修士論文

KamLAND2-Zen に向けた¹⁰Cバックグラウ ンド低減のための新手法の研究開発

Development of new method for reduction of $^{10}\mathrm{C}$ background for KamLAND2-Zen

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻

本田佳己

平成29年

ニュートリノのマヨラナ性の有無は現在の素粒子物理学において重要な意味を持つことが示唆 されている。マヨラナ性検証のための方法として、現在最有力なのがニュートリノの出ない二重 ベータ崩壊 (0νββ) の観測である。そのため、0νββ 観測実験は現在世界各地で行われている。中 でも、現在ニュートリノのマヨラナ質量に最も厳しい制限を与えているのが KamLAND-Zen 実験 である。KamLAND-Zen は約 400 kg の ¹³⁶Xe を用いた実験で、ナイロン製バルーンに内包され た¹³⁶Xe 含有液体シンチレータの発光を 1879 本の光電子増倍管 (PMT) で検出する。0νββ の寿 命は非常に長いと考えられる (最新結果では $T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26}$ year) ため、この観測にはバック グラウンド事象を極めて少なくする必要がある。中でも、現在大きな問題となっているものの1 つが 10 Cの β^+ 崩壊である。 10 C は液体シンチレータ中の 12 C がミューオン信号によって原子核 破砕を起こすことで生成され、その後27.8 sの寿命で崩壊することによってバックグラウンド信 号を作る。この原子核破砕の際には同時に中性子が生成され、それらは 210 µs で液体シンチレー タ中の陽子に捕獲される。そのため¹⁰Cはミューオン信号、ならびに中性子捕獲の際のγ線によ る信号との時間、空間的相関を用いてタグが可能である。それにもかかわらず大きな問題となっ ている理由は、ミューオンによる大光量イベント後の PMT のベースライン変動 (オーバーシュー ト) とノイズの大幅な増加 (アフターパルス) にある。KamLAND-Zen 実験では、その影響による 信号の取り逃しを防ぐためにベースライン補正回路「BLR」、および新エレクトロニクスである 「MoGURA」を導入した。しかし、MoGURA 導入後も結局¹⁰C 由来のイベントの除去率は 64% にとどまり、目標であった 90% には届かなかった。これは PMT のアフターパルスが予想以上に 多かったために中性子の検出効率が十分でないことが原因である。

KamLAND-Zen は将来計画として光量増加によりエネルギー分解能を向上させる KamLAND2-Zen を計画している。また、KamLAND2-Zen に合わせて電子回路の一新も予定している。本研究 では、光量増加の効果を利用して高性能の新型電子回路で中性子検出効率を向上させる方法を提案 した。オーバーシュートの振幅を低減させる新型ブリーダー回路、オーバーシュート中のイベント を検出するための微分ヒット判定、アフターパルスの影響を受けにくいローカルトリガーの導入 である。これらの効果による中性子検出効率の向上を定量的に評価するために、KamLAND2-Zen で使用が予定される新型 20 inch PMT に LED で擬似ミューオン信号、レーザーで擬似中性子信 号を照射する実験を行った。また、波形情報の取得にも KamLAND2-Zen へ向けて開発の進む新 型電子回路を使い、可能な限り KamLAND2-Zen の実際に近い状況で評価を行った。その結果、中性子検出効率は 97.5 ± 5.7%に向上が期待できることがわかった。これは ¹⁰C のバックグランド を 83.6 ± 13.1%だけタギングできることに対応する。現在は中性子を使う方法以外にもミューオ ン信号の波形のみから ¹⁰C をタギングする手法も研究が進んでおり、これら 2 つのタギング手法 を合わせることで KamLAND2-Zen での ¹⁰C タギング効率は 96.6 ± 3.1% が期待される。

目 次

第1章	序論	1
第2章	ニュートリノ物理	3
2.1	ニュートリノの発見	3
2.2	ニュートリノ振動	4
	2.2.1 太陽ニュートリノ問題	4
	2.2.2 ニュートリノ振動の式	4
	2.2.3 ニュートリノ振動に関する実験結果	6
	スーパーカミオカンデの結果	6
	Sudbury Neutrino Observatory(SNO) の結果	7
	KamLAND の結果	8
	2.2.4 ニュートリノの質量階層構造	11
2.3	ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊.............................	12
	2.3.1 二重ベータ崩壊 $(2\nu\beta\beta)$	12
	2.3.2 二重ベータ崩壊 $(0\nu\beta\beta)$	12
	2.3.3 マヨラナ質量と 0 <i>νββ</i> の関係	13
	$2.3.4$ $0\nu\beta\beta$ の探索実験	13
	Heidelberg-Moscow 実験	13
	GERDA	14
	KamLAND-Zen 実験の結果	14
第3章	KamLAND 実験	16
3.1	KamLAND 検出器の概要	16
3.2	ニュートリノ検出原理	17
	3.2.1 逆ベータ崩壊を使った検出	17
	3.2.2 電子散乱を使った検出	18
3.3	液体シンチレータ....................................	18
3.4	РМТ	18
3.5	データ収集用電子回路	19
	3.5.1 KamFEE(FBE)	20
	FBE の仕組み	21
	FBE のトリガーボード	21
	ミューオン信号によるデッドタイム問題	22
	3.5.2 MoGURA	24
	MoGURA の4つのゲイン	24
	ベースライン安定化回路 (BLR)	25
	MoGURA のデータ取得モード	26

	ii MoGURA のトリガー発行機構
	Adaptive trigger
第4章	KamLAND-Zen 実験 31
4.1	KamLAND-Zen 実験におけるアップテート 31
4.2	主なバックグラウンド 32
	$4.2.1 \qquad \text{Ag} \dots \dots$
	$4.2.2 {}^{214}\text{Bi} \dots \dots$
	4.2.3 ¹⁰ C 崩壞事象 34
	$4.2.4 2\nu\beta\beta \dots $
4.3	¹⁰ C バックグラウンド削減の手法 34
	4.3.1 中性子捕獲イベントを用いたトリプルコインシデンス
	4.3.2 ミューオンシャワーを用いた破砕点の特定によるタギング 38
4.4	将来計画 KamLAND2-Zen 実験
	4.4.1 アップデート内容 39
	4.4.2 将来に向けて解決すべき課題 40
	課題 1: ¹⁰ C タギング効率 40
	課題 2: BLR 由来のノイズ
	課題 3: 実験室の温度上昇 43
	4.4.3 MoGURA2の目標 43
笛⋷音	10C タゼング効率改善に向けた新手注の構相 45
カリ キ 51	マフターパルスの影響 45
5.2	1 / パーパーパーパーパーパー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
0.2	中国 スインノに同じた初于仏の構造 40 591 ボード内宮連トリガー 48
	5.2.1 小 下内向丞下 5.7
53	$M_0 CUB \Lambda_2 = 7 h \ddot{k}$
0.0	MOGURA2 $/$ $/$ $/$ $/$ $/$ $/$ $/$ $/$ $/$ $/$
	5.5.1 $MOGORAZ$) ハール ーの $M \in \dots $
	$5.5.2) \land \uparrow \land \uparrow \lor \lor$
	ADC IF
	Delay
	Trinner Manager
	Irigger Manager
	Data Formatter
	Parameter Register
	5.3.3 MOGURA2 アストホートの性能評価
	ノ 1 人評価
	周波数特性評価
	ナヤネル间クロストークの評価 58
	5.3.4 設計における問題点の修止58
	DAC 出力の下限 58
	P ケインのノイスの問題 59
5.4	改良版の PMT ブリーダー回路

第6章	新手法の評価	iii 63
6.1	データ取得のセットアップ.................................	63
6.2	タイミング広がりの評価	64
0.2	6.2.1 近接 PMT のヒットタイミング	65
	622 遠隔 PMT のヒットタイミング	65
	623 $V - \overline{U} - \overline{U}$	66
	6.2.6 タイミング評価を踏まえた山性子タギング効素のシミュレーション方法	67
63	0.2.4 パーマング前個と聞るたた中世リグイングが中ジンマング ジョンガム・・	67
0.5	中に」 パイン / 加平の 計画	67
	0.3.1 中住丁効率等山の万仏 6.2.2 パラメータ是適化	60
	0.3.2 ハノケータ取週 1	00
	0.3.3 取週化したタインク効率	70
第7章	議論	73
第8章	まとめ	75
付録A	KamFEE のトリガー回路に実装されているトリガー [2]	76
付録B	MoGURA のトリガー回路に実装されているトリガー [2]	78
付録C	FPGA 開発で苦労した部分	79
	ADC 信号のデシリアライズ	79
	デシリアライズ後のビットとび	80
	QDR の使い方	81
	1つの bank における IO ブロックの数 $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	82
	xdc ファイルによる制約の設定	82
	Timing Violation	82
付録D	MoGURA2 テストボードの回路図	84

図目次

1.1	ΔQ の大きさによる ΔT 分布の違い $\dots \dots \dots \dots \dots$		•	•		•	•		•	2
2.1	スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測結果		•	•		•	•			7
2.2	SNO 観測結果 $[b]$	•••	•	•	•••	•	•		·	8
2.3	KamLAND 実験以前に特定されにーユートリノ 振動所の範囲 [I]	.	•	•	•••	•	•	•••	•	9 10
2.4	KamLANDの原子炉との位直関係 [8]トリノの拒動 [0]	• •	•	·	•••	•	•		·	10
2.0	KamLANDに C観測された原子炉ーユートリアの振動 [8]	• •	•	·	•••	•	•	•••	·	10
2.0	ニュートリアの員里陌眉柵垣の凶 [9]	• •	•	·	• •	·	•		·	11 19
2.1 2.8	二里へ ク朋友かり能なエイルイ 平位		•	•	•••	•	• •		•	12
2.0	- 里 へ か 協 る の イ ク つ ひ	• •	•	·	•••	•	•	•••	•	12
2.9 2.10	UV =	• •	•	•	•••	•	• •		·	10
2.10 2.11	Haidalbarg Moscow 実験で得られたスペクトル	• •	•	·	•••	•	•	•••	•	13
2.11 2.12	「Therdenberg-Moscow 突厥で持ち40にハペンドル	• •	•	•	•••	•	•		•	14
2.12		• •	•	•	•••	•	•	•••	•	10
3.1	KamLAND 検出器		•				•			16
3.2	KamLAND におけるベータ崩壊検出のイメージ図		•				•			17
3.3	PMT の増幅原理 [13]		•			•	•			18
3.4	PMT の 1p.e. 波形		•			•	•			19
3.5	ダイノード構造の比較		•				•			19
3.6	KamLAND データ収集システム		•				•		•	20
3.7	KamFEE		•			•	• •			21
3.8	KamFEE のブロック図 [17]		•			•	•			21
3.9	FBE トリガーボードのモジュール図 [17]		•			•	•		•	22
3.10	・ミューオン信号後の波形		•			•	•		•	23
3.11	BLR の概念図 [15]		•			•	•			25
3.12	BLR の理想素子シミュレーション............		•			•	•		•	26
3.13	BLR の有無によるベースライン変動の違い........		•	•		•	•		•	26
3.14	MoGURA のデータ取得モードの概念図		•	•		•	•		•	27
3.15	MoGURA トリガーボード		•			•	•			28
3.16	;通常トリガーにおけるトリガー過剰発行 [3]		•	•		•	•		•	29
3.17	′Adaptive trigger の概念図 [3]		•			•	•			30
4.1	KamLAND-Zen 実験		•							32
4.2	KamLAND-Zen 実験のスペクトル									33
4.3	中性子イベントを伴わない事象									35
4.4	中性子イベントと ¹⁰ C イベントとの位置相関 (シミュレーション)[2	25]							36
4.5	中性子イベントと ¹⁰ C イベントとの位置相関 (実データ)[2]	•••					•			37

4.6	ΔQ の大きさによる ΔT 分布の違い	38^{V}
4.7	- エネルギー損失からシャワーポイントを求めるイメージ図 [2]	38
4.8	実際に求めたシャワーポイント [2]	39
4.9	MoGURA のチャージ分布 [3]	41
4.10	MoGURA 単体のアナログ性能 [15]	42
4.11	MoGURA のアナログ性能 (BLR 込み)	43
5.1	アフターパルスの時間とチャージの関係	46
5.2	アフターパルスのレート	47
5.3	KamLAND におけるミューオン発光量の分布 [2]	47
5.4	トリガー判定の window を変えた時のヒット判定領域の違い	48
5.5	window 変更による Nhit の違い	49
5.6	ボードヒット判定の概念	50
5.7	ヒット判定のオーバーラップ................................	50
5.8	大光量のミューオン信号	51
5.9	微分ヒット判定の例	51
5.10	MoGURA2 テストボード	52
5.11	テストボードの FPGA モジュール図	54
5.12	各ゲインのノイズ	56
5.13	各ゲインの線形性....................................	56
5.14	P ゲインの周波数特性	57
5.15	Lゲインの周波数特性	57
5.16	各ゲインのチャネル間クロストーク・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
5.17	回路変更前後の DAC 値と ADC 値の関係	59
5.18	変更前後のコモンモード電圧の発振	60
5.19	改善前のブリーダー回路	61
5.20	改善後のブリーダー回路	61
5.21	新旧ブリーダー回路のオーバーシュート比較	62
-		-
6.1	実験のセットアップ	63
6.2	実験の回路図	64
6.3	レーザー出力タイミングからの波形	64
6.4	近接 PMT のヒットタイミング広がり	65
6.5	PMT のダイヤモンドヒットタイミング時間差	66
6.6	レーザー出力タイミングの広がり	66
6.7	各時間の検出確率	67
6.8	新システムの概念図 [16]	69
6.9	中性子信号にトリガーがかかる回数.............................	71
6.10	アフターパルス後の総トリガー数	71
6.11	中性子タギング効率 (トリガーのみ)	72
		<i>c</i> -
C.1	Select IO interface	80
C.2	QDR interface	82

表目次

2.1	ニュートリノ振動のパラメータ [9]	11
3.1	KamFEE のゲイン [17]	21
3.2	原子核破砕により生成する代表的な原子核 [15]	23
3.3	MoGURA のゲイン [15]	24
3.4	MoGURA に使用している ADC[16]	25
5.1	アフターバルスを作るイオンの種類	46
5.2	MoGURA2 テストボードにおけるゲイン	53
5.3	MoGURA2 テストボードに使用している FADC	53

第1章 序論

現在の素粒子物理学においてニュートリノのマヨラナ性の検証は重要な意味を持つ。特に現代 物理学の未解決問題として宇宙物質優勢の謎と軽いニュートリノ質量の謎があるが、その解決に もこの性質の有無は重要なファクターとなることが示唆されている。マヨラナ性検証の方法とし ては、現状ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊 (0νββ)の観測が最有力である。0νββ 探索実験 は世界各地で行われているが、中でも最高感度を誇るのが我々の KamLAND-Zen 実験である。

KamLAND-Zen 実験は ¹³⁶Xe を使った $0\nu\beta\beta$ 観測実験であり、2011 年 9 月から 2015 年 10 月ま でデータ取得が行われてきた。¹³⁶Xe は液体シンチレータに含有される形でナイロン製ミニバルー ンに内包されており、その発光が 1879 本の光電子増倍管 (PMT) で取得される。現在は検出器内 の ¹³⁶Xe の量を増やす KamLAND-Zen 800 kg phase への準備が進められている。将来的には検 出器全体の一新によって発光量向上を目指す KamLAND2-Zen 実験を行う予定である。

 $0\nu\beta\beta$ 観測の難しさは、予測される寿命の長さにある。KamLAND-Zen 実験の最新結果による と $0\nu\beta\beta$ の半減期は 90% の有意性で 1.7×10^{26} year 以上である [1]。そのため、バックグラウン ド事象の削減が不可欠である。中でも特に深刻なのが、KamLAND 検出器の液体シンチレータ内 で生成される ¹⁰C の β^+ 崩壊である。¹⁰C は宇宙線由来のミューオンが液体シンチレータ内の ¹²C を原子核破砕することで生成され、その後 27.8 s の寿命で ¹⁰B へと β^+ 崩壊する。

¹⁰C 由来のバックグラウンドを排除するために、現在のデータ解析では2つの手法がとられてい る。1つ目は、原子核破砕で¹⁰C と共に生成される中性子を使った手法がとられている。中性子は 液体シンチレータ中で210 μs の寿命で陽子に捕獲されて 2.2 MeV のγ線を出すことがわかってい るため、この手法ではミューオン信号、中性子信号との時間、空間的相関を取ることで真の0νββ 信号と¹⁰C 由来の信号を解析的に区別する。2つ目は、発光量の推移から破砕が起こった点を特定 する手法である。ミューオンは原子核破砕を起こす点で特に大きいエネルギーを落とすため、こ の手法ではミューオン飛跡上で発光量の大きい点を原子核破砕が起きた点と特定し、その周りを 一定時間解析から除外する。

実データからの見積もりによると、中性子を使う手法単体で¹⁰C バックグラウンドの 85% ほど が排除できると見込まれる [2]。ところが実際の排除率は 64±4% であり、見積もりよりも 25% ほ ど少ない [2]。これは、一部の中性子捕獲イベントの取り逃しが原因だと考えられている。中性子 信号の取り逃しは、PMT の性質に起因する。PMT は大信号であるミューオンイベント直後に「ア フターパルス」と呼ばれる特有のノイズを発生させる。アフターパルスによって多数の PMT が ヒット判定閾値を超えるものの、それらをすべて取得していてはデータ転送が間に合わない。転 送量削減のため、現在はアフターパルスを見分けてデータ取得トリガーを発行するロジックが実 装されている [3]。このロジックでは、過去 1 μs 間の PMT ヒット数と過去 120 ns の PMT ヒット 数の差に閾値を設定する。これは、アフターパルスの発生タイミングがランダムなのに対して物 理イベントが 120 ns 以内に全 PMT に届くことを利用した方法である。しかし、このロジックに おいても高エネルギーのミューオンイベント直後にはトリガー発行の効率が落ちることがわかっ ている [2]。これは、アフターパルスの量が想定よりも多かったのが原因である。特にミューオン 信号後 50 μs の間はアフターパルスによってほとんどの PMT がヒットと判定され続けてしまい、 トリガー効率が著しく落ちる。



 $\Delta Q < 1.0 \times 10^6$ p.e.

 $\Delta Q > 1.0 \times 10^6$ p.e.

