講演番号：18pK33-7

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)，小川 智久(総研大)，庄司 愛子(岩手大)，藤井 恵介(KEK)，与那嶺 亮(CEA)，杉山 晃(佐賀大)，房安 貴弘(佐賀大)，加藤 幸弘(近畿大)，池松 克昌(東北大)，Paul Colas(CEA)，Serguei Ganjour(CEA)，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.)，小林 誠(KEK)，松田 武(KEK)，成田 晋也(岩手大)，根岸 健太郎(岩手大)，高橋 徹(広島大)，渡部 隆史(工学院大)，Ronald Dean Settles(MPI Munich)，Junping Tian(東大)，荒井 大輔(フジクラ),他 LCTPC collaboration

yumia@post.kek.jp

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

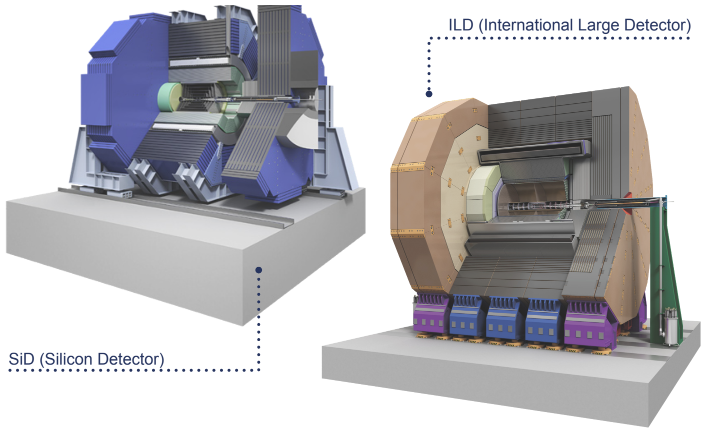
International Linear Collider（国際リニアコライダー）
（国際）（直線）（衝突型加速器）

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

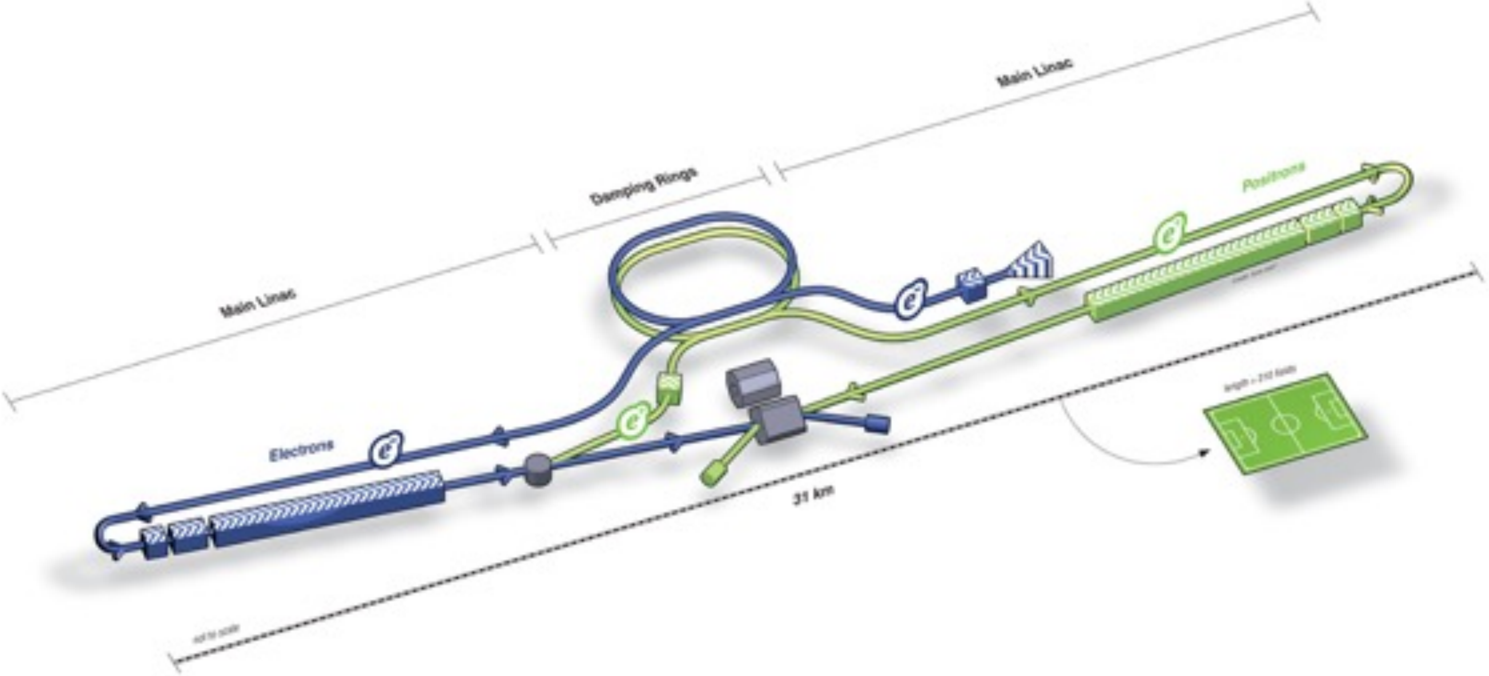
建設候補地：北上山地周辺

ILC実現に向けた最終段階
加速器・検出器の詳細設計

SiD



ILD



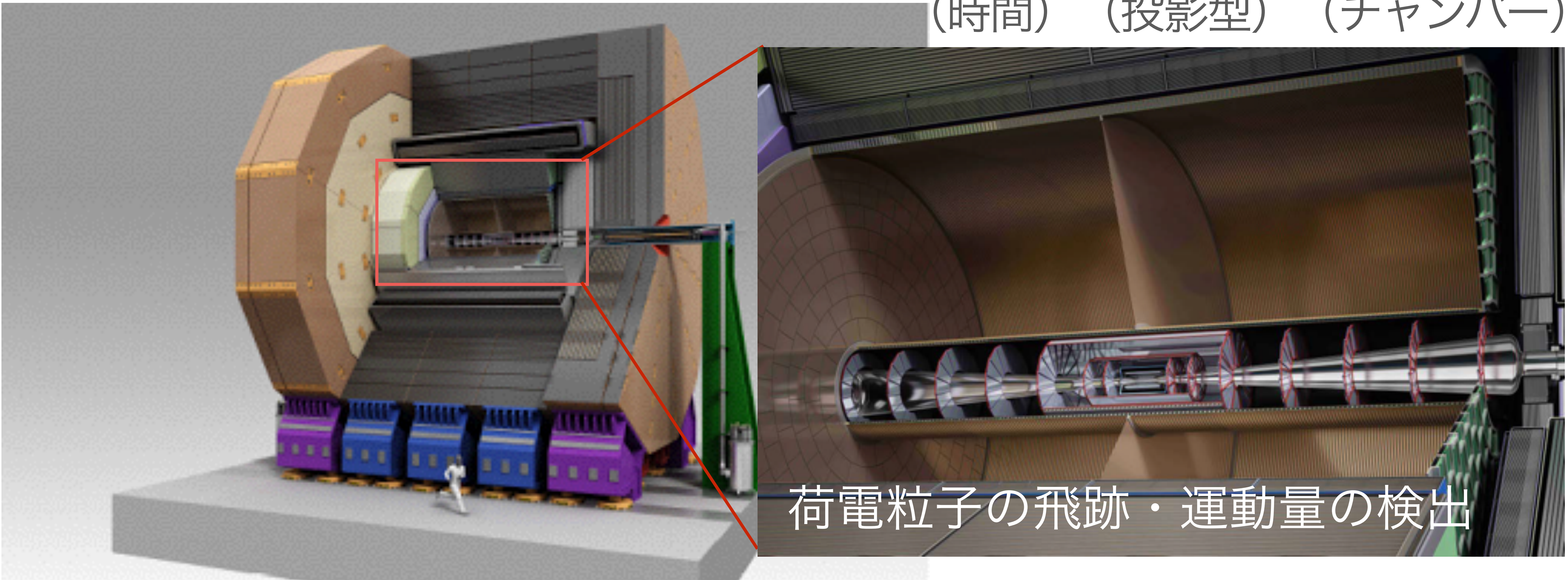
http://www.linearcollider.org/images/

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）

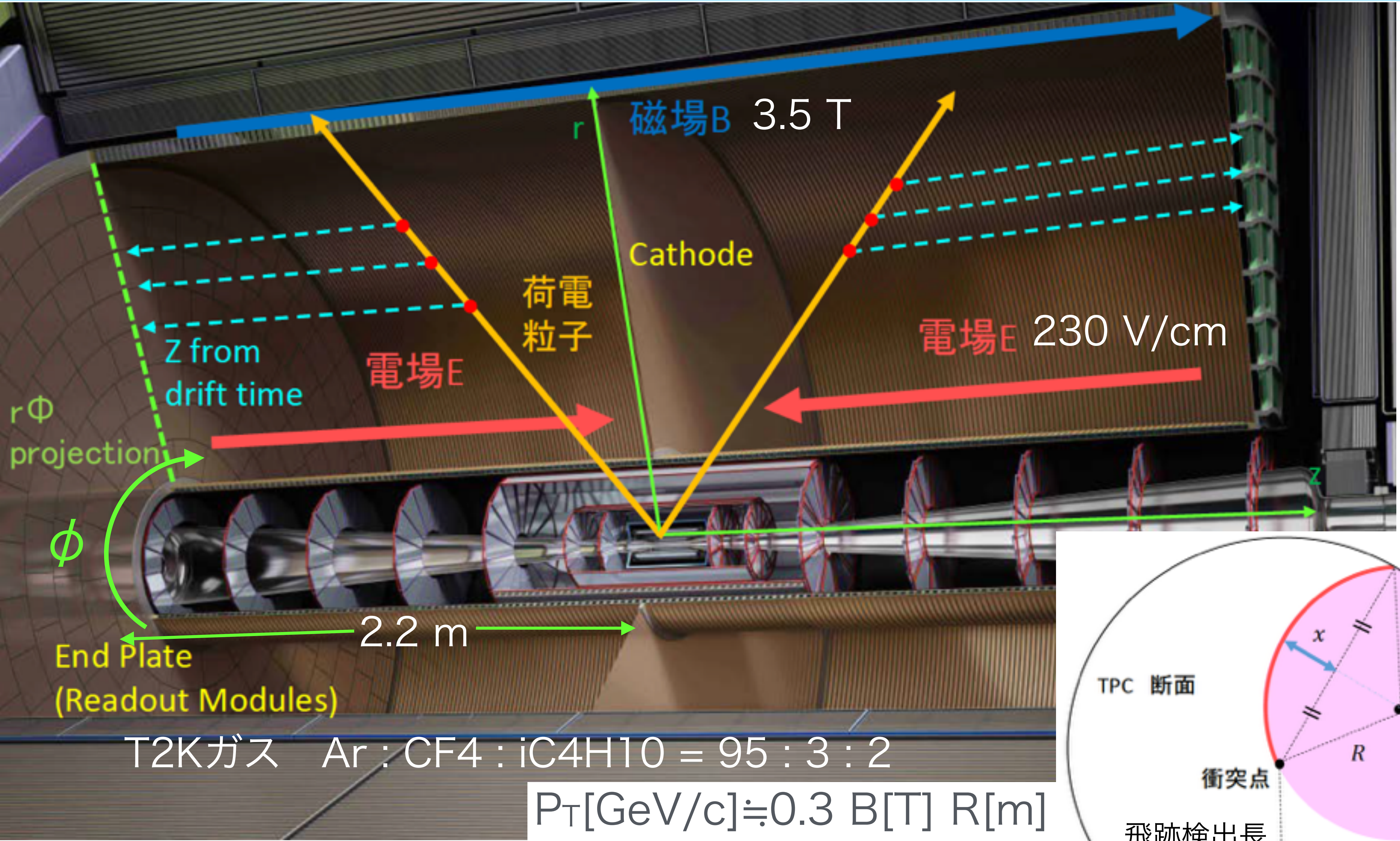
Time Projection Chamber
（時間）　（投影型）　（チャンバー）



すべての事象を基本粒子レベルで再構成する

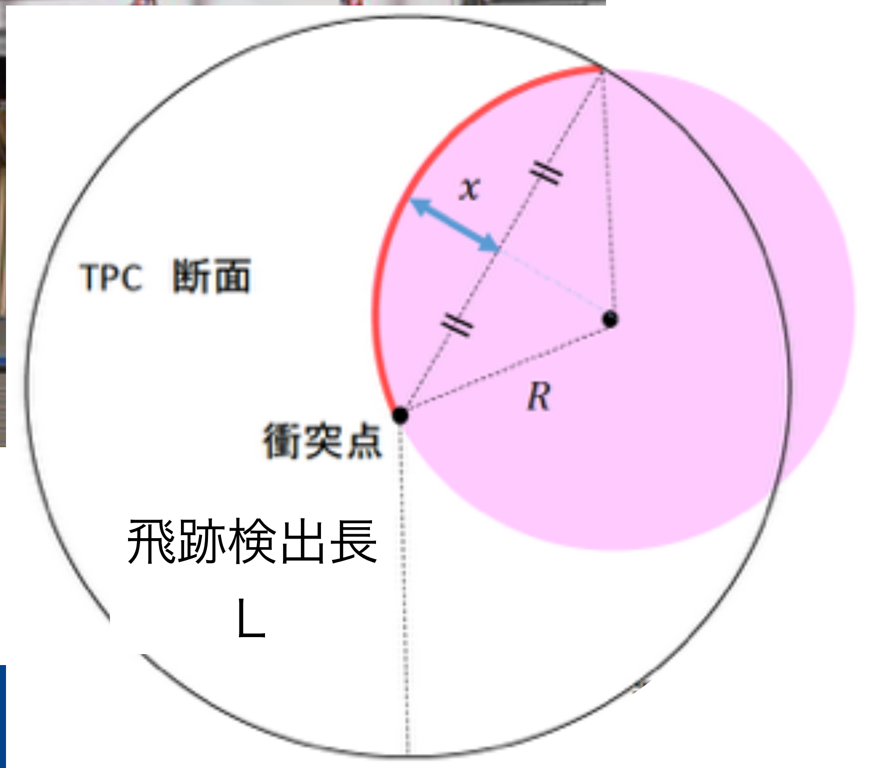
運動量分解能の目標 $\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} \simeq 1 \times 10^{-4} P_T \ GeV/c$

TPCの測定原理

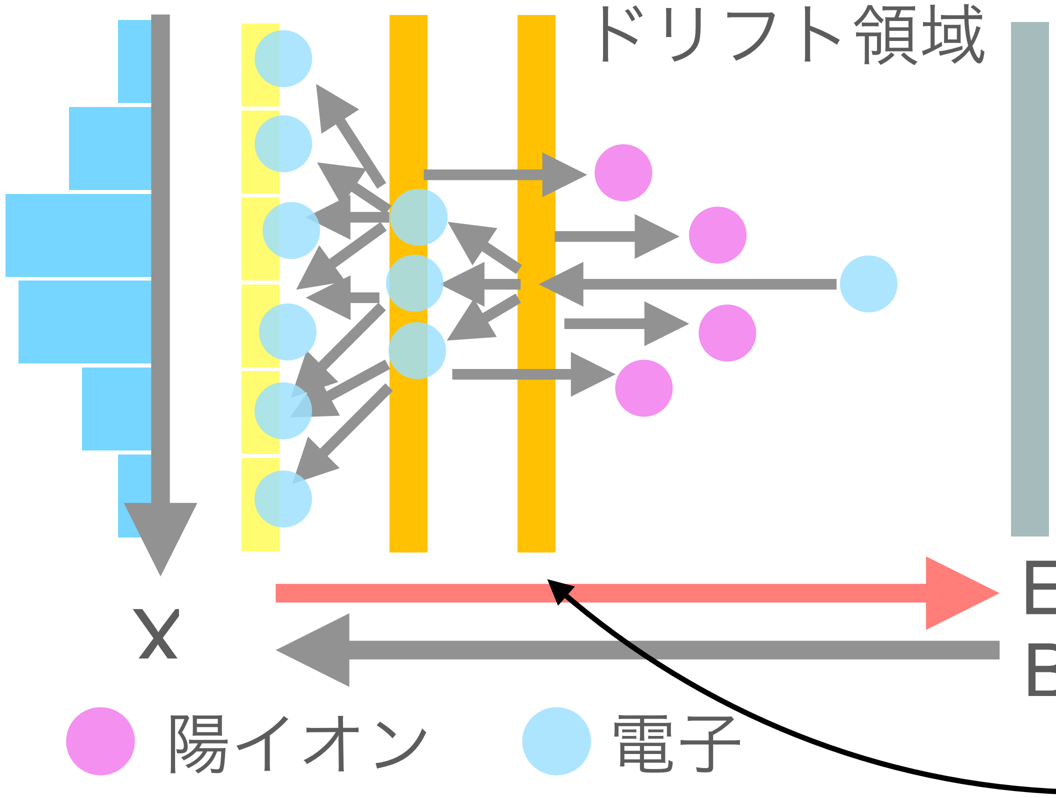


T2Kガス　Ar : CF4 : iC4H10 = 95 : 3 : 2

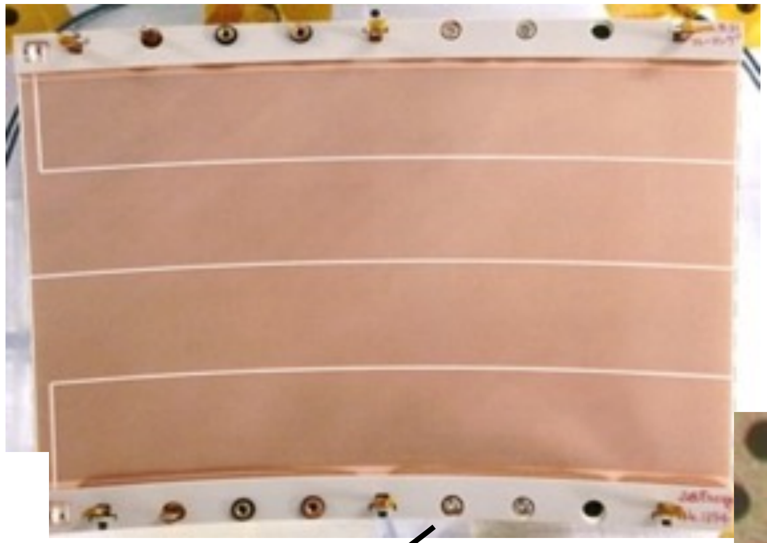
P_T[GeV/c]≒0.3 B[T] R[m]

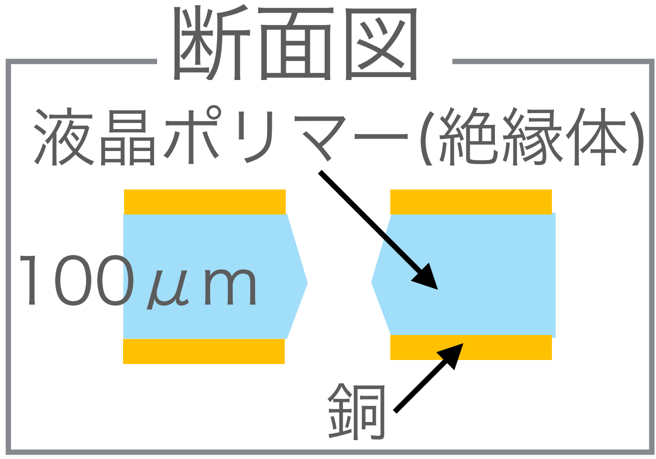


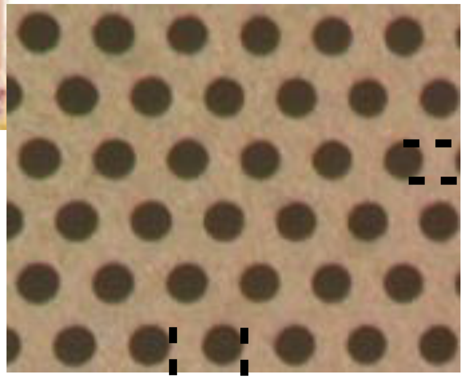
TPCの検出原理と課題



Gas Electron Multiplier







穴の中で電子雪崩を起こし増幅

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<u>位置分解能</u>が<u>悪化</u>

必要な位置分解能： $\sigma_{r\phi}$<100μm(距離2.2m/磁場3.5T)　予想：60μm以上

ドリフト領域に陽イオンが戻ってこないようにする<u>ゲート</u>が必要

yumia@post.kek.jp

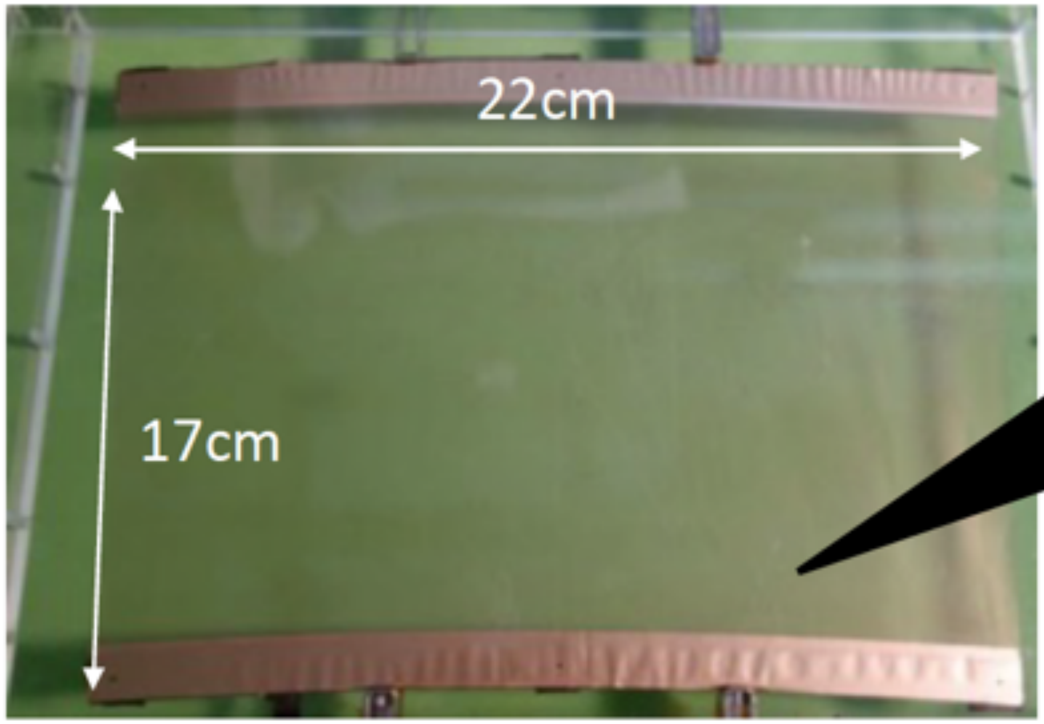
ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を
搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

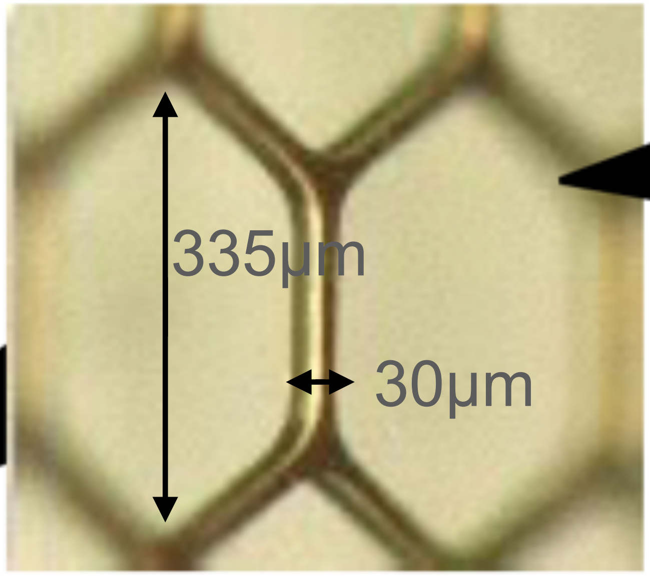
高開口度GEM型ゲート装置

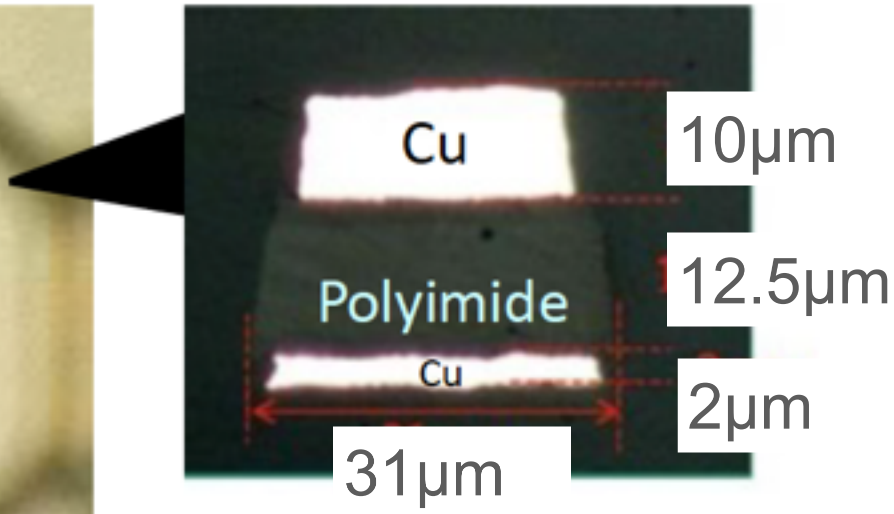
GEMをゲートとして利用＝高開口度GEM型ゲート装置(ゲートGEM)

株式会社フジクラと共同開発

銅電極に電位差を与えることで動作







光学的開口度= 82 %　　厚さ25 μm

ゲートは陽イオンを阻止する一方電子が通るのを邪魔してはいけない
→電子透過率も重要　達成可能な高磁場中での電子透過率≒光学的開口度

位置分解能100μmを達成するためには
電子透過率80%が必要

→ 今回ビームテストで確認

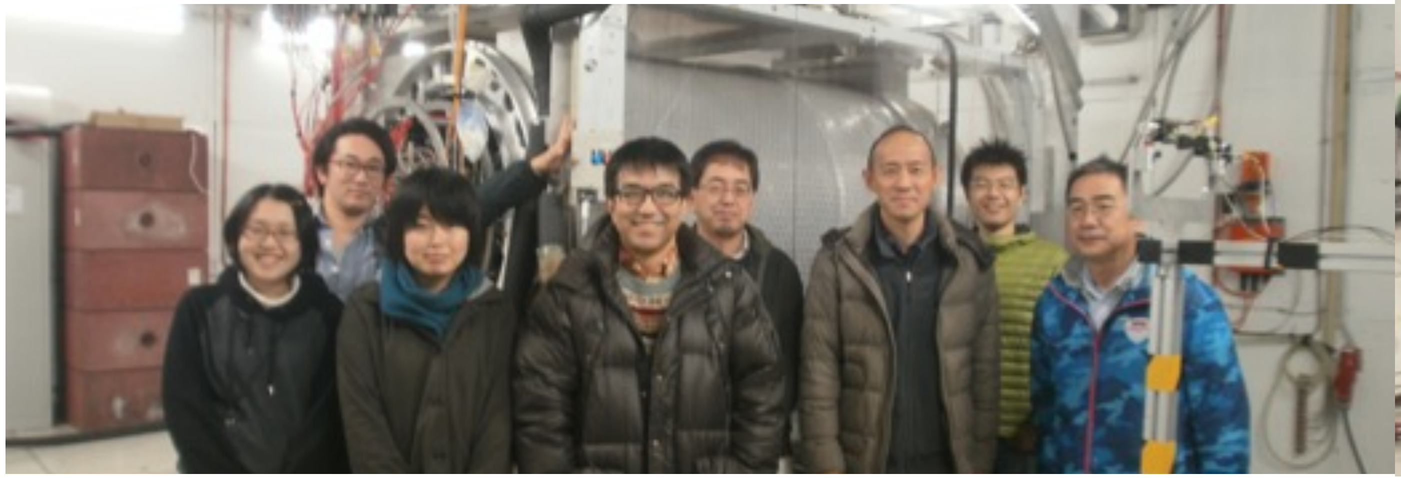
ILC-TPC用高開口度GEM型ゲート装置を搭載したTPC読み出しモジュールのビーム試験

