

修士論文

海洋底ニュートリノ検出器OBD実現に向けた
小型プロトタイプ検出器の開発研究

東北大学理学研究科
物理学専攻

荒木 拓登

2024年

概要

地球上で起こる様々な自然現象は地球内部から放出される熱により駆動される。地球内部より放出される熱は、地球誕生時からの残熱の熱と地球内部の放射性元素由来の放射性熱に分けることができるが、それぞれの絶対量はわかっていない。放射性熱源元素は、自身の崩壊の際に熱と共に、地球ニュートリノと呼ばれる反電子ニュートリノを放出する。この地球ニュートリノの量は放射性熱量と直接的な関係があり、地球内部の発熱量を決定するための重要な役割を果たす。

OBD(Ocean Bottom Detector) は海洋底に設置する液体シンチレータ検出器である。海洋底という低バックグラウンド環境、移動式であることなどの強みを活かし、現存する大陸上の検出器では観測が難しいマントル由来地球ニュートリノの直接観測による地球内放射性熱量の決定を目指す夢の検出器である。2019 年に東北大学と海洋研修開発機構との共同研究が開始され、今日までに多くの機関、企業との協力関係を構築し、大型 OBD 実現に向けて様々な開発・研究がされてきた。現在は、小型プロトタイプ検出器の開発が行われている。

本研究では、小型プロトタイプ検出器の構成要素の一つである圧力補償機構の開発研究、地上での小型プロトタイプ検出器の初の組み立てと稼働、シミュレーションによる小型プロトタイプ検出器のミュオンレートの算出といった、小型プロトタイプ検出器の深海稼働に必要な多面的な研究を行った。

本論文は 8 章構成になっており、
第 1 章では、素粒子とニュートリノの性質について、
第 2 章では、ニュートリノを用いた新たな学問であるニュートリノ地球科学について、
第 3 章では、OBD の目的と特徴について、
第 4 章では、現在開発中の小型プロトタイプ検出器について、
第 5 章では、圧力補償機構の開発研究について、
第 6 章では、小型プロトタイプ検出器の稼働実験について、
第 7 章では、小型プロトタイプ検出器におけるミュオンシミュレーションについて、
そして第 8 章では、本研究のまとめと OBD の今後の展望について記述する。

目次

第1章	素粒子物理学	1
1.1	素粒子標準模型	1
1.2	ニュートリノ	2
1.2.1	ニュートリノの発見	2
1.2.2	ニュートリノ振動	3
第2章	ニュートリノ地球科学	7
2.1	地球内部の層構造と放射性熱源分布	7
2.2	地球内熱量モデル	9
2.3	地球ニュートリノ	10
2.4	地球ニュートリノの観測の現状	11
第3章	海洋底ニュートリノ検出器 OBD	15
3.1	OBD プロジェクトの発足	15
3.2	OBD の強み	17
3.3	1.5kt サイズ検出器	20
3.3.1	設置場所	20
3.3.2	構造	22
3.3.3	ニュートリノ検出の原理	25
3.3.4	マントル由来地球ニュートリノの観測シミュレーション	27
3.4	OBD の他に他分野への応用	28
第4章	小型プロトタイプ検出器	30
4.1	小型プロトタイプ検出器の目的	30
4.2	初島沖 深海底総合観測ステーション	31
4.3	小型プロトタイプ検出器の構成要素	33
第5章	圧力補償機構の開発	39
5.1	深海環境における液体シンチレータの体積変化	40
5.2	圧力補償機構に求められる条件	42
5.3	素材の選定	43
5.3.1	実験 I 液体シンチレータによる変性があるかの検証	43

5.3.2	実験Ⅱ 素材を浸した LAB の透過率測定	44
5.3.3	実験Ⅲ潰れ特性の測定	46
5.3.4	実験Ⅳ LAB、低温による潰れ方の変化の検証	48
5.4	耐圧試験	50
5.4.1	圧力補償機構の構造	50
5.4.2	構造的耐圧性と機能的耐圧性	51
5.4.3	加圧タンク	51
5.4.4	耐圧試験 1 回目	53
5.4.5	耐圧試験 2 回目	54
5.4.6	耐圧試験 3 回目	56
5.4.7	耐圧試験 4 回目	59
5.4.8	耐圧試験 5 回目	61
5.5	まとめと考察	66
第 6 章	小型プロトタイプ検出器の稼働	68
6.1	耐水圧シールド付き光検出器モジュールの組み立て	68
6.1.1	構成要素	68
6.1.2	組み立て手順	69
6.1.3	光検出器モジュールの設置	70
6.2	液体シンチレータの作製と導入	72
6.3	初稼働	75
6.4	本課題実験で生じた問題	79
第 7 章	小型プロトタイプ検出器におけるミュオンシミュレーション	81
7.1	宇宙線ミュオンのシミュレーション	81
7.2	深海 1km における宇宙線ミュオンのフラックスと角度分布	82
7.3	小型プロトタイプ検出器でのミュオンレート	83
第 8 章	結論と今後の展望	87
8.1	結論	87
8.2	小型プロトタイプ検出器稼働までの計画	87
	参考文献	90

目次

1.1	素粒子標準模型	1
1.2	^{64}Cu のベータ崩壊での電子 (陽電子) の連続したエネルギー Spektrum [1] . .	2
1.3	太陽内部の主要な核融合反応 p-p チェイン	3
1.4	KamLAND による原子炉ニュートリノ振動観測 [2]	4
2.1	地球内構造	8
2.2	地球内放射性熱量モデル	10
2.3	KamLAND による地球内放射性熱量モデルの推定 [3]	12
2.4	KamLAND における距離ごとの地球ニュートリノ寄与 [4]	13
2.5	Borexino による地球内放射性熱量モデルの推定 [5]	14
3.1	Hanohano 10kt 検出器	16
3.2	地球ニュートリノフラックスとマントル寄与の分布図 [7]	17
3.3	ハワイ沖 深海 4000m でのエネルギー Spektrum [8]	18
3.4	各検出器設置地点でのミューオンフラックス [9]	19
3.5	海底設置のイメージ	19
3.6	西経 161 度に沿った地点でのマントル由来地球ニュートリノフラックスの予測 値 [7]	20
3.7	マントル由来地球ニュートリノフラックス予測 [7]	21
3.8	海底ケーブルの敷設状況 [10]	21
3.9	OBD イメージ図	22
3.10	内部検出器の構造	23
3.11	逆ベータ崩壊イベント	25
3.12	地球ニュートリノのエネルギー Spektrum [12]	26
3.13	中性カレント反応 (左)、荷電カレント反応 (右) の Feynman diagram	27
3.14	1.5ktOBD によるマントル地球ニュートリノ観測感度 [9]	28
3.15	LLSVP(Large Low Shear Velocity Provinces) [13]	29
4.1	深海総合観測ステーション	32
4.2	小型プロトタイプ検出器 完成系	33
4.3	ステンレス容器	34
4.4	液体シンチレータタンク	35

4.5	液体シンチレータタンク設計図	35
4.6	低温での液体シンチレータの振る舞い	37
4.7	温度、PPO 量による発光量変化 [9]	37
4.8	D-Egg [16]	38
5.1	圧力補償機構開発の手順	39
5.2	液体シンチレータの密度測定結果	41
5.3	Hanohano で考案された Compensator bag [6]	43
5.4	素材の選定プロセス	43
5.5	LAB 耐性実験Ⅱ結果	46
5.6	荷重測定器	47
5.7	荷重測定結果	47
5.8	加重後のチューブの形状	48
5.9	実験Ⅳ結果	49
5.10	圧力補償機構	50
5.11	チューブ継手の構造 [19]	51
5.12	加圧タンク [20]	52
5.13	試験対象 1 回目 加圧対象	53
5.14	水と作動油の分離性	54
5.15	試験対象 2 回目 加圧対象	55
5.16	加圧試験 2 回目 結果	56
5.17	インサート A、インサート B	57
5.18	ステンレス管 結果	58
5.19	CAD シミュレーションによる応力分布	58
5.20	インサート A 結果	59
5.21	樹脂インサート B 結果	59
5.22	耐圧試験 4 回目 加圧対象	60
5.23	耐圧試験 4 回目 結果	61
5.24	液体シンチレータタンク系	62
5.25	PTFE チューブと PFA チューブの潰れ方	63
5.26	水中カメラ	64
5.27	撮影セットアップ	64
5.28	加圧中の圧力補償系の様子	65
5.29	圧力補償系 完成版	66
6.1	光検出器モジュール	70
6.2	光検出器モジュールの台座	70
6.3	光検出器モジュールの固定	71
6.4	純化前後の LAB 透過率	72

6.5	LAB 純化の様子	73
6.6	窒素バブリングに用いた装置系	74
6.7	窒素バブリング・導入方法	75
6.8	測定セットアップ	76
6.9	水の中の検出器	77
6.10	遮蔽の様子	77
6.11	PMT1 からの出力電荷量分布	78
6.12	PMT1 の光電面の様子	79
6.13	ケーブルが干渉している様子	80
7.1	深海 1km におけるエネルギー分布	82
7.2	深海 1km における天頂角分布	82
7.3	ミューオンレート算出のためのセットアップ	83
7.4	Track length	85
7.5	Energy deposit	85
7.6	海底深度とミューオンレート	86
8.1	新青丸	89

第1章 素粒子物理学

1.1 素粒子標準模型

物質を形作る最小単位のことを素粒子と呼ぶ。

現在、素粒子理論の基本的な枠組みを標準模型とよぶ。標準模型には 17 の素粒子が登場し、4つの基本的相互作用のうち電磁気力、強い力、弱い力によって引き起こされる素粒子反応の法則がまとめられている。標準模型は実験事実と理論体系を統合した結果、確立し現在知られているほとんどの素粒子の諸現象は標準模型により説明可能である。

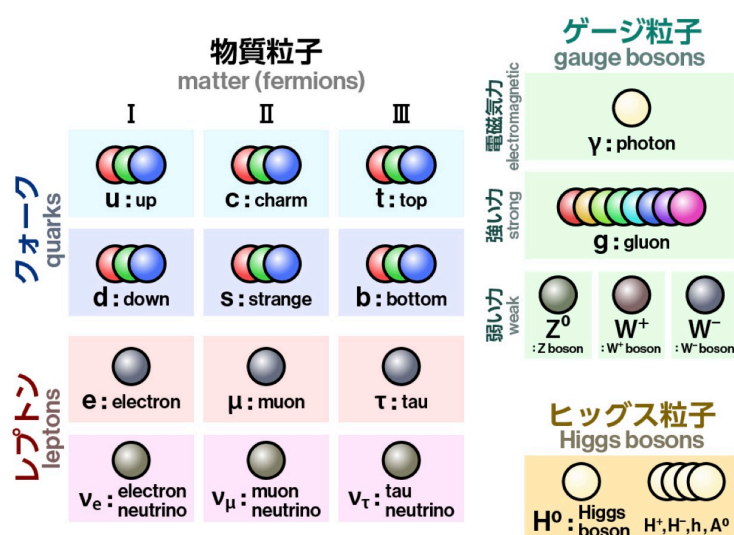


図 1.1: 素粒子標準模型

物質の構成要素であるクォークとレプトンはそれぞれ6つの種類(フレーバー)が存在し、質量の違いにより3つの世代に分類されている。ゲージ粒子は光子、グルーオン、ボソンの三種類が存在し、それぞれ電磁気力、強い力、弱い力を媒介する。ヒッグス粒子は、弱い力を媒介する粒子と物質粒子に質量を与える。これら標準模型に登場する粒子は、実験的にすべて発見されている。

1.2 ニュートリノ

ニュートリノは標準模型に登場するフェルミオンであり、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの世代の異なる3種類がある。宇宙はニュートリノで溢れており、例えば1立方センチメートルの空間には約300個ものニュートリノが満たしている。発生源も様々で、星が生まれる時、原子炉、地球の内部、などから放出される。ニュートリノは電荷を持たず、質量も非常に小さいため、物質と相互作用をほとんど起こさない。ニュートリノそのものの性質を研究するだけでなく、物質とほとんど干渉しない性質を持つニュートリノを道具として、天文学や地球科学分野に応用する研究も行われている。

1.2.1 ニュートリノの発見

ニュートリノの存在は1930年にW. パウリによって予言された。当時、原子核が β 崩壊する際に放出される電子のエネルギーが連続分布し、エネルギー保存則を破っているように見えるとされていた(1.2)。パウリはこの現象を説明するために、質量を持たず、電氣的に中性な粒子「ニュートロン」が足りない分のエネルギーを担っているという説を提案した。このニュートロンが今日のニュートリノであった。

1956年、F. ライネルとC. コーワンが原子炉からの反電子ニュートリノを液体シンチレータにカドミウムを溶かした検出器を用いた観測を成功した。検出器内で反電子ニュートリノと陽子が反応して生成した陽電子を観測する他、カドミウムが生成した中性子の捕獲時に放出する数MeVの γ 線も検出したのである。

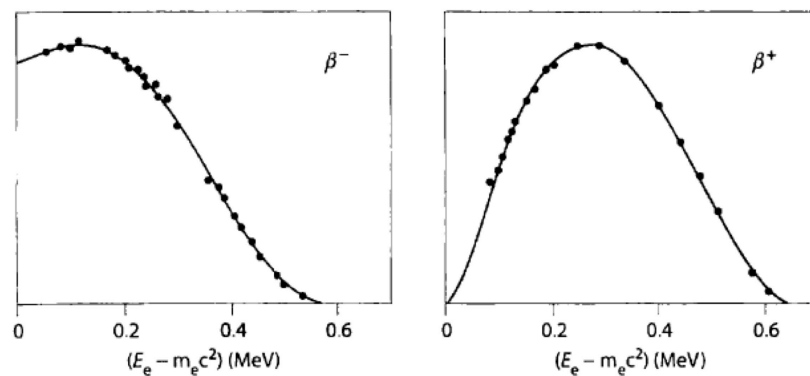


Figure 8.1 Energy distribution of the electron and positron in ^{64}Cu decay. The low energy part of the electron spectrum is enhanced due to the deceleration caused by the nuclear attraction. For the positron one has the opposite effect.

図 1.2: ^{64}Cu のベータ崩壊での電子 (陽電子) の連続したエネルギースペクトル [1]

1.2.2 ニュートリノ振動

標準模型の枠組みの中では、ニュートリノの質量は厳密に 0 と仮定されている。ニュートリノのフレーバーが移り変わるニュートリノ振動の発見はこの仮定を覆す証拠となった。

太陽ニュートリノの問題とニュートリノ振動

太陽では水素を原料とした核融合反応が起こっており、我々が普段感じる太陽のエネルギーが放出されるとともに、ニュートリノも放出されている

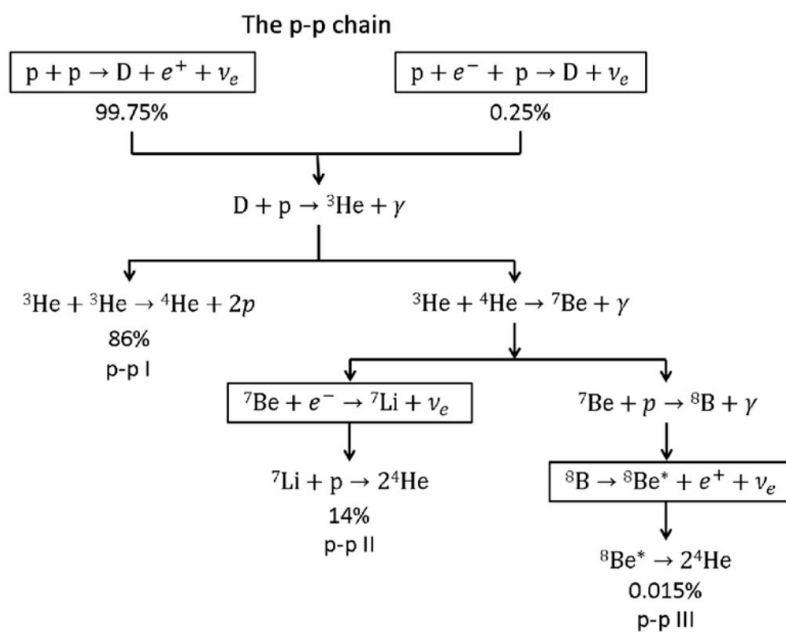
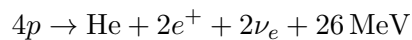


図 1.3: 太陽内部の主要な核融合反応 p-p チェイン

太陽内部の核融合反応において、正味の過程は次の式で表現することができる。



エネルギーの放出量とニュートリノ放出量は直接的な関係があり、地球に届く太陽のエネルギーから太陽ニュートリノのフラックスを計算することができる。

太陽ニュートリノを観測する実験は 1968 年から Davis らによって始められた。その実験によって得られた、太陽ニュートリノフラックスの測定値は、理論値の 1/3 程度しかなかった。太陽ニュートリノのフラックスの理論値と実測値の差は「太陽ニュートリノ問題」として長年物理学者を悩ませる現象であった。これに対し、牧二郎、中川昌美、坂田昌一によって、ニュートリノ振動の理論が提唱された。この理論では、太陽から放出された電子ニュートリノが地

球に到達するまでの間に他の世代のニュートリノに変化したため観測される電子ニュートリノの量が減ったとして、太陽ニュートリノ問題を説明した。

その後、1988年にスーパーカミオカンデ実験によってニュートリノ振動の存在が実験で確認され、ニュートリノ振動の実在が明らかになった。この実験では、大気ニュートリノフラックスの天頂角分布を測定し、ニュートリノ振動を仮定しないモデルからの予測値よりも ν_μ が減少していることを確認し、ニュートリノ振動の存在を示している。2002年にはSNO実験によって太陽ニュートリノ中の全フレーバーの総量と ν_e の量が測定され、総量が標準太陽模型の予想と一致する一方 ν_e の量が減少していたため、 ν_e が他のフレーバーに変化していることを確認した。また、原子炉ニュートリノの観測により KamLAND 実験が初めてニュートリノ振動の明確な振動パターンを確認した。

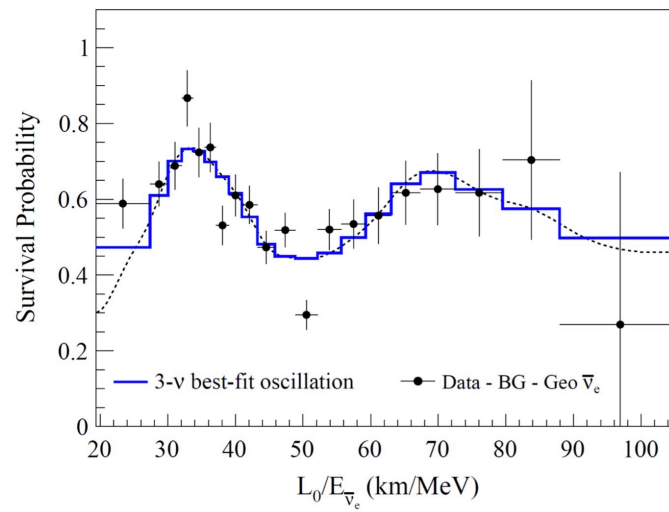


図 1.4: KamLAND による原子炉ニュートリノ振動観測 [2]

ニュートリノ振動の理論

次に真空中のニュートリノ振動の理論を説明する。

ニュートリノの世代 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) が以下のような関係を持つと仮定する。

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

$U_{\alpha i}$ は MNSP (牧-中川-坂田-Pontecrvo) 行列と呼ばれ、以下のようなユニタリ行列で表される。

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ここで $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ 、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ である。 θ_{ij} は混合角と呼ばれる。また δ_{CP} は CP 位相と呼ばれるパラメータであり、CP 対称性の破れ具合を決定する。質量固有状態の時間発展はシュレディンガー方程式、

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_i\rangle = E_i |\nu_i\rangle$$

に従う。よって、

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

となる。時刻 t で $|\nu_\alpha\rangle$ であったニュートリノの時間発展は

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

と書け、時刻 t で $|\nu_\beta\rangle$ が観測される確率は

$$\begin{aligned} P(\alpha \rightarrow \beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu(t) \rangle|^2 \\ &= \sum_{i,j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i(E_i - E_j)t} \\ &= \sum_i |U_{\alpha i} U_{\beta i}|^2 + \sum_{i \neq j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i(E_i - E_j)t} \\ &= \delta_{\alpha\beta} + \sum_{i \neq j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \left(e^{-i(E_i - E_j)t} - 1 \right) \end{aligned}$$

となる。第 2 項を $i > j$ 、 $i < j$ に分けて考えると虚部は i と j の入れ替えに対して反対称になっておりキャンセルされるので実部のみ考えて、

$$\begin{aligned} P(\alpha \rightarrow \beta) &= \delta_{\alpha\beta} + 2 \sum_{i>j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* (\cos((E_i - E_j)t) - 1) \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \sin^2 \left(\frac{(E_i - E_j)t}{2} \right) \end{aligned}$$

ニュートリノは質量が非常に小さいのでニュートリノのエネルギーは相対論的近似を用いて、

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E}$$

となる。よって i 番目と j 番目の質量二乗差を Δm_{ij}^2 として

$$P(\alpha \rightarrow \beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 t}{4E} \right)$$

となる。ニュートリノが質量を持たないとこの振動は生じないため、ニュートリノ振動の存在はニュートリノの質量がゼロでないことの証拠となる。前述の通りニュートリノ振動は実験的に確認されており、ニュートリノの質量をゼロとする標準模型を超える新たな理論を構築する必要性が生じている。

第2章 ニュートリノ地球科学

地震、火山の噴火、多様な気候、大陸移動……。私たちが居住する地球は Gaia theory が主張するように、まさに生きた星である。地球を生きた星たらしめる様々な自然現象は、地球内部の熱によって駆動されている。地球は巨大な熱機関であり、熱によって地球は長い時間をかけて進化してきた。約 46 億年前に地球が誕生してから、どのような進化を遂げてきたのか、これからどのように進化していくのか、それらのことを理解するためには、現在の地球内部の熱収支がどれだけのなのか、熱源はどれだけあり、どこにあるのかを理解することが非常に重要である。地表の複数地点での測定により、地球表面全体からの熱流量は約 $46 \pm 3 \text{ TW}$ と推定されている。2020 年の世界の発電電力量が 26.7 兆 kWh = 7.4 TW（経済産業省資源エネルギー庁）であることから、膨大な熱が地球内部から放出されていることがわかる。地球内部からの熱収支は地球誕生時からの「原始の熱」と地球を構成する物質に含まれる放射性元素 (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K など) 由来の「放射性熱」を合わせたものと考えられるが、それらの比率はわかっていない。放射性元素由来の熱の総量は、地球科学的手法によりいくつかの推定値が見積もられている。しかしその手法は太陽系惑星の素材と考えられている隕石（コンドライト隕石）と地球内部の岩石（技術的に採取できる深さのもの）の分析、地球内部の環境を再現する高圧実験などにより推定された値で、直接的な測定はできていない。

2005 年、KamLAND が地球内部の放射性元素由来の「地球ニュートリノ」を観測した。地球ニュートリノの世界初観測は、物質とほとんど相互作用しない性質を持つニュートリノを道具として地球内部の情報を直接得ることを試みる「ニュートリノ地球科学」創出の契機となった。

2.1 地球内部の層構造と放射性熱源分布

図 2.1 は地球内部の構造を示している。半径 6400km に及ぶ地球内部の構造は地震波速度の観測により内側より、核、マントル、地殻のように階層構造であると比較的良好に知られている。

一方、地球内部の放射性熱源がどこにどれだけのかなどの化学組成についてはよく知られていない。放射性熱元素である U や Th などのイオン半径が大きい元素は不適合元素と呼ばれ、不適合元素が含まれる岩石が溶融する際に液相側に濃縮される傾向がある。そのため U や Th などは基本的には核にはほとんど存在せず、表層になるにつれて濃度が高くなると考えられている。

