

# OPERAでのニュートリノ反応点探索

名古屋大学 F研究室 D1

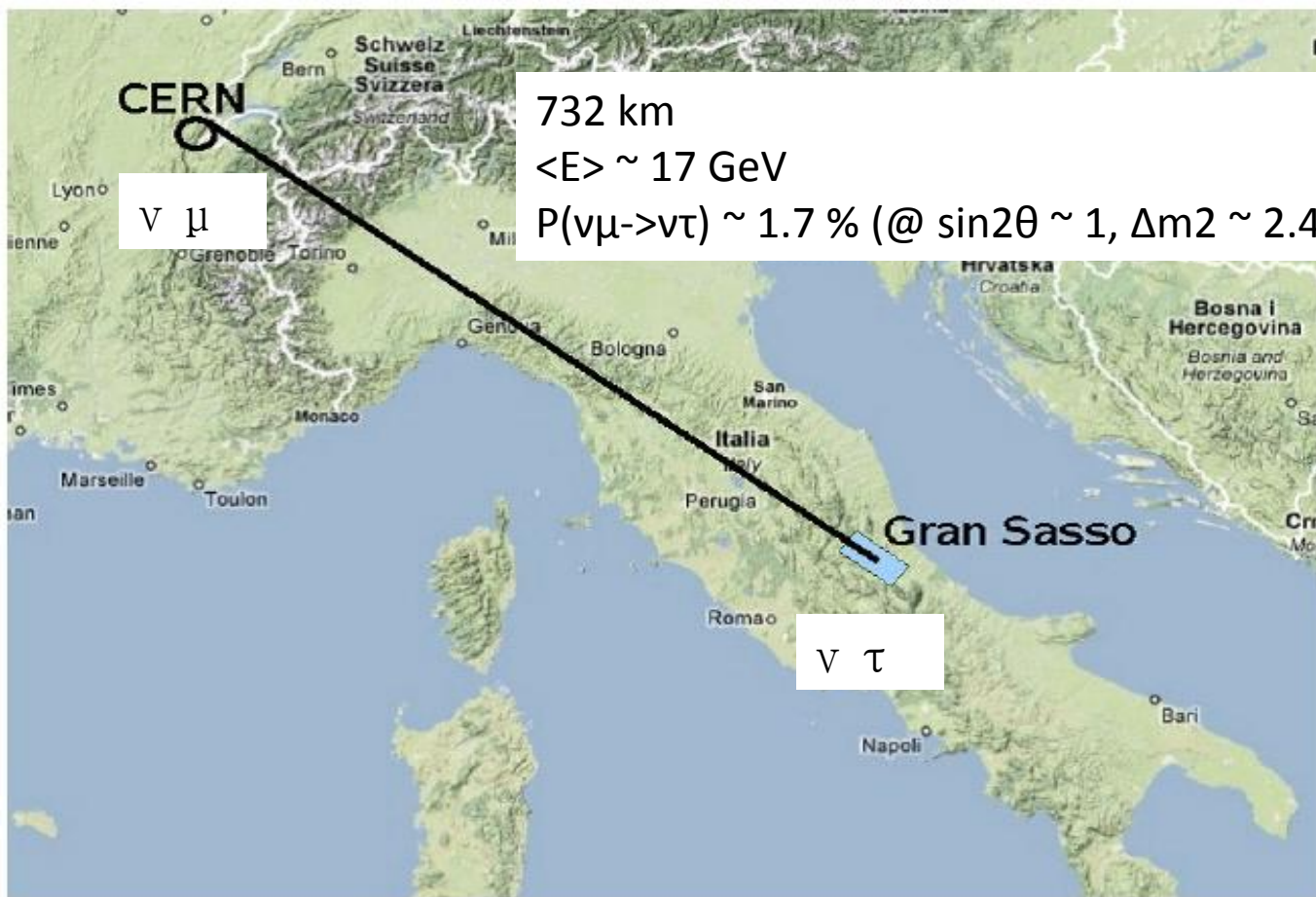
大村 拓也

# Contents

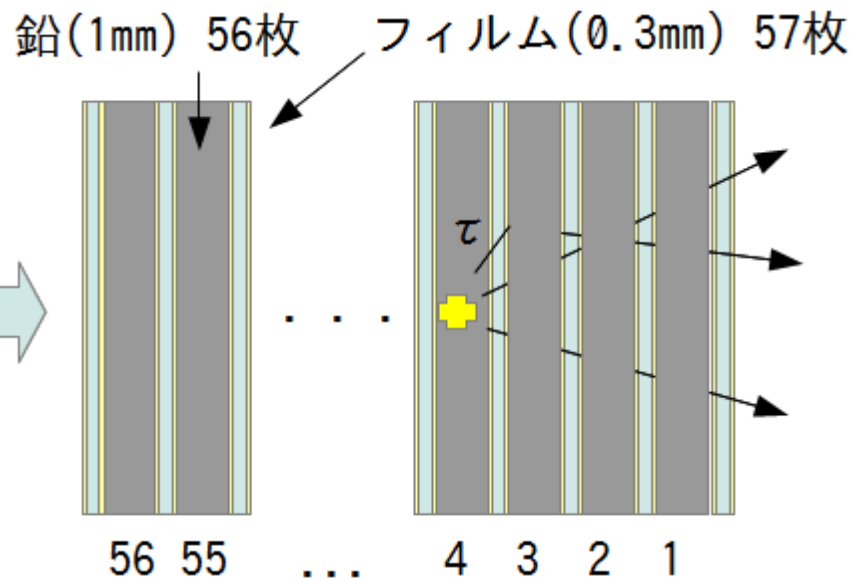
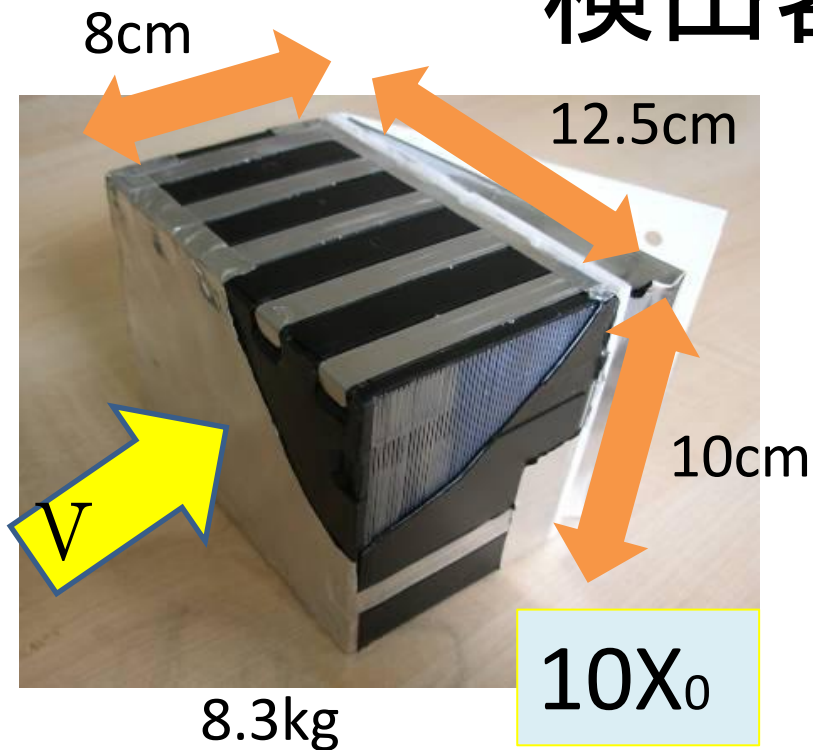
- OPERA概要
- 反応点探索
  - Overview
  - 実績、バイアス
- 飛跡検出効率検証、CS-ECC接続の分析
- まとめ
- 今後に向けて

# OPERAの目的

純粋な $\nu_{\mu}$ ビームから $\nu_{\tau}$ による反応を検出し、アピランス法で $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動を直接検証する。



# 検出器 (ECC)

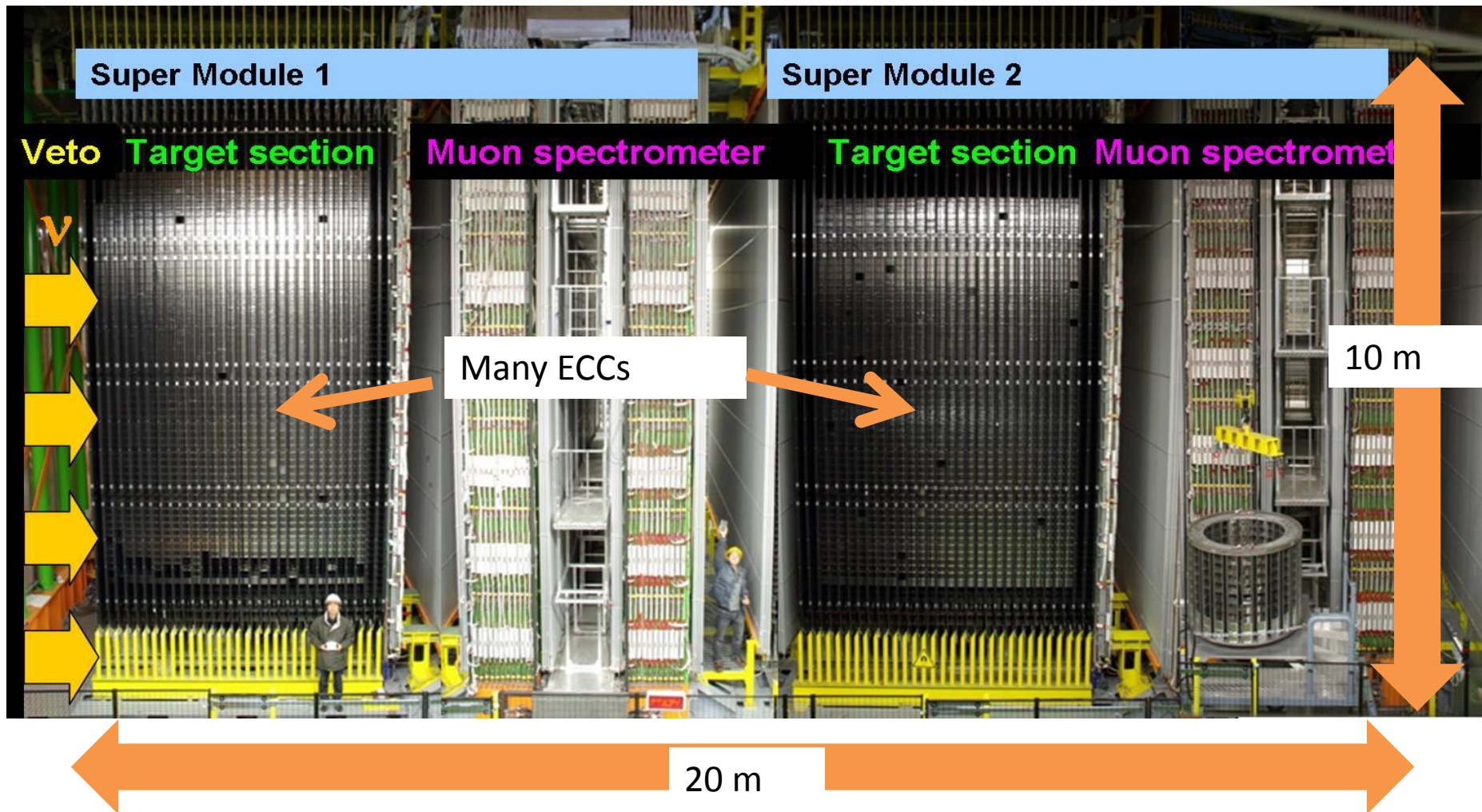


高い位置、角度分解能  
不感時間なし  
大質量化が容易

解析に時間と労力がかかる  
バックグラウンドも蓄積する

15万個使用!!

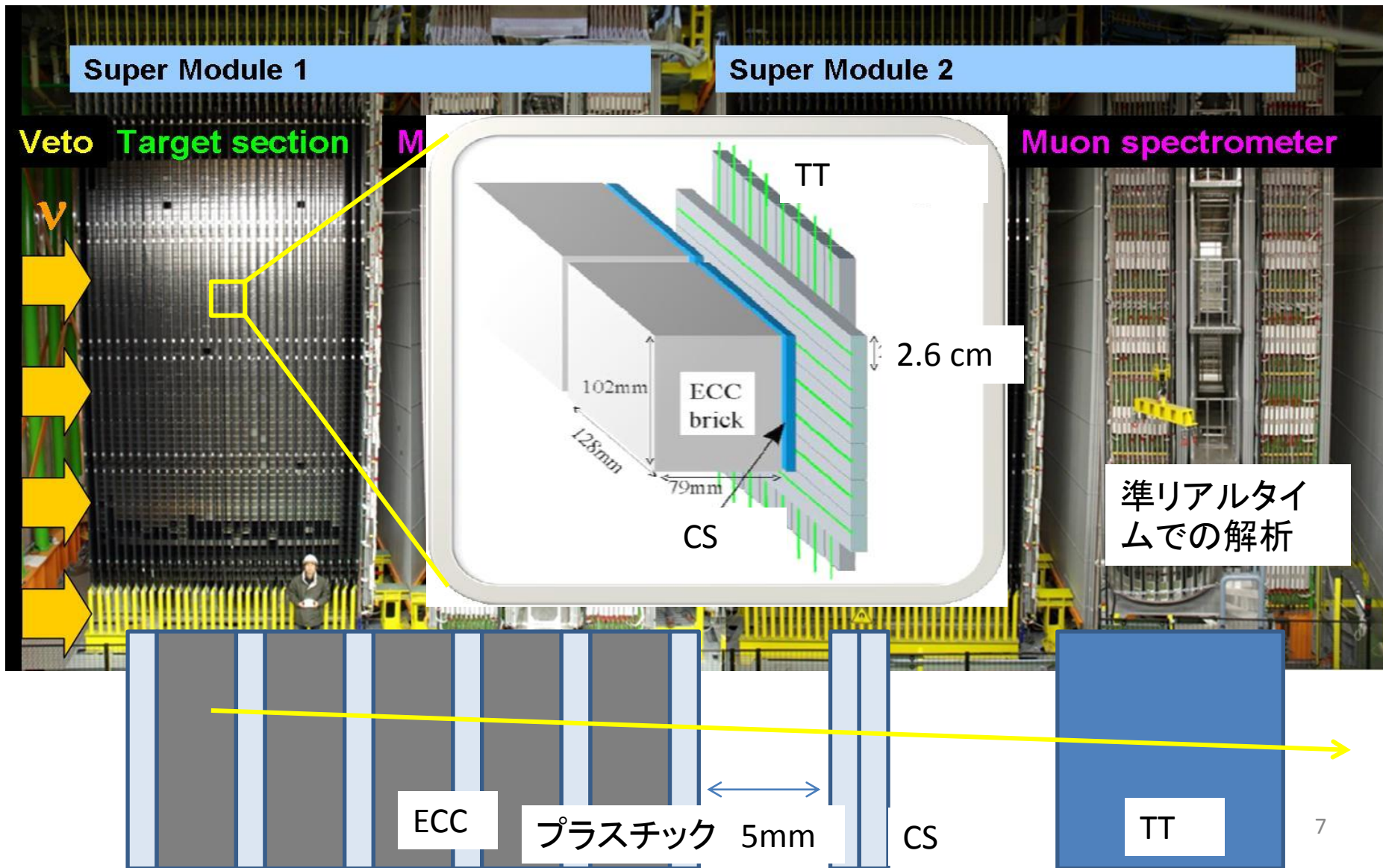
# ディテクター外観



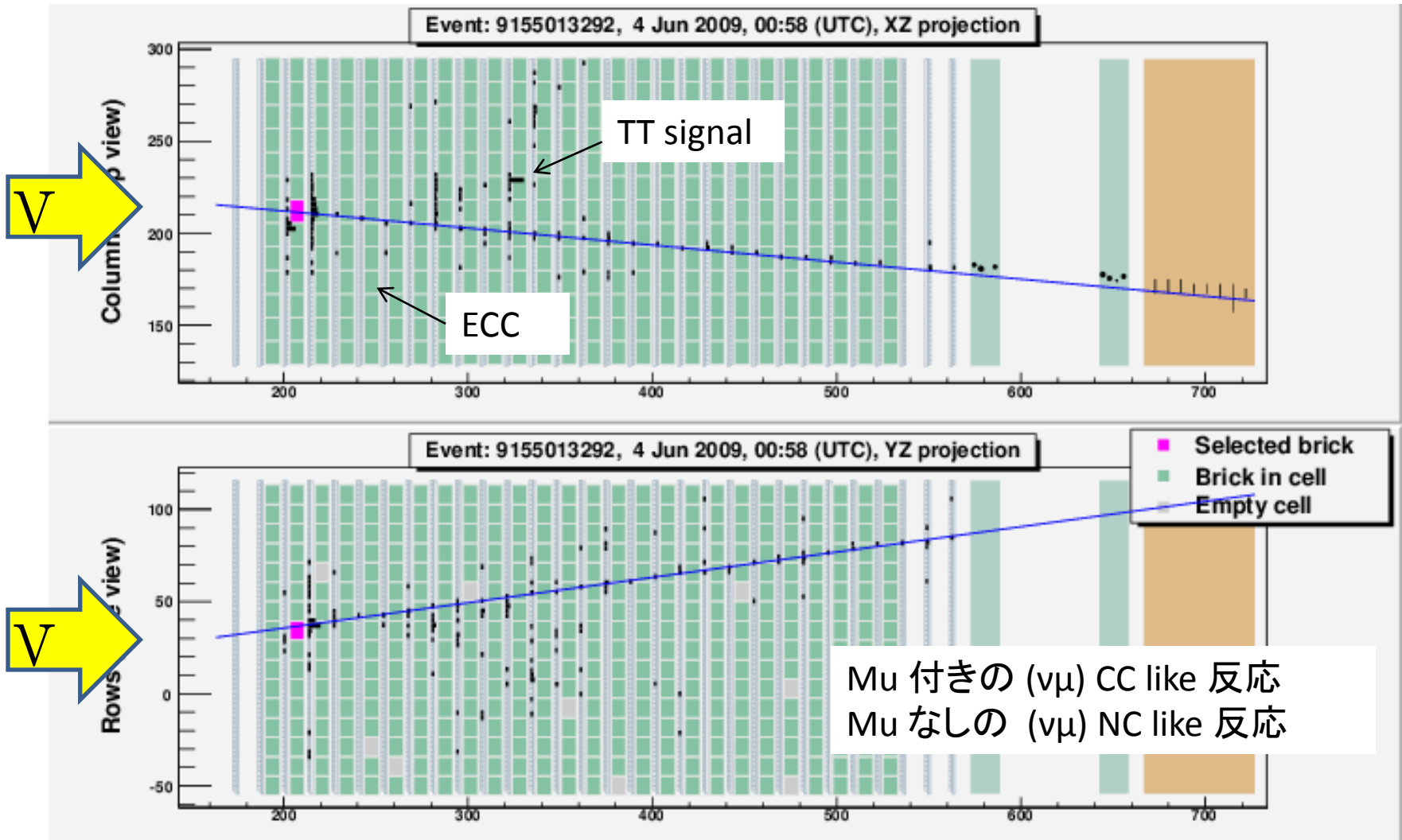
# OPERAにおける反応点探索

- 反応点を見つけることが物理解析のスタート。
- 数十メートル級の検出器の中から1点の反応点を探し出す。
- OPERAで最も大変な仕事。イベントの解析は日欧で半分こ。
- やりかた： ECC内で起こるニュートリノ反応から出てくる荷電粒子を、シンチレーター検出器(TT)とCS検出器(原子核乾板)でとらえ、それを頼りにECC中を追い上げる。

