

J-PARCにおける 反K中間子原子核の系統的研究に用いる 円筒型ドリフトチェンバーの製作と性能評価

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻

先端量子ビーム科学研究センター

電子光物理学研究部門 クォーク核物理研究部

木村 佑斗

目次

1. 研究背景
2. J-PARC E80 実験
3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)
4. E15-CDCを用いた宇宙線測定による性能評価
5. まとめと展望

1. 研究背景

2. J-PARC E80 実験

3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)

4. 旧CDC (E15-CDC) を用いた宇宙線測定による性能評価

5. まとめと展望

1. 研究背景

新しい形態の原子核

原子核

- ・ 構成粒子：陽子 (p) , 中性子 (n) 等のバリオン
- ・ 力の媒介粒子：中間子 (π etc..)

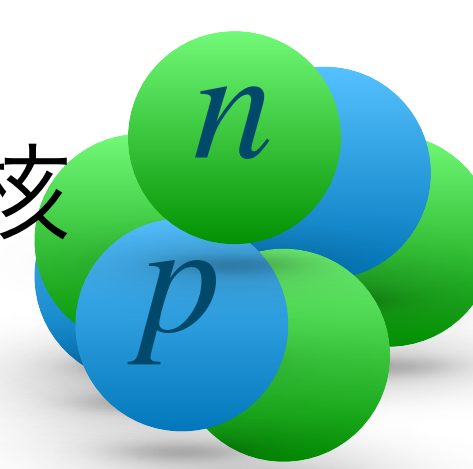
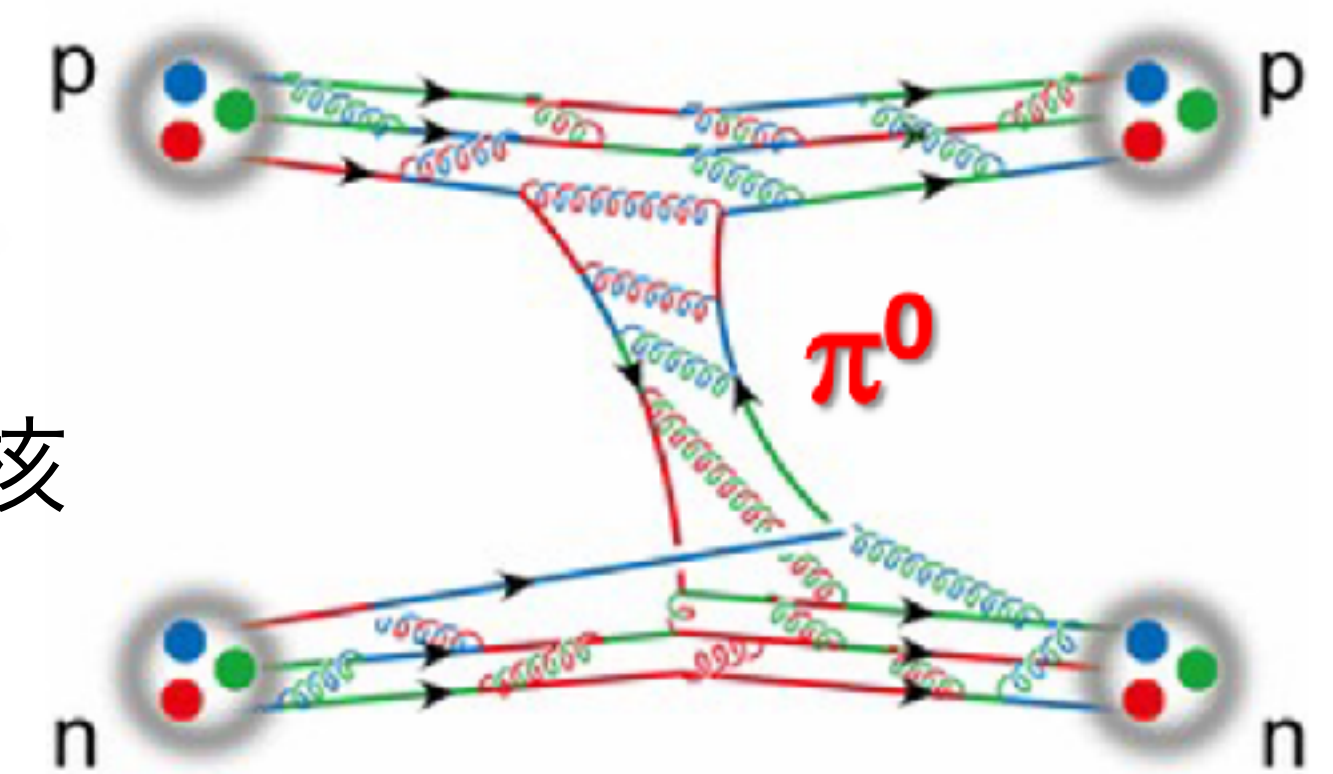
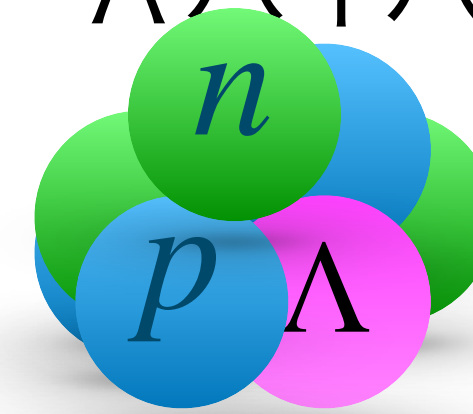
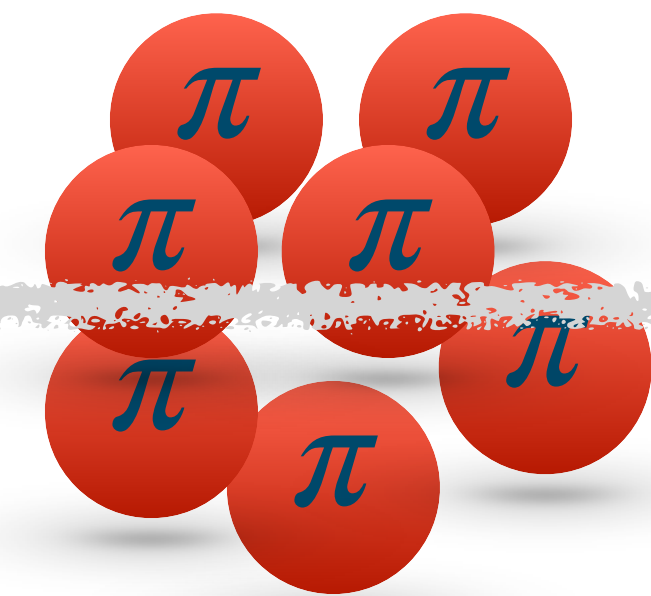
中間子

- ・ 原子核中では核子間ポテンシャルを作る仮想粒子
- ・ 真空中では固有の質量と寿命をもった実粒子として存在可能 (例 中間子ビーム)

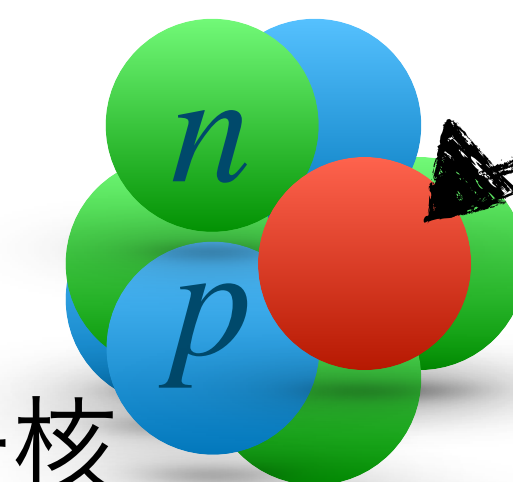
中間子が実粒子として構成粒子を担う原子核は存在するのか？

存在するならば、どんな性質なのか？

通常原子核

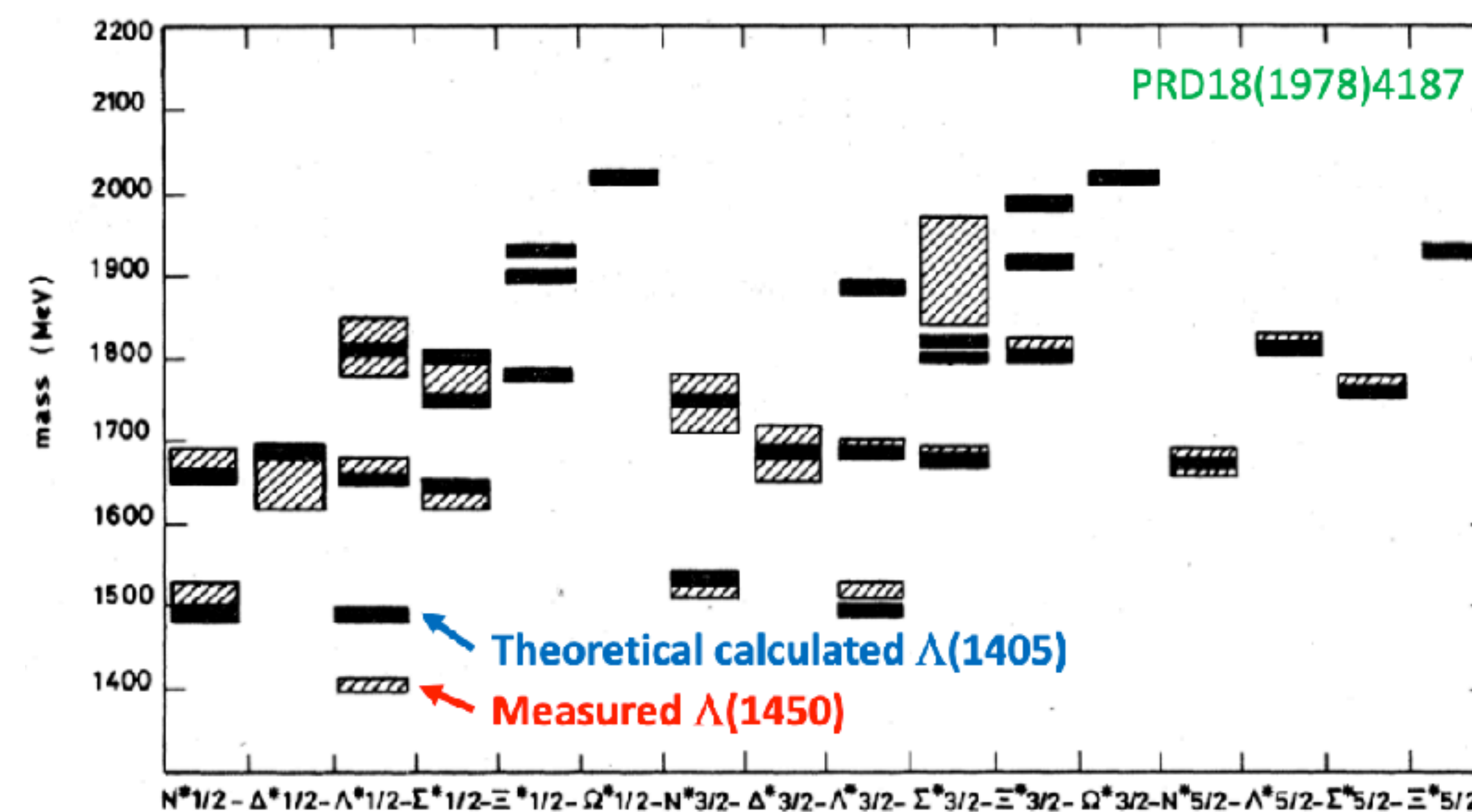
 Λ ハイパー核 π beam

“中間子”原子核

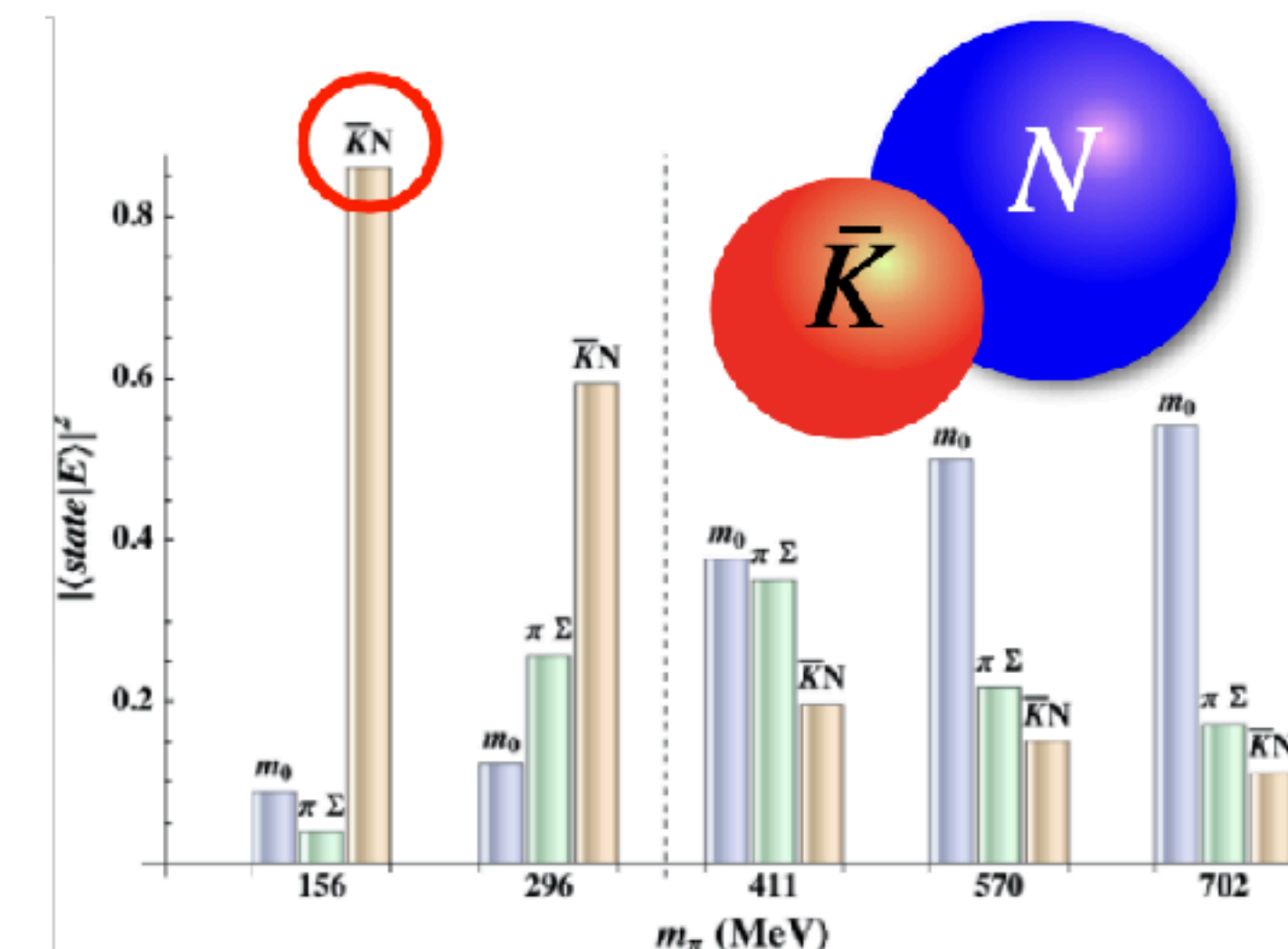


中間子

- エキゾチックハドロン $\Lambda(1405)$: $\bar{K}N$ が分子的に束縛した系??



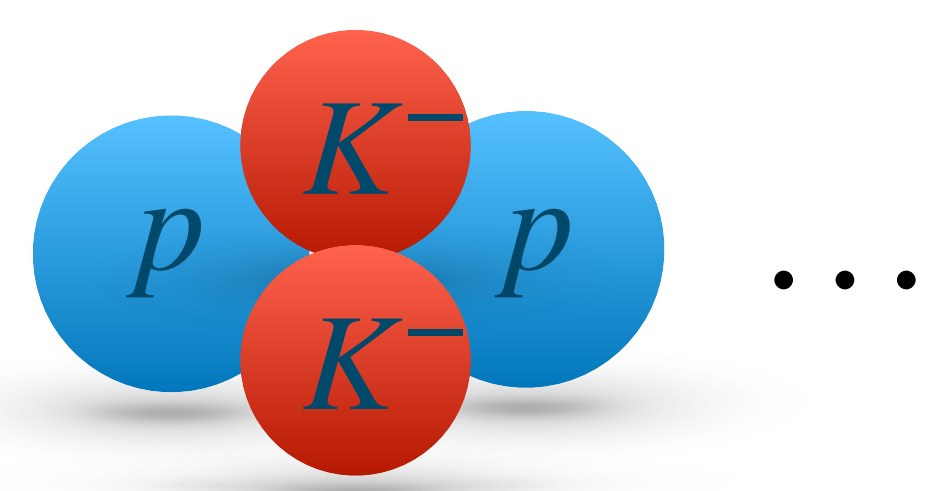
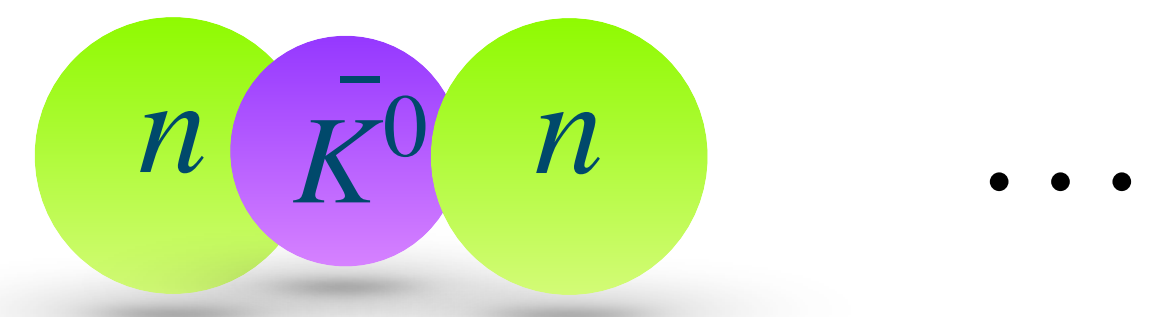
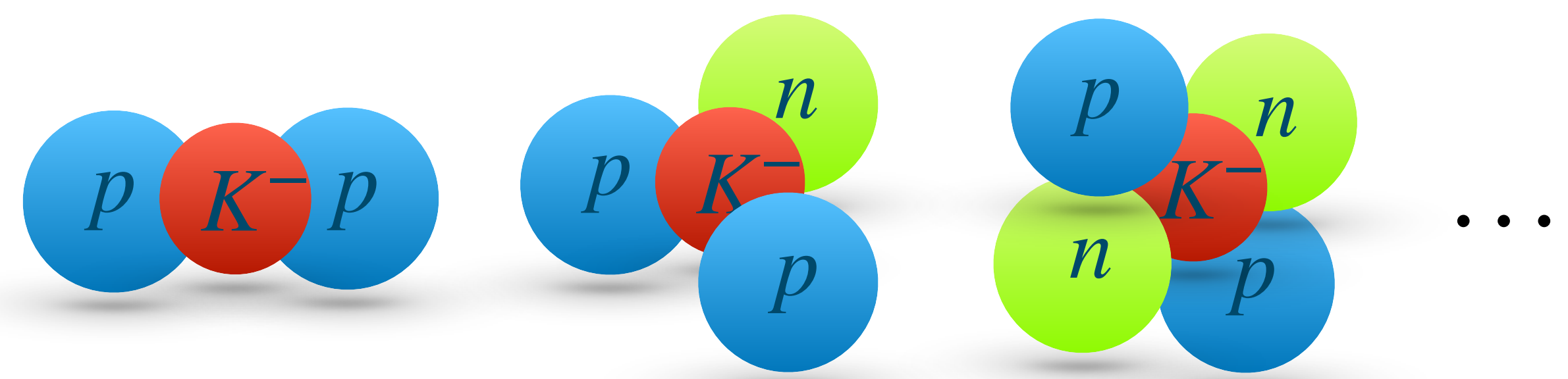
K^{bar}N molecule from Lattice QCD
PRL114(2015)132002.



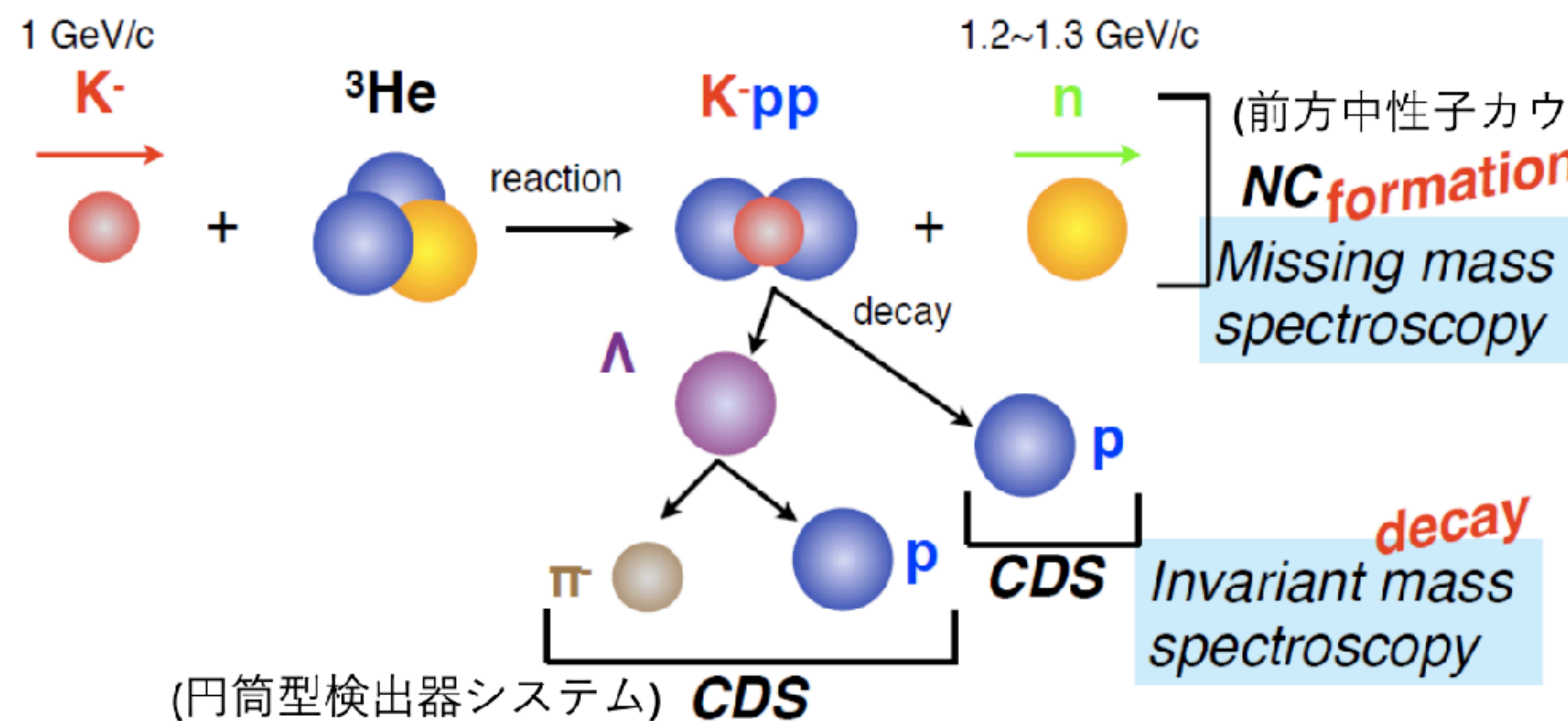
A diagram consisting of three overlapping circles arranged horizontally. The left and right circles are blue and each contains the letter N in a dark blue serif font. The middle circle is red and contains the letter $\bar{K}$ in a dark blue serif font. All three circles are contained within a larger, light gray oval background.

