



# T2K実験におけるニュートリノフラックス推定精度の向上のための電磁ホーン冷却水分布測定

総合研究大学院大学(M1) / IPNS / T2K実験

西森 早紀子

# 目次

---

1. T2K実験の概要と電磁ホーンの説明
2. 本研究の内容
  1. 研究の動機
  2. 測定の方法
  3. 測定の結果
  4. シミュレーションへの導入
3. まとめと今後の発展

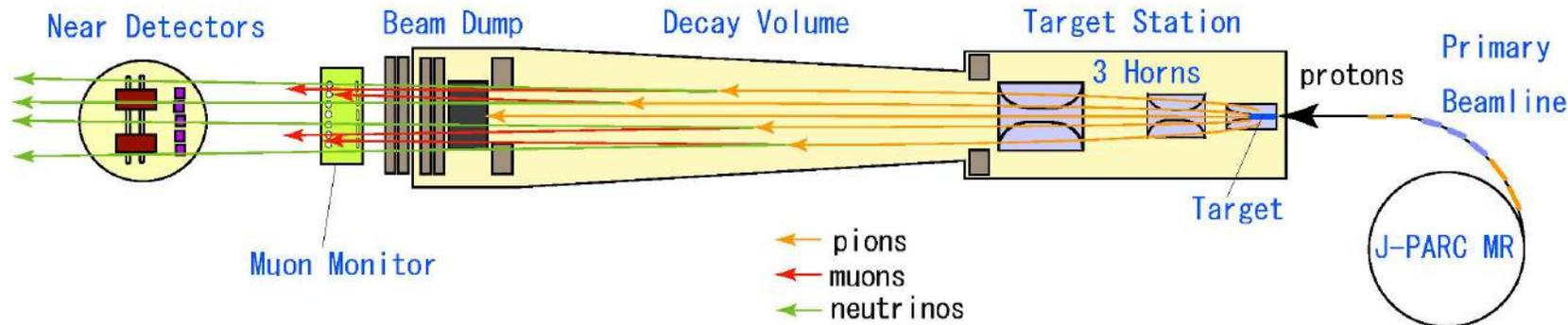
# T2K実験とは

- 加速器ニュートリノを用いた長基線ニュートリノ実験。
- ニュートリノ振動の精密測定により、レプトンのCP対称性の破れを探索する。



J-PARCでは、ニュートリノを生成し、その飛ぶ方向を正確に見積もる必要がある  
そのために、前置検出器やミュオンモニターなどが配置されている

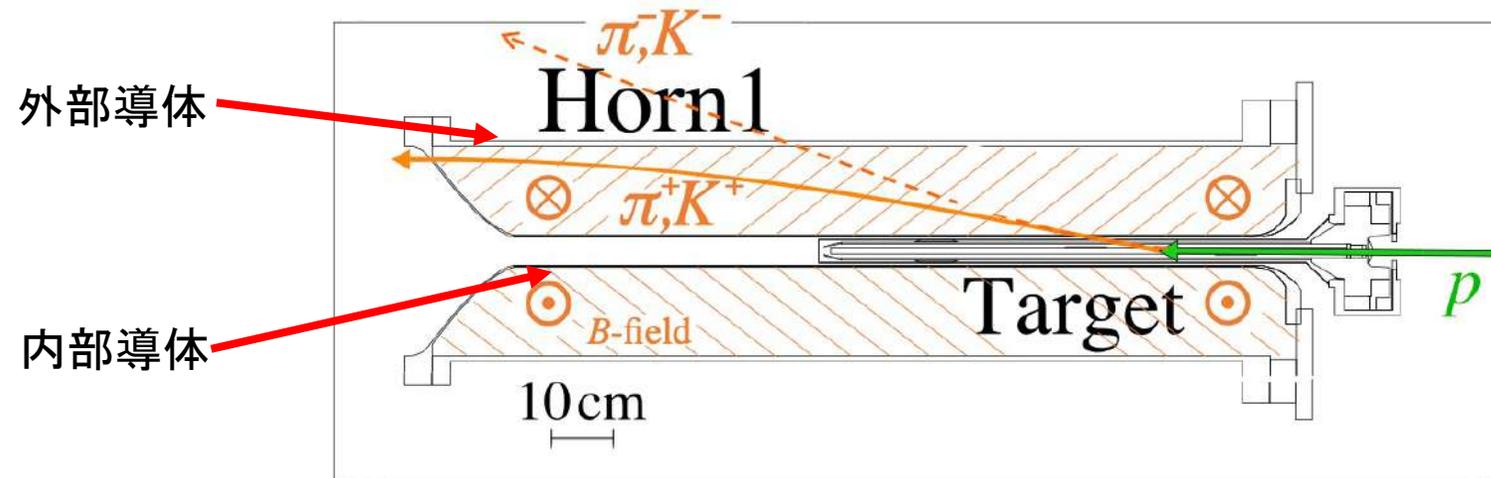
## J-PARCニュートリノ実験施設



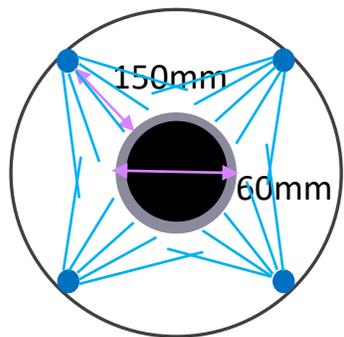
<主なニュートリノ生成過程>  
 $P(\text{from Main Ring}) \rightarrow \pi \rightarrow \mu + \nu$

# 電磁ホーン:ニュートリノビームを生成する主要装置

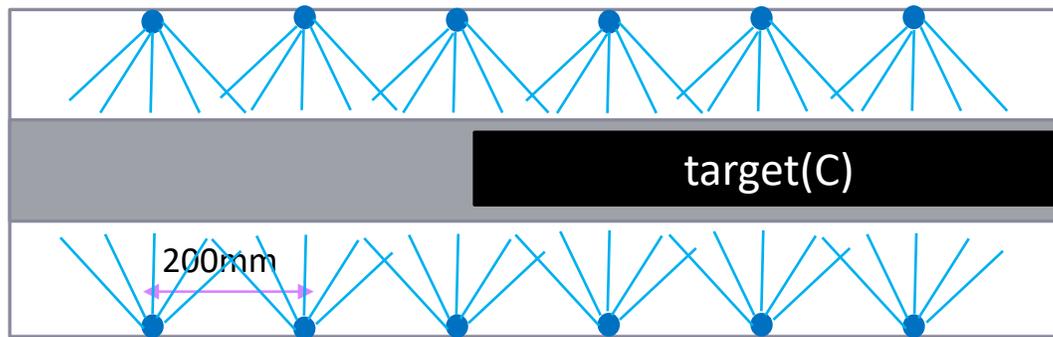
**$\pi$ 中間子を神岡方向に収束させ、生成されるニュートリノビームの向きを合わせる装置**



ビーム軸方向から



横から



トロイダル磁場を作り、 $\pi$ 中間子を曲げている。  
電磁ホーンに流す電流の向きを変えることで、収束される $\pi$ の種類が変わり、その後できるニュートリノの種類も変わる。

