

Mizuche 実験の現状報告

2011 年 1 月 13 日

第1章 Mizuche実験 概要

Mizuche 実験とは、T2K 実験の前置検出器ホールにおいて振動前のニュートリノを小型の水チェレンコフ検出器 (総水質量 2.5 トン) によって測定するテスト実験である。T2K 実験の後置検出器であるスーパーカミオカンデと同じ検出原理 (チェレンコフ光)、同じニュートリノターゲット (水核子) を使用することで、それらに起因する測定誤差をキャンセルすることが期待できる。本実験の目標は次の二つである。

1. 振動前のニュートリノの数を精度良く測定する (目標精度 2%)
2. スーパーカミオカンデでのニュートリノ反応数の予測精度の向上

上記目標の達成に向けた本テスト実験の第一段階として、大強度ニュートリノビーム環境下においても水チェレンコフ検出器が有効であることを実証する。

第2章 実験原理

使用する小型の水チェレンコフ検出器の概略図を図 2.1 に示す。本検出器は半径 70cm 長さ 160cm のタンクの周りに 164 本の PMT を等間隔に取り付け、内部で発生したチェレンコフ光をとらえる。タンクの内部にはアクリルで仕切った領域 (Fiducial volume (FV)) があり、FV 内と FV 外 (Outer volume (OV)) は独立に水を充填できる。この FV 内の水を抜き差し、それらのニュートリノ測定数の差から FV 内で発生したニュートリノ測定数を見積もる (式 2.1)。

$$N_{\text{FV}}^{\text{obs}} = N_{(\text{w/ FVwater})}^{\text{obs}} - N_{(\text{w/o FVwater})}^{\text{obs}} \quad (2.1)$$

($N_{\text{FV}}^{\text{obs}}$ は求めたい FV 内でのニュートリノ測定数、 $N_{(\text{w/ FVwater})}^{\text{obs}}$ は FV 内に水がある場合の測定数、 $N_{(\text{w/o FVwater})}^{\text{obs}}$ は FV 内に水がない場合の測定数。)

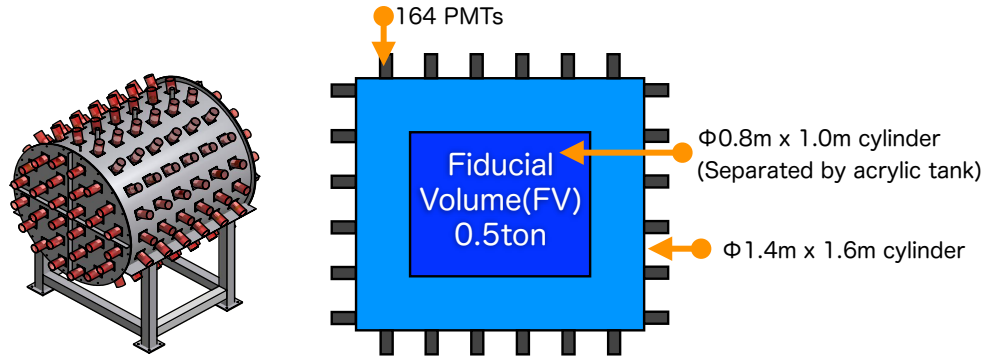


図 2.1: Mizuche 検出器の概略図。左図は検出器の外観を表示、赤色の筒状のものが PMT になる。右図は検出器の内部の概略図になる。

図 2.2 に実験原理の説明図を載せる。FV 内の水の差し引きを行うことで、FV 外での反応や、タンク外からの荷電粒子によるイベントはキャンセルでき、FV 内で起こったニュートリノ反応を数えることができる (式 2.2、2.3)。

$$N_{(\text{w/ FVwater})}^{\text{obs}} = N_{\text{FV}}^{\text{int}} \times \epsilon_{\text{FV}} + N_{\text{OV}}^{\text{int}} \times \epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w/ FVwater})} \quad (2.2)$$

$$N_{(\text{w/o FVwater})}^{\text{obs}} = N_{\text{OV}}^{\text{int}} \times \epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w/o FVwater})} \quad (2.3)$$

($N_{\text{FV}}^{\text{int}}, N_{\text{OV}}^{\text{int}}$ は FV 内、FV 外 (OV 内) でのニュートリノ反応数、 ϵ_{FV} は FV 内で反応したニュートリノに対する検出効率、 ϵ_{OV} は FV 外で反応したニュートリノに対する検出効率) この原理において、主に次の二つのことが重要である。

- 水がある場合の FV 外でのニュートリノ反応に対する検出効率 ($\epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w/ FVwater})}$) と水がない場合の FV 外でのニュートリノ反応に対する検出効率 ($\epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w/o FVwater})}$) が一致する。

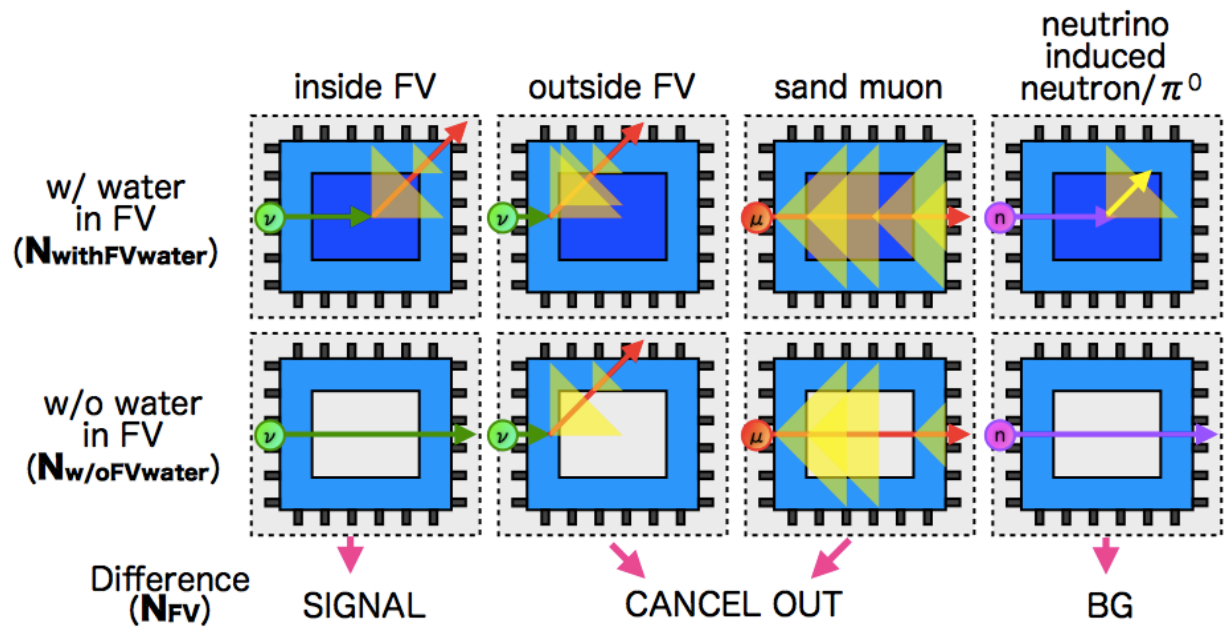


図 2.2: Mizuche 実験の原理。上の四つの図が FV 内に水がある場合、下の図が水がない場合。水がある場合とない場合とで FV 内部で発生したニュートリノ反応の分だけイベント数が異なる。

