

J-PARC E69 実験でのニュートリノと原子核の反応断面積測定
に向けたニュートリノ検出器の開発および性能評価

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 18NC203
浅田 祐希

令和 2 年 1 月 29 日

概要

T2K 実験は、ニュートリノ振動を高精度で測定するための長基線ニュートリノ振動実験である。現在、ニュートリノ生成標的の約 300m 先に設置された前置検出器を用いてニュートリノの反応断面積などの不定性を除去しているが、精密測定のためにさらなる系統誤差の削減が求められている。この目的を達成するために、J-PARC E69 実験では、前置検出器ホール B2 フロアに、新型検出器である WAGASCI 検出器群を設置し、これらの検出器を用いて T2K 実験のニュートリノビームを測定することによって、系統誤差を削減する。WAGASCI 検出器は、シンチレータを三次元格子状に組み込み、その格子の空間内にニュートリノ標的となる水を入れ、荷電粒子のトラックに対して 4π 方向のアクセプタンスを得ることができる。WAGASCI 検出器の周囲には、側面側にミューオン飛程検出器 (Wall MRD) 、下流側に磁場を印加した鉄構造体のミューオン飛程検出器 (Baby MIND) を設置し、ニュートリノ反応で生じたミューオンの運動量も測定する。Baby MIND の測定では、磁場によるミューオンの曲がる方向を使って、ミューオンの電荷が正負も測定する。

WAGASCI 検出器から大角度方向に飛んだ二次粒子 (主にミューオン) の粒子判別と運動量測定が Wall MRD の目的であり、本研究では、WAGASCI 検出器の側面側に設置される Wall MRD の建設と性能評価を行った。Wall MRD は、鉄板 11 層とシンチレータ 10 層からなり、シンチレータの各層はプラスチックシンチレータを 8 枚で構成されている。このシンチレータは薄さに対して幅が大きいので、波長変換ファイバーを波状に埋め込んで用いる。波長変換ファイバーからの光は、半導体型光検出器 (Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)) を用いて読み出す。

2019 年 11 月末からスタートしたニュートリノビーム測定に向けて、J-PARC E69 実験は 2018 年 5 月までに行われていた実験セットアップをアップグレードし、2 台の WAGASCI 検出器、2 台の Wall MRD、Baby MIND、Proton Module、NINJA 実験に使用される NINJA 検出器と同じ実験サイトに設置し、これらの検出器群で統合的なニュートリノビームの測定を行う。本研究では、検出器群のインストールやニュートリノビーム測定開始までに向けた準備作業を行なった。

本実験の実験場所でのニュートリノビームを照射した場合のニュートリノビームのフラックスはシミュレーションについて見積もられ、その系統誤差などのパラメータはニュートリノ反応断面積を求める際に不可欠である。本研究では、WAGASCI 検出器が設置される場所においてのニュートリノフラックスのとその系統誤差を、シミュレーションを用いて見積もった。

目 次

第 I 部 ニュートリノ振動	4
1 ニュートリノとは	4
2 ニュートリノ振動とは	4
3 今までのニュートリノ振動測定	5
4 ニュートリノの未解決問題について	5
第 II 部 T2K 実験	7
5 概要	7
6 ニュートリノビーム	7
6.1 ニュートリノビームライン	7
6.1.1 LINAC	7
6.1.2 3GeV 陽子シンクロトロン RCS	8
6.1.3 メインリングシンクロトロン MR	9
6.1.4 ニュートリノ実験施設	10
6.2 off-axis 法	11
7 前置検出器	11
7.1 INGRID	11
7.2 ND280	14
8 後置検出器：スーパーカミオカンデ	15
第 III 部 T2K-WAGASCI 実験	17
9 目的	17
10 設計	17
10.1 検出器の概要	17
10.2 設置場所	18
10.3 WAGASCI 検出器	18
10.4 Muon range detector (MRD)	18
10.4.1 Wall MRD	20
10.4.2 Baby MIND	20
10.4.3 Proton Module	20
10.4.4 J-PARC E71 実験及び NINJA 検出器	21
10.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)	21

10.5.1 動作原理	23
10.5.2 基礎特性	24
11 今回のフルセットアップでの測定について	25
第 IV 部 ニュートリノ反応	26
12 ニュートリノと核子・原子核反応	26
第 V 部 ニュートリノフラックスの生成及び不確定性の見積もり	29
13 ニュートリノビームが生成されるまで	29
14 JNUBEAM、FLUKA について	29
15 N61/SHINE 実験	30
16 ハドロン反応のチューニングについて	30
16.1 系統誤差に関わるハドロン反応	31
17 ハドロン反応によらない系統誤差の要因について	32
18 共分散行列の作成	34
19 結果	36
19.1 合計の共分散行列および相関係数行列	36
19.2 ニュートリノエネルギーごとの系統誤差の割合の見積もり	36
19.2.1 thin ターゲット及びレプリカターゲットを用いたチューニング結果の比較 .	41
第 VI 部 Wall MRD の建設	43
20 Wall MRD の概要	43
21 Wall MRD の構造及び建設作業	44
22 プラスチックシンチレータの挿入	46
23 エレクトロニクスの取り付け	47
23.1 MPPC のセッティング	49
23.2 使用する DAQ システム	49
23.3 エレクトロニクスのマウントの準備	50
24 J-PARC への搬出及び動作確認試験	51
24.1 搬出前後の MPPC の増幅率(ゲイン)について	51
24.2 イベントディスプレイの描画及び平均光量について	55

第 VII 部 T2K-WAGASCI 実験のビーム測定に向けた準備作業	58
25 フルセットアップでの実験場所の検出器群について	58
26 WAGASCI、Wall MRD の実験場所へのインストール	59
27 WAGASCI 検出器の注水作業	59
28 エレクトロニクスのマウント	63
28.1 検出器-DAQ PC 間のエレクトロニクスについて	63
28.2 エレクトロニクスのマウント作業	63
29 その他ハードウェア作業	65
29.1 WAGASCI からの漏水対策のフェンスの設置	66
30 フルセットアップでの検出器の同時測定試験	66
31 ニュートリノビーム測定の初期解析	71
31.1 キャリブレーション	71
31.2 ニュートリノビームのバンチ構造の確認	72
31.3 ニュートリノイベントの確認	73
31.4 ニュートリノビーム測定の POT	73
32 課題および今後の展望	75
32.1 Wall MRD の strange hit 問題	75
32.2 3D イベントディスプレイ	76
32.3 新型のインターフェースボードの使用	76
第 VIII 部 結論	79

第I部

ニュートリノ振動

ニュートリノはかつて素粒子物理学の標準模型において質量を持たないものと考えられてきたが、ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノに質量を持つことが示唆されるようになった。本章では、ニュートリノ振動の経緯について述べる。

1 ニュートリノとは

ニュートリノは、重力相互作用を除いた弱い相互作用のみを行う中性のレプトンである。ニュートリノには、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) の3世代とその反粒子が存在している。ニュートリノの存在がはじめて示唆されたのは 1930 年であり、ベータ崩壊におけるエネルギー・スペクトルを説明するため、ヴォルフガング・パウリによって提唱された。

2 ニュートリノ振動とは

1962 年、ニュートリノが質量を持ち時間発展とともにその種類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。

ニュートリノは質量を持ち、弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \nu, \tau$) と質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) は異なっており、以下のように質量の固有状態の混合状態であるとする。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{MNS}^{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1)$$

U_{MNS} は、牧・中川・坂田行列 (MNS 行列) と呼ばれ、以下の行列で表される [1]。

$$\begin{aligned} U_{MNS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量の固有状態 ν_i 、 ν_j 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。弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ 、 $|\nu_\beta\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ を用いると、

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表され、質量固有状態の時間発展は、

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1(0)\rangle \quad (4)$$

と書ける。相対論的に考えると、 $m_i \ll E_i$ なので、距離 L だけ進んだときは

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} |\nu_1(0)\rangle \\ e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} |\nu_2(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (5)$$

と近似できる。このとき $|\nu_\alpha\rangle$ が $|\nu_\beta\rangle$ に変化する確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu}\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで、 $\Delta m_{ij} = m_i^2 - m_j^2$ は質量二乗誤差、 E_ν はニュートリノのエネルギーである。また、 $|\nu_\alpha\rangle$ である確率も同様に、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) &= 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

と求まる。ニュートリノ 3 世代での振動確率は

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

と表される。

3 今までのニュートリノ振動測定

ニュートリノ振動を実験的にはじめて発見したのは、1998 年のスーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの天頂角分布の測定であり、ニュートリノ振動を仮定しない場合と比べ観測される ν_μ の数が減っていることがわかった [2]。さらに、2004 年には KEK で人工的に生成したニュートリノを 250 km 離れたスーパーカミオカンデにむけて飛ばす K2K 実験において、加速器を用いた実験による ν_μ の消失事象が観測された [3]。その後、2013 年スーパーカミオカンデにて $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ への振動を統計的に確認され、原子核乾板を用いた測定を行った OPERA 実験では $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の直接観測が行われた [5]。

これらの結果より、ニュートリノは質量を持つことが判明した。

4 ニュートリノの未解決問題について

ニュートリノには質量が存在することがニュートリノ振動により示唆されたが、ニュートリノの質量起源はまだ解明されていない。MNS 行列の精密な測定はその質量起源を探るために重要

である、今までの実験測定により MNS 行列は

$$|U_{MNS}| \sim \begin{pmatrix} 0.82 & 0.54 & 0.15 \\ 0.48 & 0.53 & 0.71 \\ 0.31 & 0.65 & 0.69 \end{pmatrix} \quad (9)$$

と求められている。

レプトンの CP 対称性の破れの測定は、物質優勢宇宙の謎を解く手がかりになる可能性があり、そのためにも δ_{CP} 測定もまた重要な課題の一つである。

他にも、ニュートリノ振動では質量二乗誤差の絶対値を測定できるが質量の固有値の順番がまだわかつていない、ニュートリノは粒子と反粒子が同じマヨラナ粒子であるかなどの問題もあり、これらの謎を解決するために様々なニュートリノ実験が行われている。

第 II 部

T2K 実験

T2K 実験の概要やビームライン、実験に使用される検出器について本章にて述べる。

5 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 からのニュートリノビームによるニュートリノ反応を、J-PARC 構内の前置検出器及び 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデにて観測し、ニュートリノ振動のパラメータを精密測定している長基線ニュートリノ振動実験である (図 1)[6]。



図 1: T2K 実験の概要

6 ニュートリノビーム

6.1 ニュートリノビームライン

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は LINAC (LINear ACcelerator)、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring) の 3 つの加速器にて構成されている大強度陽子加速器施設である (図 2) [7]。

6.1.1 LINAC

LINAC は、加速空洞を多数直線状に並べ長距離に渡って粒子を加速していく直線型加速器である。大電流での加速が可能だが各加速空洞が一つの粒子を 1 回しか加速しないため、大きな運動エネルギーを得るには加速空洞を数十～数百台、力技で並べる必要がある。LINAC では、水素ガスから負水素イオンを発生させエネルギーを 400MeV に加速させる。25Hz の繰り返しでパルス運転され 400MeV まで加速された時点で 3GeV シンクロトロンへのビームラインへ導かれる。負水素イオンは生成時はプラズマで、最初の加速電圧 (つまり運動エネルギー) は 50kV と極めて遅く、このビームを加速空洞を通し加速させつつ塊 (バンチ) に加工する。LINAC では、大電力の高周波電磁場を加速空洞に供給し、発生した電場を利用して加速させる。加速空洞内やビーム



図 2: J-PARC の 3 つの加速器

輸送ダクト内は気体分子とビームとの衝突を避け放電を防ぐために高真空状態を保っている。また、負水素イオン同士が反発し細いダクト内を発散しないよう集束させながら通す必要があるので、ビーム集束用の電磁石(四極電磁石)を周期的に配置している。粒子は高周波電場が作る進行方向の安定領域の中でバンチと呼ばれるひと塊の集団となって加速され、RCS の 1 周期の開始時に $500\mu\text{s}$ 程度以下の macro pulse を 40ms ごとに LINAC から RCS へ送られる(図3)。

6.1.2 3GeV 陽子シンクロトロン RCS

LINAC で 400MeV の運動エネルギーを得た負水素イオンは、L3BT(Linac to 3GeV-RCS Beam Transport line) というビーム輸送路を通って RCS に入射され、その際に 2 個の電子が剥ぎ取られ陽子となり周回する。LINAC からの中間パルス(3.09ns(324MHz) ごとのマイクロパルスが数百個連続した 100~300ns 幅のパルス)の周期は、RCS のビームダクトを 1 周する時間 $1.63\mu\text{s}$ に合わせてあり、マクロパルス(最大 $500\mu\text{s}$)の時間内に次々にやって来た中間パルスは先に周回していたバンチへ次々に合流してビームの電流密度がその分だけ増加しビームの強度が強くなる。この大強度の陽子バンチを約 20msかけてリングを 1 万数千回周回する間に加速空洞をくぐらせて 3GeV まで加速し出来た 3GeV の陽子バンチを蹴りだして取り出し、そして下流の施設(物質生命科学実験施設、MR シンクロトロン)へ送られる。そして 20msかけて磁場を立ち下げたのち再び入射が行われる。RCS の運転周期 25Hz とはこのように 40ms で、入射・加速・出射・立ち下げが繰り返されることを意味する。陽子のような電子に比べてはるかに重い粒子は、運動エネルギーと電流密度によって適切な加速方式が異なるので、初段は直線型加速器、次にシンクロトロンで電流密度を上げ、それを利用したりさらに次のシンクロトロンでより高いエネルギーを得る多段型加速器の構成を取ることが多い。

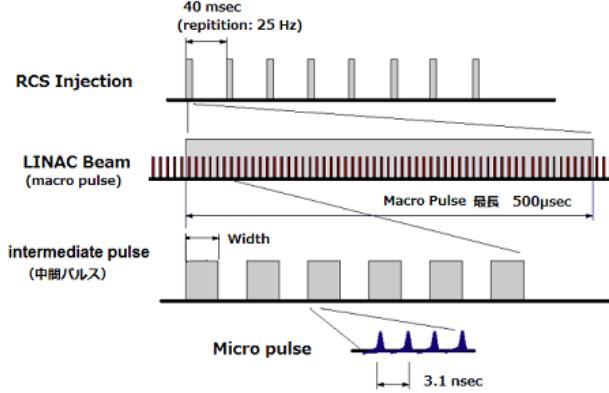


図 3: LINAC から RCS にバンチが送られる仕組み

6.1.3 メインリングシンクロトロン MR

RCS からの 3GeV ビームを受け、1.4 秒で 30GeV に加速し一挙に取り出す速い取り出しモードでニュートリノビームラインへ、または 2 秒間で徐々に取り出す遅い取り出しモードでハドロンビームラインへ取り出して下流の実験施設へ送り出す。MR の実際の形状は角の丸まった三角形に近いものとなっており、丸い部分(アーク部と呼ばれる)を大きく 120 度で 3 つに切りわけ、切った部分を引き伸ばして直線状の部分(直線部と呼ばれる)を作り出している。アーク部は基本的にビームを曲げるために存在しており、直線部では入射、ビーム整形、加速、出射、を制御する機器が並んでいる。

図 4 は、RCS から MR へ陽子バンチが送られるタイミングについての概略図である。

MR では、周回バンチを 1ヶ所の狭い場所に置かれた加速空洞に与える高周波電場で加速させる。バンチが 1 周回って来た時に再び電場の同じ位相で加速するためには、加速用高周波の周波数は周回する粒子の周波数と同じかその整数倍である必要がある。RCS からの MR に入射される 3GeV 陽子ビームは、2 個のバンチが RCS のサイクル 40ms ごとに 2 個ずつで到達する。MR と合流する入射部にはキッカー電磁石などが設置されており、キッカー電磁石では 2 つのバンチが来た瞬間にパルス電流を流しバンチの飛行方向を周回方向にキックする。

エネルギーが 3GeV から 30GeV まで変化する陽子ビームの軌道を一定に保つための電磁石を主電磁石という、96 台の偏向電磁石と 216 台の四極電磁石、72 台の六極電磁石などで構成されている。MR では 2 種類の運転モードで数秒単位のサイクル運転を行っている。1 つは加速した陽子を一挙に取り出す速い取り出しモード(FX)でニュートリノビームラインへ、もう 1 つは加速した陽子を 2 秒間で徐々に取り出す遅い取り出しモード(SX)でハドロンビームラインへ出射する。両モードとも、120ms の入射期間では 3GeV 用の磁場、1.4 秒間の加速期間は運動量の増加に合わせ徐々に磁場を強くし 30GeV に対応する磁場まで上げる。その後 FX 運転モードでは即出射され、SX 運転モードでは 2 秒間エネルギー 30GeV を維持しつつ徐々に出射する。その後ビームがいなくなつた隙間の時間に磁場を 3GeV 用に戻す戻りの時間を経て、次のサイクルになる。現在の運転周期

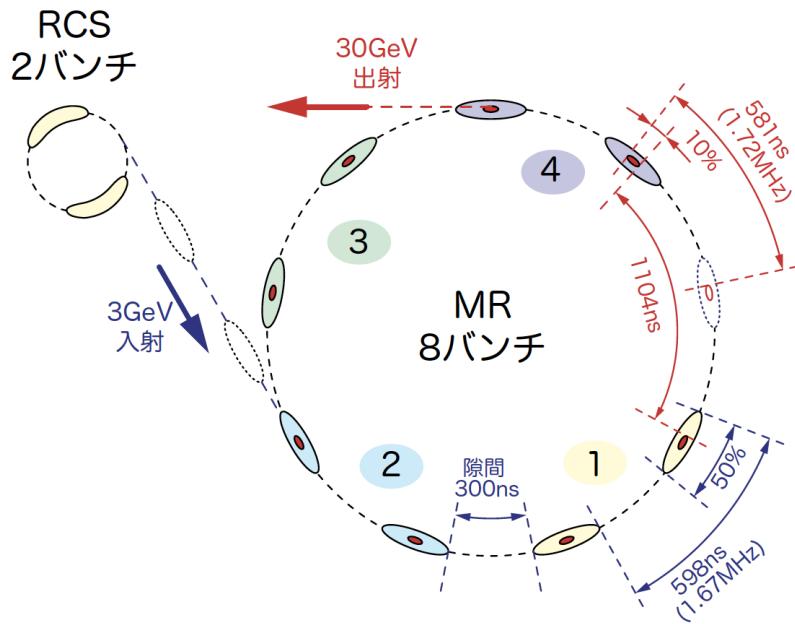


図 4: RCS から MR に陽子バンチが送られるタイミングについての概略図

は FX 運転は 2.48 秒、SX 運転は 5.4 秒である。

6.1.4 ニュートリノ実験施設

J-PARC の MR から放出した陽子ビームは多数の常伝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で作られた標的に衝突して、数多くの 2 次粒子を作り出す。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キロアンペアのパルス状の電流によって荷電 π 中間子を収束させるよう設計された特殊な電磁石であり、 π 中間子は長さ 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ミューオンとミューニュートリノの対に崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (10)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (11)$$

電磁ホーンの極性を変化させることによって、収束させる π 中間子の電荷を選ぶことで変更することが可能である。図 5 にニュートリノビームラインと検出器の位置関係を示す。ニュートリノ（およびごく一部のミューオン）以外の粒子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。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モニターする。標的から 280m 下流にはニュートリノ前置検出器、さらに 295km 先にスーパーカミオカンデがあり、これら 2 つの検出器の測定結果と比較することで、ニュートリノ振動を詳細に研究する事が可能となる。

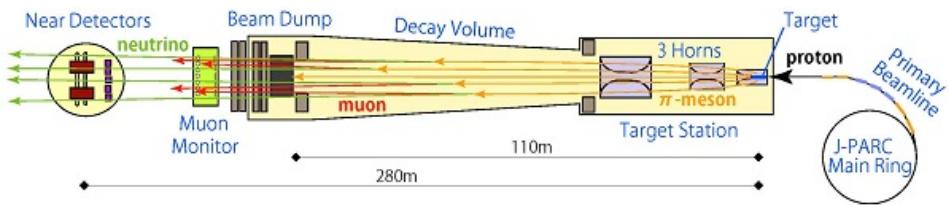


図 5: ニュートリノビームラインの生成と前置検出器

6.2 off-axis 法

off-axis 法とは、検出器をニュートリノビーム軸の中心からはずれたところに配置することで、幅の狭いニュートリノのエネルギー分布を得る方法であり T2K では世界初で採用している。T2K での off-axis 角 2.5° であり、エネルギーを $0.5 \sim 0.7\text{GeV}$ に合わせ、ニュートリノ振動効果が最もよくみえる角度を採用している(図 6)。

T2K では主に CCQE(Charged Current Quasi Elastic) 反応を信号として用いる。1 GeV 以下では CCQE 反応が主な反応であるが、on-axis のエネルギー領域である 2GeV 付近では 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 反応が増加してしまうので、これらのバックグラウンドを減らすために off-axis 法は重要である。したがって、ビーム方向は重要なパラメータであり、前置検出器 INGRID などにおいて常にモニターされている。

7 前置検出器

前置検出器は、グラファイト標的から 280 m 下流にある検出器群であり、ビーム軸上に設置された INGRID (on-axis 検出器) と π 中間子の平均崩壊地点とスーパーカミオカンデを結ぶ直線上に位置する ND280 (off-axis 検出器) から構成されている。図 7 に前置検出器が設置されているニュートリノモニター棟の概観を示す。

7.1 INGRID

on-axis 検出器 INGRID は、ニュートリノビーム方向を高精度でモニターするための検出器 [8] であり、水平・鉛直にそれぞれ 7 台ずつ設置されたモジュール及び 2 台のショルダーモジュールからなる(図 8 及び 図 9)。

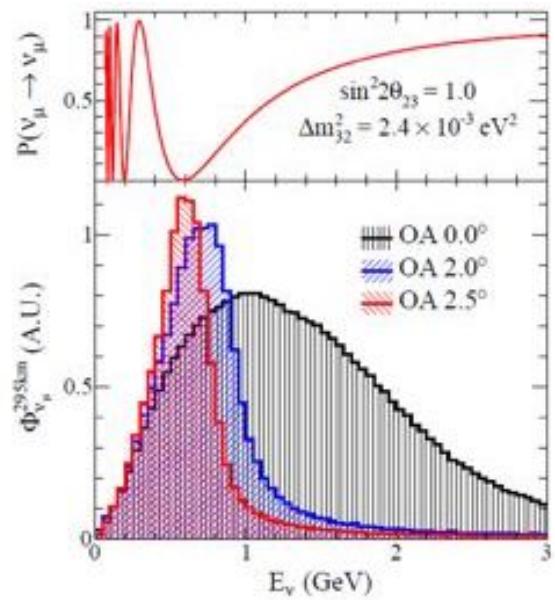


図 6: off-axis 角とニュートリノエネルギー及び振動確率の関係

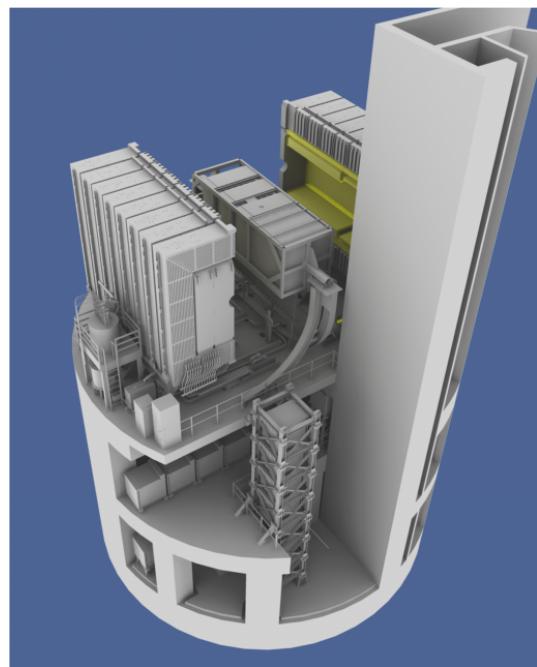


図 7: 前置検出器の概観図

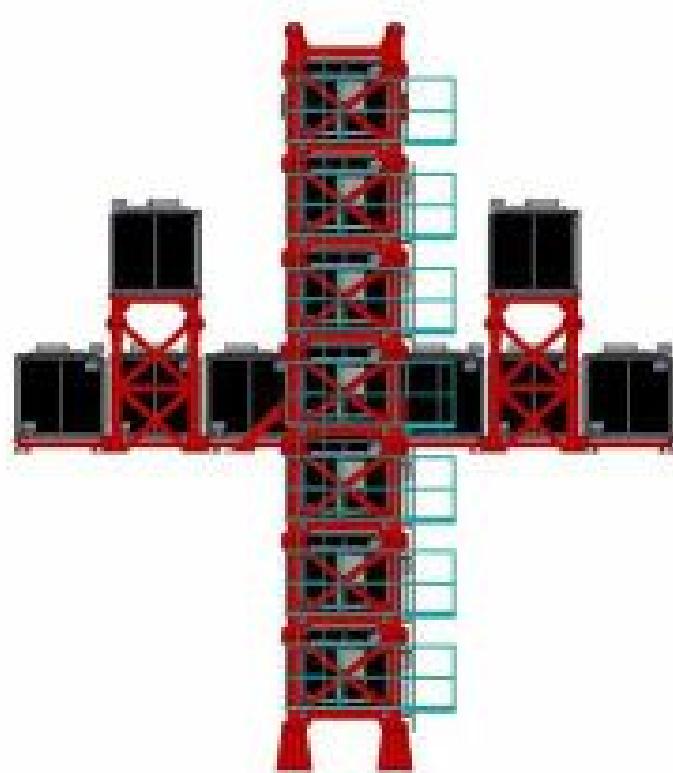


図 8: INGRID の概観図

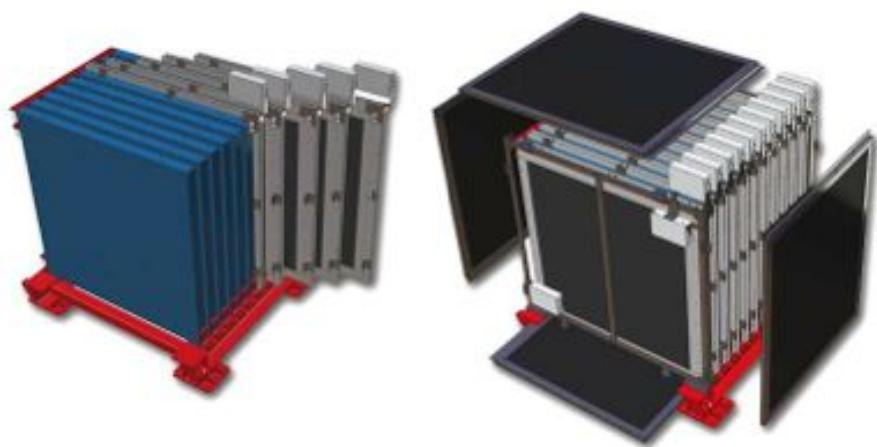


図 9: INGRID モジュール

各モジュールは鉄の層が 9 層、シンチレータの層が 11 層のサンドウィッチ構造をしている。ニュートリノ反応は基本的に鉄の層にて、鉄との間で起こり、生成された荷電粒子(主に μ)をシンチレータで検出し、波長変換ファイバーと光検出器 MPPC で読み出す。こうしてニュートリノ反応のイベントレートを算出し、その値が各モジュールにおけるニュートリノ空間分布に対応するを考える。水平・鉛直方向それぞれにおいてこの分布をガウシアンでフィットした中心ビーム方向中心と考えることでニュートリノビームの方向をモニターしている。ビーム方向がずれると、スーパーカミオカンデにおけるニュートリノフラックスのエネルギー分布が変化してしまうので、INGRID では 1 mrad よりも良い精度でビーム方向をモニタリングしている。