陽子がターゲットにあたる時に発生する熱

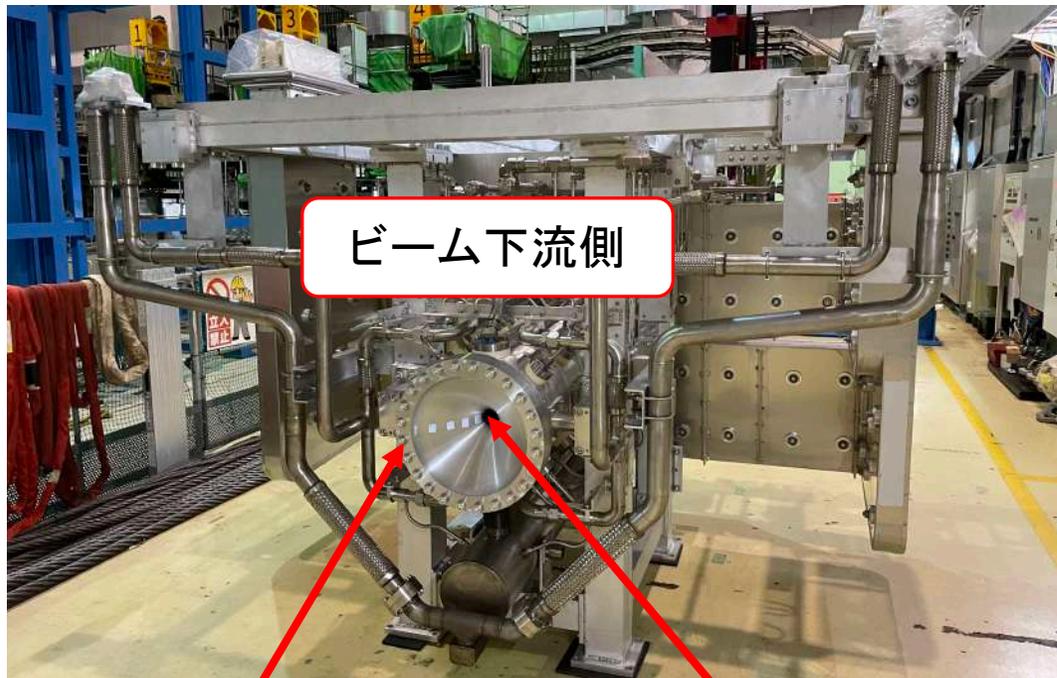
320kAの電流によるジュール熱

冷却のためにホーンの外部導体に冷却水噴射用のノズルが取り付けられており、内部導体に向かって噴射している。

冷却水用ノズルが合計24個付いている

● : nozzle

# 実際の装置の写真

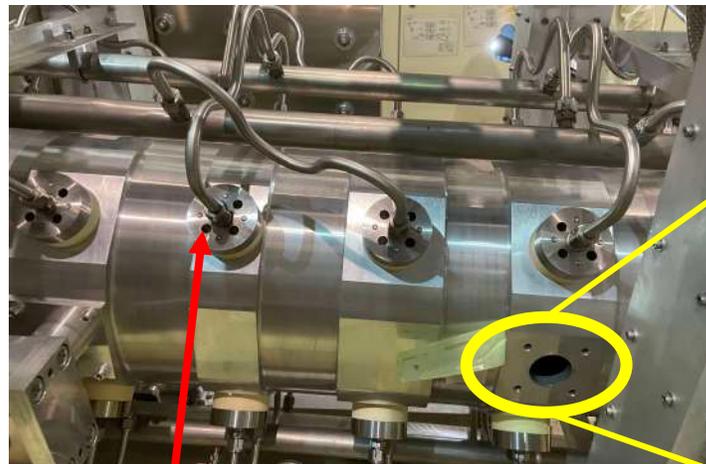


ビーム下流側

2m22cm

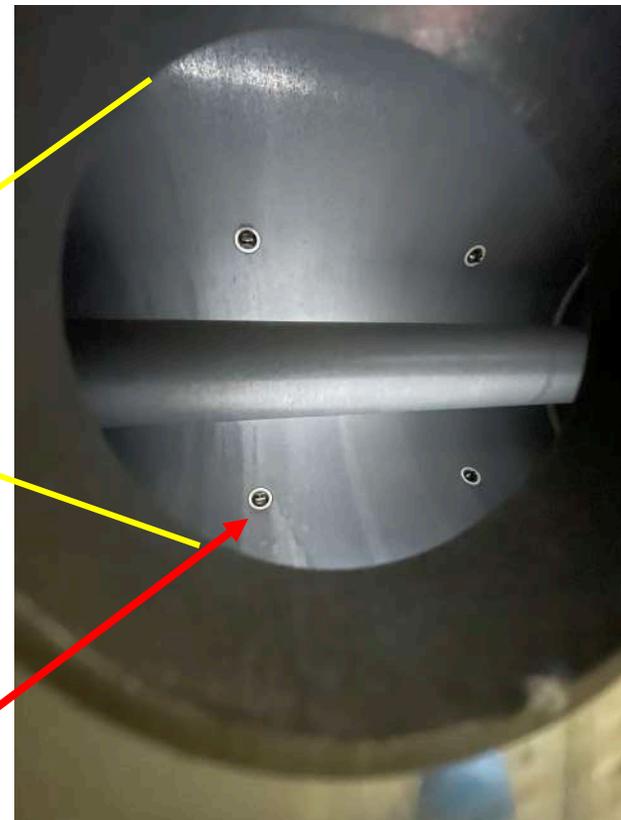
外部導体

内部導体



冷却水のパイプ

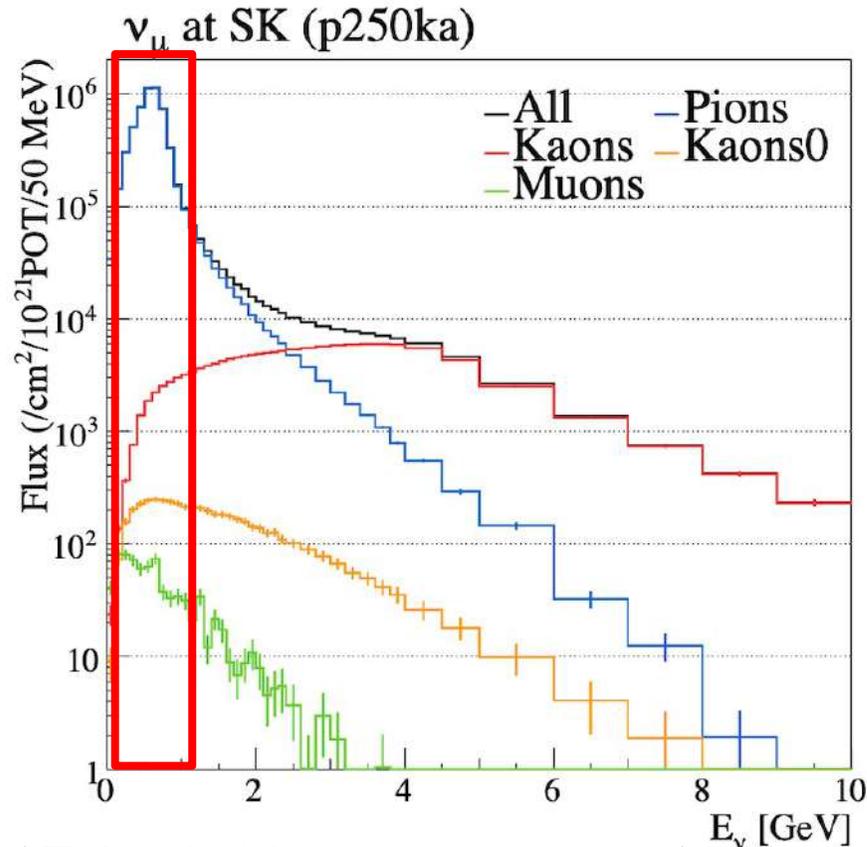
冷却水用ノズル



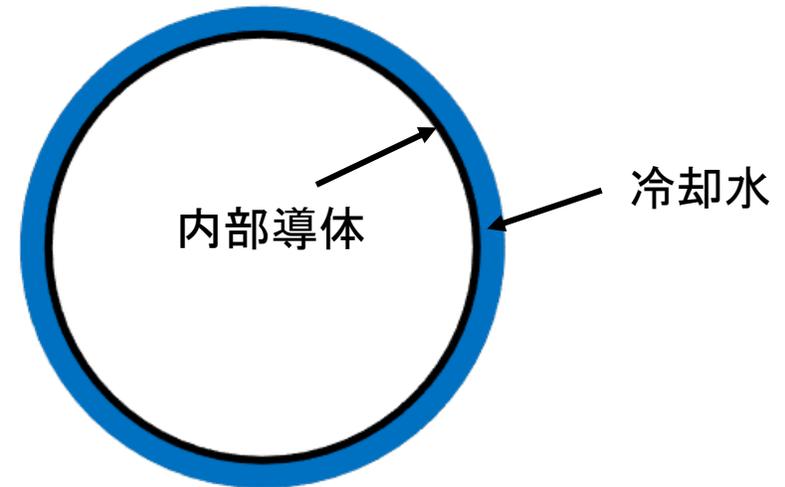
ビューポートから見たホーンの内部

# ニュートリノビームのシミュレーション

- J-PARCでのニュートリノビーム生成のモンテカルロ・シミュレーションなどを用いて、スーパーカミオカンデに到達するニュートリノのフラックスを見積もっている。



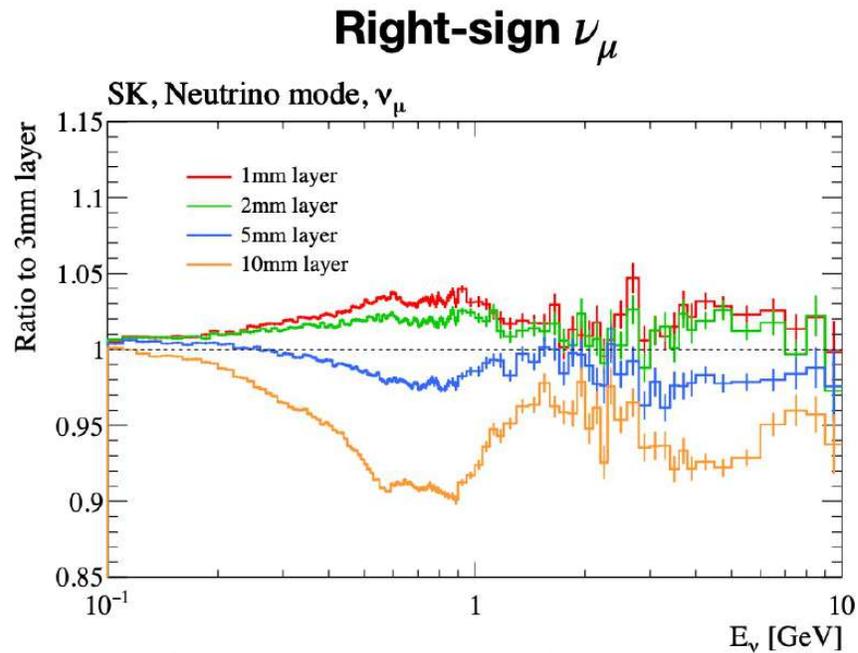
Fluxが最大になるところでは99%以上がπ中間子生成



現在は  
3±2 mm  
均一な分布で評価している。

# 冷却水が及ぼす影響

- 冷却水の分布の違いにより実際どれくらいニュートリノのフラックスに影響しているのか。

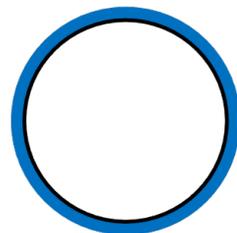


先行研究により、厚さの見積り  
の違いによって、フラックスに違いが  