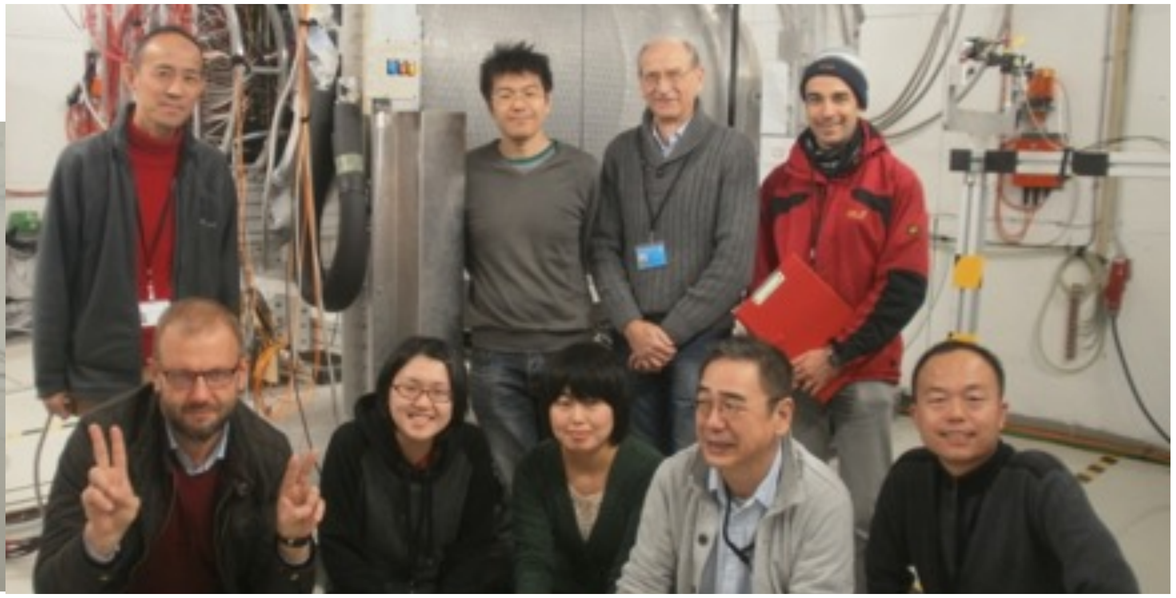
ビーム試験

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

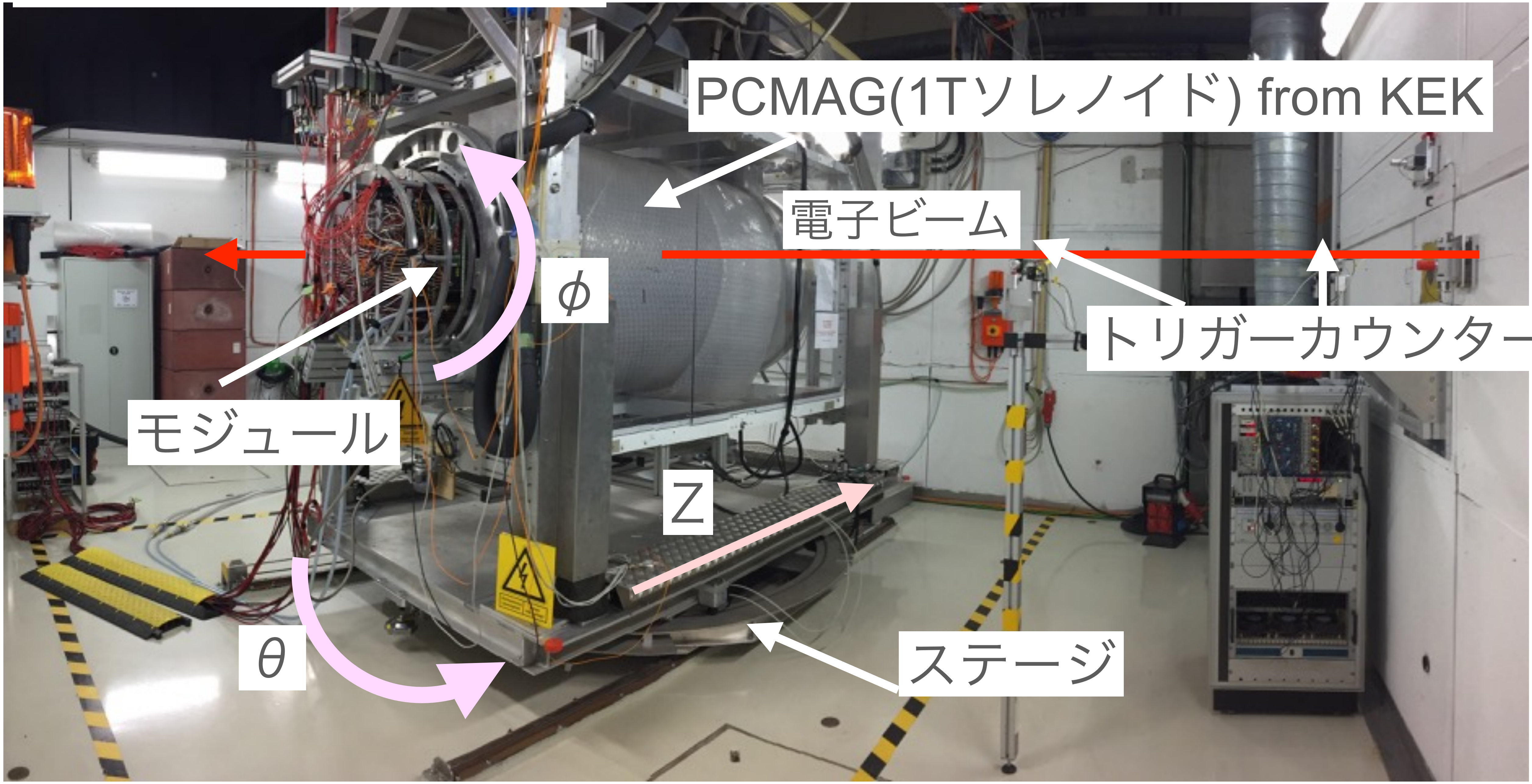
日本、フランス、ドイツ、中国から15人が参加



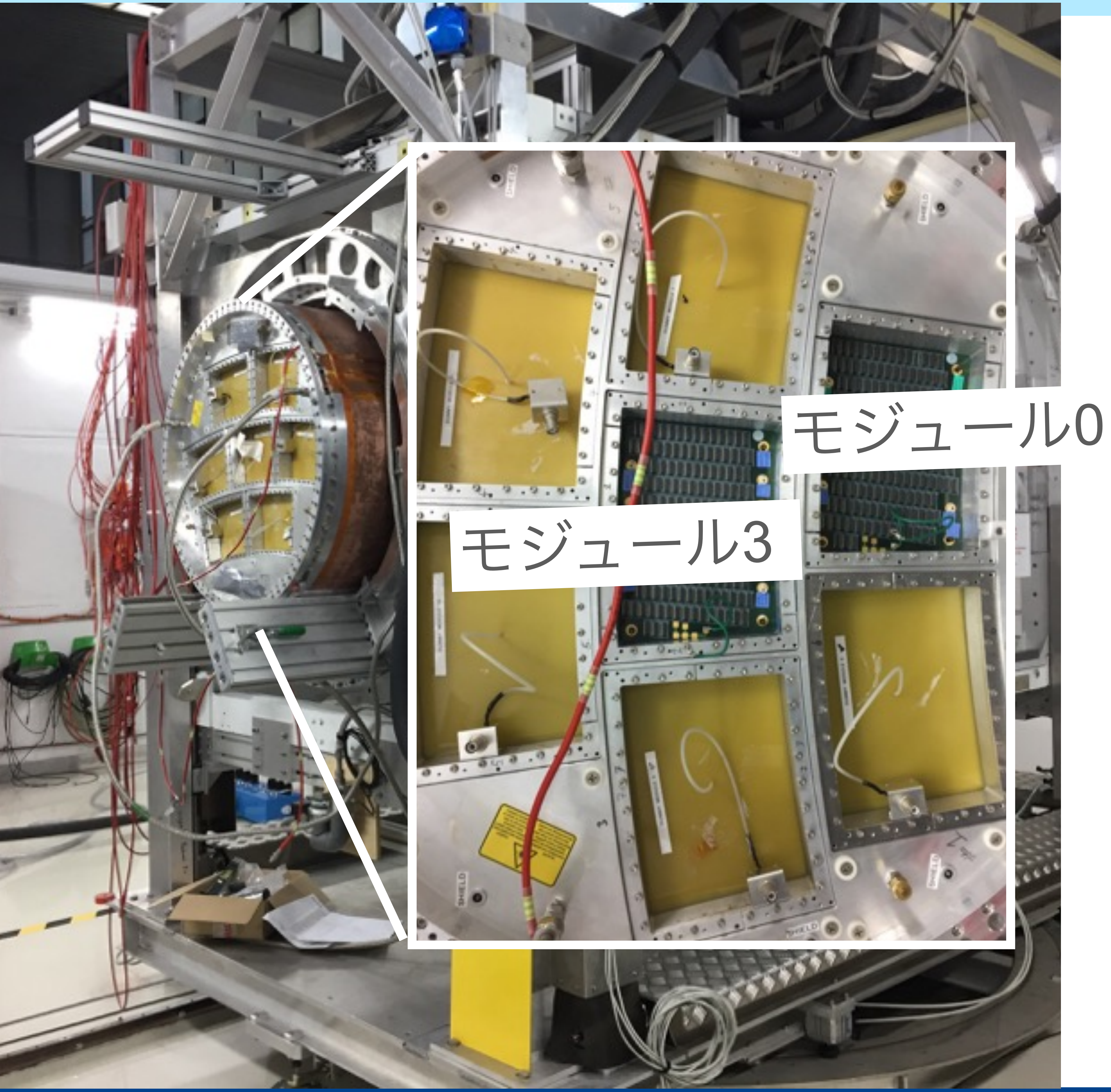


実験装置

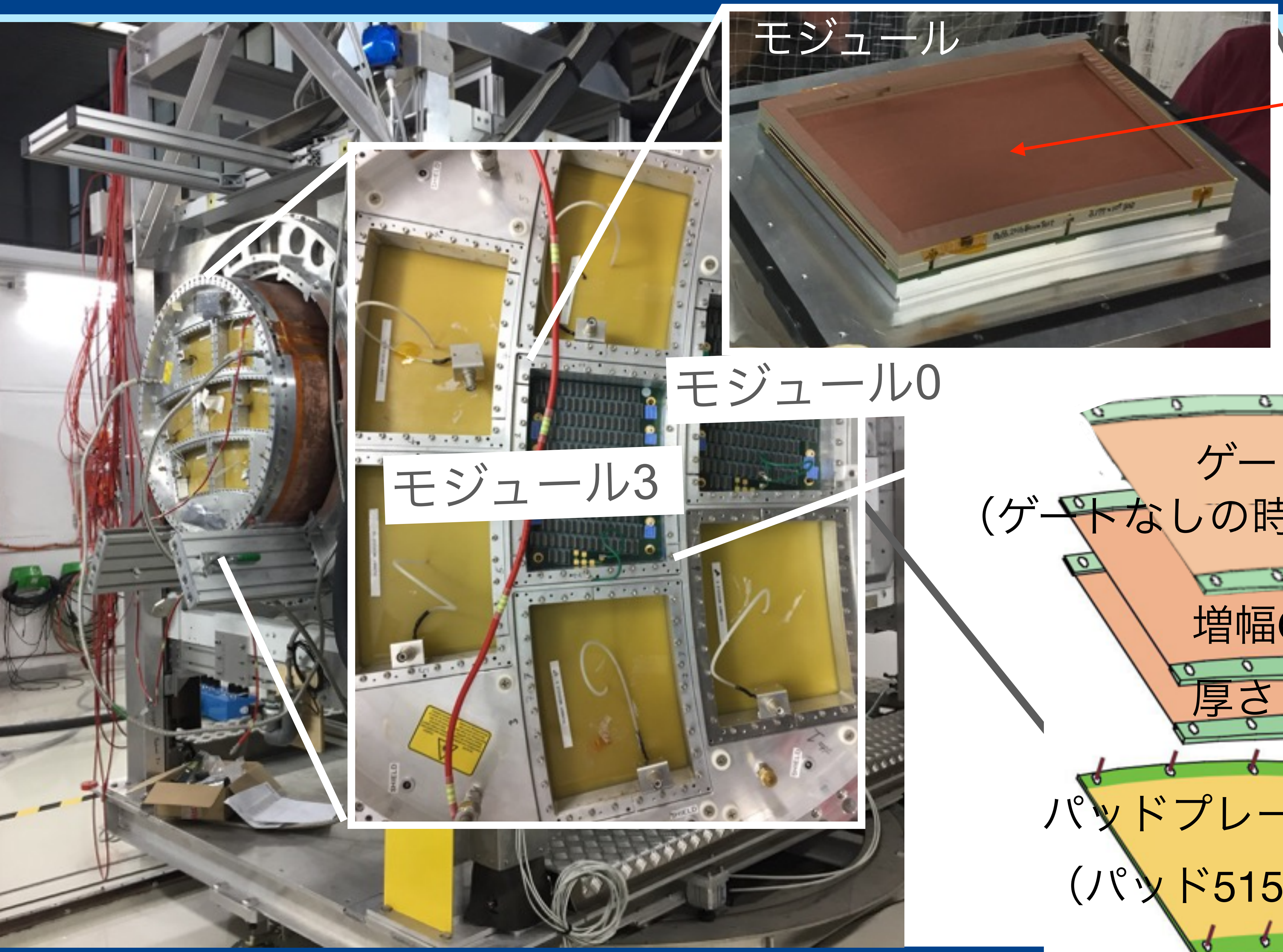
TPCの大型プロトタイプ

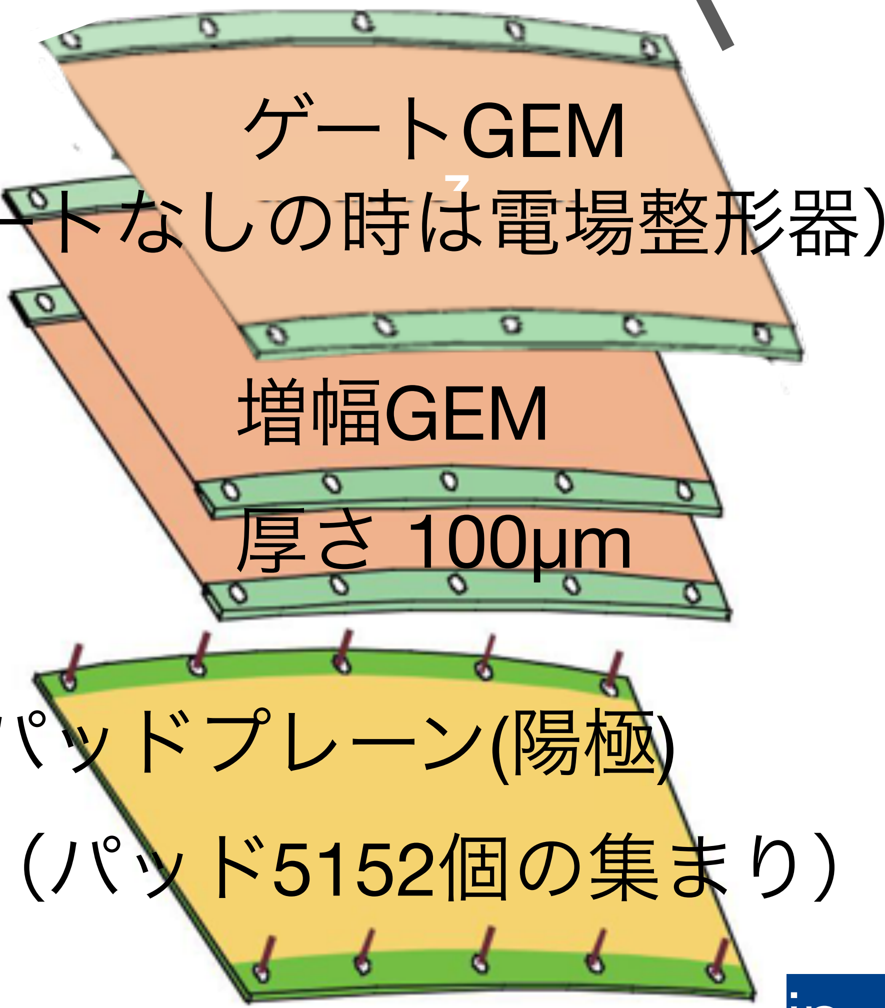


ゲートGEMを搭載したモジュール



ゲートGEMを搭載したモジュール



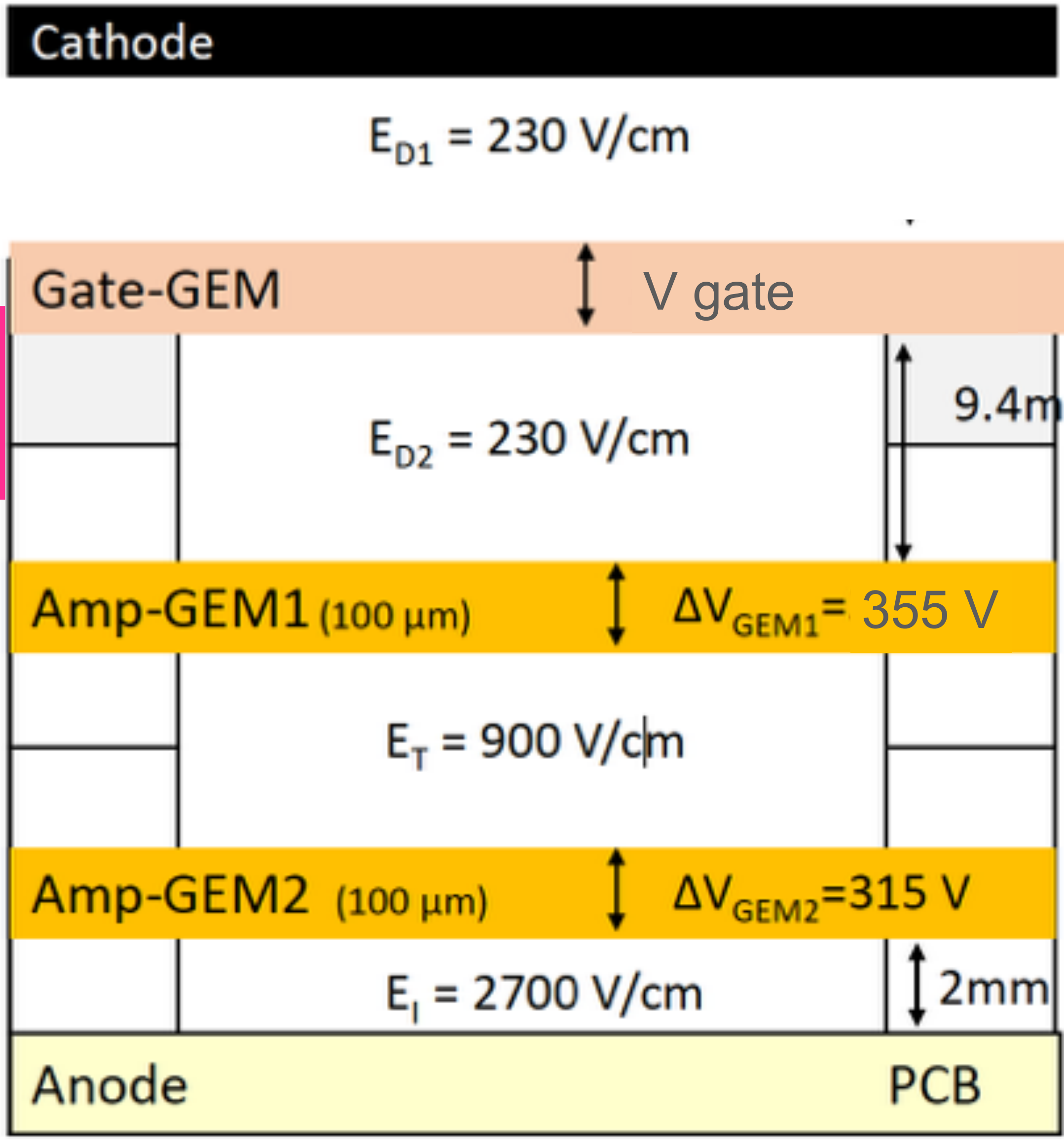


実験条件

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)	1.25,2.5,5,7.5,10,12.5,15,20 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

今回は □ の条件の結果を解析



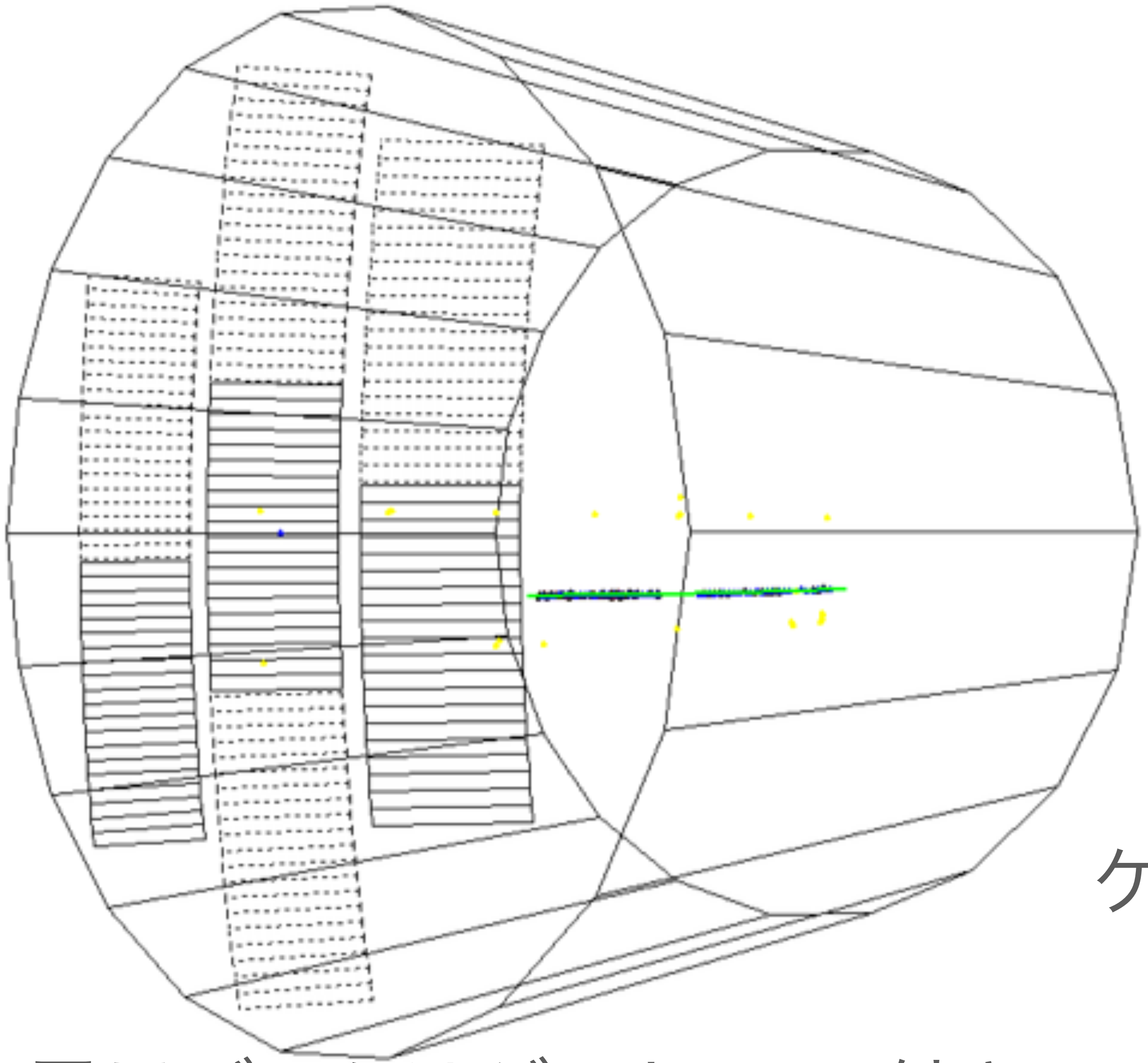
ビーム: 5 GeV 電子ビーム

ガス:T2K gas (Ar : CF_4 : Iso-C_4H_{10} = 95 : 3 : 2 [%])

