

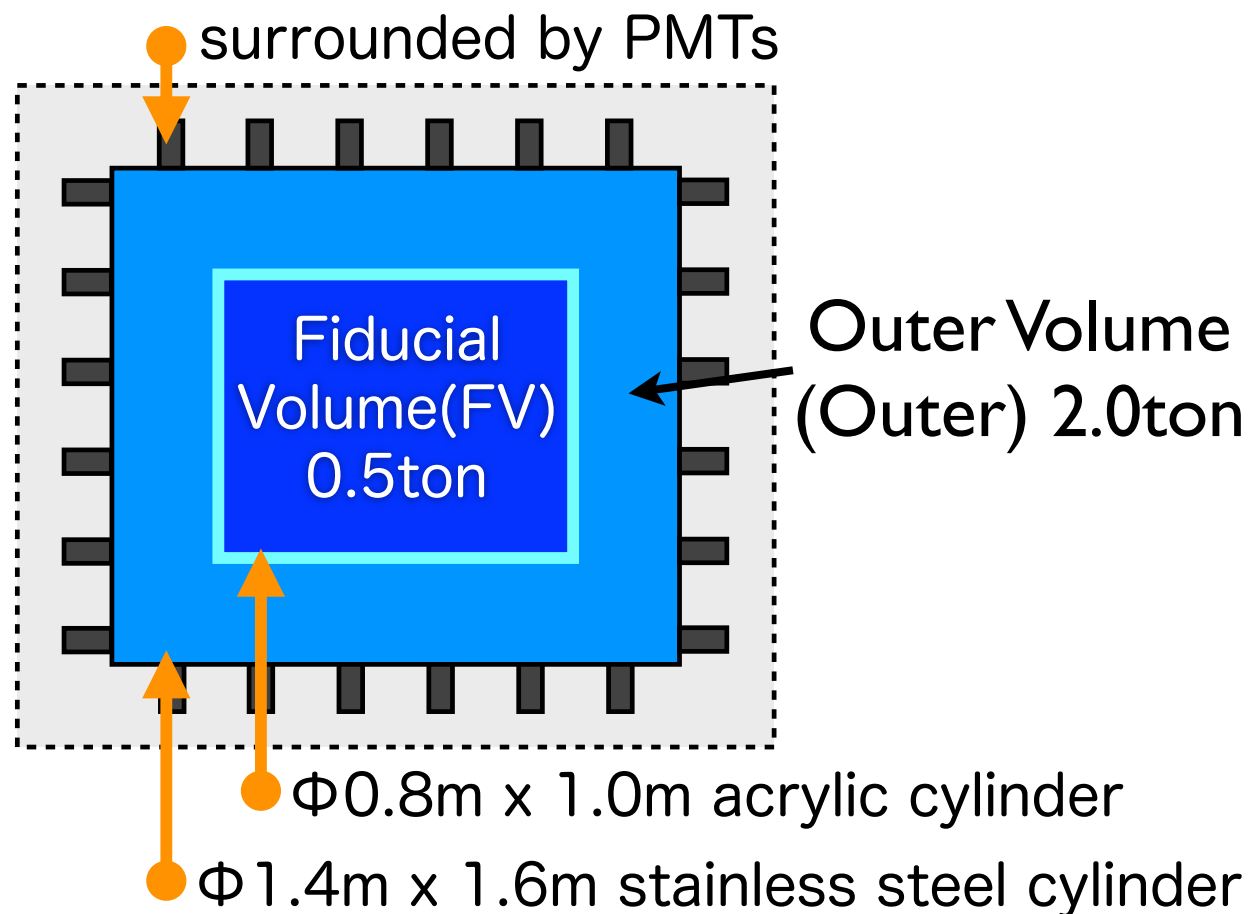
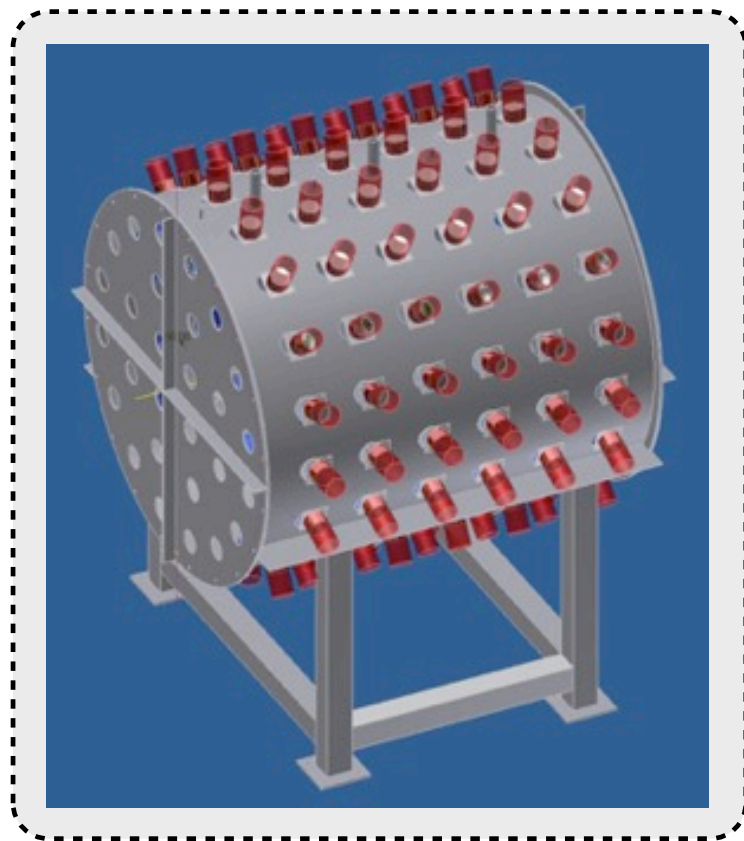
Mizuche Project MC study

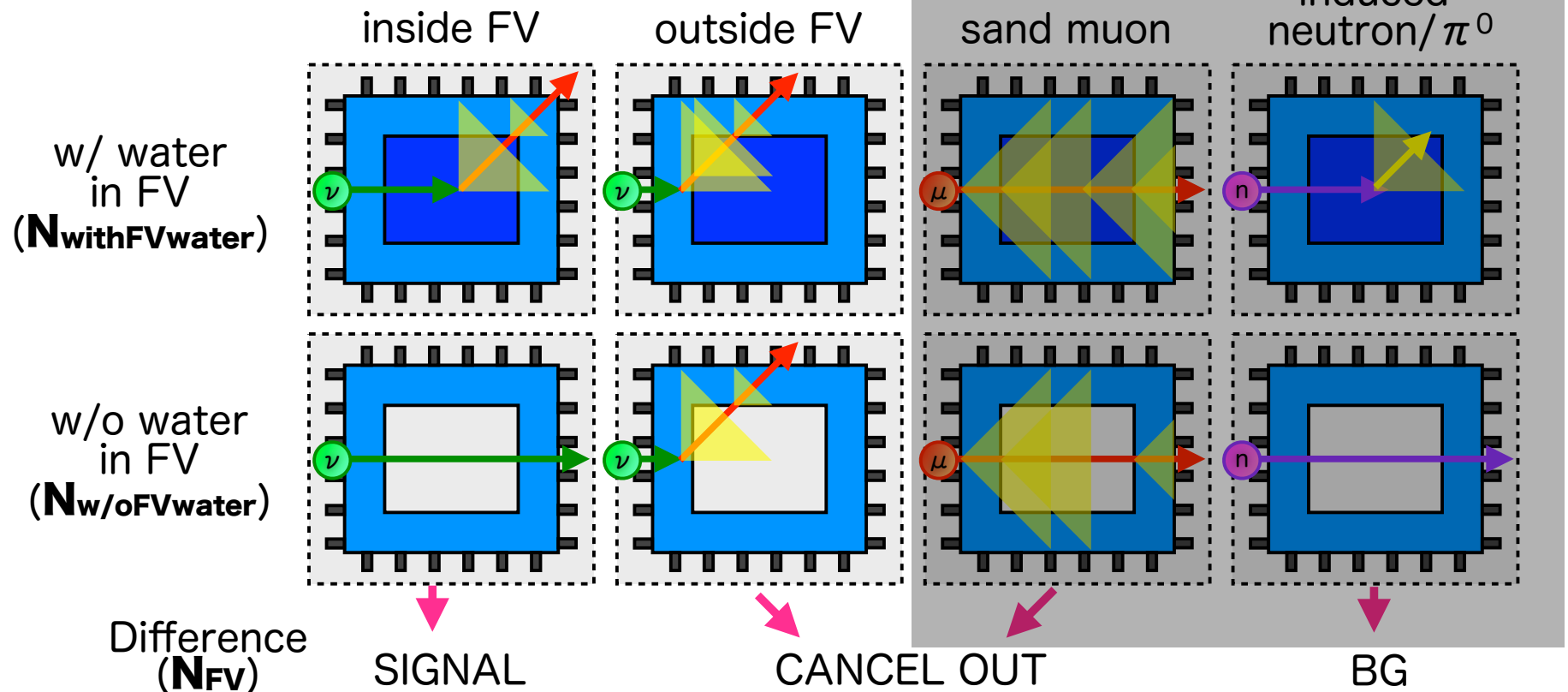
Mizuche Group

Experimental principle 実験原理

Fiducial volume 内で反応したニュートリノを数える

$$N_{FV}^{obs} = N_{Tank, with\ water}^{obs} - N_{Tank, without\ water}^{obs}$$

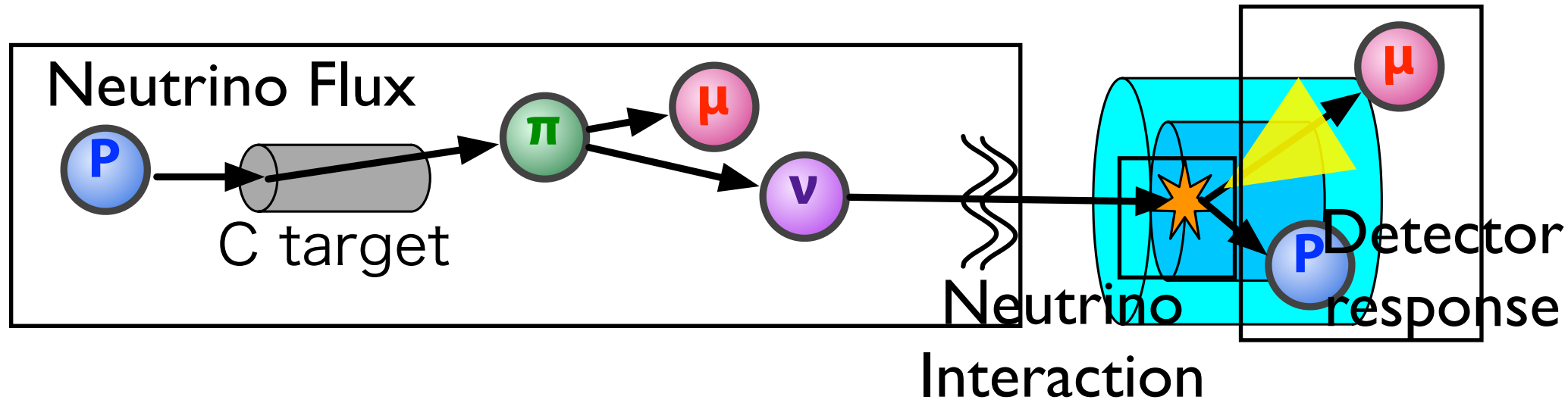




$$\begin{aligned}
 N_{\text{with water}}^{\text{obs}} &= N_{\text{FV}}^{\text{int}} \times \epsilon_{\text{FV}} + N_{\text{Outer}}^{\text{int}} \times \epsilon_{\text{with water}}^{\text{Outer}} \\
 N_{\text{without water}}^{\text{obs}} &= N_{\text{Outer}}^{\text{int}} \times \epsilon_{\text{without water}}^{\text{Outer}}
 \end{aligned}$$

- Outerでのニュートリノ反応の検出効率が水あり・水なしの場合で一致 → MC で検証.
- 検出できるニュートリノのエネルギー → MCで予測.

