

修士論文

波形弁別能力を実装した新しい
小型原子炉ニュートリノモニターの開発研究

東北大学大学院 理学研究科

物理学専攻

榎本 貴哉

平成 26 年

概要

原子炉モニターとは 小型のニュートリノ検出器を原子炉の中心から数十メートルといった比較的近距离に設置することで、原子力発電所の稼働状況、熱出力、核分裂性物質の含有量等の情報を得ることを目的とした検出器である。ニュートリノは透過性が高く遮蔽することが不可能であり、原子炉の運転状況を遠隔で監視することに適している。そのためプルトニウムの違法な生産を防ぎ、核不拡散につながると期待されている。

すでに米国で行われている SONGS 実験などでは原子炉からのニュートリノの検出に成功しているが、バックグラウンドを削減するために地下での測定でシールドも設置されている。これに対して本研究で開発する原子炉モニターは地上で測定でき、移動可能な小型の検出器を目指している。

我々のグループでは 2006 年から原子炉モニター実験を行っており、プロトタイプ検出器を茨城県の高速度実験炉常陽の炉心近傍に設置しニュートリノ検出を試みた。しかし、この実験ではデータ収集期間が短く、またバックグラウンドが多く統計的に有意にニュートリノを検出することができなかった。その後常陽での実験を踏まえ、2010 年から宇宙線由来の高速度中性子背景事象除去のための波形弁別能力を備えた改良型原子炉ニュートリノ検出器の開発を行ってきた。そして昨年度からこれまでの研究を踏まえた新型の検出器の開発を開始している。

本研究では新型の原子炉モニターを開発するために行ってきた、波形弁別能力を備えた液体シンチレータの開発、新型原子炉モニターのシミュレーションによる感度の見積もり、実際の建設に伴う試験や物品の製作、デザインなどについて記述する。

目次

概要	1
第1章 序論	1
1.1 原子炉ニュートリノ検出の背景	1
1.1.1 原子炉ニュートリノ	1
1.1.2 原子炉ニュートリノ検出原理	5
1.2 原子炉モニター開発の背景	8
1.2.1 主な世界の小型原子炉ニュートリノ検出器実験	8
1.3 東北大学での小型ニュートリノ検出器の開発	10
1.3.1 常陽実験	10
1.3.2 改良型プロトタイプ実験	12
第2章 新型原子炉モニターの概要	16
2.1 検出器のバックグラウンド	16
2.1.1 Accidental バックグラウンド	16
2.1.2 Correlated バックグラウンド	16
2.2 波形弁別法	18
2.2.1 波形弁別法の原理	18
2.2.2 Double Gate 法	18
2.3 新型原子炉モニター	19
2.3.1 新型原子炉モニターのデザイン	19
第3章 ターゲット層用液体シンチレータの開発	22
3.1 ベースオイルの選択	22
3.1.1 候補物質	22
3.1.2 ベースオイルの光量測定	24
3.1.3 ベースオイルの PSD 測定	27
3.1.4 BC521 との混合試験	29
3.1.5 アクリル耐液試験	30
3.2 LAB の PSD 能力の向上	34
3.2.1 溶質の添加	34
3.2.2 TOF を用いた γ/n 分離による測定	40
3.2.3 黄ばみの問題に対して	49
3.2.4 LAB の種類による変化	53

第 4 章	ベトー層用液体シンチレータの開発	56
4.1	候補物質	56
4.2	宇宙線を用いた測定	58
4.3	発光量測定	61
4.4	発光波形測定	63
4.4.1	波形の比較	63
4.4.2	BHT を加えたサンプルの波形	65
第 5 章	新型原子炉モニターのシミュレーション	67
5.1	Geant4	67
5.2	KAPST	67
5.3	ニュートリノシミュレーション	68
5.4	バックグラウンドシミュレーション	71
5.4.1	Accidental バックグラウンドシミュレーション	71
5.4.2	シールドによるバックグラウンドの変化	74
5.5	事象位置の再構成	77
5.5.1	Charge を用いた再構成	77
5.5.2	時間を用いた再構成	80
5.5.3	事象位置によるカット	83
5.6	ベトー層用液体シンチレータを用いた宇宙線ベトー	85
5.7	感度の推定	86
第 6 章	新型原子炉モニターのデザインと製作	91
6.1	新型原子炉モニターの設計	91
6.1.1	アクリル容器の図面	91
6.1.2	架台の図面	96
6.1.3	全体のデザイン	100
6.2	新型原子炉モニターの建設に向けて	103
6.2.1	アクリルの材質の試験	103
6.2.2	PMT について	104
6.2.3	スプリッター回路の製作	110
6.2.4	液送ポンプの選定	110
6.2.5	PMT 設置用棚の製作	112
6.2.6	キャリブレーション線源について	113
6.2.7	ターゲット容器内のおもりのカバー	113
6.2.8	液体シンチレータの攪拌	114
6.2.9	データ収集システム	114
6.3	新型原子炉モニターの建設	116
6.3.1	架台の搬入	116
6.3.2	アクリル容器の搬入と水張試験	117
6.3.3	組み立て	118
6.4	テストデータの取得	120

第7章	まとめと今後	122
7.1	まとめ	122
7.2	今後	122

目 次

1.1	^{235}U の核分裂過程[2]	2
1.2	典型的な原子炉における主な核の核分裂頻度 (緑: ^{239}Pu , 黒: ^{235}U , 赤: ^{238}U , 紺: ^{241}Pu) [1]	3
1.3	典型的な原子炉における主な核種の 1 分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布 (緑: ^{239}Pu , 青: ^{235}U , 赤: ^{238}U , 紫: ^{241}Pu) [1]	4
1.4	逆 β 崩壊反応のファインマンダイアグラム	5
1.5	$\bar{\nu}_e$ の検出原理 (逆 β 崩壊)	6
1.6	(a) は観測される反電子ニュートリノのエネルギー分布、(b) はニュートリノフラックス、(c) は反応断面積を表す。	6
1.7	高速実験炉常陽内の検出器配置 [8]	10
1.8	KASKA プロトタイプ検出器の断面図 [8]	11
1.9	改良型プロトタイプ検出器の概要 [9]	13
1.10	改良型プロトタイプ検出器の様子 [9]	13
2.1	高速中性子バックグラウンドの模式図	17
2.2	異種放射線で励起されたスチルベン中のシンチレーション波形の時間特性 (時間 0 で同じ強度に規格化) [10]	18
2.3	Double Gate 法の定義	19
2.4	新型原子炉モニターの検出器概要	20
2.5	移動可能な架台と検出器の概要図	21
3.1	LAB(左上)、PXE(右上)、PC(中央下) の構造式	23
3.2	光量測定の回路図	24
3.3	光量測定の様子	25
3.4	液体シンチレータでのエネルギー分布 (黒:NaI の後方散乱ピークでカット後、赤:コインシデンス取得データ、緑:シングル取得データ)	25
3.5	NaI シンチレータでのエネルギー分布 (黒:コインシデンス取得データ、赤:シングル取得データ)	25
3.6	ベースオイルの光量測定結果	26
3.7	^{60}Co の崩壊図	27
3.8	^{252}Cf の崩壊図	27
3.9	ベースオイル測定の回路図	27
3.10	LAB、PXE、PC の電荷分布	28
3.11	LAB、PXE、PC の波形	28
3.12	LAB の PSD 分布	28
3.13	PXE の PSD 分布	28

3.14	PC の PSD 分布	28
3.15	BC521 と各オイルとの混合液の様子 (左から PXE、PC、LAB)	29
3.16	1 週間経過後の BC521 と LAB を混合した液	29
3.17	アクリルの耐液テストの様子	30
3.18	オイルに浸けたアクリル重量の変化	31
3.19	オイルに浸けたアクリル重量の変化 (PC なし)	31
3.20	LAB に浸けたアクリル片の表面の変化の様子	32
3.21	PXE に浸けたアクリル片の表面の変化の様子	32
3.22	PC に浸けたアクリル片の表面の変化の様子	32
3.23	長期間 LAB に浸けたあとアクリルと液の様子	33
3.24	長期間 PXE に浸けたあとのアクリルと液の様子	33
3.25	長期間 PC に浸けたあとのアクリルと液の様子	33
3.26	長期間 LAB60% + PC40% に浸けたあとのアクリルと液の様子	33
3.27	PPO の構造式	34
3.28	bisMSB の構造式	34
3.29	ナフタレンの構造式	34
3.30	アセトンの構造式	34
3.31	PPO の量を変化させた時の電荷分布	35
3.32	PPO の量を変化させた時の波形	35
3.33	PPO の量を変化させた時の PSD 分布	35
3.34	bis-MSB の量を変化させた時の電荷分布	36
3.35	bis-MSB の量を変化させた時の波形	36
3.36	bis-MSB の量を変化させた時の PSD 分布	36
3.37	ナフタレンの量を変化させた時の電荷分布	37
3.38	ナフタレンの量を変化させた時の波形	37
3.39	ナフタレンの量を変化させた時の PSD 分布	37
3.40	アセトンの量を変化させた時の電荷分布	38
3.41	アセトンの量を変化させた時の波形	38
3.42	アセトンの量を変化させた時の PSD 分布	38
3.43	PC の量を変化させた時の電荷分布	39
3.44	PC の量を変化させた時の波形	39
3.45	PC の量を変化させた時の PSD 分布	39
3.46	TOF を用いた測定の回路図	40
3.47	TOF を用いた測定の様子	41
3.48	波形で見た場合の γ イベントとイベントでのピークのズレ	41
3.49	ピークの位置の差と PSD の二次元分布 (左下が gamma like、右上が neutron like)	42
3.50	PC+PPO(3g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ピークの位置の差と PSD の二次元分布)	42

3.51	LAB+PPO(3g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	42
3.52	LAB+PPO(7g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	43
3.53	LAB+PPO(3g/L)+bisMSB(30mg/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	43
3.54	LAB+PPO(3g/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	43
3.55	LAB+PPO(3g/L)+アセトン (2%) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	44
3.56	LAB(60%+PC(40%))+PPO(3g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	44
3.57	LAB+(PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	44
3.58	LAB+(PPO(7g/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	45
3.59	LAB+(PPO(3g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	45
3.60	LAB+(PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)	45
3.61	LAB に二種類の溶質を加えたサンプルの電荷分布	46
3.62	FoM を用いた各液体シンチレータの評価プロット	47
3.63	PC、LAB、新しい液体シンチレータの PSD の efficiency curve	47
3.64	新しい液体シンチレータの発光量測定の結果	48
3.65	新しい液体シンチレータの黄ばむ様子 (左:製作直後、右:製作から 1 週間後)	49
3.66	酸化防止剤 (BHT) の構造式	49
3.67	大きいパイアルでの新しい液体シンチレータの経年変化の様子 (左から 製作直後、2 週間後、1 か月後)	50

3.68	黄ばんだ新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)	50
3.69	新しい液体シンチレータの黄ばみの有無での電荷分布 (黒:黄ばみなし 赤:黄ばみあり)	51
3.70	新しい液体シンチレータの黄ばみの有無での波形 (黒:黄ばみなし 赤:黄ばみあり)	51
3.71	新しい液体シンチレータの黄ばみの有無での efficiency curve	51
3.72	液体シンチレータに BHT(1g/L) 加えたサンプルの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)	52
3.73	液体シンチレータに BHT(10g/L) 加えたサンプルの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)	52
3.74	新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルの電荷分布	53
3.75	新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルの波形	53
3.76	新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルの efficiency curve	53
3.77	CEPSA の LAB を使用した新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)	54
3.78	SASOL の LAB を使用した新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)	54
3.79	JX の LAB を使用した新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)	54
3.80	LAB を変えた新しい液体シンチレータの電荷分布	55
3.81	LAB を変えた新しい液体シンチレータの波形	55
3.82	LAB を変えた新しい液体シンチレータの efficiency curve	55
4.1	シロキサン結合	57
4.2	KF-96 の構造式	57
4.3	KF-50 の構造式	57
4.4	宇宙線を用いた測定の回路図	58
4.5	宇宙線を用いた測定の様子	58
4.6	宇宙線による測定の電荷分布 (新しい液体シンチレータは Co 線源データ)	59
4.7	宇宙線による測定の波形 (新しい液体シンチレータは Co 線源データ)	59
4.8	宇宙線による測定の PSD 分布 (新しい液体シンチレータは Co 線源データ)	59
4.9	宇宙線による測定の電化分布	60

4.10	シリコンオイルの光量測定結果 赤ラインは New LS の 1/5 を示す (各サンプルには PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えた)	61
4.11	KF-96 にオイルを加えたサンプルの光量測定結果 赤ラインは New LS の 1/5 を示す (各サンプルには PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えた)	62
4.12	KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの電荷分布の比較	63
4.13	KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの波形の比較	64
4.14	KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの PSD の比較	64
4.15	KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの efficiency curve	64
4.16	KF-50 に BHT を加えたサンプルの電荷分布	65
4.17	KF-50 に BHT を加えたサンプルの波形	65
4.18	KF-54 に BHT を加えたサンプルの電荷分布	65
4.19	KF-54 に BHT を加えたサンプルの波形	65
4.20	BHT を 10g/L 加えた KF-50、KF54 と新しい液体シンチレータの電荷分布の比較	66
4.21	BHT を 10g/L 加えた KF-50、KF54 と新しい液体シンチレータの波形の比較	66
4.22	BHT を 10g/L 加えた KF-50、KF54 と新しい液体シンチレータの PSD の比較	66
4.23	BHT の有無での KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの efficiency curve	66
5.1	逆 β 崩壊の反応断面積 (左図が微分反応断面積、右図が全反応断面積)	68
5.2	シミュレーションでの新型原子炉モニターモデル	69
5.3	ターゲットを 400L にした時のニュートリノシミュレーションの結果 (左から先発信号と後発信号の時間差分布、先発信号の Energy 分布、後発信号の Energy 分布)	69
5.4	ターゲットを 1000L にした時のニュートリノシミュレーションの結果 (左から先発信号と後発信号の時間差分布、先発信号の Energy 分布、後発信号の Energy 分布)	70
5.5	ターゲット 400L 時のバックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (青:環境ガンマ線バックグラウンド 赤:宇宙線バックグラウンド)	71
5.6	ターゲット 1000L 時のバックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (青:環境ガンマ線バックグラウンド 赤:宇宙線バックグラウンド)	72
5.7	ターゲットが 400L と 1000L それぞれでの環境ガンマバックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:400L 赤:1000L)	72
5.8	ターゲットが 400L と 1000L それぞれでの宇宙線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:400L 赤:1000L)	73
5.9	ターゲット 400L の場合に鉛シールドの量を変えた環境ガンマ線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)	74

5.10	ターゲット 1000L の場合に鉛シールドの量を変えた環境ガンマ線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)	75
5.11	ターゲット 400L の場合に鉛シールドの量を変えた宇宙線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)	75
5.12	ターゲット 1000L の場合に鉛シールドの量を変えた宇宙線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)	76
5.13	球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x, y, z)	78
5.14	球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x, y, z)	78
5.15	球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から r, θ, ϕ)	78
5.16	球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から r, θ, ϕ)	79
5.17	箱型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x, y, z)	79
5.18	箱型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x, y, z)	79
5.19	球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x, y, z)	80
5.20	球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x, y, z)	81
5.21	球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から r, θ, ϕ)	81
5.22	球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から r, θ, ϕ)	81
5.23	箱型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x, y, z)	81

5.24	箱型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x , y , z)	82
5.25	400L の場合で Resolution を 10cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布	83
5.26	400L の場合で Resolution を 5cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布	83
5.27	1000L の場合で Resolution を 10cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布	84
5.28	1000L の場合で Resolution を 5cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布	84
5.29	400L と 1000L の場合で Resolution が 5cm と 10cm のとき先発信号と後発信号の事象位置の差でカットを行った時の efficiency curve	84
5.30	ターゲット層の新しい液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの波形の比較	85
5.31	ターゲット層の新しい液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの PSD の比較	85
5.32	原子炉の出力と信頼水準 2σ でニュートリノによる原子炉運転検出までにかかる時間の関係	88
5.33	ニュートリノレートとバックグラウンドレートとニュートリノによる原子炉運転の検出までの時間のプロット	89
5.34	新型原子炉モニターでのシングルバックグラウンドの分布	89
5.35	新型原子炉モニターでのカット後のバックグラウンドの分布	90
6.1	アクリル容器の図面	92
6.2	内側アクリル容器の図面	92
6.3	内側アクリル容器上部の図面	93
6.4	内側アクリル容器下部の図面	93
6.5	外側アクリル容器の図面	94
6.6	外側アクリル容器上部の図面	94
6.7	外側アクリル容器下部の図面	95
6.8	内側アクリル容器チムニーフランジの図面	95
6.9	キャスターの写真 (左:ストッパー無し 右 ストッパー有り)	96
6.10	アジャスターボルトの写真 (左 足止め無し 右 足止め有り)	96
6.11	上部からの架台図面	97
6.12	上部を外した時の上部からの架台図面	97
6.13	正面からの架台図面	98
6.14	側面からの架台図面	98
6.15	底面からの架台図面	99

6.16	新型原子炉モニターの全体図 (暗箱有り)	100
6.17	新型原子炉モニターの全体図 (暗箱無し)	101
6.18	新型原子炉モニターの全体図 (シールド無し)	101
6.19	新型原子炉モニターの全体図 (PMT 用棚なし)	102
6.20	アクリルの透過率測定の結果	103
6.21	アクリルの材質検証のためのセッティング	104
6.22	アクリルの種類による光量測定の結果の変化	104
6.23	光電子増倍管 (R5912) の寸法図	105
6.24	光電子増倍管 (R5912) とアクリルハウジング	105
6.25	光電子増倍管 (R7081) の寸法図	105
6.26	上面 PMT 用固定具	107
6.27	接着剤のテストの写真 (左から付ける前、ミネラルオイルに浸けたもの、シリコンオイルに浸けたもの)	108
6.28	シリコンゴムを固めている様子	109
6.29	アクリル板に密着させられるかのテストの様子	109
6.30	KF-96 100 万の粘度の様子	109
6.31	スプリッター回路の回路図	110
6.32	スプリッター回路の写真	110
6.33	ターゲット層用液体シンチレータ用ポンプ	111
6.34	ポンプ電源周波数制御用インバータ	111
6.35	ベトー層用液体シンチレータ用ポンプ	111
6.36	ポンプ用エアークンプレッサー	111
6.37	PMT 設置用棚の写真	112
6.38	側面 PMT 固定具の写真	112
6.39	線源をカバーするナイロンのフィルムの写真	113
6.40	ナイロンフィルムの耐液テストの様子	113
6.41	おもりにナイロンフィルムでカバーを掛ける様子	114
6.42	ナイロンフィルムでカバーされたおもりの様子	114
6.43	液体シンチレータの攪拌の様子	115
6.44	液体シンチレータに紫外線ランプをあてた様子	115
6.45	新型原子炉モニターの測定回路	115
6.46	架台の搬入の様子	116
6.47	架台の防油堤の水張試験の様子	116
6.48	架台の塗装の様子	116
6.49	塗装された架台	116
6.50	遮光用のアルミ板を設置された架台	117
6.51	ブラックシートで全体を覆い遮光を行う様子	117
6.52	光漏れがあった隙間をブラックテープで塞ぐ様子	117
6.53	アクリル容器の搬入の様子 1	118
6.54	アクリル容器の搬入の様子 2	118
6.55	外側アクリル容器の水張試験の様子	118
6.56	内側アクリル容器の水張試験の様子	118

6.57 架台の骨組みを設置し組み立てを行う様子	119
6.58 内側アクリル容器に液入れを行う様子	119
6.59 PMT を設置し配線を行う様子	119
6.60 完成した原子炉モニターと KASKA/Double Chooz グループのメンバー	120
6.61 破損したアクリル容器	121
6.62 新型原子炉モニターで取得した Co 線源のエネルギー分布	121

表 目 次

1.1	中性子捕獲断面積 [4]	7
1.2	Rovno 実験及び SONGS 実験の小型原子炉ニュートリノ検出器の能力値 [5]	9
1.3	世界の小型原子炉ニュートリノ検出器の特徴 [7]	9
1.4	常陽実験における原子炉ニュートリノのイベントセレクションの結果 (括弧内の数値は efficiency)[8]	12
1.5	改良型プロトタイプ検出器の最終的な解析結果 [9]	14
1.6	改良型プロトタイプ検出器 (テール補正有) の最終的な解析結果 [9]	14
2.1	消防法上の引火点による引火性物質 (第 4 類) の指定数量 [11]	20
3.1	LAB,PXE,PC の比較 [12]	23
4.1	KF-96 と混合したサンプルの引火点	62
5.1	ニュートリノシミュレーションの結果	70
5.2	バックグラウンドシミュレーションの結果 (ニュートリノセレクション後)	72
5.3	鉛シールドを用いた場合のバックグラウンドシミュレーションの結果 (ニュートリノセレクション後)	76
5.4	鉛シールドを設置する場合の重量	76
5.5	シミュレーションの結果	86
5.6	SONGS 実験と新型原子炉モニターの比較 [19]	88
6.1	光電子増倍管 (R5912) の仕様	106
6.2	光電子増倍管 (R7081) の仕様	106

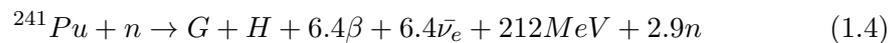
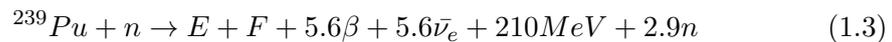
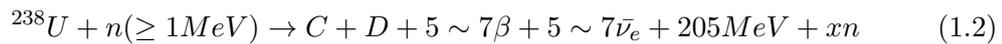
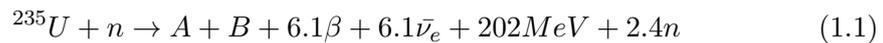
第1章 序論

1.1 原子炉ニュートリノ検出の背景

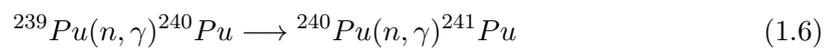
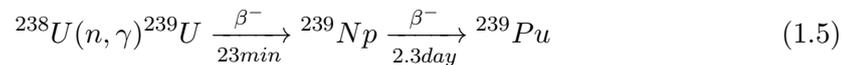
原子炉内での核分裂の過程で生成されるニュートリノは、弱い相互作用しか反応しないため遮蔽することが不可能であり、壁を透過して直接測定することができる。また原子炉は安定的なニュートリノ供給源であり、ニュートリノの性質を測定するための多くの原子炉ニュートリノ実験が行われている。

1.1.1 原子炉ニュートリノ

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



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



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

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

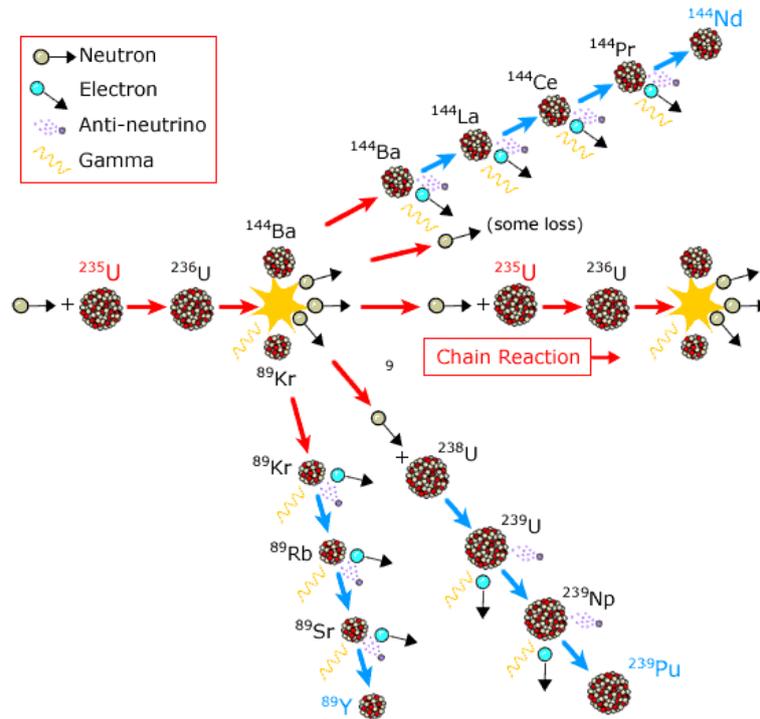


図 1.1: ^{235}U の核分裂過程[2]

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

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

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

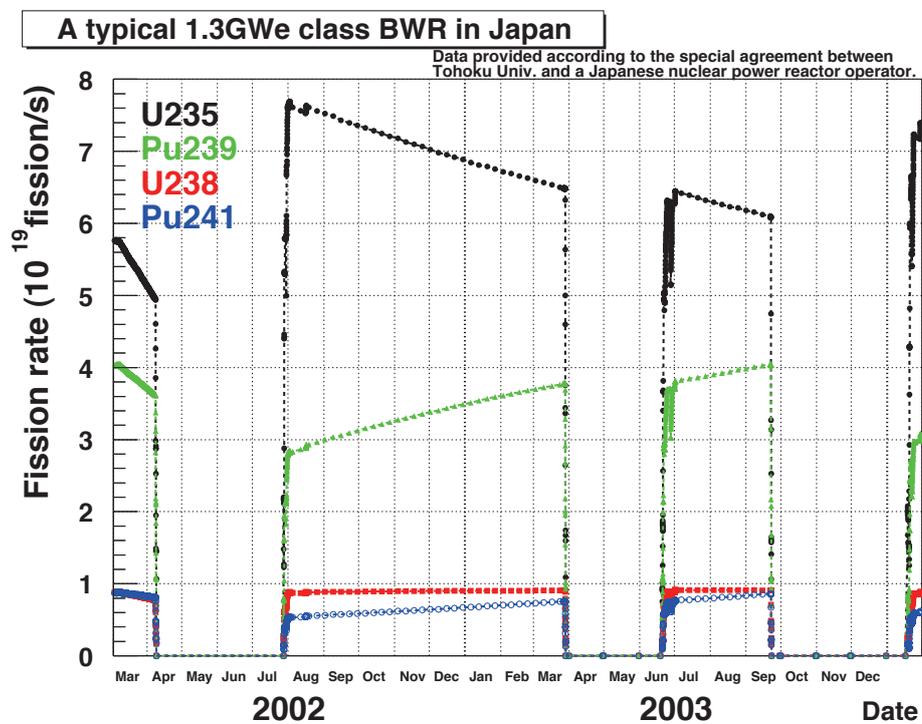


図 1.2: 典型的な原子炉における主な核の核分裂頻度 (緑: ^{239}Pu , 黒: ^{235}U , 赤: ^{238}U , 紺: ^{241}Pu) [1]

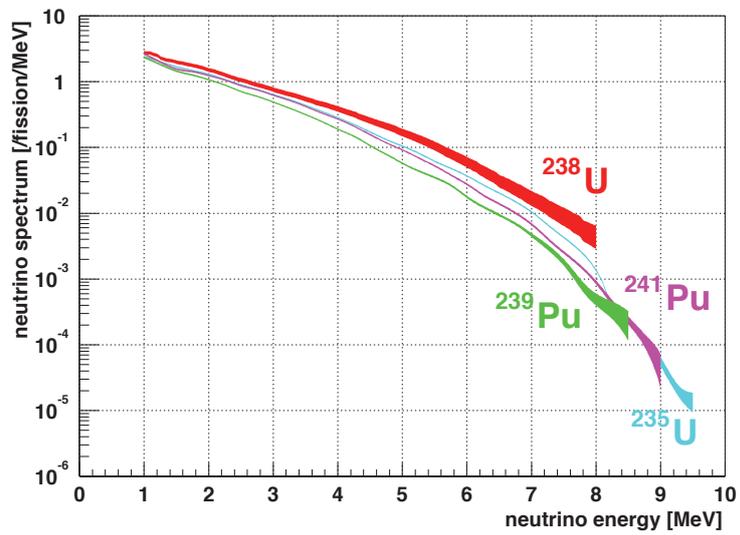


図 1.3: 典型的な原子炉における主な核種の 1 分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布 (緑:²³⁹Pu, 青:²³⁵U, 赤:²³⁸U, 紫:²⁴¹Pu) [1]

1.1.2 原子炉ニュートリノ検出原理

原子炉ニュートリノの検出原理として Gd を含有した有機シンチレータと逆 β 崩壊を用いた遅延同時計測法について以下に記載する。これは原子炉ニュートリノの測定時にバックグラウンドとなりやすい宇宙線ミュオンや環境線などのバックグラウンドを除去して反電子ニュートリノを検出する方法として非常に有効な方法であり、様々な実験で採用されており本研究でも採用しているためここで紹介する。

1.1.2.1 逆 β 崩壊

有機シンチレータは自由水素を多く含み、陽子と反電子ニュートリノとの逆 β 崩壊反応を起こす。逆 β 崩壊反応を用いた検出原理の模式図を図 1.5 に示す。検出器内部では逆ベータ崩壊によって陽電子と中性子が生成される。そして陽電子は液体シンチレータ内で運動エネルギーを落とし、電子と対消滅し 2 本の γ 線を放出しシンチレーション光が発生する。中性子は液体シンチレータ中の陽子と衝突をくりかえし熱中性子となる。熱中性子となった後に Gd に捕獲され、 γ 線が放出されシンチレーション光が発生する。逆ベータ崩壊反応のファインマンダイアグラムを図 1.4 に示す。

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

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

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

ただし m_e は陽電子の質量、 τ_n は中性子の寿命を意味する。

検出器で観測される $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布を図 1.6 に示す。ニュートリノ事象反応頻度はニュートリノフラックス (図 1.6 の (b)) と反応断面積 (図 1.6 の (c)) に比例する。観測される反電子ニュートリノのエネルギー分布 (図 1.6 の (a)) は 4 MeV 付近にピークを持つ。

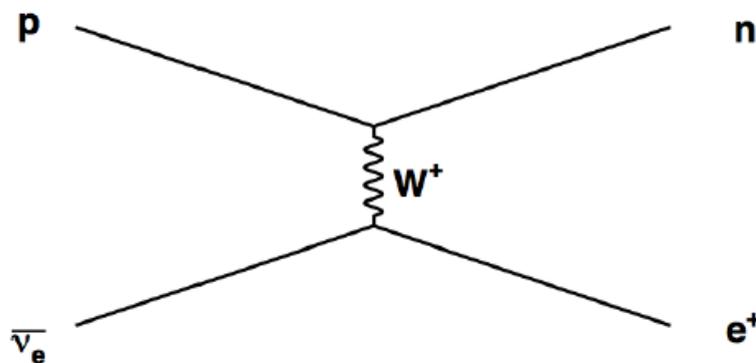


図 1.4: 逆 β 崩壊反応のファインマンダイアグラム

prompt signal

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

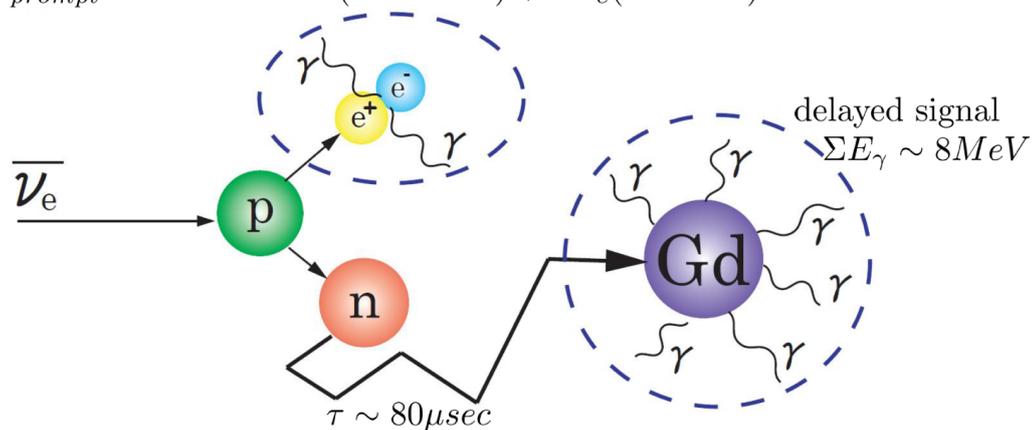


図 1.5: $\bar{\nu}_e$ の検出原理 (逆 β 崩壊)

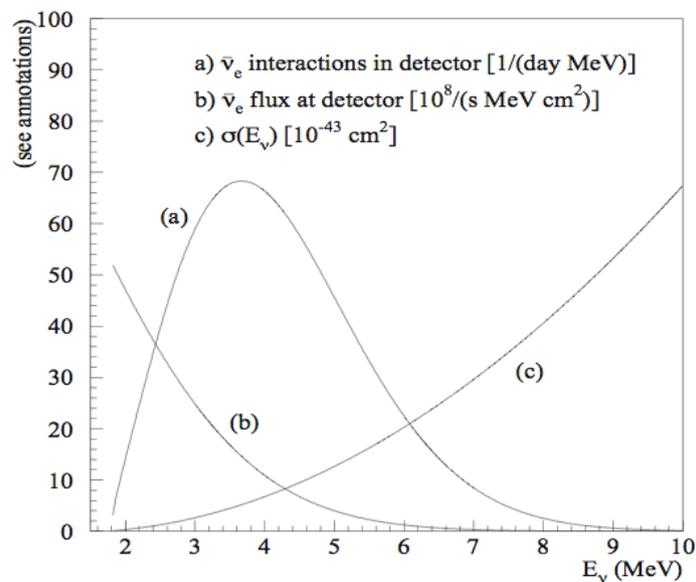


図 1.6: (a) は観測される反電子ニュートリノのエネルギー分布、(b) はニュートリノフラックス、(c) は反応断面積を表す。

1.1.2.2 遅延同時計測法

本研究では検出器を地上に設置し測定することを目指しており、宇宙線ミュオンや環境ガンマ線といったバックグランド事象を減らし、ニュートリノ事象を同定するために遅延同時計測法を利用している。これは逆 β 崩壊反応で発生する粒子によって起こる特徴的な信号をもとにニュートリノ事象を識別する方法である。特徴的な信号とは以下に説明する先発信号と後発信号であり、これらの信号とその時間差を利用する。

• 先発信号

反電子ニュートリノが液体シンチレータ中の陽子と逆 β 崩壊を起こした際に生じる陽電子由来の信号が先発信号となる。中性子の反跳エネルギーはほとんど無視できるので、陽電子からの信号は反電子ニュートリノのエネルギーから逆 β 崩壊の閾値(1.8MeV)を引き、対消滅で γ 線になった質量(1.022MeV)を足したものになる。

$$E_{prompt} = E_{\bar{\nu}_e} - 1.804MeV + 1.022MeV \quad (1.11)$$

$$\sim E_{\bar{\nu}_e} - 0.8MeV \quad (1.12)$$

• 後発信号

本研究で開発している検出器には中性子捕獲断面積の大きいガドリニウムを配合した有機シンチレータを用いる予定である。中性子捕獲断面積は表 1.1 に示した。(1.9)の反応で生成された中性子は有機シンチレータ中の陽子と衝突しながら、減速して熱中性子となる。熱中性子となった後はガドリニウムに吸収され、全エネルギー約8MeVの複数の γ 線になって放出されるか、水素に捕縛され2.2MeVの γ 線を放出する。

表 1.1: 中性子捕獲断面積 [4]

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

ガドリニウムからの信号のエネルギーを $E_{delayed}$ とすると、合計のエネルギーの値は、

$$E_{delayed} = \Sigma E_{\gamma} \sim 8MeV \quad (1.13)$$

であり、水素に捕縛される場合は、

$$n + p \rightarrow d + 2.2MeV \quad (1.14)$$

となる。

- 先発信号と後発信号の時間差

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

$$\Delta t = \frac{\Delta t_H^{KamLAND} \times \frac{\rho_H^{KamLAND}}{\rho_H}}{1 + \frac{\rho_{Gd}}{\rho_H} \times \frac{\sigma_{Gd}}{\sigma_H}} \quad (1.15)$$

で示される。ここで、 $\rho_H^{KamLAND}$ は 6.6×10^{22} /ml、 $\Delta t_H^{KamLAND}$ は $211.4 \mu\text{sec}$ であり、KamLAND グループによって測定された値である。[1]

1.2 原子炉モニター開発の背景

ニュートリノを利用した原子炉モニターとは原子炉から発生するニュートリノを検出することで、原子力発電所の稼働状況、熱出力、核分裂性物質の含有量等の情報を得ることを目的とした検出器である。ニュートリノは中性子やガンマ線と比べて、その反応断面積の小ささから物質と非常に反応しにくく遮蔽することが事実上不可能であり、検出も難しいが壁を貫通して観測することができる。近年では原子炉ニュートリノ振動実験の検出技術を利用した小型原子炉モニターの R & D が世界中で行われており、ゲリラ運転によるプルトニウム生産を防ぐための遠隔監視といった目的のために、国際原子力機関 (IAEA) の安全保障制度に役立つとして非常に注目されている。実用化に向けて IAEA からの要求として、ニュートリノの検出性能の他に、基線が数十 m での測定ができ独立性を持っていることや、低コストかつ小型で 1t 程度のターゲット重量で収まること、不燃物または法的制限の範囲内の危険物の使用であることなど挙げられている。

1.2.1 主な世界の小型原子炉ニュートリノ検出器実験

原子炉ニュートリノ実験として KamLAND 実験や Double Chooz 実験の検出装置では実際に原子炉ニュートリノの観測に成功している。しかし装置の規模が大きく、コストも高いため安価で小型の原子炉ニュートリノ検出器の開発が行われている。代表的な小型原子炉ニュートリノ検出器実験の性能比較を表 1.2 に載せる。これらの実験ではニュートリノ事象が確認され、小型ニュートリノ検出器実験の可能性が注目されることとなる。これらの実験を契機として世界中で小型ニュートリノ検出器の R&D が盛んに行われている。しかしこれらの実験ではバックグラウンドに対するシールドを設けており、宇宙線ミュオンを減らすために地下で測定を行っており、将来的に普及させるためにはコストが掛かり過ぎるという問題がある。そのため近年ではより実用化を見据えて炉心から数十 m 離れた地上で、1t 程度の volume のシンプルな構造の検出器が求められている。各国の取り組みを表 1.3 に記載する。

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

Experiment	Power [GW]	mass [ton]	Distance [m]	Depth [mwe]	$\bar{\nu}_e$ rate [/day]
Rovno	0.44	0.43	18		909
SONGS	3.64	0.64	24.5	10	459

表 1.3: 世界の小型原子炉ニュートリノ検出器の特徴 [7]

グループ	国	主要検出技術
SONGS	アメリカ	Gd loaded liquid Scintillator
Nucifer	フランス	Gd loaded Scintillator
DANSS	ロシア	Segmented Plastic Scintillator + Gd film
Angra	ブラジル	Gd doped Water Cerenkov
Tohoku Univ.	日本	Gd loaded liquid Scintillator
PANDA	日本	Segmented Plastic Scintillator + Gd film
Niigata Univ.	日本	Gd doped Plastic Scintillator
Stereo	フランス	Gd loaded liquid Scintillator
Hanaro	韓国	Gd or ^6Li liquid Scintillator
Prospect	アメリカ	Gd or ^6Li liquid Scintillator
Solid	イギリス	^6Li liquid Scintillator, Segmented

1.3 東北大学での小型ニュートリノ検出器の開発

東北大学では2006年から原子炉モニターの研究開発を行っており、これまで行ってきた実験として高速実験炉常陽にて測定を行った常陽実験と、常陽実験で用いた装置を改良し検出効率の向上を図った改良型プロトタイプ実験がある。これらの実験結果を踏まえて2013年より新型原子炉モニターの開発を開始しており、本論文では新型原子炉モニターのために行ったR&Dを説明する。

1.3.1 常陽実験

この実験は茨城県にある高速実験炉常陽において炉心から24.3 m離れた地上にニュートリノ検出器を設置しニュートリノ検出を試みた(図1.7)。高速実験炉常陽とは茨城県東茨城郡大洗町にある高速実験炉である[6]。常陽の熱出力は140 MWthである。また、常陽の稼働サイクルは出力が60日間で停止が2~3週間であり、短いサイクルでONとOFFのデータを取得し比較することができる。

