

修士論文

KamLAND2 プロトタイプ検出器における
較正手法の開発と性能評価

Development of calibration method and performance evaluation
for KamLAND2 prototype detector

東北大学理学研究科
物理学専攻

中根 淳

令和 5 年

概要

ニュートリノには粒子と反粒子が同一であるというマヨラナ性がある可能性が示唆されている。これを検証できる現実的な唯一の手段がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 $0\nu\beta\beta$ の探索である。 $0\nu\beta\beta$ 事象はレプトン数が保存せず標準理論を超えた物理現象であるため、その発見自体に新たな理論の必要性を示すという意義がある。また、その他の $0\nu\beta\beta$ の探索の意義として、 $0\nu\beta\beta$ の半減期からニュートリノのマヨラナ有効質量や質量階層構造の決定に近づくこともできるほか、 $0\nu\beta\beta$ の発見によりニュートリノのマヨラナ性が証明されると、シーソー機構によりニュートリノ質量が極端に小さいことを自然に説明できる。さらに、ニュートリノのマヨラナ性の証明は物理界の謎の一つである宇宙物質優勢を解決する鍵となると考えられている。

KamLAND-Zen 実験は、極低バックグラウンド環境で低エネルギーへの感度を持つ KamLAND 検出器に二重ベータ崩壊核として ^{136}Xe を大量に導入することで世界最高峰の感度で $0\nu\beta\beta$ の探索を行っている。しかし、いまだ $0\nu\beta\beta$ を観測することはできていない。そこで実験感度向上を目指した KamLAND2-Zen 実験が計画されており、主な改良として ^{136}Xe の増量 (1000 kg)、高量子効率 PMT の導入 (観測光量 1.9 倍)、PMT に集光ミラーを装着 (集光量 1.8 倍)、新型液体シンチレータ (LAB-LS) の導入 (発光量 1.4 倍) による観測光量の増加が計画されている。

前述した改良案はそれぞれ独立して開発が進められているのみで、それらを組み合わせた際の性能評価についてはまだ行われていない。そこで、KamLAND 検出器の高性能化を事前に実測で確認することを目的として KamLAND2 プロトタイプ検出器を建設した。本研究では、プロトタイプ検出器の較正手法の開発及び、その手法を用いた較正を行った。そして、その較正結果を適用したプロトタイプ検出器の集光性能の評価を行った。

プロトタイプ検出器の性能評価をするにあたって、まずプロトタイプ検出器の較正を行う必要がある。そこで、プロトタイプ検出器のシミュレーションによる計算と実際に検出器を使った測定との 2 つのデータを用い、それぞれを比較することでプロトタイプ検出器の較正を行うという較正手法を開発した。較正対象はその後の性能評価の精度を高めるために必要な要素として、プロトタイプ検出器に導入されたタイベックシートの反射率と 14 本の PMT のゲインの不定性及び時間変化とした。較正の結果、タイベックシートの反射率は $90 \pm 3\%$ (@ 400 nm) であると判明した。また、ゲインの不定性は $\pm 4.8\%$ であることがわかり、時間変化は放射線測定の解析における光電子数の計算に適用した。

続いて、集光ミラーのみの集光性能と各装置の性能が合わさったプロトタイプ検出器全体の集光性能及びその性能の長期安定性を評価した。その結果、集光ミラーの集光性能として HQE-PMT の観測光量が 1.7 ~ 2.6 倍となることを明らかにした。また、プロトタイプ検出器の集光性能がシミュレーションと約 40% 以内で一致し、1 年にわたって非常に安定していることを実証した。これらの結果から、KamLAND2-Zen 実験にプロトタイプ検出器と同様の装置を導入することによる集光性能の向上とその性能の安定性を示すことができた。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	ニュートリノ物理	3
2.1	素粒子ニュートリノ	3
2.2	ニュートリノ振動	4
2.2.1	太陽ニュートリノ問題	4
2.2.2	大気ニュートリノ異常	5
2.2.3	ニュートリノ振動	5
2.3	ニュートリノ質量	7
2.3.1	質量階層構造	7
2.3.2	ニュートリノ質量の絶対値	8
2.4	マヨラナニュートリノ	8
2.4.1	マヨラナ粒子	8
2.4.2	シーソー機構	9
2.5	ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$)	10
2.5.1	$0\nu\beta\beta$ 探索の意義	11
2.5.2	$0\nu\beta\beta$ 探索実験の現状	12
第 3 章	KamLAND-Zen 実験	15
3.1	KamLAND 実験	15
3.1.1	KamLAND 検出器	15
3.1.2	ニュートリノの検出原理	19
3.1.3	KamLAND 実験の成果	20
3.2	KamLAND-Zen 実験	20
3.2.1	KamLAND-Zen 実験の概要	21
3.2.2	KamLAND-Zen 実験のバックグラウンド	22
3.2.3	KamLAND-Zen 実験の成果と現状	23
3.3	KamLAND2-Zen 実験	26
3.3.1	KamLAND2-Zen 実験の改良案	26

3.3.2	KamLAND2-Zen 実験の検出感度	27
第 4 章	KamLAND2 プロトタイプ検出器	29
4.1	検出器の構成	29
4.1.1	ステンレスタンク	29
4.1.2	タイベックシート	30
4.1.3	HQE-PMT	31
4.1.4	集光ミラー	34
4.1.5	アクリル容器	36
4.1.6	LAB-LS	37
4.2	KamLAND2 検出器との相違点	38
4.3	検出器の建設	38
4.3.1	ステンレスタンクの建設	39
4.3.2	検出器の洗浄	40
4.3.3	タイベックシートの取付	41
4.3.4	HQE-PMT の取付	42
4.3.5	集光ミラーの製作	43
4.3.6	集光ミラーの取付	44
4.3.7	純水の注入	45
4.3.8	LAB-LS の作製	45
4.3.9	LAB-LS の導入	47
4.3.10	測定小屋の建設	48
4.4	検出器における測定	50
4.5	検出器の解体	51
4.6	建設において生じた問題	53
4.6.1	建設中に生じた問題	53
4.6.2	建設完了後に生じた問題	55
第 5 章	プロトタイプ検出器における測定及びシミュレーション	59
5.1	測定	59
5.1.1	シンチレータ球測定	59
5.1.2	放射線源測定	63
5.2	シミュレーション	65
5.2.1	Geant4	65
5.2.2	シンチレータ球シミュレーション	66
5.2.3	放射線源シミュレーション	66
第 6 章	プロトタイプ検出器の較正	69
6.1	タイベックシートの反射率	69

6.1.1	較正手法	69
6.1.2	較正結果	70
6.2	1p.e. ゲイン	71
6.2.1	較正手法	71
6.2.2	較正結果	72
第 7 章	プロトタイプ検出器の性能評価	75
7.1	集光ミラーの集光性能	75
7.1.1	評価方法	75
7.1.2	評価結果	78
7.2	プロトタイプ検出器の観測光量	80
7.2.1	評価方法	80
7.2.2	評価結果	83
第 8 章	まとめ	85
	謝辞	87

目次

2.1	標準理論を構成する素粒子	3
2.2	KamLAND が観測した原子炉ニュートリノの振動	6
2.3	二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラム	10
3.1	KamLAND 検出器とその周辺の様子	15
3.2	KamLAND 検出器の概略図	16
3.3	ニュートリノ弾性散乱のファインマンダイアグラム	20
3.4	逆ベータ崩壊	20
3.5	KamLAND-Zen 実験の概略図	21
3.6	二重ベータ崩壊のエネルギースペクトルのイメージ	23
3.7	^{10}C の生成過程	24
3.8	^{238}U の崩壊過程	24
3.9	KamLAND-Zen 800 実験で得られたマヨラナ有効質量への制限	25
4.1	KamLAND2 プロトタイプ検出器の概略図	30
4.2	ステンレスタンク上面の概略図	30
4.3	Tyvek1082D の反射率 (空気中)	31
4.4	R12860-03LXA の外観	32
4.5	HQE-PMT と 17 インチ PMT の量子効率	32
4.6	HQE-PMT の計数率入射位置・角度依存性	33
4.7	KamLAND 検出器の PMT 配置	33
4.8	タンクに設置された PMT の概略図	33
4.9	集光ミラーの形状	34
4.10	プロトタイプ検出器における HQE-PMT・集光ミラーの配置図	35
4.11	集光ミラーの構造のイメージ図	35
4.12	実際に測定された集光ミラーの反射率	35
4.13	シミュレーションに登録された集光ミラーの反射率	36
4.14	アクリル容器の設計図	36
4.15	LAB-LS の発光時間分布	37
4.16	LAB-LS の再発光確率	38

4.17	LAB-LS の透過率と減衰長	38
4.18	ステンレスタンク	40
4.19	洗浄中の様子	40
4.20	作業時の装備	41
4.21	タイバックシート取付	41
4.22	HQE-PMT 取付	42
4.23	集光ミラー製作	43
4.24	集光ミラー取付	44
4.25	純水注入	45
4.26	LAB-LS 作製	46
4.27	LAB-LS 設置後の検出器の設計図	47
4.28	LAB-LS 導入	48
4.29	測定小屋	49
4.30	検出器の純水透過率	51
4.31	LAB-LS 導入	52
4.32	ノイズが生じた PMT 信号	53
4.33	接触・変形した集光ミラー	54
4.34	気泡が残ったアクリルドームの一つ	55
4.35	光電面が剥がれ落ちた No. 1 の PMT	56
4.36	浮力によって浮上した PMT	56
4.37	アルミニウムが剥離した集光ミラー	58
4.38	錆びたステープラーの針	58
5.1	シンチレータ球	60
5.2	シンチレータ球の発光スペクトル	61
5.3	シンチレータ球の発光等方性	61
5.4	シンチレータ球測定に用いられた回路	62
5.5	シンチレータ球測定で得られた波形の一例	62
5.6	放射線源	63
5.7	放射線源測定に用いられた回路	64
5.8	放射線源測定で得られた波形	64
5.9	プロトタイプ検出器のジオメトリ	65
5.10	光量シミュレーションの解析に用いられる波形	67
6.1	Δt 分布のシミュレーション結果の一例	70
6.2	シンチレータ球測定における光子の経路の解略図	70
6.3	タイバックシートの反射率と Δt 分布の形の関係	71
6.4	測定とシミュレーションの Δt 分布の比較結果	71

6.5	PMT 信号を積分する範囲	72
6.6	1p.e. ゲイン分布の一例	72
6.7	1p.e. ゲインの値	73
6.8	ゲインの時間変化	73
7.1	シミュレーション結果の Δt 分布の一例	77
7.2	測定結果の Δt 分布の一例	77
7.3	KamLAND2 検出器とプロトタイプ検出器の PMT への光の入射角の概略図	77
7.4	集光ミラーの集光性能	79
7.5	シミュレーションによる積分範囲の選定	82
7.6	波形解析における積分範囲	82
7.7	合計光電子数 (Q) 分布の一例	82
7.8	シミュレーションと測定データの集光量	83

表目次

3.1	バッファオイルの組成	17
3.2	KamLAND-LS の組成	18
3.3	Xe-LS の組成	22
3.4	KamLAND-LS の組成	27
4.1	R12860-03LXA の性能	32
4.2	LAB-LS の発光時定数とその割合	37
4.3	KamLAND2 検出器とプロトタイプ検出器の相違点	39
4.4	プロトタイプ検出器建設のタイムライン	39
4.5	シンチレータ球・放射線源測定の測定時期	50
5.1	シンチレータ球の組成	60
5.2	シンチレータ球の発光時間幅及び発光時定数	60
5.3	シミュレーションで発生させた放射線の条件	66
7.1	集光ミラー有・無の観測光量と集光性能	79
7.2	5 倍アンプの増幅率	81

第 1 章

序論

我々の宇宙は、内部構造を持たない「素粒子」によって構成されている。私の研究対象であるニュートリノは素粒子の 1 つであるが、電氣的に中性で弱い相互作用するのみであることから検出が困難であるため、性質の一部は解明されていない。

素粒子標準理論においてニュートリノの質量は厳密に 0 とされてきたが、ニュートリノ振動の観測により有限の質量を持つことが明らかとなった。ただし、その絶対質量についてはいまだ解明されていない。また、ニュートリノは電荷を持たないことから粒子数が保存せずとも電荷保存則を破らないため、粒子と反粒子が同一であるという性質 (マヨラナ性) を持つマヨラナ粒子である可能性がある。ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、シーソー機構によって質量が他の素粒子と比べて極めて小さい理由を説明できる上、重い右巻きニュートリノの存在を容認できる。この重い右巻きニュートリノによって、ビッグバンで同じだけ創られたはずの物質と反物質のうち物質だけが現在の宇宙に残っている理由を説明できる可能性がある。ニュートリノのマヨラナ性を検証できるもっとも有効な手段は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 事象の検出である。 $0\nu\beta\beta$ の崩壊率はニュートリノ有効質量と関係しているため、たとえ検出に至らずともその半減期に対する制限からニュートリノ有効質量に対する制限を得ることができる。

KamLAND-Zen 実験はニュートリノのマヨラナ性を検証するために、液体シンチレータを使った世界最大のニュートリノ検出器である KamLAND 検出器に二重ベータ崩壊核の ^{136}Xe を導入し、 $0\nu\beta\beta$ 事象を探索する実験を行っている。これまでに世界最高感度の検出により $0\nu\beta\beta$ の半減期に世界で最も厳しい制限をかけることに成功しているが、いまだ $0\nu\beta\beta$ を観測することはできていない。そこで、さらなる感度向上のために新たに開発した高発光液体シンチレータや高量子効率 PMT、集光ミラーを導入することで、検出器を KamLAND2 検出器に改良し、それを用いて KamLAND2-Zen 実験を行うことを計画している。KamLAND 検出器の改良に先駆けて、高発光液体シンチレータや高量子効率 PMT、集光ミラーによる観測光量の増加を測定し、これらの性能評価を行うためにプロトタイプ検出器を建設した。プロトタイプ検出器は KamLAND 検出器と比較できるように設計され、2022 年 12 月から約 1 年間、測定が行われた。

本研究では、このプロトタイプ検出器の較正手法の開発及び、その手法を用いた較正を行った。その較正結果を適用した後、新たに開発した高発光液体シンチレータや高量子効率 PMT、集光ミラーの性能評価を行った。

第2章

ニュートリノ物理

2.1 素粒子ニュートリノ

この宇宙の物質は素粒子と呼ばれる最小単位の粒子によって構成されている。また、素粒子の間で働く相互作用によって様々な物理現象が起きる。この素粒子の性質や反応を記述した理論として、「標準理論」が現在確立している。標準理論における素粒子を図 2.1 に示す。素粒子には 5 種類のボソンと 12 種類のフェルミオンが存在する。素粒子間に働く相互作用は電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用の 4 種類存在するが、ボソンのうち光子 γ が電磁相互



図 2.1 標準理論を構成する素粒子

作用を、ウィークボソン W^\pm 、 Z^0 が弱い相互作用を、グルーオン g が強い相互作用を、ヒッグスボソン H^0 が重力相互作用を媒介する素粒子である。フェルミオンは強い相互作用をして核子を構成する6種類のクォークと強い相互作用が働かない6種類のレプトンに分類され、さらに両者とも第一世代から第三世代までの3つの世代に分けられる。レプトンの中で $-e$ の電荷を持つものが荷電レプトン(電子 e 、ミューオン μ 、タウ τ)、電荷を持たないものがニュートリノ(電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ)であり、つまり、ニュートリノは電氣的に中性なため電磁相互作用も働かない素粒子である。元々ニュートリノは、ベータ崩壊の研究により予言され、20年の時を経て発見された粒子である。1914年、放射線が放出される核種に対して固有のエネルギー値を持つアルファ崩壊とガンマ崩壊とは対照的に、ベータ崩壊で放出されるベータ線のエネルギーは連続的に分布するスペクトルとして観測された。当時、ベータ崩壊は2体崩壊すると考えられており、連続スペクトルが観測されることはエネルギー保存則を破っていることを示唆するため、非常に大きな問題となった。そこで、1930年に Pauli はエネルギー保存則を成り立たせるため、ベータ崩壊では電子と同時に電氣的に中性な粒子が放出され3体崩壊するという仮説を提唱した。その後の中性子の発見に伴い、この未知の粒子は Fermi によってニュートリノと名付けられ、ベータ崩壊が式 (2.1) で表される現象であることが判明した。

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.1)$$

存在自体は1930年代に予言されていたニュートリノであるが、弱い相互作用しか働かないため検出が非常に困難であった。それから20年以上経った1956年、Reines と Cowan は、塩化カドミウム CdCl_2 を溶かした水と液体シンチレータを層状に重ねた検出器を用いて、原子炉からの反電子ニュートリノと水分子中の陽子による逆ベータ崩壊で生成される中性子と陽電子で遅延同時計測することで、世界初のニュートリノ観測を成功させた。その後の測定から、弱い相互作用でパリティが破れていることや、全てのニュートリノ・反ニュートリノのヘリシティがそれぞれ左巻き・右巻きであることがわかった。これらの結果を踏まえて標準理論では、ニュートリノは質量が厳密に0であると仮定し、光速で運動するとしている。

2.2 ニュートリノ振動

ニュートリノの発見後も性質を調べるために多くの測定が行われ、その過程でニュートリノが質量を持たないと説明できない観測結果が得られた。これらは太陽ニュートリノ問題、大気ニュートリノ異常と呼ばれ、さらなる研究を必要とした。理論および実験的研究の結果、ニュートリノ振動という現象によりこれらの問題は説明され、ニュートリノが質量を持つことが証明された。

2.2.1 太陽ニュートリノ問題

太陽内部で起きている核融合の連鎖は pp チェーンと呼ばれ、式 (2.2) で表される。この反応は4つの陽子が核融合することで最終的に ${}^4\text{He}$ を作り出す連鎖反応で、電子ニュートリノを生成する。

$$4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e \quad (2.2)$$

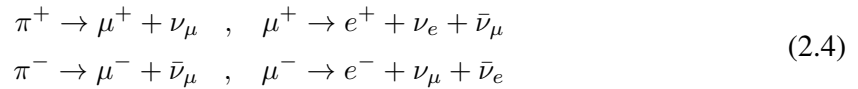
また、この核融合が進むと ${}^7\text{Be}$ や ${}^8\text{B}$ など合成され、これらが反応する際にも電子ニュートリノが生成される。このような太陽内部で起こる核融合によって生成されるニュートリノを太陽ニュートリノと呼ぶ。

1968年に行われた Homestake 実験では、テトラクロロエチレン C_2Cl_4 を用いた式 (2.3) で表される反応を見ることで、太陽ニュートリノの測定を行った [1]。しかし、この実験で観測された太陽ニュートリノのフラックスは、標準太陽模型によって予測されていた値の 1/3 程度であった。そのため、検出器による実験と太陽模型による理論に対して入念なチェックが行われたが、観測値と予測値の違いを説明することはできず、この不一致は次第に深刻な問題となった。このことは太陽ニュートリノ問題と呼ばれ、約 30 年もの間解決されなかった。



2.2.2 大気ニュートリノ異常

宇宙線が空気中の原子核と衝突した際に放出されるニュートリノは大気ニュートリノと呼ばれ、その主な生成反応は式 (2.4) のパイオンからの連続崩壊である。



この反応式より、 ν_μ と ν_e のフラックスの比はおおよそ 2 になると予想される。しかし、大型水チェレンコフ光検出器を用いた Kamiokande 実験での ν_μ と ν_e の観測事象数の比は、シミュレーションから予想される値と異なっており、両者の比 R は以下の通りであった [2]。

$$R \equiv \frac{[\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu / \nu_e + \bar{\nu}_e]_{\text{observed}}}{[\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu / \nu_e + \bar{\nu}_e]_{\text{expected}}} = 0.60_{-0.06}^{+0.07}(\text{stat.}) \pm 0.05(\text{syst.}) \quad (2.5)$$

これは、 ν_μ が減少している、または ν_e が増加していることを示しており、他実験でも同様の結果が得られた。このことは大気ニュートリノ異常と呼ばれるようになった。

2.2.3 ニュートリノ振動

太陽ニュートリノと大気ニュートリノ異常は長い間謎のままであったが、Super-Kamiokande 実験と SNO 実験によりニュートリノ振動が確認されたことで解決された。ニュートリノ振動とはニュートリノのフレーバーが確率で周期的に変化する現象で、ニュートリノが質量を持つ場合のみ生じる。1998年に Super-Kamiokande 実験で大気ニュートリノ中のミューニュートリノの損失が観測され [3]、2002年に SNO 実験で太陽ニュートリノの総量とその中の電子ニュートリノ成分の総量が観測され [4]、ニュートリノのフレーバー変化が証明された。また、KamKAND 実験では原子炉由来のニュートリノを観測することで世界で初めて完全なフレーバー振動を示した (図 2.2)。以下にニュートリノ振動についての概要を述べる。

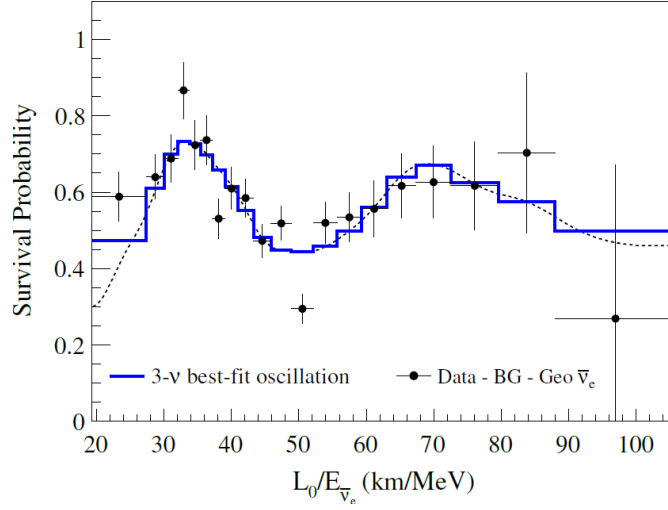


図 2.2 KamLAND が観測した原子炉ニュートリノの振動 [5]
 $\bar{\nu}_e$ の振動が 2 周期にわたって確認できる

ニュートリノのフレーバー固有状態を $|\nu_\alpha\rangle$ 、質量固有状態を $|\nu_i\rangle$ 、質量固有値を m_i とおく。この時、フレーバー固有状態と質量固有状態は式 (2.6) のように重ね合わせで表せる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle, \quad |\nu_i\rangle = \sum_\alpha (U^\dagger)_{i\alpha} |\nu_\alpha\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i}^* |\nu_\alpha\rangle \quad (2.6)$$

ここで、 U は Pontecorvo・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれるユニタリー行列である。シュレディンガー方程式より、質量固有状態の時間変化は、エネルギー固有値 E_i を使って

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle \quad (2.7)$$

と表されるため、フレーバー α のニュートリノの時間変化は次のように表される。

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(t)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \\ &= \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} |\nu_\beta\rangle \end{aligned} \quad (2.8)$$

したがって、 U の CP 複素位相を無視すると、フレーバー α から β に移行する確率 $P(\alpha \rightarrow \beta)(t)$ は式 (2.9) のように書ける。

$$\begin{aligned} P(\alpha \rightarrow \beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \sum_{i,j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-iE_i t} e^{iE_j t} \\ &= \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2 + 2\text{Re} \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i(E_i - E_j)t} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで、ニュートリノの質量が十分に小さく、相対論的に運動するため $p_i \gg m_i$ 、 $E \simeq p_i$ として、

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (2.10)$$

と近似ができ、さらに光速で移動するとすれば、式 (2.9) は

$$P(\alpha \rightarrow \beta) = \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}^*|^2 + 2\text{Re} \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right) \quad (2.11)$$

とできる。ここで $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ は質量二乗差で、 $L \equiv ct$ は時間 t の間にニュートリノが移動する距離である。

ここでは簡単のため ν_e と ν_μ の 2 フレーバー間のみのニュートリノ振動を考えると

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

と書いて、その遷移確率は

$$\begin{aligned} P(e \rightarrow \mu) &= 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta + 2\text{Re} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \cdot \exp\left(-i \frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{21}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]\right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

となる。

2.3 ニュートリノ質量

ニュートリノ振動の発見でニュートリノが有限の質量を持つことが明らかとなったが、式 (2.11) からわかるように、ニュートリノ振動から導けるのは質量二乗差であり、質量の絶対値ではない。実際、ニュートリノ質量の値は未だにわかっていない。ただし、いくつかの制限を与えることはできている。

2.3.1 質量階層構造

ニュートリノ振動の測定は、質量固有状態の大きさの順である質量階層構造に制限を与えることができる。その測定結果から許される質量階層構造は以下の 3 種類である。

- 順階層構造 (NO): $m_1 < m_2 \ll m_3$
- 逆階層構造 (IO): $m_3 \ll m_1 < m_2$
- 縮退構造 (QD) : $m_1 \simeq m_2 \simeq m_3$

ここで、 m_1 と m_2 の大小関係が決まっているのは、電子ニュートリノが物質中を通過する際に周囲の大量の電子の存在によりポテンシャルを感じるという MSW 効果の共鳴振動によって、太陽ニュートリノ観測の結果がうまく説明できるからである。質量階層構造はニュートリノの基本的性質の 1 つであるものの未だ決定には至っておらず、これを決定することが現代のニュートリノ物理において重要な課題の一つとなっている。

2.3.2 ニュートリノ質量の絶対値

ニュートリノの質量階層構造の決定に向けた研究が進められる一方で、質量そのものに制限をかける試みもいくつか行われている。そのうちの 하나가ベータ崩壊のエネルギースペクトルの精密測定である。ニュートリノが質量を持つことにより、ベータ崩壊で放出される電子の最大運動エネルギーが変化する。そのためベータ崩壊のエネルギースペクトルのエンドポイントを調べることで、以下の式で表される電子ニュートリノの質量 m_{ν_e} を測定できる。

$$m_{\nu_e} = \sqrt{\sum_i |U_{ei}|^2 m_i^2} \quad (2.14)$$

現在、KATRIN 実験によるトリチウムのベータ崩壊の測定から電子ニュートリノの質量には

$$m_{\nu_e} < 1.1 \text{ eV} \quad (90\% \text{ C.L.}) \quad (2.15)$$

という制限が与えられている [6]。もう一つの方法としては、宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) のような宇宙構造の精密測定が挙げられる。宇宙初期には大量のニュートリノが生成されたため、そのニュートリノの質量による重力が宇宙の構造に影響を与えたと考えられる。現在でも、有効質量を測定可能な感度には達していないが、Planck 衛星の測定結果から、ニュートリノの質量和に対して次の制限が与えられている [7]。

$$\sum m_\nu \leq 0.12 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.}) \quad (2.16)$$

いずれの結果からもニュートリノ質量は他のフェルミオンに比べて極端に小さいことがわかる。この事実もニュートリノの大きな謎の一つである。

2.4 マヨラナニュートリノ

ニュートリノが電荷を持たないこと、及び、その極めて小さな質量を自然に説明できることからニュートリノがマヨラナ粒子である可能性が示唆されている。マヨラナ粒子とは、粒子と反粒子が等価な中性フェルミオンのことである。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、ニュートリノの質量が極端に小さいことや右巻きニュートリノが未発見であることに説明がつく。さらに、宇宙物質優勢の謎を解明できる可能性もあるため、ニュートリノのマヨラナ性の有無の決定は素粒子物理において非常に重要なものとなっている。以下では、マヨラナ粒子の定式化を行った後、マヨラナ性とニュートリノの非常に軽い質量との関連性を述べる。