# TTとCS

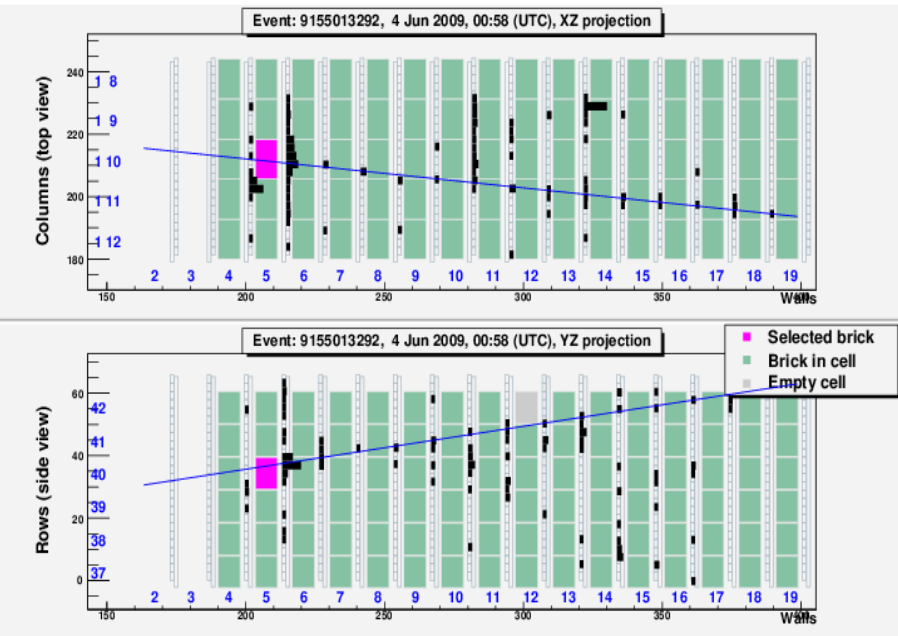


# TTでのイベント描像





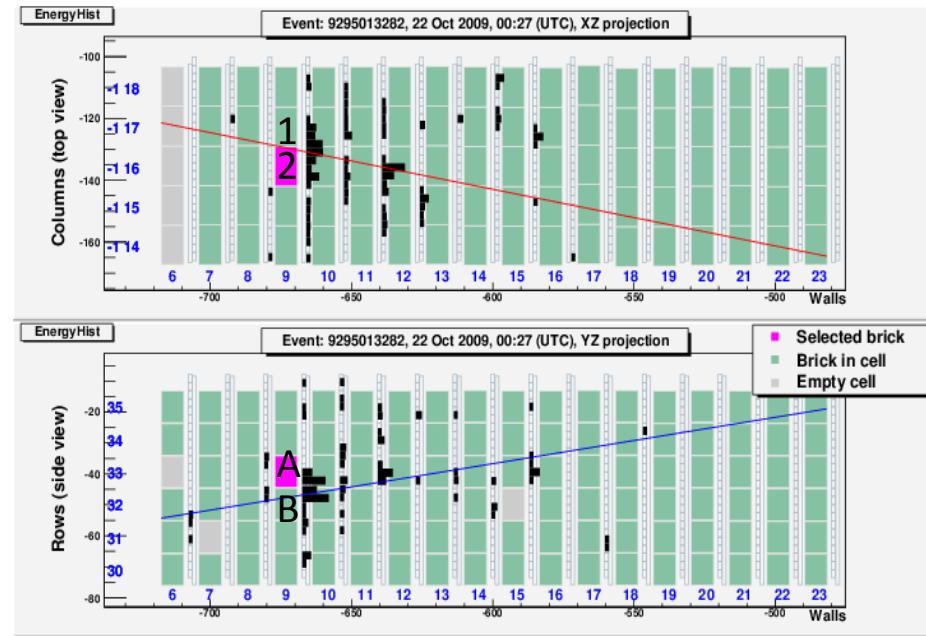
# TTでの候補ECC絞り込み



プロバビリティ 0.97

再構成したミュオン  
TTのヒットパターン

→ ECCのプロバビリティを定義

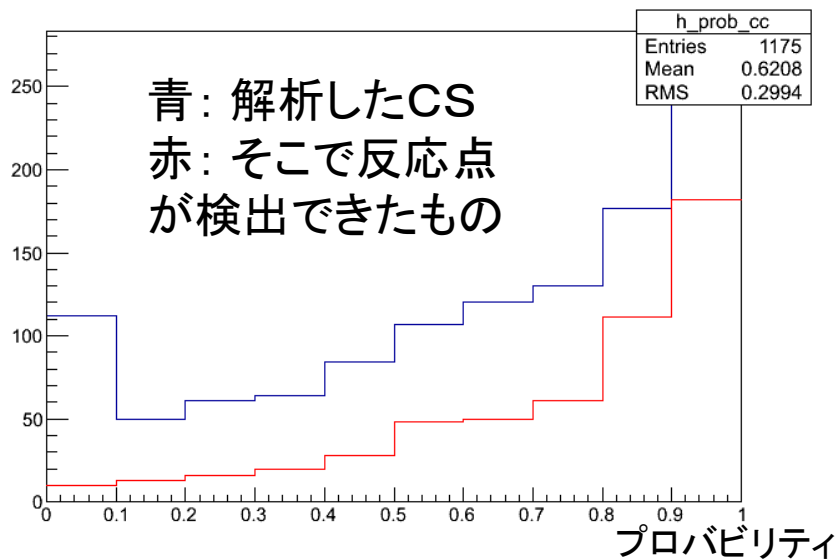


プロバビリティ

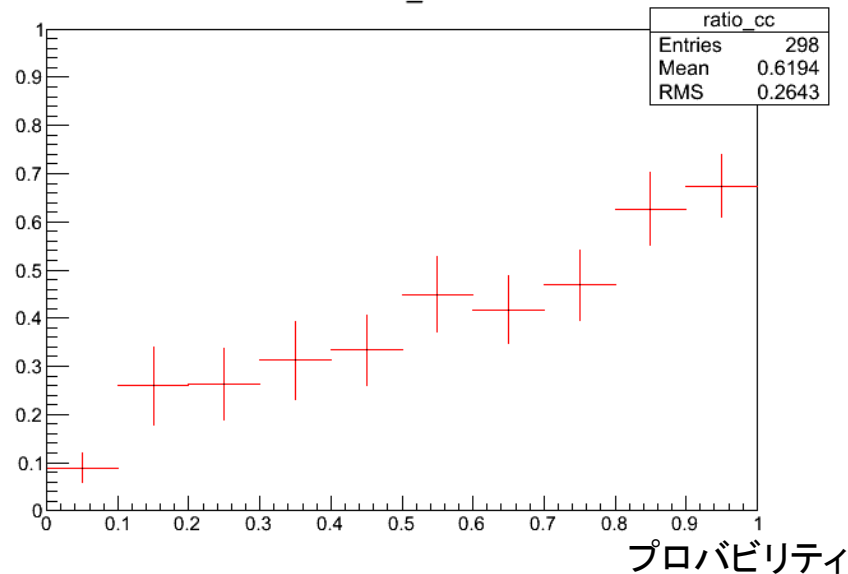
1B 0.12  
1A 0.42  
2B 0.07  
2A 0.44

# プロバビリティと反応点検出率

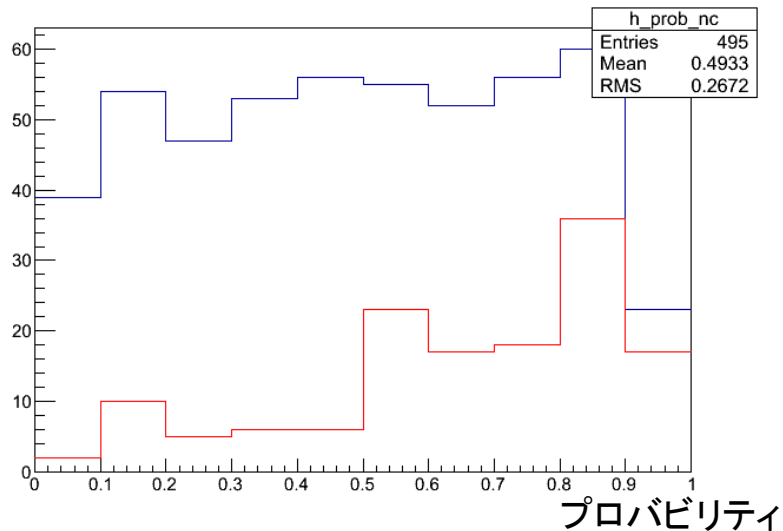
CC like



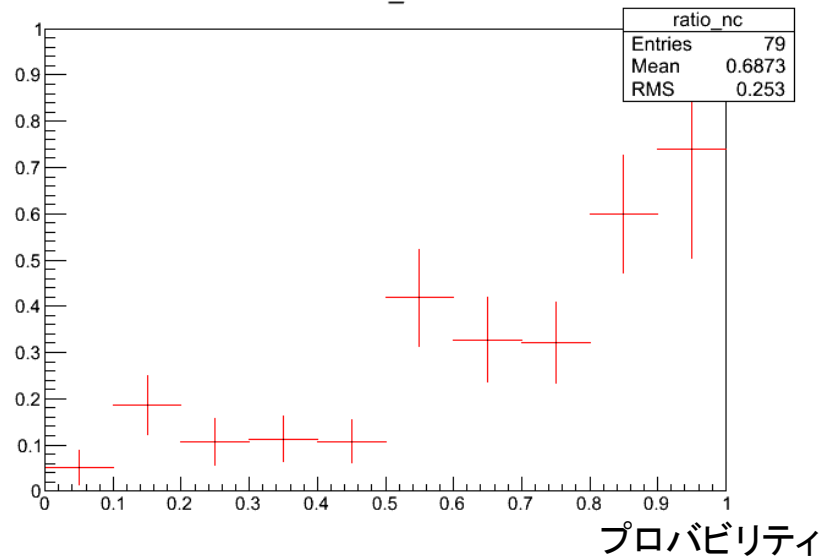
ratio\_cc



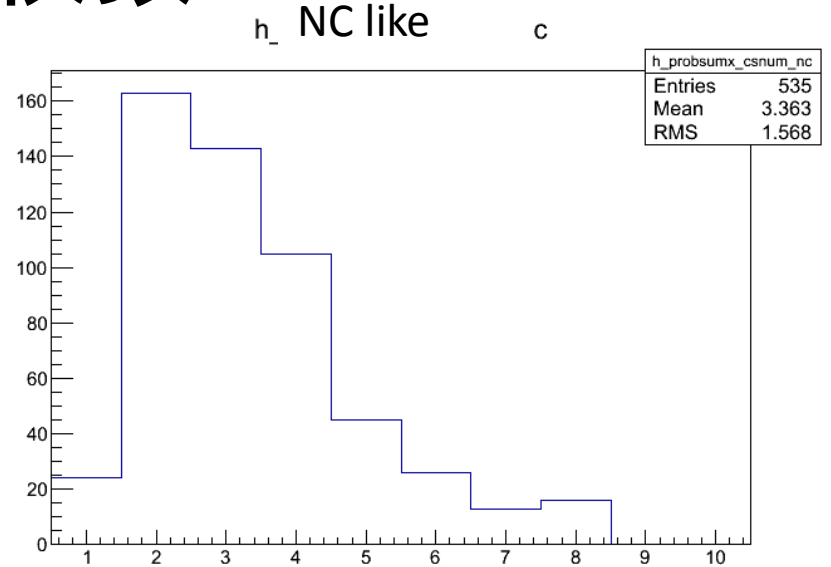
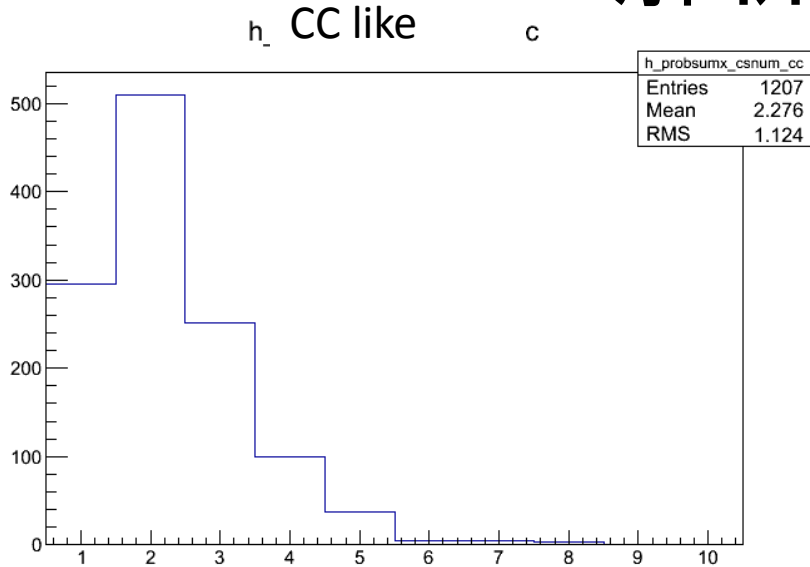
NC like



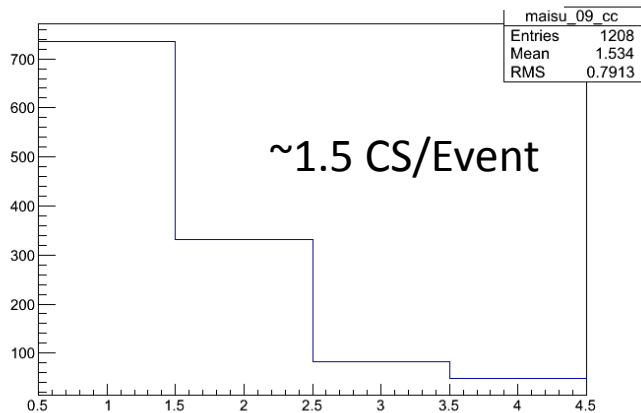
ratio\_nc



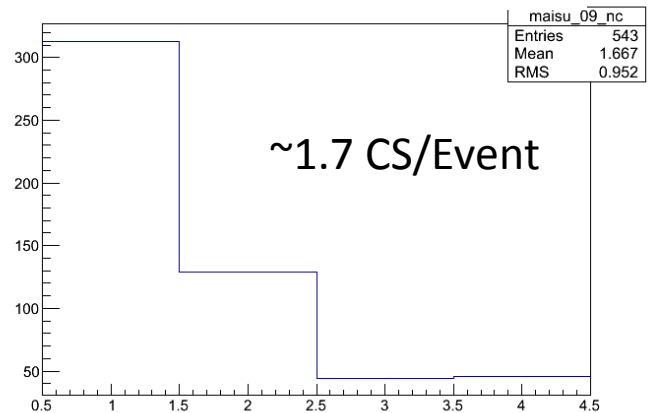
# プロバビリティ合計 $\geq 0.9$ に必要な 解析CS枚数



実際の解析数



実際の解析数



# スキャン面積の設定

TTでミュオンの飛跡を再構成できたものはその予想位置を中心に $2\sigma$ をまずスキャン

NCライクのイベントはTTの信号をカバーするように目で見えて設定

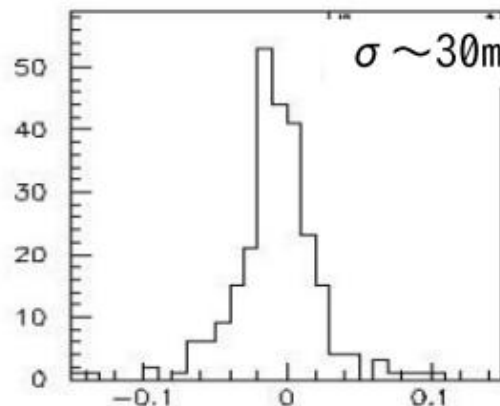
平均的なスキャン面積

CC like: 26 cm<sup>2</sup>

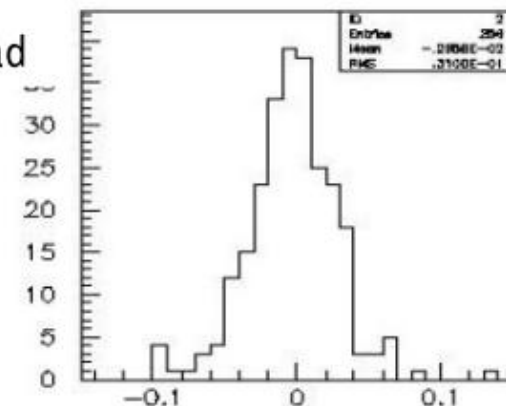
NC like: 61 cm<sup>2</sup>

見つからなければスキャン面積を再設定してもう一度スキャンする。

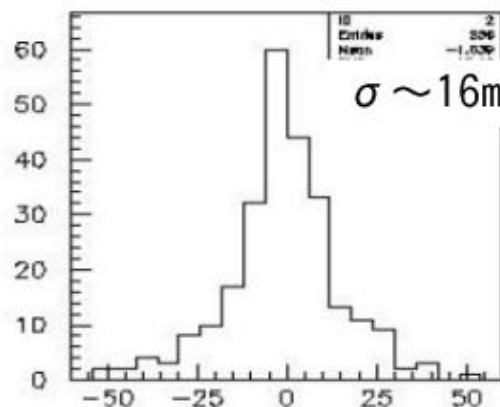
ミュオンプレディクションの精度



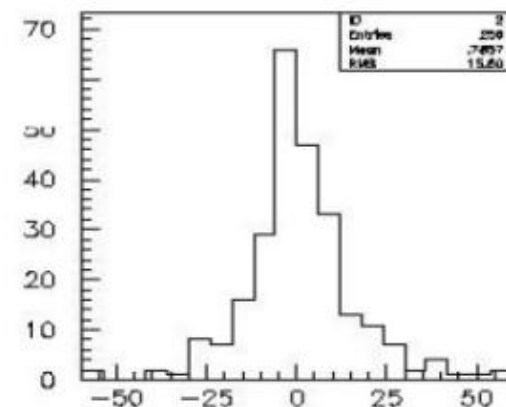
角度ズレ[rad](x-proj.)



角度ズレ[rad](y-proj.)

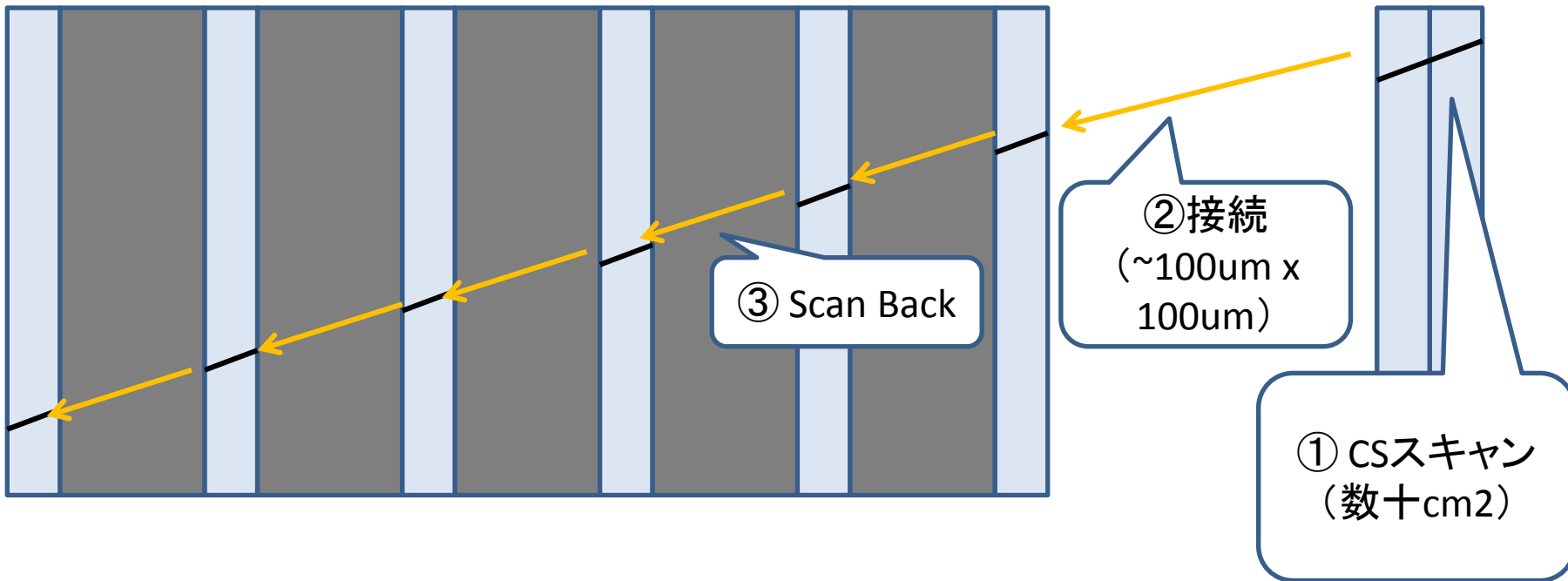


位置ズレ[mm](x-proj.)

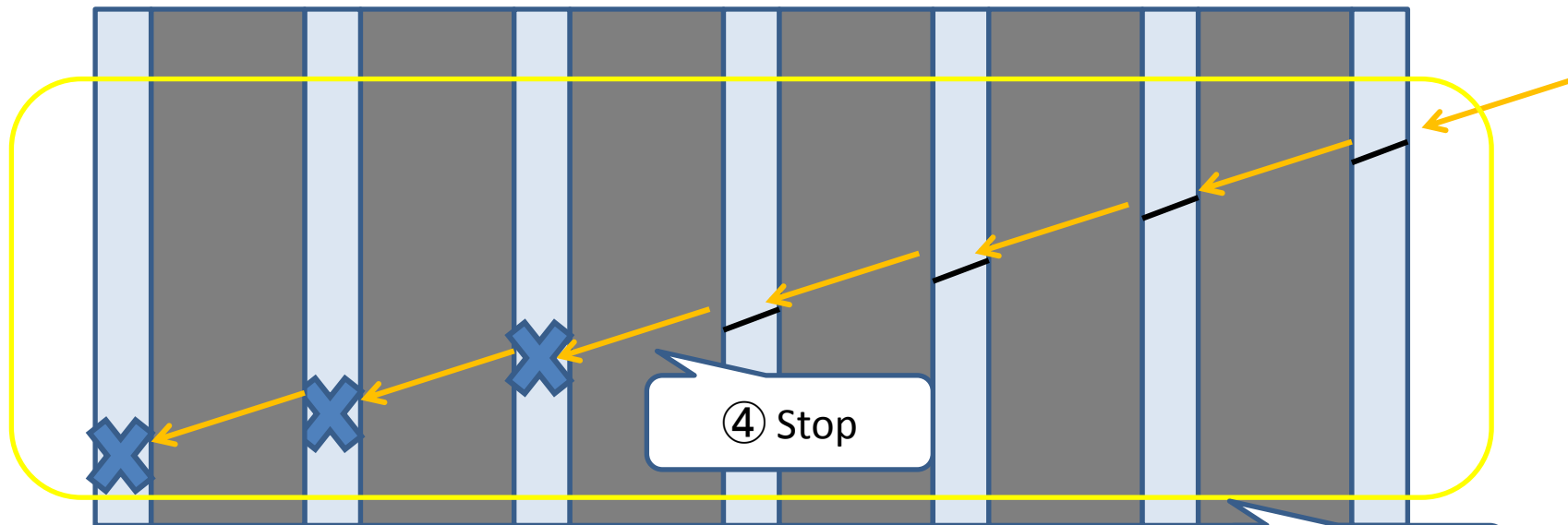


位置ズレ[mm](y-proj.)