出ることがわかっている。(東工大  
Lukas Bernsさんによる研究)

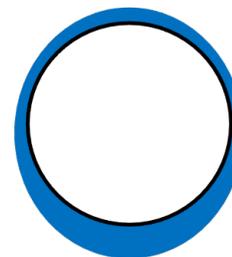
例えば、

- 水の厚さ
- Dipole成分
- Quadrupole成分

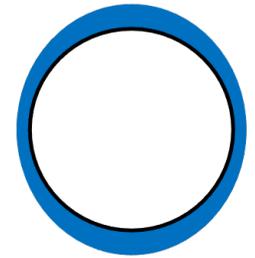
といった水の分布形状の仮定を変えたシミュレーションにより影響を考慮することが可能。



Symmetric  
 $r = r_{pipe} + \Delta r$



symmetric + Dipole  
 $r = r_{pipe} + \Delta r + \Delta r'(1 - \sin\theta)$



symmetric + Quadrupole  
 $r = r_{pipe} + \Delta r + \Delta r'(1 - \cos 2\theta)$

➡ 原因は冷却水と $\pi$ 中間子が反応してしまうこと

# 本研究の動機

- $\pi$ 中間子と冷却水の反応が、ニュートリノのフラックスに影響している。→冷却水の分布を知る必要がある。

現在の測定方法は、、、



- 電磁ホーンのビューポートから観測した冷却水の様子を元にシミュレーションをしている。冷却水の量をコンサバティブに評価している可能性がある。

そこで、、、



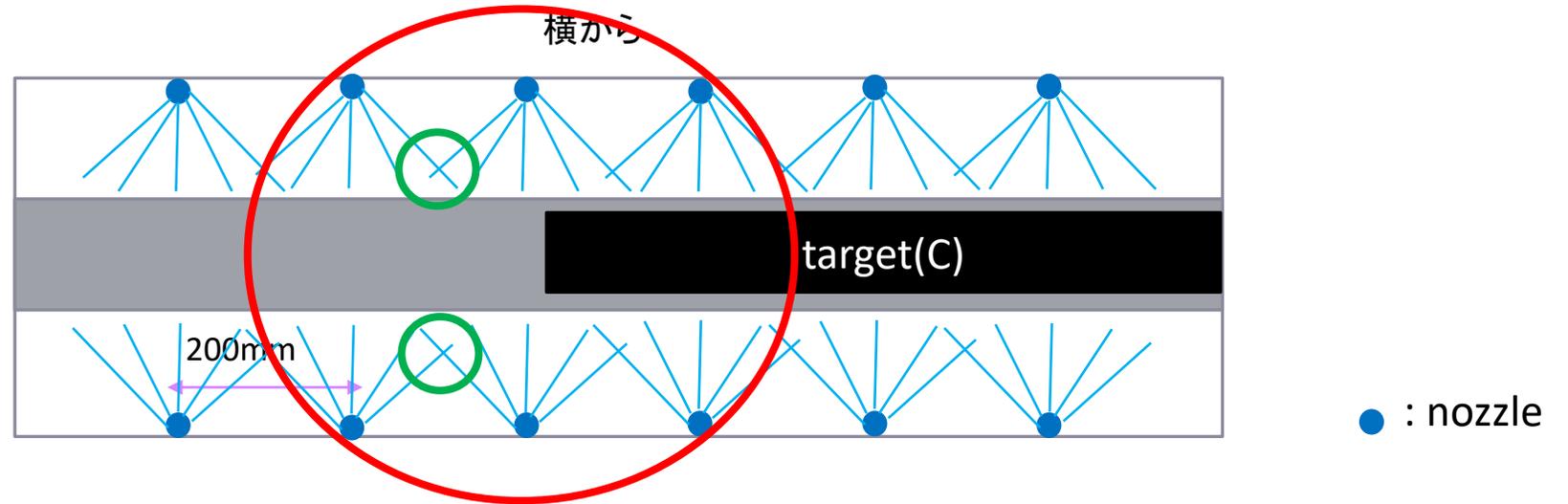
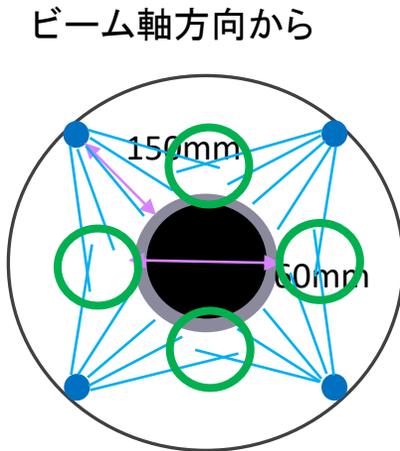
- **あらゆる方向から冷却水分布を観察できるようなモックアップを作り、冷却水分布を観察できる様にする。**これにより、冷却水分布をより詳細に見積もることができる。