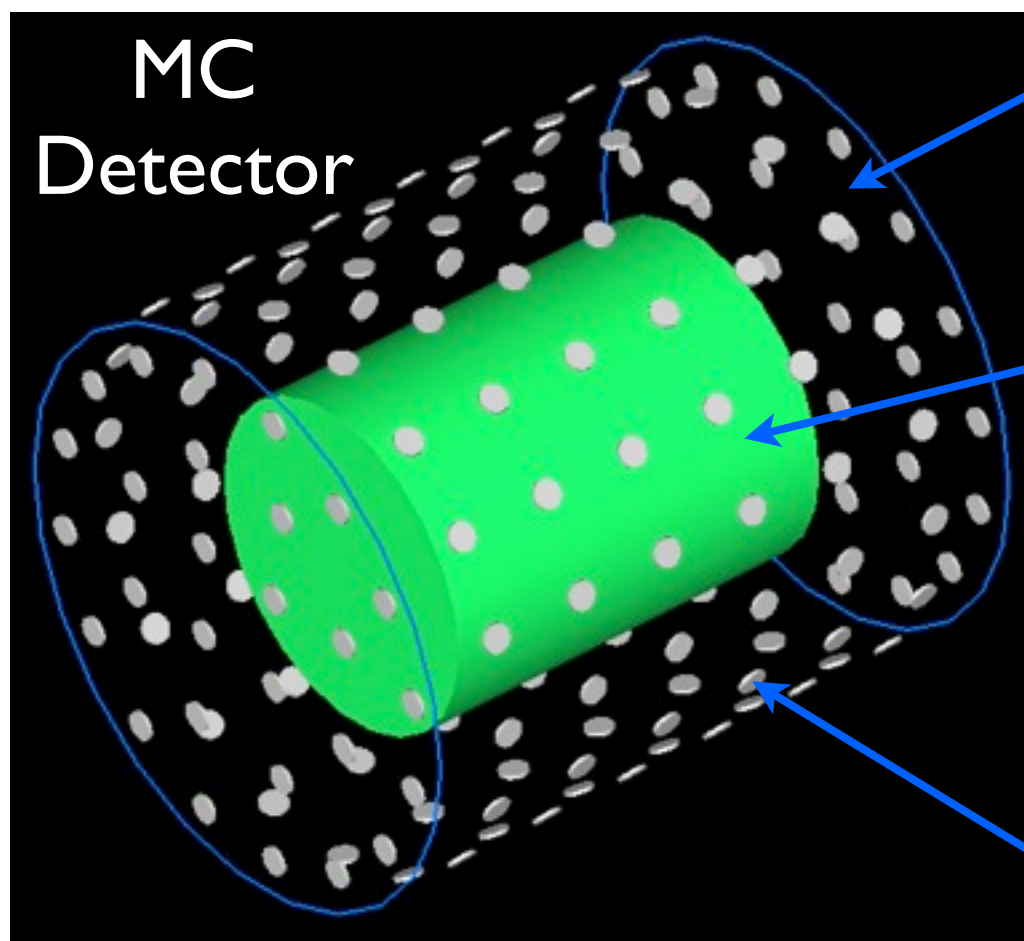
Overview of MC



- Neutrino Flux : T2K前置検出器でのFlux (Temporary → タンクの場所でのFluxを作成中)
- Neutrino interaction : Fluxを元にNEUTで水でのニュートリノ反応をシミュレート.
- Detector response : GEANT4で検出器を再現. 荷電粒子によるチェレンコフ光生成をシミュレート.

Detector MC : Geometry

- タンク、Fiducial volume (FV)のスペック、PMTの設置位置は実機スペックをGEANT4で再現.



タンク :

半径70cm, 長さ1.6m

FV(アクリルチューブ) :

半径40cm, 長さ1m, 厚さ
5mm, 8mm

PMT × 164本 :

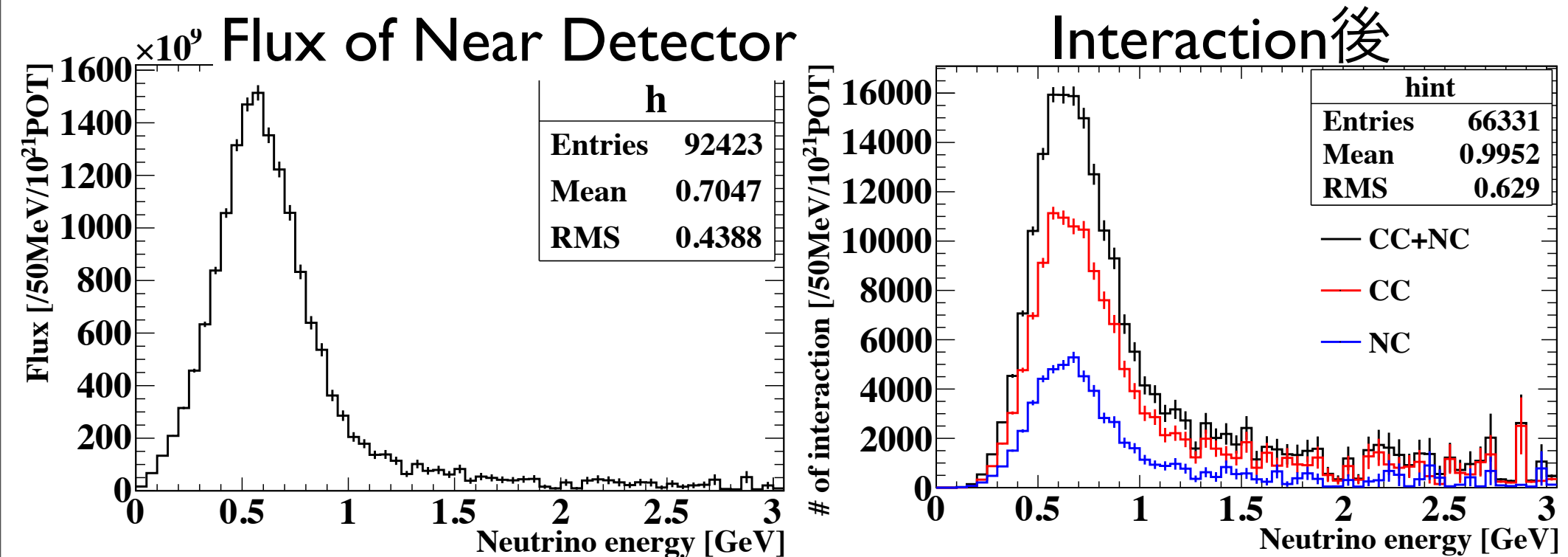
窓の半径3.5cm

Detector MC : setting

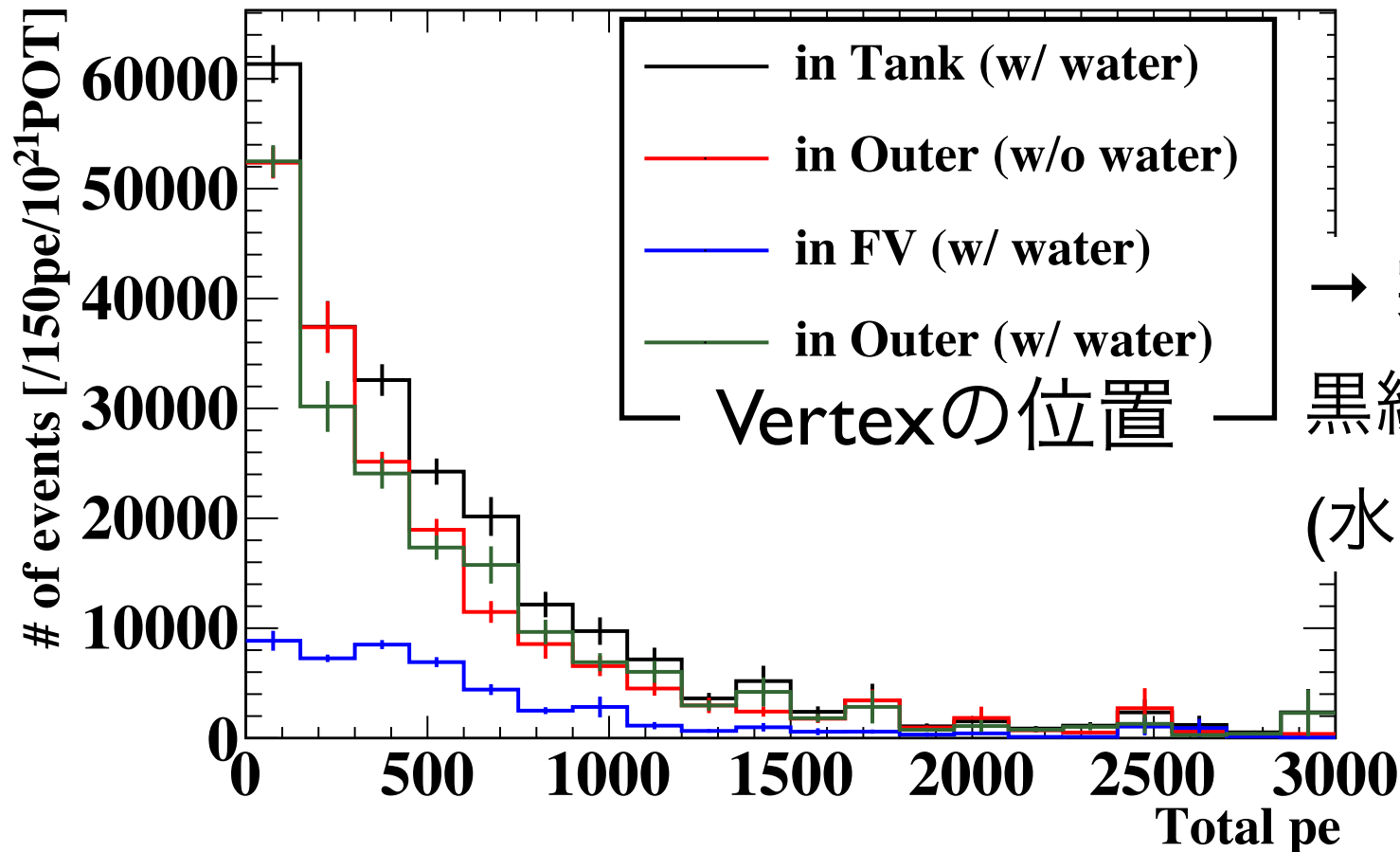
- 水・アクリル・空気の境界について
 - 境界は真っ平らな状態(乱反射しない)
 - 各物質に屈折率を設定。境界での屈折率・反射率は簡単なモデル(Fresnel formula)を使用.
 - タンク内側では反射しない.
- PMTでのQEはカタログ値を参照