7.2 ND280

ここでは、図 10 に示された ND280 検出器群について述べる。

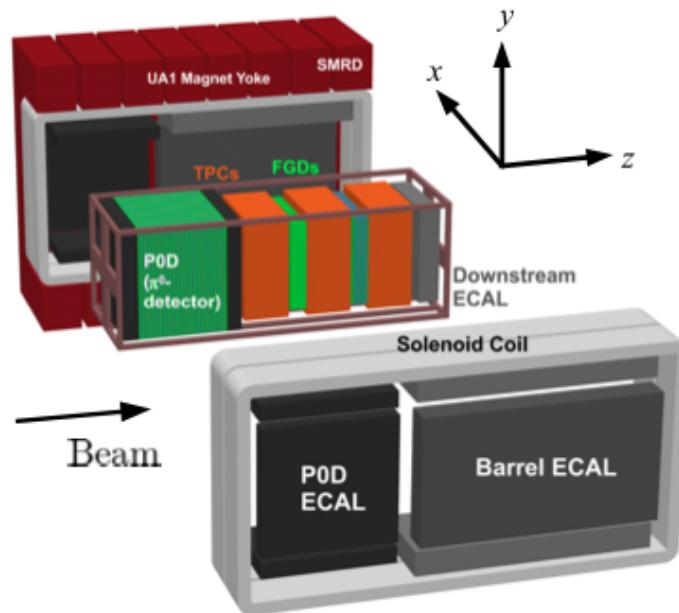


図 10: ND280 検出器群

UA1 magnet

検出器全体に 0.2 T の磁場を加えている大型常伝導電磁石。UA1 実験で使用されたものを CERN より寄贈された。

P0D : π^0 Detector[9]

π^0 を含む終状態におけるニュートリノ反応検出器。鉛の薄膜とシンチレータ及び水ターゲットのサンドwich構造になっている。

FGD : Fine Grained Detector[10]

断面が約 1 cm 四方の細かく区分されたシンチレータからなるトラッカー。検出器がニュー

トリノ標的となり、反応点付近の粒子を観測することができる。シンチレータのみのモジュール、水標的とシンチレータとのサンドウィッヂ構造のモジュールの2台からなる。

TPC : Time Projection Chamber[11]

ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子の磁場で曲げられた軌道とエネルギー損失から粒子の識別および運動量の観測を行う。

ECAL : Electromagnetic CALorimeter[12]

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観測しエネルギーを測定している。訛りとシンチレータのサンドウィッヂ構造になっている。

SMRD : Side Muon Range Detector[13]

UA1 magnet の鉄レイヤー同士の隙間に設置された、プラスチックシンチレータからなる検出器。大角度での散乱にて TPC に入射しなかった荷電粒子の軌跡及びエネルギーの再構成を行う。

8 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、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町神岡鉱山の地下 1000 m に位置する後置検出器であり、50 kt の純粋を用いた直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒の形をした水チェレンコフ検出器である(図 11)[14]。スーパーカミオカンデの内部は 20 インチの光電子増倍管が内側向きに 11200 本、外部は 8 インチの光電子増倍管が外側向きに 1885 本設置されている。

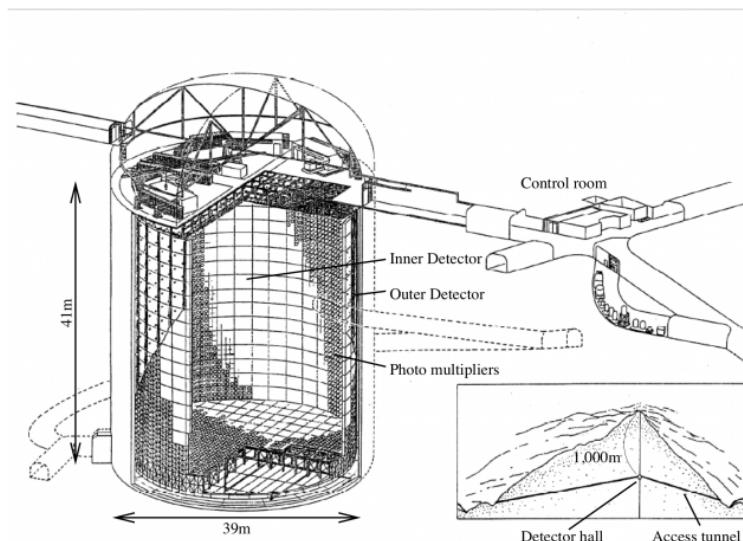


図 11: スーパーカミオカンデの概観図

水標的とニュートリノの反応によって生じた荷電粒子が、

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (12)$$

であるとき (n は水の屈折率)、

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (13)$$

となる方向に円錐状のチェレンコフ光を放射し、リング状の像を作る。その光を光電子増倍管で観測し、粒子の種類や生成点、エネルギー、運動方向を再構成している。

第 III 部

T2K-WAGASCI 実験

この章では J-PARC E69 実験 WAGASCI について述べる。

9 目的

T2K 実験では、ニュートリノ生成直後に設置された前置検出器を用いてニュートリノフラックスや反応断面積などの不定性の削減を行っている。現在 off-axis 前置検出器には水を標的とした検出器が設置されており、ニュートリノの水に対する反応断面積の解析が進められている。off-axis 前置検出器は、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その構造上から前方に限られている。そのため、phase space 測定できない方向が存在し、その部分については外部のデータ (MiniBooNE など) に依存しており、 4π 方向で観測を行うスーパーカミオカンデでの測定においてその方向に大きな系統誤差がついている。そこで、我々は J-PARC E69 実験として、三次元格子構造を持った新型ニュートリノ検出器群を製作し、 4π 方向に感度を持った測定を実現した。

10 設計

10.1 検出器の概要

図 12 に検出器の全体図を掲載する。



図 12: J-PARC E69 検出器群の全体図

中心に置かれている WAGASCI 検出器はニュートリノ標的の水とプラスチックシンチレータが用いられており、ビーム方向にそって、水標的層、CH 標的層が 2 層で構成されている。WAGASCI 検出器はシンチレータで構成される全感知型ニュートリノ標的検出器である INGRID モジュールの前後に設置し、その側面に 2 台の Muon Range Detector (Wall MRD)、下流側に、磁場を印加した Muon Range Detector (Baby MIND) 1 台を配置する。WAGASCI 検出器と Wall MRDs の間は 50 cm ほどの間隔を空け、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、バックグラウンドのイベントを除去する。

10.2 設置場所

設置場所はニュートリノモニター棟地下2階に設置し、ニュートリノビームを測定に用いる。設置場所の off-axis 角は 1.5° である。

10.3 WAGASCI 検出器

WAGASCI 検出器 [15] は、1280枚のプラスチックシンチレータとそれを取り囲む0.6トンの水で構成されている。その内部は、プラスチックシンチレータを格子状に組み込むことで三次元の格子構造を実現している。その様子が図13である。プラスチックシンチレータは、縦方向、グ

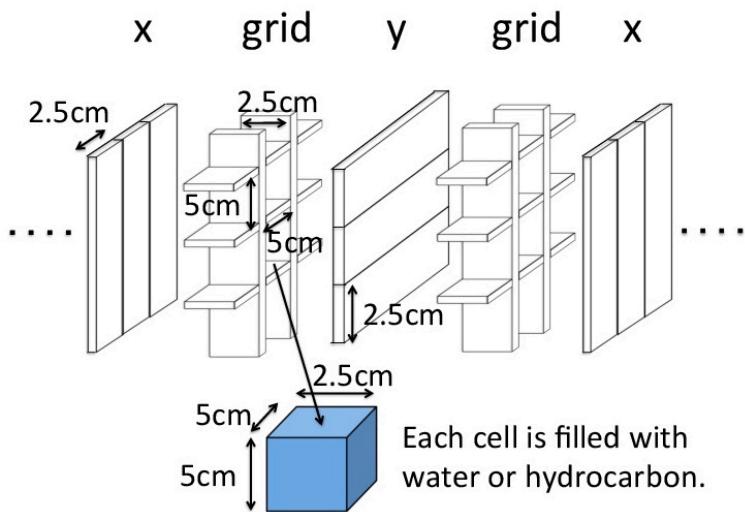


図 13: WAGASCI 検出器内部の三次元格子構造

リッド構造、横構造、グリッド構造という順番で並んでおり、そしてグリッド構造内のプラスチックシンチレータは縦横5cm間隔で並んでおり、その中に水を入れるので、 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ の水のセルが並んでいるようになる(水抜きの場合は空洞である)。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子はプラスチックシンチレータを通った際にトラックが形成され、WAGASCI 検出器ではプラスチックシンチレータを三次元格子構造に組むことで荷電粒子について 4π 方向のアクセプタンスでの検出を実現できる。

10.4 Muon range detector (MRD)

MRDとは、鉄とプラスチックシンチレータのサンドウィッチ構造をした検出器であり、ミューオンの検出とその運動量の測定を目的としている。MRDは下流側に1台、側面側に2台設置されている。

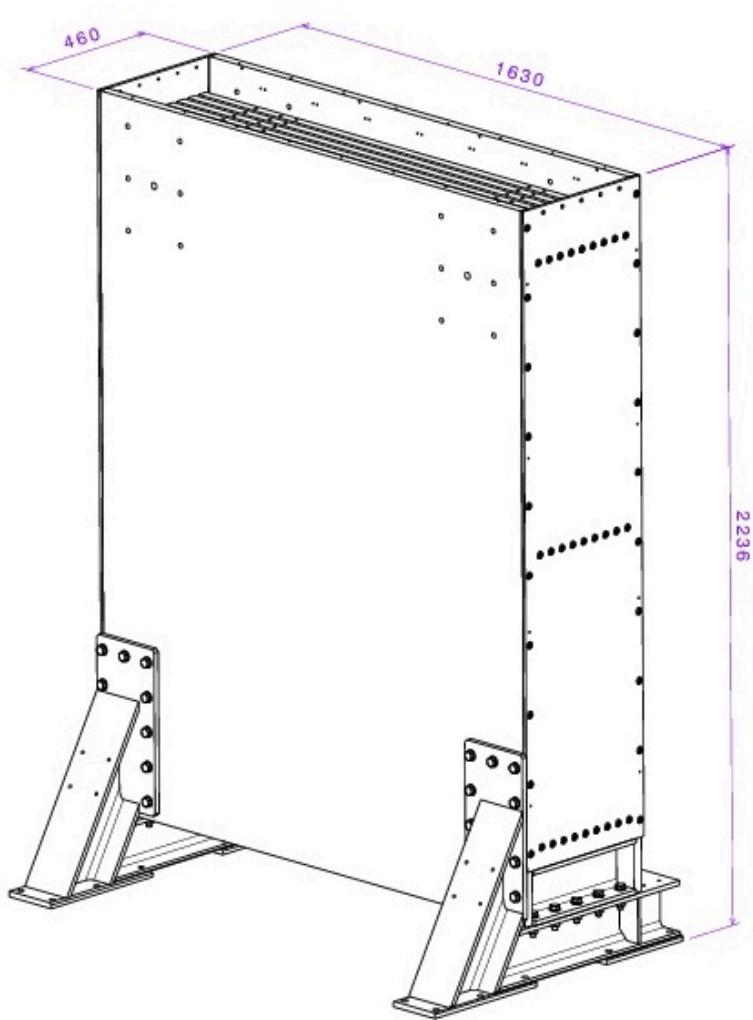


図 14: Wall MRD の構造体

10.4.1 Wall MRD

Wall MRD とは、WAGASCI 検出器の側面側に設置される MRD (図 14) である。

Wall MRD は、高さ 1.8 m、長さ 1.6 m、厚さ 3 cm の鉄板が 11 層とシンチレータ 10 層からなり、シンチレータの各層は高さ 1.8 m、長さ 0.2 m、厚さ 7 mm のプラスチックシンチレータを 8 枚で構成されており、1 台につき総重量は約 8 トンである。

図 15 は、WAGASCI と Wall MRD の位置関係を表した概略図であり、Wall MRD は、WAGASCI でのニュートリノ反応による大角度方向へ飛んだ荷電粒子の粒子識別と方向同定、貫通した鉄層 1 層の枚数 (1 枚あたり約 50 MeV のエネルギーを失う) から運動量を測定するという役割を担う。

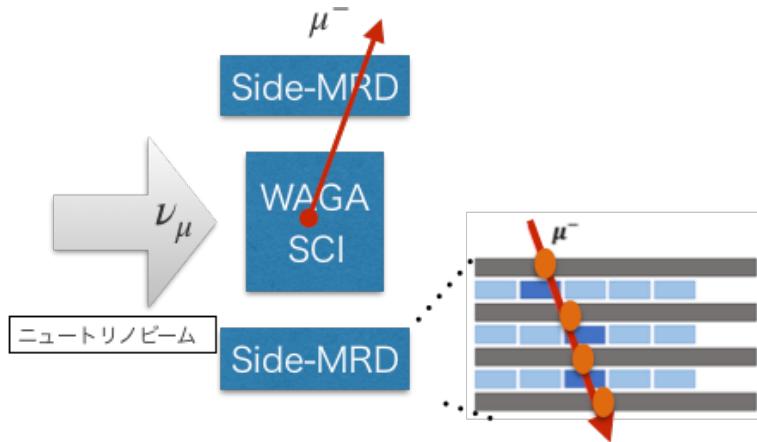


図 15: WAGASCI と Wall MRD の位置関係の概略図。Wall MRD は、WAGASCI でのニュートリノ反応による、大角度方向へ飛んだ荷電粒子の粒子識別と方向同定、貫通した鉄層 1 層の枚数 (1 枚あたり約 50 MeV のエネルギーを失う) から運動量を測定するという役割を担う。

今回、我々は 2 台の Wall MRD の建設及び性能試験を行った。その詳細については第 VI 部にて後述する。

10.4.2 Baby MIND

Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector) とは、WAGASCI 検出器の下流側に設置する MRD である [16]。ニュートリノ反応によって生成される荷電粒子 μ の電荷の正負を判別するために、鉄に磁場を印加させた検出器である。

Baby MIND 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ている。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 $3500 \times 2000 \times 50 \text{ mm}^3$ で重さは 1900kg である。150A の電流に対して形成する磁場は 1.5T であり、図 16 のように磁場が分布されている。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 $2880 \times 31 \times 7.5 \text{ mm}^3$ である。

10.4.3 Proton Module

Proton Module[17] は、本実験ではビーム方向中心部に設置され炭化水素 (CH) 標的検出器として使用される。

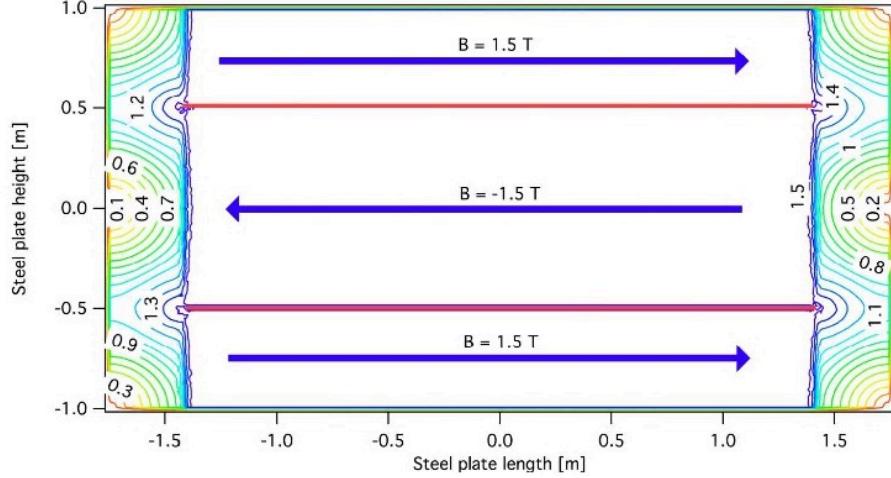


図 16: Baby MIND 内の磁場の分布

図 17 のように、上下左右 4 枚の veto plane に囲まれた、2 枚の上流方向の飛程検出面と 34 枚の下流方向の飛程検出面で構成されているプラスチックシンチレータバー層を用いたニュートリノ反応検出器である。Proton Module を構成しているプラスチックシンチレータバーは 2 種類のものを使用されている。一つは、INGRID 検出器のトラッキング面にて使用されている $50 \times 1203 \times 10 \text{ mm}^3$ の INGRID タイプと呼ばれるシンチレータである。もう一つは、 $25 \times 1203 \times 10 \text{ mm}^3$ の主にポリスチレンで構成されている SciBar タイプと呼ばれるシンチレータである。

10.4.4 J-PARC E71 実験及び NINJA 検出器

J-PARC E71 実験 NINJA (Neutrino Interaction research with Nuclear Emulsion and J-PARC Accelerator) とは、原子核乾板を用いたニュートリノ振動研究におけるサブミクロンスケールでの精密測定を行う実験 [18] である。

ニュートリノ反応標的に原子核乾板検出器を使用することで、従来のニュートリノ反応研究における検出器よりも 100 倍以上の一分解能を達成し、精密な測定データを取得することが可能となる。NINJA 実験で得られる 100MeV～数 GeV のエネルギー帯のニュートリノ反応を用いることで、LSND 実験、MiniBooNE 実験等で示唆されているステライルニュートリノの検証やチャーム粒子を含む原子核やチャームクォークを含むペンタクォークの探索といったエキゾチックな原子核・ハドロンの研究にも繋がる可能性がある。

NINJA 実験にて使用する検出器は、NINJA 検出器という。本実験においては、WAGASCI 実験との統合的なデータ解析を図ることを目的とし、水標的及び二次粒子であるミューオン以外の粒子による超短飛程のトラックの検出という役割を担う。

10.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) [19] は、数光子から数千光子程度の微弱光測定のため開発された半導体光検出器 (図 18) である。ピクセル化された APD をガイガーモードで動作させ、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。このタイプの光検出器を一般に Pixelated Photon Detector (PPD) と呼び、MPPC は浜松ホトニクス製の PPD で

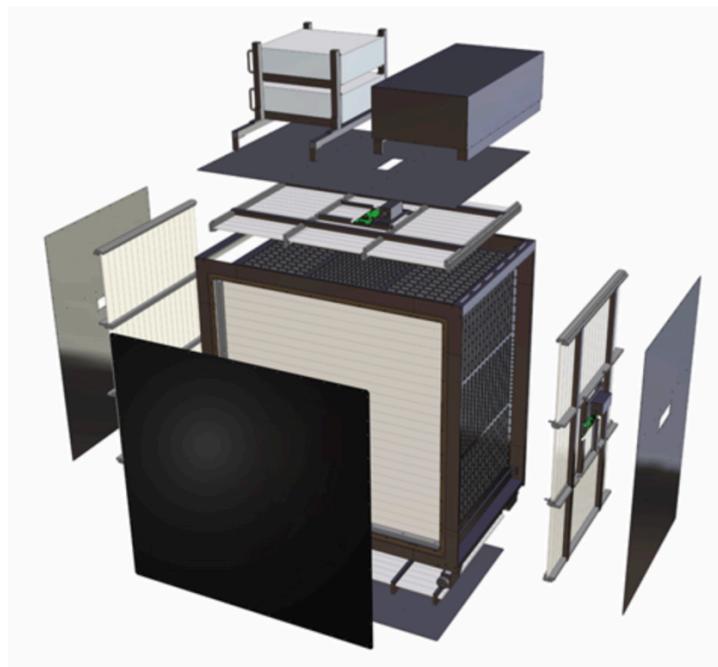


図 17: Proton Module の構造図

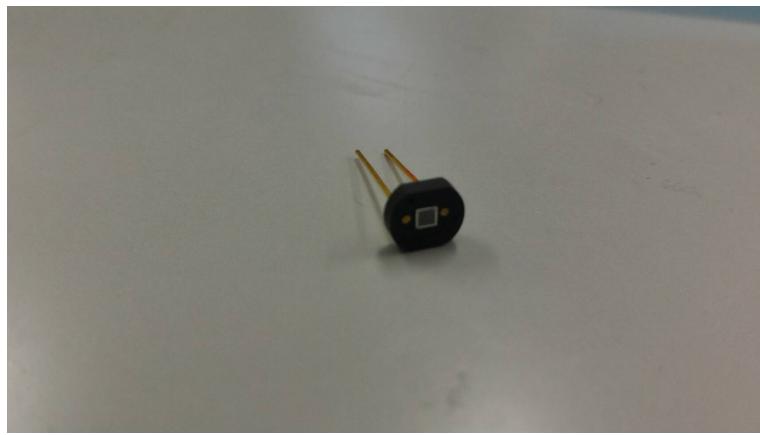


図 18: MPPC (S13360 シリーズ)

ある [19]。MPPC は、その小ささ、光電子増倍管に並ぶゲイン、光検出効率、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、など光電子増倍管と比較して数々の優れた性質を持ち、非常に手軽に使用することができる。さらに、読み出しチャンネル数を飛躍的に増やせるため、より再分割された超高精度検出器を作ることを可能とする。また、増幅領域が 2 μm 程度のため信号の立ち上がりが早く、時間分解能も優れている。

10.5.1 動作原理

フォトダイオードのうち、逆電圧を印加することにより光電流が増倍される高速・高感度のフォトダイオードをアバランシェ・フォトダイオード(APD)という。そして、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(APD がガイガーモードで動作するための閾値電圧)より 1 ~ 4 V 程度高い逆バイアス電圧をかけることにより、増幅領域はガイガーモードで動作し、入射光子によりはじき出された光電子がこの領域中で雪崩崩壊する。電子雪崩が発生したピクセルには電流が流れることでピクセルに直列に接続された数百 k Ω 程度のクエンチング抵抗に電圧降下が発生し、増幅領域にかかっている電位降下が発生し、増幅領域にかかっている電位差を下げることで雪崩を終息させる(図 19)。

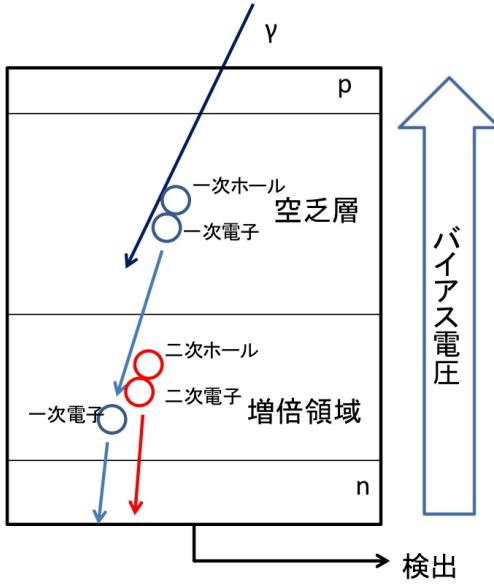


図 19: アバランシェダイオードの電子雪崩による電子増幅の仕組み。

このとき、1 ピクセルからの出力電荷 Q_{pix} は、 C_{pix} をピクセル一つのキャパシタンス、 V を印加電圧、 V_{bd} ブレイクダウン電圧とすると、

$$Q_{pix} = C_{pix}(V - V_{bd}) \quad (14)$$

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

$$Q = \sum_i^N Q_i = N Q_{pix} \quad (15)$$

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。MPPC のゲイン g は Q_{pix} を素電荷 $|e|$ で割ったものとして定義され、 $C_{pix} \sim 10 - 100 \text{ pF}$ 、 $\Delta V \sim 1V$ の範囲では、 $g = 10^5 \sim 10^6$ という値になる。

10.5.2 基礎特性

以下に、MPPC の基礎特性について述べる。

- 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以下になると電子雪崩が終了するので、ゲインは $\Delta V = V - V_{bd}$ に比例する。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つており、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

一般的に、PPD は高室温で高いダークノイズレートを持つ。ダークノイズの原因は、主に熱励起による電子が電子雪崩を起こすことによると考えられ、ノイズの大きさは 1 光電子相当がほとんどであり、ピクセル間クロストークやアフターパルスの影響で 2 光電子以上現れる。また、不純物による中間準位や局所的な高電圧の領域が存在すると電子雪崩が発生しやすくなりノイズ源となる。

- 光子検出率 (Photon Detection Efficiency, PDE)

MPPC の PDE は量子効率 (QE)、受光面積中の有感領域の割合、電子雪崩を起こす確率の三つの確率で決まっている。MPPC は APD の構造を基にしているため、PMT に比べて高い QE をもつ。しかし、各ピクセル外周にバイアス抵抗と絶縁用の不感領域があるため、有感領域の割合が 100 % ではない。電子-正孔子雪崩を起こす確率は ΔV に依存するため、MPPC の PDE もまた ΔV に依存する。

- 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して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いう。これが頻繁に起きると、MPPC の出力が実際に検出されるべき光電子数より大きくなってしまう。また、この頻度からピクセル毎にばらついていると、応答関数の形に不定性を生じる。クロストークが起きる確率は、一定時間内に発生する熱電子ノイズの数から、次のようにして測定された。

$$\text{クロストーク確率} = \frac{\text{2 ピクセル相当以上のノイズ数}}{\text{1 ピクセル相当以上のノイズ数}} \quad (16)$$

