

修士論文

次期 KamLAND 実験へ向けた フロントエンドエレクトロニクスの開発

Development of front-end electronics
for the next KamLAND experiment

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

林田 眞悟

平成 26 年

概要

KamLAND は、液体シンチレータを用いた反電子ニュートリノ検出器である。KamLAND では、検出器内部の事象によるシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) で電気信号に変換し、フロントエンドエレクトロニクス (FEE) で波形データの所得を行っている。KamLAND は現在までに、原子炉反電子ニュートリノ観測や地球反電子ニュートリノ観測で物理学分野に大きく貢献して来た。また、現在は KamLAND の低バックグラウンド環境に ^{136}Xe を導入して、KamLAND-Zen と称したニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 観測実験が行われている。KamLAND-Zen 実験では、既にニュートリノ質量縮退領域において ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 半減期及びニュートリノ有効質量に対する世界最高の制限を得ている。

現在、更にニュートリノ質量逆階層領域での探索を行うために、検出器に高感度化を施した KamLAND2 における観測が計画されている。更に、KamLAND2 では高純度 NaI(Tl) 結晶を用いたダークマター探索実験や、直近にサイクロトロン加速器を設けて行う第 4 世代ニュートリノ探索実験等も計画されている。しかし、現在の FEE は老朽化により、次期 KamLAND 実験に用いる事は出来ない。そこで、新たな FEE が必要になる。

本研究では、次期 KamLAND 計画で運用する新 FEE の概念設計と、新 FEE 開発へ向けたテスト基板の回路設計を行った。新 FEE の概念設計で行った特筆すべき事項としては、アナログ信号処理回路の単純化や、微分 Discr1 機能と言った現在の FEE に無い特徴を考案した点である。これらの特徴により、次期 KamLAND 実験に安定的で高機能なデータ所得環境を提供することが可能になる。また、これらの機能を検証することが可能なテスト基板の回路設計に成功することが出来た。

目次

1	序章	10
2	ニュートリノ物理	11
2.1	ニュートリノ振動	11
2.1.1	Super-Kamiokande による大気ニュートリノ観測	12
2.1.2	KamLAND による原子炉ニュートリノ観測	13
2.1.3	Daya Bay による原子炉ニュートリノ観測	14
2.1.4	ニュートリノ質量階層構造	16
2.2	ニュートリノ質量	17
2.2.1	マヨラナ性とシーソー機構	17
2.2.2	ニュートリノレス2重ベータ崩壊	18
2.2.3	ニュートリノレス2重ベータ崩壊探査実験	21
2.3	超新星ニュートリノ	24
2.3.1	超新星爆発によるニュートリノ生成	24
2.3.2	超新星モデル	25
3	KamLAND 実験	27
3.1	KamLAND 検出器の構造	27
3.1.1	液体シンチレータ	28
3.1.2	ナイロンバルーン	29
3.1.3	光電子増倍管 (PMT)	29
3.1.4	外部検出器	32
3.2	ニュートリノの検出原理	33
3.2.1	逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出	33
3.2.2	電子散乱によるニュートリノの検出	36
3.2.3	陽子散乱によるニュートリノの検出	37
3.3	事象再構成	38
3.3.1	波形解析	38
3.3.2	PMT の時間・電荷校正	38
3.3.3	事象位置再構成	40
3.3.4	事象エネルギー再構成	41
3.4	KamLAND-Zen 実験	43
3.4.1	^{136}Xe	43
3.4.2	^{136}Xe 含有液体シンチレータ	44
3.4.3	ミニバルーン	44
3.4.4	KamLAND-Zen 第1フェイズの結果	45
3.4.5	^{136}Xe 含有液体シンチレータの純化	48

3.4.6	KamLAND-Zen 第 2 フェイズの中間結果	50
3.4.7	KamLAND-Zen 次期フェイズ	52
3.5	KamLAND の将来計画	53
3.5.1	KamLAND2	53
3.5.2	KamLAND2-Zen	54
3.5.3	KamLAND-PICO	54
3.5.4	IsoDAR	55
4	KamLAND データ収集システム	57
4.1	PMT 信号波形	58
4.1.1	ノイズレート	58
4.1.2	1 p.e. 事象	58
4.1.3	宇宙線ミュオン事象	59
4.2	KamDAQ	62
4.2.1	KamFEE	62
4.2.2	トリガ回路	64
4.2.3	DAQ コンピュータ	67
4.3	MogDAQ	69
4.3.1	BLR	69
4.3.2	MoGURA	70
4.3.3	トリガ回路	75
4.3.4	DAQ コンピュータ	79
4.3.5	MoGURA アナログ性能	80
4.3.6	^{10}C 事象タギング効率	83
4.3.7	MoGURA パフォーマンス	84
5	新フロントエンドエレクトロニクス (FEE) 開発	85
5.1	新 FEE の目標	85
5.1.1	アナログ回路デザイン	86
5.1.2	オンボード機能	88
5.2	新 FEE 開発の見通し	94
5.3	新 FEE を用いた DAQ システム	94
6	新 FEE テスト基板開発	96
6.1	アンプ回路設計	97
6.1.1	アンプ回路概要	97
6.1.2	P ゲインチャネルアンプの特性	100
6.1.3	L ゲインチャネルアンプの特性	106
6.2	FPGA	109

6.3	クロック	109
6.4	Ethernet 通信	109
6.5	コネクタ類	110
6.5.1	LEMO 入力コネクタ	110
6.5.2	+3.3 V LVDS 入力コネクタ (34 芯)	110
6.5.3	+1.8 V 入出力コネクタ (16 芯)	110
6.6	電源回路	111
6.6.1	デジタル電源	111
6.6.2	アナログ電源	111
7	結論	114
7.1	新 FEE 開発の現状	114
7.2	今後の研究計画	114
A	付録：テスト基板回路図	116

表 目 次

1	2重ベータ崩壊核一覧	18
2	KamLAND 液体シンチレータの組成	28
3	バルーン及びロープの放射性不純物含有量	29
4	17inch PMT プリード回路の抵抗値及びキャパシタ容量 [30]	31
5	^{136}Xe 含有液体シンチレータの組成	44
6	MoGURA が搭載する ADC 製品の性能	72
7	MoGURA における各種ゲインチャンネルの仕様	72
8	デジタル波形データ処理	75
9	MoGURA アナログ回路のノイズレベル例 (0x02 番 Ch0)[31]	81
10	MoGURA アナログ回路のノイズレベル例 (MoGURA : 0x02 番 Ch0 , BLR : 01 番 Ch12)[31]	82
11	新 FEE に用いる ADC	87
12	新 FEE における各種ゲインの仕様	88
13	MoGURA FEF と新 FEE FEF 候補の性能比較	93
14	アンプ回路に用いるオペアンプ製品の主な性能	98
15	テスト基板の信号波形所得性能	114

目次

2.1.1 SK-I + II + III の大気ニュートリノの 2 世代解析による振動パラメータ	13
2.1.2 原子炉における主要 4 核種の 1 分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギースペクトル	14
2.1.3 KamLAND による原子炉ニュートリノの 2 世代解析による振動パラメータ	14
2.1.4 Daya Bay による各検出器位置 (EH1, EH2, EH3) におけるニュートリノ生存率及び θ_{13} への制限	15
2.1.5 Daya Bay, RENO, Double Chooz のベースライン長依存に注目したグローバル解析による Δm_{31}^2 への制限	16
2.1.6 ニュートリノ質量階層構造	16
2.2.1 ^{136}Xe における 2 重ベータ崩壊図	18
2.2.2 2ν 放出モードと 0ν 放出モードの二重ベータ崩壊のファインマン・ダイアグラム	19
2.2.3 2ν 放出モードと 0ν 放出モードの二重ベータ崩壊における電子のエネルギースペクトル	19
2.2.4 ニュートリノ質量と質量階層構造の関係	20
2.2.5 KK-claim における ^{76}Ge の $0\nu\beta\beta$ 事象	22
2.3.1 ニュートリノ質量と質量階層構造の関係	25
2.3.2 SASI による衝撃波面の時間変化の様子	26
2.3.3 SASI 表面側に面している際の IceCube と Hyper-Kamiokande において期待される超新星ニュートリノ事象レート	26
3.1.1 KamLAND 検出器の構造	28
3.1.2 17inch, 20inch PMT の構造	30
3.1.3 17inch PMT プリーダ回路 [30]	30
3.1.4 浜松ホトニクス社による 17inch PMT(R7250) と 20inch PMT(R3600) の TTS 比較 [30]	31
3.1.5 各光波長に対する 17inch PMT(R3750) の量子効率	32
3.2.1 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出原理	33
3.2.2 逆ベータ崩壊の反応断面積	36
3.3.1 17inch PMT の電荷分布と 20inch PMT の電荷分布	39
3.4.1 KamLAND-Zen の構造	43
3.4.2 ミニバルーンの形状	45
3.4.3 KamLAND-Zen 第 1 フェイズで得られたエネルギースペクトル	46
3.4.4バックグラウンド候補による $0\nu\beta\beta$ 領域エネルギースペクトルのフィット [33]	46
3.4.5 $0\nu\beta\beta$ 領域事象の時間分布とバックグラウンド候補核の崩壊レートによるフィット	47
3.4.6 KamLAND-Zen 第 1 フェイズ結果による $0\nu\beta\beta$ 半減期に対する制限	48
3.4.7 Xe 蒸留装置の概略図 [10]	49
3.4.8 KamLAND が所有する液体シンチレータ蒸留装置の概略図 [31]	50
3.4.9 純化作業前後の $0\nu\beta\beta$ 領域 (2.2 MeV \sim 2.0MeV) における事象の変化	50

6.0.2	テスト基板の概略図	97
6.1.1	アンプ回路の基本構成図	98
6.1.2	シミュレーションに用いたアンプ回路	101
6.1.3	テスト基板と MoGURA の P ゲインチャンネルアンプ周波数特性	102
6.1.4	擬似 2 p.e. 信号に対するテスト基板と MoGURA の P ゲインチャンネル出力比較 . . .	103
6.1.5	小信号に対する P ゲインチャンネルアンプの出力特性	104
6.1.6	擬似 30,000 p.e. 信号に対するテスト基板と MoGURA の P ゲインチャンネル出力比較	105
6.1.7	シミュレーションに用いた L ゲインチャンネルアンプ回路	106
6.1.8	L ゲインチャンネルアンプ回路の小信号特性	107
6.1.9	L ゲインチャンネルアンプ回路の大信号特性	108
6.6.1	LMZ14203H による+12 V 電源からの+10 V 電源作成シミュレーション回路 . . .	112
6.6.2	LMZ14203H による+12 V 電源からの+10 V 電源作成シミュレーション結果 . . .	113

1 序章

KamLAND は、検出器内部の事象由来のシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT ; Photomultiplier tube) で捉え、電気信号に変換している。この電気信号は、フロントエンドエレクトロニクス (FEE ; Front-end Electronics) により AD 変換され、波形データとして記録される。FEE は 2 種類存在し、一つが KamLAND 稼働当初より運用されている KamFEE、もう一つが、KamFEE のデッドタイムを補助する目的で開発され、17inch PMT のみの波形所得を行う高性能バックアップ FEE の MoGURA である。

現在、KamLAND の次期計画として、検出器を高感度化する KamLAND2 等が存在する。しかし、KamFEE は既に老朽化しており、KamLAND2 以降安定したデータ所得を行える保証がない。そこで、KamFEE に替るに足る性能を持ち、更にデッドタイムフリーという長所を持つ MoGURA が主要 FEE の役割を担うべきである。ところが、以下の様な理由により、MoGURA は主要 FEE としての役割を担うことが出来ない。

- 搭載している 8bit 1GSPS FADC の廃盤により、現 20inch PMT 本数分のチャンネル確保のための量産が不可能
- 安定した動作に難がある
- 将来計画のためには更なる高性能化が求められる

この様な経緯から、KamLAND2 以降に用いる FEE を新たに開発するに至った。新 FEE 開発では、以下の事項の実現を目標とした。

- デッドタイムフリー性能
- 安定動作・コスト抑制を目的とした回路の単純化
- 高機能デジタル信号処理
- Ethernet 技術を用いた高速読み出し
- 近傍超新星イベント事象所得のための大容量オンボードメモリ搭載

本論文では、第 2 章で KamLAND2 で解明を試みるニュートリノ物理における謎と、その一般的な解明方法について論じる。また、この他、長く解明が待ち望まれている超新星爆発機構のニュートリノ検出による解明可能性についても記述する。その後、第 3 章にて KamLAND 実験の詳細、第 4 章にて KamLAND のデータ収集システムについて述べる。第 5 章では、新 FEE 開発の概要を述べ、第 6 章にて新 FEE に向けたテスト基板の開発に関する詳細を記述する。最後に、第 7 章にて本研究の結論をまとめ、今後の展望について論じる。

2 ニュートリノ物理

長らく、素粒子標準模型においてニュートリノはその質量を零とされてきた。しかし、ニュートリノ振動現象の発見により、ニュートリノは有限の質量を持つことが明らかとなった。

本章では、ニュートリノ振動現象の物理とそれを裏付ける観測結果、ニュートリノが有限の質量を持つことが明らかとなったことで、新たに解明が望まれるマヨラナ性とその観測について述べる。更に、ニュートリノ物理学が貢献し得る代表的な分野である超新星爆発に関する物理についても述べる。

2.1 ニュートリノ振動

ニュートリノのフレーバ固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の関係は、3 世代混合を考えると、Maki-Nakagawa-Sakata(MNS) 行列 $U_{\alpha i}$ を用いて、以下の様に表される。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (2.1.1)$$

ここで、MNS 行列 $U_{\alpha i}$ は、混合角 θ と CP 位相 δ を用いて、

$$\begin{aligned} U_{\alpha i} &= \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

と表される。ただし、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ である。ここで、式 (2.1.2) の時間発展は以下の式で表される。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i(t=0)\rangle \quad (2.1.3)$$

ここで、 E_i は質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の固有値である。よって、時刻 t において $|\nu_\alpha\rangle$ が $|\nu_\beta\rangle$ へ遷移する確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(t=0) \rangle|^2 \\ &= \left| \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-iE_i t} \right|^2 \\ &= \sum_i |U_{\alpha i} U_{\beta i}|^2 + \sum_{i \neq j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} e^{-i(E_i - E_j)t} \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

となる。簡単のため、2 世代混合を考えてみると、MNS 行列 (2.1.2) は、

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.1.5)$$

と表される．ここで，質量二乗差 $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ とし，相対論的な場合 ($m_i \ll p, E = p$) を考えると，

$$\begin{aligned} E_i - E_j &= \sqrt{m_i^2 + p_i^2} - \sqrt{m_j^2 + p_j^2} \\ &= \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

$$t \simeq L \quad (2.1.7)$$

となる．よって，式 (2.1.4) は，

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{(E_i - E_j)t}{2} \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L (\text{km})}{E (\text{GeV})} \right) \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

となる．

式 (2.1.8) より，ニュートリノ振動はエネルギー E と飛行距離 L に依存することが分かる．以降，ニュートリノ振動実験による各種パラメータ測定とニュートリノの質量階層構造について述べる．

2.1.1 Super-Kamiokande による大気ニュートリノ観測

陽子 (p) や α 粒子等の一次宇宙線は地球大気と原子核反応を起こし， π 粒子や K 粒子等を生成する．この π 粒子や K 粒子が崩壊する際に生成されるニュートリノを大気ニュートリノと呼ぶ．大気ニュートリノは主に，以下の過程で生成される．

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \quad (2.1.9)$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu) \quad (2.1.10)$$

大気ニュートリノの典型的なエネルギーは $100\text{MeV} \sim 100\text{GeV}$ で，発生点は Super-Kamiokande(SK) 天頂から天底までの $10\text{km} \sim 13000\text{km}$ である．SK は，大気ニュートリノ事象の L/E 分布を測定し，ニュートリノ振動パラメータを仮定して式 (2.1.8) から予想される事象数の L/E で χ^2 フィットティングを行うことで，振動パラメータを算出している．以下に，大気ニュートリノの解析より得られた振動パラメータを示す (図 2.1.1)[11]．

$$\begin{aligned} \Delta m_{23}^2 &= 2.1 \times 10^{-3} \text{eV}^2, \\ \sin^2 2\theta &= 1.0, \quad \text{at best fit} \end{aligned} \quad (2.1.11)$$

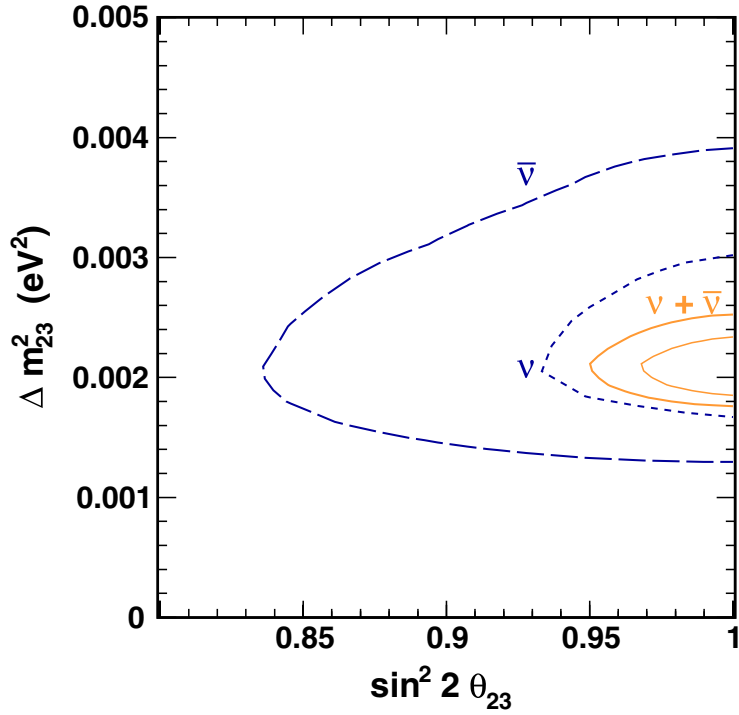


図 2.1.1: SK-I + II + III の大気ニュートリノの 2 世代解析による振動パラメータ．青色の点線と破線はそれぞれ ν と $\bar{\nu}$ の 90 % C.L. を，橙色の実線は $\nu + \bar{\nu}$ の 68 % と 90 % C.L. を表す．

2.1.2 KamLAND による原子炉ニュートリノ観測

原子炉で使用されている核燃料の主な核分裂性核種は ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu である．これらの核種が β 崩壊する際に生成されるニュートリノを原子炉ニュートリノと呼ぶ．原子炉ニュートリノのエネルギーは 10MeV 以下と低エネルギー (図 2.1.2) である．

KamLAND は検出器から約 130km ~ 220km に位置する原子炉が生成するニュートリノを検出している．KamLAND は原子炉ニュートリノの観測により， Δm_{21}^2 , θ_{12} を最高精度で測定している．KamLAND によって得られた振動パラメータを以下に示す (図 2.1.3)[17]．

$$\begin{aligned}\Delta m_{21}^2 &= 7.58_{-0.134}^{+0.14}(\text{stat})_{-0.15}^{+0.15}(\text{syst}) \times 10^{-5} \text{eV}^2, \\ \tan^2 \theta_{12} &= 0.56_{-0.07}^{+0.10}(\text{stat})_{-0.06}^{+0.10}(\text{syst}), \quad \text{at best fit}\end{aligned}\tag{2.1.12}$$

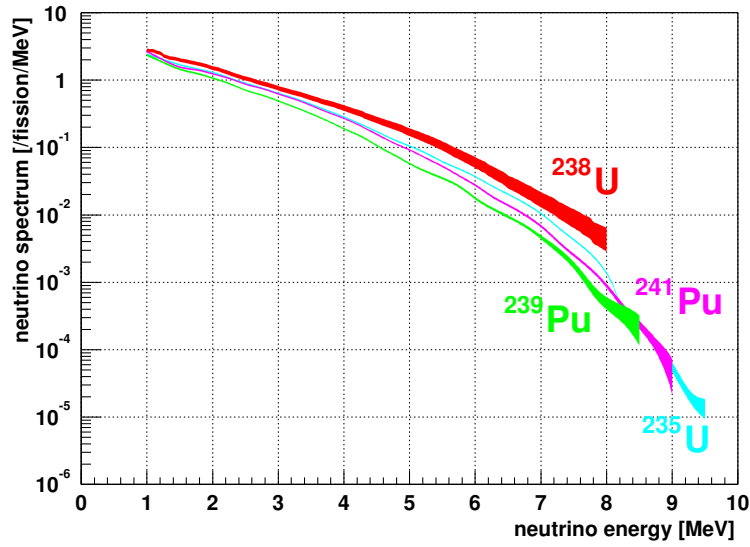


図 2.1.2: 原子炉における主要 4 核種の 1 分裂あたりの $\bar{\nu}_e$ のエネルギースペクトル (青: ^{235}U , 赤: ^{238}U , 緑: ^{239}Pu , 紫: ^{241}Pu) [29]

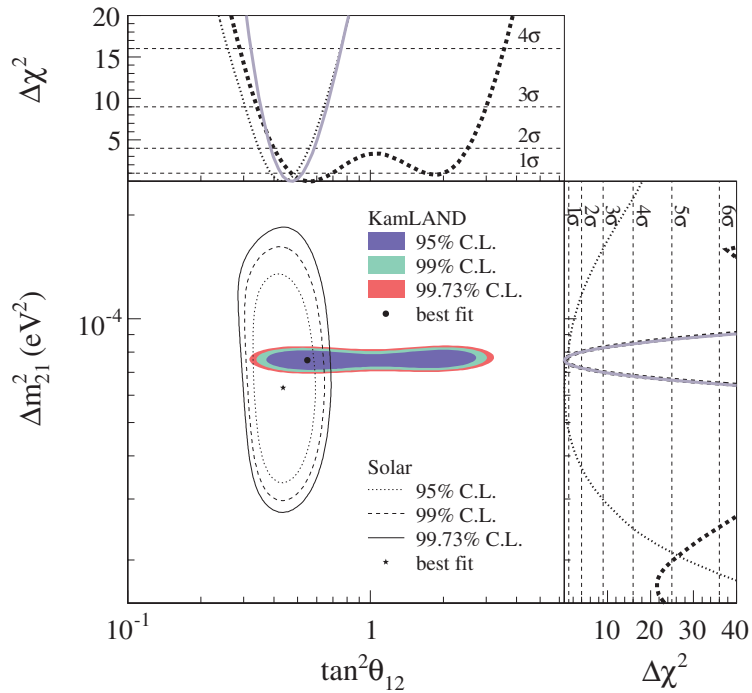


図 2.1.3: KamLAND による原子炉ニュートリノの 2 世代解析による振動パラメータ

2.1.3 Daya Bay による原子炉ニュートリノ観測

Δm_{31}^2 は, 前述の測定結果の $\Delta m_{21}^2 \ll \Delta m_{32}^2$ から, $\Delta m_{31}^2 \simeq \Delta m_{32}^2$ の有限値を持つことが推測出来る. これに対して, θ_{13} について, Daya Bay による原子炉ニュートリノ実験により, θ_{13} の有

限界を得ている Daya Bay は、小さな混合角 θ_{13} を測定するために、原子炉から約 400m ~ 1900m の 3 箇所に合計 6 個の検出器を配置している。Daya Bay によって得られた θ_{13} 値を以下に示す (図 2.1.4)[7] .

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst}), \quad \text{at best fit} \quad (2.1.13)$$

更に、他の原子炉ニュートリノ実験である RENO, Double Chooz のベースライン長依存性に注目したグローバル解析により、以下の Δm_{31}^2 が測定されている (図 2.1.5)[3] .

$$\Delta m_{31}^2 = 2.95^{+0.42}_{-0.61} \times 10^{-3} \text{eV}^2, \quad \text{at best fit} \quad (2.1.14)$$

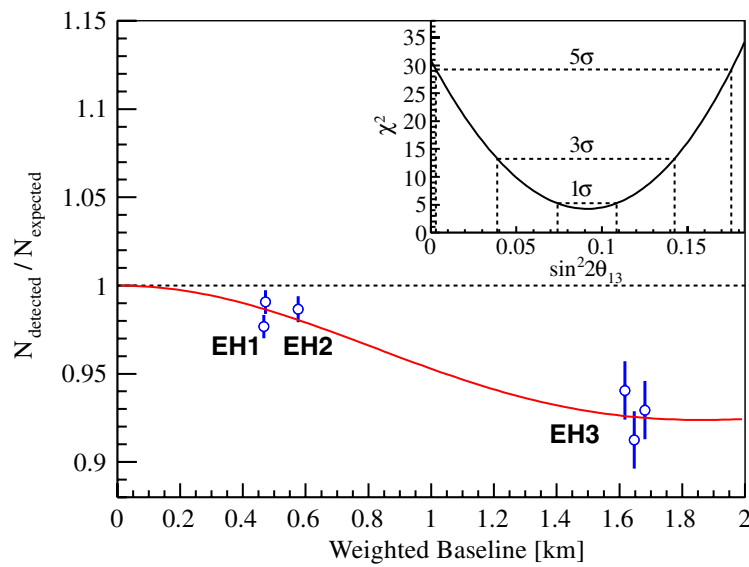


図 2.1.4: Daya Bay による各検出器位置 (EH1, EH2, EH3) におけるニュートリノ生存率及び θ_{13} への制限

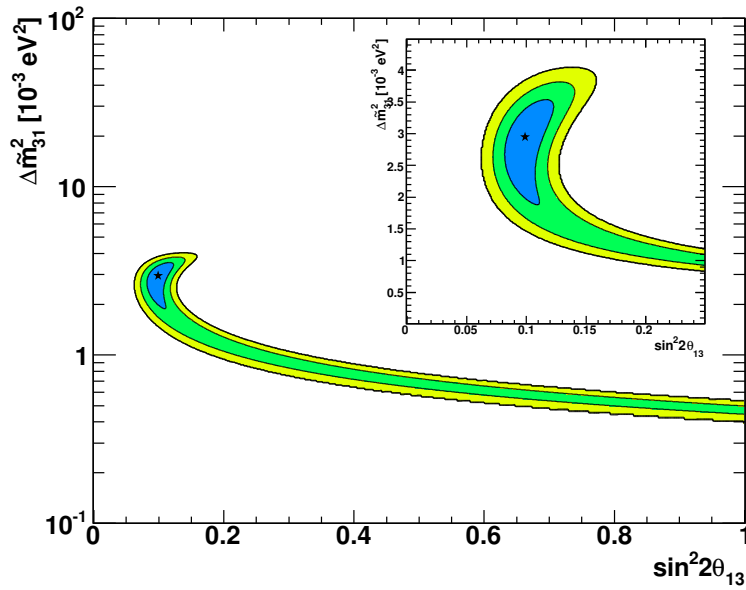


図 2.1.5: Daya Bay, RENO, Double Chooz のベースライン長依存性に注目したグローバル解析による Δm_{31}^2 への制限

2.1.4 ニュートリノ質量階層構造

上記のニュートリノ振動実験で求められた Δm_{ij}^2 により, 各ニュートリノ質量固有値の相対関係は3種類考えられている(図 2.1.6). 1つ目は正常階層構造(Normal Hierarchy)と呼ばれ, $m_1 \simeq m_2 \ll m_3$ の相対関係を持つ. 2つ目は逆階層構造(Inverted Hierarchy)と呼ばれ, $m_3 \ll m_1 \simeq m_2$ の相対関係を持つ. 3つ目は縮退構造(Degenerated)と呼ばれ, 各ニュートリノ質量固有値がほぼ同程度となる構造である.

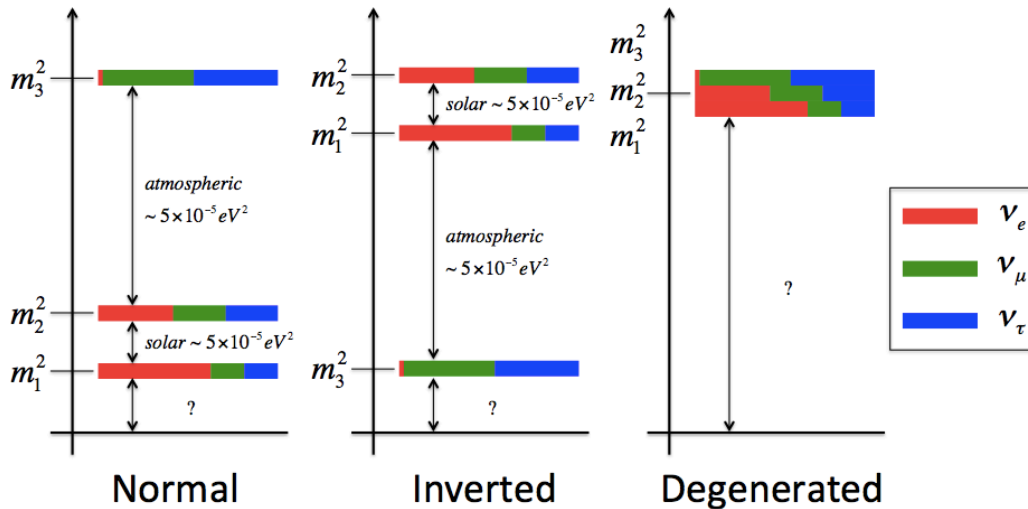


図 2.1.6: ニュートリノ質量階層構造

2.2 ニュートリノ質量

2.2.1 マヨラナ性とシーソー機構

素粒子標準理論に登場する全ての素粒子は、ディラック粒子である。ディラック粒子は、右巻き粒子と左巻き粒子の結合によって質量を獲得する粒子であり、それぞれの粒子について、電荷の正負が逆になった反粒子が存在する。これらの左巻きと右巻き粒子、左巻き右巻き反粒子は実験的にも確認されている。これに対して、左巻きの粒子と右巻きの反粒子の結合によって質量を獲得するマヨラナ粒子がある。マヨラナ粒子は、粒子と反粒子は同一であり、左巻き粒子と右巻き粒子のみが存在するという粒子である。

これまでのニュートリノのヘリシティに関する実験では、ニュートリノは左巻きニュートリノと右巻き反ニュートリノのみしか存在しない事が分かっている [19]。この事実から、近年まで、素粒子標準理論においてニュートリノの質量は"0"として扱われてきた。しかし、ニュートリノ振動現象の発見により、ニュートリノが有限の質量を持つことが明らかとなった。そのため、ニュートリノがディラック粒子であるとすると、質量の獲得方法と、ヘリシティの実験結果が矛盾してしまう。この矛盾は、幸いにもニュートリノが中性であるために、ニュートリノがマヨラナ粒子であると仮定することで解決出来る。

先ず、ニュートリノがディラック粒子である場合、場のラグランジアン¹の質量項は、

$$L_{mD} = \frac{1}{2}m_D (\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_L^c\psi_R^c) \quad (2.2.1)$$

と書かれる。ここで、 m_D はニュートリノのディラック質量である。これに対し、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、左巻きニュートリノと右巻きニュートリノの場のラグランジアン¹の質量項はそれぞれ、

$$L_{mL} = \frac{1}{2}m_L\bar{\psi}_L^c\psi_L + h.c. \quad (2.2.2)$$

$$L_{mR} = \frac{1}{2}m_R\bar{\psi}_R^c\psi_R + h.c. \quad (2.2.3)$$

と書くことが出来る。よって、マヨラナ粒子の場合、左巻きニュートリノと右巻きニュートリノは異なる質量 m_L, m_R を持つことが出来る。

ニュートリノの質量は他の素粒子の質量と比較して、極めて小さい事が観測より明らかとなっている。何故、其程までに質量が小さいのかという疑問に対して、柳田勉と Murray Gell-Mann によって、シーソー機構と呼ばれる理論が提唱された。本理論では、 m_D, m_L, m_R が全て有限の値を持つことを仮定すると、自然に式 (2.2.4) により、左巻きニュートリノ質量を獲得することが導かれる。

$$m_L \simeq \frac{m_D^2}{m_R} \quad (2.2.4)$$

観測結果より、 m_L は極めて小さいことが明らかとなっている。よって、極めて大きな $m_R(10^8\text{GeV以上})$ が存在することになる。このように考えると、右巻きニュートリノはその質量が大き過ぎるために通常観測する事は出来ず、左巻きニュートリノのみが観測される事を説明出来る。

2.2.2 ニュートリノレス 2 重ベータ崩壊

不安定な原子核は、式 (2.2.5) のベータ崩壊を起こし、より安定な原子核に遷移する。この際、電子と反電子ニュートリノが放出される。

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A + 1) + e^{-} + \bar{\nu}_e \quad (2.2.5)$$

通常、エネルギー準位が高い原子核へ崩壊することはないが、2 回ベータ崩壊することでよりエネルギー準位が低い原子核へ遷移し得る場合、稀に式 (2.2.6) の 2 回同時にベータ崩壊を起こす (図 2.2.1)。

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A + 2) + 2e^{-} + 2\bar{\nu}_e \quad (2.2.6)$$

これを 2 重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$) と呼ぶ。現在、2 重ベータ崩壊が観測されている核種を表 1 に示す。

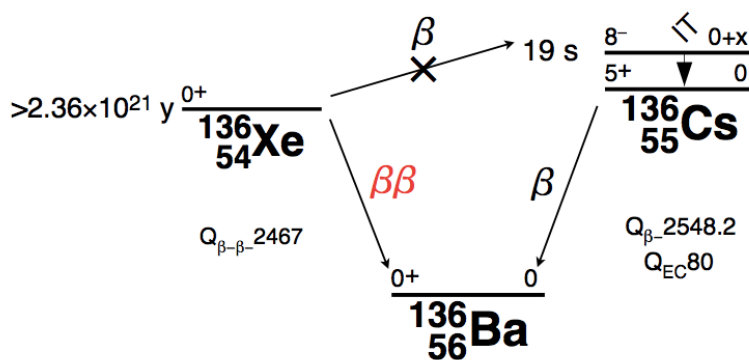


図 2.2.1: ^{136}Xe における 2 重ベータ崩壊図

表 1: 2 重ベータ崩壊核一覧

Nuclears	$T_{1/2}^{2\nu}$ [year]	$T_{1/2}^{0\nu}(m_{\beta\beta} = 50 \text{ [meV]})$ [year]	Q-value [keV]
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.4×10^{19}		4273.6
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	1.55×10^{21}	0.86×10^{27}	2039.0
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	9.6×10^{19}	2.44×10^{26}	2995.5
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	2.35×10^{19}	0.98×10^{27}	3347.7
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	7.11×10^{18}	2.37×10^{26}	3034.4
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.8×10^{19}	2.86×10^{26}	2813.5
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	7.0×10^{20}	2.16×10^{26}	2527.0
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.3×10^{21}	4.55×10^{26}	2457.8
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	9.11×10^{18}	2.23×10^{25}	3371.4

ここで、もし、ニュートリノがマヨラナ性を持っているならば、式(2.2.7)のニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊過程が考えられる。

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A + 2) + 2e^- \quad (2.2.7)$$

これは、2重ベータ崩壊によって放出された2つの反電子ニュートリノが仮想的に対消滅を起こすという事が考え得るためである(図2.2.2)。この反応はニュートリノレス2重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)と呼ばれる。

ここで、我々が実験によって直接観測可能な電子のエネルギースペクトルは、 $2\nu\beta\beta$ では連続スペクトルなのに対し、 $0\nu\beta\beta$ ではQ値における線スペクトルとなる(図2.2.3)。これは、ベータ崩壊でエネルギーを持ち出すニュートリノが $0\nu\beta\beta$ では放出されない事による。

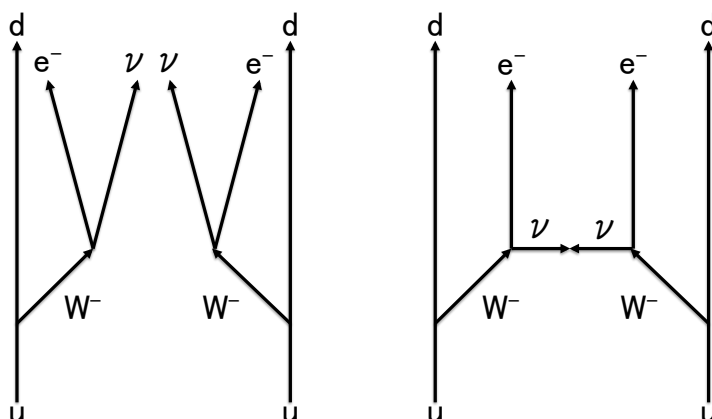


図 2.2.2: 2ν 放出モード(左)と 0ν 放出モード(右)の二重ベータ崩壊のファインマン・ダイアグラム

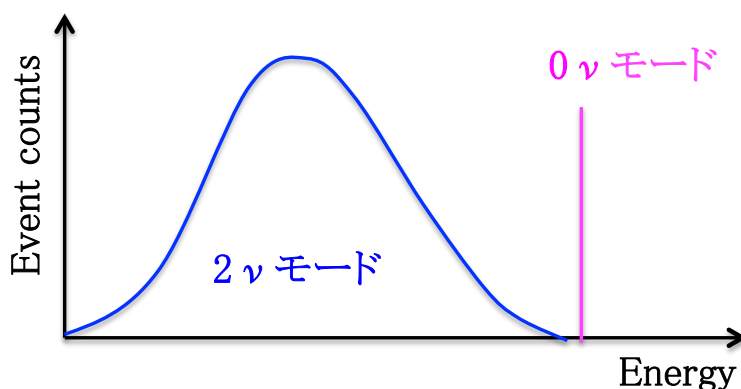


図 2.2.3: 2ν 放出モード(左)と 0ν 放出モード(右)の二重ベータ崩壊における電子のエネルギースペクトル

原子核の $0\nu\beta\beta$ 半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ を位相空間因子 $G^{0\nu}(Q, Z)$ と核行列要素 $M^{0\nu}$ で表すと、式(2.2.8)

のようにニュートリノ有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ に依存する事が分かる .

$$(\mathbf{T}_{1/2}^{0\nu})^{-1} = \mathbf{G}^{0\nu} |\mathbf{M}^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle \quad (2.2.8)$$

ここで , $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ は MNS 行列要素を用いて , 式 (2.2.9) で定義される .

$$\begin{aligned} \langle m_{\beta\beta} \rangle &\equiv \left| \sum_i U_{ei}^2 m_i \epsilon_i \right| \\ &= \left| c_{12}^2 c_{13}^2 m_1 e^{i\alpha_1} + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2 e^{i\alpha_2} + s_{13}^2 m_3 e^{-2i\delta} \right| \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

ここで , $i = 1, 2, 3$ とし , α_1, α_2 はマヨラナ CP 位相である . 式 (2.2.9) を見て分かる通り , $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ はニュートリノ質量階層構造によって異なる値を取る . 図 2.2.4 に , その関係を示す .

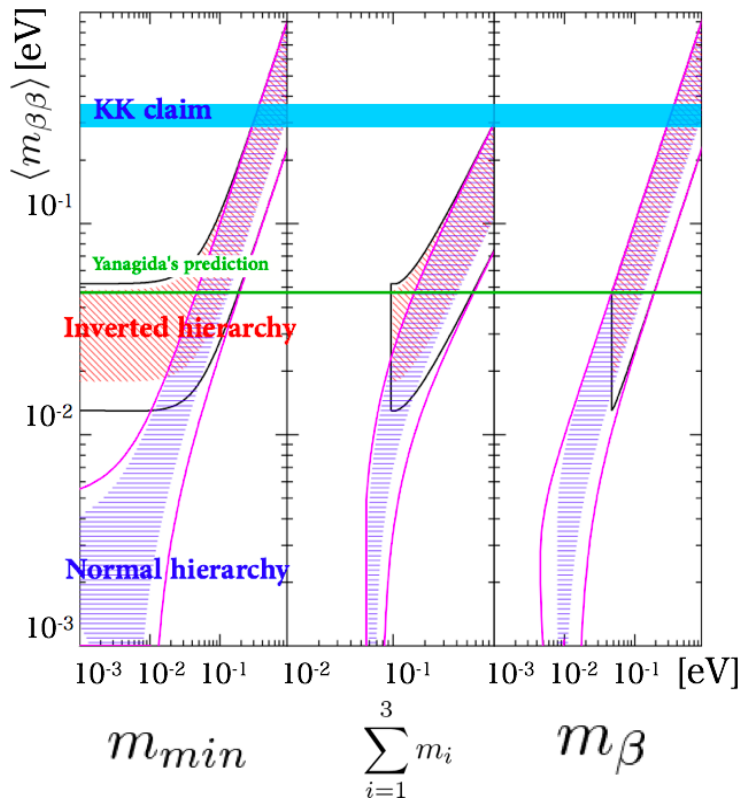


図 2.2.4: ニュートリノ質量と質量階層構造の関係 [1] . 赤斜線と青斜線の領域はそれぞれ逆階層構造と正常階層構造におけるマヨラナ CP 位相による不定性を含んだ制限値を表す . 実線は更に振動パラメータの 3σ のエラーを付加したものである . 水色の領域は KK claim, 緑色の実線は Yanagida's prediction を表す .

ここで , m_{min} は最も小さな質量固有値 , $\sum_i m_i$ は各質量固有値の和 , m_{β} はベータ崩壊における電子エネルギースペクトルの精密測定により求まるニュートリノ平均質量を表す .

図中の水色の領域は , $0\nu\beta\beta$ を観測したことを唯一主張する (KK claim) 実験から得られた $m_{\beta\beta}$ であり ,

$$m_{\beta\beta} = 0.32 \pm 0.03\text{eV} \quad (2.2.10)$$

となっている [23] . この値は , 実験によるエラーの他に , $G^{0\nu}(Q, Z)$ と $M^{0\nu}$ の理論的な不定性を含む . なお , この主張に対しては , バックグラウンドの評価等を理由に懐疑的な意見が多い .

また , 図中の緑色の実線は柳田勉氏の理論によって予想される値で , 逆階層構造の領域である

$$m_{\beta\beta} = 47 \pm 1 \text{meV} \quad (2.2.11)$$

となっている [21] .

2.2.3 ニュートリノレス 2 重ベータ崩壊探査実験

$0\nu\beta\beta$ 観測実験は , ニュートリノのマヨラナ性と有効質量を検証するための唯一現実的な実験である . しかし , $0\nu\beta\beta$ は極めて稀な現象であるため , 観測は非常に困難である . そこで , 以下の項目を満たす実験が望ましい .

- 大量の二重ベータ崩壊核を用いる
- 極低バックグラウンド環境
- 高いエネルギー分解能の検出器

極めて稀な現象を捉える実験では , 大量の線源を用いて極低バックグラウンド環境下で行う事は一般的である . しかし , $0\nu\beta\beta$ 観測実験では , 更に高いエネルギー分解能の検出器を用いる必要がある . これは , 図 2.2.3 を見て分かる通り , $0\nu\beta\beta$ の線スペクトルは $2\nu\beta\beta$ の連続スペクトルと近接しているため , 検出器のエネルギー分解能の限界により , $2\nu\beta\beta$ 事象がバックグラウンドとなってしまうためである . よって , この $2\nu\beta\beta$ バックグラウンド低減のために , 検出器のエネルギー分解能は実験の良し悪しの指標となり得る .

$0\nu\beta\beta$ 観測実験は , その重要性から世界中で行われている . 以下に , 特筆すべき実験を列挙する .

Heidelberg-Moscow

Heidelberg-Moscow は , イタリアの Gran Sasso underground laboratory(LNGS) にて行われた ^{76}Ge を用いた 2 重ベータ崩壊実験である . 86% に濃縮した ^{76}Ge を 11.3kg 含む Ge 結晶を 2 重ベータ崩壊源かつ半導体検出器として用いることで , 低バックグラウンドで高いエネルギー分解能を実現している . 2001 年には ,

$$\begin{aligned} T_{1/2}^{0\nu} &> 1.9 \times 10^{25} \text{year} \\ \langle m_{\beta\beta} \rangle &< 0.32 \pm 0.03 \text{eV} \end{aligned} \quad (2.2.12)$$

という高い感度で $0\nu\beta\beta$ の半減期と有効質量の制限を与えている [24] .

しかし , 2004 年に , 同実験グループの一部の研究者により $0\nu\beta\beta$ を観測したという結果が発表されている . その後 , 2006 年には結果が更新され , 6σ の信頼度での観測が主張されている [23] .

この主張は、KK-claim と呼ばれている。図 2.2.5 に、KK-claim における ^{76}Ge の $0\nu\beta\beta$ 事象のスペクトルを示す。KK-claim における ^{76}Ge の $0\nu\beta\beta$ 半減期と有効質量は、

$$\begin{aligned} T_{1/2}^{0\nu} &= 2.23_{-0.31}^{+0.44} \times 10^{24} \text{year} \\ \langle m_{\beta\beta} \rangle &= 0.32 \pm 0.03 \text{eV} \end{aligned} \quad (2.2.13)$$

となっている [23]。

しかし、この実験結果にはバックグラウンドの見積における疑問が存在し、懐疑的な意見が多い。そのため、 $0\nu\beta\beta$ 観測実験における最初の課題として、KK-claim を検証することが望まれている。

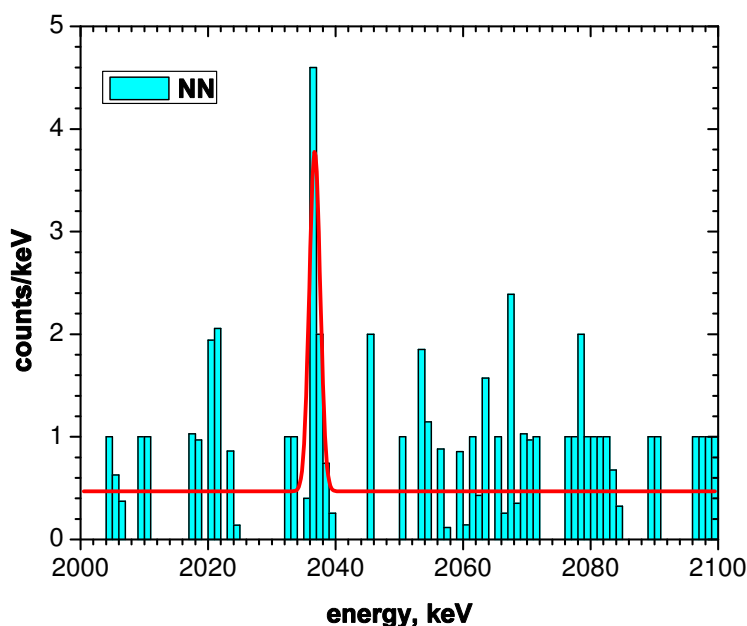


図 2.2.5: KK-claim における ^{76}Ge の $0\nu\beta\beta$ 事象

EXO-200

EXO-200 はアメリカの WIPP laboratory で行われている ^{136}Xe を用いた 2 重ベータ崩壊実験である。 ^{136}Xe のシンチレーション光と、Time Projection Chamber (TPC) による荷電粒子を捉えることで、 $\sigma/E = 1.53\%$ (at Q-value) の高いエネルギー分解能と粒子識別能力を備えている。2014 年に発表した結果では、

$$\begin{aligned} T_{1/2}^{0\nu} &> 1.1 \times 10^{25} \text{year} \\ \langle m_{\beta\beta} \rangle &< 190 \sim 450 \text{meV} \end{aligned} \quad (2.2.14)$$

という制限が得られている [9]。

GERDA

GERDA はイタリアの LNGS で行われている ^{76}Ge を用いた 2 重ベータ崩壊実験である . Heidelberg-Moscow 実験と IGEX 実験で用いられていた 17.6kg の ^{76}Ge を用いて , Heidelberg-Moscow 実験と同一核種である ^{76}Ge を用いているため , 核行列要素等に依存しない直接的な KK-claim の検証が可能である . 2013 年に発表した結果では ,

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.1 \times 10^{25} \text{year} \quad (2.2.15)$$

という制限が得られている [15] . この結果は , 2004 年に発表された Heidelberg-Moscow における claim を強く棄却している .

