

修士論文

KamLAND-Zen 実験における信号波形情報を用いた背景事象除去の研究

Study on Background Reduction Using  
Waveform Information in KamLAND-Zen

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

蜂谷尊彦

平成 27 年



## 要旨

近年のニュートリノ振動の発見で、ニュートリノはわずかながら質量を持つことが明らかになった。ニュートリノが物質と反物質が同じである、というマヨラナ性をもつと、その軽い質量を説明出来る他、宇宙初期に反物質が消えた理由を説明できる可能性がある。このマヨラナ性を検証するための手段がニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊 ( $0\nu$ モード) 探索である。

本研究では  $0\nu$ モード探索実験 KamLAND-Zen において、これまで考慮されていなかった  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  パイルアップ事象のバックグラウンドとしての影響を見積もった。その結果、将来的に無視できない影響をもつことが分かったため、この事象を除去するために単一事象と短時間内の2事象を判別するツール (ダブルパルスフィッタ) を新たに開発し、約半分に除去することができた。

新たに開発したダブルパルスフィッタの応用として、液体シンチレータ (LS) 検出器 KamLAND でオルソポジトロニウム ( $o$ -Ps) 事象の同定が可能であることを示した。このことを用いて、宇宙線ミューオンによる原子核破碎生成物  $^{11}\text{C}$  が KamLAND-Zen の Xe 溶解 LS (Xe-LS) 中で生成される量を初めて測定した。同じ原子核破碎生成物である  $^{10}\text{C}$  は  $0\nu$ モード探索のバックグラウンドであり、KamLAND の LS (Outer-LS) 中での生成量はこれまでに測定されているが、Xe-LS 中での生成量が分かっておらず、 $0\nu$ モード探索の不定性となっていた。 $^{11}\text{C}$  の生成量を測定することで、その手がかりを得ることを期待した。本研究で測定した  $^{11}\text{C}$  の生成量の結果は  $1.2 \pm 0.2(\text{stat.}) \pm_{0.2}^{0.3}(\text{syst.})/\text{day/ton}$  であり、先行研究で測定されている Outer-LS 中の生成量  $0.97 \pm 0.01/\text{day/ton}$  と誤差の範囲で一致していた。系統誤差は  $o$ -Ps の寿命の不定性に起因しているため、実験室測定により寿命を決定すれば削減することができ、今後統計がたまれば Outer-LS と比較が可能な精度での測定が実現できると期待する。

将来計画 KamLAND2-Zen では集光量が現行比で約5倍になる見込みである。これによりダブルパルスフィッタの性能も向上する可能性があるため、パイルアップバック事象グラウンドと  $o$ -Ps 事象の同定率のさらなる向上を期待する。

# 目次

要旨	i
第1章 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊	1
1.1 ニュートリノ振動の発見と未解決問題	1
1.2 マヨラナ性とシーソー機構	2
1.3 ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊とその研究意義	3
1.4 実験手法	4
1.5 主な $0\nu$ モード探索実験	5
1.5.1 KamLAND-Zen	5
1.5.2 EXO-200	6
1.5.3 Heidelberg-Moscow 実験	6
1.5.4 GERDA	6
1.5.5 CUORE	7
1.6 $0\nu$ モード探索の世界情勢	7
第2章 KamLAND-Zen	8
2.0.1 期間と名称	8
2.1 検出器	8
2.1.1 ID	10
2.1.2 OD	14
2.1.3 LSの純化	14
2.1.4 データ収集システム	16
2.1.5 新回路 MoGURA と BLR	17
2.2 KamLAND-Zenの背景事象	18
2.2.1 想定していた背景事象	18
2.2.2 想定していなかった背景事象: $^{110m}\text{Ag}$	20
2.3 これまでの結果	20
2.3.1 1st フェーズ	20
2.3.2 2nd フェーズ途中結果	21
2.4 今後の計画	23
2.4.1 次期計画: KamLAND-Zen 800	23
2.4.2 将来計画: KamLAND2-Zen	24

2.5	事象再構成と検出器較正	25
2.5.1	PMT の信号波形解析	25
2.5.2	PMT のヒット時間と電荷の較正	25
2.5.3	バッドチャンネル選定	27
2.5.4	宇宙線ミューオン事象の再構成	28
2.5.5	事象位置再構成	29
2.5.6	エネルギー再構成	30
2.5.7	VertexBadness	34
<b>第 3 章</b>	<b><math>^{212}\text{Bi}</math>-<math>^{212}\text{Po}</math> 背景事象除去</b>	<b>37</b>
3.1	開発動機: $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ パイルアップバックグラウンド	37
3.1.1	$^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ パイルアップバックグラウンド	37
3.1.2	ダブルパルスフィッタによるパイルアップ事象同定	37
3.1.3	現在までの $0\nu$ 探索解析におけるパイルアップバックグラウンドの影響	40
3.1.4	発光性バルーン導入時のパイルアップバックグラウンドの影響	40
3.2	新しいダブルパルスフィッタの開発	42
3.2.1	現行の DP フィッタ	42
3.2.2	新しい DP フィッタのコンセプト	42
3.2.3	HTDP フィッタの「波形」	43
3.2.4	HT 波形の比較	43
3.2.5	リファレンス波形の決定	45
3.2.6	フィッティング手法	45
3.2.7	シングルパルスフィッタ	47
3.3	HTDP フィッタの性能評価	48
3.3.1	遅延同時計測による $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ 事象数推定	48
3.3.2	HTDP フィッタによる $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ パイルアップ同定能力の評価	49
3.3.3	WFDP フィッタによる $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ パイルアップ同定能力の評価	51
3.3.4	HTDP フィッタのシングルイベント誤判定確率の評価	51
3.3.5	まとめ	55
<b>第 4 章</b>	<b>新しいダブルパルスフィッタの応用</b>	<b>58</b>
4.1	KamLAND におけるオルソポジトロニウムの形成率・寿命測定	58
4.1.1	LS 中におけるオルソポジトロニウムのふるまい	58

4.1.2	Outer-LS 中での $o$ -Ps の形成率・寿命の予想 . . . . .	58
4.1.3	KamLAND における $o$ -Ps 事象の同定の可能性 . . . . .	59
4.1.4	KamLAND における $o$ -Ps の形成率・寿命測定 . . . . .	60
4.2	Xe-LS 中の $^{11}\text{C}$ 生成量見積り . . . . .	67
4.2.1	イベント選定 . . . . .	68
4.2.2	パイルアップバックグラウンド量の見積もり . . . . .	69
4.2.3	$\Delta T$ 分布のフィット . . . . .	70
4.2.4	考察 . . . . .	72
<b>第 5 章 まとめ</b>		<b>73</b>
<b>付録 A U、Th 崩壊系列</b>		<b>74</b>
<b>謝辞</b>		<b>83</b>

# 第1章 ニュートリノを伴わない二重 ベータ崩壊

## 1.1 ニュートリノ振動の発見と未解決問題

近年のニュートリノ振動の発見でニュートリノが質量を持つことが明らかになった。ニュートリノ振動の理論では、ニュートリノのフレーバー固有状態  $|\nu_\alpha\rangle$ 、( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) と質量固有状態  $|\nu_i\rangle$ 、( $i = 1, 2, 3$ ) をポンテコルボ-牧-中川-坂田 (PMNS) 行列  $U$  を用いて、

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

と記述する。ニュートリノ振動観測から分かったのは、3つのニュートリノの質量二乗差であり、未解決問題として

- 質量階層構造
- 他のフェルミオンよりも極端に軽い質量

が残っている。3つの質量固有状態の質量を  $m_i$ 、( $i = 1, 2, 3$ ) とするとき、

$$m_1 < m_2 < m_3 \quad (1.2)$$

となる関係を標準階層構造 (NH) と呼び、

$$m_3 < m_1 < m_2 \quad (1.3)$$

となる関係を逆階層構造 (IH) と呼ぶ。3世代ニュートリノ振動の合同解析の結果 [1] から得られている質量二乗差は、

$$\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2 = (7.54_{-0.22}^{+0.26}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad (1.4)$$

と、

$$|\Delta m^2| \equiv \left| m_3^2 - \frac{m_1^2 + m_2^2}{2} \right| \quad (1.5)$$

$$= (2.43 \pm 0.6) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (NH の場合)} \quad (1.6)$$

$$= (2.38 \pm 0.6) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (IH の場合)} \quad (1.7)$$

である。ここからニュートリノの合計質量  $\sum_i^3 m_i$  の下限値は約 50 meV であることが分かる。上限値は宇宙観測からモデル依存性のもとに  $\sum_i m_i \leq (0.3\text{--}1.3) \text{ eV}$ 、95% C.L.[2] と制限されている。また、 $\beta$  崩壊のエネルギースペクトルを観測することで、

$$m_\beta^2 \equiv \sum_i^3 |U_{ei}|^2 m_i^2 \quad (1.8)$$

という有効質量を計算でき、その上限値は 2 eV [2] と制限されている。これらの上限値はいずれも電子の質量の  $10^{-5}$  以下であり極めて小さい。

## 1.2 マヨラナ性とシーソー機構

ニュートリノは現在、左巻きニュートリノ  $\nu_L$  と右巻き反ニュートリノ  $\bar{\nu}_R$  しか観測されていないが、その質量について考えるために、右巻きニュートリノ  $\nu_R$  を仮定してディラック質量項を書き下すと [3]

$$-\mathcal{L}_D = m_D(\bar{\nu}_L\nu_R + \bar{\nu}_R\nu_L) \quad (1.9)$$

となる。ここで  $m_D$  はディラック質量である。

ところで、ニュートリノは電荷を持たないため、ニュートリノ  $\nu$  とその CP 共役  $\nu^c$  が同じものである可能性がある。このような性質をマヨラナ性と言い、マヨラナ性を持つ粒子をマヨラナ粒子という。この場合、左巻きニュートリノ  $\nu_L$  と右巻きニュートリノ  $\nu_R$  が

$$\nu_R = (\nu_L)^c \quad (1.10)$$

という形で書けるため、式 1.9 は左巻きニュートリノのみで

$$-\mathcal{L}_L = \frac{1}{2}m_L(\bar{\nu}_L(\nu_L)^c + \overline{(\nu_L)^c}\nu_L) \quad (1.11)$$

と書き換えることができる。ここで  $m_L$  は質量の次元をもつフリーパラメータである。この左巻きニュートリノと独立に右巻きニュートリノが存在すると仮定すれば、その質量項は式 1.9 を書き換えて右巻きニュートリノのみで

$$-\mathcal{L}_R = \frac{1}{2}m_R(\bar{\nu}_R(\nu_R)^c + \overline{(\nu_R)^c}\nu_R) \quad (1.12)$$

と書くことができる。さらに  $m_L = 0$ 、 $m_D \neq 0$ 、 $m_R \neq 0$  の仮定のもと、 $\mathcal{L}_D$  と  $\mathcal{L}_R$  を合わせて、質量項を

$$-\mathcal{L}_{D+R} = \frac{1}{2}\overline{(\mathcal{N}_L)^c}M\mathcal{N}_L + \text{h.c.} \quad (1.13)$$



と書くことができる。ここで  $M$  は

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

であり、 $\mathcal{N}_L$  は

$$\mathcal{N}_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ (\nu_R)^c \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

である。ニュートリノの軽い質量は  $m_D \ll m_R$  であれば、行列  $M$  の固有値  $m_D^2/m_R$  として自然に導出することができる。これをシーソー機構 [4, 5, 6] という。

### 1.3 ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊とその研究意義

ニュートリノのマヨラナ性を検証するために現状有効な手段がニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊 ( $0\nu$  モード) 探索である。通常の二重  $\beta$  崩壊 ( $2\nu$  モード) は標準理論内で許される崩壊であり、

$$2n \rightarrow 2p + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (1.16)$$

というように反電子ニュートリノが2つ放出される。一方、 $0\nu$  モードでは図 1.1 に示すように、ニュートリノを交換する形で二重  $\beta$  崩壊が発生する。この崩壊はニュートリノが質量を持ち、かつマヨラナ粒子である場合にのみ可能である。

また、 $0\nu$  モードは宇宙初期の反物質消失を説明するために必要なレプトン数非保存な崩壊である。

さらに、 $0\nu$  モード探索で質量階層構造を決定できる可能性がある。 $0\nu$  モードの半減期  $T_{1/2}^{0\nu}$  は位相空間因子  $G^{0\nu}$  と核行列要素  $M^{0\nu}$  を用いて

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (1.17)$$

という式で書ける。ここで、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  はマヨラナ有効質量であり、PMNS 行列  $U$  と、3つのニュートリノ質量を用いて

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \equiv \left| \sum_{i=1}^3 m_i U_{ei}^2 \right| \quad (1.18)$$

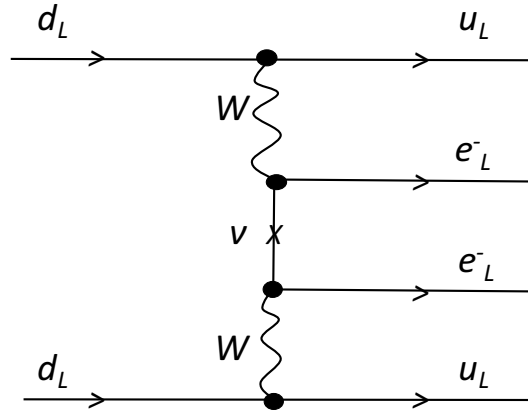


図 1.1:  $0\nu$  モードのファインマン図

と定義される。この式から、最も軽いニュートリノの質量  $m_{\text{light}}$  とマヨラナ有効質量の関係は図 1.2 のようになり、マヨラナ有効質量約 20 meV まで  $0\nu$  モード探索を行えば逆階層構造が許されるかどうかを決定できる可能性がある。

以上が、 $0\nu$  モード探索の学術的意義として挙げられる。

## 1.4 実験手法

$2\nu$  モードでは  $\bar{\nu}_e$  がエネルギーを持ち去るため、電子の合計エネルギーを観測すると、連続スペクトルとなる。一方、 $0\nu$  モードでは電子の合計エネルギーは  $Q$  値に等しくモノクロなピークとなる。このピークの観測を目指すのが  $0\nu$  探索の概略である。

実験デザインの上で重要なのは以下の要素である。

- 大量の二重  $\beta$  崩壊核を用いて実験できる。 $0\nu$  モードは半減期約  $10^{25}$  年以上であり、非常に稀な現象である。逆階層構造領域探索のためには ton スケールまでの拡張可能性が必要である。
- 天然の放射性不純物由来のバックグラウンドを除去する。二重  $\beta$  崩壊核の  $Q$  値の多くは  $^{208}\text{Tl}$  と  $^{214}\text{Bi}$  の  $\gamma$  線の影響を受ける領域に位置するため、その対策が必要である。

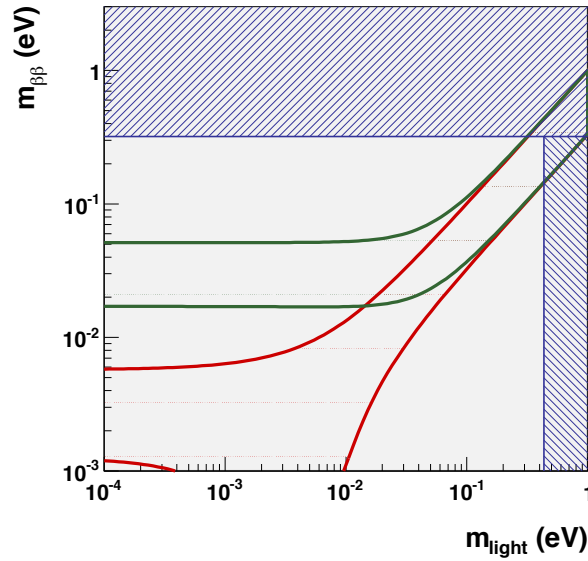


図 1.2: 最も軽いニュートリノの質量  $m_{\text{light}}$  とマヨラナ有効質量  $m_{\beta\beta}$  の関係。緑線で囲まれた領域が逆階層構造の場合に許される領域であり、赤線で囲まれた領域が標準階層構造の場合に許される領域を表す。図は文献 [3] より転載。

- エネルギー分解能。2 $\nu$  モードのエネルギースペクトルのテール成分と 0 $\nu$  モードの事象を切り分ける必要がある。

## 1.5 主な 0 $\nu$ モード探索実験

### 1.5.1 KamLAND-Zen

KamLAND-Zero Neutrino Double Beta Decay Search (KamLAND-Zen)

0 $\nu$  モード崩壊核  $^{136}\text{Xe}$  のガスを液体シンチレータへ溶解し、ニュートリノ検出器 KamLAND へ導入することで 0 $\nu$  モード探索を行っている。Xe 使用量は 382 kg であり、 $^{136}\text{Xe}$  の純度は 91% である。二重  $\beta$  崩壊反応 Q 値 (2.5 MeV) でのエネルギー分解能は 4.0% である [7]。既存の検出器を用いた速やかな実験開始と KamLAND の極低放射能環境を特徴とし、2016 年 1 月現在、2014 年発表のデータでマヨラナ有効質量に対して世界で最も厳しい上限値 140–280 meV、90% C.L. [7] を与えている。値が幅を持つのは核行列要素の不定性のためである。2016 年に Xe を 800 kg へ増量する予定であり、増量後 2 年観測での予想到達感度は約 50 meV [7] である。

### 1.5.2 EXO-200

Enriched Xenon Observatory (EXO)

EXO-200 は  $^{136}\text{Xe}$  を用いた  $0\nu$  モード探索実験であり、液体 Xe のシンチレーションと電離電子を検出する。電離電子の検出時間情報を利用することで事象位置が広がる傾向のある  $\gamma$  線のバックグラウンドを削減する。 $^{136}\text{Xe}$  を 80.6% まで純化した Xe を約 200 kg 使用する [8]。二重  $\beta$  崩壊反応 Q 値でのエネルギー分解能は 1.53% である。2014 年に発表したデータ [8] でマヨラナ有効質量に対して 190–450 meV、90% C.L. という上限値を与えている。

### 1.5.3 Heidelberg-Moscow 実験

Heidelberg-Moscow (HDM) 実験 [9] は、二重  $\beta$  崩壊核  $^{76}\text{Ge}$  を 86% まで純化した高純度 Ge 半導体検出器 (HPGe) を 19.2 kg 用いて  $0\nu$  モード探索を行った。HPGe はエネルギー分解能が高く、 $^{76}\text{Ge}$  の二重  $\beta$  崩壊 Q 値 (2.0 MeV) で実現された分解能は 0.2% である。2001 年発表のデータ [9] でマヨラナ有効質量に対する上限値 350 meV、90% C.L. を与えた。同年、この結果とは別に、研究グループの一部のメンバーが有効質量 0.11–0.56 eV、95% C.L. (中心値は 0.39 MeV) として  $0\nu$  モード崩壊発見を主張した [10]。2006 年に再度報告された結果 [11] では  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 0.32_{-0.03}^{+0.03}$  eV としている。この結果について、バックグラウンド見積もりの問題が指摘されており [12]、2013 年に発表された KamLAND-Zen と EXO-200 の 2012 年の結果 [13] の合同解析 [14] は、この 2006 年の結果を 97.5% C.L. で棄却した。

### 1.5.4 GERDA

Germanium Detector Array (GERDA)

GERDA は HDM と IGEX [15] の HPGe を約 20 kg 用いて実験を行った (Phase I)。冷媒兼外部  $\gamma$  線対策のシールドとして液体 Ar 中に HPGe を導入した。またさらにその液体 Ar 格納容器を水中に導入して  $\gamma$  線対策とした。2013 年発表の結果 [16] では HDM [9] と IGEX [15] の結果との合同解析で、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  に対して上限値 0.2–0.4 eV、90% C.L. を与えた。

アップデート計画の Phase II では、形状が同軸型であった HPGe を Broad Energy Germanium Detector (BEGe) へ変更することで、 $\beta/\gamma$  識別を行う。また、液体アルゴンの発光観測によるアクティブベトーとしての活用を予定している。2015 年 9 月の段階で試験運転を行っていることが報告されている [17]。3 年観測での予想感度は  $^{76}\text{Ge}$  の  $0\nu$  モード崩壊の

半減期で  $1.4 \times 10^{26}$  年としており [18]、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  に換算すると約 100 meV である。

### 1.5.5 CUORE

The Cryogenic Underground Observatory for Rare Events (CUORE)

CUORE は  $\text{TeO}_2$  結晶を用いたボロメータ実験である。二重  $\beta$  崩壊核は  $^{130}\text{Te}$  (Q 値 2.5 MeV) である。ボロメータの手法を用いることにより、イベント取得幅は 5 s と長い [19]、Q 値で 1% 以下という高いエネルギー分解能を実現している。CUORE は  $^{130}\text{Te}$  を約 200 kg 用いて行う予定である。19 分の 1 サイズの CUORE-0 実験の結果 [19] と、さらにその前身実験である CUORICINO [20] の結果の合同解析として  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 270\text{--}760$  meV、90% C.L. という制限を与えている。CUORE の運転開始は 2015 年内 [21] とされており、マヨラナ有効質量への予想到達感度は 5 年観測で 50–130 meV である。

## 1.6 $0\nu$ モード探索の世界情勢

近年までの  $0\nu$  探索はまず HDM 内のグループの発見の主張を検証することが第一段階であった。この主張は KamLAND-Zen と EXO-200 により棄却される可能性が高くなっているが、 $^{136}\text{Xe}$  の結果と  $^{76}\text{Ge}$  の結果の比較には核行列要素の不定性があるため、 $^{76}\text{Ge}$  を用いる実験による直接検証が求められる。

これから数年の実験では図 1.2 の逆階層構造領域に差し掛かる  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 50$  meV への感度到達が目安であり、いよいよ  $\sum_i m_i$  の下限値に近い領域で  $0\nu$  モード探索が行われる。

さらにその先、逆階層構造領域横断となる  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20$  meV への感度到達のために、将来実験のデザイン、準備研究が必要な時期であると言える。

## 第2章 KamLAND-Zen

KamLAND-Zen は Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector (KamLAND) を用いて行っているニュートリノを伴わない (Zero-neutrino: Zen) 二重  $\beta$  崩壊探索実験である。二重  $\beta$  崩壊核である  $^{136}\text{Xe}$  を溶解させた液体シンチレータ (Xe-LS) を透明なナイロン製バルーン (ミニバルーン) に格納し、そのミニバルーンを極低放射能環境を実現していた KamLAND へ導入する、という簡素なデザインである。2011 年 6 月の KamLAND の太陽ニュートリノ観測終了 [22] からわずか 4 ヶ月後の 2011 年 10 月よりデータ取得を開始した [23]。前述した実験開始の早さ、ミニバルーンを入れ替えて標的核を増やせるという拡張可能性、 $0\nu$  信号発見の際には標的核を回収してバックグラウンド測定ができる、という点が KamLAND-Zen の特徴である。

### 2.0.1 期間と名称

本論文中では KamLAND のデータ取得期間、および作業期間について述べる機会が多数あるため、あらかじめ図 2.1 のように時系列を整理しておく。データ取得期間は 4 つに大別し、KamLAND-Zen 開始前については、太陽ニュートリノ観測に向けた純化作業前を反ニュートリノフェーズ、純化作業後をソーラーフェーズと呼ぶ。KamLAND-Zen 開始後は、Ag 除去に向けた純化作業前を 1st フェーズ、純化作業後を 2nd フェーズと呼ぶ。

## 2.1 検出器

KamLAND は 1 kton の液体シンチレータを用いた反ニュートリノ検出器である。その所在地は岐阜県神岡鉱山の地下、2,700 meter water equivalent (m.w.e.) の深さに位置し、検出器内に侵入する宇宙線ミューオンは 0.34 Hz である [24]。検出器の構造は直径 18 m のステンレス容器に格納する内部検出器 (Inner Detector, ID) とそれを取り囲む外部検出器 (Outer Detector, OD) に大別できる。概略図を図 2.2 に示す。