反K中間子原子核

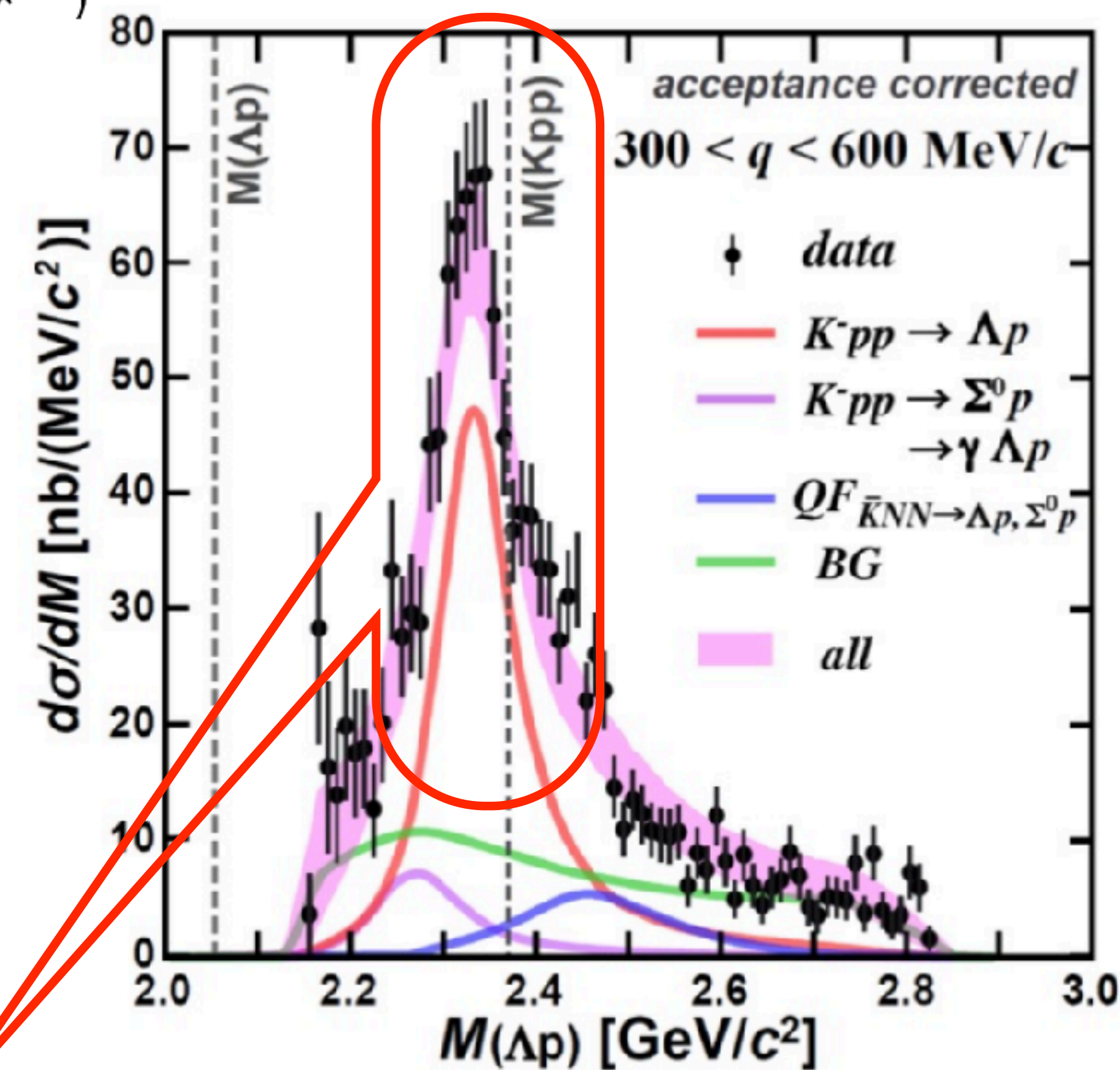
“実”反K中間子 $\bar{K}$ と核子Nが束縛した新奇な原子核



K⁻pp 探索実験 (先行研究 J-PARC E15)

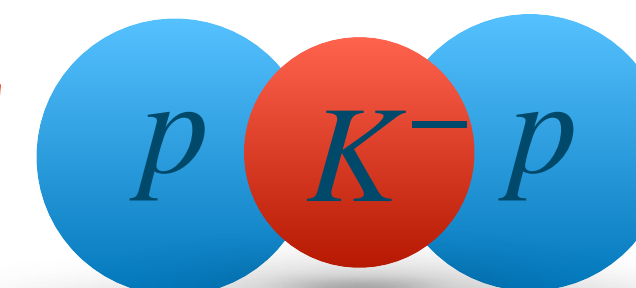


PLB789(2019)620., PRC102(2020)044002.



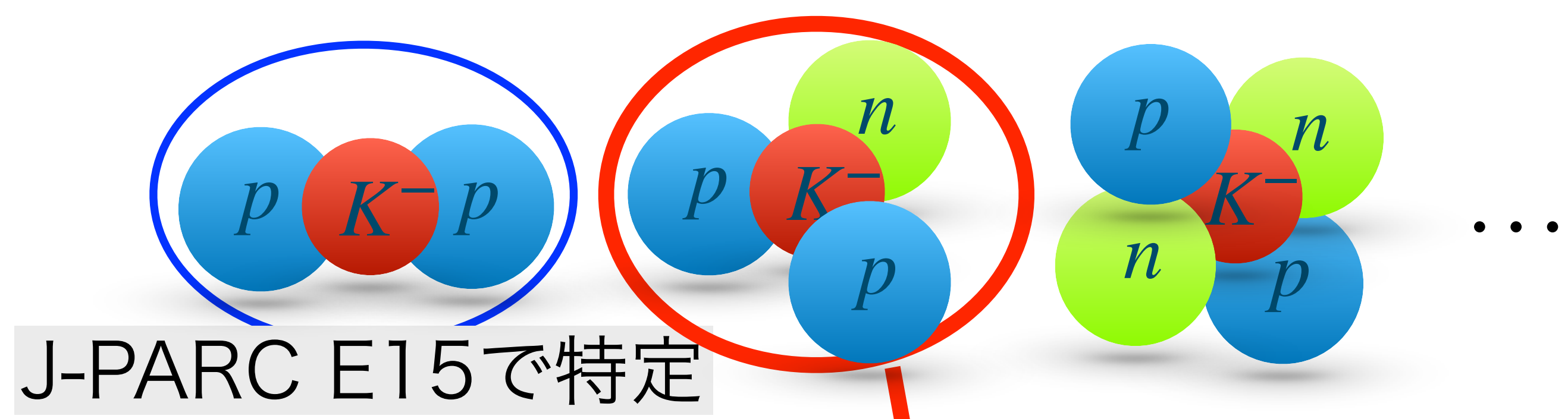
束縛エネルギー = 42 ± 3 (stat.) $^{+3}_{-4}$ (syst.) MeV
崩壊幅 = 100 ± 7 (stat.) $^{+19}_{-9}$ (syst.) MeV

反K中間子原子核K⁻ppの確固たる証拠!!!

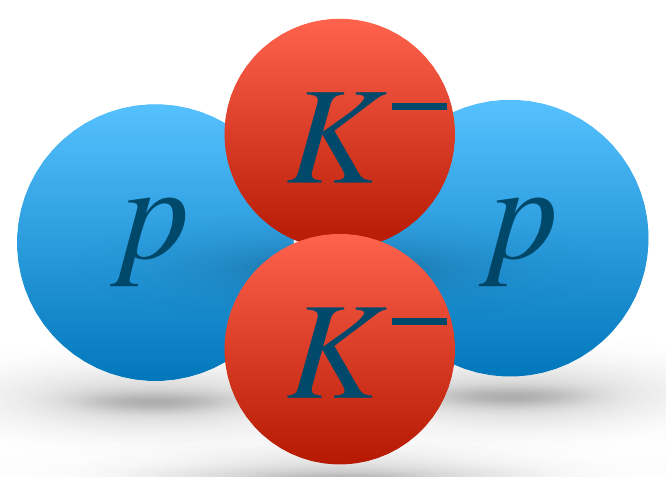
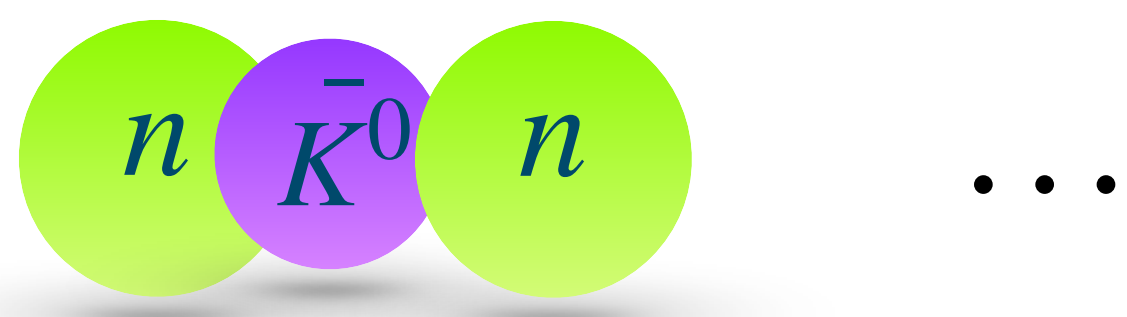


反K中間子原子核

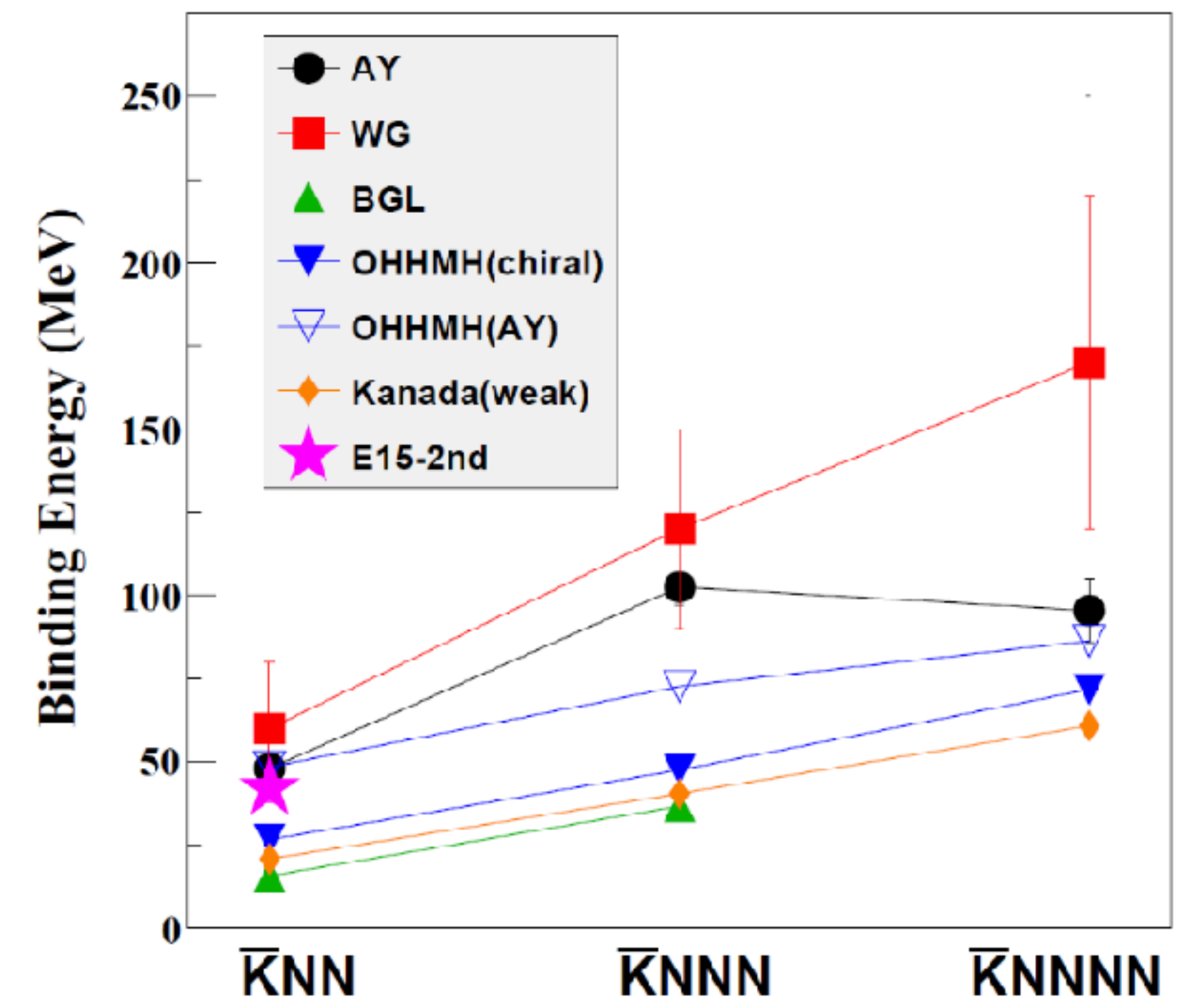
“実”反K中間子 $\bar{K}$ と核子Nが束縛した新奇な原子核



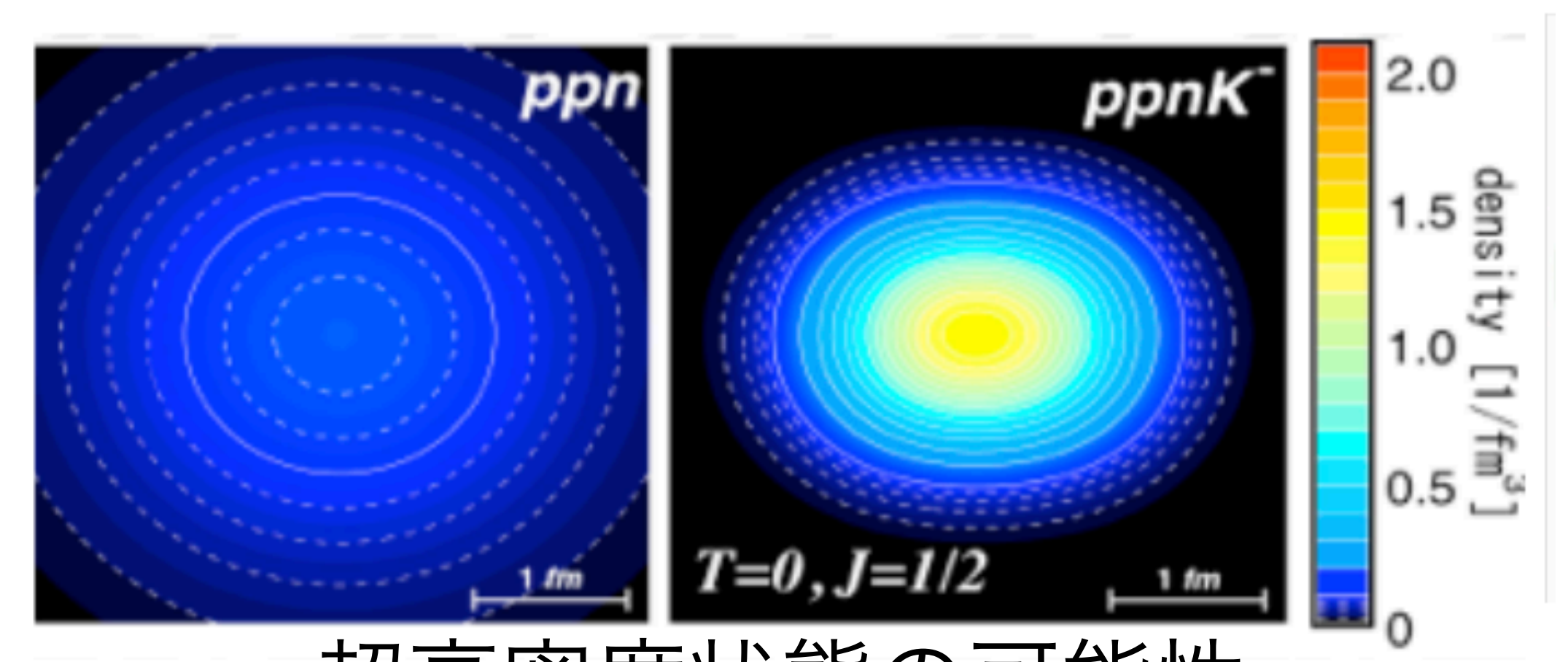
J-PARC E15で特定



次のターゲット K^-ppn
 K^-ppn 探索実験 J-PARC E80



A. Dote, H. Horiuchi, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Lett. B 590 (2004) 51



超高密度状態の可能性

1. 研究背景

2. J-PARC E80 実験

3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)