2.3 超新星ニュートリノ

超新星ニュートリノ観測は KamLAND2 に限ったものではないが、本研究で開発する FEE は、大容量のオンボードメモリを有するため、地球近傍で発生した超新星爆発による爆発的なニュートリノ事象を全て記録する事が可能である。そのため、高統計の超新星ニュートリノによる超新星爆発機構の解明が可能となる。本節では、ニュートリノ検出によって解明が期待されている超新星爆発機構について記述する。

2.3.1 超新星爆発によるニュートリノ生成

超新星爆発とは、大質量の恒星がその一生を終える際に起こす大爆発である。超新星爆発には主に、連星系の合体によるものと重力崩壊によるものの2種類が存在するが、本節ではニュートリノ物理学に関わりの深い後者を取り扱う。

太陽質量の8～10倍の恒星は、進化過程で Fe 等の重元素を生成し、コア中心に蓄積していく。この恒星のコアは、電子の Fermi 縮退圧によって支えられている。重元素の蓄積によりコア中心の密度が上昇していき、ある臨界密度に達すると、重元素への電子捕獲が盛んに行われるようになる。これにより、電子の縮退圧は減少し、コアは自重により重力崩壊する。

太陽質量の10倍以上の恒星は、一般にコア中心の温度が高い。この恒星のコアは、Fe の圧力によって支えられている。恒星進化に伴い、コア中心の温度は上昇していき、 10^{10} K に達すると、高エネルギーの光による Fe 分解が生じるようになる。コアを支えるエネルギー源となっていた Fe の分解により、コアは自重により重力崩壊する。

コアの崩壊は、強い相互作用による斥力が働く密度に達した時点で停止する。そこで、崩壊を停止したコア内殻に対して落ち込むコア外殻は、高密度のコア内殻表面で跳ね返り、衝撃波を生成する。この衝撃波がコアの外側に突き抜けることで、超新星爆発が生じる。

コアの重力崩壊が始まると、コアの密度・温度は上昇し、電子捕獲反応が始まり、膨大な ν_e が生成される。しかし、コアの密度が高いために、生成された ν_e は散乱され、コア外部にほとんど放出されずに閉じ込められてしまう。このニュートリノ閉じ込め領域はニュートリノ球と呼ばれる。

衝撃波はコア内部の原子核を陽子と中性子に破壊しながら進む。そのため、衝撃波が通過した後は陽子による電子捕獲が行われ、中性子と ν_e が生成される。衝撃波がニュートリノ球を通過すると、ニュートリノ放出を阻害していた原子核が破壊され、 ν_e は一気にコア外側へ放出される。これによる ν_e 放出は中性子化バーストと呼ばれる。

衝撃波がコア外殻を通過すると、その後には中性子や陽子、電子・陽電子が残る。これらによる電子捕獲、陽電子捕獲、電子・陽電子対消滅により、3世代のニュートリノ・反ニュートリノが全て生成される。衝撃波通過後の物質は、原始中性子へ降着し、重力エネルギーは熱エネルギーに変換される。この熱エネルギーをニュートリノによって持ち出される。

更に、残された原始中性子星には、内部に熱平衡状態のニュートリノが存在する。このニュートリノはゆっくりと放出され、原始中性子星から熱エネルギーとレプトン数を持ち出す。その結果、中性子星が生成される。

なお、衝撃波はコア外殻表面に達した後、恒星の外層を吹き飛ばす。この外層は 10^7 km 以上の厚みを持つため、衝撃波が外層を吹き飛ばして光が放出されるまでに数時間を要する。

2.3.2 超新星モデル

超新星爆発の数値シミュレーションにより、衝撃波はコア内部でエネルギーを使い果たし、コア表面に達する前に消滅してしまうことが分かっている。これを受けて、ニュートリノによる陽子・中性子の加熱反応により、衝撃波を復活させる Delayed explosion というモデルが提唱されている [20]。その後、このモデルに加え、コア内部の物質の相互作用のより精密な計算を取り入れる事によって、衝撃波を復活させることに成功している [18]。

現在、以上のモデルを基本として種々の原子核・素粒子反応を高精度で計算する研究が行われている。その一例として、これら複数の計算の結果から得られる、超新星爆発から原始中性子星冷却までの一貫した超新星ニュートリノのルミノシティと平均エネルギーを図 2.3.1 に示す [13]。

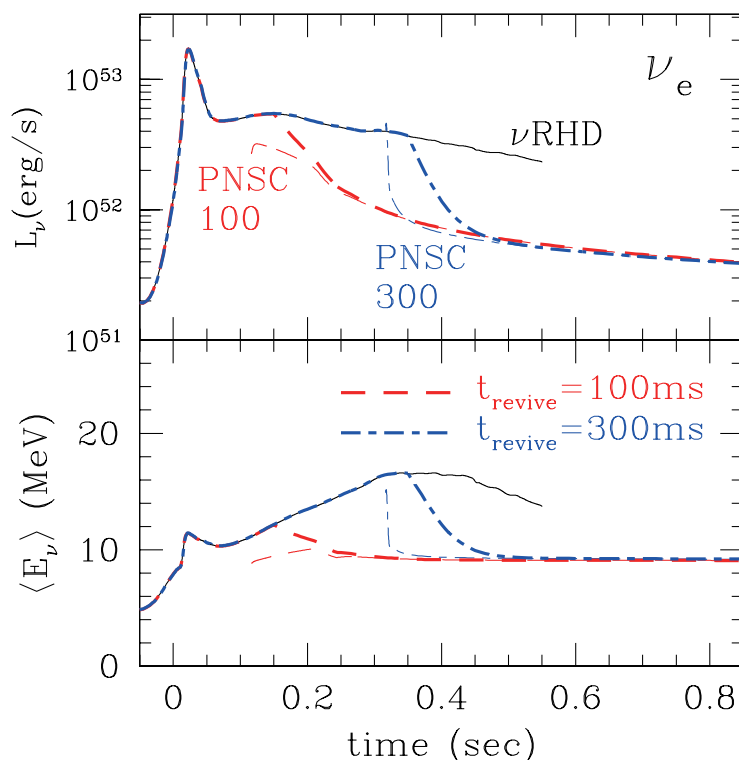


図 2.3.1: 中里氏による超新星ニュートリノのルミノシティ(上図)と平均エネルギー(下図)の時間変化。コアバウンスのタイミングを時間軸の基準としている。 $13 M_{\odot}$, 0.02 Fe/H の超新星親星について、ダイナミカルフェイズのニュートリノと原始中性子冷却フェイズのニュートリノを衝撃波復活のタイミング(赤線: 100 msec, 青線: 300 msec)で内挿により連結している。

また、超新星爆発の流体的なシミュレーション等も行われている。その中で、近年注目されている物が、定在降着衝撃波不安定性 (SASI; Standing Accretion Shock Instability) である。SASI は、停滞した衝撃波と原始中性子星間で渦と音波が繰り返し反響し合い、図 2.3.2[22] の様に衝撃

波を歪ませていく現象である．これにより，ニュートリノ加熱効率が上昇し，爆発に繋がる．この際，ニュートリノ放出に特徴的な振動が反映される(図 2.3.3[8])．もし，このようなニュートリノの事象変化を地上検出器で捉えることが出来れば，超新星爆発のダイナミクス解明に大きく貢献することが出来る．

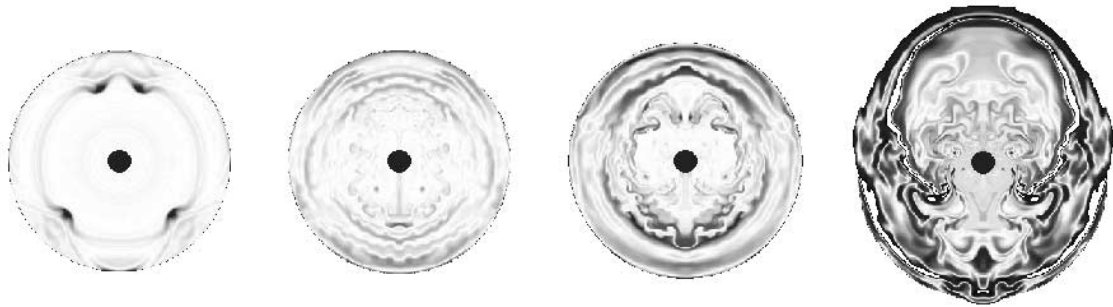


図 2.3.2: 左図から右図にかけて SASI による衝撃波面の時間変化の様子．最右図は約 300 msec 時の様子．

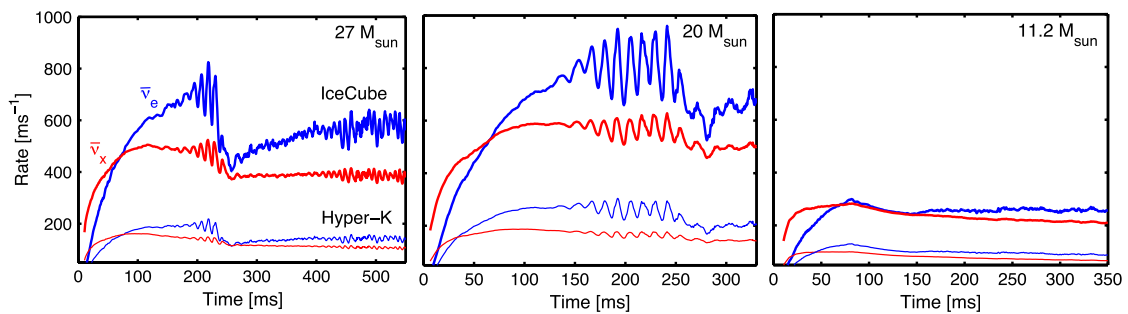


図 2.3.3: SASI 表面側に面している際の IceCube(青色) と Hyper-Kamiokande(赤色) において期待される超新星ニュートリノ事象レート． $\bar{\nu}_x$ は $\bar{\nu}_e$ 以外を表す．超新星親星質量は 27, 20, 11.2 M_{\odot} を仮定している．

3 KamLAND 実験

KamLAND(Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) は神岡鉱山内に置かれた液体シンチレータを用いた反電子ニュートリノ検出器である。本章では、KamLAND におけるニュートリノの検出原理から始まり、事象再構成の仕組みを述べる。更に、KamLAND によって得られた実験結果と現在進行中の 2 重ベータ崩壊実験 KamLAND-Zen と、将来計画についても記述する。

3.1 KamLAND 検出器の構造

KamLAND 検出器は岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山内に置かれ、池ノ山の山頂下 1,000m に位置している。これにより、宇宙線ミュオンレートを地上の 10 万分の 1 に低減している。図 3.1.1 に KamLAND 検出器の構造を示す。

ニュートリノターゲットには、1,000ton と世界最大量の液体シンチレータを用いている。液体シンチレータは直径 13m のナイロン製バルーンにより密閉されており、バルーンの周りはバッファオイルで満たされている。バッファオイルはシンチレーション光を放出しない性質を持ち、放射性不純物の多い光電子増倍管付近のバックグラウンド事象を低減している。光センサとしては、1325 本の 17inch 径と 554 本の 20inch 径の合計 1879 本の光電子増倍管 (PMT) を用いてシンチレーション光を電気信号に変換している。更に、これらは直径 18m のステンレス製タンクで仕切られている。以上の構造を内部検出器 (ID ; Inner Detector) と呼んでいる。

内部検出器の外側には純水 3,200ton を用いた円柱形の外部検出器 (OD ; Outer Detector) が存在する。外部検出器の役割は、外部由来のバックグラウンドの低減と、宇宙線ミュオン識別のための水チェレンコフ検出器である。チェレンコフ光は 225 本の 20inch PMT を用いて検出される。外部検出器の容器は高さ 20m、直径 20m の円柱形をしており、ステンレス製となっている。

更に、検出器上部にはドームエリアと呼ばれる空間が存在し、PMT 信号を所得するためのフロントエンドエレクトロニクスが置かれたエレクトロニクスハット (E-Hut) や、バルーン開口部分に直結するチムニーが存在する。

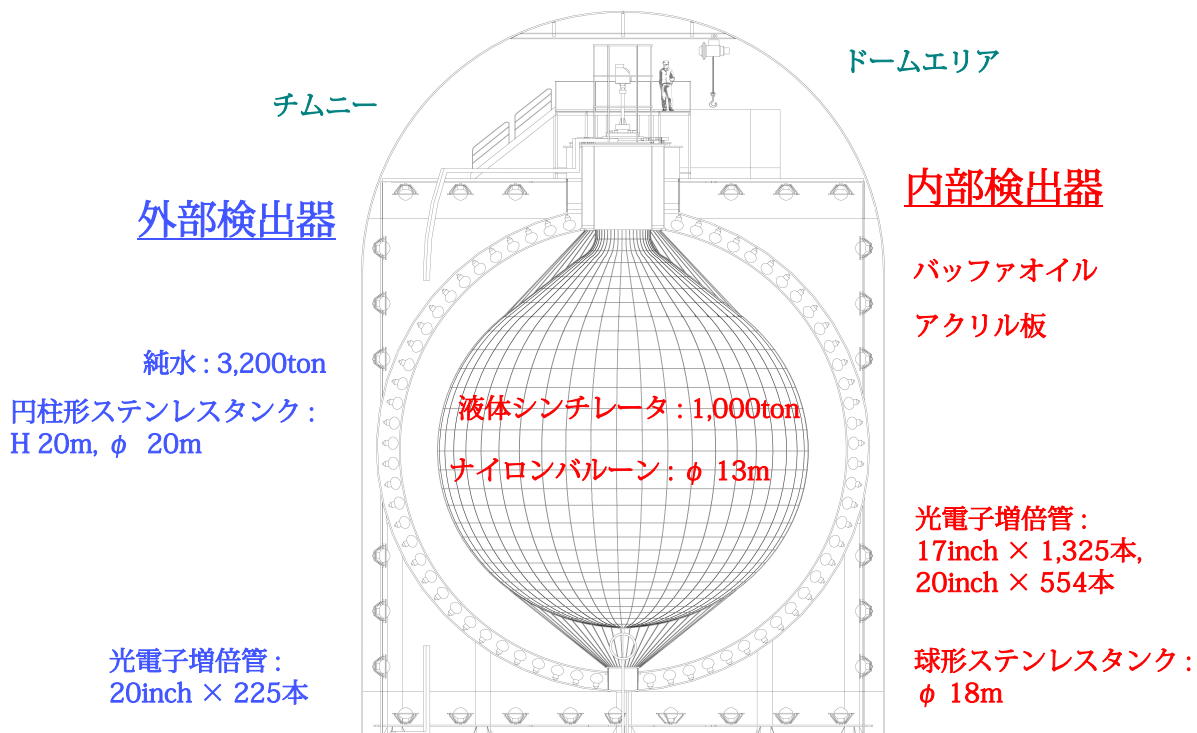


図 3.1.1: KamLAND 検出器の構造

3.1.1 液体シンチレータ

KamLAND では、ニュートリノターゲットとして液体シンチレータを用いている。液体シンチレータは放射線に反応して発光する。この発光をシンチレーション光と呼ぶ。シンチレーション光はチェレンコフ光の約 100 倍の強度を持つ。そのため、Super-Kamiokande 等のチェレンコフ検出器と比較して、低エネルギーの物理事象を観測することが出来る。

現在の KamLAND で用いている液体シンチレータは KamLAND グループが独自に開発したものである。以下にその組成を示す。

表 2: KamLAND 液体シンチレータの組成

物質名	組成式	密度 (g/cm ³)	体積組成
N-12(ドデカン)	C ₁₂ H ₂₆	0.749	80%
PC(1,2,4-トリメチルベンゼン)	C ₉ H ₁₂	0.875	20%
PPO(2,5-ジフェニオキサゾール)	C ₁₅ H ₁₁ NO	-	1.36g/l
合計 (KamLAND 液体シンチレータ)	-	0.77721	-

PC は放射線のエネルギーを吸収し、PPO に伝達する役割を担っている。PPO は発光剤であり、受け取ったエネルギーを元に発光する。本来であれば、以上の 2 成分のみで液体シンチレータとしての役割を果たせるが、1,000ton の大規模の検出器に用いる場合、シンチレーション光は PMT

に届く前に途中で減衰してしまう。そこで、透過率の高い N-12 を用いて希釈することで、液体シンチレータ組成を KamLAND に最適化している。その結果、KamLAND 液体シンチレータの発光量は 8300photon/MeV となっており、これに集光率と PMT の量子効率を掛け合わせることで、17inch PMT において 300p.e./MeV (p.e. : photo electron), 17inch + 20inch PMT において 500p.e./MeV の信号を得ている。

3.1.2 ナイロンバルーン

KamLAND 液体シンチレータは厚さ 135 μ m, 直径 13m の球状のナイロン製バルーンによって密閉されている。バルーンは 44 枚のゴアシートを溶着することで形成されている。ゴアシートは 3 層のナイロンフィルムを EVOH(エパール:エチレン-ビニルアルコール共重合体) で両側から挟み込む 5 層構造となっている。これらの素材は光透過度, 強度, 有機溶剤耐性が優れており, 特に EVOH は極性の弱い気体の遮蔽率が高いため, 外部からの Rn ガス侵入を防いでいる。ここで, バルーンは強度の高いケブラー製のロープを 44 本用いて吊るされており, このロープをロードセルに接続することで, 常に重量を監視している。バルーン及びロープの放射性不純物の含有量は少なくなっており, これは KamLAND の低バックグラウンド環境を構築する上で重要な項目である (表 3)。

表 3: バルーン及びロープの放射性不純物含有量

放射性不純物	ナイロンバルーン	ケブラー製ロープ
^{238}U	0.018 ppb (0.02 Bq)	0.08 ppb (0.1 Bq)
^{232}Th	0.014 ppb (0.006 Bq)	0.8 ppb (0.33 Bq)
^{40}K	0.27 ppb (7.2 Bq)	1.2 ppb (31 Bq)

3.1.3 光電子増倍管 (PMT)

KamLAND の内部検出器には, 17inch PMT(浜松ホトニクス社 R7250) を 1,325 本と 20inch PMT(浜松ホトニクス社 R3250) を 554 本と, 合計 1879 本の PMT を用いている。図 3.1.2 にそれぞれの PMT の構造を, 図 3.1.3 と表 4 に 17inch PMT のプリーダ回路の構造を示す。

ここで, KamLAND で用いている 20inch PMT はかつて Kamiokande で用いられていたものに耐油処理を施したものである。20inch PMT のダイノード構造には大口径に適した Venetian-Blind 型が用いられている。

一方, 17inch PMT は KamLAND 用に新たに開発されたものである。17inch PMT のダイノード構造にはより時間分解能及びエネルギー分解能の高い Line-Focus 型を用いている。ただし, 17inch PMT の実際の口径は 20inch PMT とほぼ同一である。17inch の名は, 時間分解能の低い光電面端の部分をマスクし, 中心の 17inch 部分のみを用いている事に由来する。この結果, 光電効果の生じる時間のばらつきを表す指標である TTS(Transit Time Spread) は, 20inch PMT で 6 nsec であるのに対し, 17inch PMT では 3.5 nsec と向上している (図 3.1.4)。光電面カバー率は 17inch

PMT が 22% , 20inch PMT が 12% の合計 34% となっている . また , 量子効率は 350~400 nm の光波長領域で最大となっている . 例として , 図 3.1.5 に 17inch PMT の光波長に対する量子効率を示す .

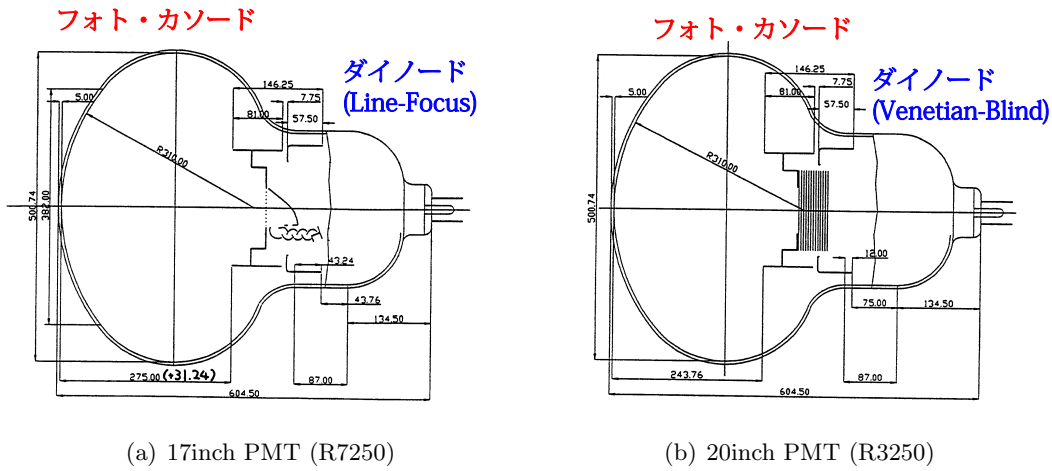


図 3.1.2: 17inch, 20inch PMT の構造 [30]

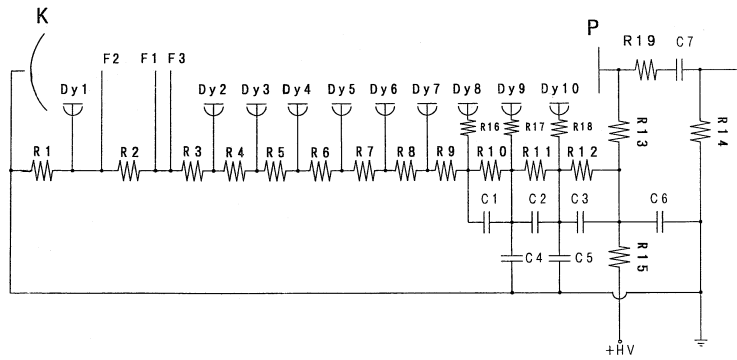


図 3.1.3: 17inch PMT プリーダ回路 [30]

表 4: 17inch PMT ブリーダ回路の抵抗値及びキャパシタ容量 [30]

PRT No.	Description	PRT No.	Description
R1	2.22 M Ω	R12	480 k Ω
R2	72 k Ω	R13	100 k Ω
R3	408 k Ω	R15	10 k Ω
R4	600 k Ω	R14, R16 ~ R18	50 Ω
R5	396 k Ω	R19	75 Ω
R6	204 k Ω	C1 ~ C3	10 nF
R7 ~ R9	120 k Ω	C4, C5	1000 pF
R10	240 k Ω	C6, C7	4700 pF
R11	360 k Ω		

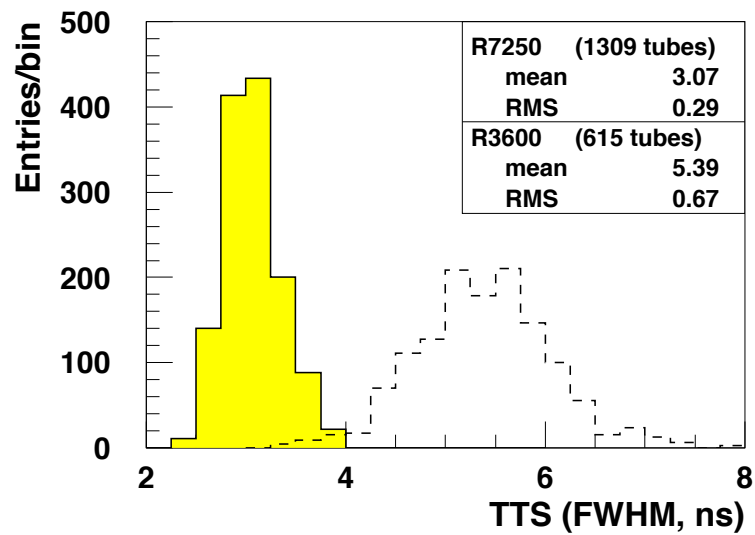


図 3.1.4: 浜松ホトニクス社による 17inch PMT(R7250) と 20inch PMT(R3600) の TTS 比較 [30]

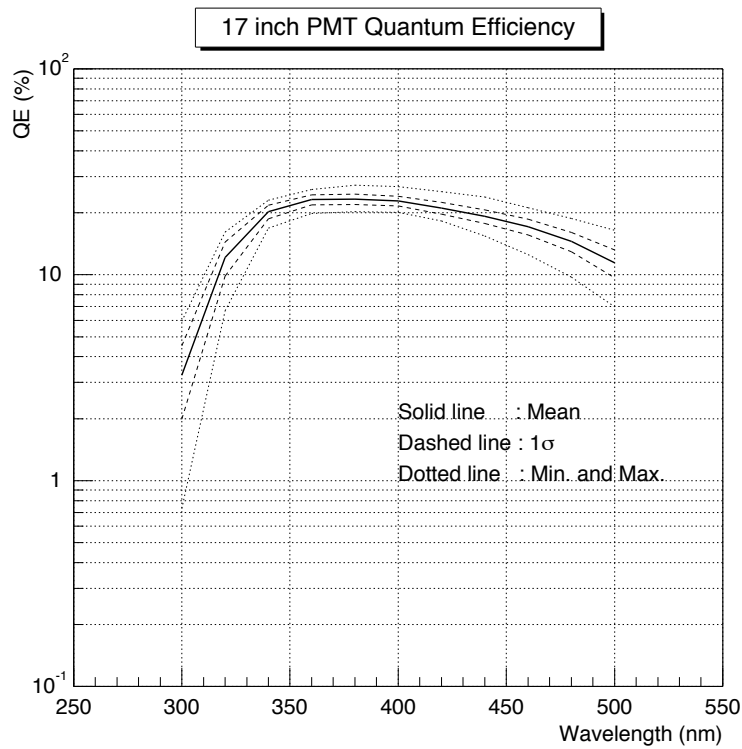


図 3.1.5: 各光波長に対する 17inch PMT(R3750) の量子効率 (QE ; Quantum Efficiency)[30]

3.1.4 外部検出器

KamLAND の外部検出器は、内部検出器を覆うように高さ 20m、直径 20m の円柱形の構造をしている。外部検出器は 3,200ton の純水で満たされており、荷電粒子が作るチェレンコフ光を 225 本の 20inch PMT と 8 本の 8inch PMT、5 本の 6inch PMT で捉える仕組みになっている。これにより、宇宙線ミューオンを VETO している。その他、外部 γ 線や高速中性子等の環境放射線を遮断する役割の他、 10°C 程度の純水の 8ton/hour の流量により内部検出器を冷却し、温度を一定に保つ役割を果たしている。

3.2 ニュートリノの検出原理

3.2.1 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出

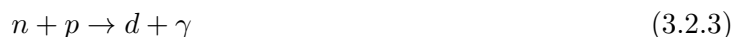
KamLAND では、式 (3.2.1) の逆ベータ崩壊反応を利用して、検出器内に飛来した反電子ニュートリノを検出している。



この反応では、飛来した反電子ニュートリノと液体シンチレータ中の陽子が反応し、中性子と陽電子が生成される。先ず、生成された陽電子は液体シンチレータにエネルギーを与えた後、直ちに液体シンチレータ中の電子と対消滅 (式 (3.2.2)) し、0.511 MeV の γ 線を 2 本放出する。



また、生成された熱中性子は、液体シンチレータ中の原子核と弾性散乱した後熱中性子となり、207.5 μsec の寿命で陽子に捕獲されて重水素となり、この際に 2.2 MeV の γ 線が放出される (式 (3.2.3))。



以上の様子を、図 3.2.1 に示す。この反応では、電子陽電子対消滅による先発信号と中性子捕獲による後発信号が発生する。我々は、先発信号と後発信号を遅延同時計測することで、反電子ニュートリノ事象とバックグラウンド事象を高精度で識別している。

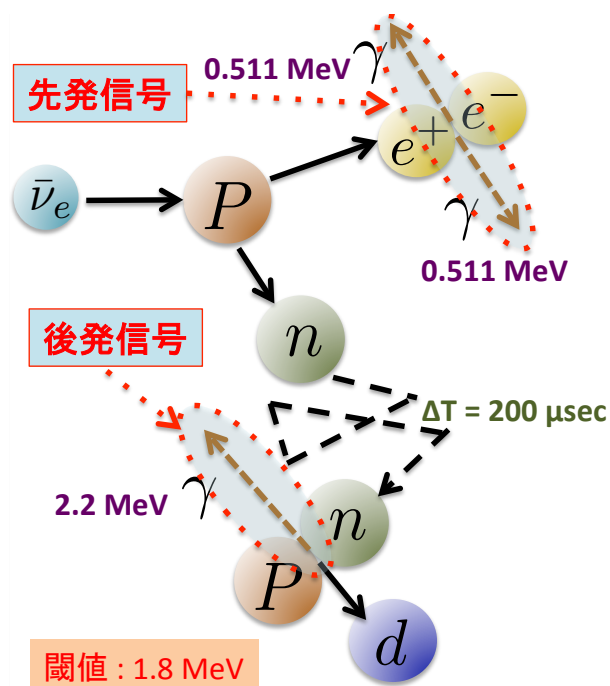


図 3.2.1: 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出原理

逆ベータ崩壊閾値

ここで、逆ベータ崩壊を起こす反電子ニュートリノには、エネルギーの閾値が存在する。これは、式(3.2.1)に注目すると、反応前の実験室系の s パラメータは、反電子ニュートリノの質量を 0 と近似して、

$$s = m_p^2 + 2E_{\bar{\nu}_e}^{thr} m_p \quad (3.2.4)$$

反応後の重心系の s パラメータは、閾値を考える上で中性子と陽電子の運動エネルギーを 0 とすると、

$$s = m_n + m_{e^+} + 2m_n m_{e^+} \quad (3.2.5)$$

となる。 s パラメータは、系に関わらず、反応の前後で保存するはずなので、これより反電子ニュートリノエネルギーの逆ベータ崩壊閾値(実験室系)

$$\begin{aligned} E_{\bar{\nu}_e}^{thr} &= \frac{1}{2m_p} (m_n^2 + m_{e^+}^2 + 2m_n m_{e^+} - m_p^2) \\ &= 1.806 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

が得られる。

逆ベータ崩壊反応断面積 [32]

逆ベータ崩壊の行列要素 \mathcal{M} は、

$$\mathcal{M} = \frac{G_F \cos \theta_C}{\sqrt{2}} \left[\bar{u}_n \left(\gamma_u f - \gamma_u \gamma_5 g - \frac{if_2}{2M} \sigma_{\mu\nu} q^\nu \right) u_p \right] \times [\bar{\nu}_{\bar{\nu}_e} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) v_{e^+}] \quad (3.2.7)$$

と表される。ここで、

$$G_F = 1.166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \text{ (フェルミ結合定数)}$$

$$f = 1.0 \text{ (ベクトル結合定数)}$$

$$g = 1.26 \text{ (軸性ベクトル結合定数)}$$

$$f_2 = \mu_p - \mu_n - 1.0 = 2.793 + 1.913 - 1.0 = 3.706 \text{ (核子軸性ベクトル磁気モーメント)}$$

$$\cos \theta_C = 0.974 \text{ (カビボ角)}$$

である。 M を核子の平均質量として、陽電子エネルギーの $1/M$ における第 0 次近似は、

$$E_e^{(0)} = E_{\bar{\nu}_e} - \Delta \quad (3.2.8)$$

となる。ここで、 $\Delta \equiv m_n - m_p$ である。ここで、 $1/M$ の各オーダーにおける陽電子運動量と陽電子速度をそれぞれ、 $\sqrt{E_{e^+}^2 - m_{e^+}^2}$ 、 $v_{e^+} = p_{e^+}/E_{e^+}$ と書くと、逆ベータ崩壊の微分反応断面積の第 0 近似は、

$$\left(\frac{d\sigma(E_{\bar{\nu}_e})}{d\cos\theta_{e^+}} \right) = \frac{\sigma_0}{2} [(f^2 + 3g^2) + (f^2 + g^2) v_{e^+}^0 \cos\theta_{e^+}] E_{e^+}^{(0)} p_{e^+}^{(0)} \quad (3.2.9)$$

と表される．ここで， σ_0 はエネルギーに独立な内部輻射補正を含む規格化定数であり，

$$\sigma_0 = \frac{G_F^2 \cos^2 \theta_C}{\pi} \left(1 + \delta_{inner}^{rad}\right) \quad (3.2.10)$$

と書かれる．ここで， $\delta_{inner}^{rad} \simeq 0.024$ である．よって，式 (3.2.9) より，全反応断面積 $\sigma_{tot}^{(0)}$ の第 0 近似を以下の様に求めることが出来る．

$$\begin{aligned} \sigma_{tot}^{(0)} &= \sigma_0 (f^2 + 3g^2) E_{e^+}^{(0)} p_{e^+}^{(0)} \\ &= 0.0952 \left(\frac{E_{e^+}^{(0)} p_{e^+}^{(0)}}{1 \text{ MeV}^2} \right) \times 10^{-42} \text{ cm}^2 \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

また，内部輻射補正は中性子のベータ崩壊率にも同様に影響しているため，全反応断面積は，

$$\sigma_{tot}^{(0)} = \frac{2\pi/m_e^5}{f_{p.s.}^R \tau_n} E_{e^+}^{(0)} p_{e^+}^{(0)} \quad (3.2.12)$$

と書くことも出来る．ここで， τ_n は中性子寿命， $f_{p.s.}^R = 1.7152$ は位相空間因子（クーロン，弱磁性，反跳，外部輻射補正含む）である．

次に，陽電子エネルギーの $1/M$ における第 1 次近似を考えると，散乱角 θ_{e^+} に依存する形で以下のように書かれる．

$$E_{e^+}^{(1)} = E_{e^+}^{(0)} \left[1 - \frac{E_{\bar{\nu}_e}}{M} \left(1 - v_{e^+}^{(0)} \cos \theta_{e^+} \right) \right] - \frac{y^2}{M} \quad (3.2.13)$$

ここで， $y^2 \equiv (\Delta^2 - m_e^2)/2$ である．よって，微分反応断面積の $1/M$ における第 1 次近似は，

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\sigma}{d \cos \theta_{e^+}} \right)^{(1)} &= \frac{\sigma_0}{2} \left[(f^2 + 3g^2) + (f^2 + g^2) v_{e^+}^{(1)} \cos \theta_{e^+} \right] E_{e^+}^{(1)} p_{e^+}^{(1)} \\ &\quad - \frac{\sigma_0}{2} \left[\frac{\Gamma}{M} \right] E_{e^+}^{(0)} p_{e^+}^{(0)} \end{aligned} \quad (3.2.14)$$

と表すことが出来る．ここで，

$$\begin{aligned} \Gamma &= 2(f + f_2)g \left[\left(2E_{e^+}^{(0)} + \Delta \right) \left(1 - v_{e^+}^{(0)} \cos \theta_{e^+} - \frac{m_{e^+}^2}{E_{e^+}^{(0)}} \right) \right] \\ &\quad + (f^2 + g^2) \left[\Delta \left(1 + v_{e^+}^{(0)} \cos \theta_{e^+} \right) + \frac{m_{e^+}^2}{E_{e^+}^{(0)}} \right] \\ &\quad + (f^2 + 3g^2) \left[\left(E_{e^+}^{(0)} + \Delta \right) \left(1 - \frac{1}{v_{e^+}^{(0)}} \cos \theta_{e^+} - \Delta \right) \right] \\ &\quad + (f^2 - g^2) \left[\left(E_{e^+}^{(0)} + \Delta \right) \left(1 - \frac{1}{v_{e^+}^{(0)}} \cos \theta_{e^+} - \Delta \right) \right] v_{e^+}^{(0)} \cos \theta_{e^+} \end{aligned} \quad (3.2.15)$$

である．以上より， $O(1/M)$ を考慮した逆ベータ崩壊の全反応断面積は，

$$\sigma(E_{\bar{\nu}_e}) = \left[\int_{-1}^1 \left(\frac{d\sigma(E_{\bar{\nu}_e})}{d \cos \theta} \right)^{(1)} d \cos \theta \right] \left(1 + \delta_{outer}^{rad} \right) \quad (3.2.16)$$

と表される．ここで， δ_{outer}^{rad} は，エネルギーに依存する外部輻射補正である．式 (3.2.16) で求められる，反電子ニュートリノのエネルギーに対する逆ベータ崩壊の全反応断面積を図 3.2.2 に示す．

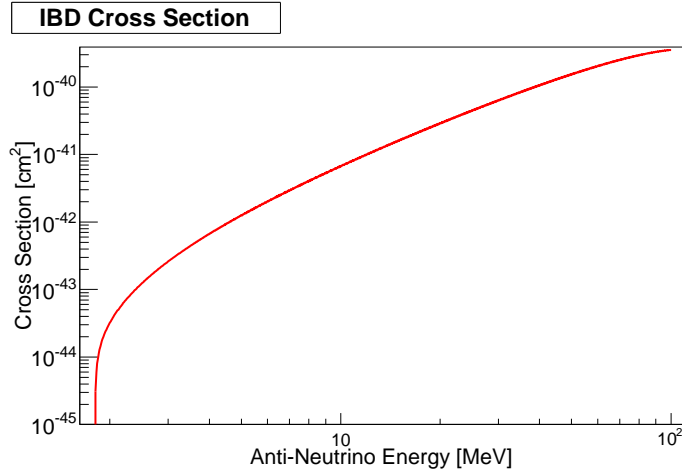


図 3.2.2: 逆ベータ崩壊の反応断面積

3.2.2 電子散乱によるニュートリノの検出

KamLANDで検出可能なニュートリノの反応として、電子散乱が存在する。これは、式(3.2.17)の弾性散乱として表される。

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^- \quad (3.2.17)$$

この反応は、検出器に飛来したニュートリノにより弾性散乱された液体シンチレータ中の電子が、液体シンチレータにエネルギーを与えることで、検出が可能となる。逆ベータ崩壊反応と違い、この反応は遅延同時計測を行うことが出来ない。そのため、バックグラウンド事象との識別は困難である。しかし、逆ベータ崩壊反応の様なニュートリノエネルギー閾値を持たないため、極めて低エネルギーのニュートリノを検出することが可能である。

ここで、式(3.2.17)の微分反応断面積は次式で表される。

$$\frac{d\sigma}{dT_e} = \frac{G_F^2 m_e}{2\pi} \left[A + B \left(1 - \frac{T_e}{E_\nu}\right)^2 + C \frac{m_e T_e}{E_\nu^2} \right] \quad (3.2.18)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A &\equiv (g_V + g_A)^2 \\ B &\equiv (g_V - g_A)^2 \\ C &\equiv (g_A^2 - g_V^2) \\ (g_V, g_A) &\equiv \begin{cases} (2 \sin^2 \theta_W + \frac{1}{2}, \frac{1}{2}) & \text{for } (\nu_e) \\ (2 \sin^2 \theta_W - \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}) & \text{for } (\nu_\mu, \nu_\tau) \end{cases} \end{aligned}$$

である。 θ_W はワインバーグ角である。単ループの輻射補正を考慮すると、式(3.2.17)中の係数は、

$$\frac{G_F^2 m_e}{2\pi} = 4.31 \times 10^{-45} \text{ cm}^2 \text{ MeV}^{-1} \quad (3.2.19)$$

となる．よって，電子の運動エネルギー T_e に関して 0 から $T_{e \max}$ まで積分することで，式 (3.2.17) 全反応断面積は，

$$\sigma(E_\nu) = \begin{cases} 8.96 \times 10^{-44} \frac{E_\nu(\text{MeV})}{10(\text{MeV})} \text{cm}^2 \text{ for } (\nu_e) \\ 1.58 \times 10^{-44} \frac{E_\nu(\text{MeV})}{10(\text{MeV})} \text{cm}^2 \text{ for } (\nu_\mu, \nu_\tau) \end{cases} \quad (3.2.20)$$

と表される．ここで， ν_μ, ν_τ の反応は中性カレントのみであるのに対し， ν_e の反応は中性カレントに加え荷電カレントが存在する．そのため， ν_μ, ν_τ の反応よりも ν_e の反応の方が散乱断面積が大きくなる．

3.2.3 陽子散乱によるニュートリノの検出

KamLAND で検出可能な反応として，陽子散乱によるものがある．この反応は，式 (3.2.21) で表される．

$$\nu + p \rightarrow \nu + p \quad (3.2.21)$$

この反応は，検出器に飛来したニュートリノにより弾性散乱された陽子が，液体シンチレータ中にエネルギーを与えることで，検出が可能となる．前述の電子散乱同様，式 (3.2.21) の反応は遅延同時計測が出来ない，反応にニュートリノエネルギー閾値を持たないという特徴がある．

ここで，式 (3.2.21) の微分反応断面積は次式で表される [2] ．

$$\frac{d\sigma}{dT_p} = \frac{G_F^2 M_p}{2\pi E_\nu^2} \left[(c_V + c_A)^2 E_\nu^2 + (c_V + c_A)^2 (E_\nu - T_p)^2 - (c_V^2 - c_A^2) M_p T_p \right] \quad (3.2.22)$$

ここで，

$$c_V \equiv \frac{1 - 4 \sin^2 \theta_W}{2} = 0.04$$

$$c_A \equiv \frac{1.27}{2}$$

である．因みに，反ニュートリノに関しては，式 (3.2.22) 中で， $c_A \rightarrow -c_A$ と書き換えることで表される．

ここで， E_ν/M_p における第 0 次近似を考えると， $(E_\nu - T_p)^2 \simeq E_\nu^2$ とすることが出来る．すると，式 (3.2.22) は以下の式で表すことが出来る．

$$\frac{d\sigma}{dT_p} = \frac{G_F^2 M_p}{\pi} \left[\left(1 - \frac{M_p T_p}{2E_\nu^2}\right) c_V^2 + \left(1 + \frac{M_p T_p}{2E_\nu^2}\right) c_A^2 \right] \quad (3.2.23)$$

よって，式 (3.2.21) の全反応断面積は，陽子の運動エネルギー T_p に関して 0 から $T_{p \max}$ まで積分

$$\sigma(E_\nu) = \int_0^{T_{p \max}} \frac{d\sigma}{dT_p} dT_p \quad (3.2.24)$$

で表すことが出来る．

3.3 事象再構成

KamLAND は、PMT 本数に相当する内部検出器に 1,879 個、外部検出器に 225 個のデータ収集チャンネルを持ち、PMT から送られる電圧値をフロントエンドエレクトロニクス (FEE) でデジタル化し、信号の大きさや時間情報から、事象のエネルギーや位置情報を再構成している。ここで、PMT 信号には、検出器内部で起こる有用な物理事象以外に、宇宙線ミュオン事象や放射性不純物によるバックグラウンド事象、PMT 自身の熱的ノイズ等に由来するものが含まれる。そのため、事象再構成を行う際、それぞれの信号が何に起因するものかを調べて区分する必要がある。事象再構成の手順は以下の通りである。

1. 波形解析
2. 各チャンネルの時間・電荷校正、バッドチャンネルの除去
3. 事象位置再構成
4. 事象エネルギー再構成

以降、これらの内容について述べる。

3.3.1 波形解析

PMT 波形から、信号が来た時間と電荷情報を求める。そのために、まず、波形が持つペDESTAL と呼ばれる電圧値のオフセットを知る必要がある。このオフセットは、PMT プリーダ回路やフロントエンドエレクトロニクス内のアナログ回路に起因する。ペDESTAL は、データ所得開始の際にサンプルする際の波形の平均値から見積もる。また、所得した波形に混在する高周波ノイズ成分の除去が行われる。この処理をスムージングと呼ぶ。

以上の処理が行われた信号波形から、波形の立ち上がり位置が求められる。また、各波形の導関数を用いて、波形のピーク位置が決定される。更に、波形とペDESTAL の差分を時間積分することで、電荷量が求められる。電荷量は、1 p.e. の単位で規格化されている。

3.3.2 PMT の時間・電荷校正

KamLAND における、1,879 個のチャンネルは PMT から FEE までのケーブル長や、FEE 内部回路の配線長が異なる。更に、PMT や FEE のゲインの違いにより、1 p.e. 信号の PMT 電荷量が異なる。そのため、各チャンネルの信号のタイミング校正や電荷校正を行う必要がある。

まず、タイミング校正については、KamLAND 中心から各 PMT にレーザ光を照射することで行った。レーザ光は検出器外部で生成され、光ファイバケーブルを用いて KamLAND 中心へ送られ、ケーブル先端に取り付けられた光拡散球に照射される。これにより、各 PMT に同じタイミングで光が入射し、各チャンネルでレーザ光検出の時間情報を知ることが出来る。このタイミング校正により、時間精度は 4.65 nsec (FWHM) となっている。

次に、電荷校正については、各 Run 毎に 1 p.e. に相当する PMT 電荷量を算出している。そのために、各 Run 中から 1 p.e. に対応する事象を取り出す必要があり、その条件を以下の様にして

- 宇宙線ミュオン事象、ノイズ事象は除く
- 宇宙線ミュオン事象から 2 msec 以内を除く
- $120 \leq 17\text{inch PMT の HIT 数の合計} \leq 230$
- PMT と事象位置間の距離 $> 6 \text{ m}$
- 波形中のピークが 1 つ

以上の方法で選ばれた事象の電荷分布は図 3.3.1 の様になる。図 3.3.1 に示す通り、17inch PMT は、電荷分布をガウス関数でフィットすることで、この中心値を 1 p.e. の PMT 電荷量としている。一方、20inch PMT の電荷分解能が悪いため、周囲に位置する 8 本の 17inch PMT の平均電荷との相対電荷を以下のように定義し、この相対電荷を電荷校正に使用している。

$$\text{相対電荷} = \frac{\text{20inch PMT の電荷}}{\text{隣接する 8 本の 17inch PMT の平均電荷}} \quad (3.3.1)$$

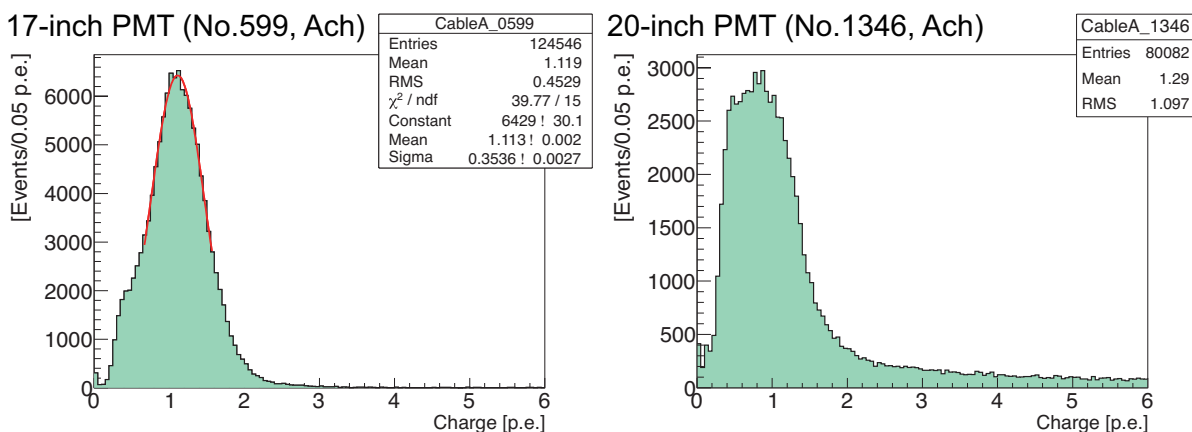


図 3.3.1: 17inch PMT の電荷分布 (左) と 20inch PMT の電荷分布 (右)[25]

ここで、KamLAND のデータ収集チャンネルの中に、ヒットレートが高くノイズの多いものや、逆にヒットレートが低く波形所得されないものが幾つか存在する。その他、PMT への電源供給が不安定なものや電荷が異常なもの、FEE に問題のあるチャンネル等も存在する。このようなチャンネルをバッドチャンネルと呼ぶ。バッドチャンネルは、正しい解析に支障をきたしてしまうため、事前に取り除く必要がある。バッドチャンネルは、Run 毎に変動するため、Run 毎に以下の条件を設け、定義している。

- ヒットレート $< 600/10,000$

- ノーヒットレート $> 1,000/10,000$
- ミューオン事象におけるヒットレート $< 80/100$
- ATWD の A チャンネルと B チャンネルのヒット数の差 $> 22 \%$
- i 番目の PMT に関して、隣接する PMT の電荷 $Q_j (i \leq j \leq N_i)$ の差が、

$$\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{(Q_i - Q_j)}{Q_j} > 400 \text{ p.e.} \quad (3.3.2)$$

となるもの。

- 外部検出器のチャンネルは、以下の条件のみ

$$\text{ヒットレート} < 5/10,000 \quad (3.3.3)$$

3.3.3 事象位置再構成

事象位置再構成は、PMT のヒット時間の分布を用いて行われる。時間分布は、以下の要因によって決まる。

- 反応点の座標
- 屈折率や吸収再発光等の液体シンチレータ特性
- PMT の時間分解能
- 信号の強度
- ダークヒット
- 多重ヒット
- 反応粒子の種類 (γ, β, e^+, n 等)

事象位置再構成には、Maximum-Likelihood を用いる。線源を用いた事象位置校正を行い、時間分布の Likelihood 関数 (L) を作成しており、信号のタイミングの期待値からの遅延時間 τ_i として、以下の式で表される。

$$\log(L) = \sum_i^{N_{hits}} \log(\phi[\tau_i(x, y, z, t)]) \quad (3.3.4)$$

ここで、 i 番目のチャンネルにおいて、 τ_i は、

$$\tau_i = t_i - t - TOF_i(x, y, z) \quad (3.3.5)$$

$(t_i : i$ 番目の PMT における観測時刻, $TOF_i = \frac{\text{反応点}(x, y, z) \text{ から } i \text{ 番目の PMT までの距離}}{\text{液体シンチレータ中の光速}})$

と定義される．また， ϕ は $\tau_i(x, y, z, t)$ を確率変数とする確率密度関数である．位置校正を行うことで， L には吸収再発光や多重ヒット等の直接測定できないパラメータの影響が含まれる．

この $\log(L)$ が最大となる座標 (x, y, z) と時刻 t が最も確からしい事象位置と時間となるので，各パラメータでの一階微分が 0 となれば良い．よって，以下の方程式によって事象位置と反応時間が求められる．

$$\begin{aligned}\frac{\partial \log(L)}{\partial x} &= \sum_i^{N_{hits}} \frac{\partial \log(L)}{\partial \tau_i} \frac{\partial \tau_i}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \log(L)}{\partial y} &= \sum_i^{N_{hits}} \frac{\partial \log(L)}{\partial \tau_i} \frac{\partial \tau_i}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \log(L)}{\partial z} &= \sum_i^{N_{hits}} \frac{\partial \log(L)}{\partial \tau_i} \frac{\partial \tau_i}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \log(L)}{\partial t} &= \sum_i^{N_{hits}} \frac{\partial \log(L)}{\partial \tau_i} \frac{\partial \tau_i}{\partial t} = 0\end{aligned}\tag{3.3.6}$$

3.3.4 事象エネルギー再構成

事象エネルギー再構成は，電荷情報とヒット時間情報を用いることで，低エネルギーから高エネルギーまで高い分解能を実現している．事象エネルギー再構成に用いる Likelihood は，以下の式で書かれる．

$$\begin{aligned}L &= \prod_{i \in no-hit} \kappa_{i0}(\vec{r}_{pmt_i}, \vec{r}_{impact}, E_{vis}) \\ &\times \left[\prod_{i \in hit} \left(\sum_{j=1}^{\infty} \kappa_{ij}(\vec{r}_{pmt_i}, \vec{r}_{impact}, E_{vis}) f_{ij}(q_i) \right) \eta_i(t_i | \mu_i) \right]\end{aligned}\tag{3.3.7}$$

κ_{ij} : i 番目の PMT に j 個の光子がヒットする確率 (ポアソン分布)

μ_{ij} : i 番目の PMT にヒットする光子の期待値

$f_{ij}(q_i)$: i 番目の PMT に j 個の光子がヒットした時の電荷 - 確率分布関数 (ガウス分布)

$\eta(t_i | \mu_i)$: μ_i が与えられた時の i 番目の PMT におけるヒット時間 - 確率分布関数

ここで，各変数は，

$$\begin{aligned}\kappa_{i0} &= e^{-\mu_i} + (1 - \epsilon) e^{-\mu_i} \equiv \nu_i e^{-\mu_i} \\ \kappa_{ij} &= \frac{e^{-\mu_i} \mu_i^j}{j!} \\ \mu_i &= c\Omega_{eff_i}(\vec{r}_{pmt_i}, \vec{r}_{impact}) E_{vis} + d_i \equiv b_i(\vec{r}_{pmt_i}, \vec{r}_{impact}) E_{vis} + d_i \\ f_{ij}(q_i) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi j\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(q_i - j)^2}{2j\sigma^2}\right) \\ \eta(t_i | \mu_i) &= \frac{b_i \psi_i(t_i) E_{vis} + d_i}{b_i E_{vis} + \int_{-175 \text{ sec}}^{192 \text{ nsec}} (\Delta d_i)(dt)_i} = \frac{b_i \psi_i(t_i) E_{vis} + d_i}{\mu_i} \equiv \frac{s_i}{\mu_i}\end{aligned}$$

- ϵ : 閾値は 0.3 p.e. での 1 p.e. 検出効率 (= 0.964)
 c : MeV 単位でのエネルギースケールと無次元占有因子の間の比例係数
 Ω_{eff} : 有効立体角 (PMT の量子効率, 吸収長, 影の効果を考慮)
 b_i : 1 MeV あたりの光子数の期待値
 d_i : 時間幅内で i 番目の PMT でダークヒットが発生する光子数の期待値
 σ : 1 p.e. 分布
 $\psi(t_i)$: 反応位置 *Visible* エネルギーが与えられた時の波形関数
 s_i : 実際の波形関数
 Δd_i : $\int_{-175 \text{ sec}}^{192 \text{ nsec}} (\Delta d_i)(dt)_i = d_i$

と定義されている。これより,

$$\begin{aligned}
\log(L) = & \sum_{i \in \text{no hit}} \log(\nu_i e^{-\mu_i}) + \sum_{i \in \text{hit}} \log(1 - \nu_i e^{-\mu_i}) \\
& + \sum_{i \in \text{hit}} \log(c_i) + \sum_{i \in \text{hit}} \log\left(\frac{s_i}{\mu_i}\right)
\end{aligned} \tag{3.3.8}$$

となる。よって, Maximum-Likelihood を用いると, 以下の条件を満たす時が最適のエネルギーとなる。

$$\frac{\partial \log(L)}{\partial E} = 0 \tag{3.3.9}$$

3.4 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen(KamLAND Zero neutrino double beta decay search experiment) は, KamLAND 検出器における ^{136}Xe を崩壊核に用いた 2 重ベータ崩壊実験である. 本実験では, ^{136}Xe 気体を液体シンチレータへ溶かし込み, これを KamLAND 検出器内に新たに設けたミニバルーンへ投入することで, 観測を行っている. 図 3.4.1 に, KamLAND-Zen の構造を示す.

