



総研大



ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を 搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

青木優美(総研大/KEK)

2017.3.18, 日本物理学会 第72回年次大会@大阪大学

青木 優美(総研大), 藤井 恵介(KEK), 与那嶺 亮(Saclay), 小林 誠(KEK), 松田 武(KEK), 小川 智久(総研大), 成田 晋也(岩手大), 根岸 健太郎(岩手大), 庄司 愛子(岩手大), 杉山 晃(佐賀大), 房安 貴弘(佐賀大), 高橋 徹(広島大), 渡部 隆史(工学院大), 加藤 幸弘(近畿大), 池松 克昌(東北大), Ronald Dean Settles(MPI Munich), Junping Tian(東大), 荒井 大輔(フジクラ), Paul Colas(Saclay), Serguei Ganjour(Saclay), Ralf Diener(DESY), Oliver Schäfer(DESY), 川田 真一(DESY), Felix Müller(DESY), Leif Jönsson(Lund Univ.), Ulf Mjörnmark(Lund Univ.), Huirong Qi(IHEP), 木原 大輔(Siegen Univ.), 他 LCTPC collaboration

ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を 搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

ILC実験

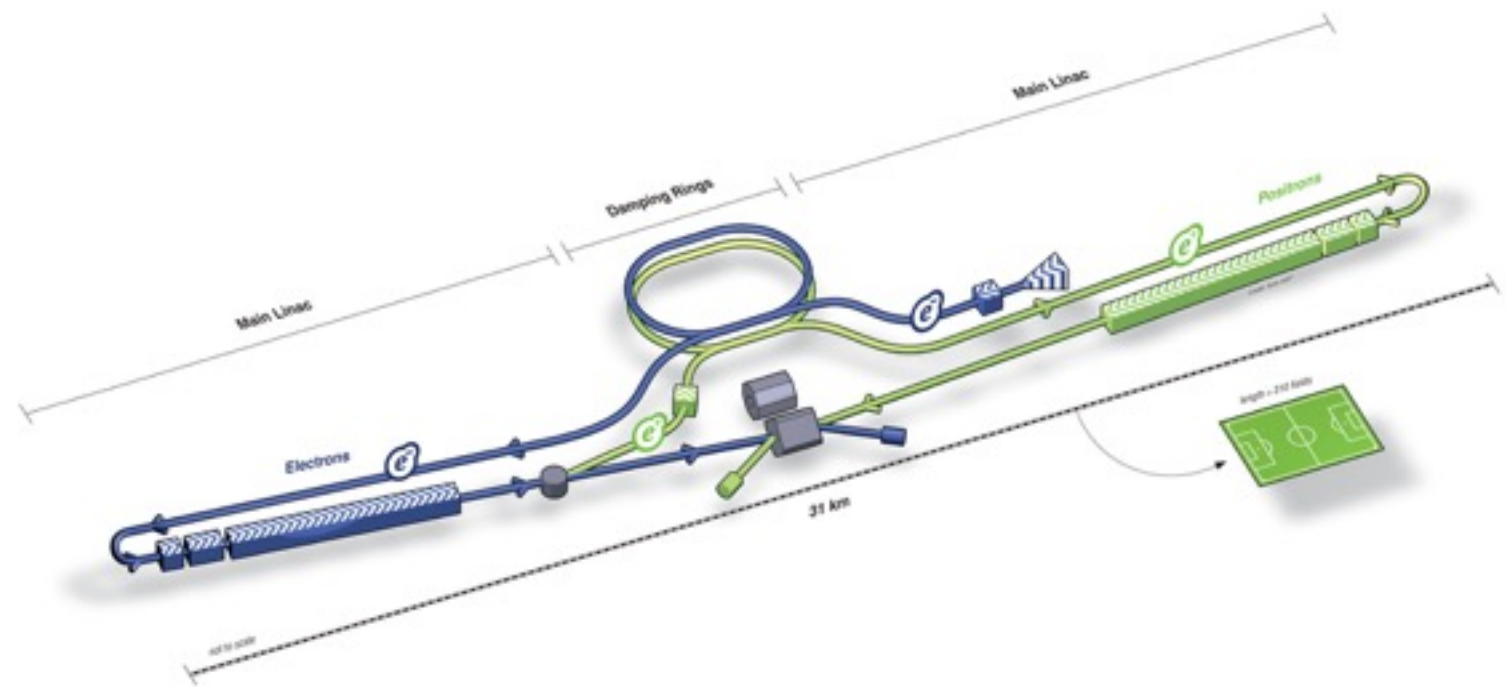
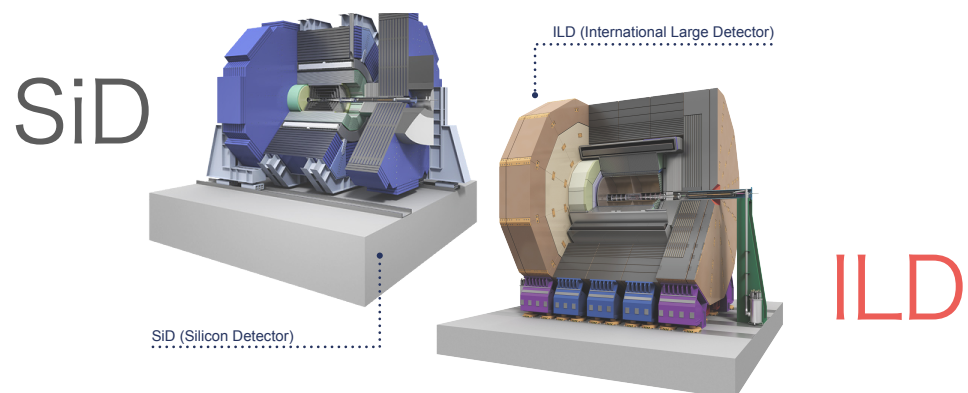


International Linear Collider (国際リニアコライダー) (国際) (直線) (衝突型加速器)

電子と陽電子を世界最高エネルギー (250~500 GeV) で衝突させる

↓
電弱対称性の破れの謎を解明し標準理論を超える新しい物理へ
建設候補地：北上山地周辺

ILC実現に向けた最終段階
加速器・検出器の最終設計



<http://www.linearcollider.org/images/>

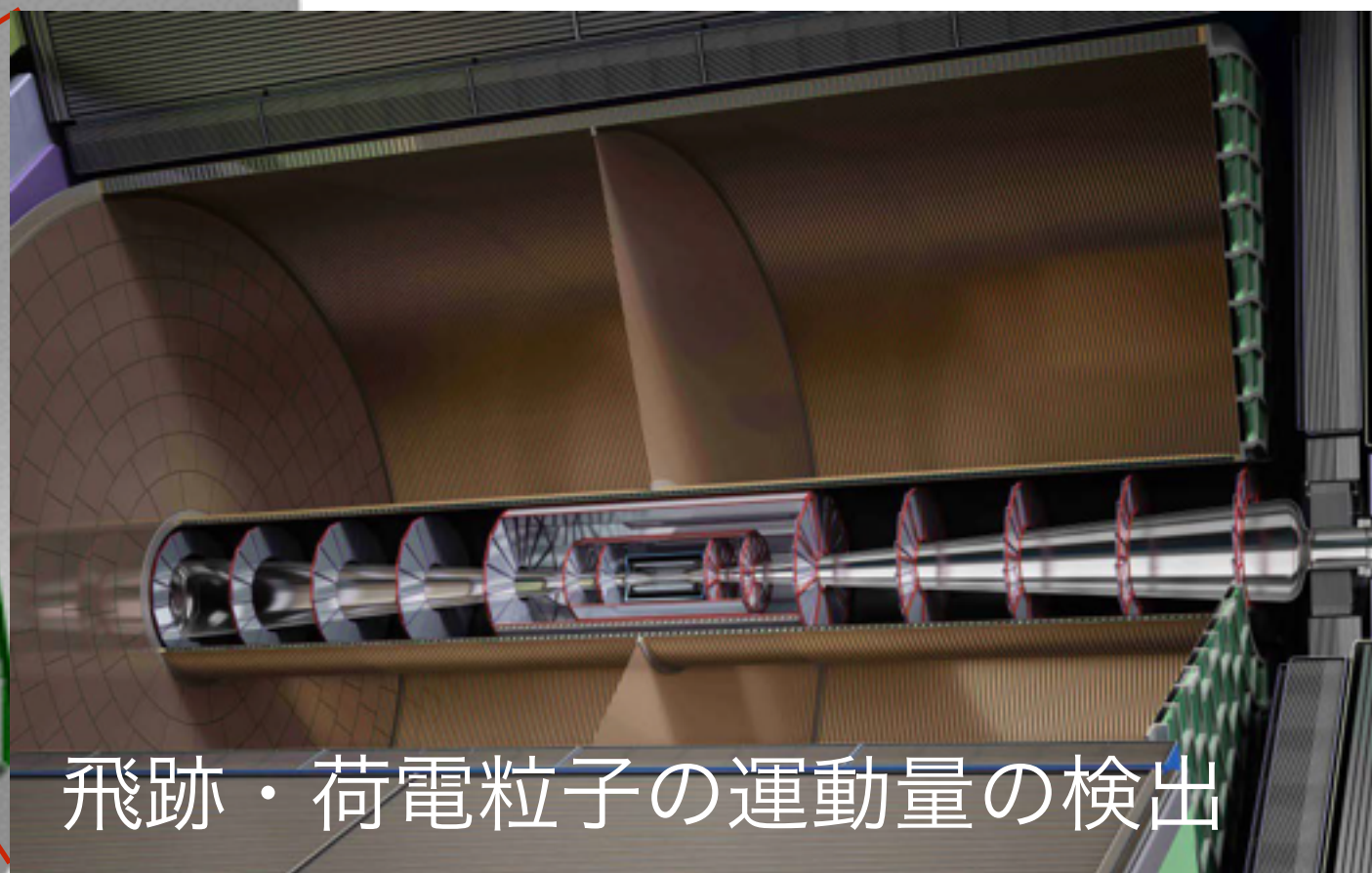
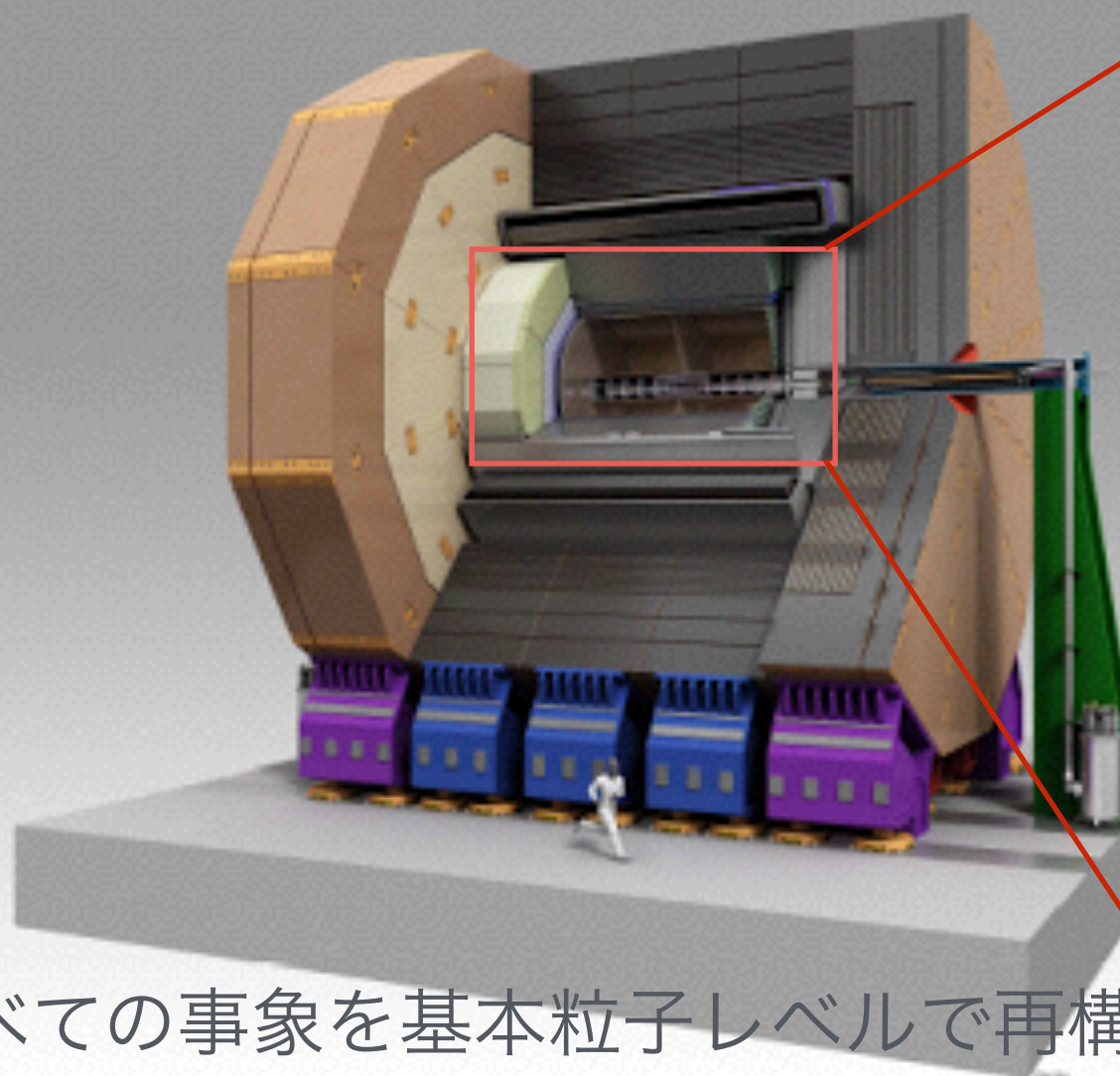
ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を 搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

TPC



International Large Detector
(国際) (大型) (測定器)

Time Projection Chamber
(時間) (投影型) (チャンバー)

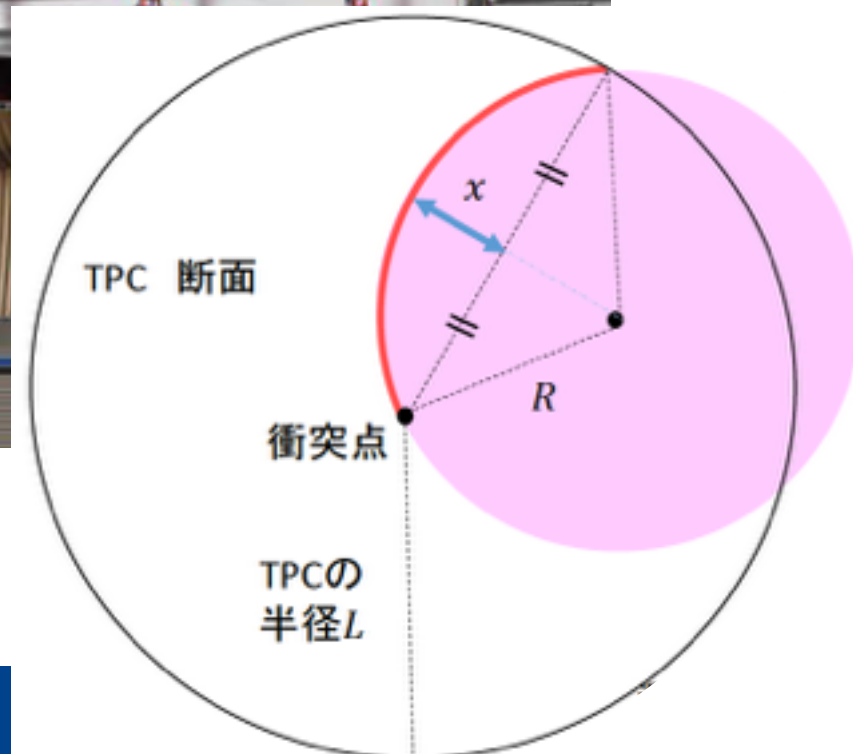
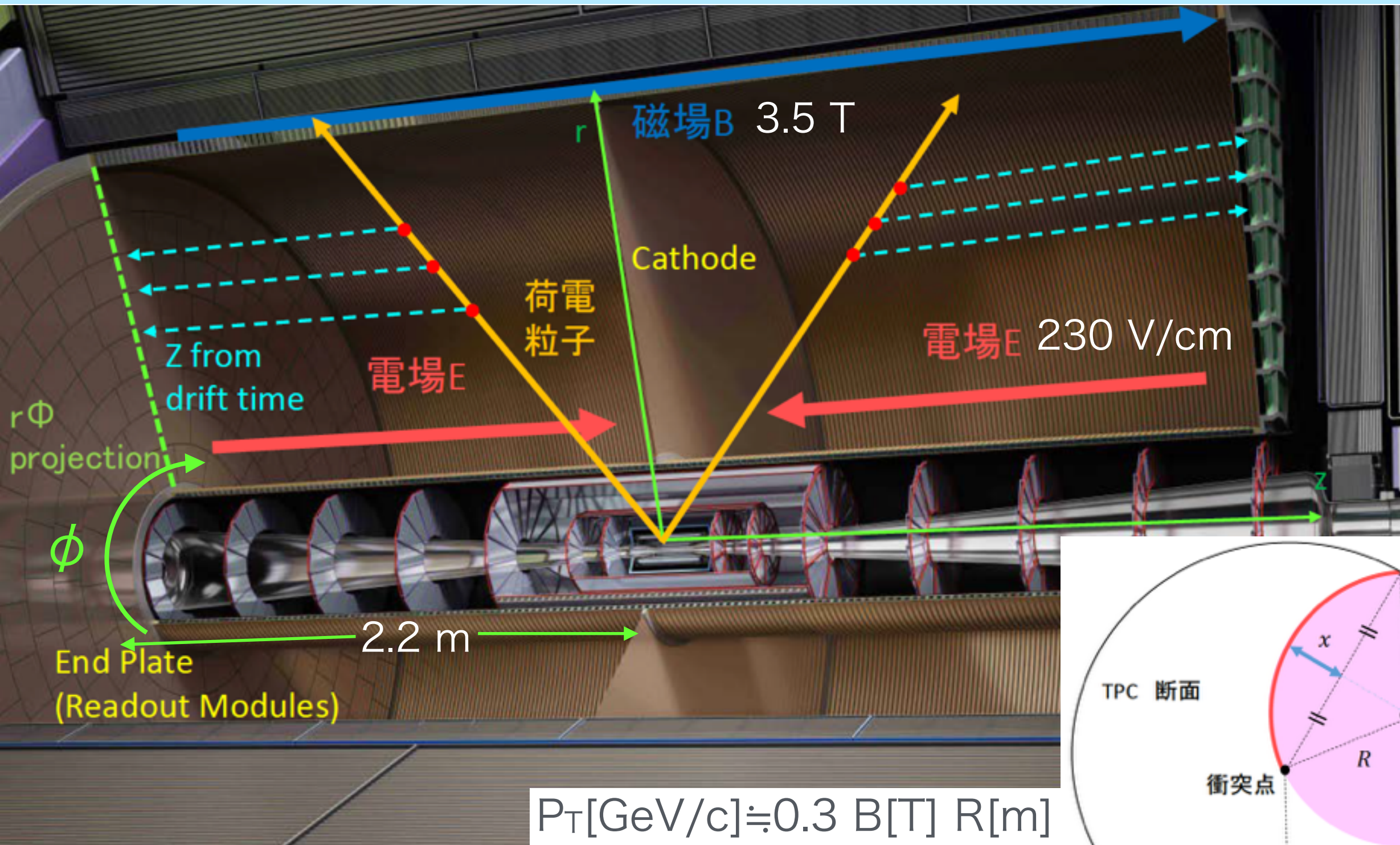


飛跡・荷電粒子の運動量の検出

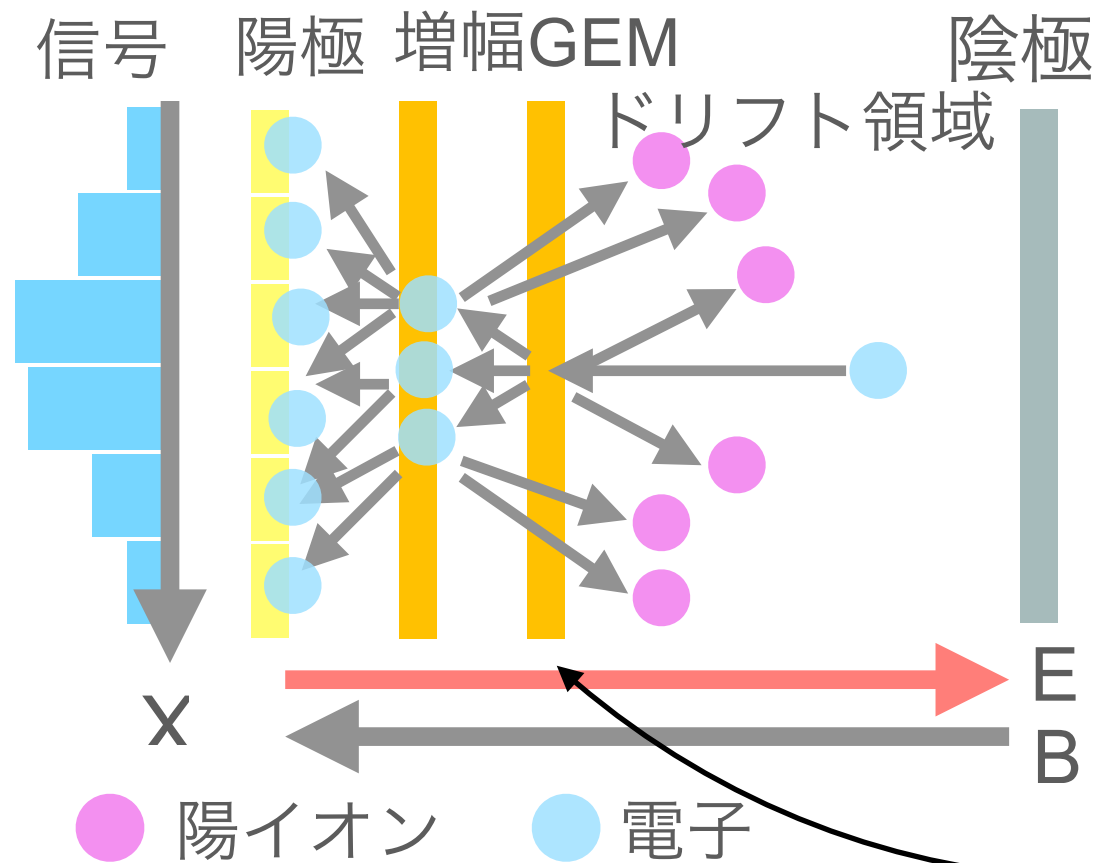
すべての事象を基本粒子レベルで再構成する

運動量分解能の目標 $\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \simeq 1 \times 10^{-4} P_T \text{ GeV}/c$

