

J-PARC E69 実験 (WAGASCI プロジェクト) における読み出し基板開発と最初のニュートリノビーム測定の結果

横浜国立大学 理工学府
数物・電子情報系理工学専攻 物理工学教育分野
学籍番号 19NC208
片山 優菜

2021年1月25日

概要

T2K 実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC からのミューニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市に位置するスーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験ではニュートリノ生成標的の 280 m 後方に設置されている前置検出器によってニュートリノの反応断面積の解析が進められている。しかしこの前置検出器は荷電粒子を検出できる方向が限られているため、T2K 実験による粒子と反粒子の対称性の破れの探索において大きな系統誤差が生じている。そこで J-PARC E69 実験では水標的とニュートリノの反応を 4π 方向のアクセプタンスで測定できる新型ニュートリノ検出器 WAGASCI を開発した。

WAGASCI 検出器 2 台、Wall MRD2 台、Proton Module1 台、Baby MIND1 台のフルセットアップで 2019 年 11 月から 2020 年 2 月にかけてニュートリノビーム測定が行われた。本研究ではフルセットアップでのニュートリノビーム測定のデータから、光漏れやケーブルの断線等の問題がなくデータ取得が行われたか確認した。

また、従来使用されていた読み出し基板 Interface は外側に実装した追加基盤の影響で安定したデータ取得ができない問題が生じていた。そこで、追加基板を内部回路に埋め込んだ新しいデザインの Interface を開発した。本研究では新型 Interface の性能試験を行い、次回のニュートリノビーム測定で使用できることを確認した。

目 次

第 1 章 ニュートリノ	3
1.1 ニュートリノとは	3
1.2 ニュートリノ振動	3
1.3 ニュートリノ振動の測定	4
1.4 ニュートリノ振動測定の課題	5
1.5 ニュートリノ反応	5
第 2 章 T2K 実験	9
2.1 概要と目的	9
2.2 ニュートリノビームライン	9
2.3 off-axis 法	11
2.4 前置検出器	12
2.4.1 INGRID	12
2.4.2 ND280	14
2.5 後置検出器:スーパーカミオカンデ	14
第 3 章 J-PARC E69 実験 (WAGASCI プロジェクト)	16
3.1 目的	16
3.2 検出器の概要	16
3.2.1 WAGASCI 検出器	17
3.2.2 Wall MRD	17
3.2.3 Baby MIND	18
3.2.4 Proton Module	20
3.3 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)	20
3.3.1 動作原理	20
3.3.2 諸特性	21
3.4 フルセットアップでの測定	22
第 4 章 エレクトロニクス	23
4.1 概要	23
4.2 SPIROC2D	27

第 5 章 読み出し基板の開発	28
5.1 目的	28
5.2 新型 Interface の概要	28
5.3 性能試験	31
5.3.1 手順	31
5.3.2 結果	32
5.4 検出器における新型 Interface の交換作業	32
5.5 プルアップ抵抗	36
第 6 章 最初のニュートリノビーム測定の結果	38
6.1 ニュートリノビーム測定の POT	38
6.2 ZedBoard における課題	39
6.3 Wall MRD の fake hit 問題	40
6.4 各検出器の hit 数解析	41
6.4.1 WAGASCI 検出器	41
6.4.2 Wall MRD	42
第 7 章 結論	46

第1章 ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

1930年パウリは β 崩壊におけるエネルギースペクトルを説明するために、初めてニュートリノの存在を示唆した。ニュートリノは中性のレプトンであり、弱い相互作用と重力相互作用を行う。また、3つの異なるフレーバーを持ち、それらは、電子ニュートリノ(ν_e)、ミュー・ニュートリノ(ν_μ)、タウ・ニュートリノ(ν_τ)で各々のフレーバーに対応した反粒子が存在する。

1.2 ニュートリノ振動

素粒子物理学の標準理論よりニュートリノの質量は0であり、ニュートリノのフレーバーは変化しないと考えられてきた。しかし、1962年ニュートリノ振動の発見によってニュートリノは有限の質量を持つことが示唆されるようになった。

ニュートリノは有限の質量を持ち、弱い相互作用の固有状態(フレーバー) $|\nu_\alpha\rangle (\alpha = e, \nu, \tau)$ と質量の固有状態 $|\nu_i\rangle (i = 1, 2, 3)$ は異なり、1つの弱い相互作用の固有状態は質量の固有状態の混合状態で表される。

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

式(1.1)の行列 U_{MNS} は牧・中川・坂田行列と呼ばれ、以下のような式で表される 3×3 のユニタリー行列である[1]。

$$\begin{aligned} U_{MNS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2) \end{aligned}$$

式(1.2)において $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ 、 $|\nu_j\rangle$ の混合角、 δ は複素位相を表しており、 $\delta \neq 0$ のときMNS行列はCP対称性が破れるので、 δ はCP位相とも呼ばれる。2つの質量固有状態 $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ は自由粒子のハミルトニアン \hat{H} の定常状態で

$$\hat{H}|\nu_1\rangle = i\frac{\partial}{\partial t}|\nu_1\rangle = E_1|\nu_1\rangle \quad (1.3)$$

を満たす。エネルギー固有値 E_1 は運動量 p とおくと $E_1 = \sqrt{p^2 + m_1^2}$ である。したがって、質量固有状態の時間発展は

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{-iE_1 t} \quad (1.4)$$

と表される。弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$, $|\nu_\beta\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_1\rangle$, $|\nu_2\rangle$ を用いて 2×2 のユニタリーベクトルで表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

$t = 0$ において運動量 p で生成された ν_α について考える。

$$|\psi(t=0)\rangle = |\nu_\alpha\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \quad (1.6)$$

式 (1.4) よりこの波動関数の時間発展は

$$|\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle e^{-iE_1 t} + \sin\theta|\nu_2\rangle e^{-iE_2 t} \quad (1.7)$$

である。相対論的に考えると、 $m_1, m_2 \ll p$ より、 $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ とおくと、 $t = 0$ で $|\nu_\alpha\rangle$ が飛行距離 $L (= t)$ で $|\nu_\beta\rangle$ になる確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ は

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\alpha | \psi(\mathbf{x}, t) \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{21}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

となる。また、 $|\nu_\alpha\rangle$ が $|\nu_\alpha\rangle$ になる確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$ も同様に、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) &= 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{21}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

と求まる。

1.3 ニュートリノ振動の測定

1998 年スーパーカミオカンデにて大気から降り注ぐニュートリノを観測することによってニュートリノ 振動がはじめて実証された。これはニュートリノ 振動を仮定しない場合に比べ、 ν_e に対

する ν_ν の数が少ないという観測結果から実証された [2]。また、2010 年には原子核乾板を用いた OPERA 実験において $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の直接観測に成功したと発表された [3]。この他にも様々な方法を用いてニュートリノ 振動に関する実験が行われている。

1.4 ニュートリノ振動測定の課題

ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノには質量があることが示唆されているが、その質量起源はまだ解明されていない。MNS 行列の精密測定は質量起源を探るために重要である。今までの測定により MNS 行列は

$$|U_{MNS}| \sim \begin{pmatrix} 0.82 & 0.54 & 0.15 \\ 0.48 & 0.53 & 0.71 \\ 0.31 & 0.65 & 0.69 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

と求められている。また、クォークの混合行列である CKM 行列は、

$$|V_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} 0.97434^{+0.00011}_{-0.00012} & 0.22506 \pm 0.00050 & 0.00357 \pm 0.00015 \\ 0.22492 \pm 0.00050 & 0.97351 \pm 0.00013 & 0.0411 \pm 0.00015 \\ 0.00875^{+0.00032}_{-0.00033} & 0.040 \pm 0.0013 & 0.99915 \pm 0.00005 \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

であり、この 2 つを比較すると MNS 行列の非対角成分は大きいことがわかる。これはニュートリノの混合が大きいことに起因する。Tri-bimaximal モデルでは、 $\theta_{13} = 0^\circ$ 、 $\theta_{23} = 45^\circ$ と考えて

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

となることが提唱されている。しかし、これまでの θ_{13} の測定結果では Tri-bimaxial モデルに反している。また、 θ_{23} では 45° の最大混合を示すことが示唆されており、 θ_{23} のより良い精密測定が課題となっている。

1.5 ニュートリノ反応

ニュートリノはその存在を直接観測することはできないため、実験の際にはニュートリノと核子・原子核の反応によって生じる粒子を観測する。

ニュートリノと核子・原子核反応には大きく分けて、電荷カレント反応 (Charged Current) と中性カレント反応 (Neutral Current) の 2 種類の反応がある。荷電カレント反応ではニュートリノは同一タイプの荷電レプトンに転換し、実験においては荷電レプトンを検出する。中性カレント反応ではニュートリノはニュートリノのまま残るが、それが反応したものにエネルギーと運動量を受け渡す。このため標的が反跳したり破碎したりするので、実験においてはこのエネルギー移行を検出する。

図 1.1 にニュートリノの反応断面積とエネルギーの関係を示す。

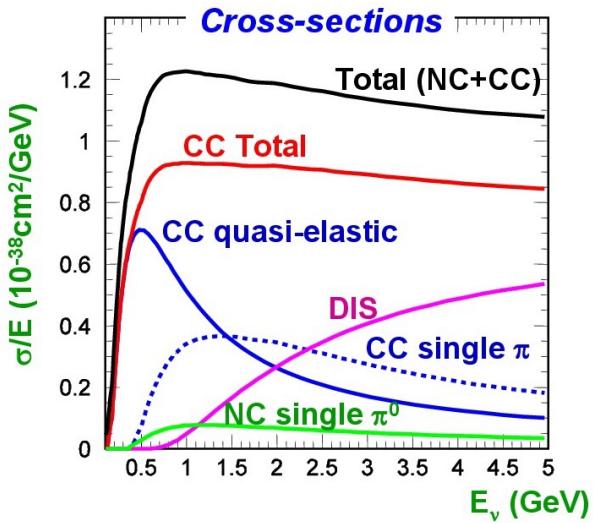


図 1.1: ニュートリノの反応断面積

- 電荷カレント準弾性散乱 (Charged Current Quasi Elastic scattering)

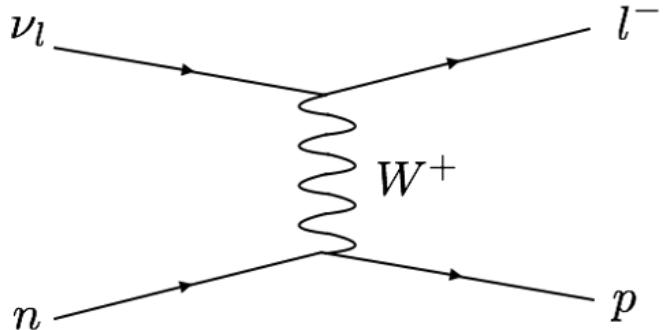


図 1.2: CCQE 反応

CCQE 反応(図 1.2)は数百 MeV の低エネルギー領域における主な反応である。後述の T2K 実験では $E=$ 約 600 MeV のミューニュートリノビームが使用されており、もとのニュートリノエネルギーを再構成することができる CCQE 反応を主に信号として用いている。生成された荷電レプトンの散乱角を θ_l 、エネルギーを E_l としてニュートリノのエネルギーを以下のように求めることができる。

$$E_\nu = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (1.13)$$

ここで、 m_N は核子の質量、 m_l 、 p_l はそれぞれレプトンの質量と運動量を表す。

- 単一パイオニン生成反応 (Single pion production)

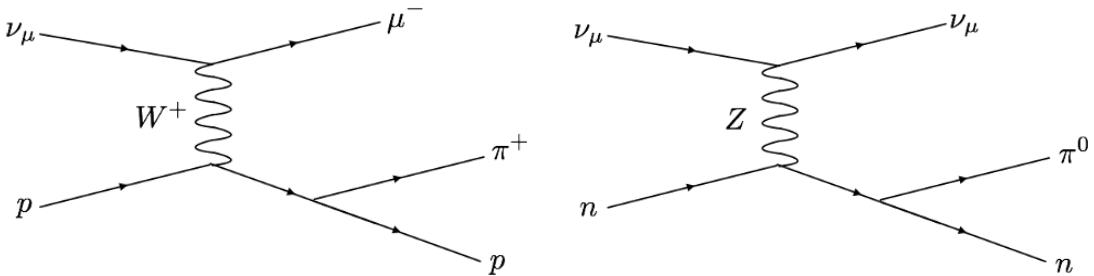


図 1.3: CC (Charged Current) 1 π 反応

図 1.4: NC (Neutral Current) 1 π 反応

CC1 π 反応 (図 1.3) は、 π 中間子を生成する反応であり、数 GeV 以下の領域で CCQE 反応の次に起こりやすい反応であり、低エネルギーのニュートリノ振動実験にも影響を与える。 π 粒子が検出器の性質や原子核内反応などによって検出できなかった場合、CCQE 反応と間違えられる可能性があり、CCQE 反応の主なバックグラウンドとなる。