KamLAND-Zen は, 既に極低バックグラウンド環境を実現している KamLAND 検出器を流用することで, 2011 年 10 月に, 計画から 2 年という異例の早さで観測を開始した. KamLAND-Zen の開始初期は, ^{136}Xe を 320 kg 用いて行われていた. この期間を第 1 フェイズと呼ぶ. 第 1 フェイズの観測は 213.4 日間行われたが, 予期せぬバックグラウンドが存在する事が明らかとなった. そこで, このバックグラウンド除去のために ^{136}Xe 含有液体シンチレータの純化作業を行い, 2014 年 12 月に ^{136}Xe を 383 kg に増量した第 2 フェイズを開始した.

本説では, KamLAND-Zen に用いた ^{136}Xe 含有液体シンチレータ及びミニバルーン, 更に, 観測により得られた結果等について述べる.

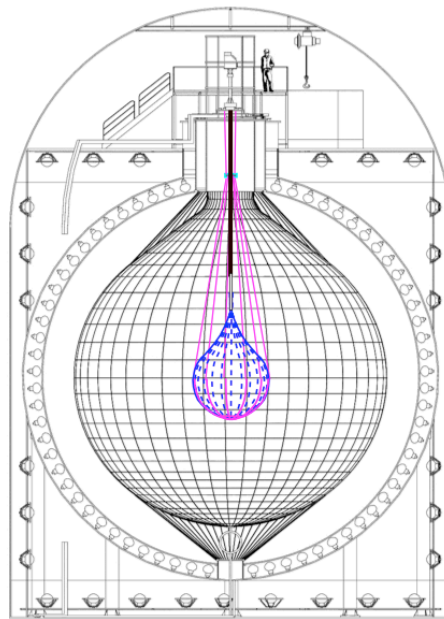


図 3.4.1: KamLAND-Zen の構造

3.4.1 ^{136}Xe

^{136}Xe は以下の様な長所を持つ.

- Q 値が比較的高い
- $0\nu\beta\beta$ 半減期が比較的小さい
- バックグラウンドとなる $2\nu\beta\beta$ 半減期が比較的小さい

- 濃縮方法が確立されており，大量に入手することが出来る
- 液体シンチレータによく溶け，取り扱い易い

以上の様な長所を持つ事から，KamLAND-Zen に用いる 2 重ベータ崩壊核に選定した．

3.4.2 ^{136}Xe 含有液体シンチレータ

^{136}Xe を溶かし込む液体シンチレータの組成を表 5 に示す．KamLAND 液体シンチレータと違い，希釈剤に N-10 を用いている．これは， ^{136}Xe を溶かし込む液体シンチレータの密度が外側の KamLAND 液体シンチレータよりも大きくなってしまふ事を防ぐために，密度の小さいものへの変更が必要なためである．また， ^{136}Xe を溶かし込んだことによる液体シンチレータの発光量低下を解消するため，発光剤である PPO の量を約 2 倍に増やしている． ^{136}Xe 含有液体シンチレータの体積組成比は，密度調整によって決まり，KamLAND 液体シンチレータとの密度差を小さくすることで，ミニバルーンにかかる圧力を最小にしている．

表 5: ^{136}Xe 含有液体シンチレータの組成

物質名	組成式	密度 (g/cm ³)	体積組成 (1st)	体積組成 (2nd)
N-10(デカン)	C ₁₀ H ₂₂	0.735	82.3 %	80.7 %
PC(1,2,4-トリメチルベンゼン)	C ₉ H ₁₂	0.875	17.7 %	19.3 %
PPO(2,5-ジフェニオキサゾール)	C ₁₅ H ₁₁ NO	-	2.7 g/l	2.29 g/l
Xe	-	-	3.0 wt%	3.02 wt%

3.4.3 ミニバルーン

^{136}Xe 含有液体シンチレータは，直径 3.16 m，高さ約 4.55 m の滴状のミニバルーン（図 3.4.2）によって密閉されている．ミニバルーンは，舟形をした厚さ 25 μm のナイロンフィルム 24 枚を熱溶着することで形成されている．フィルムが極めて薄い理由は，フィルムが含有する ^{238}U ， ^{232}Th ， ^{40}K といった放射性不純物を許容値に収めるためである．ここで， ^{136}Xe バリア性を高めるため，溶着部分には 2 枚のナイロンフィルムを貼り合わせて補強している．ミニバルーン上端には， ^{136}Xe 含有液体シンチレータを注入・抽出するための直径 11.6 cm・長さ 1.5 m のナイロン製の管が接続されている．この管は更に，PEEK(PolyEther-Ether-Ketone) 製接続管を介して，強度の高い 7 m のナイロン製コルゲート管に接続されている．

また，ミニバルーンを吊り下げるロープには 12 本のベクトランと呼ばれるポリアリレート系繊維を用いている．このロープはロードセルに接続され，ミニバルーンにかかる負荷を常時監視出来る様になっている．

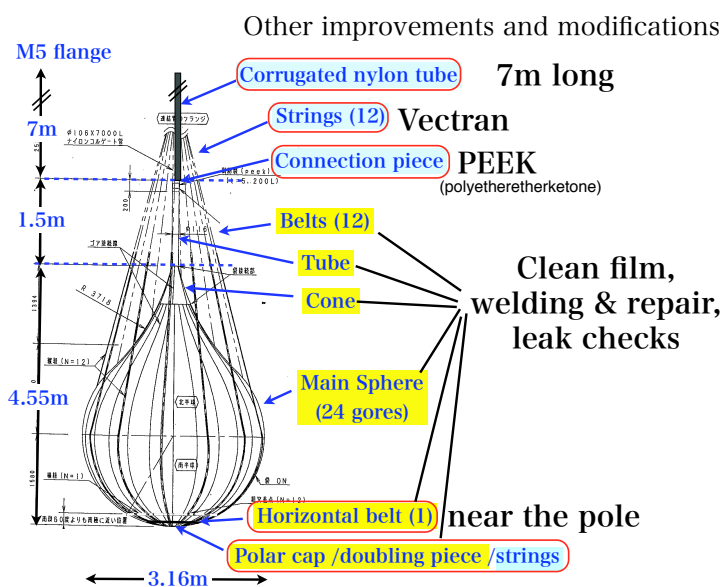


図 3.4.2: ミニバルーンの形状

3.4.4 KamLAND-Zen 第1フェイズの結果

KamLAND-Zen 第1フェイズは、 ^{136}Xe を 320 kg 用いて行われた。図 3.4.3 に得られたエネルギースペクトルを示す [6]。

図 3.4.3 を見ると、 $0\nu\beta\beta$ の信号領域に、大きな $^{110\text{m}}\text{Ag}$ バックグラウンド事象が存在することが分かる。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ バックグラウンドは、KamLAND-Zen 開始前に予期するものではなかった。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ がミニバルーン内に混入した原因として、 ^{136}Xe 空輸中の宇宙線ミュオンによる原子核破碎生成や福島第一原発事故により生成されてミニバルーン等に付着した事等が考えられるが、依然明らかとはなっていない。ここで、 $0\nu\beta\beta$ の信号領域の事象が $^{110\text{m}}\text{Ag}$ によるものであるという事実は、以下に記述する方法で明らかとなった。

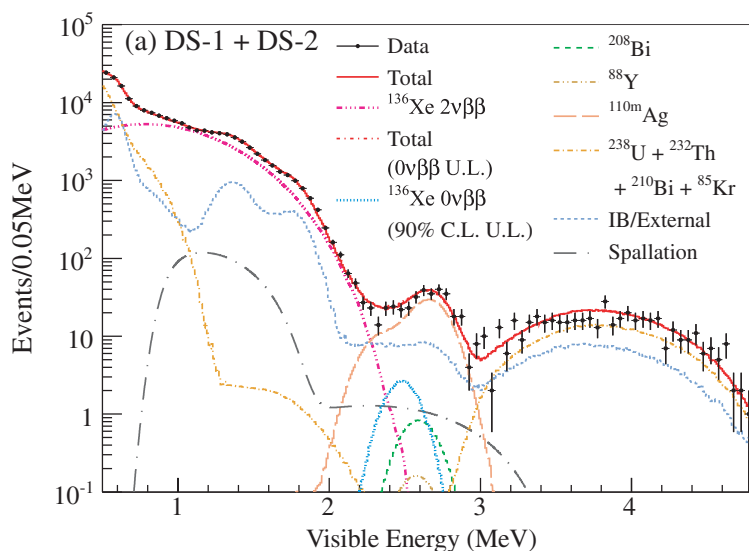


図 3.4.3: KamLAND-Zen 第1 フェーズで得られたエネルギースペクトル

エネルギースペクトルフィットによる同定

バックグラウンド核種の選定は，ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File)に含まれる全ての核種を対象にして行った．約 2,000 個のエネルギースペクトルや半減期に注意して目視で選定を行った結果，最終的な候補として， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ， ^{208}Bi ， ^{88}Y ， ^{60}Co の 4 核種が残った．この 4 核種について，観測結果のうち $0\nu\beta\beta$ 領域である 2.2 MeV ~ 3.0 MeV のエネルギースペクトルを $0\nu\beta\beta$ スペクトルと核種の崩壊エネルギースペクトルを合わせてフィットすることで，同定を行った．112.3 日間のデータを元に行ったエネルギースペクトルフィットの一例を図 3.4.4 に示す．

先ず， $0\nu\beta\beta$ のみのエネルギースペクトルでフィットした場合， $\chi^2 = 85$ となり，好ましくない結果となった． ^{60}Co は $0\nu\beta\beta$ と非常に似たスペクトルであるため， $\chi^2 = 82.9$ となり，同様に好ましくない．残った核種では， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が $\chi^2 = 13.1$ ， ^{208}Bi が $\chi^2 = 22.7$ ， ^{88}Y が $\chi^2 = 22.2$ となった．よって，エネルギースペクトルのフィットでは， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ がもっとも好まれる結果となった．

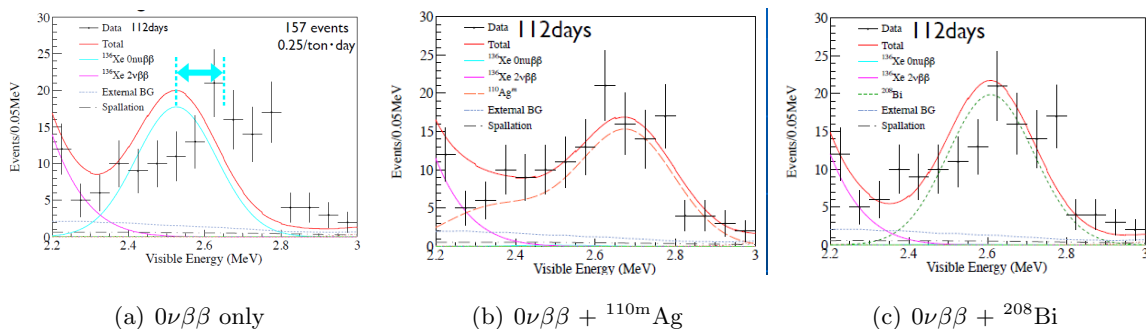


図 3.4.4: バックグラウンド候補による $0\nu\beta\beta$ 領域エネルギースペクトルのフィット [33]

バックグラウンドの崩壊レートによる同定

200 日を超える観測結果を用いることで、 $0\nu\beta\beta$ 領域の事象の時間変化を用いて、それに合致する崩壊レートを持つ核種の同定を行った。 $0\nu\beta\beta$ 領域である 2.2 MeV ~ 3.0 MeV の事象の時間変化と、バックグラウンド候補核種の崩壊レートによるフィット結果を図 3.4.5 に示す。

この結果、平均寿命 360 日の ^{110m}Ag が $\chi^2 = 2.22$ と最も好まれる結果となった。エネルギースペクトルフィットによる結果を考慮すると、 ^{110m}Ag がバックグラウンドとなる核種であることが強く主張される。

ここで、図中の DS-1 と DS-2 は、ミニバルーン中の ^{136}Xe 液体シンチレータをテフロン製フィルタを通して、ミニバルーンへ再注入するというバックグラウンド除去を試みた作業の前後の期間を表している。DS-1 と DS-2 で、バックグラウンドの崩壊レートに差異が無いことから、 ^{110m}Ag は濾過不能な極微小粒子であることが明らかとなった。

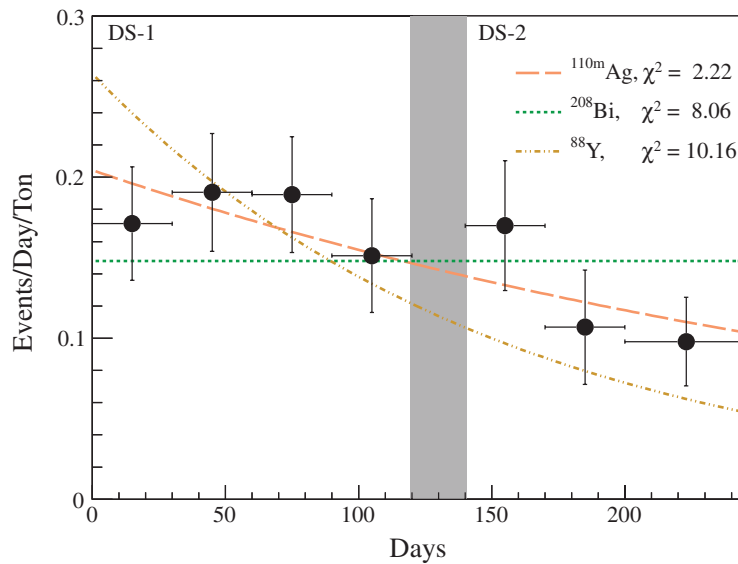


図 3.4.5: $0\nu\beta\beta$ 領域事象の時間分布とバックグラウンド候補核の崩壊レートによるフィット

以上の様に、予期せぬバックグラウンドが混入してしまったにも関わらず、KamLAND-Zen 第 1 フェイズは $0\nu\beta\beta$ 半減期に厳しい制限を与えている (図 3.4.6)。その結果は、90 % C.L. で、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25} \text{ year},$$

となっている。この結果より、KamLAND-Zen は KK-claim の検証が可能な領域まで近いと言える。

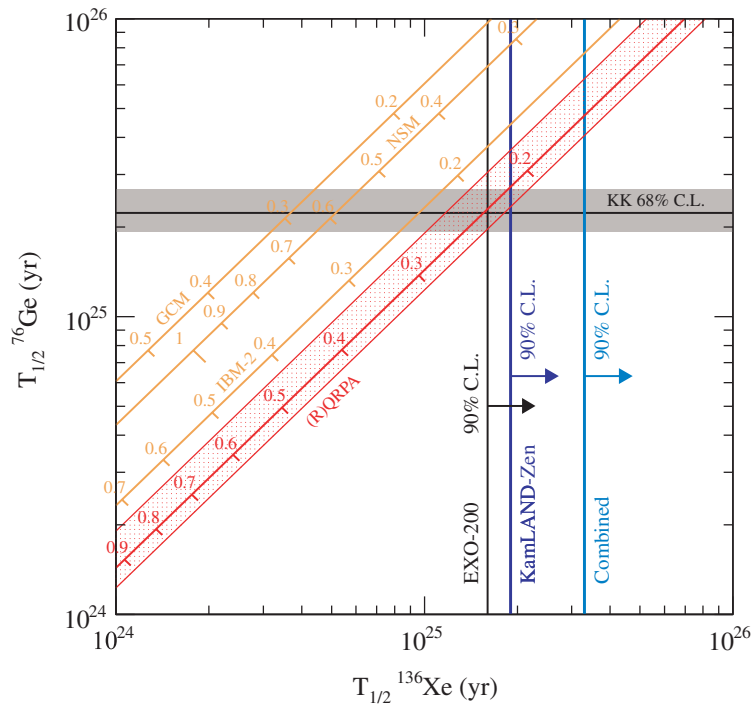


図 3.4.6: KamLAND-Zen 第 1 フェーズ結果による $0\nu\beta\beta$ 半減期に対する制限

3.4.5 ^{136}Xe 含有液体シンチレータの純化

KamLAND-Zen 第 1 フェーズにて大きなバックグラウンドとなっていた $^{110\text{m}}\text{Ag}$ を除去するために、ミニバルーン内部の純化作業を行った。

まず、大量の $^{110\text{m}}\text{Ag}$ を含むと考えられる ^{136}Xe 溶媒の有液体シンチレータを新たなものに取り替えるために、液体シンチレータ中から ^{136}Xe を回収する必要がある。これは、ミニバルーンから外部容器に Xe 含有液体シンチレータを取り出し、窒素パージを行うことで、液体シンチレータ中から ^{136}Xe の回収を行った。ここで、ミニバルーンが外圧によって萎まない様に、ミニバルーンから外部容器への送液と、外部容器からミニバルーンへの送液を同時に行った。

この方法により回収した ^{136}Xe には、大量の窒素が含まれているため、純化する必要がある。そこで、XMASS 実験で用いられた Xe 蒸留装置を借り受け、 ^{136}Xe の蒸留を行った。Xe 蒸留装置の概略図を図 3.4.7 に示す。Xe 蒸留装置は、投入された気体を塔上部で冷却することで沸点の高い Xe 等のガスを液化し、塔下部で液体 Xe を加熱することで沸点の高い Xe のみを液体のまま取り出す仕組みになっている。

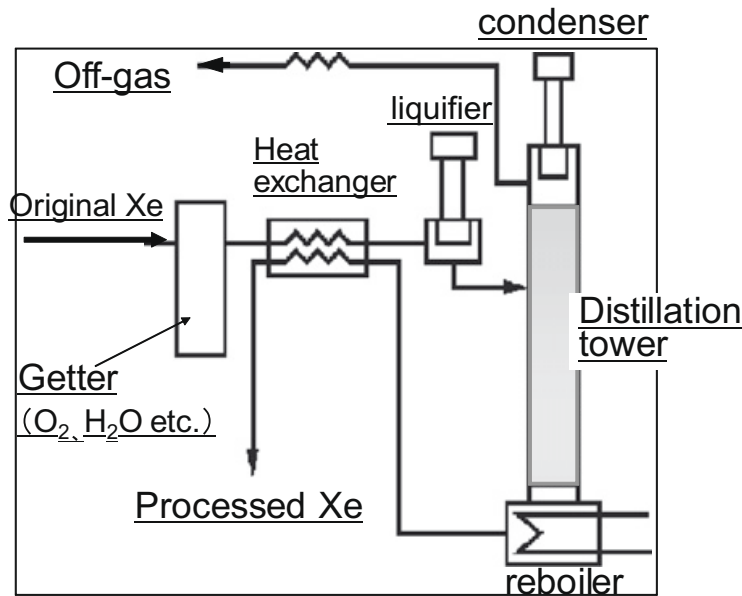


図 3.4.7: Xe 蒸留装置の概略図 [10]

^{136}Xe が取り出されたミニバルーン内の液体シンチレータは、新たな液体シンチレータへと取り替えられた。ここで、密度を大きく調整された液体シンチレータをミニバルーン下部より注入することで、古い液体シンチレータとの混合を防いだ。この作業の後、 $0\nu\beta\beta$ 信号付近の事象は $1/3 \sim 1/4$ 程度に減少した。液体シンチレータの総入れ替えを行った割に、バックグラウンド事象がそれ程減少していないことから、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ はミニバルーン表面に大量に付着しており、それが液体シンチレータへ溶け出したということが考えられる。

我々は、この事実より、ミニバルーン内側表面洗浄のために、3回の液体シンチレータ総入れ替えを行った。ここで、入れ替える液体シンチレータは、新たに購入せずに、ミニバルーンより取り出した液体シンチレータを KamLAND が所有する液体シンチレータ蒸留装置へ送り、蒸留済みの液体シンチレータをミニバルーンに送液するという工程で行われた。図 3.4.8 に KamLAND が所有する液体シンチレータ蒸留装置の概略図を示す。KamLAND 液体シンチレータは3種類の成分より構成されているため、それぞれの成分毎に沸点が異なる。この沸点の差を利用して、それぞれ成分を高純度で取り出し、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 等の重金属を除去する事が出来る。なお、ミニバルーン洗浄に際しては液体シンチレータが発光する必要はないため、液体シンチレータに PPO を含ませに行った。更に、ミニバルーン内で古い液体シンチレータと混合させないために、蒸留済みの液体シンチレータは密度を大きくしてミニバルーン下部より注入することで入れ替えを行った。

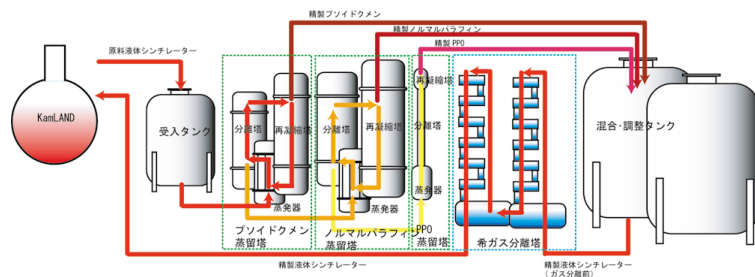


図 3.4.8: KamLAND が所有する液体シンチレータ蒸留装置の概略図 [31]

ミニバルーン内側を 3 回洗浄した後，回収した ^{136}Xe と新たな ^{136}Xe の合計 383 kg を新品の液体シンチレータに溶かし混んだものをミニバルーンにインストールした．ここで， ^{136}Xe には $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が付着している可能性があるため，加熱されることで重金属を吸着する Zr ゲッターを通して，液体シンチレータへ溶かし込んだ．

3.4.6 KamLAND-Zen 第 2 フェイズの中間結果

KamLAND-Zen 第 2 フェイズは，ミニバルーン内部の純化後， ^{136}Xe の量を 383 kg に増やして開始された．先ず，純化作業によって，バックグラウンド事象は約 1/10 に現象した事が分かった．図 3.4.9 に，純化作業前後のバックグラウンド事象の比較を示す．

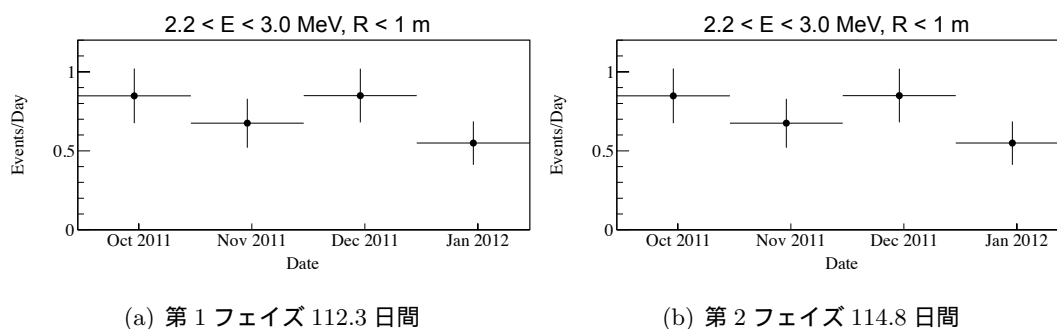


図 3.4.9: 純化作業前後の $0\nu\beta\beta$ 領域 (2.2 MeV \sim 2.0MeV) における事象の変化．但し，有効体積をミニバルーン中心から 1 m 以内に設定．

次に，ミニバルーン内のバックグラウンド事象の位置依存を図 3.4.10 に示す．これを見ると，ミニバルーン底部にバックグラウンド事象が偏っている事が分かる．これは， ^{214}Bi による事象であり，純化作業中に送液ポンプが破れ，坑内空気が混入してしまった事に由来する．

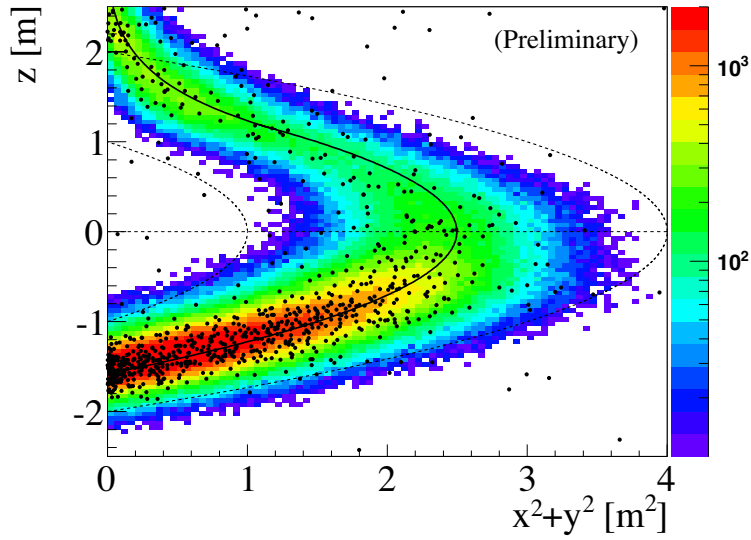


図 3.4.10: KamLAND-Zen 第 2 フェイズにおける $0\nu\beta\beta$ 領域 (2.3 MeV ~ 2.7 MeV) 事象の位置依存．黒色実線がミニバルーンの輪郭を表す．ミニバルーン底部の事象は ^{214}Bi によるもの．

KamLAND-Zen 第 2 フェイズの内，114.8 日分のデータを元に得られたエネルギースペクトルを図 3.4.11 に示す [12]．この結果より，KamLAND-Zen 第 2 フェイズにおける $0\nu\beta\beta$ 半減期は 90 % C.L. で，

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.3 \times 10^{25} \text{ year}$$

と求まる．ここで，第 1 フェイズの結果と Combined することで，

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.6 \times 10^{25} \text{ year}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.14 - 0.28 \text{ eV}$$

という結果が得られる．

以上が，KamLAND-Zen 第 2 フェイズの中間結果である．今後，データの蓄積や有効体積の最適化等を行った上で，第 2 フェイズの結果が更新される予定である．

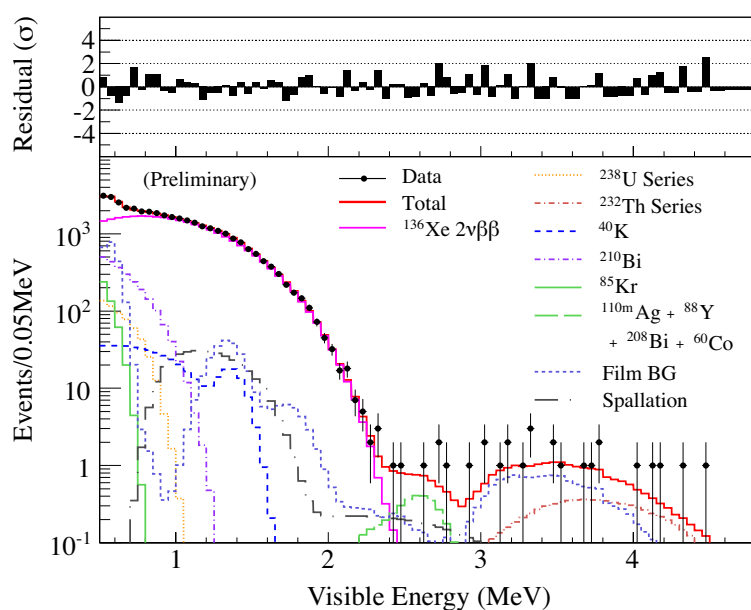


図 3.4.11: KamLAND-Zen 第2 フェイズにおける 114.8 日分のデータを元に得られたエネルギースペクトル. 有効体積は, ミニバルーン中心より 1 m 以内. グラフ上部分は best fit からの Residuals を表す.

3.4.7 KamLAND-Zen 次期フェイズ

KamLAND-Zen 第2 フェイズ後の計画として, ^{136}Xe を 700 kg 投入するものが 2016 年に計画されている. 但し, 現在のミニバルーンが有する量の液体シンチレータには, これ以上の ^{136}Xe を溶かし込む事が出来ない. そこで, より大きな直径を持つミニバルーンを新たに製作し, これを用いることで大量の ^{136}Xe 投入を実現する.

また, 新規にミニバルーンを製作することで, $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の様なミニバルーンに付着している放射性不純物によるバックグラウンドを除去する事が出来る. そのために, ミニバルーン製作段階や, インストール段階で放射性不純物の混入を防ぐ手段が現在議論されている.

3.5 KamLAND の将来計画

現在，KamLAND の将来計画として，検出器の高感度化を行う KamLAND2 が予定されている．また，KamLAND2 と同時に，高感度環境下で行う $0\nu\beta\beta$ 探索実験として，KamLAND2-Zen が開始される予定である．更に将来的には，KamLAND 検出器内部に高純度 NaI 結晶を投入した暗黒物質探索実験 KamLAND-PICO や，サイクロトロン加速器を設けた第 4 世代ニュートリノ探索実験 IsoDAR 等が計画されている．本節では，各将来計画について詳細を記述する．

3.5.1 KamLAND2

KamLAND2 は，検出器の高感度化を目的とした KamLAND の将来計画である．この高感度化により，検出器のエネルギー分解能の向上が見込まれ，現在の $\sigma = 6.4\%/\sqrt{E}$ から $\sigma = 3.2\%/\sqrt{E}$ となる予定である．これは，具体的には以下の検出器改良を行うことで実現する．

大発光量液体シンチレータへの入れ替え

現在の KamLAND 液体シンチレータから，新たな大発光量の液体シンチレータへの入れ替えが行われる．その候補として，リニアアルキルベンゼン (LAB ; Linear Alkylbenzene) が有力である．LAB の長所として，大発光である以外に光透過率の良さや引火点が低いこと，安価で入手できること等が挙げられる．現在，KamLAND 液体シンチレータの 1.4 倍の発光量を目標に開発が進められている．今後，LAB の純化方法を確立し，純化装置の設計等を行う予定である．

高量子効率 PMT への取り替え

KamLAND で用いられている 17inch PMT と 20inch PMT から，光電面にバイアルカリを用いた高量子効率の 20inch PMT へ取り替えが行われる．現在の PMT の量子効率が 20 %程度であるのに対し，高量子効率 PMT では 30 %になる見込みである．さらに，ダイノード構造にはボックスライン型が用いられることにより，TTS 性能が 2.7 nsec(FWHM) に向上する．現在，ゲインや TTS 性能の角度依存性や，ダークレート，大信号後に発生するアフターパルスの評価等が行われている．

また，ブリーダ回路の仕様変更を行うことで，デッドタイムを生じ得る大信号直後のオーバーシュート問題を緩和するための試みも行われる予定である．

集光ミラーの取り付け

KamLAND に用いられる PMT に，ウィンストンコーン形の集光ミラーを取り付けることが行われる．これにより，PMT 光電面への集光量が 1.8 倍になる予定である．耐油性を考慮して，PET 板にアルミニウムを蒸着したものが用いられる予定である．現在，集光率の角度依存性や変形による集光率の変化，17inch PMT と 20inch PMT における集光率の違い等の評価が行われている．

3.5.2 KamLAND2-Zen

KamLAND2-Zen は, KamLAND2 の高感度環境下で行われる 1,000 kg の ^{136}Xe を用いた $0\nu\beta\beta$ 探索実験である (図 3.5.1) . KamLAND2-Zen の特色として,

- $0\nu\beta\beta$ 崩壊核の増加による SN 比の向上
- 検出器のエネルギー分解能向上 ($\sigma(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow 2\%$) による $2\nu\beta\beta$ バックグラウンドの低減

が挙げられる. 特に, 後者については, $0\nu\beta\beta$ 事象の最終的なバックグラウンドとなる $2\nu\beta\beta$ 事象の効果を 1/60 に低減することが出来る点で特筆し得る.

この結果, KamLAND2-Zen では, 5 年間の観測で, $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 20 \text{ meV}$ の領域までを探索する予定である. この値は, ニュートリノ質量逆階層領域をほぼ全てカバーし得るものである.

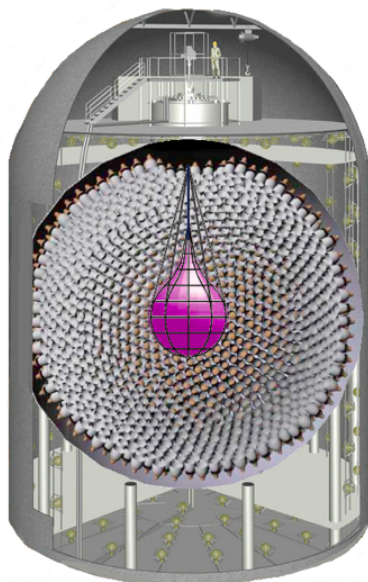


図 3.5.1: KamLAND2-Zen の予定図

3.5.3 KamLAND-PICO

KamLAND-PICO(KamLAND - Planar Inorganic Crystal Observatory) は, 1000 kg の高純度の NaI(Tl) 結晶を KamLAND 検出器にインストールし, WIMPs ダークマター探索を行う実験である [14]. NaI 結晶に含まれる放射性不純物量は, U 系が $5.4 \pm 0.9 \text{ ppt}$, Th 系が $3.3 \pm 2.2 \text{ ppt}$ を目標としている.

NaI 結晶では, DAMA/LIBRA が 2 ~ 6 keV 領域の計数率の季節変動 (図 3.5.2) による WIMPs の検出を主張している [16]. しかし, 他の半導体検出器や, Xe を用いた WIMPs 探索実験では, DAMA/LIBRA の主張を棄却する結果のみが得られている. ところが, 同じ NaI 結晶による検証が望まれているが, DAMA/LIBRA に用いられた NaI 結晶はその純度の高さから, 他の NaI 結

晶を用いた実験により検証することが不可能であった。KamLAND-PICO に用いる NaI 結晶は、DAMA/LIBRA に用いられたものよりも高純度を目指しているため、DAMA/LIBRA の主張の直接的検証が期待されている。

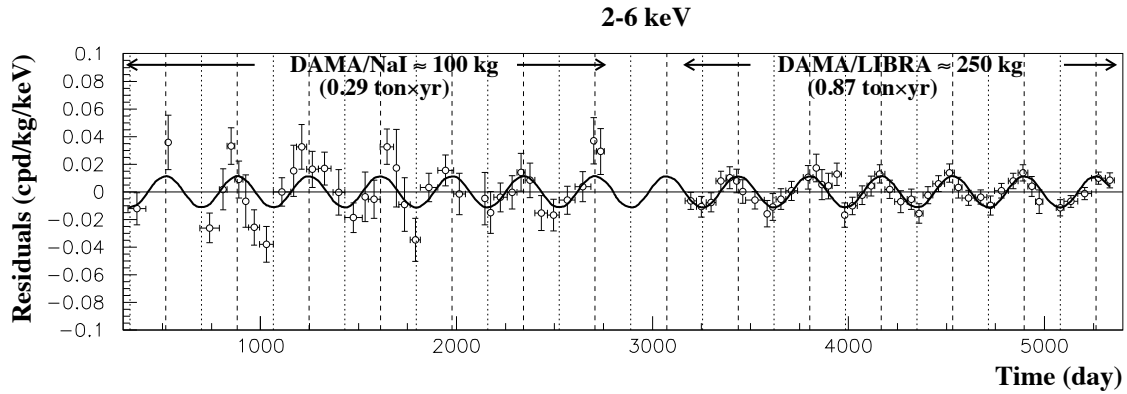


図 3.5.2: DAMA/LIBRA による計数率の季節変動

3.5.4 IsoDAR

IsoDAR (An Isotope Decay-At-Rest Sterile Neutrino Search) は、サイクロトロン加速器を用いた第 4 世代ニュートリノ探索実験である [5]。サイクロトロン加速器は、KamLAND 直近に置かれ、陽子ビームを D_2O で囲まれた ^9Be ターゲットに照射することで、高エネルギー中性子を生成する。生成された高エネルギー中性子は、 ^7Li に捕獲され、 ^8Li が生成される。この ^8Li がベータ崩壊する事によって、 $\bar{\nu}_e$ が KamLAND 検出器直近で生成される。

$\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ の第 4 世代ニュートリノを考慮した場合、ニュートリノ振動の周期は図 3.5.3 の様になる。そのため、IsoDAR の様な第 4 世代ニュートリノ探索実験は、検出器の極近くでニュートリノを生成しなければならないのである。図 3.5.4 に、IsoDAR における $\bar{\nu}_e$ 欠損に対する 5 年間の観測による感度を示す。

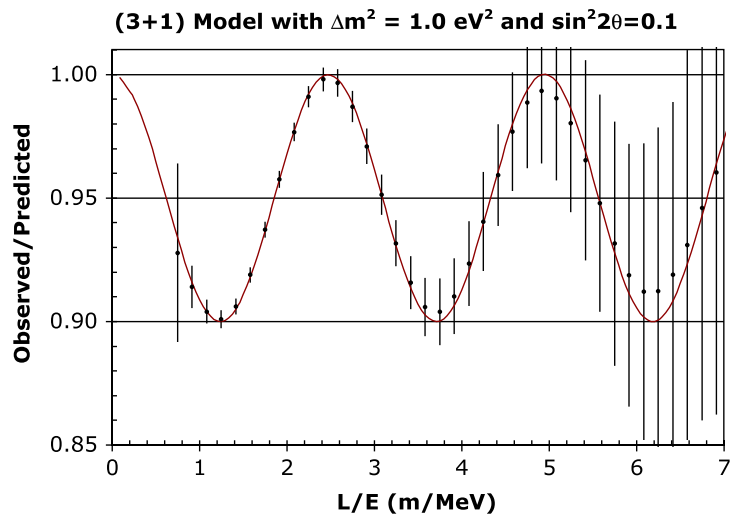


図 3.5.3: $\Delta m^2 = 1 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta = 0.1$ とした場合の第 4 世代を含むニュートリノ振動周期

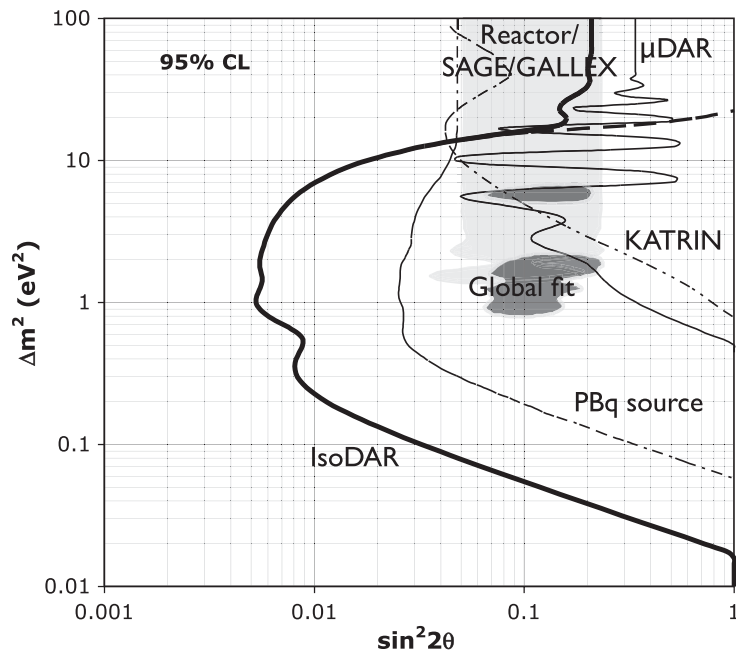


図 3.5.4: IsoDAR における $\bar{\nu}_e$ 欠損に対する 5 年間の観測による感度と他実験の感度との比較

4 KamLAND データ収集システム

KamLAND では、PMT 信号を ADC(Analog to Digital Converter) によってデジタル信号に変換し、専用コンピュータによって記録している。この PMT 信号波形記録に係る一連のシステムをデータ収集 (DAQ ; Data acquisition) システムと呼ぶ。KamLAND では、KamDAQ と MogDAQ と呼ばれる 2 種類の DAQ システムが並列に稼働している。図 4.0.5 に、KamLAND における DAQ システムの概略図を示す。

KamDAQ は KamLAND 観測開始当初から稼働する DAQ システムである。KamDAQ は、KamLAND グループが独自開発した KamFEE(KamLAND Front-End Electronics) と呼ばれる ADC 基板による PMT 信号波形記録を制御している。KamFEE に用いる ADC チップには、ATWD(Analog Transient Waveform Digitizer) と呼ばれるキャパシタアレイとウィルキンソン型 ADC を組み合わせた物を使用している。ATWD は、キャパシタの放電によってデータを読み出すため、この間がデータ所得のデッドタイムとなってしまう。

太陽ニュートリノ観測や $0\nu\beta\beta$ 探索では、宇宙線ミュオンが KamLAND 液体シンチレータ中の ^{12}C を破碎する結果生じる ^{11}C や ^{10}C がバックグラウンドとなり得る。宇宙線ミュオンによる原子核破碎生成の際、中性子が同時に生成され、 $207.5 \mu\text{sec}$ で液体シンチレータ中の陽子による中性子捕獲事象が発生する。この中性子捕獲事象を検出する事が出来れば、宇宙線ミュオン事象・中性子捕獲事象・ ^{11}C または ^{10}C 崩壊事象の 3 点遅延同時計測によりバックグラウンド事象としてタグgingし、除去する事が可能である。しかし、KamFEE では、宇宙線ミュオンが作る連続事象によりデッドタイムを生じてしまうため、この中性子捕獲事象を検出する事が出来ない。

そこで、デッドタイムフリーの ADC 基板として新たに開発されたのが MoGURA(Module for General Use Rapid Application) と呼ばれるフラッシュADC(FADC) を用いた電子回路である。MoGURA は、KamFEE 同様 KamLAND グループにより独自開発された。MoGURA は、KamDAQ から準独立した MogDAQ と呼ばれる専用の DAQ システムによって制御されている。

本章では、KamLAND で用いる PMT の信号特性、KamDAQ と MogDAQ、及びそれぞれが制御する ADC 基板について記述する。

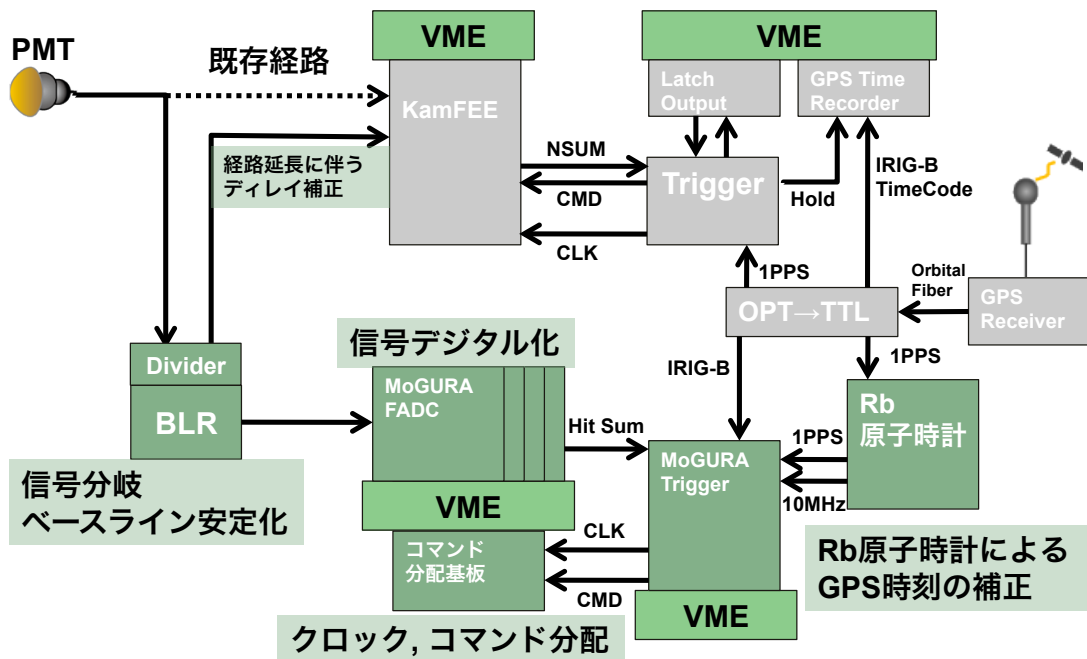


図 4.0.5: KamLAND DAQ システムの概略図 [34]

4.1 PMT 信号波形

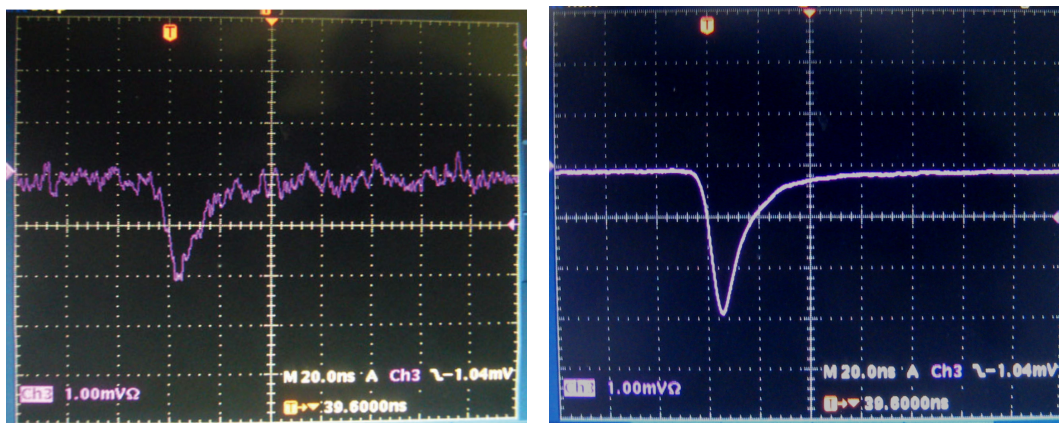
4.1.1 ノイズレート

PMT 信号は、PMT プリーダ回路の熱雑音等によって常にある程度のベースライン変動を持っている。そのため、KamLAND では、真の 1 p.e. 以上の大きさの信号を判別するために、1 p.e. 信号電圧値の 1/4 程度を Discr 閾値に設定している。KamLAND の PMT では、この Discr 閾値を超える信号レートは 10 kHz ~ 100 kHz 程度である。このようなレートで全ての PMT 信号波形を記録する事は、データ転送バッファや記録ディスクの容量の関係で不可能である。更に、PMT 信号の殆どは、PMT 自身のダークヒットや、 ^{14}C を始めとする低エネルギーのバックグラウンド事象である。そこで、有用な物理事象による信号波形のみを所得するために、全チャンネルの PMT 信号情報を元にトリガをかけ、非同期な PMT ダークヒットや、低エネルギーのバックグラウンド事象の除去を行う。これにより、波形所得が行われるレートは 100 Hz 程度に低減する。

4.1.2 1 p.e. 事象

図 4.1.1 に、PMT の 1 p.e. 信号波形の例を示す。512 個の 1 p.e. 信号波形を平均化すると、信号の立ち上がりに要する時間は約 8 nsec、その間の Slew rate は約 $0.4 \text{ V}/\mu\text{sec}$ であることが求まる。更に、この信号波形の周波数成分を求めると、図 4.1.2 の様になる。これを見ると、1 p.e. 信号波形の周波数帯域 (-3 dB) は 10 MHz 程度であるが、信号エネルギーの 99 % を所得するために

は、68 MHz 程度までの周波数成分が必要になる．よって、1 p.e. 信号波形を歪みなく所得するためには、フロントエンドエレクトロニクスは 68 MHz 以上の周波数帯域が必要になる．



(a) 1 p.e. 信号の例

(b) 1 p.e. 信号の平均

図 4.1.1: PMT の 1 p.e. 信号の例 (左) と 512 個の波形を平均したもの (右)[31] . グリッドサイズは 20 nsec, 1 mV

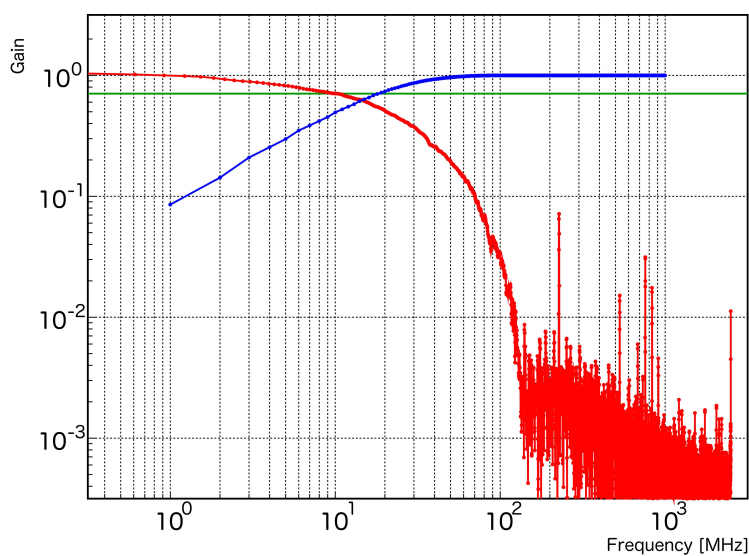


図 4.1.2: 赤色実線が 1 p.e. 信号波形の周波数成分 [31] . 緑色実線が -3 dB 値を表す . 青色実線がその周波数までに含まれる信号のエネルギーの割合を表す .