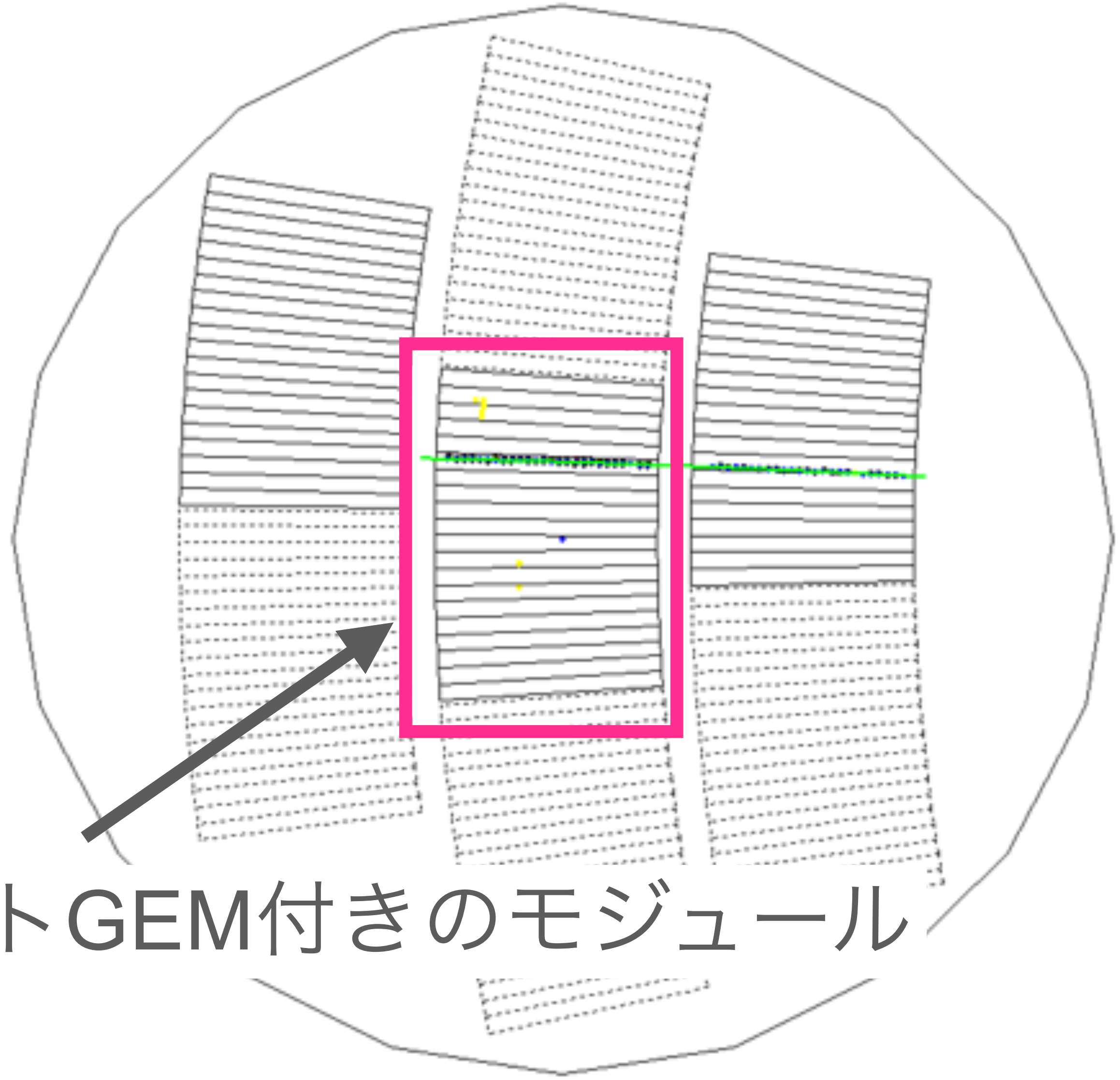
解析フレームワーク:MarlinTPC（20000イベント/1 runを解析）

典型的なイベント

横からの図



正面からの図

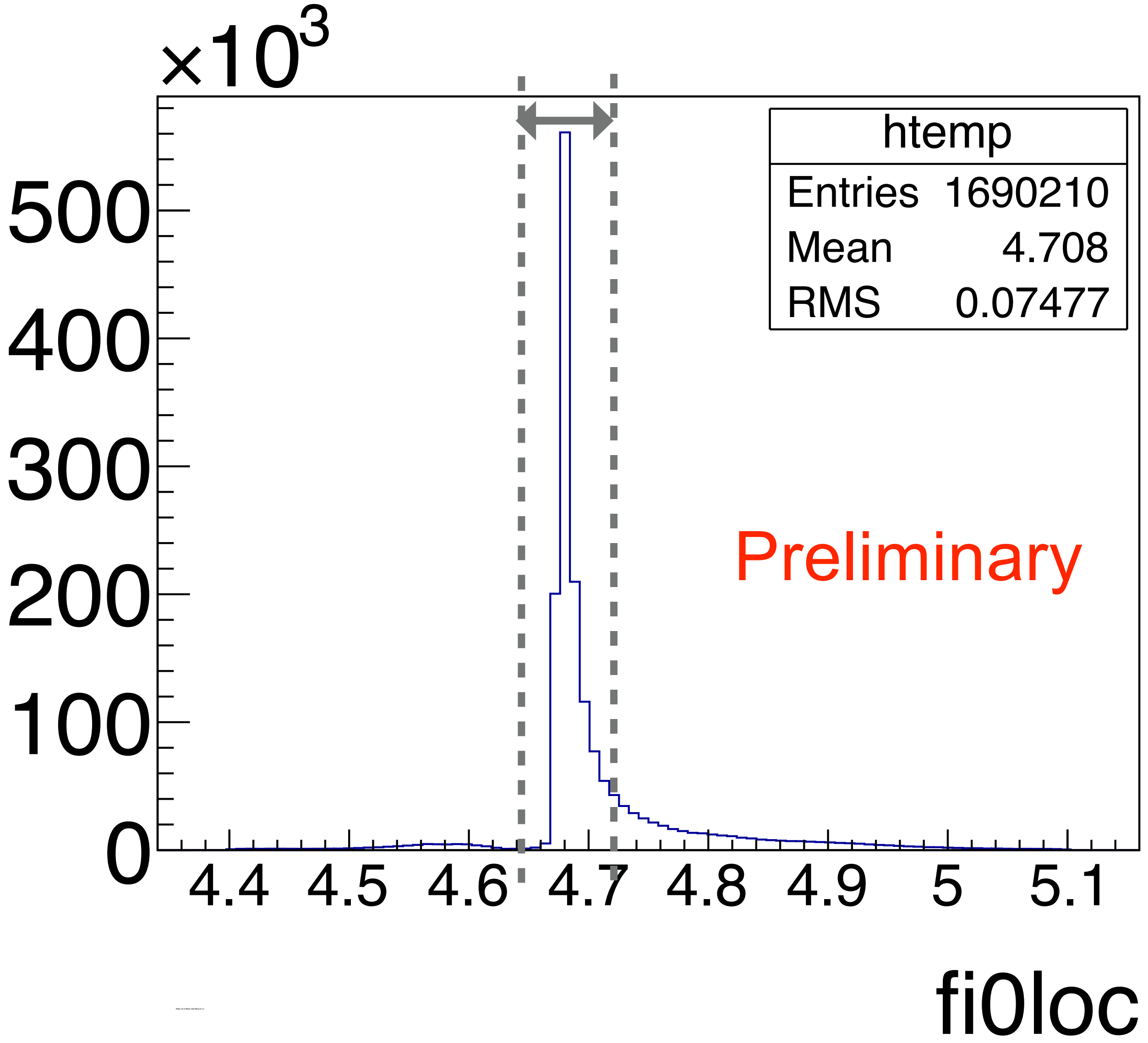


電子ビームはゲートGEM付きのモジュールの端から十分離れた部分を通っている

飛跡選択

飛跡角度[rad]

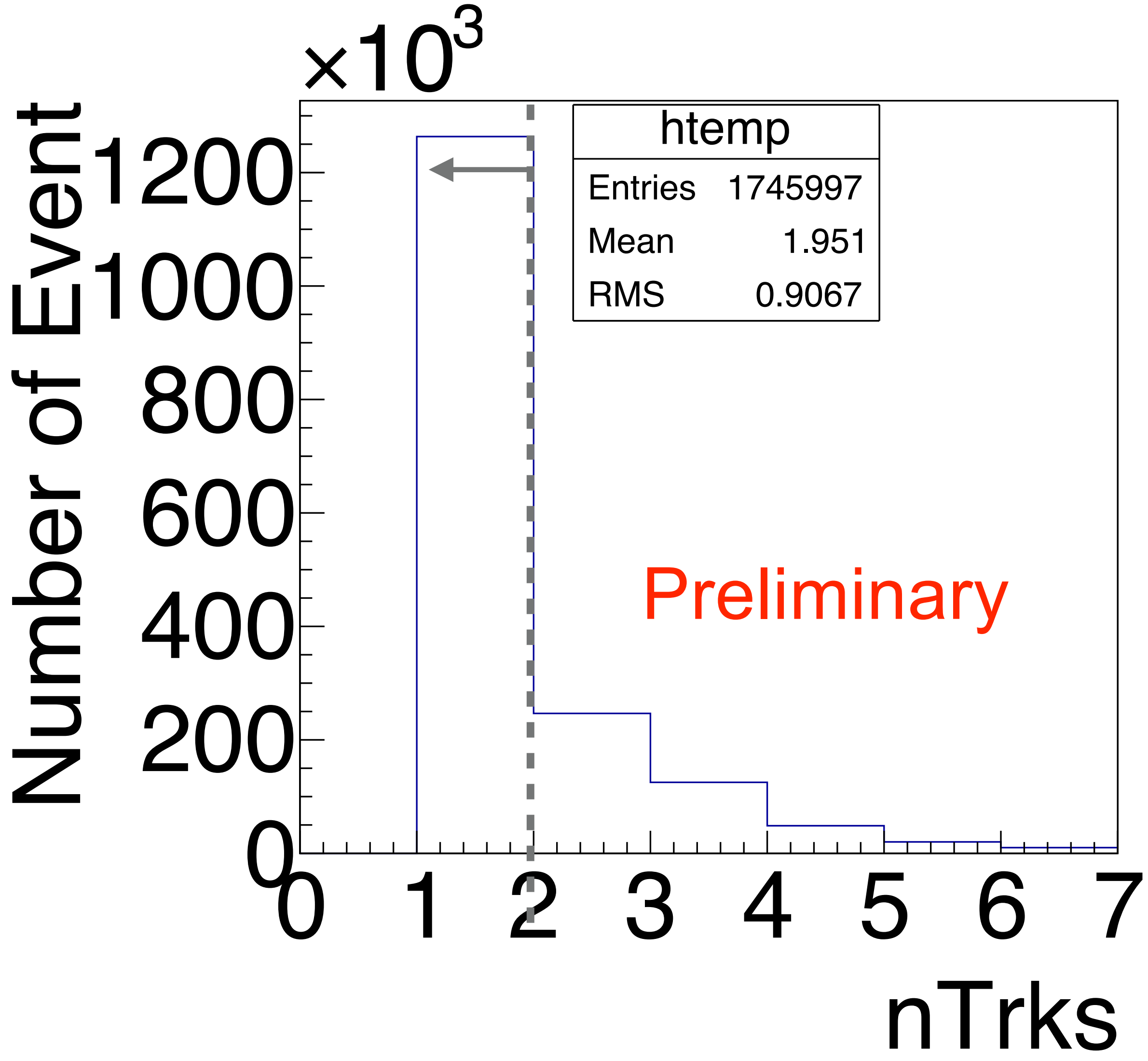
4.64< ϕ_0 <4.72



垂直入射のトラックを選ぶ

1イベントの飛跡の数

nTrks = 1

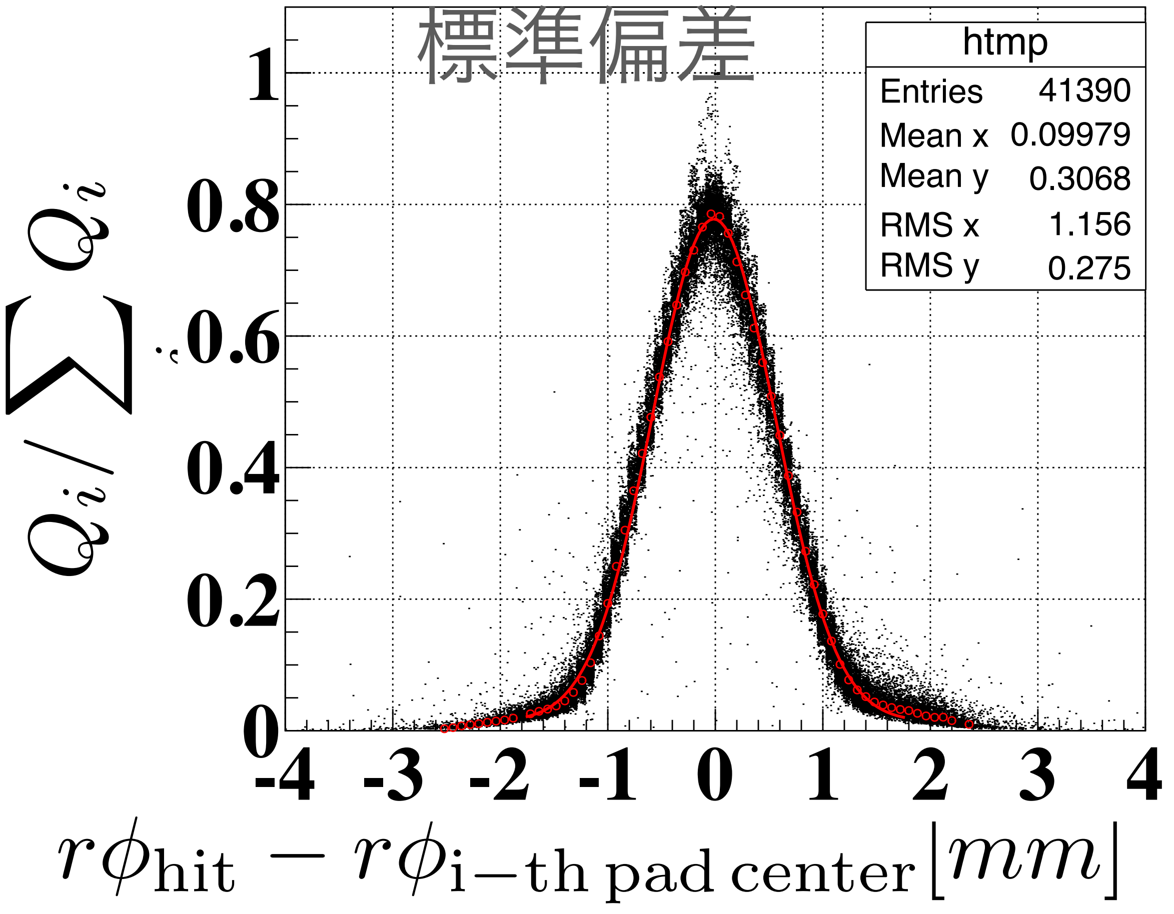


電磁シャワーになったものを除く

yumia@post.kek.jp

解析-電子透過率の求め方

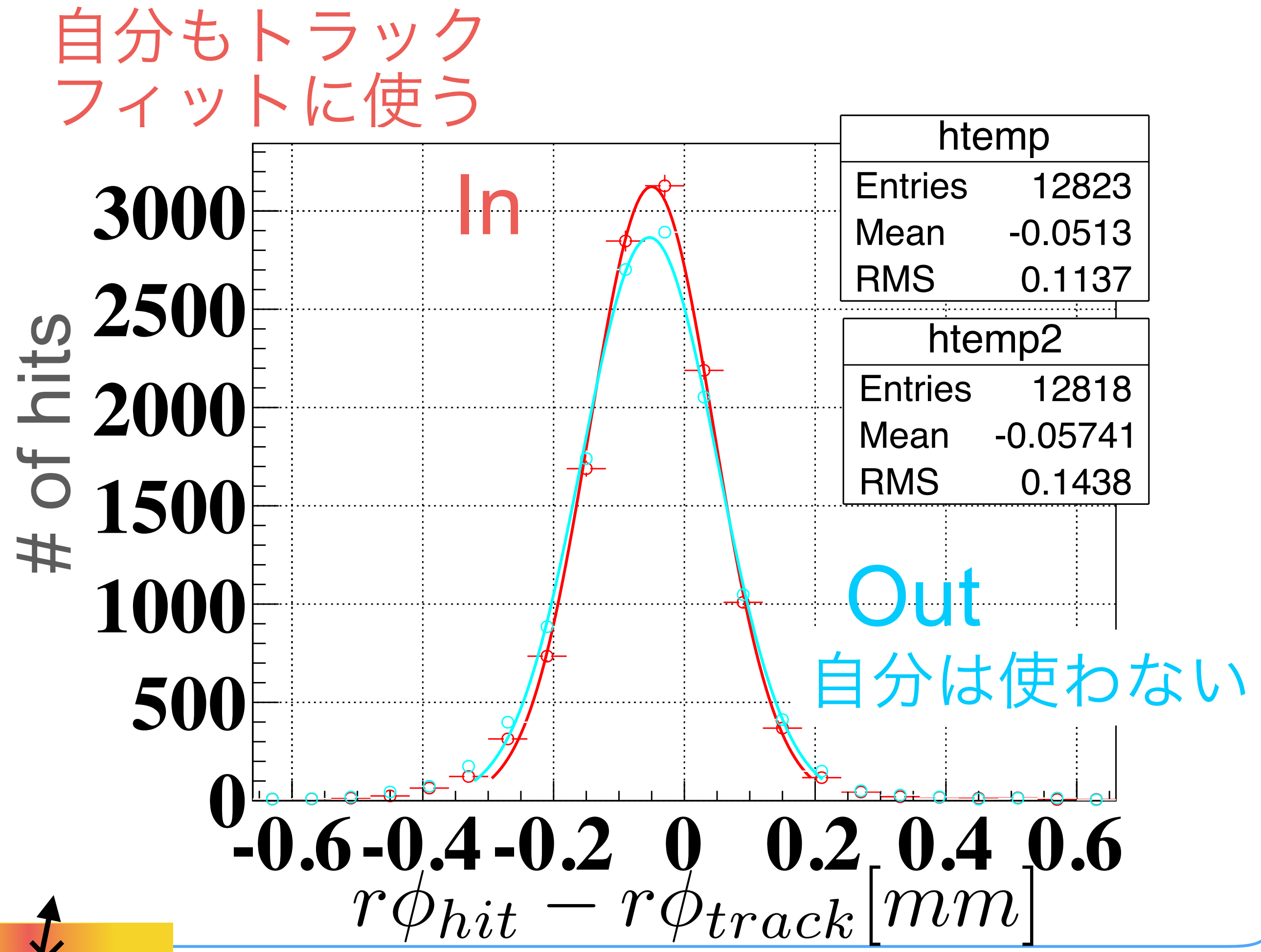
パッド応答関数（σ_{PR}）

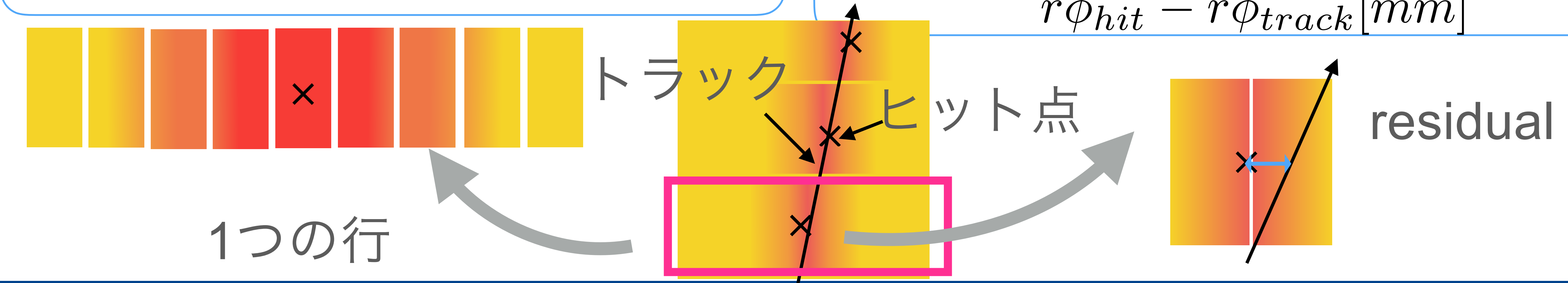


i= -4, -3, .., 0, ..3, 4

位置分解能（$\sigma_{r\varphi}$）

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





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（$\sigma_{r\varphi}$）

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

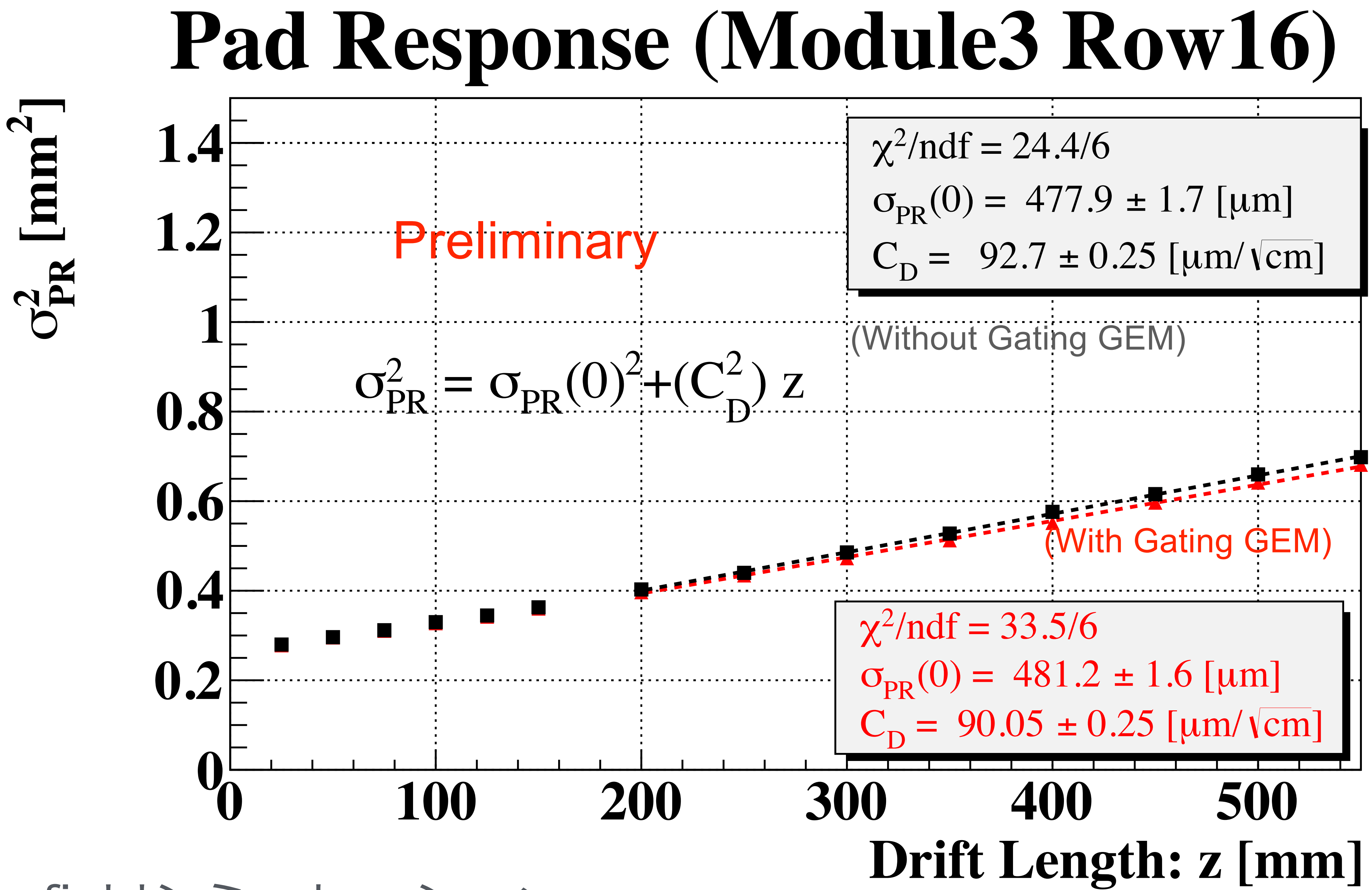
実効電子数Neffを求める

↓

Neffの比≒電子透過率 $R_{e.t.} = \frac{< Q_{\mathrm{w/\,Gate}} >}{< Q_{\mathrm{w/o\,Gate}} >}$

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

パッド応答関数

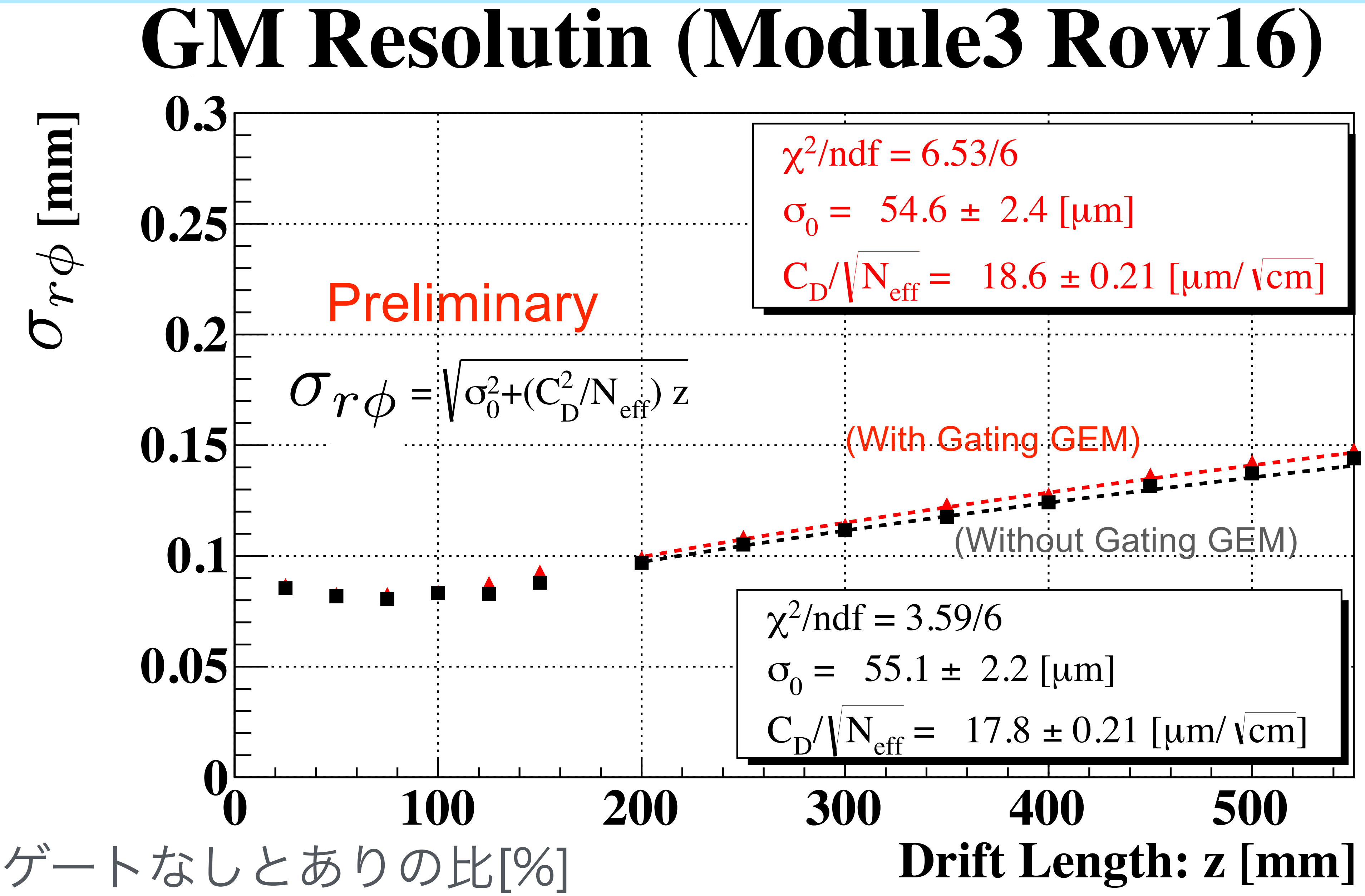


Garfieldシミュレーション

ゲートありのときの温度圧力でのCd　94.1 μm/√cm +/- 0.6%

ゲートなしのときの温度圧力でのCd　94.3 μm/√cm +/- 0.4%

位置分解能（rφ）



σrφのゲートなしとありの比[%]