2.4.1 マヨラナ粒子

スピンの $1/2$ のフェルミオンはディラック方程式

$$(i\gamma_\mu \partial^\mu - m_D)\psi = 0 \quad (2.17)$$

に従い、ここでのラグランジアン密度 \mathcal{L} とその質量項 \mathcal{L}_D は以下のように書ける。

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma_\mu\partial^\mu - m_D)\psi \quad (2.18)$$

$$\mathcal{L}_D = m_D\bar{\psi}\psi \quad (2.19)$$

ラグランジアンがローレンツ不変かつエルミートであるため、質量項もローレンツスカラーかつエルミートでなくてはならない。したがって ϕ によって作られる質量項は上記の形のみに限られる。しかし、荷電共役である ψ^C も合わせて考えると、以下で定義するマヨラナ質量項 \mathcal{L}_M も考えることができる。

$$\mathcal{L}_M = m_L\bar{\psi}\psi^C + m_R\bar{\psi}^C\psi + m_M\bar{\psi}^C\psi^C \quad (2.20)$$

この質量項は位相変換に対してレプトン数を保存しないが、ニュートリノのような中性粒子ならば、電荷の保存を破らない。以下では式 (2.20) の第一項、第二項をそれぞれ \mathcal{L}_L 、 \mathcal{L}_R と呼び、第三項は $\bar{\psi}\psi$ の荷電共役であるため無視する。ここで、右手系左手系への射影演算子 $P_{L,R} = \frac{1}{2}(1 \mp \gamma^5)$ を導入すると、任意の右巻きスピノルと左巻きスピノルの関係は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \phi &= (P_L + P_R)\phi = \phi_L + \phi_R \\ \bar{\phi}_L\phi_L &= \bar{\phi}P_R P_L\phi = 0 \\ \bar{\phi}_R\phi_R &= 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

これらを用いるとラグランジアンの質量項 \mathcal{L}_D 、 \mathcal{L}_L 、 \mathcal{L}_R は

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_D &= m_D(\bar{\phi}_L\phi_R + \bar{\phi}_R\phi_L) \\ \mathcal{L}_L &= m_L(\bar{\phi}_L\phi_R^C + \bar{\phi}_R^C\phi_L) \\ \mathcal{L}_R &= m_R(\bar{\phi}_L^C\phi_R + \bar{\phi}_R\phi_L^C) \end{aligned} \quad (2.22)$$

と書ける。さらにマヨラナ条件 $\phi_{L,R} = (\phi_{R,L})^C$ を課すと、ラグランジアンの質量項 \mathcal{L}_{mass} は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{mass} &= \mathcal{L}_D + \mathcal{L}_L + \mathcal{L}_R \\ &= m_D(\bar{\phi}_L\phi_R + h.c.) + m_L(\bar{\phi}_L\phi_L + h.c.) + m_R(\bar{\phi}_R\phi_R + h.c.) \end{aligned} \quad (2.23)$$

第二項と第三項がそれぞれ独立な質量項になっていることから、マヨラナ粒子は右巻きと左巻きで別の質量を持たせることができることがわかる。

2.4.2 シーソー機構

式 (2.25) を変形すると

$$\mathcal{L}_{\Downarrow\uparrow JJ} = (\bar{\phi}_L\bar{\phi}_R) \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_L \\ \phi_R \end{pmatrix} + h.c. \quad (2.24)$$

となり、質量だけで書ける行列が現れる。この行列を対角化すると以下の行列 M_{diag} が得られる。

$$\begin{aligned} M_{diag} &\equiv \begin{pmatrix} -m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(m_R + m_L) - \frac{1}{2}\sqrt{(m_R + m_L)^2 + 4m_D^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(m_R + m_L) + \frac{1}{2}\sqrt{(m_R + m_L)^2 + 4m_D^2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.25)$$

このとき、ディレック質量 m_D に比べて左巻きニュートリノの質量 m_L が非常に軽く ($m_L \sim 0$)、右巻きニュートリノの質量 m_R が非常に重い ($m_R \gg m_D$) と仮定すると、マヨラナ質量 m_1, m_2 は

$$\begin{aligned} m_1 &\approx -\frac{1}{2}m_R + \frac{1}{2}m_R\sqrt{1 + \frac{4m_D^2}{m_R^2}} \approx \frac{m_D^2}{m_R} \ll m_D \\ m_2 &\approx \frac{1}{2}m_R + \frac{1}{2}m_R\sqrt{1 + \frac{4m_D^2}{m_R^2}} \approx m_R \gg m_D \end{aligned} \quad (2.26)$$

となる。これらの式から m_2 が大きくなると m_1 が小さくなることがわかり、このことをシーソー機構という [8]。現在右巻きニュートリノが見つかっていないことから、 $m_2 \approx m_R$ が非常に重いことは自然な仮定である。故にシーソー機構はニュートリノをマヨラナ粒子であるとするだけで、質量が非常に小さいことを自然に説明している。

2.5 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$)

ニュートリノのマヨラナ性を検証できる現実的な唯一の手段がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 $0\nu\beta\beta$ の探索である。原子核中の中性子がベータ崩壊を起こすと

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A + 1) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.27)$$

のように電子と反電子ニュートリノが放出される。さらに、ある特定の偶偶核ではベータ崩壊がほぼ同時に2回生じる二重ベータ崩壊という事象が起こる。この反応は

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (2.28)$$

と表され、ニュートリノが2つ放出されることから $2\nu\beta\beta$ と表されることもある。 $2\nu\beta\beta$ はエネルギー的にベータ崩壊が禁止されており、かつ、ベータ崩壊の終状態のスピンの始状態と大きく異なるものの、原子番号 Z が2つ変われば安定化するという場合にしか起こり得ないため、崩壊核

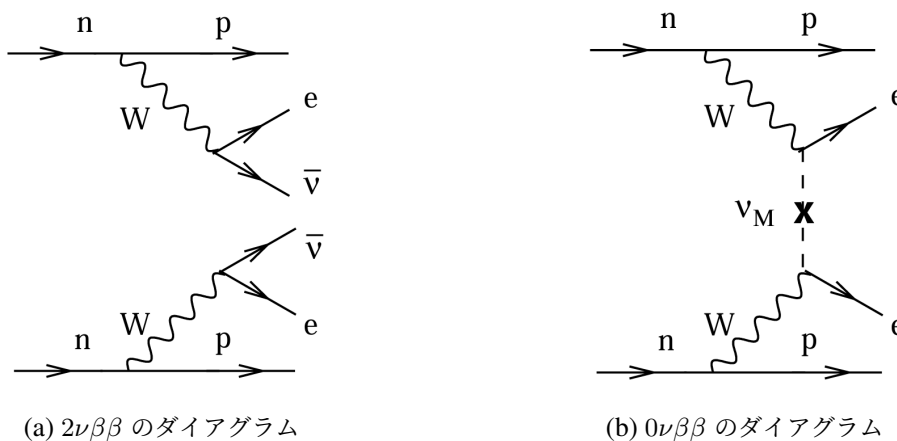


図 2.3 二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラム [9]

は 36 種類に限られる。現在までにそのうちの 10 種類の原子核で直接 $2\nu\beta\beta$ が測定されている。一方で二重ベータ崩壊には $2\nu\beta\beta$ とは別のモードとして、存在は理論的に予想されているものの未だに発見されていない反応がある。その反応が以下の式で表されるニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) である。

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A + 2) + 2e^- \quad (2.29)$$

この反応はレプトン数を保存しないため標準理論を超えた反応であり、図 2.3(b) で表すようにニュートリノと反ニュートリノが互いに打ち消し合うことで起こる反応である。これはニュートリノと反ニュートリノが同等である場合のみ生じ、ニュートリノがマヨラナ性を持つ必要がある。よって $0\nu\beta\beta$ を見つけることは、ニュートリノがマヨラナ粒子であることの証明となる。

2.5.1 $0\nu\beta\beta$ 探索の意義

$0\nu\beta\beta$ 探索には複数の意義がある。まず、 $0\nu\beta\beta$ 事象はレプトン数が保存しない標準理論を超えた物理現象であるから、その反応の発見自体に新たな理論の必要性を示すという意義がある。また、前述した通りマヨラナ粒子が持つシーソー機構によりニュートリノ質量が極端に小さいことを説明できる。その他の $0\nu\beta\beta$ 探索の意義を以下に挙げる。

マヨラナ有効質量

$0\nu\beta\beta$ 探索によりニュートリノのマヨラナ有効質量を決定することができる。マヨラナ有効質量とは、質量固有状態の混合として

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right| \quad (2.30)$$

と表される物理量である。質量階層構造の各構造はある決まったマヨラナ有効質量の許容範囲を持っているため、マヨラナ有効質量を求めることで質量階層構造についての情報がえられる。さらに、マヨラナ有効質量は $0\nu\beta\beta$ の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ と

$$\left(T_{1/2}^{0\nu} \right)^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (2.31)$$

という関係にあるため、 $0\nu\beta\beta$ 探索はマヨラナ有効質量、質量階層構造の決定に近づくことになる。ただし、式 (2.31) の位相空間因子 $G^{0\nu}$ と原子核行列要素 $M^{0\nu}$ は数値計算によって求める必要のある量である。位相空間因子については計算手法が確立しているものの、原子核行列要素は様々な中間状態を考慮する必要があり計算が複雑となるため、計算手法によって値が異なるというのが現状である。よって、この原子核行列要素の精密な計算も重要な研究対象となっている。

宇宙物質優勢

ビッグバン直後の宇宙には粒子と反粒子が同量だけ存在したと考えられているが、その場合、現在の宇宙には物質と反物質が同程度存在するのが自然である。しかし、我々の宇宙には物質 (バリ

オン)ばかりが存在する。このことは宇宙物質優勢と呼ばれ、物理界の謎の一つである。この宇宙物質優勢の解決の鍵と考えられているのがニュートリノのマヨラナ性である。

もし、ニュートリノがマヨラナ粒子であり、重い右巻きニュートリノが存在すると、低温になるにつれて重い右巻きニュートリノからレプトンとヒッグス粒子への熱平衡から切れた崩壊が起こる。その後、そのレプトンはスファレロン過程という真空での熱的遷移によってバリオンへと転換される。もし宇宙初期に物質が反物質よりも 100 億分の 1 だけ多く生成された上で、これらの一連の反応が起きたとすると宇宙物質優勢が成り立つ。このシナリオによって宇宙物質優勢を説明する理論をレプトジェネシスと呼ぶ [10]。この理論の鍵となるのがニュートリノのマヨラナ性であるため、 $0\nu\beta\beta$ 探索により宇宙物質優勢を解決できると考えられている。

2.5.2 $0\nu\beta\beta$ 探索実験の現状

前述した通り $0\nu\beta\beta$ 探索は物理的価値が高いため、世界各国で多くの実験が行われている。しかしながら、二重ベータ崩壊自体が非常に稀有な事象で、観測には大量の崩壊核、極低放射能環境、高エネルギー分解能の検出器が求められるため、未だ発見には至っていない。ここでは次章で詳細を述べる KamLAND-Zen 実験以外の主な $0\nu\beta\beta$ 探索実験について簡単に紹介する。

- CUORE

The Cryogenic Underground Laboratory for Rare Events (CUORE) はイタリアのグランサッソ国立研究所で行われている崩壊核 ^{130}Te を使用した $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ の TeO_2 結晶 998 個からなる約 10 mK の極低温ボロメータを使用している。この検出器の特徴としては、崩壊の際に生じるエネルギーによる温度変化を測定し、FWHM でおよそ 7 keV という非常に高いエネルギー分解能を持つことが挙げられる。 $0\nu\beta\beta$ の半減期に

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.2 \times 10^{25} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (2.32)$$

という制限を与えている [11]。

- GERDA

GERmanium Detector Array (GERDA) はイタリアのグランサッソ国立研究所で行われている崩壊核 ^{76}Ge を使用した $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。 ^{76}Ge を 87% まで濃縮した High Purity Ge (HPGe) 検出器を使用している。一般に半導体検出器はエネルギー分解能が高いという特徴があるため、GERDA 実験ではエネルギー分解能が高い測定が可能である。 $0\nu\beta\beta$ の半減期に

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.8 \times 10^{26} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (2.33)$$

という制限を与えている [12]。

- EXO-200

Enriched Xenon Observatory (EXO) はアメリカの Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) で行われている崩壊核 ^{136}Xe を使用した $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。液体キセノンを使用し、検出器として Time Projection Chamber (TPC) を用いることで飛跡検出が可能である。さらに、液体キセノン自身のシンチレーション光を用いた検出を組み合わせることでエネルギー分解能の高い測定を行うことができる。 $0\nu\beta\beta$ の半減期に

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.5 \times 10^{25} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (2.34)$$

という制限を与えている [13]。

第3章

KamLAND-Zen 実験

3.1 KamLAND 実験

KamLAND (Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) 検出器は、岐阜県の神岡鉱山の Kamiokande 検出器跡地に建設された反電子ニュートリノ検出器である。この検出器は宇宙線由来のバックグラウンドを低減するために山頂から地下 1000 m の位置に設置されており、宇宙線フラックスを地上の 10^5 程度に抑制している。また、液体シンチレータを用いることで低エネルギーへの感度を持つため、低エネルギー領域での物理現象の探索が可能となっている。

3.1.1 KamLAND 検出器

KamLAND 検出器の構造を図 3.2 に示す。KamLAND 検出器は直径 20 m、高さ 20 m の円筒形水槽の内側に直径 18 m のステンレス製球形タンクが設置されており、それらの間が外部検出器、球形タンクの内側が内部検出器となっている。

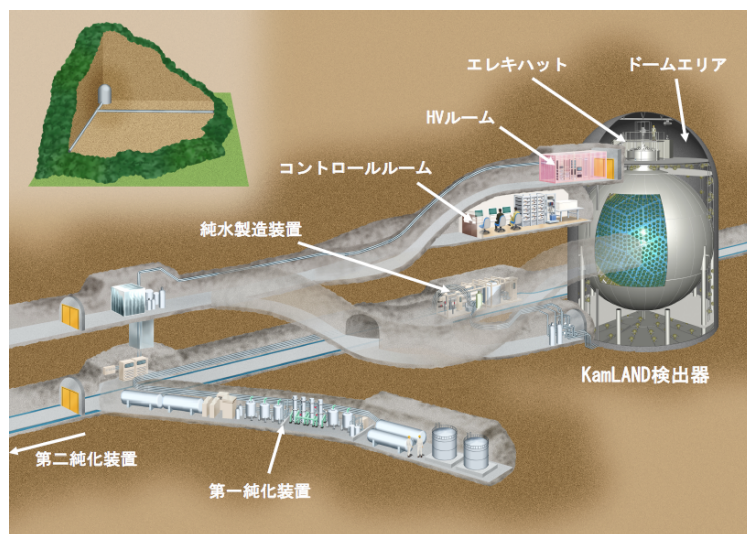


図 3.1 KamLAND 検出器とその周辺の様子

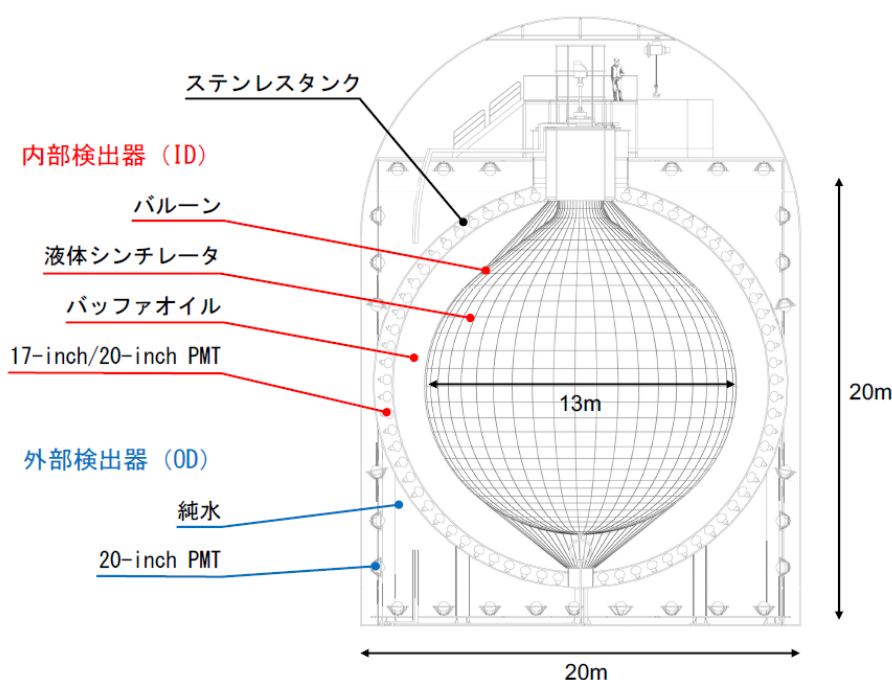


図 3.2 KamLAND 検出器の概略図

外部検出器

KamLAND 検出器の円筒形水槽と球形ステンレスタンクの間を外部検出器 (Outer Detector: OD) と呼ぶ。外部検出器は約 3.2kton の純水で満たされており外部ガンマ線や岩盤で生成される中性子を遮蔽している。また外部検出器に設置された光電子増倍管は、宇宙線ミューオンが外部検出器内の純水を通過した際に生じるチェレンコフ光を検出する役割を持つ。内壁は検出光量を高めるため、反射率の高いタイベックシートで覆われている。これにより宇宙線由来の物理事象と他の物理事象を区別することが可能となっている。

内部検出器

球形ステンレスタンクの内側を内部検出器 (Inner Detector: ID) と呼ぶ。ステンレスタンク内部の構造は外側からブラックシート、計 1879 本の光電子増倍管、アクリルパネル、バッファオイル、ナイロンバルーン、液体シンチレータとなっている。内部検出器は物理事象によって液体シンチレータが発するシンチレーション光を光電子増倍管で検出している。外部検出器と異なり内部検出器の内壁は反射の少ないブラックシートで覆われており、光電子増倍管で検出される直接光の割合を増やす目的がある。

光電子増倍管

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) は 1 光子から検出することができる、高時間分解能光センサーの一種である。PMT は、光電面に光子が入射すると光電効果により一定確率で光電面から光電子 (photo-electron: p.e.) を放出し、その光電子を高電圧がかけられたダイノードで段階的に増幅することで電気信号として出力する。

KamLAND 検出器には、実験開始に当たって新しく開発された入射光面の口径が 17 インチの PMT (Box and Line 型、浜松ホトニクス製 R7250) と、Kamiokande 実験で実際に使用された口径 20 インチの PMT (Venetian Blind 型、浜松ホトニクス製 R3250) が用いられている。Box and Line 型は T.T.S. (Time Transition Spread) などの時間分解能や入出力の線形性に優れており、Venetian Blind 型は光電子の電場による収集が容易な構造で大口径の PMT に適している。

内部検出器には 17 インチ PMT が 1325 本、20 インチ PMT が 554 本設置されており、PMT の被覆率は 34% となっている。また、設置位置として PMT を球面上に射影された菱形三十面体のステンレスフレーム内に格子状に配置されているため、位置の対称性が高くなり、物理解析がしやすくなっている。外部検出器には、Kamiokande 実験で使用されていた 20 インチ PMT が 225 本設置されていたが、2016 年に行われた外部検出器改修工事の際に 140 本の 20 インチ PMT に取り替えられている。その内訳は高量子効率 PMT が 47 本、Super-Kamiokande 実験で水中での長期使用実績のある R3600-06MOD が 93 本となっている。また 20 インチ PMT の他に、内部検出器上部を通過するミュオンなどを検出することを目的として、8 インチ PMT を 16 本、5 インチの PMT を 6 本設置している。

バッファオイル

KamLAND におけるバッファオイル (Buffer Oil: BO) はドデカンとイソパラフィンを混合したものである。その組成比を表 3.1 に示す。バッファオイルの主な役割はバルーンを安定させることや、球形タンクや PMT に含まれる放射性不純物由来の放射線による発光を防ぐことなどがある。そのためバッファオイルに求められる条件としてバルーン内の KamLAND-LS と同程度の密度であること、放射線により発光しないことなどが挙げられる。

表 3.1 バッファオイルの組成

成分	組成式	密度 [g/cm ³]	比率 (体積比)
ドデカン	C ₁₂ H ₂₆	0.749	53%
イソパラフィン	C _n H _{2n+2}	0.795	47%
バッファオイル	—	0.777	—

バルーン

バルーンは内部検出器をバッファオイル層と液体シンチレータ層とに分ける役割を担っており、透過率や強度保持のためにナイロンの3層と EVOH の2層の計5層のフィルムから形成されている。

液体シンチレータ

シンチレータは、放射線に反応して蛍光 (シンチレーション光) を発する物質のことである。液体シンチレータ (Liquid Scintillator: LS) は、形を自由に変えられ、作りやすいという利点があり、一般に有機溶媒と発光剤や波長変換剤などの溶質から構成される。発光原理としては以下の通りである。

1. 放射線のエネルギーを吸収し、溶媒分子が電離する。
2. 溶媒分子が電子と再結合し、励起状態となる。
3. 溶媒分子が脱励起し、1次シンチレーション光が放出される。
4. 溶質分子が1次シンチレーション光を吸収し、溶質分子が励起される。
5. 溶質分子が脱励起し、2次シンチレーション光が放出される。
6. 溶質が複数種類ある場合、その数だけ3、4を繰り返す。

KamLAND 検出器に用いられている液体シンチレータは KamLAND-LS と呼ばれ、表 3.2 に示すような組成となっている。KamLAND-LS はドデカン (N-12) と 1,2,4-トリメチルベンゼン (プソイドクメン: PC) を溶媒とし、溶質として 2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO) が溶解している。KamLAND-LS での発光過程は PC から 1次シンチレーション光が放出され、PPO から 2次シンチレーション光が放出されている。ドデカンは密度と光透過率の調整の目的で使用されており、シンチレーション光には寄与していない。シンチレーション光の波長は PMT の感度波長である 400 nm に合わせて、およそ 380 nm に設定されている。また液体シンチレータは水に不溶であり、数百度で気化するため液液抽出や蒸留などを用いた不純物除去を行うことで、極低放射能環境を実現している。

表 3.2 KamLAND-LS の組成

成分	組成式	密度 [g/cm ³]	比率 (体積比)
ドデカン (N-12)	C ₁₂ H ₂₆	0.749	80%
1,2,4-トリメチルベンゼン (PC)	C ₉ H ₁₂	0.875	20%
2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO)	C ₁₅ H ₁₁ NO	—	1.36 g/L
KamLAND-LS	—	0.778	—

3.1.2 ニュートリノの検出原理

液体シンチレータはガンマ線や荷電粒子と反応してシンチレーション光を放出するため、中性粒子であるニュートリノは直接シンチレーション光を発生させることはできない。KamLAND 検出器ではニュートリノと液体シンチレータ中の構成物質が反応して生じるガンマ線や荷電粒子をシンチレーション光によって検出しており、ニュートリノと反ニュートリノはそれぞれ異なる反応によるシンチレーション光で検出される。

ニュートリノの検出

ニュートリノは、式 (3.1) で表される液体シンチレータ中の電子との弾性散乱によって検出される。

$$\nu_{\alpha} + e^{-} \rightarrow \nu_{\alpha} + e^{-} \quad (\alpha = e, \mu, \tau) \quad (3.1)$$

この弾性散乱は図 3.3 が示すファインマンダイアグラムのような 2 種類が存在し、それぞれ中性カレント反応、荷電カレント反応と呼ばれている。中性カレント反応はニュートリノの全フレーバーに対して起こるが、荷電カレント反応は電子ニュートリノのみが起こす。そのため電子ニュートリノの弾性散乱反応断面積は他のニュートリノと比べて大きくなっている。弾性散乱は反応閾値が存在しないため低エネルギーの事象も検出が可能であることから、KamLAND 検出器では主に太陽ニュートリノが検出対象となっている。しかし、弾性散乱の信号はバックグラウンドとの識別が難しいため、得られたエネルギースペクトルから背景事象を取り除くことが必要である。

反ニュートリノの検出

反ニュートリノは、式 (3.2) で表される液体シンチレータ中の陽子との逆ベータ崩壊によって検出される。

$$\bar{\nu}_{\alpha} + p \rightarrow n + e^{+} \quad (3.2)$$

逆ベータ崩壊によって生成される陽電子は数 ns オーダーで電子と対消滅し、511 keV のガンマ線を 2 本放出する。一方、中性子は液体シンチレータ中で弾性散乱を繰り返し、平均寿命約 210 μ s で周りの陽子に捕獲され、2.2 MeV のガンマ線を放出する。これらのガンマ線をそれぞれ先発信号、後発信号として遅延同時計測を行うことで反ニュートリノを検出している。反ニュートリノの検出では、遅延同時計測によってバックグラウンドとの識別が容易となっており、KamLAND 検出器では主に原子炉ニュートリノや地球ニュートリノの検出に用いられている。

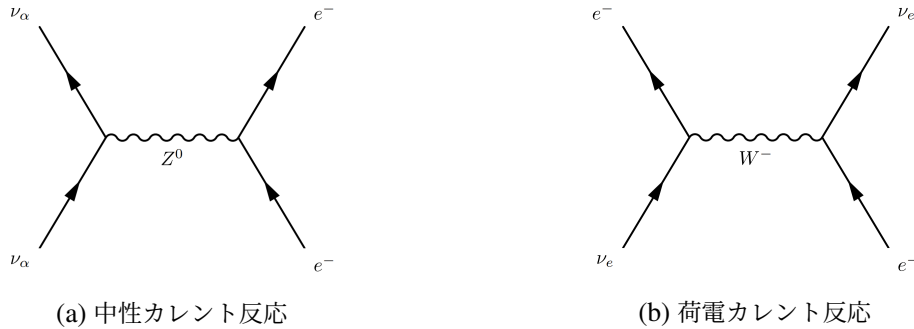


図 3.3 ニュートリノ弾性散乱のファインマンダイアグラム

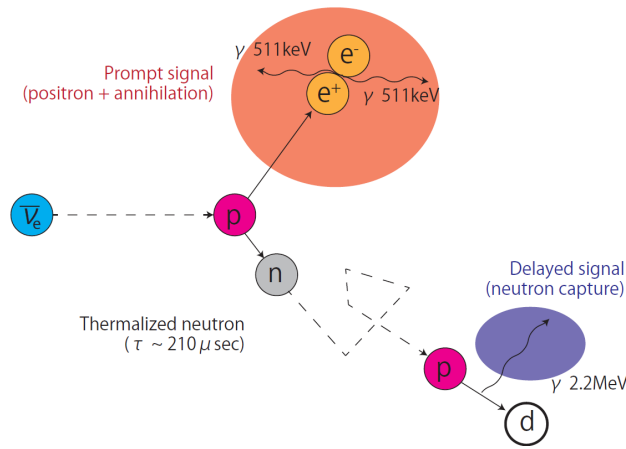


図 3.4 逆ベータ崩壊

3.1.3 KamLAND 実験の成果

2002 年に開始された KamLAND 実験は、低エネルギー領域の事象への感度と極低バックグラウンド環境を利用してこれまで数多くの成果を残してきた。その一つが 2.2 節でも述べた原子炉ニュートリノ検出によるニュートリノ振動を示したことである。その他の主な成果として、二世世代ニュートリノ振動の混合解への制限や、地球ニュートリノの観測が挙げられる。二世世代ニュートリノ振動の Δm^2 と θ の組み合わせには 4 種類の解があるとされていたが、2003 年に KamLAND 実験の観測結果により LMA 解という 1 つの解に特定された [14]。地球ニュートリノ観測では、地殻やマントルに存在する U や Th などの原子核の放射性崩壊による熱量を約 21 TW と見積もった [15]。この観測結果は地球化学による予測値を再現しており、地球内部を観察する上で地球ニュートリノ観測が強力な方法であることを示した。

3.2 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験は KamLAND 検出器を用いて 2011 年から行われている $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。二重ベータ崩壊の崩壊核として ^{136}Xe を採用しており、大容量の ^{136}Xe の使用と極

低放射能環境の実現によって、 $0\nu\beta\beta$ 探索実験としては世界最高峰の感度となっている。また、KamLAND-Zen 実験は、濃縮キセノンを 320 ~ 380 kg 用いた 2011 年 10 月から 2015 年 10 月までの KamLAND-Zen 400 実験と、濃縮キセノンを 745 kg に増量した 2019 年 1 月から現在も実験期間中である KamLAND-Zen 800 実験に分けられる。