# 乾板での解析プロセス Overview



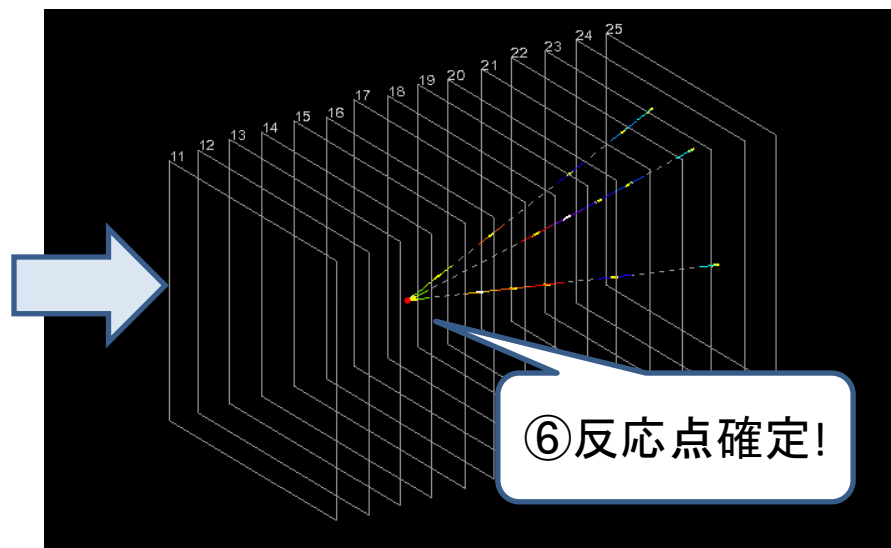
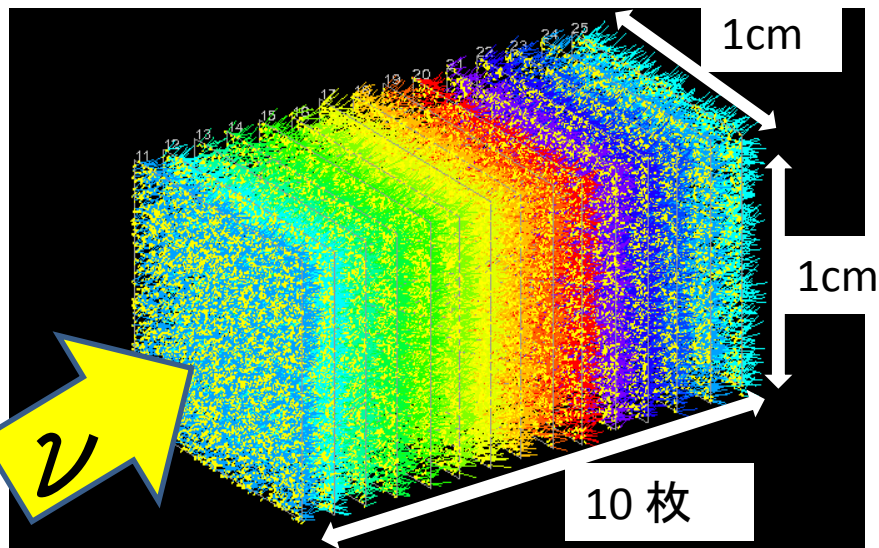
- ①CSをスキャンして飛跡検出。見つからなければ他のCSを取り出して解析。
- ②CSで見つかった飛跡をECC最下流のフィルムに延長し、肉眼観察で探す。
- ③鉛を挟んで一枚一枚追い上げる。(Scan Back)



④ 飛跡が途切れるまで追いかける。

⑤ 途切れた付近10枚程度を自動読取装置でスキャン。

⑥ スキャンバックしたトラックと、それと1点で収束する飛跡を抽出する。



# これまでの実績 (RUN 08, 09)

	2008 RUN			2009 RUN		
	CC	NC	Total	CC	NC	Total
Trigger	607	212	819	1208	543	1751
CS Track Found	488	151	639	961	331	1292
Connected to ECC	310	89	399	696	221	917
Located in ECC	348	89	437	657	165	822
Located / Triggerd	0.57	0.42	0.53	0.54	0.30	0.47

~ 1.5  
CS/EVent

~ 1.7  
CS/EVent

~ 1.5  
CS/EVent

~ 1.7  
CS/EVent

# これまでの実績 (RUN 10, 11)

	2010 RUN			2011 RUN		
	CC	NC	Total	CC	NC	Total
Trigger	1347	567	1914	1614	428	2042
CS Track Found	1040	384	1424	853	259	1112
Connected to ECC	592	214	806	312	116	428
Located In ECC	451	138	589	173	66	239
Located / Triggerd	0.33	0.24	0.31	0.11	0.15	0.12

~ 1.3  
CS/EVent

~ 1.4  
CS/EVent

~ 1.2  
CS/EVent

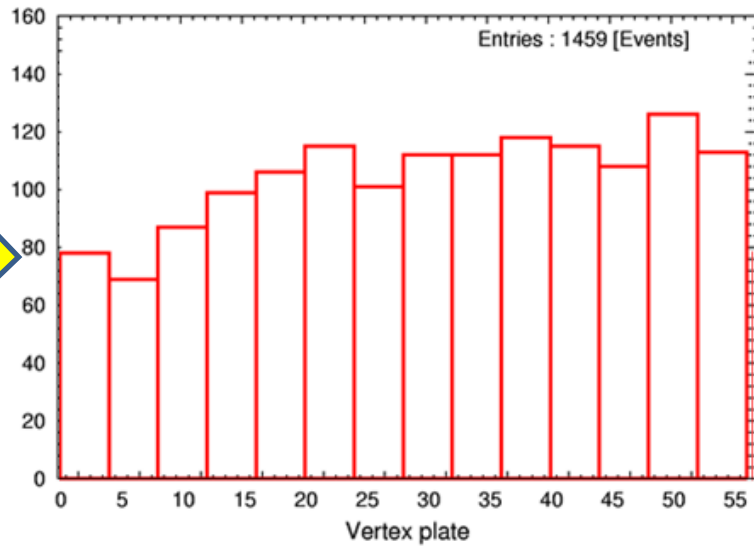
~ 1.2  
CS/EVent

2012 年度のイベントも既に届きだしている。

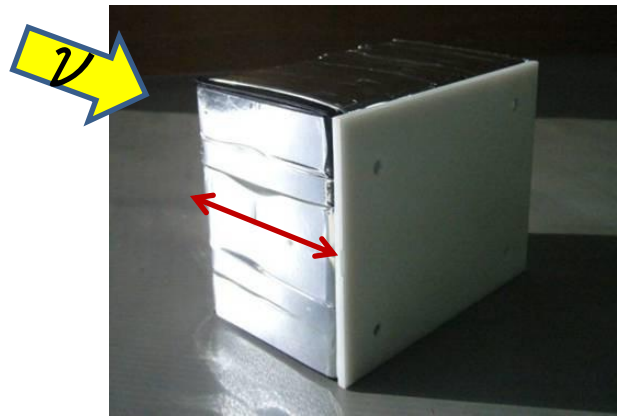
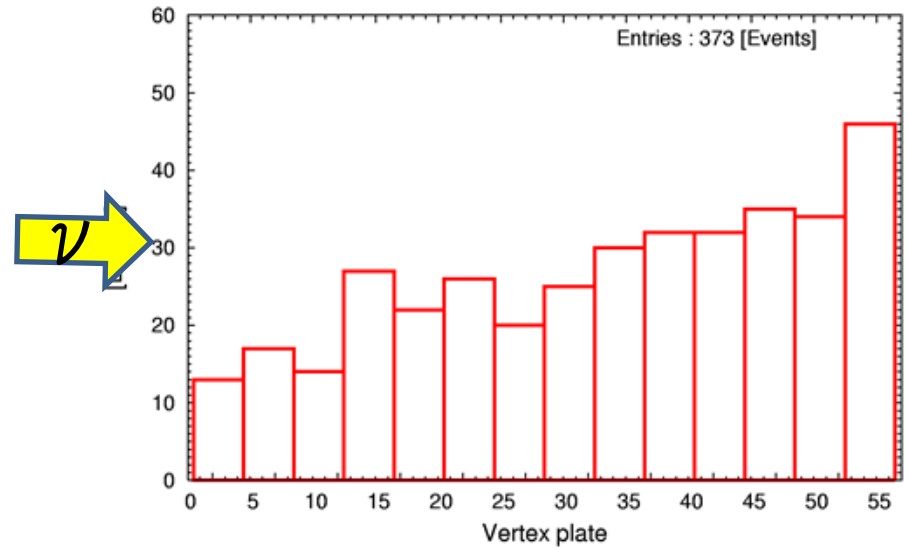


# 反応点探索バイアス(鉛プレート分布)

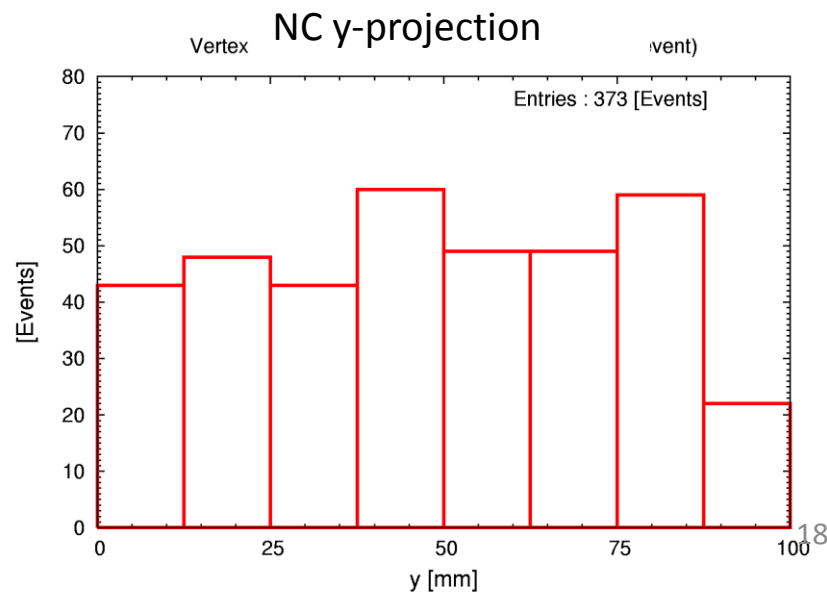
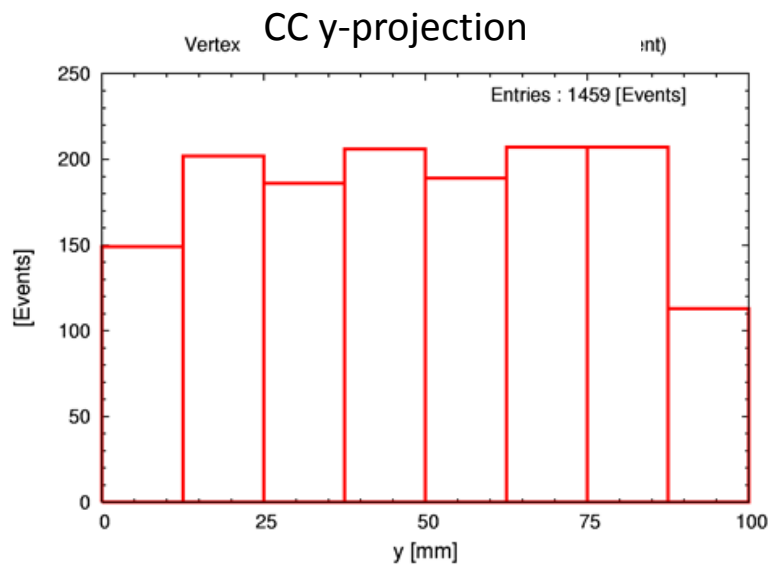
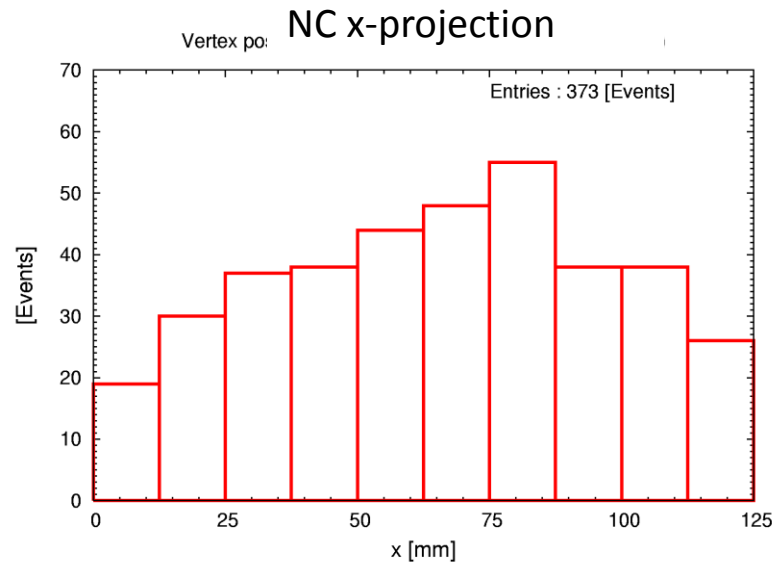
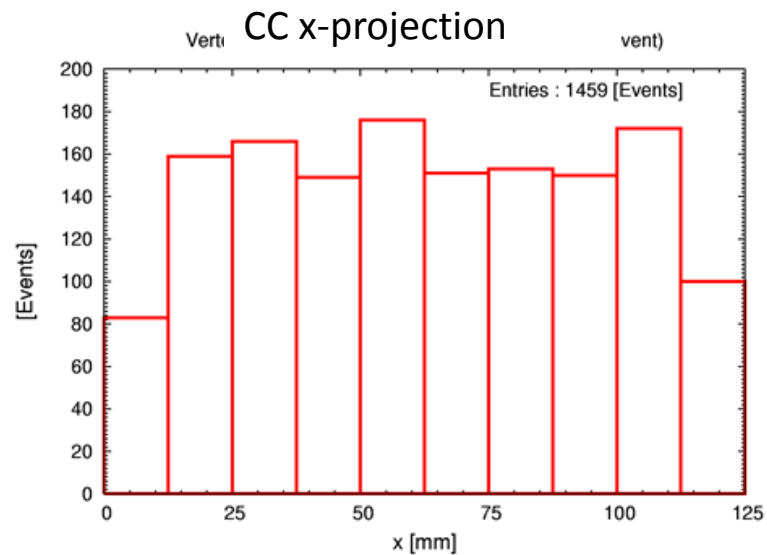
CC like



Vert NC like

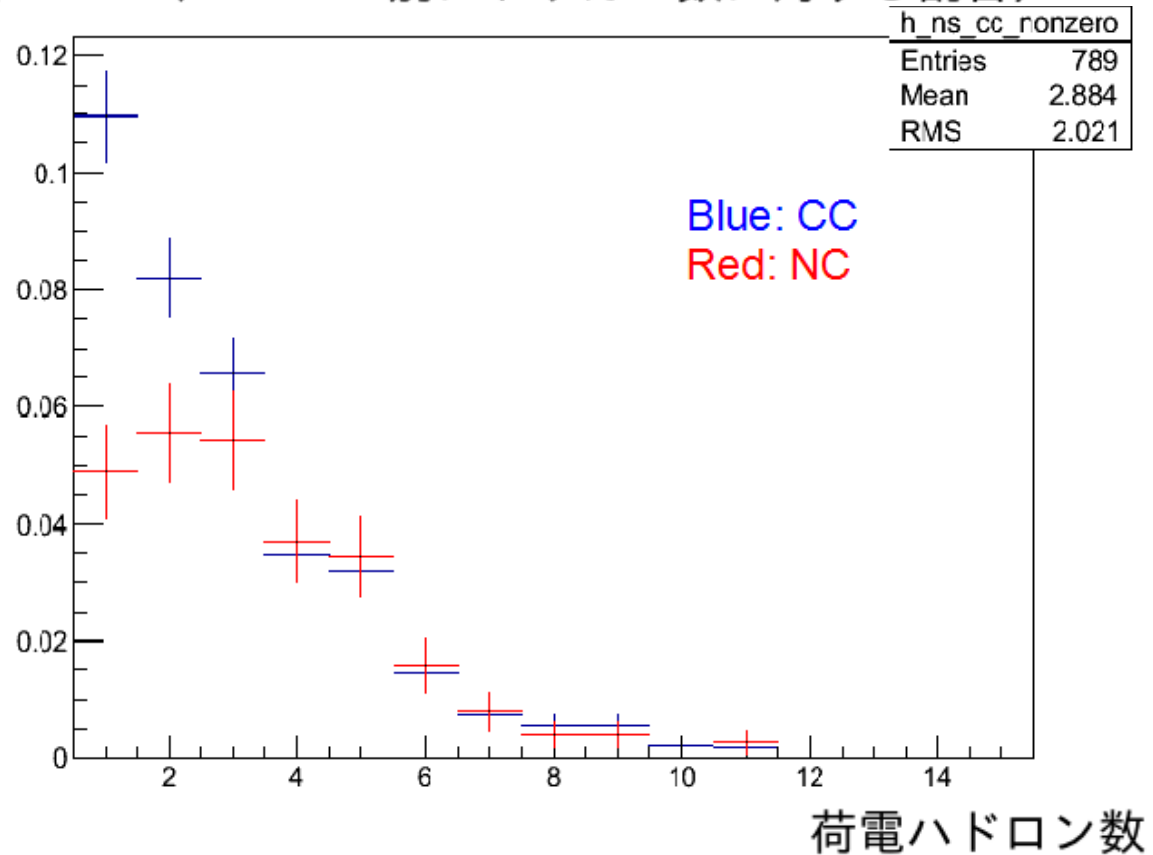
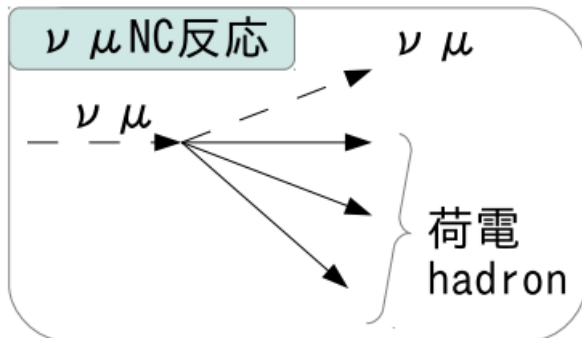
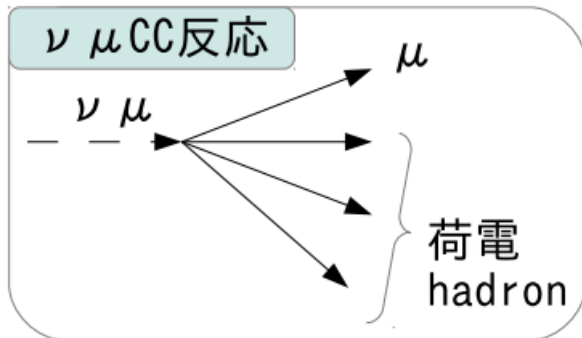


# XY平面分布

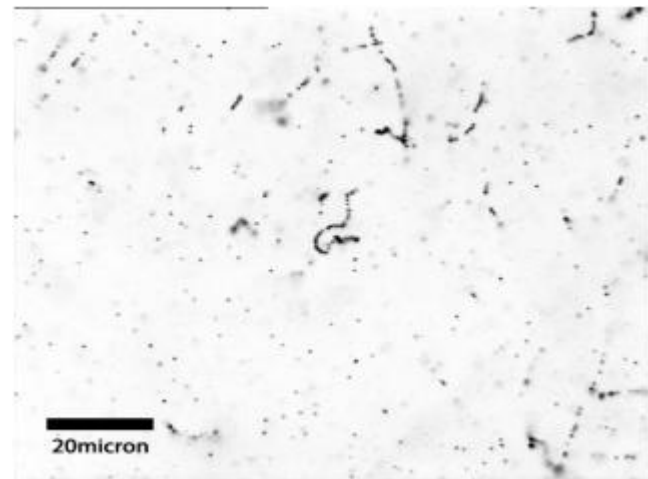
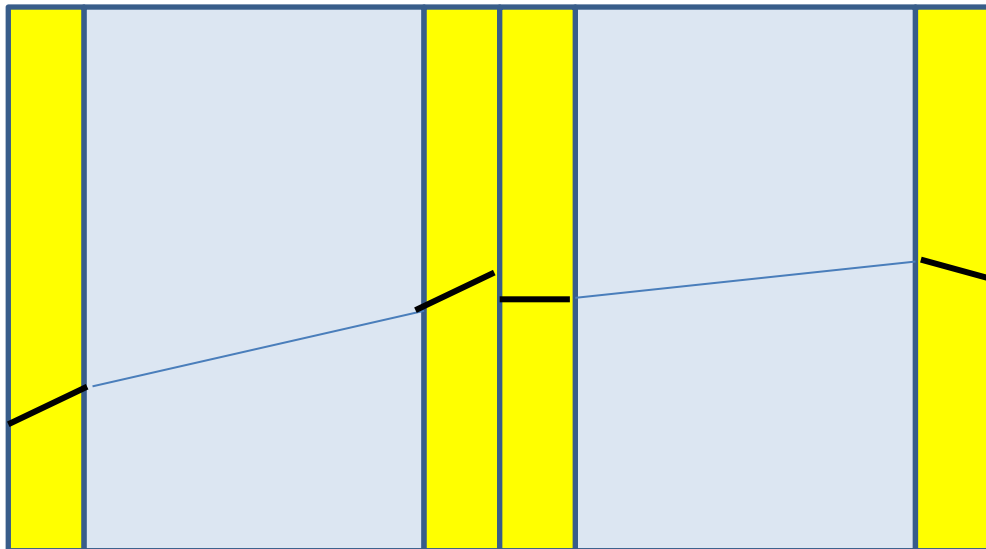


# 荷電ハドロン数による分布

反応点が確定したイベントの荷電ハドロン数による分布  
(CC-like、NC-like別にトリガー数に対する割合)