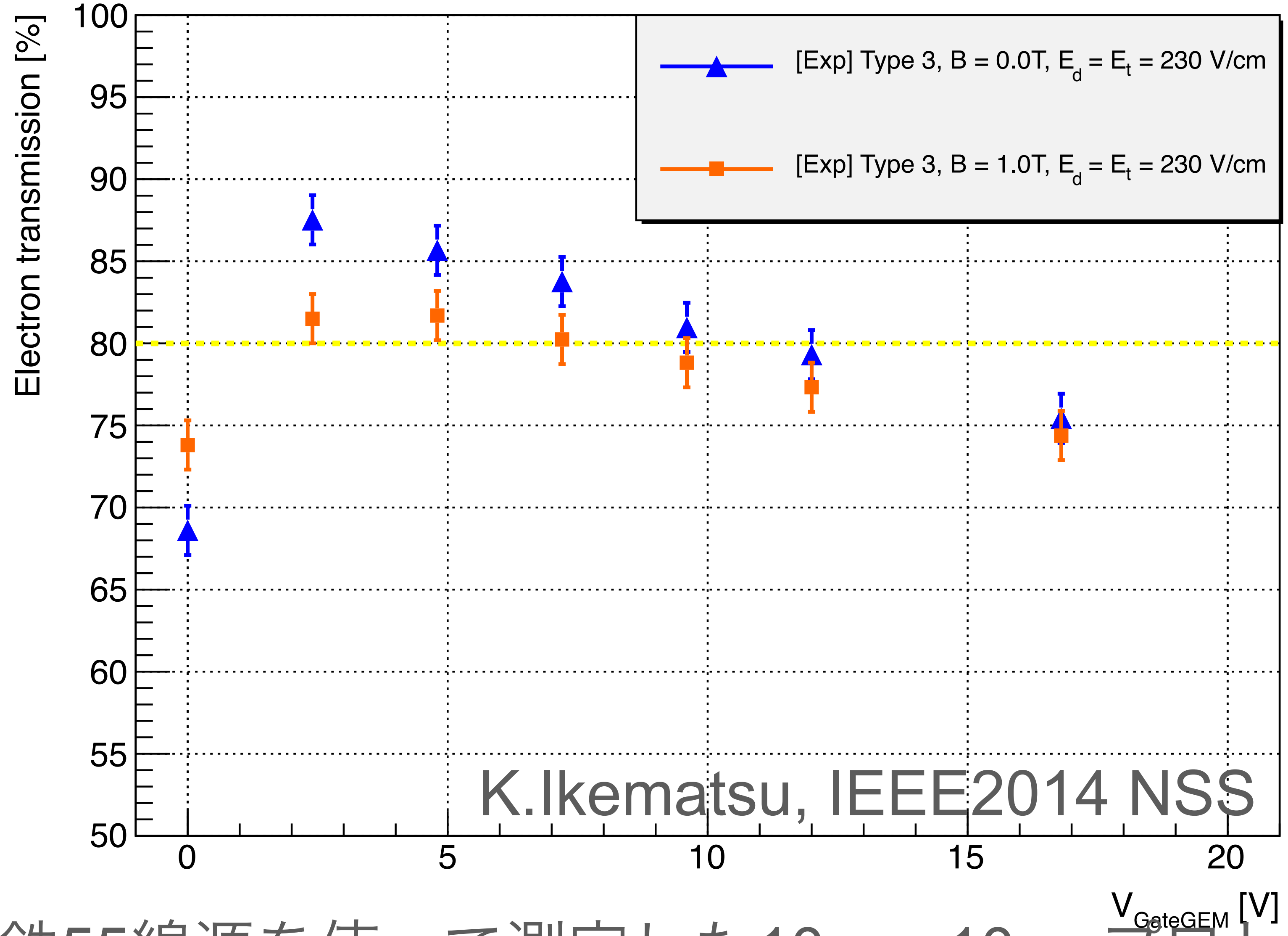
	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Ratio /%	101.7 ±0.1	101.2 ±0.1	102.9 ±0.1	100.7 ±0.1	105.8 ±0.1	105.8 ±0.1	102.4 ±0.1	103.3 ±0.1	102.1 ±0.1	104.8 ±0.1	103.0 ±0.1	104.0 ±0.1	103.8 ±0.1	102.7 ±0.2

予想されていた比率：110 %

Preliminary(Stat. only)

電子透過率

使用したCd値 [μm/√cm]	ゲートありの N_{eff}	ゲートなしの N_{eff}	比率[%]
実測	23.4±0.6	27.1±0.7	86.4±3.0
シミュレーション	26.7±0.8	30.1±0.8	88.8±3.5



Neffで評価した電子透過率は80%を達成している

小型プロトタイプの測定結果≒82 %により近いのは実測Cd値を使ったとき

鉄55線源を使って測定した10cm×10cmプロトタイプの電子透過率（1T）

yumia@post.kek.jp

まとめ

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86.4±3.0%であった

目標の電子透過率を達成している

理解すべき課題点

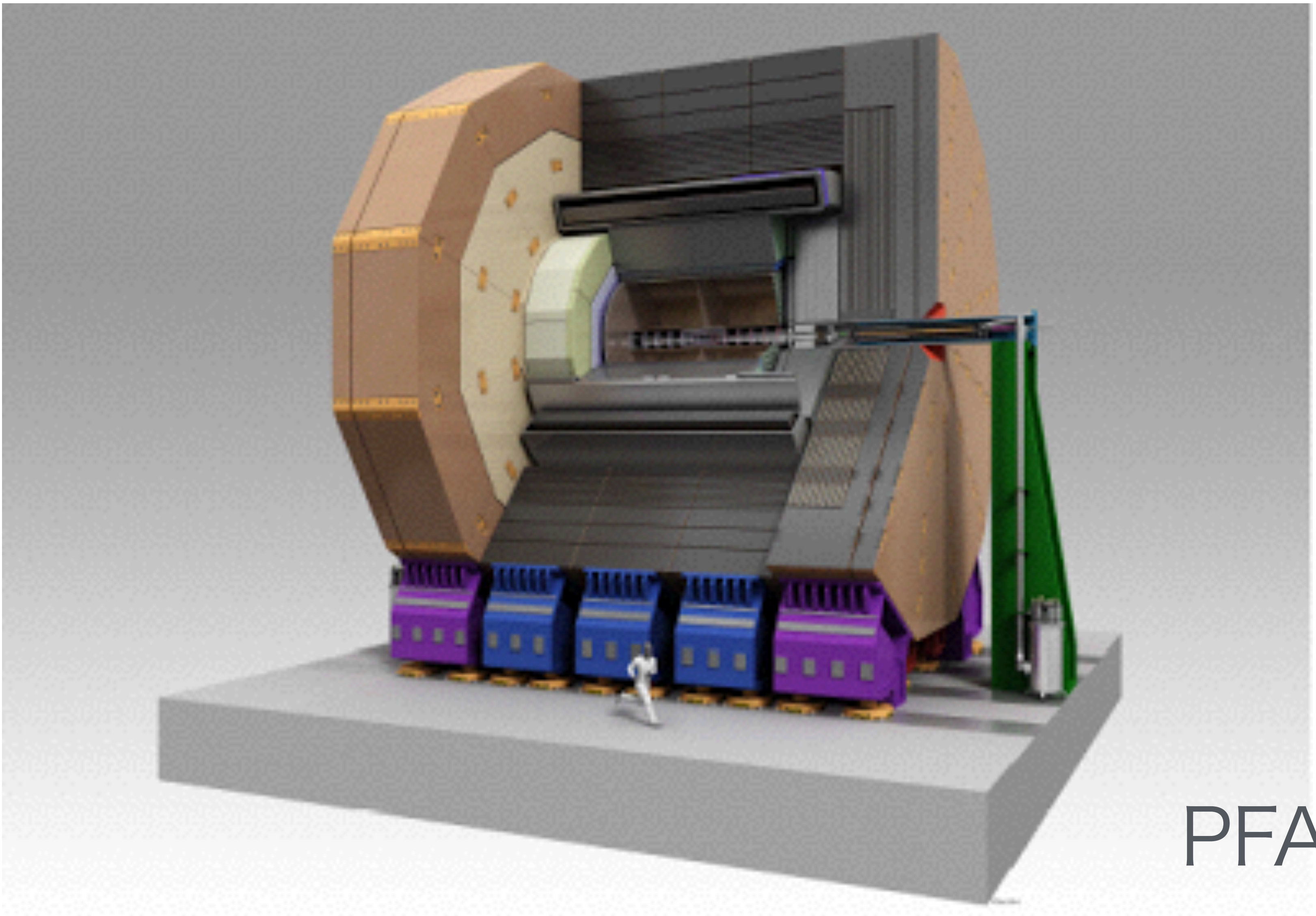
ゲートあり/なしでCdに違いが見られたこと

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

補足スライド

ILD

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



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
PFA

エネルギー分解能を実現.

PFA:Particle Flow Analysis

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

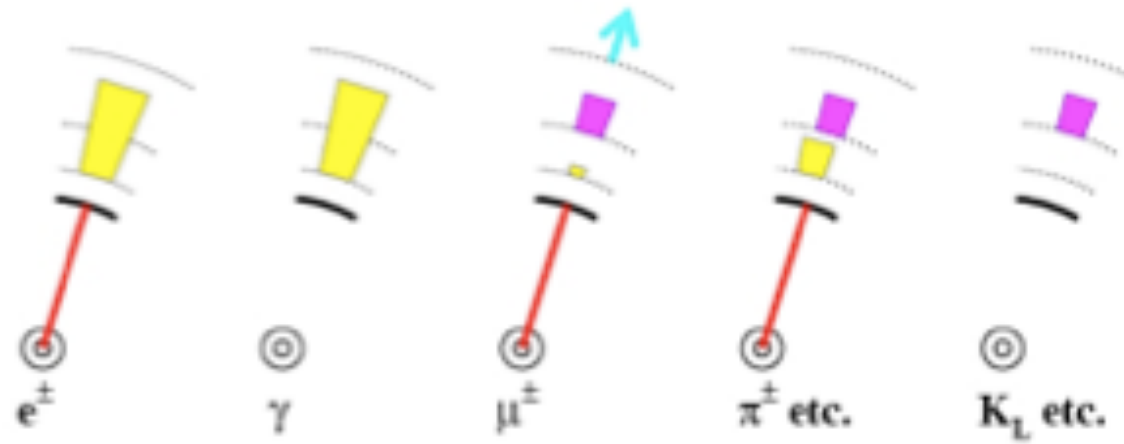
2つの4元ベクトル

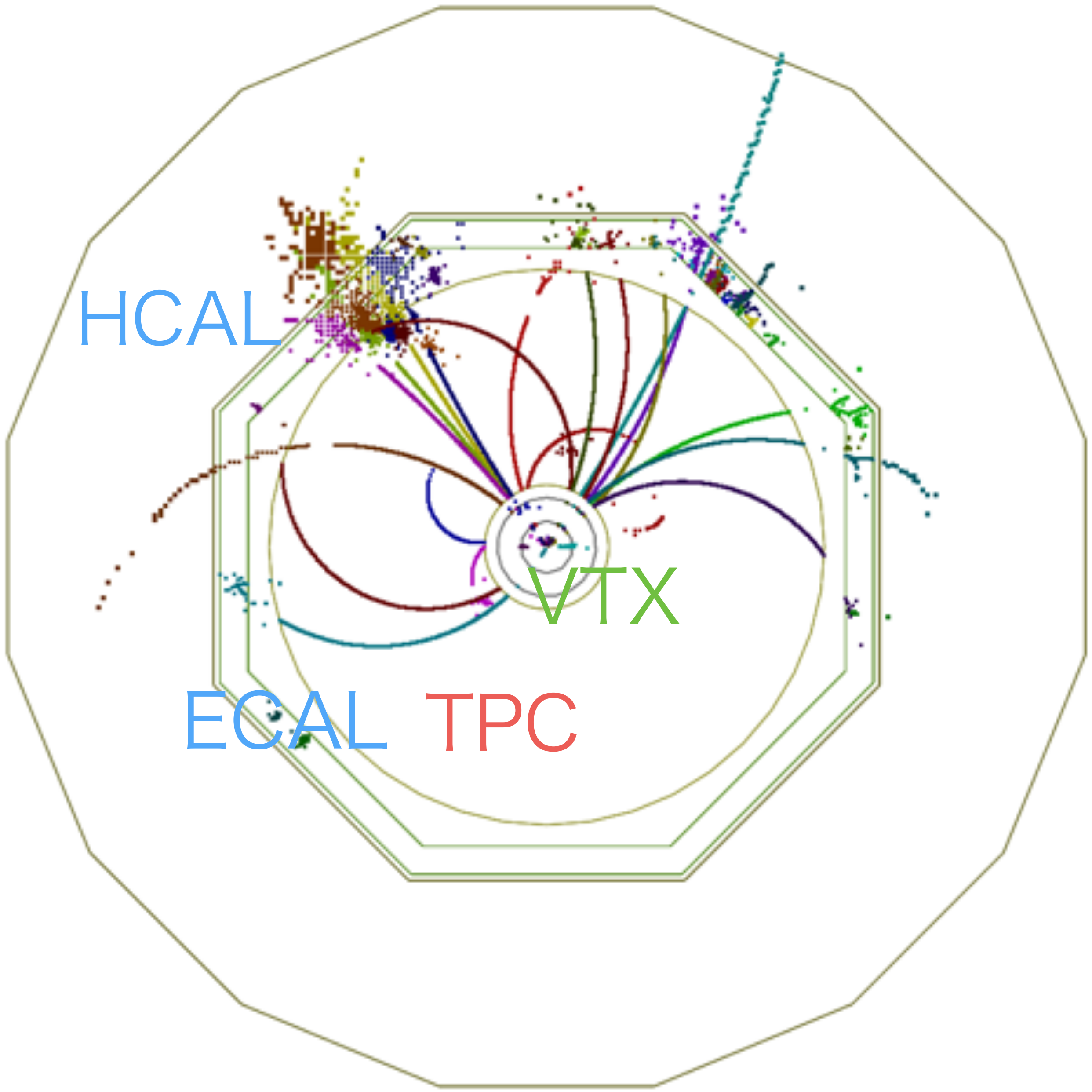
$P^\mu = (E/c, p)$

$x^\mu = (ct, x)$

カロリーメーター：中性粒子

飛跡検出器：荷電粒子





TPCの2つの役割

①荷電粒子の検出

飛跡検出　2次元

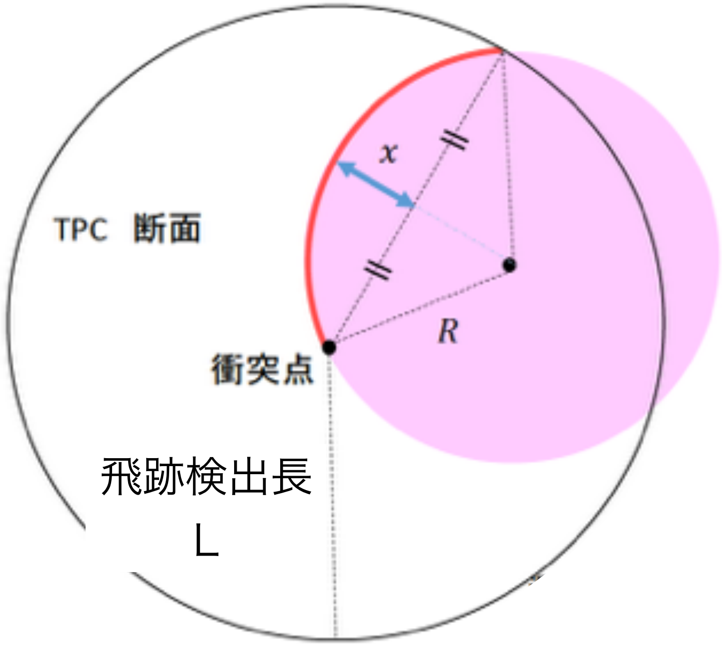
＋

時間から求める残り1次元

運動量測定

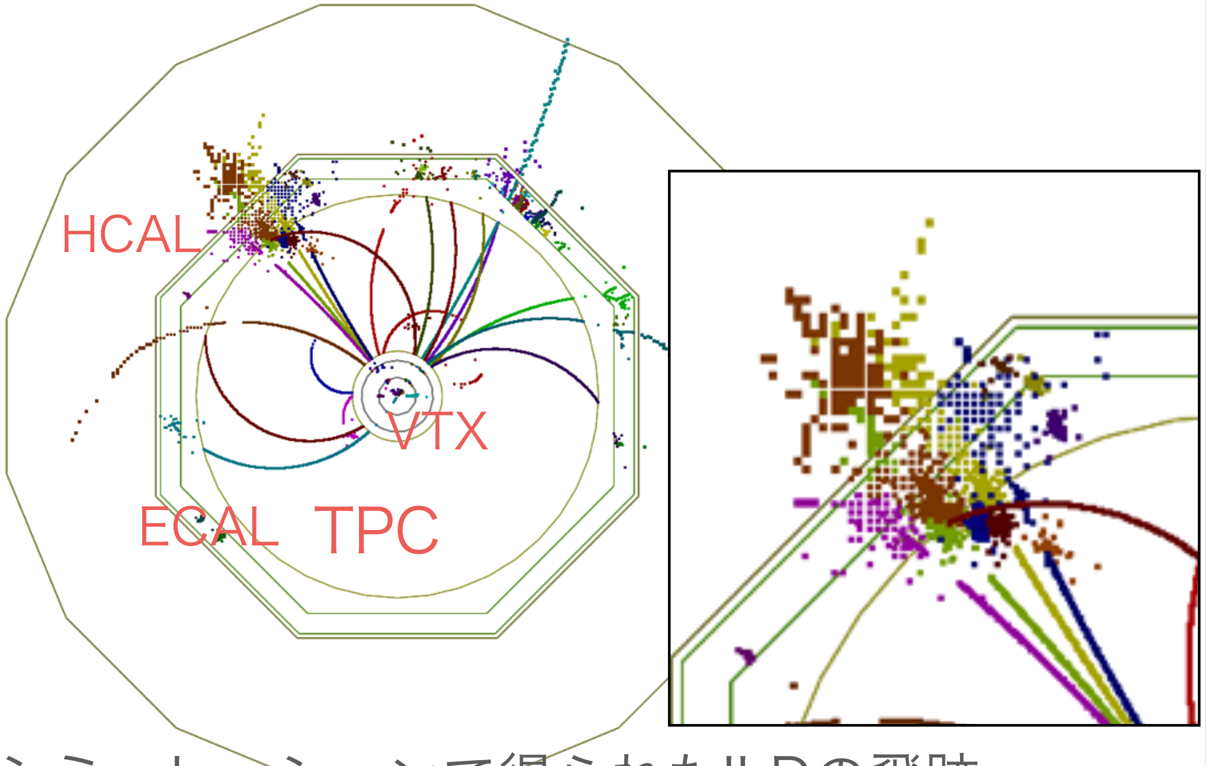
曲率半径・磁場から求める

$P_T[GeV/c] \fallingdotseq 0.3\ B[T]\ R[m]$



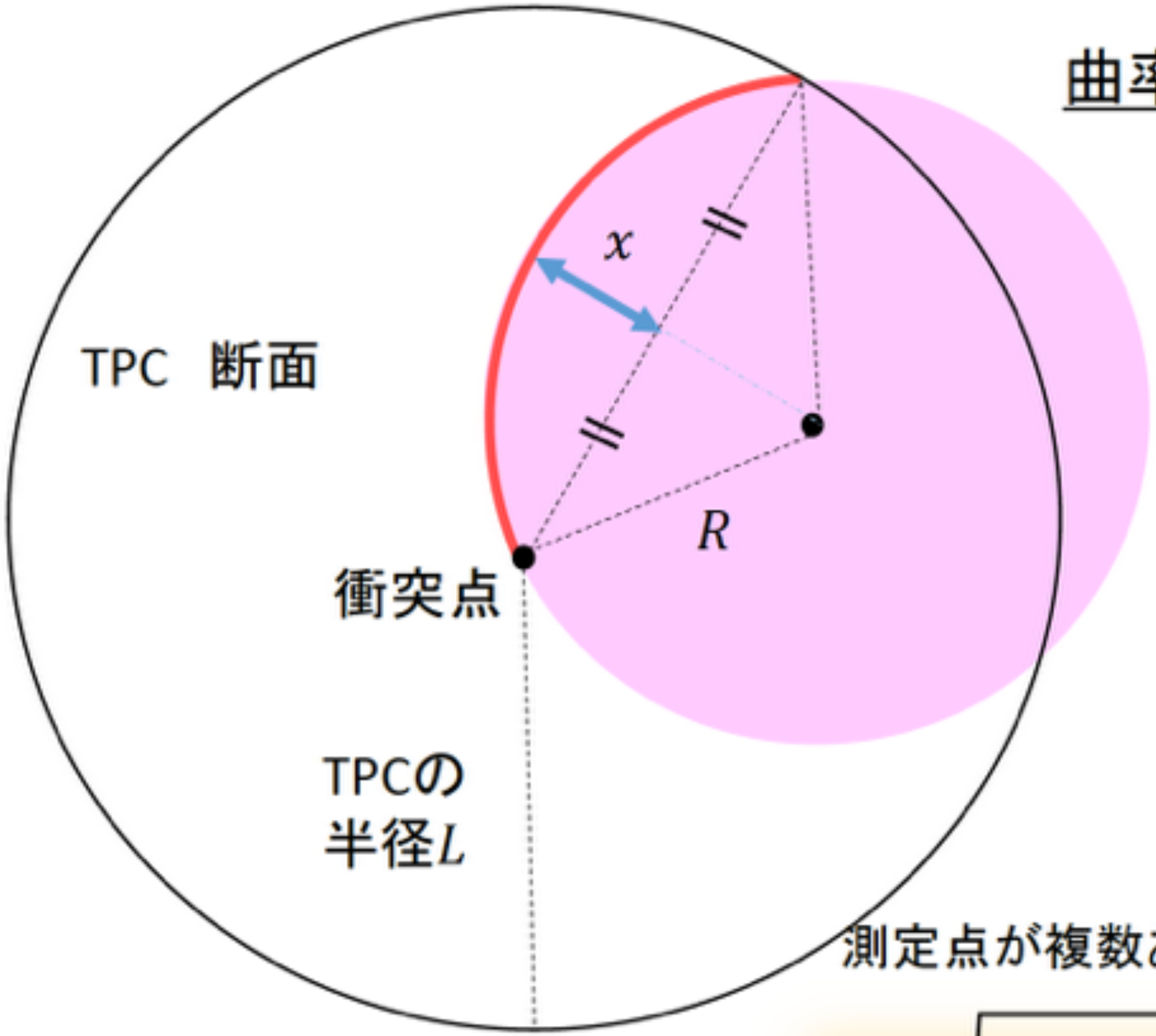
②2飛跡の分離

他の検出器で2つの飛跡を判別できるようにする



シミュレーションで得られたILDの飛跡

運動量測定



曲率半径Rを求める

$$R^2 = (R-x)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2$$

$R \gg x$とすると

$$R \approx \frac{L^2}{8x}$$

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

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

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

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

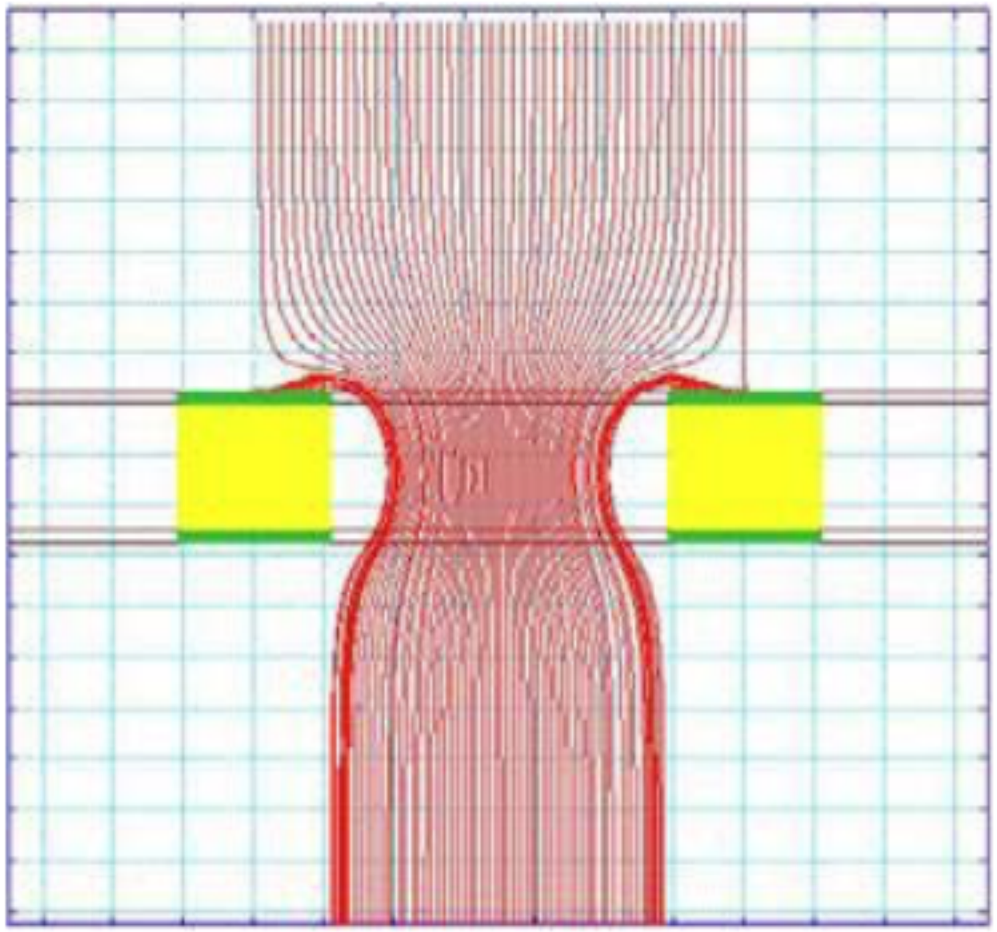
measurements　multiple scattering

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

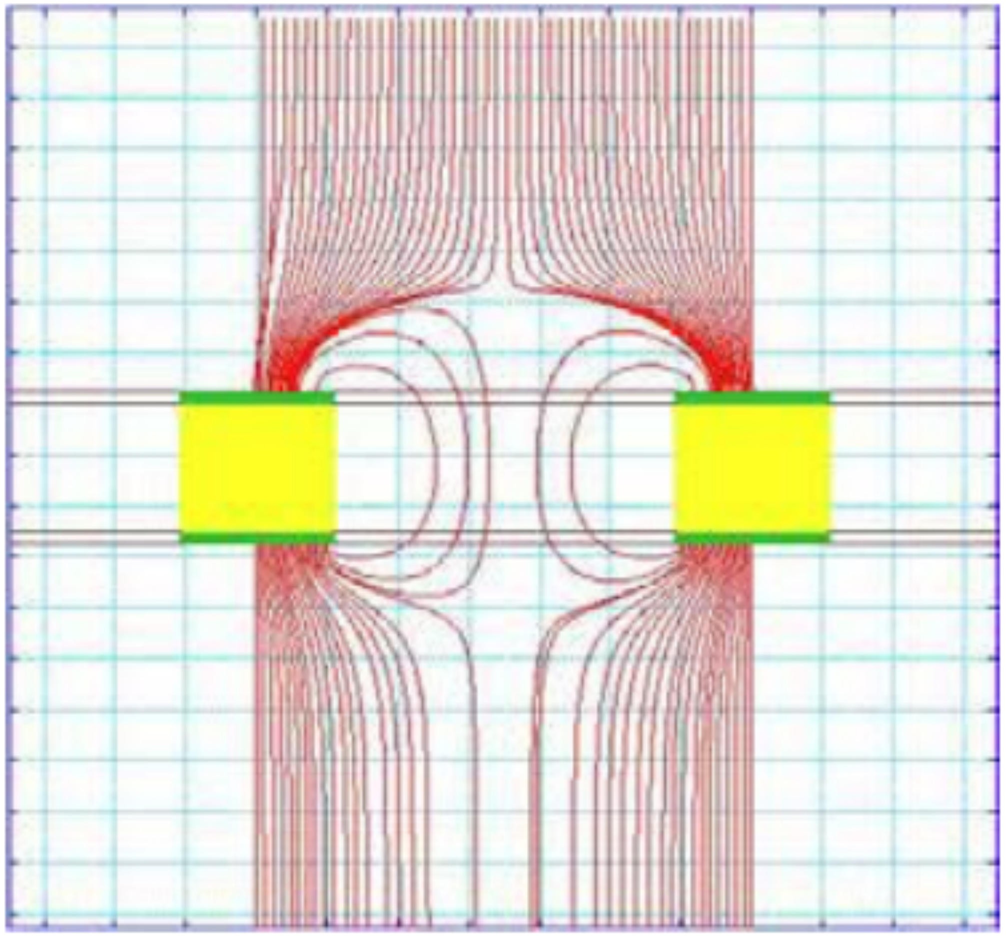
測定点の数: n と位置分解能:σ_xと磁場の強さ: B と 飛跡検出長L に依存

