

# NINJA(E71)の現状と展望

Yosuke Suzuki

# 内容

- NINJA実験について
- 検出器概要
- 水ECC解析状況(emulsion film status)
- パイロット解析について
  - ECC-BM 飛跡接続
  - ECC内での飛跡解析
- 今後の展望(E71b)

# NINJA実験

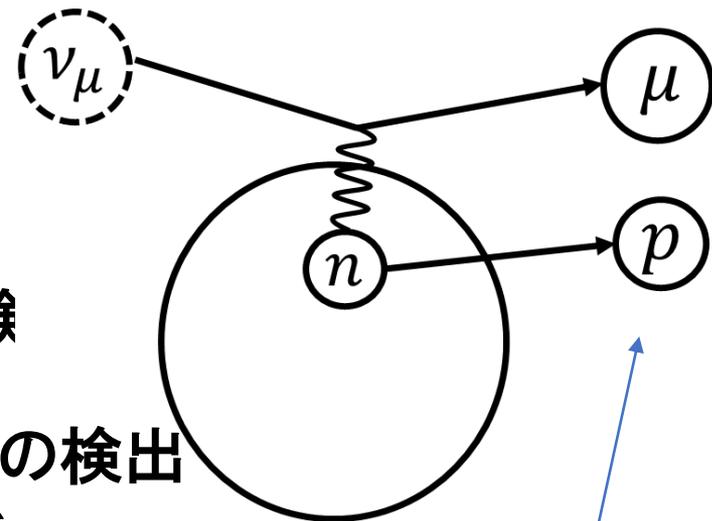
Neutrino Interaction research with  
Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator

原子核乾板を用いた

ニュートリノ-原子核反応の精密測定実験

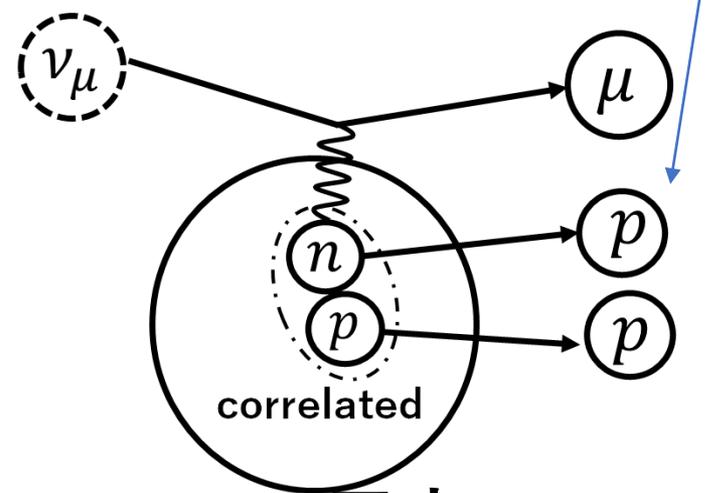
原子核乾板

- **低いエネルギー閾値** → 200MeV/c陽子の検出
- さまざまな標的原子核での測定が可能  
(Fe, H<sub>2</sub>O, Pb, ...)

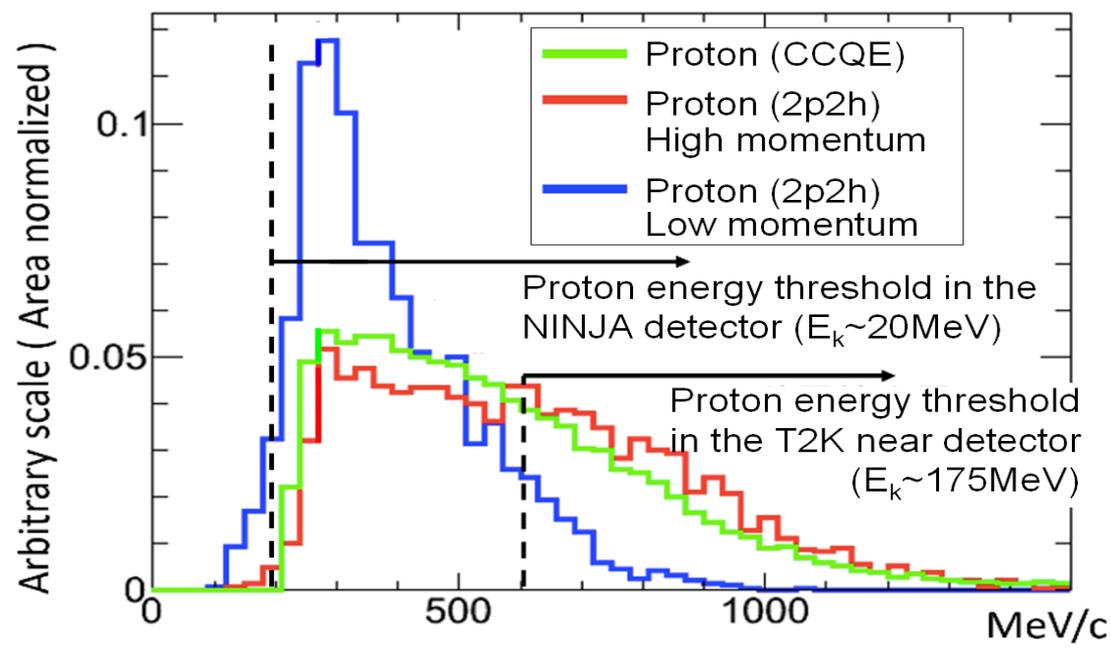


CCQE反応

陽子の検出が可能



2p2h反応?

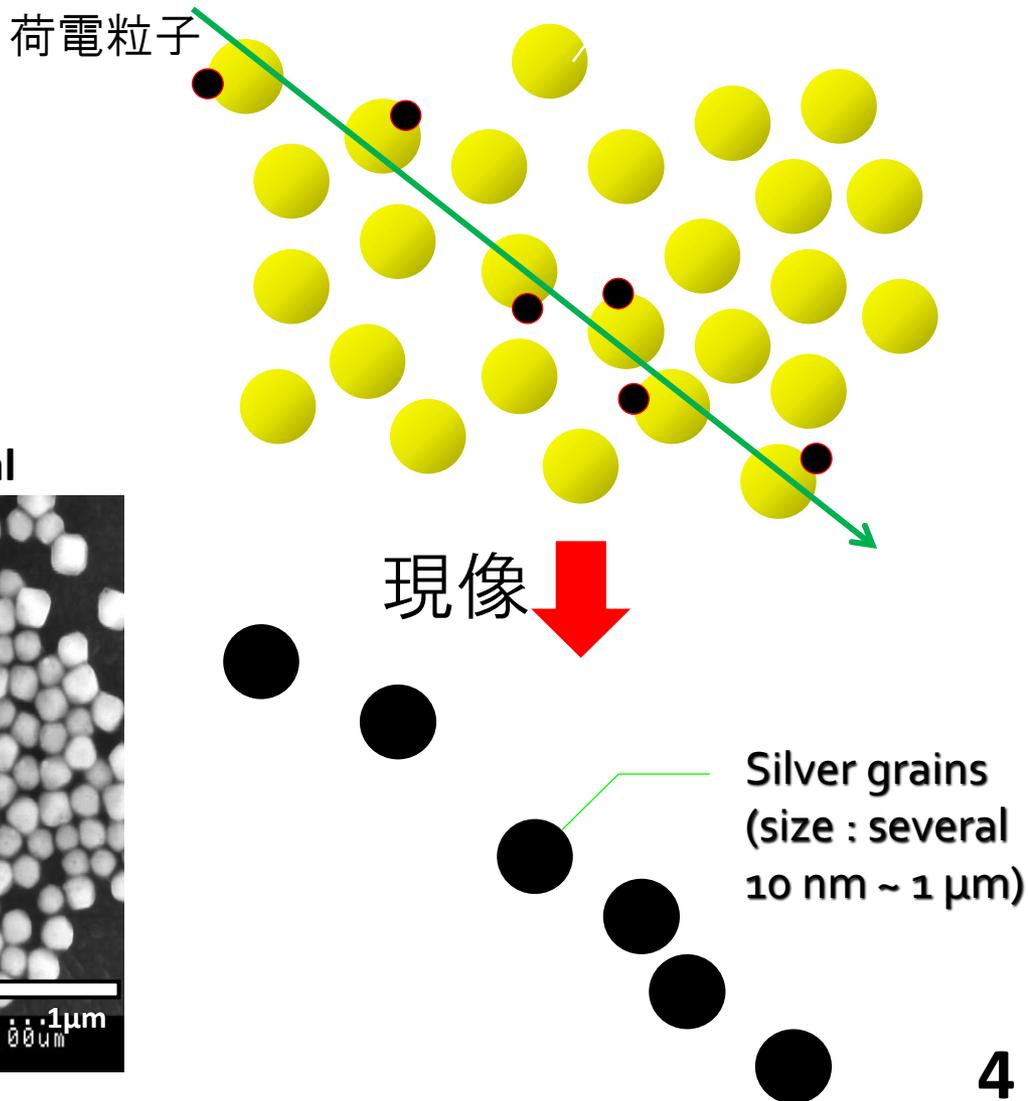


# NINJA実験

Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator  
原子核乾板を用いたニュートリノ-原子核反応の精密測定実験

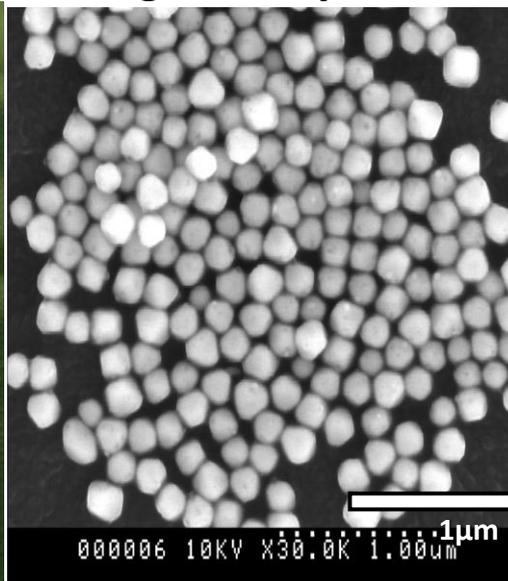
原子核乾板とは

- 高感度の写真フィルム
- 荷電粒子の飛跡をサブミクロンの精度で測定



AgBr · I crystal

Gelatin + crystal



# NINJA実験

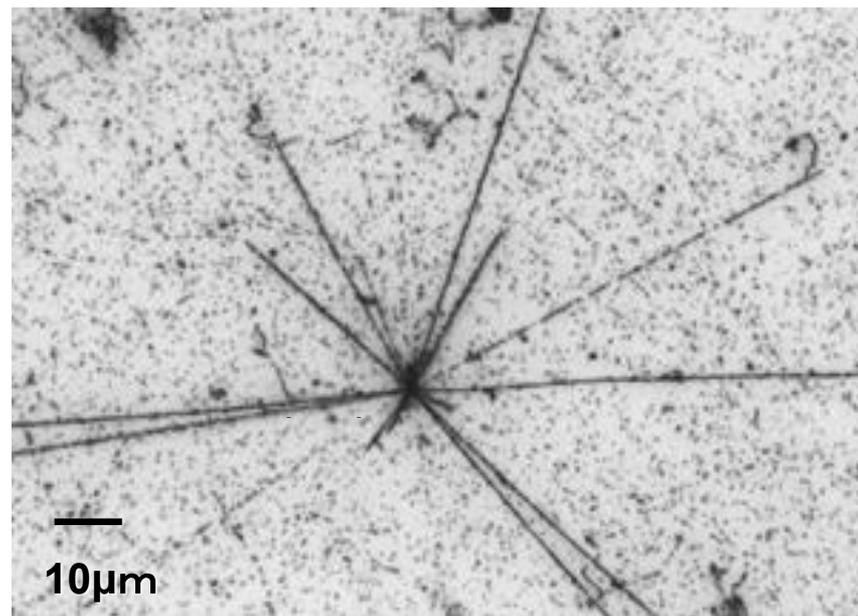
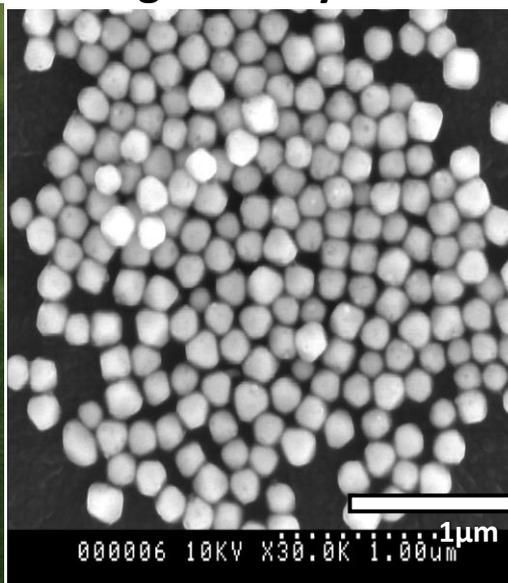
Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator  
原子核乾板を用いたニュートリノ-原子核反応の精密測定実験

原子核乾板とは

- 高感度の写真フィルム
- 荷電粒子の飛跡をサブミクロンの精度で測定

AgBr · I crystal

Gelatin + crystal

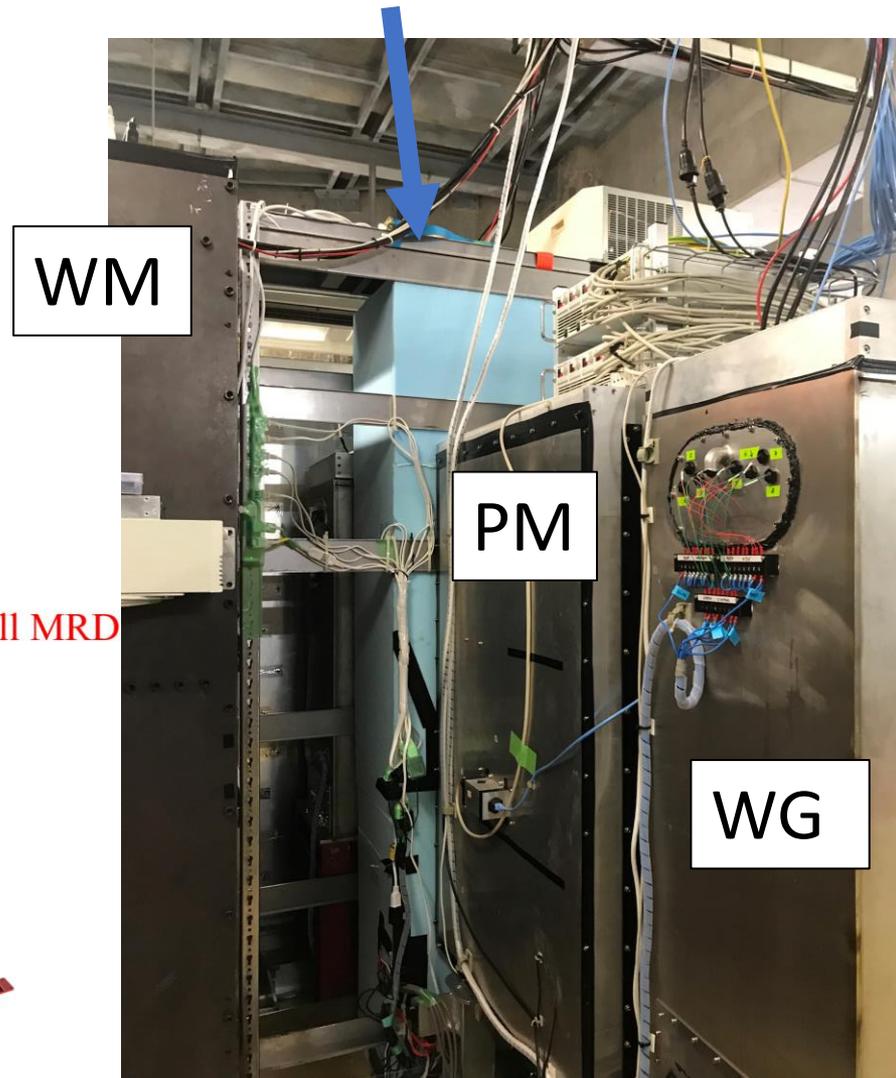
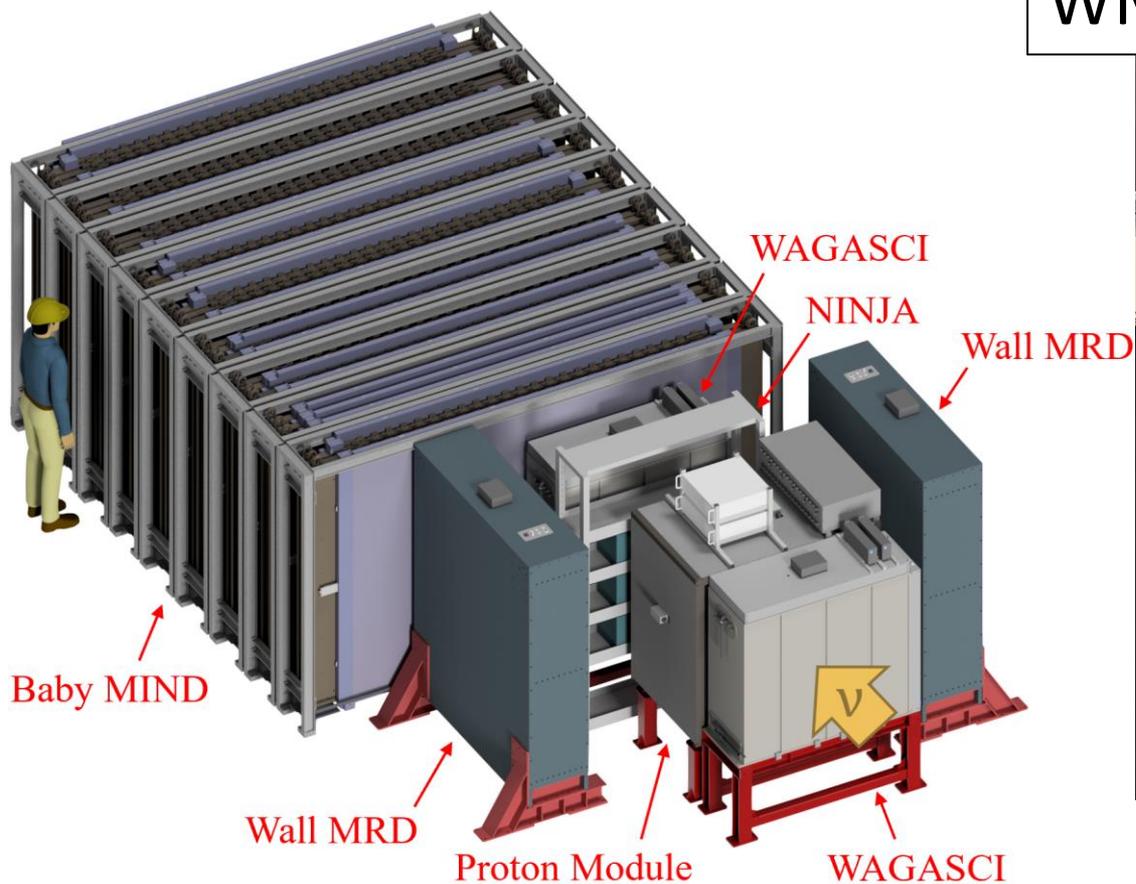