熱電子ノイズは各ピクセルでランダムに起きるので、二つ以上のピクセルが同時に熱電子ノイズを出す確率は非常に小さい。よって、2 ピクセル相当以上のノイズはほとんどがクロストークによって引き起こされたものと考えられる。

- アフターパルス

MPPC の増幅領域内には結晶の格子欠陥が存在してここに雪崩電子が捕獲され、行って時間後に再放出されることにより再び雪崩を引き起こすことがある。このような現象はアフターパルスと呼ばれる。この欠陥のポテンシャルの深さは様々であり、どの程度の深さの欠陥に電子が落ち込むかでその捕獲確率や再放出の時定数が変化する。この現象の定量的な理解や

改善は未だ進行中であるが、結晶の質を向上させることによりアフターパルスを減少させることを期待され、今後の改善が待たれる。

11 今回のフルセットアップでの測定について

2019年11月から2020年3月までのニュートリノビーム測定のために既存の検出器のセットアップを拡張し、NINJA 検出器を同じ実験場所へ組み込んだフルセットアップ J-PARC E71 実験 WAGASCI を開始した。

まず2017年11月から2018年7月にかけて2台のWall MRD の建設および性能評価試験を行った。次に、2019年1月から各検出器の実験場所へのインストールのために、実験に使用する検出器群の設置位置の考察を行った。検出器群がインストールされた後は、2019年11月の本測定に向けた準備作業を行った。

第IV部

ニュートリノ反応

本章では、T2K 実験においての系統誤差の最大の要因である反応断面積の不定性について関わるニュートリノ反応について述べる。

12 ニュートリノと核子・原子核反応

ニュートリノは、実験において反応が起こった場合にその存在を検出することしかできない。ニュートリノと核子・原子核反応には、荷電カレント反応 (Charged Current) 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、実験では荷電レプトンを検出する。中性カレント反応は、ニュートリノはニュートリノのまま残るが、それが反応した核子・原子核にエネルギーと運動量を受け渡す。これによって標的が反跳したり、破碎したりするので、実験ではこのエネルギー移行を検出する。

エネルギーが 100 MeV 以上におけるニュートリノ反応は、図 20 のように、以下の反応が確率的に起こる。

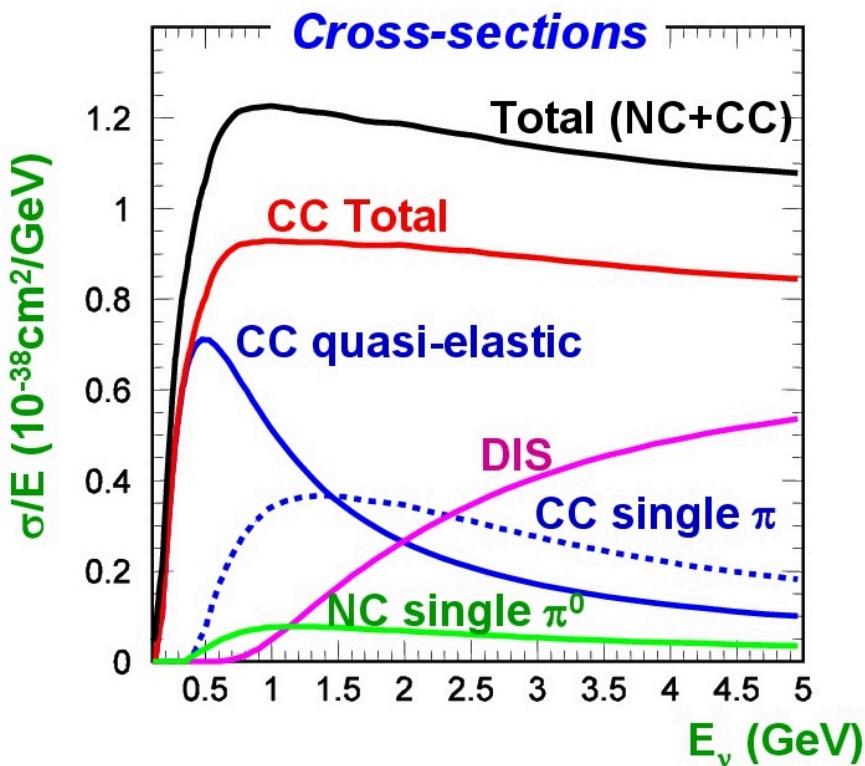


図 20: ニュートリノの反応断面積とエネルギーの関係

荷電カレント 擬弾性散乱 (Charged Current Quasi Elastic scattering)

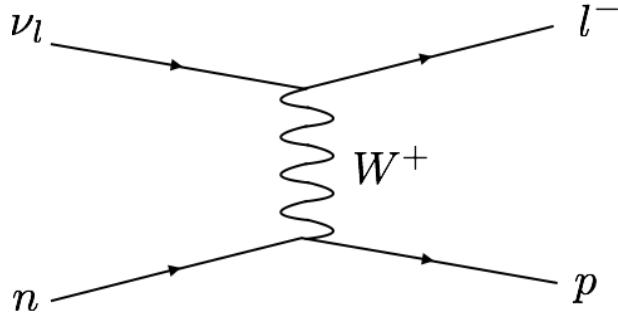


図 21: CCQE 反応

CCQE 反応(図 21)は、数百 MeV の低エネルギー領域での主な反応であり、T2K 実験では、もとのニュートリノの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 θ_l およびエネルギー E_l を用いることによって、2 体問題としてニュートリノのエネルギーを以下のように再構成が可能となる。

$$E_\nu = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (17)$$

ここで、 m_N は核子の質量、 m_l 、 p_l はそれぞれのレプトンの質量と運動量である。

単一パイオニン生成反応 (Single pion production)

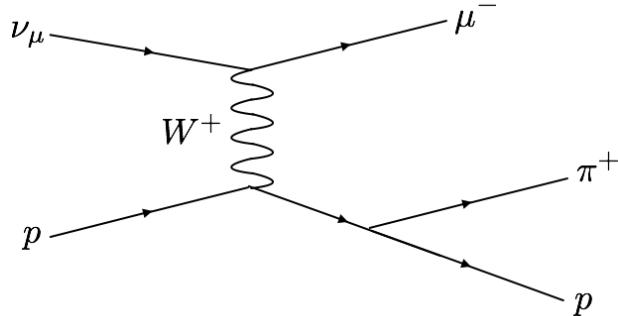


図 22: CC (Charged Current)1 π 反応

CC (Charged Current)1 π 反応(図 22)は、 π 中間子を生成する反応であり、数 GeV 以下で Charged Current Quasi Elastic 散乱の次にくる反応であり、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 粒子が何らかの理由(検出器の性質・原子核内反応など)で検出できなかった場合、CCQE 反応と誤認される可能性があり、CCQE 反応の主となるバックグラウンドとなる。NC (Neutral Current)1 π 反応(図 23)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り運動量が小さく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 と判別された場合は、CCQE 反応と誤認される可能性がある。

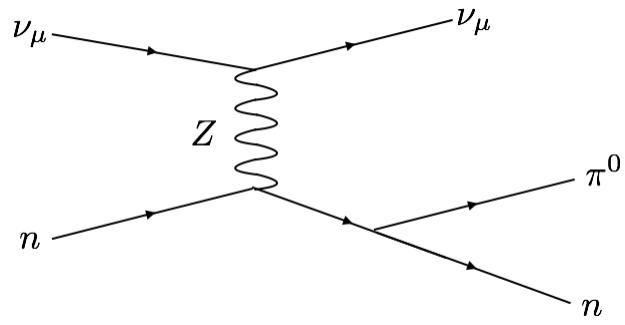


図 23: NC (Neutral Current) 1π 反応

深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering)

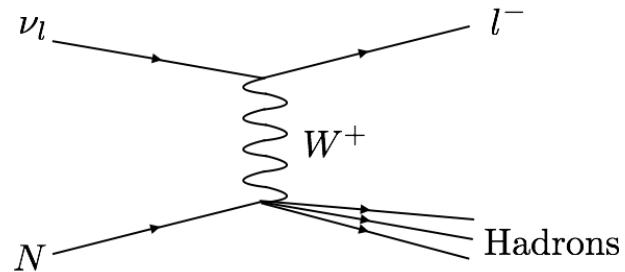


図 24: DIS 反応

DIS 反応 (図 24) は、高エネルギー領域 (\sim 数十 GeV) の主要な反応であり、ニュートリノが quark と散乱していると近似できる。

第V部

ニュートリノフラックスの生成及び不確定性の見積もり

ニュートリノ反応断面積を測定する際に、ニュートリノフラックスとその系統誤差が必要となる。本研究では、WAGASCI 実験が行われる地点である off-axis 角 1.5° 地点におけるニュートリノフラックスとその系統誤差をモンテカルロシミュレーションを用いて見積もった。

13 ニュートリノビームが生成されるまで

以下に、シミュレーション上におけるニュートリノフラックス生成までの流れを述べる。

(1) FLUKA シミュレーション

FLUKA[20] とは、素粒子物理学における統合的なモンテカルロシミュレーションパッケージの一つであり、そのハドロン反応モデルを用いて、陽子と炭素標的のハドロン生成反応をシミュレーションする。

(2) JNUBEAM

シミュレーションパッケージ GEANT3 を用いて、ターゲット(炭素標的)から出て行く粒子のトラッキング及びニュートリノへの崩壊をシミュレーションする。JNUBEAM については後述する。

(3) ハドロン生成のチューニング

NA61/SHINE 実験などの結果をシミュレーションに組み込み、ニュートリノフラックスの系統誤差を削減する。

(4) ニュートリノフラックスの生成

14 JNUBEAM、FLUKA について

JNUBEAM は、T2K 実験前置検出器及びスーパーカミオカンデのニュートリノフラックスを予測するために GEANT3[21] をベースに開発されたシミュレーションツールである。

まず、ビームラインのジオメトリ上におけるターゲットステーション上流側にて 30GeV の陽子が生成され、FLUKA によるハドロン反応モデルによりターゲット内部でのハドロン連鎖反応がシミュレートされる。ハドロン反応モデルのシミュレーションツールは FLUKA の他に、GEANT3 に含まれる GCALOR や GFLUKA などもあるが、NA61/SHINE 実験の測定データと最も良く合致している FLUKA が採用されている。FLUKA の後、ターゲットから飛び出した二次粒子のトラッキング情報は JNUBEAM へ引き継がれる。そして、電磁ホーンで収束された二次粒子がニュートリノに崩壊し、ニュートリノフラックスを生成する。

15 N61/SHINE 実験

NA61/SHINE 実験は、CERN North Area の H2 ビームラインによって行われているターゲット実験[23]である。この実験は多目的研究施設であり、様々な長基線ビームラインニュートリノ実験(T2K, NO ν A, MINER ν A)のために、ニュートリノフラックスの不確定性を削減するために正確なハドロン生成測定を行なっている。NA61/SHINE 実験は、TPC(Time Projection Chambers)及び ToF(Time-of-Flight detector)を組み合わせて使用することで、ビームバス中に設置された固体ターゲットから出でていく荷電粒子の yield(多重度)を測定することを特に得意とした実験である。粒子識別は、TPC のイオン化エネルギー損失と ToF の時間情報との組み合わせにより得られ、粒子の運動量とそのトラッキングは TPC による測定から再構成される。NA61/SHINE 実験では、T2K 実験のためにレプリカターゲット (T2K 実験のグラファイトターゲットのレプリカ) 及び薄さ 2cm にカットされたターゲット(thin ターゲット)(図 25) の 2 種類のターゲットを用いられた。thin ターゲットは、陽子が炭素に衝突した初めのハドロン生成反応について、レプリカターゲットのデータは二次粒子や三次粒子の反応についての系統誤差削減を目的に測定された。本研究では、この 2 種類のデータを用いてハドロン反応における不確定性の見積もりを行った。

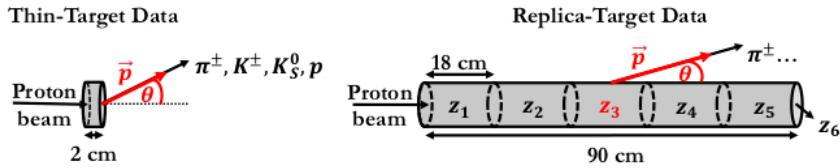


図 25: NA61/SHINE 実験の thin ターゲット (左図) 及びレプリカターゲット (右図)。

16 ハドロン反応のチューニングについて

FLUKA 及び JNUBEAM のシミュレーション後、ハドロン反応については NA61/SHINE 実験などのデータを用いてチューニングされる。ここで、NA61/SHINE 実験以外の h ドロン反応の実験のデータもチューニングに使用されている。例えば HARP 実験[22]の結果はパイ中間子を様々な物質標的に入射した際の反応を測定した実験であり、今回のニュートリノフラックスにおいてはパイ中間子の再散乱のパイ中間子生成反応の多重度の不確定性の見積もりに用いられている。

シミュレーションで得たニュートリノフラックスを NA61/SHINE 実験などのデータを用いてチューニングする方法は以下の 2 ステップで行われる。

1. 粒子生成のハドロン反応確率についての重みの計算

ある物質中において、粒子が物質と反応する確率は、通過距離 d から後の無限小のステップ Δd を用いて、

$$P_{int} = (\rho \sigma_{prod}(p_{in}) \Delta d) e^{-\rho \sigma_{prod}(p_{in}) d} \quad (18)$$

と表される。 σ_{prod} は、非弾性反応断面積から準弾性反応断面積を引くことで得られる生成反応断面積である。また、 p_{in} は入射粒子の運動量、 ρ は物質中の原子核ターゲットの密度である。さらに、ある物質中を d だけ通過する粒子が物質と反応しない確率は、

$$P_{surv} = e^{-\rho\sigma_{prod}(p_{in})d} \quad (19)$$

になる。したがって、粒子がある物質中に距離 d_0 だけ進み物質と反応を起こし、反応後の粒子がその後 d_1 だけ運動する反応確率は式 (18) 及び式 (19) の積となる。そして、チューニングのための重み W は以下のように、実験データから算出された反応確率からシミュレーションによる反応確率の割合として表される。

$$W(p_{in}, p_{out}, A, d_0, d_1) = \frac{\sigma_{prod}^{data}(p_{in}, A)}{\sigma_{prod}^{MC}(p_{in}, A)} e^{(\sigma_{prod}^{data}(p_{in}, A) - \sigma_{prod}^{MC}(p_{in}, A))d_0} e^{(\sigma_{prod}^{data}(p_{in}, A) - \sigma_{prod}^{data}(p_{in}, A))d_0} d_1 \quad (20)$$

ここで、 A は物質中の原子量である。

2. 反応の終状態の粒子の運動量での多重度を基にした重みの計算

終状態の多重度のチューニングは、以下のような微分断面積で定義された多重度 n を用いる。

$$\frac{d^2n(p, \theta)}{dpd\theta} = \frac{1}{\sigma_{prod}} \frac{d^2\sigma(p, \theta)}{dpd\theta} \quad (21)$$

ここで、 p は反応後の粒子の運動量、 θ は入射粒子の方向に対しての反応後の粒子の角度、 σ_{prod} は生成反応断面積である。反応確率による重み付けの場合と同じように、実験データから算出された多重度からシミュレーションによる多重度の割合を、ハドロン反応の多重度に対する重み W とした。

$$W(p, \theta) = \left[\frac{d^2n(p, \theta)}{dpd\theta} \right]_{data} / \left[\frac{d^2n(p, \theta)}{dpd\theta} \right]_{MC} \quad (22)$$

3. シミュレーションで得たニュートリノフラックスに 1 及び 2 で得た重み付けを行い、チューニングしたフラックスを算出

16.1 系統誤差に関わるハドロン反応

ニュートリノフラックスの系統誤差のうち、最もその割合を占める不確定性はハドロン反応モデルである。ハドロン反応確率及び生成後のパイ中間子やバリオンの運動量やエネルギー、多重度の不確定性がニュートリノフラックスのピーク付近である 600 ~ 800MeV で最も大きくなる。一方、1GeV を超える高エネルギー領域では、生成された K 中間子の運動量や多重度が大きな系統誤差となる。

正ニュートリノビームでのニュートリノフラックスでは、1 つのニュートリノ生成においてターゲット中では平均 1.35 回ハドロン反応が起こっており、そのうち 1.0 回分はパイ中間子や K 中間子及び核子の生成反応、約 0.35 回分の反応においては二次粒子がターゲット内でパイオニア陽子

を生成するハドロン反応、パイ中間子の再散乱反応が占める。さらに、陽子、中性子、パイ中間子が電磁ホーンまたはビームダンプのようなターゲット外の物質と反応して生成されるハドロンからニュートリノが生成されることも考えられる。

以上のことから、実験データを用いてチューニングすべき反応は以下の反応となる。

- 1次粒子の陽子による生成反応 $p + A \rightarrow \pi^\pm + X$
- 1次粒子の陽子による生成反応 $p + A \rightarrow K^\pm + X$
- 1次粒子の陽子による生成反応 $p + A \rightarrow K^0 + X$
- 1次粒子及び2次粒子の陽子による生成反応 $p + A \rightarrow p(n) + X$
- 2次粒子の核子及びターゲット外での生成反応 $p(n) + A \rightarrow \pi^\pm + X$
- ターゲット内外での反応 $\pi^\pm + A \rightarrow \pi^\pm + X$
- 反応物質:炭素 C(ターゲット及びビームダンプ)、アルミニウム Al(電磁ホーン)、鉄 Fe(ディケイボリュームの壁)

以上の項目におけるハドロン反応に対してチューニングを行い系統誤差を見積もった。

17 ハドロン反応によらない系統誤差の要因について

上記にて示したハドロン反応による系統誤差以外にも、ニュートリノフラックス生成の過程で系統誤差を生み出す要因が存在し、本研究では以下に挙げる要因についての系統誤差も見積もった。

- 電磁ホーンの水冷機構

ビーム測定中、ホーンの伝導体はビーム被曝やジュール熱損失により熱せられ、電磁ホーンの内部伝導体のは常にスプレッド式の水によって冷やされている。その水が、特に上流のホーンの内部伝導体の外側に付着していると考えられ、本研究では伝導体内部に 1mm の厚さの液体の水がある場合でのジオメトリに変更してシミュレーションを行い、これを本項目に関してチューニングを行なったニュートリノフラックスとして得た。

- 電磁ホーンの電流

電磁ホーンに流れる電流値によって荷電粒子の収束及びそれに伴う運動量も変化するので、系統誤差として考えられる。本研究では、チューニングしない場合でのフラックス生成の際の $\pm 250\text{kA}$ から 2% のずれである $\pm 5\text{kA}$ の電流でフラックスを作成し本項目における系統誤差を見積もった。

- 陽子ビームの形状

ターゲットステーション内部には、標的でのビーム形状を光学的にモニターする装置 (OTR) が設置されており、OTR の情報により陽子ビームのプロファイルが得られる。そしてそのビーム形状情報のうち、ビーム中心 Y 及びビーム角度 θ_Y がニュートリノフラックスの系統誤差を発生する要因である。これらの効果を見積もるために、JNUBEAM のフラックスシミュレーションでは、測定されたビーム位置と角度の幅と不確定性をカバーできる幅広の陽子ビーム (図 26) として陽子を発生させニュートリノフラックスを生成した。

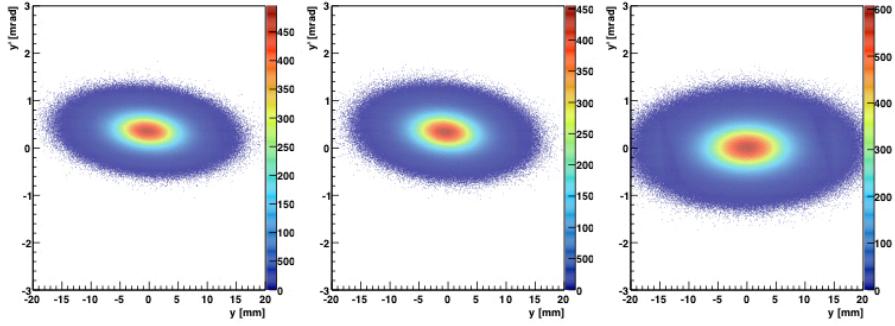


図 26: $Y - \theta_Y$ 位相空間でのビームプロファイル。左図は T2K 本測定 Run 5b、中央図は T2K 本測定 Run 5c でのプロファイルであり、右図は不確定性の見積もりのためのワイドビームのサンプルである。

表 1: INGRID によるビーム方向測定の結果 (中心位置 \pm 統計誤差 \pm 系統誤差)

Run period	Horizontal center (mrad)	Vertical center (mrad)
Positive focussing mode		
Run 1	$0.138 \pm 0.049 \pm 0.094$	$-0.250 \pm 0.052 \pm 0.105$
Run 2	$0.094 \pm 0.026 \pm 0.095$	$-0.041 \pm 0.028 \pm 0.104$
Run 3b	$0.048 \pm 0.097 \pm 0.112$	$-0.092 \pm 0.110 \pm 0.134$
Run 3c	$0.131 \pm 0.023 \pm 0.094$	$0.177 \pm 0.025 \pm 0.105$
Run 4	$0.122 \pm 0.015 \pm 0.094$	$0.014 \pm 0.016 \pm 0.104$
Run 5a+b	$0.150 \pm 0.036 \pm 0.096$	$0.029 \pm 0.058 \pm 0.104$
Run 6a+f	$-0.018 \pm 0.057 \pm 0.093$	$0.141 \pm 0.065 \pm 0.141$
Run 7a+c	$-0.004 \pm 0.038 \pm 0.095$	$0.162 \pm 0.042 \pm 0.105$
Run 8	$-0.037 \pm 0.010 \pm 0.095$	$0.196 \pm 0.011 \pm 0.106$
Run 9a	$0.019 \pm 0.059 \pm 0.093$	$-0.015 \pm 0.065 \pm 0.107$
Negative focussing mode		
Run 5c	$0.015 \pm 0.066 \pm 0.118$	$0.185 \pm 0.077 \pm 0.141$
Run 6b+c+d+e	$-0.016 \pm 0.026 \pm 0.121$	$0.120 \pm 0.029 \pm 0.139$
Run 7b	$-0.055 \pm 0.018 \pm 0.122$	$0.147 \pm 0.029 \pm 0.140$
Run 9b+c+d	$0.005 \pm 0.017 \pm 0.121$	$0.022 \pm 0.019 \pm 0.140$

- INGRID によるビーム方向の測定による off-axis 角の不確定性

INGRID にて測定された off-axis 角でのビーム方向とその不確定性について表 1 に示す。

ニュートリノビームの off-axis 角のずれは、各検出器におけるニュートリノフラックスの系統誤差の要因となる。本研究では、表 1 に示した各 Run における off-axis 角に設定したニュートリノフラックスをそれぞれ作成し、その Run 中に得た各検出器の累積統計 POT(Protons on target) による加重平均を取たフラックスを、本項目にてチューニングしたニュートリノフラックスとした。

- ターゲットステーション内の構成物の位置

ターゲットステーション内部におけるターゲット及び 3 台の電磁ホーンの設置位置によって陽子ビームがターゲットと衝突する位置やディケイボリューム内でのニュートリノビームの収束位置が変化し、結果としてニュートリノフラックスの系統誤差を生み出すので、本項目についても系統誤差を見積もった。ターゲット及び電磁ホーンの配列を水平方向及び垂直方向の両方向に 1mrad ずらした場合のジオメトリに設定したシミュレーションにて得たニュートリノフラックスを用いて系統誤差を見積もった。

18 共分散行列の作成

共分散行列は、 i 行 j 列で構成された標準偏差 σ_i 及び相関係数 ρ_{ij} はを用いて以下のように定義される。

$$V_{ij} = \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} \quad (23)$$

ここで、本研究における σ は、

$$\sigma = \frac{\sum(\Phi_{nominal} - \Phi_{uncertainty})}{\sqrt{N}} \quad (24)$$

として定義され、乱数を用いたシミュレーション回数 N で得たフラックス統計分布において不確定性を導入する前のフラックス $\Phi_{nominal}$ から不確定性項目を考慮したフラックス $\Phi_{uncertainty}$ を引いた標準偏差を表す。

共分散行列をフラックス $\Phi_{nominal,i} \Phi_{nominal,j}$ で規格化すると、

$$V_{ij}^{frac} = \frac{\sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}{\Phi_{nominal,i} \Phi_{nominal,j}} \quad (25)$$

となり、 σ 内の標本変数が nominal のフラックスからのフラックスの割合という値になり、この標準偏差を求ることで、フラックスのエネルギー中の不確定性の割合の系統誤差を見積もることができる。

本研究では、以下のように 3 種類の検出器に対して、正ニュートリノモードと 250kA での反ニュートリノモードの 2 種類でシミュレーションを得たニュートリノフラックスを 4 種類のニュートリノフレーバーごとに作成し、そしてニュートリノエネルギーを下記のように 20 個の要素に分割し、合計 $20 \times 4 \times 2 \times 3 = 480$ 個の要素での共分散行列を作成した。

- ニュートリノエネルギー: 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0, 30.0GeV の 20 ビン

- ニュートリノのフレーバー: $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$
- ニュートリノモード:電磁ホーンの電流+250kA の正ニュートリノモード (FHC) 及び-250kA での反ニュートリノモード (RHC) の 2 種類
- 検出器:ND280、スーパーカミオカンデ、WAGASCI 検出器の 3 種類

したがって、共分散行列の各ビンは、以下のようなリストになる。

- 0-19: FHC での ND280 ν_μ ビン
- 20-39: FHC での ND280 $\bar{\nu}_\mu$ ビン
- 40-59: FHC での ND280 ν_e ビン
- 60-79: FHC での ND280 $\bar{\nu}_e$ ビン
- 80-99: RHC での ND280 ν_μ ビン
- 100-119: RHC での ND280 $\bar{\nu}_\mu$ ビン
- 120-139: RHC での ND280 ν_e ビン
- 140-159: RHC での ND280 $\bar{\nu}_e$ ビン
- 160-179: FHC での WAGASCI ν_μ ビン
- 180-199: FHC での WAGASCI $\bar{\nu}_\mu$ ビン
- 200-219: FHC での WAGASCI ν_e ビン
- 220-239: FHC での WAGASCI $\bar{\nu}_e$ ビン
- 240-259: RHC での WAGASCI ν_μ ビン
- 260-279: RHC での WAGASCI $\bar{\nu}_\mu$ ビン
- 280-299: RHC での WAGASCI ν_e ビン
- 300-319: RHC での WAGASCI $\bar{\nu}_e$ ビン
- 320-339: FHC での SK ν_μ ビン
- 340-359: FHC での SK $\bar{\nu}_\mu$ ビン
- 360-379: FHC での SK ν_e ビン
- 380-399: FHC での SK $\bar{\nu}_e$ ビン
- 400-419: FHC での SK ν_μ ビン
- 420-439: FHC での SK $\bar{\nu}_\mu$ ビン
- 440-459: FHC での SK ν_e ビン
- 460-479: FHC での SK $\bar{\nu}_e$ ビン