4.1.3 宇宙線ミュオン事象

図 4.1.3 に、PMT の宇宙線ミュオン信号波形の例を示す . 宇宙線ミュオンは、空間的な広がりを持つ高エネルギーの事象を作る . そのため、信号の立ち上がりには要する時間は 20 nsec ~ 40 nsec と 1 p.e. 信号よりも長くなる . また、宇宙線ミュオン信号のうち、単一チャンネルで 30,000

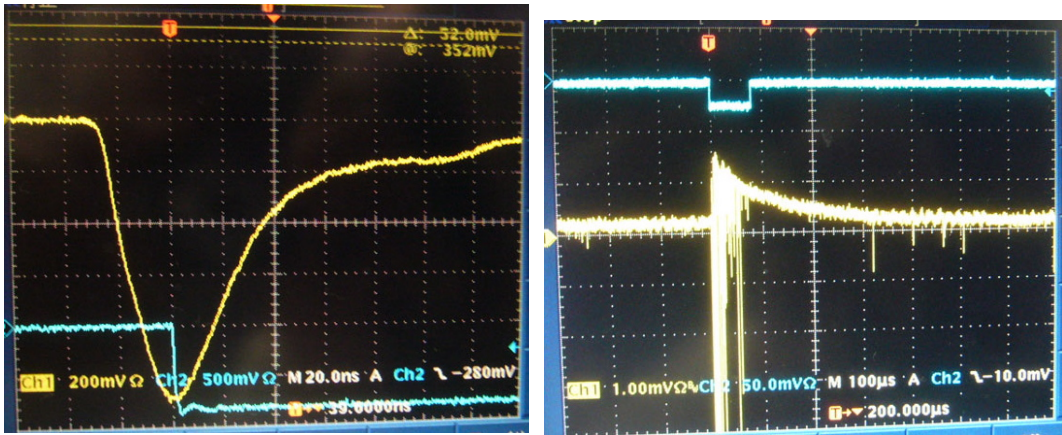
p.e. を超えるような信号振幅は 10 V 以上となり，Slew rate は $500 \text{ V}/\mu\text{sec}$ に達する．宇宙線ミュオン信号波形の周波数成分を求めると，図 4.1.4 の様になる．これを見ると，宇宙線ミュオンの周波数帯域は 3.2 MHz 程度で，32 MHz の周波数までの成分が信号エネルギーの 99 % を占めることが分かる．そのため，周波数帯域の面では 1 p.e. 信号波形よりもフロントエンドエレクトロニクスへの要求は緩やかである．

図 4.1.3 に示す様に，宇宙線ミュオン直後にオーバーシュートが発生する．これは，PMT ブリダ回路出力の AC 結合部分の影響である．オーバーシュートの大きさは，ミュオン信号の大きさに相関を持つ．例として，30,000 p.e. 信号時のオーバーシュート振幅は 2.6 mV で，収束までの時間は $\sim 1 \text{ msec}$ を必要とする．この間，1 p.e. 信号はその最大値が通常時よりも小さくなってしまいうため，Discr 閾値を超えず，波形記録が不可能となる．そのため， ^{11}C や ^{10}C タギングに必要な宇宙線ミュオンによる原子核破碎生成時の中性子事象を検出する事が不可能となる．

更に，宇宙線ミュオン事象の様な高エネルギー事象後，アフターパルスと呼ばれる擬似ヒット信号が発生する (図 4.1.5)．これは，PMT 真空部分に残存するヘリウムやアルゴンガスが大信号によってイオン化され，光電面を励起することで発生する．アフターパルスは宇宙線ミュオン事象後，数十 μsec ～ 数百 μsec の間に渡って高レートの信号を作る．そのため，ほぼ同タイミングに起こる ^{11}C や ^{10}C 生成時の中性子事象を検出するためには，フロントエンドエレクトロニクスに高レート事象記録に対応したバッファを実装するか，中性子事象検出のための高機能トリガを実装する必要がある．

以上を総括すると，フロントエンドエレクトロニクスに必要とされる性能は以下の様になる．

- 1 mV ～ 10 V の信号を精度良く記録出来る．
- 周波数帯域が 68 MHz 以上である．
- Slew rate が $400 \text{ V}/\mu\text{sec}$ である．
- 宇宙線ミュオンによる原子核破碎生成時の中性子事象の検出が必要な場合に限り，オーバーシュート対策及びアフターパルス対策が必要．



(a) 典型的な宇宙線ミュオン信号波形

(b) ミュオン信号直後のベースライン変動

図 4.1.3: 宇宙線ミュオン信号波形 (左) と直後のベースライン変動 (右)[31] . グリッドサイズは左 : 20 nsec, 200 mV , 右 : 100 μ sec, 1 mV .

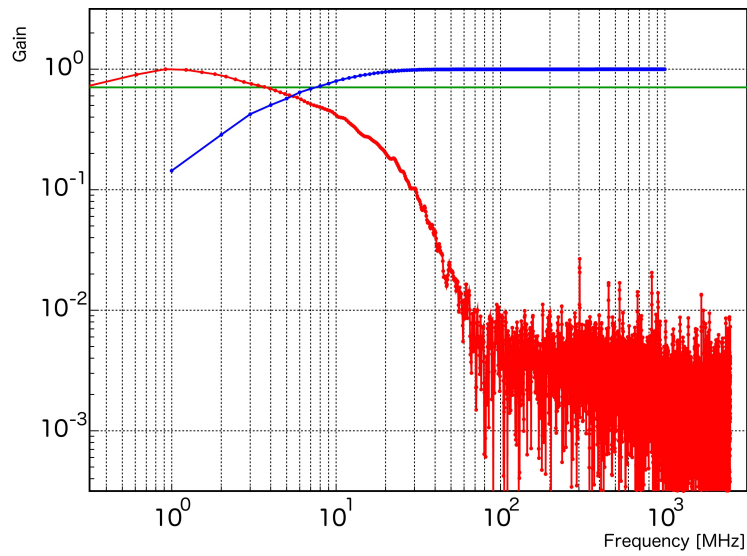


図 4.1.4: 赤色実線がミュオン信号波形の周波数成分 [31] . 緑色実線が-3 dB 値を表す . 青色実線がその周波数までに含まれる信号のエネルギーの割合を表す .

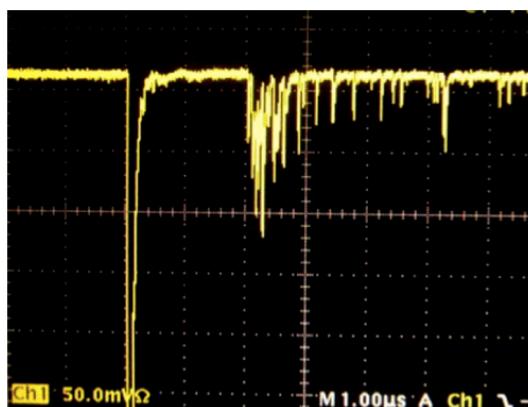


図 4.1.5: 宇宙線ミュオン事象後のアフターパルス [26]

4.2 KamDAQ

KamDAQ は、ADC 基板 KamFEE を用いて PMT 信号波形を記録するための DAQ システムである。KamDAQ は、200 枚の KamFEE とトリガ回路、システムクロック校正用クロックと GPS レシーバ及び、DAQ コンピュータに構成されている。KamFEE とトリガ回路は VME 規格のクレートに設置されている。KamDAQ のシステムクロックは 40 MHz で、全ての KamFEE とトリガ回路で同期されている。

KamFEE は、KamLAND の PMT 数に対応したチャンネル数を持ち、全ての PMT から信号入力を受けている。KamFEE に入力された PMT 信号は、先ず Discr され、Hit 信号が生成される。全チャンネルの Hit 信号は、各 KamFEE 基板上とトリガ回路で合計され、NSUM 値と名付けられてトリガ判定に用いられる。この時、発生した事象が物理事象らしいと判断されると、トリガ回路から KamFEE へトリガ信号が発行される。トリガ信号を受けた KamFEE は、波形をデジタル化し、このデータは VME 経由で DAQ コンピュータ側に読み出されることになる。

以上が、KamDAQ によるデータ収集の大まかな流れである。以降は、KamFEE とトリガ回路、DAQ コンピュータの詳細な仕組みを述べる。

4.2.1 KamFEE

KamFEE は、PMT 信号波形記録を目的とした、VME 9U 1Slot 規格の ADC 基板である (図 4.2.1)。ADC チップには、KamLAND グループが独自開発した ATWD と呼ばれる 128 個のキャパシタアレイとウィルキンソン型 ADC を組み合わせた物が用いられている。KamFEE は、1 基板上に 12 チャンネルの BNC 入力端子を有しており、50 Ω の入力抵抗となっている。KamFEE は、入力信号を 1 mV ~ 10 V の範囲で精度良く所得するために、25,000 のダイナミックレンジを持っている。このダイナミックレンジは、3 種類の異なる増幅率を持つアンプ (20 倍, 4 倍, 0.5 倍) へ分割入力する事で実現している。基板上には、波形データを一時的に記憶するための 64 MB サイ

ズの DIMM が搭載されている。また，KamFEE へのレジスタアクセスや KamFEE からのデータ読み出しは，VME インターフェイス経由で行われる。

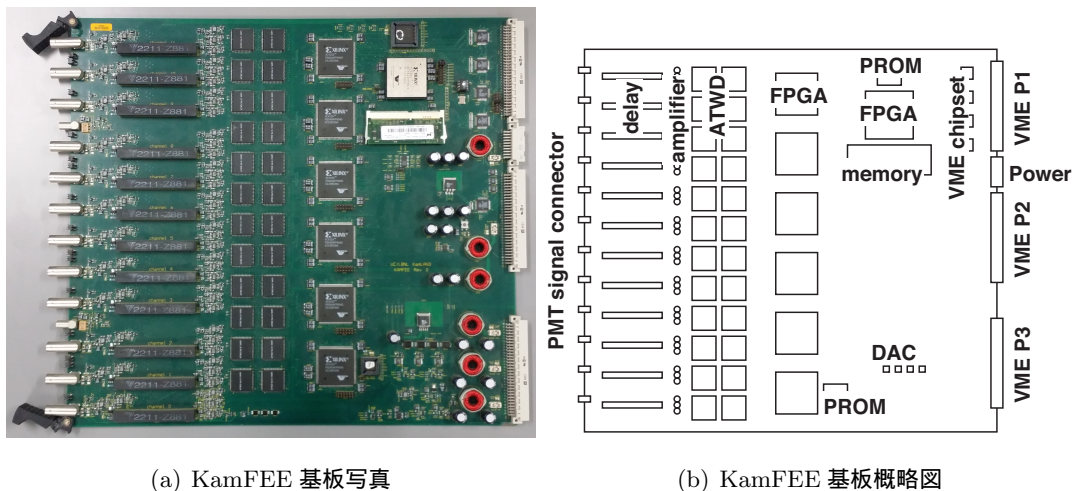


図 4.2.1: KamFEE 基板 [4]

図 4.2.2 に，KamFEE における信号波形のデジタル化・記録部分の構成図を示す．先ず，入力信号はディスクリミネータ側とアンプ側に分配される．ディスクリミネータ側では，信号の Hit 判定が行われ，1 基板上の 12 チャンネルの Hit 数を合計した値 (Hit-sum) が FPGA を通してトリガ回路へ送られる．一方，アンプ側の信号は，ディレイ回路を通して 3 種類のアンプへ分配され，増幅される．その後，デジタル化のために，更に 2 個の ATWD(ATWD-A, ATWD-B) へ分配される．ATWD には，40 MHz のサンプリングクロックが入力されている．ATWD では，サンプリングクロックを受けた後，128 個のキャパシタアレイに約 1.5 nsec の時間間隔で 1 個目から順番に信号波形を蓄積して行く．128 個目のキャパシタに達した後は，再び 1 個目のキャパシタから順番に上書きされる．ここで，入力信号がディスクリミネータにより Hit と判定された場合，FPGA から”capture”コマンドが ATWD へ発行される．”capture”コマンドを受けた ATWD は，キャパシタアレイの上書きを停止し，”hold”状態へ移行する．アンプ前のディレイ回路は，このサンプル開始から”capture”コマンドを受けるまでの時間を補正するためのものである．その後，トリガ回路から”acquire”コマンドが各 KamFEE へ発行され，”hold”状態のキャパシタアレイの電荷が，ウィルキンソン型 ADC でデジタル化される．ここで，キャパシタからウィルキンソン型 ADC への電荷読み出しには合計で約 25 μ sec を要するため，この間キャパシタアレイに信号波形を新たに蓄積することが出来ない．このデッドタイムは，1 チャンネルに 2 個の ATWD を用いて，一方の ATWD がサンプル不可能な状態はもう一方の ATWD でサンプルを行う事で軽減している．しかし，宇宙線ミュオン事象後の高レート事象には対応できず，このデッドタイムにより，原子核破碎生成時の中性子捕獲事象を困難にしている．また，一定時間”acquire”コマンドを受けなかった場合は，FPGA から ATWD へ自動的に”clear”コマンドが発行され，”hold”状態が解除され信号波形のキャパシタアレイへの蓄積が再開される．なお，デジタル化された波形データは一時的に KamFEE 上の DIMM に記憶され，VME インターフェイス経由で外部コンピュータへ逐次

読み出される。

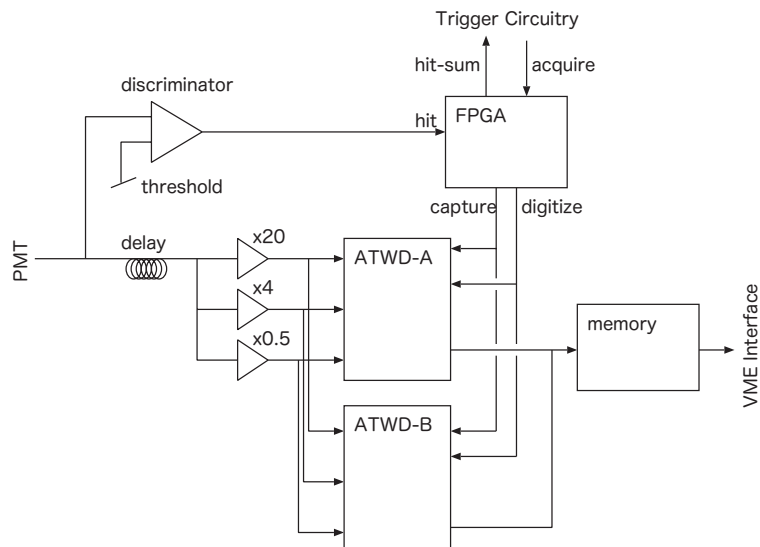


図 4.2.2: KamFEE における信号波形のデジタル化・記録部分の構成図 [4]

4.2.2 トリガ回路

KamDAQ で用いるトリガ回路は、VME 20U サイズの大型回路である (図 4.2.3)。トリガ回路の制御やトリガデータの読み出しは VME インターフェイスを経由して行われる。トリガ回路は、200 枚の KamFEE から 4bit の Hit-sum 信号入力を 40 MHz で並列に受け、その合計値 (NSUM) を算出する。トリガ回路は、内部検出器 (ID) のチャンネルや外部検出器 (OD) のチャンネルの NSUM に応じた Hit ベースのトリガや NSUM に依らない強制トリガ、外部コマンドの要求によるトリガ等、20 種類以上のトリガを全 KamFEE に対して発行する。

また、トリガ回路は神岡鉱山の跡津坑口に設けられた GPS レシーバによる時間情報と同期している。更に、GPS 時刻により校正された 1 Hz のクロックを元に 40 MHz のシステムクロックを生成して、全 KamFEE にシステムクロックを供給している。

以下に、トリガの種類を挙げる。

ID Hit Base Triggers

- ID Singles
 - ID の NSUM が ID-Singles-Trigger threshold(200 Hits) を超えた時に ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ。
- ID Prompt
 - ID の NSUM が ID-Prompt-Trigger threshold(200 Hits) を超えた時に ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ。

- ID Delayed
 - ID の NSUM が ID-Delayed-Trigger threshold(120 Hits) を超えた時に ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- ID Prescale
 - ID の NSUM が Prescale time 内に ID-Prescale-Trigger threshold を超えた時に ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- ID 5-inch
 - チムニー内の 5inch PMT の NSUM が ID-5inch-Trigger threshold(7 Hits) を超えた時に ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- OD-to-ID
 - OD の Hit ベースのトリガが発行された時に ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .

OD Hit Base Triggers

- OD Top Singles
 - OD Top 部分の NSUM が OD-Top-Singles-Trigger threshold(6 Hits) を超えた時に OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- OD Upper Singles
 - OD Upper 部分の NSUM が OD-Upper-Singles-Trigger threshold(5 Hits) を超えた時に OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- OD Lower Singles
 - OD Lower 部分の NSUM が OD-Lower-Singles-Trigger threshold(5 Hits) を超えた時に OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- OD Bottom Singles
 - OD Bottom 部分の NSUM が OD-Bottom-Singles-Trigger threshold(7 Hits) を超えた時に OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- ID-to-OD
 - ID の Hit ベースのトリガが発行された時に OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .

History Triggers

- ID History
 - ID の NSUM が ID-History-Trigger threshold を超えた時に波形保存の代わりに 25 nsec(1 システムクロック) 毎の NSUM を最大 200 nsec の間記録する .
- OD Top History
 - OD Top 部分の NSUM が OD-Top-History-Trigger threshold を超えた時に波形保存の代わりに 25 nsec(1 システムクロック) 毎の NSUM を最大 200 nsec の間記録する .
- OD Upper History
 - OD Upper 部分の NSUM が OD-Upper-History-Trigger threshold を超えた時に波形保存の代わりに 25 nsec(1 システムクロック) 毎の NSUM を最大 200 nsec の間記録する .
- OD Lower History
 - OD Lower 部分の NSUM が OD-Lower-History-Trigger threshold を超えた時に波形保存の代わりに 25 nsec(1 システムクロック) 毎の NSUM を最大 200 nsec の間記録する .
- OD Bottom History
 - OD Bottom 部分の NSUM が OD-Bottom-History-Trigger threshold を超えた時に波形保存の代わりに 25 nsec(1 システムクロック) 毎の NSUM を最大 200 nsec の間記録する .

Time Base Triggers

- 1PPS Trigger
 - GPS と同期して , 1 sec 間隔で全ての KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- GPS Trigger
 - Run スタート直後 , 32 sec 間隔で OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .

Calibration Triggers

- ID Calibration Forced
 - レーザ・LED 用の校正装置から外部トリガを入力し , ID の KamFEE へ発行される強制トリガ .
- ID Calibration Global
 - 外部トリガを入力し , ID の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ .
- OD Calibration Forced

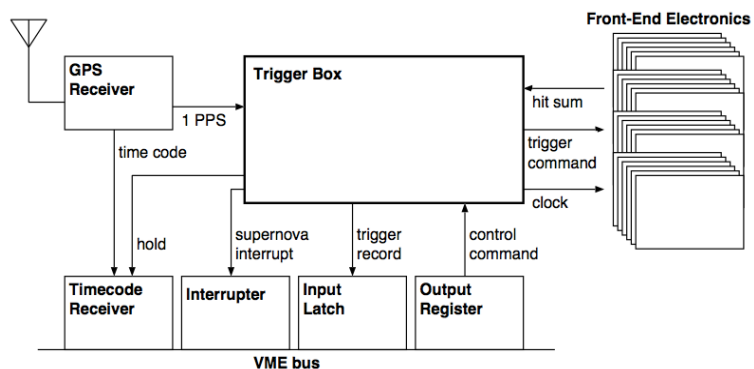
- 外部トリガを入力し，OD の KamFEE へ発行される強制トリガ．
- OD Calibration Global
 - 外部トリガを入力し，OD の KamFEE へ発行されるグローバルトリガ．
- Acquire Trigger
 - KamFEE の自動校正を行うためのデータ所得（ベースライン測定，40 MHz のクロック波形，テスト波形等）に用いられるトリガ．DAQ コンピュータの要求により発行される．

Other Triggers

- Supernova Trigger
 - NSUM より超新星候補となる事象を検出した時，DAQ コンピュータへ超新星候補検出の通知を行い，超新星トリガモード（1 min の間強制的に DAQ を継続）へ移行する．
- Disable Trigger
 - データバッファがフルに近い状態になった時，トリガを無効状態にする．
- Enable Trigger
 - データバッファがフルの状態から回復した時，トリガを有効状態にする．



(a) トリガ回路の写真



(b) トリガシステムの概略図

図 4.2.3: KamFEE 用トリガ回路 [34][4]

4.2.3 DAQ コンピュータ

KamDAQ には，榎本三四郎氏によって開発された KiNOKO (Kinoko is Network-distributed Object-oriented KamLAND Online-system) と呼ばれるデータ収集ソフトウェアが用いられている．KiNOKO は，そのシステムの下位層にオブジェクトリクエストブローカ (ORB) を持ち，分

散環境上で並列動作するシステムの統合を可能にしている．これを利用して，KamDAQ システムの構成は図 4.2.4 の様に複数のコンピュータを用いたものになっている．KamDAQ システムは，KamFEE やトリガ回路が収められている VME クレートにファイバケーブルによって接続されている 15 個のフロントエンドコンピュータと，オンライン解析用コンピュータ，データ記録用コンピュータ，システムコントロール用コンピュータ等によって構成されている．以上の構成より，KamDAQ は安定したデータ収集・オンライン解析・データ転送を可能にしている他，図 4.2.5 の様に優れた GUI によってシステムの監視が可能となっている．

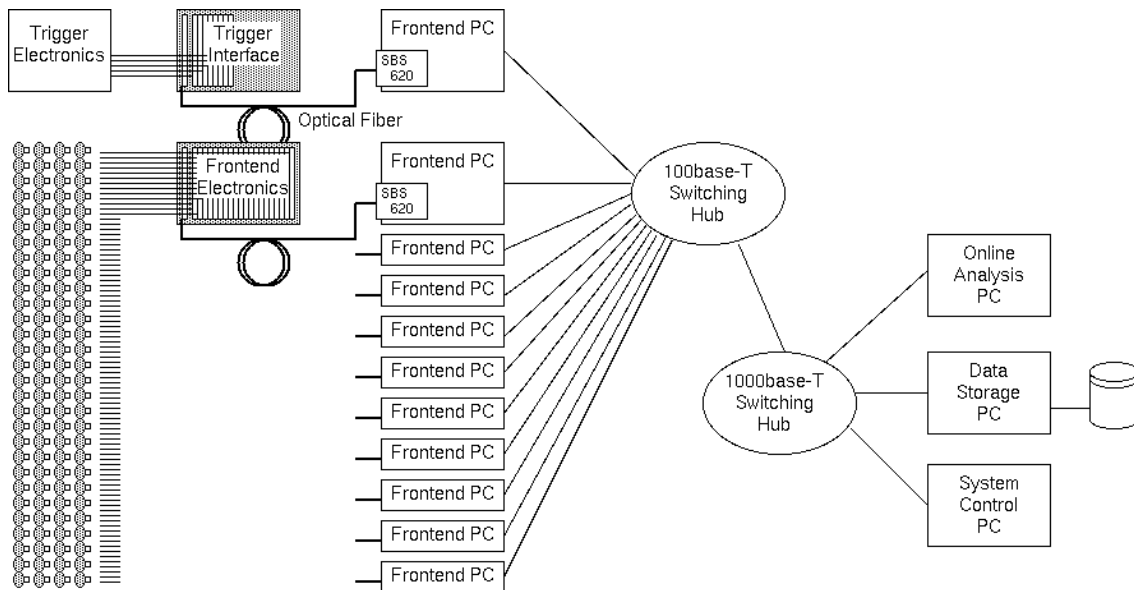
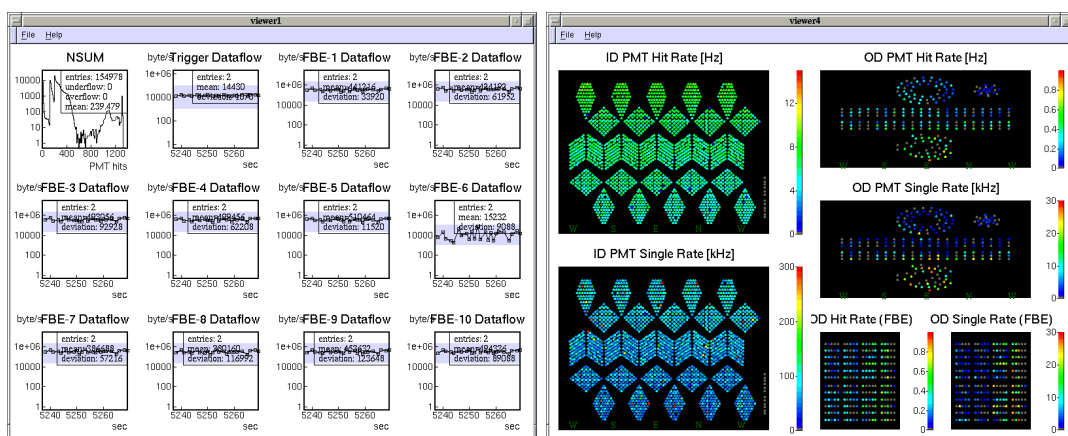


図 4.2.4: KamDAQ システムの構成図 [4]



(a) KamFEE とトリガ回路からのデータ転送

(b) KamFEE の Hit 状況

図 4.2.5: KamDAQ システム監視の一例 [34]

4.3 MogDAQ

KamFEE が有する宇宙線ミュオン直後の連続事象に対するデッドタイムを補うために、PMT のオーバーシュートを解消するための HPF 回路 BLR(Base Line Restorer) と、デッドタイムフリーの ADC 基板 MoGURA が開発された。これらを用いて、PMT 信号波形を記録するための DAQ システムが MogDAQ であり、2010 年 8 月から新たに運用が開始された。2015 年現在、BLR と MoGURA は 17inch PMT にのみ対応しており、MogDAQ は KamDAQ と準独立したバックアップシステムとしての役割を担っている。

MogDAQ は、BLR、約 113 枚の MoGURA とトリガ回路及びトリガコマンド分配器基板、システムクロック校正用の Rb 原子時計と GPS レシーバ、DAQ コンピュータによって構成されている。MogDAQ のシステムクロックは 50 MHz で、全ての MoGURA とトリガ回路で同期されている。

17inch PMT の信号は、BLR 基板部分で、KamFEE 側と BLR の HPF 回路側に分割される。HPF 回路を通った信号は、MoGURA でデジタル化・Discrri されて Hit 信号が生成される。全チャンネルの Hit 数の合計は、HITSUM 値と名付けられてトリガ回路へ入力され、HITSUM 値を元にトリガ判断が行われる。この時、発生した事象が物理事象らしいと判断されると、トリガ回路から MoGURA へトリガ信号が発行される。トリガ信号を受けた MoGURA は、波形を記録し、VME 経由で DAQ コンピュータ側に読み出される。

以上が、MogDAQ によるデータ収集の大まかな流れである。以降は、MoGURA とトリガ回路、BLR や DAQ コンピュータの詳細な仕組みを述べる。

4.3.1 BLR

BLR は、宇宙線ミュオン事象直後に発生するオーバーシュートを解消するための HPF 回路である。BLR は、1 基板当たり 16 チャンネルの BNC 入力に対応しており、入力信号をそのまま出力する BNC 端子と、HPF を通して出力する LEMO 端子を持つ。図 4.3.1 に、BLR 基板の写真と概略図を示す。

BLR に入力された信号は、先ず 2 つに分配され、片方は KamFEE 側へそのまま出力される。もう一方は、ベースライン安定化処理を行うための HPF 回路へ入力される。HPF 回路は、負側パルス除去回路と LPF 回路、及び減算回路より構成されている。HPF 回路では、信号が 2 つに分配され、片方は負側パルス除去回路で宇宙線ミュオン事象をカットした後、LPF 回路でオーバーシュートの成分のみを取り出される。その後、この信号は減算回路に入力される。もう一方は、処理を受けずに減算回路に入力される。減算回路では、処理を受けていない信号から、オーバーシュート成分を減算することで、ベースラインが安定化された信号が生成される。

図 4.3.2 に、BLR のベースライン安定化性能を示す。最大値を約 +10 mV とする 1 msec 間続く擬似的なオーバーシュートテスト信号入力に対して、初期の 1.4 μ sec を残して安定化出来ている事が分かる。初期の 1.4 μ sec のベースライン上昇は、BLR の過渡応答特性によるものである。この 1.4 μ sec 間は 1 p.e. 信号検出は不可能であるが、中性子捕獲の寿命は 207.5 μ sec であるため、宇宙線ミュオン後の中性子捕獲事象を取り逃す確率は 1 % 以下である。

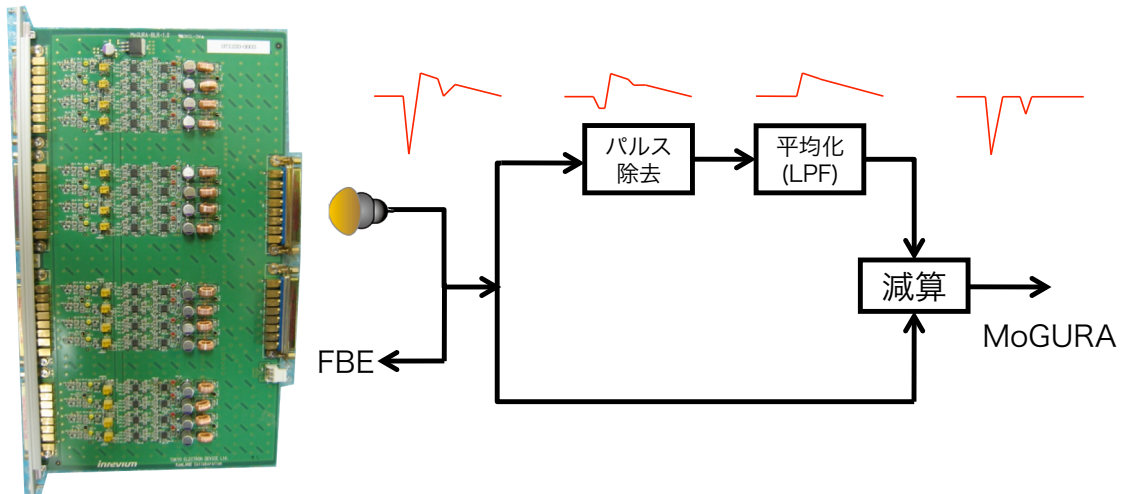
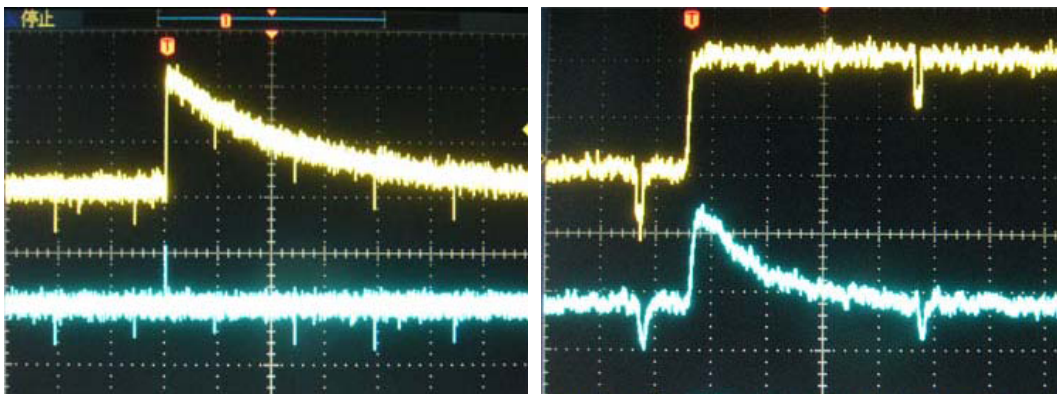


図 4.3.1: BLR 基板写真 (左) と概略図 (右)[34]



(a) グリッドサイズは 200 μsec , 5 mV

(b) 拡大図 . グリッドサイズは 0.5 μsec , 5 mV

図 4.3.2: BLR のベースライン安定化性能 [31]

4.3.2 MoGURA

MoGURA は、デッドタイムフリーで PMT 信号波形を記録するための VME 9U 1Slot サイズの ADC 基板である。ADC チップにはフラッシュADC(FADC) を用いており、これにより、デッドタイムフリー性能が実現されている。MoGURA には、KamLAND 以外にも汎用的に用いることが出来る様に、拡張性に富んだ設計思想の元開発された。図 4.3.3 に、MoGURA 基板を示す。MoGURA は、前面パネルに 12 チャンネルの LEMO 入力端子と外部トリガコマンド入力用の LEMO 入力端子を持つ。また、アナログ HITSUM 出力用の LEMO 出力端子と、ステータス表示用の 7 セグメント LED、各種 LED を持つ。背面パネルには、VME Control I/F とデジタル HITSUM 入出力端子が配置されている。コマンド分配器板から VME Control I/F を通して、50 MHz のシステムクロックが供給される様になっているが、MoGURA 単体で使用可能とするために、基板上

に水晶クロックが配置されており、ジャンプスイッチにより切り替えることが出来る様になっている。

MoGURA 基板には、ADC インターフェイス用のフロントエンド FPGA(FEF) と基板制御用のシステム FPGA(sFPGA) の他、拡張機能を組み込める UserFPGA が搭載されている。これらの FPGA の運用によって、MoGURA は複雑な信号処理を行うことが可能となっている。また、信号波形を一時的に基板上に保持するための 64 MB サイズの SDRAM が搭載されている。

MoGURA のアナログ回路は子基板として、MoGURA 基板本体に接続するようになっている。これは、上述の MoGURA の汎用思想に基づくものである。MoGURA のアナログ回路はアンプ回路となっており、MoGURA に 1 p.e. 信号から宇宙線ミュオン信号まで精度良く記録するための 100,000 のダイナミックレンジを与えている。このダイナミックレンジは、4 種類の異なる増幅率を持つアンプ (P:20 倍, H:24 倍, M:2.4 倍, L:0.24 倍) を用いることによって実現している。ここで、P アンプには、1 GSPS 8 bit の FADC が用いられており、1 p.e. 信号を高い電圧分解能・時間分解能で所得することが出来る。他アンプには 200 MSPS 8 bit のパイプライン型 ADC が用いられており、電圧幅が中規模から宇宙線ミュオン級の大規模信号までを所得出来る様になっている。なお、1 GSPS 8 bit の FADC には 2 チャンネル入力の製品を、200 MSPS 8 bit の ADC には 1 チャンネル入力の製品を用いている。表 6 に MoGURA が搭載する ADC 製品の性能を、表 7 に各種ゲインチャンネルの仕様を示す。

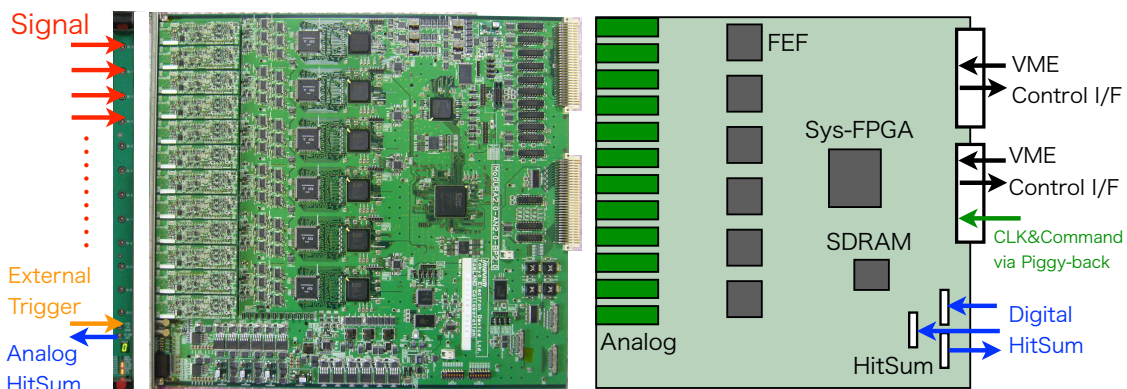


図 4.3.3: MoGURA 基板の写真 (左) と概略図 (右)[34]

表 6: MoGURA が搭載する ADC 製品の性能

ゲインチャンネル	P ゲインチャンネル	H, M, L ゲインチャンネル
製品名	ATMEL 社製 AT84AD001B	National Semiconductor 社製 ADC08200
ADC タイプ	FADC	Pipeline ADC
分解能	8 bit	8 bit
サンプリングレート	1 GSPS	200 MSPS
入力チャンネル	差動入力 2 チャンネル	シングル入力 1 チャンネル
最大入力電圧範囲	500 mV _{PP}	3V
有効ビット数	7.2 bit @ 20 MHz	7.4 bit @ 20 MHz
SN 比	45 dB @ 20 MHz	46 dB @ 20 MHz
チャンネル間クロストーク	-55 dB	-
出力インターフェイス	Parallel LVDS	Parallel LVDS
消費電力	1.4 W	1 mW

表 7: MoGURA における各種ゲインチャンネルの仕様

ゲインチャンネル	P	H	M	L
サンプリングレート	1 GSPS	200 MSPS		
電圧範囲	+5 mV ~ -20 mV	+25 mV ~ -100 mV	+250 mV ~ -1 V	+2.5 V ~ -10 V
分解能	0.1 mV	0.5 mV	5 mV	50 mV
増幅率	20 倍	24 倍	2.4 倍	0.24 倍

信号波形のデジタル化

図 4.3.4 に、MoGURA におけるデータフロー概略図を示す。MoGURA に入力された信号は、4 種類のアンプへ分配され、各アンプを通して ADC へ入力される。KamFEE と違い、MoGURA では、信号波形は即座に ADC でデジタル化されて FEF へ送られる。FEF では、デジタル波形は内部の 250 kB リングバッファ(一次バッファ)に一次記録され、また、デジタル化された波形を元に Discr1 を行い、HIT 信号が生成される。HIT 信号は、sFPGA にて MoGURA 基板上的全チャンネルの合計値 (HITSUM) を計算した後、システムクロックに同期してデジチェーンで繋がった前段の MoGURA から送られてきた HITSUM 信号に加算され、再び HITSUM 信号を後段の MoGURA に送る。HITSUM 信号は最終段の MoGURA からトリガ回路へ送られ、この値がトリガ判定に用いられている。なお、同じ事象に対して各 MoGURA 基板における HITSUM 信号はデジチェーンへ出力されなければならないため、予めレイテンシを測定・設定されて HITSUM 出力のタイミングを補正している。

トリガ回路から VME 経由でトリガコマンドが送られると、波形デジタル化からのレイテンシ分だけ遡って一次バッファに記録された波形が記録される。ここで、記録する波形の長さは、予め設定した所得時間 (Event Window Length) 分だけで行う。Event Window Length の最大値は 114 CLK (2.28 μ sec) である。これは、実効的に使用出来る一次バッファの長さが 7 ~ 8 μ sec であり、一次バッファを 2 チャンネルで共有しなければならないための制限による。

記録される波形データは、FEF でフレームトレインというフォーマットに整理され、FEF 内の二次バッファを介して sFPGA へ転送される。sFPGA では、6 つの FEF からフレームトレインを受け取り、SDRAM への記録を行う。VME 側からデータ転送の命令を受けると、sFPGA は SDRAM からデータの読み出しを行い、VME 側へデータの転送を行う。

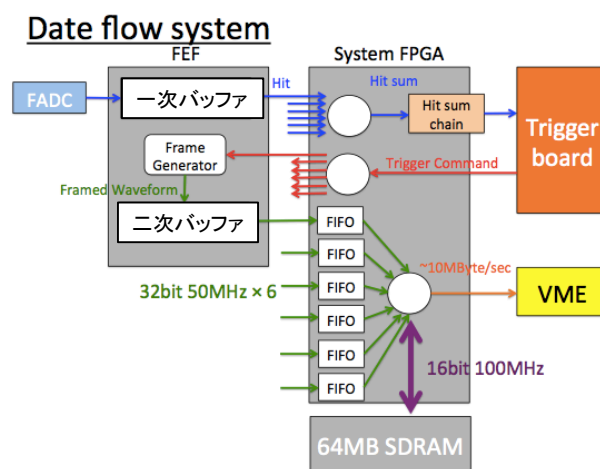


図 4.3.4: MoGURA におけるデータフロー概略図 [26]

デジタル波形データ処理

FEF では、データ量の削減を目的とした以下のようなデジタル波形データ処理を行っている。

- ゼロサプレッション (Acquire-Hit モード)
- 波形積分処理 (積分値モード)
- 緊急圧縮処理 (緊急圧縮モード)

ゼロサプレッションは、恒常的に不要な波形データを削除することで、データ量を削減する方法である。MoGURA は、デッドタイムフリー性能及びダイナミックレンジの大きさから、記録するデータ量が膨大となってしまう。これは、データ転送やデータストレージの観点から望ましくない。そのため、Acquire-Range と呼ばれる Event Window Length 分の波形データを全て記録する波形所得モードに加え、Acquire-Hit と呼ばれるゼロサプレッション機能を用いた波形所得モードが FEF に搭載されている。図 4.3.5 に、ゼロサプレッションの手順を示す。まず、予め設定されたパラメータである Start Threshold と Stop Threshold を元に、信号波形の Start 位置と Stop 位置が

決められる．次に，同じく予め設定されたパラメータである Preceding 値分だけ Start 位置から遡った点を波形記録開始位置を定め，Proceeding 値分だけ Stop 位置から進んだ点を波形記録終了位置と定める．Acquire-Hit モードでは，この様にして定められた区間のみを記録し，それ以外のデータは全て破棄される．この方法を用いることで，例えば，無信号状態の不要な波形データを削減したり，小信号に対して感度の無い増幅率の低いアンプ系統の波形データを削減することが出来る．Acquire-Range モードと Acquire-Hit モードは，トリガコマンドにより選択することが出来る．トリガを受ける度にその都度どちらのモードを使用するか判断している．

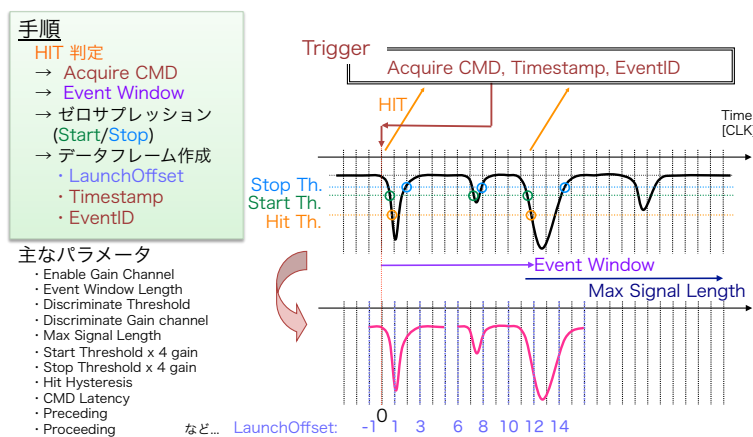


図 4.3.5: ゼロサプレッションの手順 [34]

積分値モードは，二次バッファの容量が逼迫している際に行われる緊急時のデータ所得モードである．トリガレートが高い状態や，Acquire-Range モードで波形を所得している場合，FEF 内の二次バッファから sFPGA への転送が追い付かず，二次バッファの容量が逼迫して行く．二次バッファが Full 状態に近い時 (FIFO Almost Full)，可能な限りの情報を得るために，波形積分モードへ移行する．積分値モードでは，波形情報の代わりに，Event Window Length 内の ADC 値の合計と，信号立ち上がり部分 4 点の ADC 値，時間情報のみを記録する．この時，フレームトレインは”Almost Full”の名前付けが行われる．積分値モードでは，1 フレームトレイン当たりのデータサイズは 16 Byte となり，二次バッファが Full 状態になるのを防ぐ．

更に，積分値モードでも二次バッファの Full を防ぎきれない場合は，緊急圧縮モードへ移行する．緊急圧縮モードでは，フレームトレインは FEF ではなく sFPGA で生成され，HIT 情報と時間情報のみが SDRAM に書き込まれる．緊急圧縮モード時のフレームトレインの名前は”Empty”で，1 フレームトレイン当たりのデータサイズは 12 Byte となる．以上のように，緊急圧縮モードでは PMT 電荷情報を得ることが出来ないため，データの有用性は非常に低い．そのため，緊急圧縮モードへ移行しないようなパラメータ設定が必要である．

表 8: デジタル波形データ処理

波形記録モード	生成フレーム	記録情報
Acquire-Range	Normal	Event Window Length 以内の全ての波形， TimeStamp，LaunchOffset
Acquire-Hit	Normal	Event Window Length 以内のゼロサブレーション波形， TimeStamp，LaunchOffset
積分値モード	Almost Full (16 Byte)	Event Window Length 以内の ADC 値合計 (積分値) と 立ち上がり部分 4 点の ADC 値， TimeStamp，LaunchOffset
緊急圧縮モード	Empty (12 Byte)	TimeStamp

4.3.3 トリガ回路

MoGURA へのトリガ出力は，VME 9U 2Slot サイズのトリガ回路 (図 4.3.6) を用いている．トリガ回路の制御やトリガデータの読み出しは VME インターフェイスを経由して行われる．トリガ回路は，図 4.3.8 の様にデジチェーンで連結されている MoGURA から，50 MHz で HITSUM 信号を受け取っている．この HITSUM 信号を元に，トリガ判定が行われ，コマンド分配基板を通じて各 MoGURA にトリガが送られる．

特に，図 4.3.7 の方法で計算されるパラメータ”NHIT”はトリガ判定に頻繁に用いられる．先ず，”Hit Window”の長さ分の HITSUM 値を加算し，これを NHIT と定義している．NHIT が設定された閾値を超えていれば，Hit Base のトリガが発行される．なお，MoGURA で波形所得が行われている間に，再びトリガを発行する訳にはいかないので，”Trigger Window”の間は次のトリガが発行されない．ここで，KamLAND では，Hit Window の長さは 6 CLK(120 nsec) となっている．これは，KamLAND 検出器内部の事象によるシンチレーション光が全て PMT へ届くまでに最大で 120 nsec 未満である事による．

トリガ回路へは，KamDAQ に用いるものと同じ GPS 信号が入力されている．更に，Rb 原子時計を用いて同じ GPS 信号から作られた 1 Hz クロック (1 PPS) と 10 MHz が供給されており，これを用いて 50 MHz のシステムクロックを作成している．作成された 50 MHz のシステムクロックは，コマンド分配基板を通じて各 MoGURA へ供給されている．

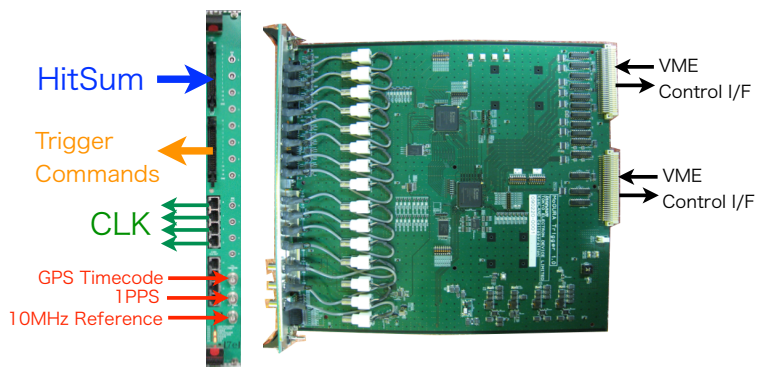


図 4.3.6: トリガ回路 [34]

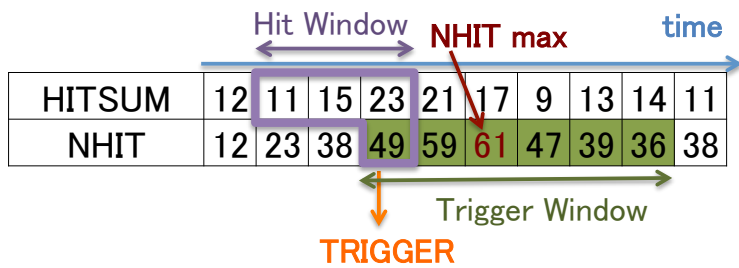


図 4.3.7: Hit Base トリガの発行概念図

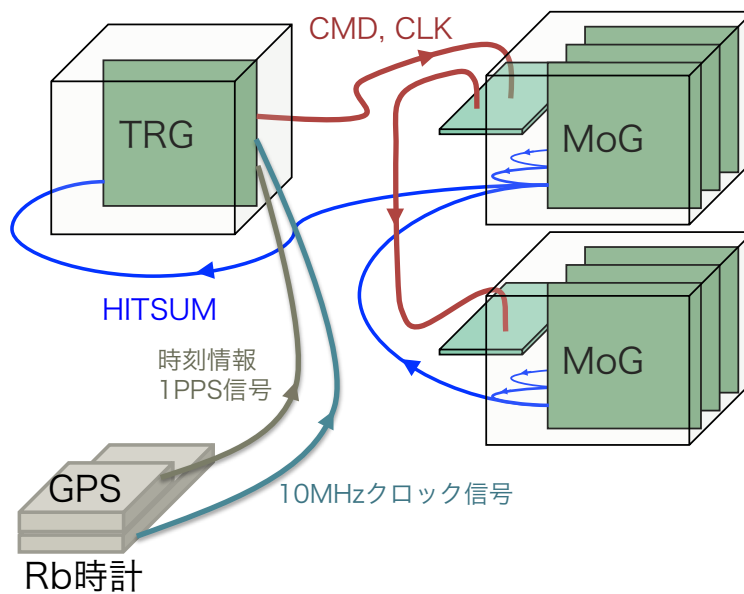


図 4.3.8: トリガ回路の信号入出力の関係 [34]

トリガ回路が発行するトリガの種類には、以下の様なものがある。Hit Base トリガ

- Single Trigger
 - 最も基本的なトリガ。Single threshold(NHIT=70) を超えた時に発行される。
- Launch Trigger
 - 宇宙線ミュオンを対象としたトリガ。Launch threshold(NHIT=950) を超えた時に発行される以外は、Single Trigger と変わらない。
- Prescaled Trigger
 - Hit Window を任意の間隔で開き、NHIT が Prescaled threshold を超えた時に発行される。Hit Window の長さの間隔は、分子・分母として設定可能で、線源測定時等に鳥がレートを下げたり低いNHIT 閾値でデータ所得を行うことが出来る。
- Rollback + Retrive Trigger
 - 太陽ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる ^{85}K タギングのために開発された。Rollback Trigger は、NHIT が Rollback threshold を超えた時に発行される以外は、Single Trigger と変わらないが、Retrive Trigger の発行条件となる。Retrive Trigger は、Rollback Trigger 時点から過去に遡り、非常に低い閾値 (Retrive threshold) を超えたNHIT がある時に発行される。このような方法を用いることで、通常所得することが出来ない低エネルギーの事象を所得することが出来るようになる。
- Adaptive Trigger
 - 宇宙線ミュオンによる原子核破砕生成核 ^{11}C や ^{10}C のタギングのために開発された。図 4.3.9 にトリガ発行の仕組みを示す。“Hit Accumulation Window” と “Context Window” の二種類のウィンドウを開き、それぞれのウィンドウ中の HITSUM 和の差が設定された閾値 (Adaptive threhold) を超えていれば発行される。ここで、Adaptive Trigger の発行条件として、Launch Trigger が発行されている必要がある。このような方法を用いることで、宇宙線ミュオン直後のアフターパルス事象から、中性子捕獲事象を検出する事が出来る。

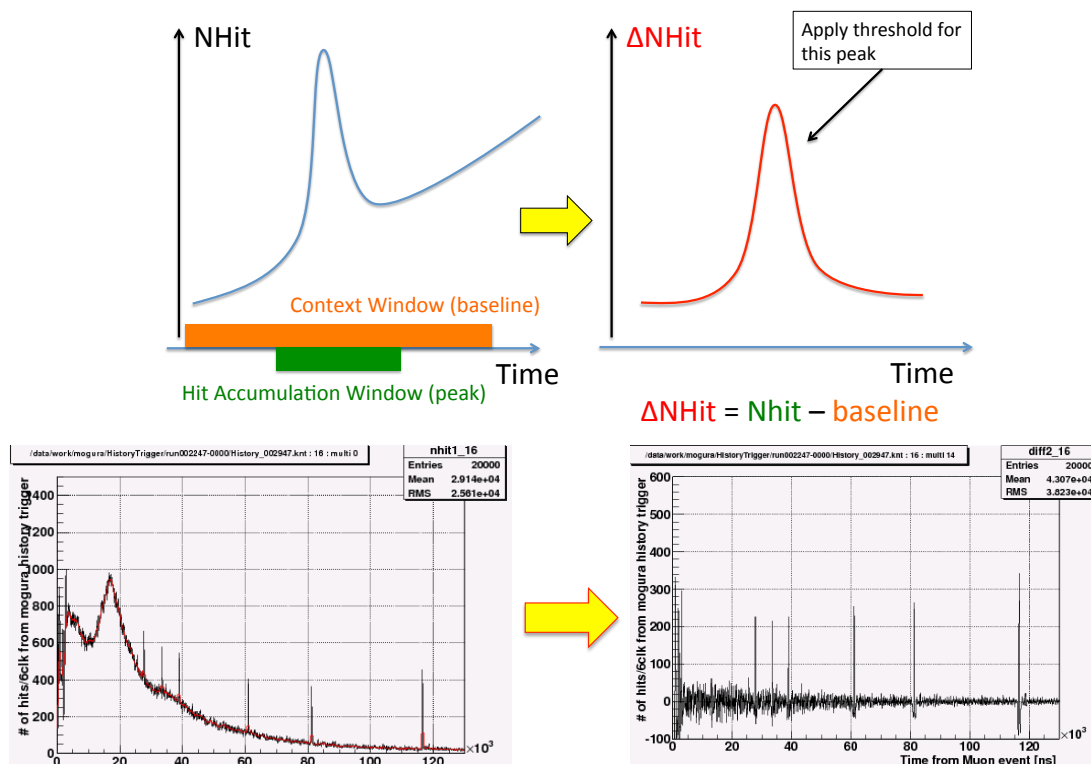


図 4.3.9: Adaptive Trigger 発行の概念図 [26]

Time Base トリガ

- 1PPS Trigger
 - 1PPS 信号に同期して, 1 sec 間隔で発行される .
- Background Trigger
 - 任意の時間間隔で発行される .
- Baseline Trigger
 - 任意の時間間隔で発行される . 但し, 波形所得は Acquire-Range で行われる .
- Successive Trigger
 - Launch Trigger 発行直後に発行される . BLR のオーバーシュート数 μsec の波形を Acquire-Range で記録することで, デッドタイムを解消している .

