

ニュートリノフラックス計算精度向上に向けたNA61/SHINE実験 における荷電K中間子生成測定に対する解析状況

2026/Mar./24

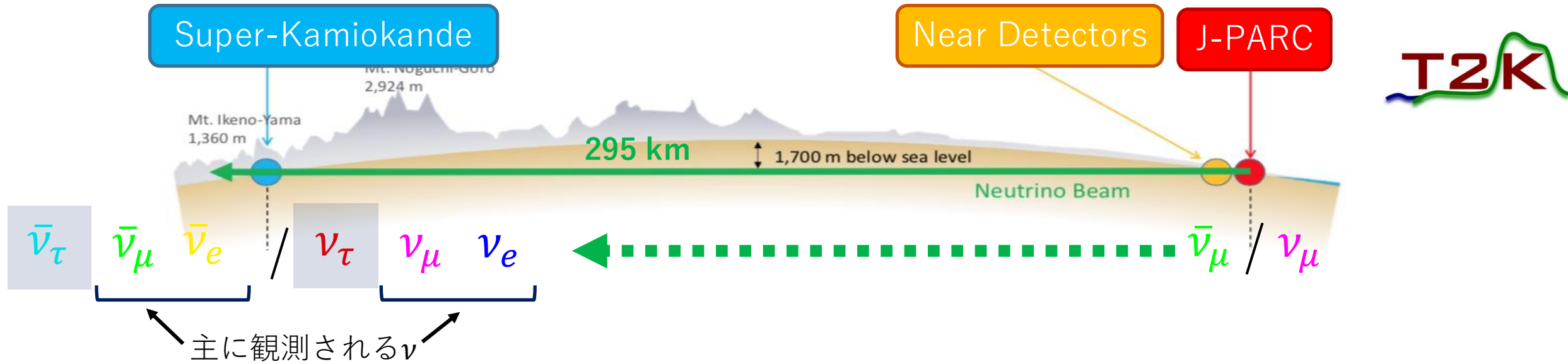
日本物理学会 2026年春季大会

24pT1-7

白石悠樹、小汐由介、坂下健^A、中平武^A、Megan Friend^A、
西森早紀子^B、永井義一^C、

他NA61/SHINE Collaboration

岡大理、高工研^A、総研大^B、エトヴェシュ・ロラード大^C



- ・ ニュートリノ振動を精密測定をする長基線ニュートリノ実験
- ・ J-PARCで生成した ν ビームをND280とSKで観測する
- ・ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率を比較することで ν CPVの検証を行う
- ・ 現在は δ_{CP} が0もしくは π であることを90%CLで棄却しており、最終的には 3σ での棄却を目指す

更なる不定性の削減が重要

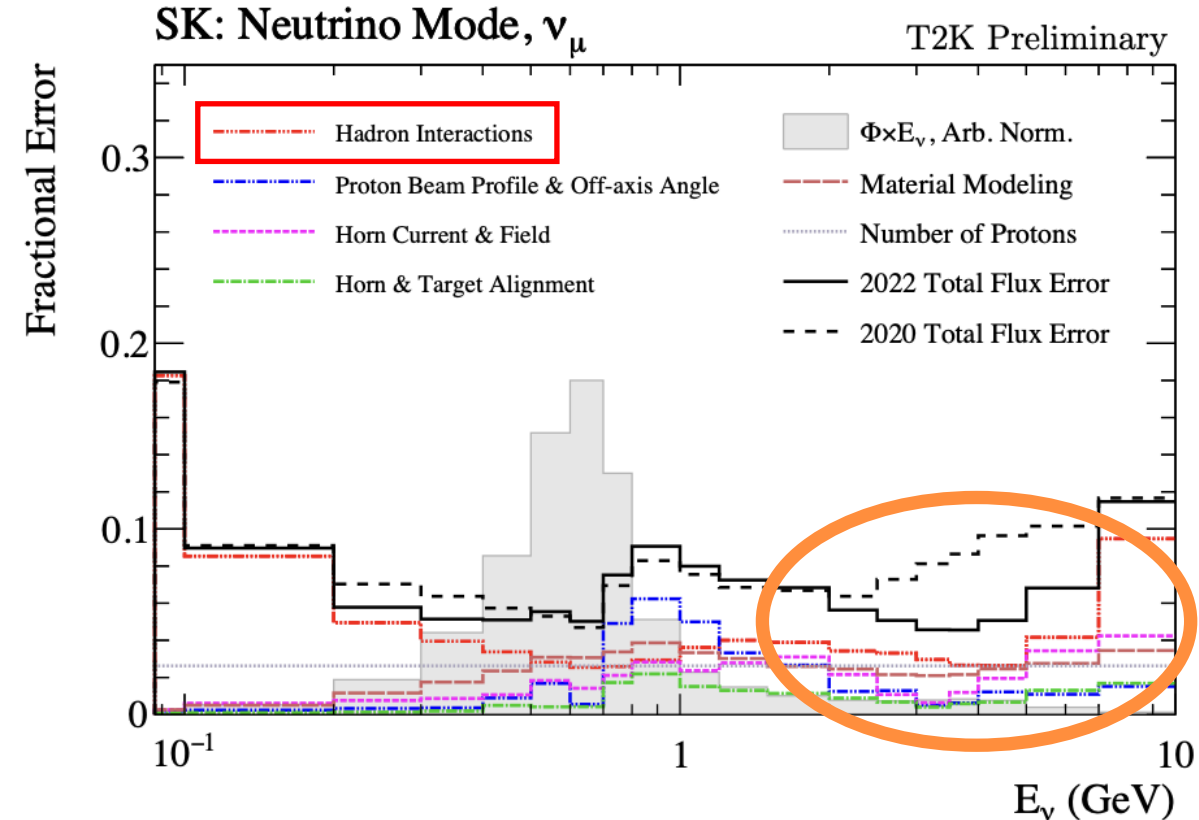
ハドロン生成に対する不定性

主要な不定性の一つ：ニュートリノフラックス計算に対するハドロン生成の不定性

- 2007年から2010年にかけて、T2K実験用のデータをNA61/SHINE実験にて取得した
→フラックスピーク付近で5%程度まで不定性削減
- 先行研究の結果、過去に測定結果のない高運動領域の荷電K中間子を測定することで更なる不定性削減が可能
- 2022年の6月から7月にかけて再度NA61/SHINE実験を実施

測定目標

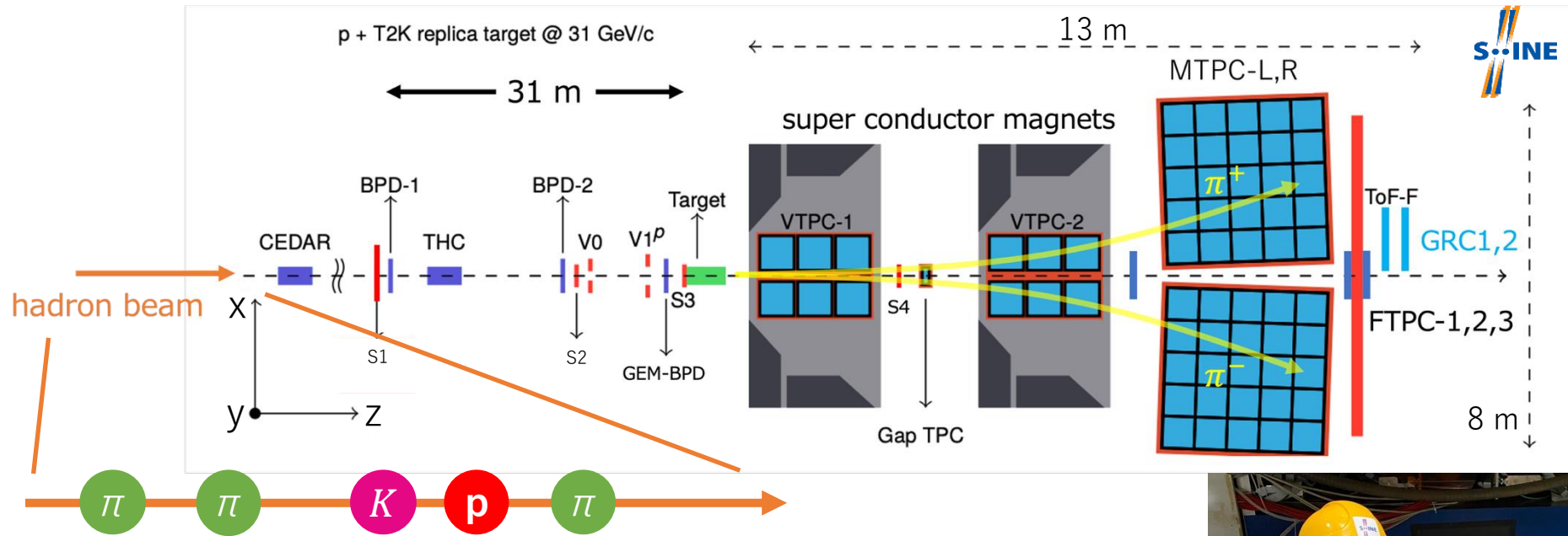
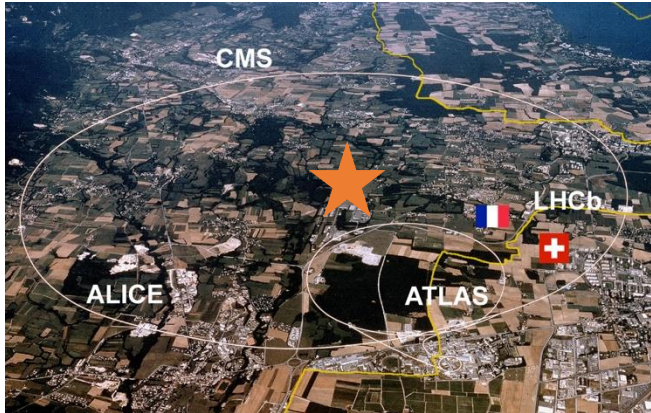
- ✓ 高運動領域における荷電K中間子 → 高エネルギー領域における不定性削減 (本講演)
- ✓ T2K replica targetによる K_S^0 → T2K replica targetにおける K_L^0 生成の不定性削減



NA61/SHINE実験

SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment

CERN



- CERNのNorth Areaで行われている多目的物理・固定標的実験
- SPSから供給されるビームを二次のハドロンビームにして使用する

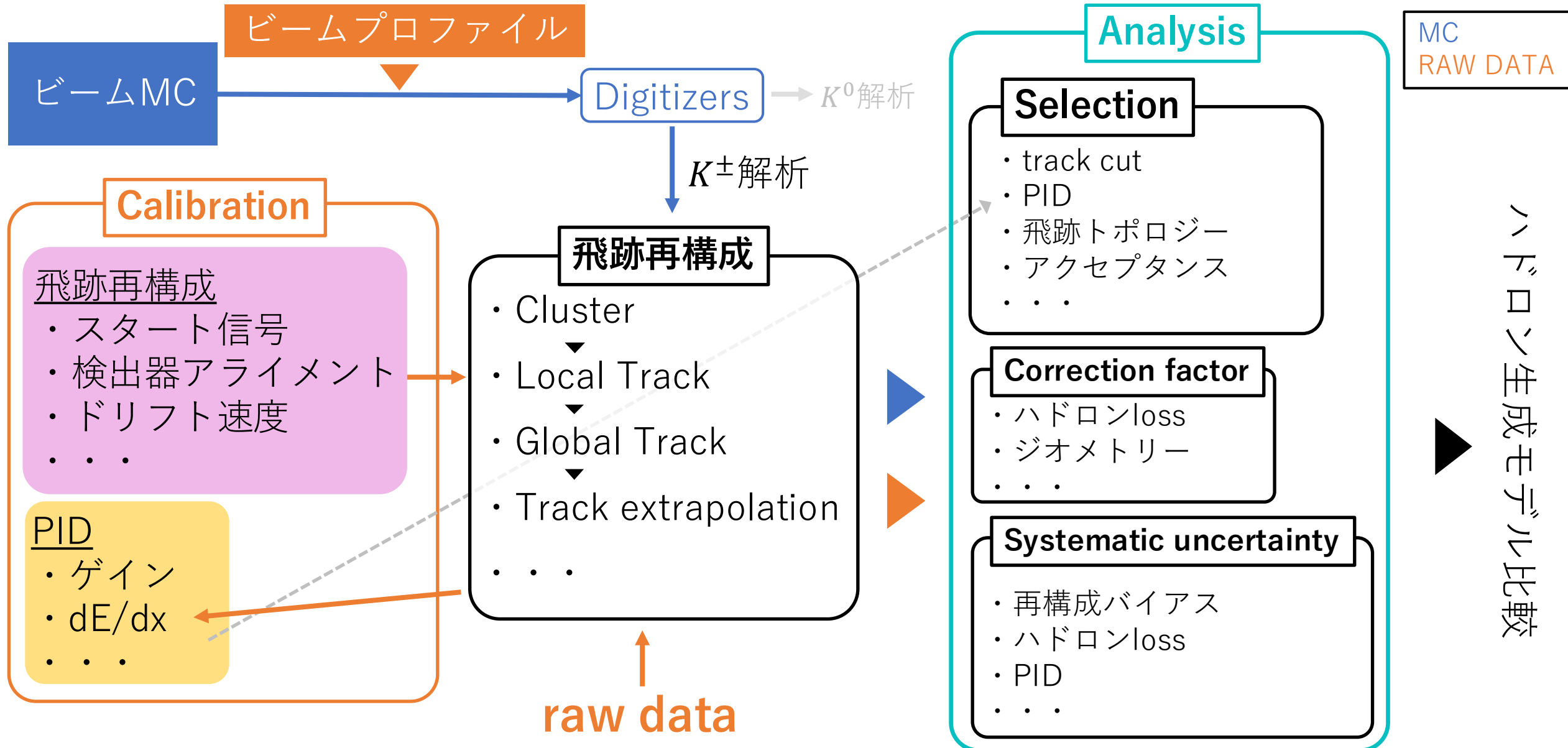
T2K 2022 run
 : T2K replica target + 31 GeV/c の陽子ビーム

◀ T2Kと同様のセッティング

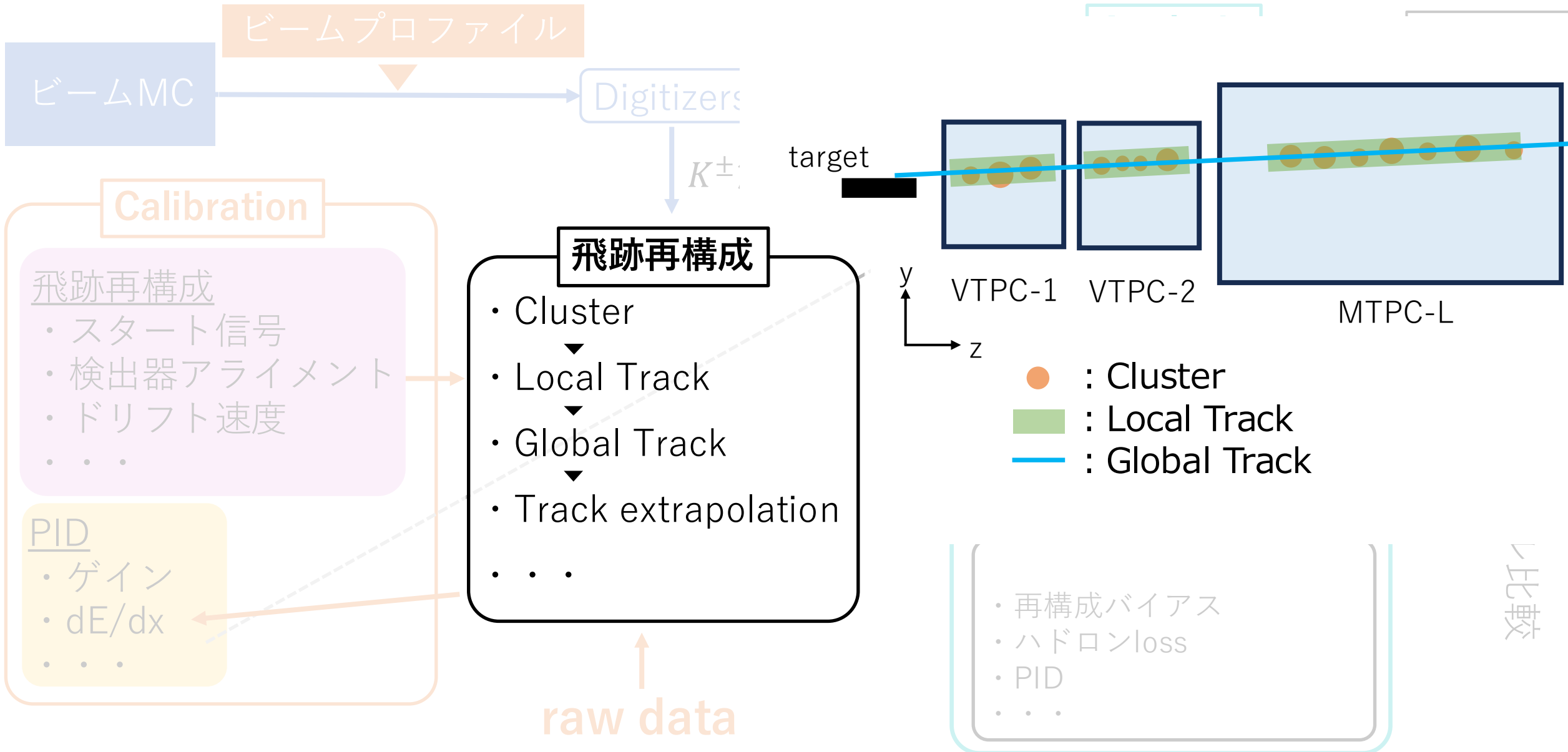
- 主な検出器：4台の巨大TPC + ビーム軸上のTPC
 → 荷電粒子の飛跡を3次元で再構成する



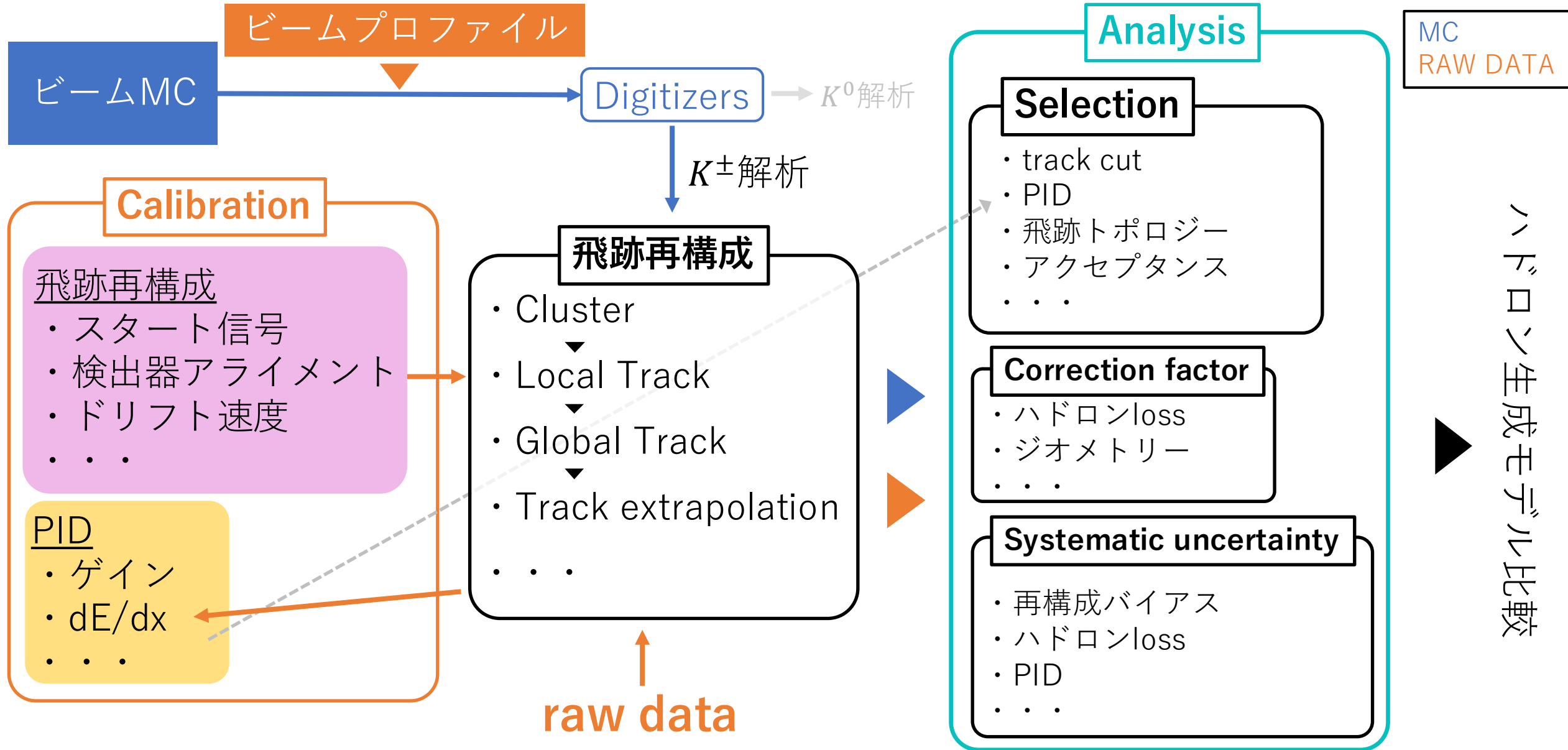
荷電 K 中間子解析の流れ



トラック外挿



荷電 K 中間子解析の流れ



Track cut

ビームプロファイル

- MCを用いて適切なカット条件を検証
- 陽子ビームを100,000回炭素標的に照射
- ビーム情報は実際のプロファイルを反映させたMC

- トリフト速度
- ...
- PID
- ゲイン
- dE/dx
- ...