A neutrino interaction in emulsion @J-PARC

- 反応点近傍の詳細解析  
→ 反応プロセスの理解

# 検出器全体紹介

## NINJA検出器



# NINJA実験検出器コンセプト

## 水ECC (Emulsion Cloud Chamber)

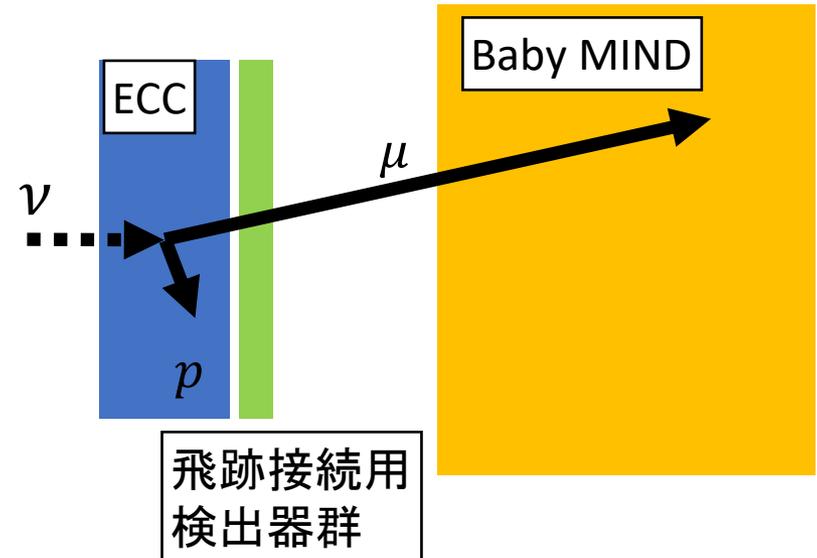
- 水と原子核乾板の積層構造
- 反応点近傍の荷電粒子解析
- 運動量,  $dE/dx$  測定  $\rightarrow$  Particle ID
- 位置・角度分解能: 非常に高い  $\sim O(\mu\text{m})$
- 時間分解能: なし
- $\mu$  id: 物質不足

## Baby MIND (Muon Range Detector)

- 鉄とシンチレータからなる飛跡検出器
- $\mu$  の飛程測定  $\rightarrow \mu$  id, 運動量測定
- 位置・角度分解能: 不十分
- 時間分解能: あり
- $\mu$  id:  $\sim O(\text{GeV}/c)$  まで飛程で測定可能な物質
- 磁場がかかっている (電荷識別可)

## 飛跡接続用検出器

- Emulsion Shifter  
+ Scintillation Tracker
- $\mu$  id のためECCとMRDの飛跡を接続
- 位置・角度分解能: (非常に)高い  
ES  $\sim O(\mu\text{m})$ , ST  $\sim O(\text{mm})$
- 時間分解能: あり  
ES  $\sim O(\text{hr})$ , ST  $\sim O(\mu\text{s})$

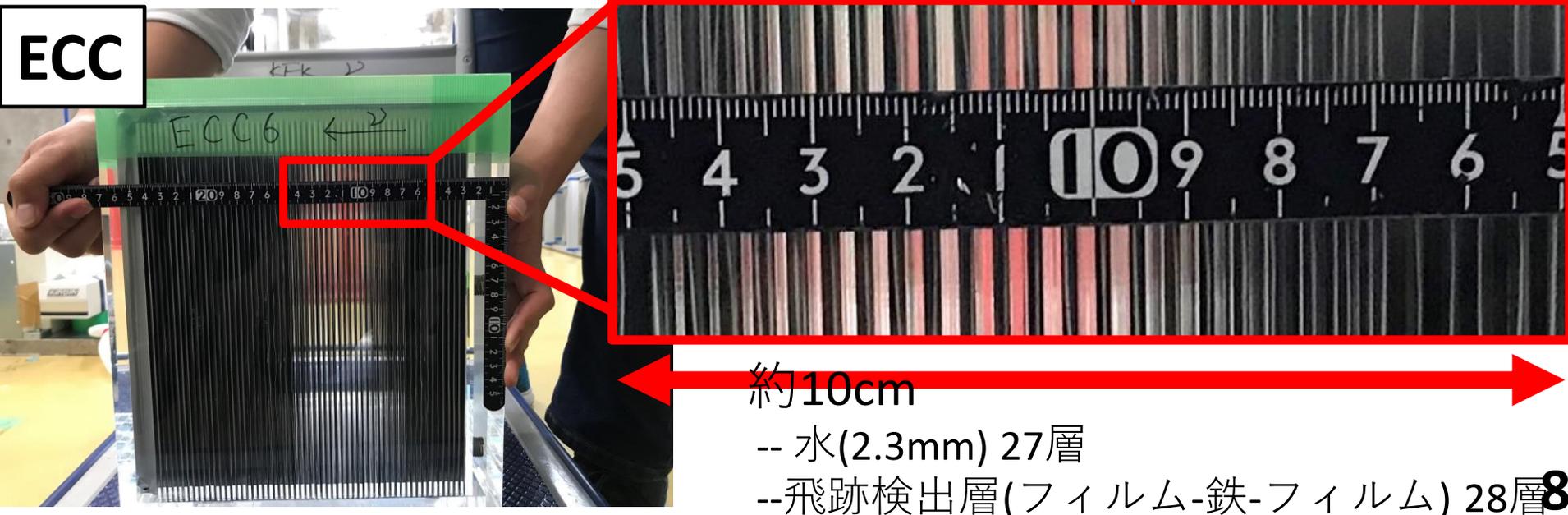
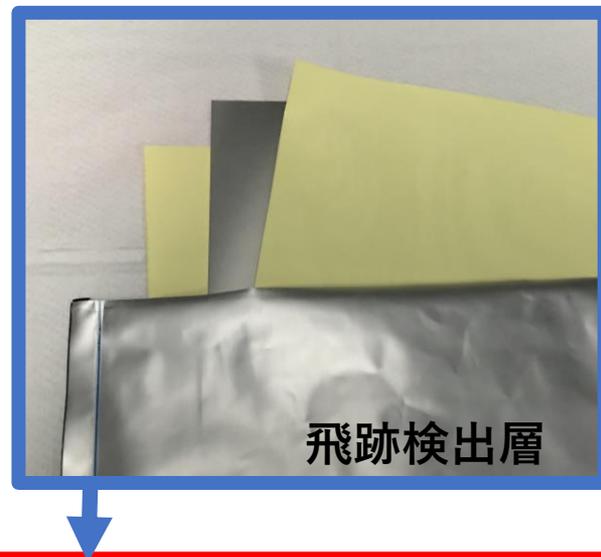


# 水標的 ECC(Emulsion Cloud Chamber)

水標的ECC:

2.3mmの水と1.5mmの飛跡検出層(0.5mmの鉄を原子核乾板2枚で挟み真空パック)の積層構造

- ・ 1ECCに原子核乾板フィルム133枚使用
- ・ 物理ランでは9個のECCを用いた  
(総標的質量 : 水75kg, 鉄130kg)



# 水標的 ECC を使って測定できる量

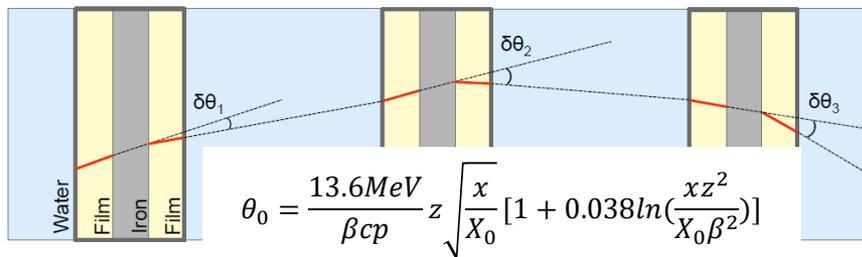
## 放出(荷電)粒子の本数

陽子の運動量閾値 > 200 MeV/c  
(鉄板 500 μm 貫通)

## 放出粒子の角度

$$\sigma_{\tan\theta} \leq 0.05, |\tan\theta| < 4$$

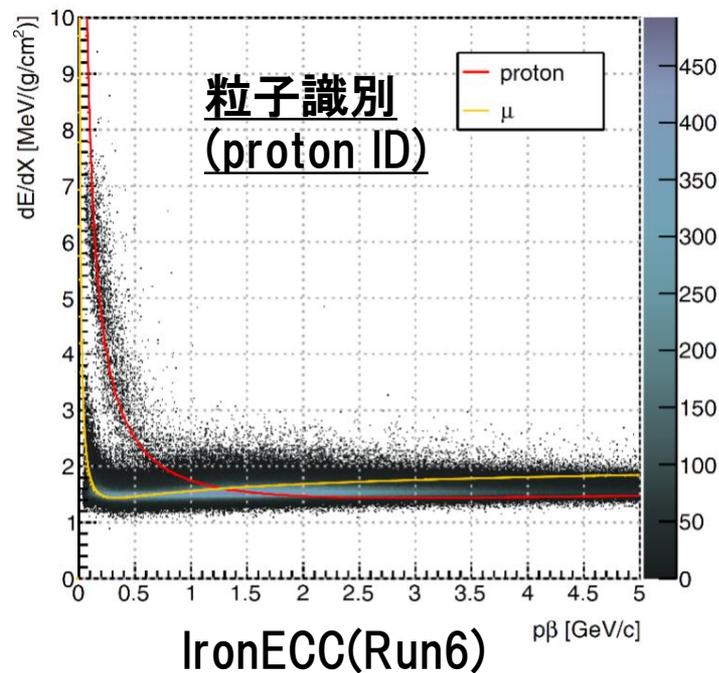
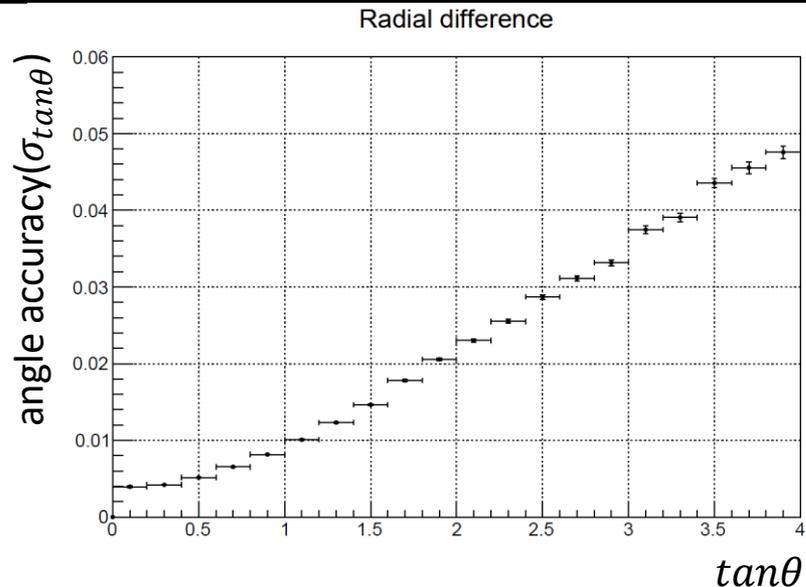
## 運動量(ECC中物質のMCS)



## 電離損失(飛跡の濃さ)

## エネルギー

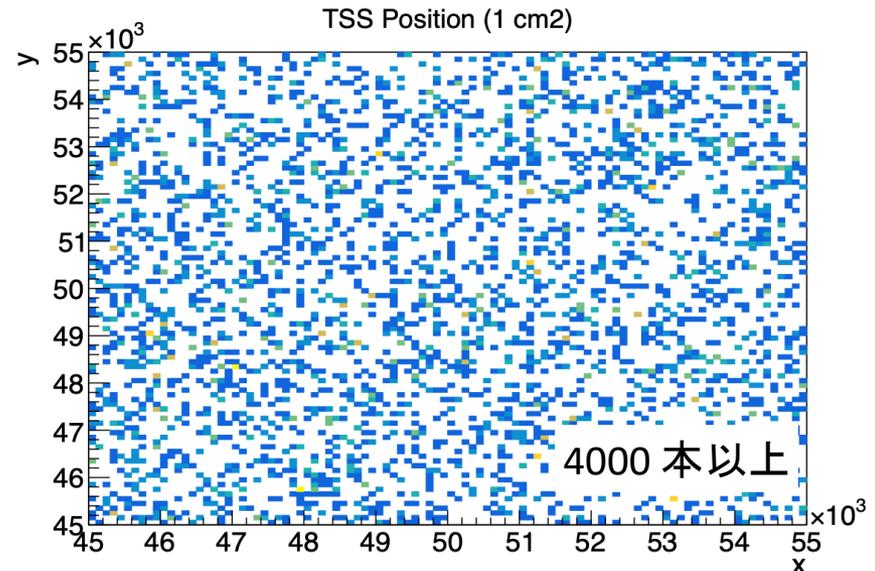
(飛跡長: ECC中で止まる飛跡)



# 飛跡接続用検出器

- 原子核乾板は時間情報を持たず，作成から現像までの膨大な飛跡がすべて蓄積される
- Baby MIND の位置分解能 (1cm-十数cm) では水 ECC 内の対応する飛跡を同定できない  
→ 水 ECC と Baby MIND の間に位置・時間分解能の良い検出器を設置する必要
- **Emulsion Shifter** と **Scintillation Tracker** を組み合わせて使用

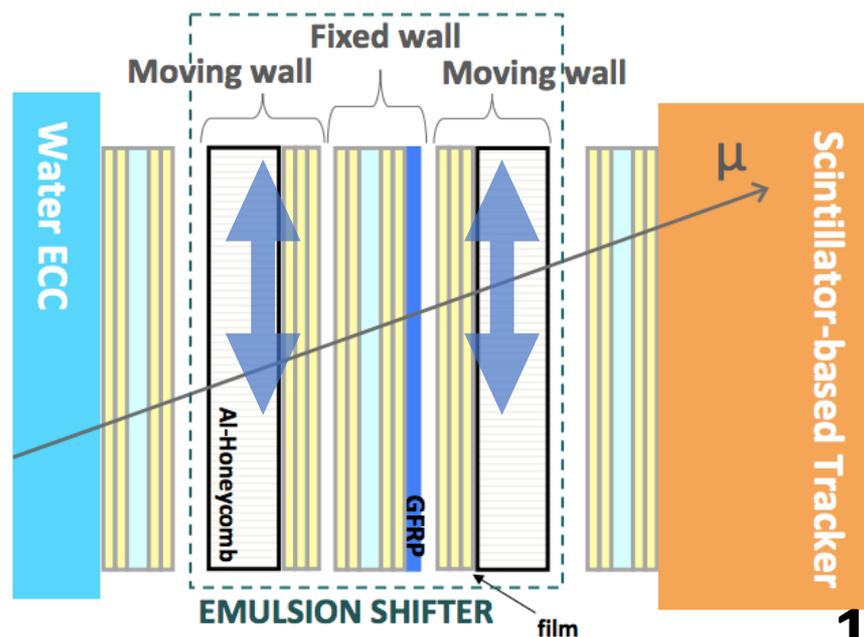
原子核乾板には $O(10^3)/\text{cm}^2$ の飛跡が時間情報を持たず蓄積される