NC1 π 反応 (図 1.4) は、 π^0 を生成する反応であり、 π^0 が崩壊して発生する γ のうち片方が非対称崩壊などによって運動量が小さくなり検出されなかつた場合や、2つの γ のなす角が小さくて1つの γ と判別された場合には CCQE 反応と間違えられる可能性がある。

- 深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering)

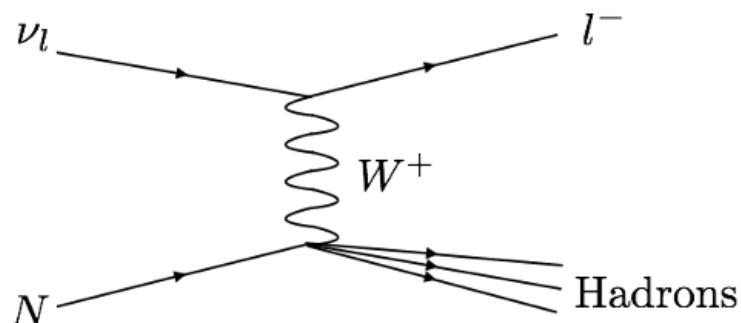


図 1.5: DIS 反応

DIS 反応(図 1.5)は、~数 GeV の高エネルギー領域における主な反応であり、ニュートリノが quark と散乱していると近似できる。

第2章 T2K 実験

2.1 概要と目的



図 2.1: T2K 実験

T2K(Tokai to Kamioka) 実験は 2009 年に開始した加速器型長基線ニュートリノ振動実験であり、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)からのミュニニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市に位置するスーパーカミオカンデで観測する(図 2.1)[4]。検出器には後置検出器であるスーパーカミオカンデの他に、ミュニニュートリノビームが生成された位置から 280 m のところに前置検出器群があり、双方を比較することによってニュートリノ振動を測定することを目的としている。

2.2 ニュートリノビームライン

J-PARC は図 2.2 に示すように、LINAC(LINear ACcelerator)、RCS(Rapid Cycling Synchrotron)、MR(Main Ring) の 3 つの加速器から成る大強度陽子加速器施設である [5]。

- LINAC

LINAC は主に負水素イオンを生成するイオン源と高周波電場によりビームを加速する加速空洞から構成される。加速空洞には、加速されるに従って速くなるビームの速度に応じて最も効率的にビームを加速できる電場を生成するために 4 種の構造(RFQ, DTL, SDTL, ACS)を持ったものが採用されている。これらの加速空洞を使用することで、250 m 程度の加速区間で負水素イオンビームを 400 MeV まで加速し RCS へ送られる。



図 2.2: J-PARC の構造

- 3GeV 陽子シンクロトロン RCS

上流の LINAC で 400 MeV に加速された負水素イオンビームは L3BT(Linac to 3GeV-RCS Beam Transport line) と呼ばれるビーム輸送路を通って RCS に入射され、その際に電子 2 個を剥ぎ取られ陽子に変換される。そして 3 GeV まで加速されたのち、下流の物質生命科学実験施設とメインリングシンクロトロンに供給される。RCS は一周およそ 350 m の大きさで、陽子ビームは $1.63 \mu\text{s}$ で一周する。加速器を一周する際、高周波加速空洞を通過するたびに少しずつエネルギーを上げて、最終的に 3 GeV まで加速する。RCS では 25 Hz の周期でビームの加速と取り出しが行われている。また、1 MW という大強度のビームを出すことが、この RCS の最大の特徴と言える。

- メインリングシンクロトロン MR

MR は地下 10 m のトンネルに建設された 1 周 1567.5 m の円形加速器であり、全周に大小 300 台を超える電磁石、高周波加速装置、ビームの出入射に用いられる特殊な電磁石、数百を超えるモニター観測機器で構成される。RCS から 40 ms ごとに 4 回に分けて入射蓄積される 3 GeV の陽子ビームを約 1.5 秒で 30 GeV まで加速し、2.48 秒の周期でニュートリノ実験施設へ、もしくは 5.20 秒の周期でハドロン実験施設へ出射する。この陽子ビームはパルスあたりの陽子数にして 270 兆個という世界記録の大強度陽子ビームである。

- ニュートリノ実験施設

図 2.3 にニュートリノビームの生成過程を示す。MR から放出された陽子ビームは多くの常伝

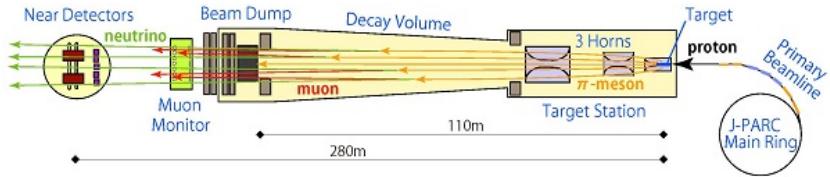


図 2.3: ニュートリノビームの生成

導電磁石や超伝導電磁石、ビームモニターを軌道上に配列した一次ビームラインを通って西向きに曲げられる。陽子ビームはターゲットステーション内のグラファイト標的に衝突することで生じるハドロン反応により、多数のハドロンが生成される。このうち正電荷を持つ π 中間子を、電磁ホーンによって前方に収束させる。電磁ホーンはビーム射出に同期した数百kAのパルス状の電流によって π^+ を収束させるよう設計された特殊な電磁石であり、 π^+ は長さ100mのトンネル(ディケイボリュームと呼ばれる)を飛行中に以下のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

電磁ホーンの極性を変化させることにより収束させる π 中間子の電荷を選択することで、ミューニュートリノからなるビームと反ミューニュートリノからなるビームを選ぶことができるため、ニュートリノの粒子と反粒子の対称性(CP対称性)の破れを測定できる。生成されたニュートリノ以外の粒子(陽子や π 中間子など)は大型グラファイトブロックで作られたビームダンプで吸収されるため実験施設外に出ることはない。ビームダンプを通過したミューオンの空間分布をミューオンモニターによって観測することで、ニュートリノの空間分布を間接的に観測する。標的から280m下流にはニュートリノ前置検出器があり、さらに295km離れた場所には後置検出器スーパーカミオカンデが位置している。これらの測定結果を比較することで、ニュートリノ振動を測定できる。

2.3 off-axis 法

T2K実験はoff-axis法を世界で初めて採用したニュートリノ実験である。off-axis法とは、検出器をニュートリノビーム軸(π 中間子の収束軸)からずらして置くことで、幅の狭いエネルギー分布のニュートリノビームを得る方法である。

T2K実験で使用されるニュートリノビームは、 0° (on-axis)の方向においては図2.4より2GeV周辺にピークを持った広いエネルギー分布となる。このエネルギー領域におけるニュートリノ振動確率は低く、 ν_e が現れるバックグラウンドとなる π^0 を生じるNC1 π^0 反応や ν_μ が消失するバックグラウンドとなる π 中間子を生じるCC1 π 反応の反応断面積が大きい。そのためT2K実験では、ニュートリノ振動確率が最大となる0.7GeVにピークを持つエネルギー分布のニュートリノビー

ムを生成するために、スーパーカミオカンデから 2.5° ずれた軸上に π 中間子を収束させる。ビームの方向は後述の前置検出器 INGRID にて常に高精度で監視している。

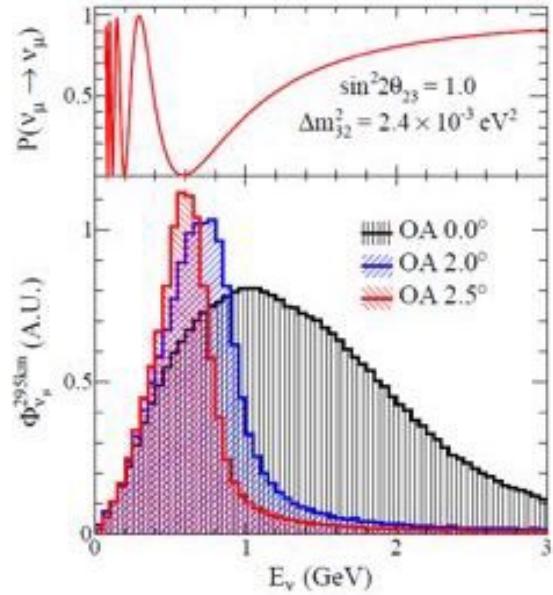


図 2.4: off-axis 角とニュートリノエネルギー・振動確率の関係

2.4 前置検出器

前置検出器は、グラファイト標的から 280 m 下流の地点に位置しており、ビーム軸上に置かれている INGRID(on-axis 検出器) と、 π 中間子の平均崩壊点とスーパーカミオカンデを結ぶ直線上に置かれている ND280(off-axis 検出器) から構成されている(図 2.5、図 2.6)。

2.4.1 INGRID

on-axis 検出器 INGRID は、ニュートリノビーム軸上に設置されており、ビームの方向と強度を監視するのに使用されている [6]。計 16 個のモジュールから成り、図 2.7 のように十字に配置されている。また、各モジュールは図 2.8 のように 9 層の鉄の層と 11 層のシンチレータの層がサンドイッチ構造になっている。鉄の層にてニュートリノが鉄と反応することによって生成された荷電粒子をシンチレータで検出する。



図 2.5: INGRID の写真



図 2.6: ND280 の写真

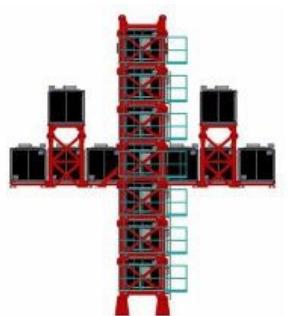


図 2.7: INGRID の概観

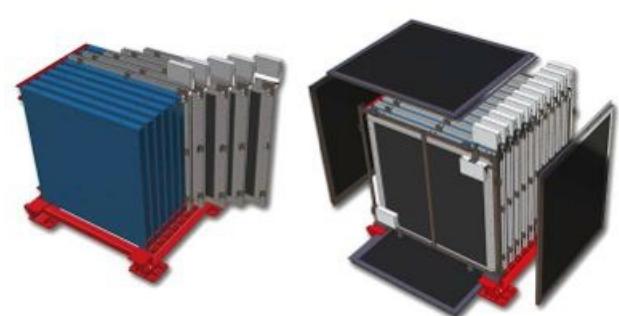


図 2.8: INGRID モジュール

2.4.2 ND280

off-axis 検出器 ND280 はスーパーカミオカンデの方向に設置されており、ニュートリノ振動が起こる前のニュートリノビームのフランクス、エネルギースペクトル、反応断面積を測定するのに使用されている。検出器全体がマグネットで覆われており、P0D、TPC、FGD、ECAL、SMRD の 5 つの検出器で構成される。

- UA1 Magnet

荷電粒子の飛跡を曲げるために検出器全体に 0.2 T の磁場を印加している大型常伝導ダイポール電磁石。かつて CERN の UA1 実験で使用されていたものが寄贈された。

- P0D(π^0 Detector)[7]

最上流に設置されており、 π^0 生成ニュートリノ反応の測定を行う。鉛薄膜、シンチレータ、水ターゲットのサンドイッチ構造になっている。

- FGD(Fine Grained Detector)[8]

断面が約 1 cm 四方の細かく分けられたシンチレータから成る検出器であり、ニュートリノ標的となることで反応点付近の粒子を検出する。2 台のモジュールから構成され、後方のモジュールはシンチレータと水標的のサンドイッチ構造となっており、水のニュートリノ反応断面積を測定できる。

- TPC(Time Project Chamber)[9]

ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子の飛跡の曲がり具合とエネルギー損失から粒子の識別および運動量の測定を行う。計 3 台のモジュールから成り、2 台の FGD の前後とその間に設置されている。

- ECAL(Electromagnetic CALorimeter)[10]

マグネット内側の最外層に位置し、鉛とシンチレータのサンドイッチ構造になっている。ニュートリノ反応によって生成された電子や γ 粒子の電磁シャワーを捕らえ、そのエネルギーを測定している。

- SMRD(Side Muon Range Detector)[11]

マグネットの隙間に設置されたシンチレータから成る検出器。大角度で散乱されて TPC に入射しなかった荷電粒子の飛跡を測定し、エネルギーを再構成する。

2.5 後置検出器: スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデとは、水チエレンコフ検出器であり、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山内に位置する。その概略図が図 2.9 である。宇宙線由来のバックグラウンドを減らすために地下 1000 m に建設された。検出器は 5 万トンの純水で満たされた二層式の水タンクと、その内部に取り付けられた 20 インチ光電子増倍管、タンク外側に設置された 8 インチ光電子増倍管から構成される。

