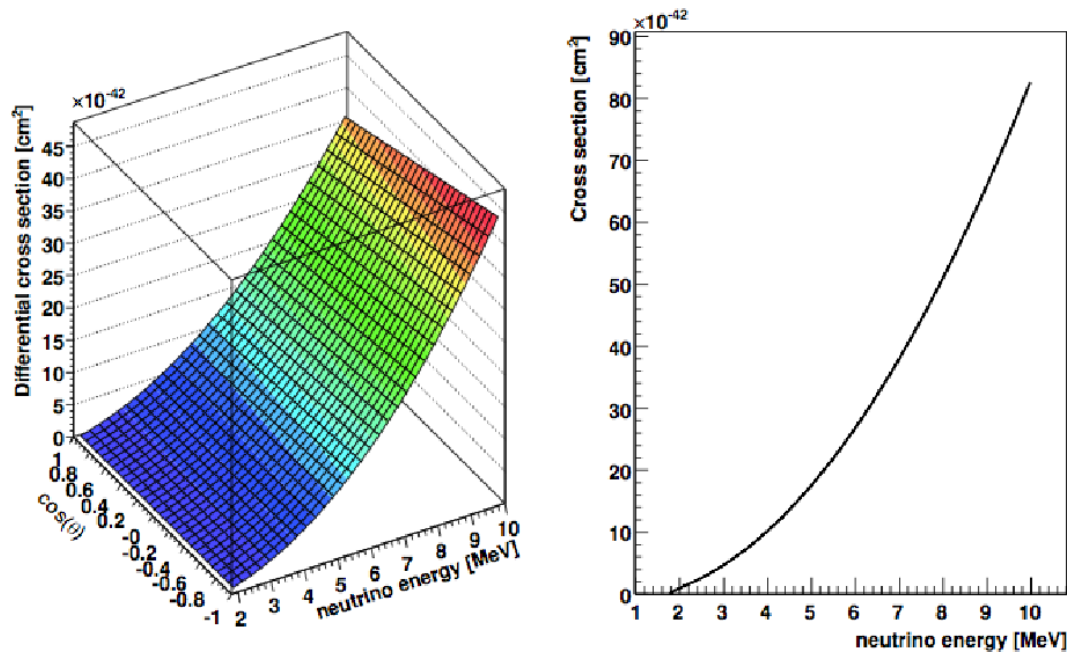


図 4.2: 逆 β 崩壊の反応断面積 (左図が微分反応断面積、右図が全反応断面積)

Threshold による Cut Efficiency である。検出器の Threshold の設定から、シミュレーションでは 2 MeV 以上のイベントを採用する。

先発信号と後発信号の時間差の分布では液体シンチレータの構成に依存した分布をする。

事象位置差の分布においては 40 cm 以下に多くの事象が分布しており、検出器のターゲットサイズに依存している。

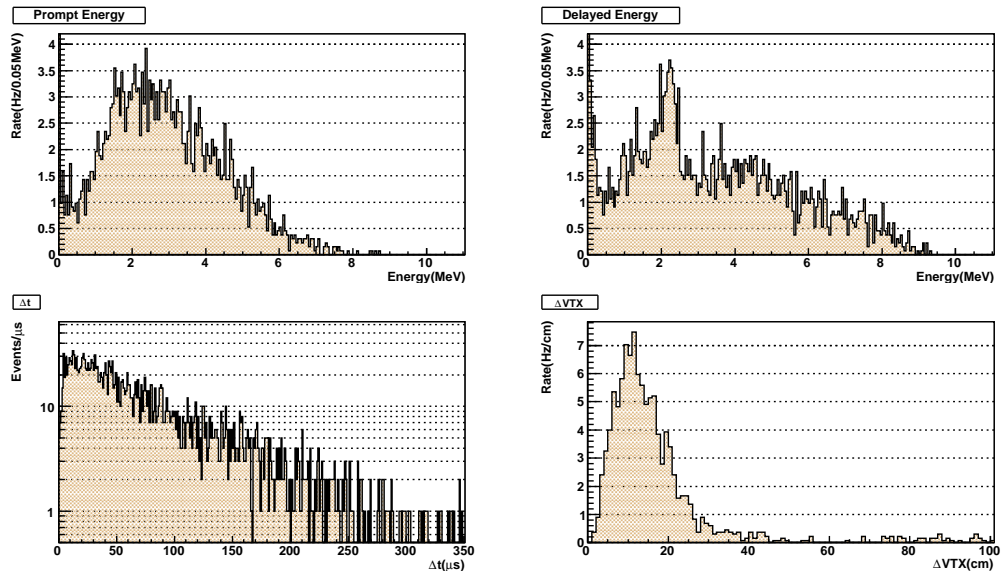


図 4.3: ニュートリノシミュレーションの結果 (左上図が先発信号の Energy 分布、右上図が後発信号の Energy 分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差の分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布)

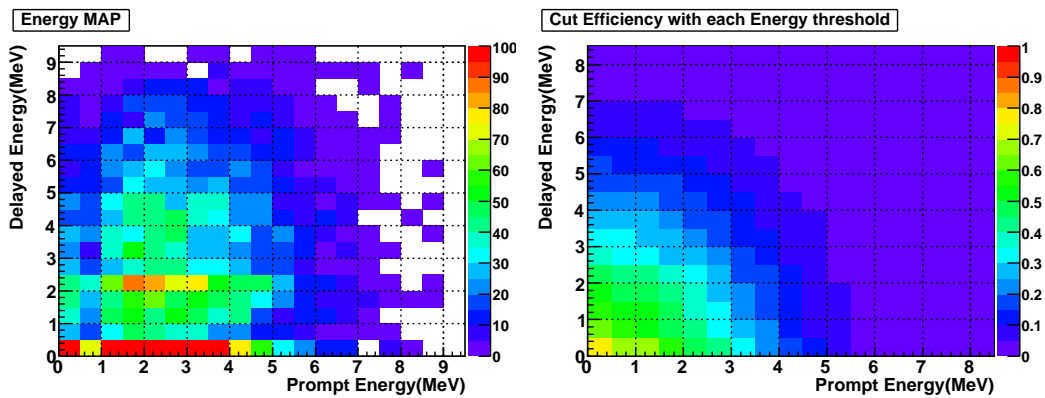


図 4.4: ニュートリノシミュレーションにおけるエネルギー分布とエネルギー Threshold の関係 (左図が先発信号と後発信号のエネルギーの相関、右図が先発信号と後発信号のエネルギー Threshold による Cut Efficiency)

第5章 バックグラウンド

ニュートリノを検出するにあたり、ニュートリノ事象と類似したバックグラウンド事象を評価しなければならない。本節ではバックグラウンドの発生原理及び特徴について説明する。

本研究では東北大学において改良検出器を用いて実際にバックグラウンド測定を行った。解析では8.24日のデータを使用している。東北大学ではニュートリノ源はなく全ての事象はバックグラウンドである。

5.1 シングルバックグラウンド

オフラインで遅延同時計測法を行う前のバックグラウンドをシングルバックグラウンドと呼ぶ。取得したシングルバックグラウンドデータ及びニュートリノシミュレーションのエネルギー分布を図5.1に示す。本章のニュートリノシミュレーションは4.3節の設定と同様である。このときのニュートリノシミュレーションの設定は原子炉出力3 GW $_{th}$ 、炉心からの距離25 mである。またシングルバックグラウンド事象頻度とエネルギー Threshold の関係を図5.2に示す。シングルバックグラウンドはニュートリノ事象に対して5桁程度多い状態である。シングルバックグラウンドは遅延同時計測法を用いて大きく除去する。シングルバックグラウンドの主な構成要素は

- 環境 γ 線
- 宇宙線ミュオン

である。さらにシングルバックグラウンドとなる環境 γ 線は主に物質中に含まれる放射性同位体である ^{238}U 、 ^{232}Th の崩壊チェーンおよび ^{40}K により生成されている。これらの環境 γ 線は最大 2.615 MeV のエネルギーを持つが、エネルギー分解能によるエネルギー分布のひろがりの影響で数 MeV にわたって分布する。環境 γ 線の発生源として装置の周囲を覆うコンクリートなどが考えられている。

宇宙線ミュオンは GeV 単位以上のエネルギー幅を持っており、図5.1における数十 MeV 付近の分布は宇宙線ミュオンによるものである。また高エネルギーミュオンはコンクリートなどの物質との相互作用によって高速中性子を放出する。宇宙線由来の高速中性子による信号はシングルバックグラウンドでは環境 γ 線や宇宙線ミュオンに比べ大きな構成要素ではないが、遅延同時計測法を用いたニュートリノセレクション後には主なバックグラウンドとなる。遅延同時計測法については次節で述べる。

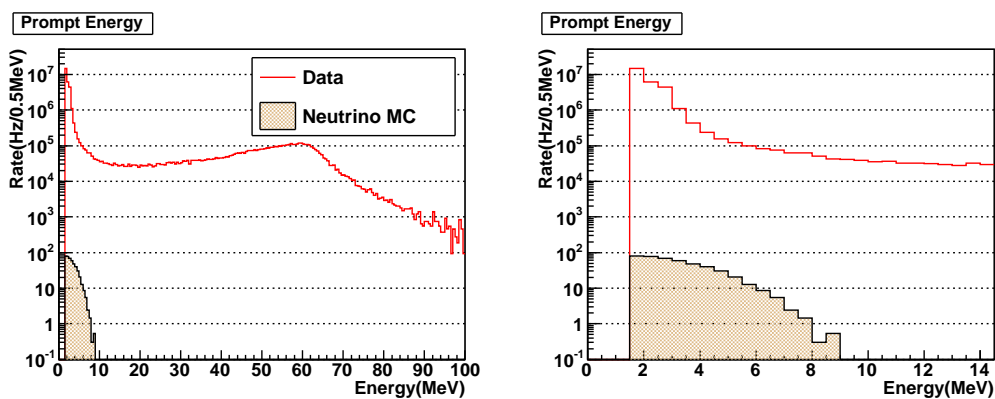


図 5.1: 改良検出器におけるシングルバックグラウンドと $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布 (赤がシングルバックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーション)

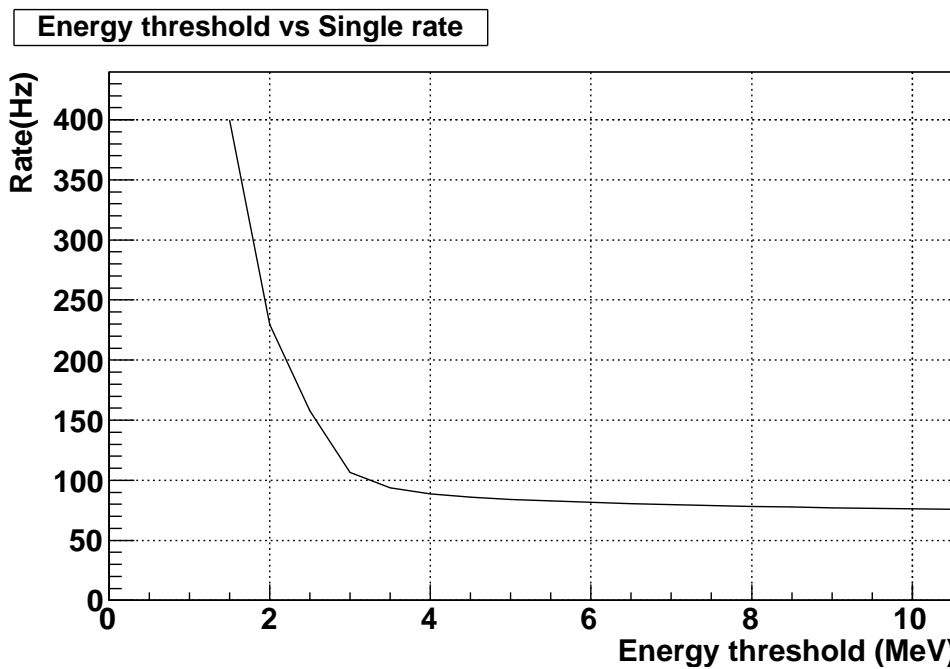


図 5.2: 改良検出器におけるシングルバックグラウンド Rate とエネルギー Threshold の関係

5.2 遅延同時計測バックグラウンド

改良検出器では 1.1.2 節でも述べた通り、オフライン解析にて遅延同時計測法を利用してニュートリノ事象候補を選出する。遅延同時計測法を利用するとバックグラウンドを大幅に減らすことが可能となる。その後残ったバックグラウンドを遅延同時計測バックグラウンドと呼ぶ。遅延同時計測バックグラウンドは

- Accidental (偶発同時計測) バックグラウンド
- Correlated (相関性) バックグラウンド

からなる。

5.2.1 Accidental バックグラウンド

相関のない 2 つの事象が偽先発信号と偽後発信号を独立につくり、偶発的に遅延同時計測法の時間幅にトリガーをつくるバックグラウンドを Accidental バックグラウンドと呼ぶ。遅延同時計測法を含む解析変数でのカット (詳細は第 6 章) を行った後の偽先発信号は主に環境 γ 線であり、偽後発信号は主に宇宙線による信号である。環境 γ 線は 5.1 節でも述べたように主に周辺のコンクリート内の ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K に起因する。

5.2.2 Correlated バックグラウンド

先発信号と後発信号が相関のある一つの事象で遅延同時計測法の設定時間幅内にトリガーをつくるバックグラウンドを Correlated バックグラウンドという。本実験では Correlated バックグラウンドは主に高速中性子事象である。主に先発信号は反跳陽子、後発信号は Gd による中性子捕獲事象の信号である。高速中性子バックグラウンドの発生原理の模式図を図 5.3 に示す。また高速中性子事象の他に宇宙線ミュオン由来で発生する Michel electron 事象が存在する。宇宙線ミュオンが運動エネルギーを落としきって止まる間に先発信号を作り、そのミュオンが崩壊する際に発生する電子によって後発信号が作られる事象である。

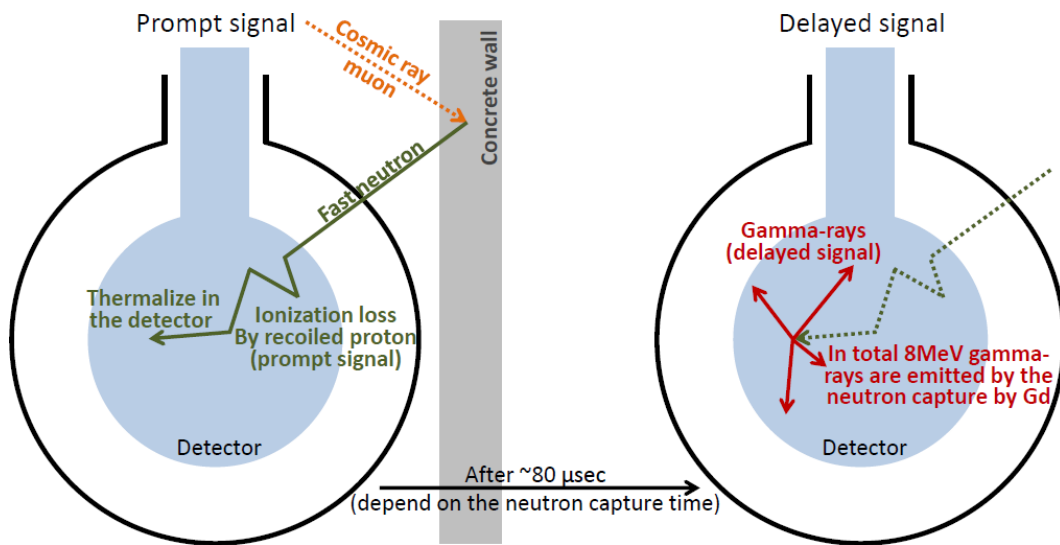


図 5.3: 高速中性子バックグラウンドの模式図

5.3 バックグラウンドデータ

本研究では $500 \mu\text{sec}$ 以内で遅延同時計測の組み合わせを作る事象を ON Timing データと呼ぶ。ON Timing データには Accidental バックグラウンドと Correlated バックグラウンド両方が含まれている。このバックグラウンドを Total バックグラウンドと呼ぶ。Total バックグラウンド内の Accidental バックグラウンドを見積もるために OFF Timing データを定義した。OFF Timing データは先発信号から $1000 \mu\text{sec}$ 時間を空けて $1000\sim 1500 \mu\text{sec}$ 以内の信号と遅延同時計測の組み合わせを作った事象である。

