

J-PARC小型水チェレンコフ 検出器”Mizuche”の開発と 私の2年間

京都大学大学院 理学研究科
高エネルギー物理学研究室
修士課程2年 高橋 将太

目次

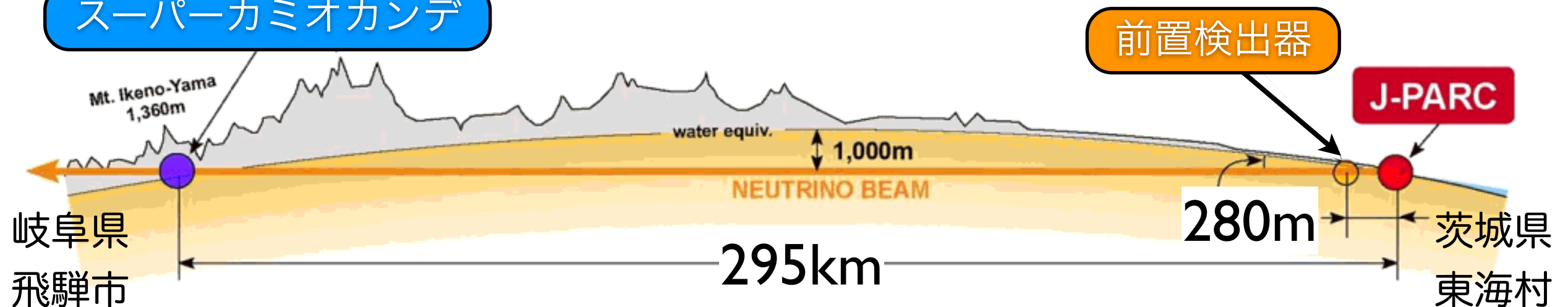
- Mizuche実験について
- 強度解析を踏まえての詳細設計
- 光電子増倍管のキャリブレーション
- 宇宙線に使ったチェレンコフ光の光量測定
- 検出器シミュレーションによる検出効率の見積り
- まとめ

T2K長基線ニュートリノ振動実験

- J-PARCで生成した大強度 μ ニュートリノビーム
- 前置検出器、スーパーカミオカンデ（SK）で観測
 1. μ ニュートリノ消失モードの精密測定
 2. 電子ニュートリノ出現モードの世界初観測

世界最大水チェレンコフ検出器

スーパーカミオカンデ



Mizuche実験

- 前置検出器(ND)の結果を外挿して、SKでの反応数を予測

$$N_{SK}^{\text{exp}} = N_{ND}^{\text{obs}} \times \frac{\int \Phi_{SK}^{\text{MC}} \times \sigma_{SK} \times \epsilon_{SK} \times dE}{\int \Phi_{ND}^{\text{MC}} \times \sigma_{ND} \times \epsilon_{ND} \times dE}$$

NDの測定結果

モンテカルロで求めた
フラックス

ν 反応断面積 検出効率

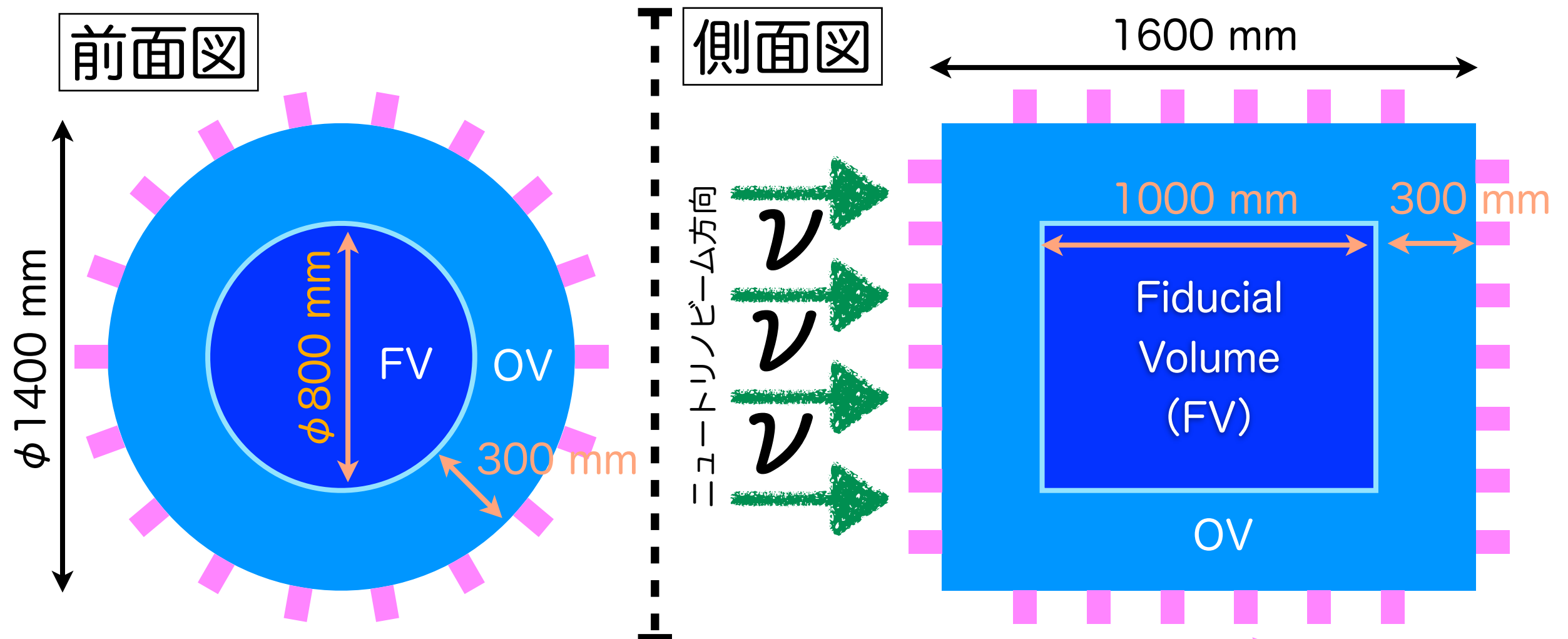
- 反応数予測の精度向上
 - 反応標的：**水** $\Rightarrow$ ν 反応断面積 σ の不定性を抑制
 - 検出原理：**チェレンコフ光** $\Rightarrow$ 検出効率 ϵ の不定性を抑制
- $\Rightarrow$ **小型水チェレンコフ検出器 "Mizuche" の開発 @ 前置ホール**

Mizucheの目標

- 目標
 1. 前置検出器部分での ν 反応数測定（目標精度2%）
 2. SKでの ν 反応予測精度向上
- 特徴
 - SKと系統的によく似た検出器
 - 小型（有効体積0.5トン）
 - T2Kのビーム強度でも ν 反応が1バンチごとに区別可能
 - 反応数測定に特化（エネルギー再構成できない）

検出器の概念図

詳細設計は後述



- **2層**構造の円筒
 - 有効体積 (**FV**) : 質量 500 kg の水標的
 - アウター層 (**OV**) : FV周囲に **300 mm** の水バッファ層
 - FV端の ν 反応で生じたチェレンコフ光の測定に**必要な最短距離**
- 光電子増倍管 (**PMT**) : 3インチ管 (164本、coverage $\sim 6.2\%$)

測定原理

ν がホール壁と反応して生成された n/π^0
 ν がホール壁と反応して生成された μ

	ν によるイベント		ν 以外のイベント	
測定状態	FV	FV外 (OV)	砂ミューオン	ν 由来の 中性子 / π^0
FV水あり				
FV水なし				
残差	シグナル	キャンセル	キャンセル	バック グラウンド

ν 反応に対する検出効率のスタディ

(スタディ中 / 今後スタディ)

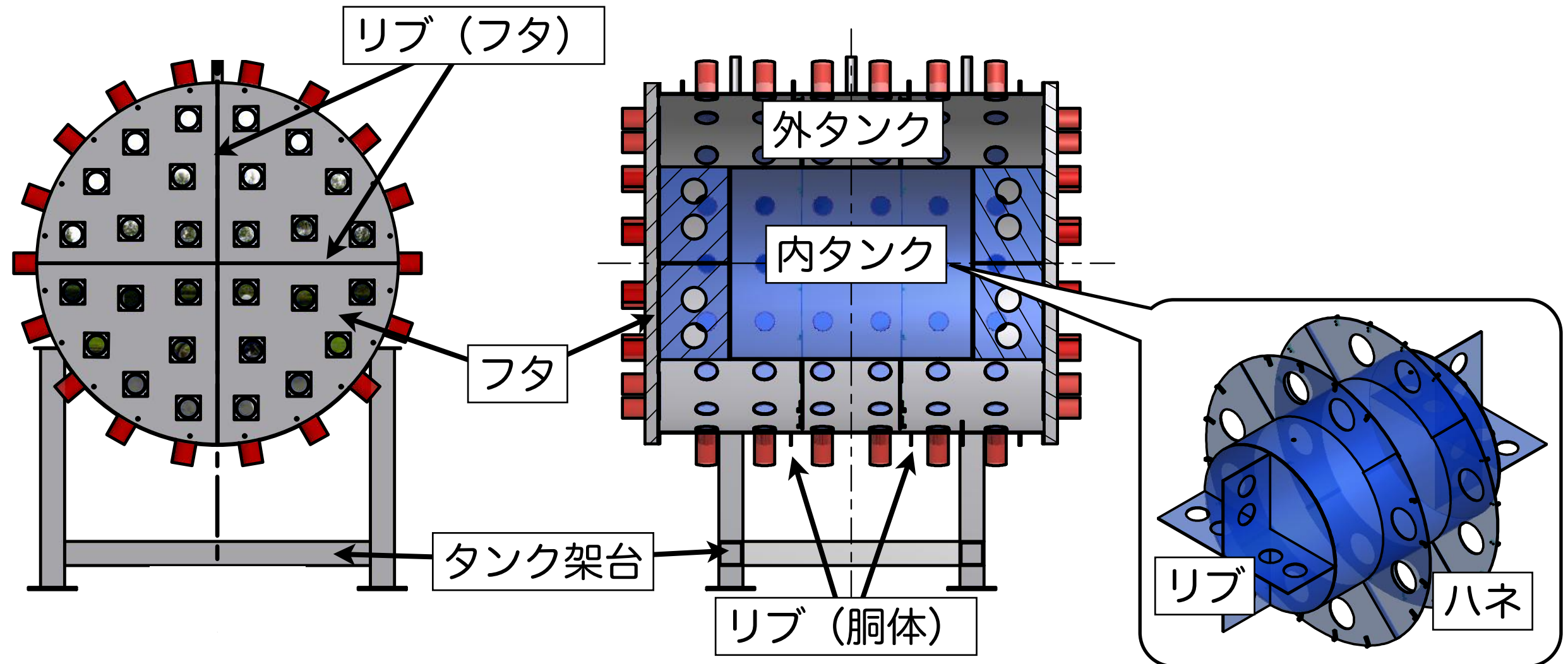
1年間で期待されるν反応数

- 1年**100日**、ビーム強度**100kW**（750kW）で計算
- 測定時間による**統計誤差が最小**となる測定時間比＝体積比
 - FV水**あり**：FV水**なし** = 2.5トン：2.0トン = 56日：44日
 - 統計誤差2.7%（1.0%）

測定状態	測定日数	ν反応頻度 [/日]	ν反応数
FV水 あり	56	199 (1,490)	11,065 (82,985)
FV水 なし	44	158 (1,186)	7,009 (52,570)
残差 (=FV内)		41 (304)	

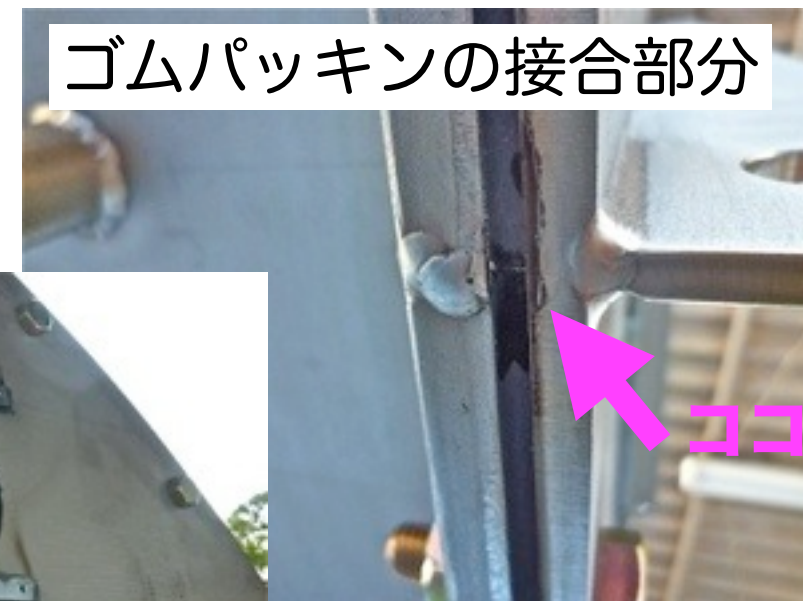
検出器の詳細設計

検出器の詳細設計



- 総質量**2.5トン**の水
 - 水圧に耐え得る構造の設計が必要 ⇒ 強度解析・耐震解析
 - 強度解析ツールにANSYSを使用
 - **安全強度3以上、震度5強**以上を目標に構造を決定

水漏れ試験

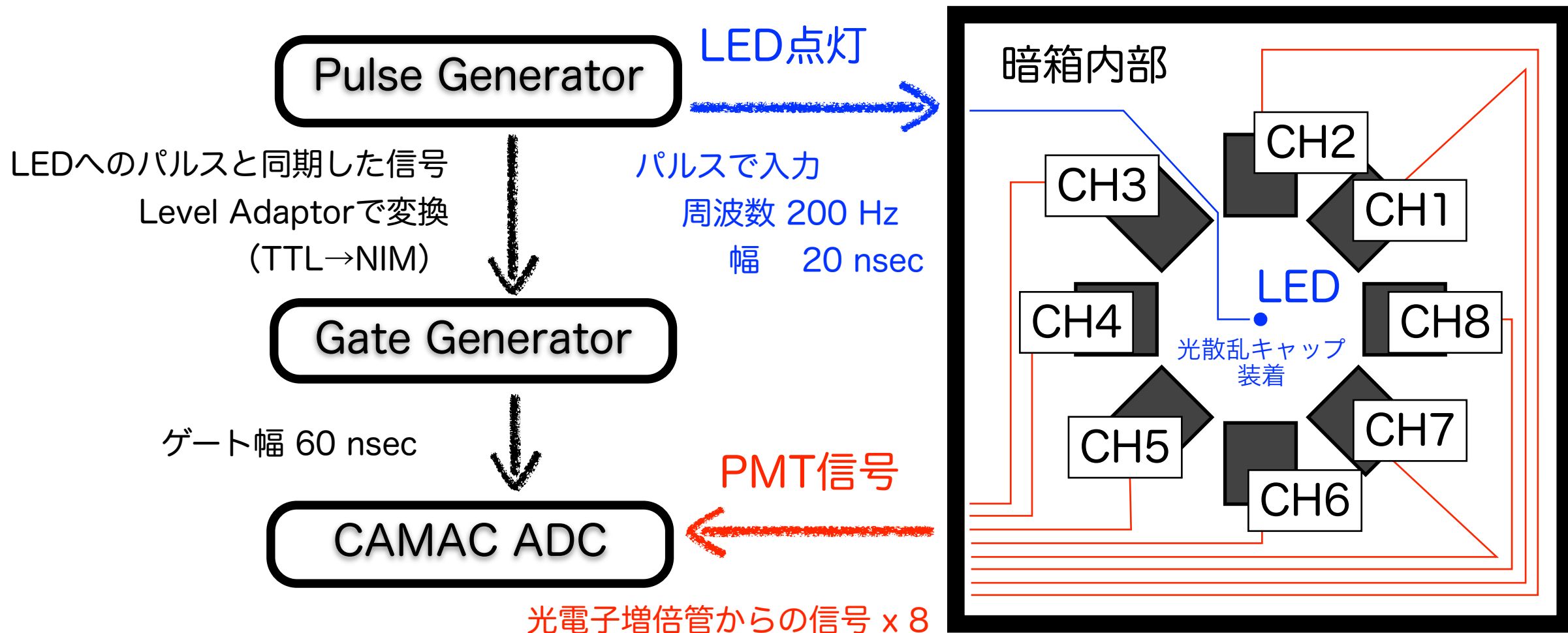


- 水漏れ試験：満水状態で**24時間**静置
- 漏水箇所：
 - ギムパッキンの接合部分：パッキンの取り付け方の調整 + 板ナット
 - PMT取り付け窓**3**箇所：接着の不備 ⇒ 該当箇所のみ再接着
- 後日再試験 → **問題なし** ⇒ 前置ホール地下にインストール**済**