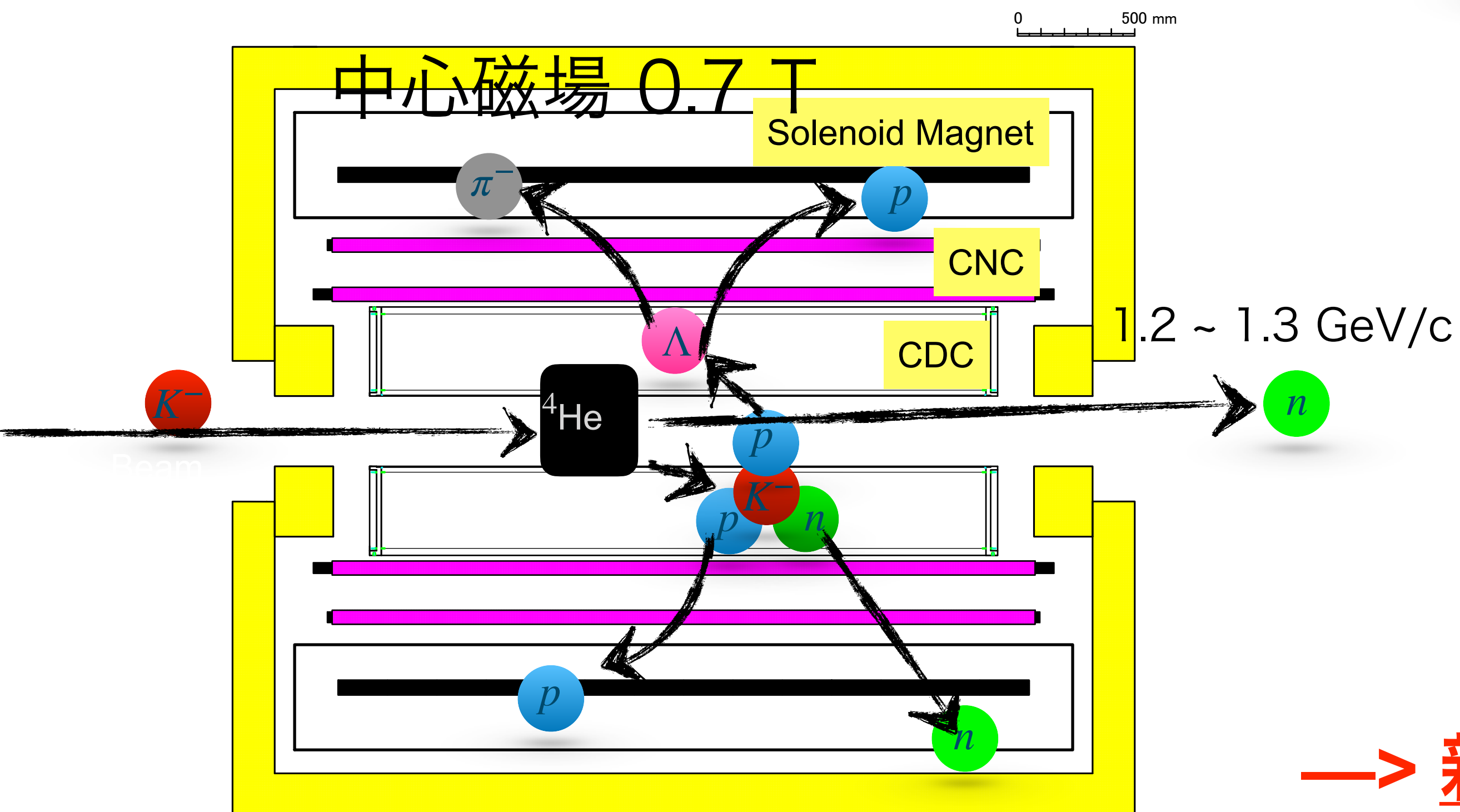
4. 旧CDC (E15-CDC) を用いた宇宙線測定による性能評価

5. まとめと展望

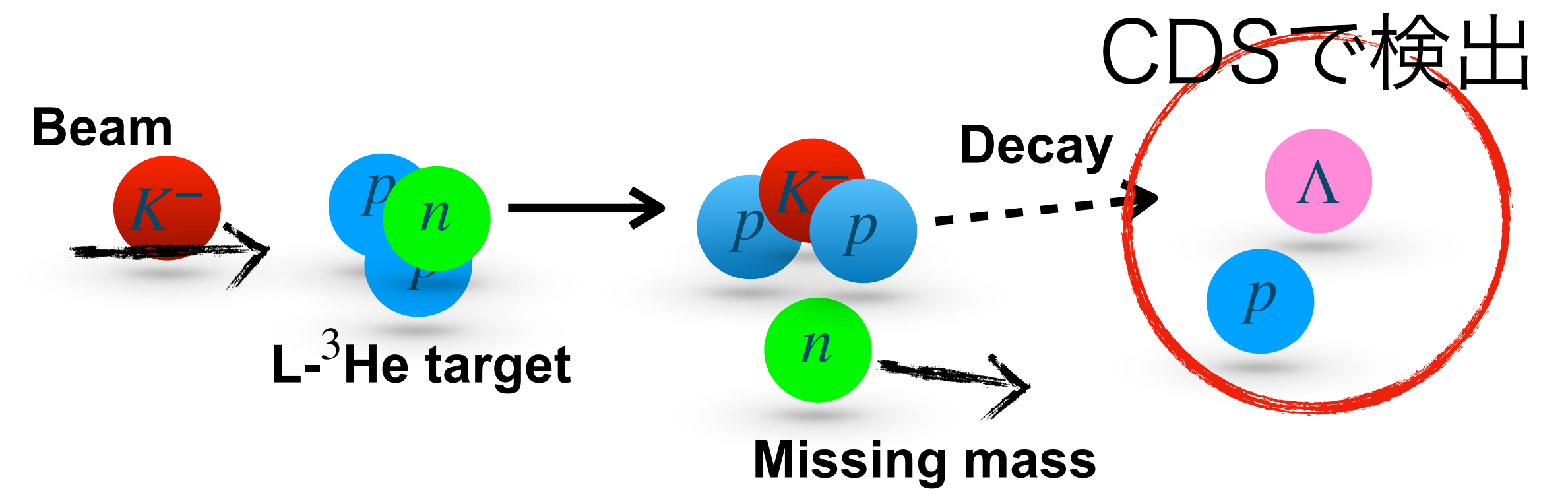
K⁻ppn探索実験

- E80実験

K^-ppn の存在の有無に決着をつけ、
その基本的性質である束縛エネルギー、
崩壊幅、崩壊分岐比を導く。



- E15では全粒子の4元運動量を完全に再構成



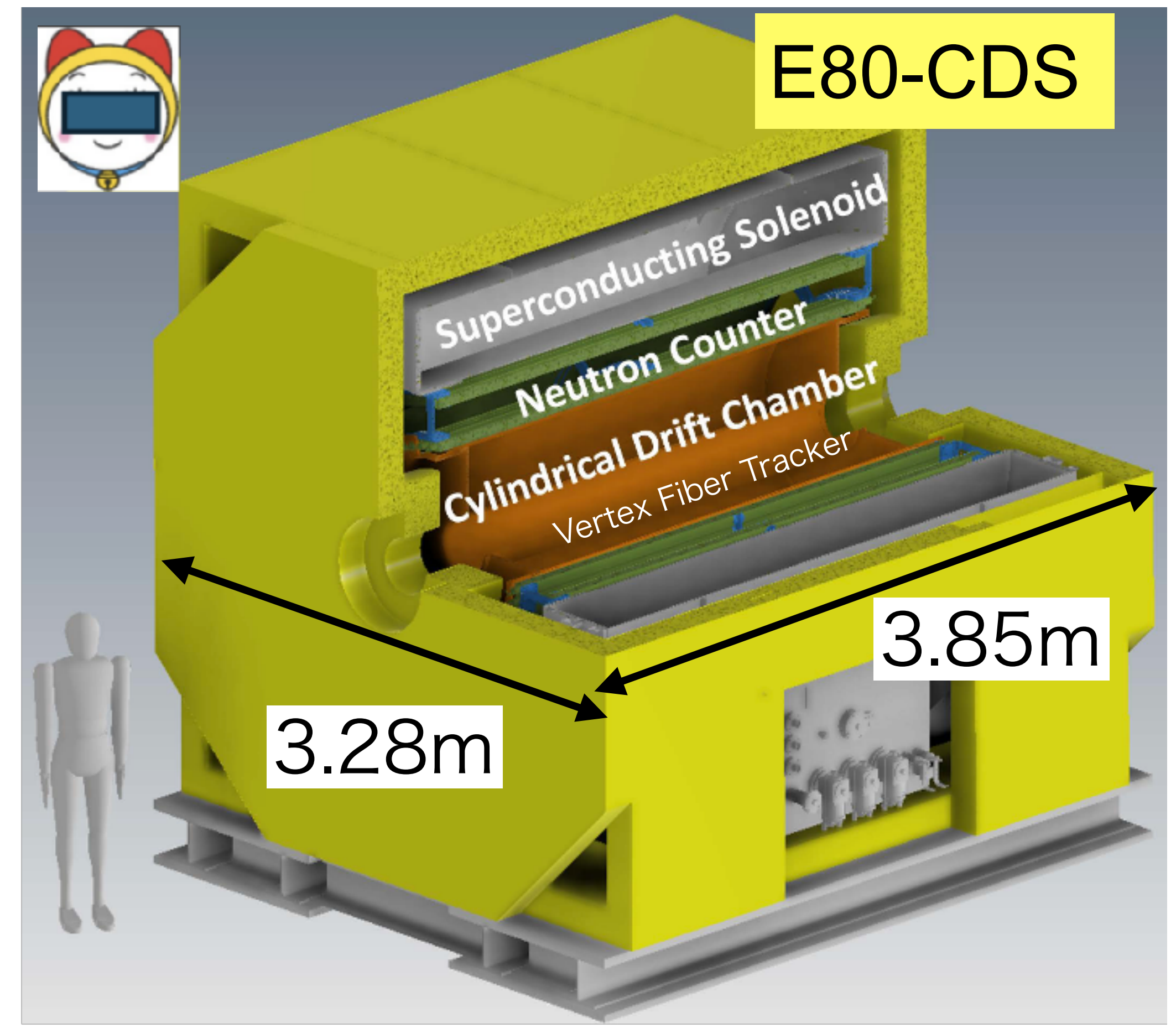
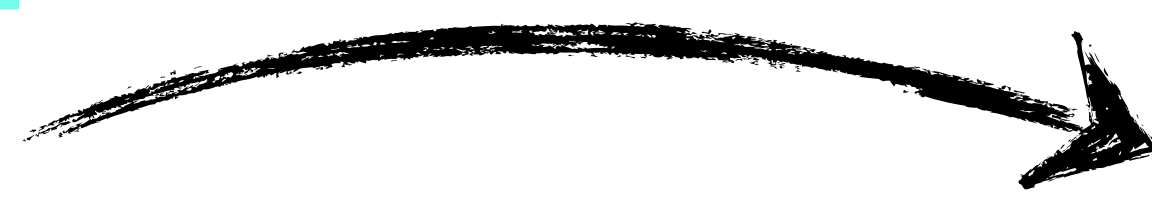
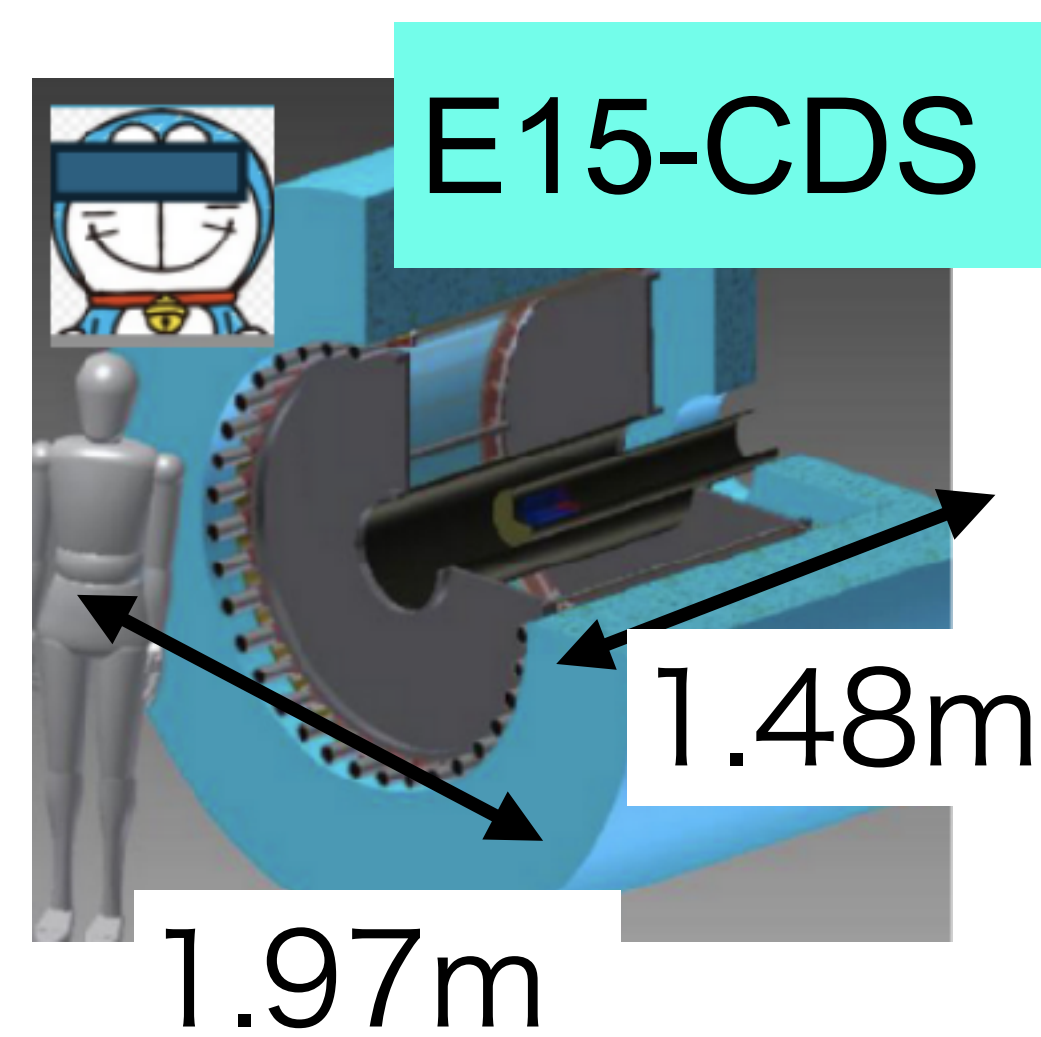
E80では、

- 検出すべき中性子が出てくる
- E15に比べ、終状態粒子数が増える

→ 新たな大立体角検出器システムを建設中

大立体角検出器システム (E80-CDS)

反K中間子原子核からの全ての崩壊粒子の検出



大立体角検出器システム (E80-CDS)

反K中間子原子核からの全ての崩壊粒子の検出

Vertex Fiber Tracker :

- ・崩壊点決定の精密化

円筒型ドリフトチェンバー

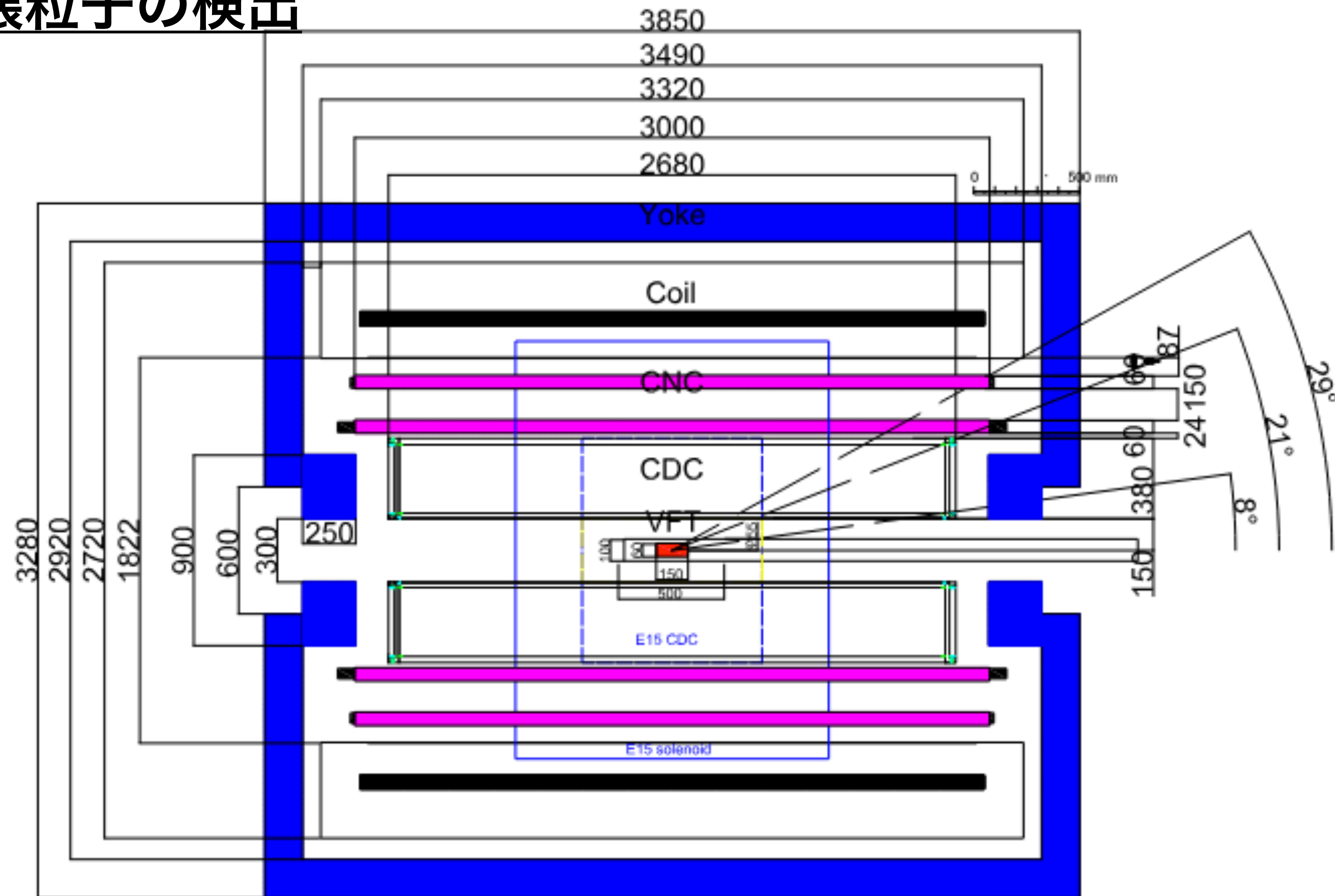
Cylindrical Drift Chamber (×Solenoid Magnet) :

- ・飛跡の曲率から運動量解析

円筒型中性子カウンター

Cylindrical Neutron Counter :

- ・トリガー
- ・TOFによる粒子識別
- ・中性子検出



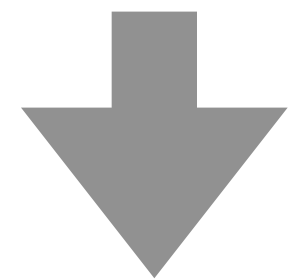
大立体角検出器システム (E80-CDS)

反K中間子原子核からの全ての崩壊粒子の検出

CDC長手方向に3倍。

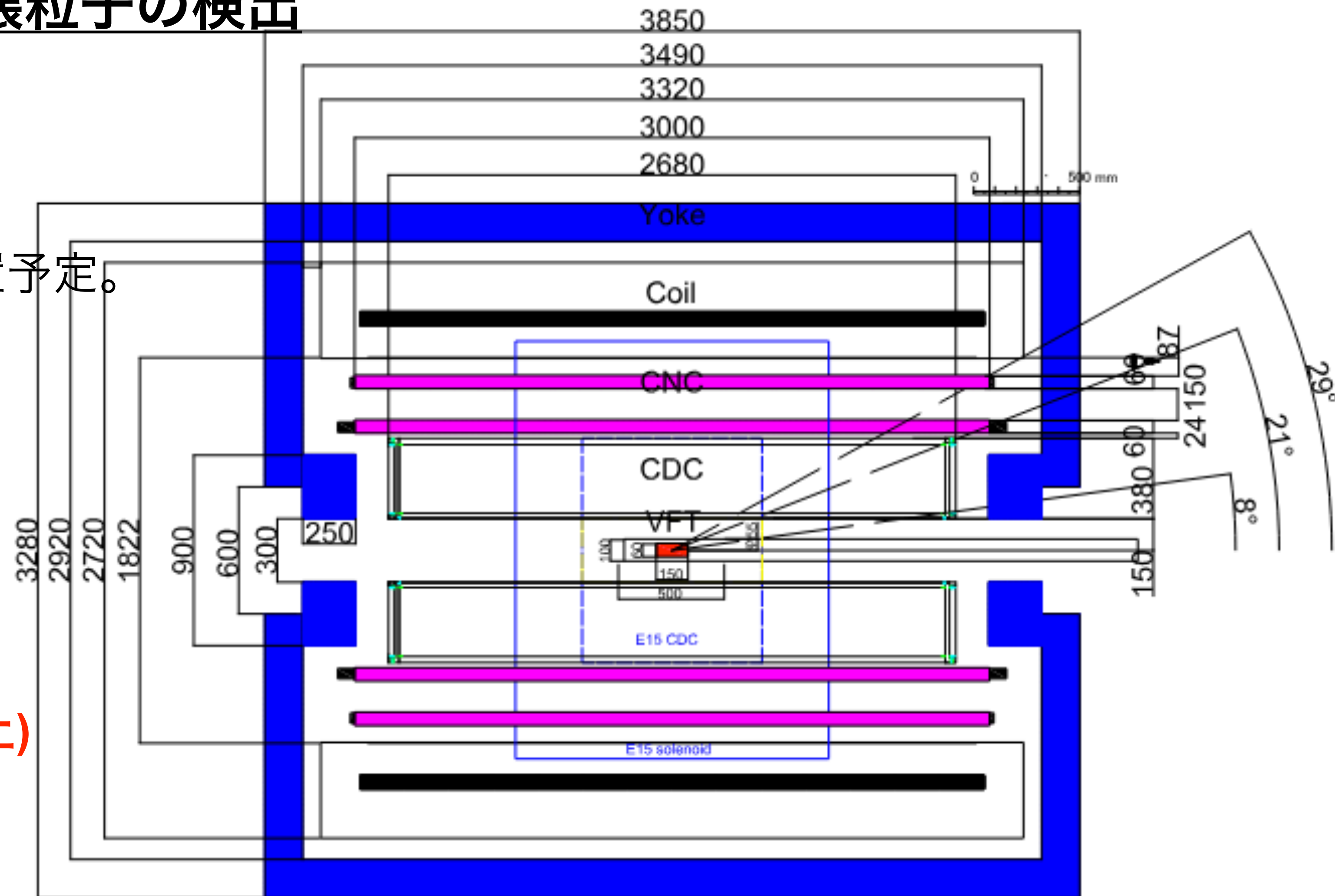
CNCの厚さを4倍に。

CDCの前後方にも中性子カウンター設置予定。



改良点： E80-CDS は E15-CDS よりも

- 1.6 倍の立体角 (59% → 93%)
- 4倍の中性子検出能力 (3% → 12%以上)



本研究：CDCに使うガスの決定とその性能評価

目次

1. 研究背景

2. J-PARC E80 実験

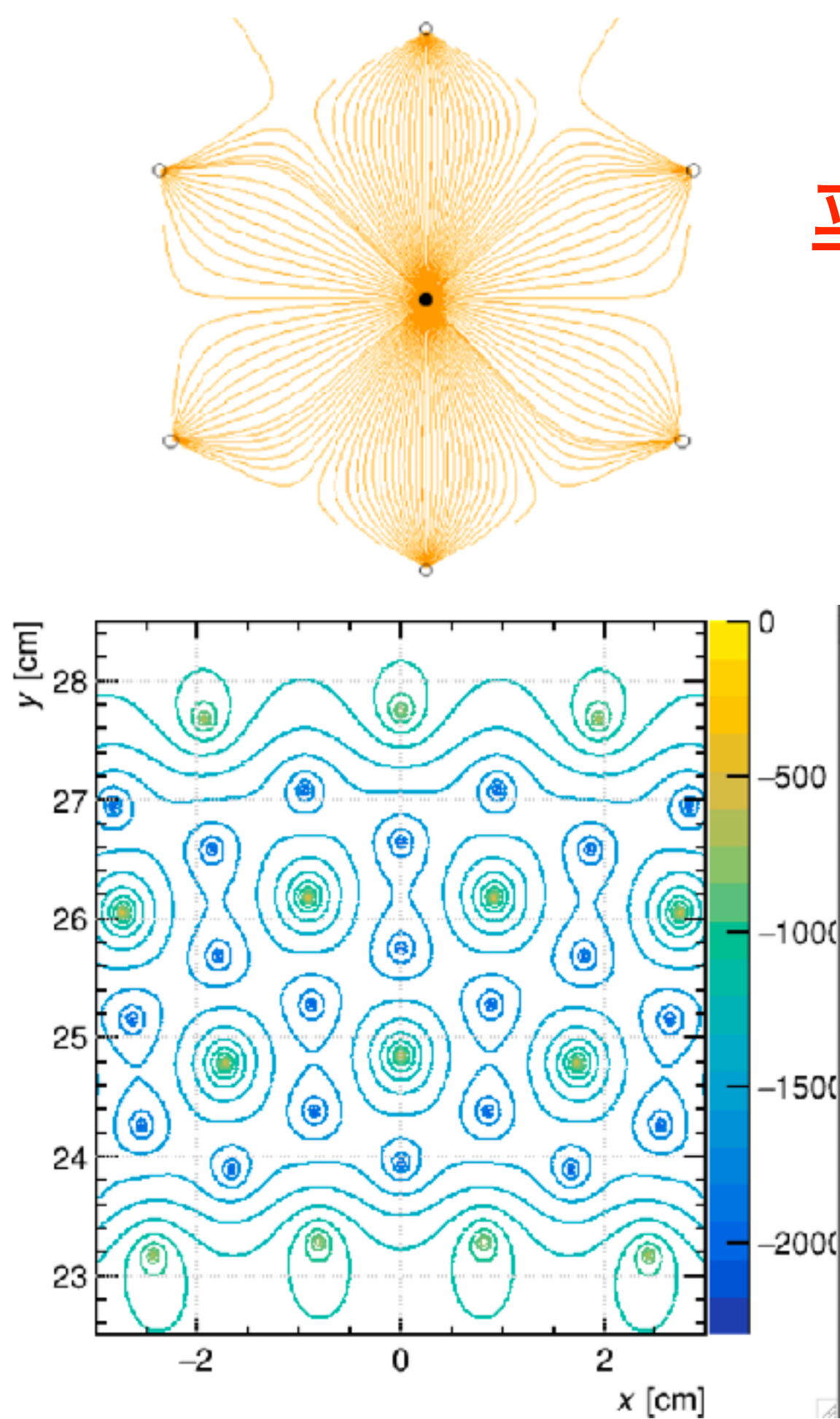
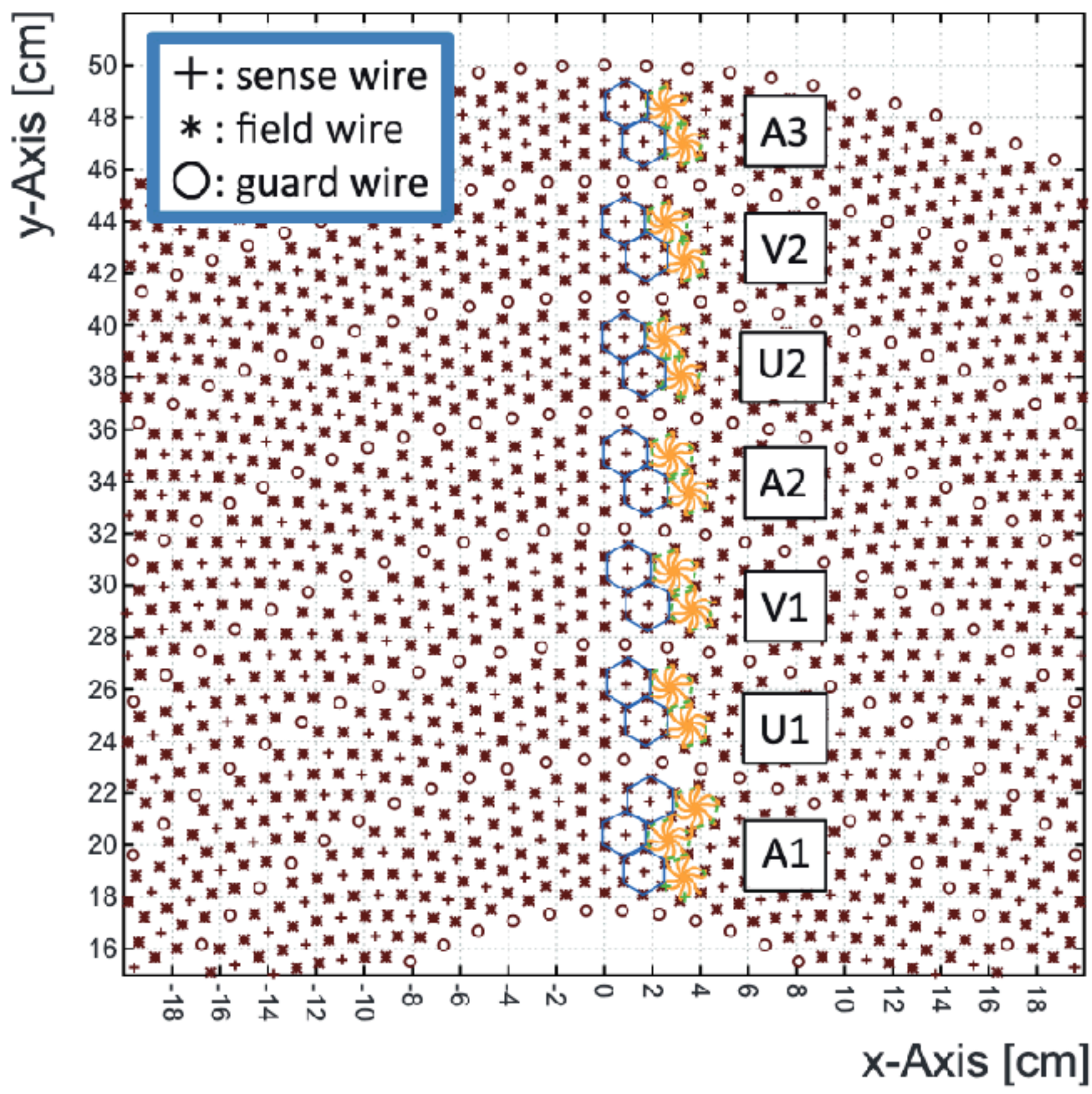
3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)

4. 旧CDC (E15-CDC) を用いた宇宙線測定による性能評価

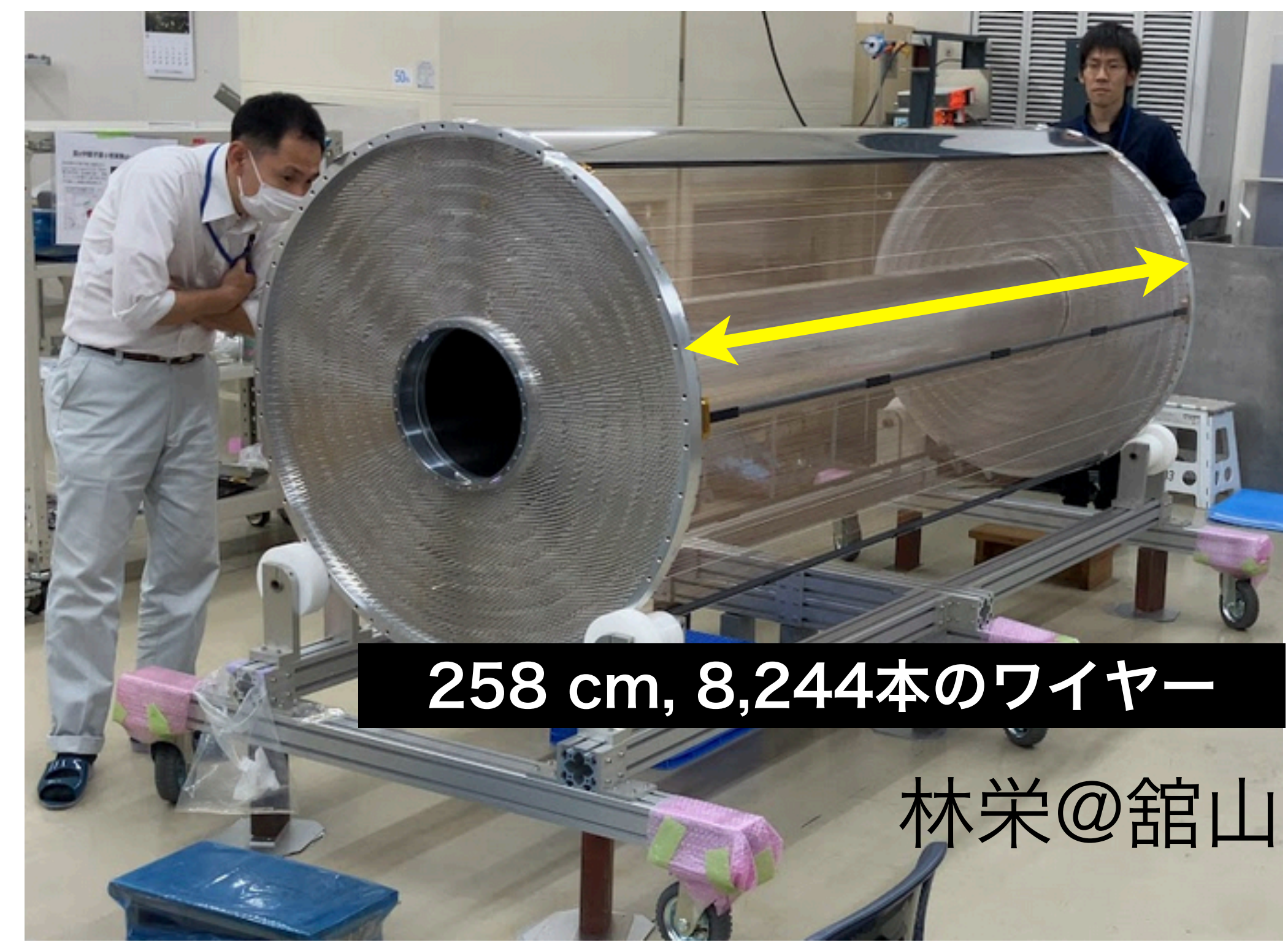
5. まとめと展望

基本構造

セル	ワイヤー	ワイヤー数	半径 (Beam軸垂直)	長さ (Beam軸方向)
六角形 15層	Au-W (Be-Cu) φ 30 μm (80 μm)	1,816 (6,428)	15 cm (内径) , 53 cm (外径)	258 cm
				85 cm