- タンク外から来た中性子が FV 内部で反応してチェレンコフ光を出したイベントをニュートリノ反応と間違えて数えてしまう

1 番目が保証できなければ、水の抜き差しをして測定したイベント数の差をとっても、FV 外でのニュートリノ反応数がうまくキャンセルせずに、バックグラウンドとなってしまう。

2 番目の外部からのバックグラウンドのうちが FV 内でのニュートリノ反応 (シグナル) 対して無視できない程度に存在し、なんらかの方法で測定、ないしは見積もることができなければ、測定精度の向上は困難になる。現在、T2K 実験の測定データやシミュレーションからその数の見積りを行ったり、シミュレーションを用いることでバックグラウンドの除外の方法を検討している。

本レポートでは主にモンテカルロシミュレーション (MC) によるニュートリノ反応に対する検出効率の見積もりについて報告する。

第3章 モンテカルロシミュレーションによる 検出効率の見積もり

3.1 シミュレーションの概略

図 3.1 にシミュレーションの概略を示す。

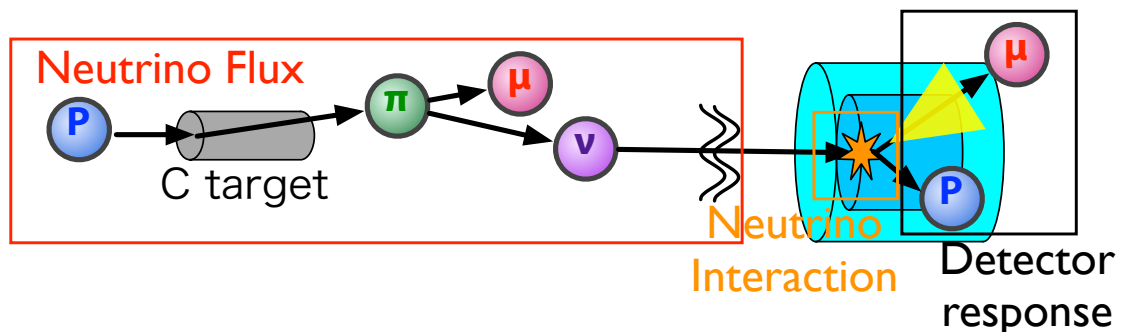


図 3.1: Mizuche 実験におけるモンテカルロシミュレーションの概略

ニュートリノ反応に対する Mizuche 検出器の応答のシミュレーションは次の3つのステップからなる。

1. 本検出器位置でのニュートリノフラックス

T2K 実験で使用されているニュートリノビームシミュレーション (JNUBEAM) を使用して、本検出器の設置場所での予測ニュートリノフラックスを作成。

2. ニュートリノ反応

JNUBEAM で作成したフラックスを元に、T2K 実験やスーパーカミオカンデで使用されているニュートリノ反応シミュレーション (NEUT) を使用して、水とニュートリノとの反応をシミュレート。

3. 検出器内での反応

GEANT4 によって検出器実機を再現し、ニュートリノ反応によって生成された粒子の水中での運動や、物理プロセス (主にチェレンコフ光放射) をシミュレートした。生成したニュートリノ反応をすべてのモードについて GEANT4 でシミュレートさせた (以下断りなく単に”ニュートリノ反応”という場合はすべてのモードを含んだ全ニュートリノ反応のことをさす)。

3.2 検出器のジオメトリ

図 3.2 のように Geant4 内で検出器実機を再現した。

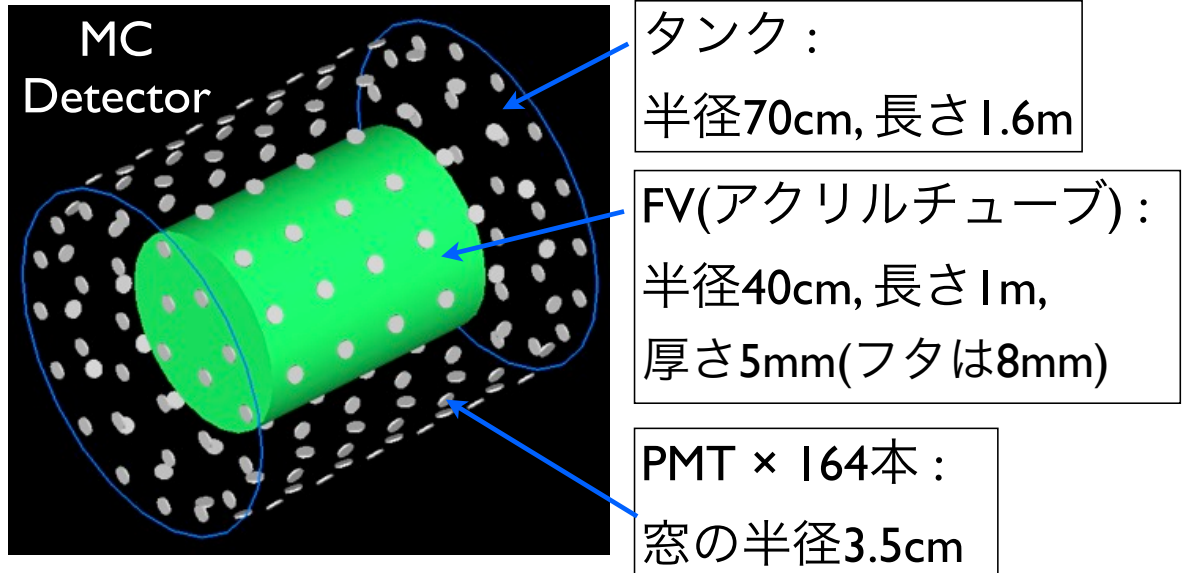


図 3.2: MC 内での検出器のジオメトリ。

その他の検出器のセットアップは以下の通り。

- タンク内壁で光子が反射しないようにした（検出器実機のタンク内壁は黒くする）。
- アクリルの表面は滑らかなものと仮定し、理想的な反射・屈折を行うように設定。
- アクリル・水の屈折率は表 3.2 のように設定した。水の屈折率はなるべく現実に即した値にした。アクリルについては、今回は一般的なアクリルの屈折率を定数で入れた（近々にカタログ値を元に波長に依存した形で値を入れる）。
- 水中での光子の吸収率は現実に即すように波長に応じて変化させている。

表 3.1: MC で設定した水とアクリルの屈折率

水	1.34~1.36	(光の波長に依存して変化)
アクリル	1.49	(一定値)