ゲートGEM動作原理

ゲートOpen



ゲートClose



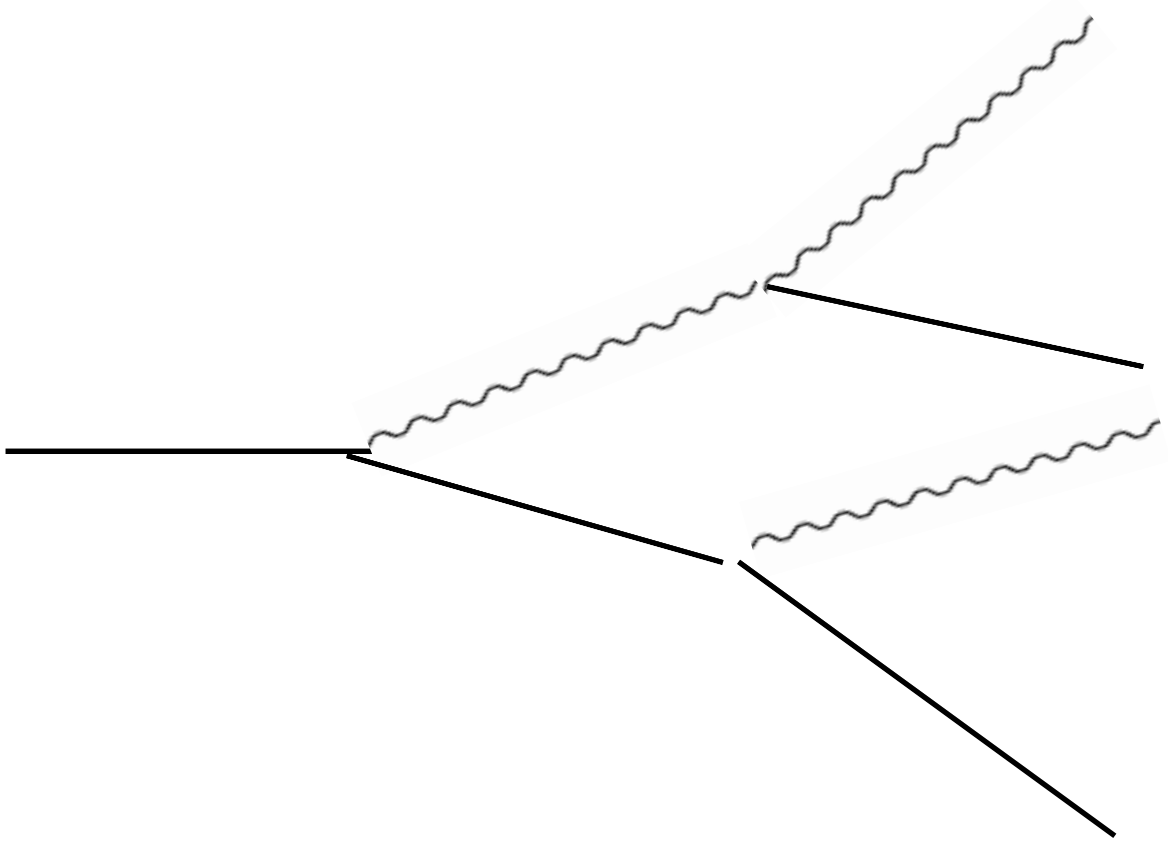
T2Kガス

Ar : CF4 : iC4H10 = 95 : 3 : 2

Ar アルゴン	• 希ガス ⇒比較的低電圧でガス増幅率が高くなる
CF_4 フロン	• 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
Iso-C_4H_{10} イソブタン	• 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 <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

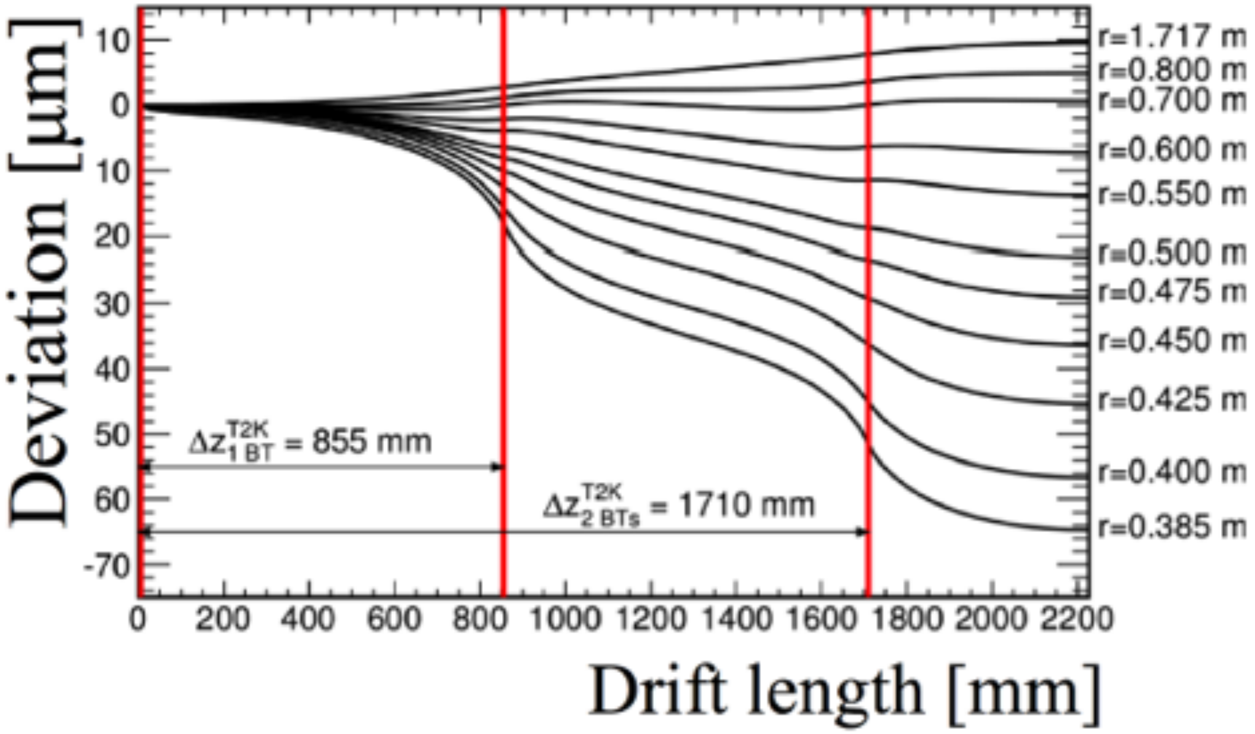
電子雪崩

強い電場の中で自由電子が気体分子と衝突すると新たな電子が叩き出され、これが電場で加速されてさらに別の分子と衝突して指数関数的に電子数が増える



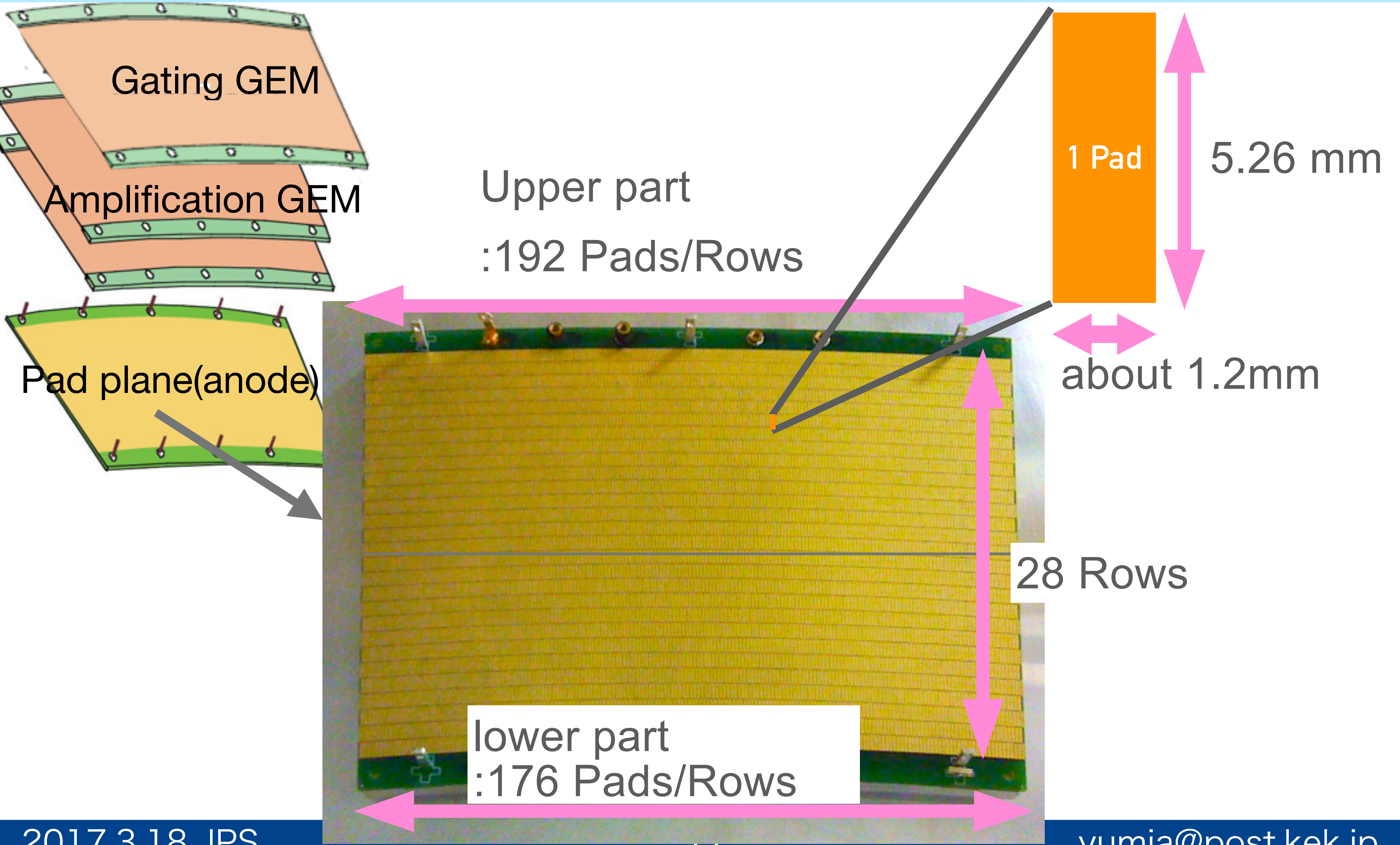
イオンフィードバック問題による位置分解能の悪化

円板状の2次陽イオン群による飛跡ひずみの影響予想図と、
生成陽イオン群による位置分解能への影響
(Ion Back Flow=3)



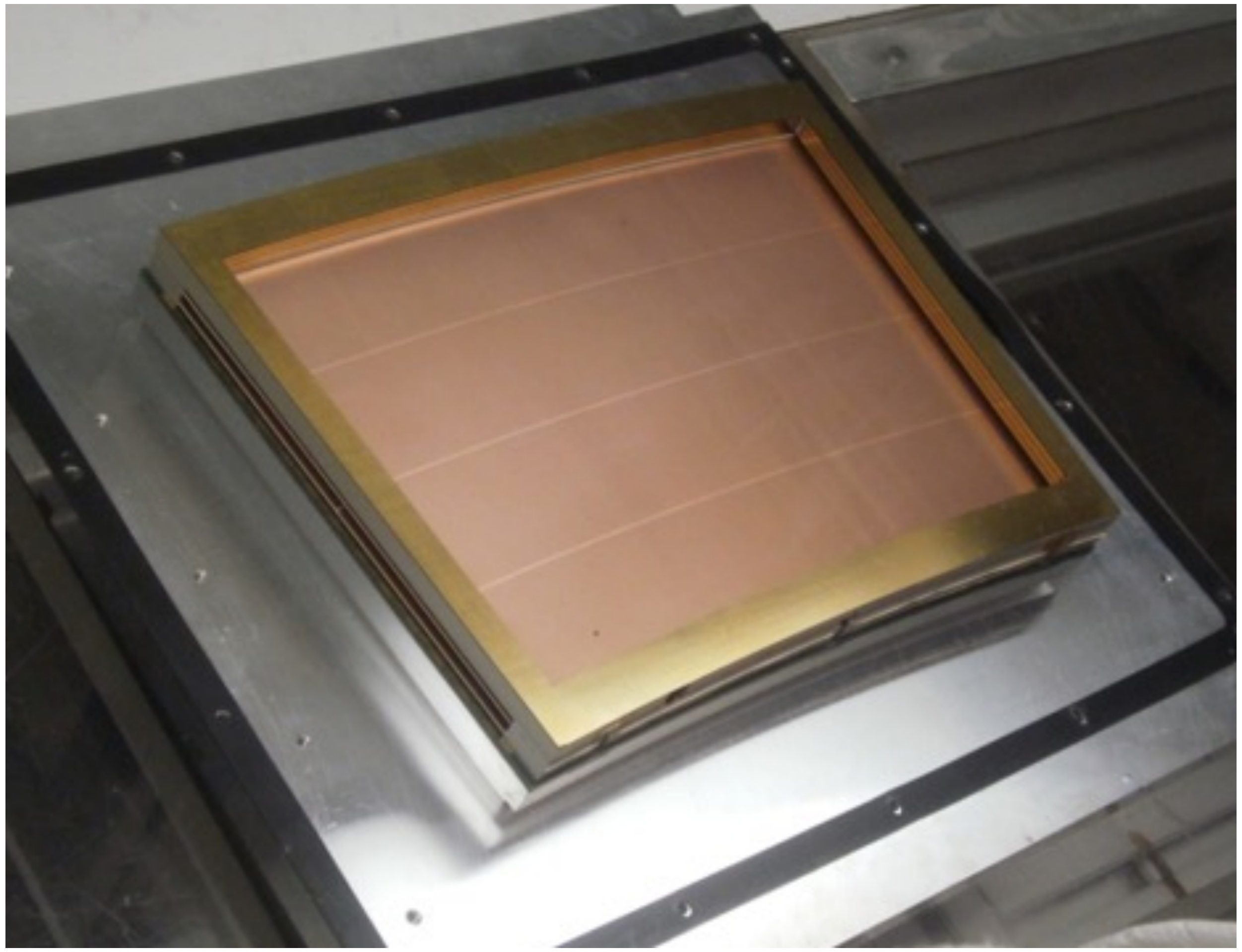
	ゲート装置なし	ゲート装置あり
1次陽イオン	8.5 um	8.5 um
2次陽イオン	60.0 um	0.01 um
合計	70 um	8.5um

Readout Pads



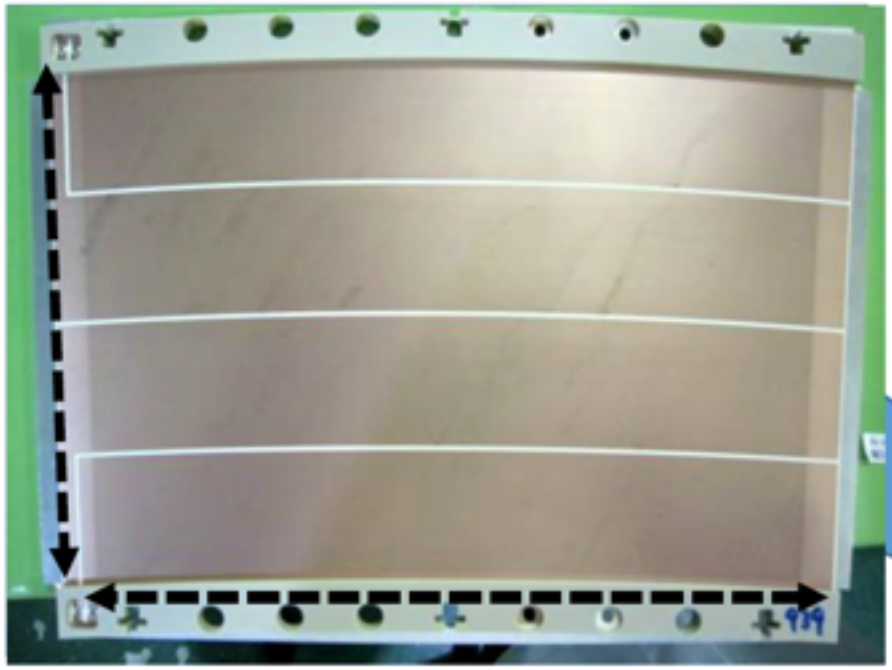
yumia@post.kek.jp

ゲートなし= フィールドシェーパーつき



Asian GEM モジュールの構成

GEM module



17 cm

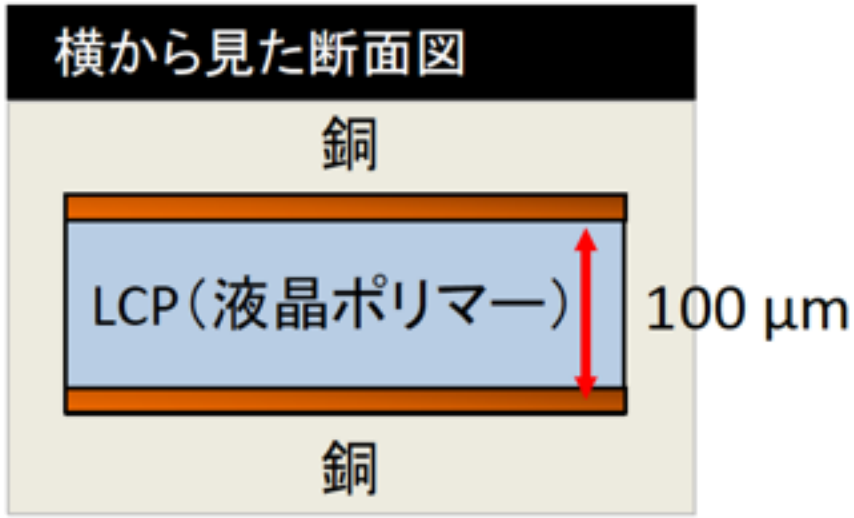
22 cm

孔の直径

70 μm

細孔間隔

140 μm



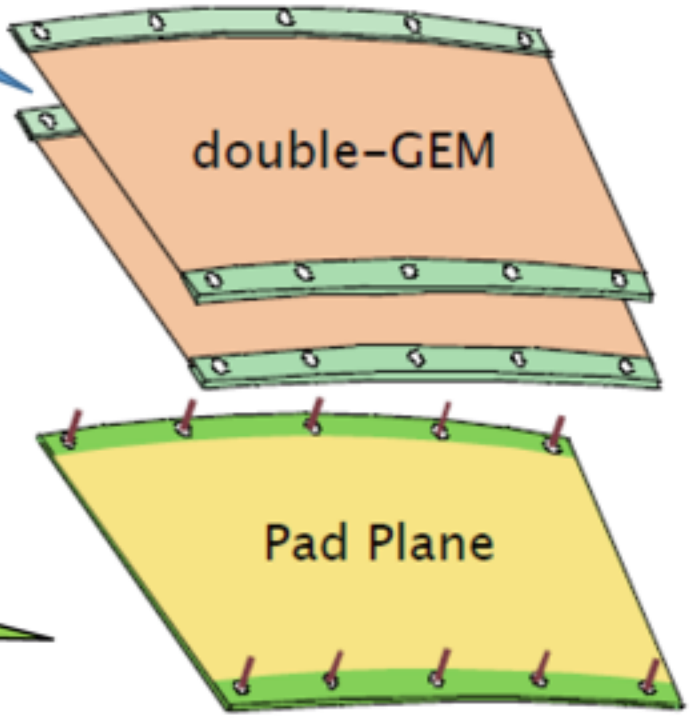
Pad Plane

金メッキされた銅

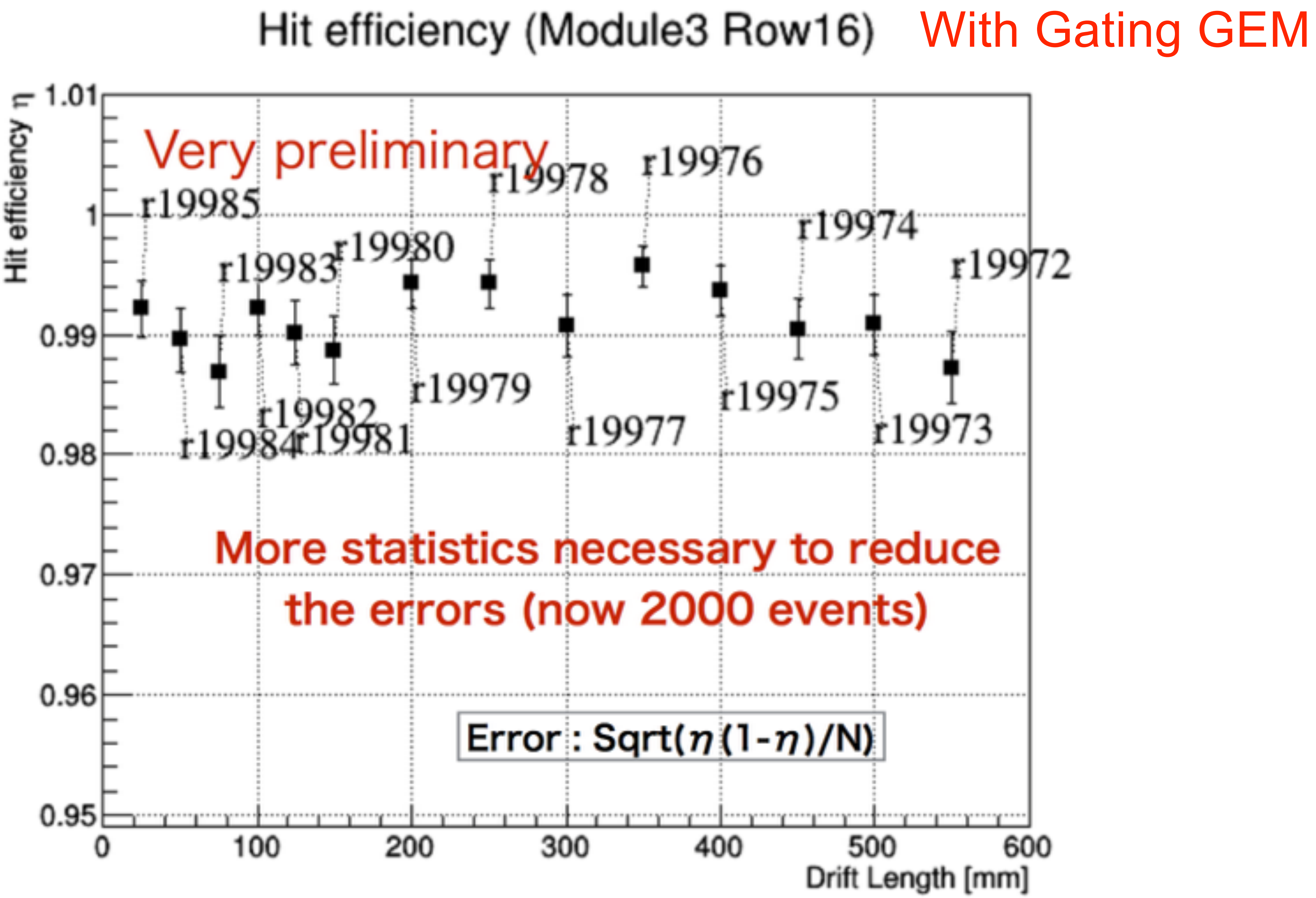
1.15~1.25 mm

5.26 mm

×5152 pads



Data quality check - Hit efficiency

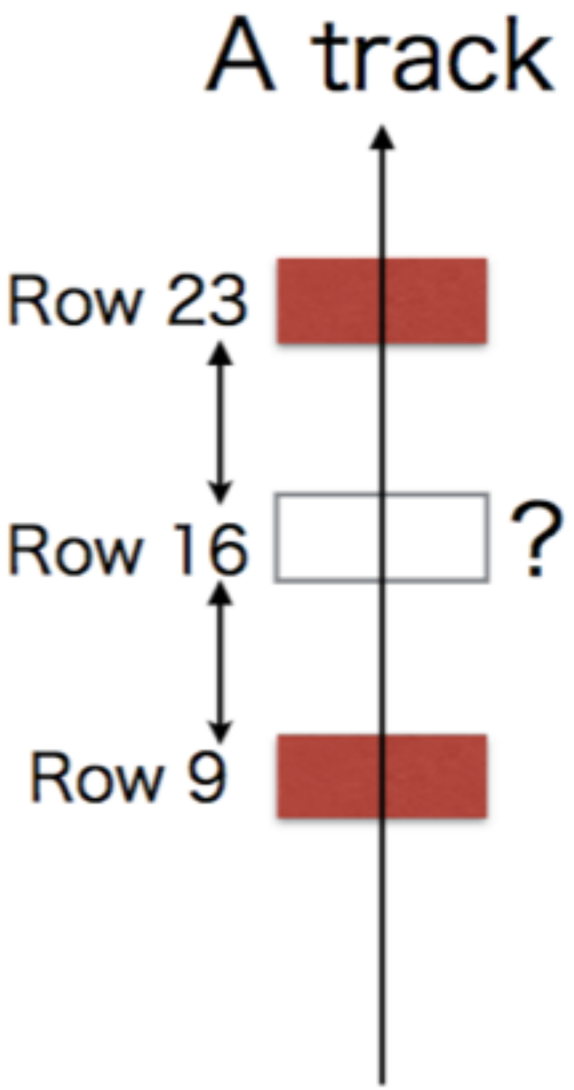


- Missing track is about 1%

Hit efficiency estimation

Looked at row-16 (module 3)

7rows away to avoid effects by the diffusion.