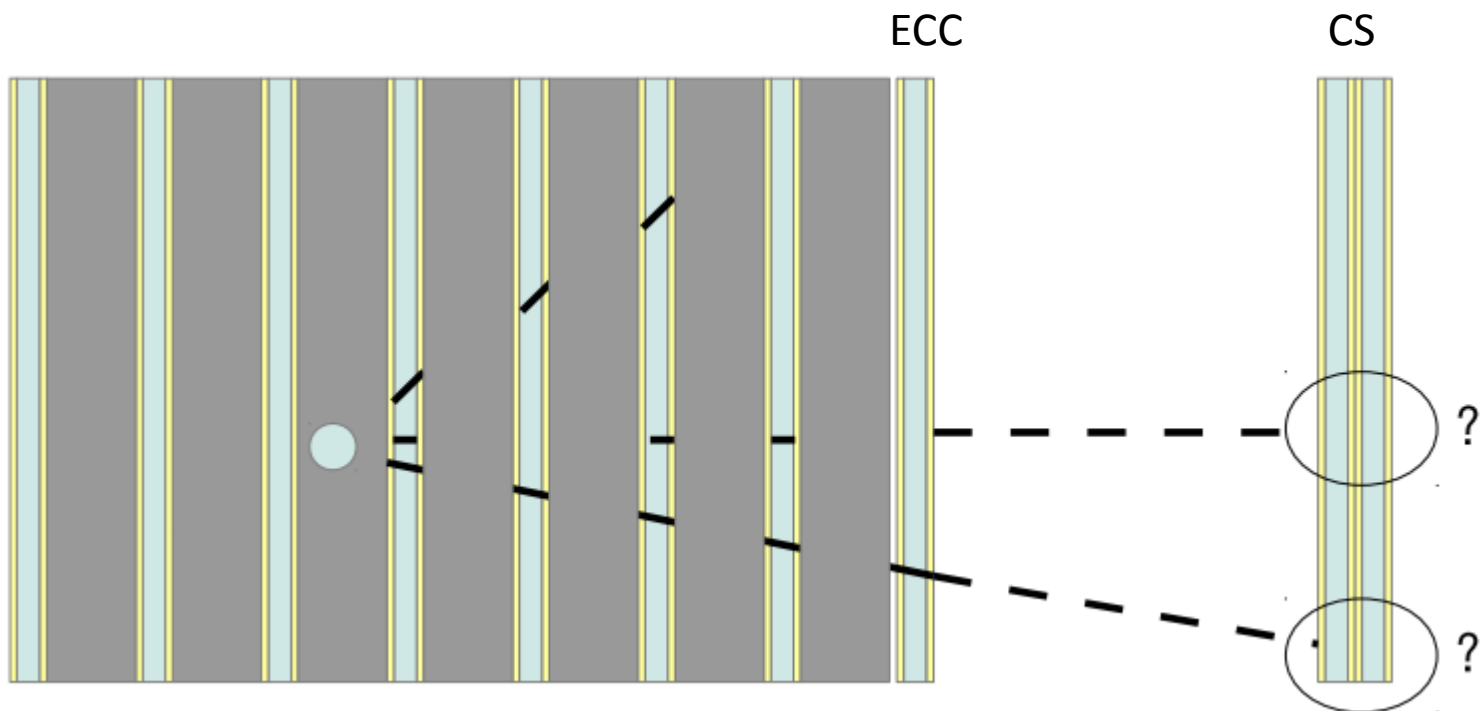


# CSでの飛跡検出手法



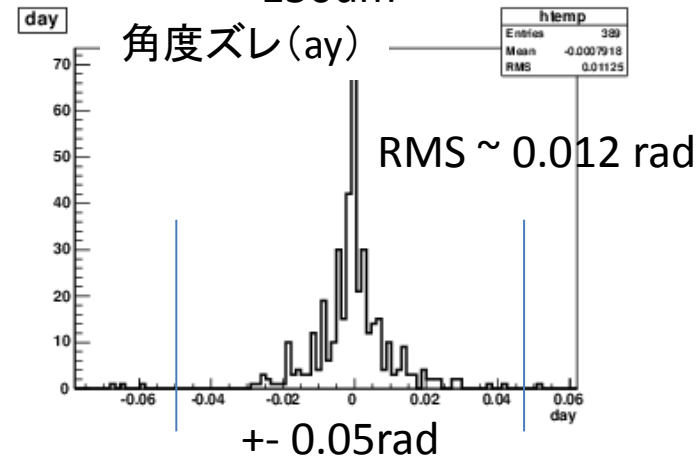
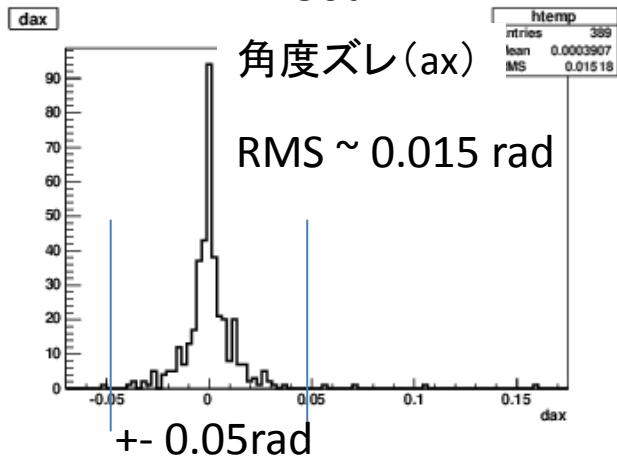
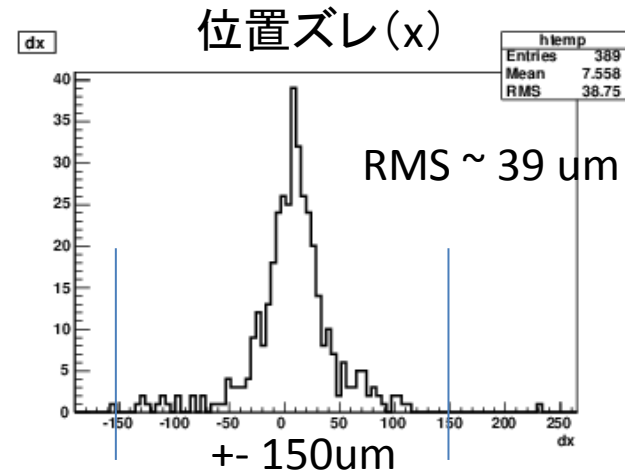
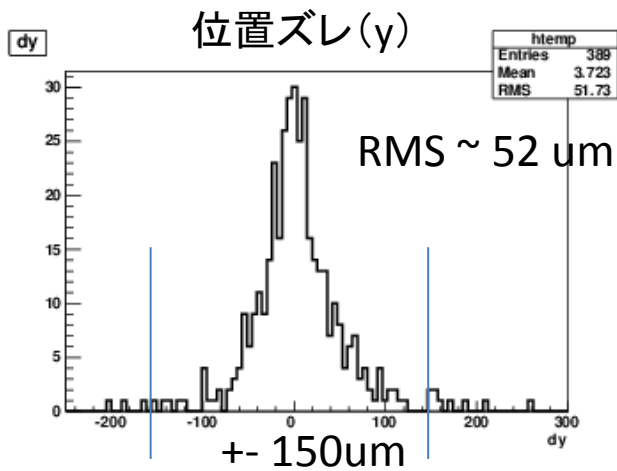
- 4層のコインシデンス -> 100万本/cm<sup>2</sup> -> 10 本/cm<sup>2</sup>
- ライクリフトによるシグナル候補ピックアップ -> BG density 0.2/cm<sup>2</sup>
  - PH(飛跡の濃さ)
  - ベーストラックの角度ずれ
  - ベーストラックとマイクロトラックの角度ずれ
- TTの信号との整合性がないものは人の目で候補から除外
- 肉眼観察でコンファーム -> BG ~ 0

# CSの飛跡検出効率

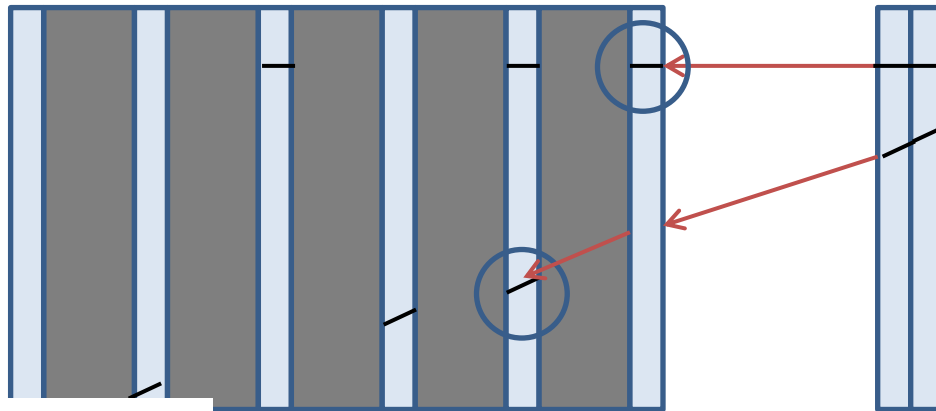


4層コインシデンス+ライクリフト 63%  
3層コインシデンス+ライクリフト 89%

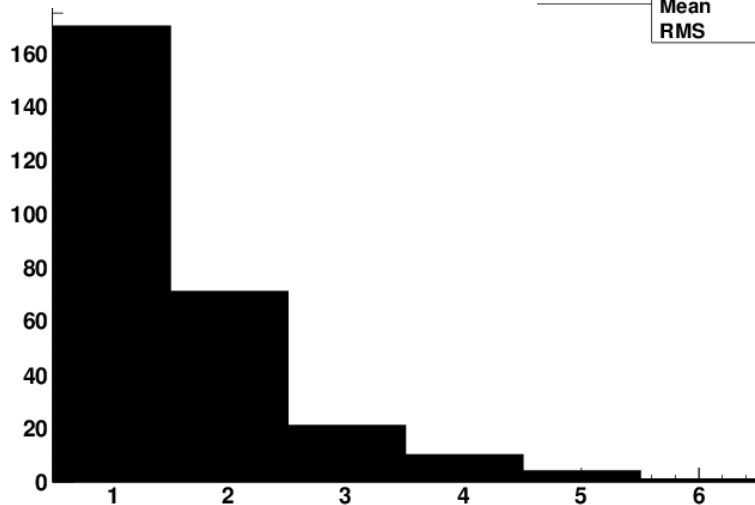
# CSからECCへの接続



# ECCでの検出効率

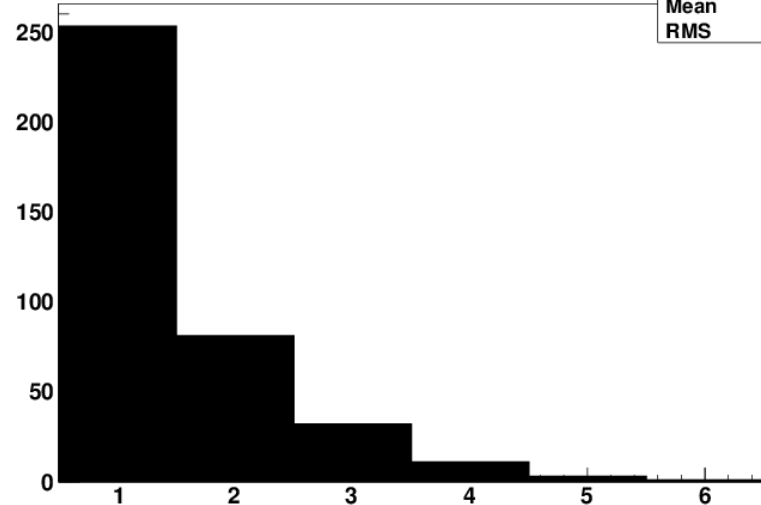


繋がった飛跡が何枚目から  
検出されたか(ミュオン)



hpl	
Entries	281
Mean	1.592
RMS	0.9248

[ ミューオン以外

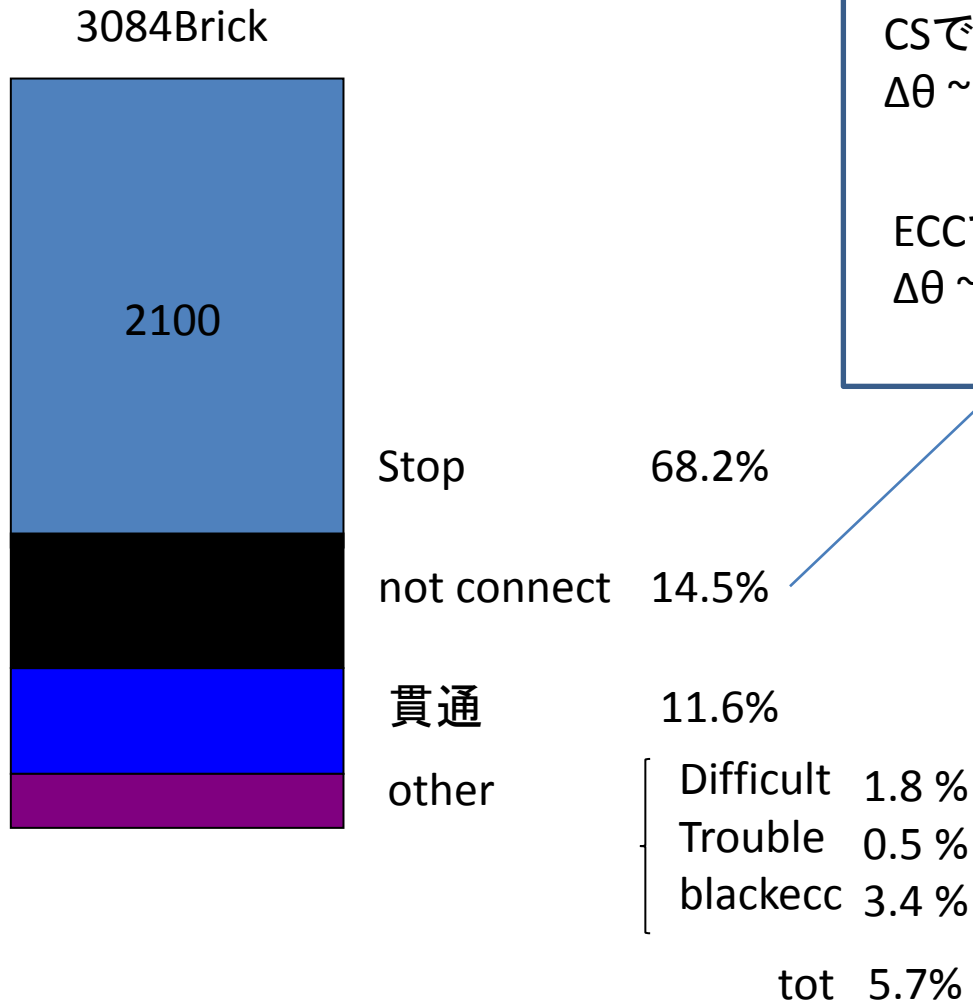


hpl	
Entries	389
Mean	1.512
RMS	0.8591

Eff ~ 62%

4枚みることで約98%の検出効率

# Scan Back の実績



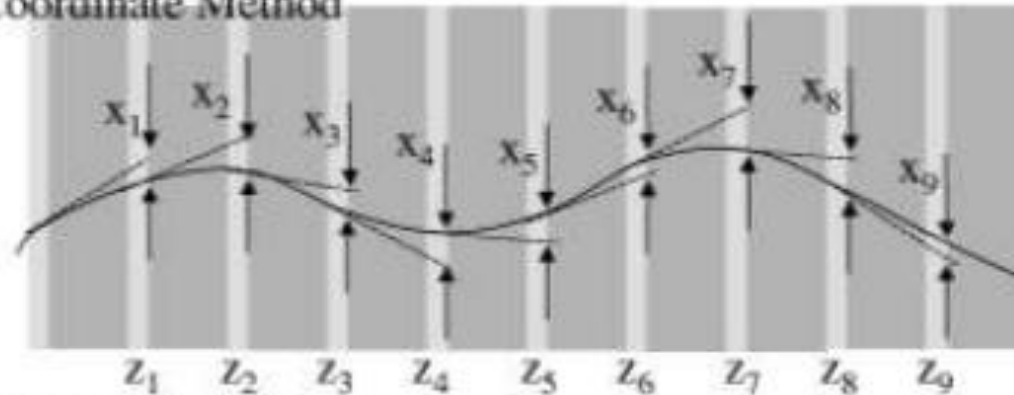
CSでの角度ずれアクセプタンス  
 $\Delta\theta \sim 20 \text{ mrad}$  (フィルム1枚)  $\rightarrow \sim 25 \text{ MeV}$

ECCでの角度ずれアクセプタンス  
 $\Delta\theta \sim 50 \text{ mrad}$  (鉛1枚)  $\rightarrow \sim 120 \text{ MeV}$

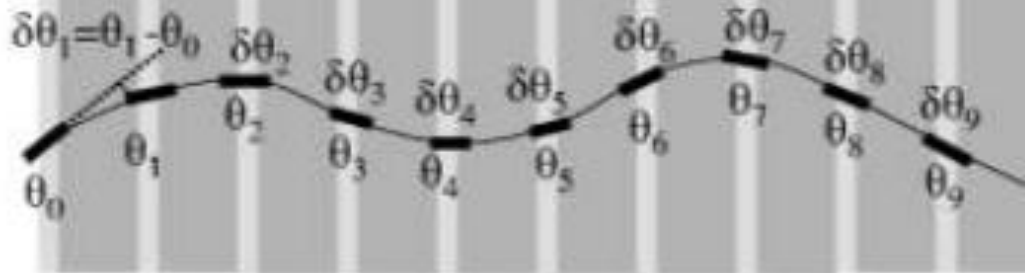


# Scan Back Track の運動量

Coordinate Method



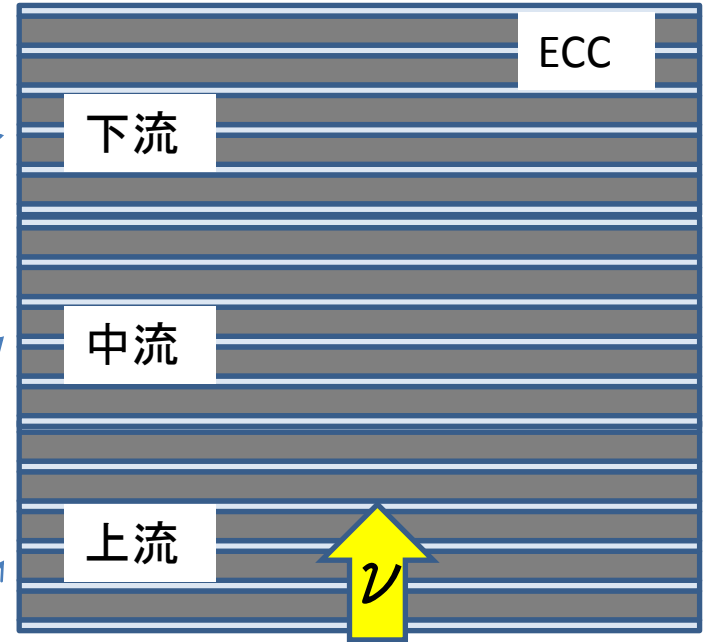
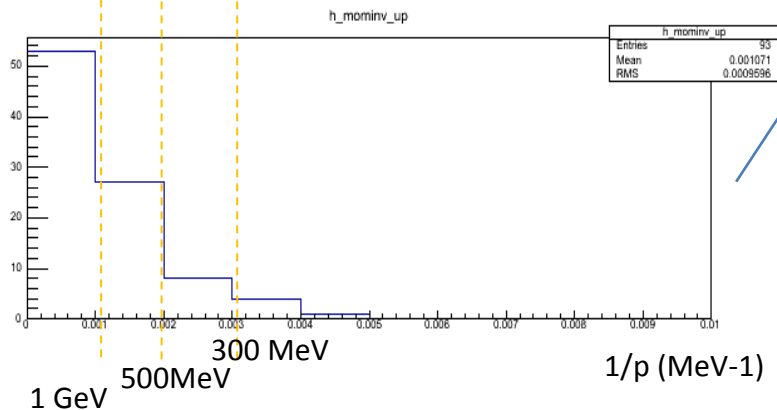
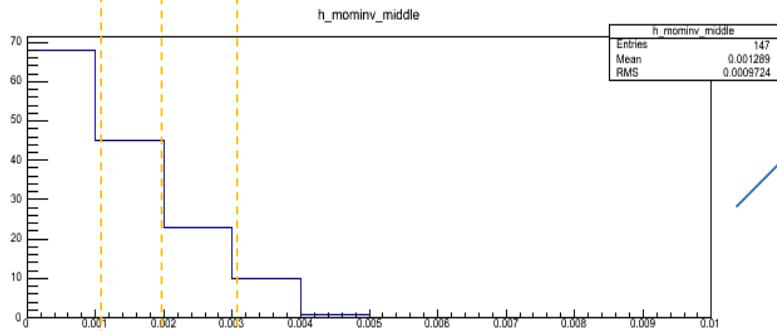
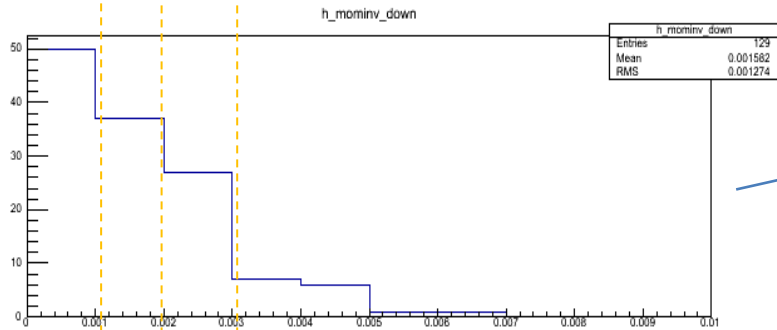
Angular Method



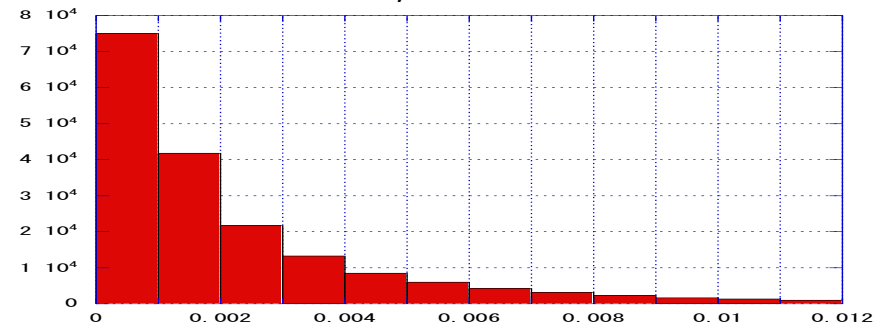
$$d\theta^{RMS} = \frac{13.6}{pc\beta} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left( 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right)$$