図 1.1: ΔQの大きさによる ΔT 分布の違い [2]

 ΔT はミューオンイベントからの時間差である。中性子の捕獲は確率事象のため、すべての中性子信号を取得できているのであればイベント数は ΔT に対して指数関数的な減衰がみられるはずである。しかし、 ΔT が十分大きな範囲でのフィッティング結果を比較すると高エネルギーのミューオンでは $\Delta T < 400 \mu s$ の範囲で予想よりもイベント数が少ないことがわかる [2]。なお、 ΔQ はミューオンが検出器内で失ったエネルギーを表す指標であり、 $\Delta Q > 10^6$ p.e.を超えるものは特に原子核破砕の主要な原因となるハドロンのシャワーを生成しやすい。

将来計画である KamLAND2-Zen では電子回路の一新も計画されている。本研究では新型の高 性能電子回路で中性子検出効率を向上させる新しい方法を提案し、実験室での原理検証実験の結 果を報告する。2、3、4 章では前提知識としてニュートリノ物理学や我々が行ってきた実験、なら びに将来計画である KamLAND2-Zen 実験を紹介する。そのうえで、5 章でバックグラウンド低 減のための新手法の構想、6 章で原理検証実験によるその評価を述べる。

第2章 ニュートリノ物理

ニュートリノは電荷0、スピン1/2のフェルミ粒子であり、宇宙空間で光子に次いで2番目に多 く存在する粒子であると考えられている。しかし弱い相互作用しかせず、反応断面積も他の粒子 に比べて非常に小さい。

近年、ニュートリノが振動現象を起こすことが確認された。これによってニュートリノが質量を 持つことが証明されたほか、ニュートリノのマヨラナ性についても理論的に予言される。特にマ ヨラナ性については素粒子物理学において重要なファクターとなるため、我々の KamLAND-Zen 実験をはじめとして現在世界各地で検証実験が行われている。

本章ではニュートリノがもつ物理について触れ、後半では我々の実験の根幹であるニュートリ ノの出ない二重ベータ崩壊について解説していく。

2.1 ニュートリノの発見

素粒子物理学において、長らく研究者を悩ませていた問題のひとつがベータ崩壊の観測におけるエネルギー非保存性であった。ベータ崩壊は中性子が電子を放出して陽子へと変化する現象で、 ニュートリノが発見されていなかった時代はこの反応が単純な2体崩壊であると考えられていた (式 2.1)。

$$n \to p^+ + e^- \tag{2.1}$$

2.1 式を認めれば、観測される電子のエネルギーは単一スペクトルになるはずである。しかし、 実際に観測されたのは連続スペクトルであり、そのエネルギーには核子ごとに上限があった。こ のことから、Wolfgang Ernst Pauli は 1930 年に電荷 0 でスピン 1/2 のフェルミ粒子である非常に 軽い粒子の存在を提唱し、それがエネルギーを持ち去っていると仮定すれば説明がつくと主張し た。この粒子は電荷をもたず非常に小さいという意味でニュートリノと名付けられた。ニュート リノの導入によって、式 2.1 は式 2.2 のように書きかえられる。

$$n \to p^+ + e^- + \bar{\nu_e} \tag{2.2}$$

ニュートリノは1956年にその存在が発見された。発見したのはClyde Cowan と Frederick Reines らの実験グループであり、塩化カドミウムを含んだ水によって原子炉から出る反電子ニュートリ ノが起こす逆ベータ崩壊を観測した。逆ベータ崩壊はベータ崩壊の逆反応であり、式2.3のように 表せる。

$$p^+ + \bar{\nu_e} \to n + e^+ \tag{2.3}$$

このように、逆ベータ崩壊では陽電子と中性子が同時に放出される。この実験に用いられた検 出器内では、陽電子は水中の電子と対消滅を起こし、中性子はカドミウム原子に捕獲されて数本 のγ線を出す (式2.4、2.5)。そこで、遅延同時計測¹によってニュートリノの反応とバックグラウ ンド信号を見分ける解析手法が用いられた。この測定によって、世界で初めてニュートリノの存 在が実験的に確認された。

$$\begin{cases} e^+ + e^- \to 2\gamma \tag{2.4}$$

$$n + \mathrm{Cd} \to \mathrm{Cd} + (3 \sim 4)\gamma$$

$$(2.5)$$

2.2 ニュートリノ振動

2.2.1 太陽ニュートリノ問題

1960 年代、複数の実験で太陽起源のニュートリノの数が予想より少ないことが問題となっていた (太陽ニュートリノ問題)。最も代表的なのは、Raymond Davis Jr. らによる Homestake 実験であった。これは四塩化炭素を用いて、塩素による ν_eの捕獲反応 (式 2.6)を観測する実験である。反応によって生まれた³⁷ Ar ガスは He によるバブリングによって回収され、その生成量が計測される。しかし、実際に反応によって得られた³⁷ Ar は太陽モデルから予想される量の 30%ほどしか存在しなかった [4]。

$${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \to {}^{37}\text{Ar} + e^- \tag{2.6}$$

この原因については、太陽モデルの精度や実験の信憑性など様々な観点から議論がなされたが、 その中で提示された可能性の1つがニュートリノ振動と呼ばれる理論であった。この理論は1957 年に Bruno Pontecorvo によって K 中間子の振動現象をもとに初めて予測され、1962 年に坂田昌 一、牧二郎、中川昌美らによって節で述べるような形で定式化された。この理論は提唱から約半 世紀後に実験的に証明されることとなったが、その詳細については2.2.3 節で述べる。

2.2.2 ニュートリノ振動の式

2.2.1 節で述べたように、クォークの世界では時間とともに別のフレーバーへ変化する「振動」 という現象がすでに知られていた。これは粒子のフレーバー固有状態が質量固有状態の重ね合わ せであることによって起こる量子力学的現象である。今、この現象をレプトンであるニュートリ ノにも同様に当てはめることを考えよう。ニュートリノが質量をもつと仮定すると、ニュートリ ノのフレーバー固有状態は式 2.7 のように表せる。

$$\nu = \sum_{i} U_i \nu_i \tag{2.7}$$

ニュートリノには現在3種類のフレーバーが見つかっている。よって、2.7を3成分の重ね合わせで考えると式2.7の*U*は以下のような行列で表せる。

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$
(2.8)

¹遅延同時計測は、短時間に連続した信号が来た時のみそれを真の信号とみなす計測法である。Reines の実験の場 合は発生した陽電子が数 ns で対消滅を起こすのに対し、中性子捕獲の寿命は数百 µs である。つまり先発信号直後に いくつかの後発信号が観測されればそれがニュートリノ由来であることが特定できるため、バックグラウンド事象と明 確に区別できる。

ただし $s_{ij} = \sin \theta_{ij}, c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ である。この行列 U は PMNS 行列と呼ばれる。

ここで、 $\nu_1 \ge \nu_3$ の間の振動角 θ は $\nu_1 \ge \nu_2$ 、 $\nu_1 \ge \nu_3$ に比べて十分に小さいので、簡単のため2 成分 (ν_e, ν_μ)のみのニュートリノ振動を考える。各ニュートリノのフレーバー固有状態は質量固有 状態を用いて式 (2.9)のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle\\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle\\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \qquad \forall z \not z \ \cup U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$
(2.9)

例えば ν_e として生じたニュートリノは時刻tにおいて式(2.10)のように表せる。

$$|\nu(t)\rangle = \cos\theta \,|\nu_1\rangle \,\mathrm{e}^{-iE_1t} + \sin\theta \,|\nu_2\rangle \,\mathrm{e}^{-iE_2t} \tag{2.10}$$

よってこのニュートリノが時刻 *t* において ν_{μ} として観測される確率は式 2.11 のようになる。なお、計算には $\langle \nu_i | \nu_j \rangle = \delta_{ij}$ を利用した。

$$|\langle \nu(t) | \nu_{\mu} \rangle|^{2} = |(\cos \theta e^{iE_{1}t} \langle \nu_{1}| + \sin \theta e^{iE_{2}t} \langle \nu_{2}|)(-\sin \theta | \nu_{1} \rangle + \cos \theta | \nu_{2} \rangle)|^{2}$$

$$= |-\sin \theta \cos \theta e^{iE_{1}t} + \sin \theta \cos \theta e^{iE_{2}t}|^{2}$$

$$= \left|\frac{1}{2}\sin(2\theta)(e^{iE_{2}t} - e^{iE_{1}t})\right|^{2}$$

$$= \sin^{2}(2\theta)\sin^{2}\frac{(E_{2} - E_{1})t}{2}$$
(2.11)

ここで、ニュートリノの質量は運動量に比べて十分小さいことからニュートリノの全エネルギー Eについて式 2.12 のような近似が可能になる。

$$E = \sqrt{p^2 + m^2}$$

= $p\sqrt{\frac{1+m^2}{p^2}}$
= $p + \frac{m^2}{2p}$ (2.12)

運動量は保存するため、 E_1 と E_2 について以下の式が成立する。ただし、 Δm^2 は $m_1^2 - m_2^2$ である。

$$E_1 - E_2 = \frac{\Delta m^2}{2p}$$
(2.13)

よって、式 2.11 は式 2.14 のように書きかえることができる。

$$|\langle \nu(t)|\nu_e\rangle|^2 = \sin^2(2\theta)\sin^2\frac{(E_2 - E_1)t}{2}$$
$$= \sin^2(2\theta)\sin^2\frac{\Delta m^2}{4p}t$$
(2.14)

最後に、ニュートリノの飛行距離を L と置くと、ニュートリノは質量が非常に小さい上にその 速度も光速に近いことから t = L、p = E と近似できる。これを用いると、結局式 2.14 は式 2.15 のように書きかえられる。

$$\sin^{2}(2\theta)\sin^{2}\frac{\Delta m^{2}}{4p}t = \sin^{2}(2\theta)\sin^{2}\frac{\Delta m^{2}}{4E}L$$
$$= \sin^{2}(2\theta)\sin^{2}\left(\frac{1.27\Delta m^{2}(eV^{2})}{4E(GeV)}L(km)\right)$$
(2.15)

この式から、生存確率は発生源からの距離とニュートリノのエネルギーに依存することがわかる。つまり、もし検出器が1つのフレーバーにしか感度がなかった場合、観測されるニュートリノの数は実際に発生した数とは異なる。

2.2.3 ニュートリノ振動に関する実験結果

ニュートリノが質量をもつというデータによって、2015年に梶田隆章氏、McDonald 氏の両名 がノーベル物理学賞を受賞したのは記憶に新しい。ここではその発見に焦点を当て、ニュートリ ノ振動が証明された経緯を振り返る。

スーパーカミオカンデの結果

ニュートリノ振動による距離ごとのフラックスの変化が世界で初めて観測されたのはスーパー カミオカンデによる実験であった。スーパーカミオカンデは純水 22.5 kt を用いた実験で、これを 使って大気由来の ν_μ が出すチェレンコフ光の方向分布を観測した。大気ニュートリノは 2 次宇宙 線であり、1 次宇宙線と大気との相互作用で生まれる粒子の崩壊によって生成される。特に支配的 な反応は荷電パイオンの崩壊であり、その反応式は式 2.16 のように表される [26]。

$$\pi^{\pm} \to \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\overline{\nu_{\mu}})$$

$$\downarrow \qquad (2.16)$$

$$\mu^{\pm} \to e^{\pm} + \nu_{e}(\overline{\nu_{e}}) + \nu_{\mu}(\overline{\nu_{\mu}})$$

ニュートリノ振動があると仮定した場合、検出器の上から飛来するニュートリノと下から飛来 するニュートリノでは地球の大きさの分だけ飛行距離に差があるため、観測データには振動によ る非対称性が現れる。図 2.1 はスーパーカミオカンデによる ν_μ の飛来方向ごとの反応数分布であ るが、観測データがニュートリノ振動がある場合に予想される分布に有意に従っていることがわ かる。



図 2.1: スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測結果。cos θ が 1 のときが真上からの入射に対応している。[26]

Sudbury Neutrino Observatory(SNO)の結果

ν_μの観測数の変化だけではニュートリノが別のフレーバーへ変化したという証拠にはならない。 真にニュートリノ振動が起きていると決定づけるためには3種類のニュートリノの総フラックスが 不変であることの証明が必要である。それに対する答えを与えたのがカナダで行われた SNO 実験 である。この実験では塩化ナトリウムを含んだ重水を用いており、ν_eのみが起こす荷電カレント 反応 (式 2.17) と、すべてのニュートリノが起こす弾性散乱 (式 2.18)、中性カレント反応 (式 2.19) を観測することができる。

$$\nu_e + D \to e^- + 2p \tag{2.17}$$

$$\nu + e^- \to \nu + e^- \tag{2.18}$$

$$\nu + D \to p + n + \nu \tag{2.19}$$

この3つの反応はニュートリノのフレーバーによって反応断面積が違うため、その反応数について次のような式が立てられる。

$$\phi_{CC} = \phi_e \tag{2.20}$$

$$\phi_{ES} = \phi_e + 0.154\phi_{\mu\tau} \tag{2.21}$$

$$\phi_{NC} = \phi_e + \phi_{\mu\tau} \tag{2.22}$$

なお、 $\phi_{\mu\tau} \equiv \phi_{\mu} + \phi_{\tau}$ である。これらの3つの反応を観測し、 $\phi_e - \phi_{\mu\tau}$ 空間に落とし込んだの が図 2.2 である。



図 2.2: SNO 観測結果 [6]

重要なのは、全フラックスに相当する ϕ_{NC} (青色領域) が標準太陽モデルからの予想範囲内 (点線内部) に存在している点である。つまり、 ϕ_e が予想より少なかったのと対照的に全フラックスは太陽モデルに一致していることがわかる。これによってニュートリノは飛来するうちに別の種類のニュートリノに変化していたということがわかった。

時間変化を起こすという観測結果を相対論的帰結と照らし合わせることで、ニュートリノは質量を持つという結論が導かれる。素粒子物理学の基礎ともいえる標準理論ではニュートリノの質量が正確にゼロとされているだけに、これは物理学における革命ともいうべき発見であった。後にこの功績を称えられ、2つのグループの代表者である梶田隆章氏、Arthur B. McDonald 氏にはノーベル物理学賞が授与された。

KamLANDの結果

上記の2つの実験結果からわかることはニュートリノのフレーバーが時間変化することであり、 実際に2.2.2 節で述べた振動現象が起きているかは断定できない。そこで、実際に振動パラメータ *θ_{ij}*, Δ*m* の具体的な領域を決定したのが我々KamLAND グループである。

振動現象が起こっていると仮定してスーパーカミオカンデ、SNOの実験結果を合わせてニュー トリノ振動のパラメータ範囲を特定すると、図 2.3 の領域に限定される。



図 2.3: KamLAND 実験以前に特定されたニュートリノ振動解の範囲 [7]

つまり、振動パラメータが許される領域は5箇所に限定されることがわかる。KamLAND実験の詳細は後述することにして、ここでは結果だけ簡潔に述べる。KamLAND検出器の周りには様々な距離に原子炉が存在する (図 2.4) ため、我々はそこから飛来するニュートリノの分布を調べることで振動パラメータを特定した。



図 2.4: KamLAND の原子炉との位置関係 [8]

原子炉から飛来するニュートリノは、その内部の反応から生成数が数%の誤差で見積もること ができる。そのため、見積もりと実際の生成数を比べることでニュートリノの生存確率を確かめ ることができる。

これによって KamLAND で観測された原子炉でのスペクトルは図 2.5 のようになった。重要と なるポイントは、式 2.15 の通りに生存確率が sin²(*E/L*) にしたがっていることが立証された点であ る。これによって、振動解は 5 つ候補があげられていた中の 1 つ、「大混合角 (LMA, Large Mixing Angle) 解」に合致していることがわかった。これによって、ニュートリノが質量をもっているこ とだけでなく「振動」現象を起こしていることが世界で初めて証明された。



図 2.5: KamLAND にで観測された原子炉ニュートリノの振動 [8]

なお、その後の研究によってニュートリノの振動パラメータはより正確に測定された。また、こ こで紹介した3実験で問題となっていた*ν*₁,*ν*₂ 間、*ν*₂,*ν*₃ 間の振動のみならず、パラメータ*θ*₁₃ に ついても有限の値を持つことが確認された。現在わかっている精密な結果は、表 2.1 のとおりで

ある。

パラメータ	測定値 (誤差は 1 <i>o</i>)				
Δm_{21}^2	$7.60 {}^{+0.19}_{-0.18} \times 10^{-5} \mathrm{eV^2}$				
Δm^2_{32}	$^{(\rm NH)2.48^{+0.05}_{-0.07}}_{(\rm IH)2.38^{+0.05}_{-0.06}} \times 10^{-3} eV^2$				
θ_{12}^2	$0.323{\pm}0.016$				
$ heta_{23}^2$	$\begin{array}{c}(\mathrm{NH})0.567\substack{+0.032\\-0.124}\\(\mathrm{IH})0.573\substack{+0.025\\-0.039}\end{array}$				
$ heta_{13}^2$	$(NH)0.0226\pm0.0012$ $(IH)0.0229\pm0.0012$				

表 2.1: ニュートリノ振動のパラメータ [9]

2.2.4 ニュートリノの質量階層構造

ニュートリノ振動によってニュートリノが質量をもつことは解明されたが、式 2.15 からもわか るように振動パラメータを精密に測定してもわかるのは各固有状態の差の絶対値のみである。そ のため、*v*₁ から *v*₃ の大きさの順番はここからはわからない。具体的には、次の 3 つのモデルが考 えられる。

$$m_1^2 < m_2^2 \ll m_3^2$$
(正規階層構造) (2.23)

$$m_3^2 \ll m_1^2 < m_2^2$$
(逆階層構造) (2.24)

$$m_1^2 \approx m_2^2 \approx m_3^2$$
(準縮退構造) (2.25)

これらのモデルは図 2.6 のように表すことができる。ニュートリノがどの階層構造を持つかは現 在もわかっておらず、現在もニュートリノ物理学における大きな課題となっている。なお、2.3 節 で述べるようにニュートリノがマヨラナ粒子であった場合は準縮退構造が KamLAND-Zen 実験の 結果により棄却されることがわかっている。



図 2.6: ニュートリノの質量階層構造の図 [9]

2.3 ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊

2.3.1 二重ベータ崩壊 (2*ν*ββ)

二重ベータ崩壊は特定の原子核内で2つの中性子が同時にベータ崩壊を起こす現象である。核 子が崩壊を起こす際には基本的にエネルギー準位の低い状態に落ち行くため、通常は崩壊後の原 子核のほうがエネルギーが大きい場合ベータ崩壊は起こらない。しかし、ベータ崩壊が2回起き た後の原子核がもとの原子核よりエネルギーが低ければ2回同時にベータ崩壊を起こすことでエ ネルギーの低い状態に遷移することができる(図2.7、図2.8)。



図 2.7: 二重ベータ崩壊が可能なエネルギー準位

図 2.8: 二重ベータ崩壊のイメージ図

二重ベータ崩壊を起こす原子核のうち、我々が行っている KamLAND-Zen 実験では¹³⁶Xe を用 いた観測を行っている。¹³⁶Xe を例に挙げると、この反応は式 2.26 のように表される。

136
Xe \rightarrow^{134} Ba + 2 e^- + 2 $\bar{\nu_e}$ (2.26)

この崩壊で生まれる粒子のエネルギー合計 (Q値) は崩壊前と崩壊後の原子核のエネルギー準位 の差になるため、原子核それぞれに固有の値となる。しかし、現実的に検出器で観測できるのは 放出される電子のエネルギーのみである。すなわち、ニュートリノが反応エネルギーの一部を外 に持ち去るので、実際に観測されるエネルギーは連続的なスペクトルとなる。

2.3.2 二重ベータ崩壊 (0*ν*ββ)

ニュートリノが質量を持つことを認めると、理論的にニュートリノがマヨラナ粒子である可能 性が導かれる。レプトンの世界ではマヨラナ性を持つ粒子は未発見であり、ニュートリノのマヨ ラナ性は物理学において非常に大きな意味を持つ。マヨラナ性検証の手段で現在最有力と言われ ているのがニュートリノの出ない二重ベータ崩壊 (0νββ)の観測である。

2.3.1 節で述べたように通常の二重ベータ崩壊の場合はニュートリノが反応エネルギーの一部を 持ち去るが、もしニュートリノがマヨラナ粒子だった場合は生成されたニュートリノが原子核内 で対消滅する可能性が考えられる。(図 2.9)、(式 2.27)。

136
Xe \rightarrow^{134} Ba + 2 e^{-} (2.27)

この場合ニュートリノが対消滅することによって反応エネルギーは全て e⁻ が担うことになるため、検出器で観測されるエネルギーは Q 値そのものである。したがって、検出器で二重ベータ崩壊を観測した場合に観測されるエネルギー分布は理想的には図 2.10 のようになる。



図 2.9: 0 µ β β の 図

図 2.10: KamLAND-Zen における理想スペクトル

原理的には観測したエネルギーによって 0νββ の反応を特定することが可能であるが、実際の 検出器ではエネルギー分解能の分だけ広がりができる。そのため、バックグラウンドイベントの 中に Q 値付近のエネルギーを落とすものがあった場合、それらはすべて観測のための障壁となっ てしまう。

2.3.3 マヨラナ質量と **0***ν*ββ の関係

マヨラナ有効質量 (*m_{ββ}*) と 0*νββ* の半減期には式 2.28 のような関係があることがわかっている。

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu}(Q,Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$
(2.28)

ここで、 $G^{0\nu}(Q,Z)$ は位相空間因子と呼ばれる、原子核の種類とQ値によって決められる量、 $|M^{0\nu}|^2$ は各行列要素と呼ばれる原子核物理学の理論計算によって決められる量である。つまり、 $0\nu\beta\beta$ の半減期が実験的に決定できればマヨラナ有効質量も導くことができる。