Neutrino interaction MC

- 同じニュートリノ反応サンプルに対して、FVに水あり・なしの二通り。
- GEANT4でのニュートリノ反応点はタンクの水中で一様に分布させる。



$$Total\ p.e.(CC + NC) = \sum_{p.e. > 1} p.e.\ of\ PMT$$

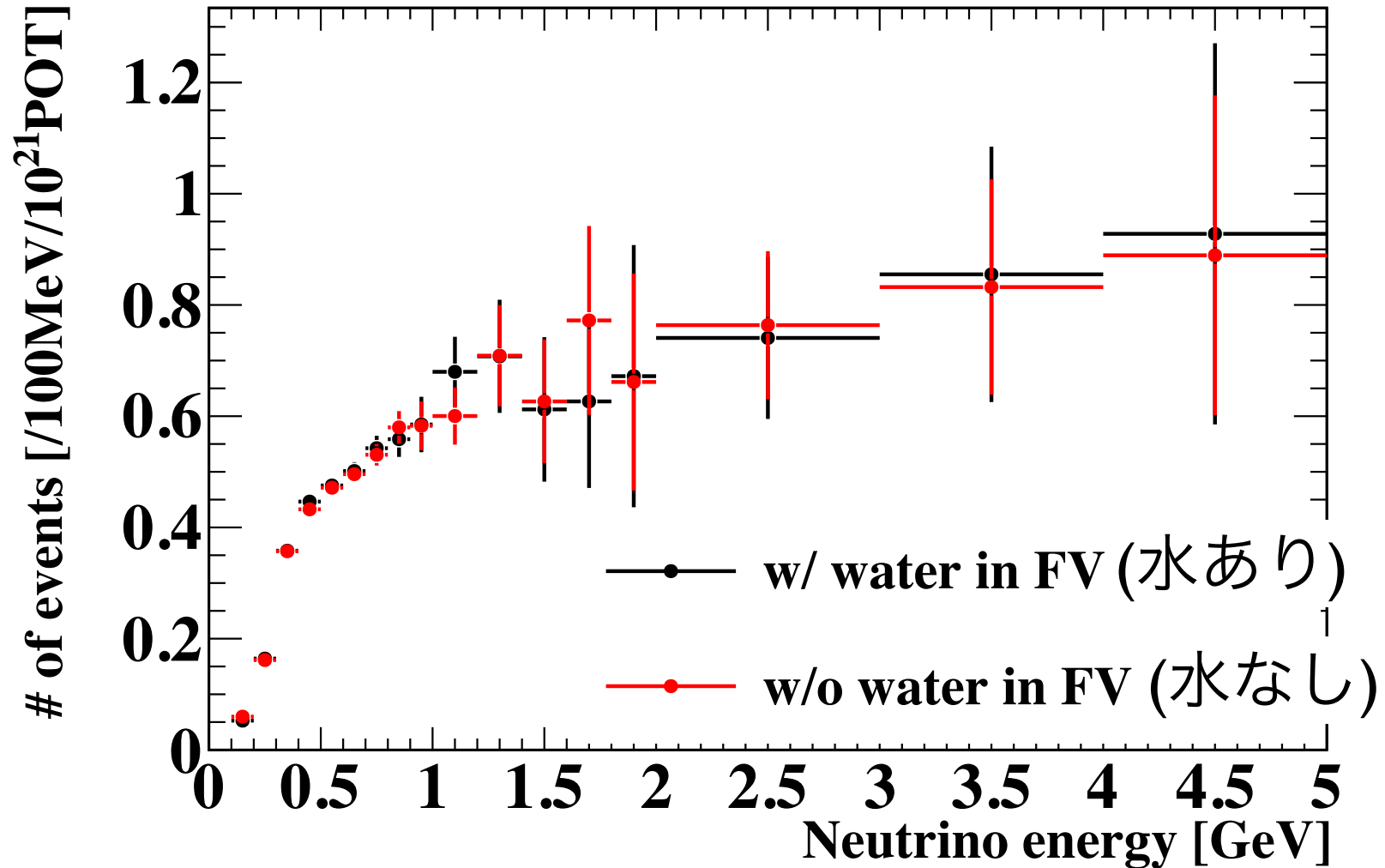


→ 実際には、
黒線(水あり)と赤線
(水なし)を観測する。

Outerでのニュートリノ反応について、Total p.e.<150では水あり・水なしの場合のイベント数が一致。

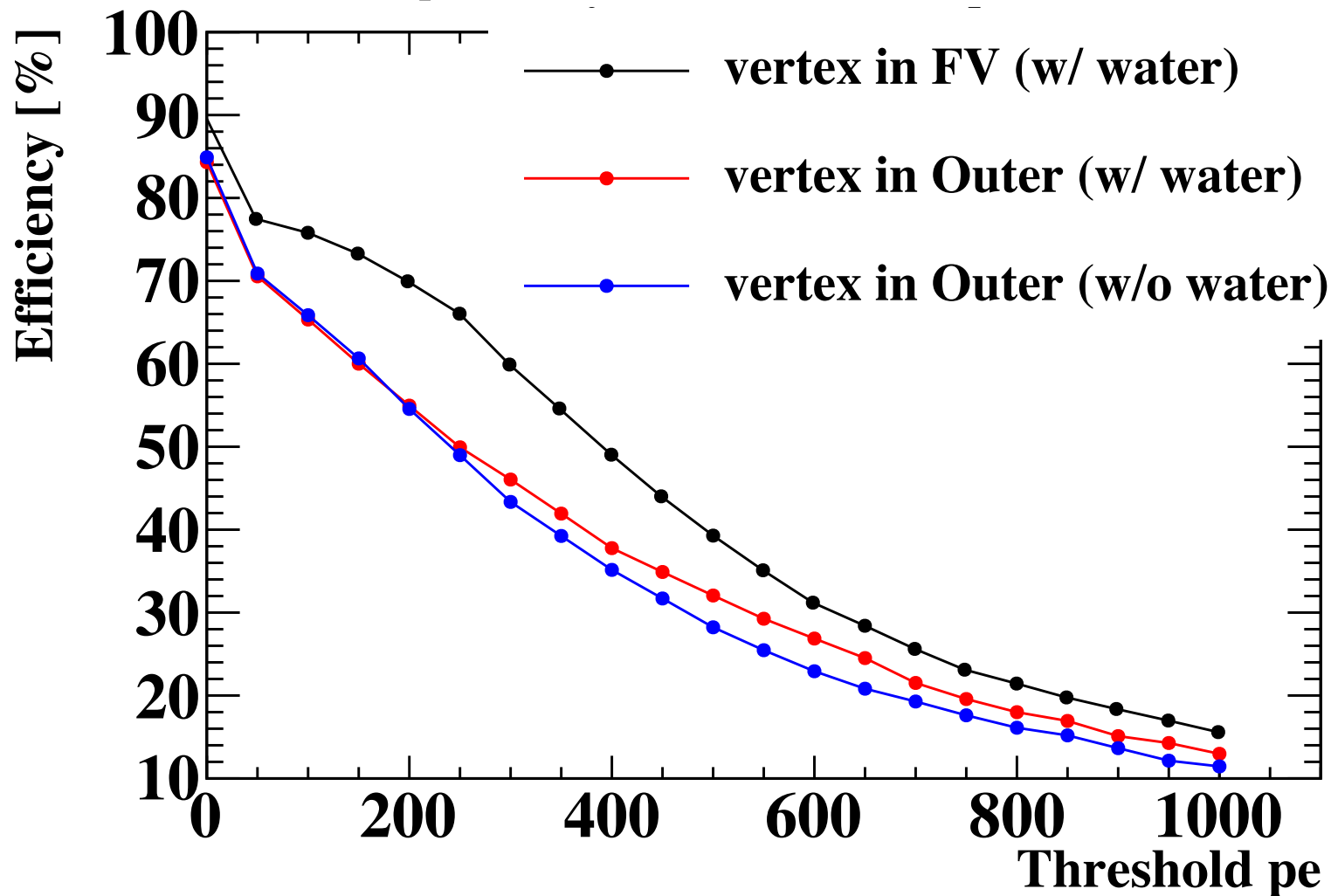
→ 生成された荷電粒子が長いトラックを残すようなイベントでは、水あり・水なしのどちらでも十分な光量が観測できる。

Efficiency (total p.e.>150) to neutrino interacted in Outer (CC+NC).



Total p.e.>150 のカットなら、Outerで反応したニュートリノの数は差し引きで上手く引ける。

Efficiency vs Threshold total p.e.