19 結果

19.1 合計の共分散行列および相関係数行列

前述のようにビンを設定した共分散行列を、図 27 に示す。さらに、この共分散行列のうち、FHC モードに限定して表示したものが図 28 になる。

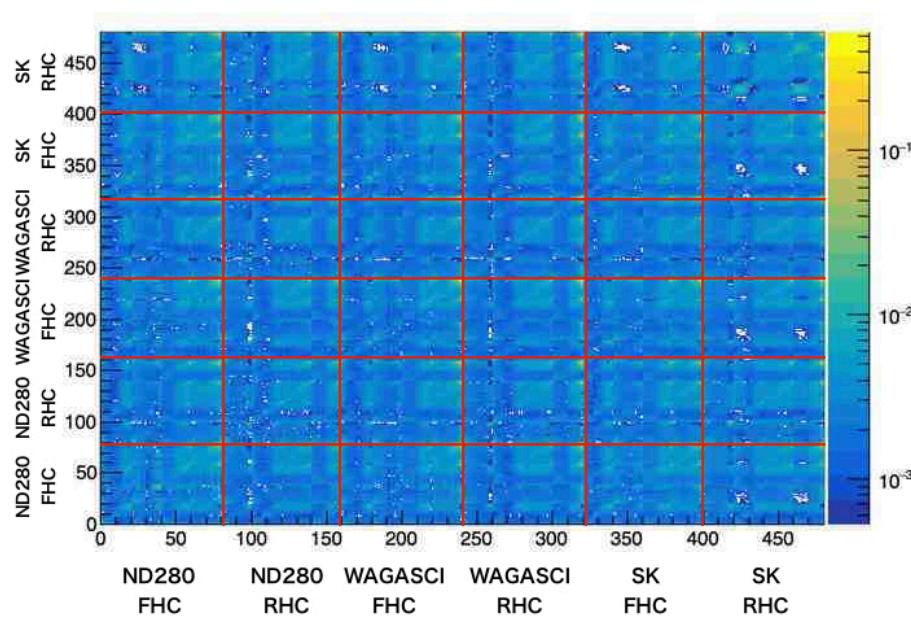


図 27: ニュートリノフラックスの不確定性の合計の共分散行列。横軸、縦軸それぞれが各検出器でのニュートリノフラックスのエネルギーのビンに対応している。

19.2 ニュートリノエネルギーごとの系統誤差の割合の見積もり

前述にて求めた共分散行列のうち、逆対角成分は、その検出器の各エネルギーでの分散を示している。この分散の平方根を取ることで標準偏差を得ることができ、この標準偏差がニュートリノエネルギーごとの系統誤差の割合である。この標準偏差を用いて、ニュートリノフラックス中の各系統誤差の割合及び系統誤差の合計を算出した。

以下に、NA61/SHINE 実験 レプリカターゲットを用いてチューニングされた WAGASCI 検出器地点でのニュートリノフラックスの系統誤差を、FHC においては図 36 に示す。

このグラフにおいて各線は下記の系統誤差の割合を表す。

- 赤:中間子の多重度に関する系統誤差の割合。
- 緑:パイ中間子の散乱反応についての系統誤差の割合。
- 黄線:二次粒子の核子の反応による系統誤差の割合。

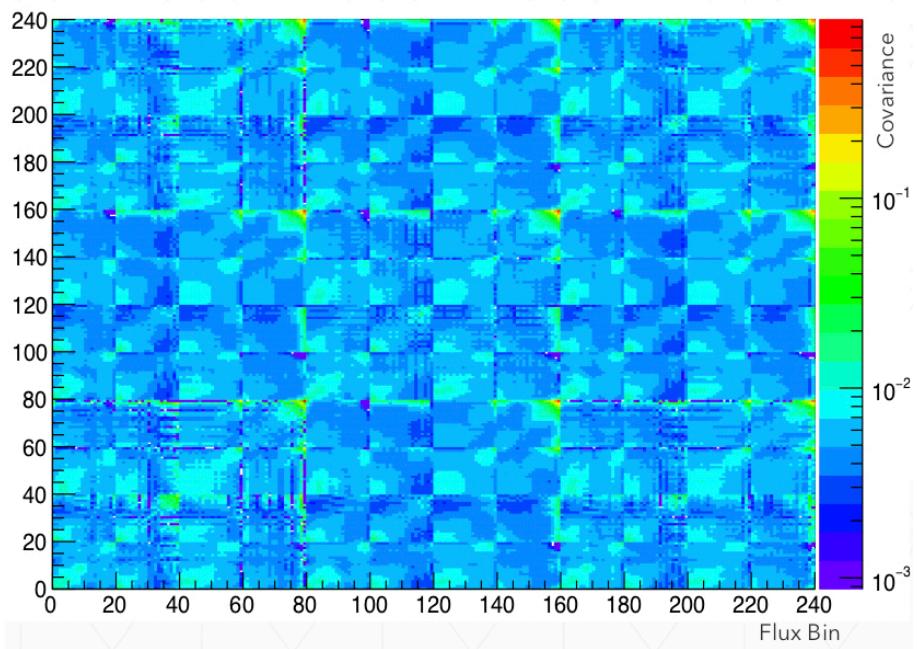


図 28: 図 27 のうち、FHC モードでのニュートリノ フラックスの合計の不確定性の共分散行列。このとき、BIN に配置については、RHC モードの BIN を除いたニュートリノ エネルギーで、80 BIN ごとに ND280、WAGASCI、SK となっている。

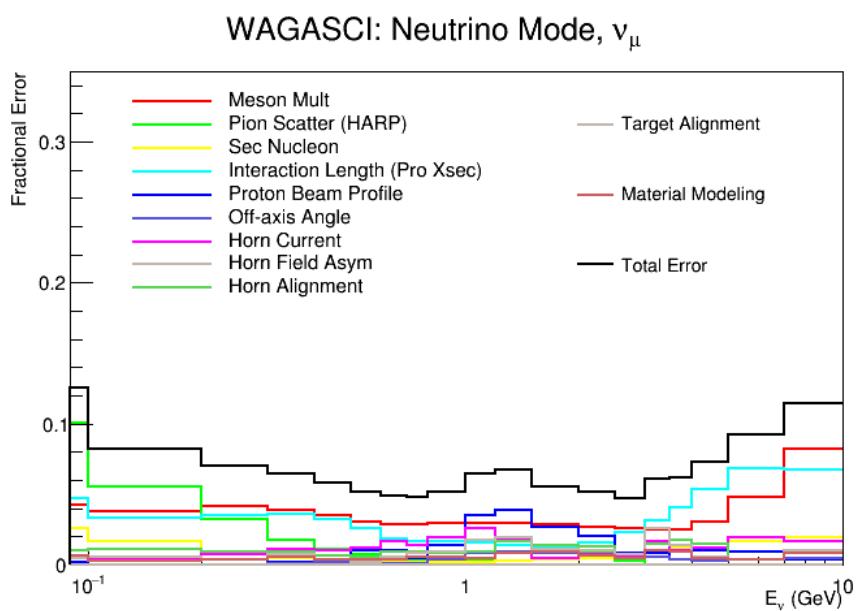


図 29: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノ エネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 FHC モード、 ν_μ

WAGASCI: Neutrino Mode, $\bar{\nu}_\mu$

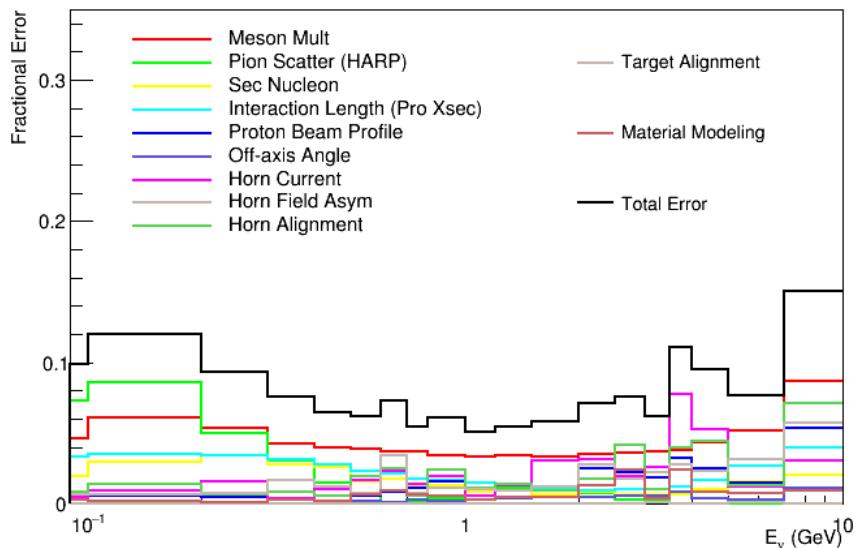


図 30: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 FHC モード、 $\bar{\nu}_\mu$

WAGASCI: Neutrino Mode, ν_e

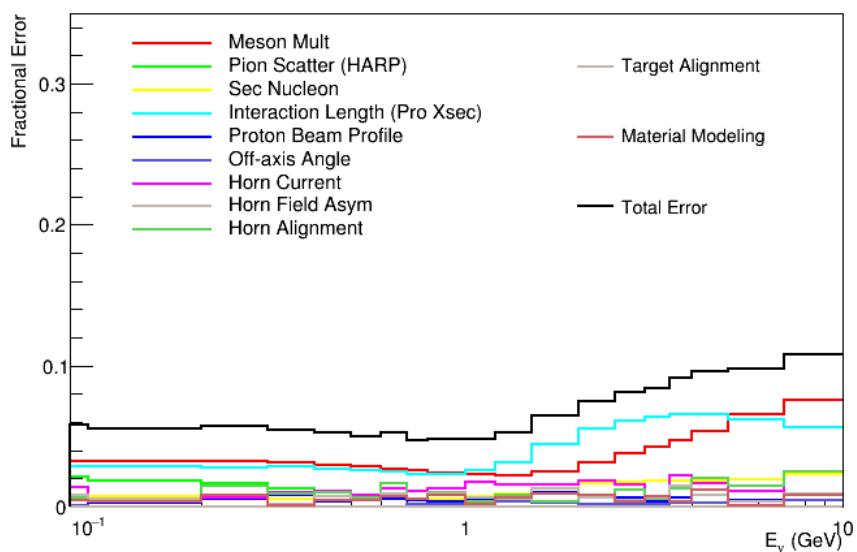


図 31: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 FHC モード、 ν_e

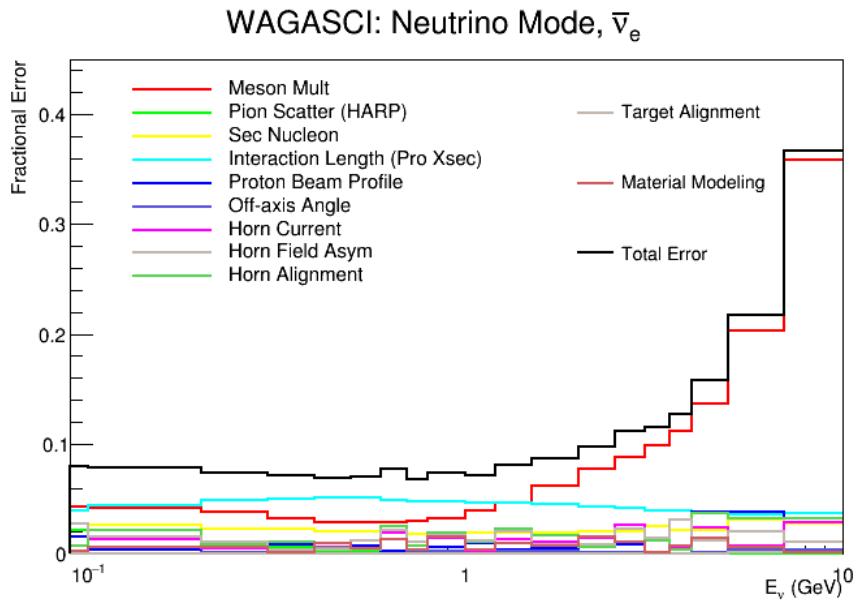


図 32: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 FHC モード、 $\bar{\nu}_e$

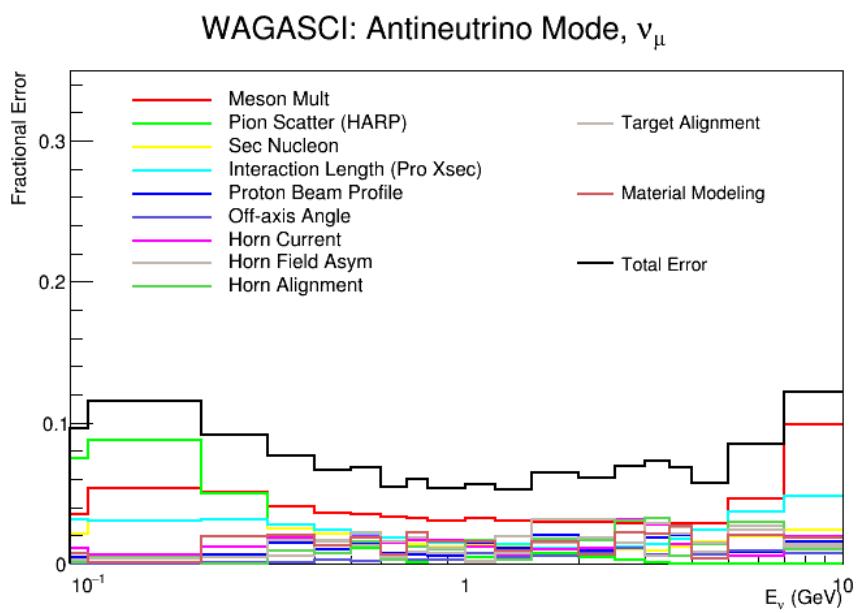


図 33: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 RHC モード、 ν_μ

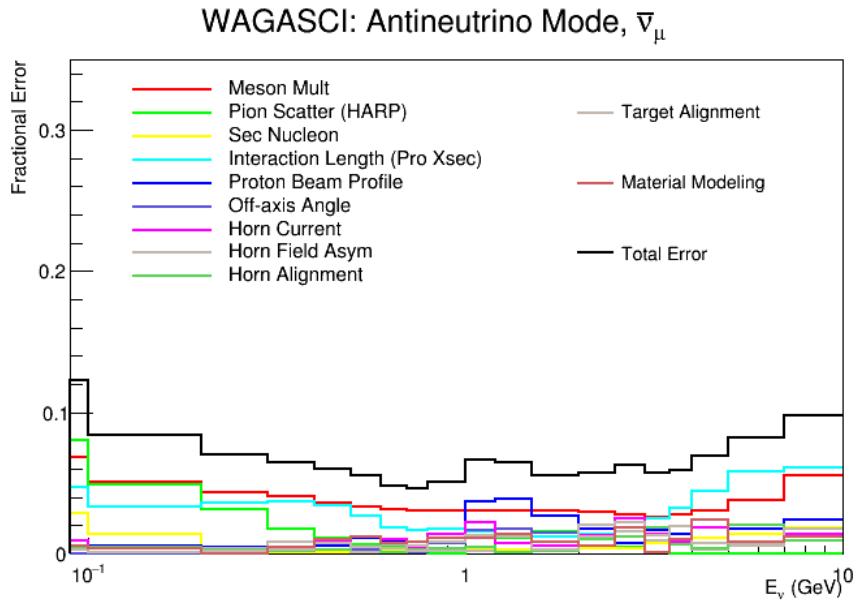


図 34: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 RHC モード、 $\bar{\nu}_\mu$

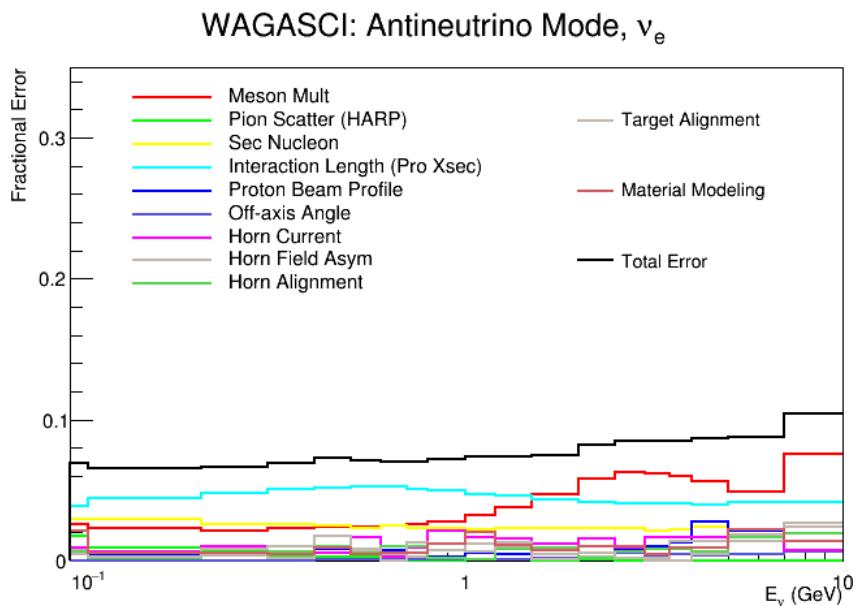


図 35: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 RHC モード、 ν_e

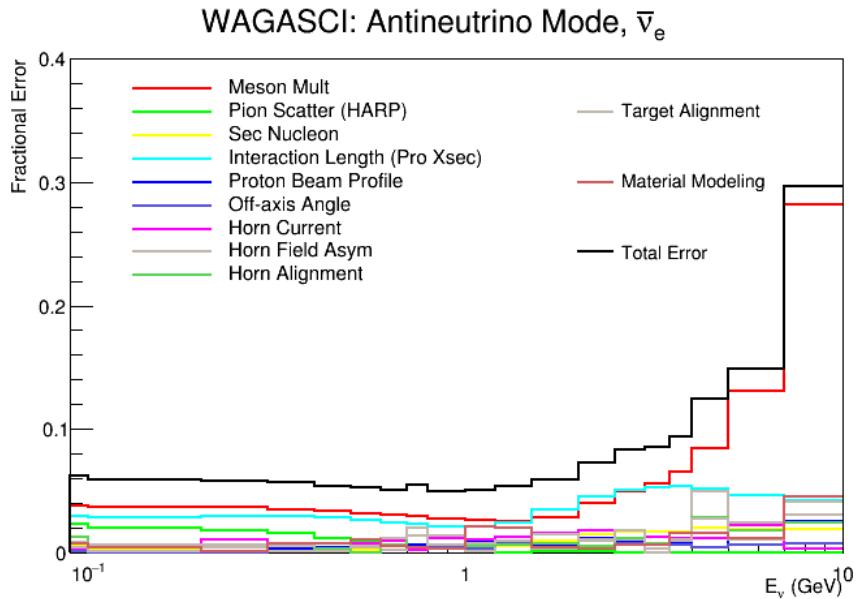


図 36: NA61 レプリカターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 RHC モード、 $\bar{\nu}_e$

- 水色線:ハドロン反応長についての系統誤差の割合。
- 青線:陽子ビームの形状についての系統誤差の割合。
- 紫線:off-axis 角についての系統誤差の割合。
- ピンク線:電磁ホーンの電流についての系統誤差の割合。
- 灰色線:電磁ホーンが作る磁場についての系統誤差の割合。
- 深緑線:電磁ホーンの角度、位置のずれについての系統誤差の割合。
- 薄灰色線:炭素標的（ターゲット）の位置のずれについての系統誤差の割合。
- 茶色線:物質モデリングについての系統誤差の割合。チューニングに用いる実験データが、炭素標的やターゲット外の物質が標的以外の物質を用いて測定された場合、その物質を該当標的にスケーリングしてチューニングに使用する際についての系統誤差の割合。

19.2.1 thin ターゲット及びレプリカターゲットを用いたチューニング結果の比較

ハドロン反応のチューニングにおいて、NA61/SHINE 実験での thin ターゲットおよびレプリカターゲットをそれぞれ用いた場合でのニュートリノフラックスのエネルギーごとの系統誤差の割合について述べる。

図 37 は、NA61 thin ターゲットをチューニングに使用した FHC モード (正ニュートリノモード) での WAGASCI 検出器地点でのニュートリノフラックスのうちの系統誤差の割合を示したグラフになる。

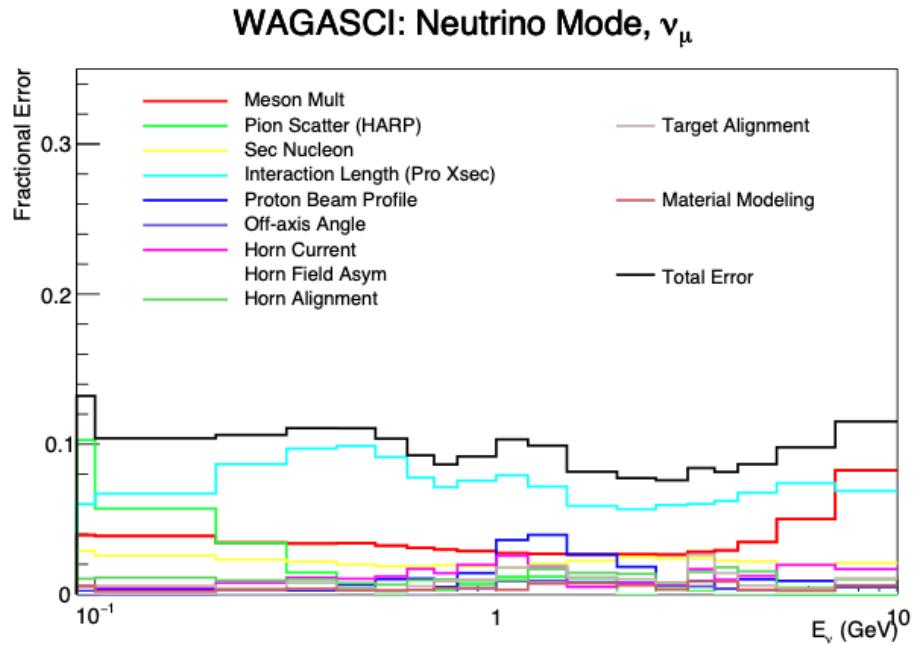


図 37: NA61 thin ターゲットを用いてチューニングされたニュートリノエネルギーのうちの各不確定性の系統誤差の割合。WAGASCI 検出器 FHC モード、 ν_μ

図 37 および図 36 の両グラフを比較したときに、最も違いが現れているのはハドロン反応長についての系統誤差の割合である。thin ターゲットを使用した場合では、グラフ上のニュートリノエネルギー全領域においておよそ 6% の割合であり、この系統誤差が全体の系統誤差の割合の大半を占めている。このハドロン反応長についての系統誤差、レプリカターゲットを使用した場合は、ニュートリノフラックスのエネルギーのピーク領域を越えた高エネルギー側においては NA61 thin ターゲットを用いた場合とほとんど変わらないが、それ以外のエネルギー領域では 2~4% まで低減できることが分かった。NA61 レプリカターゲットは T2K 実験にて実際に使用されているターゲット及び FLUKA、JNUBEAM にてモデリングされているターゲットと同じジオメトリに設定されたものであり、thin ターゲットでは測定することが出来なかった、ターゲット内部でのハドロン反応が何回起こるか、どれだけの確率で起こるかという実データを収集することができたため、そのデータをチューニングに用いることで系統誤差を大きく削減できた。

第 VI 部

Wall MRD の建設

本章では、Wall MRD の構造体の建設、シンチレータの挿入やエレクトロニクスの取り付け、宇宙線を用いた試験テストについて述べる。ロシアの INR (The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences) にて製作されたプラスチックシンチレータを 2017 年 7 月横浜国立大学で再度性能試験を行った。その後、同年 11 月下旬、1 台目の Wall MRD の鉄構造体を搬入・組み立てを行った。組み立てた後、シンチレータを鉄層の間に挿入、エレクトロニクス及び MPPC の取り付け、最後に宇宙線を用いたテストを行い、Wall MRD の性能を評価した。2018 年 3 月から 2 台目の Wall MRD の建設にとりかかり、2018 年 7 月に 2 台の検出器を J-PARC に搬出し、NM 棟 B2 フロアに設置する予定である。したがって、本論文では 2 台の Wall MRD の建設について述べる。

20 Wall MRD の概要

Wall MRD とは、WAGASCI 検出器に設置される MRD である。高さ 1.8 m、長さ 1.6 m、厚さ 3 cm の鉄板が 11 層とシンチレータ 10 層からなり、シンチレータ層は高さ 1.8 m、長さ 0.2 m、厚さ 7 mm のプラスチックシンチレータを 8 枚で構成されており、1 台につき総重量は約 8 トンである。重量を約 8 トンにおさめた理由は、検出器建設後に J-PARC に搬出し NM 棟 B2 フロアに設置する際に使用できるクレーンの許容荷重が 10 トンのためである。WAGASCI 検出器から大角度方向に飛んだ二次粒子（主に μ ）に対しての粒子識別と運動量測定の精度を向上させることが Wall MRD の目的である。このシンチレータは薄さに対して幅が大きいので、直径 1.0 mm の波長変換ファイバー (Y-11 (S タイプ)) を波状に埋め込んで用いる。その様子を図 38 に示す。その

