

J-PARC E69 実験(WAGASCI プロジェクト)における
エレクトロニクスの性能試験

横浜国立大学 理工学部
数物・電子情報系学科 物理工学 EP
学籍番号 1564309
片山 優菜

2019年2月13日

概要

T2K 実験は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市 のスープーカミオカンデに向けてニュートリノビームを照射する加速器型長基線ニュートリノ振動実験である。ビーム生成地点から 280 m に位置する前置検出器群と後置検出器であるスープーカミオカンデの双方でニュートリノ反応を観測し、比較することでニュートリノ振動のパラメータを精密測定することを目的としている。

J-PARC E69 実験は T2K 実験におけるニュートリノと原子核の反応の系統誤差削減のため、水標的とニュートリノの反応を広い立体角で誤差 10 % 以内の制度で測定する。この目的達成のため に新型ニュートリノ検出器 WAGASCI が開発された。WAGASCI 検出器はシンチレータが三次元格子状に組まれた構造となっており、その空間内に水またはプラスチックをターゲットとして入れることにより、荷電粒子の飛跡に対して 4π 方向にアクセプタンスを持つという特徴がある。本研究では WAGASCI 検出器に用いられるフロントエンドエレクトロニクス ASU について性能試験を行った。ASU に MPPC という光検出器を取り付けダークカウントを測定することで計 49 枚の ASU を試験した。

目 次

第 1 章 ニュートリノ	4
1.1 ニュートリノとは	4
1.2 ニュートリノ振動	4
1.3 ニュートリノ振動測定の現状	5
1.4 CCQE 反応	6
第 2 章 T2K 実験	8
2.1 概要と目的	8
2.2 ニュートリノビームライン	8
2.3 off-axis 法	9
2.4 前置検出器	9
2.4.1 INGRID	11
2.4.2 ND280	11
2.5 後置検出器:スーパーカミオカンデ	12
第 3 章 J-PARC E69 実験	14
3.1 目的	14
3.2 WAGASCI(WAter Grid And SCIntillator) 検出器	14
3.2.1 WAGASCI モジュール	15
3.2.2 side-MRD	15
3.2.3 Baby MIND	16
第 4 章 エレクトロニクス	17
4.1 概要	17
4.2 SPIROC2D	20
4.3 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)	21
4.3.1 動作原理	22
4.3.2 諸特性	22
第 5 章 ASU 性能試験	24
5.1 目的	24
5.2 測定の手順	24
5.3 結果	25

第1章 ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

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。またニュートリノは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。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、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。

1.2 ニュートリノ振動

1962年ニュートリノが質量を持ち、飛行中にそのフレーバーを変化させるニュートリノ振動という現象が理論的に提唱された。

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。

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

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 のユニタリー行列で表される。

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

$t = 0$ において運動量 \mathbf{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³ 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 ニュートリノ振動測定の現状

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。

1.4 CCQE 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。後述の T2K 実験では、ニュートリノのエネルギー $E =$ 約 0.6 GeV のミューニュートリノビームが使用されている。図 1.1 のように、このエネルギー領域で主に生じるニュートリノと核子間の反応は、電荷カレント反応の一種である Charge Current Quasi Elastic(CCQE) 反応である。図 1.2 に CCQE 反応の様子を示した。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。