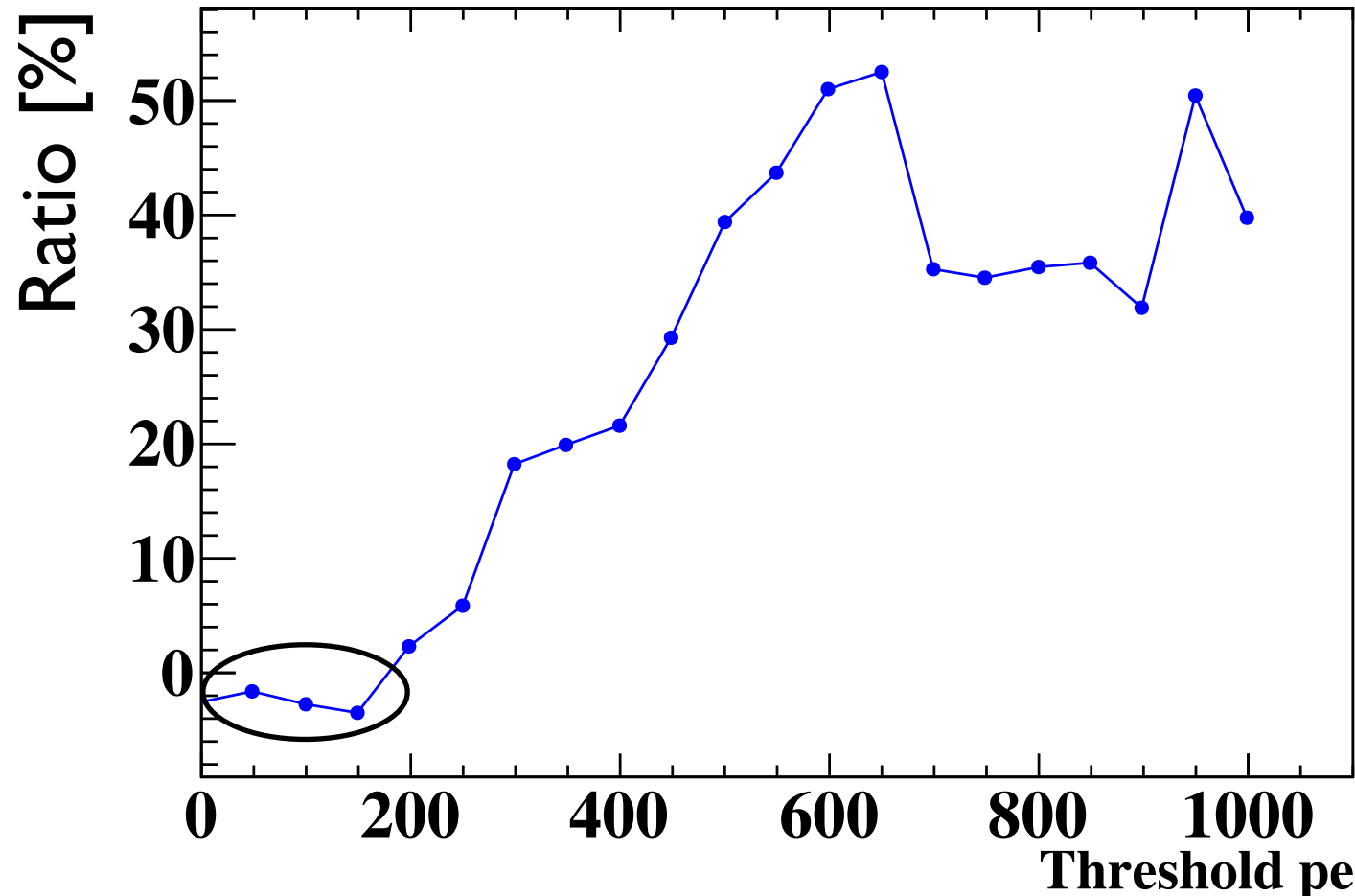
低光量領域ではOuterでの検出効率是一致

→ 水ありの方が水中のパスが長いいため検出効率が高い。

Total p.e. > 150 FVでの反応に対する検出効率は~75%

$(\# \text{ of Remaining})/(\# \text{ of Signal})$

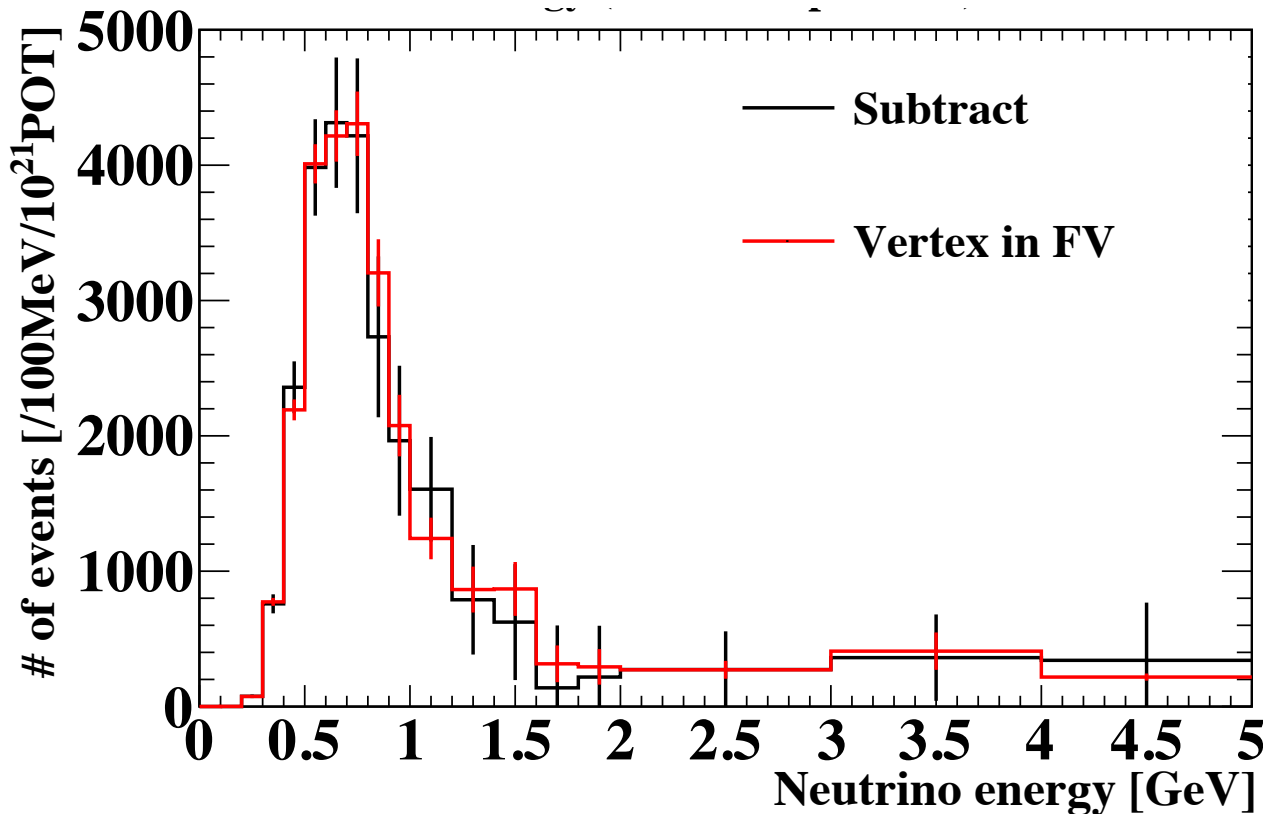
FV内での反応の検出数に対する、Outerで反応した
内で差し引きしても残る検出数の割合



Total p.e.>150のカットで、FV内での反応の検出数に対して数%のイベントが差し引きして残ってくる。

Observed neutrino energy (CC+NC)

Total p.e.>150のカットで検出できるニュートリノのエネルギー



Subtract: 水あり・なしの差し引きで残る
ニュートリノ

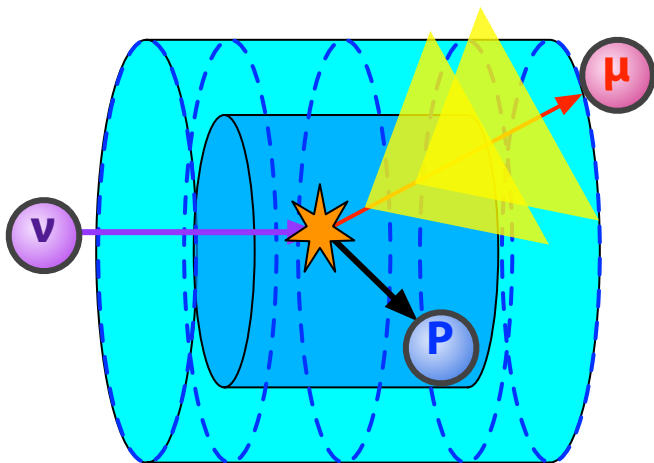
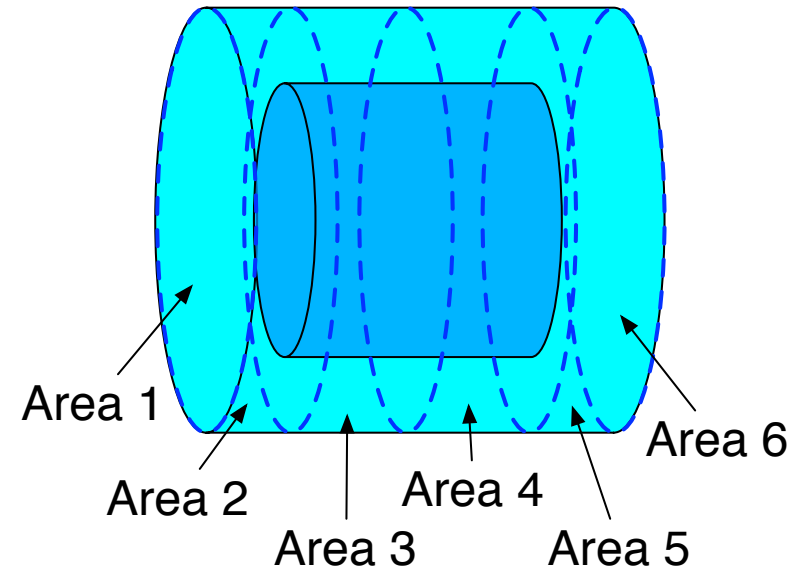
二つのエネルギースペクトルが一致

→ 水の抜き差しでの測定はFVでの反応を測定している
0.7GeV付近の低エネルギーニュートリノに感度がある。

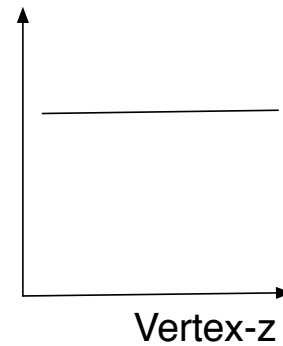
- (次の3ページ分はまだスタディも始めていないアイディアについて)

Total p.e. 以外の測定可能な量

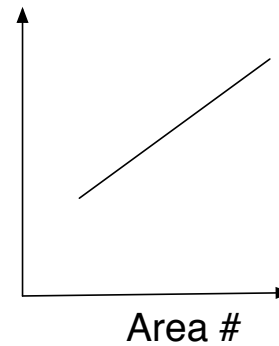
- 水の差し引きでの測定で、上手くFV内で起きた反応だけを測定できることが期待できる.
- 測定量がTotal p.e. だけでは、実際にニュートリノビームのデータを取っている際に、何が測定できているのかわかりづらい.
- 他に測定できる量はないか → タンク



of neutrino

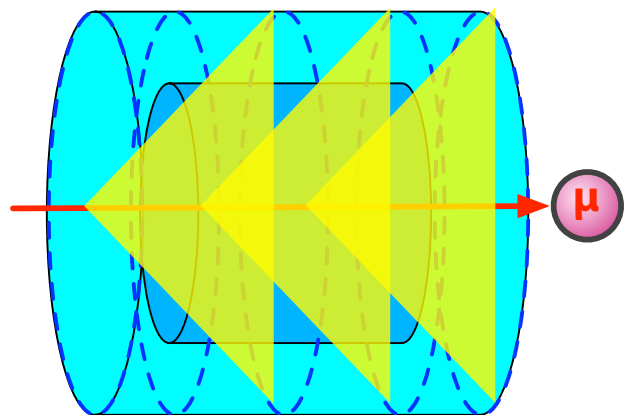


Area p.e.
/ Total pe

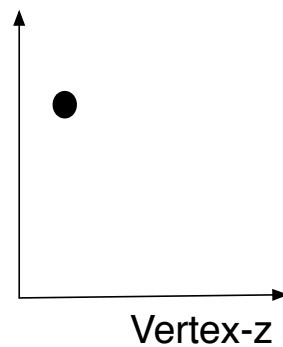


Charged particle の大部分は前方に出るため、下流のエリアの方が光量が多くなる。

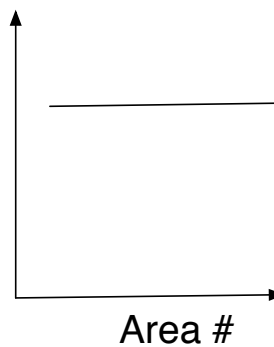
Total p.e. > 150 のカットをかけた後 → CCを選んでくれる。
→ イベントトポロジーとして左のような場合がほとんどに