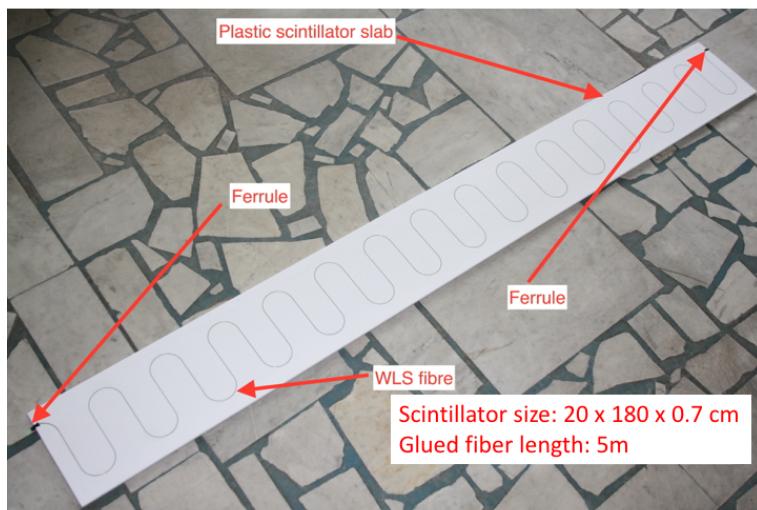


図 38: sideMRD にて用いるプラスチックシンチレータ

ため、波長変換ファイバーが長くなるので、Wall MRD に用いるシンチレータに関しては MPPC の両側読み出しで用いる。MPPC は、浜松フォトニクス製の S13081-050CS(X1) を用いた。

21 Wall MRD の構造及び建設作業

2017年11月に1台目、2018年3月に2台目のWall eMRDの構造体部分の部品が横浜国立大学に搬入され、構造体の組み立てが行われた。Wall MRDの鉄構造体は、以下の部品で構成されている(表2及び図39、40)。検出器の制作図面及び組み立て手順書はフランスのLLR(Laboratoire Leprince-Ringuet)の共同研究者(Oscar, Alain, Thomasら)が作成し、構造体の部品のうちサイズが大きな部品に関しては日鈴精機工業で製造し、その他の部品はLLRで製造後、日本に送られた。

表2: sideMRD 鉄構造体の部品

図面番号	参照番号	名称	数量(1台)
WGI-MD-03-001	3	Right Foot	1
WGI-MD-03-002	3	Left Foot	1
WGI-MD-03-003	5	Rear Plate	1
WGI-MD-03-004	1	Front Plate	1
WGI-MD-03-005	4	Central Plate	9
WGI-MD-03-006	2	Side Plate	2
WGI-MD-03-007	15	Spacer H Beam	2
WGI-MD-03-014	6	Spacer 1	16
WGI-MD-03-015	7	Spacer 2	16
WGI-MD-03-016	8	Spacer 3	4
WGI-MD-03-017	16	Lifting Bar	2
WGI-MD-03-020	9	Vertical Foot	2
WGI-MD-03-021	10	H Position Foot	2
WGI-MD-03-022	11	Rotating Part	2
WGI-MD-03-023	12	Interface Rotating	2
WGI-MD-03-024	13	Washer	2
WGI-MD-03-025	14	Rotating Shat	2

この後の作業(シンチレータの挿入、エレクトロニクスの取り付け)の利便性や搬出のことを考慮して、横浜国立大学にて行われる作業は全てWall MRD構造体が地面に水平に置かれた状態で行った。

以下に、組み立て手順を示す。

- (1) Foot部分、Rear Plateがあらかじめ取り付けられた状態で、2.8トンクレーンを用いてワーキングルームのシャッター側から建設作業地点へ移動させた。
- (2) Side Plate 2枚を取り付けた。
- (3) 事前にSpacerが取り付けられたCentral Plate 8枚をRear Plateの上に順番に置いてゆき、Side Plateボルトで留めた。このとき、各Central Plateの荷重は4つのSpacerにほとんど集まつておらず、最終的にFoot部分にて荷重が支えられることになり、Side Plate部分における荷重負荷はほとんどない。

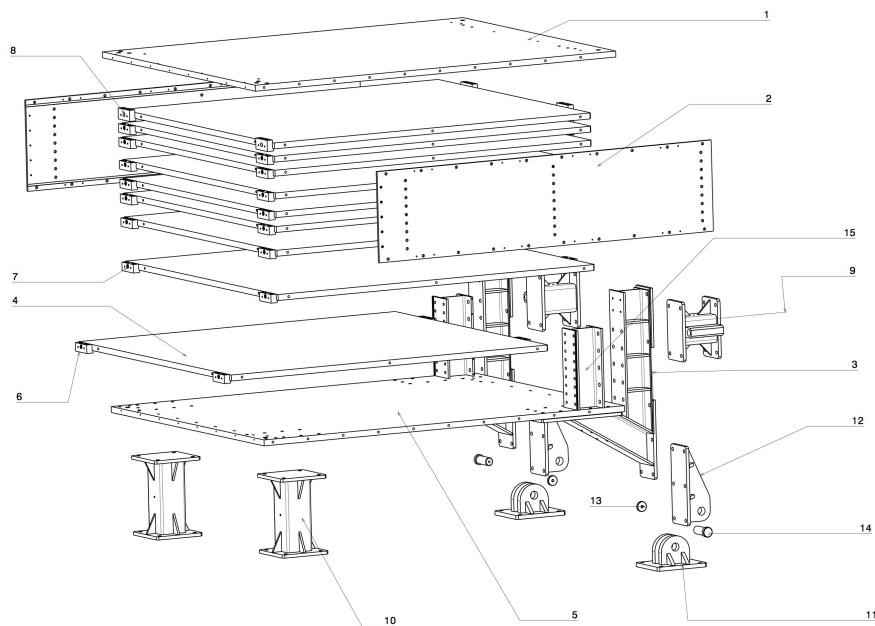


図 39: sideMRD 構造体の設計図 1

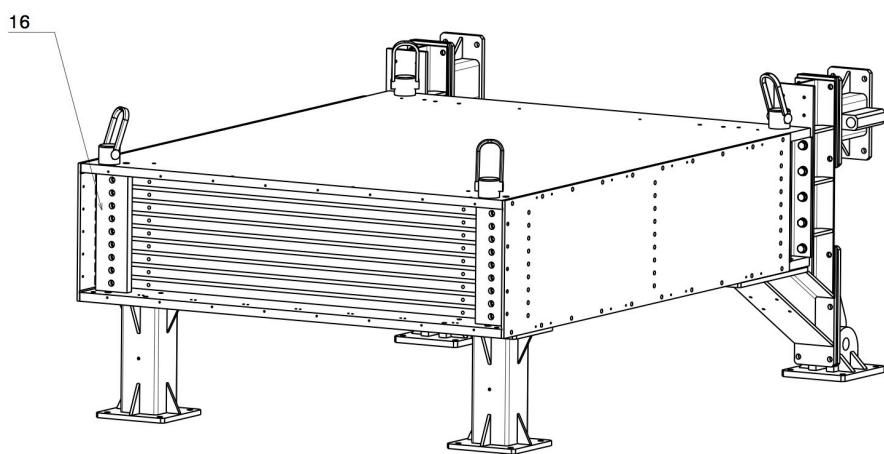


図 40: sideMRD 構造体の設計図 2

- (4) Front Plate を置き、全体をボルトで固定した。最後に、Spacer H Beam と Front Plate、Rear Plate 間が接触する箇所を溶接で固定した。

組み立て完了後の構造体は図 41 である。



図 41: 組み立て直後の Wall MRD 構造体

このあと、鉄の層の間に挟まっている Spacer を取り除き、鉄層の自重でシンチレータ層の幅が変化しないように指定箇所に Lifting Bar を取り付けた。このとき、一度に全ての Spacer を取り除くと、13 mm の隙間が鉄板の荷重により狭くなり、かつ Side Plate における荷重が集中するので、Spacer を1つずつ取り外して Lifting Bar を取り付けた。組み立て後の Wall MRD の構造体の各長さを図 42 にまとめた。

22 プラスチックシンチレータの挿入

Wall MRD 構造体の完成後、front plate と rear plate の間の central plate で仕切られた隙間 10 層に、プラスチックシンチレータを 1 層につき各 8 枚挿入する。隙間は 13 mm、シンチレータの厚さは 7 mm なのでそのまま挿入すると余分に 6 mm の隙間が生じてしまい、J-PARC への運搬、NM 棟にて検出器を垂直に立てる際や地震などの振動によりシンチレータが隙間の中で動き、ファイバーに傷が付き光量が変化するといった問題が懸念されていた。それらの対策として、シンチレータの両側面に厚さ 3 mm のスポンジゴム (EPDM 製、厚さ 3 mm、幅 20 mm、長さ 1.8 m) を両端に 2 枚貼り、更に、挿入におけるスポンジゴムと plate 間の摩擦の軽減及びシンチレーションファイバーの保護を考慮して、シンチレータをシートで巻いた状態で挿入を行うことにした。

この際に使用したシートは、デュポン社のタイベックハウスラップ (Tyvek sheet) であり、透湿性、防水性、引っ搔きや引っ張りに対する強度をもつ。シンチレータを挿入する層の全体の幅

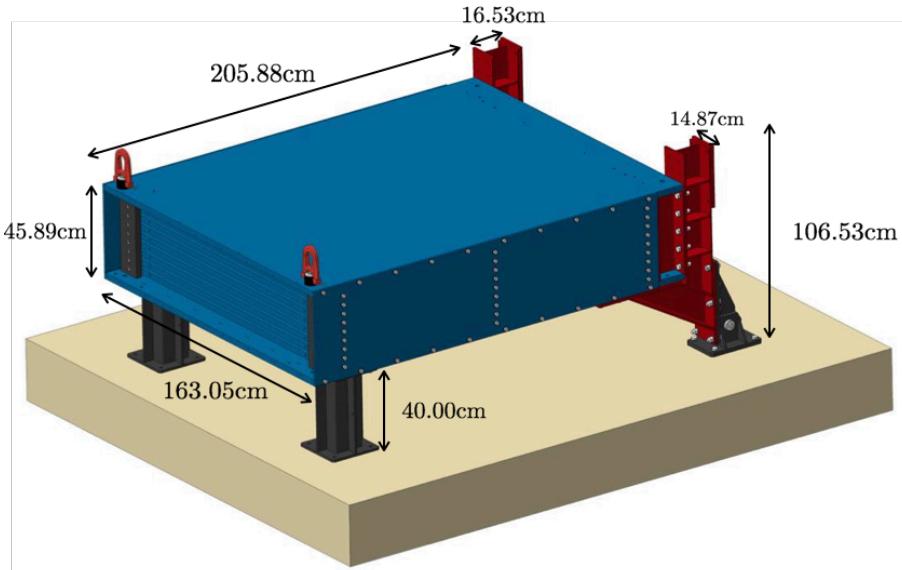


図 42: Wall MRD 構造体のジオメトリ

は 1610 mm であり、幅 200 mm のシンチレータを 8 枚挿入すると理想では 10 mm の猶予があるが、巻いたシートのシワや挿入位置のズレなどで猶予が足りなくなる恐れがあるので、図 43 のような形状のシート（①を②の上に折りたたんでシンチを包む）を使用して幅の方向に対してのシートのしわ寄せが来ないようにした。

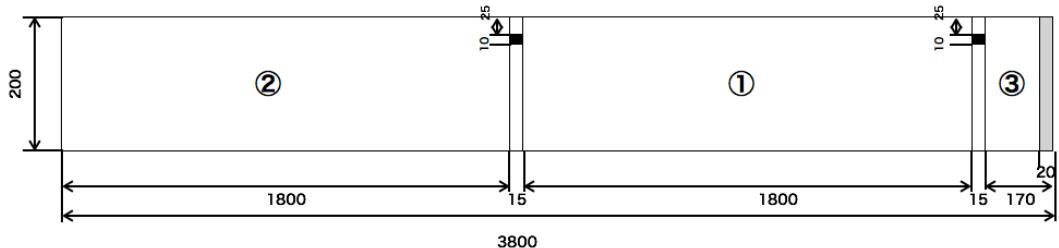


図 43: シートの形状

黒塗りの部分はシンチレータと MPPC とのコネクションのための穴であり、灰色の部分はシートを留めるためのシールである。スポンジゴムを貼ったシンチレータを 1 面の上に置き、2 面をシンチレータの上にかぶせ、その上に 3 面をかぶせシールで留める、という手順で挿入前のシンチレータを作成した。10 層 80 枚全てのシンチレータを挿入した構造体は図 44 である。

このままの状態では、検出器を垂直に起こしたと際にシンチレータが bottomo 側から滑り落ちてしまうので、構造体の上下面に Scintillation Support Bar (図面番号 WGI-MD-03-01-009) を取り付け、シンチレータを上下方向に対して固定した (図 45)。

23 エレクトロニクスの取り付け

シンチレータの挿入後、構造体の上下に、データ読み出し用のエレクトロニクスを取り付けた。まずは、各シンチレータに取り付ける MPPC のセッティングについて述べる。



図 44: シンチレータ挿入後の構造体



図 45: Support Bar 取り付け後の構造体

23.1 MPPC のセッティング

MPPC とエレクトロニクスは、後述する Single MPPC Board の入力チャンネルから同軸ケーブル、PCB ボードを通して接続される。さらに、今回使用するプラスチックシンチレータのファイバー面と MPPC の受光面を固定するために、MPPC の足側ににスポンジを装着したのち、オプティカルコネクタを着用する。Single MPPC Card は構造体の上下面の中央部に取り付けるので、中央部から最も遠いシンチレータのファイバーのコネクタに MPPC が取り付けられるような長さを用意しなければならない。図 46 より、最長の長さは約 90 cm と見積もられるので、長さ 1.1 m の同軸ケーブル (高機能無線、U.FL-2LP-068N1-A-1100) を用意した。

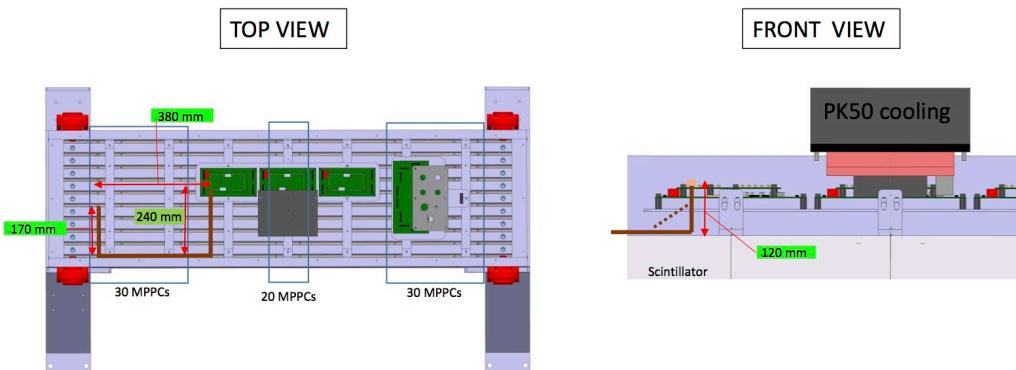


図 46: 同軸ケーブルの配線予想図

23.2 使用する DAQ システム

今回の sideMRD 検出器にマウントされる DAQ(データ収集) システムは以下のエレクトロニクスで構成されている。図 47 は、WAGASCI 検出器にて使用されている DAQ システムであり、今回の Wall MRD 検出器においても同様の DAQ システムを使用した。

- ASU (Active sensor Unit)
SPIROC(SiPM Integrated Rand Out Chip) という、フランスのオメガ社が開発した、MPPC の信号のアナログ処理、デジタル化、デジタルパートによる管理、PC に転送までを行う ASIC が搭載された基板であり、MPPC からの信号を読み出す。
- Interface
MPPC や各基板に電圧を供給する基板であり、1 つの DIF と 4 つの ASU と接続可能である。
- DIF (Detector Interface)
SPIROC2D を操作するための FPGA が搭載されている。PC 側からの信号を SPIROC に送信し、その応答信号及び出力データを得る役割をもつ。
- GDCC (Giga Data Concentrator Card) 及び CCC (Clock and Control Card)
GDCC は PC と DIF 間の信号の伝達を行う FPGA が搭載されている基板であり、CCC は GDCC に clock 信号を送信する。

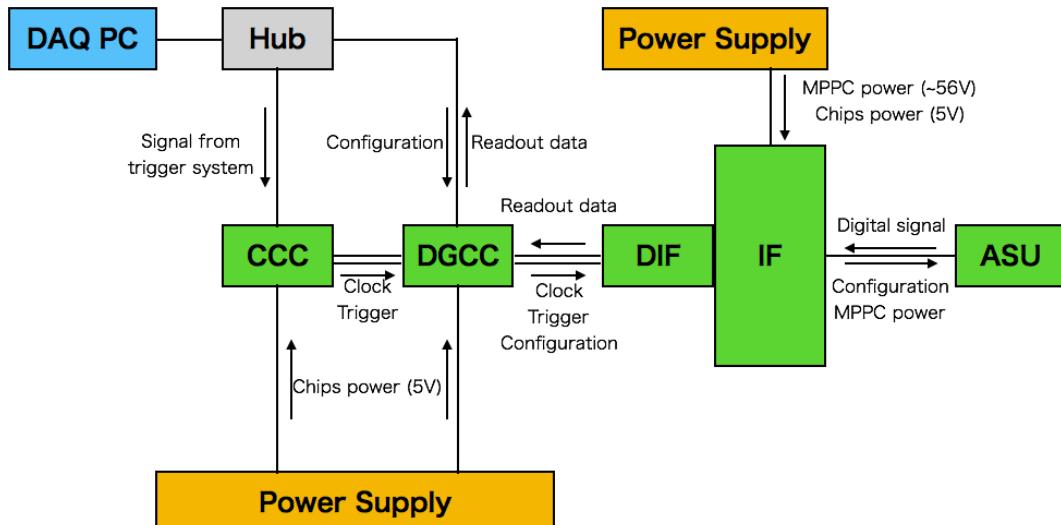


図 47: WAGASCI 検出器及び Wall MRD 検出器の DAQ システム

- Single MPPC Card

Single MPPC Card(図 48) はシングルタイプの MPPC と ASU 間と接続するための基板であり、1 枚につき最大 32 ch の MPPC が接続可能である。

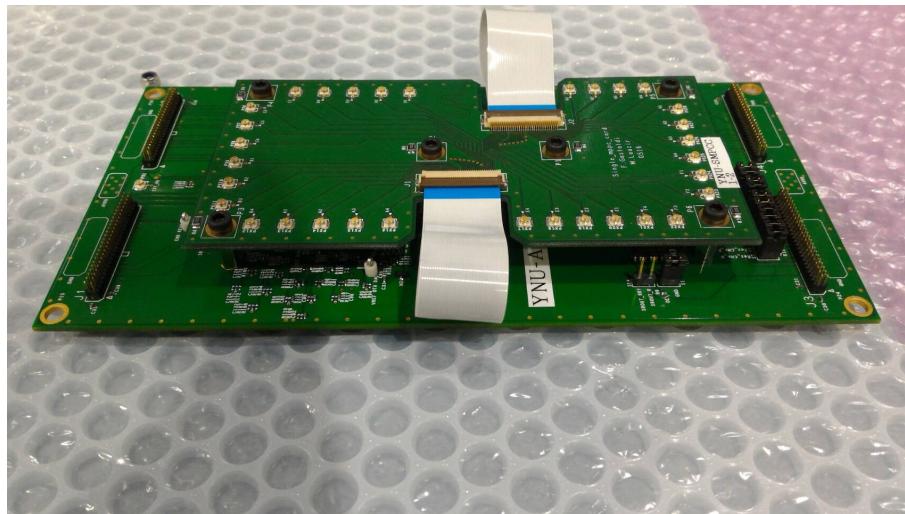


図 48: ASU に接続された Single MPPC Card (上部の基板)

23.3 エレクトロニクスのマウントの準備

以下にエレクトロニクスのマウントを行うための準備作業の手順を説明する。

- (1) Wall MRD top 側の横側面に Top Cover Corner (図面番号 WGI-MD-03-01-010)、top 側の横側面に SMRD H Bar (図面番号 WGI-MD-03-01-008) を取り付けた。
- (2) top 側、bottom 側の外周部分に Spacer とスポンジゴムを接着した。

- (3) Scintillator Support Bar にスペーサを取り付け、その上に IF、DIF を支えるための Plate と ASU、Single MPPC Board を支えるための Plate を取り付けた。

MPPC の取り付け、基盤の取り付けを終えると最終的にはエレキボックスとして Top Cover 及び Bottom Cover を取り付ける。各 Cover には、IF が取り付けられる位置と中央部(真ん中の ASU と Single MPPC Card が位置する場所)が長方形方に 2箇所くり抜かれており、そこにはそれぞれ Patch Panel というケーブル類の出入り口と、クーリングユニットというエレキボックス内部を冷やすための機器を取り付けるためのものである。

24 J-PARC への搬出及び動作確認試験

前述のように、横浜国立大学にて Wall MRD の鉄構造体の組み立て、プラスチックシンチレータの挿入、エレクトロニクスの取り付けを行い、検出器として完成したのち、これら 2台の検出器を J-PARC NM 棟へ搬入した。図 49 及び図 50 が、搬入の様子である。その後、Wall MRD の横浜国立大学、J-PARC への輸送中にプラスチックシンチレータ、波長変換フィアバー光センサー、かつエレクトロニクスに破損がなく正常に機能しているかを確認するために、J-PARC NM 棟にて、2台の Wall MRD の MPPC のゲインの測定及び宇宙線によるプラスチックシンチレータの平均光量の測定を行なった。図 51 は、この動作確認試験の様子である。



図 49: 横浜国立大学から J-PARC へ搬入される Wall MRD の様子。

24.1 搬出前後の MPPC の増幅率(ゲイン)について

まず、Wall MRD を J-PARC に搬出する前後においての MPPC のゲインを測定し、輸送前後において変化が無いことを確認した。この動作試験においては、エレキボックス内部のクーリングユニットを稼働させ一定の温度を保った状態で測定を行なった。各チャンネルのゲイン測定においては、MPPC のダークカレントによる信号のみを検出するように設定して測定を行なった。



図 50: J-PARC NM 棟に到着し、10t クレーンにより降下されている Wal MRD。



図 51: J-PARC NM 棟にて 2 台の Wall MRD の動作試験を行なわれている様子。

2台のWall MRD の320チャンネルについて、それぞれのADC分布を作成し、1 p.e. 分布のピーク値からペデスター分布のピーク値を引くことでそれをゲインとした。今回のゲインの見積もりにおいては、前回のWAGASCI検出器のゲインとして設定して40 ADC count / p.e. をWall MRD のゲインとしてその値に統一することができるかどうか試験を行なった。

図52～55までが、各々のWall MRD 内での各面でのゲイン分布を示している。

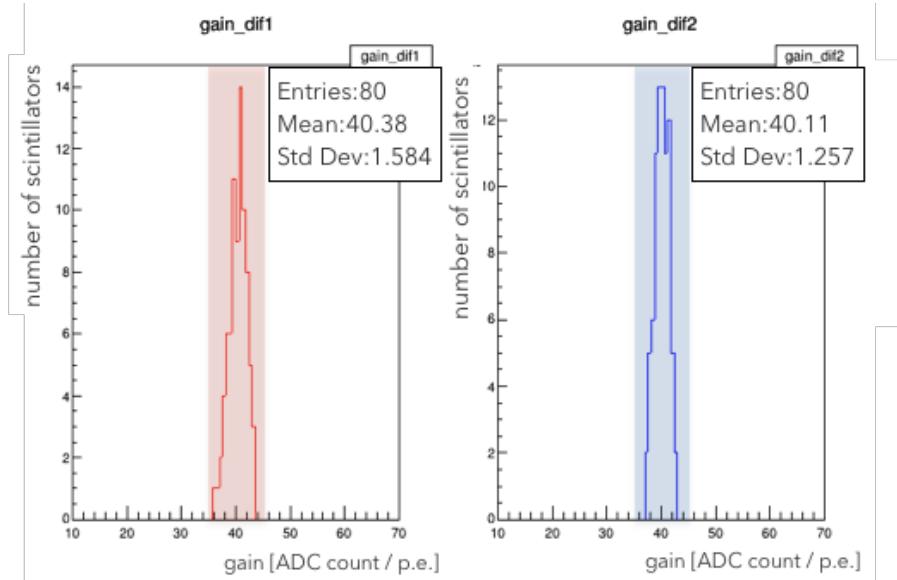


図 52: J-PARC 搬出前の Wall MRD(1台目) のゲイン分布。左図が Top Side、右図が Bottom Side でそれぞれ 80 チャンネルのゲインで、色付けされた領域は平均値から 10% の範囲内を示している。

また、これらの試験の結果を表3にて示す。

表 3: 各 Wall MRD での Top Side 及び Bottom Side でのゲイン分布。

	Wall MRD Side	平均値 [ADC count / p.e.]	Std Dev	エレキボックス内温度 [°C]
搬出前	1st Top	40.38	1.584	20.8
搬出前	1st Bottom	40.11	1.257	20.8
搬出前	2nd Top	39.86	1.405	21.7
搬出前	2nd Bottom	39.25	1.532	21.7
搬出後	1st Top	40.59	1.639	20.3
搬出後	1st Bottom	40.33	1.381	20.3
搬出後	2nd Top	40.67	1.392	20.2
搬出後	2nd Bottom	41.78	1.542	20.2

表3から、搬出前後どちらの2台のWall MRD ともにゲインのばらつきを10%に収め、その平均値を40 ADC count / p.e. に設定することに成功した。

J-PARC 搬出前は横浜国立大学研究推進機構ワーキングルーム、搬出後はJ-PARC NM棟1階にて測定を行なったが、測定場所の空調による温度差により、クーリングユニットを稼働してもエレキボックス内部の温度を一致させることができなかった。MPPCには温度依存性があり、一

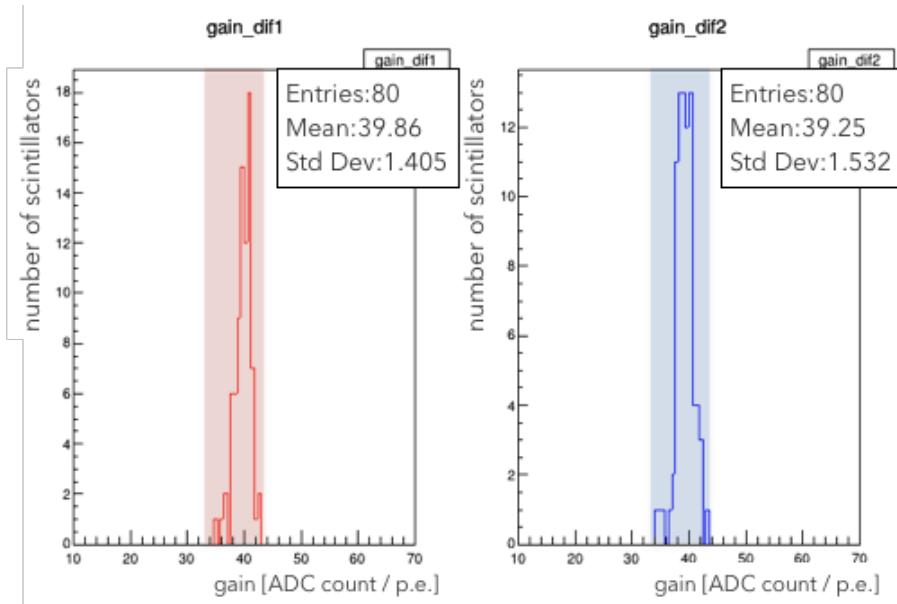


図 53: J-PARC 搬出前の Wall MRD(2 台目) のゲイン分布。左図が Top Side、右図が Bottom Side でそれぞれ 80 チャンネルのゲインで、色付けされた領域は平均値から 10% の範囲内を示している。