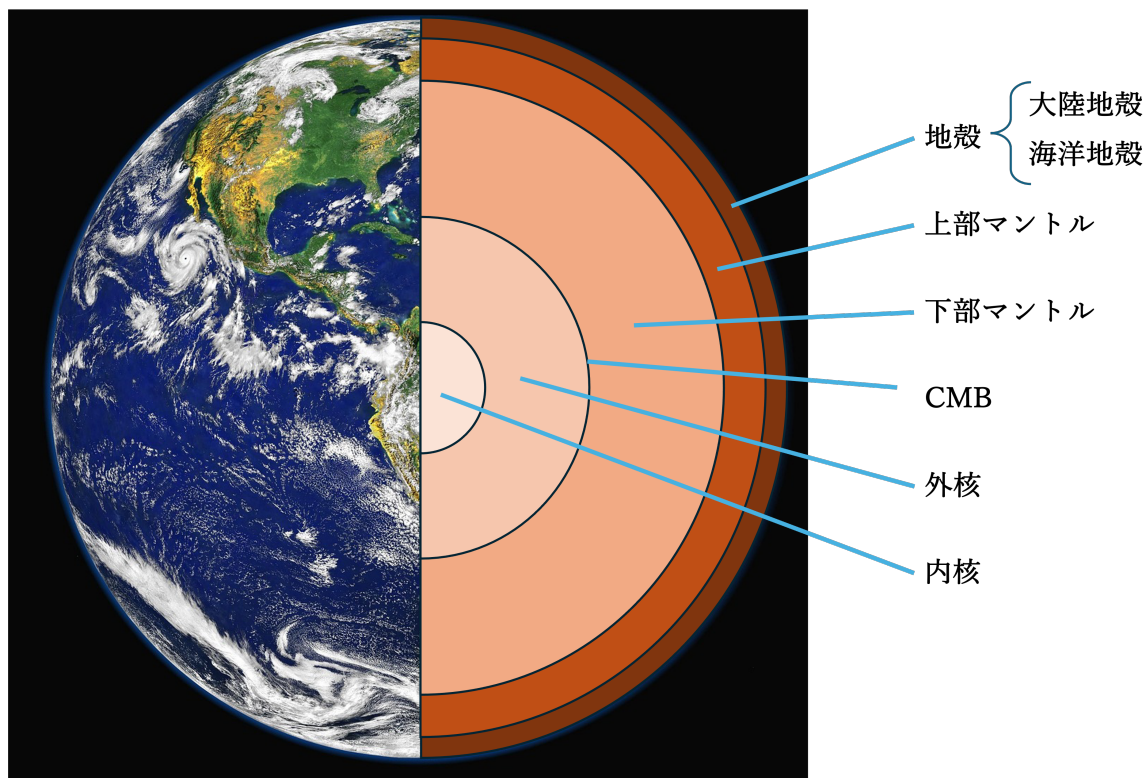


図 2.1: 地球内構造

核

地球の最心部を構成する。主成分はNi、Feであると考えられており、固体金属の内核、その外側の液状金属の外核に分かれる。外核の金属流体の運動が地球の磁場、地磁気を形成している。核で生成される熱は、内核の固化にともなう潜熱と、核内の軽元素の浮上による重力エネルギーの解放がある。放射性熱源が存在するかどうかは未だわかっていないが、多くの地球科学者によると全くない、あったとしてもほとんど存在しないと推測されている。

マントル

マントルは外核の外側を形成する岩石層である。マントルはマントル内で生成された熱や核での冷却熱を宇宙空間に放出するにおいて輸送役を担っており、その過程で熱対流を起こしていると考えられている。対流に関しては、地震波測定を根拠とした一層対流モデルと岩石学的立場に基づく二層対流モデルがある。一層対流モデルでは、上部マントルと下部マントルの境界を突き抜ける対流があり、マントルの組成は均一なものと考えられている。二層対流モデルでは上部マントルと下部マントルの境界(遷移層)での密度差により、それぞれの層毎に対流が起きていると考えられ、化学組成も二層化していると考えられている。上部マン

トルはかんらん岩が主要構成要素であり、火成活動の結果、地上に露出してくるものを採取することもできる。マントルと外核の境界は CMB(Core-Mantle Boudary) と呼ばれるが、CMB 直上から数百 km の深度帯の南太平洋、アフリカ大陸化に地震波の低速度領域があることが知られている。この領域は LLSVP(Large Low Shear Velocity Province) と呼ばれ、その組成は地球科学分野における、大きな謎の一つである。

地殻

地球の表面約 30km～50km を形成する層である。マントルから部分溶融したものが地表付近に移動/噴出し、固化したもので、地殻は大陸地殻と海洋地殻に分かれる。現在の技術においてもサンプル岩石を最も採取しやすい層である。

厚さは大陸地殻が約 30km で海洋地殻より薄く約 5km ほどである。

大陸地殻は海洋地殻がマントルに沈み込み、溶融されることにより形成されるため不適合元素の選択性に則り、大陸地殻の放射性元素存在量は海洋地殻の約 100 倍にも濃縮される。

2.2 地球内熱量モデル

先述の通り、地球内の熱は地球生成からの「原始の熱」と放射性元素の崩壊時に放出される「放射性熱」の 2 つが存在するが、それらの絶対量はわかっていない。しかし、地球科学的な理解から、放射性熱量が予測されている。図 2.2 は三つの主要なマントル+地殻の石質層 (BSE) 由来の放射性熱量モデルである。Low-Q モデルはマントルとの同位体組成比が類似しており金属コアを説明するのに十分な鉄を含んでいるエンスタタイトコンドライト隕石の組成により推測された低放射性熱量モデルである。Middle-Q モデルはマントルの主要構成岩石の組成差と太陽系と近い元素組成を持つ C1 コンドライト隕石から推測された中程度の放射性熱量モデル。High-Q モデルはマントル対流の一層対流を仮定して推測された高放射性熱量モデル。

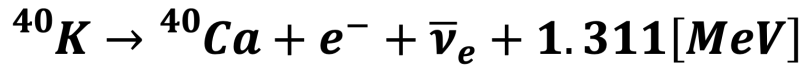
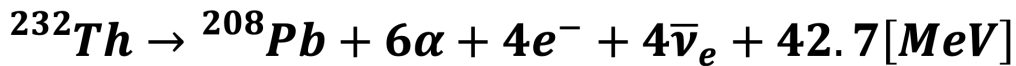
Low-Q での放射性熱量は 10～15TW(Sramek et al. 2016)。Middle-Q では、17～22TW(McDonough and Sun, 1995)。High-Q(Turcotte and Schubert, 2002) では 25TW 以上と予測されている。大陸地殻については 7.8 ± 0.9 TW(Radnick and Gao, 2003)、海洋地殻については 0.22 ± 0.03 TW(White & Klein, Plank) のように、地殻由来の熱量に関しては比較的小さい不確かさで放射性熱量が推定されている。つまり地球科学的モデル間の放射性熱量の不定性はマントル由来の熱量の推測の不確かさに強く依存し、放射性熱量の決定のためにはマントルの化学組成、ダイナミクスについて理解を深めることが必要不可欠である

	放射性熱量 (TW)	根拠
Low-Q	10 – 15	エンスタタイトコンドライト隕石
Middle-Q	17 – 22	マントル岩石 + C1コンドライト隕石
High-Q	≥ 25	マントル一層対流

図 2.2: 地球内放射性熱量モデル

2.3 地球ニュートリノ

地球ニュートリノは地球内部の放射性熱源に由来する反電子ニュートリノである。地球内部の放射性熱源は ^{238}U 系列、 ^{232}Th 系列、 ^{40}K 系列があり、それらは長い半減期の中で次のようにベータ崩壊する。その際に熱とともに反電子ニュートリノが放出される。この反電子ニュートリノが地球ニュートリノと呼ばれ、崩壊過程から明らかなように、地球ニュートリノ発生量は地球内放射性元素の物質質量、発熱量と直接的な関係がある。すなわち地球ニュートリノの観測は地球内部の熱源情報を直接的にもたらしてくれる。



地球ニュートリノは、1956 年に G.Gamow がその存在を示唆して以来、地球内部の化学組成や熱量に関して直接的な観測ができるものとして観測が期待されていた。2005 年、KamLAND は地球ニュートリノの世界初観測を成し遂げ、その後イタリアの Borexino 実験でも観測されている。

2.4 地球ニュートリノの観測の現状

地球ニュートリノは 2005 年に KamLAND で世界初観測がされた後、Borexino(イタリア)でも観測がされている。また SNO + (カナダ)、JUNO(中国) などでも観測が始まっている。ここでは KamLAND と Borexino における地球ニュートリノの観測結果を紹介する。

KamLAND による地球ニュートリノ観測

KamLAND による観測の結果を示す [3]。KamLAND(Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) は岐阜県飛騨市の池の山地下 2700m にある神岡鉱山内に建設されたニュートリノ検出器である。2002 年 1 月から 2024 年 8 月まで観測が行われ、現在は KamLAND2 実験開始に向け大幅なアップデートが行われている。

2002 年 3 月 9 日から 2020 年 12 月 31 日までのデータ取得期間のうち、LiveTime は 5227 日で、地球ニュートリノの観測数は 174^{+31}_{-29} であった。この観測期間中には日本の原子力発電所が停止し、地球ニュートリノとエネルギー範囲が重なる原子炉由来の反電子ニュートリノが極端に少ない期間も含まれている。

この観測の結果から、地球内放射性熱量モデルのうち、マントル一層対流を仮定した High-Q モデルが 99.76 % で否定された。

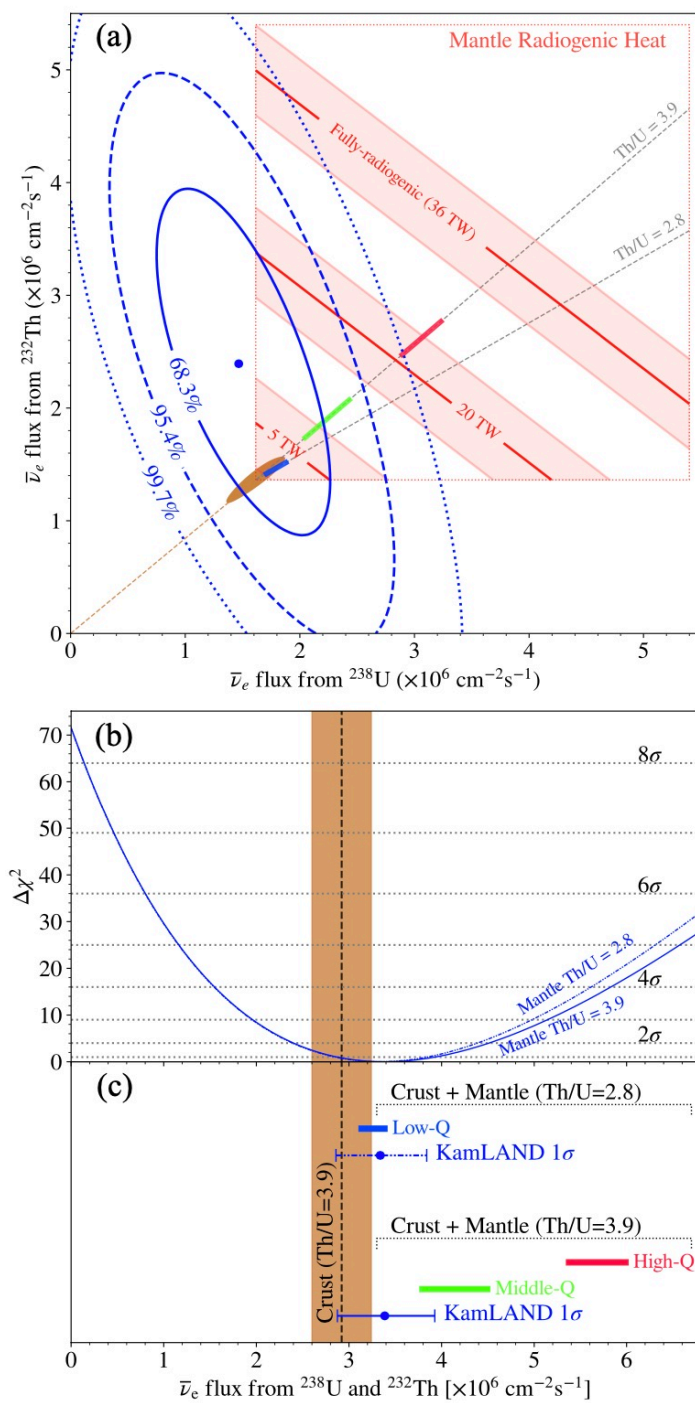


図 2.3: KamLAND による地球内放射性熱モデルの推定 [3]

また図 2.4 KamLAND で観測される地球ニュートリノの 50 %以上が 500km 以内の地殻由来

のものである。そのためマントル由来の地球ニュートリノ量の決定し、全放射性熱量を推定するためには、検出器近傍の地形の化学組成について深く理解し地殻由来の地球ニュートリノ量を不定性少なく見積もることが重要である。

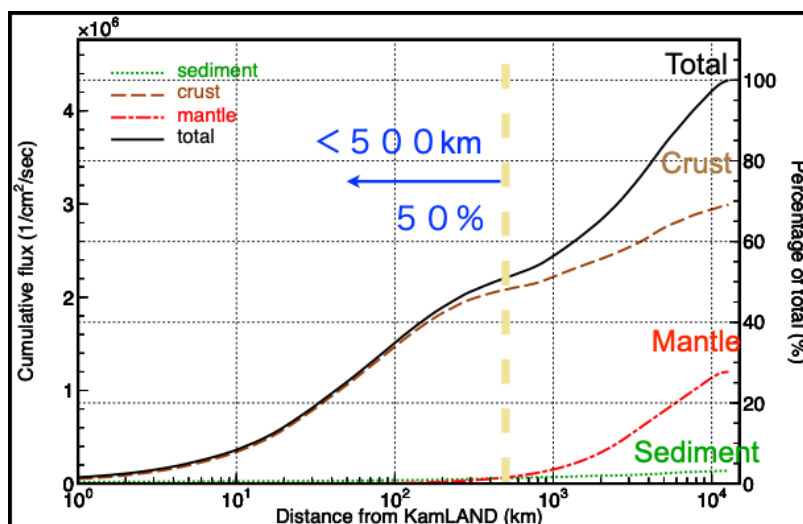


図 2.4: KamLAND における距離ごとの地球ニュートリノ寄与 [4]

Borexino による地球ニュートリノ観測

Borexino による地球ニュートリノ観測の結果を示す [5]。2007 年 12 月から 2019 年月までのデータ取得期間のうち LiveTime は 3262.74 日で地球ニュートリノの観測数は $52.6^{+12.1}_{-10.7}$ であった。Borexino の解析結果と各地球熱量モデルによる推定値を図に示す。Borexino の結果は Middle-Q、High-Q モデルが支持されている。KamLAND との異なる結果は、地殻モデルの差により生じていると考えられる。

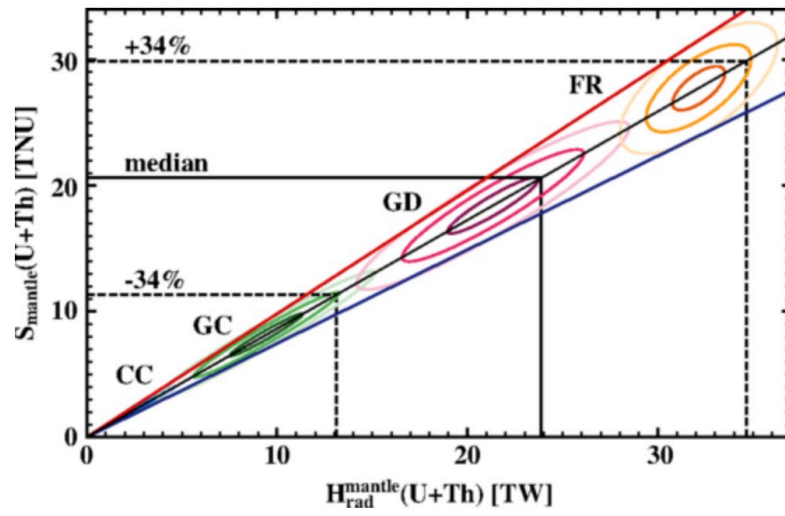


図 2.5: Borexino による地球内放射性熱量モデルの推定 [5]

第3章 海洋底ニュートリノ検出器 OBD

海洋底ニュートリノ検出器 OBD(Ocean Bottom Detector) は、深海に液体シンチレータ検出器を沈め、マントル由来の地球ニュートリノの観測を目指す今までにない検出器である。

2005 年に KamLAND による地球内放射性元素由来の地球ニュートリノの初観測は、ニュートリノ地球科学という新しい学問分野を創出する契機となった。その後地球ニュートリノの観測数を増やしていき、地球科学的知見が得られるレベルにまで発展してきた。しかし既存の大陸上の検出器の感度は検出機からの距離の二乗に反比例するため、観測される地球ニュートリノのほとんどは検出器に近く、放射性熱源を高濃度に含む大陸地殻由来のものである。地球科学の側面からみても、採取できる地球内物質は地殻およびマントル最上部の岩石に限られ、かつ採取できる場所も局所的であり地殻よりも深部の情報を直接得ることは難しい。マントルの放射性熱量を推定するために、検出器で観測された地球ニュートリノ量から、地殻モデルにより算出される地殻由来の地球ニュートリノ量を引くという手法が行われている。そのためマントル由来の放射性熱量の推定は地殻モデルに大きく依存し、現状非常に大きな不定性が存在している。

そんな中、OBD は大陸から遠く、地殻の薄い海洋底に設置することでマントル由来の地球ニュートリノを直接観測することができる。また船で運搬することで複数地点での観測が可能である。OBD はこれらの特徴から、マントル由来の放射性熱量、さらには全地球内放射性熱量の決定に大きく貢献できることが期待されている。

3.1 OBD プロジェクトの発足

深海に液体シンチレータを沈めて、マントル由来の地球ニュートリノを観測するアイデアは、2005 年にハワイ大学と Makai Ocean Engineering によって Hanohano という 10kt~50kt サイズの検出器 (図 3.1) として発案された [6]。深海の環境でのニュートリノ観測に向けて具体的な技術研究が行われたが実現には至らなかった。その後長らくこのアイデアが引き継がれることはなかったが、2019 年に東北大学と JAMSTEC(海洋研究開発機構) の共同研究が始まり、1.5kt サイズの OBD 実現に向けた研究開発が開始された。現在は複数のグループとの共同研究が開始され、分野横断的なプロジェクトに発展している。

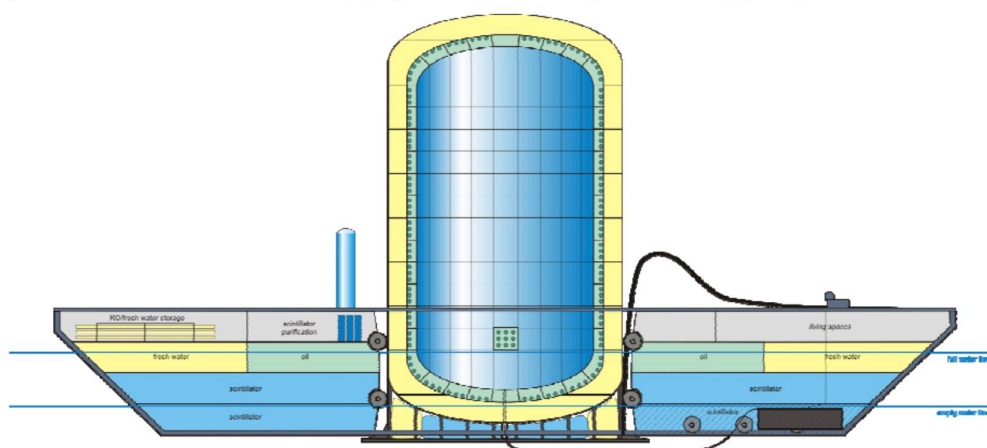


図 3.1: Hanohano 10kt 検出器

3.2 OBD の強み

ここでは他の素粒子検出器と比較した際の OBD の強みを述べる。

深海という特殊環境での測定

深海での液体シンチレータ検出器による測定はいまだ実現されていない。深海に巨大なニュートリノ検出器を設置することで、マントル由来地球ニュートリノをはじめとした大陸の検出機では観測が難しい現象を選択的に観測することができる。

図 3.2 からわかるように、海洋は地球ニュートリノフラックスは少ないが、到来する総地球ニュートリノ量に対するマントル由来の地球ニュートリノの割合が大きい。特に太平洋、ハワイ沖でマントルの寄与が最大となっている (ハワイ沖ではマントルの寄与が全地球ニュートリノの 70 % を占める)。

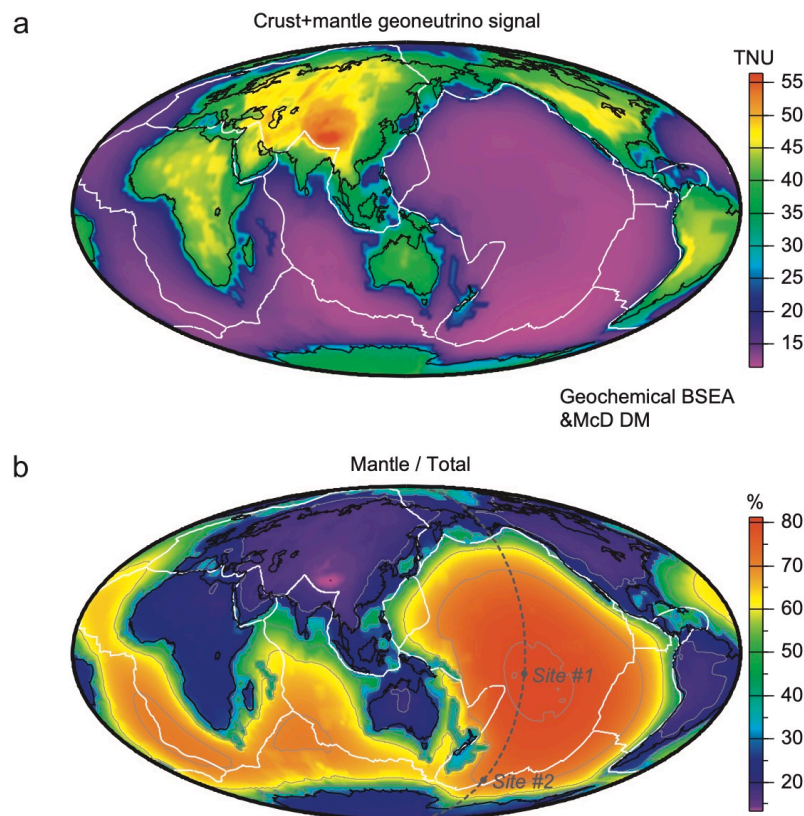


図 3.2: 地球ニュートリノフラックスとマントル寄与の分布図 [7]

また、大陸から離れることで原子炉からのニュートリノの寄与を抑制することができる。原子力発電所から放出される原子炉ニュートリノは地球ニュートリノとエネルギー範囲を共有していることから、地球ニュートリノ観測において非常に深刻なバックグラウンドとなる。原子力発電所のある大陸から離れることで、そのバックグラウンドを減らすことができる。

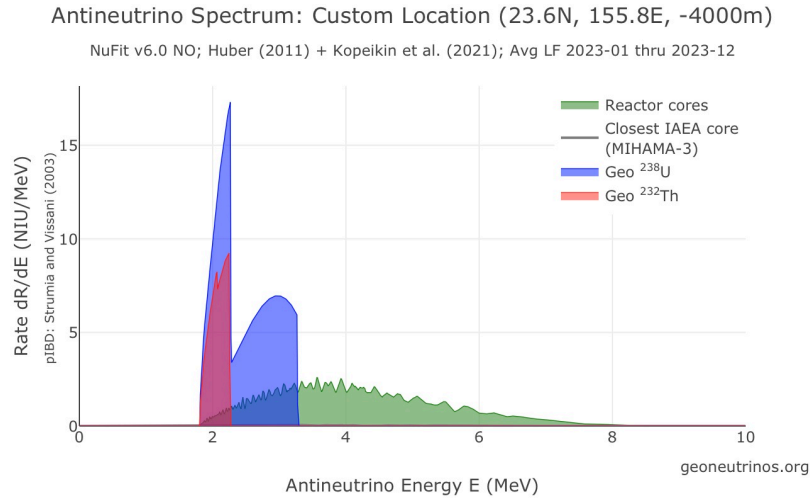


図 3.3: ハワイ沖 深海 4000m でのエネルギースペクトル [8]

加えて、ある程度の深度で海水により宇宙線ミュオンの遮蔽が可能である。図 3.4 には各ニュートリノ検出器の設置場所における宇宙線ミュオンのフラックスが示されている。OBD が設置される深海 4000m は緑の星印で記されており、4000m まで沈めることで観測への影響を無視できるまでミュオンフラックスが少なくなる。

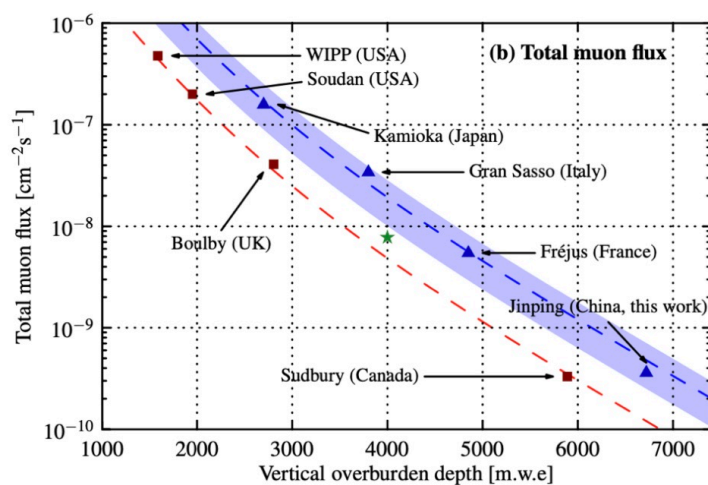


図 3.4: 各検出器設置地点でのミュオンフラックス [9]