E15-CDC →
立体角を稼ぐため、ワイヤー長をE15-CDCの3倍



林栄@舘山

信号読み出しの流れ

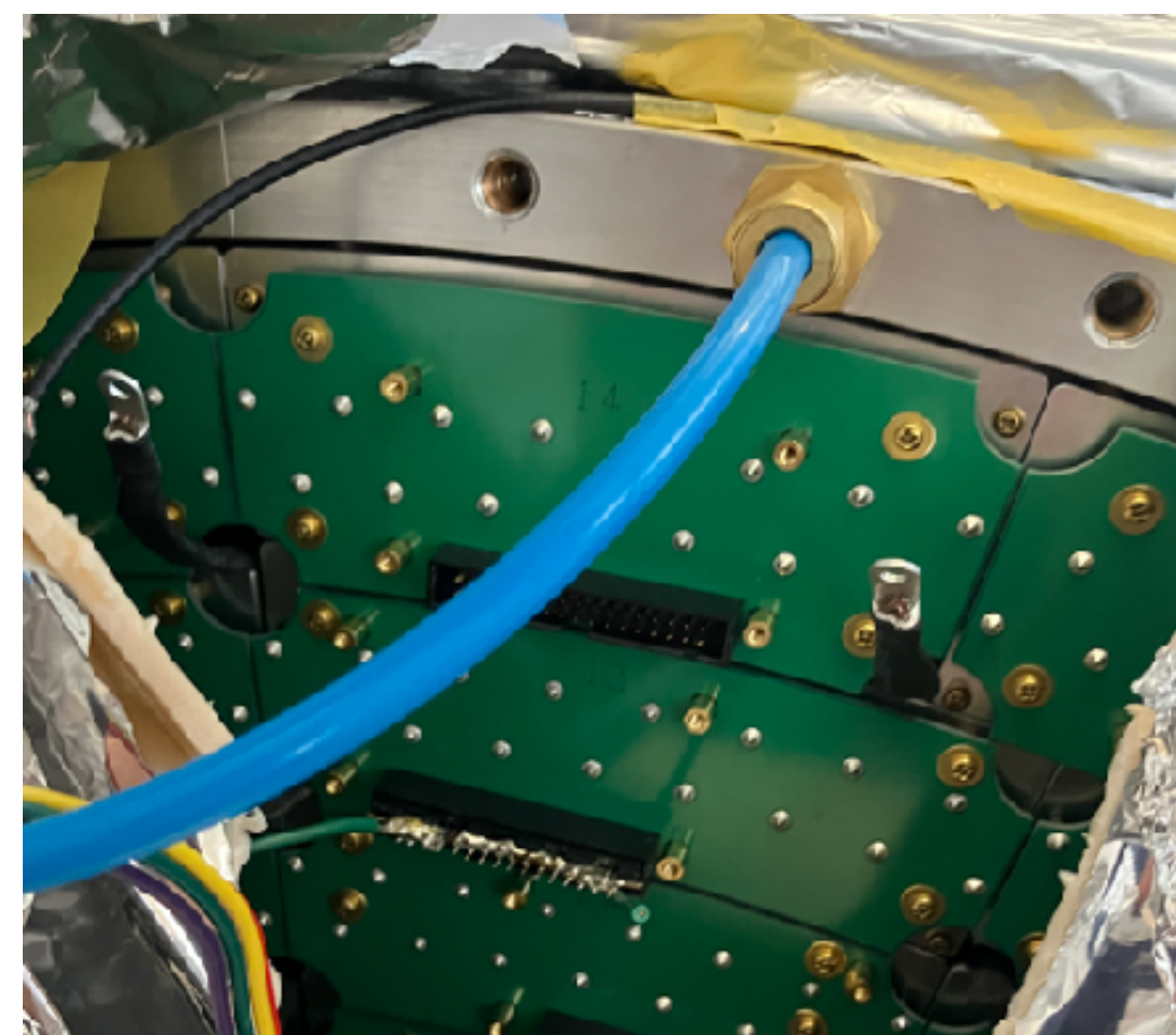
ASD (SONY CXA3653Q):

Amplifier-**S**haper-**D**iscriminator

- ・ 16 ch
 - ・ 積分時間 16 ns
 - ・ pre-amp ~ 0.8 V/pC, main-amp Gain = 7
- logic signalに。

マルチヒットTDC :

- ・ HUL (Hadron Universal Logic Module)
 - ・ 1.2 GHz clockで時間測定
 - ・ TDC精度 0.833 ns
 - ・ 最大16 Hits / event
 - ・ Leading / Trailing両対応
- Time over Threshold (ToT)も取得可能



センスワイヤー (フィードスルー) → 変換基板 → ASDカード → マルチヒットTDC

充填ガスについて

実験	容積	充填ガス
J-PARC E15	700 L	Ar-C2H6 (50:50)
J-PARC E80	2093 L	??

世界的に使われているチェンバーガス

Detector	Gas Mixture	Comment
PHENIX	Ar/C2H6(50/50)	Barrel
CLAS	Ar/CO2(90/10)	Barrel
CLAS12	Ar/CO2(90/10)	Plane
CDM-3	Ar/iC4H10(80/20)	CDC
FOPI	Ar/CH4/iC4H10(88/10/2)	CDC
H1	Ar/C2H6(50/50)	CDC(jet-chamber)
E15, E325	Ar/C2H6(50/50)	CDC

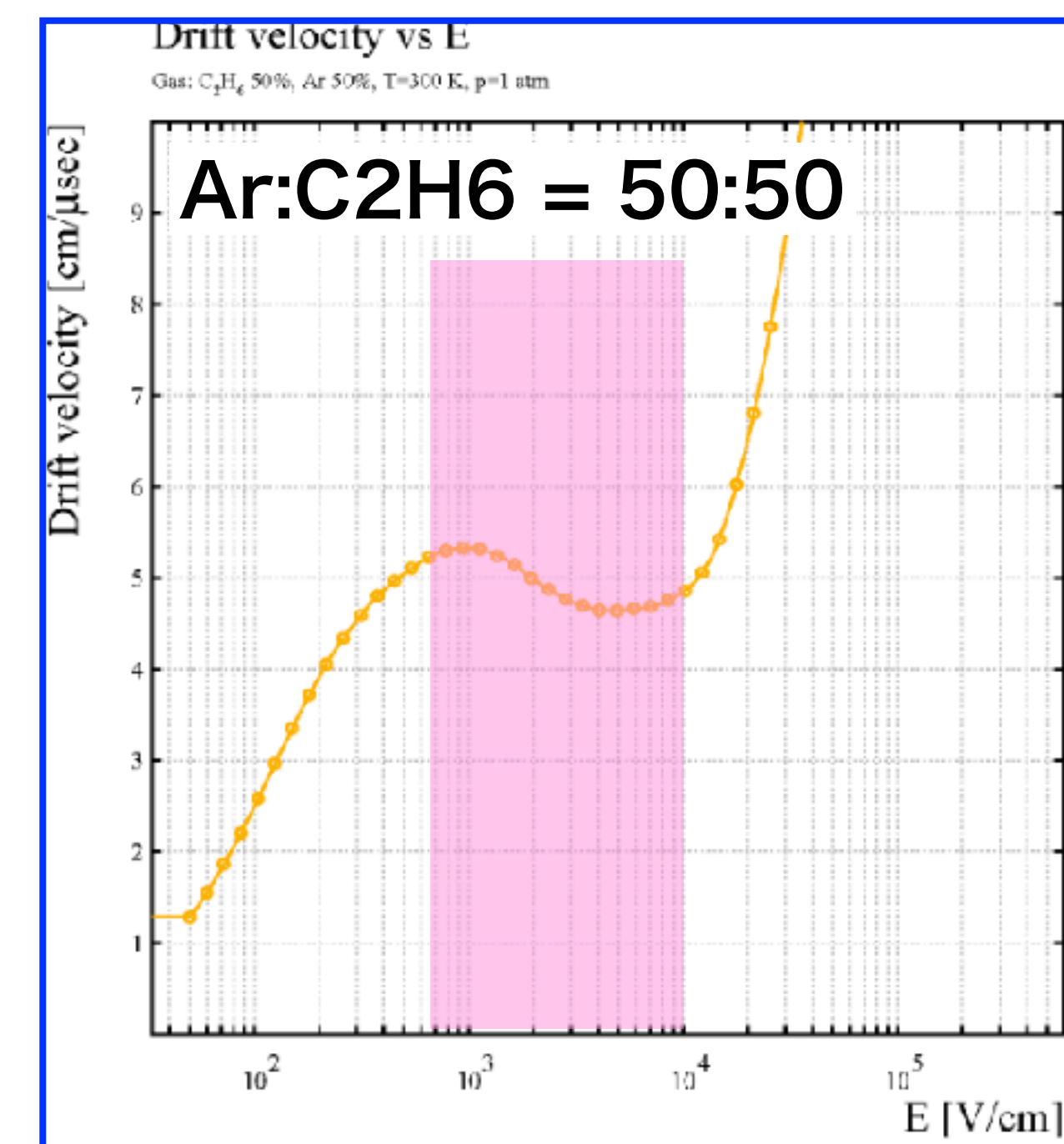
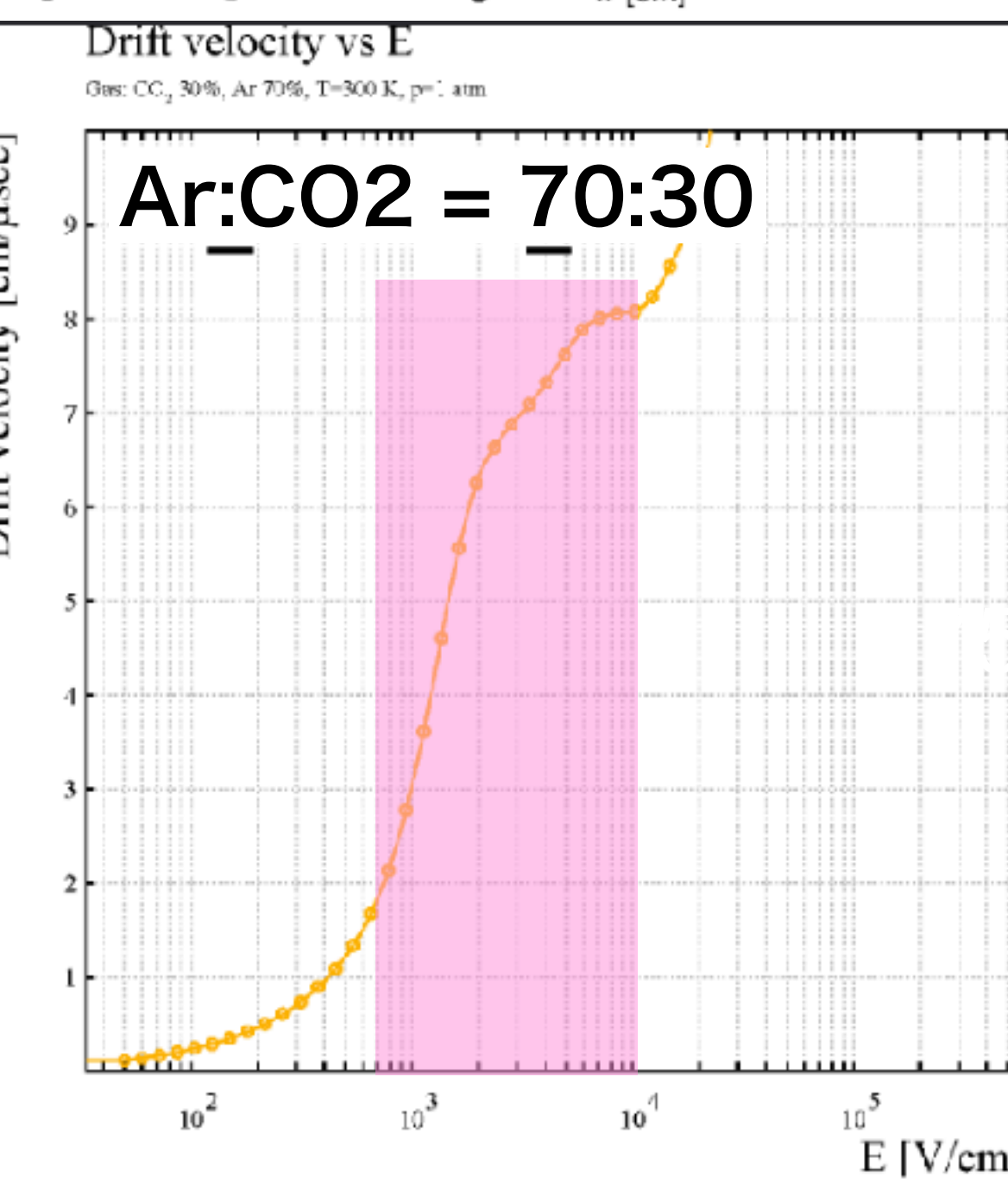
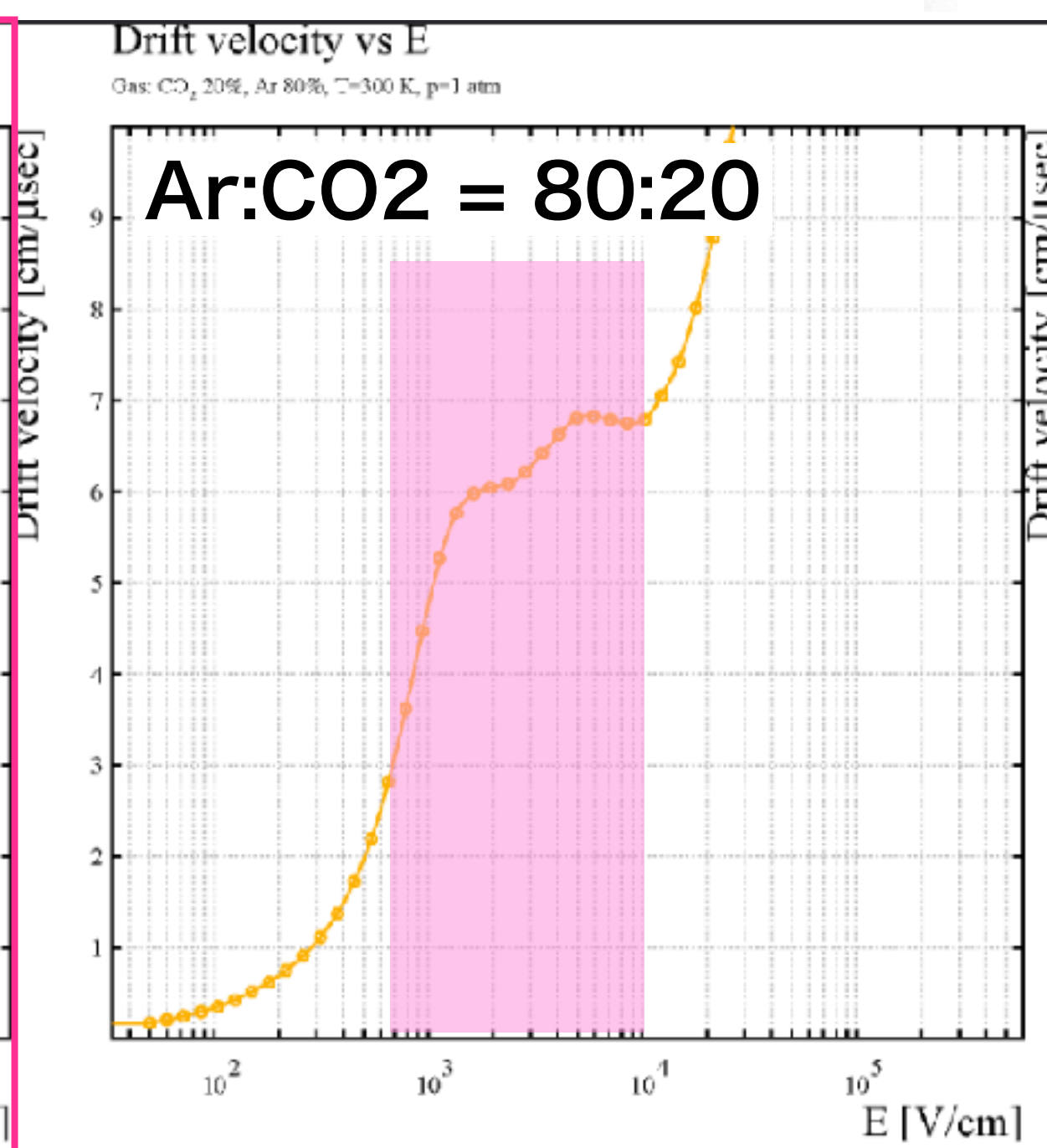
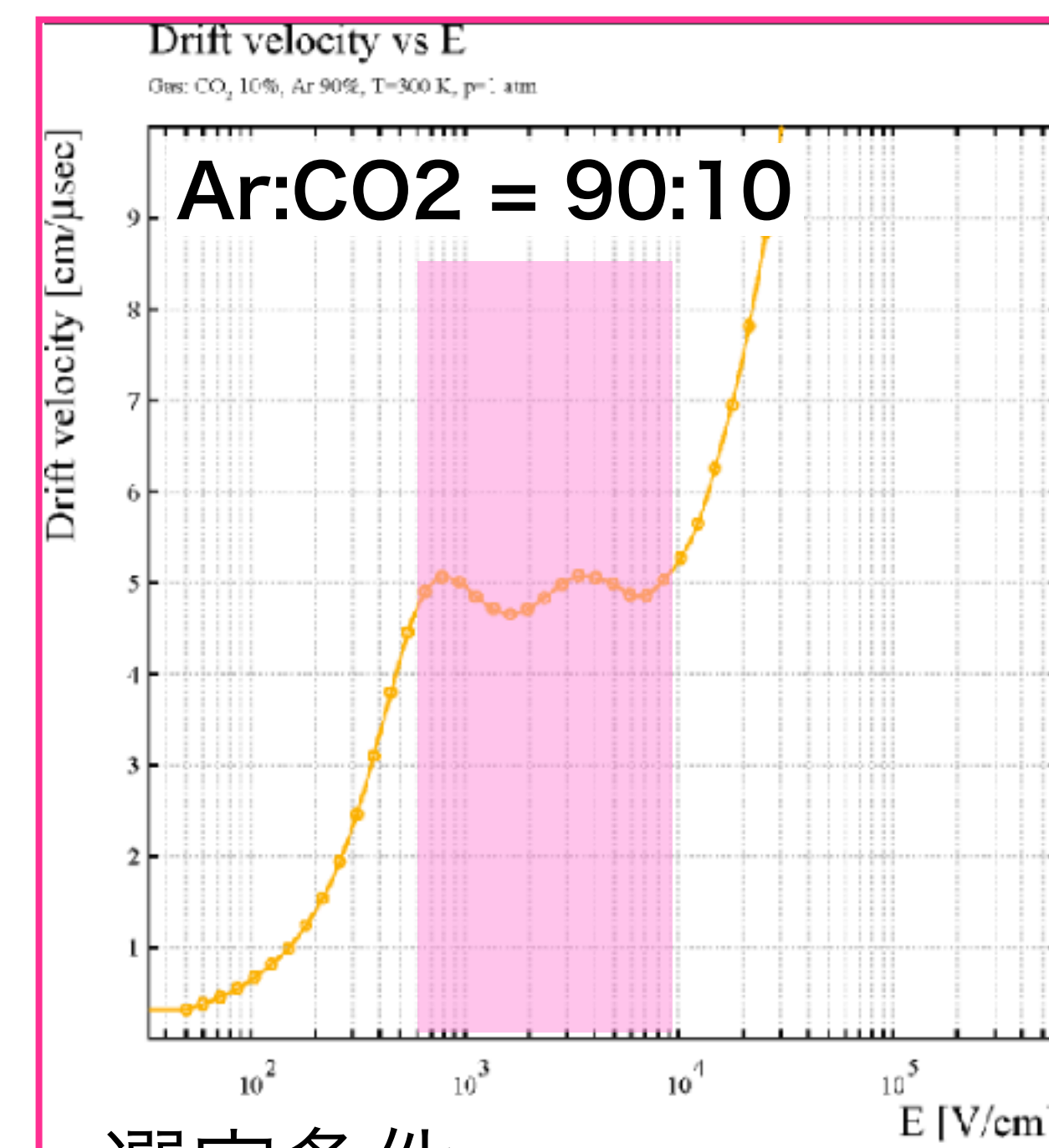
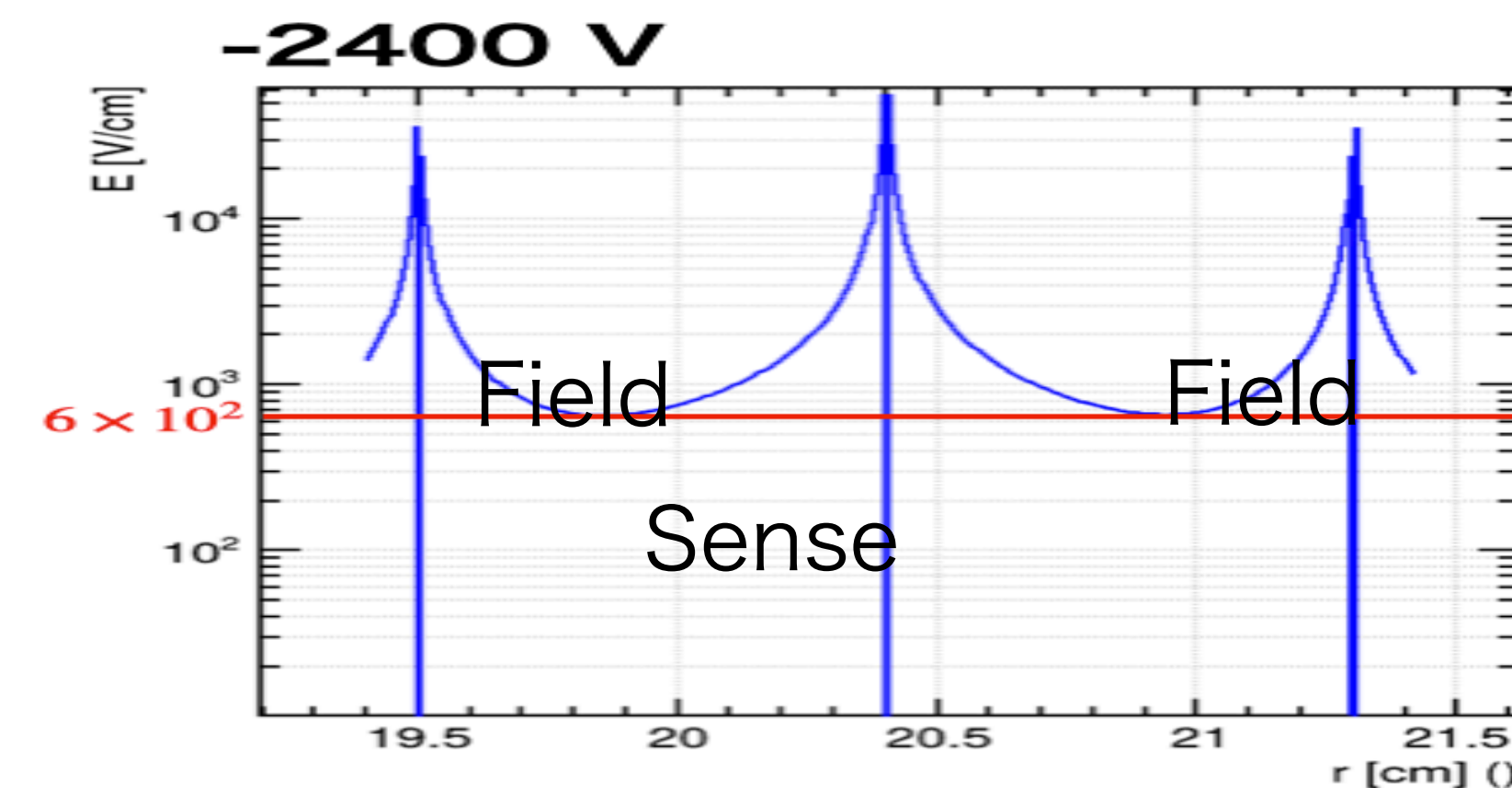
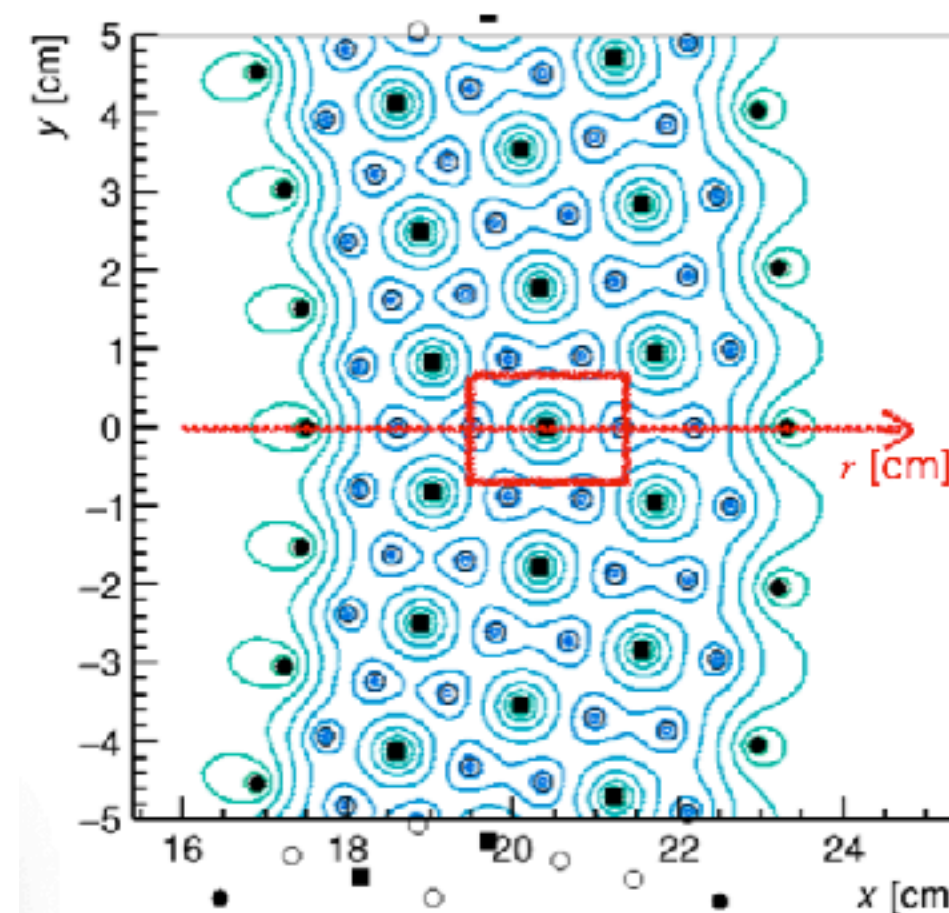
- E15-CDCに比べて3倍の容積。
- 安全性の観点から不燃性ガスが望ましい。