3.2.1 典型的なイベントディスプレイ

図 3.3、図 3.4 に、FV に水がある場合、ない場合でのイベントディスプレイを載せる。

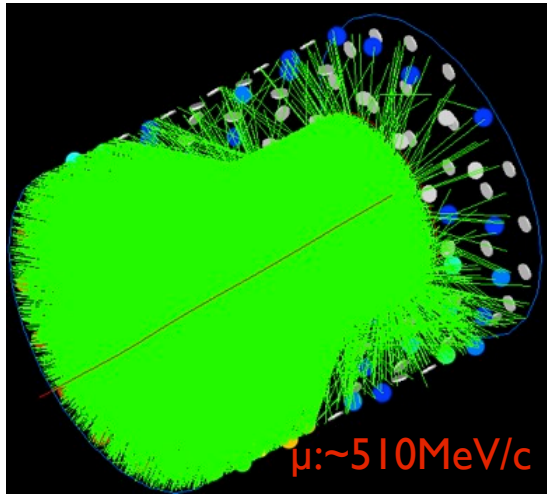


図 3.3: FV 水あり状態のイベントディスプレイ。入射ニュートリノエネルギー $E_\nu=0.56$ GeV、生成したミューオンの運動量 $p_\mu=510$ MeV/c、PMT に入射した全光電子数 860 p.e.

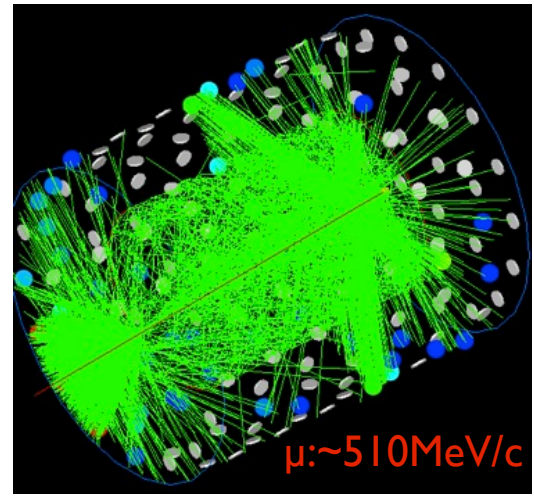


図 3.4: FV 水なし状態のイベントディスプレイ。入射ニュートリノエネルギー $E_\nu=0.56$ GeV、生成したミューオンの運動量 $p_\mu=510$ MeV/c、PMT に入射した全光電子数 273 p.e.

3.3 Mizuche 検出器位置でのニュートリノビームフラックス

Mizuche の設置場所でのニュートリノビームフラックスを図 3.5 に示す。また、その時に反応するニュートリノのエネルギー分布を式 3.6 に示す。

3.4 ニュートリノ反応エネルギー分布

図 3.6 に Mizuche 検出器内で反応したニュートリノのエネルギー分布を示す。色の違いは反応モードの違いを表し、赤網掛け線は荷電カレント反応、青網掛け線は中性カレント反応の場合を示す。

3.5 ニュートリノ反応に対する総光量分布

タンク内でのニュートリノ反応に対して予測される総光量分布を示す。ここで言う総光量とは、ヒットがあった PMT で測定した光量 (p.e.) の和を意味する。また今回のスタディでは、一つの PMT で 2p.e. 以上の光量を測定できた場合にその PMT でヒットがあったと判断する (つまり、ヒットの閾値は 2p.e. と設定した)。FV 内に水あり、水なしの 2 状態でシミュレーションしたときに検出された全光電子数を図 3.7 に示す。

図 3.7 の FV 内の水の状態、ニュートリノ反応の位置の違いによる場合分けは次の通り。

vertex in Tank (w/ water) : 黒色 FV 内に水ありの状態、タンク全体でニュートリノが反応した場合

vertex in OV (w/o water) : 緑色 FV 内に水なしの状態、FV 外 (OV 内) でニュートリノが反応した場合

vertex in FV (w/ water) : 赤色 FV 内に水ありの状態、FV 内でニュートリノが反応した場合

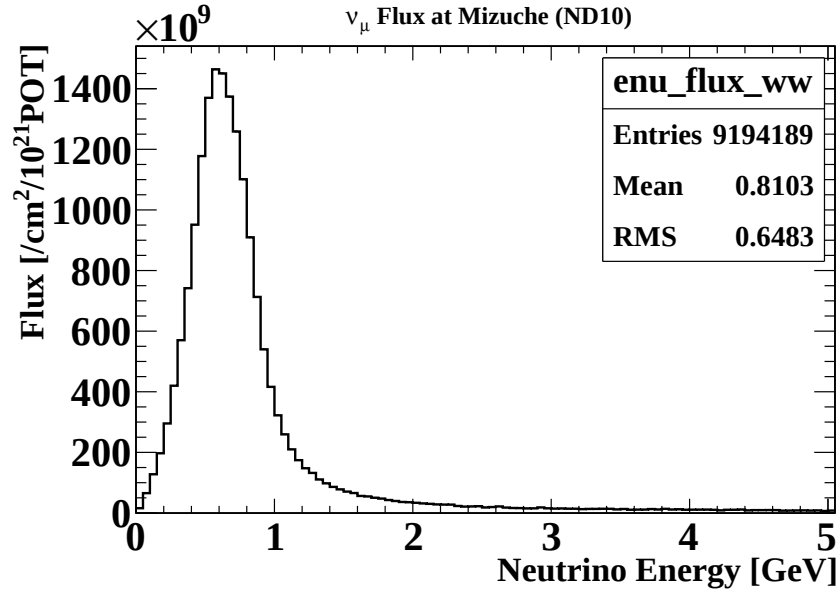


図 3.5: Mizuche の設置場所でのニュートリノビームフラックス。

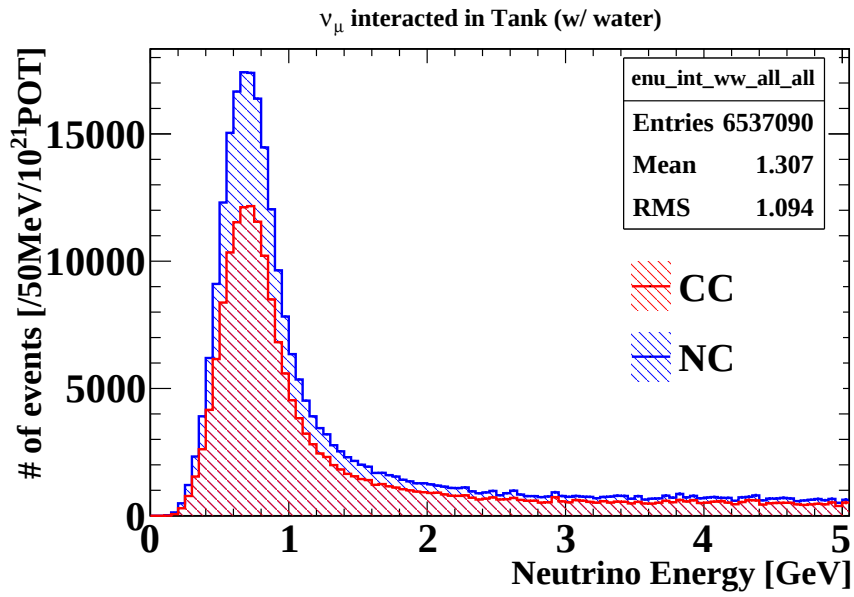


図 3.6: Mizuche 検出器内で反応するニュートリノのエネルギー分布 (FV 内に水あり)。赤斜線：荷電カレント (CC) 反応、青斜線：中性カレント (NC) 反応。