複数地点での観測が可能

船での運搬・導入・回収・メンテナンスといったプロセスを確立させ、それを繰り返すことで場所を変更しながらの観測が可能となる。

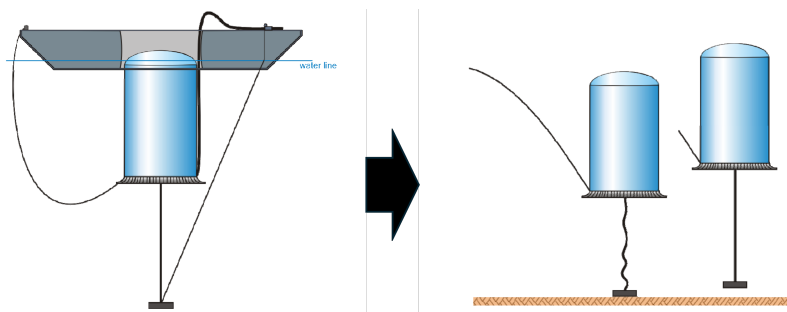


図 3.5: 海底設置のイメージ

複数地点での観測によって、マンツルの不均一性の測定ができることが期待される。図 3.6 は西経 161 度に沿った経路において、各地球熱流モデルを仮定した場合に予測される地球ニュートリノフラックスである。OBD により太平洋を南北を縦断して複数地点での地球ニュートリノフラックスを比較することでマンツル構造やマンツル深部の化学組成の不均一性を特定できることが示唆される。

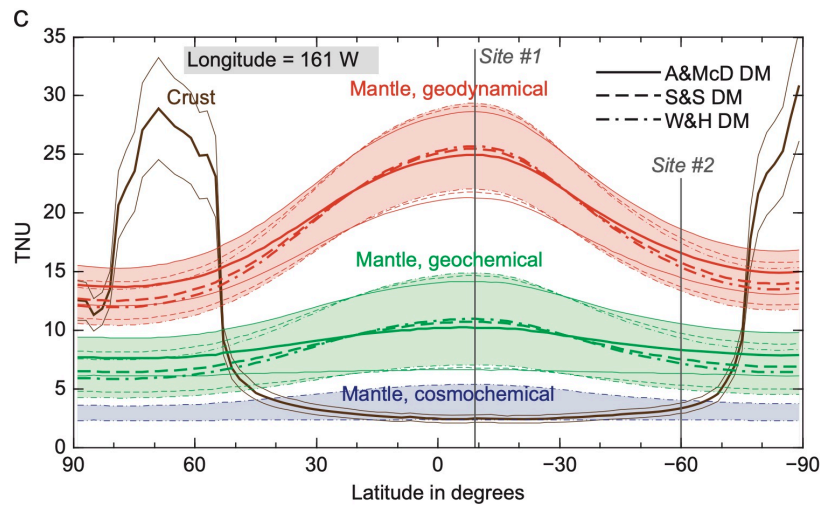


図 3.6: 西経 161 度に沿った地点でのマントル由来地球ニュートリノフラックスの予測値 [7]

3.3 1.5kt サイズ検出器

このセクションでは現在の計画において一つの大きな目標である、1.5kt サイズ検出器について説明する。1.5kt 検出器は現実的な観測期間でマントル由来の地球ニュートリノ観測が可能かつ、海洋運搬も現存する船で可能なサイズである。

3.3.1 設置場所

現在、OBD の第一設置地点としてはハワイ沖、4 km 海底が候補になっている。その理由としては、マントル由来地球ニュートリノフラックスの予測値が大きいこと (図 3.7)、海底ケーブルなどの電力設備が整えられていること (図 3.8) が挙げられる。

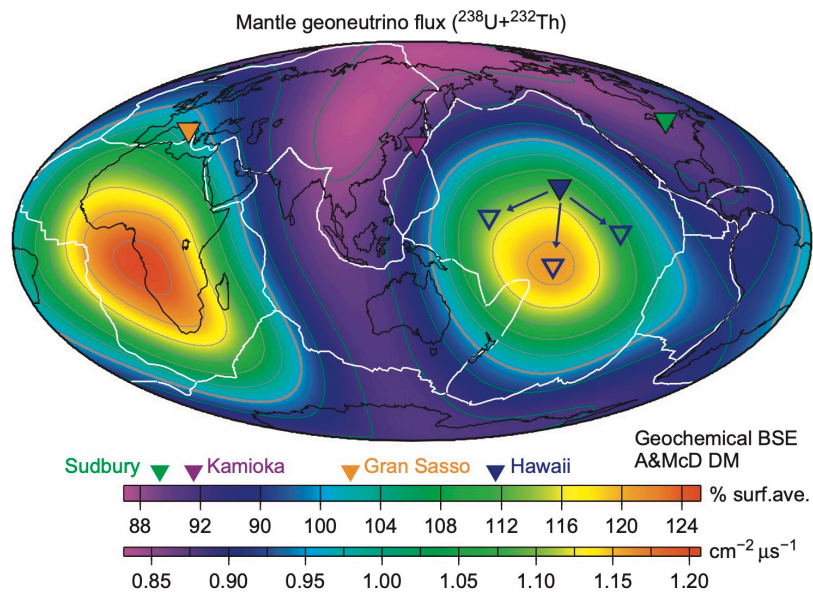


図 3.7: マントル由来地球ニュートリノフラックス予測 [7]

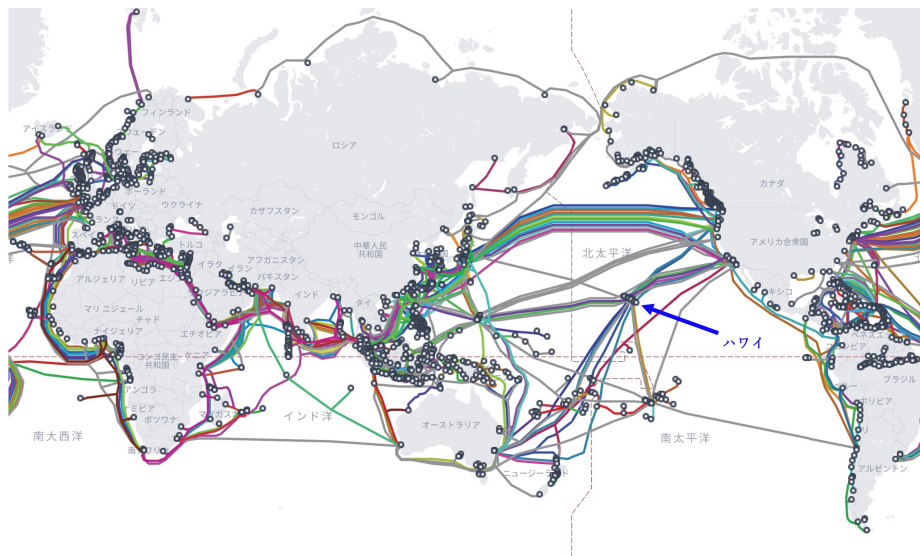


図 3.8: 海底ケーブルの敷設状況 [10]

海底は地上とは全く異なる環境である。圧力に関しては、水深が 10m 増えるごとに 1 気圧上昇するとされており、4km 海底では地上の 400 倍にもなる 40MPa の水圧がかかる。温度に関しては、水深約 1000m で 2~4℃ になり、それ以上深い海でもほぼ一定となる。このような地上とは全く異なる環境で検出器を稼働させるためには、様々な技術開発が必要となる。

3.3.2 構造

ここでは 1.5kt サイズ検出器の構造について記述する。正確な検出器の構造、寸法などは決定していないが、ここでは先行研究 [9] で行った 1.5kt サイズのシミュレーションで設計したものをベースに説明する。

図 3.9 に海底に設置された OBD のイメージ図を載せる。

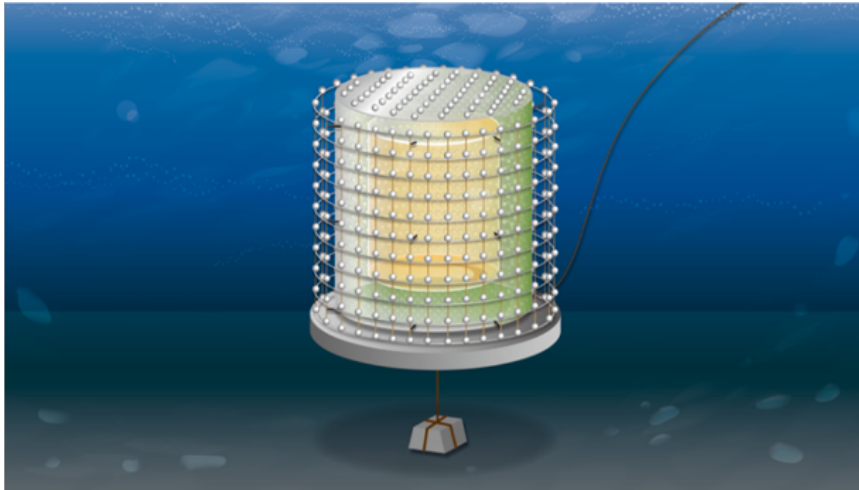


図 3.9: OBD イメージ図

1.5kt サイズ検出器は半径 9m、高さ 20m の円柱形のステンレスタンクに内包された内部検出器とその外側に光検出器をつけた外部検出器からなる。

内部検出器 (ID)

内部検出器 (Inner Detector) は地球ニュートリノをはじめとするメインの事象を観測するための液体シンチレーション検出器である。図 3.10 に内部検出器の構造を示す。

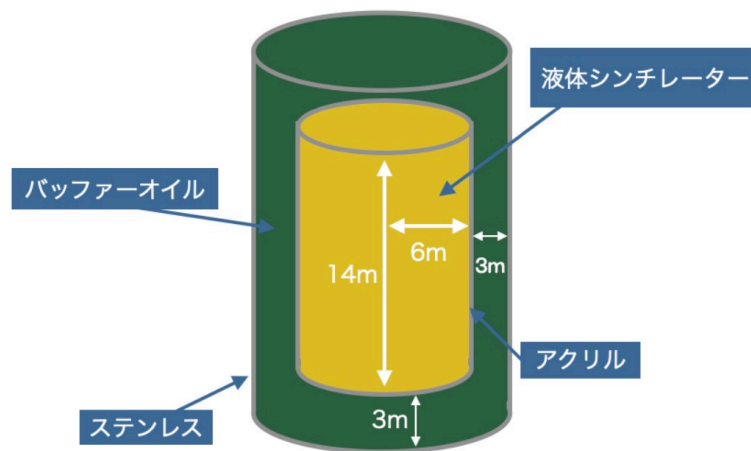


図 3.10: 内部検出器の構造

ステンレスタンク

半径 9m、高さ 20m、厚さ 3m の円柱形である。外的要因による損傷、液体シンチレータ等の検出器内部の液体が海に流れ出るのを防ぐ。

ステンレスタンク内壁には光検出器が 3232 本取り付けられており、photo coverage は約 40 % ほどになる。

光検出器モジュール

液体シンチレータの発光を捉え、電気信号に変換する。耐水圧性のガラスシールドに内部に PMT、データ収集・制御基盤を詰め込んだ構造にすることを考えられている。また可能な限りの低電力化が求められている。

バッファオイル

ステンレスタンクとアクリルタンクの間の層を満たす液体。ステンレスタンクや PMT に含まれる放射性不純物由来のバックグラウンドを防ぐ。

アクリルタンク

液体シンチレータを用いた実験では、耐薬品性も確認され、発光波長に対する透過率も高く、低放射能なアクリルが容器の素材として用いられることが多い。一方、海洋実験での実績は少なく、深海での耐圧性に対しては検討する必要がある。

液体シンチレータ

OBD では粒子が液体シンチレータ中を通過する際に発する光を光検出器で検出することで素粒子を観測する。

シンチレータは有機シンチレータと無機シンチレータに大別され、それぞれにおいて液体と固体のシンチレータが存在する。OBD では純化、大規模化のしやすさ、比較的安価であることから液体シンチレータが使用される。液体シンチレータは有機溶媒と発光剤などの溶質で構成される。

液体シンチレータによるニュートリノ検出の原理については 3.3.3 で説明する。

外部検出器 (OD)

海水をターゲットとして、主に背景事象の補足の役割を担う。また、KM3NET のように高エネルギーニュートリノの観測に応用することも将来的に考えられている。耐水圧シールドに入った光検出モジュールが 360 個設置される予定である。

3.3.3 ニュートリノ検出の原理

ここでは液体シンチレータによるニュートリノ検出の原理を述べる。

反電子ニュートリノ検出

地球ニュートリノなどの反電子ニュートリノの検出は、逆ベータ崩壊を用いた遅延同時計測法によって行われる。図 3.11 は検出過程のイメージである。

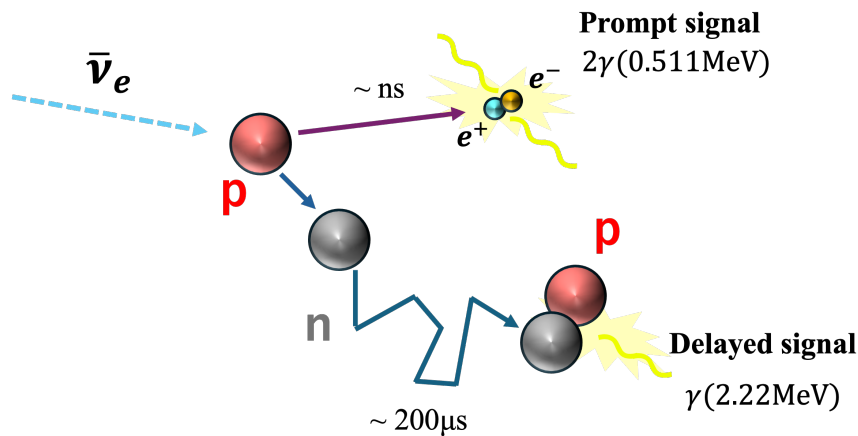
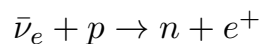
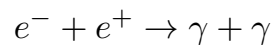


図 3.11: 逆ベータ崩壊イベント

到来した反電子ニュートリノは液体シンチレータを構成する陽子と逆ベータ崩壊を起こし陽電子と中性子を放出する。

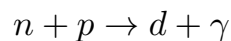


生成された陽電子は数 ns で周囲の電子と対消滅を起こし、その際に 511 keV の γ 線を 2 本放出する。



この時、陽電子及び 2 本の γ 線により液体シンチレータが発光し、先発信号となる。

一方中性子は周囲の原子核と弾性散乱を繰り返しながら熱中性子となる。最終的には陽子に捕獲され、2.2 MeV の γ 線を放出して重陽子となる。



逆ベータ崩壊から中性子捕獲まで約 210 μsec を擁し、この時放出された γ 線による液体シンチレータの発光が後発信号となる。このように時間的・空間的に相関のある 2 つの信号を遅延同時計測することで反電子ニュートリノを選択的に検出できる。

反電子ニュートリノと液体シンチレータ中の陽子による逆ベータ崩壊の閾値は 1.8MeV であることから、U 系列の地球ニュートリノ、Th 系列の地球ニュートリノの一部は観測できるが、 ^{40}K 系列の地球ニュートリノは液体シンチレータでは観測できず、電子散乱といった他の観測技術を用いなければならない。

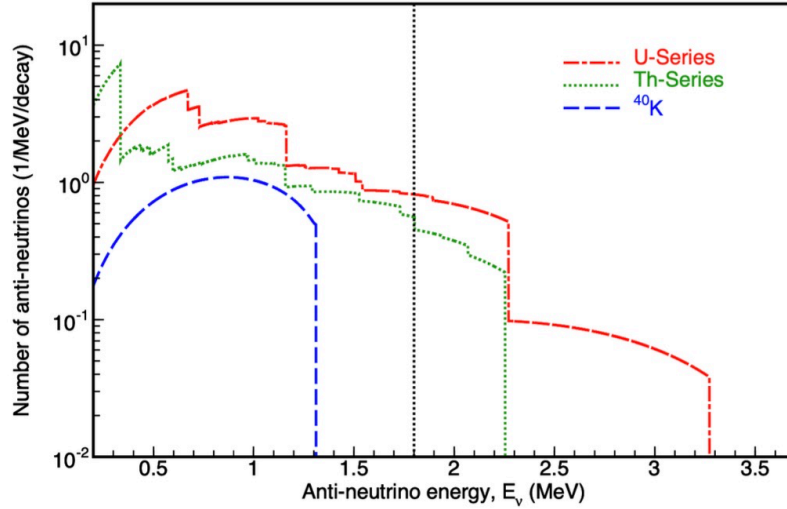


図 3.12: 地球ニュートリノのエネルギースペクトル [12]

反ミューニュートリノや反タウニュートリノについては次の反応による遅延同時計測で検出可能である。

$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow l^+ + n \quad (l = \mu, \tau) \quad (3.1)$$

反応閾値は、反ミューニュートリノに関しては 113MeV 、反タウニュートリノに関しては 3463MeV である。

ニュートリノ検出

ニュートリノの検出は荷電カレント (CC) や中性カレント (NC) による電子散乱の計測によって行う。

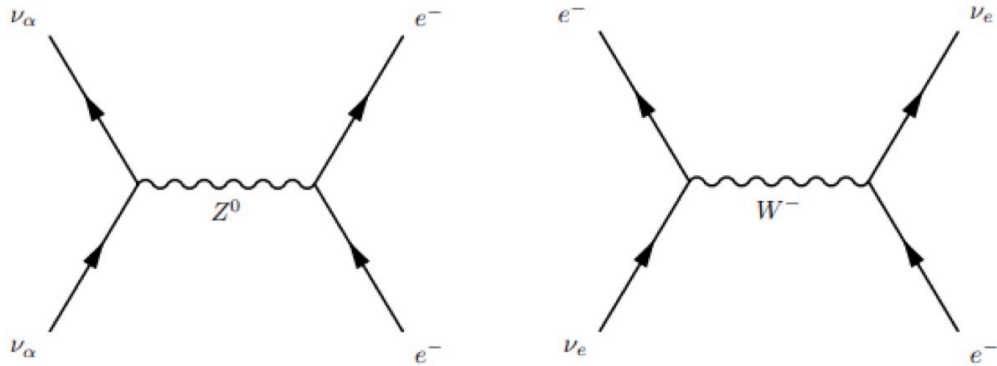


図 3.13: 中性カレント反応 (左)、荷電カレント反応 (右) の Feynman diagram

ニュートリノの検出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できるが、一方で遅延同時計測によるバックグラウンドとの識別はできない。よって、ニュートリノの検出は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で行われる。OBD では反電子ニュートリノである地球ニュートリノを主要な観測対象としているが、巨大な低バックグラウンド検出器は様々な物理事象の観測に適した環境であるため、太陽ニュートリノといった電子散乱で観測する観測対象についても高い観測感度が期待できる。

3.3.4 マントル由来地球ニュートリノの観測シミュレーション

シミュレーションにより、1.5kt サイズ OBD によるハワイ沖でのマントルニュートリノの観測感度が求められている。地球内放射性熱量モデルの low-Q モデルを仮定した場合には 10 年間観測で 2.5σ 、middle-Q モデルを仮定すると 3 年間観測で 3.5σ 、high-Q モデルを仮定すると 1 年間観測で 3.7σ でマントル由来地球ニュートリノが観測できることがわかった。

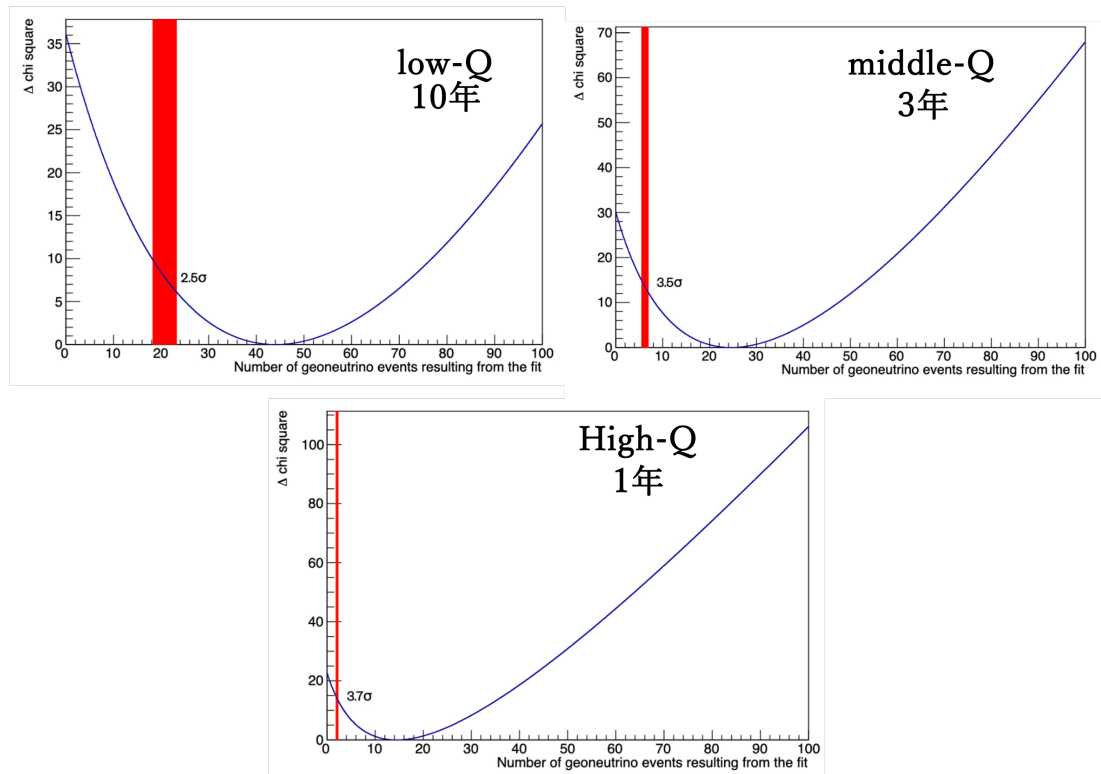


図 3.14: 1.5ktOBD によるマントル地球ニュートリノ観測感度 [9]

またモデルの分離能力については表 3.1 に示したようになっており、地球内放射性熱量の決定に十分貢献することができると考えられる。

		low-Q	middle-Q	high-Q
仮定したモデル	low-Q	\	99.5%	100%
	middle-Q	99.5%	\	99.9%
	high-Q	100%	99.9%	\

表 3.1: 10 年観測時の熱量モデルの排除確率 [9]

3.4 OBD のに他分野への応用

ここでは地球ニュートリノ観測以外で、OBD の特徴を活かすことで研究対象となりえる事柄を挙げる。

地球内組成解明への貢献

地球最深部の核、マントル最下層にある LLSVP(Large Low Shear Velocity Provinces) 等、地球内構造の化学組成は地球科学における大きな謎の一つである。ニュートリノ観測はその謎を解明するブレークスルーとして期待されている。

ニュートリノ地球科学には、地球ニュートリノを観測することで地球内部の放射性元素量の決定を目指すだけでなく、地球を通過するニュートリノの振る舞いを観測することで地球深部の化学組成決定の貢献しようとする取り組みも存在する。例えば、KM3Net では地球内部を通過するニュートリノのニュートリノ振動の変化を見ることがコアの化学組成を明らかにしようとする研究が行われている。

OBD では、船による運搬で観測地を選択できることを利用し LLSVP 直上での大気ニュートリノ観測を行い、LLSVP 直下でない地点での大気ニュートリノの生存率の比較を行うことで LLSVP の化学組成決定に貢献しようと考えている。

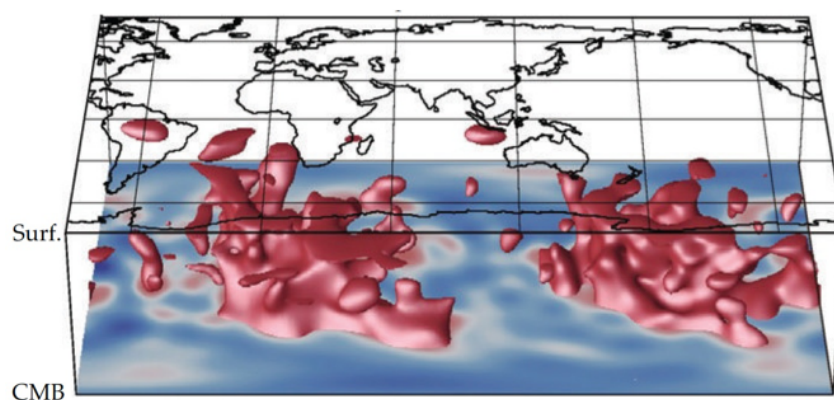


図 3.15: LLSVP(Large Low Shear Velocity Provinces) [13]