PMTのキャリブレーション

PMTのキャリブレーション

- 入射光量に対する全PMTの出力を一様にしたい
- LEDからの光をPMTで観測
 - 入射光量 (p.e.)、ゲインを測定
- 測定セットアップ：同時に8本測定可能



測定原理

- 測定した信号と平均入射光電子数とゲインの関係

測定した信号の
平均・標準偏差

$$\mu = G \cdot e \cdot \lambda_{p.e.}$$
$$\sigma_{\mu} = G \cdot e \cdot \sqrt{\lambda_{p.e.}}$$

G : ゲイン
e : 素電荷
 $\lambda_{p.e.}$: 平均入射光電子数

- 相対的量子効率の定義

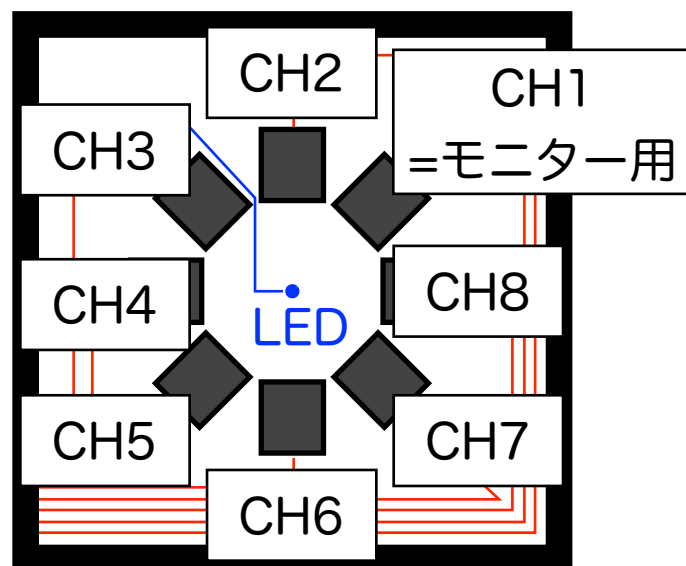
$$Q_{rel}^{(i)} \equiv \frac{Q^{(i)}}{Q^{(ref)}} = \frac{Q^{(i)} \lambda_{\text{photon}}}{Q^{(ref)} \lambda_{\text{photon}}} = \frac{\lambda_{p.e.}^{(i)}}{\lambda_{p.e.}^{(ref)}}$$

とあるPMTの光量

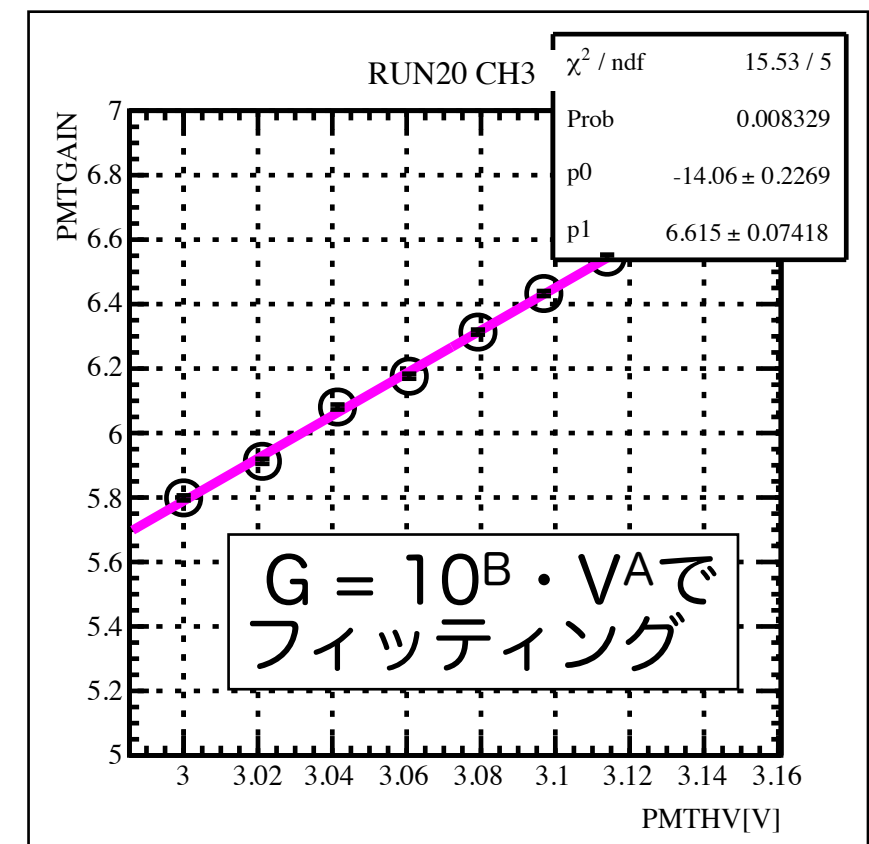
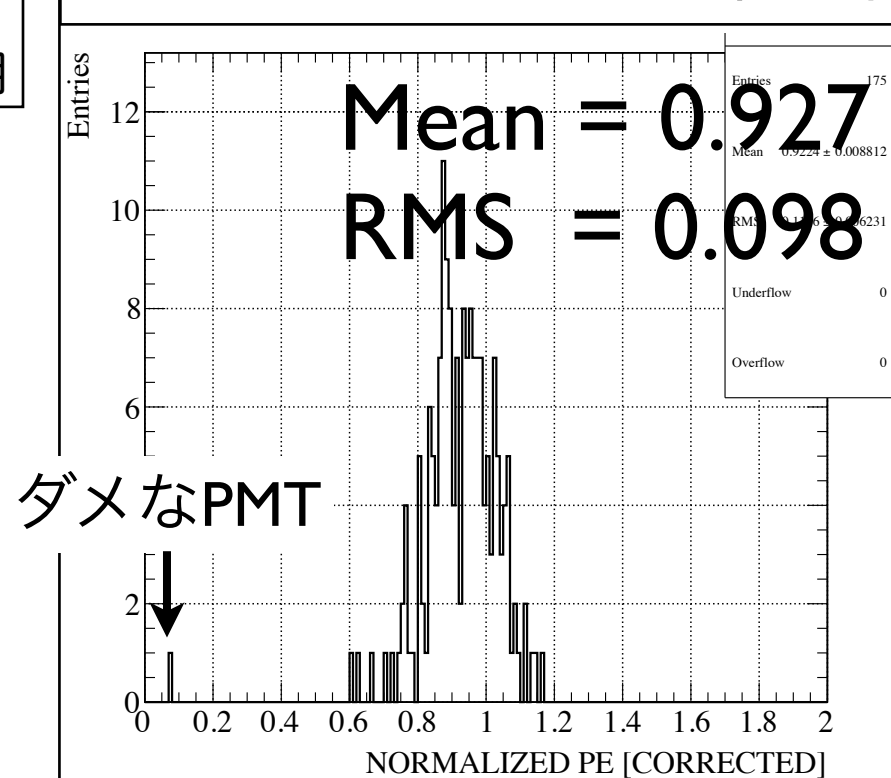
モニタ用PMTの光量

相対的量子効率とゲインカーブ

- 同時に7本のPMTを測定 (合計175本測定)
- 各PMTの光量をモニター用PMTの光量で規格化
⇒ モニター用PMTに対する各PMTの相対的量子効率
- 光量の場所依存性を補正 ⇒ 相対的量子効率のバラつき~11%
- 印加電圧を変えてゲインカーブを測定
- 1000V ~ 1300V、50V刻み