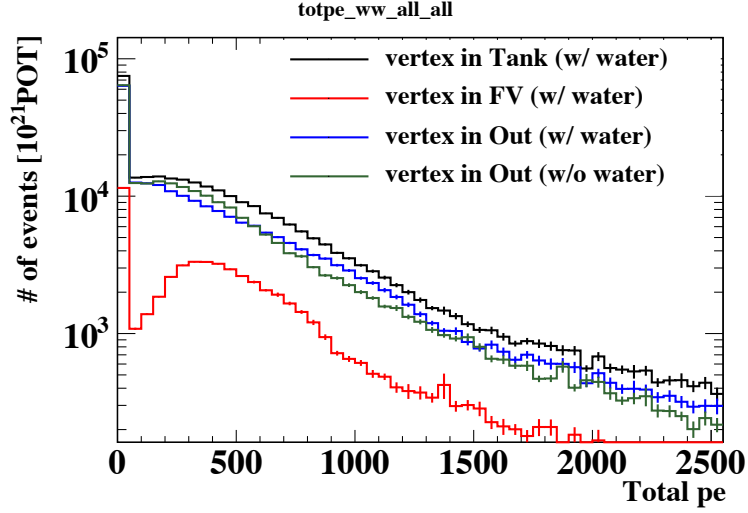


図 3.7: ニュートリノ反応に対する総光量分布。線の色違いについては本文を参照

vertex in OV (w/ water)：青色 FV 内に水ありの状態、FV 外でニュートリノが反応した場合

FV 内で反応したニュートリノの総光量分布 (赤色) において 0 付近にピークが立っているが、これは中性カレント反応で荷電粒子が全くでない場合や、荷電カレント反応で荷電粒子が生成されてもチェレンコフ光を出すほどのエネルギーがない場合の光量である。

また、FV 内に水がある場合とない場合で、FV 外で反応したニュートリノに対する総光量の違いを見てみると、低い領域 (<200p.e.) では良く一致しているのがわかる。

実験で測定できる分布としては、黒色 (vertex in Tank (w/ water)) と緑色 (vertex in OV (w/o water)) になる。

3.5.1 ニュートリノ反応に対する検出効率

実際の測定では PMT のノイズによるアクシデンタルなイベントが起こりうる。そのようなバックグラウンドイベントを落としてニュートリノ反応によるシグナルイベントのみを数えるために、得られた総光量に対してある光量以下のイベントをバックグラウンドとしてカットする。しかしこのような選択 (光量カット) を掛けることで、一部のシグナルイベントを落としてしまう。このとき、どの程度のシグナルイベントが残るのか、その検出効率を見積もった。検出効率 (Efficiency) の式は次の通り、

$$\text{Efficiency} = \frac{\# \text{ of events after total p.e. cut}}{\# \text{ of neutrino interactions}} \quad (3.1)$$

図 3.8 は、横軸をカットをかけた全光電子数の値にし、縦軸に検出効率をプロットしたものである。50～200p.e. の範囲でカットをかけるならば、FV 外で反応するニュートリノに対する検出率は、FV 内に水がある場合 ($\epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w/ FV water})}$) でもない場合 ($\epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w/o FV water})}$) でもほぼ同じであることがわかる。

FV 外の水の厚さは 30cm であり、手計算で 600～800MeV/c のミューオンがその領域を通った場合に観測される総光量は～150p.e. と見積もれる。この 150p.e. の光量カットを掛けた場合に測定できるニュートリノのエネルギー分布とその際の検出効率を見ていく。

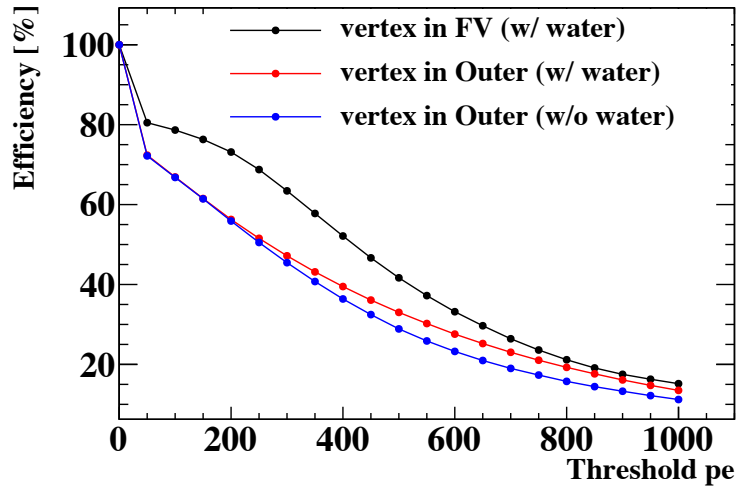


図 3.8: 総光量に対するカットの閾値と検出効率の関係。横軸は総光量に対するカットの閾値、縦軸はニュートリノ反応に対する検出効率を表す。全ニュートリノ反応を使用。

光量カット (Total p.e.>150p.e.) 後のニュートリノエネルギー分布

図 3.9 は PMT で測定した総光量が 150p.e. 以下を落とす光量カット後のニュートリノエネルギー分布を表す。黒色が FV 内に水ありの場合の光量カット後のエネルギー分布から、FV 内に水がない場合の光量カット後のエネルギー分布を引いたものである。ともにタンク全体で反応したニュートリノを使用している。黒色の分布が実験で測定できるニュートリノの予測エネルギー分布となる。一方、赤色は (FV 内に水がある場合で) FV 内でのみ反応したニュートリノのカット後のエネルギー分布を表す。赤色の分布が測定したいニュートリノのエネルギー分布となる。図 3.9 のように黒色と赤色の分布が良く一致していることから、水の抜き差しで測定数の差をとるだけで、測定したい FV 内で反応したニュートリノと同じエネルギー分布のニュートリノの数を測定できる。

また、このとき測定できるニュートリノエネルギー分布のピークエネルギーは約 750MeV ある。

FV 内でのニュートリノ反応に対する検出効率

FV 内部で反応したニュートリノに対する検出効率を図 3.10 に示す。線の色の違いは反応モードの違いを表す。黒線は全ニュートリノ反応に対する検出効率、赤線は荷電カレント反応のみに対する検出効率を表す。荷電カレントに対しては 200MeV のあたりから検出効率が急激に立ち上がり、700MeV 以上では 90% 以上の高い検出効率が期待される。