History トリガ

- History Trigger

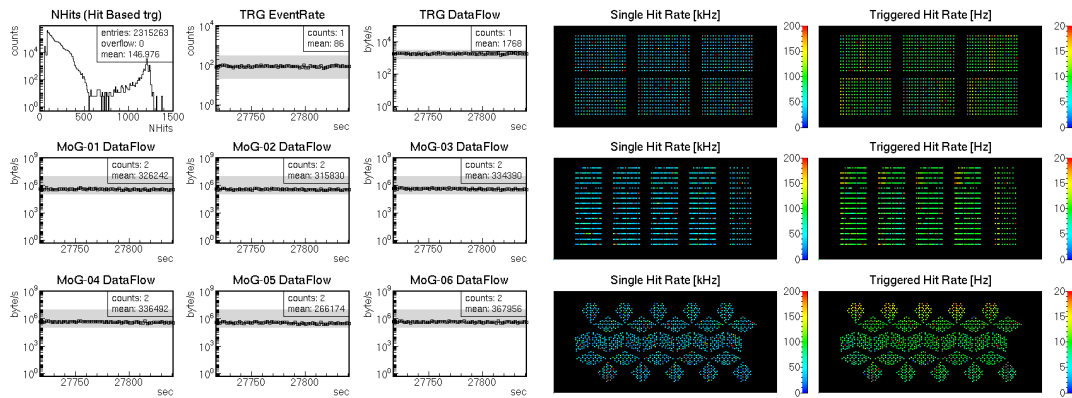
- 波形情報の代わりに，HITSUM の記録を行う．任意のトリガに対して発行可能であり，HITSUM を記録する期間及び閾値を任意に設定することが出来る．また，トリガ発行地点から遡った時点からの HITSUM 記録も可能である．

また，トリガ回路から送られるコマンドは，波形所得用のトリガ以外に以下の様なものがある．

- 始動コマンド：DAQ 開始時に使用する．
 - Initialize：Timestamp の初期化，ステータスのリセット，パラメータの設定を行う．
 - Scan Baseline：Baseline を測定し，パラメータ (Baseline Level, Baseline Offset) として設定する．
 - Scan/Set Latency：トリガコマンド・HITSUM の遅延時間の測定を行い，パラメータとして設定する．
- 波形所得コマンド：波形所得するためのトリガコマンド
 - Acquire-Hit, Acquire-Range：ゼロサプレッションを行うか否かの選択．
 - Reject：Acquire コマンドの強制終了．

4.3.4 DAQ コンピュータ

MogDAQ は，KamDAQ と同じく KiNOKO を用いて DAQ システムを構築している．システムの構成は，KamDAQ とほぼ同様で，MoGURA やトリガ回路が収められた VME クレートにファイバケーブルによって接続されている 7 個のフロントエンドコンピュータとデータ記録用コンピュータ，ホストコンピュータによって構築されている．ホストコンピュータは，システムコントロールを行ったり，データパケットを TimeStamp 順に並べ替えたりする役割を担っている．MogDAQ の Run は，KamDAQ の Run がトラブルにより中断している状況でも稼働し続ける様になっており，KamLAND データ収集のデッドタイムを低減している．なお，Run 切り替えは手動の他，KamDAQ の Run 開始時に自動的に行われるようになっている．データ収集の状況も，KamDAQ 同様に KiNOKO の GUI 機能により監視出来る様になっている (図 4.3.10)．



(a) MoGURA とトリガ回路からのデータ転送

(b) MoGURA の HIT 状況

図 4.3.10: MogDAQ システム監視の一例

4.3.5 MoGURA アナログ性能

無信号状態の MoGURA の信号波形から，MoGURA アナログ回路のノイズレベルを知ることが出来る．図 4.3.11 に，MoGURA アナログ回路の各ゲインチャンネル毎のノイズレベル例を示す．各ヒストグラム中心値が各ゲインチャンネルのベースライン値であり，中心から左側が負電圧領域側，右側が正電圧領域側になる．このヒストグラムから求まるノイズレベルを表 9 に示す．注意が必要な P ゲインチャンネルのノイズレベルは $0.81 \text{ ADC}_{\text{RMS}}$ と，1 ADC 値以内に収まっており，MoGURA は KamLAND で用いる FEE として十分なアナログ性能を持っている事が分かる．

ここで，KamLAND において，MoGURA は BLR を組み合わせた状態で運用される．そこで，MoGURA と BLR を組み合わせた状態で同様に測定したノイズレベルの例が図 4.3.12 である．このヒストグラムから求まるノイズレベルを表 10 に示す．これより，P ゲインチャンネルのノイズレベルは $1.36 \text{ ADC}_{\text{RMS}}$ と，1 ADC 値を超えてしまう事が分かる．ノイズレベルの増加は，トリガレートの上昇に繋がり，データレートを増加させてしまう．これにより，トリガ発行閾値を高く設定しなければならないため，極低エネルギー事象の所得が出来ない．しかし，MoGURA のデッドタイムフリー性能を活かすためには，BLR を用いることは不可欠である．そのため，ノイズレベルが不十分ながらも MoGURA に BLR を組み合わせた状態で運用している．

以上で得られたノイズレベルは正規分布に従っているため，P ゲインチャンネルのノイズレベルを用いると，BLR 自体のノイズレベルは，

$$\begin{aligned} \sqrt{(1.36 \text{ ADC}_{\text{RMS}})^2 - (0.81 \text{ ADC}_{\text{RMS}})^2} &= 1.09 \text{ ADC}_{\text{RMS}} \\ &= 0.109 \text{ mV}_{\text{RMS}} \end{aligned}$$

であることが推測される．これは，MoGURA 自体のノイズレベルよりも大きい．そのため，MoGURA で所得する信号波形のノイズの大部分が BLR に由来することになる．

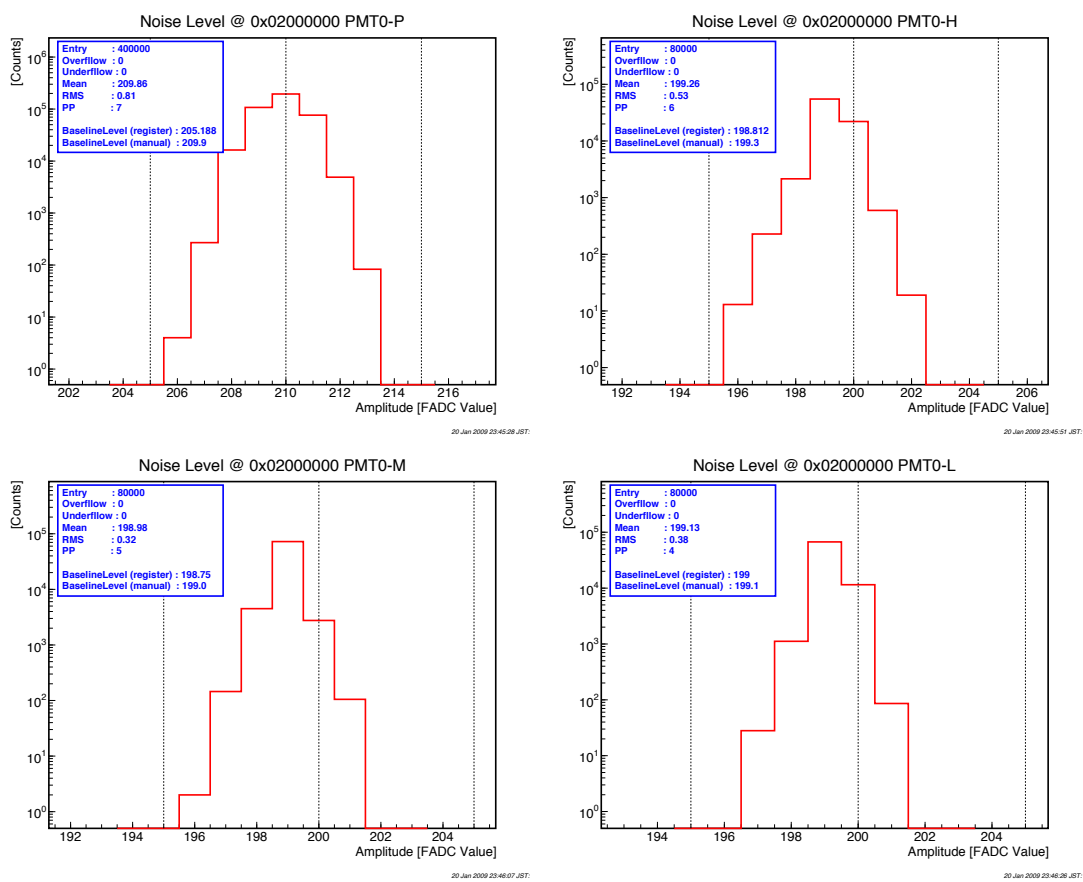


図 4.3.11: MoGURA アナログ回路のノイズレベルの例 (0x02 番 Ch0)[31]. 左上図: P ゲインチャンネル, 右上図: H ゲインチャンネル, 左下図: M ゲインチャンネル, 右下図: L ゲインチャンネル.

表 9: MoGURA アナログ回路のノイズレベル例 (0x02 番 Ch0)[31]

ゲインチャンネル	ADC 値の RMS	入力換算電圧の RMS
P	0.81	0.081 mV
H	0.53	0.265 mV
M	0.32	1.6 mV
L	0.38	19 mV

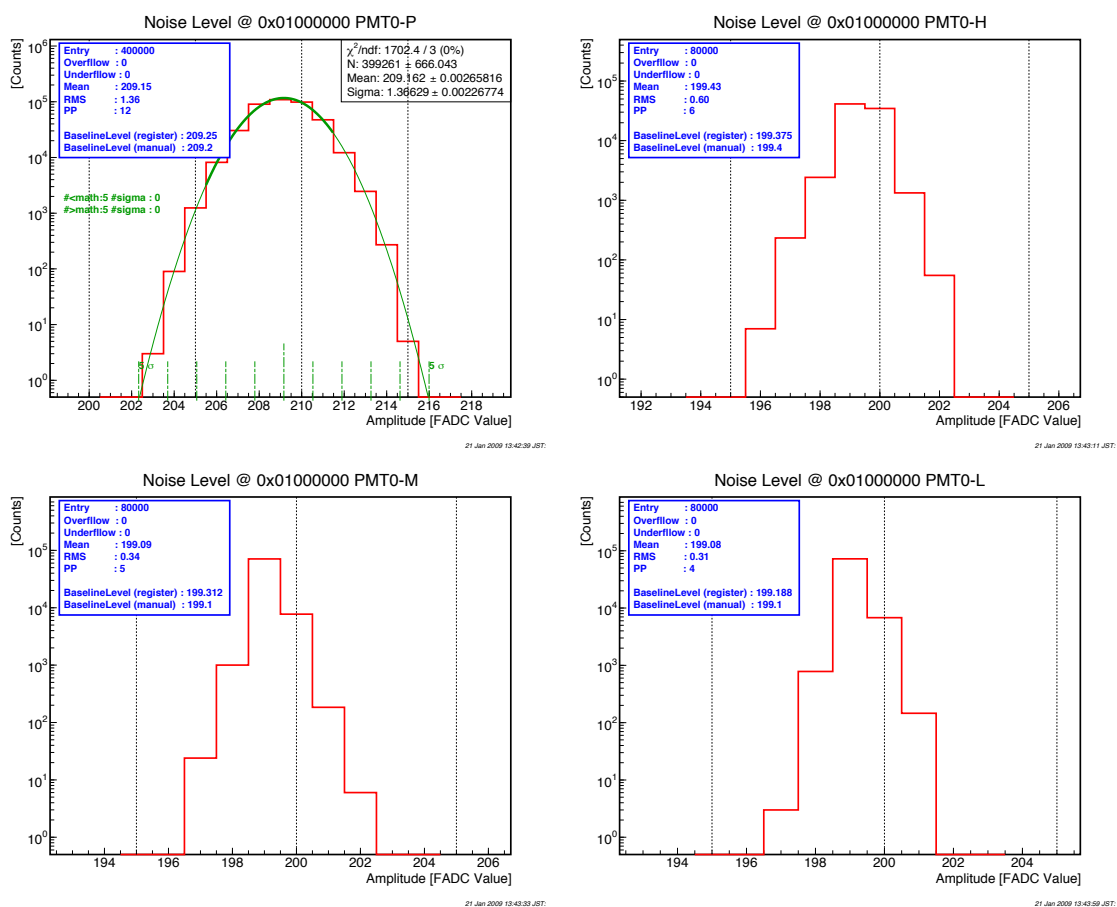


図 4.3.12: MoGURA+BLR ノイズレベルの例 (MoGURA : 0x02 番 Ch0 , BLR : 01 番 Ch12)[31] .
 左上図 : P ゲインチャンネル, 右上図 : H ゲインチャンネル, 左下図 : M ゲインチャンネル, 右下図 : L
 ゲインチャンネル .

表 10: MoGURA アナログ回路のノイズレベル例 (MoGURA : 0x02 番 Ch0 , BLR : 01 番 Ch12)[31]

ゲインチャンネル	ADC 値の RMS	入力換算電圧の RMS
P	1.36	0.136 mV
H	0.60	0.3 mV
M	0.34	1.7 mV
L	0.31	15.5 mV

4.3.6 ^{10}C 事象タグging効率

現在, KamLAND-Zen において, MoGURA により検出された中性子捕獲事象により, ^{10}C 事象タグgingが行われている. 現在の ^{10}C 事象選定条件は, 以下の通りである.

- 検出器中心から 4 m 以内
- 宇宙線ミュオン事象からの時間 $\Delta T < 180 \text{ sec}$
- 中性子事象からの距離 $\Delta R < 1.6 \text{ m}$

この条件に沿う $0\nu\beta\beta$ 事象付近のエネルギー領域 $2.2 \sim 3.5 \text{ MeV}$ の ^{10}C 事象候補を図 4.3.14 に示す. 以上の方法でタグされた ^{10}C 事象数を先行研究で予想される事象数と比較すると, MoGURA による中性子捕獲事象検出による ^{10}C 事象のタグging効率は $72 \pm 5 \%$ となる.

現在, ^{136}Xe 含有液体シンチレータ中の ^{10}C 事象のタグgingがなされており, $0\nu\beta\beta$ 事象エネルギー領域のバックグラウンド事象低減に役立っている.

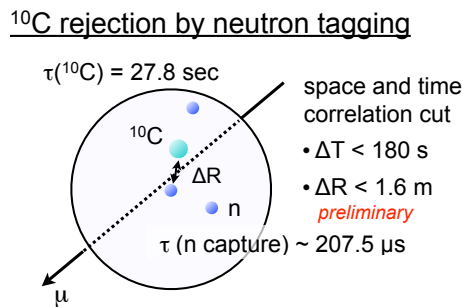
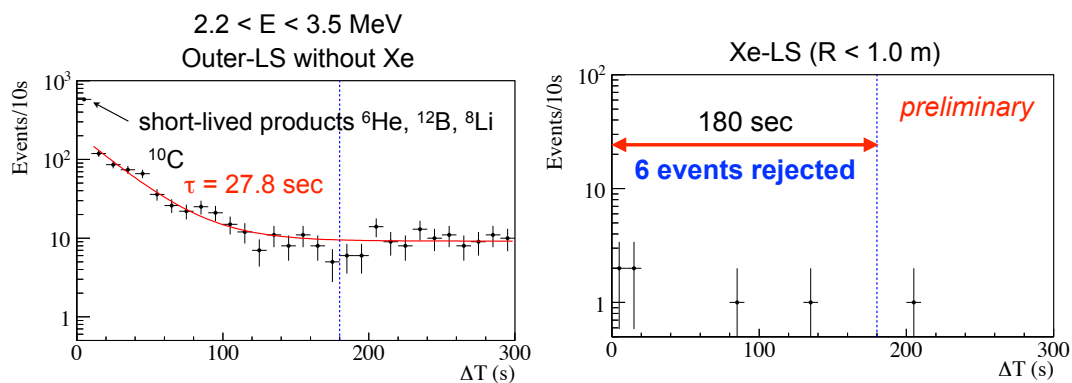


図 4.3.13: ^{10}C 事象の選定条件 [28]



(a) ^{136}Xe 含有液体シンチレータを除く領域での事象. 事象の崩壊レートが ^{10}C 寿命 $\tau=27.8 \text{ sec}$ に沿って中心から 1.0 m 以内での事象. タグされた 6 事象を $0\nu\beta\beta$ 領域から除去することができる.

図 4.3.14: 中性子捕獲事象検出によりタグされた ^{10}C 事象 [28]

4.3.7 MoGURA パフォーマンス

MoGURA のアンプ回路は、周波数帯域が 54 MHz であり、高周波成分まで増幅を保証している。また、従来のエレクトロニクスである KamFEE の信号波形サンプリング間隔が約 1.5 nsec であるのに対し、MoGURA は 1 nsec 間隔での信号波形サンプリングを行っている。以上より、MoGURA は KamFEE よりも高い時間分解能を持っていることになる。この効果は、KamLAND における事象位置再構成の精度に反映される。

MoGURA は 17inch PMT にのみ対応しており、チャンネル数の不足が欠点である。そのため、KamFEE データとのコンバインしたものの活用する事が望ましい。この場合、事象位置再構成に用いる Likelihood は、

$$L(\vec{x}, t^{Kam}, t^{MoG}) = L^{Kam}(\vec{x}, t^{Kam}) \times L^{MoG}(\vec{x}, t^{MoG}) \quad (4.3.1)$$

と表される。ここで、 L^{Kam} には MoGURA が対応していないチャンネルのみを用いる。

以上の方法を用いて、2011 年に行った ^{60}Co 線源を用いたキャリブレーションデータによる評価を図 4.3.15 に示す。なお、このキャリブレーションでは、 ^{60}Co 線源を KamLAND バルーン中心に入れ、垂直軸 (Z 軸) 方向に ± 600 mm の範囲で移動させている。また、MoGURA が対応しているチャンネルは約 1,100 チャンネルである。図 4.3.15 より、事象位置再構成の精度は 1 ~ 2 cm 向上する事が分かる。MoGURA が 17inch PMT の全チャンネル数 (1,325) に対応する事で、更なる精度向上が期待される。

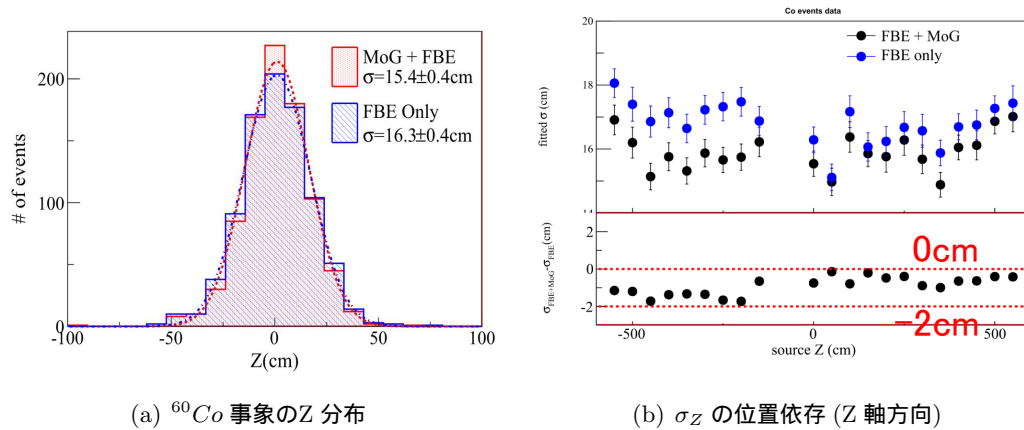


図 4.3.15: MoGURA 導入による事象位置再構成精度の向上 [27]

5 新フロントエンドエレクトロニクス (FEE) 開発

KamFEE は、KamLAND 開始当初から現在まで 10 年以上データ所得を行って来た。しかし、KamFEE は既に老朽化しており、KamLAND2 以降安定したデータ所得を行える保証がない。そこで、KamFEE に替り、安定してデータ所得を行う新たな FEE が必要になる。

KamFEE の代替として、MoGURA が一つの候補である。4 章で述べた通り、MoGURA は KamFEE に代わり得る性能を持っている。もし、現 20inch PMT 本数分のチャンネル数を揃えることが出来れば、KamLAND2 以降のデータ収集を MoGURA で行う事ができる。しかし、MoGURA には以下の様な問題が存在し、実際には KamFEE の代わりを果たすことが出来ない。

- 1 GSPS FADC の廃盤により、これ以上の量産が不可能である。
- Run の途中で原因不明のエラーが生じる。

特に、前者については深刻な問題であり、KamFEE の代替として運用不可能な最大の理由である。

そこで、KamLAND2 以降に用いる FEE を新たに開発する必要がある。新たな FEE として運用するためには、以下の項目が必要絶対条件である。

- 低ノイズなアナログ回路
- デッドタイムフリー性能
- 安定した動作
- 安価な基板価格

また、KamLAND2 以降の将来を見据えて、FEE の多機能化が望まれている。そのため、次期 FEE にはデジタル回路部分の高機能化が必要となる。

本章では、新 FEE のデザインと開発の見通しを述べる。

5.1 新 FEE の目標

新 FEE は、デッドタイムフリー性能や高機能トリガロジック等を踏まえ、MoGURA をベースとした設計を考える。また、以下の項目の実現を目指す。

- 低価格・安定動作性能
 - 回路の単純化によりチャンネル単価の抑制及び、不具合を未然に防ぐ。より具体的には、アンプ回路の削減による 1 基板 14 チャンネル化や汎用的な IC 製品を用いることで実現する。
- デッドタイムフリー性能
 - 宇宙線ミュオンによる原子核破碎生成由来のバックグラウンド除去に必要である。FADC を用いることで実現する。

- 高機能デジタル信号処理
 - － データ所得システムの単純化に関する機能や将来的に計画へ向けた新機能を追加する．複雑なロジックを搭載できる高性能 FPGA を搭載することで実現する．
- Ethernet 技術を用いた高速読み出し
 - － データ読み出し速度を向上するために行う．SiTCP 技術を FPGA に搭載することで実現する．
- 大容量オンボードメモリの搭載
 - － データ量が膨大となる近傍超新星事象を全て所得するために行う．大容量の SO-DIMM を搭載することで実現する．

また，この他，消費電力を可能な限り抑える事を考慮して設計を行う．これは，多数の基板を KamLAND で運用する際に問題となる排熱処理を考慮してのことである．

5.1.1 アナログ回路デザイン

KamLAND に用いる FEE としては，1 p.e. の様な小信号から宇宙線ミュオン信号の様な大信号まで所得出来る必要がある．特に，1 p.e. 信号を始めとする小信号は，事象の位置決定精度やエネルギー分解能に直結するため，高分解能で所得する必要がある．分解能 0.1 mV で 1 nsec 間隔でサンプリングすることが望ましい．この精度を宇宙線ミュオン信号のような大信号にまで適用すると，1 GSPS 17 bit の FADC が必要になる．この様な FADC は，MoGURA 開発当時に存在しなかった．しかし，宇宙線ミュオンレベルの高エネルギー事象にはエネルギー分解能がそれ程必要とされていない．そのため，高精度で波形所得を行う必要のある小信号のみを高増幅率のアンプを通して 1 GSPS 8 bit の FADC(P ゲインチャンネル) で所得し，その他の信号を 3 系統の異なる増幅率のアンプに繋がる 200 MSPS 8 bit の ADC(H, M, L ゲインチャンネル) で所得するという手段をとっている．なお，大信号の場合も信号の立ち上がり部分は 1 GSPS 8 bit FADC で所得出来るため，高エネルギー事象の位置決定精度は悪化しない．

2015 年現在も，1 GSPS 17 bit の FADC は存在していない．そのため，新 FEE でも MoGURA 同様，小信号所得用のゲインチャンネル (P ゲインチャンネル) とその他の信号を所得するためのゲインチャンネル (L ゲインチャンネル) を組み合わせる必要がある．新 FEE では，回路規模を単純化するために，ゲインチャンネルを 2 系統化することを試みる．そのため，価格・性能を考慮して，表 11 の製品を選出した．

表 11: 新 FEE に用いる ADC

ゲインチャンネル	P ゲインチャンネル	L ゲインチャンネル
製品名	Texas Instruments 社製 ADC08D1020	Texas Instruments 社製 ADS42LB69
ADC タイプ	FADC	Pipeline ADC
分解能	8 bit	16 bit
サンプリングレート	1 GSPS	250 MSPS
入力電圧範囲	0 ~ 2.15 V 範囲で 870 mV _{PP}	0 ~ 3V 範囲で 2 V _{PP}
入力チャンネル	差動入力 2 チャンネル	差動入力 2 チャンネル
有効ビット数	7.4 bit @ 248 MHz	11.85 bit @ 170 MHz
SN 比	46.8 dB @ 248 MHz	73.2 dB @ 170 MHz
チャンネル間クロストーク	-65 dB	-100 dB
出力インターフェイス	Parallel LVDS	Parallel LVDS
消費電力	1.7 W	1.64 W

ここで、注目すべき点の一つとして、L ゲインチャンネルの分解能が 16 bit であることが挙げられる。これにより、宇宙線ミュオン信号範囲である +2.5 ~ -10 V までの信号を、 $12.5\text{V}/2^{16} \simeq 0.2\text{mV}$ の分解能でサンプルすることが出来る。つまり、MoGURA の H ゲインよりも高い分解能で L ゲインの信号範囲をサンプルすることが可能となり、ゲインチャンネルを 2 系統化することが出来る。但し、ADC が内包するノイズの影響を受け、16 bit の分解能の内、有効に使えるビット数は 11.85 bit しかない点に注意しなければならない。この場合、実際の分解能は $12.5\text{V}/2^{16} \simeq 3\text{mV}$ となる。

この分解能の寄与によるエネルギー分解能を概算するために、例として、信号幅 72 nsec 程度の中信号が 17inch PMT 1,325 本に入った場合を考える。信号幅 72 nsec の波形は 18 サンプルされるため、信号波形の面積に対する 3 mV 分解能の影響は誤差の伝播式より、

$$\sqrt{(3 \text{ mV} \times \text{nsec})^2 + \dots + (3 \text{ mV} \times \text{nsec})^2} \simeq 12.7 \text{ mV} \times \text{nsec} \quad (5.1.1)$$

となる。ここで、図 4.1.1(a) の 1 p.e. 信号を立ち上がり時間 8 nsec、立ち下がり時間 32 nsec、高さ 3 mV の三角波として近似すると、1 p.e. 当たりの面積は $60 \text{ mV} \times \text{nsec}$ となる。よって、この信号の 1 チャンネル当たりの電荷分解能は 0.21 p.e. と書き換えられる。また、17inch PMT 1,325 本分の総電荷への、1 チャンネル当たりの電荷分解能 0.21 p.e. による影響は、同じく誤差の伝播式より、

$$\sqrt{(0.21 \text{ p.e.})^2 + \dots + (0.21 \text{ p.e.})^2} \simeq 7.64 \text{ p.e.} \quad (5.1.2)$$

となる。現在の 1,325 本の 17inch PMT で検出する場合、1 MeV 事象当たりの総電荷は約 300 p.e. であるため、エネルギー分解能への寄与は 0.025 MeV 程度であることが言える。この分解能は、L ゲインチャンネルが対応する中エネルギーから高エネルギー事象に関しては問題となる精度では

ない。更に、KamLAND2では、1,879本のPMT及び集光率の向上などにより、1 MeV 事象当たりの総電荷は数倍に増加するため、ADC 有効ビット数のエネルギー分解能への寄与は更に小さくなる。したがって、このADC製品を用いることのデメリットは小さいと言える。

また、注目すべきもう一つとして、Pゲインチャンネルの最大入力電圧範囲が870 mV_{PP}となる点が挙げられる。MoGURAに用いたFADCの最大入力電圧範囲の500 mV_{PP}と比較して大きいため、更に高増幅率のアンプを用いて信号を大きくすることで、FADC入力付近で受けるノイズの影響を低減することが出来る。

以上を踏まえて考案されている新FEEの各ゲインチャンネルの仕様を表12に示す。

表 12: 新 FEE における各種ゲインの仕様

ゲインチャンネル	P	L
サンプリングレート	1 GSPS	250 MSPS
入力換算電圧範囲	+2 mV ~ -20 mV	+3 V ~ -10 V
分解能	0.1 mV	0.2 mV
増幅率	40 倍	0.2 倍

5.1.2 オンボード機能

新FEEには、MoGURAの反省点や将来計画を踏まえ、以下の様な部品を実装する。

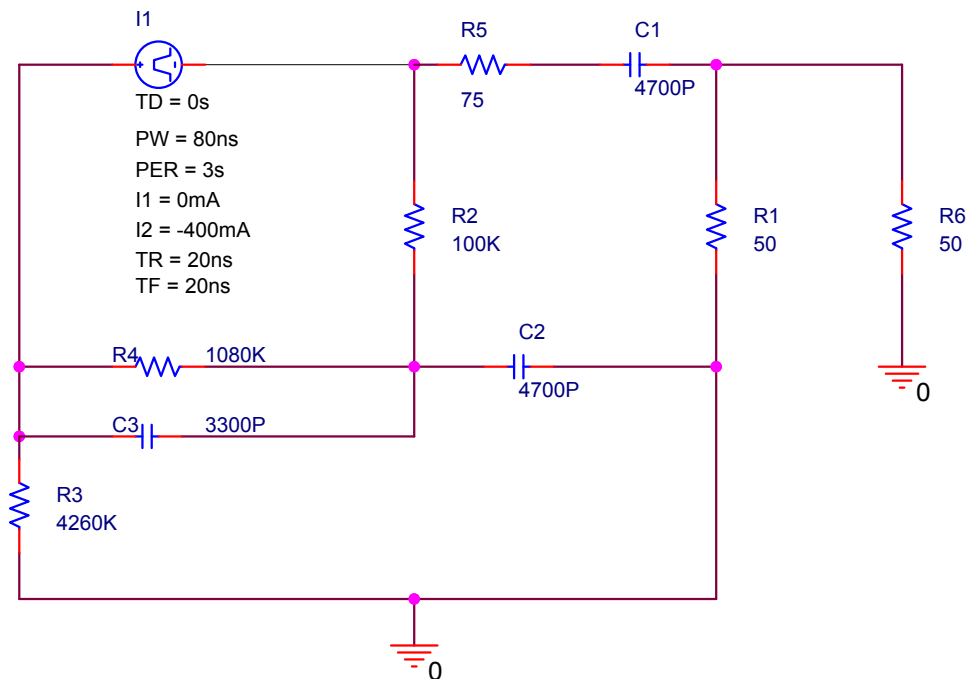
- 高性能 FEF
- Ethernet ポート
- 大容量 SO-DIMM

高性能 FEF：微分 Discrri 機能

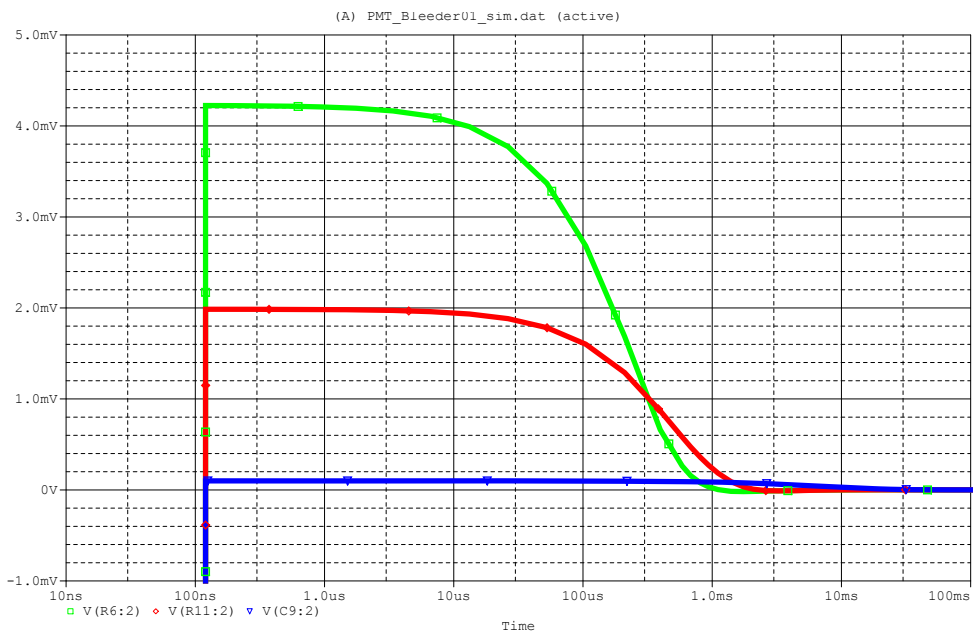
MoGURAでは、宇宙線ミュオン後のオーバーシュートを解消するために、BLRを用いている。しかし、4章で述べた通り、BLRは一つのノイズ源となっている。そこで、KamLAND2に用いる高量子効率PMTでは、ブリーダ回路の改良によってオーバーシュートを低減する試みが行われている。

PMTブリーダ回路において、オーバーシュートを作る原因となっている箇所は、信号出力のAC結合部分である。そのため、この部分の時定数を大きくすることで、キャパシタの放電時間を延長し、オーバーシュートの電圧振幅を小さくすることが出来る。AC結合部分の時定数調整は、図3.1.3におけるC7またはR13の値を調整することで可能である。ここで、C7の変更に付随して、C6の変更も必要である。そこで、OrCAD PSpiceシミュレータを用いて、PMTブリーダ回路のオーバーシュートシミュレーションを行った。図5.1.1に、用いたPMTブリーダ回路の等価回路とシミュレーション結果を示す。なお、擬似宇宙線ミュオン信号(30,000 p.e.)として、電

圧振幅 10 V , 立ち上がり時間 20 nsec , 立ち下がり時間 20 nsec , 上底 120 nsec , 下底 80 nsec の台形波を電流入力 I2 とした .



(a) PMT ブリーダ回路の等価回路



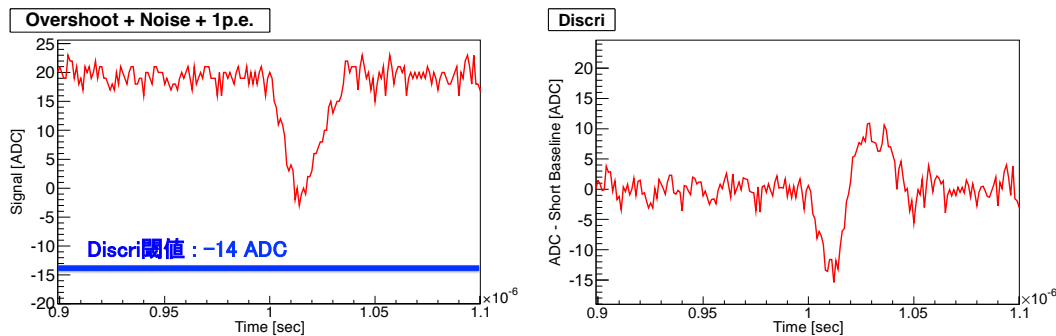
(b) オーバーシュートシミュレーション結果 (R6 上端の電圧)

図 5.1.1: OrCAD PSpice による PMT ブリーダ回路のオーバーシュートシミュレーション . 緑色 : C1=4700 pF, R2=100 kΩ(現 17inch PMT) , 赤色 : C1=10000 pF, R2=100 kΩ , 青色 : 10000 pF, R2=2 MΩ .

ここで、C1のキャパシタには3 kV耐電圧のセラミックコンデンサを用いる必要があるが、安価に手に入る製品としては10000 pFのキャパシタが最大容量となる。そのため、時定数を大きくするには、C1=10000 pFとして、R2を値を大きくする方法しかない。図5.1.1の右図より、C1=10000 pF、R2=2 MΩの組み合わせにより、時定数は現在のブリーダ回路の約40倍となるため、オーバーシュートの電圧振幅は約0.1 mVに抑制されることが分かる。しかし、R2を20倍とすることで、R2由来の熱雑音の効果が $\sqrt{20}$ 倍となってしまう、BLRの代わりにブリーダ回路の仕様を変更するメリットが無くなってしまう。そのため、ブリーダ回路仕様は、C1=10000 pFとR2=100 kΩの組み合わせによる時定数約2倍の延長がせいぜいである。この場合、オーバーシュートの電圧振幅は約2 mVとなり、中性子捕獲事象の1 p.e. 信号をDiscrriすることが出来ない。

そこで、従来の電圧値によるDiscrriを撤廃し、新たに微分Discrri機能を実装することでオーバーシュート問題の解決を試みる。微分Discrriとは、ごく短い期間の信号変化分から信号の立ち上がりを検出することで、HIT判定を行う方法である。これは、ベースラインのレベルに依存せずに行うことが出来るため、FEFに微分Discrriロジックを実装することで、オーバーシュート中に1 p.e. 信号をDiscrriすることが可能になる。現在考案中の微分Discrriロジックによる信号検出シミュレーションの一例を図5.1.2に示す。

しかし、FPGAにこのようなロジックを実装するには、多くのロジックセルを必要とする。MoGURAのFEFは、既に複雑な信号処理ロジックが多数実装されており、新たに機能を追加する余裕が無い。そこで、新FEEに搭載するFEFには、高性能なFPGAを搭載することで、微分Discrriロジックの実装を可能にする。



(a) 宇宙線ミューオン後約1 μsec時の擬似1 p.e. 信号 (b) 微分結果。-14 ~ -5 nsec 遡った期間のADC値を約120 MHzまでのホワイトノイズを含んで平均をShortBaselineと定義し、各時点でのADC値から差し引いた結果。

図5.1.2: ベースライン上昇時の1 p.e. 信号微分シミュレーション。Discrri 閾値を超えない信号ピークを検出可能なことが確認できる。

高性能 FEF : 大容量一次バッファ

現在, 全 PMT ガラス内の U, Th 等の放射性不純物 (約 4 MeV の α 線を放出) は合計で数十 kBq 存在する. これ等が検出器内で事象を作ると, データ量が膨大となり, データ所得が破綻してしまう. その対策として, KamLAND 内部検出器内には, 液体シンチレータと PMT 間にシンチレーション光を発しないバッファオイルの層が存在する. しかし, もしトリガボードで HIT 情報から事象位置を判定し, PMT 付近のバックグラウンド事象を排除することが出来れば, バッファオイル層が不要となり, 液体シンチレータ量を約 2.2 kton 化することが可能となる. その結果, 地球反電子ニュートリノ観測に関しては, PMT 不純物に起因する $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ バックグラウンドを考慮して, PMT 表面から 0.5 m の領域を解析時にカットして, 有効体積は現在の約 2.4 倍となる約 1.9 kton に増加する事が出来る. また, 超新星ニュートリノ観測や陽子崩壊観測では, 比較的高エネルギーな事象であるため PMT 表面直前までを解析に用いることが可能であり, 有効体積は約 2.2 kton 全てを用いることが出来る. 現在, 図 5.1.3 に示す PMT ダイヤモンド集団毎の HIT タイミングにより, 事象位置を判定する方法が研究されている.

例として, KamLAND 内部検出器の中心から $R=0\text{ m}, 2\text{ m}, 4\text{ m}, 6\text{ m}$ の位置で, 10 MeV の陽電子事象 (約 3,000 p.e.) による GEANT4 シミュレーションを行った結果を図 5.1.4 に示す. ここで, HIT 信号は 250 MHz でトリガへ送られるものとし, 各 PMT ダイヤモンド集団で 3 HIT することをダイヤモンド HIT と定義する. 図 5.1.4(a) は事象位置毎のダイヤモンド HIT タイミングの分布である. これより, 最初のダイヤモンド HIT から最後のダイヤモンド HIT までの時間をダイヤモンド HIT タイミング幅と定義すると, 各事象位置のダイヤモンド HIT タイミング幅は図 5.1.4(b) となる. ここで, 右上図は事象位置とダイヤモンド HIT タイミング幅の関係を直線フィットしたものであり, 直線の傾きから, ダイヤモンド HIT タイミング判定による位置分解能は約 30 cm であることが言える. 以上の結果は, バックグラウンド事象などを考慮しない理想的なシミュレーションに基づいたものではあるが, ダイヤモンド HIT タイミングによる事象位置判定トリガ開発を行うモチベーションとしては十分である.