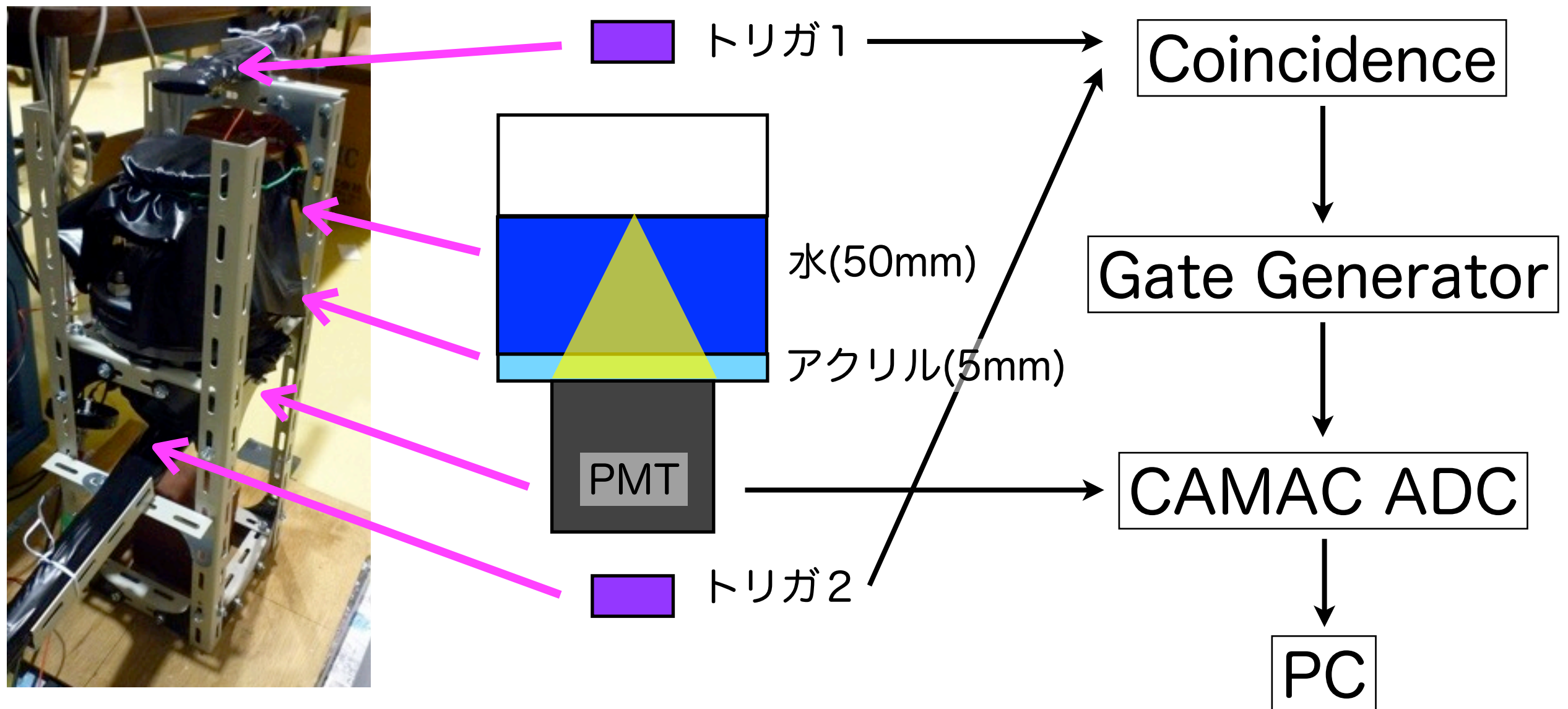
全PMTの相対的量子効率分布



宇宙線による 水チェレンコフ光量測定

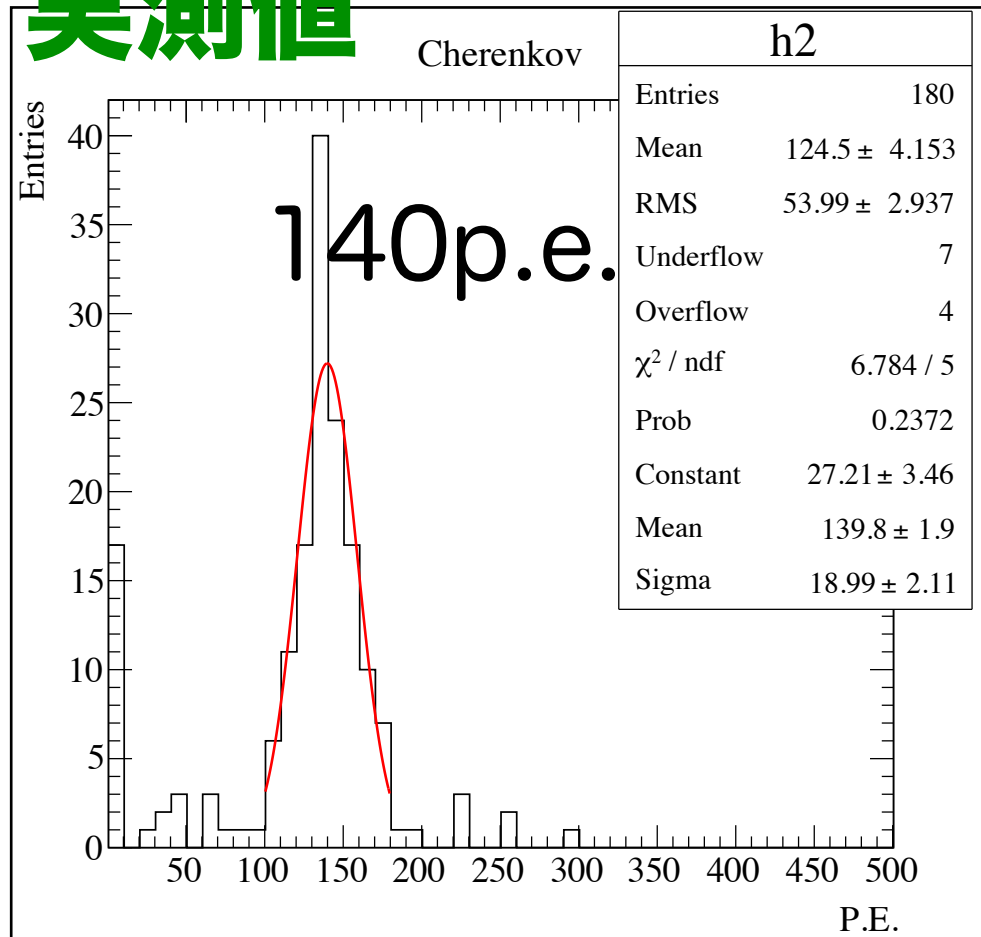
≡ Mizuche

- 宇宙線のチェレンコフ光を使った光量測定
 - ⇒ 実機と同じアクリル窓、PMTを使用
- 水層50mm + アクリル層5mm

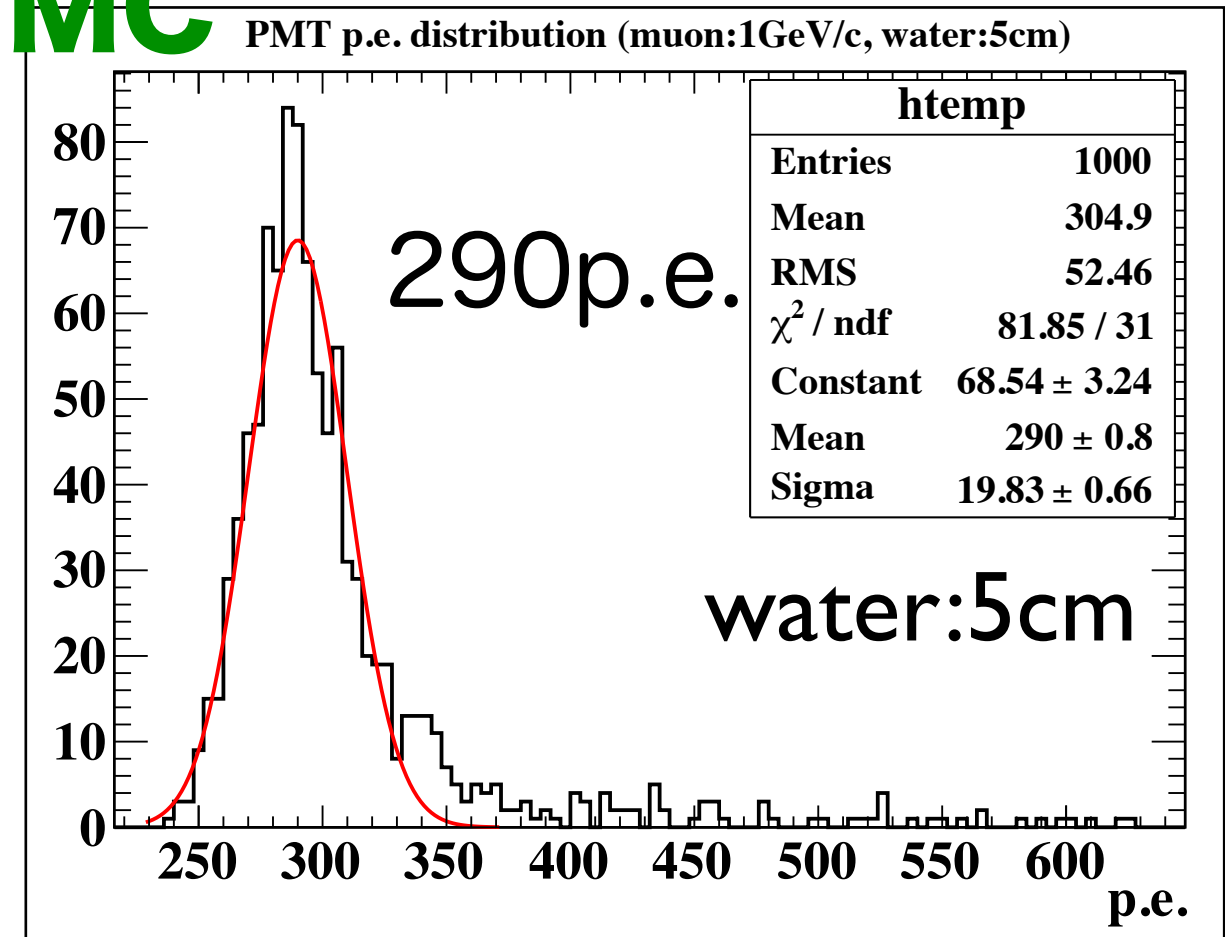


MCと実測値の光量比較

実測値



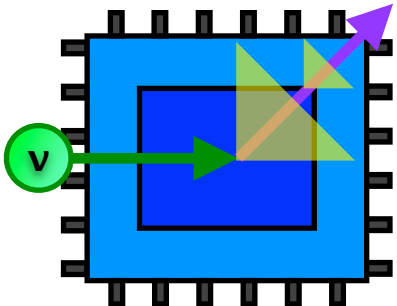
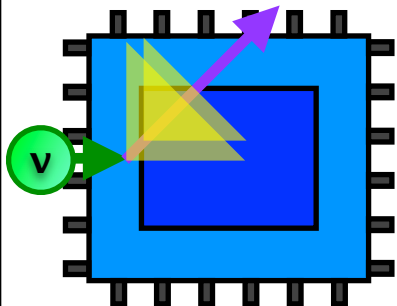
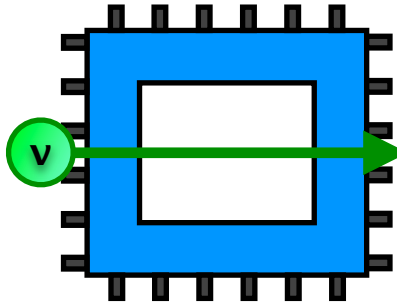
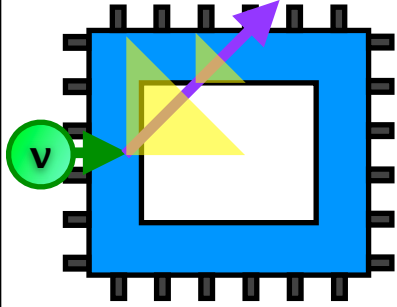
MC



- 問題点：結果は約2倍違う・・・原因は現在スタディ中
- 屈折率の波長依存性 ⇒ MCに追加
- UVTアクリルの透過率の測定 ⇒ MCに追加
- 新しいPMTで測定 ⇒ これから

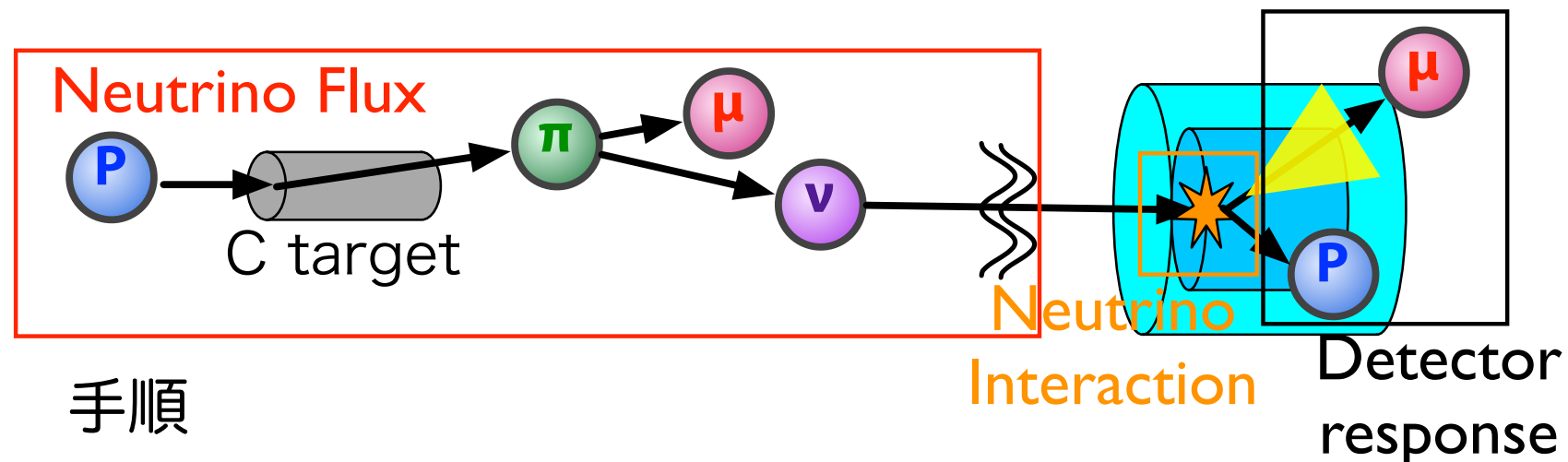
ν 反応に対する検出効率

ν 反応に対する検出効率のスタディ

測定 状態	反応した場所		測定数
	FV	FV外 (OV)	
FV 水あり			$N_{ww}^{obs} = N_{FV} \times \epsilon_{FV} + N_{OV} \times \epsilon_{OV}^{ww}$ ww : with FV water
FV 水なし			$N_{wow}^{obs} = N_{OV} \times \epsilon_{OV}^{wow}$ wow : w/o FV water
残差	シグナル	キャンセル	$N_{FV}^{obs} = N_{FV} \times \epsilon_{FV}$

- 残差によってシグナルを計数する場合、OVの検出効率がFV水あり／なしで一致する必要がある ($\epsilon_{OV}^{ww} = \epsilon_{OV}^{wow}$)

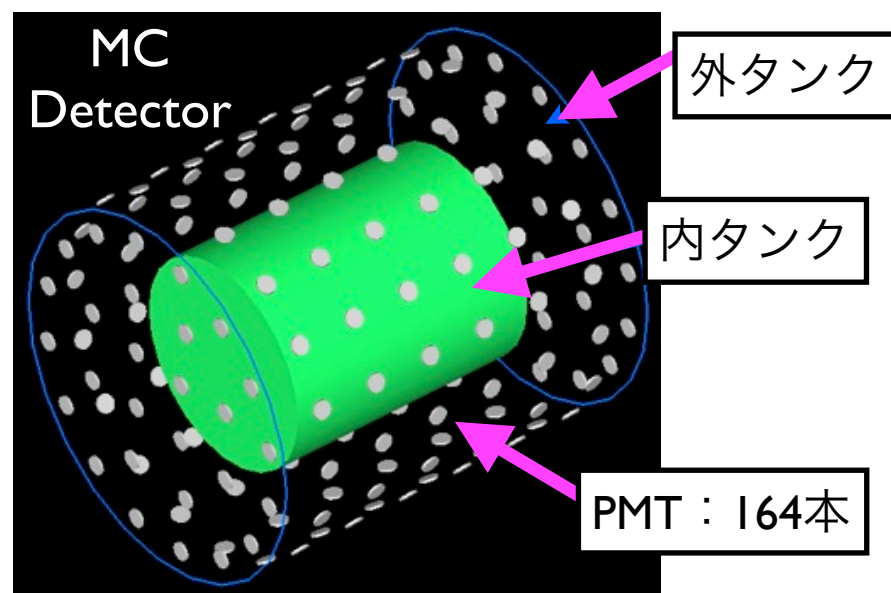
検出器シミュレーションの概要



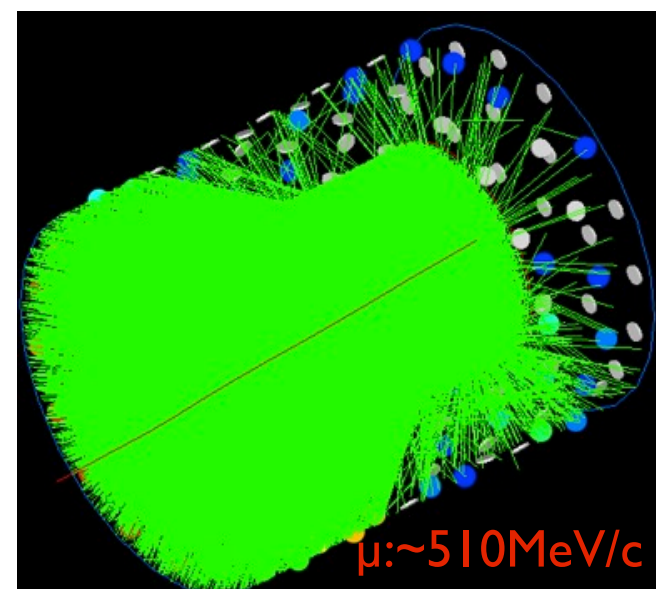
- 手順

1. ニュートリノフラックスの作成 (JNUBEAM)
2. ニュートリノ反応の生成 (NEUT)
3. 検出器の応答確認 (GEANT4)