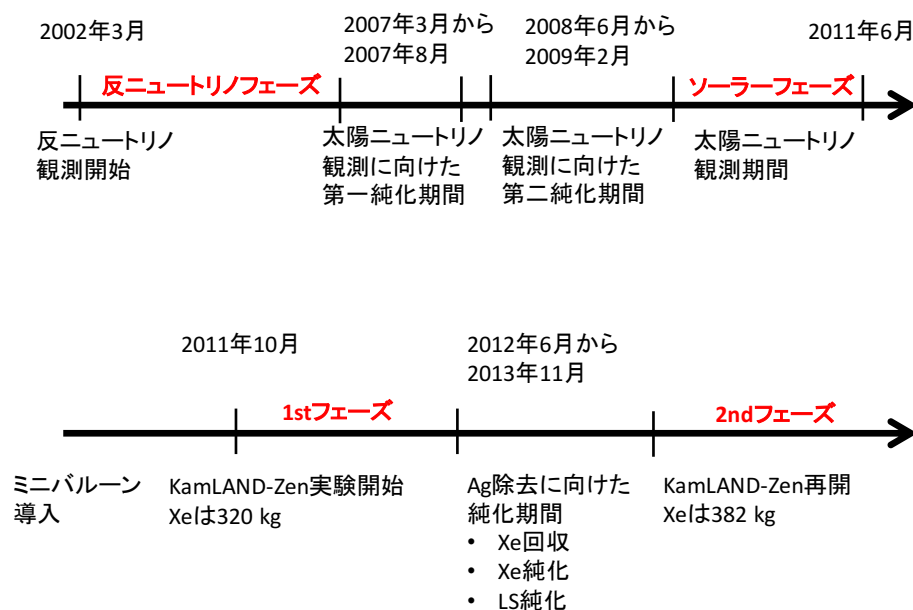


図 2.1: KamLAND のデータ取得期間と作業期間の概略図

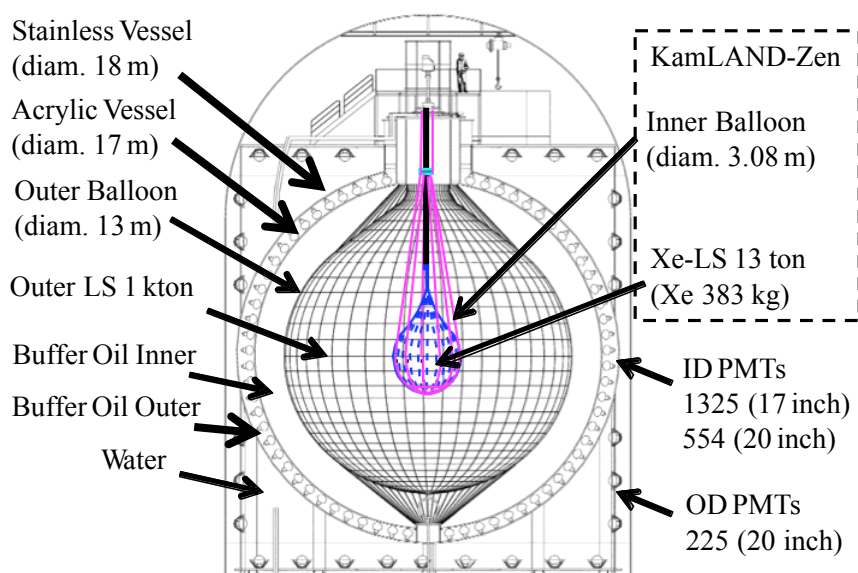


図 2.2: KamLAND (KamLAND-Zen) の概略図

### 2.1.1 ID

ID は液体シンチレータ (Liquid Scintillator, LS) で発生する放射線由来の光信号を光電子増倍管 (Photomultiplier-tube, PMT) で取得するという機能をもつ。主な構成要素を中心部から順に内側から順に列挙すると、

- Xe-LS
- Xe-LS 格納用バルーン (ミニバルーン)
- Outer-LS
- Outer-LS 格納用バルーン (アウターバルーン)
- 内部バッファオイル (Buffer Oil Inner, BOI)
- アクリル容器
- 外部バッファオイル (Buffer Oil Outer, BOO)
- PMT(17 インチ型のもの と 20 インチ型のものがある)

である。

#### 液体シンチレータ: Outer-LS

KamLAND は 2002 年の反ニュートリノフェーズから 2011 年のソーラーフェーズ終了まで、LS としては Outer-LS のみを用いて運転してきた。Outer-LS はプソイドクメン (PC,  $C_6H_3(CH_3)_3$ ) が体積比 20%、ノルマルドデカン ( $CH_3-(CH_2)_{10}-CH_3$ ) が体積比 80%、2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO,  $C_6H_5-C_3HNO-C_6H_5$ ) が 1.36 g/l という構成の混合物である。KamLAND の平均温度 11.5 度における LS の密度は  $0.78 \text{ g/cm}^3$  であり [24]、総質量は約 1 kton である。

LS の発光波長は主に溶質である PPO によって決まり、370 nm 付近にピークを持つ。PMT の感度波長である 400 nm 周辺での LS の光減衰長は約 10 m である [25]。発光の減衰時間は早い成分と遅い成分で

$$\frac{a_f}{\tau_f} \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + \frac{a_s}{\tau_s} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (2.1)$$

$$a_f \equiv \text{早い成分の割合} \quad (2.2)$$

$$\tau_f \equiv \text{早い成分の減衰時間} \quad (2.3)$$

$$a_s \equiv \text{遅い成分の割合} \quad (2.4)$$

$$\tau_s \equiv \text{遅い成分の減衰時間} \quad (2.5)$$



表 2.1: 1st フェーズ、2nd フェーズの Xe-LS の組成 [28, 7, 29]

	1st フェーズ	2nd フェーズ
PC 量 (体積比%)	18	19
ノルマルデカン量 (体積比%)	82	81
PPO 量 (g/l)	2.7	2.3
Xe 量 (kg)	320	383
Xe 量 (Xe-LS 質量比%)	2.44	2.96
発光量 (Outer-LS 比%)	97	93

とモデル化すると、それぞれ

$$a_f = 0.69 \quad (2.6)$$

$$\tau_f = 4.0 \text{ ns} \quad (2.7)$$

$$a_s = 0.31 \quad (2.8)$$

$$\tau_s = 8.6 \text{ ns} \quad (2.9)$$

である [26]。

KamLAND で取得できる Outer-LS の発光からの光電子 (photo-electron, p.e.) 量は 2007 年の第一純化作業前で 17 インチ PMT のみを用いる場合に 300 p.e./MeV、17 インチ PMT と 20 インチ PMT を両方用いる場合に 500 p.e./MeV であった。2009 年に第二純化作業が終了した後では、第一純化作業前よりも取得光電子量が約 30% 減少した [27]。

#### 液体シンチレータ: Xe-LS

Xe-LS は Xe を溶解させた状態での比重を Outer-LS と揃えるため、ノルマルドデカンの代わりにノルマルデカン ( $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_8-\text{CH}_3$ ) を用いることで、Xe 溶解前での比重が Outer-LS よりも小さくなるよう設計している。また、Xe を溶解させることにより光量が減少するため、Outer-LS よりも PPO 量を 1 g/l 程度増やしている。1st フェーズ、2nd フェーズの Xe-LS の組成を表 2.1 にまとめる。 $^{136}\text{Xe}$  の同位体濃縮度は 91% である [28]。

#### バッファオイル

バッファオイル (BO) はノルマルドデカンとイソパラフィン ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ,  $n \sim 14$ ) の混合物であり、LS よりも 0.04% 重くなるように調節している [26]。PMT 由来の  $\gamma$  線を遮蔽する役割を持つ。

### アウターバルーン

アウターバルーンは直径 13 m、厚さ 135  $\mu\text{m}$  であり、ナイロンと Ethylene Vinyl alcohol copolymer (EVOH) を用いて、EVOH(25  $\mu\text{m}$ )、ナイロン (15  $\mu\text{m} \times 3$ )、EVOH(25  $\mu\text{m}$ ) の層状構造で形成されている [26]。ナイロンは強度保持の役割を持ち、EVOH は高いガスバリア性で LS 内に Rn の侵入を防ぐ役割を持つ [26]。

### ミニバルーン

ミニバルーンは厚さ 25  $\mu\text{m}$  の単層ナイロンで構成されている。この厚さは、 $0\nu$  信号のエネルギー領域でバックグラウンドとなる  $^{214}\text{Bi}$  事象を同定するために、 $^{214}\text{Bi}$  に続いて崩壊する  $^{214}\text{Po}$  の  $\alpha$  線の検出効率を保持する必要性から決まったものである [28]。

400 nm の光に対する透過率は  $99.4 \pm 0.03\%$  である [28]。要求値は 95% 以上であり、よく満たしている。

フィルムの含有放射性不純物量への要求値は  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{208}\text{Tl}$  の影響を考慮して、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  ともに  $10^{-12}$  g/g レベルである。ミニバルーンへ整形前のフィルムの分析結果は  $^{238}\text{U}$  が  $2 \times 10^{-12}$  g/g、 $^{232}\text{Th}$  が  $3 \times 10^{-12}$  g/g [30] であったが、ミニバルーン導入後の KamLAND-Zen の解析結果では、 $^{238}\text{U}$  が  $2.2 \times 10^{-11}$  g/g、 $^{232}\text{Th}$  が  $1.4 \times 10^{-10}$  g/g [31] と増加しており、整形過程か導入過程で汚染した可能性を疑っている。

### アクリル容器

アクリル容器は 3 mm 厚であり、PMT とステンレス容器由来の Rn が BOI へ侵入するのを防ぐ [26]。

### PMT

ID の PMT は 17 インチ型が 1325 本、20 インチ型が 554 本の合計 1879 本である。ID 内での被覆率は 17 インチ型のみで 22%、17 インチ型と 20 インチ型の PMT を合わせて 34% である [26]。20 インチ型 PMT のダイノード構造はベネチアンブラインド型であり、増幅電子の Transit Time Spread (TTS) は半値全幅で評価すると約 5.4 ns である [32]。一方、17 インチ型 PMT は時間分解能を得るために 20 インチ型 PMT のダイノード構造をラインフォーカス型へ変更し、光電面を 17 インチに制限する、という改良がなされたものであり、半値全幅にして約 3.1 ns の TTS をもつ [32]。光電面の量子効率 は 17 インチ型、20 インチ型ともに約 22% である [32]。

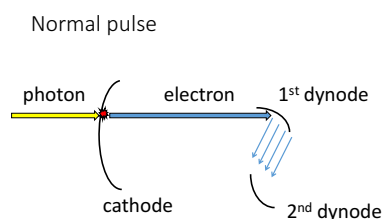


図 2.3: メインパルスの概念図。入射光によって光電面で生成された電子がダイノードで増幅される。

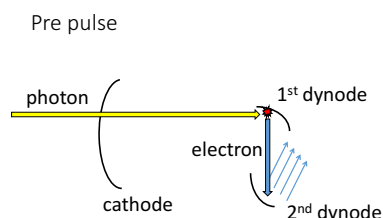


図 2.4: プリパルスの概念図。光子が光電面を透過し、第一ダイノードで光電効果を起こす。

### PMT のメインパルスとメインパルス以外のパルスの特徴

PMT は図 2.3 に示すように、光電面へ入射した光を光電効果で電子へ転換し、その電子を多段のダイノードで増幅する、という構造をとる。この本来の過程以外に発生する信号としてプリパルス、レイトパルス、アフターパルスが挙げられる。

図 2.4 に示すプリパルスは、光電面を透過した光子が第一ダイノードで光電効果を起こす際に発生する。17 インチ型 PMT のプリパルスはメインパルスより約 55 ns 早く発生し、その発生率はメインパルスの約 1% である [32]。

図 2.5 にレイトパルスの概念図を示す。レイトパルスは、光電子が第一ダイノードで増幅されずに弾性散乱 (もしくは一部非弾性散乱) し、光電面方向へ逆戻りした後に第一ダイノードで増幅されることにより発生する信号である。17 インチ型 PMT のレイトパルスはメインパルスより約 110 ns 遅れて発生し、その発生率はメインパルスの約 4% である [32]。

図 2.6 はアフターパルスの概念図である。PMT 中の残留ガスが光電子に電離されることにより発生した陽イオンが、光電面に衝突して電子を生成するとアフターパルスとなる。17 インチ型 PMT のアフターパルスは

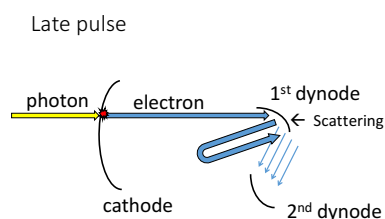


図 2.5: レイトパルスの概念図。光電子が第一ダイノードで散乱される。

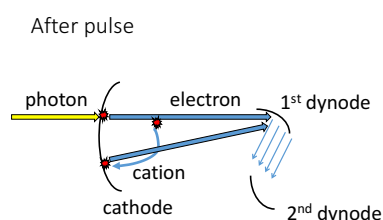


図 2.6: アフターパルスの概念図。PMT 中の残留ガスが光電子に電離され、そこから生じた陽イオンが光電面で電子を発生させる。

メインパルスの数  $\mu\text{s}$  後から数十  $\mu\text{s}$  後にかけて発生し、その発生率はメインパルスの約 3% である [32]。

## 2.1.2 OD

OD は宇宙線ミューオンが水中で生成するチェレンコフ光を観測し、ミューオン事象を同定する。また、岩盤からの中性子と  $\gamma$  線が ID へ侵入するのを防ぐ。OD 用の PMT には 20 インチ型のものを 225 本使用している。OD の水量は 3.2 kton であり、水純化装置によって  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  を  $10^{-13}$  g/g レベルまで純化した水を使用している [33]。

## 2.1.3 LS の純化

### 液液抽出 (第一純化)

液液抽出は液体中の不純物をその不純物の溶解度が高い別の液体を用いて取り除く方法である。水と油では極性の違いがあるため、LS と BO を純水で洗うことで、天然放射性不純物 U、Th、K のイオンを取り除くことができる。純化前の LS の  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  の不純物量はそれぞれ  $10^{-13}$  g/g

表 2.2: LS 中の  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  量 [24, 22, 14, 34]。2nd フェーズの U 量と Th 量の関係が他の期間と著しく異なる点については現在調査中である。

	$^{238}\text{U}$ ( $\times 10^{-18}$ g/g)	$^{232}\text{Th}$ ( $\times 10^{-17}$ g/g)
反ニュートリノフェーズ	3.5	5.2
ソーラーフェーズ	5.0	1.3
1st フェーズ、Xe-LS	130	180
2nd フェーズ、Xe-LS	180	5.9

程度であるが、純化後は  $^{238}\text{U}$  が  $10^{-18}$  g/g 程度、 $^{232}\text{Th}$  が  $10^{-17}$  g/g 程度となる。各期間の LS 中の不純物量を表 2.2 にまとめる。反ニュートリノフェーズの LS はこの液液抽出の後に液中の Rn ガス、酸素、水分を窒素パージで追い出してから KamLAND へ導入された [26]。

#### 蒸留および窒素パージ (第二純化)

$^7\text{Be}$  太陽ニュートリノのエネルギースペクトルは約 800 keV より低い領域に分布しており、その観測のためには、同エネルギー帯に分布しバックグラウンドとなる  $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{210}\text{Bi}$ 、 $^{210}\text{Po}$  を減らす必要があった [22]。 $^{210}\text{Bi}$  と  $^{210}\text{Po}$  は  $^{210}\text{Pb}$  の娘核である。そこで、KamLAND 国際共同実験グループは、KamLAND 本体と LS を循環させながら Pb を蒸留で除去し、Kr を窒素パージで除去する、という一連のシステムを構築した (第二純化システム)[27]。図 2.1 に示すソーラーフェーズ前の二度の純化期間で KamLAND 体積の約 5 倍量の LS を循環し、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{210}\text{Bi}$ 、 $^{210}\text{Po}$  はそれぞれ反ニュートリノフェーズと比較して約  $6 \times 10^{-6}$ 、 $8 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-2}$  になった [22]。

#### Xe-LS に対する純化作業

1st フェーズの Xe-LS は前述した第一純化装置と第二純化装置を用いて、

1. PC、ノルマルデカンをそれぞれ液液抽出
2. PC、ノルマルデカン、PPO をそれぞれ蒸留
3. PC、ノルマルデカン、PPO を混合した LS を窒素パージ
4. LS へ Xe を溶かし込む

という流れで作成し、KamLAND-Zen のミニバルーン内へ導入した。

### $^{110m}\text{Ag}$ 除去のための純化

1st フェーズのバックグラウンドとして  $^{110m}\text{Ag}$  が問題であったため [14]、KamLAND-Zen 国際共同実験グループは 2012 年 6 月から 2013 年 11 月までの期間 (図 2.1) で、Xe-LS の純化作業を行った [35]。この純化作業では Xe を Xe-LS から回収し、LS は新調した。新調した LS は 3 体積分の循環で蒸留作業を行い、Xe は

- チャコールフィルタ
- SUS 製の焼結金属フィルタ
- Zr 合金製のゲッタ
- Polytetrafluoroethylene (PTFE) フィルタ

を通した後に蒸留して純化した。金属除去が期待できるのはチャコールフィルタと蒸留である。純化後のデータでは  $^{110m}\text{Ag}$  は 10 分の 1 以下になった [7]。

#### 2.1.4 データ収集システム

KamLAND のデータ収集システムは、

- PMT の信号をデジタイズするフロントエンドエレクトロニクス (KamFEE)
- トリガーモジュール (KamTrigger)
- データ収集をコントロールするプログラム (KamDAQ)

から構成される。

#### **KamFEE**

KamFEE は PMT の信号をデジタイズする基板であり、1 枚につき 12 本の PMT のインプットを持つ。KamFEE に内蔵される Analog Transient Waveform Digitizer (ATWD) が PMT の波形を 1.5 ns 刻みでサンプルする。信号波形がディスクリミネータの閾値を超えると、それを 175 ns の間保持し、KamTrigger からトリガーが発行されれば 25  $\mu$  ほどでデジタイズする。この 25  $\mu$ s の間に波形情報を失わないよう、各 PMT の入力チャンネルにつき 2 つの ATWD が搭載されている。

入力信号の強度によって 3 種の増幅度:

- 20 倍、Precise-gain (P-gain)
- 5 倍、High-gain (H-gain)
- 0.5 倍、Low-gain (L-gain)

を用いる。

### KamTrigger

KamTrigger は 40 MHz のクロックを内蔵し、このクロックから各事象のタイムスタンプを発行する。クロックは GPS と同期している。KamTrigger は毎クロック (25 ns) ごとに全 200 枚の KamFEE からヒット情報を取得し、設定閾値を越えればトリガーを発行する。ソーラーフェーズと KamLAND-Zen 期間の閾値は 70 ヒットであった。70 ヒットの事象はエネルギーにして約 0.3 MeV である。反ニュートリノフェーズでの閾値は 120 ヒットであった。

### KamDAQ

KamDAQ はデータ収集の開始/停止命令、データの転送、オンライン解析によるデータ取得状況の管理を行い、データ収集全体をコントロールするプログラムである。

#### 2.1.5 新回路 MoGURA と BLR

KamLAND-Zen の  $0\nu$  モード探索のバックグラウンドである  $^{10}\text{C}$  は宇宙線ミューオンによる原子核破砕生成物である。そのため、

- 原子核破砕を起こす宇宙線ミューオンの事象
- 原子核破砕で生成された中性子が捕獲される事象 (平均寿命約 200  $\mu\text{s}$ 、2.2 MeV の  $\gamma$  線)
- $^{10}\text{C}$  の  $\beta^+$  崩壊事象 (平均寿命 28 s)

という 3 つの事象を同定 (3 事象同時計測) することにより  $^{10}\text{C}$  の事象を同定できる。ところが、KamFEE は宇宙線ミューオンが高エネルギーであるために、その事象後最大で 2 ms ほどベースラインが上昇してしまう (オーバーシュート)[36]。加えて、ATWD のデッドタイムと PMT のアフターパルスの影響で中性子捕獲事象を同定することが困難である。

これらの問題への対策として、KamLAND グループは独自開発のデッドタイムフリー回路 Module for General-Use Rapid Application (MoGURA) とを BaseLine Restorer (BLR) を導入した。BLR の導入でオーバーシュートからの回復時間は約  $1 \mu\text{s}$  [36] となった。

現在、KamLAND のデータ取得は KamFEE と MoGURA を両方用いて行っており、これらを組み合わせた解析で 2.2–3.5 MeV のエネルギーの  $^{10}\text{C}$  事象の同定効率として約 70% を達成している [37]。KamLAND での中性子捕獲事象の検出効率はデッドタイムフリーであれば約 90% [38] であり、 $^{10}\text{C}$  形成時には中性子が 2 つ以上放出されることもあるため、今後の解析改善で 90% 以上の  $^{10}\text{C}$  事象同定効率を期待している。

## 2.2 KamLAND-Zen の背景事象

### 2.2.1 想定していた背景事象

KamLAND-Zen の計画段階で想定されていた主なバックグラウンドを以下に挙げる。

- $^{214}\text{Bi}$  崩壊事象。 $^{214}\text{Bi}$  は天然の放射性元素  $^{238}\text{U}$  の娘核である。Q 値が 3.3 MeV の  $\beta$  崩壊を起こし、 $\gamma$  線も放出する。LS 中での崩壊であれば、後続の  $^{214}\text{Po}$  の  $\alpha$  崩壊 (半減期  $164 \mu\text{s}$ ) との遅延同時計測で同定できる。ミニバルーンフィルム中での崩壊では、 $\alpha$  線の検出効率が低下するため、 $^{214}\text{Bi}$  の同定効率は 66% となる [30]。
- $2\nu$  モード崩壊事象。検出器の有限なエネルギー分解能のために  $2\nu$  モード崩壊のエネルギースペクトルのテール成分が  $0\nu$  モード探索のバックグラウンドとなる。
- $^{10}\text{C}$  崩壊事象。 $^{10}\text{C}$  は宇宙線ミューオンの原子核破砕により生成され、半減期 20 秒で Q 値 3.6 MeV の  $\beta^+$  崩壊を起こす。MoGURA を用いた 3 事象同時計測で 90% 以上の除去を見込む。
- $^8\text{B}$  太陽ニュートリノ事象。将来的に不可避なバックグラウンドであり、影響の低減のためには Xe-LS を加圧することで体積辺りの Xe を増やすことが必要である。

これらのバックグラウンドの影響はシミュレーションから図 2.7 のエネルギースペクトルを作成して見積もった [30]。このシミュレーションで仮定した検出器性能は以下の通りである。

- エネルギー分解能  $6.8\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$



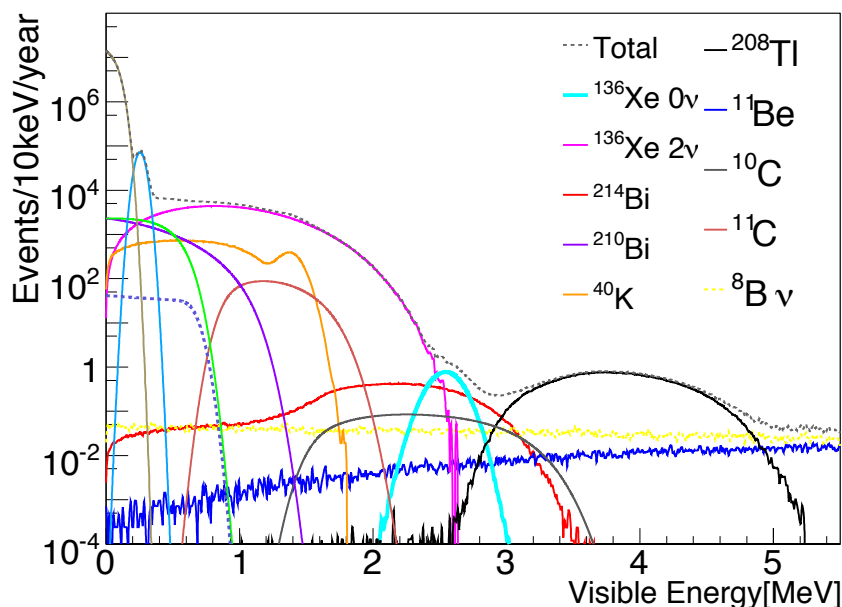


図 2.7: シミュレーションから作成した KamLAND-Zen のエネルギースペクトル。 $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 150$  meV を仮定し、核行列要素の計算に RQRPA モデル [39] を用いて  $0\nu$  モード半減期に換算している。Xe-LS 全領域を有効体積としている。図は [30] より転載。

- 位置分解能  $12.5 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$
- Xe 量 400 kg
- ミニバルーン半径 158 cm
- ミニバルーンフィルム中の  $^{238}\text{U}$  量  $10^{-12}$  g/g
- ミニバルーンフィルム由来の  $^{214}\text{Bi}$  除去効率 66%
- $^{10}\text{C}$  除去効率 90%

シミュレーション結果から、 $0\nu$  モード信号領域 ( エネルギー分解能を考慮して Q 値を中心に  $-\sigma$  から  $+2\sigma$  の範囲) における年間予想イベント数は表 2.3 のようになっていた。この表から、 $^{214}\text{Bi}$ 、 $^{10}\text{C}$ 、 $2\nu$  モードのバックグラウンドがそれぞれ  $0\nu$  モード探索に対して同等の影響を与えることが予想されていた。予想到達感度は 3 年観測で  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 50$  meV であった [40]。

表 2.3: KamLAND-Zen の  $0\nu$  信号領域の年間予想事象数 [30]。エネルギー分解能を考慮し、Q 値を中心に  $-\sigma$  から  $+2\sigma$  の範囲で計算した。

