

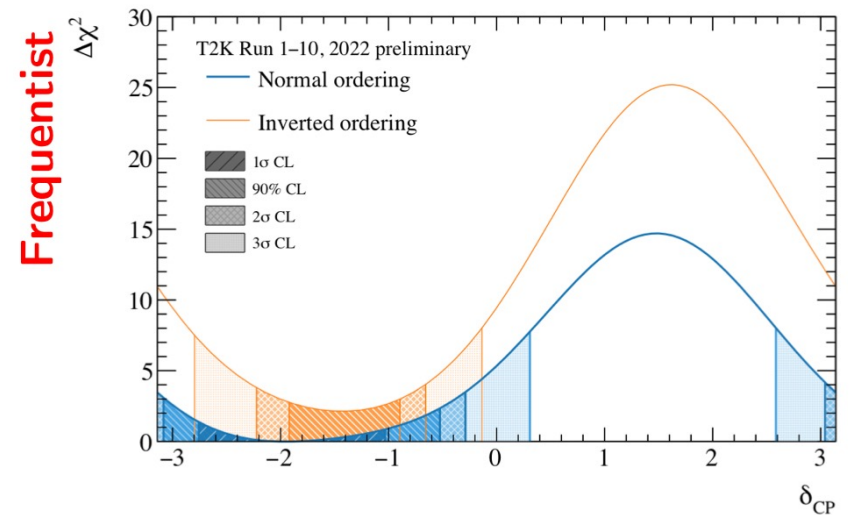
T2K実験新型前置検出器における再構成手法の Super FGD検出器内の不良チャンネルを考慮した性能評価

東京大学 横山研究室 修士1年

新居 智将

T2K実験

- 長基線ニュートリノ振動実験
- J-PARC (茨城県東海村) で生成したニュートリノを, 前置検出器 ND280 と後置検出器 (スーパーカミオカンデ) で検出.
- ニュートリノ振動, 特に $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$) の振動を調べる事で, レプトン領域におけるCP対称性の破れを検証.
- 現在, 90%以上の信頼度でCP対称性の破れを示唆.



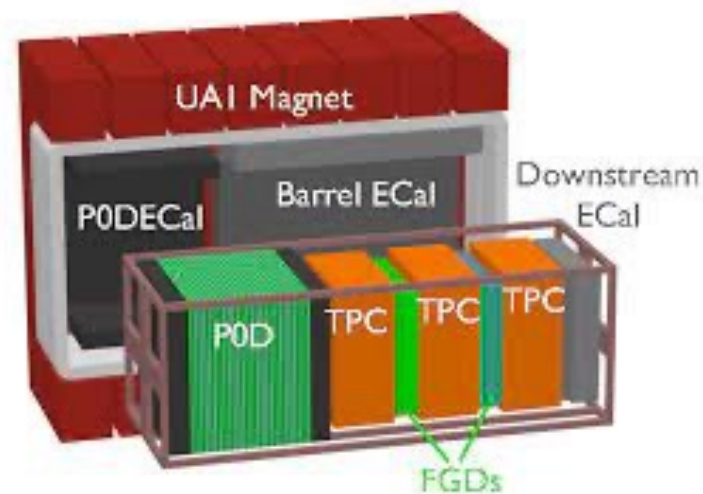
前置検出器 ND280

前置検出器 ND280

- ビーム標的から280m下流に設置された検出器群
- 振動前のミューニュートリノ, 電子ニュートリノのフラックス, およびニュートリノ反応断面積の測定を目的としている.

アップデート前のND280は,

- **FGD (Fine Grained Detector): ニュートリノ反応点の検出, 荷電粒子の飛跡検出**
 - TPC (Time Projection chamber): 荷電粒子の運動量測定
 - マグネット: 0.2Tの常伝導ダイポール電磁石
- 等からなる.



ND280 アップグレード (T2K-II)

3 σ (99.7%) 以上の信頼度でCP対称性の破れを検証するために,

- 統計量の増加 → ビーム強度の増強

- 系統誤差の削減 → **前置検出器 ND280 のアップグレード**

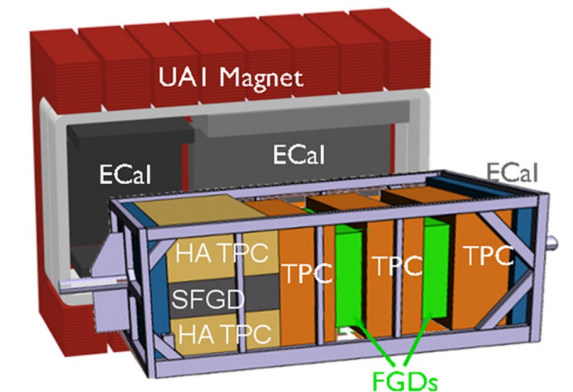
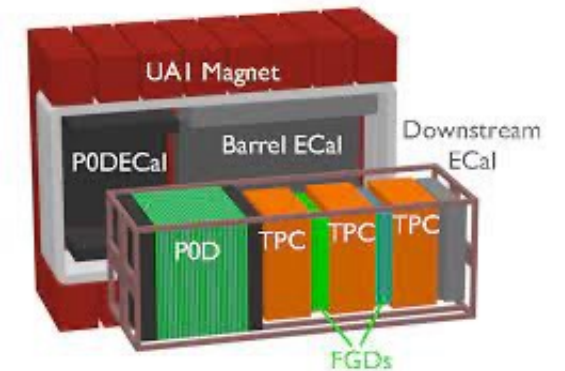
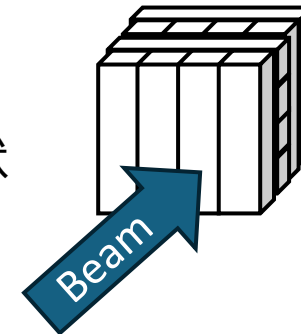
ND280の課題

従来の飛跡検出器(FGD)は棒状シンチレータを層状に重ねた形状
→大角度に散乱された粒子や低運動量の粒子への感度が低い.

上流部を新検出器に交換

- **Super FGD : 反応標的 兼 新型シンチレータ飛跡検出器**
- HA-TPC(High Angle TPC) : 大角度散乱粒子の検出.
- ToF(Time-of-Flight)検出器 : 粒子の飛来方向の同定や識別精度向上.

Super FGD, HA-TPCを囲むように6面に設置.



Super FGD

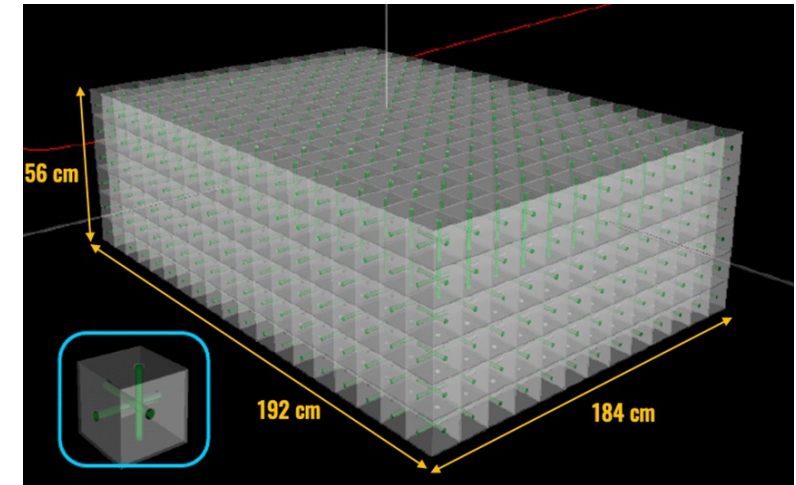
Super FGD 検出器概要

- 1cm角のシンチレータキューブが
192×182×56 個積み重なっている.
- 各キューブに空いた穴から波長変換ファイバーによって
3方向に光を伝播し, MPPCによって読み出す.
→粒子の飛跡の3平面それぞれへの射影が得られる.

FGDと比較して, 大角度・短飛程の粒子への感度改善.
また, 粒子識別性能も改善.