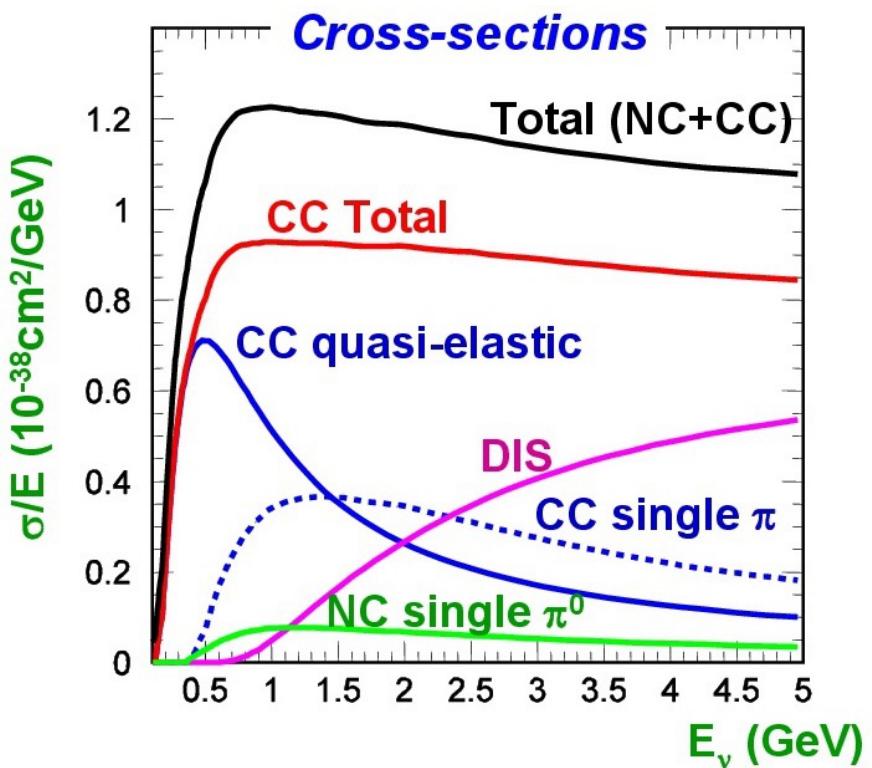


図 1.1: ニュートリノの反応断面積

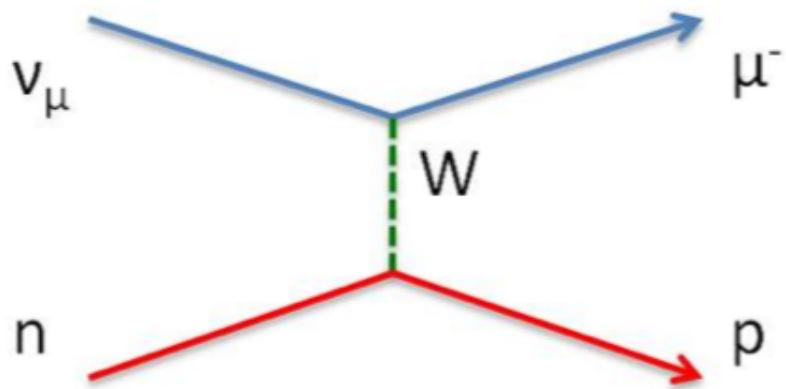


図 1.2: CCQE 反応

第2章 T2K 実験

2.1 概要と目的



図 2.1: T2K 実験 [1]

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(図 2.1)。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、ミュー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 の構造を図 2.2 に示す。LINAC(LINear ACcelerator) で生成された陽子は RCS(Rapid Cycling Synchrotron)、MR(Main Ring) の順に加速され、1 スピルあたり 8 バンチの構造をしたビームになる。その後陽子ビームはグラファイト標的に照射され、グラファイト標的と衝突することで生じるハドロン反応により、 π 中間子を中心とする多数のハドロンが生成される。生成された π 中間子 (π^+) は 3 台の電磁ホーンにより平行に収束され、標的下流に位置する崩壊領域で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、ミューオンニュートリノからなるビームと反ミューオン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。



図 2.2: J-PARC の構造

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 2.3 より 2 GeV 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、バックグラウンドとなる π^0 を生じる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 0.7 GeV 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。

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 2.4、図 2.5)

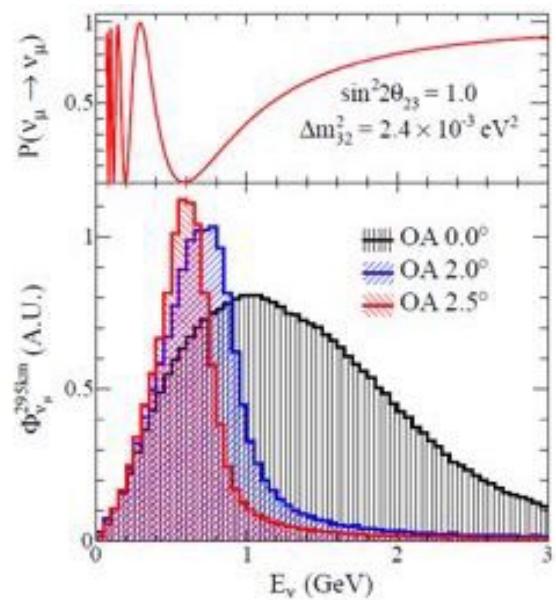


図 2.3: off-axis 角とニュートリノエネルギー・振動確率の関係



図 2.4: INGRID の写真



図 2.5: ND280 の写真

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。計 16 個のモジュールから成り、図 2.6 のように十字に配置されている。また、各モジュールは図 2.7 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。

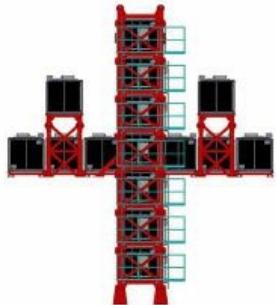


図 2.6: INGRID の概観

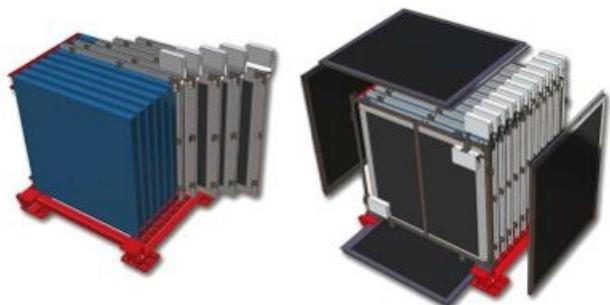


図 2.7: INGRID モジュール

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ックス、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)