$^{214}\text{Bi}$	$^{10}\text{C}$	$^8\text{B}$	$2\nu$	BG	$0\nu$
				Total	
3.15	2.44	0.20	1.93	8.93	17.79

### 2.2.2 想定していなかった背景事象: $^{110m}\text{Ag}$

KamLAND-Zen グループが 2011 年に  $0\nu$  モード探索の 1st フェーズを開始すると、エネルギー 2.6 MeV 付近に予期していなかったバックグラウンドを観測した [14]。1st フェーズで取得したエネルギースペクトルを図 2.8 に示す。Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) のデータベースの全検索から、2.4–2.8 MeV にピーク構造を作り、親核が 30 日以上の寿命を持つ原子核として、 $^{110m}\text{Ag}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{208}\text{Bi}$ 、 $^{60}\text{Co}$  が挙げられた。この中から事象頻度の時間変化がその寿命に合致する核として  $^{110m}\text{Ag}$  (Q 値 3.62 MeV の  $\beta$  崩壊核、平均寿命 360 日) がバックグラウンドの正体であると特定した [14]。

混入の原因は

- 2011 年のミニバルーン作成時に福島原発事故由来の放射性不純物が付着した
- Xe の輸送中に宇宙線ミューオンによる原子核破砕で Xe から生成した

という可能性がある。

## 2.3 これまでの結果

### 2.3.1 1st フェーズ

データ取得期間: 2011 年 10 月から 2012 年 6 月

1st フェーズの結果 (Exposure は 89.5 kg·yr) [14] は前述の  $^{110m}\text{Ag}$  のバックグラウンドに制限されるも、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu$  モード崩壊の半減期に対する下限値として KamLAND-Zen 単独で  $1.9 \times 10^{25}$  年 (90% C.L.)、EXO-200 の 2012 年の結果 [13] との合同解析で  $3.4 \times 10^{25}$  年 (90% C.L.) を与えた。合同解析結果に対応するマヨラナ有効質量の上限値は核行列要素の不定性を考慮して 120–250 meV であり、HDM 実験の一部のグループが主張した  $^{76}\text{Ge}$  の  $0\nu$  モード発見報告 [11] を 97.5%信頼度で棄却した。

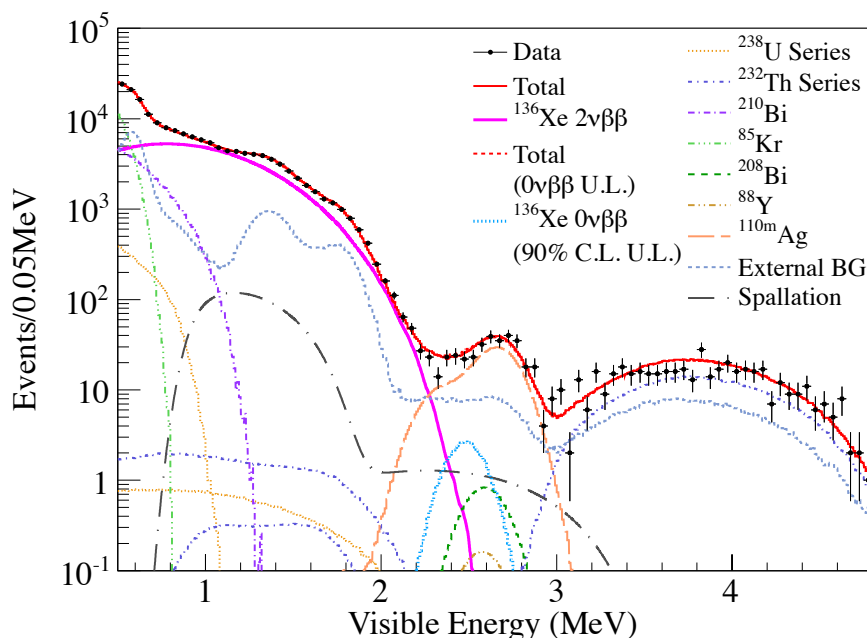


図 2.8: 1st フェーズで取得したエネルギースペクトル。有効体積は検出器中心から約 1.35 m 以内である。「External BG」はミニバルーンフィルム由来の放射性不純物の寄与を表す。図は [30] より転載。

### 2.3.2 2nd フェーズ途中結果

データ取得期間: 2013 年 12 月から 2014 年 5 月

1st フェーズ後の純化作業で  $^{110m}\text{Ag}$  は 10 分の 1 以下に除去された [7]。2nd フェーズ途中結果 [7] のエネルギースペクトルを図 2.9 に示す。2nd フェーズは事象位置とエネルギーの 2 次元解析を行っているため Exposure の厳密な定義は困難だが、検出器中心から 1 m 以内のバックグラウンドレベルが低い領域から計算すると 27.6 kg-yr である。この結果から得られた  $0\nu$  モード半減期の下限值は  $1.3 \times 10^{25}$  年 (90% C.L.) であり、1st フェーズとの合同解析から得られた下限値は  $2.6 \times 10^{25}$  年 (90% C.L.) であった。この合同解析に対応するマヨラナ有効質量の上限値は 140–280 meV であり、2016 年 1 月現在、世界で最も厳しい制限である。

2nd フェーズは 2015 年 10 月に放射線源を用いたキャリブレーションを行い、データ収集を終了した。前述の途中解析からの展望では、2nd フェーズの観測を 2 年行ったときの予想到達感度は半減期にして  $3 \times 10^{25}$  年であり、最終結果の発表が待たれる。

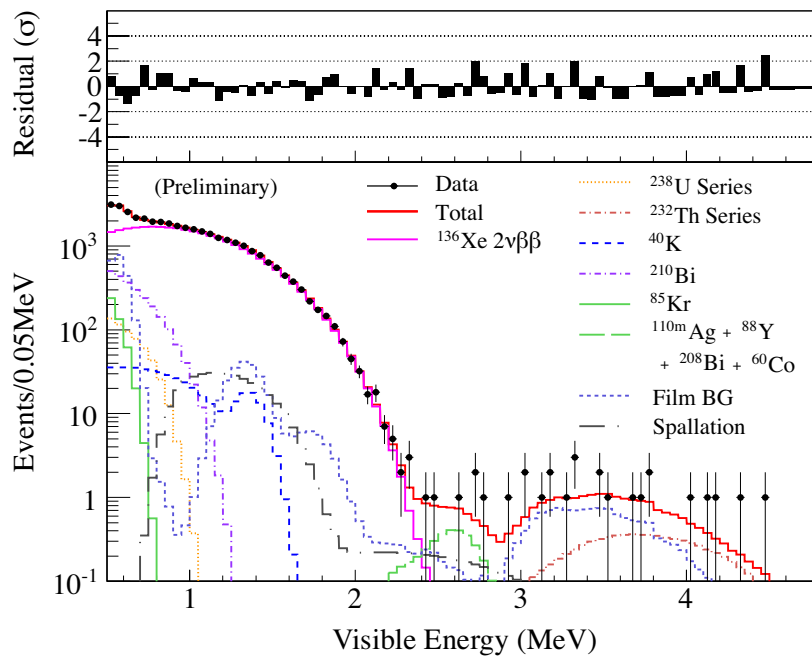


図 2.9: 2nd フェーズで取得したエネルギースペクトル。有効体積は検出器中心から 1.0 m 以内である。「Film BG」はミニバルーンフィルム由来の放射性不純物の寄与を表す。図は [7] より転載。

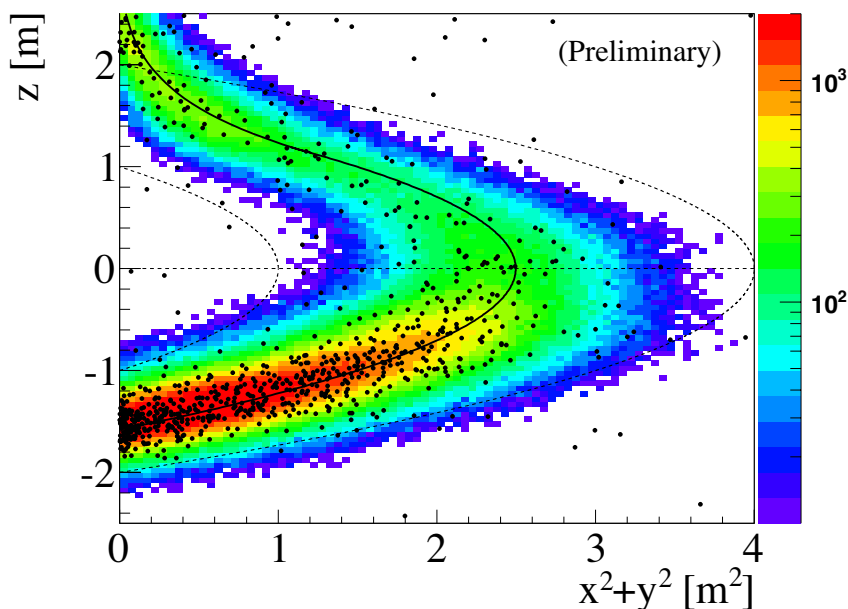


図 2.10: 2nd フェーズの  $0\nu$  モード探索解析対象事象の位置分布 (黒点)。色付きのヒストグラムはモンテカルロシミュレーションで作成した  $2.2 < E_{\text{vis}} < 2.7$  MeV の  $^{214}\text{Bi}$  バックグラウンドの分布を示す。強度のスケールは任意である。実線はミニバルーンフィルムである。図は文献 [7] より転載。

## 2.4 今後の計画

### 2.4.1 次期計画: KamLAND-Zen 800

1st フェーズ、2nd フェーズの結果から、KamLAND-Zen の  $0\nu$  モード探索のバックグラウンドは  $^{110m}\text{Ag}$  を除いて実験計画段階で予期していたものと大方一致していた。 $^{110m}\text{Ag}$  の次に問題となっているのが、ミニバルーン由来の  $^{214}\text{Bi}$  である。ミニバルーンは 1st フェーズで導入したときから  $^{238}\text{U}$  量が  $10^{-11}$  g/g レベルであり、実験デザイン値よりも 10 倍程度  $\text{U}$  を多く含んでいた。2nd フェーズでは  $^{110m}\text{Ag}$  除去のための純化作業中に発生したダイアフラムポンプの破損による外気の混入でミニバルーン底面にゴミを誘引してしまい、その周辺で  $^{214}\text{Bi}$  事象がさらに増加している。図 2.10 に 2nd フェーズの事象位置分布を示す。この  $^{214}\text{Bi}$  バックグラウンド対策として、ミニバルーンを新しいものと交換する計画が KamLAND-Zen 800 である。新調に伴い、半径を約 2 m へ拡大し、Xe を 800 kg に増量す

る。ミニバルーン作成作業の見直しで、ミニバルーンフィルムの整形前の分析  $^{238}\text{U}$  含有量  $2 \times 10^{-12}$  g/g そのままのレベルで  $0\nu$  モード探索を行うことを目標としている。2016 年に実験開始予定であり、2 年観測でマヨラナ有効質量約 50 meV への感度到達を見込む [7]。

## 2.4.2 将来計画: KamLAND2-Zen

$2\nu$  バックグラウンド低減のために、検出器を大幅改造してエネルギー分解能 (集光量) の向上を図るのが KamLAND2-Zen である。集光量向上のための施策を以下に挙げる。

- 高量子効率 (H.Q.E) PMT の使用 [41]。現行の KamLAND の PMT の約 1.5 倍の量子効率を持つ PMT を使用し、さらに光電面を 20 インチにすることで、計 1.9 倍の集光量向上を見込む。
- 集光ミラーの使用 [42, 43]。PMT に集光ミラーを装着することで、集光量を 1.8 倍にする。
- 直鎖アルキルベンゼン (LAB)-LS の使用 [42]。高発光、高透明な LAB-LS の使用で集光量を 1.4 倍にする。

以上の施策で集光量を現行比約 5 倍にし、 $0\nu$  モード Q 値でのエネルギー分解能は 2.5% 以下を見込む [7]。Xe は 1 ton 使用予定であり、5 年観測でマヨラナ有効質量 20 meV への感度到達を目指す。

この他、さらなるバックグラウンド低減に向けて発光性ミニバルーン [44] とイメージング検出器 [45] の導入のための R&D を行なっている。

### 発光性ミニバルーン

発光性のある素材 (Polyethylene Naphthalate, PEN) を用いてミニバルーンを作成することで、 $^{214}\text{Bi}$  崩壊の後続  $^{214}\text{Po}$  の検出効率を高めようという施策である。PEN フィルム自体の  $^{238}\text{U}$  含有量が  $10^{-11}$  g/g レベルであり既存のナイロン製フィルムよりも高いが、発光性能による  $^{214}\text{Bi}$  除去率は 99.7% を見込み [44]、Xe-LS 全領域の有効体積としての使用が期待される。

### イメージング検出器

イメージング検出器で LS の発光事象を撮像することにより、その像の広がり具合から  $\beta/\gamma$  事象の識別を行おうという試みである。直径約 5.5 cm

のミラーをもとにした検出器を KamLAND 内に約 150 器配置した時の性能として、 $^{10}\text{C}$  事象除去率 79% を見込む [45]。設置箇所と設置個数が課題となっている。

## 2.5 事象再構成と検出器校正

KamLAND の事象再構成は

- PMT の信号波形解析
- PMT のヒット時刻と電荷の校正
- バッドチャンネル選定

という処理を経てから行われる。

### 2.5.1 PMT の信号波形解析

KamLAND で取得される PMT の信号波形は、KamFEE を介して 10 ビット、128 サンプルの Analog-to-Digital Converter (ADC) の値としてデジタイズされる。サンプリング幅は約 1.5 ns である。各 PMT 用のチャンネルの ADC 値のオフセットは run の開始時に取得するペDESTAL 波形からノイズとダークヒットの無い波形を選択し、それらの平均値から推定する。このオフセットを差し引き、スムージングした後にベースラインを再調整したものを波形として記録する。128 サンプルの ADC 値のうち、一番最初に立ち上がりとなるサンプルの時間をその波形のヒットタイムとする。

### 2.5.2 PMT のヒット時間と電荷の校正

#### TQ 補正

PMT への光子到達から信号のデジタイズまでの時間はケーブル長、PMT の個性、KamFEE 基板の個性によって、各 PMT チャンネルごとにばらつきがある。また、信号の強度 (PMT の増幅度) によって信号の立ち上がり時間は変化するためこれを補正 (TQ 補正) する必要がある。KamLAND グループは反ニュートリノフェーズに行った色素レーザーを用いたキャリブレーションデータで、この TQ 補正を行っている。

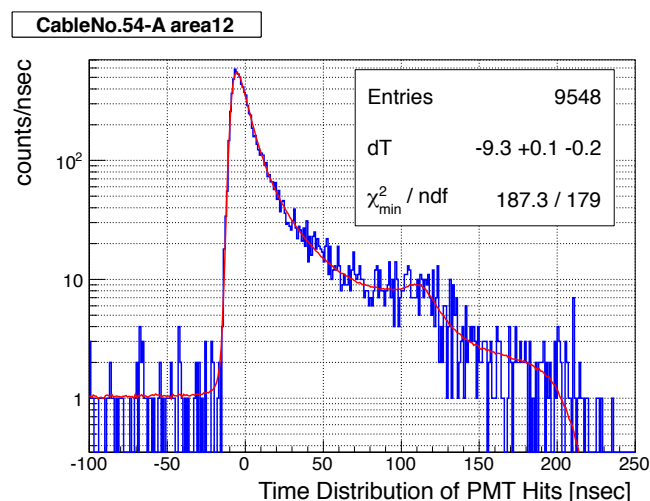


図 2.11: 1つのチャンネルの1つのrun中のヒット時間分布。赤線は確率密度関数を用いたフィットのベストフィットを表す。

#### 経年変化のための時間補正

検出器の長期運転に伴う変化に対する時間補正も行っている。時間情報に最も影響するのは KamFEE 基板の交換である。KamFEE 基板はしばしば故障のために交換が必要であり、交換後の基板では時間特性が異なる。

ソーラフェーズについては約1ヶ月ごとに取得した  $^{60}\text{Co}$  線源のキャリブレーションデータで経年変化分の補正を行っている。KamLAND-Zen ではミニバルーン支持具に含まれる放射性不純物の事象をもとに補正している。

#### 時間補正ツールの更新

2nd フェーズの解析を機に時間補正ツールの更新を行っている。経年変化のための時間補正項  $dT$  は各 run、各チャンネルのヒット時間分布から決定している。1つのチャンネルの1つのrun中でのヒット時間分布を図 2.11 に示す。これまで、 $dT$  はヒット時間分布のピーク付近をガウシアンでフィットすることで決定していた。更新したツールでは、PMT の配置の高さごとに 16 個の確率密度関数を作成し、これを用いたフィットで  $dT$  を決定する。フィットの様子を図 2.11 に示す。また、高さごとの確率密度関数を図 2.12 に示す。ツールの更新により、時間補正精度が改善したた



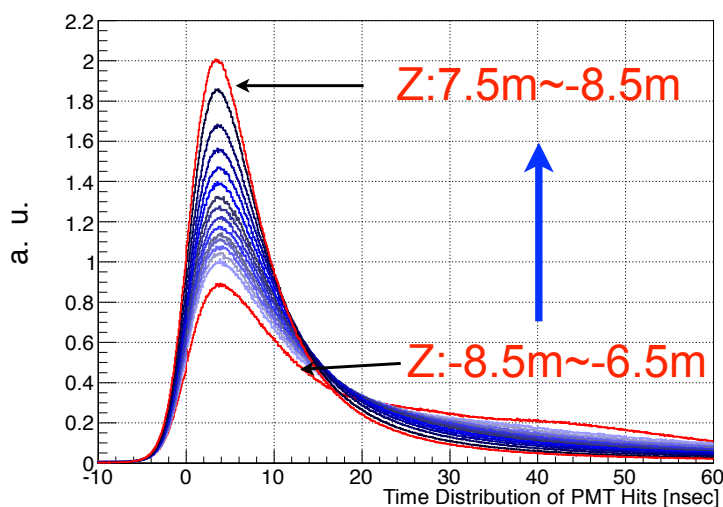


図 2.12: ヒット分布フィット用の確率密度関数。検出器中心から見た PMT の高さ  $z$  ごとに異なる 16 個の関数を用いる。

め、事象位置分解能が向上した(節 2.5.5 で述べる)。本論文中的ソーラーフェーズのデータ解析には更新前のツールを用いており、2nd フェーズのデータ解析には更新後のツールを用いている。

### ゲイン較正

電荷は信号波形の面積として定義する。1 光電子 (photoelectron、p.e.) に相当する電荷の補正が各 PMT のチャンネルごとに各 run で必要である。NSumMax(トリガーが発行されてから 125 ns 以内の NSum) が 120 より大きく 230 より小さいという低エネルギー事象から 1 p.e. 相当の電荷を推定し、較正している。

### 2.5.3 バッドチャンネル選定

各 run ごとに動作の怪しいチャンネル(バッドチャンネル)を選定し、これらを除いたチャンネルを用いて事象再構成を行っている。バッドチャンネルの選定条件の詳細は文献 [30] に記述されている。

## 2.5.4 宇宙線ミュオン事象の再構成

### 宇宙線ミュオン事象の選定

宇宙線ミュオン事象は次のいずれかの条件を満たす事象として選定する。

1. 全 17 インチ型 PMT の合計電荷  $Q_{17}$  が 10,000 p.e. 以上である
2.  $Q_{17}$  が 500 p.e. 以上であり、かつ ODPMT の合計ヒット数が 5 ヒット以上である

宇宙線ミュオン事象は KamLAND で取得したい物理事象と比較して数 GeV という高エネルギー事象であるため、LS を通過する場合は条件 1 で選定できる。条件 2 は BO を通過する場合を想定している。

### ミュオントラックの再構成

KamLAND を貫通したミュオン事象は PMT 信号の時間情報を用いてそのトラックを再構成できる。KamLAND で損失しきらなかったエネルギーに対応する電荷 (Residual Charge、 $\Delta Q$ ) を以下のように算出することができる。

$$\Delta Q = Q_{17} - L_{LS} \left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Scintillation}} - L_{BO} \left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Cherenkov}} \quad (2.10)$$

ここで、 $L_{LS}$  は LS 内でのトラック長、 $L_{BO}$  は BO 内でのトラック長であり、 $\left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Cherenkov}}$  と  $\left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Scintillation}}$  はそれぞれ

$$\left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Cherenkov}} = \frac{Q_{17}}{L_{BO}} \quad (2.11)$$

$$\left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Scintillation}} = \frac{Q_{17} - L_{ID}}{L_{LS}} \quad (2.12)$$

として計算する。ここで、 $L_{ID} = L_{LS} + L_{BO}$  である。反ニュートリノフェーズで推定された  $\frac{dQ}{dx}$  はそれぞれ

$$\left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Cherenkov}} = 31.45 \text{ p.e./cm} \quad (2.13)$$

$$\left( \frac{dQ}{dx} \right)_{\text{Scintillation}} = 629.4 \text{ p.e./cm} \quad (2.14)$$

である [30]。原子核破砕反応を起こすような高エネルギーミュオン事象をシャワリングミュオンと呼び  $\Delta Q > 10^6$  p.e. のミュオン事象として定義する。シャワリングミュオンは原子核破砕で  $^{11}\text{C}$  や  $^{10}\text{C}$  を生成する。

### 2.5.5 事象位置再構成

事象位置再構成は 17 インチ型 PMT のヒットタイミングを用いて行う。時刻  $t$ 、位置  $(x, y, z)$  で発生した事象由来の  $i$  番目のヒットの、 $t$  から見た相対時間  $\tau_i$  を次のように定義する。

$$\tau_i(x, y, z, t) = t_i - t - \text{TOF}_i \quad (2.15)$$

ここで、 $t_i$  は  $i$  番目のヒットの生の時間、 $\text{TOF}_i$  は事象発生位置から  $i$  番目のヒット PMT までの距離へ到達するまでに光子が飛行する時間 (Time-Of-Flight, TOF) である。この  $\tau_i$  の期待分布は線源を用いたキャリブレーションデータから事象位置ごとに決定している。その期待分布をもとに作成した位置評価のための関数  $\phi(\tau_i)$  から対数尤度関数を

$$\log(L) = \sum_i \log(\phi(\tau_i)) \quad (2.16)$$

と定義し、これを最大化するように

$$\left. \frac{\partial \log(L)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=x,y,z,t} = 0 \quad (2.17)$$

という式を解いて  $(x, y, z, t)$  を決定する。この作業を行うツールを Vertex フィッタと呼ぶ。

#### 位置再構成の精度

KamLAND-Zen 以前のデータでは事象位置再構成の分解能と再構成位置のバイアスが線源を用いたキャリブレーションから求められており、バイアスは 3 MeV 以下の事象について検出器中心から 4.5 m 内で 5 cm 以下である [27]。分解能は

- 反ニュートリノフェーズで  $11.4 \pm 2.1 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$
- ソーラーフェーズで  $13.6 \pm 1.8 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$

である [27]。KamLAND-Zen では検出器中心を原点とした同径方向の事象位置分布をフィットすることで分解能を見積もっており、

- 1st フェーズで  $15 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$
- 2nd フェーズ、時間補正ツール更新前で  $14.1 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$
- 2nd フェーズ、時間補正ツール更新後で  $13.1 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$

である [28, 46]。

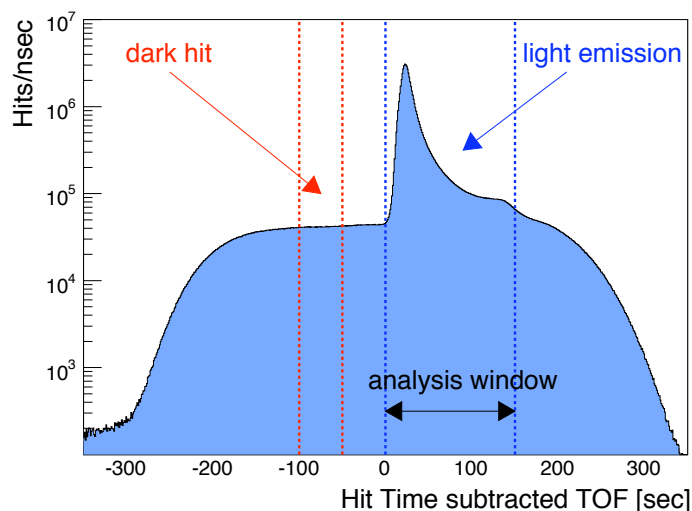


図 2.13: TOF を差し引いた PMT のヒットタイミング分布。赤点線で示す  $-100$ – $50$  ns の区間をダークヒットの推定に使用し、青点線で示す  $0$ – $150$  ns の区間のヒットをもとにエネルギーを計算する。図は [27] より転載。