東北大学において改良検出器によって測定したバックグラウンドデータの ON Timing データと OFF Timing データの分布を図 5.4 に示す。先発信号のエネルギー分布が左上図、後発信号のエネルギー分布が右上図、先発信号と後発信号の時間差が左下図、先発信号と後発信号の事象位置差が右下図である。黒が ON Timing データ、赤が OFF Timing データ、ベージュがニュートリノシミュレーションである。先発信号と後発信号の時間差の分布において Accidental バックグラウンドのヒストグラムは比較するために $1000 \mu\text{sec}$ 引いたデータである。このデータのセレクション条件は Threshold としての

- $2.0 [MeV] < \text{Prompt Energy}$
- $2.0 [MeV] < \text{Delayed Energy}$

である。

Accidental バックグラウンドは先発信号と後発信号に相関がないので、様々な時間差の事象が一定の割合で存在する。Single Rate は 400 Hz 程度であり、Accidental バックグラウンドの先発信号と後発信号の時間差の分布は Correlated バックグラウンドに比べてフラットな分布 (Single Rate の傾き) となる。先発信号と後発信号の時間差は ON Timing データと OFF Timing データにおいて $200\sim 300 \mu\text{sec}$ 程度でほぼフラットな分布となっている。従って時間差が $300 \mu\text{sec}$ 以上の事象はほぼ Accidental バックグラウンドと考えられる。Accidental バックグラウンドを見積もるための OFF Timing データの分布はほぼフラットな分布をしており、Accidental バックグラウンドが主に含まれると考えられる。

図 5.4 の左上図と右上図から Accidental バックグラウンドの先発信号と後発信号のエネルギー分布の形が同じであることが分かる。 3 MeV 以下では ON Timing データと OFF Timing データが重なっているため、Accidental バックグラウンドが支配的である。

事象位置差の分布において 50 cm 以下で ON Timing データが OFF Timing データと比較して多い。 50 cm よりも大きい事象位置差での事象は Miss Reconstruction であり、これは Accidental バックグラウンドが主な要素である。

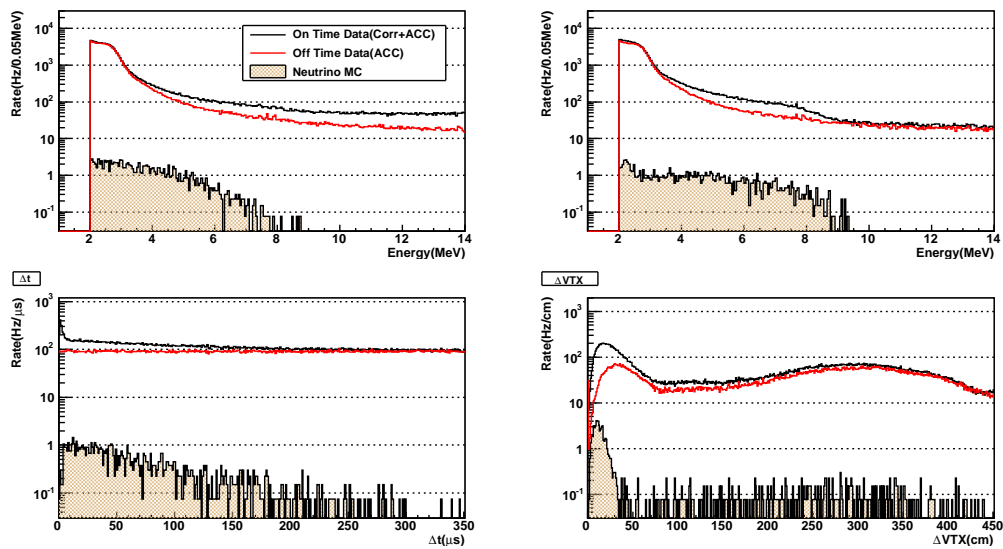


図 5.4: 左上図が先発信号のエネルギー分布、右上図が後発信号のエネルギー分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布 (青が Correlated バックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーション)

5.3.1 高速中性子

本研究では Correlated バックグラウンドは Total バックグラウンドの分布から Accidental バックグラウンドの分布を差し引いた分布と定義している。Correlated バックグラウンドとニュートリノシミュレーションの分布を図 5.5 に示す。先発信号のエネルギー分布が左上図、後発信号のエネルギー分布が右上図、先発信号と後発信号の時間差が左下図、先発信号と後発信号の事象位置差が右下図である。青が Correlated バックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーションである。

高速中性子事象は宇宙線による核破砕が起源であるため先発信号となる Recoil proton のエネルギーは宇宙線のエネルギー分布に影響され、高エネルギー領域まで広がりを持つ。そのため図 5.5 の左上図にある先発信号のエネルギー分布は高エネルギー領域まで広がりを持っている。後発信号のエネルギー分布は 2 MeV 程度に水素による中性子捕獲事象のピークがあり、Gd による中性子捕獲事象の分布が 8 MeV 付近までである。Gd による事象は γ 線が反応せずに外に出て行く事象があり、分布がピークにならない。Correlated バックグラウンドのエネルギーはニュートリノシミュレーションのエネルギー領域に重なっており、エネルギーで分離することは難しい。

先発信号と後発信号の時間差の分布では Correlated バックグラウンドの分布とニュートリノシミュレーションの分布において $10 \mu\text{sec}$ 以下では分布の傾きに差があるものの、それ以上の領域では傾きがほぼ一致している。Correlated バックグラウンドの分布における $10 \mu\text{sec}$ 以下の事象は Michel electron 事象と考えられるが、この事象は事象位置差のカット条件によって除去される。

事象位置差の分布では 40 cm 以下に多くの事象が分布しており、検出器のターゲットの大きさに起因すると考えられる。

以上のことから本研究における定義で作成した Correlated バックグラウンドは高速中性子事象が主体であることが推定される。また高速中性子によるバックグラウンドの分布はニュートリノ事象と類似していることがわかる。ニュートリノ事象と高速中性子事象を識別するために波形弁別法が必要である。

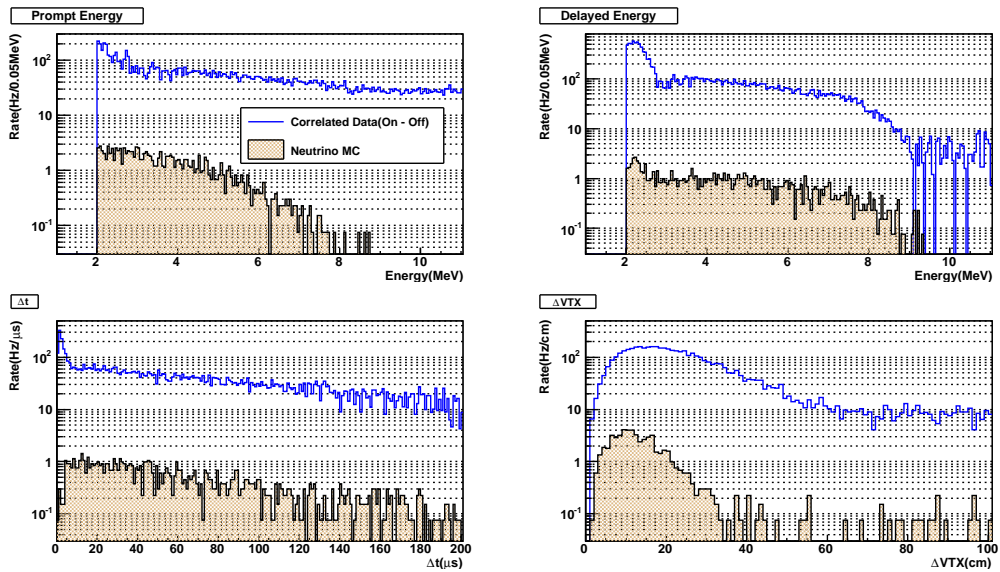


図 5.5: 左上図が先発信号のエネルギー分布、右上図が後発信号のエネルギー分布、左下図が先発信号と後発信号の時間差分布、右下図が先発信号と後発信号の事象位置差の分布（青が Correlated バックグラウンド、ベージュがニュートリノシミュレーション）

第6章 ニュートリノセレクション解析

東北大学の実験室におけるバックグラウンドを原子炉近傍のバックグラウンドと仮定して、バックグラウンド除去の解析を行っている。本研究は原子炉施設内の地上測定を想定しており、実験室は想定と同様の地上である。ニュートリノ事象を観測するにあたり、ニュートリノ事象に類似したバックグラウンドがある。有意なニュートリノ事象を観測するためにニュートリノ事象をできるだけ多く残しながら、バックグラウンドを解析によって大きく除去する必要がある。本章では検出器で取得した波形データからバックグラウンド除去に有効な変数を作成し、カット条件の最適化を行っている。

6.1 解析変数とカット条件

解析に使用した変数は

1. Time difference : ΔTime
2. Multiplicity
3. 波形弁別法による変数 (TailQ/TotalQ、 χ^2/NDF)
4. Energy
5. Vertex difference : ΔVertex

である。解析変数のカット条件の最適化には Enhance というパラメータを定義し、それが最大値をとるときが最適であると考え、ニュートリノセレクション範囲を決定した。式 6.1 に Enhance の定義を記載する。ここで ε_{sig} は残したい事象の Cut Efficiency であり、 ε_{bg} はバックグラウンドの Cut Efficiency である。 $\sqrt{\varepsilon_{bg}}$ はバックグラウンドの Cut Efficiency の統計誤差を表している。Enhance は残したい事象の Cut Efficiency に対するバックグラウンド事象の Cut Efficiency の統計誤差の比である。Enhance に比例して残したい信号の優位性は高くなる。

$$Enhance = \frac{\varepsilon_{sig}}{\sqrt{\varepsilon_{bg}}} \quad (6.1)$$

最適なカット条件の評価は変数の相関性を考慮して行った。扱うエネルギー領域では変数 1、2、3 は独立な要素であると考えられるので、それぞれを独立に評価している。また変数 1、2、3 とは独立である変数 4、5 は互いに相関性があるのでその相関を考慮して評価を行っている。変数 4、5 は変数 1、2、3 の最適なカット条件を使用した後のデータを用いて評価を行っている。以下で先発信号の Energy を E_p 、後発信号の Energy を E_d と呼ぶ。

6.1.1 ΔTime

遅延同時計測における先発信号と後発信号の時間差を ΔTime と定義している。 ΔTime は基本的に Gd による中性子捕獲事象に依存するためニュートリノ事象と高速中性子事象で同じ振る舞いをすると考えられる。一方、Accidental バックグラウンドは先発信号と後発信号の時間相関性がないため、ニュートリノや高速中性子事象と比較して ΔTime に依存せず、ほぼフラットな分布になる。そのため ΔTime のカット条件の最適化にはニュートリノ事象候補と Accidental バックグラウンドの分布を用いて最適化を行う。測定データを用いて最適化を行う方が直接的であるため、本節では高速中性子事象多く含むデータである Correlated バックグラウンドをニュートリノ事象と仮定して用い、バックグラウンドデータとして Accidental バックグラウンドデータを用いている。高速中性子の Cut Efficiency を ε_{sig} 、Accidental バックグラウンドの Cut Efficiency を ε_{bg} とする。 ΔTime の最適値を決定するにあたり用いたパラメータは ΔTime の上限値である。図 6.1 の左上図は ΔTime 分布である。左下図は ΔTime の上限値を変化させた際の Accidental バックグラウンドの Cut Efficiency のグラフである。

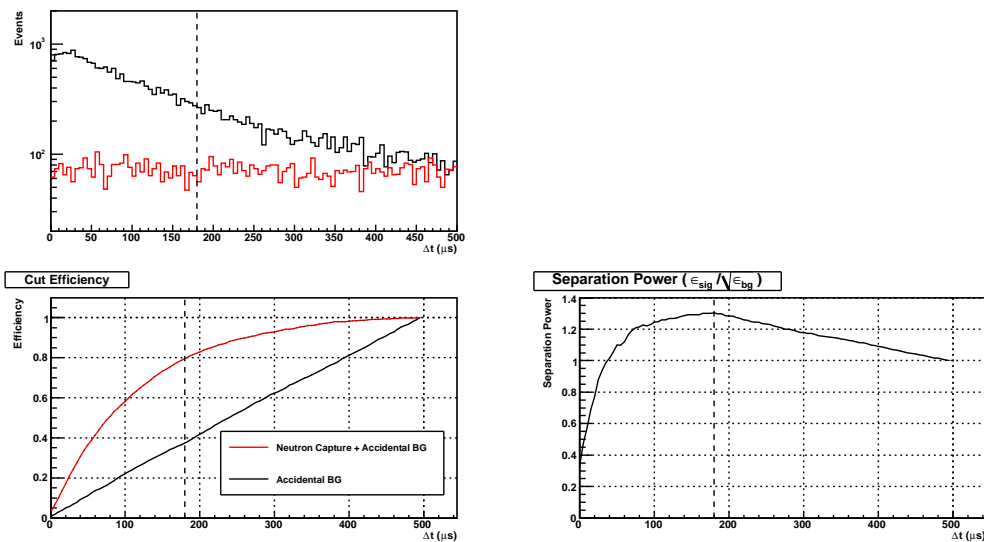


図 6.1: 左上図は ΔTime の分布 (黒は高速中性子事象、赤は Accidental バックグラウンド事象)。左下図は ΔTime の上限値を変化させた際の Accidental バックグラウンドの Cut Efficiency のグラフ。右下図は ΔTime のカット値による Enhance。

図 6.1 の右下図に示す Enhance の値が最も大きくなる ΔTime のカット上限値は $180 \mu\text{sec}$ である。従ってこれを ΔTime の上限値の最適値とした。

6.1.2 Multiplicity

同時に二つ以上の高速中性子が検出器に入る場合がある。これをマルチ中性子事象と呼ぶ。例として二つの場合で説明する。二つの中性子の陽子反跳による信号はほぼ同時に発生するため、先発信号はこの二つの信号が合わさったものが一つの信号とし