- Global Track
- Track extrapolation
- ...

raw data

Analysis

Selection

- track cut
- PID
- 飛跡トポロジー
- アクセプタンス
- ...

Correction factor

- ハドロンloss
- ジオメトリー
- ...

Systematic uncertainty

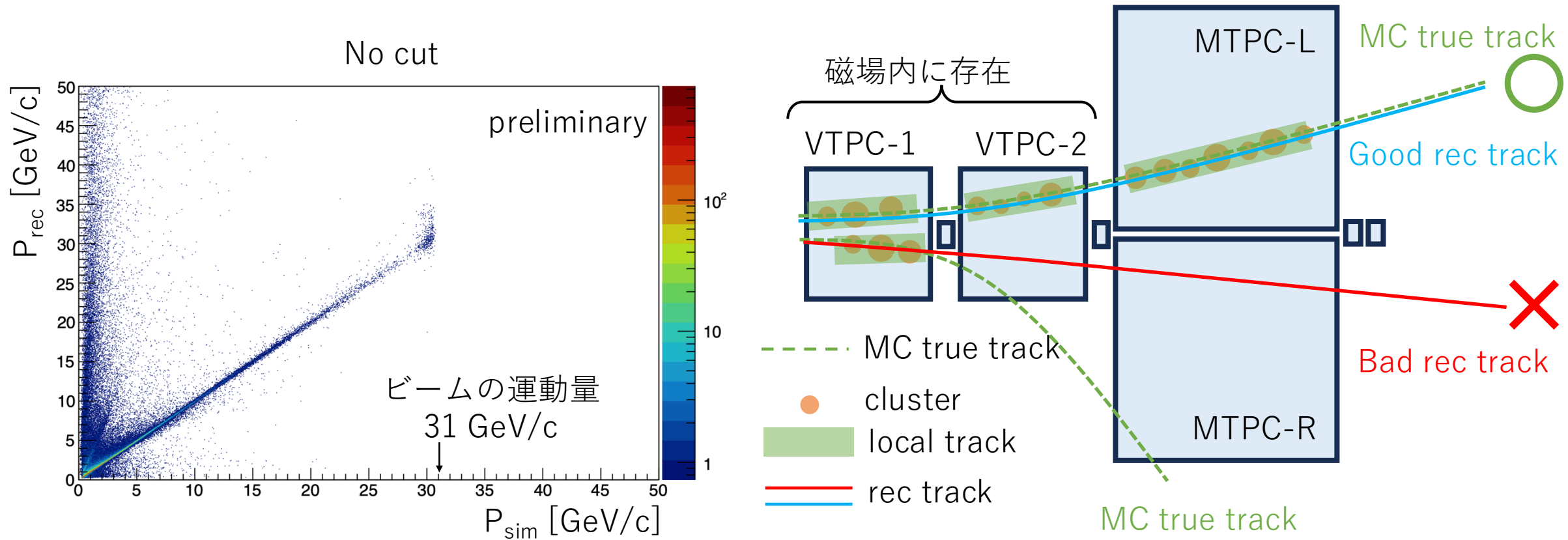
- 再構成バイアス
- ハドロンloss
- PID
- ...

MC
RAW DATA

ハドロン生成モデル比較



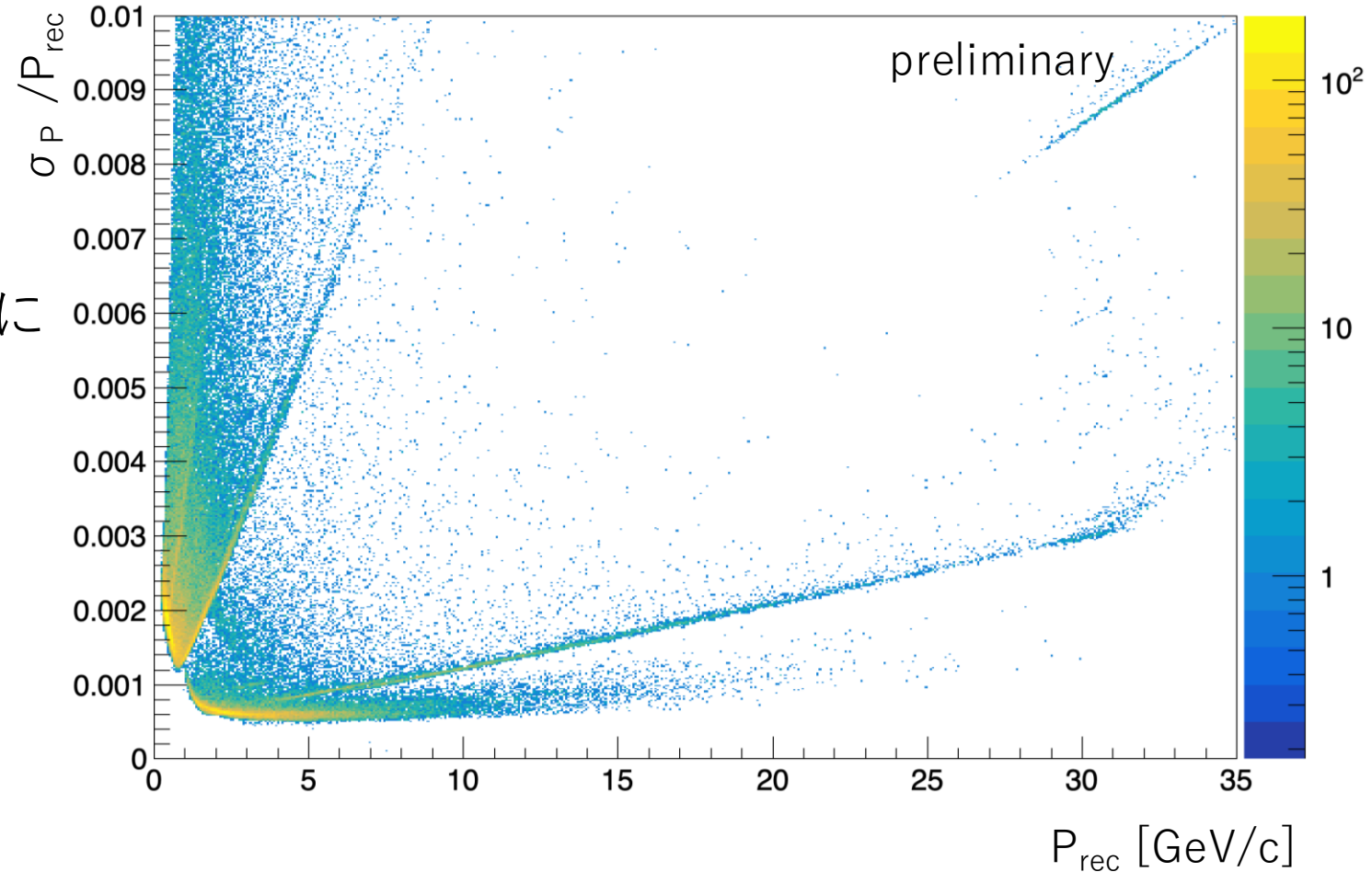
Cluster数によるtrack cut



- MC trueのtrackの運動量(P_{sim})と、それらに再構成をかけたtrackの運動量(P_{rec})を比較すると、 P_{sim} が小さいtrackで実際よりも運動量を大きく再構成してしまっているものがある
- 再構成trackに付随するcluster数が少ないと運動量の再構成精度が悪いと考えられる

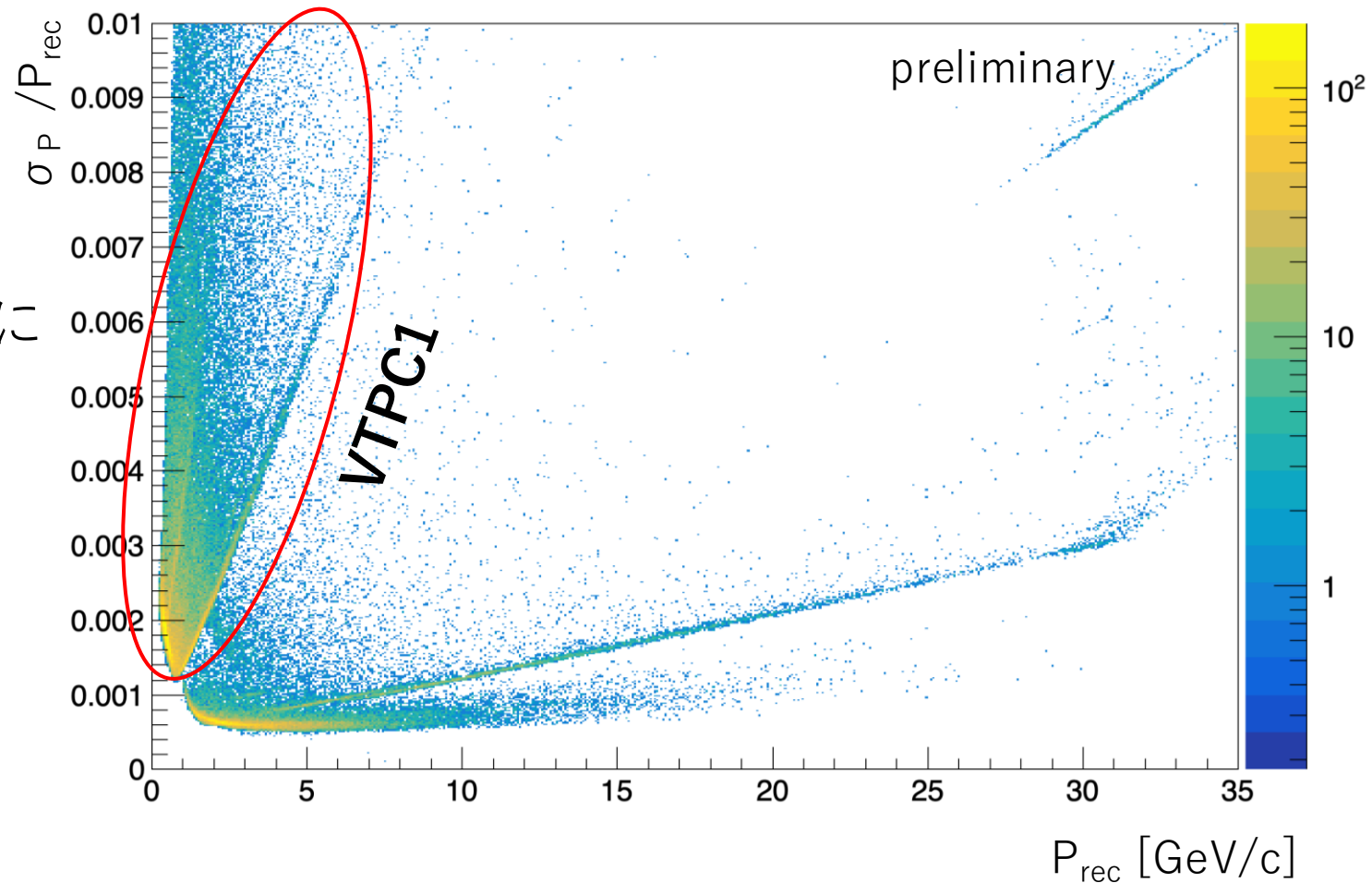
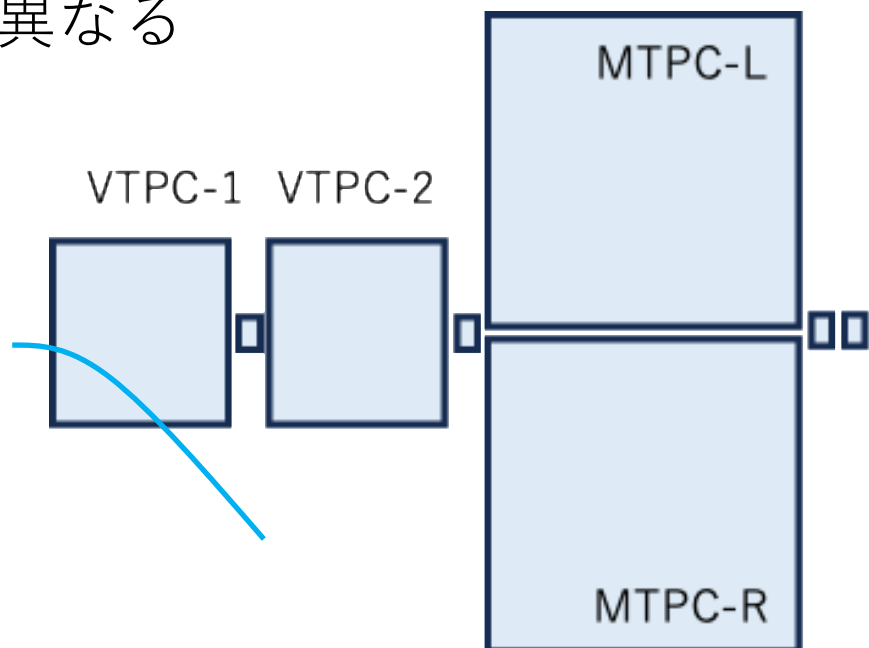
運動量の再構成精度

- 再構成したtrackの運動量とその精度(σ_P / P_{rec})とを比較した分布を見るといくつかのグループが存在
- trackがどこのTPCを通過したかによっても運動量の再構成精度が異なる



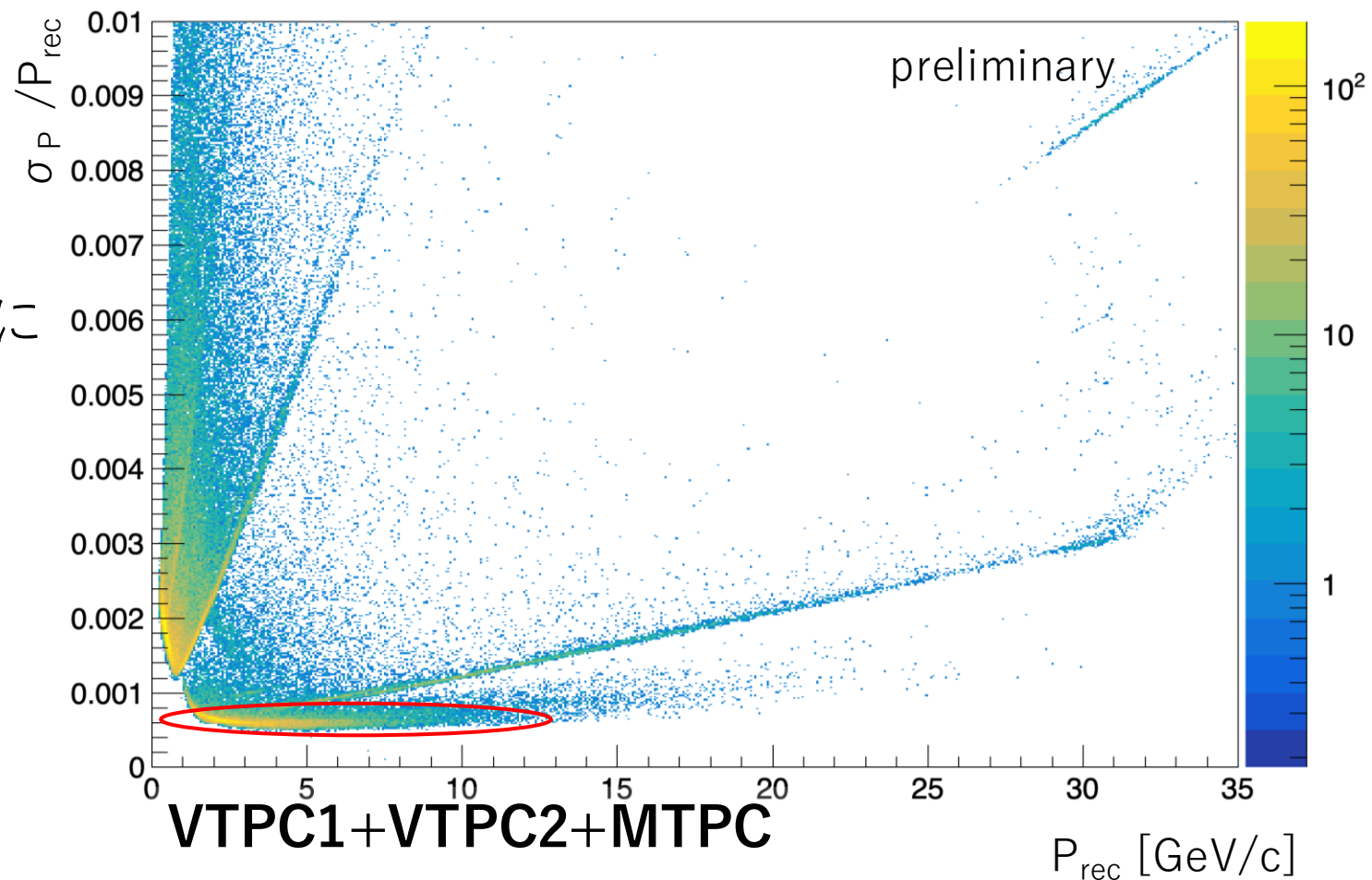
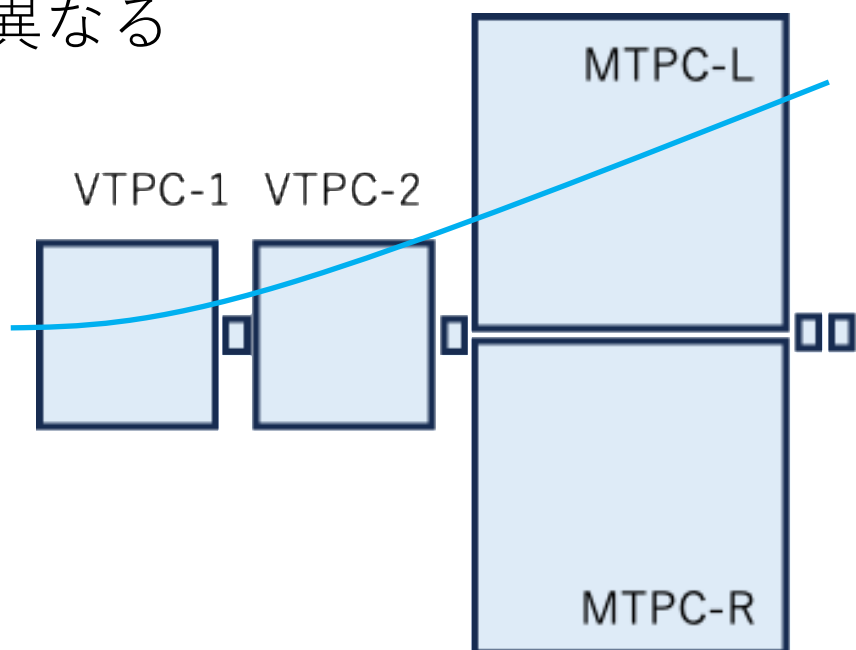
運動量の再構成精度

- 再構成したtrackの運動量とその精度(σ_P / P_{rec})とを比較した分布を見るといくつかのグループが存在
- trackがどこのTPCを通過したかによっても運動量の再構成精度が異なる