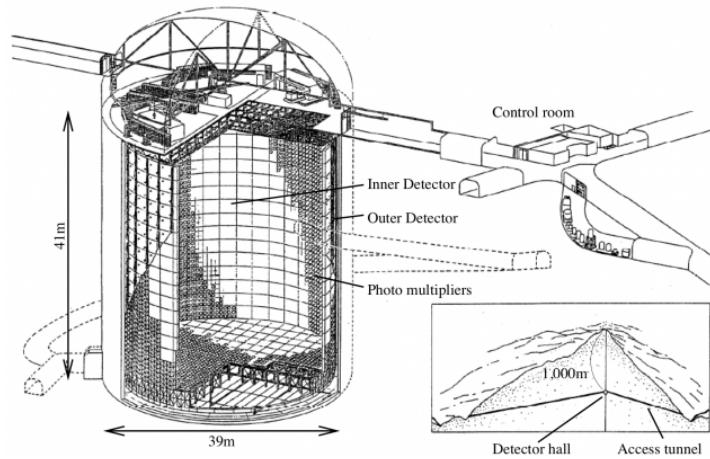


図 2.9: スーパーカミオカンデの概略図

スーパーカミオカンデでは、水とのニュートリノ反応によって生じた荷電粒子が水中を飛行する際に発するチエレンコフ光を光電子増倍管が感知することでニュートリノを観測している [12]。水タンク内側の光電子増倍管でチエレンコフ光を観測するとリング状に見え、その形状から粒子の種類を決定する。ミューニュートリノとの反応で生成されるミューオン由来のチエレンコフ光は輪郭が明瞭なリングになるのに対し、電子ニュートリノとの反応によって生じる電子由来のチエレンコフ光は電磁シャワーの影響により輪郭がぼやけたリングになる。ここで π^0 が生成された場合、通常輪郭がぼやけた二つのリングが観測されるが、リングが一つしか見られない場合が存在する。この時、電子ニュートリノイベントとの区別が困難であるため、 π^0 を生成するニュートリノ反応はバックグラウンドとなる。

第3章 J-PARC E69 実験 (WAGASCI プロジェクト)

3.1 目的

T2K 実験では、ニュートリノ生成標的の 280 m 後方に設置されている前置検出器 ND280 によってプラスチック (CH) 標的および水標的とニュートリノの反応断面積の解析が進められている。しかし、ND280 はニュートリノ反応で生成された荷電粒子を検出できる方向が構造上により前方方向に限られている。そのため phase space に測定できない方向が存在し、その部分については外部データ (MiniBooNE など) に依存しており、 4π 方向で測定を行う後置検出器スーパーカミオカンデにおいて大きな系統誤差が生じている。そこで J-PARC E69 実験では水標的とニュートリノの反応を 4π 方向のアクセプタンスで測定できる新型ニュートリノ検出器 WAGASCI を開発した。

3.2 検出器の概要

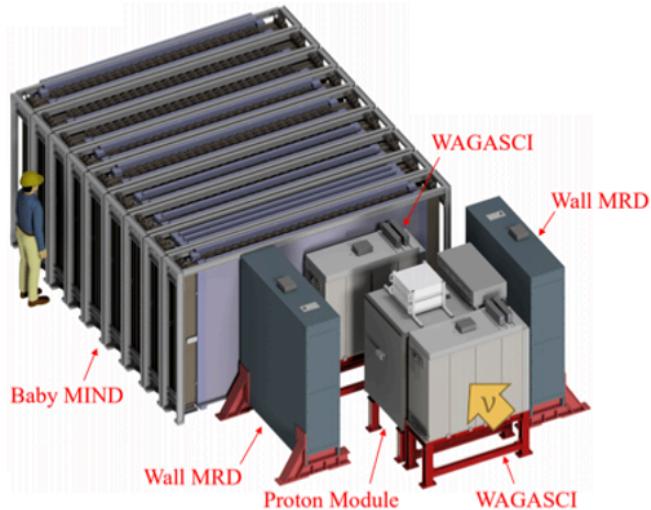


図 3.1: 検出器群の全体図

図 3.1 に検出器の全体図を示す。これらの WAGASCI 検出器群は ND280 が設置されている前置検出器ホール地下 2 階の off-axis 角 1.5° の位置に設置される。中央に設置された WAGASCI 検出

器は 2 台あり、水で満たされている。また、2 台の WAGASCI 検出器の間には CH 標的検出器の Proton Module が設置されている。さらに、WAGASCI 検出器の両側面には 2 台のミューオン飛程検出器 (Wall MRD) が設置され、下流側には磁場を印加したミューオン飛程検出器 (Baby MIND) が 1 台設置されている。

3.2.1 WAGASCI 検出器

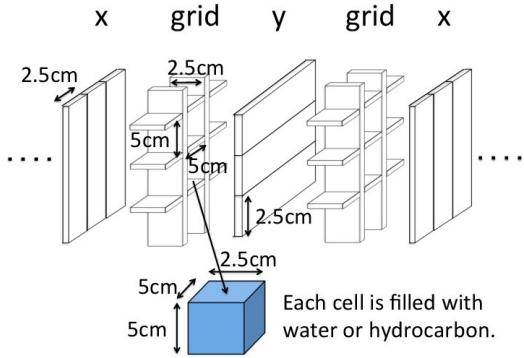


図 3.2: WAGASCI モジュールの内部構造

WAGASCI 検出器 1 台の大きさはビーム軸に対して垂直方向に縦横 1 m、平行な方向に 0.5 m である。1280 枚のプラスチックシンチレータとその間を満たす 0.6 トンの水標的で構成されている [13]。図 3.2 のようにプラスチックシンチレータは格子状に組まれ三次元的な格子構造を実現している。プラスチックシンチレータは、縦方向、グリッド構造、横方向、グリッド構造という順に配置され、グリッド構造内のプラスチックシンチレータは縦横 5 cm 間隔で並んでおり、その中に水を入れるため、 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ の水のセルが並んだ構造となっている。プラスチックシンチレータの三次元格子構造により、 4π 方向のアクセプタンスで荷電粒子を検出できる。WAGASCI 検出器では 32 チャンネル Array 型半導体型光検出器 (MPPC) を用いてシンチレーション光を観測している。MPPC の詳細については本章第 3 節で述べる。

3.2.2 Wall MRD

Wall MRD の大きさは図 3.3 に示す通りであり、11 の鉄の層と 10 のシンチレータの層が交互に並んだサンドイッチ構造である。1 台あたりの総重量は約 8 トンで、鉄板の大きさは高さ 1.8 m、長さ 1.6 m、厚さ 3 cm、プラスチックシンチレータの大きさは 1 枚あたり高さ 1.8 m、長さ 0.2 m、厚さ 7 mm である。また、シンチレータ層は 8 枚のプラスチックシンチレータで構成される。このシンチレータは薄さに対して幅が広い設計になっているため、直径 1.0 mm の波長変換ファイバーを波状に埋め込んで用いる。そのため波長変換ファイバーが長くなることから、MPPC(浜松ホト

ニクス・S13081-050CS)を用いて両側読み出しを行う。MPPCの詳細については本章第3節で述べる。

Wall MRDの設置によって、大角度に散乱する荷電粒子(特にミューオン)を観測できるようになる。さらに、WAGASCIモジュールとWall MRDの間に50 cm程度の間隔を設けることによつて、ヒットタイミングの時間差から荷電粒子の運動方向を求め、バックグラウンドとなるイベントを取り除くことも可能である。

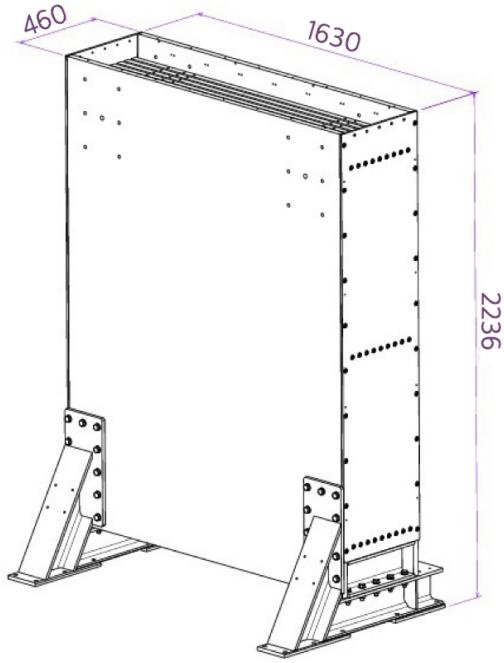


図 3.3: Wall MRD の概観

3.2.3 Baby MIND

Baby MIND(Magnetized Iron Neutrino Detector)とは、WAGASCI検出器の下流に位置するMRDである(図3.4)[14]。このMRDは33枚の鉄モジュールと18枚の飛程検出モジュールで構成される。鉄モジュールは鉄板と電磁コイルで構成されており、大きさは $3500 \times 2000 \times 50$ mm³で重さは1900 kgである。また飛程検出モジュールは95枚の水平シンチレータと16枚の垂直シンチレータで構成されており、大きさは $2880 \times 31 \times 7.5$ mm³である。150 Aの電流に対して1.5 Tの磁場を形成でき、磁場を印加することによってニュートリノ反応によって生成される荷電粒子 μ の電荷(μ^- か μ^+)を判別することが可能である。

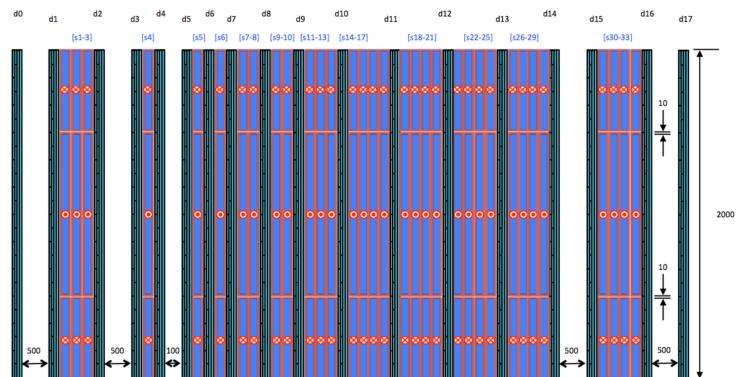


図 3.4: Baby MIND の側面図 (グレーの部分がシンチレータ、青・赤の部分が磁化鉄)

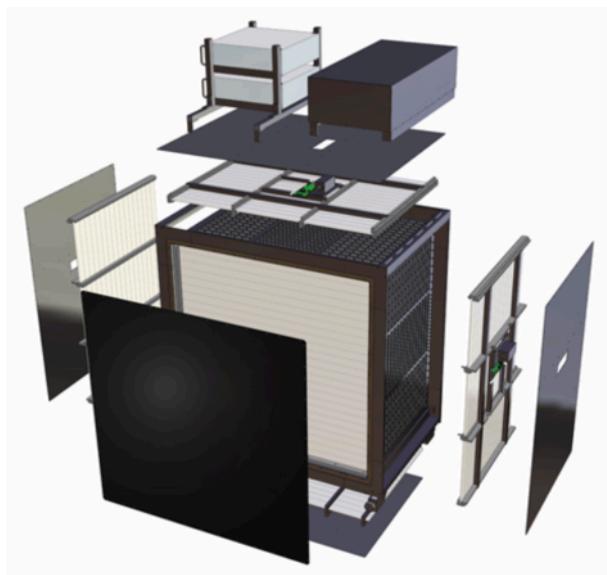


図 3.5: Proton Module の構造

3.2.4 Proton Module

Proton Module は本プロジェクトにおいて、2台の WAGASCI 検出器の間に設置され CH 標的検出器として使用される。図 3.5 のように 36 の tracking plane でえ囲まれた veto plane で構成されており、各 tracking plane は 2 種類のシンチレータバーで構成される [15]。内側領域の 16 本は $25 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ の SciBar タイプと呼ばれるシンチレータであるのに対し、外側領域の 16 本は $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ の INGRID タイプと呼ばれるシンチレータである。

3.3 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

MPPC は浜松ホトニクス製の PPD(Pixelated Photon Detector) で、ガイガーモード APD(Avalanche Photo Dyode) をマルチピクセル化し、各ピクセルの信号の和を並列に読み出すタイプの半導体光検出器である [16]。小さい本体、光電子増倍管に並ぶゲインと光検出率、磁場に対する耐性、高いコストパフォーマンス、70 V 程度の電圧で動作することなど多くの長所があり、手軽に使用できる。



図 3.6: Single 型 MPPC

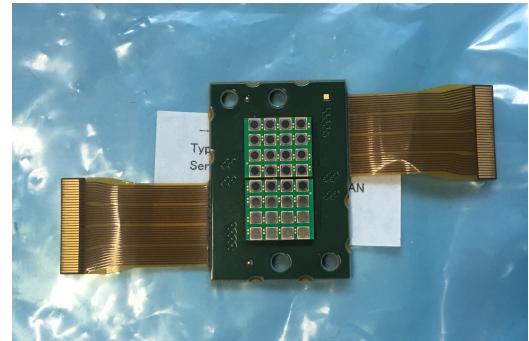


図 3.7: Array 型 MPPC

図 3.6 は Single 型 MPPC で、図 3.7 は WAGASCI 検出器で使用される Array 型 MPPC である。Array 型は 32 チャンネルの MPPC が 1 つの基板上にのっている。