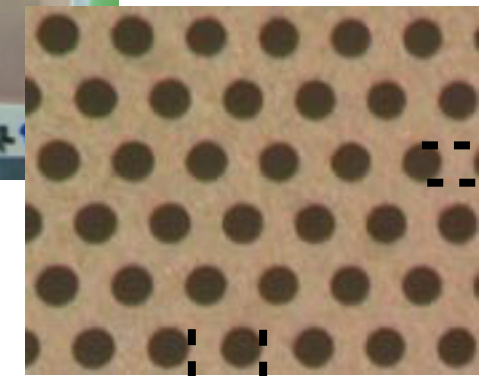
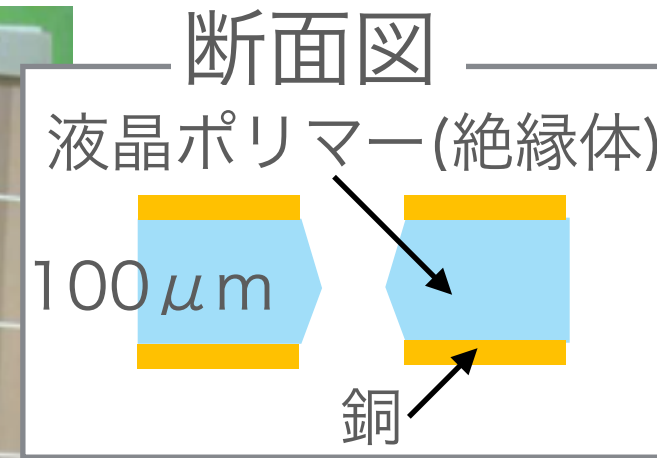
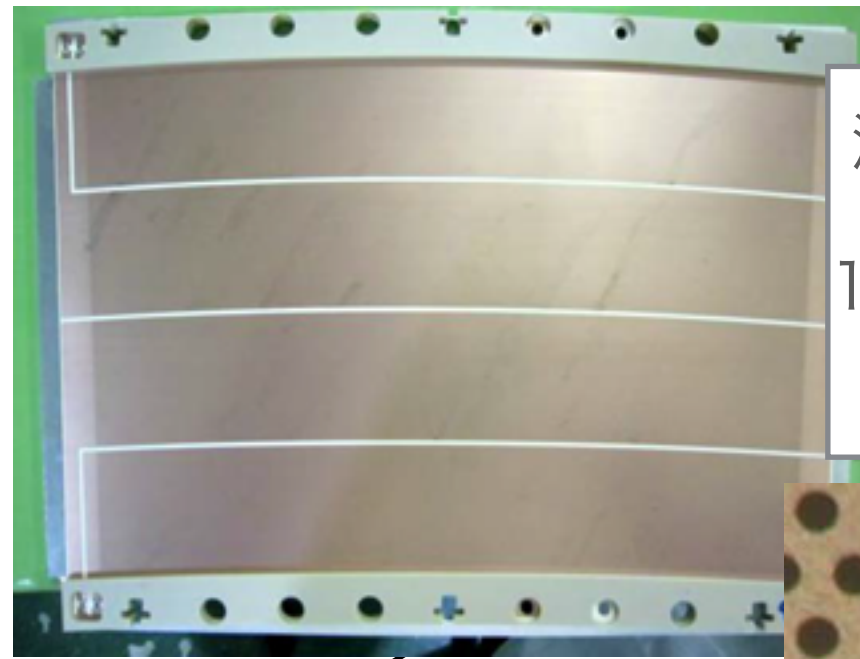
TPCの測定原理



TPCの検出原理と課題



Gas Electron Multiplier



穴の中で電子雪崩を起こし増幅

140 μm

陽イオンフィードバック問題

増幅で発生した陽イオンがドリフト領域に逆流→電場を歪ませ位置分解能が悪化

必要な位置分解能： $\sigma_{r\phi} < 100 \mu m$ (距離2.2m/磁場3.5T)

予想：60 μm

ドリフト領域に陽イオンが戻ってこないゲートが必要

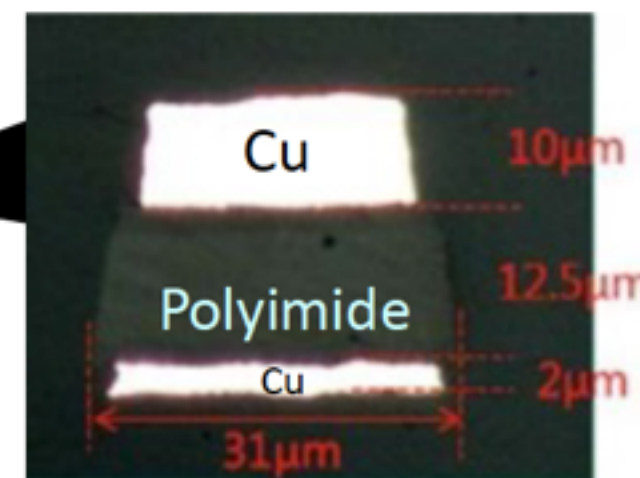
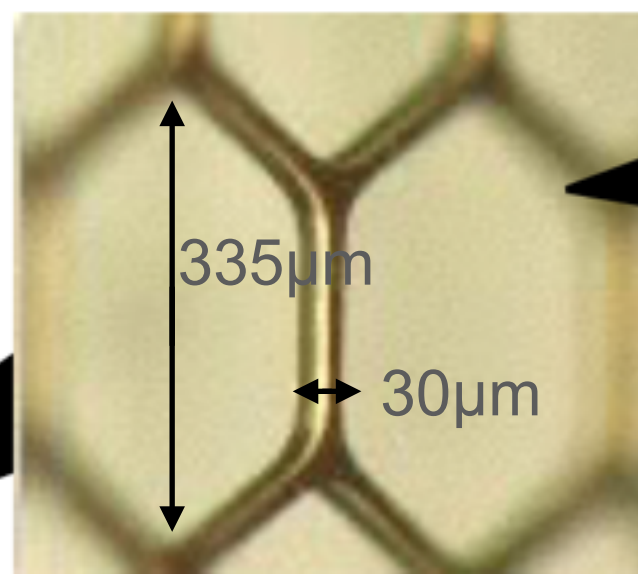
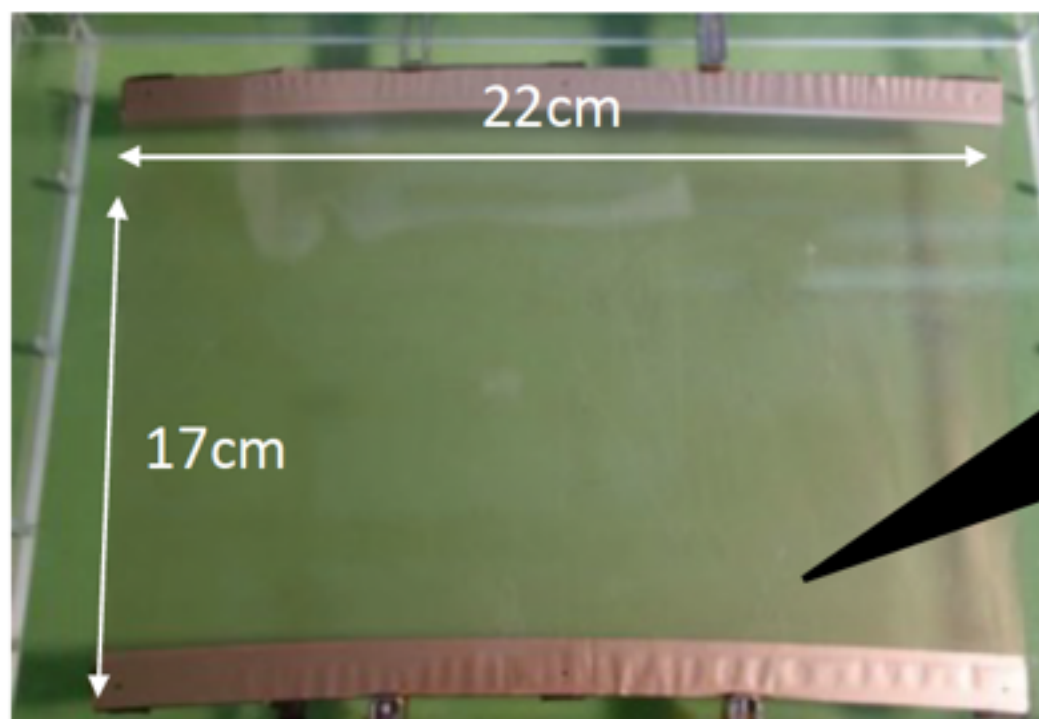
ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を 搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

高開口度GEM型ゲート装置



GEMを改変してゲートとして利用 = 高開口度GEM型ゲート装置
(以下ゲートGEM)

株式会社フジクラが開発



光学的開口度 = 82 % 厚さ 20 μm

高磁場中での電子透過率 ≒ 光学的開口度

目標

位置分解能 100μm を達成するために必要な、
電子透過率 80% を達成

→ 今回ビームテストで確認

ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を 搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

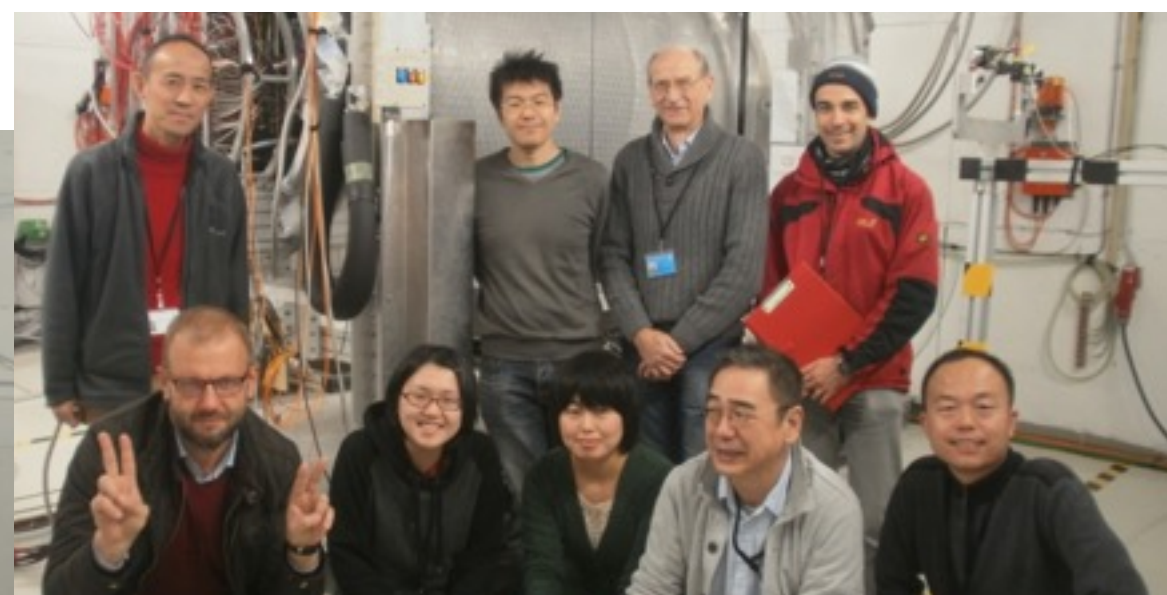
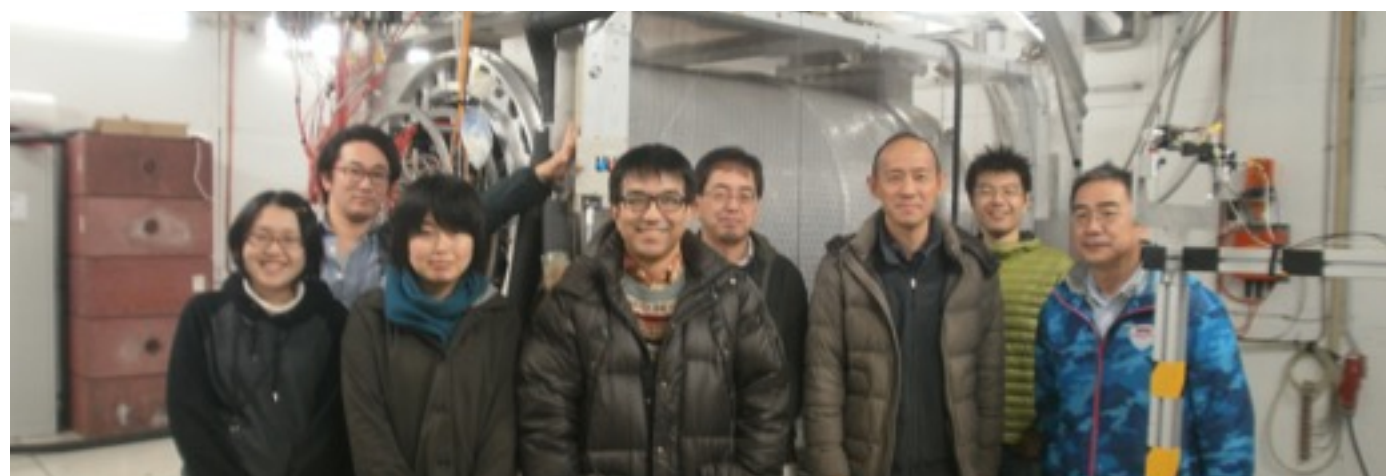
ビーム試験