FV 外でのニュートリノ反応に対する検出効率

FV 外でのニュートリノ反応に対する検出効率を、FV 内に水あり・なしの場合について見積もった。その結果は図 3.11 となる。

全エネルギー領域において、FV 内に水がある場合とない場合の検出効率が MC の統計の範囲内で一致している。このことから、外部からのバックグラウンドがないと仮定する

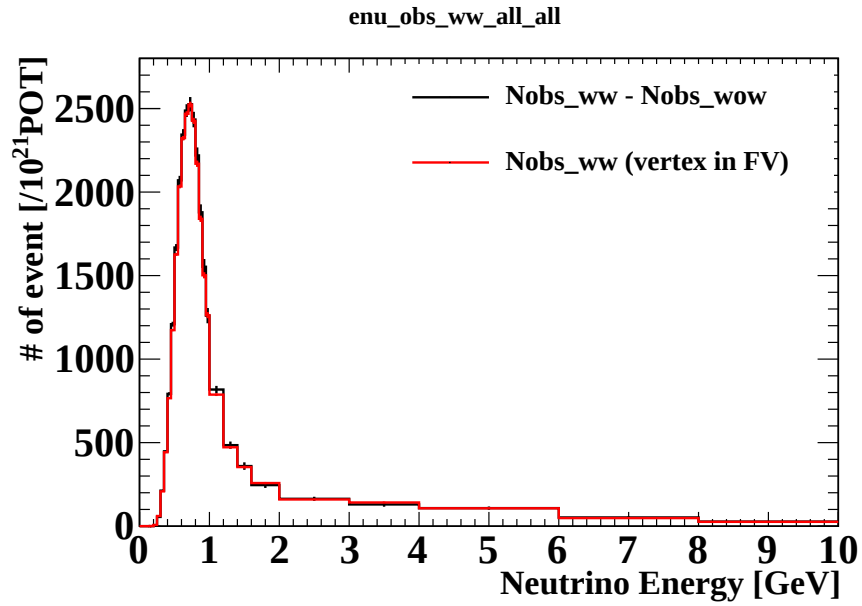


図 3.9: 測定した総光量 $>150\text{p.e.}$ のカットを掛けた後のニュートリノエネルギー分布。黒色がFV内に水ありの場合となしの場合の差をとったエネルギー分布。赤色がFV内でのみ反応したニュートリノのエネルギー分布。全エネルギー領域で両者がよく一致している。

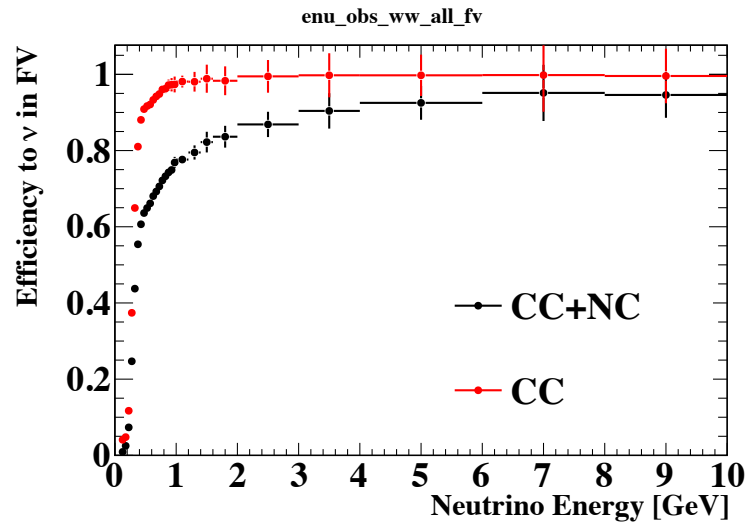


図 3.10: FV内での検出効率。黒色が全ニュートリノ反応に対する検出効率、赤色が荷電カレント反応に対する検出効率を表す。

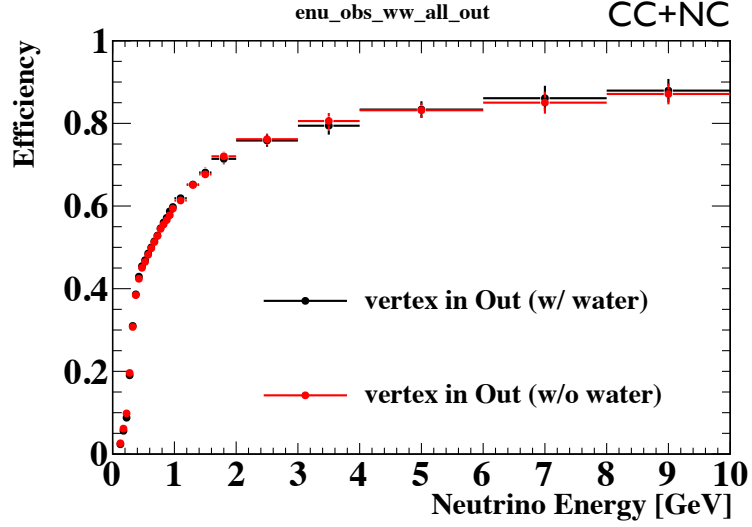


図 3.11: FV 外での検出効率。全ニュートリノ反応を使用した。

と、実験原理のように水を抜き差しした場合の測定数の差をとることで、FV 内でのニュートリノ反応のみを数えることが期待できる。

3.5.2 シグナルに対するバックグラウンドの割合

FV 外で反応したニュートリノによるイベントの内、水の差し引きで残ってしまうイベント (バックグラウンド) が、FV 内で反応したニュートリノによるイベント (シグナル) に対してどの程度あるかを見積もった (S/N の逆数の見積もり)。計算式としては、次の通り、

$$(S/N)^{-1} = \frac{N_{OV}^{(w/ FVwater)}(\text{after total p.e. cut}) - N_{OV}^{(w/o FVwater)}(\text{after total p.e. cut})}{N_{FV}^{(w/ FVwater)}(\text{after total p.e. cut})} \quad (3.2)$$

図 3.12 は各光量カットの閾値に対する $(S/N)^{-1}$ を表す。光量カットの閾値が 200p.e. 以下の場合、残ってしまうバックグラウンドはシグナルに対して小さいことがわかる。

図 3.13 は光量カット >150p.e. をかけた場合の $(S/N)^{-1}$ のエネルギー依存性を表す。このプロットより、測定できるエネルギー分布のピーク付近では、 $(S/N)^{-1}$ が約 3% と低いバックグラウンドの環境下での測定が期待できる。

3.5.3 まとめ

本章で述べてきた MC スタディの結果より、

- 総光量 > 150 p.e. のカットを行えば、FV 外で反応したニュートリノに対する検出効率は水がある場合でもない場合でも同じ。このことから実験原理のように水の差し引きでうまく FV 内で反応したニュートリノの数を数えることができる。
- このとき、反応したニュートリノを高い S/N ($(S/N)^{-1}=3\%$) で測定できる。