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)

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)

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)

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)

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の神岡鉱山内に位置する。その概略図が図 2.8 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 万トンの超純粋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。

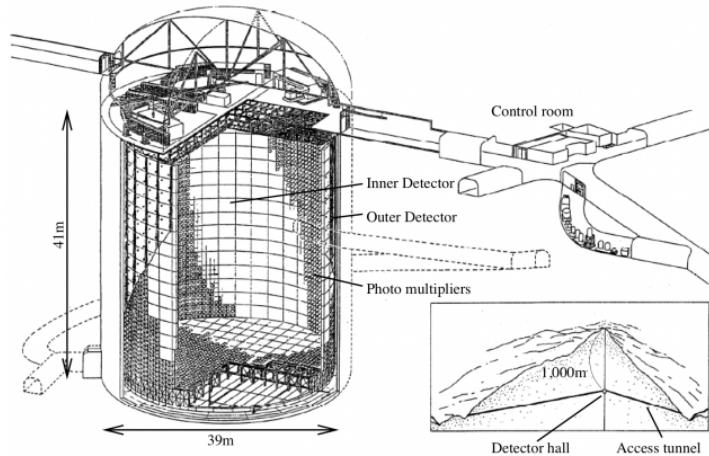


図 2.8: スーパーカミオカンデの概略図

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。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

3.1 目的

現在 T2K 実験では、ニュートリノビーム生成直後に設置されている前置検出器 ND280 によって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、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誤差 10 %以内の精度で測定を目標として新型ニュートリノ検出器 WAGASCI を開発した。

3.2 WAGASCI(WAtter Grid And SCIntillator) 検出器



図 3.1: WAGASCI 検出器の概要

図 3.1 に示した WAGASCI 検出器は 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 モジュールは 2 台あり、水で満たされている。WAGASCI モジュールの両側面には 2 台の Muon Range Detector(side-MRD) が設置され、下流側には磁場を印加した検出器 (Baby MIND) が 1 台設置される。

3.2.1 WAGASCI モジュール

WAGASCI モジュール 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 であり、1280 枚のプラスチックシンチレータとそれを取り囲む 0.7 トンの水で構成されている。

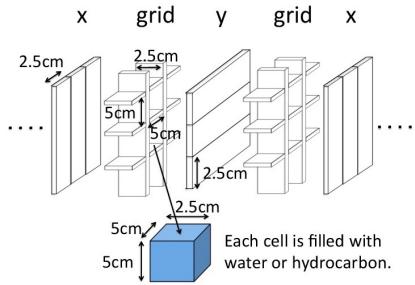


図 3.2: WAGASCI モジュールの内部構造

図 3.2 のようにその内部はプラスチックシンチレータを格子状に組むことで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 cm × 5 cm × 2.5 cm の水のセルが並んだ構造となっている (CH 検出器として利用する場合は空洞)。プラスチックシンチレータの三次元構造により、 4π 方向のアクセプタンスで荷電粒子を検出できる。

3.2.2 side-MRD

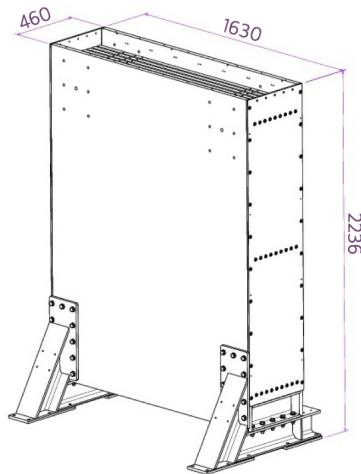


図 3.3: side-MRD の概観

side-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。side-MRD の設置によって、大角度に散乱する荷電粒子 (特にニューオン) を観測できるようになる。さらに、WAGASCI モジュールと side-MRD の間に 50 cm 程度

の間隔を設けることによって、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。

3.2.3 Baby MIND

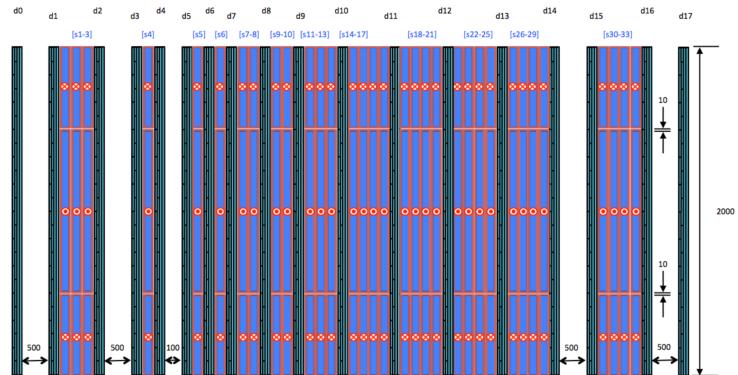


図 3.4: Baby MIND の側面図 (グレーの部分がシンチレータ、青・赤の部分が磁化鉄)[2]