海底下生命圏の理解

海底の堆積物に生命が発見された。彼らは水の放射性分解によりエネルギーを得ている可能性がある。OBD による深海、深海堆積物の放射線量を測定することで海底下生命圏の理解に貢献することができる。

その他の極希事象の観測

OBD が設置される海底という低バックグラウンド環境と巨大な検出器を利用し、超新星ニュートリノ観測、暗黒物質観測など様々な極希事象の観測に応用できると考えられる。

第4章 小型プロトタイプ検出器

ここでは現在開発を進行中の小型プロトタイプ検出器について説明する。

4.1 小型プロトタイプ検出器の目的

小型プロトタイプ検出器は大型 OBD 実現に向けた課題を解決、もしくは解決するために必要な情報を得るために、深海 1km での稼働を目指している。

大型 OBD 実現に向けた課題としては以下のようなものが挙げられる。

運搬・設置・稼働・回収・整備のプロセスの確立

- 陸からインストール地点までの運搬方法
- 深海へ沈める方法、手順
- 海底設備 (海底ケーブル等) への接続方法
- 検出器稼働中のモニタリング
- 万が一の異常が生じた際のアラームシステムの開発

深海での液体シンチレータ検出器の応答評価

- 海底の低温・高圧環境が液体シンチレータ検出器にどのような影響を与えるか。

深海環境に晒される液体シンチレータ検出器の開発

- 低温・高圧環境に耐性を持つ構造、素材
- 深海 ↔ 地上の遠距離データ取得システムの開発

以上の大型 OBD 実現に向けた課題を踏まえて、小型プロトタイプ検出器の目的としては以下の三つがある。

目的 1 : 運搬・設置・稼働・回収・整備のプロセス構築

目的 2 : 深海でのLS検出器の応答評価

目的 3 : 深海にさらされる液体シンチレータ検出器の開発知見の獲得

目的 1 に関しては、小型プロトタイプ検出器の設置場所である相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」と呼ばれる海底施設へのインストール通して達成することを考えている。「深海底総合観測ステーション」については 4.2 で詳細を説明する。

目的 2 に関してはプロトタイプ検出器の応答を地上と深海で比較することで、深海の低温・高圧環境が液体シンチレータ検出器に与える影響を調査することで達成することを考えている。応答評価のソースとしては、放射性線源、もしくは深海での宇宙線ミュオンを考えている。放射性線源については第 6 章にて、地上での小型プロトタイプ検出器の稼働実験にて深海での使用可否を考察した。宇宙線ミュオンについては第 7 章にてシミュレーションによりいくつかの物理量を求めた。

目的 3 に関してはプロトタイプ検出器の設計、組み立てを通して達成する。小型プロトタイプ検出器は深海にさらされる環境での精密な測定のためにさまざまな考慮のもと設計が行われている。構成要素の詳細については 4.3 で説明する。

4.2 初島沖 深海底総合観測ステーション

小型プロトタイプ検出器は相模湾初島沖の「深海底総合観測ステーション」に設置される。「深海底総合観測ステーション」は海洋研究開発機構により 1993 年に設置された、日本に数少ない海底でのリアルタイム観測を目的とした施設である。深海 1km に位置し、水温は 2~3 °C、水圧は 10MPa にもなる。ビデオカメラをはじめとして種々観測機器が完備されており、小型プロトタイプ検出器は水中着脱コネクタに接続される。コネクタは電気コネクタが 5 式、通信用の光コネクタが 4 式ある。電気コネクタにより、24V もしくは 144V の電圧供給が可能である。プロトタイプ検出器とコネクタの接続は ROV (remotely operated vehicle) により海底で行われる。深海で取得されたデータは、9km のケーブルを通して初島陸上局に送られることとなる。

小型プロトタイプ検出器は、横須賀の海洋研究開発機構本拠から船により運搬後、深海に沈められ 2~3 ヶ月設置される。この設置期間はシブタイムの制限による。

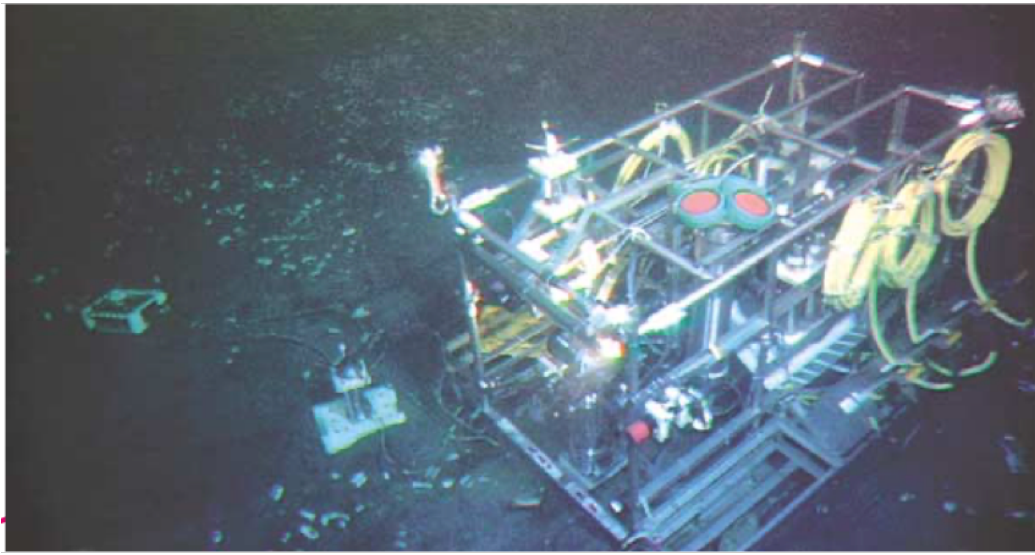


図 4.1: 深海総合観測ステーション

4.3 小型プロトタイプ検出器の構成要素

ここでは小型プロトタイプ検出器の構成要素について詳しく述べる。

図 4.2 は小型プロトタイプ検出器の完成形である。

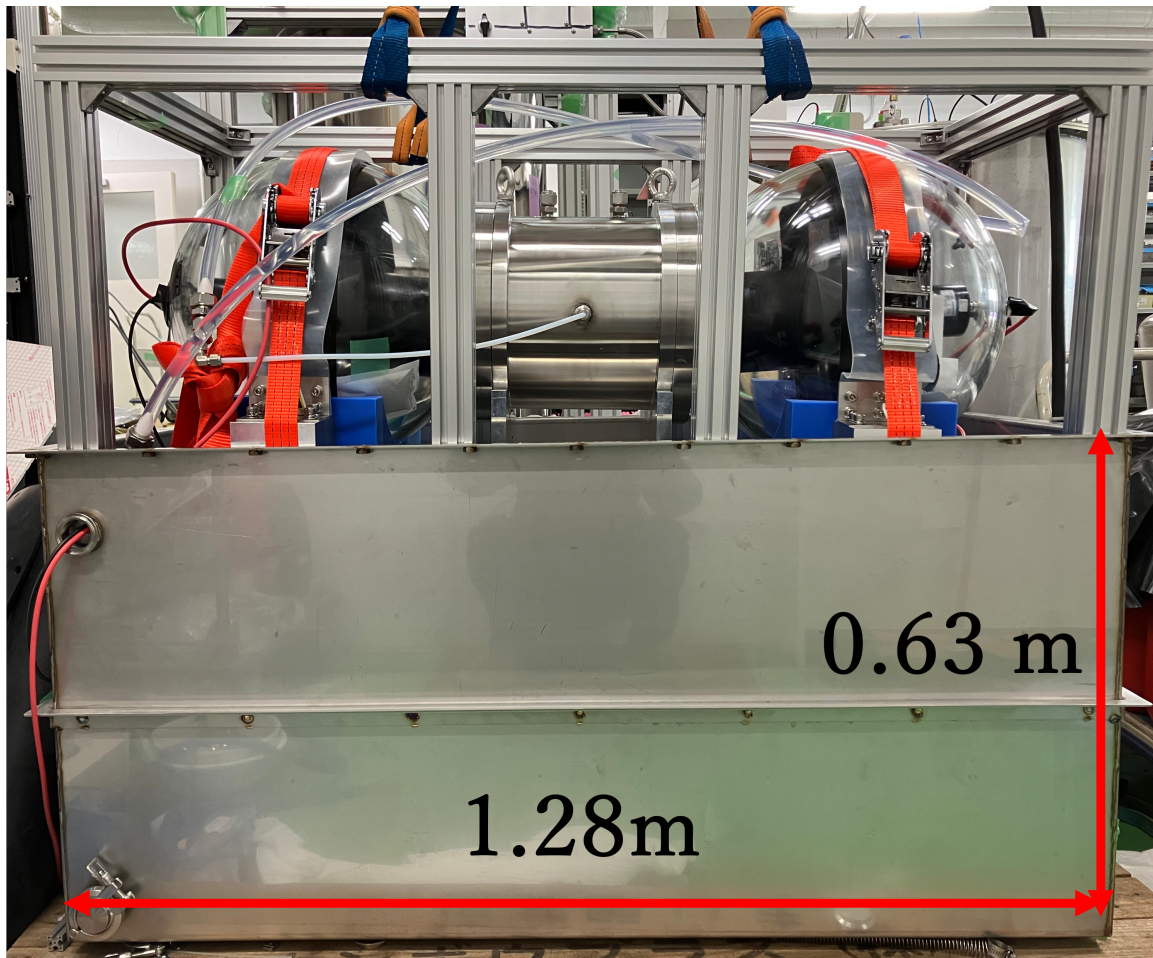


図 4.2: 小型プロトタイプ検出器 完成系

ステンレス容器

プロトタイプ検出器の最外装を担う、幅 1.28m、高さ 0.63m、幅 0.62m のステンレス製の容器である。万が一に内部の液体シンチレータが漏れた時に、海に流出するのを防ぐ。内部圧力の保持のため、内部は海水で満たされる。

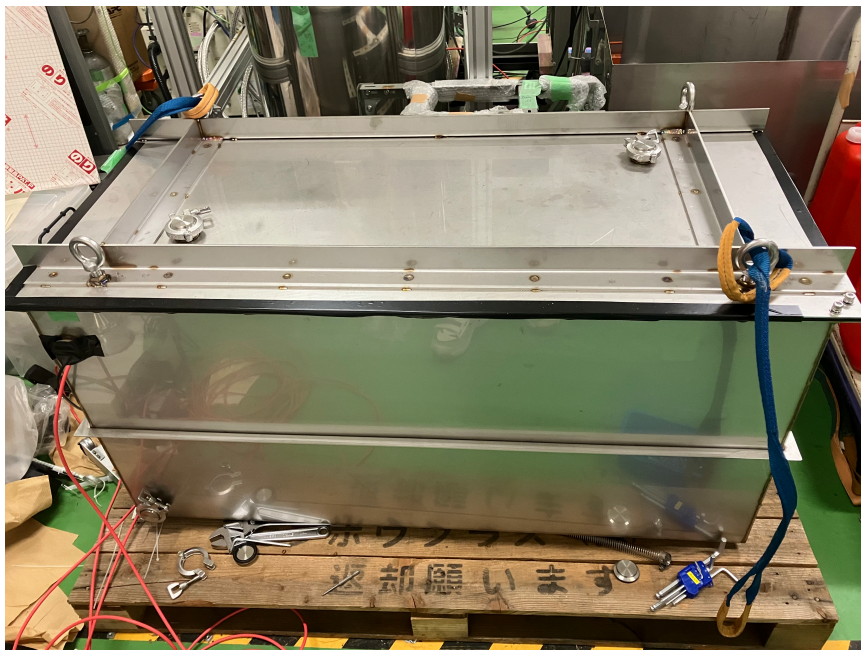


図 4.3: ステンレス容器

液体シンチレータタンク

液体シンチレータを格納する容器である。ステンレス管の両側はフランジになっており、そこに液体シンチレータの発光波長について透過性のあるアクリルの円板を挟み込んでビューポートとしている。ステンレス管とアクリル板の間はゴムのOリングでシールを形成している。ステンレス管側面には、窒素バブリング用ポート、排気用ポート、圧力補償機構の接続ポートがついている。

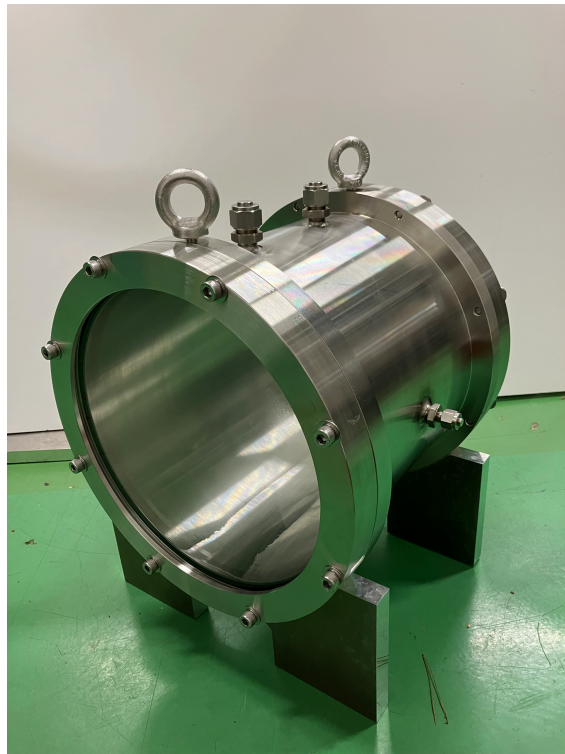


図 4.4: 液体シンチレータタンク

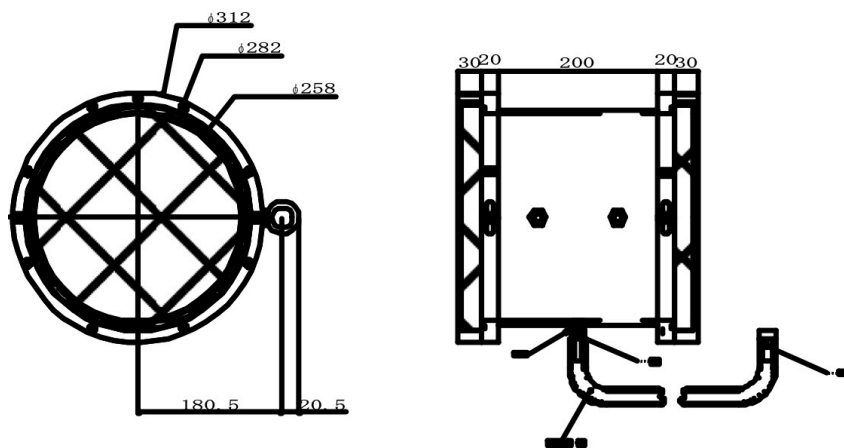


図 4.5: 液体シンチレータタンク設計図

液体シンチレータ

小型プロトタイプ検出器においては液体シンチレータの溶媒としてLAB(リニアアルキルベンゼン)、溶質としてPPOを用いることが予定されている。LABをベースとした液体シンチレータは現在建設中のKamLAND 2実験に使用されることが計画されており、大光量、高透過率であることが報告されている。

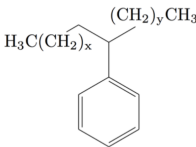
LAB (Linear Alkylbenzene)	
構造式	
化学式	C_mH_{2m-6}
沸点(大気圧)	280～310℃
密度(常温常圧)	0.86 g/cm ³
引火点	～150℃
消防法危険物分類	第4類第3石油類
吸光 / 発光波長	260nm/283nm

表 4.1: LAB の諸特性

先行研究 [9],[15] で深海環境における LAB ベース液体シンチレータの特性評価が進められている。図 4.6(a) は液体シンチレータを 4℃ に冷やした時の様子で、目視でも濁りが生じ、透過率が減少していることがわかる。これは液体シンチレータ中に混在する水分が原因であるとされており、乾燥窒素によるバブリングで水分を追い出すことで濁りを解消することができる (図 4.6(b))。

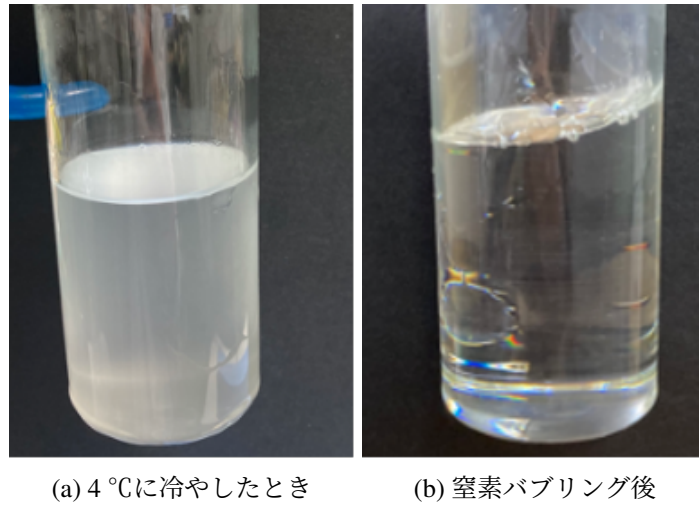


図 4.6: 低温での液体シンチレータの振る舞い

また図 4.7 は温度と導入する PPO の量による LAB をベースとした液体シンチレータの発光量を測定して得られた結果である。

室温に比べ低温に冷やした液体シンチレータの発光量が増加していることがわかる。また PPO の量に関して、ある一定の量までの添加で発光量増加が頭打ちになっていることがわかる。この結果では、発光量増加の効果を得られる PPO の量は 3.0 g/L とわかる。これによりプロトタイプ検出器に導入する LAB ベース液体シンチレータとして適した PPO の量は 3.0g/L とした。

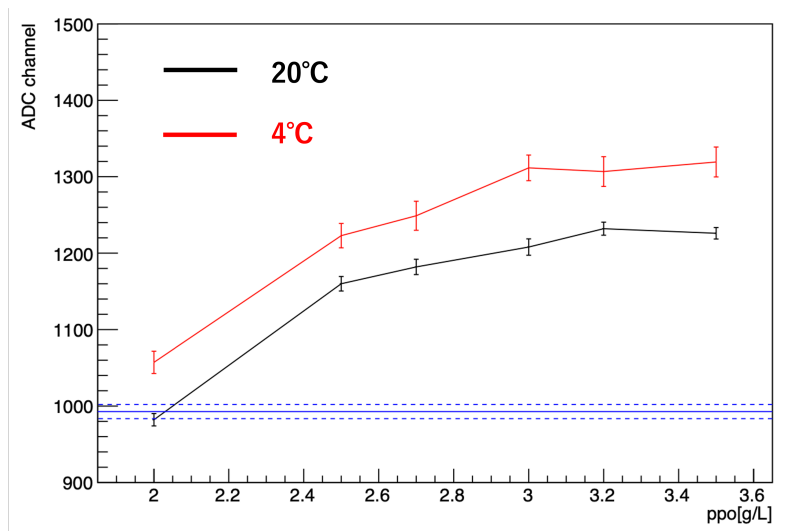


図 4.7: 温度、PPO 量による発光量変化 [9]

液体シンチレータの発光を光電子増倍管で捉え、光電子増倍管からの出力電荷をデジタルチャンネル数 (ADC 値) に変換した量を測定している。青い線は KamLAND-LS の発光量。

LAB は海で使用するにあたり法的な制限は特にはない。しかしながら海に流出した場合には環境に悪影響を与えることとなるので、流出を防ぐ構造、仕組みが必要である。

圧力補償機構

深海環境における液体シンチレータの体積減少を補償し内部圧力を保持する機構。第 5 章に圧力補償機構開発の詳細を記載する。

光検出器モジュール

液体シンチレータタンクの両隣に、発光を捉える光検出器が設置される。70MPa までの耐圧性のある耐水压シールド内部に PMT、シグナルを読み出すためのデータ取得回路、PMT に電圧を印加し各ダイノードに適切に電圧を分配する電源供給用回路基盤などが内包される。IceCube 実験で設置されている D-Egg(図 4.8) を応用する形で使用を予定しており、液シン用 D-Egg を千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターニュートリノ天文学研究所 (ICEHAP) との共同研究が開始されている。

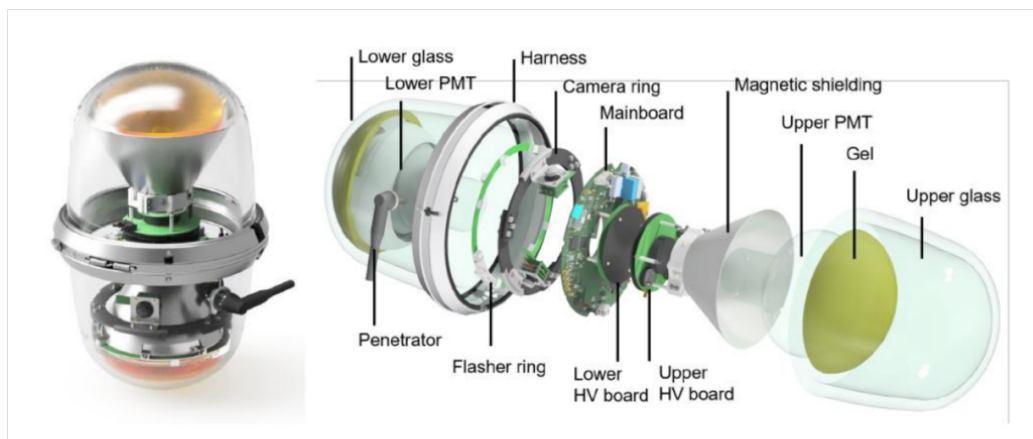


図 4.8: D-Egg [16]

第5章 圧力補償機構の開発

本章では小型プロトタイプ検出器の構成要素の一つである、圧力補償機構の開発について述べる。

深海環境設置時の温度・圧力の変化によって検出器内の液体シンチレータの体積が減少する。圧力補償機構は液体シンチレータの体積減少分を検出器に供給し内部圧力を保持する役割を担っている。

図 5.1 には開発の手順を示す。

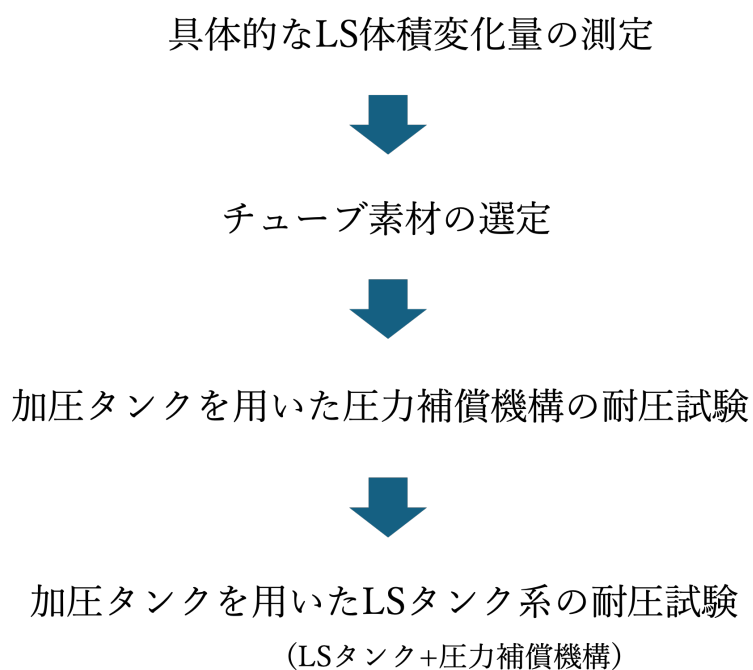


図 5.1: 圧力補償機構開発の手順

5.1 深海環境における液体シンチレータの体積変化

プロトタイプ検出器に付随する圧力補償機構の開発にあたり、深海における具体的な体積の減少量を得るために、株式会社東レリサーチセンターに委託して高圧用振動式密度計を用いた液体シンチレータの密度の測定を行った。表 5.1 には測定を行った 6 点を青の丸印で示している。

	大気圧	10MPa	20MPa
常温(20°C)			
10°C			
2°C			

表 5.1: 液体シンチレータ密度の測定点

高圧用振動式密度計は、試料液体を入れた金属製 U 字管を発振コイルで振動させ、U 字管の固有振動の振動周期を測定することで試料液体の密度を求めることができる。

対応可能な温度と圧力はそれぞれ-10°C～150°C、0.1MPa(大気圧)～20MPa、測定精度は±0.05 %であり、幅広い条件の中、高精度な測定が可能である。