C₂H₆の代替としてCO₂を候補とした。

以後、Ar : CO2の混合比を選択し、E15-CDCによって性能評価をする。

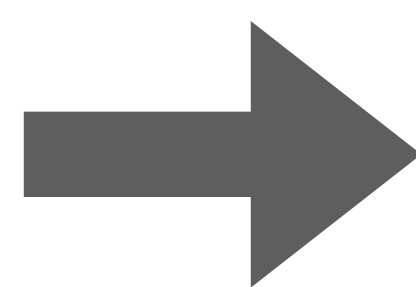
充填ガスについて

ドリフト速度シミュレーション結果



選定条件

- ドリフト速度がなるべく速い。
- ドリフト速度一定の領域が広い。



**Ar : CO2 = 90 : 10 を候補とした
混合比90:10でAr-CO2の性能評価を行う。**

目次

1. 研究背景

2. J-PARC E80 実験

3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)

4. E15-CDCを用いた宇宙線測定による性能評価

5. まとめと展望

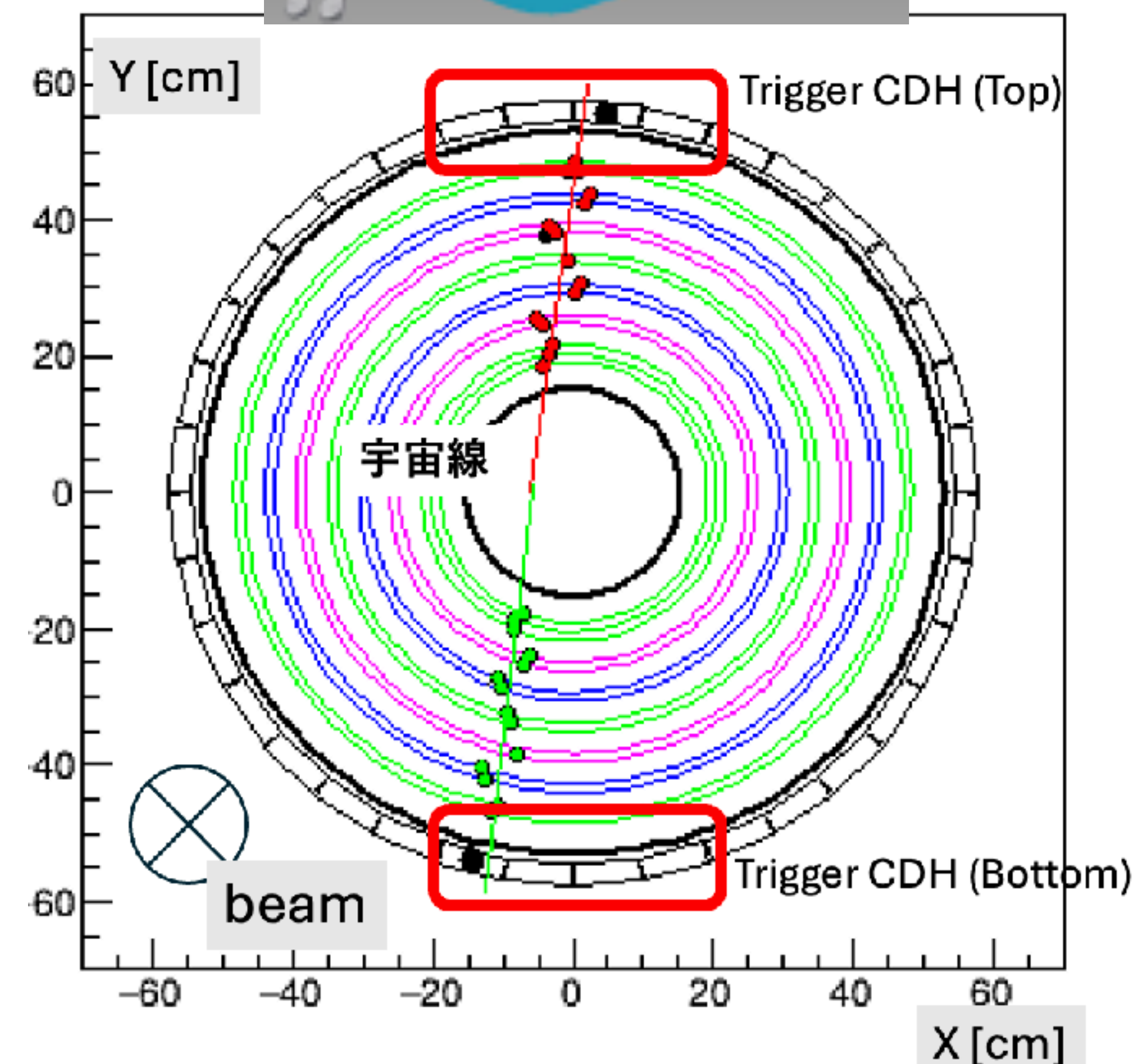
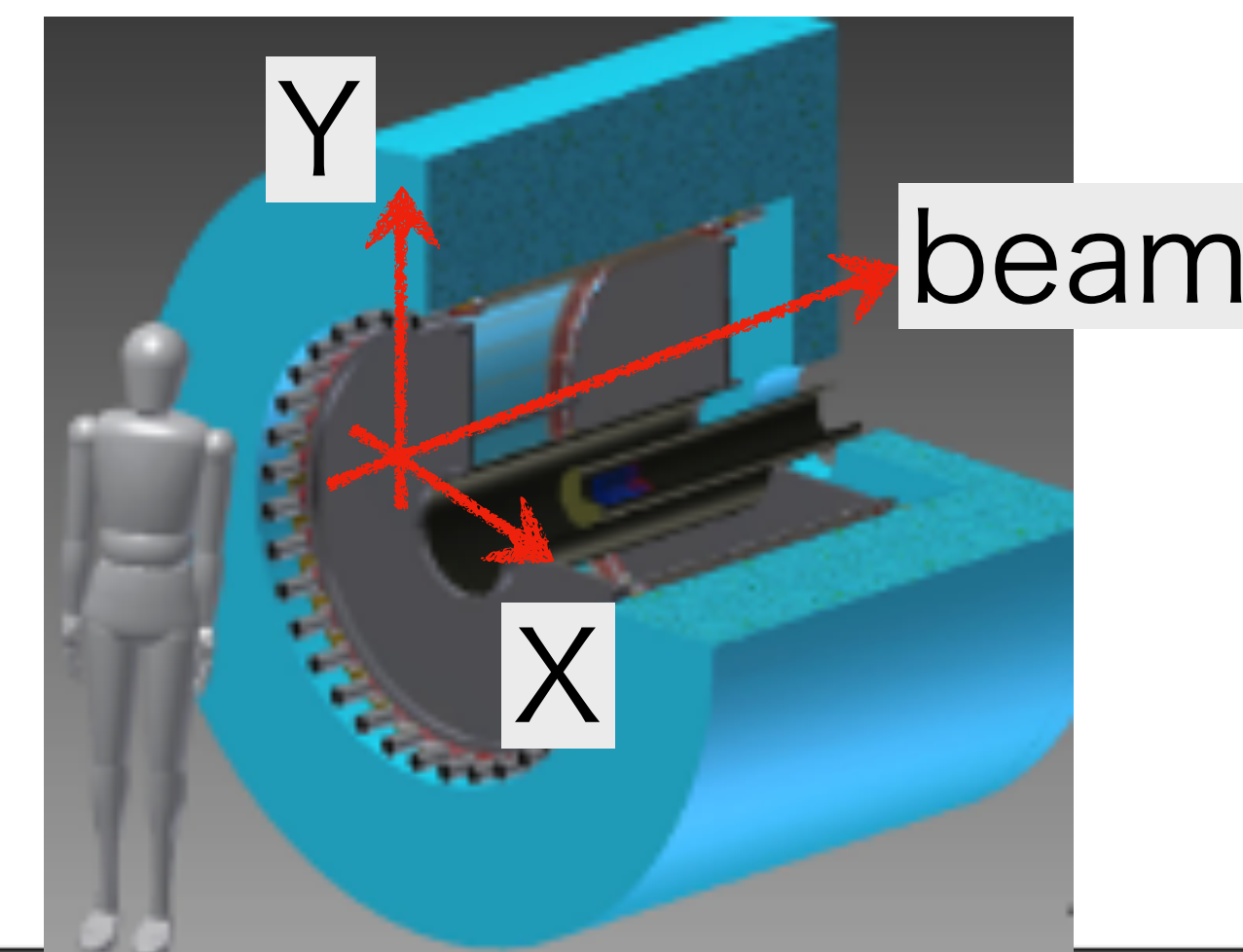
E15-CDCによる宇宙線テスト

目的：実際のCDCを用いてAr-CO₂ (90:10) が要求性能を満たすか、Ar-C₂H₆ (50:50) との性能比較も含めて調査した。

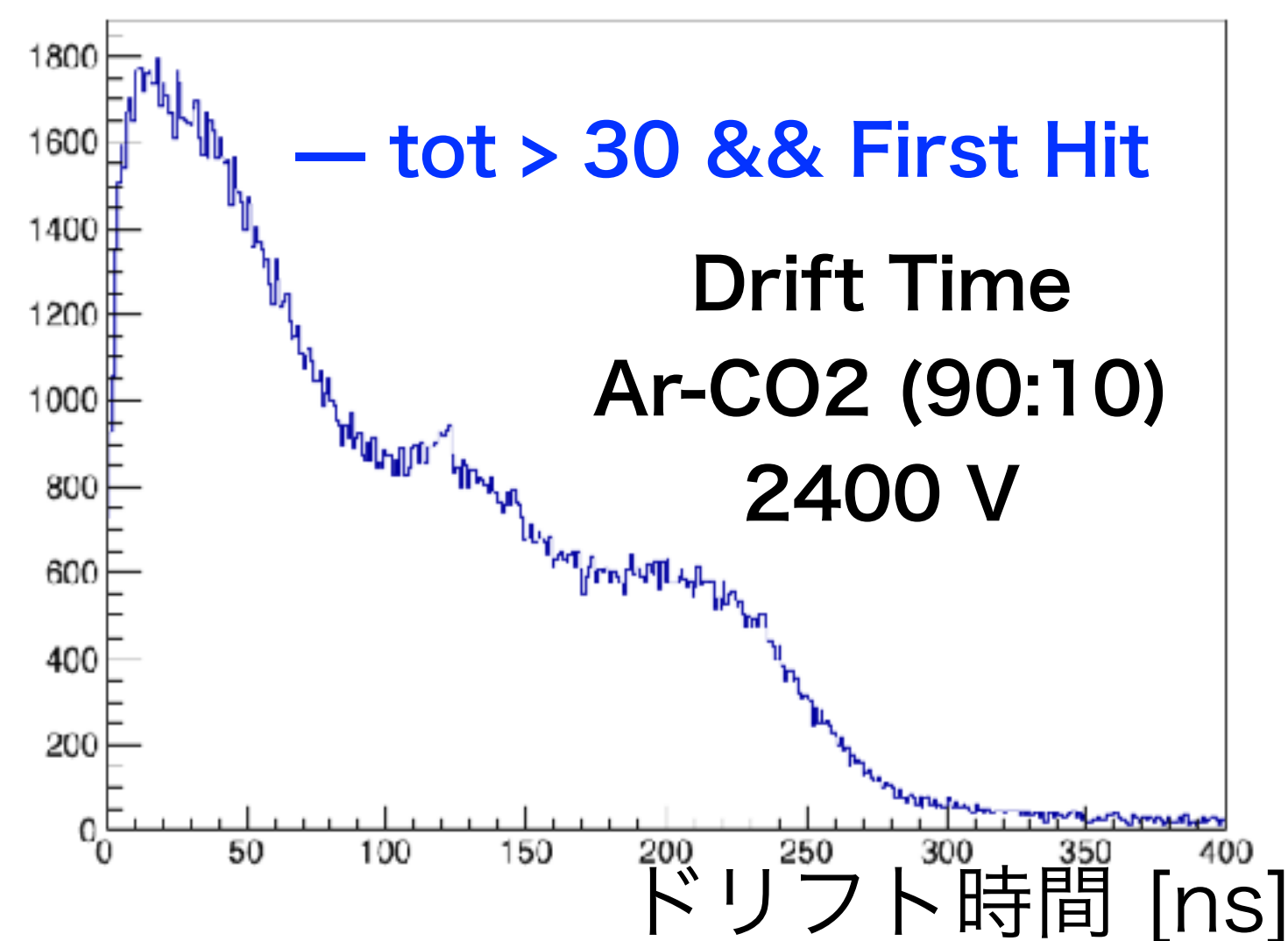
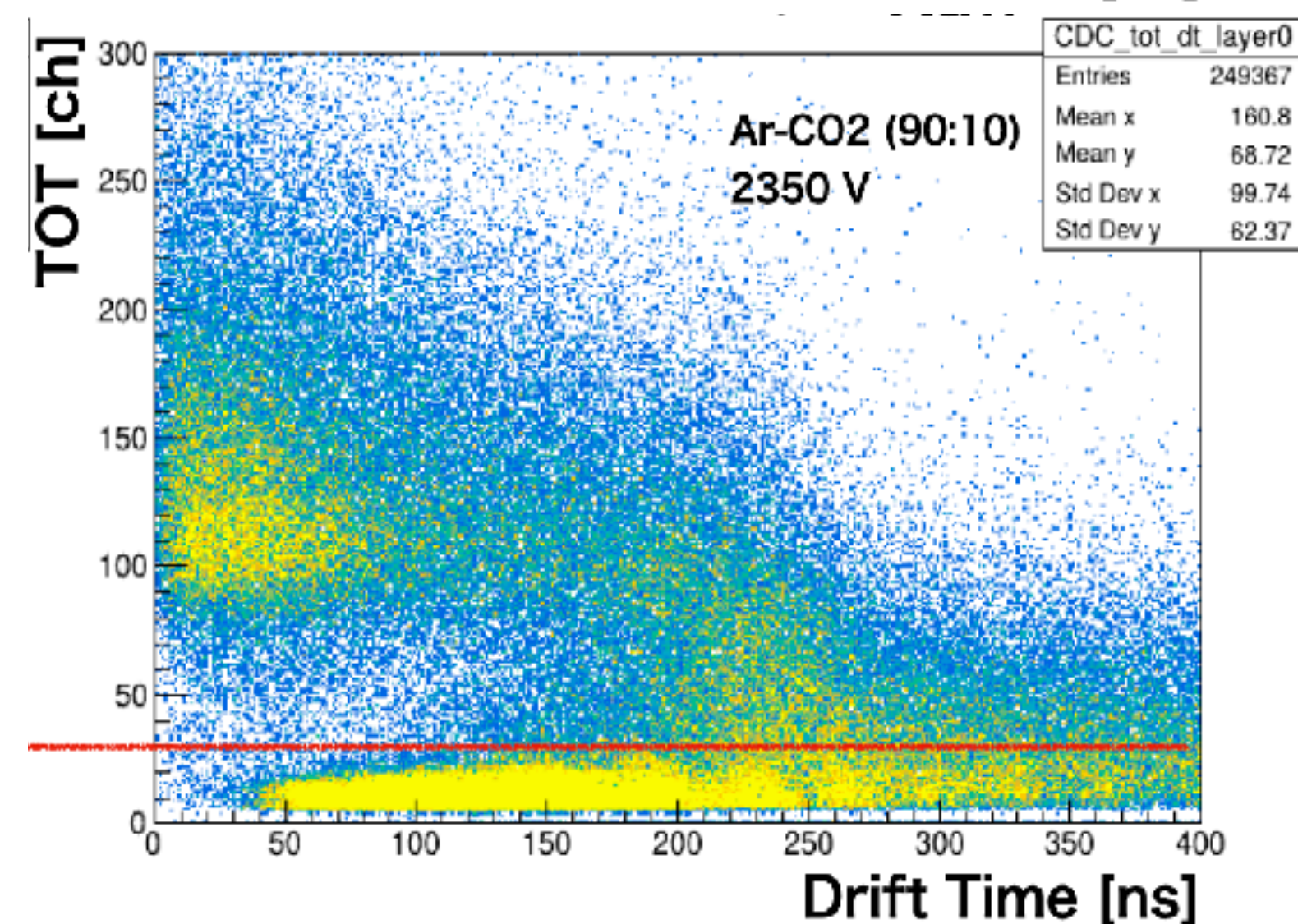
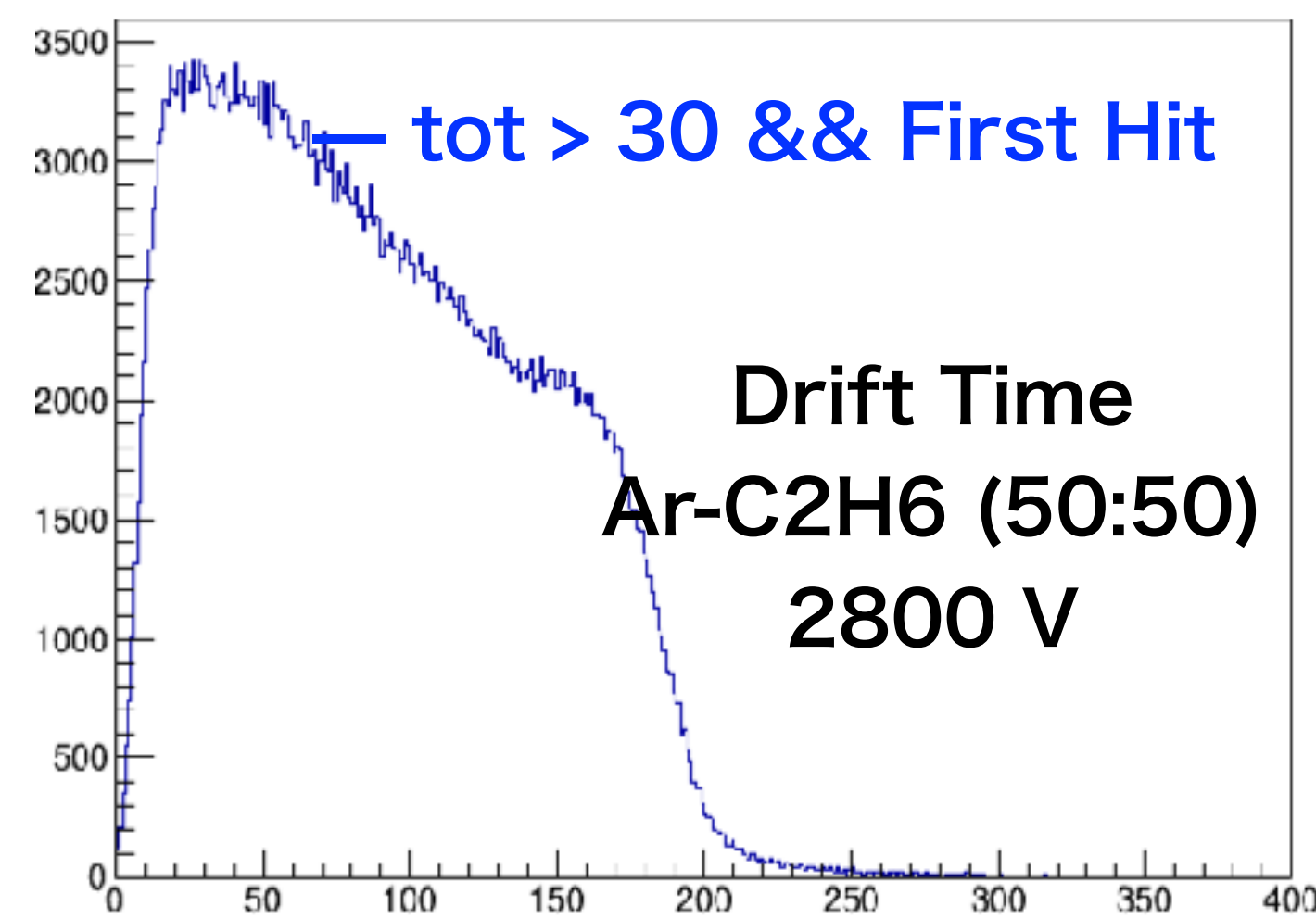
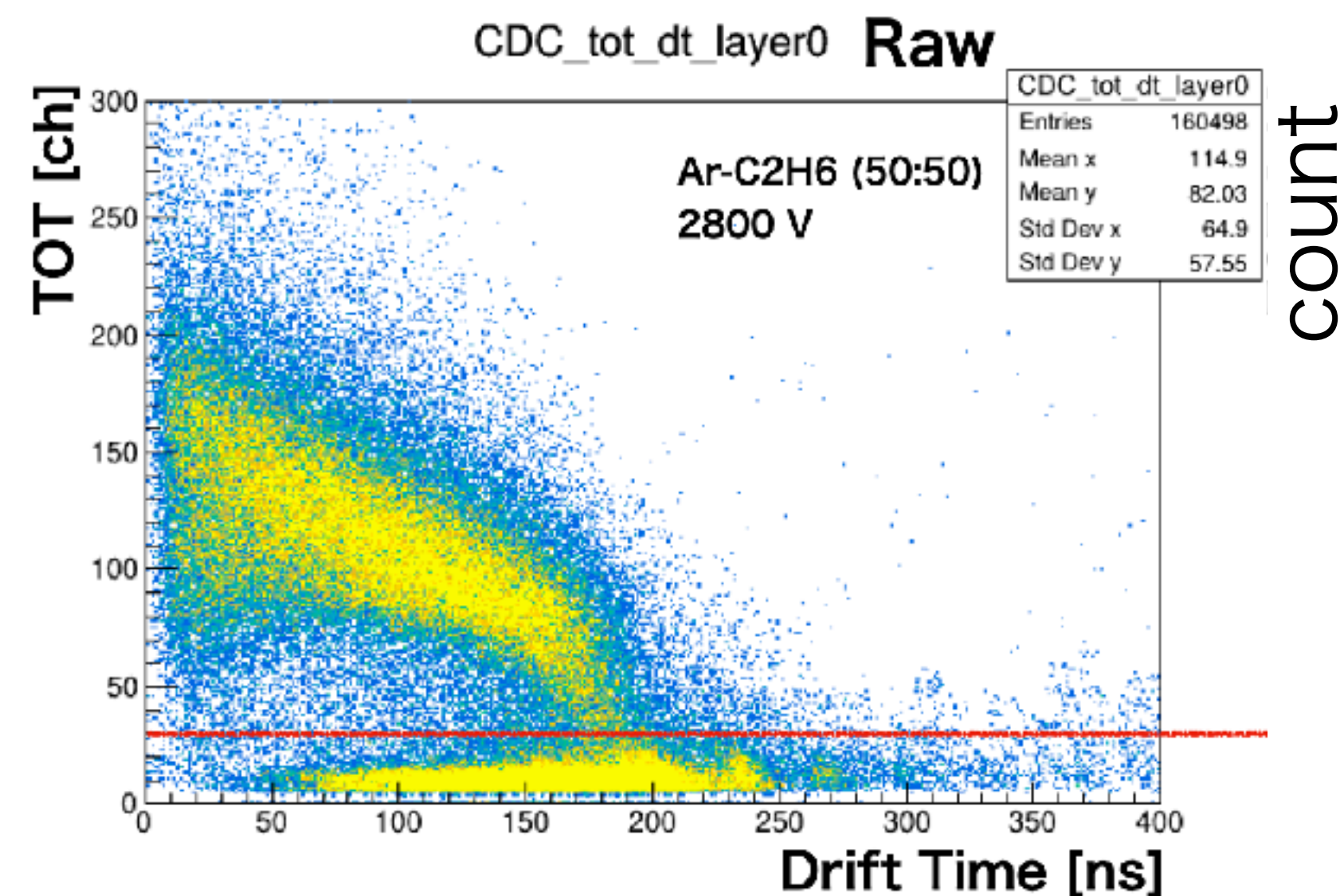
要求性能：Layer 検出効率~97%、位置分解能~200 μ m