2.3.4 $0\nu\beta\beta$ の探索実験

Heidelberg-Moscow 実験

Heidelberg-Moscow 実験は、これまでにマヨラナニュートリノの「発見」の可能性を主張した 唯一の実験である。この実験はイタリアのグランサッソで 1990 年から 2003 年まで行われており、 濃縮した ⁷⁶Ge 結晶を 19.2 kg 用いて 0νββ 探索をしていた。特に ⁷⁶Ge を半導体検出器として使っ ているため、エネルギー分解能の高さが強みである。2004 年に、この研究チームの一部が準縮退 構造の領域にマヨラナニュートリノを発見したと主張した (図 2.11)。しかし、バックグラウンド の見積もりなどに懐疑的な意見も多く、現在いくつかの実験でこれと矛盾する結果が得られてい ることから、この主張は KK-claim と呼ばれている [10]。



図 2.11: Heidelberg-Moscow 実験で得られたスペクトル [11]。実験グループの 一部が赤線のフィット結果を $0\nu\beta\beta$ の信号であると主張した。

GERDA

GERDA は、イタリアのグランサッソで行われている実験である。この実験では Heidelberg-Moscow と同じ⁷⁶Ge を用いており、直接的に KK-claim を検証することができる。また、KK-claim ではバックグラウンドの見積もりに対して懐疑的な意見が多かったが、GERDA ではバックグラ ウンド事象を拒否するシステムを採用することで改善がなされている [22]。このグループは $0\nu\beta\beta$ の半減期として、2013 年に 2.1 × 10²⁵ year という上限値を導出した。特に、KK-claim で主張さ れた $0\nu\beta\beta$ の半減期は $2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{24}$ year であったため、これを強く棄却する結果となった [10]。 また、2017 年に出した最新結果では 5.3×10^{25} year という上限値が得られている。

KamLAND-Zen 実験の結果

KamLAND-Zen 実験は、我々KamLAND グループが現在進めている実験であり、¹³⁶Xe を用いて $0\nu\beta\beta$ の探索を行っている。検出器の詳細については 4 章で述べることにして、ここでは結果を 簡潔に記述する。

KamLAND-Zen 実験の代表的な結果は、2013 年 2 月に出版された論文である [23]。この際導出 された $0\nu\beta\beta$ の半減期の上限値は 1.9×10^{25} year(90% C.L.) であり、我々と同様に ¹³⁶Xe を使っ た実験である EXO-200 の結果とあわせて 3.4×10^{25} year となる。これによって、世界の実験に先 立って KK-claim を 97.5% の信頼度で棄却することに成功した。また、2016 年に出した最新結果 では KamLAND-Zen 単独で 1.07×10^{26} year という上限値が得られており [1]、これは 2018 年現 在、世界で最も厳しい値である。KamLAND-Zen 実験は現在、逆階層構造の探索 (図 2.12) を目標 に掲げて検出器のアップデートを進めている。



図 2.12: ニュートリノのマヨラナ質量における制限 [1]。横軸は最も軽いニュー トリノで、縦軸はマヨラナ有効質量である。現在わかっているニュートリノ 質量差の情報に質量階層構造のモデルを当てはめることによって、最も軽い ニュートリノとマヨラナ有効質量の関係に上記のような制限が与えられる。ま た、図の右側は 0νββ 観測実験における原子核ごとの探索状況を表している。 ¹³⁶Xe は他の原子核より探索が進んでおり、逆質量階層構造の探索を目前とし ている。

第3章 KamLAND実験

ニュートリノ振動パラメータの精密測定は、21世紀初頭のニュートリノ物理学における大きな 課題であった。2.2.3 節でも述べたように、スーパーカミオカンデ、SNOの2つの実験結果だけ ではパラメータ領域として大きく5つの候補が残されてしまったからである。そのような中で、 KamLAND実験は2003年、液体シンチレータを使ったニュートリノ検出器として測定を開始し た。KamLANDの最大の強みは低エネルギー閾値、低バックグラウンドである。特に2.2.3 節で 述べた成果は、低エネルギーである原子炉由来のニュートリノを利用したこともあり、長所を最大 限生かした結果であった。本章では KamLAND 検出器の概要、その検出原理について説明する。

3.1 KamLAND 検出器の概要

KamLAND はスーパーカミオカンデの前身であるカミオカンデ検出器の跡地を利用して作られ た検出器で、岐阜県神岡鉱山の地下およそ 1000 m に位置している。検出器部分は内側と外側で大 きく 2 つに区切られており、外側が外部検出器 (OD:Outer Detector)、内側が内部検出器 (ID:Inner Detector) と呼ばれている。各検出器部分には壁を覆うように PMT が取り付けられており、中の 液体による発光を電気信号に変換して送ることができる。図 3.1 に検出器の全体図を示す。



図 3.1: KamLAND 検出器

OD は純水で満たされたチェレンコフ光検出器で、直径 18 m、高さ 20 m の円柱型をしている。 この部分はミューオンのタギングのほか、岩盤由来の γ 線を遮蔽する役割も果たしている。この 部分に使われている PMT は 2015 年に水を抜いての大規模な改修がなされ、それまで使用されて いた PMT225 本に代わって 140 本の PMT が新たに取り付けられた [12]。 ID の中にはさらに3つの層があり、それぞれ外側から順に Outer buffer oil、Inner buffer oil、 液体シンチレータで満たされている。buffer oil 層は発光材は含まれておらず、光を透過する性質 を持つ。KamLAND 実験がターゲットとする光は、液体シンチレータの発光であり、PMT の波 形から発光位置やエネルギーが再構成される。

3.2 ニュートリノ検出原理

KamLAND 検出器でニュートリノを観測する場合、液体シンチレータ内でニュートリノが起こ す反応を観測することになるが、観測したいニュートリノによって2種類の反応を使い分けるこ とができる。以下にそれぞれの反応を用いた検出について解説する。

3.2.1 逆ベータ崩壊を使った検出

逆ベータ崩壊は2.1節で説明したようにベータ崩壊の逆反応である。この反応による検出はReines の時代から行われてきた由緒正しい検出方法でもあり、最大のメリットは遅延同時計測によって バックグラウンド事象との明確な区別が可能な点である。式3.1にその反応を再掲する。

$$p^+ + \bar{\nu_e} \to n + e^+ \tag{3.1}$$

KamLAND 検出器では、陽電子は生成されて 3 ns の寿命で電子と対消滅を起こし、中性子は 210 μ s の寿命で陽子に捕獲されて 2.2 MeV の γ 線を放出する (図 3.2)。これら 2 つの反応は式 3.2、 3.3 のように表せる。

$$\int e^+ + e^- \to 2\gamma \tag{3.2}$$

$$(n+p^+ \to d+\gamma) \tag{3.3}$$



図 3.2: KamLAND におけるベータ崩壊検出のイメージ図

この反応はバックグラウンド事象との区別が比較的容易なため、少数統計のデータにも用いる ことができる。現在では原子炉由来のニュートリノや地球内部由来のニュートリノのほか、地球 近傍で超新星爆発を起こすと予測されている星の爆発前兆ニュートリノの検出など、様々な分野 へと情報を与えている。

3.2.2 電子散乱を使った検出

電子散乱は全てのフレーバーのニュートリノが起こす反応であるが、その反応断面積は電子ニュー トリノが最も大きい。この反応は式 3.4 で表せる。

$$e^- + \nu_e \to e^- + \nu_e \tag{3.4}$$

このとき観測されるのは逆ベータ崩壊とは異なり単独のイベントとなる。これには反応閾値が 存在しないため、1 MeV を下回るようなニュートリノの検出も可能である。しかし、逆ベータ崩 壊の遅延同時計測のようなバックグラウンド低減はできない。現在は太陽由来の電子ニュートリ ノを解析する際にこの検出法が用いられている。

3.3 液体シンチレータ

KamLAND の液体シンチレータはドデカンを 80%、1,2,4-トリメチルベンゼン (PC) を 20%、 2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO) を混合して作られている。シンチレーション過程に関与する のは PC と PPO であり、ドデカンは透過率や密度を調整するために用いられる。これによる発光 量は 8300 photon/MeV であることがわかっている。

3.4 PMT

前述のように、光信号の検出には PMT を用いる。PMT は光検出器の一種であり、光電効果を 利用して光信号を電気信号として取り出すことができる。光電面に入射した光子は電子を放出し、 放出された電子は高電圧によって加速されて増幅を繰り返す。最終的にはもとの信号の百万倍近 くまでに増幅される (図 3.3) ため、光子1つ分の信号でも検出可能なほか、信号波形の解析によっ て元の信号の光子数も調べることが可能である。



図 3.3: PMT の増幅原理 [13]

左の図が PMT の概形で、右がダイノード部分の拡大図。

KamLAND 検出器の検出ターゲットは数 MeV の信号であるため、発光量も小さい。前述のように液体シンチレータの発光量自体は 8300 photon/MeV である [14] ものの、PMT の量子効率や カバー面積などを考慮すると実際に検出されるのはほとんどが1光子によるイベント (1 p.e.) であ る (図 3.4)。





図 3.4: PMT の 1p.e. 波形

左図は1イベントの波形で、右図は512イベントの平均波形 [15]。横軸は1目 盛が20 ns、縦軸は1目盛が1 mV に対応する。三角形に立ち上がった部分の 面積はチャージと呼ばれ、光子数に比例する。そのため、チャージを用いた解 析によって入射した光子の数を計算することができる。

ID に属する PMT は、大きく 2 種類に分けられる。それらは実効検出面積の違いからそれぞれ 17 inch PMT¹、20 inch PMT と呼ばれており、その数は 17 inch PMT にあたるものが 1325 本、 20 inch PMT にあたるものが 554 本である。20 inch PMT はカミオカンデ実験で使われていた PMT に対液加工を施したものであるのに対し、17 inch PMT は KamLAND 実験を始めるにあ たって新たに開発されたものである。17 inch PMT 開発に当たっての大きな改良点はダイノード 部分で、それまでのベネシアンブラインド型からラインフォーカス型へ変更された (図 3.5)。ベネ シアンブラインド型の PMT は線形性に優れているが、図 3.5 からもわかるように、光収集の一様 性に関してはベネシアンブラインド型よりも劣る。そのため、現在は PMT の端を物理的にマス キングすることで一様性の改善を図っている。



図 3.5: ダイノード構造の比較

左がラインフォーカス型で、右がベネシアンブラインド型 [13]。ラインフォー カス型は線形性が良くなる分、端から入射した光をとらえにくい。

3.5 データ収集用電子回路

データは最終的にニュートリノ科学研究センター所有の計算機へ保存されることになるが、PMT から送られるのはアナログ信号であるため、そのままコンピュータへ転送することはできない。し

¹17 inch PMT は実効検出面積が 17 inch PMT とほぼ同じであるためそう呼ばれている。これは後述のように物 理的なマスキングがかかっているためであり、実際の大きさは 17 inch PMT と 20 inch PMT で違いはない。

たがって、アナログ電圧をデジタル信号へ変換する過程が必要になる。しかし、現在素粒子実験 に使えるレベルの汎用的な装置は存在しないため、実際は KamLAND 実験用に特別に開発され た電子回路によってデジタル化、並びに PC への転送を行うことになる。KamLAND では現在、 「KamFEE」(FBE) と呼ばれる回路と「MoGURA」と呼ばれる回路を用いて準独立に 2 種類の データ収集を行っている (図 3.6)。



図 3.6: KamLAND データ収集システム [16]。KamLAND 開始当初は FBE が 単独でデータ収集を行っていたが、MoGURA の導入に伴って既存の経路が延 長された。現在は divider で信号を二又に分割することで 2 つの回路が準独立 にデータ収集を行っている。

KamLAND 実験開始当初は FBE が単独でデータ収集をしており、2 つ目の電子回路として MoGURA が導入されたのは 2010 年のことである。これは、後述する理由により FBE が宇宙 線由来のミューオン信号の直後に 1 ms ほどの不感時間 (デッドタイム) を生じることに起因する。 原子炉ニュートリノや地球ニュートリノなどの逆ベータ崩壊を観測する際には遅延同時計測の恩恵 で支障をきたさなかったデッドタイム問題だが、太陽由来のニュートリノ観測、0νββ 観測など、 KamLAND が新たな物理に移行するにあたって失われた 1 ms 間が重要な意味を持つようになっ たのである。

現在はメインのデータ解析を FBE で行い、ミューオン直後の解析を MoGURA のデータで補う という、それぞれが協力し合う形での解析手法をとっている。この節では、2つの電子回路の特徴 について説明する。

3.5.1 KamFEE(FBE)

KamFEE は KamLAND グループが独自に開発したデータ収集回路であり、KamLAND 開始当初 から現在までの十数年間使用されてきた。1 ボードにつき 12 チャンネルの入力があり、KamLAND では約 200 枚の KamFEE ボードを用いてデータ収集を行っている (図 3.7、図 3.8)。ID と OD す べての PMT からデータをすることができるため、前述のようにメインのデータ解析に用いられ ている。



図 3.7: KamFEE

図 3.8: KamFEE のブロック図 [17]

FBE の仕組み

PMT からの入力信号は delay や AMP を通った後 ATWD(Analog Transient Waveform Digitizer) と呼ばれる ASIC に送られ、そこでアナログ-デジタル変換がなされる。ATWD のサンプリング間 隔は DAC によって調整することが可能である。なお、ATWD はキャパシタの放電によってデー タの読み出しを行うためにトリガー発行から 25 µs の間は信号が取得できないデッドタイムとなっ てしまう。これは、逆ベータ崩壊などの遅延同時計測をするにあたっては致命的である。この対 策として、ATWD は1つのチャンネルにつき 2 つ設置されており、1 つの ATWD がデータ取得 をストップしている際はもう片方の ATWD によってデータ収集を行う仕組みとなっている。

表 3.1 のように、KamFEE には 3 種類のゲインチャンネルが用意されている。飽和して取りき れなかった信号に対してはよりゲインの低いチャンネルでデジタル化を行う。デジタル化はゲイ ンの高い順に行われ、ATWD 値が飽和していた場合のみより低いゲインチャンネルのデジタル化 が行われる [?]。各ゲインの分解能、並びに取得可能範囲は以下のようになっている。

ゲインチャンネル	Hゲイン	Mゲイン	Lゲイン
分解能	0.12mV	0.60mV	4.8mV
入力換算電圧範囲	122mV	614mV	4.9V
増幅率	20 倍	4倍	0.5 倍

表 3.1: KamFEE のゲイン [17]

FBE のトリガーボード

FBE ボードの個々のチャンネルは、PMT からのアナログ信号が discri 閾値を超えた場合にヒット信号を出す仕組みになっている。しかし、ヒット信号生成の直後に逐一デジタル化を行うわけではない。なぜなら、PMT には液体シンチレータの発光で立つ信号とは別に各 PMT でダーク信号が発生するからである。ダーク信号は PMT の内部にあるガスが熱励起し、それが基底状態に落ちるときに発生する、PMT 特有のノイズ信号である。これは 1 つの PMT につき約 10 kHz ほどの信

号になるため、FBE のデジタル化速度では間に合わない。この問題を解決するため、KamLAND では個々の FBE ボードとは別に全体の総指揮を務めるトリガーボードが配置されている (図 3.9)。



図 3.9: FBE トリガーボードのモジュール図 [17]

このボードには個々のボードのヒット PMT 数の総和が送られ、そのヒット数が有意に多いとき のみ物理イベントと判断されて個々の FBE にデータ取得のためのトリガーがかけられる。このよ うにする理由は、物理イベントは液体シンチレータの発光のため数百本の PMT がほぼ同時に信 号を出すのに対し、ダーク信号は各 PMT でランダムな時間に発生するからである。まとめると 以下のように段階を踏んで信号の取得をしていることになる。

1. 個々のボードでのヒット判定

2. ヒット判定された PMT 数に応じて物理イベントかどうか判断

3. 物理イベントと判断された場合のみデジタル化してデータを転送

ボードごとのヒット PMT 数合計は「hitsum」、全ボードの hitsum を合計したヒット PMT 数 は「Nsum」と呼ばれ、トリガーは Nsum の値に応じて発行される。FBE ボードでトリガーがか かった場合、そのときヒットと判定された PMT から 128 点のデータが PC に送られる。現在は ATWD のサンプリング間隔が 1.5 ns に設定されているため、200 ns 強のデータ長となっている。

なお、FBEトリガーボードには現在13種類のトリガー発行機構がある。これは、物理イベント とは別に装置の時間校正のためのトリガーなどが含まれているためである。トリガーの詳細につ いては本論文の主題とは逸れるため付録に記載する。

ミューオン信号によるデッドタイム問題

FBE は 2 つの ATWD によってデータ取得を行っているが、取得幅が 200ns なのに対してデジ タル化に要する時間は 25 µs である。つまり、短時間に大量のトリガーが発行されるような状況 ではデジタル化ができない不感時間 (デッドタイム)が生じてしまう。ここで問題となるのが、大 光量のミューオン信号が入射した場合に生じる PMT のオーバーシュート、並びにアフターパルス である (図 3.10)。



図 3.10: ミューオン信号後の波形 (入力信号は 3 V×100 ns)

KamLAND では地下 1000 m に設置することによりレートを地上の 100000 分の 1 まで減らし てはいるものの、それでも 0.2 Hz のレートで宇宙線ミューオンイベントが検出される。PMT は ミューオンイベントほどの大きな信号が検出されるとイベント後 1 ms にわたり、「オーバーシュー ト」ならびに「アフターパルス」と呼ばれる 2 つの現象が起こる。

オーバーシュートは大信号によって PMT のブリーダー回路部分にあるコンデンサが充電され、 信号後に放電が起きることで起こる。これはベースラインを引き上げることによって実質的にト リガーの閾値をあげる効果としてはたらく。それに対して、アフターパルスは信号によって加速さ れた光電子が PMT の真空部分に残存しているガスを電離させることで起こる。これはトリガー レートを上げることで不感時間を作る効果を及ぼす。この2つの現象によって FBE ではミューオ ン信号から1 ms の間は物理イベントがあっても信号をほとんど検出することができない。この デッドタイムを解決するには、オーバーシュート、アフターパルス、ともに対策が必要である。

太陽ニュートリノ観測や 0νββの探索に際してこの不感時間の解析が重要となる理由は、宇宙 線ミューオンが液体シンチレータに含有する元素の原子核破砕を起こしてしまうことにある。破 砕された原子は時に放射性元素となり、それぞれに固有の寿命で崩壊してバックグラウンドとな る放射線を発する。この破砕物のうち代表的なものを表 3.2 に挙げる。

生成核	寿命	崩壊モード	エネルギー [MeV]	生成量 [evt/day/kton]
⁷ Be	76.9[day]	EC, $\gamma(10\%)$	0.478	-
¹¹ C	$29.4[\min]$	β^+	1.98	1106
^{10}C	27.8[sec]	β^+	3.65	21.1
⁸ Li	1.21[sec]	$\beta^{-}(84\%), \beta^{-} + n(16\%)$	16.0	15.6
⁶ He	1.16[sec]	$\beta^{-}(50\%), \beta^{-} + n(50\%)$	3.51	0.9

表 3.2: 原子核破砕により生成する代表的な原子核 [15]

KamLANDのミューオンイベントの観測レートは、約5sに1回である。したがって、それよりも長寿命の原子核が生むバックグラウンド信号は時間情報のみでタギングすることはできない。

しかし、後述する KamLAND-Zen 実験においては ¹⁰C の崩壊によって生成される γ 線が深刻な バックグラウンドとなってしまう。この問題の解決に当たって重要なのが、原子核破砕の時に同 時に生成される中性子である。液体シンチレータ中で生成された中性子の 99.4% は 210 μ s の寿命 で陽子に捕獲され、その際に 2.2 MeV の γ 線を放出する。そのため、中性子捕獲イベントとの時 間情報と空間情報の相関を利用すれば ¹⁰C 由来の信号か否かを解析的に見分けることが可能であ る。しかし、それを行うためにはミューオンイベント直後に起こる中性子捕獲イベントの波形を 取得せねばならない。前述したように FBE にはミューオン後に約 1 ms 間のデッドタイムが生じ るのに対して、中性子捕獲の寿命は 210 μ s である。したがって、ミューオン信号直後の信号を取 得するにはデータ収集を補助する新たなエレクトロニクスが必要となる。²