構成要素

192×182×56 ~ 2×10^6 個のシンチレータキューブ
約56000本のファイバー
64個のMPPC を搭載した881枚のPCB (Printed Circuit Board)



Super FGDの読み出し装置

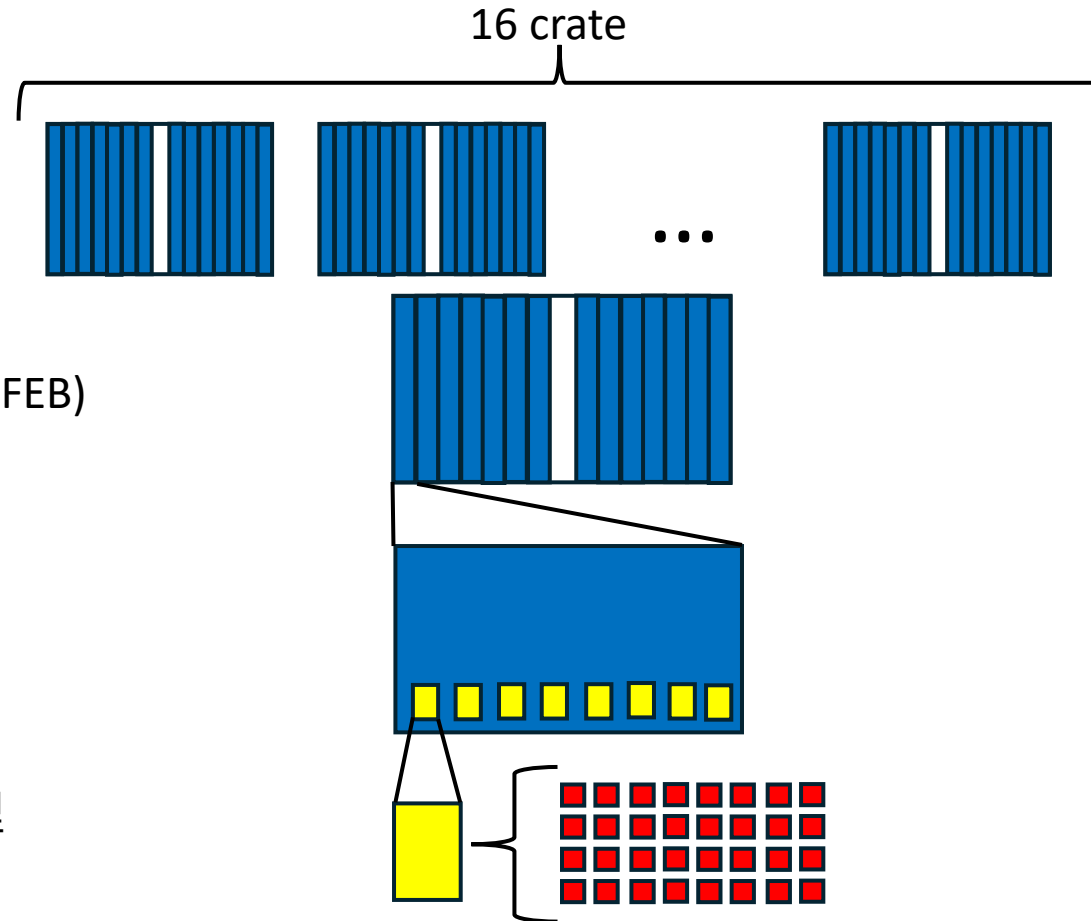
Super FGDの読み出し

全体で16 crate

1 crate (14個のFront End Board(FEB))

1 FEB (8個のASIC)

1 ASICで 32ch からの信号を処理
(2 ASICでPCB1枚)

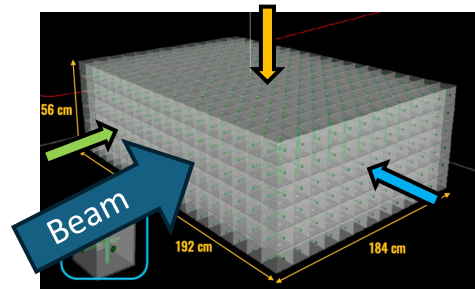


Super FGD の現状

Super FGD の現状

2023年10月にインストール完了,
11月にビームデータの取得開始.

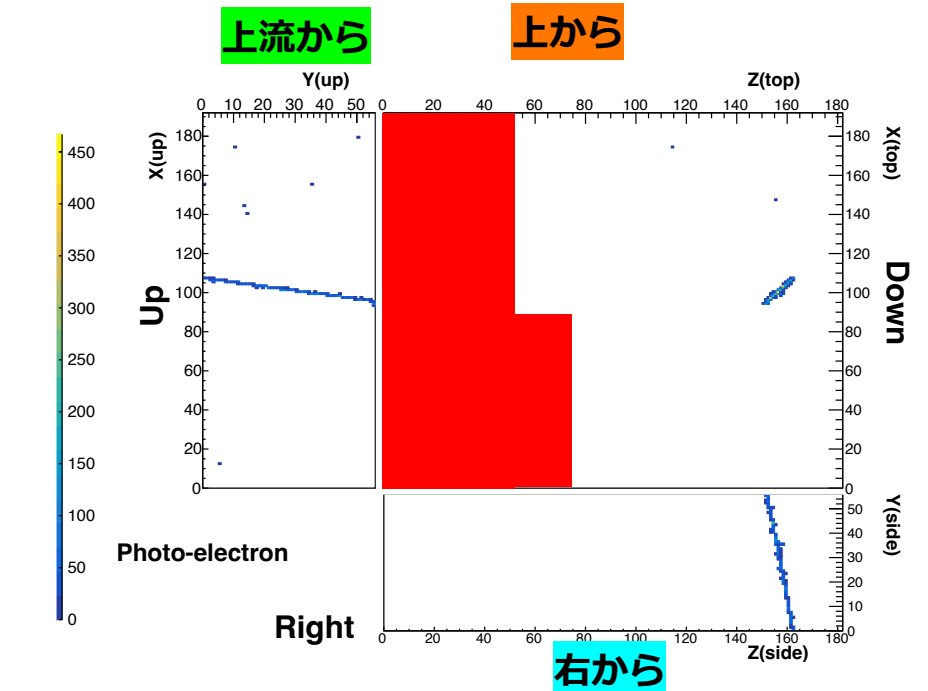
ただし, FEB の到着が遅れているため,
全体の約80%のchからのみデータを取得,
今春に残りのFEBを挿入し完成予定.



不良チャンネル

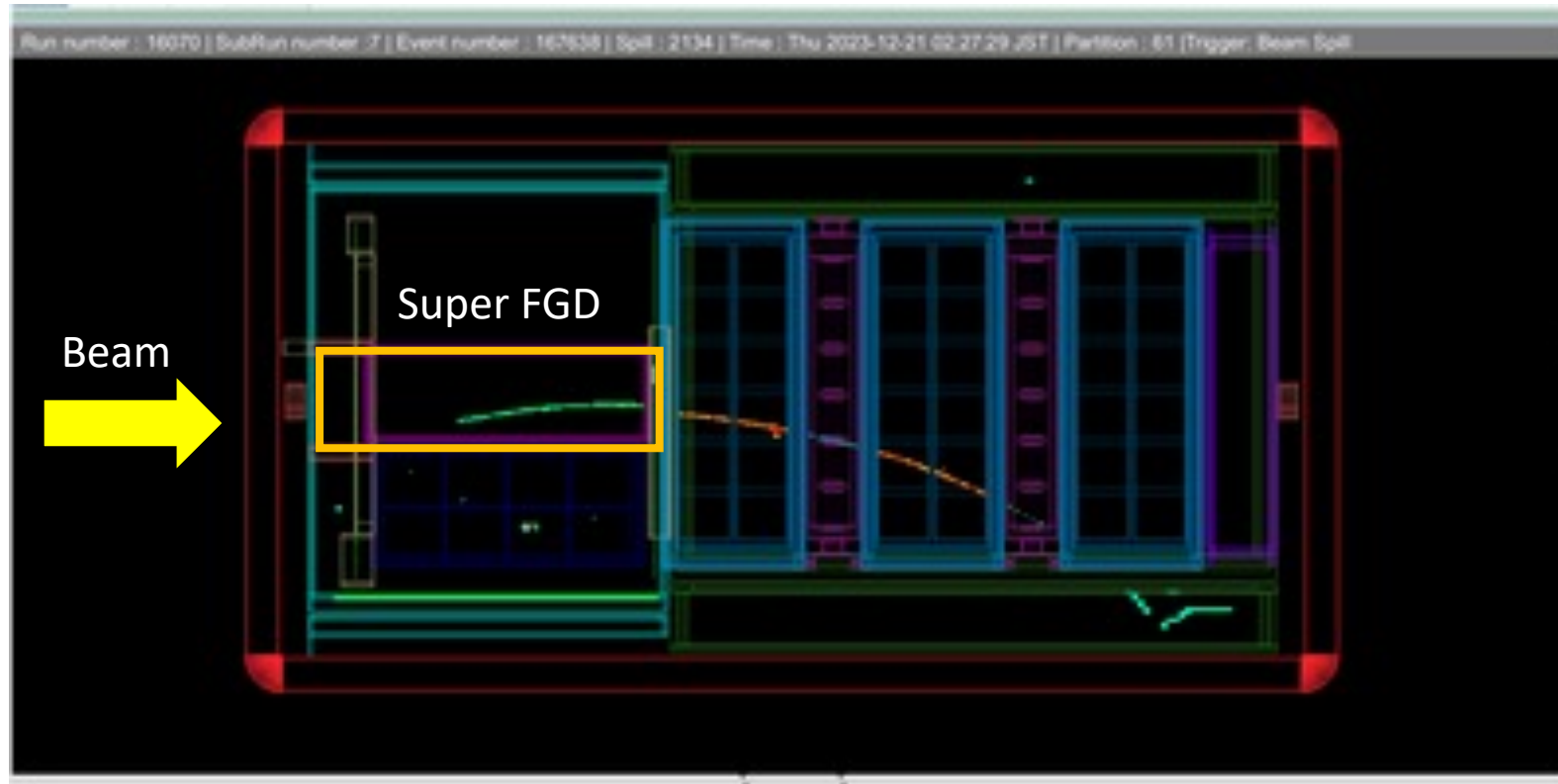
11-12月のrunを通じて応答のなかったチャンネルが計59ch.

また, run中に一時的/あるいは半永久的に応答がなかった
チャンネルがASIC, FEB 単位で存在した.