3.3.1 動作原理

MPPC は $1 \sim 3 \text{ mm}$ 四方のシリコンチップが搭載された多数の APD ピクセルで構成されている。ピクセル内の p-n 接合面にブレイクダウン電圧 V_{bd} より $1 \sim 4 \text{ V}$ 程度高い逆電圧を印加すると、光量の大小にかかわらず素子固有の飽和出力が発生する(ガイガーフラッシュ)。この電圧で APD を動作させる状態をガイガーモードと呼ぶ。ガイガーモードの MPPC ピクセルに光子が入射すると、入射光子によって弾き出された光電子が増幅領域内で電子雪崩を起こす(図 3.8)。その後、このピクセルには電流が流れ、直列に接続された数百 $\text{k}\Omega$ 程度のクエンチング抵抗によって電圧降下が起こり、雪崩は終息する。

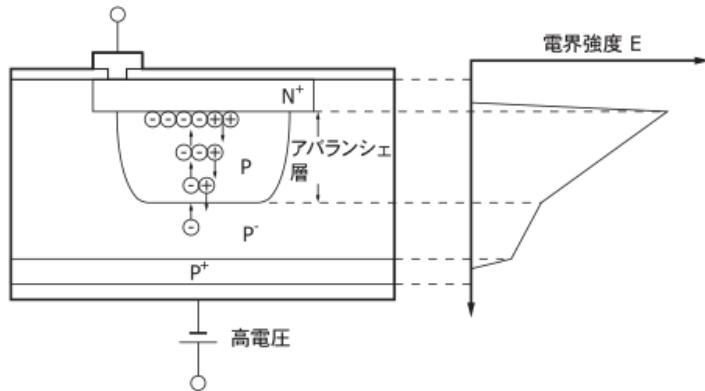


図 3.8: アバランシェ増倍の仕組み

このとき、1つのピクセルからの出力電荷 Q_{pix} は C_{pix} を1つのピクセルのキャパシタンス、 V を印加電圧、 V_{bd} をブレイクダウン電圧とすると、

$$Q_{pix} = C_{pix}(V - V_{bd}) \quad (3.1)$$

と表される。全ピクセルの出力電荷の和が出力信号となるため、 C_{pix} および印加電圧が一様であれば MPPC の出力電荷 Q は、

$$Q = \sum_i^N Q_i = NQ_{pix} \quad (3.2)$$

となり、電子雪崩を起こしたピクセルの数 N に比例した電荷が得られる。

3.3.2 諸特性

- ゲイン・ブレイクダウン電圧

電圧降下により印加電圧がブレイクダウン電圧 V_{bd} 以下になったとき電子雪崩が終了するため、MPPC のゲインは印加電圧とブレイクダウン電圧の差に比例する。また、ブレイクダウン電圧は温度に線形に依存することがわかっており、室温から液体窒素温度までの温度係数は約 50 mV/K であることが確認されている。

- ダークノイズ

MPPC では光によって生成されたキャリア以外の要因によってパルスが発生することがあり、これをダークノイズと呼ぶ。ダークノイズの主な原因は熱励起による電子が電子雪崩を起こすことであると考えられ、検出誤差へつながる。ノイズの大きさは1光電子相当 (=1 p.e.) がほとんどであるが後述のピクセル間クロストークやアフターパルスの影響で2 p.e. 以上現れる場合もある。WAGASCI に用いられる MPPC では、ノイズ源となる不純物による中間準位や局所的に高電圧の領域の存在を取り除いた結果、非常に低い Noise rate を達成している。

- ピクセル間クロストーク

あるピクセルで電子雪崩が発生した際、その雪崩中で赤外波長の光子が発生し、周囲のピクセルに伝搬することで別の雪崩を引き起こしてしまうことがある。このような現象をピクセル間クロストークと呼ぶ。これが起きると、MPPC の出力が実際に検出されるべき光電子数よりも大きくなってしまう。クロストークが生じる確率は印加電圧 V とブレイクダウン電圧 V_{bd} の差に比例することがわかっており、典型的なクロストークの確率は 0.1 ~ 0.2 程度であると考えられている。

- アフターパルス

MPPC の增幅領域内には結晶の格子欠陥が存在し、アバランシェ増倍の過程でこの格子欠陥に雪崩電子が捕獲され、一定時間後に再放出されることにより再びアバランシェ増倍を起こすことがある。このような現象はアフターパルスと呼ばれる。入射フォトンによるパルスとアフターパルスはその形状からは区別できない。

3.4 フルセットアップでの測定

2018 年 12 月から Wall MRD、WAGASCI 検出器、Baby MIND が J-PARC の T2K 実験前置ニュートリノホール地下 2 階にインストールされた。インストール完了後、J-PARC E69 実験として 2019 年 11 月から 2020 年 2 月の期間ではじめてフルセットアップでのニュートリノビーム測定を行った。この測定結果については本論文第 5 章で述べる。

第4章 エレクトロニクス

4.1 概要

WAGASCI検出器で用いられているデータ収集システム(DAQ)はフランスl'Ecole polytechniqueのLaboratoire Leprince Ringuet(LLR)で設計され、日本で制作したものである。図4.1にエレクトロニクスのセットアップを模式的に示した。

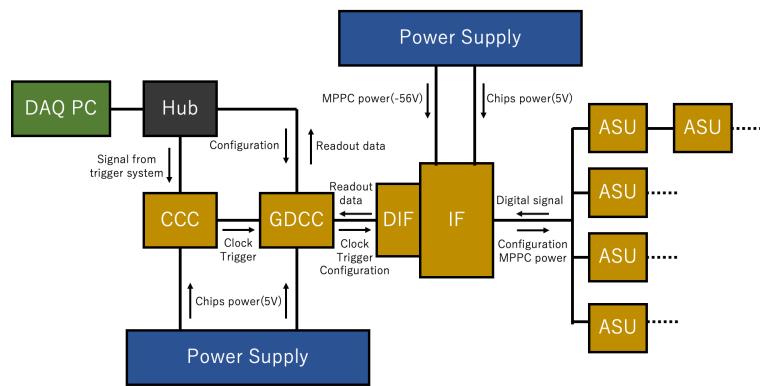


図 4.1: エレクトロニクスの概要

- ASU(Active Sensor Unit)



図 4.2: ASU の写真

ASU は後述の SPIROC2D という ASIC(Application Specific Integrated Circuit) が 1 枚搭載されたボードであり、その写真を図 4.2 に示した。ASU の主な役割は MPPC のアナログ信号をデジタルデータに変換し、そのデータを DIF 側へ送ることである。また、Interface に入力されたバイアス電圧を MPPC に送るという役割も担っている。Interface と ASU の接続には 50 pin、22 cm のフラットケーブル (Samtec 社・FFTP-25-D-08.77-01-N) を使用する。また、ASU 同士の接続には 50 pin、10 cm のフラットケーブル (Samtec 社・FFTP-25-D-03.85-01-N) 2 本が必要となる。また、終端の ASU にのみジャンパーピンを取り付ける。

- Interface



図 4.3: Interface の写真

Interface は、ASU と DIF の信号のやりとりを司る役割を担う。図 4.3 がその写真である。DIF とは 90 pin のコネクタを用いて接続され、ASU との接続には前述のフラットケーブルを用いる。また、High Voltage、Low Voltage とも接続できるようになっており、MPPC への電力供給や DIF 上の FPGA チップ、ASU 上の SPIROC2D への電力供給も行う。接続する ASU の列数に応じてジャンパーピンを取り付ける必要がある。

- DIF(Detector InterFace)



図 4.4: DIF の写真

DIF は ASIC である SPIROC2D を制御するための FPGA チップが 1 枚搭載されたボードであり、SPIROC2D でデジタル変換されたデータを後述する GDCC/PC 側へ送ったり、PC で設定した閾値等の情報を SPIROC2D へ伝えたりといったデジタルデータのやりとりを担う。図 4.4 がその写真である。GDCC とは HDMI ケーブルで接続される。

- GDCC(Giga Data Concentrator Card)



図 4.5: GDCC の写真

GDCC は FPGA チップが 1 枚搭載されたボードであり、図 4.5 がその写真である。DIF-PC 間のデータのやりとりを担う。PC とはイーサネットケーブルで接続される。

- CCC(Clock and Control Card)

GDCC ボードのファームウェアを書き換えることでスピルトリガーの制御を行う。GDCC とは HDMI ケーブルで接続される。

- Single MPPC Card

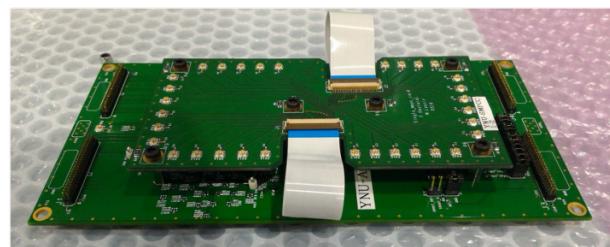


図 4.6: Single MPPC Card の写真 (上部の基板)

Single MPPC Card(図 4.6) はシングルタイプの MPPC と ASU 間の接続を担う基板であり、1 枚につき最大 32ch の MPPC が接続可能である。Wall MRD に使用する ASU に取り付けられる。

- DAQ PC

データ収集用のパソコンであり、OSはCentOS(バージョン7.4.1708 64bit版)を用いている。また、フランスLLRで開発されたCalicoesを読み出しソフトウェアとして用いる。Calicoesの動作にはPyrameと呼ばれるソフトウェアフレームワークが必要となる。

- Power Supply



図 4.7: Power Supply

CCC、GDCC、DIF、SPIROC2Dに対する電圧源には図4.7に示したPower Supply(TDK Lambda社・ZUP Series)をLow Voltageとして使用し、MPPCに対する電圧源には同様のPower SupplyをHigh Voltageとして使用した。

以上がデータ収集システムに必要なエレクトロニクスであり、図4.8に各検出器とDAQ PC間のエレクトロニクスの概略を示す。

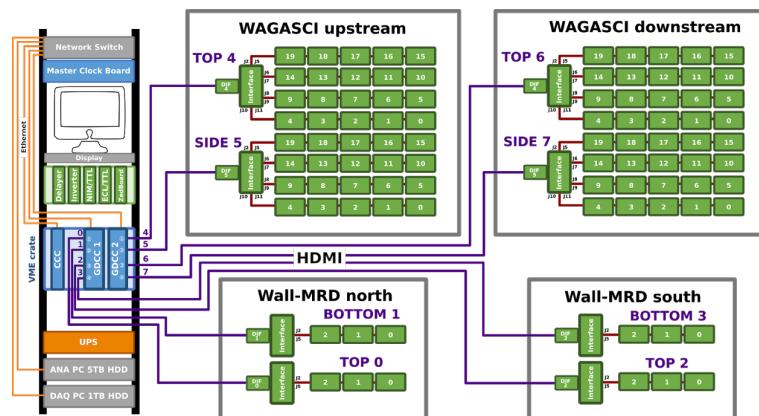


図 4.8: 各検出器と DAQ PC 間のエレクトロニクスの概略図

4.2 SPIROC2D



図 4.9: SPIROC2D

図 4.9 は ASU に搭載されている信号読み出し専用チップ (ASIC)、SPIROC2D である [17]。SPIROC(Silicon Photomultiplier Integrated Read Out Chip) は SiPM の信号を読み出すためにフランスの OMEGA 社によって開発された。SPIROC は様々な発展を遂げ、最新版が ASU に搭載されている SPIROC2D である。

主な役割はアナログ情報をデジタル化し、DAQ PC に転送することである。そのほかにも各チャネルごとの MPPC にかかるバイアス電圧の微調整や、信号の増幅率の変更、閾値を超えた信号をヒットとして認識するディスクリミネータの役割も果たす。

- 10-bit discriminator trigger threshold DAC

trigger threshold はある閾値を超えた信号をヒットとして認識するディスクリミネータの役割を持つ。threshold の電位の値は 260 mV から 2.5 V までの間を 1024 段階で変更できる。

- 6-bit Pre-Amplifier DAC

SPIROC2D にはゲインの異なる 2 つのプリアンプが各チャネルで用意されている。信号が小さい場合は High Gain、信号が小さい場合は Low Gain に自動的に切り替わるように設定されている。つまり、ある閾値以上の信号が入ると自動的に Low Gain に切り替わる。ただし、全ての閾値以上の信号が Low Gain に切り替わるわけではなく、一部の信号は High Gain のままである。閾値以上の信号のうち、Low Gain に切り替わった信号の割合は Gain Select efficiency と呼ばれ、threshold によってこの値も変わるが、2.5 p.e. の時には 95 % 程度になる。

- 8-bit Input DAC

MPPC のアノード側の電位を各チャネルごとに 0 ~ +2.5 V の範囲で上げることができ、バイアス電圧はその分だけ減少する。使用する MPPC のオペレーションボルテージをチャネルごとに変更するために使用する。

第5章 読み出し基板の開発

5.1 目的

初期の Interface(図 5.1) を用いた性能試験では、接続する ASU の枚数を増やすと Configuration(ASIC を初期化するプロセス) が行えないという問題点があった [18]。これは Slow Clock 信号の回路が直列であると接続する ASU の枚数が増えた際に電圧低下が発生し、うまく信号を伝えられないため生じた。この問題を解決するために図 5.2 のように Interface に追加基板を実装した。この追加基板により、Slow Clock 信号の回路が並列になり、ASU の枚数を増やしても適切に信号が伝わるように改善された。しかし、基板の外側に追加基盤を実装したことで露出したケーブルが外力の影響を受けるという新たな問題が生じた。ケーブルが外力を受けることで、Configuration が不安定になったり、データが入らない ASU が出現したりしたことから、ケーブルが外力を受けないよう Interface 内部の回路に埋め込む新しいデザインが必要となった。