3.2.1 KamLAND-Zen 実験の概要

KamLAND-Zen 実験の概略図を図 3.5 に示す。液体シンチレータで満たされた KamLAND 検出器のバルーン中心により半径の小さいミニバルーンを吊るし、その中に ^{136}Xe を溶解した液体シンチレータ Xe-LS を封入している。この溶解された ^{136}Xe が二重ベータ崩壊を起こすと放出される電子のシンチレーション光検出により $0\nu\beta\beta$ 探索を行なっている。

ミニバルーン

Xe-LS が封入されているミニバルーンは、液体シンチレータへの耐性・高透過率・少ない放射性不純物含有量の条件を満たすために素材には厚さ 25 μm のナイロンフィルムが採用されている。直径は KamLAND-Zen 400 実験では 3.08 m、KamLAND-Zen 800 実験では 3.8 m となっている。また、極低バックグラウンドを維持するために、高クラスのクリーンルームで製作された。

2016 年に KamLAND-Zen 800 実験に向けて導入された最初のミニバルーンには、ホールによるリークが確認された。そのため現在の検出器には、強度に関わるパラメータが再考されたミニバルーンが導入されている。

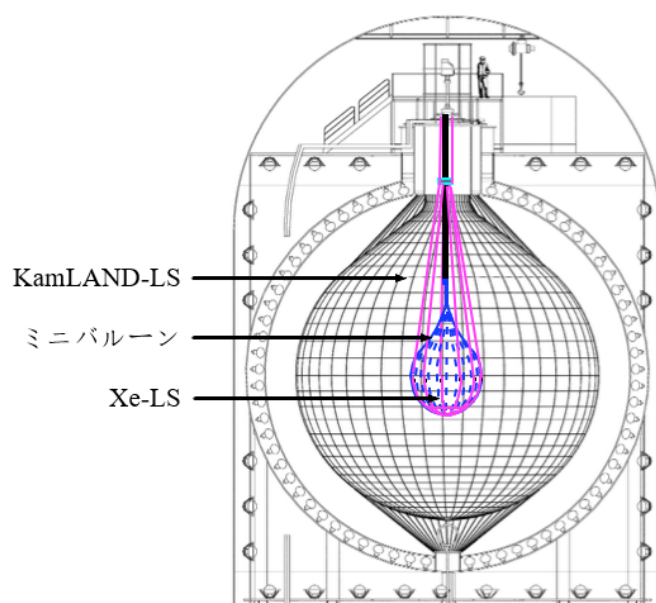


図 3.5 KamLAND-Zen 実験の概略図

Xe-LS

KamLAND-Zen 実験で ^{136}Xe を採用している理由としては主に以下の4つが挙げられる。

- 液体シンチレータに溶解しても色につかない。
- Xe-LS に使用する液体シンチレータに約 3 wt.% とよく溶ける。
- 遠心分離法により ^{136}Xe が比較的容易に濃縮できる。
- 安定な希ガスのため溶解後の再利用・純化ができる。

Xe-LS は組成が表 3.3 のようになっており、ミニバルーンへの負担を考慮して KamLAND-LS の密度におおよそ揃えられている。KamLAND-LS に ^{136}Xe をそのまま溶解すると密度が大きくなるため、Xe-LS ではドデカンよりも密度の低いデカンを採用している。また、 ^{136}Xe による消光作用で発光量が落ちるため、PPO の濃度が KamLAND-LS と比べて高くなっている。

表 3.3 Xe-LS の組成

成分	組成式	密度 [g/cm ³]	比率 (体積比)
デカン	C ₁₀ H ₂₂	0.735	82.3%
PC	C ₉ H ₁₂	0.875	17.7%
PPO	C ₁₅ H ₁₁ NO	—	2.7 g/L
キセノン (Xe)	—	—	3.13 wt.%
Xe-LS	—	0.777	—

3.2.2 KamLAND-Zen 実験のバックグラウンド

$0\nu\beta\beta$ は非常に稀有な事象であるため、探索にはバックグラウンドの低減・識別が重要になる。本項では、KamLAND-Zen 実験での $0\nu\beta\beta$ 探索に影響する主なバックグラウンドについて述べる。

^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$

二重ベータ崩壊で放出される電子のエネルギースペクトルは、図 3.6(a) のように $0\nu\beta\beta$ では Q 値 2.46 MeV の線スペクトル、 $2\nu\beta\beta$ ではその Q 値が最大値となる連続スペクトルになる。そのため、理想的な検出器ならばこの2つは区別することができる。しかし、KamLAND 検出器をはじめとする実際の検出器はエネルギー分解能が有限である。そのため、 $0\nu\beta\beta$ のスペクトルが広がりを持ち、図 3.6(b) のように $2\nu\beta\beta$ と被ってしまう。このバックグラウンドを低減するためには検出器のエネルギー分解能を向上させるほかない。

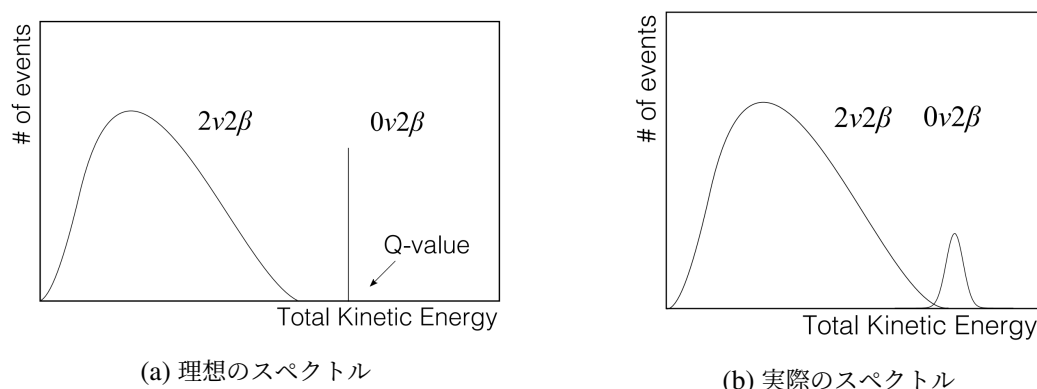


図 3.6 二重ベータ崩壊のエネルギースペクトルのイメージ

^{10}C の崩壊事象

高エネルギーの宇宙線は液体シンチレータ中の ^{12}C の原子核を破碎し、 ^{10}C を生成する。KamLAND 検出器では ^{10}C が $21.1 \pm 1.8 \text{ events/day/kton}$ のレートで生成されており、この ^{10}C が半減期 27.8 s で起こす β^+ 崩壊が $0\nu\beta\beta$ のバックグラウンドとなる。

図 3.7 に示すように、 ^{10}C の生成時には同時に 90% 以上の確率で中性子が生成される。このことを用いて、飛来したミュオン・陽子の中性子捕獲・ ^{10}C の β^+ 崩壊のそれぞれによる発光での遅延同時計測を行うことで ^{10}C によるバックグラウンドを識別することができる

^{214}Bi の崩壊事象

KamLAND-Zen 実験で使われる Xe-LS やミニバルーンには ^{214}Bi が混入・付着しており、その β^- 崩壊が $0\nu\beta\beta$ のバックグラウンドとなる。

β^- 崩壊を崩壊妹核に含む ^{238}U 系列の崩壊過程は図 3.8 に示すとおりで、 ^{214}Bi の崩壊後に生成される ^{214}Po は半減期 $164 \mu\text{s}$ でアルファ崩壊する。このことを用いて、 ^{214}Bi と ^{214}Po の連続崩壊を遅延同時計測を行うことで、 ^{214}Bi によるバックグラウンドを識別することができる。しかし、ミニバルーン付近での崩壊ではアルファ線のエネルギーがミニバルーン通過時に吸収されてしまうため検出が難しくなる。これを考慮して、解析の際の有効体積にはミニバルーン付近を除外している。

3.2.3 KamLAND-Zen 実験の成果と現状

KamLAND-Zen 400 実験

KamLAND-Zen 400 実験の中でも、2011 年 10 月から 2012 年 6 月までの期間を 1st phase、2013 年 11 月から 2015 年 10 月までの期間を 2nd phase と呼んでいる。1st phase では予期していなかった $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が混入していることがわかり、その β^- 崩壊が $0\nu\beta\beta$ 探索の大きなバックグ

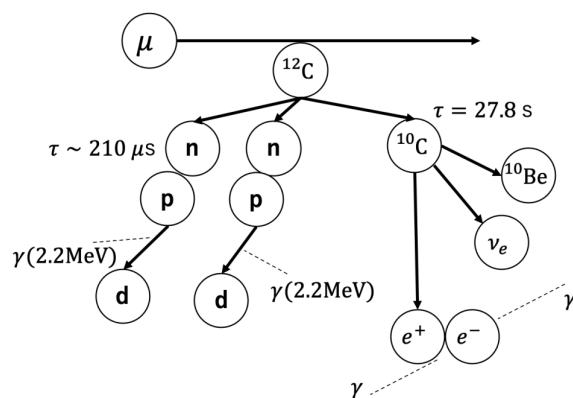


図 3.7 ^{10}C の生成過程

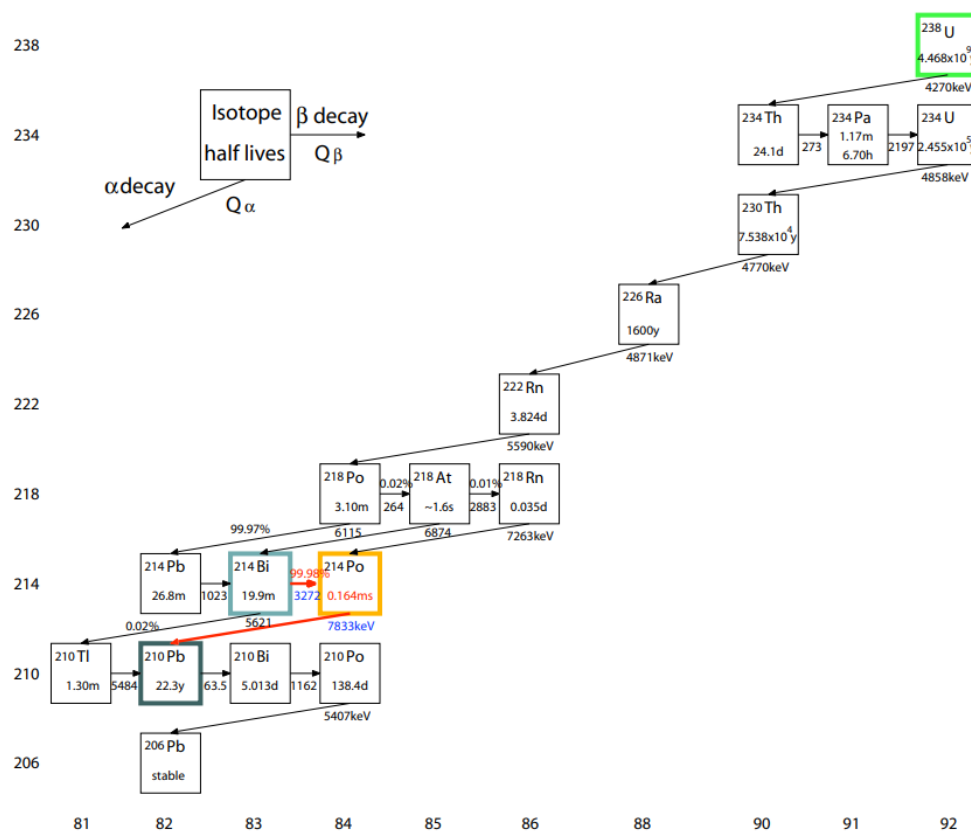


図 3.8 ^{238}U の崩壊過程

ラウンドになった。そのため、2012 年 6 月から蒸留や液液抽出による Xe-LS の純化が行われ、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ によるバックグラウンドを低減させた後に 2nd phase を開始させた。

1st phase と 2nd phase を組み合わせることで得られた結果として、 $0\nu\beta\beta$ の半減期とニュートリノのマヨラナ有効質量に以下のような制限を与えた [16]。

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.07 \times 10^{26} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \tag{3.3}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61 - 165 \text{ meV} \tag{3.4}$$

KamLAND-Zen 800 実験

KamLAND-Zen 800 実験は、濃縮キセノンを増量することで前実験よりも感度の向上が成されている。また、ミニバルーン接続管の表面汚染によるバックグラウンド増加を予防するため、有機溶媒を用いた新しい洗浄法も導入されており、ミニバルーンの放射性不純物は約 1/3 倍まで減少している。

2019年2月から2021年5月までのデータを用いて得られた結果を図 3.9 に示す。また、 $0\nu\beta\beta$ の半減期とニュートリノのマヨラナ有効質量に以下のような制限を与えている [17]。

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 2.3 \times 10^{26} \text{ year (90\%C.L.)} \quad (3.5)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 36 - 156 \text{ meV} \quad (3.6)$$

また、5年間の測定で以下の制限を与えることを目標に現在も測定が続けられている。

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 5.0 \times 10^{26} \text{ year (90\%C.L.)} \quad (3.7)$$

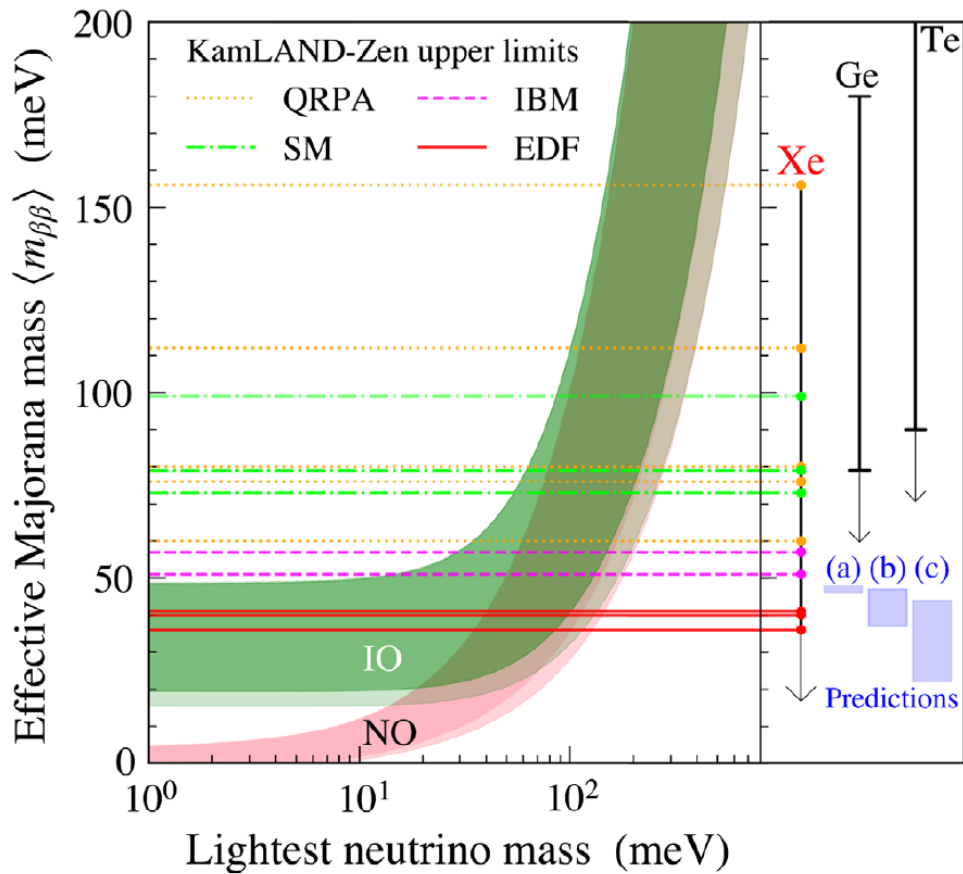


図 3.9 KamLAND-Zen 800 実験で得られたマヨラナ有効質量への制限 [17]

3.3 KamLAND2-Zen 実験

2011 年から現在も尚 $0\nu\beta\beta$ 探索を世界最高峰の感度で行っている KamLAND-Zen 実験だが、未だ $0\nu\beta\beta$ の観測やニュートリノ質量階層構造の決定には至っておらず、これは ^{136}Xe の増量や実験期間の長期化のみで解決するのは難しいと考えられる。そこで、さらなる感度向上のために KamLAND 検出器を KamLAND2 検出器へと改良して行う KamLAND2-Zen 実験が将来的に計画されている。

3.3.1 KamLAND2-Zen 実験の改良案

$0\nu\beta\beta$ 探索への感度を向上させる上では、まず $2\nu\beta\beta$ によるバックグラウンド低減のため、検出器のエネルギー分解能を向上させる必要がある。そのため KamLAND2-Zen 実験に向けてエネルギー分解能の向上を目的とした、観測光量を改善するための研究開発が多く進められている。また、その他のバックグラウンド低減や検出感度向上に向けた改良案もいくつか計画されている。以下では、それらの改良案の中から代表的なものを紹介する。

20 インチ高量子効率 PMT

PMT は、量子効率が高いほど同じ入射光量に対する信号の大きさや検出効率が高くなる。現在の KamLAND 検出器に使われている 17 インチ PMT は量子効率が最大で約 20% となっているのに対し、KamLAND2 検出器に導入予定の PMT は最大で約 30% の 20 インチ高量子効率 (High Quantum Efficiency PMT: HQE-PMT) となっている。また、KamLAND2 検出器には HQE-PMT が 1885 本導入予定で、その時の PMT の被覆率は 42% となる。量子効率と被覆率の向上により合計で観測光量が 1.9 倍程度になると見込まれている。

集光ミラー

KamLAND-Zen 実験における PMT の被覆率は約 34% であり、17 インチ PMT が全て HQE-PMT に変わったとしても 42% であるため、半分以上がデッドスペース (隙間) である。そこで PMT に多角形型の集光ミラーを取り付けることにより被覆率を改善し、集光量を向上させることが計画されている。集光ミラーの導入によって、集光量が 1.8 倍程度向上すると期待されている。

シンチレーションバルーン

KamLAND-Zen 実験ではミニバルーンによって ^{214}Po のアルファ線が吸収されてしまいバックグラウンドである ^{214}Po - ^{214}Bi の識別効率が低下してしまう。そこでミニバルーン自体をシンチレーション発光する素材で作成することで、 ^{214}Po からのアルファ線を検出し ^{214}Bi の識別効率を向上させることが計画されている。

シンチレーションバルーンの素材候補としてはポリエチレンナフタレート (Polyethylene Naph-

talate: PET) が考えられている。シンチレーションバルーンによって ^{214}Bi によるバックグラウンドは 99.7% 除去できると見込まれており [18]、解析の際の有効体積が改善されることが期待される。

大光量液体シンチレータ

単位エネルギーあたりの発光量を増加させることを目的に、現在の検出器で使われている KamLAND-LS をより発光量の多い新たな液体シンチレータに変更することが計画されている。現在有力な候補としては、溶媒としてリニアアルキルベンゼン (LAB) と PC を組み合わせたものに第 1 溶質として PPO、第 2 溶質として 1,4-ビス (2 メスルスチル) ベンゼン (Bis-MSB) を溶解させた LAB-LS が挙げられている。LAB-LS の組成を表 3.4 に示す。溶媒として LAB を使用する理由は透過率が良いためである。PC は光量増加の役割と KamLAND-LS からの再利用という目的がある。第 2 溶質の Bis-MSB は波長変換の役割を持ち、後述するシンチレーションバルーンによる吸収を避けるために使用される。この第 2 溶質の種類と量は光量、時間分解能を考慮して最適化された [19]。この LAB-LS により発光量が 1.4 倍程度向上することが期待されている。

表 3.4 KamLAND-LS の組成

成分	組成式	密度 [g/cm ³]	比率 (体積比)
リニアアルキルベンゼン (LAB)	$\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$	0.86	80%
PC	C_9H_{12}	0.875	20%
PPO	$\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{NO}$	—	2.00 g/L
1,4-ビス (2 メスルスチル) ベンゼン (Bis-MSB)	$\text{C}_{24}\text{H}_{22}$	—	5 mg/L
LAB-LS	—	0.865	—

^{136}Xe の増量

検出感度の向上のため Xe-LS に使用する濃縮キセノン量を約 1000 kg に増量する。その際、Xe-LS の量が増えるため、ミニバルーン直径を約 4 m に大きくすることが予定されている。

3.3.2 KamLAND2-Zen 実験の検出感度

以上で述べた改良により、KamLAND2-Zen 実験全体で観測光量は約 5 倍になり、エネルギー分解能としては二重ベータ崩壊の Q 値付近で 4% から約 2.5% までの改善が期待される。その結果、5 年間の測定でニュートリノのマヨラナ有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の到達感度は約 20 meV となり、逆階層構造である場合に許されるマヨラナ有効質量領域をほとんど網羅することができると見込まれている [20]。

第 4 章

KamLAND2 プロトタイプ検出器

3 章で述べた通り、KamLAND2-Zen 実験への改善案として複数の案が考えられている。しかし、それらの改善案に対してそれぞれ独立して開発が進められているのみで、それらを組み合わせた際の性能評価についてはまだ行われていない。そこで、KamLAND 検出器の高性能化を事前に実測で確認することを目的として KamLAND2 プロトタイプ検出器が建設された。また、液体シンチレータに含まれる ^{232}Th が $0\nu\beta\beta$ 探索におけるバックグラウンドの原因となることが予想されているが、LAB-LS の ^{232}Th 含有量の評価はまだ行われていないため、検出器が低バックグラウンド環境下にあることを生かして ^{232}Th 濃度を測定することもプロトタイプ検出器の目的の一つとなっている。

また、KamLAND 検出器の高性能化を確認でき、KamLAND2-Zen 実験が開始された後については、液体シンチレータの体積を増加させて液体シンチレータの極低放射能分析を行う案や、このプロトタイプ検出器を NaI を用いた暗黒物質探索実験の検出器として再利用する案が計画されている。

4.1 検出器の構成

図 4.1 にプロトタイプ検出器の概略図を示す。KamLAND2 検出器の内部検出器の一部分を簡易的に再現するように設計され、実際の地下環境下に設置された。以下で、プロトタイプ検出器の各構成要素の詳細について述べる。

4.1.1 ステンレスタンク

ステンレスタンクはプロトタイプ検出器の外装であり、KamLAND 検出器と同様の神岡鉱山地下 1000 m に設置されている。厚さ 4 mm のステンレスを用いた直径 4 m、高さ 4 m の円筒形になっている。図 4.2 に示したように上面には 6 つの導入口 (フランジ) があり、1 m フランジと 25 cm フランジ A,B,C はそれぞれ閉止フランジによって閉じられている。25 cm フランジ D は、検出器内外の PMT のケーブルを接続するフィードスルーコネクタを取り付けたフランジで閉じられている。50 cm フランジは、50 cm–10 cm 変換フランジ (10 cm フランジ)、10 cm–6 cm 変

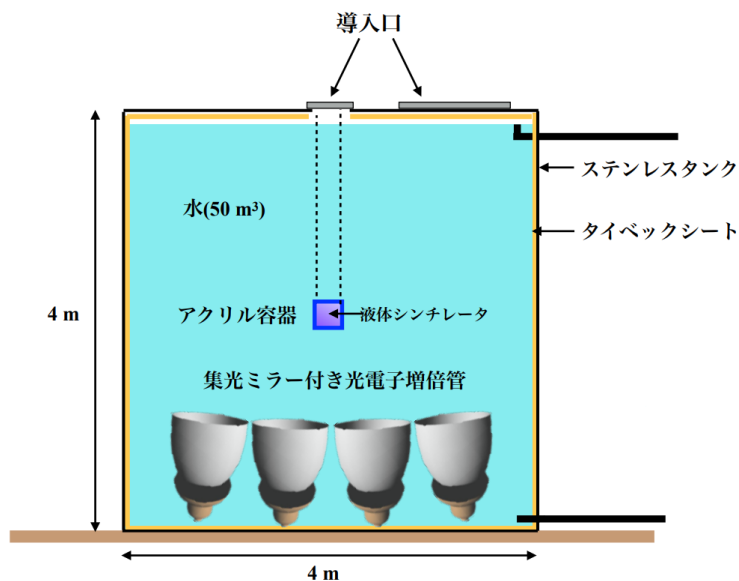


図 4.1 KamLAND2 プロトタイプ検出器の概略図

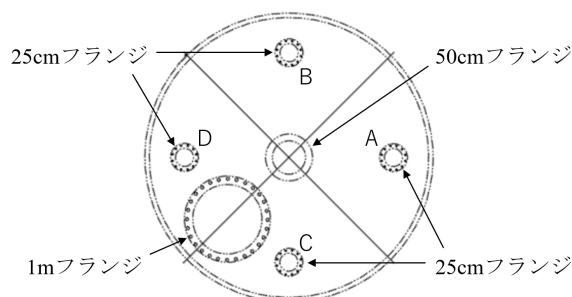


図 4.2 ステンレスタンク上面の概略図

換フランジ (キャリブレーションフランジ)、閉止フランジによって閉じられている。また、純水を循環させるためにタンクの側面上部及び底面にそれぞれオーバーフロー配管とドレン配管が接続されているほか、上面に圧力センサー、上面及びドレイン配管に差圧式差圧式トランスミッタ、側面上部及び中部に測温抵抗体に取り付けられている。

4.1.2 タイベックシート

タイベックは、デュポン社によって開発された高密度ポリエチレン不織布であり、建築用資材、防護服、農業用資材など様々な用途に使用されている。反射率は入射波長 350 nm ~ 600 nm まで 90% 以上である。またタイベックの反射は拡散反射だけでなく鏡面反射の成分もあることが知られている [21]。

KamLAND 検出器では、PMT で検出される光子の中で解析時にノイズとなる反射光を減らすことを目的として検出器内壁にブラックシートが用いられているが、プロトタイプ検出器でブラックシートを用いた場合、PMT の設置範囲が狭いために直接光の検出光量が少なく、LAB-LS

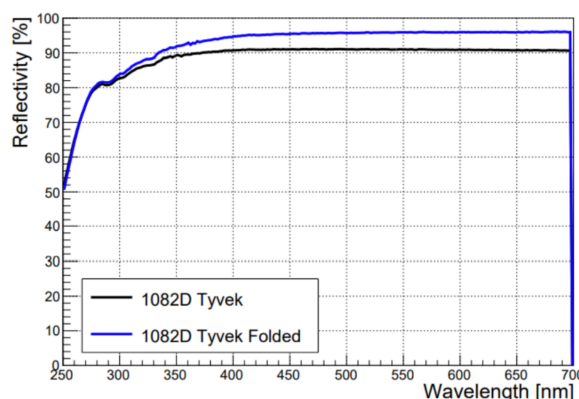


図 4.3 Tyvek1082D の反射率 (空気中)

の発光量に対する検出光量の損失が大きくなることが予想されている。検出器の検出光量はエネルギー分解能と相関関係をもつことから、LAB-LS 内の ^{232}Th 由来の低エネルギー事象を測定するために必要な高いエネルギー分解能を得るためには、できるだけ多くの光子を検出する必要がある。そこで、PMT 設置範囲外の光を反射することで少ない直接光を補い、検出光量の損失を防ぐことを目的としてプロトタイプ検出器にはタイベックシート (Tyvek1082D) が用いられている。使用したタイベックシートは KamLAND 外水槽を刷新した際に耐水性及び水中で反射性能の高さが確認されている [22]。タイベックシートは反射率を高くするため二枚重ねになっており、空気中での反射率は図 4.3 に示したとおりである。ただし、経験則より水中での反射率は空気中よりも低くなることがわかっているが、未測定である。

4.1.3 HQE-PMT

プロトタイプ検出器の PMT には KamLAND2 検出器で使用予定の HQE-PMT(浜松ホトニクス、R12860-03LXA、図 4.4) を 14 本使用している。この PMT の浜松ホトニクスで測定された性能を表 4.1 に挙げる。特に 17 インチ PMT と比較した量子効率率は図 4.5 の通りである。また、PMT の出力値は光電面を覆っているガラス表面への光の入射位置と入射角度に依存していることがわかっており、その計数率の位置依存性と角度依存性を表したグラフを図 4.6 に示す [23]。