て検出される。その後、数十 μsec 程度の時間差で順次 Gd の熱中性子捕獲による γ 線の信号が二回発生する。そのため、基本的にこのマルチ中性子事象は陽子反跳による一つの信号と、中性子の個数分の熱中性子捕獲信号が発生する。従って遅延同時計測法で先発信号と後発信号の二つの組み合わせ事象を作っていく際に、例えば二つの中性子からなるマルチ事象の場合図 6.2 に示す配置となり、表 6.1 の組み合わせが発生する。

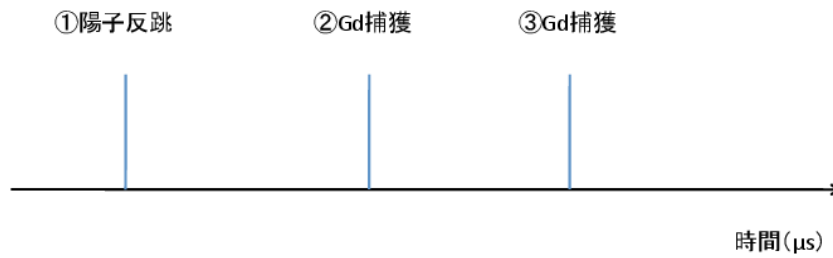


図 6.2: 二つの中性子からなるマルチ事象概念図

表 6.1: マルチ事象における信号の組み合わせ

	組み合わせ 1	組み合わせ 2	組み合わせ 3
先発信号	①	①	②
後発信号	②	③	③

特に組み合わせ 3 は先発信号、後発信号ともに γ 線であるため、このような組み合わせは高速中性子事象除去のために使用する波形弁別法では排除できずにニュートリノ事象候補内に残ってしまう。そのため別途この組み合わせを取り除く変数が必要である。

そこで先発信号と後発信号が組み合わせられたデータサンプルごとに、図 6.3 の定義で先発信号周りの "Multiplicity (MP)" を数えることにより、三つ以上の信号が数百 μsec 内に発生した場合を除外する。

しかし、偶発的にニュートリノ事象と他の事象が数百 μsec 内に発生した組み合わせも存在する可能性がある。その場合ニュートリノ事象の一定割合が損失してしまう inefficiency が発生する。したがって MP の Cut Efficiency を考慮する際に inefficiency の大きさも同時に考慮する必要がある。Correlated バックグラウンドにおける MP の定義は先発信号の前後に事象がいくつ有るかを数える。後発信号のみは MP=1 である。先発信号の前の時間幅を Pre time、後の時間幅を Post time と定義する (図 6.3 の左図)。また、数える信号の条件として Energy 閾値 ($E_{\text{threshold}}$) のみを考慮する。Accidental バックグラウンドにおいては Post time の定義が Correlated バックグラウンドと異なっている。Accidental バックグラウンドでは Post time は先発信号から $1000[\mu\text{sec}]$ 離れた位置から後ろに時間幅を定義している (図 6.3 の右図)。

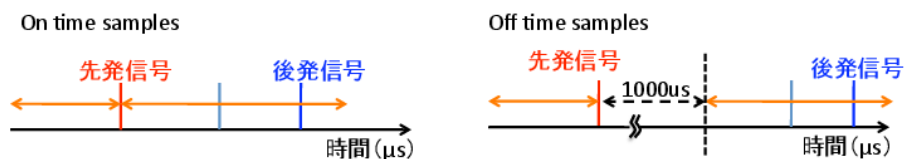


図 6.3: MP の定義 (左図は Correlated バックグラウンド、右図は Accidental バックグラウンド)

MP において最適化に用いるパラメータは

1. Pre time の幅
2. Post time の幅
3. $E_{\text{threshold}}$ の値

である。Pre time や Post time の時間幅が広いほど、また $E_{\text{threshold}}$ が低いほどマルチ中性子事象を多く排除できる。しかしニュートリノ事象の inefficiency が増加する。時間幅の増加によってニュートリノ事象と他の事象が同時に時間幅に入る可能性が増加する。また $E_{\text{threshold}}$ を低くすることによって Single rate が増え、やはりニュート

リノ事象と他の事象が同時に時間幅に入る可能性が増加する。三つのパラメータの組み合わせの中で Enhance が大きくかつニュートリノの inefficiency の低い最適値を決定する。評価において DoubleGate 法及び χ^2 検定 (詳細は 6.1.3.2 節参照) を用いて、最も波形弁別能力が高い値を最適なカット条件とした。本節で評価するパラメータはそれぞれ独立と考えられるため、あるパラメータのカット条件の最適化を行う際は他のパラメータは固定している。MP の評価において Correlated バックグラウンドの後発信号をニュートリノ事象と仮定して、この Cut Efficiency を ε_{sig} としている。後発信号は γ 線の事象であるため波形弁別においてはニュートリノ事象と同様の振る舞いをする。また高速中性子事象の先発信号を用い、この Cut Efficiency を ε_{bg} とする。カット条件の最適化の際に inefficiency を考慮して Enhance 値 \times (1-inefficiency) の最大値を用いて評価する。MP を評価する際に評価のためだけに設定したカット条件を適用している。用いたカット条件を表 6.2 に示す。

表 6.2: MP 評価の際のカット条件

パラメータ	下限値	上限値
E_p [MeV]	3.5	10
E_d [MeV]	3.5	10
Δ Vertex [cm]	25	-
Δ Time [μ sec]	5	200

波形弁別法の定義は

- DoubleGate 法 : StartT=-20[nsec]、TailStartT=20[nsec]、EndT=160[nsec]
- χ^2/NDF 分布条件 : Fit 範囲=-20~160[nsec]

である。

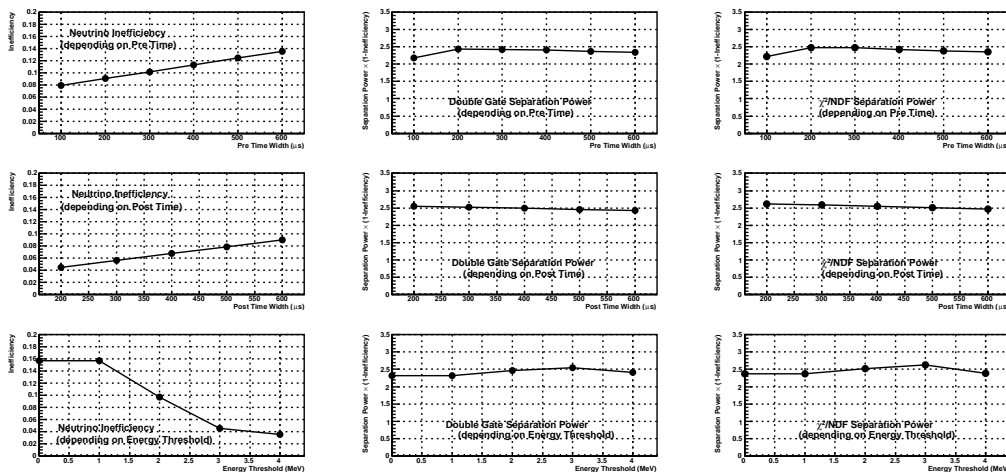


図 6.4: 上段が Post time、中段が Pre time、下段が $E_{threshold}$ 。左がニュートリノ inefficiency、中央が DoubleGate 法による Enhance 値 \times (1-inefficiency)、右図が χ^2/NDF による Enhance 値 \times (1-inefficiency)

Post time は Enhance 値が時間幅によらないため、inefficiency の一番小さい $200 \mu\text{sec}$ とする。Pre time は $200 \mu\text{sec}$ より広い時間幅においては Enhance 値が一定であるため $200 \mu\text{sec}$ を採用する。 $E_{\text{threshold}}$ で Enhance 値が最大である 3 MeV を最適値とする。

6.1.3 波形弁別法における変数

波形弁別解析には Double Gate 法と χ^2 検定を用いた。本節では波形テール部補正有の波形を用いて評価方法を説明する。

6.1.3.1 Double Gate 法

DoubleGate 法は高速中性子による反跳陽子の波形がピーク後の減衰が緩やかであることを利用して、2つの異なる長さの Gate を定義し、それらの電荷の比をとり波形弁別を行う方法である。図 6.5 に Gate の従来の定義を記載した。Total Gate として peak の 20 nsec 前から peak の 120 nsec 後までの範囲を定義し、Tail Gate を peak の 20 nsec 後から peak の 120 nsec 後までの範囲として定義している (表 6.3)。ここで波形データを Total Gate の範囲で積分した値を TotalQ、Tail Gate の範囲で積分した値を TailQ と呼ぶ。

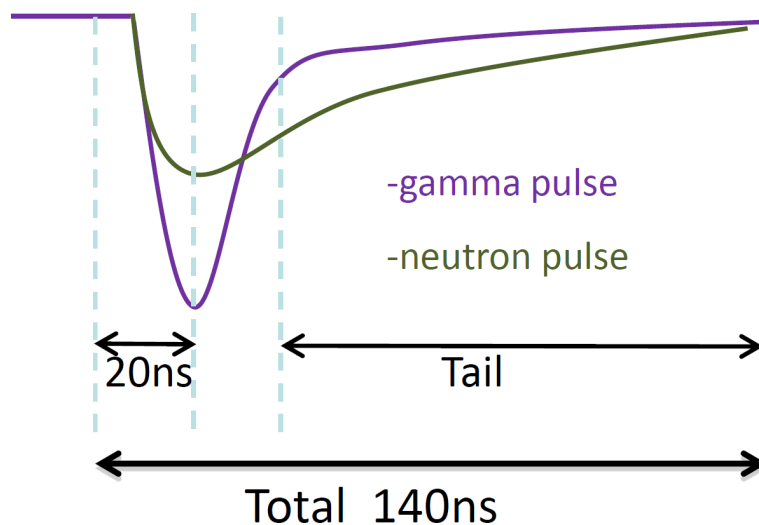


図 6.5: Double Gate 法の Gate の定義

表 6.3: DoubleGate 法の定義 (波形ピーク位置を 0 nsec)

パラメータ	値
Total Gate の開始時間 [nsec]	-20
Total Gate 及び Tail Gate の終了時間 [nsec]	120
Tail Gate の開始時間 [nsec]	20

従来の定義においてニュートリノ事象を 85 % 残す場合、中性子事象は 88 % 除去できる。

本研究で波形のテール部の補正を行うことでテール部の分解能向上を行っている。その分解能向上を経て、波形弁別法の最適化を行った。最適化には6.1節で定義した Enhance 値を用いる。最適化において用いたパラメータは

1. Total Gate の開始時間 (StartT)
2. Total Gate 及び Tail Gate の終了時間 (EndT)
3. Tail Gate 開始時間 (TailT)

である。これらは最適化を行うエネルギー領域において独立なパラメータと仮定している。よってあるパラメータの最適化を行う際は他の二つは固定している。高速中性子の後発事象をニュートリノ事象と仮定しており、その Cut Efficiency を ε_{sig} としている。高速中性子事象をバックグラウンドとして、その Cut Efficiency を ε_{bg} としている。また使用するデータに対して表6.4のカットを用いている。MP の定義は6.1.2節で求めたカット条件を用いている。

表 6.4: DoubleGate 法のプレセレクション

パラメータ	下限値	上限値	値
E_p [MeV]	3.5	10	-
E_d [MeV]	3.5	10	-
Δ Vertex [cm]	-	25	-
Δ Time [μ sec]	5	200	-
MP	-	-	1

ここでの定義として波形のピーク位置を 0 nsec としている。まず、

- TailT = 20 nsec
- EndT = 280 nsec

として StartT の最適値を評価した。図 6.6 の左図が StartT に対する Enhance 値を表している。この図から StartT の最適値は -4 nsec である。

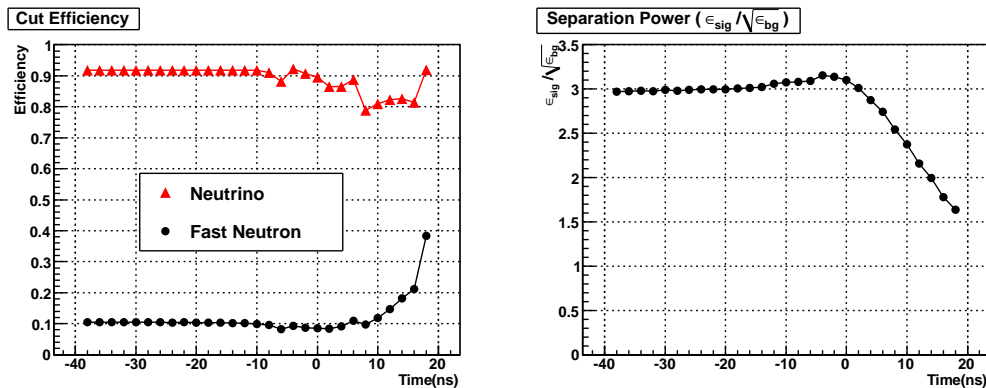


図 6.6: 左図が StartT に対する Cut Efficiency、右図が StartT に対する Enhance 値

次に、

6.1. 解析変数とカット条件

67

- StartT = -20 nsec
- EndT = 280 nsec

として TailT の最適値を評価した。図 6.7 の左図が TailT に対する Enhance 値を表している。この図から TailT の最適値は 20 nsec である。

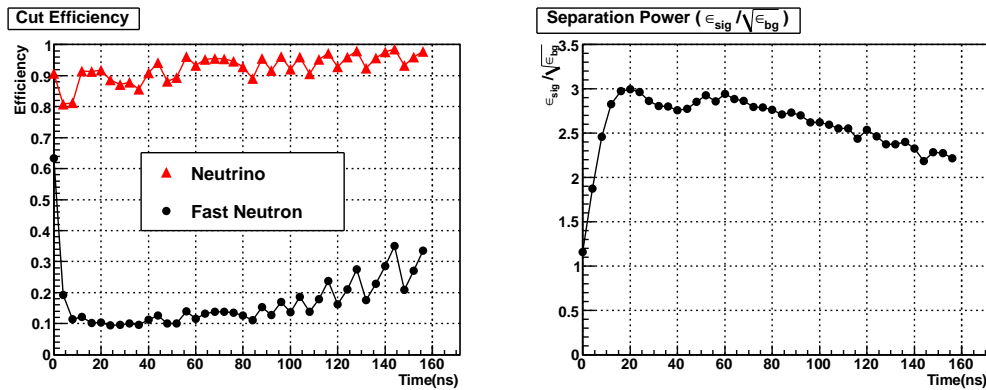


図 6.7: 左図が TailT に対する Cut Efficiency、右図が TailT に対する Enhance 値

また、

- StartT = -20 nsec
- TailT = 20 nsec

として EndT の最適値を評価した。図 6.8 の左図が EndT に対する Enhance 値を表している。この図から EndT の最適値は 280 nsec である。