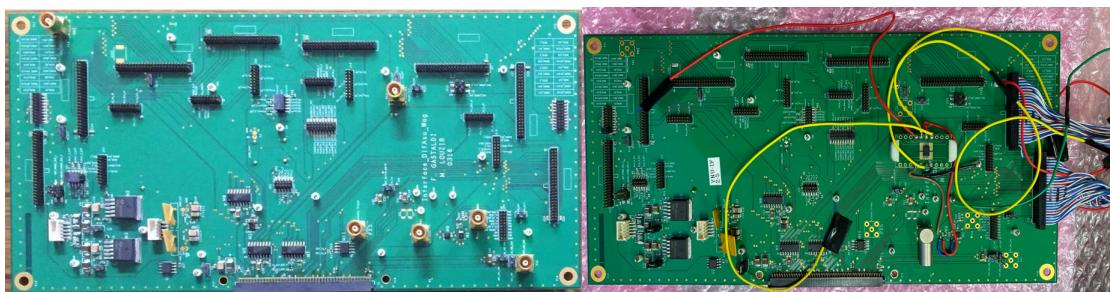


図 5.1: 初期の Interface

図 5.2: 追加基板を実装した Interface

5.2 新型 Interface の概要

図 5.3 は新型 Interface の写真である。そして図 5.4 に従来の Interface の設計図を、図 5.5 に新型 Interface の設計図を示した。図中の赤丸部分に注目すると、従来の Interface では追加基盤が実装されていた部分が新型 Interface では内部回路に埋め込まれた設計になっていることがわかる。また、図 5.5 中の青丸は後述のプルアップ抵抗の位置を示す。

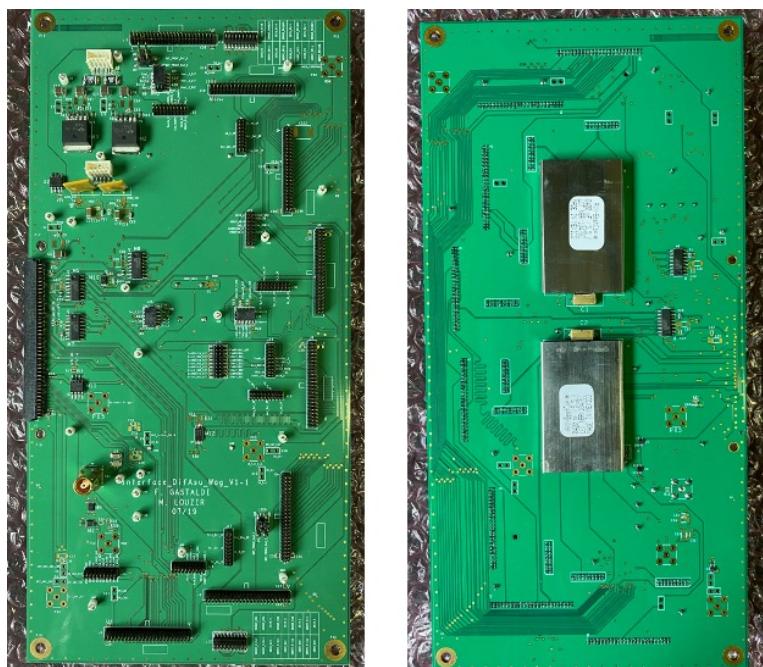


図 5.3: 新型 Interface の写真

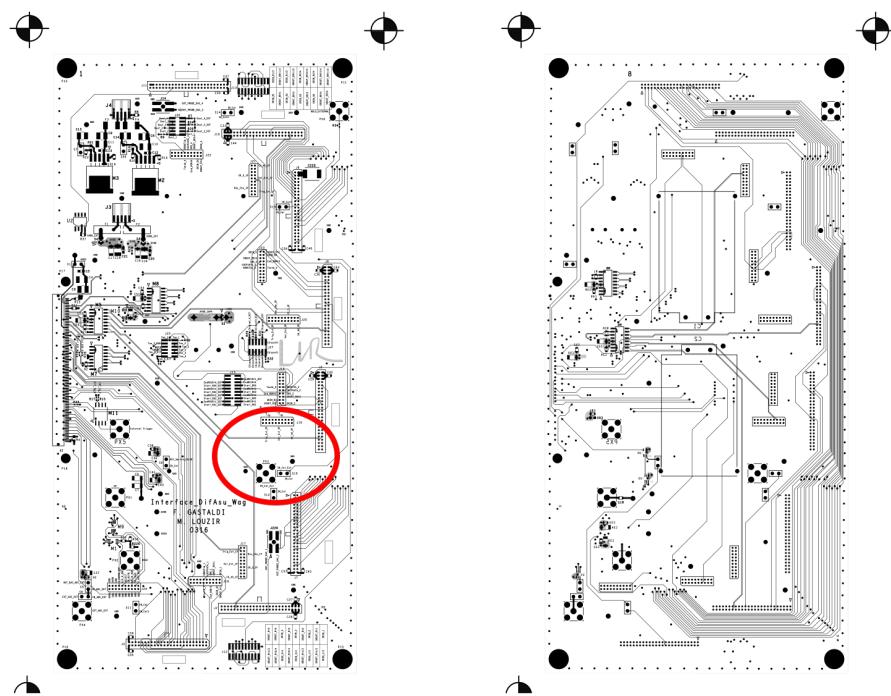


図 5.4: 従来の Interface の設計図 (左:表側、右:裏側)

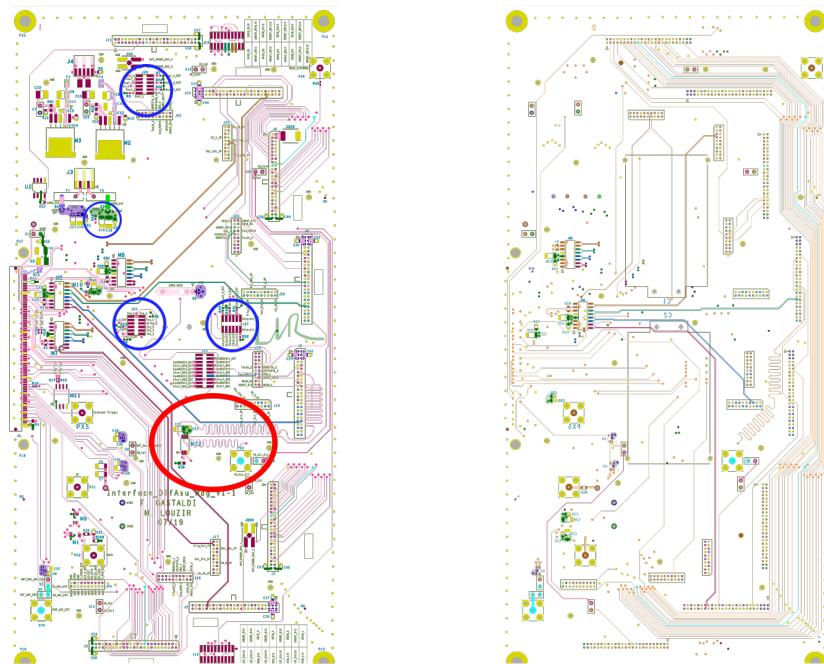


図 5.5: 新型 Interface の設計図 (左:表側、右:裏側)

5.3 性能試験

ここでは、WAGASCI 検出器に新型 Interface をインストールする前に横浜国立大学にて行った性能試験について述べる。

5.3.1 手順

試験の手順は以下の通りである。

(1) 機器のセットアップ

測定したい Interface と ASU にジャンパープラグが正しく装着されていることを確認してフラットケーブルでつなぐ。ASU はブラックシートで隙間ができないように覆い遮光する。また、今回の試験では ASU を 1 枚接続して MPPC のダークノイズを測定した。その際 ASU には 32 チャンネル Array 型 MPPC を取り付けた。

(2) 閾値等の設定の変更を PC で行う。

閾値は 0.5 p.e. 相当に設定した。

(3) Pyrame の起動

PC で Pyrame を起動することにより Calicoes を使用できるようになる。

(4) Low Voltage の電源を入れる。

まず CCC/GDCC 側の電源を入れ、電流が安定したら (1.8 A を超えた場合) Interface の電源を入れる。この時 Interface 側の電流が 0.50 A 前後になることを確認する。

(5) configure

測定に使用する ASU の枚数、閾値などの設定が反映される。PC からコマンドを入力することで行った。

(6) High Voltage の電源を入れる。

MPPC の劣化を防ぐため、規定の電圧値まで徐々に上げていく。今回の測定では電圧は 56.7 V に統一した。

(7) Spill を入れる

データ取得時間とデータ読み出し時間のタイミングを調整するためのスpillと呼ばれる矩形波の信号を用いる。PC からコマンドを入力することで Spill を出した。

(8) 測定

PC にコマンドを入力することで測定を開始/終了することができる。なお測定時間は約 3 分間とした。測定終了後は、HV、Interface 側の LV、CCC/GDCC 側の LV というように測定開始時と逆の順序で止める。

(9) Decode

測定終了後 raw ファイルと呼ばれるデータが PC 内に作成される。そのままでは解析ができないため、Decode と呼ばれる作業を行い raw ファイルを解析可能な ROOT ファイルに変換する。このファイルは CERN が開発したソフトウェア ROOT を用いて解析できる。

試験は Interface 以外のセットアップを変更せず、Interface のみを順次付け替えていき、計 8 枚の Interface にて MPPC のダークノイズを測定することで行った。

5.3.2 結果

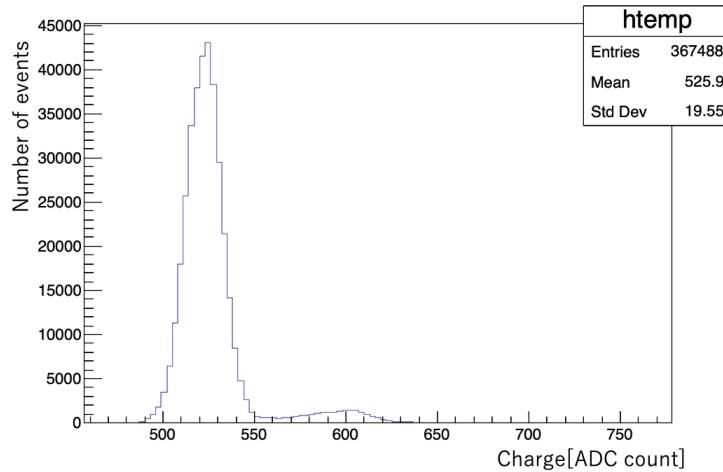


図 5.6: 全チャンネルの ADC 分布

図 5.6 はある Interface で MPPC のダークノイズを測定した際の全チャンネルの ADC 分布である。Charge が 530 ADC count と 600 ADC count 付近にピークが見られる。これらはペデスターと呼ばれる 0 光子相当 (p.e.=photoelectron または photoelectron equivalent という) と MPPC が 1 光子を検出した時の 1 p.e. の信号を表し、それぞれのピークはガウス分布を成す。

8 枚全ての新型 Interface に関して図 5.6 と同じような ADC 分布を示したことから、故障や異常等の問題なくデータが取れることができた。

5.4 検出器における新型 Interface の交換作業

図 5.7 に WAGASCI 検出器への新型 Interface の交換作業の様子を示す。新型 Interface の交換作業は上流 WAGASCI Side View を最初に行い、動作試験を行った。その後、データが問題なく取得できることを確認してから他の検出器の交換作業を行った。

動作試験は上流 WAGASCI Side View の 20 枚の ASU と新型 Interface を用いて MPPC のダークノイズを測定することで行った。その結果、取得したデータが壊れており解析できなかった。その後、10 枚の ASU を用いて MPPC のダークノイズを測定した結果、図 5.8 と図 5.9 の ADC 分布が得られた。図 5.8 は横軸が ASU の番号、縦軸がその ASU での ADC count、z 軸が ADC count のイベント数を表しておりイベント数の大きさによって色分けされている。この結果より、接続する ASU の数が 10 枚の時は全 ASU で正しくデータを測定できることがわかった。