結果

図 5.2 に得られた測定結果を示す。

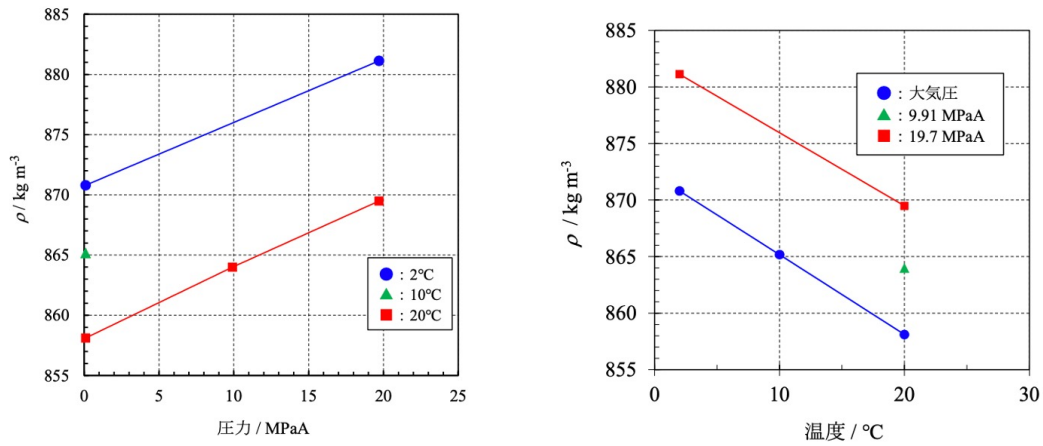


図 5.2: 液体シンチレータの密度測定結果

密度と温度、密度と圧力の関係は地上～深海の範囲で、直線的に近似することができる。よって測定結果より、式 (5.1)～(5.4) で表される液体シンチレータの密度-温度、密度-圧力関係式を得られた。

$$\rho_{T,P=19.7 \text{ MPa}} = (-0.65 \pm 0.03) T (^{\circ}\text{C}) + 882.41 \pm 0.49 \quad (5.1)$$

$$\rho_{T,P=0.1 \text{ MPa}} = (-0.71 \pm 0.03) T (^{\circ}\text{C}) + 872.21 \pm 0.44 \quad (5.2)$$

$$\rho_{T=2^{\circ}\text{C},P} = (0.53 \pm 0.03) P (\text{MPa}) + 870.75 \pm 0.44 \quad (5.3)$$

$$\rho_{T=20^{\circ}\text{C},P} = (0.58 \pm 0.03) P (\text{MPa}) + 858.11 \pm 0.39 \quad (5.4)$$

これらの式を用いて、初島地上 (20 °C, 大気圧) から初島 1km 深海 (2 °C, 10MPa) に環境を変化させると、2.08 %液体シンチレータの体積が減少することがわかった。またハワイ地上 (25 °C, 大気圧) からハワイ 4km 深海 (2 °C, 40MPa) に環境が変化する場合には、4.2 %体積が減少する。

体積弾性率

一定温度 T のもと、物体に作用する周囲の圧力 p の変化によって、物体の体積 v がどの程度変化するかを表す状態量を等温圧縮率といいその逆数を体積弾性率という。体積弾性率は流体の体積変化のしやすさを表す一般的な指標である。

$$\text{等温圧縮率} : \kappa_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

$$\text{体積弾性率} : K = \frac{1}{\kappa_T}$$

OBD 液体シンチレータの体積弾性率は 2 °C で 1.457GPa、20 °C で 1.286GPa であった。

温度・圧力変化による影響差

温度と圧力変化のどちらがより液体シンチレータの体積減少に影響を及ぼすかを考察してみる。

20°C, 大気圧 (858.11 ± 0.43) と、20°C, 10MPa、2°C, 大気圧を比較すると、圧力を変化させた場合 (大気圧 → 10MPa)、0.7% 減少温度を変化させた場合 (20°C → 2°C)、1.5% 減少となり、温度変化による体積変化の影響がより大きいことがわかった。このことは温度の均一化に時間がかかる大型検出器の場合には体積安定のために十分に冷やす時間を取ることが必要であることが示唆される。

5.2 圧力補償機構に求められる条件

深海環境における検出器内の液体シンチレータの体積減少分を補填する機構には以下の条件が求められる。

- ①液体シンチレータに関して耐薬品性があること。
- ②低温・高圧下で液体を供給することができ、また環境が元に戻ったとき供給した液を再度格納できること。
- ③深海環境に対する破壊耐性があること。

OBD 前身の Hanohano では、圧力補償機構としてバック形状のものが考案された (5.3)。バック形状の利点としては大容量であることである。一方、接続部分の脆弱性には不安が残る。JAMSTEC での海洋実験では、設置時の自由度の高さ、接続のしやすさ、また市場にさまざまな素材のチューブが流通しており手に入りやすいとのことから、チューブ型の形状が使われている。大型の際にはどちらの形状 (また、他の形) も検討すべきだが、本研究ではチューブ型の形状で開発を行った。



図 5.3: Hanohano で考案された Compensator bag [6]

5.3 素材の選定

圧力補償機構の素材の選定を行なった。

PTFE、PFA、ナイロン 12、ポリエチレン、水道用ホース (塩化ビニル) を用意して選定を行った。PTFE、PFA は様々な液体シンチレータ実験での使用実績がある樹脂である。ポリエチレンは、LAB を汲み取る際に使用するポンプの素材としての実績があったことから候補に含めた。以下の表には素材の選定のために行った実験、実験により確認される圧力補償機構に求められる条件 (5.2 参照)、実験で好成績を残した素材をまとめた。

	確認する条件	生き残った素材		
実験Ⅰ: LSによる変性があるかの検証	①	PTFE	PFA	ナイロン12
実験Ⅱ: 素材を浸したLABの透過率測定	①	PTFE	PFA	
実験Ⅲ: 潰れ方の特性の測定	②	PTFE	PFA	
実験Ⅳ: LAB,低温による潰れ方の変化の検証	③		PFA	

図 5.4: 素材の選定プロセス

結論、PFA が圧力補償機構に最も適した素材であることが分かった。
以下では各実験の詳しい内容について説明する。

5.3.1 実験Ⅰ 液体シンチレータによる変性があるかの検証

候補素材の液体シンチレータの溶媒として使われるリニアアルキルベンゼン (LAB) に対する薬品耐性を測定した。

実験手順は以下の通りである。

実験手順

1. 各素材チューブをカットし、LAB に浸して恒温槽にて 24 時間漬け込んだ。
2. 漬けておいたチューブ片を取り出し、重さや質感の変化を調べた。

恒温槽内は 40 °C に設定してある。アレニウスの式と経験則から、温度が 10 °C 上がるごとに化学反応速度が 2 倍になる [19]。小型プロトタイプ検出器における液体シンチレータの温度が 2 °C (深海 1km での水温) であるとする、反応速度は 16 倍になる。

結果

結果を表 5.2 にまとめた。

素材	重さ変化	質感の変化
PTFE	-0.0009g	変化なし
PFA	±0g	変化なし
ナイロン12	0.0014g	変化なし
ポリエチレン	0.1531g	明らかに柔らかくなった
水道ホース(軟質PVC)	-0.6097g	明らかに固くなった

表 5.2: 実験 I 結果

ポリエチレン、水道用ホースは LAB にひたすことで重さや質感の変化があった。水道用ホース PVC について重さの減少が確認されたがこれは乳化剤が溶けたことに起因すると考えられる。これら変化があった素材に関しては、LAB への耐性が弱く、圧力補償機構の素材には適さないと判断できる。PFA に関しては重さ、質感ともに変化はなかったが、PTFE、ナイロン 12 に関しては重さの変化が若干見られた。しかし、明らかに変化があったポリエチレン、水道用ホースと比べてわずかな重さの変化であったため、この実験においては測定誤差とみなした。

5.3.2 実験 II 素材を浸した LAB の透過率測定

実験 I にて変性が見られなかった 3 種類の素材 (PTFE、PFA、ナイロン 12) に関して、より詳しく LAB 耐性を調べるために各素材を浸した LAB の透過率を測定した。

実験手順

1. 各素材のチューブが漬かる表面積を同程度になるようにカットし、純化した LAB に浸して恒温槽で 1 週間漬け込んだ。
2. ベースラインとしてシクロヘキサンの 9cm 透過率を測定した。
3. 漬け込んだ LAB 試料について 9cm 透過率を測定した。
4. 一回の測定ごとにセルの洗浄を行い、各試料について 3 回ずつ測定を行った。
また測定の前にはセル内の試料を平衡状態にするために 10 分ほど放置してから測定を行った。
5. 3 回の測定の平均値を真の値とした。

透過率測定の原理

本研究ではダブルビーム型分光光度計 U-3900(日立ハイテック製)を用いて透過率を測定した。本測定では、光源として可視領域にハロゲンランプ、紫外領域には重水素ランプを用い、回折格子を用いたモノクロメーターで光を単色光に分光する。分光器から出た光は回転ミラーによって、サンプルの入った 1cm 石英セルと 10cm 石英セルにそれぞれ入射し、その後同一の光電子増倍管 (PMT) によって光の強度が検出される。10cm と 1cm の 2 つの石英セルを使うことで、セル表面での光学的影響を無視することができる。10cm と 1cm のセルの透過強度をそれぞれ I_{10cm} 、 I_{1cm} とすると、光路差 9cm を通過する間に減衰する光量の相対値は以下の表に書ける。

$$T_{9cm,relative} = \frac{I_{10cm}}{I_{1cm}}$$

ここで、短距離で透過率がほぼ 100 % であり、サンプルと屈折率が近い物質でベースラインを測定することで、サンプルの透過率の絶対値を測定することができる。本研究では屈折率が LAB と近い ($n=1.42$) である、シクロヘキサンを用いてベースラインを測定した。9 cm 透過率 T_{9cm} は以下のように求められる。

$$T_{9cm} = \frac{T_{9cm,relative}(sample)}{T_{9cm,relative}(baseline)} = \frac{I_{10cm}(sample)/I_{1cm}(sample)}{I_{10cm}(baseline)/I_{1cm}(baseline)}$$

結果

図 5.5 に透過率測定の結果を示す。黒点の LAB と比較したとき、PTFE、PFA についてはほとんど変化は見られなかった。一方、ナイロン 12 については若干の透過率の低下が確認できる。特に PPO の発光波長である 380~400nm あたりに関して大きく透過率が減少する部分がある。この結果より、PTFE、PFA は液体シンチレータ耐性があると判断した。

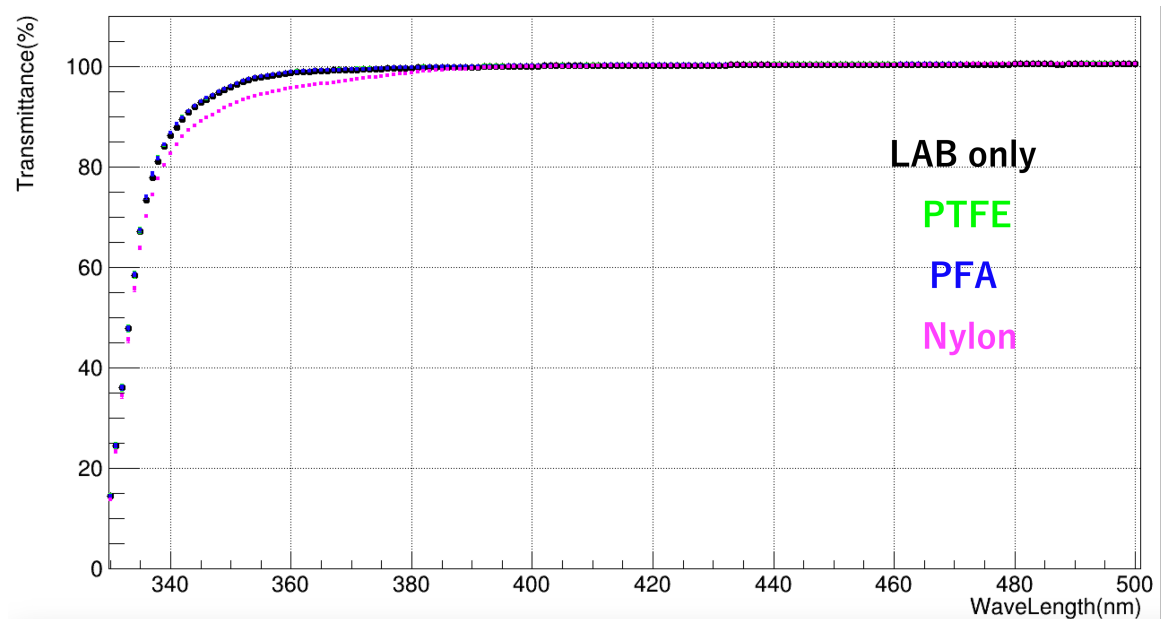


図 5.5: LAB 耐性実験Ⅱ結果

5.3.3 実験Ⅲ潰れ特性の測定

深海 1km の圧力下で液体シンチレータを補償するのに十分潰れるチューブを選定するために、荷重測定器を用いて、チューブを潰す際にかかる荷重を測定した。

実験手順

1. チューブを 2cm に切断する。
2. 荷重測定器 (イマダ デジタルホースゲージ 図 5.6) を用いて、チューブ片を潰していく際の力を測定する。荷重測定器では昇降速度、トリガーを設定することができる。以下この実験で設定した測定サイクルを示す。

測定サイクル

- a) 荷重 0.1N が測定されると (測定器先端がチューブに接触すると) 測定開始。
- b) 80 mm/min で下降。
- c) 荷重 250.0N に達するとそこで停止し、10 秒間維持。
- d) 300 mm/min で上昇する。



図 5.6: 荷重測定器

結果

測定の結果を図に示す。

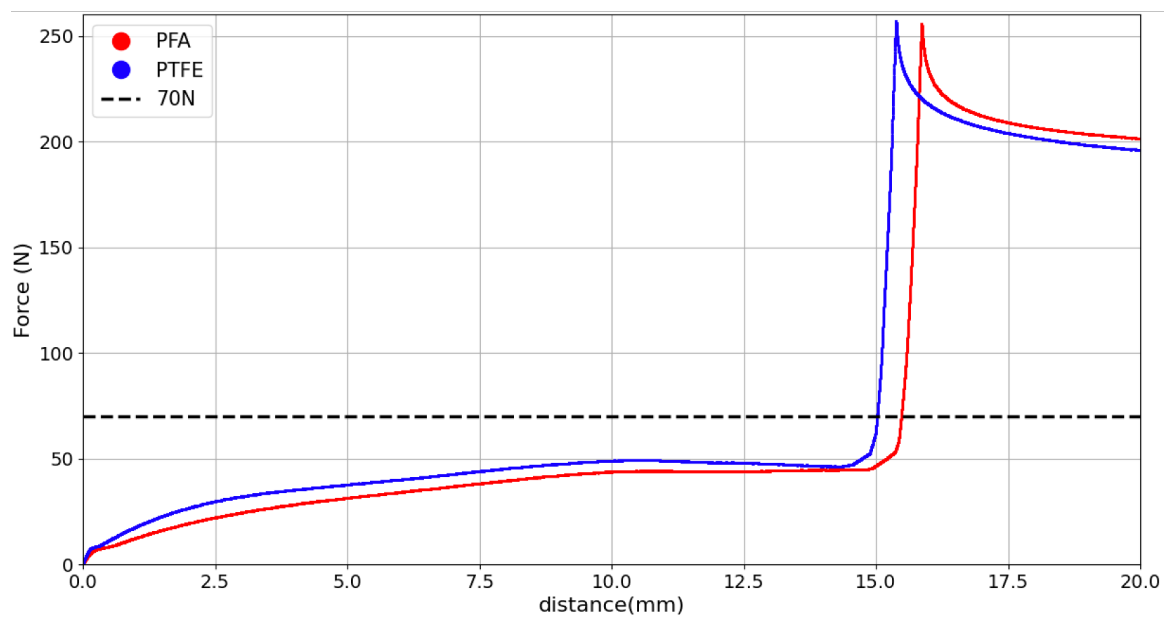


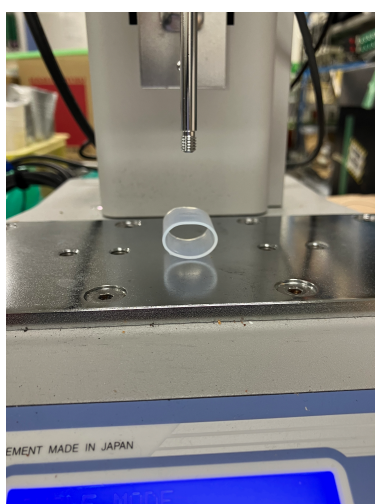
図 5.7: 荷重測定結果

PTFE チューブと PFA チューブはともに外径 18mm、内径 16mm(厚さ 1mm) である。傾き

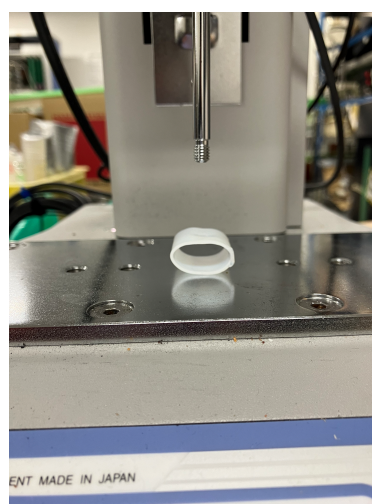
が急激に大きくなることはチューブが完全に潰れ、地面に力がかかっていることを示している。また、点線は荷重 70N を表している。測定器先端は直径 0.3cm の円形をしているため、約 70N の荷重で部分的にはあるが、深海 1km の水圧 10mMPa ($=101.972 \text{ kgf/cm}^2$) を再現できる。点線よりも小さい荷重で傾きの急増があれば、深海 1km において完全に潰れることができ、十分に液体シンチレータを供給することができると考えられる。

PFA、PTFE とともに荷重が 70N に達するまでに完全に潰れており、深海 1km で十分に液を供給できる柔軟性を持っていると判断できた。

しかし図 5.8 に示したように加重後には、PTFE は PFA よりも潰れたままの状態を維持していた。よって PFA の方がチューブ形状の復元性がよく、液体を再度格納できる能力に優れていると判断できる。



(a) PFA



(b) PTFE

図 5.8: 加重後のチューブの形状

5.3.4 実験Ⅳ LAB、低温による潰れ方の変化の検証

実験Ⅰ～Ⅲのすべてで好成績を収めた PFA チューブについて、LAB 浸すこと、低温に冷やすことで潰れ方に変性があるのか検証した。

実験手順は以下の通りである。

実験手順

1. LAB に浸した PFA チューブ片、3℃ (初島沖深海 1km 水温) に冷やしたチューブ片、そのままのチューブ片を用意する。
2. 荷重測定器を用いて、チューブ片を潰していく際の力のかかり方を測定する。

結果を図 5.9 にしめす。

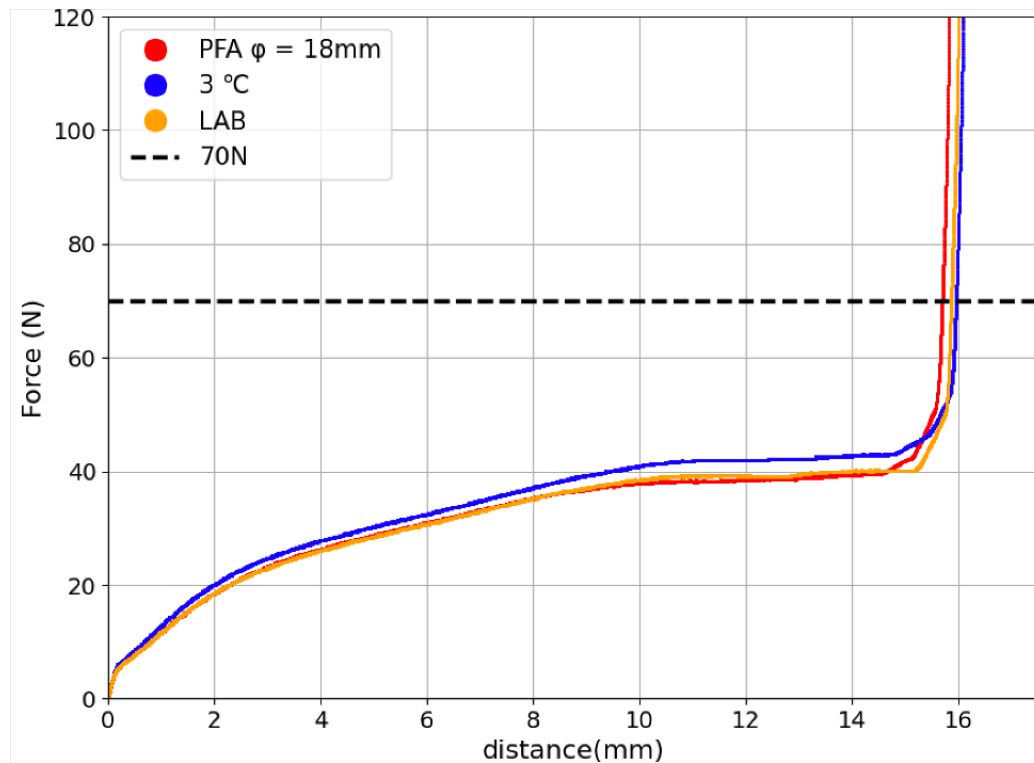


図 5.9: 実験IV結果

LAB に浸した PFA チューブの潰れ方には変化がなかった。

一方、冷やされた LAB については傾きが大きくなり、多少の硬化がみられた。しかし、深海 1km での水圧では十分につぶれる柔らかさであり、海中での使用に際しては問題ないと判断できる。

以上、圧力補償機構に用いるチューブ素材の選定試験 I ～IVを通して、すべての試験で良好な結果を示した PFA チューブがもっとも適していることがわかった。

5.4 耐圧試験

PFA チューブを使用した圧力補償機構の耐圧性を深海の高水圧を再現できる加圧タンクを用いて確認した。

5.4.1 圧力補償機構の構造

圧力補償機構の構造を図 5.10 に示す。



図 5.10: 圧力補償機構

5.3 で選出した PFA チューブ (外径:18mm、内径:16mm) の両端を Swagelok 社の継手で封じる。実際の小型プロトタイプ検出器ではチューブの長さは 3m である。3m での内容量は約 0.60L であり、液体シンチレータタンク内の体積減少分 0.24L を十分に補償することができる。また、一巻きでステンレス容器内に配置できる長さでもあり、検出器内の過密を防ぐ。

PFA チューブ

ニチアス株式会社製の PFA チューブ [18] を使用した。寸法は外径 18mm × 内径 16mm (肉厚 1mm) である。最小曲げ半径は 250mm であり、ステンレス容器の内周に沿って、キンクをさせることなく配置することができる。

継手

Swagelok 社製のチューブ継手を使用。バックフェルール、フロントフェルールという二つのフェルールによりチューブとの間に強固なシールを形成する。

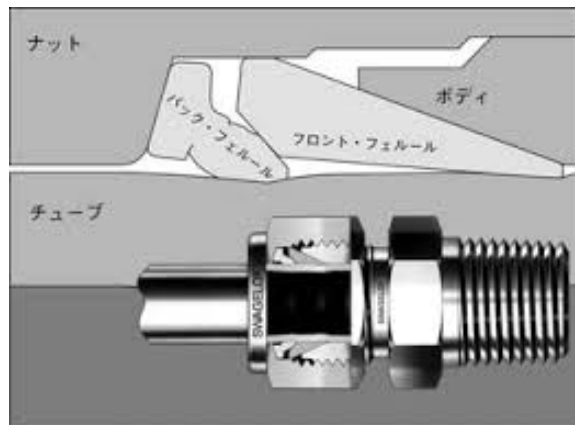


図 5.11: チューブ継手の構造 [19]

5.4.2 構造的耐圧性と機能的耐圧性

本加圧試験において検証した、二種類の耐圧性を定義する。

構造的耐圧性：機能が働かない中、加圧されても漏れがないか。

機能的耐圧性：加圧下で期待される機能が働くか、または機能が働いた際に構造を維持できるか。

これら耐圧性の有無を加圧タンクを用いた試験で検証した。

5.4.3 加圧タンク

本試験では、株式会社鶴見精機が所有する、加圧タンクを用いた。



呼称	フロート用	深海用	汎用	圧力計用
使用圧力	45Mpa	105MPa	50MPa	100MPa
容量	φ475×2300mm	φ600×1400mm	φ280×1000mm	φ160×450mm
用途	Deep NINJA	CTD、流速計	水質計	しんかい6500圧力計
構造	- 点検用窓付 - フランジ蓋 - ボルト止め型	シャープブロック型	- フランジ蓋 - ボルト止め型	- フランジ蓋 - ボルト止め型

図 5.12: 加圧タンク [20]

株式会社鶴見精機が所有する耐圧試験用加圧タンク。耐圧試験 1 回目～4 回目では汎用、5 回目では深海用加圧タンクを使用した。

タンク内部を水で充填し、電動ポンプを用いて水を入れ込んでいき加圧していく。内部圧力を自動制御できる機能はなく、圧力計を見ながら手動で加圧制御を行う必要がある。

5.4.4 耐圧試験 1 回目

1 回目の耐圧試験では、圧力補償機構の構造的耐圧性の試験を行なった。実験方法は以下の通りである。

実験方法

1. 株式会社鶴見精機が所有する汎用加圧タンクを使用した。
2. 加圧対象は、PFA チューブ (30cm) を Swagelok 継手で封じたものである。内部は作動油で満たし加圧されてもチューブが変形できないようにする。(図 5.13)
3. 加圧サイクルは、
 - ・ 15MPa まで 1MPa/min で加圧する。
 - ・ 1 時間保持する。
 - ・ 大気圧まで 1MPa/min で減圧する。