3.5.2 MoGURA

MoGURA は 2010 年に新たに導入されたデータ収集用電子回路である。その最大のモチベーショ ンはミューオン直後のデータ取得であり、FBE で問題だったオーバーシュート、アフターパルス 中での信号取得に特化した工夫がなされている。大きな特徴として以下に挙げる 3 点があり、こ れによって FBE がデッドタイムとなってしまう状況でも安定してデータ収集を行うことが可能に なっている。それぞれの詳細については以降の節で解説する。

- Flash-ADC を用いた高速デジタル化
- ベースライン安定化回路 (BLR) を用いたオーバーシュート補正
- Adaptive trigger を用いた中性子捕獲特化のトリガー

なお、MoGURA は 17 inch PMT にしか使用されていない。これは後述する P ゲインの ADC が 生産終了してしまい、十分なボード数が確保できなかったためである。この理由から、MoGURA は基本的にミューオン直後の解析にのみ用いられている。

MoGURA の4つのゲイン

KamLAND で使用する上では、ミューオン事象から1フォトイベントまで幅広く見ることので きるダイナミックレンジが不可欠である。そのため、MoGURA にも FBE と同様に増幅率の違う 4つのゲインが用意されている (表 3.3)。

ただし、MoGURA は ATWD ではなく ADC を利用してデジタル化がなされているという点で FBE と大きく異なる。つまり、アナログ信号は逐一デジタル化されて FPGA に送られる。P ゲイ ンでは Flash-ADC を、H,M,L ゲインには 3 つのゲインで同じ ADC を用いており、それぞれの仕 様は表 3.4 のようになっている。

ゲインチャンネル	P ゲイン	Ηゲイン	M ゲイン	Lゲイン
サンプリングレート	1 GSPS	200 MSPS	200 MSPS	200 MSPS
分解能	0.1 mV	$0.5 \mathrm{mV}$	5 mV	50 mV
入力換算電圧範囲	$+5 \text{ mV} \sim -20 \text{ mV}$	+25 mV~-100 mV	$+250 \text{ mV} \sim 1 \text{ V}$	$+2.5 \text{ V} \sim -10 \text{ V}$
增幅率	20 倍	24 倍	2.4 倍	0.24 倍

表 3.3: MoGURA のゲイン [15]

²同様に、太陽ニュートリノ観測においては原子核破砕由来の¹¹C が主要なバックグラウンドとなる。後述するデッドタイムフリー回路「MoGURA」は、当初は¹¹C 由来のバックグラウンドをタギングする目的として導入された。

FADC	AT84AD001B	ADC08200		
使用ゲイン	Pゲイン	H, M, L ゲイン		
サンプリングレート	1 GSPS	200 MSPS		
分解能	8 bit	8 bit		
入力	差動入力2チャネル	シングルエンド入力1チャネル		
チャネル間クロストーク	-55 dB	-		
出力インターフェース	parallel LVDS	parallel LVDS		

表 3.4: MoGURA に使用している ADC[16]

ベースライン安定化回路 (BLR)

BLR は 2010 年に MoGURA とともに導入された。この回路はアナログ的にベースラインに対 する正電圧を差し引く役割を果たしており (図 3.11)、PMT のオーバーシュートによってトリガー がかかりにくくなる問題を解決した。

図 3.12 は BLR を使用した場合の PMT 信号のシミュレーション、図 3.13 は PMT 信号に実際 に BLR を使用した結果であるが、想定通りベースラインの安定化がなされていることがわかる。



図 3.11: BLR の概念図 [15]



図 3.12: BLR の理想素子シミュレーション [15]。緑線が入力信号で、赤線が出 力信号を示す。



図 3.13: BLR の有無によるベースライン変動の違い。オシロスコープで取得 した 512 波形を平均した。

MoGURA のデータ取得モード

MoGURA には、高速なデータ取得を実現するために転送するデータ容量を減らす工夫がなされている。データ取得モードは以下の3つであり、状況に応じてこれらが使い分けられている。

• Acquire range $\exists - k$

Acquire range モードはもっとも単純な波形取得モードで、あらかじめ設定した「event time window」の長さ分だけ波形を取得する。現在の KamLAND では後述する succesive trigger によってミューオン後 10 μ s の波形は強制的に取得する設定になっており、その波形取得の際にこのモードが使用される。

• Acquire hit $\forall - \lor$

Acquire hit モードは Acquire range モードにサプレッション機能を組み込んだ波形取得モードであり、基本的に KamLAND のデータ取得はこのモードで行う。物理イベントの解析で

重要な波形は三角形に立ち上がった部分のみであるため、その前後の波形はできるだけ間引 いて取得するというのがこのモードのコンセプトである。precede / proceed time window と start / stop threshold をあらかじめ設定しておき、window 内部に入った信号のみを取得 することで解析に重要な波形のみを取得することができる。³

• Charge モード

Charge モードには、ボード内バッファの almost full frame が検出されたときに切り替わる。 これは波形の積分値ならびに信号立ち上がりの ADC 値 4 点のみを記録するモードであり、 データ転送が間に合わないときにも必要最低限のデータを取得することが可能になる。

それぞれのモードについて、概念図を図 3.14 に示す。



図 3.14: MoGURA のデータ取得モードの概念図

MoGURA のトリガー発行機構

MoGURA も FBE と同様、ヒット判定された PMT の和 Nhit に対してトリガーを発行する。た だし、MoGURA では前述のように ADC によってアナログ電圧値が逐一デジタル化されている。 したがって、閾値はアナログ的な discri ではなく ADC の値に対してかけることになる。閾値を設 定するために必要なベースラインは run のはじめに計算され、ベースラインと ADC 値との差分 が閾値を超えるとその PMT がヒットと判定される。

ヒット判定された PMT には当然ダーク信号によるものも含まれるため、MoGURA にもデータ 取得トリガーを発行するためのボード (図 3.15) が用意されている。これによって、*N_{hit}* の値に応 じて物理イベントかどうかを判断してトリガーを発行することができる。⁴

³Acquire hit モードにはこれ以外にも、ADC 値が飽和したゲイン、つまり ADC 値で 0 が検出されたゲインはそのイベントの波形取得において以降のデータを取得しないという工夫もなされている。

⁴液体シンチレータの光が各 PMT に届くには時間差があるため、MoGURA の Nsum は 120 ns のヒット判定数 の和で計算される。しかし、MoGURA の場合はヒット判定がシステムクロックの周期である 20 ns の幅でなされる ため、複数 CLK ぶんヒット判定を出してしまうとトリガーボードでヒット数が重複して足されてしまう。そのため、 MoGURA の個々のチャンネルは一度ヒットと判定されてから 6 CLK(120 ns 間) はヒット判定がなされない。


図 3.15: MoGURA トリガーボード

MoGURA のトリガーロジックは本研究の主題にも関連するため、以下に関連の深いトリガーを 示す。残りのトリガーについては付録に記載する。

- Single Trigger
 通常の物理イベントを観測するためのトリガー。Nhit = 70を超えた時に発行される。
- Launch Trigger

Nhit = 950を超えた時に発行されるトリガー。ミューオン事象を対象としている。

• Adaptive trigger

ミューオンイベント直後に特化したトリガーで、Launch trigger の後1 ms の間有効になる。 このトリガーが有効な間は Single Trigger ならびに Launch trigger は発行されない。これに ついては次節で詳しく解説する。

• Succesive trigger

Launch trigger から数 µs の間、acquire range モードで強制的にデータを取得するトリガー をかける。これは、ミューオン信号後数 µs の間アフターパルスが非常に多い状態が続くた めである。

Adaptive trigger

Adaptive trigger は 2014 年に導入された新型トリガーで、中性子取得に特化したトリガーであ る。前述のように、ミューオン信号の後は大量のアフターパルスが出現する。これを Single trigger で検出しようとすると、ミューオン信号後約 80 µs もの間、常にトリガーがかかってしまうことに なる (図 3.16。波形取得の速さに比べて DAQ PC への転送は大幅に時間がかかるため、取得され た波形は一時的にボード上のメモリに保持する必要があるが、ボード上のメモリには 10 µs 間ほ どの波形しか保持することができない。つまり、長時間トリガーがかかり続けると転送が間に合 わなかった波形情報は失われてしまう。この問題を解決するために導入された、アフターパルス を見分けて選択的にトリガーを発行するロジックが Adaptive trigger である。着目したのは、ア フターパルス出現タイミングのランダム性である。



図 3.16: 通常トリガーにおけるトリガー過剰発行 [3]

アフターパルスは加速された光電子が PMT 内の残留ガスをイオン化させることで起こる。したがって、図 3.16 からもわかるようにガスの原子の種類によって信号が出やすいタイミングがあるものの ns 単位で見れば出現タイミングはランダムである。それに対して、物理イベントである中性子捕獲の場合は液体シンチレータの光が一斉に全ての PMT へ届くため、各 PMT 間の反応時間差は最大でも 120 ns 以内にとどまる。これを利用して、Adaptive trigger は PMT のヒット数の増加分にトリガーをかける (図 3.17)。



図 3.17: Adaptive trigger の概念図 [3]

Hit Accumulation Window の Nhit 平均と、Context Window の Nhit 平均 の差「 Δ Nhit」に閾値を設定する。Hit Accumulation Window は 6 CLK(120 ns) に設定されており、可変パラメータとして、Context Window の長さ、Hit Accumulation Window の Context Window に対する遅延、Adaptive trigger 発行の threshold が用意されており、Hit Accumulation Window は 120 ns(6 CLK)の固定値である。

なお、先行研究による最適化の結果 [3]、各パラメータは以下のように定まった。これは 2017 年 12 月現在の KamLAND でも使われている値である。

- Context Window の長さ:48 CLK
- Context Window の遅延: 24 CLK
- Adaptive trigger \mathcal{O} threshold : 100

第4章 KamLAND-Zen実験

KamLAND 検出器は超低バックグラウンド、かつ超低エネルギー観測が可能な環境が整っている。そのため、ニュートリノ振動の結果が出てからはこの環境を生かした新たな物理現象の観測に手を広げる計画が考案された。なかでもひときわ特徴にマッチしたのが、ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$)の観測であった。この実験は KamLAND-Zen と名付けられ、KamLAND 検出器をアップデートする形で観測環境の構築が行われた。KamLAND-Zen は 2011 年から 2016 年まで観測が行われ、現在は観測対象である ¹³⁶Xe を増加させる計画が進行中である。2.3.4 節で述べたように 2017 年に出された最新結果は、2018 年現在も $0\nu\beta\beta$ の半減期に対して世界最高の上限値を与えている。この章では、KamLAND-Zen 実験の概要、ならびに将来計画である KamLAND2-Zen 実験についても紹介する。

4.1 KamLAND-Zen 実験におけるアップデート

KamLAND-Zen 実験を始めるにあたっての大きなアップデートは、検出器内に¹³⁶Xe 含有液体 シンチレータを入れたミニバルーンをインストールしたことである (図 4.1)。ミニバルーンには 厚さ 25 μm のナイロンフィルムを貼り合わせることで制作されており、その半径は約 1.5 m であ る。ミニバルーン内部の液体シンチレータはドデカンではなくデカンを溶媒とすることで外側の 液体シンチレータとの密度調整を行っている。このような手法で境界を作ることによって、ミニ バルーン内側では KamLAND-Zen 実験用の解析が行えるのに加えてミニバルーン外側ではこれま でのニュートリノ観測がそのまま行える。現在の KamLAND では ¹³⁶Xe を約 800 kg に増やすた めにより大きなミニバルーンを作成中であり、これによって 0νββ における逆質量階層の領域 (図 2.12 へ踏み込むことが期待される。



図 4.1: KamLAND-Zen 実験

4.2 主なバックグラウンド

前述のように、KamLAND-Zen 実験の観測対象は 0νββ、すなわち特定のエネルギーを持った 信号である。しかし、実際にはエネルギー分解能の分だけ広がりができてしまうため、Q 値であ る 2.46 MeV の近傍領域に反応エネルギーをもつ事象はすべてバックグラウンド信号となる。

前述したように、期待される統計量は非常に小さい。有意なデータを得るためにはバックグラ ウンド事象をいかにして減らすかが非常に重要である。最新の結果では、観測されたスペクトル は図 4.2 のようになっている。以下に主要なバックグラウンドと、その解決策を挙げる。



図 4.2: KamLAND-Zen 実験のスペクトル。後述する 1st phase と 2nd phase を合わせた結果である。

4.2.1 ^{110m}Ag

^{110m}Ag は KamLAND-Zen 実験の初期に問題となったバックグラウンドである。検出器への混 入経路としては¹³⁶Xe の輸送時における福島原発起源の原子核破砕が挙げられているが、未だ確証 は得られていない。これを取り除くことを目的として、KamLAND-Zen 実験では約1年間のデー タ取得後に大規模な蒸留作業が行われた。このため、KamLAND-Zen の解析の際には、基本的に 蒸留前を第一フェーズ、蒸留後を第二フェーズと区別して解析が行われている。この蒸留作業に よって液体シンチレータ中の^{110m}Agを取り去ることに成功し、第二フェーズでは^{110m}Agのない 超低バックグラウンド環境での観測が可能になった。

4.2.2 ²¹⁴Bi

²¹⁴Bi はミニバルーン表面に溶け込んだ自然放射物によるバックグラウンドであり、^{110m}Ag の除 去後は最も深刻なバックグラウンド要因となった。混入の原因はミニバルーン中に含まれる ²³⁸U をはじめとした放射性不純物であり、崩壊を重ねて ²¹⁴Bi に行き着くことで生成される。生成され た ²¹⁴Bi は 19 min の寿命で ²¹⁴Po に崩壊し、その際に放出される β/γ 線がバックグラウンドとな る。このバックグラウンドを排除するために、現在は 2 つの手法が取られている。

1つ目は、娘核である²¹⁴Poの出すアルファ線を用いた排除である。²¹⁴Poは生成後約 160 µsの 寿命でアルファ崩壊を起こすため、遅延同時計測によってタギングすることが可能となる。しか し、アルファ線が検出される確率はミニバルーンを透過する確率と液体シンチレータ中で反応を 起こす確率に依存する。後発イベントが観測されれば 99.97%の確率でタギングすることは可能で あることが示されているものの、ミニバルーン表面での消光効果によって実際のタギング効率は 52.5%まで落ちてしまっている [24]。

2つ目は、有効体積を設定する手法である。これらのイベントはすべてミニバルーン表面で起こ るため、ミニバルーン表面に近いイベントを解析から除くことでバックグラウンドを除去するこ とが可能である。この際バックグラウンド事象として残るのは位置再構成の広がりによるしみこ みのみである。しかし、削減した体積のぶんだけ 0*νββ* の観測数も少なくなってしまうため、好ま しい方法ではない。

0*ν*ββの解析は低バックグラウンドを要求する。そのため、現在は²¹⁴Bi が有効体積を削減する 原因となってしまっている。この問題を解決するために、将来計画として2つの方法が考えられ ている。

1つ目は、シンチレーションフィルムでミニバルーンを製作する方法である。²¹⁴Poのα線によっ てミニバルーン自体が発光することで、前述した遅延同時計測をほぼ確実に行うことができる。

2つ目は、Tag2と呼ばれている方法である。Bi-Po 遅延同時計測では ²¹⁴Bi の娘核である ²¹⁴Po を使ってタギングを行っていたが、それに対して Tag2 では ²¹⁴Bi の親核である ²¹⁴Pb の β 線で遅 延同時計測を行う。ただし、²¹⁴Bi 自体の寿命が 19 min と非常に長いため、これを実行するには検 出器で ²¹⁴Pb に見える事象を現在より少なくする必要がある。そのため、ミニバルーン内部に含 まれる ⁴⁰K を 10⁻¹¹g/g まで落とす、液体シンチレータの ²¹⁰Pb を現在の 1/10 に落とすなど様々 な改善が必要である [18]。

4.2.3 ¹⁰C 崩壊事象

この事象は本研究のメインテーマであり、将来的に最も深刻になるであろうと考えられている バックグラウンドである。¹⁰C は、検出器内に入射した宇宙線由来のミューオンが液体シンチレー タ中の ¹²C の原子核を破砕することで生成され、27.8 s の寿命で式 4.1 に記述する β^+ 崩壊を起 こす。

$${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^{10}\text{B} + e^+ + \nu_e$$
(4.1)

KamLAND 検出器のミューオンイベントレートは 0.2 Hz であり、¹⁰C の寿命に比べて長い。したがって、バックグラウンド排除の際は ¹⁰C 生成の時間に加えて場所を特定することが必要になる。具体的な方法については本研究のテーマとも密接に関連するため 4.3 節で詳しく解説する。

4.2.4 $2\nu\beta\beta$

2.3.2 節でも述べたように、2νββと0νββの観測エネルギーにはニュートリノが持ち去るエネル ギーの分だけ差ができる。そのため、原理的にはこれら2種類の反応はエネルギーの違いによって 見分けることが可能である。しかし、実際の観測ではエネルギー分解能の分だけ観測エネルギー に広がりができるため、図4.2 からもわかるように 2νββのスペクトルが0νββ 領域にしみだして しまう。これを防ぐには、エネルギー分解能の改善以外に手段はない。そのため、将来的には検 出器全体を一新して発光量ならびに集光量の改善を行う予定である。これによって、Q 値におけ るエネルギー分解能は現在の4.0% から2.5% 以下へ改善できることが見込まれる[14]。現在計画 されているアップデート内容については4.4.1 で改めて述べる。

4.3¹⁰Cバックグラウンド削減の手法

¹⁰C の排除には、時間情報のほかに ¹⁰C 生成場所の情報を用いる。つまり、遅延同時計測の考 え方を拡張して、¹⁰C が生成された付近を一定時間解析から除外するという方法を取る。したがっ て、重要になるのは ¹⁰C の生成場所を特定する方法である。この節では、¹⁰C 生成場所の特定の ために現在取られている 2 つの方法を紹介する。

4.3.1 中性子捕獲イベントを用いたトリプルコインシデンス

この手法は原子核破砕で ¹⁰C と共に生成される中性子を利用するタギング方法である。液体シンチレータ中で生成された中性子は 210 μ s の寿命で液体シンチレータ中の陽子に捕獲されて 2.2 MeV の γ 線を放出する。そのため、発光点を ¹⁰C 生成場所とみなす。

¹⁰C 生成時の中性子イベント数を調べるために、Fluka を用いたシミュレーション [25] が行われた。KamLAND1 年分に相当する 10⁷ event のミューオンがシミュレーションされ、このとき 4542 個の ¹⁰C が生成された。図 4.3 の左図は横軸が ¹⁰C 生成数、縦軸が中性子捕獲イベントの数であり、¹⁰C 生成数が1 だったイベントのうち4 イベントで中性子捕獲イベント数は0 であった。右図は ¹⁰C イベントとミューオンとの距離を示すが、有効体積の外で中性子捕獲が起きたものが 26 イベント存在した。





Neutron capture position R>6.5 m

図 4.3: 中性子イベントを伴わない事象 [25]。左の図からは中性子を伴わない イベント数、右の図からは中性子捕獲が検出部の外で起こるイベント数がわか る。なお、ミューオンの方向、エネルギー情報は地下素核実験用のシミュレー ションツール MUSIC[29] によって与えた。液体シンチレータは CH₂ として再 現しており、組成としてはミニバルーン外側の液体シンチレータに近い。

また、中性子が陽子以外に捕獲される確率は0.6%という値が得られており、これらを総合する と中性子を使ったタギング手法が原理的に使えない状況は以下のようにまとめられる。

- 原子核破砕の際に中性子が生成されない場合 (0.1%)[25]
- 生成された中性子が検出器外に放出される場合(0.5%)[25]
- 生成された中性子が陽子以外に捕獲される場合 (1つの中性子につき 0.6%)[2]

以上より、原子核破砕したミューオンに対して少なくとも1つの中性子が陽子に捕獲される確率 はシミュレーションをもとにすると99%を超えることがわかる。また、これに加えて中性子イベ ントと¹⁰C崩壊イベントの位置的相関の理解も不可欠である。シミュレーション上[25]では、両 者の相関は図 4.4 のようになった。