冷却水が噴射されている時にホーンのビューポートから内部の様子を観察した写真。

# ホーン内の冷却水ノズルの配置

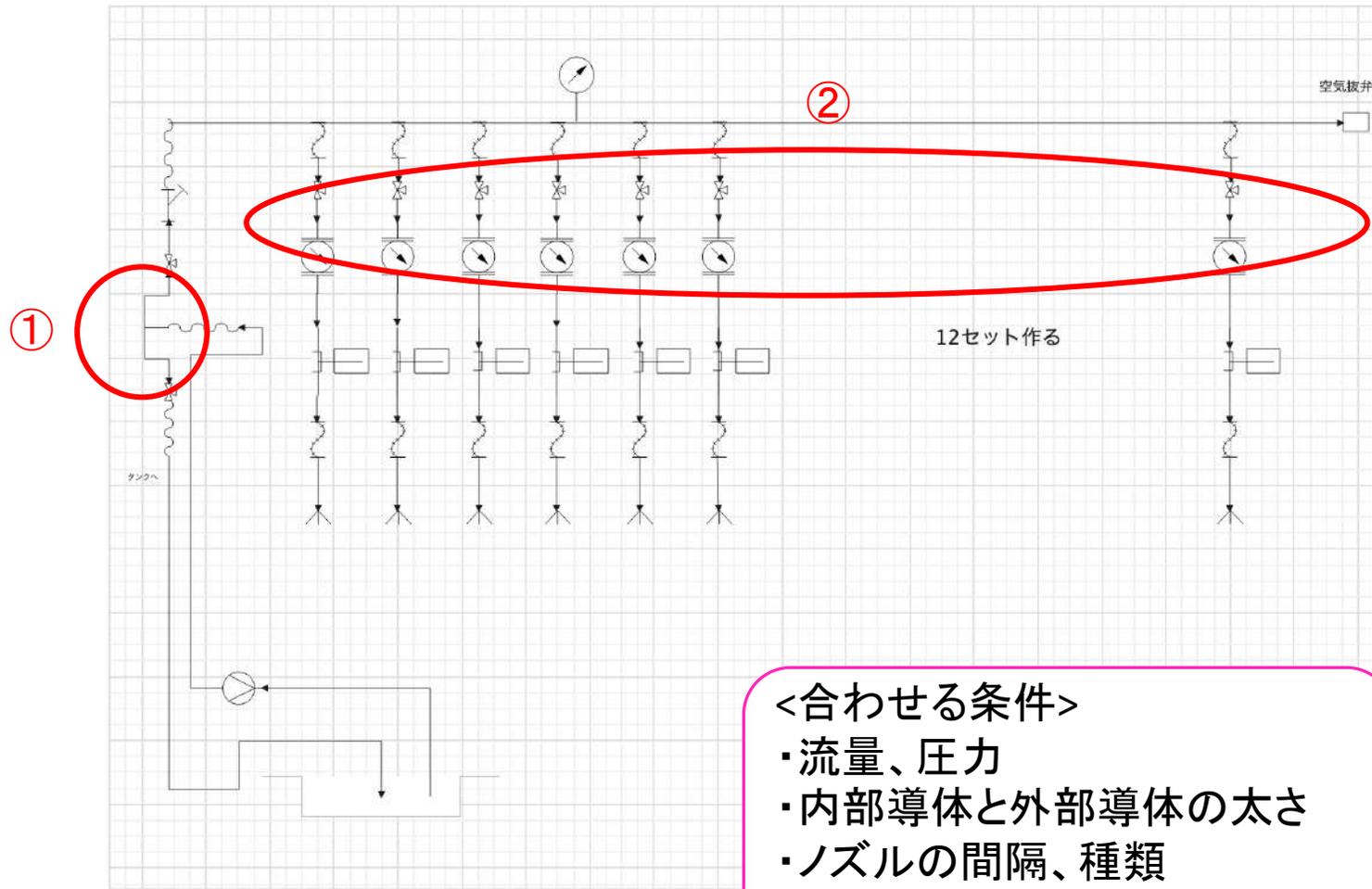
- 流量 : 2.5L/min (1つのノズルあたり)
- 圧力 : 3気圧



ノズル  $4 \times 3 = 12$ 個でモックアップを作る

○印の部分など、隣のノズルからの冷却水と重なる影響を見るため。

# 実験での冷却水系統図



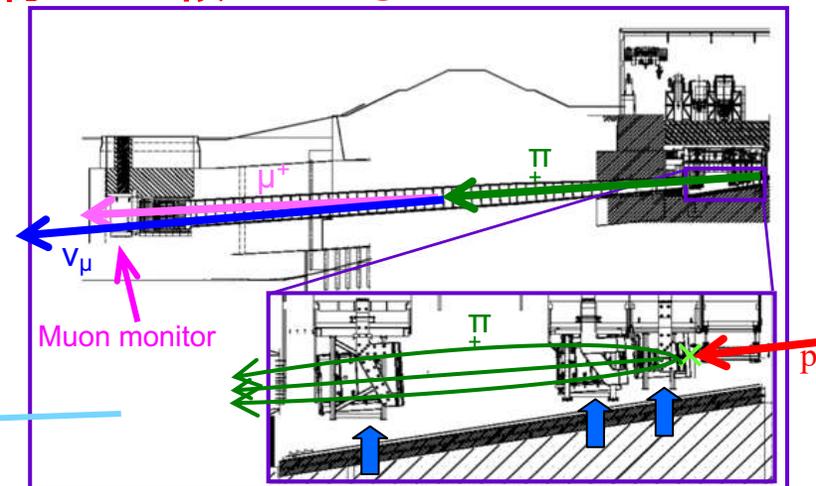
<ポイント>

- ① 流量・圧力調整ができる様に分岐を作った。
- ② 一つずつのノズルでのばらつき調整のために全てのノズルにバルブと流量計をつけた。

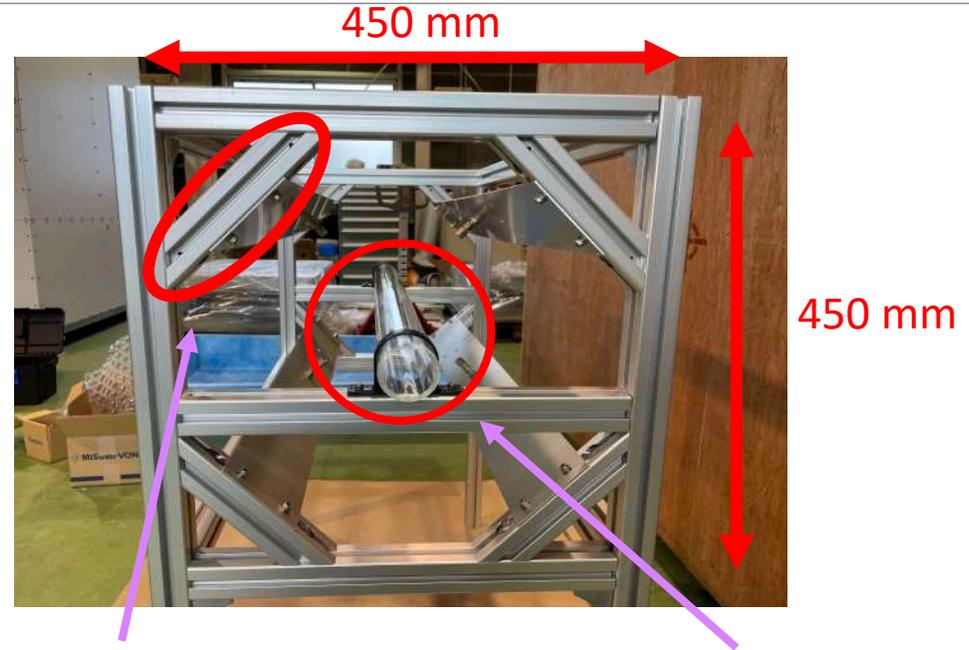
神岡方向に向けるため、水平面に対して約 $3.64^\circ$  傾いている

<合わせる条件>

- ・流量、圧力
- ・内部導体と外部導体の太さ
- ・ノズルの間隔、種類
- ・傾け具合



# モックアップの様子



アルミフレームにアルミ板を固定。  
そこにノズルを取り付けた。  
ノズル部の長さを考慮して、この斜めの  
アルミフレームの長さを決定した。

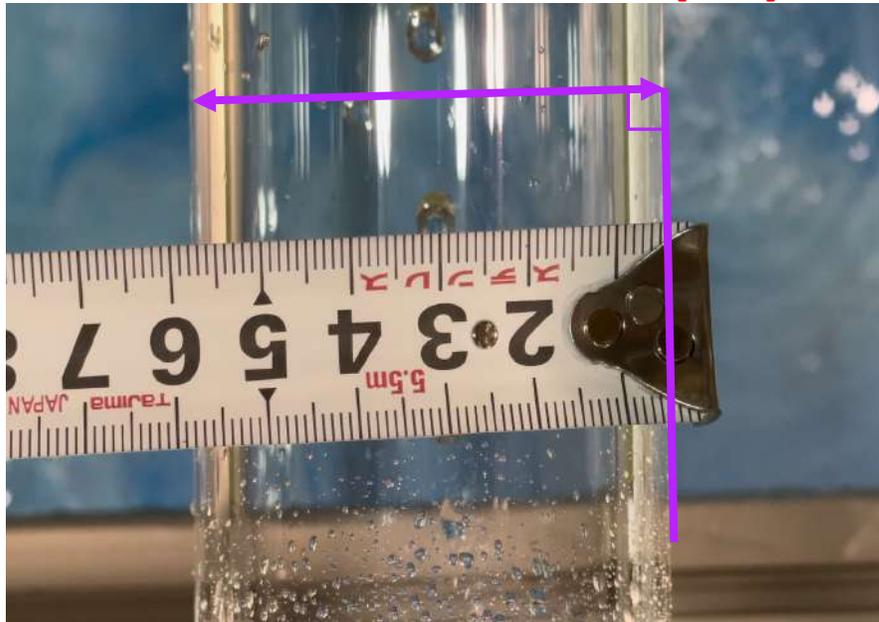
内側からも観察できるように透明な  