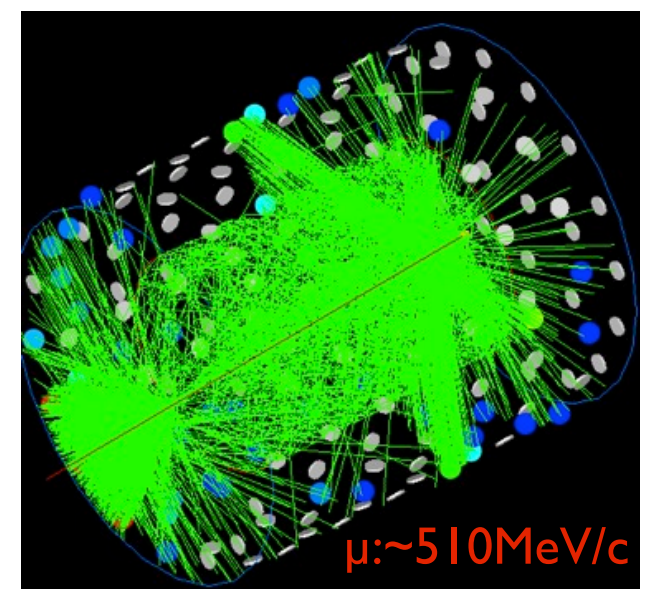
- GEANT4の設定



FV水あり

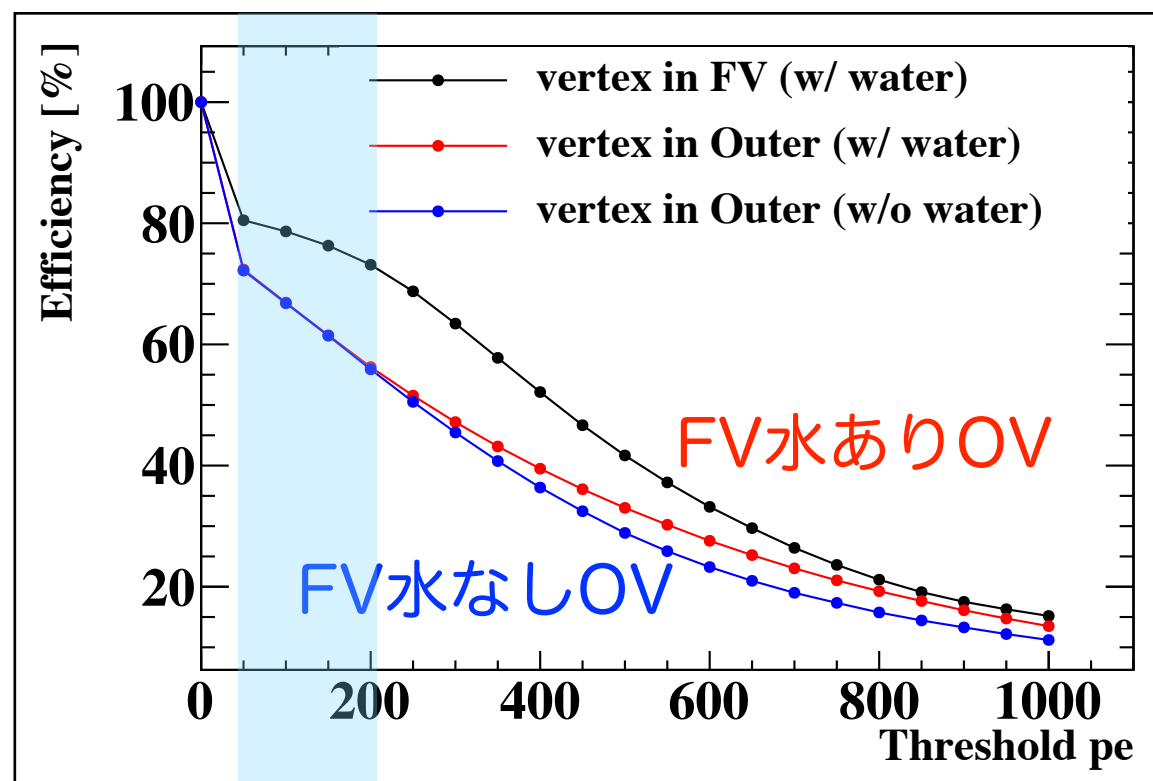


FV水なし

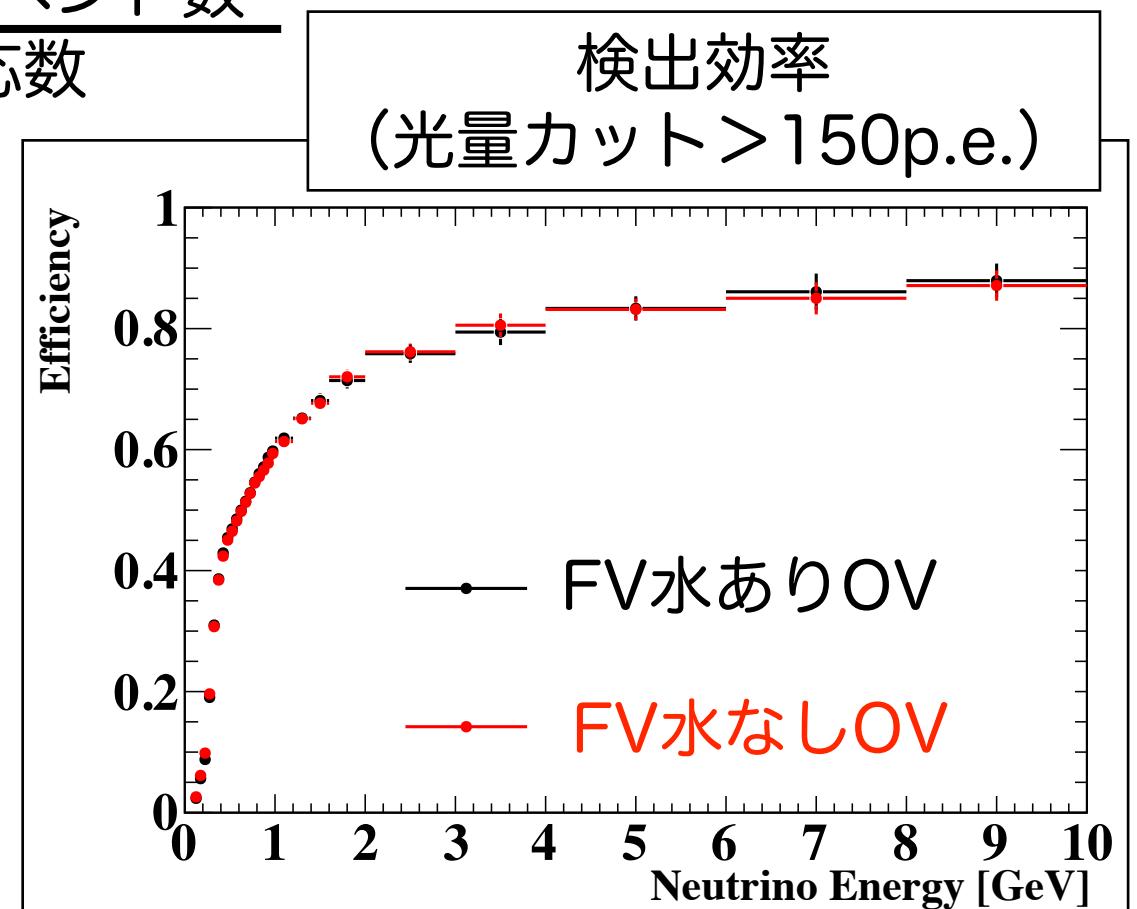


総光量によるカットと検出効率

- ヒット : 2 p.e. 以上入射したPMT
- 総光量 : ヒットがあったPMTの光量の総和 (total p.e.)
- 光量カット : 総光量に対して、ある光量以上のイベントを選択
- 検出効率 : $\frac{\text{光量カット後に残るイベント数}}{\text{ニュートリノ反応数}}$



検出効率が一致する光量カットの範囲
50 p.e. ~ 200 p.e.



全エネルギー領域で一致

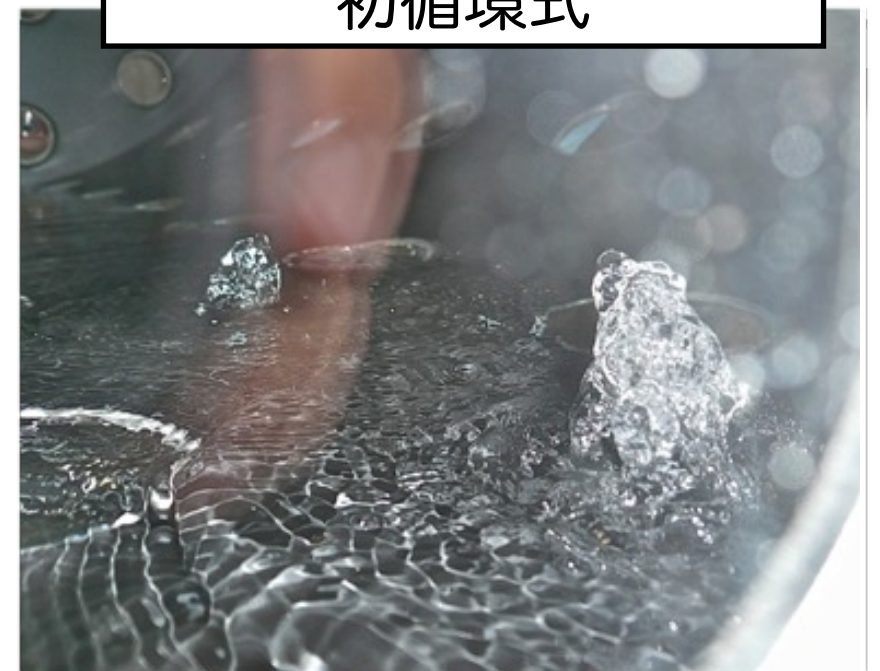
現状と今後の予定

ぽちっ！

- 1週間前
 - タンク水循環テスト
 - アクリル透過率の測定
 - PMT取り付け部分の再検討
 - twitterはじめました(@Mizuche)
- ～2月下旬：検出器のアセンブリー
 - PMT取り付け／ケーブリング
- ～3月中・下旬：動作確認
 - 検出器のキャリブレーション
- 3月下旬：測定開始
 - FV水あり状態から



初循環式



まとめ

- Mizuche実験
 - **小型水チェレンコフ検出器**による ν 反応数測定 @ T2K前置検出器
 - 系統誤差を抑えたSKでの ν 反応数予測が最終的な目標
 - FV内の水が**ある状態**／**ない状態**での測定数の**残差**
 - 強度解析・耐震解析を踏まえた検出器設計・製作
 - **安全係数3**を保証、**震度5強**の地震でも壊れない
 - 水漏れ試験もクリアし、地下ヘインストール済
 - 光電子増倍管のキャリブレーション
 - 相対的量子効率、ゲインカーブを測定
 - 検出器本体、光電子増倍管の**準備が整った**
 - 宇宙線を使ったチェレンコフ光の光量測定
 - MCと2倍の差 $\Leftarrow$ 原因はまだ分ってない
 - ν 反応に対する検出効率
 - 光量カット ($>150\text{p.e.}$) で2状態の検出効率が**ほぼ一致**
- 今後の予定
 - 検出器のアセンブリー
 - 砂ミュオンなどを用いた光量キャリブレーション
 - FV水ありでの ν 反応数測定

バックアップ

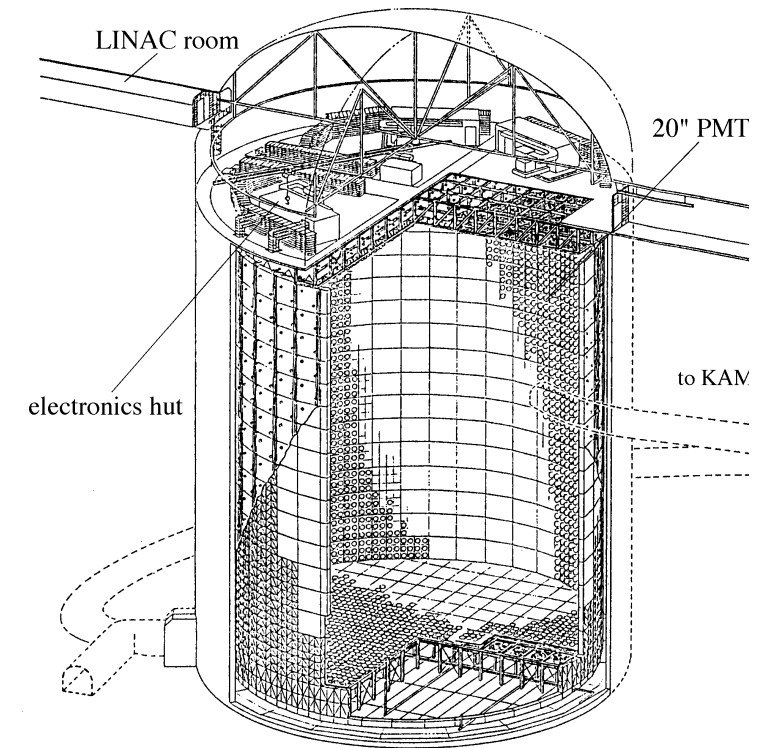
J-PARC加速器



ビームエネルギー	30 GeV	スピン構造	8 bunches/spill
ビーム強度	750 kW	バンチ間隔	581 nsec
1スピン当たりの陽子数	3.3×10^{14} pps	バンチ幅	58 nsec
スピン周期	2.11 sec		

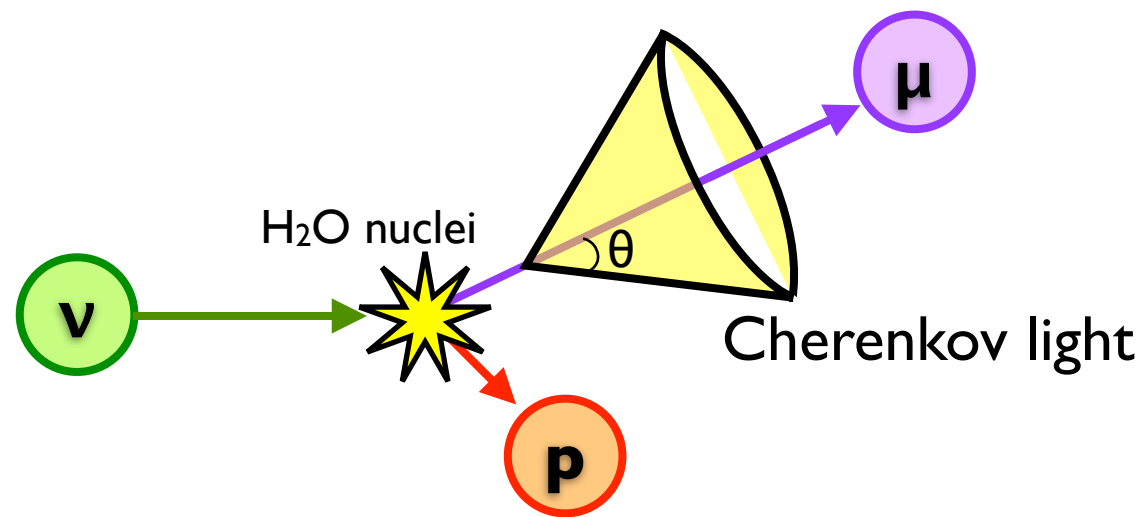
スーパーカミオカンデ

- 岐阜県飛騨市、神岡鉱山 地下1000m
- 直径39.3m、高さ41.4m
- 総質量5万トン（有効体積22.5トン）
- 20" PMT 11200本、8" PMT 1900本
- 太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ観測
- チェレンコフ光の光量・到達時間・リングパターンを測定
 - ⇒ 粒子の種類・エネルギー・発生点・運動方向などを決定



検出原理

- **ν 反応**によって生じた**荷電粒子**が水中を進むときに放出する**チェレンコフ光**を観測



- チェレンコフ放射

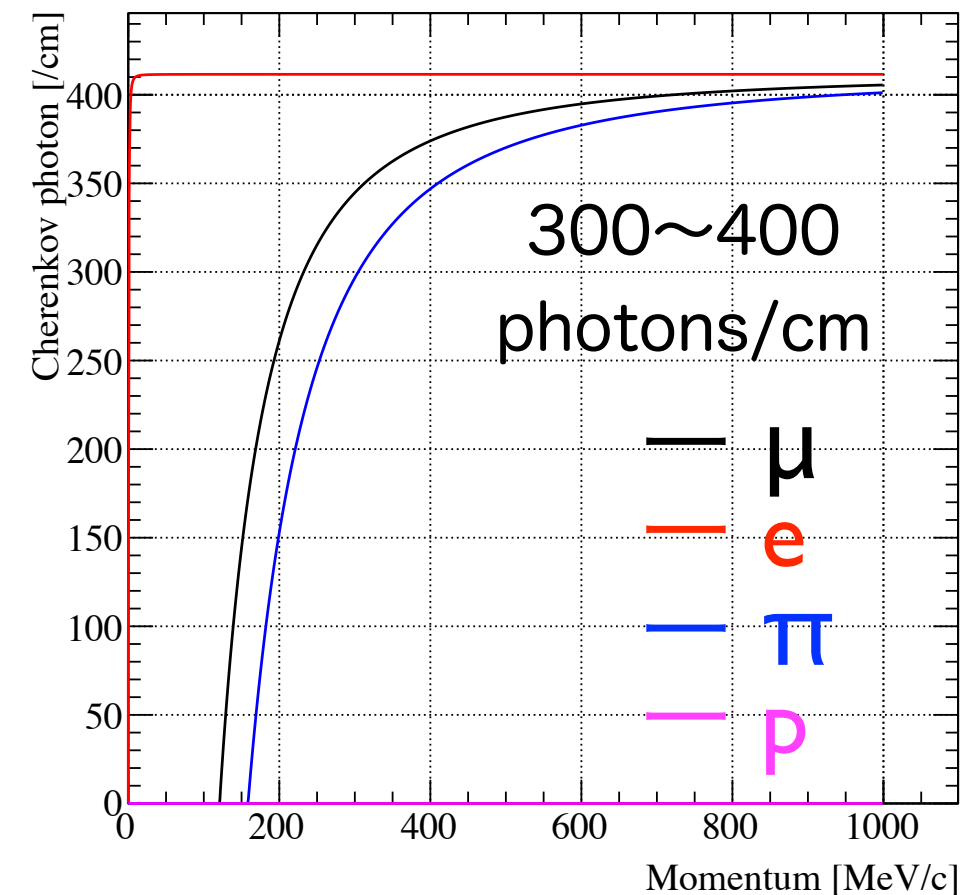
- 荷電粒子の速度 > 媒質中の光速
- チェレンコフ角 $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$