10C - neutron distance (nearest)

図 4.4: 中性子イベントと ¹⁰C イベントとの位置相関 (シミュレーション)[25]

一方、KamLANDの実データから調べた結果が図4.5である。



図 4.5: 中性子イベントと¹⁰C イベントとの位置相関 (実データ)[2]

2.0 < r < 3.5 m(KamLAND 液体シンチレータ中)、2.2 < E < 3.5 MeV の 事象について、5 < ΔT < 105 sec を ON time(青いヒストグラム)、200 < ΔT < 300sec を OFF time(緑のヒストグラム) として近接した中性子事象と の距離 ΔR を見た。その差 (赤いヒストグラム) から、85.7 ± 12.5% の ¹⁰C 事象は ΔR < 1.6 m に存在するということが分かる。なお、ミニバルーン支 持具の放射性不純物が多い部分は除いている。

実データはシミュレーションと比べて相関が悪い。この原因はシミュレーションの問題と後述 する中性子信号取り逃しの問題の2つが考えられるが、どちらの影響が大きいかはわかっていな い。しかし、少なくとも中性子捕獲イベントを使ったトリプルコインシデンスによって85%程度 のバックグラウンドを削減できることは導かれる。それにもかかわらず、実測値によるとこの手 法による現在の¹⁰ タギング効率は64±4%であり[2]、予想より20%ほど少ない。この原因は、 大光量のイベントの際に中性子捕獲イベントがトリガーにかからず、データを取り逃しているた めであると推測される (図 4.6)。

この改善のためには、より大光量のイベントに強いトリガーロジックを組み込むことが考えら れる。これについては本研究のテーマでもあるため、5章以下で詳しく述べる。一方、別の視点か らのアプローチとして中性子を使わずにタギングをするという方法も考えられる。それが 4.3.2 節 で紹介する、ミューオンイベントの波形のみを使って ¹⁰C の生成場所を特定するタギング方法で ある。



 $\Delta Q < 1.0 \times 10^6$

 $\Delta Q > 1.0 \times 10^6$

図 4.6: ΔQの大きさによる ΔT 分布の違い

中性子の捕獲は確率事象のため、すべての中性子信号を取得できているのであ ればイベント数は ΔT に対して指数関数的な減衰がみられるはずである。しか し、 ΔT が十分大きな範囲でのフィッティング結果を比較すると高エネルギー のミューオンでは $\Delta T < 400 \mu s$ の範囲で予想よりもイベント数が少ないことが わかる。なお、 ΔQ は最小電離を上回った分の電荷を表し、 $\Delta Q > 10^6$ p.e. を 超えるものは原子核破砕の主要な原因となるハドロンのシャワーを生成する。

4.3.2 ミューオンシャワーを用いた破砕点の特定によるタギング

この手法はミューオンイベントの波形のみで行う破砕点特定方法で、2016年に提案された比較 的新しい手法である [2]。

ミューオンが KamLAND 検出器に入射すると、エネルギーを落としながら液体シンチレータ中 を進んでいく。そのため、PMT の信号を用いてミューオンの飛跡を一本の線で再構成することが できる。原子核破砕のときにはより多くのエネルギーを落とすため、飛跡上で最も光量の変化し た点を探すことで原子核破砕の起きた位置を特定することができる (図 4.7、図 4.8)。



図 4.7: エネルギー損失からシャワーポイントを求めるイメージ図 [2]



図 4.8: 実際に求めたシャワーポイント [2]

KamLAND で取得した典型的なイベントで、赤点は中性子イベント。例えば このイベントではシャワーポイントは *L*_{long} = 1200cm の所に特定される。中 性子イベントまでの距離の小ささから、シャワーポイントが正しく決められて いることがわかる。

この手法の最大のメリットは中性子イベントを伴わなくても¹⁰C タギングが可能であるという 点である。ただし、全てのミューオンイベントに対してこの操作を行うため、トリプルコインシ デンスと比べて排除する面積は非常に大きくなってしまう。現在のパラメータでは、最適化の結 果デッドタイムが 14.3%になると予想されている。

4.4 将来計画 KamLAND2-Zen 実験

KamLAND2-Zen は逆階層領域の全探索を目標にした、KamLAND-Zen 将来計画である。現在 の KamLAND は先ほども述べたように、800 kg フェーズに向けての準備が進んでいる。しかし、 最終的に逆階層構造の領域を探索するにはエネルギー分解能の改善が不可欠である。それにあたっ て現在一番のボトルネックは、発光量の少なさにある。物理イベントによる発光量は現在全 PMT を合わせて 500 p.e./MeV 程度であり、例えば $0\nu\beta\beta$ のエネルギーである 2.46 MeV の信号では、 50%程度の PMT しか発光しない。これを改善するため、将来計画である KamLAND2-Zen では 大々的に検出器全体の改良を行う。

4.4.1 アップデート内容

KamLAND2-Zen では、現在 KamLAND に入っている液体シンチレータを回収し、装置全体を 一新する。これによって、発光量は現在の約5倍になることが予想されている。以下に、予定さ れている改良点を挙げる。

液体シンチレータ

現在、液体シンチレータに代わる手段として LAB(Linear Alkyl Benzene) による検出が検 討されている。LAB は洗剤に使われている油のため安く手に入る上、発光量も現在の 1.5 倍 程度になると予想されている [18]。 • PMT

現在の PMT の量子効率は、17 inch PMT で約 22%、20 inch PMT で約 34% である。た だし、17 inch PMT については量子効率が悪く、20 inch PMT はエネルギー分解能が悪い。 一方、KamLAND2-Zen で使う予定の PMT は量子効率が 20 inch PMT と変わらない上、一 様性も改善されているため物理的なマスクをせずに使用可能である。これによる集光効率は 2.1 倍に改善されることが予想される [27]。

なお、新電子回路との兼ね合いで PMT ブリーダー回路の改良も行う予定であるが、これは 5.4 節で改めて述べる。

集光ミラー

KamLAND 検出器は球状のタンクの壁を PMT で覆う形となっているが、壁一面をすべて 覆えるわけではない。そのため、PMT 同士の隙間に入射した光子は検出することができな い。そこで、より効率の良い集光のために球状の鏡を取り付ける。これによる集光効果で、 現在の 1.9 倍の集光量が見込まれる [19]。

• 電子回路

現在は2つの電子回路による協力体制を敷いているが、システムが複雑になる以上様々な問題を生む。加えて、MoGURAの致命的な問題にADCの廃盤によってこれ以上の量産ができないという点がある。そこで、将来的にはこれらを一新して1種類の電子回路のみでデータ収集を行う。新型の高性能電子回路は「MoGURA2」と呼ばれ、現在開発がすすめられている。

4.4.2 将来に向けて解決すべき課題

現行のデータ収集システムには大きく3つの課題がある。そのため、KamLAND2-Zenへの移 行に当たってデータ収集用電子回路の一新によって解決を図る。以下に3つの課題を挙げる。

課題 1:¹⁰C タギング効率

これは本研究のメインテーマでもあり、KamLAND2-Zen に向けた最重要課題でもある。

KamLAND2-Zen ではミニバルーンの半径が 1.58 m から 2.14 m に増加する予定である。ミニ バルーン付着物由来のバックグラウンドは絶対量で半径の 2 乗に比例するのに対して、¹⁰C バック グラウンドは半径の 3 乗に比例して増加する。そのため、KamLAND2-Zen で最も深刻なバック グラウンド事象になると予想される。

加えて、図 4.6 に示したように現在行われている中性子タギングは大光量のイベントで著しく効 率を落とす。この問題は、発光量が増大する KamLAND2-Zen ではより深刻になることが予想さ れる。そこで、新型電子回路では大光量のミューオンイベントにも適応できる新しいロジックを 組み込む。5 章で、KamLAND2-Zen に使用するシステムを最大限生かしたロジックの構想を紹介 し、6 章で原理検証実験を踏まえた評価結果を述べる。

課題 2: BLR 由来のノイズ

電子回路のノイズは、実質的に光量を落とす効果としてはたらく。これは、閾値の設定に制限 がかけられてしまうためである。設定する閾値はすべての1 p.e. を検出できるのが理想的だが、低 く設定しすぎるとノイズによってデータ取得用トリガーがかかってしまう。したがって設定する 閾値は、1 p.e. を検出可能で、なおかつノイズをかけすぎない値が要求される。

図 4.9 は MoGURA で取得した 1 p.e. のチャージ分布であるが、理想的なガウス分布にならずに 左端が欠けている。これはノイズを避けるために閾値を上げた分、小光量の信号は波高が低すぎ てヒット判定がされなかったためである。



図 4.9: MoGURA のチャージ分布 [3]

先に述べた理由から、ノイズは小光量の信号を取り逃す原因になる。なお、MoGURA の各ゲインにおけるノイズは図 4.10、4.11 のようになっている。



図 4.10: MoGURA 単体のアナログ性能 [15]



図 4.11: MoGURA のアナログ性能 (BLR 込み)[15]。なお、これらの測定は入 力を 50 で短絡して行われた。特に P ゲインのノイズは BLR 込みの場合標準 偏差が 0.08mV→0.13mV へと増加しており、これは閾値を厳しく設定するう えで大きな問題となる。

現在の MoGURA では 1/2 p.e. 波高を閾値として設定しているため、1 p.e. を検出した PMT の うち約 3% をヒット判定できない。しかし、仮に BLR なしでデータ取得を行ったとするとノイズ の RMS が現行の 2/3 に落ちる。この環境であれば閾値を約 1/3 p.e. 波高に設定してもノイズによ るヒット判定レートは現行のシステム程度である。この時ヒット判定されない PMT は約 0.3% で あり、現在の 10 倍の改善が見込まれる。以上を踏まえて、MoGURA2 ではトリガーロジックを改 善することで BLR を撤廃する。これについては 5 章で解説する。

課題 3:実験室の温度上昇

そのため、現在のシステムでは、FBE、MoGURA、ならびに BLR という多数の回路を使用している。このように複雑なシステムを組んでしまうと、消費電力が上がることで予算的な問題、また実験室の温度上昇の問題を引き起こす。特に温度の問題は現在の KamLAND でも非常に深刻であり、夏の期間は温度が上昇しすぎることによって電子回路関係の稼働が停止する事態も珍しくない。そのため、MoGURA2 ではなるべく回路を簡略化してシンプルな回路を作成することによって、消費電力の削減に取り組む。回路の簡略化については 5.3 節で述べる。

4.4.3 MoGURA2の目標

MoGURA2はこれまでの2つの回路に代替される以上、それらの上位互換である必要がある。 加えて、4.4.2節で議論した問題点を解決することを考えると、開発にあたって以下のような3点 の重要な要求が挙げられる。

● BLR の撤廃

BLR を撤廃した場合オーバーシュートによる影響が危惧されるが、これはトリガーロジックの工夫によってオーバーシュートしたデータをそのまま取得することを考える。具体的な工夫については第5.2.2節で改めて述べる。

デッドタイムフリー性能

MoGURA と同様に Flash-ADC を利用したデジタル化を行うことで解決を図る。

• 量産しやすいシンプルな回路

ここでボトルネックになるのは使用する ADC のチップ数である。そこで、MoGURA で4 種類あったゲインを2種類に削減することで解決を図る。P ゲインとして 8bit 2 チャンネル 入力の ADC を使うほか、L ゲインとして新たに 16bit 2 チャンネル入力の ADC を使うこと で、0.2mV の分解能でミューオンイベント波形を取得する。この工夫によって、MoGURA2 の ADC チップ数は 2 チップ/2ch にまで削減可能である。MoGURA に使用していた ADC チップ数は 7 チップ/2ch だったため、回路全体の大幅な簡略化が期待される。MoGURA2 に使用する ADC の詳細や仕様については 5.3 節で述べる。

第5章 ¹⁰Cタギング効率改善に向けた新手法の 構想

4.3節で述べたように、¹⁰Cバックグラウンド排除のために現在2つの手法が取られている。この中で、ミューオンシャワーを用いた方法については使用する波形を取り逃すことはない。したがって、解析手法の改善はKamLAND2-Zenのデータ取得後に行うのが望ましい。一方、中性子を使ったタギング手法はイベントを取り逃さないことが第一のポイントとなる。改善のためにはトリガーロジックそのものの変更が要求されるため、この手法の最適化はデータ取得前に完了させるべきである。加えて、この手法は大光量のミューオンイベントを弱点としていることもわかっている。発光量の増加を想定すると、中性子取得効率はさらなる悪化が懸念される。

以上の理由から、中性子を使うタギング手法は KamLAND2-Zen に先立って早急に改良する必要 がある。本研究で提案する新手法は、KamLAND2-Zen のアップデート内容ならびに MoGURA2 の優れた性能を生かして中性子タギング効率の改善を目指した、KamLAND2-Zen 独自の手法で ある。

本章では、アフターパルスがトリガーロジックに与える影響について確認し、それを解決する 新手法の構想を紹介する。

5.1 アフターパルスの影響

4.3.1 節で述べたように、現在問題となっているのは大光量のミューオンイベントにおける $\Delta T < 400 \mu s$ のイベントであり、取得効率を落とす原因は PMT のアフターパルスであると考えられている。したがって、アフターパルスの詳細な理解が問題の解決にあたって不可欠である。

まず KamLAND-Zen の実データを用いてアフターパルスが検出されやすいタイミングを調べた。アフターパルスが特に深刻である $\Delta T < 100\mu$ s におけるヒットタイミングと光量の分布を調べると、図 5.1 のようになることがわかった。



図 5.1: アフターパルスの時間とチャージの関係

adaptive trigger 導入前の run におけるヒット分布をもとに作成した図。他実験の研究結果 [28] と比較すると、アフターパルスの原因となるイオンの種類は表 5.1 のように対応していると考えられる。

衣 5.1: ブ	/ / & -	・ハルス・	を作る	17	ンの種類

アフターパルス	イオン
AP1	H ⁺
AP2	$\mathrm{He^{+}}$
AP3	$\rm CO_2^+$
$AP4(\sim 10 \mu s)$	O^+, CH_4^+
AP4(10 \sim 15 μ s)	N_2^+, O_2^+, Ar^+
AP4(15 μ s \sim)	$\rm CO_2^+$

この結果から、 $\Delta T < 50\mu$ s では特にアフターパルスのレートが大きいことがわかる。問題となるのは、現行のトリガーロジックでこの中に潜む中性子信号を見分けられるかどうかである。より詳細なレートを調べるために、実験室内で PMT に特定光量の光を入射することで実際にアフターパルスの波形を取得した。データ取得には 5.3 節で後述する MoGURA2 テストボードを使用し、各光量ごとに 50 μ s 長の波形 (図 5.8) を 2000 イベントずつ取得した。結果、各光量でのレートは図 5.2 のようになった。



図 5.2: アフターパルスのレート。実際の解析ではチャージ Q の値として全 PMT の合計チャージを用いるため、実際の Q は 1879 倍の値になることが想 定される。

なお、KamLANDでのミューオン発光量の分布は図 5.3 のようになっており [2]、KamLAND2-Zen での発光量を 5 倍と仮定した場合は図 5.2 における 1000 p.e. が最低レベルのエネルギーをも つミューオン、8000 p.e. が最高レベルのエネルギーをもつミューオンに対応する。



図 5.3: KamLAND におけるミューオン発光量の分布 [2]

この図から、 $\Delta T < 50\mu$ s におけるアフターパルスのレートは、多い領域で 100 MHz を超える。 ここで問題となるのは、現在のヒット判定に 120ns という時間幅を設定していることである。例 えばアフターパルスが 50MHz の場合に 120 ns の時間幅の中で一度もアフターパルスが検出され ない確率は、ポアソン分布をもとに 0.24% と導出できる。これは KamLAND の PMT 数に直すと わずか 5 本であり、Nhit = 100 を要求している現状では検出は不可能である。この問題を解決す るために、次節からはより短い時間幅でヒット判定を行う手法を検討する。

5.2 中性子タギングに向けた新手法の構想

現行のロジックにおける問題点は、アフターパルスによるヒット数が多すぎることであった。この問題の解決策として、本研究では KamLAND2-Zen のセットアップを利用した 2 つの新しいロ ジックを提案する。

5.2.1 ボード内高速トリガー

ボード内高速トリガーは、新手法の要となるロジックである。現在の MoGURA における問題 点は、ヒット判定に 120 ns という時間幅を利用していることであった。そこで、この時間幅を変 えた時にアフターパルスによるヒット数が変わるかをシミュレーションした (図 5.4)。シミュレー ションには図 5.2 の評価に使ったデータを 1879 波形使用し、MoGURA と同じ閾値でヒット判定 を行った。結果、アフターパルスによるヒット PMT 数は図 5.5 のようになった。



図 5.4: トリガー判定の window を変えた時のヒット判定領域の違い。赤色領 域がヒットと判定される領域である。左の図が 120 ns 幅でのヒット判定、右の 図が 20 ns 幅でのヒット判定に対応する。120 ns の window をとるとアフター パルスによってほぼ全ての PMT が常にヒットと判定されるが、20 ns 幅の判 定に変えることでアフターパルスと中性子イベントを見分けることができる。



図 5.5: window 変更による Nhit の違い。入射光量は 8000 p.e.。左の図は現在 のヒット判定法を用いた場合であるが、後述する微分ヒット判定を組み込むこ とで Nhit は右の図程度まで減少する。

このように、時間幅を変えた場合アフターパルスによるヒット判定数が減少する。しかし、Kam-LAND 検出器における物理イベントでは、信号の検出が最も速い PMT と最も遅い PMT の時間 差は最大で 120 ns 程度、ミニバルーン内のイベントに限定しても 40 ns 程度である。したがって、 全 PMT のヒット和で判定する限り 40 ns より短い時間幅を設定することはできない。

そこで、KamLAND2-Zen の光量の増加に着目する。KamLAND-Zen では 20 inch PMT も合わ せた集光量は 500 p.e./MeV である。光子を検出する確率はポアソン分布に従うため、2.2 MeV の 中性子イベントで1光子以上を検出する PMT は約 50% 程度である。それに対して、KamLAND2-Zen では発光量が 5 倍になるため集光量が 2500 p.e./MeV に増加する。これによって、中性子信 号による発光を約 95% の PMT が検出できる。一方、5.5 の右図において、アフターパルスによ るヒット数は多いところでも 1400 程度である。この状況では、例えば任意の PMT16 本を選んだ ときにそのうち 12 本以上がヒット判定を出している確率は約 60% である。

以上を踏まえて、MoGURA2では近接 PMT 十数本でローカルにヒット判定を行うことを提案 する。近接した PMT であればイベント検出時間の差は 20 ns 程度に収まるため、より短い時間 幅を取ることができる。これを実行する最も現実的な案は、各ボードごとにトリガー判定を行う 方法である。MoGURA2では 16 チャンネル入力が想定されているため、高性能 FPGA を使って 16PMT を 1 組とした判定を行う (図 5.6)。



図 5.6: ボードヒット判定の概念

この実装に当たって問題となるのがヒットタイミングの分離である。これまでと同じヒット判定法では、各 PMT の信号立ち上がりタイミングのばらつきによってヒット数が2 CLK に分散してしまう可能性がある。この問題を緩和するために、ボード内トリガー導入に伴ってシステムクロックを高速化し、ヒット判定をオーバーラップさせるよう変更する (図 5.7)。



図 5.7: ヒット判定のオーバーラップ。左が従来の判定、右が将来使用する予 定の判定法である。システムクロックの倍の時間幅を取ることでヒット数が2 CLK に分散するのを防ぐ。

5.2.2 微分ヒット判定

現在の MoGURA では、run の初めにベースラインが計算され、ヒット判定閾値はベースラインと の差として設定される。現在は BLR を用いた判定によって安定化を図っているものの、ΔT < 50µs の信号取得で問題となるのは負電圧方向のベースラインシフトである。大光量のミューオンイベ ントの場合、Δ*T* < 50µs の範囲では 1 p.e. の時間幅である 20 ns に比べてアフターパルスのレートのほうが高い。すなわち、アフターパルスが積み重なることによって実質的にベースラインが降下するような効果を起こす (図 5.8)。