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)。この MRD は鉄製であり、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。

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)で開発されたものである。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。

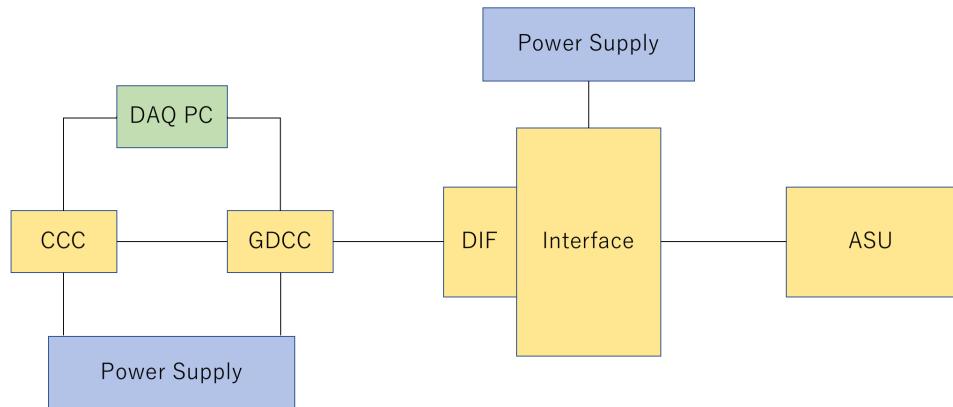


図4.1: エレクトロニクスの概要

- 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を使用する。

本研究では ASU は 1 枚ずつ測定したが、J-PARC でニュートリノビームを測定するときは複数枚の ASU を繋ぎ合わせて測定する。ASU 同士の接続には 50 pin、10 cm のフラットケーブル 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

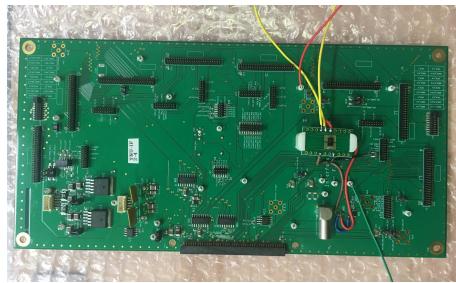


図 4.3: Interface の写真

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。

- 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 のファームウェアを書き換えることで CCC として用いることができ、スピルの制御を行う。GDCC とは HDMI ケーブルで接続される。

- 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

CCC、GDCC、DIF、SPIROC2D に対する電圧源には図 4.6 に示した 2 つの Low Voltage(GW Instek 型番 GPS-18300)を使用し、MPPC に対する電圧源には図 4.7 に示した High Voltage(Tektronix 型番 Keithley 2400)を使用した。LV の 1 つは GDCC、CCC に接続し、もう 1 つは Interface に接続することで DIF や SPIROC2D に供給される電源となる。HV は LEMO コネクターで Interface と接続し、ASU を経由することで MPPC に供給される。



図 4.6: Low Voltage



図 4.7: High Voltage

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、表 4.1 に WAGASCI 検出器 1 台に必要なエレクトロニクスの数を示した。

表 4.1: WAGASCI 検出器 1 台に必要なエレクトロニクスの数 [3]

GDCC	CCC	DIF	Interface	ASU
1	1	2	2	40

4.2 SPIROC2D



図 4.8: SPIROC2D

図 4.8 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。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ンネルごとの 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、閾値以下の信号をカット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 はある閾値以下の信号をカットするディスクリミネータの役割を持つ。threshold の電位の値は $V_1[V]$ から $V_2[V]$ 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ン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らが、2.5 p.e. の時には 95 % 程度になることが知られている。

- 8-bit Input DAC

MPPC のアノード側の電位を各チャンネルごとに $0 \sim +2.5\text{ V}$ 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がチャンネルごとに異なる場合などに使用する。

4.3 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。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 4.9: Single 型 MPPC

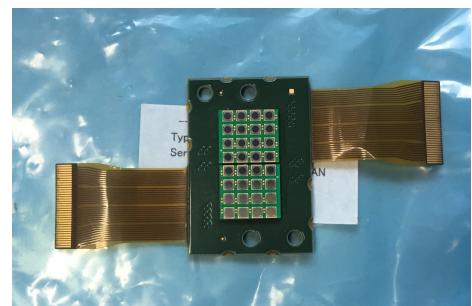


図 4.10: Array 型 MPPC

図 4.9 は Single 型 MPPC で、図 4.10 は WAGASCI 検出器で使用される Array 型 MPPC である。今回の試験に用いた Array 型は 32 チャンネルの MPPC が 1 つの基板上にのっている。