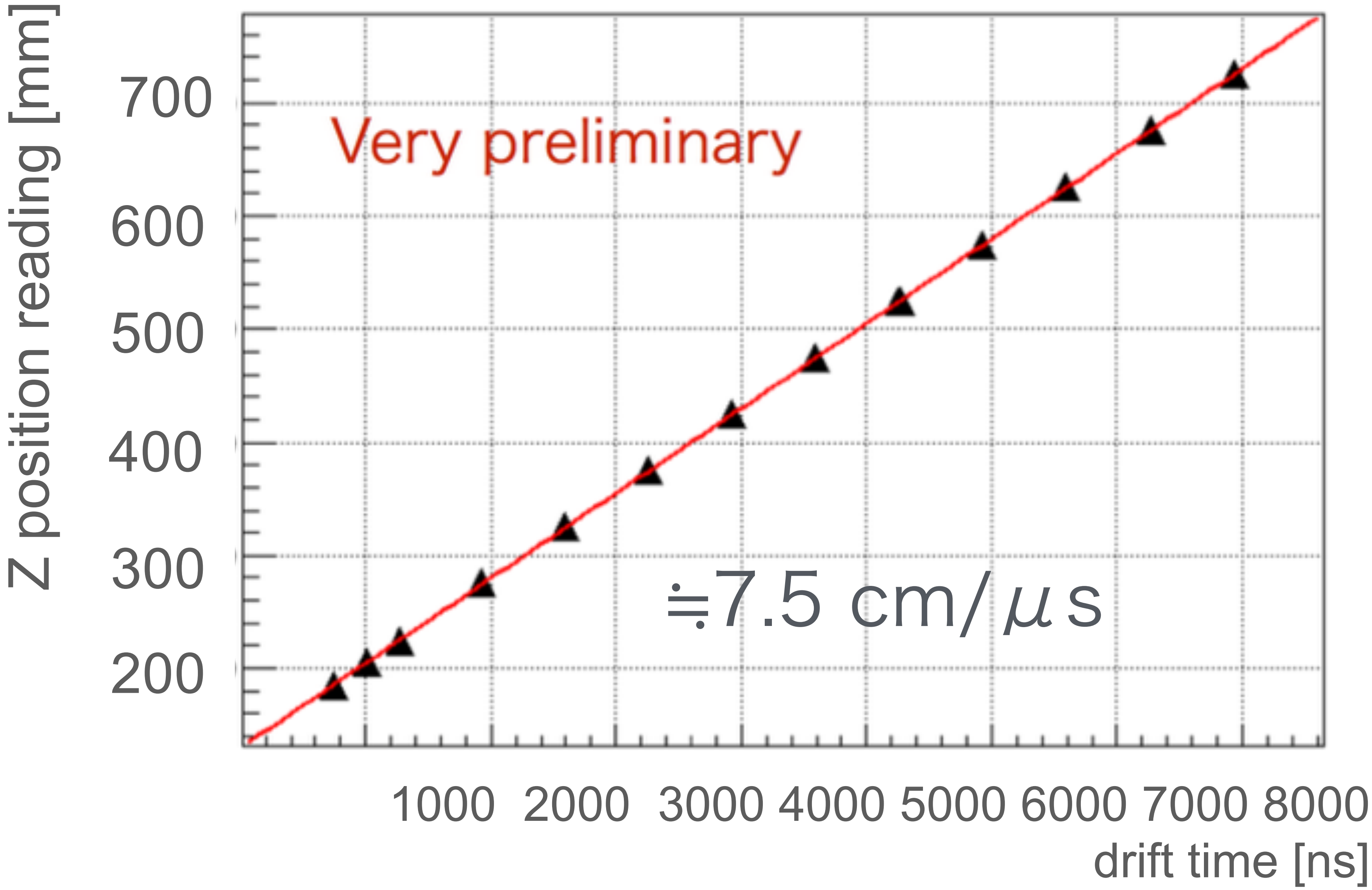


Basic idea :

Test if Row16 has a hit associated with a track that has hits both on Row9 and Row23.

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

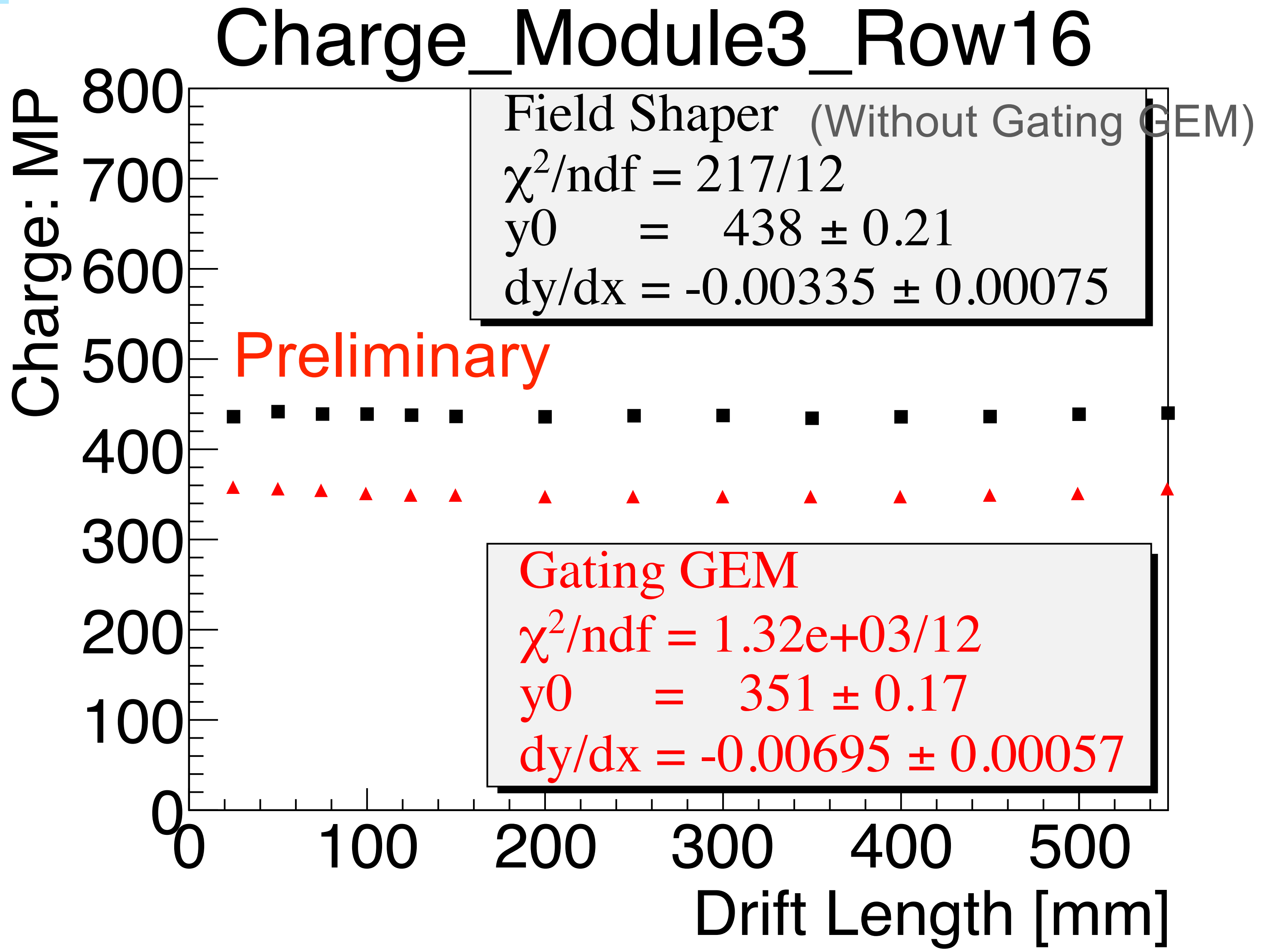
Garfieldシミュレーションシミュレーション

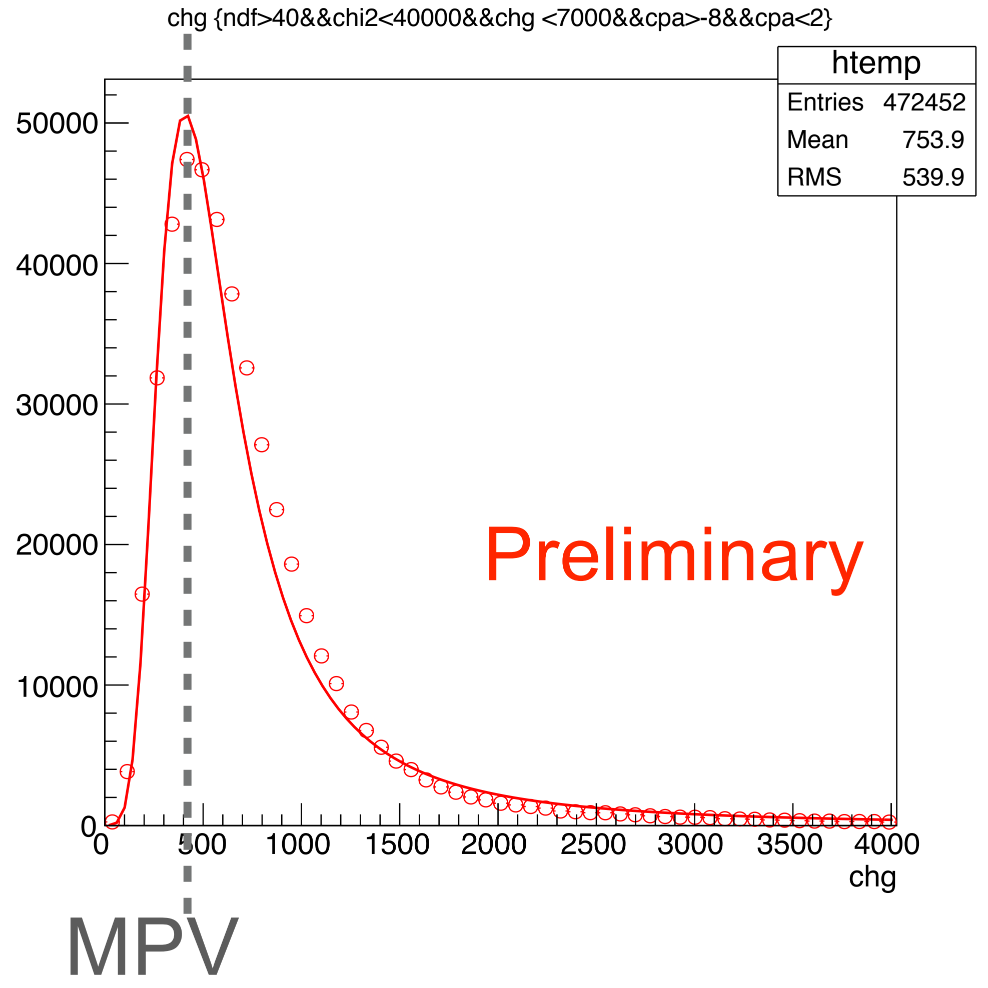
ゲートあり　76.7 cm/μs +/- 0.0013%　　0.00767409 cm/ns +/- 0.0013%

ゲートなし　7.68 cm/μs +/- 0.0022%　　0.00767739 cm/ns +/- 0.0022%

yumia@post.kek.jp

Result - Charge sum





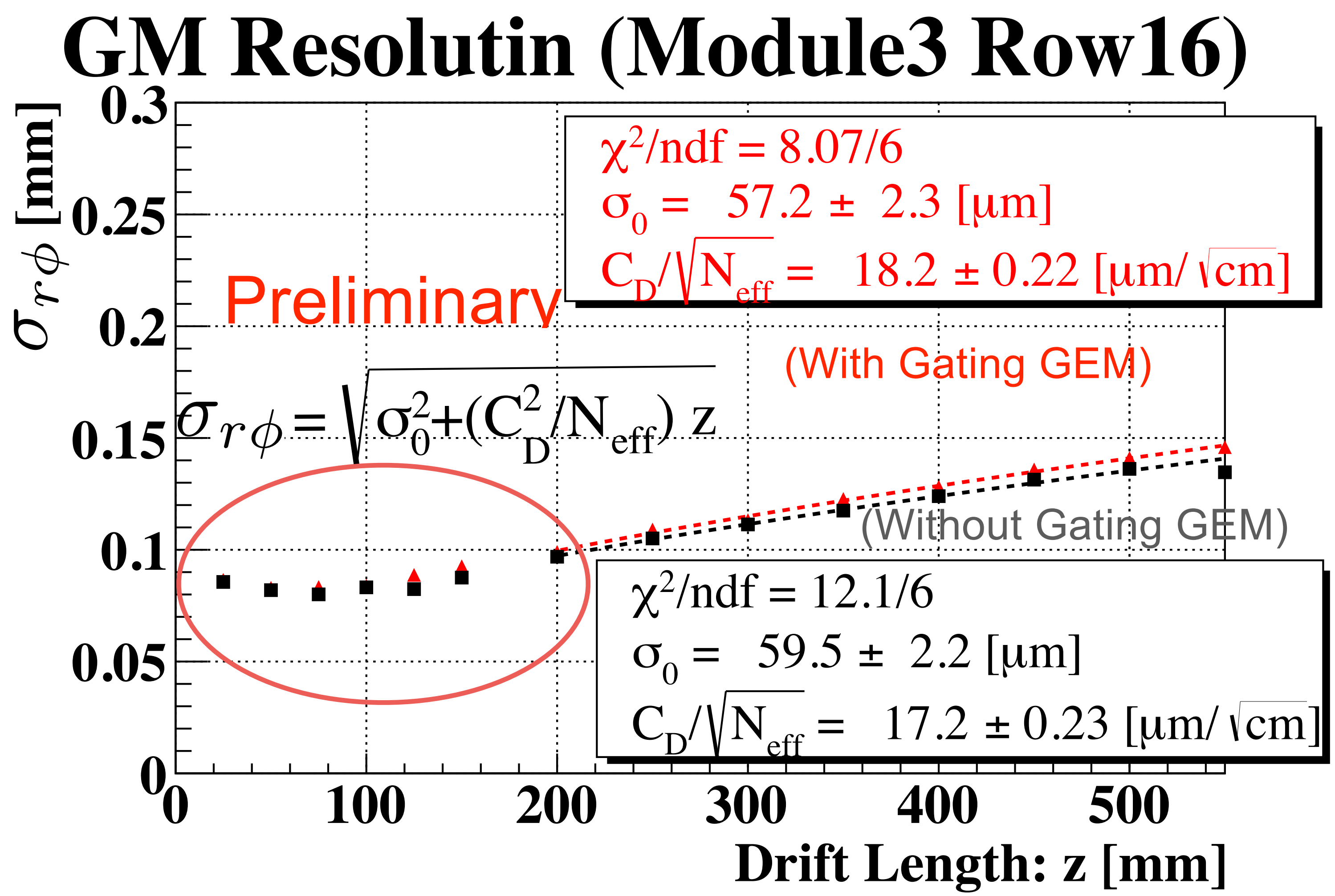
- Optical transparency = 82 %

➤ 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 ±0.1	80.4 ±0.1	80.4 ±0.1	79.9 ±0.1	79.7 ±0.1	79.7 ±0.1	79.4 ±0.1	79.2 ±0.1	79.0 ±0.1	79.7 ±0.1	79.6 ±0.1	79.9 ±0.1	79.7 ±0.1	80.6 ±0.2

Preliminary(Stat. only)