図 5.8: 大光量のミューオン信号の例。入射光量は 8000p.e. であり、データの 取得には MoGURA2 テストボードを使用した。

KamLAND2-Zen では、このベースラインシフトにも適応できるようにヒット判定ロジックを 改良する。今回、短い時間内での ADC 値の差分に閾値をかけるロジックを考案した。この方法で あれば、ベースラインシフト中でも信号立ち上がりの瞬間をとらえることができる。ただし、高 速ヒット判定と両立させる以上、組み込むロジックは単純なものである必要がある。そこで、今回 は 8 ns 前の ADC 値との差に閾値をかけることにする (図 5.9)。サチレーションが起こってしまっ た場合は 5.3 節で紹介する L ゲインを使ってヒット判定を実行することで解決を図る予定である。



図 5.9: 微分ヒット判定の例

この判定法は正負のベースラインシフトに対応できるため、この判定法への移行に伴って BLR も 撤廃する予定である。ただし、これを実行した場合現行のセットアップではオーバーシュートによっ てプラス方向へのサチレーションが起こってしまう。この問題を解決するために、KamLAND2-Zen への移行に当たって PMT のブリーダー回路に改良を加えることでオーバーシュート波高を抑制 する計画が進められている。これについては、5.4 節で述べる。

5.3 MoGURA2テストボード

4.4.1 節で述べたように、KamLAND2-Zen では現在のデータ収集用電子回路を一新する予定で ある。現在 FBE と MoGURA で行っているデータ収集を1つの高性能電子回路で代替し、4.4.2 節 で問題に上がった費用や温度の問題の解決を図る。この新たな電子回路は「MoGURA2」と名付 けられており、現在開発が進められている。この節では MoGURA2 のプロトタイプであるテスト ボードの紹介とその性能評価について述べる。

5.3.1 MoGURA2 テストボードの概要

MoGURA2のテストボードは2015年に設計が完了し、同年に生産がなされた。その画像を図 5.10に示す。また、この回路図については付録に示す。



図 5.10: MoGURA2 テストボード

入力は BNC で2 チャンネル分用意されており、それぞれが2 つに分割される。このうち片方 は P ゲイン、もう片方は L ゲインの AMP を通り、P ゲインの AMP を通った信号は1 GSPS の FADC に、L ゲインの AMP を通った信号は250 MSPS の FADC に送られてデジタル化がなされ る。デジタル化された信号は FPGA に送られ、イーサネット経由で読みだすことができる。

Pゲインは1光子から数光子によるイベントの検出を想定しており、Lゲインは数十光子信号から数千光子イベントまでの幅広い検出を目的としている。2つのゲインにおける特性と使用している FADC は表 5.2、5.3 に示す。¹

¹各ゲインの増幅率は設計段階の値であり、実際の増幅率は異なる。現在、AMP の設計ミスなどにより P ゲインの 分解能は 0.067[mV/ADC]、L ゲインの分解能は 0.079[mV/ADC] となっており、これは製品版のボードを製作する際 は修正される予定である。

ゲイン	P gain	L gain
サンプリングレート	1GSPS	250MSPS
FADC	ADC08D1020	ADS42LB69
増幅率	40 倍	0.2 倍
分解能	0.1mV	$0.2 \mathrm{mV}$
取得可能範囲	$+5mV\sim-20mV$	$+0.5$ V \sim -12V

表 5.2: MoGURA2 テストボードにおけるゲイン

表 5.3: MoGURA2 テストボードに使用している FADC

FADC	ADC08D1020	ADS42LB69
使用ゲイン	P gain	L gain
サンプリングレート	1GSPS	250MSPS
分解能	8bit	16bit
入力	差動入力2チャネル	差動入力2チャネル
チャネル間クロストーク	-55dB	-100dB
出力インターフェース	LVDS DDR	LVDS QDR

前述のように、MoGURAがVMEによって信号を転送していたのに対して MoGURA2 ではイー サネットによる信号の転送を計画している。これは Xilinx 社製品の FPGA に TCP/Ethernet 機 能を与える SiTCP 技術によって行う。このは技術は高エネルギー加速器研究機構の内田智久氏に よって開発された技術で、RJ45 Ethernet ポートの他に Ether-PHY チップ1 個のみの単純な構成 で実現する事が可能である。転送速度については保証通りの 100 Mbps が出せることをテストボー ドで確認しており、単純な回路での高速読み出しが期待される。

5.3.2 テストボードの FPGA

ADC でデジタル化したデータは FPGA 内に送られるが、実際に PC と接続してデータを取得 する際は、イーサネットを経由した転送が可能になるように FPGA 内を整備する必要がある。そ こで、今回の研究に当たって FPGA 内に図 5.11 のようなロジックを組み込むことでデータ収集を 行える環境を整えた。開発環境には Xilinx 社製のソフトウエア「Vivado」を使った。



図 5.11: テストボードの FPGA モジュール図

以下の節に、それぞれのロジックの役割を述べる。

ADC IF

テストボードからの ADC データは 1 GHz のレートで FPGA へ送られる。しかし、FPGA 内 で処理できる速度は高々200 MHz 程度である。そのため、ADC IF では IO ブロックと呼ばれる FPGA 内の専用回路群を使ってデシリアライズを行う。これによって、50 MHz のレートに落と して各ロジックへデータを送ることができる。

Delay

データ取得のトリガーは、基本的に ADC データが閾値を超えた際に発行される。しかし、ヒット判定がなされてからデータ取得を開始するまでは数 CLK の遅延がある。つまり、データ取得トリガーは信号の立ち上がりよりも早いタイミングでかけなくてはならない。そのため、実際に取得する波形を delay させることでこの問題を解決する。

Delay ロジックは取得した波形をいったん Ring Buffer に書き込み、それと同時に、遅延時間だけ前に記録した波形を Ring Buffer から読みだして Data Formatter へと送る。この手法を取ることで、信号の立ち上がりに対してトリガーのかかるタイミングを相対的に早めることができる。

Hit Detector

Hit Detector は、入力した波形に対してヒット判定を行うロジックである。入力2 チャンネル のうちどちらかがヒットと判定されたら、Trigger Manager に 1 bit のヒット情報が送られる。現 在は、MoGURA で使用されているヒット判定ならびに 5.2.2 節で解説する微分ヒット判定による 判定が組み込まれており、どちらを使うかはパラメータレジスタへ書き込むことで選択ができる。

Trigger Manager

Trigger Manager は、入力信号のヒット判定、イーサネット経由での強制トリガー、LEMO に よる外部入力トリガーのいずれかが検出されたときにトリガーを発行する機能である。トリガー は 2 bit の情報として送られるが、これは Data Formatter でのデータ転送モードの選択に用いら れる。現在、MoGURA と同じ acquire range モード、積分値モード、acquire hit モードの3種類 が組み込まれており、どのモードを使うかはパラメータレジスタによって選択が可能である。

Data Formatter

データは、フォーマット化がなされて PC へと転送される。しかし、前述のようにデータ転送 モードは3種類ある上、時間情報やトリガー情報もデータとして転送する必要がある。このため、 これらをフォーマット化して SiTCP への転送を行うのがこの部分の役割である。なお、PC への 転送には時間がかかるため、入力が 480 bit なのに対して出力は 50 MHz 8 bit の転送速度である。 また、後段の Ethernet ポートの転送速度は 100 Mbps のため、実際の転送速度はさらに落ちる。 このような理由から、Data Formatter には一時的にデータを蓄える FIFO メモリーが実装されて いる。

Parameter Register

このレジスタは、データ収集のためのパラメータを管理する役割を持つ。例えばヒット判定に 使う閾値の設定やトリガーの ON/OFF など様々な用途に使用されており、必要に応じて読み出し および書き込みを行うことができる。データの転送が TCP 通信で行われるのに対して、レジスタ への読み書きには UDP 通信が利用されており、テストボードでは通信方法が用途の違いで明確に 区別されている。

5.3.3 MoGURA2 テストボードの性能評価

KamLAND2-Zen におけるエネルギー分解能の改善のためには、電子回路のアナログ的性能が 要求を満たすことは不可欠である。そこで、今回は製品版の開発に先立ってテストボードを使っ た性能評価を行った。測定項目は以下の節で述べる4種類で、これは MoGURA で使われている ものと同じ評価法である。なお、波形の出力にはパルスジェネレータとして東陽テクニカ社製の Tabor WW2571 Arbitrary Waveform Generator を使用した。

ノイズ評価

ノイズ評価は入力を短絡した際の ADC 値の標準偏差で評価する。この評価の上で問題となるの は、MoGURA2 への移行の際に BLR を撤廃した効果が表れるかどうかである。つまり、MoGURA2 におけるノイズが MoGURA 単体のものと変わらなければ、BLR の分だけノイズは改善するとい える。この評価結果は図 5.12 のようになった。



図 5.12: 各ゲインのノイズ

この評価の結果、P ゲインの標準偏差は 0.13 mV、L ゲインの標準偏差は 1.6 mV となった。つ まり、MoGURA2 の P ゲインは BLR なしの MoGURA の P ゲイン程度、MoGURA2 の L ゲイン は BLR なしの MoGURA の M ゲイン程度のノイズであることがわかる。P ゲインでは依然とし てノイズが多く、更なる改善が要求される。

線形性評価

エネルギー分解能を保証するうえで、線形性が保たれていることは非常に重要である。この評価結果は図 5.13 のようになった。



Ρゲイン

Lゲイン

図 5.13: 各ゲインの線形性

線形性に対しては要求が満たされているものの、想定よりもゲインが大きくなってしまうこと がわかった。テストボードではもともとアンプの設計ミスによって想定よりも増幅率が想定より も多くなってしまっているが、図 5.13 はそれを補正した図である。補正後ももなお 1.2 倍の増幅 がなされる要因はまだ分かっておらず、製品版を製作するうえでの課題の1つである。

周波数特性評価

PMT の信号は基本的に 20 ns ほどの幅しか持たない。そのため、AMP や ADC の時間応答性 が悪かった場合はチャージの大きさを実際よりも小さく見積もることにつながる。周波数特性に ついては設計の際のシミュレーションによる値が得られているため、問題となるのはこの設計値 に実測値が合うかどうかである。今回、シミュレーションと同様のセットアップで測定すること で設計値との比較を行った。この結果を図 5.14、5.15 に示す [16]。



図 5.14: P ゲインの周波数特性

この測定については、シミュレーションに使った値と同じく3mVの波形を入れてテストしている。縦軸の単位は、1Vとの比較である[16]。



図 5.15: L ゲインの周波数特性

この測定については、シミュレーションに使った値と同じく 10 mV の波形を 入れてテストしている。縦軸の単位は、10 V との比較である [16]。

低周波数の信号については設計値どおりに増幅される一方、50 MHz の信号が設計値の約1.2 倍に 増幅されることがわかった。これは、基盤上に乗っている 50 MHz のシステムクロックが原因であると 思われる。テストボードでは、50MHzクロックを生成するために京セラ社製 KC7050B50.00C31A00 が基板上に取り付けられている。製品版で使用するシステムクロックはトリガーボードから各ボー ドに送られる方式のため、この増幅については製品版であらためて評価する必要がある。

チャネル間クロストークの評価

MoGURA で使用されていた ADC は P ゲインのみが2 チャネルで、H、M、L ゲインはすべて 1 チャネル入力である。つまり ADC チャネル間のクロストークは基本的に P ゲインのみを考えれ ば十分であった。加えて、P ゲインはそもそも数 p.e. 相当の信号を観測するためのゲインである。 クロストークは基本的に信号の大きさに比例するため、これまでは大きな影響を及ぼす要素では なかった。

MoGURA2 に使う予定の ADC は P、L ゲインがともに 2 チャネルである。したがって、大光 量イベントが入射された際に L ゲインで受ける影響を考慮する必要があり、クロストークの評価 がより重要になる。測定の結果は図 5.16 のようになった。



Ρゲイン

Lゲイン

図 5.16: 各ゲインのチャネル間クロストーク

この結果から、L ゲインの ADC で 16% もの大きなクロストークが起きてしまっていることが わかる。これは dB 単位に直すと-16 dB であり、仕様書の値である-100 dB と比べ 10000 倍の値 となっている。この原因についてはまだ分かっておらず、製品版を製作するうえで早急に解決す る必要がある課題の一つである。

5.3.4 設計における問題点の修正

テストボードでは、生産後の実測によっていくつかの問題点が判明した。ここでは、それらに ついて紹介する。

DAC 出力の下限

DACは、ADCの入力オフセットをアナログ的に調整する目的で使用される。これの問題として、DAC入力が低いときに電圧値が十分に下がりきらず常にオフセットをのせてしまうという問

題が発生した。この問題は特に P ゲインで深刻であり、ADC 値のベースラインを 220 以下に下げ ることができない状態であった。後にこの直接の原因は、バッファアンプ ADA4927-1YCPZ-R7 から出ているオフセット出力であることがわかった。本来であれば DAC の出力によってこのオフ セットはなくなるはずであったが、駆動電流値の不足で下げきることができていなかった。その ため、DAC の出力部分にボルテージフォロワ回路を追加することで出力電圧を下げることに成功 した。²なお、ボルテージフォロワ回路には LM7321 を使用した。



図 5.17: 回路変更前後の DAC 値と ADC 値の関係。10000 データの平均値を プロットした。

P ゲインのノイズの問題

P ゲインの ADC には、当初 3.3mV RMS ものノイズが乗っていた。これは、ADC のコモンモード電圧が発振していたためである。この問題は、コモンモード電圧に使われているバイパスコンデンサの容量 *C*₁₀₅, *C*₁₀₆ が大きすぎたことによるものであった。これを解決するために、新バージョンの回路では容量を 0.1µF から 0.1nF に下げることで、現在は発振が改善されている (図 5.18)。

²この改善は現バージョンのテストボードが製作されてから改善がなされたため、回路図には反映されていない。新 バージョンのテストボードならびに製品版では回路図に修正が加えられる予定である。



図 5.18: 回路変更前後のコモンモード電圧の発振。AMP のコモンモード電圧 入力点にプローブを当てて、オシロスコープでデータを取得した。

5.4 改良版の PMT ブリーダー回路

KamLAND2-Zen では、PMT のブリーダー回路の改良も計画されている。この改良は 5.2.2 節 で述べる微分ヒット判定の準備である。現行の PMT では BLR によってオーバーシュートが抑制 されているが、BLR を使わなかった場合プラス方向にサチレーションが起こってしまうことがわ かっている。そのため、オーバーシュートの原因はブリーダー回路のコンデンサの放電とわかっ ているため、これを改良することによる削減を目指す。改善前後の回路図を図 5.19、5.20 に示す。 なお、改善前の回路は現在 17inch PMT に使用されているものを HighQ.E. PMT 用に設計しなお したものであり、基本的な性能は現在使われている回路と変わらない。



図 5.19: 改善前のブリーダー回路



図 5.20: 改善後のブリーダー回路

注目すべきは、改善前の回路におけるキャパシタ*C*₅,*C*₆の容量を増加させたことである。これ は我々KamLAND グループが浜松ホトニクス社に提案し、設計していただいた。この部分の容量 を増加させることは、放電時定数の増加につながる。シミュレーションでは、放電時間が 20 倍に なるのに対してオーバーシュートの波高も 1/20 に抑えられていることがわかっている。なお、現 行のブリーダー回路でのオーバーシュート持続時間は約 1 ms であり、20 倍になったとしても高々 20 ms である。一方オーバーシュートを生む要因である KamLAND のミューオンイベントは約 0.2Hz のため、オーバーシュートの積み重ねによる PMT 破損の心配はない。実際に実験室でオー バーシュートを観測した新旧ブリーダー回路のテスト結果が図 5.21 である。



図 5.21: 新旧ブリーダー回路のオーバーシュート比較

オシロスコープで取得した 512 波形の平均で、入射光は 10000p.e.。アフター パルスの影響があるため、~500µs における値は実際のオーバーシュート波高 よりも低いことが予想される。

第6章 新手法の評価

5章で、中性子捕獲信号を取得するための新しい手法を示した。本研究では実験室レベルで KamLAND2-Zenのセットアップを可能な限り再現することで、その効率を検証した。本章では 6.1 で波形データ取得のセットアップを述べる。6.2 では評価の際に問題となる KamLAND での PMT ヒットタイミングの広がりを調べ、タギング効率評価法として適切な方法を議論する。そ のうえで、6.3 節でヒットタイミングの広がりを考慮した評価法によって中性子タギング効率を求 める。

6.1 データ取得のセットアップ

原理検証にあたっては、KamLAND2-Zenにおけるミューオン信号、中性子捕獲信号を再現する ことを考える。このとき、後発信号となる中性子信号は入射された時刻が正確に特定できる必要が ある。以上を考慮して、ミューオン信号相当の光はLEDを用いて、中性子信号相当の光は時間応 答の良いレーザーの光を用いて再現するのが適当である。また、データ収集のためには MoGURA2 のテストボードを使用することで再現を図る。以上の考えから、図 6.1 のようなデータ収集環境を 構築した。



図 6.1: 実験のセットアップ。ミューオン信号を LED で、中性子信号をピコ秒 ライトパルサによって再現した。実験に使用した PMT は KamLAND2-Zen に 使用する予定のものと同じ仕様である。

なお、PMTは浜松ホトニクス社製R12860HQEを、LEDは日亜化学工業株式会社製のNSPB500AS を、レーザーは浜松ホトニクス社製 PLP-10 405nm をそれぞれ使用した。ここで、原子核破砕に よる中性子信号を再現するには LED の発光から数 μs 後にレーザーの信号を入射する必要がある。 これを可能にするために、実際は図 6.2 のような回路を組んでタイミングの調整を行った。


図 6.2: 実験の回路図。10Hz のレートで LED が発光するが、ミューオン信号 が入射されてから 1 ms の間、2 µs おきにレーザーの信号が入射される。

つまり、CH0 におけるレーザーの入力を CH1 の信号から特定することを考える。実際の CH0、 CH1 の波形は図 6.3 のようになった。なお、データ取得の際は高性能 FPGA を生かして、連続し た 300 μs 長のデータを取得する。



図 6.3: レーザー出力タイミングと PMT 波形。LED の出力は OFF にして測定した。黒線が CH0 の波形を表し、赤線が CH1 の波形を表す。想定通りレーザーの SYNC OUT 立ち上がりの直後に PMT 波形の立ち上がりが位置している。なお、見やすさを考慮し CH1 の信号はオフセットを入れてプロットしている。

6.2 タイミング広がりの評価

評価には、信号立ち上がりのタイミングにおける広がりを詳細に理解することが重要である。こ の節では、シミュレーションの根拠となる PMT ヒットタイミングの広がりについての情報を先 にまとめ、その結果を踏まえた実際のシミュレーション方法を紹介する。

6.2.1 近接 PMT のヒットタイミング

ボード内高速トリガーでは、近接 PMT16 本のヒット判定和を必要とする。したがって、近接 PMT 同士の信号検出時間差の評価が必要になる。そこで、ミニバルーン内部の信号を想定して最 近接 PMT 同士でのヒットタイミングの時間差をシミュレーションした。結果、2つの PMT での 信号立ち上がり時間の広がりは図 6.4 のようになった。



図 6.4: 近接 PMT のヒットタイミング広がり

このフィッティング結果から、ガウス分布で10 ns 程度の広がりがあることがわかった。

6.2.2 遠隔 PMT のヒットタイミング

グローバルトリガーは各ボードのヒット判定和にかけることを想定している。このためには、 全 PMT でヒットタイミングの広がりを評価する必要がある。現在の KamLAND のデータから、 PMT 同士のヒットタイミングの差は最大で 120ns ほどになることがわかっている。しかし、 $0\nu\beta\beta$ に特化させた判定をするのであればミニバルーン内部のイベントの検出で十分であるため、120ns の幅を取る必要はない。KamLAND2-Zen でのミニバルーンの大きさを考慮すると、実際に $0\nu\beta\beta$ の解析に使うのは検出器中心から 2 m 以内のイベントとなる。先行研究により、物理イベントの 位置ごとのヒットタイミング差は図 6.5 のようになることがわかっている。