4.3.1 動作原理

MPPC は 1 ~ 3 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 ~ 4 V 程度高い逆電圧を印加するとアバランシェ増倍がデバイス全体に広がることによって電子雪崩が発生し、入射光子の数と比例しなくなる状態をガイガーモードと呼ぶ。ガイガーモードにおいて MPPC のピクセルに光子が入射すると電子雪崩が発生する。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 kΩ 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。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、

$$Q_{pix} = C_{pix}(V - V_{bd}) \quad (4.1)$$

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、

$$Q = \sum_i^N Q_i = NQ_{pix} \quad (4.2)$$

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。

4.3.2 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、検出誤差へとつながる。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。今回の試験に用いた 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つており、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。

第5章 ASU性能試験

5.1 目的

WAGACI 検出器で使用予定の ASU の性能試験を行い、故障している ASU がないかを確認する。また、故障が疑われるものは、その原因について考察する。今回の性能試験は主に適切なデータ測定が可能であるか確認することを目的としているため、詳細については本論では取り扱わない。

5.2 測定の手順

データ測定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 ASU にジャンパーピンが正しく装着されていることを確認して Interface とフラットケーブルでつなぐ。ASU は製作した木製の暗箱(図 5.1)に入れ、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、今回の測定では ASU は 1 枚ずつ測定した。

(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 を超えたら) 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) config

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 56.1 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。今回測定時間は 3 分間で統

一した。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 ASU 以外のセットアップを変えず、ASU のみを順次付け替えていき、計 49 枚の ASU について MPPC のダークノイズを測定することで行った。



図 5.1: 作成した木製の暗箱

5.3 結果

測定の結果、表 5.1 に示す通りとなった。

表 5.1: 測定結果

測定した全 ASU	正常なデータが得られた ASU	破損が確認された ASU	異常なデータが得られた ASU
49	45	2	2

- 正常なデータが得られた ASU

図 5.2 はある ASU のある 1 チャンネル分の ADC 分布である。Charge が 505, 545 ADC count 付近にそれぞれピークを持つ山が確認できる。これらは pedestal(0 光子相当)、1 p.e. の信号を表し、それぞれの山は理想的にはガウス分布を成す。これらの山の頂上の間隔に相当する ADC count が 1 p.e. に対応し、図 5.2 の場合は 40 ADC count が 1 p.e. に対応する。

正確にはこの ADC count をクーロン単位に変換して素電荷で割ったものがゲインであるが、本論文では便宜上 1 p.e. に対応する ADC count のことをゲインと呼ぶ。