# Emulsion Shifter

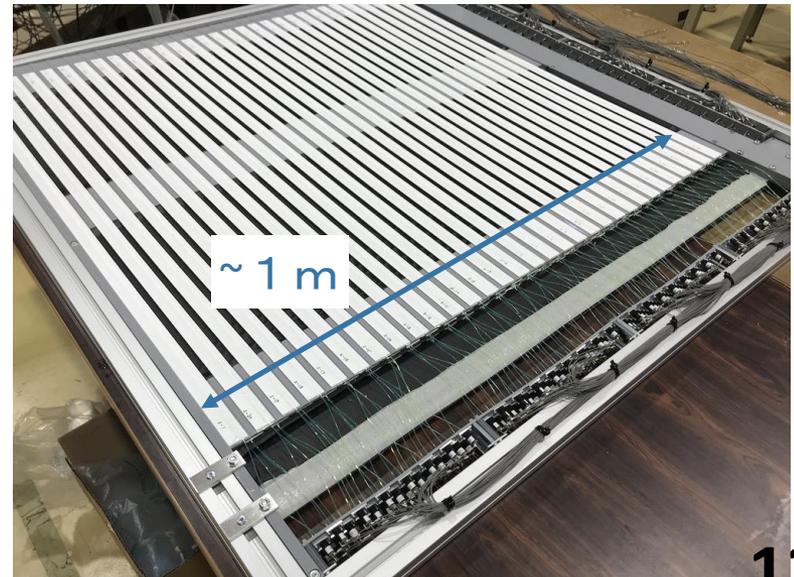
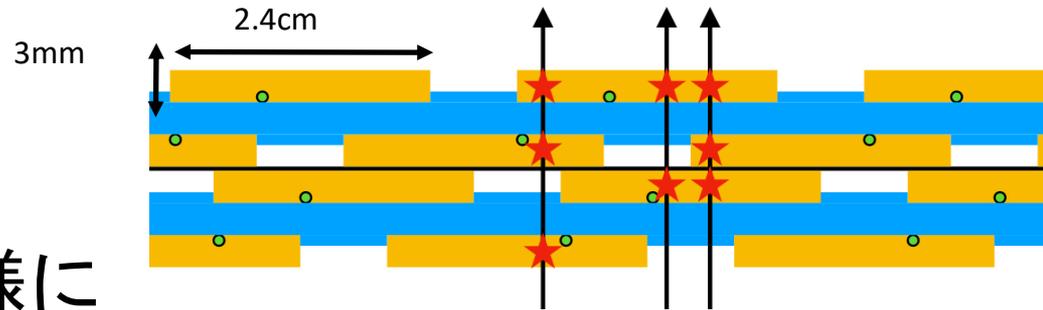
- 2枚の移動壁とそれらに挟まれた固定壁からなり、それぞれに原子核乾板が貼り付けられている
- 各移動壁は4時間、および4日ごとに2mmずつ移動
- 固定壁飛跡について移動壁をずらしながら候補探索
- パターンに対応する時間情報を飛跡に付与

非常に高い位置・角度情報を持った飛跡を、4時間ごとに分離し飛跡の密度を減らす



# Scintillation Tracker

- 薄いシンチレータを1/3ずつスタッガーさせたような層を二枚重ねたトラッカーデザイン
- Monte Carlo シミュレーションから位置分解能は  $O(\text{mm})$
- 下流の Baby MINDと同様にビームタイミングに対応したトリガー



ビームタイミングの時間情報をもった  
位置・角度情報を飛跡に付与

# エマルションフィルム の状況

# NINJA物理ラン 進捗

フィルム枚数

25cm × 25cm : 1197枚

28cm × 33cm : 36枚

34cm × 102cm : 42枚

計 927045 cm<sup>2</sup>

現像:100%

銀取り:30%

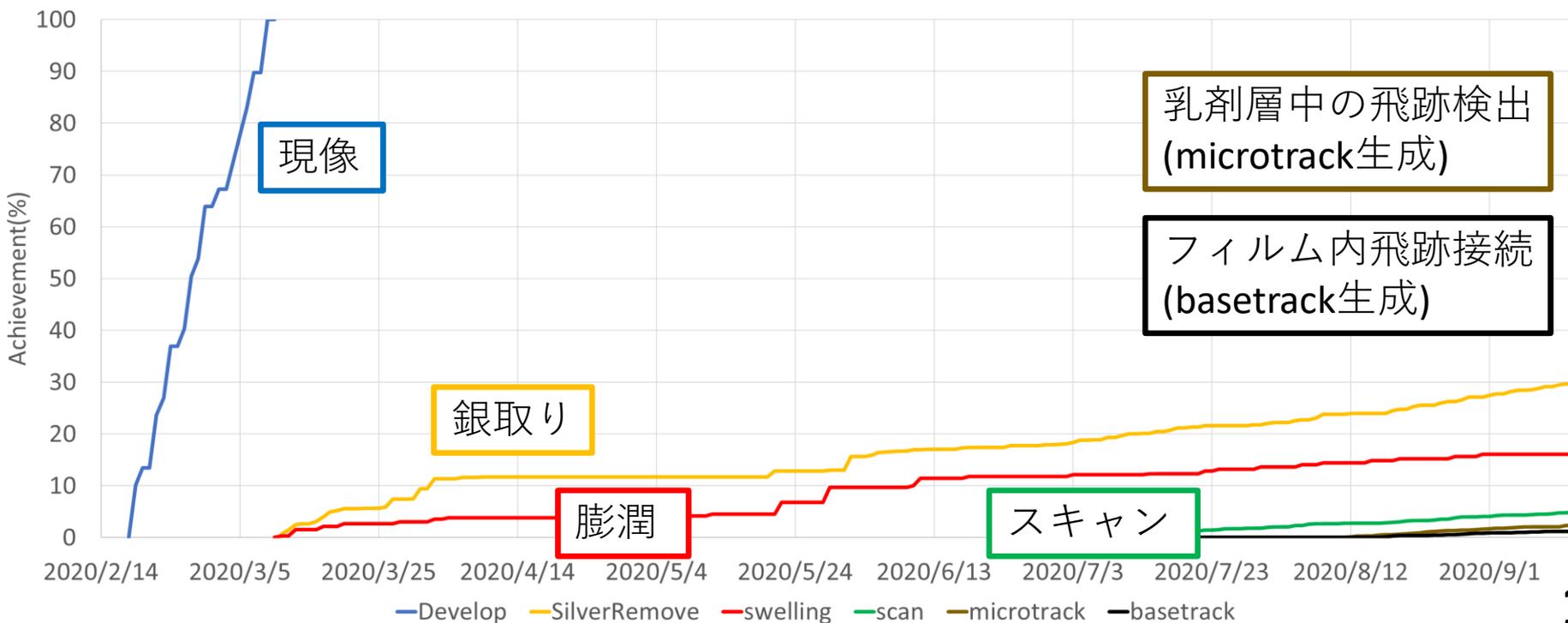
膨潤:16%

スキャン:5%

乳剤層中の飛跡検出:2%

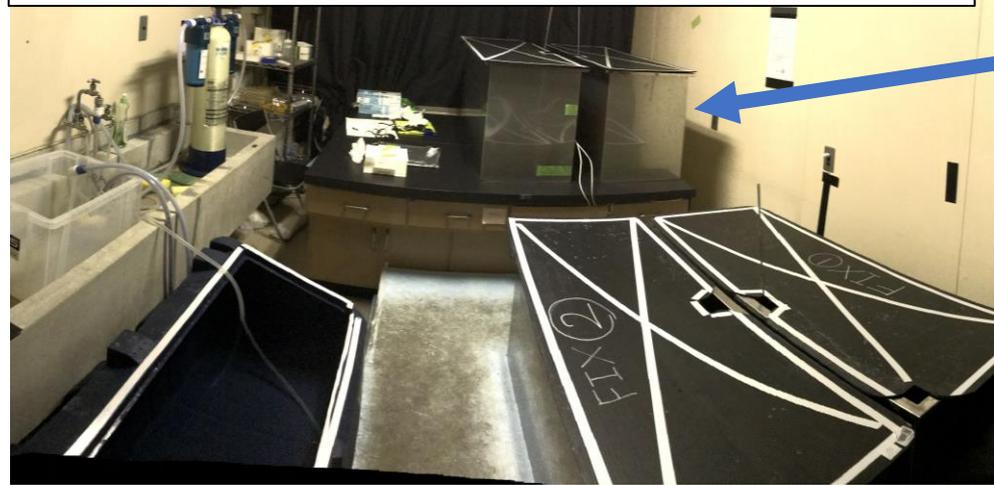
フィルム内飛跡接続:1%

E71a status



# NINJA物理ラン 現像

日本大学に現像施設を立ち上げ



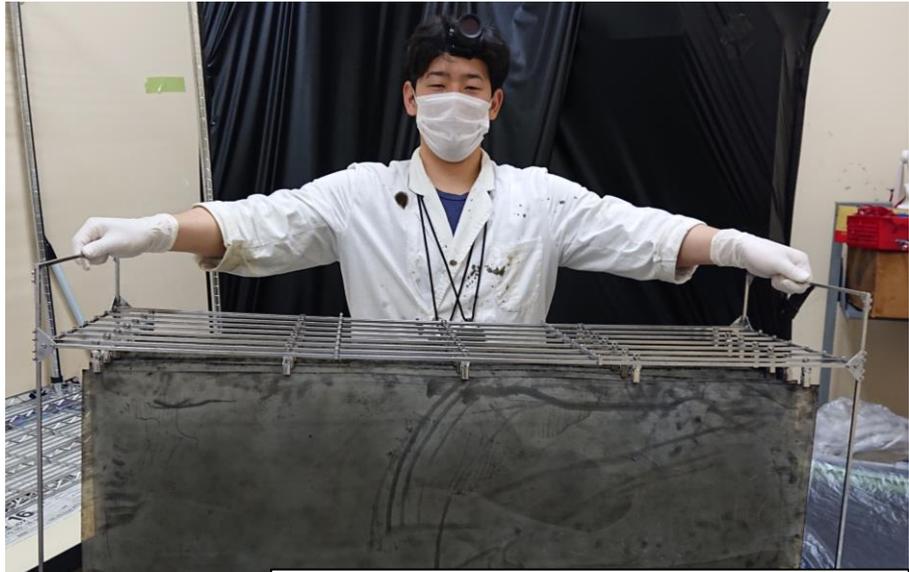
現像液



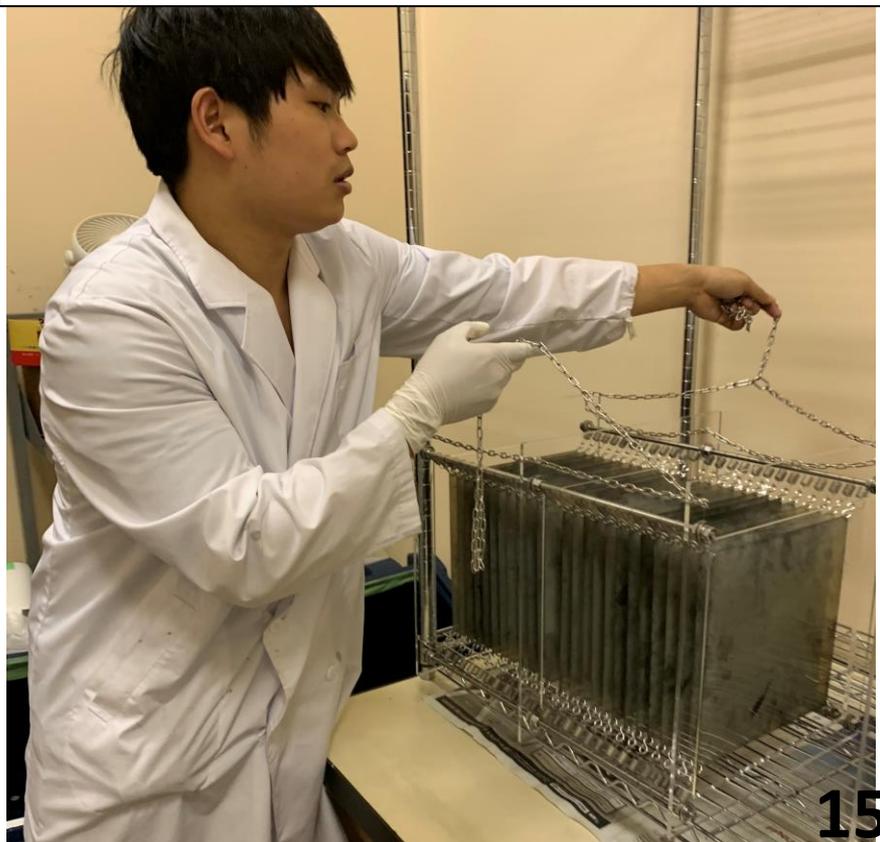
停止液



現像ラックを用いた大量現像



大型フィルムの現像



# NINJA物理ラン 進捗

## 銀取り

フィルム表面に析出した銀を取り除く



## 膨潤

現像により薄くなったフィルムをスキャン可能な厚みに膨らませる



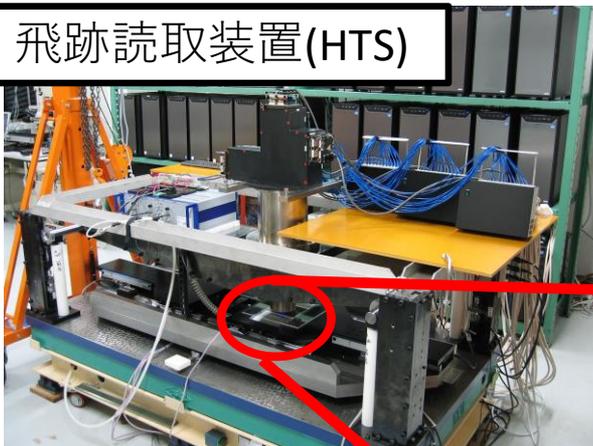
## スキャン

自動飛跡読取装置を用いてフィルム全面の飛跡を読みだす

銀取り



飛跡読取装置(HTS)



フィルムと顕微鏡レンズ



# NINJA物理ラン 進捗

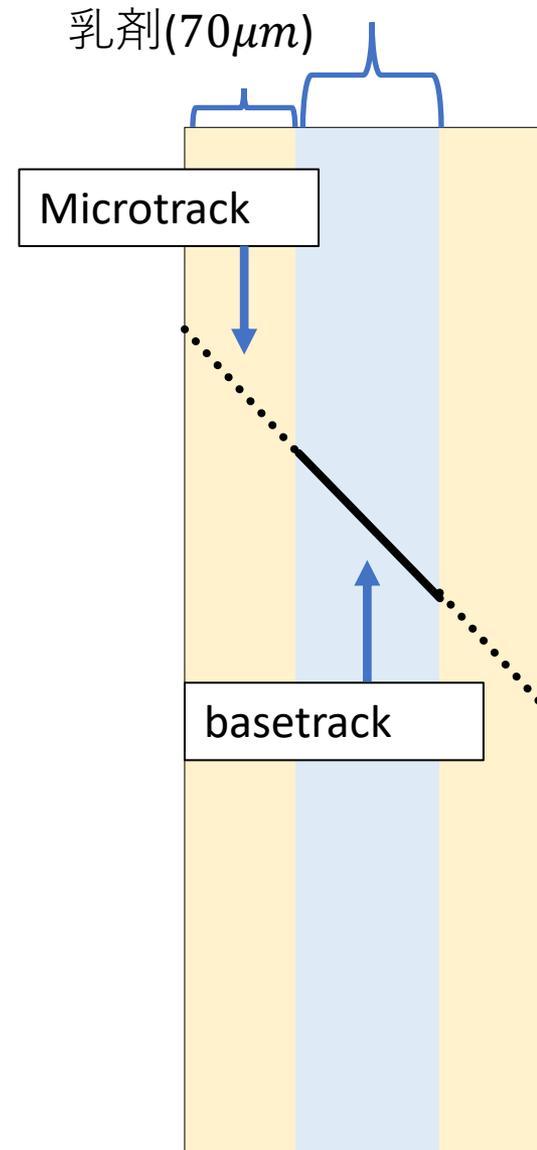
プラスチックベース  
( $210\mu\text{m}$ )