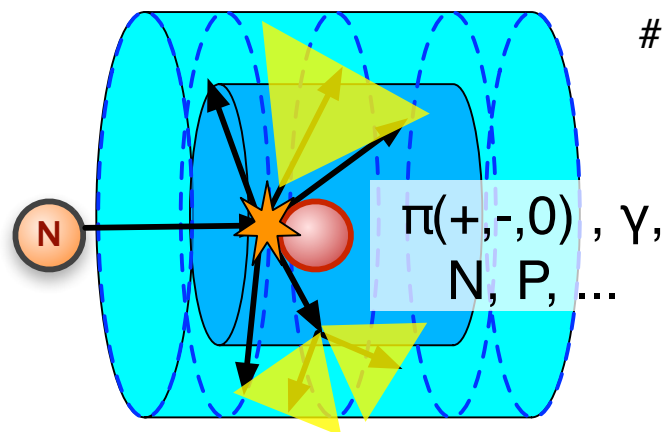
of particle



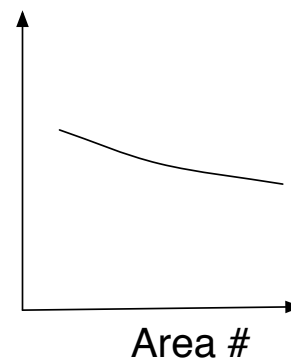
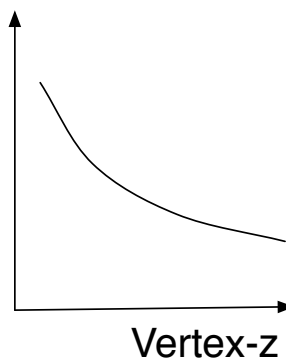
Area p.e.
/ Total pe



単純にオフセットの変化



of particle



ハドロニックに大量の
Charged particle が生成され
る、しかもいろんな方向に、
と予想される。そのため、反
応点周りにローカルに光量が
高くなる傾向がある？

- ここまで

Summary of this study

- Total p.e. > 150 のカットを用いれば、Outerで反応したニュートリノは水の差し引きで上手く引け、FVで反応したニュートリノのみを高い効率で検出できる → 原理どおり.
- Total p.e. ~ 150 付近の光量のスケールが20%程度MCと違っていても、Outerでの反応に対する検出効率はほぼ変化しない.
- MCの光量のスケールと検出器の応答を押さえれば、原理どおりの測定が期待できる.

キャリブレーション

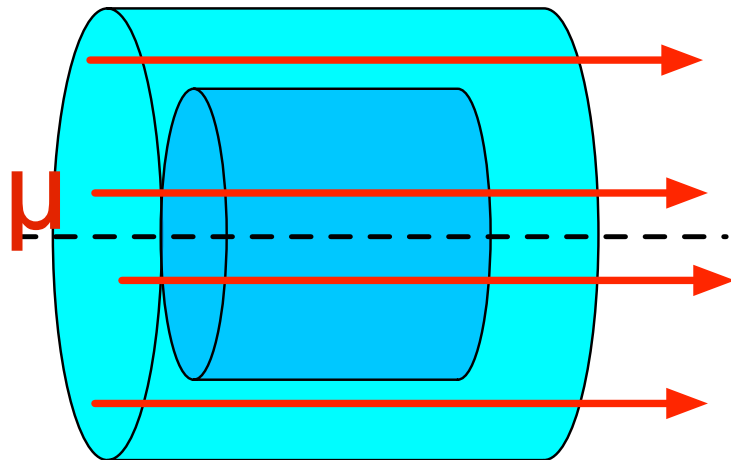
- キャリブレーションで何をおさえるべきか
 - MCで予測される光量のスケール
 - MCでの検出器の応答(境界での反射・屈折率 (水あり・なし))
- B2スペースでニュートリノビーム起源の壁からのミュオンを用いて上記のことが確認できることを示す.
- ロックミュオンレートの見積もり
- MCを用いて、ロックミュオンによる光量・検出器の応答の予測.

ロックミューオンレート

- INGRIDのニュートリノビーム測定のDataから見積もる.
- INGRIDでトラッキングして先頭プレーンに Vertex が再構成され、長いトラックを残すイベントを選ぶ.
 - INGRIDでのロックミューオン: $471800/3.26 \times 10^{19}$ # of protons (ニュートリノイベントとほぼ同じくらい)
- INGRIDのロックミューオン検出効率 ~ 1 と仮定する.
- 面積比から、100kW時にタンク上流から飛来するロックミューオンレートを見積もる → **92.7 muons/hour**
- 10時間で $\sim 10^3$ particles, 1週間で $\sim 10^4$ particles.

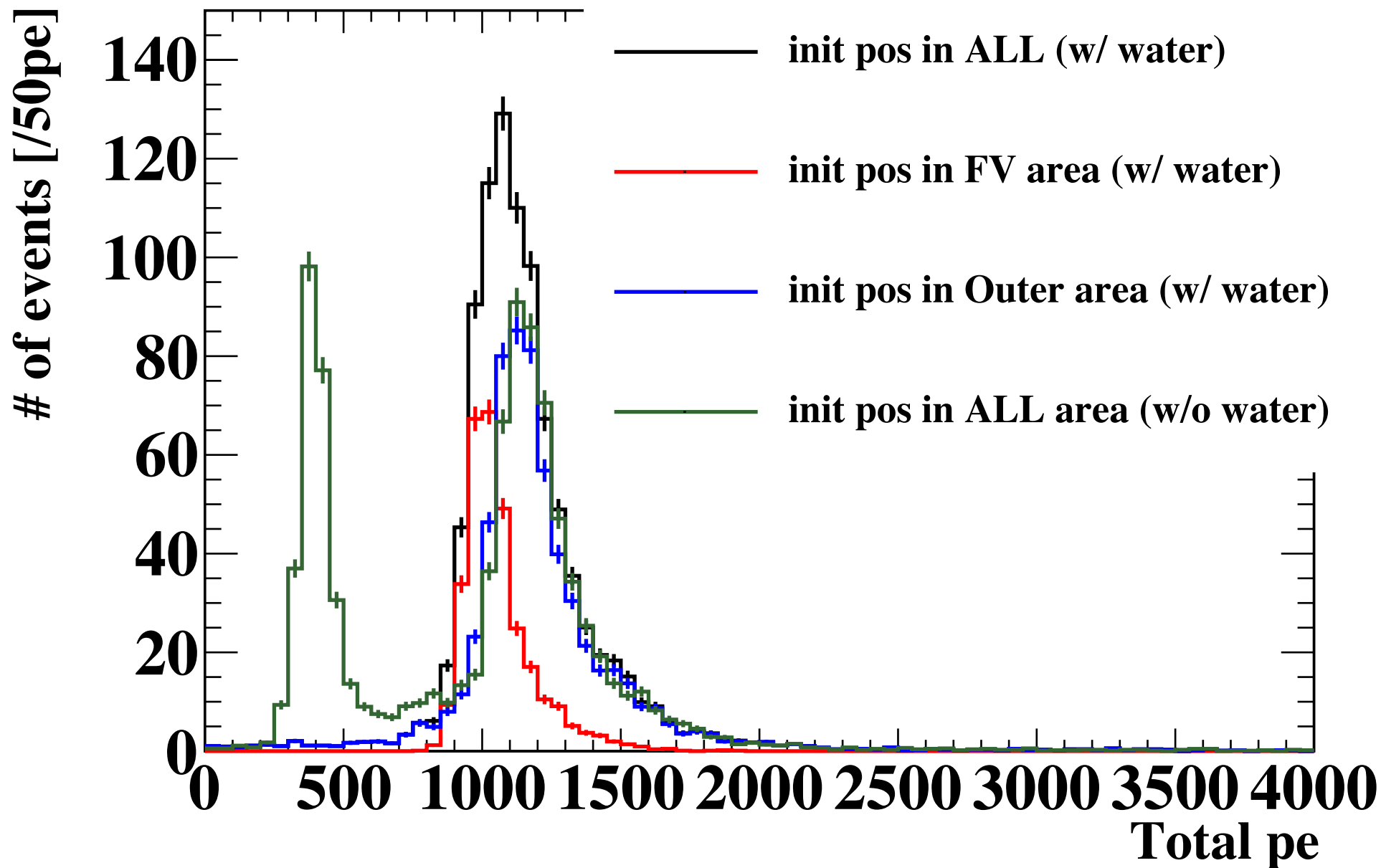
MC setting

- ミューオンをタンク上流から打ち込む
- ミューオンの条件
 - Kinetic energy : 450~1450 MeVの間で一様
 - Init. direction : 中心軸に平行
 - Init. vertex : タンク蓋内で一様