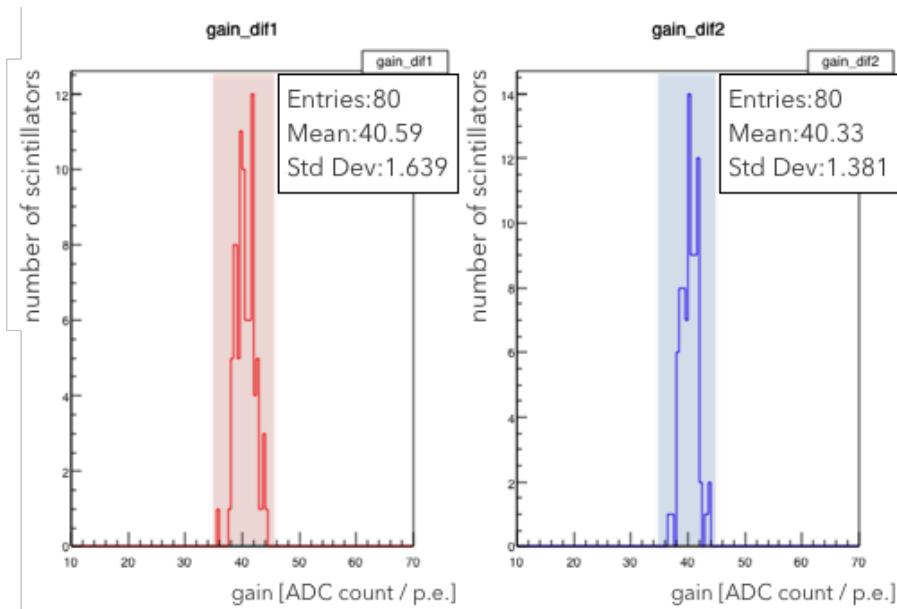


図 54: J-PARC 搬出後の Wall MRD(1 台目) のゲイン分布。左図が Top Side、右図が Bottom Side でそれぞれ 80 チャンネルのゲインで、色付けされた領域は平均値から 10% の範囲内を示している。

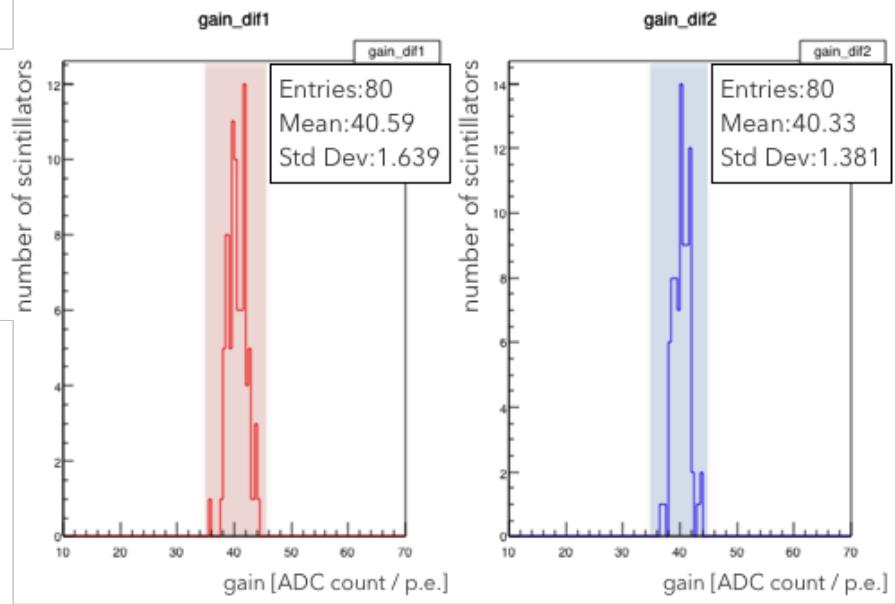


図 55: J-PARC 搬出後の Wall MRD(2 台目) のゲイン分布。左図が Top Side、右図が Bottom Side でそれぞれ 80 チャンネルのゲインで、色付けされた領域は平均値から 10% の範囲内を示している。

一般的に温度が高いとゲインは小さくなるので、エレキボックス内部の温度が低かった搬出後の測定によるゲインの方が全体的に大きくなつたと考えられる。

24.2 イベントディスプレイの描画及び平均光量について

次に、前述にて求まった搬出後のゲインを用いて、ダークノイズ以外の高光量信号の検出による宇宙線の通過を確認できるイベントディスプレイを描画した。Wall MRD は、Top Side 及び Bottom Side の両面でイベントディスプレイの描画が可能である。1 つのプラスチックシンチレータの両端に各面にチャンネルが対照的に配置しているので、ある同一イベントディスプレイでは、Top Side 及び Bottom Side のイベントディスプレイはヒット位置が同じような描画になる。

今回は、Wall MRD を水平状態に設置した場合の Top Side、Bottom Side の面をそのまま描画している。このディスプレイ中に、ヒットしたチャンネルのシンチレータを青色で表示し、そのチャンネル下にそのときの光量を表示した。このとき、光量は以下のように計算した。

$$\text{光量 } L.Y. (\text{Light Yield}) = \frac{\{(\text{ヒット信号の ADCcount}) - \text{そのチャンネルの pedestal 分布のピーク値}\}}{\text{gain}} \quad (26)$$

この結果、宇宙線測定において観測されたあるイベントディスプレイを図 56 に示す。

図 56 では、Top Side 及び Bottom Side のイベントディスプレイにてヒットしたシンチレータは、Top Side の光量 16.5 p.e. にヒットしたシンチレータを除いてすべて同じであったことがわかる。これは、1 つの宇宙線が Wall MRD の構造体内を通過したことが確認できる。また、Top Side 及び Bottom Side 両面で同じヒット位置だったチャンネルの光量を比較すると、ほぼ全てのチャンネルにおいて Top Side での光量が大きいことがわかる。Wall MRD に挿入したプラスチックシンチレータは末端のチャンネル受光場所までに光量が減衰し、シンチレータ中央を通過した場合

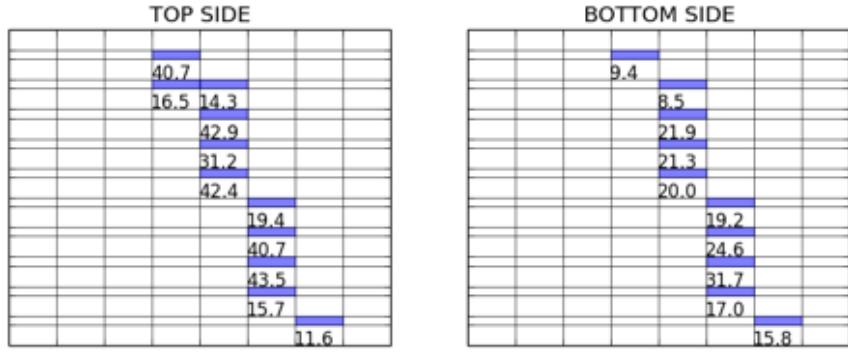


図 56: Wall MRD によるイベントディスプレイ。1つの宇宙線が構造体を通過したことがわかる。

の光量はおよそ 20 p.e. であることがわかっている [26]。したがって、この宇宙線は Wall MRD 構造体の中心より Top Side 側を通過したことがわかる。

SPIROC 2D はヒットの時間情報をナノ秒オーダーで記録できる。この時間情報を用いることでシンチレーターの長さ方向のヒット位置を再構成でき、3次元の軌道の描画が可能となる。しかし、この宇宙線測定時点では使用エレクトロニクスのうちの DIF 及び CCC の時間情報取得システムに問題があり、問題解決のためのこれら基板内の FPGA のファームウェアの更新前であったため、3次元イベントディスプレイを描写することができなかつた。しかし、今後、ファームウェア更新を行うことで Wall MRD のイベントディスプレイの描画が期待される。

次に、これらののような宇宙線の軌道を描画できたようなイベントのみに対して、それぞれヒットしたシンチレータの光量の平均値を見積もったのが、図 57 及びである。そして、これらヒストグラムの数値をまとめたものが表 4 になる。

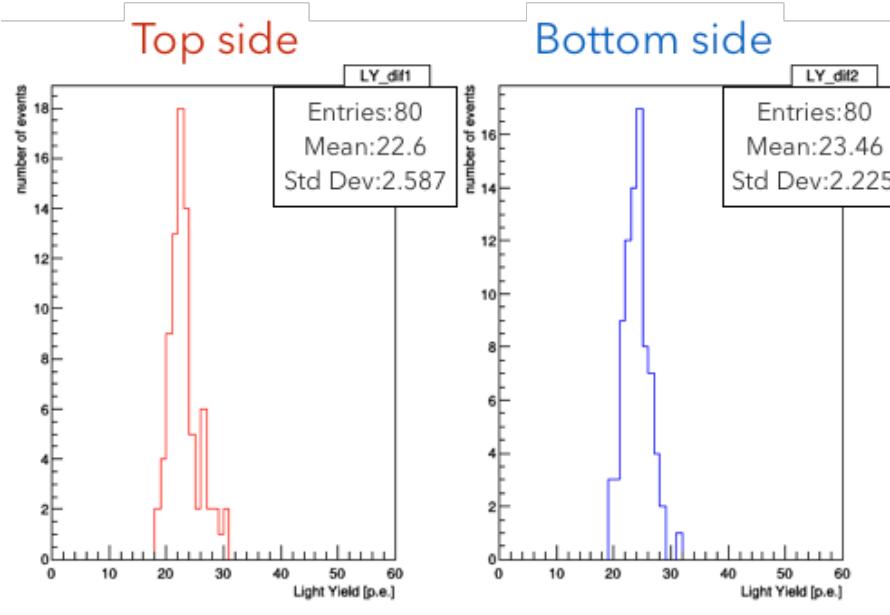


図 57: 宇宙線イベントにてヒットした1台目 Wall MRD のシンチレータの平均光量分布。

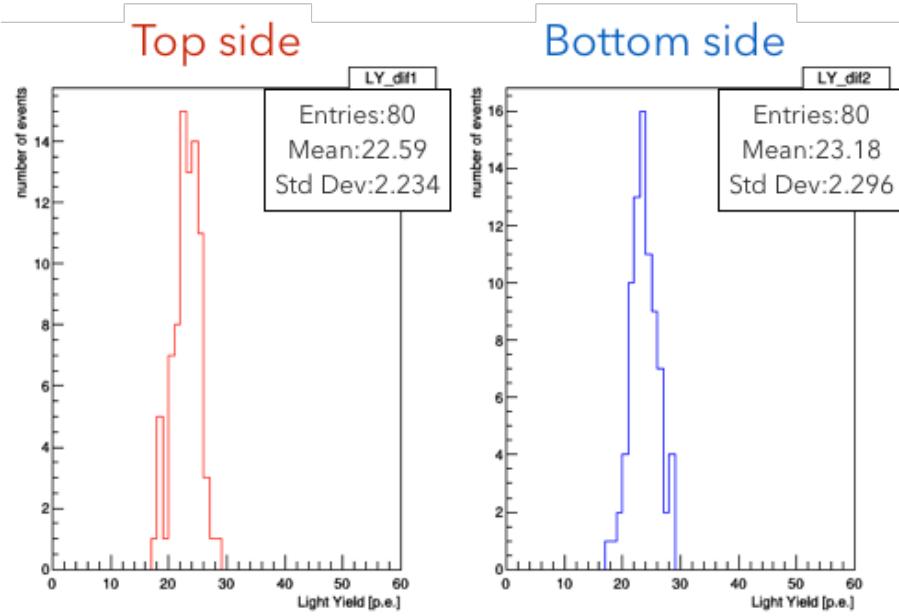


図 58: 宇宙線イベントにてヒットした 2 台目 Wall MRD のシンチレータの平均光量分布。

表 4: 各 Wall MRD での Top Side 及び Bottom Side での平均光量分布。

Wall MRD Side	平均値 [p.e.]	Std Dev
1st Top	22.6	2.587
1st Bottom	23.46	2.225
2nd Top	22.59	2.234
2nd Bottom	23.18	2.296

この平均光量分布から、平均光量は 22 ~ 24 p.e. であることがわかった。2017 年 7 月の Wall MRD の組み立て前に行われたプラスチックシンチレータの大量試験の結果では、シンチレータの中央部を通過する宇宙線の平均光量がおよそ 20 p.e. であることがわかっている。表 4 にて示された平均光量は、Wall MRD 内を通過する全ての宇宙線イベントのヒット光量であるので、大量試験の結果と 2 ~ 4 p.e. 異なるが、この違いはイベントの選定の違いによるものだと考えられる。したがって、Wal MRD に使用しているプラスチックシンチレータは大量試験の際とほぼ同じ光量であり、鉄層間への挿入作業や J-PARC への運搬作業において、波長変換ファイバーなどの破損により光量が大きく変化していないことを検証できた。

第VII部

T2K-WAGASCI実験のビーム測定に向けた準備作業

J-PARC NM 棟地下 2 階への検出器群の設置後、本測定に向けた様々な試験を行なった。

25 フルセットアップでの実験場所の検出器群について

図 59 がフルセットアップでの実験場所の各検出器の位置である。前回のセットアップ時では、Proton Module, WAGASCI, INGRID のみがニュートリノビーム方向に順に設置された構成であったので、主にビームの下流方向に放出された荷電粒子を検出して反応断面積を測定していた。今回のフルセットアップでは、2 台の WAGASCI, 2 台の Wall MRD, Baby MIND, Proton Module, NINJA 検出器で構成されている。

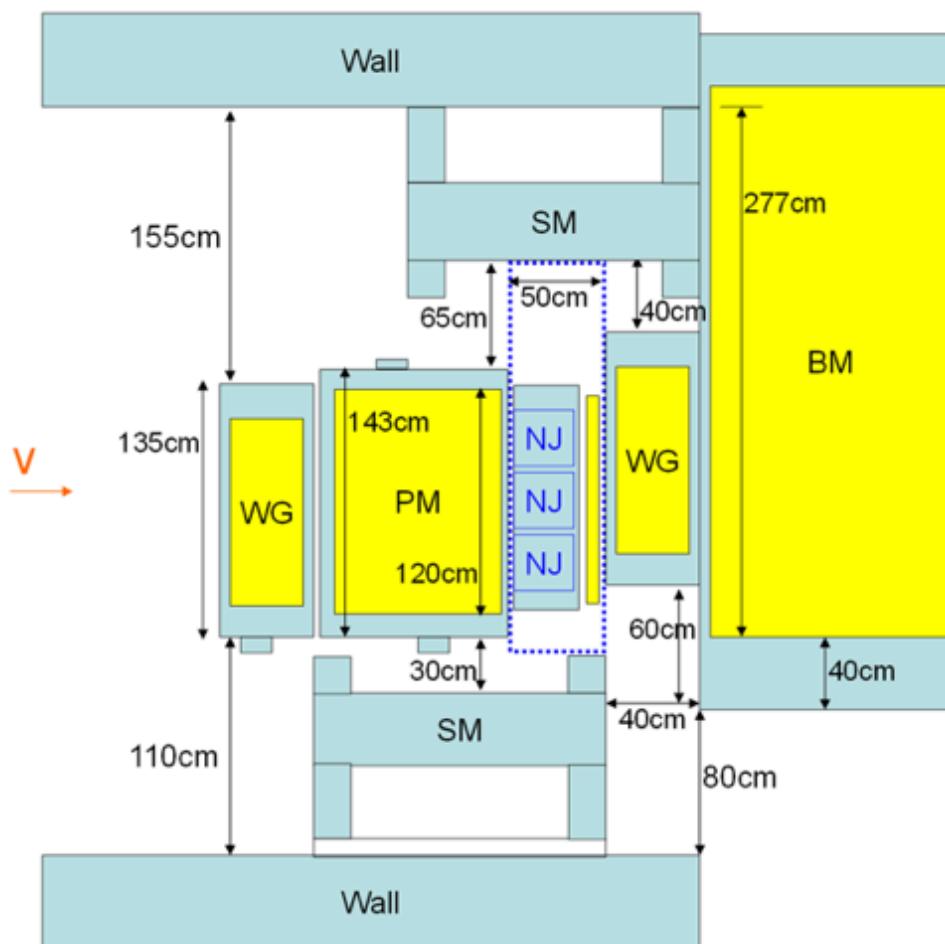


図 59: フルセットアップでの各検出器の位置

この検出器群の設置位置は、ニュートリノ反応における大角度方向に運動する荷電粒子（ミュー

オン)のアクセプタンスが大きく、イベント数をできるだけ多くなるようにシミュレーションを行った結果によって決めた。

26 WAGASCI、Wall MRD の実験場所へのインストール

2018年12月に2台のWall MRDがNM棟地下2階へ移動された。そのときの様子を図60に示す。

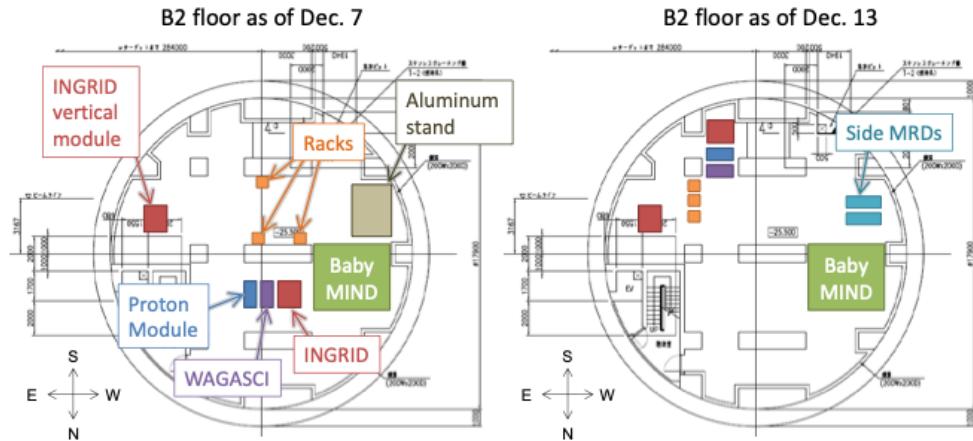


図 60: 前回のセットアップでの検出器位置（左図）および Wall MRD の設置の為の仮配置（右図）

まず、2018年5月までのニュートリノビーム測定において実験場所にて設置されていたWAGASCI, Proton Module, INGRID 検出器を、今回のフルセットアップでの設置に変更するために一旦実験場所から移動させ(図 61)、今回から追加で導入される検出器である Wall MRD を実験場所階へとインストールした。図 62 は、Wall MRD を NM 棟 1 階からクレーンを用いて地下 2 階に運搬した様子である。

さらに、2台目のWAGASCI検出器がインストールされた(図 63)。この検出器は前回のセットアップ時に建設されたWAGASCI検出器より以前に作成されたプロトタイプである。今回は、このモジュールもWAGASCI検出器として使用する。

次に、各検出器の設置位置を確定させ、その位置に固定させるためのアンカーボルトを打ち付けるために、実験場所のジオメトリを再現した図面を作成することで正確なアンカー位置を確定させた。今回の図面作成においては、Autodesk 社が提供している 3DCAD ソフトである fusion360 を使用した。2台のWAGASCI検出器、2台のWall MRD の実験場所の位置の図面を図 64 に示す。この図面に示された各検出器の地面に接する足のアンカーボルト打ち付け位置にアンカーボルトを打ち、最終的に各検出器を設置した。

27 WAGASCI 検出器の注水作業

WAGASCI 検出器は、600L の純水を入れることによって、水標的に対するニュートリノ反応を測定することが可能となる。前回のセットアップ時でのニュートリノビーム測定終了後、WAGASCI

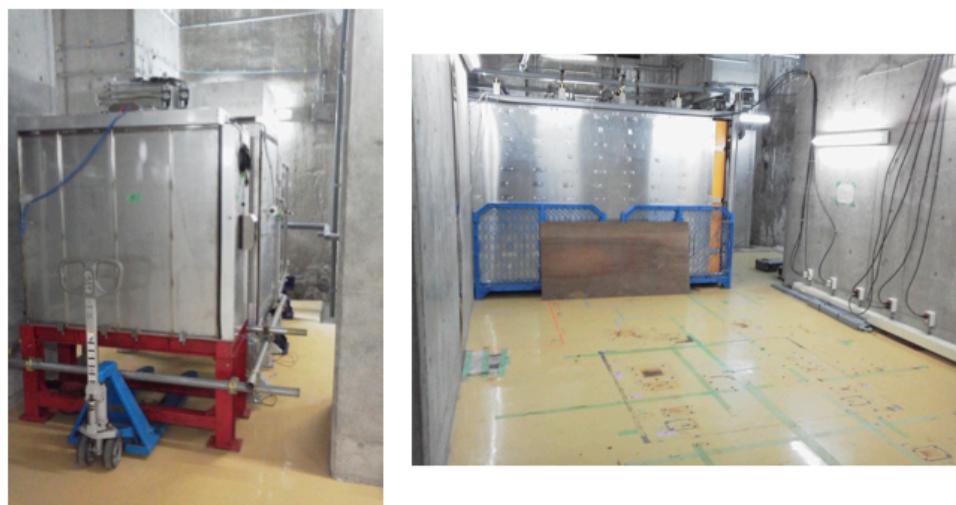


図 61: 移動後の前回セットアップ時使用の検出器群(左)とフルセットアップでの実験予定場所(右)



図 62: Wall MRD の実験場所へのインストールの様子

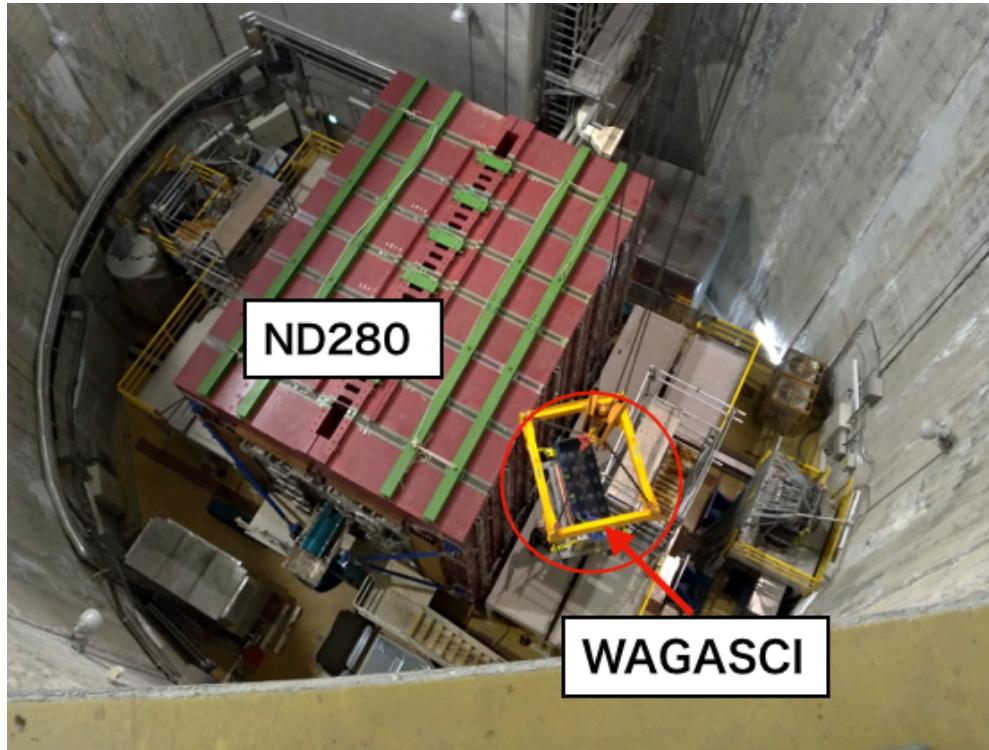


図 63: 2 台目 WAGASCI 検出器の実験場所へのインストールの様子

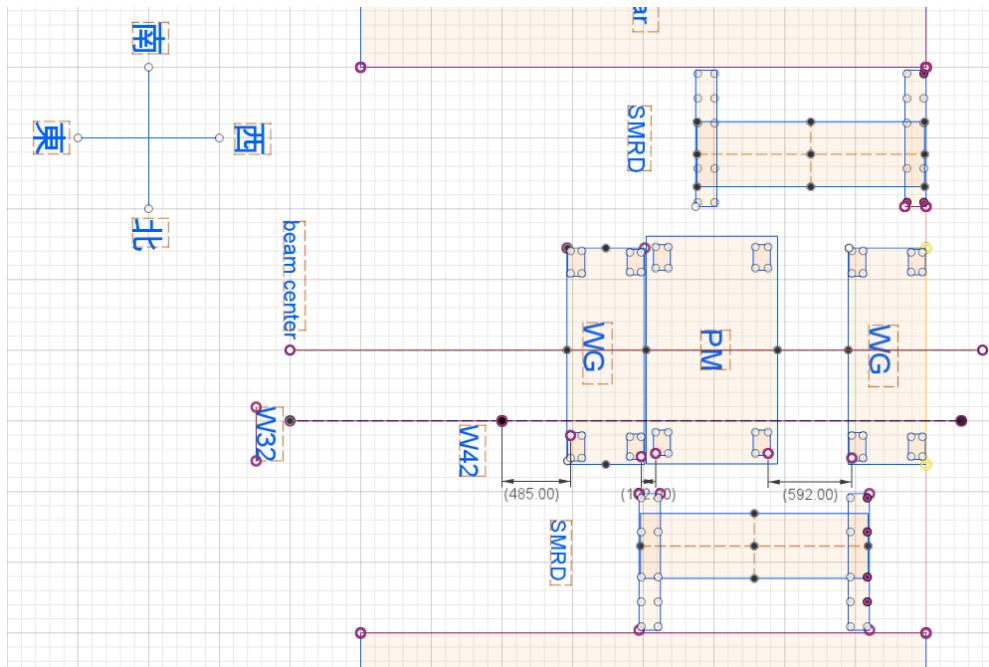


図 64: fusion360 による WAGASCI 検出器、Wall MRD の設置場所の決定

検出器内部にある純水を一度排出した。今回のフルセットアップでの検出器群設置後、再び2台のWAGASCI検出器に純水を注入する作業行った。

- (1) NM棟地下2階には、WAGASCI検出器のための純水注水用タンクが2つある(図65)。また、NM棟1階に水道水を給水できる場所があり、そこから実験場所の地下2階に向かうホースが通っている。まず、ホースを用いて1つのタンクに1階から水道水を伝わせ、必要分(2台のWAGASCI検出器に純水を注入するので、1200L)の水道水を貯めた。