2016.10.31~11.13 (ビームタイム)
@DESY TPC大型プロトタイプ

ゲートGEMを搭載したモジュールの
初めてのビーム試験

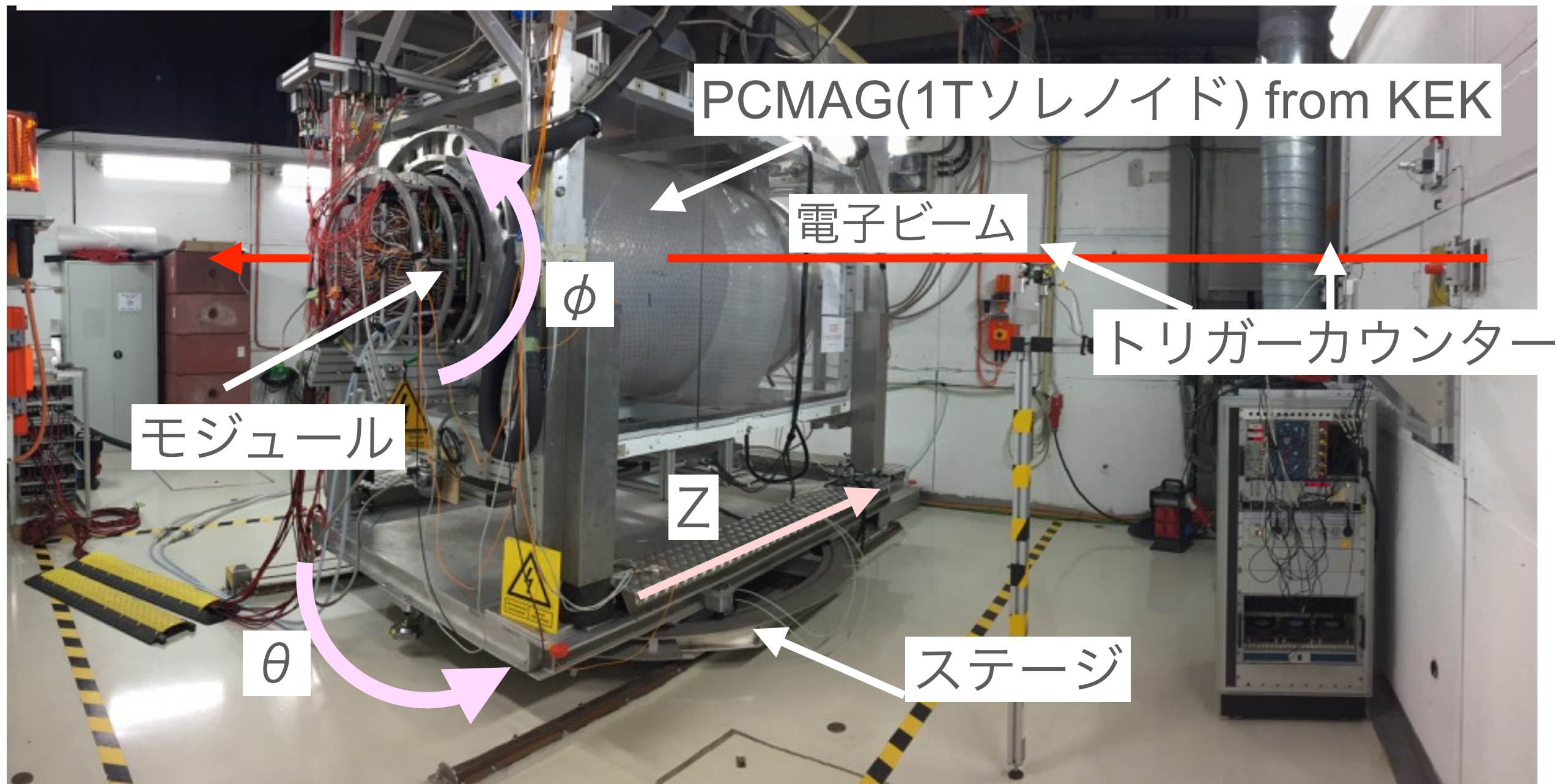
日本、フランス、ドイツ、中国から
15人が参加



実験装置



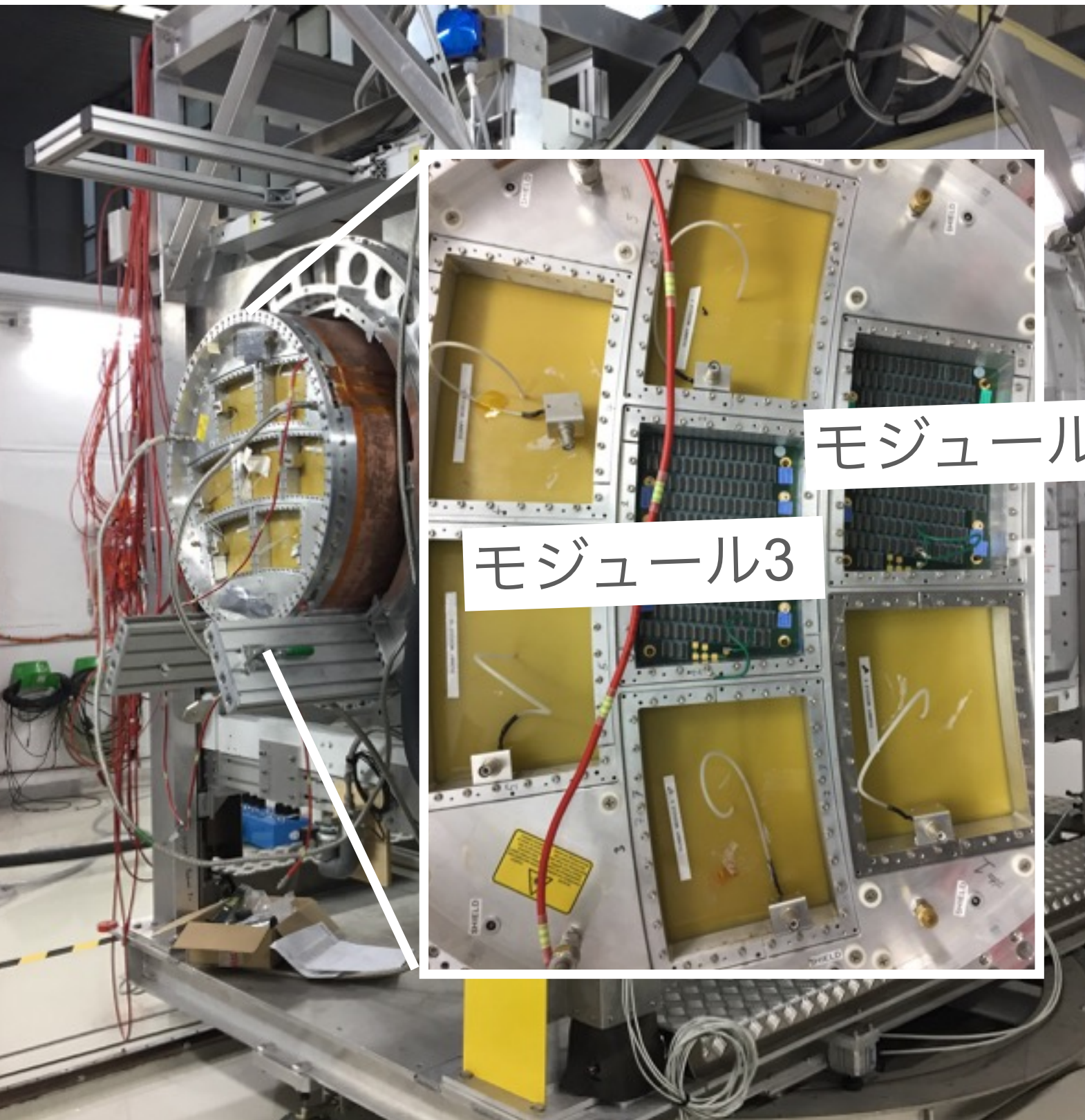
TPCの大型プロトタイプ



ゲートGEMを搭載したモジュール



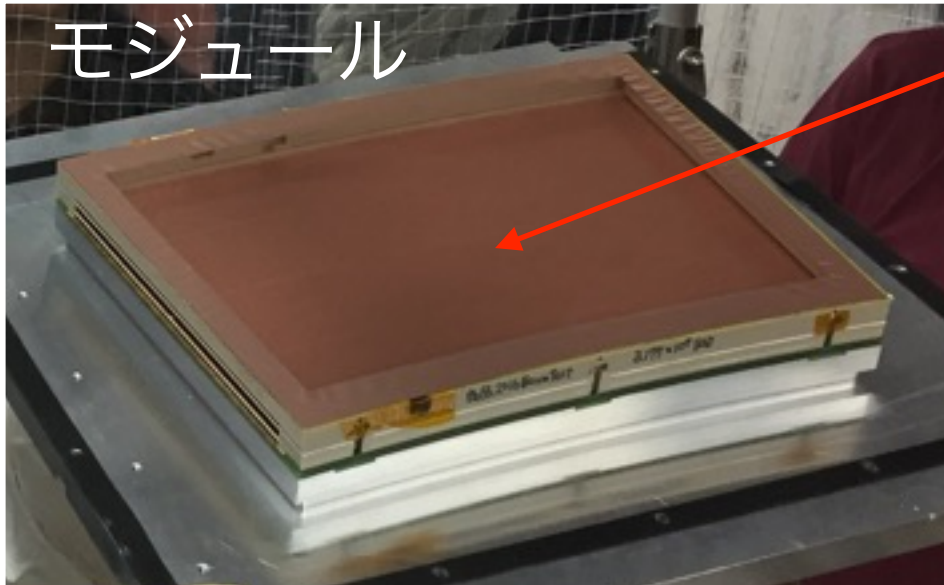
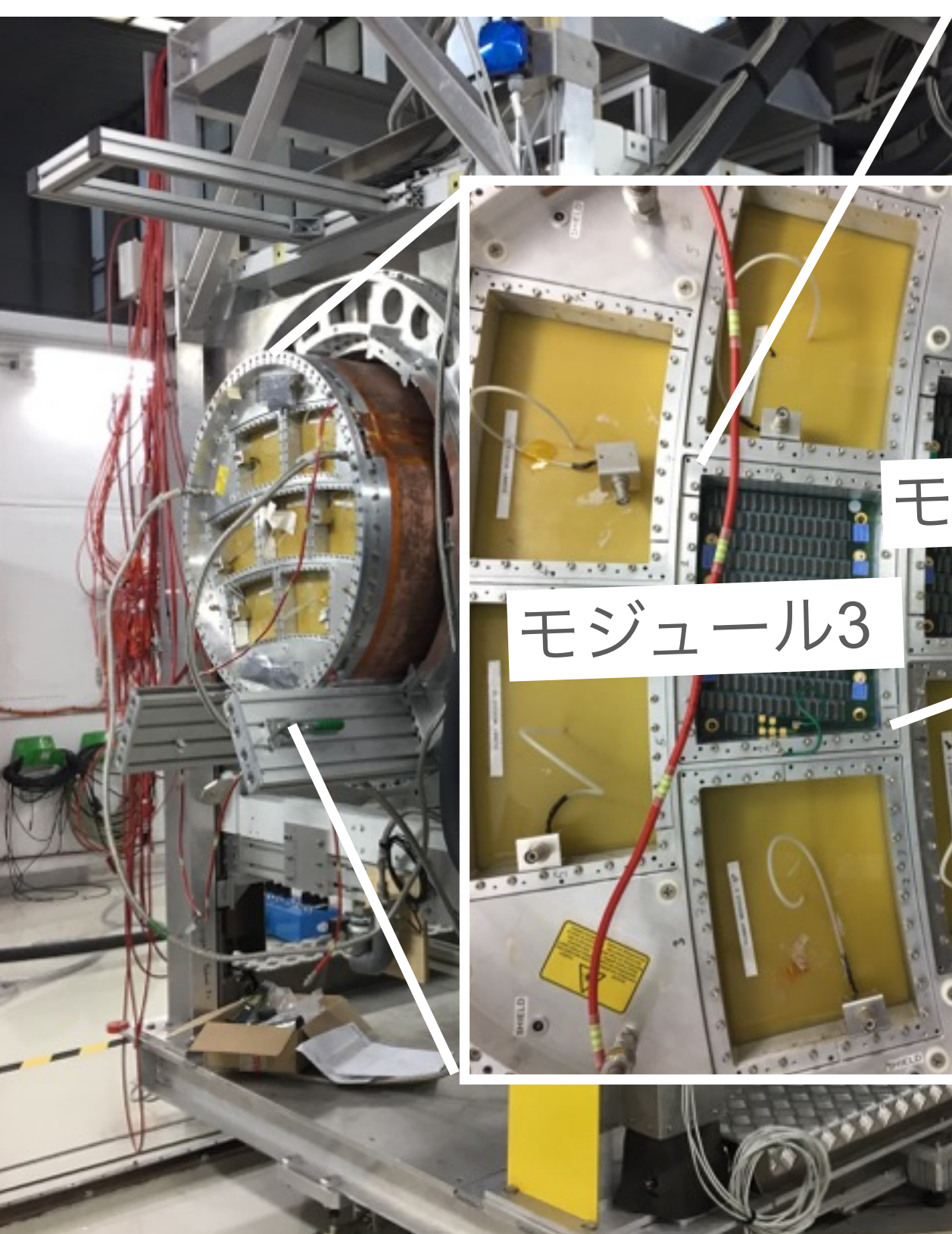
ゲートGEMを搭載したモジュール



モジュール0

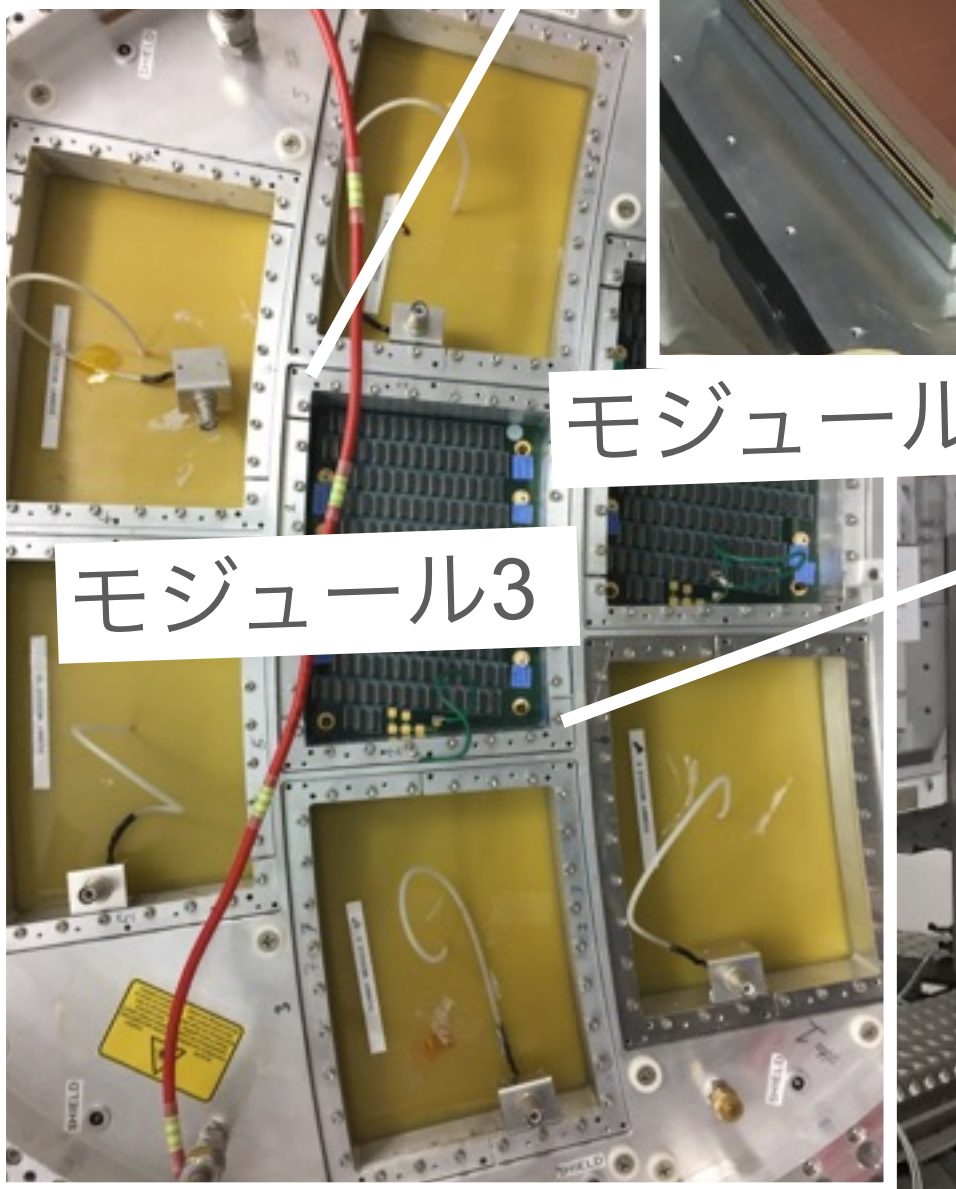
モジュール3

ゲートGEMを搭載したモジュール



モジュール

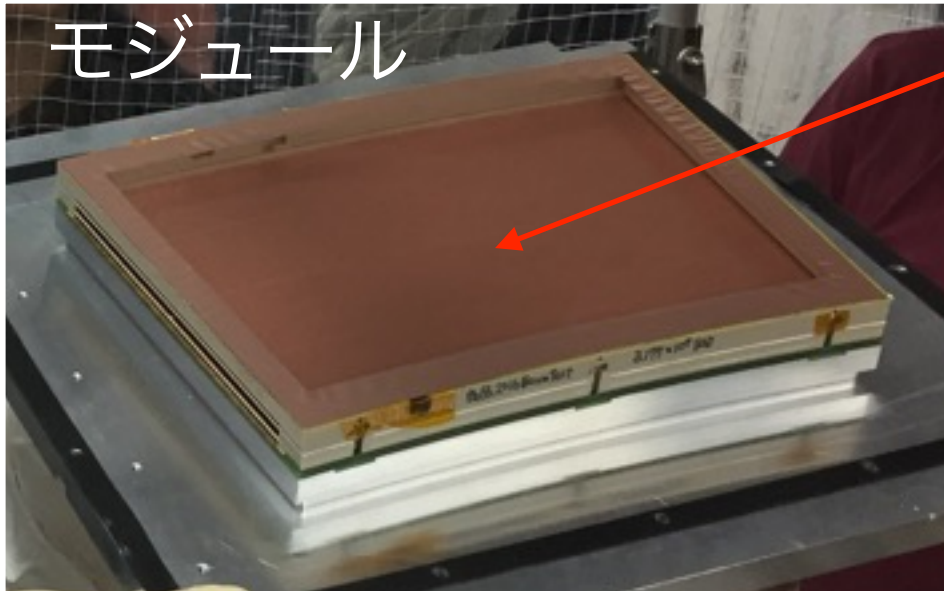
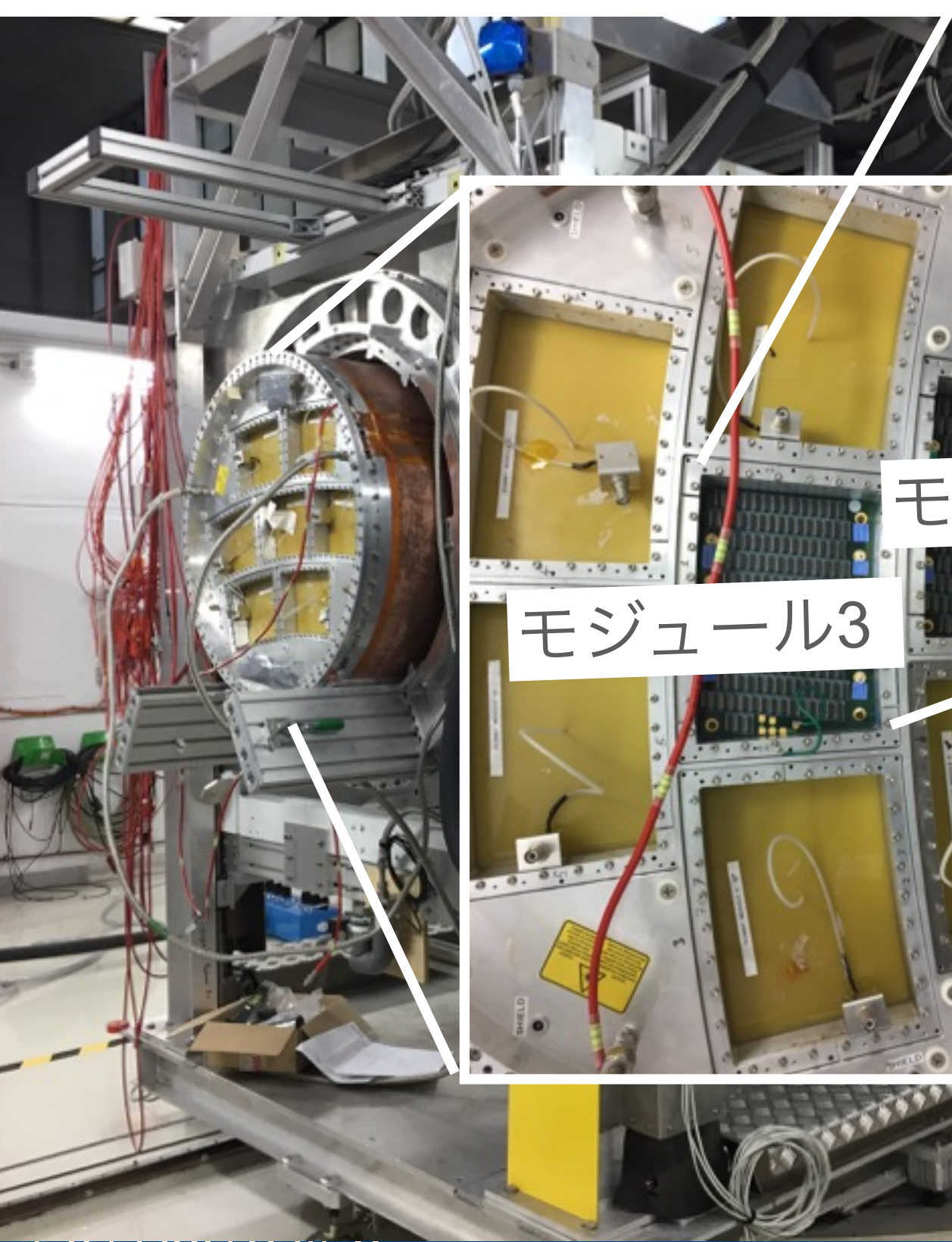
ゲートGEM



モジュール0

モジュール3

ゲートGEMを搭載したモジュール

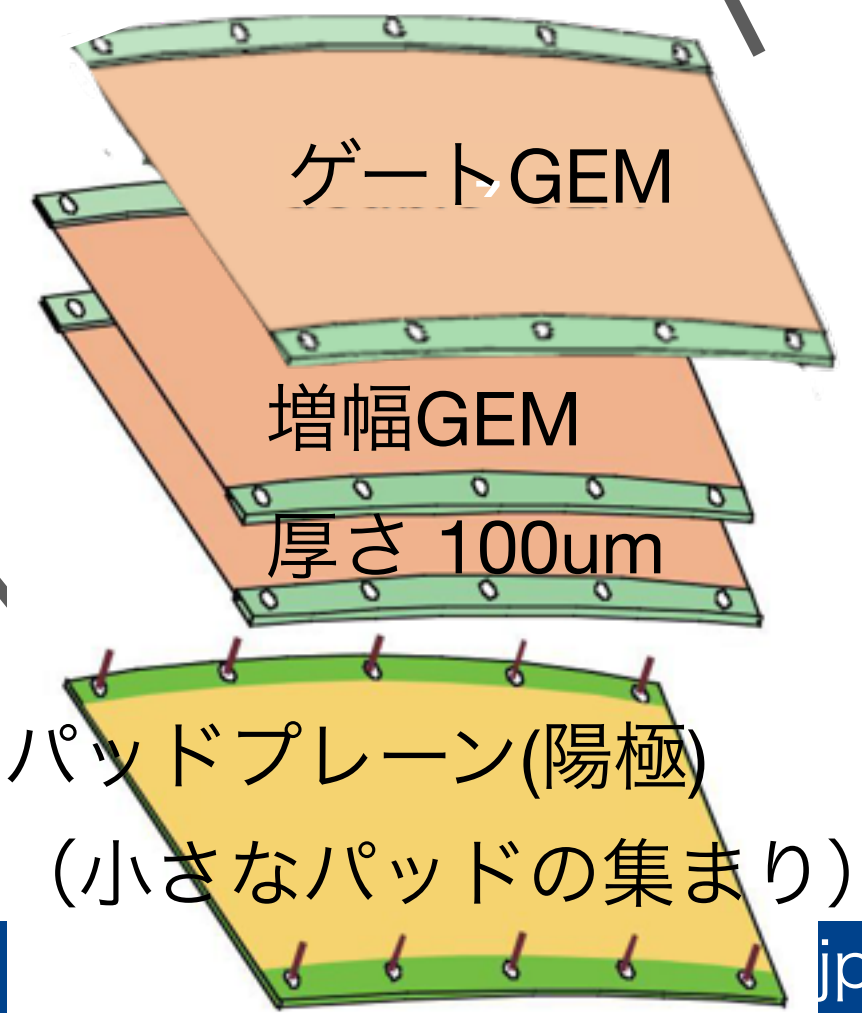


モジュール

ゲートGEM

モジュール0

モジュール3

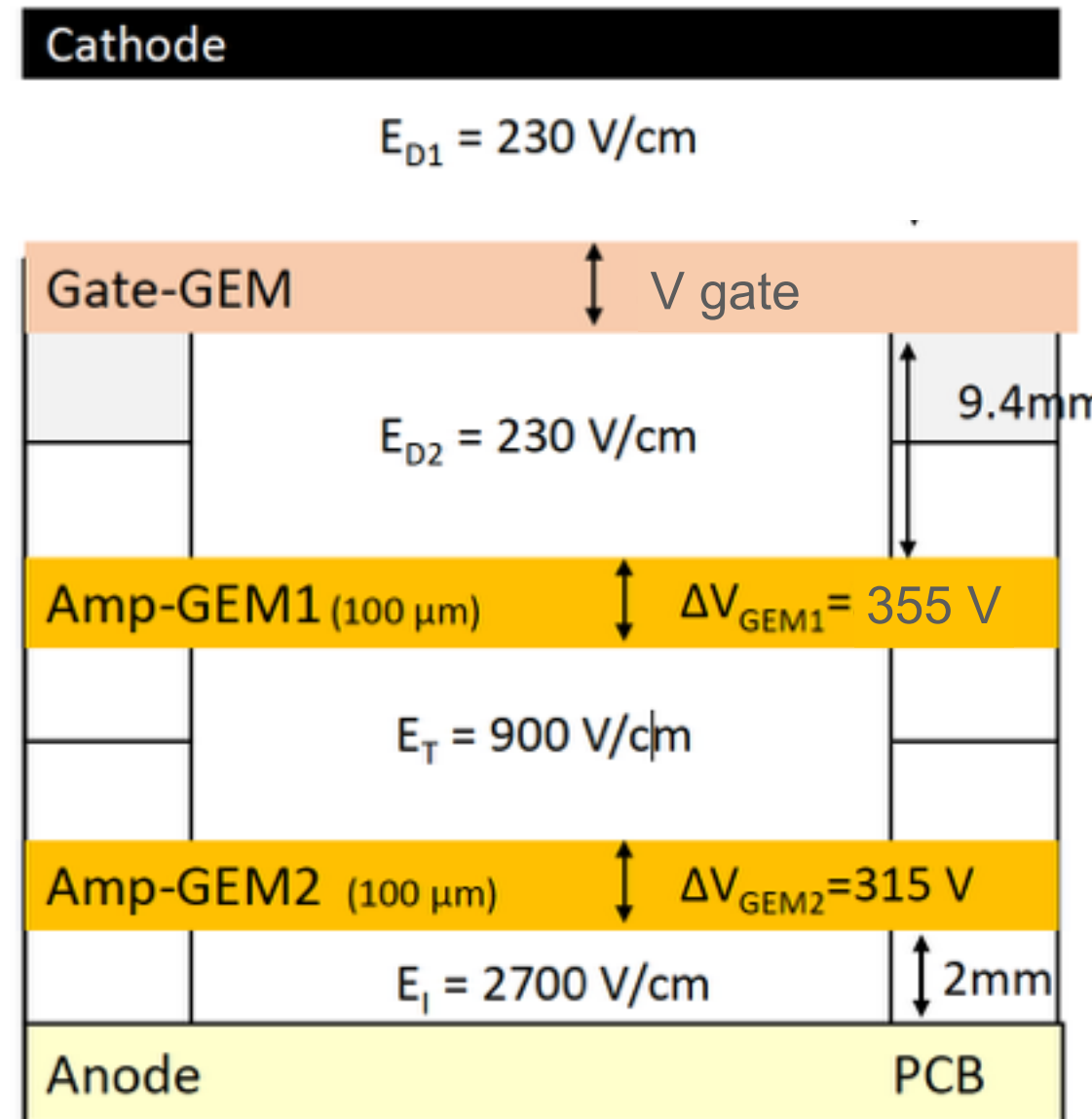


実験条件



モジュール3	ゲートGEMあり	ゲートGEMなし
モジュール0	ゲートGEMなし	ゲートGEMなし

Z[cm] (ドリフト距離)	2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55
ϕ [degree]	0, 10, 20
θ [degree]	-20, -10, 0, 10, 20
V gate[V]	-3.5, 0, 3.5
B[T]	0, 1