宇宙線イベント
赤い部分がFEBの不足に対応する部分

Event Display



2023年11-12月のrunで記録された Beam の Event Displayの一例

研究動機

Super FGD における解析手順は、右図の通りである。

不良チャンネルが存在すると、2D Hitに欠損が発生し、以降のステップにも影響を与える事が考えられる。

そのため、

- ・ 現在の再構成手法の不良チャンネルに対する耐性調査
 - ・ 不良チャンネルの存在を加味した再構成手法の開発
- を行う必要がある。

ヒットの各平面への射影情報 (2D Hit)



再構成パート

3次元ヒット(3D Hit)の再構成



トラック, シャワーの再構成



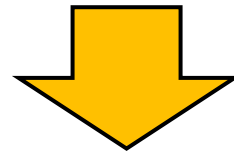
後段解析

研究動機

- ・ 現在の再構成手法の不良チャンネルに対する耐性調査
- ・ 不良チャンネルの存在を加味した再構成手法の開発

のためには,

まず, 不良チャンネルが再構成にどのような影響を与えるか調べる事が不可欠である.



本研究では,

想定される不良チャンネルのパターンに対して,

再構成手法の各ステップに対してどのような影響があるかについて調べる.

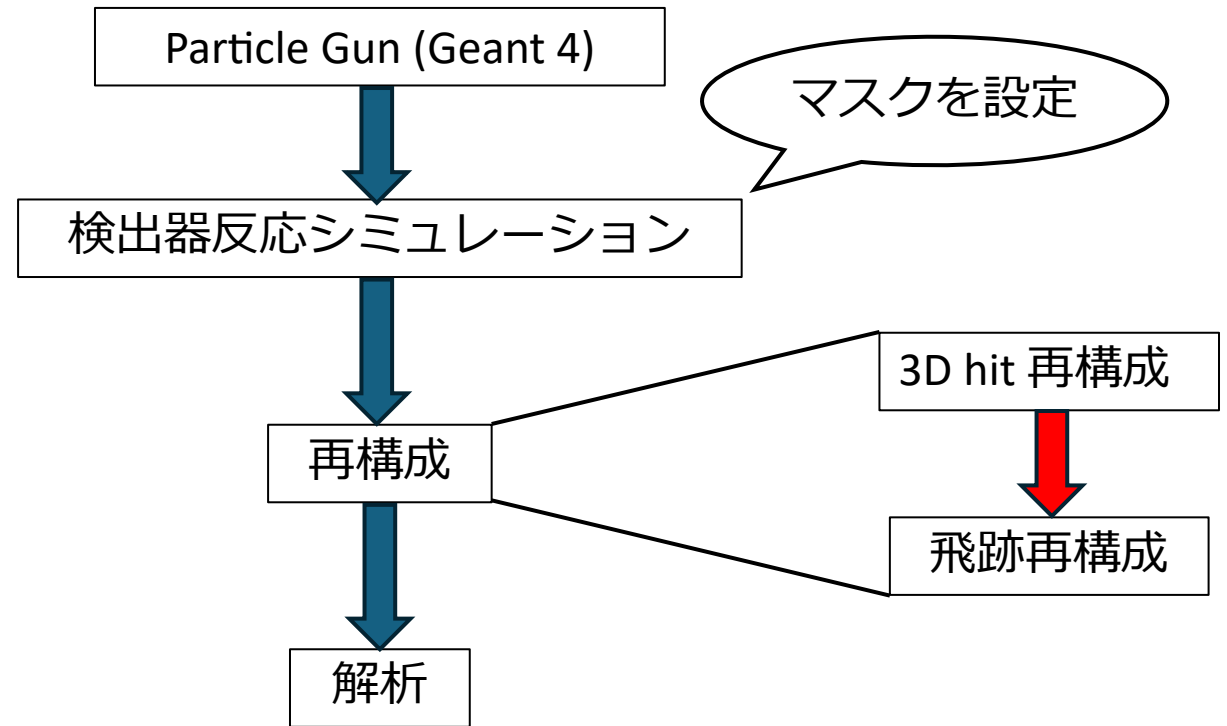
今回の発表では特にtrack-likeなイベントの再構成に焦点を当てる.

手法

Geant 4によるシミュレーションデータを使用.

仮想的な不良チャンネルとして一部のchを検出器反応シミュレーションの時点でマスクした.

それぞれの場合の検出器出力に対して再構成アルゴリズムを実行し、各段階での精度についての評価、マスクがない時との比較を行った.



使用したデータセット

- Particle gun を使用.
- 発生粒子は μ^-
- 発射点は Super FGD 内で一様ランダム.
- 射出方向は立体角 4π について一様ランダム.
- エネルギーは $[0, 2.5]$ GeV の範囲で一様ランダム.
- 10000 events.