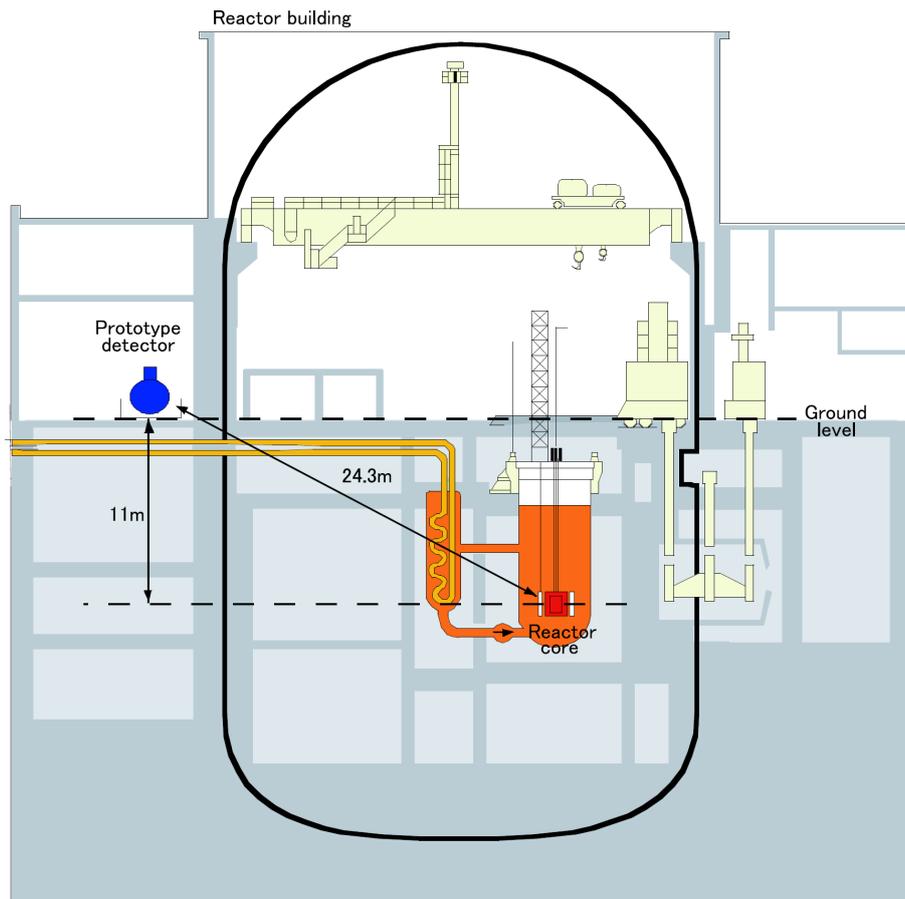


図 1.7: 高速実験炉常陽内の検出器配置 [8]

検出器は原子炉ニュートリノ振動実験 KASKA (2006年に Double Chooz 実験に合流) のプロトタイプを利用したものであり、構造の概略をを図1.8に示す。直径約

120cm のアクリル球に液体シンチレータ（約 0.7t）を充填し、球面上に 8inch の光電子増倍管（PMT 型番:浜松ホトニクス R5912）を 16 本設置している。また装置全体をブラックシートで覆い暗室にしている。

ニュートリノターゲットとなる液体シンチレータはプソイドクメン（PC）をベースとしており、その構成は BC521 11.2 %、Pseudocumene 12.6 %、Paraol 850 76.3 %、PPO 1.52 g/l、bis-MSB 0.2 g/l であった。BC521 はガドリニウムを 0.5w% 含有した市販の液体シンチレータ（SAINT-GOBAIN 社製）であり、これを用いることで液体シンチレータに Gd を溶かしこんでいる。液体シンチレータには酸素クエンチング効果を減少させるために窒素バブリングを行っている。このシンチレータとバックグラウンド事象の対策として、宇宙線 VETO カウンターおよびパラフィンと鉛のシールドを設置し、2006 年 9 月より 2007 年末までのデータ取得を行った。

Live Time として ON データは 38.9 日、OFF データは 18.5 日間得ることができた。表 1.3.1 は常陽実験のニュートリノイベントセレクション後の結果を示している [8]。測定された ON データと OFF データから 1 日あたりに見積もられるニュートリノ事象は $1.20 \pm 1.24 / \text{day}$ であり、検出器内で逆 β 崩壊反応を起こすニュートリノ数は $162 / \text{day}$ と見積もられているため、検出効率は 0.74 % である。また、モンテカルロシミュレーションにより期待されるニュートリノ事象数は $0.494 \pm 0.063 / \text{day}$ であり期待値と測定値は誤差内で一致したが、ニュートリノの有意な反応数は観測できなかった。

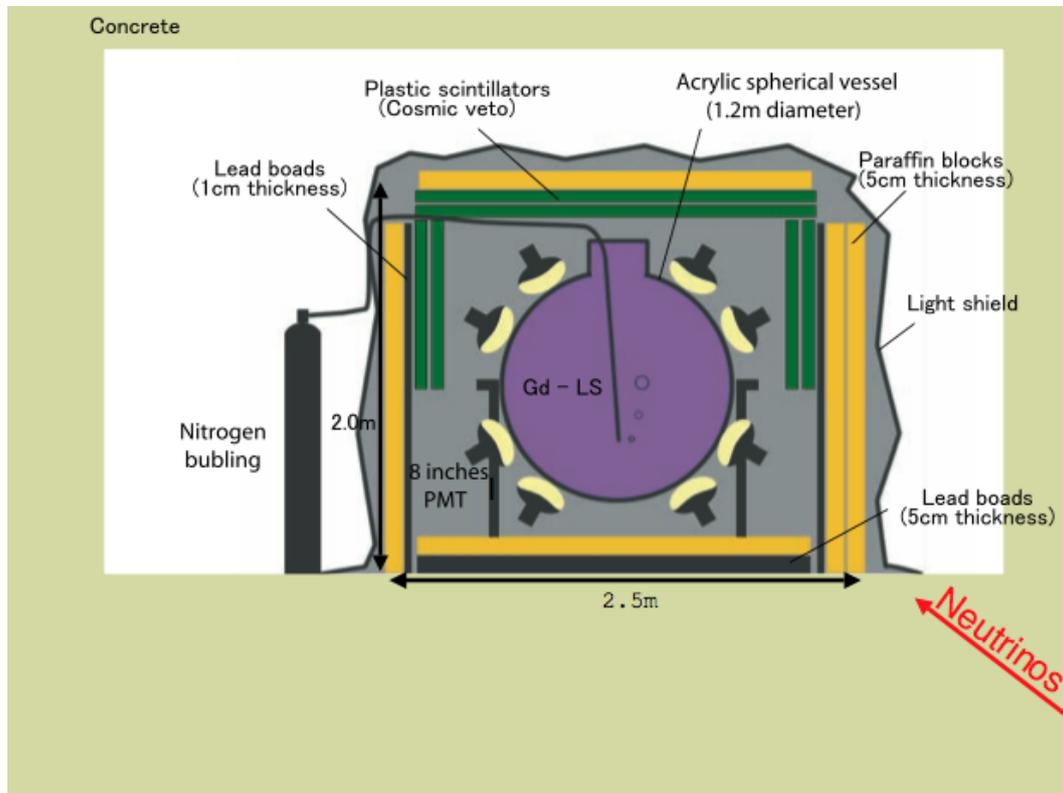


図 1.8: KASKA プロトタイプ検出器の断面図 [8]

表 1.4: 常陽実験における原子炉ニュートリノのイベントセレクションの結果 (括弧内の数値は efficiency)[8]

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

この常陽実験での問題点としては、地上測定のため宇宙線の核破碎反応により生成される高速中性子事象が多い点、検出器内の事象位置を再構成する性能が低い点。液体シンチレータの経年劣化が大きく長期間の測定ができなかった点、の3つが挙げられる。そこで、2010年より東北大学で行われてきた改良型プロトタイプ実験ではこれらの点を改善すべく R&D を行ってきた。

1.3.2 改良型プロトタイプ実験

この実験は常陽実験で用いた検出器を活用し、検出器の構造や解析手法を見直すことでニュートリノ検出効率の向上を図ったものである。原子炉モニターの実用化という観点から地上での測定で、シールドを不利用を目指して開発が行われ、この改良型プロトタイプ実験でのニュートリノの検出手法の多くは新型原子炉モニターでも利用されている。

検出器は常陽実験検出器の球体アクリル容器を再利用しており、その内側に直径75cmのガラスフラスコを入れた二重構造になっている。液体シンチレータは内側のガラスフラスコ(199L)に入れられており、外側のアクリル容器には水道水が入られた。検出器を二重構造にすることで、動径方向の事象位置再構成の能力を高め、水によって検出器の外から飛来する高速中性子を遮蔽することもできた。PMTは常陽実験と同じものを16本利用していた。検出器の概要図を1.9に示す。

液体シンチレータは容器がガラスになったことで、アクリル容器では耐性がなく実現できなかったプソイドクメン主体の液体シンチレータを採用している。その構成はBC521 4.99%、Pseudocumene 95.01%、PPO 2.85 g/lであった。この液体シンチレータの特徴の一つとして波形弁別能力が高いことがあげられる。波形弁別を利用して常陽実験で課題となっていた高速中性子バックグラウンドの排除を目指した。さらに波形弁別を利用するためにFlash ADCを導入しイベントの波形情報を利用して解析を行った。

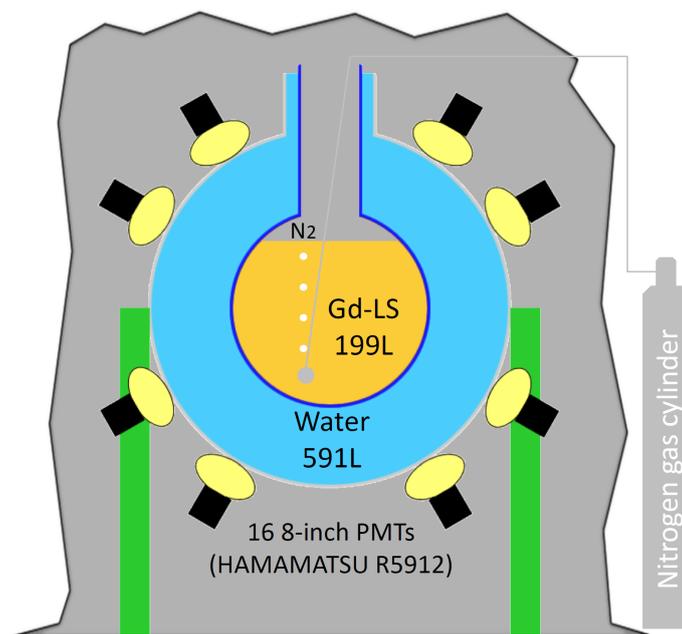


図 1.9: 改良型プロトタイプ検出器の概要 [9]

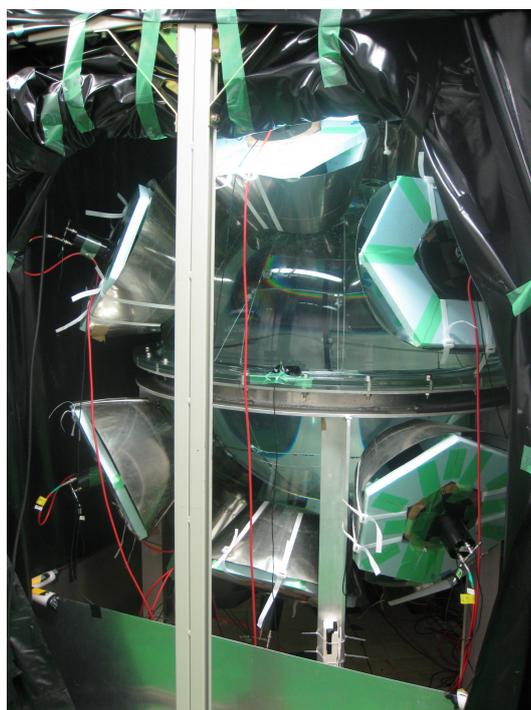


図 1.10: 改良型プロトタイプ検出器の様子 [9]

改良型プロトタイプ実験では実際にニュートリノの測定は行っておらず、東北大学において測定したバックグラウンドの解析結果とニュートリノのモンテカルロシミュレーションの結果からニュートリノ量を見積もり検出性能の評価を行った。カット条件や波形弁別の解析法の最適化を行い最終的に得られる各バックグラウンドとニュートリノの値を表 1.5 に示す。

表 1.5: 改良型プロトタイプ検出器の最終的な解析結果 [9]

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

また波形を用いた粒子識別による高速中性子バックグラウンドの除去能力を向上させるための取り組みとして、波形を増幅率1倍のものと10倍のものと二種類作成し、テール部に10倍の増幅率の波形を規格化し重ねあわせることで分解能の低下に対して補正を行った。その結果を用いた解析結果を表 1.6 に示す。

表 1.6: 改良型プロトタイプ検出器 (テール補正有) の最終的な解析結果 [9]

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

このテール部補正による解析では補正なしの解析結果に比べ検出能力が向上していることが示されているが、一方で一つの信号から二つの波形データを取得することが

必要になるため、取得するデータ量が倍になることや、要求される FADC モジュールの数も増える等の問題点もある。この解析結果から原子力発電所で実際に測定を行った場合のニュートリノの検出感度の見積もりを行った。原子炉出力 3 GWth の原子炉から 25m の場所での測定において、原子炉が停止している期間の Data を 30 日間分測定済みという仮定で、信頼水準 2σ でのニュートリノ観測にかかる測定日数はテーブル補正なしの場合で約 1.5 日、補正ありの場合で約 1 日という結果が得られた [9]。

これまでに常陽プロトタイプ検出器、改良型プロトタイプ検出器の実験で得られた経験や解析技術を踏まえ、より実用的な原子炉モニターの設計を 2013 年度から開始している。本研究では新型原子炉モニターの製作に向けて次のような取り組みを行った。

- 新型原子炉モニターに求められる液体シンチレータの開発
- モンテカルロシミュレーションから新型原子炉モニターの感度の見積もり
- 新型原子炉モニターの建設

第 2 章では新型原子炉モニターのバックグラウンドや、検出器のデザインについて説明する。第 3 章では新型原子炉モニターのターゲット層に用いる液体シンチレータの開発を行った。第 4 章ではベトー層用液体シンチレータの開発について述べる。第 7.1 章ではモンテカルロシミュレーションを行い検出器のデザインを変えた時に感度がどう変化するかを検証し、ニュートリノ検出能力を見積もった。第 7.1 章では新型原子炉モニターの建設において実際に装置を組み上げるために必要な細かい試験や、物品の購入、製作、各図面の作成、検討などを行った。

第2章 新型原子炉モニターの概要

2.1 検出器のバックグラウンド

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

遅延同時計測法を行う前のバックグラウンドの主な構成要素は環境 γ 線と宇宙線ミュオンである。環境 γ 線は主に物質中に含まれる放射性同位体である ^{238}U 、 ^{232}Th の崩壊チェーンおよび ^{40}K により生成されている。これらの環境 γ 線は最大 2.615 MeV のエネルギーを持つが、エネルギー分解能によるエネルギー分布のひろがりの影響で数 MeV にわたって分布する。環境 γ 線の発生源として装置の周囲を覆うコンクリートなどが考えられている。

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

2.1.1 Accidental バックグラウンド

相関のない2つの事象が偽先発信号と偽後発信号を独立につくり、偶発的に遅延同時計測法の時間幅にトリガーをつくるバックグラウンドを Accidental バックグラウンドと呼ぶ。先発信号頻度を $R_{prompt}[\text{Hz}]$ 、後発信号頻度を $R_{delayed}[\text{Hz}]$ 、そして設定時間幅を $\tau [\text{sec}]$ とすると、Accidental バックグラウンドの頻度 $R_{accidental}[\text{Hz}]$ は、

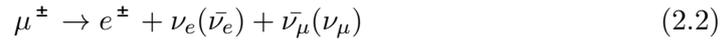
$$R_{accidental}[\text{Hz}] = R_{prompt}[\text{Hz}] \times R_{delayed}[\text{Hz}] \times \tau[\text{sec}] \quad (2.1)$$

で見積もることができる。遅延同時計測法を含むニュートリノセレクションを行った後の偽先発信号は主に環境 γ 線で偽後発信号は主に宇宙線による信号である。これは主にエネルギー領域によっている。環境 γ 線は先に述べたように主に周辺のコンクリートに起因する。また宇宙線由来の高エネルギー γ 線バックグラウンドも存在することがわかっている。

2.1.2 Correlated バックグラウンド

先発信号と後発信号が相関のある一つの事象で遅延同時計測法の設定時間幅内にトリガーをつくるバックグラウンドを Correlated バックグラウンドという。Correlated

バックグラウンドには宇宙線起源のものが3つある。ミュオン崩壊で発生する Michel electron、高速中性子、Spallation であり、本実験では Michel electron と高速中性子の事象頻度が多い。Michel electron による事象は検出器内で宇宙線ミュオンが運動エネルギーを落としきって止まる際に先発信号をつくり、そのミュオンが崩壊する際に後発信号がつけられる事象である。ミュオンの寿命は $\tau \sim 2.2[\mu \text{ sec}]$ である。崩壊の過程は、



であり、エネルギー領域や先発信号と後発信号の時間差がニュートリノの信号と異なるため、排除が比較的容易である。高速中性子は宇宙線ミュオンが装置やその周囲にあるコンクリートなどの物質の原子核と衝突して生成される。生成された高速中性子が検出器内に入射し液体シンチレータ中の陽子と衝突を繰り返して熱化する。衝突された陽子がエネルギーを落とすことで液体シンチレータが発光し、先発信号をつくりだす。また、熱化された中性子はガドリニウムに捕獲されてることで γ 線を放出し、後発信号をつくりだす。高速中性子バックグラウンドの発生原理の模式図を図 2.1 に示す。

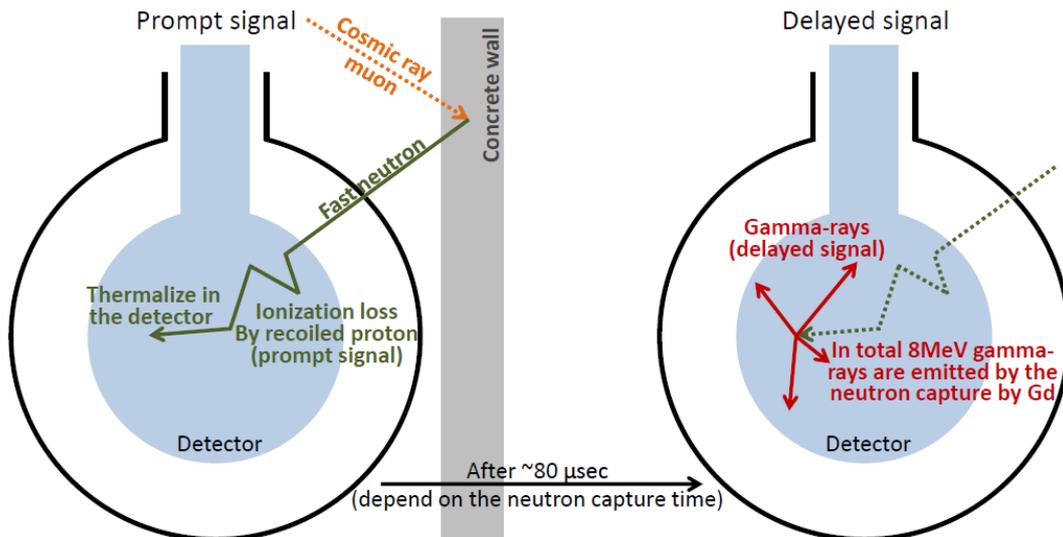


図 2.1: 高速中性子バックグラウンドの模式図

2.2 波形弁別法

2.2.1 波形弁別法の原理

高速中性子によるバックグラウンドは遅延同時計測法を用いた後の先発信号と後発信号との時間差、及びそれらの Energy はニュートリノ事象と同様の振る舞いをする。しかし、先発信号はニュートリノ事象では陽電子であり、高速中性子事象では反跳陽子となる。したがって高速中性子事象を除去する方法として中性子線と γ 線の波形の違いを用いた波形弁別法 (Pulse Shape Discrimination) (以下 PSD) が有効である。有機シンチレータにおいて観測される発光波形は励起粒子の種類に依存することが一般に知られている。波形弁別とは、この性質を用いて同じエネルギーを検出器に付与した異種の粒子間の弁別を行うことである。スチルベン結晶やいくつかの有機シンチレータは異種の放射線で励起される遅い成分の相対値が大きく異なるため波形弁別に適している。図 2.2 はアルファ粒子、高速中性子 (反跳陽子) および γ 線 (高速電子) に対してスチルベンで観測されたシンチレーション光の違いを示している。このようなシンチレータでは中性子と γ 線のように発光波形の違いによって放射線を弁別することが可能である。しかし、実際の測定において検出器のサイズが波形弁別に大きく影響する。一般に検出器のサイズが大きくなると光子計測のタイミングにずれが生じ、波形弁別が難しくなる。

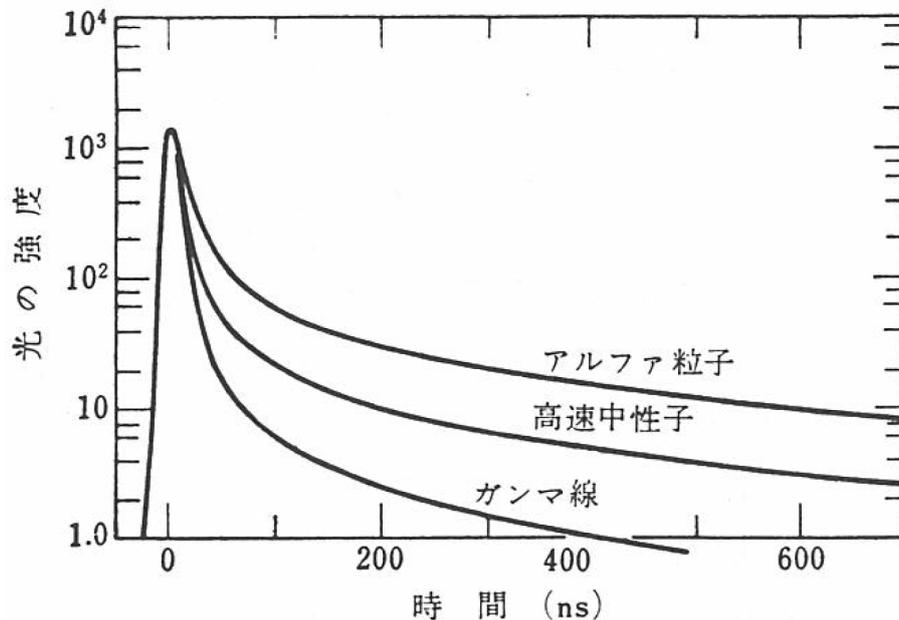


図 2.2: 異種放射線で励起されたスチルベン中のシンチレーション波形の時間特性 (時間 0 で同じ強度に規格化) [10]

2.2.2 Double Gate 法

本研究では PSD の解析方法として Double Gate 法と呼ばれる手法を用いた。図 2.3 にその定義を示した。まず、波形全体の領域を Total と定義する。波形の後半の領域

を Tail と定義する。それぞれの領域について積分した値を Q_{total} 、 Q_{tail} とする。たとえば、ガンマ線に比べ高速中性子は減衰が小さく、Tail の領域が占める割合が大きい。そのため Q_{tail}/Q_{total} の値が大きくなる。この Q_{tail}/Q_{total} の値を PSD パラメータとして、この分布を検証することで、高速中性子事象を除去することを本研究では行っている。

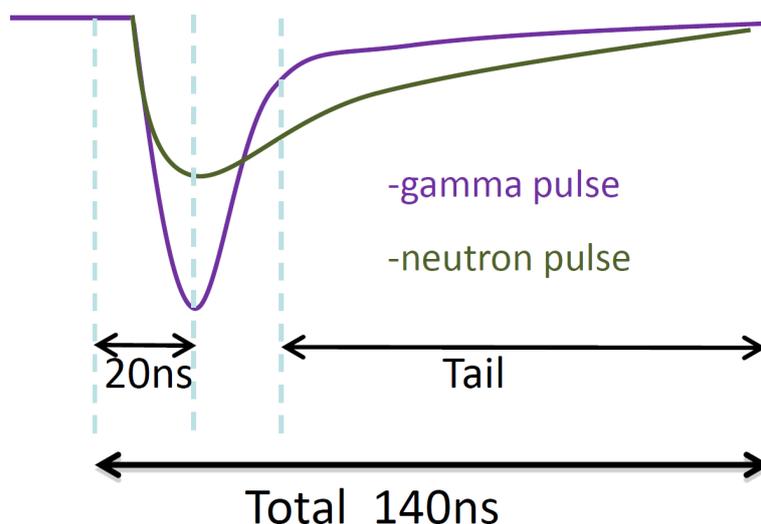


図 2.3: Double Gate 法の定義

2.3 新型原子炉モニター

1.3節でも述べたように、東北大学ではこれまでに行ってきた原子炉モニター実験を踏まえて新しい原子炉モニターの製作を行っている。新型の原子炉モニターの目指すところとして、これまでと同様に地上での測定で小型で安価でシンプルな構造といった点は引き継ぎつつ、容易に移動可能であり感度もプロトタイプ検出器と比べて向上させるといった、原子炉モニターとしての実用性を向上させるために必要なことを満たすということがある。将来的には実際の原子炉での測定を行い、我々のグループとして初のニュートリノを検出することも目指している。

2.3.1 新型原子炉モニターのデザイン

新型原子炉モニターは検出器を新しく作るということから、液体シンチレータを入れる容器の構造が大幅に変更されている。検出器の概要図を図 2.4 に示す。容器がプロトタイプ検出器の球型から直方体型に変更されている最大の理由はコストである。今回の場合は検出器の容器を内外ともにアクリルで製作することを想定していたため、球型の容器の方が高コストになる。容器の材質をアクリルにするという理由もガラスで製作するよりもコストを抑えられるという点と、割れる可能性がガラスに比べて低いので取り回しやすいためである。

ターゲット層の液体シンチレータは引火点を 70 以上のものを用いる。これにより 400L まで容量を増やすことができ検出効率の向上につながる。さらに高速中性子

バックグラウンドを除去するための PSD 能力があり、Gd を溶かしこむことができる液体シンチレータが求められる。引火点による消防法の制限の詳細について表 2.1 に示す。

表 2.1: 消防法上の引火点による引火性物質（第4類）の指定数量 [11]

	第一石油類	第二石油類	第三石油類	第四石油類
引火点	21 未満	21 以上 70 未満	70 以上 200 未満	200 以上
指定数量	非水溶性 200L 水溶性 400L	非水溶性 1000L 水溶性 2000L	非水溶性 2000L 水溶性 4000L	6000L
指定数量の 1/5 未満の危険物は規制なしで貯槽できる				

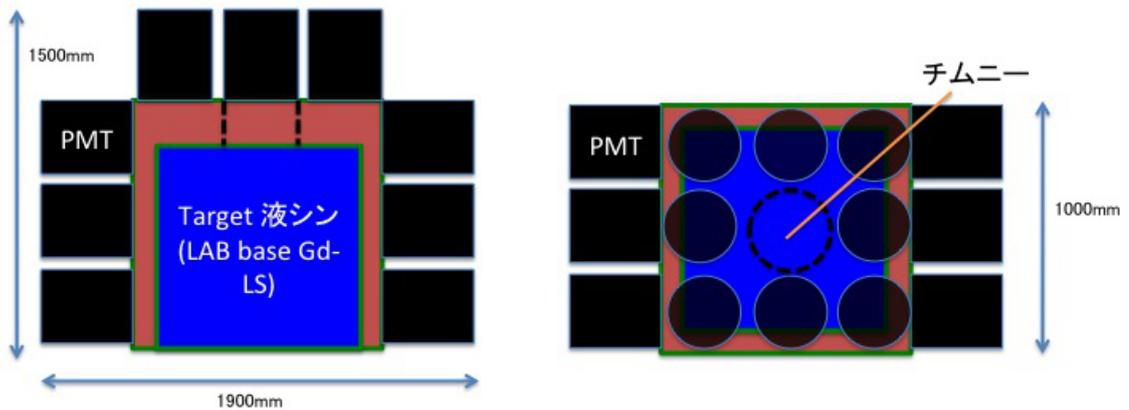


図 2.4: 新型原子炉モニターの検出器概要

また改良型プロトタイプ検出器と同様に新型原子炉モニターでも容器を二重構造にしている。これによって事象位置の再構成の精度を向上させる事ができる。また改良型プロトタイプでは消防法の制限によって外側の層には水道水を入れてバッファとして利用していたが、新型原子炉モニターでは外側の層にもシリコンオイルベースの液体シンチレータを入れ宇宙線のベトーとして利用する。ベトー層用の液体シンチレータとして高引火点で、発光量が小さく発光波形がターゲット層の液体シンチレータと弁別可能なものを用いることでこれを実現する。

解析に液体シンチレータの波形情報を利用するため改良型プロトタイプと同様にデータ取得には Flash ADC(500MS/s, 14bit) を利用する。PMT(10 インチ) は 24 本に増加させておりアクセプタンスの向上を図っている。PMT が 3 方向にしかついていないのは検出器を極力小型化するためである。

容易に移動できるようにするために、このような新型原子炉モニターの検出器を移動可能な架台に載せる。その概要図を図 2.5 に示す。架台は防液堤と暗箱の役目も兼ねており、底部にキャスターを取り付けているためそのまま移動することができる。

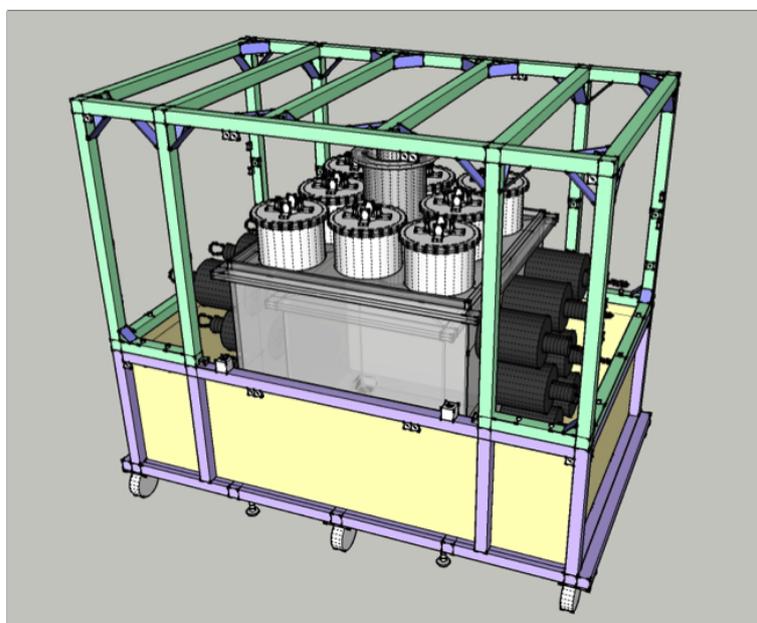


図 2.5: 移動可能な架台と検出器の概要図

第3章 ターゲット層用液体シンチレータの開発

新型原子炉モニターのターゲット層に用いる液体シンチレータを開発するにあたって、求められる性能として次のようなものがあげられる。

- PSD による粒子識別能力がある
遅延同時計測法で問題となる高速中性子バックグラウンドを PSD によって除去する
- アクリルを侵さない
液体シンチレータを入れる容器の材質にアクリルを用いたい
- Gd を溶かしこむことができる
濃度 0.1% にすることで、中性子捕縛時間が $27\mu\text{s}$ となる
- 長期的な安定性がある
経年劣化の小さい液体シンチレータにすることで、数年程度の安定的な測定を目指す
- 引火点が高い (70 以上)
消防法の制限から引火点が 70 以上になると 400L まで申請なしで利用することができる
- 発光量が十分得られる
 $10[\text{photon/keV}]$ 程度の発光量が求められる

このような要求を満たす液体シンチレータの開発を行った。

3.1 ベースオイルの選択

3.1.1 候補物質

新型原子炉モニターのターゲット層に用いる液体シンチレータはベースオイルから見直しを行った。改良型プロトタイプではプソイドクメン (PC) ベースの液体シンチレータを用いていたが、引火点が低い点やアクリルを侵してしまうという点が扱いづらく別のオイルへの変更を考えていた。今回新しいベースオイルの候補として、リニアアルキルベンゼン (LAB)、フェニルキシリルエタン (PXE)、プソイドクメン (PC) の三種類の検討を行った。それぞれの物質の構造式を図 3.1 に示す。これらのオイルは全て KamLAND や Double Chooz 検出器などでの使用の実績がある。

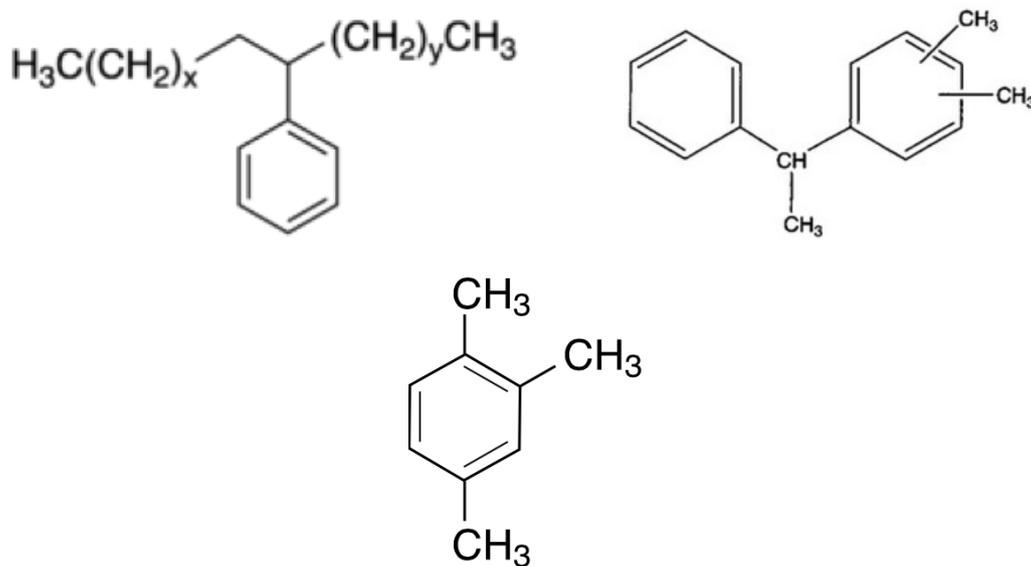


図 3.1: LAB(左上)、PXE(右上)、PC(中央下) の構造式

また各オイルの特徴を表 3.1 に示す。引火点の面からは PC は第二石油類、LAB と PXE は第三石油類に分類され、それぞれ 200L、400L まで利用できる。

表 3.1: LAB,PXE,PC の比較 [12]

	LAB	PXE	PC
分子式	$C_6H_5C_nH_{2n+1}$	$C_{16}H_{18}$	C_9H_{12}
密度 [g/cm^3]	0.86	0.99	0.89
引火点 []	130	145	48
H/C ratio	1.67(n=12)	1.12	1.33
減衰長 (=430nm)	43.4m	0.99m	5.43m

3.1.2 ベースオイルの光量測定

候補に挙げたベースオイルの発光量を知るために ^{136}Cs と NaI シンチレータを用いた後方散乱実験を行って測定した。測定回路は図 3.2 に示し、測定の様子を図 3.3 に示す。NaI シンチレータと液体シンチレータで測定したエネルギー分布を図 3.4 と図 3.5 に示す。図 3.4 の緑線はシングルトリガーで取得した分布で、赤線は NaI とのコインシデンストリガーで取得した分布、黒線は NaI の後方散乱ピークでカットした分布である。図 3.5 の赤線は NaI のシングルトリガーで取得した分布でピークとなっているのは ^{136}Cs の全吸収ピーク (662keV) で、黒線はコインシデンストリガーで取得した分布でピークは後方散乱ピーク (185keV) である。液体シンチレータと NaI のコインシデンスを取ったあと、NaI の後方散乱ピークをガウス関数でフィットしその mean 値を発光量の値として見積もった。測定に用いた FADC は v1721 である。KamLAND 検出器の液体シンチレータの発光量も同様に測定し、その発光量 (8.3[photon/keV]) との相対比較により絶対光量を見積もった。その結果を図 3.6 に示す。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 バブリングを 200ml/min で 15 分間行った。この結果から発光量は LAB は若干低い、PXE と PC は十分な発光量があることがわかった。

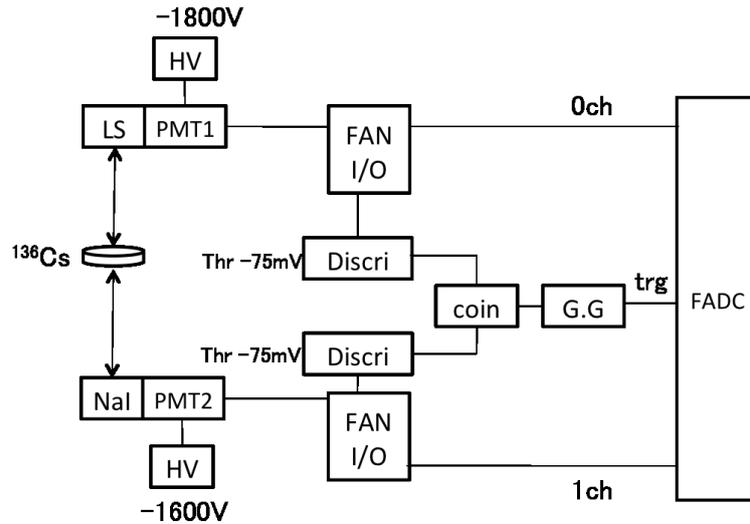


図 3.2: 光量測定の回路図



図 3.3: 光量測定の様子

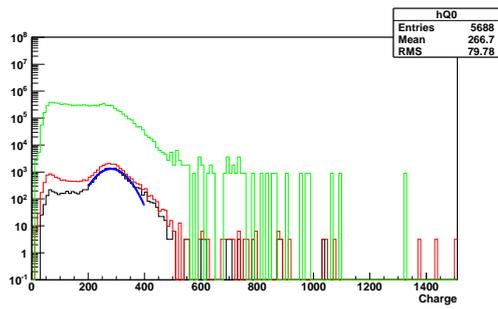


図 3.4: 液体シンチレータでのエネルギー分布 (黒:NaI の後方散乱ピークでカット後、赤:コインシデンス取得データ、緑:シングル取得データ)

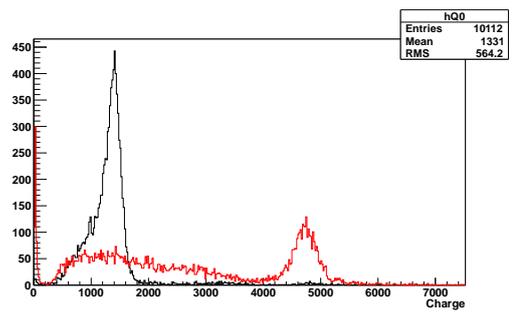


図 3.5: NaI シンチレータでのエネルギー分布 (黒:コインシデンス取得データ、赤:シングル取得データ)