図65: WAGASCIの注水作業用タンク

そして、その水道水を、オルガノ社のカートリッジ純水装置及び純水器G-10Cを用いて純水化し、もう一方のタンクに純水を貯めた。

- (2) 純水のままではタンク内やWAGASCI検出器内において次第に腐ってしまうので、重量換算で0.25%の防腐剤を混ぜた。今回使用した防腐剤はGermall plus(イミド尿素)であり、ND280のモジュールの一つであるFGD2においても用いられている防腐剤である。防腐剤を添加した後、作成した防腐剤入り純水の1L中の質量を測定した。これは、モンテカルロシミュレーションにおいてWAGASCI検出器内部の水の密度のパラメータとして用いるためである。その測定結果を表5に示す。

表5: 各WAGASCI用の純水の密度

WAGASCI	質量 [g/L]
上流 WAGASCI	998.3
下流 WAGASCI	998.8

- (3) 防腐剤入り純水を WAGASCI 検出器に注水した。WAGASCI 検出器が最終設置場所に固定される前に、検出器を 5° 傾けて設置し、その状態で純水を注入する。これは、構造体内に注入された純水中に気泡が混入した際に、シンチレータの格子部分に気泡がトラップされることなく構造体最上部（最上部には、構造体内外の圧力を等しくさせるため、過剰に注入された純水を逃すための穴が設けてある）に到達し、気泡を逃すことができるようにするためである。この作業の様子を図 66 に示す。

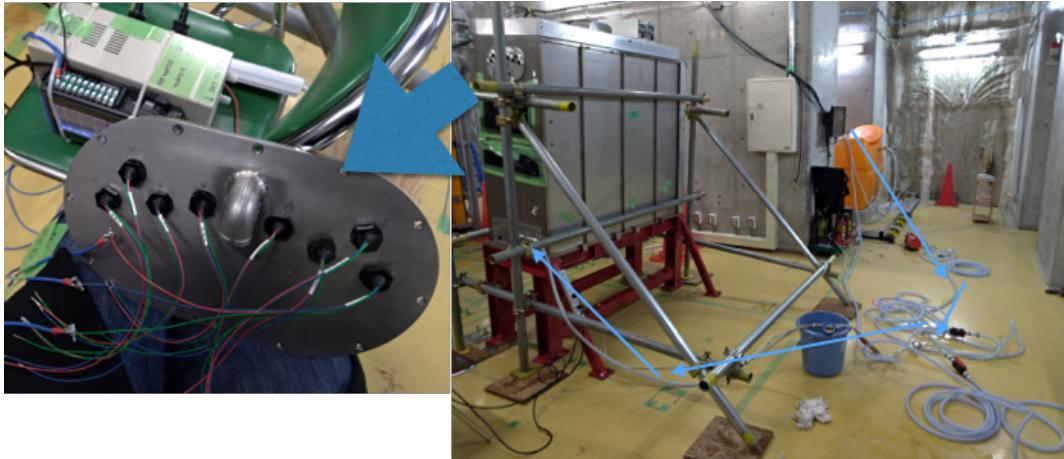


図 66: WAGASCI の注水作業の様子(右)。構造体上部には、水位センサーがセットされている(左)。

純水を注入する際の流速は、気泡の混入を防ぐ目的で、少なくとも毎分 1L 調整した。また、構造体上部には合計 8 つの水位センサーがあり、センサー位置より水面が越えたり下回ったりすると電圧が変化するようになっている。純水注入作業中は、具体的にどれだけの純水が構造体内に注入されたかを把握できないので、前述した流速制御器及び流速メーターから、一時間ごとの注入量を見積もった。そして注入量が 600L に迫るときに水位センサーが反応し始め、もっとも高い位置の水位センサーが反応した際に、純水の注入作業を終了した。

28 エレクトロニクスのマウント

28.1 検出器-DAQ PC 間のエレクトロニクスについて

今回の実験において WAGASCI 及び Wall MRD は同じ DAQ システム及びエレクトロニクス機構を用いる。その検出器間と DAQ PC 間のエレクトロニクスについての概略図を図 67 に示す。

WAGASCI 検出器は、Top View と Side View それぞれに ASU が 20 枚使用され、Wall MRD は Top Side と Bottom Side に ASU がそれぞれ 3 枚使用される。それら検出器の各面の DIF から DAQ PC 側に位置する GDCC のポートに HDMI ケーブルが接続されており、全ての ASU から時間情報が一致した状態でデータを収集することができる。

28.2 エレクトロニクスのマウント作業

各検出器のエレクトロニクスのマウント作業の様子を図 68 に示す。

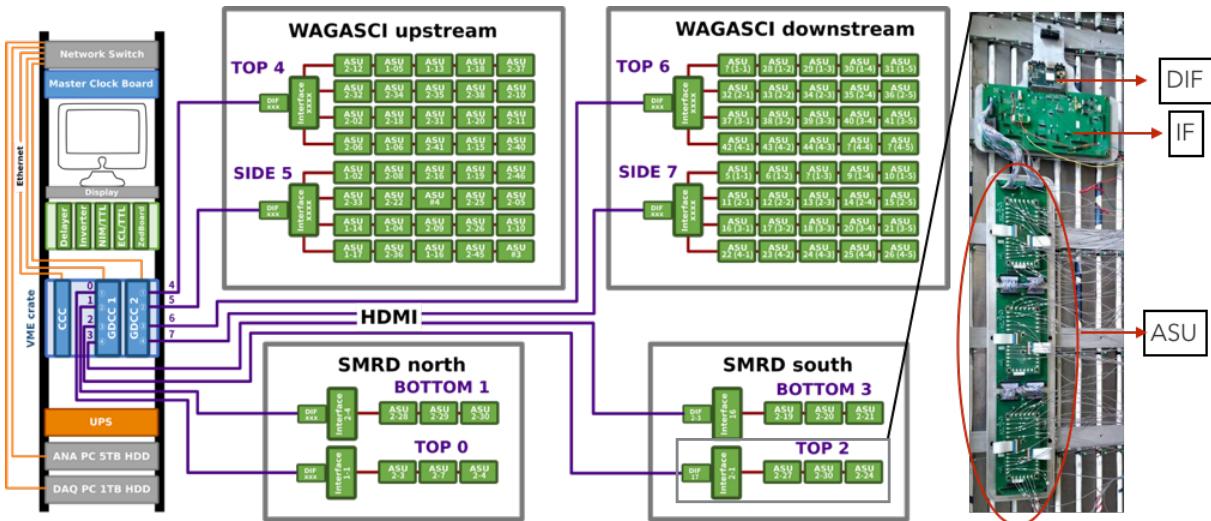


図 67: 検出器-DAQ PC 間のエレクトロニクスの概略図

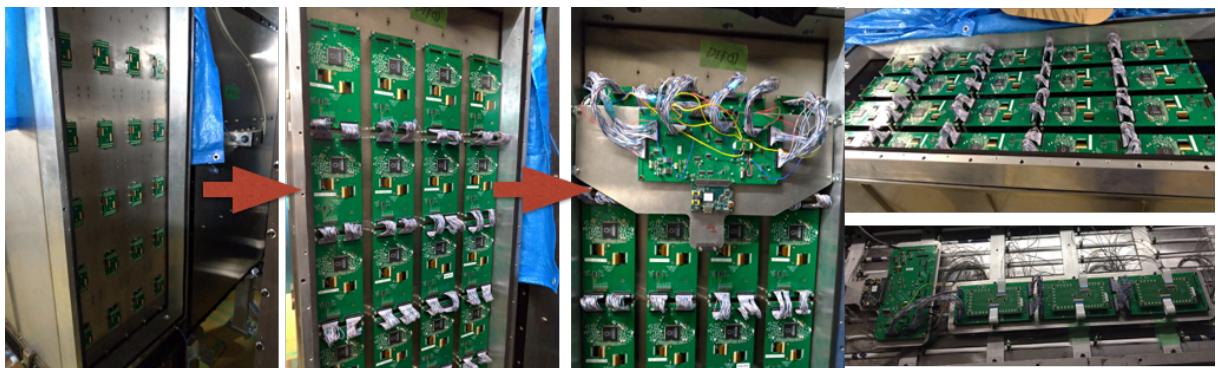


図 68: 検出器のエレクトロニクスのマウント作業。左から 3 つの図は上流 WAGASCI Side View のマウントの過程を示している。右上図は上流 QAGASCI Top View のエレクトロニクスのマウント完了後の様子で、右下図は南側 Wall MRD Bottom Side のエレクトロニクスのマウントの完了後の様子。

29 その他ハードウェア作業

エレクトロニクスのマウント作業以降の準備測定のために行った作業を以下に報告する。

- 電源装置の設置:本実験にて、WAGASCI および Wall MRD に使用する電源装置は、エレクトロニクスの論理回路を起動させるための定電圧源が4つ、MPPC のバイアス電圧のために印加させる高電圧源が合計8つ必要であり、それら電源装置を各検出器の側に設置した。本実験にて使用している電源は、TDK ラムダ社の直流安定化電源 ZUP 6-33 および ZUP 80-2.5 である。ZUP 6-33 は出力電圧 0-6V で電流 0-33A、ZUP 80-2.5 は、出力電圧 0-80V で電流 0-2.5A の 200W 電源である。エレクトロニクスの論理回路用には ZUP 6-33 を、MPPC 用には ZUP 80-2.5 を用いた。図 69 は、Wall MRD 構造体側面に設置した ZUP 6-33(奥側) および ZUP80-2.5(手前側) である。



図 69: WAGASCI および Wall MRD に使用している直流安定化電源 ZUP。図は Wall MRD 構造体側面に設置した ZUP 6-33(奥側) および ZUP80-2.5(手前側)。

- 実験場所における配線作業:各検出器と DAQ PC 間や、各検出器にそれぞれ設置された電源装置などの機器のための電源ケーブルの配線。実験場所において、各ケーブルは地面を伝わるのでなく、図 70 のように天井ラックを用いて配線作業を行った。
- 温度計および温度計制御器の設置:各検出器のエレクトロニクスが取り付けられている空間(エレキボックス)は、データ収集中などでエレクトロニクスを稼働させると次第に熱が発生し、エレキボックス内の気温が上昇する。MPPC には温度依存性があり、一般に温度が上昇すると MPPC の光電子増幅率(ゲイン)は下がるので、キャリブレーションしたゲインの安定性が崩れしまう。これを防ぐために、各エレキボックス内部にはクーリングユニットというファンが取り付けられ、エレクトロニクスの稼働と同時にファンを回すことで、エレキボックス内の気温を一定に保つ。このようにエレキボックス内部の温度管理は実験中にモニタリングすべき項目であるので、各エレキボックス内部に温度計を取り付け、リモートでモニタリングできるようにした。なお、今回使用した温度計は、Strawberry Linux 社の USB 温度計・湿度計モジュールである。



図 70: 配線作業の様子。天井ラック (左図) を用いて各検出器から配線が伝っている (右図)

しかし、ファンの風速を制御することができず、過剰な冷却によりエレキボックス内に水滴が結露しエレクトロニクスに付着する問題が発生した。この問題を回避するために、設定した温度によってファンと定電源間の回路をスイッチングする温度制御器を導入することで、エレキボックスを常に結露が生じない一定の温度に保つことができるようとした。図 71 は、エレキボックスのカバー内側に取り付けられている温度制御器 (Elmeko 社 TES60) である。

温度制御器設置後の、slow monitor で測定した各検出器のエレキボックス内部の温度および湿度のヒストリーデータは図 72 のようになる。緑線は温度制御器を導入した検出器 (上流 WAGASCI) であり、およそ 22.5° から 23.5° の間を一定に振動していることがわかった。

29.1 WAGASCI からの漏水対策のフェンスの設置

2 台の WAGASCI 検出器の構造体内には合計 1200L の純水が入っている。このためビーム測定中などに万が一構造体内から純水が漏水すると、実験場所の床が水浸しになり隣接する検出器や電源系に浸ってしまい、実験データ収集や実験建物自体の管理システムに関して甚大な悪影響が及ぶ可能性がある。この漏水対策として 2 台の WAGASCI を囲むように高さ 10cm のフェンスを床の上に設置した。そのフェンスの設置位置を図 73 に示す。図中の赤線が該当フェンスの設置位置になり、2 台の WAGASCI を囲むようにしている。万が一、2 台の WAGASCI 検出器から 1200L 全ての純水がすべて排出された場合にもフェンス外部に漏水することができないように、フェンス内部の水最大許容量が 1200L 分を上回るように設計した。フェンスは、アルミ材質の L 字アングル型のフェンスを組み合わせて、作成した。最終的に実験場所に設置されたフェンスの様子を図 74 に示す。

30 フルセットアップでの検出器の同時測定試験

前述の、フルセットアップでの実験の準備作業を終え、最終的に検出器を用いた測定試験を行うことができる状態になった実験現場の様子を図 75 に示す。



図 71: エレキボックスのカバー内側に取り付けられている温度制御器(赤丸内)及びクーリングユニット(青丸)。

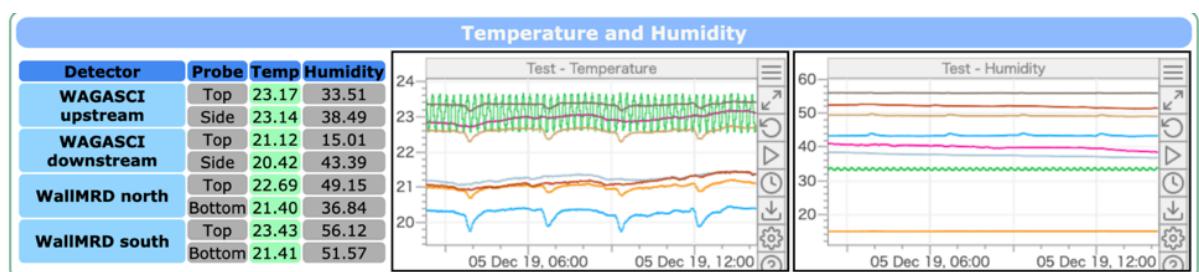


図 72: slow monitor による温度および湿度のモニタリング。緑線が温度制御器を導入した検出器(上流 WAGASCI)のエレキボックス内部の温度であり、設定値を中心として振動していることがわかる。

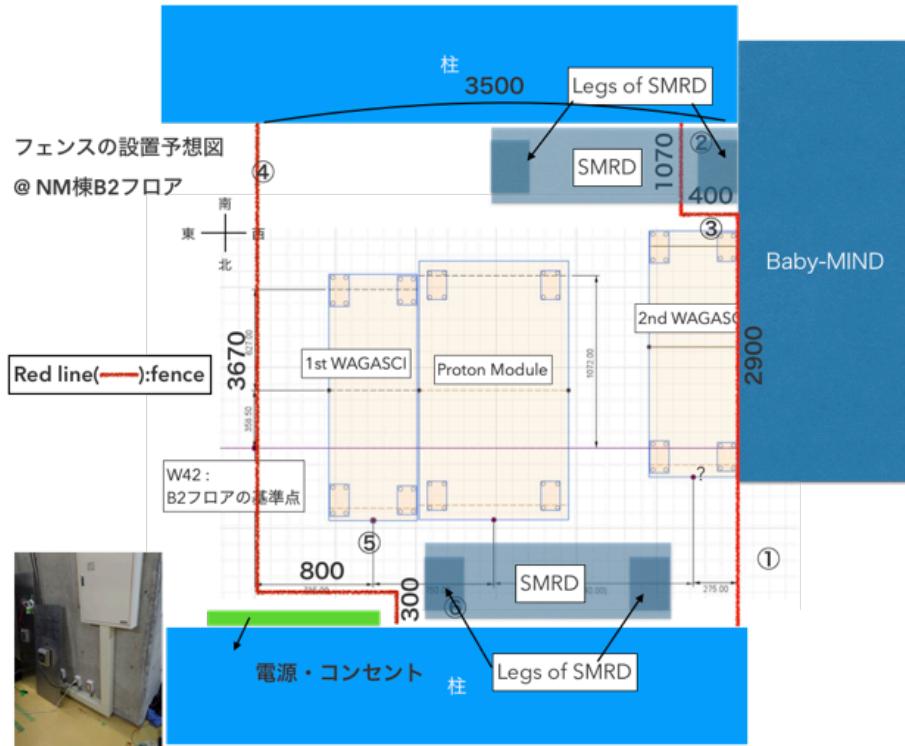


図 73: WAGASCI からの漏水対策のフェンスの設置位置に関する概略図

最初に、検出器と DAQ PC 間の信号の送受信や、検出器に使用する電源またはエレクトロニクスが正常に動作しているかを検証した。この試験では、2 台の WAGASCI および 2 台の Wall MRD を同時に稼働させて、全ての ASU の全チャンネルにて MPPC のダークカレントによる 1 光子相当の信号を検出することを試みた。図 76 は、上流 WAGASCI Top View にある ASU のうちの 1 つの全チャンネルをの ADC 分布になる。また、図 77 は、上流 WAGASCI Top View の全 ASU の ADC 分布の 2 次元ヒストグラムで、このグラフ上では z 軸がエントリー数である。最もエントリー数の多い ADC count は、測定周期中に一度もスレショルドを超える信号が検出されなかった場合の ADC count であり、ペデスタルという。次にピークが立っている分布については、スレショルドを超えた信号のうち最も小さい光量分の信号による ADC count になり、これは、前述のダークカレントによる 1 光子相当 (p.e. = photoelectron または photoelectron equivalent という) の分布である。図 77 では、最もエントリー数が多い赤い領域がペデスタル、黄色の領域が 1 p.e. を示しており、全ての ASU の ADC 分布が同様の ADC 分布をなしていることが確認できた。ここで、ペデスタル分布の ADC count の位置の違いは、ASIC 内のコンデンサーの個体差によるものである。ASU に内蔵されている SPIROC 2D では、アナログ信号からデジタル値への変換の過程で、一時的にアナログ信号は電荷量をコンデンサーに蓄積される。その際のコンデンサの微妙な個体差によって、デジタル変換をした際に未検出信号 (0 p.e.) の基準となるペデスタルのデジタル値が定まるためである。全検出器でも同様のヒストグラムを得ることができた。この結果から、WAGASCI および Wall MRD のエレクトロニクス、電源装置、配線などに故障や異常がないことが確認できた。

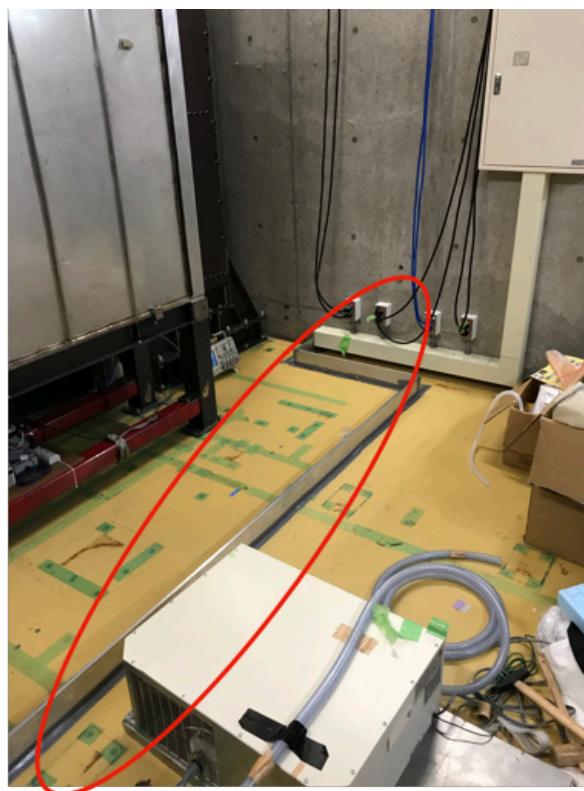


図 74: 設置後のフェンスの様子。赤丸内の床に設置されている L 字アングルがフェンスである。



図 75: 検出器を用いた測定試験を行うことができる状態になった実験現場の様子。一番手前中央側の検出器が WAGASCI(ニュートリノビーム上流側)、その後ろに Proton Module、Proton Module の後ろに WAGASCI(下流側)、それら検出器の側面に設置された検出器が Wall MRD。

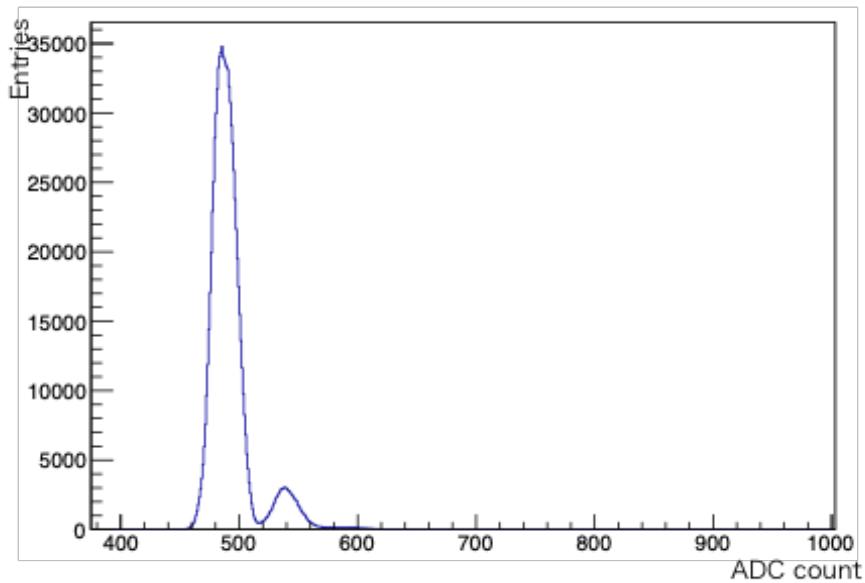


図 76: 上流 WAGASCI Top View にある 1 つの ASU の全チャンネルをの ADC 分布。

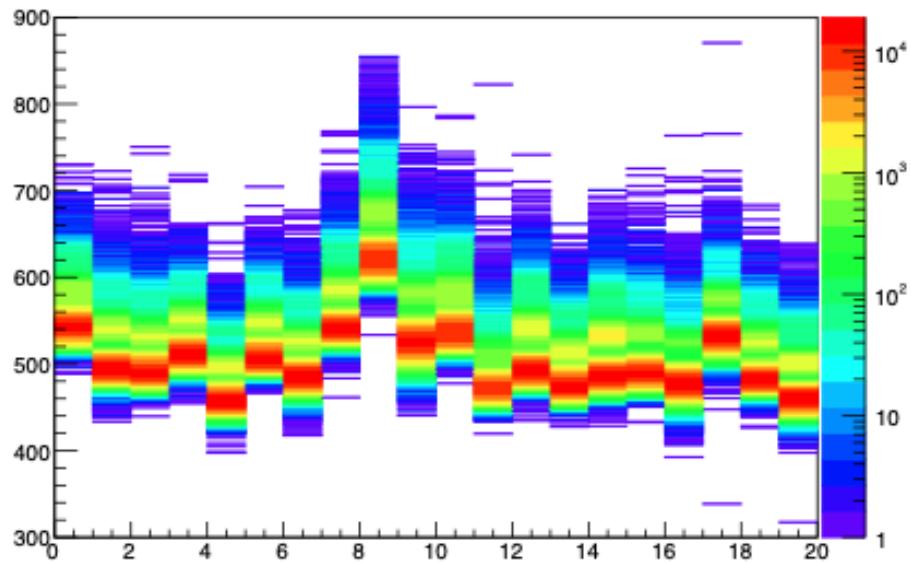


図 77: 上流 WAGASCI 検出器 Top View にある全 ASU のの ADC 分布。横軸が ASU の番号、縦軸がその ASU での ADC count、z 軸がその ADC count のイベント数が大きさによって色分けされている。

31 ニュートリノビーム測定の初期解析

2019年11月より、J-PARCよりニュートリノビームの照射が開始された。本項目では、ニュートリノビーム測定開始後のデータの解析について報告する。

31.1 キャリブレーション

WAGASCI 及び Wall MRD に使用されている光検出器である MPPC の増幅率(ゲイン)を全チャンネルにおいて調整を行うことが必要である。

ASU の ASIC である SPIROC 2D には、信号制御に関するいくつかのパラメータがあり、以下パラメータは ASU のチャンネル個々に設定することができる。以下に、本実験にて用いられている主要なパラメータを示す。

- threshold(閾値): その値を越える信号値のみ検出するための設定値。ダークノイズ信号収集のための測定では threshold 値を低く、本測定ではダークノイズ信号をカットし二次粒子などの高光量信号を検出するために高く設定される。
- inputDAC: チャンネルに印加する電圧値を最大 2.5V まで下げることができる。電源装置から全チャンネルに一律に MPPC 用の電圧を変更することができるが、MPPC の個体差などにより増幅率が異なるので、この inputDAC によって、増幅率を制御及び統一することができる。

このパラメータのうち、ゲインの較正(キャリブレーション)を行うために個々のチャンネルについて調整を行うパラメータは、threshold および inputDAC である。

まず、ゲインのキャリブレーションを行う前に、光検出器が持つダークノイズによる低光量の分布を、前述の threshold パラメータを変化させて測定を行なった。その結果を図 78 に示す。