ビーム: 5 GeV 電子ビーム

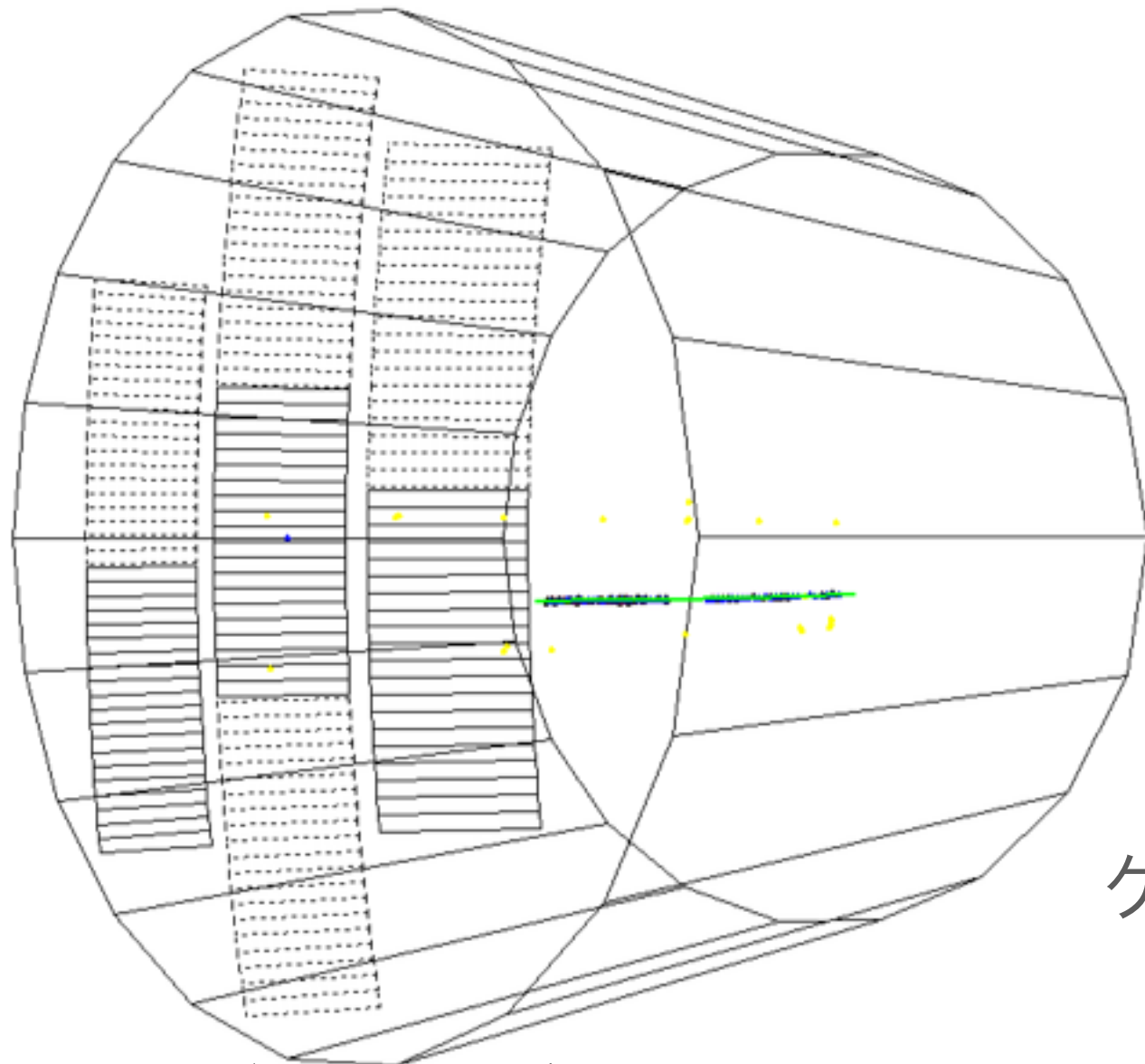
ガス:T2K gas (Ar : CF₄ : Iso-C₄H₁₀ = 95 : 3 : 2 [%])

MarlinTPC frameworkを使用 (20000イベントを解析)

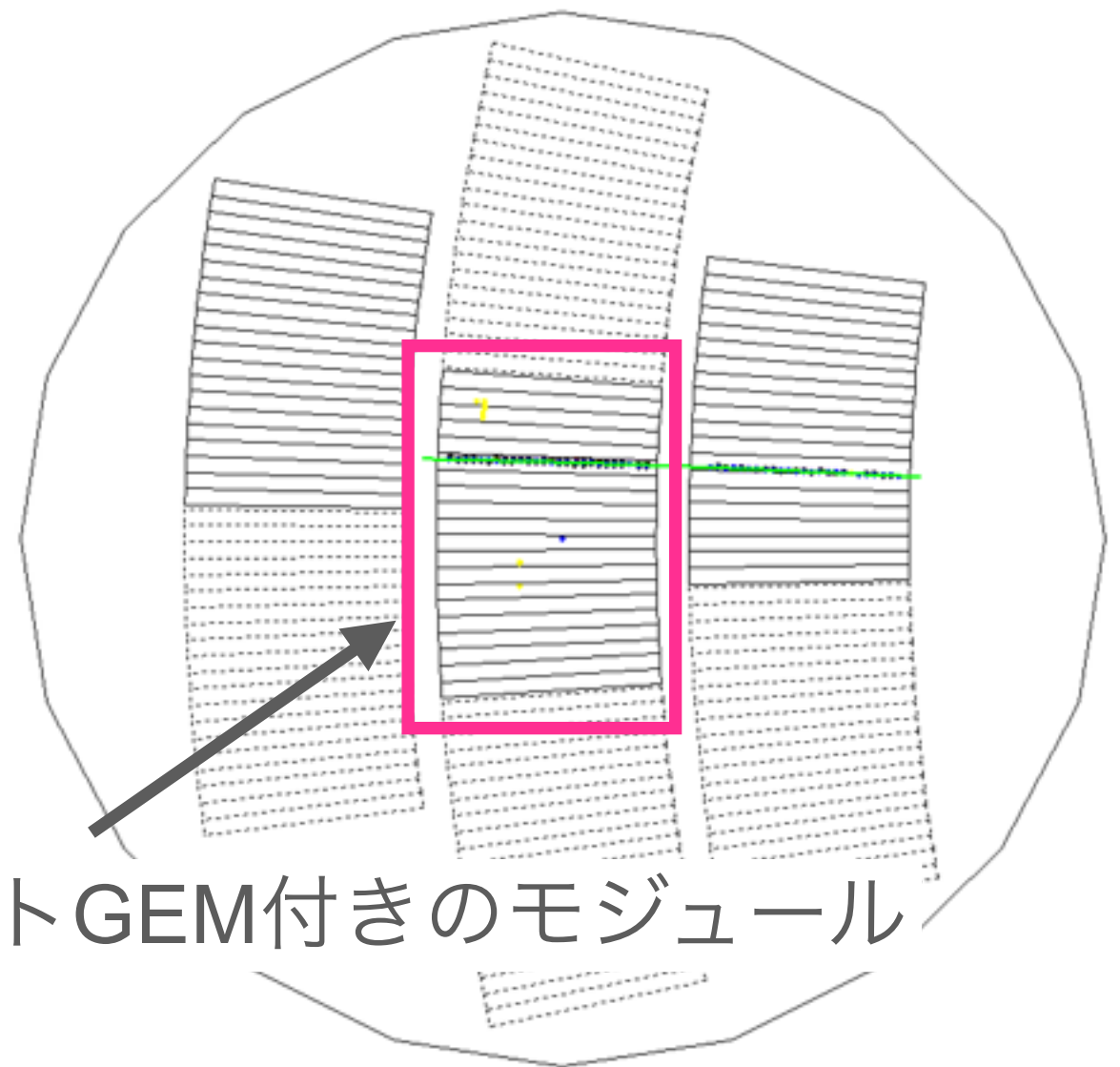
典型的なイベント



横からの図



正面からの図



ゲートGEM付きのモジュール

電子ビームはゲートGEM付きのモジュールの端から十分離れた部分
を通過している

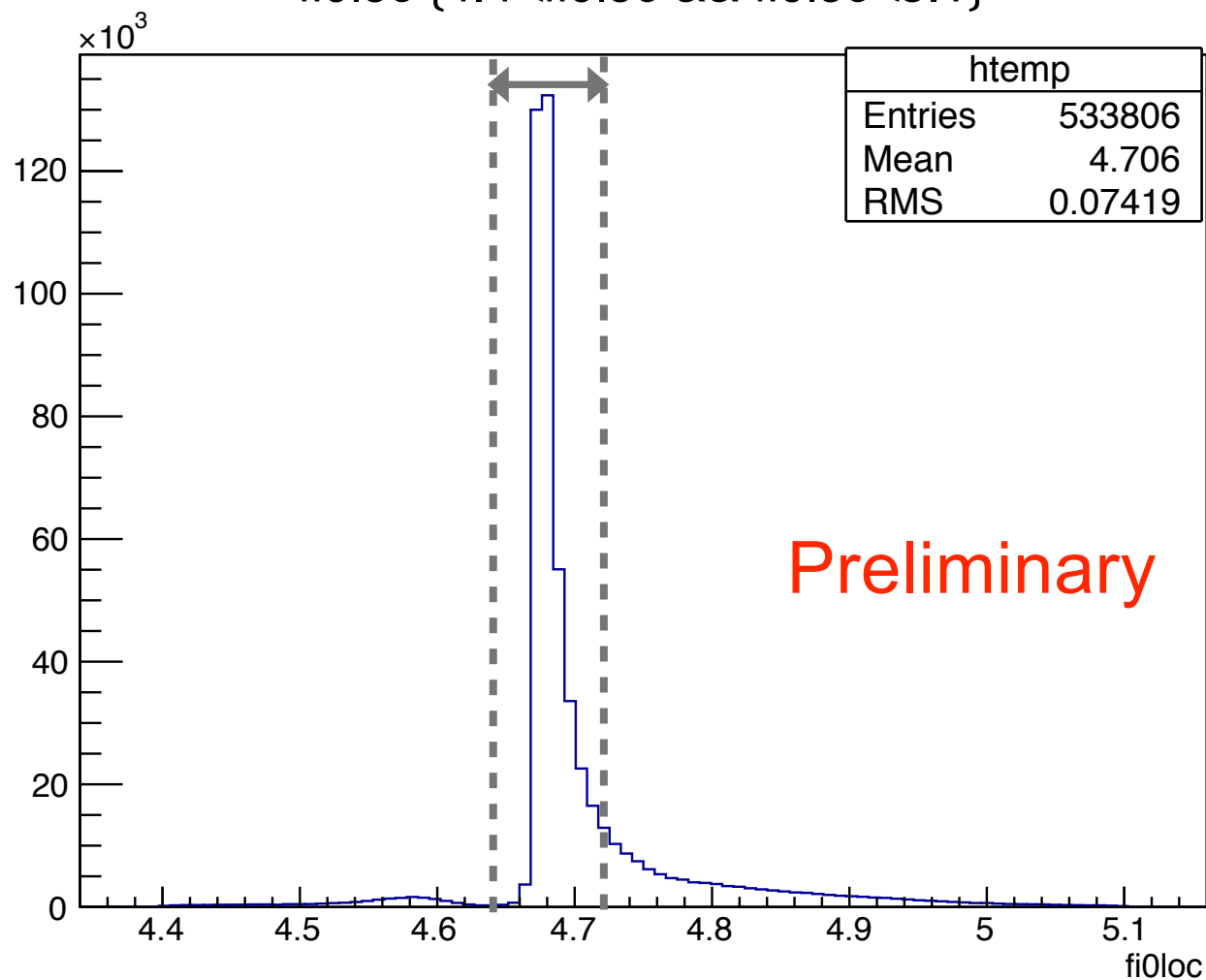
飛跡選択



飛跡角度[rad]

$$4.64 < \phi_0 < 4.72$$

fi0loc {4.4 < fi0loc && fi0loc < 5.1}

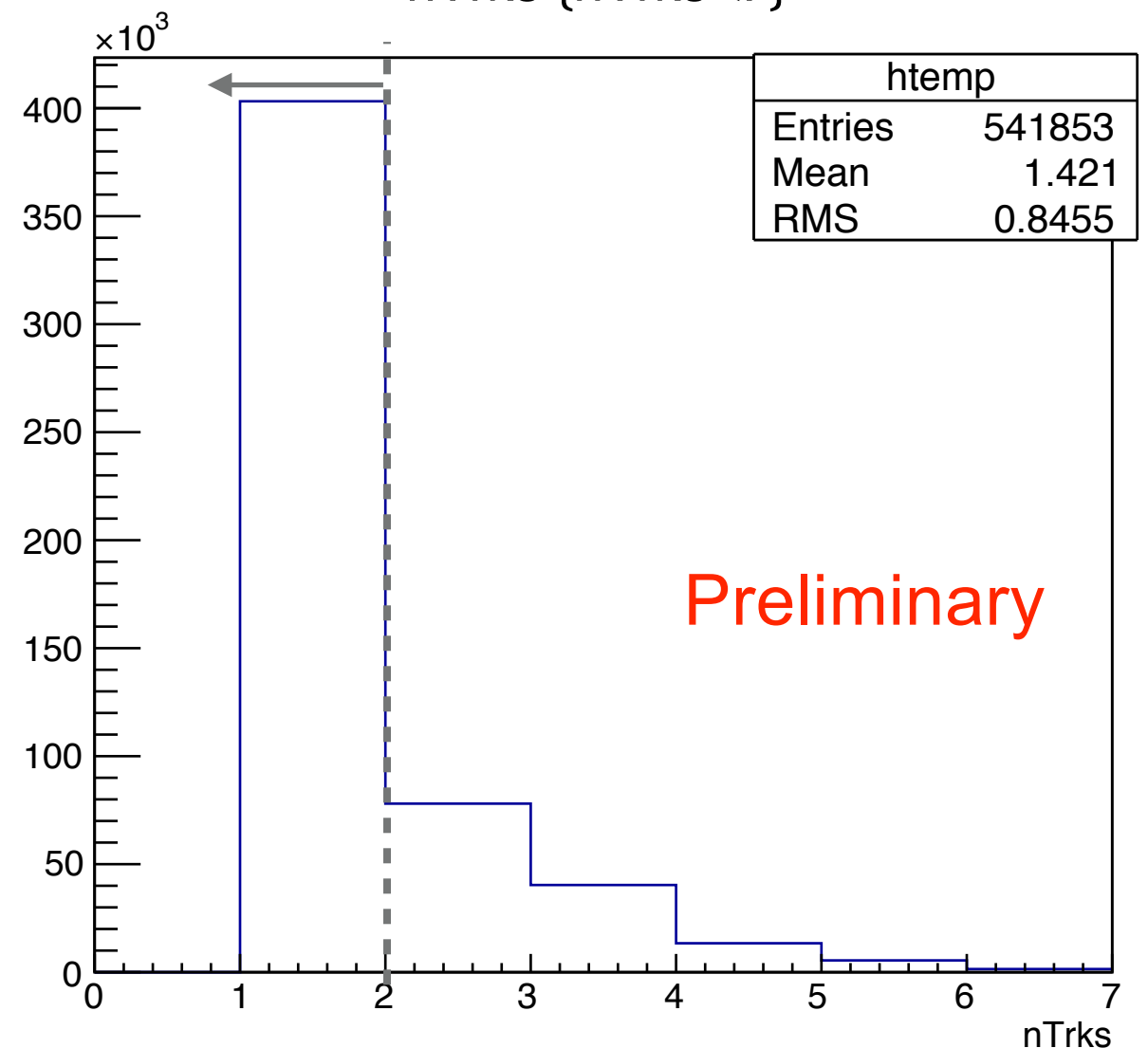


垂直入射のトラックを選ぶ

1イベントの飛跡の数

$$nTrks = 1$$

nTrks {nTrks < 7}

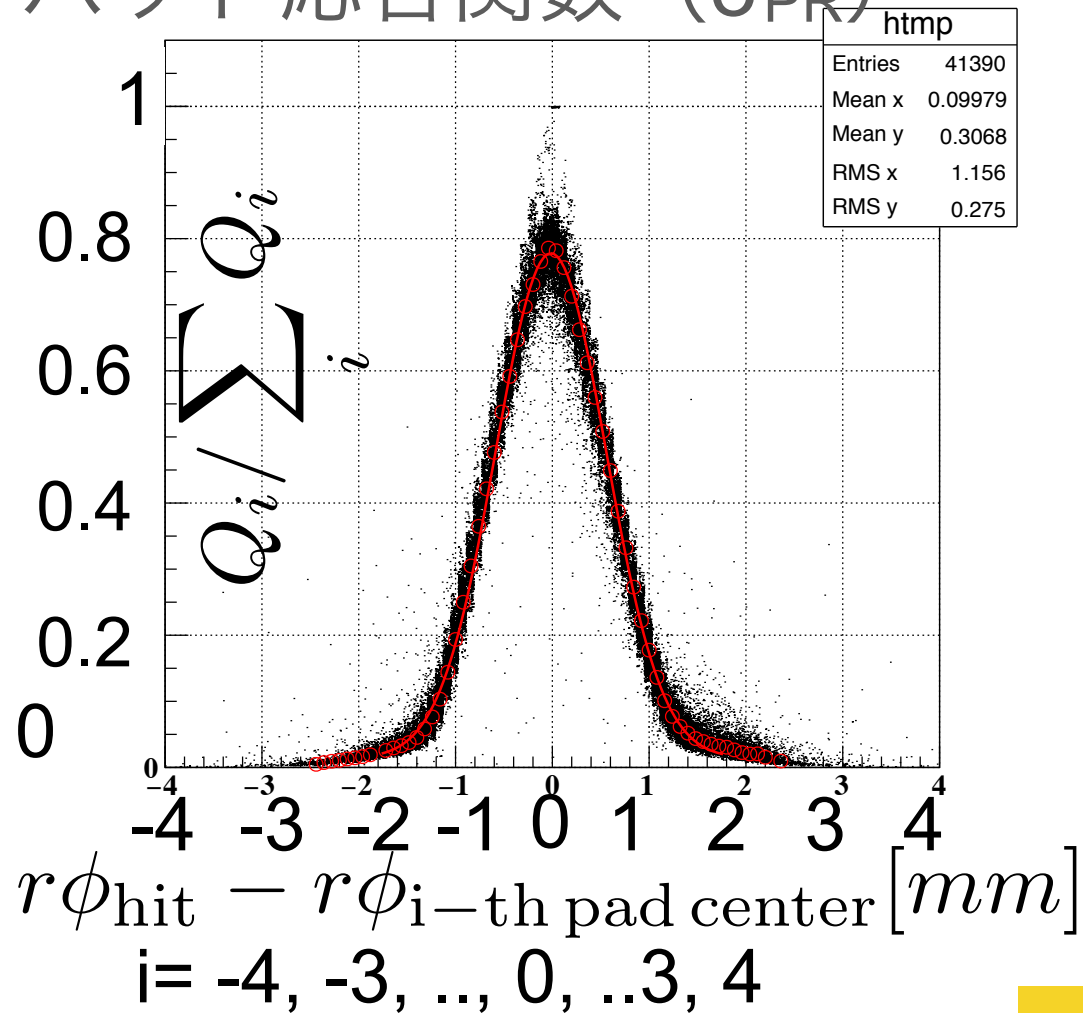


電磁シャワーになったものを除く

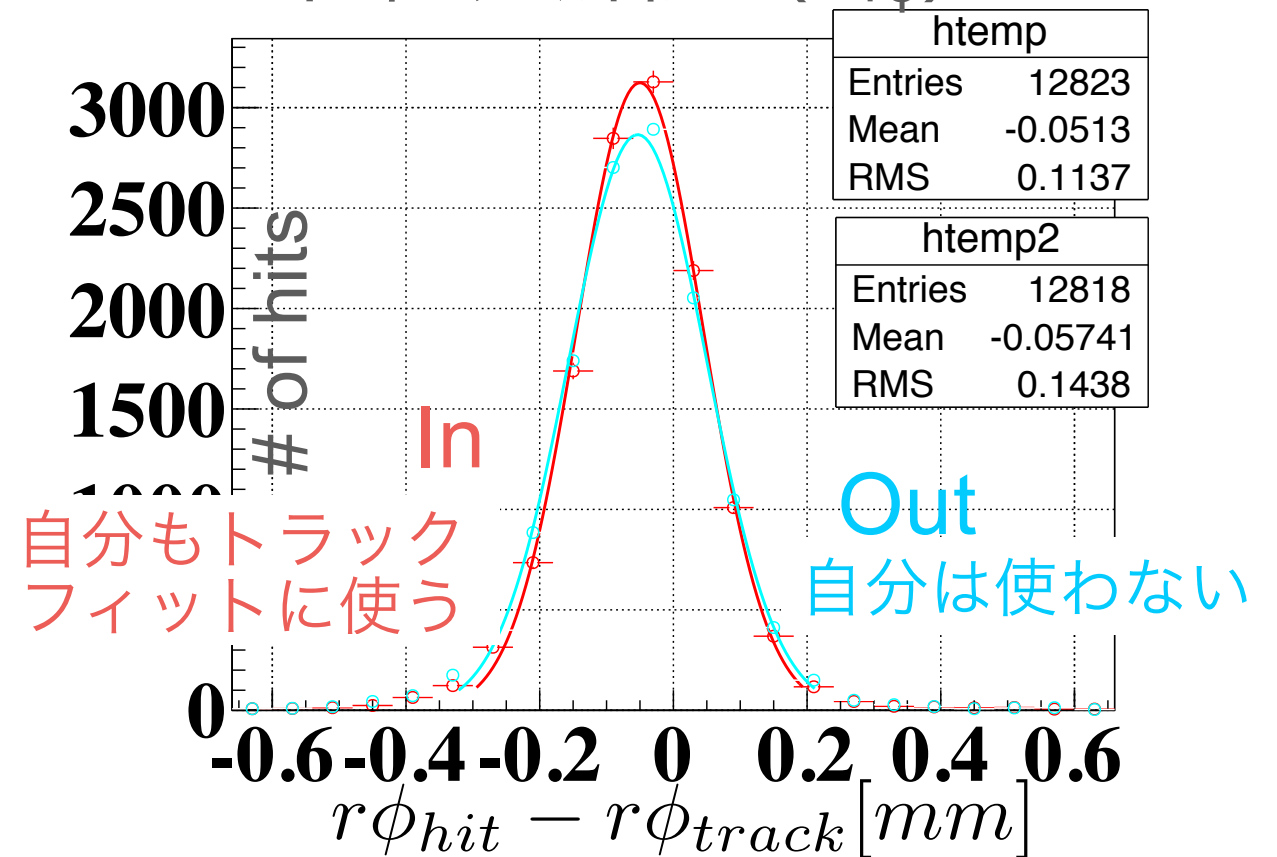
解析-電子透過率の求め方



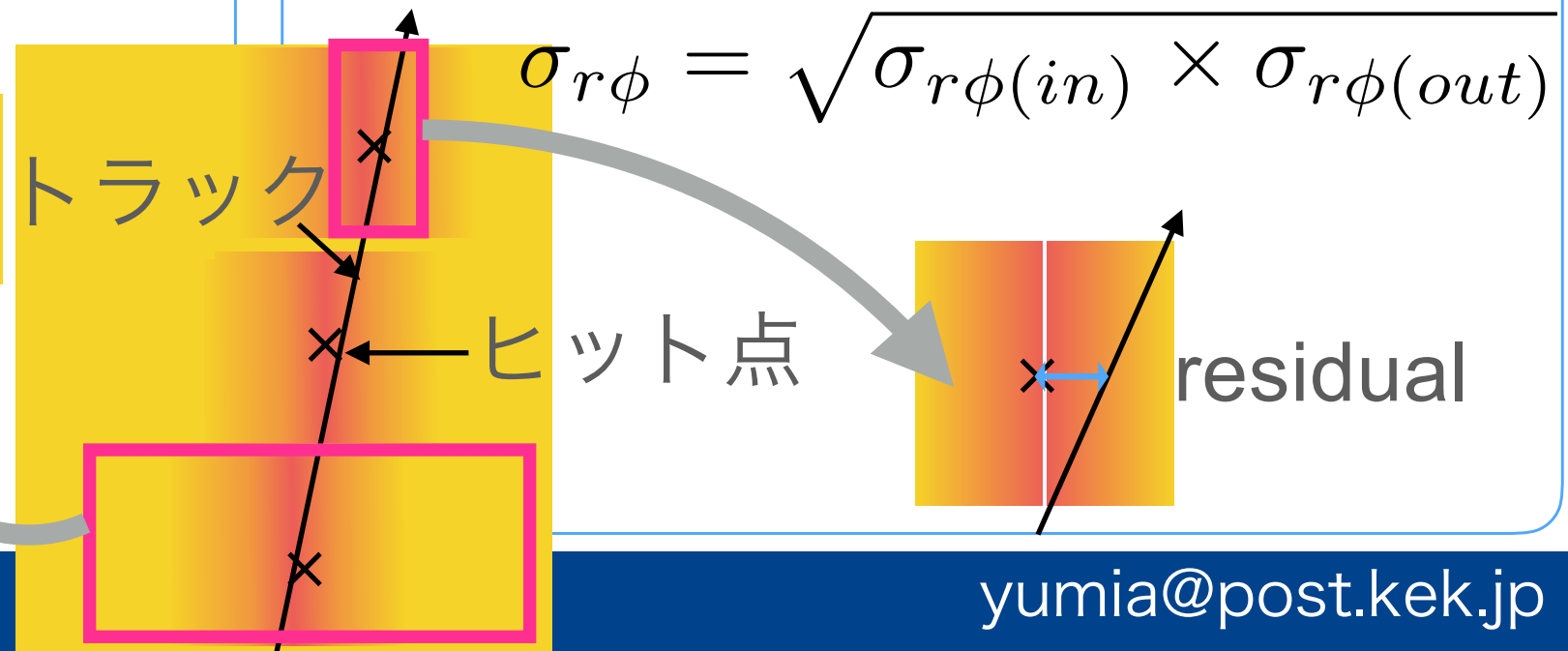
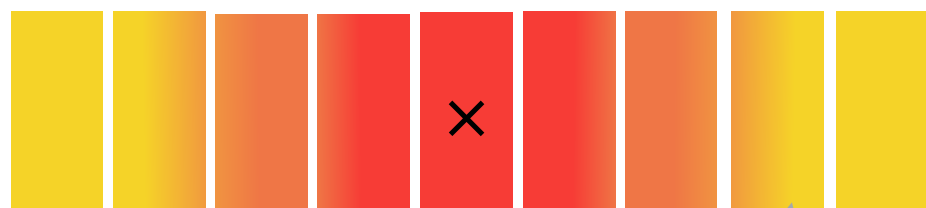
パッド応答関数 (σ_{PR})