図 6.5: PMT ダイヤモンドヒットタイミングの時間差 [16]。KamLAND 検出器 では近接 PMT をダイヤモンドと呼ばれる単位で分割しており、ダイヤモンド 内で同時に 3 つ以上の PMT がヒット判定された場合それをダイヤモンドヒッ トと定義している。右の図は物理イベントにおける最も速いダイヤモンドヒッ トと最も遅いダイヤモンドヒットの時間差であり、ターゲットとなる 0νββ 領 域では 40ns の時間差に収まっている。

この結果から、KamLAND2-Zen では中性子捕獲のためのグローバルなヒット判定にのみ 40ns の window を利用することを想定する。

6.2.3 レーザーのヒットタイミング

今回のセットアップでは、レーザーからの SYNCOUT 信号を用いて入射タイミングを特定す る。そのため、SYNCOUT からレーザーの入射までの時間差、ならびにその広がりの情報が必要 になる。この評価のために、LED の入力を切ってレーザーのみ PMT に入射したデータを 10000 イベント取得した。これを用いて CH1 の立ち上がりから CH0 の立ち上がりまでの時間差を評価 したのが図 6.6 である。



図 6.6: レーザー出力タイミングの広がり

この結果から、160ns - 176ns の範囲にほぼすべてのイベントが集まっていることがわかる。これは、図 6.4 の広がりに比べると十分小さい。

6.2.4 タイミング評価を踏まえた中性子タギング効率のシミュレーション方法

以上のヒットタイミング評価から、CH1 の立ち上がりから 160ns - 200ns をレーザーの入射があ る ONtime、0 - 40ns をレーザーの影響がない OFFtime として両者を比較することを考える。た だし、実際の KamLAND での近接 PMT によるタイミングの広がりを評価する必要があるため、 取得したデータごとに図 6.4 に従った疑似乱数を発生させ、波形全体を dt[ns] だけシフトさせるこ とで広がりの効果を組み込む。

今回、シミュレーションのためのデータ取得として 5000 イベントの取得を行った。各データ に対して上記に述べた乱数によるシフトを行い、16 イベントごとにまとめることで ONtime と OFFtime の検出効率を評価した。

6.3 中性子タギング効率の評価

6.3.1 中性子効率導出の方法

前述のように、評価にはテストボードで取得した 5000 データを用いた。これを 16 イベントご とに分割し、ローカルなトリガー 312 回分の検出確率を時間ごとに導出した。図 6.7 にその例を挙 げる。



図 6.7: 各時間の検出確率

この結果 p(t) をもとにして、118 ボードでの結果を計算する。ある時間 t において 118 ボードの うち n ボードがヒット判定される確率 $P_n(t)$ は、以下のようになる。

$$P_n(t) = {}_{118}C_n p(t)^n (1 - p(t))^{118 - n}$$
(6.1)

よって、データ取得のためのトリガー閾値を*TH* [board] に設定した際にトリガーがかかる確率 P(t) は、以下のようになる。

$$P(t) = \sum_{n=TH}^{118} P_n(t)$$
(6.2)

今回は、データ取得のトリガーがかかったら 120ns のデータを取得するロジックを仮定する。 先行研究によると、ミューオンによって生成される中性子数の期待値は 0.0379[個/muon] である [20]。つまり、1回のミューオン信号が検出された際に、 $t[\mu s]$ から $t+2[\mu s]$ の間で中性子信号以外 にトリガーがかかる回数 $N_{fake}(t)$ と中性子信号にトリガーがかかる回数 $N_{neutron}(t)$ は以下のよう に表すことができる。また、 $N_{fake}(t)$ を全時間で足し合わせたものを N_{fake} 、 $N_{neutron}(t)$ を全時 間で足し合わせたものを $N_{neutron}$ と定義する。

$$N_{fake}(t) = P(t) \times \frac{2000[\text{ns}]}{120[\text{ns}]}$$
 (6.3)

$$N_{neutron}(t) = 0.0379 \frac{2[\mu s]}{210[\mu s]} \exp(\frac{-t}{210[\mu s]}) P(t)$$
(6.4)

したがって、N_{neutron}/0.0379 が検出効率として表せる。N_{neutron}/0.0379 を可能な限り1に近づ ける必要があるが、それに伴って N_{fake} の値も増加してしまう。なお、中性子信号にアフターパ ルス信号が混ざって転送されること自体は大きな問題ではない。一度転送が完了すれば信号の判 別には計算機を使ったオフラインの解析が利用できるためである。ここで問題となるのは、N_{fake} に対して転送速度が追い付くかどうかである。トリガーパラメータを最適化する際はこの影響を 考慮しなければならない。

6.3.2 パラメータ最適化

パラメータ最適化にあたっては、以下の4つを自由に動かせるパラメータとして、中性子検出 効率が最大になるように最適化する。

- システムクロックの周波数
- Lゲイン ADC のヒット判定閾値
- ヒット判定閾値
- グローバルなヒット判定閾値

まず、6.3 で述べた転送速度の問題のため、アフターパルスによるトリガーの発行が将来のデー タ収集システムでどの程度許容されるかを評価する。将来のシステムは図 6.8 のような設計にする 予定であり、各ボードからのデータを Hub でまとめてギガビットイーサネットケーブルによって フロントエンド PC へのデータ転送を行う。フロントエンド PC は、さらにシステム全体の制御を するホスト PC に接続される。



図 6.8: 新システムの概念図 [16]

以下に、転送におけるボトルネックの候補を挙げて詳細を確認していく。

• 各チャンネルの FPGA におけるメモリ容量

データ取得トリガーが発行されしだい、各チャンネルのデータが必要な分だけ FPGA 内部 の FIFO メモリに保存される。これはテストボードにおける Data Formatter の FIFO にあ たる。FIFO に保存されたデータは各ボードに 1 枚付属しているオンボードメモリに保存さ れ、その後フロントエンド PC に転送される。いったん FPGA 内の FIFO を中継するのは、 データ取得に比べてオンボードメモリへの書き込みに時間がかかるためである。MoGURA では FIFO メモリに保存できる容量が 10 μs 長程度であり、波形情報損失のボトルネックに なっていた。しかし、現在は高性能 FPGA によって同様のロジックで 320 μs の波形が保存 できるメモリに拡張した。そのため、この部分は MoGURA2 ではボトルネックにならない。

各ボードからフロントエンド PC へのデータ転送

各ボードから Hub へのデータ転送は、100Mbps が出せることをテストボードで確認済みで ある。それに対して、フロントエンド PC への転送は最高速度 1Gbps のイーサネットケーブ ルによって行われるが、300 本近くの PMT の情報がまとめて転送されることになる。よっ て、フロントエンド PC への転送のほうがボトルネックになりやすいことがわかる。

• フロントエンド PC からホスト PC への転送

フロントエンド PC からの転送よりもボトルネックになるのが、ホスト PC への転送である。 この場合も 1GSPS のイーサネットケーブルを使用するが、この転送では各 PC からの通信 渋滞が起こる。この理由から、PMT1879 本ぶんのデータを 1GSPS の通信速度で転送する ことになる。現状一番のボトルネックはこの転送速度である。

以上より、1879PMTの情報量を1Gbpsで送る際のデータ量を評価する。ヘッダーの情報を合わせると1チャンネル当たりの波形情報のデータ量は20bit/ns程度であり、PMT1879本からデータを取得すると37580bit/nsである。転送速度1Gbpsを仮定すると1sあたり26 μ sの波形情報が転送可能である。しかし、KamLAND検出器ではミューオン以外にも物理イベントとして1sの間に約10 event程度の情報が追加で送る必要があるため、実効的な転送可能量は20 μ s程度である。また、1 Gbpsは最大速度であるため、実際の転送速度としては半分程度を見積もることにした。以上より、今回は $N_{fake} < 80$ の制限を設けて最適化を行った。これはミューオンイベント転送時間として1s程度を想定しており、アフターパルスによる余分なデータの取得を10 μ s長まで許すことと同値である。この条件のもとで $N_{neutron}$ が最大になるよう最適化を行った結果、以下のようなパラメータが得られた。

- システムクロックの周波数:125MHz
- Lゲイン ADC のヒット判定閾値: 20ADC
- ヒット判定閾値:14/16PMT
- グローバルなヒット判定閾値:65/118ボード

6.3.3 最適化したタギング効率

最適化したパラメータでの $N_{neutron}$ は図 6.9 のようになった。また、 N_{fake} と $N_{neutron}$ の和を プロットすると 6.10 のようになった。



図 6.9: 中性子信号にトリガーがかかる回数。赤い点が検証実験の結果で、青線が理想曲線である。



図 6.10: アフターパルス後の総トリガー数。理論上は中性子イベントの寿命 (青線)に従って減衰していくはずだが、アフターパルスによって Δ*T* < 20μs の範囲でアフターパルスによる大量のトリガーが発行されてしまう。

この結果を踏まえると、トリガー自体は問題なくかかるものの $\Delta T < 20 \mu s$ ではそれが中性子イ

ベントかどうかを判断することができない。そこで、トリガー情報のみを使った際の判断材料として、式 6.5 のようにパラメータ *N*_{dist}(*t*) を定義する。

$$N_{dist}(t) = N_{neutron}(t) \frac{N_{neutron}(t)}{N_{fake}(t)}$$
(6.5)

この値を各時間でプロットすると図 6.11 のようになった。



図 6.11: 中性子タギング効率(トリガーのみ)

N_{dist}(t) を全時間で足し合わせることで、トリガー情報のみを使った中性子信号の検出率が導出 される。*N_{dist}* から見積もった中性子タギング効率は92.0±5.3% まで改善可能であることがわかっ た。また、オフラインの解析で全ての中性子が判別可能であると仮定すれば97.5±5.7% の取得が 可能である。

第7章 議論

図 4.5 では、取得した中性子によって ${}^{10}C$ をタギング可能な確率は 85.7 ± 12.5% と見積もられ ている。これを参考にして 6 章の結果を ${}^{10}C$ タギング効率に変換すると 83.6 ± 13.1% という結果 が得られる。一方、ミューオンシャワーを使ったタギング手法は KamLAND-Zen のデータによっ て 79.4 ± 9.1% という検出効率が導出されている。 これらが独立と仮定して計算する。

誤差の伝搬則より、*a*,*b* を変数とする *S*(*a*,*b*) の誤差は、式 7.1 のように表せる。

$$\Delta S(a,b) = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial a}\Delta a\right)^2 \left(\frac{\partial S}{\partial b}\Delta b\right)^2} \tag{7.1}$$

また、中性子によるタギング効率 P_n とミューオンシャワーによるタギング効率 P_s を合わせた タギング効率 P_{conv} は式 7.2 のように表せる。

$$P_{conv} = 1 - (1 - P_n)(1 - P_s) \tag{7.2}$$

よって P_{conv} の誤差 ΔP_{conv} は式 7.3 のように表せる。

$$\Delta P_{conv} = \sqrt{((1 - P_s)\Delta P_n)^2 + ((1 - P_n)\Delta P_s)^2}$$

= $\sqrt{((1 - 0.794) \times 0.131)^2 + ((1 - 0.836) \times 0.091)^2}$
= 0.031 (7.3)

以上より、本研究の新手法とミューオンシャワータギングを合わせた¹⁰C タギング効率は 96.6±3.1% となる。

次に、このタギング効率をもとに KamLAND2-Zen での 10 C バックグラウンド数について議論 する。KamLAND-Zen 実験における 10 C イベントは 21.1evt/day/kton という値が得られている。 まず、有効体積を R<1.2 m と設定すると、有効体積内にある液体シンチレータの量は式 7.4 のよ うに表せる。

$$\frac{4}{3}\pi \times 1.2^3 \text{[m]} \times 0.777 \text{[g/cm}^3\text{]} = 5.621 \text{[ton]}$$
(7.4)

よって、ミニバルーン内部のみを考えた場合、5年で観測されるイベント数は式 7.5 のように なる。

$$\frac{5.621[\text{ton}]}{1000[\text{ton}]} \times 21.1[\text{evt/day/kton}] \times 1825[\text{yr}] = 216.45[\text{evt/5yr}]$$
(7.5)

KamLAND2-Zen ではミニバルーンの体積増加によって 1.8 m の有効体積を取れると仮定すると、 5 年間の観測でミニバルーン内に 730.56 event 程度の ¹⁰C が観測される。ここで、KamLAND-Zen 実験ではエネルギー領域として 2.3 - 2.7 MeV のみを選ぶカットにより、このバックグラウンド信 号を 28.7% 程度に減らすことができている。KamLAND-Zen 実験での Q 値におけるエネルギー 分解能は 4.0% であるため、このカットはエネルギー分解能の広がり σ に対して 2 σ 以内の領域を 選ぶことに相当する。将来的にエネルギー分解能が 2.5% まで改善されると仮定すれば、2 σ の領 域は 2.36 - 2.60 MeV になり、¹⁰C バックグラウンドを 17.8% に削減可能である。つまり、タギン グをしない場合の ¹⁰C バックグラウンドは式 7.7 のようになる。

$$730.56[\text{evt}/5\text{yr}] \times 0.178 = 130.03[\text{evt}/5\text{yr}]$$
(7.6)

このうち 96.6% が排除できると仮定すれば、残存するバックグラウンド事象は 7.7 のようになる。

$$130.03[\text{evt}/5\text{yr}] \times 0.034 = 4.42[\text{evt}/5\text{yr}]$$
(7.7)

この値は 0νββ レートの上限値に比べると半分程度である。なお、KamLAND2-Zen でも現状の 中性子タギング手法による効率が変化しなかったと仮定した場合、2つの手法を合わせたタギング 効率は 92.7% となるため、同様に計算すると残存バックグラウンドは式 7.8 のようになる。

$$130.03[\text{evt}/5\text{yr}] \times 0.073 = 9.49[\text{evt}/5\text{yr}]$$
(7.8)

改善前は $0\nu\beta\beta$ の上限値よりも多くのバックグラウンドが存在したのに対して、改善後はその 50% ほどが削減できている。したがって、KamLAND2-Zen におけるボトルネックであった ¹⁰C 由来のバックグラウンドを解消することに成功したといえる。

第8章 まとめ

KamLAND-Zen 実験では、¹⁰C の β⁺ 崩壊によるバックグラウンド事象が深刻な問題となって いる。これを排除するために、現在は2つの手法がとられている。1つは中性子を使ったタギング 手法、もう1つはミューオンのシャワー点特定から原子核破砕の起こった点を特定する方法であ る。しかし、中性子を使ったタギング手法は大光量のミューオンイベントを弱点としており、想定 よりも中性子イベントを取得できていないことがわかった。将来計画である KamLAND2-Zen で は検出器の一新によって発光量が増加するため、この問題はさらに深刻になることが予想される。

そこで、検出器の一新に伴って新しいデータ収集回路に中性子検出のための新しいロジックを 組み込むことを提案する。これは KamLAND2-Zen での発光量の大きさと PMT のアップデート を利用した方法であり、ボードごとのローカルな高速ヒット判定と信号を微分するヒット判定を あわせることによってアフターパルスのレートが高い時間帯でも中性子捕獲イベントを検出可能 になる。この改善によって、従来は検出できなかった Δ*T* < 50μs における中性子イベントも取得 可能になる。

今回、この手法を検証するために実験室でのテストを行った。LED を使ってミューオン信号を、 レーザーを使って中性子信号を再現し、データ取得には KamLAND2-Zen に使う PMT と新電子回 路のプロトタイプである MoGURA2 テストボードを使用することで可能な限り KamLAND2-Zen の環境を再現したデータを取得した。

取得したデータによるシミュレーションの結果、新手法による中性子取得効率は、97.5±5.7% が期待できることがわかった。解析的にアフターパルスと中性子信号を全て区別できると仮定す ると、中性子を用いた手法単体での¹⁰C タギング効率は83.6±13.1% となる。これをミューオン シャワーを使ったタギング手法と合わせることによって、KamLAND2-Zen の¹⁰C のタギング効 率は96.6±3.1% が期待できることがわかった。

付 録 A KamFEE のトリガー回路に実装され ているトリガー[2]

Hit Base Triggers

- ID Prompt, Delayed Triggers ID Prompt Trigger は ID N_{sum}¹ が ID-Prompt-Trigger threshold(通常は 70 に設定)を越えた場合に ID の FBE に発行される。ID Prompt Trigger が発行 された後 1 msec 以内に、ID Nsum が ID-Delayed-Trigger threshold(通常は 50 に設定)を 越えた場合、ID Delayed Trigger が ID の FBE に発行される。KamLAND 実験開始当初は 逆ベータ崩壊の遅延同時計測を目的として設定されていたが、現在は 136Xe の二重ベータ 崩壊の観測に対しても十分低い閾値になっている。
- ID Prescale Trigger ID Nsum が ID-Prescale-Trigger threshold(通常は 40 に設定)を越え た場合に ID の FBE に発行される。より低エネルギーの事象を取得できる。
- ID History Trigger ID Nsum が ID-History-Trigger threshold(通常は 40 に設定)を越えた 場合に ID の KamFEE に発行される。History トリガーでは波形取得の命令は出さず、こ のトリガーの threshold を越えている間 25 nsec ごとの Nsum を最長 200 nsec にわたって 記録する。その間の Nsum のうち最大のものを NsumMax と呼ぶ。
- ID 5-inch Trigger チムニー部の 5-inch PMT の Nsum が ID-5inch-Trigger threshold(7 hits) を越えた場合に ID の FBE に発行される。
- ID to OD Trigger ID Nsum に基づいて Trigger が発行された場合に、OD の KamFEE に 発行される。
- OD Top, Middle, Bottom Singles Triggers Top、Middle、Bottom の各セクションの OD Nsum が、それぞれのセクションごとに設定された threshold(Top、Middle、Bottom の順 に 8、9、11)を越えた場合に、OD の KamFEE に発行される。
- OD Top, Middle, Bottom History Triggers Top、Middle、Bottom の各セクションの OD Nsum が、それぞれのセクションごとに設定された threshold(Top、Middle、Bottom の順 に 8、9、11)を越えた場合に、OD の KamFEE に発行される。History トリガーでは波形 取得の命令は出さず、このトリガーの threshold を越えている間 25 nsec ごとの Nsum を最 長 200 nsec にわたって記録する。
- OD Global Singles Trigger Top、Middle、Bottom を合わせた OD Nsum が、設定された threshold(13hits) を越えた場合に OD の KamFEE に発行される。
- OD Global History Trigger Top、Middle、Bottom を合わせた OD Nsum が、設定された threshold(13hits) を越えた場合に OD の KamFEE に発行される。History トリガーでは波

¹ID N_{sum} には 20 inch PMT は含まれない。

形取得の命令は出さず、このトリガーの threshold を越えている間 25 nsec ごとの Nsum を 最長 200 nsec にわたって記録する。

• OD to ID Trigger OD Nsum に基づいて Trigger が発行された場合に、ID の KamFEE に 発行される。

Time Base Triggers

- GPS Trigger run 開始時から 32 秒ごとに OD の KamFEE に発行される。
- 1PPS トリガー GPS と同期して毎秒全ての KamFEE に発行される。

Other Triggers

 Disable, Enable Triggers Disable Trigger はデータバッファがフルに近い状態になったとき に発行され、データ取得のトリガーを無効状態にする。Enable Trigger はデータバッファが フルの状態から回復したときに発行され、データ取得のトリガーを有効にする。この2つの トリガーはデータ取得を伴わない。

付 録 B MoGURA のトリガー回路に実装され ているトリガー[2]

Hit Base Triggers

 Prescaled Trigger NHit が Prescaled threshold(90 hits) を越えた場合に全ての MoGURA に発行される。このトリガーを発行する間隔や有効にする長さを指定することができ、線源 を用いた較正の際などにトリガーレートを下げることができる。現在、通常のデータ取得の 際には 1 sec 間隔で 10.24 msec の間有効にしている。