アクリルパイプを使用

アルミフレームに高さ調整できる脚を装着。  
傾きがホーンと同じになる様に脚の長さを調整。

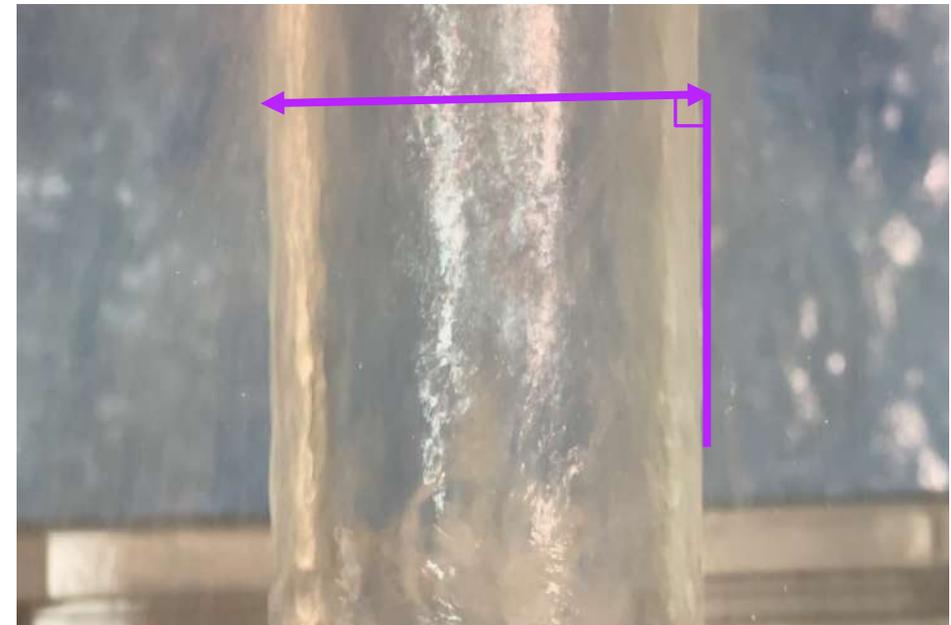
# 冷却水分布の画像による評価方法

- 全く同じ場所から写真を撮って、冷却水が噴射されている時とされていない時とを比較して、アクリルパイプ周りの水の厚さを測る。

写真上での長さ測る(=長さ①[mm])



写真上での長さ測る(=長さ②[mm])



$$\text{冷却水の厚さ[mm]} = ((\text{②}) - (\text{①})) \times \frac{60 \text{ [mm]}}{\text{①}} \times \frac{1}{2}$$

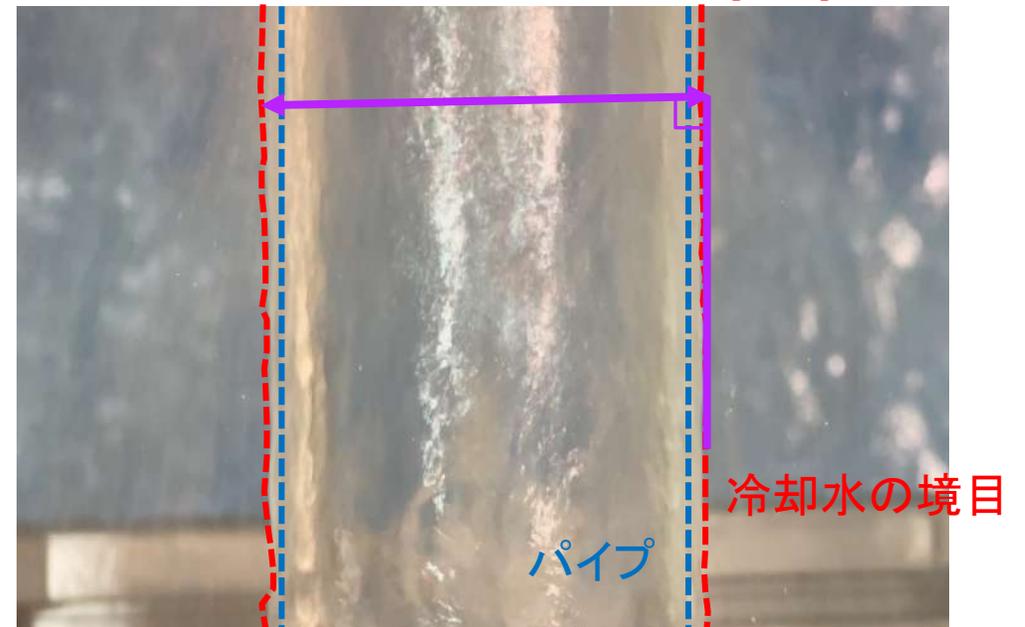
# 冷却水分布の画像による評価方法

- 全く同じ場所から写真を撮って、冷却水が噴射されている時とされていない時とを比較して、アクリルパイプ周りの水の厚さを測る。

写真上での長さ測る(=長さ①[mm])



写真上での長さ測る(=長さ②[mm])



$$\text{冷却水の厚さ[mm]} = ((\text{②}) - (\text{①})) \times \frac{60 \text{ [mm]}}{\text{①}} \times \frac{1}{2}$$