位置分解能 ($\sigma_{r\phi}$)



$$\sigma_{r\phi} = \sqrt{\sigma_{r\phi}(in) \times \sigma_{r\phi}(out)}$$



解析-電子透過率の求め方



パッド応答関数 (σ_{PR})

距離 z を横軸にとりプロット

$$\sigma_{PR}^2 = \sigma_{PR}(0)^2 + (C_D^2)z$$

拡散定数

位置分解能 ($\sigma_{r\phi}$)

距離 z を横軸にとりプロット

$$\sigma_{r\phi} = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{(C_D^2)}{N_{eff}}z}$$

実効電子数 $N_{eff} = \left[\left\langle \frac{1}{N} \right\rangle \left\langle \left(\frac{G}{\bar{G}} \right)^2 \right\rangle \right]^{-1}$

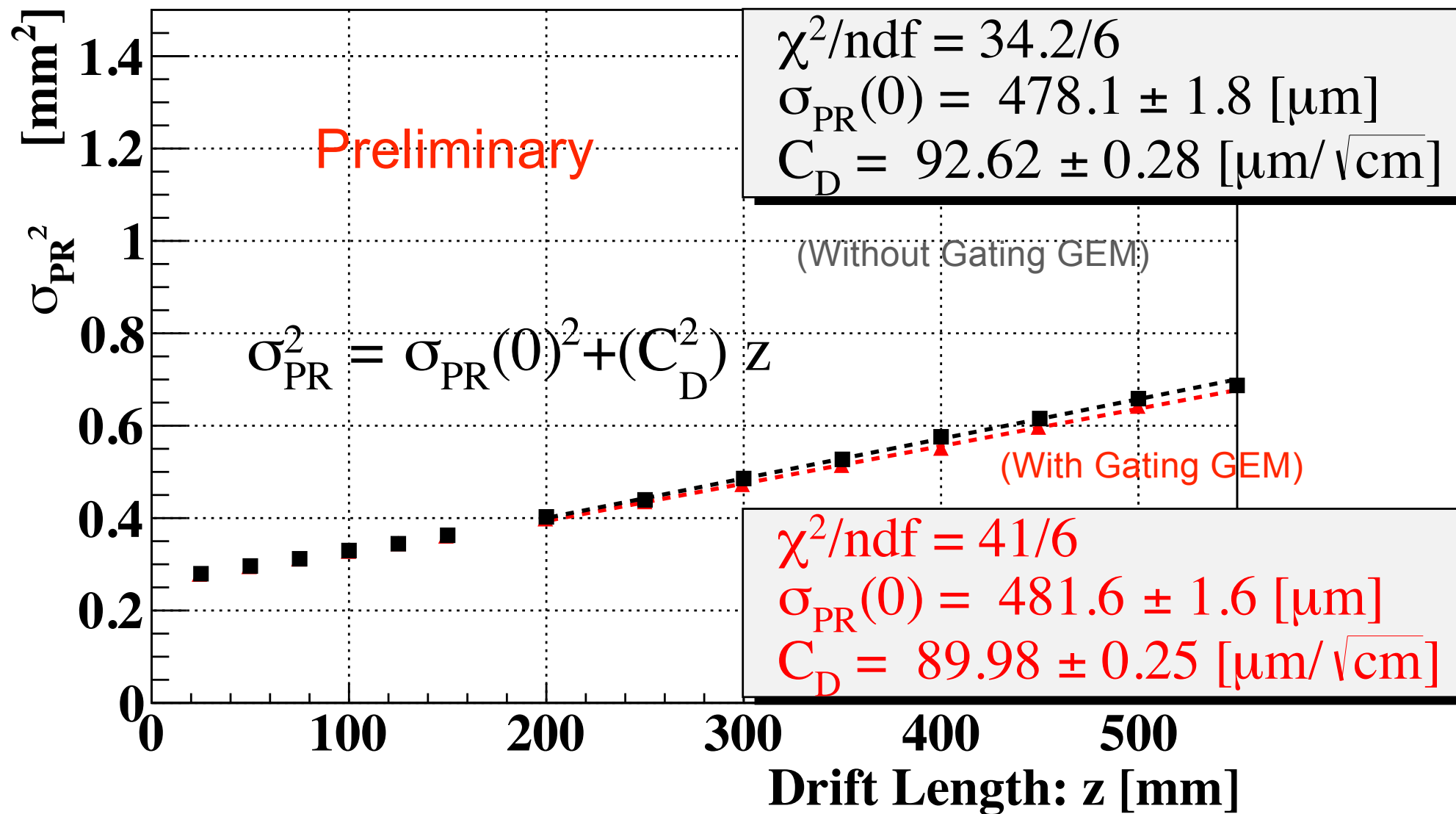
実効電子数 N_{eff} を求める

N_{eff} の比 \equiv 電子透過率

$$R_{e.t.} = \frac{\langle Q_{w/Gate} \rangle}{\langle Q_{w/o Gate} \rangle}$$

$$\frac{N_{eff}(w/Gate)}{N_{eff}(w/o Gate)} \approx R_{e.t.}$$

Pad Response (Module3 Row16)



Garfieldシミュレーションシミュレーション

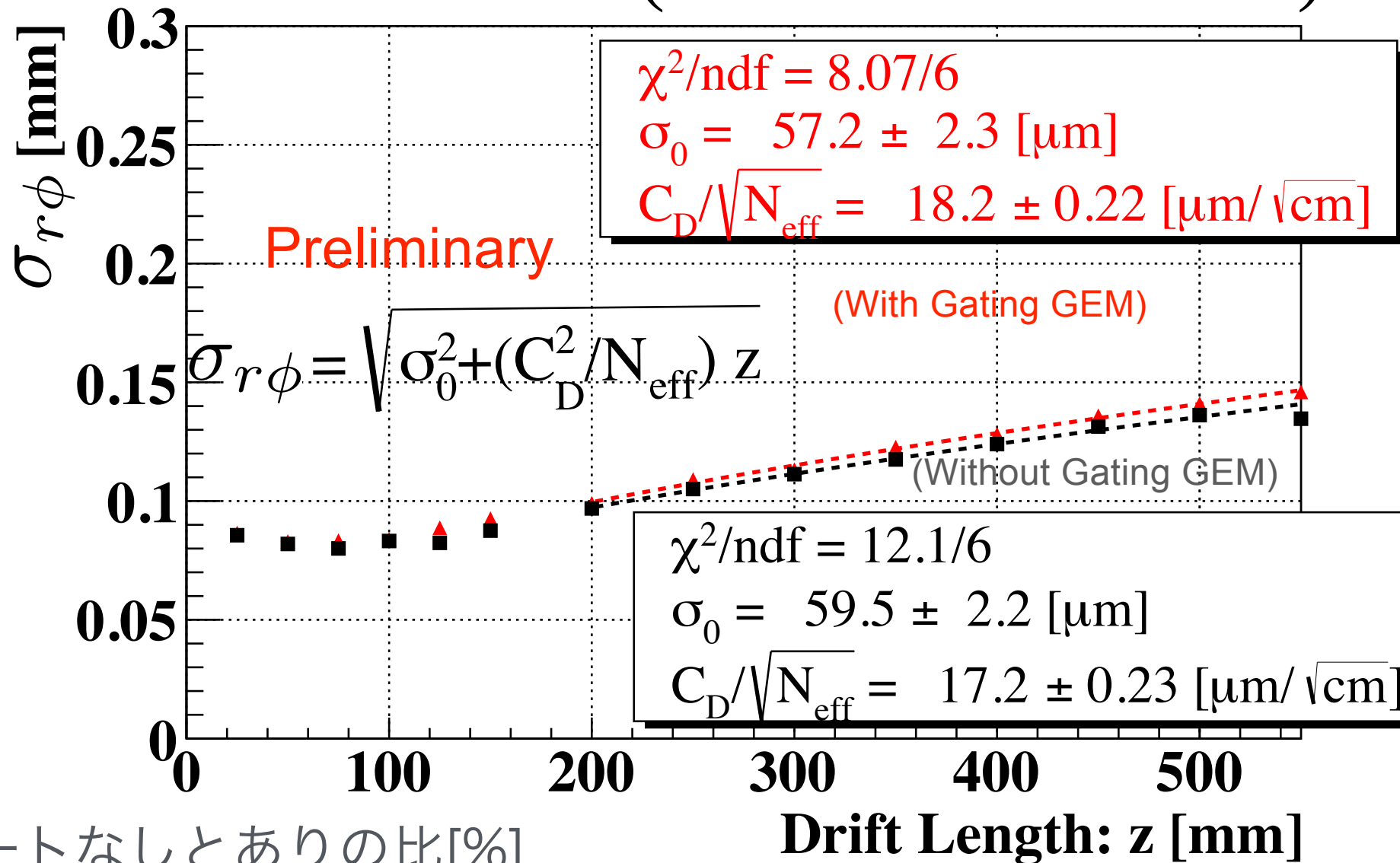
ゲートありのときの温度圧力でのCd 94.0 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$ +/- 0.6%

ゲートなしのときの温度圧力でのCd 94.1 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$ +/- 0.5%

位置分解能 (rφ)



GM Resolutin (Module3 Row16)



	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Ratio /%	101.1 ±0.1	101.2 ±0.1	104.1 ±0.1	100.8 ±0.1	107.7 ±0.1	105.8 ±0.1	102.2 ±0.1	103.8 ±0.1	101.7 ±0.1	104.4 ±0.1	103.3 ±0.1	103.4 ±0.1	103.6 ±0.1	108.4 ±0.2

予想されていた比率 : 110 %

Preliminary(Stat. only)

yumia@post.kek.jp

電子透過率



	ゲートありのCd [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	ゲートなしのCd [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]
実測	89.0 \pm 0.3	93.0 \pm 0.3
シミュレーション	94.0 \pm 0.6	94.1 \pm 0.5

	ゲートあり	ゲートなし
Cd/ $\sqrt{N_{\text{eff}}}$	18.2 \pm 0.3	17.2 \pm 0.3

使用したCd値 [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	ゲートありの N_{eff}	ゲートなしの N_{eff}	比率[%]
実測	24.4 \pm 0.7	29.2 \pm 0.8	83.7 \pm 3.1
シミュレーション	26.7 \pm 0.8	30.0 \pm 0.9	89.1 \pm 3.5

おおよその見積もりで電子透過率 80 %は達成している
光学的開口度= 82 %により近いのは実測Cd値を使ったとき

高開口度GEM型ゲート装置を搭載したTPC読み出しモジュール
の初のビーム試験に成功した



実測したCd値を用いた電子透過率は 83.7 ± 3.1 であった

これは光学的開口度= 82 %と一致しており
目標の電子透過率を達成している

理解すべき課題点

ゲートあり/なしでCdに違いが見られたこと

同時に測っていたmodule0との比較などから今後
原因を追究する



ご静聴ありがとうございました

Introduction- Why we need high electron transmission?

► Spatial Resolution vs Electron Transmission

$$\sigma_{r\phi} \propto 1/\sqrt{N_{eff}} \propto 1/\sqrt{R_{e.t.}} \quad \left(\begin{array}{l} N_{eff} = \left[\left\langle \frac{1}{N} \right\rangle \left\langle \left(\frac{G}{\bar{G}} \right)^2 \right\rangle \right]^{-1} \\ R_{e.t.} = \frac{\langle Q_{w/Gate} \rangle}{\langle Q_{w/o Gate} \rangle} \end{array} \right.$$

$$\frac{\sigma_{r\phi}(w/ Gate)}{\sigma_{r\phi}(w/o Gate)} \approx \frac{1}{\sqrt{R_{e.t.}}}$$

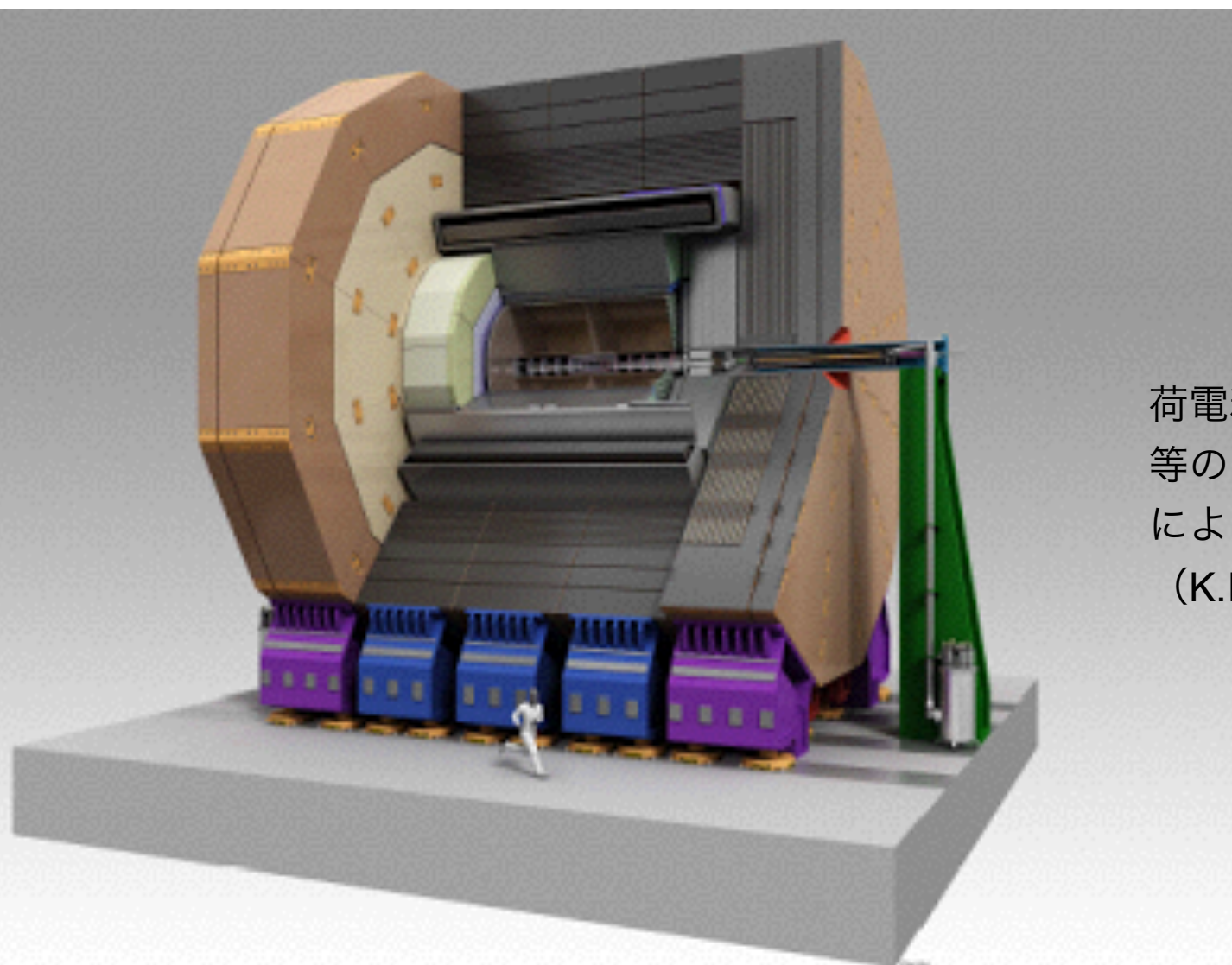
We need high electron transmission to keep good resolution:

$$R_{e.t.} > 0.8$$

for point resolution better than 100 μ m at B=3.5 T over the full drift length of 2.2 m of the ILC TPC.

So we measured resolution and other parameters related it.

International Large Detector (国際) (大型) (測定器)



Particle Flow Analytics (PFA)

荷電粒子は飛跡検出器で、光子や中性ハドロン等の中性粒子はカロリメータで重複なく測定することにより、優れたジェットエネルギー分解能を実現。

(K.Ikematsu)

それぞれの測定器の役割

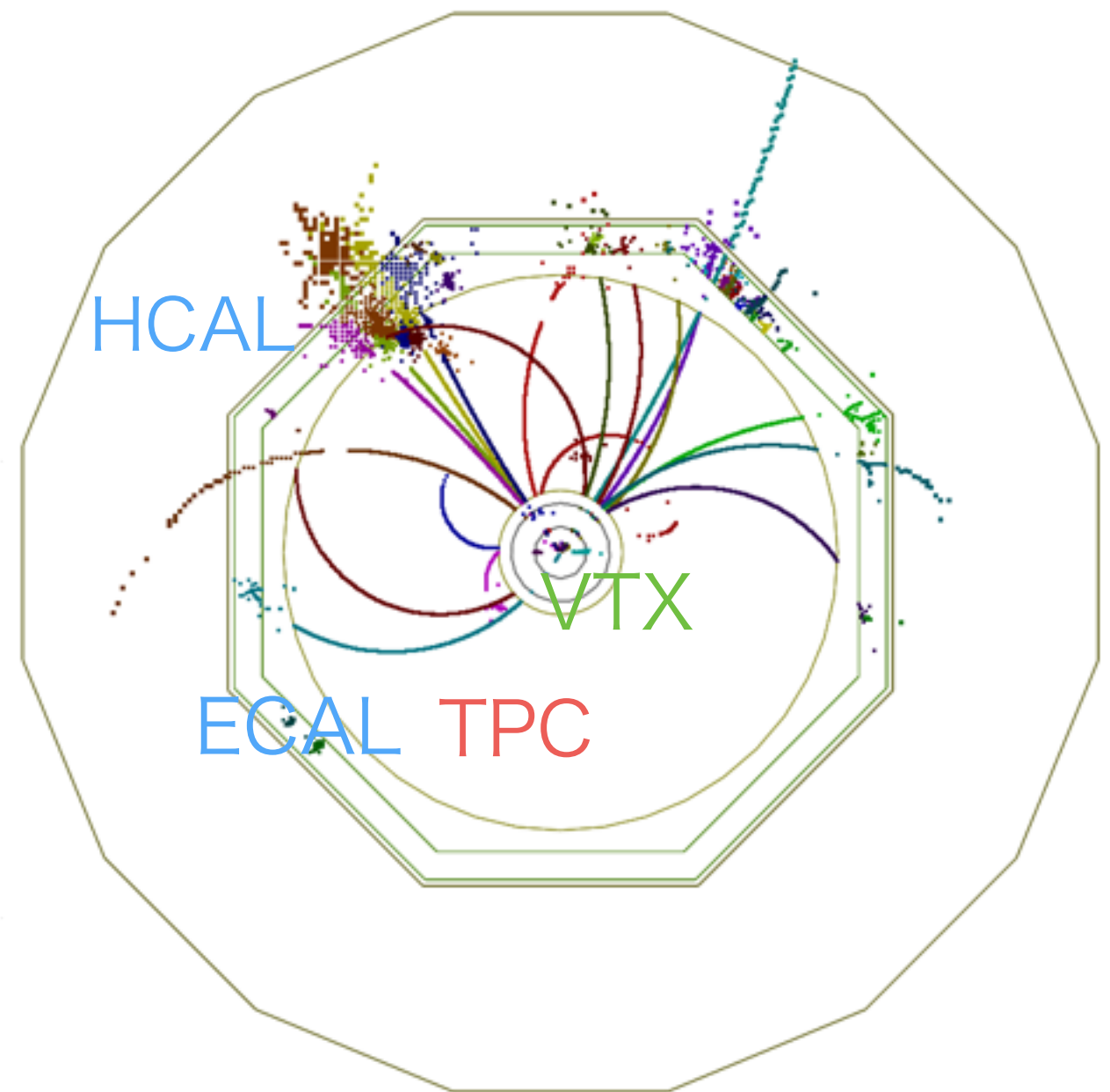
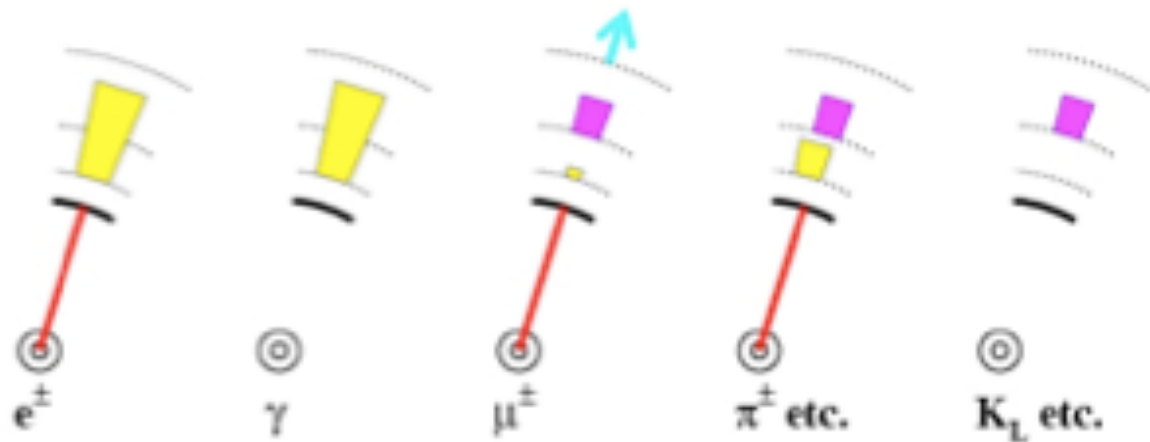