KamLAND 検出器では図 4.7 に示すように菱形三十面体を用いて球面に PMT を配置している。プロトタイプ検出器の PMT の配置は、この菱形を 4 分割し、さらにその鋭角の頂点の 2 つの PMT を除いた 14 個の PMT の位置を再現している。また、KamLAND 検出器における球面による PMT の傾きを再現するために、プロトタイプ検出器ではタンク底面に設置された傾斜のついた台座の上に PMT を取り付けている (図 4.8)。位置・角度は再現しているものの、PMT に対する観測対象の事象による液体シンチレータの発光点の位置を考えると、KamLAND2-Zen 実験は約 9 m 離れた直径 4 m のシンチレーションバルーン内であるのに対して、プロトタイプ検出器は約 2 m 離れた 0.3 m 四方の亚克力容器内である。このため、プロトタイプ検出器では、PMT への光の入射角度が KamLAND2-Zen 実験に比べて浅くなると考えられる。

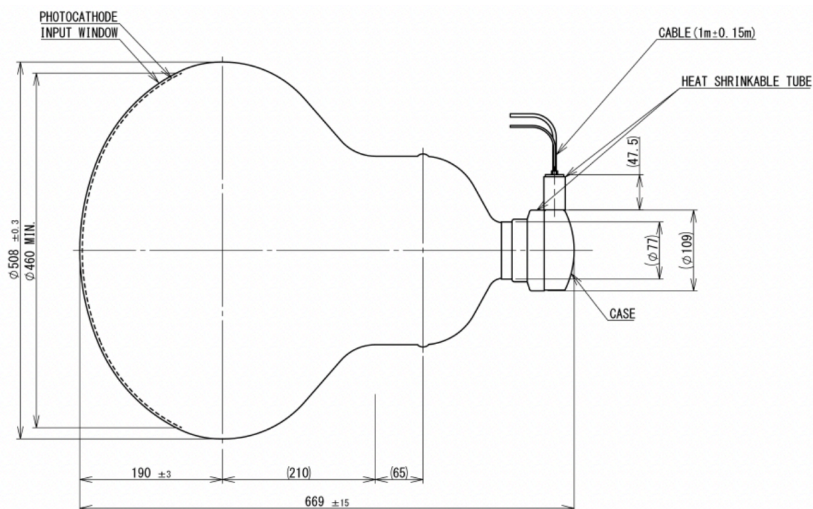


図 4.4 R12860-03LXA の外観

表 4.1 R12860-03LXA の性能

ダイノード	Box & Line
量子効率 (@ 400 nm)	31.9%
P/V 比	3
上昇時間 (代表値)	6 ns
Time Transit Spread(代表値)	2.4 ns
ダークパルスレート (平均値)	8 kHz

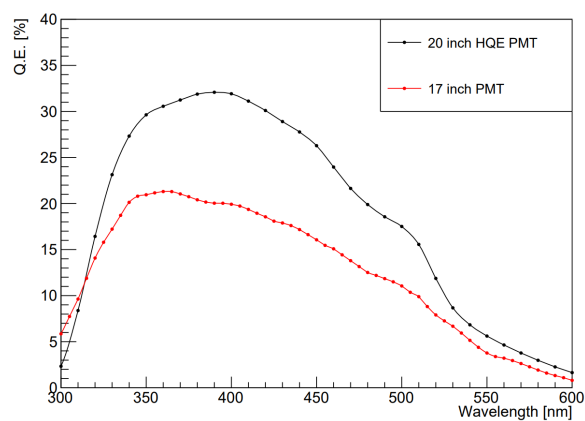


図 4.5 HQE-PMT と 17 インチ PMT の量子効率

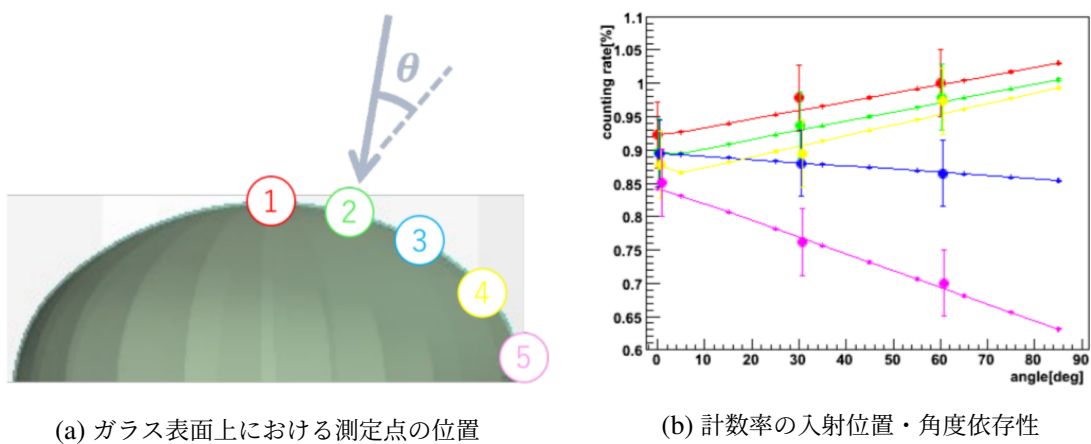


図 4.6 HQE-PMT の計数率入射位置・角度依存性

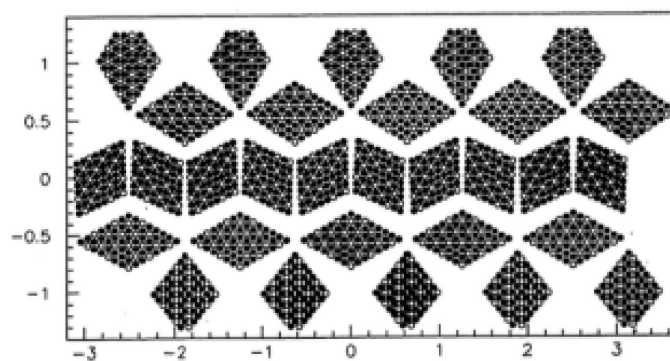


図 4.7 KamLAND 検出器の PMT 配置

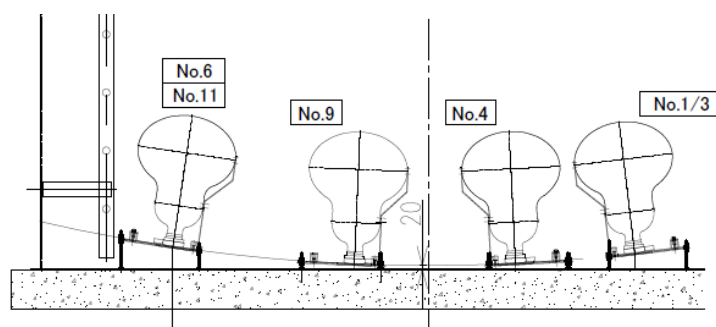


図 4.8 タンクに設置された PMT の概略図

4.1.4 集光ミラー

集光ミラーの形状は、先行研究によりウィンストンコーン型の多角形ミラーに決定されている(図 4.9) [24]。多角形の取り込み口の形状は、KamLAND 検出器の PMT 配置(図 4.7)における隣り合う 2 つの PMT 中心の垂直二等分線を一辺とする多角形となっており、四角形が 1 種類、五角形が 2 種類、六角形が 1 種類である。これら 4 種類の形状のミラーによって、集光ミラー同士が干渉することなく KamLAND 検出器の球面を埋め尽くすことができるように設計されている。プロトタイプ検出器では四角形を除く 3 種類を使用して図 4.10 のように設置されている。以降、プロトタイプ検出器における HQE-PMT と集光ミラーの通し番号は図 4.10 の番号に従うものとする。

集光ミラーの構造は、図 4.11 のように、ベースとなるアクリルにアルミニウムを蒸着し、その上にトップコートとしてアクリルシリコン樹脂系塗料を塗装した 3 層構造になっている。この構造とその素材は先行研究の長期安定性試験によって決定されている [25, 26]。

集光ミラーの反射率は、実際にプロトタイプ検出器に取り付けられたものと同様にして作られたサンプルを用いて測定されている(図 4.12) [26]。一方、シミュレーションに登録された集光ミラーの反射率は、先行研究より入射光の入射角及び反射素材とそれに接する媒質のそれぞれの複素屈折率から理想的な反射率の角度依存の式が求められている(図 4.13) [27]。実際の反射率は理論値より 5% 以上低いため、今後、理想的な反射率の角度依存の式を実測値にフィットした式を求めることで、より測定値に近い反射率をシミュレーションに登録する必要がある。

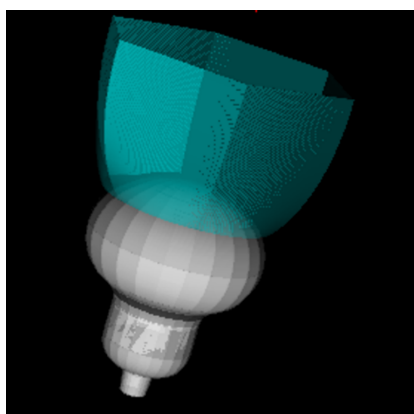


図 4.9 集光ミラーの形状

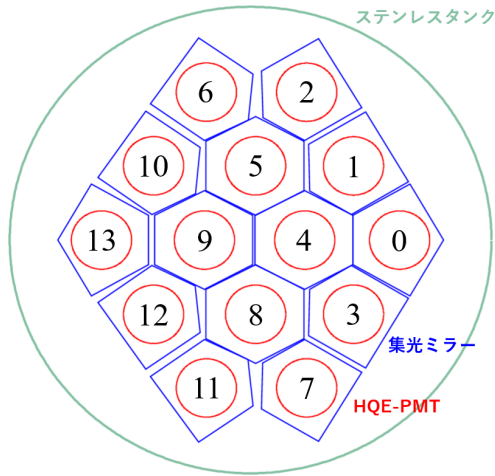


図 4.10 プロトタイプ検出器における HQE-PMT・集光ミラーの配置図

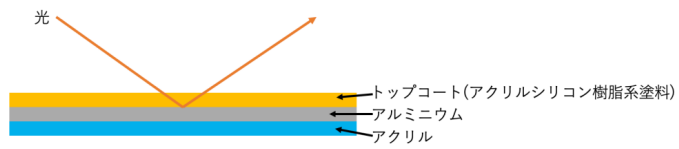


図 4.11 集光ミラーの構造のイメージ図

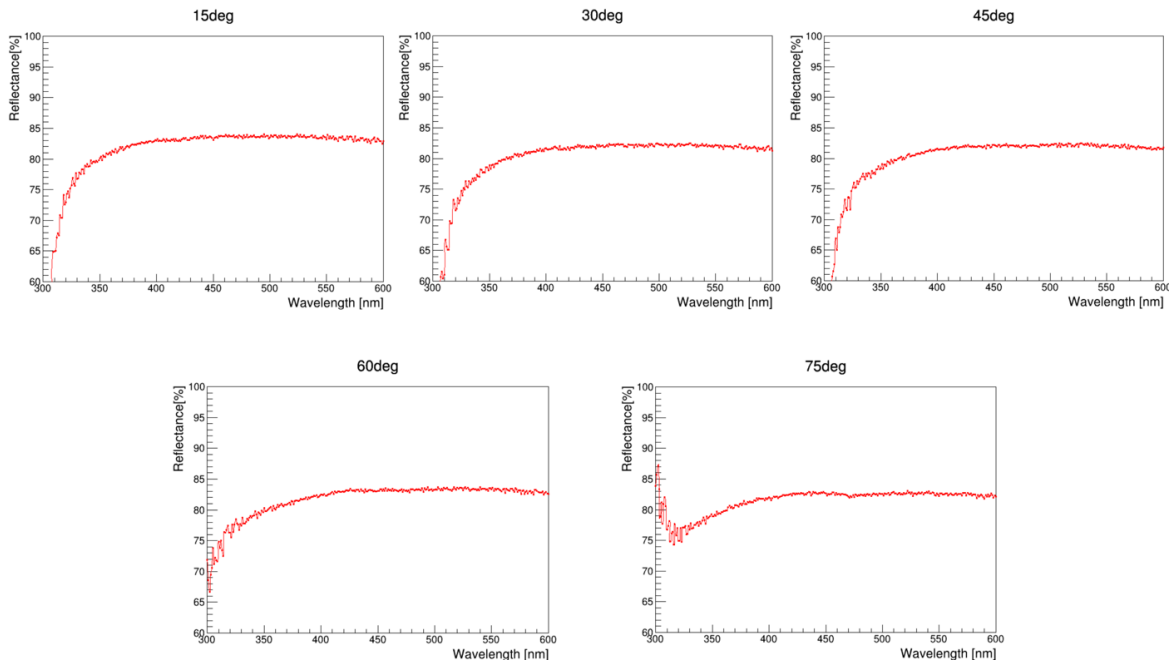


図 4.12 実際に測定された集光ミラーの反射率
(測定誤差: < 4%)

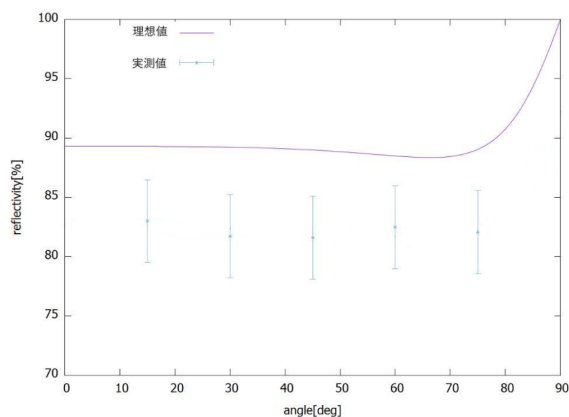


図 4.13 シミュレーションに登録された集光ミラーの反射率

4.1.5 アクリル容器

アクリルボックスは図 4.14 のように設計され、プロトタイプ検出器の中心に導入されている。材質として LAB-LS と屈折率が等しい紫外光透過アクリルを用いることで、アクリル容器による LAB-LS で発光した光子の吸収や、LAB-LS とアクリル容器の境界面での反射を抑えている。

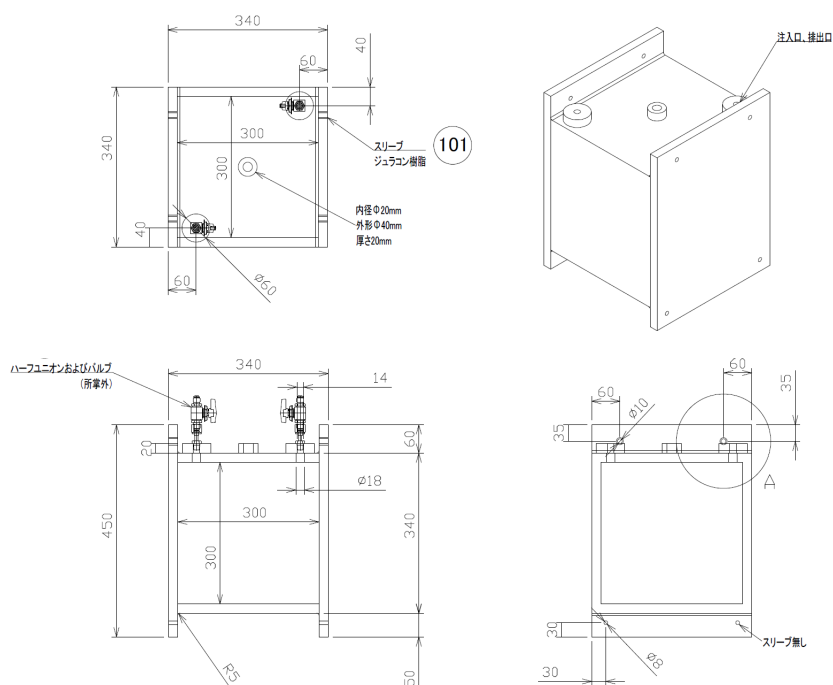


図 4.14 アクリル容器の設計図

4.1.6 LAB-LS

プロトタイプ検出器では KamLAND2 検出器で使用予定の LAB-LS を使用している。その組成は表 3.4 の通りである。また、一般に液体シンチレータの発光は時間応答に広がりを持ち、その発光時間分布は、 τ_i を発光時定数、 A_i をそれぞれの割合として以下の式のように指数関数の足し合わせで表される。

$$T(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{A_i}{\tau_i} \exp\left\{-\frac{t}{\tau_i}\right\} \quad (4.1)$$

先行研究により測定された LAB-LS の発光時間分布は図 4.15 の通りであり [19]、これから求められる発光時定数は表 4.2 である。その他の LAB-LS の性能についても先行研究により測定されており、図 4.16 は再発光確率を、図 4.17 は透過率及び減衰長を表している [27]。また、発光量は KamLAND-LS に比べて 1.365 ± 0.031 倍である [19]。シミュレーションにおいては、KamLAND-LS の発光量の値として $9030.5 \text{ photon/MeV}$ が登録されていることから、LAB-LS の発光量は $12326.6 \text{ photon/MeV}$ とした。

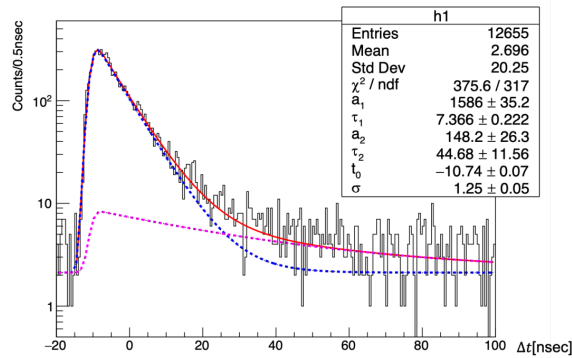


図 4.15 LAB-LS の発光時間分布

表 4.2 LAB-LS の発光時定数とその割合

i	A_i [%]	τ_i [ns]
1	91.5	7.37
2	8.5	44.7

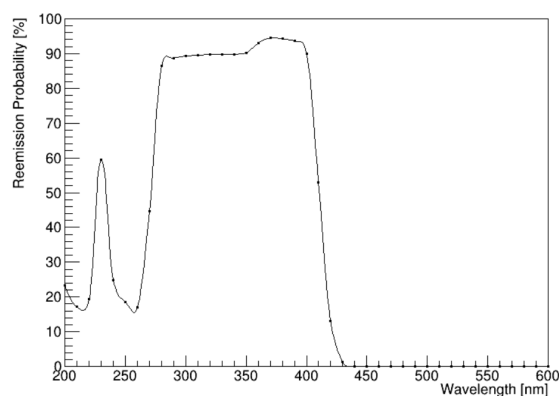
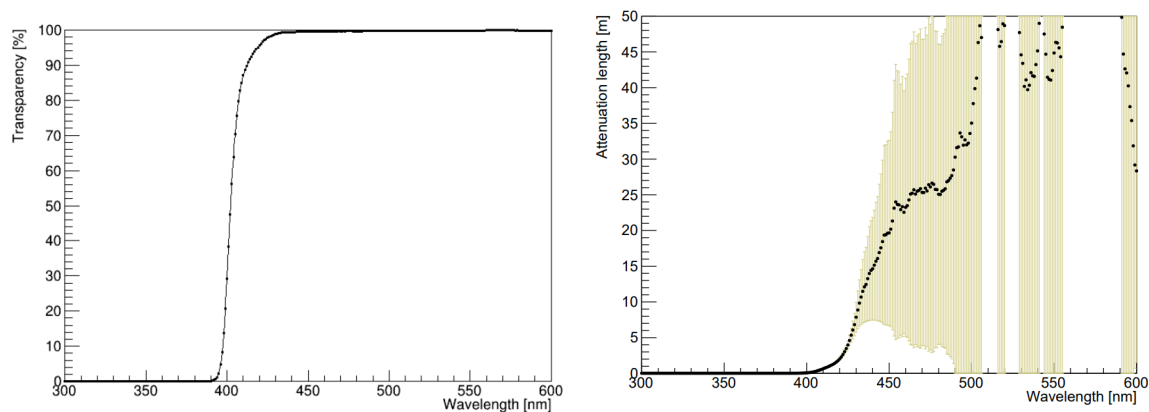


図 4.16 LAB-LS の再発光確率



(a) LAB-LS の 9 cm 透過率

(b) LAB-LS の減衰長

図 4.17 LAB-LS の透過率と減衰長

4.2 KamLAND2 検出器との相違点

プロトタイプ検出器は、検出器自体のサイズや建設にあたってのコスト・作業効率などの点から KamLAND2 検出器といくつかの相違点がある。各相違点を表 4.3 にまとめた。

4.3 検出器の建設

プロトタイプ検出器は 2021 年 11 月から 2022 年 12 月にかけて 9 回に分けて建設された。建設におけるタイムラインを表 4.4 に示す。本節では各作業の詳細を記す。

表 4.3 KamLAND2 検出器とプロトタイプ検出器の相違点

	KamLAND2 検出器	プロトタイプ検出器
タンク形状	球形	円筒形
タンクサイズ	直径 18 [m]	直径 4 [m]・高さ 4 [m]
内壁	－	タイベックシート
PMT・集光ミラー	1879 [本]	14 [本]
PMT と発光点の距離	約 7 ～ 11 [m]	約 1 ～ 2 [m]
バッファ	バッファオイル	純水
LS 容器	バルーン	アクリル容器
LS 容量	約 1×10^6 [kg]	23 [kg]

表 4.4 プロトタイプ検出器建設のタイムライン

作業時期	作業内容
2021 年 11 月	ステンレスタンクの建設
12 月	検出器の洗浄 タイベックシートの取付 HQE-PMT(7 本) の取付 測定小屋の建設
2022 年 2 月	集光ミラーの製作
7 月	集光ミラー (7 個) の取付
8 月	初期不良 HQE-PMT の交換 HQE-PMT(5 本) の取付 集光ミラー (5 個) の取付
10 月	HQE-PMT(2 本) の取付 集光ミラー (2 個) の取付
11 月	純水の注入
12 月	LAB-LS の作製 LAB-LS の導入

4.3.1 ステンレスタンクの建設

2021 年 11 月、業者によってステンレスタンクが建設された。約 20 cm のコンクリート基礎の上に 2 枚の底面板、6 枚の側板、3 枚の上板を溶接することで建てられた。



(a) 側面建設中



(b) 建設完了時

図 4.18 ステンレスタンク

4.3.2 検出器の洗浄

2021年12月、検出器の洗浄を行った。ほこりや塵といった小さなゴミ・汚れであっても検出器内部に付着・混入していると、それらに含まれる放射性物質由来の事象がバックグラウンドになってしまう。よって、検出器内部の洗浄だけでなく、新たに汚れを内部に持ち込まないための対応も必要である。そこでまず、ステンレスタンク外側上面を高圧洗浄機で洗浄した。さらに、検出器上方の岩盤から落ちる砂がタンク上部に積もることを防ぐために、タンク上面より約1～2m上方とその周囲を静電防止シートで覆った。ただし、作業のために荷揚げクレーンの可動域と昇降タラップの部分は覆わなかった。タンク上面には、PMTや液体シンチレータ等の全物品の導入口や作業員のタンク内への出入り口となるフランジがあるため、クリーンな状態を保つ必要があった。続いて、タンク内側を洗浄した。中性洗剤で汚れを落とし、高圧洗浄機でその汚れと洗剤を洗い流した。洗浄の基準として目に見えるゴミ・汚れがなくなるまで洗浄を行った。

この作業から、作業員がステンレスタンク内部で作業を行う場合は、作業員の窒息を防ぐため、送風機を用いて外部から内部へ空気を送り込んだ。



(a) 中性洗剤による洗浄



(b) 高圧洗浄機による洗浄

図 4.19 洗浄中の様子

4.3.3 タイバックシートの取付

2021年12月、検出器を洗浄した後、タイバックシートの取り付けを行った。まず、1m幅のロールで購入したタイバックシートを適切な長さ・幅に裁断し、ステープラーで2枚重ねに止めた。続いて、ステンレスタンク内壁全面に、タイバックシートを取り付けるためのステンレスワイヤーを適切な位置・間隔に張った。そのワイヤーに巻き付けるようにして、タイバックシートを裏表に注意しつつステープラーで止めた。最後に、フランジ下のタイバックにフランジと同程度の穴を開け、作業時に邪魔にならないように加工した。

この作業から、作業員は、クリーンな状態の維持及び安全性の確保のため、図4.20に示すような装備でステンレスタンク内部・上部で作業を行った。また、ステンレスタンク内部・上部に持ち込む物品は、一部を除く全てについて新品もしくはエタノール拭きされたものを用いた。

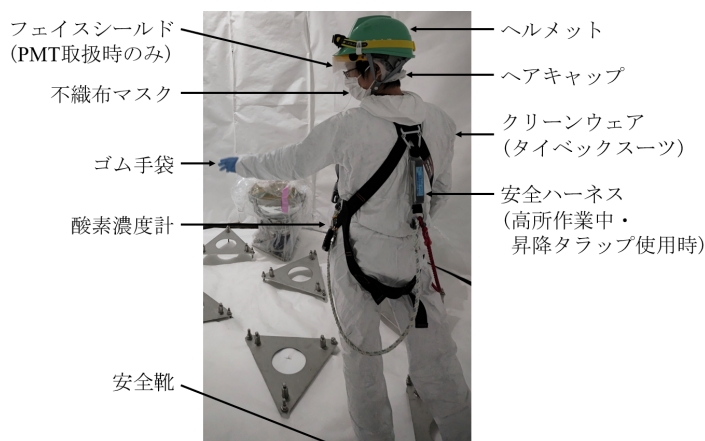


図 4.20 作業時の装備



(a) 取付中

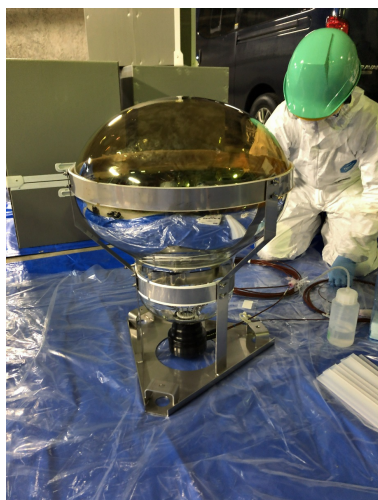


(b) 取付完了時

図 4.21 タイバックシート取付

4.3.4 HQE-PMT の取付

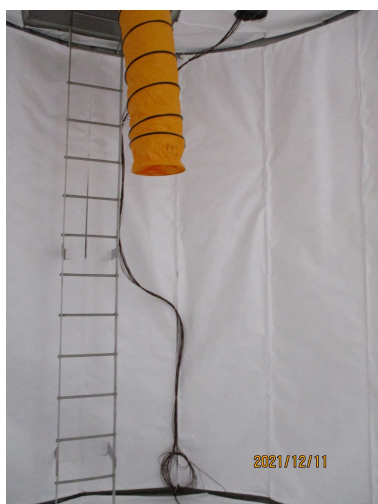
2021年12月から2022年10月にかけて、3回に分けて計14本のHQE-PMTの取り付けを行った。PMTをステンレスタンク内に運ぶ前に、まずPMTから伸びるHV・信号ケーブルにコネクタを半田付けし、PMT本体にタンク底面の台座に固定するための治具を取り付けた(図4.22(a))。このアッセンブリされたPMTを、脱脂効果の強いイソプロパノールでアルコール拭きした後、荷揚クレーンを用いてタンク内に運び込んだ。運び込まれたPMTは、タンク底面の所定の台座に仮設置され、後述する集光ミラーの取り付けの際の微調整が完了した後に完全に固定された。また、PMTのHV・信号ケーブルは、大きな負荷がかからないように注意しつつ、昇降タラップに沿わせて図4.2の25cmフランジDに取り付けられたフィードスルーコネクタに接続された(図4.22(c))。