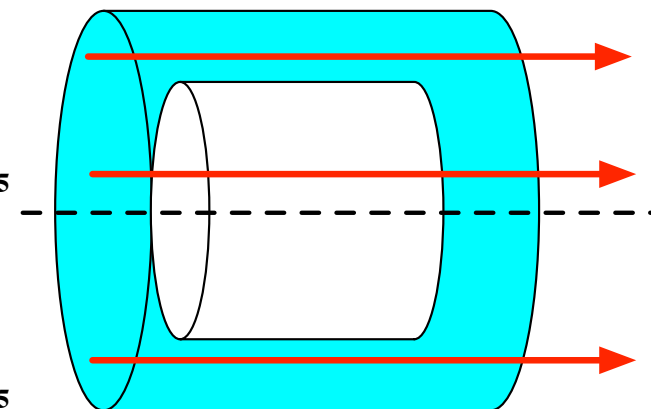
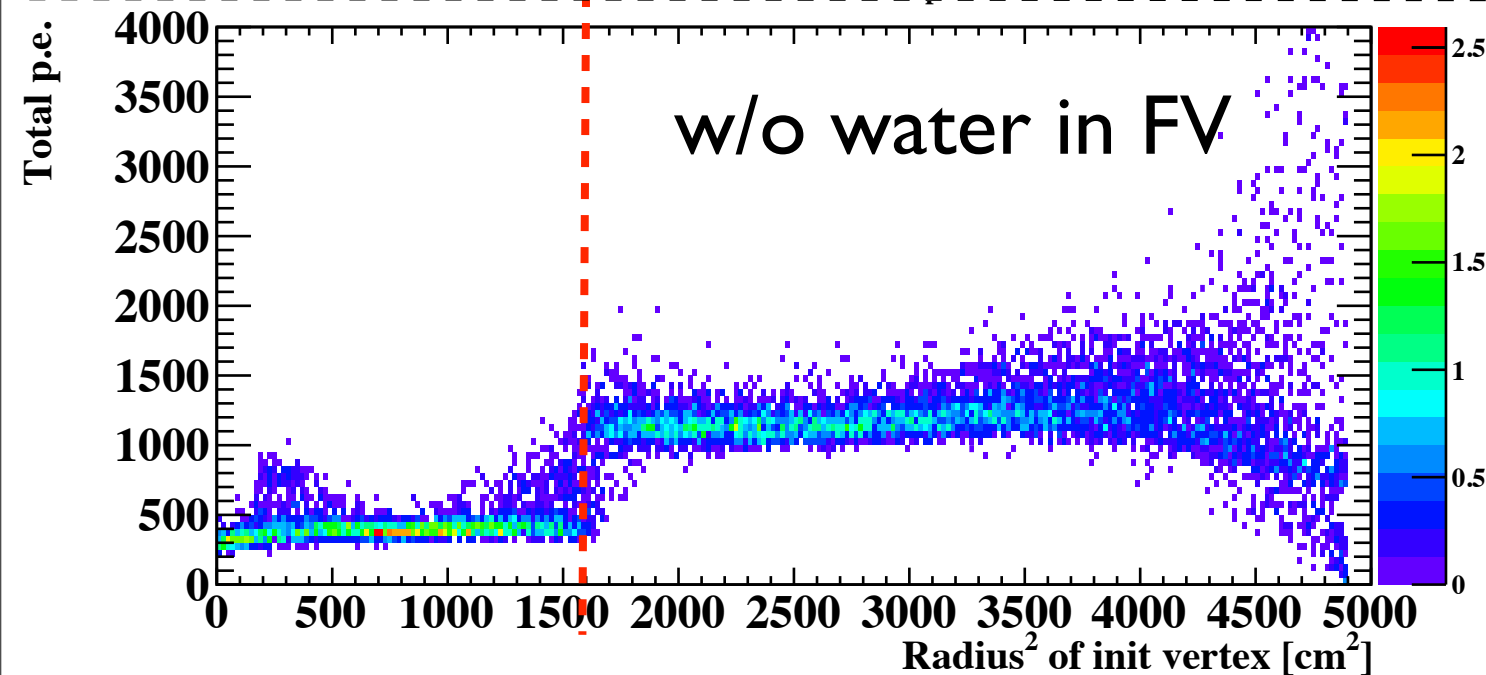
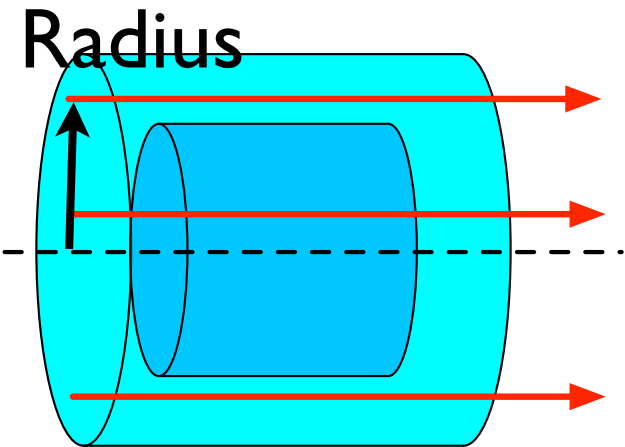
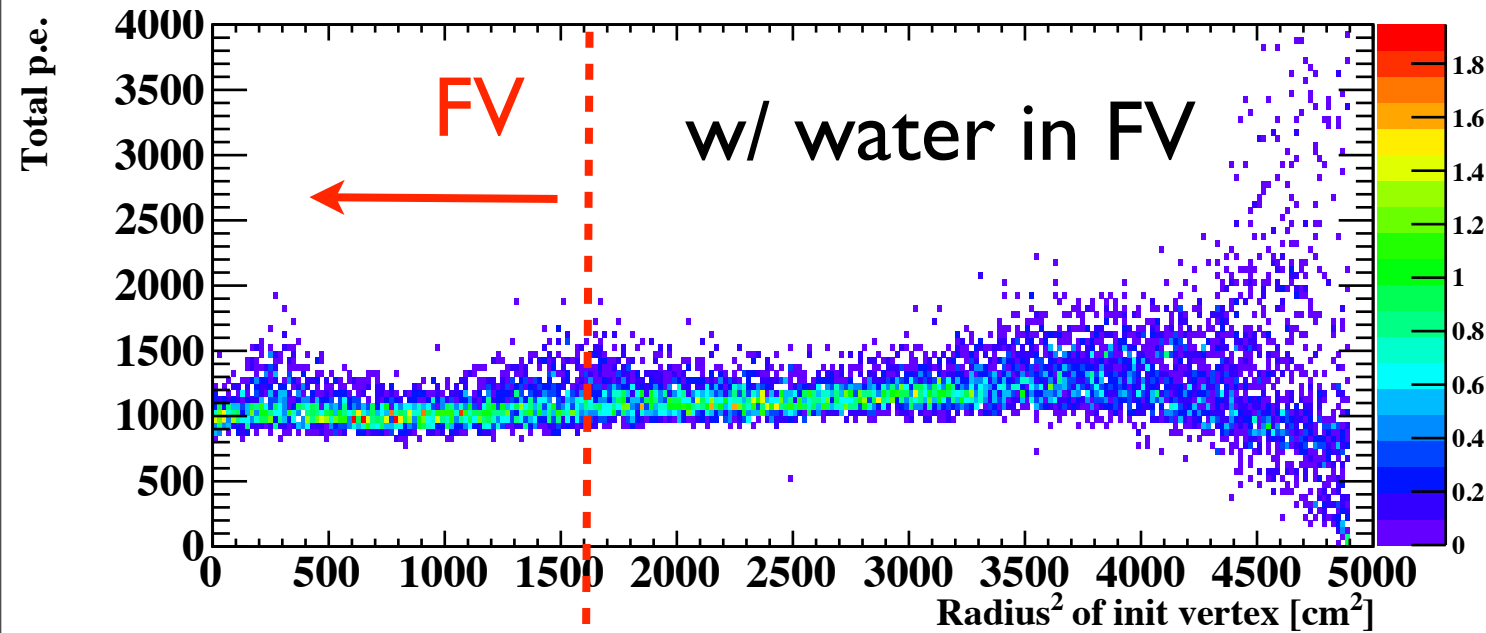


- FV内に水あり・水なしの二通り
- Normalization : 927 muons
(100kW × 10 hour)

Total p.e.



Total p.e. vs (radius of init pos)²



→ 水中のパス
の長さが違う。

Total p.e. がDataとMCで全体的に違っている.

→ MCの光量スケールがMCと実際とで違う.

光量の位置依存性がDataとMCで違う.

→

水あり・なしでの光量の差がDataとMCで違う.

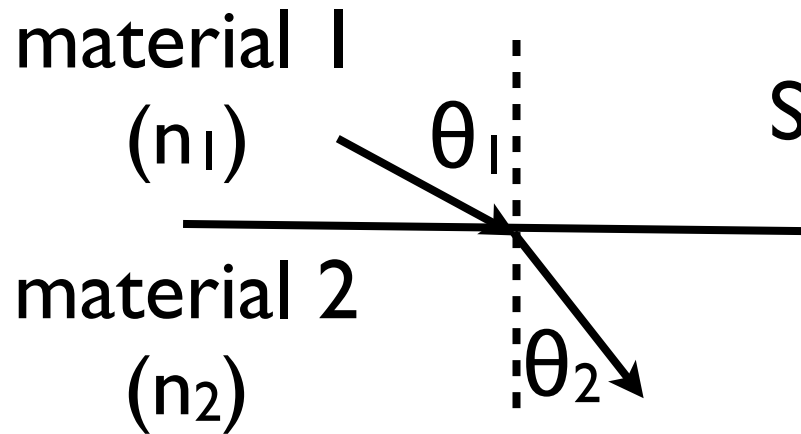
→ 境界面での屈折・反射率がMCと実際で違う.

キャリブレーション方法

- タンクの上流下流にトリガーシンチ(ホドスコープ)を設置。タンクを突き抜けるロックミュオンをトリガー
- 中心からの距離を変えながら数点で測定し、その位置でのTotal p.e.を求める.
- 各距離でのTotal p.e.をDataとMCで比較する.

Back up

Reflection probability



Snel's law: $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$

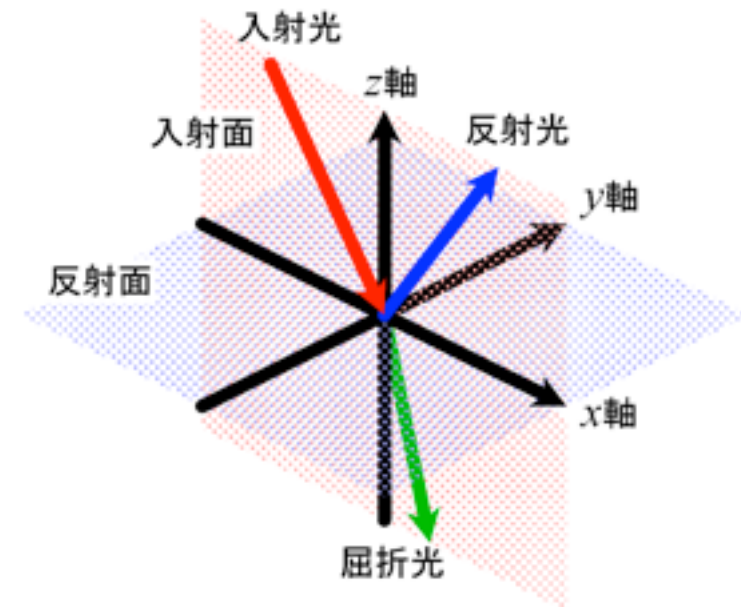
R_s : s波(入射面に垂直)の反射率

R_p : p波(入射面に平行)の反射率

Fresnel equations :