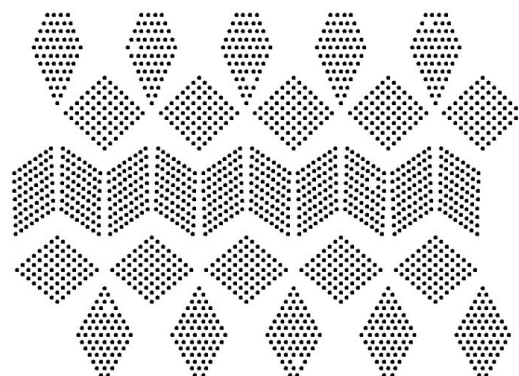
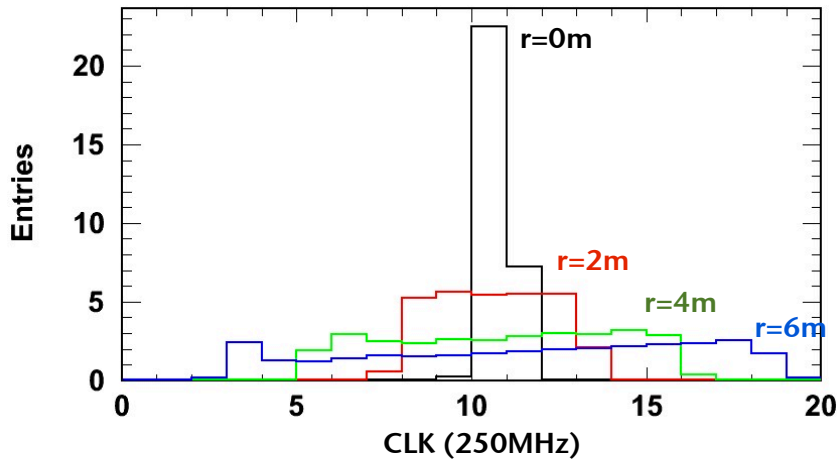
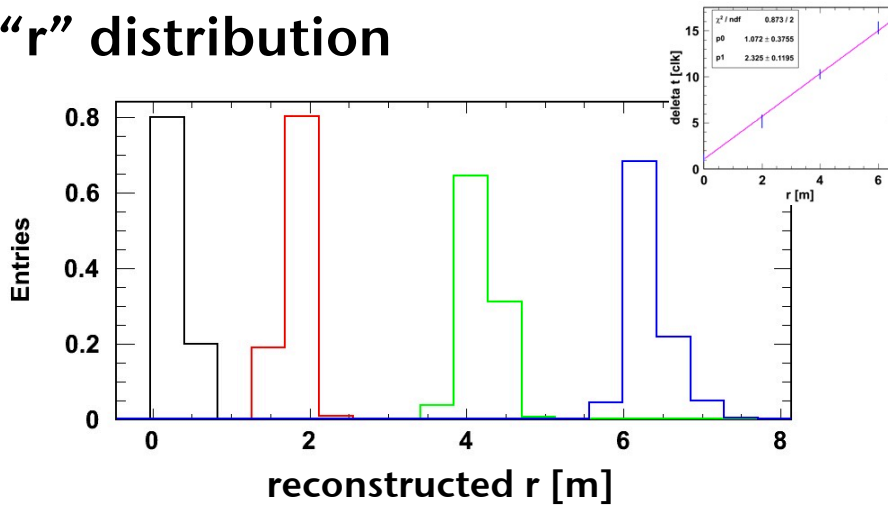


図 5.1.3: KamLAND 内部検出器の PMT 集団ダイヤモンド構造を平面上に広げた図



(a) 事象位置毎のダイヤモンド HIT タイミングの分布

“r” distribution



(b) 事象位置のダイヤモンド HIT タイミング幅依存．右上図は事象位置とダイヤモンド HIT タイミング幅の関係の直線フィット

図 5.1.4: ダイヤモンド HIT タイミングによる事象位置特定

しかし、このトリガロジックは非常に複雑になることが予想され、トリガ回路の FPGA にソフトウェアプロセッサを実装する等してトリガ判定を行わなければならない可能性がある。この場合、FEE の HIT 判定からトリガ受信までのレイテンシが大きくなる可能性がある。その場合、FEE に実装する一次バッファの容量が必要になる。宇宙線ミュオン連続事象中から中性子捕獲事象を Adaptive Trigger を用いて検出していることから分かる通り、MoGURA FEE の一次バッファをこれ以上増加させることは出来ない。そこで、ダイヤモンド HIT タイミングによる事象位置判定トリガ開発に向けて、新 FEE に搭載する FEE には、大容量のブロック RAM を搭載する高性能 FPGA が必要となる。

以上を踏まえて、新 FEE に用いる FEE として、Xilinx 社 7 シリーズの Kintex-7 ファミリー製品を用いる。MoGURA FEE として用いている Xilinx 社 Spartan-3 ファミリー XC3S2000 と、Kintex-7

ファミリの下位デバイスである XC7K160T の性能比較を表 13 に示す。

表 13: MoGURA FEF と新 FEE FEF 候補の性能比較

製品	Kintex-7 ファミリ XC7K160T	Spartan-3 ファミリ XC3S2000
ロジックセル	162,240	46,080
CLB スライス	25,350	20,480
分散 RAM	2,188 Kbit	320 Kbit
ブロック RAM	11,700 Kbit	720 Kbit
最大ユーザ I/O	400	270

Ethernet ポート

MoGURA では、データの読み出しやコマンド送信を VME インターフェイスを用いて行っている。しかし、VME インターフェイスを使用するための回路規模は比較的大きくなってしまふ。また、現在 KamLAND で運用している VME の読み出し速度は 1VME クレート当たり 13.7 MB/sec と、近年のデータ転送技術と比較すると遅れをとっている。そこで、新 FEE では Ethernet によるデータ読み出し・コマンド送信を行う。これは、高エネルギー加速器研究機構の内田智久氏が開発した Xilinx 製品の FPGA に TCP/Ethernet 機能を与える SiTCP 技術を sFPGA に実装することで実現する。SiTCP は、Xilinx 社製 FPGA と RJ45 Ethernet ポートの他に Ether-PHY チップ 1 個を必要とするのみであり、単純な回路構成で実現する事が出来る。また、SiTCP を用いた Ethernet 読み出し速度は 100 Mbps が保証されており、新 FEE では 100 Mbps の高速データ読み出しが行えるようになる。

大容量 SO-DIMM

MoGURA では、64 MB の SDRAM(Synchronous Dynamic Random Access Memory) が基板上に実装されており、VME 側からの読み出し命令まで、一時的にデータを蓄積することが出来る。通常時であれば、この SDRAM 容量は十分なものである。しかし、近傍超新星時は、KamLAND にて極めて高レートの事象が発生し、膨大なデータ量を PC 側へ転送することが出来ずに SDRAM 容量が Full となってしまう。そこで、新 FEE では安価で大容量な SO-DIMM(Small Outline Dual In-line Memory Module) を基板上に実装し、近傍超新星事象のデータを全て記録可能にする。

近傍超新星時は、最大で 20 sec の間に約 2 MEvents の事象が発生すると予想されている。MoGURA における積分値モードで 1 波形当たりのデータ数は 16 byte であるため、14 チャンネル基板の FEE 当たりのデータ容量は、

$$16 \text{ byte} \times 2 \text{ MEvents} \times 14 \text{ Ch} = 440 \text{ MB}$$

となる。したがって、標準的な 1 ~ 2 GB の SO-DIMM を実装することで、近傍超新星事象に対応出来る様になる。ここで、SO-DIMM のピン数は 204 ピンと非常に多いため、データの読み書きを行う sFPGA には I/O ピンの数が求められる。そのため、性能やコストを考慮に入れると、新

FEE に用いる sFPGA には，ユーザ I/O 数 500 の Xilinx 社製 Artix-7 ファミリ XC7A200T が適していると考えられる．

5.2 新 FEE 開発の見通し

一般的な基板開発では，回路の仕様決定や用いる部品の選定等を行う必要がある．そこで，基本的な性能評価や技術試験のためにテスト基板の作製がしばしば行われる．また，基板量産の前段階には，プロトタイプ機を製作して回路パターン等の確認作業が必ず行われなければならない．この様な，基板開発の作法に沿って，次期 KamLAND 計画で運用する新 FEE の開発を以下のスケジュールで行う予定である．

1. テスト基板開発

- テスト基板の回路設計を行う．
- テスト基板の作製を行う．

2. テスト基板の性能評価

- 要求される性能が得られない場合，再びテスト基板の回路設計からやり直す．

3. 量産基板へむけたプロトタイプ基板の開発

- プロトタイプ基板の作製には，量産基板と同じ設計図を用いる．

4. プロトタイプ基板の評価

- この時点で全ての不具合を明らかにし，対策を講じる．

5. 量産基板の開発

- プロトタイプ基板を基に開発する．

また，この他，新 FEE に関連して用いられるトリガ回路やコマンド分配基板等を平行して開発する予定である．

5.3 新 FEE を用いた DAQ システム

KamLAND2 以降は，新 FEE を用いて，新たな DAQ システムを構築する．図 5.3.1 に新 DAQ システムの概要を示す．

まず，内部検出器 (ID) の PMT 信号波形取得には，ADC 回路として新 FEE を用いる．また，外部検出器 (OD) の PMT 信号波形取得には，コスト抑制を目的として，MoGURA を流用する．そして，これらの ADC 回路から出力される HIT 信号を受け，トリガ出力を行うトリガ回路を設ける．ここで，用いるトリガ回路は新たに開発を行う予定である．

各基板はフロントエンド PC からコマンド受信やデータ転送を行う。ID 用 ADC 基板やトリガ回路は、フロントエンド PC との通信に Ethernet による TCP/UDP 通信を用いて行う。ここで、ID 用 ADC 基板の最大通信速度は 100 Mbps であるため、複数の Ethernet ケーブルを Hub でまとめて、Gbit Ethernet ケーブルによりフロントエンド PC と接続される。また、OD 用 ADC 基板では、MoGURA の現在の通信方法である VME/PCI を用いる。フロントエンド PC は更にシステム全体を制御するホスト PC にネットワーク接続される。

以上の DAQ システムは、高エネルギー加速器研究機構と産業技術総合研究所が共同開発した DAQ-Middleware を用いる事を予定している。DAQ-Middleware は、ネットワーク分散環境でデータ収集ソフトウェアを構築するためのソフトウェア・フレームワークであり、日本国内の素粒子・原子核実験で広く用いられている。

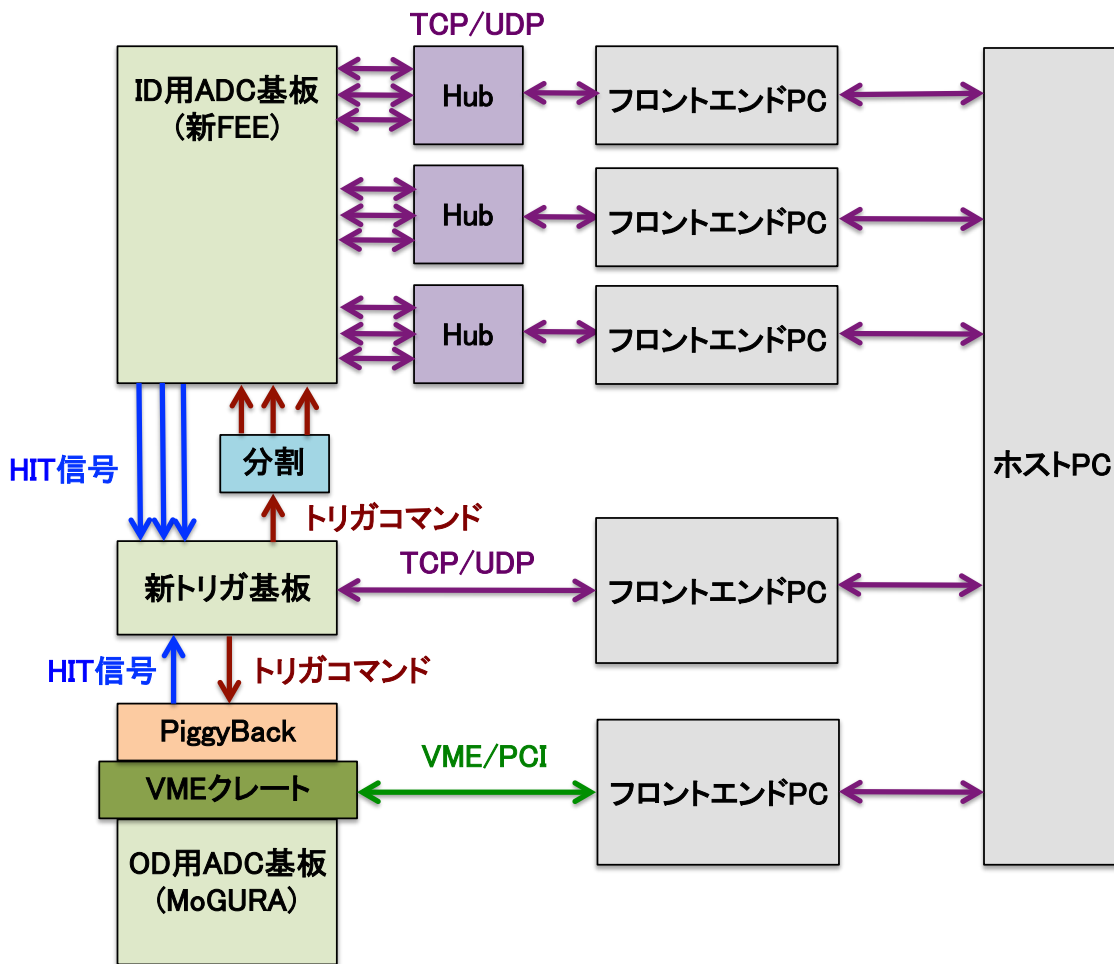


図 5.3.1: 新 FEE を用いた DAQ システムの概念図

6 新 FEE テスト基板開発

新 FEE 開発に用いる技術の試験を目的としたテスト基板の開発を行う。この度、テスト基板の回路設計を行った。本章では、開発の目的とテスト基板に実装する機能、回路の設計概要を記述する。なお、テスト基板の回路図は付録に記載する。

テスト基板では、主に以下の項目を実行する。

- アナログ回路の性能評価
 - － 基本的な増幅動作の確認
 - － ノイズレベルの測定
 - － 電源不安定性による影響の測定
- 各種部品の性能評価
 - － 消費電力の測定
 - － スイッチングレギュレータにより作成した電源の安定性
- SiTCP を用いた Ethernet 読み出しの確認
 - － SiTCP 用インターフェイスの動作確認
 - － PC 側のデータ所得ソフトウェアの動作確認
- 新ロジックによる波形データ処理の確認
 - － FPGA への新ロジック実装テスト
 - － 微分 Discr1 機能による HIT 判定精度の測定

ここで、新 FEE に搭載を予定している SO-DIMM は、タイミング制約による配線の等長処理が非常に困難である。それ故に、開発期間と費用が増大してしまうため、この度のテスト基板では実装を見送った。

図 6.0.2 に、テスト基板の概略図を示す。テスト基板の寸法は 340 mm × 233 mm の VME 6U サイズである。但し、VME インターフェイス及び VME 電源を用いないため、厳密な寸法は異なる予定である。2 チャンネルの BNC 信号入力に対応しており、外部からアナログトリガを入力出来る様に LEMO 入力端子が存在する。アンプ回路と ADC には、新 FEE で用いることを想定して設計された物が用いられ、FPGA は新 FEE で sFPGA として用いる予定の製品を使用する。ADC に供給するクロックと FPGA に供給するクロックは基板上に搭載される。また、Ethernet を用いてデータ読み出し等を行うために、Ether-PHY と RJ45 コネクタが実装される。ここで、FPGA とテスト信号の入出力を行うために、信号入出力コネクタと 4 個の LED が存在する。電源入力、新 FEE を現在の VME 電源で運用することを想定して、+15 V と +12 V 入力となっている。

以降、回路各部の設計概要を説明する。

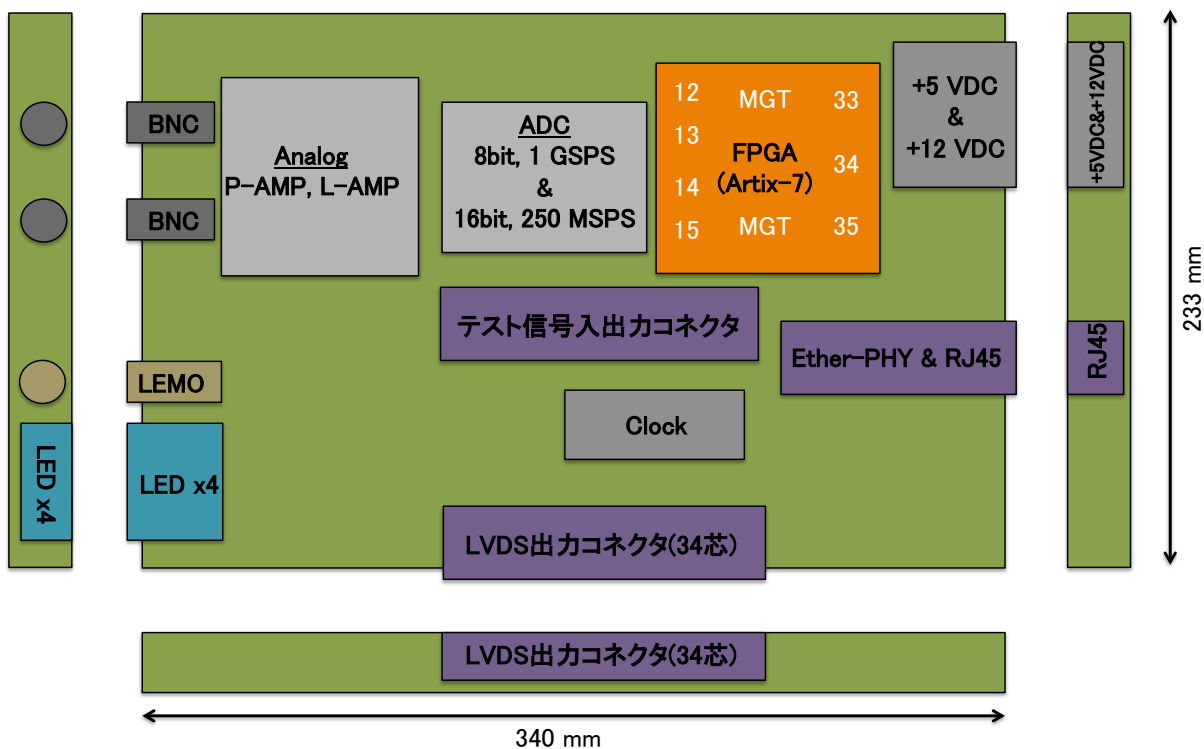


図 6.0.2: テスト基板の概略図

6.1 アンプ回路設計

6.1.1 アンプ回路概要

新FEEでは、小信号所得用のゲインチャネル(Pゲインチャネル)と大信号所得用のゲインチャネル(Lゲインチャネル)の2種類が用いられる。表12に示した通り、Pゲインチャネルには20倍アンプ回路を、Lゲインチャネルには0.2倍アンプ回路を用いる。これらのアンプ回路は、オペアンプを用いた基本的な増幅回路を基に設計した。図6.1.1にアンプ回路の基本構成を示す。また、表??に用いたオペアンプ製品的主要性能を示す。

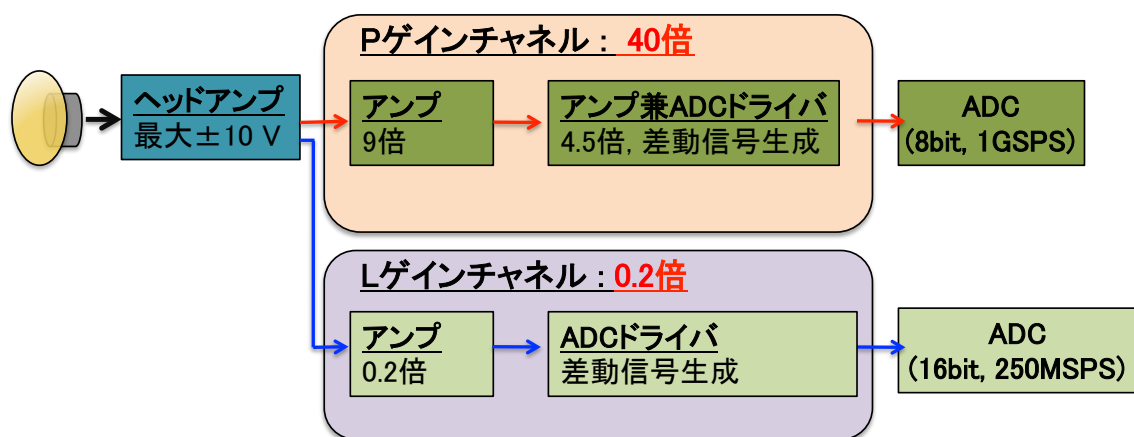


図 6.1.1: アンプ回路の基本構成図

表 14: アンプ回路に用いるオペアンプ製品の主な性能

製品名	THS3091	THS3201	LMH6702	ADA4927
メーカー	Texas Instruments			Analog Devices
周波数帯域 (2 倍増幅時)	210 MHz	1.8 GHz	1.7 GHz	2.3 GHz
入力電圧ノイズ nV/\sqrt{Hz}	2	1.65	1.83	1.4
入力電流ノイズ pA/\sqrt{Hz}	(+14/-17)	(+13.4/-20)	(+3/-18.5)	4
Slew Rate $V/\mu sec$	7,300	6,700	3,100	5,000
電源電圧 V	$\pm 5 \sim \pm 15$	$\pm 3.3 \sim \pm 7.5$	± 5	$\pm 2.5 \sim \pm 5$
用途	ヘッドアンプ	P ゲイン	L ゲイン	ADC ドライバ

ヘッドアンプ

まず、PMT 信号はヘッドアンプに入力される。ヘッドアンプは、主に信号電圧を最大 $\pm 10 V$ に制限するためのものである。これは、後段の素子を大信号より保護するために必要である。信号電圧の制限は、ダイオードを用いることで行うが、過渡応答が十分でない可能性も踏まえて、電源電圧 $\pm 10 V$ のオペアンプが必要となる。ヘッドアンプに用いるオペアンプは、耐電圧特性やノイズ特性などを考慮して、Texas Instruments 社製 THS3091 を用いた。その他、ヘッドアンプは LPF の役割を担い、約 200 MHz 以上の周波数成分をカットし、1 GSPS ADC サンプリングのエイリアシング効果を低減している。

P ゲインチャンネルアンプ

ヘッドアンプを通った信号は、P ゲインチャンネルと L ゲインチャンネルに分配される。P ゲインチャンネル最初のアンプ回路には、電流帰還型のオペアンプである Texas Instruments 社製 THS3201 を用いた。これは、周波数帯域を確保したまま大きな増幅率を得るためである。オペアンプの周

波数帯域は、増幅率の大きさと負の相関がある。そのため、十分な周波数帯域を確保したまま得られる増幅率の最大値である 9 倍のアンプ回路で設計を行った。

ここで、P ゲインチャンネルに用いる ADC は差動入力のものである。そのため、差動信号を作成用のオペアンプ (ADC ドライバ) として、Analog Devices 社製 ADA4927 を用いた。P ゲインチャンネルでは、ADA4927 を増幅率 9 倍の増幅回路としても用いている。これにより、この増幅回路出力までに、入力信号は約 80 倍になっている。しかし、ADC への入力信号を ADC の絶対定格に抑えるために、大信号をクリップする必要がある。これは、ダイオードを用いて行うため、付随してアンプ回路出力部分に抵抗を追加する必要がある。本回路では、 $49.9\ \Omega$ の抵抗を用いており、ADC の入力インピーダンスが $50\ \Omega$ であることから、ADC 入力時の信号は $1/2$ にされてしまう。そのため、P ゲインチャンネル増幅回路の増幅率は 40 倍となる。以上、テスト基板の P ゲインチャンネルには 2 つのアンプを用いている。なお、MoGURA の P ゲインチャンネルでは、20 倍の増幅率を得るために 3 つのアンプを用いているため、テスト基板のアナログ回路は単純化されている。

L ゲインチャンネルアンプ

L ゲインチャンネルでは、信号を先ず抵抗分割で $1/10$ にした後、オペアンプを用いた増幅率 2 倍の増幅回路に入力される。ここで、オペアンプは増幅を行わない場合は性能が低下してしまうため、2 倍の増幅を行っている。L ゲインチャンネルでは大きな増幅を行わないため、安価で低ノイズの Texas Instruments 社製 LMH6702 を用いた。また、L ゲインチャンネルに用いる ADC も差動入力のものを用いるため、ADC ドライバとして ADA4927 を用いて差動信号を作成している。

ADC ドライバの役割

ここで、両ゲインチャンネルの ADC 入力に対して以下の項目について注意しなければならない。

- ADC への入力コモンモード電圧の設定が必要なこと
- ADC サンプリング電圧範囲が正側・負側に等分配されること
- ADC のエイリアシングを低減するための LPF が必要なこと

これらの対策を講じる役割を担うのが ADA4927 を用いた ADC ドライバである。

先ず、ADC への入力コモンモード電圧は、ADC チップより出力されるリファレンス信号 (P ゲイン ADC : $1.26\ \text{V}$, L ゲイン ADC : $1.9\ \text{V}$) より設定される。このリファレンス電圧値を ADA4927 の出力コモンモード電圧設定端子に入力する。ここで、P ゲインチャンネルに用いる ADC が出力するリファレンス信号の電流は、ADA4927 の定格を超えてしまうため、バッファとしてボルテージフォロワ回路を通して ADA4927 端子に入力される。L ゲインチャンネルについては、ADC が出力するリファレンス信号の電流は、ADA4927 の定格内であるため、そのまま入力される。

次に、サンプリング電圧範囲が正側・負側に等分配されることについて、信号のベースラインが $0\ \text{V}$ である場合は PMT 信号波形の存在しない正側の電圧領域を無駄にしてしまうため不都合である。そのため、信号のベースラインを正側に調整する必要がある。これは、ADA4927 に加算回路機能を追加することで行う。ベースラインへ加算する電圧値は、DAC(Digital to Analog Converter)

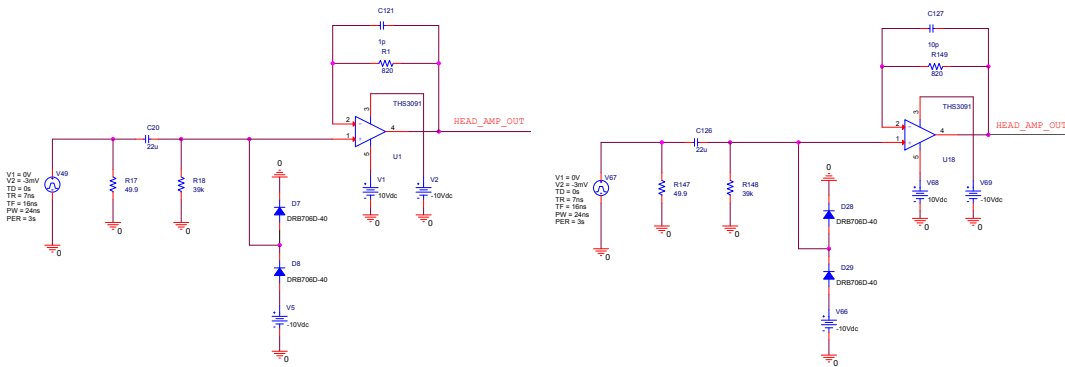
を用いて生成する．ここで，価格やノイズ特性及び分解能を考慮して，Texas Instruments 社製 DAC7678 という 12 bit の DAC を用いた．

最後に，ADC を用いる際には，サンプリング周波数の半分以上の周波数成分に対して生じるエイリアシングと呼ばれる標準化雑音に注意しなければならない．そのため，ADA4927 に LPF 機能を追加することで対策を講じる．LPF 機能は，ADA4927 の差動信号間にキャパシタを追加することで実現される．これにより，P ゲインチャンネルでは約 500 MHz，L ゲインチャンネルでは約 150 MHz を遮断周波数とする LPF が存在している．

6.1.2 P ゲインチャンネルアンプの特性

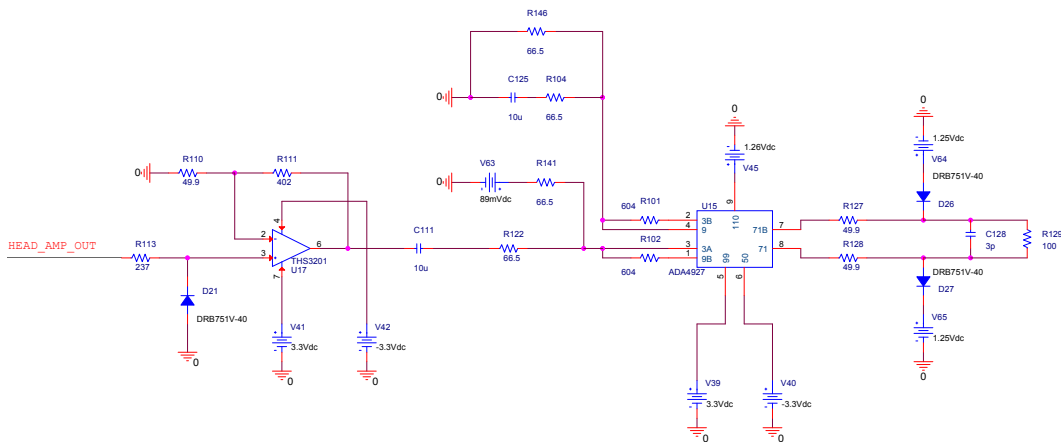
以上の回路構成を基に，OrCAD PSpice を用いて P ゲインチャンネルアンプのアナログシミュレーションを行った．図 6.1.2 に，ヘッドアンプ及び P ゲインチャンネルアンプのシミュレーション回路を示す．

先ず，小信号に対する増幅特性を調べるため，振幅 3 mV の正弦波に対する周波数特性のシミュレーションを行った．その結果として，正出力側の増幅率 (1 V 基準) の周波数特性を図 6.1.3 に示す．これを見ると，低周波成分がテスト基板では -24 dB (約 20 倍)，MoGURA では -30 dB (約 10 倍) となっていることが分かる．つまり，差動で考えると，テスト基板は約 40 倍，MoGURA では約 20 倍の増幅率となり，設計通りの値となる．また，周波数帯域はテスト基板では約 105 MHz，MoGURA では約 70 MHz となっていることが分かる．以上の結果は，MoGURA と比較して，テスト基板では高周波成分まで高い増幅率で信号増幅することが出来る事を意味している．

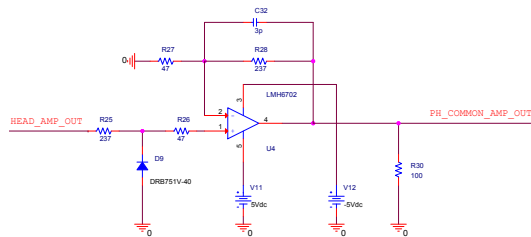


(a) テスト基板のヘッドアンプ

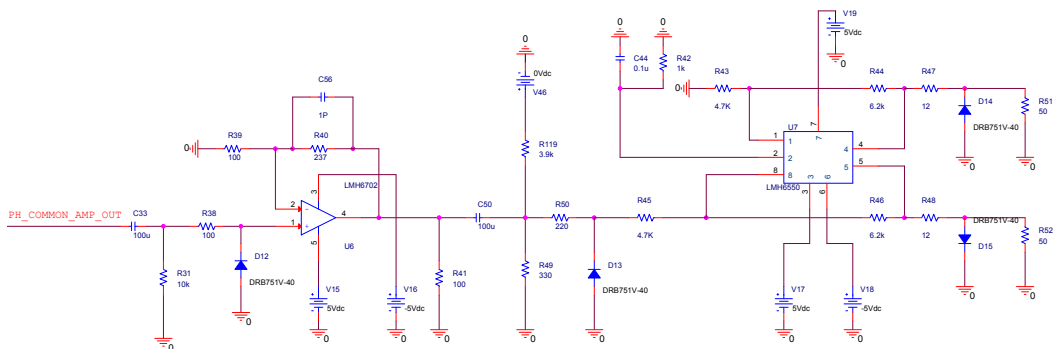
(b) MoGURA のヘッドアンプ



(c) テスト基板の P ゲインチャネルアンプ



(d) MoGURA の P ゲインチャネルアンプ (初段)



(e) MoGURA の P ゲインチャネルアンプ (後段)

図 6.1.2: シミュレーションに用いたアンプ回路

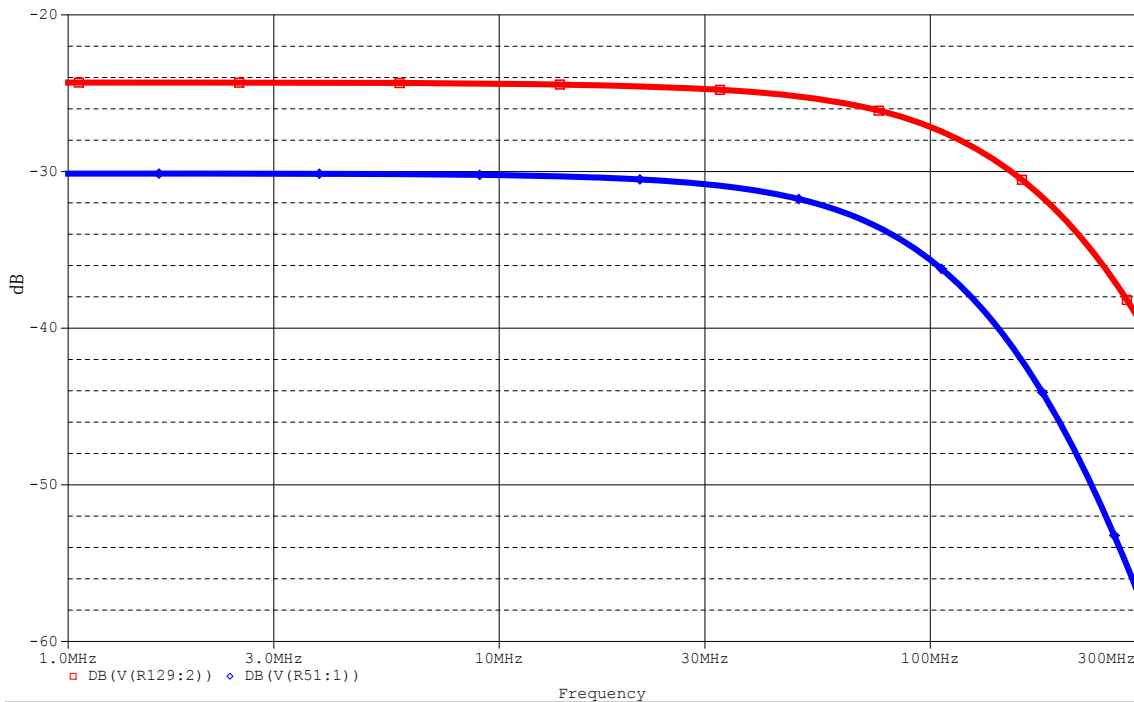
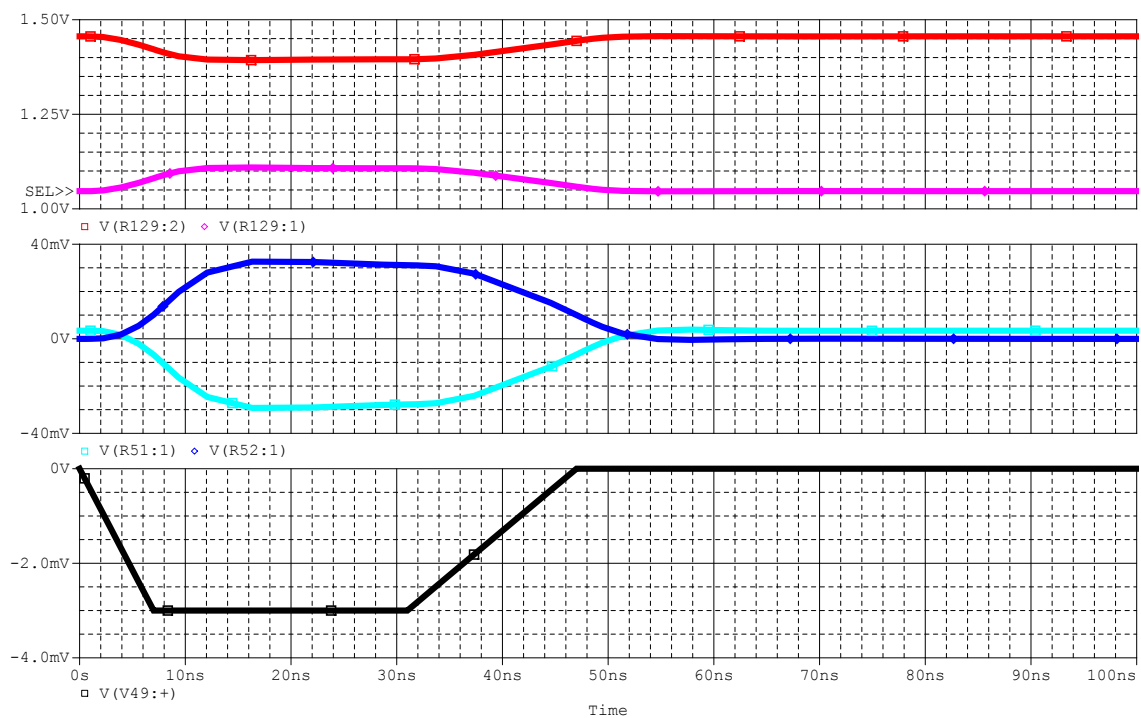


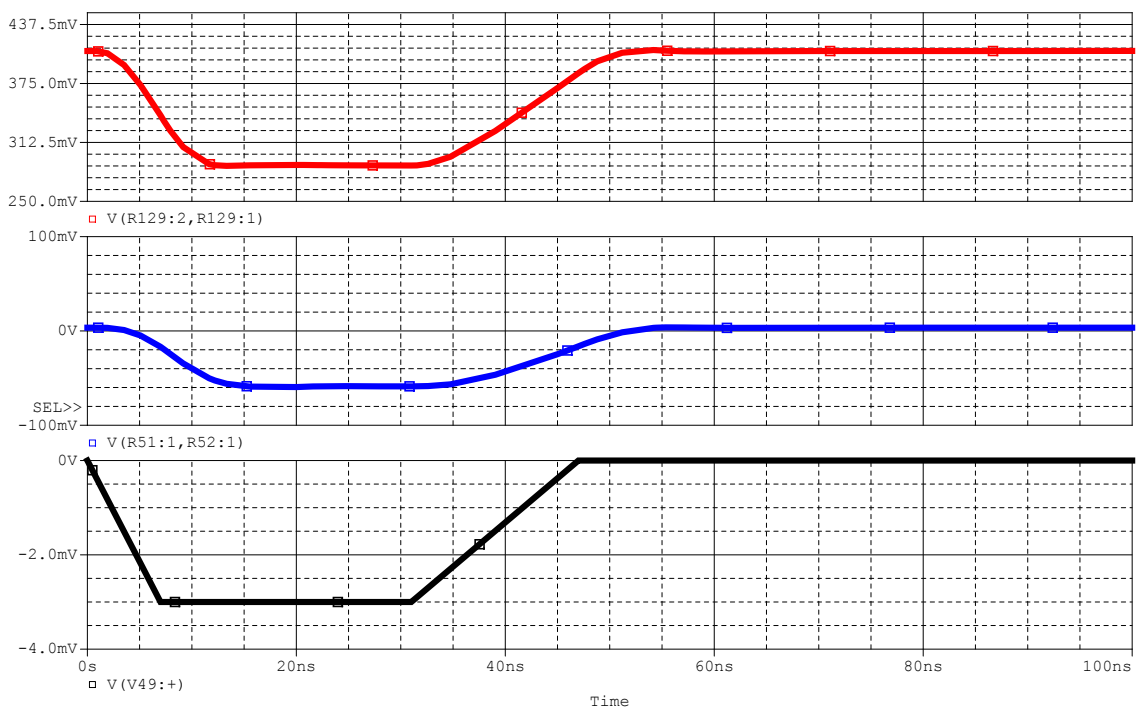
図 6.1.3: テスト基板と MoGURA の P ゲインチャンネルアンプ周波数特性 (正出力側) 増幅率は 1 V が基準 . 赤色がテスト基板 , 青色が MoGURA .

この回路を , 擬似 2 p.e. 信号を例に確かめたものが図 6.1.4 である . 図 6.1.4(a) は , 電圧振幅-3 mV の擬似 2 p.e. 信号に対する P ゲインチャンネルアンプの出力信号である . MoGURA では共通モード電圧が 0 V 付近であるのに対し , テスト基板では設定値通りの 1.26 V になっていることが分かる . これらの出力信号を差動信号として描いたものが , 図 6.1.4(b) である . これを見ると , テスト基板の出力振幅は 120 mV となっており , 設計通りの 40 倍増幅となっていることが分かる . また , ベースラインの値は MoGURA では約 0 V であるのに対し , テスト基板では約 400 mV になっていることが分かる . ADA4927 におけるベースライン加算電圧 89 mV を 4.5 倍増幅した事に由来する . これにより , ADC の正側電圧サンプリングに対応していることが確認出来た .

図 6.1.4(b) より , テスト基板と MoGURA 出力のベースラインと増幅率を調整して比較したものが , 図 6.1.5 である . これを見ると , MoGURA と比較してテスト基板出力は信号増幅をシャープに行えることが分かる . これは , テスト基板の周波数帯域が広いことに由来する . オペアンプ数の削減及び増幅率の増大がなされているにも関わらず , 正しい信号増幅が行える点はテスト基板アンプ回路の優位点である .



(a) 擬似 2 p.e. 信号 (黒色) に対するテスト基板 P ゲインチャンネル出力 (正側 : 赤色, 負側 : 桃色) と MoGURA P ゲインチャンネル出力 (正側 : 青色, 負側 : 水色)



(b) 擬似 2 p.e. 信号 (黒色) に対するテスト基板 P ゲインチャンネル差動出力 (赤色) と MoGURA P ゲインチャンネル差動出力 (青色)

図 6.1.4: 擬似 2 p.e. 信号に対するテスト基板と MoGURA の P ゲインチャンネル出力比較

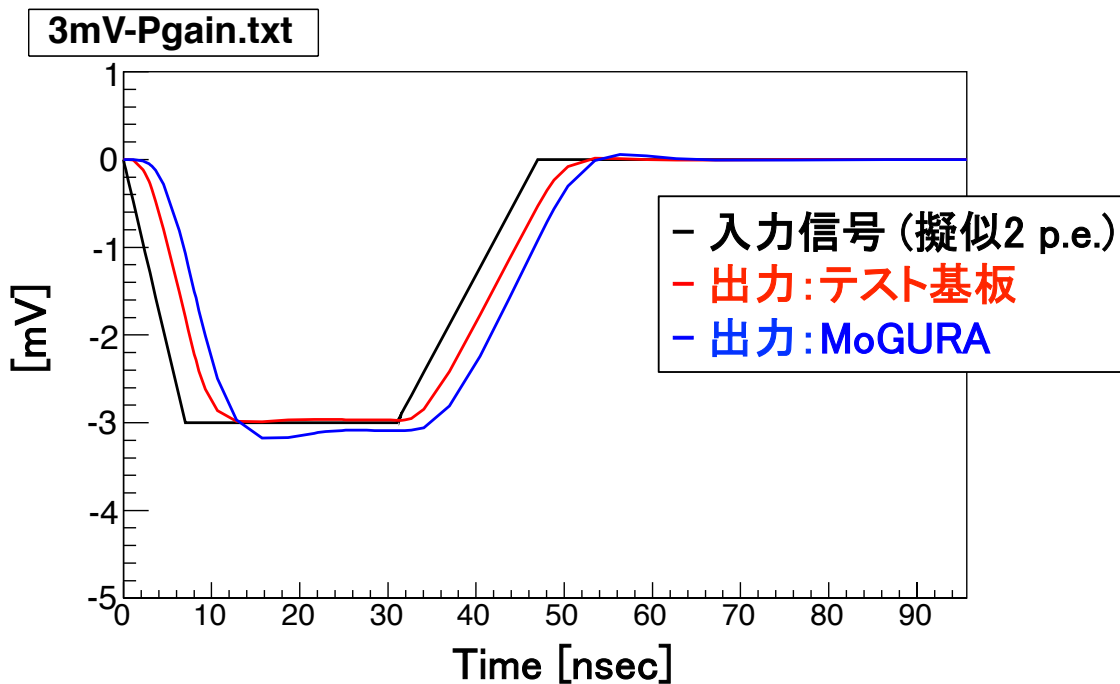
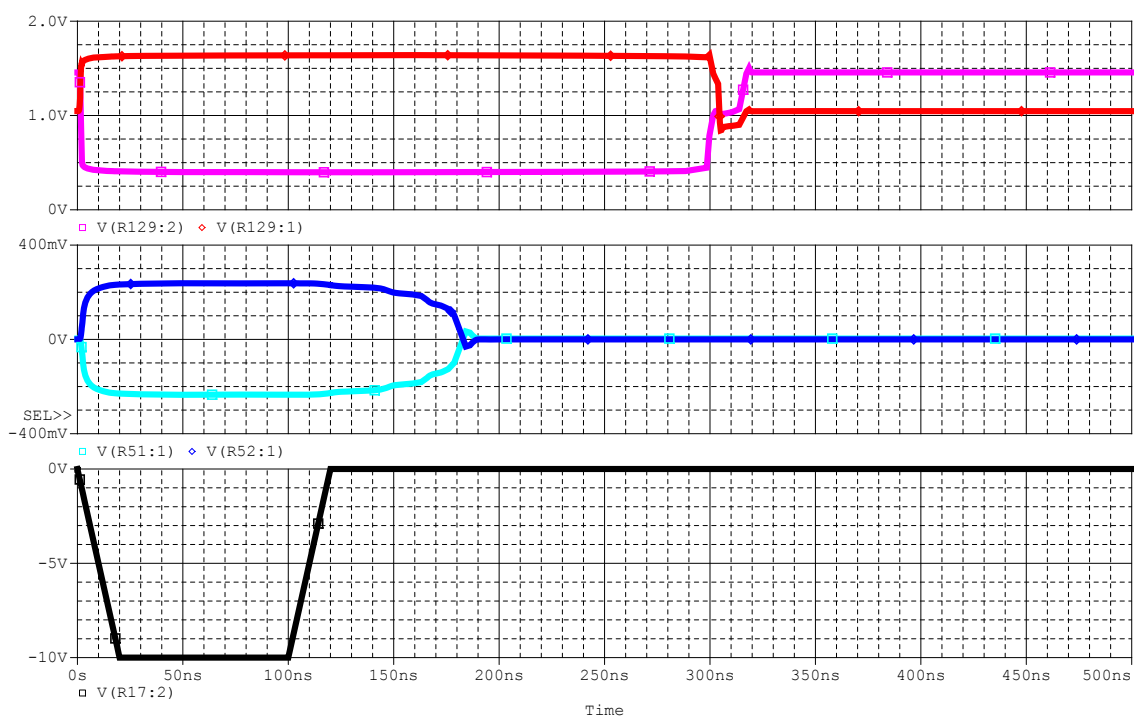


図 6.1.5: 小信号に対する P ゲインチャンネルアンプの出力特性．黒色が入力信号 (擬似 2 p.e.) , 赤色がテスト基板, 青色が MoGURA . ベースライン調整・信号振幅/増幅率の処理を行っている .

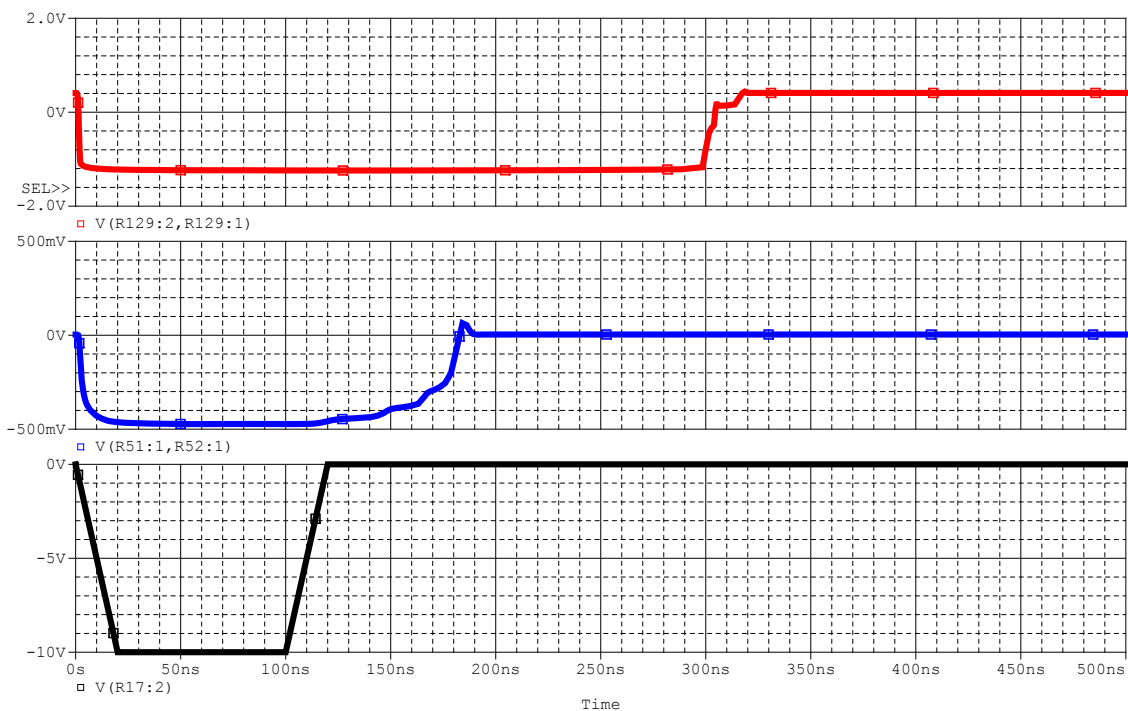
次に, P ゲインチャンネルアンプの大信号に対する応答のシミュレーションを行った . 擬似 30,000 p.e. 信号として振幅-10 V の台形波を入力信号とした結果が図 6.1.6 である . 特に, 図 6.1.6(b) に注意して見ると, ADC 定格である-0.15 V ~ +2.05 V 以内に収まっていることが分かる . これは, ADC ドライバ出力部分のダイオードによるクリッピングが働き, 大信号時に飽和する様になっているためである .

ここで, 図 6.1.6(b) でベースラインに注目すると, MoGURA の場合は約 70 nsec で 0 V に回復していることが分かる . オペアンプ出力が飽和してしまうと, その回復にある程度の時間を要する . そのため, MoGURA では, 各アンプの増幅率を調整して, 大信号に対してオペアンプ出力が飽和しないように設計されている . 一方, テスト基板では, 回路の単純化を目指してオペアンプ数を削減しているため, 各アンプの増幅率が大きくなり, 大信号時にオペアンプが飽和してしまう . そのため, ベースラインが約 400 mV に回復するまでの時間は約 200 nsec と長い . しかし, 宇宙線ミュオン事象時の中性子捕獲検出等に影響を及ぼす程の時間ではないため, 無視出来る .

以上, 設計したテスト基板の P ゲインチャンネルアンプは KamLAND で実用に値する十分な性能を持つことがシミュレーションより確認出来た .