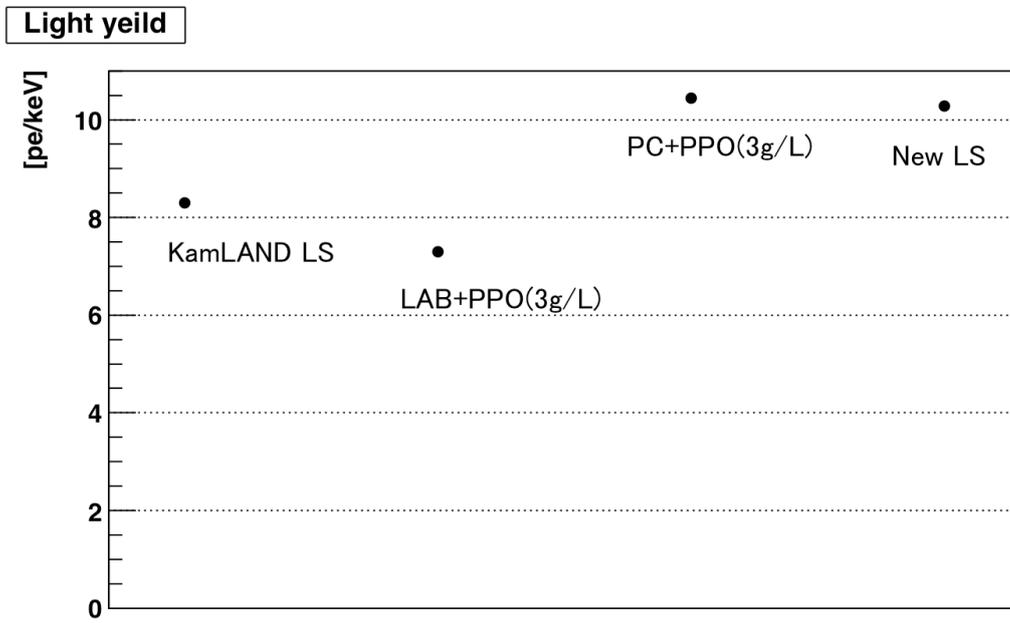


図 3.6: ベースオイルの光量測定結果

3.1.3 ベースオイルの PSD 測定

候補に挙げたベースオイルについて線源を用いて実験を行い、発光波形と PSD 能力について測定した。測定の回路は図 3.9 に示す。γ 線源として用いた ^{60}Co と、 $\gamma+n$ 線源 ^{252}Cf の崩壊図を図 3.7 と図 3.8 に示す。 ^{60}Co 線源を用いて各ベースオイルについての電荷分布の結果と波形の結果を図 3.10 と図 3.11 に示す。また ^{60}Co と ^{252}Cf 線源を用いて各ベースオイルについての PSD を測定した結果を図 3.12 から図 3.14 に示す。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 バブリングを 200ml/min で 15 分間行った。測定に用いた FADC は v1721 である。1p.e. の Charge は 1.66ch に相当しており、波形と PSD については Charge 分布の 500ch から 1000ch (約 300p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。

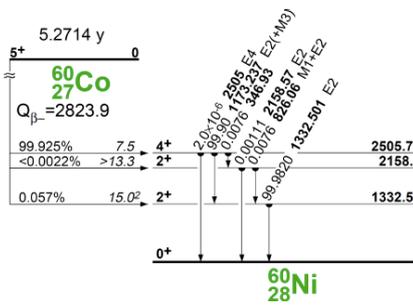


図 3.7: ^{60}Co の崩壊図

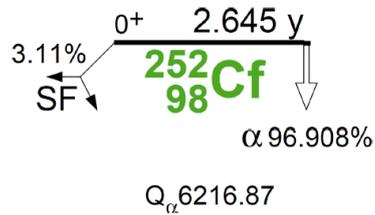


図 3.8: ^{252}Cf の崩壊図

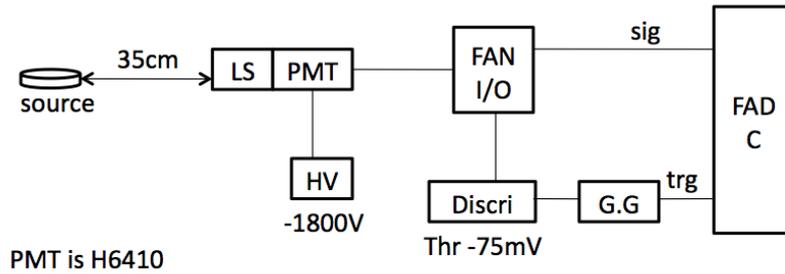


図 3.9: ベースオイル測定の回路図

測定の結果から波形は PC が LAB と PXE に比べてテール部が占める Charge の割合が小さくなっていることが分かる。PSD についてはいずれのオイルにも PSD 能力があることが確認できたが、LAB は PC と PXE に比べて能力は低い事がわかる。

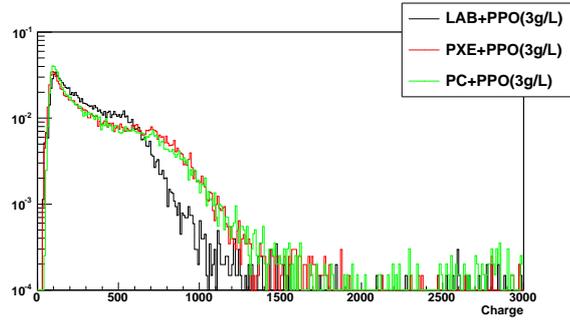


図 3.10: LAB、PXE、PC の電荷分布

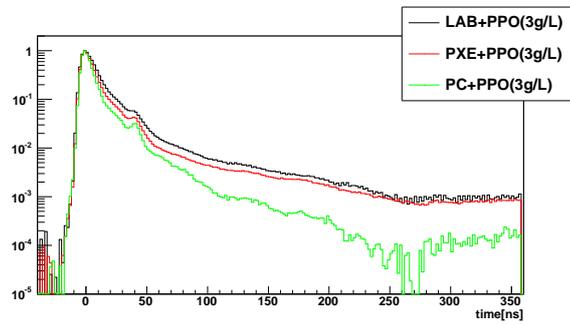


図 3.11: LAB、PXE、PC の波形

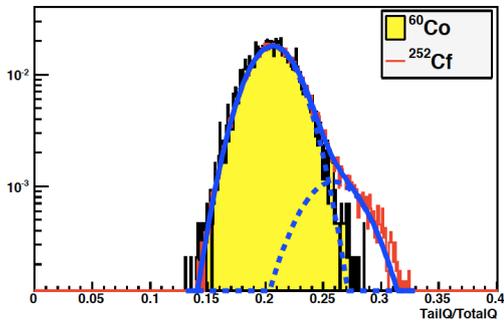


図 3.12: LAB の PSD 分布

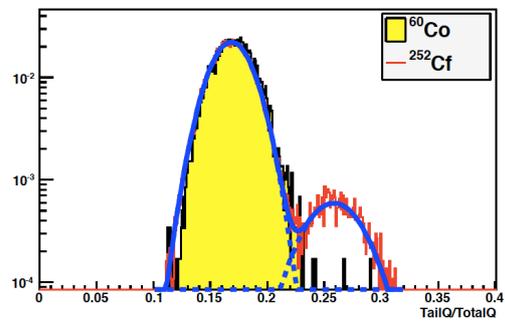


図 3.13: PXE の PSD 分布

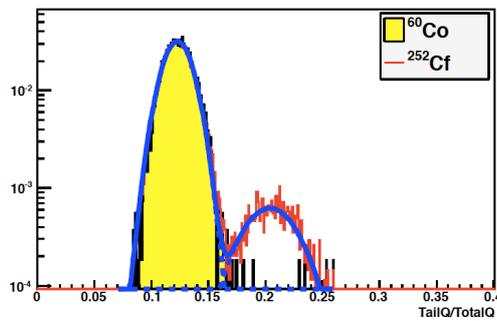


図 3.14: PC の PSD 分布

3.1.4 BC521 との混合試験

改良型プロトタイプに用いていた液体シンチレータは、Gd を溶かしこむために BC521 という市販の液体シンチレータを利用していた (詳細は 1.3)。新型原子炉モニターの液体シンチレータにも同様に BC521 を利用して Gd を溶かしこめるか試験を行った。BC521 を 5% 加えた各ベースオイルの様子を図 3.15 に示す。また LAB に関しては BC521 と混合して 1 週間後の様子も図 3.16 に示す。PXE は BC521 を 5% を加えると白濁してしまった。PC と LAB は BC521 を溶かしても透明であった。しかし LAB は時間経過 (1 週間) とともに白い沈殿が生じてしまっていた。以上から PC 以外には BC521 を用いて Gd を溶かしこむことは難しいことがわかった。

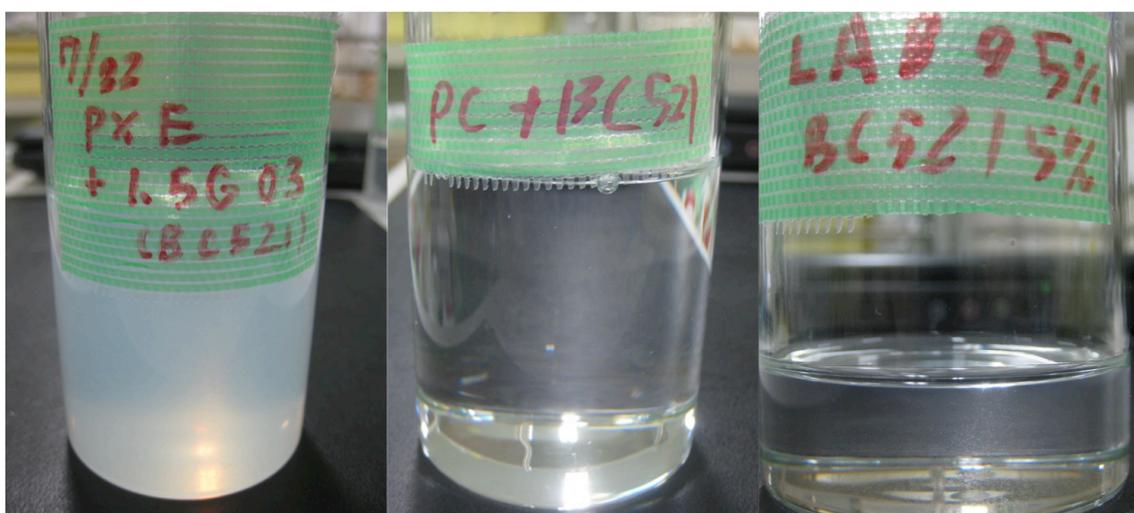


図 3.15: BC521 と各オイルとの混合液の様子 (左から PXE、PC、LAB)

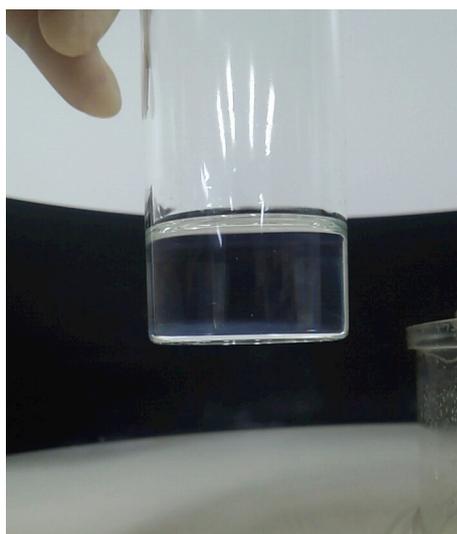


図 3.16: 1 週間経過後の BC521 と LAB を混合した液

3.1.5 アクリル耐液試験

新型原子炉モニターの液体シンチレータの容器にはアクリルを用いる。そのためアクリルが耐性のあるベースオイルを用いる必要がある。アクリルと各オイルの相性を見るために長期的な経年変化の試験を行った。図 3.17 に示すようにアクリル片をオイルとともにバイアルに入れ恒温槽で 40℃ に保ち、アクリル片の重量の変化や見た目の変化を記録した。重量の変化の結果を図 3.19 と図 3.18 に示す。アクリル片の見た目の変化を図 3.20 から図 3.22 に示す。さらに 1 年ほどアクリル片を浸けたあとの様子を図 3.23 から図 3.26 に示す。

この結果から PC は 150 日経過後には重量が 20%以上増えていて見た目にも膨潤しており、明らかにアクリルを侵していることが分かる。PXE の重量の変化は PC と比べると小さいがアクリル片の表面にクラックが生じており、長期間浸けたものは黄変しておりアクリルと反応をしていると考えられる。LAB は重量の変化も PC や PXE と比べると小さく、見た目にも大きな変化はなく、長期間浸けたあとのサンプルも変化は見られない。そのためアクリルは LAB に対しては耐性があるということがわかった。また PC は 40%以下にするとアクリルを侵さないという文献があり [12]、実際に PC40%、LAB60%のサンプルも長期間の試験を行った。その結果アクリル片の見た目は変化しておらず、PC の濃度を下げればアクリルを侵さないということが確かめられた。

これまでの結果から、新型原子炉モニターのターゲット層に用いる液体シンチレータのベースオイルは、アクリルを侵す PC と PXE ではなく LAB を採用することにした。しかし LAB は PSD 能力が他の候補に比べて低いいため LAB の PSD 能力の向上に向けた取り組みを行った (3.2 節)。



図 3.17: アクリルの耐液テストの様子

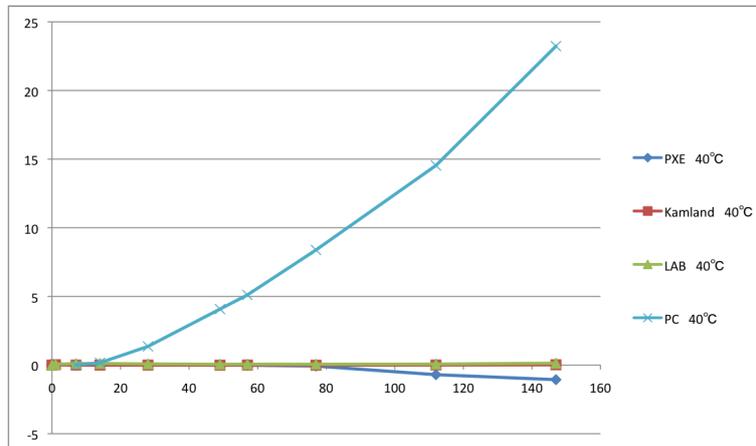


図 3.18: オイルに浸けたアクリル重量の変化

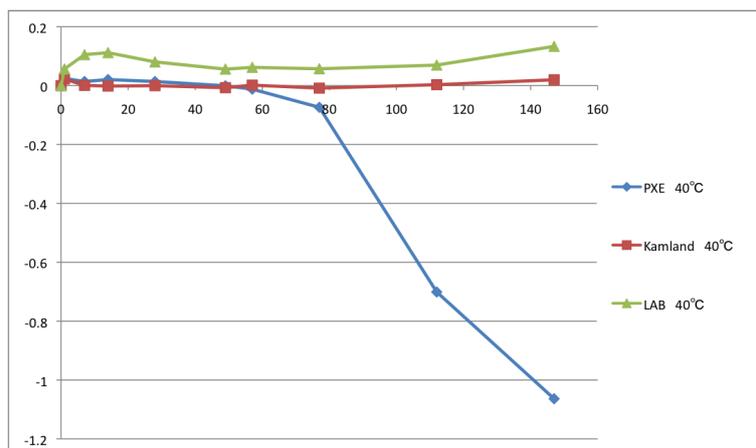


図 3.19: オイルに浸けたアクリル重量の変化 (PC なし)

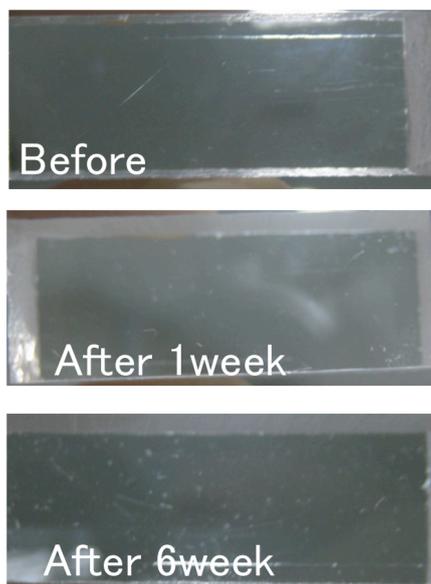


図 3.20: LAB に浸けたアクリル片の表面の変化の様子

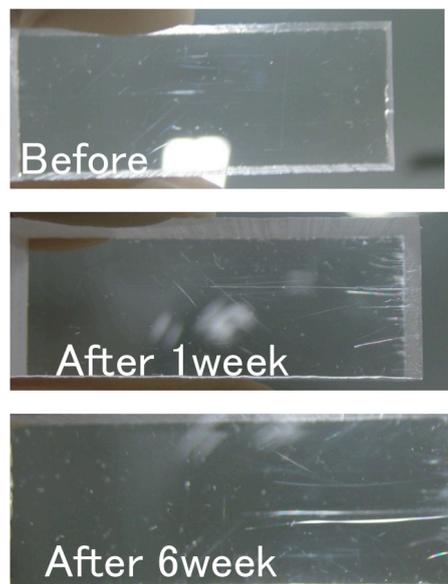


図 3.21: PXE に浸けたアクリル片の表面の変化の様子

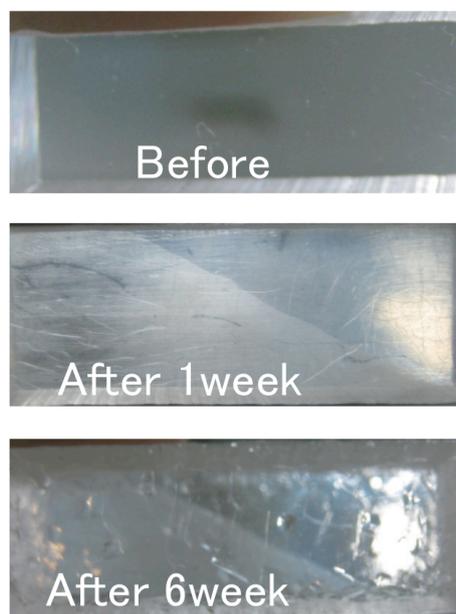


図 3.22: PC に浸けたアクリル片の表面の変化の様子



図 3.23: 長期間 LAB に浸けたあとアクリルと液の様子



図 3.24: 長期間 PXE に浸けたあとのアクリルと液の様子

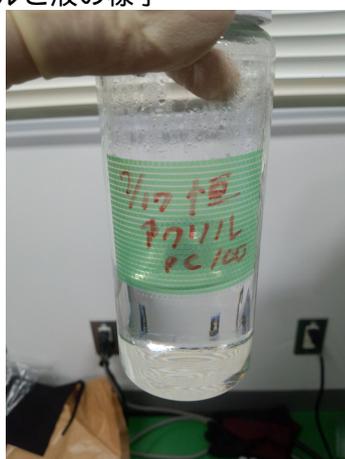


図 3.25: 長期間 PC に浸けたあとのアクリルと液の様子

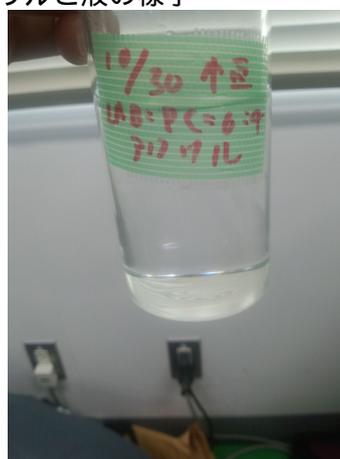


図 3.26: 長期間 LAB60% + PC40% に浸けたあとのアクリルと液の様子

3.2 LABのPSD能力の向上

3.2.1 溶質の添加

前節での結果から新型原子炉モニターの液体シンチレータとしてはLABをベースにしたものを利用する。LABは引火点が高く、アクリルを侵さないという点では優れているが、PSD能力は改良型プロトタイプで用いていたPCベースの液体シンチレータと比べると悪い。そこでLABに様々な溶質を加える事で波形やPSD能力が変化するか実験を行った。加えた溶質は、PPO、bis-MSB、ナフタレン、アセトン、PCの5種類である。各溶質の構造式を図3.27から図3.30に示す。測定回路は図3.9と同様のもので、各溶質の量を変化させ、 ^{60}Co と ^{252}Cf 線源を用いてPSDの測定を行った。測定に用いたFADCはv1721である。図3.31から図3.33にLABにPPOの量を変化させて加えた時の測定結果を示す。図3.34から図3.36にLABにPPO(3g/L)とbis-MSBの量を変化させて加えた時の測定結果を示す。図3.37から図3.39にLABにPPO(3g/L)とナフタレンの量を変化させて加えた時の測定結果を示す。図3.40から図3.42にLABにPPO(3g/L)とアセトンの量を変化させて加えた時の測定結果を示す。図3.43から図3.45にLABにPPO(3g/L)とPCの量を変化させて加えた時の測定結果を示す。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 バブリングを200ml/minで15分間行った。波形とPSDについてはCharge分布の500chから1000ch(約300p.e.から約600p.e.)でカットを行った。

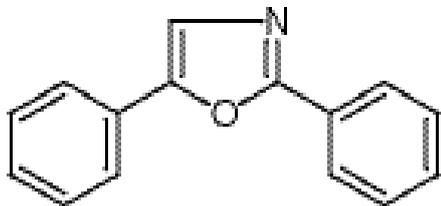


図 3.27: PPO の構造式

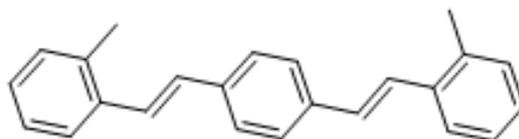


図 3.28: bisMSB の構造式

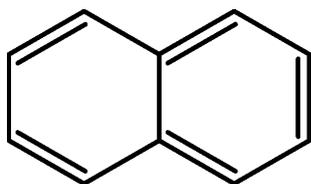


図 3.29: ナフタレンの構造式

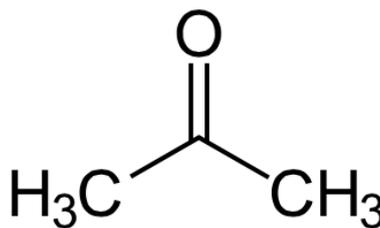


図 3.30: アセトンの構造式

PPOとbis-MSBの量を変化させたサンプルはいずれのサンプルについても電荷分布、波形、PSD分布ともに大きな変化はなかった。ナフタレンの量を変化させたサンプルについては波形に大きな変化があり、ナフタレンの量を増やすほど波形のテール部の割合が増加する傾向がみられた。アセトンの量を変化させたサンプルは波形の変化もみられたが、発光量が大きく減少しているため使用は難しいと考えられる。PCを加えたサンプルはPCの量が増えるほど波形に変化があり、PSD能力も向上していることが分かった。

この結果から LAB に溶質を加える事で波形を変化させることができ、PSD 能力を変化させることもできることが分かった。さらにより定量的に PSD を評価するために測定方法を見直し、溶質を組み合わせた場合にどうなるのか検証するために再び測定を行った。

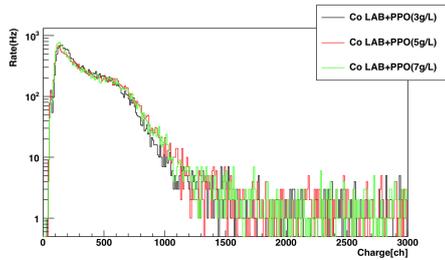


図 3.31: PPO の量を変化させた時の電荷分布

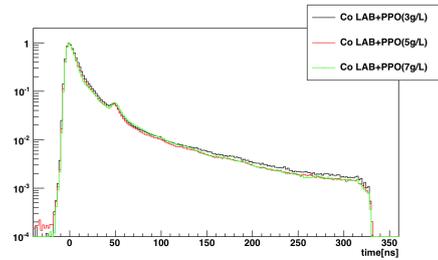


図 3.32: PPO の量を変化させた時の波形

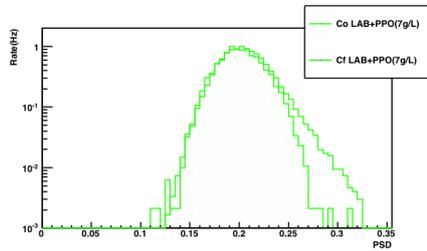
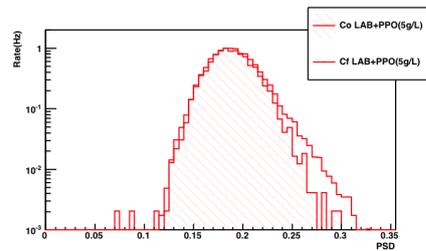
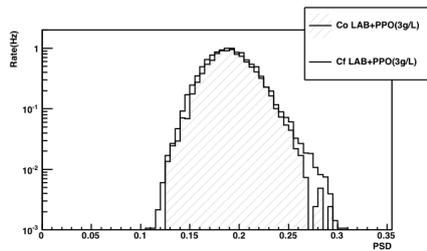


図 3.33: PPO の量を変化させた時の PSD 分布

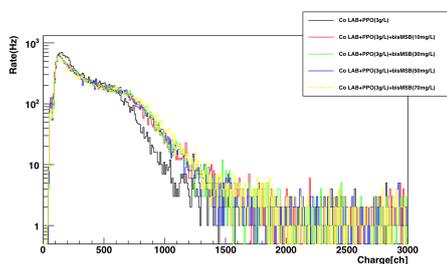


図 3.34: bis-MSB の量を変化させた時の電荷分布

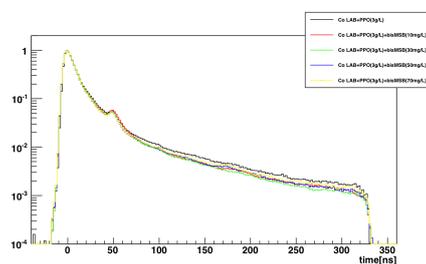


図 3.35: bis-MSB の量を変化させた時の波形

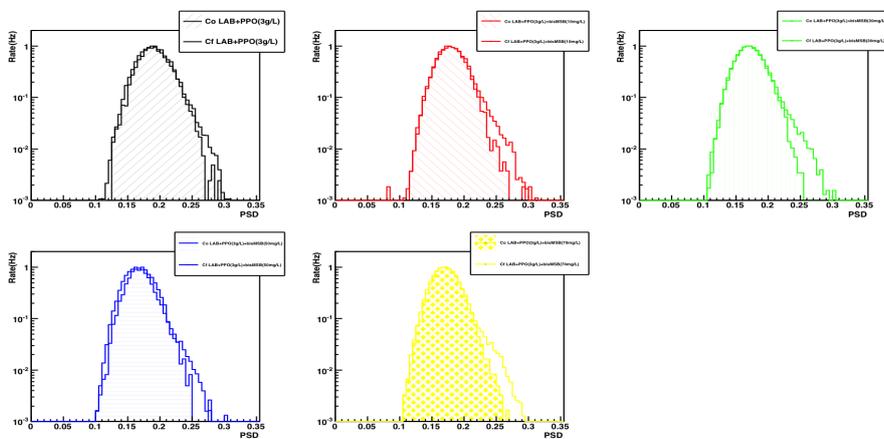


図 3.36: bis-MSB の量を変化させた時の PSD 分布

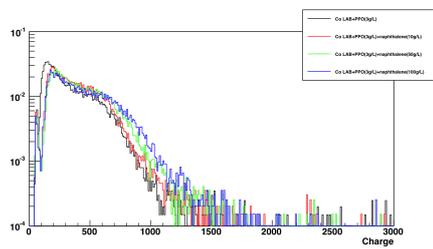


図 3.37: ナフタレンの量を変化させた時の電荷分布

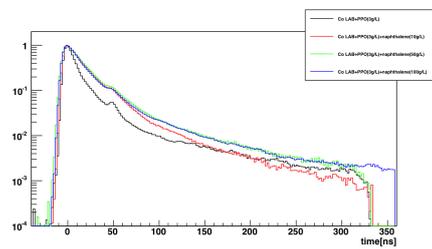


図 3.38: ナフタレンの量を変化させた時の波形

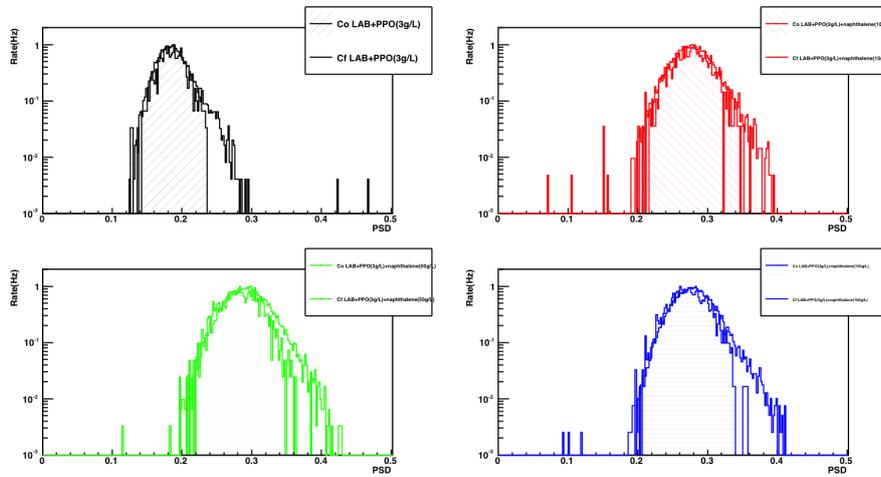


図 3.39: ナフタレンの量を変化させた時の PSD 分布

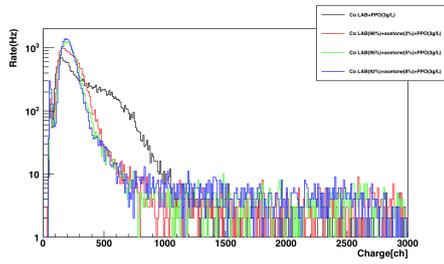


図 3.40: アセトンの量を変化させた時の電荷分布

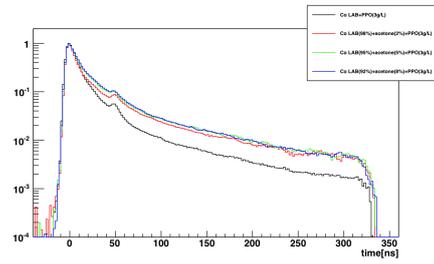


図 3.41: アセトンの量を変化させた時の波形

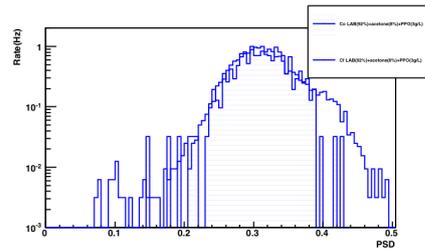
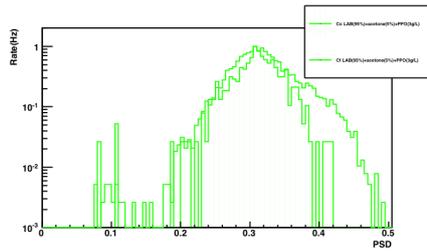
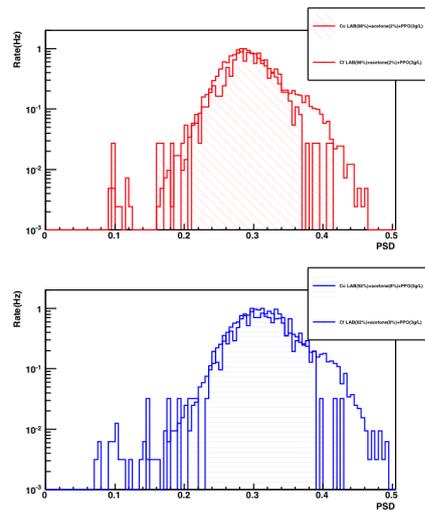
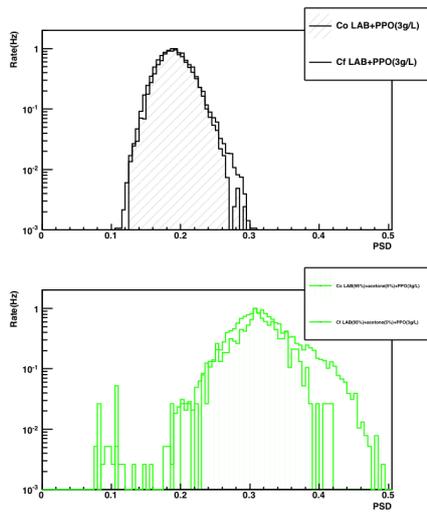


図 3.42: アセトンの量を変化させた時の PSD 分布

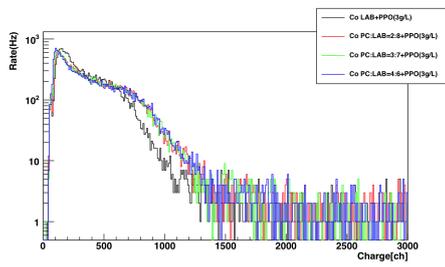


図 3.43: PC の量を変化させた時の電荷分布

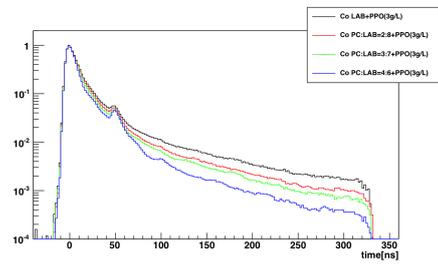


図 3.44: PC の量を変化させた時の波形

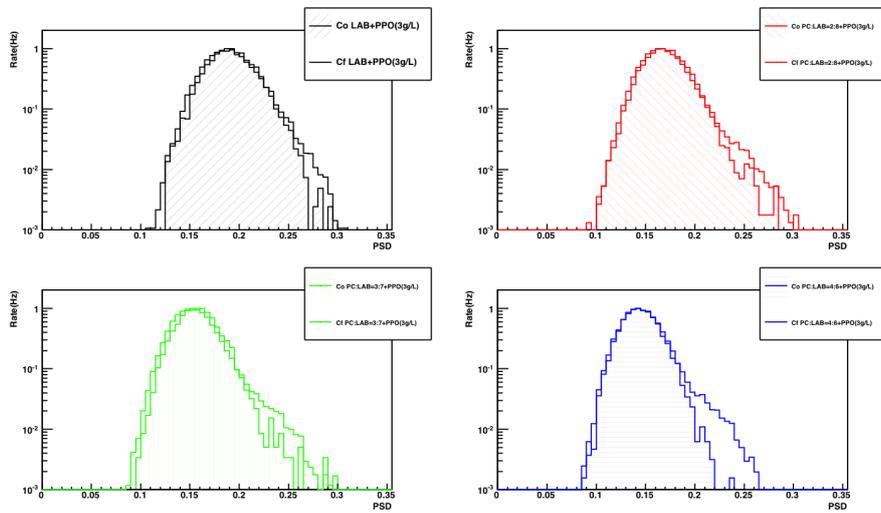


図 3.45: PC の量を変化させた時の PSD 分布

3.2.2 TOF を用いた γ/n 分離による測定

LAB に溶質を加えたサンプルの PSD 能力の測定のために Time Of Flight (TOF) を用いた実験を行った。測定の回路図を図 3.46 に示す。実際の測定の様子を図 3.47 に示す。線源には ^{252}Cf を用いており、ガンマ線と中性子線を飛行時間の違いにより識別する。線源はトリガーとなる 1L の液体シンチレータに直付けされており、測定したい液体シンチレータの入ったバイアルまでは 40cm ほどの距離がある。この距離をガンマ線の場合は約 1.3[ns]、数 MeV の中性子線の場合は 10[ns] 程度の飛行時間で飛行する。トリガーには同じ信号を用いているために波形がガンマ線イベントの場合と、中性子線イベントの場合でそれぞれの液体シンチレータの波形が 10[ns] 程度ずれる。そこで波形のピーク位置の差を使いガンマ線イベントと中性子線イベントを識別を行う。実際に取得したデータの波形のズレを図 3.48 に示す。この波形のピーク位置の差と PSD との二次元プロットを図 3.49 に示す。この分布を見ると相関のある二つのクラスターがみられ、それぞれ gamma like イベントと neutron like イベントである。この解析方法で gamma like と neutron like の波形と PSD 分布をそれぞれ導出し評価を行った。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 バブリングを 200ml/min で 15 分間行った。測定に用いた FADC は v1721 である。Charge 分布の 500ch から 1000ch (約 300p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。

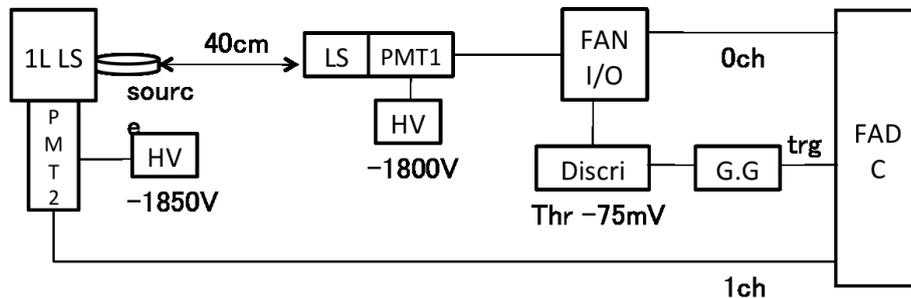


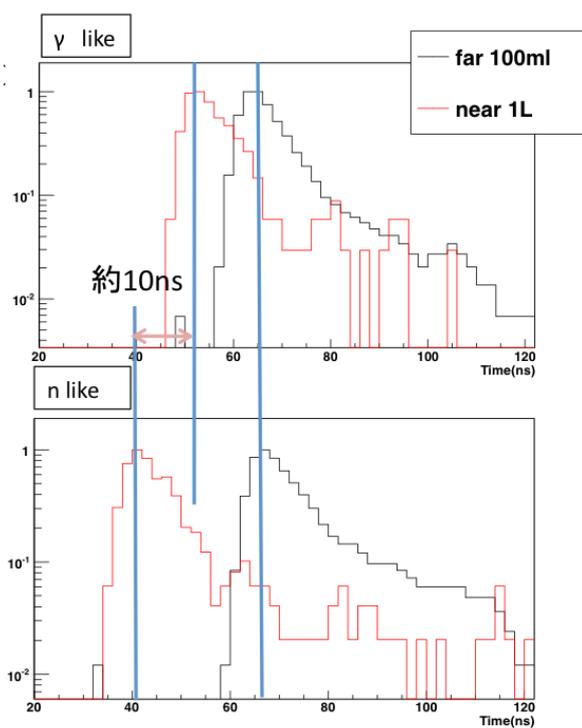
図 3.46: TOF を用いた測定の回路図

この測定を行ったサンプルは次のとおりである。

- PC+PPO(3g/L)、LAB+PPO(3g/L)、LAB+PPO(7g/L)、
- LAB+PPO(3g/L)+bisMSB(30mg/L)、LAB+PPO(3g/L)+ナフタレン (100g/L)、
- LAB+PPO(3g/L)+アセトン (2%)、LAB(60%)+PC(40%)+PPO(3g/L)、
- LAB+PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)、LAB+PPO(7g/L)+ナフタレン (100g/L)、
- LAB+PPO(3g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン (100g/L)、
- LAB+PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン (100g/L)



図 3.47: TOF を用いた測定の様子

図 3.48: 波形で見た場合の γ イベントとイベントでのピークのスレ

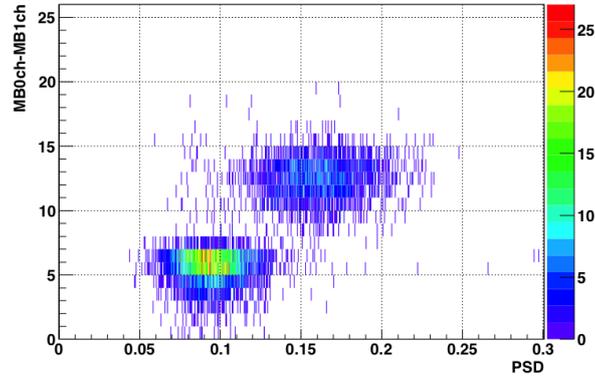


図 3.49: ピークの位置の差と PSD の二次元分布 (左下が gamma like、右上が neutron like)