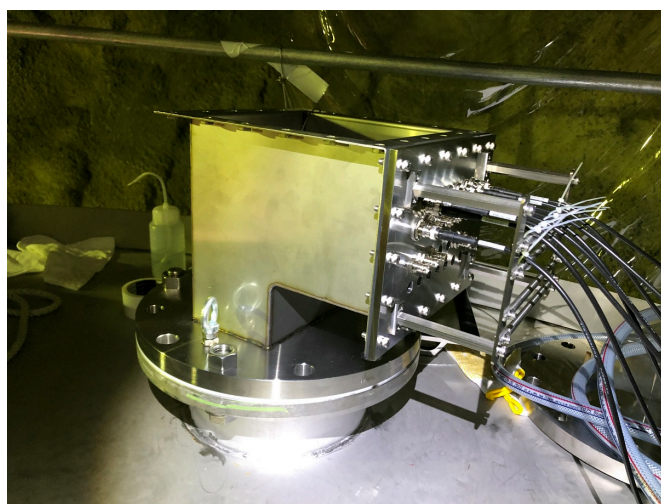
(a) アッセンブリされた PMT



(b) 仮設置された PMT



(c) HV・信号ケーブルの配線



(d) フィードスルーコネクタの外観

図4.22 HQE-PMT 取付

4.3.5 集光ミラーの製作

2022年2月、集光ミラーの製作が行われた。まず、アクリル板をコーン型に成型する際に使用する型を製作した。この型を用いて、平らなアクリル板を真空成型した。続いて、余分なアクリル板をトリミングし、目的の形状に仕上げた。この成形したアクリル板を蒸着炉にセットし、アルミニウムを蒸着した。表面の蒸着状態を確認したのち、トップコートを塗布し、集光ミラーの製作を完了した。



(a) 成型のための型



(b) 真空成型後のアクリル板

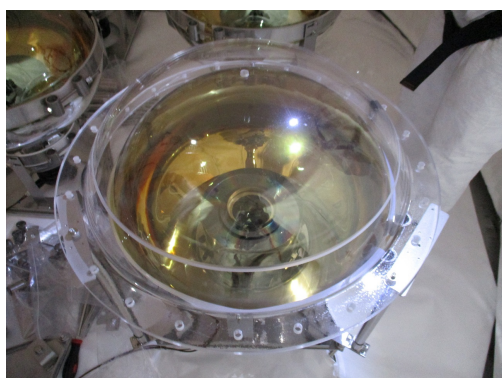


(c) アルミニウム蒸着後

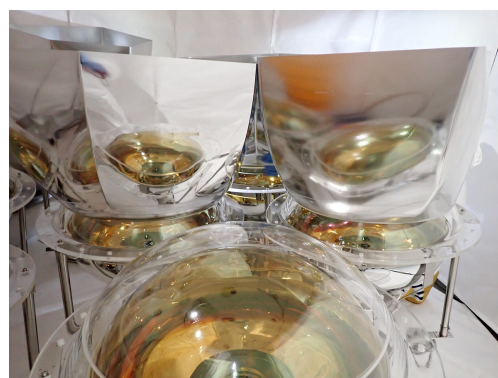
図 4.23 集光ミラー製作

4.3.6 集光ミラーの取付

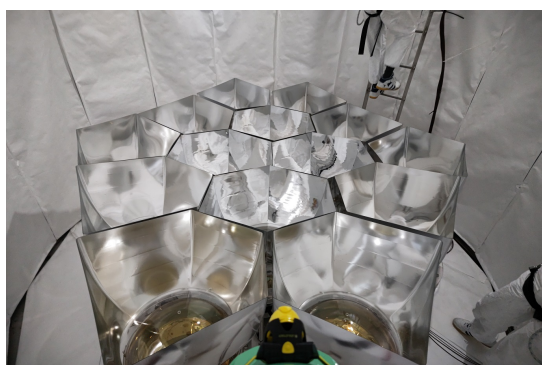
2022年7月から10月にかけて、3回に分けて計14個の集光ミラーを取り付けた。集光ミラーを取り付けるにあたって、PMTの故障・破損を防ぐために、集光ミラーがPMTに接触しないようにする必要がある。そのため、まずPMTの光電面から数cm離れた位置に紫外光透過アクリル製のアクリルドームを設置し、そのアクリルドームに接着することで集光ミラーを取り付けることとなった。よって、まずPMTの治具にアクリルドームを取り付けるための支柱としてステンレスパイプを3本取り付けた。その後、イソプロパノールでアルコール拭きしたアクリルドームを3本の支柱の上に設置した。続いて、集光ミラーを所定の位置・向きでアクリルドームの上に仮設置し、その位置・向きが図4.10の通りになっているか確認した。ずれていた場合は、PMT・アクリルドームを設置した台座の傾きを調整することで修正した。この調整が完了した後、台座及びPMT・アクリルドームは完全に固定し、接着の際に向きを再現できるようにアクリルドームと集光ミラーには印を付けた。最後に、仮設置していた集光ミラーを印に注意しつつアクリルドームに接着した。



(a) アクリルドームが取り付けられた PMT



(b) 仮設置された集光ミラー



(c) 位置・向き調整後の集光ミラー



(d) 取付完了した PMT・集光ミラー

図 4.24 集光ミラー取付

4.3.7 純水の注入

2022年11月、ステンレスタンク内に純水が注入された。純水を注入するにあたって、まず検出器のそばに純水純化装置が建設された。この純化装置は、1m³タンク、送液ポンプ、精密フィルター、紫外線流水式殺菌装置から構成されており、フィルターと殺菌装置で純化された純水を最大約0.7m³/hで検出器に送ることができる。また、精密フィルターのフィルターは約2ヶ月に1回のペースで計7回、紫外線流水式殺菌装置の紫外線ランプは約1年経過した2023年10月に1回の交換が行われた。

この装置が完成した後、純水の注入が開始された。注入した純水は、KamLAND 検出器の外部検出器の純水を流用した。まず、純水を純水純化装置の1m³タンクに注入するとともにこのタンクを窒素パージした。その後、1m³タンクへの純水注入を継続しつつ、その純水を送液ポンプを用いて精密フィルター、紫外線流水式殺菌装置、ステンレスタンク下部のドレイン配管を通してステンレスタンク内に注入した。この純水の注入は3日3晩にわたって行われ、液面がステンレスタンク上部(高さ約3.7m)にあるオーバーフロー配管に達するまで続けられた。オーバーフロー配管から排出された純水は1m³タンクに戻るため、液面がオーバーフロー配管に達した時点で、1m³タンクへの純水注入を終了し、ステンレスタンクと純水純化装置による自己循環を開始した。これとともにステンレスタンクも窒素パージし、純水の注入作業が終了した。

4.3.8 LAB-LS の作製

2022年12月、ニュートリノ科学研究センターのクリーンルームにてLAB-LSの作製が行われた。まず、アクリル容器を事前にPCで共洗いし、LAB-LSを注入する前には窒素パージを行った。一方、LAB-LSについては、30L分のLAB-LSが表3.4に示した組成で固体が溶けるまで



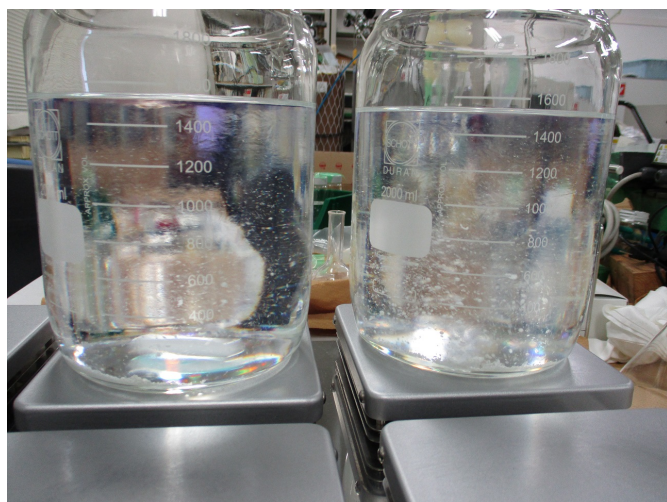
(a) 純水純化装置の外観

(b) 注入完了後の検出器内

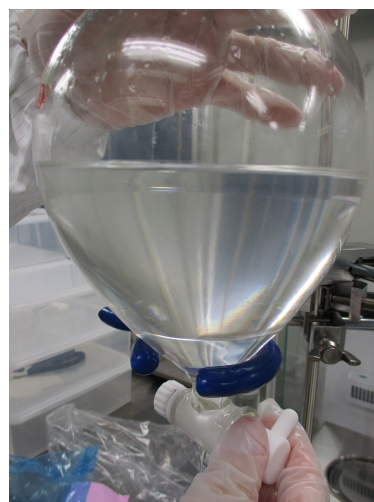
図 4.25 純水注入

十分に混ぜられた。続いて、液液抽出によって LAB-LS 内の不純物を抽出した後、バブリング装置で窒素バブリングが行われた。バブリングが終了した LAB-LS は、バブリング装置に繋がった LS 送液用配管を通してアクリル容器に注入された。

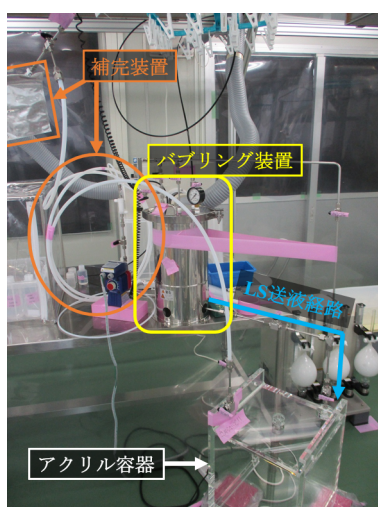
また、LAB-LS は、作製作業・運搬時の温度である 25°C から検出器内への導入後の温度である 10°C まで、約 15°C の液温低下が見込まれていた。そして、この液温低下に伴う LAB-LS の収縮・体積減少によってアクリル容器に負荷がかかり破損すると予想されていた。そこで、アクリル容器内の圧力低下を防いだ上で検出器内に導入した後もアクリル容器内を LAB-LS で満たすことを目的として、収縮による体積減少分の LAB-LS を補完するテフロンチューブ及びガスバッグからなる補完装置を作製し、アクリル容器に取り付けた。この補完装置のサイズは、15°C の液温低下による LAB-LS の体積変化量を基に決定した。



(a) PPO · Bis-MSB 溶解中



(b) 液液抽出

(c) バブリング装置・LS 送液用配管
・補完装置

(d) 8 割程度の LAB-LS が注入されたアクリル容器

図 4.26 LAB-LS 作製

4.3.9 LAB-LS の導入

2022年12月、純水で満たされた検出器内へ LAB-LS が導入された。導入にあたって、純水と LAB-LS・アクリル容器の密度差によって生じる浮力に対して、対策する必要があった。アクリル容器はステンレスタンク上面にある 50 cm フランジの内側側面のアイナットから吊るす計画だが、アクリル容器だけでは浮力によって浮上してしまい、検出器の中心に留めることができない。そこで、アクリル容器から 2 kg の錘を吊るすことで、アクリル容器の位置を検出器中心に保持することを可能にした(図 4.27)。これらの吊り下げ用のケーブルは、アクリル容器を傷つせず、かつ強度・低吸湿性・寸法安定性に優れた素材である高強力ポリアリレート繊維で編まれたケーブル(ベクトランケーブル)を用いた。また、アクリル容器を吊り下げるケーブルのフランジ側には、アクリル容器の位置を調整するためのターンバックルが取り付けられた。

導入作業としては、まず、ニュートリノ科学研究センターから神岡鉱山内に運び込まれた LAB-LS 注入済みのアクリル容器を純水拭きし、その後、荷揚クレーンを用いてステンレスタンク上部まで吊り上げた。ここでアクリル容器の下部と錘をケーブルで繋ぎ、導入準備を完了した。アクリル容器及び錘は 50 cm フランジから降下させて導入された。降下作業完了後、補完装置であるテフロンチューブ及びガスバックをその後の測定に干渉しない位置に固定した。最後に、アクリル容器上面から 50 cm フランジ上面までの距離をターンバックルで調節することでアクリル容器を正確に検出器の中心に設置し、導入作業を完了した。

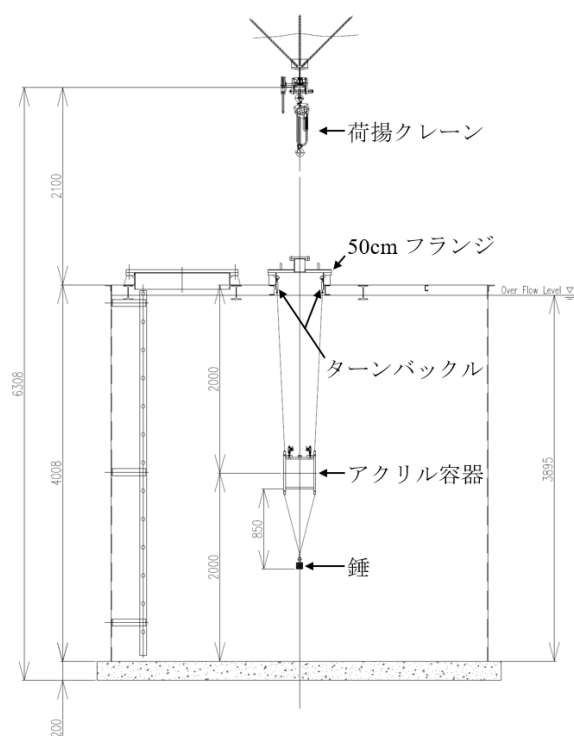


図 4.27 LAB-LS 設置後の検出器の設計図

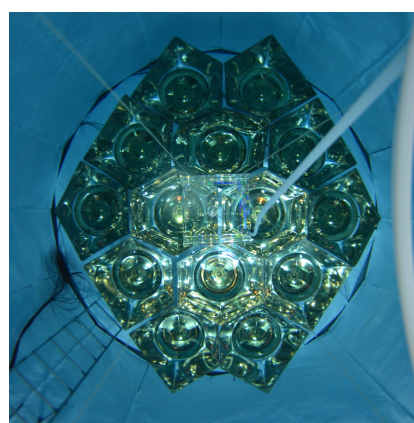


(a) アクリル容器に錘を吊るす様子

(b) アクリル容器降下中



(c) 固定された補完装置



(d) 導入完了後の検出器内

図 4.28 LAB-LS 導入

4.3.10 測定小屋の建設

2022年12月、業者によって測定小屋が建設された。この小屋にはプロトタイプ検出器での測定に必要な機器が設置された。以下に主な機器を挙げる。

- ネットワーク中継器
- HV 電源 (CAEN、R1470ETD) × 2
- デジタイザ (CAEN、V1751) × 2
- NIM モジュール
- 測定用パソコン

ネットワーク中継器は、小屋内にある機器をネットワークに接続し、これらの機器をリモート操作できるようにするために設置された。HV 電源・デジタイザは、それぞれ 8ch/ 台のものが 2 台ずつ用意され、14 本ある PMT の HV・信号ケーブルを全て接続できるように設置された。14

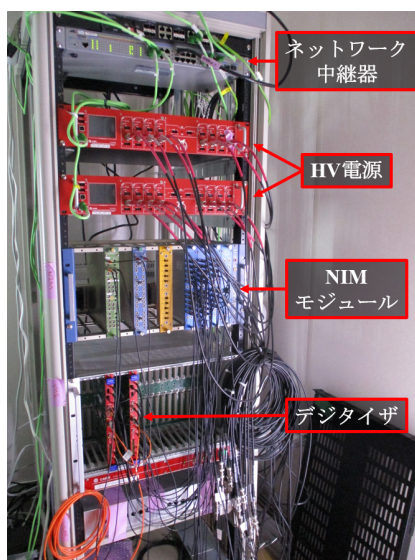
本の PMT から延びる計 28 本の HV・信号ケーブルは、フィードスルーコネクタを介して検出器外部に延長され、PMT によらず等しい長さで測定小屋まで配線された。これらのケーブルは、HV ケーブルは直接 HV 電源に、信号ケーブルは NIM モジュールを挟んでからデジタイザに接続された。HV 電源はリモート操作できる製品、デジタイザは信号を 1GHz でサンプリングできる製品が使用された。測定用のパソコンには、デジタイザを制御するための PCI Ecpres カード (CAEN、A3818) を搭載しており、2 つのデジタイザの同期や、デジタイザから光ファイバケーブルで送られてくるデータの読み取りが行われた。また、この読み取ったデータを処理するソフトウェア (CAEN、CoMPASS) もインストールされており、このパソコンでデータ取得が完結するようにした。この測定用のパソコンもリモート操作ができるようにした。



(a) 建設中



(b) 建設完了時



(c) 小屋内の測定機器

図 4.29 測定小屋

4.4 検出器における測定

プロトタイプ検出器で行われた測定について、その種類ごとに概要と時期を以下に述べる。

シンチレータ球測定

この測定では、シンチレータ球を発光させてその光量を光子計数によって測定した。測定に関する詳細は 5.1 節で述べる。この測定は集光ミラー取り付け前後に 3 回、純水注入前後に 2 回、LAB-LS 導入後に定期的に 5 回の計 10 回行った。測定時期を表 4.5 に示す。

放射線源測定

この測定では、放射線源である ^{137}Cs と ^{60}Co を用いて LAB-LS を発光させ、その光量を測定した。測定に関する詳細は 5.1 節で述べる。この測定は LAB-LS 導入後に定期的に 6 回行った。測定時期を表 4.5 に示す。

表 4.5 シンチレータ球・放射線源測定の測定時期

測定時期	シンチレータ球測定	放射線源測定	
2022 年	4 月	集光ミラー取付前の測定 (PMT : No. 1~6)	—
	8 月	集光ミラー取付前の測定 (PMT : No. 7~11)	—
		集光ミラー取付後の測定 (PMT : No. 0~11)	—
	以下、全 PMT(No. 0~13) で測定		
10 月	純水注入前の測定	—	
11 月	純水注入後の測定	—	
2023 年	12 月	定期測定	定期測定
	1 月	—	定期測定
	5 月	—	定期測定
	7 月	定期測定	定期測定
	10 月初め	定期測定	定期測定
	10 月末	定期測定	—
	12 月	定期測定	定期測定

物理測定 (継続測定)

この測定では環境放射線や宇宙線ミュオン等による LAB-LS の反応事象を継続的に観測する物理測定を行った。本研究ではこの測定によって得られたデータを扱わないため詳細は省くが、放射線源を導入しないこと以外は放射線源測定と同様の測定を行った。この測定は、シンチレータ球測定や放射線源測定を行っている間を除き、2023 年 4 月から 2024 年 1 月までの約 10 か月にわたって継続的に行った。

純水透過率測定

検出器内を満たす純水の状態を確認するために、定期的に検出器内から純水純化装置に流れてきた純水が精密フィルターの手前で採水され、その純水の透過率の測定が行われた。この測定は、純水注入以降に 8 回行われ、初回を除く 7 回の測定の後には精密フィルターのフィルター交換が行われた。測定時期及び測定結果を図 4.30 に示す。

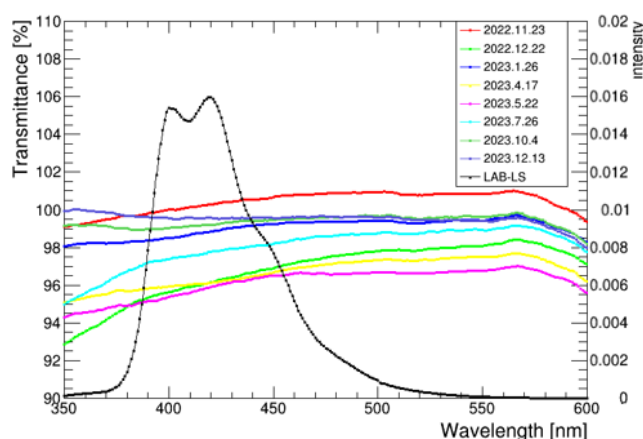


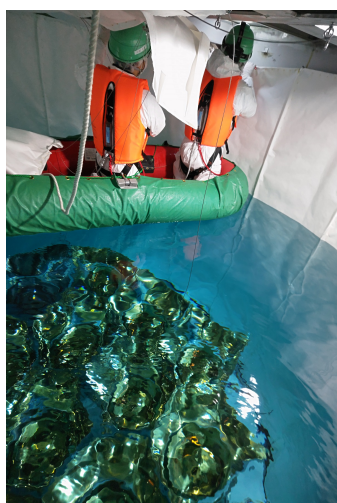
図 4.30 検出器の純水透過率
(黒色のグラフは LAB-LS の発光スペクトルを示す。)

4.5 検出器の解体

プロトタイプ検出器に使われたステンレスタンクは、KamLAND2 検出器に向けた KamLAND 検出器の大規模改修に際して、KamLAND 検出器のバッファオイルの保存タンクとして用いられる。そこで、KamLAND 検出器の大規模改修が開始される前にプロトタイプ検出器を解体する必要があるため、2024 年 1 月に解体作業が行われた。以下ではその詳細を記す。

まず、純水純化装置を停止した後、LAB-LS の搬出を行った。搬出されたアクリル容器を確認したところ、LAB-LA の漏出は見られなかった。続いてステンレスタンク内の約 1/3 の純水を排水した後、タンク上部のタイバックシートを除去した (図 4.31(a))。上部タイバックシートを除

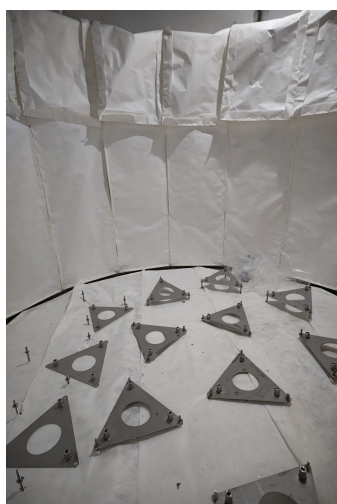
去し、残りの全ての純水を排水した後、集光ミラー・アクリルドーム・HQE-PMT の取り外し及び搬出を行った。全ての集光ミラーをアクリルドームから取り外し、タンクの外に搬出した(図 4.31(b))。続いて、PMT を設置している台座、PMT、アクリルドームを分解し、アクリルドーム及び PMT をそれぞれ搬出した(図 4.31(c))。その後、PMT の台座と残りのタイベックシートを取り外し、タンクの外に搬出した。この作業で全ての装置・物品の搬出が完了し、タンク内にはタンクに直接溶接されたボルト・ナットや昇降用はしごのみ残された状態にした。最後に、ステンレスタンク内側を高圧洗浄機で洗浄し、乾燥させて解体作業の全てを完了した(図 4.31(d))。



(a) ゴムボートに乗ってタイベックシートをはがしている様子



(b) 集光ミラー搬出後



(c) アクリルドーム・PMT 搬出後



(d) 解体作業完了後のタンク内部

図 4.31 LAB-LS 導入

4.6 建設において生じた問題

プロトタイプ検出器の建設においていくつかの問題が生じた。発生した問題は、建設中に発覚したものと建設完了後に発覚したものがあり、また発覚後に修正できたものと修正できなかったものがある。発生した問題について、具体的に以下に述べる。

4.6.1 建設中に生じた問題

初期不良の HQE-PMT

2022年4月の集光ミラー取り付け前の測定を行った際、No. 0のPMTが信号を出力していないことが発覚した。そこで、新たに1本のHQE-PMTを購入し、2022年8月、動作不良のNo. 0のPMTの交換作業を行った。交換によって取り出されたPMTの動作不良の原因を調査したが、外観に問題はなく、HV・信号ケーブルの抵抗値も正常で断線・漏電の可能性も低いことから、内部回路の不具合による初期不良であると考えられた。

ベースラインの乱れ

2022年8月の作業で仮設置されたPMTが計12本になると、各PMTから出力される波形信号に周期が約 $2\mu\text{s}$ 、振幅が $5\sim 10\text{mV}$ のノイズが生じていることが発覚した(図4.32)。これは、測定小屋内の測定機器の接地とステンレスタンク・フィードスルーの接地の間にグラウンドループが生じていたことが原因と考えられた。そこで、平編銅線を用いて両接地を繋ぐことでこのグラウンドループの対策を講じたところ、発生していたノイズが軽減された。ノイズを完全に抑制するには至らなかったものの、その後の解析で十分除去可能な程度になったため、これで問題解決とした。

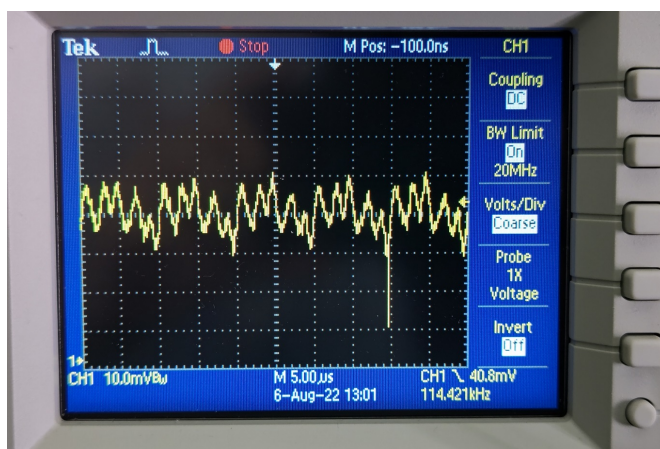


図 4.32 ノイズが生じた PMT 信号

ステンレスタンク底面板の歪み

ステンレスタンク内での作業中にタンクの底面板が歪んでいることが発覚した。この歪みは、ステンレスタンク建設作業における底面板同士や底面板と側板の溶接が原因と考えられた。しかし、時間とコストの面からステンレスタンクを造り直すことは難しかったため、底面板の歪みを修正することはできなかった。その結果、この問題を原因として新たな問題が生じた。新たに発生した問題については次に述べる。

集光ミラーの接触・変形

ステンレスタンク底面板の歪みが原因となって、集光ミラー同士が接触しそれらが変形していることが純水注入後に発覚した(図 4.33)。歪んだ底面板は、人間の体重程度の荷重で変形していた。そのため、純水の重みによってその注入前後で PMT の台座ごと底面板が変形し、集光ミラーの取り付け作業で調整した PMT・集光ミラーの位置・向きが変化した結果、隣接した集光ミラーが接触したと考えられた。この接触による影響は集光ミラーの変形のみで、集光ミラーの破損やアクリルドームからの脱落などはないことから、その後の測定結果に対する影響は小さいと考えられたため、この問題は修正されなかった。

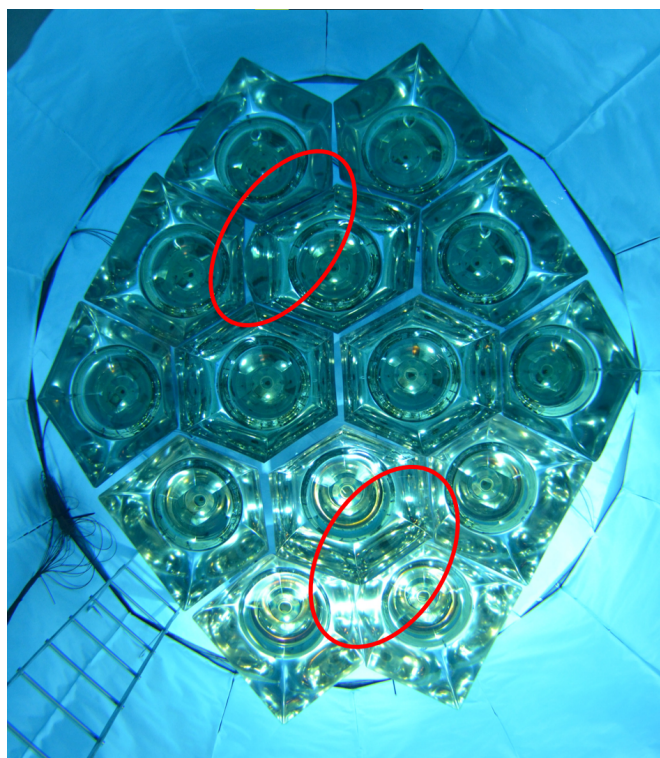


図 4.33 接触・変形した集光ミラー

アクリルドーム内の気泡

純水の注入後の 2022 年 11 月、アクリルドーム内に気泡が残っていることが発覚した(図 4.34)。純水の注入で水位が上昇すると、アクリルドームの内側の空気が抜けられないことが予想されていた。そのため、アクリルドームの中心には内側の空気を抜くための穴があげられていた。しかし、空気が小さな気泡として残ってしまっていた。これは、PMT・集光ミラーに合わせてアクリルドームも傾けて取り付けていたために、その中心が最高点にならず、内側の空気が抜けきらなかったことが原因と考えられた。この問題は、外周の PMT に取り付けられたアクリルドーム計 10 個で確認されたが、どの気泡のサイズも小さく、その後の測定結果に対する影響は小さいと考えられたことや、時間とともに空気が水に溶け、気泡がなくなると予想されたことから、修正されなかった。その後、2022 年 12 月に検出器内部を確認したところ、気泡が 4 個に減少していることが確認された。さらに、2023 年 10 月には全ての気泡が消えていることが確認された。