実験方法

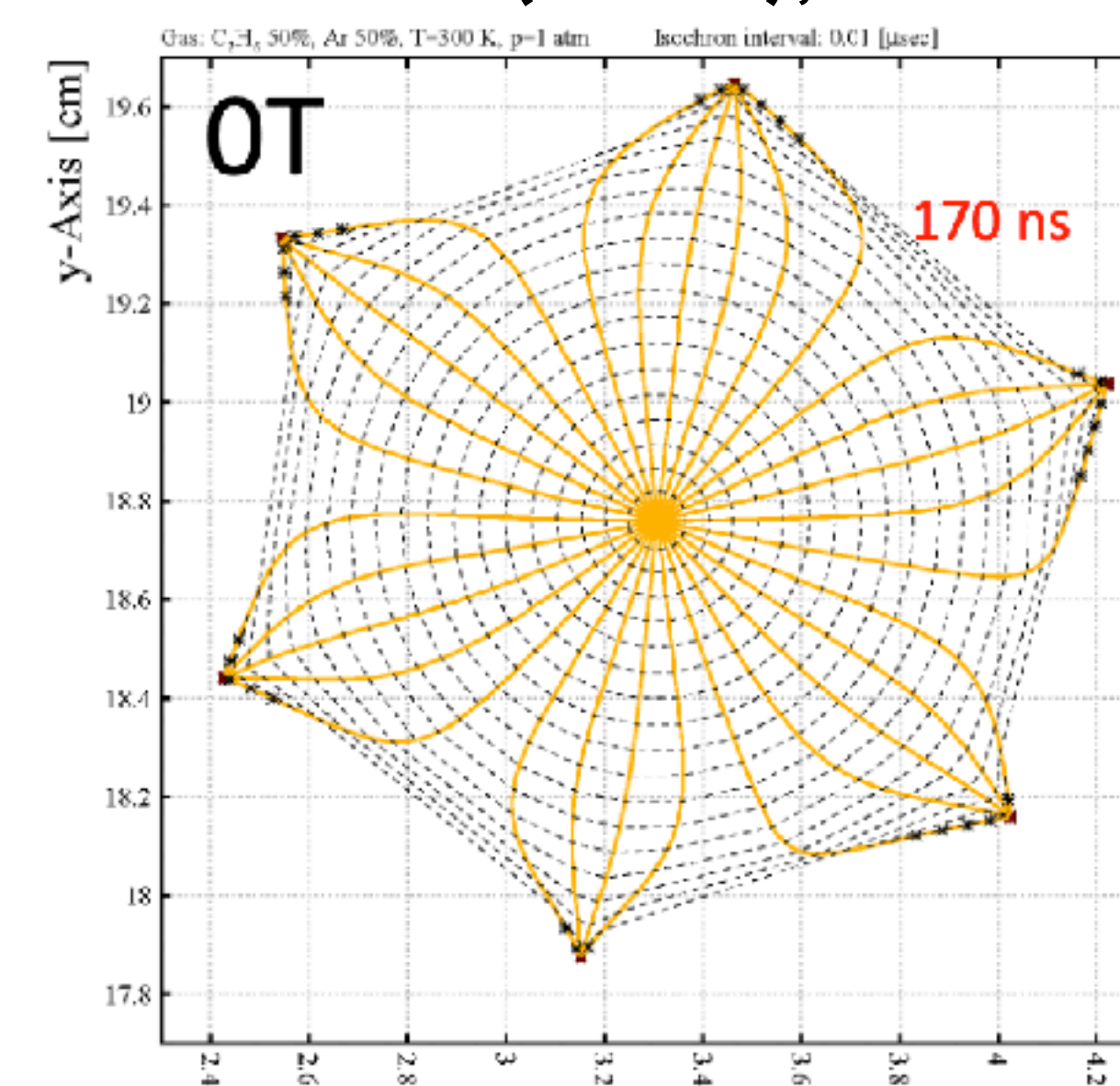
- E15-CDC、磁場ゼロ
- 印加電圧
 - Ar-C₂H₆ (50-50) : -2500 ~ -2800 V
 - Ar-CO₂ (90-10) : -2200 ~ -2400 V
- 読み出し: ASD (SONY CXA3653Q, $\tau = 16\text{ns}$)
- データ取得: Multi-Hit TDC module
時間情報 (TDC)とエネルギー情報 (Time Over Threshold)
- トリガー: 上下のシンチレータ(CDH)の 2 コインシデンス



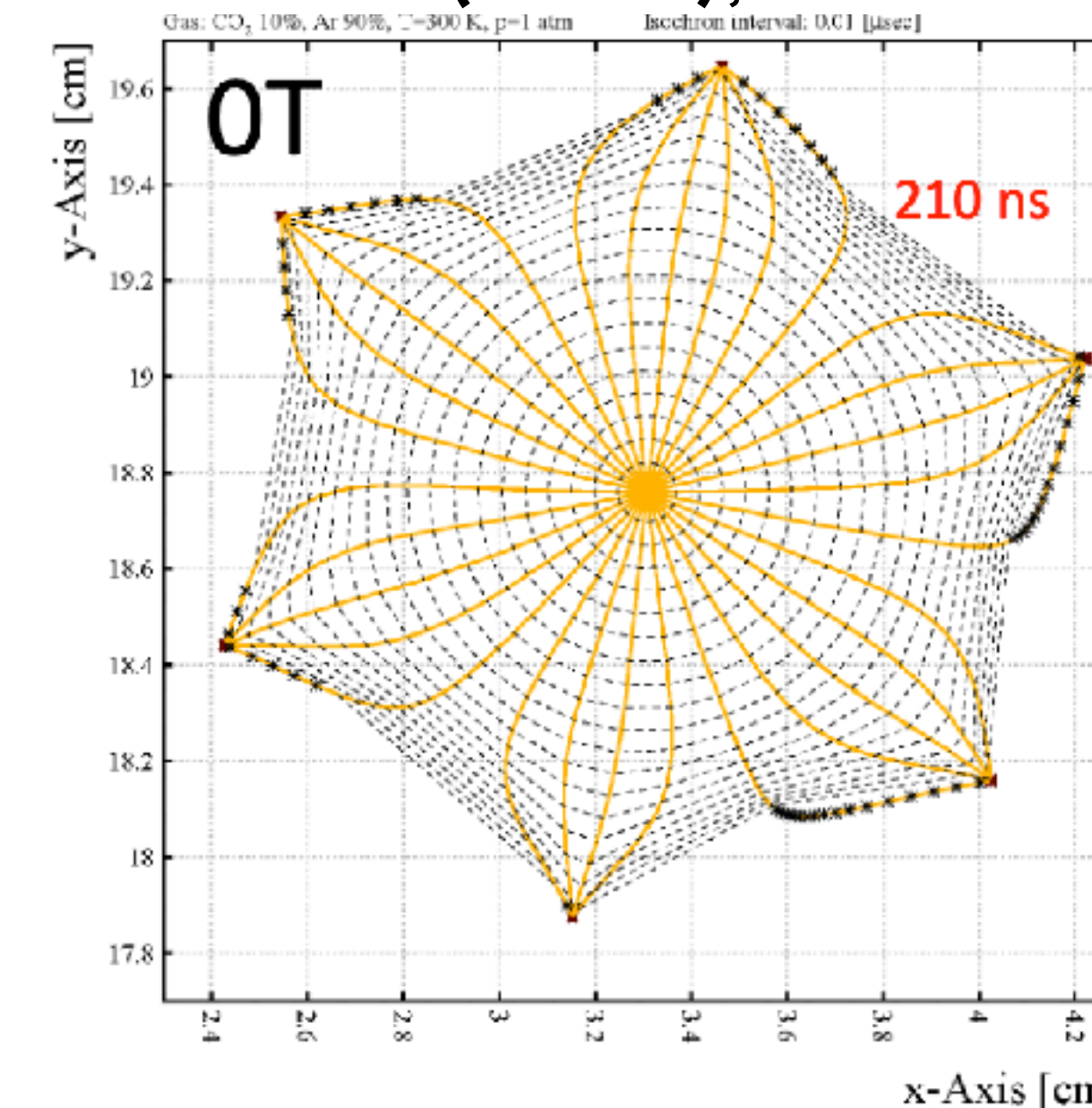
生データとドリフト時間分布



Ar-C2H6 (50:50), -2800V



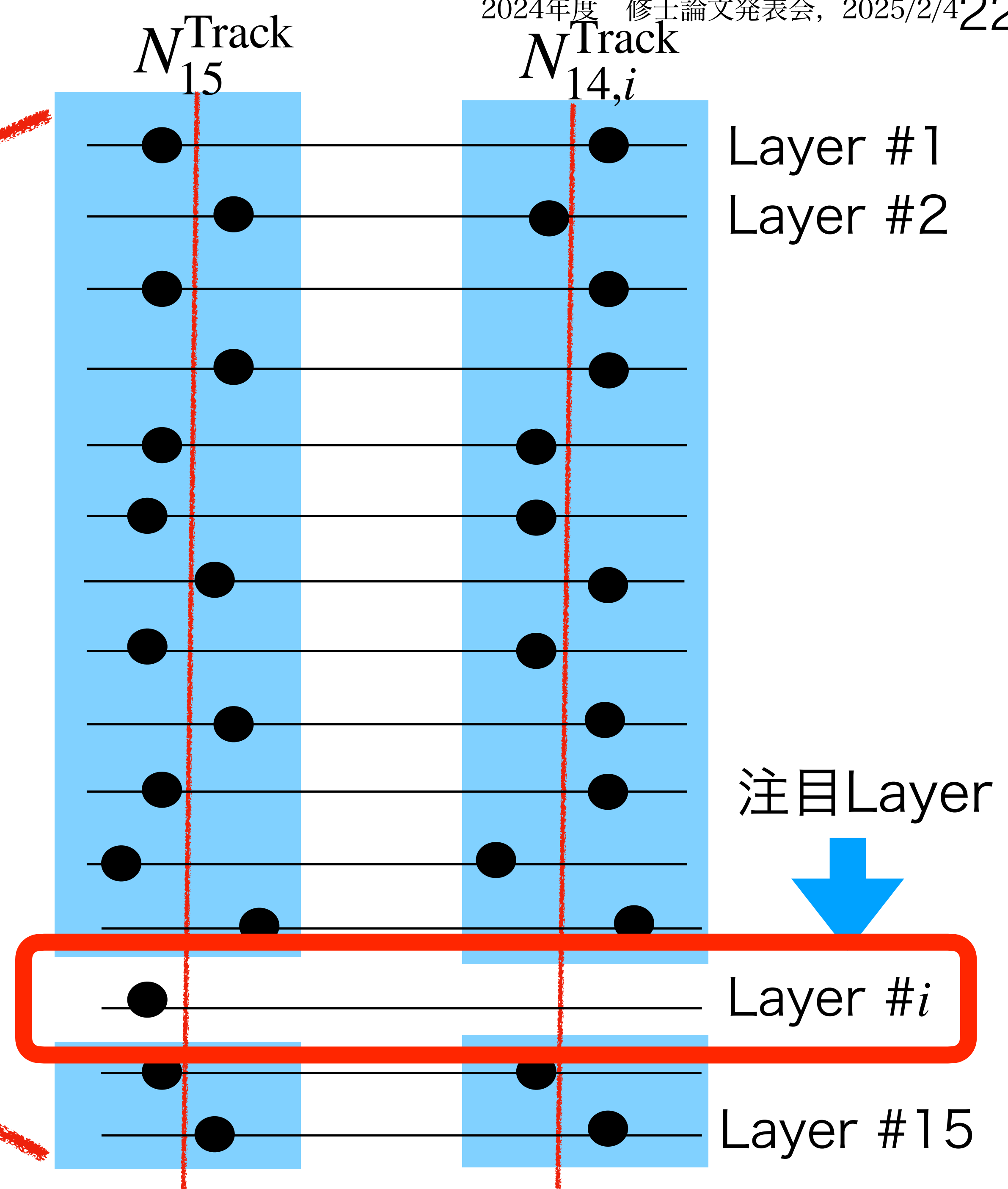
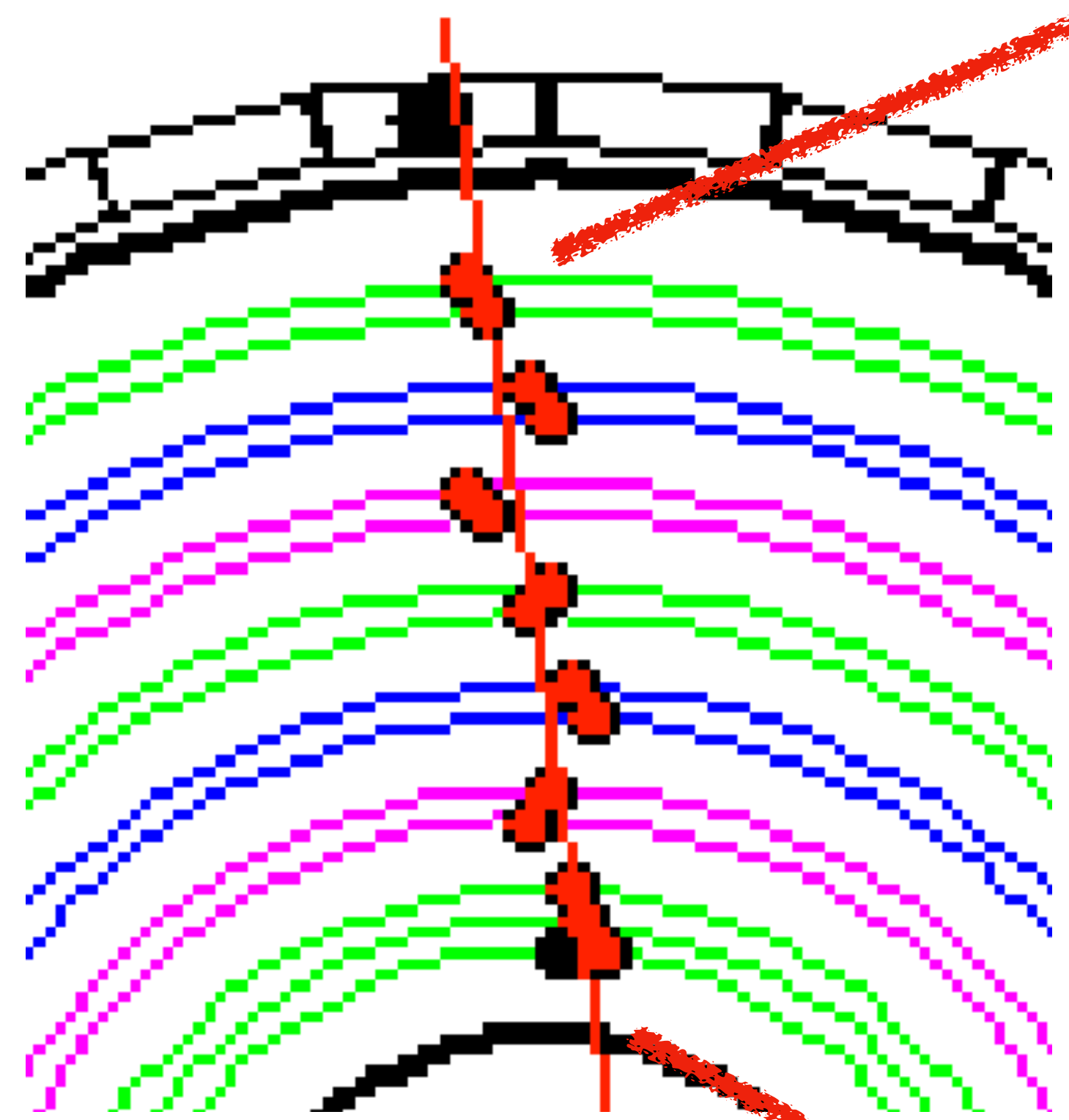
Ar-CO2 (90:10), -2350V



シミュレーション通りAr-CO2 (90:10)はAr-C2H6 (50:50)よりドリフトが遅いことがわかる。

Layer検出効率の定義

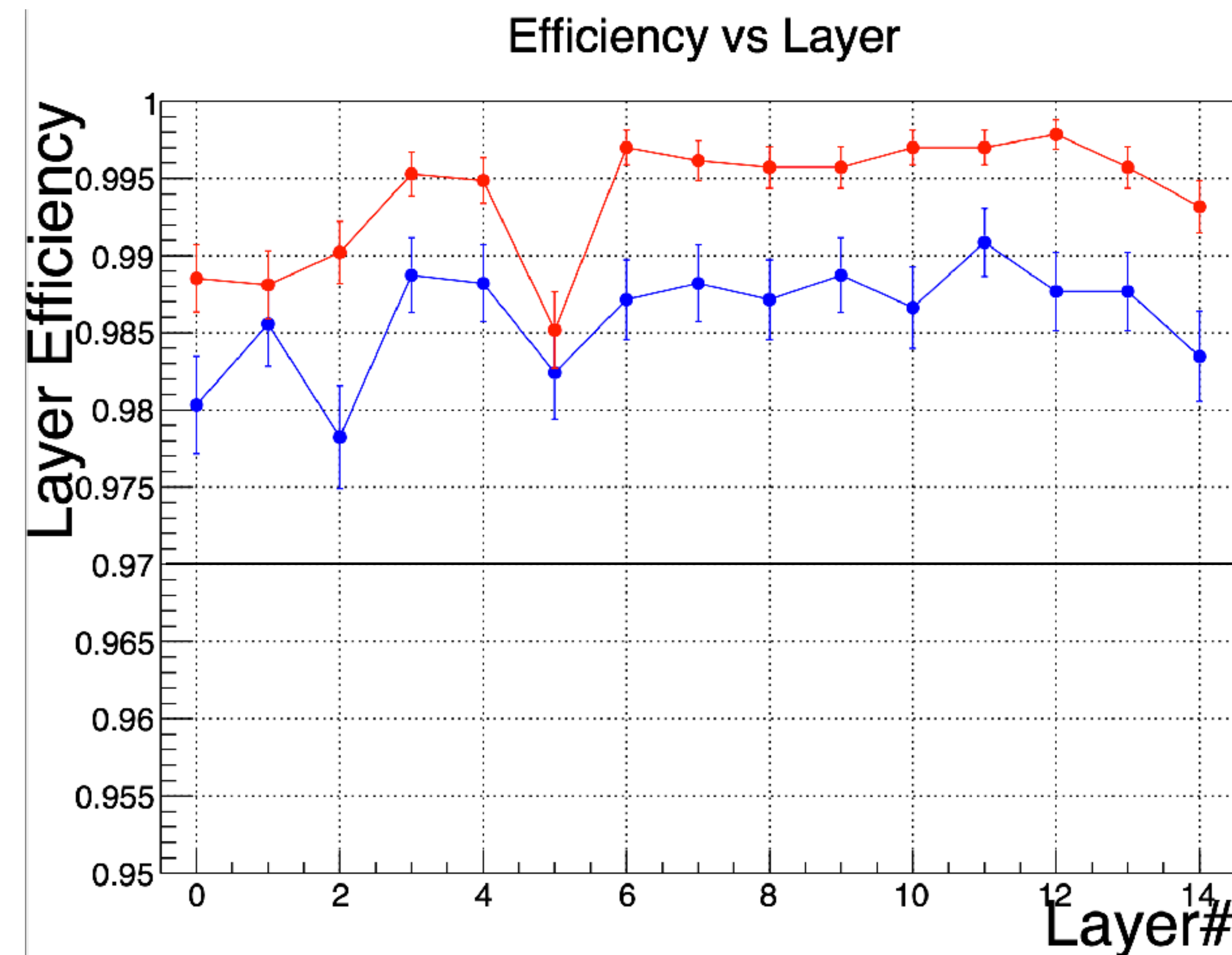
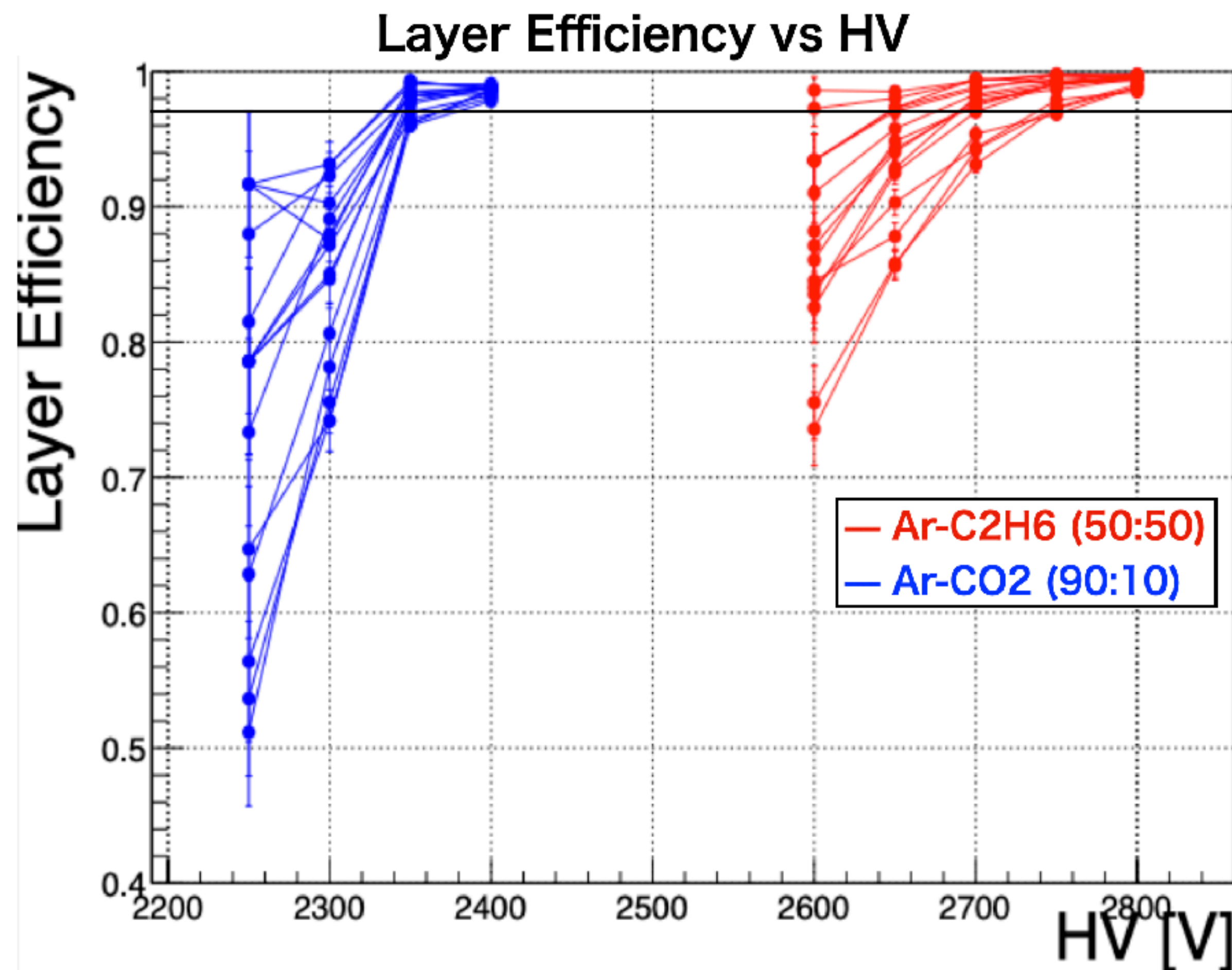
宇宙線のイベントディスプレイ



$$E_i = \frac{N_{15}^{\text{track}}}{N_{15}^{\text{track}} + N_{14,i}^{\text{track}}}$$