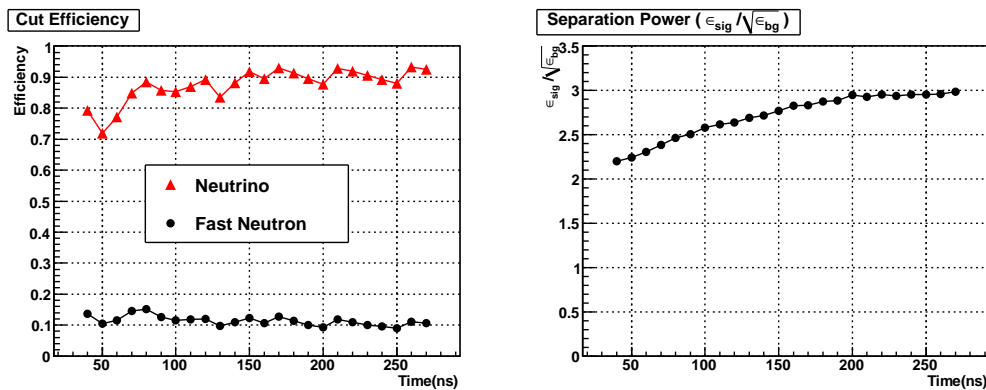


図 6.8: 左図が EndT に対する Cut Efficiency、右図が EndT に対する Enhance 値

DoubleGate 法における最適値は表 6.5 にまとめる。図 6.9 において左図に先発信号の TailQ/TotalQ の分布、右図に後発信号の TailQ/TotalQ の分布を示す。黒が Correlated バックグラウンド、赤が Accidental バックグラウンドである。後発信号及び Accidental バックグラウンドの先発信号は γ 線の事象であり、同じ位置にピークがある。Correlated バックグラウンドの先発信号における分布には二つのピークが有り、Mean 値が小さ

いものが γ 線 like な事象であり、Mean 値が大きいものが高速中性子 like な事象である。Enhance 値を図 6.10 に示す。Enhance 値を最大にする TailQ/TotalQ のカットラインの最適値は 0.215 である。このとき高速中性子の後発事象 80 %を残す場合、高速中性子の先発事象を 93 %除去できる。

表 6.5: DoubleGate 法の最適値

パラメータ	値
StartT [nsec]	-4
TailT [nsec]	20
EndT [nsec]	280

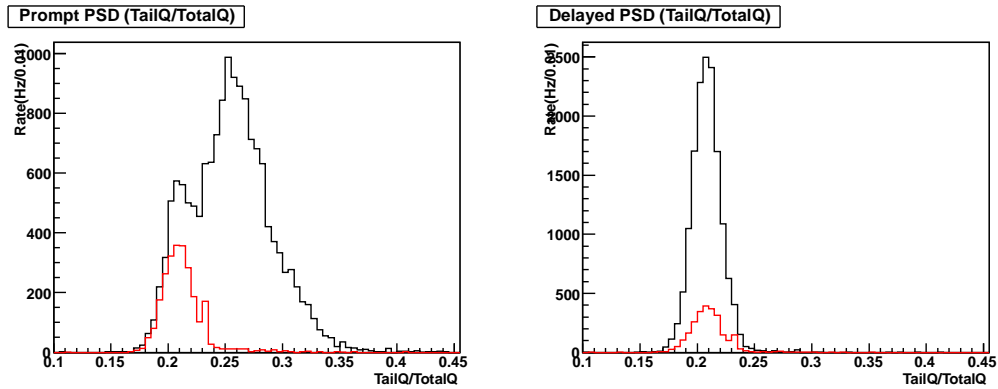


図 6.9: 左図が先発信号における TailQ/TotalQ 分布 (黒が Correlated バックグラウンド、赤が Accidental バックグラウンド)、右図が後発信号における TailQ/TotalQ 分布 (黒が Correlated バックグラウンド、赤が Accidental バックグラウンド)

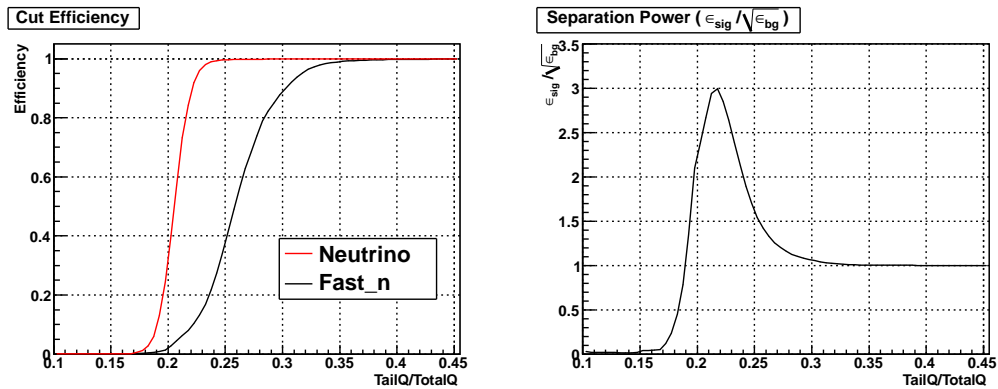


図 6.10: 左図が TailQ/TotalQ のカットラインに対する Cut Efficiency、右図が TailQ/TotalQ のカットラインに対する Enhance 値

6.1.3.2 χ^2 検定法

χ^2 検定では基準となるニュートリノ事象の先発信号 like な波形を作成し、測定波形と式 6.2 に従って χ^2 値を算出し比較する。ここで PH_{exp}^i は参照波形における i 番目の bin の波高 (期待値)、 PH_{data}^i は検定したい波形の i 番目の bin の波高 (測定値) である。また σ は期待値の RMS である。参照波形は Energy 領域ごとに作成され、参照される。

$$\chi^2 = \sum_i^{bin} \frac{(PH_{exp}^i - PH_{data}^i)^2}{\sigma_i^2(E)} \quad (6.2)$$

高速中性子事象の後発信号は Gd による γ 線のイベントが支配的であると考えられるので、参照波形は後発信号の波形を利用している。また表 6.6 のカット条件を適用した後のデータから参照波形を作成している。MP は 6.1.2 節で求めたカット条件を用いている。図 6.11 に Energy が 6 MeV のときの γ 線参照波形の各 bin の期待値と σ を示す。

表 6.6: 参照波形作成に用いたデータに適用したカット条件

パラメータ	下限値	上限値	値
E_p [MeV]	3.5	10	-
E_d [MeV]	3.5	10	-
Δ Vertex [cm]	-	25	-
Δ Time [μ sec]	5	200	-
MP	-	-	1

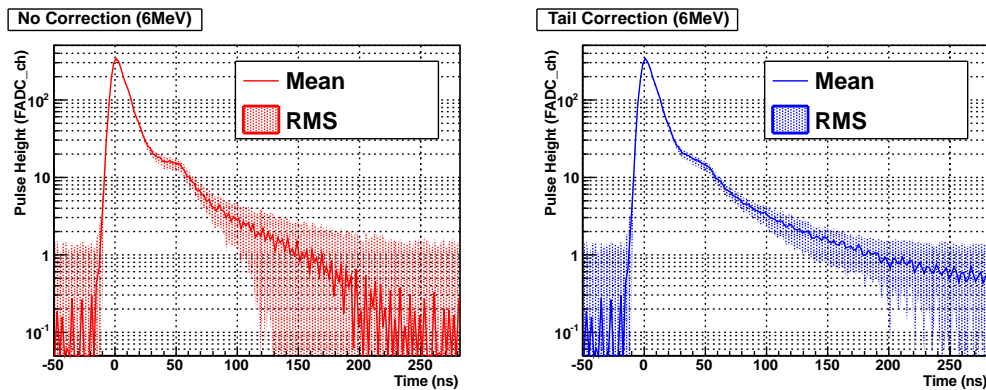


図 6.11: Energy が 6 MeV の γ 線参照波形の各 bin の期待値と σ (左図がテール部補正無、右図がテール部補正有)

χ^2 検定の最適化に用いるパラメータは

1. Fit 範囲の開始時間 (StartT)
2. Fit 範囲の終了時間 (EndT)

である。StartT と EndT は最適化を行うエネルギー領域において独立なパラメータと仮定しており、あるパラメータを最適化する際に他方は固定して一定の値を用いる。高速中性子の後発事象をニュートリノ事象と仮定してこの Cut Efficiency を ε_{sig} とし、高速中性子の先発事象をバックグラウンドとしてこの Cut Efficiency を ε_{bg} とする。使用するデータには Double Gate 法と同様のカット条件を用いる。EndT = 280 nsec と固定して StartT の最適値を評価した。図 6.12 の右図が StartT に対する Enhance 値である。この図から最適値は StartT = -14 nsec である。

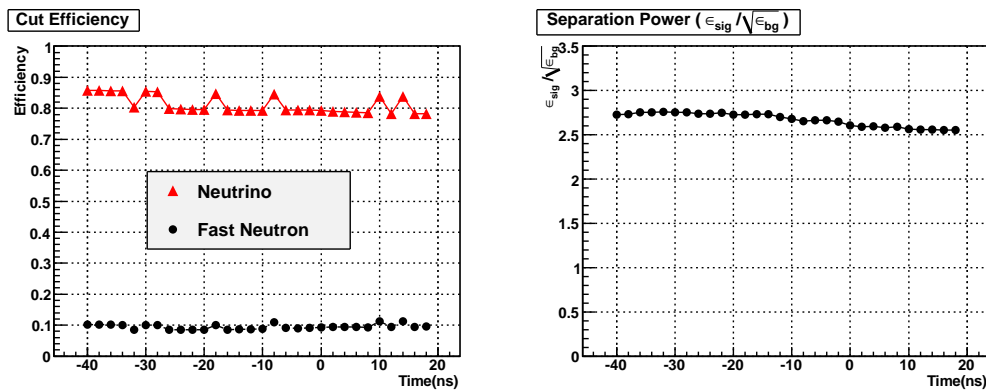


図 6.12: 左図は StartT に対する Cut Efficiency、右図は StartT に対する Enhance 値。

また、StartT = -20 nsec と固定して EndT の最適値を評価した。図 6.13 の右図が EndT に対する Enhance 値である。この図から最適値は EndT = 200 nsec である。 χ^2 検定の最適値を表 6.7 にまとめる。

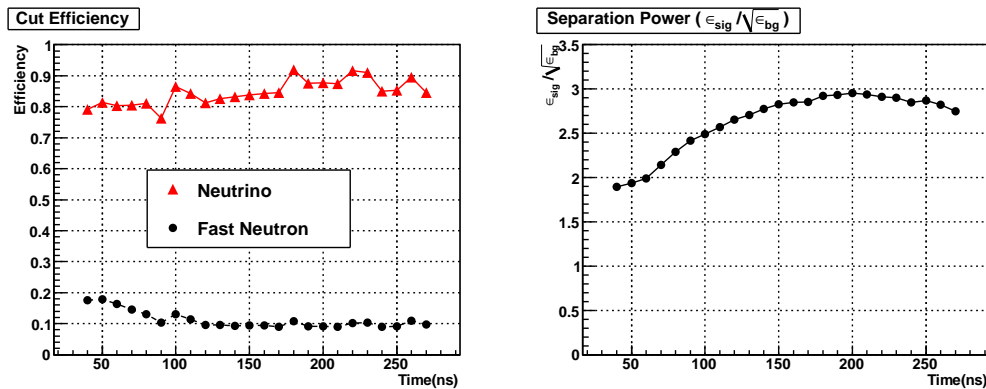


図 6.13: 左図は EndT に対する Cut Efficiency、右図は EndT に対する Enhance 値。

最適値を用いた χ^2 検定における χ^2/NDF の分布を図 6.14 の左図に示す。ここで黒は高速中性子の後発事象、赤は高速中性子の先発事象分布である。後発事象及び

表 6.7: χ^2 検定の最適値

パラメータ	値
StartT [nsec]	-14
EndT [nsec]	200

Accidental バックグラウンドの事象は γ 線の事象であるため χ^2/NDF は小さい値に分布する。Correlated バックグラウンドの先発事象では χ^2/NDF の大きい値まで分布が広がっている。Enhance 値を図 6.15 に示す。Enhance 値を最大にする χ^2/NDF のカットラインの最適値は 0.215 である。このとき高速中性子の後発事象 90 %を残す場合、高速中性子の先発事象を 93 %を除去できる。

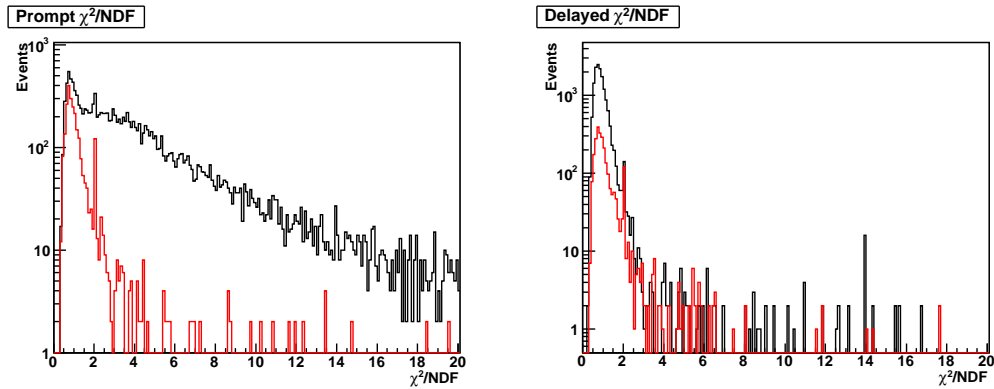


図 6.14: 左図は先発信号の χ^2/NDF 分布、右図は後発信号の χ^2/NDF 分布 (黒は高速中性子の後発事象、赤は高速中性子の先発事象)

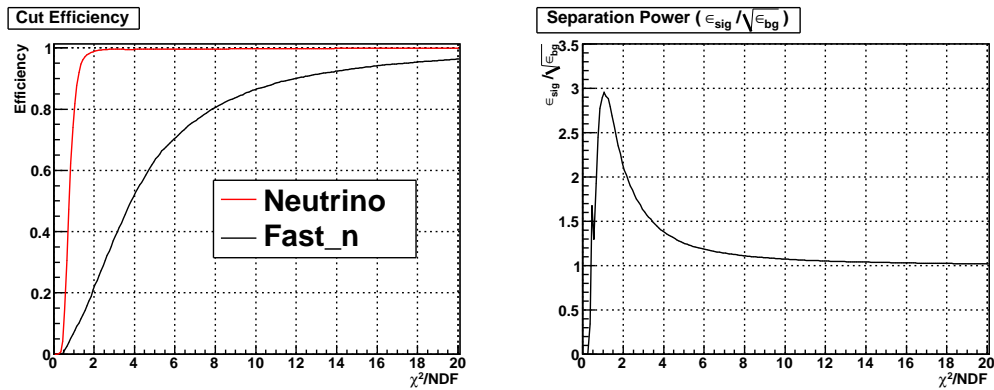


図 6.15: 左図が χ^2/NDF のカットラインに対する Cut Efficiency、右図が χ^2/NDF のカットラインに対する Enhance 値

6.1.4 Energy と Δ Vertex

図 5.5 の左上図においてニュートリノシミュレーションにおける E_p 分布は 10 MeV 程度以下に分布している。対して高速中性子の分布 (図 5.5 の左上図) と Accidental バックグラウンドの分布 (図 5.4 の左上図) は高エネルギー領域まで分布している。先発信号におけるエネルギーカットはニュートリノ事象とバックグラウンド事象の区別に有効であると考えられる。

の右上図と図??を比較して高速中性子事象の E_d はニュートリノ信号と区別できない分布をする。これはどちらの後発信号も Gd による中性子捕獲による信号が主体的であるためである。しかし、Accidental バックグラウンド事象においては宇宙線事象を中心とした高エネルギーの事象がある (図 5.4 の右上図)。後発信号におけるエネルギーカットはニュートリノ事象と宇宙線による Accidental バックグラウンド事象を区別するために用いる。