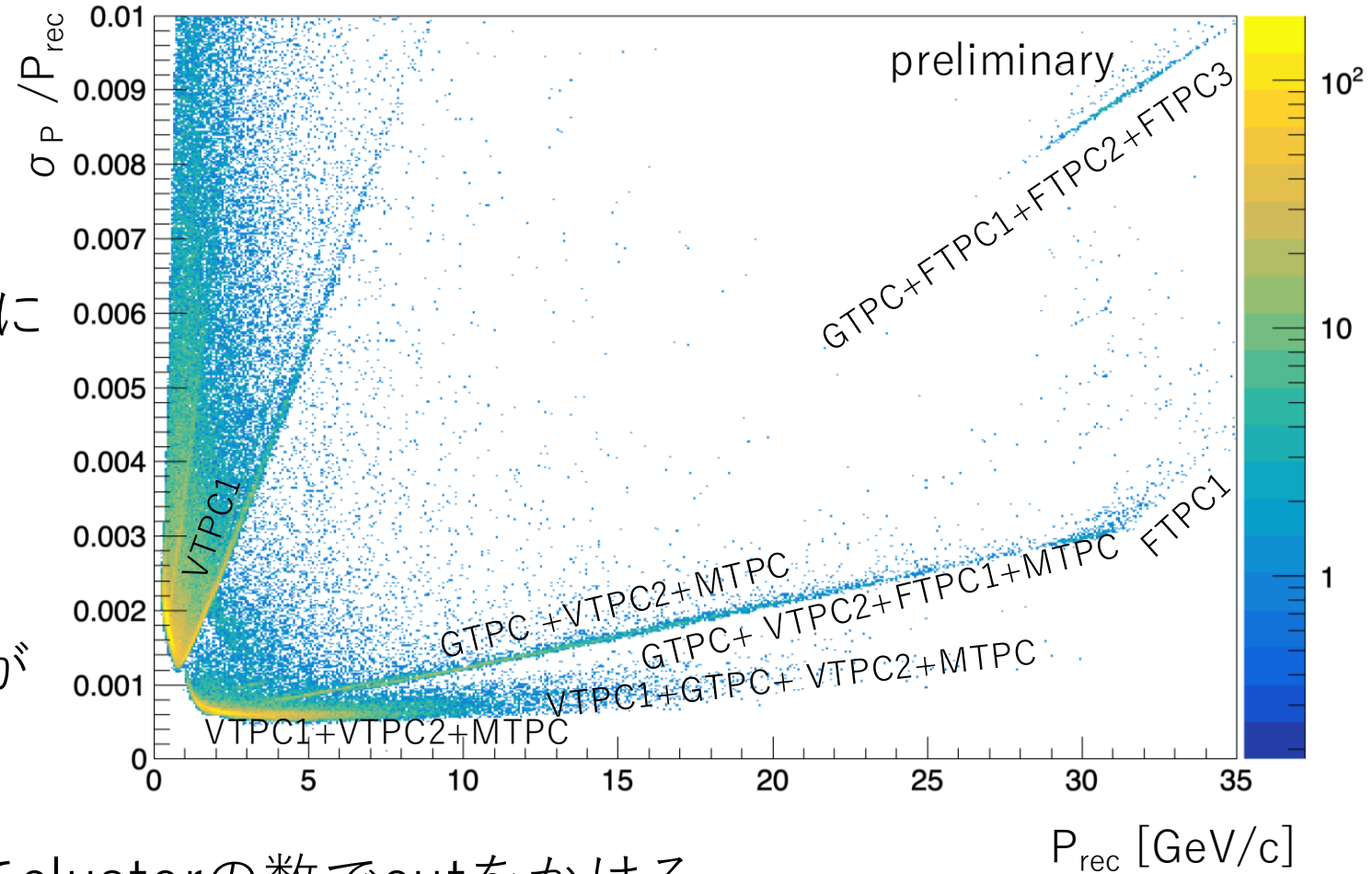
運動量の再構成精度

- 再構成したtrackの運動量とその精度(σ_P / P_{rec})とを比較した分布を見るといくつかのグループが存在
- trackがどこのTPCを通過したかによっても運動量の再構成精度が異なる



運動量の再構成精度

- 再構成したtrackの運動量とその精度(σ_P / P_{rec})とを比較した分布を見るといくつかのグループが存在
- trackがどこのTPCを通過したかによっても運動量の再構成精度が異なる
- VTPC1のみを通過しているtrackには再構成精度が良くないものが含まれる

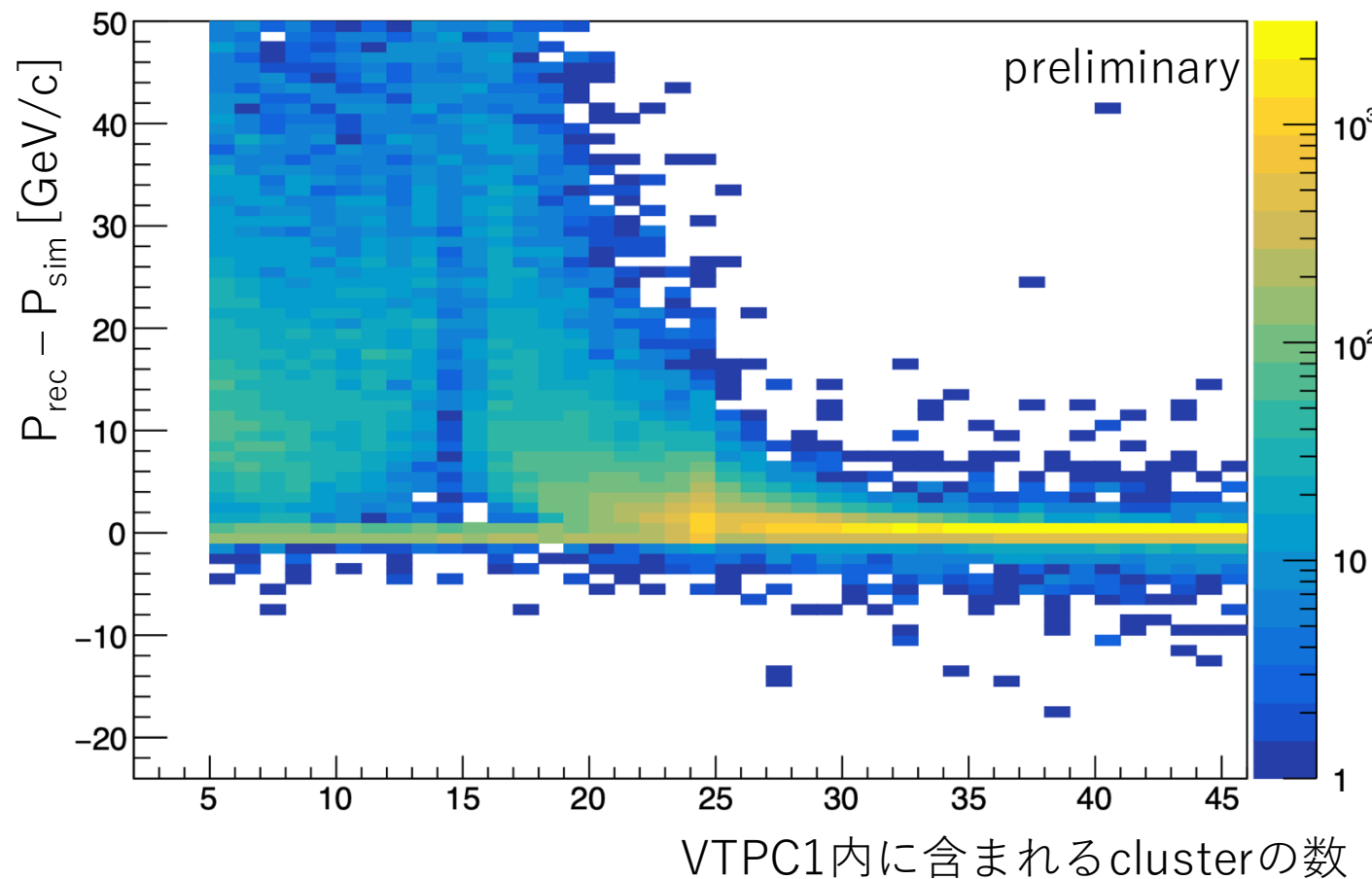


→ まずVTPC1内のtrackに対してclusterの数でcutをかける

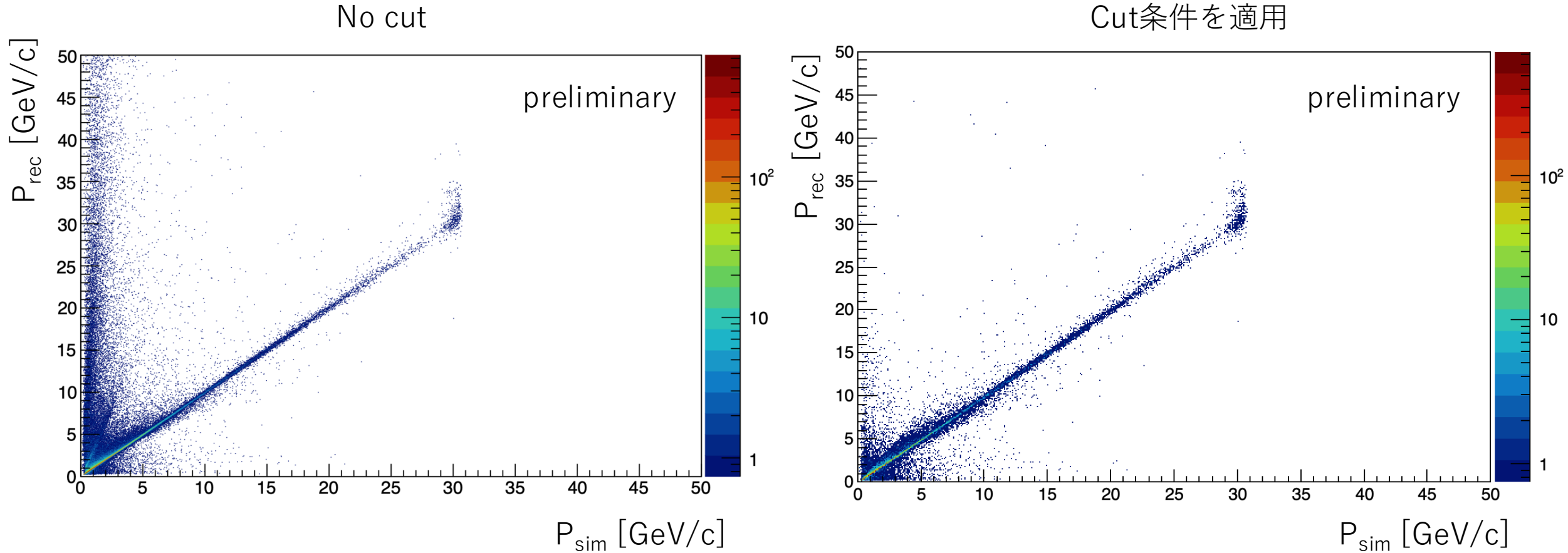
VTPC1内のcluster数に対するcut

- VTPC1内に含まれるclusterの数と $P_{\text{rec}} - P_{\text{sim}}$ の値を比較
- Cluster数が30付近まで $P_{\text{rec}} - P_{\text{sim}}$ の差が大きい
- 今回は VTPC1内のcluster数が30以上であることをcut条件に採用 (cut条件①)

↓
VTPC1内のcluster数が30未満でも



- 他の磁場内のTPCであるVTPC2とGTPCにclusterが存在すれば運動量測定が可能
- VTPC2とGTPCにclusterが存在することを要求 (cut条件②)



- 実際よりも再構成運動量を大きく計算しているtrackを削減
- 飛跡再構成精度が検出器内のトラックが通過した場所に依存する効果や、 dE/dx を用いたPIDを行う際に弁別が可能な領域を加味したカットを追加する

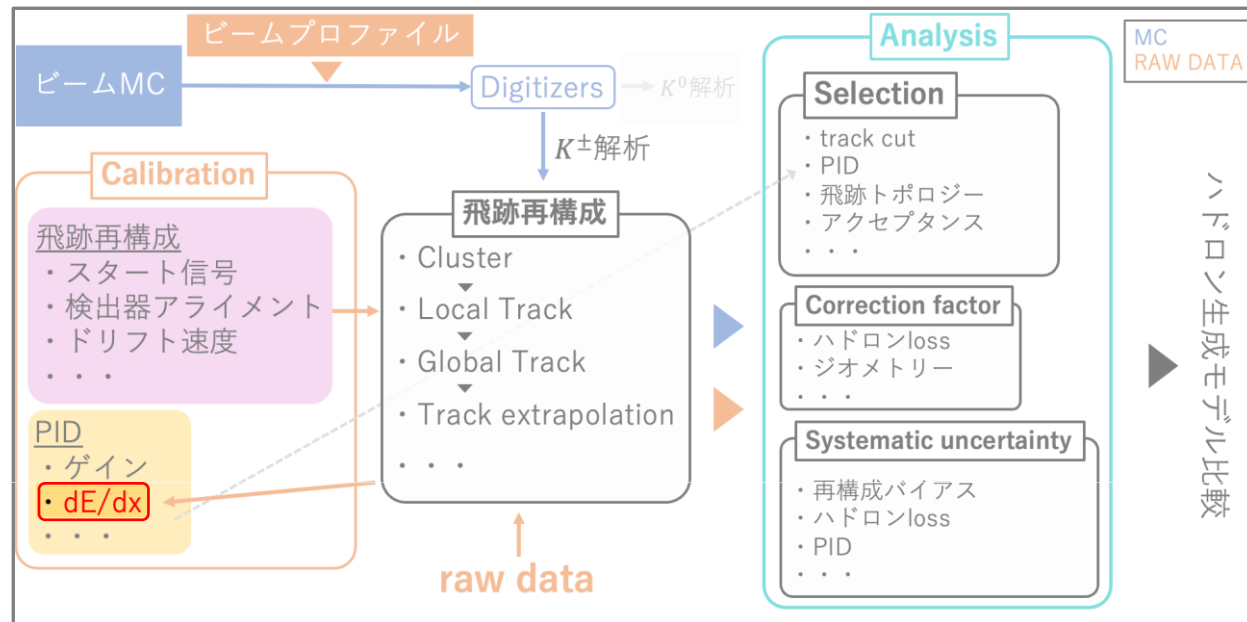
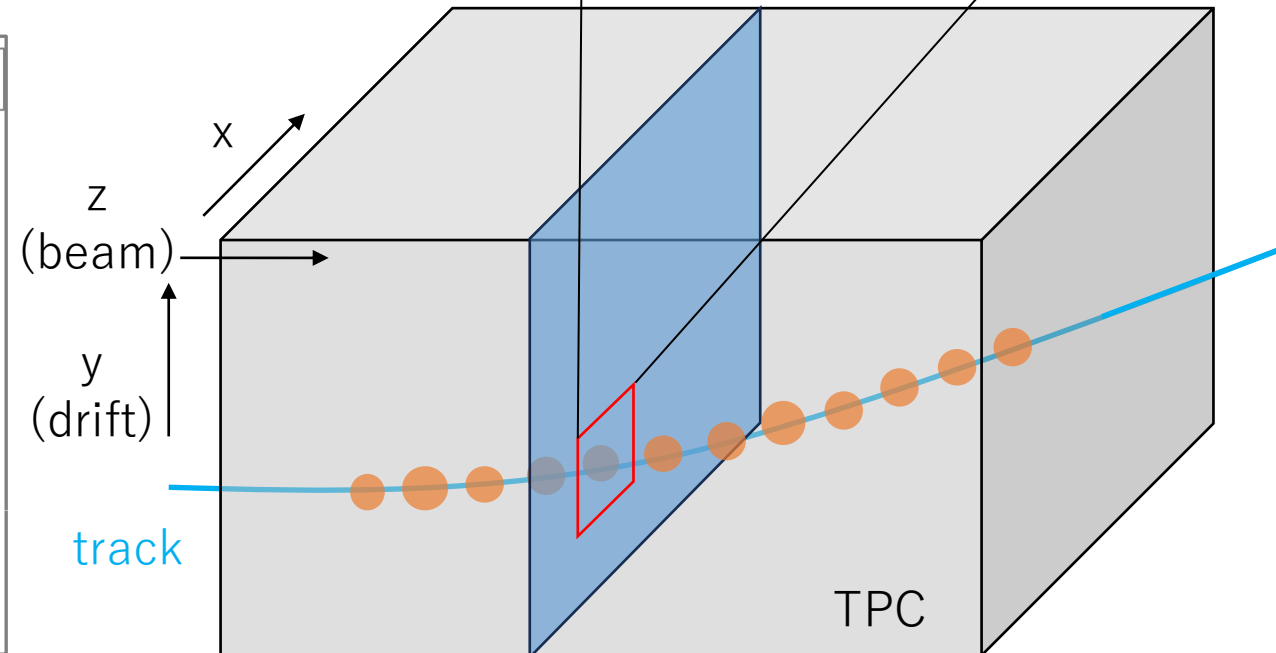
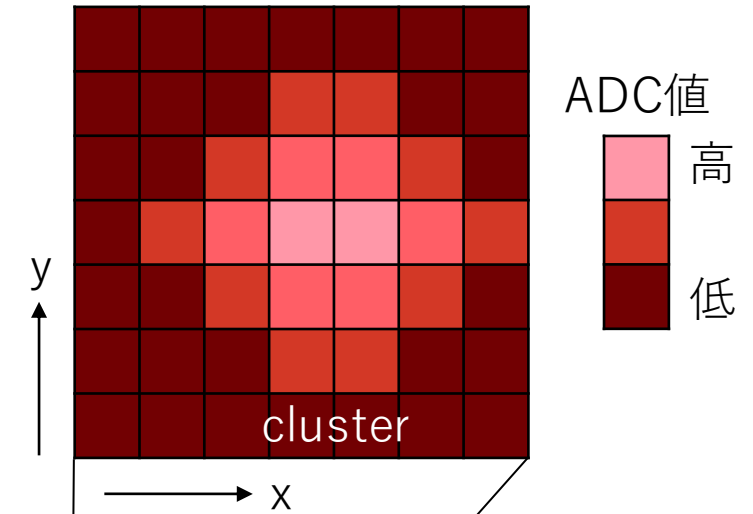
まとめ

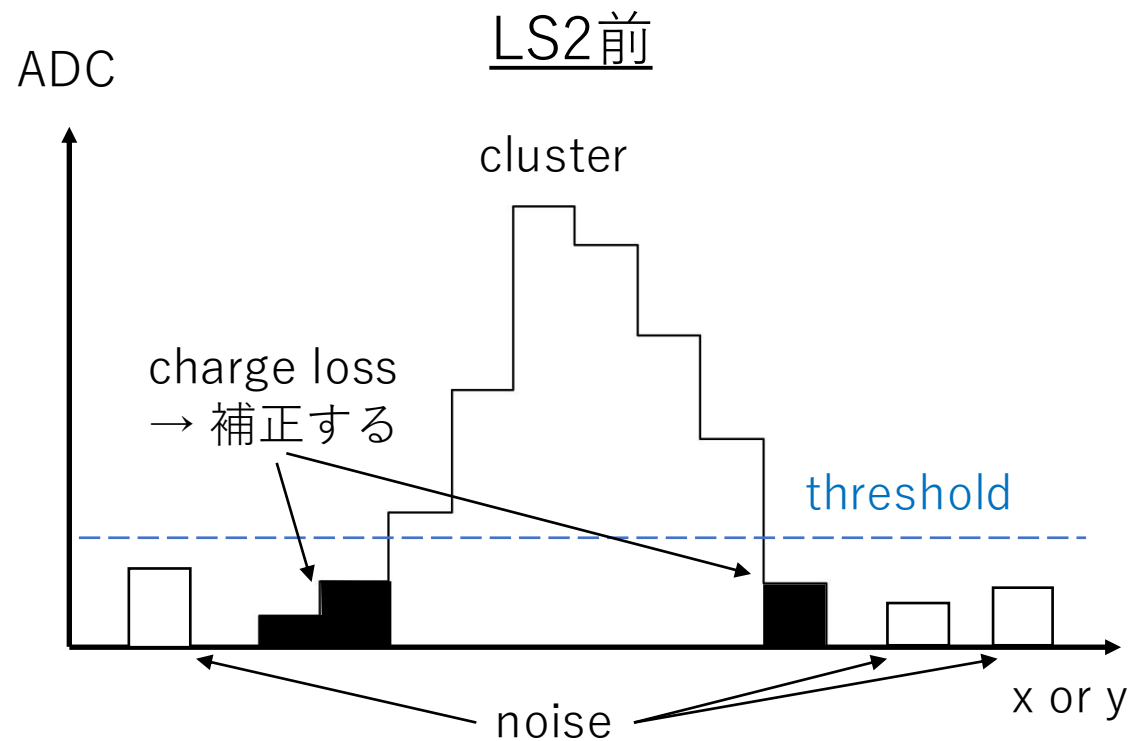
- T2K実験におけるニュートリノフラックス計算精度向上のため、2022年の6月から7月にかけてNA61/SHINE実験の追加データ取得を行なった
- 今回の主な目的は、高運動量荷電 K 中間子および K_S^0 の測定
→ 高運動量荷電 K 中間子：1GeV以上のニュートリノエネルギー領域での不定性削減
- MCを用いて再構成したトラックに対し適切なカット条件を検証
今回は再構成trackに付随するclusterの数に注目し
 - 最上流の磁場内にあるTPCのVTPC1 内でcluster数が30個以上存在
 - その他の磁場内のTPCにclusterが存在することを要求
- 実際よりも再構成運動量を大きく計算しているtrackを削減
- 今後は飛跡再構成精度が検出器内のトラックが通過した場所に依存する効果や、 dE/dx を用いたPIDを行う際に弁別が可能な領域を加味したカットを追加する