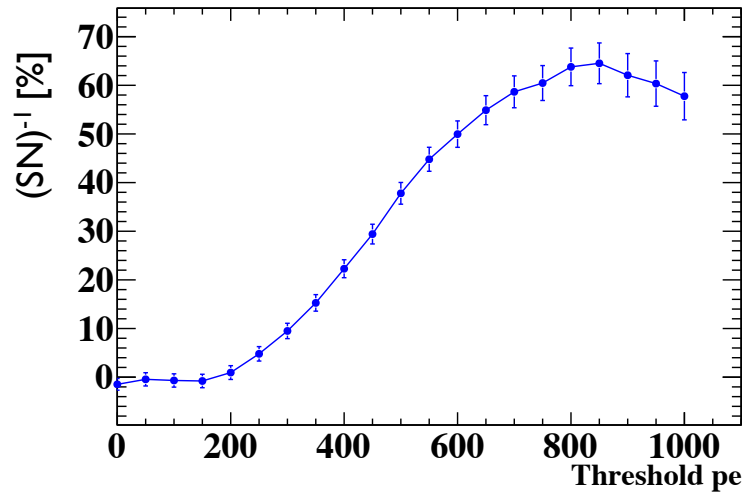


図 3.12: 光量カットの閾値に対する $(S/N)^{-1}$ 。全ニュートリノ反応を使用。

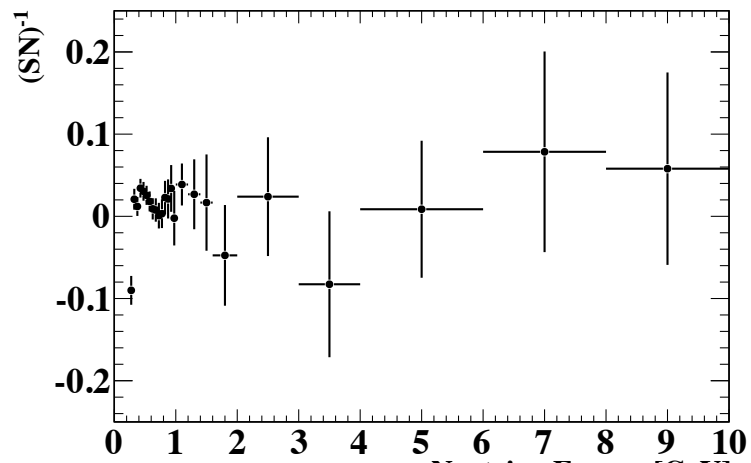


図 3.13: 光量カット >150 p.e. の場合の、 $(S/N)^{-1}$ のニュートリノエネルギー依存性。全ニュートリノ反応を使用。

ということが言える。

次に、実際の検出で測定する際に、検出器が性能通り (MC の予測通り) 動いているかを確かめる (キャリブレーションする) 方法について述べる。この方法としてはいくつかの解があるが、現時点では T2K ビームを用いた方法を計画している。実際の実験の場所でキャリブレーションを行うことで、スムーズに本実験に移ることができる。

3.6 検出器キャリブレーション

3.6.1 キャリブレーションの手段

検出器のキャリブレーションとして、検出器実機を T2K 前置検出器ホール地下 B2 に設置し、ビーム起源の壁からのミュオン (ロックミュオン) による光量測定を行う。

T2K 実験のビームラインで生成されたニュートリノビームが前置検出器ホールに到達した際、一部は検出器ではなくホール壁中の物質と反応する。その際ミュオン (壁ミュオン) が生成され、運動量の高いものは壁から出て検出器に到達する。そのミュオンをトリガーするシステムを本検出器の前後に設置することで、検出器を突き抜けた壁ミュオンのイベントのみを選択する。

3.6.2 壁ミュオンの光量測定

壁ミュオンレート

壁ミュオンがどの程度の頻度で Mizuche 検出器に飛来するかを見積もる。これには T2K 実験のニュートリノホールに設置されたニュートリノビームモニターのデータを用いる。

- INGRID の解析でトラッキングまで行い、ニュートリノイベントではなく、モジュール外から来た長いトラックを残す粒子を選ぶ。この粒子をロックミュオンと仮定する。
- 2010 年の T2K 物理データを元にイベントレートを見積もると、 $471800 \text{ events} / 3.2 \text{ e19 \# of protons}$ (全モジュール)。この数はニュートリノイベントと同程度。
- INGRID のロックミュオン検出効率を 1 と仮定する。
- INGRID と Mizuche の面積比から、タンク上流から飛来するロックミュオンのレートを見積もると、 $92.7 \text{ muons} / \text{hour}$ (100kW 時)。10 時間で $\sim 1\text{e}3 \text{ muons}$ 、1 週間で $\sim 1\text{e}4 \text{ muons}$ 。

この見積もりから、10 時間程度の測定で十分な統計が得られることがわかった。

MC による期待される検出器の応答

壁ミュオンがタンクを突き抜けた際にどのようなイベントが見えるのかを MC を用いて予測する。その際の MC のセットアップについて述べる。

まず、ミュオンを Figure 3.14 のようにタンク上流から打ち込む。

解析の際に、ミュオンの初期位置 (vertex) によって二つの場合分けを行う。図 3.15 にその場合分け (FV area, Outer area) の定義を示す。

タンクに打ち込むミュオンの条件は次の通り。

- 運動エネルギー 450~1450MeV の間で一様乱数を振り決定。
- 入射方向は、タンクの中心軸に対して平行に。
- 初期位置 (vertex) はタンク上流の蓋上で一様に決定。

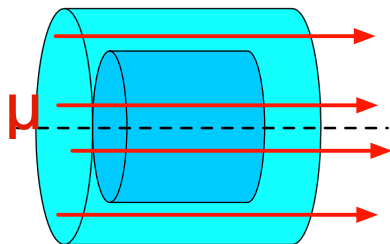


図 3.14: MC でタンク上流からミュオンを打ち込む様子。タンク中心の濃い水色が FV 領域、周りの薄い領域が Outer 領域を示す。

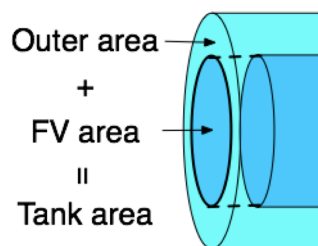


図 3.15: ミューオンの vertex の場合分けの定義。タンク上流の蓋上で、中心から 40cm 以内を FV 領域 (濃い水色)。それ以外を Outer 領域 (淡い水色) と呼ぶ。(タンク上流の蓋上に各領域を射影した形)

解析の際には、実際のタンクを貫通したミュオンのみを選択する。FV 内に水がある場合と、ない場合の二通り。MC の結果は 927 muons (100kW の 10 時間運転) で規格化する。