15MPa は深海 1km での水圧 10MPa に安全率 150 % をかけた値である。

4. 対象を取り出し後、目視による異常判断、加圧前後の重さの測定によって耐圧性の有無を確認した。



図 5.13: 試験対象 1 回目 加圧対象

結果

目視による異常は確認できなかった。一方、加圧前後で重さが 0.9g 増加した。この重さの微増については、数日経過後に再度重さを測定した際には減少したこと、継手の隙間に水が入り込んだことが確認できたこと、作動油と水の分離性が良いこと (図 5.14) に対してホース内部に水が入っていることが見られなかったことから、ホース内部ではなく継手等の隙間に入り込んだ水の重量分だと判断した。以上の結果より、圧力補償機構は 1km 深海における構造的耐圧性を十分に持つと判断した。

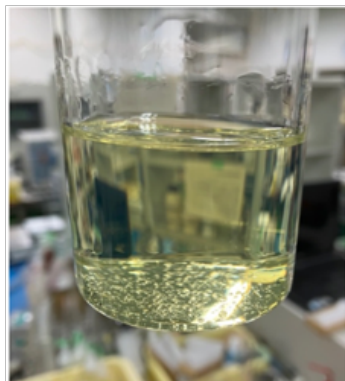


図 5.14: 水と作動油の分離性

5.4.5 耐圧試験 2 回目

2 回目の耐圧試験では圧力補償機構の機能的耐圧性を確認するために行なった。圧力補償機構に求める機能が働くように、すなわちチューブが潰れてくれるように内部を He 気体で満たした。

実験方法

1. 使用したタンクは汎用タンク。
2. 加圧対象は、PFA チューブ (30cm) を Swagelok 継手で封じる。内部は 0.1MPa の He で満たし、加圧時に本番同様チューブが潰れるようにした。(図 5.15)
3. 加圧サイクルは 1 回目と同様。
4. 目視による以上判断、加圧前後の He リークチェックにより耐圧性の有無を確認した。

加圧前の He リークチェックより、チューブ表面から約 $0.3 \sim 0.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度のリークが確認された。これは PFA はじめとする、高分子素材の透気性に由来する。加圧後の He リークチェックではこの値と比較して、リークの有無を判断した。



図 5.15: 試験対象 2 回目 加圧対象

結果

目視によってでも、チューブ内部への水の流入が見られた。チューブは楕円形に変形しており、加圧により潰れた形跡が見られた。He リークチェックでは、継手付近から大きなリークが見られた。継手付近のチューブの変形により、継手とチューブ間で形成されていたシーリングが破壊され、水が流入したと推測できる。以上の結果から、現行 (2 回目の試験実施時) の圧力補償機構の機能的耐圧性はない判断でき、継手付近のチューブの形状を保持する必要性があることがわかった。



図 5.16: 加圧試験 2 回目 結果

5.4.6 耐圧試験 3 回目

耐圧試験 3 回目の結果を踏まえて、継手付近のチューブ形状を維持し機能的耐圧性を十分に持たせるために、ステンレス管、樹脂インサート A、樹脂インサート B を挿入した圧力補償機構について加圧試験を行なった。

実験方法

1. 使用したタンクは汎用タンク
2. 加圧対象は継手付近のチューブ両側に、ステンレス管、樹脂インサート A、樹脂インサート B(図 5.17) を挿入した 3 種類の圧力補償機構。内部は 0.1MPa の He で満たした。
3. 目視による異常判断、He リークチェックにより耐圧性の有無を判断した。

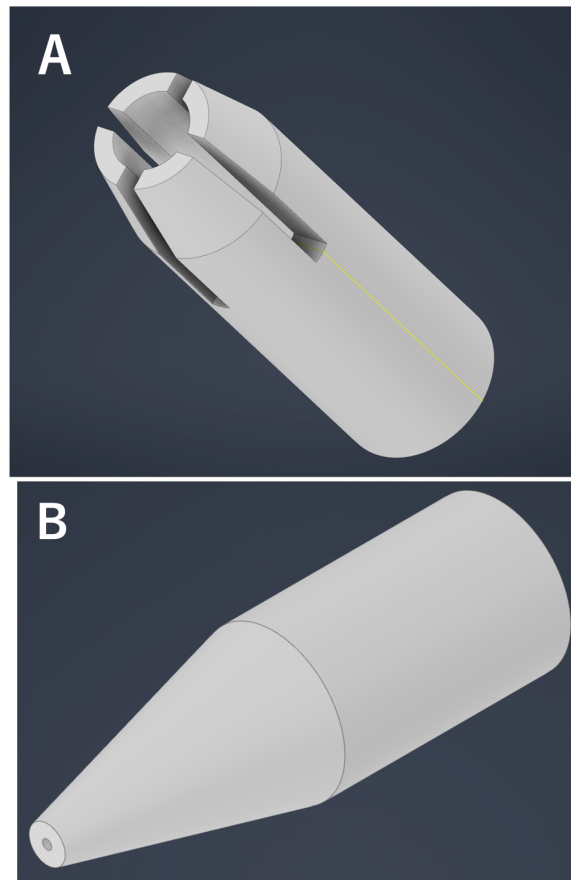


図 5.17: インサート A、インサート B

結果

ステンレス管

水が侵入が目視により確認できた。ステンレス管の端に押し付けられて、チューブに跡がついていた。He リークチェックではその跡から大きなリークが確認された。

CAD(Computer Aided Design) によるシミュレーションでは、ステンレス管のの端付近でチューブに特に応力がかかっていることがわかった。



図 5.18: ステンレス管 結果

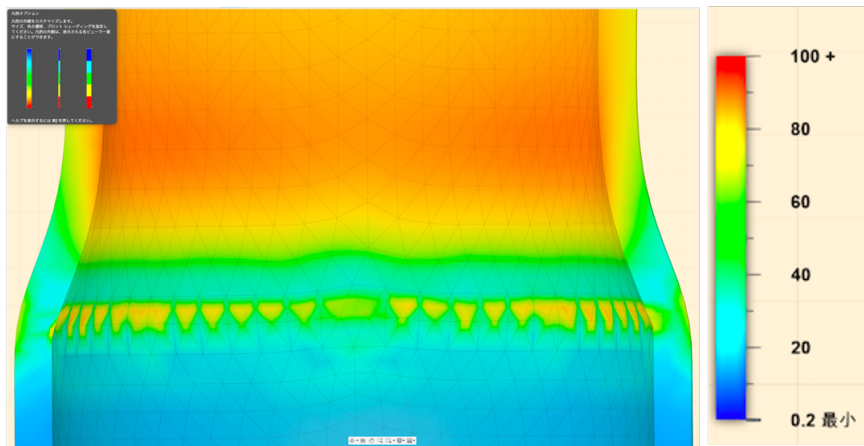


図 5.19: CAD シミュレーションによる応力分布

樹脂インサート A

水の侵入が目視により確認できた。樹脂インサート A が潰れて、チューブと継手に隙間を作ってしまった。He リークチェックでも継手付近からリークが確認できた。



図 5.20: インサート A 結果

樹脂インサート B

目視による水の侵入は確認できなかった。チューブは平らに完全に潰れた状態で取り出された。これは、PFA 表面から内部の He がリークしたためだと推測される。バルブを開けるとチューブの形状は元に戻った。He リークチェックでもリークは確認できなかった。以上の結果により、樹脂インサート B を挿入することで圧力補償機構の機能的耐圧性を 1km 深海に設置するのに十分向上させることができた。



図 5.21: 樹脂インサート B 結果

5.4.7 耐圧試験 4 回目

耐圧試験 4 回目では、チューブがキンクされること (折れること) による耐圧性への影響を確認した。

実験方法

1. 使用したタンクは汎用タンク
2. 加圧対象は PFA チューブ (～30cm) の両端を Swagelok の継手で封じたもの。チューブの継手付近には樹脂インサート B が挿入されている。チューブ中央付近にキンクを形

成し、加圧中においてもキンクを維持できるように、チューブ両端を紐で結びつけた (図 5.22)。また内部は He で満たした。

3. 加圧前の He リークチェックではキンク箇所を含めて、どこからもリークは確認できなかった。
4. 加圧サイクルは耐圧試験 1 回目～3 回目と同様。
5. 目視による以上判断、He リークチェックにより耐圧性の判断を行なった。

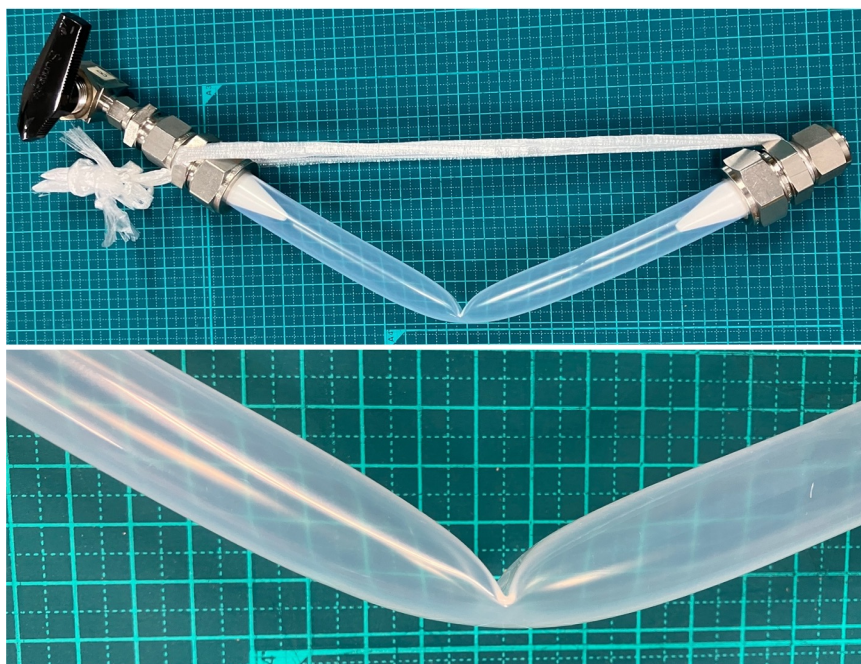


図 5.22: 耐圧試験 4 回目 加圧対象

結果

目視により水の侵入が確認された。He リークチェックではキンク箇所から少量のリークが見られた。よってキンクされることで耐圧性が損なわれることがわかる。そのため圧力補償機構の設置時にはキンクをさせないように十分に注意する必要がある。



図 5.23: 耐圧試験 4 回目 結果

5.4.8 耐圧試験 5 回目

圧力補償機構の耐圧性の最終確認として、液体シンチレータタンクと圧力補償機構からなる、液体シンチレータタンク系についての耐圧試験を行なった。

実験方法

1. 使用したタンクは深海用加圧タンク
2. 加圧対象は、液体シンチレータタンクに圧力補償機構を接続した液体シンチレータタンク系。内部は漏れがあった場合に確認しやすいように、着色した LAB を満たしている。(図 5.24)
3. 加圧サイクルは耐圧試験 1 回目～4 回目と同様。
4. これまでの目視による異常判断、He リークチェックに加えて、水中カメラを用いた加圧中のモニタリングを通して耐圧性の判断を行なった。

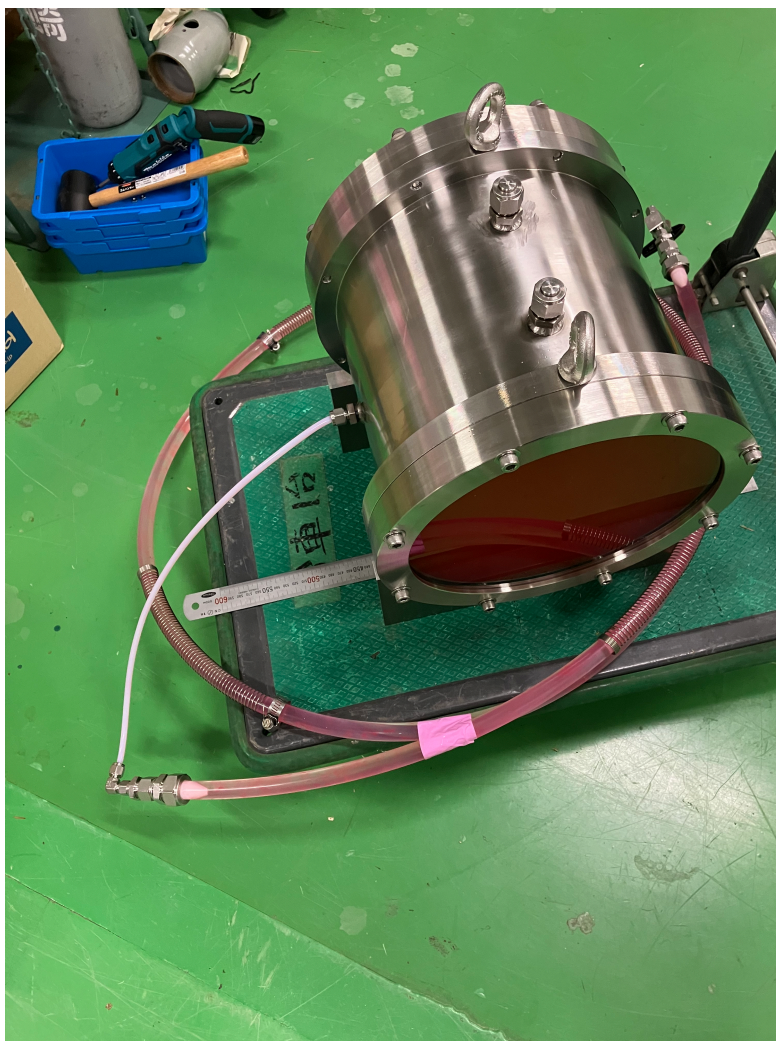


図 5.24: 液体シンチレータタンク系

PTFE チューブ

液体シンチレータタンクと圧力補償機構を繋ぐために、外径6mm×内径4mmのPTFEチューブを用いた。PTFEの耐LAB性は5.3.2実験Ⅲの結果からも十分にあると判断できる。最小曲げ半径は20mmで柔軟性に優れ、圧力補償機構がキンクしないように設置位置を調整することができる。

また、PTFEチューブの方がPFAチューブよりも潰れにくくなっており(図5.25)、PTFEチューブには常に液が充填されているため、PTFEチューブが潰れてタンクに液が供給できなくなることはない。

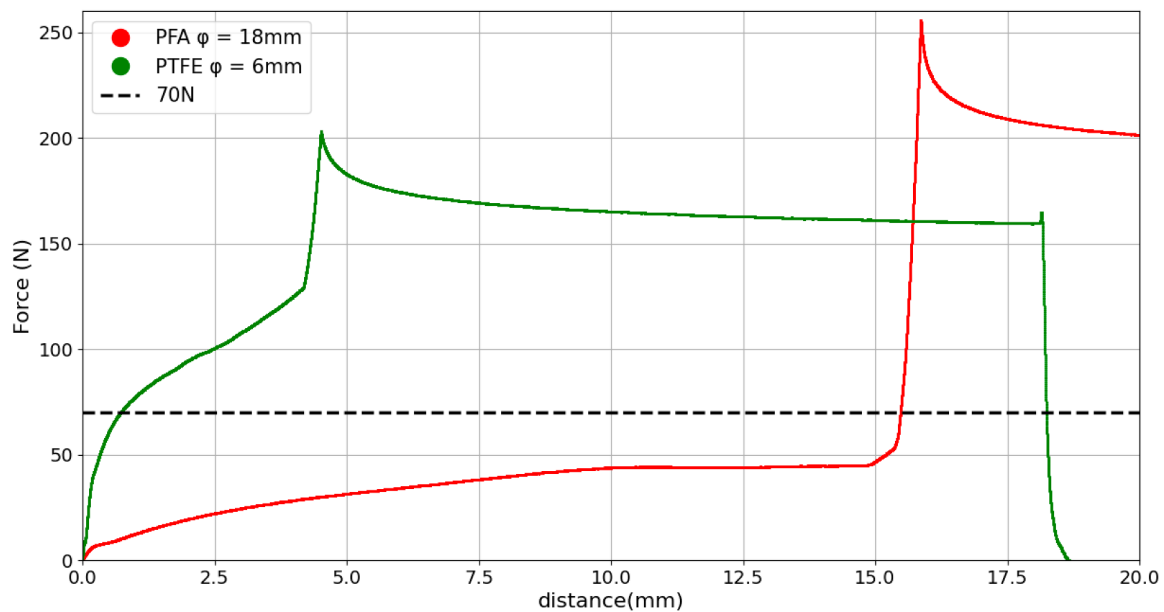


図 5.25: PTFE チューブと PFA チューブの潰れ方

水中カメラ

岡本硝子株式会社製の 10 インチ耐水压ガラス球にカメラ、照明、バッテリーを内包した、高水压対応撮影機器である [21]。耐水压ガラス球は 8000m 以上の深海においても使用実績があり、十分に耐圧性が保証されている。カメラはコムテック社製のドライブレコーダを使用している。バッテリーも内包しており、照明込みで 5~6 時間の撮影が可能となっている。

この試験では加圧対象全体が撮影されるように加圧タンクの高さ、カメラ画角等を考慮し図 5.27 のようなセットアップで水中カメラを設置した。



図 5.26: 水中カメラ



図 5.27: 撮影セットアップ

結果

目視による水の侵入は確認できなかった。水中カメラでも異常は確認できなかった。Heリークチェックでもリークは確認できず、液体シンチレータタンク系の1km 深海での耐圧性はあると判断した。

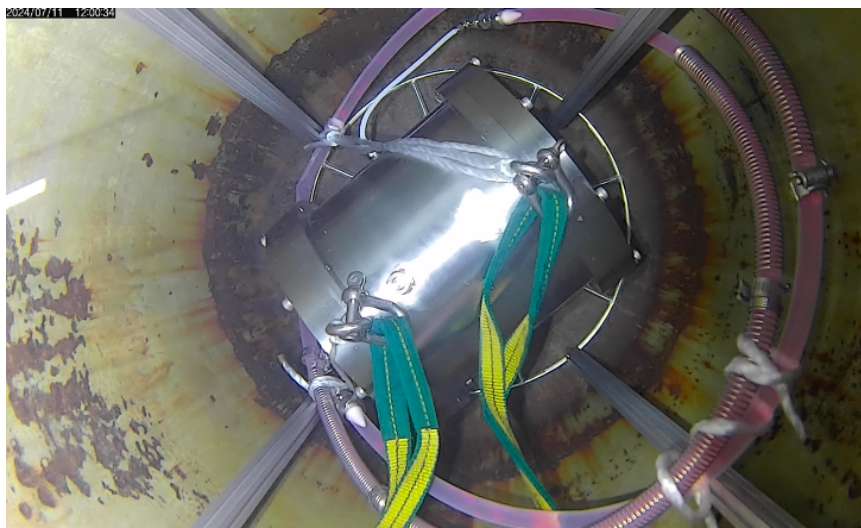


図 5.28: 加圧中の圧力補償系の様子

5.5 まとめと考察

素材の選定実験、加圧タンクを用いた耐圧試験を通して、小型プロトタイプ検出器に導入する圧力補償機構としては図 5.29 のようになった。



図 5.29: 圧力補償系 完成版

大型化に向けた考察

小型プロトタイプ検出器においては、材料の入手のしやすさ、扱いやすさ、JAMSTEC での実績があったことなどからチューブ型の圧力補償機構の開発を進めてきたが、1.5kt サイズへの導入の際には改めて検討が必要となる。1.5kt の液体シンチレータは、ハワイ地上 (25 °C、大気圧) での体積に比べ、海底環境 (2 °C、40MPa) では約 73kL 減少する。この減少分をチューブで補償するとしたら、今回採用したチューブの内径だと、約 365km もの長さが必要となり現実的ではない。Hanohano で考案されたバッグ型の構造を採用するとすると、容量に関しては、バッグの面積を内部検出器のステンレスタンク底面に合わせた場合、厚みは 20cm ほどとなり現実的である。一方、耐圧性、耐薬品性のある素材で大型バッグを作れるか、バッグの口金の素材と強度などは課題として残る。チューブ型の方が、タンクとの接続に関しては適していると言える。

どちらの形状にせよ、圧力補償機構はなるべくコンパクトな方が良い。液体シンチレータの体積減少は温度の影響をより受けると 5.1 で述べた。このことから、あらかじめ液体シンチレータを予冷してからタンクに入れることで体積減少分を小さくし、圧力補償機構のサイズも小さくできると考えられる。1.5kt サイズ検出器において地上で液体シンチレータを海底

温度 2℃ まで予冷する場合、体積減少分は圧力変化によるものだけとなり、2.37 %減少する。これは 37.5kL 減少に対応し、補償量を 37.6% 減らせることとなる。コストとかかる時間にもよるが、船上で液体シンチレータを予冷することは構造の単純化のため大型化の際には検討すべきことである。

第6章 小型プロトタイプ検出器の稼働

この章では、小型プロトタイプ検出器を実際に組み立てて、研究室での稼働実験を行った際の様子を記述する。

6.1 耐水圧シールド付き光検出器モジュールの組み立て

ここでは耐水圧シールド付き光検出器モジュールの組み立て方法について述べる。ここで留意すべきは、今回用いたPMT、硝子球は実際に海に沈める際のものとは違うということである。しかしながら、硝子球の封じ方や手順は本番でも同様となるため、組み立て方の確認を目的におこなった。

6.1.1 構成要素

本稼働実験に際して作成した光検出器モジュールの構成要素は以下の通りである。

17 インチ硝子球

岡本硝子性の耐水圧性硝子球。半球ずつからなり、片方には、光電子増倍管に接続するケーブルを通す穴が二つ空いており、内部を真空引きするためのバキュームポートが付けられている。

5 インチ光電子増倍管

浜松ホトニクス製の5インチ光電子増倍管(H6527)。硝子球内面と光電面の隙間はオプティカルグリースで埋められる。

光電子増倍管用設置台

小型プロトタイプ検出器では、光検出器モジュールは内部の光電子増倍管が横になるように設置される。そのため光電子増倍管を固定できるように台のようなものが必要である。ここでは粘土と発泡スチロールで作成した。

気圧計

硝子球は内部を真空引きすることにより、内外圧の差で半球どうしのシールを強固にする。気圧計は内部圧力の把握のために設置された。

乾燥剤

硝子球内部の結露を防ぐために、乾燥剤を封入した。

6.1.2 組み立て手順

耐水圧シールド付き光検出器モジュールの組み立て手順を以下に記す。

1. 硝子球半球に PMT の光電面をオプティカルグリースで空気が入らないように接着する。
2. ペアの半球のケーブル用穴からケーブルを通し PMT と接続する。
3. 気圧計、乾燥剤を球内に入れ、ガラス目地面をエタノールで洗浄する。
4. ケーブル用穴をシリコンシーリング材で塞ぐ。
5. バキュームポートを開き、真空ポンプを接続し減圧吸引する。
6. 内部の気圧計が 800hPa～900hPa になったらバキュームポートを閉じる。
7. 硝子目地にブチルテープを 1 周巻き、密着させる。
8. ブチルテープの上から、防水テープを 3 周巻く。
9. 30 分を目処に内部圧力が上昇していないことを確認し、上昇がなかったら完成とする。

硝子球は岡本硝子の高い硝子加工技術が成しえる、目地面の精巧さにより密封することができる。そのため目地面をできるだけ綺麗に保つことが必要不可欠である。図 6.1 に完成した光検出器モジュールを示す。



図 6.1: 光検出器モジュール

6.1.3 光検出器モジュールの設置

小型プロトタイプ検出器において光検出器モジュールは図 6.2 のような台座に設置される。



図 6.2: 光検出器モジュールの台座

設置の際考慮しなければいけないのは硝子球の浮力である。17 インチ硝子球は水中で約

245N の浮力がかかる。これは重量に換算すると約 -25kg にもなる。水中において、光検出器モジュールが浮き上がることを防ぐため、図 6.3 のようにゴムバンドとラチェット式ベルトで縛りつけた。