$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$

媒質の**屈折率** (水=1.33) $\nearrow n$

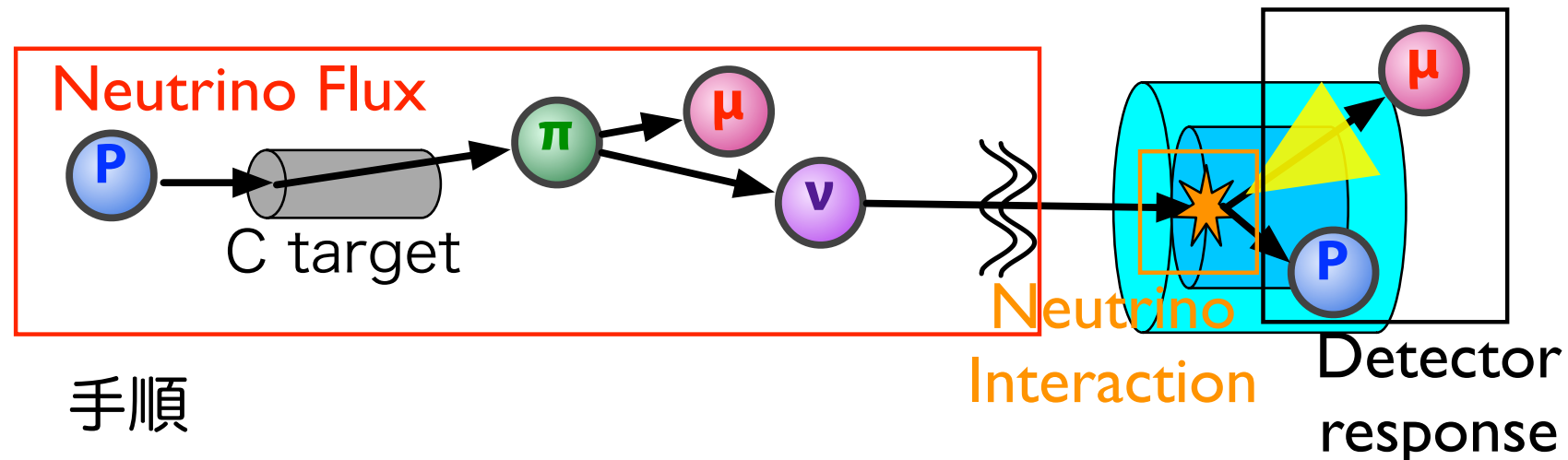
荷電粒子の**速度** $\nearrow \beta$

荷電粒子が**単位長さ**進む間に放出するチェレンコフ光子数



PMTの波長感度(350-650nm)を考慮

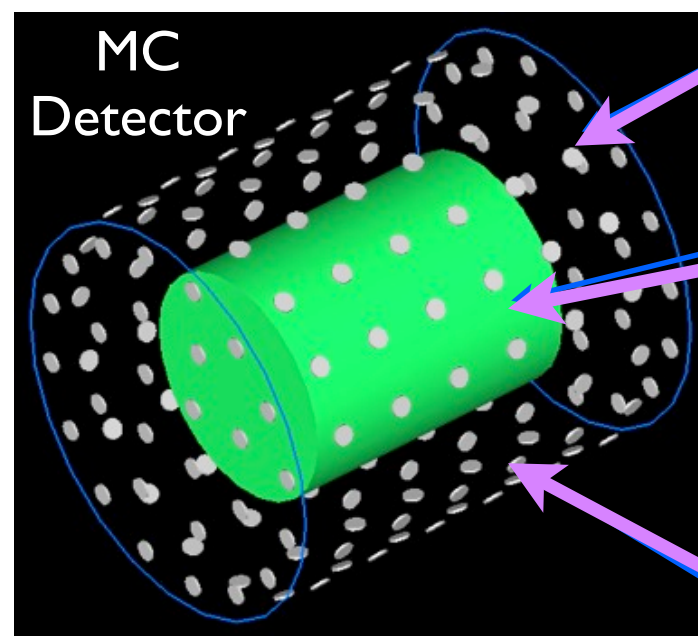
検出器シミュレーションの概要



- 手順

1. ニュートリノフラックスの作成 (JNUBEAM)
2. ニュートリノ反応の生成 (NEUT)
3. 検出器の応答確認 (GEANT4)

- GEANT4の設定



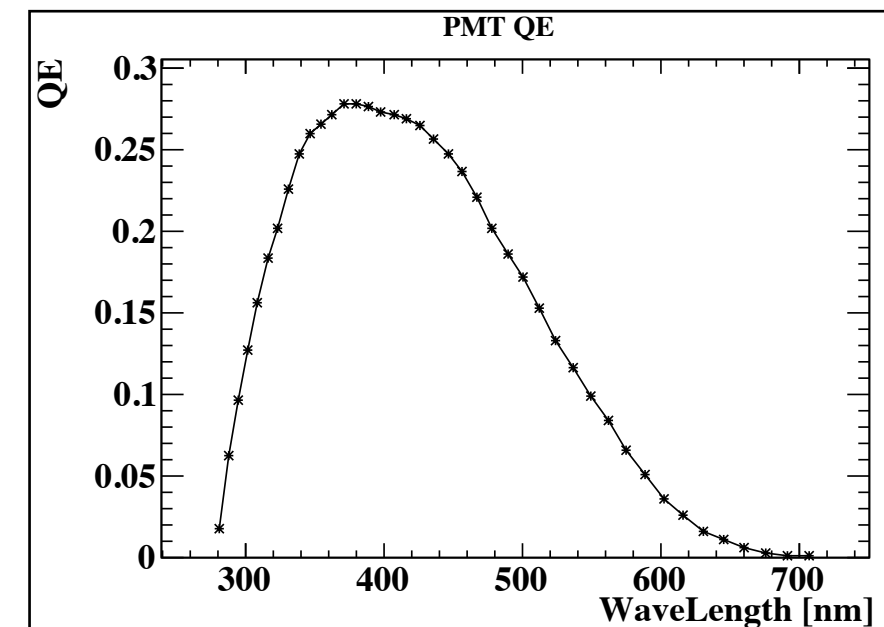
外タンク： $\Phi 1400\text{mm}$, 長さ1600mm
内壁は反射しない

内タンク： $\Phi 800\text{mm}$, 長さ1000mm
アクリル5mm厚（フタは8mm）
屈折率1.49、滑らか

PMT：164本、 $\Phi 70\text{mm}$

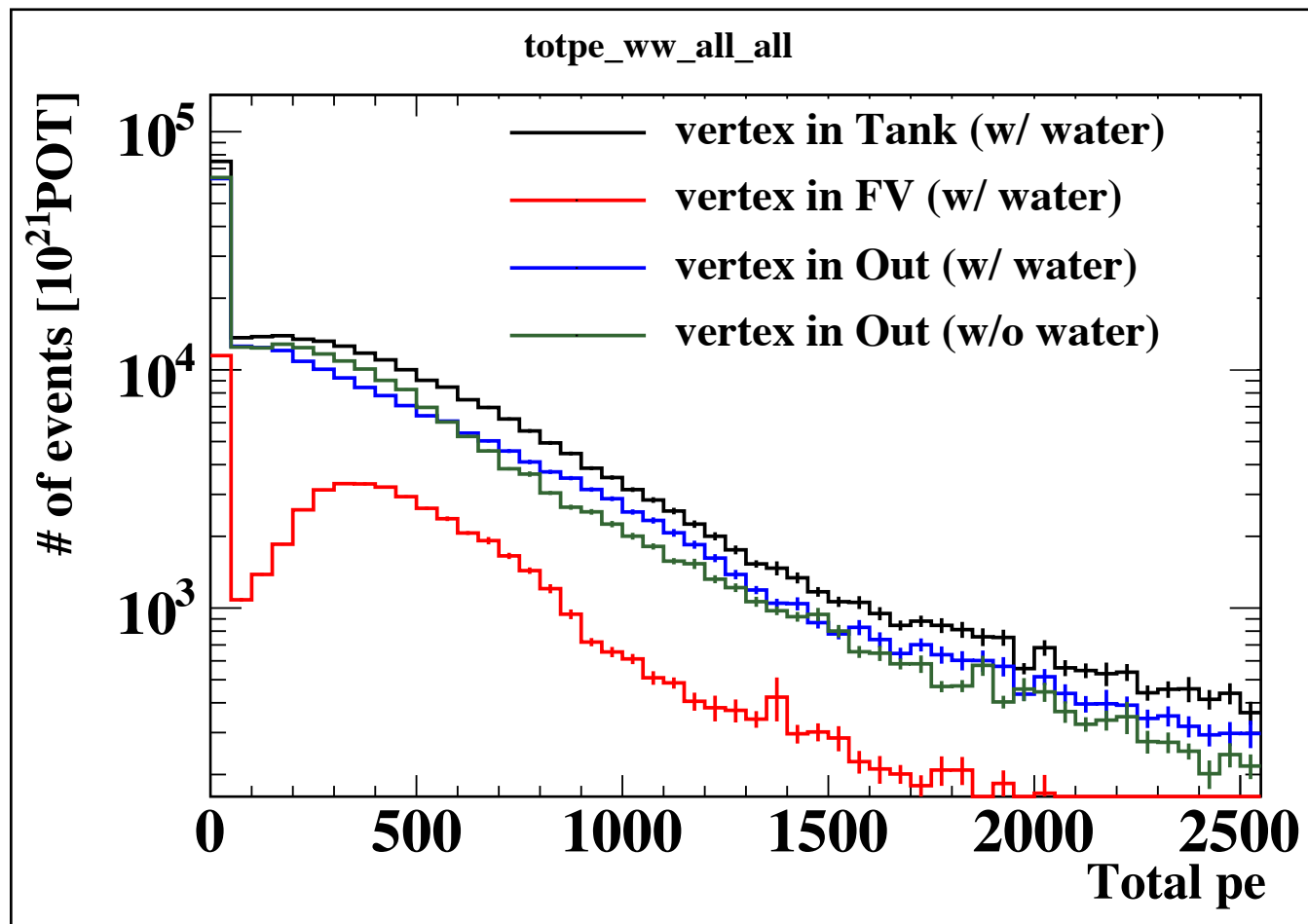
水：波長に依存した光子吸収率・屈折率（1.34～1.36）

PMTの量子効率



期待される総光量分布

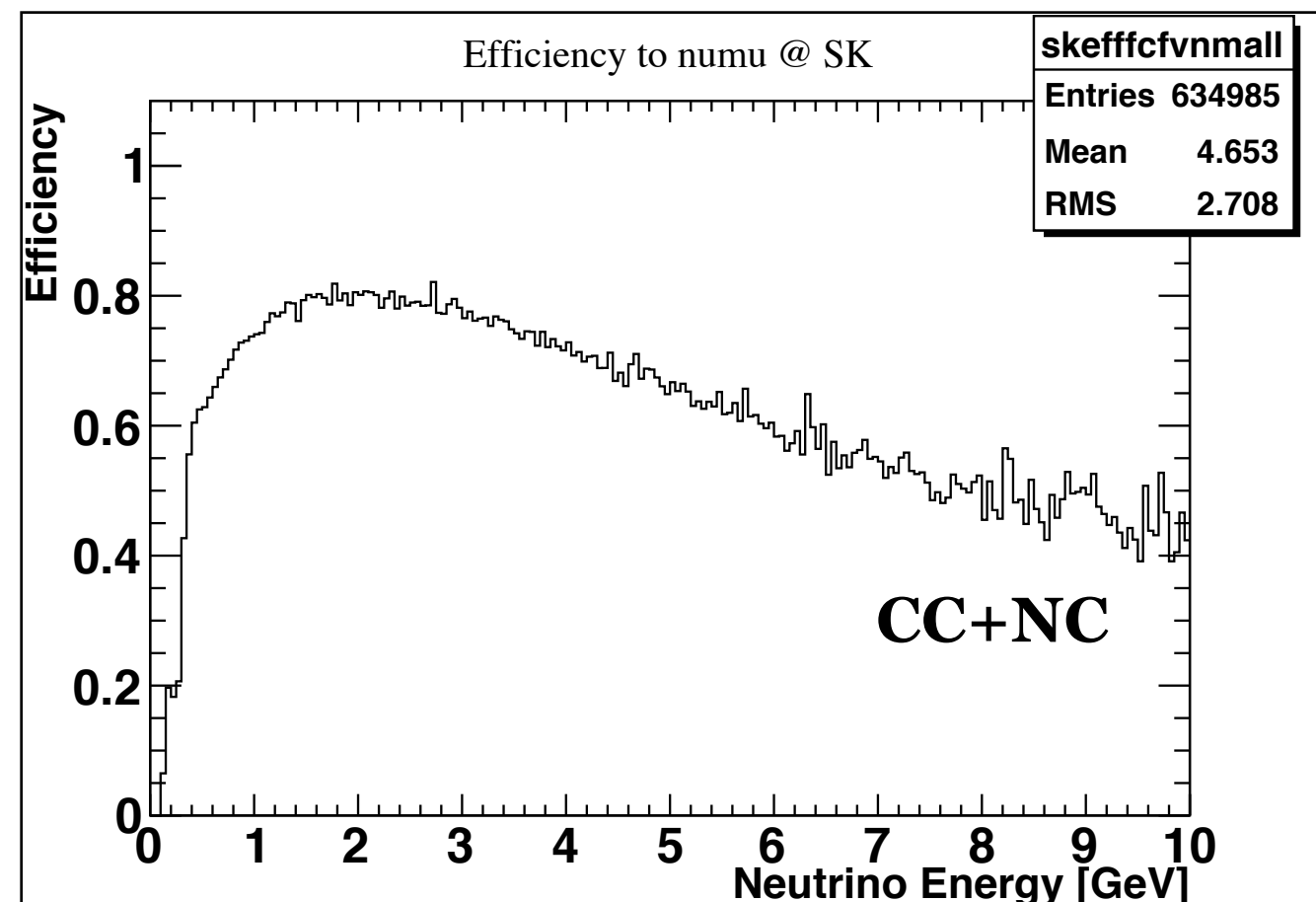
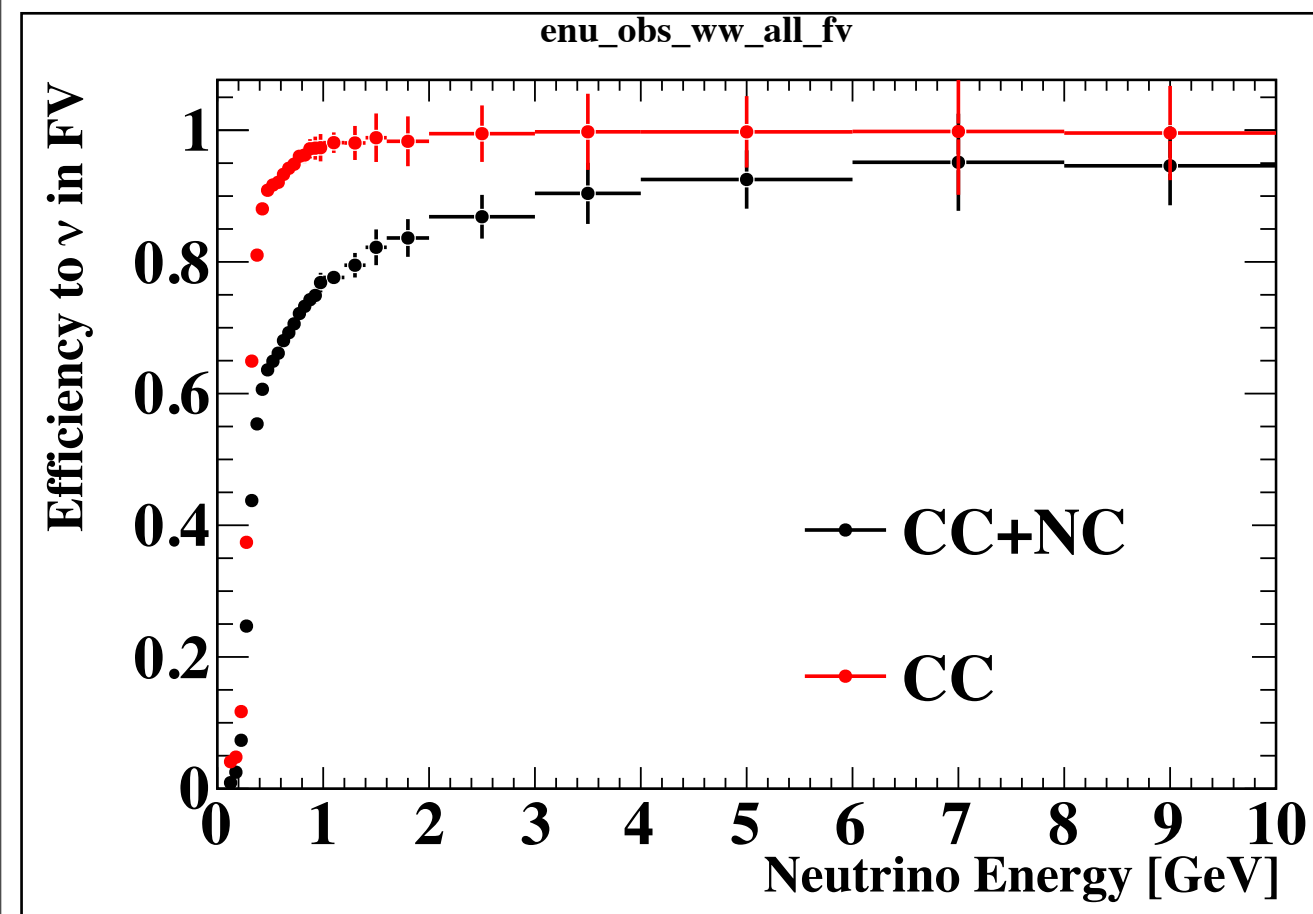
- 総光量：ヒットがあったPMTの光量の総和 (total p.e.)
- ヒット：2 p.e. 以上入射したPMT