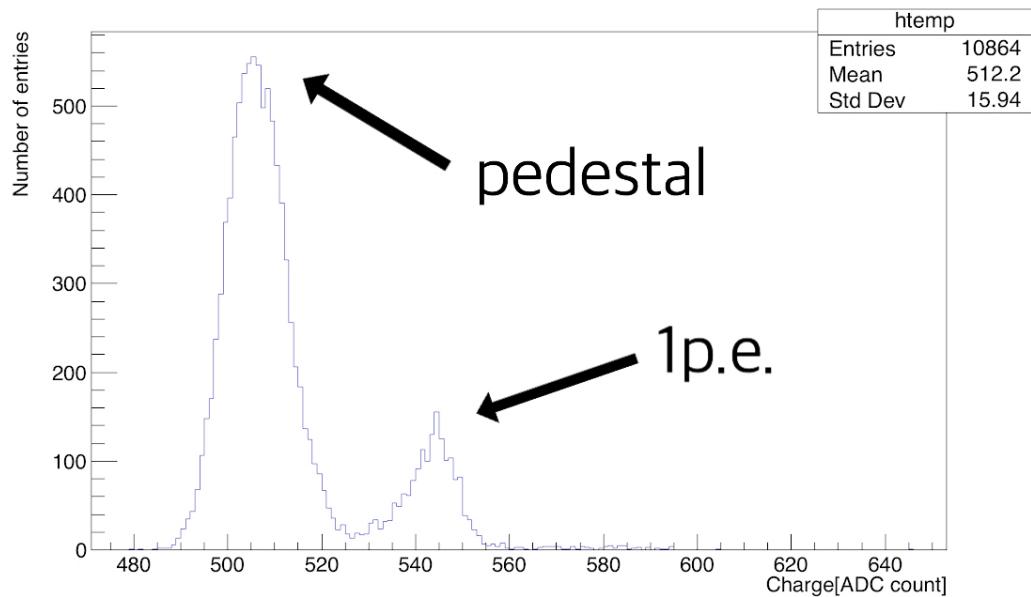


図 5.2: ある 1 チャンネル分の ADC 分布

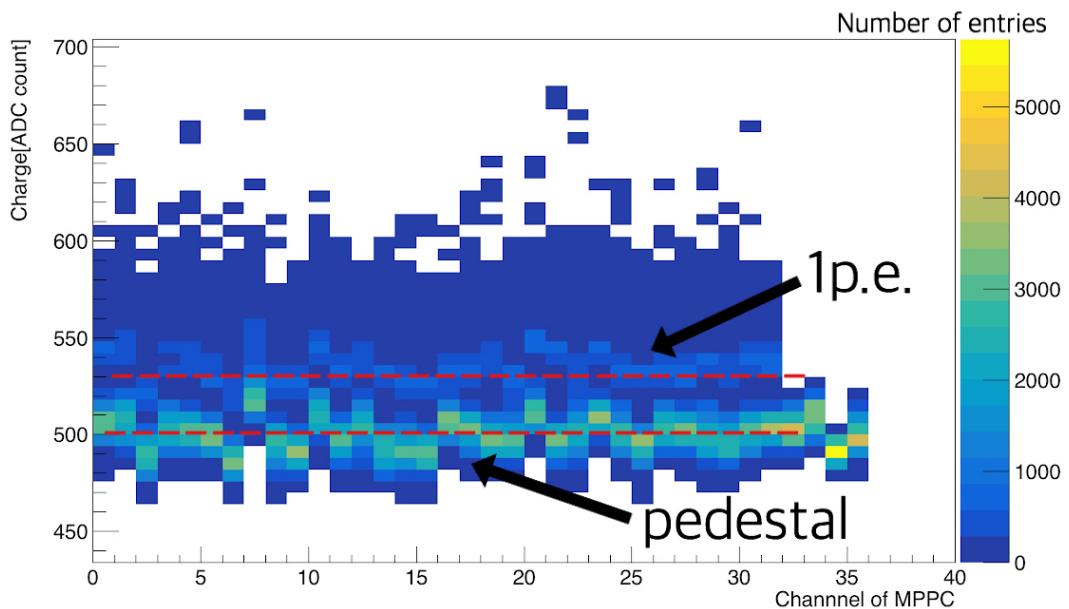


図 5.3: 32 チャンネル分の ADC 分布

図 5.3 は図 5.2 と同じ ASU の全 32 チャンネル分の ADC 分布であり、45 枚の正常な ASU はこのような分布を示した。z 軸がエントリー数に対応しており、黄色に近づくほどエントリー数が多く、濃い青色に近づくほどエントリー数は少ないことを表す。図 5.3 より pedestal の信号は概ね 485 ~ 520 ADCcount 程度の位置に分布しており、1p.e. の信号は概ね 520 ~ 550 ADCcount 程度の位置に分布している。ゲインも大きなばらつきは見られず、これらの差は input DAC の値を変えることで修正が十分に可能な範囲内である。