アングル法で計算した

# Scan Backして反応点確定したトラック の運動量(ミュー以外)



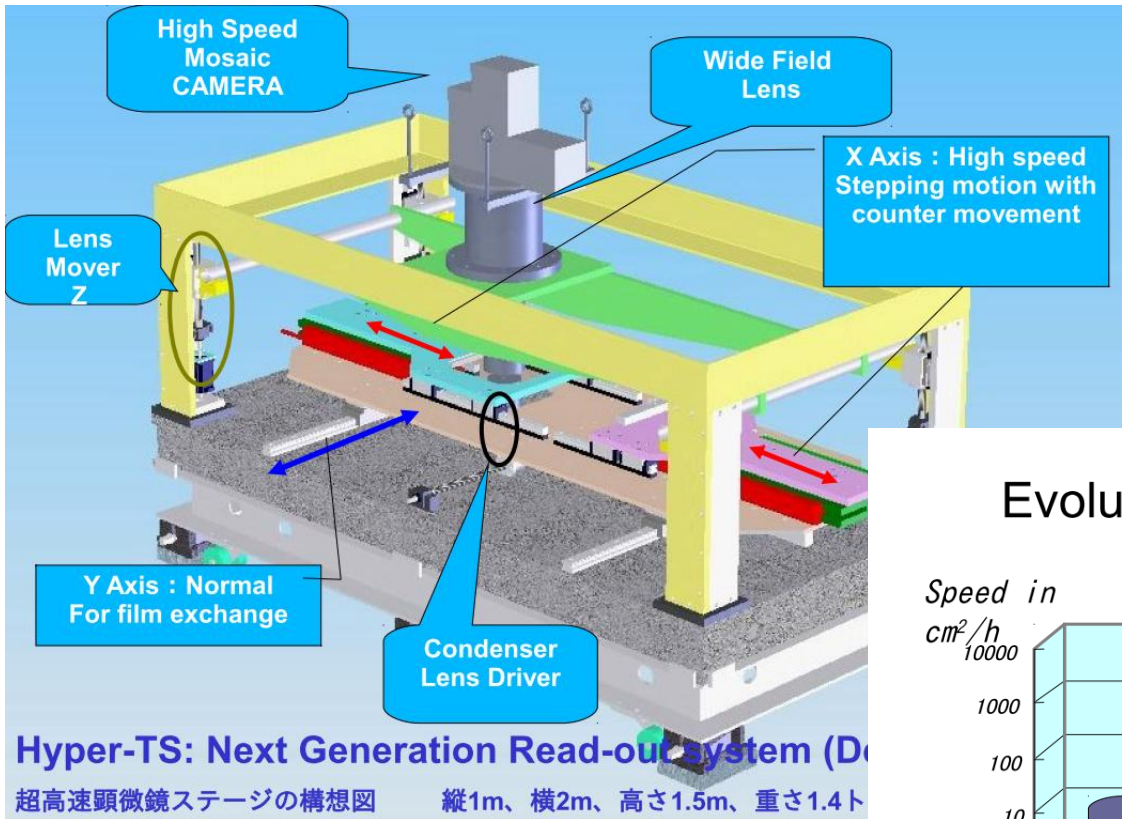
モンテカルロの1ry荷電粒子の運動量逆数分布



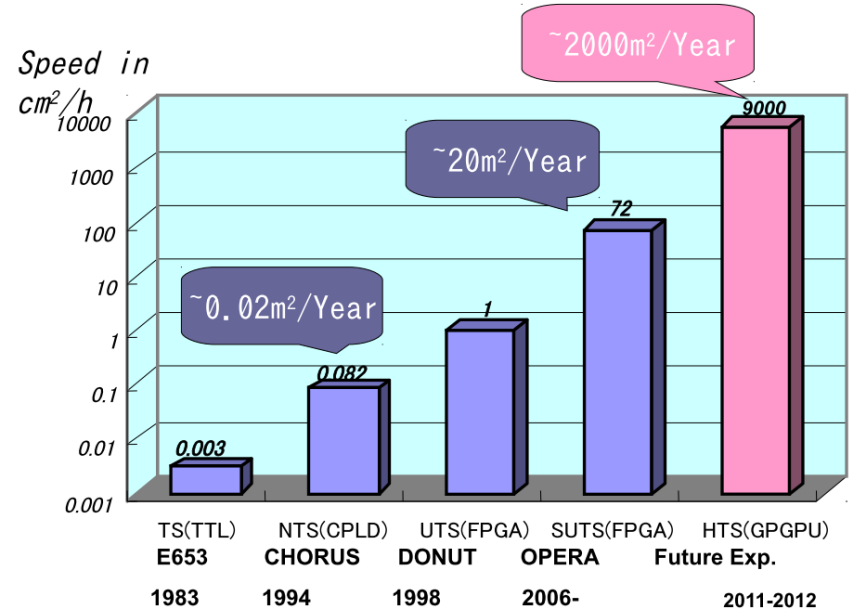
# まとめと今後

- 08, 09年度の実績より、トリガーからの efficiency $\sim$ 0.5程度でニュートリノ反応点の探索ができています。
- バイアスを理解し、検出効率を上げるための検証を行ってきている。
- 複数のCS解析をやり切れていない。
- 飛跡1本に対する検出効率が十分でない。
- 電磁シャワー成分など低エネルギー飛跡の追い上げが完全ではない。

# A Break through in near future



## Evolution of the Scanning Speed



# HTSを使い倒す

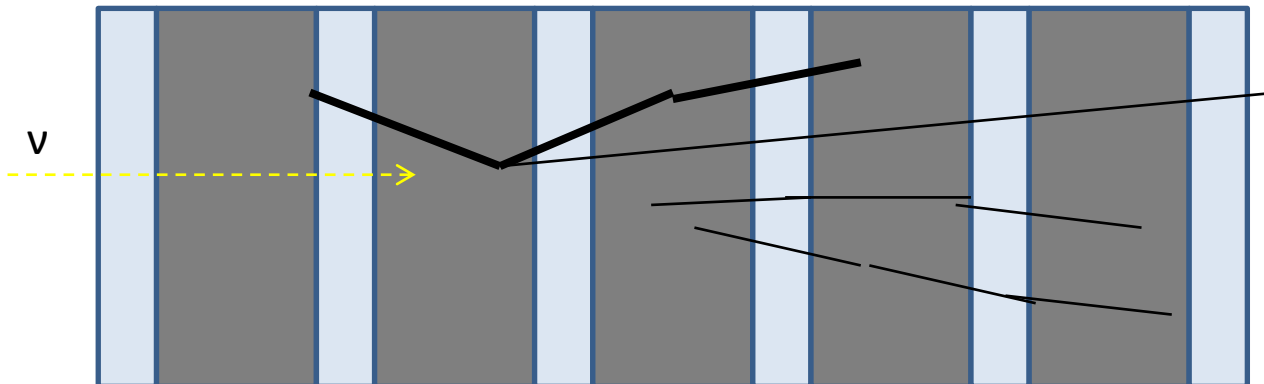
- CSを複数枚どんどん解析

- S/N向上計画

16層スキャン → 32層スキャンによる情報量アップ → S/N上げて検出効率向上

- ECCを直接解析

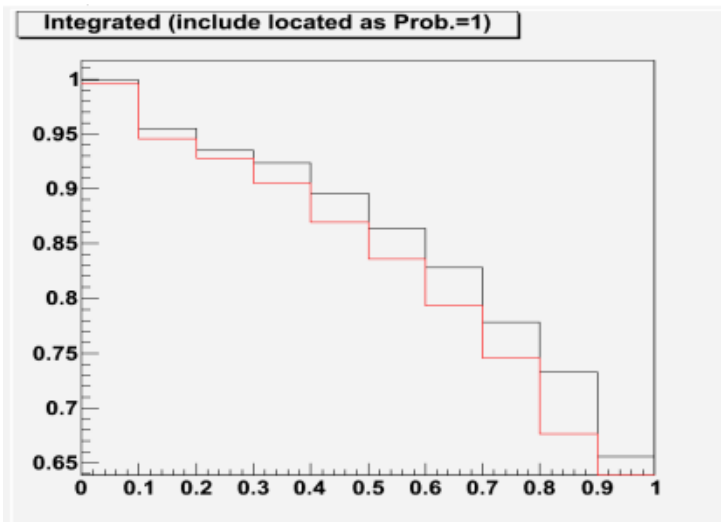
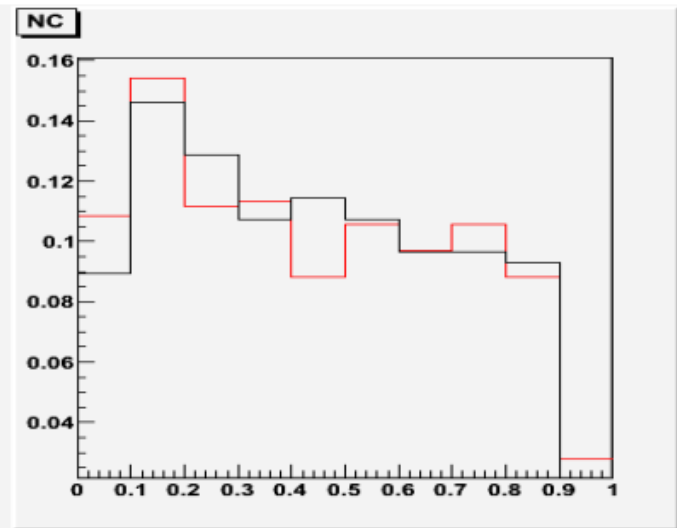
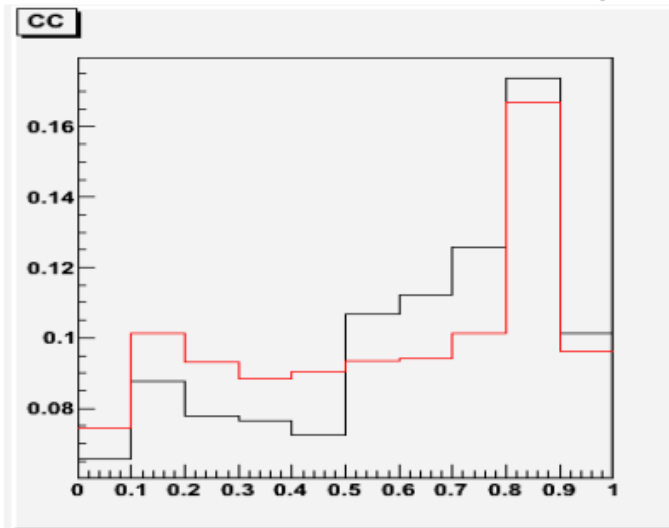
核破碎片、電磁シャワー(もちろんMIPも)をECC中で直接検出する手法開発



以上です。

# Backup

## Probability of Arrived Brick





複数のCSを解析しきったときの反応点検出効率の見積もり

仮定：

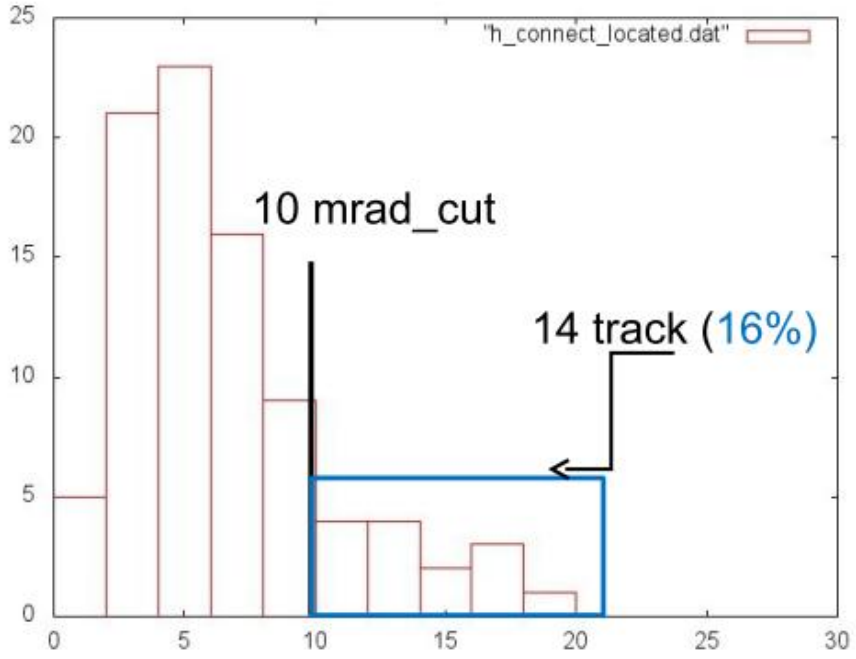
- そのECCで反応点が特定されなければ次のCSを解析する。
- 現状と同じ割合で反応点が特定できる。

2008、2009年度 の解析データから		CC		NC	
		現状	やりきったとき の見積もり	現状	やりきったとき の見積もり
1st CS	解析イベント数	1811	1811	755	755
	反応点確定数	841(46%)	841	211(28%)	211
2nd CS	解析イベント数	647(67%)	970	305(56%)	544
	反応点確定数	141(22%)	211	33(11%)	59
3rd CS	解析イベント数	182(24%)	759	126(26%)	485
	反応点確定数	16(9%)	68	4(3%)	15
4th CS	解析イベント数	59(9%)	691	62(13%)	470
	反応点確定数	3(5%)	35	4(6%)	30
反応点検出効率		55%	64%	33%	42%

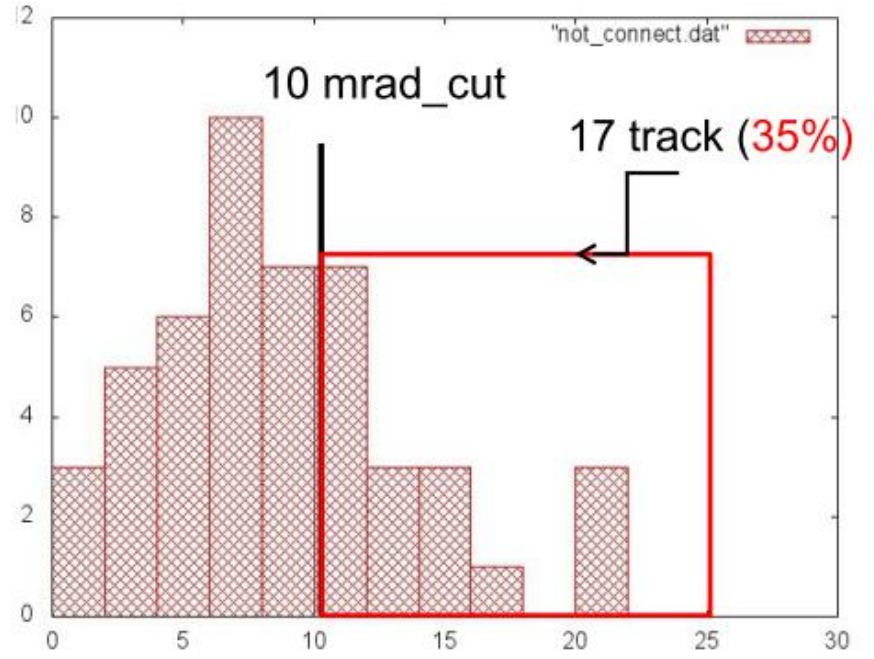
約2割増

約3割増

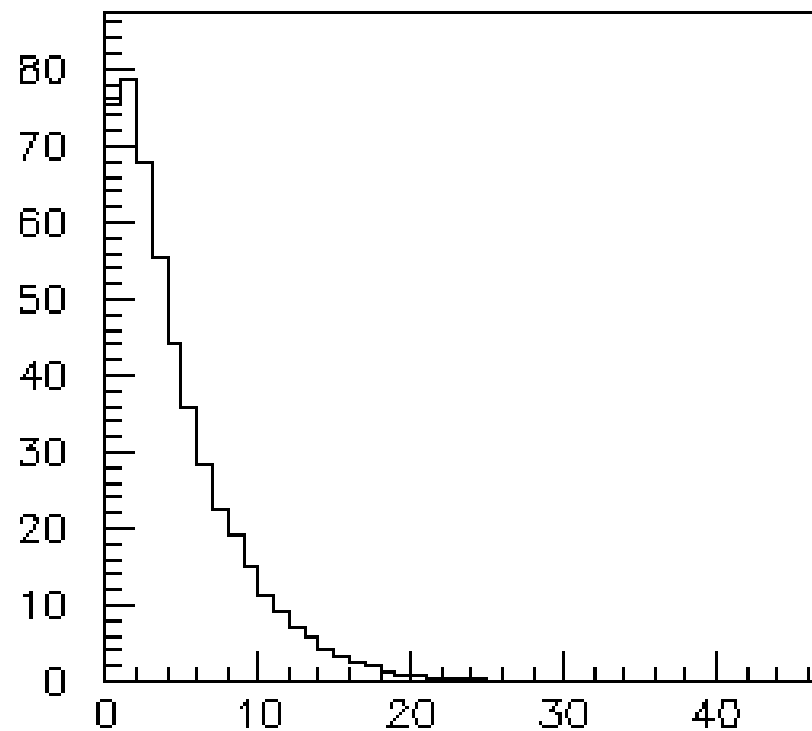
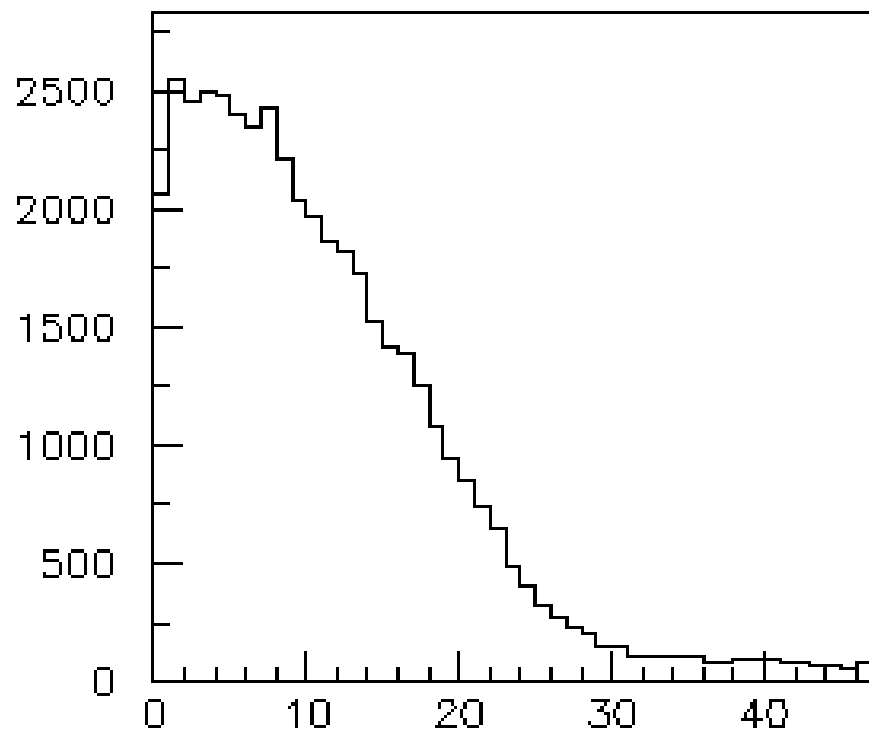
Hadron\_connect\_Located  
(88 track)



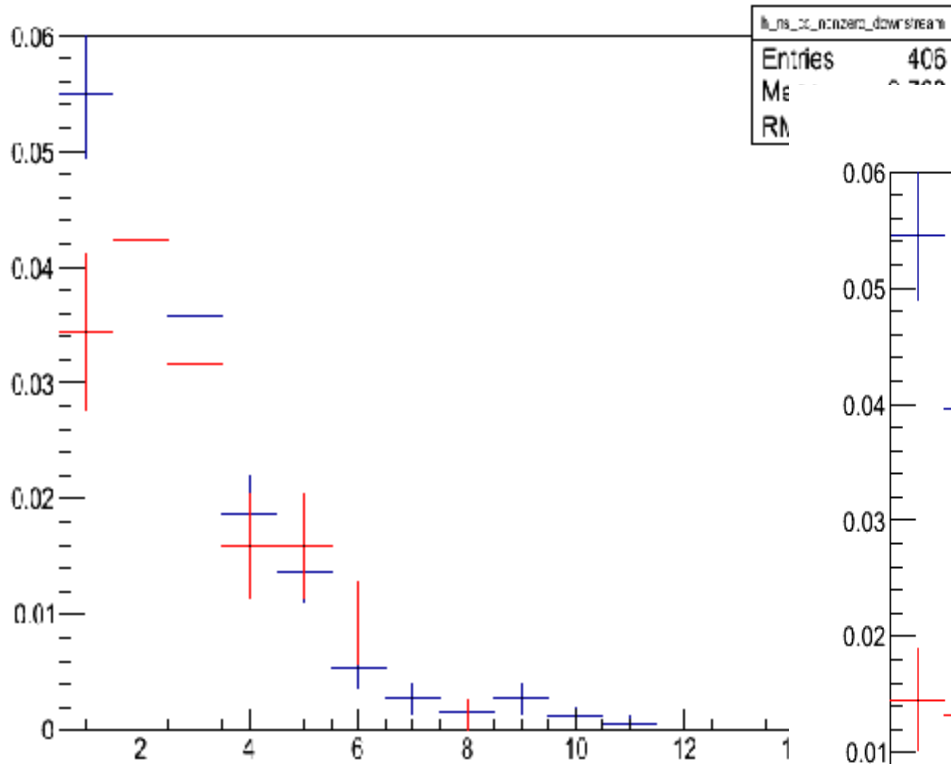
not\_connect  
(48 track)