Figure3.16 に MC のイベントサンプルを載せる。

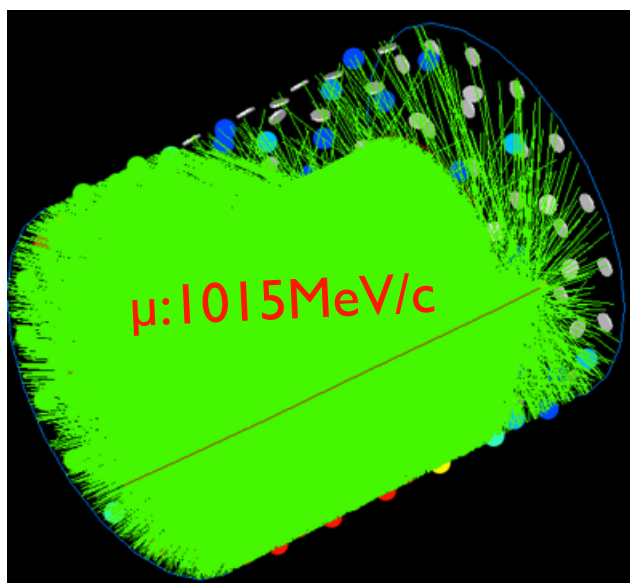


図 3.16: MC でタンク上流からミュオン (運動量=1015MeV/c) を打ち込んだ際のイベントディスプレイ。赤色のトラックがミュオン、緑色が光子を表す。タンクの表面についている円が PMT を表し、灰色はヒットがないものを表し、ヒットがある場合は光量に応じて青色から赤色に色が変わっている。このイベントで測定される総光量は 1148p.e.

ミュオンに対して予測される検出器の応答

先ほどの MC のセットアップの下で、タンクに打ち込んだミュオンに対して得られる総光量を求め、検出器の応答を予測した。図 3.17 に総光量の一次元分布を、図 3.18(FV 内に水あり)、図??(FV 内に水なし) に総光量と中心からの距離 (の二乗) の二次元分布をプロットした。

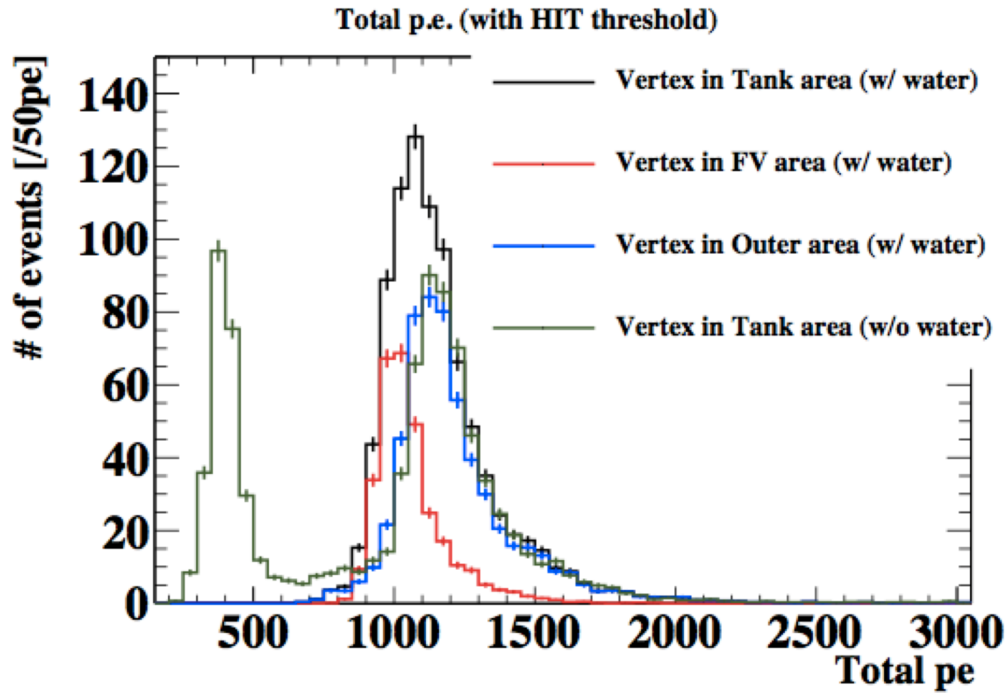


図 3.17: 測定される総光量の一次元分布。黒色が水がある場合でミューオンの vertex がタンク上流全体。赤色が水がある場合で vertex が FV 領域内。青色が水がある場合で vertex が Outer 領域内。緑色が水がない場合でタンク上流全体。

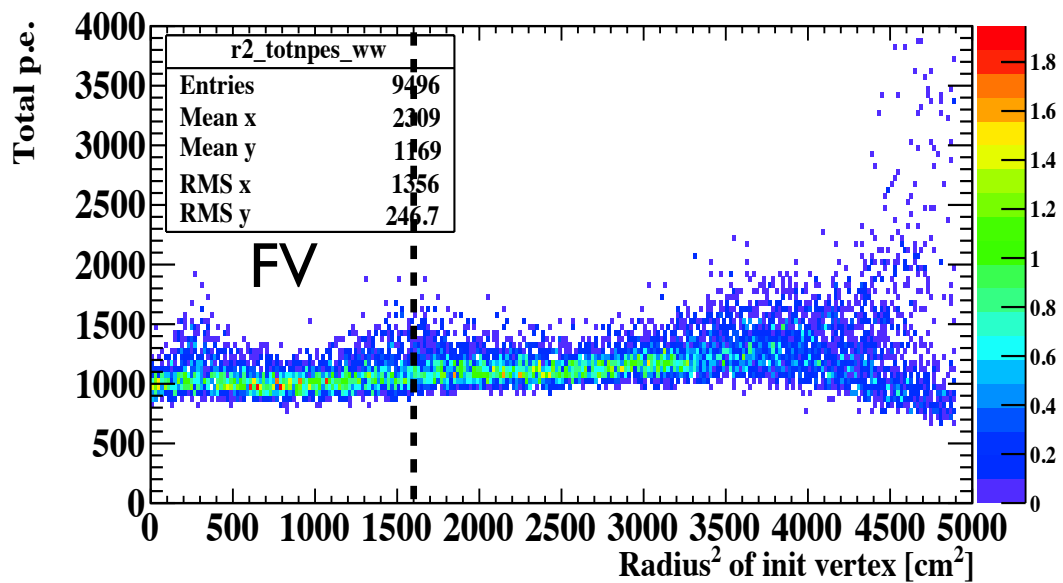


図 3.18: FV 内に水がある場合の、測定される総光量とタンク中心からの距離の二次元分布。横軸が中心からの距離の二乗、縦軸が測定される総光量を表す。黒い点線が FV の境界を表す。