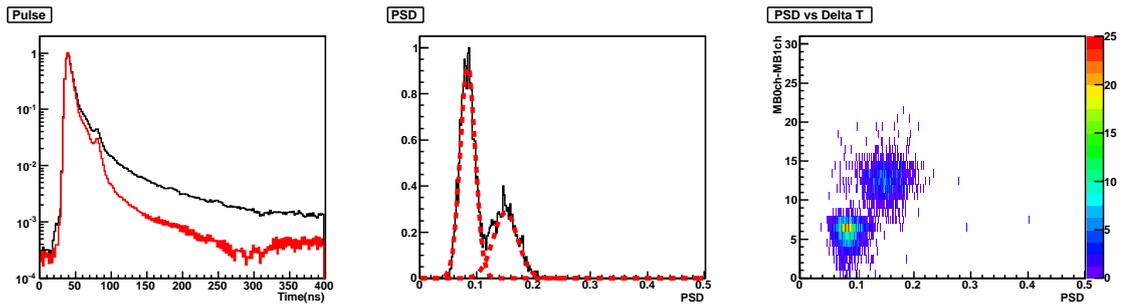


図 3.50: PC+PPO(3g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

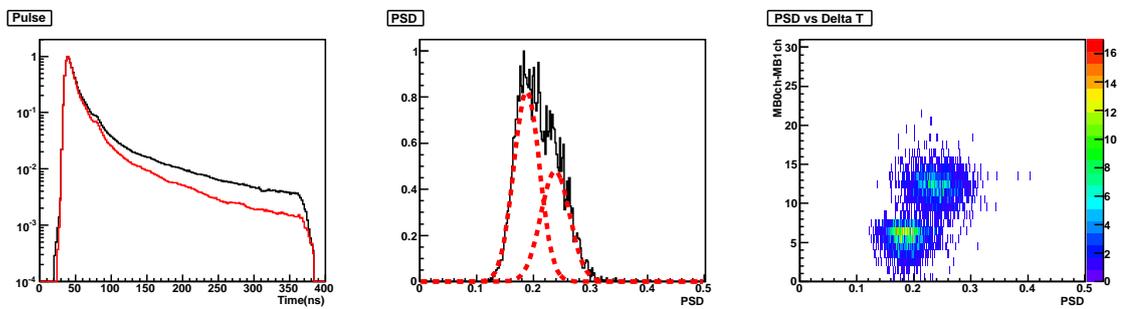


図 3.51: LAB+PPO(3g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

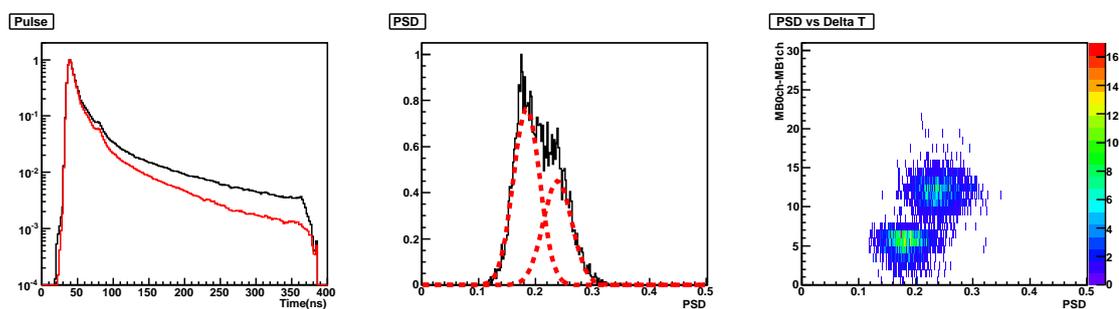


図 3.52: LAB+PPO(7g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

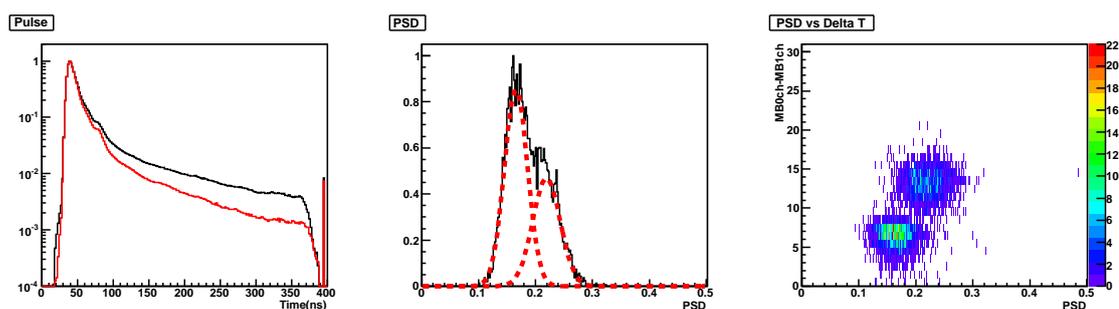


図 3.53: LAB+PPO(3g/L)+bisMSB(30mg/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

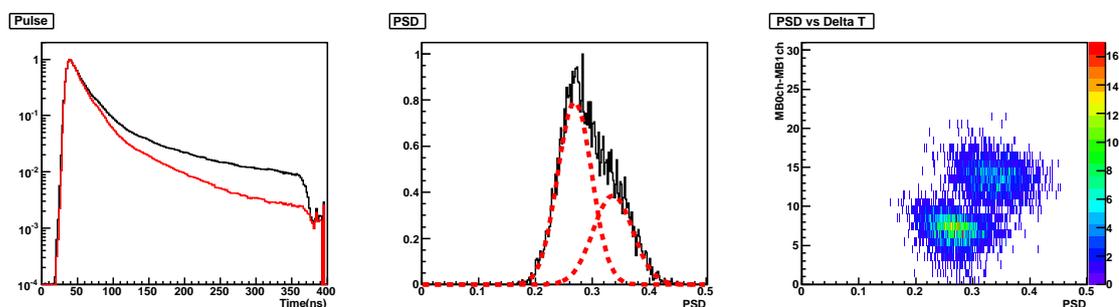


図 3.54: LAB+PPO(3g/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

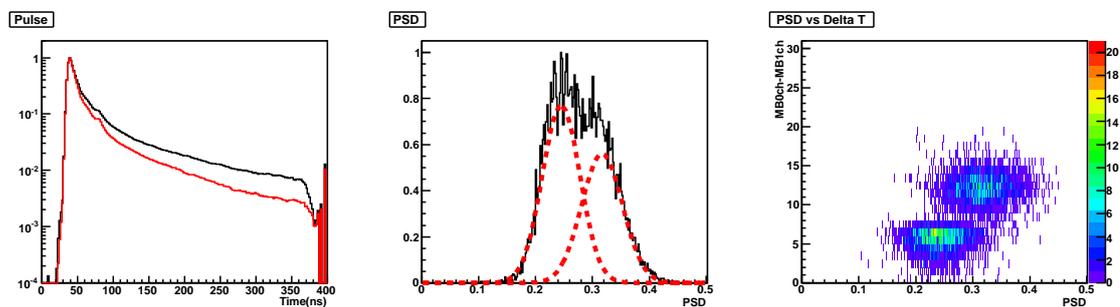


図 3.55: LAB+PPO(3g/L)+アセトン (2%) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)

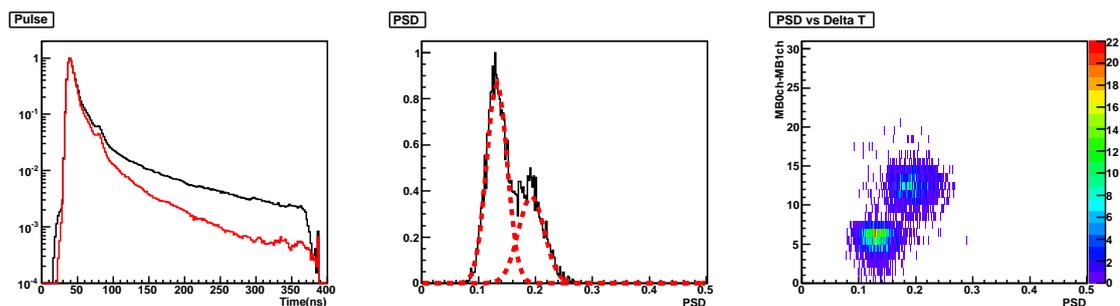


図 3.56: LAB(60%+PC(40%))+PPO(3g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)

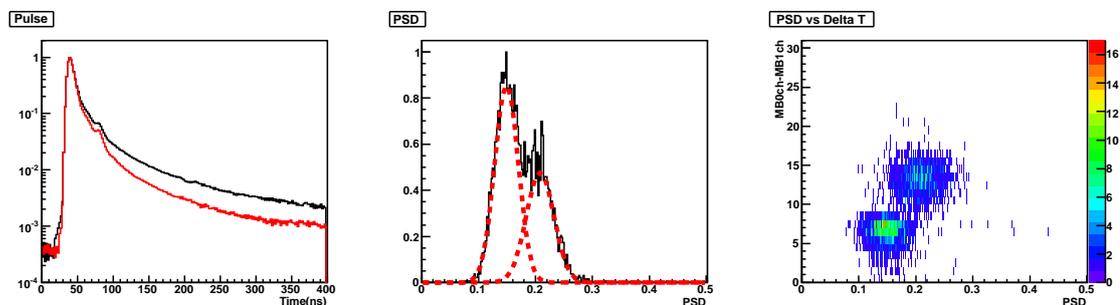


図 3.57: LAB+(PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)

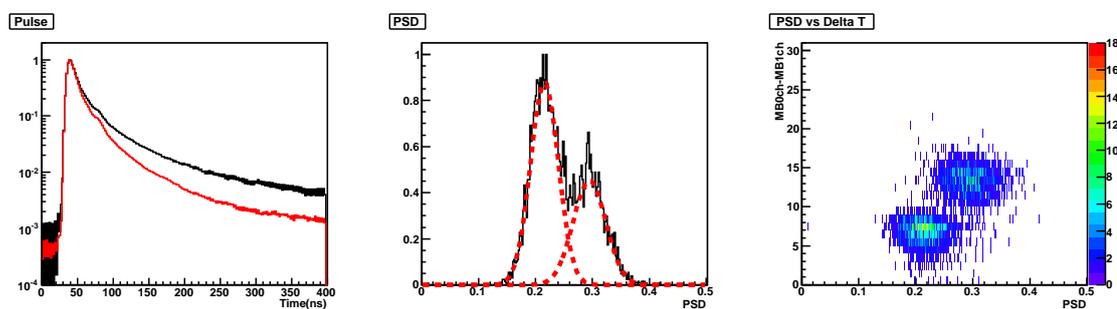


図 3.58: LAB+(PPO(7g/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

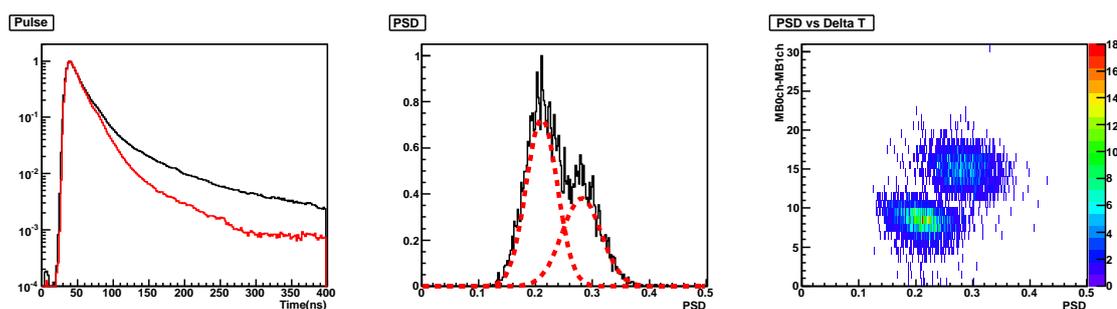


図 3.59: LAB+(PPO(3g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

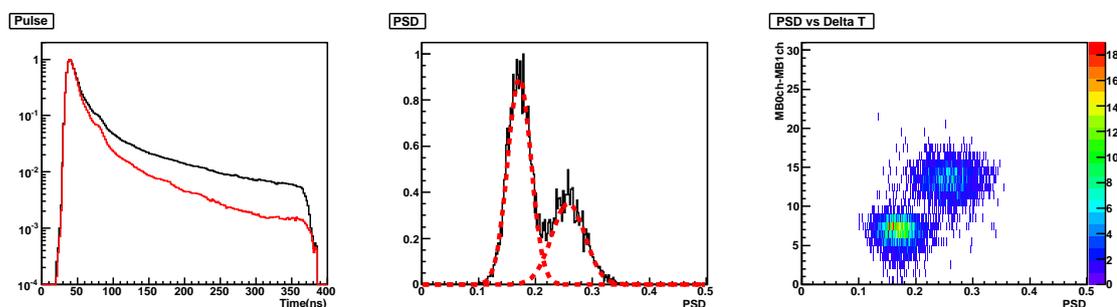


図 3.60: LAB+(PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン (100g/L) の TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

この測定では溶質を2種類加えたサンプルも測定しており、そのサンプルの電荷分布を図3.61に示す

これまでの測定結果を定量的に評価するために Figure of Merit (FoM) というパラメータを用いた。FoM は gamma like と neutron like の PSD 分布をガウスフィットしたときの mean 値を m_γ 、 m_n とし、sigma を σ_γ 、 σ_n とすると、

$$FoM = \frac{|m_\gamma - m_n|}{\sqrt{\sigma_\gamma^2 + \sigma_n^2}} \quad (3.1)$$

で与えられる。この値が大きければ分離能力が高い事を表している。図3.62にFoMを用いた評価プロットを示す。赤いラインはFoMが1.5、2.0、2.5を表している。この結果から最も波形弁別能力が高いのはLAB+PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン(100g/L)のサンプルであった。またPC+PPO(3g/L)とLAB+PPO(3g/L)とこの新しい液体シンチレータのPSDのefficiency curveを図3.63に示す。この図から新しい液体シンチレータはLABに比べて高いPSD能力があり、PCと近いPSD能力があることがわかる。またこの新しい液体シンチレータについて図3.2と同様のセッティングで光量測定を行った結果を図3.64に示す。光量についても新しい液体シンチレータはLABに比べて高い値を示していることが分かる。これはナフタレンなどの溶質を加えたことが原因と考えられる。以上の結果を総合してLAB+PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン(100g/L)を新しい原子炉モニターの液体シンチレータとして利用する(以下「新しい液体シンチレータ(New LS)」と呼称する)。しかし現在までに新しい液体シンチレータにGdを溶かしこむ方法は確立されておらず、ニュートリノ検出器としてGdを含有した液体シンチレータは不可欠であり開発は今後の課題である。

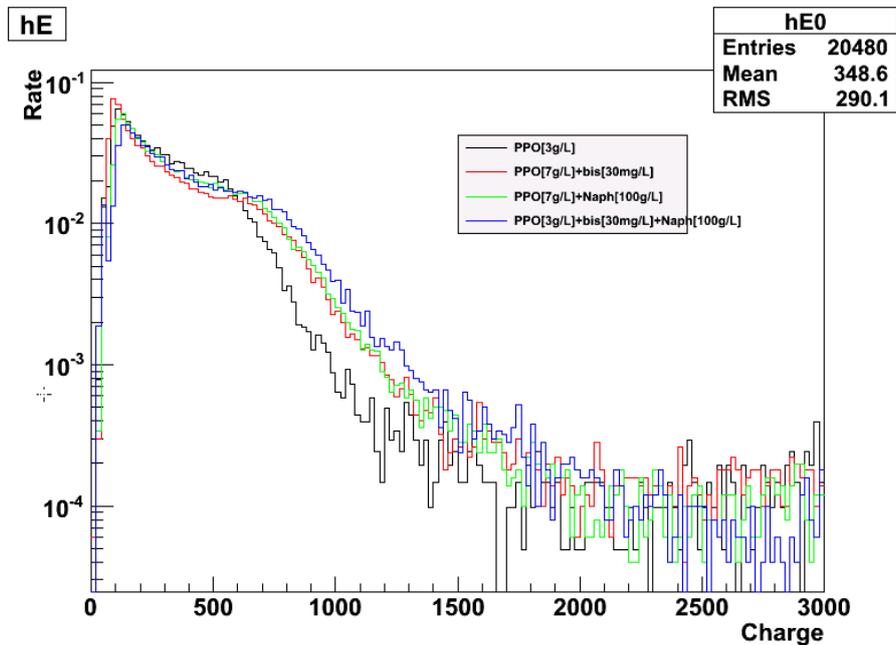


図 3.61: LAB に二種類の溶質を加えたサンプルの電荷分布

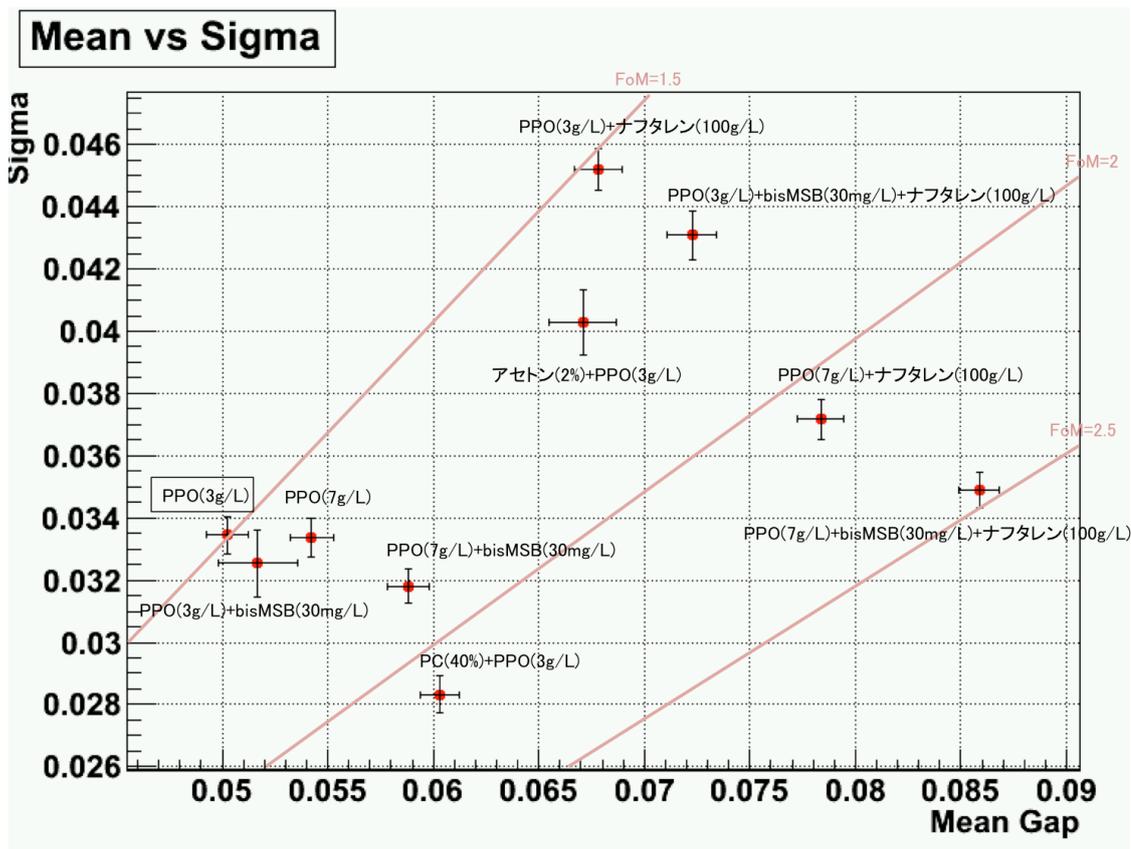


図 3.62: FoM を用いた各液体シンチレータの評価プロット

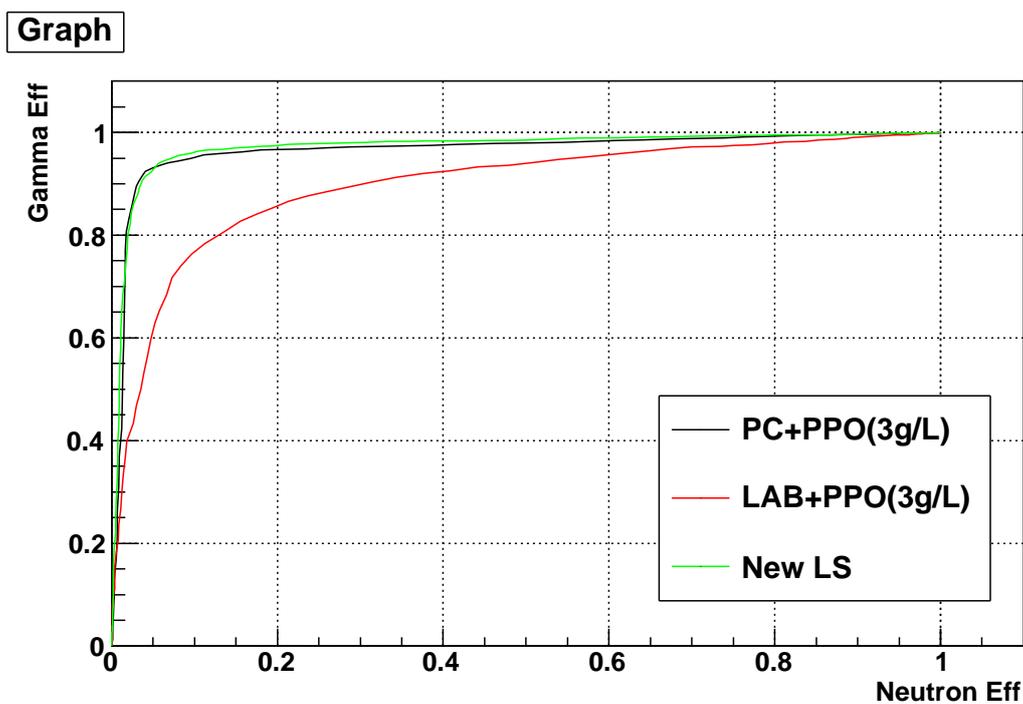


図 3.63: PC、LAB、新しい液体シンチレータの PSD の efficiency curve

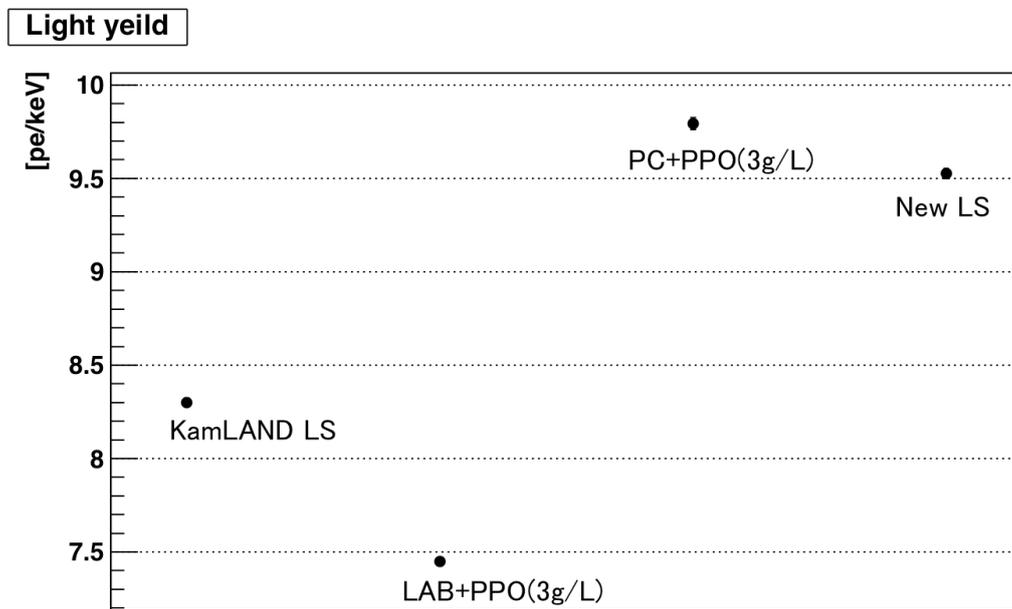


図 3.64: 新しい液体シンチレータの発光量測定の結果

3.2.3 黄ばみの問題に対して

新しい原子炉モニターの液体シンチレータとしてLAB+PPO(7g/L)+bisMSB(30mg/L)+ナフタレン(100g/L)を利用するが、この新しい液体シンチレータは溶質を溶かしこんでから数日から1週間程度で黄ばむことが分かった。黄ばむ様子を図3.65に示す。この黄ばみの原因として光にあたったことによる影響や、ナフタレンが時間経過で酸化したことによる影響等を考えた。その後ブラックシートで遮光したサンプルや、酸化を防止するために酸化防止剤ジブチルヒドロキシトルエン(BHT)を加えたサンプル等を製作し経過を観察した。BHTの構造式を図3.66に示す。その結果BHTを加えたサンプルは黄ばみが抑えられており、さらに溶質を溶かしこんだ直後に窒素バブリングを行ったサンプルについても黄ばみが抑えられたため黄ばみの原因は酸化であると考えられる。その後も大きなバイアル(3L)でBHTの量を増やして経年変化の観察を行った(図3.67)。BHTの量を増やしすことで黄ばむ速度を抑えることはできるが、バブリングを行わないとBHTを加えたサンプルも時間経過で黄ばむことがわかった。実際に原子炉モニターに導入して利用する際には窒素バブリングが欠かせないと言える。



図 3.65: 新しい液体シンチレータの黄ばむ様子 (左:製作直後、右:製作から1週間後)

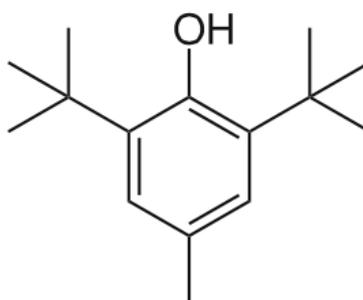


図 3.66: 酸化防止剤(BHT)の構造式

黄ばんだあとの新しい液体シンチレータについてTOFを用いた測定を行い、PSD能力などに変化があるかを確認した。測定の設定は図3.46と同様である。測定結果を図3.68に示す。黄ばみの有無での ^{60}Co 線源を用いた測定の電荷分布と波形の比較を図3.69と図3.70に示す。またPSDのefficiency curveを図3.71に示す。測定に用いた



図 3.67: 大きいバイアルでの新しい液体シンチレータの経年変化の様子 (左から製作直後、2週間後、1か月後)

FADC は v1721 である。Charge 分布の 500ch から 1000ch (約 300p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 バブリングを 200ml/min で 15 分間行った。

これらの結果から新しい液体シンチレータは黄ばむと発光量が 10% 程度落ちるが、波形や PSD 能力は変わらないということが分かる。発光量が若干下がっているのは黄ばんだことによる透過率の低下が原因の一つとして考えられる。そのため実際の原子炉モニターではより影響が大きくなる可能性があるため、出来る限り黄ばみを抑えることが重要であると考えられる。

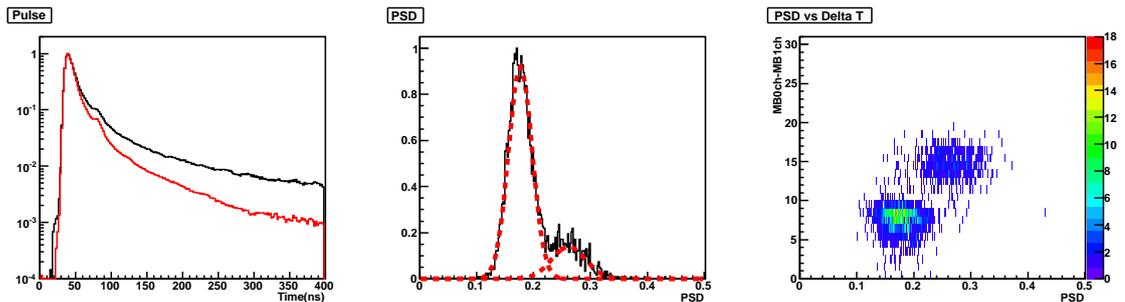


図 3.68: 黄ばんだ新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:- μ の位置の差と PSD の二次元分布)

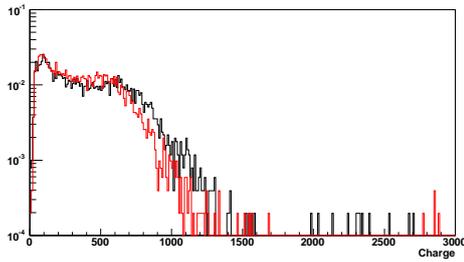


図 3.69: 新しい液体シンチレータの黄ばみの有無での電荷分布 (黒:黄ばみなし 赤:黄ばみあり)

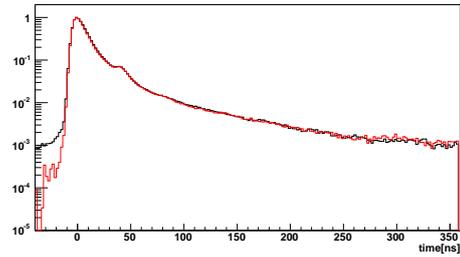


図 3.70: 新しい液体シンチレータの黄ばみの有無での波形 (黒:黄ばみなし 赤:黄ばみあり)

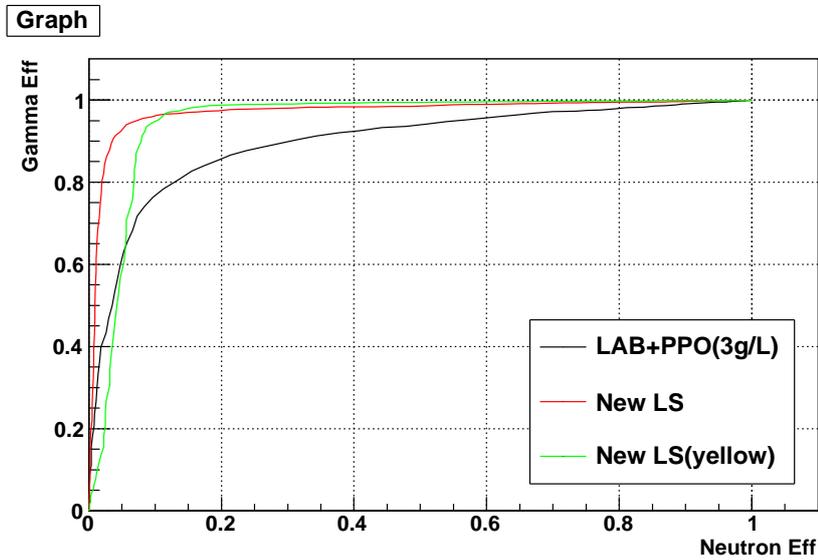


図 3.71: 新しい液体シンチレータの黄ばみの有無での efficiency curve

また黄ばみを抑えるために加える BHT の影響について確認するため、新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルについて TOF を用いた測定を行い、PSD 能力などに変化があるかを確認した。測定の設定は図 3.46 と同様である。測定結果を図 3.78 と図 3.73 に示す。BHT の量を変化させての ^{60}Co 線源を用いた測定の電荷分布と波形の比較を図 3.74 と図 3.75 に示す。また PSD の efficiency curve を図 3.76 に示す。測定に用いた FADC は v1721 である。Charge 分布の 500ch から 1000ch (約 300p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 バブリングを 200ml/min で 15 分間行った。

これらの結果から BHT を加える量を増やすと発光量が落ち、波形のテール部分の割合も減ることが分かる。しかし PSD 能力については BHT の量にあまり依らない。ターゲット層の液体シンチレータの波形はベトー層用液体シンチレータの波形との違いを用いて宇宙線ベトーとして利用する。そのため BHT の量はベトー層用液体シンチレータの波形との兼ね合いで決定され、5g/L となっている (詳細は 5.6 節)。

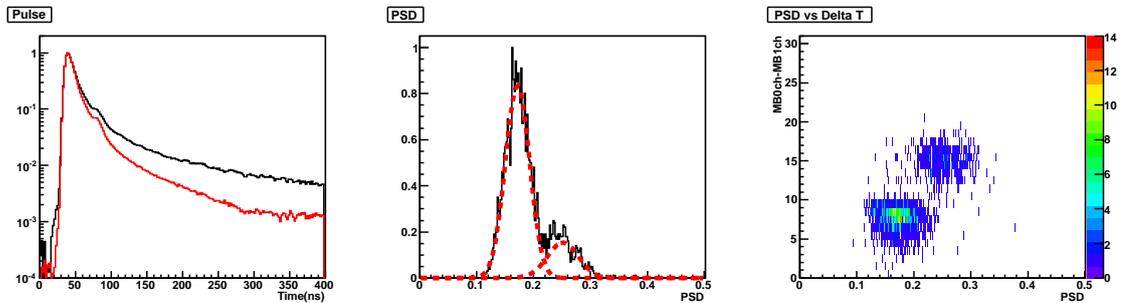


図 3.72: 液体シンチレータに BHT(1g/L) 加えたサンプルの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)

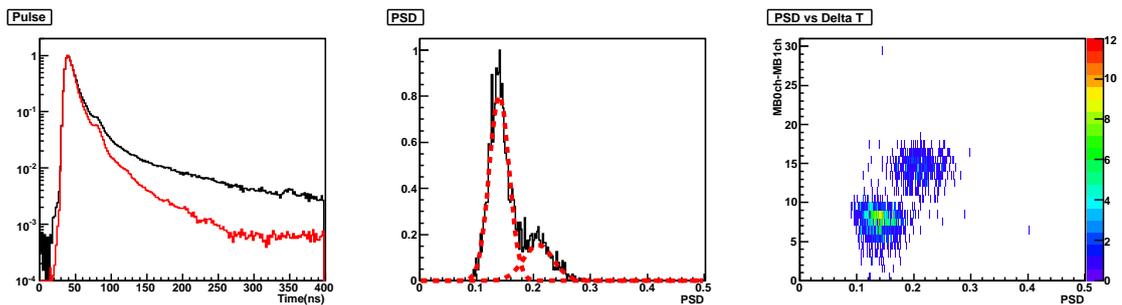


図 3.73: 液体シンチレータに BHT(10g/L) 加えたサンプルの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:一クの位置の差と PSD の二次元分布)

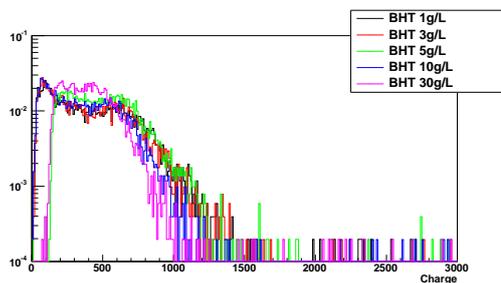


図 3.74: 新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルの電荷分布

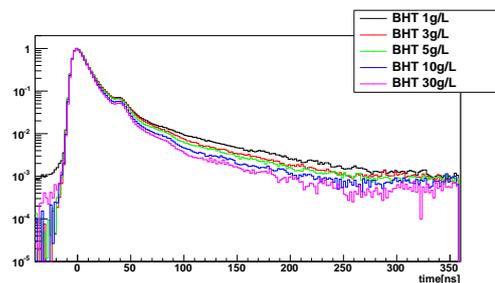


図 3.75: 新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルの波形

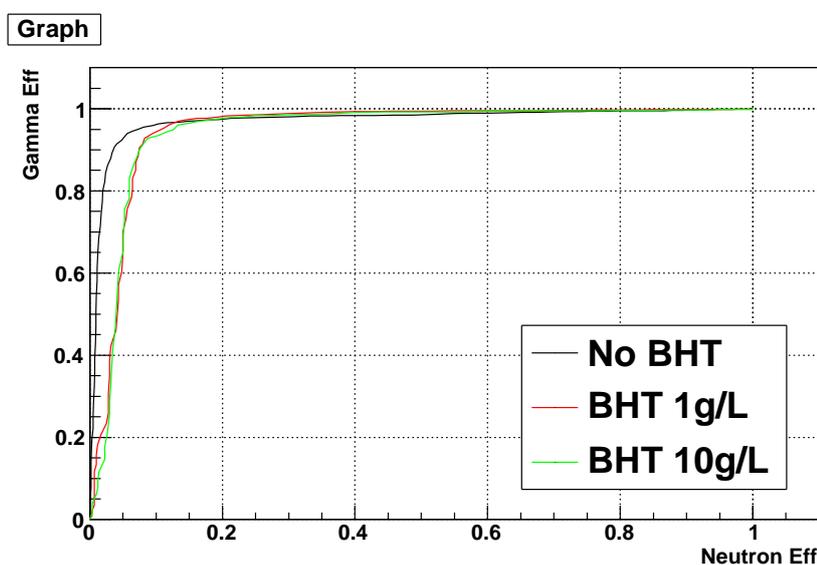


図 3.76: 新しい液体シンチレータに BHT を加えたサンプルの efficiency curve

3.2.4 LAB の種類による変化

新しい液体シンチレータに用いる LAB は世界各地にメーカーがある。今回の新しい原子炉モニターでは 3 社の LAB を混合して用いるため異なるメーカーの LAB で性能が異なるのか試験を行った。今回用いるメーカーはイタリアの CEPESA、南アフリカの SASOL、日本の JX である。それぞれについて TOF 測定を行い、その結果は図 3.77 から図 3.79 に示す。 ^{60}Co 線源を用いた測定の電荷分布と波形の比較を図 3.80 と図 3.81 に示す。また PSD の efficiency curve を図 3.82 に示す。測定に用いた FADC は v1721 である。Charge 分布の 500ch から 1000ch (約 300p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。それぞれのサンプルは測定の前に N_2 パブリングを 200ml/min で 15 分間行った。

この結果から LAB のメーカーによる液体シンチレータとしての能力の差はみられず、混合して用いても問題ないことがわかった。

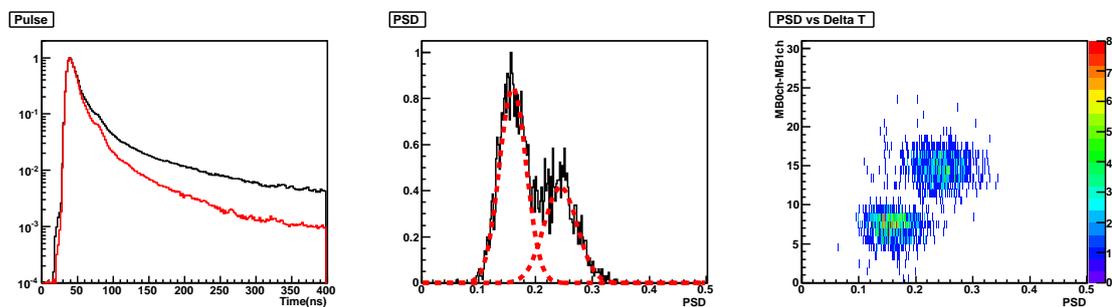


図 3.77: CEPSA の LAB を使用した新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

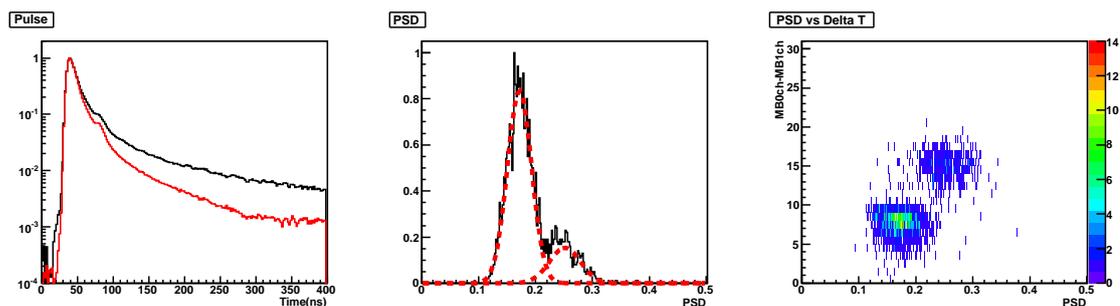


図 3.78: SASOL の LAB を使用した新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

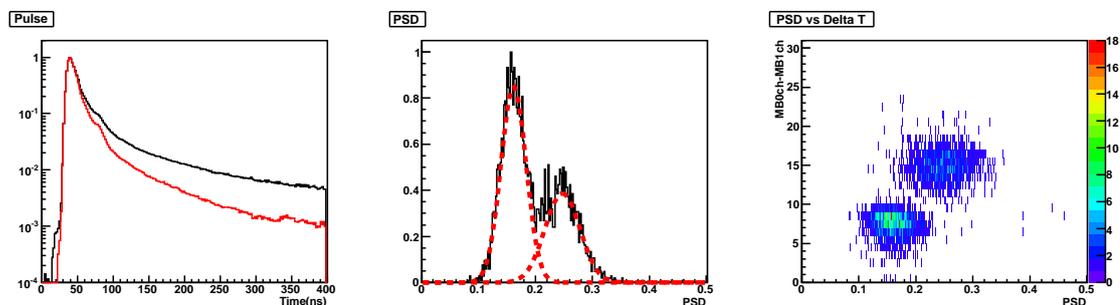


図 3.79: JX の LAB を使用した新しい液体シンチレータの TOF 測定の結果 (左図:gamma like 波形 (赤) と neutron like 波形 (黒) の比較 中央図:tailQ/totalQ 分布と 2-Gaus fit 右図:ークの位置の差と PSD の二次元分布)