Layer検出効率の評価結果

要求性能 $E_i = \frac{N_{15}^{\text{track}}}{N_{15}^{\text{track}} + N_{14,i}^{\text{track}}} > 97\%$



Ar-CO2 (90:10) においては2400 Vかけた時 要求性能を満たした。

位置分解能の評価

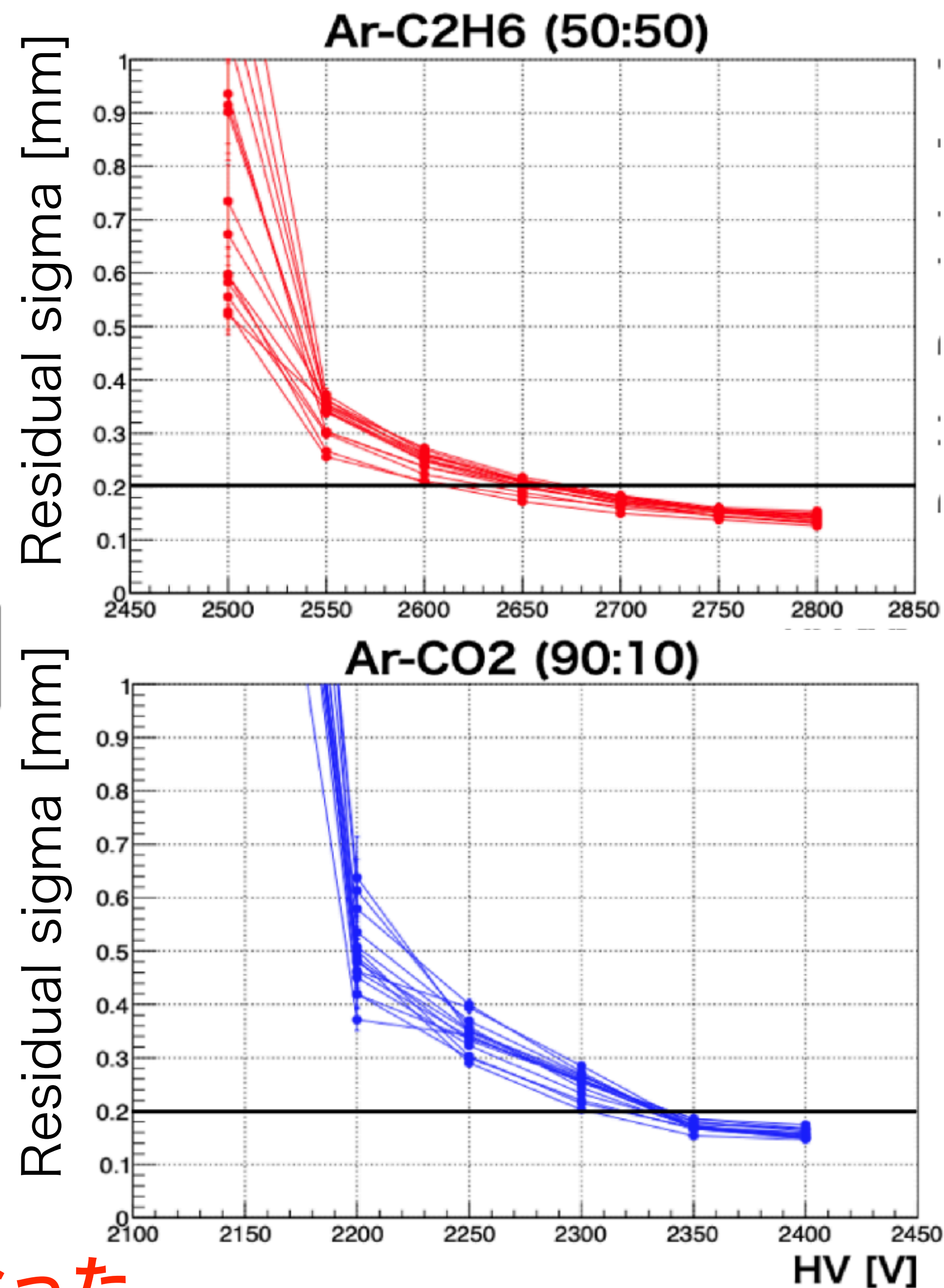
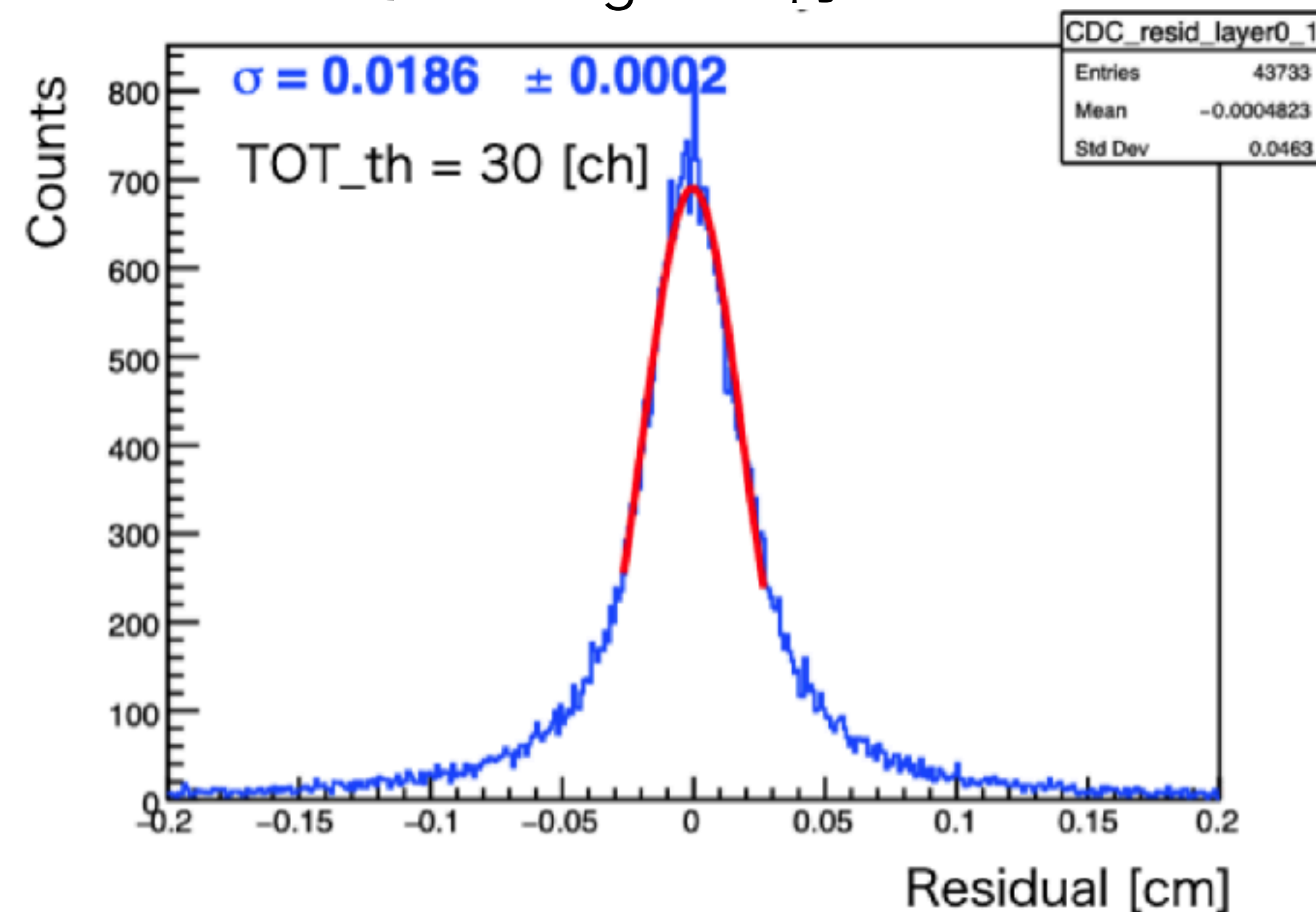
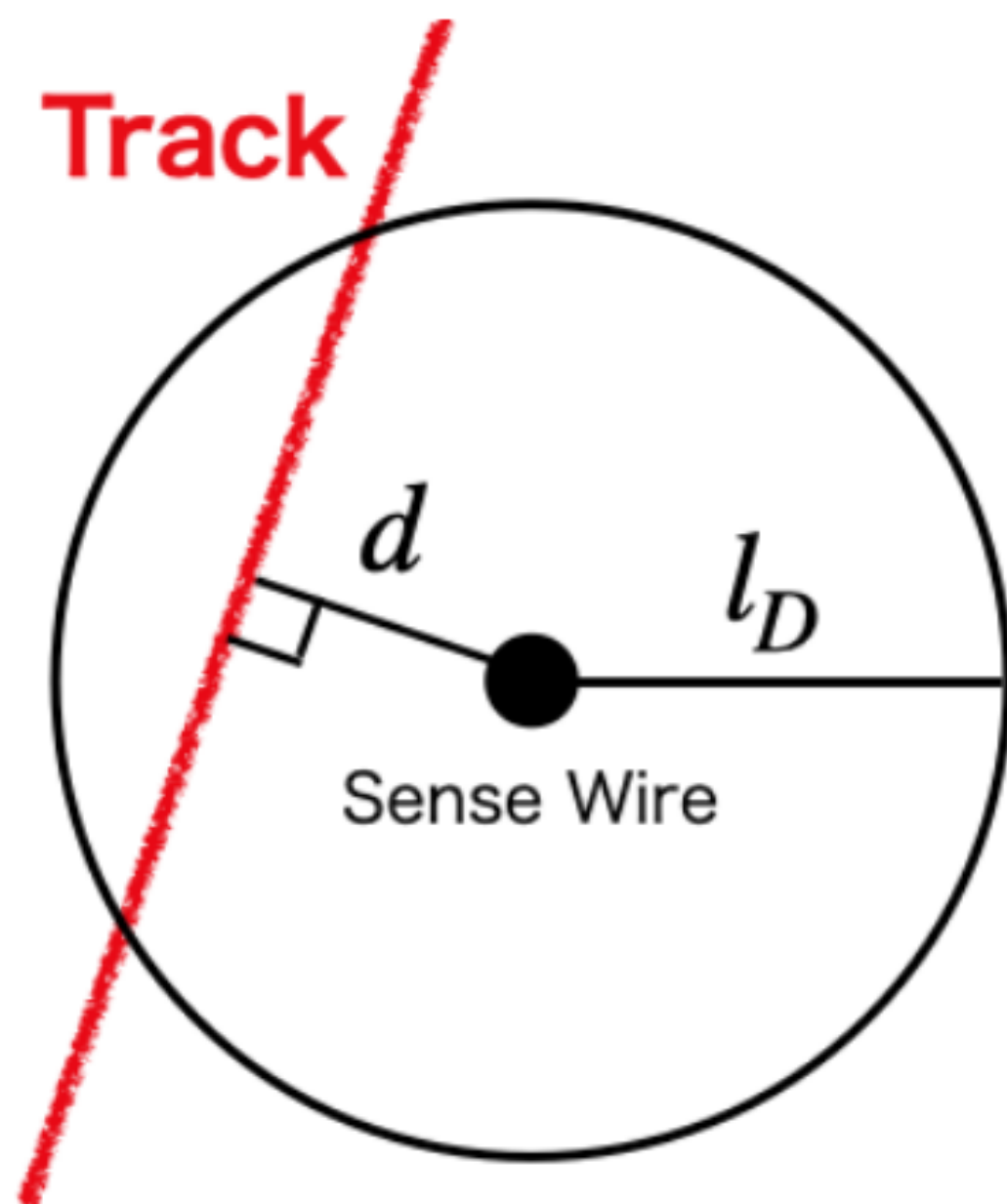
Residualの比較

定義: $\text{Residual} = l_D - d$

l_D : ドリフト長、 d : センスワイヤーとトラックの距離

ResidualのFitの例

範囲無限でガウシアンFit
その1.5sigmaで再Fit



両ガスともにHVを高くするとResidualも小さくなった。

位置分解能の評価

位置分解能 σ について

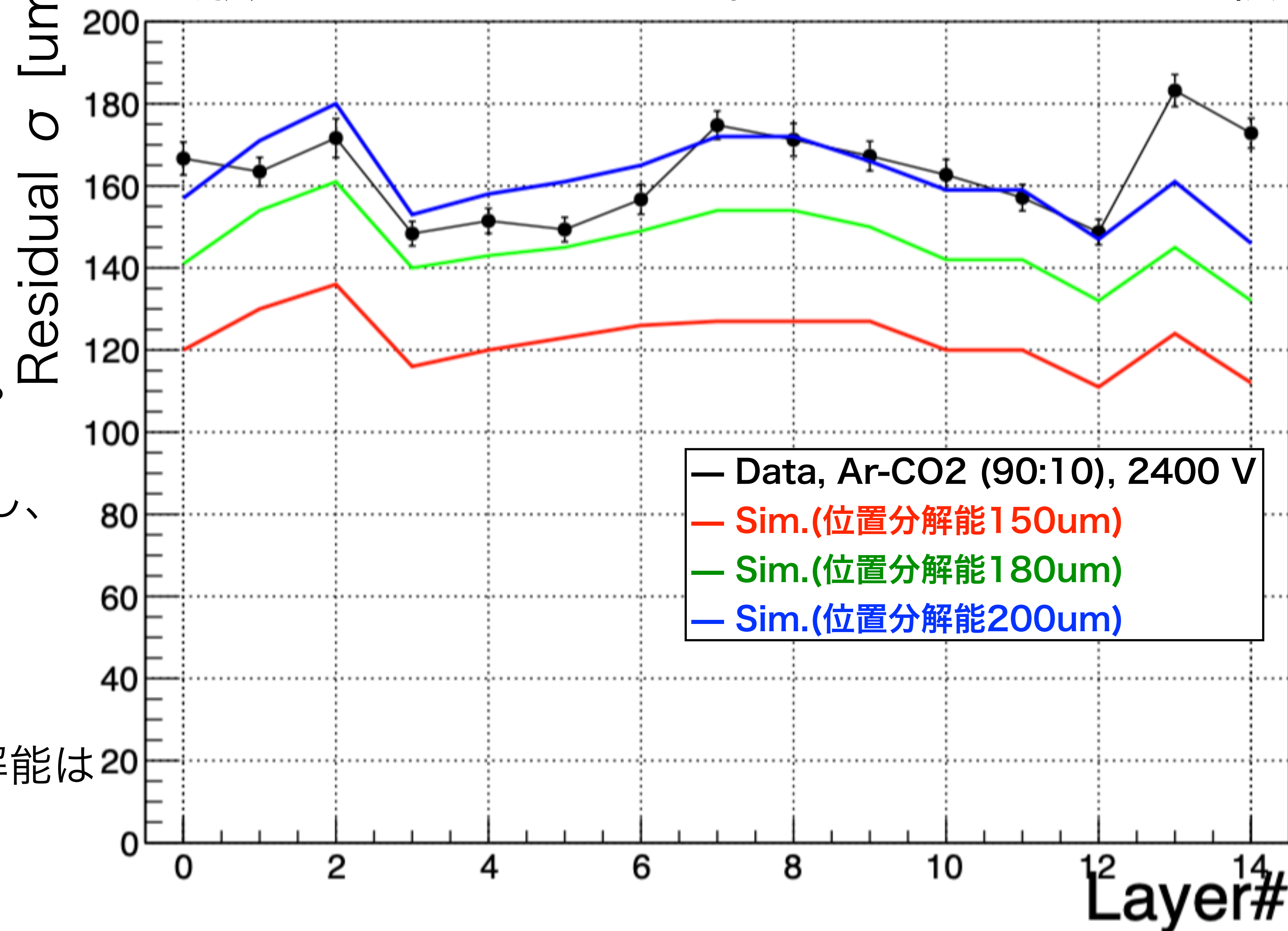
要求性能：200 μm

シミュレーションにて、
CDCの位置分解能を設定し、
トラッキングしてResidualの σ を見た。

シミュレーションと実験データを比較し、
位置分解能を見積もった。

シミュレーションとの比較から、
Ar-CO₂ (90:10)を用いた時の位置分解能は
200 μm であると判断した。

実験とシミュレーション間のResidual σ の比較



Ar-CO₂ (90:10) においては2400 Vかけたとき要求性能を満たした。

目次

1. 研究背景
2. J-PARC E80 実験
3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)
4. 旧CDC (E15-CDC) を用いた宇宙線測定による性能評価
5. まとめと展望

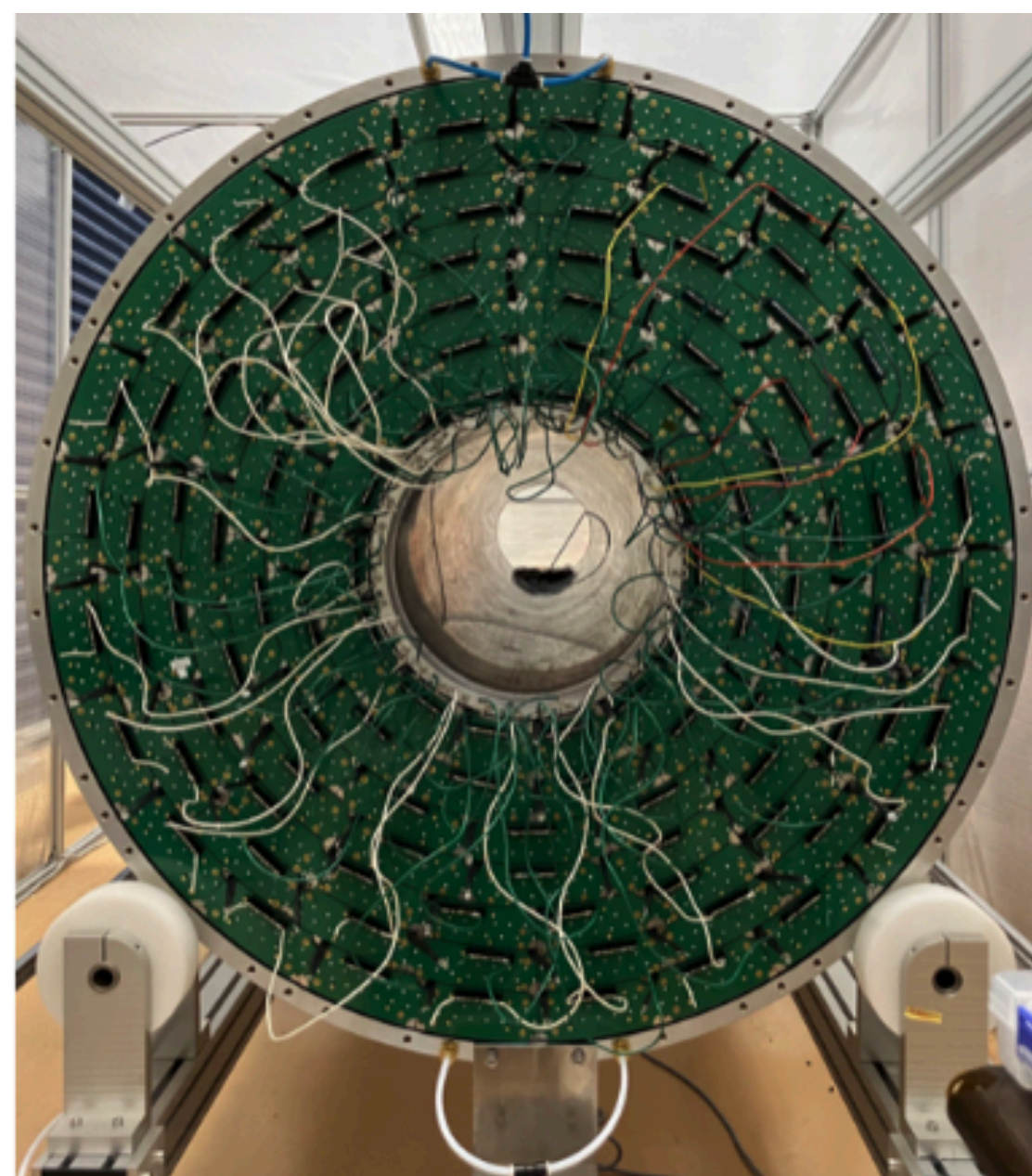
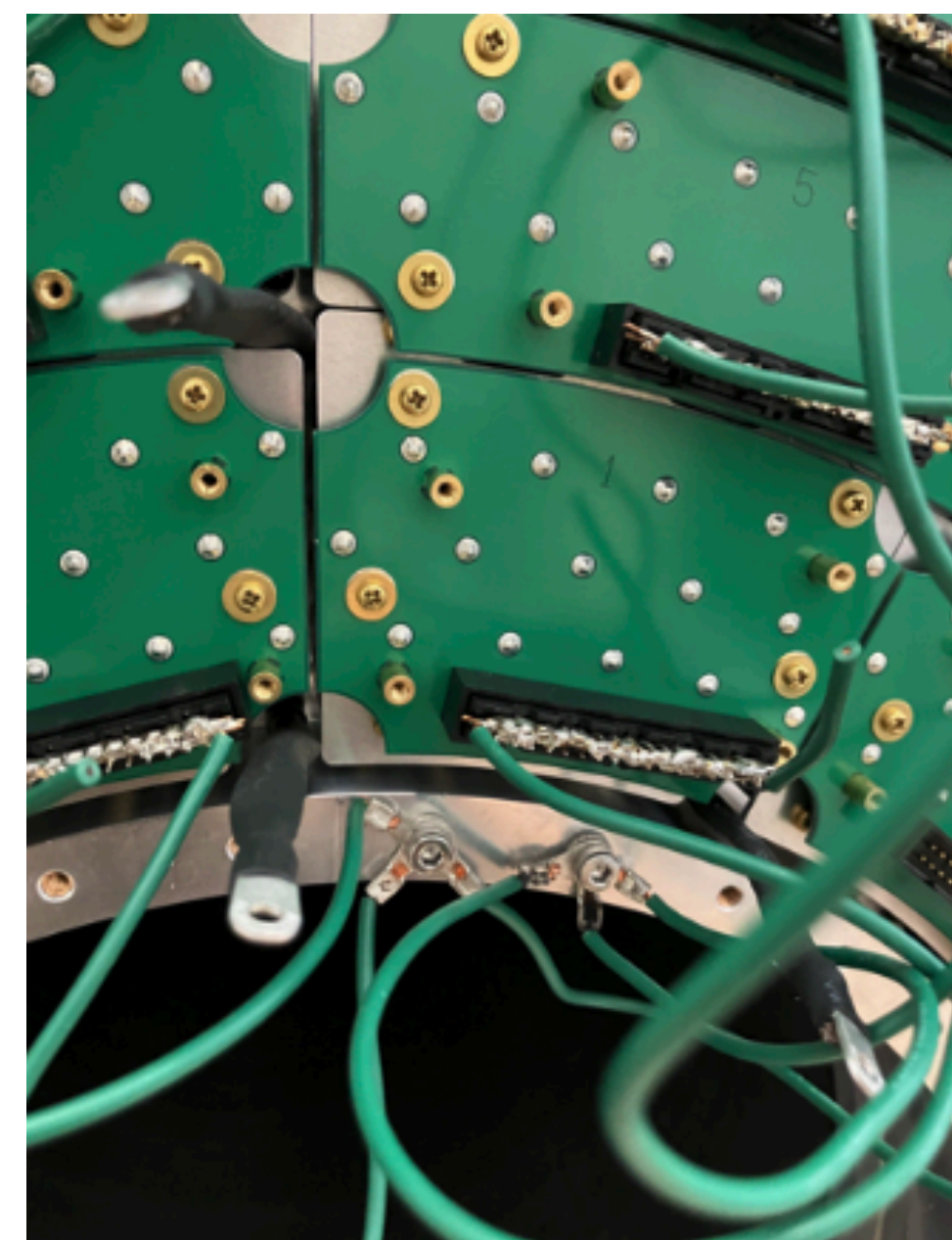
まとめ・結論