## Microtrack作成

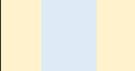
- 乳剤層中の飛跡
- 読取装置を用いて読みだす

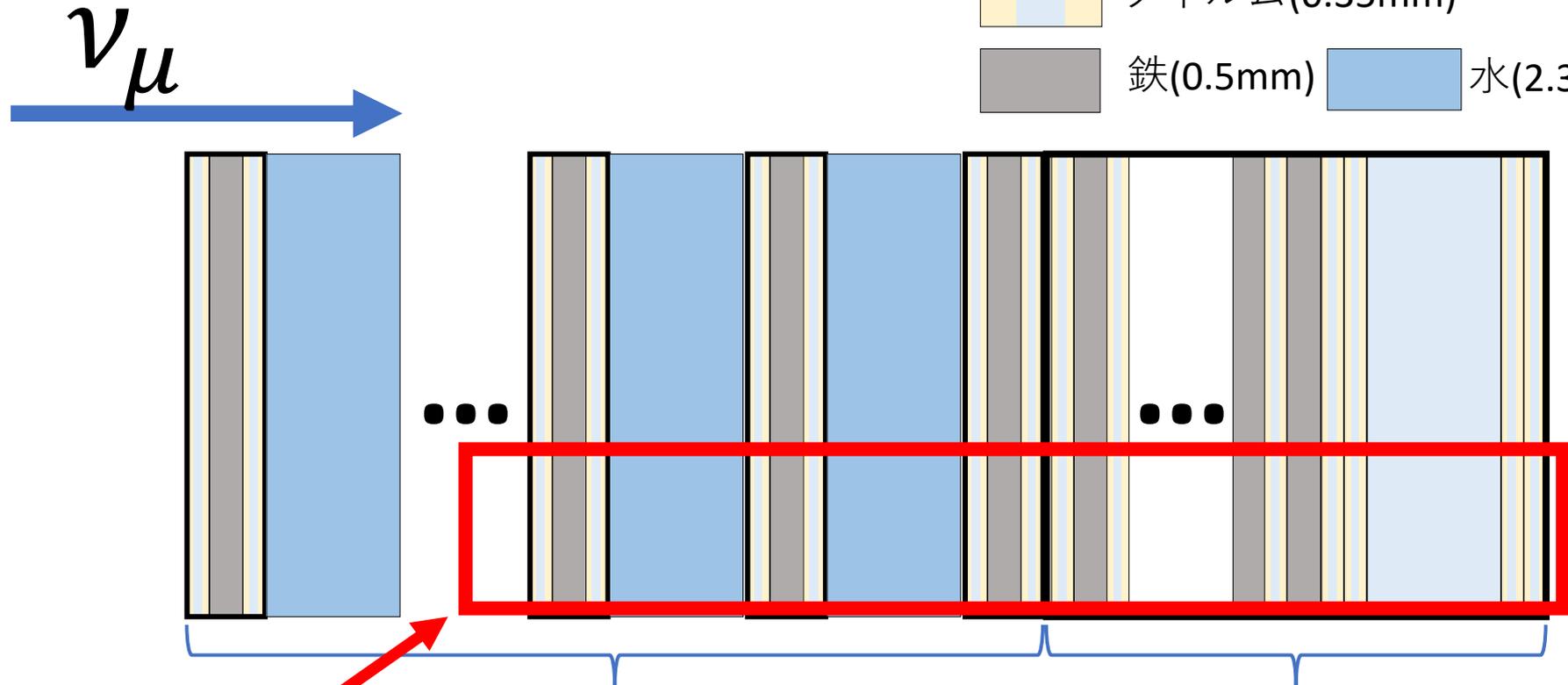
## Basetrack作成

- Microtrackを繋ぎbaseに作った仮想的な飛跡
- Baseは伸縮、歪みが小さいため、精度の良い飛跡になる
- emulsionの解析は基本的にbasetrackを用いて行う



# ECC構造/解析対象

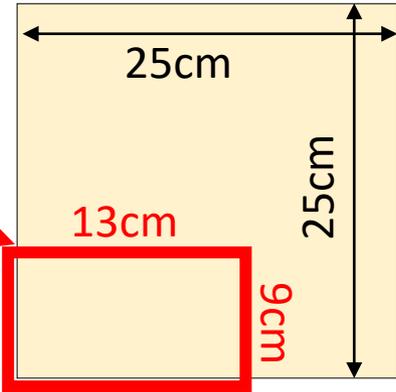
-  アクリル(2mm)
-  フィルム(0.35mm)
-  鉄(0.5mm)
-  水(2.3mm)



水標的部分  
水58層、鉄59層  
フィルム118枚

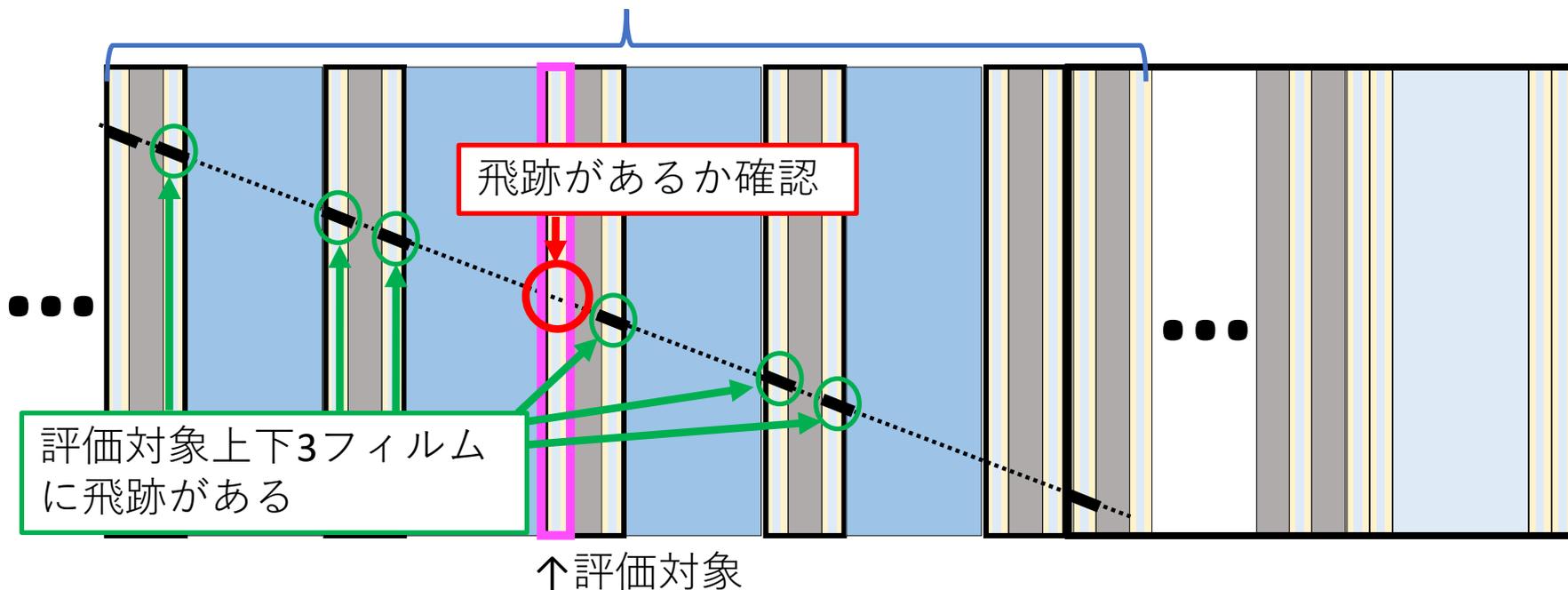
下流鉄ECC部分  
アクリル1層、鉄11層  
フィルム15枚

解析対象:  
下流側からフィルム60枚  
(水22層、鉄33層)  
9cm × 13cmの領域



# 飛跡検出効率の評価

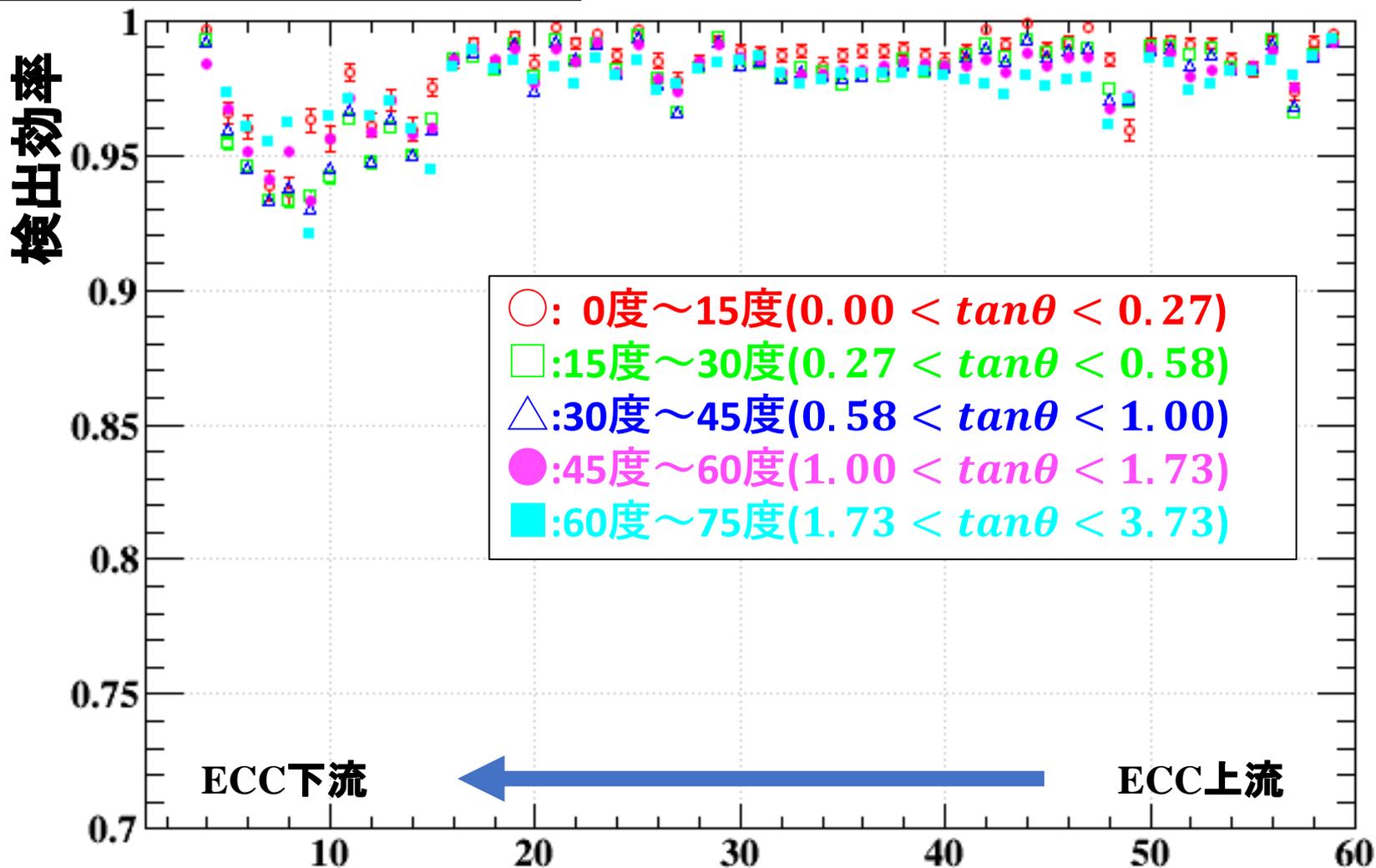
フィルム10枚以上貫通



1. フィルム10枚以上貫通する、長くつながっている飛跡を選択
2. 評価対象のフィルムの上下3フィルムに飛跡が検出されていることを要求  
→条件を満たす飛跡の本数： $N_{all}$
3. 評価対象のフィルムに飛跡があるか確認  
→見つかった飛跡の数： $N_{hit}$

$$\text{検出効率: Efficiency} = N_{hit}/N_{all}$$

# 飛跡検出効率



広い角度範囲にわたって高い検出効率が出ている  
～PL015(下流鉄ECC部分)は今後シフターの情報を用い、  
検出効率低下の原因を追究していく

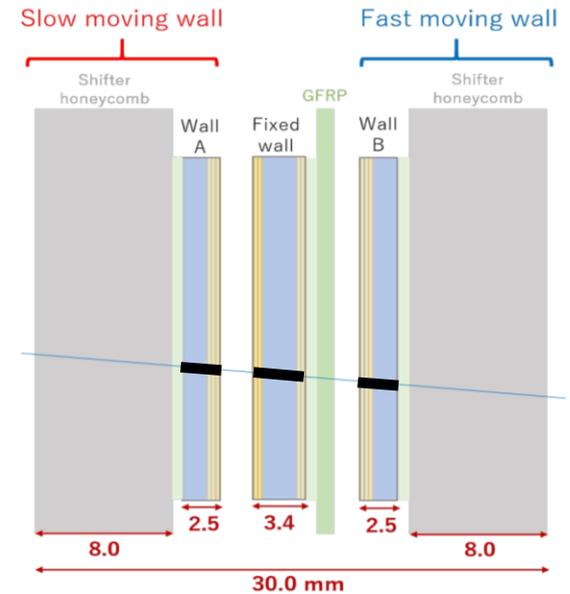
フィルム番号

# パイロット解析の報告

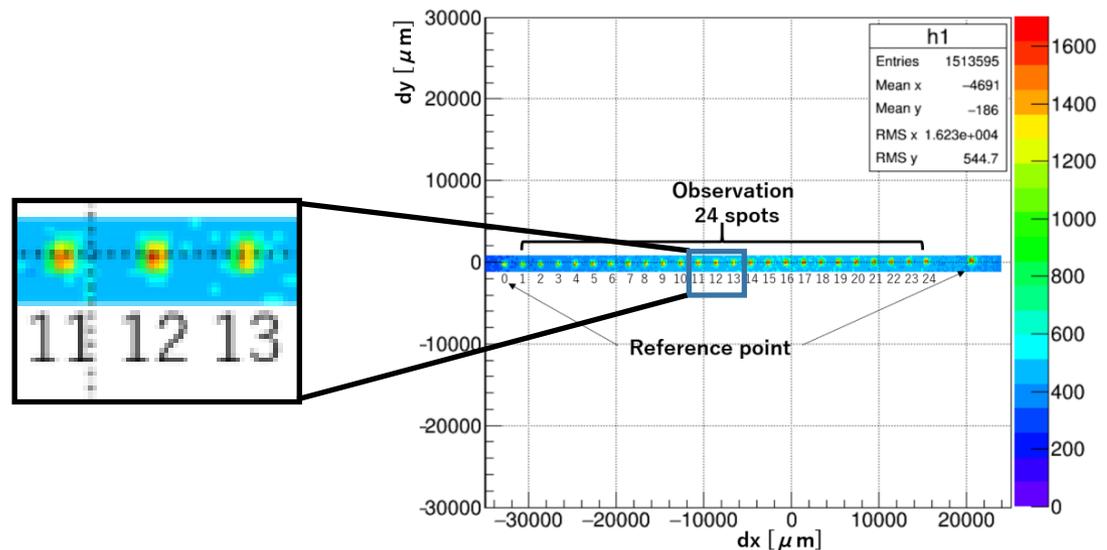


# Emulsion Shifterにおける再構成

- 各原子核乾板の飛跡から，固定壁，移動壁での飛跡の角度・位置を決定
- 壁の位置関係を $\sim 2\text{ mm}$  ずつずらしていき，固定壁に対応する移動壁上の飛跡を探索  
→ 位置関係によって飛跡に4時間の時間情報を付与

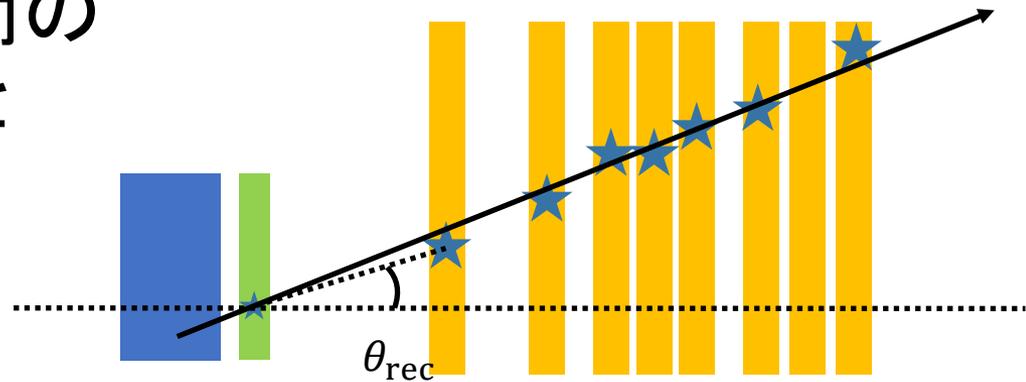


壁の位置関係 ( $dx$ ) をシフトしながら固定壁に接続した移動壁の飛跡の数をプロット  
各シフト量 (時間) に対応したスポットが確認できる



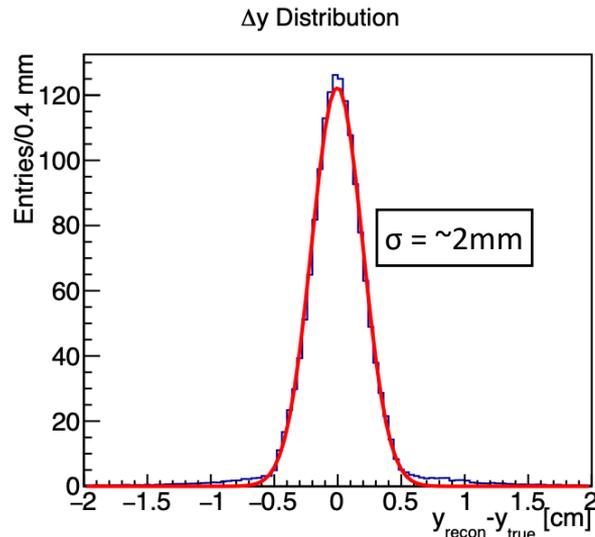
# Baby MIND/Scintillation Tracker

- Baby MIND における各飛跡候補について、対応するタイミングの Tracker ヒットを探索
- 角度: Baby MIND の上流層でのヒット位置と Tracker のヒットシンチレータの平均位置から再構成  
→ 精度は Baby MIND の位置分解能に依存
- Tracker - Baby MIND 間の距離  $\sim 1$  m を用いると 角度 ( $\tan\theta$ ) 分解能  $< \sim 0.05$