Time Base Triggers

- Background Trigger 任意に設定した間隔で発行することができるトリガー。通常のデータ 取得の際には発行していない。
- Baseline Trigger Background Trigger と同様に、任意に設定した間隔で発行することができるトリガー。Background Trigger では、データ量削減のために、波形の立ち上がりやピークなどの時刻をもとに、波形の入っていないベースラインの部分を捨てることがあるが、Baseline Trigger はデータ量を削減せず、波形の全体を記録する。
- PPS Trigger GPS からの PPS(Pulse Per Second) 信号と同期して毎秒全ての MoGURA に 発行される。

History Trigger

 History Trigger 波形情報の代わりに hit sum の記録を行う。任意のトリガーに対して発行 可能であり、hit sum を記録する期間および閾値を任意に設定することができる。また、ト リガー発行時点からさかのぼって hit sum を記録することも可能である。

付 録 C FPGA 開発で苦労した部分

今回の研究に当たって、FPGA ロジックの開発は高エネルギー研究機構の内田智久氏のご指導のもとで行った。しかし、HDLを用いた開発は知識がゼロの状態から始めたため初学者にありがちな間違いを何度も起こしてしまい、そのたびに内田氏のお世話になった。後世のために、開発を通して学んだ重要な知識を記録に残しておく。なお、開発環境は vivado2016.4 を想定している。

ADC 信号のデシリアライズ

そもそも、FPGA は大きく 2 つの部分に分類される。1 つは、IO ブロックと呼ばれる部分、も う1 つはコアと呼ばれる部分である。特に、IO ブロックと呼ばれる部分は FPGA のピンに近い部 分に位置しており、ここで入力、出力信号の電圧電流レベルのシフトを行うほか、高速信号を処 理するための特別な回路も組み込まれている。ここで、HDL でロジックを実装する際は主にプロ セス文と呼ばれる記述を使用するが、それによるロジックは FPGA コアの部分で実装される。し たがって、コア部へ送られる前に IO ブロックで高速信号のデシリアライズをしておかねばならな い。これには、ISERDESE2 と呼ばれる IO を使うのが一般的である。ただし、ISERDESE2 への 接続には BUFIO、BUFR などの他の IO を複雑に接続する必要がある。しかし、vivado であれば select IO interface を使えばそのような手続きなしで設計が可能である (図 C.1)[34]。

ocumentation 🚞 IP Locati	on 🗔 Switch to Defaults
Show disabled ports	Component Name selectio_wiz_0
(Data Bus Setup Clock Setup Data And Clock Delay Summary
	Interface Template Custom Data Bus Direction Input Data Bus Direction Input Data Rate DDR Serialization Factor External Data Width External Data Width External Data Width Dype Differential Standard Custom Copposite Edge Same Edge Same Edge Custom Custom Custom Copposite Edge Same Edge

図 C.1: Select IO interface。Serialization factor のチェックをつければ IS-ERDESE2を生成するモードになる。

ちなみに、ISERDES は入力クロック「CLK IN」と、デシリアライズしたデータが同期するク ロック「CLK DIV」によって稼働するが、IO RESET ピンは CLKDIV に同期させねばならない。 これを正しく行わなかった場合、リセット後にビットが1クロック分ずれてしまうことがあり、リ セット後の再現性に影響が出てくる。なお、この問題はクロック同士の兼ね合いに起因するもの で、本来は解決のために CLKIN に対して CLKDIV の位相を少しだけ遅らせる必要がある。しか し、vivado の最新バージョンでは BUFR に 100ps の遅延を発生させる隠れた機能がある [30] た め、RESET を CLKDIV に同期させている限り特に問題は起こらない。しかし、クロックの動作 に MMCM を使用する場合はデシリアライズ後の CLK に遅延を設定する必要がある。

デシリアライズ後のビットとび

ISERDES でデシリアライズをしたにもかかわらず、ADC 信号の同期が正しく取れずにビット とびが起こることがある。これは、FPGA の内部で遅延が発生してしまうためである。これを補正 するためには、各ビットを IDELAYE2 と呼ばれる回路に接続する必要がある。この接続は、Select IO interface の設定で Data & Clock Delay のタブから delay type を設定することで簡単に設定が 可能である。

IDELAYE2 はビットごとに短い遅延を設定させることが可能で、同期設計の手助けとなる。遅 延の値として入力できるのは5 ビットの値であり、値が1 増える (1 タップと呼ばれる) たびに約 78 ps 遅延が増加する。すなわち、最大で 2.5 ns 程度の delay を設定させることができる。遅延を 設定できるようにしたら、ソフトウエア的に遅延値を確定させるロジックを組むのが簡単である。 まず ADC から固定値を出す設定にして、遅延を1 タップずつ増加させていく。1GHz の ADC で あれば値が変化したところから6タップ目くらいが最も安定した遅延であるはずだから、遅延の 値をそこで確定する。

なお、vivado の Select IO interface で、1 つの FPGA Bank に遅延入り ISERDES を 2 つイン スタンシエートするとエラーが起こる。これは、vivado の仕様である。このエラーが出る原因は、 IDELAYE2 のキャリブレーションに使う IDELAYCTRL が 1 つの bank につき 1 つしか存在しな いためである。Select IO interface で生成したソースコードでは ISERDES ごとに IDELAYCTRL が generate されてしまうのである。この解決のためには、以下の方法をとる。

- 1. Select IO interface で「Include IDELAYCTRL」のチェックをつけた状態でいったん generate する。
- 2. IP sources から yourname_select_io_wiz.v を探し、IDELAYCTRL を除いた部分をコピーし、 新しい vhd ファイルに貼り付ける。
- 3. 別のファイルで IDELAYCTRL を component 宣言してインスタンシエートし、DELAY GROUP を設定する。
- 4. それと同じファイルの中で、2. で作ったファイルを2つぶんインスタンシエートする[31]。

ちなみに、IDELAYCTRL に使用するクロックは正確に 200MHz であることが要求されている ため、MMCM 等を使用することで適切な信号を作り出す必要がある。

QDR の使い方

MoGURA2 の 250M ADC には QDR と呼ばれるインターフェースが使用されている。これは 読み出しレートの4倍の速度でデータが転送される形式であり、少ない配線でデータの取得がで きるというメリットがある。今回使用した ADC を例にとれば読み出し速度は 250MHz なのに対 して信号は1GHz で送られる。FPGA で受け取る信号はクロック信号1ビット、データ4ビット、 FRAME 信号1ビットの計6本である。初学者はクロック信号と FRAME 信号を共にクロックと して使用するという設計をしがちであるが、これは誤りである。正しくは、ISERDES 等を用いて データ信号 + FRAME 信号の5ビット分のデータとして取得する。その後、FRAME の値に応じ てデータを整形して 16 ビットの値として読み出しを行う (図 C.2)。



図 C.2: QDR interface。FRAME 信号は、データが上位ビットであるか下位 ビットであるかを示す信号である。[32]

1つの bank における IO ブロックの数

IO ブロックは数に制限がある。例えば、DDR で信号を読みだすための IDDR と呼ばれるロジッ クは1つのピンに対して1つしか存在しない。つまり、IDDR に入れた信号を再度他の IDDR に 入力してレートを落とすというような設計は仕様上不可能である。

xdc ファイルによる制約の設定

FPGA のタイミング解析のためには、xdc ファイルに適切な制約を書き込まねばならない。な お、1GHz 程度の動作であれば配置制約や input/output delay などの細かいタイミング制約を設 定する必要はない。不可欠なのは、それぞれのクロックの周波数の情報を解析ソフトに与えるこ とである。なお、この制約は先に述べた ISERDES 使用時のように BUFIO 等に入力したものをそ のままクロックとして使う場合に必要な制約である。MMCM を通す場合は制約込みで generate されるため、新たに制約を追加する必要はない。xdc ファイルで周波数情報を与える際には、次の ような情報を書き込む。

create_clock -period 2.000 -name P_DCLK_P -waveform {0.000 1.000} [get_ports {P_DCLK_P}] 上の制約であれば、解析ソフトの中で P_DCLK_P として 500MHz のクロックが生成され、synthesis、implementation 時にそれに関連した信号のタイミング解析が行われる。

Timing Violation

Timing violation とは、FPGA 内で信号の伝達が正常に行われないという警告である。この警告が出ている FPGA は高確率で予期せぬ動作を起こすため、ロジックの改善が不可欠である。この警告が出る理由は大きく2つに分けられる。

1つ目は、信号の伝達が早すぎる場合である。例えば、process 文の中で 500MHz のクロック を使って信号を叩いた場合はほぼ間違いなくこの警告が出てくる。この解決法としては、入力信 号が高速な場合は先に述べたように ISERDESE2 を使ってレートを落とす必要がある。また、も し高レートで FPGA からの出力をしたい場合には OSERDESE2 という IO を使用する。これも Select IO interface で設計可能であり [34]、コア内を数百 MHz 程度のパラレル信号で送った後、 OSERDESE2 によって GHz 程度にシリアライズして出力する。

2つ目は、クロック間の信号伝達のミスである。例えば、100MHzのクロックに同期した信号を 50MHz クロックに同期させなおす時、50MHz のクロックで直接データを叩いてはいけない。周 波数の違うクロック間でデータを受け渡す際には、IP catalog の中にある FIFO を使用するのが 一般的である。非同期 FIFO を使って、FIFO が empty のときのみ読み出しを enable にすること で、安定した信号受け渡しが可能になる。

なお、タイミング違反が起こっていても問題ない部分に関してはその部分のタイミング解析を 無視するという制約を課すことも可能である [34]。

付録D MoGURA2テストボードの回路図
















































謝辞

研究室での3年間、非常に多くの方々にお世話になりました。

指導教員の石徹白先生には、この欄に書ききれないほどお世話になりました。特に修論執筆に 当たっては完成が締め切り間際になってしまい、土日の貴重な時間を割いてまで添削してくださ り、感謝してもしきれません。自分の怠惰な性格で常にご迷惑をかけ続けてしまったにもかかわ らず、卒業まで導いてくださり本当にありがとうございました。研究が進まない時期もモチベー ションが下がってしまった時期も、石徹白先生が辛抱強くお助けくださったおかげで、無事ここ まで来ることができました。センター長の井上先生には研究に対する様々なご指摘を頂きました。 井上先生は誰が何の話をするにしても興味を持って聞いていて、初見の話に的確な質問をしてい く姿は本当に尊敬しています。白井先生にも様々なご指摘を頂きました。白井先生のご指摘は、具 体的な数値目標はどこにあるか、グラフはどう見せるべきかといった、「人に見せる」という部分 に重点を置いたものが非常に有用で、印象に残っています。清水先生にはKamLANDの解析方法 を教えていただきました。修論前には突然居室にお邪魔し、解析に関する質問を長時間してしま いましたが丁寧に教えてくださりありがとうございました。三井先生は、発表すると独自の切り 口で質問が飛んでくるのが印象的でした。個人的に天才タイプだと思っています。また、三井先 生の提案のおかげで DAQ シフトの HV 関係が楽になったのを個人的にとても感謝しています。

バルーンエキスパートの方々には作業関係でお世話になりました。KamLANDの特徴的なところは、みんなで一つのものを作り上げることだと思います。エキスパートとして作業を主導していく姿を見て、グループで作業するときに大切なことを非常によく学べました。これは将来仕事を進めていくうえでとても重要な経験になったと考えています。玉江先生にはコンピュータ関係でお世話になりました。特に、修論直前になって自分のディスクの容量が足りなくなってしまったときは快く容量増加にご協力いただき、おかげさまで無事修論の仕上げを行うことができました。

古賀さんには神岡出張の際にお世話になりました。印象に残っているのは、3度目のDAQシフトに行ったときに言われた、「今無駄だと思うことがあってもそれがあるから将来無駄なことをしなくなる、だからどんなことでも将来に生きる」というお言葉です。この言葉は、私の中で1つ1つの物事への取り組み方が変わった大きなきっかけでした。けんごさんはとても学生思いな方でした。特に、「下の人間のミスは指導した者の責任」という考え方が印象に残っています。その姿勢からは、指導者としてあるべき姿を学びました。

事務の方々にはいつもご迷惑をおかけしきりでした。特に大塚さんには出張届を出し忘れたり、 飛行機を1人ずつ申し込まねばならないところ2人分まとめて申し込んでしまったりと、毎回の ようにご迷惑をおかけしていました。しかし、そんな私にも翌日には何事もなかったかのように 接してくださる心の広さには頭が上がりません。技術職員の中嶋さん、根本さん、鈴木さん、三 浦さんは、直接お世話になることは少なかったですが、常に施設の整備をしてくださっており、縁 の下の力持ち的といえる存在でした。私が円滑に研究を進められたのも、皆様のおかげです。松 村さんの管理してくださっているホームページは、実は就職活動で役に立ちました。企業の方が 私の名前で検索したら引っかかったそうで、私の研究内容に興味を持っていただけるきっかけに もなりました。白鳥さんは、毎日ニュートリノセンターを清掃してくださいました。白鳥さんの おかげでニュートリノセンターはいつもきれいで、気持ちよく利用することができました。かつ 子さん、茂角さんには神岡宿泊の際にお世話になりました。お二人ともとても接しやすい方々で、 お話をするたびに元気をもらいました。

直属の先輩である林田さんには、回路関係の様々なことを教えていただきました。林田さんの すごいところはその知識の多さで、技術関連でわからないことを質問するとその知識量に毎回驚 かされました。また、林田さんは人生で出会った中で1、2を争う人格者でした。ぜひ、これから も私が尊敬する先輩であり続けてほしいなと思います。小原さんには主にバルーン作業でお世話 になりました。何でもそつなくこなす手際の良さにあこがれています。蜂谷さんとは隣の席でした が、物理関係のことをよく教えてもらいました。蜂谷さんに相談すると誰よりもすっきりと解決 してくれるその能力が、正直うらやましいです。白旗さんには主に飲み会でお世話になりました。 白旗さんはいい意味で理学研究科らしくない存在で、自由な生き方を教えてくれました。尾崎さ んには、PMT 関連でお世話になりました。そして普段は普通の人なのに、お酒が入ると途端に面 白くなるのが印象的でした。同期の上澤くん、澁川さん、相馬くん、日野くんとはよく遊びまし た。みんな個性的な人たちで、いわゆる理学研究科のイメージとは違う人たちでしたが、いかに も理学研究科な僕を仲間に入れてくれてありがとう。楽しいときもつらいときも、同期だからこ そ打ち明けられる感情を共有できました。作業に区切りがつくたびに遊びに行ったり、月一回ぐ らい定例会と称して飲みにいったりと、本当に楽しかったです。みんなと過ごした時間はプライス レスでした。後輩のみんなにはとても迷惑をかけてしまいました。本来私がやらないといけない 分まで仕事をさせてしまい、申し訳なかったです。特に大塚くんはこれから私のやり残したテス トボード関連の仕事をしていくと思いますが、どうか MoGURA2 の完成まで頑張ってください。

高エネルギー加速器研究機構の池野正弘様、内田智久様には技術関係のことで大変お世話にな りました。我々の研究室では電子回路を専門に扱える者がいないために、時には出張してご相談 することもありました。池野様には電子回路のアナログ部分の改善に関するアドバイスをいただ きました。池野様のご指摘は本当に的確で、ご指摘通りに回路の変更を行うと毎回面白いように 性能が改善しました。KEK まで電子回路を持ち込んだ際にはプリント基板上の1 mm にも満た ない部品に軽々とはんだづけをしてくださり、その技術には感動しました。内田様には FPGA へ の組み込みを教えていただきました。特に ADC の高速信号の取扱いについては、内田様のアド バイスがなければ今も適切に扱えていなかったと思います。私は FPGA 組み込みをほぼ独学で進 めていたために、内田様への相談前は普通なら知っておくべきことが多数欠けている状態でした。 その中でも内田様は私が何を理解していないのか的確に洗い出してアドバイスをくださいました。 池野様、内田様のお二人がいなければここまで研究を完成させることは不可能だったと思います。 私は就職先として電子回路設計の会社を選びましたが、それもお二人に対しての尊敬の念があっ たからです。これまで私の研究の手助けをしてくださり本当に感謝しております。

皆様、3年間ありがとうございました。末筆になりますが今後益々のご多幸をお祈り申し上げ ます。

関連図書

- [1] A. Gando *et al.*, (The KamLAND-Zen Collaboration), "Search for Majorana Neutrinos near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen" arXiv:1605.02889.
- [2] 狩野祐喜 (2017) 「KamLAND-Zen 実験における宇宙線ミューオン起源のバックグラウンド 除去効率の改善」 修士論文, 東北大学.
- [3] 大木歩 (2013) 「新トリガーによる KamLAND-Zen 実験での¹⁰C バックグラウンド除去」 修 士論文, 東北大学.
- [4] 高橋範行 (2011) 「デッドタイムフリー電子回路を用いたミューオン起源長寿命バックグラウンドの識別」 修士論文, 東北大学.
- [5] 大気ニュートリノ観測 http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/commemorative/nobel/description-02.html
- [6] http://t2k-experiment.org/neutrinos/beyond-the-standard-model/sno_neutrino_rate/
- [7] 太陽ニュートリノ観測 http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/physics/solarnu.html
- [8] 原子炉ニュートリノ振動 http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/?p=58
- [9] K. A. Olive et al. (2014), Particle Data Group, "Review of Particle Physics".
- [10] 松田さゆり (2013) 「第一期 KamLAND-Zen 実験における 136Xe のニュートリノを伴わない 二重ベータ崩壊に対する制限」 修士論文, 東北大学.
- [11] H.V.KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I.V.KRIVOSHEINA, "The evidence for the observation of 0νββ decay: The identification of 0 νββevents from the full spectra" Modern Physics Letters A, Vol. 21, No. 20, pp. 1547?1566, 2006.
- [12] 尾崎秀義 (2016) 「カムランド外水槽チェレンコフ検出器の刷新と性能向上」 修士論文, 東北 大学.
- [13] 光電子増倍管ハンドブック, 浜松ホトニクス社.
- [14] 大浦智也 (2016) 「KamLAND2-Zen 実験に向けた新液体シンチレータの純化」 修士論文, 東 北大学.
- [15] 竹本康浩 (2009) 「CNO サイクル太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路の開発」 修士論文, 東北大学.
- [16] 林田眞悟 (2015) 「次期 KamLAND 実験へ向けたフロントエンドエレクトロニクスの開発」 修士論文, 東北大学.

- [17] http://www.awa.tohoku.ac.jp/ sanshiro/kinoko/Application/KamLAND/
- [18] 寺岡夕里 (2016) 「金属スカベンジャーによる KamLAND-Zen の低放射能化に関する研究」 修士論文, 東北大学.
- [19] 林歩美 (2016) 「KamLAND2-Zen に向けた集光ミラーの最適化」 修士論文, 東北大学.
- [20] S. Abe et al. (2009) "Production of radioactive isotopes through cosmic muon spallation in KamLAND" arXiv:0907.0066
- [21] H.V. Klapdor-Kleingrothaus *etal.*(2001) "Latest Results from the Heidelberg-Moscow Double-Beta-Decay Experiment" arXiv:hep-ph/0103062
- [22] GERDA http://www.natureasia.com/ja-jp/nature/544/7648/nature21717/
- [23] A. Gando et al. (2013), "Limit on Neutrinoless Decay of ¹³⁶Xe from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in ⁷⁶Ge" arXiv:1211.3863.
- [24] 小原脩平 (2015) 「KamLAND-Zen 実験における²¹⁴Bi バックグラウンド除去のための発光性 バルーンフィルムの開発研究」 修士論文, 東北大学.
- [25] H. Ikeda(2015), "¹⁰C simulation", in KamLAND-Zen Collaboration Meeting.
- [26] 金谷有歩 (1998) 「大気ニュートリノにおける東西効果の研究」 修士論文, 東京工業大学.
- [27] 朝倉康太 「KamLAND-Zen 次期計画へ向けた新型 PMT の性能研究」 修士論文, 東北大学.
- [28] K.J.Ma et al(2010), "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A".
- [29] V. A. Kudryavtsev, "Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics" arXiv:0810.4635.
- [30] Xilinx AR 57966 https://japan.xilinx.com/support/answers/57966.html
- [31] Xilinx AR 52502 https://japan.xilinx.com/support/answers/52502.html
- [32] ADS42LB69 仕様書, Texas Instruments
- [33] Vivado Design Suite UG471
- [34] Vivado Design Suite UG903