### 2.5.6 エネルギー再構成

KamLAND の事象のエネルギー  $E_{\text{vis}}$  はソフトウェア閾値を越えた PMT のヒット数と電荷を用いて事象発生時間から  $150$  ns の区間で計算する。この際、ダークヒットの影響と集光率の補正を行う。

#### ソフトウェア閾値

KamFEE のディスクリミネータの閾値の影響を避けるため、ゲイン較正後のデータに対してソフトウェア的に  $0.3$  p.e. という閾値を設けてエネルギーの計算を行う。

#### ダークヒット

ダークヒットの影響は PMT のヒットタイミング分布の  $-100$ – $50$  ns のオフタイム区間から各 run ごとに推定し各事象ごとに差し引く。図 2.13 にヒットタイミング分布を示す。  $E_{\text{vis}}$  の計算に用いる  $150$  ns 幅中のダークヒットは約  $10$  p.e. であり、 $1$  MeV のイベント (約  $200$  p.e.) の  $5\%$  に対応する [28]。

## 集光率

エネルギー推定には構造物の影の影響、光減衰長、1 p.e. 取得効率が影響する。これらの影響をまとめて集光率と呼ぶ。集光率の補正は以下の通りである。

- 構造物の影の影響は線源を用いたデータで補正している。
- 光減衰長は検出器内で一様分布する中性子捕獲事象を用いて見積もっており、 $18.0 \pm 1.6$  m としている [28]。
- 0.3 p.e. のソフトウェア閾値に起因する 1 p.e. 取得の非効率の影響は線源を用いたキャリブレーションデータで見積もり、補正している。

## エネルギー再構成のアルゴリズム

エネルギー再構成のための尤度関数は PMT のヒット数の情報と電荷の情報両方を用いて以下のように定義される。

$$L = \prod_i^{\text{no hit}} \kappa_{i,0}(\vec{R}_i, \vec{R}_{\text{event}}, E_{\text{vis}}) \prod_i^{\text{hit}} \left( \sum_j \kappa_{i,j}(\vec{R}_i, \vec{R}_{\text{event}}, E_{\text{vis}}) f_{i,j}(q_i) \right) \eta_i(t_i | \mu_i) \quad (2.18)$$

ここで、

- $\vec{R}_i$  は  $i$  番目の PMT の位置
- $\vec{R}_{\text{event}}$  は事象発生位置
- $\kappa_{i,j}$  は  $i$  番目の PMT が  $j$  番目のヒットを検出する確率
- $q_i$  は  $i$  番目の PMT の電荷
- $f_{i,j}$  は  $j$  番目のヒットを  $i$  番目の PMT が検出する際にその電荷が  $q_i$  となる確率
- $\mu_i$  は  $i$  番目の PMT が観測するヒット数の期待値
- $\eta_i$  は  $i$  番目の PMT が時刻  $t_i$  で  $\mu_i$  を取得する確率

である。エネルギー  $E_{\text{vis}}$  は式 2.18 から

$$\Delta E_{\text{vis}} = - \frac{\frac{\partial \log(L)}{\partial E_{\text{vis}}}}{\frac{\partial^2 \log(L)}{\partial E_{\text{vis}}^2}} \quad (2.19)$$

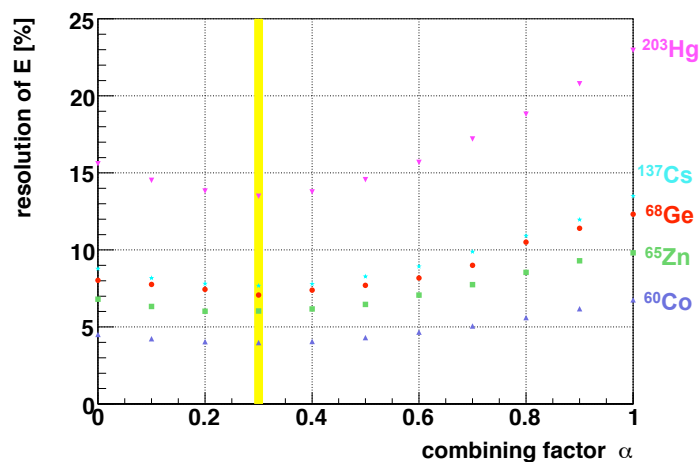


図 2.14: 係数  $\alpha$  とエネルギー分解能の関係。線源を用いたキャリブレーションデータでの評価の結果 0.3 が最適値である。図は [27] より転載。

を計算し、この  $\Delta E_{\text{vis}}$  の足しあわせとして求める。この際、5度のイタレーションを行っており、 $L$  の最大値探索に関して  $10^{-5}$  の計算精度が出る [47]。

このエネルギーは 17 インチ PMT を用いたデータと 20 インチ PMT を用いたデータからそれぞれ  $E_{17}$ 、 $E_{20}$  として推定し、

$$E_{\text{vis}} = (1 - \alpha)E_{17} + \alpha E_{20} \quad (2.20)$$

として複合する。ここで  $\alpha$  は線源を用いた較正データから 0.3 とするとき最も良いエネルギー分解能が得られる、として最適化している。図 2.14 に  $\alpha$  の最適値を決定した様子を示す。

### エネルギー分解能

反ニュートリノフェーズとソーラーフェーズのエネルギー分解能は表 2.4 に示す  $\gamma$  線事象を用いて、それぞれ

- 反ニュートリノフェーズ:  $6.0 \pm 0.1\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$
- ソーラーフェーズ:  $6.9 \pm 0.1\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$

と求まっている [27]。ソーラーフェーズでエネルギー分解能が悪化したのは純化作業のためである。ソーラーフェーズの事象位置によるエネルギー

表 2.4: エネルギー較正に使用される  $\gamma$  線事象 [27]。Visible Energy は KamLAND で再構成されるエネルギーである。

$\gamma$ 線源/事象	$\gamma$ 線の エネルギー (MeV)	Visible Energy (MeV)
$^{203}\text{Hg}$	0.279	0.214
$^{137}\text{Cs}$	0.662	0.574
$^{68}\text{Ge}$	$0.511 \times 2$	0.860
$^{60}\text{Co}$	$1.17 + 1.33$	2.35
$\text{np} \rightarrow \text{d}\gamma$	2.22	2.21
$\text{n}^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}\gamma$	4.95	4.97

の不定性は検出器中心から 4.5 m 内で 1.2% であり、経年変化による不定性は 0.8% と推定されている [27]。

KamLAND-Zen では 1st フェーズ開始時に  $\text{ThO}_2\text{W}$  を用いた較正を行い、Th の娘核  $^{208}\text{Tl}$  の  $\gamma$  線 (2.614 MeV) 事象から Xe-LS のエネルギー分解能を  $6.6 \pm 0.3\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$  と求めている [30]。位置依存性と経年変化は陽子による中性子捕獲事象 (2.2 MeV の  $\gamma$  線事象) を用いた評価で、ともに 1% 以内と見積もっている [30]。

2nd フェーズの Xe-LS のエネルギー分解能は、 $^{214}\text{Bi}$  の  $\beta$  崩壊のエネルギースペクトルを再現するように、モンテカルロシミュレーションを用いて決定し、 $6.8\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$  と推定している [48]。

#### エネルギーの非線形応答

LS の発光をエネルギーに変換する際にその応答の非線形を生むものとして、クエンチ効果とチェレンコフ光の影響がある。

LS のクエンチ効果は放射線粒子の粒子種 ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  等) によって電離密度が異なることにより生じる。この影響は Birks の式として次のように推定される。

$$\frac{dL}{dx} \propto \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + k \frac{dE}{dx}} \quad (2.21)$$

ここで、 $\frac{dL}{dx}$  は単位走行距離あたりの発光量、 $\frac{dE}{dx}$  は単位走行距離あたりのエネルギー損失であり、 $k$  を Birks 定数という。

発光事象中のチェレンコフ光の割合  $r_c$  と  $k$  は負の相関を持つことが確認されており、 $\gamma$  線事象、陽電子事象、電子事象をモンテカルロシミュレーションと比較することで、Outer-LS について

- $k = 0.26^{+0.10}_{-0.07}$  mm/MeV
- $r_c = 0.037^{+0.030}_{-0.032}$

と求まっている [47]。非線形性に起因するエネルギーの不定性は 1 MeV 以上の事象について 2.1%、2 MeV 以上の事象について 1.7%である [47]。

Xe-LS については 1st フェーズで

- $k = 0.23$  mm/MeV
- $r_c = 0.02$

と求まっており [30]、2nd フェーズは現在解析中である。

### 2.5.7 VertexBadness

KamLAND では再構成した事象の質を評価するために VertexBadness (以後簡単のために Badness と記す) というパラメータを用いる。Badness は 1 点からの発光を仮定して、以下のパラメータをもとに計算する。

$\chi_T^2$  : 再構成位置から期待されるヒット時間分布と観測されたヒット時間分布の差

$\sigma_T$  : ヒット時間分布の広がり

$H_T$  : ヒット時間分布の高さ

$\chi_{\text{Hit}}^2$  : 電荷から期待されるヒット数と観測されたヒット数の差

$R_{\text{Hit}}$  : 電荷から期待されるヒット数に対する観測されたヒット数の割合

$R_{\text{N150}}$  : 150 ns 内のヒット数と 125 ns 内のヒット数の比

$R_{\text{N48}}$  : 150 ns 内のヒット数と 48 ns 内のヒット数の比

$\chi_Q^2$  : 集光率の影響から逆算される期待電荷数と観測された電荷数の差

$\sigma_Q$  : 観測電荷/期待電荷の分布の広がり

計算の詳細は文献 [27] に記載されている。図 2.15 に示すように Badness の分布はエネルギーによって異なる。ソーラーフェーズ [22] と 1st フェーズ [14] の解析では

$$\text{Badness} > 41.1 \exp(-9.7 E_{\text{vis}}(\text{MeV})) + 2.31 \quad (2.22)$$

という条件で、Badness が高いイベントを除去している。 $^{137}\text{Cs}$  線源を用



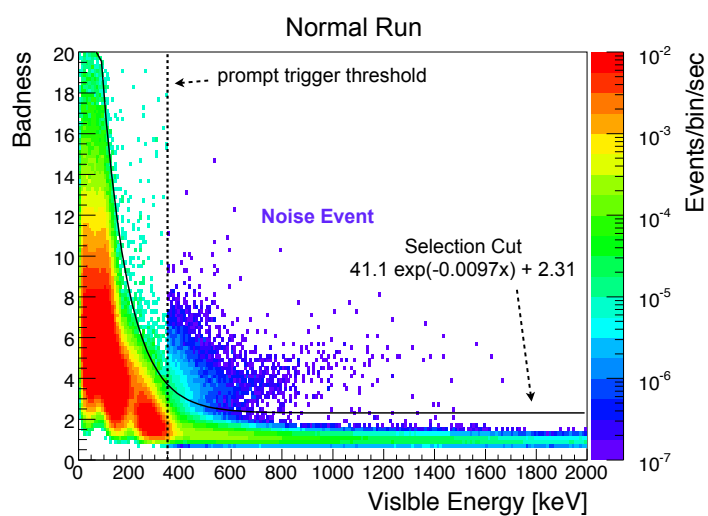


図 2.15: ソーラーフェーズの事象の Badness とエネルギーの分布。実線よりも Badness が高いイベントを除去する。点線を境に低エネルギー側のイベントは ID プリスケールトリガーで取得した事象であり、高エネルギー側のイベントは ID プロンプトリガーで取得した事象である。ID プリスケールトリガーで取得した事象のライブタイムは ID プロンプトリガーで取得した事象のライブタイムの 1%程度である。図は [27] より転載。

いた較正データから、式 2.22 の条件で単一事象 (1 つの事象取得幅に 1 つの物理事象のみが含まれている事象) 取得に生じる非効率率は 0.02% [27] と見積もっている。

Badness の高い事象は、ノイズ由来の事象と再構成に失敗した事象の他に、パイルアップ事象を含むことが調査されている [47]。パイルアップ事象とは 1 つの事象取得幅に複数の事象が混入した事象を示す。ソーラーフェーズで検出器中心から 4.5 m 以内に位置再構成された事象のうち、Badness 条件で除去される事象の約 8% がパイルアップ事象であることが同定されている [47]。また、パイルアップ事象のうち約 80% はアウトバーン近辺 (検出器中心から 6.5 m の距離) で発生した事象を 1 つ含んでいることが確認されている [47]。これは主にアウトバーン由来の  $^{210}\text{Po}$  の事象 ( $E_{\text{vis}} \sim 0.3 \text{ MeV}$ ) が約 40 Hz という高頻度で発生するためである [47]。

## 第3章 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ 背景事象除去

### 3.1 開発動機: $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ パイルアップバックグラウンド

$^{214}\text{Bi}$ バックグラウンド対策として、発光性ミニバルーンの開発が先行研究によって行われた [44]。発光性ミニバルーンの効果で KamLAND-Zen におけるミニバルーンフィルム由来の  $^{214}\text{Bi}$ バックグラウンドは年間1イベント以下に抑えられるため、Xe-LS 全体を有効体積として使用できる可能性が出てきた。Xe-LS 全体積を有効体積として使用するにあたり、新たにバックグラウンドとして問題になる可能性があるのが  $^{232}\text{Th}$  系列の放射性不純物に起因する  $^{212}\text{Bi}$  -  $^{212}\text{Po}$  パイルアップである。

#### 3.1.1 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ パイルアップバックグラウンド

$^{212}\text{Bi}$  の  $\beta$  崩壊の Q 値は 2.3 MeV [49] であるため、 $^{212}\text{Bi}$  単体で  $0\nu$  信号領域に混入するのはエネルギー分解能による染み出し程度である。しかし、 $^{212}\text{Bi}$  の娘核にあたる  $^{212}\text{Po}$  は半減期 300 ns で  $\alpha$  崩壊を起こし、8.8 MeV の  $\alpha$  線を放出する [50]。液体シンチレータ (LS) 中においてこの  $\alpha$  線は消光作用のために約 0.8 MeV 相当の光として観測される。すなわち、図 3.1 に示すように  $^{212}\text{Bi}$  と  $^{212}\text{Po}$  のイベントを合計したエネルギーのスペクトルは 3 MeV 付近まで拡大し、 $0\nu$  信号領域を含む。

KamLAND における 1 イベントの取得時間幅 (イベントウィンドウ) は約 200 ns であるため、 $^{212}\text{Bi}$  -  $^{212}\text{Po}$  連続崩壊事象のうち、約 40% は 1 イベントウィンドウ内で観測される (パイルアップ)。この計算ではエネルギーの観測閾値を考慮していない。

#### 3.1.2 ダブルパルスフィッタによるパイルアップ事象同定

KamLAND-Zen では上述のパイルアップ事象を同定するため、これまでダブルパルス (DP) フィッタを用いてきた。DP フィッタによる信号波形へのフィットの様子を 3.2 に示す。

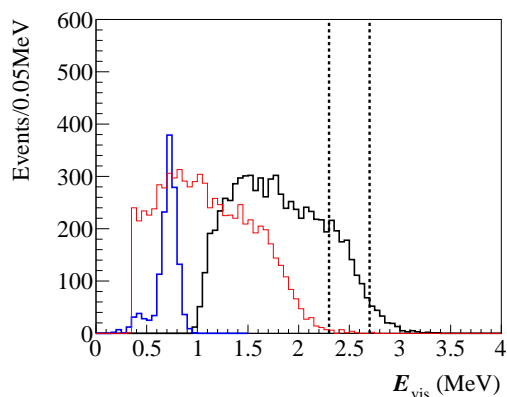


図 3.1:  $0\nu$  信号と  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  パイルアップのエネルギースペクトルが重なる様子 (イメージ図)。赤線が  $^{212}\text{Bi}$  の  $\beta$  崩壊のエネルギースペクトル、青線が  $^{212}\text{Po}$  の崩壊で放出される  $\alpha$  線の見かけエネルギー、黒線が  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  パイルアップのエネルギースペクトルである。パイルアップは点線で示す  $0\nu$  信号領域と重なりを持つ。

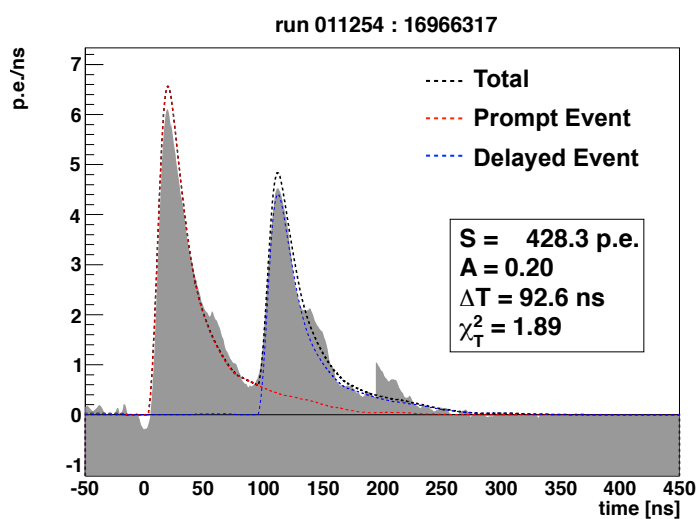


図 3.2: 現行の DP フィッタによるパイルアップ事象へのフィットの様子。図は文献 [30] より転載。 $S$  はフィット対象イベントの合計電荷数、 $A$  は先発信号と後発信号の強度比、 $\Delta T$  は先発信号と後発信号の時間差である。

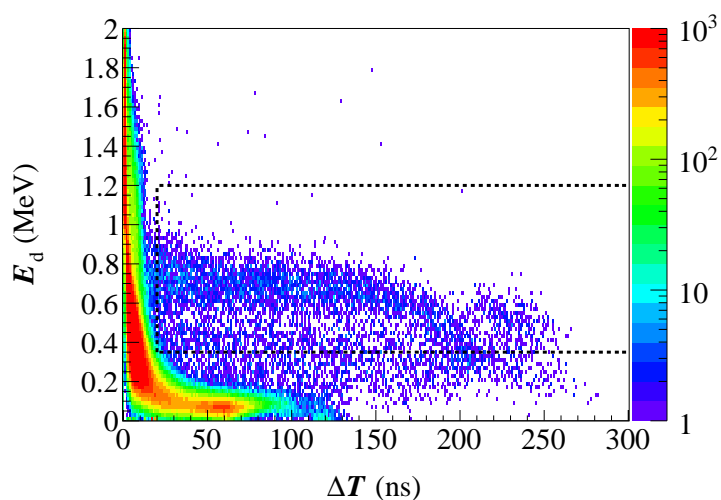


図 3.3: 現行の DP フィッタから出力される後発信号のエネルギー  $E_d$  と時間差  $\Delta T$  の関係。ここに示すイベントはミニバルーン周辺で発生したエネルギー 1 MeV 以上のイベントである。黒点線に示すように、 $0.35 \leq E_d < 1.2$  MeV、かつ  $\Delta T > 20$  ns を満たすイベントをパイルアップとして除去する。 $E_d$  が約 0.7 MeV で  $\Delta T$  が 20–150 ns の範囲に渡って続いているのがパイルアップの  $^{212}\text{Po}$  の信号である。 $E_d$  が 0.2–0.6 MeV のイベントは  $^{214}\text{Po}$  の信号と、ミニバルーンフィルム内で一部エネルギーを失った  $^{212}\text{Po}$  の信号である。 $\Delta T$  が 180 ns 以降になると  $E_d$  が低下していくのは、1 イベントウィンドウ内に PMT の信号波形が収まりきらなくなるためであると考えられる。

現行の DP フィッタのフィット結果から、以下の条件をすべて満たすイベントをパイルアップとして除去する。

1. 後発信号のエネルギーが 0.35 MeV 以上、かつ 1.2 MeV より小さい
2. 先発信号と後発信号の時間差が 20 ns より大きい

ミニバルーン周辺の 1 MeV 以上のイベントに対して現行の DP フィッタを通した結果の後発信号のエネルギー対時間差の分布を図 3.3 に示す。

現行の DP フィッタのパイルアップ判定条件において、 $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  崩壊事象のうち  $0\nu$  信号領域におけるバックグラウンドとなるのは約 0.9% である。ここで、 $0\nu$  信号領域のエネルギーとして 2.3–2.7 MeV を仮定した。ミニバルーンフィルムで Po の  $\alpha$  線が消光する影響は考慮していない。

### 3.1.3 現在までの $0\nu$ 探索解析におけるパイルアップバックグラウンドの影響

現在までの KamLAND-Zen における  $0\nu$  探索解析ではミニバルーンフィルム由来の  $^{214}\text{Bi}$  がバックグラウンドとなっているために、有効体積は Xe-LS のうち半径約 1 m 以内の領域である (実際はエネルギーと事象空間分布の 2次元解析を行っている [7])。この領域はミニバルーンフィルムから十分離れているために、 $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  パイルアップバックグラウンドの発生源は Xe-LS だけである。Xe-LS の Th 濃度、 $5.9 \times 10^{-17}$  g/g から見積もられるパイルアップバックグラウンド量は約 0.1 events/day/kton と低くこれまでの解析では無視している。

### 3.1.4 発光性バルーン導入時のパイルアップバックグラウンドの影響

発光性バルーンの導入で Xe-LS 全体を有効体積として用いる際には、フィルム領域まで有効体積に含む予定である。参考文献 [44] によれば、発光性バルーンフィルムの Th 含有量の分析上限値として  $5 \times 10^{-12}$  g/g が得られている。この値から次期 KamLAND-Zen 800 のミニバルーンを発光性バルーンに置き換えた際の予想イベントレートを表 3.1 に示す。現状の KamLAND-Zen のミニバルーンは整形前のフィルムの状態での Th 含有量の分析値が  $3 \times 10^{-12}$  g/g であったのに対し、導入後の解析でフィルム周辺のイベントから推定される Th 量は  $1.4 \times 10^{-10}$  g/g となっており、外的要因で汚染した可能性が高い。今後この外的汚染を 1/20 程度にすることは可能であると仮定して、分析上限値をそのまま採用した。表 3.1 よりパイルアップバックグラウンドは  $^{136}\text{Xe}$   $2\nu$  に次いで大きなバックグラウンドとなる可能性があることが分かる。

将来計画 KamLAND2-Zen ではエネルギー分解能の向上により  $0\nu$  領域への  $2\nu$  の浸み込みを減らす予定である。エネルギー分解能は現状の 4.0% から 2.5% 未満へ改善予定で [7]、 $2\nu$  の浸み込みは現状の 6.5% 未満となる。この計算では、浸み込みの量がエネルギー分解能の 5.8 乗に比例することを仮定した [43]。文献 [44] から概算した KamLAND2-Zen のイベントレート予測を表 3.2 に示す。表 3.2 より KamLAND2-Zen では  $^{10}\text{C}$  と並んでパイルアップが主なバックグラウンドとなる可能性がある。

逆階層構造領域をカバー (ニュートリノのマヨラナ有効質量  $< m_{\beta\beta} > = 20$  meV への感度到達) するためにはパイルアップ事象の除去が必須である。そのためには、

1. DP フィッタの時間分解能を向上する

表 3.1: KamLAND-Zen 800 を発光性バルーンを用いて行う際の  $0\nu$  信号領域における年間予想イベント数。文献 [44] の値をもとに、Xe-LS の体積とミニバルーンの大きさをスケールして計算した。 $0\nu$  信号の観測エネルギーのピークから  $-1\sigma$ 、 $+2\sigma$  の領域を  $0\nu$  信号領域として用いる。発光性バルーンの比重は  $1.36 \text{ g/cm}^3$  [51] とした。発光性バルーンフィルムの Th 含有量は分析上限値の  $5 \times 10^{-12} \text{ g/g}$  として計算した。

$^{214}\text{Bi}$	0.7
$^{10}\text{C}$	4.6
$^8\text{B}$ solar $\nu$	2.2
$^{136}\text{Xe}$ $2\nu$	13
$^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$	5.1
BG Total	26
$^{136}\text{Xe}$ $0\nu$ ( $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 50 \text{ meV}$ )	3.2

表 3.2: KamLAND2-Zen を発光性バルーンを用いて行う際の  $0\nu$  信号領域における年間予想イベント数。文献 [44] の値をもとに、Xe-LS の体積とミニバルーンの大きさをスケールして計算した。エネルギー分解能は  $4.0\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$  ( $0\nu$  信号のエネルギー領域で 2.5%) とした。LS の密度は LAB-LS を想定して  $0.86 \text{ g/cm}^3$  [52] とした。

$^{214}\text{Bi}$	0.45
$^{10}\text{C}$	3.4
$^8\text{B}$ solar $\nu$	1.6
$^{136}\text{Xe}$ $2\nu$	0.78
$^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$	3.0
BG Total	9.2
$^{136}\text{Xe}$ $0\nu$ ( $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 20 \text{ meV}$ )	0.63