Backup

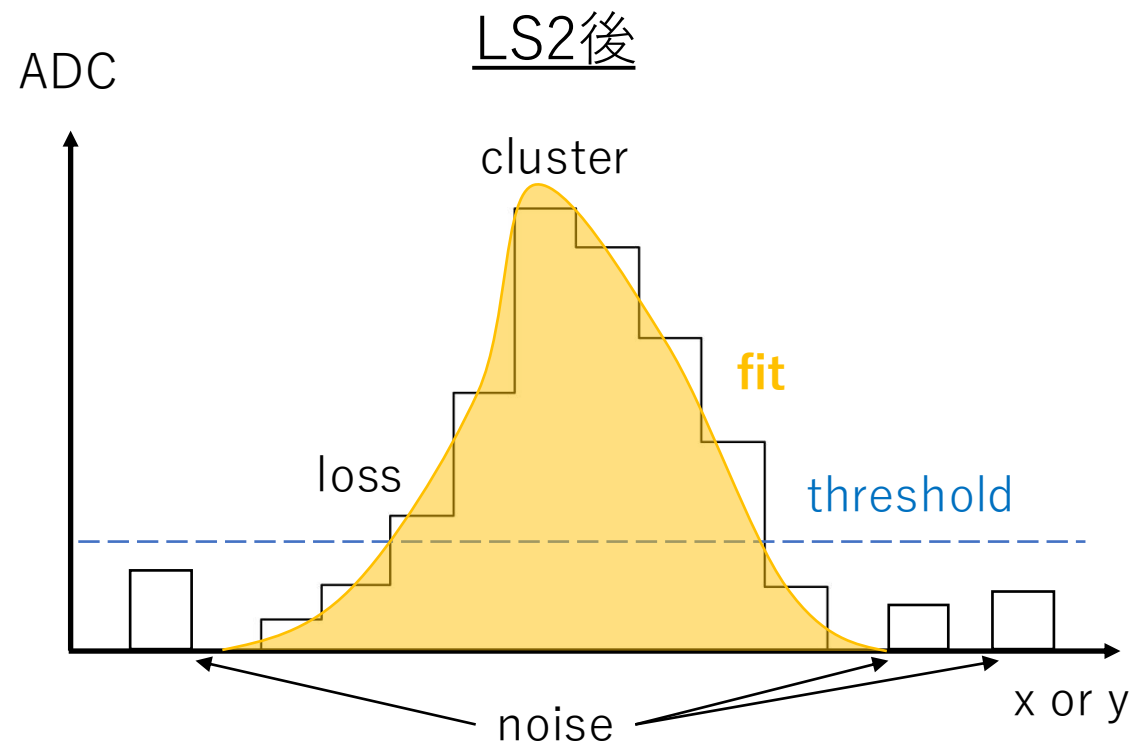
今後の展望 -Cluster fitting-

- PIDは dE/dx を用いて行う
→ dE/dx の精度を向上するためには電荷量の較正が必要
- 本研究の解析データはCERNのLong Shutdown 2(LS2)後の初の取得データ
→ LS2中にTPCのread outを新しくしたため、clusterの電荷量計算について同様の手法が適用できるか非自明





- 閾値以上のADC値を持つclusterを保存
- 閾値以下のtail部分のlossは専用のtableを準備して補正していた

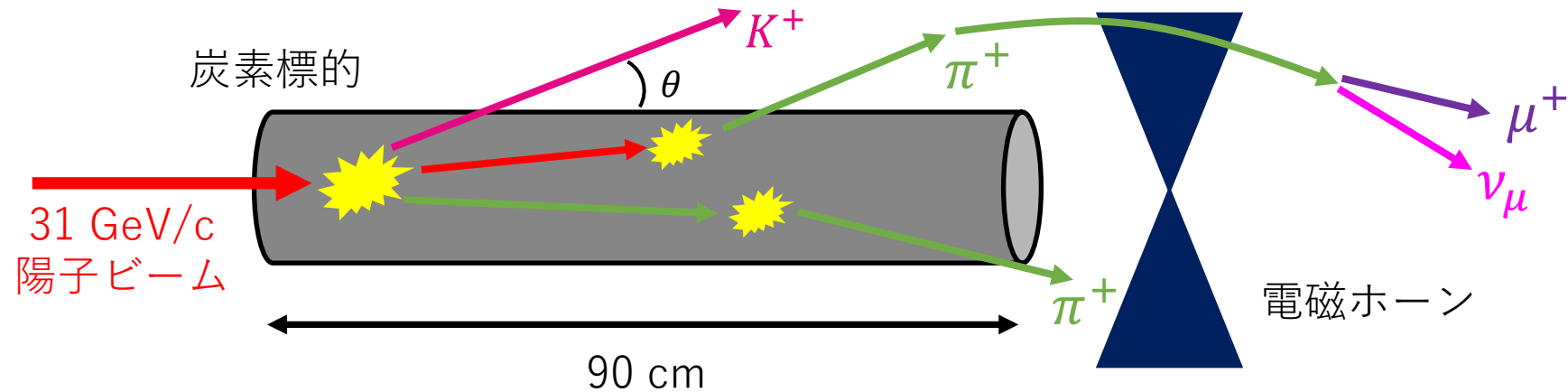


- TPC readoutが新しくなっているため、既存の補正tableが適用できるか非自明
- より正確な手法であると思われるcluster fittingの手法を開発する

ハドロン生成に対する不定性

主要な不定性の原因の一つ

→ ニュートリノフラックス計算に対するハドロン生成の不定性



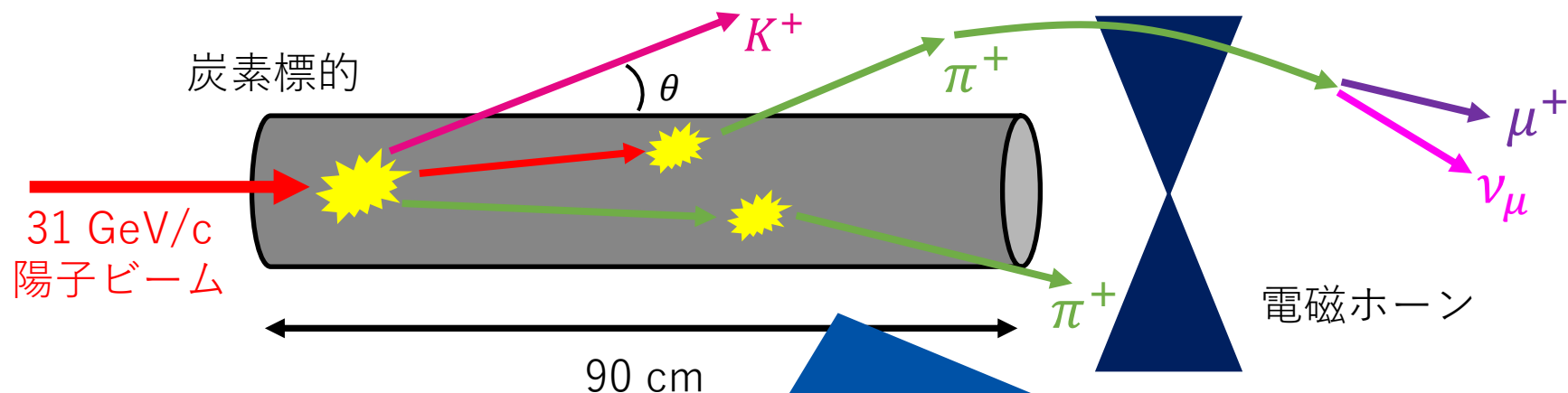
- T2K実験では31 GeV/cの陽子ビームを炭素標的に照射し、生成されるハドロン(主には π と K)の崩壊によって ν フラックスを生成している
- 標的内で陽子が複数回の複雑な散乱をするため、シミュレーションによって完全に再現することは難しく、モデル不定性が存在する

NA61/SHINE実験の測定結果から得られるハドロンの p - θ 分布によって重み付けをし補正する

ハドロン生成に対する不定性

主要な不定性の原因の一つ

→ ニュートリノフラックス計算に対するハドロン生成の不定性

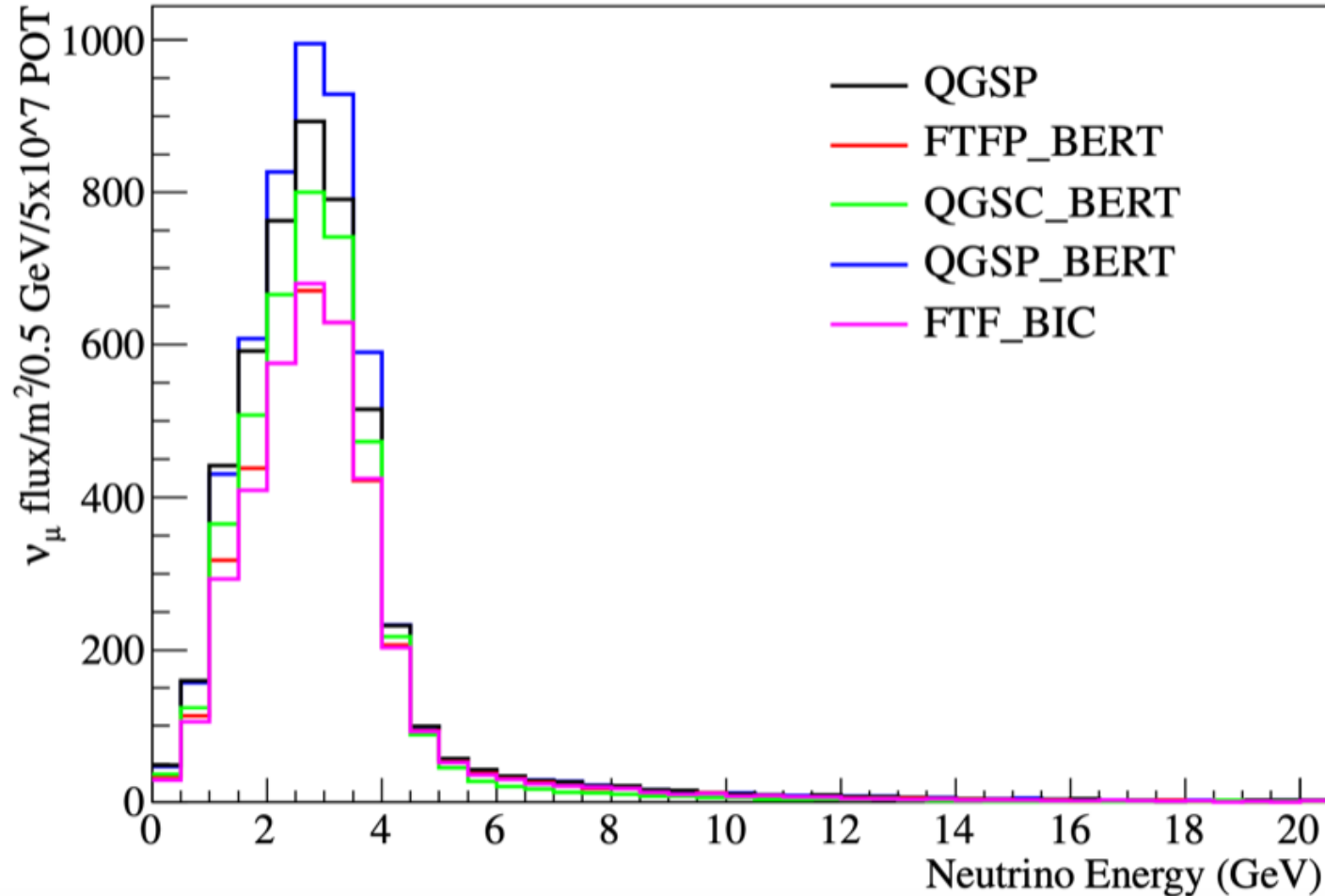


- T2K実験では31 GeV/cの陽子ビームを炭素標的の崩壊によって ν フラックスを生成して
 - 標的内で陽子が複数回の複雑な散乱をするため、シミュレーションによって完全に再現することは難しく、モデル不定性が存在する
- Callout box questions:
- どのようなハドロンが? (Which hadrons?)
 - どのような運動量で? (With what momentum?)
 - どの角度で? (At what angle?)
 - どの程度の量? (How much?)

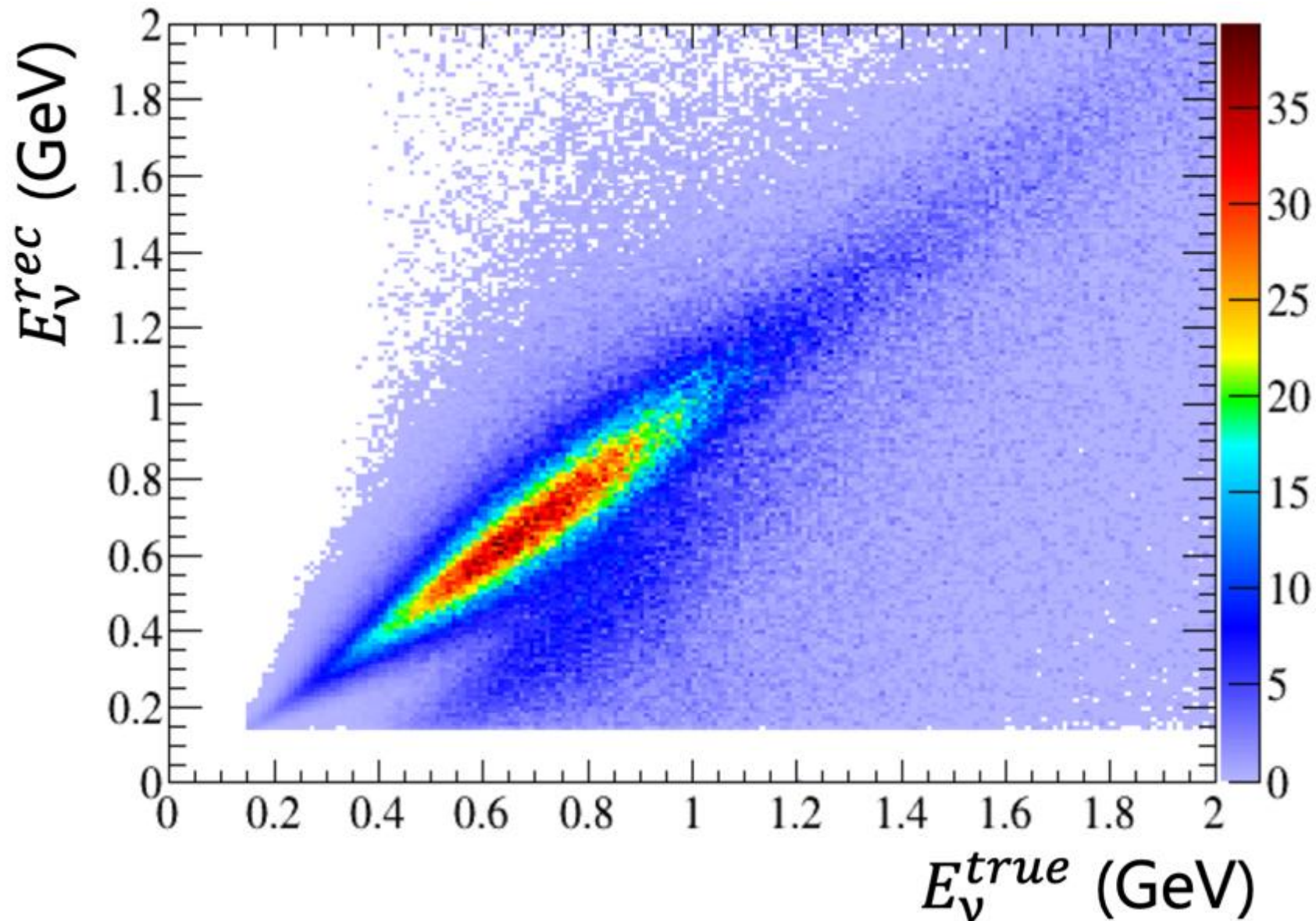
NA61/SHINE実験の測定結果から得られるハドロンのp- θ 分布によって重み付けをし補正する

ハドロン生成に対する不定性

モデル不定性の一例

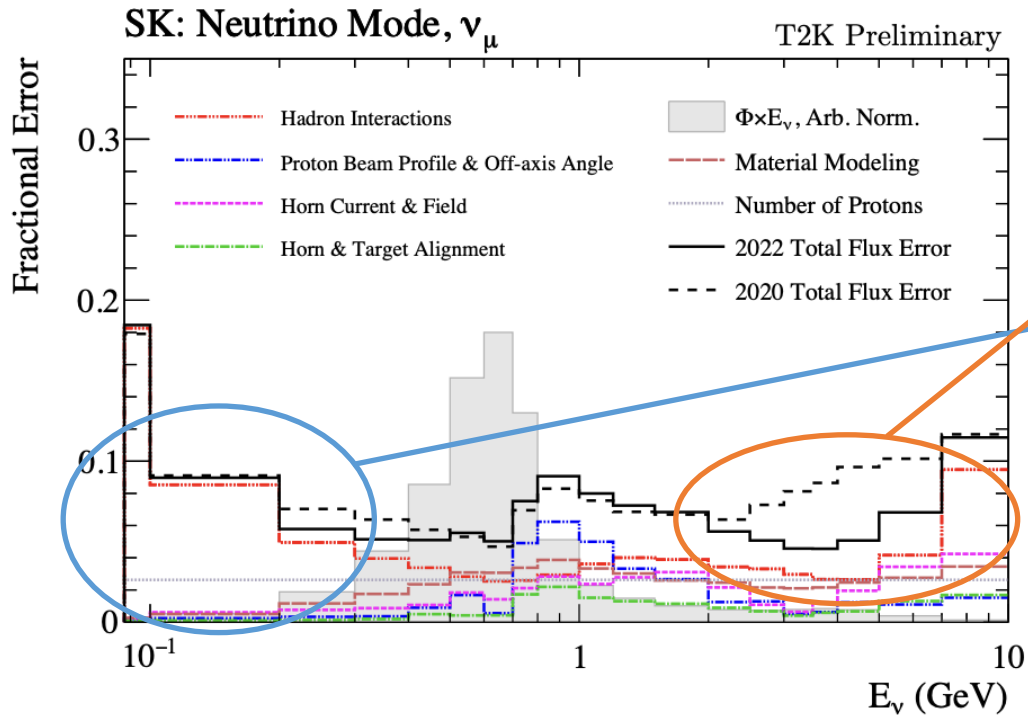
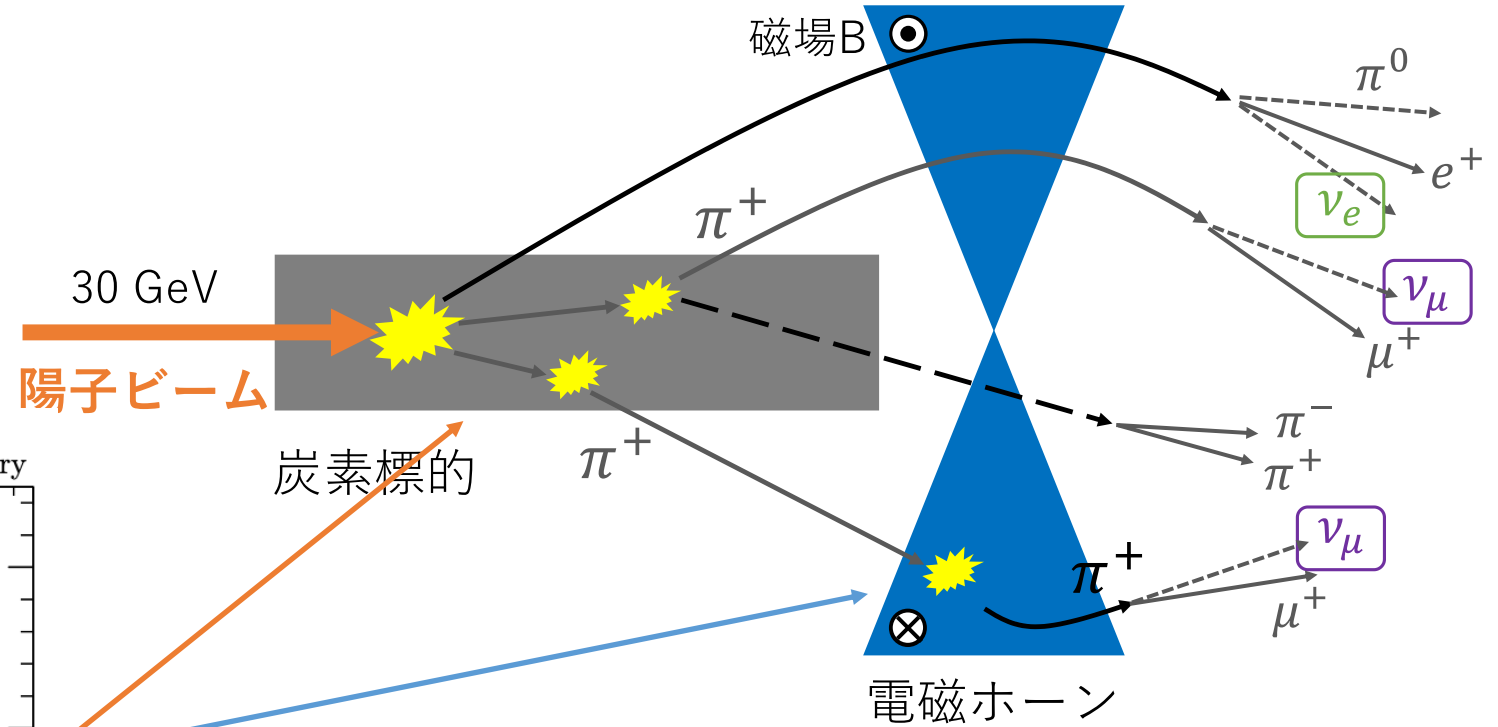