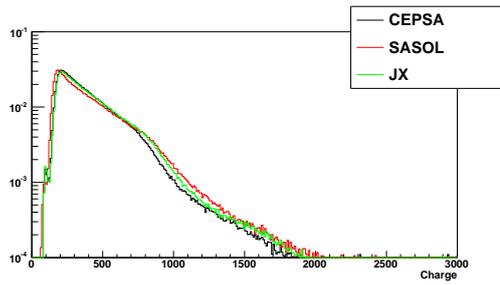


図 3.80: LAB を変えた新しい液体シンチレータの電荷分布

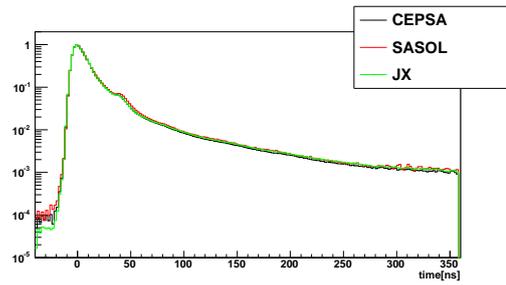


図 3.81: LAB を変えた新しい液体シンチレータの波形

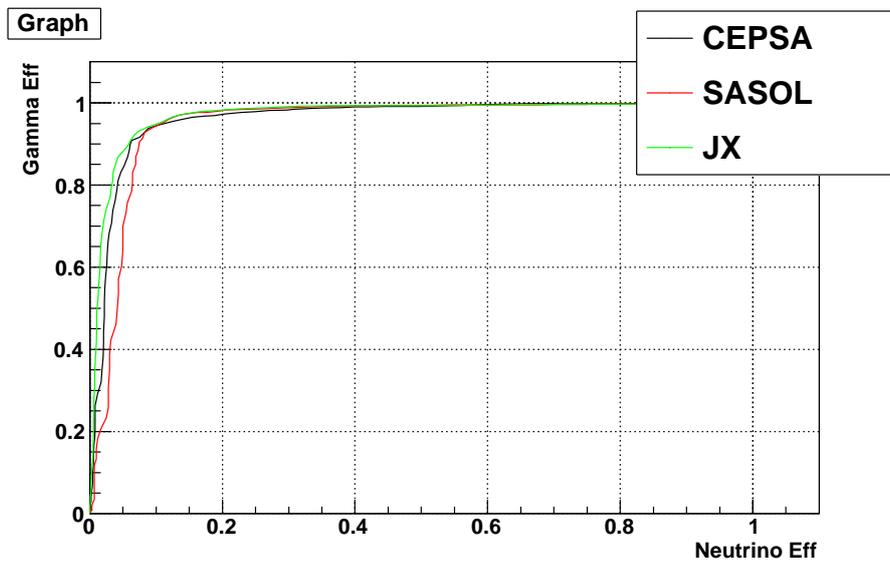


図 3.82: LAB を変えた新しい液体シンチレータの efficiency curve

第4章 ベトー層用液体シンチレータの開発

新型原子炉モニターのベトー層用液体シンチレータは改良型プロトタイプ検出器には実装されていなかった新しい要素である。宇宙線バックグラウンドは必ず検出器外部から飛来してくるため、ベトー層を通過する。宇宙線バックグラウンドを構成する宇宙線ミュオンが液体シンチレータ中を通過する際のエネルギー損失 dE/dx は約 2MeV/cm であり、ベトー層に発光能力のある液体シンチレータを用いることでその発光の波形を利用し宇宙線を弁別できる。求められる性能としては次のようなものがあげられる。

- シンチレーション発光する
ターゲット層に用いる液体シンチレータの $1/5$ 程度の発光量
- 引火点が 250 以上
消防法の制限から外れる
- アクリルを侵さない
容器にはアクリルを用いる

このような要求を満たす液体シンチレータの開発を行った。

4.1 候補物質

ベトー層用液体シンチレータの候補として本研究ではシリコンオイルを利用した。シリコンオイルとはシロキサン結合 (図 4.1) を持つ直鎖状の分子で、一般的に無色透明で耐熱性、化学的安定性に優れた物質である。化学的に安定であるため、アクリルも侵さないことがわかっている。このシリコンオイルをシンチレータとして利用している報告があり [14]、新型原子炉モニターにも利用できないか検討した。

今回利用したシリコンオイルは参考にした報告と同様の信越化学工業のシリコンオイルである。その中で候補として試験を行ったのは KF-96 100cs, KF-50 100cs, KF-54 400cs の 3 種類である。報告で利用されていた HIVAC F4 は引火点が 250 を下回っていたため利用できなかった。KF-96 の構造式を図 4.2、KF-50 の構造式を図 4.3 に示す。KF-54 については構造式は公表されていない。これらのシリコンオイルは価格が比較的安く、実際に新型原子炉モニターに導入する場合でもコストを抑えられる。またいずれのシリコンオイルも引火点が 300 以上であり消防法上の使用制限はかからない。これらのシリコンオイルについて発光量、発光波形の測定を行った。

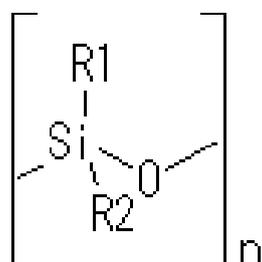


図 4.1: シロキサン結合

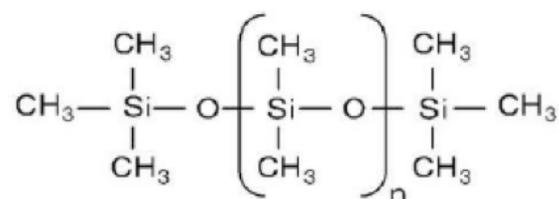


図 4.2: KF-96 の構造式

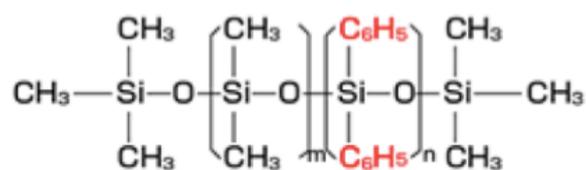


図 4.3: KF-50 の構造式

4.2 宇宙線を用いた測定

まずシリコンオイルが発光するか確認するために、宇宙線を用いた測定を行った。新型原子炉モニターのパトー層は15cm厚であるが、ここではバイアルを用いて10cm厚の液を宇宙線ミュオンが通過した時の発光を調べた。10cm厚での発光量が十分得られれば15cm厚の場合でも発光量が保証される。宇宙線ミュオンが液面の高さ10cmのバイアルを通過した際のエネルギー損失は約20MeVとなる。測定の回路は図4.4に示す。また実際の実験の様子を図4.5に示す。測定したい液体シンチレータの上下にプラスチックシンチレータを設置し、上下のプラスチックシンチレータのコインシデンスをとりトリガーとして用いる。つまり両方のプラスチックシンチレータに宇宙線が通過した場合にバイアルのデータを取得するという回路になっている。上下のプラスチックシンチレータに宇宙線が通過した場合にはバイアルにも宇宙線が通過しているため効率よく宇宙線事象を取得できる。この測定ではKF-96とKF-50についてPPO(3g/L)を加えて測定を行った。

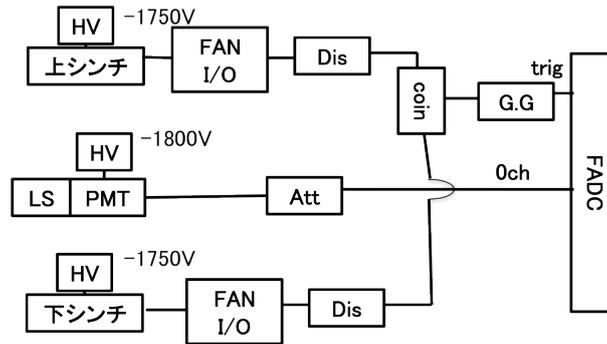


図 4.4: 宇宙線を用いた測定の回路図

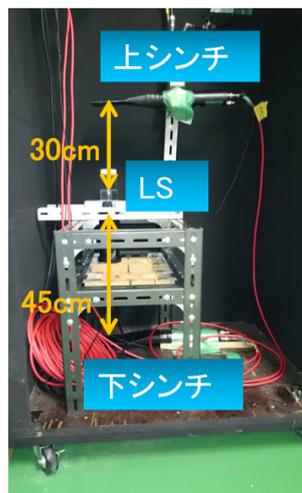


図 4.5: 宇宙線を用いた測定の様子

電荷分布の結果を図4.6、波形の結果を図4.7、波形のPSD分布の結果を図4.8に示す。測定に用いたFADCはv1721である。電荷分布は1p.e.あたり1.66chに相当し

ており、宇宙線のエネルギー損失のピークがKF-96(赤線)は1200ch(約720p.e.)付近、KF-50(緑線)は3000ch(約1800p.e.)付近にみられる。波形とPSDの分布はこのピーク付近の領域でカットした。新しい液体シンチレータ(黒線)は ^{60}Co を用いて測定した結果であり、500chから1000ch(約300p.e.から約600p.e.)でカットを行った。波形とPSDの分布を見るとKF-96とKF-50ともに波形によって区別することができる。しかしPPOを加えなかったサンプルも含めた電荷分布(図4.9)をみると、PPOの無いサンプルも一定の発光量がある。これは宇宙線ミュオンがシリコンオイルを通過する際にチェレンコフ光を放射していることが原因と考えられる。チェレンコフ光は宇宙線の進行方向に放射されるため、PMTが上を向いていたこともその影響を受けやすくなった原因と考えられる。そのためこの結果はチェレンコフ成分を除いて評価する必要がある。また波形にもチェレンコフ光の成分が含まれ、正確な波形の評価ができない。そこで発光量と波形について評価を行えるよう測定をやり直した。

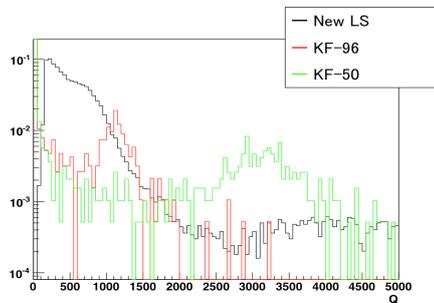


図 4.6: 宇宙線による測定の電荷分布 (新しい液体シンチレータは Co 線源データ)

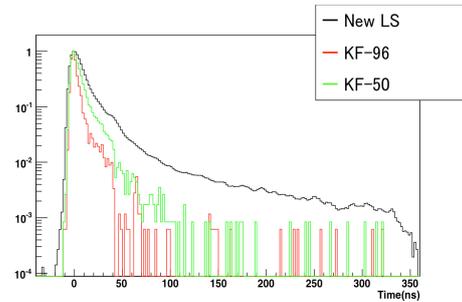


図 4.7: 宇宙線による測定の波形 (新しい液体シンチレータは Co 線源データ)

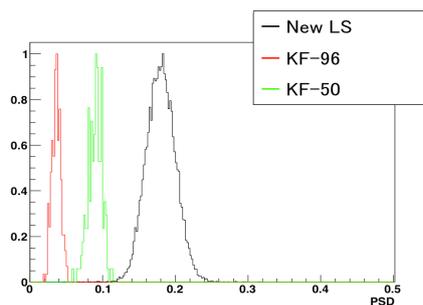


図 4.8: 宇宙線による測定の PSD 分布 (新しい液体シンチレータは Co 線源データ)

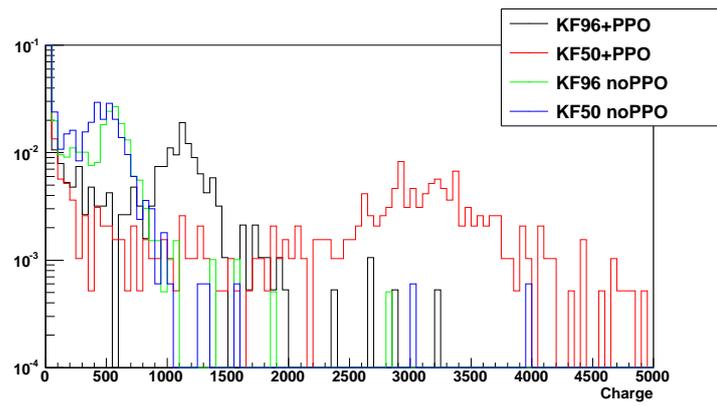


図 4.9: 宇宙線による測定 of 電化分布

4.3 発光量測定

発光量の測定は図 3.2 と同様のセッティングで行った。線源は ^{136}Cs を用いた。測定したサンプルは KF-96、KF-50、KF-54 の三種類に PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えたものである。測定結果を図 4.10 に示す。この結果から KF-50 と KF-54 は必要な発光量が得られることがわかった。しかし KF-96 は発光量が小さくこのままの状態では使用できないことも分かった。

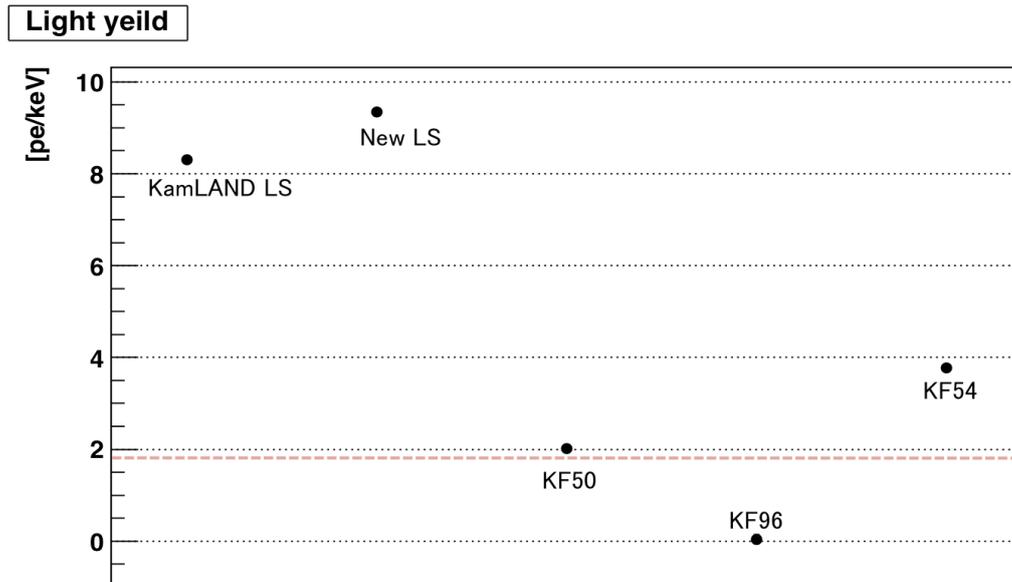


図 4.10: シリコンオイルの光量測定結果 赤ラインは New LS の 1/5 を示す (各サンプルには PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えた)

シリコンオイルは一般的な液体シンチレータに用いられるオイル等に比べると安いものでも価格が数倍する。そこでより安価にベトー層用の液体シンチレータを作るためにシリコンオイルと LAB や PXE、PC、ナフタレンを加えたサンプルで発光量が得られるか実験を行った。測定のセッティング等は前述のものと同様である。測定を行ったサンプルは KF-96(80%)+LAB(20%), KF-96(90%)+PXE(10%), KF-96(90%)+PC(10%), KF-96+ナフタレン (10g/L) にそれぞれ PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えたものである。発光量の測定結果を図 4.11 に示す。しかし発光量が得られたサンプルの引火点の測定を行ったところ軒並み大きく 250 を下回っていた。その結果を 4.1 に示す。この引火点の結果を見ると混合したサンプルの引火点は引火点の低いサンプルに大きく引っ張られていることが分かる。KF-96 をオイルと混合して利用することは難しく、KF-96 はベトー層用液体シンチレータとしては利用することは出来ないことがわかった。

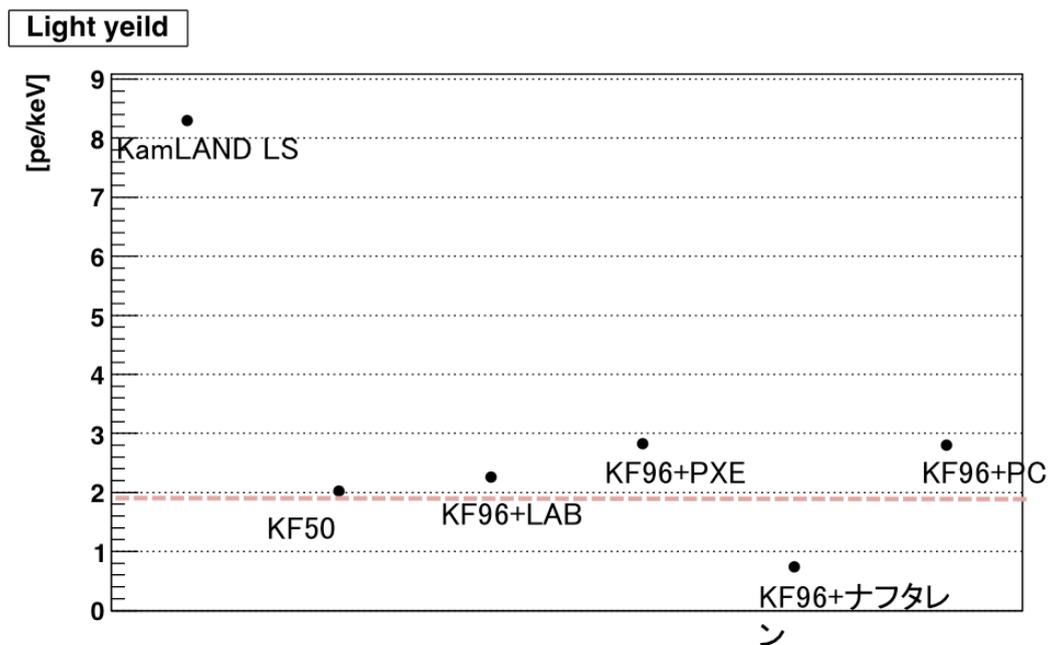


図 4.11: KF-96 にオイルを加えたサンプルの光量測定結果 赤ラインは New LS の 1/5 を示す (各サンプルには PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えた)

表 4.1: KF-96 と混合したサンプルの引火点

	KF-96(80%)+LAB(20%)	KF-96(90%)+PXE(10%)	KF-96(90%)+PC(10%)
引火点	151	157	58
参考引火点	KF-96 : 315	以上 LAB : 130	PXE : 145 PC : 48

4.4 発光波形測定

4.4.1 波形の比較

ターゲット層に用いる液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの波形は解析的に弁別できることが求められる。ここではシリコンオイル波形を取得するために再び宇宙線を用いた測定を行った。しかし今回の測定ではチェレンコフ光の影響を抑える必要があるため図 4.4 のようにコインシデンスを取らず、図 3.9 のセッティングで線源を用いずに測定を行った。シングルでデータを取得すると環境ガンマ線の影響でレートは上昇するが、様々な方向からの宇宙線ミュオンのデータを取得できるためチェレンコフ光の影響を減少できる。新しい液体シンチレータと、KF-50 と KF-54 に PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) を加えたサンプルについて測定を行った。電荷分布の結果を図 4.12、波形の結果を図 4.13、PSD 分布の結果を図 4.14、efficiency curve を図 4.15 に示す。測定に用いた FADC は v1751 である。波形と PSD については Charge 分布の 6000ch から 8000ch (約 450p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。この結果から PSD を用いた新しい液体シンチレータとの分離能力では KF-50 が優れていることが分かる。

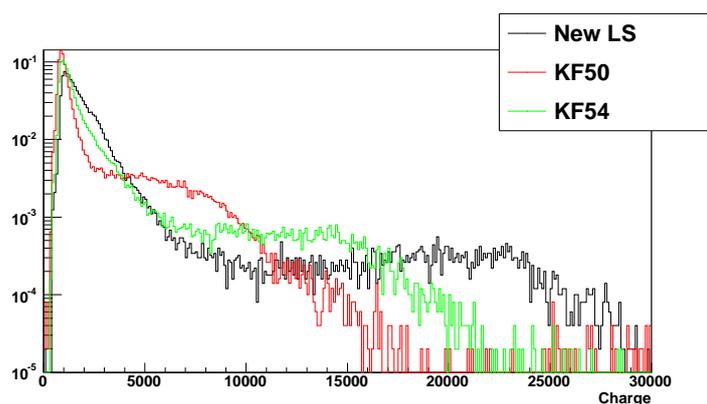


図 4.12: KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの電荷分布の比較

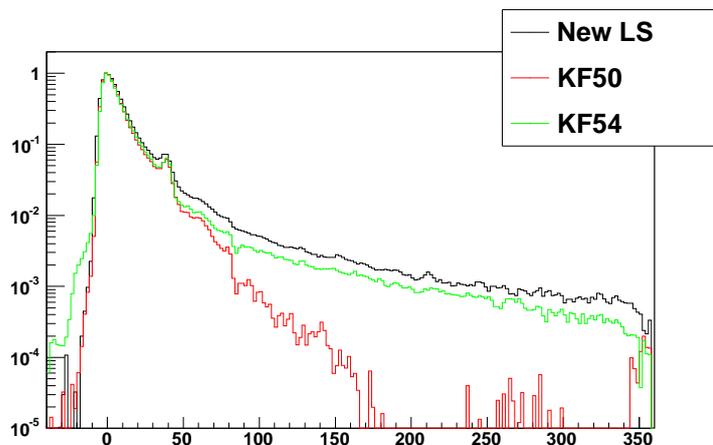


図 4.13: KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの波形の比較

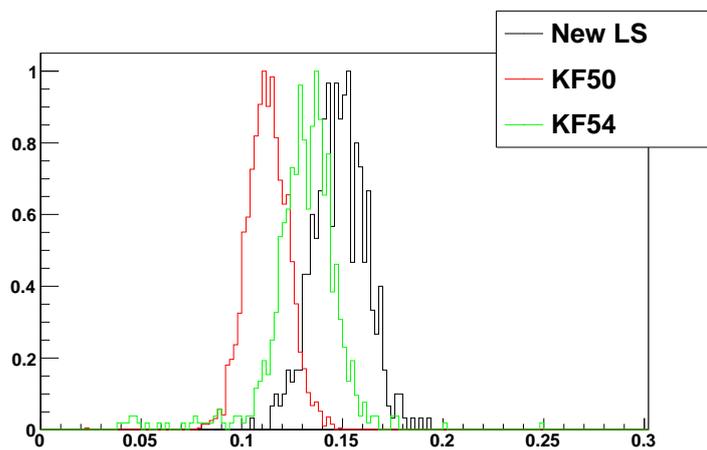


図 4.14: KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの PSD の比較

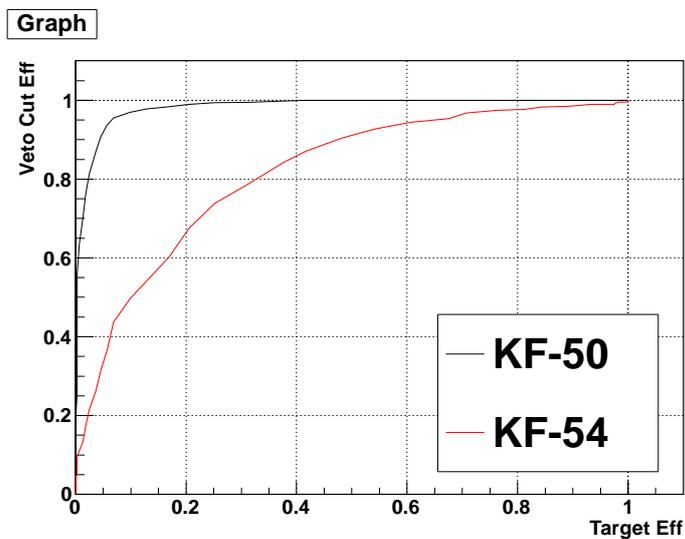


図 4.15: KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの efficiency curve

4.4.2 BHT を加えたサンプルの波形

より分離能力を向上させるためにシリコンオイルに BHT を加える事で波形が変化するか実験を行った。ターゲット層に用いる液体シンチレータでは BHT を加えるほど波形が変化しており、同様な変化がシリコンオイルにもみられれば、PSD による分離能力が向上すると考えた。測定方法は前述のものと同様である。KF-50 と KF-54 に PPO(3g/L) と bisMSB(20mg/L) と BHT を 1g/L,10g/L 加えたサンプルについて測定を行った。電荷分布の結果を図 4.16、図 4.18、図 4.20 に、波形の結果を図 4.17、図 4.19、図 4.21 に、PSD 分布の結果を図 4.22 に、efficiency curve を図 4.23 に示す。測定に用いた FADC は v1751 である。波形と PSD については Charge 分布の 6000ch から 8000ch (約 450p.e. から約 600p.e.) でカットを行った。この結果から BHT を加えるとシリコンオイルの発光波形もテール部の割合が少なくなり、発光量も落ちることがわかった。また BHT を加えた KF-50 が最も高い分離能力を示しており、ベトー層用液体シンチレータとしてこの KF-50+PPO(3g/L)+bisMSB(20mg/L)+BHT(10g/L) を利用することにした(以下「ベトー層用液体シンチレータ (Veto LS)」と呼称する)。

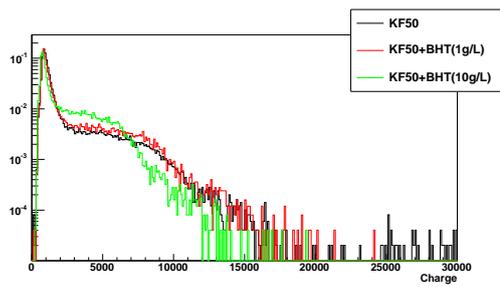


図 4.16: KF-50 に BHT を加えたサンプルの電荷分布

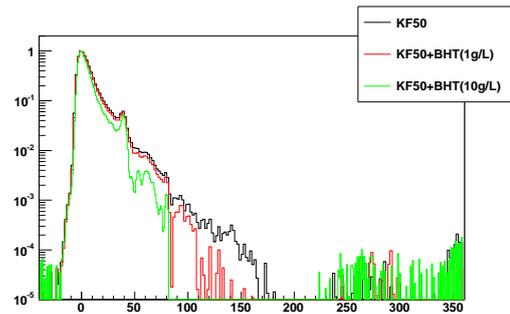


図 4.17: KF-50 に BHT を加えたサンプルの波形

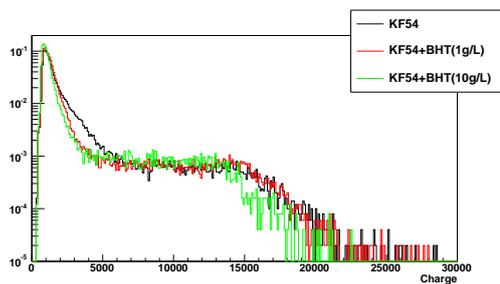


図 4.18: KF-54 に BHT を加えたサンプルの電荷分布

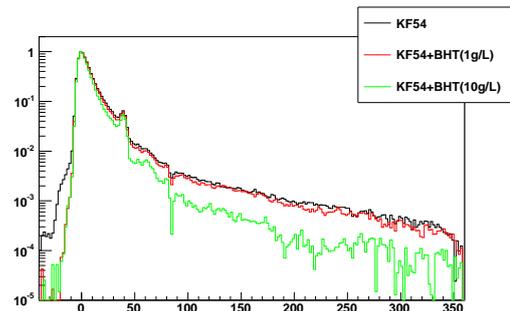


図 4.19: KF-54 に BHT を加えたサンプルの波形

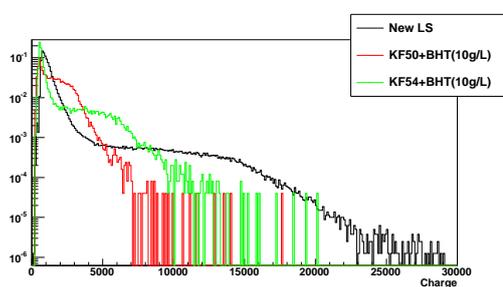


図 4.20: BHT を 10g/L 加えた KF-50、KF54 と新しい液体シンチレータの電荷分布の比較

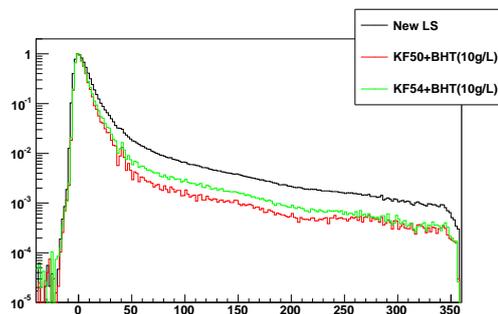


図 4.21: BHT を 10g/L 加えた KF-50、KF54 と新しい液体シンチレータの波形の比較

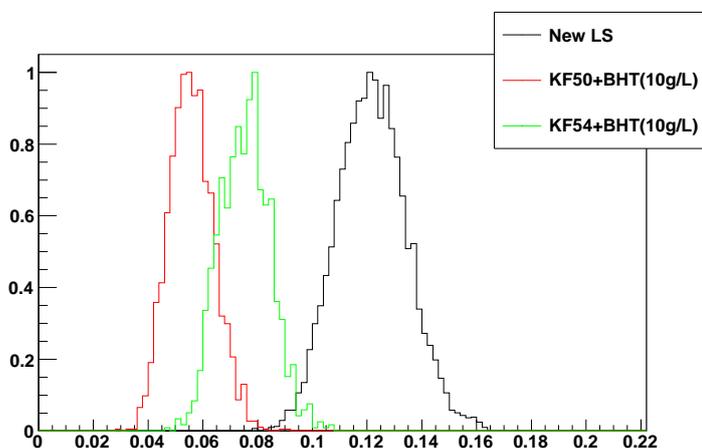


図 4.22: BHT を 10g/L 加えた KF-50、KF54 と新しい液体シンチレータの PSD の比較

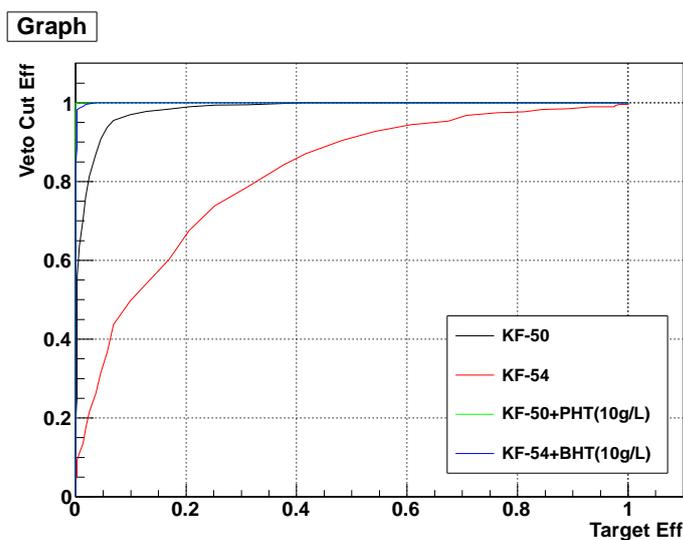


図 4.23: BHT の有無での KF-50、KF-54 と新しい液体シンチレータの efficiency curve

第5章 新型原子炉モニターのシミュレーション

本研究においてニュートリノの反応数やスペクトルを見積もるためにモンテカルロシミュレーションを使用する。

5.1 Geant4

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

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

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

5.2 KAPST

Geant4を用いたプロトタイプのシミュレータの作成は東京工業大学で行われ、検出器の改良とともに東北大学にて改良が加えられた。作成したシミュレータはKASKA Prototype Detector Simulator Tokyo Tech(KAPST)と呼ばれる。物理プロセスにはHadronic interaction processのためにQGSP BIC HPを採用している。QGSP BIC HPとは、20 MeV以下の低エネルギー範囲の中性子物理から宇宙線ミュオンと検出器周りの物質との相互作用のようなGeVスケールの高エネルギー範囲まで包含する。KAPSTは荷電粒子の電離によって液体シンチレータ中で放出される光子の散乱などの物理過程を追っている。シミュレータには光電子増倍管に到達する光子の時間情報と光子数情報が蓄積される。この光子の情報をもとに検出器で取得できるデータ

を再現し解析に用いる。本研究ではKAPSTを用いて新型原子炉モニターの性能評価を行う。

5.3 ニュートリノシミュレーション

ニュートリノジェネレータは逆 β 崩壊反応後に放出される陽電子と中性子をシミュレートする。事象位置はターゲット層内及びベトー層内に一様に発生させる。

陽電子の散乱角 θ の分布は次の式で表される微分反応断面積 $d\sigma/d\cos\theta$ に従う [8]。

$$\left(\frac{d\sigma}{d\cos\theta}\right)^{(0)} = \frac{\sigma_0}{2} [(f^2 + 3g^2) + (f^2 - g^2)v_e^{(0)}\cos\theta] E_e^{(0)} P_e^{(0)} \quad (5.1)$$

ここで $P_e = \sqrt{E_e^2 - m_e^2}$ は陽電子の運動量、 $v_e = P_e/E_e$ は速度を意味する。 $f=1.0$ と $g=1.267$ はベクトル結合定数と擬ベクトル結合定数である。また $E_e^0 = E_\nu - \Delta$ ($\Delta = M_n - M_p$)である。ニュートリノのエネルギー分布は主な同位体である ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu からのニュートリノのエネルギー分布を平均したものである。図5.1は逆 β 崩壊の反応断面積を示す。左図は微分反応断面積を表し、右図は全反応断面積を表す。

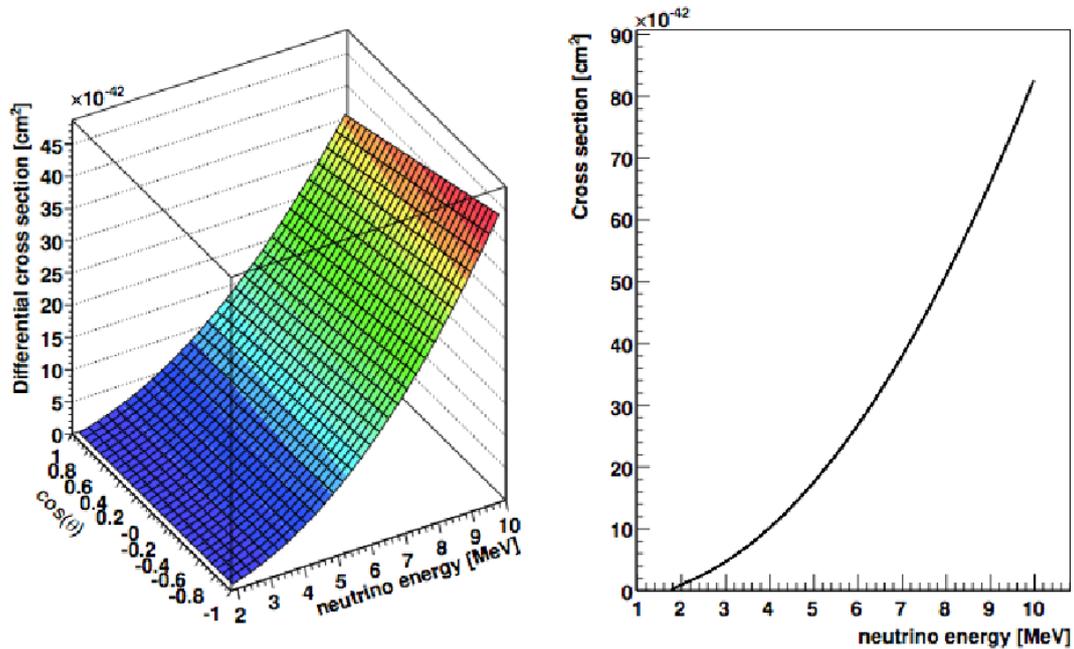


図 5.1: 逆 β 崩壊の反応断面積 (左図が微分反応断面積、右図が全反応断面積)

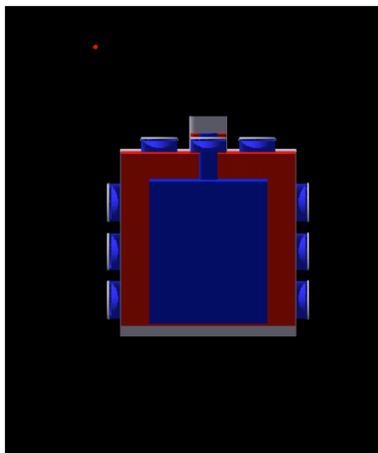


図 5.2: シミュレーションでの新型原子炉モニターモデル

シミュレーションのために用いた新型原子炉モニターのモデルを図 5.2 に示す。新型原子炉モニターのニュートリノシミュレーションを行い得られた分布を図 5.3 と図 5.4 に示す。ここでは原子炉の熱出力 3GWth、炉心からの距離 35m と設定している。ターゲット層の容量を 400L の場合と 1000L の場合の二通りのシミュレーションを行った。Gd の濃度は 0.025wt% である。液体シンチレータの指定数量の制限から 1000L 使用することは難しいが、今後の研究の参考のため 1000L のターゲットの場合でのシミュレーション結果も掲載する。

シミュレーションの結果を表 5.1 に示す。ニュートリノセレクションの条件は次のとおりである。

- $2[\text{MeV}] < E_{\text{prompt}} < 10[\text{MeV}]$
- $2[\text{MeV}] < E_{\text{delayed}} < 10[\text{MeV}]$
- $10[\mu\text{s}] < \Delta T < 100[\mu\text{s}]$

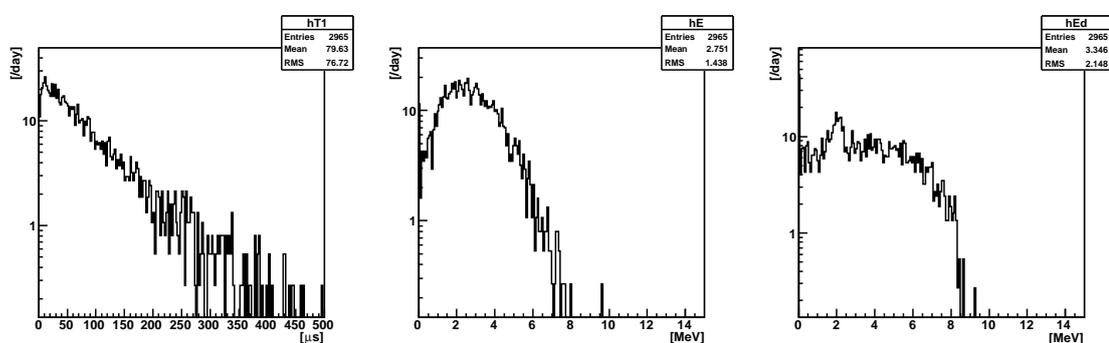


図 5.3: ターゲットを 400L にした時のニュートリノシミュレーションの結果 (左から先発信号と後発信号の時間差分布、先発信号の Energy 分布、後発信号の Energy 分布)