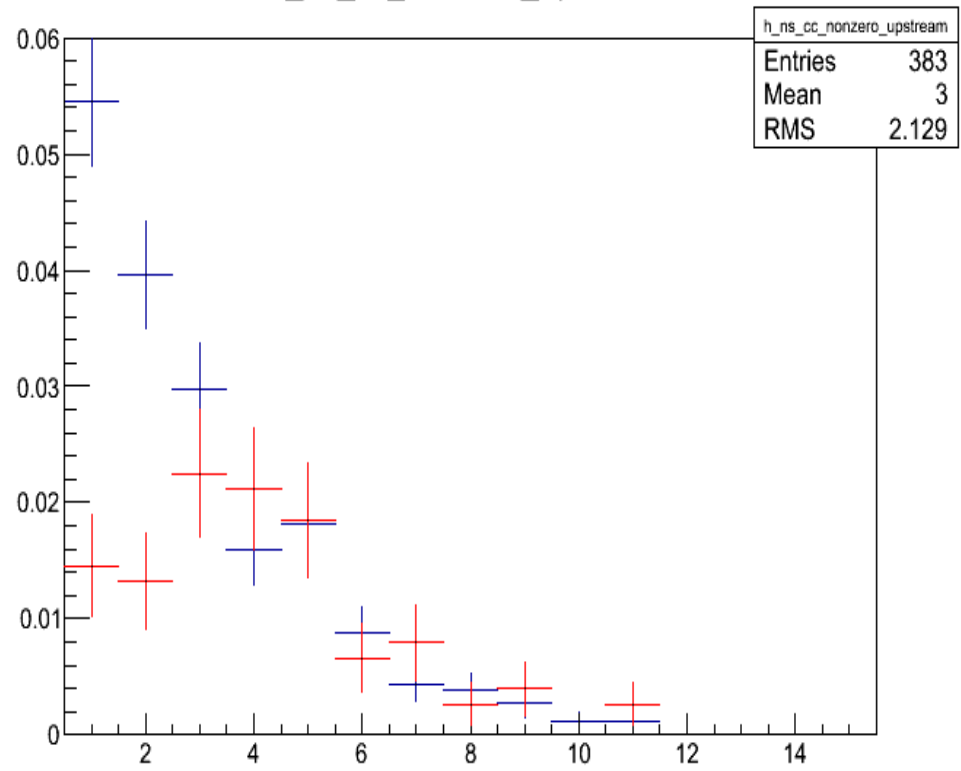
# $\tau$ に的を絞ったイベントセレクション



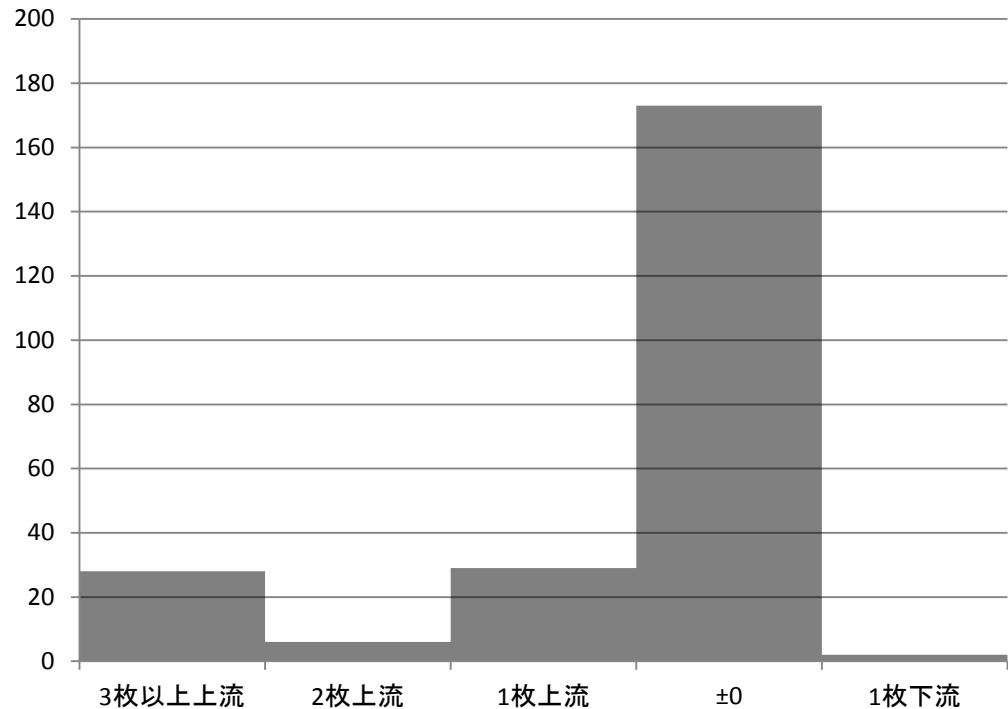
h\_ns\_cc\_nonzero\_downstream



h\_ns\_cc\_nonzero\_upstream

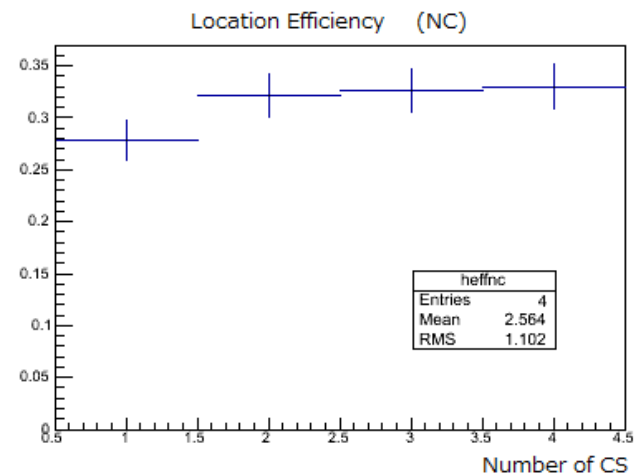
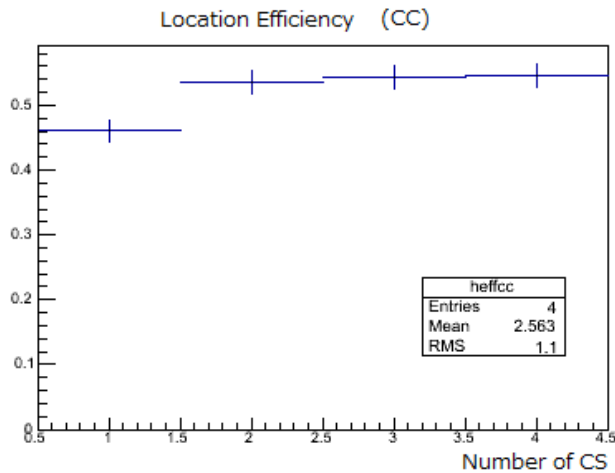
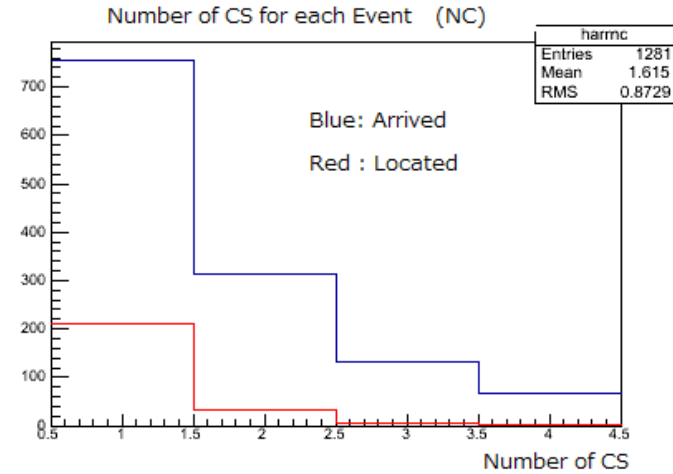
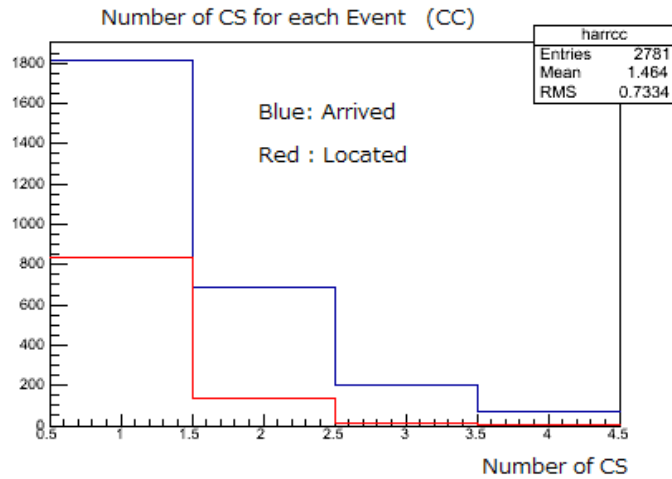


# SBストップ<sup>o</sup>→VH



Netscan は SB stop plateの上流3枚までscanしているので、vertex plateが1枚程度上流でもそれほど問題にならないが、3枚以上だと再SB、再Netscanが必要になる  
(1枚違いはOKとするなら 間違い率は 14.3%)

# CSの数

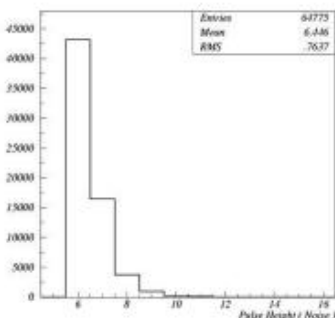
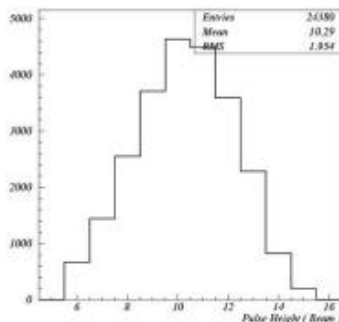


# ライクリフト

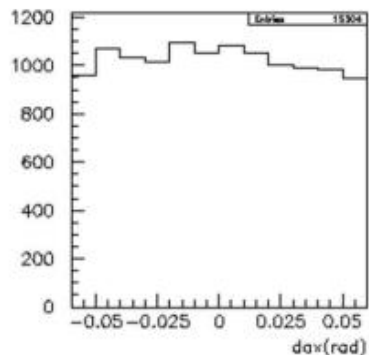
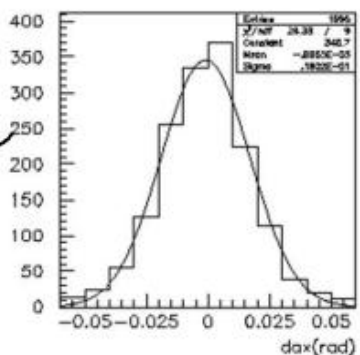
高エネルギー粒子

コンプトン電子

PH分布



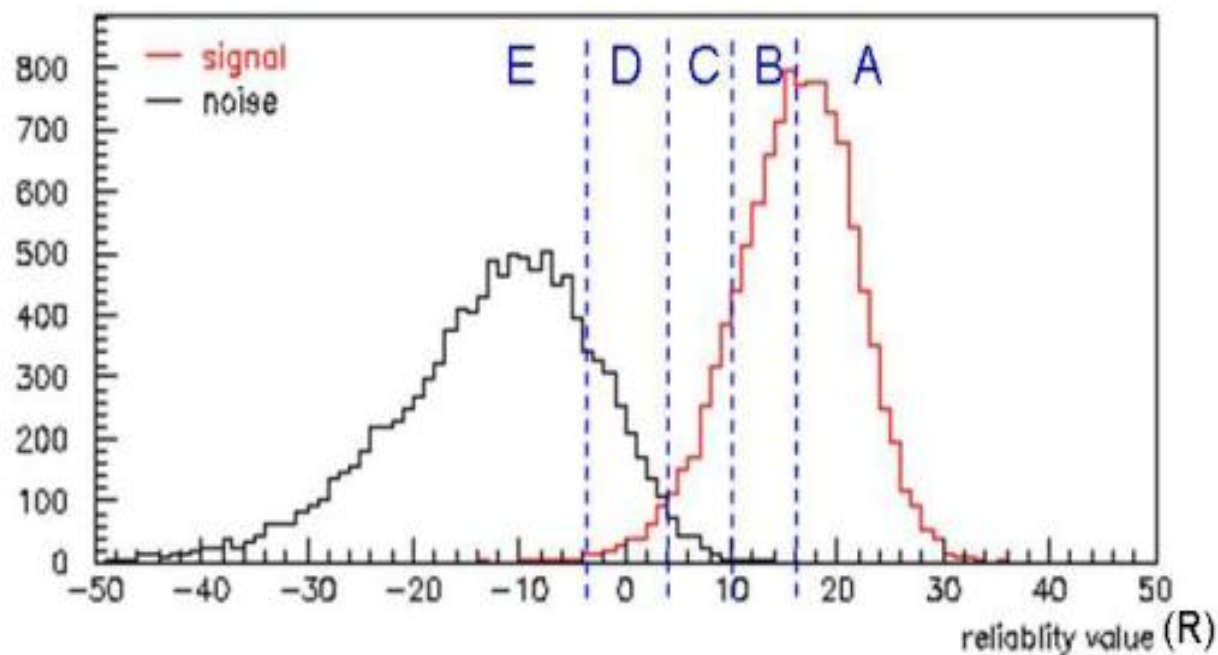
角度ズレ分布



$$L^{signal} = \prod_{i=1}^4 P_{PH_i}^{signal}(\theta) * \prod_{i=1}^8 P_{dA_{micro}_i}^{signal}(\theta) * P_{dA_{base}_i}^{signal}(\theta)$$

$$L^{noise} = \prod_{i=1}^4 P_{PH_i}^{noise}(\theta)$$

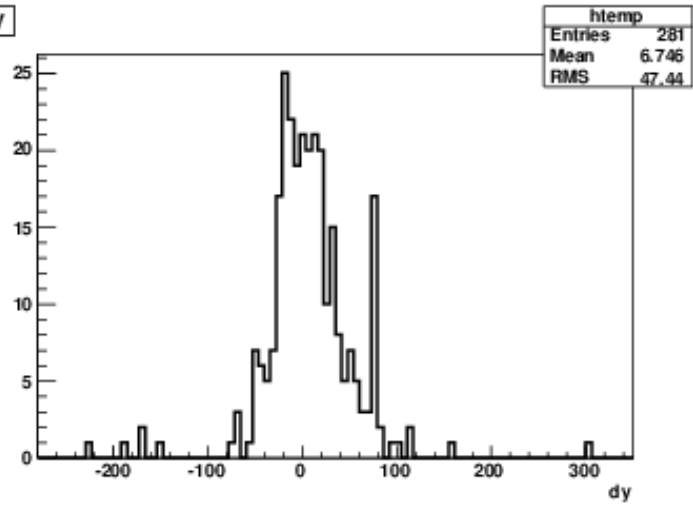
$$Reliability\ Value: R = \log \frac{L^{signal}}{L^{noise}}$$



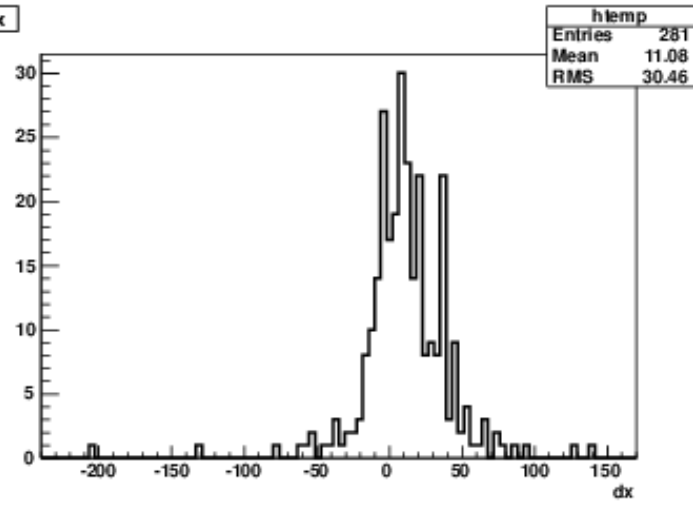
Track Rank	The reliability as real track	Tracking efficiency (%)	BG density (/cm <sup>2</sup> )
A	$R > 16$	43	0.001
B	$16 > R \geq 10$	68 (A, B)	0.01
C	$10 > R \geq 4$	77 (A~C)	0.2
D	$4 > R \geq -4$	79 (A~D)	1.6
E	$-4 > R$	79 (A~E)	8



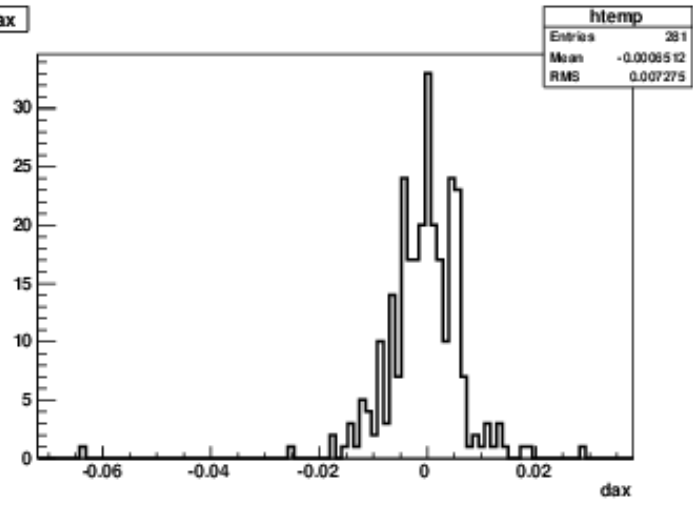
dy



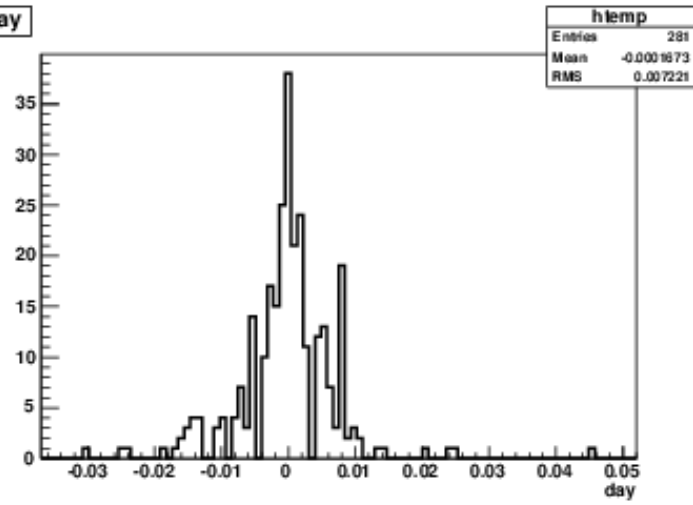
dx

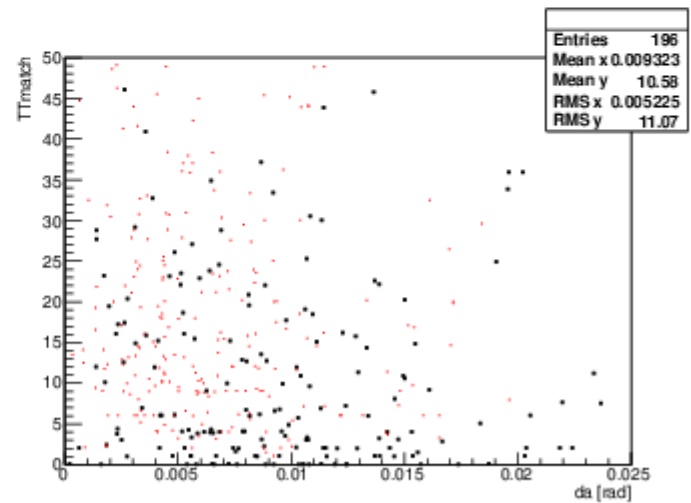
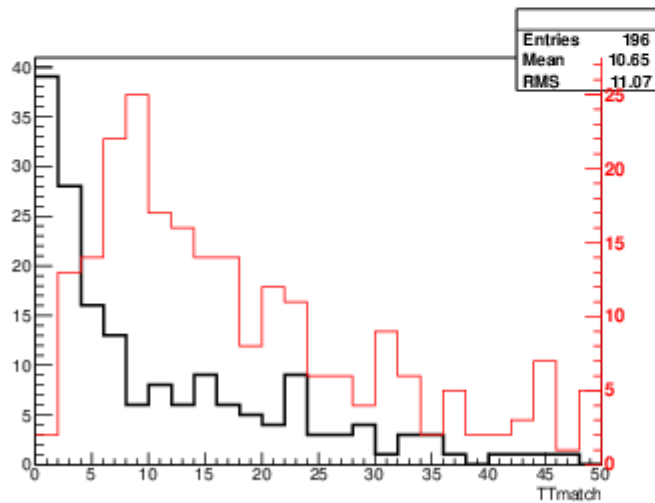
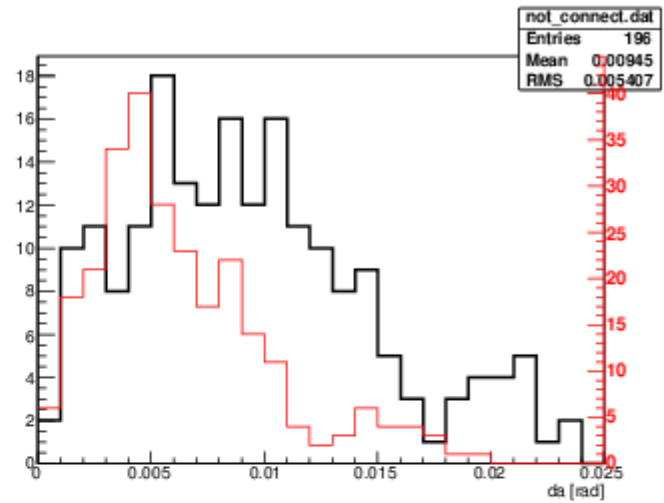
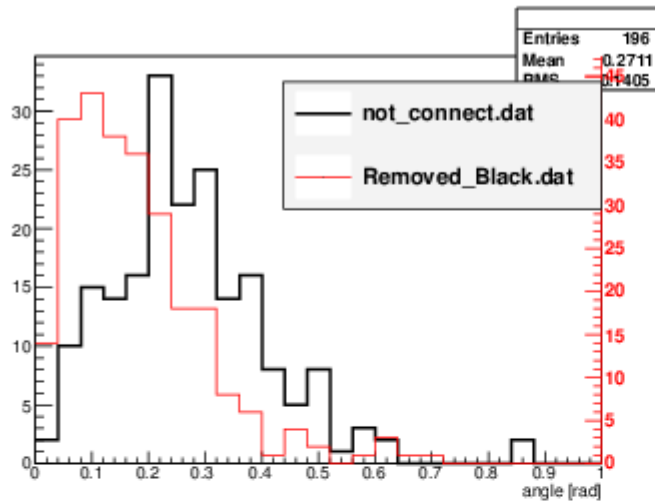


dax

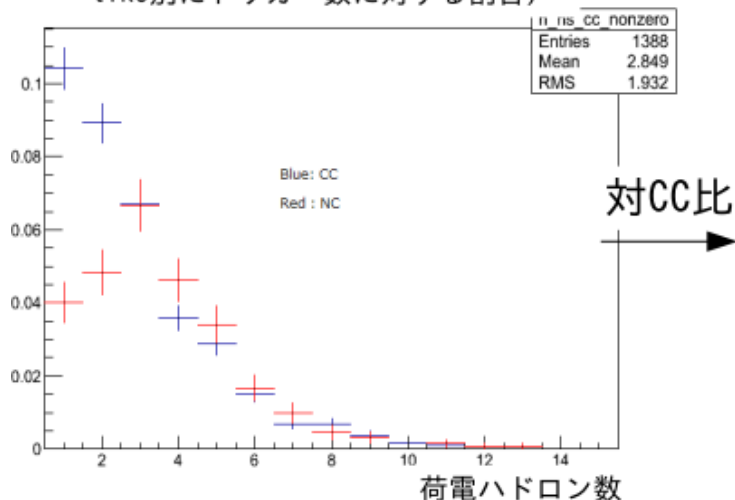


day

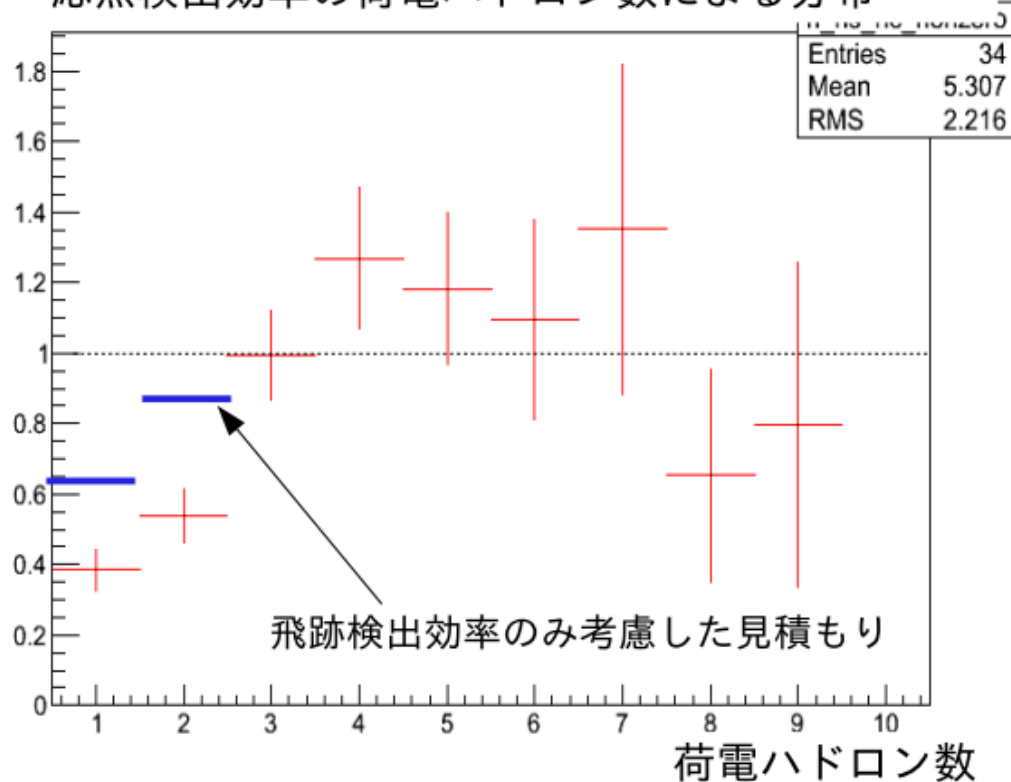




反応点が確定したイベントの荷電ハドロン数による分布(CC-like、NC-like別にトリガー数に対する割合)