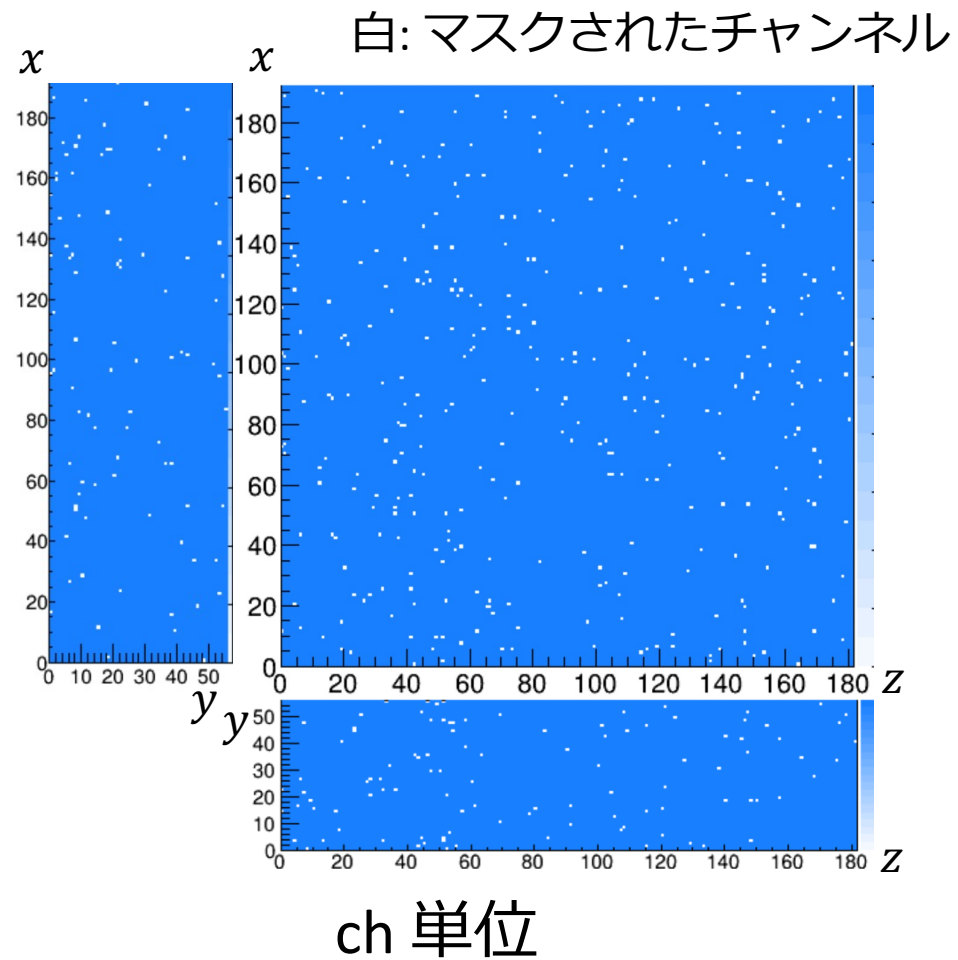
マスク設定

3種類のマスク (+マスクなし) を用意

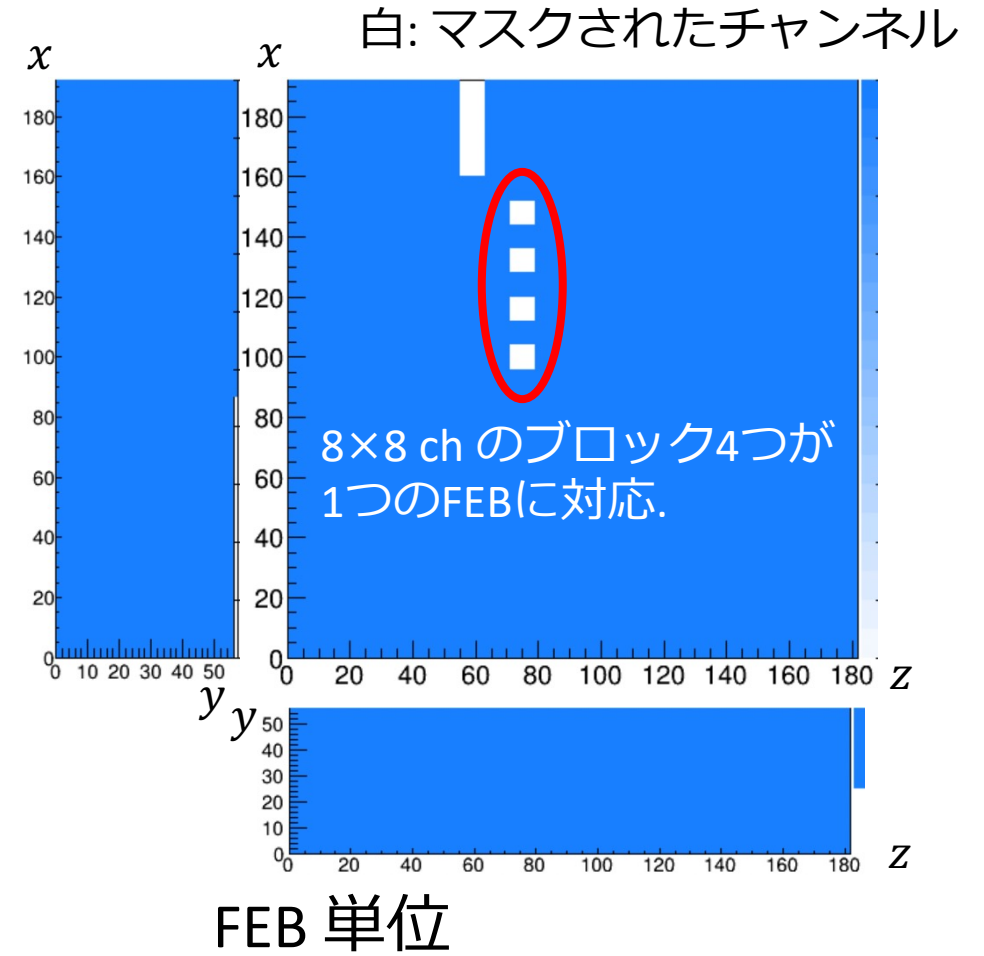
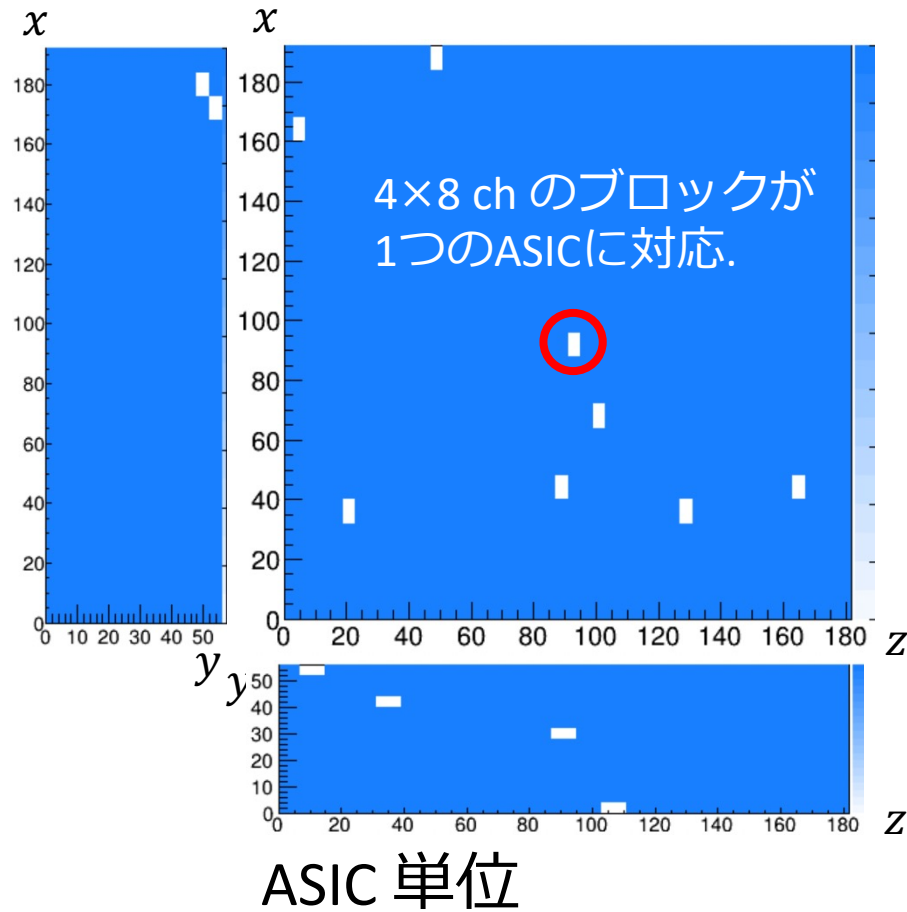
- ch 単位: 1% 560 ch masked
- ASIC 単位: 1% 14 ASIC = 448 ch masked
- FEB 単位: 1% 2 FEB= 512 ch masked

- 各単位について独立ランダムにマスクを生成.
- マスクは各イベントにおいて共通.

実際にはマスクの影響には位置依存性があるが,
今回は各単位についてマスクは1種類ずつのみ使用した.



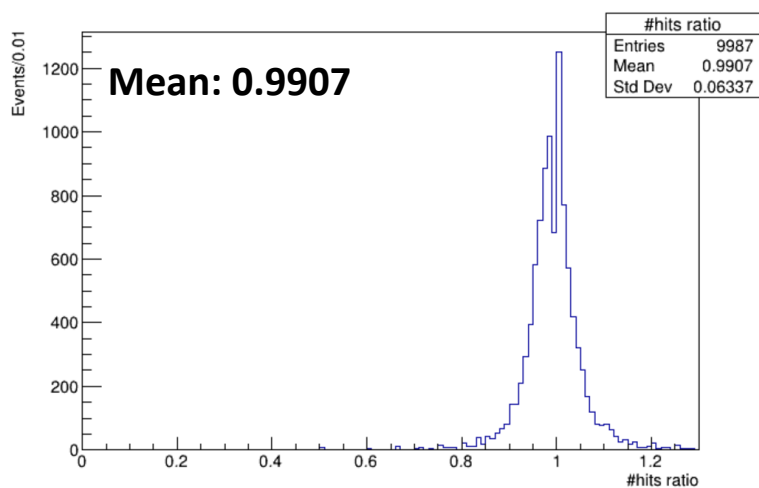
マスク設定



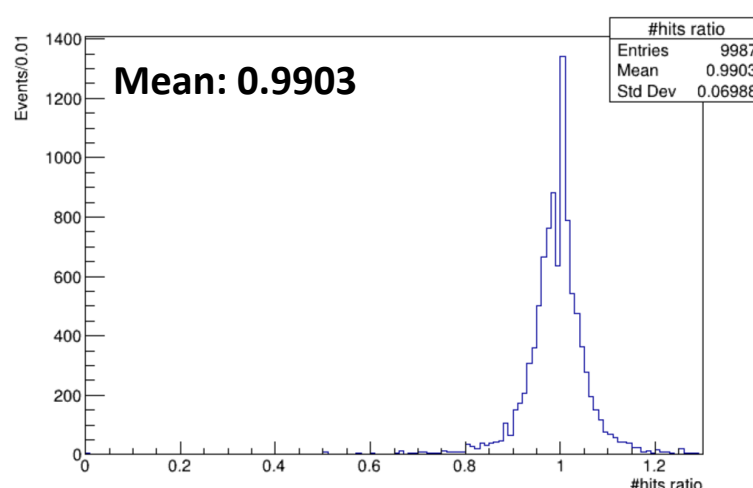
2D Hit への影響

以下は, マスクなしの時と比較したときの, 各イベントでの2D Hit の数の比率である.

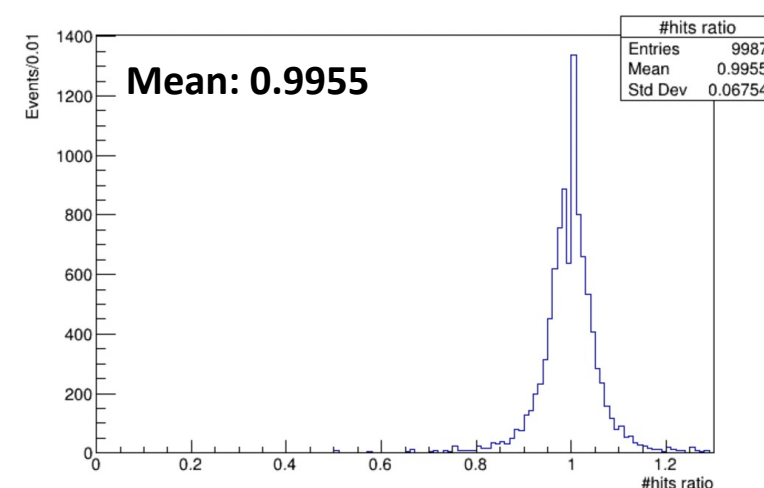
- 各 2D Hit はチャンネルと一対一に対応しているため, 平均値は0.99程度になる事が期待される.
- 実際にはマスクの影響には場所依存性があり, FEB 単位の時の平均値はやや大きくなっている.