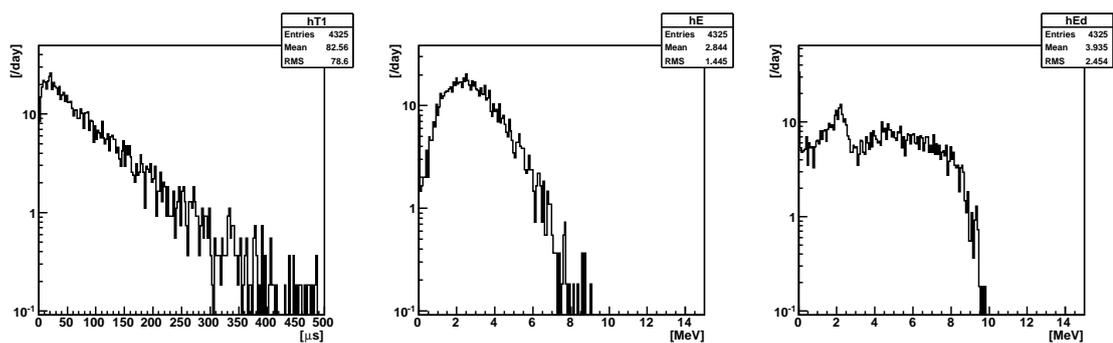


図 5.4: ターゲットを 1000L にした時のニュートリノシミュレーションの結果 (左から先発信号と後発信号の時間差分布、先発信号の Energy 分布、後発信号の Energy 分布)

表 5.1: ニュートリノシミュレーションの結果

ターゲット容量	ニュートリノ反応数 [event/day]	セレクション後 [event/day]	efficiency
400L	792.4	231.6	29.2%
1000L	1585	504.9	31.6%

5.4 バックグラウンドシミュレーション

5.4.1 Accidental バックグラウンドシミュレーション

新型原子炉モニターのバックグラウンドのシミュレーションを行った。バックグラウンドの構成要素については2.1節を参照のこと。これまでの研究から主に Correlated バックグラウンドを構成する高速中性子事象は PSD を用いることによって大きく除去できることがわかっている [9][17]。そのため本研究では残りのバックグラウンドの多くを占める Accidental バックグラウンドのシミュレーションを行い評価を行った [18]。

環境ガンマ線ジェネレータには ^{238}U と ^{232}Th 系列、 ^{40}K の主要な崩壊系列から生じるガンマ線を組み込んでいる [8]。事象の初期位置として検出器の中心から半径 150cm の球面を想定し、そこから一様かつランダムな方向に生じさせている。

宇宙線ミュオンジェネレータから生じる宇宙線ミュオンの Energy や運動量は J. Kempa, Krawczynaka の研究に基づいている [16][8]。

ターゲット容量が 400L の場合と 1000L の場合でそれぞれ環境ガンマ線シミュレーションと宇宙線ミュオンのシミュレーションを行い、レートで規格化した結果の分布を図 5.5 と図 5.6 に示す。また環境ガンマ線バックグラウンドと宇宙線バックグラウンドそれぞれがターゲット容量の違いでどのように変化するかを図 5.7 と図 5.8 に示した。この分布を見るとニュートリノセレクションの範囲内では 5MeV 程度までは環境ガンマ線バックグラウンドが支配的で、それ以上の Energy 領域は宇宙線バックグラウンドが支配的になっていることが分かる。また各バックグラウンドのニュートリノセレクション後のレートを表 5.2 に示す。またターゲットの容量が増えるとバックグラウンドのレートが増加していることが確認できる。特に環境ガンマ線バックグラウンドが大きく増加している。

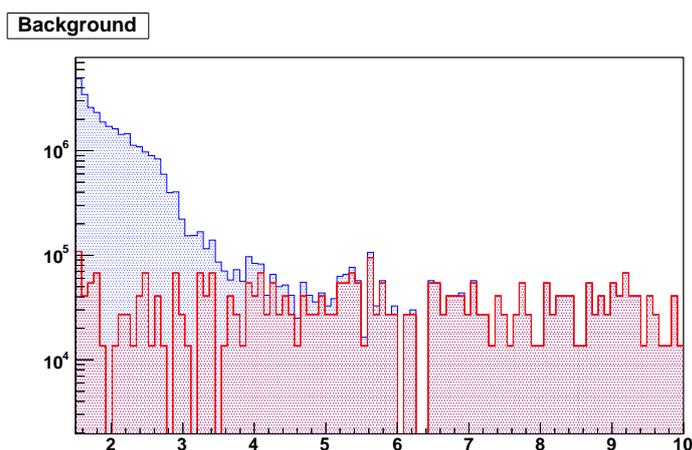


図 5.5: ターゲット 400L 時のバックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (青:環境ガンマ線バックグラウンド 赤:宇宙線バックグラウンド)

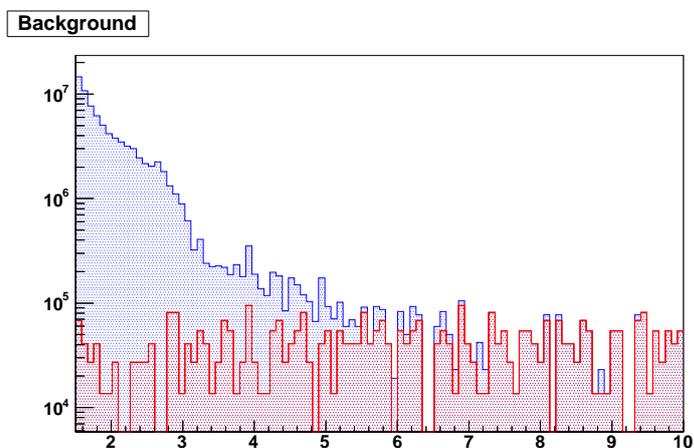


図 5.6: ターゲット 1000L 時のバックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (青:環境ガンマ線バックグラウンド 赤:宇宙線バックグラウンド)

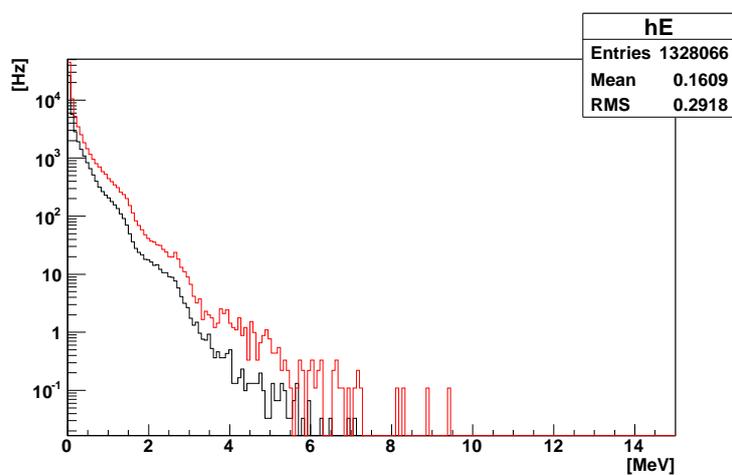


図 5.7: ターゲットが 400L と 1000L それぞれでの環境ガンマバックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:400L 赤:1000L)

表 5.2: バックグラウンドシミュレーションの結果 (ニュートリノセレクション後)

ターゲット容量	環境ガンマ線 [Hz]	宇宙線 [Hz]	合計 [Hz]
400L	138	36.1	174
1000L	371	44.5	416

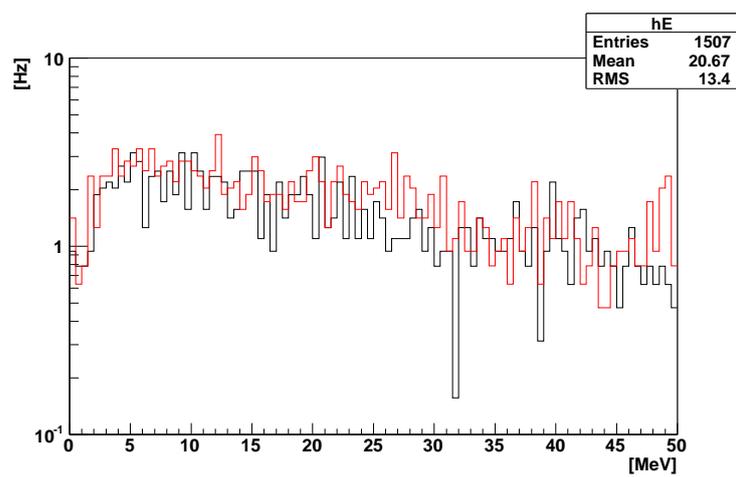


図 5.8: ターゲットが 400L と 1000L それぞれでの宇宙線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:400L 赤:1000L)

5.4.2 シールドによるバックグラウンドの変化

Accidental バックグラウンドのシミュレーションの結果、環境ガンマ線バックグラウンドが大きな割合を占めていることがわかった。そのため検出器の周りにシールドを設置することでバックグラウンドを削減することができると考えられ、シミュレーションでその効果を確認した。ターゲット容量が400Lの場合と1000Lの場合それぞれについて、鉛シールドのない場合、5cmの厚さの鉛シールドを検出器のPMTのついていない3面に設置した場合、検出器全体を鉛シールドで覆う場合(2.5cm, 5cm)について環境ガンマ線バックグラウンドと宇宙線バックグラウンドのシミュレーションを行った。

環境ガンマ線バックグラウンドの結果を図5.9と図5.10に示す。宇宙線バックグラウンドの結果を図5.11と図5.12に示す。また各バックグラウンドのニュートリノセレクション後のレートを表5.3に示す。環境ガンマ線バックグラウンドは鉛シールドを設置するほど減少しており、宇宙線バックグラウンドはほとんど変化はないことが分かる。実際に新型原子炉モニターを建設する際に鉛シールドを利用するとき、それぞれ必要な重量は表5.4に示す。移動可能な検出器という目標があるため、シールドを増やすことでバックグラウンドを削減できても、いたずらに重量を重くできない。そのため400Lのターゲット容量を想定すると、6面を2.5cmの厚さで覆う方法が効率よくバックグラウンドを削減でき、このシールドの置き方を採用する。またシールドに鉄を用いる場合には厚さを3.5cm程度にすることで鉛2.5cmの場合と同等の遮蔽効果が得られるため、実際の新型原子炉モニターには鉄のシールドを用いる。

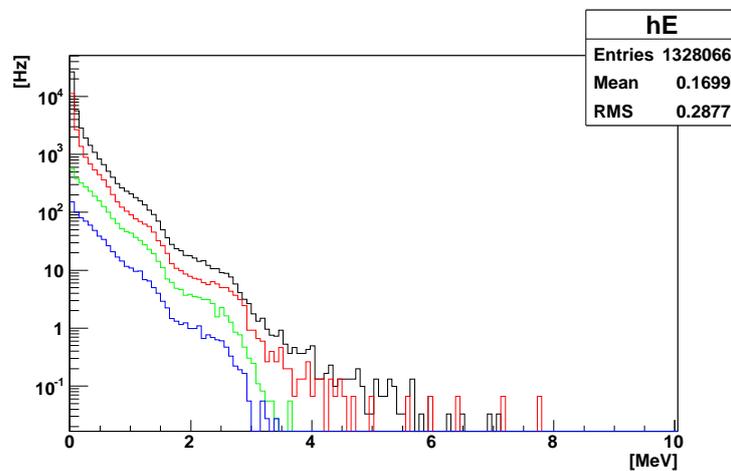


図 5.9: ターゲット 400L の場合に鉛シールドの量を変えた環境ガンマ線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3面 5cm、緑:6面 2.5cm、青:6面 5cm)

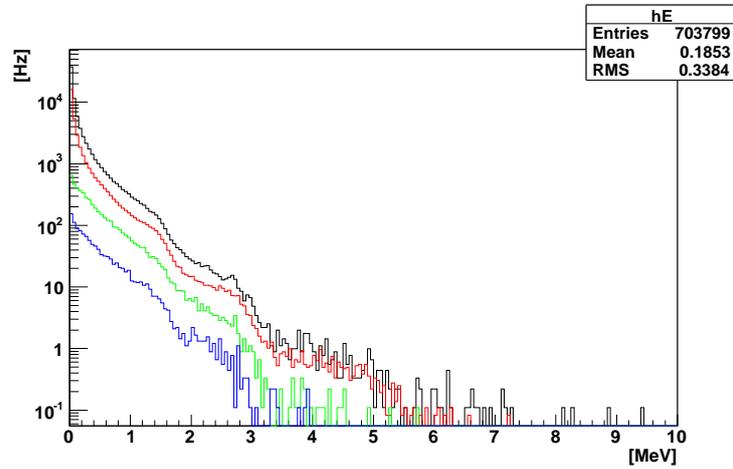


図 5.10: ターゲット 1000L の場合に鉛シールドの量を変えた環境ガンマ線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)

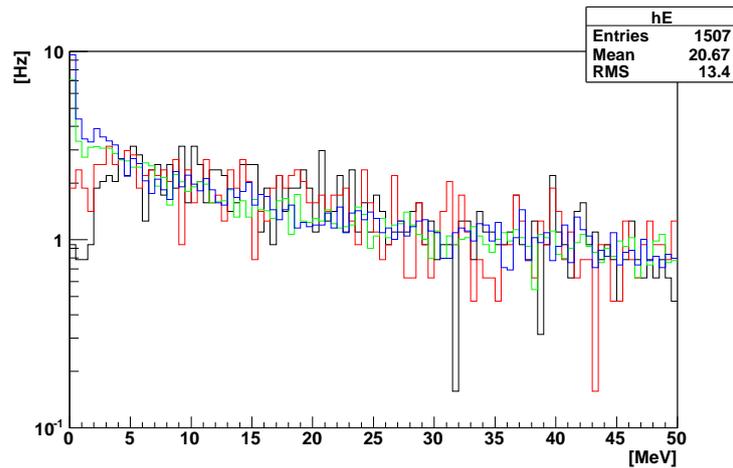


図 5.11: ターゲット 400L の場合に鉛シールドの量を変えた宇宙線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)

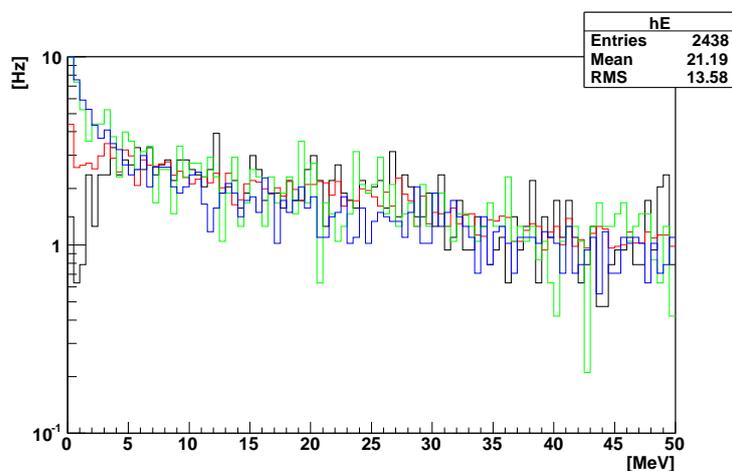


図 5.12: ターゲット 1000L の場合に鉛シールドの量を変えた宇宙線バックグラウンドシミュレーションの Energy 分布の結果 (黒:シールド無し、赤:3 面 5cm、緑:6 面 2.5cm、青:6 面 5m)

表 5.3: 鉛シールドを用いた場合のバックグラウンドシミュレーションの結果 (ニュートリノセレクション後)

ターゲット容量	シールド	環境ガンマ線 [Hz]	宇宙線 [Hz]	合計 [Hz]
400L	無	138	36.1	174
400L	3 面 5cm	70.7	38.1	109
400L	6 面 2.5cm	26.3	39.3	65.5
400L	6 面 5cm	7.3	39.9	47.2
1000L	無	371	44.5	416
1000L	3 面 5cm	212	45.4	247
1000L	6 面 2.5cm	70.1	46.3	116
1000L	6 面 5cm	19.5	47.5	67.0

表 5.4: 鉛シールドを設置する場合の重量

	必要な鉛の重量
400L 3 面 5cm	1770kg
400L 6 面 2.5cm	2540kg
400L 6 面 5cm	5070kg
1000L 3 面 5cm	2880kg
1000L 6 面 2.5cm	3940kg
1000L 6 面 5cm	7880kg

5.5 事象位置の再構成

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

この Vertex は PMT からの情報によって事象位置を再構成することで用いられる変数であり、この再構成の精度によってカットの efficiency も変化するため、新型原子炉モニターでの事象位置の再構成の能力の評価を行った。

5.5.1 Charge を用いた再構成

ここでは事象位置を各 PMT の電荷分布を利用して再構成する。この方法は常陽プロトタイプ検出器から用いられていた方法である。検出器のサイズが小さいため減衰長の影響は無視できるため予想される全光電子数に対する各々の PMT に入る光子数の比 R_i^{exp} は次のように表される。

$$R_i^{exp} = \frac{N_{photon} \times \Omega_i \times \exp(-\frac{L_i}{\tau})}{\sum_{i=1}^{24} N_{photon} \times \Omega_i \times \exp(-\frac{L_i}{\tau})} = \frac{\Omega_i}{\sum_{i=1}^{24} \Omega_i} \quad (5.2)$$

ここで i は PMT の番号、 Ω_i は事象位置からの PMT の光電面の立体角、 L_i は事象位置から光電面までの距離、 τ は液体シンチレータの減衰長、そして N_{photon} は事象位置の光子数である。事象位置は R_i^{exp} と観測率 R_i^{obs} を比較する事で求められる。観測率は光電子数に比例し、24 本の PMT のキャリブレーション後の合計電荷を Q_i としして次のように表される。

$$R_i^{obs} = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^{24} Q_i} \quad (5.3)$$

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

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{24} \frac{(R_i^{exp} - R_i^{obs})^2}{\sigma^2} \quad (5.4)$$

まずこの電荷量を使った事象位置の再構成の評価を行った。検出器の内部に一様に electron を生じさせ、その結果 PMT に入った光子の情報から再構成を行い、Truth の事象位置と比較し評価を行った。改良型プロトタイプのような球型の原子炉モニターを想定して再構成を行った結果を図 5.13 から図 5.16 に示す。また同じアルゴリズムで箱型の新型原子炉モニターのモデルで再構成を行った結果を図 5.17 と図 5.18 に示す。球型の原子炉モニターでの再構成の結果は resolution が 5cm 程度の精度で再構成できている。しかし球体のターゲット層の上部に空気層があるため +z 方向の再構成

の精度が悪くなっている。一方箱型の原子炉モニターでの再構成の結果は球型に比べて精度が悪くなっている。特に PMT の無い x 方向の再構成の精度が悪く、容器の中心から離れるほど再構成の精度が悪くなっている。これは球型の原子炉モニターの場合と異なり、全ての PMT が中心を向いていないためと考えられる。より精度よく再構成を行うためには PMT 毎に立体角の補正をする必要がある。この補正の方法を開発するのは今後の課題である。

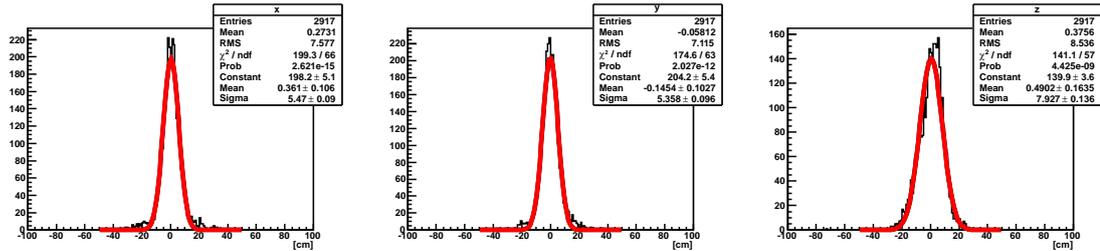


図 5.13: 球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x , y , z)

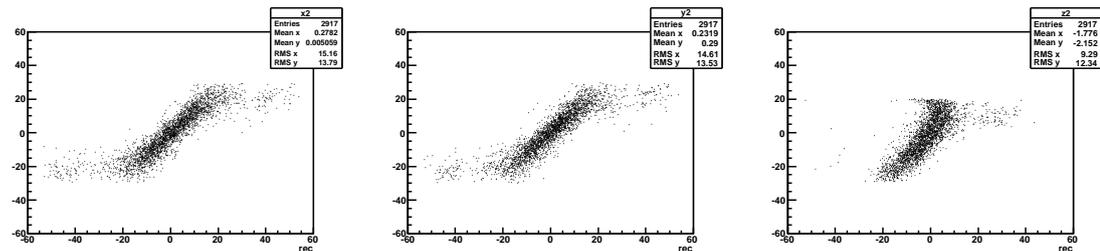


図 5.14: 球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x , y , z)

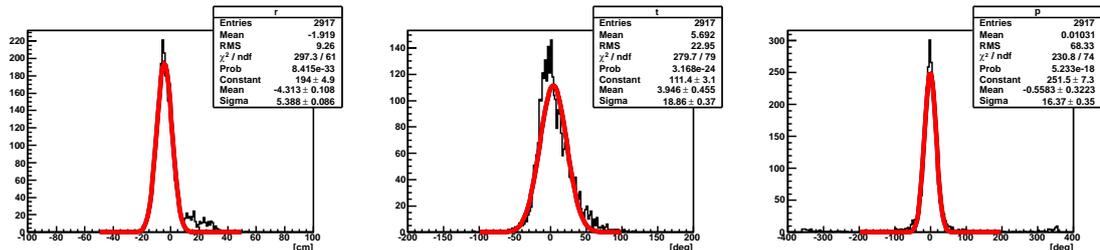


図 5.15: 球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から r , θ , ϕ)

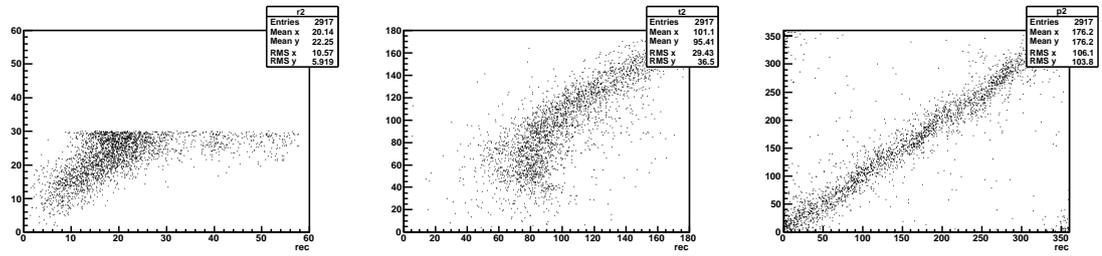


図 5.16: 球型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から r , θ , ϕ)

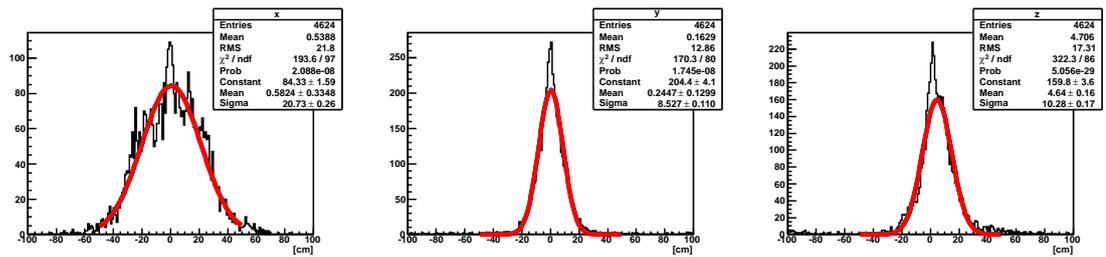


図 5.17: 箱型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直角座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x , y , z)

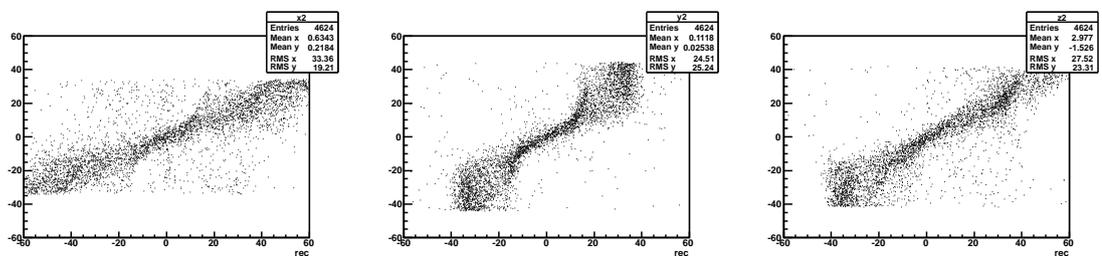


図 5.18: 箱型の原子炉モニターにおける Charge を用いた再構成の直角座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x , y , z)

5.5.2 時間を用いた再構成

時間を用いた再構成はこれまでの研究でも行われてこなかった方法であり、新たな取組みである。各 PMT に光子が入射した時間 T_i^{exp} を次のように表す。

$$T_i^{exp} = \frac{r_i}{c} \quad (5.5)$$

ここで i は PMT の番号、 r_i は事象位置から各 PMT までの距離、 c は光速を表す。実際にそれぞれの PMT で観測された波形のピーク位置を HitTime として利用する。また BaseTime としてもう一つのパラメータを利用する。

$$T_i^{abs} = BaseTime - HitTime_i \quad (5.6)$$

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

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{24} \frac{(T_i^{exp} - T_i^{obs})^2}{\sigma^2} \quad (5.7)$$

このアルゴリズムで球型の原子炉モニターと箱型の原子炉モニターで事象位置再構成を行った。Charge を用いた再構成と同様に検出器内部に一樣に発生させた electron のシミュレーションのデータを用いて再構成の評価を行った。球型の原子炉モニターで再構成を行った結果を図 5.19 から図 5.22 に示す。箱型の原子炉モニターで再構成を行った結果を図 5.23 と図 5.24 に示す。この結果から球型の原子炉モニターでは 10cm 程度の resolution で再構成ができていることが分かる。これは Charge を使って再構成した結果より精度が悪い。また箱型の原子炉モニターの再構成の結果も精度が悪くなっている。これは現在のアルゴリズムでは再構成に使用している情報が各 PMT の時間情報一つだけであることが原因の一つではないかと考えている。より多くの情報を用いて再構成を行った方が精度よく再構成できると考えられ、Charge と時間情報を両方利用した再構成の方法を開発することで高精度の事象位置再構成を達成できるのではないかと考えている。

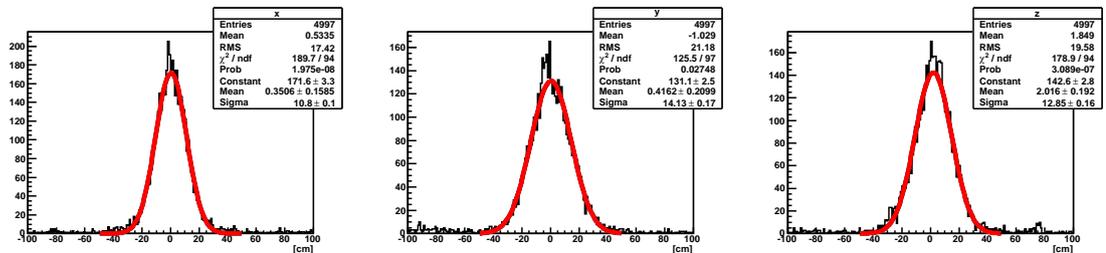


図 5.19: 球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直交座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x, y, z)

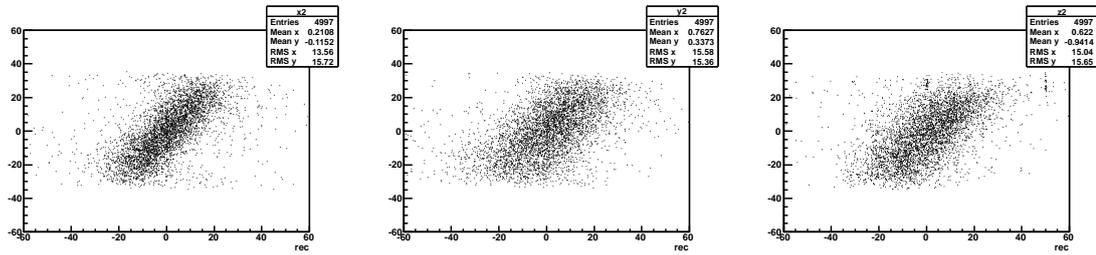


図 5.20: 球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直角座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x , y , z)

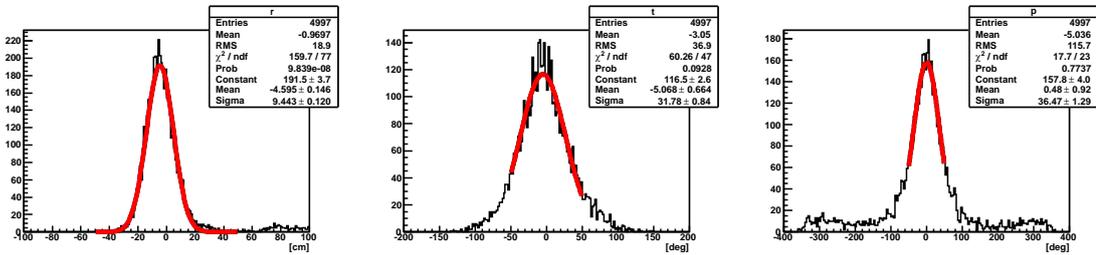


図 5.21: 球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から r , θ , ϕ)

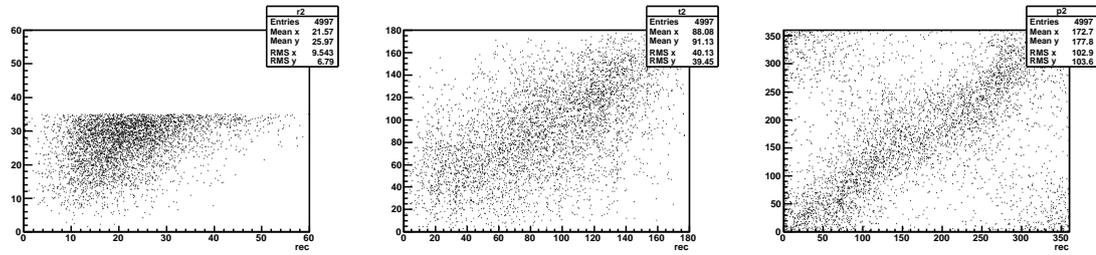


図 5.22: 球型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の極座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から r , θ , ϕ)

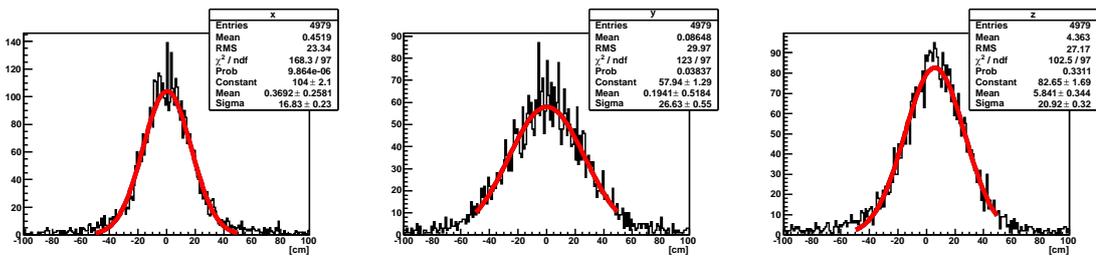


図 5.23: 箱型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直角座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の差の分布の結果 (左から x , y , z)

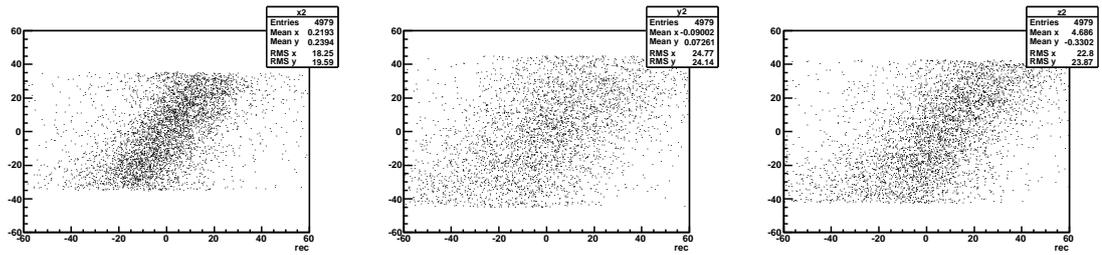


図 5.24: 箱型の原子炉モニターにおける時間を用いた再構成の直角座標系での Truth の事象位置と再構成した事象位置の二次元分布の結果 (左から x, y, z)

5.5.3 事象位置によるカット

事象位置の再構成アルゴリズムには改良の余地があるが、ここでは再構成の resolution を仮定した場合に Vertex を利用してどの程度 Accidental バックグラウンドを削減できるかを評価する。ニュートリノシミュレーションの Vertex には 5.3 節と同じ結果を用いた。Truth の先発信号と後発信号の事象位置を仮定した resolution で広がりを持たせ、その差を Vertex として利用する。また Accidental バックグラウンドとしては検出器の内部のランダムな 2 点を選択し、それぞれ resolution で広がりを持たせその距離を求め Vertex として利用する。ターゲットの容量が 400L の場合と 1000L の場合でそれぞれ resolution を 5cm, 10cm とした時の efficiency の評価を行った。400L で resolution=10cm の Vertex の分布を図 5.25、400L で resolution=5cm の Vertex の分布を図 5.26、1000L で resolution=10cm の Vertex の分布を図 5.27、1000L で resolution=5cm の Vertex の分布を図 5.28 に示す。この分布からニュートリノと Accidental バックグラウンドの efficiency curve を図 5.29 に示す。ターゲットの容量が大きい 1000L の場合は 400L の場合と比べると全体的に分離能力が高くなっている。400L の場合でも resolution が 5cm 程度の高い精度で再構成することができ、ニュートリノシグナルを 90% 残しつつ Accidental バックグラウンドを 90% 除去できる可能性がある。この結果を踏まえて事象位置の再構成アルゴリズムは 5cm 程度の resolution で再構成できるものを開発するという目標を設定し、新型原子炉モニターの性能評価にはその場合のカット efficiency を利用する。

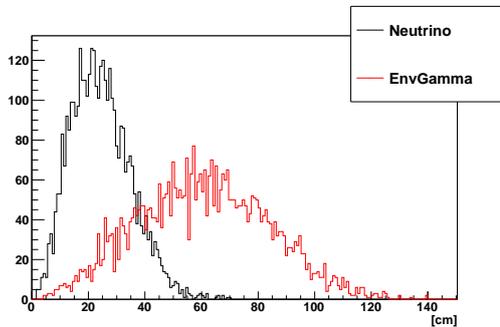


図 5.25: 400L の場合で Resolution を 10cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布

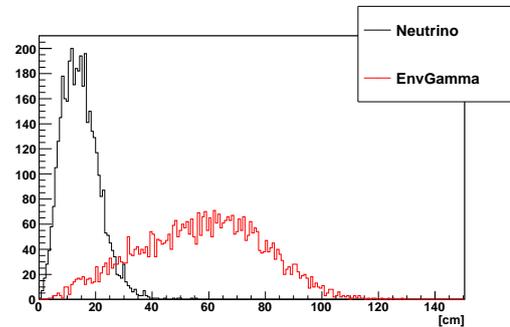


図 5.26: 400L の場合で Resolution を 5cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布

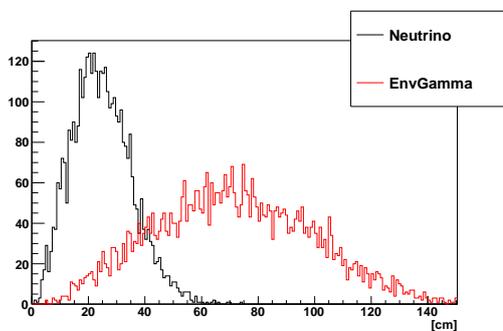


図 5.27: 1000L の場合で Resolution を 10cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布

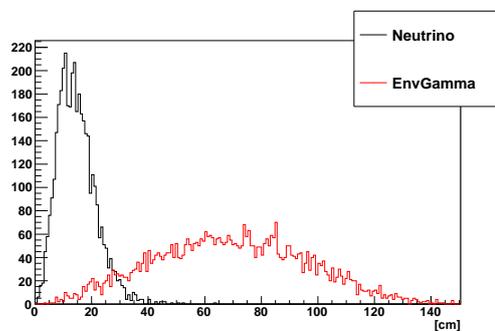


図 5.28: 1000L の場合で Resolution を 5cm として再構成したニュートリノシミュレーションと Accidental バックグラウンドシミュレーションの先発信号と後発信号の事象位置の差の分布

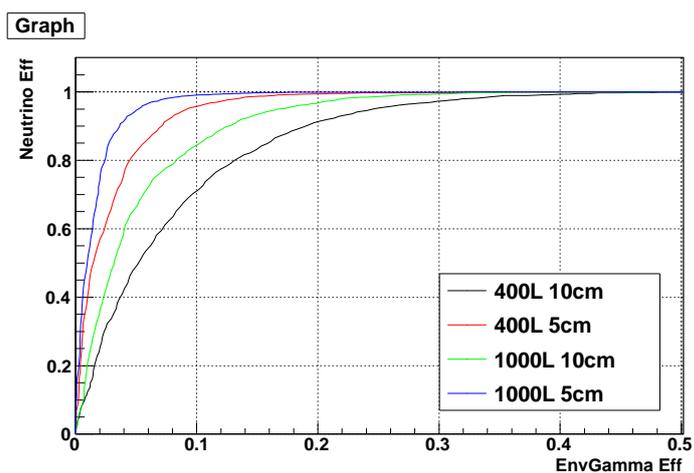


図 5.29: 400L と 1000L の場合で Resolution が 5cm と 10cm のとき先発信号と後発信号の事象位置の差でカットを行った時の efficiency curve

5.6 ベトー層用液体シンチレータを用いた宇宙線ベトー

Accidental バックグラウンドをさらに減少させるために、宇宙線ミュオン事象に対してベトー層用液体シンチレータを利用した宇宙線ベトーの能力の評価を行った。ターゲット層の新しい液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの波形を PSD を用いて弁別することで宇宙線事象を同定する。ターゲットの新しい液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの波形の違いを図 5.30 と図 5.31 に示す。PSD 分布を見ると二つは分離しており、波形による弁別でほとんどの宇宙線事象を除去できるように見える。しかし実際の新型原子炉モニターでの宇宙線事象は宇宙線ミュオンが全てベトー層のみを通過するわけではなく、ターゲット層を数 cm かするイベントも存在する。その場合両方の液体シンチレータの波形が混ざったものになり、弁別の能力が落ちると考えられる。実際にどの程度の弁別能力が得られるかは詳細なシミュレーションを行い評価する必要があるが、ここでは最終的な感度を推定するためにニュートリノイベントを 90% 残した時宇宙線バックグラウンドを 90% 除去できる性能を仮定する。