知りたいもの→すべての粒子の特定

2つの4元ベクトル

$$P^\mu = (E/c, \mathbf{p})$$

$$X^\mu = (ct, \mathbf{x})$$



TPCの2つの役割

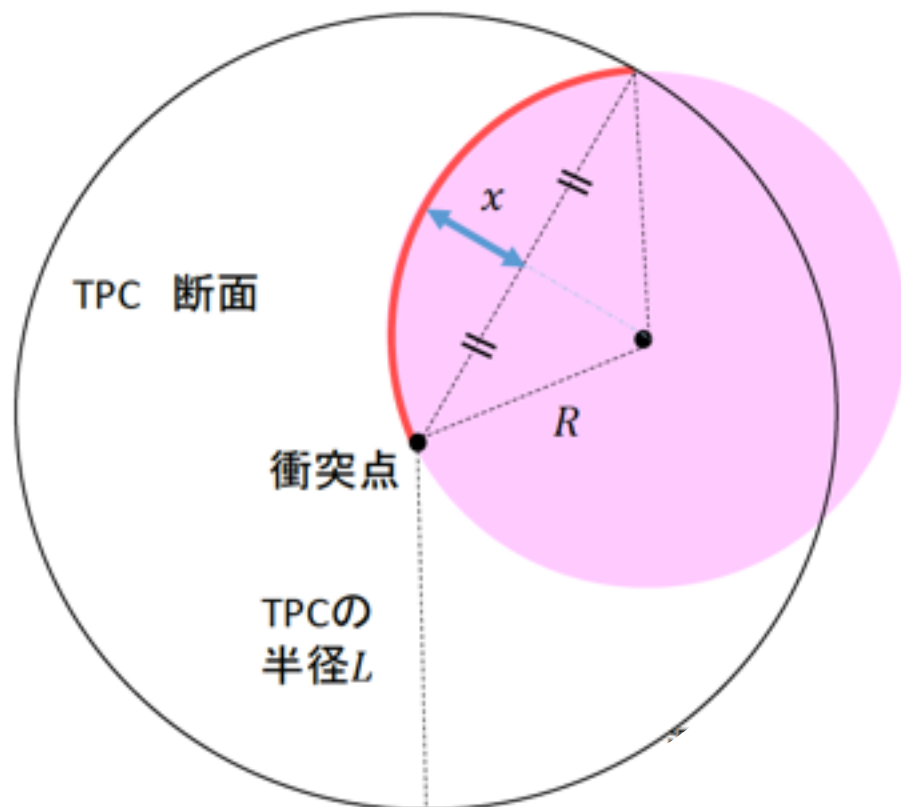


①荷電粒子の検出

運動量測定

曲率半径・磁場から求める

$$P_T[\text{GeV}/c] \doteq 0.3 B[\text{T}] R[\text{m}]$$



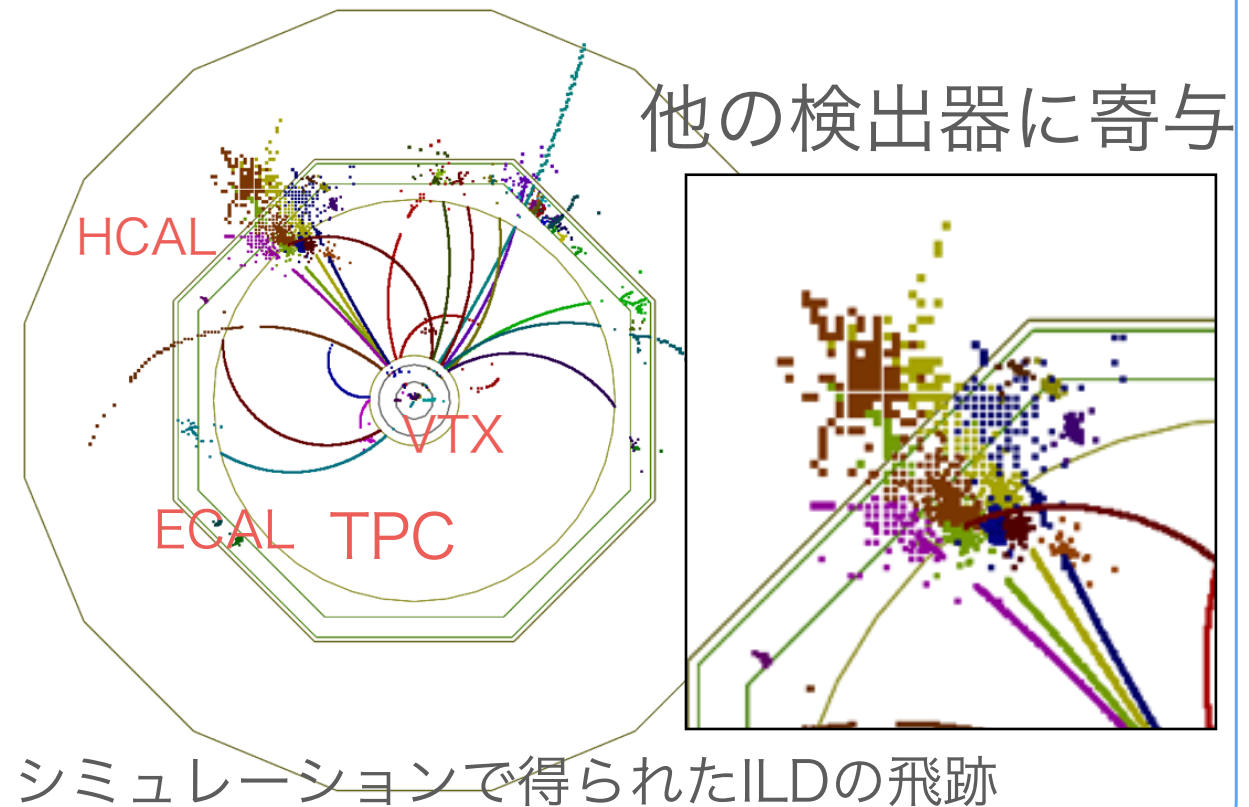
②位置の測定

飛跡検出

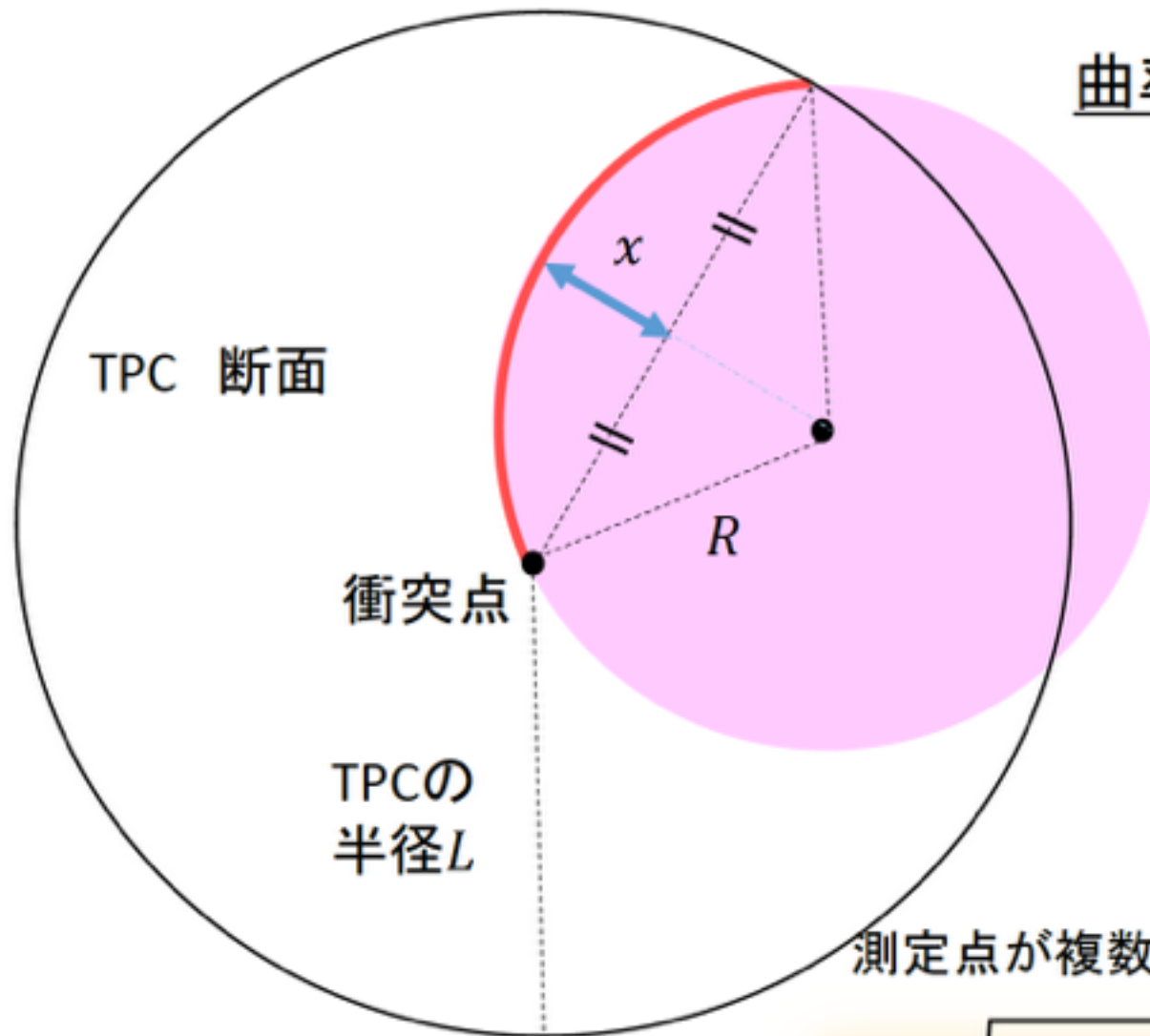
2次元

+

時間から求める残り1次元



運動量測定



曲率半径 R を求める

$$R^2 = (R - x)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad R \gg x \text{ とすると} \quad R \approx \frac{L^2}{8x}$$



$$P_T = 0.3BR \approx \frac{0.3BL^2}{8x}$$

$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \propto \frac{\sigma_x P_T}{0.3BL^2}$$

測定点が複数あることや多重散乱等を考慮するとより正確には...

運動量分解能

$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \simeq \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\alpha' \sigma_x}{BL^2}\right)^2 \left(\frac{720}{n+4}\right) P_T^2}_{\text{measurements}} + \underbrace{\left(\frac{\alpha' C}{BL}\right)^2 \left(\frac{10}{7}\right) \left(\frac{X}{X_0}\right)}_{\text{multiple scattering}}}$$

R.L. Gluckstern, NIM 24 (1963), 381

測定点の数: n と位置分解能: σ_x と磁場の強さ: B と検出器半径: L に依存

T2Kガス

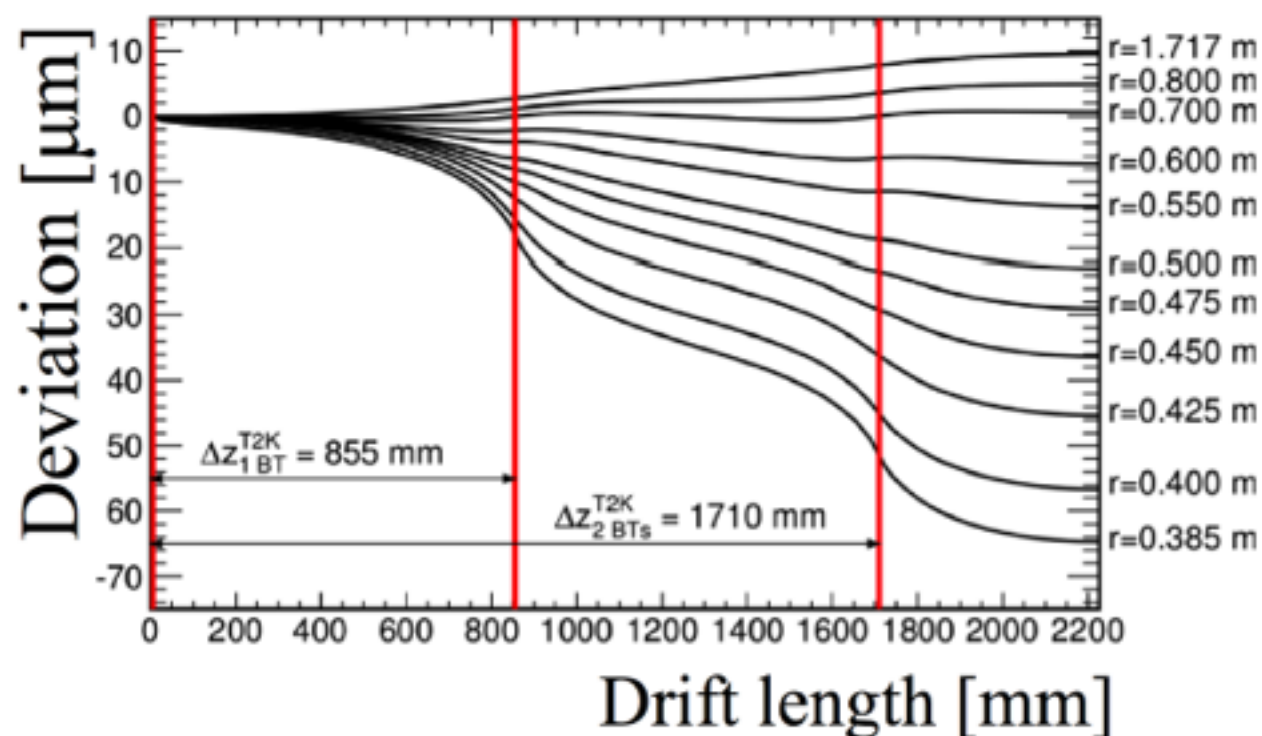


Ar : CF₄ : iC₄H₁₀ = 95 : 3 : 2

<p>Ar アルゴン</p>	<ul style="list-style-type: none">• 希ガス ⇒比較的 low 電圧でガス増幅率が高くなる
<p>CF₄ フロン</p>	<ul style="list-style-type: none">• 磁場中で電子の横方向拡散を抑制しやすい ⇒位置分解能が良くなる• ドリフト速度が速い• クエンチング作用を持つ
<p>ISO-C₄H₁₀ イソブタン</p>	<ul style="list-style-type: none">• クエンチング作用を持つ• ペニング効果で電子の増幅率を高くする <p><u>ペニング効果</u>: 原子の準安定励起状態がこれよりも小さいイオン化ポテンシャルの分子や原子に衝突すると、イオン化ポテンシャルの低い分子や原子が電離する現象</p>