- 実際に測定出来る分布：黒、緑
- 黒 = 赤 + 青
- OVで起こる反応の光量分布：青、緑
- 200 p.e.以下でとてもよく一致

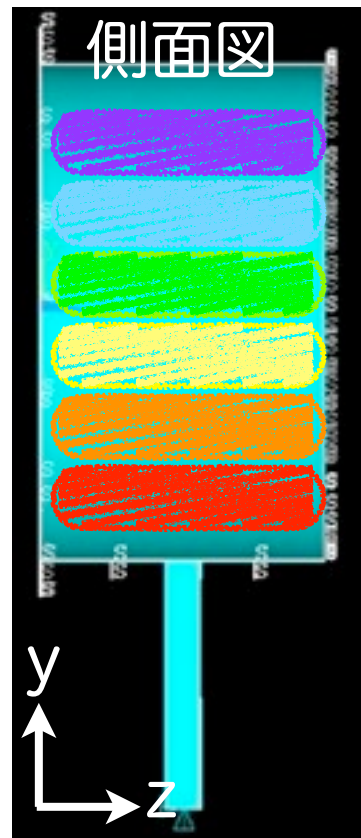
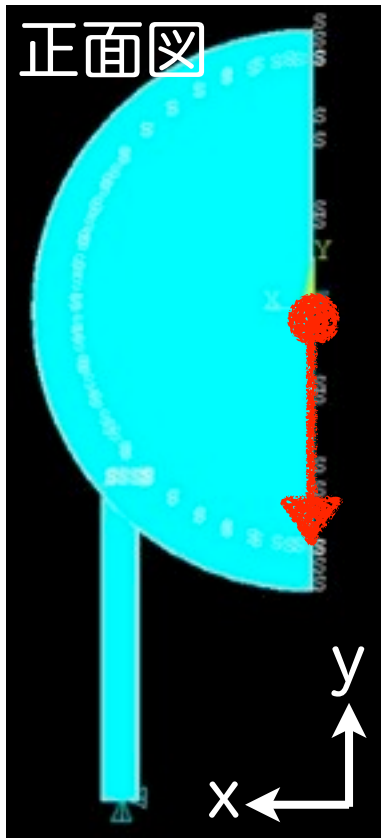
FVでの ν 反応の検出効率

- 光量カット：総光量に対して、ある光量以上のイベントを選択
- 検出効率：
$$\frac{\text{光量カット後に残るイベント数}}{\text{ニュートリノ反応数}}$$
- FVでの ν 反応に対する検出効率

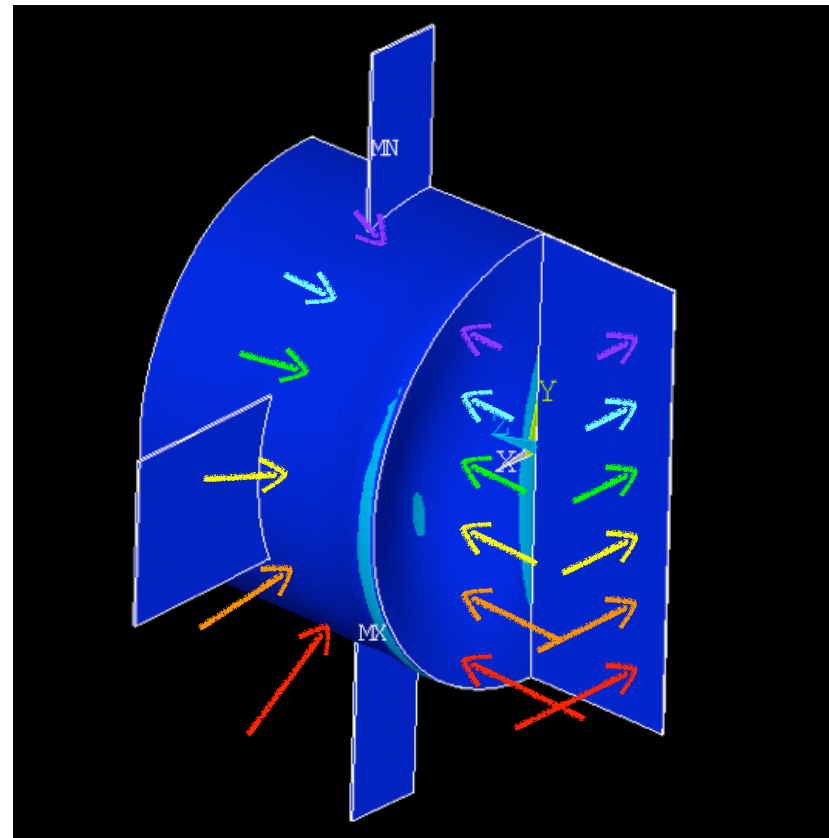


強度解析

外タンク



内タンク



荷重定義

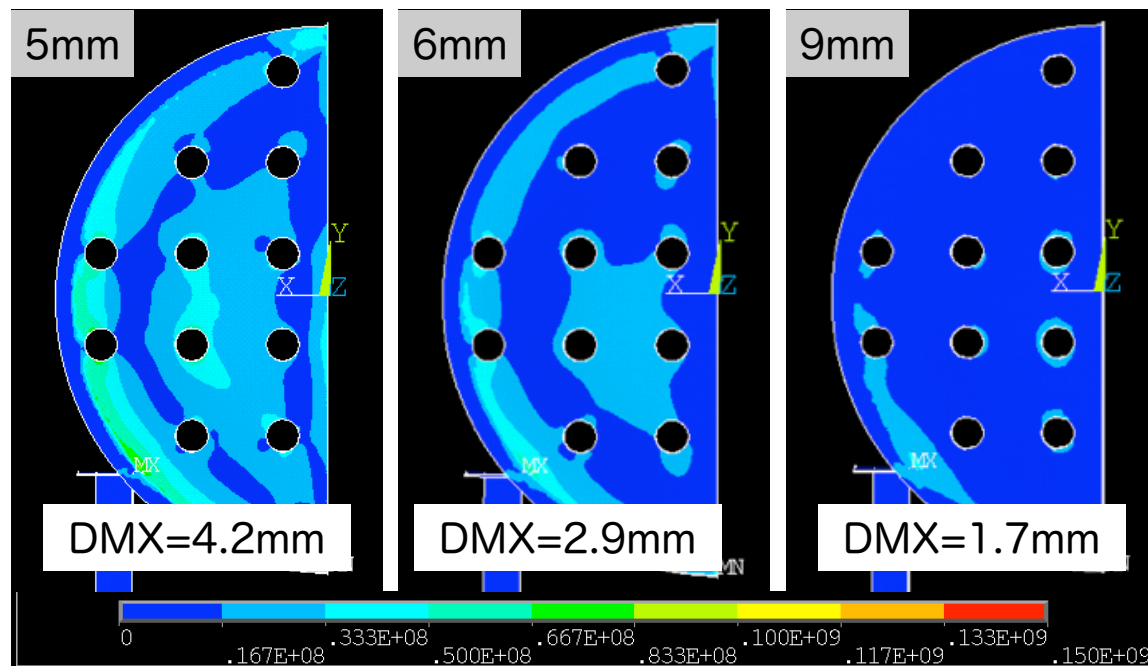
水圧

自重

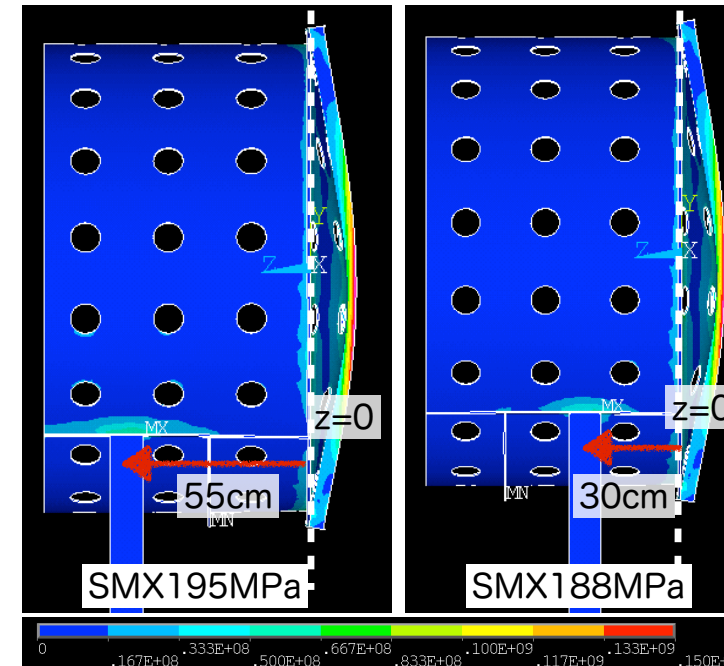
- 次のような点を変更して強度（相当応力・変形量）を確認
- フタの厚み／架台の脚を取り付ける位置／
フタに取り付けるリブの形状・厚み
- ハネの形状・枚数、etc... ⇒ **安全係数3**を満たす構造を選択

強度解析結果の例

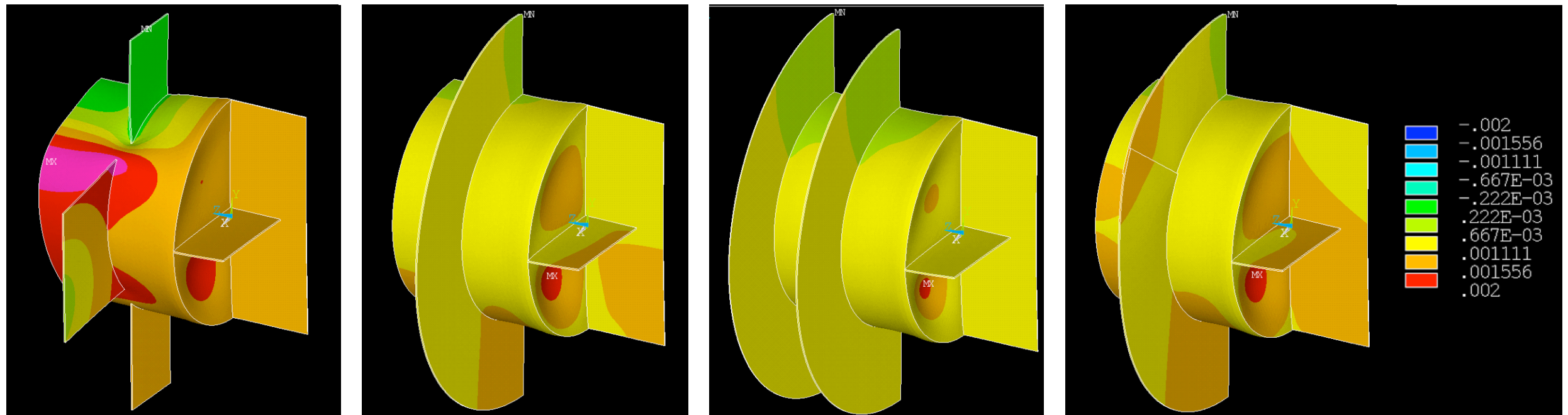
フタの厚み



架台の脚の取り付け位置

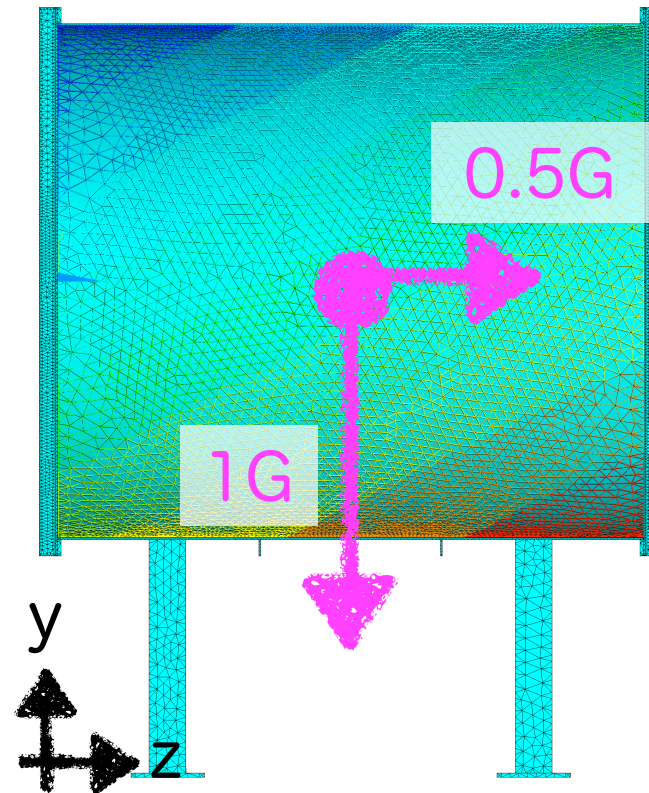
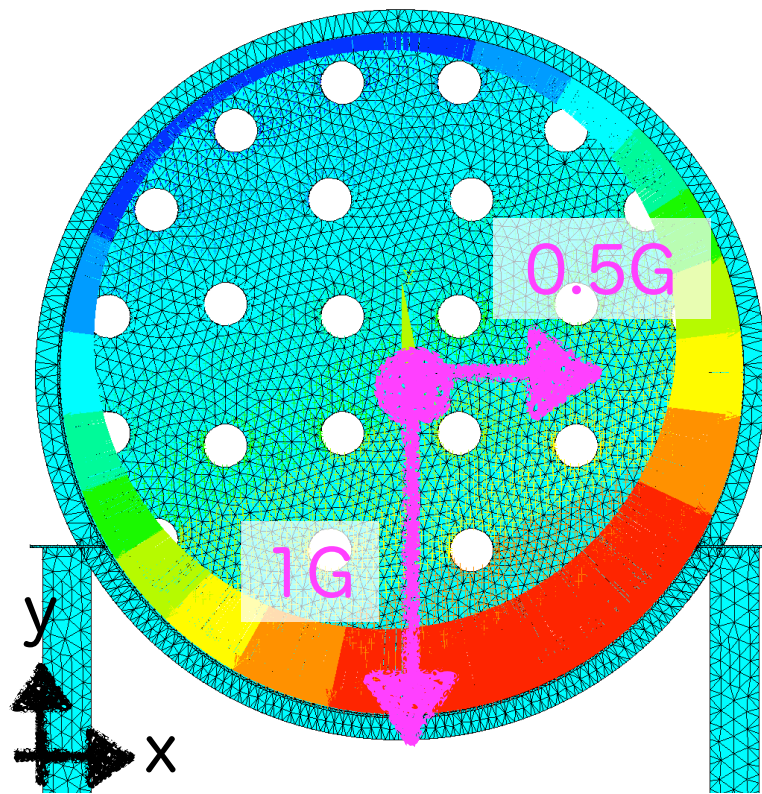