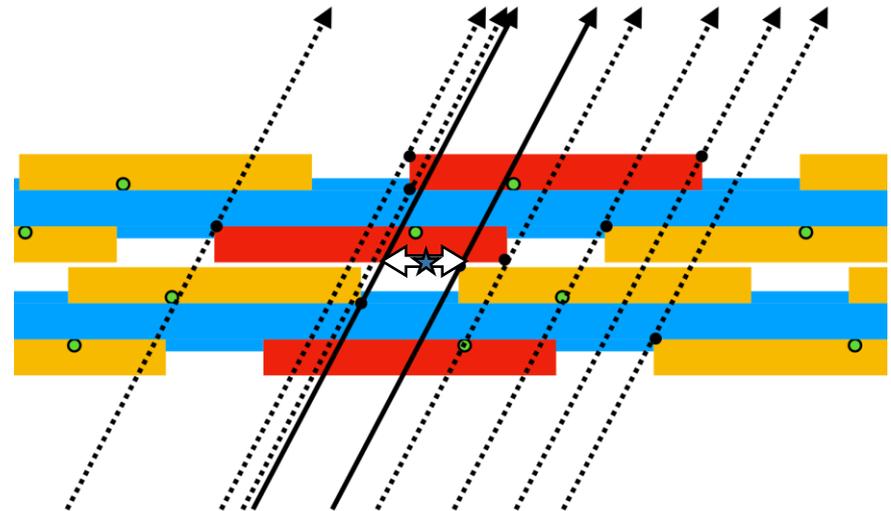


# Baby MIND/Scintillation Tracker

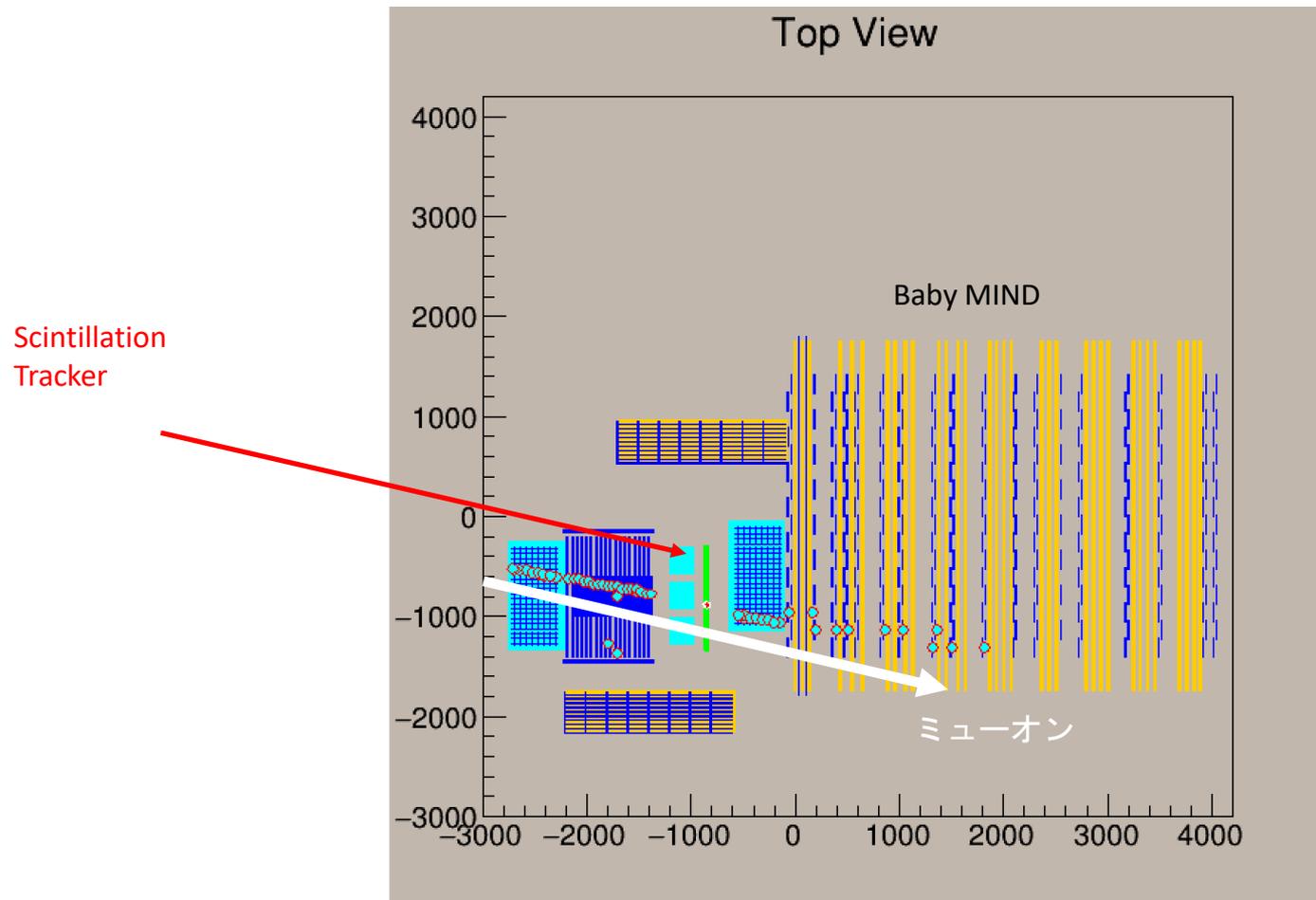
- 位置:  $\theta_{\text{rec}}$  から Tracker のヒットパターンより再構成
- 傾き  $\tan\theta_{\text{rec}}$  の直線を各シンチレータ頂点から引き,  
ヒットパターンが実現可能かどうかを判定  
-> パターンを実現する直線が通る領域の中心を  $\text{pos}_{\text{rec}}$  と定義



MC (1 muon) での recon - true 分布



# イベントディスプレイの例



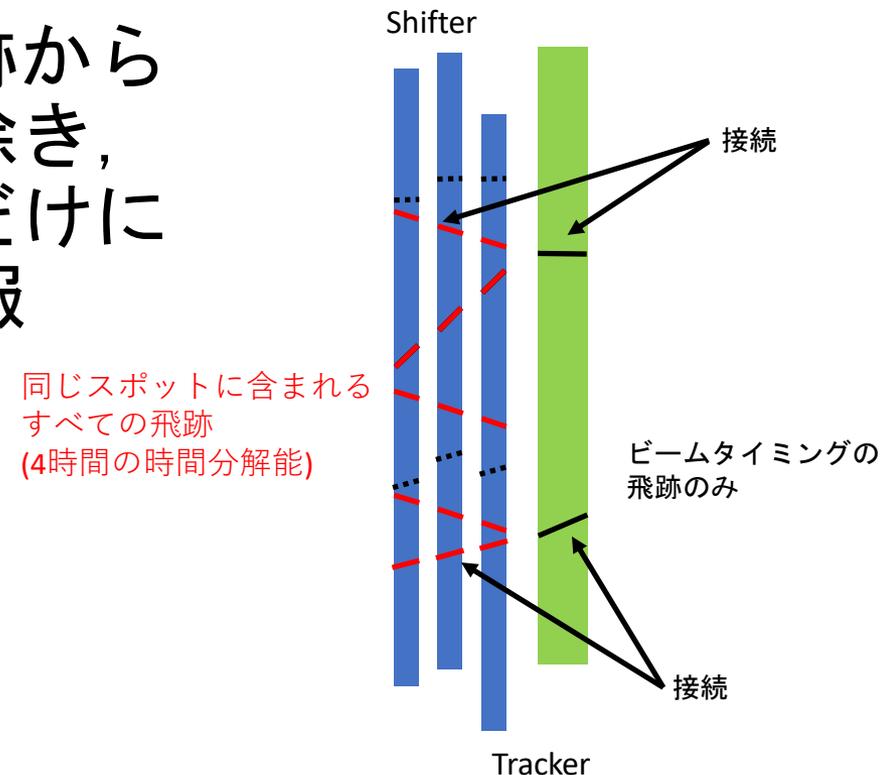
サンドミュオンの候補の例

# Scintillation Tracker/Emulsion Shifter

- Tracker と Baby MIND の位置・角度，時間情報と Shifter の飛跡の位置・角度，スポットから飛跡接続
- まずは飛跡接続が可能かを確認するため単純なサンプルを用いた
  - Shifter は 9 cm x 13 cm の小領域，
  - Tracker は 2/1-10 までの10 日間のデータ
  - Tracker でのヒットが 荷電粒子1 本らしく Baby MIND と接続された

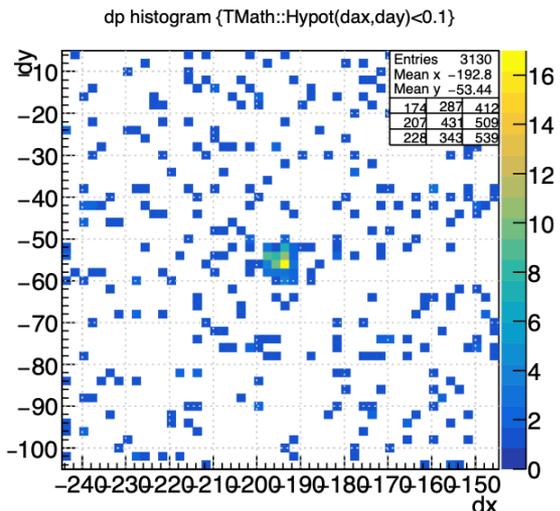
# Scintillation Tracker/Emulsion Shifter

- Shifter の各スポットについて対応する時刻の Tracker の飛跡をすべてリストアップ  
-> 位置差 +/- 5 mm, 角度 ( $\tan\theta$ ) 差 +/- 0.1 以内の範囲で対応する飛跡を探索
- スポット内に含まれる飛跡から宇宙線などの背景事象を除き, ビームタイミングの飛跡だけに  
-> 下流の Baby MIND の情報も付与し ミューオン id

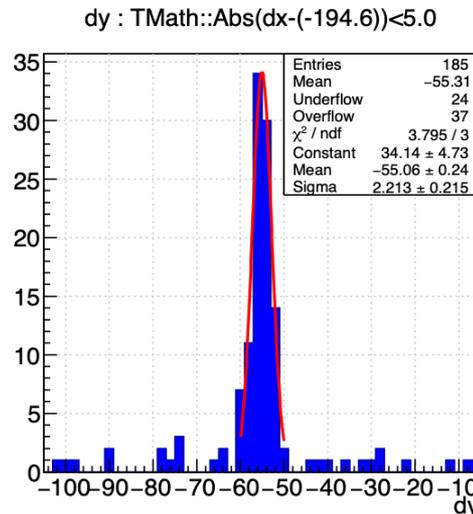


# Scintillation Tracker/Emulsion Shifter

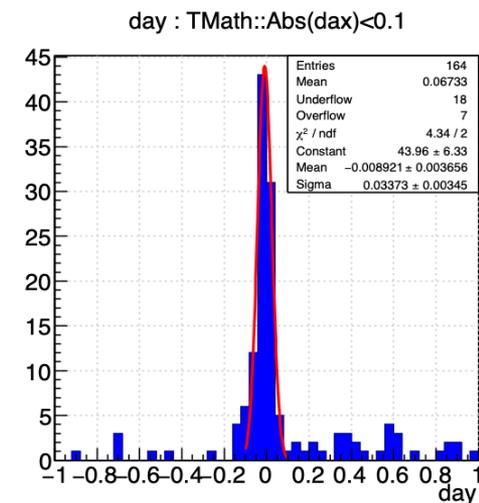
- 飛跡探索の結果, 位置・角度差ともに想定した場所にピークを発見 -> 飛跡接続に成功 (80本の飛跡)
- Tracker に対して Shifter の位置分解能は無視できる  
-> 位置差の分布の広がりが Tracker の位置分解能に対応  
->  $\sigma = \text{約 } 2 \text{ mm}$  と MC と consistent な値が得られた



位置差の二次元分布

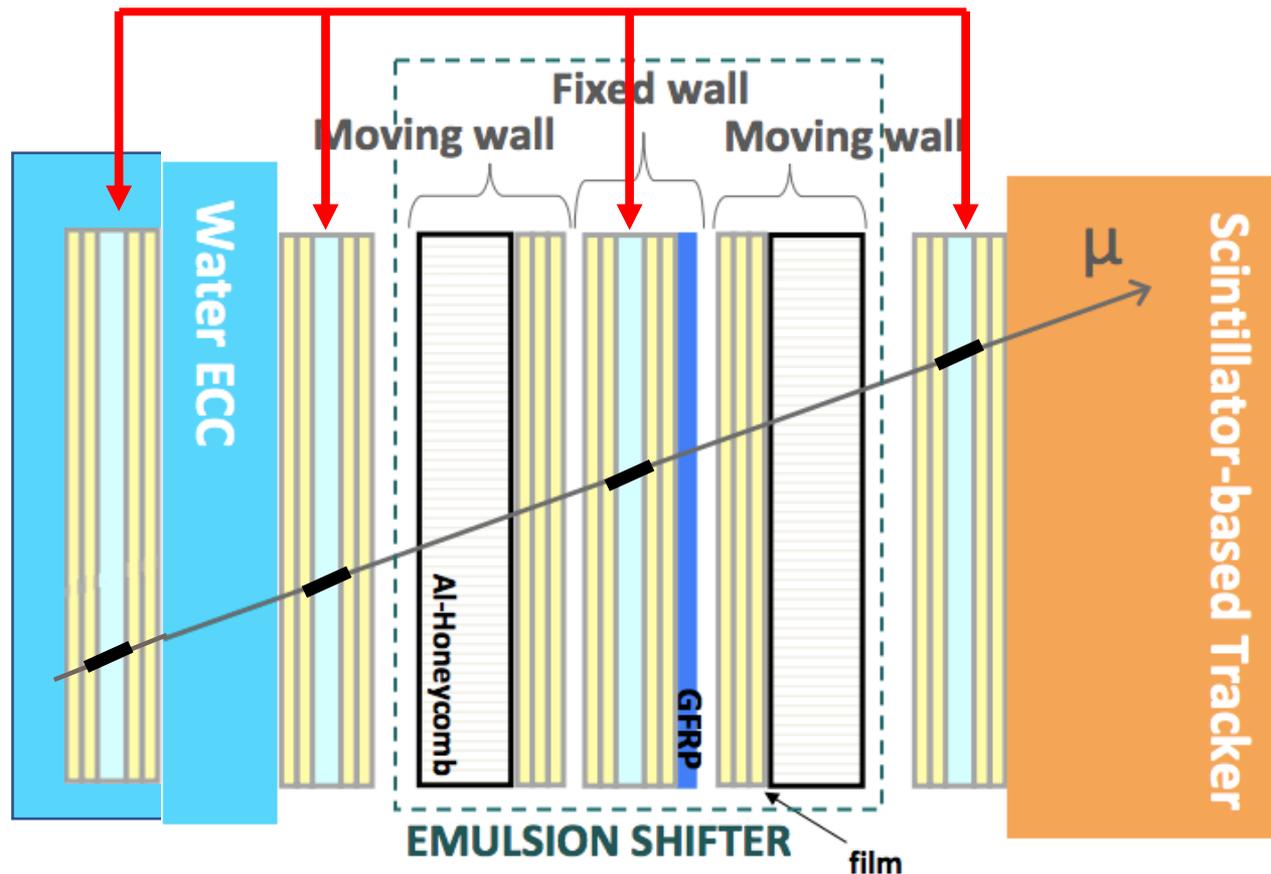
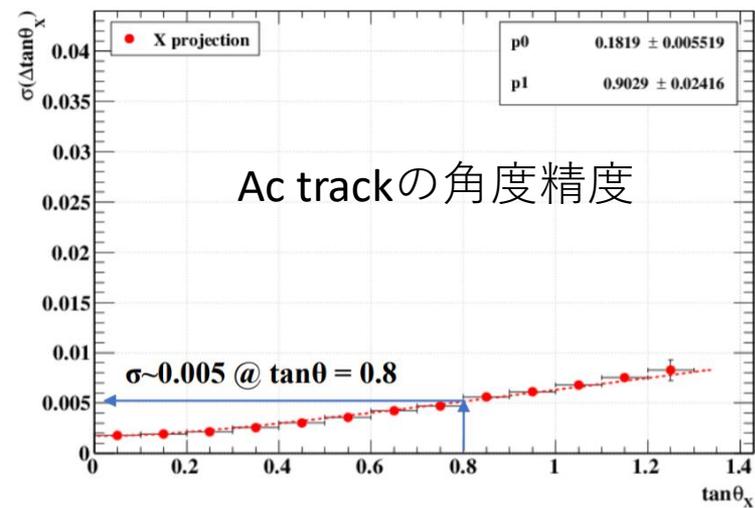