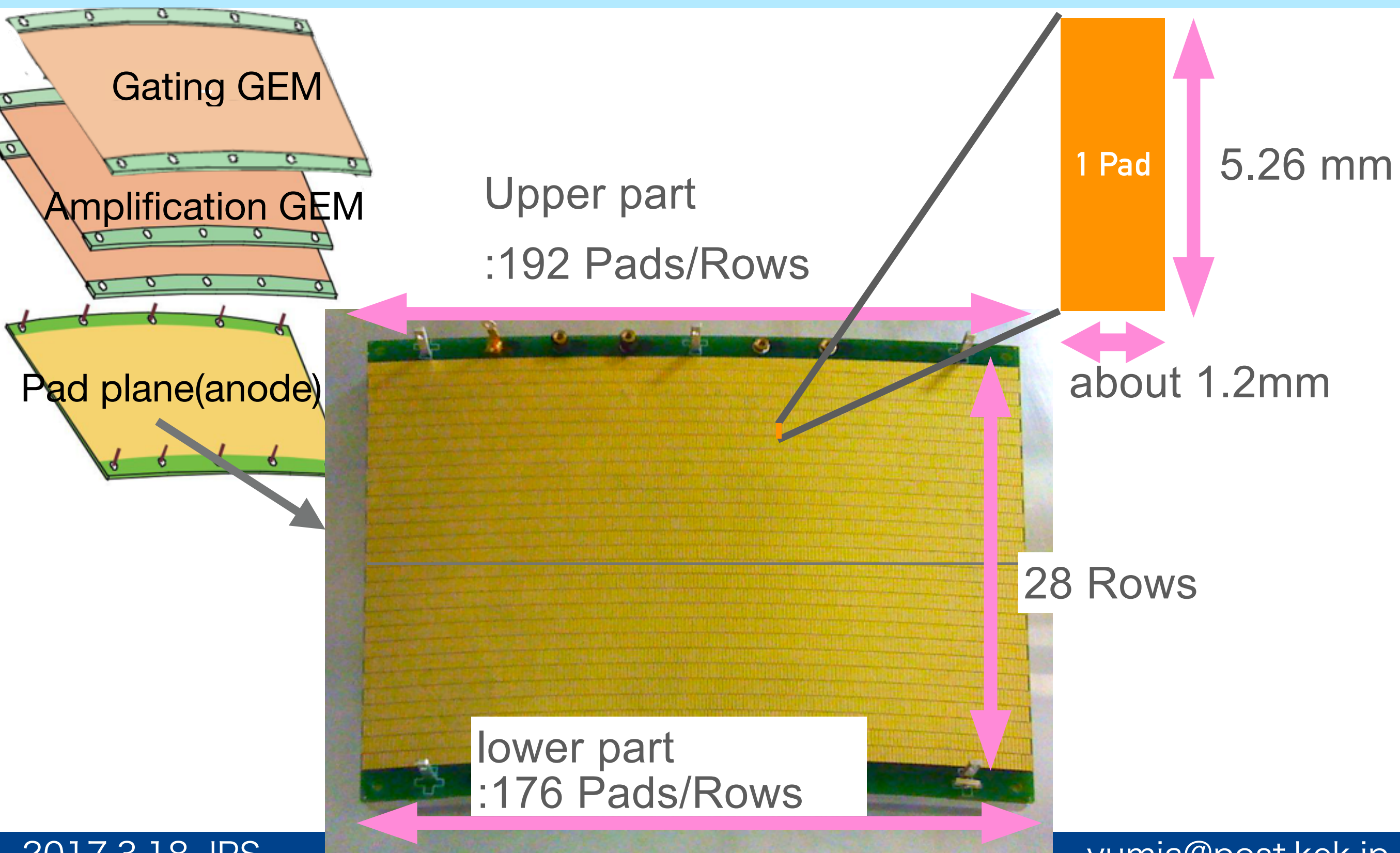
イオンフィードバック問題による位置分解能の悪化

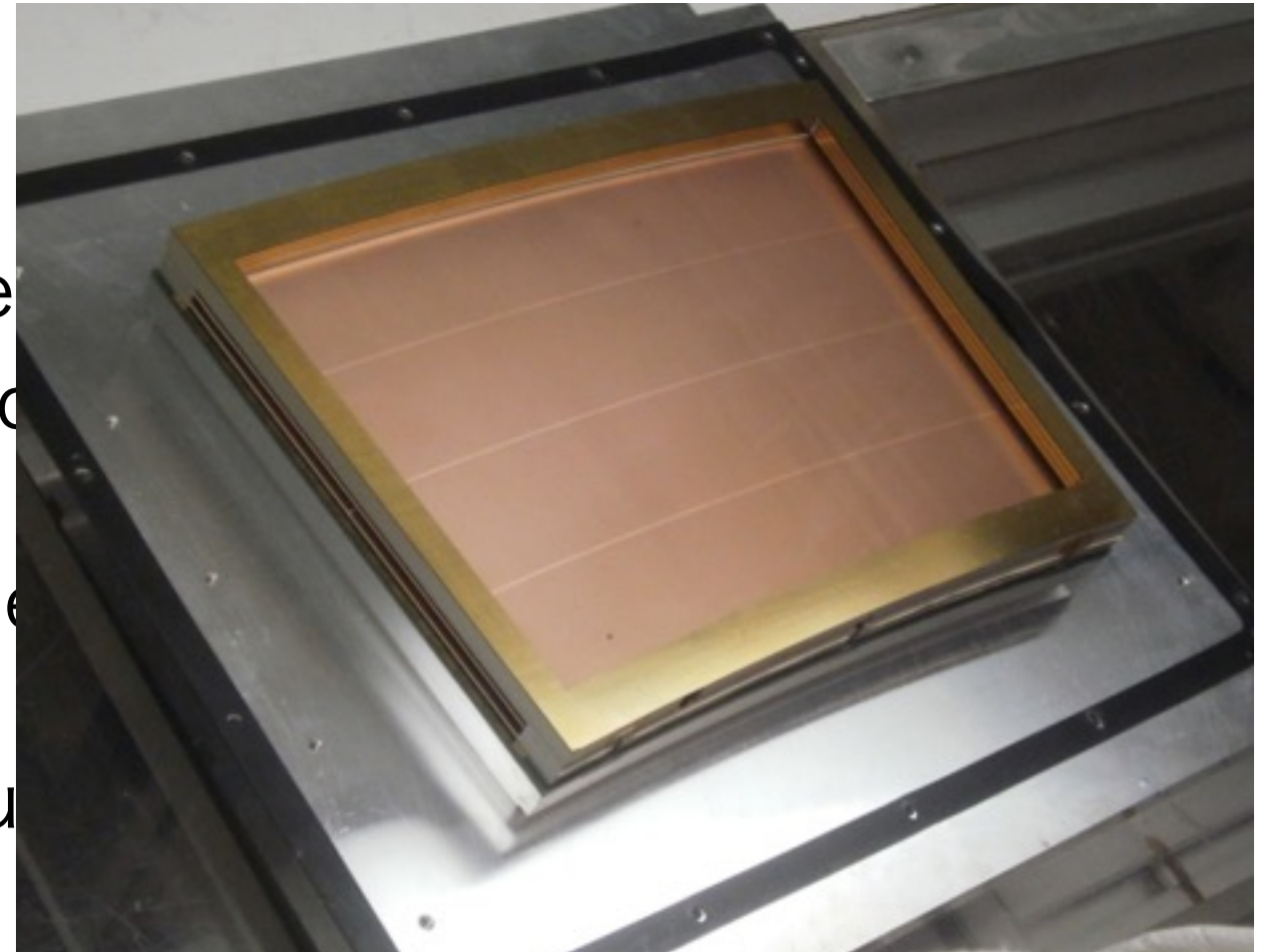
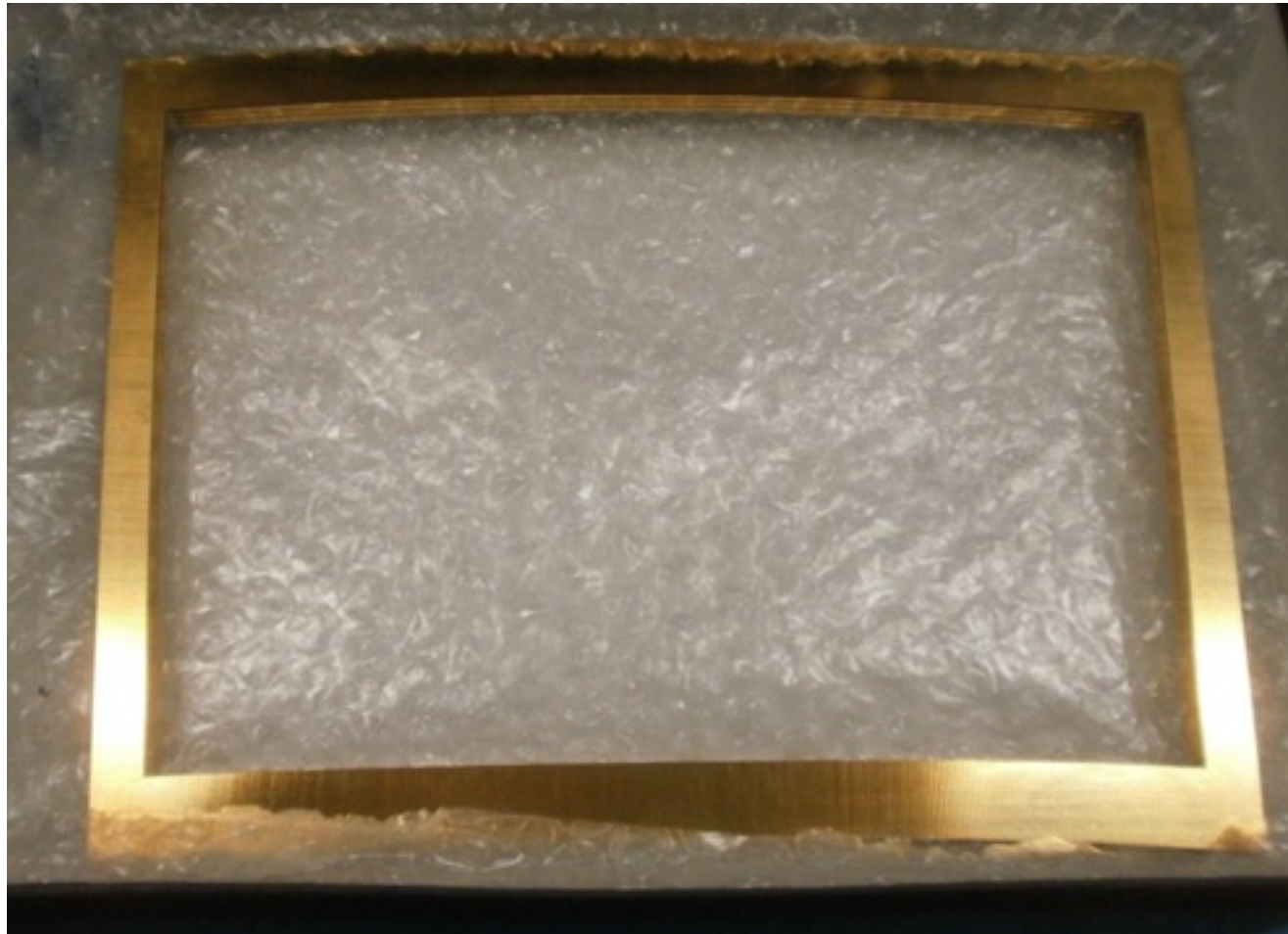


	ゲート装置なし	ゲート装置あり
1次陽イオン	8.5 μm	8.5 μm
2次陽イオン	60.0 μm	0.01 μm
合計	70 μm	8.5 μm

図 4: 円板状の2次陽イオン群による飛跡歪みの影響予想図と、生成陽イオン群による位置分解能への影響。Ion Back Flow=3 と仮定しての評価。

Readout Pads





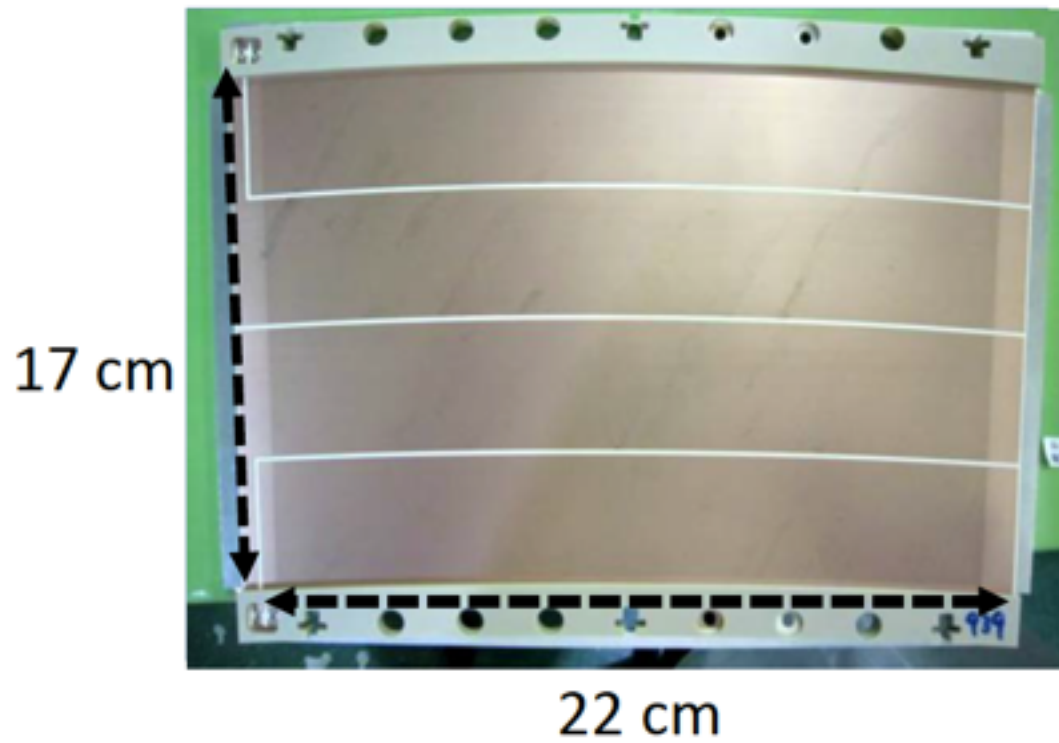
- Why there is little difference between with gate and Field shaper to make electric field uniform without gate?

- We expect 10 % difference

Asian GEM モジュールの構成



GEM module



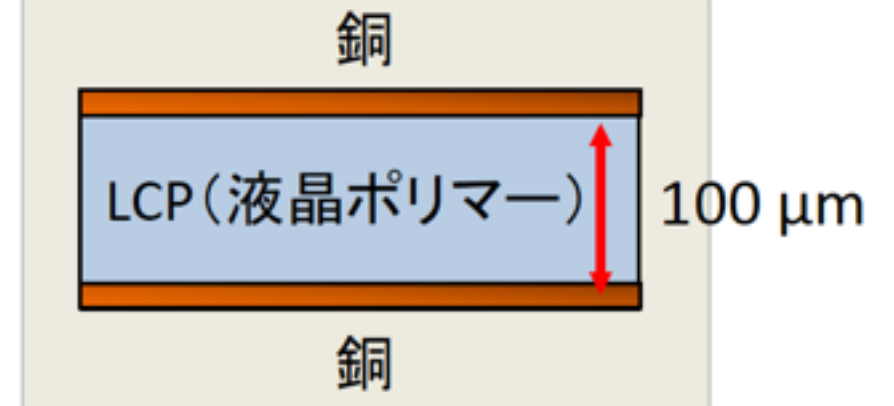
孔の直径

70 μm

細孔間隔

140 μm

横から見た断面図

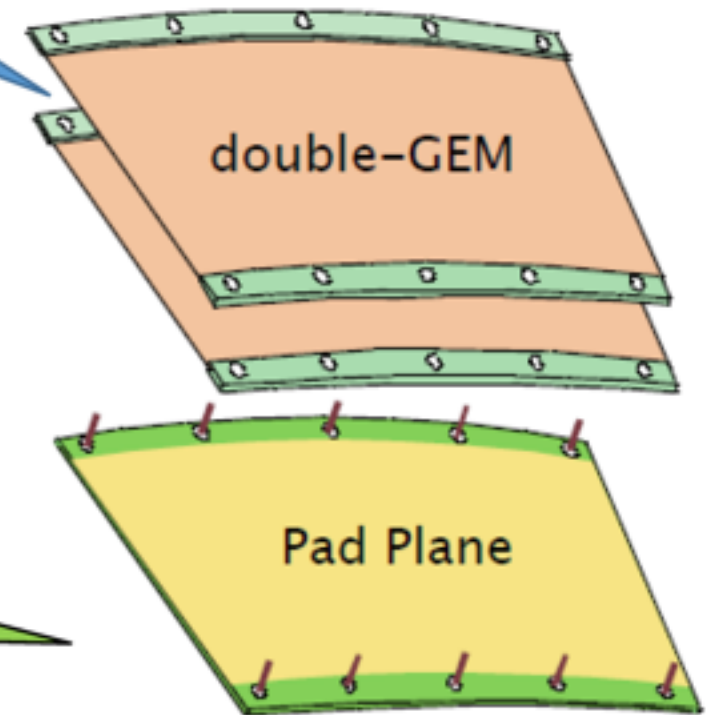


Pad Plane



金メッキされた銅

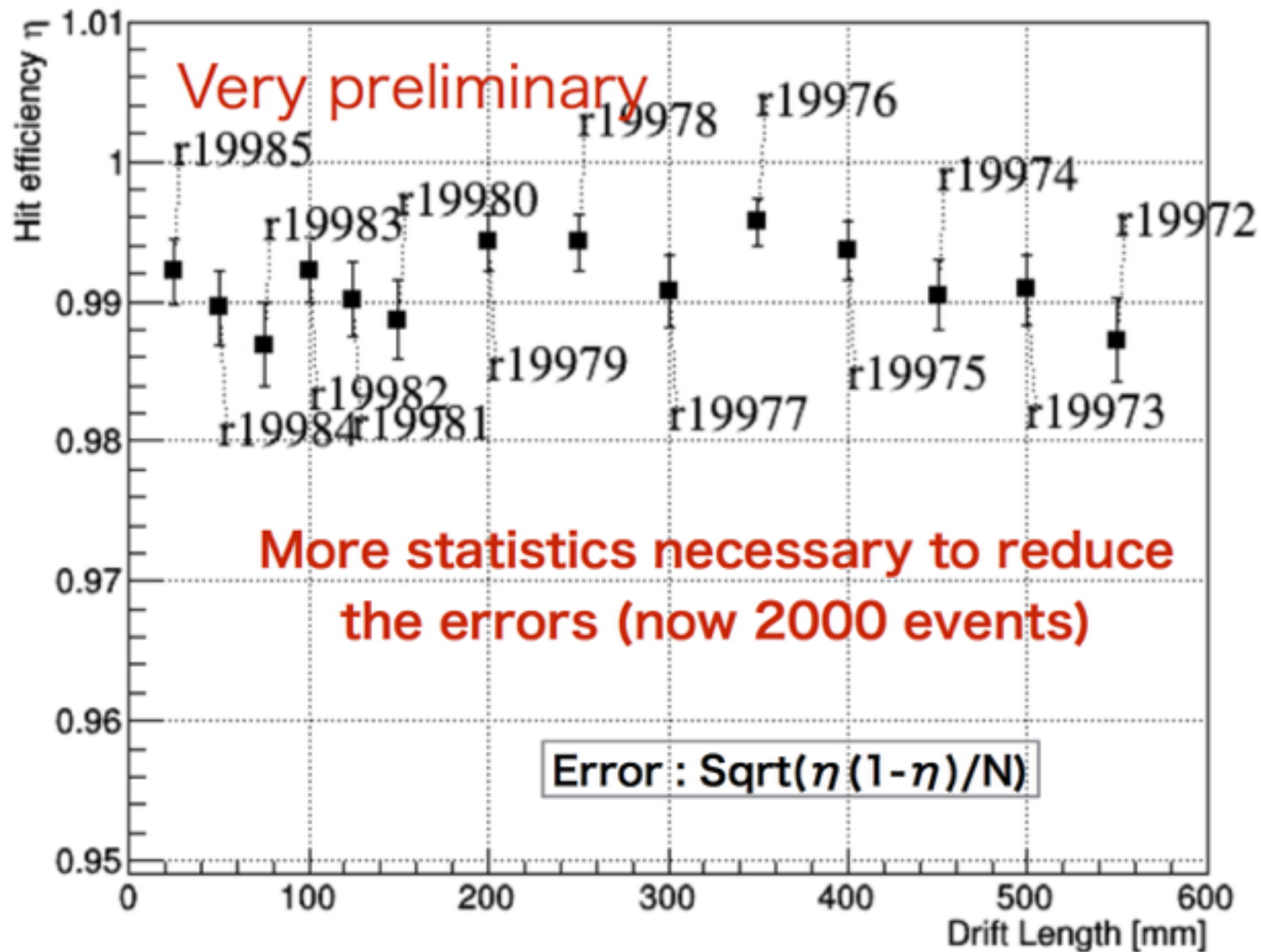
1.15~1.25 mm
5.26 mm
× 5152 pads



Data quality check - Hit efficiency



Hit efficiency (Module3 Row16) **With Gating GEM**



- Missing track is about 1%

Hit efficiency estimation

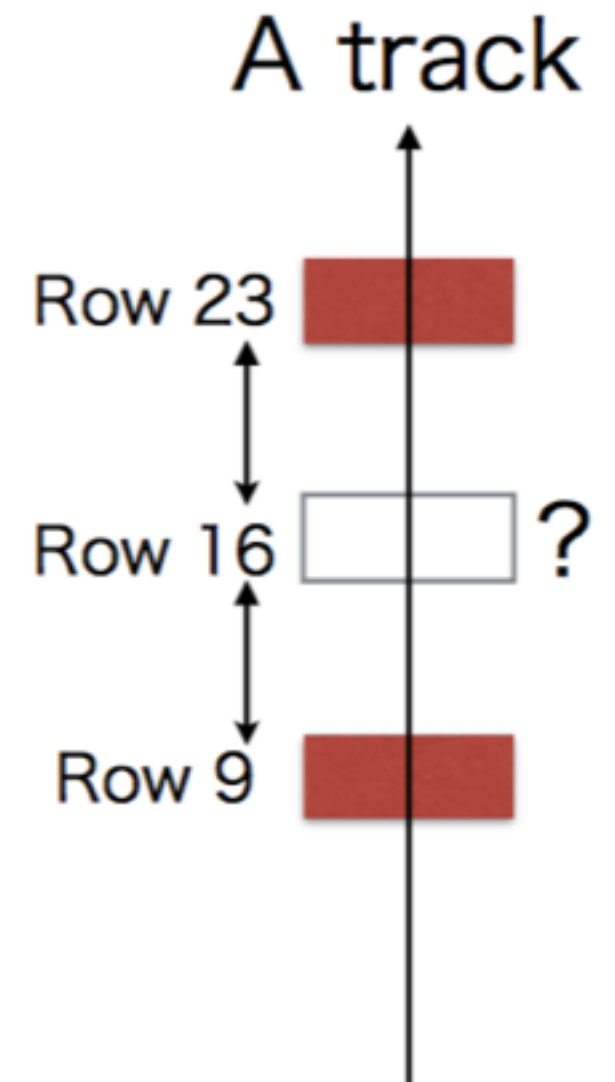
Looked at row-16 (module 3)

7 rows away to avoid effects by the diffusion.

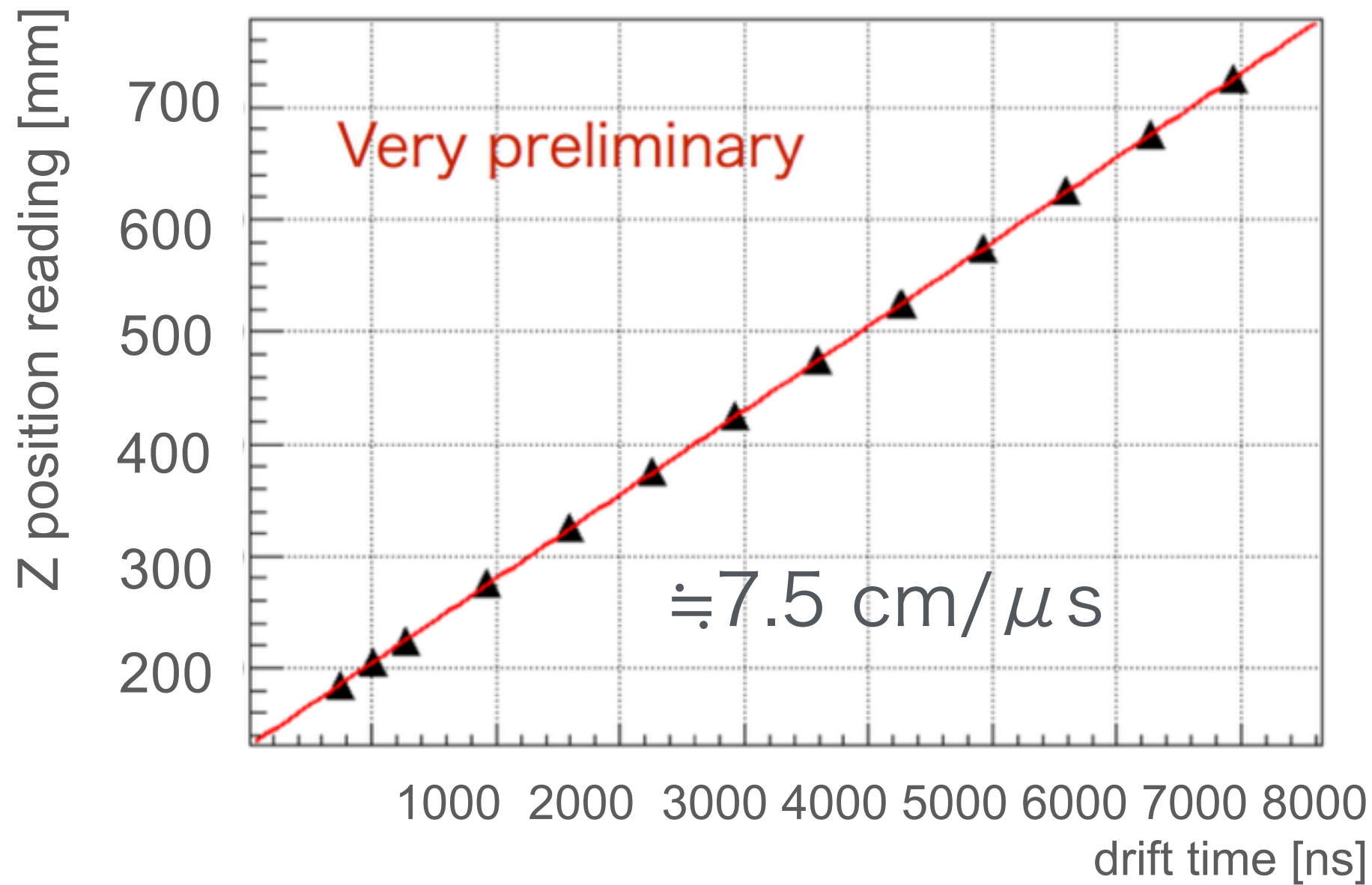
Basic idea :

Test if Row 16 has a hit associated with a track that has hits both on Row 9 and Row 23.

To reduce biases, minimum number of hits per track is set to be a relatively small value (=10) in the track reconstruction step.