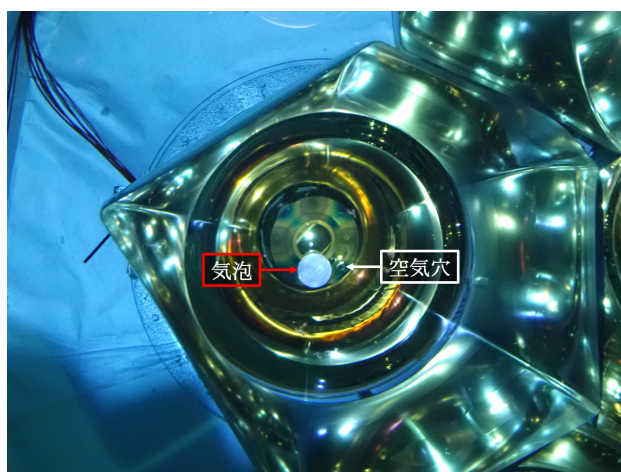


図 4.34 気泡が残ったアクリルドームの一つ

4.6.2 建設完了後に生じた問題

2 本の故障した PMT

プロトタイプ検出器の建設が完了し、物理測定が開始された後の 2023 年 5 月と 6 月に、それぞれ No. 1 と No. 3 の PMT が信号を出力していないことが発覚した。発覚が純水注入後であったため、時間とコストの面からこれらの交換は行われなかった。ただし、2023 年 10 月に検出器上部から目視による確認が行われた。その結果、No. 1 については図 4.35 のように光電面が剥がれて表面の色が無色になっていることが確認された。一方、No. 3 については外観に異常はないものの、HV・信号ケーブルの抵抗値が正常値の約 1/10 程度しかないことが確認された。両 PMT ともに、故障の原因は PMT の内部への空気や純水の侵入であると考えられた。それぞれの正確な故障原因は、検出器解体で取り外された PMT を調査することで特定する予定である。

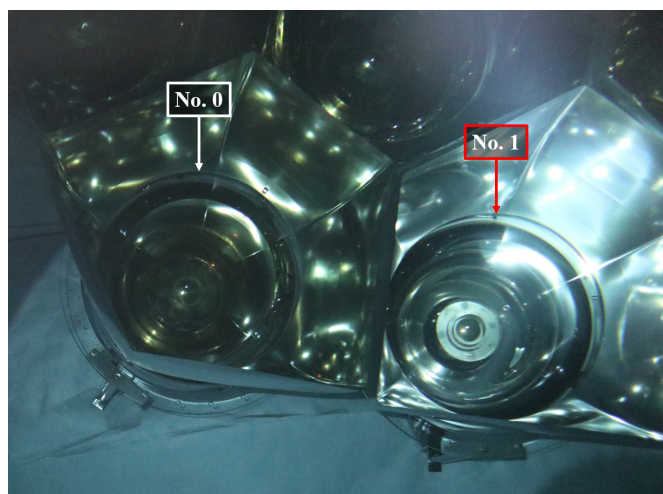
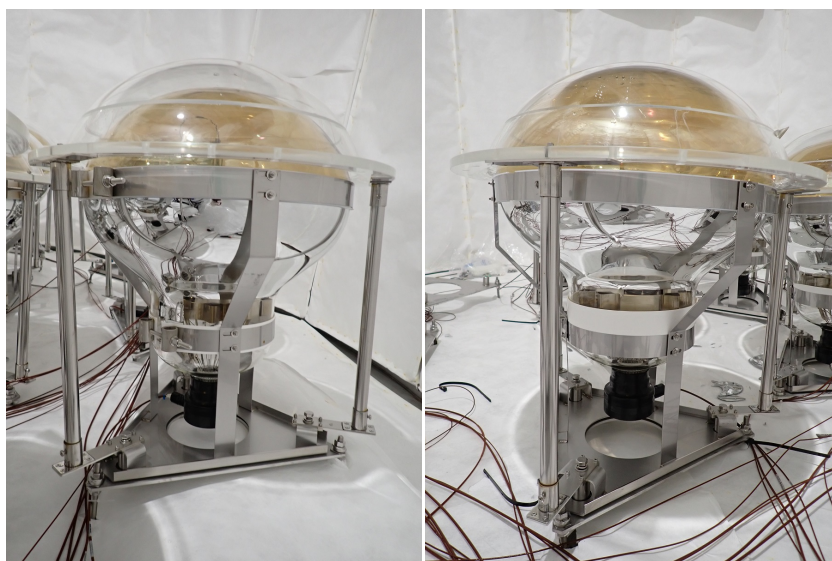


図 4.35 光電面が剥がれ落ちた No. 1 の PMT

浮力による PMT の浮上

検出器解体作業でアクリルドーム及び HQE-PMT を取り外した際に、一部の PMT の設置位置が上昇していることが発覚した (図 4.36)。PMT は治具にステンレスバンドで固定されていたが、純水注入後に PMT にかかる浮力に耐えられず浮上し、アクリルドームと接触することで安定していたと考えられる。この問題は、KamLAND2 検出器においては脱離した PMT が破損し周囲の PMT も連鎖的に破損するといった致命的な問題を引き起こす可能性がある。よって、治具に PMT を固定する方法を見直す必要がある。



(a) 通常の PMT

(b) 浮上した PMT

図 4.36 浮力によって浮上した PMT
(アクリルドームと PMT 表面の隙間が減少している。)

集光ミラーのアルミニウムの剥離

検出器解体作業で集光ミラーを取り外した際に、集光ミラー表面に蒸着されているアルミニウムが剥離していることが発覚した(図 4.37)。これは、純水が集光ミラー表面のトップコート及びアルミニウムを侵食したことが原因で剥離したと考えられる。この剥離によって、純水注入後の集光ミラーの集光性能が徐々に低下していたと考えられる。この問題は、より長期間の運用を予定している KamLAND2 検出器においては剥離がより悪化し、重大な問題になりかねない。よって、今後の研究で、集光ミラーのバッファオイル内での耐性試験を十分に行う必要がある。

錆の発生

検出器解体作業において、タイベックシートの取り付けに用いられたステープラーの針が錆びていることが発覚した(図 4.36)。ステープラーの針はステンレス製のものを使用したが錆に弱い製品であったと考えられる。一般に、一つの金属で錆が発生すると、「もらい錆」と呼ばれる現象により周囲の金属にも錆が発生してしまうことが知られている。長期運用の予定がある KamLAND2 検出器においては一つの部品が錆びることによって全ての金属が錆びてしまう恐れがある。したがって、純水で満たされる予定の外部検出器でステープラーを使用する際には、ステンレス製品の中でも錆に強い針を使用する必要があることがわかった。



図 4.37 アルミニウムが剥離した集光ミラー
(斑点状に見えるものが剥離した跡である。)

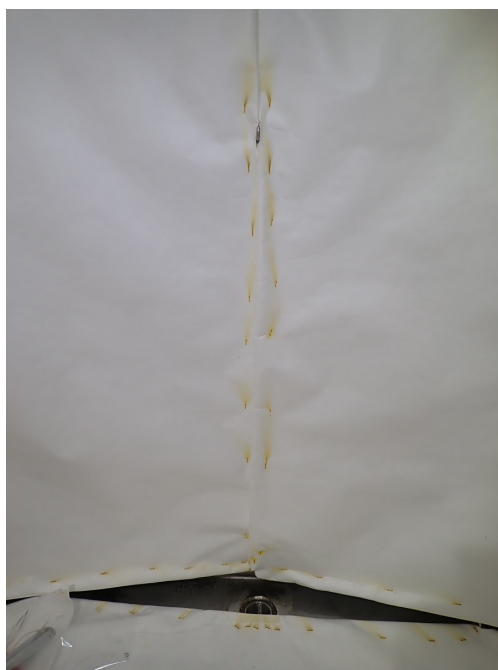


図 4.38 錆びたステープラーの針

第 5 章

プロトタイプ検出器における測定及びシミュレーション

本研究では、プロトタイプ検出器での測定とシミュレーションによる計算の 2 つの手法を用い、それぞれで得られたデータを比較することでプロトタイプ検出器の較正及び性能評価を行った。本章では、実際の測定手法とシミュレーションによる計算手法、及びその結果得られるそれぞれのデータについて述べる。

5.1 測定

プロトタイプ検出器の建設中及び完了後に 2 種類の測定を行い、その測定結果から解析に必要なデータを取得した。

5.1.1 シンチレータ球測定

シンチレータ球の製作

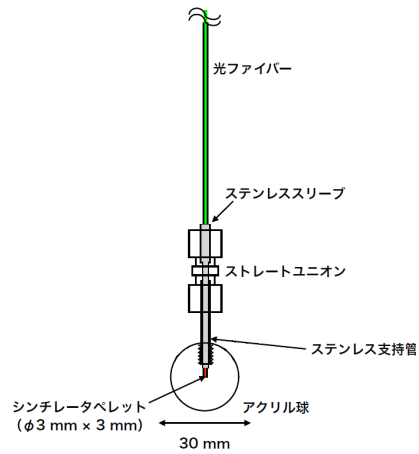
まず、この測定に用いるシンチレータ球を製作した。これは、LAB-LS に近い波長で、時間と方向によらない一定光量で発光することを目標として製作された。製作したシンチレータ球は図 5.1 のように直径 30 mm の半透明の亚克力球で、そこにステンレス管と光ファイバーを接続したものを測定に用いた。亚克力球は、購入した材料を混合させて型で固めた製作品で、その光学特性が LAB-LS に近くなるような大きさ・材料・混合割合で製作された。また、亚克力球の交換と液中での使用を同時に可能とするため、防水性の継手と接着剤を用いて亚克力球とステンレス管、光ファイバーを接続した。今回製作されたシンチレータ球の組成は表 5.1 の通りであり、その発光時定数と発光時定数、発光スペクトルの測定結果は表 5.2 及び図 5.2 の通りである。加えて、シンチレータ球の発光等方性を測定した。上から吊るしたシンチレータ球の水平面上の 4 方向 (東西南北) と真下方向の計 5 方向に 10 cm 離して 2 inchPMT を設置し、各方向で得られたシンチレータ球の発光量を比較することで発光等方性を評価した。測定結果を図 5.3 に示す。この結果より、今回製作されたシンチレータ球の発光等方性が $\pm 5\%$ 以下であることが明らかと

なった。

この発光等方性の測定及びプロトタイプ検出器での測定に用いた光源は、UV-LED ドライバ (CAEN、SP5605) から一定光量で出力させた発光波長 248 ± 8 nm、パルス幅 (FWHM) ~ 4 ns の光で、この光を CAEN がカスタムした光ファイバー (Thorlabs、M00279695) によってシンチレータ球中心に導入した。導入された光は、シンチレータ球に含まれる TPB と POPOP で長波長に波長変換される。さらに放出光の等方性を高めるため、シンチレータ球の中心部にシンチレータペレットを充填させ、拡散剤として MgO を添加している。



(a) 外観



(b) 概略図

図 5.1 シンチレータ球

表 5.1 シンチレータ球の組成

成分	組成式	比率/含有量
紫外線透過アクリル	—	100%
1,1,4,4-テトラフェニル-1,3-ブタジエン (TPB)	$C_{28}H_{22}$	1.5 wt. %
1,4-ジ (5-フェニル-2-オキサゾリル) ベンゼン (POPOP)	$C_{24}H_{16}N_2O_2$	0.02 wt. %
酸化マグネシウム (MgO)	—	0.3 wt. %

表 5.2 シンチレータ球の発光時間幅及び発光時定数

発光時間幅 (FWHM)[ns]	~ 4
発光第一時定数 [ns](割合)	2.3(37%)
発光第二時定数 [ns](割合)	14(30%)
発光第三時定数 [ns](割合)	2.0×10^2 (33%)

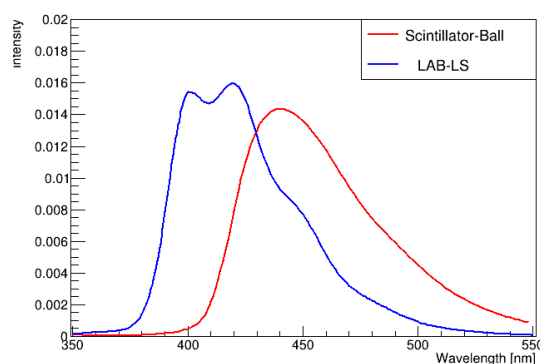


図 5.2 シンチレータ球の発光スペクトル (励起波長：300 nm)

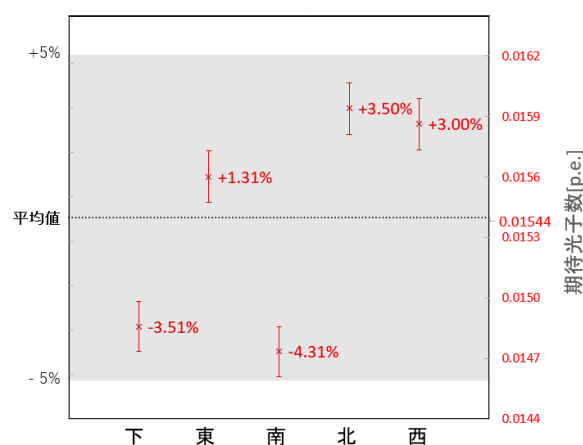


図 5.3 シンチレータ球の発光等方性

測定

これらの特性を持つシンチレータ球を発光させ、その光量を光子計数によって測定した。まず、純水注入前の検出器内が空気で満たされている状態で、集光ミラーを取り付ける前後に計 2 回、測定が行われた。この測定では、検出器の中心を高さ $z = 0.0\text{ m}$ として $z = -0.5\text{ m}$ から $z = 1.5\text{ m}$ までの 0.5 m 間隔の位置に、 50 cm フランジと 25 cm フランジ A,B の 3 か所からそれぞれ垂らすことで計 15 点で測定を行った。また、純水注入及び LAB-LS 導入後には、 50 cm フランジから $z = 1.0\text{ m}$ の位置にシンチレータ球を垂らし発光させ、その 1 点のみで測定を行った。

シンチレータ球測定では、図 5.4 に示すような回路でトリガー信号と 14 個の PMT 信号が測定された。トリガー信号として、LED ドライバから出力される LED の発光タイミングと同期したパルス信号が測定された (図 5.5(a))。PMT 信号は、各 PMT でトリガー信号とコインシデンスを取ることで各 PMT ごとに測定された (図 5.5(b))。光子計数測定で得られる PMT 信号は 1 p.e. の信号のため波高が低いことから、5 倍アンプを 2 回かけて測定した。測定された各波形に対し、ト

リガー信号では 500 ch、PMT 信号では 5 ch のスレッシュホールドにかかった時間をそれぞれ t_{LED} 、 t_{PMT} として、各 PMT 信号においてのトリガー信号との時間差を $\Delta t \equiv t_{PMT} - t_{LED}$ と定義した。シンチレータ測定では、 Δt とトリガー信号の波形、PMT 信号の波形の 3 種類のデータを取得した。

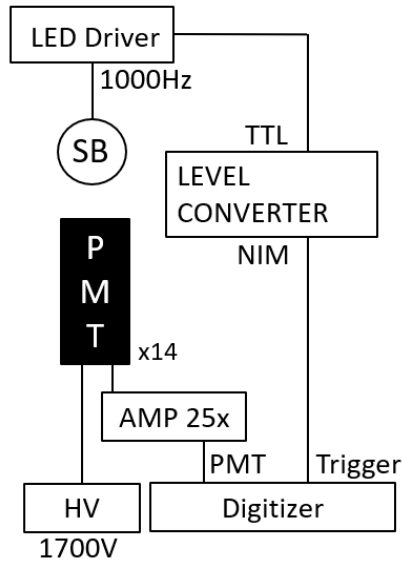


図 5.4 シンチレータ球測定に用いられた回路

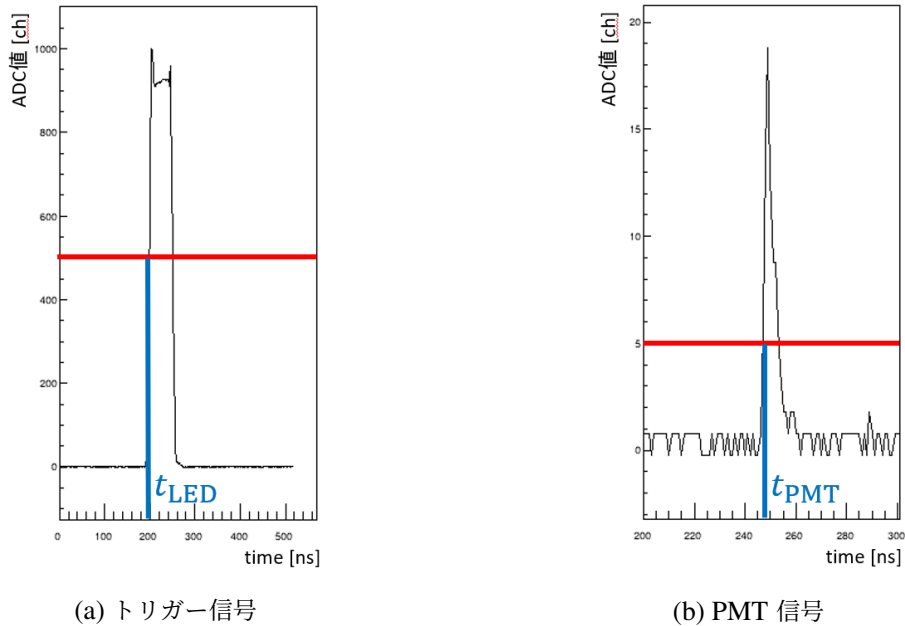


図 5.5 シンチレータ球測定で得られた波形の一例

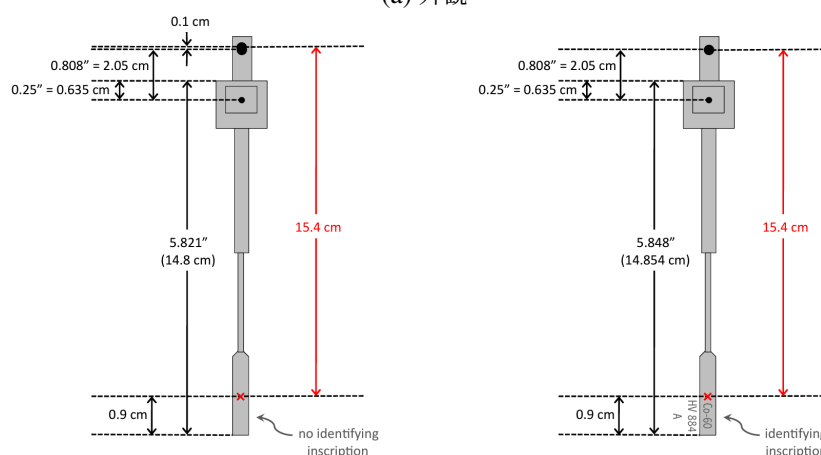
5.1.2 放射線源測定

放射線源測定では、放射線源として図 5.6 に示すような ^{137}Cs と ^{60}Co を用い、 ^{137}Cs から放出される 0.662 MeV のガンマ線や ^{60}Co から放出される 1.17 MeV と 1.33 MeV のガンマ線による LAB-LS の発光量をそれぞれ測定した。この測定は LAB-LS 導入後に行われ、放射線源は 50 cm フランジからベクトルケーブルを使って検出器及び LAB-LS の中心から 20 cm 直上に導入された。

この測定は図 5.7 に示すような回路で測定され、各 PMT に設けられたセルフトリガーで 14 個の PMT 信号をそれぞれ測定した。この際の各トリガーのスレッシュホールドは約 4 p.e. 分 (16 ch) とした。この測定で得られる PMT 信号は、同時に大量の光電子が増幅されることで信号の波高が非常に高くなることから、信号のサチュレーションを防ぐために 5 倍アンプを 1 回のみかけて測定した。測定された各 PMT 信号に対し、その信号を出力した PMT が No. n のとき、スレッシュホールドにかかった時間を測定開始を基準とする経過時間 t_n として取得した。放射線源測定では、 t_n と PMT 信号の波形の 2 種類のデータを取得した (図 5.8)。



(a) 外観



(b) 概略図

図 5.6 放射線源

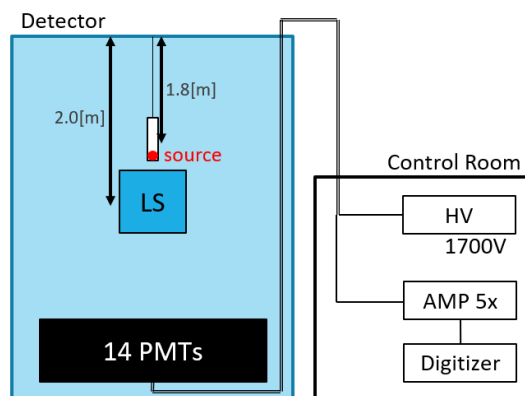


図 5.7 放射線源測定に用いられた回路

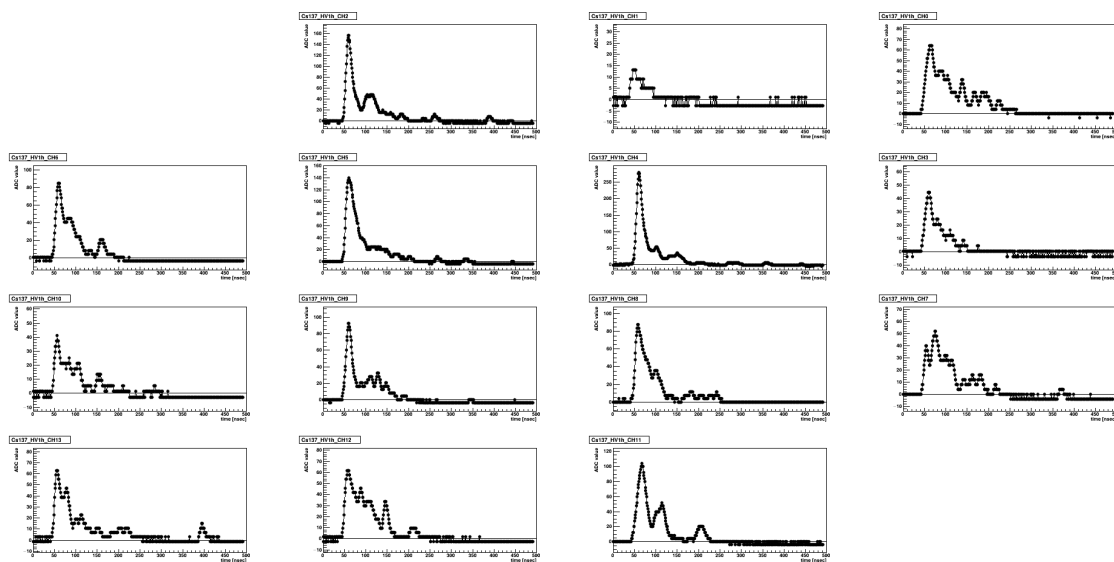


図 5.8 放射線源測定で得られた波形の一例

(右上から左に向かって PMT の No. 0, 1, 2, 2 段目の右から No. 3, 4, ... の結果と続く。
この並びはプロトタイプ検出器の PMT の配置に準じており、以下 14 個並んだ結果は同様である。)

5.2 シミュレーション

Geant4 を用いたシミュレーションを行い、その結果から解析に必要なデータを取得した。

5.2.1 Geant4

シミュレーションに使用したソフトウェアは Geant4 [28] である。Geant4 は C++ を使用言語としており、ジオメトリ設計・物質定義・物理プロセス定義などを設定する上で有用なクラスを多数用意している。そのため目的に応じてクラスを変更することで設定を容易に変更できる。これらの理由から素粒子・原子核物理学や宇宙物理学などの放射線を扱う分野で広く使用されている。

プロトタイプ検出器のシミュレーションは、KamLAND 検出器を再現した大規模シミュレーション”KLG4”を基にしている。KLG4 には KamLAND 検出器を再現するジオメトリが構築されているだけでなく、KamLAND 検出器に用いられている物質の組成や光学特性などが登録されている。プロトタイプ検出器のジオメトリは先行研究で構築されたものを使用した(図 5.9) [27]。

Geant4 は放射線やその他の粒子の軌跡・反応を一粒子ごとにシミュレートするため、各粒子の軌跡・反応のシミュレーション結果を出力することができる。本研究では、一つの放射線を発生させることを 1 イベントとして、放射線の発生から、その放射線と LAB-LS の反応によって発光した光子がいずれかの PMT に hit し、その光電面での光電効果によって飛び出した光電子(photoelectron: p.e.) がその PMT で計測されるまでを全光子に対してシミュレートしており、その結果として以下のデータを出力した。これらのデータを処理し、必要なデータを取得した。

- イベント番号
- 放射線が LAB-LS との反応による損失エネルギー [MeV]
- 1 イベント内で発生した光子の通し番号
- 光子が hit した PMT 番号
- 放射線発生から光子が PMT に計測されるまでの時間 (hit 時間)[ns]

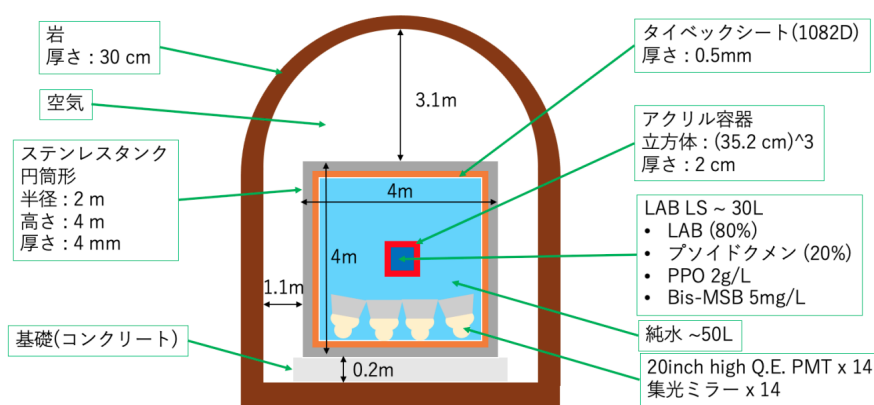


図 5.9 プロトタイプ検出器のジオメトリ

5.2.2 シンチレータ球シミュレーション

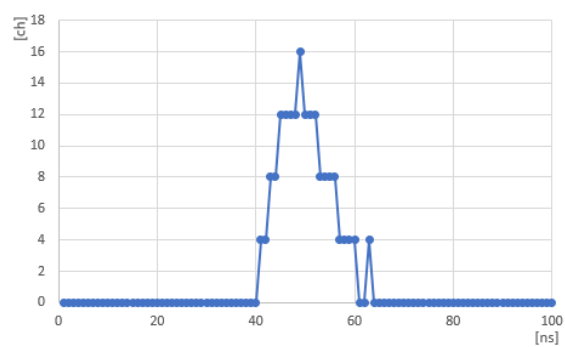
シンチレータ球測定を再現するようなシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、LAB-LS の代わりにシンチレータ球の光学特性を登録した液体シンチレータを用い、それをシンチレータ球測定と同様の条件・位置に設置した。その液体シンチレータの中心で 1 MeV の電子を発生させた (表 5.3)。またシミュレーションでは、直接光の光子のみによるデータを得るため、タイベックシートの反射率を 0 にしたシミュレーションも行った。それぞれのシミュレーションの結果、出力された全イベント・全光子のデータの hit 時間をシンチレータ球測定と同様に Δt とした。シンチレータ球シミュレーションでは、 Δt の 1 種類のデータを取得した。