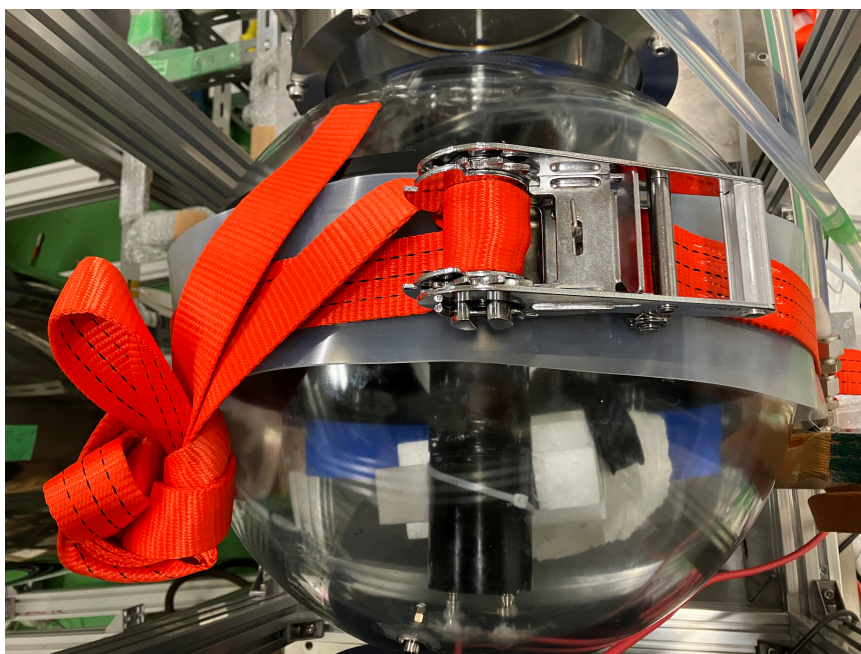


図 6.3: 光検出器モジュールの固定

6.2 液体シンチレータの作製と導入

LAB の純化

工業的に生産された LAB には製造上の有機不純物が含まれる可能性があり、透過率の低下が見られる。(図 6.4)

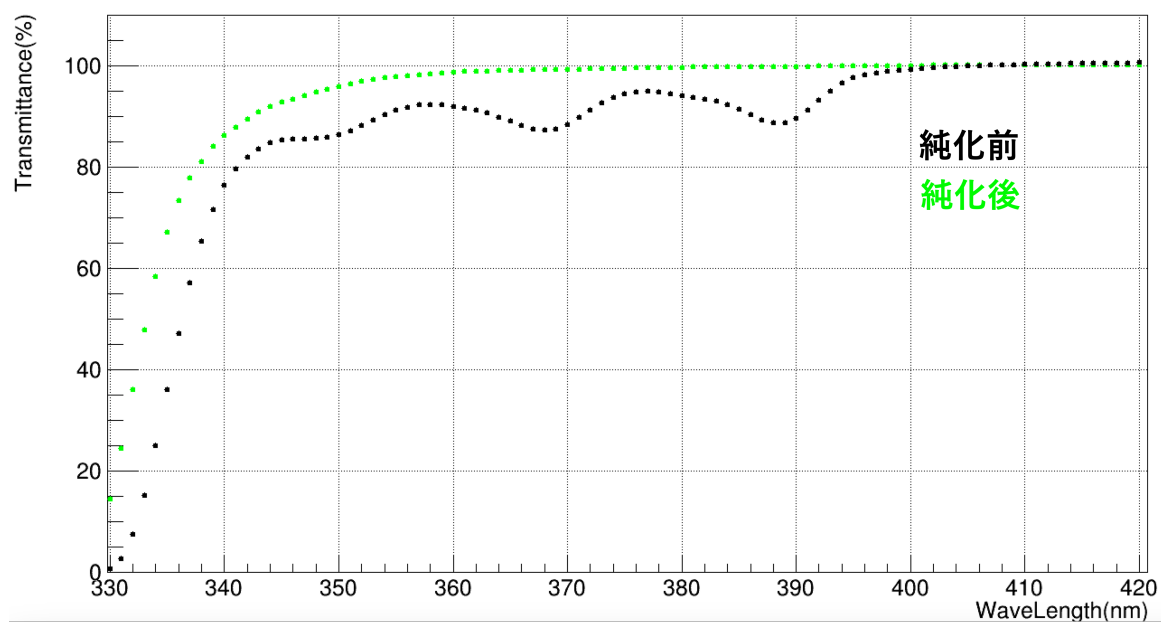


図 6.4: 純化前後の LAB 透過率

先行研究 [22] により活性炭を用いて LAB に含まれる不純物の吸着純化が可能であるという報告がされており、本研究でも活性炭による純化を行った。

活性炭量は LAB 100mL に対して 12.4g で、純化時間は 18 時間とした。



図 6.5: LAB 純化の様子

液体シンチレータの作製

純化した LAB に発光剤である PPO を混ぜ、液体シンチレータを 13L 作成した。溶媒に LAB のみを使った液体シンチレータについては、PPO の量は 3g/L までは、発光量が増加することが先行研究によって明らかになっている (図 4.7)。ここではそれに従って 3g/L の分量で PPO を入れた。

液体シンチレータの導入

図 6.6 にあるような、窒素バブリングとプロトタイプ検出器への導入を連続にできる装置を用いた。酸素クエンチングによる発光量の減少、低温環境における透過率の悪化を防ぐために窒素バブリングを行うことは必要である。



図 6.6: 窒素バブリングに用いた装置系

1. 液体シンチレータタンク内を窒素で満たした。(図 6.7a)
2. バブリングを行うステンレスタンク内に液体シンチレータを 4.5L 入れる。
3. 窒素の流量 5L/min で 20 分間、窒素バブリングを行う。(図 6.7b)
4. ステンレスタンク内の液体シンチレータを液体シンチレータタンク、圧力補償ホースに送液する。(図 6.7c)
5. 2~3 を 3 回繰り返す、液体シンチレータタンクと圧力補償ホース内を満たす。

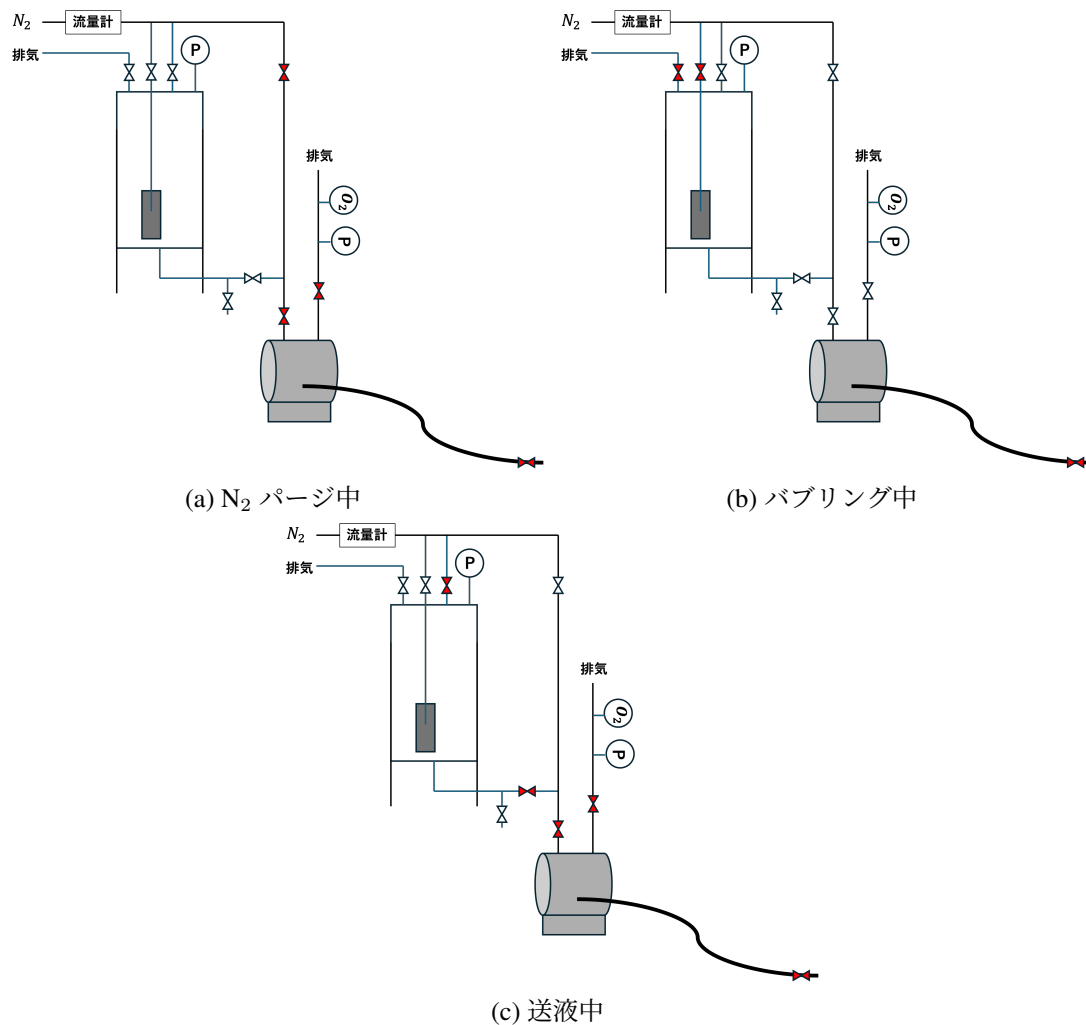


図 6.7: 窒素バブリング・導入方法

6.3 初稼働

小型プロトタイプ検出器の研究室での稼働を行った。この稼働では ^{60}Co 線源から放出される2本の γ 線(1.17MeV、1.33MeV)による液体シンチレータの発光を光検出器モジュールで捉えられるか確認することを目的とした。本実験で使用した ^{60}Co の数量は約 $2 \times 10^4 \text{ Bq}$ で、法律で定められる ^{60}Co の下限数量 $1 \times 10^5 \text{ Bq}$ を下回っている。この場合「放射性同位元素等の規制に関する法律」に基づく規制の対象にならず、届け出や許可の必要なく使用することができる。本稼働実験にて、 ^{60}Co 線源の γ 線による液体シンチレータの発光を小型プロトタイプ検出器の構造で捉えることができれば、検出器とともに深海に沈めることで検出器の長期間の稼働における性能評価を行う校正線源として利用できる。

測定のセットアップ

測定のセットアップの概略図を図 6.8 に示す。本実験は二つの条件での測定を行なった。条件 1 は、 ^{60}Co を設置せず PMT のノイズ、ミューオンによるチェレンコフ光、シンチレーション光などのバックグラウンドの測定を行なった。条件 2 では、 ^{60}Co を液体シンチレータタンク側面に貼り付けて測定を行なった。ステンレス容器内部に液体シンチレータタンクと二つの光検出器モジュールが格納されており、PMT の光電面と液体シンチレータタンクの亚克力窓が浸る水位で水をためた (図 6.9)。ステンレス容器の上蓋を被せ、暗幕で外部からの光を遮蔽した (図 6.10)。硝子球のケーブル用穴と、ステンレス容器のケーブル用ポートを通して、HV(High Voltage) ケーブルが高压電源に、シグナルケーブルが FADC(Flash Analog to Deigital Converter) に接続される。PMT からの出力電荷量は FADC によって、デジタルチャンネル数 (ADC 値) に変換され波形が取得される。その後、その波形を積分することで電荷 (Q) が求められる。

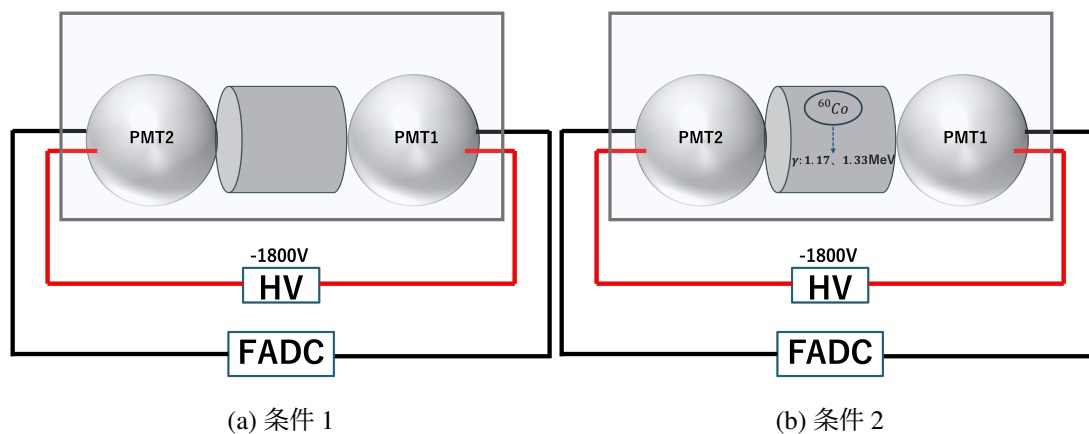


図 6.8: 測定セットアップ

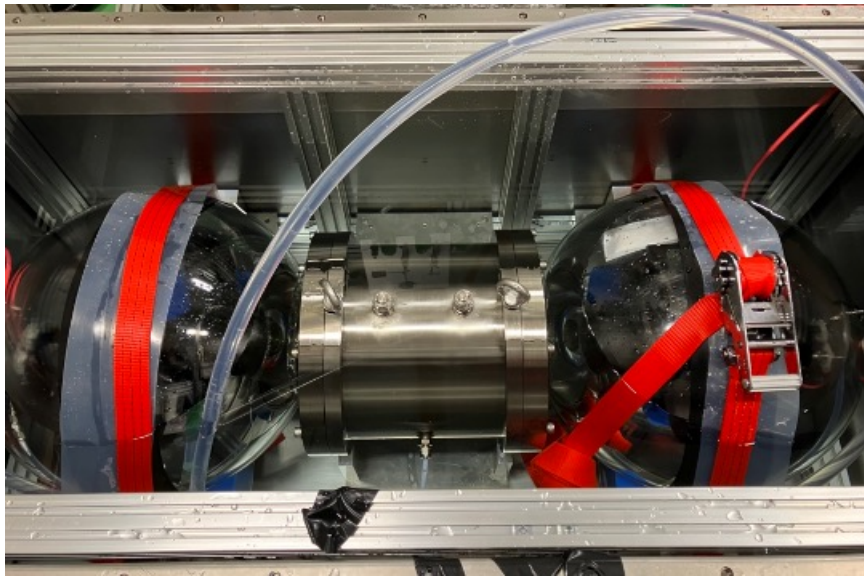


図 6.9: 水の中の検出器



図 6.10: 遮蔽の様子

PMT の故障

本来、二つの PMT のコインシデンスを取ることにより、バックグラウンドの削減を行う予定であった。しかし高電圧をかけていく過程で、PMT2 の電圧がかからない現象が発生した。その後、高圧電源を換えたりしながら何度か電圧をかけなおしたが、電圧はかからなかった。よって故障とみなし、ここでは PMT1 で得た結果を示す。

故障の原因については調査中であるが、検出器内の窮屈さから高電圧用ケーブルが屈曲が原因の一つであると考えられる。。

結果

図 6.11 に PMT 測定結果を示す。

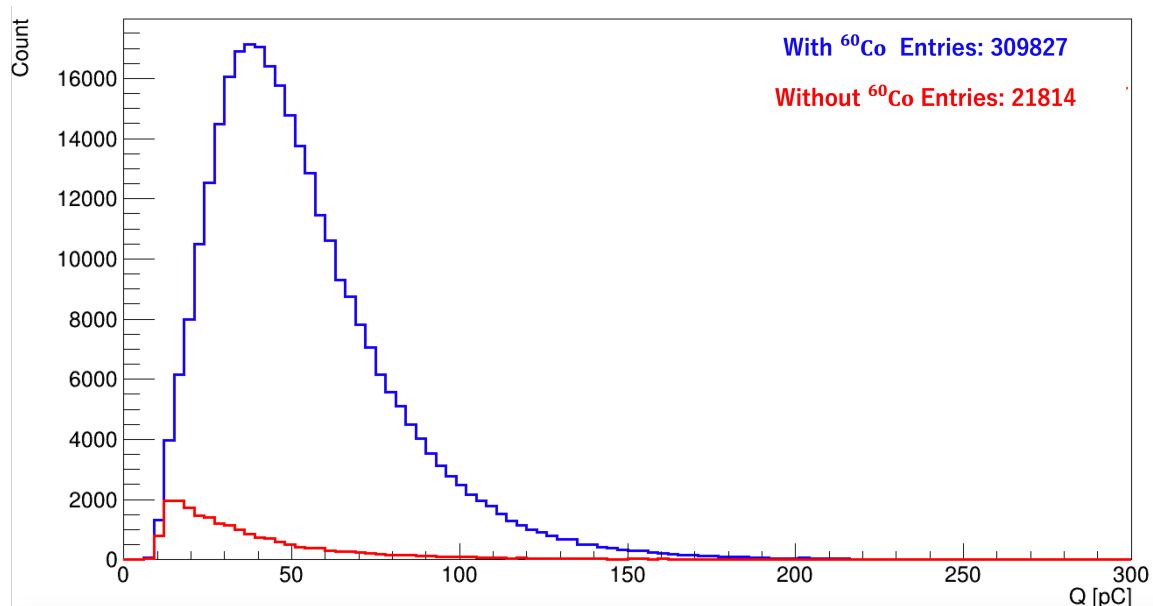


図 6.11: PMT1 からの出力電荷量分布

条件 1 線源を置かなかった時の結果は赤のヒストグラムで、条件 2 線源を置いた時の結果は青のヒストグラムで示している。測定時間は 60 秒である。線源が置かれなかった線源の有無で明確な変化があり、これは ^{60}Co 線源の γ 線による液体シンチレータの発光を捉えることができたためだと推測できる。

図 6.12 には PMT1 の光電面の様子を示してある。オプティカルグリースの充填部に気泡が入り込んだりしていることがわかる。現在、千葉大学と共同開発している D-Egg 型光検出器モジュールでは、硝子球と PMT の光電面の間を光学ゲルで充填するが、非常に綺麗に充填する方法が確立されている。また光電面も今回の稼働実験で使用したものよりも大きくなる。

そのため深海での測定時には今回の結果以上に明確に ^{60}Co 線源の γ 線を検出できることが推測される。よって、 ^{60}Co は小型プロトタイプ検出器の校正線源として十分使用可能である。

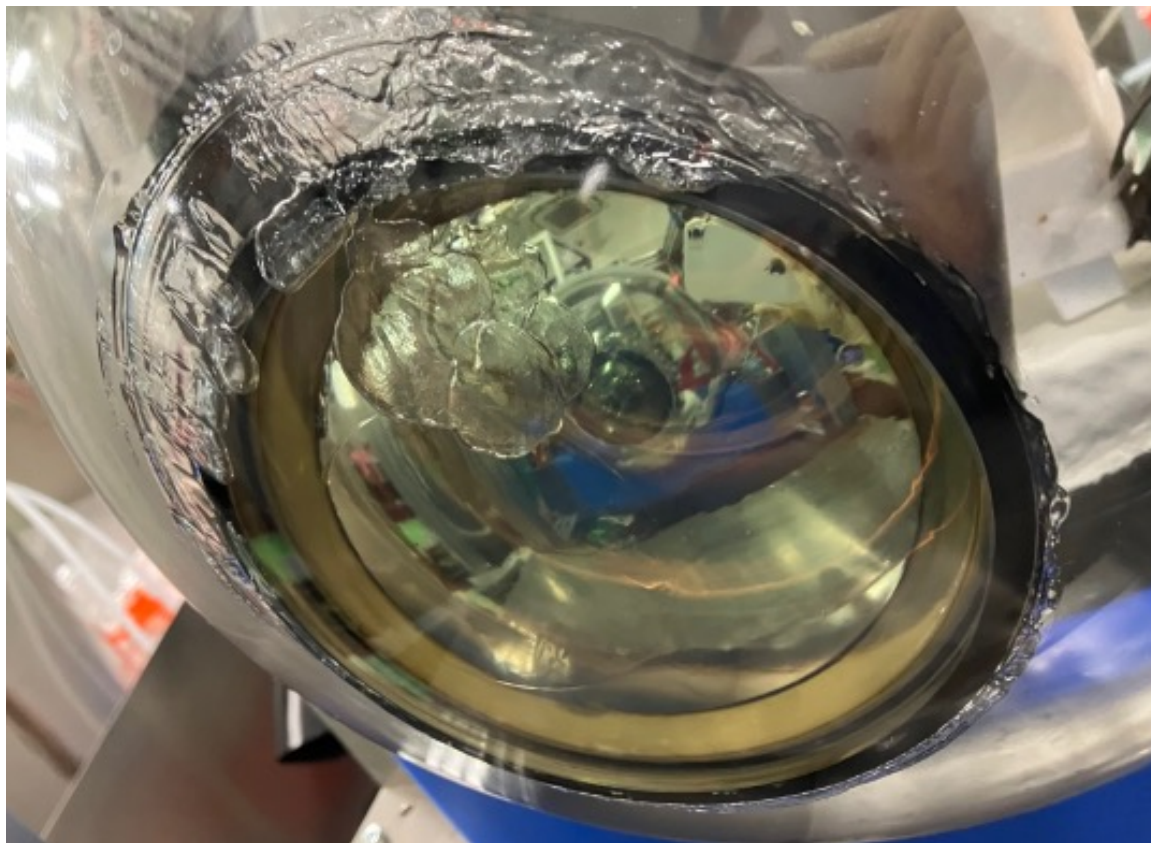


図 6.12: PMT1 の光電面の様子

6.4 本課題実験で生じた問題

硝子球の浮力

6.1.3 でも、述べたように水中に設置される検出器では浮力は大きな問題である。特に光検出器モジュールの硝子球はその浮力の大きさと、球体であるが故の固定のしづらさから開発の際に考慮すべき事柄である。実際に本稼働実験においてもゴムバンド、ラチェット式ベルトをすり抜けて浮き上がることがあった。浮力を減らすこと、安全に固定することの両軸で考える必要がある。

ケーブルの配線

検出器を組み立てるとステンレスタンク内は非常に窮屈である。そのため図 6.13 のようにケーブルが壁や他の構成要素と干渉していた。



図 6.13: ケーブルが干渉している様子

ステンレス容器、検出器構成要素を固定するステンレスフレームの拡張を考慮すべきである。

第7章 小型プロトタイプ検出器におけるミュオンシミュレーション

小型プロトタイプの観測対象の一つに深海でのミュオンレートがある。この章ではシミュレーションによる小型プロトタイプ検出器におけるミュオンレートの見積もりについて述べる。

7.1 宇宙線ミュオンのシミュレーション

本研究では MUSIC(MUon SImlulation Code)[24],[25] を用いて、小型プロトタイプ検出器に到達するミュオンのエネルギー、角度分布、レートを求めた。MUSIC はミュオンに特化した三次元モンテカルロシミュレーションツールである。MUSIC では、ミュオンが物質を通過する際の、エネルギー損失を伴う相互作用(制動放射、非弾性散乱、電子対生成、電離)を確率過程とみなし取り扱う。ミュオンの物質との相互作用を一つ一つ追うわけではないので、他の素粒子シミュレーションツールに比べて計算が格段に早い。

MUSICでは海面でのミュオンのエネルギースペクトルを考慮する必要がある。海面での宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルは T.K.Gaisser によって次の式のように表すことができる。

$$\frac{dN_{\mu_0}}{dE_{\mu_0}d\Omega} \approx A \frac{0.14E_{\mu_0}^{\gamma}}{\text{cm}^2 \text{ sr s GeV}} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1\tilde{E}_{\mu_0} \cos \theta}{115}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1\tilde{E}_{\mu_0} \cos \theta}{850}} + r_c \right\} \quad (7.1)$$

ここで E_{μ_0} は地表面でのミュオンエネルギー、 $\tilde{E}_{\mu_0}$ は大気の上にあるミュオンのエネルギー、 θ は地表の天頂角である。低エネルギー領域では E_{μ_0} と $\tilde{E}_{\mu_0}$ の間にわずかな違いがあるが、Gaisser パラメータ化では $E_{\mu_0} = \tilde{E}_{\mu_0}$ として扱う。また Gaisser パラメータ化では $A = 1$ 、 $\gamma = 2.70$ 、 $r_c = 0$ であるが、深さが 1-2 km w.e. (kilometer water equivalence) より大きい場合は、支配的な高エネルギーミュオンを詳細に記述するために LVD(Large Volume detector) パラメータ化が推奨されている。その場合 $A = 1.84$ 、 $\gamma = 2.77$ となる。本研究では小型プロトタイプ検出器の設置深度である深海 1km を想定しているので Gaisser パラメータを使用した。

本研究では小型プロトタイプ検出器設置深度である 1km でのシミュレーションを行った。

7.2 深海 1km における宇宙線ミュオンのフラックスと角度分布

シミュレーションの結果、海底 1km における宇宙線ミュオンのエネルギー分布、天頂角 θ 分布を得た。また宇宙線ミュオンフラックスは $2.11 \times 10^{-6} (cm^{-2} s^{-1})$ 、平均エネルギーは 186GeV と算出された。