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \right)^2$$

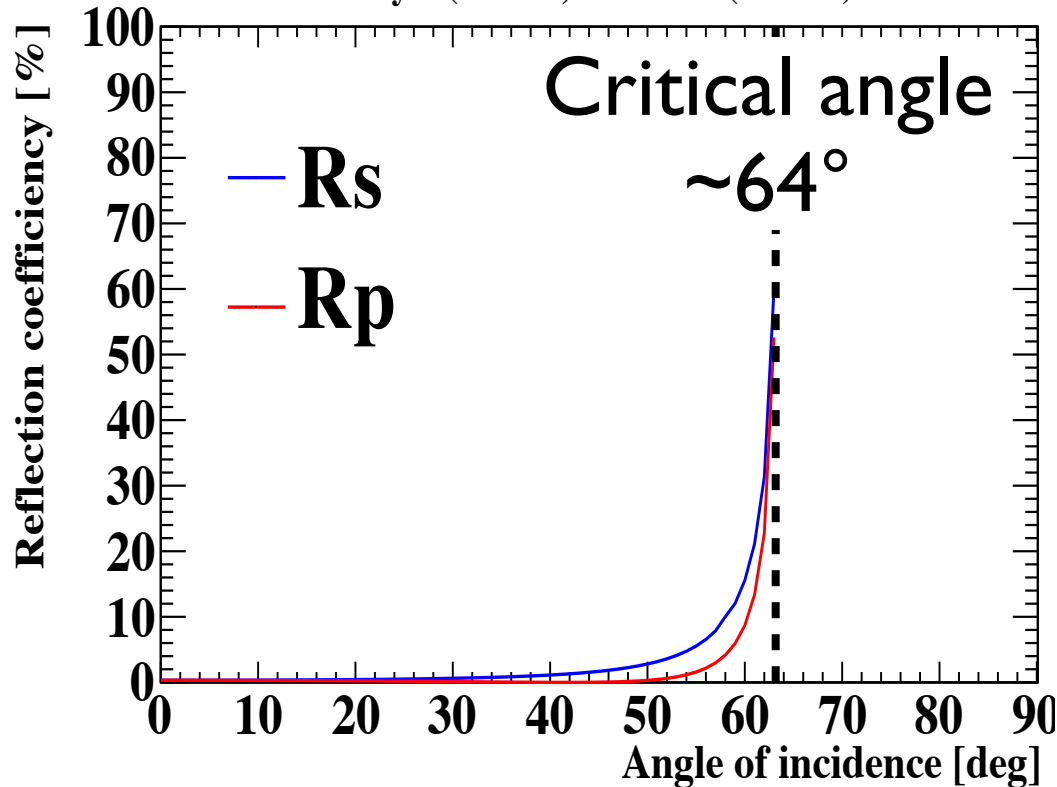
$$R_p = \left(\frac{n_1 \cos\theta_2 - n_2 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_2 + n_2 \cos\theta_1} \right)^2$$



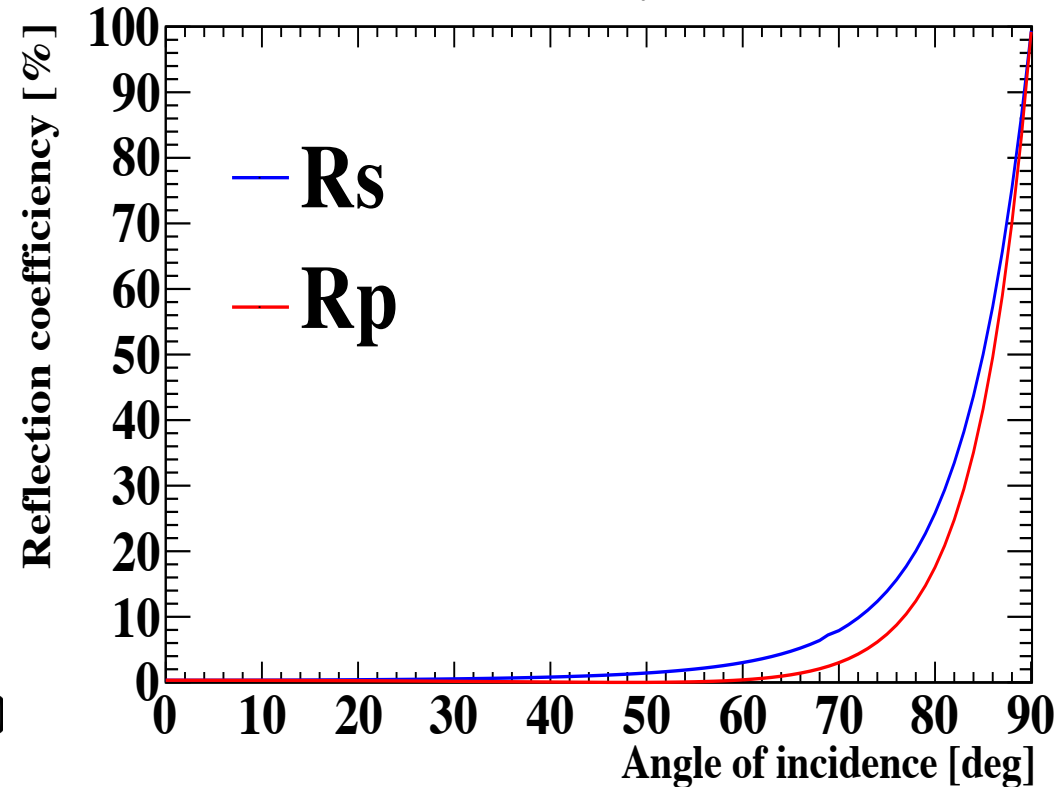
Reflection probability

Water : $n=1.33$, Acrylic $n=1.49$

Acrylic($n=1.49$) $\rightarrow$ Water($n=1.33$)



Water($n=1.33$) $\rightarrow$ Acrylic($n=1.49$)



Acrylic $\rightarrow$ Water : Total internal reflection (angle $> 64^\circ$)

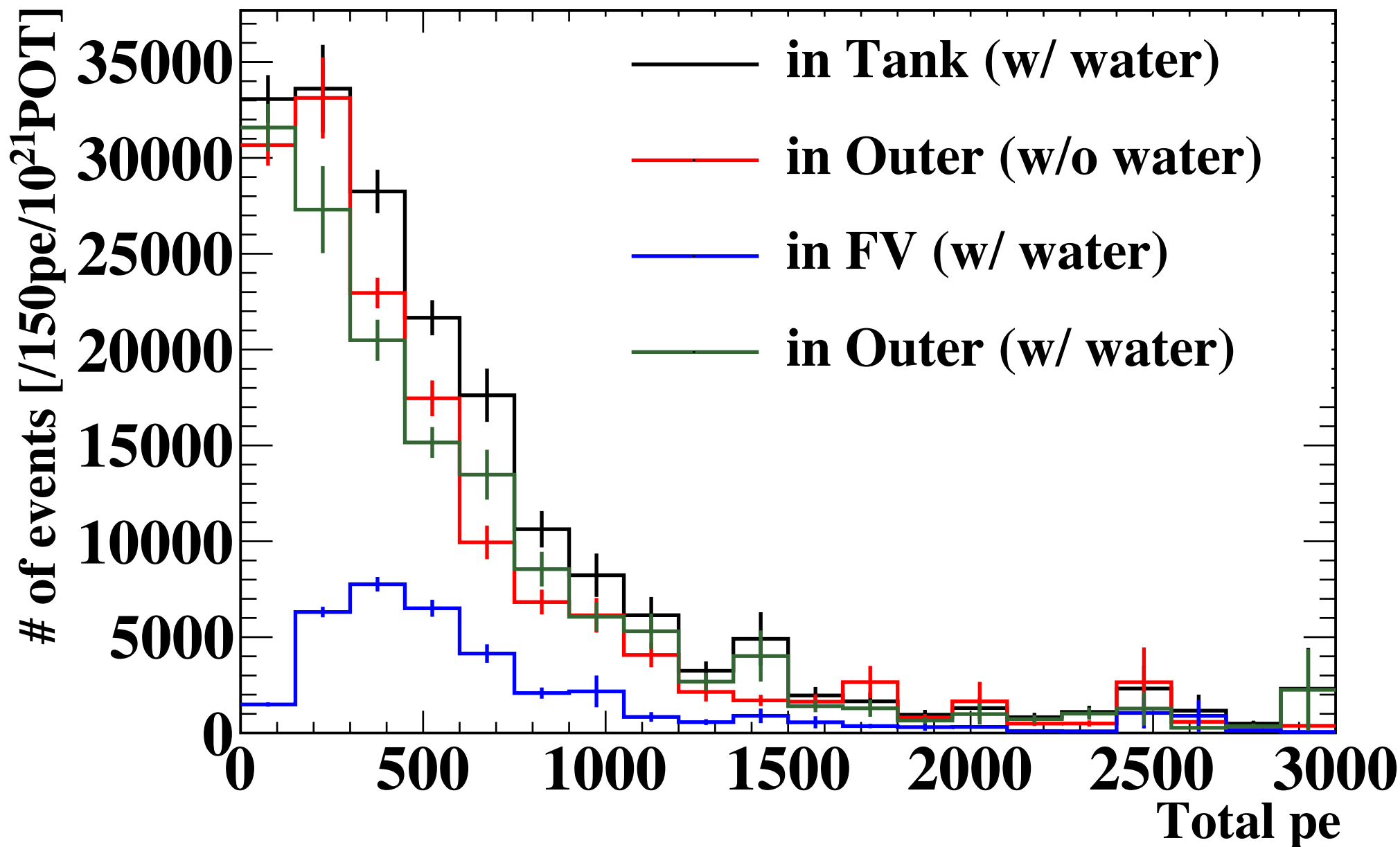
Water $\rightarrow$ Acrylic : Reflection probability is 80~90% (angle $\sim 90^\circ$)