- MINERvA実験におけるNuMI beamlineにおいて π^+ からの崩壊で生成されるニュートリノフラックスのエネルギー分布をGeant4におけるいくつかのハドロン生成モデルで描いたもの
- モデルによって生成されるニュートリノフラックス分布が異なる

E_{ν}^{true} vs E_{ν}^{rec} 

- 真のニュートリノのエネルギーと再構成後のニュートリノエネルギーには幅があるためより高エネルギーのイベントからの影響も染み出す

ハドロン生成に対する不定性



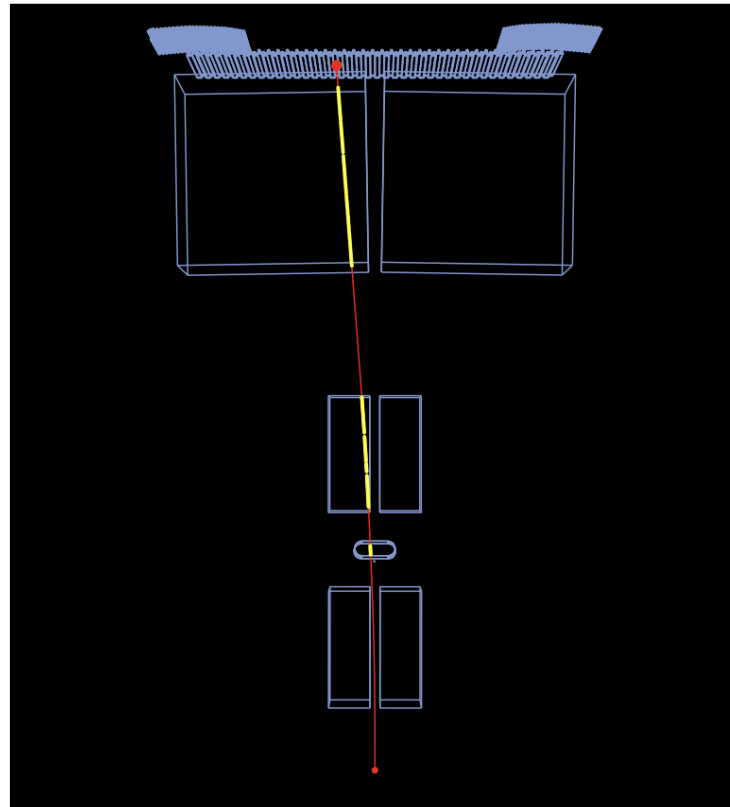
- 高エネルギー領域：高運動量荷電K中間子
- 低エネルギー領域：低運動量ハドロンと標的周辺の物質の相互作用 (AIで出来た電磁ホーン)
- 低運動量領域における不定性についてはLS3後にlow-energy beamlineを建設しデータ取得することが計画

関連発表：25aT1-1

Right Side Track(RST) と Wrong Side Track(WST)

RST

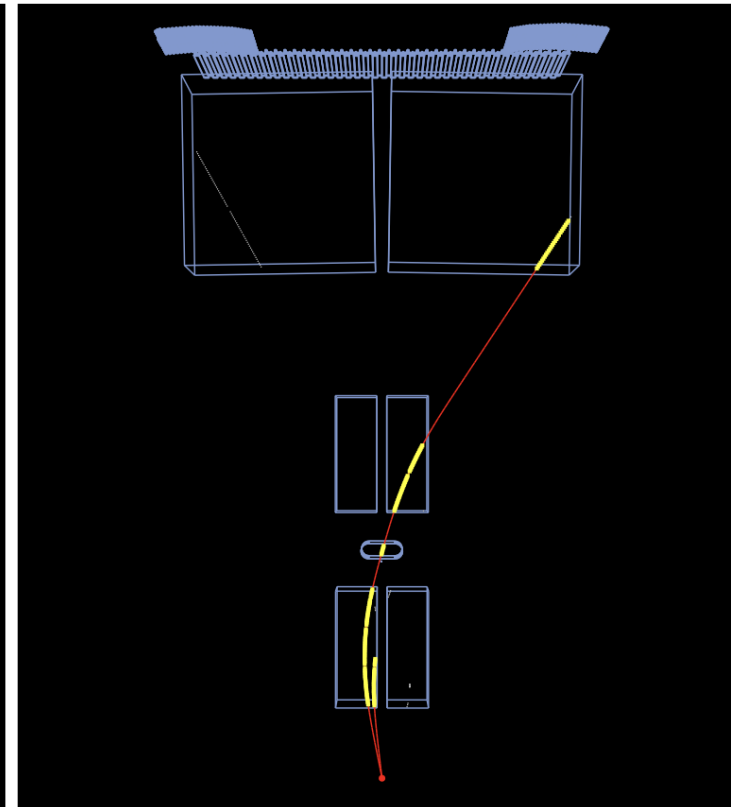
$$q \cdot px > 0$$



(a)

WST

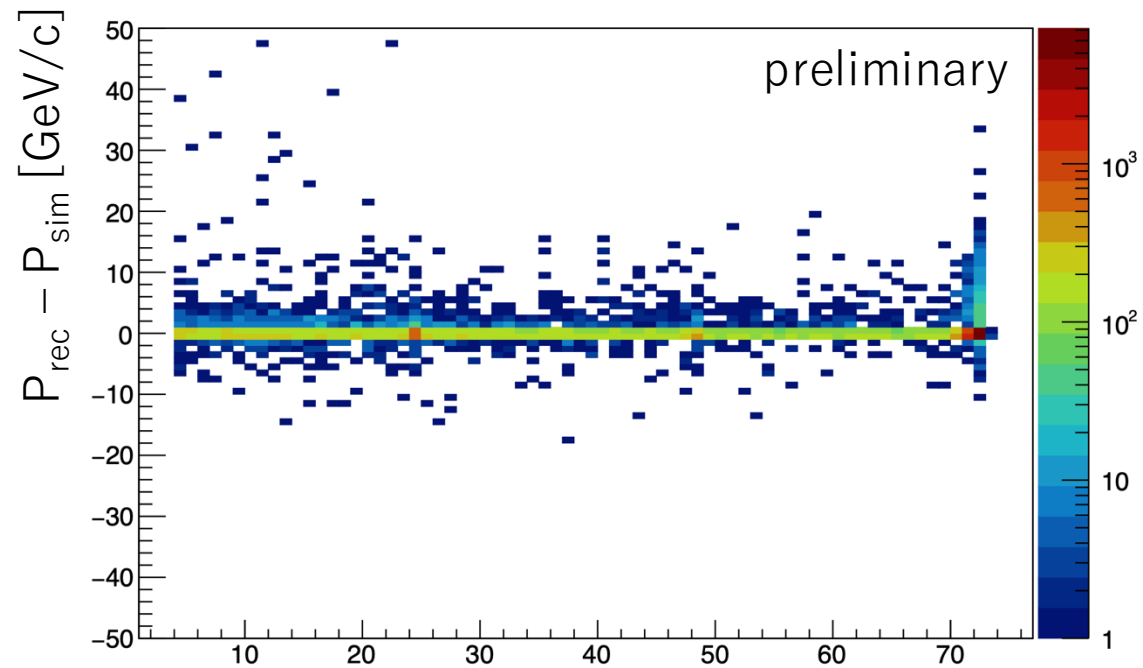
$$q \cdot px < 0$$



(b)

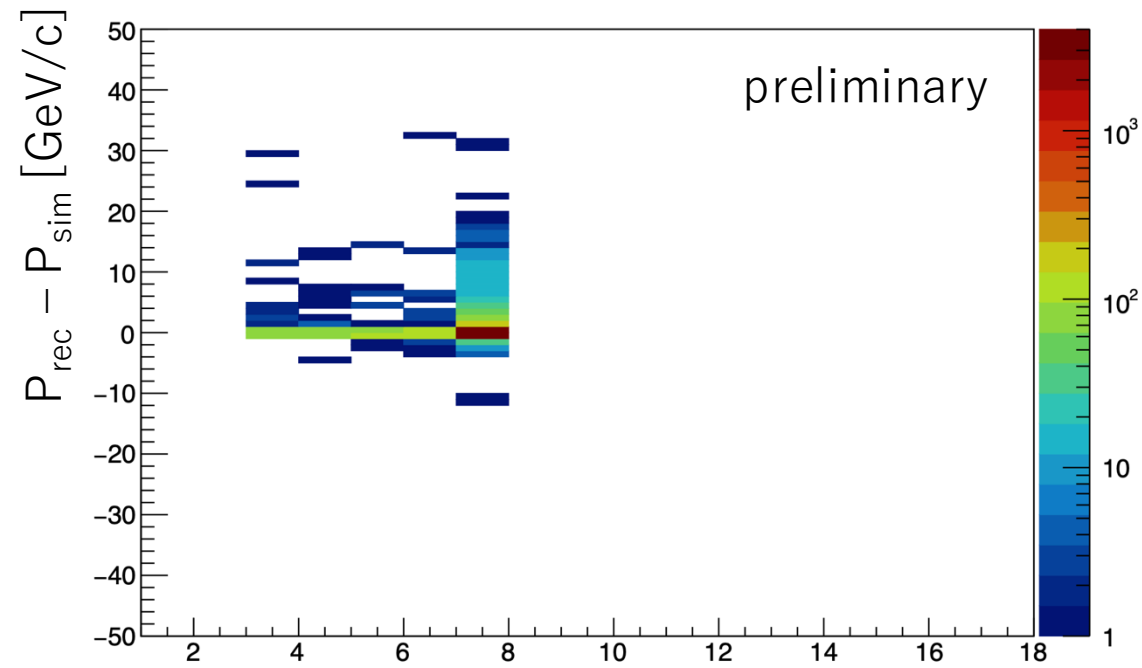
VTPC2及びGTPC内のcluster数に対するcut

VTPC2内のcluster数に対して



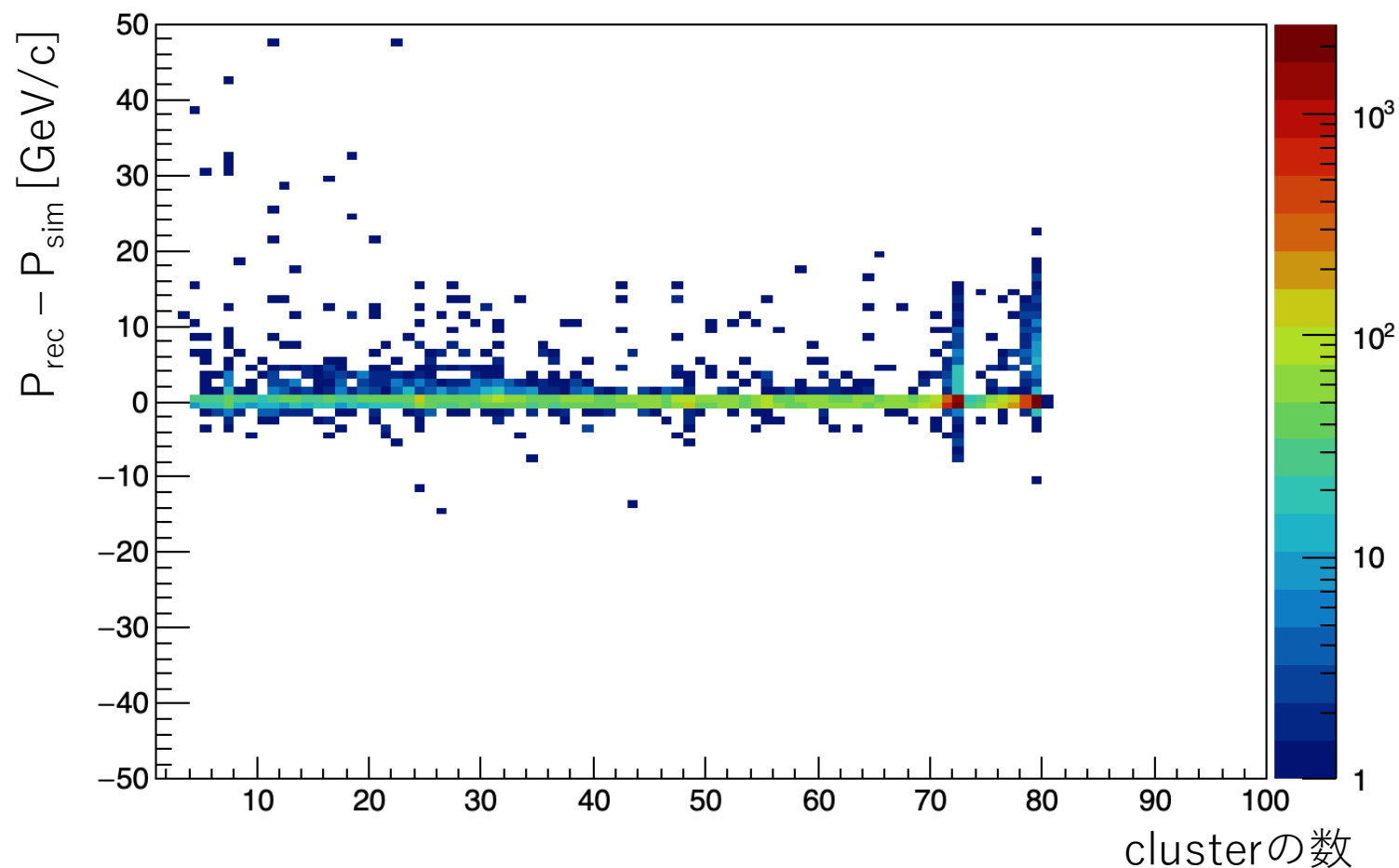
VTPC2内に含まれるclusterの数

GTPC内のcluster数に対して



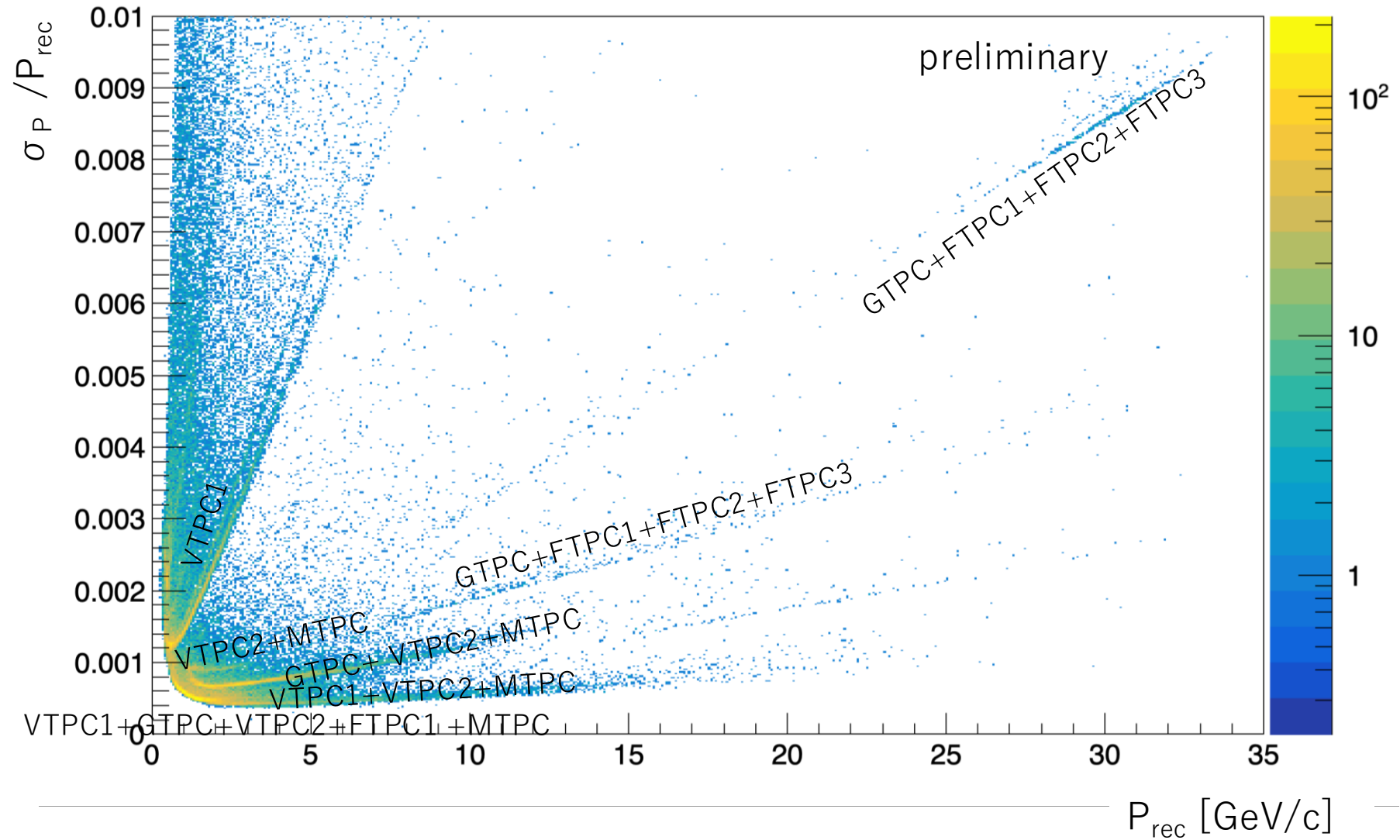
GTPC内に含まれるclusterの数

VTPC2及びGTPC内のcluster数に対するcut



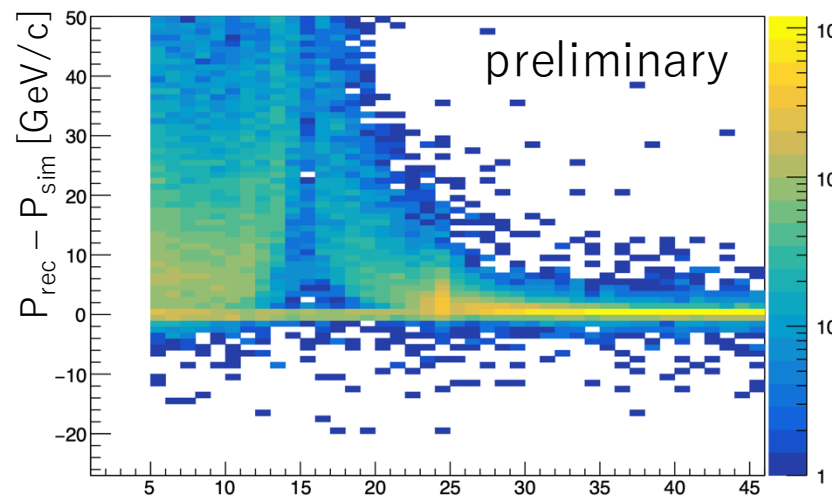
- VTPC1内のclusterが30未満であるときの、VTPC2及びGTPC内の合計のcluster数と $P_{\text{rec}} - P_{\text{sim}}$ の値の関係
- どのcluster数でも $P_{\text{rec}} - P_{\text{sim}}$ の差が極端に広がっている場所は少ないためVTPC1内のclusterが30未満であってもVTPC2あるいはGTPCにclusterが存在すればtrackを残すようなcutを考えた