図 5.7: 上流 WAGASCI Side View にマウントした新型 Interface の写真

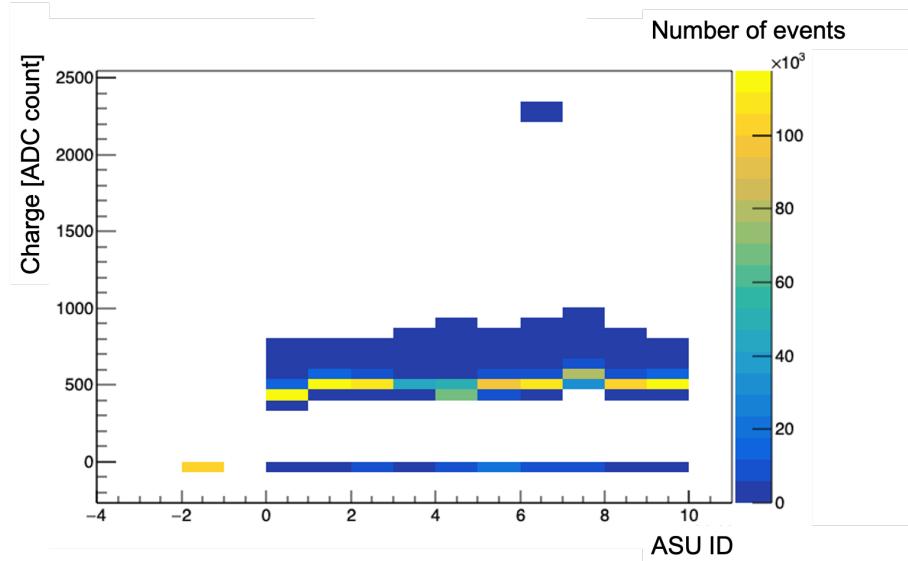


図 5.8: 上流 WAGASCI Side View における ASU10 枚 (5 枚× 2 列) 接続時の ADC 分布

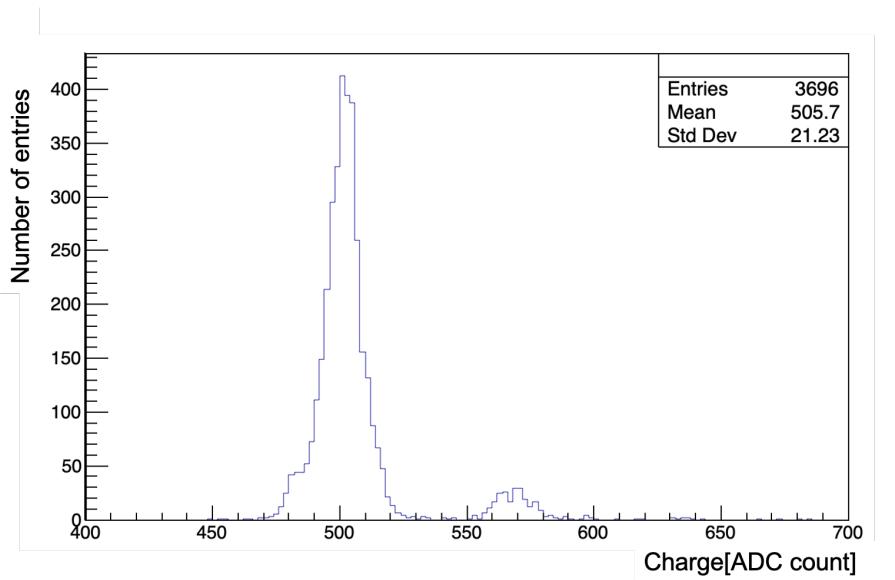


図 5.9: 上流 WAGASCI Side View における ASU10 枚 (5 枚× 2 列) 接続時のあるチャンネルの ADC 分布

このように接続する ASU の枚数を増やした際、データの入らない ASU が存在する原因として後述のプルアップ抵抗の値が高すぎる可能性を考えた。新型 Interface には 1 枚あたり計 12 個の $1\text{k}\Omega$ 抵抗がプルアップ抵抗として装着されている (図 5.5 中の青丸部分)。このプルアップ抵抗の抵抗値が高すぎるため、接続する ASU の枚数が増えた際、全 ASU に適切な信号を送ることができなかったことが原因であると考えた。そこで、12 個のプルアップ抵抗を 100Ω 抵抗に付け替えた。プルアップ抵抗付け替え後に 20 枚の ASU を接続して測定した結果を図 5.10 と図 5.11 に示す。この結果から、プルアップ抵抗の抵抗値を 100Ω に変更したところ、全 ASU で正しくデータを取得できた。ゆえに、プルアップ抵抗を 100Ω に交換後の新型 Interface はニュートリノビーム測定に使用できるようになった。

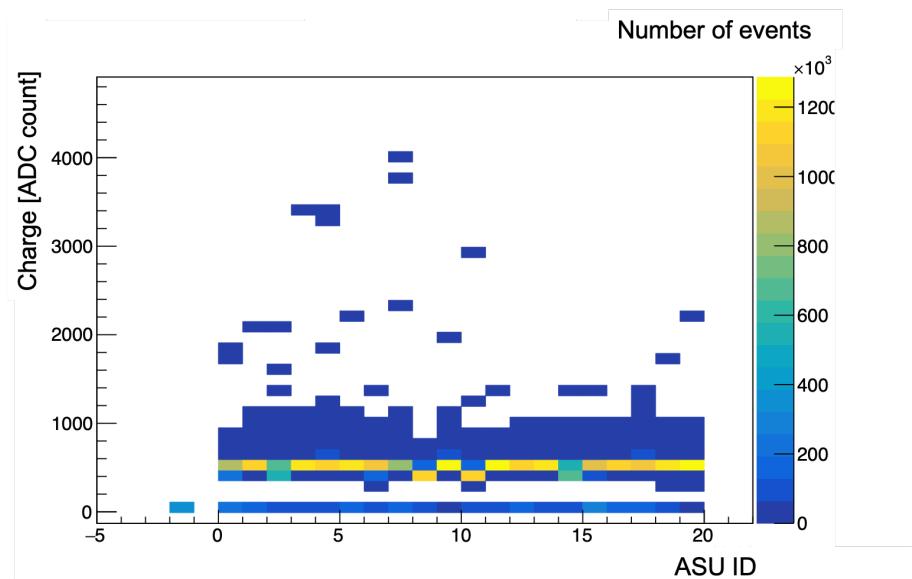


図 5.10: 新型 Interface のプルアップ抵抗変更後、ASU20 枚接続時の各 ASU の ADC 分布

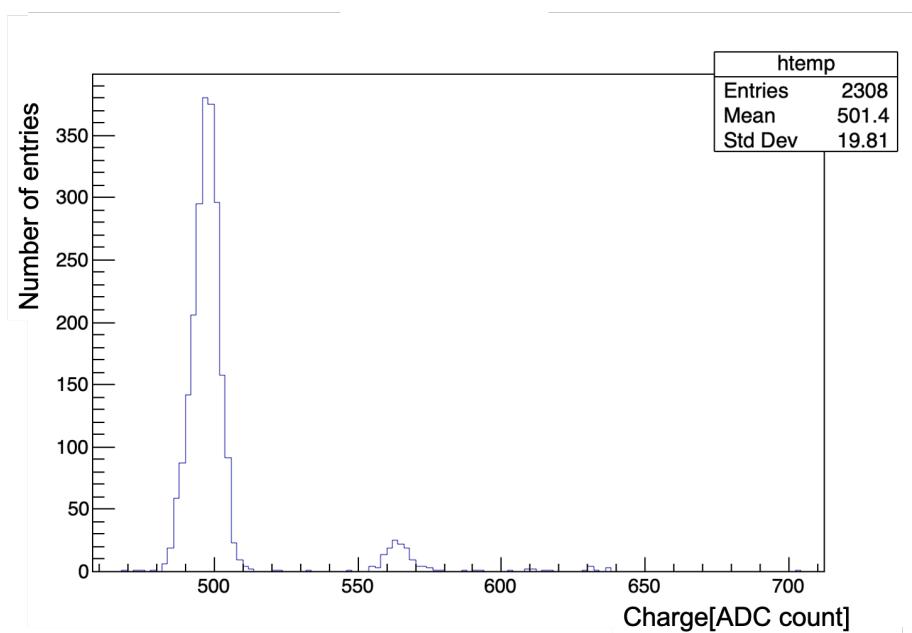


図 5.11: ASU20 枚接続時のあるチャンネルの ADC 分布

5.5 プルアップ抵抗

デジタル回路における信号としての電圧は、High または Low の電圧が印加されている必要があり、High と Low の中間電圧の状態では誤作動を生じる場合がある。また、図 5.12 のように回路の入力端子がどこにも接続されていない「浮いている」状態があると、周囲の静電気や電磁誘導による浮遊電位により高電圧が発生し、故障の原因となる。その対策として用いられるのがプルアップ抵抗である [19]。

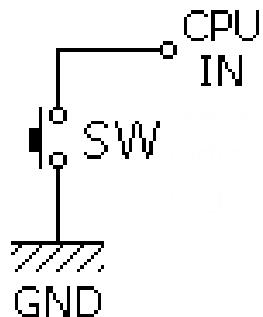


図 5.12: 「浮いている」状態のある回路 (スイッチを off にしている時、入力端子がどこにも接続されていない)

図 5.13 のようにプルアップ抵抗を用いた回路のスイッチを off にした際、抵抗を介して V_{CC} と CPU が繋がるために、IN ポートには V_{CC} の電流が流れ込むことになる。つまりスイッチが off の場合には High の電圧が印加されるのだ。また、回路が「浮いている」状態にもならない。

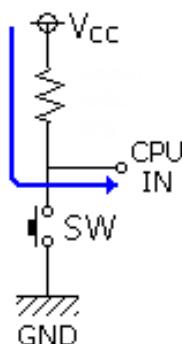


図 5.13: プルアップ抵抗が取り付けられた回路の例 (スイッチ off 時)

続いて図 5.14 のようにスイッチを on にした際、電流は CPU より抵抗値の低い側、つまりスイッチを経由して GND に流れることでこのラインは 0 V となる。したがってスイッチが on の場合には

Low の電圧が印加される。

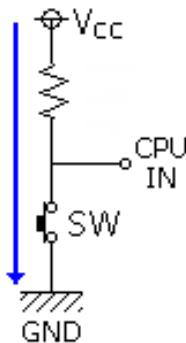


図 5.14: プルアップ抵抗が取り付けられた回路の例 (スイッチ on 時)

このプルアップ抵抗の抵抗値は大きすぎても小さすぎても問題を生じる。抵抗値が大きすぎる場合に起こりうる問題は以下の通りである。

- 回路が「浮いている」状態に近づいてしまう
- スイッチ off 時にも CPU に印加される電圧が High となる最低電圧以下になる
電磁誘導ノイズ等で回路電流が上下した際に CPU に印加される電圧が High となる最低電圧以下になる可能性があるため、余裕を持たせる必要がある。
- 回路に流れる電流が小さくなるため、スイッチに流れる電流が最低電流以下になる

また、抵抗値が小さすぎる際に生じる問題は以下の通りである。

- 回路がショートしてしまう
- スイッチ on 時の消費電流が大きくなる

第6章 最初のニュートリノビーム測定の結果

6.1 ニュートリノビーム測定のPOT

2019年11月から2020年2月までニュートリノビームが照射された。図6.1は2019年11月14日から2020年2月6日のニュートリノビームにおける本実験の収集データの累積統計である。ただし、2019年12月18日から2020年1月14日までのビーム運転休止期間が存在する。累積データには、J-PARCで生成された炭素標的に入射した陽子数 POT(Proton on target)が用いられる。WAGASCI検出器におけるデータ収集効率を100%と仮定した場合、本期間のPOTは 4.77×10^{20} POTとなる。

図6.1中の赤い線はDelivered POT、黄色い線は上流WAGASCIのPOT、紺色の線は下流WAGASCIのPOT、緑色の線は北側Wall MRDのPOT、水色の線は南側Wall MRDのPOTを表す。WAGASCIにおいて12月初旬ごろからthresholdを下げすぎてしまい、ダークノイズがデータを占めて物理解析に使用できないデータとなったため、POTが増加していない。また、Wall MRDにおいては後述のfake hit問題の解決後(1月14日)から測定を開始したため、ビーム運転休止期間以降からPOTが増加している。

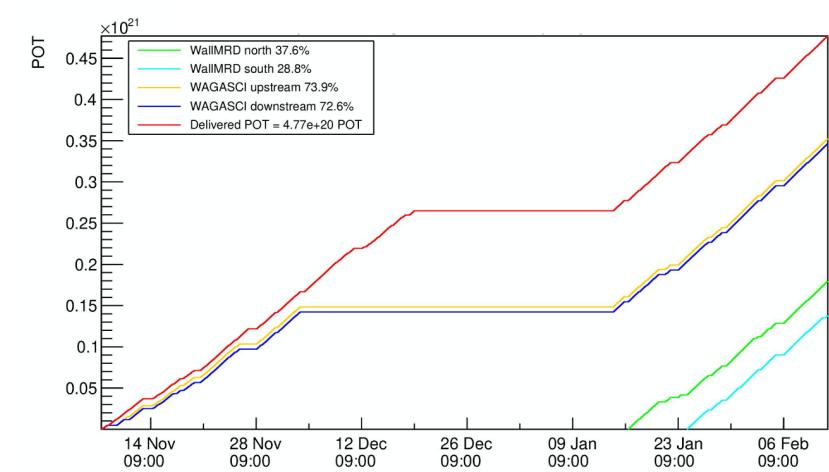


図6.1: 2019年11月14日から2020年2月6日までのニュートリノビームのPOT(Proton on target)。赤はDelivered POT、黄は上流WAGASCIのPOT、紺は下流WAGASCIのPOT、緑は北側Wall MRDのPOT、水は南側Wall MRDのPOTを表す。