Parameters

- Refractive
- QE of PMT

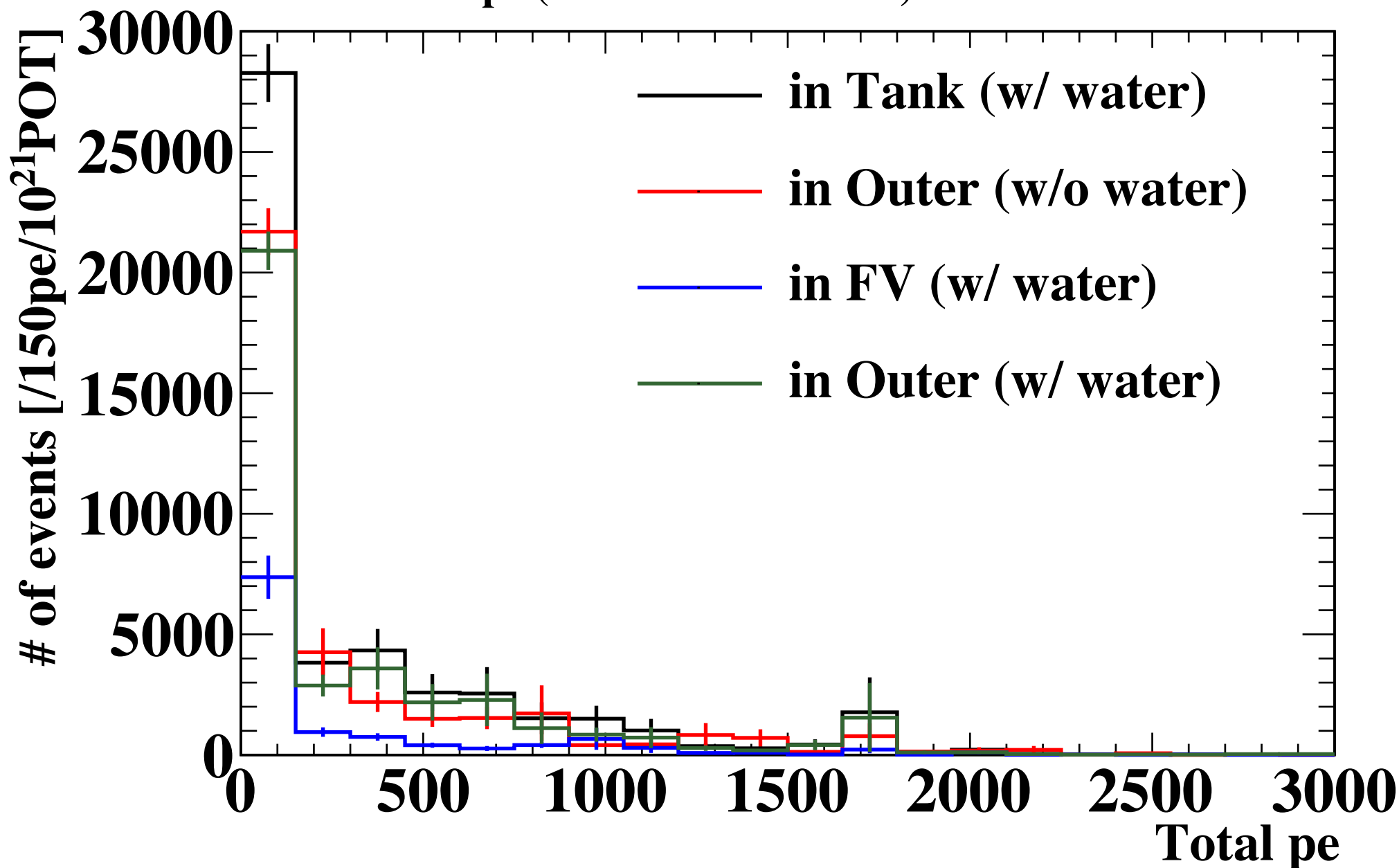
Total p.e. (CC)

Total pe (with HIT threshold) : CC



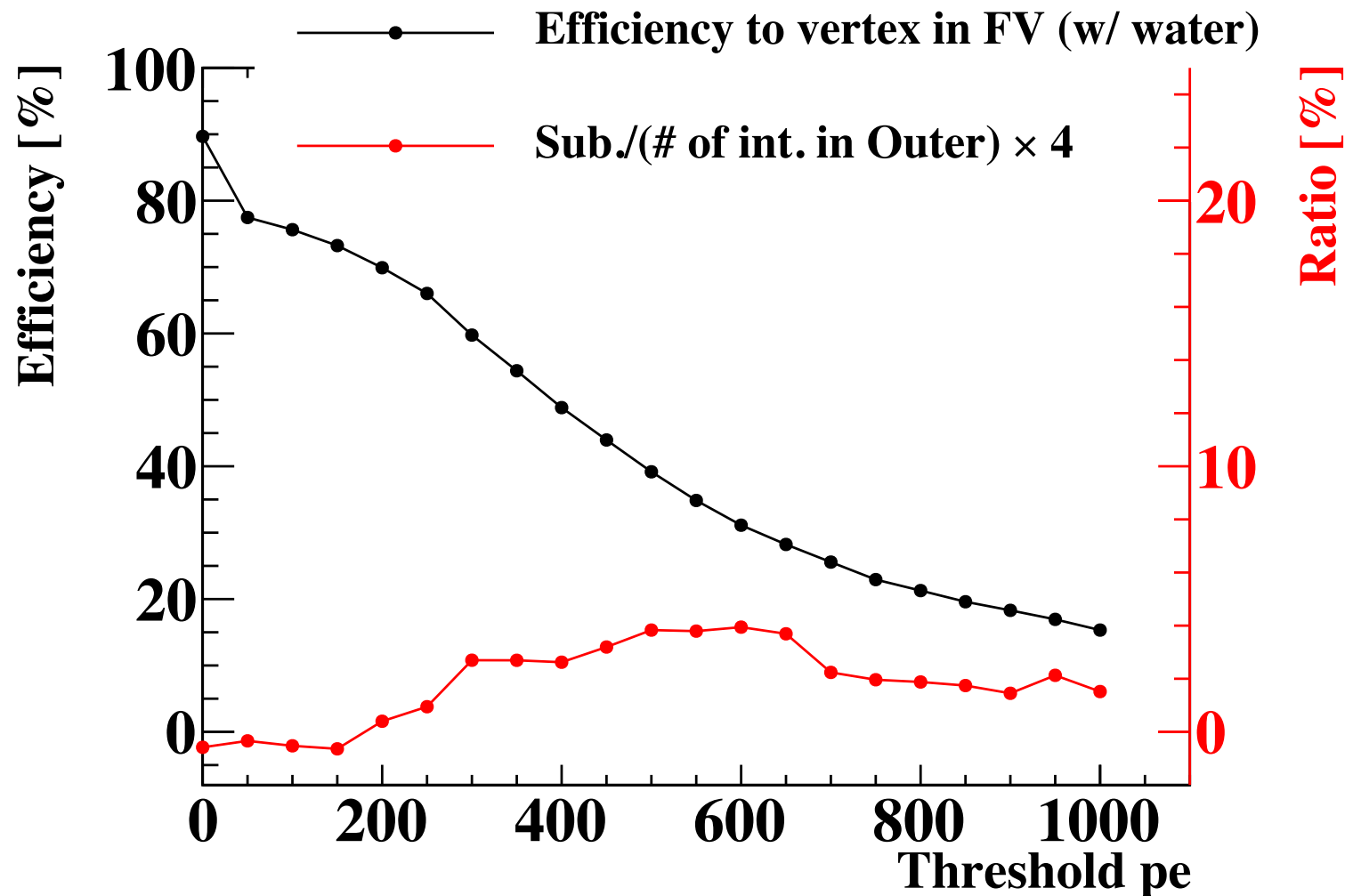
Total p.e. (NC)

total pe (with HIT threshold) : NC



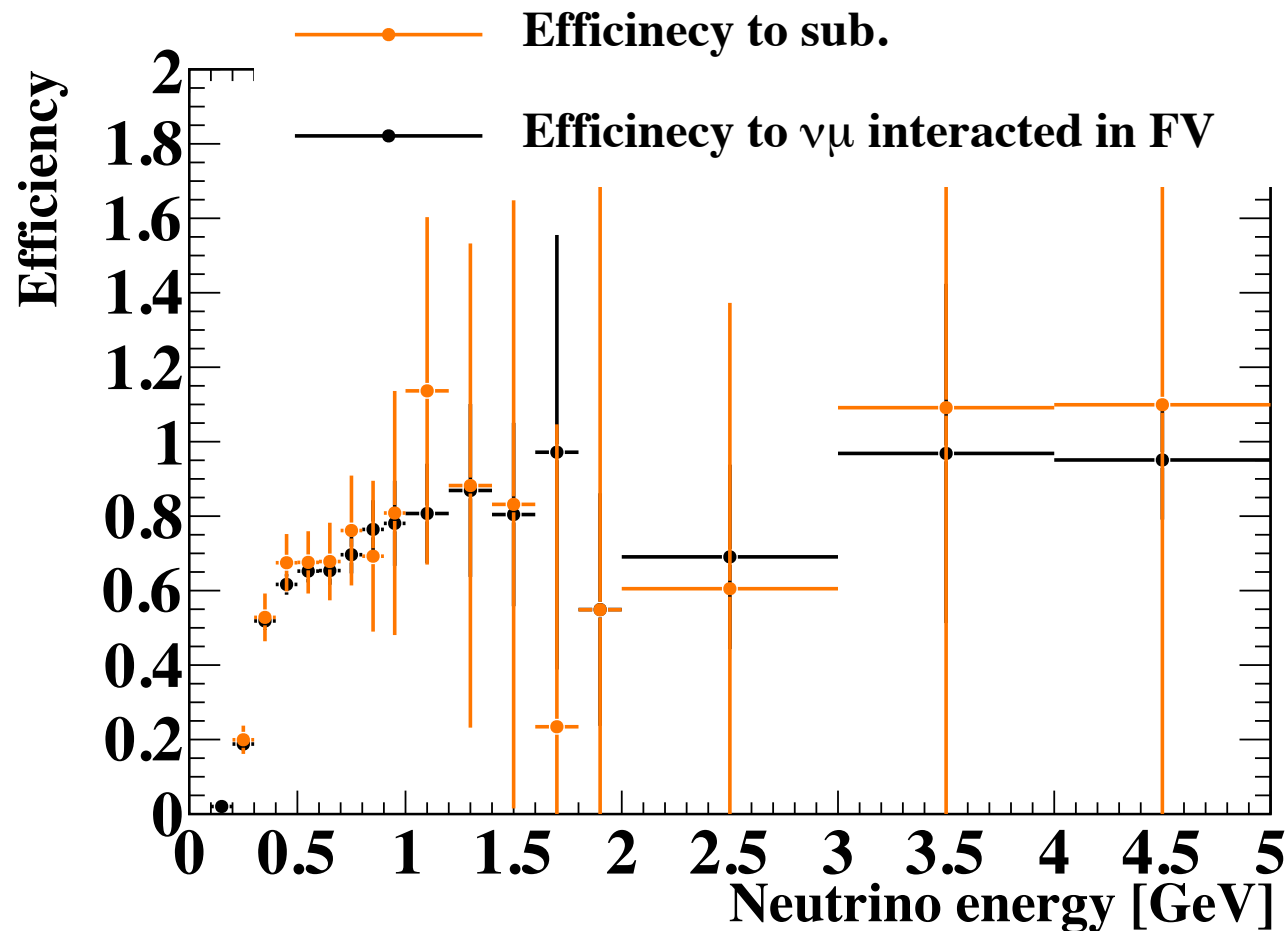
Efficiency vs Threshold total pe

FV内での反応に対する検出効率と、Outerで反応した内で差し引きして残る(Back ground)の割合



Efficiency (total p.e.>150) to signal neutrino

$$\epsilon_{Sub} = \frac{N_{with\ water}^{obs} - N_{without\ water}^{obs}}{N_{FV}^{int}}$$



FV内で反応した
ニュートリノに対して、
Energy~0.3GeVから急激
に立ち上がる検出効率
が期待できる。