ニュートリノ事象は遅延同時計測法で組み合わせを作る場合、先発信号と後発信号の間の距離は Gd の濃度に依存した一定の範囲に収まると考えられる。一方 Accidental バックグラウンドは先発信号と後発信号は独立であるため、位置は無相関であると考えられる。このことから先発信号と後発信号の位置の差である Δ Vertex を定義し、主に Accidental バックグラウンドの除去に用いた。

Δ Vertex は光量を用いて定義している変数であるためエネルギーと Δ Vertex は相関があり、また Correlated バックグラウンドと Accidental バックグラウンドの比によっても変わる。従って、他の変数のカット条件の最適化を行った後に最適化を行った。本節ではニュートリノシミュレーションの結果から得られたニュートリノ事象を用いて計算したニュートリノ Cut Efficiency を ε_{sig} とし、Accidental バックグラウンドの Cut Efficiency を ε_{bg} としている。Energy と Δ Vertex を最適化するにあたり用いたパラメータは

1. 先発信号の Energy、後発信号の Energy の下限値
2. 先発信号の Energy の上限値
3. 後発信号の Energy の上限値
4. Δ Vertex の上限値

である。

図 6.16 は $3.0 < E_p < 6.3 \text{ MeV}$ 、 $3.0 < E_d < 8.7 [\text{MeV}]$ における E_p の下限値と Δ Vertex の相関であり、Z 軸は Enhance 値を表している。また図 6.17 の左上図は Δ Vertex の Cut Efficiency、左下図は左上図の最大値付近の拡大したものである。ここで赤はニュートリノシミュレーションであり、黒は Accidental バックグラウンドである。右図は Δ Vertex に対する Enhance 値である。パラメータを変動させ、求めた最適なカット条件を表 6.8 に記載する。

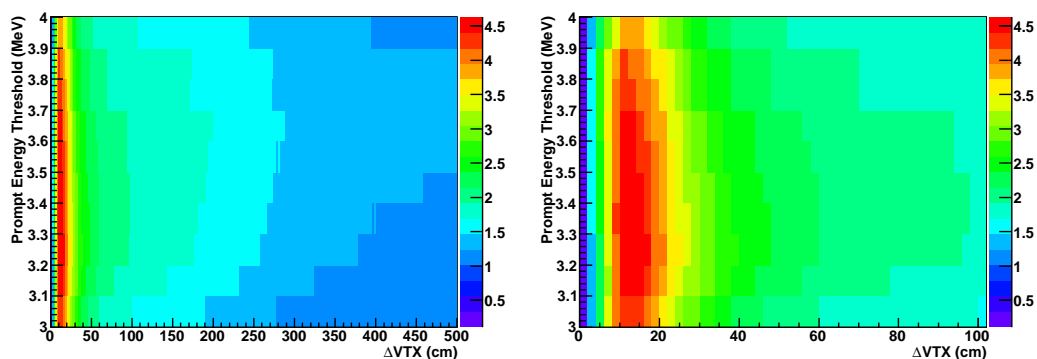


図 6.16: 左図は E_p の下限値と ΔVertex の相関の一例。右図は左図の最大値付近の拡大 ($E_p < 6.3[\text{MeV}]$ 、 $E_d < 9.0[\text{MeV}]$)

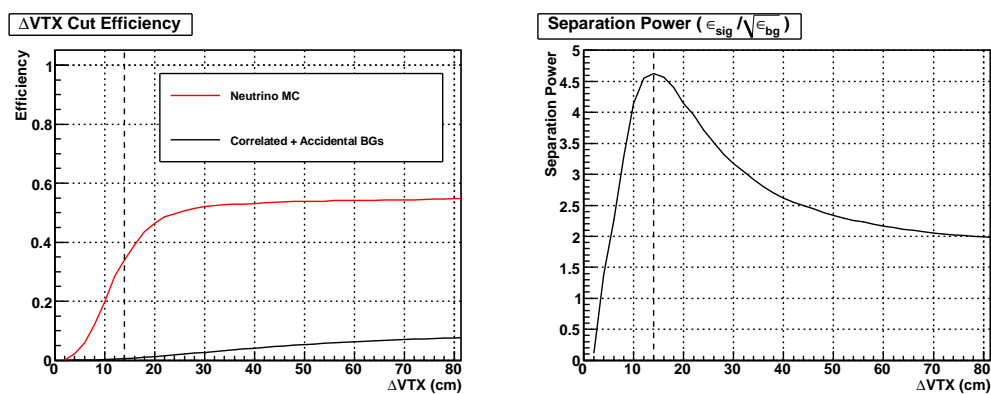


図 6.17: 左上図は ΔVertex の Cut Efficiency、左下図は左上図の拡大。右上図は ΔVertex の Enhance、右下図は右上図の拡大。

表 6.8: Double Gate 法 (テール補正有) の Energy と ΔVertex の最適値

パラメータ	下限値	上限値	値
先発信号の Energy [MeV]	3.2	6.3	-
後発信号の Energy [MeV]	3.2	8.7	-
ΔVertex [cm]	-	-	14
Enhance	-	-	4.41

6.2 ニュートリノセレクション解析のまとめ

6.2.1 解析変数のカット条件のまとめ

6.1節で求めた解析変数の最適なカット条件を表 6.9 にまとめる。また最適化した MP 定義について表 6.10 に記載する。

各波形弁別法における最適 Fit 範囲を表 6.11 にまとめる。また各波形弁別法における Energy 及び ΔVertex の最適化したカット条件を表 6.12 にまとめる。6.1.3 節ではテール補正有の波形弁別法を例に最適化の説明をしているが、同様の方法でテール補正無の最適値を求めている。

表 6.9: 解析変数の最適値

パラメータ	下限値	上限値
ΔTime [μsec]	-	180

表 6.10: MP に関するパラメータの最適値

パラメータ	最適値
Post time [μsec]	200
Pre time [μsec]	200
$E_{\text{threshold}}$ [MeV]	3

表 6.11: 各波形弁別法の Fit 範囲の最適値 (ピークを 0 [nsec] と定義)

波形弁別法	StartT [nsec]	EndT [nsec]	TailT [nsec]	Cut line
Double Gate 法	-4	16	160	$\text{TailQ}/\text{TotalQ} < 0.258$
Double Gate 法 (テール補正)	-4	20	280	$\text{TailQ}/\text{TotalQ} < 0.228$
χ^2 検定法	-14	140	-	$\chi^2/\text{NDF} < 1.06$
χ^2 検定法 (テール補正)	-14	200	-	$\chi^2/\text{NDF} < 1.16$

表 6.12: 各波形弁別法の Energy 及び Δ Vertex の最適値

波形弁別法	先発信号の Energy 下限値 [MeV]	先発信号の Energy 上限値 [MeV]	後発信号の Energy 下限値 [MeV]	後発信号の Energy 上限値 [MeV]	Δ Vertex [cm]
Double Gate 法	3.2	6.3	3.2	9.0	16
Double Gate 法 (テール補正)	3.2	6.3	3.2	8.7	14
χ^2 検定法	3.2	7.9	3.2	9.0	16
χ^2 検定法 (テール補正)	3.2	6.3	3.2	8.7	12

6.2.2 波形解析の評価

高速中性子事象の先発信号を高速中性子事象の波形、後発信号を γ 線事象の波形とした場合の検出器における波形弁別法ごとの Efficiency Curve を図 6.18 に示す。赤は Double Gate 法、青は χ^2 検定である。破線はテール補正無、実線はテール補正有である。参考のためにバイアル測定における酸素濃度 0.2 mg/l の場合の Efficiency Curve を黒の実線で表示している。テールの補正により PSD 能力の向上が確認できた。しかし、バイアル測定と比較すると検出器における PSD 能力は低い状態である。この PSD 能力の差は今後さらに調査が必要な課題である。

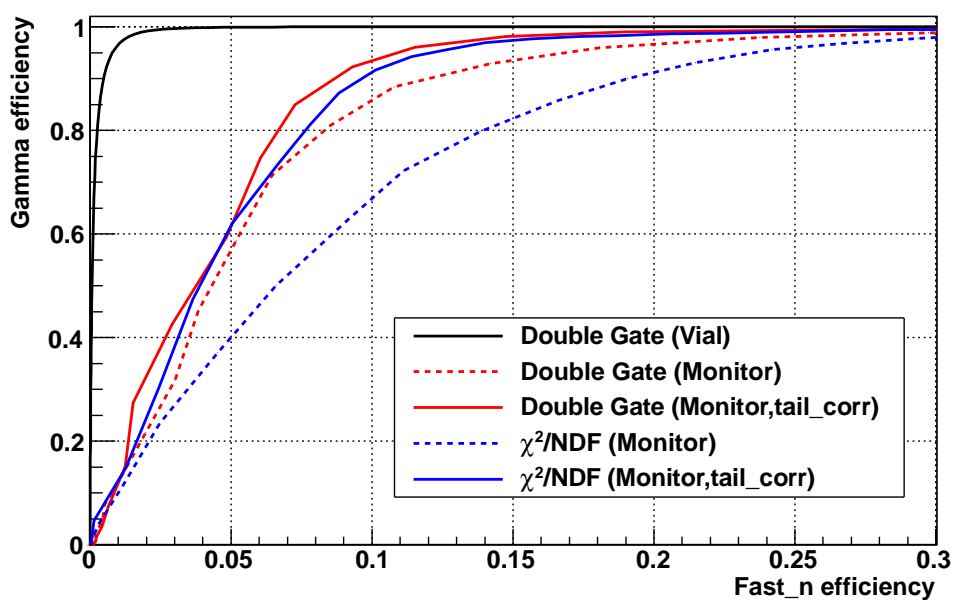


図 6.18:

第7章 ニュートリノ検出能力

7.1 目的

この章では、東北大学において測定したバックグラウンドの解析結果とニュートリノのモンテカルロシミュレーション結果から見積もったニュートリノ量を用いてニュートリノに対するバックグラウンド量を算出する。6.2節でまとめた最適化したカット条件と各波形弁別法のニュートリノ検出性能の評価を行う。ニュートリノシミュレーションの設定は4.3と同様である。

7.2 各波形弁別法における解析結果

以前の解析法による結果を表7.1に示す。

表 7.1: 以前の解析結果 [33]

Cut condition	Correlated バックグラウンド rate [/day]	Accidental バックグラウンド rate [/day]	Total バックグラウンド rate [/day]	Neutrino rate [/day]
$3.5 < E_p < 6.0$ [MeV] $3.5 < E_d < 10$ [MeV] $5.0 < \Delta\text{Time} < 100$ [μsec] $\Delta\text{Position} < 25$ [cm]	791 \pm 14	187 \pm 6.7	978 \pm 13	21.6
tailQ/totalQ<0.2	95.9 \pm 1.7	158 \pm 4.8	254 \pm 5.1	18.3
S/N	1/6.3	1/10.3	1/13.9	-

6.2節に記載した最適値を用いて各波形弁別法における解析結果を記載する。表7.2がDouble Gate法における解析結果、表7.3がDouble Gate法(テール補正有)における解析結果、表7.4が χ^2 検定法における解析結果、表7.5が χ^2 検定法(テール補正有)における解析結果である。表における括弧内の数値はカットによって減った割合、すなわちCut Efficiencyを表す。評価におけるエラーは統計エラーを見積もっている。

S/Nを比較し全ての条件で以前の結果から向上している。これはカット条件の最適化が全てに影響していると考えられる。また波形テール補正によるS/Nの向上が見られている。テール補正有のDouble Gate法では以前の解析結果と比較してCorrelatedバックグラウンドのS/Nが2.1倍程度向上している。またAccidentalバックグラウンドでは1.3倍程度向上している。波形解析の最適化によってCorrelatedバックグ

ラウンド除去能力が向上したと考えられる。また解析変数のカット条件の最適化から Accidental バックグラウンド除去能力が向上したと考えられる。

表 7.2: Double Gate 法における解析結果

Cut Condition	Correlated バックグラウンド rate [/ <i>day</i>]	Accidental バックグラウンド rate [/ <i>day</i>]	Total バックグラウンド rate [/ <i>day</i>]	Neutrino rate [/ <i>day</i>]
$\Delta\text{Time} < 200$ [μsec]	6940.35 ± 71.5	17615 ± 46.2	24555 ± 54.6	82.3
MP=1	5203.9 ± 67.8 (0.750)	16367 ± 44.6 (0.929)	21571 ± 51.2 (0.878)	78.6 (0.955)
TailQ/TotalQ < 0.258	817.5 ± 60.4 (0.157)	14624 ± 42.1 (0.894)	15442 ± 43.3 (0.716)	73.0 (0.929)
$3.2 < E_p < 6.3$ [MeV] $3.2 < E_d < 9.0$ [MeV] $\Delta\text{Vertex} < 16$ [cm]	112.8 ± 6.7 (0.138)	129.8 ± 4.0 (0.00888)	242.6 ± 5.4 (0.00157)	28.7 (0.393)
S/N	1/3.9	1/4.5	1/8.5	-

表 7.3: Double Gate 法 (テール補正有) における解析結果

Cut Condition	Correlated バックグラウンド rate [/ <i>day</i>]	Accidental バックグラウンド rate [/ <i>day</i>]	Total バックグラウンド rate [/ <i>day</i>]	Neutrino rate [/ <i>day</i>]
$\Delta\text{Time} < 200$ [μsec]	6940.35 ± 71.5	17615 ± 46.2	24555 ± 54.6	82.3
MP=1	5203.9 ± 67.8 (0.750)	16367 ± 44.6 (0.929)	21571 ± 51.2 (0.878)	78.6 (0.955)
TailQ/TotalQ < 0.228	362.5 ± 55.9 (0.0697)	12674 ± 39.2 (0.774)	13037 ± 39.8 (0.604)	72.6 (0.923)
$3.2 < E_p < 6.3$ [MeV] $3.2 < E_d < 8.7$ [MeV] $\Delta\text{Vertex} < 16$ [cm]	44.2 ± 5.0 (0.122)	82.1 ± 3.2 (0.00648)	126.3 ± 3.9 (0.00969)	24.5 (0.337)
S/N	1/1.8	1/3.4	1/5.2	-

一例としてテール補正有の Double Gate 法の各解析変数のカット条件の最適化の結果を図 A.3 に示す。左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は ΔTime の分布、右下図は ΔVertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布である。ここで黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC である。

表 7.4: χ^2 検定法における解析結果

Cut Condition	Correlated バックグラウンド rate [/day]	Accidental バックグラウンド rate [/day]	Total バックグラウンド rate [/day]	Neutrino rate [/day]
$\Delta\text{Time} < 200$ [μsec]	6940.35 \pm 71.5	17615 \pm 46.2	24555 \pm 54.6	82.3
MP=1	5203.9 \pm 67.8 (0.750)	16367 \pm 44.6 (0.929)	21571 \pm 51.2 (0.878)	78.6 (0.955)
$\chi^2/NDF < 0.106$	537.6 \pm 40.8 (0.103)	6603.9 \pm 28.3 (0.403)	7141.5 \pm 29.4 (0.331)	62.7 (0.798)
$3.2 < E_p < 7.9$ [MeV] $3.2 < E_d < 9.0$ [MeV] $\Delta\text{Vertex} < 16$ [cm]	155.5 \pm 6.9 (0.289)	117.1 \pm 3.8 (0.0177)	272.6 \pm 5.8 (0.0382)	26.7 (0.426)
S/N	1/5.8	1/4.4	1/10.2	-