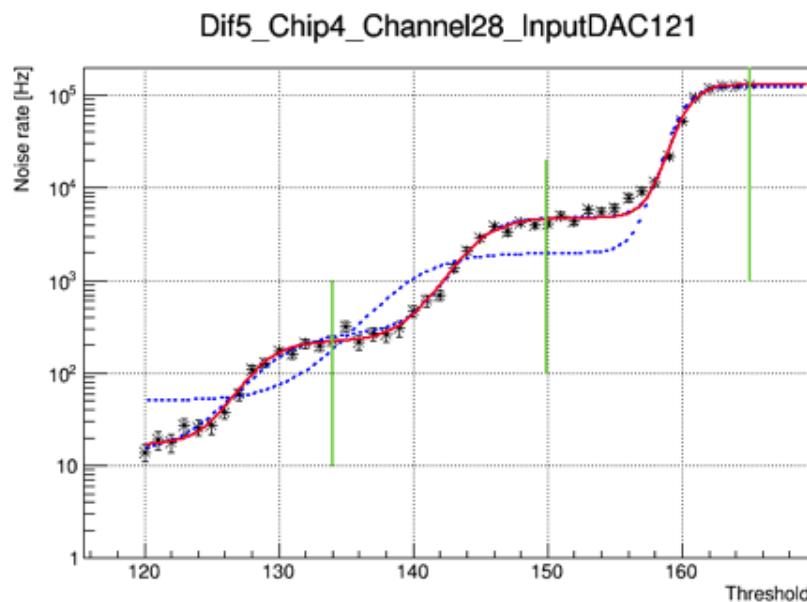


図 78: WAGASCI 検出器におけるゲインのキャリブレーション前のダークノイズの測定。

縦軸のダークノイズは、測定時のある周期中に検出する信号が SPIROC 2D 内のメモリ上にどれだけの速さで貯まるかという時間を表し、値が大きいと検出する信号が多くダークノイズが大きいという意味である。そして、各 threshold ごとのダークノイズをプロットすると、threshold = 165, 150, 135 付近のダークノイズは一定の値になることがわかる。これは、これらの値が各 p.e. に対応するピーク間の信号がない領域に対応している為である。そして、threshold=165 付近でのダークノイズが最も大きいので、この区間での検出信号は 1 p.e. 以下の信号であることがわかり、この中間に位置する threshold を 0.5 p.e. の信号のカットポイントであることがわかった。同様に、threshold=150 付近は 1.5 p.e. の信号、threshold=135 付近は 2.5 p.e. の信号のカットポイントであることがわかった。そして、2.5 p.e. 以降の threshold 領域ではダークノイズがほとんど現れないので、ニュートリノビームにおける本測定ではこの 2.5 p.e. のカットポイントを設定して測定を行う。

次に、この threshold によるダークノイズの変化(以後、S-Curve)を利用して、ゲインのキャリブレーションが行われた。

0.5 p.e. に threshold することで 1p.e. がピーク値、1.5 p.e. に threshold することで 1p.e. 及び 2p.e. がピーク値となる ADC 分布を得ることができる。この各光量のピーク値の ADC count の差を 1p.e.あたりのゲインとした。このゲインと inputDAC の関係について、各 inputDAC でのゲインの値をプロットし、その線形関係を得たのが、図 79 になる。横軸の inputDAC は 8bit の 0 ~ 255 の値で、255 が一律に印加される電圧から何も降下させない状態で、0 は 2.5V 降下させる。この図では、inputDAC を 6 点選び、その設定でダークカレント測定を行い各チャネルのゲインを見積もりプロットしたものである。図 79 のように、プロットは線形関数で近似することができ、その近似において、すべてのプロット点がある inputDAC の値のゲインの平均を 10% 以内に収めることができた。

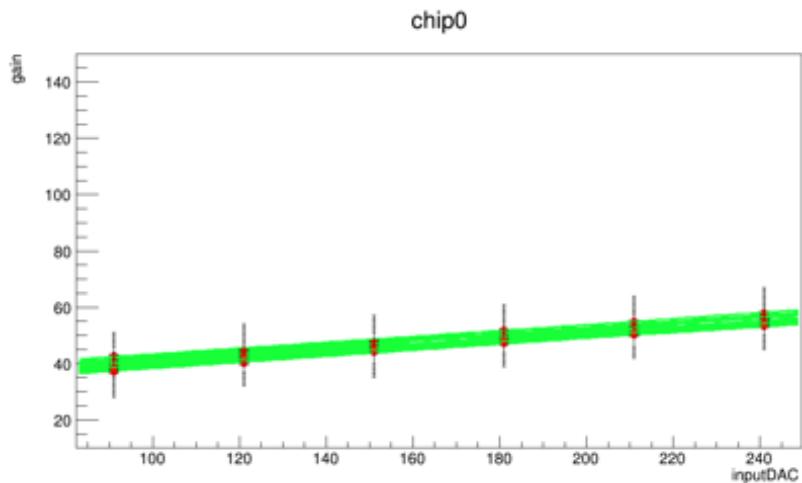


図 79: WAGASCI 検出器におけるゲインのキャリブレーション。

31.2 ニュートリノビームのバンチ構造の確認

図 80 は、2 台の Wall MRD(北側、南側)の Top Side 及び Bottom Side のチャネルから観測されたニュートリノビームのバンチ構造の描画である。横軸は SPIROC 2D で測定したヒット時間 [ns] であり、縦軸は測定中に threshold を越えて検出したヒット数である。

ニュートリノビームは 1 spill 中に 8 つのバンチが入射され、各バンチの間隔は 581 ns であり、この図では、北側 Wall MRD Top Side を除く 3 面において時間タイミング及び各バンチの間隔がおよそ 581ns であることがわかるヒストグラムを描画することに成功した。ただし、北側 Wall MRD Top Side においては後述のエレクトロニクスに関する問題などの影響で正常にデータが取れない状況である。

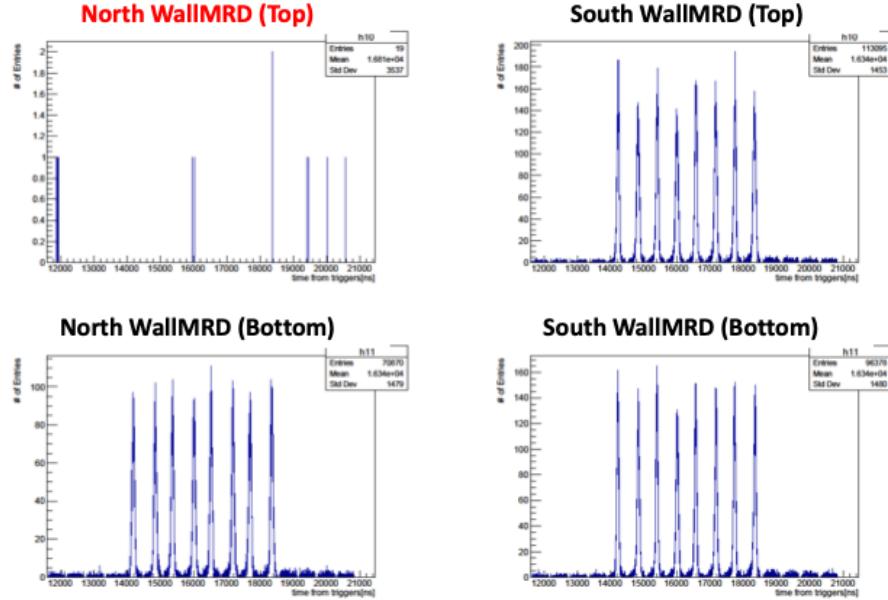


図 80: Wall MRD でのニュートリノビームのバンチ構造の確認。

31.3 ニュートリノイベントの確認

図 81 は、WAGASCI, Proton Module, Baby-MIND の 3 つの検出器で観測されたニュートリノ反応事象のイベントのディスプレイである。このイベントディスプレイでは、各検出器のヒットしたチャンネルを Top view と Side view の 2 つの 2 次元平面で表現している。この図では、上流 WAGASCI 側の最もビームに近い側のチャンネルから BabyMIND 側に一つの直線のようにヒットを残していることから、ニュートリノ反応が検出器よりも上流の壁の中で起こったイベントだと考えられる。

31.4 ニュートリノビーム測定の POT

2019 年 11 月にニュートリノビームが照射され、同月 14 日より本実験にてデータ収集を開始した。図 82 は、2019 年 11 月から 2020 年 1 月 21 日時点での、本実験におけるニュートリノビームにおける収集データの累積統計である。累積統計は、J-PARC にて生成された炭素標的に入射した陽子数 POT(Protons on target) で表される。12 月 18 日から 2020 年 1 月 14 日まで運転休止期間が存在する。WAGASCI 検出器でのデータ収集効率を 100% と仮定した場合、2019 年 11 月 14 日から 2020 年 1 月 21 日までの累積統計 POT は、 2.86×10^{20} POT となる。

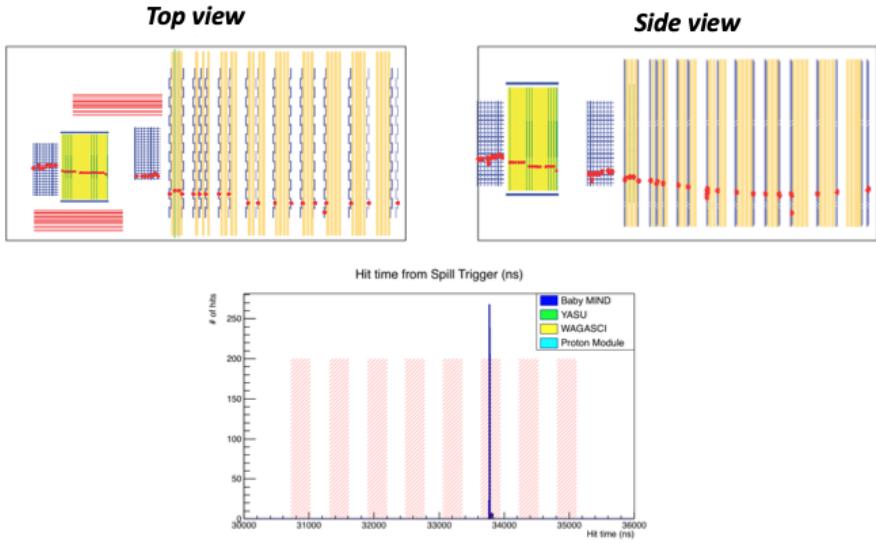


図 81: ニュートリノ反応事象のイベントディスプレイ。この事象は、検出器より上流の壁でニュートリノ反応が起こった事象である。

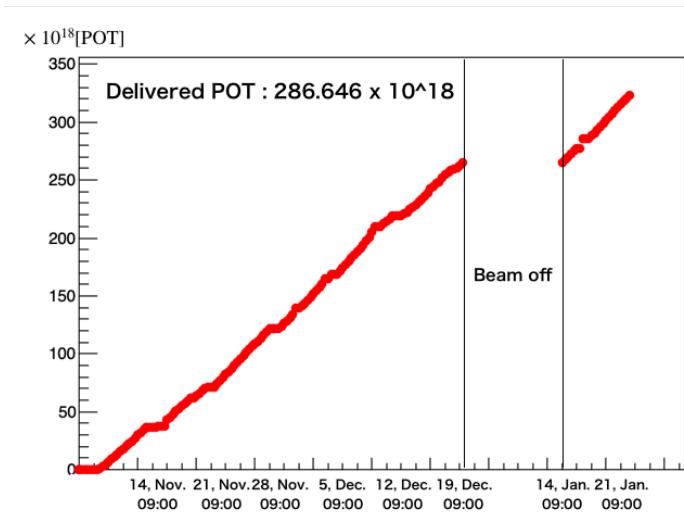


図 82: 2019 年 11 月 14 日から 2020 年 1 月 21 日までのニュートリノビームの POT(Protons on target)。

32 課題および今後の展望

2020年1月現在、本実験はニュートリノビーム測定を行っているが、現時点での課題や今後の展望について述べる。

32.1 Wall MRD の strange hit 問題

ゲインキャリブレーション時に各検出器の ASU の S-Curve を作成するが、Wall MRD の場合、WAGASCI の ASU にて作成できたような、threshold が 0.5, 1.5, 2.5 p.e. 領域ではダークノイズがほとんど変化せず、S-Curve が得ることが出来ず歪な形になってしまった。したがって、Wall MRD では、ゲインのキャリブレーションを行うことができなかった。

通常、threshold 値を越える信号が検出された場合、SPIROC 2D 内の”hit”というパラメータが”1”という値で記録され、その他の値に対しては”0”をとる。しかし、Wall MRD に関しては threshold の設定に関係なく hit が 1 を取る信号が存在する。この strange hit の問題についての調査を行なった結果、Wall MRD に使用する 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。従来に使用していた 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 (HV) の供給及び 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、高電圧供給側から来るノイズがかかりやすい状況であった。

この strange hit 問題を解決するために、新型の single MPPC card を開発した(図 83)。

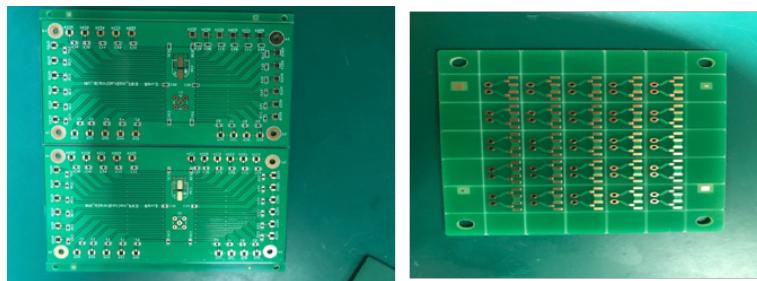


図 83: 新型の single MPPC card(左図) 及び PCB ボード(右図)。

この新型の single MPPC card は、従来の設計が抱えていた問題を解決するために、以下の改良が行われた。

- 全 32 チャンネルが GND に接続される。
- 2 本の同軸ケーブルを用いて、信号読み出しラインと HV 供給ラインを分離する。

そして、この新型 single MPPC card を使用して、J-PARC にて動作試験が行われた。

図 84 は、北側 Wall MRD Top Side の 1 つの ASU に新型 single MPPC card を取り付けて、1 つのチャンネルのみを接続して行われた測定による ADC 分布である。このとき、threshold は 1.5 p.e. 相当する値に設定していた。左図は、hit 値を限定しないで全ての検出信号による ADC 分布であり、480 ADC count 付近にペデスタル分布、700 ADC count 付近に 2 p.e. 分布以降の信号が検出されていることがわかる。そして右図は、hit 値を”1”として記録された信号のみを表示させた ADC 分布であり、threshold 値を越えないペデスタル分布が消えていることが確認できた。

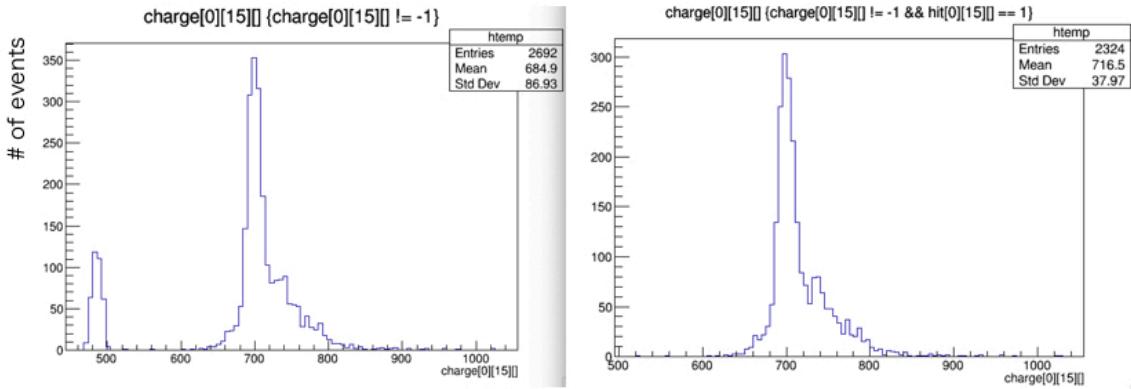


図 84: 新型の single MPPC card 使用にて測定された Wall MRD のあるチャンネルの ADC 分布。左図は、hit 値を限定しないで全ての検出信号による ADC 分布を表示させており、右図は hit 値を”1”に指定した場合の ADC 分布である。

したがって、新型 single MPPC card を用いることにより、threshold 値を越える信号のみに hit が 1 の値を持ち、strange hit が消えた。

しかし、新型 single MPPC card を使用した場合でも 5%程度のチャンネルで strange hit が残つており、現在も引き続き調査が行われている。

32.2 3D イベントディスプレイ

2D のイベントディスプレイでは、同じイベントを異なる 2 面 (x-z 面及び y-z 面) から観測することで 3 次元でのイベントディスプレイを想像することができる。ただ、3D イベントディスプレイがあれば、各ヒット位置の関係を 3 次元空間上で視覚的に判断することが可能となる。図 85 は、現在作成中の 3D イベントディスプレイであり、今後の実験装置のモニタリングのひとつとして導入が検討されている。

32.3 新型のインターフェースボードの使用

WAGACI 及び Wall MRD にて使用されるエレクトロニクスのうち、ASU と DIF、MPPC 用電圧の印加などの各種信号の伝達を担う基板であるインターフェイスボード (IF) は基板の構造上、ケーブルの接触や圧迫に弱く伝達信号に影響が出ることが多かった。図 86 は、これまでの IF の構造である。1 つの IF には 4 つ ASU のチェーンと接続する箇所があり、IF から ASU に流れる信号は図 87 のように各 ASU チェーンを一周するようなリレーのように流れるが、初期の設計における IF においては、信号の伝達中に電圧降下が発生してしまいデータ収集前のエレクトロニクスの稼働段階にてエラーが起こっていた。その問題を解決するために赤丸に示されているバッファーを信号に経由させることで、電圧を供給し電圧降下を防いでいた。しかし、この手作業による改造により、IF-ASU 間のケーブルの改造箇所が脆弱になり接触不良によるエラーが多発するようになってしまった。この問題を根本的に解決するために、バッファーを IF 基板に埋め込み、関連する配線を基板の配線として埋め込むことで、人為的な作業による接触不良のエラーをなくすことができるようになる。この新型 IF の製造が完了し、現在、横浜国立大学のテストベンチでの試験が目下行われている。

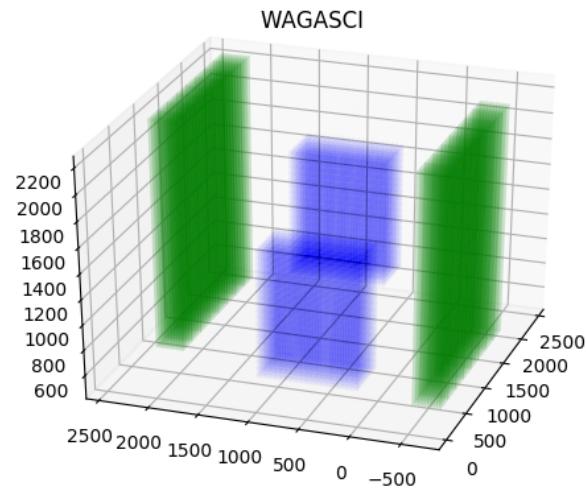


図 85: 3D イベントディスプレイ。この例では、すべての WAGASCI のシンチレータ (青) 及び Wall MRD のシンチレータ (緑) を表示している。



図 86: インターフェースボード。赤丸がバッファー。

Bit-stream for configuration

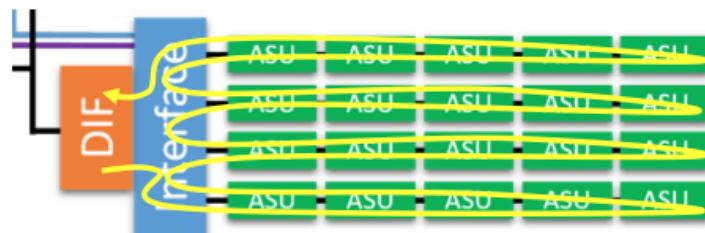


図 87: IF と ASU 間の信号のリレー。

第VIII部 結論

2019年11月からのニュートリノビーム測定に向けたフルセットアップでのJ-PARC E69実験WAGASCIのための様々な準備作業を行なった。

まず、2017年11月から2018年2月までに行われた1台目のWall MRDの建設に引き続き、同年3月から7月にかけて2代目のWall MRDを建設した。そして、2台のWall MRDを横浜国立大学からJ-PARCに搬送した後、これまでの建設及び搬送に際して構造体内のプラスチックシンチレータ及びエレクトロニクス、光検出器が正常に動作しているかの性能評価試験を行った。その動作試験においては、Wall MRD検出器の全てのチャンネルにおいて誤差10%の平均40 ADC count / p.e. のゲインを得ることができ、そして宇宙線が構造体内を通過するイベントディスプレイを描画することに成功したので、MPPC及びシンチレータが正常に動作することを確認した。

次に、ニュートリノビームの中心軸からの角度(off-axis角)1.5°のWAGASCI地点でのニュートリノフラックス及びその系統誤差を見積もった。フラックスにおける最大の系統誤差は、陽子ビームが炭素標的に衝突した際に、ニュートリノに崩壊する中間子の生成に関するハドロン生成反応確率及び多重度である。このハドロン生成反応確率の系統誤差を削減するために行われたNA61/SHINE実験によるデータを用いて、ニュートリノフラックスとその系統誤差の見積もりを行なった。特に、今回はNA61/SHINE実験のデータのうち、T2K実験と同じ材質(グラファイト)と形状の陽子標的のデータを使用することで、系統誤差をニュートリノエネルギーの領域全体でおよそ5%にまで下げることに成功した。

2018年12月から本実験に使用する各検出器を実験場所へ設置した。WAGASCIの設置の際に、気泡の混入を避けるために検出器を傾けた後にWAGASCI構造体内に純水を注水した。検出器群の設置完了後は、光検出器からの信号読み出しエレクトロニクスの取り付け、DAQ PC間や電源装置との配線などの準備作業を行なった。各検出器のエレクトロニクス及びDAQシステムのセットアップが完了後、WAGASCI及びWall MRDを同時に稼働させた状態での同時測定を行い、全ての光検出器及びエレクトロニクスが動作していることを確認した。

最後に、ニュートリノビーム測定で得たデータから、ゲインのキャリブレーションやニュートリノビームのバンチ構造、累積統計POTの確認、複数の検出器によるイベントディスプレイの確認などを行なった。今後は、ニュートリノビーム測定によるデータ収集を行いながら、平行してWall MRDのstrange hitの低減、新型のインターフェースボード導入を行う。そして、測定データを用いてニュートリノと標的原子核の反応断面積の精密測定を行い、T2K実験による粒子・反粒子の対称性の破れの測定感度の向上を実現する。

謝辞

この2年間、研究を通して様々な方と出会い、多くの成長の機会をえてくださいました。本論文の執筆にあたり、ご指導ご協力をしてくださり誠にありがとうございました。

南野彰宏准教授には、研究を進めるにあたって様々な議論をしていただき、多くのアドバイスをもらいました。このような形で修士論文をまとめることができたのは南野さんの支えのおかげだと思っています。

Wall MRD の建設に携わってくれた、岡本君、片山さん、佐々木君、谷原君、山本君、Giorgio に改めてお礼申し上げます。検出器の建設作業はとても一人で完遂することはできず、かつ肉体的にも労力を要する作業でしたが、快く協力して手伝ってください、本当にありがとうございました。

前年度東京大学博士課程卒業の竹馬さん、千葉大学に栄転された金さんは、前回のセットアップでの測定である J-PARC T59 WAGASCI 実験の研究者であり、フルセットアップへと引き継ぐ我々に対して様々な助言をくださいました。また、実験に携わる学生の我々に、慣れない東海村での滞在方法やその他研究外のこととも気さくに話しかけてください、T2K 実験の学生メンバーの一員として溶け込むことができました。

本実験の共同研究者である東京大学の松下君、江口君、大阪市立大学の小幡君、本條君、京都大学の安留さんらは、本実験の学生メンバーとして多くの研究作業を共に行いました。また、皆さんのおかげで東海村での生活が楽しくなることができました。

南野研究室の皆様、東海村での他実験含む様々な研究者の皆様のおかげで楽しく研究生活を送ることが出来ました。本当にありがとうございました。

最後に、私の選択を応援し支え続けくれた家族や友人に、心より感謝いたします。

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] M. H. Ahn et al.(K2K Collaboration), " Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment " Phys. Rev. D 74 (2006): 072003.
- [4] K. Abe et. al.(Super-Kamiokande Collaboration), " Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande " Phys. Rev. Lett. 110(2013): 181802.
- [5] 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.
- [6] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A659, 106 (2011).
- [7] J-PARC HP, <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [8] 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.
- [9] S. Assylbekov et al., " The T2K ND280 off-axis pizero detector." Nucl. Instrum. Meth. A 686 (2012): 48-63.
- [10] P. A. Amaudruz et al., " The T2K fine-grained detectors." Nucl. Instrum. Meth. A 696 (2012): 1-31.
- [11] N. Abgrall et al., " Time projection chambers for the T2K near detectors." Nucl. Instrum. Meth. A 637.1 (2011): 25-46.
- [12] D. Allan et al., " The electromagnetic calorimeter for the T2K near detector ND280." J. Instrum. 8.10 (2013): P10019.
- [13] S. Aoki et al., " The T2K side muon range detector (SMRD)." Nucl. Instrum. Meth. A 698 (2013): 135-146.
- [14] K. Abe et al.(T2K Collaboration), " The T2K experiment." Nucl. Instrum. Meth. A 659.1 (2011): 106-135.
- [15] 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.
- [16] M. Antonova et al., Baby MIND: A magnetized spectrometer for the WAGASCI experiment, arXiv:1704.08079 [physics.ins-det].
- [17] 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).

- [18] T. Fukuda et al., “First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline” , PTEP 2017, 063C02 (2017).
- [19] 浜松ホトニクス社, MPPC カタログ.
- [20] A. Ferrari et al., “FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005)” .
- [21] R. Brun et al., “GEANT Detector Description and Simulation Tool” .
- [22] M. Apollonio et al. ”Forward production of charged pions with incident protons on 1821 nuclear targets at the CERN PS”. Phys.Rev., C80:035208, 2009.
- [23] N. Antoniou et al. [NA61/SHINE Collaboration], CERN-SPSC-2007-004, (2007).
- [24] 竹馬匠泰, 東京大学, ”Measurements of neutrino charged-current interactions on water and hydrocarbon targets using a sub-GeV anti-neutrino beam”, 博士論文.
- [25] 浅田祐希, 横浜国立大学, 学士論文.
- [26] 岡本浩大, 横浜国立大学, 学士論文.