ch単位



ASIC 単位

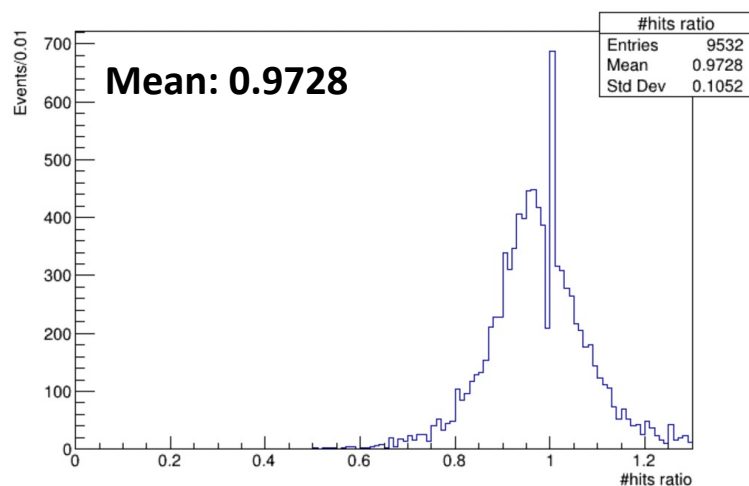


FEB 単位

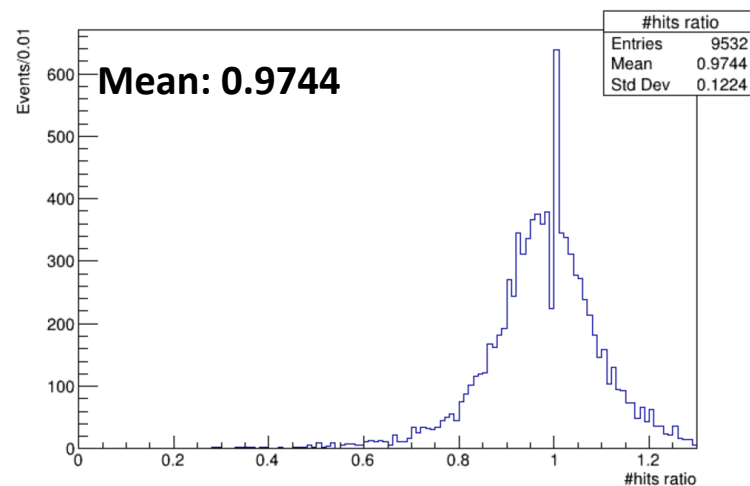
3D Hit 再構成効率

以下は, マスクなしの時と比較したときの, 再構成された 3D Hit の数の比率の分布である.

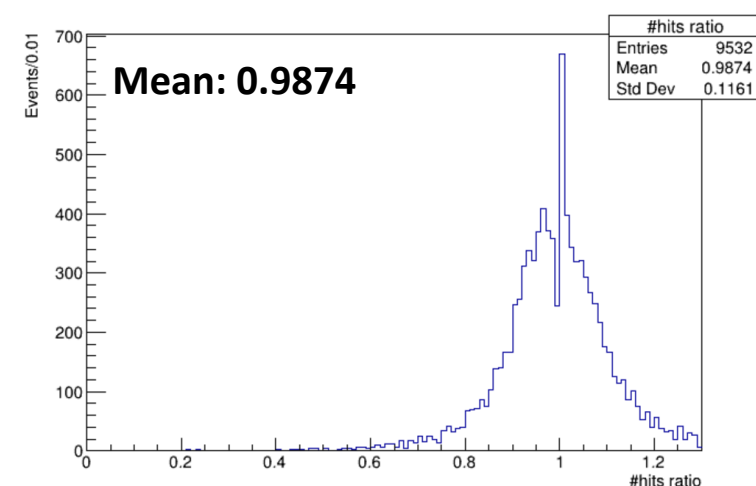
- アルゴリズムの性質上, 3D Hit の再構成のEfficiencyは $1-0.01 \times 3=0.97$ 程度になる事が想定される.
- 飛跡が短いイベントを中心として 3D Hit の数が完全に一致するイベントが4~5%程度存在している.