表 7.5: χ^2 検定法 (テール補正有) における解析結果

Cut Condition	Correlated バックグラウンド rate [/day]	Accidental バックグラウンド rate [/day]	Total バックグラウンド rate [/day]	Neutrino rate [/day]
$\Delta\text{Time} < 200$ [μsec]	6940.35 \pm 71.5	17615 \pm 46.2	24555 \pm 54.6	82.3
MP=1	5203.9 \pm 67.8 (0.750)	16367 \pm 44.6 (0.929)	21571 \pm 51.2 (0.878)	78.6 (0.955)
$\chi^2/NDF < 0.116$	398.2 \pm 43.8 (0.0765)	7719.4 \pm 30.6 (0.472)	8117.5 \pm 31.4 (0.376)	72.0 (0.916)
$3.2 < E_p < 6.3$ [MeV] $3.2 < E_d < 8.7$ [MeV] $\Delta\text{Vertex} < 16$ [cm]	60.1 \pm 5.2 (0.151)	82.4 \pm 3.2 (0.0107)	142.4 \pm 4.2 (0.0175)	24.3 (0.338)
S/N	1/2.5	1/3.4	1/5.9	-

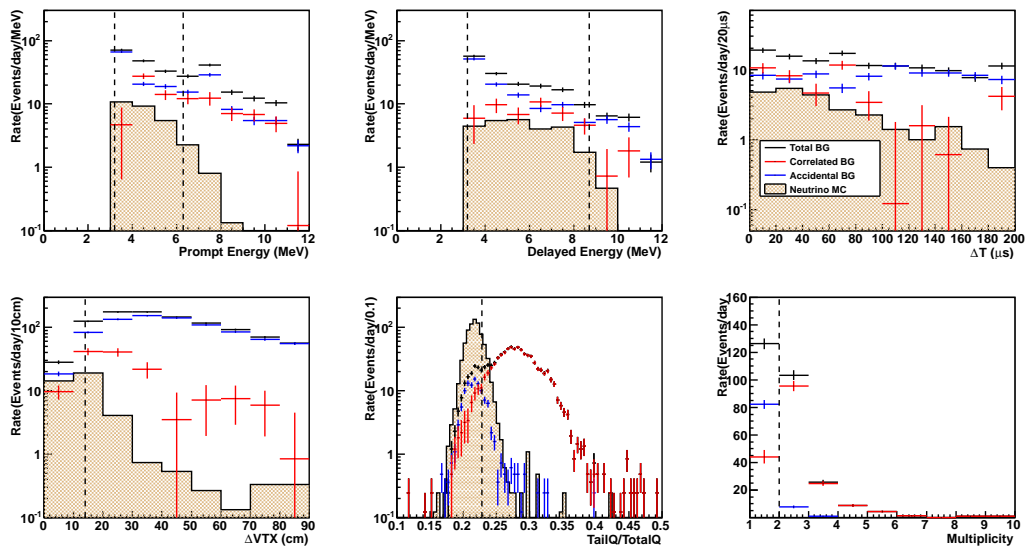


図 7.1: テール補正有の Double Gate 法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は ΔTime の分布、右下図は ΔVertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)

各波形弁別法の解析結果を表 7.6 にまとめる。S/N を比較して現状のセットアップではテール補正有の Double Gate 法が最もバックグラウンド除去能力がある。

表 7.6: 解析手法別結果

解析手法	Total バックグラウンド rate [<i>/day</i>]	Neutrino rate [<i>/day</i>]	S/N
Previous study	254±5.1	18.3	1/13.9
Double Gate 法	242.6±5.4	28.7	1/8.5
Double Gate 法 (テール補正有)	126.3±3.9	24.5	1/5.2
χ^2 検定法	272.6±5.8	26.7	1/10.2
χ^2 検定法 (テール補正有)	142.4±4.2	24.3	1/5.9

7.3 S/N Study

現在の検出器で 1.1.1 節の計算結果をもとに原子力発電所の出力に対して原子炉ニュートリノの検出感度を見積もった。検出感度を算出する際に、

- 原子炉出力 3 *GWth*
- 原子炉が停止している際の *Deta* を 30 日間分測定済み
- 原子炉の中心から 25 *m* 離れた場所で測定

を仮定した。

この仮定のもと、改良検出器での測定時間に対する原子炉ニュートリノ観測のための信頼水準 (confidence level) n_σ を算出した。 n_σ は次式で与えられる。

$$n_\sigma = \frac{S}{\sqrt{(S + N_1) + N_2}} \quad (7.1)$$

ここで S はイベントセレクション後のニュートリノの事象数であり、 N_1 は原子炉稼働中のバックグラウンドの事象数、 N_2 は原子炉停止中のバックグラウンドの事象数である。さらにニュートリノの頻度を R_ν /*day*、バックグラウンドの頻度を R_{BG} 、そして原子炉の ON の測定時間を D *days* とすると、

$$n_\sigma = \frac{DR_\nu}{\sqrt{DR_\nu + (D + 30)R_{BG}}} \quad (7.2)$$

と変形できる。この式に測定したバックグラウンドの頻度とシミュレーションで算出したニュートリノ事象頻度を代入する事で信頼水準を求めることができる。

図 7.2 に信頼水準 2σ でのニュートリノ観測にかかる測定日数と原子炉熱出力の関係を示した。本研究以前の解析を用いた結果が黒線である。赤が Double Gate 法、青が χ^2 検定法である。本研究では FlashADC を 32ch 用いてテールの補正を行っている。赤、青それぞれ網掛け線がテール補正無、実線がテール補正有である。この結果から本研究の条件においてはテール補正有の Double Gate 法が最も分離能力が高いことが示された。テール補正によって波形弁別能力が向上したことから、FlashADC の性能向上によってニュートリノ検出能力が向上する可能性が示唆された。以前の解析手法では信頼水準 2σ で原子炉の ON-OFF を確認するために 4 日必要であったのに対し、本研究の解析手法では 1 日で可能となった。

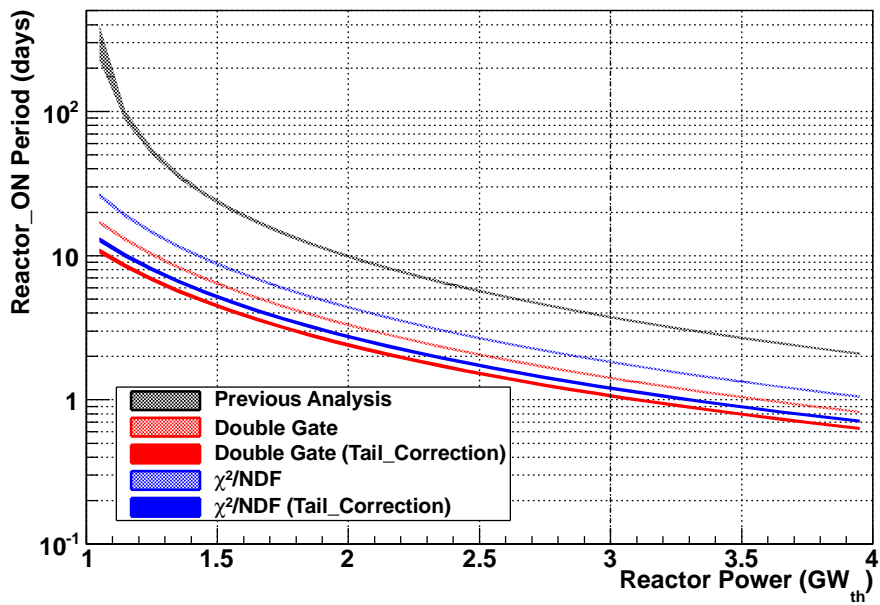


図 7.2: 信頼水準 2σ でのニュートリノ観測にかかる測定日数と原子炉熱出力の関係

第8章 まとめと今後

8.1 まとめ

第2章で液体シンチレータの酸素濃度の低下と PSD 能力の確認ができた。第7章の結果から波形テール部補正による波形弁別能力の向上が確認できた。このことから将来的に高分解能の FlashADC を使用することで、検出器のニュートリノ検出性能が向上する可能性が示唆された。現状ではテール補正後の Double Gate 法が最もバックグラウンド除去能力がある。

3 *GWth* の原子炉において信頼水準 2σ で1日程度の測定でニュートリノを検出できる能力が示唆された。

8.2 今後

検出器とバイアル測定の PSD 能力に差があり、その原因について調べる必要がある。波形分解能の高い FlashADC を導入することで波形弁別能力の向上ができると考えられる。

PMT の本数を 16 本から 24 本に増やし、光量を増加することによって Energy 分解能及び波形弁別能力の向上させる改良案がある。

その他に検出器 Buffer 層を液体シンチレータとすることによって Accidental バックグラウンドの除去を行う改良案がある。この方法においてシミュレーションを用いた結果では Accidental バックグラウンドの 75% を除去できる可能性が示唆されている。今後の改良として実際に検出器 Buffer 層に液体シンチレータを入れ、バックグラウンド除去の評価を行う必要がある。

謝辞

ニュートリノ科学研究センターという恵まれた環境の中で研究できたことは私にとって大変有意義でありました。

指導教官である末包准教授には研究の方針や物理について、また研究内容の発表についてなどさまざまな場面で指導していただきました。修士論文としてまとめることができたのも末包准教授のおかげであると考えております。

また研究員の古田氏には実験及びデータ解析をするにあたり、親身にご協力をしていただき大変感謝しております。

Double Chooz Collaborator の皆様には実験のセットアップを構築するために機材をお借りいたしました。皆様のご協力無しにはデータ取得及び結果をまとめることはできなかったと思います。また実験を実行するにあたり、ニュートリノ科学研究センターの技術職員の方々には大変多くのご協力及びアドバイスをいただき、思い通りのセットアップを作成できました。

その他の同じ研究室の皆様にはさまざまな場面で励ましを受け、協力をしていただき、充実した研究生生活を送ることができました。

大学院生活及び修士論文を作成するにあたり、多くの方々に支えていただきました。この場を借りて心より感謝いたします。

付録A 改良検出器の解析におけるコントロールプロット

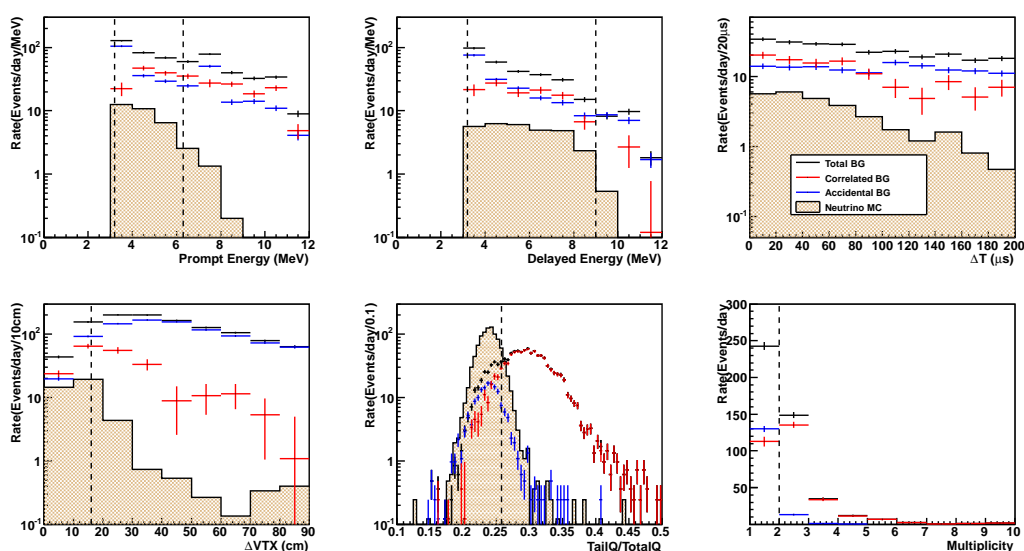


図 A.1: テール補正無の Double Gate 法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)

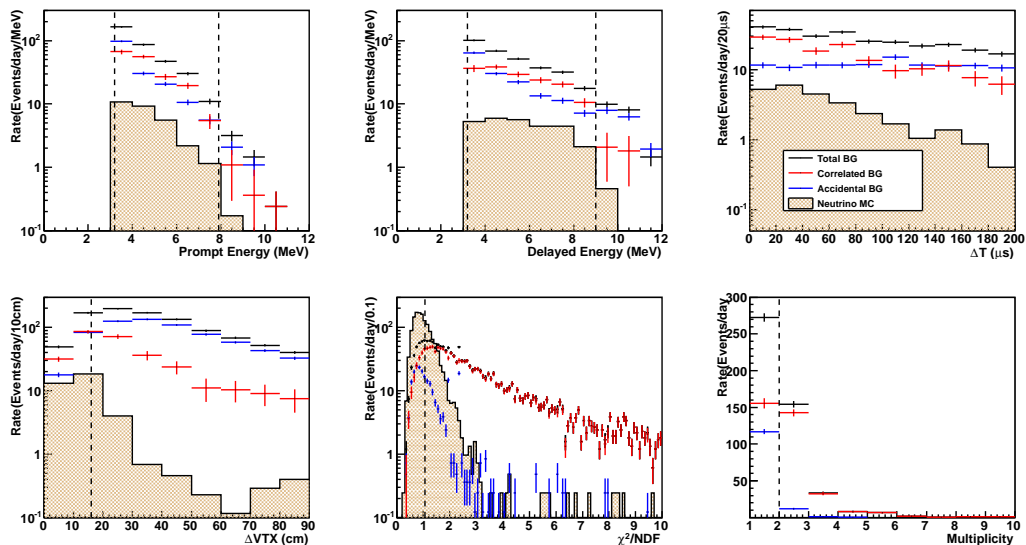


図 A.2: テール補正無の χ^2 検定法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)

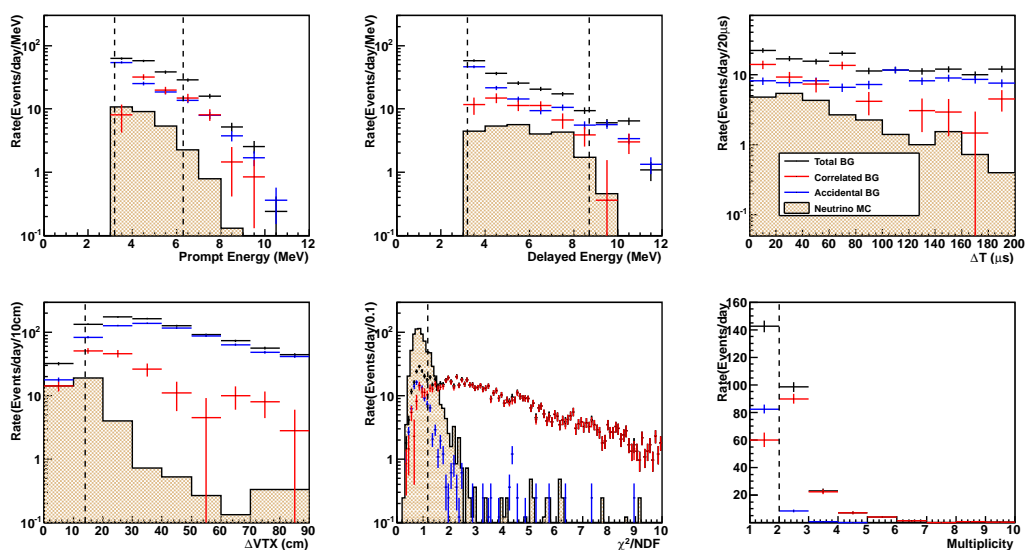


図 A.3: テール補正有の χ^2 検定法解析結果 (左上図は E_p 分布、中央上図は E_d 分布、右上図は Δ Time の分布、右下図は Δ Vertex 分布、中央下図は TailQ/TotalQ 分布、右下図は Multiplicity 分布、黒は Total バックグラウンド、赤は Correlated バックグラウンド、青は Accidental バックグラウンド、ベージュがニュートリノ MC)