2.  $^{212}\text{Po}$  の  $\alpha$  線由来の発光波形情報を用いてパイルアップを同定するという2つの手法がある。本論文では手法1を試みた。

## 3.2 新しいダブルパルスフィッタの開発

### 3.2.1 現行の DP フィッタ

現行の DP フィッタはヒット判定された17インチPMTの信号波形を合算した波形に対してフィットを行う。17インチPMTの信号のみを使うのは節2.1.1に示したように、時間分解能が20インチPMTよりも良いためである。波形を合算する際には事象位置をもとに光子飛行時間 (TOF) を各波形から差し引く [53]。フィットに用いる基準波形は遅延同時計測で同定した  $^{214}\text{Bi}$  を用いている。また、フィットに使うパラメータは

- 先発信号のエネルギー ( $E_p$ )
- 後発信号のエネルギー ( $E_d$ )
- 先発信号と後発信号の時間差 ( $\Delta T$ )

である。先発信号のタイミング ( $T_p$ ) は事象位置再構成フィッタ (vertex フィッタ) から決定される基準時間 ( $T_0$ ) に固定している。

1 MeV のイベントから取得される光ヒット数 (p.e.) は17インチPMTの合計で約200 p.e. であり、 $0\nu$  探索解析を行う数 MeV 領域において1PMTあたりのヒット数の期待値は1以下である。このような状況において、信号波形を合算する現行の DP フィッタは、波高値のふらつきの影響を受けやすくなることが予想される。

### 3.2.2 新しい DP フィッタのコンセプト

上述のような状況では、

- 信号波形を合算する前に各PMTの波形解析を行い、
- その波形解析から各PMTのヒットタイミングを決定し、
- 最終的にヒットタイミングを合算した分布を「波形」と見立ててフィットする



という手法が有用である可能性がある。

また 20 ns 以内のパイルアップに対して vertex フィッタが  $T_0$  を正確に決定できない可能性もあるため、 $T_p$  もパラメータとして扱うほうが良いと考えられる。

以上の考えのもと、ヒットタイミングを用いる新しい DP フィッタの開発を試みた。以後、現行の DP フィッタを Waveform-DP フィッタ (WFDP フィッタ) と呼び、新開発の DP フィッタを Hit-time-DP フィッタ (HTDP フィッタ) と呼んで区別する。

### 3.2.3 HTDP フィッタの「波形」

HTDP フィッタは PMT のヒットタイミングを合算した分布を「波形」としてとらえる (HT 波形)。

#### ヒット判定とヒットタイミング

PMT の取得電荷が 0.3 p.e. を超えた PMT をヒットのあった PMT と判定する。ヒットタイミングは、ヒットした PMT の波形 (200 ns) を 128 分割し、最初の立ち上がり時間を採用する。タイミング精度は 1.5 ns である。

#### TOF と $T_0$ の差し引き

各ヒット ( $j$  番目のヒット) のタイミング  $t_j$  は vertex フィッタにより決定されるイベント時間  $T_0$  と、イベント発生位置をもとに計算される TOF を差し引いた後に合算され、HT 波形となる。つまり

$$t'_j = t_j - T_0 - \text{TOF} \quad (3.1)$$

のヒストグラムが HT 波形である。

### 3.2.4 HT 波形の比較

図 3.4、3.5 に HT 波形の比較図を示す。図 3.4 より、 $2\nu$  信号のエネルギーによる違いは波形のピーク値で比較して 1% 未満である。反応種の違いを見ると、 $\beta + \gamma$  の事象と  $\alpha$  の事象は  $\beta + \beta$  の事象と比較してピークが 7% 程度低くなっている。この違いについては、Bi と Po がミニバルーンフィルム近傍の事象であるため、光学的界面が影響している可能性がある。図 3.5 より、検出器中心から 200 cm 以内での HT 波形の位置による違いはピークで比較して 2% 以下であり小さい。

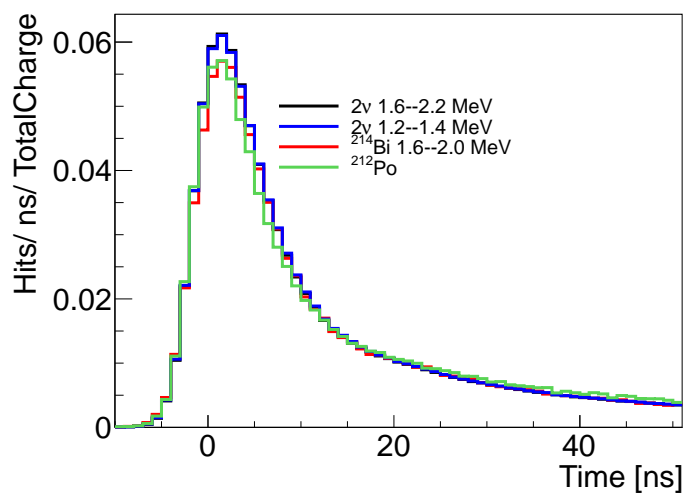


図 3.4: HT 波形のエネルギーと反応種ごとの比較図。電荷で規格化している。黒線が検出器中心から半径  $R$  100 cm 以内、エネルギー 1.6–2.2 MeV の  $2\nu$  信号の波形 ( $\beta + \beta$ )。青線が  $R$  100 cm 以内、エネルギー 1.2–1.4 MeV の  $2\nu$  信号の波形。赤線が  $R$  120 cm 以内、エネルギー 1.6–2.0 MeV の  $^{214}\text{Bi}$  信号の波形 ( $\beta + \gamma$ )。緑線が  $R$  140 cm 以内の  $^{212}\text{Po}$  信号の波形 ( $\alpha$ )。

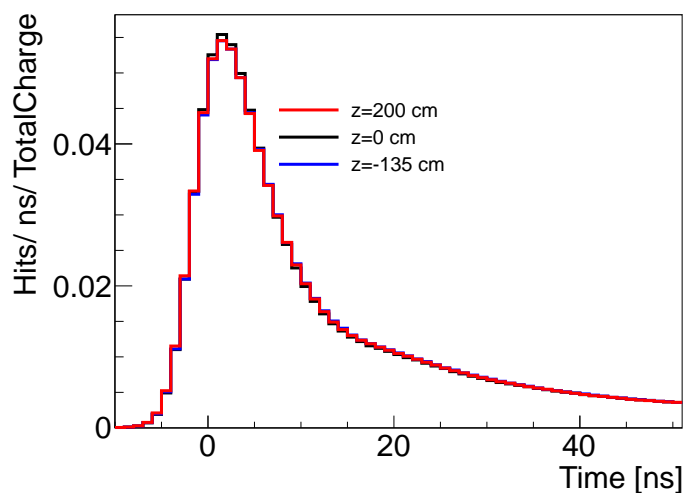


図 3.5: HT 波形の位置依存性比較図。 $^{60}\text{Co}$  線源のキャリブレーションのデータを用いた。 $z$  は検出器中心を  $z = 0$  cm としたときの線源の高さである。

### 3.2.5 リファレンス波形の決定

HTDP フィッタのリファレンス波形を決定するにあたり、0 $\nu$  信号が誤って DP 判定されないことが重要である。よって 0 $\nu$  信号に最も近いと思われる、2 $\nu$  事象の高エネルギー成分 (1.6–2.2 MeV、発生点は検出器中心から半径 1.0 m 以内) の信号をリファレンス波形として採用した。

### 3.2.6 フィッティング手法

HTDP フィッタがフィットに用いるパラメータは

- 先発信号のエネルギー ( $E_p$ )
- 先発信号のタイミング ( $T_p$ )
- 後発信号のエネルギー ( $E_d$ )
- 先発信号と後発信号の時間差 ( $\Delta T$ )

の 4 つである。これらのパラメータをもとに 1 ns ごとにビン分けした波形へ最尤法に基づくフィットを行った。最小化すべき  $\chi^2$  は次のように定義した。

$$\chi^2 = 2 \sum_i \left( -(x_i - f_i) + x_i \ln \frac{x_i}{f_i} \right), \quad (3.2)$$

ここで、 $i$  は  $i$  番目のビン、 $x_i$  は  $i$  番目のビンに含まれるヒット数、 $f_i = f(i|E_p, T_p, E_d, \Delta T)$  は  $i$  番目のビンにおけるヒットの期待値である。1 MeV に規格化したリファレンス波形  $R(i)$  とダークレート  $D$  を用いて、 $f_i$  はさらに

$$f_i = |E_p| R(i - T_p) + |E_d| R(i - T_p - \Delta T) + D \quad (3.3)$$

と書き下すことができる。

#### ダークレートの決定

ダークレートはイベントごとに  $-200$ – $50$  ns という 150 ns 区間 (オフタイム) での平均ヒット数で決定した。オフタイムでヒットが無い場合には一律で 0.02 (150 ns 区間にヒットがないときに 95% の信頼度で許される上限値) とした。

また、KamLAND がイベント取得するトリガの閾値は 70 ヒット ( $E_{\text{vis}}$  にして約 0.3 MeV) であるため、その閾値を超えないイベントがオフタイムに混入することがある (オフタイムイベント)。拡張したオフタイム区間 ( $-200$ – $15$  ns) 中のヒット数が 50 以上となる場合は、オフタイムイベントとみなし、ダークレートには 0.02 を用いた。

## フィットレンジとパラメータレンジ

フィットレンジとパラメータレンジはオフタイムイベントの有無によって変更した。

オフタイムイベントが無い場合は以下のようにになっている。

- $\chi^2$  計算レンジ:  $-50-350$  ns
- $T_p$ :  $-12-2$  ns
- $\Delta T$ :  $0-300$  ns

オフタイムイベントが有る場合は以下のように  $\chi^2$  計算レンジを 200 ns 早い方向へスライドさせ、 $T_p$  のレンジを 200 ns 早い方向まで拡張した。

- $\chi^2$  計算レンジ:  $-250-150$  ns
- $T_p$ :  $-212-2$  ns
- $\Delta T$ :  $0-300$  ns

## 最小 $\chi^2$ の決定

最小  $\chi^2$  の決定は以下の手順で行った。

1. ひとつの ( $T_p$ ,  $\Delta T$ ) の組について解析ソフト ROOT に含まれる最小化ツール Minuit によるフィットを行い、対応する  $E_p$ ,  $E_d$  を決定する。Minuit を用いる際にはオプションで対数尤度による最小化を有効にした。
2. ( $T_p$ ,  $\Delta T$ ) の全組み合わせについて手順 1 を行い、最小となる  $\chi^2$  とそのときのパラメータ ( $E_p$ ,  $T_p$ ,  $E_d$ ,  $\Delta T$ ) を決定する ( $T_p$ ,  $\Delta T$  の探索幅はともに 1 ns 刻みである)。

時間成分について全組み合わせの  $\chi^2$  を計算するという手法のために、1 イベントに対するフィット所要時間は約 10 秒である。

## エネルギーの補正

HTDP フィッタの  $E_p$ ,  $E_d$  はリファレンス波形をスケールするためのパラメータである。KamLAND のイベントのエネルギー再構成には位置依存性があるため、 $E_p$ ,  $E_d$  には補正が必要である。HTDP フィッタを適

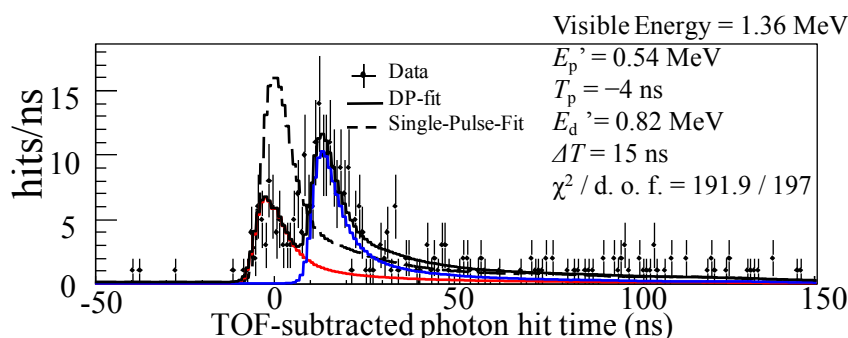


図 3.6: DP 候補の波形を HTDP フィッタでフィットしている様子。黒実線はベストフィットを表し、-50–150 ns の範囲で計算した  $\chi^2/\text{d.o.f.}$  は 191.9/197 であった。実際のフィットでは  $\chi^2$  の計算範囲は -50–350 ns である。赤線に示す先発信号と青線に示す後発信号の和が黒実線である。点線は HTSP フィッタのベストフィットである。

用するイベントはイベント選定の段階で位置依存性を考慮した  $E_{\text{vis}}$  を計算しているため、

$$E'_p = E_{\text{vis}} \times \frac{E_p}{E_p + E_d} \quad (3.4)$$

$$E'_d = E_{\text{vis}} \times \frac{E_d}{E_p + E_d} \quad (3.5)$$

として補正した。

### 3.2.7 シングルパルスフィッタ

HTDP フィッタと合わせて、単一波形でフィットを行う HT シングルパルスフィッタ (HTSP フィッタ) も作成した。HTSP フィッタは式 3.3 において  $E_d = 0$  にしたときの  $f_i$  を期待値として用いる。フィットレンジ、パラメータレンジ、ダークレートの計算手法は HTDP フィッタと同じであるが、オフタイムイベント有りと判定される場合でもフィットレンジとパラメータレンジの変更は行わない。

本論文では HTSP フィッタを解析に用いていないが、今後 HTSP フィッタの最小  $\chi^2$  と HTDP フィッタの最小  $\chi^2$  の差をとることで、信号の 2 波形らしさを評価できる可能性がある。

図 3.6 に HTDP フィッタと HTSP フィッタを DP 候補のイベントに適用している様子を示す。

### 3.3 HTDP フィッタの性能評価

HTDP フィッタの性能評価にはミニバルーンフィルム由来の  $^{212}\text{Bi}-^{212}\text{Po}$  パイルアップを用いる。 $^{212}\text{Bi}-^{212}\text{Po}$  連続崩壊のうち、 $^{212}\text{Po}$  が 200 ns よりも長生きして  $^{212}\text{Bi}$ 、 $^{212}\text{Po}$  がそれぞれ別のイベントとして観測できる場合は遅延同時計測により同定できる。遅延同時計測から予想されるパイルアップイベント数と HTDP フィッタで同定されたパイルアップイベント数を比較する。比較するエネルギーの領域は  $0\nu$  信号領域 (2.3–2.7 MeV) とする。

#### 3.3.1 遅延同時計測による $^{212}\text{Bi}-^{212}\text{Po}$ 事象数推定

ここで使用するデータは 2013 年 12 月 11 日から 2015 年 8 月 16 日の期間に取得したデータである。KamLAND-Zen の run 番号では run12247–13184 の期間である。遅延同時計測による  $^{212}\text{Bi}-^{212}\text{Po}$  事象数推定は以下に示す手順で行った。

1. 後発信号の  $E_{\text{vis}}(E_{\text{visd}})$  として用いる範囲を決定するためのイベント選定を以下の条件で行う
  - (a) 先発信号の  $E_{\text{vis}}(E_{\text{visp}})$  と  $E_{\text{visd}}$  の和が 2.3 MeV より大きい、かつ 2.7 MeV より小さい。 $E_{\text{visp}} + E_{\text{visd}}$  が  $0\nu$  信号領域となるように設定した。選定の様子を図 3.7a に示す。
  - (b) 先発信号の事象再構成位置の検出器からの距離 ( $r_p$ ) が 100 cm より大きく、200 cm より小さい。検出器中心から 154 cm に位置するミニバルーンフィルム由来のイベントを網羅できるように設定した。選定の様子を図 3.7f に示す。
  - (c) 先発信号の事象再構成位置と後発信号の事象再構成位置の差 ( $\Delta R$ ) が 100 cm より小さい。選定の様子を図 3.7e に示す。
  - (d) 宇宙線ミューオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全イベントを除去する。宇宙線ミューオン事象は全 PMT の電荷合計が 10,000 p.e. 以上、または OD の PMT ヒット数が 5 以上の事象として判断する。
  - (e) 先発信号と後発信号の時間差 ( $\Delta T$ ) が 1000 ns より小さい。選定の様子を図 3.7d に示す。
2. 条件 1 を満たすイベントの  $E_{\text{visd}}$  の分布を 0.6–1.0 MeV の範囲でガウシアンでフィットし、 $E_{\text{visd}}$  のピークから  $-2\sigma$  より大きく、ピークから  $+3\sigma$  より小さい  $E_{\text{visd}}$  を選択する。選定の様子を図 3.7c に示す。

3. 条件 1a、1b、1c、1d、2 を満たすイベントについて  $\Delta T$  の分布を作成する。作成した分布を 0.55–5.0  $\mu\text{s}$  の範囲で  $^{212}\text{Po}$  の寿命を仮定してフィットし、 $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  事象数を推定する。フィットの様子を図 3.7d に示す。

図 3.7d に赤線で示すフィットは以下の式で行った。

$$A \frac{0.125}{0.431} \exp\left(-\frac{\Delta T}{0.431}\right) + 0.125|B| \quad (3.6)$$

ここで、 $A$  は  $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  事象数、0.125 はビン幅 ( $\mu\text{s}$ )、0.431 は  $^{212}\text{Po}$  の寿命 ( $\mu\text{s}$ ) [50]、 $B$  は一定成分であり  $^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po}$  事象を含む。

ベストフィットの結果は

$$A = 2.8 \times 10^3 \pm 1 \times 10^2 \quad (3.7)$$

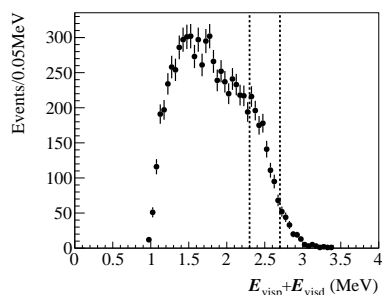
$$B = 9 \pm 2 \quad (3.8)$$

であった。このようにして、ミニバルーンフィルム由来の  $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  事象で  $E_{\text{visp}} + E_{\text{visd}}$  が  $0\nu$  信号領域と一致するようなイベントの推定値  $A$  を求めた。

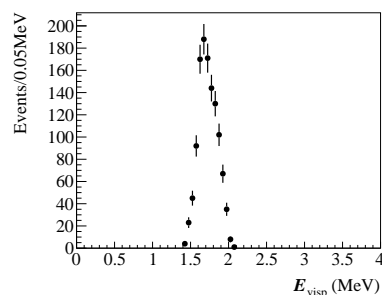
### 3.3.2 HTDP フィッタによる $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$ パイルアップ同定能力の評価

HTDP フィッタによる  $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  パイルアップ同定能力の評価は以下に示す手順で行った。

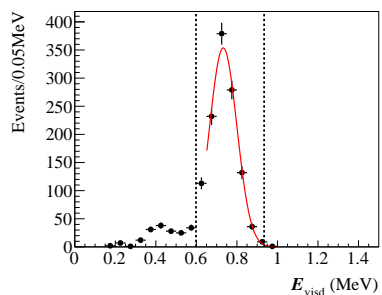
1. イベント選定を以下に示す条件で行う
  - (a)  $E_{\text{vis}}$  が 2.3 MeV より大きい、かつ 2.7 MeV より小さい。選定の様子を図 3.8a に示す。
  - (b) 事象再構成位置の検出器中心からの距離 ( $r$ ) が 100 cm より大きい、かつ 200 cm より小さい
  - (c) 宇宙線ミュオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全イベントを除去する
  - (d) 3 ms 以内に連続して発生した事象を除去する。 $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$ 、 $^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po}$  の連続事象を除去する。
  - (e) 原子炉に由来する反ニュートリノ事象を除去する
  - (f) 宇宙線ミュオンの原子核破碎生成物事象の除去。宇宙線ミュオン事象後に発生した中性子捕獲事象の位置から 160 cm 以内のイベントを除去する。



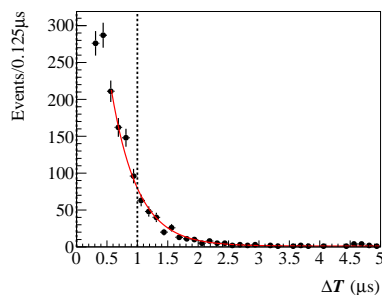
a: 選定条件を満たすイベントの  $E_{\text{visp}} + E_{\text{visd}}$  の分布。点線で囲まれた領域が選定条件を満たす。



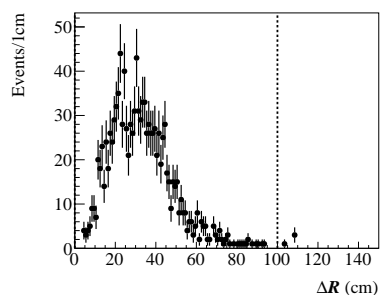
b: 選定条件を満たすイベントの  $E_{\text{visp}}$  の分布。 $E_{\text{visp}}$  に対する条件は設定していないが参考として図を載せた。



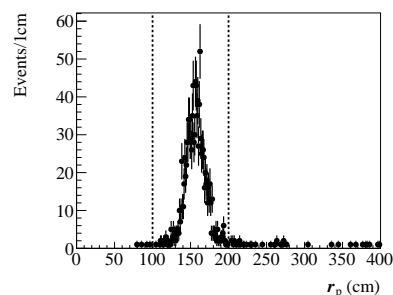
c: 選定条件を満たすイベントの  $E_{\text{visd}}$  の分布。0.65–1.0 MeV の範囲でガウシアンでフィットした結果が赤線であり、ピークが  $0.733 \pm 0.003$  MeV、 $\sigma$  が  $0.067 \pm 0.002$  MeV であった。点線で示す選定条件はピークから  $-2\sigma$ 、 $+3\sigma$  の領域である。



d: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta T$  の分布。図 3.7c のイベントは点線に示す  $1 \mu$  未満のイベントから選定した。赤線は式 3.6 のベストフィットである。



e: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta R$  の分布。点線に示すように 100 cm 未満を選定条件にした。



f: 選定条件を満たすイベントの  $r_p$  の分布。点線で挟まれた 100–200 cm が選定条件である。

図 3.7: 遅延同時計測のイベント選定に関わる各パラメータの分布



(g) HTDP フィッタのフィット結果の  $\Delta T$  が 30 ns 以上、かつ 90 ns 以下である

2. 条件 1 を満たすイベントの  $E'_d$  の分布をガウシアンでフィットし (フィットレンジは 0.6–1.1 MeV)、 $E'_d$  のピークから  $-2\sigma$  より大きく、ピークから  $+3\sigma$  より小さい  $E'_d$  を選択する。選定の様子を図 3.8c に示す。
3. 条件 1a–1f、2 を満たすイベントの  $\Delta T$  の分布を節 3.3.1 で評価した  $^{212}\text{Bi}$ – $^{212}\text{Po}$  事象数から計算した期待値と比較する。 $\Delta T$  の分布を図 3.8d に示す。

図 3.8d の  $\Delta T$  が短い領域を拡大したのが図 3.9 である。期待曲線と 10 ns から一致しているのが確認できる。 $\Delta T \leq 20$  ns の期待事象数を計算すると 130 であった。10  $\leq \Delta T \leq 20$  ns で同定できた事象数は 70 であり、約半分のパイルアップバックグラウンド削減を達成した。

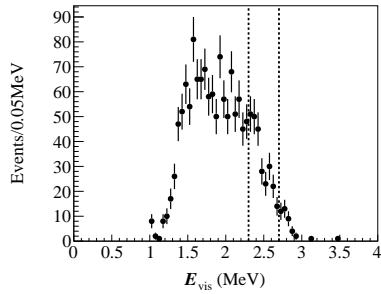
### 3.3.3 WFDP フィッタによる $^{212}\text{Bi}$ – $^{212}\text{Po}$ パイルアップ同定能力の評価

HTDP フィッタの性能と WFDP フィッタの性能を比較するため、WFDP フィッタについても節 3.3.2 と同様の手順で  $^{212}\text{Bi}$ – $^{212}\text{Po}$  パイルアップ同定能力を評価した。HTDP フィッタの評価に用いた時間補正ツール (節 2.5.2) は WFDP フィッタの評価に用いたものから更新されており、ここでの比較は厳密とは言い切れないが、参考として示す。もともとの WFDP フィッタは  $E_{\text{vis}}$  を用いた補正を行っていなかったため、HTDP フィッタと同様に式 3.5 で補正した。図 3.10 にイベント選定の様子を示す。図 3.10d の  $\Delta T$  が短い領域を拡大したのが図 3.11 である。期待曲線と 14 ns から一致しているのが確認できる。