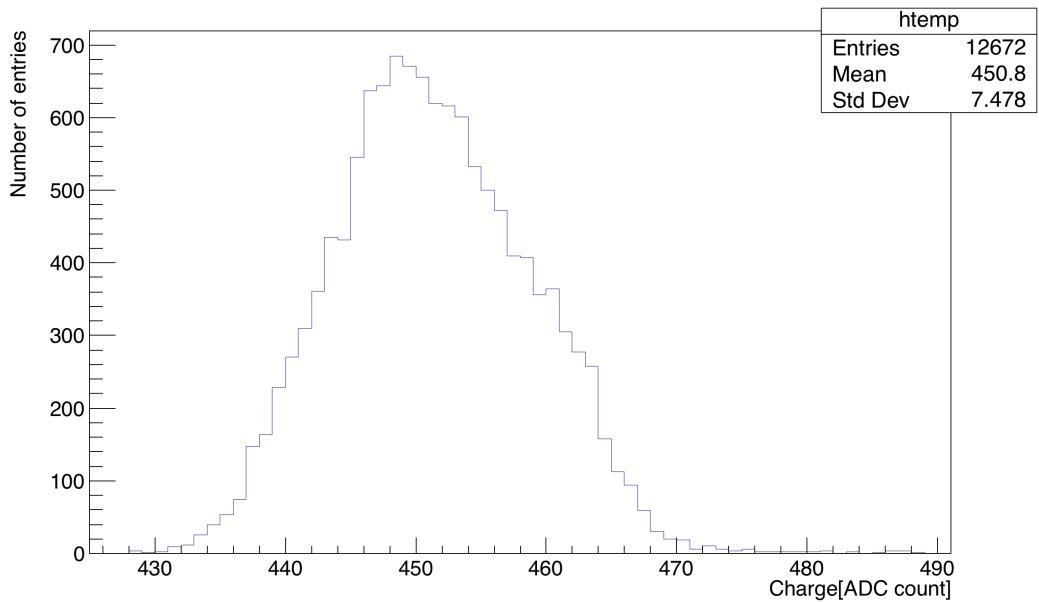


図 5.4: ある 1 チャンネル分の ADC 分布

正常なデータが得られた ASU の中には、図 5.4 のように 1 p.e. の信号が見えづらいチャネルもいくつか確認されたが、これは MPPC や SPIROC2D の個体差が原因で生じる現象であると考えられる。Array 型 MPPC は全ピクセルのブレイクダウン電圧 V_{bd} が一定ではなく、5 V 程度の誤差がある [4]。そのため全てのピクセルに同じ電圧を印加するとピクセルごと (つまりチャネルごと) に印加電圧 V とブレイクダウン電圧 V_{bd} の差 ($V - V_{bd}$) が異なる。また、正常なデータが得られた 45 枚の ASU は閾値やプリアンプゲインの設定を変更せずに測定した。MPPC や SPIROC2D の個体差に合わせて閾値は threshold DAC、プリアンプゲインは Pre-Amplifier DAC、各チャネルごとの印加電圧は input DAC で変更することができるため、図 5.4 のようなチャネルが存在しても上記のパラメーターを調整することで対応できる。

- 破損が確認された ASU

図 5.5 のように MPPC コネクター部分に破損が確認された ASU が 2 枚あった。この 2 枚の MPPC は測定が行えなかつたため、専門業者に破損箇所の修理を依頼した。

- 異常なデータが得られた ASU

図 5.6 のような ADC 分布が得られた ASU が 2 枚あった。グラフより、-1 ADC count のエントリー数が非常に多いことがわかる。SPIROC2D は信号を観測できなかつたときに -1 ADC count を出力するよう設定されているため、この ASU はほとんどの信号を観測できていないと考えられる。ディスクリミネータの役割を持つ SPIROC2D が本来観測すべき 1 p.e. の信号をカットしてしまった可能性を考え、閾値を下げて 2 枚とももう一度測定を行つた。その結果得られた ADC 分布を図 5.7 に示す。異常なデータが得られたどちらの ASU も閾値を下げることで今まで観測できていなかつた信号を観測できるようになり、正常な ADC 分布を得ることができた。これは SPIROC2D の個体差から生じた現象であり、他の ASU にとっては 0.5 p.e. 相当に設定されていた閾値がこの 2 枚の ASU にとっては 1.5 ~ 2 p.e. 相当になっていたことが原因であると考えられる。WAGASCI で使用されるデータ収集システムでは ASU ごとに閾値の値を変更することが可能であるため、この 2 枚の ASU も問題なくニュートリノビーム測定に使用できる。