WSTでの運動量の再構成精度



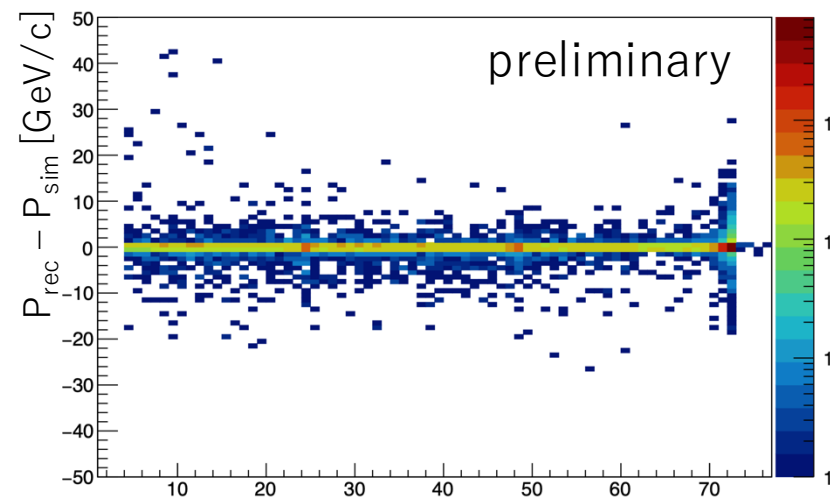
WSTでのcluster数に対するcut

VTPC1内のcluster数に対して



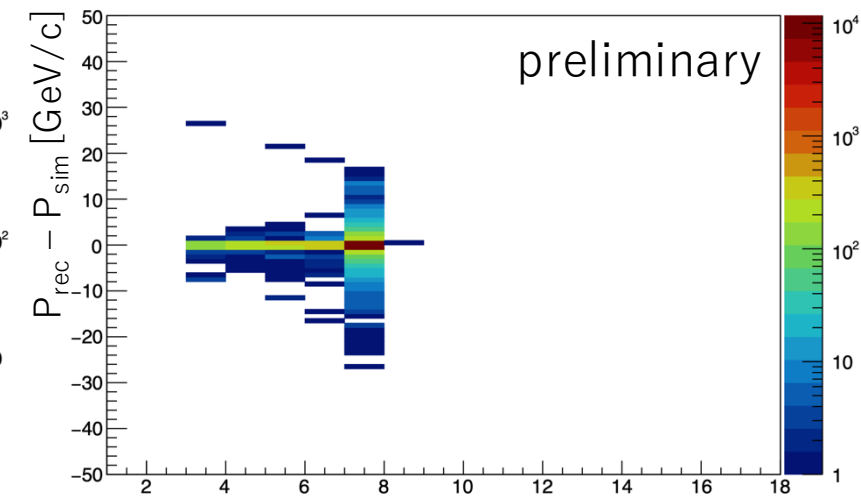
VTPC1内に含まれるclusterの数

VTPC2内のcluster数に対して



VTPC2内に含まれるclusterの数

GTPC内のcluster数に対して

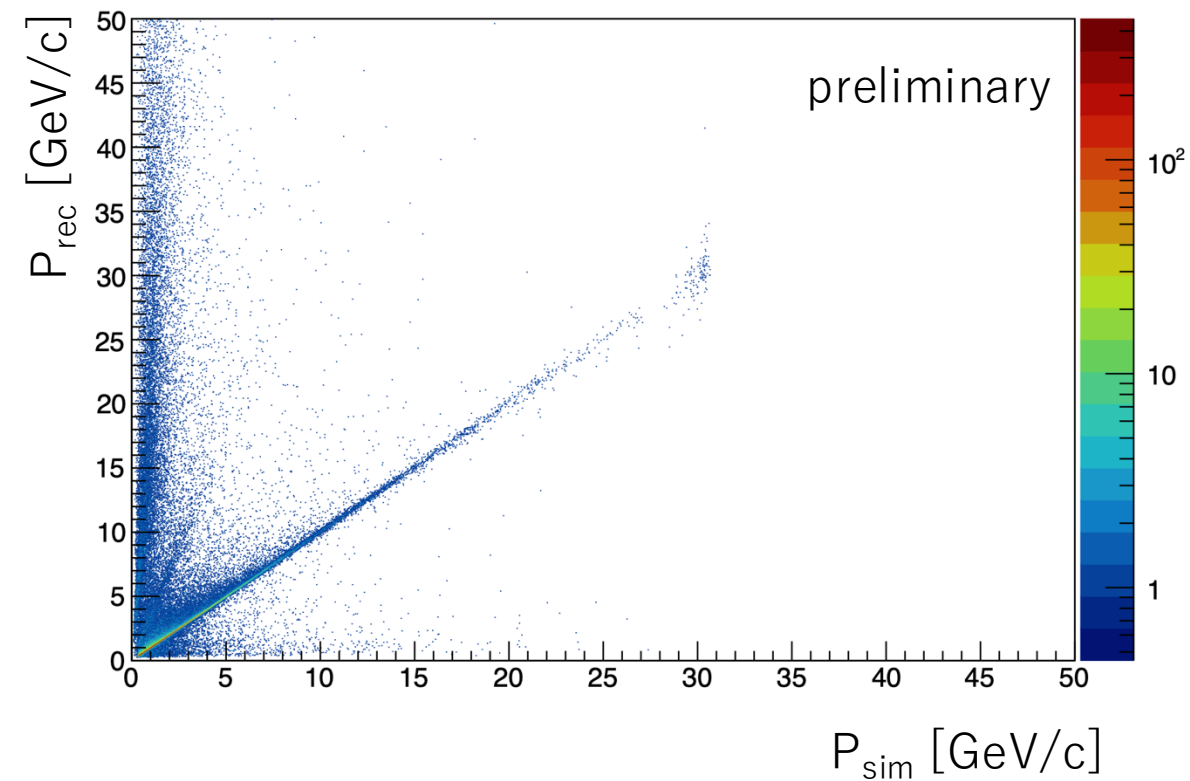


GTPC内に含まれるclusterの数

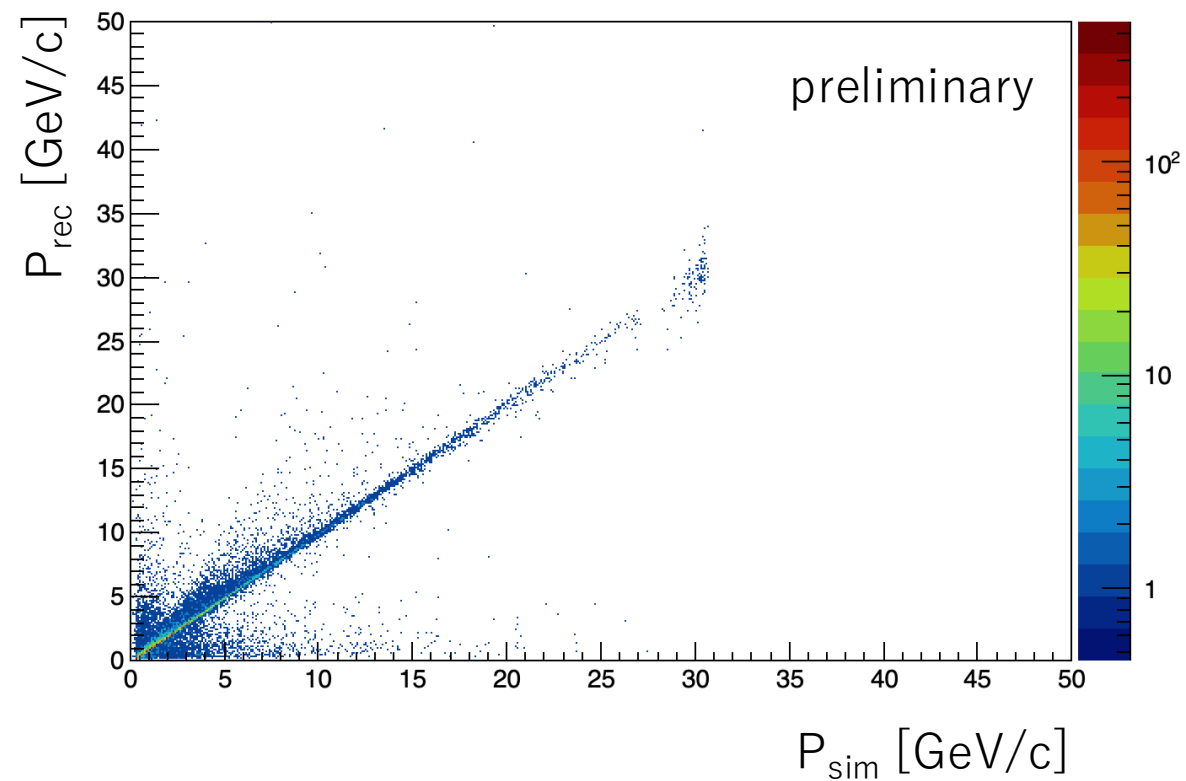
WSTでcut条件を適用した場合

- WSTに対しても同様のcut条件を適用する。
 - VTPC1 内でcluster数が30個以上存在
 - その他の磁場内のTPCにclusterが存在

No cut



Cut条件を適用



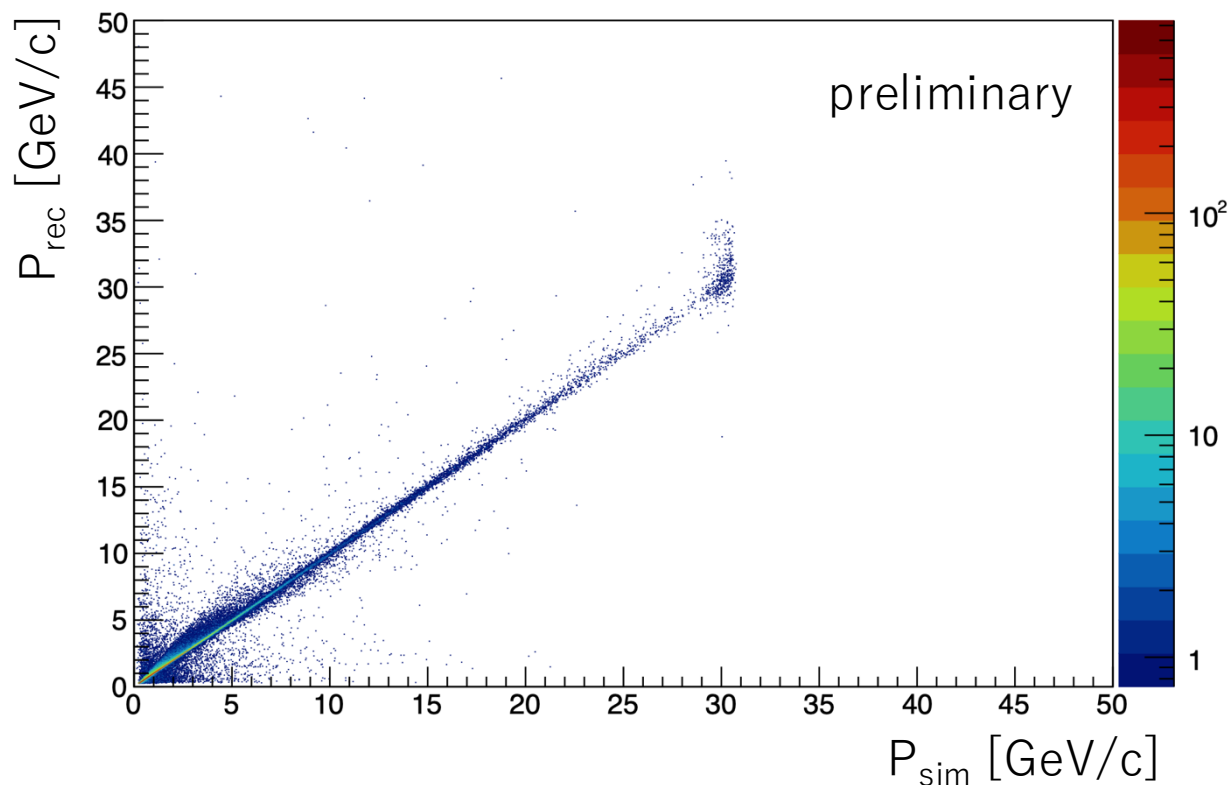
前回解析のカット条件との比較(RST)

前回解析でのcut条件

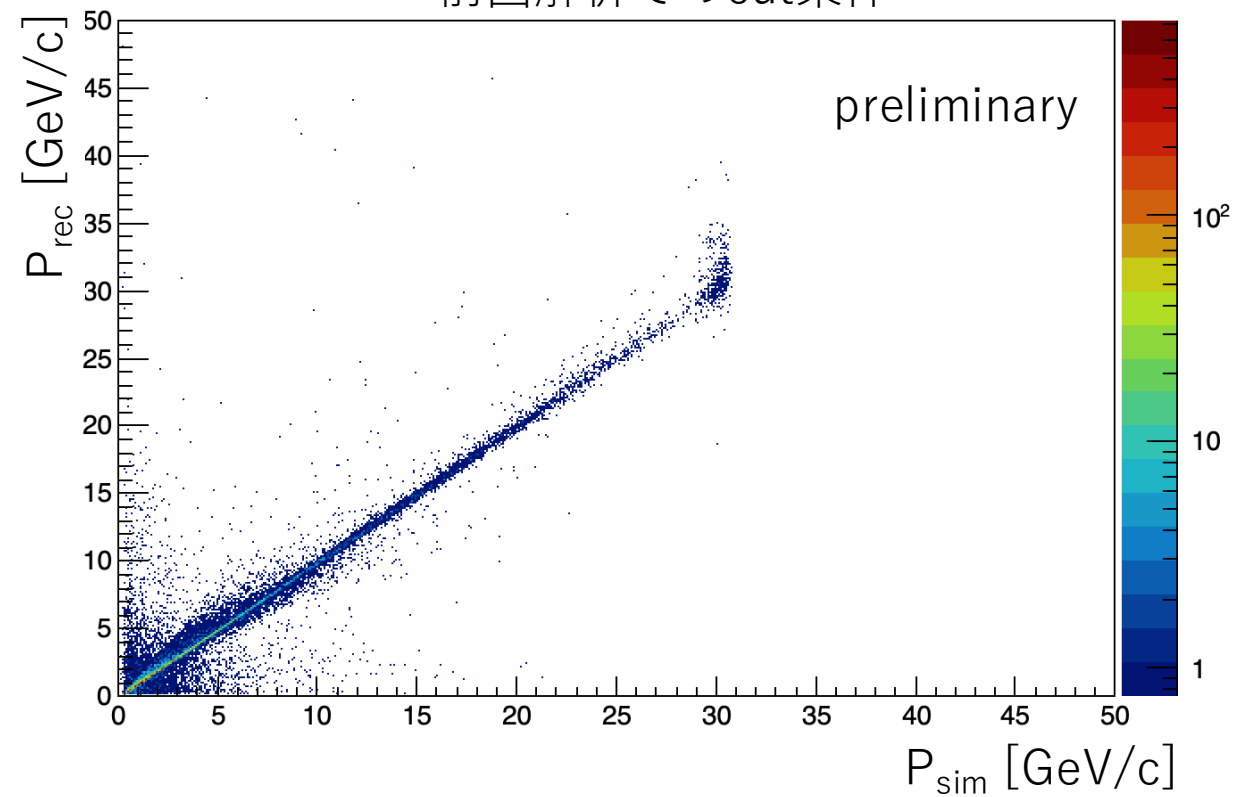
運動量測定が

- GTPCのみ → # of GTPC clusters ≥ 5 , # of MTPC clusters ≥ 30
- VTPC1 or 2のみ → # of VTPC clusters ≥ 25
- 2個以上 → # of VTPC1 + VTPC2 + GTPC clusters ≥ 20

今回のcut条件



前回解析でのcut条件

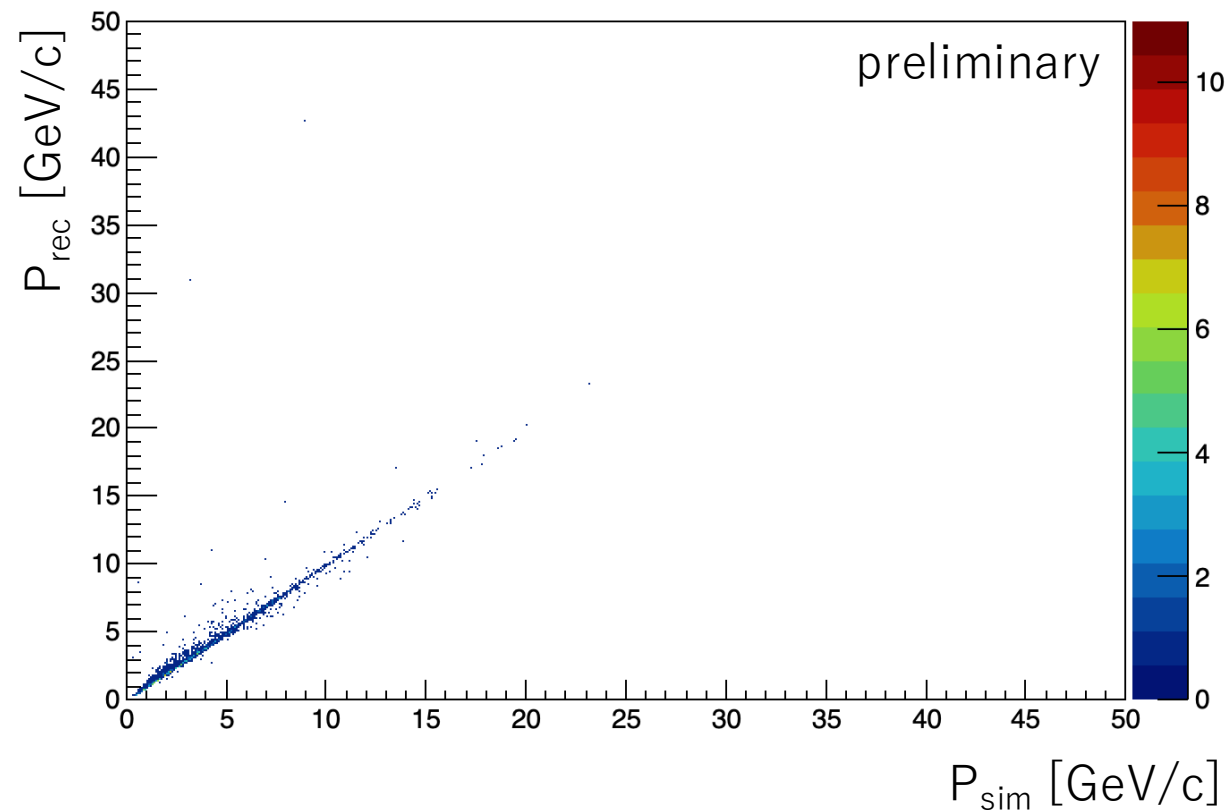
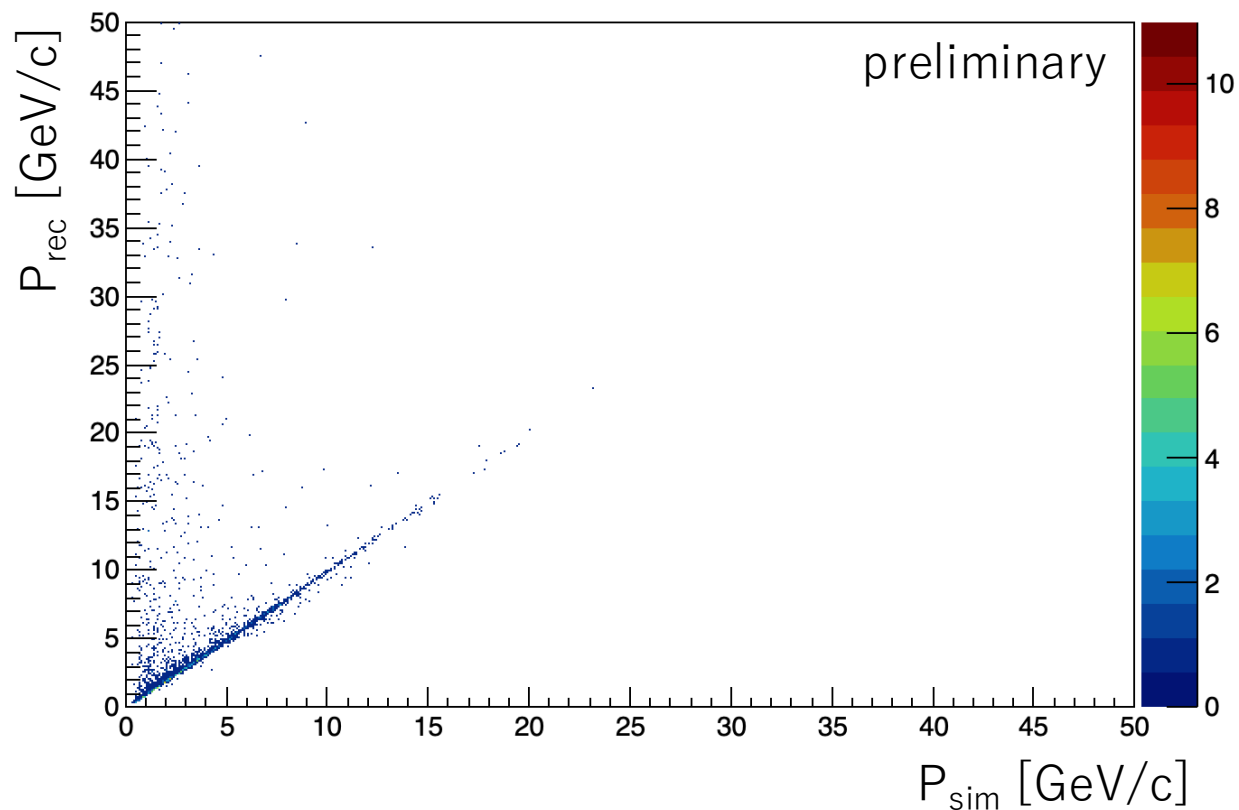