位置/角度差のプロットの例

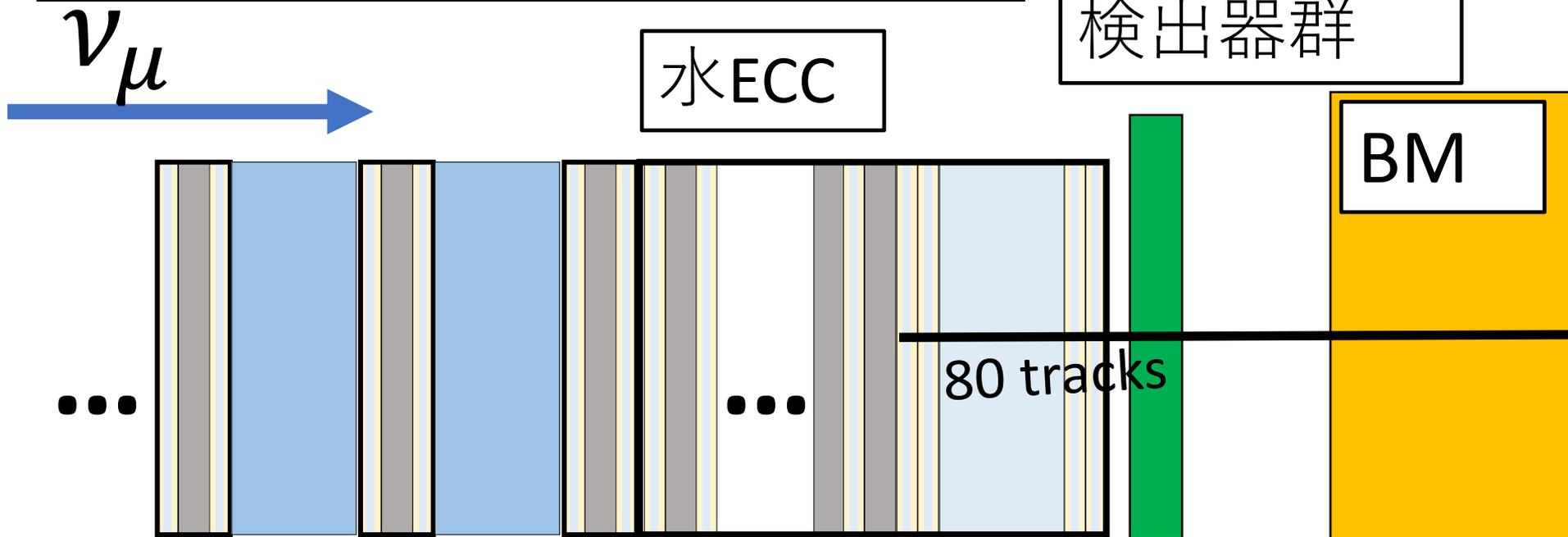


# Emulsion Shifter/ECC

- 2mmのAcを使い角度精度の高い飛跡を作る。
- ECC内-ECC外-Fixed wall-Tracker  
上流の広いギャップをつなぐ



# ミューオン飛跡の解析

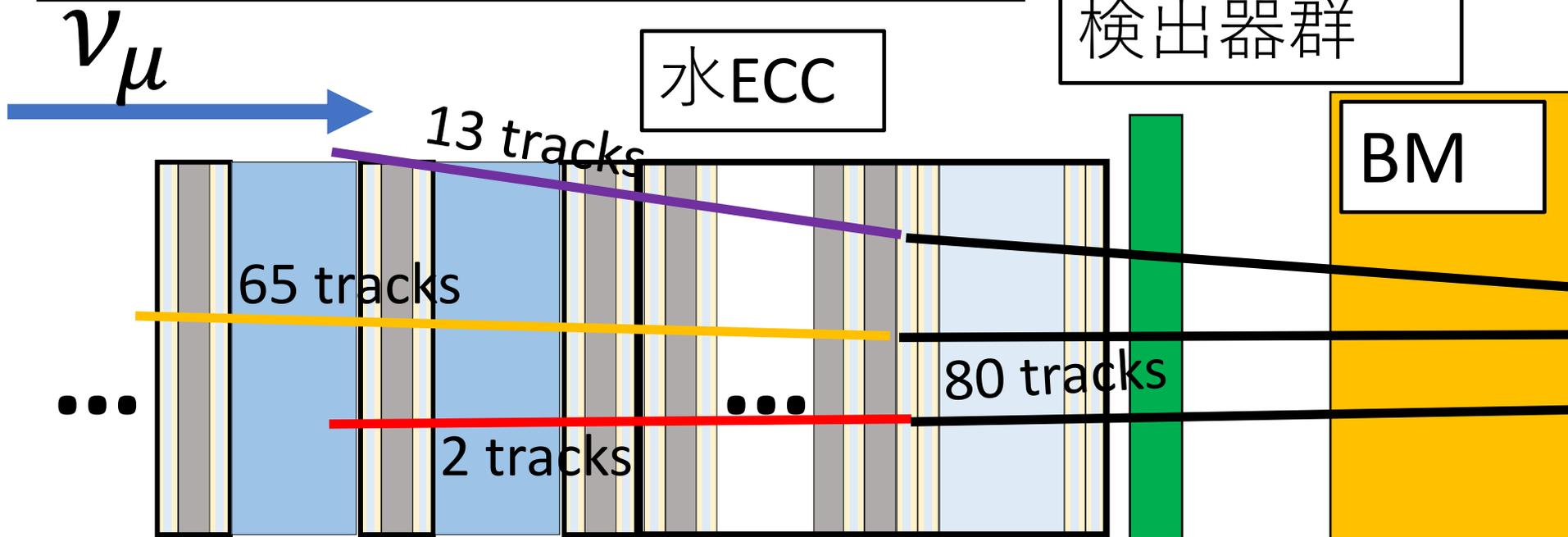


BM → 飛跡接続用検出器群  
→ 水ECC下流フィルム  
80本

- 面積 : 9 cm x 13 cm
- 期間 : 2/1-10 までの10日間
- Tracker でのヒットが荷電粒子1本らしく Baby MIND と接続された

# ミューオン飛跡の解析

飛跡接続用  
検出器群



BM → 飛跡接続用検出器群

→ 水ECC下流フィルム

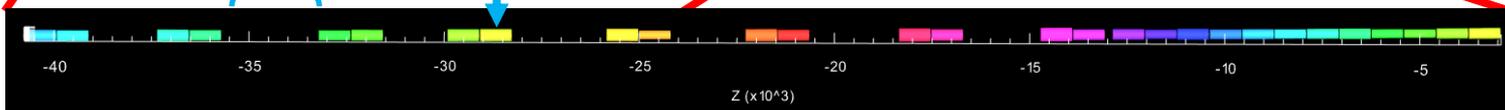
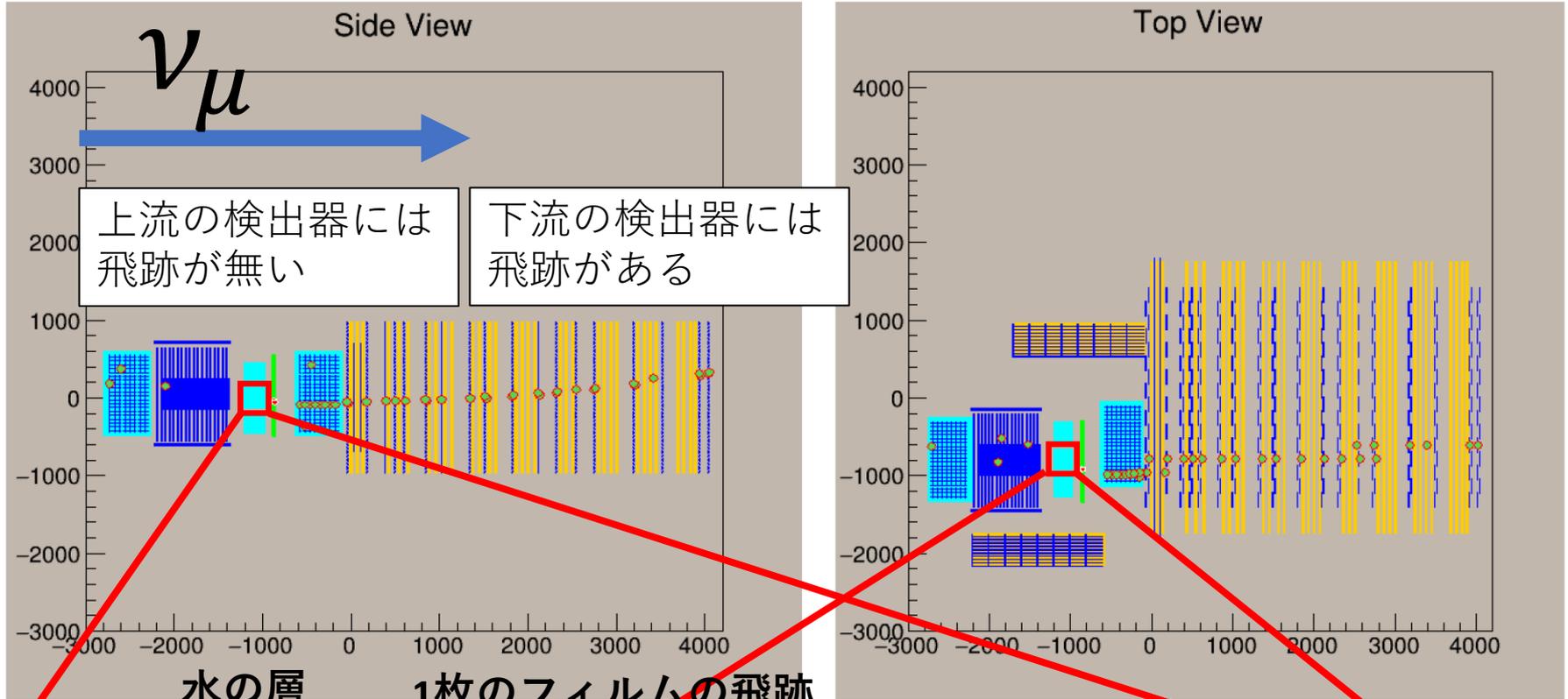
80本 → PL60まで貫通: 65本

解析範囲外へ横抜け: 13本

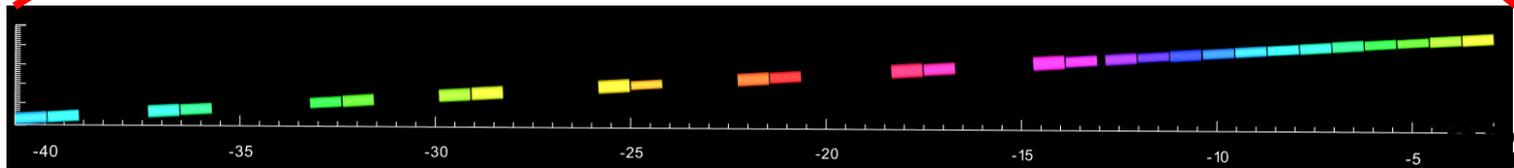
解析範囲内ECC中から発生: 2本

↑ ECC中ニュートリノ反応候補 32

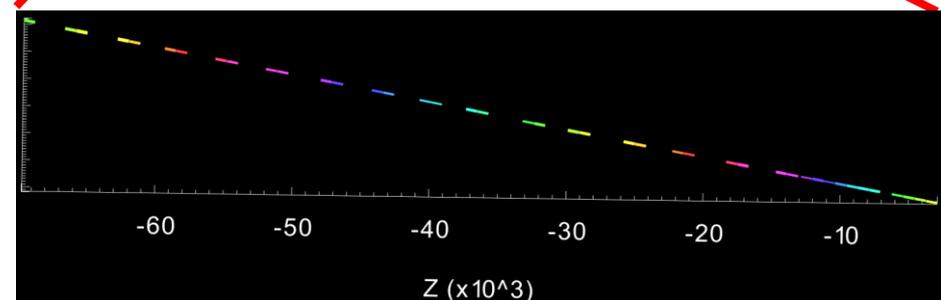
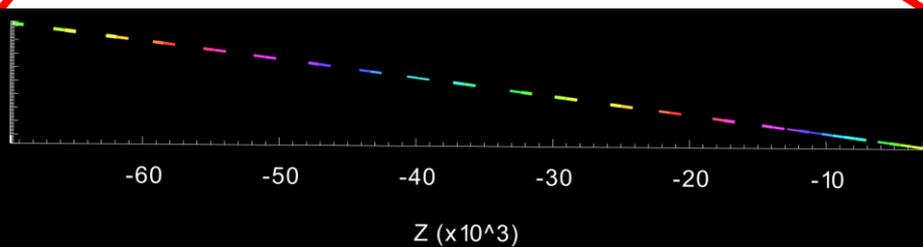
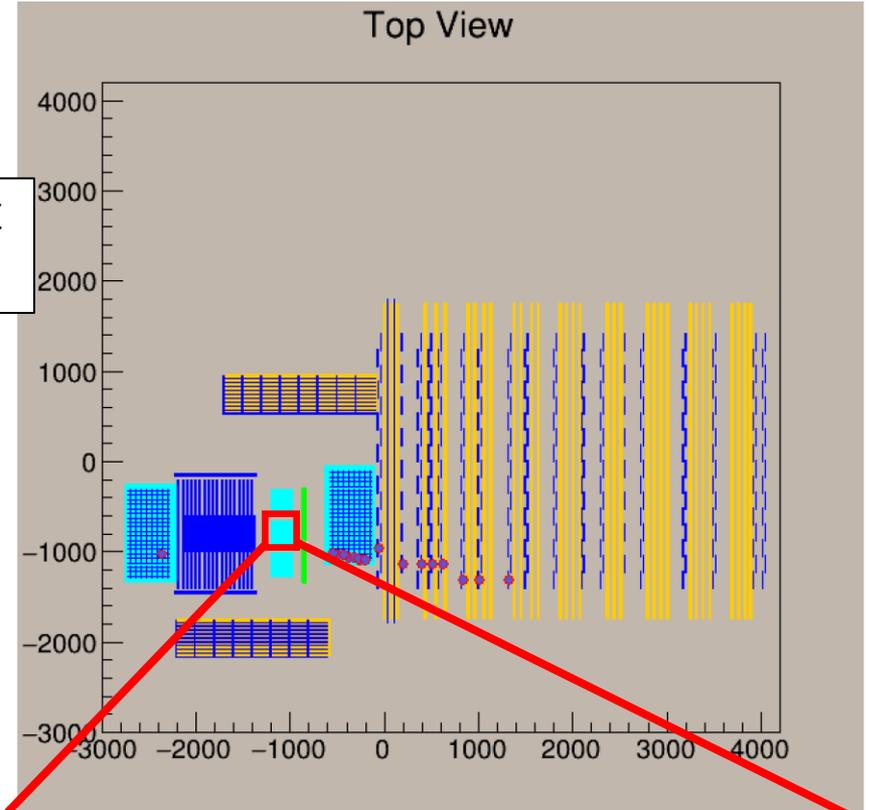
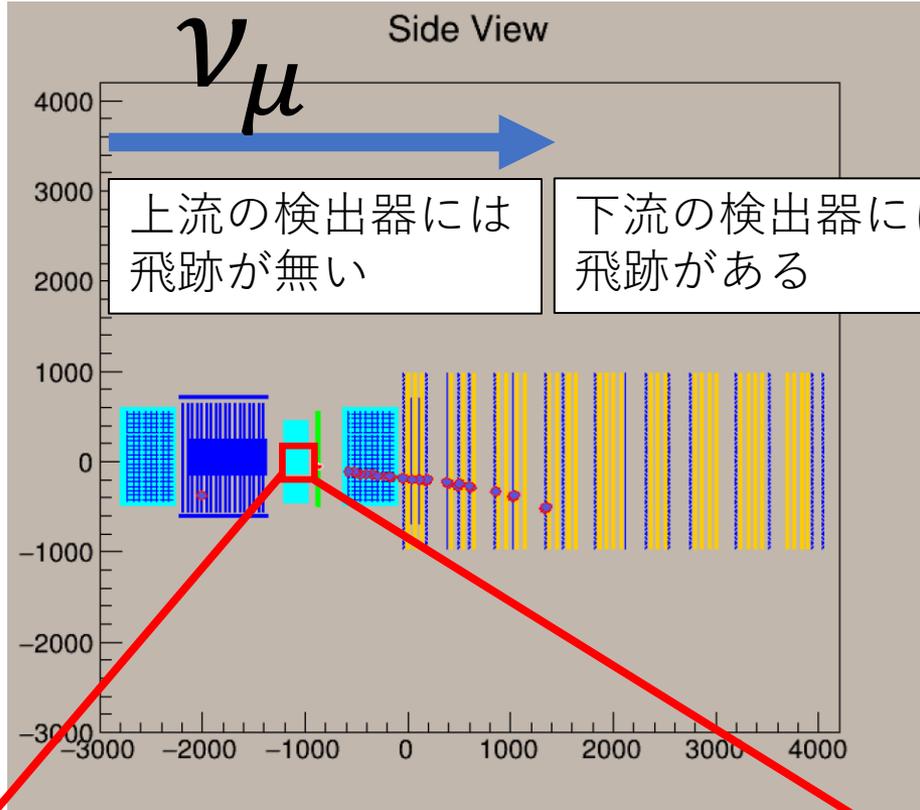
# 周囲の検出器のディスプレイ ①