ホドスコープエフェクト

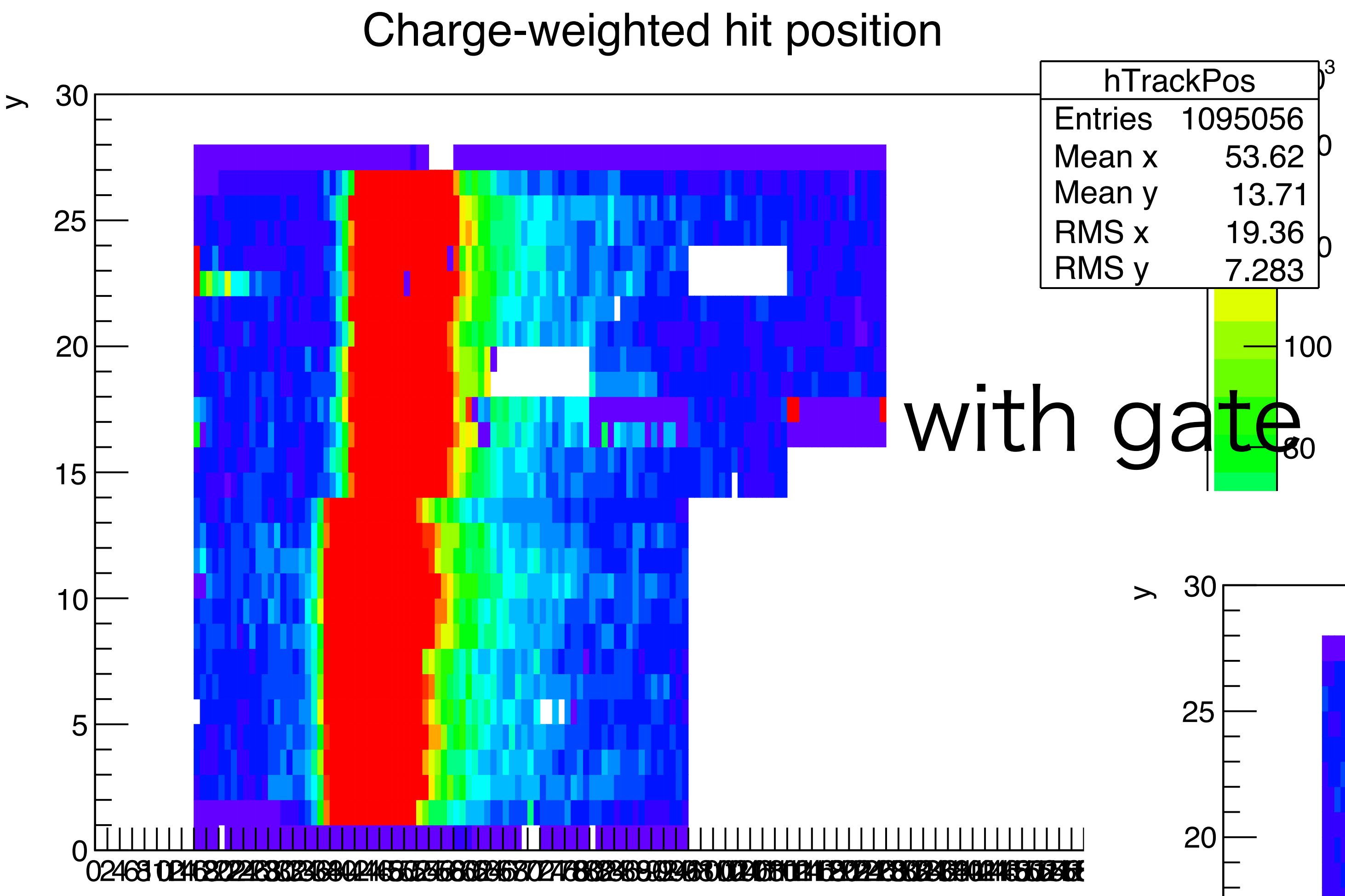


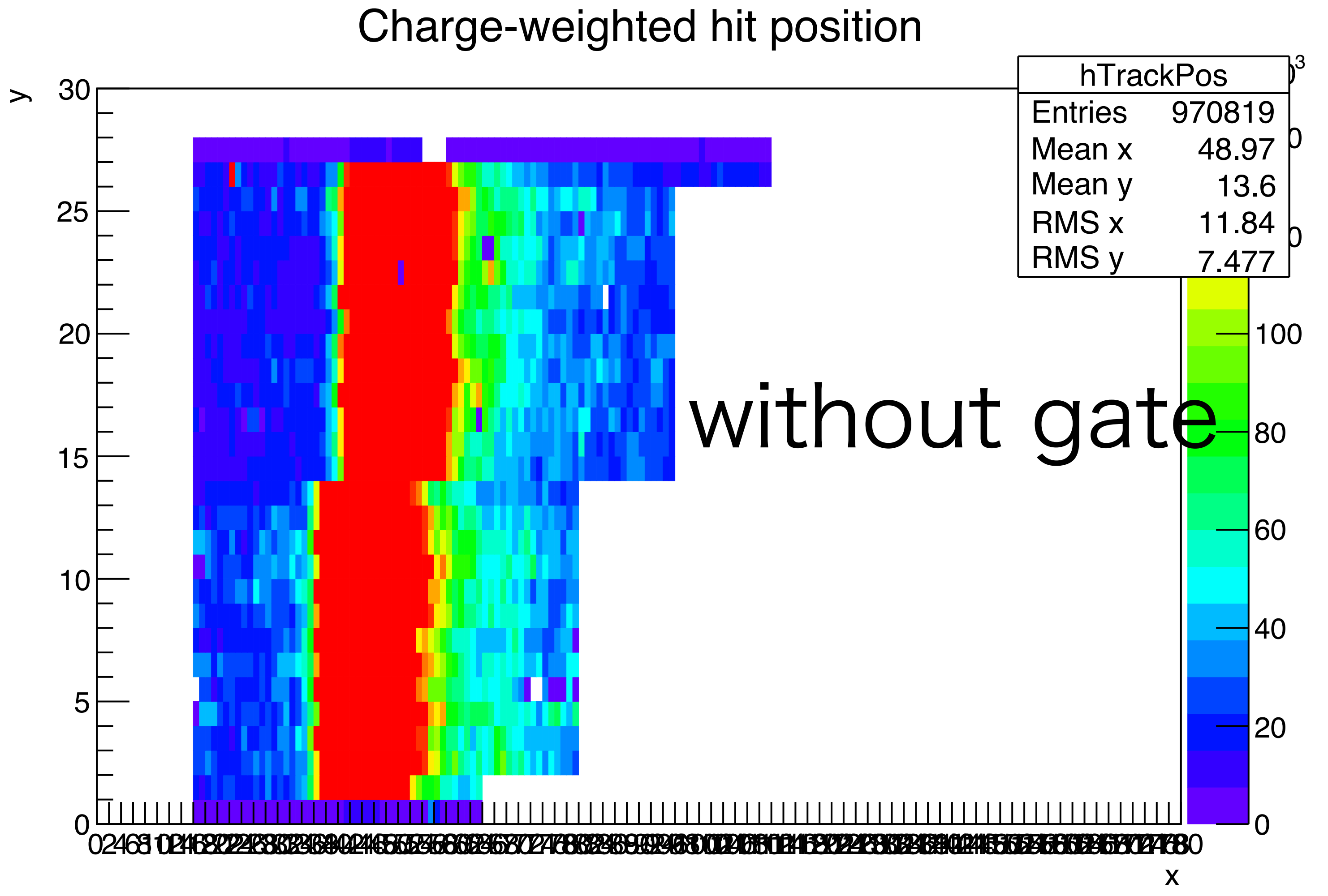
ホドスコープ (Hodoscope) とは飛跡検出器の一種

ストリップ状シンチレータなどを用いて（重心法を用いずに）トラッキングを行う検出器

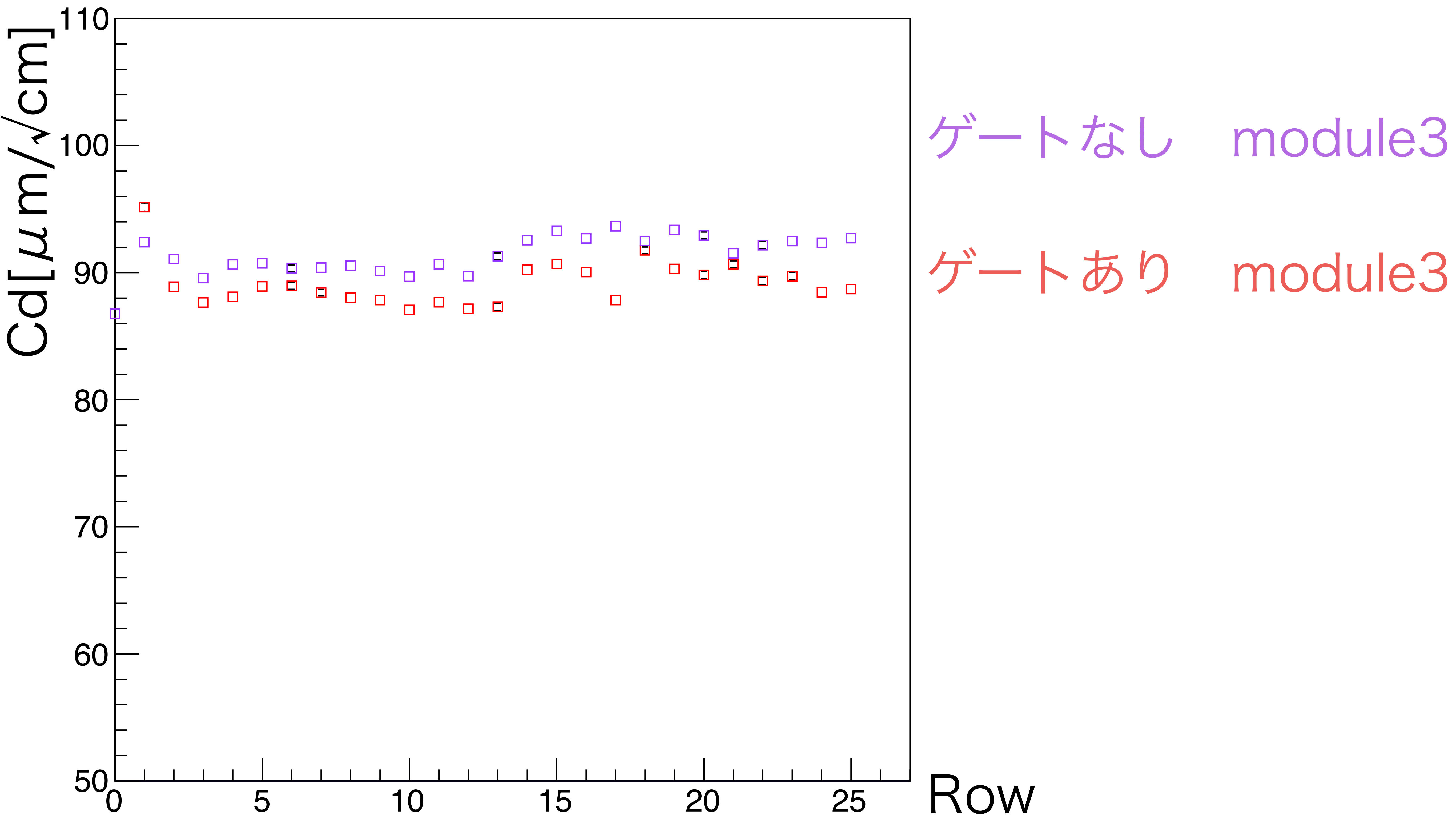
よって、シングルパッドヒットによる効果をホドスコープエフェクトと呼んでいる

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
y
with gate

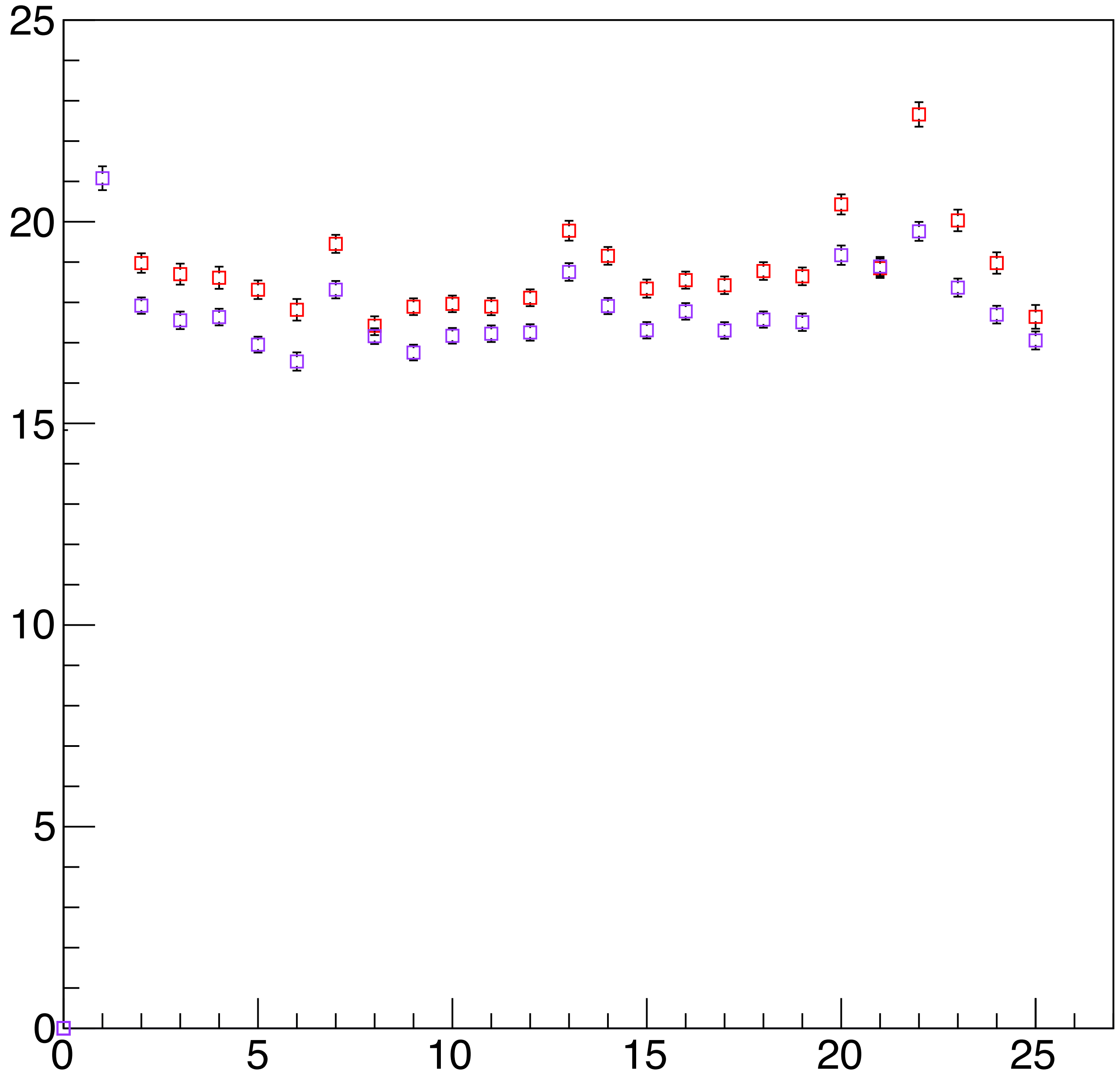

Charge-weighted hit position
hTrackPos
Entries 970819
Mean x 48.97
Mean y 13.6
RMS x 11.84
RMS y 7.477
y
x
without gate

Row依存性 Cd



Cd[μm/√cm]
110
100
90
80
70
60
50
0
5
10
15
20
25
Row
ゲートなし module3
ゲートあり module3

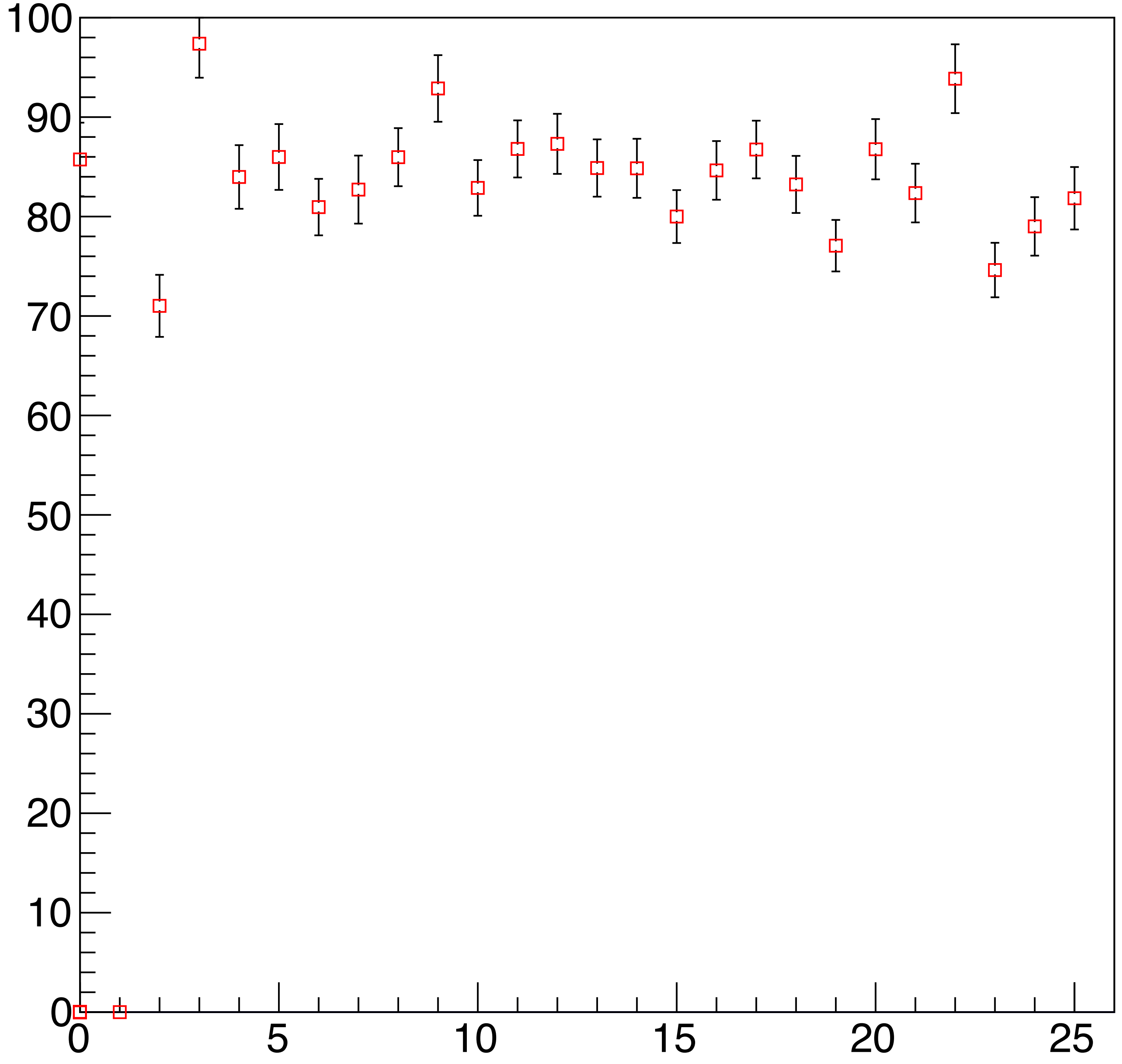
Row依存性　Cd²/√Neff



Row依存性　Neff

yumia@post.kek.jp

Row依存性　透過率



予想：110%

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

N_{eff} が80%になるとすると

比率＝√1/0.8

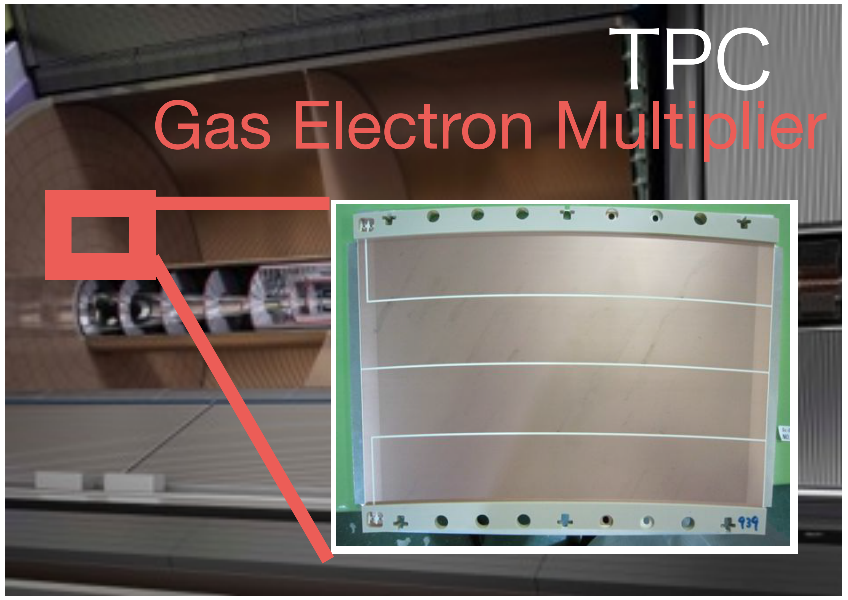
=√1.25

＝1.1

前回のビーム試験の問題点

TPCに要求されること

- 高い運動量分解能
- PFAを可能にする高い飛跡認識能力



TPC大型プロトタイプビーム試験施設（@DESY）

前回のビーム試験（2010）：Z=2.2m で100μm以下の位置分解能を達成

陽イオンフィードバック問題

今回のビーム試験の目的

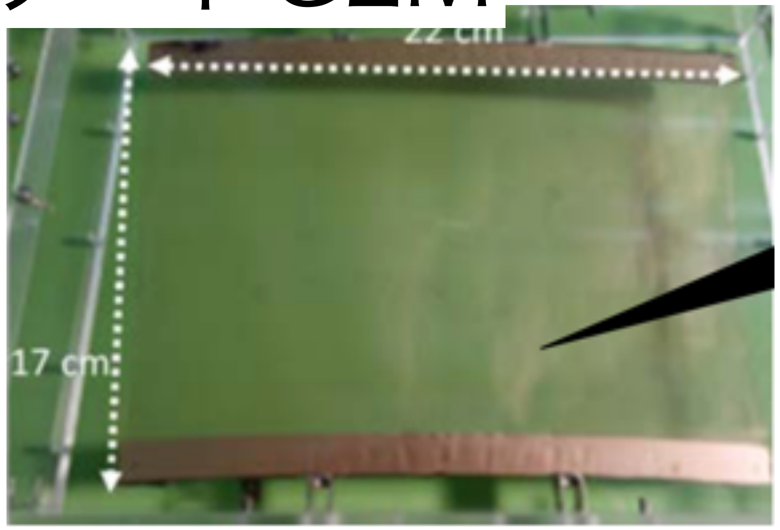
陽イオンフィードバック問題

電離によって大量に発生した陽イオンが電場を歪ませ、位置分解能が悪化

カソード側に陽イオンが戻ってこない、

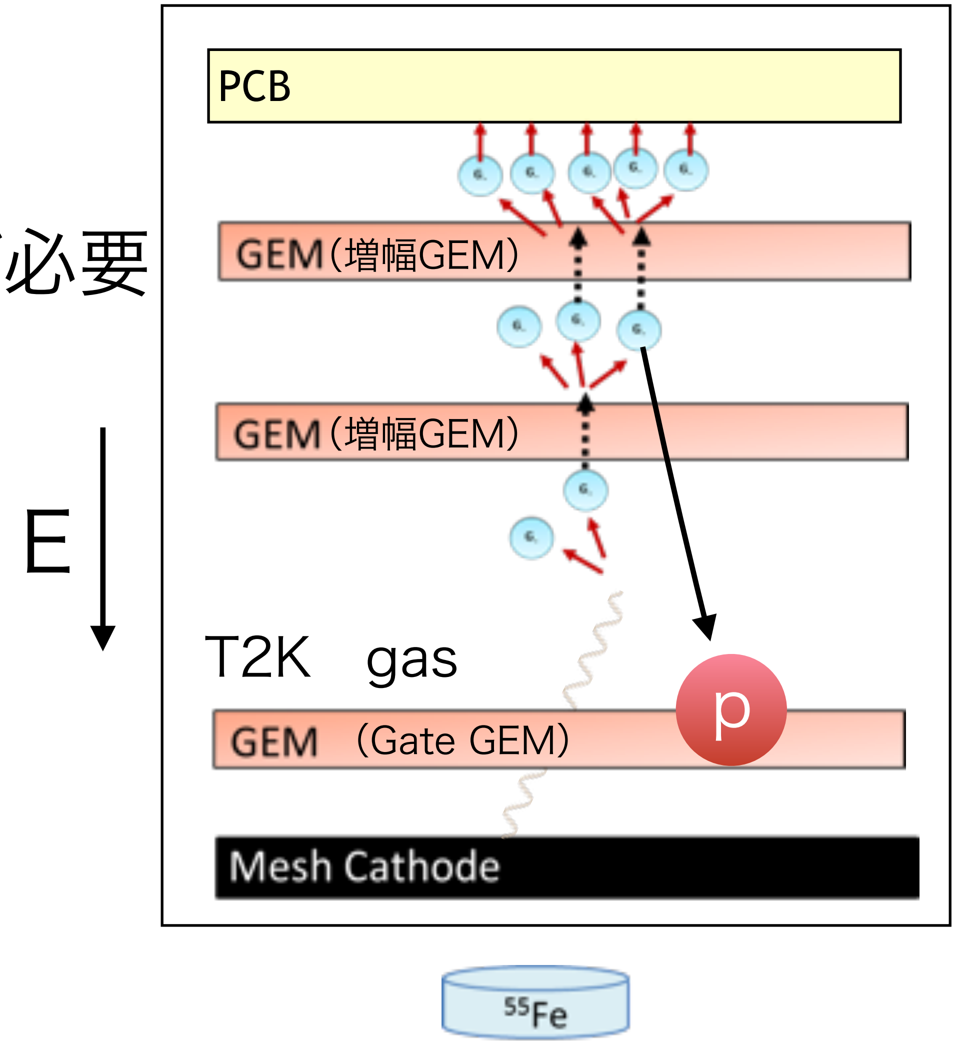
電子透過率80%を達成できる高開口度の<u>ゲート</u>が必要

ゲートGEM



世界初

・非常に薄く、
開口度の高い
ゲートとしてのGEM



今回のビーム試験（2016.10〜）：ゲートGEMを搭載

ビーム試験に向けた準備

目的：DESYでのビーム試験での動作条件の決定
（ゲートGEM が放電が少なくかつ十分な S/N 比が得られる）

① 増幅率と放電率

GEMにかける電圧設定を変えて
測定を行う

② 均一性

その電圧設定で全体に
均一な増幅率が得られるか

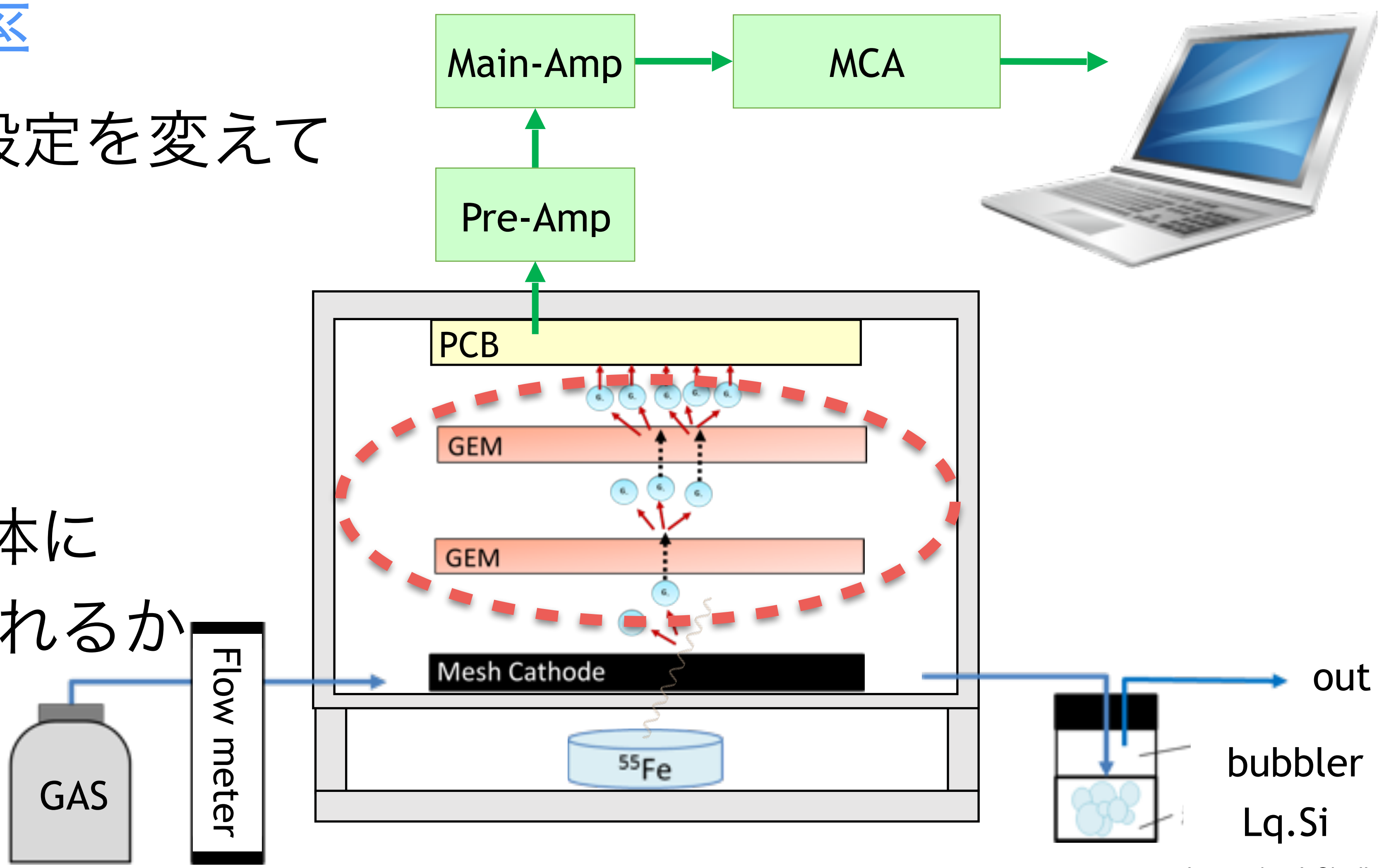
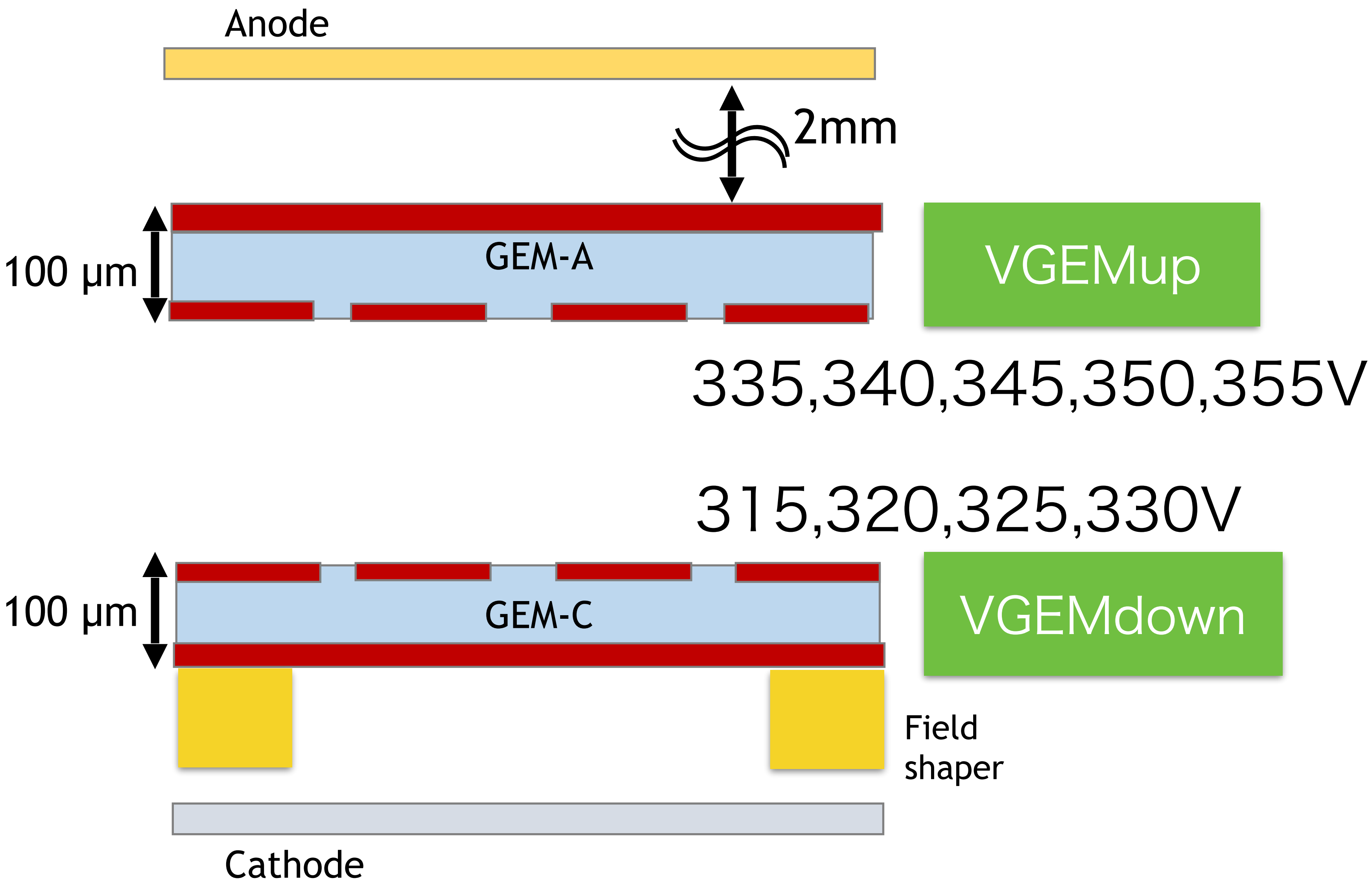
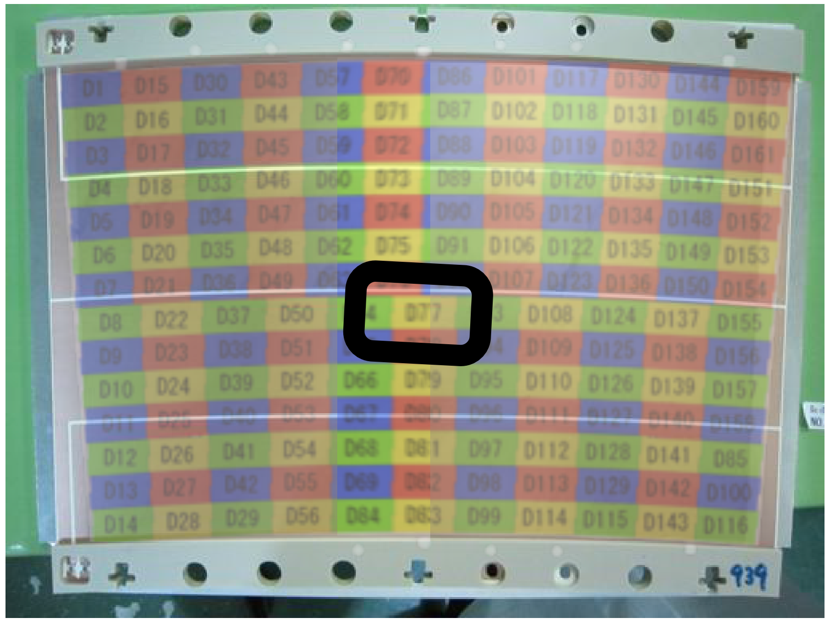


image by A.Shoji

実験：増幅率と放電率の測定

〜GEMの断面図〜





Position

5分間測定

※2組のGEMについて測定

放電率：１つのGEMの上下面の電流をモニター→安定値から同時に動いたら、放電があったとみなす（30分測定）

結果・考察：増幅率と放電率

Pair-1 comparison on D77

V_{GEMup} [V]	$V_{GEMdown}$ [V]: 315	320	325	330
335		**No measurement**		
340	1685		Discharge lot 2815	×
345	2377	**discharges little** 2755	Discharge lot 3093	×
350	2769		×	×
355	3252		×	×

There will be many discharges

Pair-2 comparison on D77

V_{GEMup} [V]	$V_{GEMdown}$ [V]: 315	320	325	330
335	2262	**No measurement**		
340	2474	3032	Discharge Lot 3736	×
345	2860	Discharge Little 3427	×	×
350	3446	**discharges little ?** 4230	×	×
355	4226		×	×