図 5.5: MPPC とのコネクター部分に破損が確認された ASU

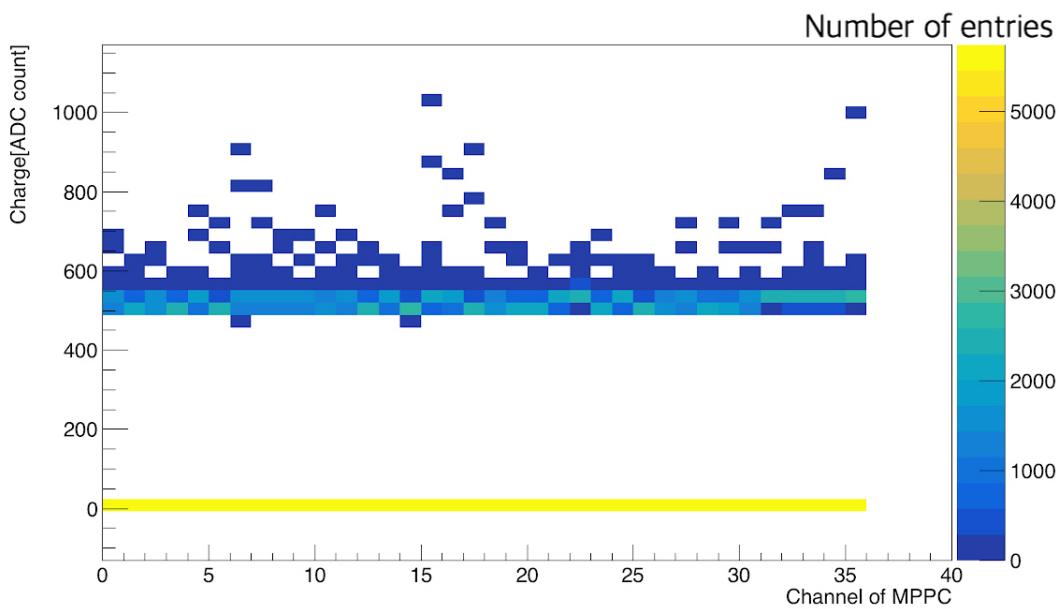


図 5.6: 異常なデータが得られた ASU の ADC 分布

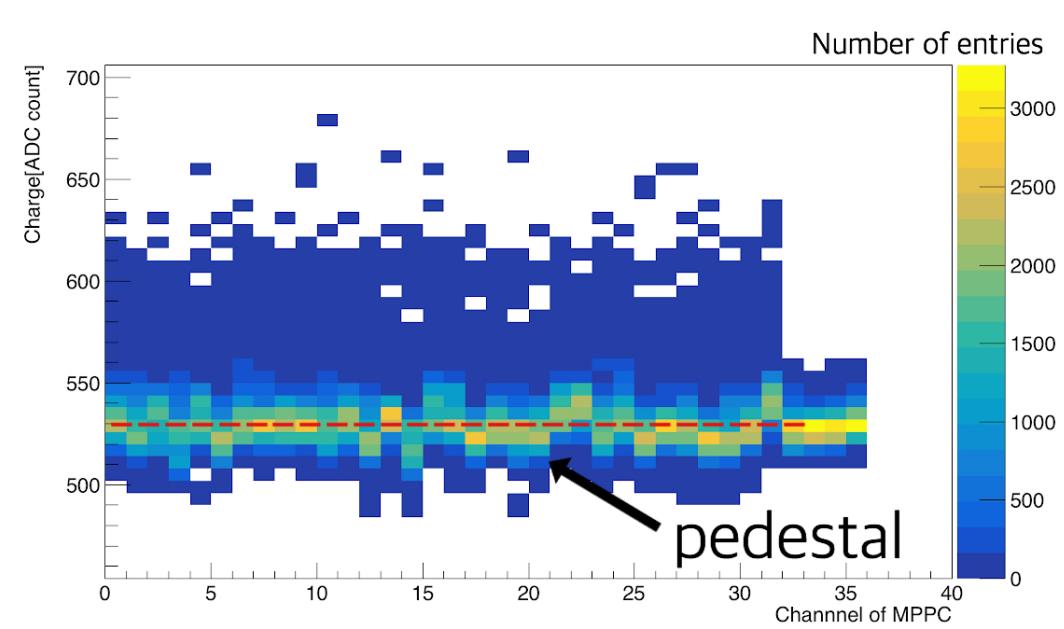


図 5.7: 異常が見つかった ASU の ADC 分布 (閾値を下げた時)

第6章 結論

J-PARC E69 実験で開発された WAGASCI 検出器に使用予定のフロントエンドエレクトロニクスの性能試験を行った。全 49 枚の ASU について MPPC のダークノイズを測定した結果、45 枚は正常なデータを得ることができた。一部の ASU に関して、数チャンネルで 1 p.e. の信号が見え難かったが、MPPC や SPIROC2D の個体差から生じる現象であると考えられるため、問題なくニュートリノビーム測定に使用できる。異常なデータが得られた 2 枚の ASU は閾値を下げることによって正常なデータを得ることができた。WAGASCI 検出器で使用されるデータ収集システムでは ASU ごとに閾値を変更できるため、この 2 枚に関しても問題なくニュートリノビーム測定に使用できる。MPPC コネクター部分の破損が確認された 2 枚の ASU は修理したのち、今回と同様の試験を行いたい。

今回の試験によって 47 枚の ASU が J-PARC での運用可能であることがわかった。WAGASCI 検出器 1 台に使用する ASU は 40 枚であるため、正常な ASU が十分な数あることを確認できた。今後は横浜国立大学で ASU の詳細キャリブレーションを行い、その後 WAGASCI 検出器に取り付けて 2019 年 4 月から予定されているニュートリノビーム測定を実現させたい。

謝辞

本研究に際して、多くの方々にご協力及びご指導していただき、自身の成長に繋がりました。ここに感謝の意を表します。

指導教員の南野彰宏准教授にはミーティングや授業等でお忙しい中、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。思い通りのデータが得られなかつた際も考えられる原因について教えていただきました。深く感謝申し上げます。

本研究室の Giorgio Pintaudi 先輩と淺田祐希先輩には、測定手順や解析方法に関して多大な助言を賜りました。日々温かく見守ってくださり、安心して研究を進めることができました。厚く御礼申し上げます。

湘南電子機器有限会社には ASU の修理を快く引き受けていただき、厚く御礼を申し上げ、感謝する次第です。

そして、本研究室の同期の山本君、谷原君、佐々木君とはゼミでの議論を通じて多くの知識を得ることができただけでなく、日常の他愛ない会話によって楽しく濃い一年間を過ごすことができました。

参考文献

- [1] T2K 実験 ホームページ [\[http://t2k-experiment.org/ja/\]](http://t2k-experiment.org/ja/) (参照 2019-2-5)
- [2] M.Antonova (2017) "Baby MIND: A Magnetised Spectrometer for the WAGASCI Experiment" NUPHYS2016
- [3] 竹馬匠泰 (2016) 「J-PARC T59 WAGASCI 実験の信号読み出しシステムの開発」(計測システム研究会 2016 発表資料)
- [4] 浜松ホトニクス MPPC データシート