付録B Accidentalバックグラウンド除去方法のMCスタディによる評価

Buffer層液体シンチレータ化による Accidentalバックグラウンド除去の定量的評価について記述する。本研究のニュートリノセレクション範囲に残る Accidentalバックグラウンドは宇宙線ミュオン事象が全体の半分程度と考えられる。宇宙線を同定することが可能であれば Accidentalバックグラウンドの低減ができると考えられる。この取り組みの目的やセットアップについては以前の研究において詳細に記載されているため [21] を参照していただきたい。本付録ではその後の取り組みについて言及する。

B.1 宇宙線事象同定方法

宇宙線事象は検出器に入射する際必ず Buffer層を通過する。検出器においてニュートリノ事象は主にターゲット層で反応するが、宇宙線事象は Buffer層においても十分反応する。この特性を用いて宇宙線事象を同定する取り組みを行った。同定方法は Buffer層にニュートリノターゲットと異なる特性を持った液体シンチレータを用いて波形弁別によって行う。

B.1.1 Buffer層用液体シンチレータ候補

Buffer層に用いる液体シンチレータには

- ターゲット液体シンチレータと比較し波形が広い
- ターゲット液体シンチレータと比較して発光量が小さい

という条件が要求される。波形を広くする理由は Buffer層を反応した事象を波形弁別法によって除去することを目的としている。また検出器の Single Rateの上昇を防ぐために発光量が小さいことが必要である。

本付録の取り組みでは Buffer層用液体シンチレータ候補としてパラフィンオイル (N12D) +PPO を用いており、PPO濃度の異なる試料を作成した (0.3, 1.0, 1.5, 3.0, 4.0, 4.8w%)。

B.1.2 Buffer層用液体シンチレータ候補の特性

バイアル測定によって Buffer層用液体シンチレータ候補の特性を測定した。バイアル測定のセットアップは [21] を参照していただきたい。

図 B.1 は Buffer 層用液体シンチレータ候補の電荷分布である。参考のために黒の実線でターゲット液体シンチレータの分布を記載している。相対光量においてターゲット液体シンチレータは約 73 %anthracene であるのに対し、図 B.2 の結果から Buffer 層用液体シンチレータ候補では発光量が小さいことを確認した。

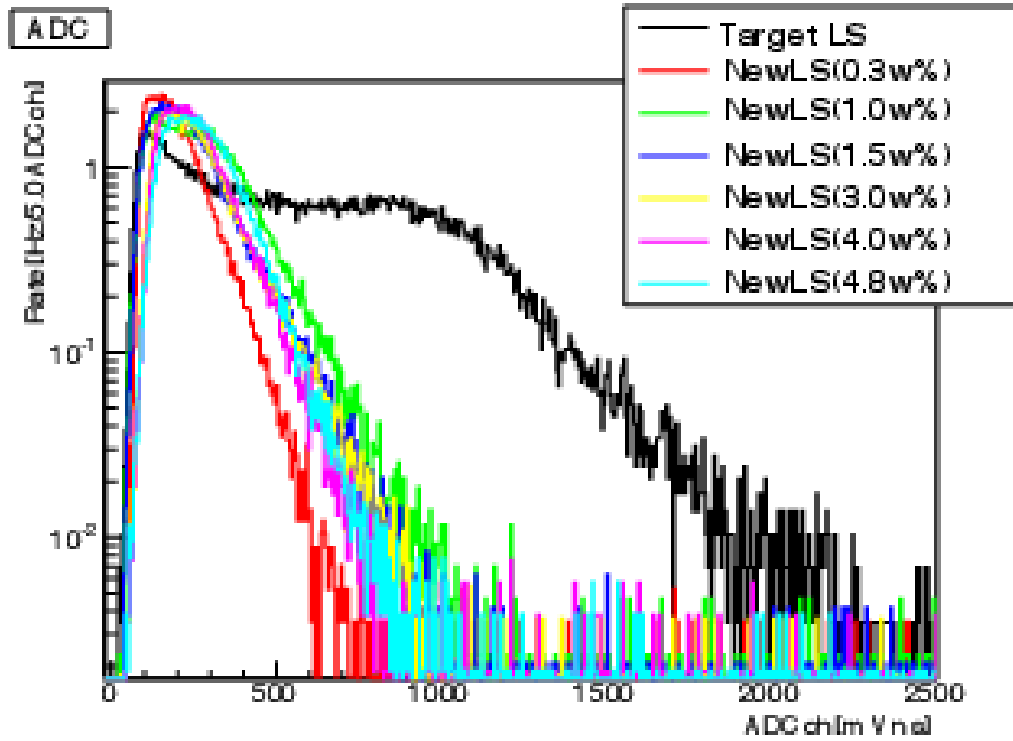


図 B.1: Buffer 層用液体シンチレータ候補の電荷分布

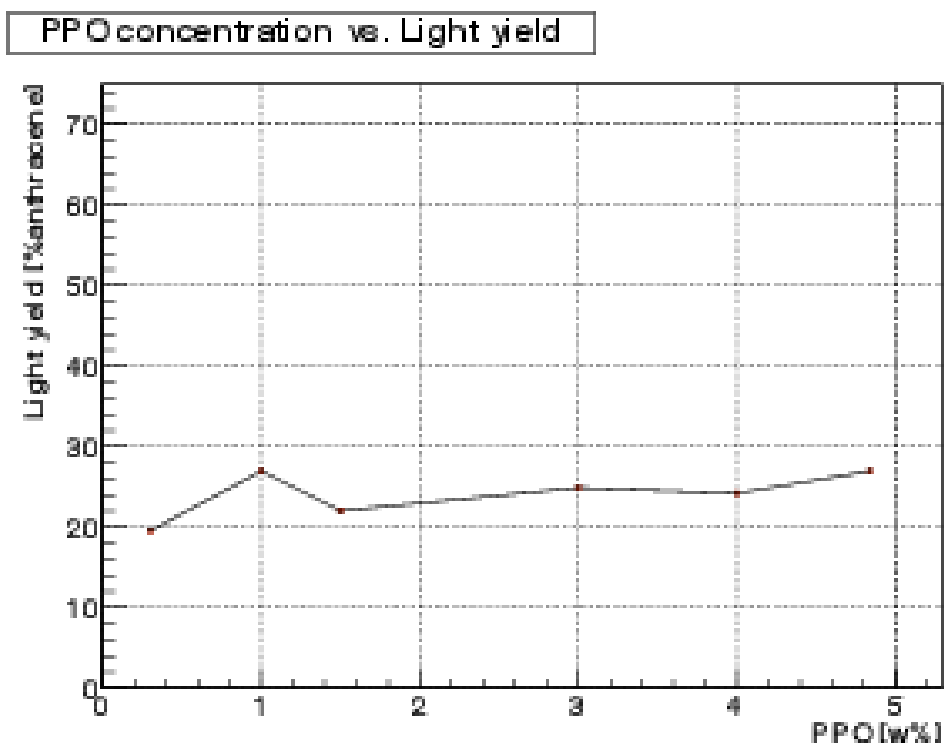


図 B.2: Buffer 層用液体シンチレータ候補の相対光量

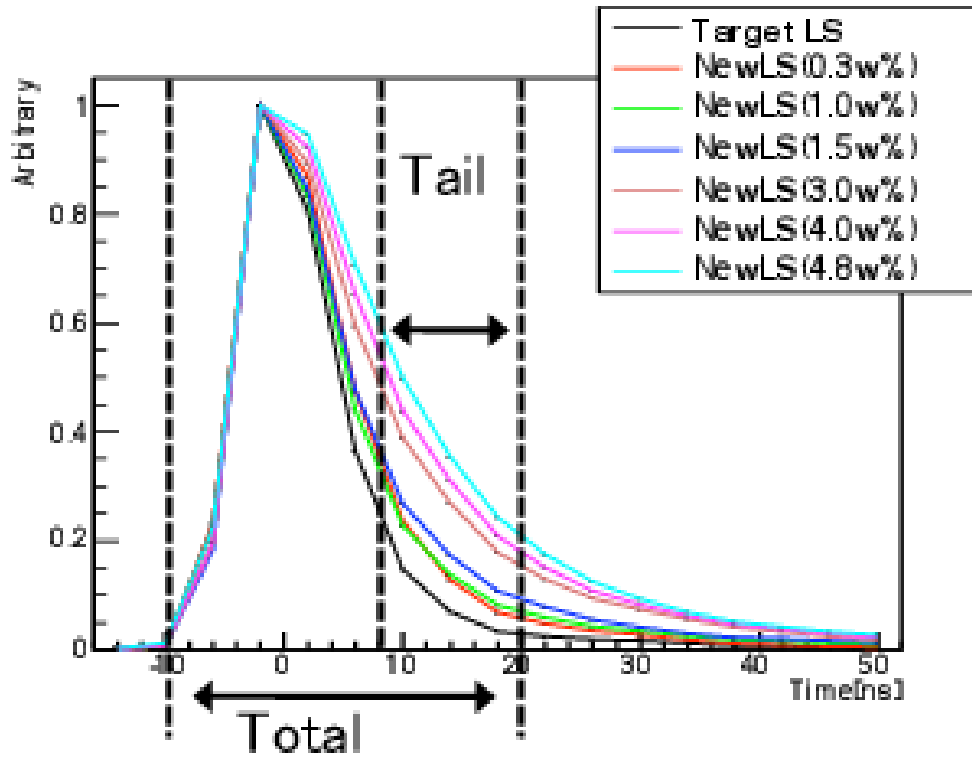


図 B.3: Buffer 層用液体シンチレータ候補の発光波形

図 B.3 から PPO 濃度が上昇するほどに波形テール部の割合が増えていく傾向を確認した。

図 B.4 から PPO 濃度 3.0 w% 以上ではターゲット液体シンチレータと Buffer 層用液体シンチレータの波形において十分な分離が見られている。PPO 濃度が低いほどコストを抑えられるため、PPO 濃度 3.0 w% の Buffer 層用液体シンチレータの性能を用いてシミュレーションによる評価を行った。

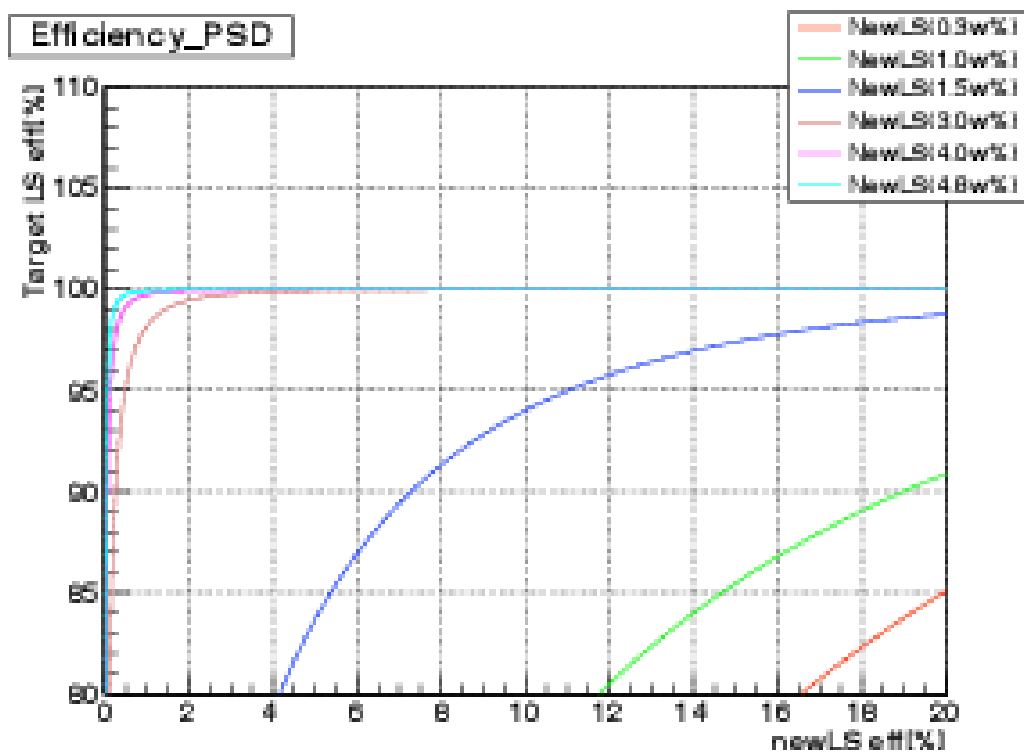


図 B.4: ターゲット液体シンチレータと Buffer 層用液体シンチレータ候補の分離比較

B.2 結果

宇宙線分離能力をシミュレーションによって評価した。シミュレーションにおけるシンチレーション光再現の概要及び設定パラメータは [21] を参照していただきたい。

ニュートリノは熱出力以外は本編と同様の設定であり、ここでは熱出力 1 GWth と設定している。また宇宙線ミュオンは検出器中心から 1.1 m 上空に直径 13 m の円盤を仮定し、その円盤から発生させる。ミュオンジェネレーターにおける入射方向及び運動量分布は [34]、[35] の文献に従った。

宇宙線ミュオン事象とニュートリノ事象の波形弁別には Double Gate 法を用いており、その定義は図 B.3 に示すように

- Total Gate : ピークより前 10 nsec から後 20 nsec
- Tail Gate : ピークより後 8 nsec から後 20 nsec