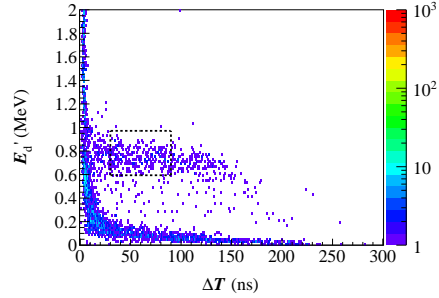
### 3.3.4 HTDP フィッタのシングルイベント誤判定確率の評価

ここまでで DP となるイベントの同定能を調べた。ここではシングルパルス (SP) イベントを DP と誤判定する確率について調べる。SP イベントには遅延同時計測で同定した  $^{214}\text{Bi}$  を用いる。ここで使用するデータは 2013 年 12 月 11 日から 2015 年 10 月 26 日の期間に取得したデータである。KamLAND-Zen の run 番号では run12247–13291 の期間である。イベント選定は以下のように行った。

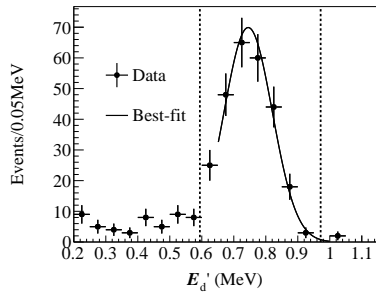
1. 後発信号の  $E_{\text{vis}}(E_{\text{visd}})$  として用いる範囲を決定するためのイベント選定を以下の条件で行う



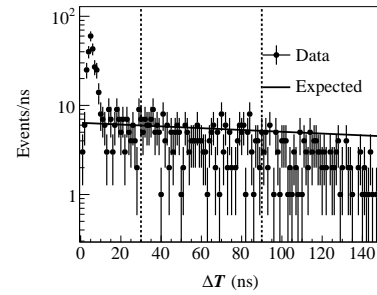
a: 選定条件を満たすイベントの  $E_{\text{vis}}$  の分布。点線で囲まれた領域が選定条件を満たす。



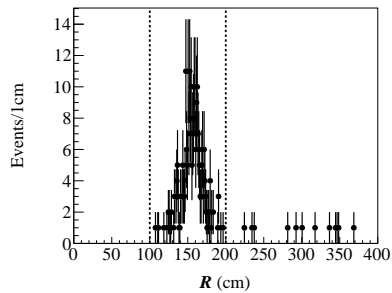
b: 選定条件を満たすイベントの  $E_d'$  対  $\Delta T$  の分布。点線は図 3.8c、3.8d の点線と対応する。



c: 選定条件を満たすイベントの  $E_d'$  の分布。0.65–1.0 MeV の範囲でガウシアンでフィットした結果が実線であり、ピークが  $0.745 \pm 0.007$  MeV、 $\sigma$  が  $0.075 \pm 0.006$  MeV であった。点線で示す選定条件はピークから  $-2\sigma$ 、 $+3\sigma$  の領域である。



d: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta T$  の分布。図 3.8c のイベントは点線に示す 30–90 ns のイベントから選定した。黒線は遅延同時計測から見積もった期待値である。



e: 選定条件を満たすイベントの  $R$  の分布。100 cm 以内にイベントがないことが確認できる。

図 3.8: HTDP フィッタの評価に関わるパラメータ

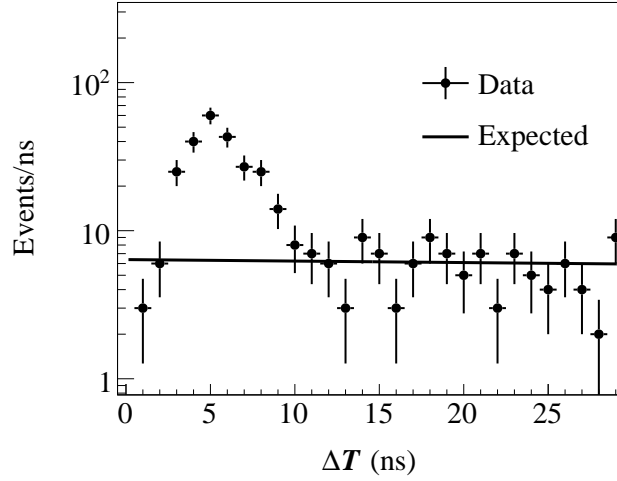
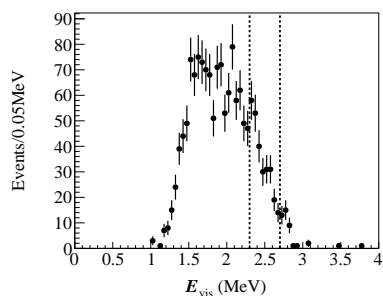


図 3.9: 図 3.8d の拡大図。期待曲線と 10 ns から一致しているのが確認できる。

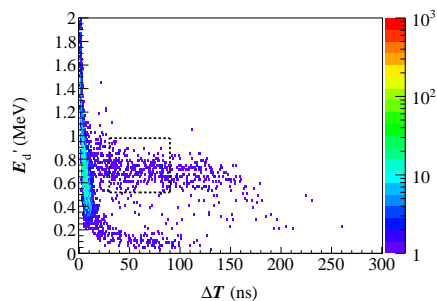
- (a)  $E_{\text{vis}}(E_{\text{visp}})$  が 2.3 MeV より大きい、かつ 2.7 MeV より小さい。選定の様子を図 3.12a に示す。
- (b) 先発信号の事象再構成位置の検出器中心からの距離 ( $r_p$ ) が 100 cm より大きく、200 cm より小さい。選定の様子を図 3.12b に示す。
- (c) 先発信号の事象再構成位置と後発信号の事象再構成位置の差 ( $\Delta R$ ) が 100 cm より小さい。選定の様子を図 3.12c に示す。
- (d) 宇宙線ミュオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全イベントを除去する。
- (e) 先発信号と後発信号の時間差 ( $\Delta T$ ) が 5–1000  $\mu\text{s}$  の範囲内である。 $\Delta T$  の下限値を 5  $\mu\text{s}$  としているのは、 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  と区別するためである。選定の様子を図 3.12e に示す。

2. 条件 1 を満たすイベントの  $E_{\text{visd}}$  の分布を 0.4–0.8 MeV の範囲でガウシアンでフィットし、 $E_{\text{visd}}$  のピークから  $-3\sigma$  より大きく、ピークから  $+3\sigma$  より小さい  $E_{\text{visd}}$  を選択する。選定の様子を図 3.12d に示す。

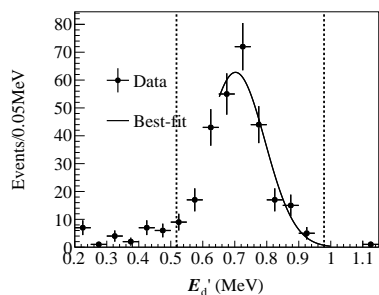
以上のように選定した  $^{214}\text{Bi}$  のイベントを HTDP フィッタで処理した結果を図 3.13 に示す。図 3.12e の  $\Delta T$  は実際の  $^{214}\text{Bi}$ - $^{214}\text{Po}$  事象の時間差であるが、図 3.13b の  $\Delta T$  は HTDP フィッタが  $^{214}\text{Bi}$  単体の波形を 2 波形でフィットしたときに出力されるパラメータであることに注意されたい。図



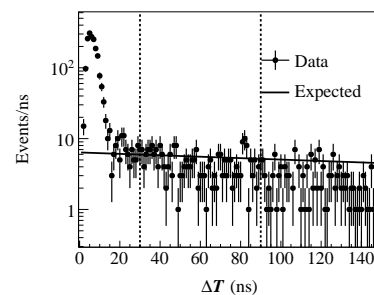
a: 選定条件を満たすイベントの  $E_{\text{vis}}$  の分布。点線で囲まれた領域が選定条件を満たす。



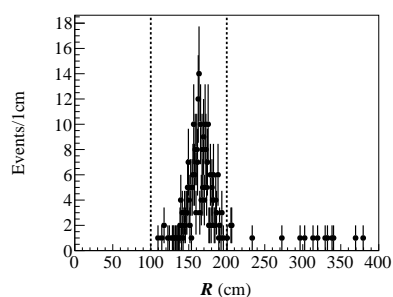
b: 選定条件を満たすイベントの  $E'_d$  対  $\Delta T$  の分布。点線は図 3.10c、3.10d の点線と対応する。



c: 選定条件を満たすイベントの  $E'_d$  の分布。0.65–1.0 MeV の範囲でガウシアンでフィットした結果が実線であり、ピークが  $0.70 \pm 0.02$  MeV、 $\sigma$  が  $0.09 \pm 0.01$  MeV であった。点線で示す選定条件はピークから  $-2\sigma$ 、 $+3\sigma$  の領域である。



d: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta T$  の分布。図 3.10c のイベントは点線に示す 30–90 ns のイベントから選定した。黒線は遅延同時計測から見積もった期待値である。



e: 選定条件を満たすイベントの  $R$  の分布。

図 3.10: WFDP フィッタの評価に関わるパラメータ

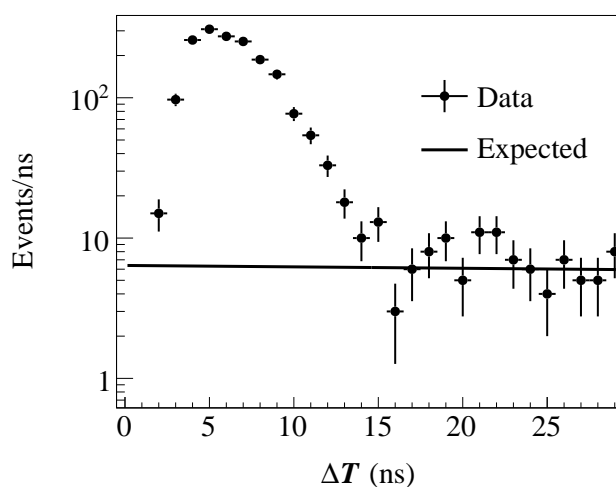


図 3.11: 図 3.10d の拡大図。期待曲線と 14 ns から一致しているのが確認できる。

3.13b の  $\Delta T$  の分布を作成するために用いた  $E'_d$  の選択領域は、 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  パイルアップを HTDP フィッタで評価した時と同じである。2.3–2.7 MeV のミニバルーンフィルム領域の  $^{214}\text{Bi}$  イベントのうち、 $\Delta T$  が 10 ns 以上と判定されたイベントは  $0.17 \pm 0.06\%$  であった。

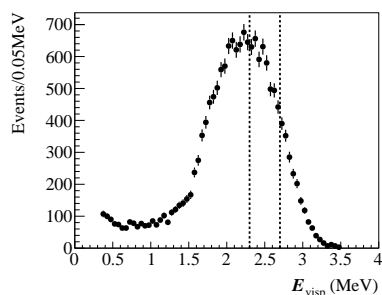
### 3.3.5 まとめ

KamLAND-Zen の  $0\nu$  探索のバックグラウンドとして、 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  パイルアップの影響を初めて見積もり、現行の解析手法のままでは KamLAND2-Zen において主要な BG となることを明らかにした。これを除去するために HTDP フィッタを開発し、約半分の除去を達成した。この結果から KamLAND2-Zen のパイルアップバックグラウンドは年間 3.0 事象であったものが年間 1.5 事象となる。この量は依然として削減が必要な量であり、年間 1 事象未満にすることが望ましい。

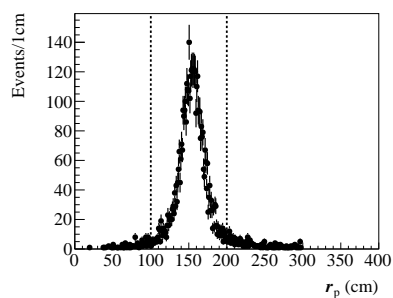
将来展望として KamLAND2-Zen を現行の KamLAND-Zen と比較すると、 $\Delta T$  検出限界が改善する要因と悪化する要因がある。

- 改善する要因

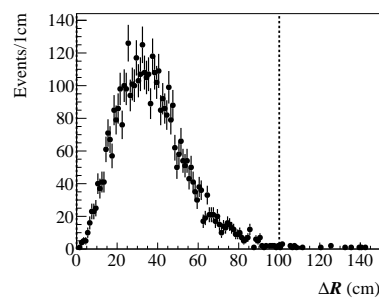
1. イベントあたりの光量が約 5 倍となりヒットの統計数が増える
2. LS の透過率向上により、直接光を取得しやすくなる



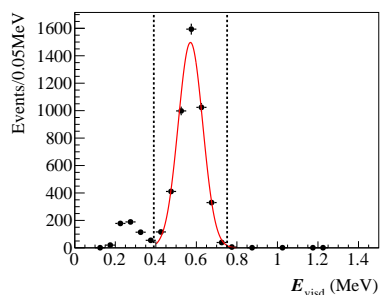
a: 選定条件を満たすイベントの  $E_p$  の分布。点線で囲まれた領域が選定条件を満たす。



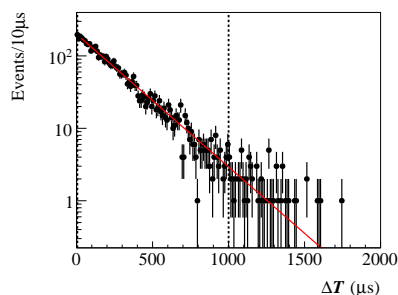
b: 選定条件を満たすイベントの  $r_p$  の分布。点線で囲まれた領域が選定条件を満たす。



c: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta R$  の分布。点線で示す 100 cm 未満を選定条件とした。

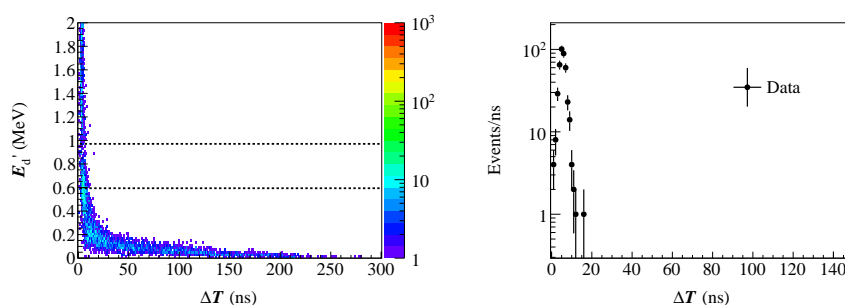


d: 選定条件を満たすイベントの  $E_{visd}$  の分布。0.4–0.8 MeV の範囲でガウシアンでフィットした結果が赤線であり、ピークが  $0.5709 \pm 0.0009$  MeV、 $\sigma$  が  $0.0603 \pm 0.0007$  MeV であった。点線で示す選定条件はピークから  $-3\sigma$ 、 $+3\sigma$  の領域である。



e: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta T$  の分布。図 3.12d のイベントは点線で囲んだ 5–1000  $\mu s$  のイベントから選定した。赤線は  $^{214}\text{Po}$  の寿命を仮定したベストフィットである。

図 3.12:  $^{214}\text{Bi}$  選定のためのパラメータ



a: SP イベントの  $E_d'$  対  $\Delta T$  の分布。図 3.13b は点線で囲まれた領域から選定した。  
 b: 選定条件を満たすイベントの  $\Delta T$  の分布。

図 3.13: SP イベントに HTDP フィッタを適用した結果

3. 波長変換剤 (*bis*-MSB) により、LS の発光波長が長波長側へ移行するため、溶媒の吸光を受けにくくなり、直接光を取得しやすくなる。波長変換剤は発光性ミニバルーン導入時に用いる予定である。

- 悪化する要因

1. 集光ミラーの反射を介することで時間分解が悪くなる
2. LAB-LS の時間応答は現行の LS よりも鈍い

今後、これらの影響を光学シミュレーションにより評価する必要がある。また、LS の  $\alpha/\beta$  波形弁別能力を用いて  $0\nu$  信号 ( $\beta + \beta$ ) の波形とパイルアップ ( $\beta + \alpha$ ) の波形を弁別する方法を検討も必要である。

## 第4章 新しいダブルパルスフィッタの応用

章3で新開発のHTDPフィッタは $\Delta T = 10$  ns付近まで感度を持つことが明らかになった。この章ではHTDPフィッタの時間分解能を活かして $\beta^+$ 崩壊事象の同定を試みたことに関して記す。

### 4.1 KamLANDにおけるオルソポジトロニウムの形成率・寿命測定

#### 4.1.1 LS中におけるオルソポジトロニウムのふるまい

陽電子は一般に電子と出会うと対消滅する。しかし対消滅の前にポジトロニウムという束縛状態を形成する。ポジトロニウムのうち、スピン1重項となる組み合わせをパラポジトロニウム ( $p$ -Ps) と呼び、スピン3重項となる組み合わせをオルソポジトロニウム ( $o$ -Ps) と呼ぶ。真空中において  $p$ -Ps の寿命は 125 ps であり、 $o$ -Ps の寿命は 140 ns である [54]。物質中においてはポジトロニウム形成に関わる電子とは別の電子によるピックアップ反応、化学反応、スピン反転による  $p$ -Ps への転換により  $o$ -Ps の寿命は短くなる [54]。このときの合計 1.02 MeV の対消滅 $\gamma$ 線は3本ではなく2本となる。また、ポジトロニウム形成を介さず、直ちに対消滅を起こす場合もある。LS中における典型的な  $o$ -Ps の形成率とその寿命はそれぞれ約 50% と 3 ns である [55, 56]。

#### 4.1.2 Outer-LS 中での $o$ -Ps の形成率・寿命の予想

KamLAND の Outer-LS と類似の LS についての実験室規模での測定結果は  $o$ -Ps 形成率が 48.9%、その寿命が 3.41 ns と報告されている [55]。文献 [55] 中の LS と Outer-LS の違いは、

- 文献 [55] はイソパラフィンを用いており、Outer-LS はノルマルドデカンを用いている



表 4.1: Outer-LS 中での *o*-Ps の形成率・寿命の予想

	<i>o</i> -Ps 形成率 (%)	<i>o</i> -Ps 寿命 (ns)
類似の LS[55]	$48.9 \pm 0.3$	$3.41 \pm 0.02$
ドデカンとイソパラフィンの違い	+8.8	-0.37
PPO 量の違い	-1.7	-0.10
Outer-LS 予想	$56.0 \pm 3.5$	$2.94 \pm 0.24$

- 文献 [55] は PPO を 2 g/l 用いているが、Outer-LS は PPO を 1.36 g/l 用いている
- 文献 [55] は室温約 23 度での測定であるが、KamLAND は約 12 度である

という点である。

イソパラフィン中での形成率、寿命はそれぞれ 39.6%、3.50 ns[55] と報告されており、ノルマルドデカン中での形成率、寿命はそれぞれ 50.6%、3.04 ns[56] と報告されている。LS 中のノルマルドデカンの割合 80% を考えると、Outer-LS は文献 [55] の LS よりも 8.8% 高い形成率、0.37 ns 短い寿命を持つことが予想できる。

文献 [56] より、PC 単体と PC+PPO 1.5 g/l のサンプルを比較した際には、PPO を加えたサンプルのほうが形成率が 2.7%、寿命が 0.16 ns 増加している。このことから Outer-LS は文献 [55] よりも形成率が 1.7% 低く、寿命が 0.10 ns 程度短いことが予想できる。

芳香族炭化水素中での *o*-Ps の形成率、寿命の温度依存性については Goworek *et al.*[57] によって調べられており、23 度と 12 度の違いは無視できる。

以上をまとめたのが表 4.1 であり、Outer-LS での *o*-Ps の形成率、寿命の予想値はそれぞれ  $56.0 \pm 3.5\%$ 、 $2.94 \pm 0.24$  ns である。誤差は予想のもとにした文献値と予想値の差の半分を適用している。

#### 4.1.3 KamLAND における *o*-Ps 事象の同定の可能性

HTDP フィッタの  $\Delta T$  検出限界は 10 ns 程度であるため、*o*-Ps 事象のうちの数%は、先発信号を陽電子 (および  $\beta^+$  崩壊に伴う  $\gamma$  線) のエネルギー損失、後発信号を対消滅  $\gamma$  線 (合計 1.022 MeV) のエネルギー損失とするパイルアップ事象として同定できると予想される。

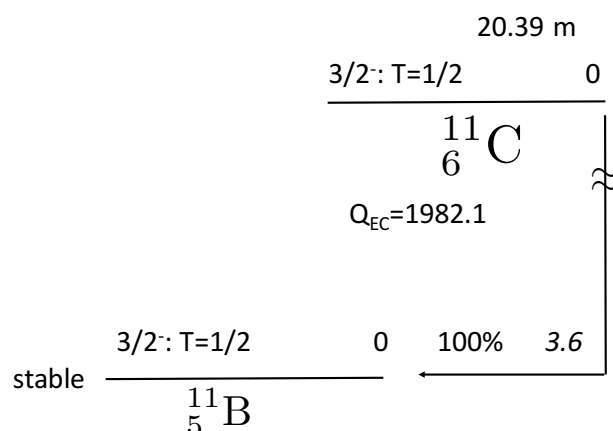


図 4.1:  ${}^{11}\text{C}$  の崩壊図 [27]

#### 4.1.4 KamLAND における $o\text{-Ps}$ の形成率・寿命測定

KamLAND においては宇宙線ミュオンによる炭素原子核破砕由来の  ${}^{11}\text{C}$  崩壊事象 (Q 値 2.0 MeV[58]) が  $\beta^+$  崩壊事象のサンプルとして高統計で取得できる。崩壊図を図 4.1 に示す。Outer-LS 中での生成量は  $0.97 \pm 0.01$  /day/ton[22] である。この節ではソーラーフェーズの 2009 年 4 月 7 日から 2011 年 6 月 21 日 (run8502-10485) の期間のデータから  ${}^{11}\text{C}$  事象を選定し、それらの事象から  $o\text{-Ps}$  の形成率・寿命を評価する。

##### ${}^{11}\text{C}$ 事象の純度の決定

${}^{11}\text{C}$  事象純度の決定に用いたイベントの選定条件を以下に示す。

1. 事象再構成位置の検出器中心からの距離が 4 m より小さい
2. 宇宙線ミュオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全イベントを除去する。宇宙線ミュオン事象は全 PMT の電荷合計が 10,000 p.e. 以上、または OD の PMT ヒット数が 5 以上の事象として判断する。
3. 全 PMT の電荷合計が 1,000 p.e. であった事象から 100  $\mu\text{s}$  以内の事象を除去する。ノイズイベントを避ける。

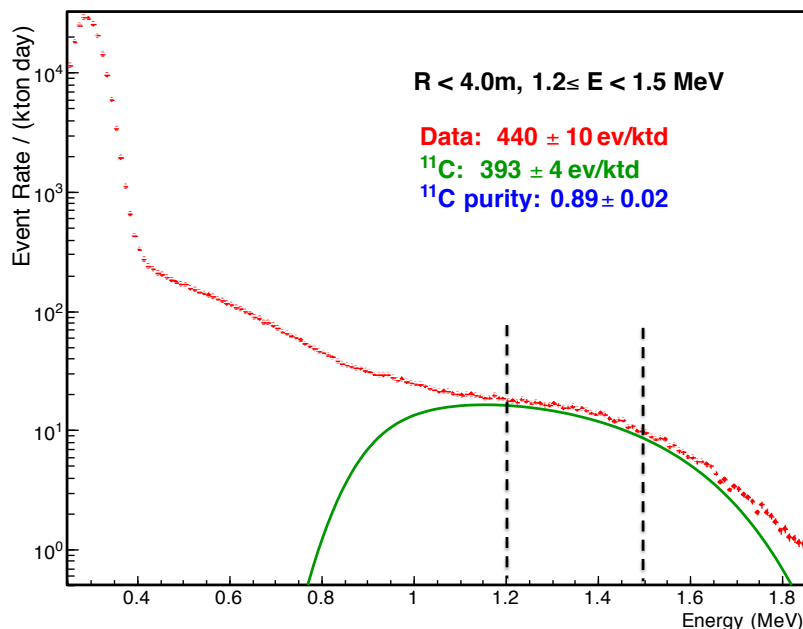


図 4.2: 選定条件を満たすイベントのエネルギースペクトル。点線に示す 1.2–1.5 MeV において緑の実線で示す  $^{11}\text{C}$  事象の純度は 89% である。

4.  $1 \mu\text{s}$  以内の連続事象を除去する。シンチレーション光の時間的広がりがないイベントをまたいで影響するのを避ける。
5.  $1.2 \text{ ms}$  以内の連続事象を除去する。 $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$ 、および  $^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po}$  の連続崩壊事象を除去する。
6.  $\text{Badness}$  が  $41.1\exp(-9.7E_{\text{vis}} (\text{MeV})) + 2.31$  より大きいイベントを除去する。 $\text{Badness}$  はイベント再構成の質を表すパラメータである。この条件で空間相関のない 2 事象の偶発パイルアップとノイズイベントを除去する。