# 実験セットアップ

はじめに1セット(ノズル4つ)での  
セットアップを作り、流量や圧力  
の条件を合わせる



3セット(ノズル12個)でのセット  
アップを作り、条件を合わせる

ノズル4つの時はマニホールドを枠内  
に入れていたが、12個に増やした際  
にマニホールドや流量計などを枠外  
に出した。

流量計は初めは簡易流量計を用いて  
いたが、測定精度を上げるためにデ  
ジタル流量計も4台配置。  
また、圧力計は分岐前と分岐後両方  
に配置。



# 1セットでの冷却水分布

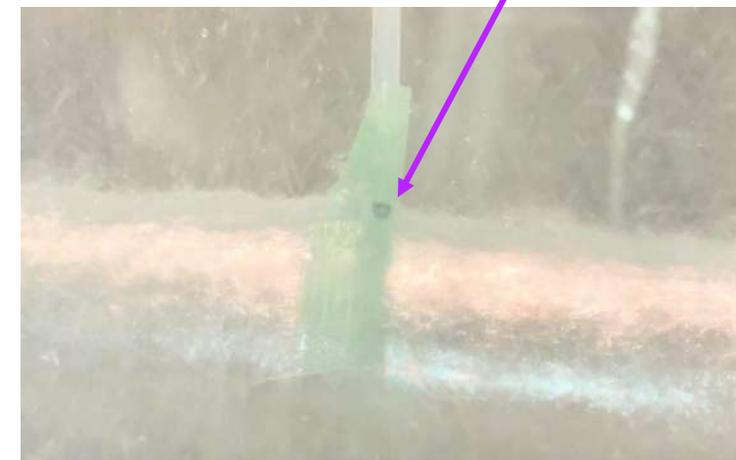
1セット(4ノズル)での測定を撮影方法を変えながら行なった



真上から撮影。  
2ページ前で説明した方法で  
数カ所厚さを測定したところ、  
**1mm~2mm**  
だった。



横から撮影。  
真ん中に線状構造が見られた。  
同じ構造が上下左右に見られた。

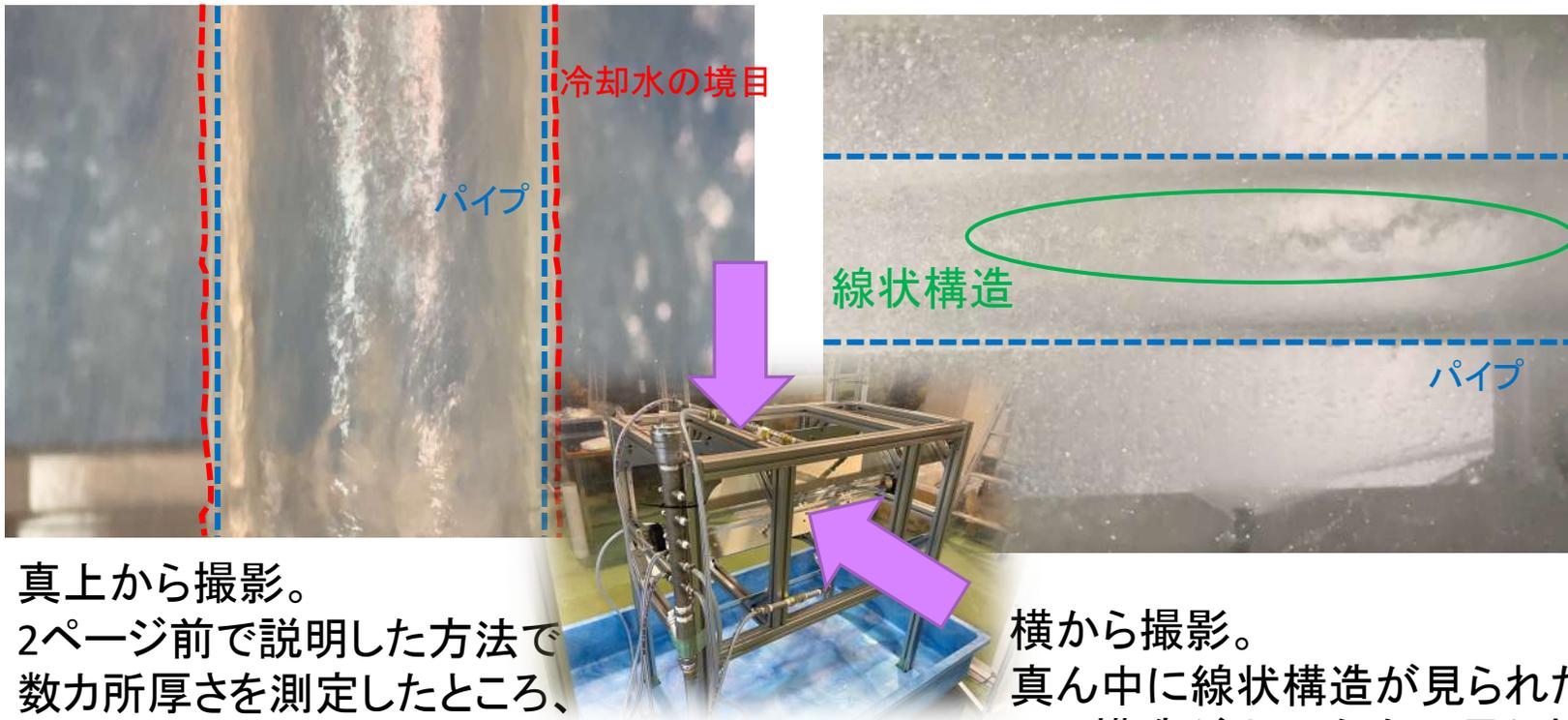


上方を横から撮影。  
2mmラインをつけた自作メジャーをつけ  
たところ、上部の厚さが**約2mm**であった。

今まで考えていた均一分布よりも複雑な構造をしていることがわかった。

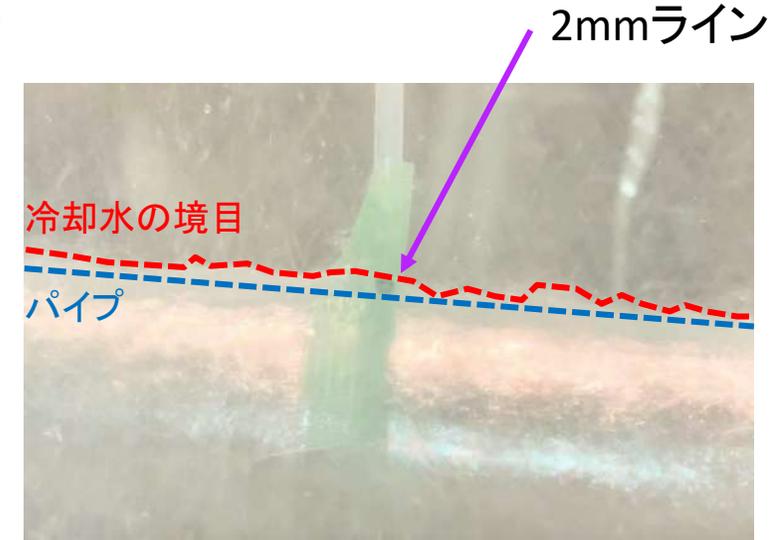
# 1セットでの冷却水分布

1セット(4ノズル)での測定を撮影方法を変えながら行なった



真上から撮影。  
2ページ前で説明した方法で  
数カ所厚さを測定したところ、  
**1mm~2mm**  
だった。

横から撮影。  
真ん中に線状構造が見られた。  
同じ構造が上下左右に見られた。



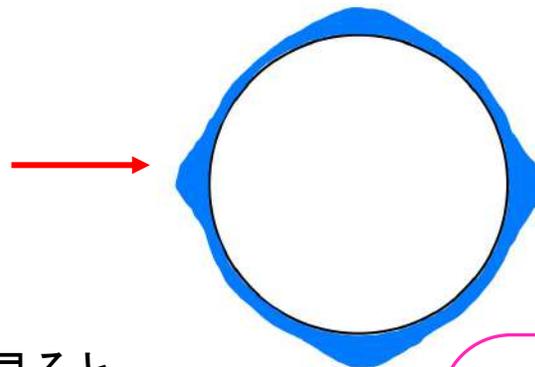
上方を横から撮影。  
2mmラインをつけた自作メジャーをつけたところ、上部の厚さが**約2mm**であった。

今まで考えていた均一分布よりも複雑な構造をしていることがわかった。

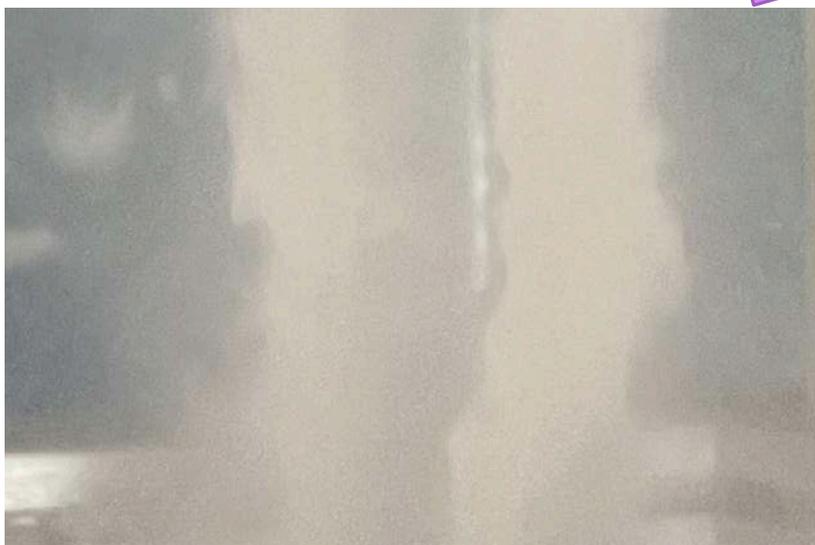
# 冷却水分布の見積もり

1セットでの画像評価により、

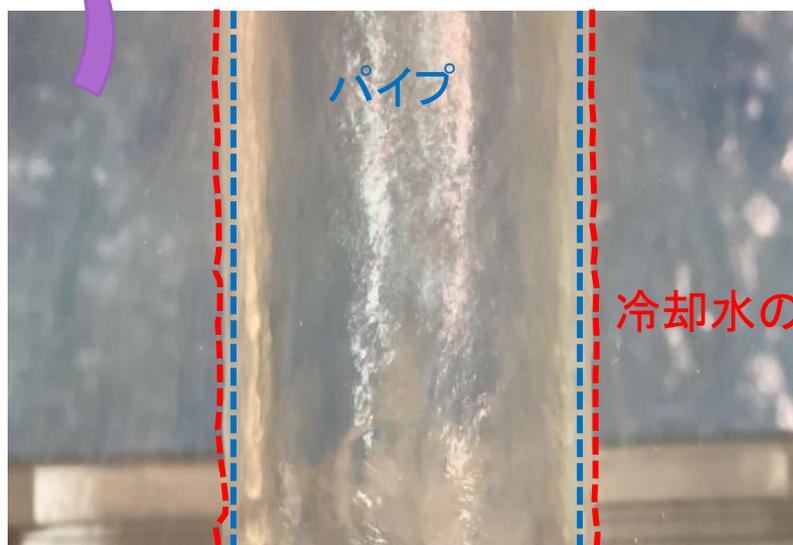
- 水の厚さは1mm~2mm程度
- 上下左右が分厚くなっている分布形状であることがわかった。



さらに3セットのノズルでの分布を見ると...



1セットでの場合



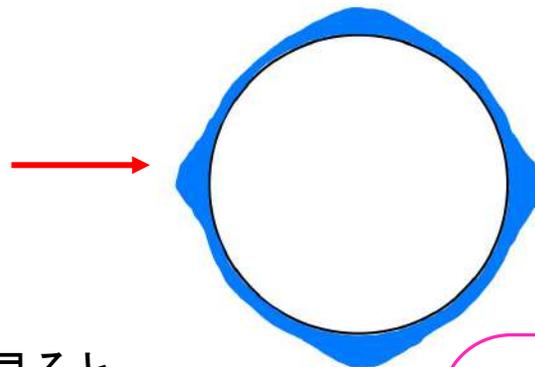
- 3セットでの観察結果
- 画像比較では厚さが平均約2倍になったが、流量増加の影響で場所や時間による厚さの違いがかなり大きくなった。
  - 上下左右が分厚くなるという形状は1セットの時と同じく見られた。