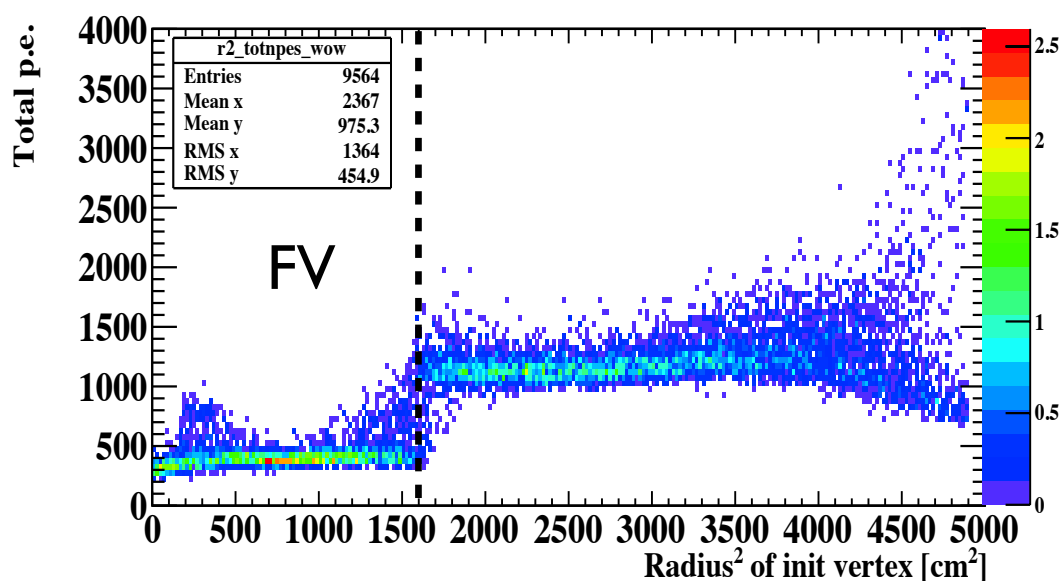


図 3.19: FV 内に水がない場合の、測定される総光量とタンク中心からの距離の二次元分布。横軸が中心からの距離の二乗、縦軸が測定される総光量を表す。黒い点線が FV の境界を表す。

実際の測定時は、ミュオンの通過位置をずらしながら数回測定することで、Figure 3.18, 3.19 のような中心からの距離に応じた光量のプロットを作成。その結果を MC と比較、検出器の応答の理解につなげる。

検出器実機のキャリブレーションの方法

タンク上流と下流にトリガー（ホドスコープ、シンチレータ）を設置し、タンクを突き抜けるロックミュオンをトリガーする。図 3.18, 図 3.19 のようなプロットを作成するために、トリガーの位置を変えつつ測定を数回行う。見積もったロックミュオンレートを元にとすると、10 時間で $\sim 10^3$ ミュオンが期待されるので、トリガーの設置時間などを含めて、各位置で 1 日の測定を行う。実際にトリガーに使用する検出器、読み出しシステムなどの具体的な案は現在検討中。

3.7 現在の実験の進行状況

現在の実験の状況を箇条書きで簡単に報告する。

- タンクのインストール：ニュートリノホール地下 B2 に設置済み (図 3.20)。
- PMT の設置：タンクへの設置は専用の固定具に PMT を取り付けた後に行う。それらに必要な固定具は製作済み、後は実際に作業を行うのみ (PMT の設置作業は全行程含めて 10 日ほどかかる)。
- 水の準備：水のバッファータンクを地下に設置、2 トンの水 (実験には 2.5 トン必要) をタンク内に貯水済み (図 3.21)。循環系もタンクへの接続以外は完成しており、現在は水をイオン交換樹脂に通すことで水の純化を行っている。水漏れは現在のところない。
- 読み出しシステム：エレキハウスの設置が完了し、必要な機器の設置も完了 (図 3.22)。実際のビームトリガーを用いた読み出しのテストに成功。現在は読み出し機器 (ATM) のキャリブレーションを行っている。
- ケーブルリング：必要なケーブルはすべてそろっている。ケーブルの配線は PMT の設置を行った後に行う予定。
- PMT キャリブレーション：実験に必要なゲインカーブ、相対 QE の測定は予備を含めた全 PMT に対して完了した。
- 宇宙線測定：既に行っているが、結果の一部に不明な点があるため、1 月中に再度行う。
- ロックミュオン測定の準備：トリガーとして同じく J-PARC で行われている Koto 実験で使用されていたホドスコープの使用を検討中。現在ホドスコープ実機を借りてきて、テスト中。また、平行して別の解も検討中。

主要メンバーの高橋が2月頭まで修論の執筆に専念するため、修論終了後、PMT の取り付け、ケーブルリングを行い、2月末にはビーム測定の準備を完了させる。



図 3.20: T2K 前置検出器ホール地下 B2 に設置した検出器の写真。足付きのステンレス製のタンクがアンカーで床に固定されている。



図 3.21: 使用するイオン交換樹脂 (手前) と橙色のバッファータンク (奥) の写真。

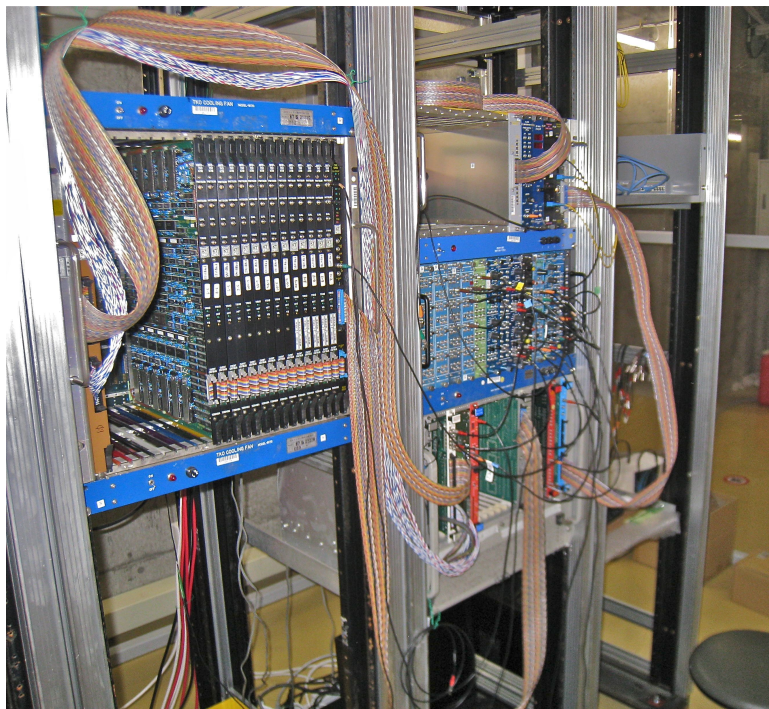


図 3.22: 読み出しシステムの全体写真。写真手前の黒色のボードがPMTの信号を読み出す ATM ボード。写真真ん中はゲートの生成やタイミング制御、トリガー生成などを行う NIM モジュールと ATM などのボードのデータを読み出す VME モジュールの読み出し機器。