以上の条件から選ばれた事象の  $E_{\text{vis}}$  の分布を図 4.2 に示す。分布に対するフィット結果から  $E_{\text{vis}}$  が 1.2–1.5 MeV の領域では、 $^{11}\text{C}$  事象が  $89 \pm 2\%$  の純度で得られることが分かった。この領域の事象を  $o\text{-Ps}$  の評価に用いることとした。

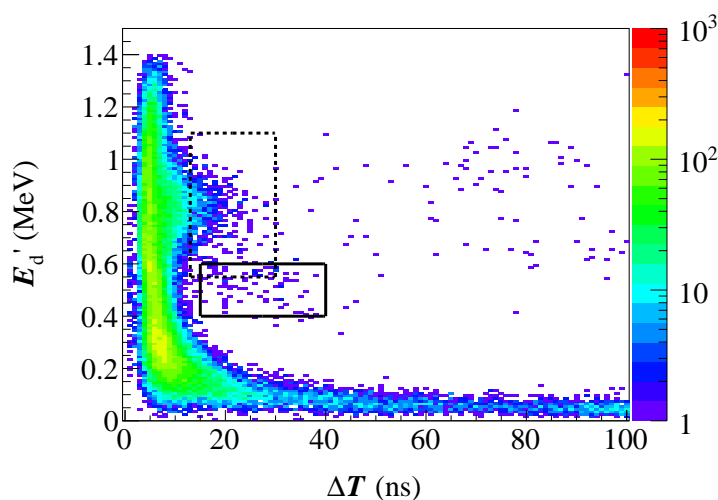


図 4.3: Badness 条件適用前の  $E'_d$  対  $\Delta T$  の分布。点線で囲った領域に  $o$ -Ps 由来の信号が確認できる。実線で囲った領域は Badness が高いイベントである。描画には  $E'_p > 0.1$  MeV の条件を加えている。

#### HTDP フィッタの適用

HTDP フィッタのリファレンス波形は KamLAND-Zen の解析のために  $2\nu$  事象を用いていたが、ここで扱うのはミニバルーン導入前の KamLAND のデータであるため、扱うデータと同期間中に取得した  $^{60}\text{Co}$  線源のキャリブレーションの事象をリファレンス波形として用いた。 $^{11}\text{C}$  事象の純度決定に用いたイベント条件 (条件 6 を除く)、かつ  $1.2 < E_{\text{vis}} \text{ (MeV)} < 1.5$  を満たすイベントの  $E'_d$  対  $\Delta T$  の分布を図 4.3 に示す。図 4.3 より、 $E'_d = 0.8$  MeV 周辺で  $\Delta T$  が 10–30 ns あたりまで筋が伸びているのが確認できる。この領域の信号が  $o$ -Ps の信号に対応する。 $E'_d$  が 1.022 MeV よりも低いのは、 $\gamma$  線事象であるために LS の消光作用を受けたためと思われる。参考として、 $^{68}\text{Ge}$  線源のキャリブレーションデータ ( $^{68}\text{Ge}$  が  $\beta^+$  崩壊を起こし、線源格納容器内で陽電子が静止するため対消滅の信号が得られる) の  $E_{\text{vis}}$  は図 4.8 のように約 0.85 MeV となる。

#### Badness 条件の再決定

SP イベントの大半は Badness が約 1 であるが、図 4.3 の実線で囲った領域のイベントは図 4.5 に示すように Badness が約 5 という高い値を示す。

図 4.6 に示すのは、

- $^{11}\text{C}$  事象の純度決定に用いたイベント条件 (条件 6 を除く)

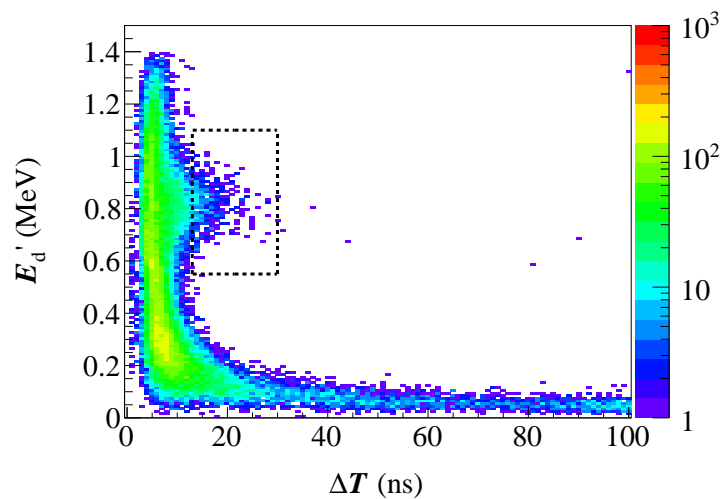


図 4.4: Badness 条件適用後の  $E'_d$  対  $\Delta T$  の分布。描画には  $E'_p > 0.1$  MeV の条件を加えている。

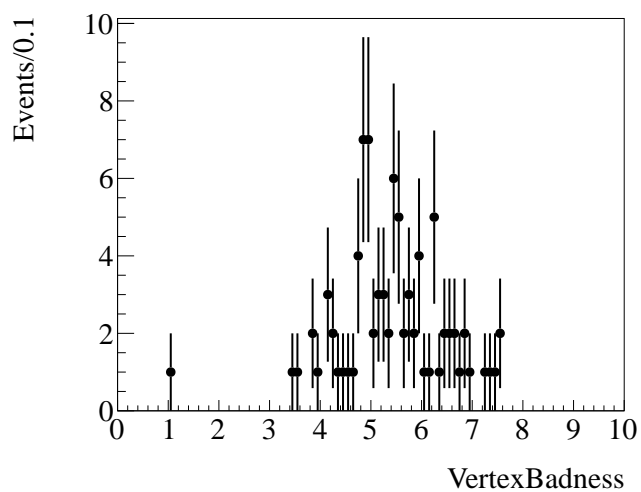


図 4.5: 図 4.3 に実線で示す領域の Badness の分布

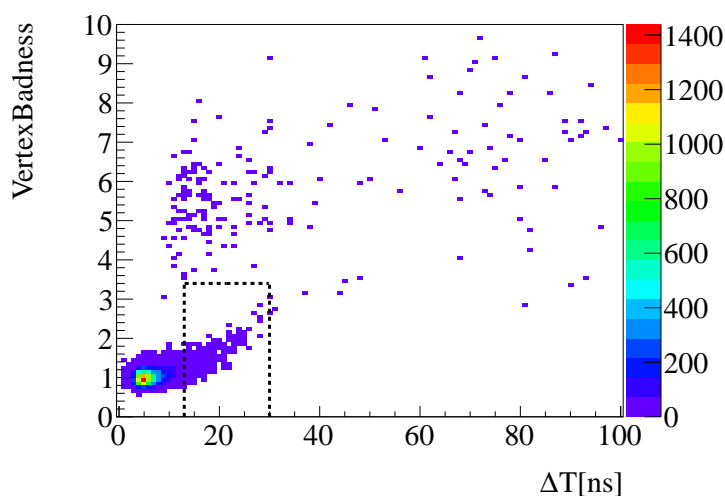


図 4.6:  $^{11}\text{C}$  候補イベントの Badness 対  $\Delta T$  の分布

- $1.2 < E_{\text{vis}} \text{ (MeV)} < 1.5$ 、かつ  $0.55 < E'_d \text{ (MeV)} < 1.1$

を満たすイベントの Badness 対  $\Delta T$  の分布である。今回評価対象の  $o\text{-Ps}$  由来と見られるイベントは、 $\Delta T$  が約 10 から 30 ns へ大きくなるにつれて Badness が徐々に大きくなっていく集団であると見られる。この傾向は、 $\Delta T$  が大きくなるにつれて、Badness の指標の  $\chi_T^2$  と  $\sigma_T$  が大きくなるためであると思われる。 $^{11}\text{C}$  事象の純度決定に用いたイベント条件 6 は Badness が約 2.4 以上のイベントを除去するため、 $o\text{-Ps}$  由来のイベントが  $\Delta T = 25 \text{ ns}$  あたりから非効率を生じる。今回の解析では Badness の高い集団を除去しつつ、 $\Delta T$  のレンジを広くとるため、Badness が 3.4 より高いイベントを除去することとした。結果として  $\Delta T$  は 30 ns まで使用できるようになった。このように決定した領域を図 4.6 に点線で示す。条件変更前後でイベント数は

- Badness 条件変更前: 56446 ( $^{11}\text{C}$  事象の純度決定に用いたイベント条件、かつ  $1.2 < E_{\text{vis}} \text{ (MeV)} < 1.5$ )
- Badness 条件変更後: 56462 ( $^{11}\text{C}$  事象の純度決定に用いたイベント条件 1-5、かつ Badness が 3.4 より大きい事象の除去、かつ  $1.2 < E_{\text{vis}} \text{ (MeV)} < 1.5$ )

となり、増加したイベントは 0.03% であるため、 $^{11}\text{C}$  純度には影響しない。

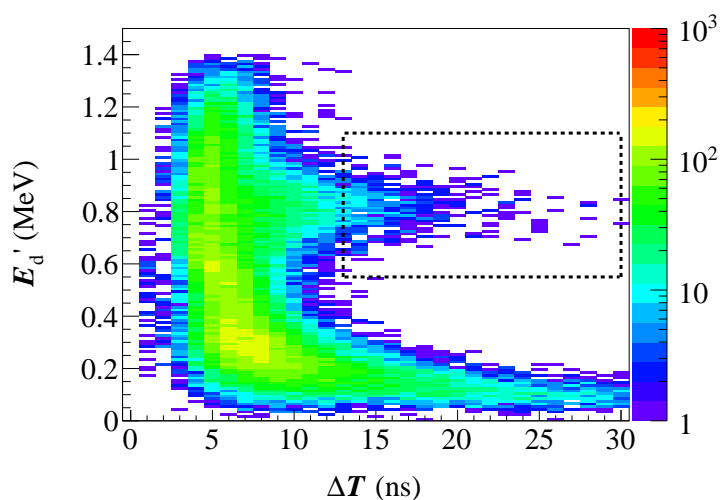


図 4.7: 図 4.4 の拡大図。点線で囲った領域で図 4.8、4.9 の評価を行う。描画には  $E_d' > 0.1$  MeV の条件を加えている。

#### イベント選定条件の整理

前小節で Badness に対する条件を設定できたため、ここで  $o$ -Ps の形成率・寿命評価を行うためのイベント選定条件を既出のものも含めて改めて列挙する。

1. 事象再構成位置が 4 m より小さい
2. 宇宙線ミュオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全イベントを除去する
3. 全 PMT の電荷合計が 1,000 p.e. であった事象から 100  $\mu$ s 以内の事象を除去する
4. 1  $\mu$ s 以内の連続事象を除去する
5. 1.2 ms 以内の連続事象を除去する
6. Badness が 3.4 より大きい事象を除去する
7.  $E_{\text{vis}}$  が 1.2 MeV より大きく、1.5 MeV より小さい
8.  $E_d'$  が 0.55 MeV より大きく、1.1 MeV より小さい

以上の条件のもと作成した  $E_d'$  対  $\Delta T$  の分布を図 4.4 に示す。図 4.3 の実線領域に見られたようなイベントが無くなったのを確認できる。

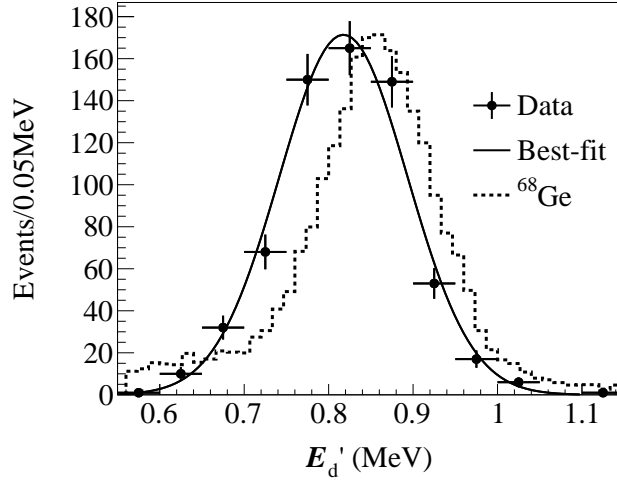


図 4.8:  $^{11}\text{C}$  候補イベントの  $E'_d$  の分布。  $13 \leq \Delta T \leq 30$  ns の範囲から選択した。実線はガウシアンでのベストフィットの結果を表す。フィット範囲は 0.55–1.1 MeV で、 $\chi^2/\text{d.o.f.}$  は 10.1/8 であった。点線は  $^{68}\text{Ge}$  のキャリアブレーションデータの  $E_{\text{vis}}$  である。 $^{68}\text{Ge}$  より  $E'_d$  が低く出るのは、先発信号の存在が影響していると思われる。

図 4.7 は図 4.4 の拡大図である。図 4.7 に点線で示す領域で  $E'_d$  の評価を行った様子を図 4.8 に示す。図 4.8 の分布をガウシアンでフィットした結果、平均値が  $0.82 \pm 0.03$  MeV、 $\sigma$  が  $0.076 \pm 0.002$  MeV となった。この結果から 0.55–1.1 MeV のレンジを選択することによる  $o$ -Ps イベントの非効率率は 0.03% である。

図 4.9 に  $0.55 < E'_d < 1.1$  MeV で選定した  $\Delta T$  の分布を示す。図 4.9 の  $\Delta T$  の分布を

$$56462 \times 0.89 \times \frac{r_{\text{op}}}{\tau_{\text{op}}} \exp\left(-\frac{\Delta T}{\tau_{\text{op}}}\right) \quad (4.1)$$

$$r_{\text{op}} \equiv o\text{-Ps 形成率} \quad (4.2)$$

$$\tau_{\text{op}} \equiv o\text{-Ps の寿命} \quad (4.3)$$

と仮定すると、13–30 ns でのベストフィットの値は  $r_{\text{op}}$  が  $65 \pm 11\%$ 、 $\tau_{\text{op}}$  が  $3.2 \pm 0.1$  ns  $\chi^2/\text{d.o.f.}$  は 13.9/16 であった。フィット範囲の下限値は図 4.7 から単一事象の誤判定が混入しないように決定した。

## 考察

ベストフィット結果と文献 [55] からの予想値



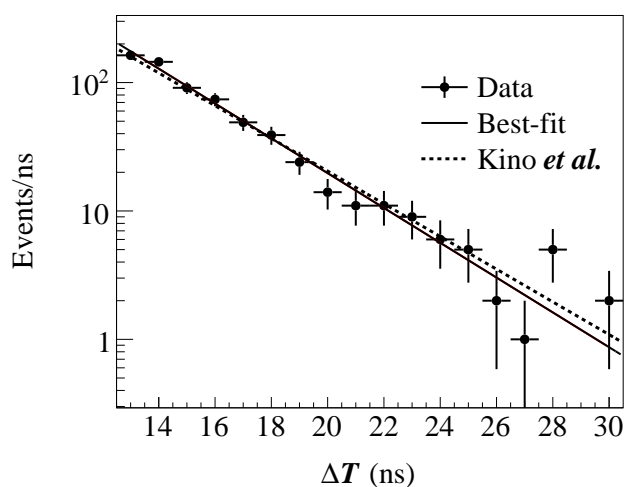


図 4.9:  $^{11}\text{C}$  候補イベントの  $\Delta T$  の分布。  $0.55 < E'_d < 1.1$  MeV の範囲から選択した。実線は式 4.1 でのベストフィットの結果を表す。フィット範囲は 13–30 ns で、 $\chi^2/\text{d.o.f.}$  は 13.9/16 であった。点線は文献 [55] の実験室測定値を適用した曲線である。

- 形成率:  $56.0 \pm 3.5\%$ 、寿命:  $2.94 \pm 0.24$  ns

は誤差の範囲で一致していた。

この一連の解析で、KamLAND で  $o\text{-Ps}$  事象を同定できることが明らかになった。今回  $E'_d$ 、 $\Delta T$  を評価するための領域に残ったイベントは 1.2% であった。同定できる量はこのように少ないが、この手法は  $\beta^+$  事象の推定手法としての応用が考えられる。

## 4.2 Xe-LS 中の $^{11}\text{C}$ 生成量見積り

KamLAND-Zen において、Xe-LS 中の  $^{11}\text{C}$  生成量が測定されていなかった。 $^{11}\text{C}$  のエネルギースペクトルが  $2\nu$  のエネルギースペクトルに埋もれるためである。2nd フェーズの Xe-LS 中での宇宙線ミューオンによる中性子生成量は Outer-LS の 1.2 倍 (1st フェーズは 1.1 倍 [23]) となっており、 $0\nu$  探索のバックグラウンドである  $^{10}\text{C}$  について Xe-LS と Outer-LS での生成量の違いが不定性になっている。 $^{11}\text{C}$  の生成量を確かめることで、その推定材料となることが期待できる。

表 4.2: Xe-LS 中での *o*-Ps の形成率・寿命の予想

	<i>o</i> -Ps 形成率 (%)	<i>o</i> -Ps 寿命 (ns)
Ar-LS[55]	$49.5 \pm 0.7$	$3.42 \pm 0.03$
飽和ガスの不定性	–	0.2
デカンとイソパラフィンの違い	+8.8	–0.37
PPO 量の違い	+0.54	+0.03
Xe-LS 予想	$59 \pm 5$	$3.1 \pm 0.2$

### Xe-LS 中での *o*-Ps の形成率と寿命の予想値

Xe-LS は希ガスである Xe を溶解させているため、ここでは文献 [55] の LS の Ar ガス飽和時の *o*-Ps 形成率 49.5%、寿命 3.42 ns をもとに Xe-LS 中でのそれぞれの値を予想する。以後文献 [55] の Ar ガス飽和 LS を Ar-LS と記す。

飽和ガスによる違いについては、文献 [55] で He、Ar、窒素、酸素のそれぞれの場合について調べられている。形成率に対する違いは無視できるほど小さく、寿命に対する違いは 0.2 ns 程度生じる可能性がある。これは不定性として考える。

LS 組成の違いについて、イソパラフィンとノルマルドデカンの違いは節 4.1.2 で論じた。文献 [55] よりオクタンよりドデカンでの寿命が 0.06 ns 短く、デカンとドデカンでの寿命の違いはさらに小さいと思われるため無視する。LS 組成の違いから Ar-LS より Xe-LS は 8.8% 高い形成率、0.37 ns 短い寿命を持つと予想できる。

PPO 量は Ar-LS よりも Xe-LS の方が 0.3 g/l だけ多い。節 4.1.2 と同様の考察で、Ar-LS よりも Xe-LS のほうが 0.54% 高い形成率を持ち、0.03 ns 長い寿命を持つと予想できる。

以上を表 4.2 にまとめた。予想される Xe-LS 中の *o*-Ps の形成率は  $59 \pm 5\%$ 、寿命は  $3.1 \pm 0.2$  ns となる。形成率に対する誤差は Ar-LS での形成率との差の半分を適用した。Xe-LS 中の  $^{11}\text{C}$  量を見積もる際には、寿命に対する不定性の影響が支配的である。

#### 4.2.1 イベント選定

解析に用いたデータの期間は 2013 年 12 月 11 日から 2015 年 10 月 26 日 (run12247–13295) である。イベント選定は以下の条件で行った。

1. 事象再構成位置が検出器中心から 120 cm より小さい
2. エネルギーが 1.2–1.6 MeV の範囲内である

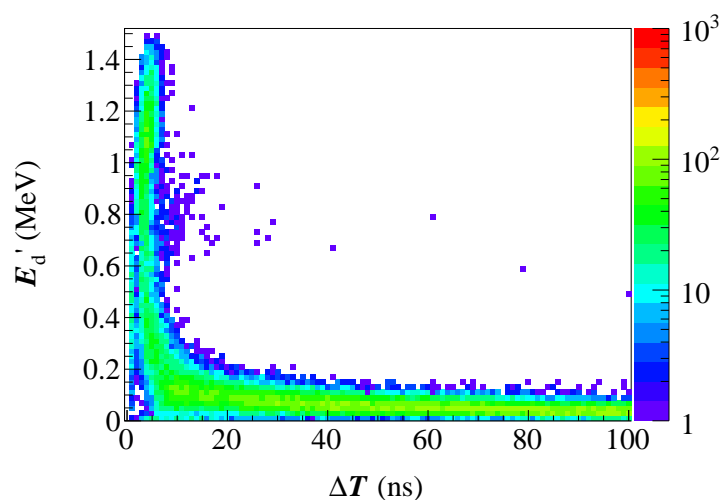


図 4.10: Xe-LS 中の  $^{11}\text{C}$  候補事象の  $E'_d$  対  $\Delta T$  の分布 ( $E'_p > 0.1$  MeV)。 $o\text{-Ps}$  のイベントが  $\Delta T < 20$  ns に集中して見られる。20–100 ns に分布するのは  $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$  パイルアップバックグラウンドである。

3. 宇宙線ミュオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全ての事象を除去する
4. 3 ms 以内に連続して発生した事象を除去する
5. 原子炉に由来する反ニュートリノ事象を除去する
6. 宇宙線ミュオンの原子核破砕生成物事象を除去する。 $^{11}\text{C}$  の半減期は 20 分と長いため、この選定で除去される量は無視できる
7. Badness が 3.4 より大きい事象を除去する

図 4.10 に  $E'_d$  対  $\Delta T$  の分布を示す。

#### 4.2.2 パイルアップバックグラウンド量の見積もり

パイルアップバックグラウンド量を以下の手順で遅延同時計測により見積もった。遅延同時計測のイベント選定は以下の通りである。

1. 先発信号の  $E_{\text{vis}}(E_{\text{visp}})$  と  $E_{\text{visd}}$  の和が 1.2 MeV より大きい、かつ 1.6 MeV より小さい。
2. 先発信号の事象再構成位置の検出器からの距離 ( $r_p$ ) が 120 cm より小さい

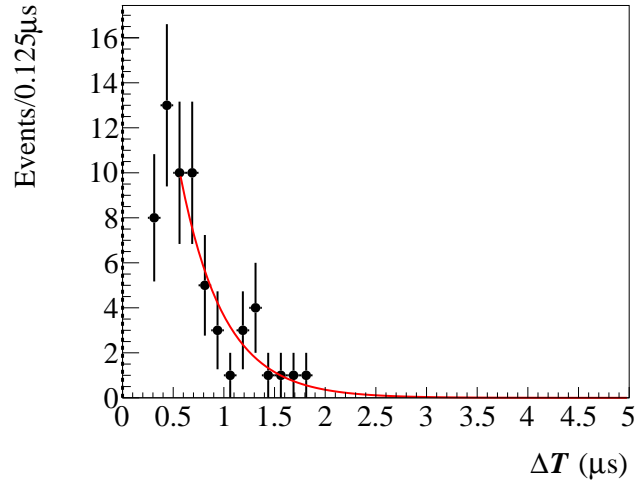


図 4.11: 遅延同時計測で選定した  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  の  $\Delta T$  の分布。赤線は式 4.11 でのベストフィットである。

3. 先発信号の事象再構成位置と後発信号の事象再構成位置の差 ( $\Delta R$ ) が 100 cm より小さい
4. 宇宙線ミュオン事象、およびその事象から 2 ms 以内の全イベントを除去する。
5.  $E_{\text{visd}}$  が 0.55 MeV より大きく 1.1 MeV より小さい

これらの条件全てを満たすイベントから作成した  $\Delta T$  の分布を図 4.11 に示す。作成した分布を 0.55–5  $\mu\text{s}$  の範囲で  $^{212}\text{Po}$  の寿命を仮定して式 3.6 でフィットすると、 $A = 1.3 \times 10^2 \pm 0.2 \times 10^2$  となった。