評価の方法を検討

# 冷却水分布の見積もり

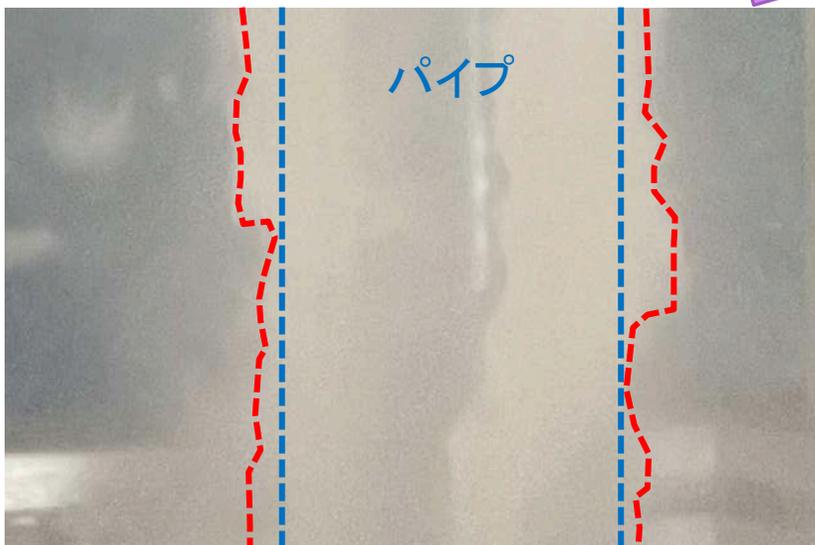
1セットでの画像評価により、

- 水の厚さは1mm~2mm程度
- 上下左右が分厚くなっている分布形状であることがわかった。

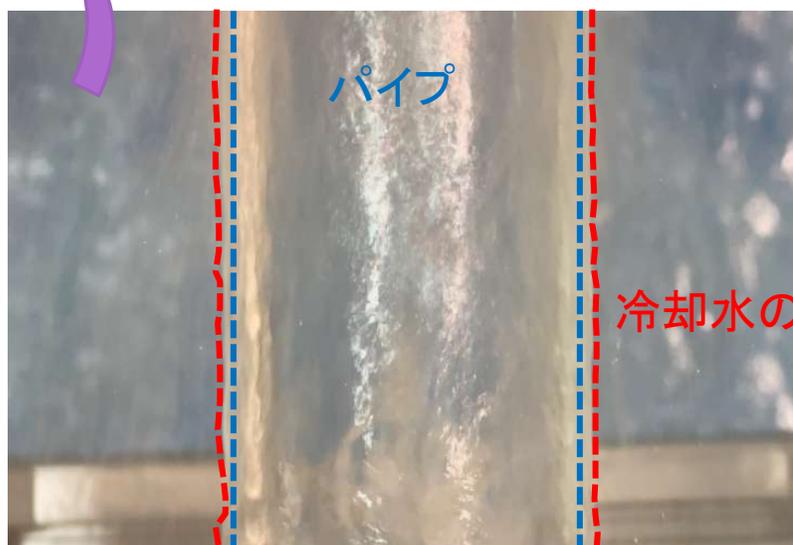


さらに3セットのノズルでの分布を見ると...

冷却水の境目



1セットでの場合



冷却水の境目

- 3セットでの観察結果
- 画像比較では厚さが平均約2倍になったが、流量増加の影響で場所や時間による厚さの違いがかなり大きくなった。
  - 上下左右が分厚くなるという形状は1セットの時と同じく見られた。

評価の方法を検討

# ニュートリノフラックス推定への反映方法

見積もり結果より、  
上下左右が厚くなる構造を考える。

例えば、冷却水分布の断面の形状として

$$r[\text{cm}] = r_{\text{pipe}} + \Delta r + r'(1 + \cos 4\theta)$$

でモデル化する。

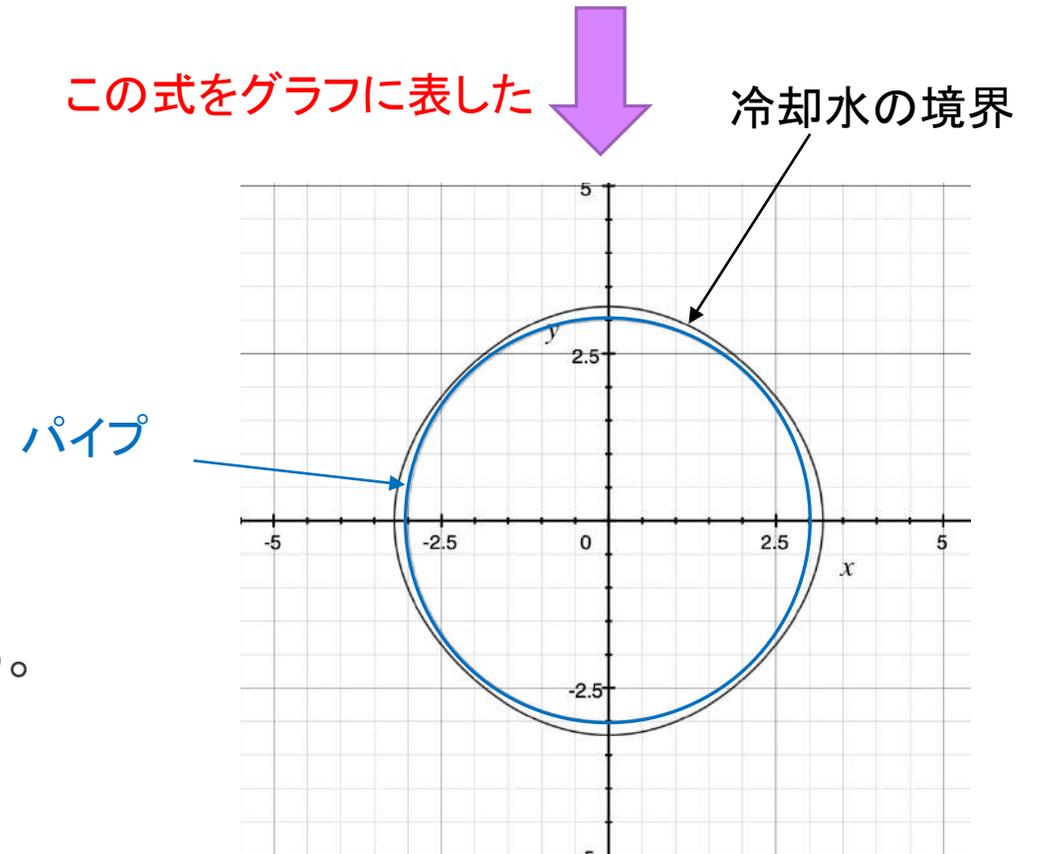
$r_{\text{pipe}}$ : パイプの半径(=3[cm])

2つのパラメータ( $\Delta r, r'$ )としては、

モックアップ試験の結果を最も再現する値を用いる。

例:  $\Delta r = 1[\text{mm}] = 0.1[\text{cm}]$ ,  
 $r' = 0.5[\text{mm}] = 0.1[\text{cm}]$ の場合、  
 $r = 3 + 0.1 + 0.05(1 + \cos 4\theta)$

この式をグラフに表した



# まとめと今後の発展

---

## <まとめ>

- ニュートリノフラックスの誤差推定精度向上のため、ホーンの冷却水分布を正確に見積もる目的でモックアップ試験を行なった。
- 製作したモックアップでは、実際の冷却水分布をいろいろな方向から観察でき、今まで考えられていなかった分布の様子が確認できた。
- 観察した結果から、モンテカルロシミュレーションで仮定する冷却水分布の形状を検討した。

## <今後の発展>

- 現在の観察方法(写真を撮って分析)に加え、別の評価の方法を検討中。
  - パイプに位置分解能があるセンサーをつけて、冷却水の有無でのレーザー光の分布位置の違いにより水の厚さを見積もる。
  - 物体までの距離が測れるセンサーを用いて冷却水がある場合とない場合での距離の違いを見積もる。(市販品から使いそうなものを探す)
- モックアップ試験での、実測に基づいた冷却水形状を仮定したシミュレーションにより、ニュートリノフラックスとその不定性を評価する。