(a) 擬似 30,000 p.e. 信号 (黒色) に対するテスト基板 P ゲインチャンネル出力 (正側 : 赤色, 負側 : 桃色) と MoGURA P ゲインチャンネル出力 (正側 : 青色, 負側 : 水色)



(b) 擬似 30,000 p.e. 信号 (黒色) に対するテスト基板 P ゲインチャンネル差動出力 (赤色) と MoGURA P ゲインチャンネル差動出力 (青色)

図 6.1.6: 擬似 30,000 p.e. 信号に対するテスト基板と MoGURA の P ゲインチャンネル出力比較

6.1.3 L ゲインチャンネルアンプの特性

L ゲインチャンネルアンプも P ゲインチャンネル同様にアナログシミュレーションを行った。図 6.1.7 に L ゲインチャンネルアンプのシミュレーション回路を示す。なお、ヘッドアンプは図 6.1.2(a) の回路を用いた。

まず、L ゲインチャンネルアンプの小信号特性を調べるため、振幅 10 mV の入力信号に対する応答を調べた。このような電圧値の信号を考える理由は、P ゲインチャンネルと L ゲインチャンネルが同時に対応するオーバーラップ領域の信号電圧が -10 mV 程度のためである。図 6.1.8(a) に振幅 10 mV の信号に対する周波数特性を示す。これを見ると、周波数帯域は約 96 MHz であり、十分な特性を有する事が分かる。また、図 6.1.8(b) に振幅 -10 mV の台形波入力に対する出力信号を示す。これを見ると、出力信号の振幅が増幅率 0.2 倍アンプに沿った 2 mV であることが確認出来る。また、コモンモード電圧が約 1.9 V、差動信号のベースライン値が約 911.5 mV であることが分かる。これは、それぞれ、ADC ドライバにおける出力コモンモード設定値 1.9 V、ベースライン加算電圧 900 mV による効果である。

次に、L ゲインチャンネルアンプの大信号特性を調べるため、振幅 10 V の入力信号に対する応答を調べた。図 6.1.9(a) に振幅 10 V の信号に対する周波数特性を示す。これを見ると、周波数帯域は小信号同様に約 96 MHz であり、宇宙線ミュオン所得に必要な周波数特性を有する事が分かる。また、図 6.1.9(b) に擬似 30,000 p.e. 信号である振幅 -10 V の台形波入力に対する出力信号を示す。これを見ると、出力振幅は約 1.6 V であり、増幅率 0.2 倍アンプに沿っていない。これは、橙色が表すヘッドアンプ出力が -8 V で飽和してしまっていることが原因である。この飽和は MoGURA でも存在する。KamLAND では、飽和した信号は信号時間幅等から p.e. 数を推測していること、及び -10 V 級の信号は探求する物理的に意味の無い高エネルギーの宇宙線ミュオンが作るものであるため、この飽和が及ぼす効果は無視出来る。

以上、設計したテスト基板の L ゲインチャンネルアンプは KamLAND で実用に値する十分な性能を持つことがシミュレーションより確認出来た。

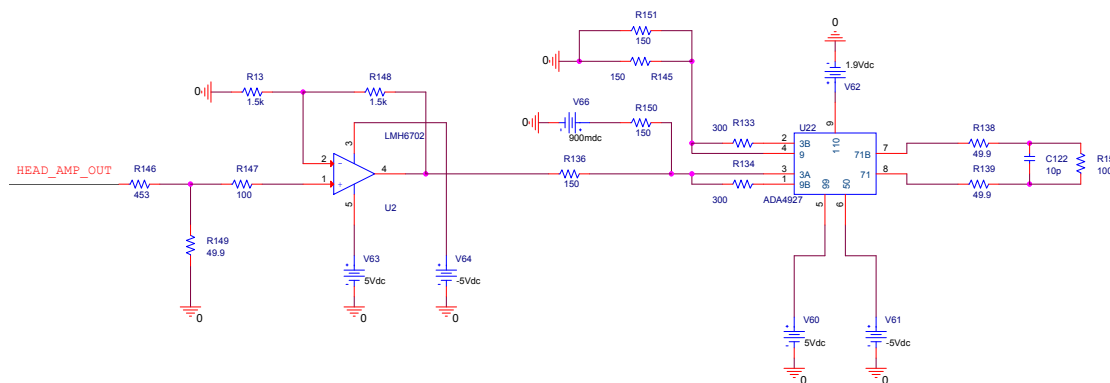
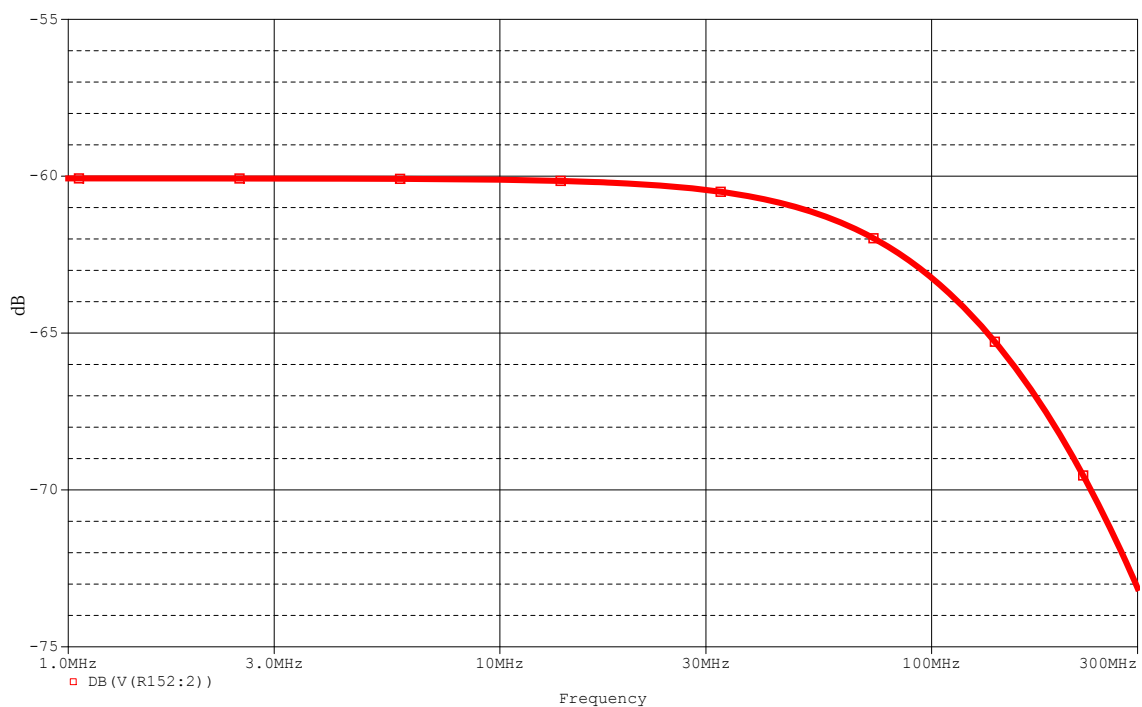
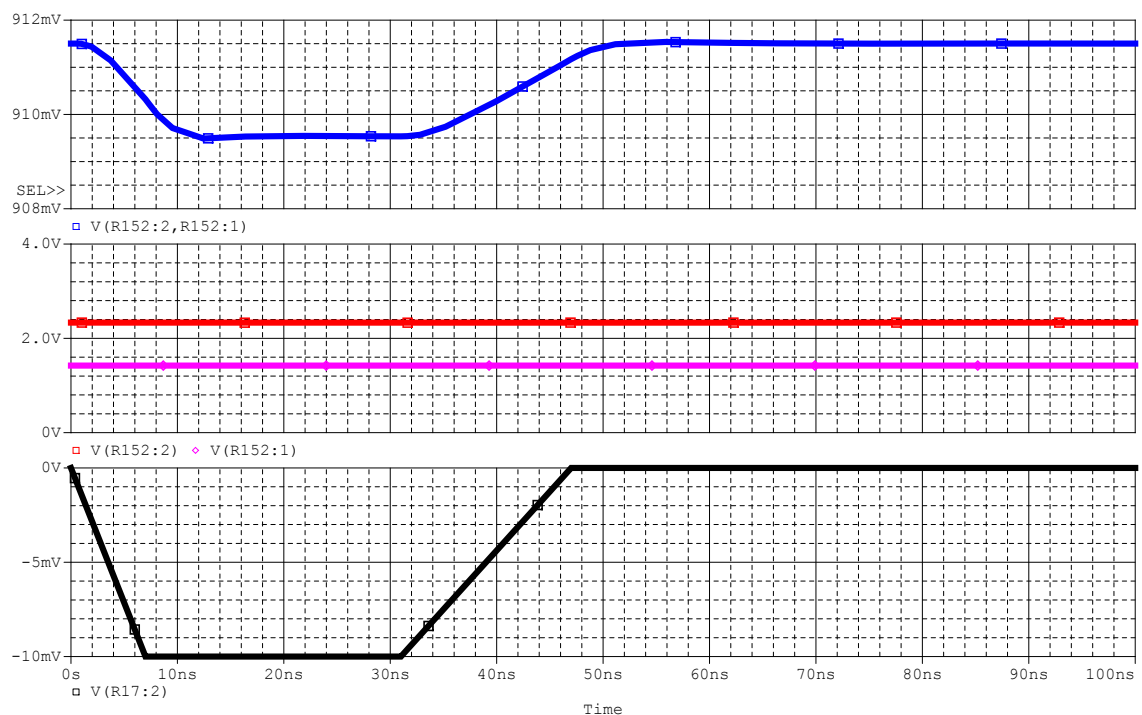


図 6.1.7: シミュレーションに用いた L ゲインチャンネルアンプ回路

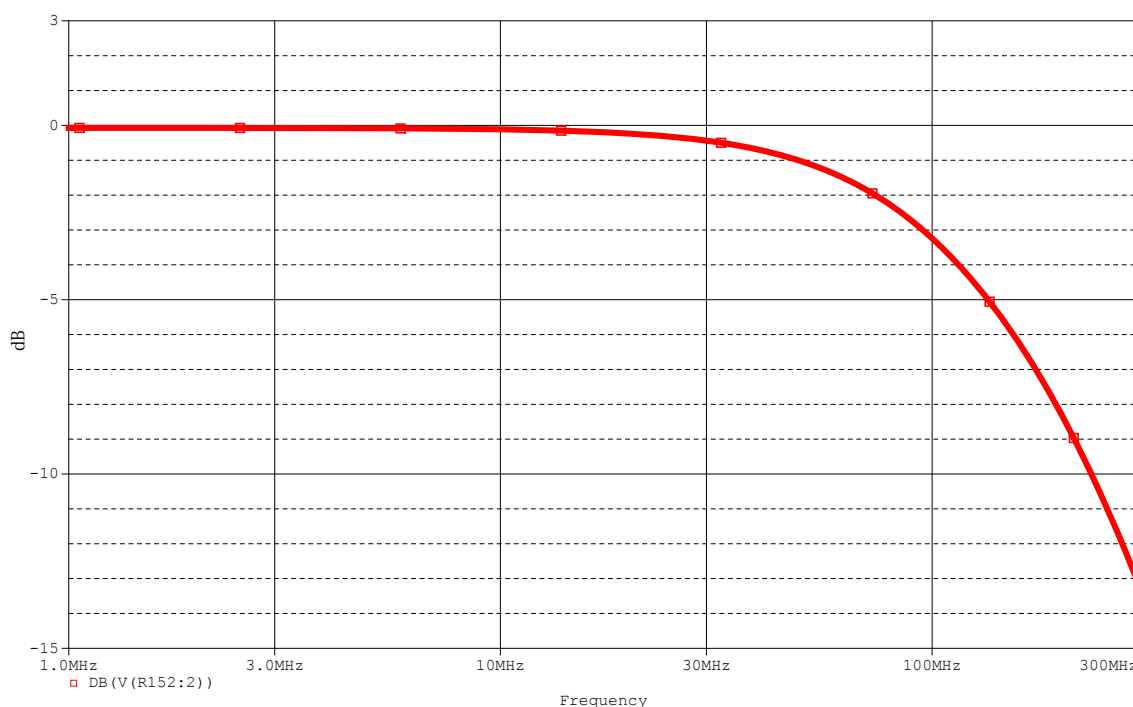


(a) 振幅 10 mV の少信号に対する周波数特性

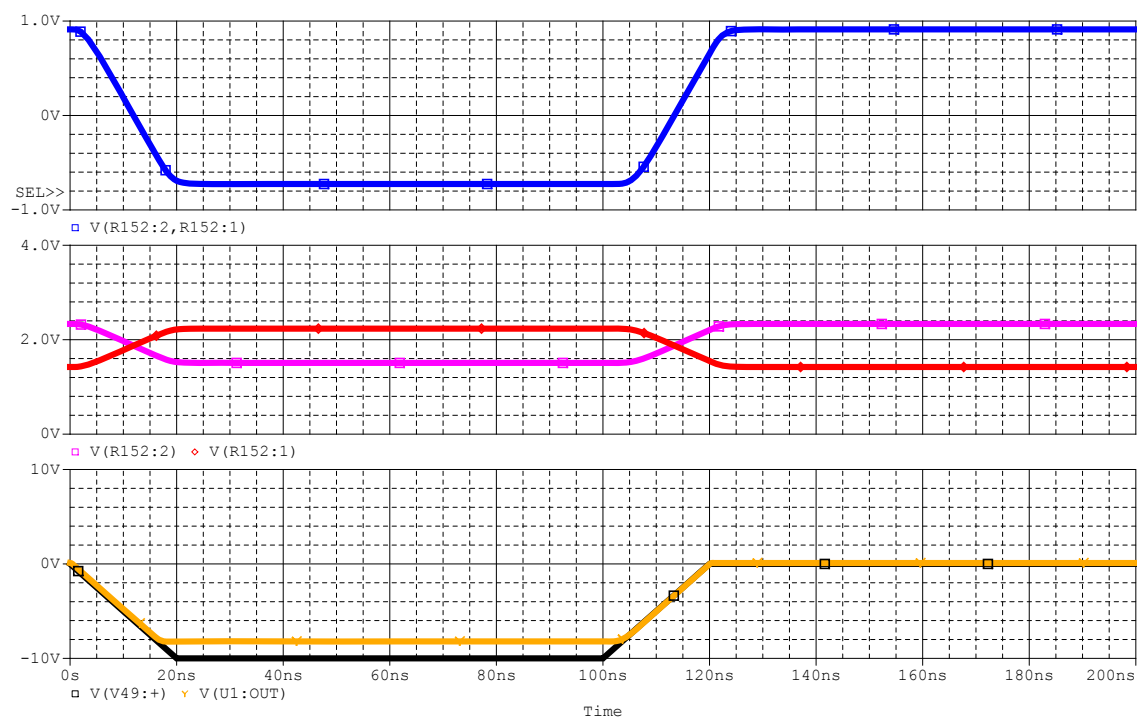


(b) 振幅 10 mV の台形波信号 (黒色) に対するテスト基板 L ゲインチャネル出力 (正側 : 赤色, 負側 : 桃色) と差動出力 (青色)

図 6.1.8: L ゲインチャネルアンプ回路の小信号特性



(a) 振幅 10 V の大信号に対する周波数特性



(b) 擬似 30,000 p.e. 信号 (黒色) に対するテスト基板 L ゲインチャンネル出力 (正側 : 赤色, 負側 : 桃色) と差動出力 (青色)

図 6.1.9: L ゲインチャンネルアンプ回路の大信号特性

6.2 FPGA

テスト基板に搭載する FPGA は、主に新 FEE に実装する波形データ処理ロジックと、SiTCP を用いた Ethernet 読み出し技術を確認するためのものである。そのため、新 FEE で sFPGA として搭載する予定の Xilinx 社製 Artix-7 ファミリ XC7A200T を搭載する事にした。Artix-7 ファミリは、新 FEE の FEF として用いる予定の Kintex-7 ファミリの下位シリーズに当たる。しかし、XC7A200T は、Artix-7 ファミリの最上位製品であり、Kintex-7 ファミリの下位製品よりも高性能である。そのため、新 FEE の FEF・sFPGA 両者に実装するロジックを確認することが出来る。

6.3 クロック

テスト基板が搭載するクロックは、FPGA へ供給する 50 MHz のシステムクロックと ADC へ供給するクロックの 2 種類である。

50 MHz システムクロック

先ず、50 MHz システムクロック作成には、京セラ社製 KC7050B50.00C31A00 を用いる。この製品を選んだ理由は、低価格であることであるが、ジッタや周波数許容偏差等は実用上十分な性能を持っている。

ADC へのクロック供給

次に、ADC に供給するクロックの作成には、Texas Instruments 社製 CECE62002 を用いる。この製品は、2 チャンルの LVDS 出力が可能であり、SPI インターフェイスによるレジスタアクセスでクロック周波数を可変出来る点が特徴である。出力クロックは、デバイスへの入力クロックに同期して出力可能であり、テスト基板では FPGA より 10 MHz の LVDS クロックを入力している。

P ゲインチャンネルに用いる 8 bit ADC のサンプリング周波数は 1 GSPS であるが、DDR サンプリングが可能である。また、波形データ出力は各チャンネル当たり 8 bit の DDR 出力が可能である。そのため、供給するクロックは 500 MHz で良い。

また、L ゲインチャンネルに用いる 16 bit ADC のサンプリング周波数は 250 MSPS で、波形データ出力は各チャンネル当たり 4 bit の QDR 出力が可能である。そのため、供給するクロックは 250 MHz となる。

6.4 Ethernet 通信

SiTCP は、10 Mbps ~ 1 Gbps の速度で安定した TCP/IP Ethernet 通信を実現できる。但し、100 Mbps を超える通信には、光インターフェイスを用いなければならず、UTP ケーブルと比較して取り扱いが煩雑になる。新 FEE では、通常時のデータ読み出し速度はそれ程必要とされず、近傍超新星時の様なデータレート爆発時はオンボードの大容量 SO-DIMM にストレージすることになるため、データ読み出し速度は重要ではない。そのため、読み出し速度よりも UTP ケーブルを用いる取り扱い性を選ぶべきである。

UTP ケーブルを用いる場合、通信速度の最大値は 100 Mbps になる。新 FEE では、100 Mbps 通信を予定しているため、Ether-PHY のインターフェイスは GMII が必要となる。これらの理由から、テスト基板の Ether-PHY には、Microchip 社製 LAN8710A を用いることにした。

また、Ethernet ケーブルは、2015 年現在 RJ45 形状のものが広く用いられている。そのため、Ethernet コネクタとして、RJ45 規格製品である Pulse 社製 J0011D01BNL を用いることにした。

6.5 コネクタ類

テスト基板には、FPGA とのアクセスが可能な多数のポートが存在する。これらは、以下の 3 種類のコネクタとして基板上に実装されている。

- LEMO 入力コネクタ
- +3.3 V LVDS 入力コネクタ (34 芯)
- +2.5 V 入出力コネクタ (16 芯)

6.5.1 LEMO 入力コネクタ

LEMO 入力コネクタは、主に信号波形所得のトリガ信号入力として使用する予定である。KamLAND のテストベンチ環境では、NIM 規格の信号を LEMO ケーブルで用いることが多い。そのため、テスト基板による信号波形所得の評価を既存のテストベンチ環境下で行い易いように、LEMO 入力コネクタを設けている。入力信号は、Texas Instruments 社製 SN65LVDS34D によって +3.3 V LVTTTL に変換され、FPGA に入力される。この信号を受けて、FPGA は信号波形所得を行うことになる予定である。

6.5.2 +3.3 V LVDS 入力コネクタ (34 芯)

MoGURA トリガ回路は、+3.3 V LVDS 信号のトリガコマンドを 34 芯ケーブルで出力する。テスト基板では、多種多様なトリガによる信号処理をテストするために、MoGURA トリガ回路を利用できるように、+3.3 V LVDS 入力 34 芯コネクタが実装されている。34 芯の内、1 ペアは GND であり、16 ペアはバッファ素子として設けられた Texas Instruments 社製 SN65LVDT388 によって +3.3 V LVTTTL に変換され、FPGA に入力される。この信号を受けて、FPGA は各種トリガに応じた処理を行うことになる予定である。

6.5.3 +1.8 V 入出力コネクタ (16 芯)

上記のコネクタと違い、FPGA の +1.8 V I/O ピンに直接アクセス出来るポートが 14 個設けられている。これらをまとめた 16 芯のコネクタが用意されている。なお、16 芯の内、2 つが GND に繋がっている。これらのアクセスポートを用いて、テスト信号を入出力することで、FPGA ロジックのテストを行う予定である。

6.6 電源回路

テスト基板の電源は，アナログ回路専用のアナログ電源と，その他主にデジタル素子に用いるデジタル電源の2種類に分離されている．テスト基板に入力する電源の内，+12 V 電源からアナログ電源を，+5 V 電源からデジタル電源を作成する．また，GND はアナログ GND とデジタル GND に区別されており，テスト基板上で 0 Ω 抵抗によって接続されている．

6.6.1 デジタル電源

テスト基板で使用するデジタル電源は以下の5種類である．

- +1.0 V : FPGA 電源
- +1.8 V : FPGA 電源, L ゲイン ADC 電源
- +1.9 V : P ゲイン ADC 電源
- +3.3 V : FPGA 電源, 他多数
- -3.3 V : LEMO 入力受信素子電源

これらの電源は，-3.3 V 電源を除き，全て+5 V 電源から Texas Instruments 社製スイッチングレギュレータ LMZ10503 を用いて作成される．LMZ10503 は，電流出力定格 3 A であり，大電流出力に対応している．その一方，電流を殆ど消費しない場合の電圧変換効率も優れている．以上の電源は，ノイズを生じるスイッチングレギュレータによって作成されているので，別系統の電源作成時のノイズをカットするために，供給電源側にチップビズを挟むことでノイズ対策を講じている．ここで，FPGA の仕様に沿って，FPGA への電源供給は+1.0 V → +1.8 V → +3.3 V の順番になるように，ソフトスタート設定端子に接続するキャパシタ容量を調整している．

また，-3.3 V 電源は，+3.3 V 電源から Texas Instruments 社製のチャージポンプインバータ TPS60403 を用いて作成される．TPS60403 は，電流出力定格が 0.06 A と小さいが，-3.3 V 電源の用途は LEMO 入力受信素子 SN65LVDS34D のみであるため十分な性能である．

6.6.2 アナログ電源

テスト基板で使用するアナログ電源は以下の6種類である．

- ±10 V : ヘッドアンプ
- ±5 V : L ゲインチャンネルアンプ
- ±3.3 V : P ゲインチャンネルアンプ, ADC ドライバ, 信号クリップ用+1.25 V 作成

これらの電源は、全て+12 V 電源から作成されており、±3.3 V 電源を除き、Texas Instruments 社製スイッチングレギュレータ LMZ14203H が用いられている。LMZ14203H は、電流出力定格 3 A であり、広い電流範囲で高い電圧変換効率を持っている。一方、電流を消費しない場合の待機電力も 100 mW 程度と省電力性にも優れている。デジタル電源作成時同様、別系統の電源作成時のノイズをカットするために、供給電源側にチップビズを挟んでノイズ対策を講じている。更に、アナログ電源の安定性はオペアンプのノイズ特性等にも影響を及ぼす可能性が高いため、作成電源出力側にもチップビズを挟んで、電源の安定性を高めている。

ここで、+12 V 電源から ±10 V 電源を作成することについて、電圧差が小さいという不安要素が存在する。この電圧差は、Texas Instruments 社が公開しているデータシートで保証されているが、OrCAD PSpice を用いたシミュレーションにより電源作成を確認することにした。シミュレーションには、Texas Instruments 社が公開している LMZ14203H の PSpice モデルを使用した。図 6.6.1 にシミュレーション回路を、図 6.6.2 にシミュレーション結果を示す。これを見ると、+12 V 電源入力後 4 msec 程度で十分な+10 V 電圧及び+1 A 電流が得られていることが分かる。よって、テスト基板の 10 V 電源作成に LMZ14203H を使用できると判断した。

また、LMZ14203H の最低出力電圧は 5 V である。そのため、±3.3 V 電源作成には、LMZ14203H と特性が類似している定電圧出力素子 LMZ14203 を用いている。

LMZ14203H START-UP SIMULATION

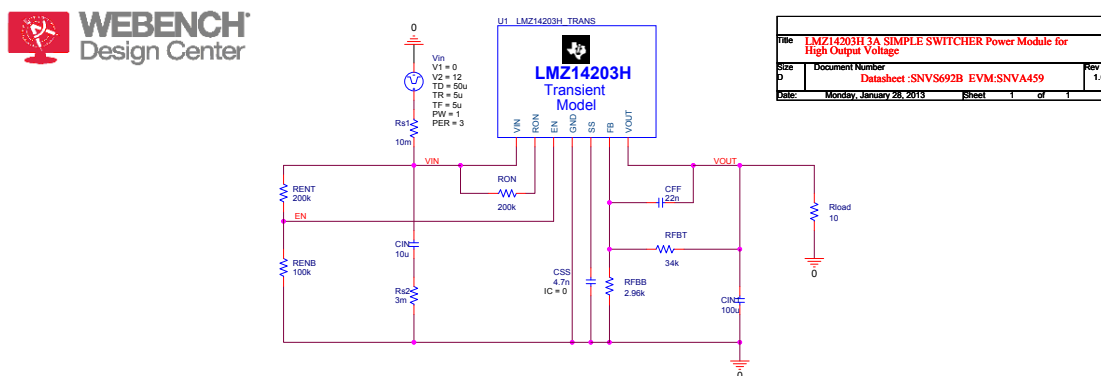


図 6.6.1: LMZ14203H による+12 V 電源からの+10 V 電源作成シミュレーション回路。抵抗 Rload が 10 Ω の負荷であり、+10 V 出力時の+1 A 消費電流を考える。

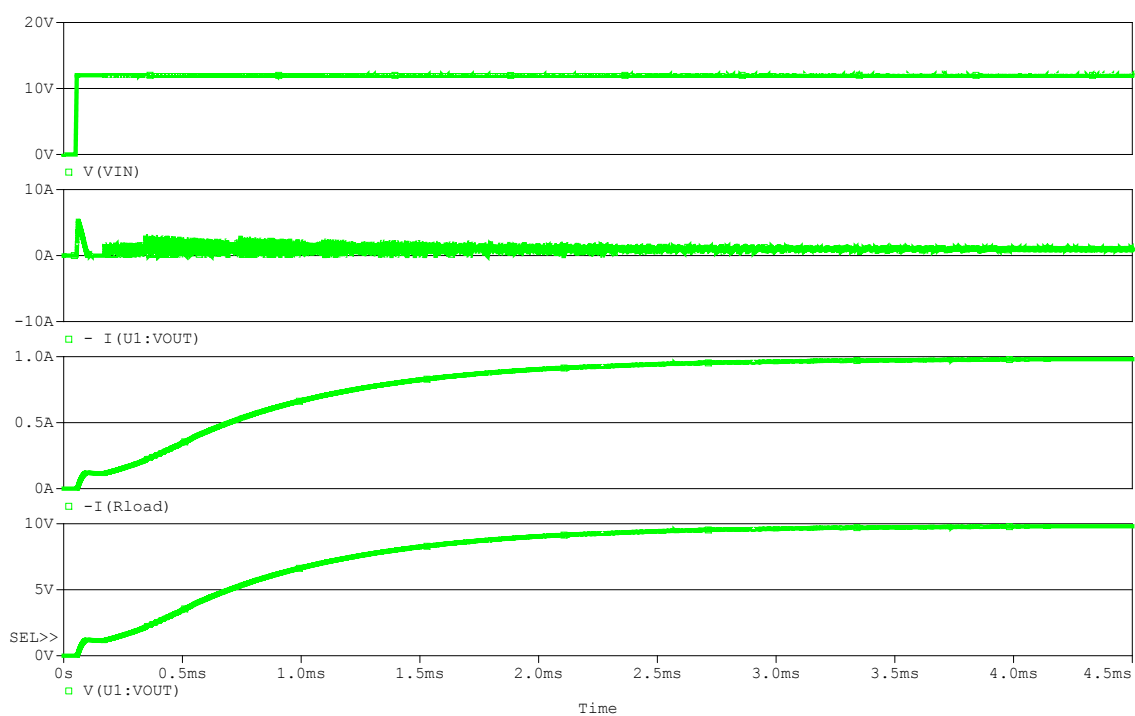


図 6.6.2: LMZ14203H による+12 V 電源からの+10 V 電源作成シミュレーション結果 . +12 V 電源 (上から 1 番目) の立ち上がり後 , 4 msec 時点で十分な+10 V 電圧 (上から 4 番目) と+1 A 電流 (上から 3 番目) が得られていることが分かる .

7 結論

以上，記述した事項をまとめ，新 FEE 開発の現状と今後の研究計画を以下に記す．

7.1 新 FEE 開発の現状

KamLAND 次期計画に向けて，以下の特徴を持つ新 FEE を開発する．

- 低価格・安定動作性能
- FADC によるデッドタイムフリー波形所得性能
- 高機能デジタル信号処理機能
- Ethernet による高速データ読み出し機能
- 大容量オンボードメモリ機能

そのために，以上の内，大容量オンボードメモリ機能を除く機能を検証するためのテスト基板の開発を行った．本研究では，以下の機能を搭載したテスト基板回路の設計を完了した．

- 2 系統のゲインチャンネルによる広電圧範囲の高精度波形所得 (表 15)

表 15: テスト基板の信号波形所得性能

	P ゲインチャンネル	L ゲインチャンネル
分解能	0.1 mV	0.2 mV
サンプリングレート	1 GSPS	250 MSPS
入力換算電圧範囲	+2 mV ~ -20 mV	+3 V ~ -10 V
周波数帯域	105 MHz	96 MHz

- 高性能 FPGA 搭載
- Ethernet 読み出し機能搭載
- アナログ系電源とデジタル系電源の分離によるノイズ対策
- 基板評価・デジタル信号処理機能のテストを容易にする拡張性

7.2 今後の研究計画

現在，設計した回路図を基にテスト基板を製作中である．テスト基板製作の完了後，設計図通りの回路になっていることを確認した後，テスト基板の性能評価を行う．特に，以下の点について注意して評価する．

- アナログ回路のノイズ特性
- アンプ回路の周波数特性
- 大信号に対する P ゲインチャネルの応答
- L ゲインチャネルによる信号波形所得精度

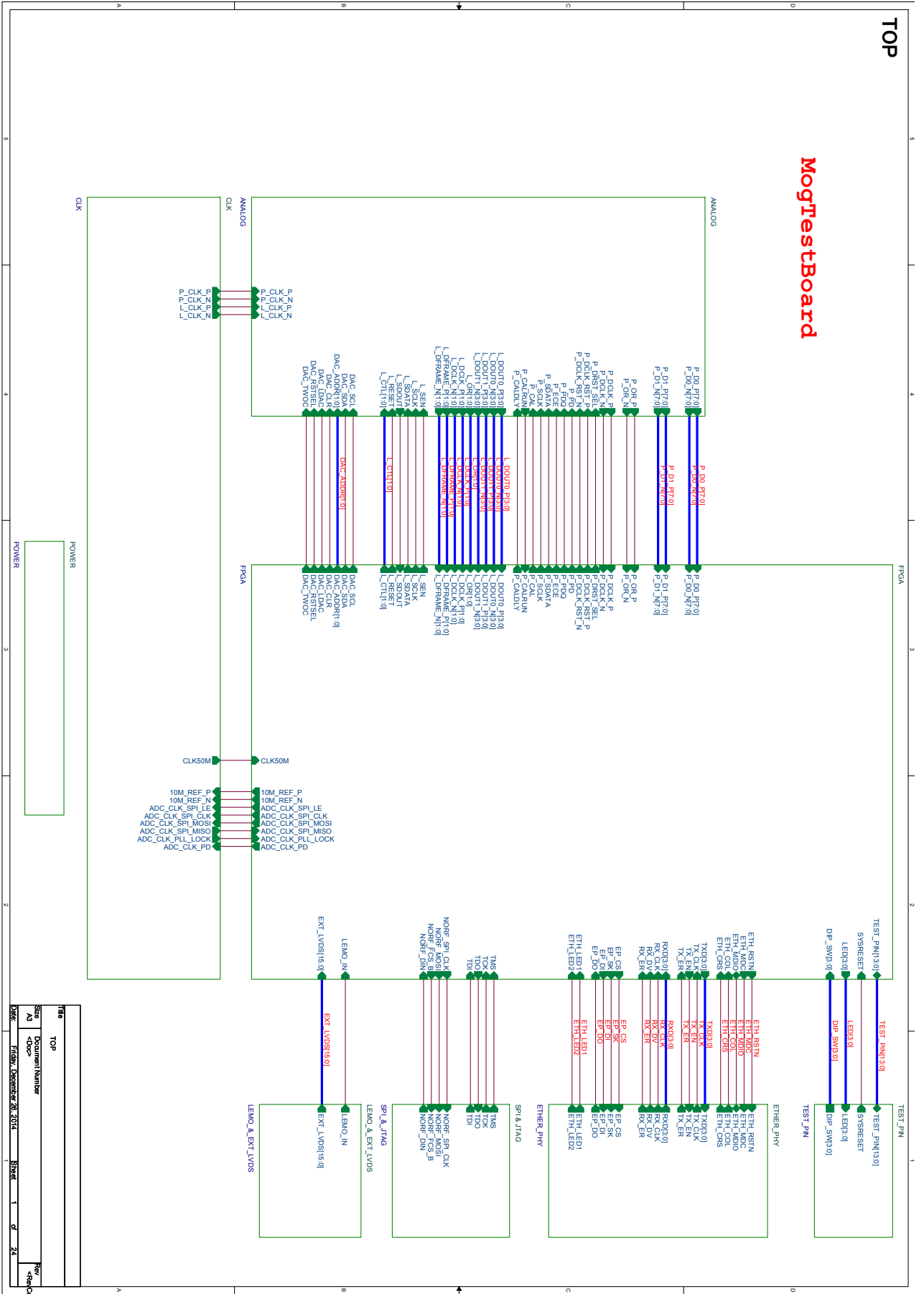
また，以上の性能評価を行うために，ADC インターフェイスの作成等を行い，テスト環境の構築を行う．

性能評価の結果，問題が見つかった場合は，対策を講じた後，再びテスト基板を作製する等して新 FEE の基本機能の完成に努める．その後，新 FEE のプロトタイプ基板開発に進む．

更に，これに平行して，新 FEE で行うデータ処理ロジックの開発を行う．特に，オーバーシュート対策として考案した微分 Discr_i 機能の開発は優先的に行う予定である．

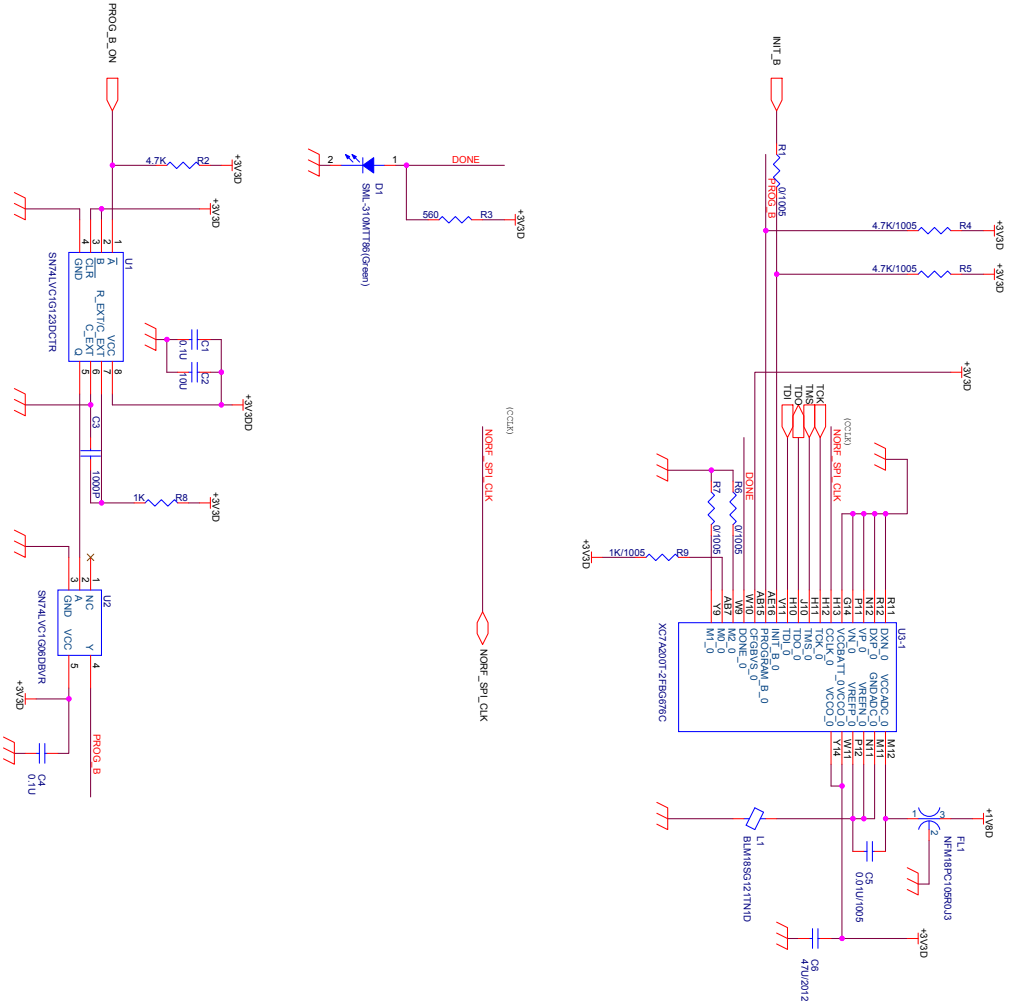
A 付録：テスト基板回路図

MogTestBoard



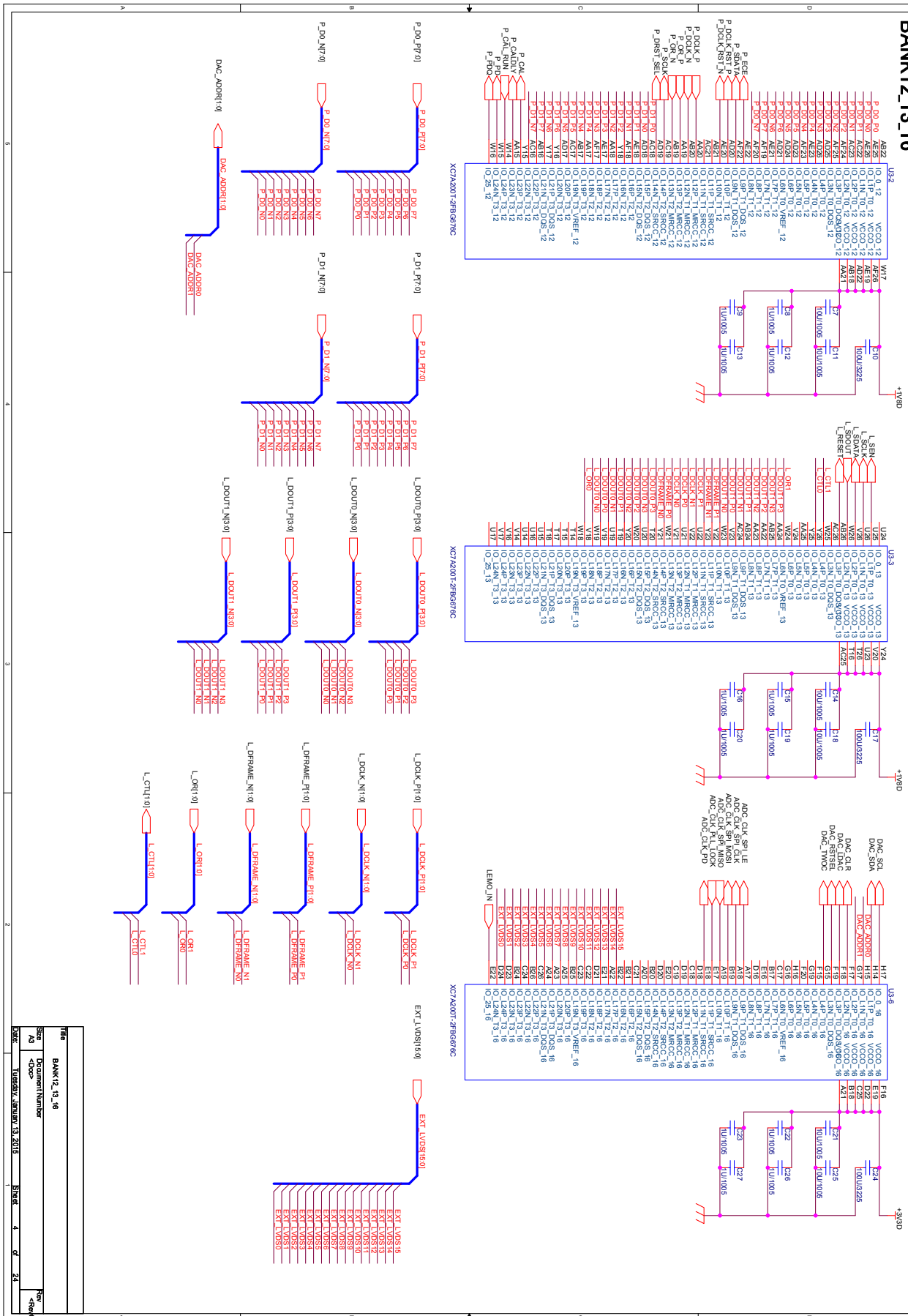
FILE	TOP	REV	1
Doc	Document Number	Rev	1 of 24
Date	Friday, December 26, 2014	Sheet	1 of 24

BANK0



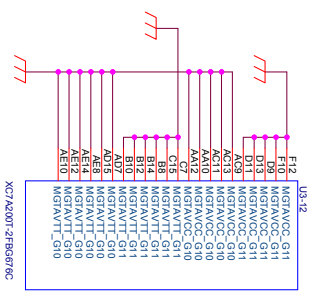
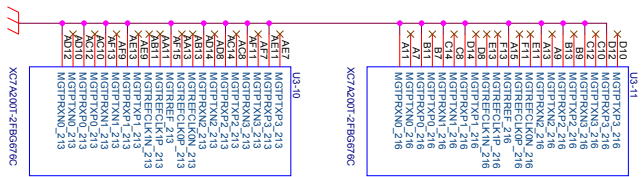
TITLE	BANK0
Sheet	1 of 24
Document Number	Doc-1930
Date	TUESDAY, JANUARY 13, 2015
Sheet	3 of 24

BANK12_13_16



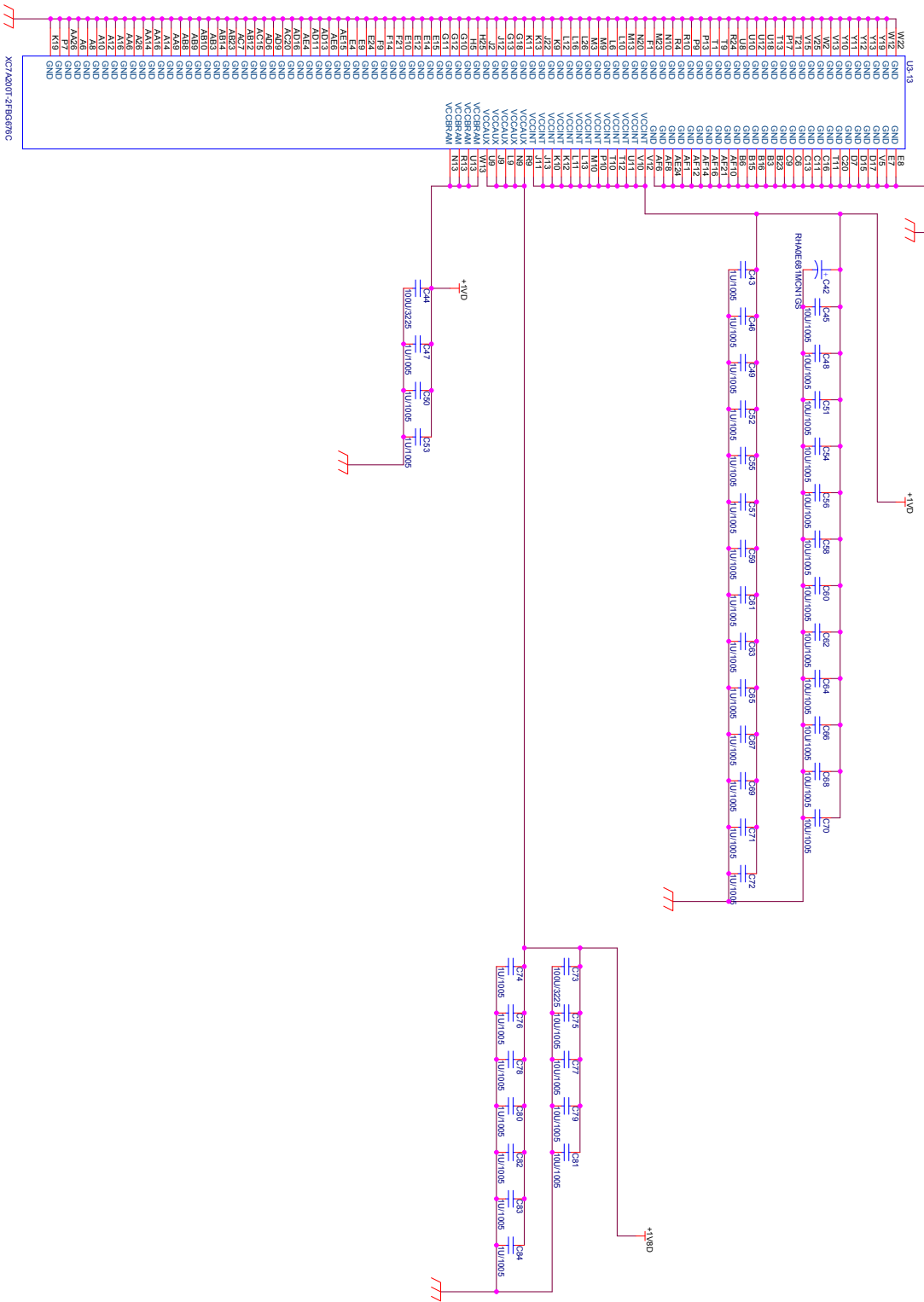
Rev	4	of	24
Doc#	TUS059J, January 13, 2015		
Doc#	BANK12_13_16		
Doc#	Document Number		
Doc#	Title		

FPGA_BANK_MGT



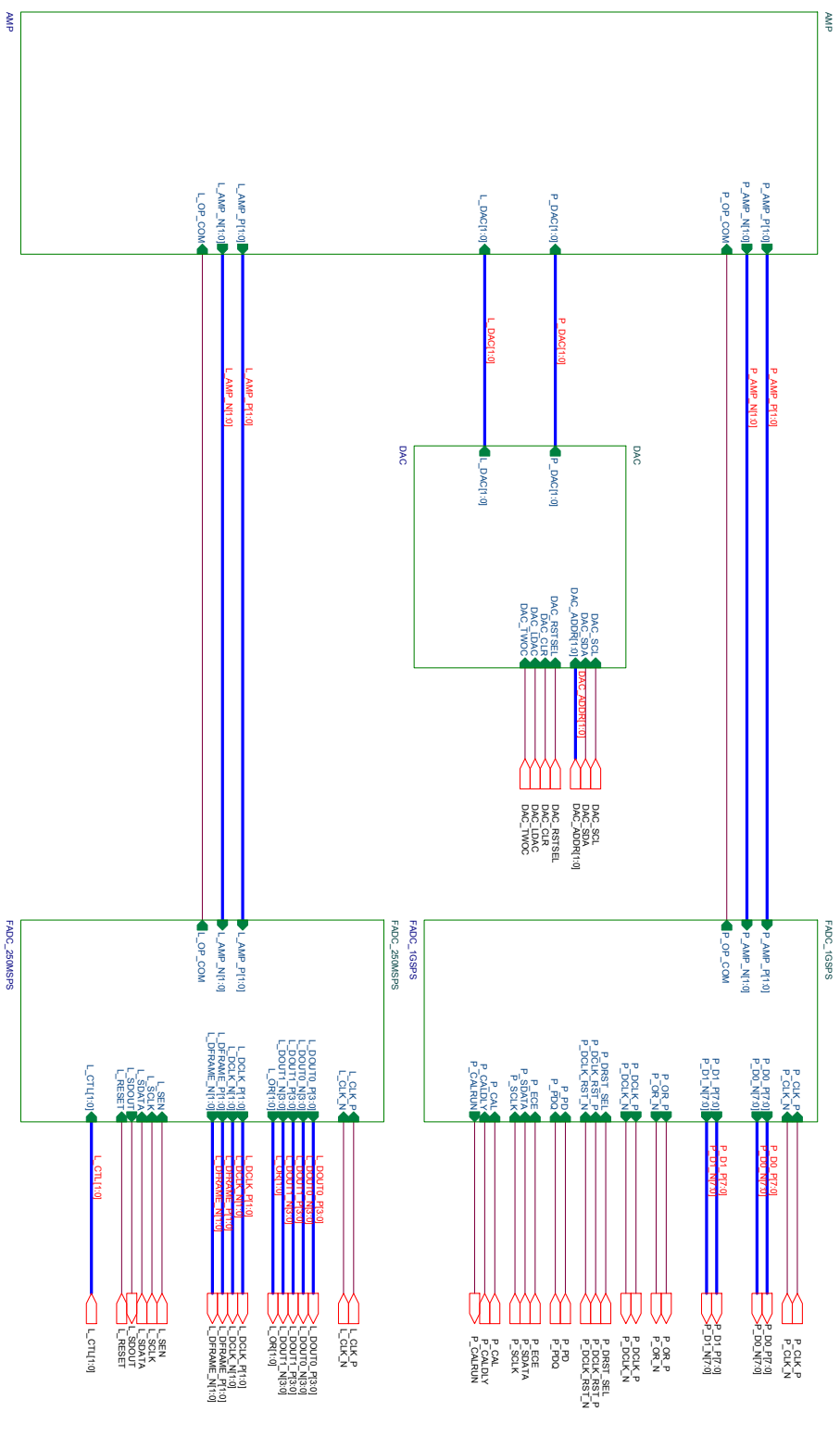
Title		FPGA_BANK_MGT	
Size	Document Number	Rev	416
A3	Doc#	7	24
Date	Released	7	24