6.2 ZedBoard における課題

J-PARC のニュートリノビームラインからは 2 つの信号が出ている。一つはビームトリガーと呼ばれるもので、2 個のパルスで構成されている。もう一つはスピルナンバーと呼ばれる信号である。これは各ビームにおけるスピルの絶対値を表しており、ECL(Emitter Coupled Logic) の 16 ビットのデジタル信号である。

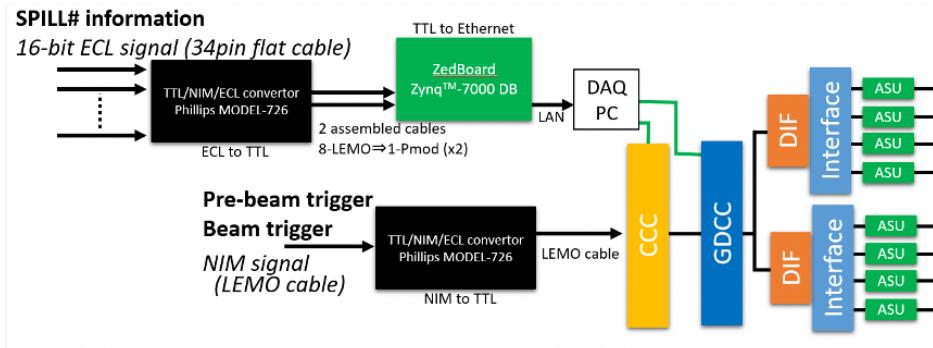


図 6.2: ビームトリガーとスピルナンバーの信号処理の概要

図 6.2 に示す通り、ビームスピルナンバーはニュートリノビームラインから光接続で受信されたのち、ビームトリガーラックで ECL に変換され、「WAGASCI DAQ ラック」へ送られ、「Philips MODEL 726」 NIM モジュールで TTL に変換され、「ZedBoard Zynq-7000 DB」に伝わり、イーサネットに変換されて DAQ PC と GDCC に分配される。上記のビームスピルナンバーの伝達経路のうち ZedBoard に問題があり、ビームラインから送られるスピルナンバーと WAGASCI 実験が受信するスピルナンバーにズレが生じた。この ZedBoard の問題とはビットの凍結とビットの反転である。ビットの凍結とは 8 ビット目と 12 ビット目 (最下位の桁から数える) が 0 のまま凍結してしまい 1 に戻らない現象である。また、ビットの反転とはランダムなビットの数が 0 から 1 へ、1 から 0 へと反転してしまう現象である。これらの問題から生じたスピルのズレを直すために以下の手順を踏んだ。

1. 不連続点を検出する。(8 ビット目と 12 ビット目のみ)
2. 線形化する。その際近似直線から大きく離れた点は無視せず、直線に近づける。(8 ビット目と 12 ビット目のみ)
3. バッドスピルを再解析する。この際前後に正常なスピルがあればそこから予測する。(8 ビット目と 12 ビット目のみ)
4. バッドスピルを再解析する。この際前後に正常なスピルがあればそこから予測する。(正常な全てのビット)
5. バッドスピルのみ不連続点を検出する。(正常な全てのビット)

6. スピルナンバーが単調増加していることを確認する。(正常な全てのビット)

7. スピルナンバーを 65535 から 32768 ヘリセットする。(正常な全てのビット)

この改良によって、図 6.3 のように WAGASCI で測定されたイベント数を横軸にとった際、単調増加しているスピルナンバーが得られた。図 6.3 中の赤い点は修正前のスピルナンバー、水色の点は修正後のスピルナンバー、紫の点はバッドスピルを表す。また、手順 7 でスピルナンバーを 65535 から 32768 ヘリセットするのは、この領域がビットの反転の問題の影響を受けやすいためである。

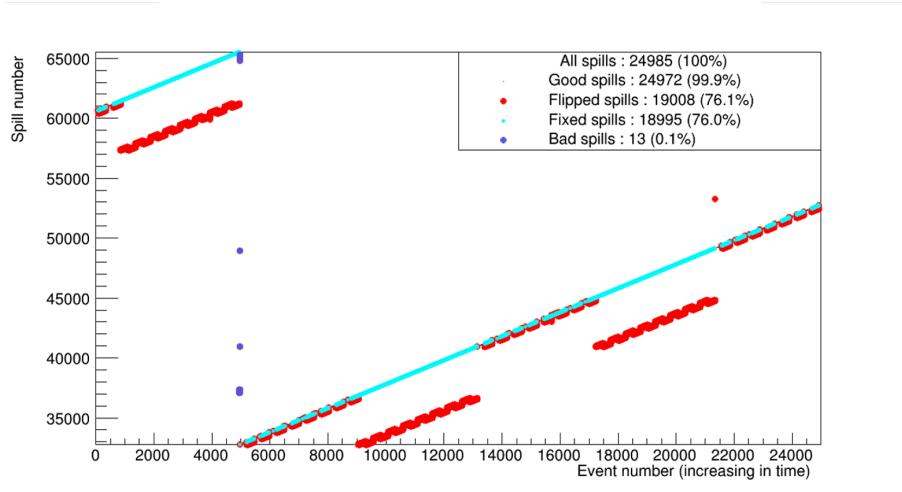


図 6.3: ある期間における北側 Wall MRD Top Side のスピルナンバーの推移。赤い点は修正前のスピルナンバー、水色の点は修正後のスピルナンバー、紫の点はバッドスピルを表す。

6.3 Wall MRD の fake hit 問題

MPPC のゲインキャリブレーションを行う際、ASU の threshold を変化させながらダークノイズ頻度の変化を調べる。しかし、Wall MRD の場合 threshold を変化させてもダークノイズ頻度がほとんど変化せずゲインキャリブレーションを行うことができなかった。通常、threshold 値を超える信号が検出された場合 SPIROC2D 内に”hit=1”と記録され、その他の値に関しては”hit=0”と記録される。しかし Wall MRD においては threshold 値の設定に関わらず”hit=1”となる信号が存在する。調査の結果、この fake hit の問題は Wall MRD に使用されている Single MPPC Card の GND 接続に起因するノイズが原因であることがわかった。従来の Single MPPC Card は MPPC の PCB ボードと 1 本の同軸ケーブルで接続され、印加電圧の供給と MPPC からの信号の送信を一本の同軸ケーブルで行っていた。このため、信号にノイズがかかりやすい状況であった。この fake hit 問題を解決するために開発した新型 Single MPPC Card が図 6.4 中の ASU の上に装着されている基板である。この新型 Single MPPC Card の改良点は以下の 2 点である。

- 全 32 チャンネルが GND に接続されている。
- 2 本の同軸ケーブルを用いて MPPC からの信号読み出しのラインと MPPC への電圧供給のラインを分けた。

なお、MPPC への電圧供給ラインには図 6.4 に示すように ASU の上に装着された HV distribution board が使用される。また、MPPC と 2 本の同軸ケーブルを仲介するために新型 mini-PCB board が用いられる。

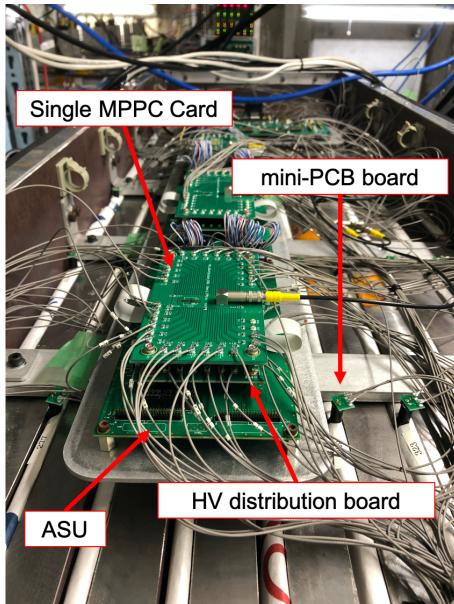


図 6.4: 新型 Single MPPC Card と HV distribution board、新型 mini-PCB board の写真

新型 Single MPPC Card を用いることで threshold 値を超える信号のみ”hit=1”となり、fake hit が消えた。2020 年 1 月の加速器メンテナンス日にこの新型 Single MPPC Card を Wall MRD に導入した。その結果、Wall MRD でも物理データが取得できるようになった。

6.4 各検出器の hit 数解析

6.4.1 WAGASCI 検出器

図 6.5 と図 6.6 はそれぞれある共通の期間における上流 WAGASCI と下流 WAGASCI の hit 数分布を示しており、縦軸は hit 数、横軸はチャンネル数を表す。なお、ASU の threshold と inputDAC はゲインキャリブレーションを行ったのち各チャンネルごとに値が決められている。これらの hit 数分布より、大幅に突出した hit 数を持つチャンネルや hit 数が 0 のチャンネルは確認できなかつた。このことから、WAGASCI 検出器に光漏れやケーブルの断線等ハードウェアに異常は見られ

ないことが確認できた。しかし、大幅ではないもののチャンネルごとに hit 数のばらつきがある。この結果から、MPPC のゲインキャリブレーションが不十分であることがわかった。ただし今回見つかった hit 数のばらつきの測定への影響は小さく、物理解析は問題なく行える。2021 年 2 月から予定されている次回のニュートリノビーム測定では、より精密にキャリブレーションを行い、hit 数のばらつきを小さくする。

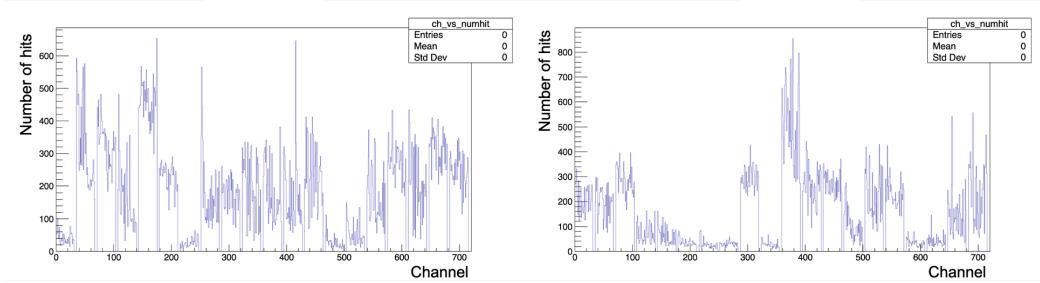


図 6.5: 上流 WAGASCI の hit 数分布 (左図 : Top View、右図 : Side View)

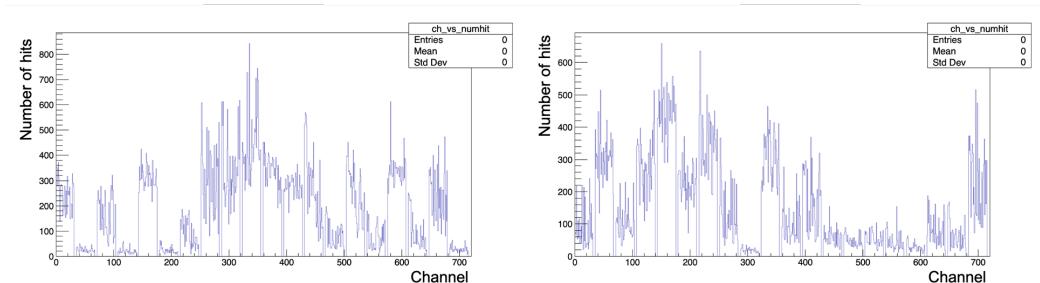


図 6.6: 下流 WAGASCI の hit 数分布 (左図 : Top View、右図 : Side View)

6.4.2 Wall MRD

図 6.7 と図 6.8 はそれぞれある共通の期間における北側 Wall MRD と南側 Wall MRD の hit 数分布を示す。この期間中全チャンネルにて threshold は 130(2~3 p.e. に相当)、inputDAC は 120 に設定して測定を行った。これらの hit 数分布より大幅に突出した hit 数を持つチャンネルがいくつかあることがわかる。hit 数が大きかったチャンネルのうち、ある 1 チャンネルの ADC 分布を図 6.9 と図 6.10 に示す。図 6.9 は hit 値を指定せず、全ての検出信号を表示しており、図 6.10 は hit=1 の信号のみを表示している。図 6.10 より、threshold 値を超えない分布が消え、threshold 値

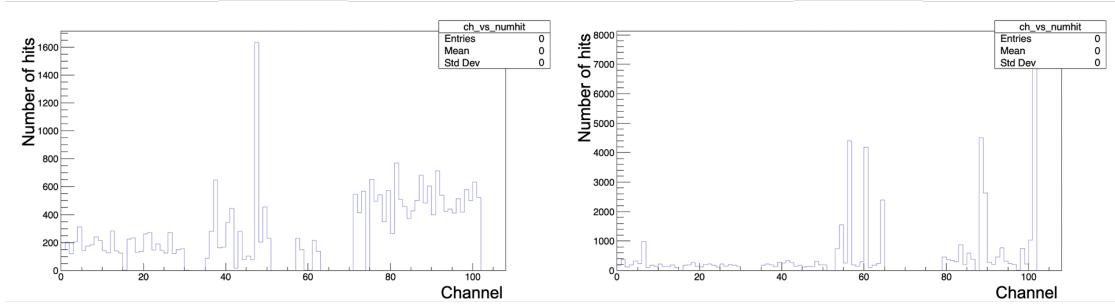


図 6.7: 北側 Wall MRD の hit 数分布 (左図 : Top Side、右図 : Bottom Side)