#### 4.2.3 $\Delta T$ 分布のフィット

節 4.2.1 の事象から  $E'_d$  が 0.55 MeV より大きく、1.1 MeV より小さいという条件を満たす事象の  $\Delta T$  の分布を図 4.12 に示す。 $^{212}\text{Bi}$ – $^{212}\text{Po}$  バックグラウンド推定値を用いて以下の式でフィットした。フィット範囲は単一事象の誤判定を避けるために 10–30 ns とした。

$$\frac{C_{\text{psx}}}{\tau_{\text{psx}}} \exp\left(-\frac{\Delta T}{\tau_{\text{psx}}}\right) + \frac{130}{431} \exp\left(-\frac{\Delta T}{431}\right) \quad (4.4)$$

$$C_{\text{psx}} \equiv o\text{-Ps 事象数} \quad (4.5)$$

$$\tau_{\text{psx}} \equiv o\text{-Ps の寿命} \quad (4.6)$$

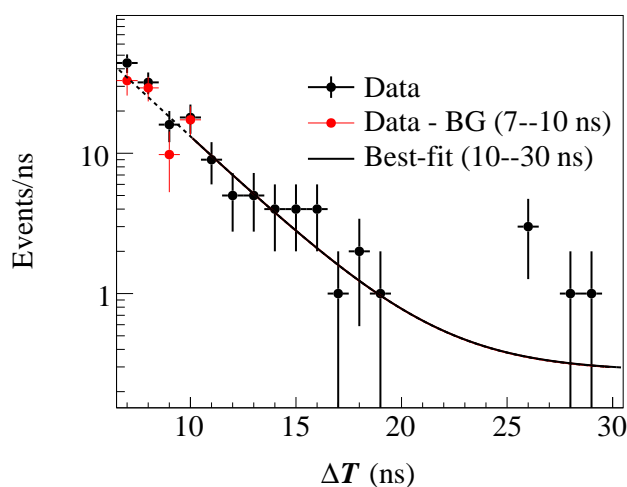


図 4.12: Xe-LS 中の  $^{11}\text{C}$  候補事象の  $\Delta T$  の分布。黒実線は式 4.4 で 10–30 ns のデータ点に対してのベストフィットを示す ( $\chi^2/\text{d.o.f.}$  は 9.4/19 であった)。赤点は 7–10 ns のデータについて  $^{60}\text{Co}$  線源のキャリブレーションから見積もった単一事象誤判定のバックグラウンドを差し引いたものであり、ベストフィットの延長線 (点線) との合致が確認できる。

$o$ -Ps の寿命は予想値  $3.1 \pm 0.2$  ns を仮定し、 $\chi^2$  の計算に、

$$\frac{(\tau_{\text{opx}} - 3.1)^2}{0.2^2} \quad (4.7)$$

の項を加えた。図 4.13 に  $o$ -Ps 事象数と  $o$ -Ps の寿命の許容領域の分布を示す。2 つの変数の間に反相関を確認できる。この分布から

$$C_{\text{psx}} = (1.1_{-0.2}^{+0.3}) \times 10^3 \quad (4.8)$$

$$\tau_{\text{psx}} = 3.1 \pm 0.2 \text{ ns} \quad (4.9)$$

と求まった。この結果から  $o$ -Ps 形成率の予想値  $59 \pm 5\%$  と、ライブタイム 534.5 日、LS 密度  $0.78 \text{ g/cm}^3$ 、 $^{11}\text{C}$  のエネルギー選択効率 47.6% を用いると、Xe-LS 中での  $^{11}\text{C}$  生成量は

$$1.2 \pm 0.2(\text{stat.})_{-0.2}^{+0.3}(\text{syst.})/\text{day/ton} \quad (4.10)$$

と求まった。 $^{11}\text{C}$  生成量に対する系統誤差の内訳は

- Xe-LS 中での  $o$ -Ps の形成率の不定性から 8.5%
- Xe-LS 中での  $o$ -Ps の寿命の不定性から +22%、−14%

であった。

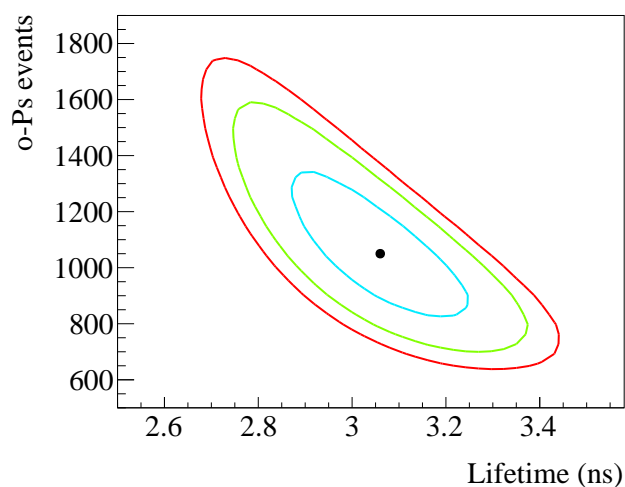


図 4.13: フィットパラメータの許容領域。黒点はベストフィットを表し、水色線、黄緑線、赤線はそれぞれ自由度 1 のときの  $1\sigma$ 、90%、95%信頼区間を表す。

#### 4.2.4 考察

今回推定した Xe-LS 中の  $^{11}\text{C}$  生成量は Outer-LS 中での生成量  $0.97 \pm 0.01/\text{day}/\text{ton}$ [22] と誤差の範囲で一致しており、Outer-LS と比較を行うには誤差が大きかった。しかし、系統誤差は Xe-LS 中での *o*-Ps の寿命の不定性に起因しており、実験室測定を行うことで無くすることができる。また統計誤差は将来の Xe-LS 増量で削減できるため、今後 Outer-LS と比較可能な精度でこの測定を行うことは可能であると考えられる。

## 第5章 まとめ

KamLAND-Zen の  $0\nu$  探索のバックグラウンドとして、 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  パイルアップの影響を初めて見積もり、現行の解析手法のままでは KamLAND2-Zen において主要なバックグラウンドとなることを明らかにした。これを除去するために HTDP フィッタを開発し、約半分の除去を達成した。この除去を考慮した上での KamLAND2-Zen の年間予想事象数を表 5.1 に示す。

また HTDP フィッタの時間分解能を活かして、 $o$ -Ps 形成時の  $e^+$  事象が同定可能であることを示し、 $o$ -Ps 事象の 5% を用いて Xe-LS 中の  $^{11}\text{C}$  生成量を初めて  $1.2 \pm 0.2(\text{stat.})_{-0.2}^{+0.3}(\text{syst.})/\text{day}/\text{ton}$  と測定した。 $o$ -PS 事象同定の手法はこのほか、 $^{10}\text{C}$  生成量の見積もりと逆  $\beta$  崩壊を原理とする反ニュートリノ検出への応用が期待できる。

将来展望として KamLAND2-Zen を現行の KamLAND-Zen と比較すると、 $\Delta T$  検出限界が改善する要因と悪化する要因がある。今後、それらの影響を光学シミュレーションにより評価する必要がある。

改善となる場合、 $\Delta T = 5 \text{ ns}$  まで事象判別できれば、パイルアップバックグラウンドは年間 0.75 事象となる。また、 $o$ -Ps 事象は 20% 程度を同定できることが期待される。

表 5.1: KamLAND2-Zen を発光性バルーンを用いて行う際の  $0\nu$  信号領域における年間予想イベント数 (HTDP フィッタ導入後)。

$^{214}\text{Bi}$	0.45
$^{10}\text{C}$	3.4
$^8\text{B}$ solar $\nu$	1.6
$^{136}\text{Xe}$ $2\nu$	0.78
$^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$	1.5
BG Total	7.7
$^{136}\text{Xe}$ $0\nu$ ( $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 20 \text{ meV}$ )	0.63

# 付録A U、Th崩壊系列



図 A.1:  $^{238}\text{U}$  崩壊系列。図は [27] より転載。



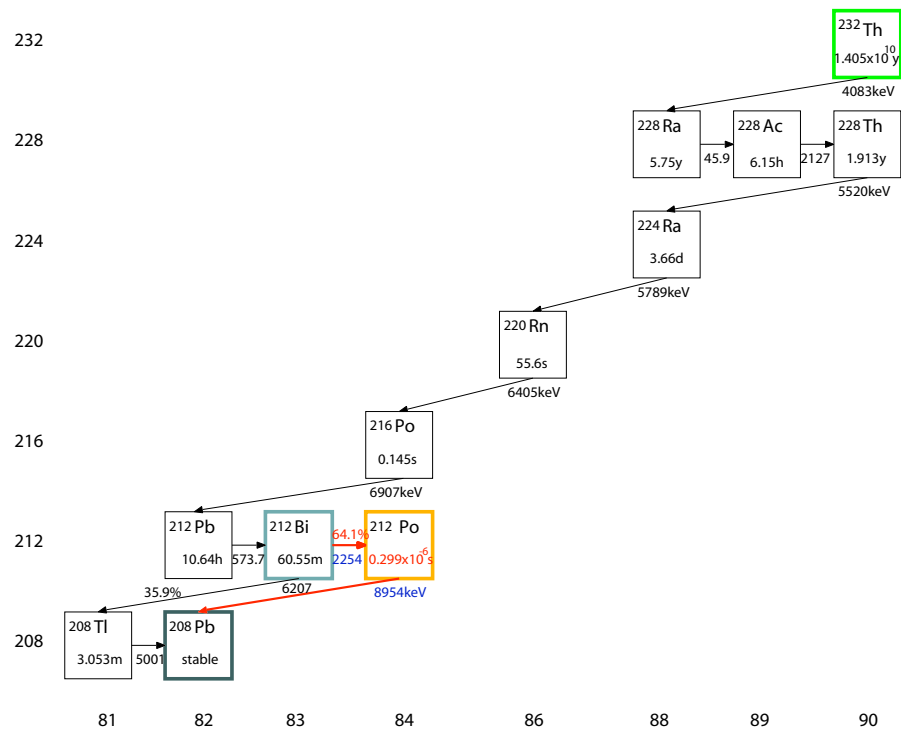


図 A.2:  $^{232}\text{Th}$  崩壊系列。図は [27] より転載。

## 参考文献

- [1] F. Capozzi, G. L. Fogli, E. Lisi, A. Marrone, D. Montanino, and A. Palazzo, “Status of three-neutrino oscillation parameters, circa 2013,” *Phys. Rev. D* **89** no. 9, (May, 2014) 093018.  
<http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.093018>.
- [2] **Particle Data Group** Collaboration, K. A. Olive *et al.*, “Review of Particle Physics,” *Chin. Phys.* **C38** (2014) 090001.
- [3] J. J. Gomez-Cadenas, J. Martin-Albo, M. Mezzetto, F. Monrabal, and M. Sorel, “The search for neutrinoless double beta decay,” [arXiv:1109.5515](https://arxiv.org/abs/1109.5515). <http://arxiv.org/abs/1109.5515>.
- [4] P. Minkowski, “ $\mu \rightarrow e\gamma$  at a rate of one out of 109 muon decays?,” *Phys. Lett. B* **67** no. 4, (Apr, 1977) 421–428. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037026937790435X>.
- [5] T. Yanagida, “Horizontal gauge symmetry and masses of neutrinos,” in *the Workshop on the Unified Theory and Baryon Number in the Universe*, O. Sawada and A. Sugamoto, eds., pp. 95–98. 1979.
- [6] M. Gell-Mann, P. Ramond, and R. Slansky, “Complex Spinors and Unified Theories,” [arXiv:1306.4669](https://arxiv.org/abs/1306.4669).  
<http://arxiv.org/abs/1306.4669>.
- [7] **KamLAND-Zen** Collaboration, K. Asakura *et al.*, “Results from KamLAND-Zen,” in *AIP Conf. Proc.*, p. 170003. 2015.  
<http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.4915593>.
- [8] **EXO-200** Collaboration, J. B. Albert *et al.*, “Search for Majorana neutrinos with the first two years of EXO-200 data,” *Nature* **510** no. 7504, (Jun, 2014) 229–234, [arXiv:1402.6956](https://arxiv.org/abs/1402.6956).  
<http://www.nature.com/doi/10.1038/nature13432>.

- [9] H. Klapdor-Kleingrothaus *et al.*, “Latest results from the HEIDELBERG-MOSCOW double beta decay experiment,” *Eur. Phys. J. A* **12** no. 2, (Oct, 2001) 147–154. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s100500170022>.
- [10] H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS, A. DIETZ, H. L. HARNEY, and I. V. KRIVOSHEINA, “EVIDENCE FOR NEUTRINOLESS DOUBLE BETA DECAY,” *Mod. Phys. Lett. A* **16** no. 37, (Dec, 2001) 2409–2420, [arXiv:0201231 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0201231). <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0201231><http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217732301005825>.
- [11] H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I. V. KRIVOSHEINA, “THE EVIDENCE FOR THE OBSERVATION OF  $0\nu\beta\beta$  DECAY: THE IDENTIFICATION OF  $0\nu\beta\beta$  EVENTS FROM THE FULL SPECTRA,” *Mod. Phys. Lett. A* **21** no. 20, (Jun, 2006) 1547–1566. <http://inspirehep.net/record/724934?ln=ja>.
- [12] C. E. AALSETH *et al.*, “COMMENT ON ”EVIDENCE FOR NEUTRINOLESS DOUBLE BETA DECAY”,,” *Mod. Phys. Lett. A* **17** no. 22, (Jul, 2002) 1475–1478, [arXiv:0202018 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0202018). <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0202018>.
- [13] **ECO-200** Collaboration, M. Auger *et al.*, “Search for neutrinoless double-beta decay in  $^{136}\text{Xe}$  with EXO-200.,” *Phys. Rev. Lett.* **109** no. 3, (Jul, 2012) 032505. <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.109.032505>.
- [14] **KamLAND-Zen** Collaboration, A. Gando *et al.*, “Limit on Neutrinoless  $\beta\beta$  Decay of  $^{136}\text{Xe}$  from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in  $^{76}\text{Ge}$ ,” *Phys. Rev. Lett.* **110** no. 6, (Feb, 2013) 062502. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.062502>.
- [15] **IGEX** Collaboration, C. E. Aalseth *et al.*, “IGEX  $^{76}\text{Ge}$  neutrinoless double-beta decay experiment: Prospects for next generation experiments,” *Phys. Rev. D* **65** no. 9, (May, 2002) 092007. <http://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.65.092007>.

- [16] **GERDA** Collaboration, M. Agostini *et al.*, “Results on Neutrinoless Double- $\beta$  Decay of Ge 76 from Phase I of the GERDA Experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **111** no. 12, (Sep, 2013) 122503, [arXiv:1307.4720](https://arxiv.org/abs/1307.4720). <http://arxiv.org/abs/1307.4720>.
- [17] K. Gusev, “Status of the GERDA experiment: on the way to Phase II,” *TAUP 2015* (2015) . [https://www.mpi-hd.mpg.de/gerda/public/2015/t15\\_TAUP\\_gerda\\_kg.pdf](https://www.mpi-hd.mpg.de/gerda/public/2015/t15_TAUP_gerda_kg.pdf).
- [18] C. MACOLINO, “RESULTS ON NEUTRINOLESS DOUBLE-BETA DECAY FROM GERDA PHASE I,” *Mod. Phys. Lett. A* **29** no. 01, (Jan, 2014) 1430001. <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217732314300018>.
- [19] **CUORE** Collaboration, K. Alfonso *et al.*, “Search for Neutrinoless Double-Beta Decay of  $^{130}\text{Te}$  with CUORE-0,” *Phys. Rev. Lett.* **115** no. 10, (Apr, 2015) 102502, [arXiv:1504.02454](https://arxiv.org/abs/1504.02454). <http://arxiv.org/abs/1504.02454><http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.102502><http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.102502>.
- [20] **CUORICINO** Collaboration, E. Andreotti *et al.*, “ $^{130}\text{Te}$  neutrinoless double-beta decay with CUORICINO,” *Astropart. Phys.* **34** no. 11, (Jun, 2011) 822–831. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650511000351>.
- [21] **CUORE** Collaboration, D. R. Artusa *et al.*, “CUORE-0 results and prospects for the CUORE experiment,” [arXiv:1502.02576](https://arxiv.org/abs/1502.02576). <http://arxiv.org/abs/1502.02576>.
- [22] **KamLAND** Collaboration, A. Gando *et al.*, “Be 7 solar neutrino measurement with KamLAND,” *Phys. Rev. C* **92** no. 5, (Nov, 2015) 055808. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.92.055808>.
- [23] **KamLAND-Zen** Collaboration, A. Gando *et al.*, “Measurement of the double- $\beta$  decay half-life of  $^{136}\text{Xe}$  with the KamLAND-Zen experiment,” *Phys. Rev. C - Nucl. Phys.* (2012) .
- [24] **KamLAND** Collaboration, K. Eguchi *et al.*, “First results from KamLAND: evidence for reactor antineutrino disappearance,” *Phys. Rev. Lett.* **90** no. 2, (2003) 021802, [arXiv:0212021](https://arxiv.org/abs/0212021) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].

- [25] O. Tajima, “Development of Liquid Scintillator for A Large Size Neutrino Detector,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2000. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/tajima\\_osamu\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/tajima_osamu_m.pdf).
- [26] O. Tajima, *Measurement of Electron Anti-Neutrino Oscillation Parameters with a Large Volume Liquid Scintillator Detector, KamLAND*. PhD thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2003. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/internal/ThesisFile\\_KamLAND/tajima\\_osamu\\_d.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/internal/ThesisFile_KamLAND/tajima_osamu_d.pdf).
- [27] K. Nakajima, *First Results from  ${}^7\text{Be}$  Solar Neutrino Observation with KamLAND*. PhD thesis, Graduate School of Science, Tohoku university, 2010. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/internal/ThesisFile\\_KamLAND/nakajima\\_kyohei\\_d.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/internal/ThesisFile_KamLAND/nakajima_kyohei_d.pdf).
- [28] A. Gando, *First Results of Neutrinoless Double Beta Decay Search with KamLAND-Zen*. PhD thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2012. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/gando\\_azusa\\_d.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/gando_azusa_d.pdf).
- [29] K. Nakamura, K. Ueshima, D. Motoki, and S. Matsuda, “Xe-LS filling,” *Kaml. Collab. Meet.* (2014) .  
[http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/meeting/2014/sendai/files/04\\_ueshima.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/meeting/2014/sendai/files/04_ueshima.pdf).
- [30] H. Yoshida, *Limit on Majorana Neutrino Mass with Neutrinoless Double Beta Decay from KamLAND-Zen*. PhD thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2013. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/yoshida\\_hisataka\\_d.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/yoshida_hisataka_d.pdf).
- [31] I. Shimizu, “Results of Geo Neutrino and Xenon Experiment with KamLAND,” *Symp. Life Sci. Dr. Raju Raghavan* (2012) .  
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/KamWiki/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=conference:rajusymposium-kamland-result.pdf>.
- [32] K. Tagashira, “高精度 17 インチ光電子増倍管の性能計測研究,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2000. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/tagashira\\_kenji\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/tagashira_kenji_m.pdf).

- [33] T. Iwamoto, *Measurement of Reactor Anti-Neutrino Disappearance in KamLAND*. PhD thesis, Graduate School of Science, Tohoku university, 2003.
- [34] S. Matsuda, “Background status,” *KamLAND-Zen Collab. Meet.* (2015) . [http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/meeting/2015/tendo//agenda\\_files/01-01-150327-bg-status-matsuda.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/meeting/2015/tendo//agenda_files/01-01-150327-bg-status-matsuda.pdf).
- [35] K. Ueshima, “Results and Prospects from KamLAND-Zen,” *6th Symp. Symmetries Subat. Phys.* (2015) . [http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/KamWiki/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=conference:ueshima\\_kota-ssp15.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/KamWiki/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=conference:ueshima_kota-ssp15.pdf).
- [36] Y. Ono, “ニュートリノレス二重  $\beta$  崩壊探索のための 10C タギングによるバックグラウンド低減,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2012. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/ono\\_yohei\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/ono_yohei_m.pdf).
- [37] I. Shimizu, “Results from KamLAND-Zen,” in *XXVI Conference on Neutrino Physics and Astrophysics*. 2014. <http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/KamWiki/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=conference:kamland-zen-results-shimizu.pdf>.
- [38] **KamLAND** Collaboration, S. Abe *et al.*, “Production of radioactive isotopes through cosmic muon spallation in KamLAND,” *Phys. Rev. C* **81** no. 2, (Feb, 2010) 025807, [arXiv:0907.0066](https://arxiv.org/abs/0907.0066). <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.81.025807>.
- [39] V. Rodin, A. Faessler, F. Šimkovic, and P. Vogel, “Assessment of uncertainties in QRPA -decay nuclear matrix elements,” *Nucl. Phys. A* **766** (Feb, 2006) 107–131, [arXiv:0706.4304](https://arxiv.org/abs/0706.4304). <http://arxiv.org/abs/0706.4304>.
- [40] I. Shimizu, “KamLAND,” in *11th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors*. 2010. <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/NNN10/slides/14am-Shimizu.pdf>.

- [41] K. Asakura, “Study of new PMT for KamLAND-Zen upgrade,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2014. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/asakura\\_kota\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/asakura_kota_m.pdf).
- [42] A. Obata, “Xe を用いた二重ベータ崩壊実験のための集光ミラーと大光量液体シンチレータの開発,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2012. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/obata\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/obata_m.pdf).
- [43] H. Tachibana, “Development of light collecting mirror for KamLAND2 - Zen,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2014. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/tachibana\\_hajime\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/tachibana_hajime_m.pdf).
- [44] S. Obara, “KamLAND-Zen 実験における  $^{214}\text{Bi}$  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,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2014. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/obara\\_shuhei\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/obara_shuhei_m.pdf).
- [45] S. Ishio, “Development of imaging device for particle identification in KamLAND-Zen,” Master’s thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2014. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/ishio\\_shouhei\\_m.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/Thesis/ThesisFile/ishio_shouhei_m.pdf).
- [46] S. Matsuda, “Update of double beta decay analysis,” in *KamLAND-Zen Collatoration Meeting*. 2015. [http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/meeting/2015/tendo/agenda\\_files/01-05-150327-db-update-matsuda.pdf](http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/meeting/2015/tendo/agenda_files/01-05-150327-db-update-matsuda.pdf).
- [47] Y. Takemoto, *Observation of  $7\text{ Be}$  Solar Neutrinos with KamLAND*. PhD thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, 2014.
- [48] S. Matsuda, “Measurement of double-beta decay half-life,” in *KamLAND-Zen Collatoration Meeting*. 2014. <http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND-Zen/internal/KamWiki/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=db-Onu-limit.pdf>.
- [49] “Table of Isotopes decay data,  $^{212}\text{Bi}$ .” <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=830212>.

- [50] “Table of Isotopes decay data,  $^{212}\text{Po}$ .” <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=840212>.
- [51] “機械的特性 | 製品情報 | 帝人デュポンフィルム株式会社.” <https://www.teijindupontfilms.jp/product/material/kikai.html>.
- [52] “ICSC 0265 - DODECYLBENZENE.” [http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0265](http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0265).
- [53] **KamLAND** Collaboration, K. Asakura *et al.*, “Search for the proton decay mode  $p \rightarrow \nu^- K^+$  with KamLAND,” *Phys. Rev. D* **92** no. 5, (Sep, 2015) 052006. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.92.052006>.
- [54] H. J. Ache, *Positronium and Muonium Chemistry*, pp. 1–49. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, Jun, 1979. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ba-1979-0175.ch001>.
- [55] Y. Kino, T. Sekine, Y. Sato, H. Kudo, F. Suekane, A. Suzuki, Y. Ito, and T. Suzuki, “Positron Annihilation in Liquid Scintillator for Electron Antineutrino Detection,” *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **1** no. 2, (2000) 63.
- [56] D. Franco, G. Consolati, and D. Trezzi, “Positronium signature in organic liquid scintillators for neutrino experiments,” *Phys. Rev. C* **83** no. 1, (Jan, 2011) 015504, [arXiv:1011.5736](https://arxiv.org/abs/1011.5736). <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.83.015504>.
- [57] T. Goworek, C. Rybka, J. Wawryszczuk, and R. Wasiewicz, “Temperature effects in positronium formation: Solid aromatic hydrocarbons,” *Chem. Phys. Lett.* **106** no. 5, (May, 1984) 482–486. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0009261484853440>.
- [58] “Table of Isotopes decay data,  $^{11}\text{C}$ .” <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=60011>.



## 謝辞

まず初めに、この論文の主査であり、学部生時代から面倒を見ていただいている清水先生に心から感謝申し上げます。自分がゆとりのない目標設定をするがために、毎度期限ぎりぎりの校閲を依頼する形になっており大変申し訳ありませんでしたが、最後までおつき合いいただきありがとうございました。

審査員の先生方におかれましては、お忙しい中、この論文をお読みいただきありがとうございます。

所属研究室であるニュートリノ科学研究センターの皆様には大変お世話になりました。先生方、研究員の方々には沢山のご助言をいただきました。技術職員の皆様には円滑に実験できるよう多大なお力添えをいただきました。この論文はデータ解析が主ですので、私個人で実験室規模で行った内容は掲載しておりませんが、解析テーマの着想には実験の経験が活きております。博士課程後期の先輩方には解析のことを教えていただきました。同期とは研究面では刺激し合えたり、各種提出物の情報など共有して(もらって)いたと思います。後輩には仕事を協力してもらったり、解析を教えてもらうこともありました。事務の方々には学業以外の面で大変お世話になりました。白鳥さん、毎日お掃除ありがとうございます。

また、この論文でデータを使用させていただいている KamLAND のコラボレータの皆様には感謝申し上げます。

最後にここまで進学の道を支えていただいた両親に感謝申し上げます。(金銭的な)恩返しまではもう少々お待ち下さい。

2016年2月5日 蜂谷尊彦