ch 単位



ASIC 単位



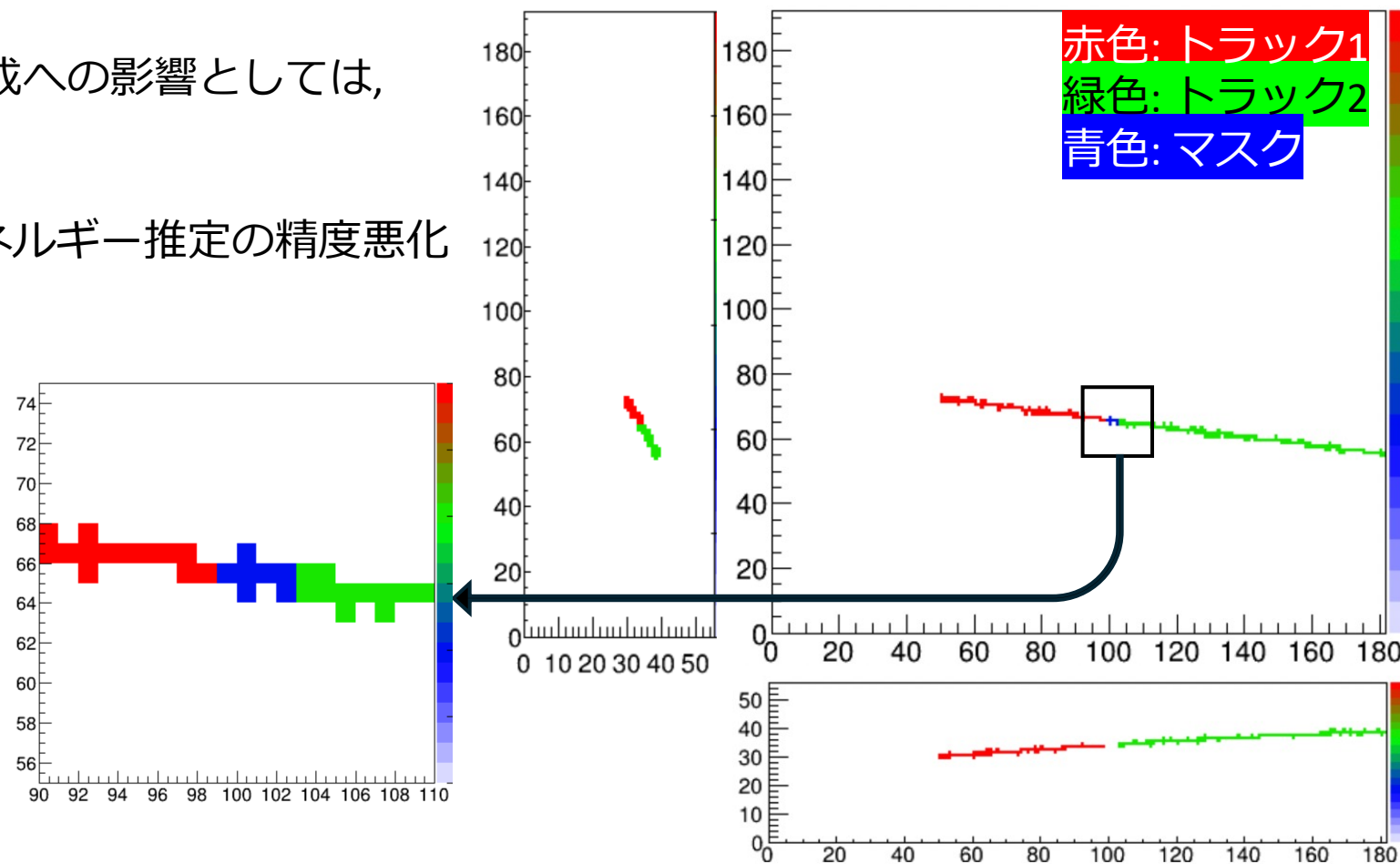
FEB 単位

ミュオントラックの再構成

3D Hit の欠損のその後の再構成への影響としては、

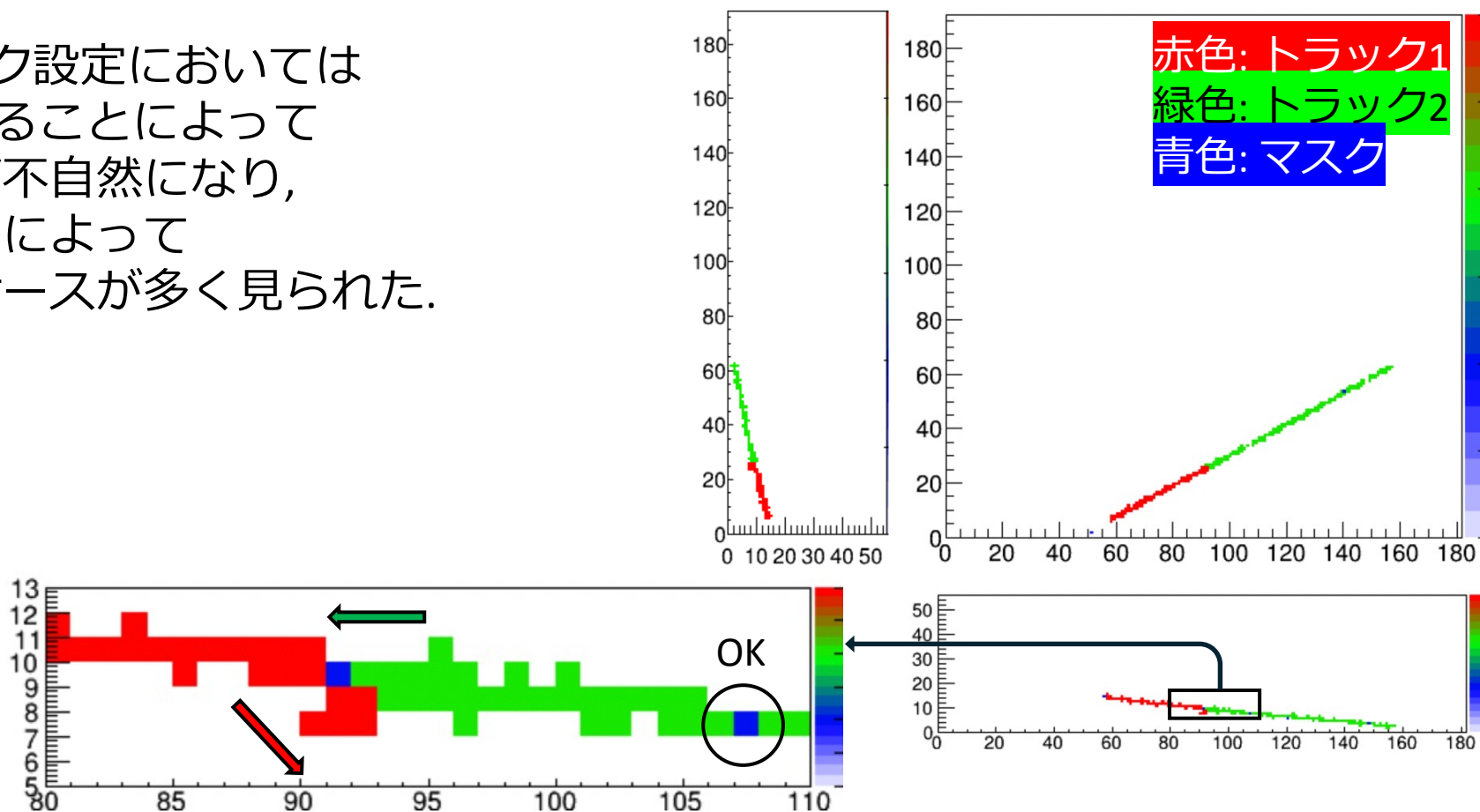
- **トラックの再構成の阻害**
- 粒子識別の精度悪化
- 粒子が検出器内で失ったエネルギー推定の精度悪化等が考えられる。

右図はASIC 単位の不良チャンネルによってトラックが分断されてしまったイベントの一例。



ミューオントラックの再構成

一方, ch 単位のマスク設定においては
3D Hit の一部が欠けることによって
再構成された飛跡が不自然になり,
再構成アルゴリズムによって
分断されてしまうケースが多く見られた。



ミューオントラックの再構成

トラックの再構成について以下の条件をみたすイベントの割合を計算した.

1. トラックの再構成が行われた事象

全イベントのうち1本以上のトラックが再構成された事象.

2. 1本のトラックが再構成された事象

1. のうちちょうど1本のトラックが再構成された事象.
ただし, トラックの始点を決定できなかったものも含む.

結果

条件	マスクなし	ch 単位	ASIC 単位	FEB 単位
1本以上の飛跡再構成	0.953 ± 0.002	0.951 ± 0.002	0.947 ± 0.002	0.949 ± 0.002
1本の飛跡再構成	0.871 ± 0.003	0.856 ± 0.004	0.845 ± 0.004	0.855 ± 0.004

ミューオントラックの再構成

考察

- 全てのタイプのマスクで効率は **2-3%** 劣化した。
- 特に, **ASIC 単位**のマスクで比較的大きく劣化した。

理由としては,

- ASIC 単位の不良チャンネルのブロックはトラックを分断するのに十分な大きさであったから。
- 不良チャンネルが比較的広範囲に散らばり, 多くのトラックが影響を受けたから。

等が考えられる。

ただし, 不良チャンネルの**場所依存性**の影響に注意する必要がある。

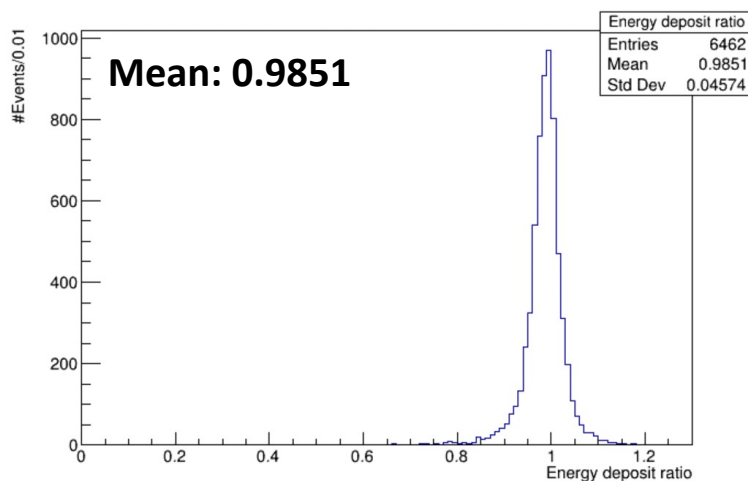
条件	マスクなし	ch 単位	ASIC 単位	FEB 単位
1本以上の飛跡再構成	0.953 ± 0.002	0.951 ± 0.002	0.947 ± 0.002	0.949 ± 0.002
1本の飛跡再構成	0.871 ± 0.003	0.856 ± 0.004	0.845 ± 0.004	0.855 ± 0.004

Energy Deposit の再構成

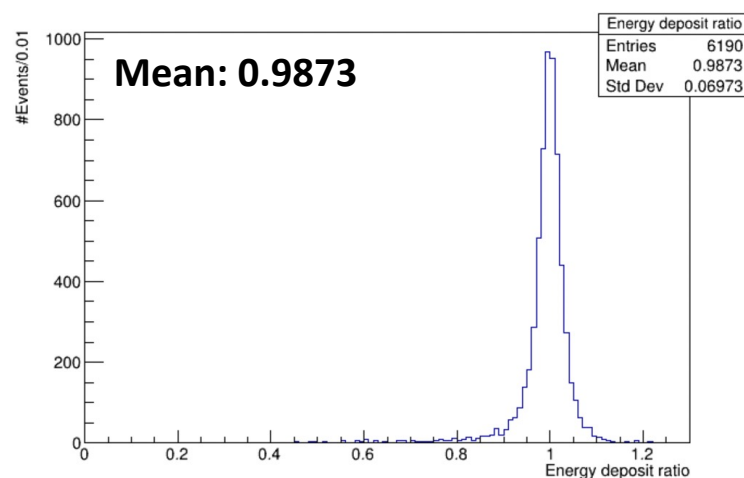
Energy Deposit

以下は **1本のトラックが再構成されたイベント** に限定した時の飛跡上で粒子が失ったエネルギー推定量の比率の分布である。

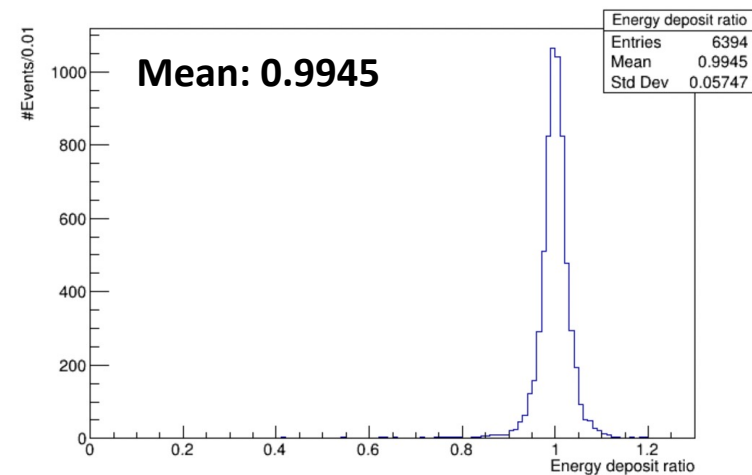
2D Hit の欠落率に比例して少なく見積もられている。



ch 単位



ASIC 単位



FEB 単位

まとめ

- Super FGDは昨年10月にインストールされ運用が開始されたが, 不良チャンネルの存在が報告されている.
- Super FGD 内に不良チャンネルが存在する場合におけるミュオントラックの再構成の効率の劣化をいくつかのパターンについて調べた.
- 不良チャンネルが存在した際, いずれの場合も再構成の効率は悪化したが, 特にASIC 単位でかたまつて存在した時に劣化が顕著であった.

条件	マスクなし	ch 単位	ASIC 単位	FEB 単位
1本以上の飛跡再構成	0.953 ± 0.002	0.951 ± 0.002	0.947 ± 0.002	0.949 ± 0.002
1本の飛跡再構成	0.871 ± 0.003	0.856 ± 0.004	0.845 ± 0.004	0.855 ± 0.004

展望

今後に向けた研究課題としては次のようなものが挙げられる.