荷電Kaonに限定した場合 (RST)

- MC trueの情報を使って荷電K中間子のtrackに限定し、カット条件を適用した場合

No cut

Cut条件を適用

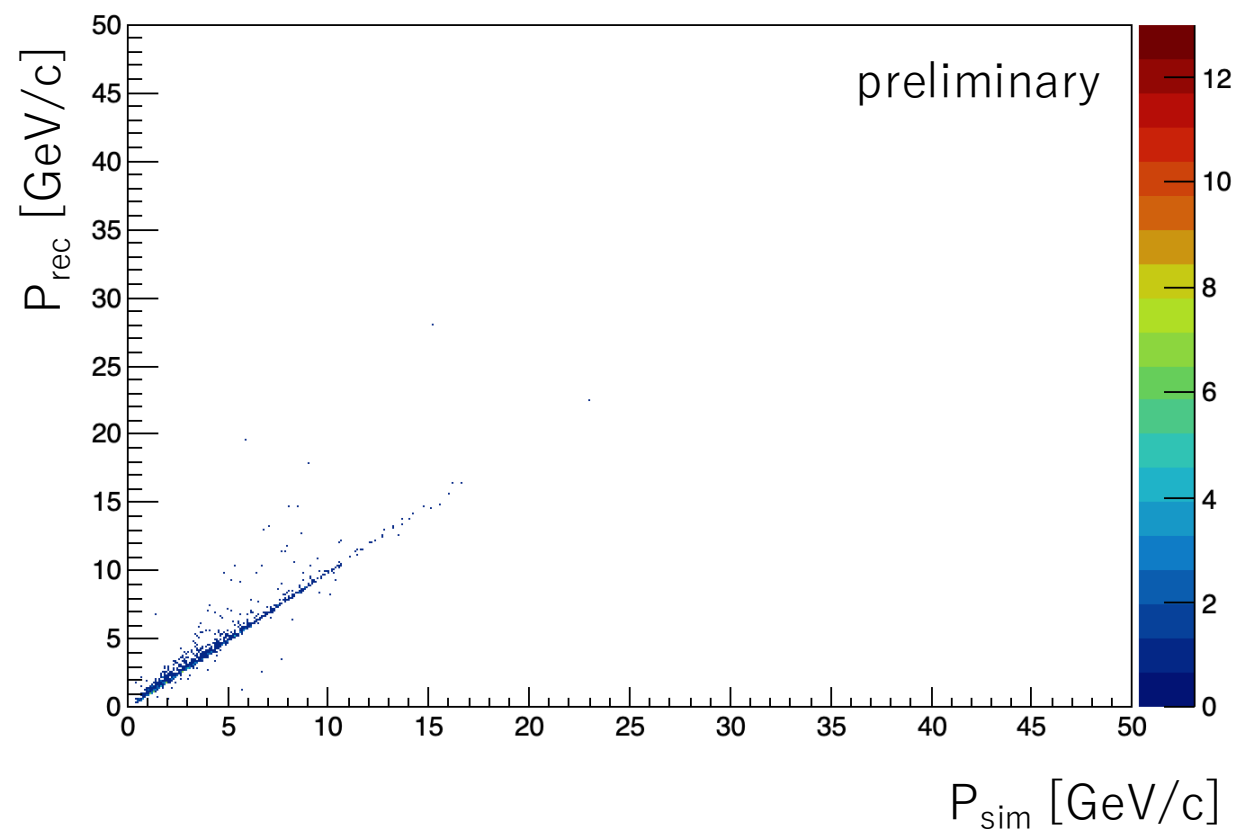
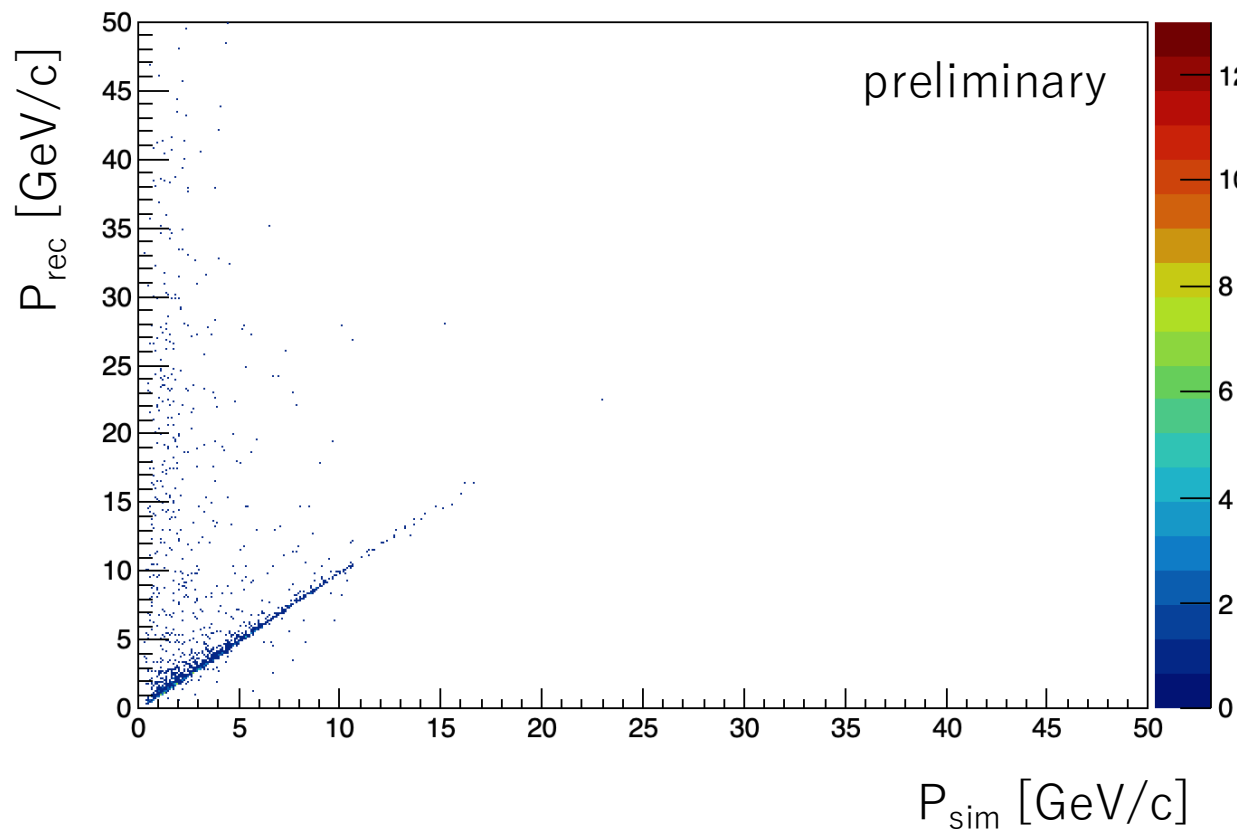


荷電Kaonに限定した場合 (WST)

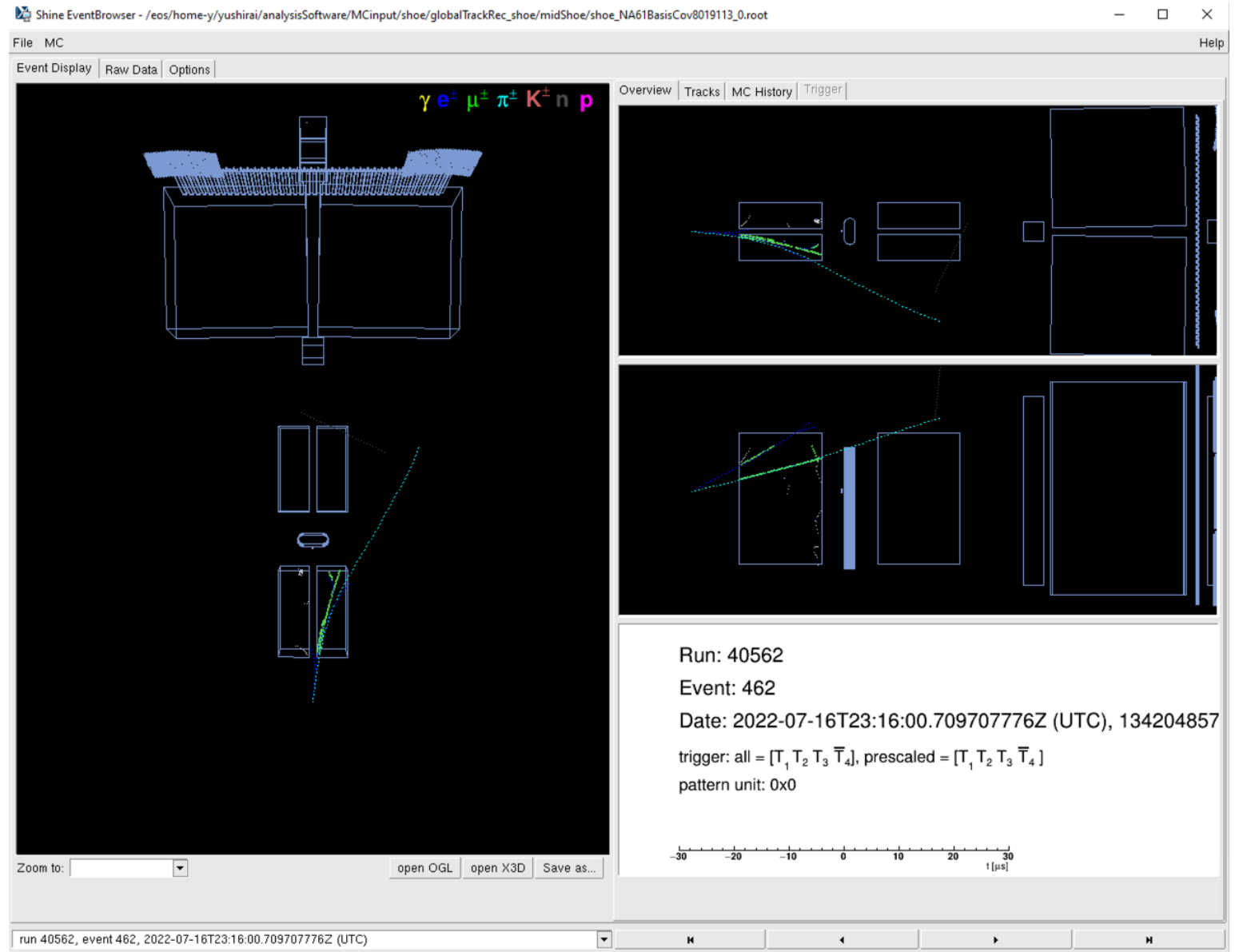
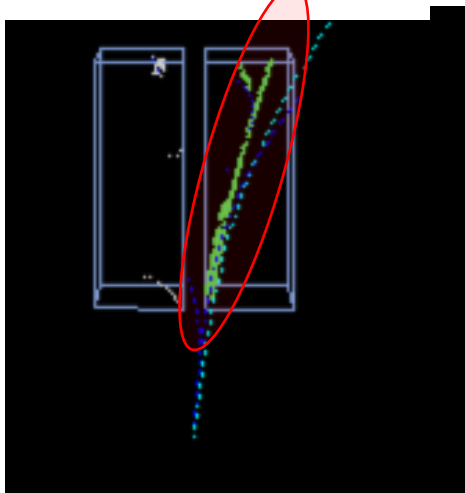
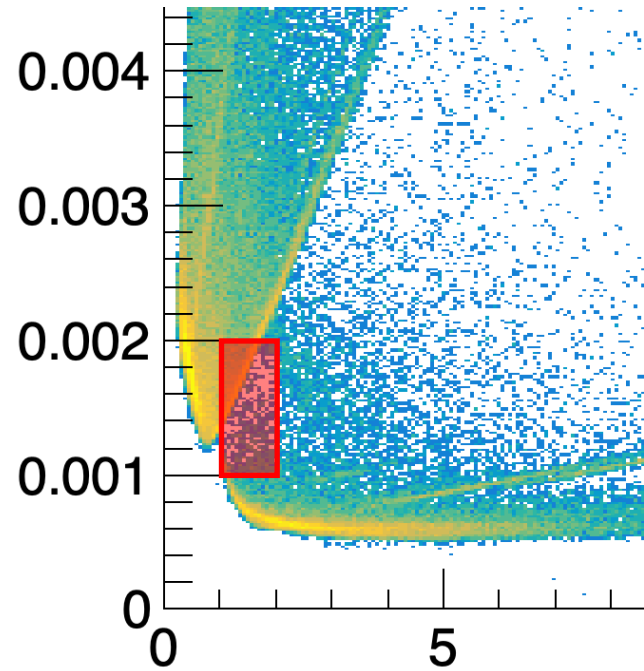
- MC trueの情報を使って荷電K中間子のtrackに限定し、カット条件を適用した場合

No cut

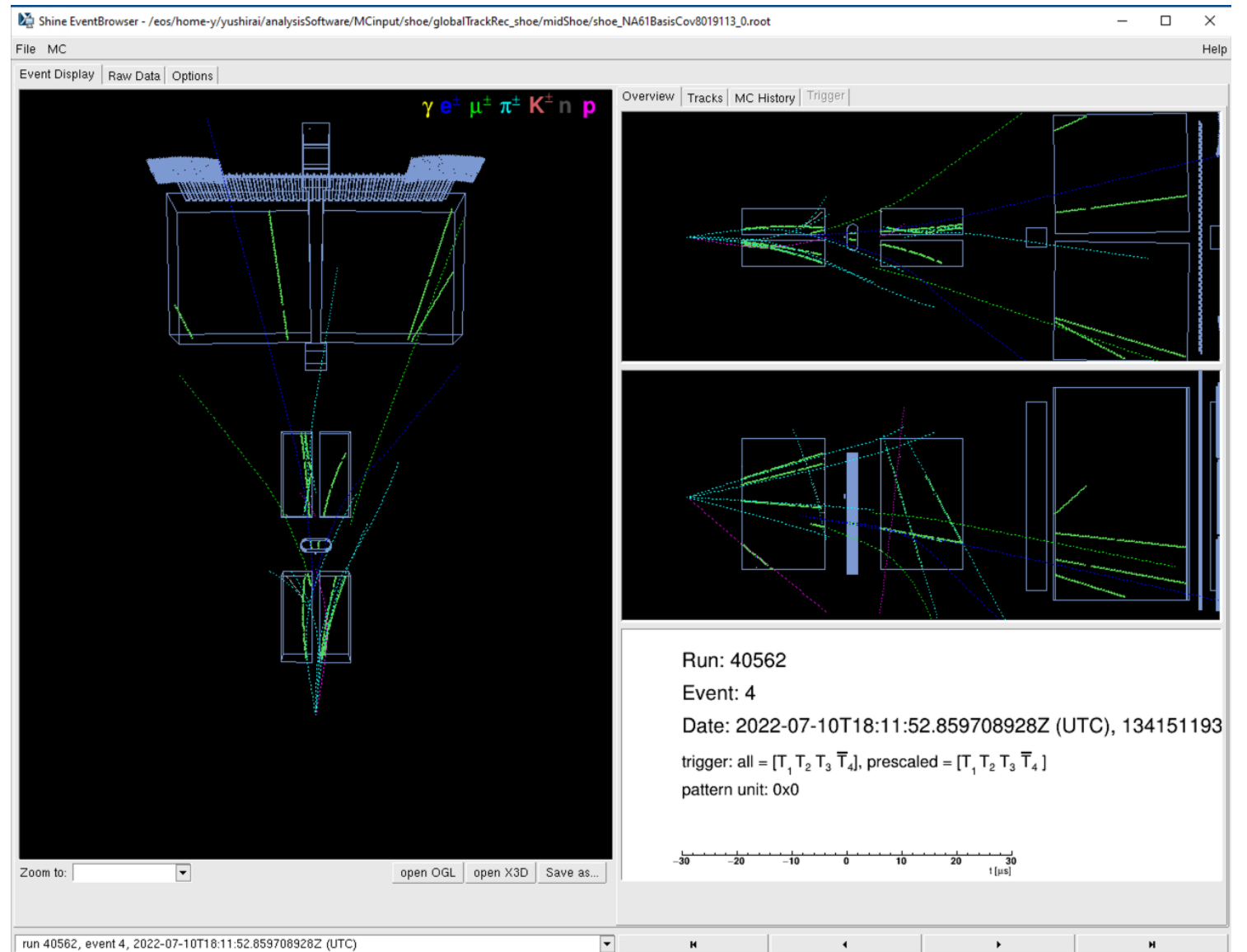
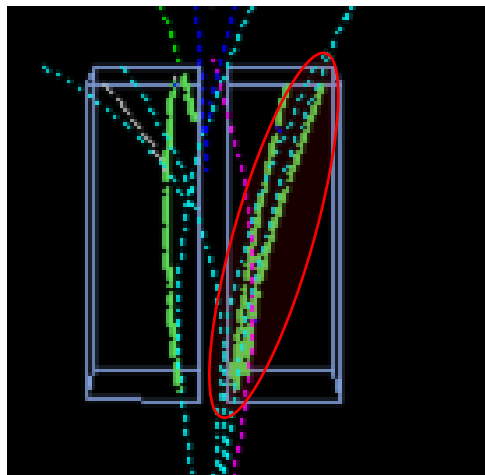
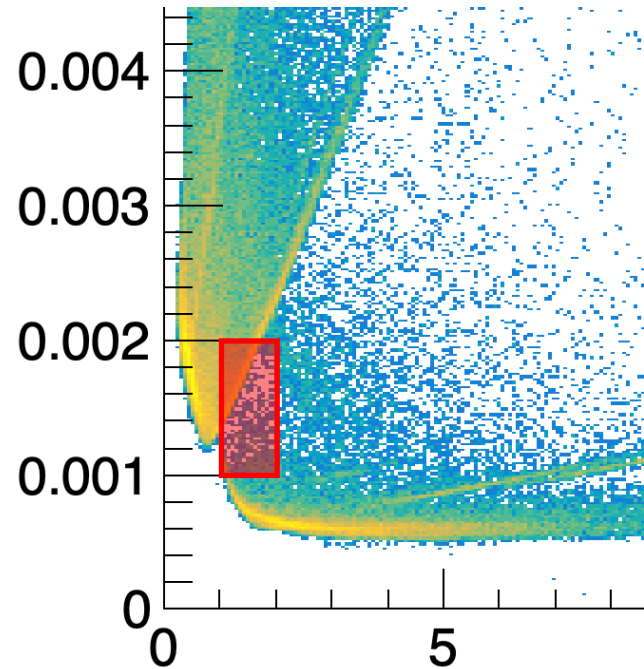
Cut条件を適用