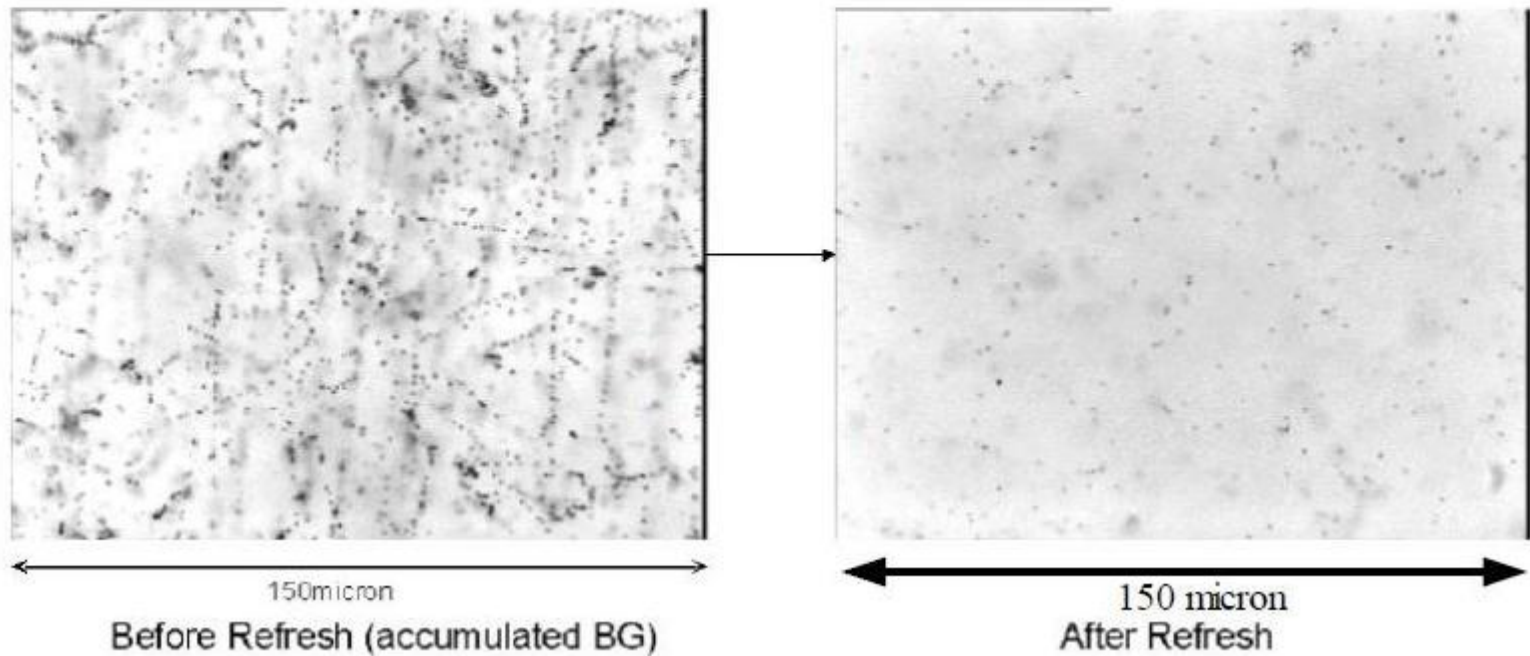
NC-likeイベントのCC-likeイベントに対する反応点検出効率の荷電ハドロン数による分布



対CC-likeイベント比でのロス

## リフレッシュ

温度30°C、湿度90%で3日



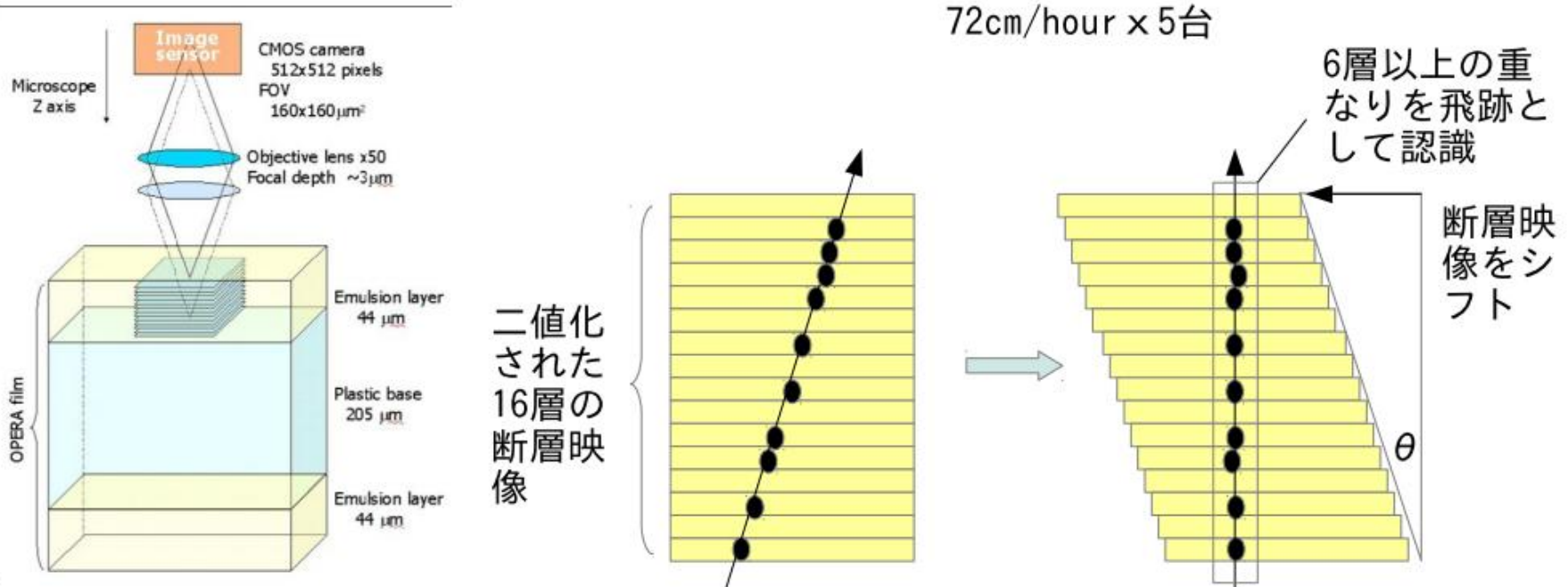
# OPERAフィルムの読み出し

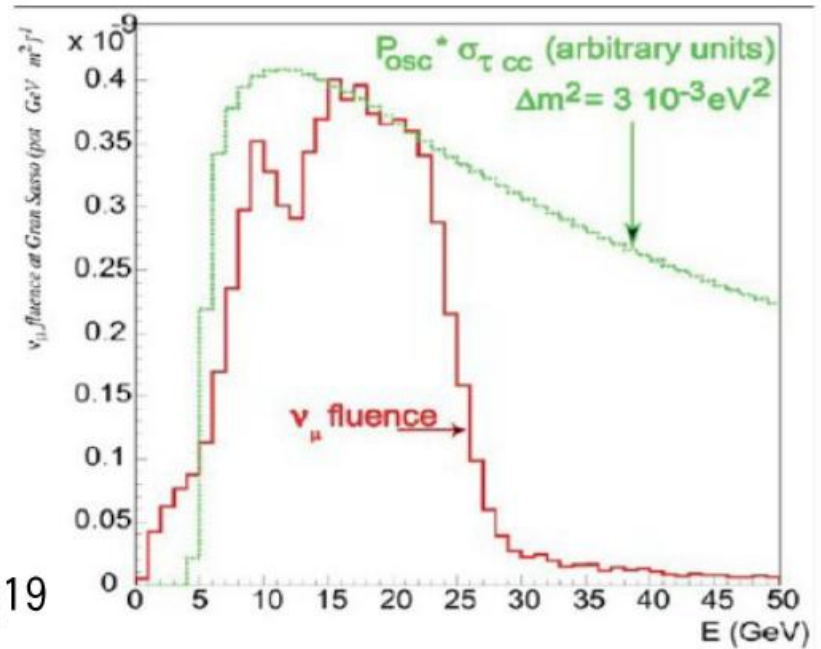
自動飛跡読取装置S-UTSによって飛跡をよみだす。

1. 乳剤層を16層に分割した顕微鏡断層映像を取得
  2. グレインのあるなしで二値化
  3. 各断層映像を(認識したい角度) $\times$ (高さ)だけずらす
  4. 6層以上のグレインの重なりを飛跡として認識
- 位置、角度、層の数(PH)、飛跡の濃さ(VPH)を出力



72cm/hour  $\times$  5台



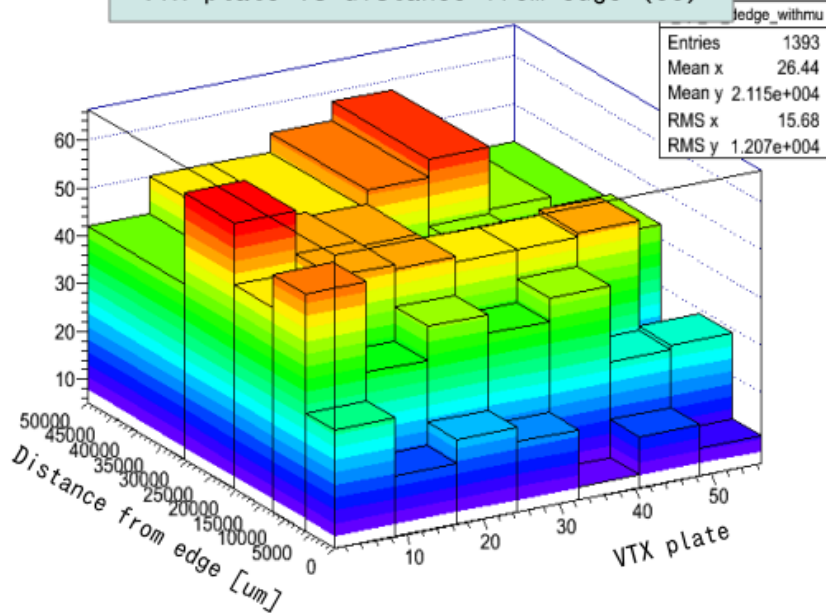


プロポーザルでのPOT :  $22.5 \times 10^{19}$

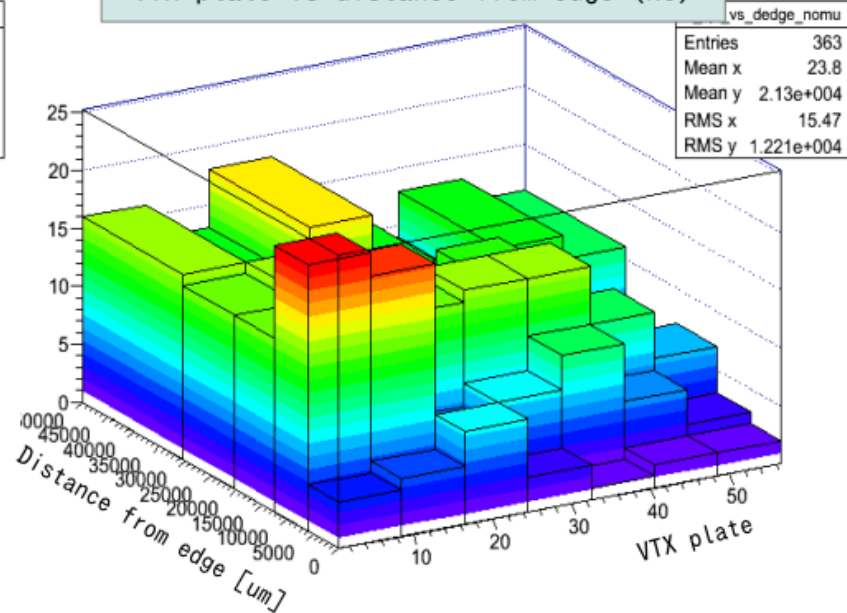
年度	POT	積分POT (プロポーザル比)	トリガーされた反応数
2008	$1.78 \times 10^{19}$	7.9%	1698
2009	$3.52 \times 10^{19}$	23.6%	3693
2010	$4.04 \times 10^{19}$	41.5%	4248
2011	$4.84 \times 10^{19}$	63.0%	4265
2012	$\sim 4.5 \times 10^{19}$	$\sim 83\%$	-

# Edgeの検出効率

VTX plate vs distance from edge (CC)



VTX plate vs distance from edge (NC)



## 崩壊事象の探索

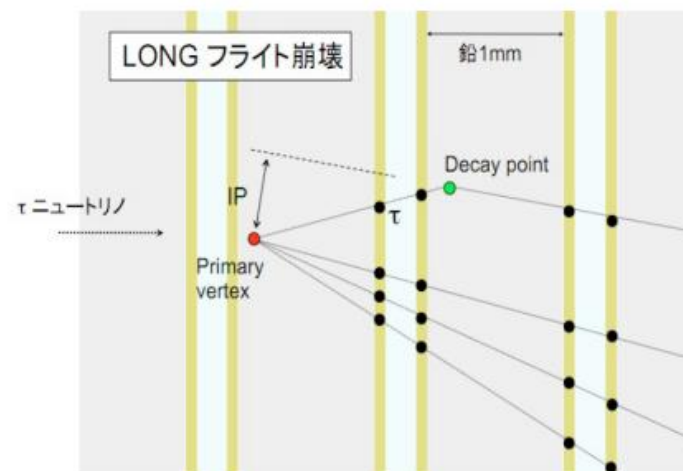
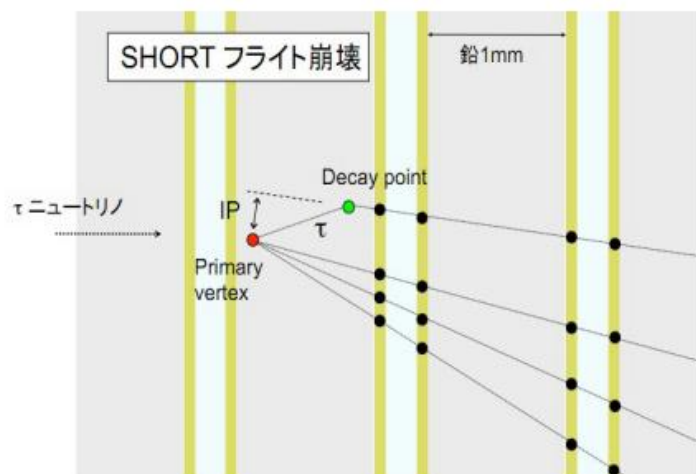
$\tau$  崩壊の約80%は荷電粒子1本

確定した反応点に対して大きなIPを持つ娘粒子候補を探す。

Decay topology	Decay mode	Branching (%)
Kink	$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	18
	$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	17
	$\tau^- \rightarrow h^-(nh^0) \nu_\tau$	50
Trident	$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ (nh^0) \nu_\tau$	15
計		100

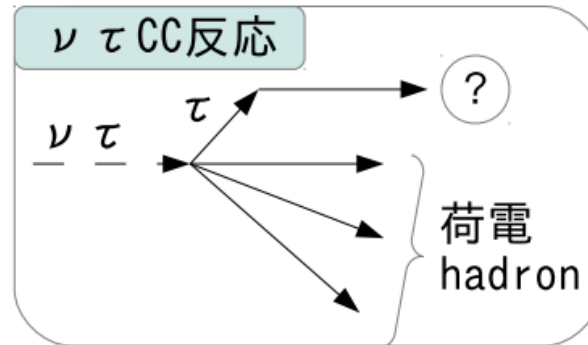
システマティックな探索条件：

- フィルム3枚以上で再構成されている。
- $IP > 10 + 0.01x$  (鉛中の深さ)





## NC-likeイベントの重要性



Decay topology	Decay mode	Branching (%)
Kink	$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	18
	$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	17
	$\tau^- \rightarrow h^-(nh^0) \nu_\tau$	50
Trident	$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ (nh^0) \nu_\tau$	15
計		100

NC-like

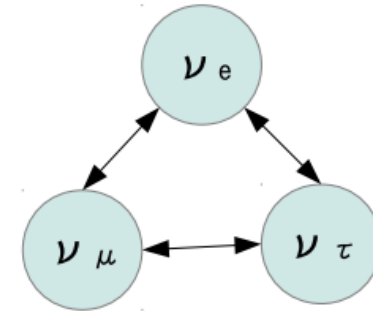
イベント数の比率 → CC反応:NC反応~3:1



NC-like反応のひとつの重みはCC-like反応に対して約12倍

## ニュートリノ振動

ニュートリノ振動：  
 ニュートリノに質量があれば、飛行中に別の種類に変化  
 (1962年、牧、中川、坂田)



$$\begin{pmatrix} |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} \longrightarrow$$

シュレーディンガー方程式によって時間とともに混合の割合が変化

弱い相互作用  
の固有状態

質量固有状態

$$\text{振動確率： } P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau; L) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \cdot \Delta m^2 [eV^2] \cdot L [km]}{E [GeV]}$$



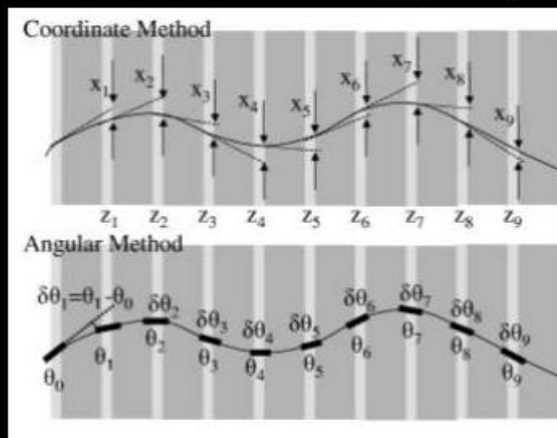
振動によってある種のニュートリノが消滅  
(減少する)

振動によって別種のニュートリノが出現する

# ECC features

## Momentum measurement

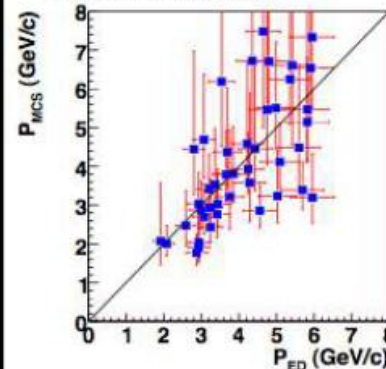
Measurement of the position or angular displacement given by Multiple Coulomb Scattering (MCS)  
 Ref: New Journal of Physics 14(2012)013026



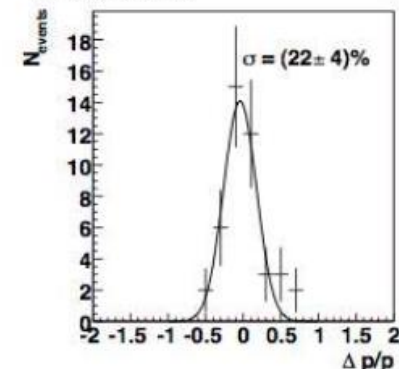
$$d\theta^{RMS} = \frac{13.6}{pc\beta} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left( 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right)$$

## Soft muon data sample

Muon momenta measured by MCS as a function of the momenta obtained from the electronic detectors.