データ品質確認 - ドリフト速度



	ゲートあり	ゲートなし
温度 [K]	291.28	290.4
圧力 [hPa]	1010.79	1005.31

Garfieldシミュレーションシミュレーション

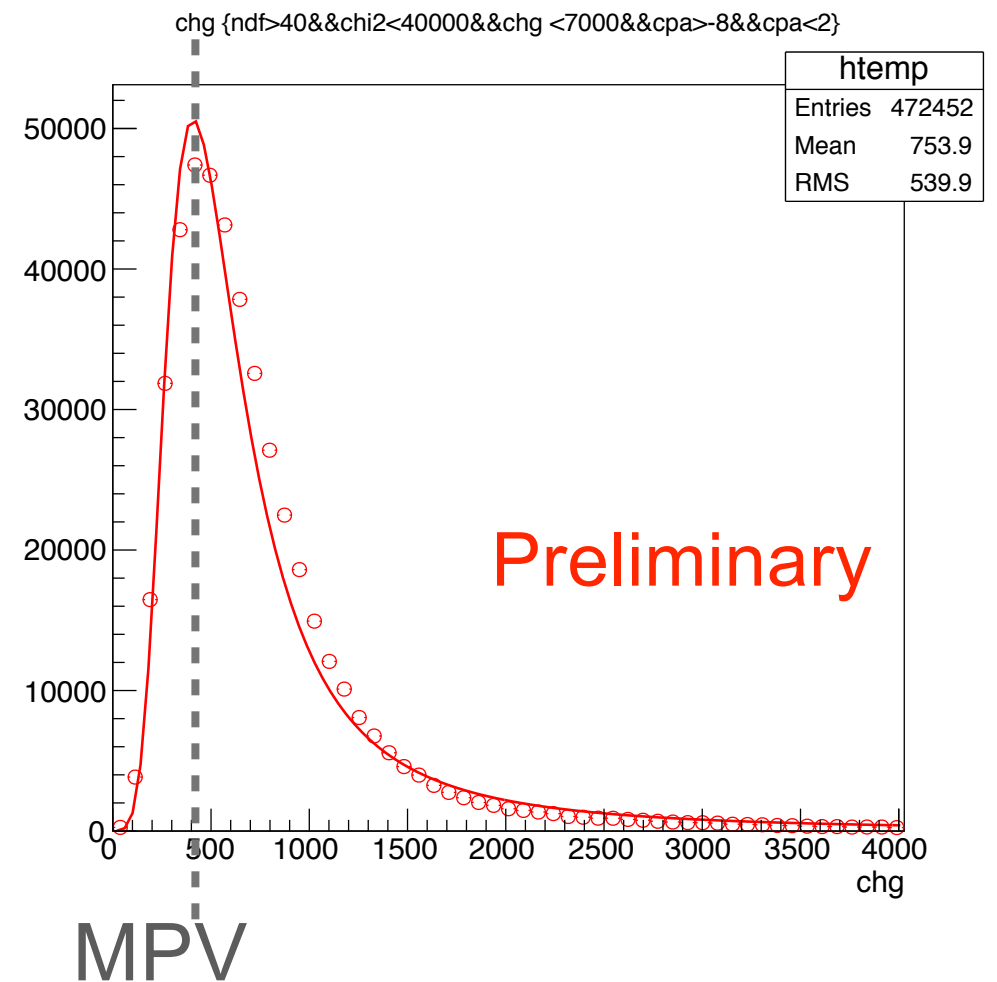
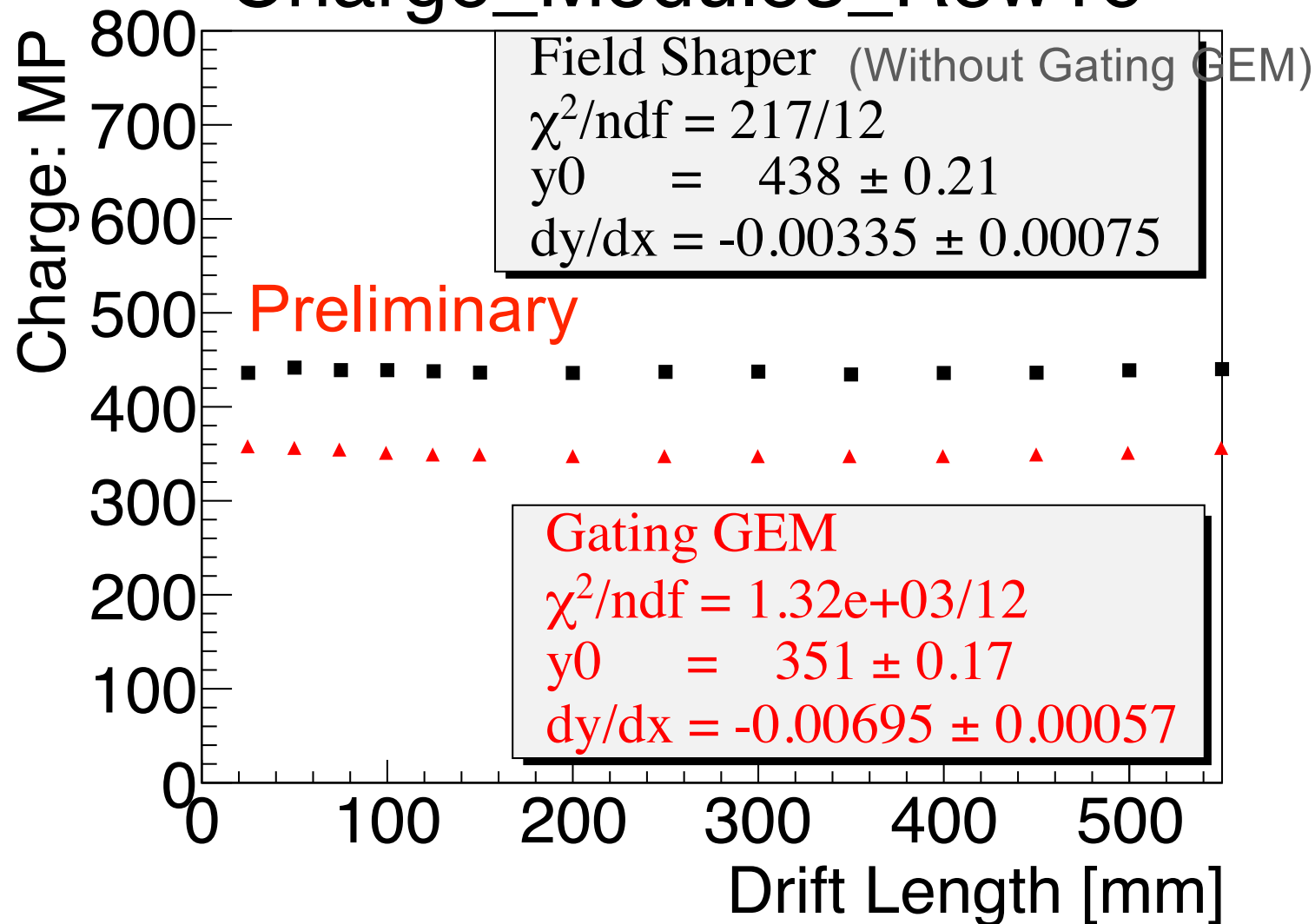
ゲートあり 7.67088 $\text{cm}/\mu\text{s}$ +/- 0.0016%

ゲートなし 7.67583 $\text{cm}/\mu\text{s}$ +/- 0.0019%

Result - Charge sum



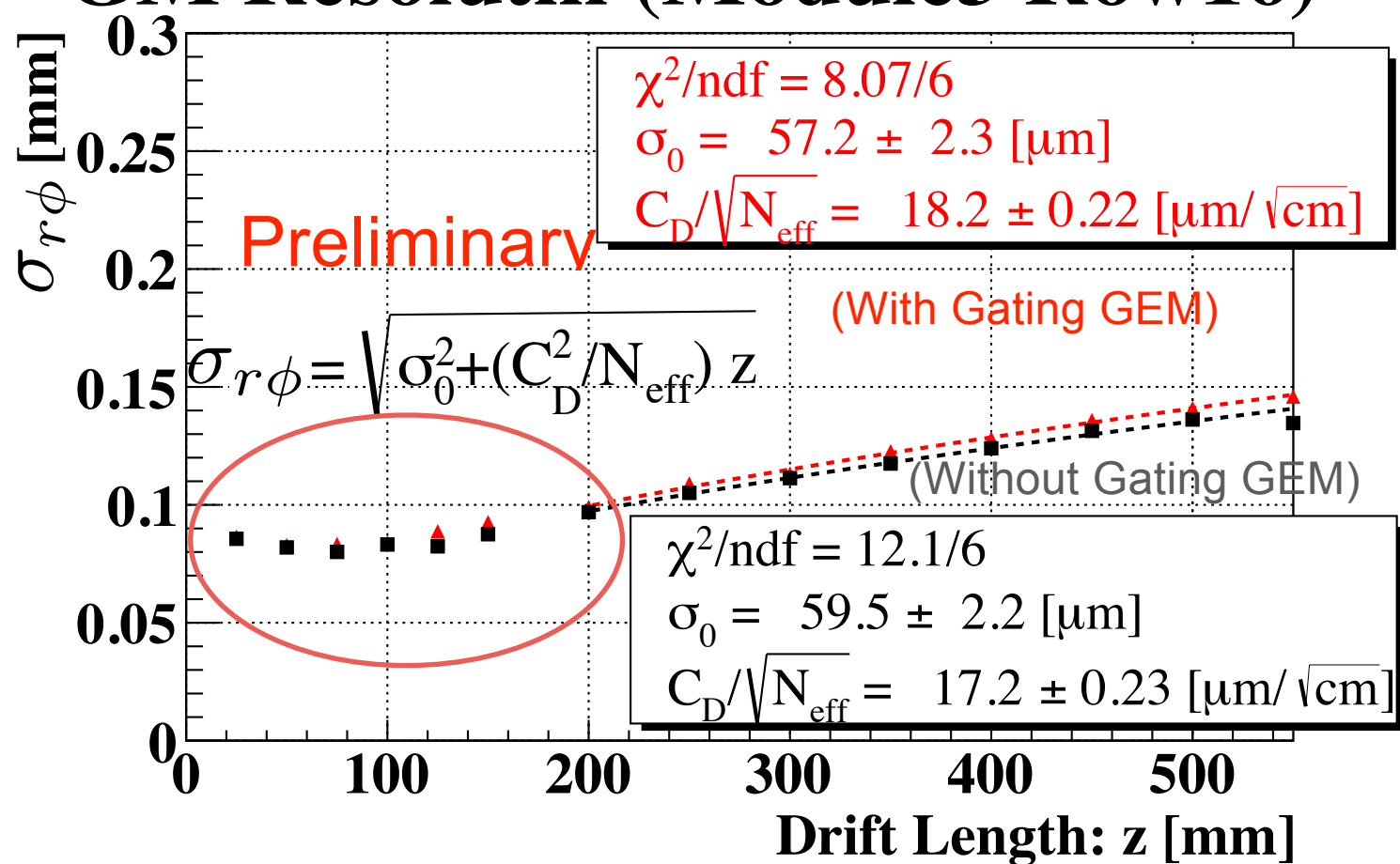
Charge_Module3_Row16



- Optical transparency = 82 %
- There seems to be no electron attachment (P/T correction is not included)

	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Ratio	82.0	80.4	80.4	79.9	79.7	79.7	79.4	79.2	79.0	79.7	79.6	79.9	79.7	80.6
/%	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.2

GM Resolutin (Module3 Row16)



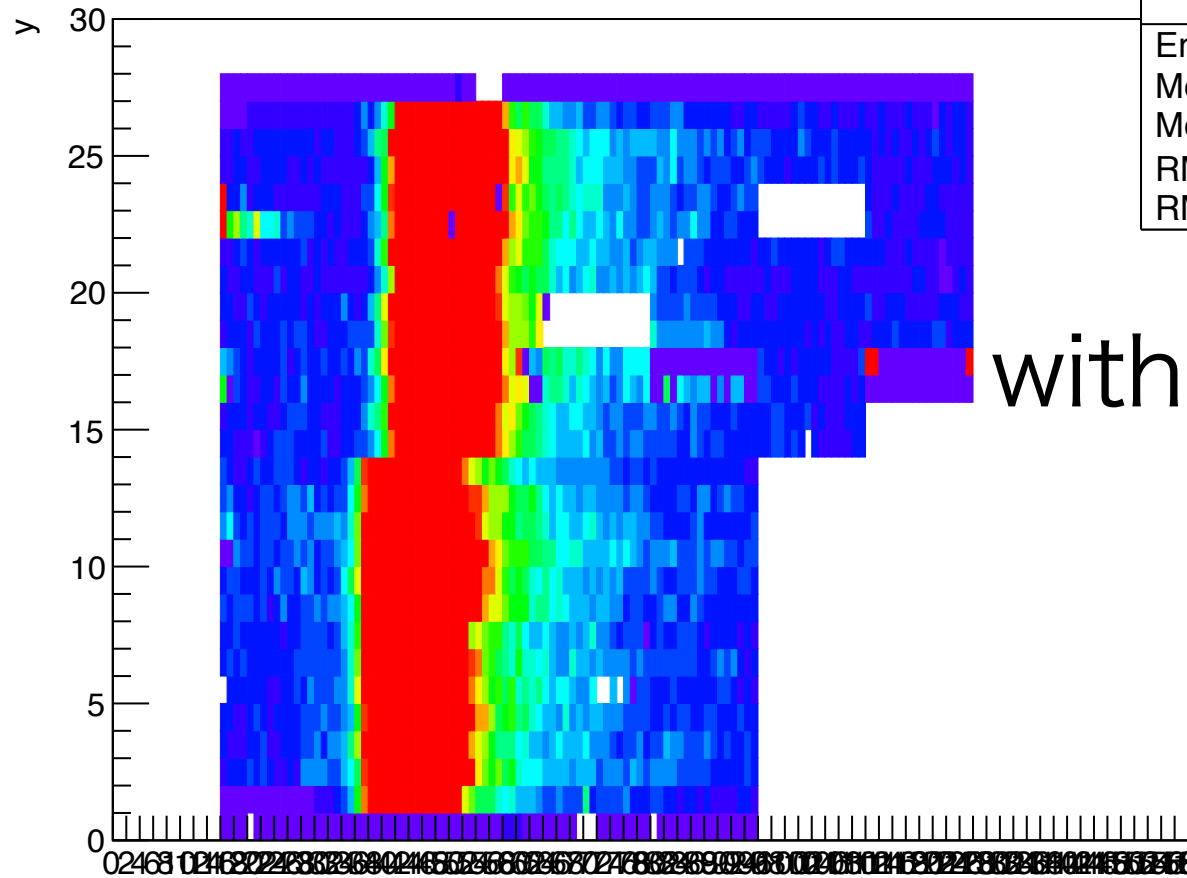
パッドレスポンス



Charge-weighted hit position

hTrackPos	
Entries	1095056
Mean x	53.62
Mean y	13.71
RMS x	19.36
RMS y	7.283

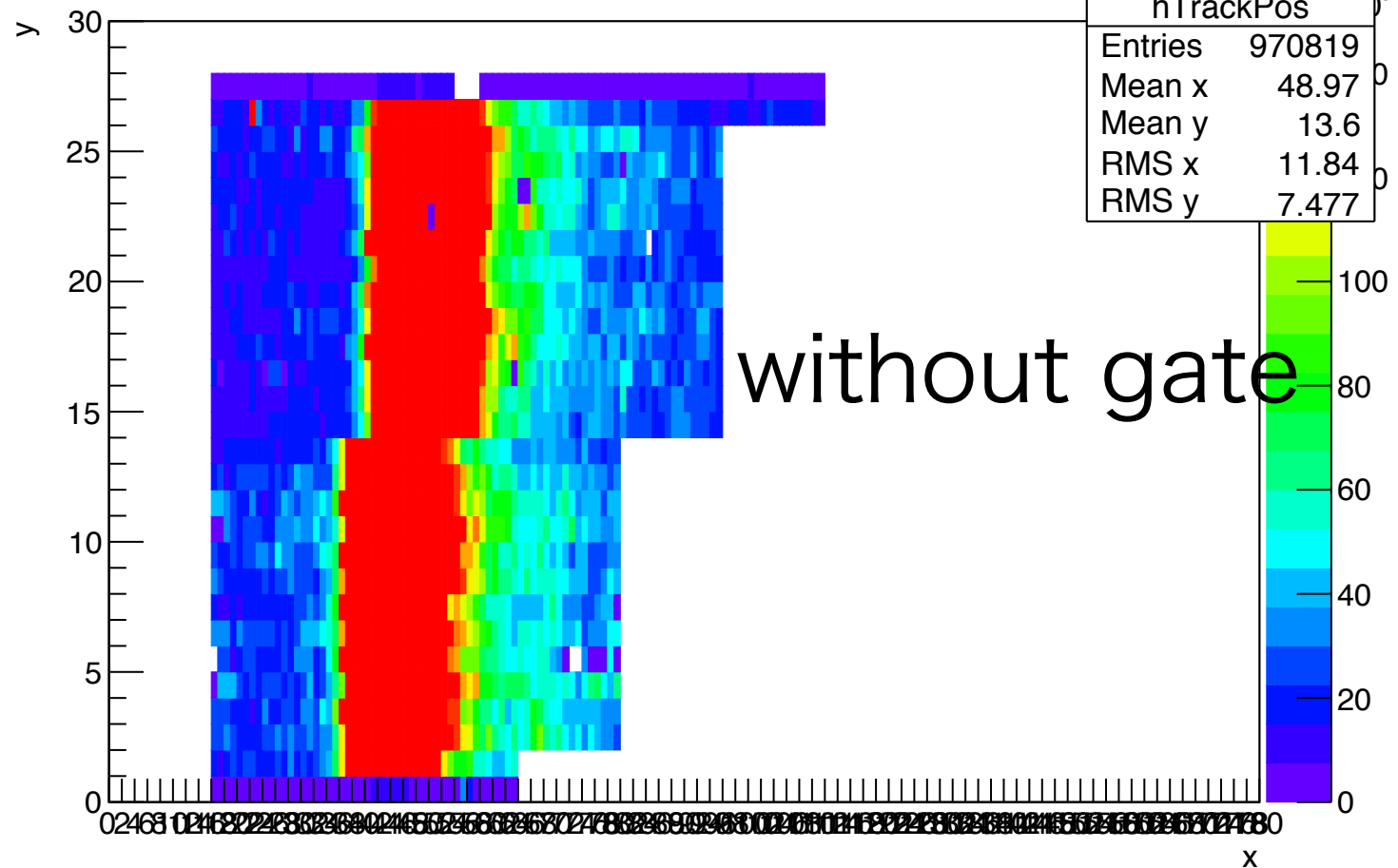
with gate



Charge-weighted hit position

hTrackPos	
Entries	970819
Mean x	48.97
Mean y	13.6
RMS x	11.84
RMS y	7.477

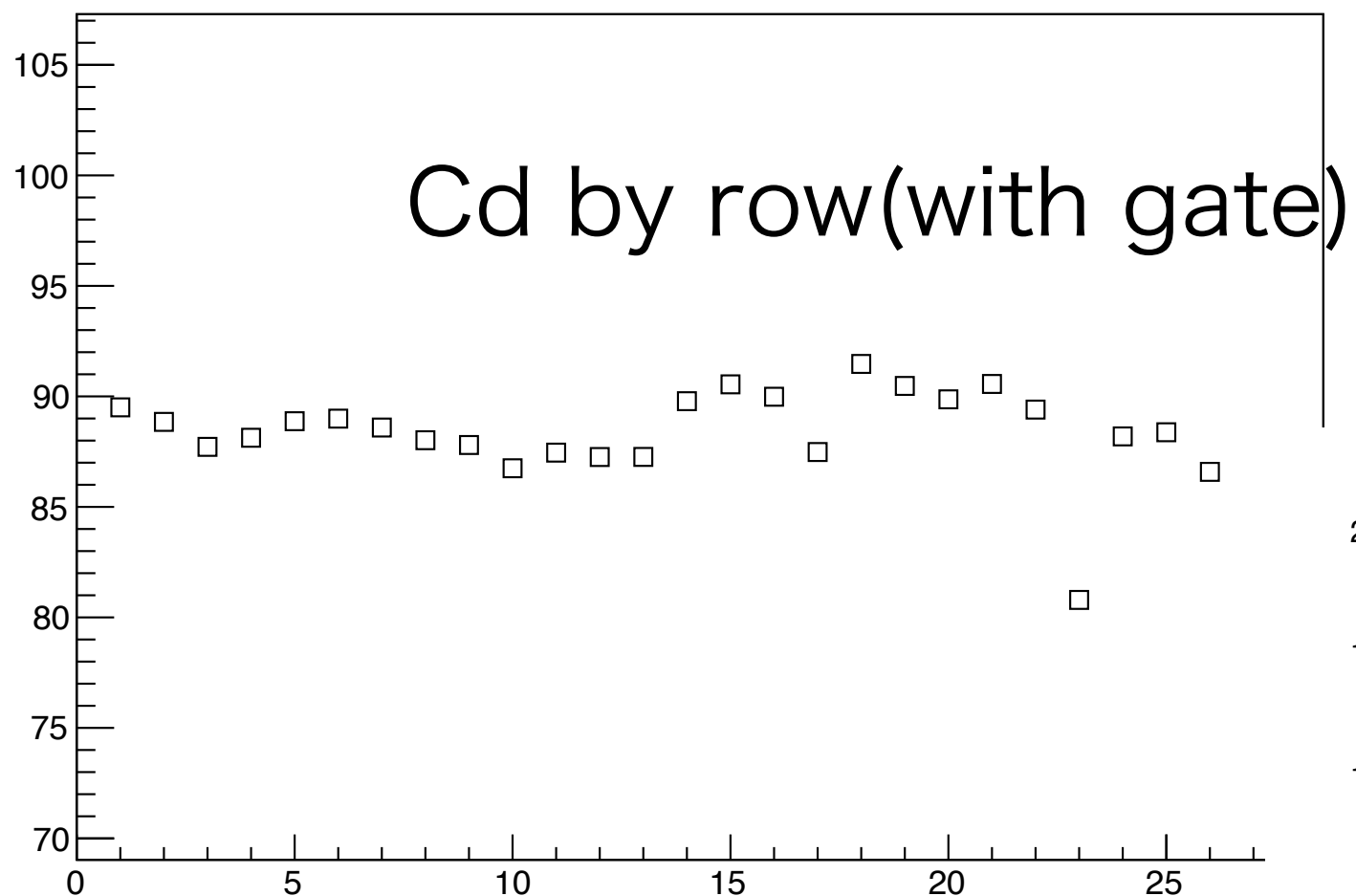
without gate



row依存性



Graph



Graph