5.2.3 放射線源シミュレーション

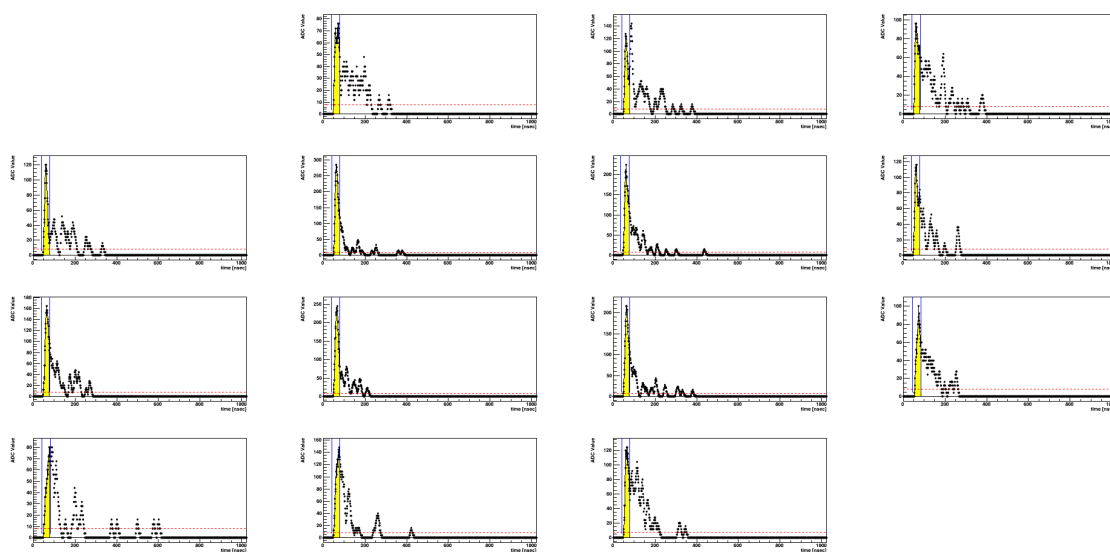
放射線源測定を再現するシミュレーションも行った。このシミュレーションでは ^{137}Cs と ^{60}Co を線源とした放射線をそれぞれ再現するため、表 5.3 に示した条件の放射線を発生させた。実際の ^{60}Co 線源は 1.17 MeV と 1.33 MeV の 2 本のガンマ線を同時に放出するが、シミュレーションでは、それぞれのガンマ線を 1 本ずつ発生させた。このシミュレーションでもタイベックシートの反射率を 0 にし、直接光の光子のみのシミュレーションを行った。それぞれのシミュレーションの結果、まず各イベント・各 PMT における全光子の hit 時間を取得した。その各 hit 時間でシンチレータ球測定から取得した 1p.e. による代表的な波形を足し合わせ、そのイベントの各 PMT が出力するであろう波形を再現した (図 5.10)。放射線源シミュレーションでは、各イベントごとの波形の 1 種類のデータを取得した。

表 5.3 シミュレーションで発生させた放射線の条件

条件	シンチレータ球	放射線源シミュレーション	
	シミュレーション		
発生粒子	電子	^{137}Cs によるガンマ線	^{60}Co によるガンマ線 (2 本)
エネルギー [MeV]	1.0	0.662	1.17+1.33
発生位置	LAB-LS 内一様	LAB-LS 中心から 直上 20 cm	LAB-LS 中心から 直上 20 cm
発生イベント	1,000	100,000	100,000



(a) 1p.e. 波形



(b) PMT から出力される信号を再現した波形の一例

図 5.10 光量シミュレーションの解析に用いられる波形

第 6 章

プロトタイプ検出器の較正

プロトタイプ検出器の性能評価をするにあたって、まずプロトタイプ検出器の較正を行う必要がある。そこで、5 章で述べたプロトタイプ検出器を実際に使った測定とシミュレーションによる計算で得られたそれぞれのデータを用いて、タイベックシートの反射率と 1p.e. ゲインの較正を行った。本章では、それぞれの較正手法と結果について述べる。

6.1 タイベックシートの反射率

シンチレータ球測定・シミュレーションで得られた Δt 分布を比較することでタイベックシートの反射率及び反射モデルを較正した。

6.1.1 較正手法

4.1.2 項で述べたようにタイベックシートの空気中での反射率は測定されているが、水中での反射率は測定されておらず、また水中で反射率が低下する可能性があるうえ、Geant4 のシミュレーションではその複雑な反射モデルの再現が難しいため、水中での反射が正しくシミュレーションできていない。よって、シミュレーションに登録する水中での反射率のチューニングが必要である。そこで、図 6.1 に示すような Δt 分布の形に着目した。この Δt 分布は 2 つのピークを持ち、それぞれ鋭いピークと長いテールを持つピークであることがわかる。図中の青色に塗りつぶされたヒストグラムはタイベックシートの反射率を 0 にした直接光の光子のみのシミュレーションの結果である。直接光 + 間接光と直接光のみの 2 つのシミュレーションから、鋭いピークをつくる主なイベントは直接光で、長いテールを持つピークをつくるイベントはタイベックシートで 1 回以上反射をしてから PMT に hit した反射光であることがわかる。これは、図 6.2 のように光子の経路長を考えたとき、直接光の経路長は 2 ~ 2.5 m 程度なのに対して、反射光の経路長は約 3 m 以上で、さらに反射回数が多いほど長くなることからわかる。したがって、タイベックシートの反射率の影響を受けるのは長いテールを持つピークであり、反射率が高い場合、検出光子数の減少具合が緩やかで長いテールを持ち、低い場合、減少具合が早く短いテールを持つことが予想できる。そこで、シミュレーションに登録するタイベックシートの反射率と反射モデルを変更し、

シミュレーション結果と実際の測定結果の Δt 分布の長いテールの減少具合を一致させることで、水中での実際のタイベックシートの反射率及び反射モデルを見積もった。

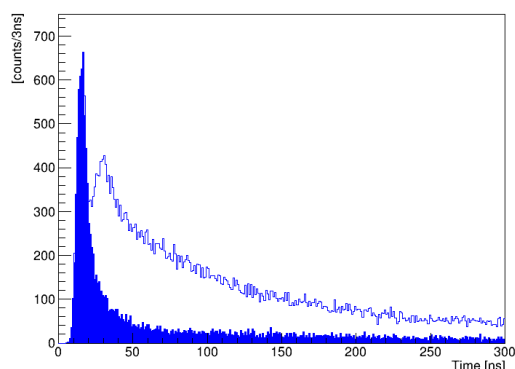


図 6.1 Δt 分布のシミュレーション結果の一例
(青色：直接光、白色：直接光 + 間接光)

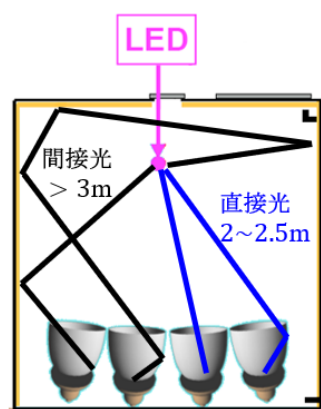
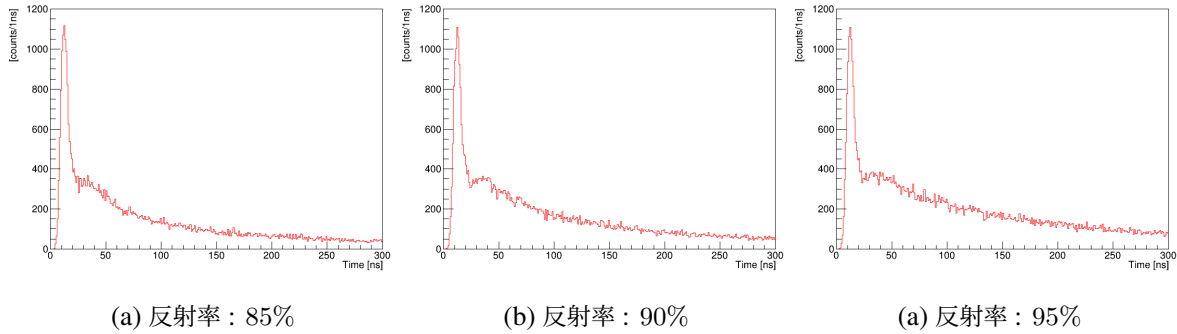
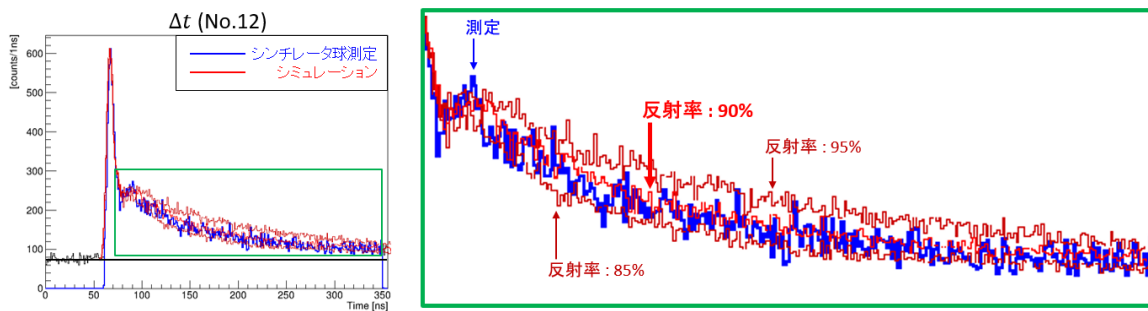


図 6.2 シンチレータ球測定における光子の経路の概略図

6.1.2 較正結果

純水注入後のシンチレータ球測定を再現するシンチレータ球シミュレーションに登録するタイベックシートの反射率を 85%, 90%, 95% (@ 400 nm) と変更した結果、シミュレーションから得られる Δt 分布は図 6.3 のように変化した。このシミュレーション結果を純水注入後のシンチレータ球測定の結果と比較したところ、反射率が $90 \pm 3\%$ (@ 400 nm) で、反射モデルが乱反射の場合に一致することが分かった (図 6.4)。以降の純水注入後のシミュレーションにはこの反射率が登録された。また、この結果は、厳密な数値の比較によるものではないため、今後、テールにフィットする関数を求め、そこから求まる減少率を比較することでより正確な反射率を求める必要がある。

図 6.3 タイベックシートの反射率と Δt 分布の形の関係図 6.4 測定とシミュレーションの Δt 分布の比較結果 (PMT : No. 12)
(右図は緑色枠線内の拡大図)

6.2 1p.e. ゲイン

シンチレータ球測定で得られた PMT 信号の波形から 14 本ある PMT それぞれのゲインを間接的に調べ、その時間変化を求めることでその他の測定の 1p.e. ゲインの値を校正した。

6.2.1 校正手法

LAB-LS 導入後に行った 5 回のシンチレータ球測定で得られた PMT 信号の各波形に対して、図 6.5 に示すような $t_{\text{PMT}} - 10 [\text{ns}] < t < t_{\text{PMT}} + 30 [\text{ns}]$ の範囲で波形を積分し、ADC 積分値を求めた。この ADC 積分値の分布図をガウスフィットし、その mean 値を求めた (図 6.6)。シンチレータ球測定で得られる PMT 信号の波形は 1p.e. のものであることから、その ADC 積分値は各 PMT のゲインの大きさに比例する。よって、ここでは 1p.e. ゲインの値を ADC 積分値として定義した。各 PMT において 5 回のシンチレータ球測定から求めた 1p.e. ゲインの値の結果から、1p.e. ゲインの不定性及び各 PMT の時間変化を求めた。

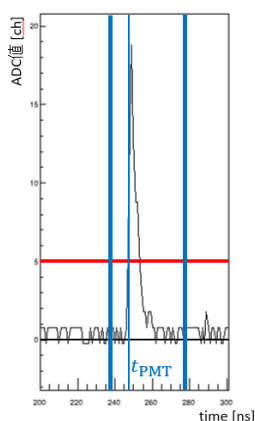


図 6.5 PMT 信号を積分する範囲

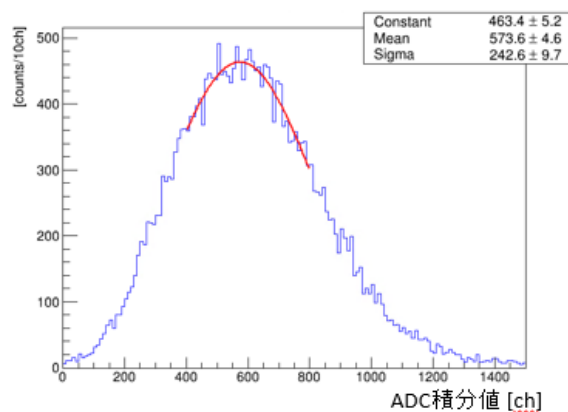


図 6.6 1p.e. ゲイン分布の一例 (PMT : No. 7)

6.2.2 較正結果

まず、全 PMT の 5 回の測定で求められた 1p.e. ゲインの値を図 6.7(a) に示す。この結果から、各 PMT について 2023 年 7 月の測定を基準としたゲインの比率を求め、それぞれの測定における全 PMT の比率の平均値を求めた (図 6.7(b))。この平均値より、ゲインの不定性を $\pm 4.8\%$ とした。

続いて、各 PMT のゲインの時間変化を図 6.8 に示す。各 PMT について 5 回の測定値を一次関数でフィットすることでその PMT のゲインの時間変化の関数を求めた。この結果から、他の測定における各 PMT の 1p.e. ゲインを時間変化の関数とその測定の日時から求め、較正した。この時間変化は、後述する放射線測定の解析における検出光電子数の計算に適用した。

ただし、No. 1 と No. 3 の PMT については 2023 年 7 月の測定以前に故障していたため、不定性には含めず、時間変化は 2022 年 12 月の値で一定とした。また、No. 9 の PMT については 2022 年 12 月に測定されたゲインを外れ値とし、それ以外の 4 つの測定値を用いて時間変化の関数を求めた。

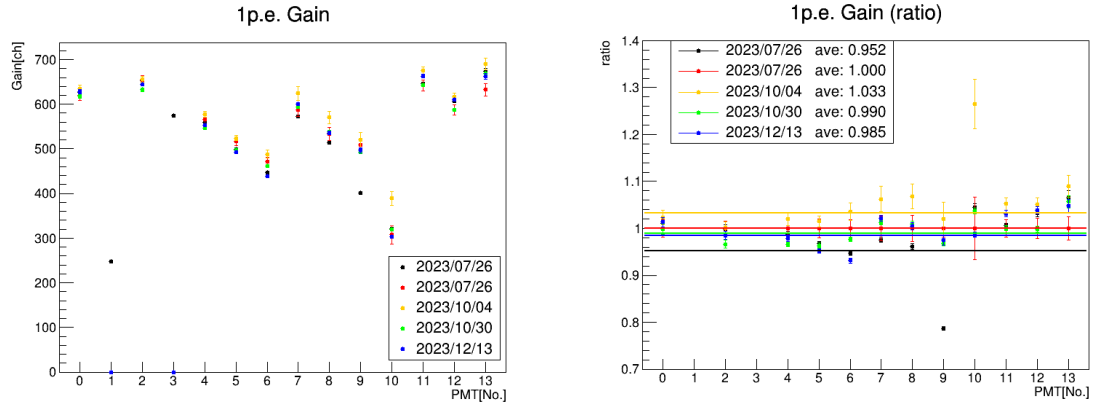


図 6.7 1p.e. ゲインの値

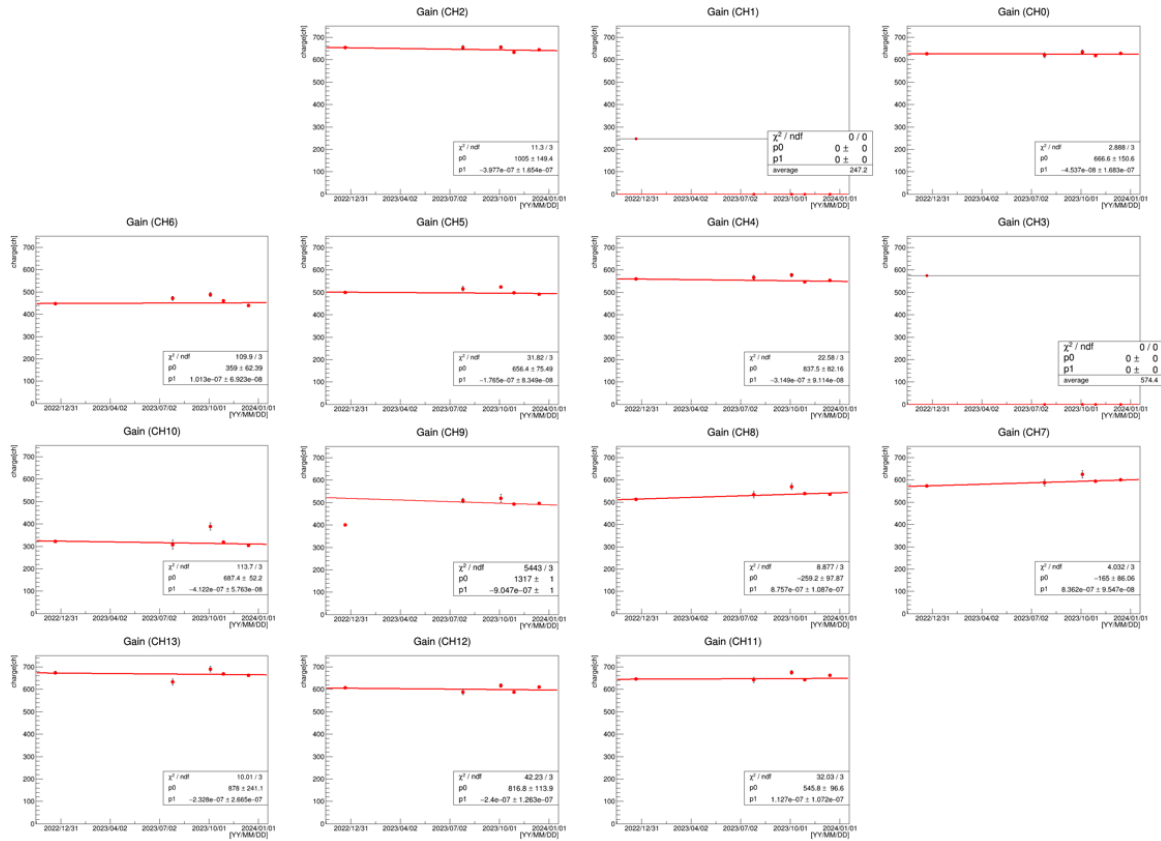


図 6.8 ゲインの時間変化

第7章

プロトタイプ検出器の性能評価

5章で述べたプロトタイプ検出器を実際に使った測定とシミュレーションによる計算で得られたそれぞれのデータを用いて、集光ミラーの集光性能とプロトタイプ検出器の観測光量の評価を行った。本章では、それぞれの評価手法と結果について述べる。

7.1 集光ミラーの集光性能

集光ミラーの集光性能を評価するために、シンチレーション球測定とシミュレーションのデータを用いて、集光ミラーの有無による各 PMT の観測光量を比較した。

7.1.1 評価方法

集光性能を評価するために、集光ミラー取り付け前後に行ったシンチレータ球測定のデータを用いた。まず、直接光のイベントを選別した。KamLAND2 検出器において他の PMT に直接光として届く、もしくは液体シンチレータ等に吸収されるはずの光子が、プロトタイプ検出器においてはタイバックシートで反射されて間接光として検出されてしまう。よって、KamLAND2 検出器で使用する際の集光ミラーの性能をプロトタイプ検出器で評価するには間接光のイベントが不要である。しかし、プロトタイプ検出器の測定データからは直接光と間接光を完全に分けることができない。そこで、6.1 節で述べたようなシミュレーションにおける両者の Δt 分布の違いを用いて、直接光のイベントを選定するのに適した Δt のカット範囲を求めた。その結果、カット範囲は 10 ns とした (図 7.1)。

次に、このカット範囲を測定のデータに適用し、各 PMT の集光ミラー取り付け前後の観測光量を求めた。まず、シンチレータ球の発光が微弱であることから、シンチレータ球の発光回数に対して PMT が 1p.e. 以上を検出する確率が 1/100 以下であるため、PMT が 1p.e. を検出する確率

はポアソン分布に従うとした。このとき、任意の PMT が n 個の光電子を検出する確率は、

$$P(n) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^n}{n!} \quad (7.1)$$

であるから、シンチレーション球の 1 回の発光に対して 1p.e. 以上を検出する確率は、

$$P(n \geq 1) = 1 - P(0) = 1 - e^{-\lambda} \quad (7.2)$$

となる。一方、測定結果 (図 7.2) より、

$$P(n \geq 1) = \frac{(\text{カット範囲内のシンチレータ球の発光によるイベント数})}{(\text{シンチレータ球の発光回数})} \quad (7.3)$$

$$= \frac{(\text{カット範囲内のイベント数}) - (\text{カット範囲内の BG のイベント数})}{(\text{シンチレータ球の発光回数})} \quad (7.4)$$

である。ここで、単位 Δt あたりの BG のイベント数は、 $0 \text{ ns} \leq \Delta t \leq 100 \text{ ns}$ に含まれる単位 Δt あたりのイベント数の平均とした。この 2 式 (7.2), (7.3) より、その PMT の観測光量 λ を求めた。

続いて、各集光ミラーについて、集光ミラー取り付け前の観測光量 $\lambda_{w/o}$ に対する取り付け後の観測光量 λ_w の比を集光性能として求めた。ただし、No. 0 の PMT については故障 PMT との交換直後に集光ミラーが取り付けられ、No. 12 と No. 13 の PMT については集光ミラーも同時に取り付けられたため、集光ミラー取り付け前のシンチレータ球測定が行われなかった。また、No. 10 の PMT については、ゲインが小さいためにカット範囲内のシンチレータ球の発光によるイベント数が統計的に十分な量ではなかった。そのため、その 4 個の集光ミラーの集光性能は計算しなかった。一方、シミュレーションに対しても同様の解析を行い、全ての集光ミラーの集光性能を求めた。

最後に評価対象とする集光ミラーを選定した。KamLAND2-Zen 実験における観測対象の発光はミニバルーン内で起こるが、その光は各 PMT に $0 \text{ rad} \sim$ 約 0.22 rad の角度で入射する。一方、プロトタイプ検出器では、シンチレータ球が発光した光は中央の 4 個の集光ミラー (No. 4, 5, 8, 9) には約 $0.15 \text{ rad} \sim$ 約 0.22 rad の角度で、その他の外周の集光ミラーには約 $0.35 \text{ rad} \sim$ 約 0.43 rad の角度で入射する (図 7.3)。したがって、中央の 4 個の集光ミラー (No. 4, 5, 8, 9) は KamLAND2-Zen 実験における集光ミラーの集光性能を評価できる位置にあり、さらに直接光の検出量や反射光との選別が十分であるため、KamLAND2-Zen 実験への導入に向けた集光性能の絶対値を評価するとともに、測定とシミュレーションを比較することで性能評価した。一方、外周の集光ミラーは KamLAND2-Zen 実験における集光ミラーの集光性能を再現できない。さらに、直接光の入射角が浅いため直接光を十分に取り込めない上、タイベックシートに近く直接光と反射光の検出時間の差が小さいため直接光と反射光の選別が十分にできない。ただ、この外周の集光ミラーに関しては、KamLAND2-Zen 実験におけるミニバルーンより外側の発光に対する集光性能は再現できるため、より広い入射角に対する性能として測定とシミュレーションの比較によって性能評価を行った。

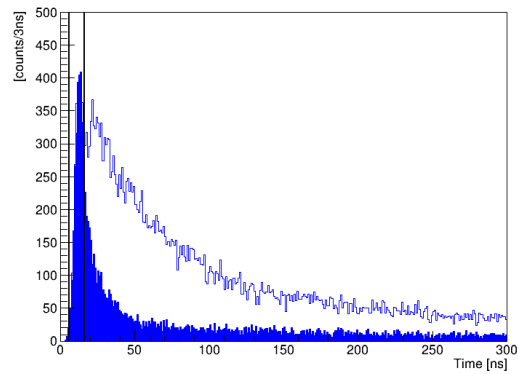


図 7.1 シミュレーション結果の Δt 分布の一例
(PMT : No. 4, 集光ミラー有、縦線 : カット範囲)

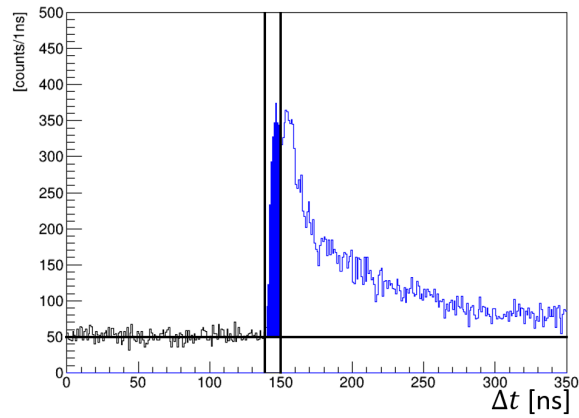


図 7.2 測定結果の Δt 分布の一例

(PMT : No. 4, 集光ミラー有、青色 : カット範囲内のシンチレータ球の発光によるイベント)

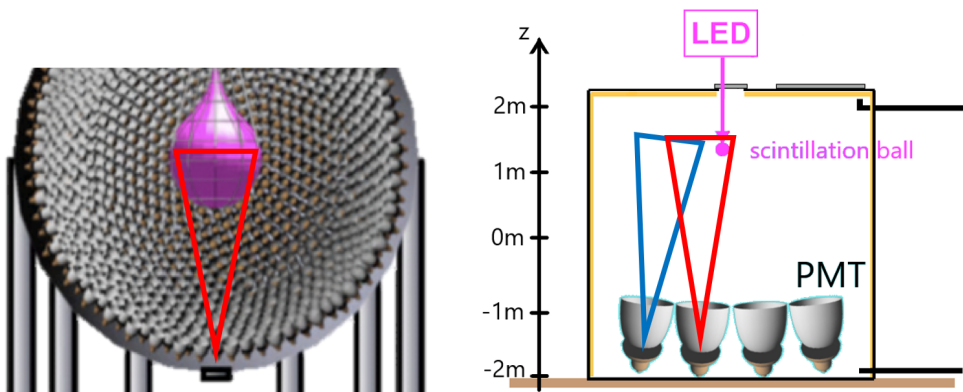


図 7.3 KamLAND2 検出器とプロトタイプ検出器の PMT への光の入射角の概略図

7.1.2 評価結果

シンチレーター球測定とシミュレーションのデータから求められた各 PMT の観測光量 $\lambda_w, \lambda_{w/o}$ と集光性能 $\frac{\lambda_w}{\lambda_{w/o}}$ を表 7.1 にまとめた。また、各 PMT の集光性能を図 7.4 に示した。シミュレーションの誤差は、先行研究より求められた集光ミラーの反射率の不定性と設置時の位置不定性を系統誤差とした [27]。測定の誤差は、統計誤差に加えて、 Δt 分布のカット範囲に含まれる反射光の寄与による観測光量の不定性を系統誤差とした。 Δt 分布のカット範囲に含まれる反射光の寄与による不定性 D は、集光ミラー有・無と直接光・直接光 + 反射光の組み合わせ全 4 通りの条件で計算したシミュレーションによる観測光量 λ を用いて以下の式から各集光ミラーについて求めた。