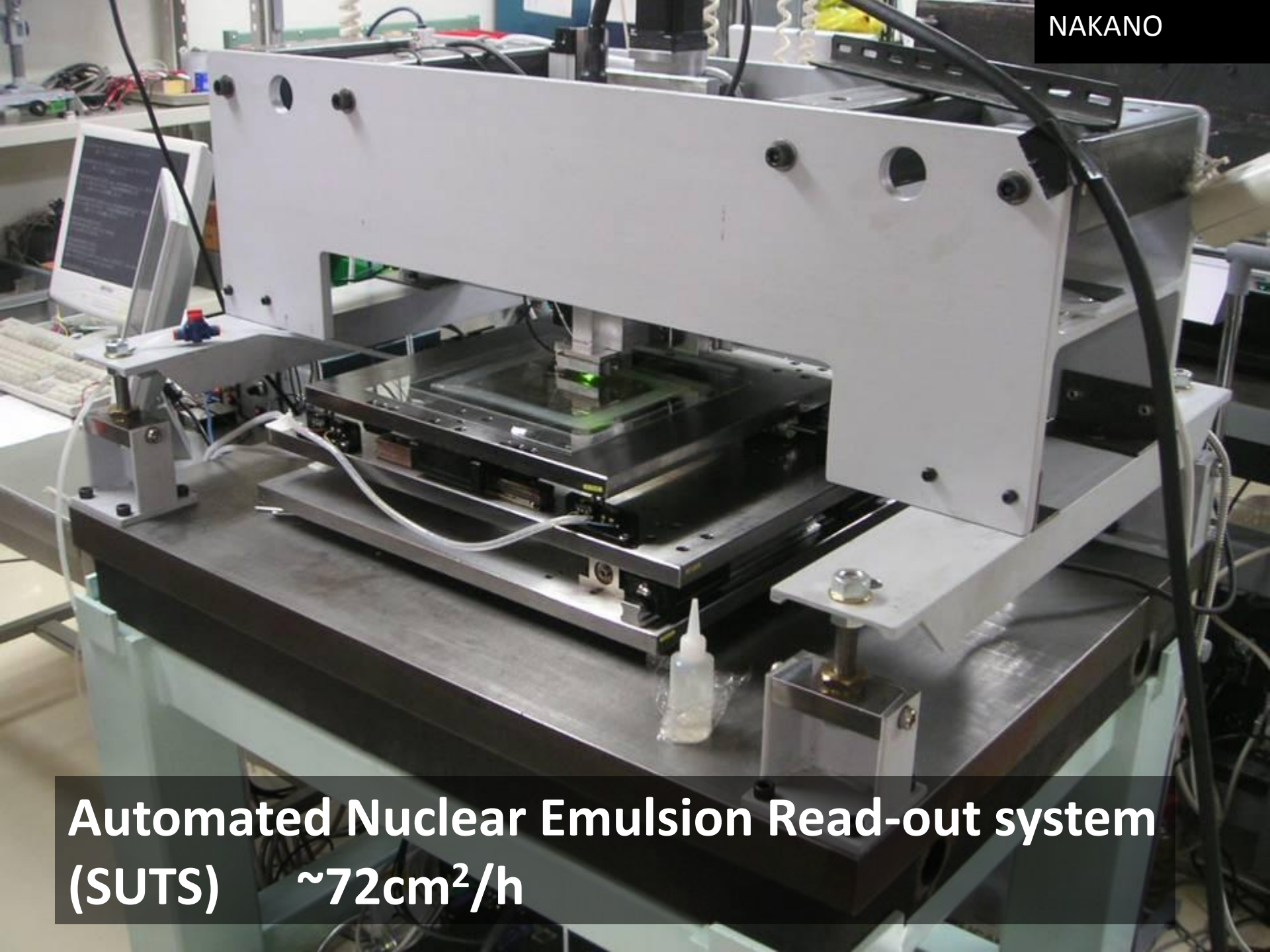


The relative difference between the two measurements with respect to the electronic detector measurement.



## Particle ID

Particle ID is possible in ECC by detecting secondary interactions (Hadron), cascade showers (Electron) and dE/dX measurement.

A photograph of an Automated Nuclear Emulsion Read-out system (SUTS) in a laboratory. The machine is a large, white, rectangular unit with a central processing area. A computer monitor and keyboard are visible on the left side, connected to the system. A small bottle of liquid is on the table in front of the machine. The machine is mounted on a metal stand.

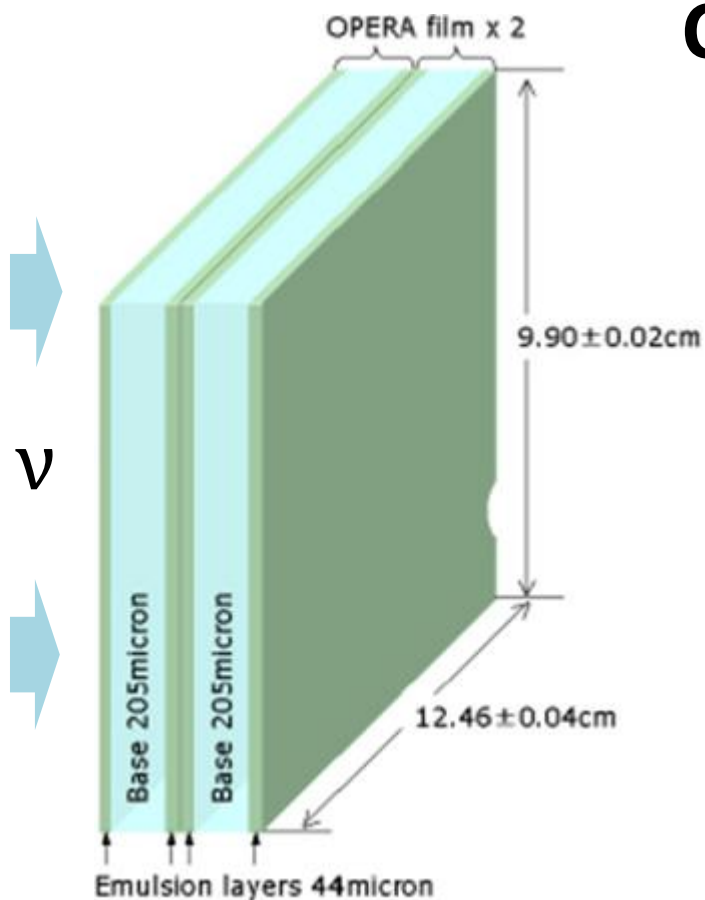
**Automated Nuclear Emulsion Read-out system  
(SUTS)  $\sim 72\text{cm}^2/\text{h}$**

# Changeable Sheet (CS)

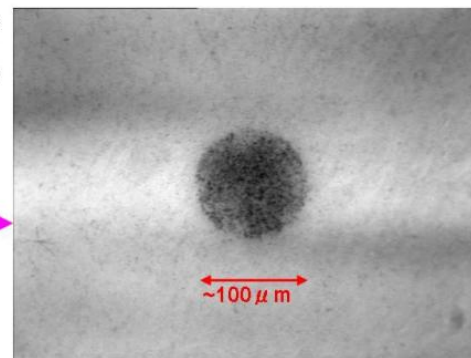
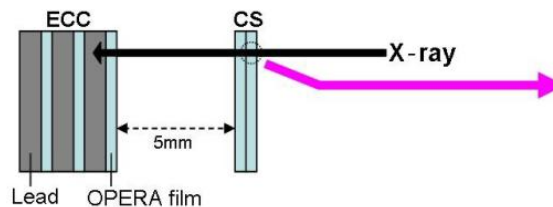
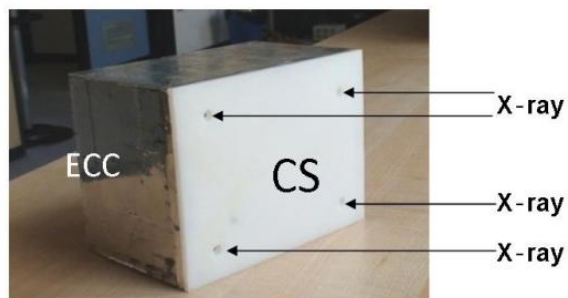
## CSの役割

①そのECCで反応があったかを判断する

②ECC中を追い上げる飛跡の候補を見つける



X-ray Mark



# 厚みの補正

検出効率評価に使った飛跡サンプルにシュリンク補正を施す。

- 4レイヤートラックの20%についてランクが向上。4%についてランクが低下。
- 新たに見つかった飛跡はなし。
- ハドロン検出効率2%向上。

レイヤー	ランク	検出効率		見積もり
		シュリンク補正前	シュリンク補正後	
4	A	0.25 ± 0.05	0.29 ± 0.05	0.43
	B	0.44 ± 0.06	0.53 ± 0.06	0.68
	C	0.61 ± 0.06	0.63 ± 0.06	0.77
	D	0.67 ± 0.06	0.65 ± 0.06	0.79
	E	0.67 ± 0.06	0.67 ± 0.06	

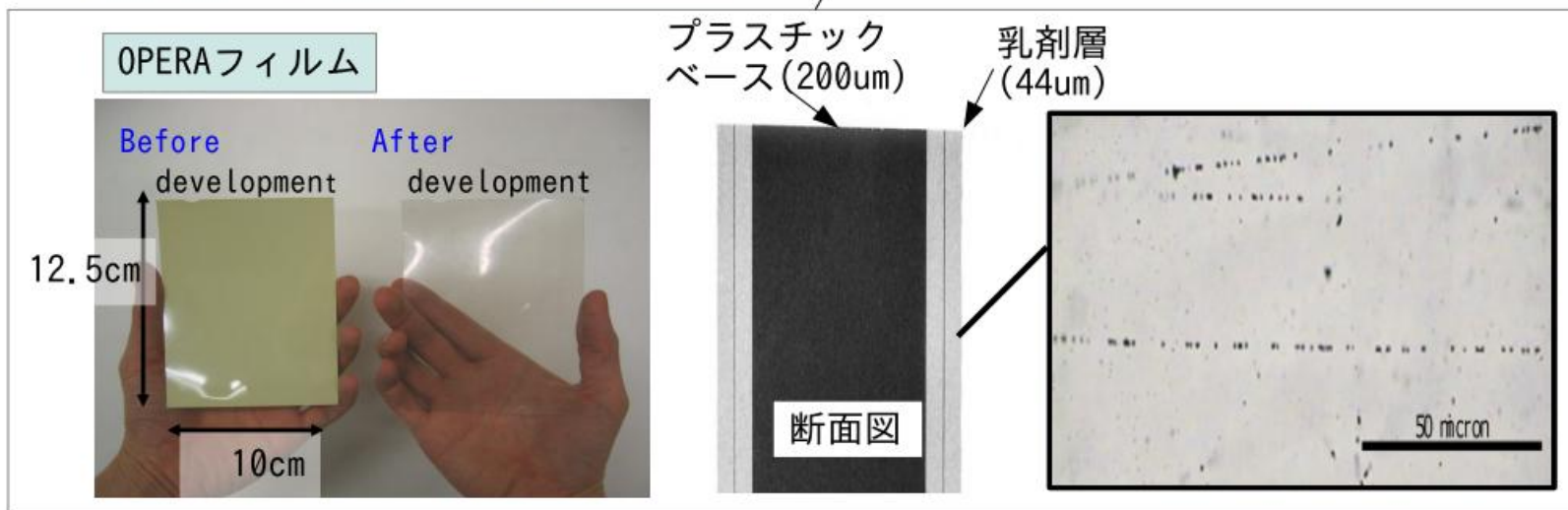
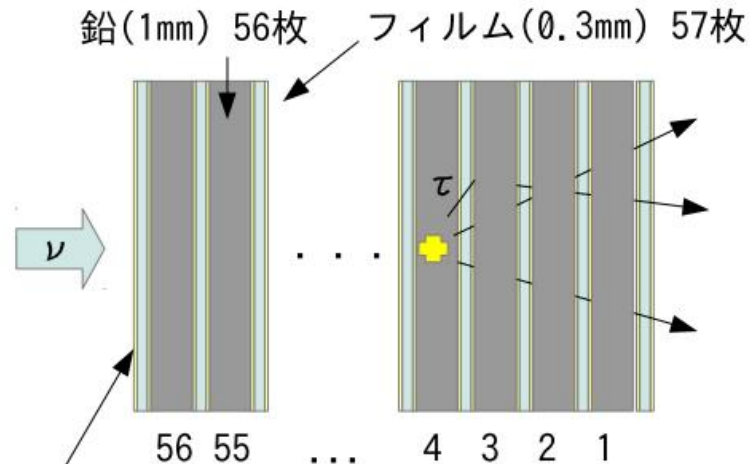
他の可能性：

非一様に生じる歪み

潜像退行現象による飛跡の濃さの減少

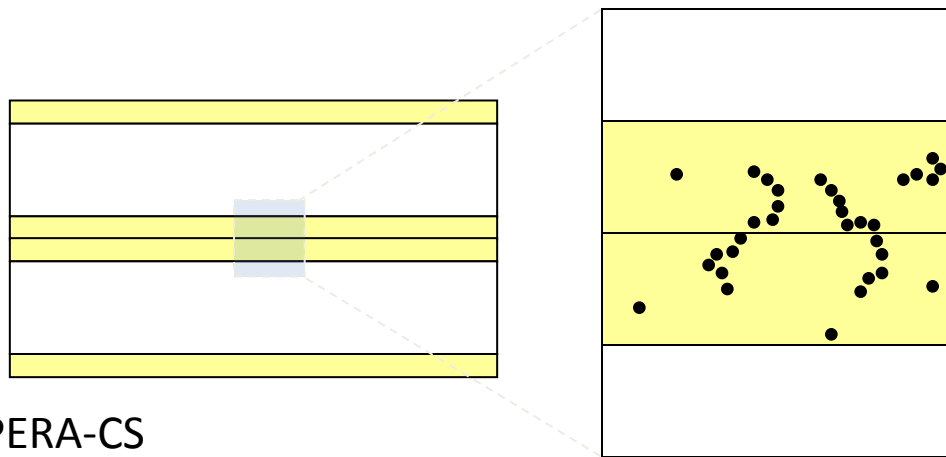
→ 今後の課題

# Emulsion Cloud Chamber (ECC)



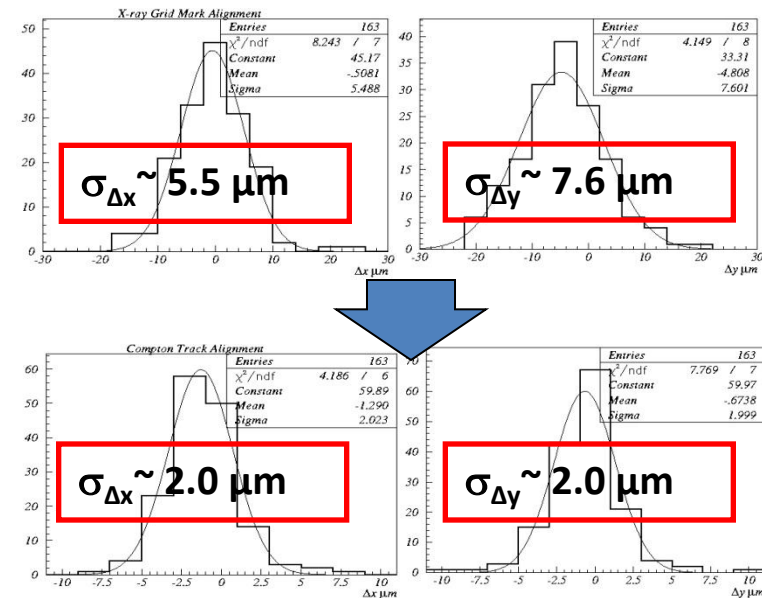
# OPERAで開発したノイズ除去技術 1: Compton alignment

接している乳剤層に渡って記録された低エネルギー電子を用いて精密にアライメントをとる。



OPERA-CS

## アライメント精度



- ノイズである低エネルギー電子をアライメントに逆利用。
- OPERA-film 2枚の位置合わせの精度向上によりChance coincidence BGを $\sim 1/10$ に低減。



# OPERAで開発したノイズ除去技術 2: Navigation

人間の目は最良の測定器。高いS/Nで高エネルギー粒子と低エネルギー電子の識別ができる。

肉眼観察は専用の測定器で行う。

自動飛跡読み取り装置が検出した飛跡はどれか??

→ 飛跡がすぐに見つからない場合、数分程度探すことになる。

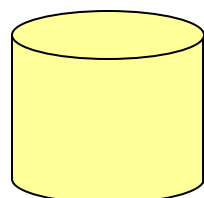
自動飛跡読取装置



ハードウェア間の移動



肉眼観察専用機



データを送って  
パターンマッチ

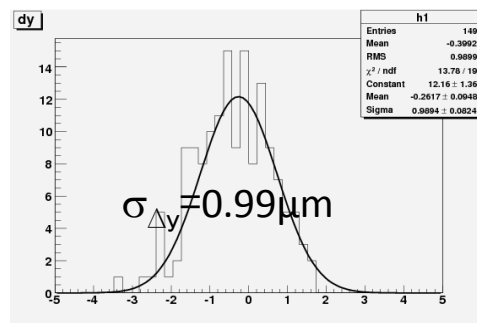
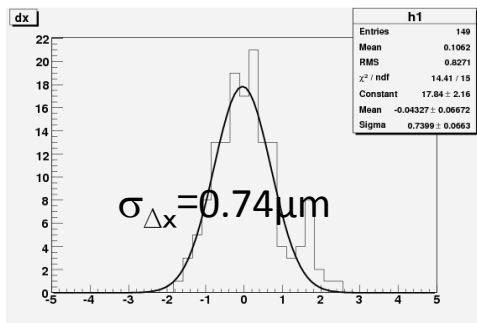
自動飛跡読取装置で  
取得した飛跡データ



肉眼観察専用機

目的の飛跡の周りの数視野  
の飛跡データを再度取得  
(低エネルギー電子の飛跡)

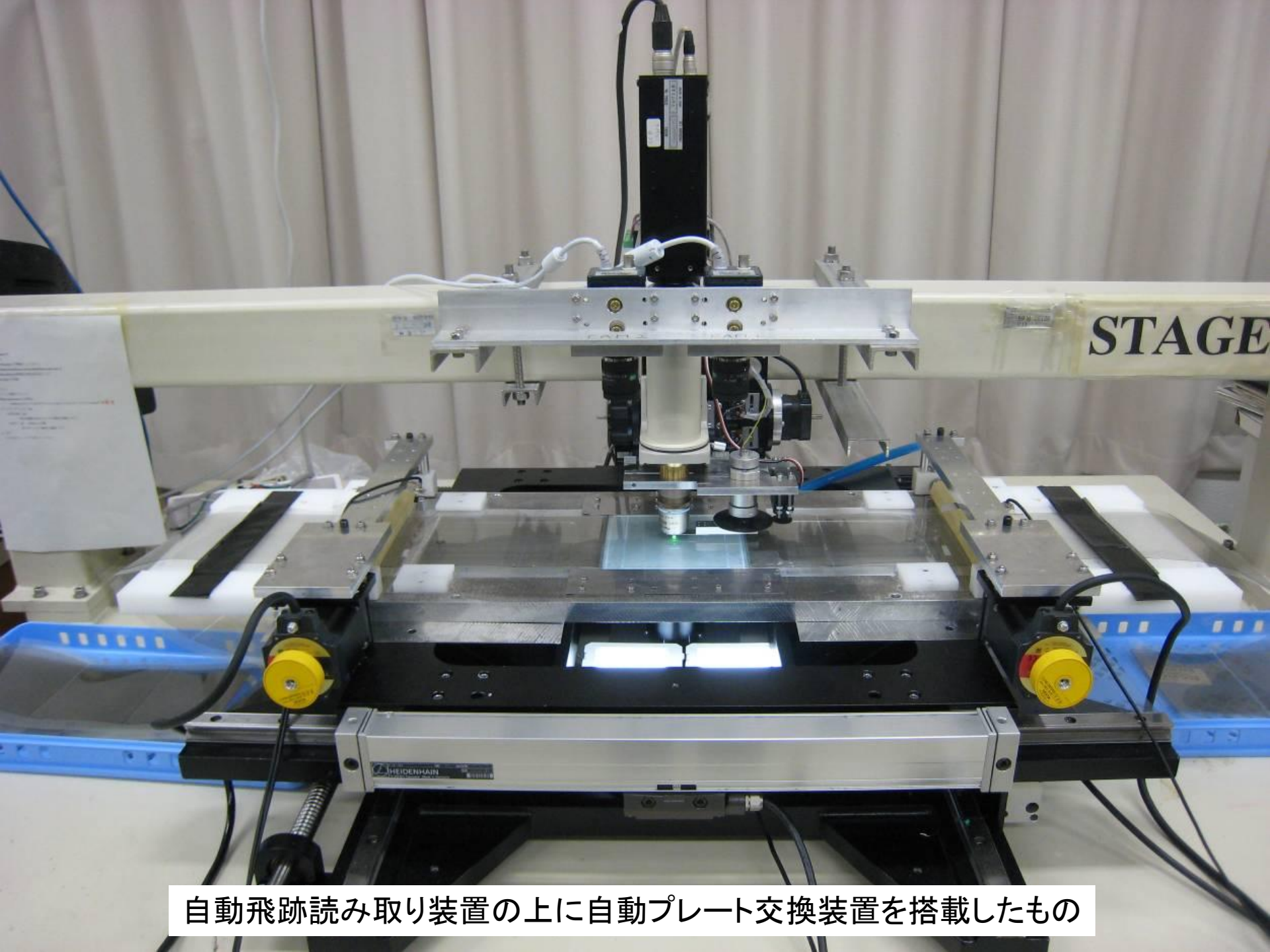
パターンマッチ後の飛跡の位置再現性



肉眼観察時の判定速度の向上







自動飛跡読み取り装置の上に自動プレート交換装置を搭載したもの



# Direct VTX Hunting

CS上の複数本の飛跡より  
最も可能性が高いVTXの位置を推定  
直接その付近のデータをとる