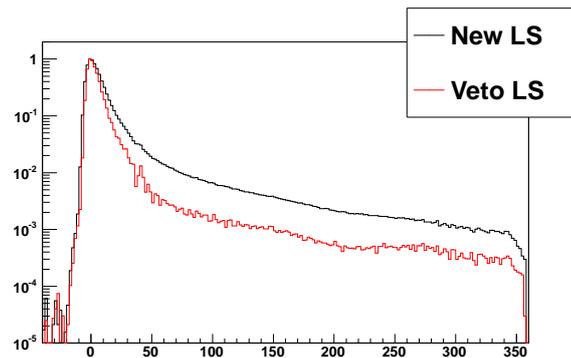


図 5.30: ターゲット層の新しい液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの波形の比較

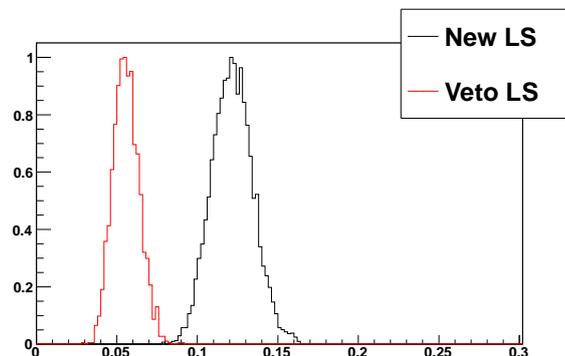


図 5.31: ターゲット層の新しい液体シンチレータとベトー層用液体シンチレータの PSD の比較

5.7 感度の推定

これまでのシミュレーションの結果を踏まえて感度を評価する。1日当たりの Accidental バックグラウンドのイベント数は次の式で表される。

$$\text{Accidental[event/day]} = ((\text{cosmic[Hz]} \times A) + \text{gamma[Hz]})^2 \times B \times C \times 86400 \quad (5.8)$$

ここで A は宇宙線ベトーカット efficiency で 0.1、B は Vertex カット efficiency でターゲット容量が 400L で 0.1、1000L で 0.05、C は T カット efficiency でニュートリノセレクションの値から 9×10^{-5} を代入する。

一日あたりのニュートリノイベント数は次の式で表される。

$$\nu \text{ rate[event/day]} = \text{Num of } \nu \text{ reaction[event/day]} \times a \times b \times c \quad (5.9)$$

ここで a は宇宙線ベトー efficiency で 0.9、b は Vertex efficiency で 0.9、c はニュートリノセレクション efficiency の値を代入する。

ニュートリノイベントとバックグラウンドのレートと S/N の値を表 5.5 に示す。ここで高速中性子バックグラウンドは [9] の解析結果から 100[event/day] 程度と見積もられており本研究ではこれを利用する。

表 5.5: シミュレーションの結果

ターゲット容量	シールド	Accidental[event/day]	Correlated[event/day]	ν rate	S/N
400L	無	15594	100	188	1/83.5
400L	3面 5cm	4317	100	188	1/23.5
400L	6面 2.5cm	711	100	188	1/4.31
400L	6面 5cm	99.1	100	188	1/1.06
1000L	無	54806	100	409	1/134
1000L	3面 5cm	18231	100	409	1/44.8
1000L	6面 2.5cm	2171	100	409	1/5.55
1000L	6面 5cm	229	100	409	1/0.804

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

- 原子炉出力 3 *GWth*
- 原子炉が停止している際の *Deta* を 30 日間分測定済み
- 原子炉の中心から 35 *m* 離れた場所で測定

を仮定した。

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

$$n_\sigma = \frac{S}{\sqrt{(S + N_1) + N_2}} \quad (5.10)$$

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

$$n_\sigma = \frac{DR_\nu}{\sqrt{DR_\nu + (D + 30)R_{BG}}} \quad (5.11)$$

と変形できる。これを $n_\sigma=2$ として D について解くと、

$$D = \frac{R_\nu + R_{BG}}{\frac{R_\nu^2}{4} - \frac{R_{BG}}{30}} \quad (5.12)$$

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

図 5.32 にニュートリノによる原子炉運転の検出にかかる時間と原子炉の熱出力の関係を示した。これには本研究のシミュレーションの 400L の 6 面 2.5cm の鉛シールドを設置した結果とシールドを用いなかった結果、以前の改良型プロトタイプでの解析結果 (表 1.6) を利用した。改良型プロトタイプに比べると、新型原子炉モニターはシールドを用いなかった場合でも検出能力が向上していることが分かる。さらにシールドを使用することでより高い検出能力が得られ、3GWth の原子炉の場合、3 時間程度でニュートリノによる原子炉運転の検出が可能であるという結果が得られた。

図 5.33 にニュートリノのレートとバックグラウンドのレートに対する信頼水準 2σ でのニュートリノを検出するのに必要な時間を示した。これを見ると改良型プロトタイプ検出器ではバックグラウンドレートは低い、ニュートリノレートも低い領域であるのに対し、新型原子炉モニターではバックグラウンドレートは増加したもののニュートリノレートも増加し結果的に感度が上昇しているということが分かる。

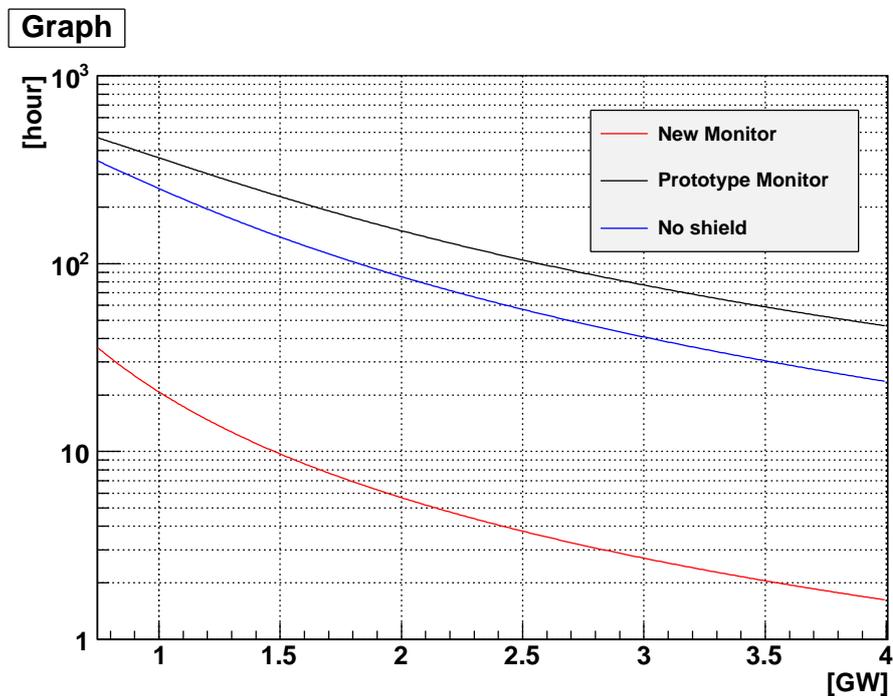
この新型原子炉モニターの感度の評価を SONGS 実験と同じ条件 (原子炉出力 3.4GWth、炉心からの距離 24.5m) と 30 日分の Off data を取得済みという仮定で、宇宙線由来の高エネルギー γ 線バックグラウンドや Correlated バックグラウンドを含めて詳しい評価を行った。ターゲット容量は 400L で Gd の濃度は 0.1wt% である。この時のニュートリノセレクションは、

- $2[\text{MeV}] < E_{\text{prompt}} < 10[\text{MeV}]$
- $3[\text{MeV}] < E_{\text{delayed}} < 10[\text{MeV}]$
- $5[\mu\text{s}] < \Delta T < 100[\mu\text{s}]$

とした。式 5.8 の各 efficiency は、 $A=0$ 、 $B=0.1$ 、 $C=9.5 \times 10^{-5}$ 、式 5.9 の各 efficiency は、 $a=1.0$ 、 $b=0.9$ 、 $c=0.35$ を代入する。その結果を表 5.6 に示す。各バックグラウンドのシングルトリガーでの合計の分布を図 5.34 に、カット後の分布を図 5.35 に示す。各バックグラウンド新型原子炉モニターは地上での測定で、ターゲット容量も SONGS 検出器に比べると小さいが、S/N 比とニュートリノレートは高い値を示していることが分かる。

表 5.6: SONGS 実験と新型原子炉モニターの比較 [19]

	SONGS	新型原子炉モニター
Depth	10m(μ flux $\sim 1/7$)	0m
ターゲット容量	748L	400L
シールド	水/ポリエチレン (50cm)	ベト層 (15cm), 鉛 (2.5cm)
Accidental[event/day]	3732	960
Correlated[event/day]	105	1390
ν rate[event/day]	459	624
S/N	1/8.4	1/3.8

図 5.32: 原子炉の出力と信頼水準 2σ でニュートリノによる原子炉運転検出までにかかる時間の関係

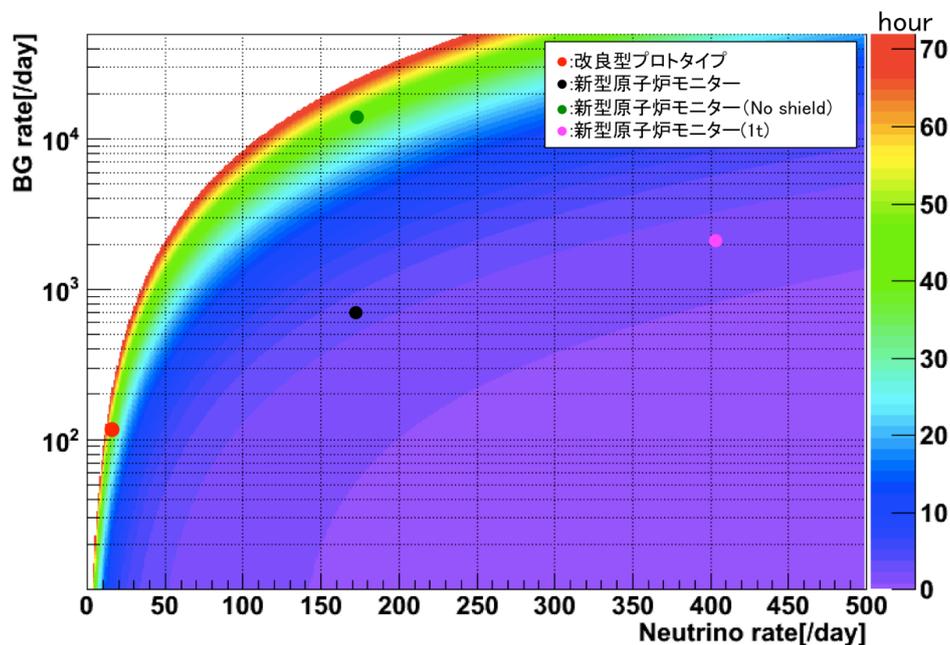


図 5.33: ニュートリノレートとバックグラウンドレートとニュートリノによる原子炉運転の検出までの時間のプロット

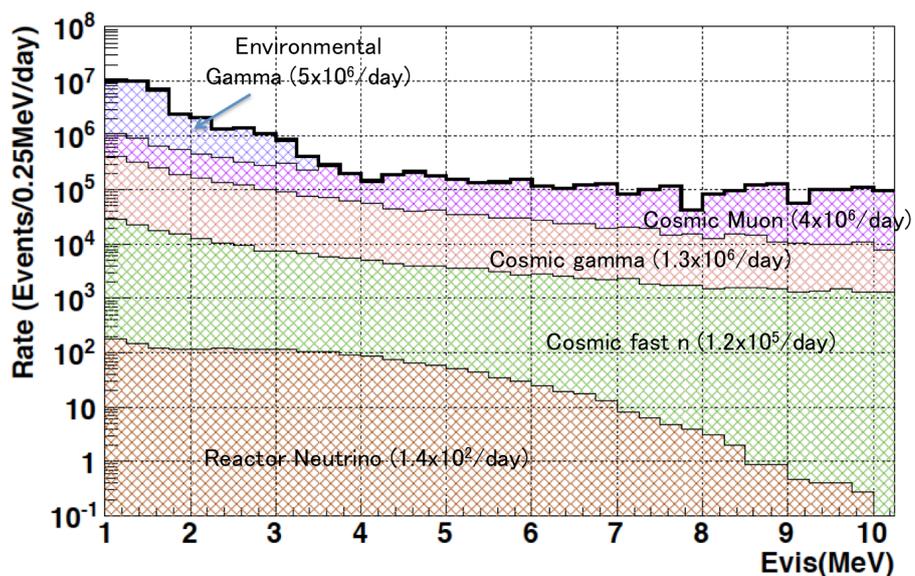


図 5.34: 新型原子炉モニターでのシングルバックグラウンドの分布

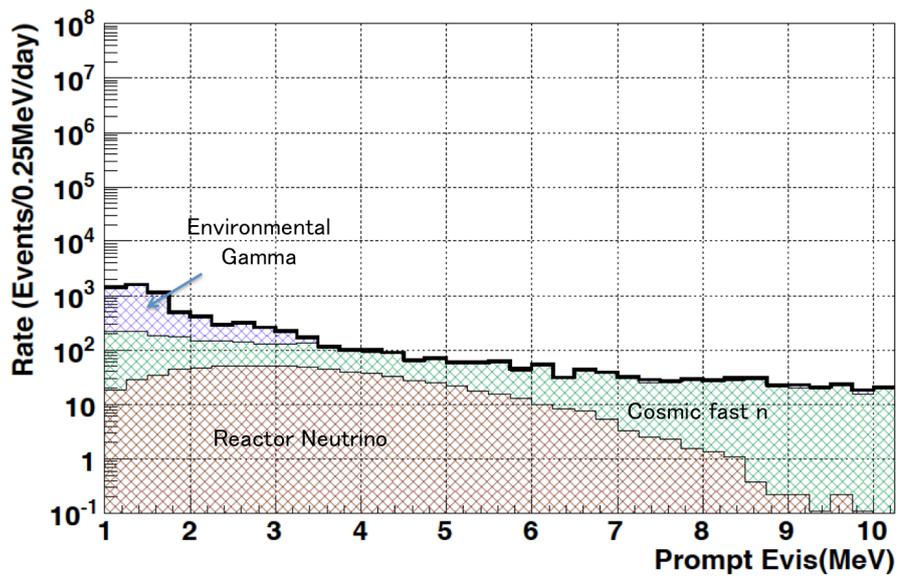


図 5.35: 新型原子炉モニターでのカット後のバックグラウンドの分布

第6章 新型原子炉モニターのデザインと製作

ここでは新型原子炉モニターの建設のための各装置の図面、様々な試験、物品の製作などについて述べる。

6.1 新型原子炉モニターの設計

新型原子炉モニターの建設にあたって液体シンチレータを入れるアクリル容器や、架台の詳細な設計を行った。検出器の概要は2.3節でも述べたが、ここではシミュレーションの結果を受けてより詳しい設計を図面に起こした。この図面を元に業者に発注を行った。

6.1.1 アクリル容器の図面

アクリル容器はシー・アイ工業に製作を発注を行った [20]。検出器としての要求を満たすデザインを自分たちで行い、そこから起こした図面を図 6.2 から図 6.7 に示す。アクリル容器は内側容器と外側容器独立した構造になっている。またそれぞれの容器の上面は独立した構造で、バイトンの O リングによって気密を保つ。アクリルは紫外線非透過型を用いる。板と板の接着には加熱重合接着を用い、全体をアニール処理することで強度をもたせている。外側アクリル容器の上面には PMT 固定具に用いるオイル用の防油堤を設けている。また各液体シンチレータの密度はターゲット層の新しい液体シンチレータが $0.87[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、ベトー層用液体シンチレータが $0.99[\text{g}/\text{cm}^3]$ となっており、内側の液体の密度の方が低い。そのため内側の容器全体に浮力が 35kg 程度かかる。この浮力を相殺するために内側のアクリル容器の底におもりとしてステンレスの板を 4 枚設置する。各アクリル容器の重量は内側が約 85kg、外側が約 160kg である。内側アクリル容器のチムニーのフランジには液入れや窒素バブリング用のコネクタを設けており、その図面を図 6.8 に示す。

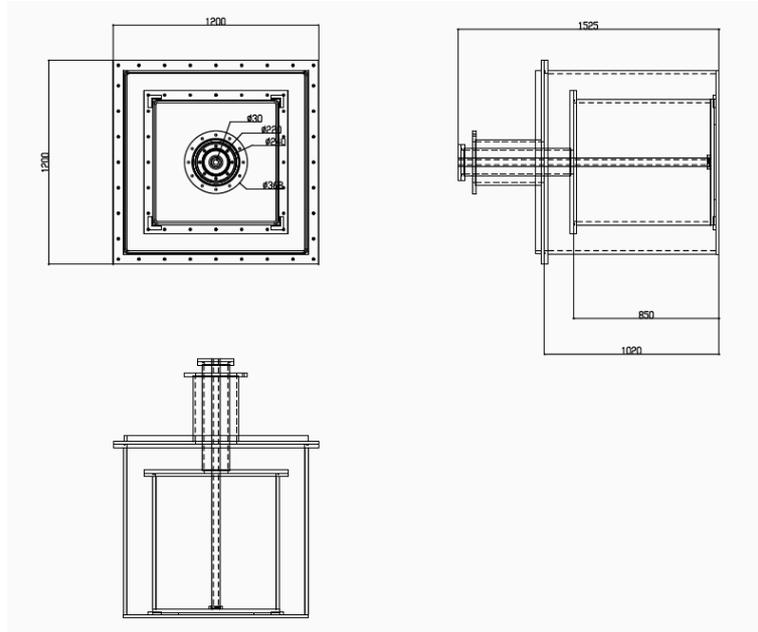


図 6.1: アクリル容器の図面

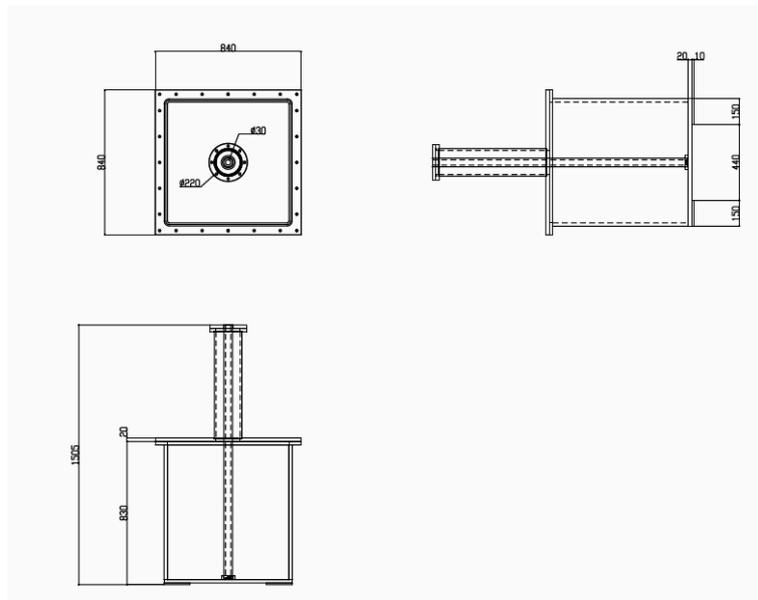


図 6.2: 内側アクリル容器の図面

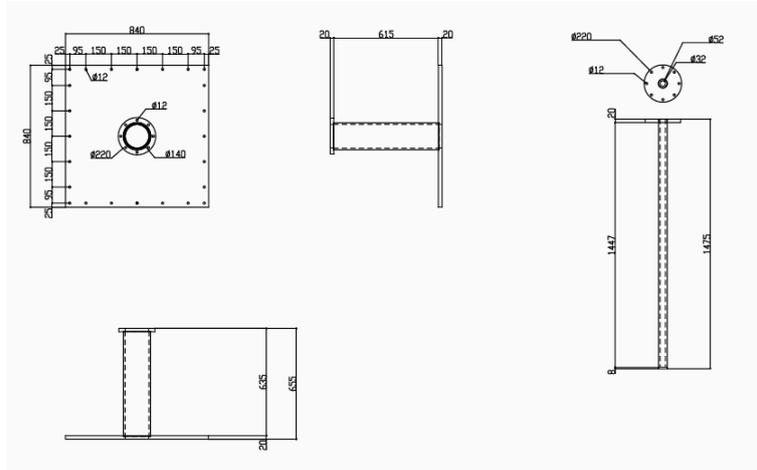


図 6.3: 内側アクリル容器上部の図面

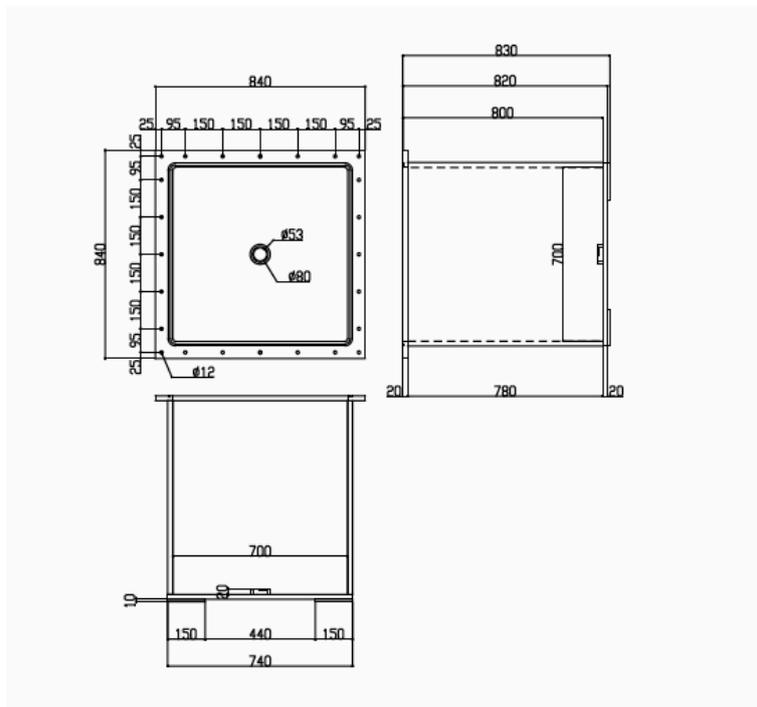


図 6.4: 内側アクリル容器下部の図面

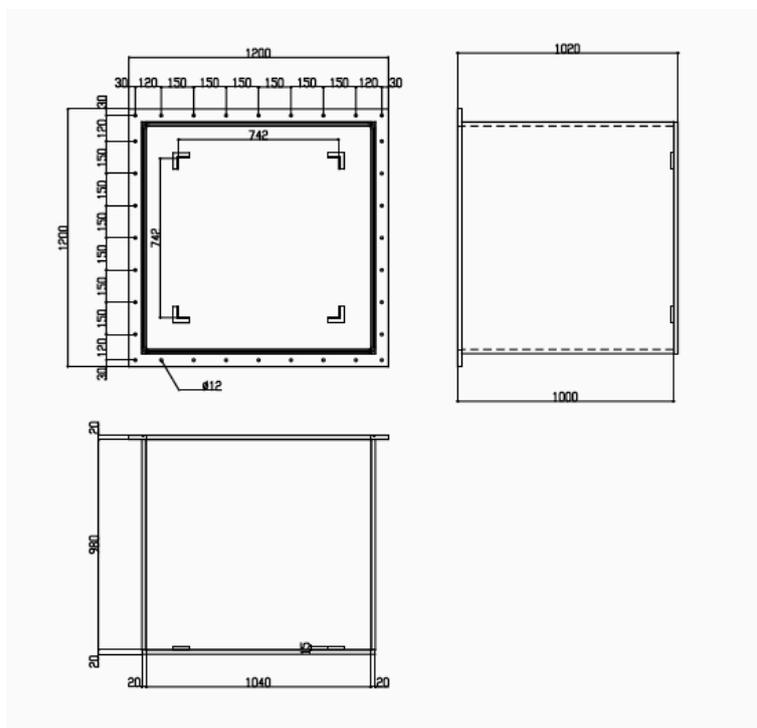


図 6.7: 外側アクリル容器下部の図面

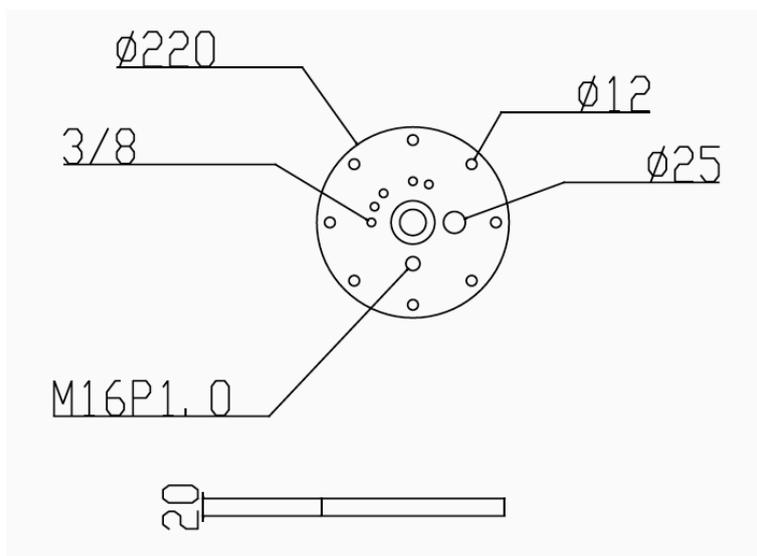


図 6.8: 内側アクリル容器チムニーフランジの図面

6.1.2 架台の図面

アクリル容器や PMT 設置用の棚、シールド等を載せる架台は東北大学の機器開発研修室に依頼した。図面は SketchUp というソフトを利用して自分で製図した [21]。その図面を図 6.11 から図 6.15 に示す。この図面に示した緑色の上部の骨組みと桃色の下部の骨組み、黄色の防液堤はそれぞれ独立した構造になっている。それぞれのパーツの重量は上部骨組みが約 100kg、下部骨組みが約 150kg、防油堤が約 80kg 程度となっている。上部の骨組みと下部の骨組みはボルトで固定され、組み立てなどの際に上部を外すことで作業性を向上させる。骨組みには 50mm 角で 3.2mm 厚の鉄パイプを利用している。防液堤はステンレス板を溶接し製作し、液体シンチレータの総量の約 1.4 倍の容量をもっている。また防液堤内にアクリル容器の位置決め用金具を取り付けてある。この架台の底部には移動可能な検出器とするためにキャスター (DHJB-100U-MC(ストッパー有), DHJ-100U-MC(ストッパー無)) を計 7 個設置している。その写真を図 6.9 に示す。このキャスターの耐荷重は合計で 7t である。また測定時等の検出器を移動させない期間に検出器を固定するためにアジャスターボルト (M20 180mm 足止めプレート付 4 本、足止めプレート無 6 本) を計 10 個設置している。その写真を図 6.10 に示す。またクレーンなどで検出器全体を移動させる可能性を考慮し、4 箇所に M24 のアイボルトを取り付ける。M24 のアイボルトの耐荷重量は 0.95t であり 4 箇所トータル 3.8t までの重量に耐えられる。また防液堤内に設置する PMT 用棚を固定する金具を角パイプに取り付けている。図面には無いが実験室の床の耐荷重の制限から床に鉄板を敷きその上に装置を設置する。



図 6.9: キャスターの写真 (左:ストッパー無し 右 ストッパー有り)



図 6.10: アジャスターボルトの写真 (左 足止め無し 右 足止め有り)

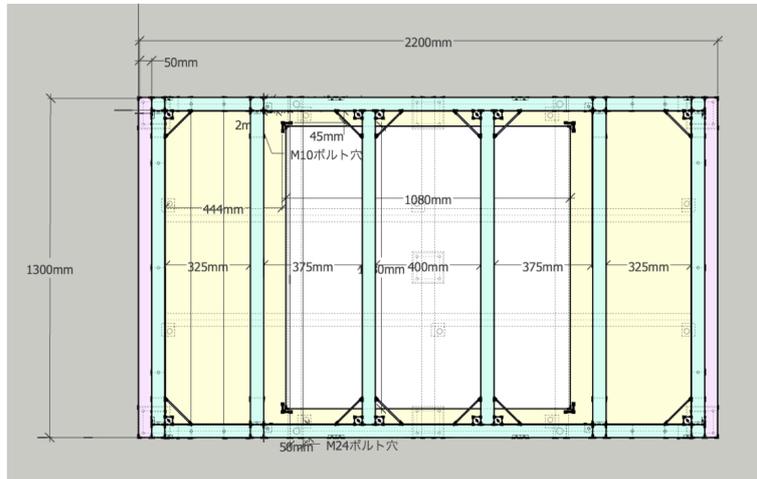


図 6.11: 上部からの架台図面

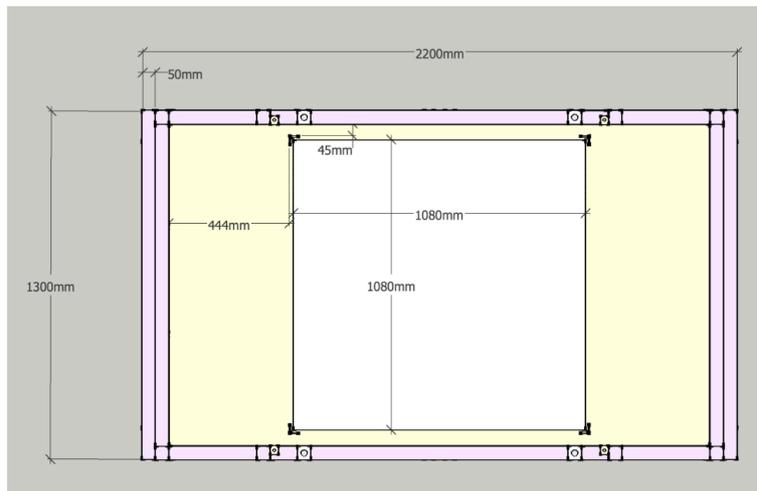


図 6.12: 上部を外した時の上部からの架台図面

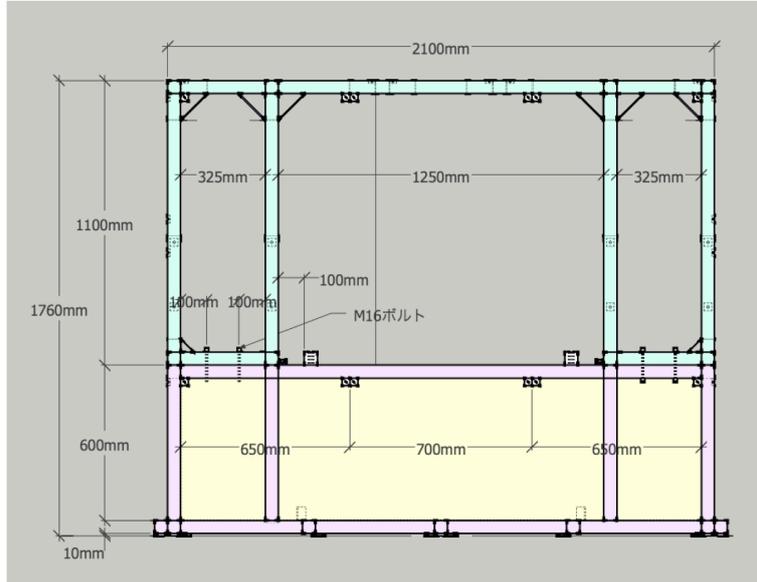


図 6.13: 正面からの架台図面

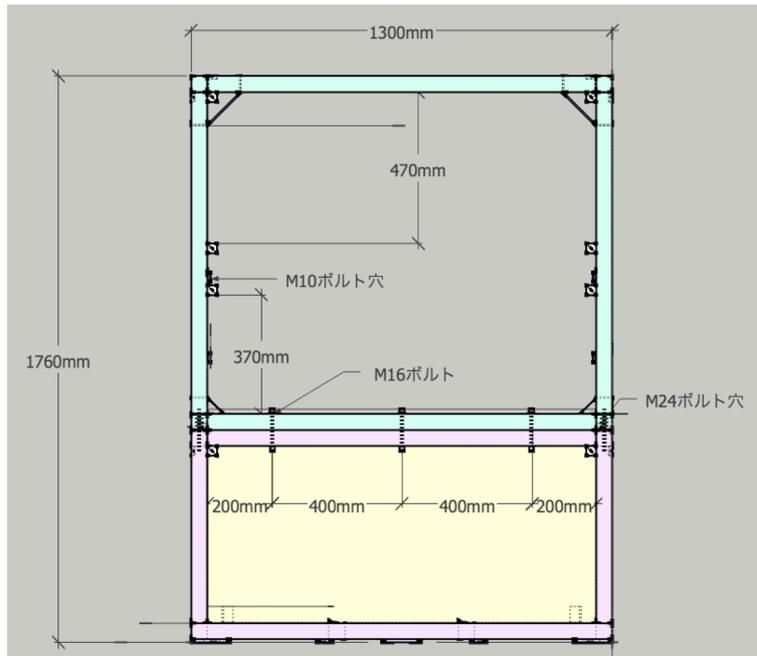


図 6.14: 側面からの架台図面

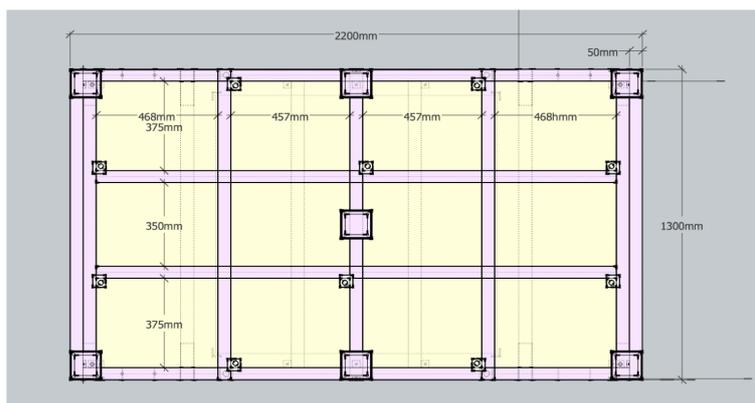


図 6.15: 底面からの架台図面

6.1.3 全体のデザイン

ここでは図面から起こした全体のモデルを図 6.16 から図 6.19 に示す。図 6.16 は検出器に暗箱用のアルミ板を取り付けたモデルである。骨組みの角パイプにアルミ板を取り付けることによって内側を暗室にする。図 6.17 は暗箱用のアルミ板を取り除いたモデルである。防液堤の内側にはアクリル容器を取り囲むように PMT 用の棚とシールドを設置している。図 6.18 はさらにシールドを取り除いたモデルである。PMT 用棚には側面に取り付ける PMT を固定する構造を設ける。上面の PMT はアクリル容器に直接固定具を取り付ける。図 6.19 は PMT 用棚も取り除いたモデルである。アクリル容器は防液堤にシールド用の 3.5mm の鉄板の上に設置している。実際に新型原子炉モニターを建設する際は、シールドを当初から全面には設置せず、あとから追加してバックグラウンドの変化を検証する。

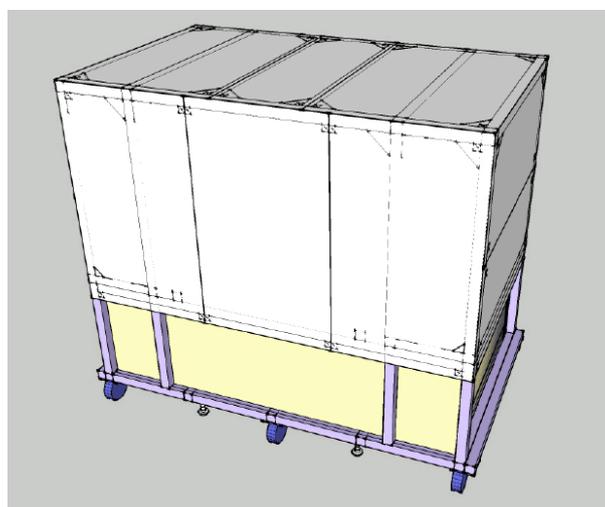


図 6.16: 新型原子炉モニターの全体図 (暗箱有り)

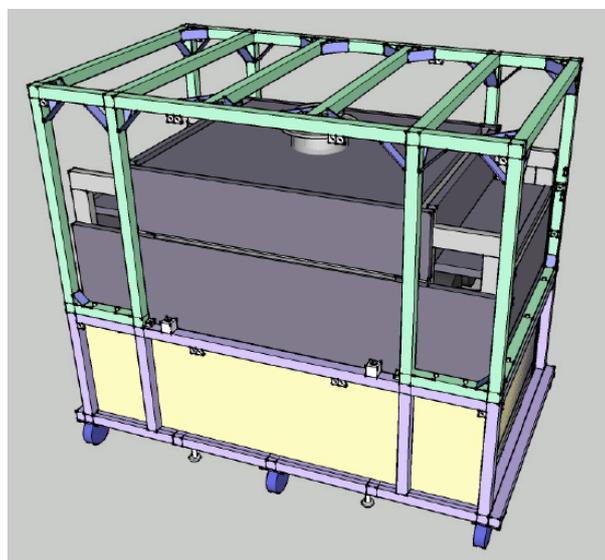


図 6.17: 新型原子炉モニターの全体図 (暗箱無し)

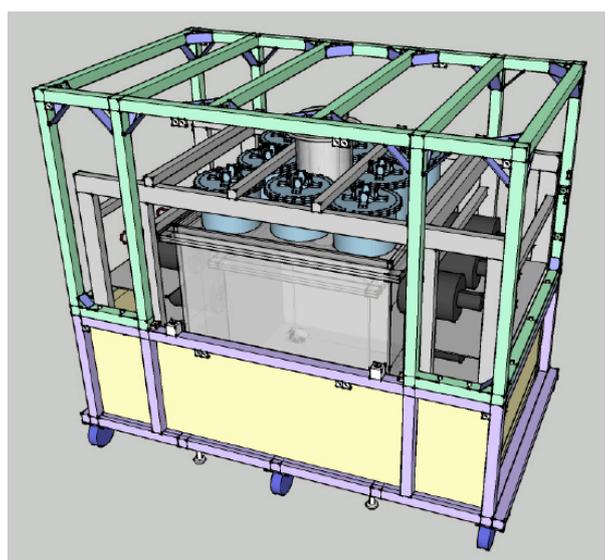


図 6.18: 新型原子炉モニターの全体図 (シールド無し)

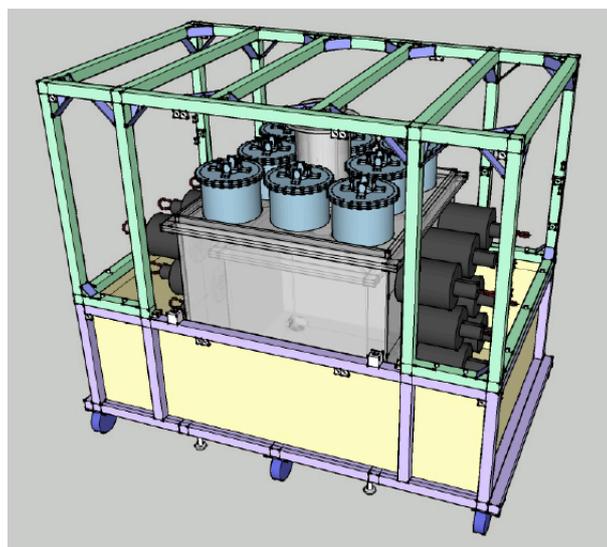


図 6.19: 新型原子炉モニターの全体図 (PMT 用棚なし)

6.2 新型原子炉モニターへの建設に向けて

前節に示したデザイン新型原子炉モニターへの建設に向けて、ここでは必要な試験や自分たちで製作した物品について述べる。

6.2.1 アクリルの材質の試験

常陽プロトタイプ検出器、改良型プロトタイプ検出器で用いていた球型アクリル容器は材質に紫外線透過型の特殊なアクリルを用いていた。しかし一般的に用いられているアクリルは紫外線領域の透過率が低くなっている。それぞれのアクリルの透過率を測定した結果を図 6.20 に示す。波長が 400nm 以下の領域で紫外線非透過型のアクリルの透過率が低くなっていることがわかる。新型原子炉モニターではコストを抑えるために、この安価な紫外線非透過型のアクリルを利用できるか検証を行った。