ハネの形状・位置



耐震解析

X方向解析モデル Z方向解析モデル



荷重定義

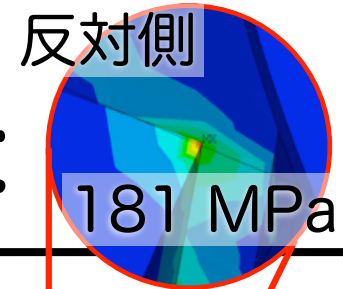
水圧

自重

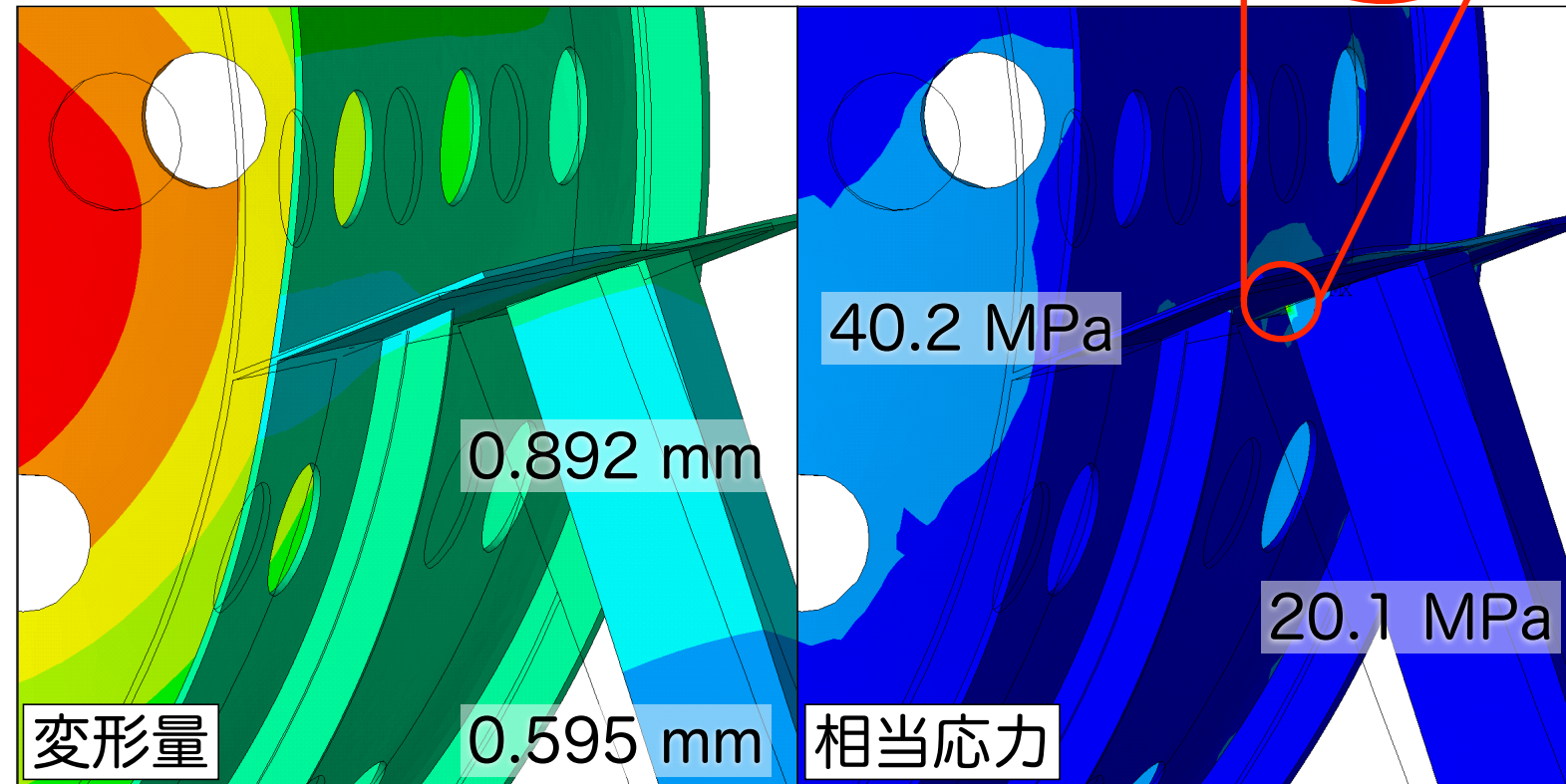
横方向の重力加速度 (0.5G)

- 0.5G横方向の重力加速度 = **震度5強**相当
- 検出器が**壊れない** ⇒ **引張強度内**であればOK
- 結果的に安全係数2以上を満たした

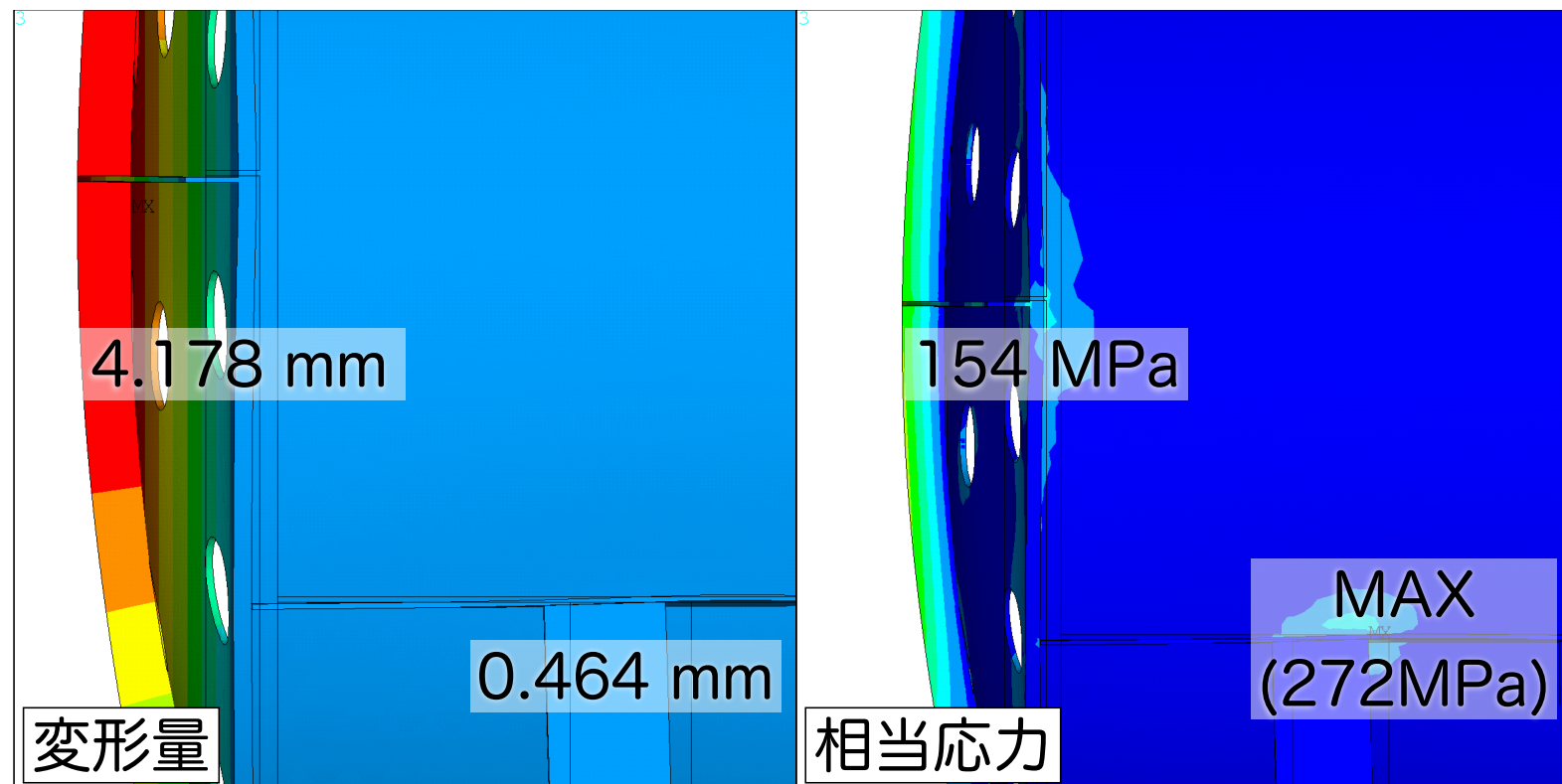
耐震解析の結果



X方向解析モデル

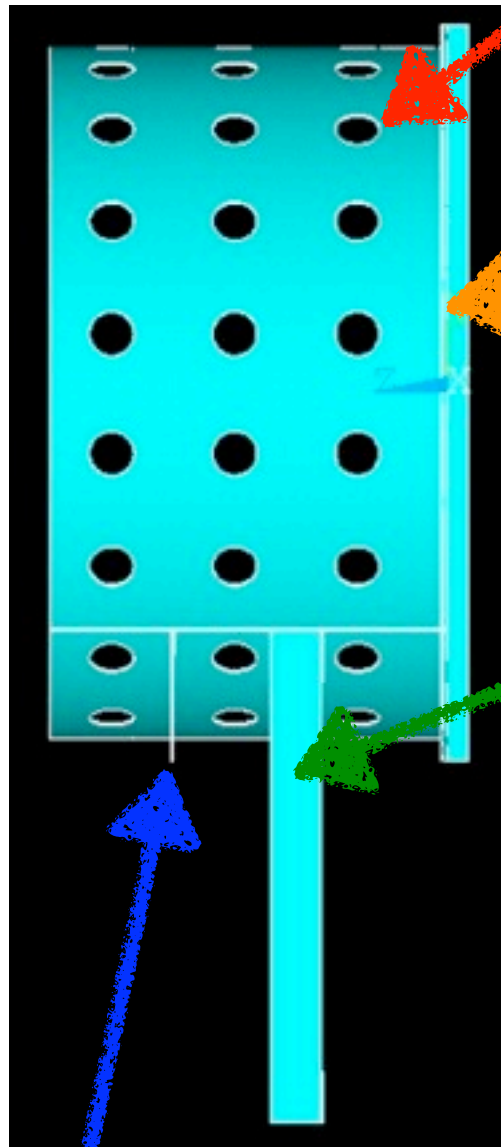


Z方向解析モデル



外タンクの詳細設計

総重量 **511 kg**



タンク本体 (**281.5 kg**)

- $\Phi=1400\text{mm}$, $L=1600\text{mm}$, $t=4.5\text{mm}$ SUS304
- フランジ (**8.34 kg** x2)
 - $w=50\text{mm}$, $t=9.0\text{mm}$ SUS304

フタ (**84.8 kg** x2)

- $\Phi=1500\text{mm}$, $t=6.0\text{mm}$ SUS304
- リブ (**2.7 kg** x 4)
 - $L=1500\text{mm}$, $w=50\text{mm}$, $t=4.5\text{mm}$ 鉄

脚 (**1.9 kg** x4)

- $100\text{mm} \times 100\text{mm}$, $t=6.0\text{mm}$, $L=1000\text{mm}$, 鉄・角パイプ
- フタから300mmの位置
- タンクとくっつけるための板 (**8.5 kg** x2)
 - $L=1600\text{mm}$, $w=150\text{mm}$, $t=4.5\text{mm}$ 鉄

リブ (**4.1 kg** x2)

- $w=50\text{mm}$, $t=4.5\text{mm}$ 鉄
- フタから550mmの位置

その他

- 水ホース用の穴
 - タンク水x2, 空気x1, アクリル水x2
- アイボルト
 - タンク本体x4, フタ各x2

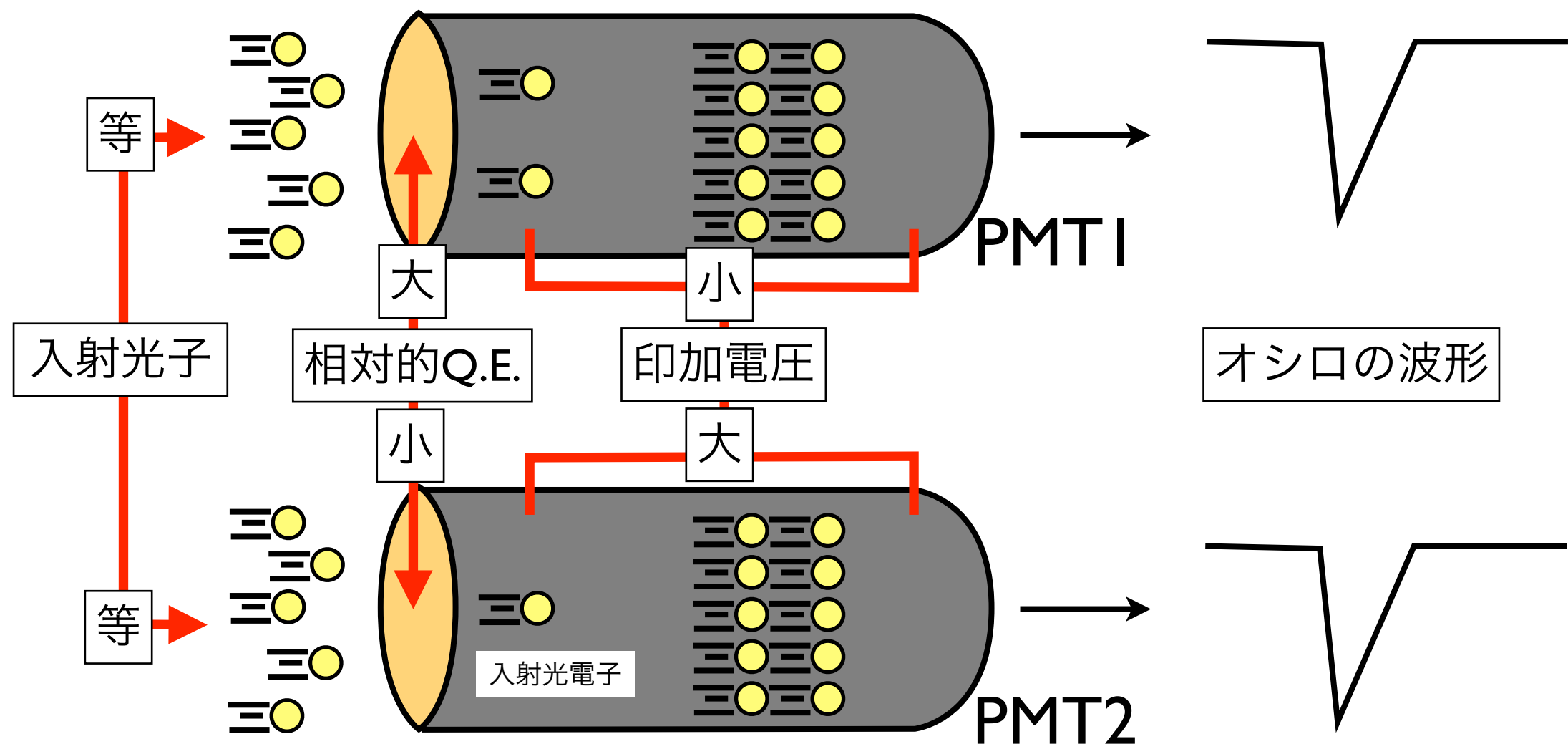
強度解析・耐震解析の結果

- 強度解析
 - 材料の引張強度に対し**安全係数3**を設定
 - ⇒ 外タンク・内タンクそれぞれクリア
- 耐震解析
 - 一時的な応力なので、**引張強度以内**であれば問題ない
 - 結果的に安全係数2程度をクリア

材料名	引張強度 [MPa]	安全強度 [MPa]
鉄	400	130
ステンレス	520	170
アクリル	65	21

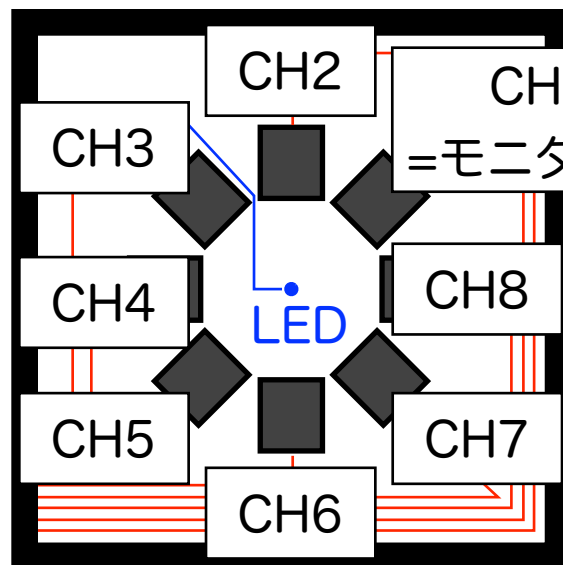
光量カットとPMT出力の一様性

- PMTごとに相対的な量子効率を把握
- ある入射光量に対する出力を、全PMTで一様にする
 - ゲインを調整 $\Leftrightarrow$ 印加電圧を制御