FPGA_Power



Title	
FPGA_Power	
Size	Document Number
As	Doc
Date	Friday, December 26, 2014
Sheet	8 of 24
Rev	148
Created	

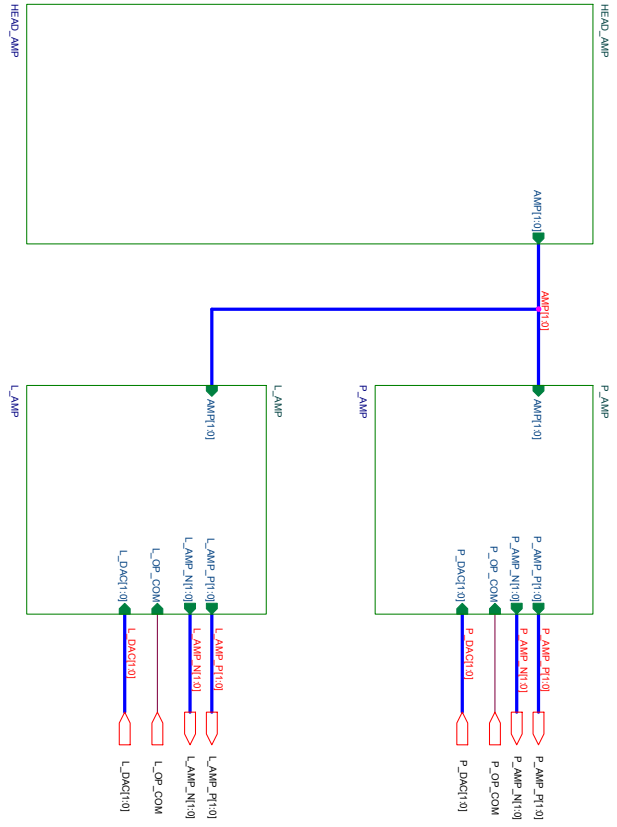
ANALOG



Rev	Chg	By	Date	Desc
1		Shen	9/24	ANALOG

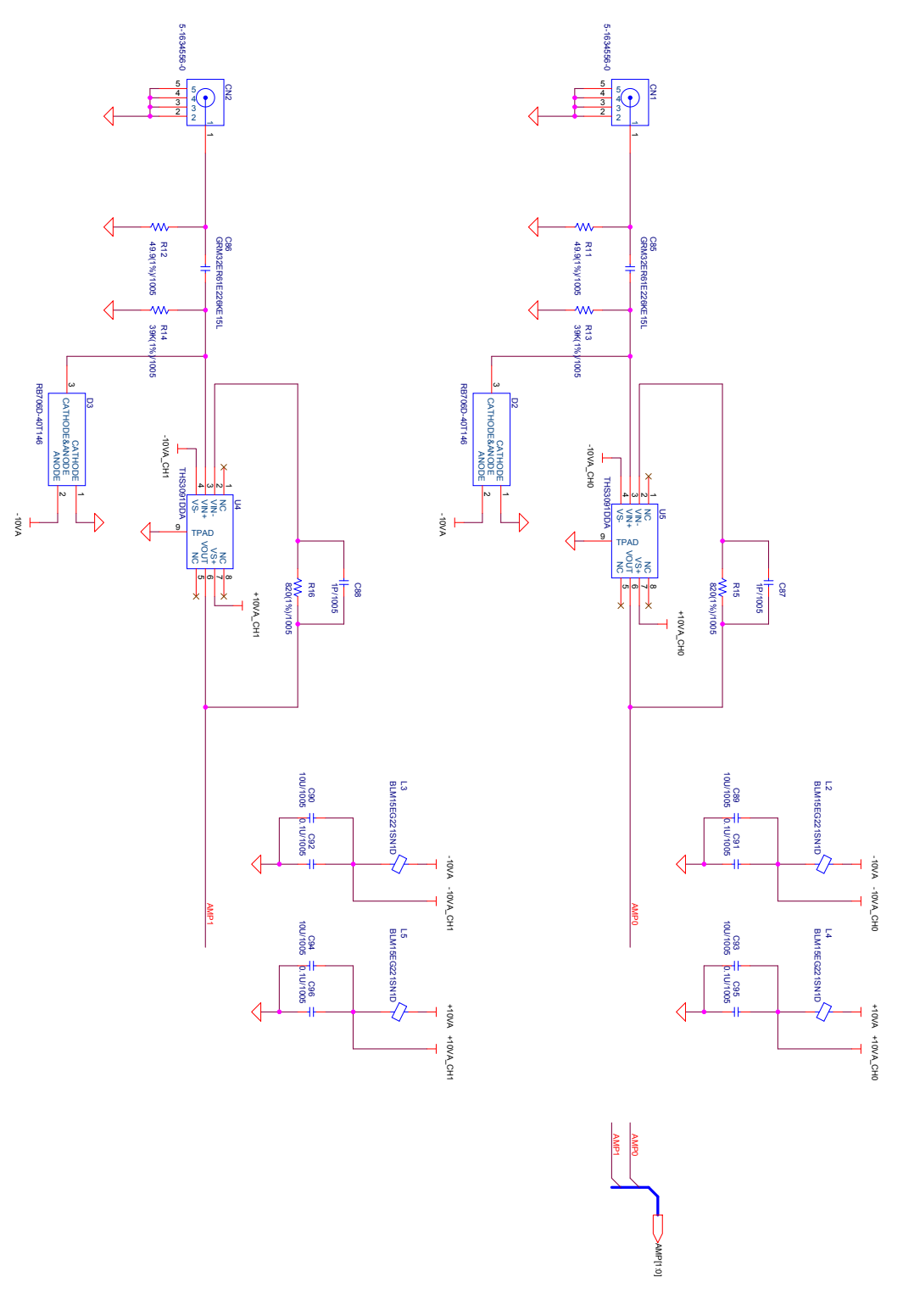
Doc: Filter, December 26, 2014

AMP



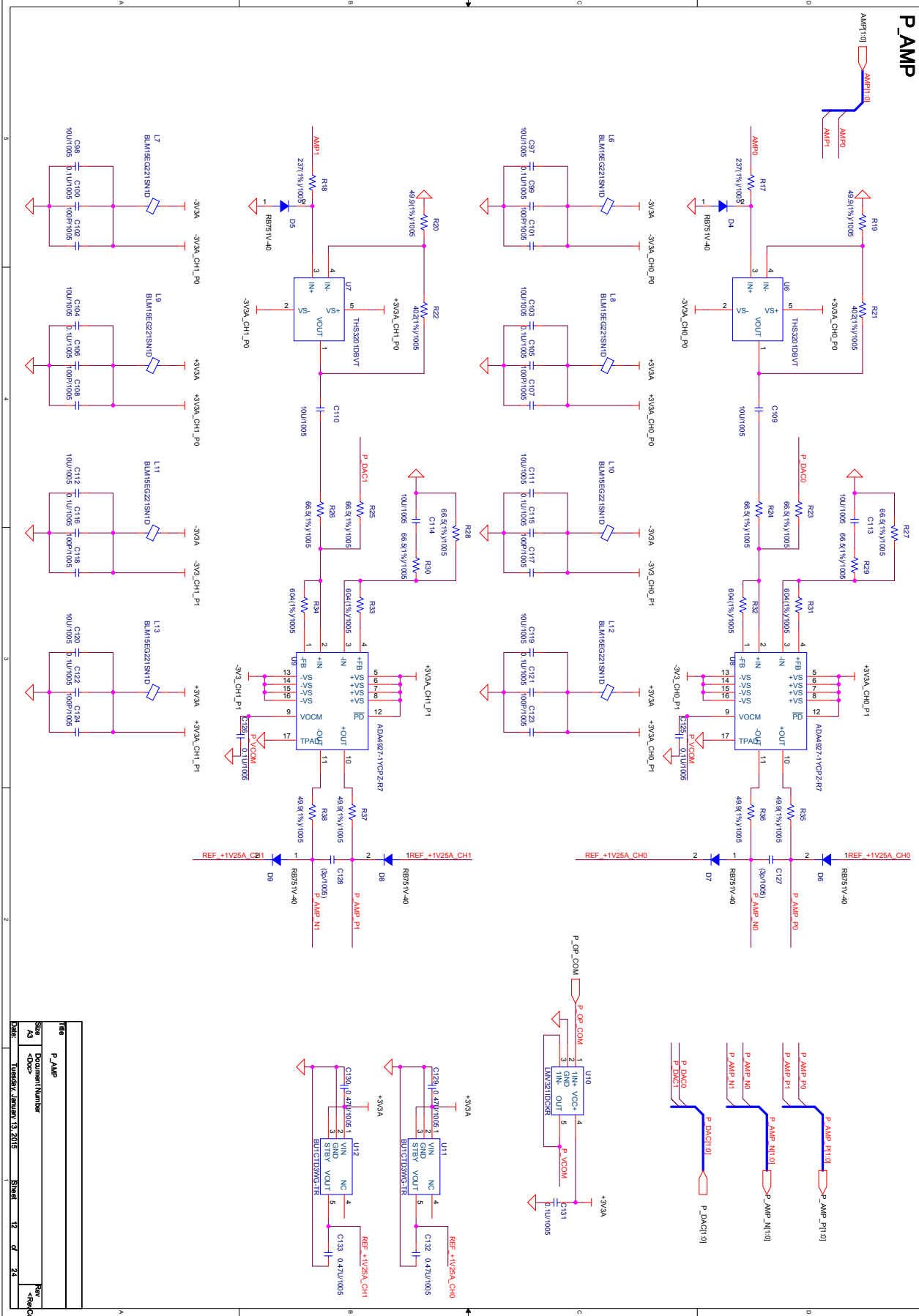
TITLE		AMP
Size	Document Number	
As	Doc#	
Date	Friday, December 28, 2014	Sheet 10 of 24
Rev		419
Code		

HEAD_AMP



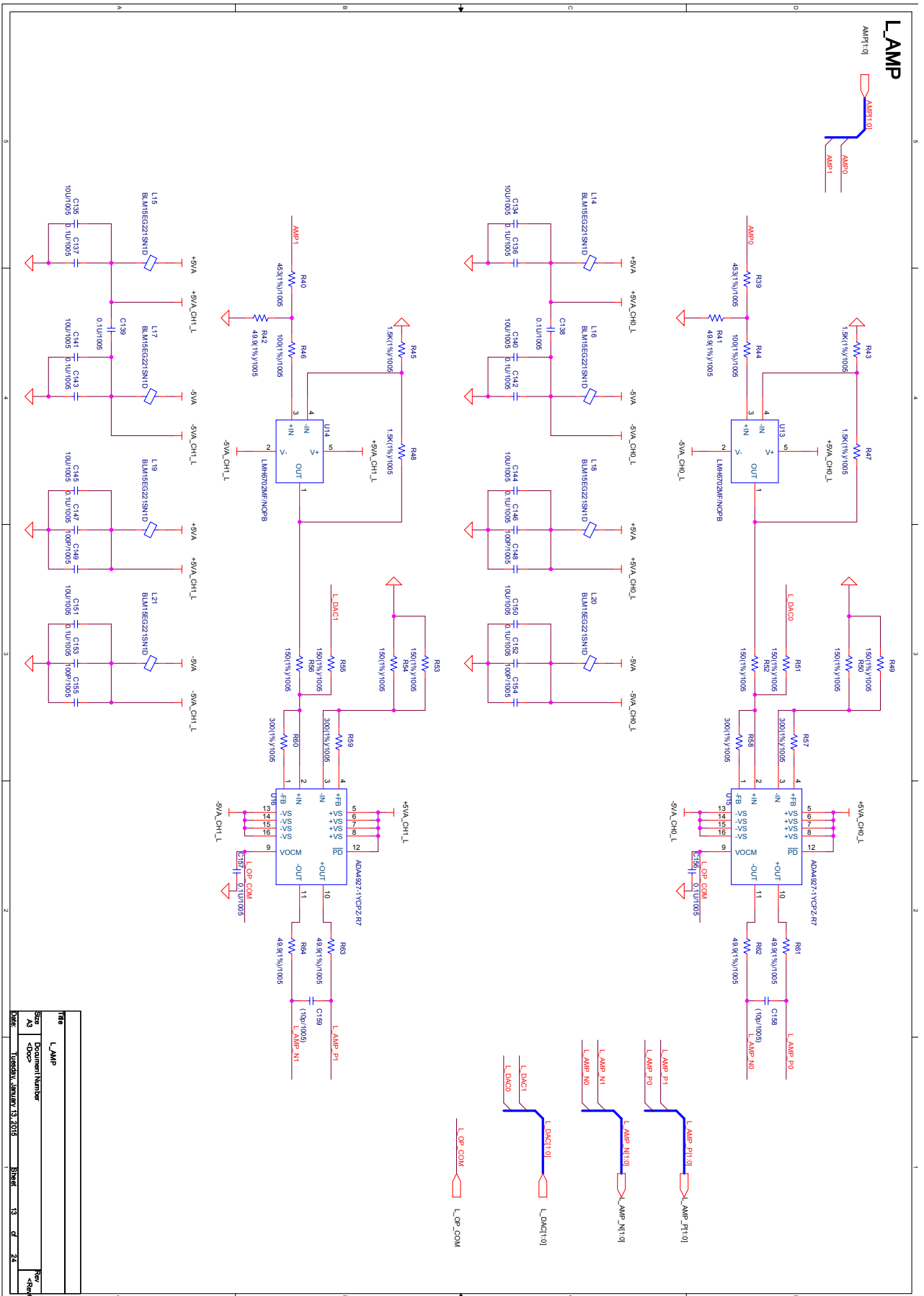
TITLE	HEAD_AMP
SIZE	Document Number
NO	Doc#
DATE	Tuesday, January 13, 2015
	Sheet 11 of 24
REV	1
CODE	

P_AMP



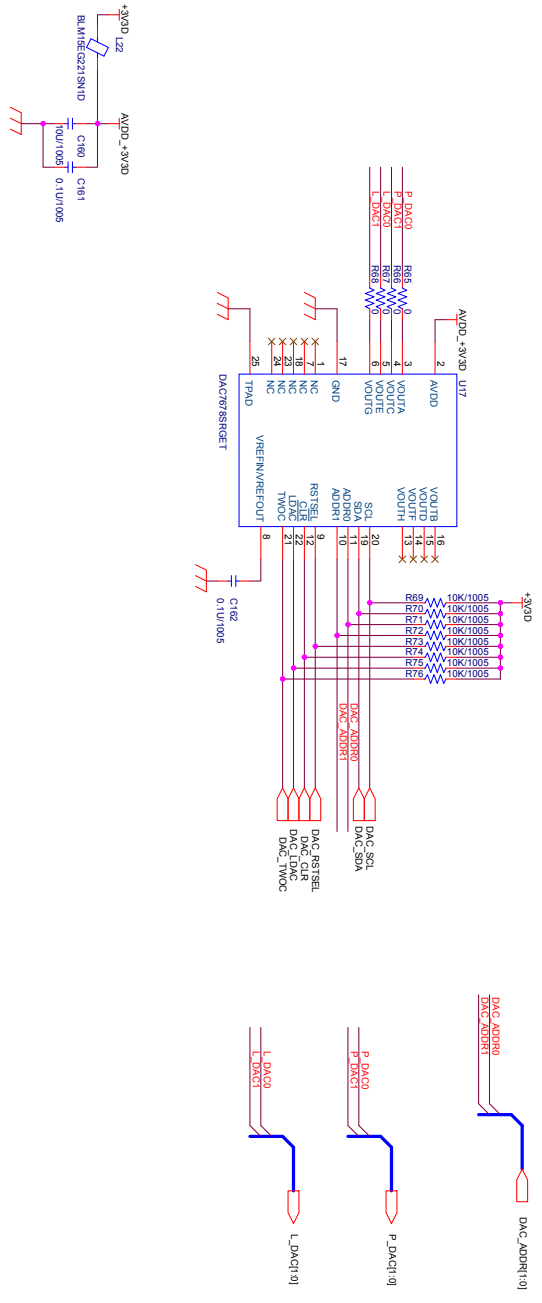
REV	DATE	BY	CHKD	APP'D	DESCRIPTION
1	2015.10.13	Shen	12	24	Initial Design

L_AMP



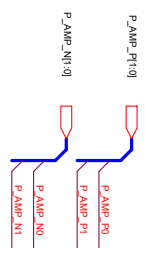
Rev	Change	Date	By
1	Doc	13/01/2015	Shah

DAC



FILE	DAC
Sheet	14 of 24
Doc#	108583V1 January 13, 2015
Rev	14
Code	Shen

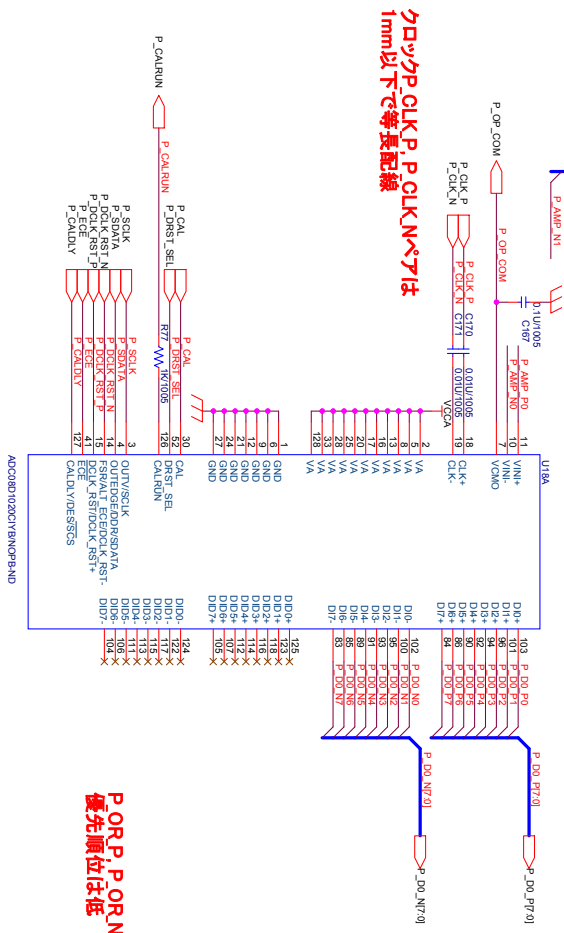
FADC_IGSPS



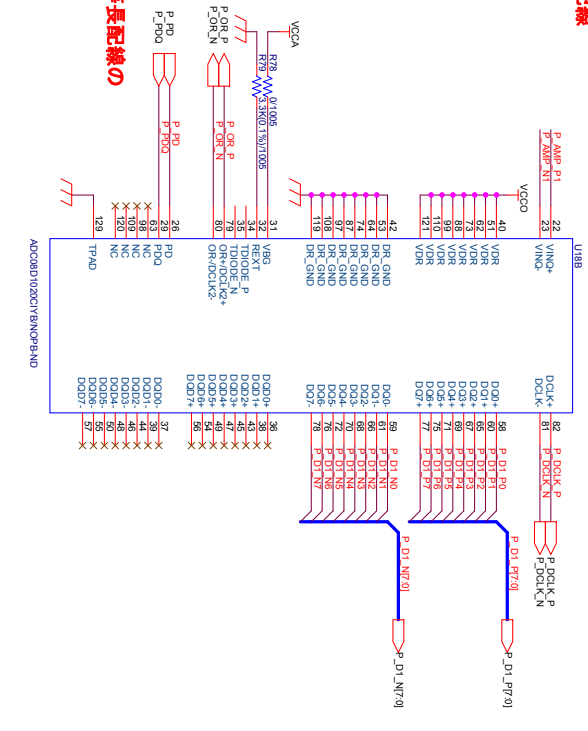
PNペタは差動100Ωで、等長配線

データラインP_DD[7:0], P_DD[N:7:0], P_D1_P[7:0], P_D1_N[7:0]とデータラインP_DCLK_P, P_DCLK_Nは5mm以下で等長配線

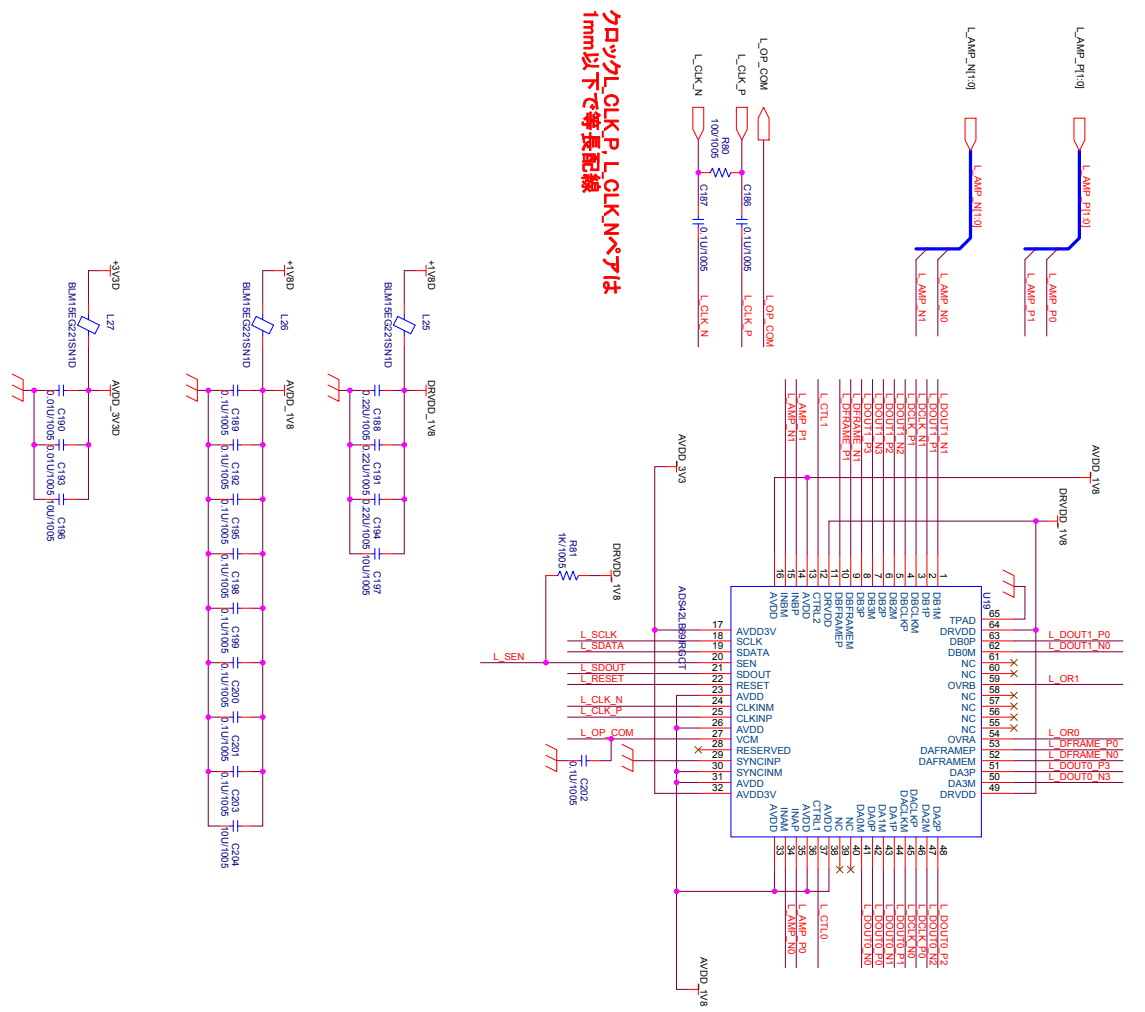
クロックCLK_P, P_CLK_Nペタは1mm以下で等長配線



P_OR_P, P_OR_Nペタの等長配線の優先順位は低

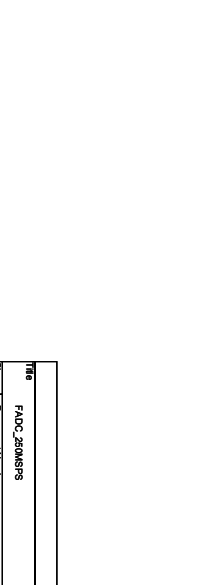


FADC_250MSPS



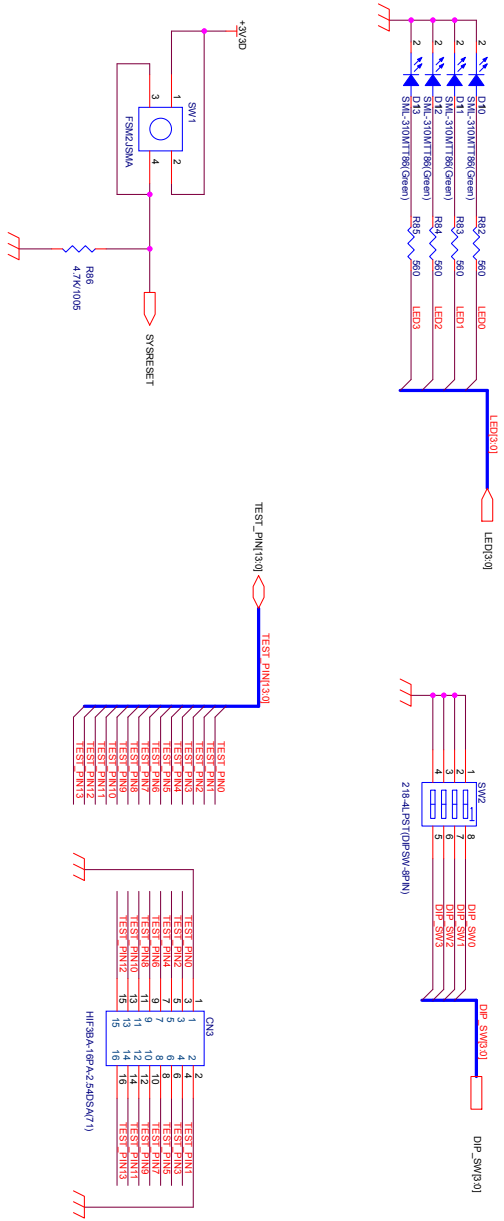
クロック L_CLK_P, L_CLK_Nは 1mm以下で等長配線

データ L_DOUT0_P[3:0], L_DOUT0_N[3:0], L_DOUT1_P[3:0], L_DOUT1_N[3:0]は 10mm以下で等長配線



FILE	FADC_250MSPS
Sheet	Docp
Document Number	TUGSEKIV_JANUARY_13_2015
Rev	16
Checked	24

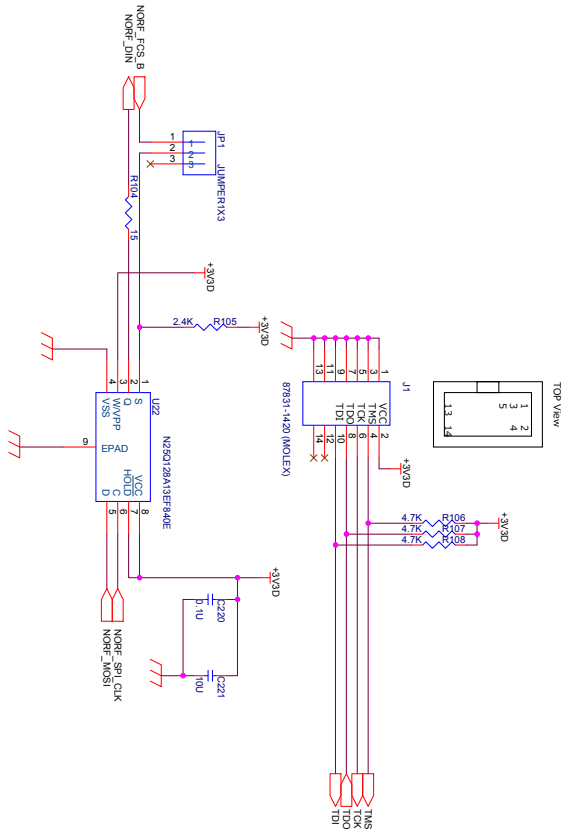
TEST_PIN



Rev	Code	Author	Date
1		Shankar	17 Jul 24

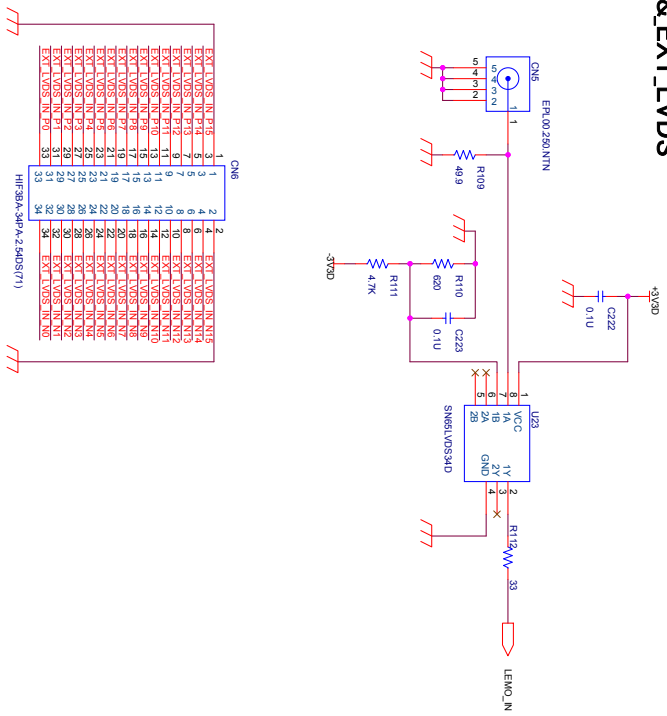
TEST_PIN
 Document Number
 TUGSBAV January 13, 2015
 Rev 1 of 24

SPI & JTAG

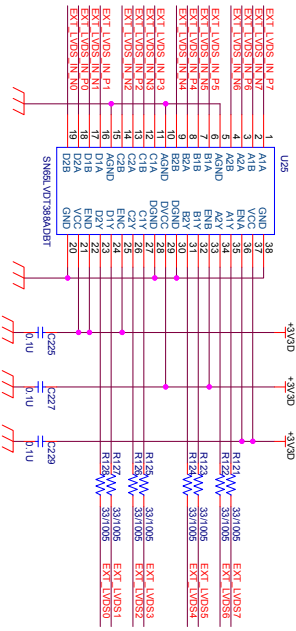
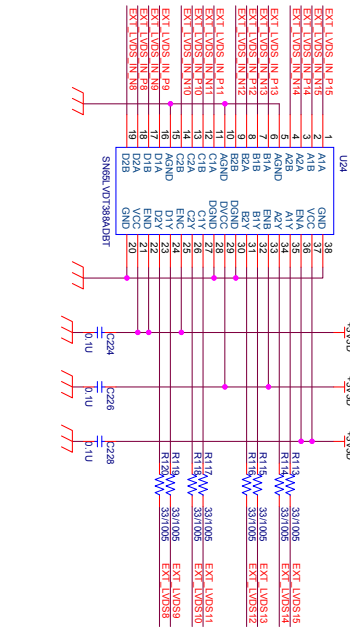


TITLE		SPI & JTAG	
Sheet	1	Document Number	
Rev	1.0	Date	Friday, December 28, 2014
Drawn		Sheet	18 of 24

LEMO_&EXT_LVDS



EXT LVDS_IN[1:50] & EXT LVDS_IN_N[1:50] 1:1 等長配線

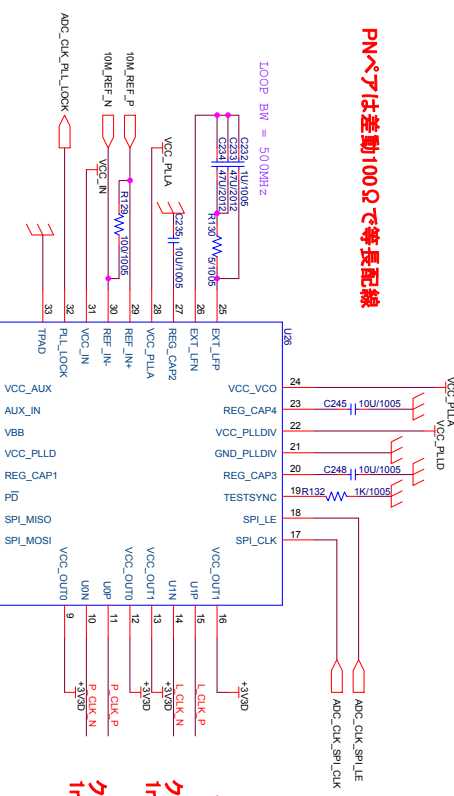


Rev	Change	Date	By	Appr	File
1	1	2014.12.24	Shimizu	20	24

CLK

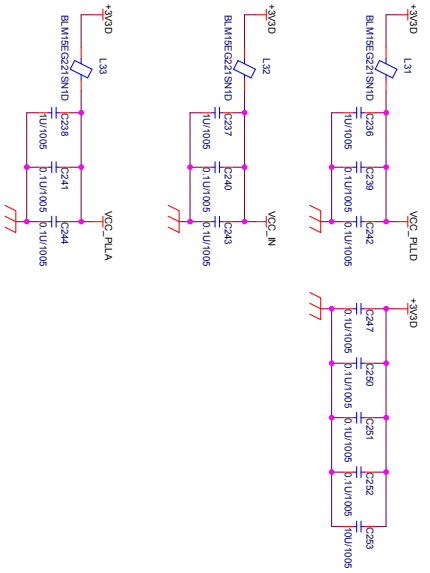
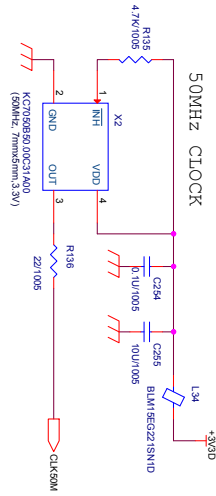
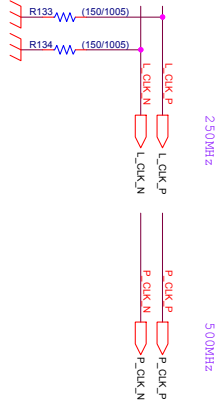
PNペアは差動100Ωで等長配線

LOOP BW = 500MHz



クロック10M REF P, 10M REF Nペアの等長配線の優先順位は低

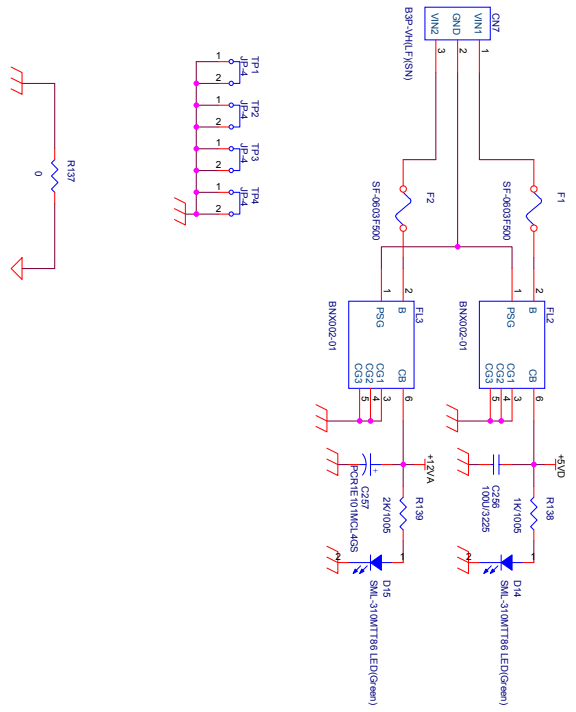
クロックL_CLK_P, P_CLK_Nペアは1mm以下で等長配線
クロックL_CLK_P, L_CLK_Nペアは1mm以下で等長配線



Rev	Code	Rev	Code
1	Doc	1	Doc

File	Rev	Date
CLK	1	2015.11.24

POWER



POWER_DIGITAL



991_POWER_DIGITAL

POWER_ANALOG

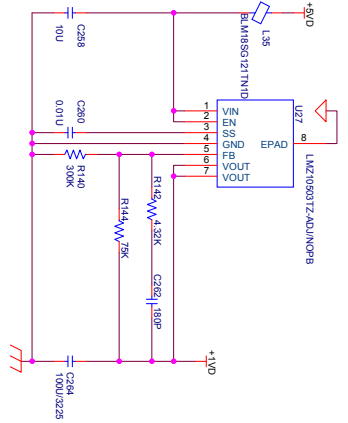


992_POWER_ANALOG

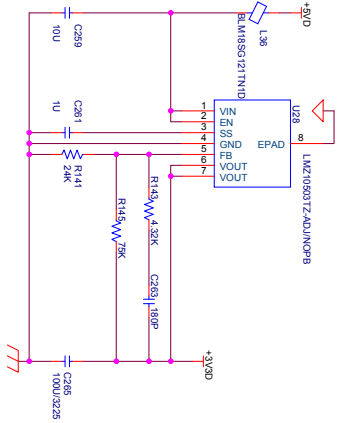
TITLE		POWER	
Sheet No	Doc#	Document Number	Rev
1	Doc#		1.0
Date		Friday, December 26, 2014	Sheet 22 of 24

POWER DIGITAL

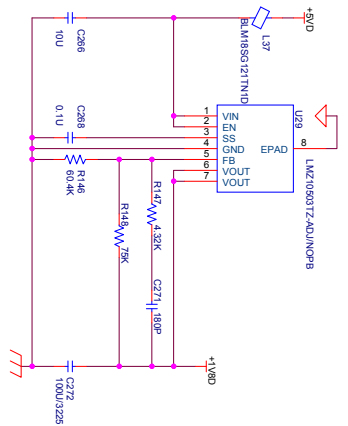
+5V -> +1.0V (Vccint, Vccbram)



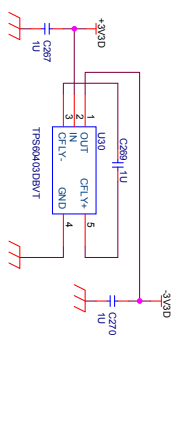
+5V -> +3.3V



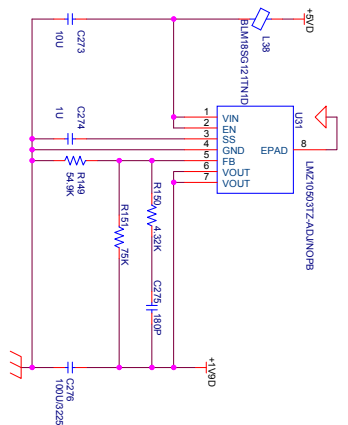
+5V -> +1.8V (Vccaux)



+5V -> -3V3D



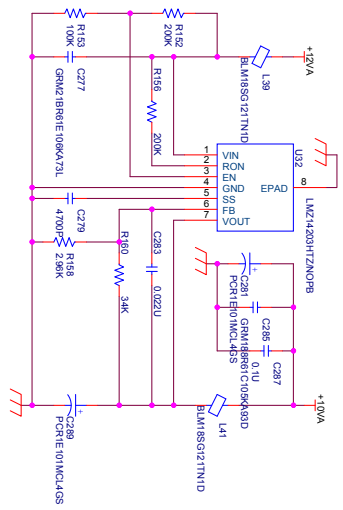
+5V -> +1.9V



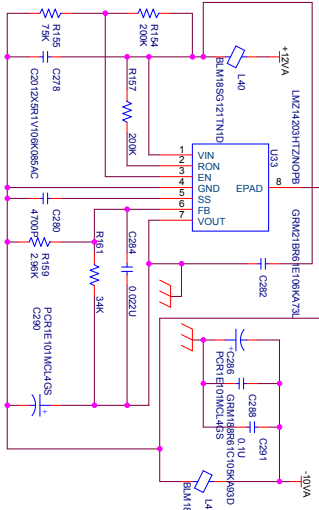
TITLE	
Sheet No	POWER DIGITAL
Doc No	Document Number
Rev	1-0
Date	Friday, December 26, 2014 3:28:23 AM
Drawn	Shinji
Checked	

POWER ANALOG

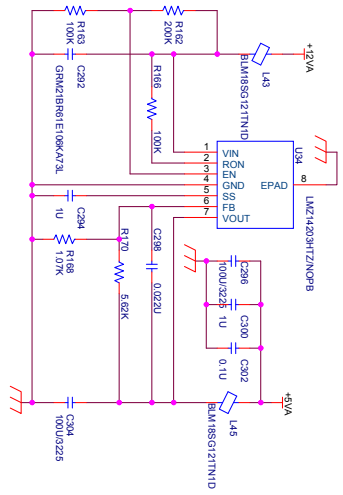
+12VA -> +10VA



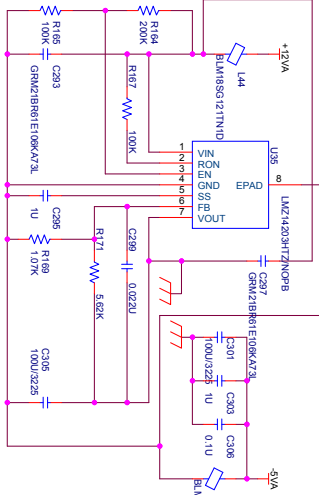
+12VA -> -10VA



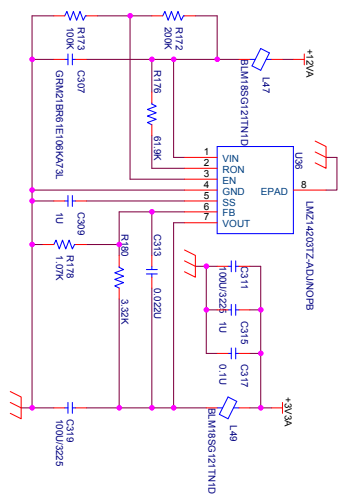
+12VA -> +5VA



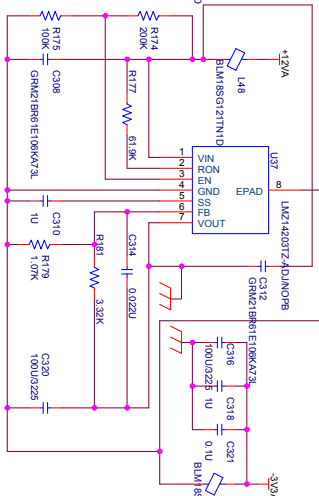
+12VA -> -5VA



+12VA -> +3V3A



+12VA -> -3V3A



REV	DATE	DESCRIPTION
1	2014.12.24	POWER ANALOG

引用

- [1] Particle data group 2013.
- [2] John Beacom, Will Farr, and Petr Vogel. Detection of supernova neutrinos by neutrino-proton elastic scattering. *Phys. Rev. D*, Vol. 66, p. 033001, Aug 2002.
- [3] T.J.C. Bezerra, H. Furuta, F. Suekane, and T. Matsubara. A global fit determination of effective from baseline dependence of reactor disappearance. *Physics Letters B*, Vol. 725, pp. 271–276, 2013.
- [4] S. Enomoto. Phd thesis. *Tohoku University*, 2005.
- [5] A. Bungau et al. Proposal for an electron antineutrino disappearance search using high-rate ^8Li production and decay. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 109, p. 141802, Oct 2012.
- [6] A. Gando et al. Limit on neutrinoless $\beta\beta$ decay of ^{136}Xe from the first phase of kamland-zen and comparison with the positive claim in ^{76}Ge . *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 110, p. 062502, Feb 2013.
- [7] F. P. An et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at daya bay. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 108, p. 171803, Apr 2012.
- [8] I. Tamborra et al. Neutrino emission characteristics and detection opportunities based on three-dimensional supernova simulations. *Phys. Rev. D*, Vol. 90, p. 045032, Aug 2014.
- [9] J. B. Albert et al. Search for majorana neutrinos with the first two years of exo-200 data. *Nature*, Vol. 510, pp. 229–234, 2014.
- [10] K. Abe et al. Distillation of liquid xenon to remove krypton. *Astroparticle Physics*, Vol. 31, No. 4, pp. 290 – 296, 2009.
- [11] K. Abe et al. Search for differences in oscillation parameters for atmospheric neutrinos and antineutrinos at super-kamiokande. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 107, p. 241801, Dec 2011.
- [12] K. Asakura et al. Result from kamland-zen. 2014.
- [13] Ken'ichiro Nakazato et al. Supernova neutrino light curves and spectra for various progenitor stars: From core collapse to proto-neutron star cooling. *ApJS*, Vol. 205, No. 1, p. 2, 2013.
- [14] K.Fushimi et al. Kamland-pico project to search for cosmic dark matter. 2014.
- [15] M. Agostini et al. Results on neutrinoless double- β decay of ^{76}Ge from phase i of the gerda experiment. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 111, No. 6, p. 122503, Sep 2013.

- [16] R. Bernabei et al. Dama/libra results and perspectives. 2013.
- [17] S. Abe et al. Precision measurement of neutrino oscillation parameters with kamland. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 100, p. 221803, Jun 2008.
- [18] T. Totani et al. Future detection of supernova neutrino burst and explosion mechanism. *ApJS*, Vol. 496, No. 1, 1998.
- [19] M. Goldhaber, L. Grodzins, and A. Sunyar. Helicity of neutrinos. *Phys. Rev.*, Vol. 109, pp. 1015–1017, Feb 1958.
- [20] J. R. Wilson H. A. Bethe. Revival of a stalled supernova shock by neutrino heating. *ApJ*, Vol. 295, pp. 14–23, 1985.
- [21] Keisuke Harigaya, Masahiro Ibe, and Tsutomu T. Yanagida. Seesaw mechanism with occam’s razor. *Phys. Rev. D*, Vol. 86, p. 013002, Jul 2012.
- [22] C. DeMarino J. M. Blondin, A. Mezzacappa. Stability of standing accretion shocks, with an eye toward core-collapse supernovae. *ApJ*, Vol. 584, pp. 971–980, 2003.
- [23] H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I. V. KRIVOSHEINA. The evidence for the observation of $0 \nu \nu$ decay: The identification of $0 \nu \nu$ events from the full spectra. *Modern Physics Letters A*, Vol. 21, No. 20, 2006.
- [24] H.V. Klapdor-Kleingrothaus, A. Dietz, L. Baudis, G. Heusser, I.V. Krivosheina, B. Majorovits, H. Paes, H. Strecker, V. Alexeev, A. Balysh, A. Bakalyarov, S.T. Belyaev, V.I. Lebedev, and S. Zhukov. Latest results from the heidelberg-moscow double beta decay experiment. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, Vol. 12, No. 2, pp. 147–154, 2001.
- [25] S. Matsuda. Master thesis. *Tohoku University*, 2013.
- [26] A. Oki. Master thesis. *Tohoku University*, 2013.
- [27] M. Otani. Kamlandにおける位置再構成精度向上のための研究. 日本物理学会 2013 年秋季大会.
- [28] I. Shimizu. Results from kamland-zen. Neutrino 2014.
- [29] I. Shimizu. Phd thesis. *Tohoku University*, 2004.
- [30] K. Tagashira. Master thesis. *Tohoku University*, 2000.
- [31] Y. Takemoto. Master thesis. *Tohoku University*, 2009.
- [32] H. Watanabe. Phd thesis. *Tohoku University*, 2012.

- [33] S. Yamada. Results from kamland-zen double-beta decay experiment with ^{136}Xe . ICHEP2012.
- [34] H. Yoshida. Master thesis. *Tohoku University*, 2011.

謝辞

本研究に際して、沢山の方々からご指導を頂きましたため、この場をお借りして感謝の意を表したいと思います。

テスト基板開発に関して

先ず、高エネルギー加速器研究機構の池野正弘前任技師からは、テスト基板回路設計にご協力頂きました。余りにもお世話になっているために、その内容はこの場には書ききれない程です。おそらく、池野様のご協力無くして回路設計を終えることは無かったはずです。

更に、高エネルギー加速器研究機構の内田智久准教授からは、テスト基板のFPGA周辺に関してご協力を頂きました。特に、ADCとのシリアル通信の困難さをお伝え頂いたおかげで、早い段階で部品変更を行うことが出来ました。

有限会社ジー・エヌ・ディーの宮澤正和代表取締役社長には、テスト基板の製作にご協力頂きました。お取引時期が修士論文執筆と重なってしまったため、遅れて回路修正をお願いしてしまった事に大変申し訳無く感じております。

KamLAND でのご指導に関して

井上邦雄教授からは、KamLAND で研究する機会を頂きました。ミーティング等においては、私の分かり辛い発表にも真剣に耳を傾けて頂き、とても励みになりました。その他、休憩時間等には他の学生と共に歓談を楽しみ、とても良い研究生生活を送らせて頂きました。

石徹白晃治助教からは、学部4年時より全面的にお世話になりました。研究室のお花見で、近傍超新星対策を目的としたDAQシステムアップデートのお話を頂いたことがきっかけで、超新星研究や新FEE開発を行うことに繋がって行ったのだと思います。おそらく、私の博士過程でも沢山ご迷惑をお掛けするはずなので、感謝の言葉は博士号を取った際にまとめて表させて頂く予定です。

IPMUの竹本康浩研究員からは、MogDAQに関わるアドバイス等を頂きました。私はMogDAQエキスパートを任されていますが、トラブルの大半は竹本さんに対処して頂きました。出来るだけ早く能力が追い付くように、努力したいと思います。

この他にも、研究室の先生方・スタッフ・学生には研究生生活を送る上で大変お世話になりました。おかげ様で、毎日研究室に来るのがとても楽しみでした。

私は博士課程に進学致しますので、皆様には更にご迷惑をお掛けする事になるかと存じます。今後とも、ご指導ご鞭撻の程よろしくお願い致します。