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{\lambda_{(\text{Direct}, w/)} }{\lambda_{(\text{Direct}, w/o)} } \\ r_2 &= \frac{\lambda_{(\text{Direct}, w/)} }{\lambda_{(\text{Direct}+\text{Indirect}, w/o)} } \\ D &= \frac{r_1 - r_2}{r_1} \end{aligned} \quad (7.5)$$

まず、中央の 4 個の集光ミラーの測定結果より、実際の集光性能の絶対値が 1.7 ~ 2.6 倍 (平均値: 2.06 ± 0.10 倍) となることを明らかにした。一方、シミュレーションの結果ではその平均値が 2.52 ± 0.09 倍となることから、実際の集光性能はシミュレーションに比べて $82 \pm 7\%$ の性能であることがわかった。また、外周の集光ミラーについては、シミュレーションの平均値の 1.82 ± 0.05 倍に対して、測定結果の平均値が 1.53 ± 0.14 倍であり、 $84 \pm 12\%$ の性能であることがわかった。実際の性能が約 20% 低い原因は、4.1.4 項で述べたように、実際の集光ミラーの反射率がシミュレーションに登録した理論値よりも 5% 以上低いことや、 Δt 分布のカット範囲に含まれる反射光の寄与による観測光量の不定性が最大 30% あること、ステンレスタンク底面板の歪みにより集光ミラーを取り付けた際のその位置・向きが正確でなく、本来の性能が発揮できていないことがあげられる。一方、中央の 4 個の集光ミラーによる集光性能の絶対値から、集光ミラーを KamLAND2 検出器に導入することでその観測光量が増えることを示すことができた。

表 7.1 集光ミラー有・無の観測光量と集光性能

PMT [No.]	測定			シミュレーション		
	$\lambda_w/$ [$\times 10^{-3}$ p.e.]	$\lambda_{w/o}$ [$\times 10^{-3}$ p.e.]	$\frac{\lambda_w/}{\lambda_{w/o}}$	$\lambda_w/$ [$\times 10^{-3}$ p.e.]	$\lambda_{w/o}$ [$\times 10^{-3}$ p.e.]	$\frac{\lambda_w/}{\lambda_{w/o}}$
0	1.16 ± 0.04	—	—	4.19 ± 0.19	2.29 ± 0.11	1.83 ± 0.12
1	1.31 ± 0.04	0.63 ± 0.03	2.08 ± 0.48	4.61 ± 0.21	2.40 ± 0.12	1.92 ± 0.13
2	1.65 ± 0.04	1.17 ± 0.03	1.41 ± 0.30	4.20 ± 0.19	2.35 ± 0.11	1.79 ± 0.12
3	1.56 ± 0.04	1.22 ± 0.04	1.28 ± 0.25	4.40 ± 0.20	2.32 ± 0.11	1.90 ± 0.13
4	2.28 ± 0.05	1.07 ± 0.03	2.13 ± 0.14	4.73 ± 0.21	1.82 ± 0.09	2.60 ± 0.18
5	2.52 ± 0.05	1.13 ± 0.03	2.23 ± 0.27	4.85 ± 0.22	2.04 ± 0.10	2.38 ± 0.16
6	1.79 ± 0.04	1.00 ± 0.03	1.79 ± 0.48	4.24 ± 0.19	2.39 ± 0.12	1.77 ± 0.12
7	1.74 ± 0.04	0.80 ± 0.03	2.17 ± 0.67	4.19 ± 0.19	2.46 ± 0.12	1.70 ± 0.11
8	1.14 ± 0.04	0.65 ± 0.03	1.74 ± 0.18	5.03 ± 0.22	1.93 ± 0.10	2.61 ± 0.17
9	1.27 ± 0.04	0.48 ± 0.02	2.62 ± 0.37	4.75 ± 0.21	1.90 ± 0.10	2.50 ± 0.17
10	—	—	—	4.62 ± 0.21	2.25 ± 0.11	2.05 ± 0.14
11	1.58 ± 0.04	1.00 ± 0.03	1.58 ± 0.31	4.33 ± 0.20	2.28 ± 0.11	1.90 ± 0.13
12	—	—	—	4.61 ± 0.21	2.26 ± 0.11	2.04 ± 0.14
13	—	—	—	5.06 ± 0.23	2.19 ± 0.11	2.31 ± 0.15

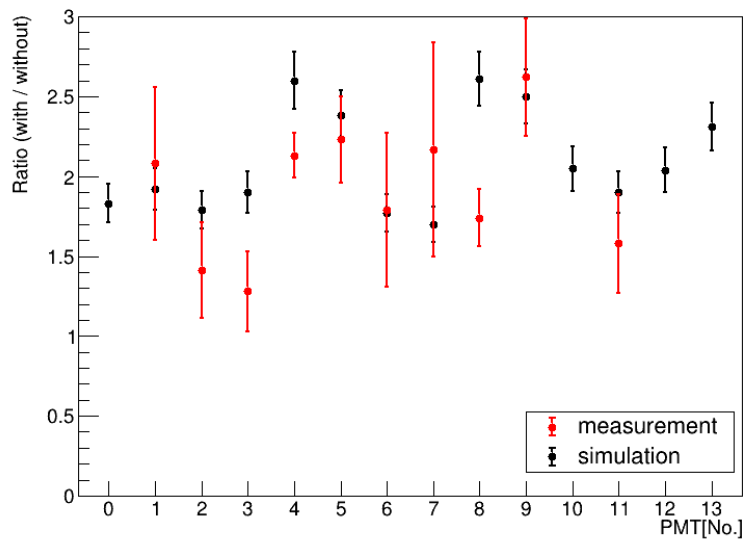


図 7.4 集光ミラーの集光性能

7.2 プロトタイプ検出器の観測光量

プロトタイプ検出器の観測光量の性能評価を行うために、放射線源測定とシミュレーションのデータを用いて、それぞれから求まる観測光量を比較した。また、6回の放射線源測定の結果から、長期安定性を評価した。

7.2.1 評価方法

性能評価を行うために、時期をずらして6回行った放射線源測定のデータを用いた。この放射線源測定では、主に以下の性能を組み合わせた性能が観測光量として求められる。

1. LAB-LS の発光量
2. 集光ミラーの集光性能
3. HQE-PMT の量子効率
4. 純水の透過率
5. タイバックシートの反射率

本研究での性能評価の対象は1,2,3のみであるため、観測光量に対する4,5の影響はできる限り抑えたい。そこで、タイバックシートでの反射が1回もなく、経路も短い直接光を選別し用いることで4,5の影響を低減し、さらに、放射線源測定直後に採取された検出器の純水の透過率を測定し比較対象のシミュレーションに登録することで4の影響をより小さくした。

そこでまず、直接光の選定を行った。シンチレータ球測定と異なり、放射線源測定では Δt が測定できないため、各PMTから出力されるPMT信号の波形を積分する際の積分範囲で直接光の選定を行う必要がある。そこで、シミュレーションで直接光 + 間接光の波形と直接光のみの波形を比較することで直接光のイベントを選定するのに適した波形の積分範囲を求めた。その結果、積分範囲は $t_n - 10 \text{ ns} \leq t \leq t_n + 25 \text{ ns}$ とした(図7.5)。ここで、 t_n は、No. n のPMTが出力する波形がスレッシュホールドを超えた時刻である。この積分範囲で直接光と間接光を完全に区別することはできないため、シミュレーションにおける直接光 + 間接光の観測光量と直接光のみの観測光量を比較することで、この積分範囲に含まれる間接光の信号の割合を求めた。その結果、8.2%以下であることがわかった。この間接光による寄与は測定データにも同様に含まれると考えられるため、測定データにおける間接光の寄与による不定性を8.2%とした。

次に、この積分範囲と校正した1p.e.ゲインの値を測定データに適用し、各PMTにおける観測光量を計算した。まず、以下の式より、波形を出力したPMT(No. n とする)のADC積分値を求めた(図7.6)。

$$(\text{ADC 積分値 [ch]}) = \sum_{t=t_n-10 \text{ [ns]}}^{t_n+25 \text{ [ns]}} (\text{ADC [ch]}) \quad (7.6)$$

この各PMT・各信号のADC積分値を1p.e.ゲインの値で割ることで、その信号で検出された光電子数が計算できる。ただし、1p.e.ゲインの値を求めるシンチレーション球測定では2回かけて

いた5倍アンプを、放射線源測定では1回だけに行っている。そこで、放射線源測定の解析では、シンチレーション球測定で求めた1p.e. ゲインの値を5倍アンプの増幅率で割った値を用いる必要がある。しかし、5倍アンプの増幅率は正確に5倍ではないため、その増幅率を測定した。本研究では5倍アンプのNIMモジュールを3台使用しているため、それぞれの増幅率を測定した。増幅率の測定は、一つのPMT信号を5倍アンプを2回かけた信号と1回だけかけた信号に分けて測定し、それぞれの波形をシンチレータ球測定と同様の解析をしてADC積分値を求め、そのADC積分値の比を増幅率として求めた。その結果、各5倍アンプの増幅率は表7.2のように求められ、5倍アンプの増幅率の平均値は5.126倍で、不定性は1.5%であることがわかった。この増幅率を用いて放射線源測定における1p.e. ゲインの値を計算し、その値で各PMT・各信号のADC積分値を割ることで、その信号で検出された光電子数 q_n を求めた。一方、シミュレーションに対しても同様の解析を行い、同一イベントで各PMTが検出する光電子数 q_n を求めた。

続いて、各PMT・各信号の測定開始からの経過時間 t_n を用いて、任意の200nsの間に6本以上のPMTで信号が検出された場合に、その200ns間で出力された各PMT信号の光電子数 q_n を足し合わせた合計光電子数 Q を求めた。一方、シミュレーションでは、同一イベントの光電子数 q_n を足し合わせた合計光電子数 Q を求めた。その合計光電子数を横軸としたヒストグラムに現れるピークをガウスフィットし、そのmean値を観測光量として求めた(図7.7)。

最後に、6回の放射線測定と各時期の純水透過率を反映したシミュレーションから求められた観測光量を比較することでプロトタイプ検出器の観測光量の性能評価を行った。また、6回の放射線測定から求められた観測光量の時間変化を見ることで、プロトタイプ検出器の長期安定性の評価を行った。ただし、4.6節で述べたようにNo. 1, 3のPMTは途中で故障し信号が出力されなくなったため、全ての観測光量の結果にはこの2本のPMTのデータを含めなかった。

表 7.2 5倍アンプの増幅率

5倍アンプ	使用したPMT[No.]	増幅率
1台目	0～4	5.144 ± 0.004
2台目	5～9	5.049 ± 0.003
3台目	10～13	5.184 ± 0.004

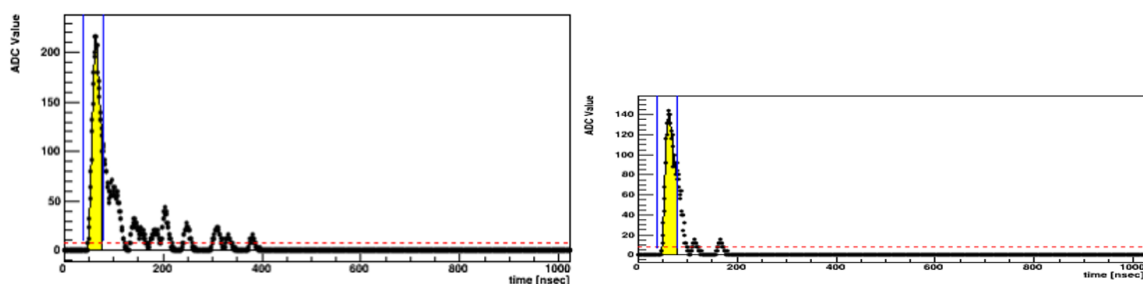


図 7.5 シミュレーションによる積分範囲の選定
(PMT : No.8、左 : 直接光 + 間接光、右 : 直接光のみ、縦線 : 積分範囲)

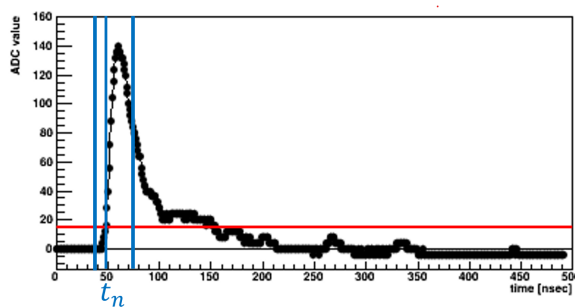


図 7.6 波形解析における積分範囲
(横線 : スレッシュホールド、縦線 : 積分範囲)

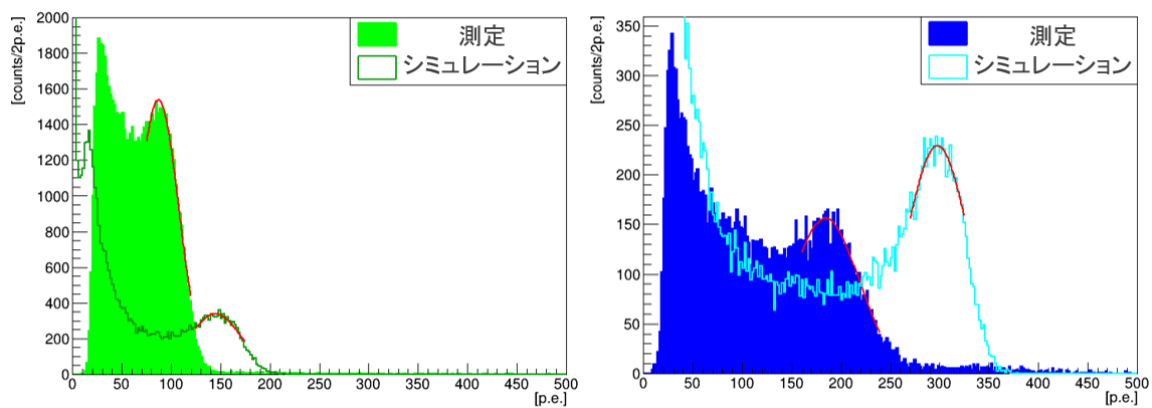


図 7.7 合計光電子数 (Q) 分布の一例

7.2.2 評価結果

放射線源測定とシミュレーションのデータから求められた観測光量を図 7.8 に示す。また、シミュレーションの誤差は、先行研究より求められたタイベックの反射特性の不定性と集光ミラーの反射率の不定性、設置時の位置不定性、LAB-LS の発光量の不定性、HQE-PMT の量子効率の不定性を系統誤差とした [27, 29]。測定の誤差は、統計誤差に加え、6.2 節で求めた 1p.e. ゲインの不定性と前述した間接光の寄与による不定性を系統誤差とした。

この結果より、プロトタイプ検出器で実際に測定される観測光量は、シミュレーションから計算される観測光量に対して約 40% 以内で一致することが明らかとなった。観測光量が低い原因としては、実際の集光ミラーの集光性能がシミュレーションより約 20% 低いことや、HQE-PMT の量子効率に約 10% の不定性があること、シミュレーションにより選定した積分範囲に間接光が約 8% 含まれており、それが不定性となること、4.6 節で述べたような検出器に発生した問題が影響を与えていることなどが考えられる。今後、実際の集光ミラーの集光性能をシミュレーションに登録し、シミュレーション結果の観測光量を修正する必要がある。また、さらなる研究で各不定性を低下させ、それぞれの観測光量を真の値に近づける必要がある。

また、プロトタイプ検出器の長期安定性については、測定された観測光量が 1 年にわたって $\pm 2\%$ 以内で安定しており、プロトタイプ検出器の集光性能が非常に安定していることが判明した。この結果は、より長期間の運用が予定されている KamLAND2-Zen 実験で観測光量を維持できることを示す重要な結果である。

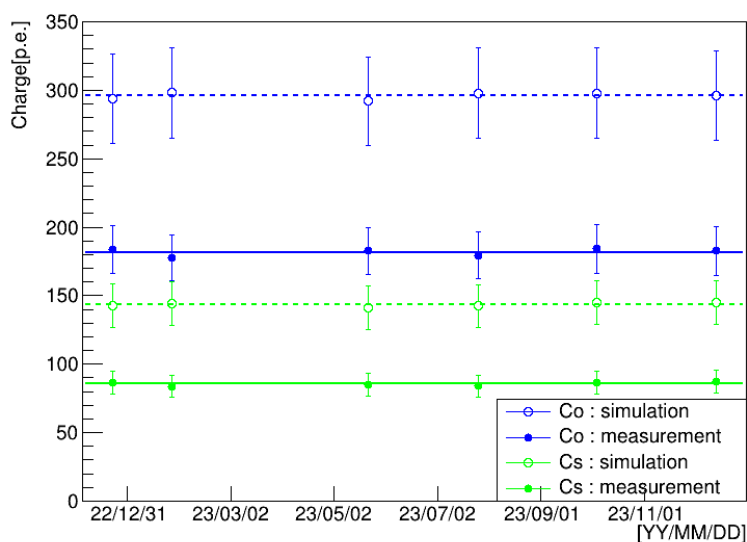


図 7.8 シミュレーションと測定データの集光量
(シミュレーションは純水透過率により増減している。)

第 8 章

まとめ

KamLAND-Zen 実験から KamLAND2-Zen 実験への複数の改善案のうち、HQE-PMT、集光ミラー、LAB-LS の導入による集光性能の向上を事前に実測で確認するために、KamLAND2 プロトタイプ検出器が建設された。本研究では、プロトタイプ検出器の較正手法の開発及び、その手法を用いた較正を行った。そして、その較正結果を適用したプロトタイプ検出器の集光性能の評価を行った。

プロトタイプ検出器の建設・運用

2021 年 11 月から約 1 年間でプロトタイプ検出器を建設し、その後 2024 年 1 月までの約 1 年にわたって検出器を運用した。この 2 年間の間に、ハードウェアに関する複数の問題が発生した。その中には、KamLAND2 検出器に導入するにあたって重大な問題になるようなものもあり、今後、さらなる調査・研究が必要である。

開発した較正の結果

プロトタイプ検出器の性能評価をするにあたって、まずプロトタイプ検出器の較正を行う必要がある。そこで、プロトタイプ検出器を実際に使った測定とシミュレーションによる計算で得られたそれぞれのデータを用い、それぞれを比較することでプロトタイプ検出器の較正を行った。まず、シミュレーションに登録するタイベックシートの水中の反射率と反射モデルを変更し、シンチレータ球測定とシミュレーションの Δt 分布の形を一致させることで、実際のタイベックシートの反射率及び反射モデルを見積もった。その結果、反射率が $90 \pm 3\%$ (@ 400 nm) で反射モデルが乱反射の場合に一致することがわかった。この反射率及び反射モデルは以降のシミュレーションに適用した。また、同条件で約 2 か月おきに行われた 5 回のシンチレータ球測定で求めた 1p.e. ゲインの値の結果から、各 PMT の 1p.e. ゲインの不定性及び時間変化を求めた。その結果から、ゲインの不定性が $\pm 4.8\%$ であることを明らかにした。時間変化はその他の測定の解析における光電子数の計算に適用した。

集光ミラーの集光性能の評価

シンチレータ球測定の結果を用いて集光ミラーの有無による各 HQE-PMT の観測光量を比較し、集光ミラーのみの集光性能を評価した。その際、KamLAND2-Zen 実験で使用した際の集光性能を見積もるため、シミュレーションを用いて直接光の信号を選定し、さらに、KamLAND2-Zen 実験を再現する位置にある PMT を選定した。その結果、集光性能として HQE-PMT の観測光量が 1.7 ～ 2.6 倍となることを明らかにした。また、実際の集光性能はシミュレーションに比べて $82 \pm 7\%$ の性能であることがわかった。今後、実際の集光ミラーの反射率をシミュレーションに登録することでそれぞれの観測光量をより一致させられると考えている。これらの結果は、集光ミラーを KamLAND2 検出器に導入することでその観測光量が増えることを示す結果である。

プロトタイプ検出器の集光性能の評価

放射線源測定の結果を用いて各装置の性能が合わさったプロトタイプ検出器全体の集光性能及びその性能の長期安定性を評価した。その際、測定結果における純水透過率とタイベックシーートの反射率の影響を抑え、性能評価の対象である LAB-LS の発光量、集光ミラーの集光性能、HQE-PMT の量子効率による効果の割合を増やすために、シミュレーション結果から直接光を選別できる解析条件を見積もり、実際の測定の結果から直接光を選別した。その結果、プロトタイプ検出器で実際に測定される観測光量は、シミュレーションから計算される観測光量に対して約 40% 以内で一致することが明らかとなった。今後、実際に測定された集光ミラーの集光性能をシミュレーションに登録するほか、さらなる研究で各不定性を削減させることで、それぞれの観測光量をより一致させられると考えている。一方、測定された観測光量は、1 年にわたって $\pm 2\%$ 以内で安定しており、プロトタイプ検出器の集光性能が非常に安定していることが判明した。この結果は、より長期間の運用が予定されている KamLAND2-Zen 実験で観測光量を維持できることを示す重要な結果である。

謝辞

本論文の執筆及び研究活動にあたり、たくさんの方々にご指導、ご協力いただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

本研究の指導教員である清水先生には、研究の方針決定から論文の執筆に至るまでの約2年間にわたって大変多くのご指導をいただきました。物理学の素粒子分野における実験や解析の手法に関する知識が乏しかった私がここまで研究を進めてこられたのは、研究相談に親身になって対応していただいたからこそです。また、一つの検出器の建設から運用、解体までの経験やたくさんの方の研究発表の機会をいただきました。ニュートリノ科学研究センターのセンター長の井上先生には、KamLAND-Zen 実験の一員に加えていただき、大変貴重で恵まれた環境で研究することができました。さらに、先生の鋭いご指摘によって本研究をより良いものにすることができました。岸本先生には、進捗ミーティングにてたくさんの方の本質を突いた助言をいただき、研究において必要となる観点や重要な思考回路を学ぶことができました。

また、本研究は多くの方々のご協力により建設された KamLAND2 プロトタイプ検出器を用いて測定されたデータの結果をまとめたものです。本検出器に携わってくださったセンターの教員の皆様、技術職員の皆様、先輩・同期・後輩の皆様、神岡で研究を支えてくださった皆様、本当に多くの方々のおかげで自分の研究をこのような形でまとめることができました。重ねて御礼申し上げます。

最後に、陰ながら支えてくださった家族のおかげで研究に集中することができました。ありがとうございました。そして、本論文を執筆中に他界した祖父に捧げます。

参考文献

- [1] B. T. Cleveland et al., “Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector”, *Astrophys. J* **496**, 505 (1998) , DOI: [10.1086/305343](https://doi.org/10.1086/305343).
- [2] K. Hirata, K. Inoue, T. Ishida et al., “Observation of a small atmospheric ν_μ/ν_e ratio in Kamiokande”, *Physics Letters B* **280**, 146 (1998) , DOI: [10.1016/0370-2693\(92\)90788-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(92)90788-6).
- [3] Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichihara et al., “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos”, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562–1567 (1998) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.81.1562](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562).
- [4] S. Ahmed, A. Anthony, E. Beier et al., “Measurement of the Total Active ^8B Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 181301 (2004) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.92.181301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.181301).
- [5] A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago et al., “Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND”, *Phys. Rev. D* **88**, 033001 (2013) , DOI: [10.1103/PhysRevD.88.033001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.033001).
- [6] M. Aker, K. Altenmüller, M. Arenz et al., “An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 221802 (2019) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.123.221802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.221802).
- [7] Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y. et al., “Planck 2018 results - VI. Cosmological parameters”, *A&A* **641**, A6 (2020) , DOI: [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910).
- [8] T. Yanagida, “Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos”, *Progress of Theoretical Physics* **64**, 1103–1105 (1980) , DOI: [10.1143/PTP.64.1103](https://doi.org/10.1143/PTP.64.1103).
- [9] F. T. A. III, S. R. Elliott, and J. Engel, “Double Beta Decay, Majorana Neutrinos, and Neutrino Mass”, *Rev.Mod.Phys.* **80**, 481 (2008) , DOI: [10.1103/RevModPhys.80.481](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.481).
- [10] M. Fukugita and T. Yanagida, “Baryogenesis Without Grand Unification”, *Physics Letters B* **174**, 45–47 (1986) , DOI: [10.1016/0370-2693\(86\)91126-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91126-3).
- [11] D. Q. Adams, C. Alduino, K. Alfonso et al., “Improved Limit on Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{130}Te with CUORE”, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 122501 (2020) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.124.122501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.122501).
- [12] M. Agostini, G. R. Araujo, A. M. Bakalyarov et al., “Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- β Decay”, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 252502 (2020) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.125.252502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.252502).
- [13] G. Anton, I. Badhrees, P. Barbeau et al., *Phys. Rev. Lett.* **123**, 161802 (2019) , DOI:

- [10.1103/PhysRevLett.123.161802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.161802).
- [14] K. Eguchi, S. Enomoto, K. Furuno et al., “First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance”, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 021802 (2003) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.90.021802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.021802).
- [15] A. Gando, Y. Gando, K. Ichimura et al., “Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements”, *Nature Geoscience* **4**, 647–651 (2011) , DOI: [10.1038/ngeo1205](https://doi.org/10.1038/ngeo1205).
- [16] A. Gando, Y. Gando, T. Hachiya et al., “Search for Majorana Neutrinos near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 082503 (2016) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.082503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.082503).
- [17] S. Abe, S. Asami, M. Eizuka et al., “Search for Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen”, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 051801 (2023) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.130.051801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.051801).
- [18] 小原 修平, “KamLAND-Zen における ^{214}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研究”, 修士論文, 東北大学 (2015) .
- [19] 後藤 杏奈, “KamLAND2-Zen 実験の液体シンチレータに導入する最適な波長変換剤の選定と濃度決定”, 修士論文, 東北大学 (2022) .
- [20] I. Shimizu, “Search for Majorana neutrinos”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, ptad038 (2023) , DOI: [10.1093/ptep/ptad038](https://doi.org/10.1093/ptep/ptad038).
- [21] W. Ling-Yu, L. Hao-Qi, Y. Chang-Gen et al., “Study of Tyvek reflectivity in water”, *Chinese Physics C* **36**, 628 (2012) , DOI: [10.1088/1674-1137/36/7/011](https://doi.org/10.1088/1674-1137/36/7/011).
- [22] 尾崎 秀義, “カムランド外水槽チェレンコフ検出器の刷新と性能向上”, 修士論文, 東北大学 (2016) .
- [23] 朝倉 康太, “KamLAND-Zen 次期計画へ向けた新型 PMT の性能研究”, 修士論文, 東北大学 (2015) .
- [24] 三本杉 洗斗, “KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーの形状最適化”, 修士論文, 東北大学 (2021) .
- [25] 立花 創, “KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーの研究開発”, 修士論文, 東北大学 (2015) .
- [26] 中島 梨花, “KamLAND2-Zen 実験へ向けた集光ミラーの研究と液体シンチレータの性能評価”, 修士論文, 東北大学 (2024) .
- [27] 吉田 雄貴, “KamLAND2 プロトタイプ検出器におけるシミュレーションの構築と極低放射能分析感度の評価”, 修士論文, 東北大学 (2022) .
- [28] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al., “Geant4—a simulation toolkit”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **506**, 250–303 (2003) , DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- [29] K. Abe, K. Abe, H. Aihara et al., “Hyper-Kamiokande Design Report”, *physics.ins-det*, 107 (2018) , DOI: [arXiv:1805.04163v2](https://arxiv.org/abs/1805.04163v2).