図 6.21 のようにアクリルを PMT とバイアルの間にはさみ図 3.2 と同様の回路で光量測定を行った。測定を行ったサンプルはターゲット層の新しい液体シンチレータとベトー層用のシリコンオイル KF-50 に PPO(3g/L) のみ加えたもの、PPO(3g/L) と bis-MSB(20mg/L) を加えたものである。それぞれについてはさむアクリルの種類を変えた場合の光量測定の結果を図 6.22 に示す。ターゲット層の新しい液体シンチレータには bis-MSB が 30mg/L 含まれている。これを踏まえて結果を見ると、KF-50 に PPO を 3g/L のみ加えたサンプルは非透過型のアクリルで大きく光量が落ちているが、bis-MSB の含まれている液体シンチレータはアクリルの種類によって発光量が殆ど変わらないことが分かる。これは bis-MSB が発光波長の変換剤として働き、より長波長側に発光波長がシフトしたためと考えられる。この結果より光量の面からは液体シンチレータに bis-MSB を加える事でアクリルに紫外線非透過型を用いることができるということがわかった。

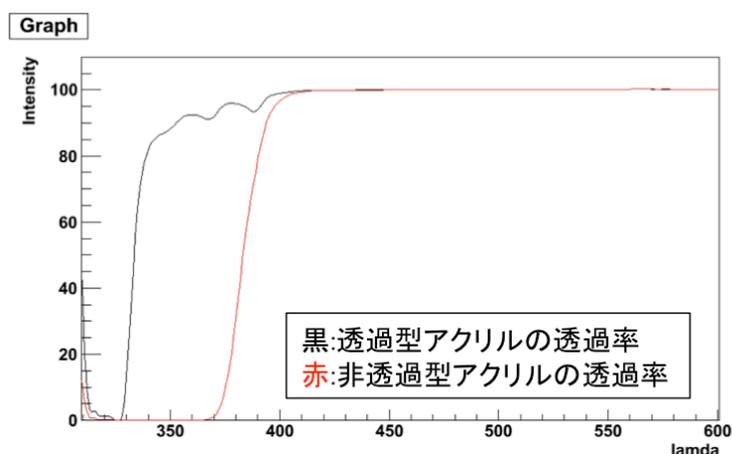


図 6.20: アクリルの透過率測定の結果

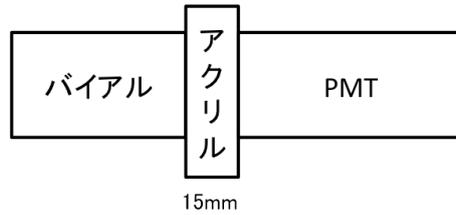


図 6.21: アクリルの材質検証のためのセッティング

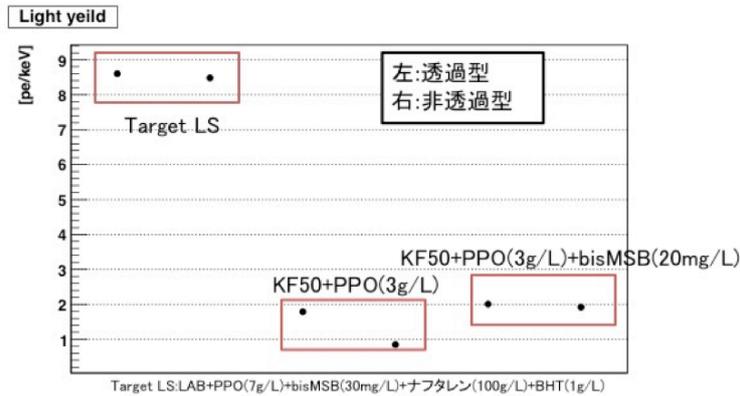


図 6.22: アクリルの種類による光量測定の結果の変化

6.2.2 PMT について

新型原子炉モニターでは PMT は 24 本用いるが、アクリル容器の側面の 16 本には 8 インチ PMT (浜松ホトニクス R5912、以下 8 インチ PMT) を用い、アクリル容器の上面の 8 本には 10 インチ PMT (浜松ホトニクス R7081、以下 10 インチ PMT) を用いる。図 6.23 と表 6.1 に 8 インチの PMT の寸法概要と仕様を示す [22]。PMT はアクリル製のハウジングに入れられており、透明のシリコンゴム (信越科学工業; 型番 KE-103) で固定されている。アクリルハウジングと PMT の写真を図 6.24 に示す。図 6.25 と表 6.2 に 10 インチの PMT の寸法概要と仕様を示す [22]。

ここではそれぞれの PMT をアクリル容器に固定する固定具の製作と試験について述べる。

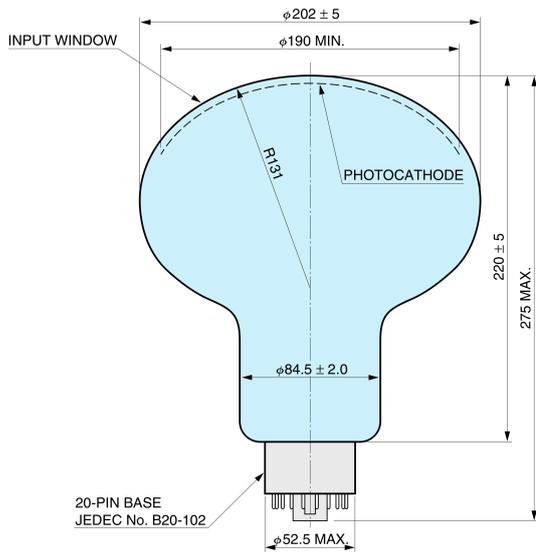


図 6.23: 光電子増倍管 (R5912) の寸法図

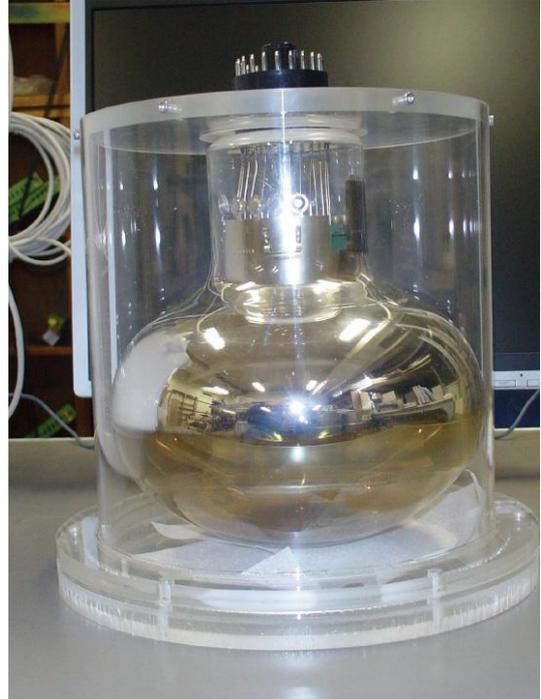


図 6.24: 光電子増倍管 (R5912) とアクリルハウジング

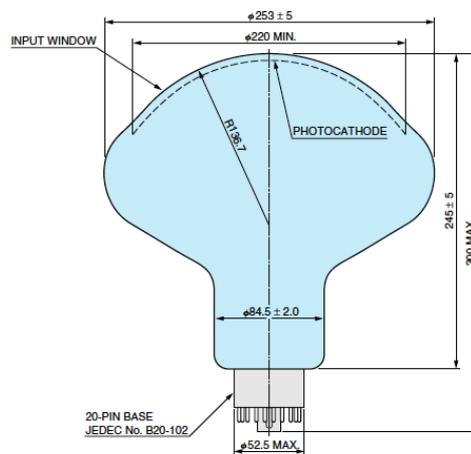


図 6.25: 光電子増倍管 (R7081) の寸法図

表 6.1: 光電子増倍管 (R5912) の仕様

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

表 6.2: 光電子増倍管 (R7081) の仕様

Parameter	Minimum	Typical	Maximum
Cathode Quantum Efficiency at 420nm	-	22%	-
Supply Voltage for Gain 10^7	-	-1500V	-2000V
Anode Dark Current at 10^7 and 25 > 0.25 p.e.	-	50nA	700nA
Transit Time Spred at 10^7 gain (FWHM with 1 p.e. detection)	-	2.9ns	-
Anode Pulse Rise Time	-	4.3ns	-
Transit Time	-	63ns	-
Peak to Vally Ratio	-	2.5	-

6.2.2.1 上面 PMT 用固定具の製作

アクリル容器の上面に設置する PMT は 10 インチ PMT で新型原子炉モニターのために新しく揃えたものである。そのため PMT を固定する器具を自分たちで製作した。PMT を入れる筒にはタキロン株式会社のポリプロピレン製ます用アジャスターを利用した。この筒をアクリル容器上面に接着し、PMT をその中に入れる。PMT とアクリルの間の空気層は信越化学工業のシリコンオイル KF-96 100cs で充填する。1 本あたりシリコンオイルは 2.2L 利用する。PMT を固定するための蓋は 3D プリンターで製作し、取り付け金具によって固定する。上面 PMT 用固定具の写真を図 6.26 に示す。

アクリル容器とポリプロピレン製の筒を接着する接着剤には、コニシ株式会社のボンドウルトラ多用途プレミアムソフトという接着剤を利用する。これ以外にもボンド GP クリヤー、Loctite の E-40FL という接着剤での接着テストを行った。しかし GP クリヤーは接着面に空気が入り、E-40FL はポリプロピレン面で剥離してしまい使用することは出来なかった。また接着剤が接着後オイルに侵されないかテストを行った。このテストにはミネラルオイル (N12D) とシリコンオイル (KF-96) で試験を行った。その結果、1 週間程度経過後にはミネラルオイルに浸したサンプルは接着部が膨潤して柔らかくなっていたのに対し、シリコンオイルに浸したサンプルには変化がみられなかった。その試験の写真を図 6.27 に示す。そのためオイルにはシリコンオイルを採用した。

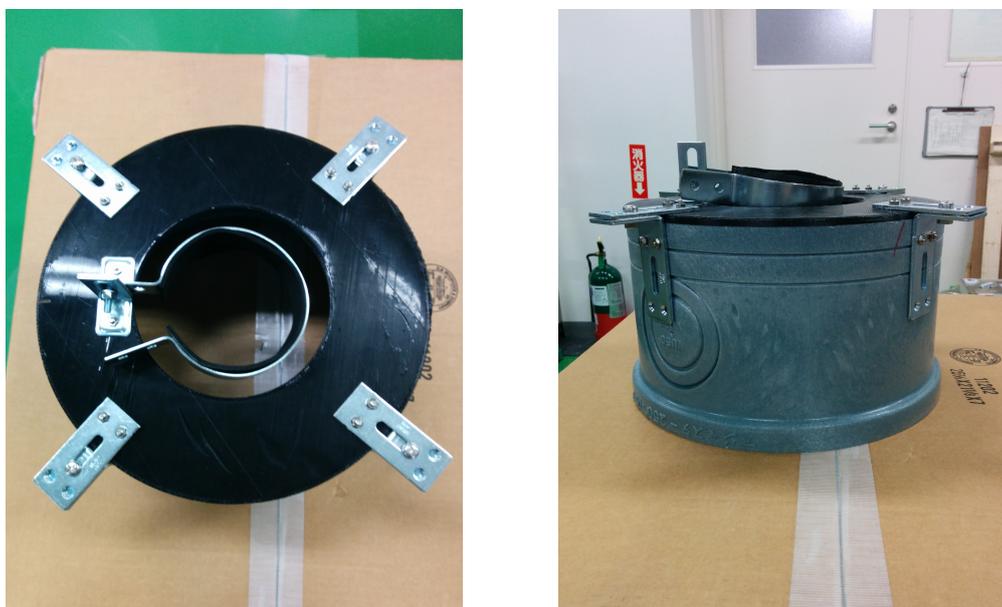


図 6.26: 上面 PMT 用固定具

6.2.2.2 8inchPMT 用シリコンゴム試験

アクリル容器の側面に設置する PMT は 8 インチ PMT であり、改良型プロトタイプ検出器で利用していたものを引き続き利用する。この 8 インチ PMT はアクリルハウジングに入れられているが、球型のアクリル容器に設置するために、光電面側のア



図 6.27: 接着剤のテストの写真 (左から付ける前、ミネラルオイルに浸けたもの、シリコンオイルに浸けたもの)

クリルの面が球面になっている。新型原子炉モニターの亚克力容器は箱形であり平面に設置するため、そのままだと亚克力容器と亚克力ハウジングの間に隙間が生じ空気が入ってしまう。この対策として亚克力ハウジングの光電面側の外面にシリコンゴム(信越科学工業; 型番 KE-103)を平らになるようにポッティングした。そのシリコンゴムを固める様子を図 6.28 に示す。8 インチ PMT の光電面側の縁を養生テープで囲い、KE-103 を 280g、硬化剤の CAT-103 を 15g 混合し流し込み 72 時間経過することで硬化させる。

しかし硬化後の 8 インチ PMT をそのまま亚克力容器に取り付けようとしてもシリコンゴムと亚克力の間に空気が入ってしまう。そこでこのシリコンゴムの縁を面取りした後、表面に高粘度シリコンオイルを塗ることでこれを解決した。ここで使用したシリコンオイルは信越化学工業の KF-96 100 万 cs である。KF-96 100 万 cs は非常に高粘度であり、その写真を図 6.30 に示す。PMT が横向きになっているため、塗布したシリコンオイルが垂れないように高い粘度が求められる。10g 程度塗った後、8 インチ PMT を後ろから亚克力容器に押し付ける力をかけることで密着させることができる。そのため側面の PMT は後ろから力をかけられる機構が必要になる。PMT の設置用棚の製作の際に実際に PMT を押し、亚克力板に密着させられることを確かめた。その様子を図 6.29 に示す。

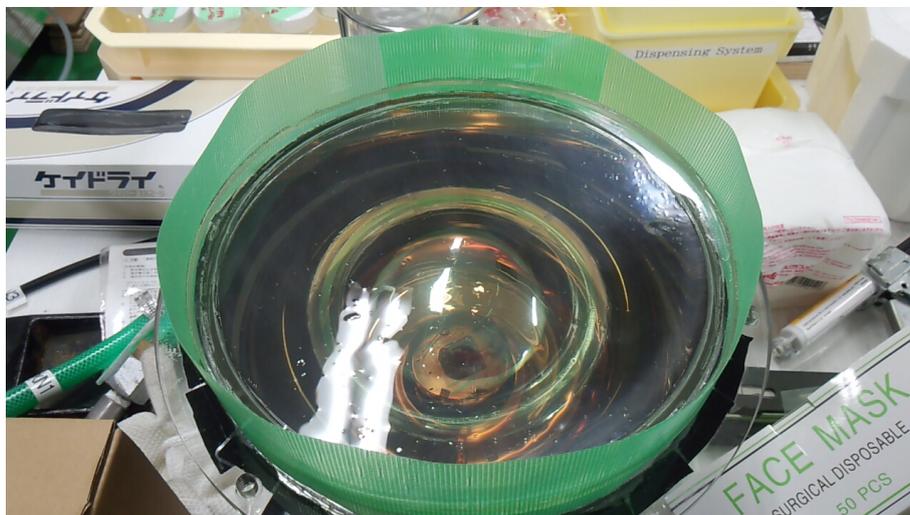


図 6.28: シリコンゴムを固めている様子

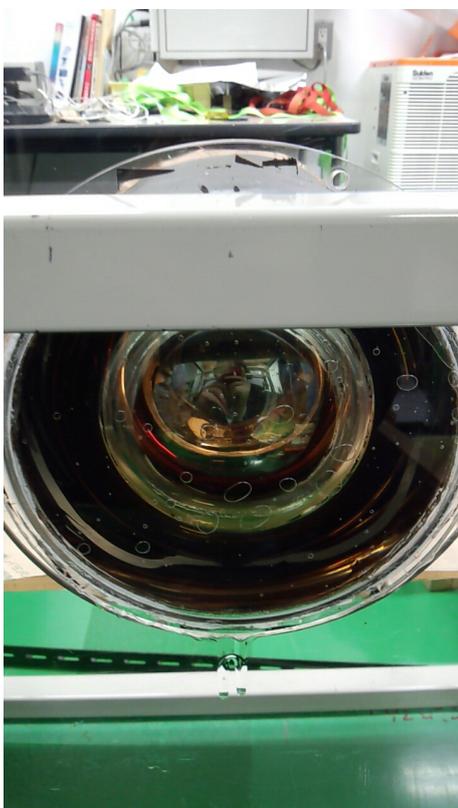


図 6.29: アクリル板に密着させられるかのテストの様子



図 6.30: KF-96 100 万の粘度の様子

6.2.3 スプリッター回路の製作

10 インチ PMT の 8 本のうち 6 本の PMT には Double Chooz 実験で用いられていたものを使用している。この PMT は電圧の印加とシグナルの読み出しを 1 本のケーブルで行っており、検出器外部でスプリッター回路を用いて 2 つに分離される。そのためこの Double Chooz PMT 用にスプリッター回路を 6ch 分製作した。スプリッター回路の回路図を図 6.31 に、完成したスプリッター回路の写真を図 6.32 に示す。スプリッター回路には高電圧がかかるため、ピッチの広い基板を用いており、放電を防ぐために通電部の表面をシリコンで固めている。

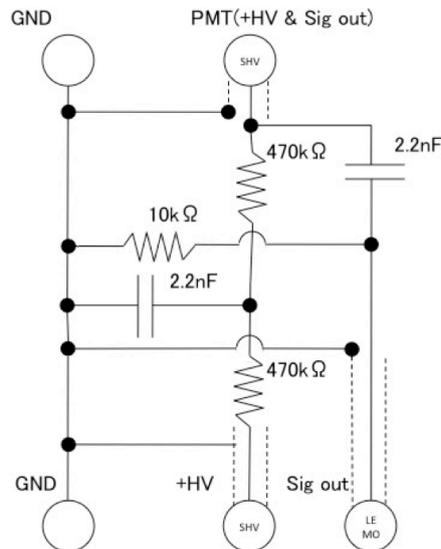


図 6.31: スプリッター回路の回路図



図 6.32: スプリッター回路の写真

6.2.4 液送ポンプの選定

ターゲット層の内側容器に液体シンチレータを送るためのポンプ (NIKUNI : IS-NPD02A) が図 6.33 である。またポンプ出力を制御するために電源周波数を制御でき

るインバータ (TOSHIBA : 型式 VF S11) を接続している (図 6.34)。インバータにおいて電源の周波数 50 Hz を 20 Hz に変更して出力している。このためポンプのモーターの回転数が低下し、管内圧力を抑えることができる。

ベトー層の外側容器に液体シンチレータを送るためのポンプ (FLOJET : G573205A) が図 6.35 である。ベトー層用液体シンチレータはシリコンオイルベースであり、粘度がターゲット層の液体シンチレータに比べて高く、一般的な水送ポンプは利用できない。このポンプはダイヤフラムポンプであり比較的高粘度の液体を送ることができる。接液部はポリプロピレンとバイトンでありシリコンオイルには侵されない材質である。またこのポンプを駆動させるためにはエアーコンプレッサー (EATH MAN : ACP-130oL 図 6.36) を接続し空気を送る必要があり、空気の流量によって送液の流量を制御する。



図 6.33: ターゲット層用液体シンチレータ用ポンプ 図 6.34: ポンプ電源周波数制御用インバータ



図 6.35: ベトー層用液体シンチレータ用ポンプ 図 6.36: ポンプ用エアーコンプレッサー

6.2.5 PMT 設置用棚の製作

図 6.18 に示したように、検出器の防液堤の内部には側面の PMT を設置する役割とシールドを設置する役割を担う棚を設置する。この棚の骨組みにネグロス電気株式会社の組み立てフレームチャンネルを利用して製作した。その写真を図 6.37 に示す。この骨組みにアルミ板の棚板を設置し、L 型アンクルを利用して PMT 固定具を設けた。その写真を図 6.38 に示す。



図 6.37: PMT 設置用棚の写真



図 6.38: 側面 PMT 固定具の写真

6.2.6 キャリブレーション線源について

エネルギーのキャリブレーション等を行うために検出器内に線源を配置する必要がある。内側容器のチムニーから底面まで伸びているキャリブレーション用のパイプは、この中に線源を紐で吊るし検出器の中心にアクセスするために設けられている。しかし仮にこのパイプが何らかの理由で割れて液が侵入した場合、線源が直接液体シンチレータに接することになり危険である。そのため線源はナイロンのフィルムで図 6.39 のように溶着し覆う。このフィルムがターゲット層の新しい液体シンチレータに耐性があるか図 6.40 のように試験を行った。その結果液につけてから 1 日以上経過した後もフィルム内部には液は侵入しておらず、このナイロンフィルムを利用することにした。



図 6.39: 線源をカバーするナイロンのフィルムの写真



図 6.40: ナイロンフィルムの耐液テストの様子

6.2.7 ターゲット容器内のおもりのカバー

ターゲット容器には液体シンチレータの比重の差分の浮力を相殺するためのおもりが仕込まれている。おもりはステンレス製の板 (300mm x 350mm x 20mm 約 17kg) で計 4 枚設置される。このおもりが直接液体シンチレータに触れることを防ぐために、線源と同様にナイロン製のフィルムでカバーをかけた。まず反射を防ぐために黒い PET のフィルムでおもりを包み、その上からナイロンフィルムで二重に包んだ。その様子を図 6.41 と図 6.42 に示す。

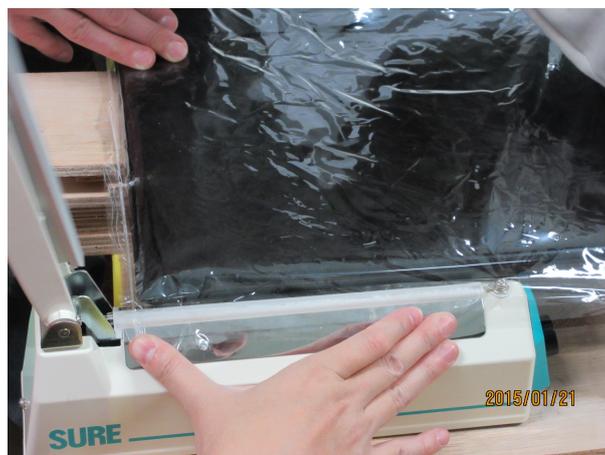


図 6.41: おもりにナイロンフィルムでカバーを掛ける様子



図 6.42: ナイロンフィルムでカバーされたおもりの様子

6.2.8 液体シンチレータの攪拌

液体シンチレータはアクリル容器に入れる前にドラム缶と攪拌機を用いて各溶質を溶かしこんだ。PPO は他の溶質と比べ溶けづらいため事前にふるいにかけ粒子を細かくしたものを溶かした。攪拌の様子を図 6.43 に、出来上がった液体シンチレータに紫外線ランプをあてた様子を図 6.44 に示す。

6.2.9 データ収集システム

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



図 6.43: 液体シンチレータの攪拌の様子



図 6.44: 液体シンチレータに紫外線ランプをあてた様子

6.2.9.1 Flash Analog to Digital Converter

FADC は CAEN 社製の v1721 を二つ、v1751 を一つを用いる。また Controller は CAEN 社製の v2718 である。v1721 は 8bit のデータ値を 500 MHz のサンプリングレートで取得することが可能であり、データ点は 2 nsec おきにとることができ、v1751 は 10bit のデータ値を 1 GHz のサンプリングレートで取得することが可能であり、データ点は 1 nsec おきにとることができる。また将来的には 14bit のデータ値を取得することができる v1730 を用いることを計画している。

6.2.9.2 Trigger logic

改良検出器のトリガー回路を図 6.45 に示す。図 6.45 においてトリガー後 500 nsec にわたって veto をかけている。FlashADC はトリガー直前のデータを記録する仕様となっている。本研究ではトリガーから前 496 nsec のデータを取得している。常陽実験では遅延同時計測法をハードウェアで行っていたため、データを限定して取得できる一方で回路が複雑になっていた。新型検出器ではトリガーを 24 本の PMT の合計電荷量で決定し、データを取得する。データ量が多くなってしまおう一方でシンプルな回路で測定ができる利点がある。このデータをオフラインで遅延同時計測法を用いて解析を行う。

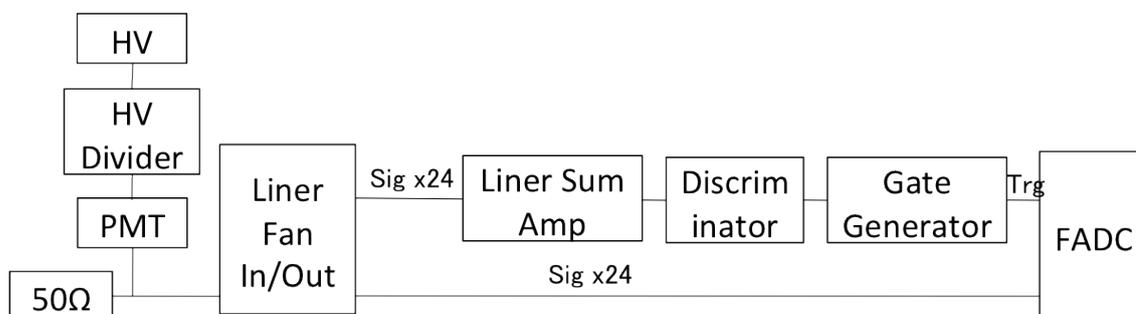


図 6.45: 新型原子炉モニターの測定回路

6.3 新型原子炉モニターの建設

ここでは実際に原子炉モニターを建設した際にどのような工程を行ったということと、その様子について述べる。

6.3.1 架台の搬入

搬入された架台の防油堤について水張試験を行い穴がないことを確認した。搬入の様子を図 6.46 に、水張試験の様子を図 6.47 に示す。



図 6.46: 架台の搬入の様子

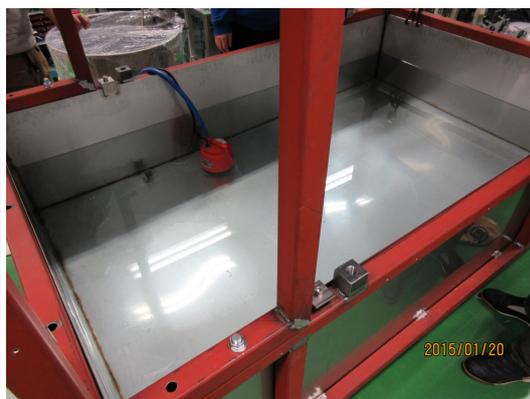


図 6.47: 架台の防油堤の水張試験の様子

6.3.1.1 架台の塗装

架台の溶接部分や加工された部分は鉄がむき出しになっているため、将来的に錆びることが懸念された。そこで反射防止のための黒い塗料でフレームを塗装し錆止めを施した。塗装の様子を図 6.48 に、塗装が終わった架台を図 6.49 に示す。



図 6.48: 架台の塗装の様子



図 6.49: 塗装された架台

6.3.1.2 暗箱と遮光

架台にはアルミ板を設置することができる構造になっており、ブラックシートを併用することでどの程度遮光できるかを検証した。その様子を図 6.50 と図 6.51 に示す。その結果防油堤と下部骨組みの隙間から光漏れがあることがわかり、図 6.52 のように隙間を塞いだ。



図 6.50: 遮光用のアルミ板を設置された架台
図 6.51: ブラックシートで全体を覆い遮光を行う様子



図 6.52: 光漏れのあった隙間をブラックテープで塞ぐ様子

6.3.2 アクリル容器の搬入と水張試験

搬入されたアクリル容器は水張試験を行った。外側アクリル容器はプランジ下まで、内側アクリル容器はチムニートップまで満水になるまで水を入れ数十分様子を観察した。搬入の様子を図 6.53 と図 6.54 に、水張試験の様子を図 6.55 と図 6.56 に示す。この時の水張試験では漏れ等の問題はなかった。



図 6.53: アクリル容器の搬入の様子 1



図 6.54: アクリル容器の搬入の様子 2



図 6.55: 外側アクリル容器の水張試験の様子



図 6.56: 内側アクリル容器の水張試験の様子

6.3.3 組み立て

アクリル容器が搬入されたあと、架台にアクリル容器を設置し組み立てを行った。液入れ、フレームの設置、PMTの設置と配線等の作業の様子を図 6.57 から図 6.59 に示す。



図 6.57: 架台の骨組みを設置し組み立てを行う様子
図 6.58: 内側アクリル容器に液入れを行う様子



図 6.59: PMT を設置し配線を行う様子

6.3.3.1 完成

アクリル容器が納入されてから組み立ては夜通し行い、翌日の修論発表会までに検出器を完成させることが出来た。その時に撮影した写真が図 6.60 である。



図 6.60: 完成した原子炉モニターと KASKA/Double Chooz グループのメンバー

6.3.3.2 アクリル容器の破損

しかし、その後テストデータを取得しようとしていた時、突然内側アクリル容器の接着面が破損し液体シンチレータが流出しベトー層用の液体シンチレータと混ざるといった事態になった。ターゲットの液体シンチレータはほぼ満量、ベトー層用の液体シンチレータは半分弱入っていた状態での出来事であった。アクリル容器の接着がしっかりとできていなかったことが原因と思われる。この破損のせいでアクリル容器には補修、または作り直しが必要になり新型原子炉モニターの完成は大幅に遅れることが予想される。破損したアクリル容器の様子を図 6.61 に示す。

6.4 テストデータの取得

内側のアクリル容器は破損し液体シンチレータは混ざってしまったものの、外側アクリル容器は無事であった。そこでこのまま何もデータを取らないのは悔しいのでテストデータを取得した。LED を使い各 PMT のゲインを大まかに合わせたあと、 ^{60}Co 線源を用いてエネルギー分布を取得した。その結果を図 6.62 に示す。ピークとして見えているものがおそらく ^{60}Co 線源の 2.5MeV のピークであると考え、横軸をスケールした。液体シンチレータが全量入っていないため、液面より高い PMT は空気層に

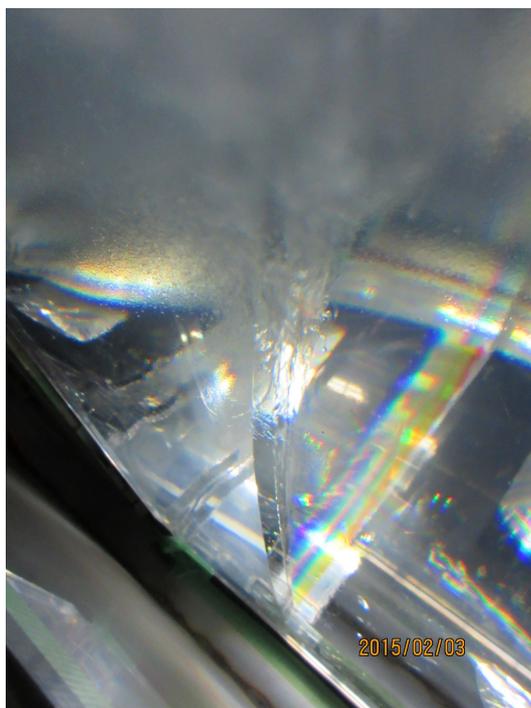


図 6.61: 破損したアクリル容器

面していることや、液体シンチレータが混ざってしまったことにより発光量が落ちたためエネルギーの分解能が悪くなっていると考えられる。

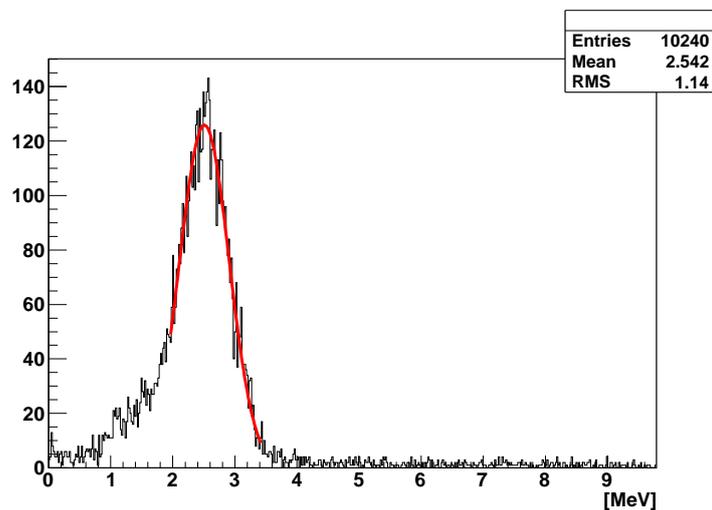


図 6.62: 新型原子炉モニターで取得した Co 線源のエネルギー分布

第7章 まとめと今後

7.1 まとめ

昨年度から、これまで東北大学で行ってきた研究を元に、新型原子炉モニター的设计、建設を行ってきた。本研究では新型原子炉モニターのための液体シンチレータの開発と、シミュレーションによる評価、実際の建設作業の取り組みについて述べた。

液体シンチレータの開発では PSD 能力を付加した LAB の開発に成功し、引火点の制限やアクリルとの共用の問題を解決できた。またベトー層用として、シリコンオイルをベースにした高引火点液体シンチレータの開発も行った。新型原子炉モニターではそれぞれの液体シンチレータの発光波形の違いを利用し、宇宙線ベトー能力をもたせることができた。

シミュレーションでは新型原子炉モニターの感度の推定を行い、シールドや Vertex によるカット、ベトー層用液体シンチレータを用いた宇宙線ベトーの評価を行った。その結果、新型原子炉モニターは 3GWth の原子炉の炉心から 35m の距離に設置した場合、信頼水準 2σ で 3 時間程度の測定でニュートリノによる原子炉運転を検出できる能力が示唆された。

また検出器のデザインを行い実際に新型原子炉モニターの建設を行った。アクリル容器と検出器の架台はそれぞれ設計を行い外部に製作を依頼した。また検出器で測定を行うために必要である各種試験や製作を行った。

7.2 今後

新型原子炉モニターの新しい液体シンチレータについては現在のところ Gd を溶かしこむ方法は未確立である。現在新しい液体シンチレータに Gd を溶かす方法の R&D を行っており開発が急がれる。また長期的な安定性を保証できていないため、時間経過による変化を抑える取り組みも必要である。

ベトー層用液体シンチレータとの波形を用いた宇宙線ベトーでは、宇宙線ミュオンがベトー層だけでターゲット層もかすめた場合の事象も含め、厳密なベトー効率の評価を行う必要がある。

改良型プロトタイプ検出器で用いていた Charge を利用した事象位置の再構成アルゴリズムでは resolution が低いため、新型原子炉モニターに対応した事象位置の再構成のアルゴリズムを開発する必要がある。この時 Charge だけでなく時間情報も利用することで高精度化させるというアイデアがある。

今回製作したアクリル容器は破損のため利用できないが、補修または作り直したアクリル容器を用いて再び建設を行う必要がある。また実際に新型原子炉モニターの建設が完了した後、キャリブレーションやバックグラウンドデータの取得を行い評価す

ることでシミュレーション通りの感度が達成できるか評価を行う。その後シールドを取り付けた場合のバックグラウンドの変化や、新しい高分解能 Flash ADC を利用した場合に PSD 能力がどれほど向上するかといった評価を行う。将来的には実際に原子力発電所に新型原子炉モニターを設置しニュートリノの検出を試みる。

謝辞

本研究を行うにあたっては非常に多くの方々から御協力、御指導を頂ききました。この場を借りてお礼申し上げます。

指導教官の末包准教授には研究というものの考え方の基礎や、物理についての考え方など多くの助言を頂きました。研究を進める中で行き詰まった時などに相談をさせていただくと、自分では考えつかなかったようなアドバイスを頂き大変感謝しております。

研究員の古田氏には実験及びデータ解析などの研究全般について指導していただきました。わからないことを相談させていただくと、細かいことでも手引きしていただき問題の解決に繋がられました。こうして修士論文としてまとめられたことにも古田氏の指導があってこそだと考えています。

Double Chooz Japan グループの Collaborator の皆様には実験の機材をお借りしたり、Collaboration Meeting で研究への助言を頂きました。またこの研究とは直接関係はありませんが、Double Chooz 検出器の PMT installation の作業に参加させていただいたことは、私にとって非常に有意義な経験で深く感謝しております。

またニュートリノ科学研究センターのスタッフの皆様方には様々な場面で協力をいただき、新型原子炉モニターの建設という大きな仕事を行うことが出来ました。また同研究室内の Thiago 氏、Emmanuel 氏は気さくに接していただき、私の英語力もいくらか向上したと思います。同輩の坂井くんには修士からこの研究室に入った私に先輩よろしく色々教えてもらい感謝しています。後輩の榎崎くんには実験をかなり手伝ってもらいとても助かりました。今後の研究の進捗をお祈りします。また先輩の江澤さんにも忙しい中作業を手伝っていただき感謝しております。アクリル容器が納入されてからの徹夜での作業はみなさん本当にお疲れ様でした。その他の Double Chooz Japan グループの学生やニュートリノセンターの学生には大変お世話になりました。

最後に6年間仙台での学生生活を支えてくれた両親、家族、友人の皆様方に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] I .Shimizu, PhD thesis, Tohoku University (2004)
- [2] http://www.nobelprize.org/educational/physics/energy/fission_2.html
- [3] T. Araki et al. (KamLAND Collaboration), Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion, *Physics Rev. Lett.*, Vol. 94, 081801, 2005
- [4] M. Aoki, K.Akiyama, Y. Fukuda, A.Fukui, Y. Funaki, H. Furuta, T. Hara, T. Haruna, N. Ishihara, T.Iwabuchi, M. Katsumata, T. Kawasaki, M. Kuze, J. Maeda, T. Matsubara, T.Matsumoto, H. Minakata, H. Miyata, Y. Nagasaka, T.Nakagawa, N. Nakajima, H. Nakano, K. Nitta, M. Nomachi, K. Sakai, Y. Sakamoto, K.Sakuma, M. Sasaki, F. Suekane, H. Sugiyama, T. Sumiyoshi, H. Tabata, N. Tamura, M. Tanimoto, Y. Tsuchiya, R.Watanabe and O. Yasuda, Letter of Intent for KASKA(2008)
- [5] A. Bernstein, G. Baldwin, B. Boyer, M. Goodman, J. Learned, J. Lund, D. Reyna, R. Svoboda, Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors : Current Capabilities and Future Prospects (2009)
- [6] <http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/joyo/indexs.html>
- [7] N.Bowden, Experiment with reactor antineutrinos in US : SONGS, 6th International Workshop on Low energy neutrino physics (2011)
- [8] H. Furuta, Doctor Thesis, Tokyo Institute of Technology University (2009)
- [9] Y. Sawamura, Master Thesis, Tohoku University (2013)
- [10] Grenn F. Knoll 著、木村逸郎、阪井英次 訳、放射線計測ハンドブック第三版 (2001)
- [11] <http://www.epc.osaka-u.ac.jp/pdf/kikenbutu.pdf>
- [12] M. Yeh, A. Garnov, R.L. Hahn, Gadolinium-loaded liquid scintillator for high-precision measurements of antineutrino oscillations and the mixing angle, 13, *Nucl.Instrum.Meth.* A578 (2007) 329-339
- [13] Virginia B. Firestone, Table of Isotopes Eight Edition(1996)

- [14] 吉沢 幸夫, 箕輪 はるか, 瀧上 誠, シリコンオイル シンチレータを用いたラドン測定法の開発 (第 127 回成医会総会一般演題)
- [15] <http://www.silicone.jp/j/products/type/oil/index.shtml>
- [16] J. Kempa and A. Krawczynska, Nuclear Physics B(Proc. Suppl.) 151(2006) 299-302
- [17] Y.Furuta , Master Thesis, Tohoku University (2012)
- [18] 榎本貴哉, 波形弁別能力を実装した Gd 入り液体シンチレータを用いた新しい小型原子炉ニュートリノモニターの開発, 日本物理学会 2014 秋季大会
- [19] A. Bernstein, G. Baldwin, B. Boyer, M. Goodman, J. Learned, J. Lund, D.Reyna, R. Svoboda, Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors :Current Capabilities and Future Prospects (2009)
- [20] <http://www2.dango.ne.jp/cikogyo/>
- [21] <http://www.sketchup.com>
- [22] <http://www.hamamatsu.com/>