である。

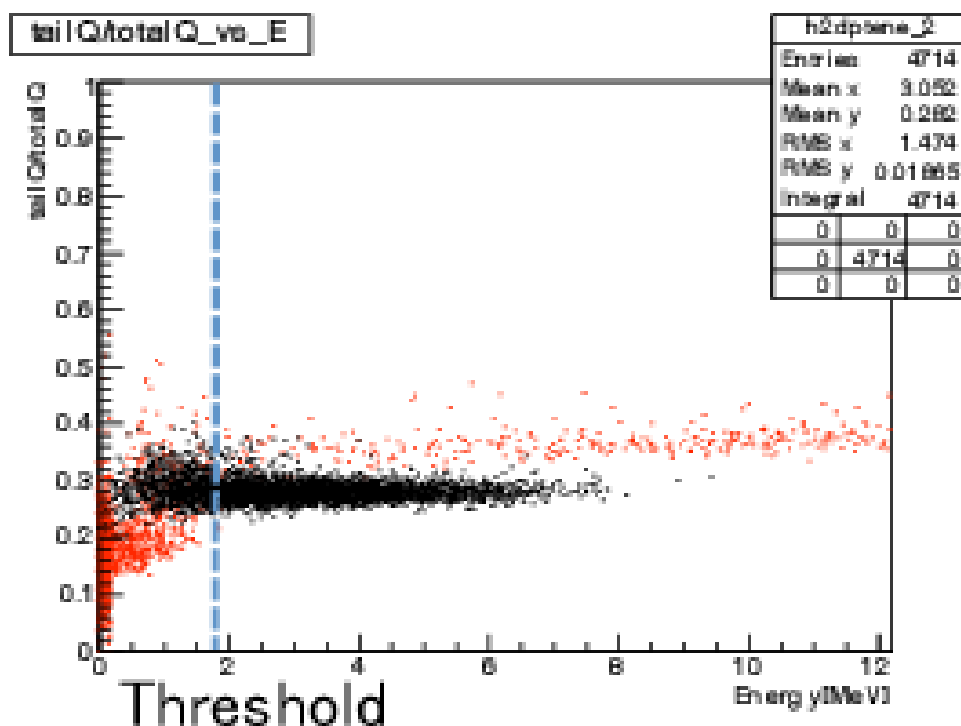


図 B.5: ニュートリノシミュレーションと宇宙線ミュオン事象におけるエネルギーと TailQ/TotalQ の相関

図 B.5 の 1.8 MeV 以上の分布を用いて Cut Efficiency のプロット (図 B.6) を作成した。この結果から 1.8 MeV 以上の事象においてニュートリノ事象を 100% 残す場合、宇宙線事象を 99.5% 以上除去できることが示唆される。先発信号と後発信号それぞれで宇宙線事象は半分程度存在している。それぞれの信号で宇宙線事象を 99.5% 同定できた場合、先発信号と後発信号の組み合わせである Accidental バックグラウンドはおよそ 75% 除去される可能性が示唆された。

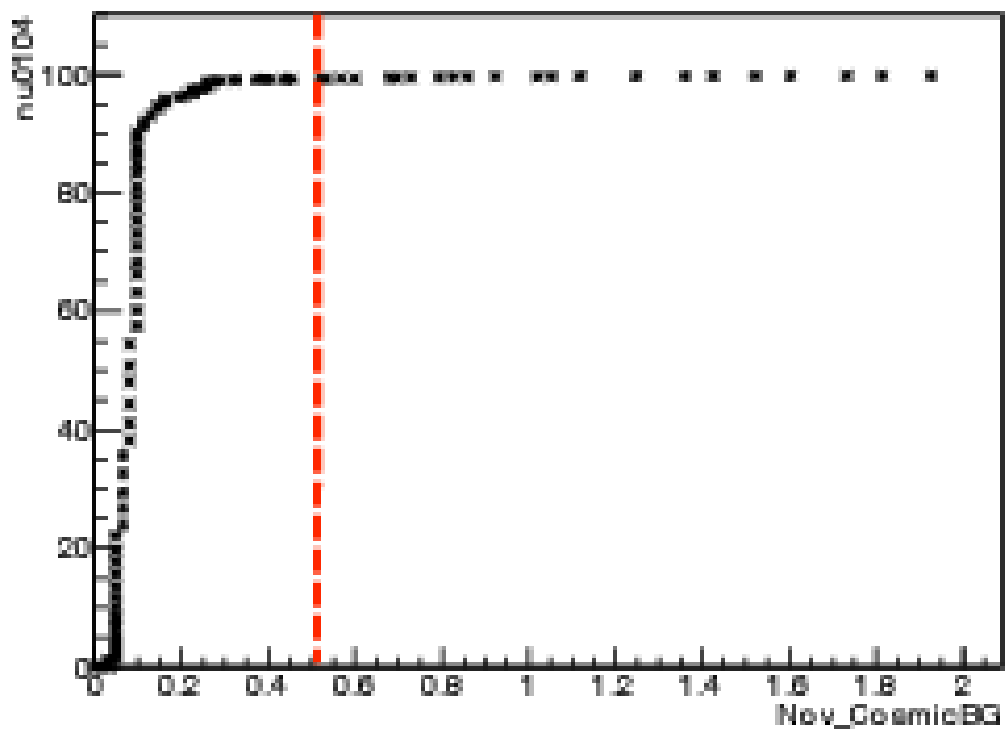


図 B.6: ニュートリノシミュレーションと宇宙線ミュオン事象における Efficiency

付録C データ取得用マイコンセットアップ

本研究では酸素濃度計及び溶存酸素濃度計のデータ取得において 8bit マイコンを用いたインターフェイスを作成し、PC によるデータ取得を可能にしている。本研究で用いた 8bit マイコンは Japanino (大人の科学 Vol.27 テクノ工作セットの付録：図 C.1) である。

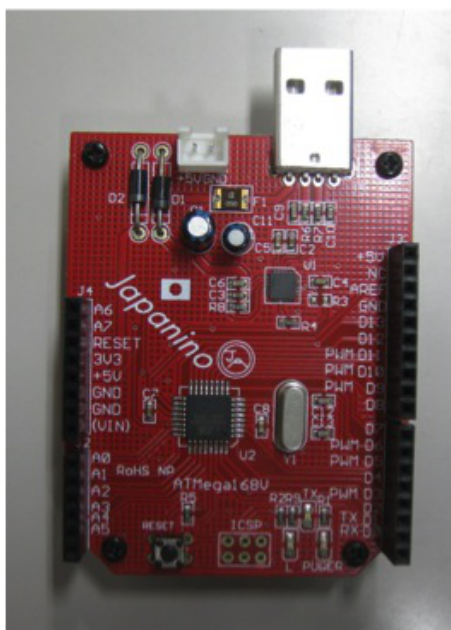


図 C.1: 使用した 8bit マイコン (Japanino)

マイコンでデータ取得するためには濃度計による信号は小さい。そのため、信号を増幅するアンプの作成を行っている。マイコンに用いたアンプの回路図は図 C.2 に記載する。ここで計装アンプ (AD620 : アナログ・デバイセズ) を使用している。

アンプ回路のゲインを $Gain$ とし、回路中の抵抗 R_G を用いて式 C.1 が成り立つ。

$$Gain = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1 \quad (C.1)$$

マイコンの制御には Arduino 言語による Arduino ソフトウェアを用いている。このソフトウェアを用いてデータ読み込み及び PC への書き込みなどのマイコン操作を制御している。

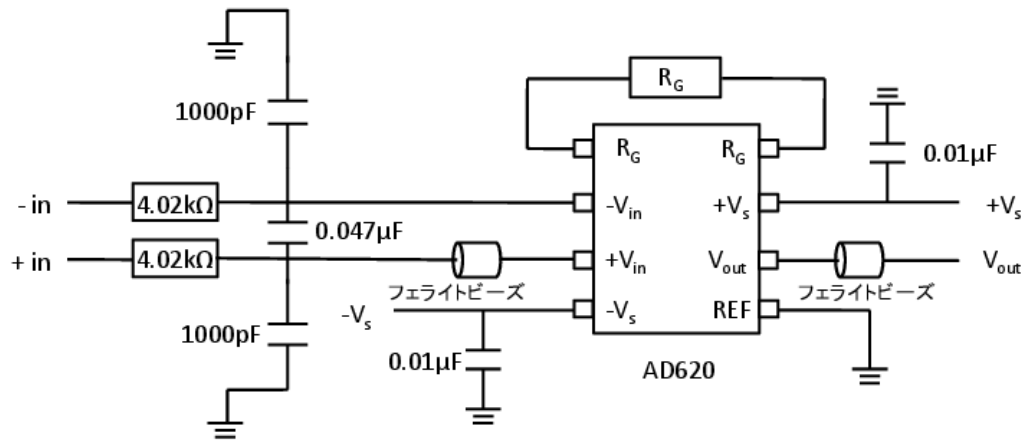


図 C.2: 信号増幅用アンプ回路図

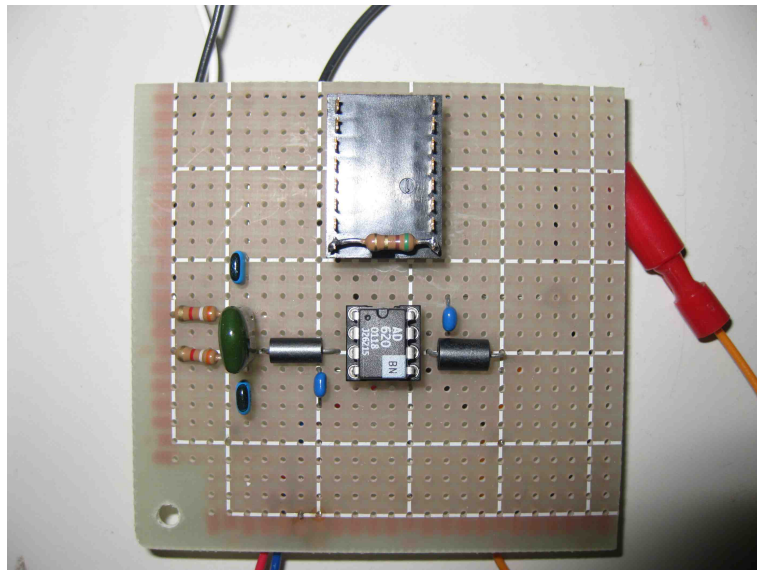


図 C.3: 信号増幅用アンプ回路の写真

参考文献

- [1] http://www.nobelprize.org/educational/physics/energy/fission_2.html
- [2] T. Araki et al. (KamLAND Collaboration), Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion, *Physics Rev. Lett.*, Vol. 94, 081801, 2005
- [3] M. Apollonio et al., (CHOOZ Collaboration), Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment, *Physics Lett. B*, Vol 466 (331-374), 2003.
- [4] Apollonio, et al., Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station, *Eur. Phys. J. C27* (331-374), 2003
- [5] A. Bernstein, G. Baldwin, B. Boyer, M. Goodman, J. Learned, J. Lund, D. Reyna, R. Svoboda, *Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors : Current Capabilities and Future Prospects* (2009)
- [6] <http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/joyo/indexs.html>
- [7] T.Aoyama et al., *Nuclear Engineering and Design* 237 (2007) 353-368.
- [8] P.Huber and T.Schwetz, *Phys. Rev. D* 70, 053011(2004)
- [9] N.Bowden, Experiment with reactor antineutrinos in US : SONGS, 6th International Workshop on Low energy neutrino physics (2011)
- [10] D. Lhuillier, Nucifer Status, International Workshop on Applied Antineutrino Physics (2011)
- [11] The recent experiments with reactor antineutrino in Russia : DANSS project, 6th International Workshop on Low energy neutrino physics (2011)
- [12] H. Furuta, Doctor Thesis, Tokyo Institute of Technology University (2009)
- [13] I .Shimizu, PhD thesis, Tohoku University (2004)
- [14] Carlo Bemporad et al., Reactor-based Neutrino Oscillation Experiment, *hepph/0107277*, 2001
- [15] <http://www.showa-shell.co.jp/index.html>
- [16] A. Yoshino, Master Thesis, Tokyo Institute of Technology (2008)

- [17] Richard L.(Dick)Hahn, Solar-Neutrino & Nuclear-Chemistry Group, Chemistry Department, BNL, Gd-Loaded Liquid Scintillator (Gd-LS): Past Problems, Current Solution, & Future Directions(2006)
- [18] H.O. Back, M. Balata, G. Bellini, J. Benziger, S. Bonetti, B. Caccianiga, F. Calaprice, F. Dalmoki-Veress, D. D'Angelo, A de Bellefon, H. de Kerret, A. Derbin, A. Etenko, K. Fomenko, R. Ford, D. Franco, C. Galbiati, S. Gazzana, M.G. Giammarchi, M. Goeger, A. Goretti, C. Grieb, S. Hardy, A. Ianni, A. M. Ianni, G. Korga, Y.Kozlov, D.Kryn,M.Laubenstein, M. Leung, E. Litvinovich, P. Lombardi, L. Ludhova, I. Machulin, I. Manno, D.Manuzio, G. Manuzio, F. Masetti, K. McCarty, E. Meroni, L. Miramonti, M. Misiaszek, D. Montanari, M. E. Monzani, V. Muratova, L. Niedermeier, L. Oberauer, M. Obolensky, F.Ortica, M. Pallavicini, L. Papp, L. Perasso, A. Pocar, R. S. Raghavan, G. Ranucci, A. Razeto, A. Sabelnikov, C. Salvo, S. Schoenert, T. Shutt, H. Simgen, M. Skorokhvatov, O. Smirnov, A. Sonnenschein, A. Sotnikov, S. Sukhotin, Y. Suvorov, V. Tarasenkov, R. Tartaglia, G. Testera, D. Vignaud, R. B. Vogelaar, F. Von Feilitzsch, B. Williams, M. W'ojcik, O. Zaimidoroga, S. Zavatarelli, G. Zuzeel, Pulse-Shape discrimination with the Counting Test Facility
- [19] <http://www.caen.it/product.php?mod=V1721>
- [20] Y.Furuta , Master Thesis, Tohoku University (2012)
- [21] T.Niisato , Master Thesis, Tohoku University (2012)
- [22] A. Imura, Master Thesis, Tohoku University (2011)
- [23] H. Tadokoro, Master Thesis, Tohoku University (2010)
- [24] Virginia B. Firestone, Table of Isotopes Eight Edition(1996)
- [25] M. Aoki, K.Akiyama, Y. Fukuda, A.Fukui, Y. Funaki, H. Furuta, T. Hara, T. Haruna, N. Ishihara, T.Iwabuchi, M. Katsumata, T. Kawasaki, M. Kuze, J. Maeda, T. Matsubara, T.Matsumoto, H. Minakata, H. Miyata, Y. Nagasaka, T.Nakagawa, N. Nakajima, H. Nakano, K. Nitta, M. Nomachi, K. Sakai, Y. Sakamoto, K.Sakuma, M. Sasaki, F. Suekane, H. Sugiyama, T. Sumiyoshi, H. Tabata, N. Tamura, M. Tanimoto, Y. Tsuchiya, R.Watanabe and O. Yasuda, Letter of Intent for KASKA(2008)
- [26] 石河寛昭 著、液体シンチレーション測定法 南山堂 (1981)
- [27] Grenn F. Knoll 著、木村逸郎、阪井英次 訳、放射線計測ハンドブック第三版 (2001)
- [28] E.Fermi, Ricercha Scient. 2, No 12 (1933); Z. Phys. 8, 161 (1934)
- [29] JOHN R. Taylor 著、林茂雄、馬場涼 訳、計測における誤差解析入門 東京化学同人 (2000)

- [30] Glen Cowan, Statistical Data Analysis, Clarendon press Oxford (1998)
- [31] <http://root.cern.ch/drupal/>
- [32] URL :[http://www.as 1.co.jp/academy/17/17 4.html](http://www.as1.co.jp/academy/17/17_4.html)
- [33] H. Furuta, Y. Furuta, T. Niisato, A. Imura, T. J. C.Bezerra and F. Suekane, Pulse Shape Discrimination (PSD) Study with Gd loaded Liquid Scintillator for Reactor Neutrino Monitoring(2011)
- [34] J. Kempa and A. Krawczynska, Nuclear Physics B(Proc. Suppl.) 151(2006) 299-302
- [35] S. Haino et al., arXiv:astro-ph/0403704