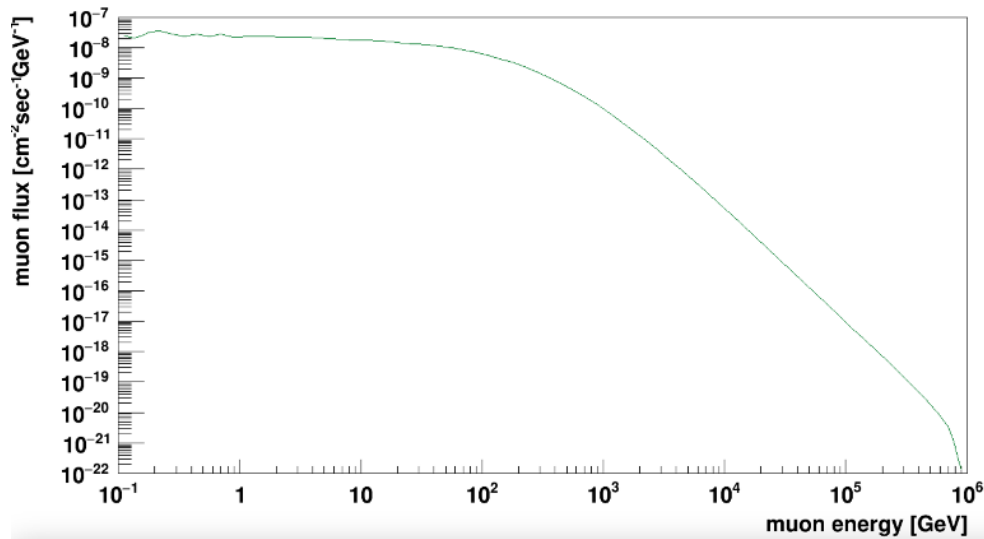


図 7.1: 深海 1km におけるエネルギー分布

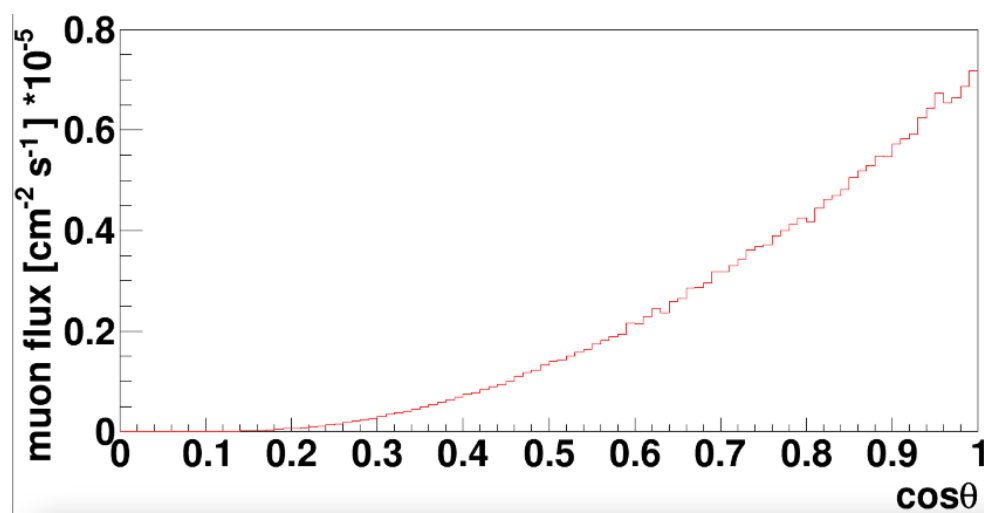


図 7.2: 深海 1km における天頂角分布

7.3 小型プロトタイプ検出器でのミュオンレート

前述のように得た、1 km 深海での宇宙線ミュオンのシミュレーション結果と Geant4 という素粒子シミュレーションツールを用いて、小型プロトタイプ検出器に到達するミュオンレートを求めた。

シミュレーションのセットアップを図に示す。

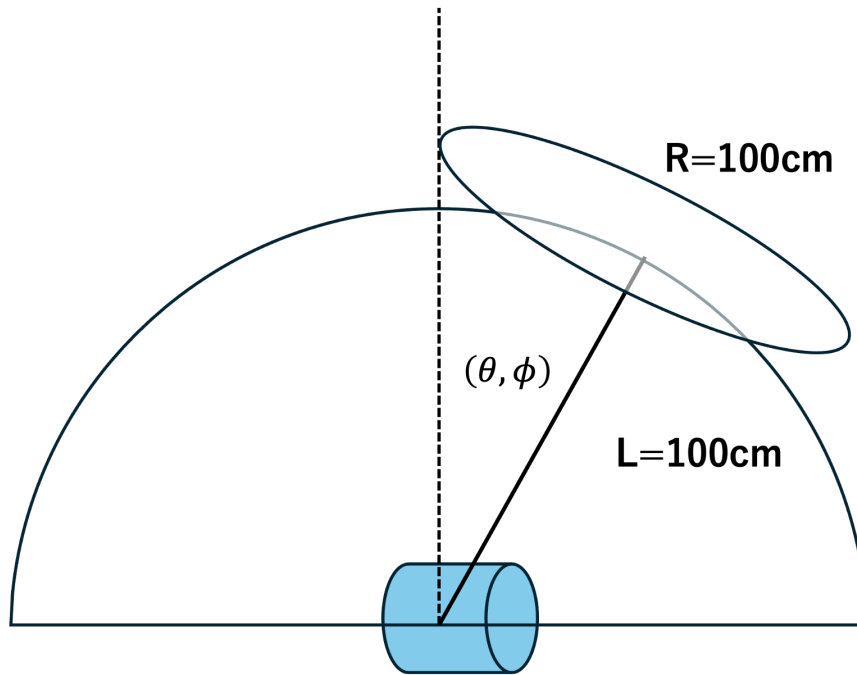


図 7.3: ミュオンレート算出のためのセットアップ

まず、Geant4 を用いて小型プロトタイプ検出器のジオメトリを作成した。次に、先述の MUSIC で得たサンプルイベントを 1 つランダムに取ってきて、ミュオンのやってくる角度方向 (θ, ϕ) から小型プロトタイプ検出器を覆う半径 100cm の半球の表面上で (θ, ϕ) に従った 1 点を決める。その点から半径 100 cm の円盤を用意し、その円盤上の任意の点を決め、その点から円盤に垂直な方向にミュオンを発射する。ここで半球や円盤の半径を 100cm としているのは、小型プロトタイプ検出器を十分に覆う長さであるからである。このシミュレーションをミュオン 500 万イベント分行なった。これは現実世界で、

$$\begin{aligned}
\text{SimTime} &= \frac{\text{EventNum}}{\text{area} * \text{flux}} \\
&= \frac{5 \times 10^6}{(100(\text{cm})^2 \times \pi) \times 2.11 \times 10^{-6}(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})} \\
&= 7.54 \times 10^7 (\text{s})
\end{aligned}$$

の時間に相当する。

シミュレーションの結果、500 万回のミュオン照射に対して、液体シンチレータ領域に到達しエネルギーを落としたミュオンの数は 80100 個であった。

よってミュオンレートは、

$$\begin{aligned}
\text{Muon rate} &= \frac{\text{Event Num}}{\text{Sim Time}} \\
&= \frac{80100}{7.54 \times 10^7} \\
&= 1.06 \times 10^{-3} \text{Hz}
\end{aligned}$$

となった。これは小型プロトタイプ検出器の設置予定期間の 1 ヶ月で 2748 個到達することになる。

また、図 7.4、図 7.5 に液体シンチレータ領域でのミュオンの track length、energy deposit のヒストグラムを示す。track length のヒストグラムに引かれた青い点線は、小型プロトタイプ検出器の円柱底面の直径 258mm の位置である。小型プロトタイプ検出器に侵入するミュオンは天頂方向のものがもっとも多く LS タンクは円柱を横に倒した構造をしているため、258mm より少しピークの位置がずれ、広がりを持った分布をしている。

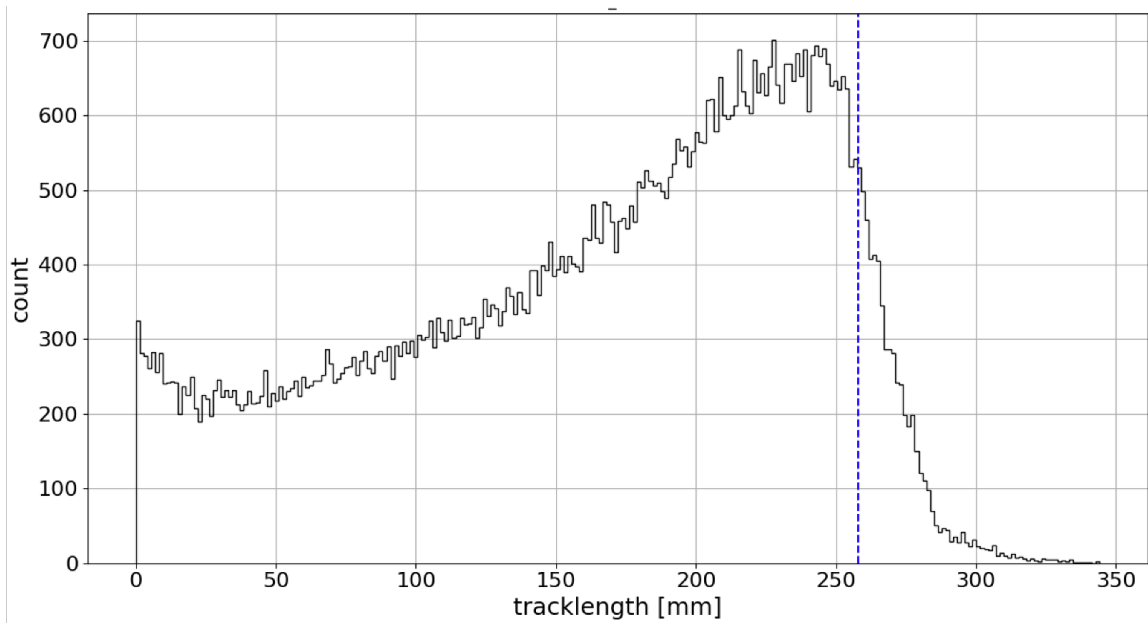


図 7.4: Track length

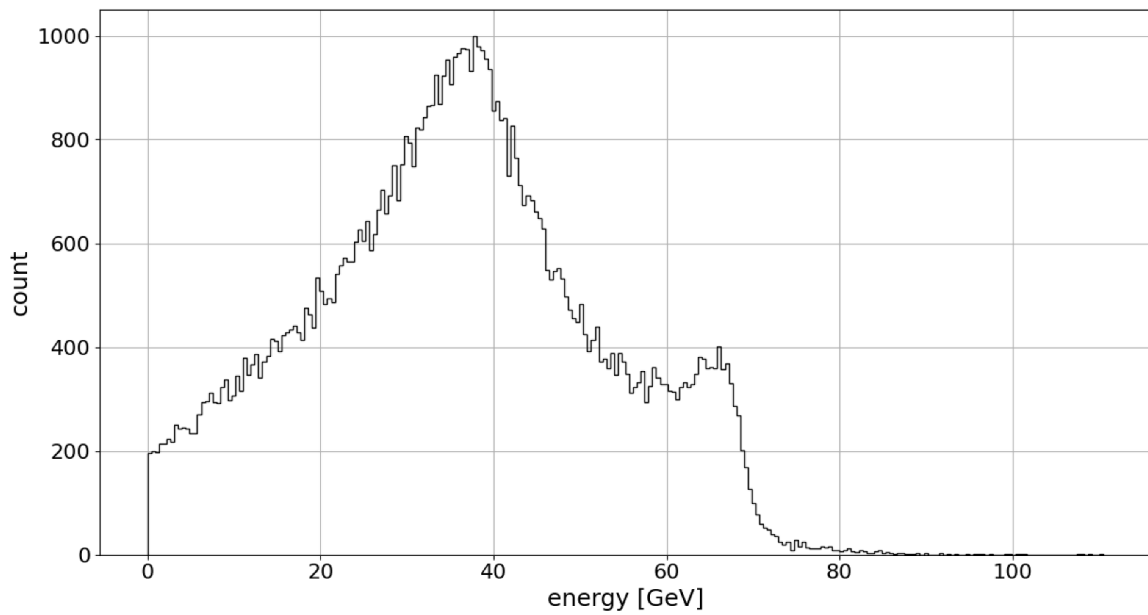


図 7.5: Energy deposit

ここで得られたシミュレーション結果は、光学シミュレーションによる光検出器でのミュオンの検出効率の算出に使用され、約 8 割のミュオンによる液体シンチレータの発光が光検出器で捉えることができると求められた。

深度によるミュオンレートの変化

小型プロトタイプ検出器では深度ごとのミュオンレートを測定することも観測対象の一つにしている。

シミュレーションによるミュオンレートの深度による変化の様子を示す。

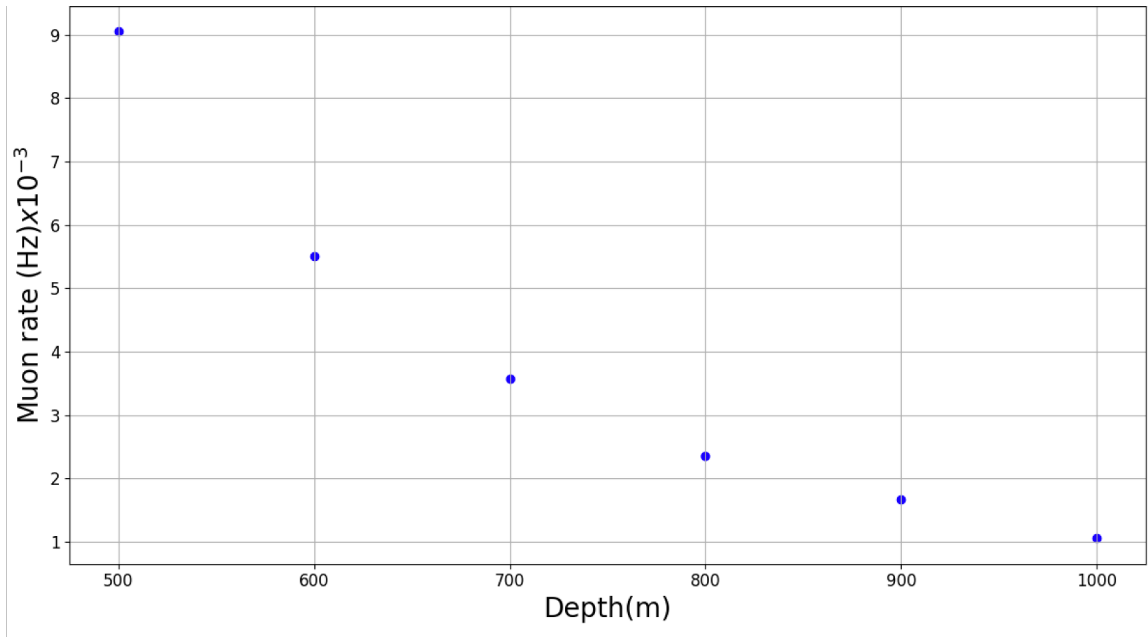


図 7.6: 海底深度とミュオンレート

第8章 結論と今後の展望

8.1 結論

本研究では、小型プロトタイプ検出器を 1km 深海での稼働の実現に必要な、圧力補償機構の開発、小型プロトタイプ検出器の地上での初稼働、シミュレーションによるミュオンレートの算出を行なった。圧力補償機構の開発では、液体シンチレータの溶媒として使用予定のリニアアルキルベンゼン (LAB) に対する耐薬品性があるかどうか、深海の高圧下で十分に潰れ液を供給することができるか、深海環境において破壊耐性があるかどうかを確認するいくつかの実験を行った結果、素材として PFA がもっとも適切であるとわかった。その後、深海水压を再現できる加圧タンクを用いた圧力補償機構の耐圧試験を行なった。その結果、小型プロトタイプ検出器の液体シンチレータタンクと圧力補償機構の役割を担う PFA チューブ 3m からなる、液体シンチレータタンク系の 1km 深海での耐圧性を十分にもつ構造を設計することができた。

次に、プロトタイプ検出器の地上での初稼働では、検出器の組み立てを行い、 ^{60}Co 線源の γ 線による液体シンチレータの発光を捉えることを目的とした実験を行った。検出器を初めて組み立てることで、いくつかの解決すべき問題点を把握することができた。結果として、 ^{60}Co 線源の γ 線による液体シンチレータの発光を捉えることができ、小型プロトタイプ検出器の深海での稼働の際に ^{60}Co を校正線源としての使用可能性を示すことができた。

最後に、シミュレーションによるミュオンレート推定では、小型プロトタイプ検出器の観測対象の一つとして考えられているミュオンの深海 1 km における到達レートをモンテカルロシミュレーションによって求めた。結果として、小型プロトタイプのミュオンレートは $1.06 \times 10^{-3} \text{Hz}$ であった。

8.2 小型プロトタイプ検出器稼働までの計画

以下には 2025 年 1 月現在における、プロトタイプ検出器の深海 1 km での稼働までに、やるべきことを列挙している。

- ・ 光検出器モジュールの開発
- ・ 液体シンチレータの漏れを防ぐ機構の開発
- ・ プールテスト
- ・ 観測対象候補となる物理イベントのシミュレーション
- ・ 運搬船の使用申請

光検出器モジュールの開発

2024 年 12 月より、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター (ICEHAP) との共同研究を開始し、OBD に適したガラスシールド付き光検出器モジュールの開発を行っている。2024 年 12 月の共同研究では、D-Egg の使用方法、得たデータの解析方法のレクチャーを受けた。また、液体シンチレータの発光を捉えることを目的とした簡易的な実験を行なった。

2025 年春ごろには、OBD 用のエレクトロニクスに関して ICEHAP との共同開発が開始される予定である。

液体シンチレータの漏れを防ぐ機構の開発

最外装のステンレス容器が液体シンチレータの海への流出を防ぐ役割を担っているが、万が一のために、リーク対策をより強固なものにしたい。

プールテスト

深海 1 km への設置手順の確認、遠隔稼働試験を巨大なプール施設における試験を行う予定である。

物理イベントのシミュレーション

本研究で行ったミュオンレート算出を元に、光検出器での宇宙線ミュオンの検出効率の算出を Geant4 や ROBAST というシミュレーションツールを用いて行われている。また今後、海水中に含まれる放射性物質に関してもシミュレーションによるパラメータの見積もりを行っていく予定である。

運搬船の使用申請

小型プロトタイプ検出器の運搬船として、JAMSTEC 所有の研究船「新青丸」を使用する予定である。

以下、新青丸の基本情報を載せる。

- ・ 全長：66.0m
- ・ 幅：13.0m
- ・ 深さ：6.2m
- ・ 喫水：4.0m
- ・ 同軸ケーブルウインチ、ワイヤーウインチを含む複数のウインチが常設されている。
- ・ 2 トン、5 トンクレーンなど複数クレーンが常設されている。

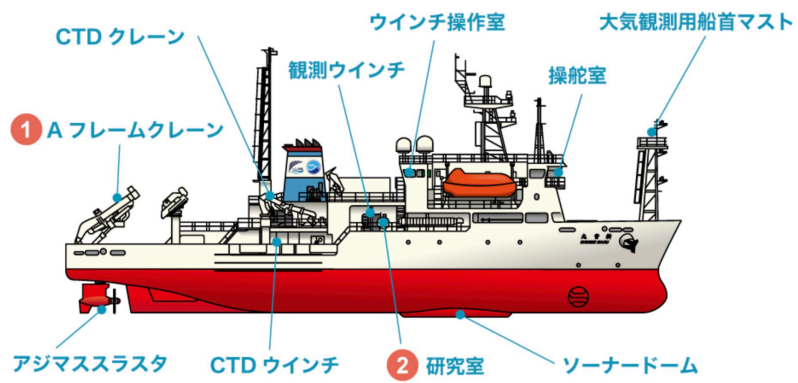


図 8.1: 新青丸

参考文献

- [1] C.A. Bertulani, “Nuclear Physics in a Nutshell” Princeton University Press, 2007.
- [2] A. Gando et al., “Constraints on θ_{13} from A Three-Flavor Oscillation Analysis of Reactor Antineutrinos at KamLAND”, Phys. Rev. D83:052002, 2011. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.052002>
- [3] S. Abe et al., “Abundances of uranium and thorium elements in Earth estimated by geoneutrino spectroscopy”, Geophysical Research Letters, Volume 49, Issue 16, e2022GL099566, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022GL099566>.
- [4] 榎本 三四郎, 「KamLAND 実験と地球ニュートリノ その物理と観測の現状」, 2005.
- [5] M. Agostini et al., “Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino”, Physical Review D 101, 012009 (2020). <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.101.012009>.
- [6] MAKAI-OCEAN-ENGINEERING and U. of Hawaii, “A Deep Ocean Anti-Neutrino Detector near Hawaii - Hanohano Final Report”, Rep. prepared for The Natl. Def. Cent. Excell. for Res. Ocean. Sci. (CEROS), 2006.
- [7] O. Šrámek et al., “Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth’s mantle”, Earth and Planetary Science Letters 361, 356 – 366, 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1207.0853>
- [8] A. Barna and S. Dye, “Web application for modeling global antineutrinos”, arXiv preprint arXiv:1510.05633, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1510.05633>
- [9] 酒井太一, 「海洋底反ニュートリノ観測装置 OBD に向けた低温高圧環境用検出器要素の開発とシミュレーションによる性能評価」, 修士論文, 東北大学, 2022.
- [10] Submarine Cable Map, <https://www.submarinecablemap.com>.
- [11] William F. McDonough and Hiroko Watanabe, “Neutrino Geoscience: Review, Survey, Future Prospects”, 2023.
- [12] 榎本三四郎, “Neutrino Geophysics and Observation of Geo-Neutrinos at KamLAND”, 博士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2005.

- [13] O. Šrámek, William F.McDonough, John G.Learned, "Geoneutrinos", Advances in High Energy Physics Volume 2012, Article ID 235686, 34 pages.
- [14] 原子力規制委員会, https://www.nra.go.jp/law_kijyun/law/004/index.html.
- [15] Z. Xie et al., "A liquid scintillator for a neutrino detector working at 50 degree", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 1009, 165459 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165459>
- [16] R. Abbasi et al., "D-Egg: A Dual PMT Optical Module for IceCube", Proceedings of the 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), Madison, WI, USA, 2019.
- [17] 株式会社イマダ, <https://www.forcegauge.net/product/detail/zta010>
- [18] ニチアス株式会社, <https://www.nichias.co.jp>
- [19] Swagelok, <https://www.swagelok.co.jp/downloads/webcatalogs/JP/ms-13-151.pdf>
- [20] 鶴見精機株式会社, <https://tsurumi-seiki.co.jp/product/sku-11/>
- [21] 岡本硝子株式会社, <https://ogc-jp.com/productinfo/glassball/glasshousing/>
- [22] 上澤康平, 「KamLAND2-Zen 実験で用いる新液体シンチレータの活性炭による純化」, 修士論文, 東北大学, 2018.
- [23] 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, 2023.
- [24] P. Antonioli et al., "A three-dimensional code for muon propagation through the rock: Music", Astroparticle Physics, vol. 7, no. 4, pp. 357 – 368, 1997.
- [25] V. Kudryavtsev, "Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics", *Computer Physics Communications*, vol. 180, pp. 339 – 346, 2009.
- [26] 国立研究開発法人海洋研究開発機構 研究プラットフォーム運用部門 https://www.jamstec.go.jp/mare3/j/ships/research_vessel/shinsei.html

謝辞

本研究は多くの方々の支えのもと行うことができました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

指導教員の渡辺先生には、お忙しい時にもいつも親身に暖かく相談に乗っていただきました。圧力補償機構の完成がなかなか遅くなってしまい申し訳ありませんでした。陰ながら OBD が実現する時を心待ちにしています。本当にありがとうございました。

センター長の井上先生には、世界最先端の環境で研究させていただけたこと感謝しております。また人柄の温かさとカリスマ性に勇気を与えていただきました。ありがとうございました。

教員の方々にも、都度お世話になりました。石徹白先生には SMART で、また日常でも気にかけていただきました。ありがとうございました。市村先生には修論発表の直前にもかかわらず多くのアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

技術職員の根本さん、鈴木さん、山田さんには実験の準備に際してお世話になりました。ありがとうございました。

鶴見精機の皆様には耐圧試験の際にお世話になりました。皆様のご協力がなければ、本研究の成果は生まれていませんでした。ありがとうございました。

岡本硝子の高橋さん、内川さんには硝子球の密封を行う際には大変お世話になりました。お忙しい中にもかかわらず、親身に対応いただけたこと感謝しております。ありがとうございました。

RCNS のスタッフの方々、先輩、後輩の皆さんには研究、プライベート問わずお世話になりました。飲み会の場で楽しくお話しできたことは良い思い出です。ありがとうございました。

そして同期の皆さん。みんなと同期で本当によかった。それに尽きます。一生の仲間ができたと思ってます。これからはそれぞれの道を歩んでいくことになりますが、ずっと応援しています。たまには集まりたいですね。

最後に修論の謝辞からは少し飛躍してしまうのですが、両親、家族、これまでの人生で出会ったすべての人々のおかげで今の自分が存在していることを実感しています。これからは皆さんから与えられたものを少しでも返していけるように精進していきたいと思います。ありがとうございました。