- **後段の解析も加味した最終的な粒子識別への影響の確認.**
- **電子ニュートリノの荷電カレント反応を想定したイベントに対する再構成への影響の確認.**
- **実際のビームを想定したデータを元にしたイベント選別への影響の確認.**
- **不良チャンネルの割合を連続的に変化させた時の再構成の効率の変化の確認.**
- **不良チャンネルの場所依存性の効果の確認.**

Back Up

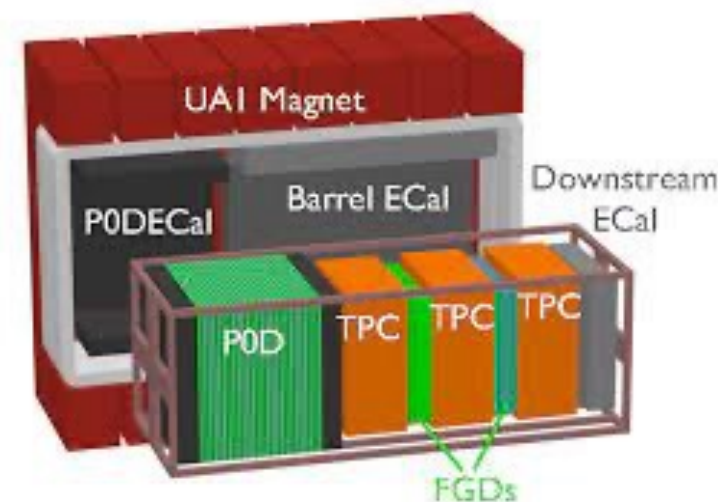
前置検出器 ND280

前置検出器 ND280

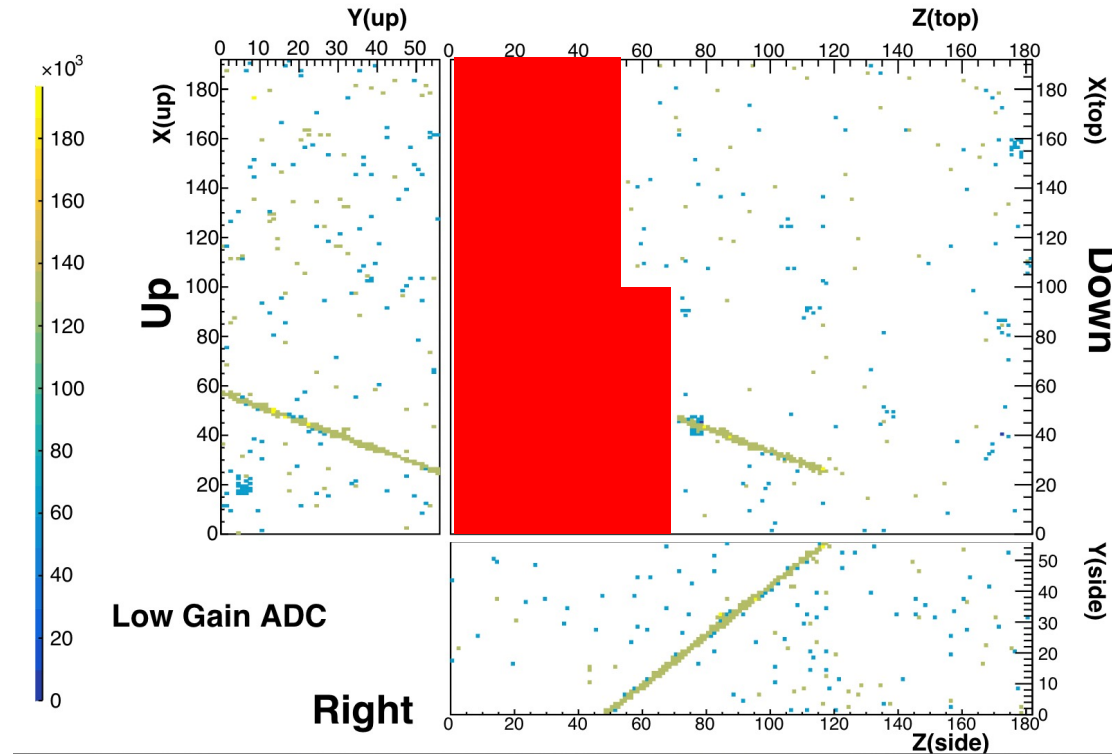
アップデート前のND280は,

- **FGD (Fine Grained Detector): ニュートリノ反応点の検出, 荷電粒子の飛跡検出**
- TPC (Time Projection chamber): 荷電粒子の運動量測定
- ECAL(Electromagnetic Calorimeter) : 電子・ γ 線のエネルギー測定
- POD (Pi 0 Detector) : π^0 生成反応測定
- SMRD (Side Muon Range Detector) : ミューオン飛程検出器
- マグネット : 0.2Tの常伝導ダイポール電磁石

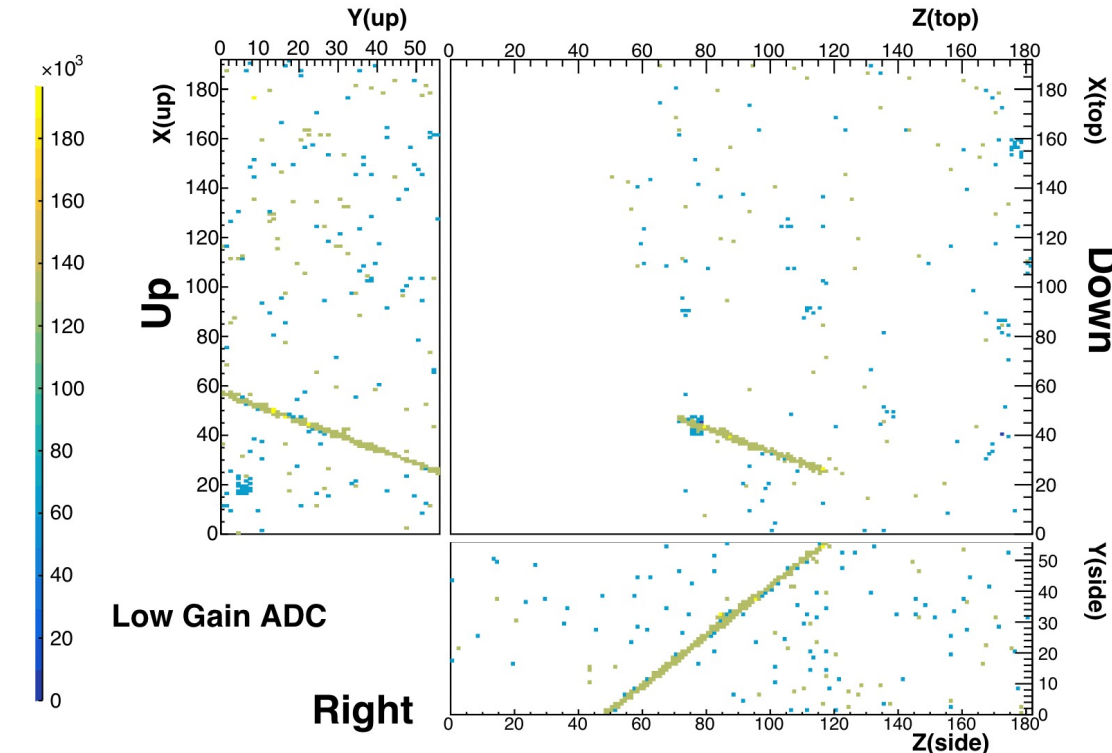
からなる



Cosmic event display (with dead channels)

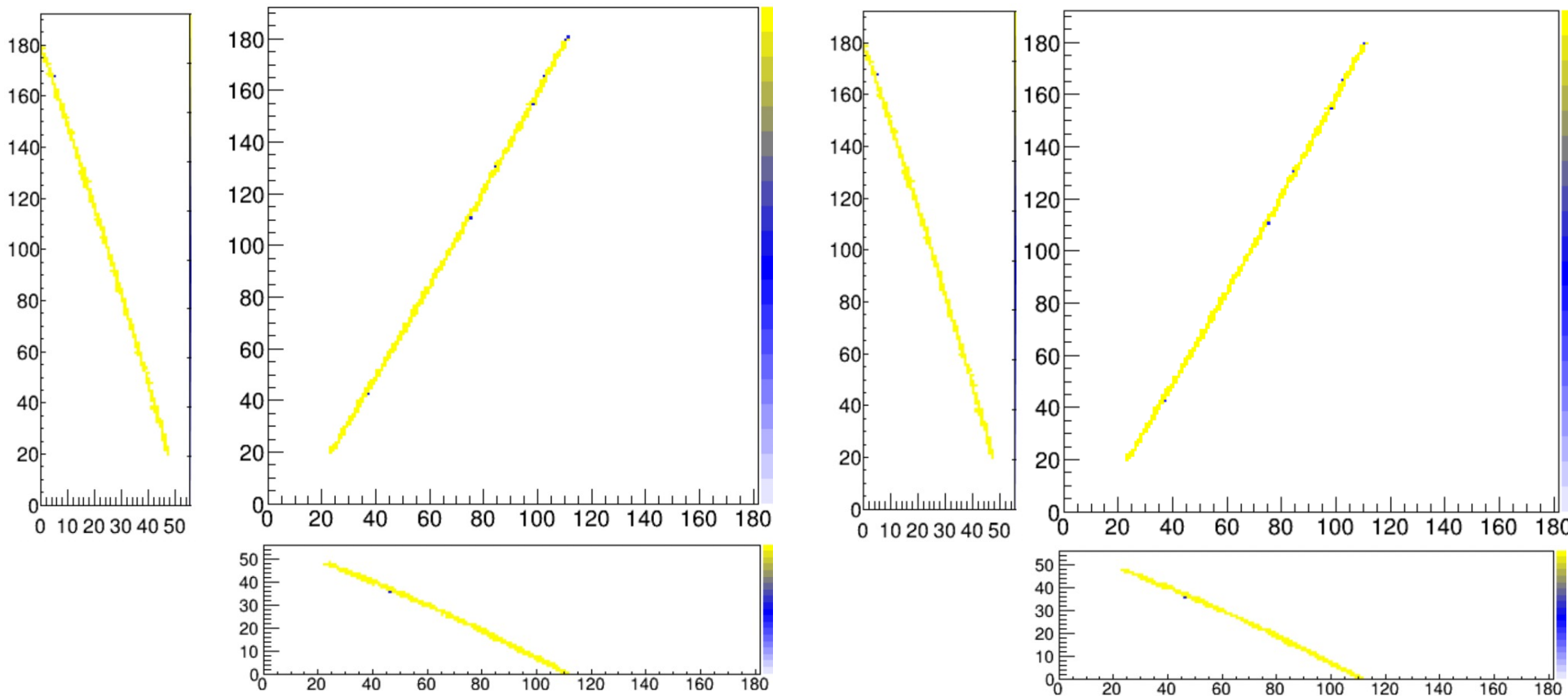


Cosmic event display (with dead channels)