3.7cm

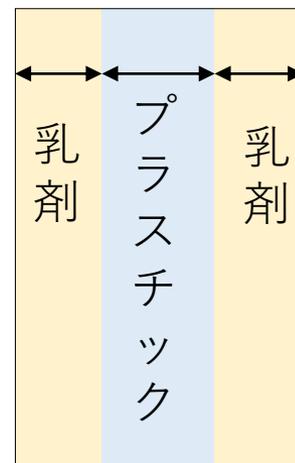


# 周囲の検出器のディスプレイ②



6.3cm

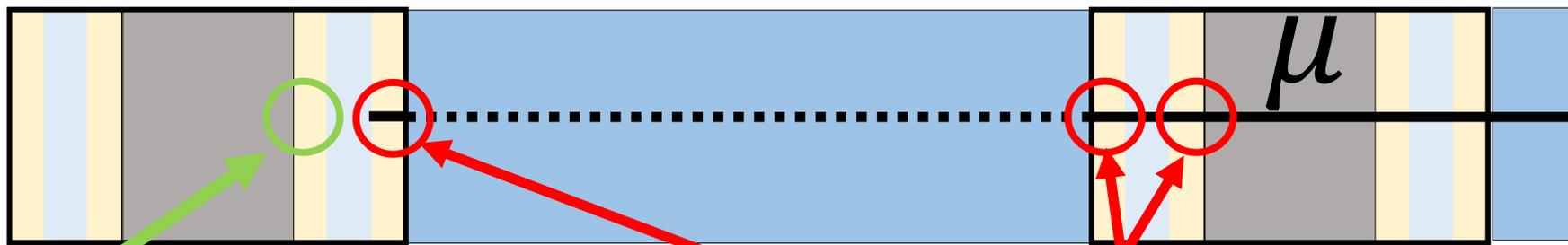
# 反応物質の決定



フィルムの構造→  
乳剤部分は感度があり飛跡が見える

$v_{\mu}$  →

①

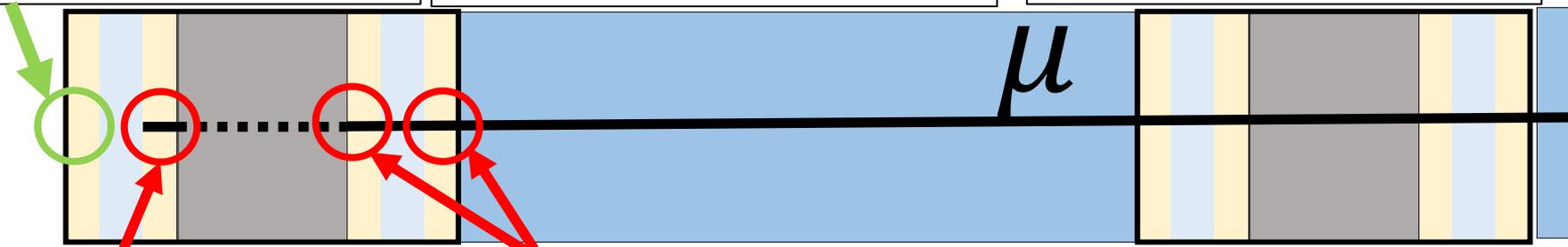


フィルムの上流側の乳剤には飛跡が**無い**ことを確認

フィルムの下流側の乳剤にのみ飛跡が**ある**ことを確認

フィルムの両面の乳剤に飛跡が**ある**ことを確認

②

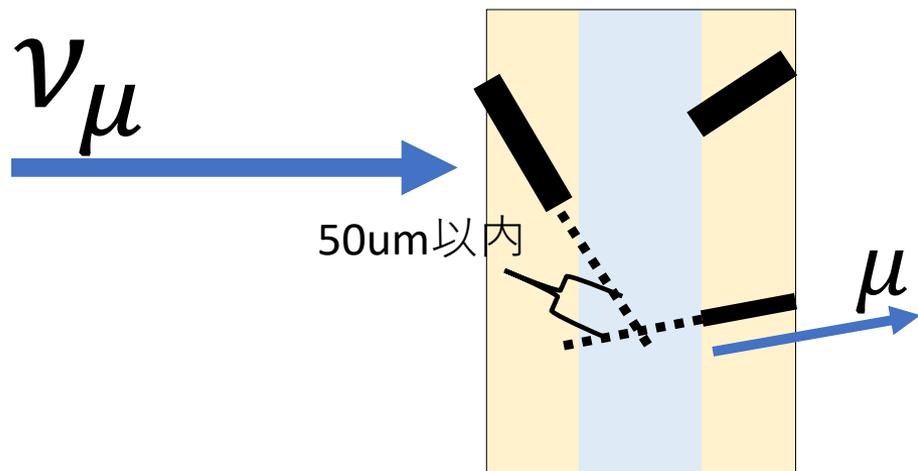


フィルムの下流側の乳剤にのみ飛跡が**ある**ことを確認

フィルムの両面の乳剤に飛跡が**ある**ことを確認

①,②ともに  
プラスチック反応

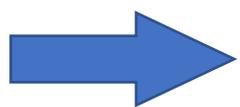
# 反応点付近の詳細解析



陽子の場合(プラスチック210 $\mu\text{m}$ )  
 $\tan\theta = 0 \rightarrow 80\text{MeV}/c$   
 $\tan\theta = 4 \rightarrow 140\text{MeV}/c$   
の運動量閾値での探索に相当

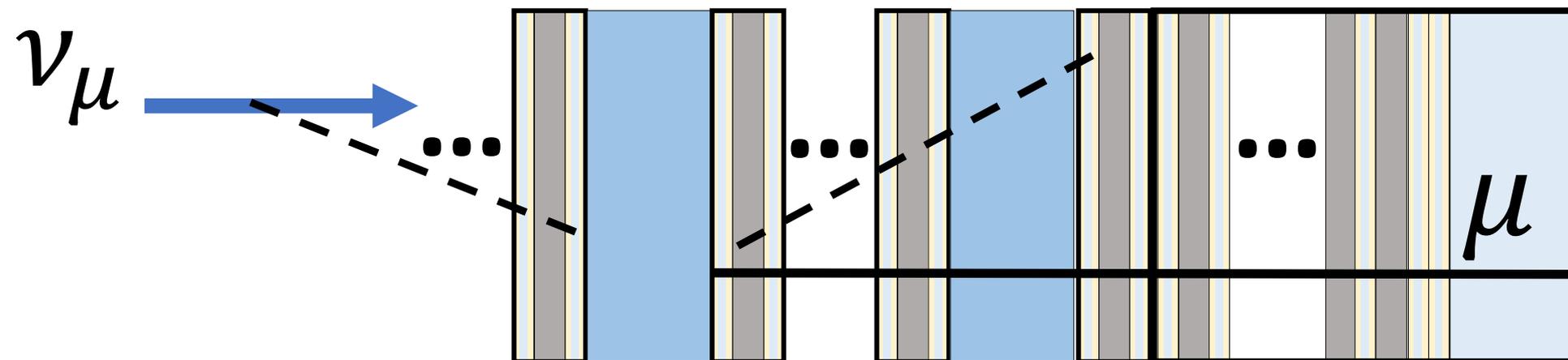
ミューオンの飛跡に対してvertexを組むような飛跡を探した

- 最近接距離 $<50\mu\text{m}$
- 片面乳剤のみに飛跡がある
- $\mu$ の飛跡よりも濃い( $dE/dx$ が大きい)
- 角度： $|\tan\theta| < 4$



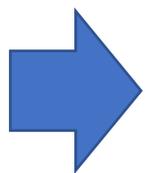
- ①  $\rightarrow$  組みそうな飛跡候補なし
- ②  $\rightarrow$  組みそうな飛跡候補を1本検出

# 反応点付近の詳細解析



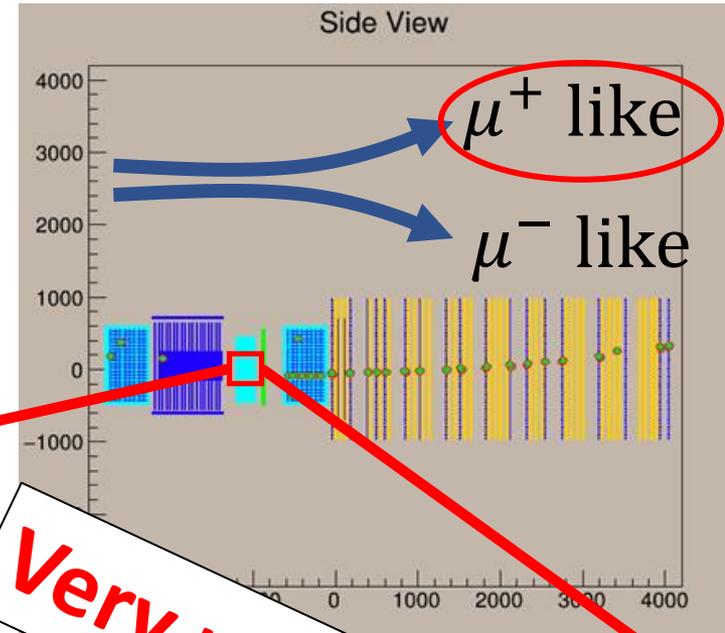
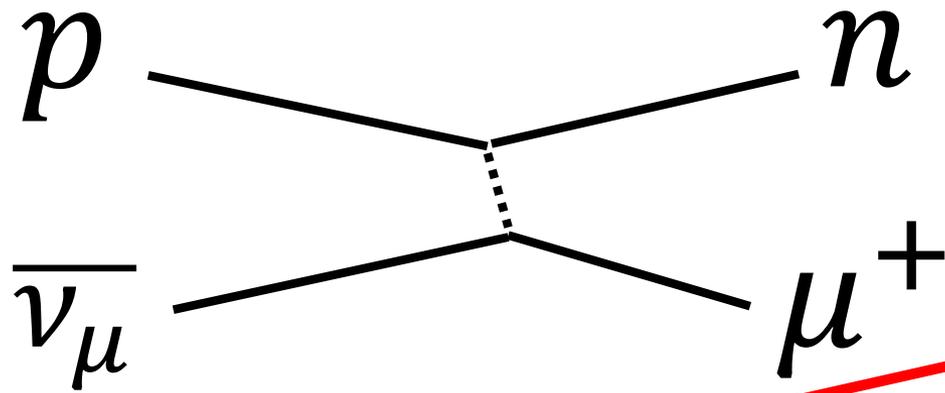
ミューオンの飛跡に対してvertexを組むような飛跡を探した

- 最近接距離 $<200\mu\text{m}$
- ミューオンの最上流のフィルムを貫通していない
- 角度： $|\tan\theta| < 4$



- ① → 組みそうな飛跡候補なし
- ② → 組みそうな飛跡候補なし

# 再構成後のニュートリノ反応①



Very preliminary

$y$

運動量:

$4.3^{+inf}_{-2.6}$  GeV/c

-40

-30

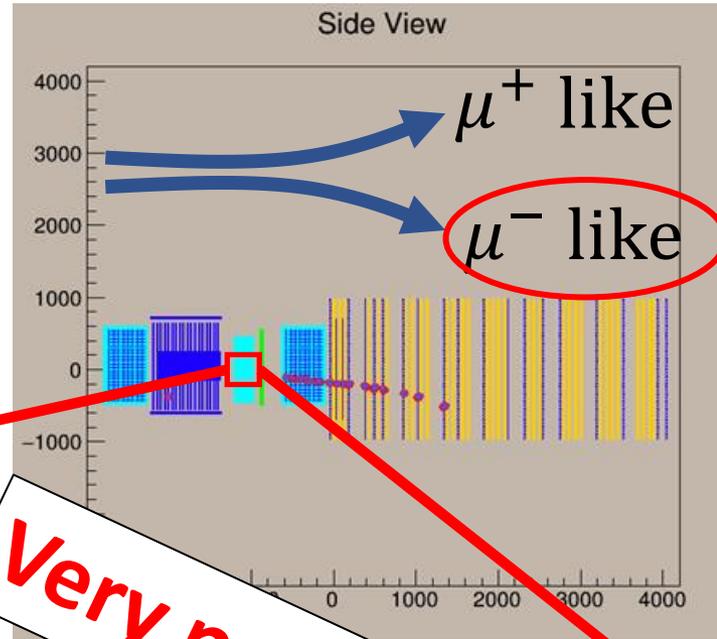
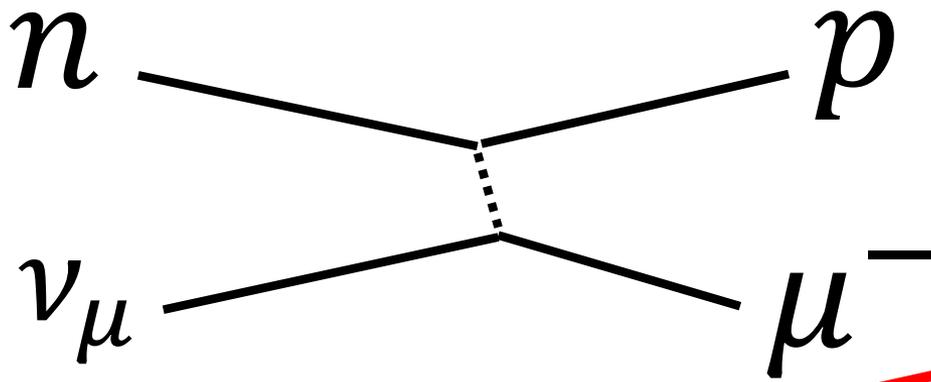
-20