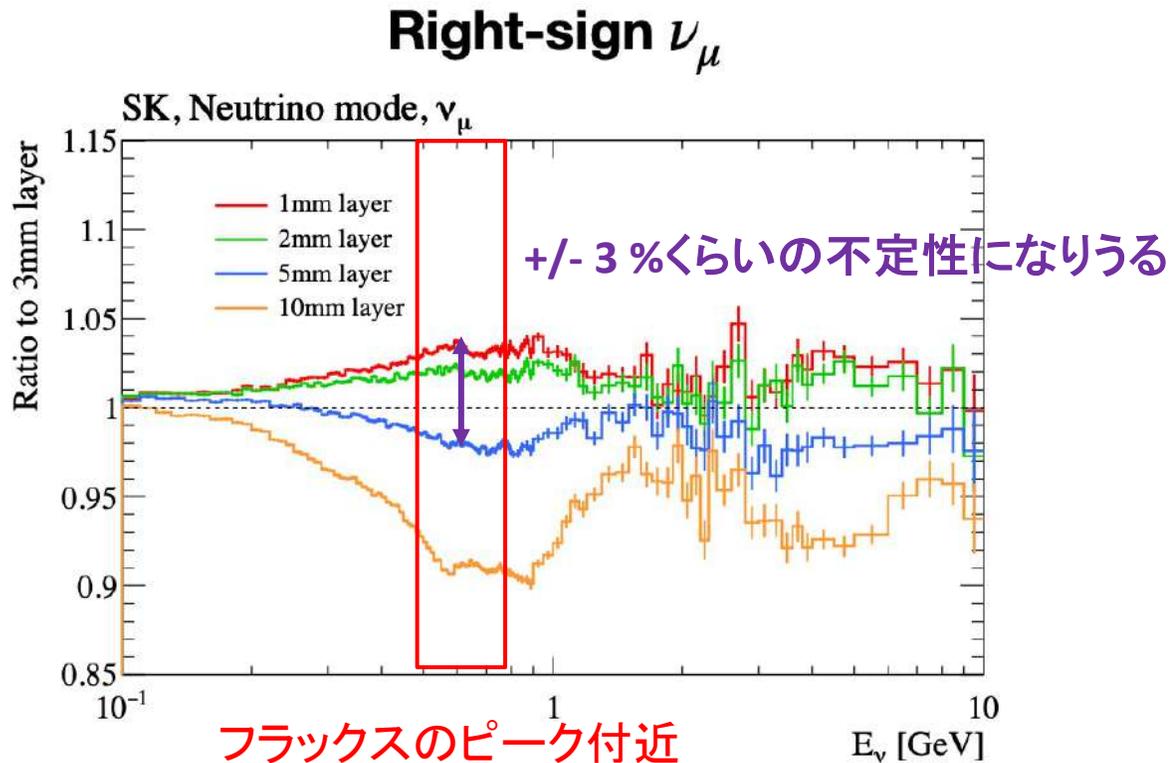
# Back up

---

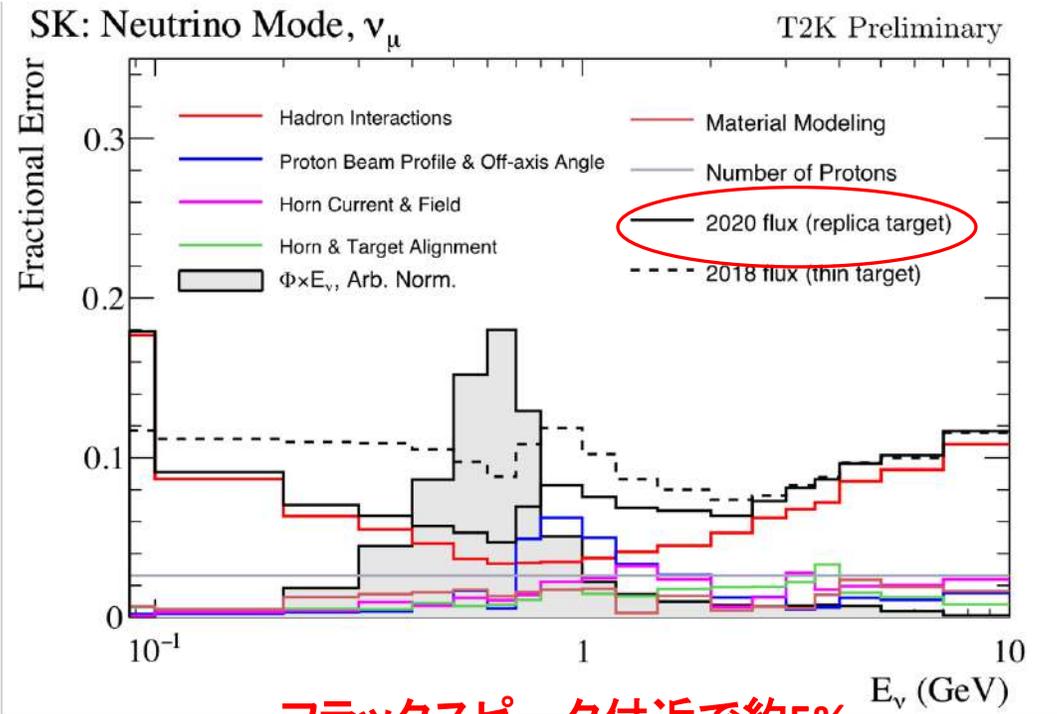
# 試験の推定精度

現在は  
**3 ± 2 (mm)**  
 均一な分布で評価している。

1~5 mmを想定している



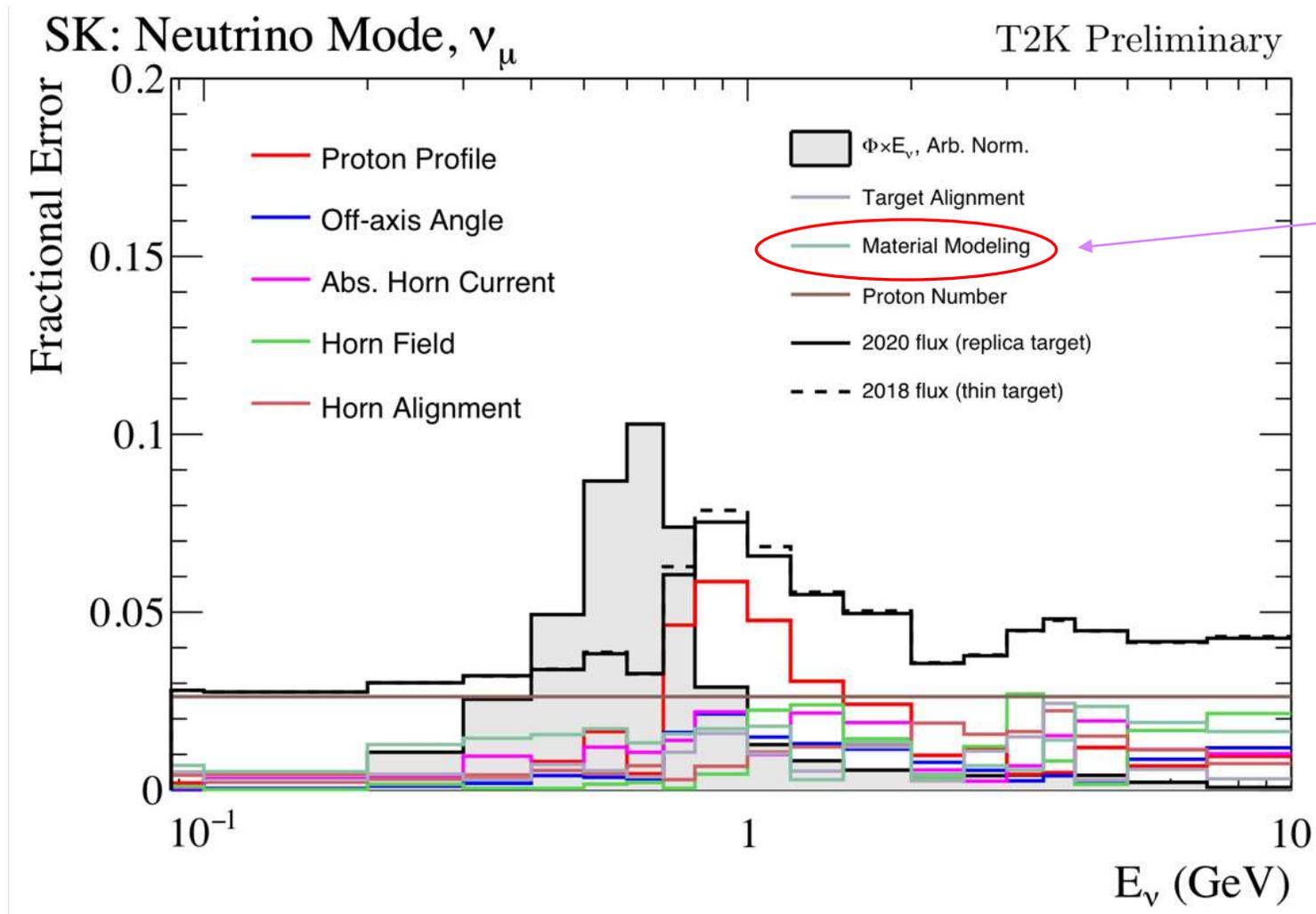
不定性を表したグラフ



**フラックスピーク付近で約5%  
 改善を目指している**

**現在の冷却水分布推定の不定性は  
 決して小さくない**

# 他の不定性との関係



この中に冷却水分布の不定性が入っている