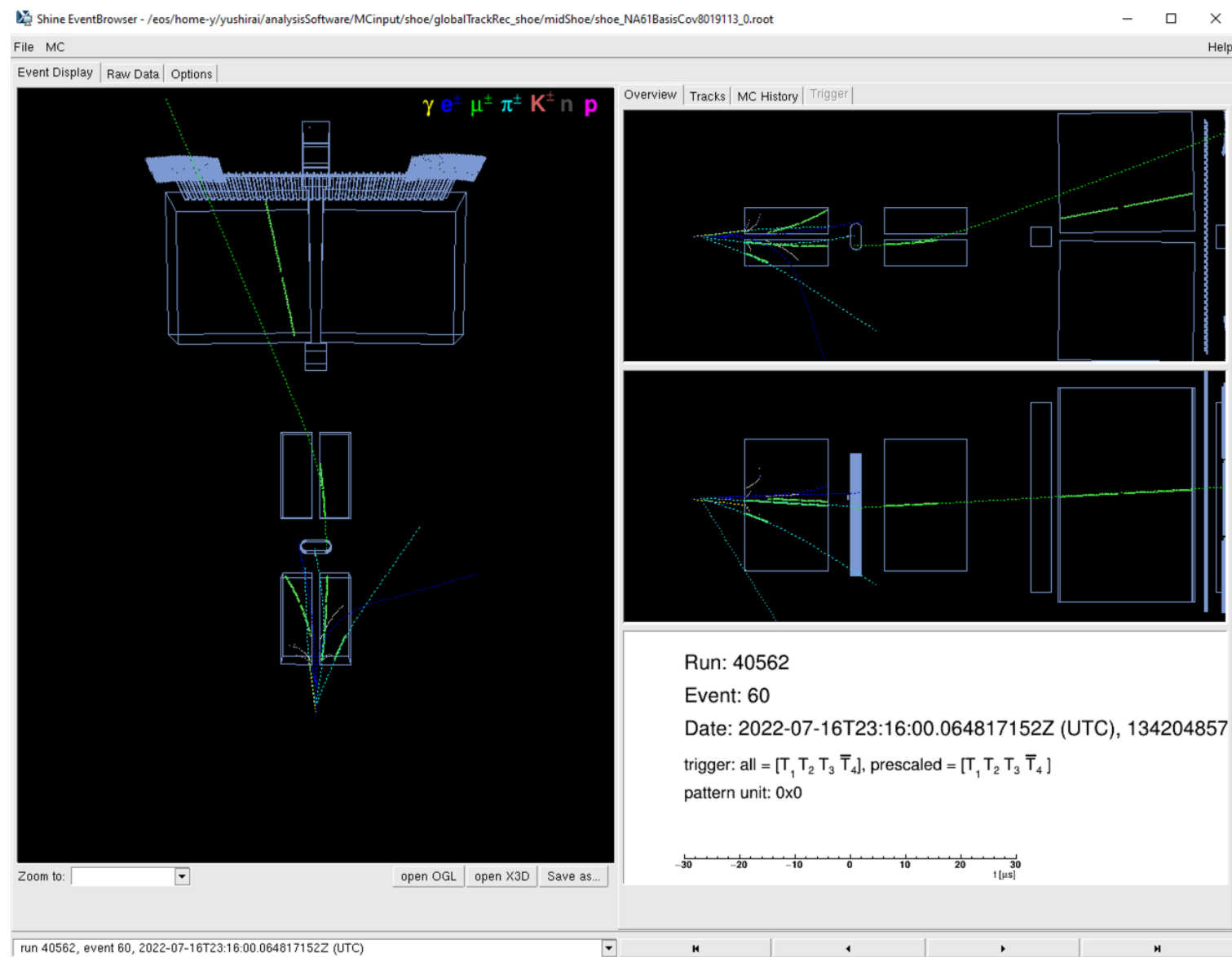
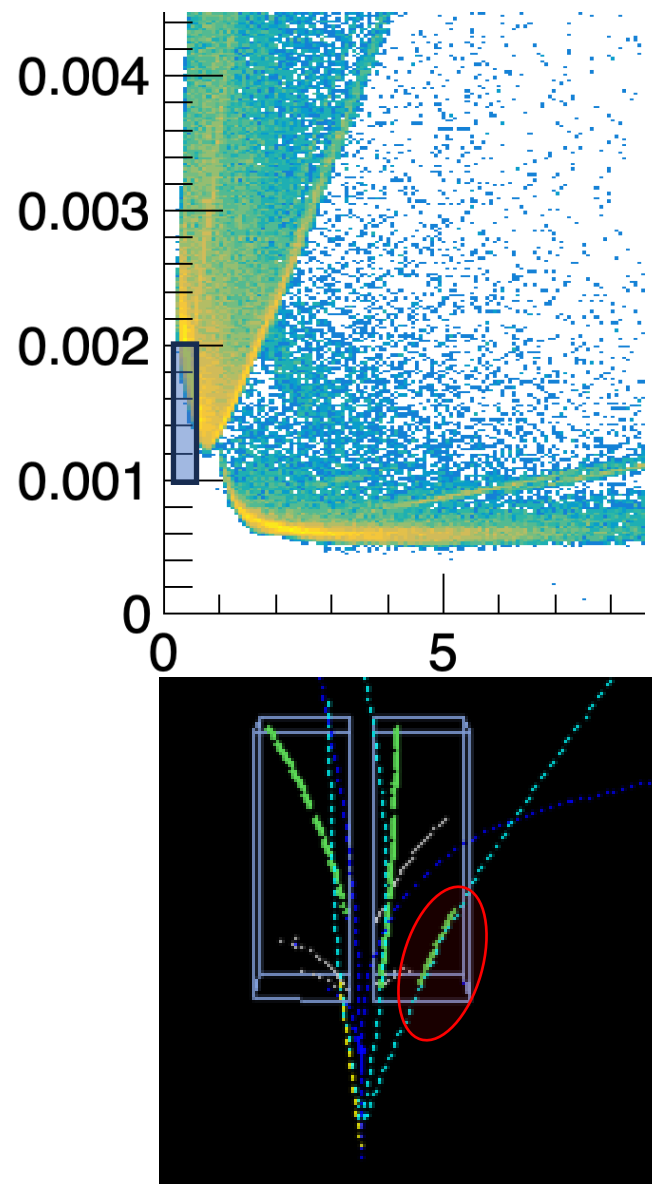
Watching event browser (RST: region 1)



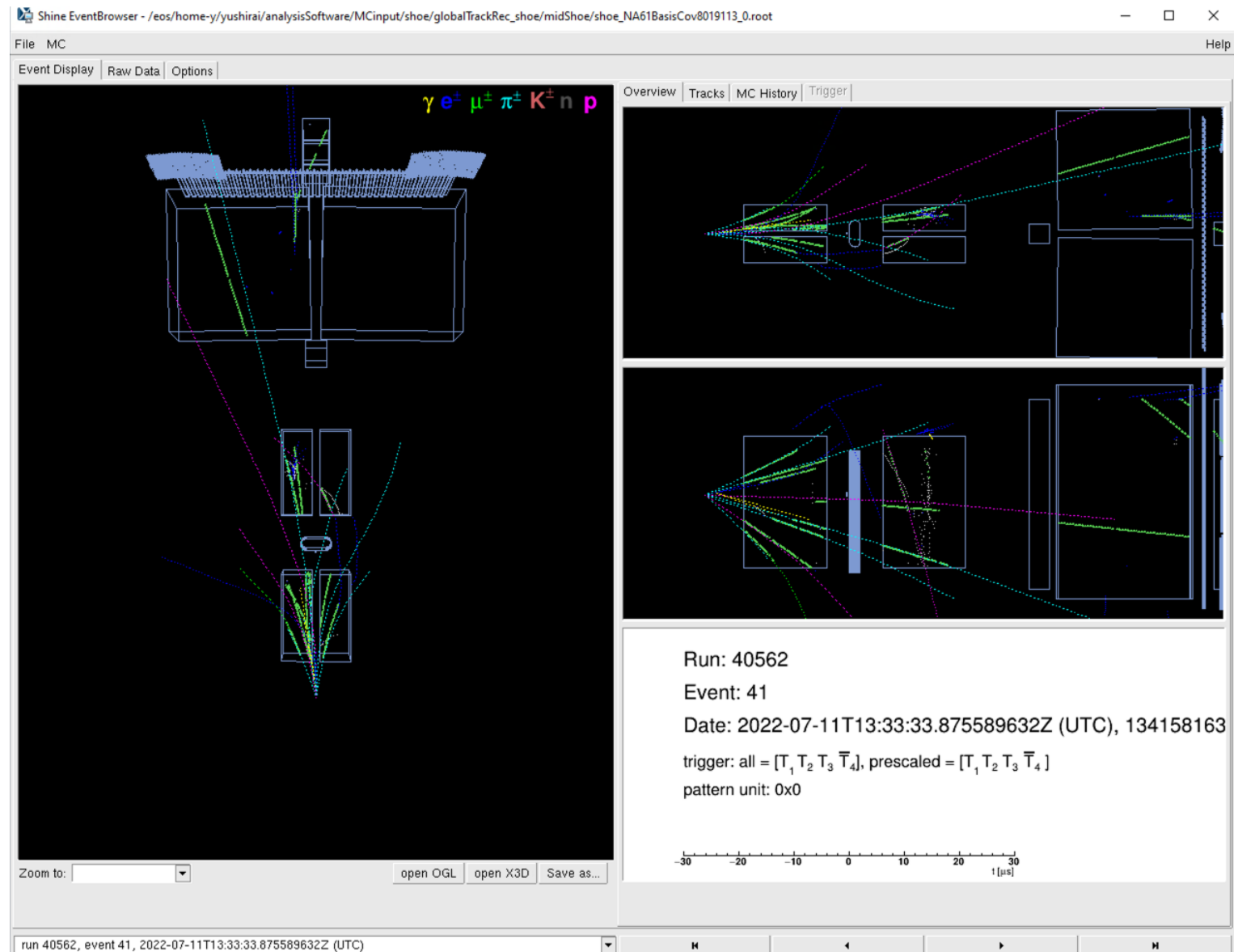
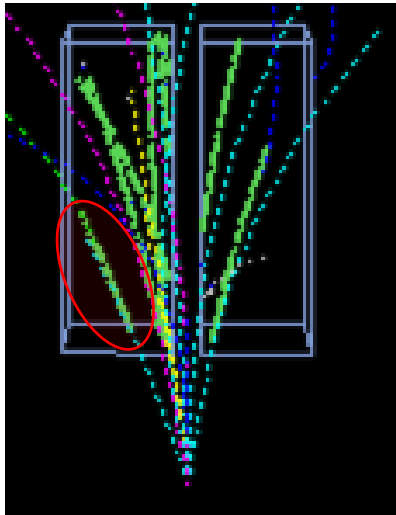
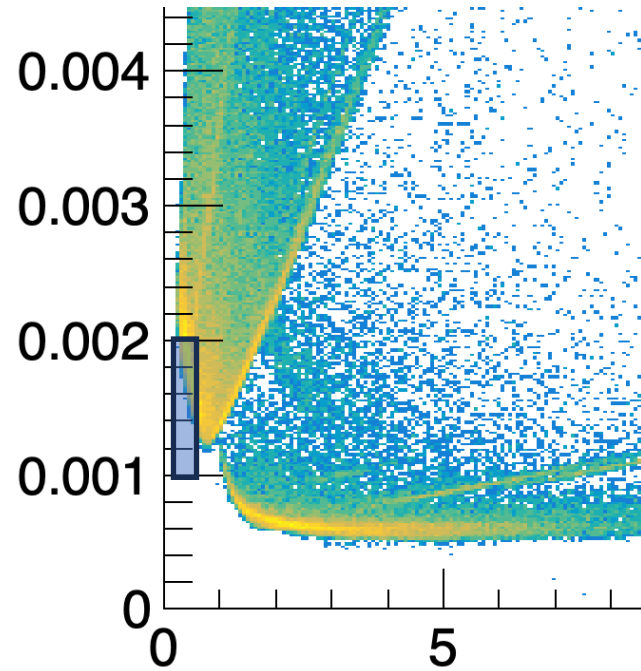
Watching event browser (RST: region 1)



Watching event browser (RST: region 2)



Watching event browser (RST: region 2)

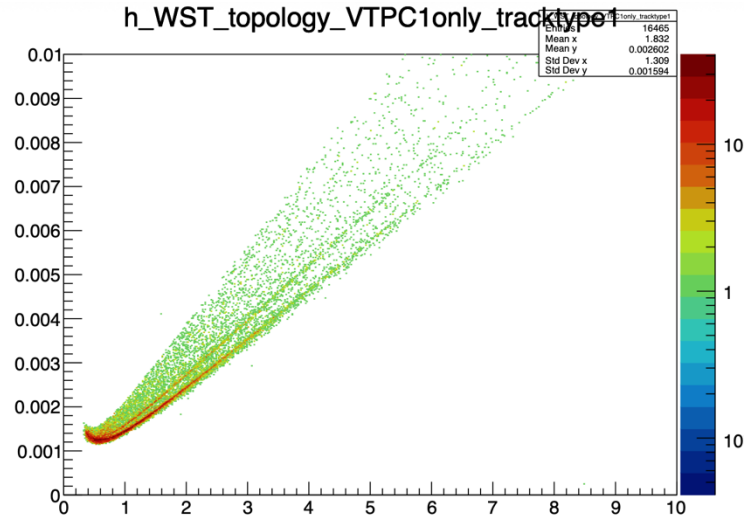
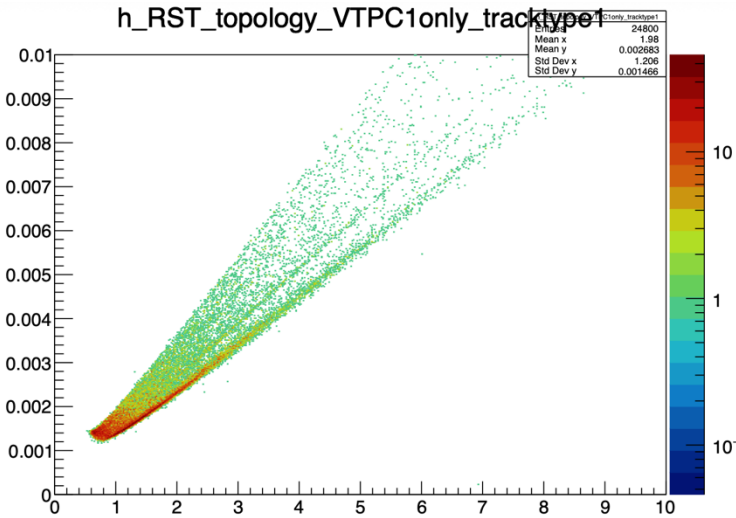


Cluster数で分ける

RST

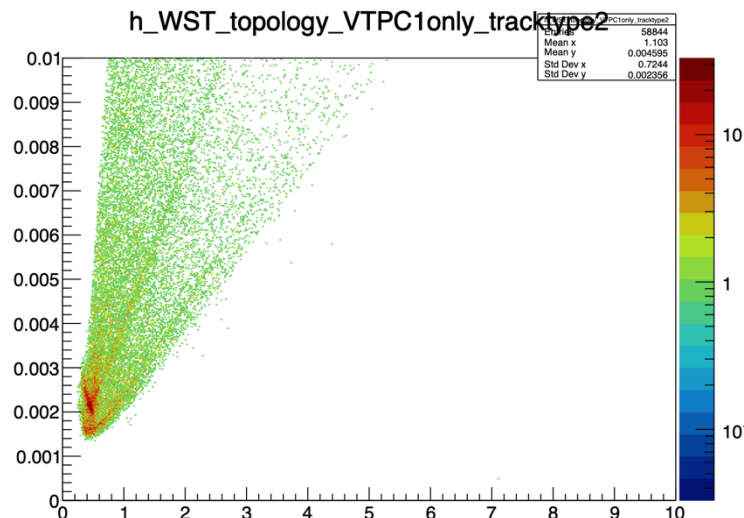
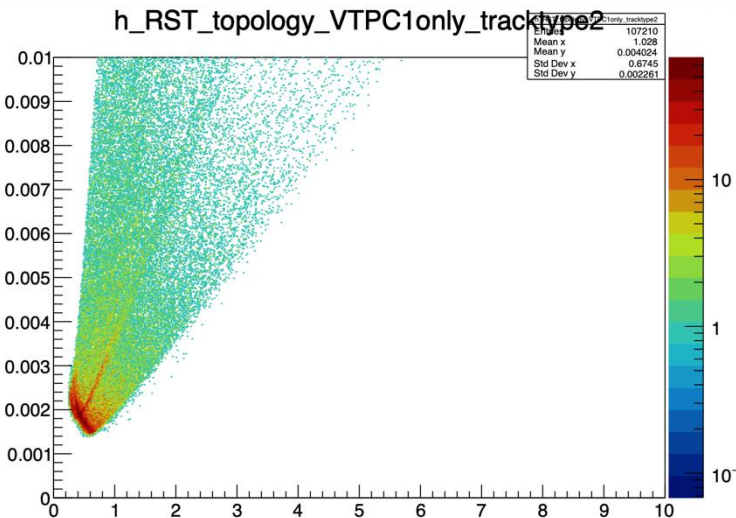
WST

of clusters > 40

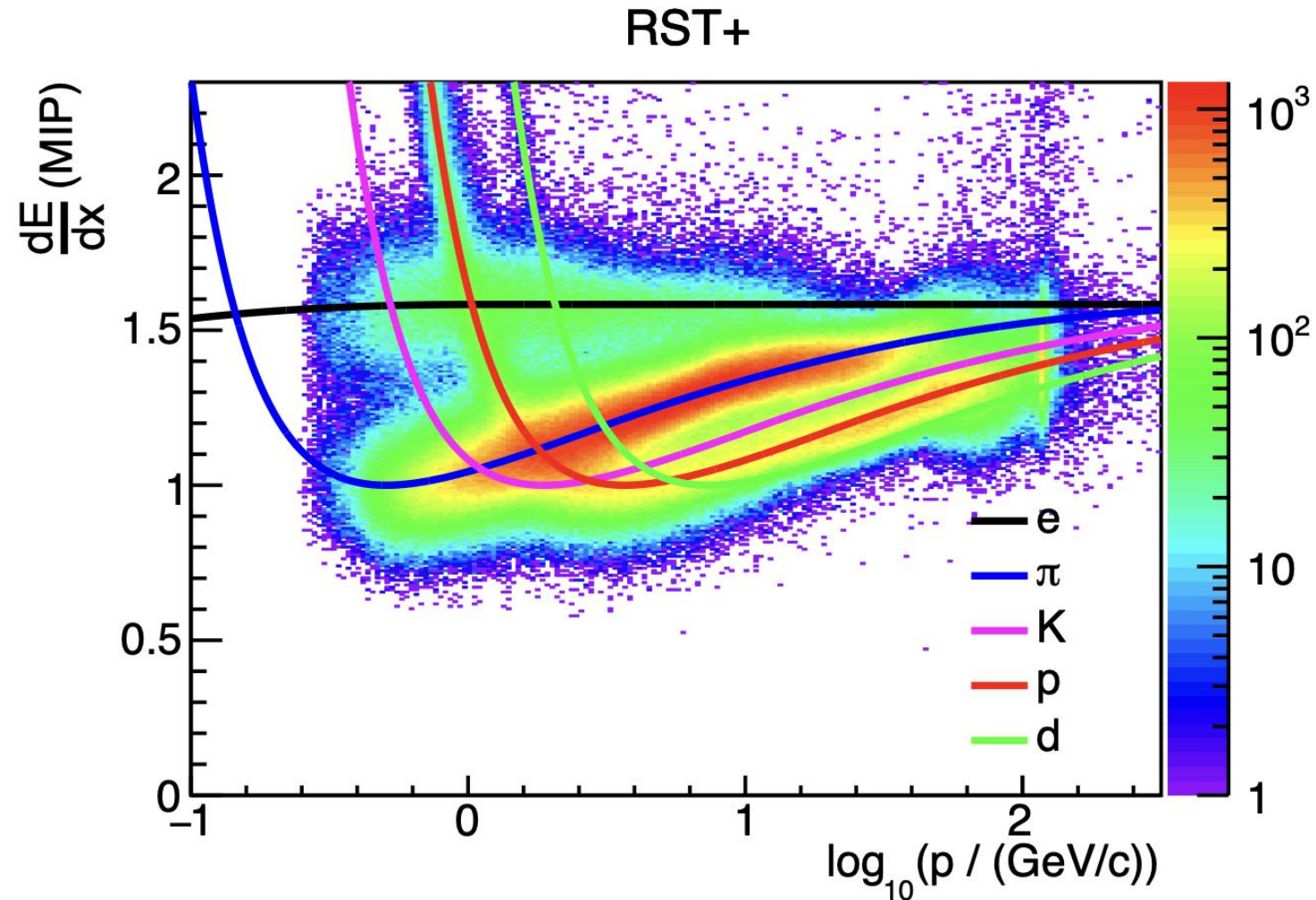


- cluster数が多ければTPC内を通過するtrackの長さが長いと仮定してcluster数が40より多いか、そうでないかで分けた

of clusters =< 40



過去解析でのdE/dx calibrationの例



2016年に取得された
thin C+proton@120 GeV/c
dataの例