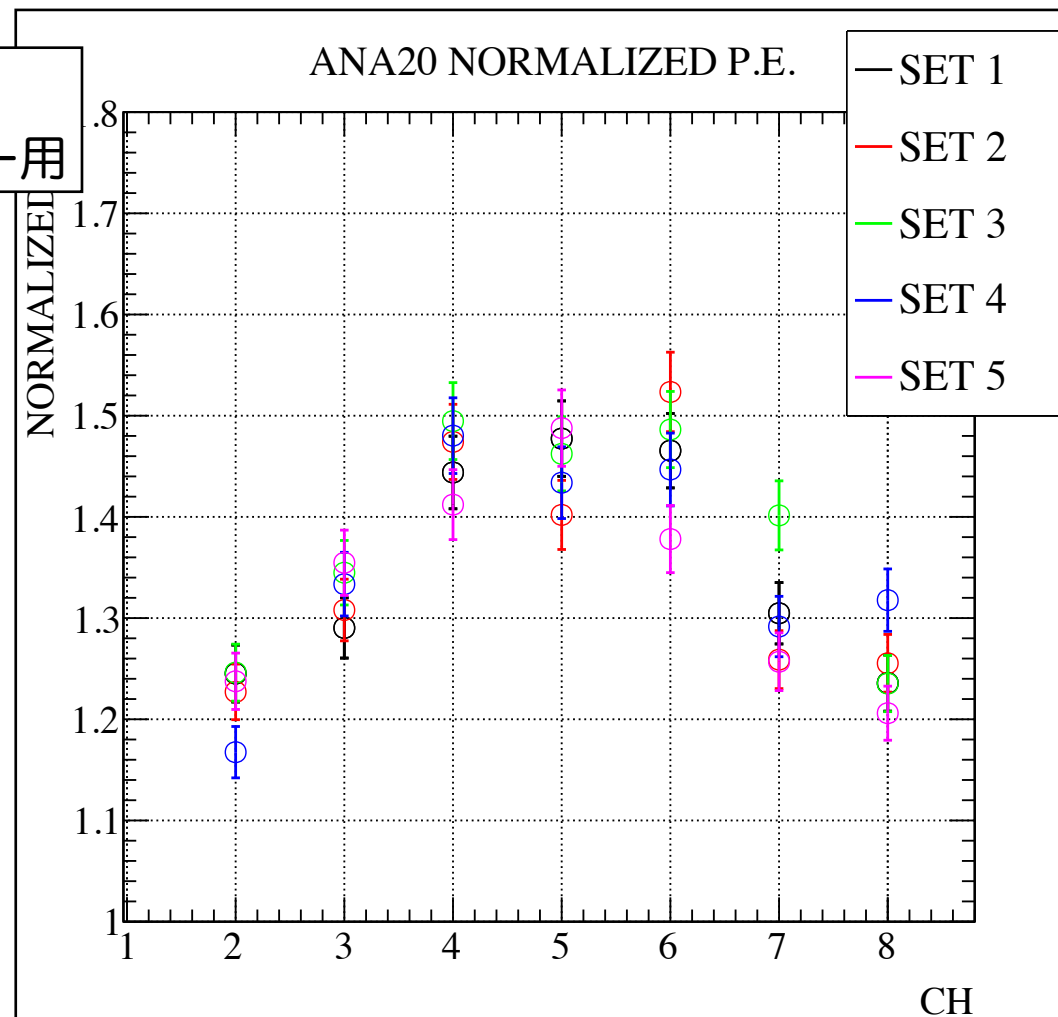


等方性・再現性の確認

- 同一のPMTの場所を変えてLEDからの光量測定
- 各場所での光量をモニター用PMTの光量で規格化



CH2~CH8まで1周
= 1セット

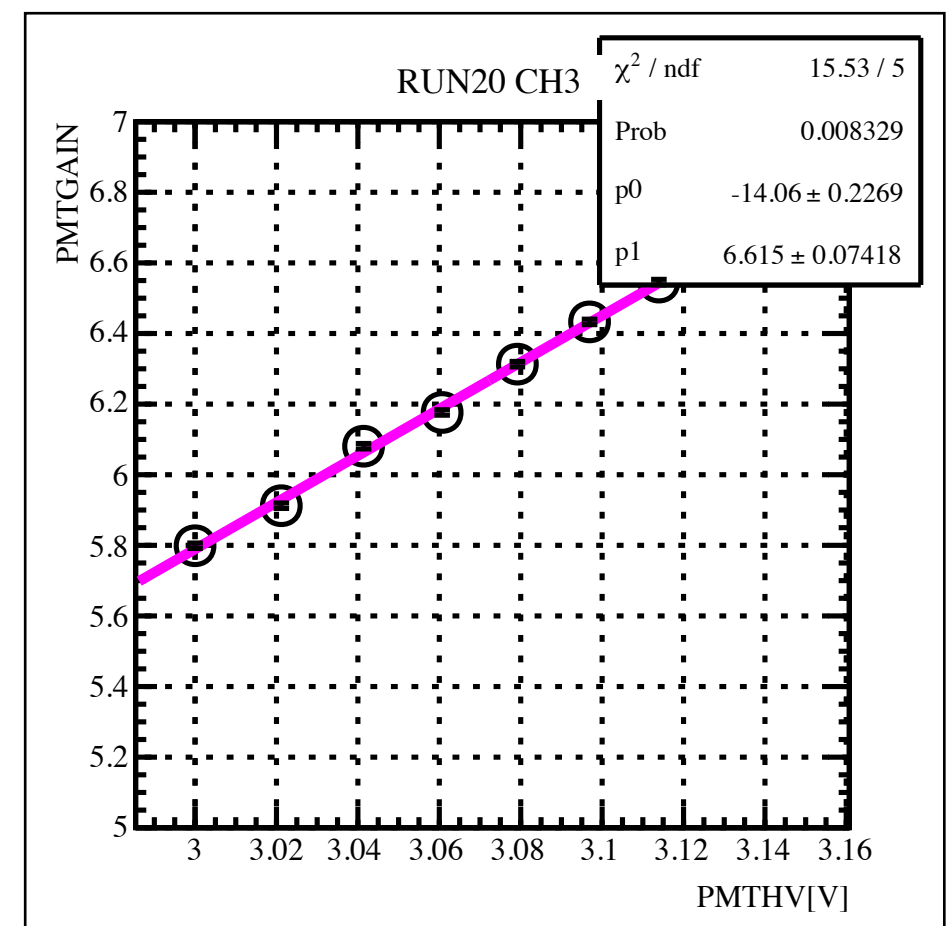


ch2	1.22	$\pm 2.40\%$
ch3	1.33	$\pm 1.80\%$
ch4	1.46	$\pm 2.02\%$
ch5	1.45	$\pm 2.15\%$
ch6	1.46	$\pm 3.30\%$
ch7	1.30	$\pm 4.05\%$
ch8	1.25	$\pm 2.99\%$

- 場所による再現性を確認
- 場所ごとの光量補正係数を定義 (=各場所での平均値)

ゲインカーブ

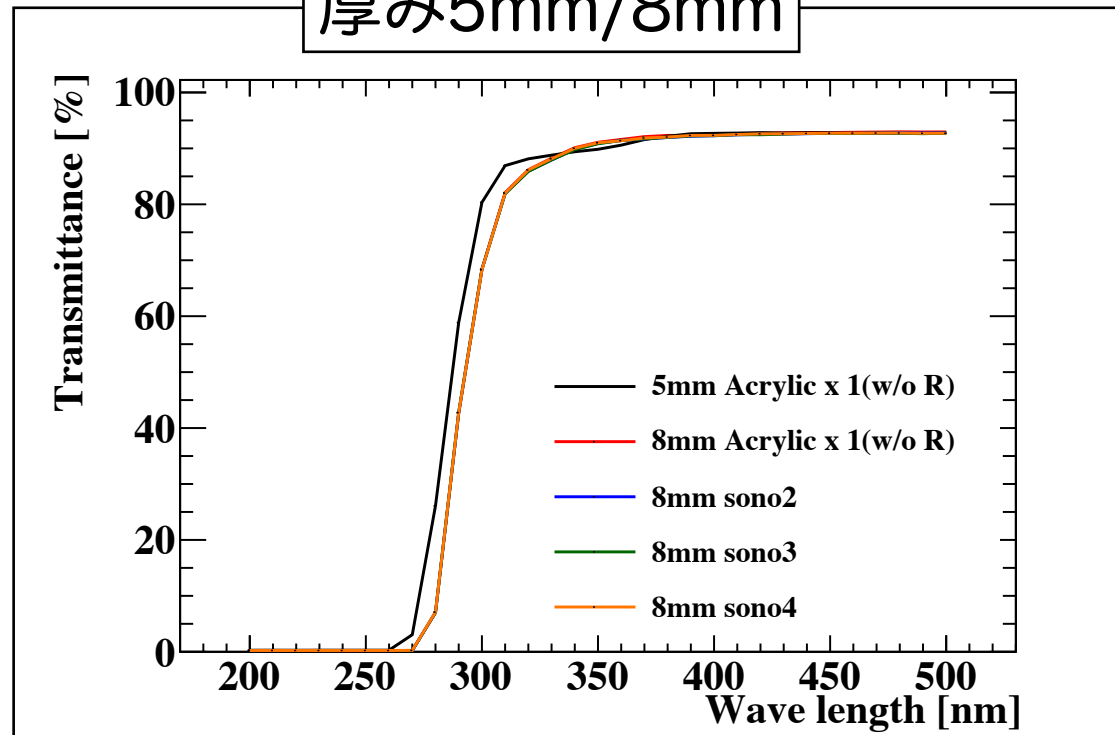
- 同時に7本のPMTを測定 (合計154本測定)
- 印加電圧を変化させて測定し、ゲインを算出
- 1000V - 1300V、50V刻み
- 両対数グラフにプロット
- 直線によるフィッティング
 - $y = Ax + B$
 $\Leftrightarrow G = 10^B \cdot V^A$
ゲイン 印加電圧
- 全PMTのゲインカーブを測定
 - 今後は必要なゲインGを見積もり、印加電圧Vを逆算



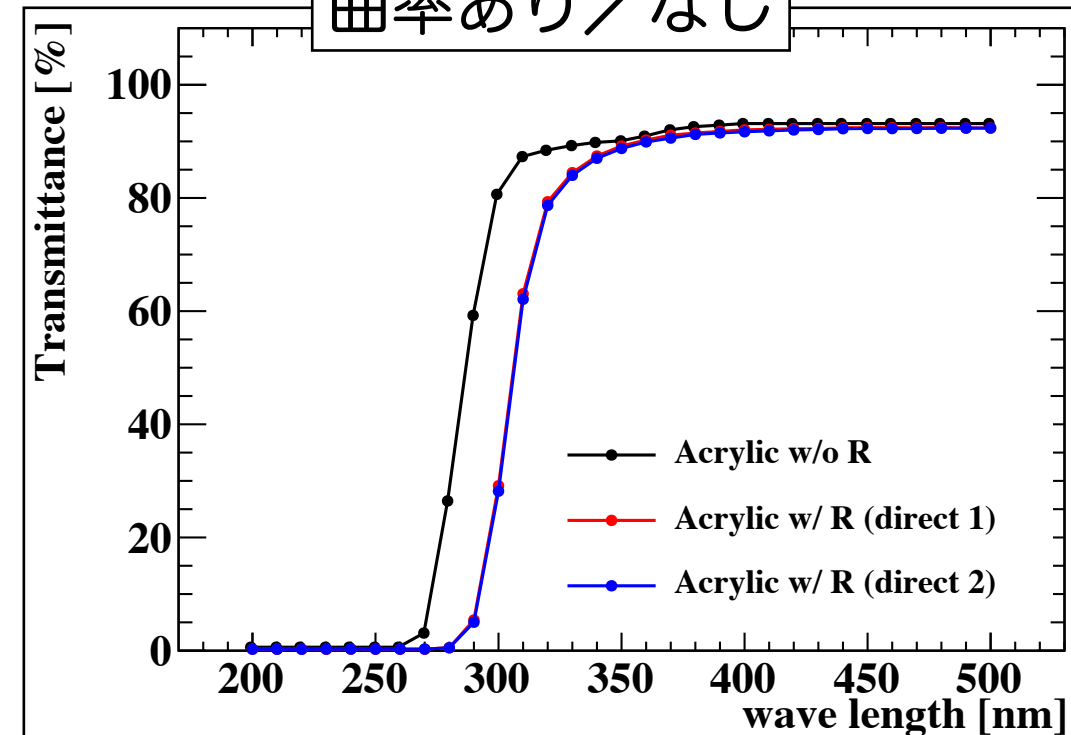
MC内のPMTの量子効率

アクリル透過率の測定結果

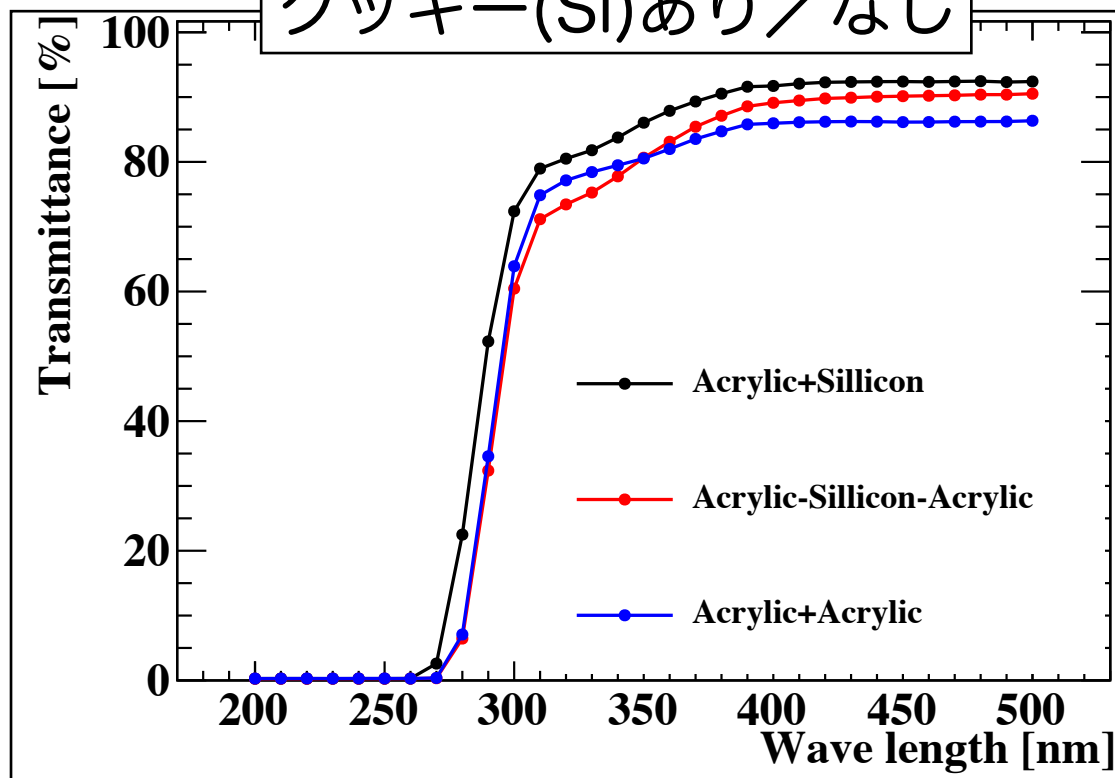
厚み5mm/8mm



曲率あり／なし



クッキー(Si)あり／なし



- 短波長側で透過率が落ちる
- fundamentalなことらしい

私の2年間

- 2009.10 Mizucheと出会う
- 2009.11
- 2009.12 はじめてのGeant4
- 2010.01 PMTのチェック
- 2010.02 宇宙線の測定
- 2010.03 初めての学会発表
- 2010.04 宇宙線測定2
- 2010.05 学振申請
- 2010.06 強度計算、図面作成
- 2010.07
- 2010.08
- 2010.09 タンク発注
- 2010.10 タンク完成
- 2010.11 タンクインストール
- 2010.12
- 2011.01 修論
- 2011.02 なう