-10

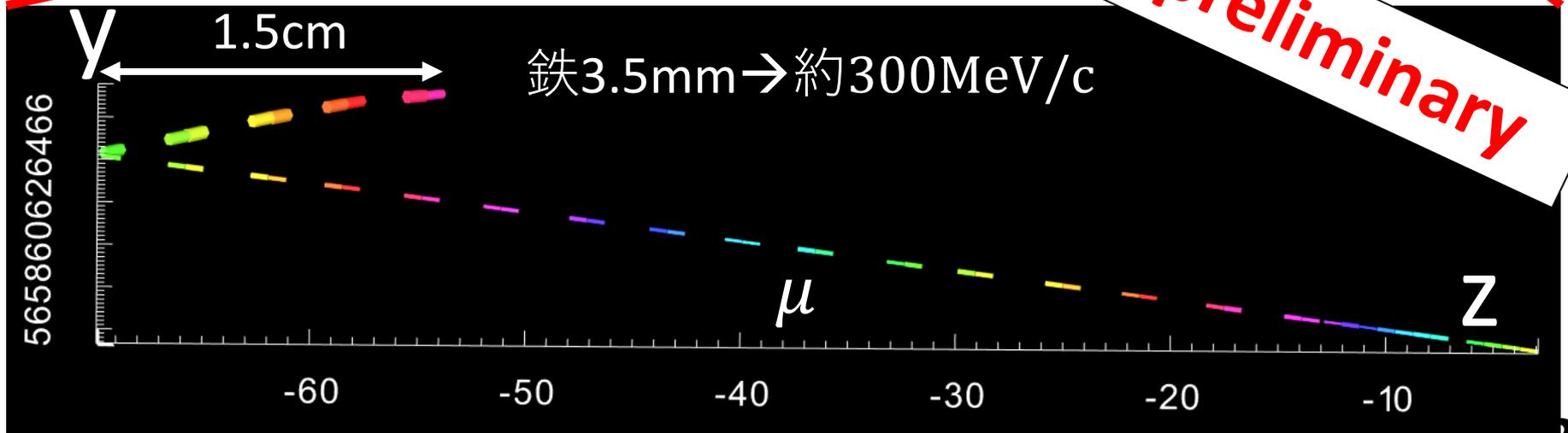
$z$

# 再構成後のニュートリノ反応②

組んでいる飛跡は陽子と仮定

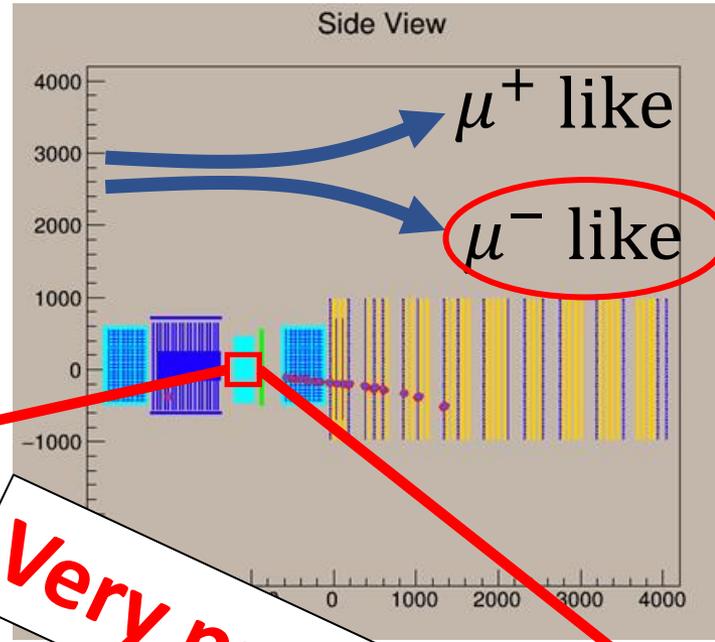
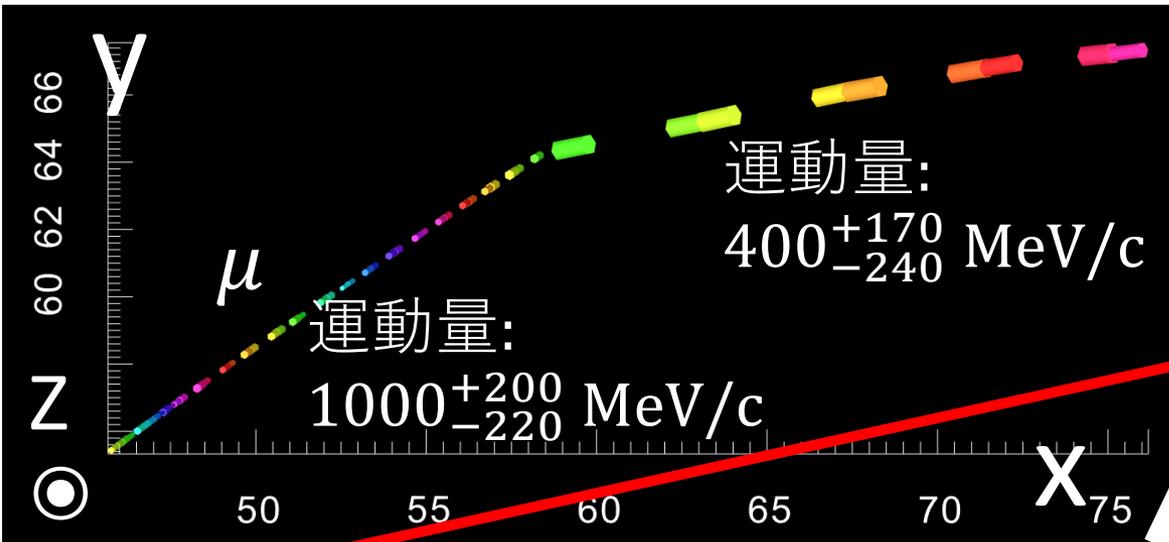


**Very preliminary**

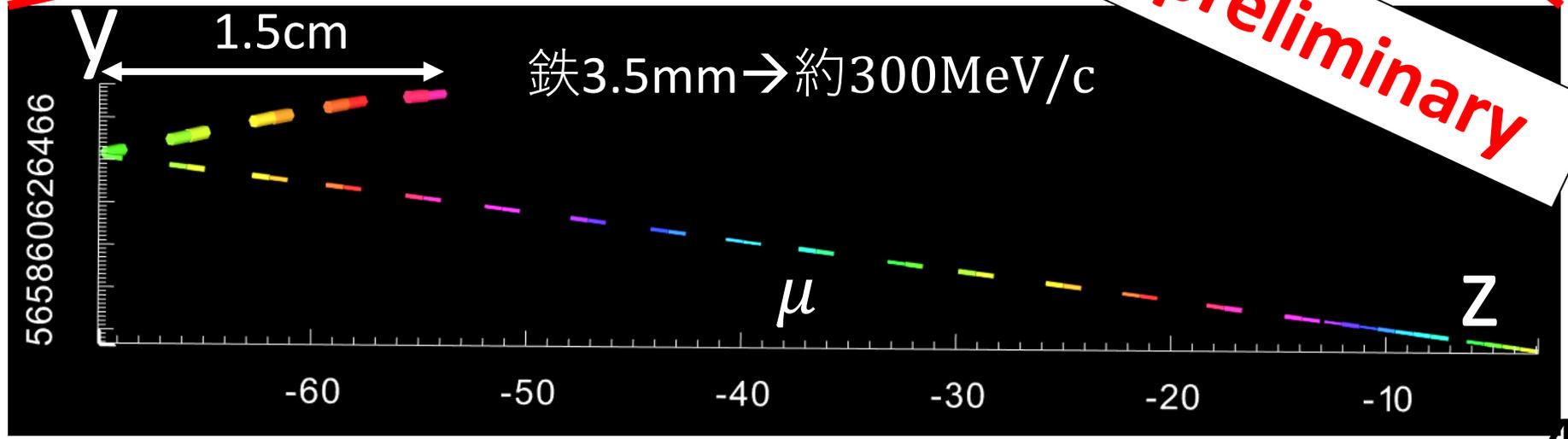


# 再構成後のニュートリノ反応②

組んでいる飛跡は陽子と仮定



**Very preliminary**



# 今後の展望

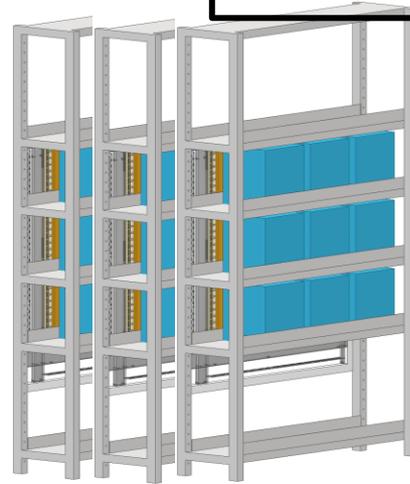
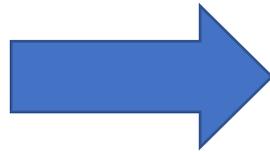
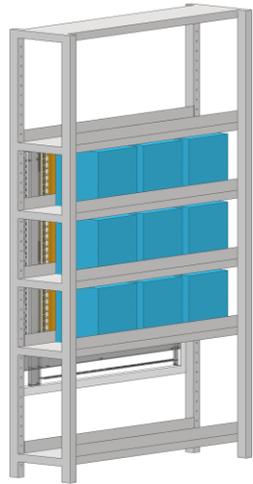
- 自動飛跡読取装置の1Areaのデータ解析  
→1film 全エリアのデータ解析(25cm × 25cm)
- トラッカー2本以上のデータも使った解析
- ECC内の運動量測定の精度評価・最適化
- Vertexを探す際のallowanceの最適化、  
BGの見積もり
- 検出効率やVPH(飛跡の濃さ)の経時変化、  
補正
- 各検出器間の位置関係の評価

# NINJA実験の今後の展望 (E71b)

# E71b(次の物理ラン)についての案

- E71aでは水ECCを $3 \times 3 = 9$ 個  
→ $3 \times 4 \times 3 = 36$ 個

Need discussion for  
detector space



横を4つに拡張予定  
ビーム軸方向に3つ重ねる

Target Mass: 250kg → 1ton

Beam power : ×1.4

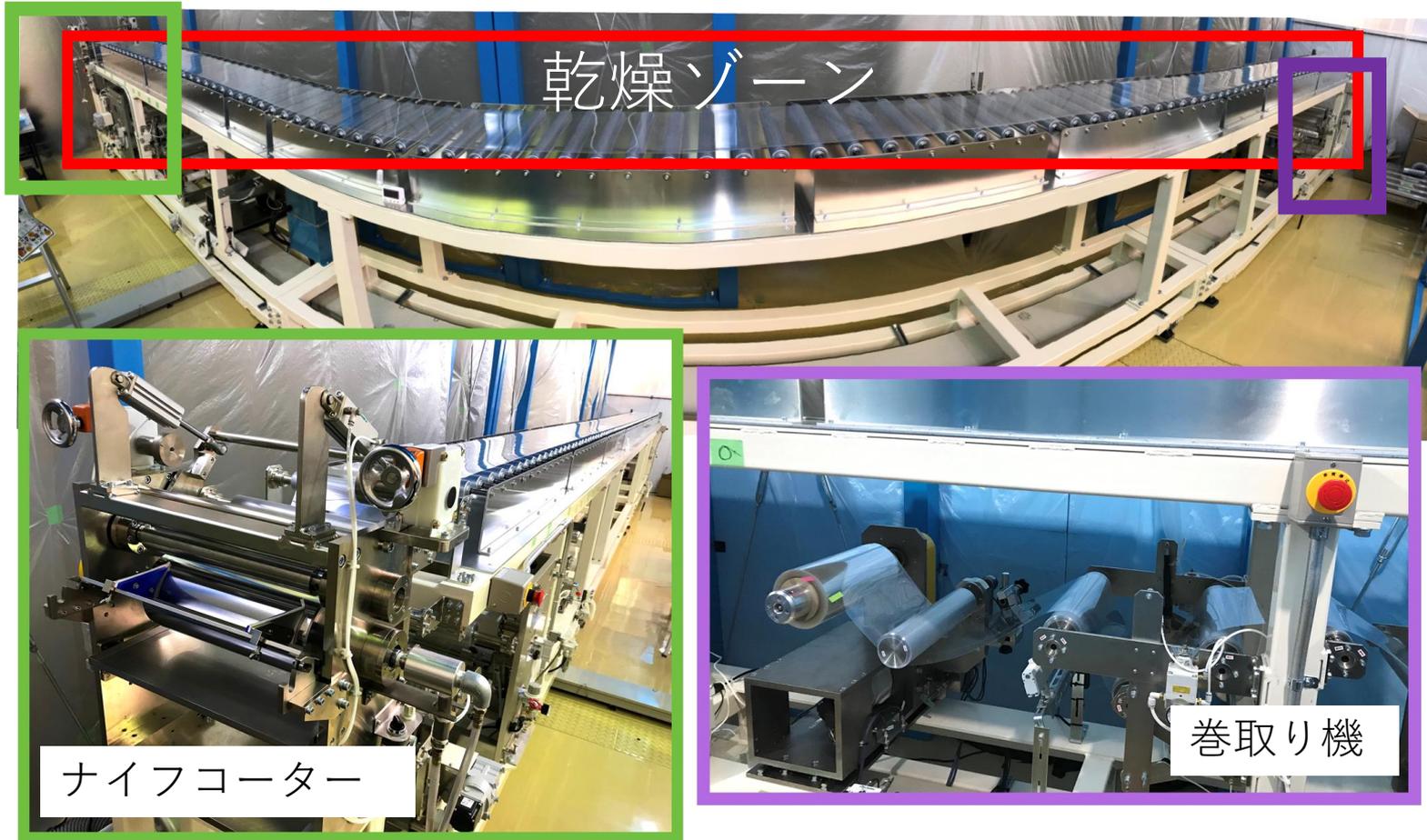
Exposure time : × 1.0~1.5?



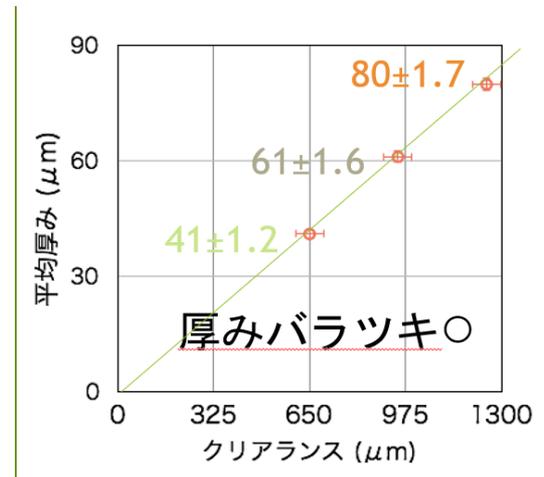
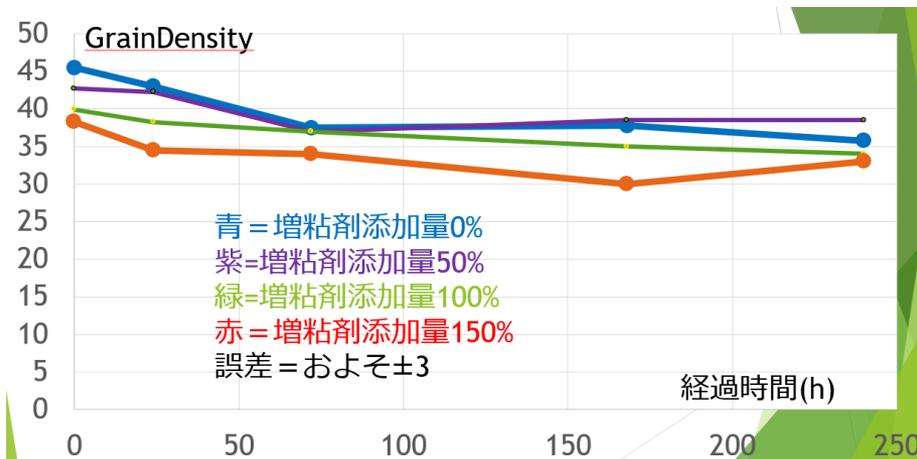
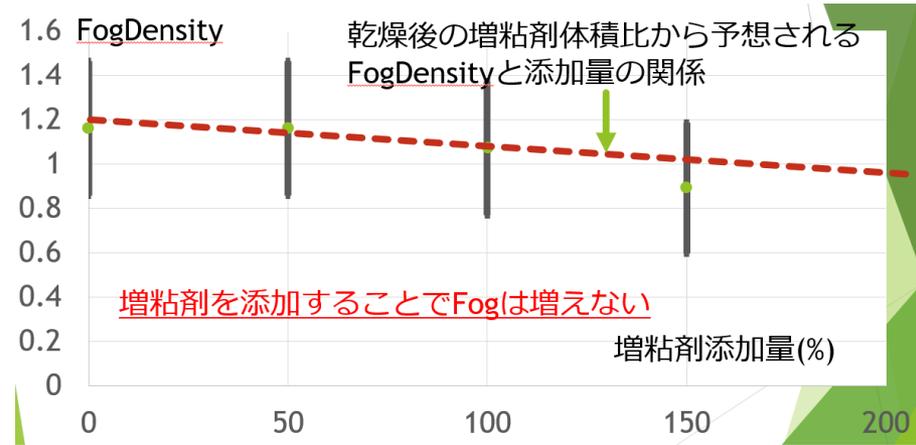
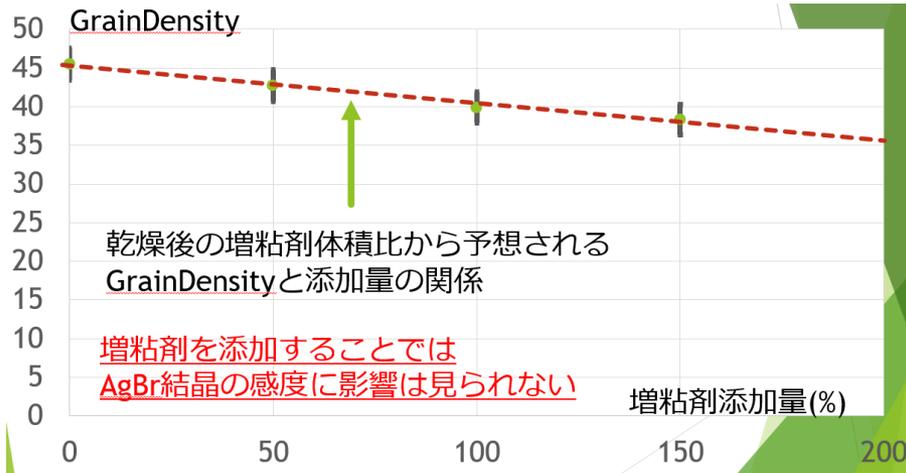
E71aの約10倍の統計  
(100,000  $\nu_\mu$  events)  
( 1,000  $\nu_e$  events)

# E71bに向けたfilm大量作成

- フィルムを自動で大量に作成するため、自動塗布機を立ち上げている



# E71bに向けたfilm大量作成



- 自動塗布装置によって今までの10倍でのフィルム製造が可能になる
- 自動塗布用の乳剤の開発や性能評価も進んでいる

# 飛跡読み取り装置の開発(HTS2)



- 現在立ち上げが進行中
- 今年度中に読取速度が5倍

# Summary

- NINJA実験はSub GeV～Multi GeVのニュートリノ原子核反応精密測定実験であり、原子核乾板を用いて反応からハドロンの情報を取り出すことを目標としている。
- 物理ランは昨年末から今年2月までニュートリノ照射を行い、その後約 $100m^2$ の原子核乾板の現像を完遂した。
- パイロット解析でBMから水ECCまで飛跡接続を行い、2イベントのミュオンID付きのニュートリノ反応を検出した。
- 今後、解析対象のフィルム面積を増やしニュートリノ反応の検出を進めていく。
- 次の物理ランに向けての準備も進んでいる。