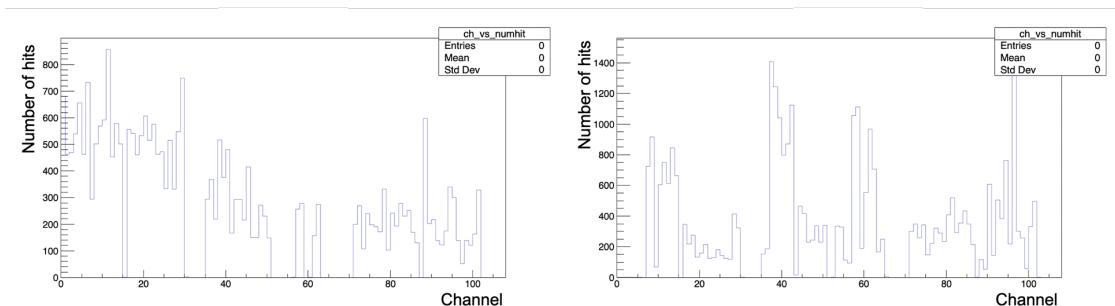


図 6.8: 南側 Wall MRD の hit 数分布 (左図 : Top Side、右図 : Bottom Side)

を超える ADC count のイベントのみが残ることから、fake hit 問題が残っているのではなく光漏れ等による実際の光を観測していると考えられる。

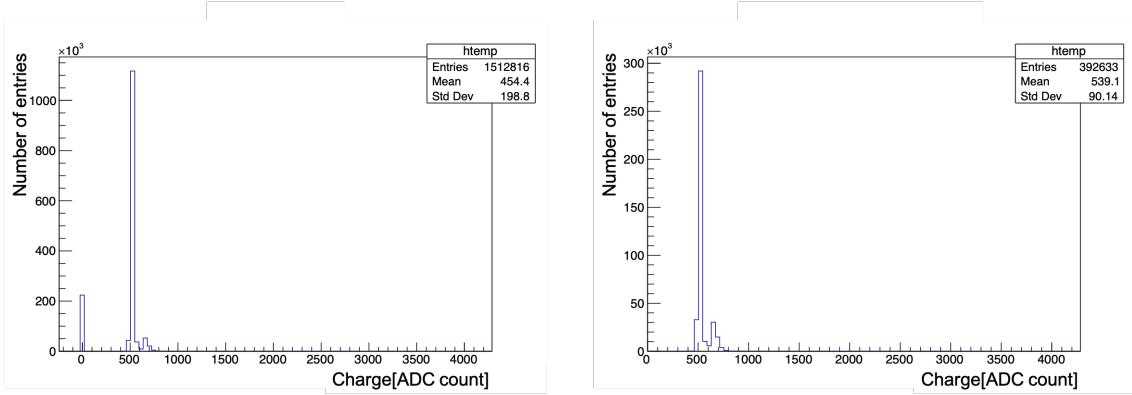


図 6.9: hit 数の大きかった 1 チャンネルの ADC 分布。hit 値を指定せず、全ての検出信号を表示。
図 6.10: hit 数の大きかった 1 チャンネルの ADC 分布。hit=1 に指定して表示。

続いて、hit 数が大きいチャンネルが検出器においてどこのシンチレータにあたるか示したもののが図 6.11 から図 6.14 である。これらの図中の赤い部分は図 6.7、図 6.8 における hit 数 1000 以上のチャンネルの位置を表しており、橙色の部分は hit 数 700~1000 のチャンネルの位置を示している。図 6.12 では hit 数の大きいチャンネルは右端に集中している。この結果から、hit 数が大きくなつた原因は検出器本体と蓋との間からの光漏れであると考えられる。また、図 6.14 では hit 数の大きいチャンネルは真ん中に集中している。この結果から、hit 数が大きくなつた原因是図 6.15 の赤丸部分に示す Wall MRD の蓋に装着されているクーリングユニットからの光漏れであると考えられる。北側 Top Side(図 6.11) と南側 Top Side(図 6.13) では hit 数が大きいチャンネルの数が Bottom Side と比べると少なく、チャンネルの位置もばらついている。そのため、これらの hit 数が高い原因是 MPPC のゲインキャリブレーションが不十分であったことであると考えられる。今回見つかった hit 数のばらつきと光漏れによる hit 数の増加は測定への影響は小さく、物理解析は問題なく行える。次回のニュートリノビーム測定では、光漏れ対策を行い万全の状態でデータ収集を実現する。

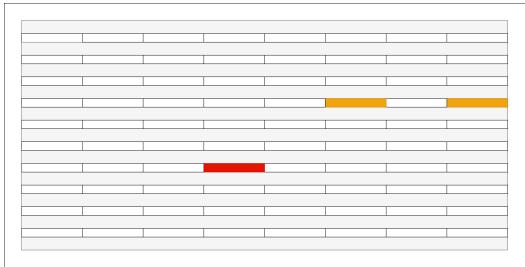


図 6.11: 北側 Wall MRD Top Side の hit 数が大きかったチャンネルのマップ



図 6.12: 北側 Wall MRD Bottom Side の hit 数が大きかったチャンネルのマップ

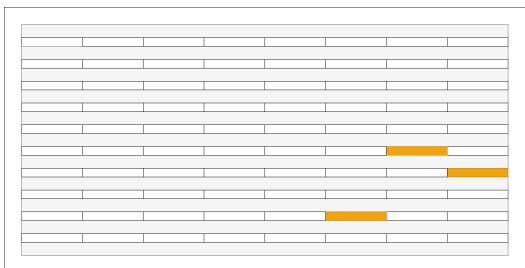


図 6.13: 南側 Wall MRD Top Side の hit 数が大きかったチャンネルのマップ



図 6.14: 南側 Wall MRD Bottom Side の hit 数が大きかったチャンネルのマップ

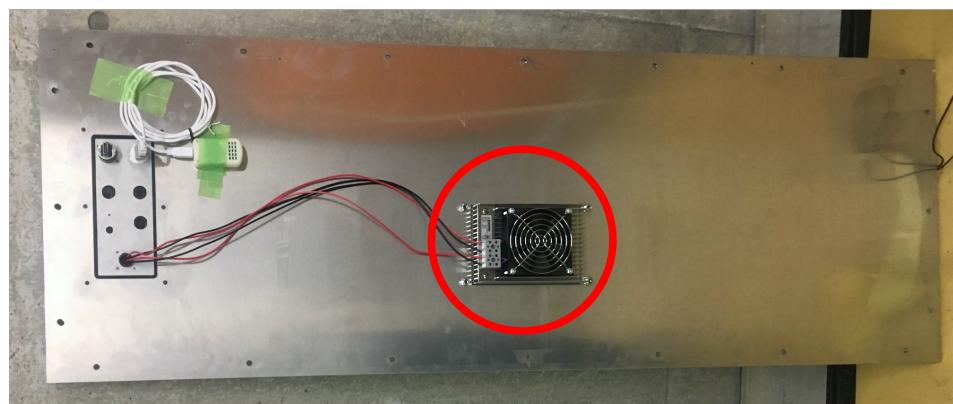


図 6.15: Wall MRD の蓋の写真

第7章 結論

2021年2月から予定されているニュートリノビーム測定においてより安定した測定を目指して読み出し基盤の開発を行った。従来、外側に追加基板を実装したInterfaceが使用されていたが、露出したケーブルが外力を受けることでConfigurationが不安定になったり、データが入らないASUが出現したりといった問題があった。そのため、追加基板を内部回路に埋め込んだ新しいデザインのInterfaceを開発した。最初に横浜国立大学にて新型InterfaceとASU1枚を接続して正常にデータが取得できることを確認した。その後、J-PARCにて20枚のASUと接続しMPPCのダークノイズ測定を行った結果、得られたデータは破損しており解析不能であった。この原因は新型Interfaceに実装されているプルアップ抵抗の抵抗値が高すぎることであると考え、新型Interface1枚につき12個実装されている $1\text{ k}\Omega$ のプルアップ抵抗を $100\ \Omega$ 抵抗に変更した。プルアップ抵抗変更後、再度20枚のASUを接続してMPPCのダークノイズを測定したところ正常なデータが得られた。2021年2月から予定されているニュートリノビーム測定では、新型Interfaceを用いて安定した測定を実現する。

また、2019年11月から2020年2月に行われたニュートリノビーム測定で得られたデータから累積統計POT、ZedBoardにおける問題とその改良、各検出器のhit数の確認を行った。hit数にはばらつきが見られ、WAGASCI検出器ではMPPCのゲインキャリブレーションが不十分であることがわかった。さらにWall MRDではMPPCのゲインキャリブレーションが不十分であることに加えて光漏れがあることがわかった。ただし今回見つかったhit数のはらつきの測定への影響は小さく、物理解析は問題なく行える。2021年2月から予定されている次回のニュートリノビーム測定では、より精密な検出器キャリブレーションと光漏れ対策を行うことでhit数のはらつきを小さくする。

謝辞

本研究を通じて多くの方に出会い、自身の成長につながりました。修士論文の執筆にあたり、ご協力及びご指導をしてください誠にありがとうございます。

指導教員の南野彰宏准教授には授業等でお忙しい中、きめ細やかなご指導を賜りました。研究室で過ごした3年間、度々ご迷惑をおかけしましたが温かく見守り、たくさんの経験をさせていただきました。南野彰宏准教授がいなければ、このように修士論文をまとめることはできませんでした。深く感謝申し上げます。

本研究室のGiorgio先輩、浅田先輩、岡本先輩は常に優しく接してください、皆様からたくさんのこと学びました。また、本実験の共同研究者である東京大学の松下先輩、江口さん、京都大学の安留先輩、大阪市立大学の小幡さん、本條さんらとは議論を重ねながら研究作業を行いました。皆様にはたくさんのご助言をいただきだけでなく、気さくに話しかけてくださったことで慣れない東海村での生活が楽しく感じられました。

湘南電子機器有限会社の方々には、度重なる基板の制作・修理を快く引き受けさせていただきました。担当していただいた玉ノ木様には何度も電話で相談に乗ってもらったり、大学へ足を運んでいただいたらと大変お世話になりました。

そして、本研究室の皆様や他大学の同期の皆様のおかげで濃密で充実した学生生活を送ることができました。

最後に、私の選択を応援し、悩んだときには相談に乗り、常に温かく見守って下さった杉山先生と友人の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Mark Thomson (2013) Modern Particle Physics, United Kingdom : Cambridge University Press.
- [2] Y. Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration), "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos." Phys. Rev. Lett. 81.8 (1998): 1562.
- [3] N. Agafonova et al.(OPERA Collaboration), "Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment." Phys. Rev. Lett. 115.12 (2015): 121802.
- [4] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A659, 106 (2011).
- [5] J-PARC HP, <https://j-parc.jp/Neutrino/ja/> (参照 2020-1-16).
- [6] K. Abe et al.(T2K Collaboration), "Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector." Nucl. Instrum. Meth. A 694 (2012): 211-223.
- [7] S. Assylbekov et al., "The T2K ND280 off-axis pizero detector." Nucl. Instrum. Meth. A 686 (2012): 48-63.
- [8] P. A. Amaudruz et al., "The T2K fine-grained detectors." Nucl. Instrum. Meth. A 696 (2012): 1-31.
- [9] N. Abgrall et al., "Time projection chambers for the T2K near detectors." Nucl. Instrum. Meth. A 637.1 (2011): 25-46.
- [10] D. Allan et al., "The electromagnetic calorimeter for the T2K near detector ND280." J. Instrum. 8.10 (2013): P10019.
- [11] S. Aoki et al., "The T2K side muon range detector (SMRD)." Nucl. Instrum. Meth. A 698 (2013): 135-146.
- [12] K.Abeetal.(T2KCollaboration), " The T2K experiment." Nucl. Instrum. Meth. A659.1 (2011): 106-135.
- [13] 古賀太一朗, 東京大学, "Measurement of neutrino interactions on water and search for electron anti-neutrino appearance in the T2K experiment", 博士論文.

- [14] M. Antonova et al., Baby MIND: A magnetized spectrometer for the WAGASCI experiment, arXiv:1704.08079 [physics.ins-det].
- [15] K. Abe et al. (T2K Collaboration), “Measurement of the inclusive $\nu \mu$ charged current cross section on iron and hydrocarbon in the T2K on-axis neutrino beam”, Phys. Rev. D 90, 052010 (2014).
- [16] 浜松ホトニクス社, MPPC カタログ.
- [17] OMEGA 社, SPIROC2 DATASHEET.
- [18] 浅田祐希, 横浜国立大学, 修士論文 (2020).
- [19] Myke Predko, “独習デジタル回路”, 翔泳社 (2008)