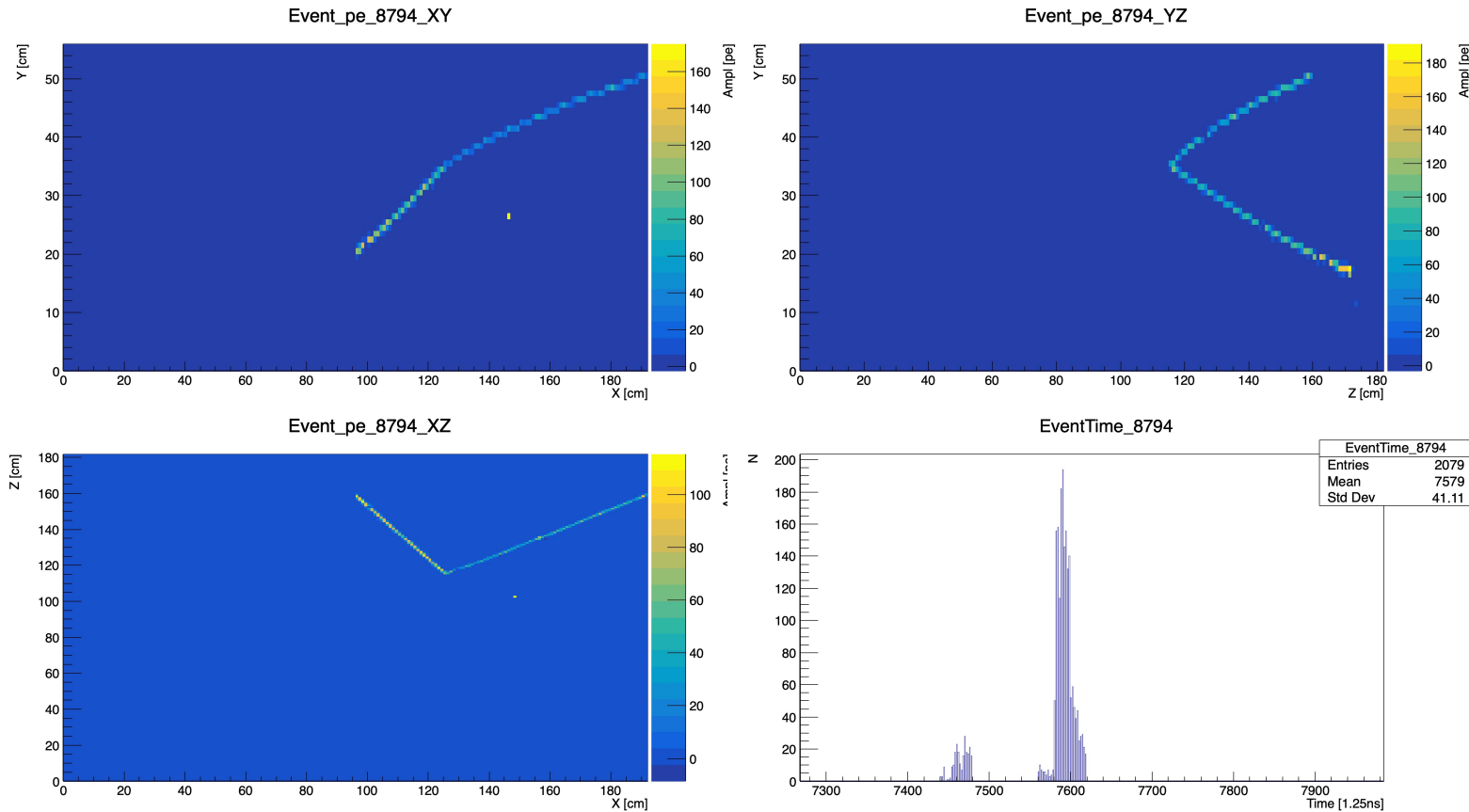


ミューオントラックの再構成

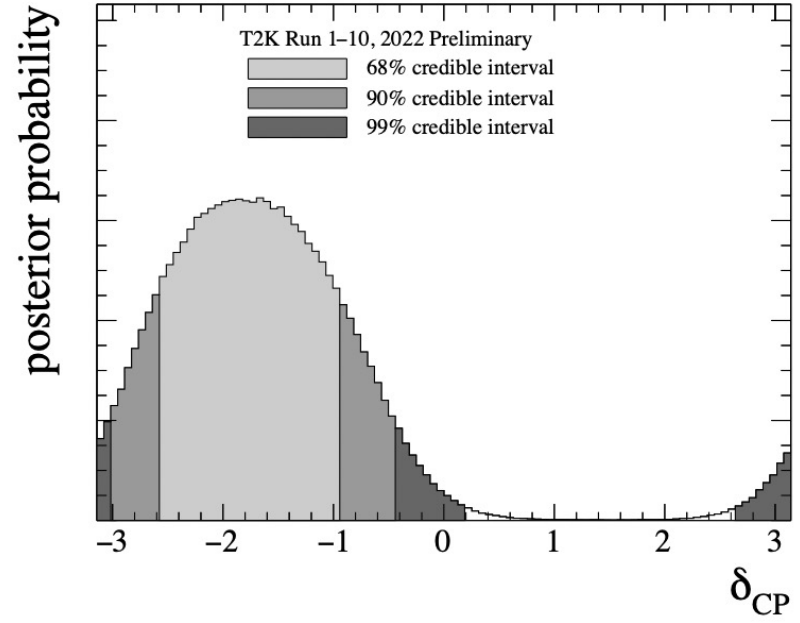
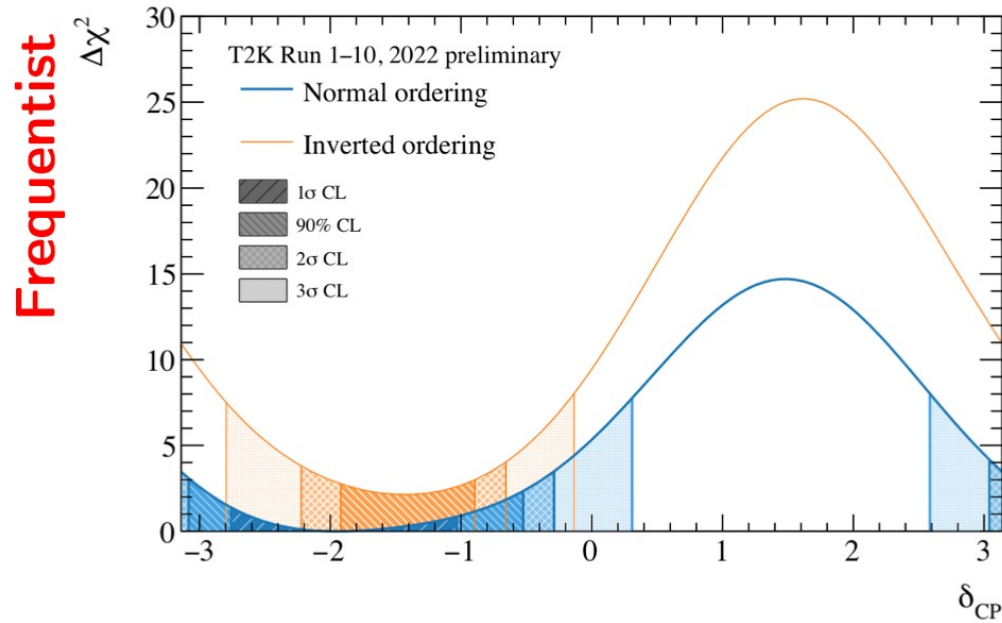
成功例



Super FGDで記録された Beam Event



T2K Result 2022



ミューオントラックの再構成

結果

条件	マスクなし	ch 単位	ASIC 単位	FEB 単位
1本以上の飛跡再構成	9532 ± 21	9509 ± 22	9473 ± 22	9493 ± 22
実質的に1本の飛跡再構成	8711 ± 34	8562 ± 35	8448 ± 36	8554 ± 35
1本の飛跡再構成	7119 ± 45	6876 ± 46	6546 ± 48	6764 ± 47
粒子識別成功	554 ± 23	534 ± 22	518 ± 22	510 ± 22