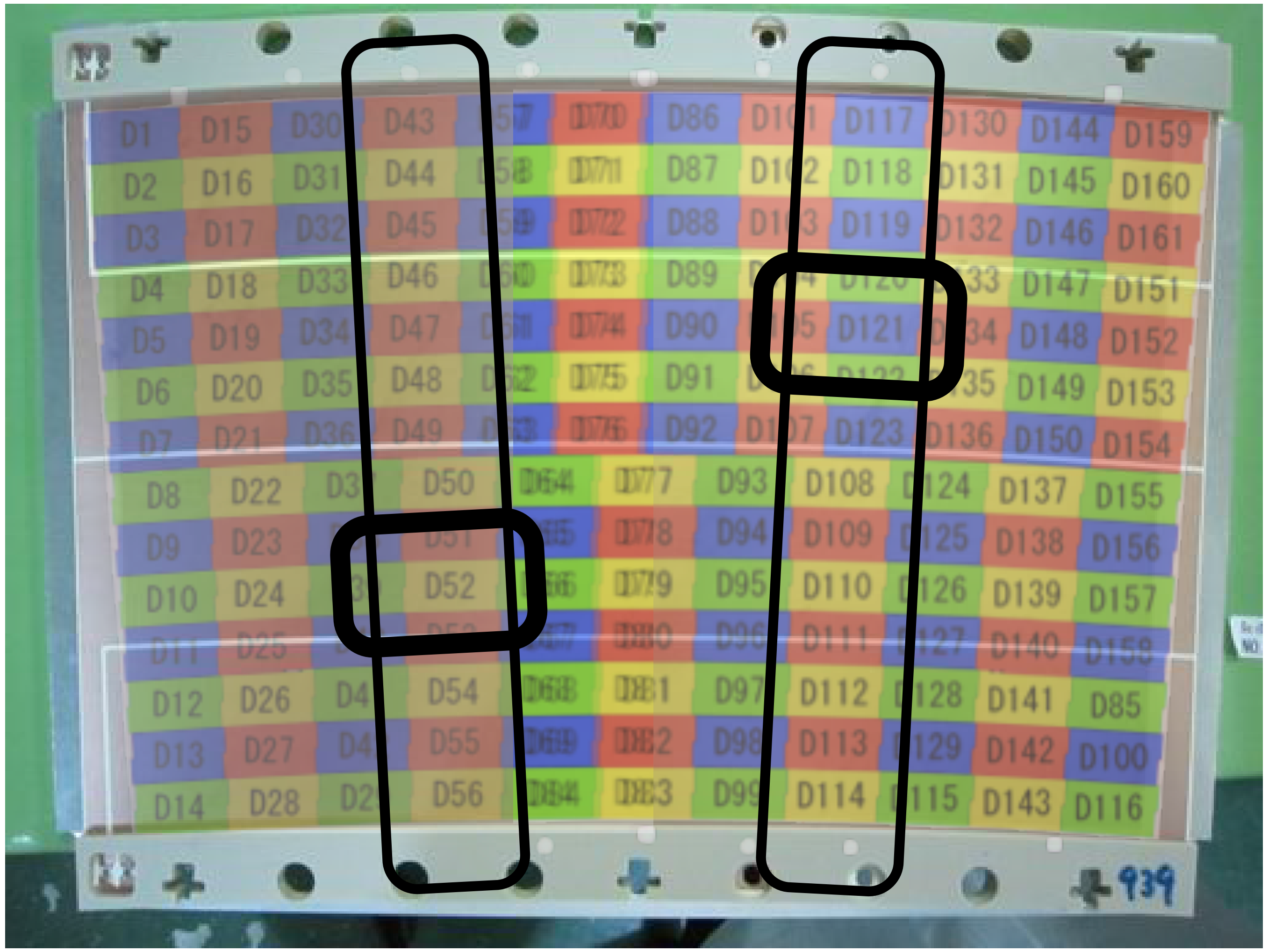
There will be many discharges

There will be many discharges

pair2のほうが比較的高い増幅率で少ない放電率である

実験：均一性

Position/Connector numbers



Pair2

VGEMup:345 V

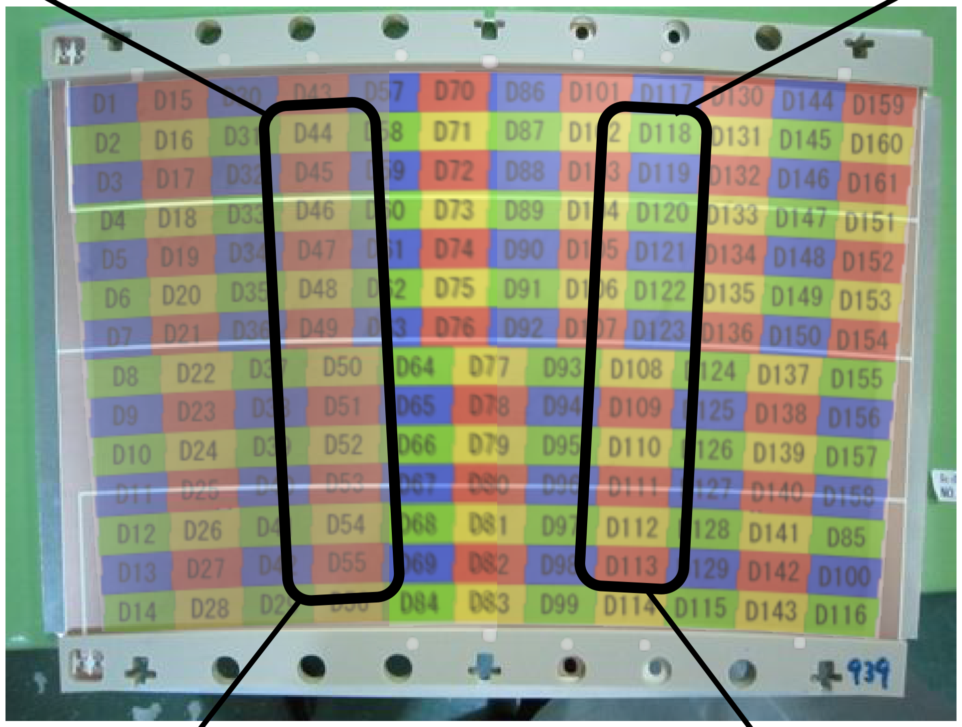
VGEMdown:315 V

2列を測定

装置内のH_2O,O_2量の変化を考慮に入れた補正を行うため、2箇所測定を行うごとに<u>参照値</u>の箇所を測定

結果：均一性

	GAIN	Resolution
D44	2807	0.15
D45	2405	0.09
D46	2302	0.10
D47	2105	0.09
D48	2163	0.09
D49	2245	0.08
D50	2365	0.08
D51	2427	0.09
D52	2554	0.13
D53	2177	0.09
D54	2293	0.08
D55	2551	0.09



	GAIN	Resolution
D118	2807	0.09
D119	2669	0.10
D120	2419	0.10
D121	2875	0.08
D122	3086	0.08
D123	2647	0.09
D108	2640	0.08
D109	2908	0.09
D110	3158	0.17
D111	2609	0.10
D112	2346	0.10
D113	2745	0.08

増幅率変化：2456±14%

増幅率変化：2752±15%

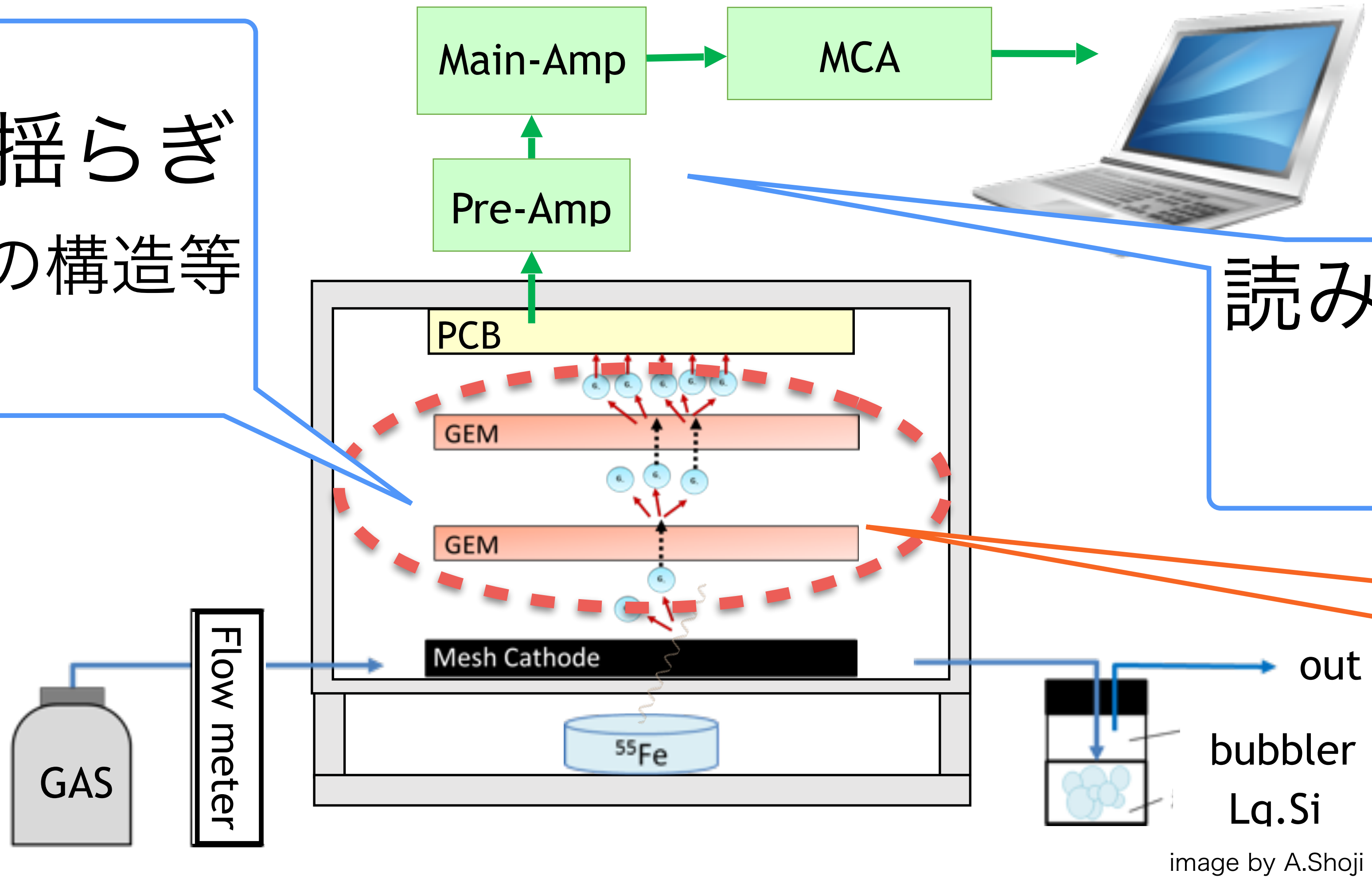
考察：均一性

GEMが均一でなくなる原因

物理で決まっていない原因で信号測定の精度が悪化している可能性がある

ガスゲイン揺らぎ

・増幅 GEM の構造等



読み出しエレキのノイズ

GEMの厚さの不均一性

GEMの厚さについて

GEM2枚で増幅率約2500倍

↓

GEM1枚で増幅率約50倍

GEM1枚で起こる電子雪崩の回数は

$2^n=50$　$5<n<6$

より5回

GEMの厚さは100μm→20μm薄くなると

増幅率が1/2になる

課題：GEMの厚さによってどれだけ増幅率が変わるかのシュミレーション

まとめと課題

DESYのビーム試験に用いる予定のGEM に対して安定動作し十分な増幅率を出せる電圧設定を理解した

- 増幅率と放電率

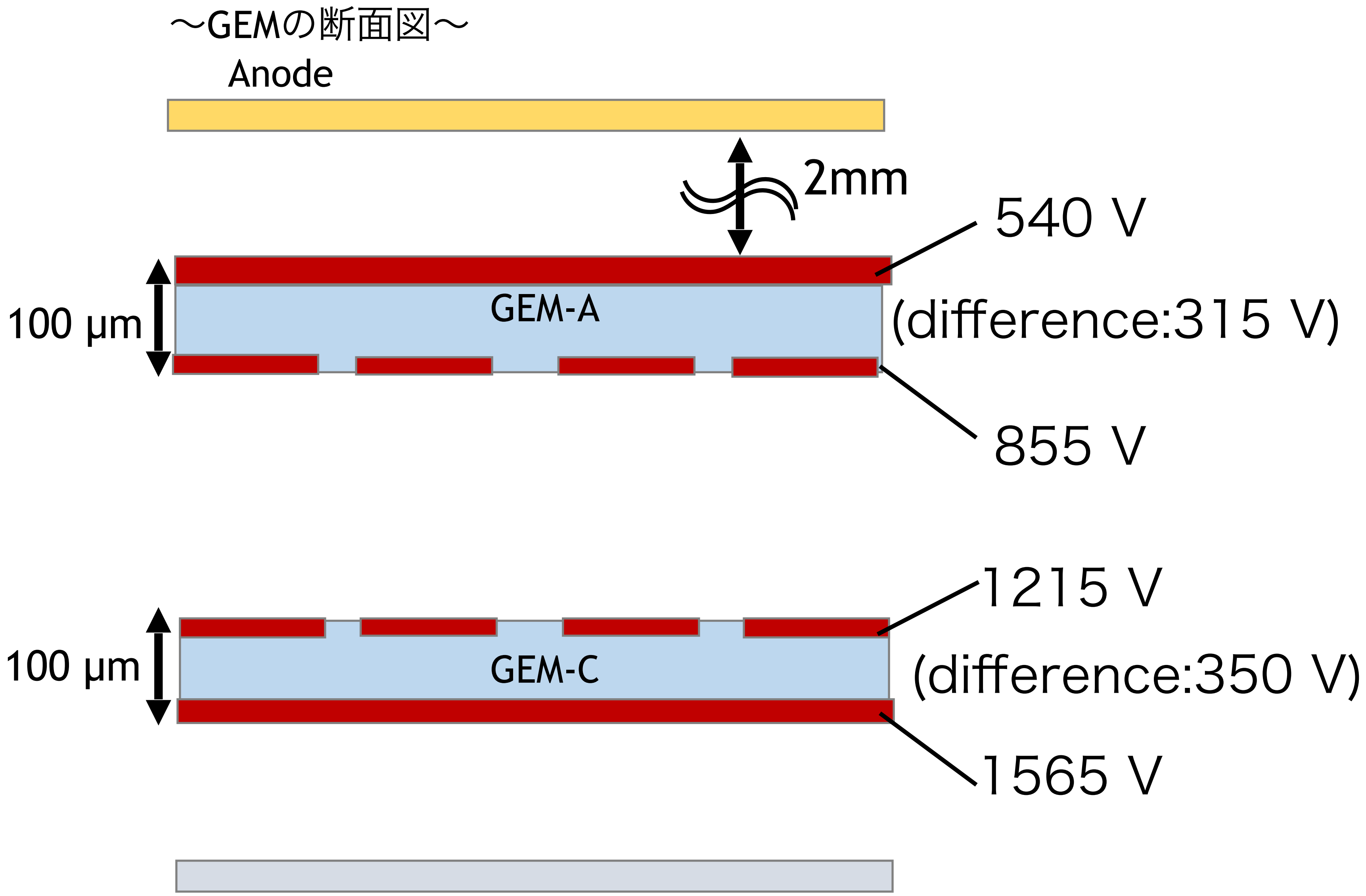
Pair2>pair1
H.V.の組み合わせ :VGEMup345V 、VGEMdown315V

- 均一性

均一性のばらつきは約15%であることが分かった

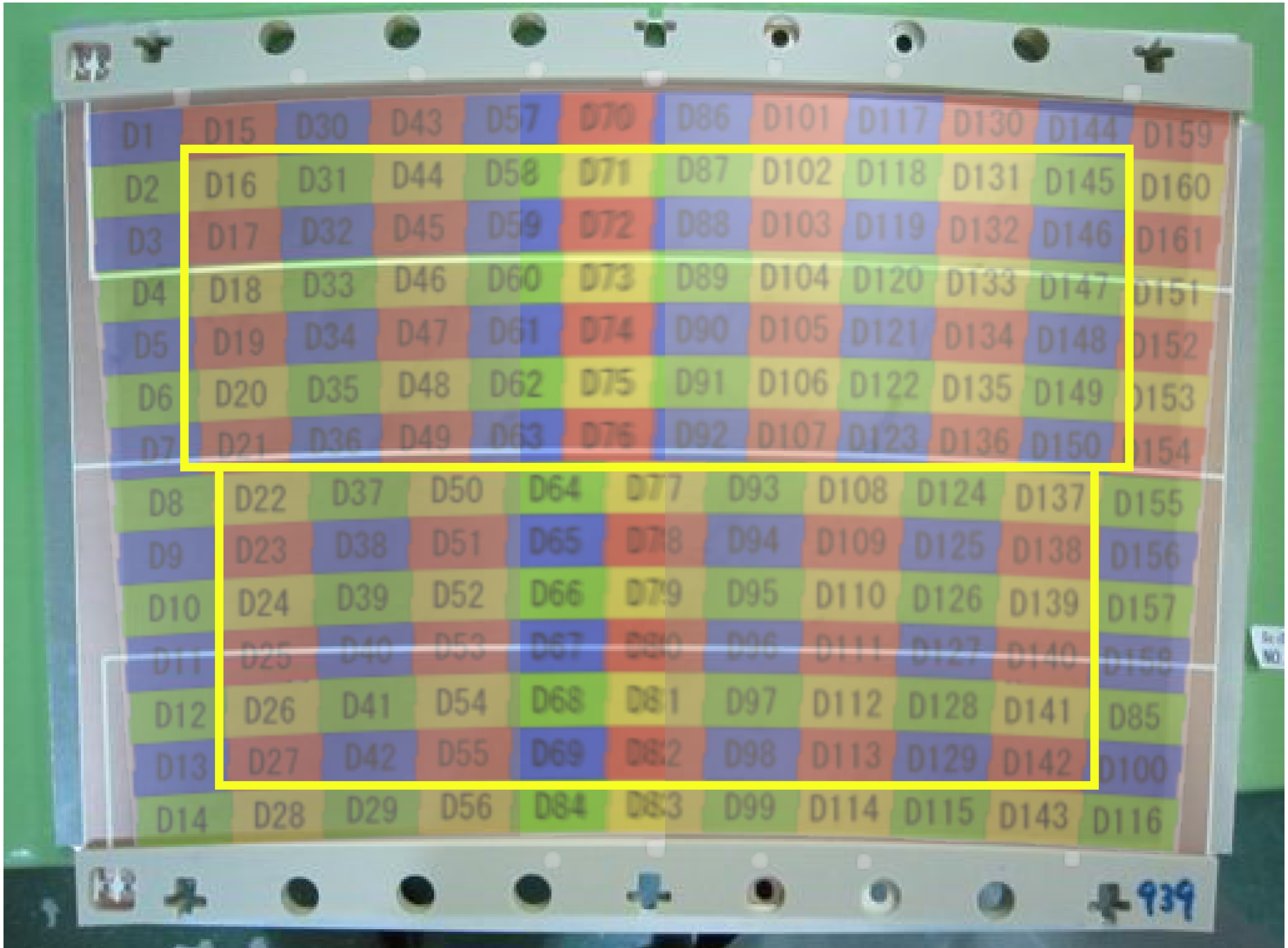
GEMが均一でないことの原因の解明が課題

Uniformity

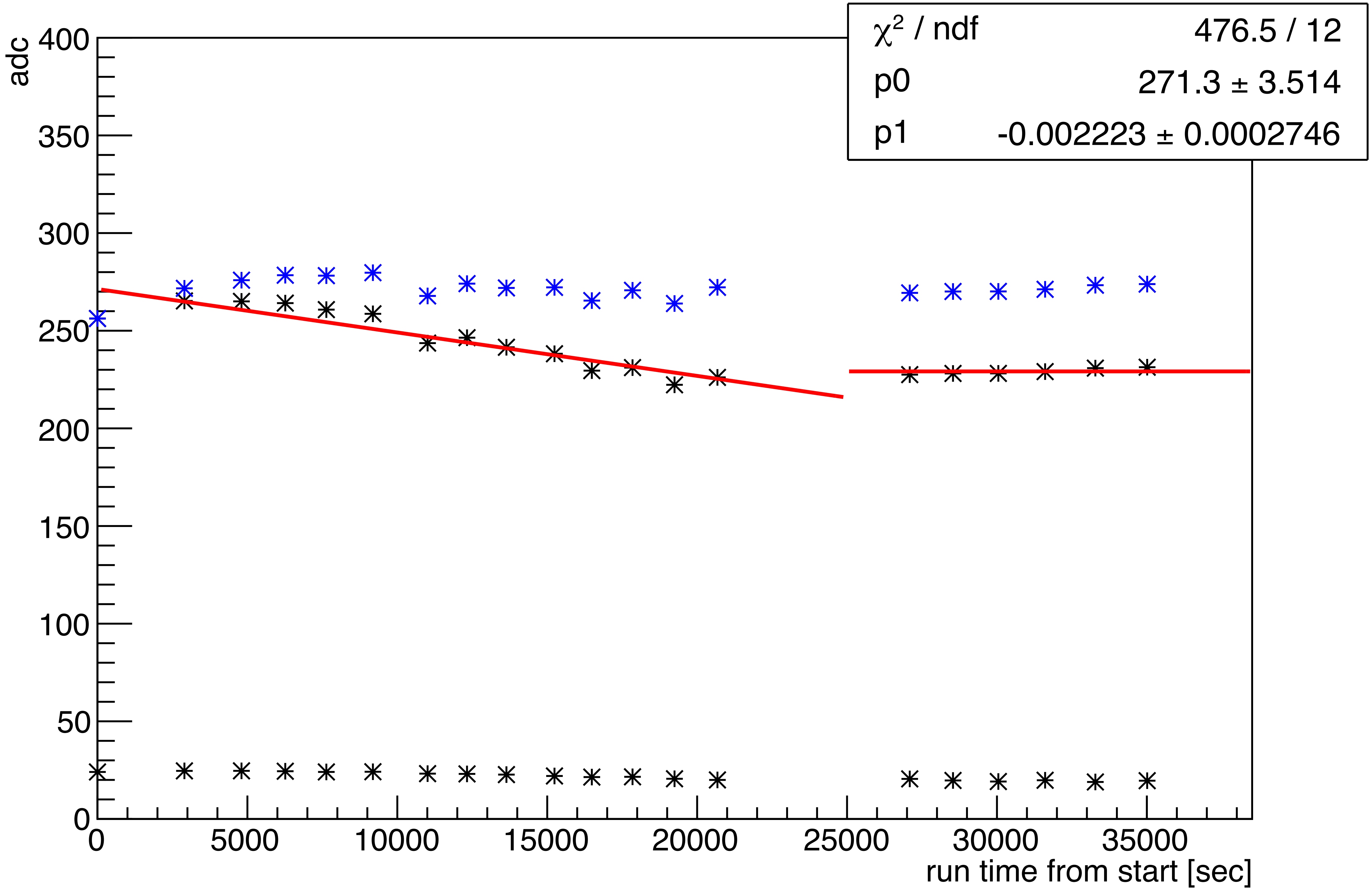


Pressure:1013
Temperature:25
O_2:27.5
H_2O:674->466

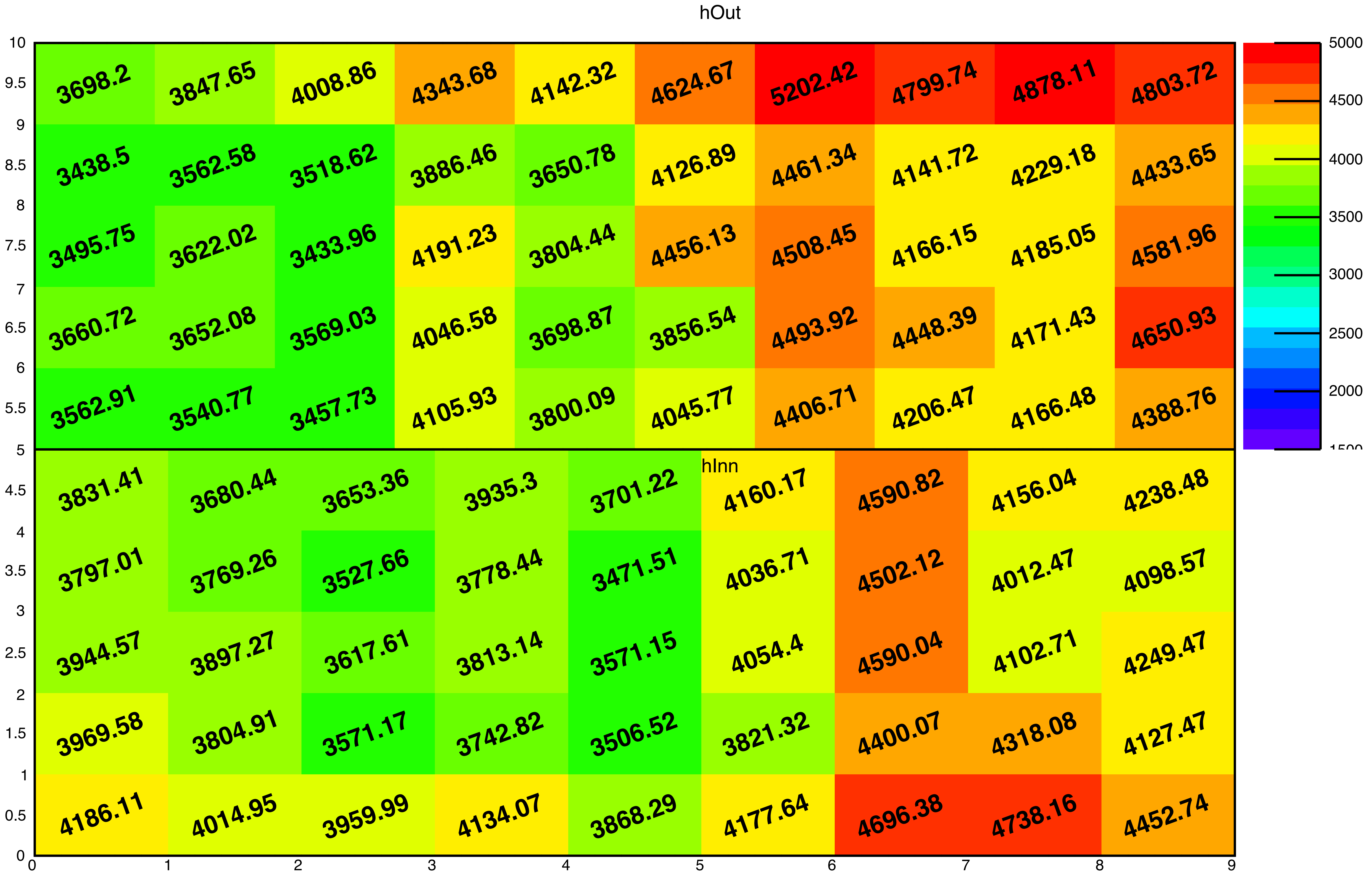
Measurement points



About correction



Uniformity



hOut
hInn
3698.2
3847.65
4008.86
4343.68
4142.32
4624.67
5202.42
4799.74
4878.11
4803.72
3438.5
3562.58
3518.62
3886.46
3650.78
4126.89
4461.34
4141.72
4229.18
4433.65
3495.75
3622.02
3433.96
4191.23
3804.44
4456.13
4508.45
4166.15
4185.05
4581.96
3660.72
3652.08
3569.03
4046.58
3698.87
3856.54
4493.92
4448.39
4171.43
4650.93
3562.91
3540.77
3457.73
4105.93
3800.09
4045.77
4406.71
4206.47
4166.48
4388.76
3831.41
3680.44
3653.36
3935.3
3701.22
4160.17
4590.82
4156.04
4238.48
3797.01
3769.26
3527.66
3778.44
3471.51
4036.71
4502.12
4012.47
4098.57
3944.57
3897.27
3617.61
3813.14
3571.15
4054.4
4590.04
4102.71
4249.47
3969.58
3804.91
3571.17
3742.82
3506.52
3821.32
4400.07
4318.08
4127.47
4186.11
4014.95
3959.99
4134.07
3868.29
4177.64
4696.38
4738.16
4452.74

Summery

- The gain of GEM pair 3 is about 3500~5000 (difference : ±22 %)
- The gain of D103~D112 is little higher than others
- I'll conduct research about GEM thickness simulation to describe non uniformity.