- 反K中間子原子核, $\bar{K}NNN$ 探索実験のための大立体角検出器システムを建設中である。
- その中のメイン検出器の1つである円筒型ドリフトチェンバーへの充填ガス決定のため、性能比較をし、その使用可能性について調査した。
充填ガス候補はAr-CO₂、要求性能は Layer 検出効率～97 %、位置分解能～200 um。
- ガスシミュレーションとテストチェンバーを用いた実験にて、Ar-CO₂の適切な混合比を調査し、90:10と決定した。
- E80-CDCと同じセル構造を持つE15-CDCでの宇宙線測定データの解析にて、Ar-CO₂ (90:10) は上記の要求性能を満たすという結果を得た。
したがってAr-CO₂ (90:10) はCDCにおいて、使用可能であるという結論に至った。

今後の展望

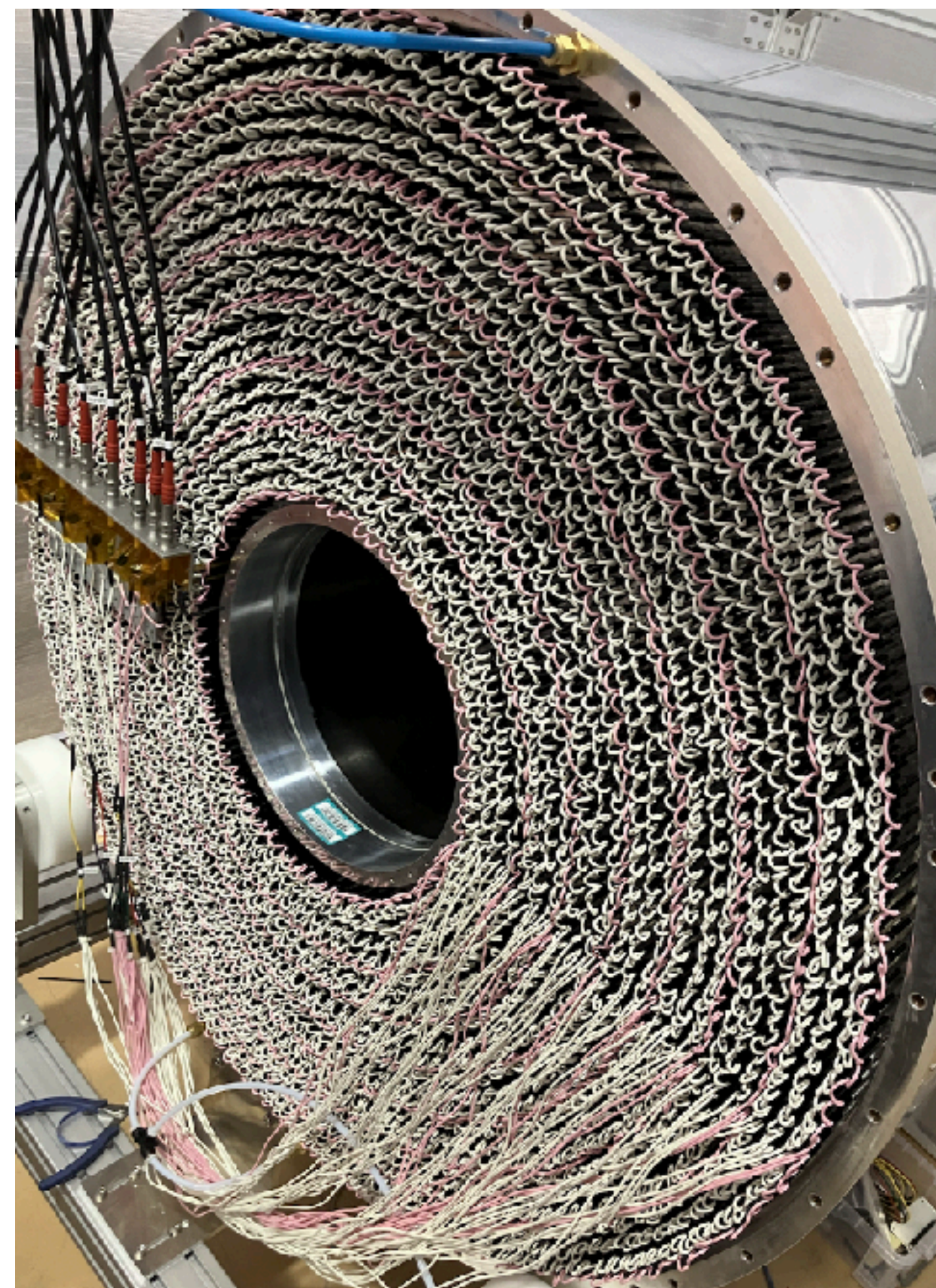
E80-CDCの現状

信号変換基板取り付け完了



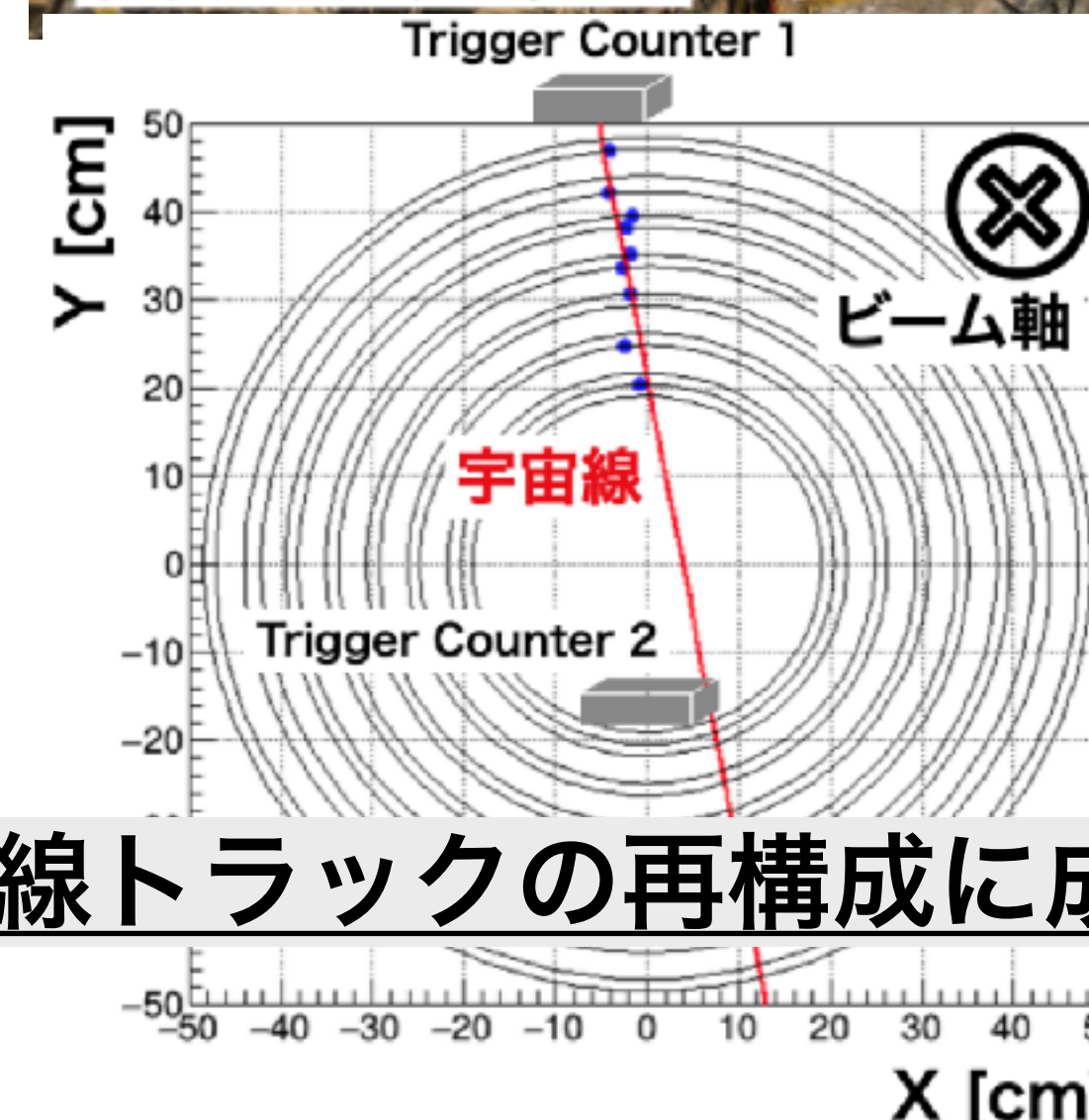
HV側組み立て完了

目標の2400Vの安定印加確認



部分的にASDを取り付けて

宇宙線測定

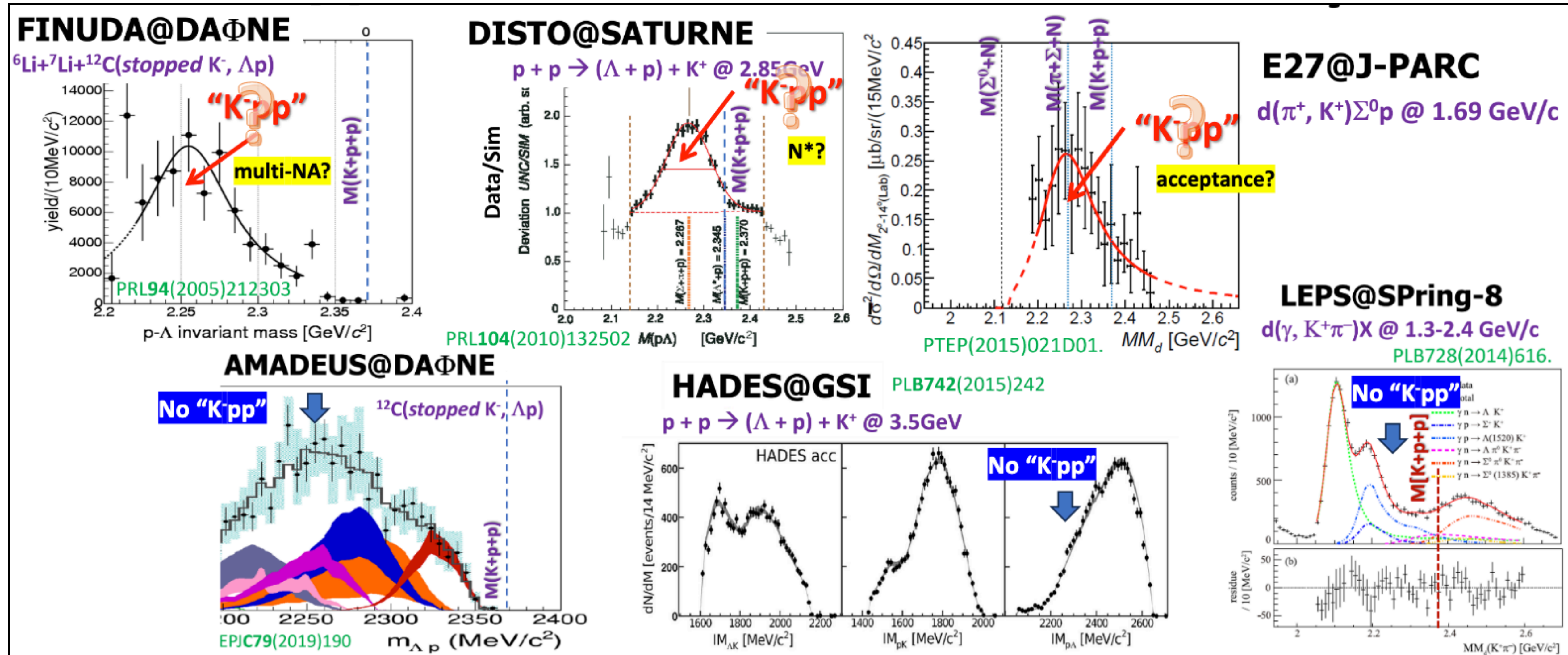


宇宙線トラックの再構成に成功

- E80-CDCにおいて、全てのASDを取り付けた状態でAr-CO₂テストを行う。
- 2026年度に予定されているJ-PARC E80実験の準備を進める。

Back Up

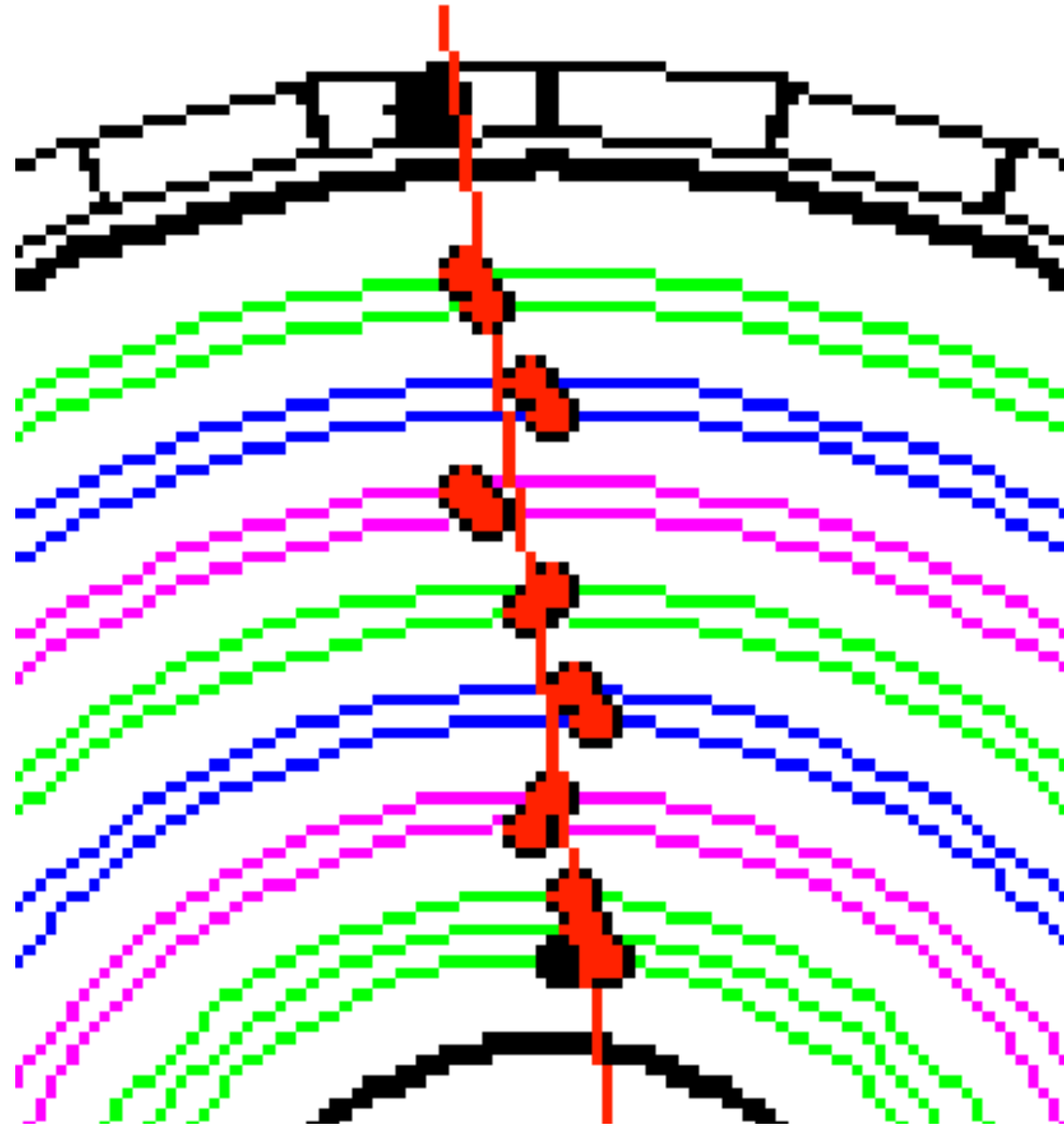
K-ppの歴史



要求性能の決め方

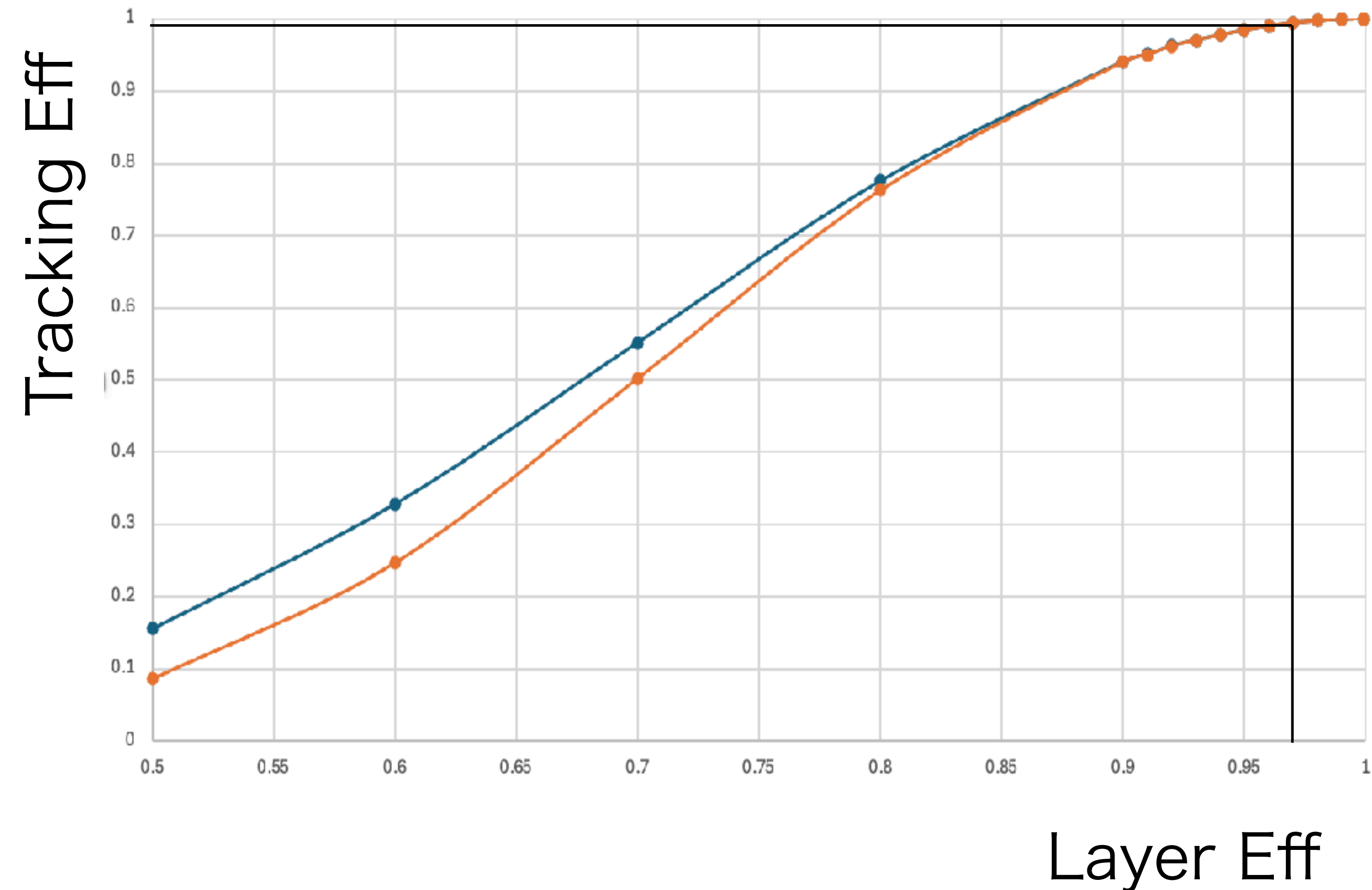
Layer Efficiency ~97%の理由

→ Tracking Efficiency ~99%欲しい



今回の解析におけるTraking条件

- ・ 各Super Layer毎に最低 1 Hit
- ・ 合計10 Hits



要求性能の決め方

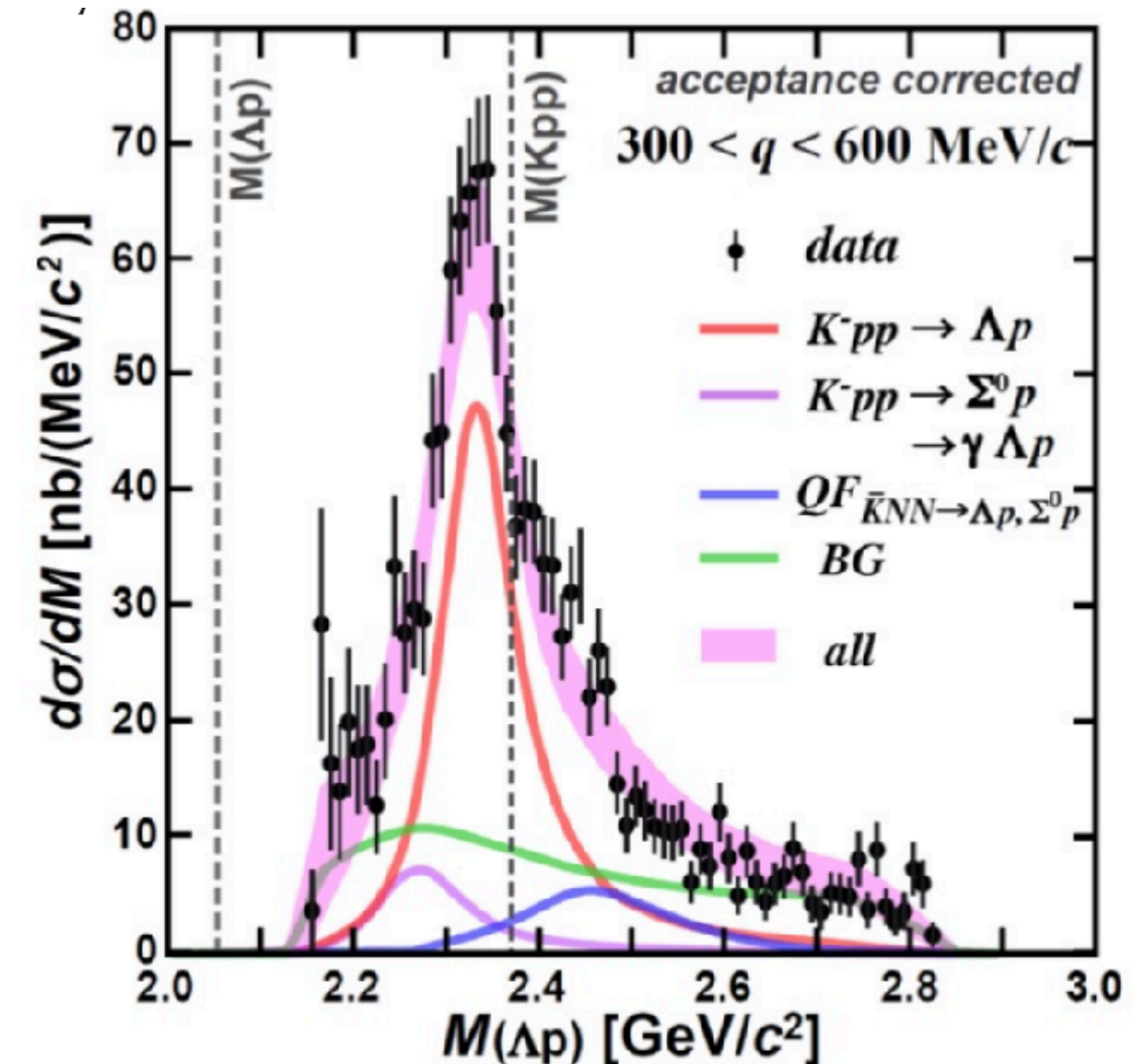
位置分解能 ~200 μm の理由

過去のシミュレーションより、

200 μm という位置分解能で
K-ppのMass resolution 40 MeV/c^2 となる。

幅100 MeV/c^2 のものを観てるから、200 μm で妥当。

角度分解能分もあるが、それはVFTで補う。



セル内電場の計算

Garfield++を用いた。

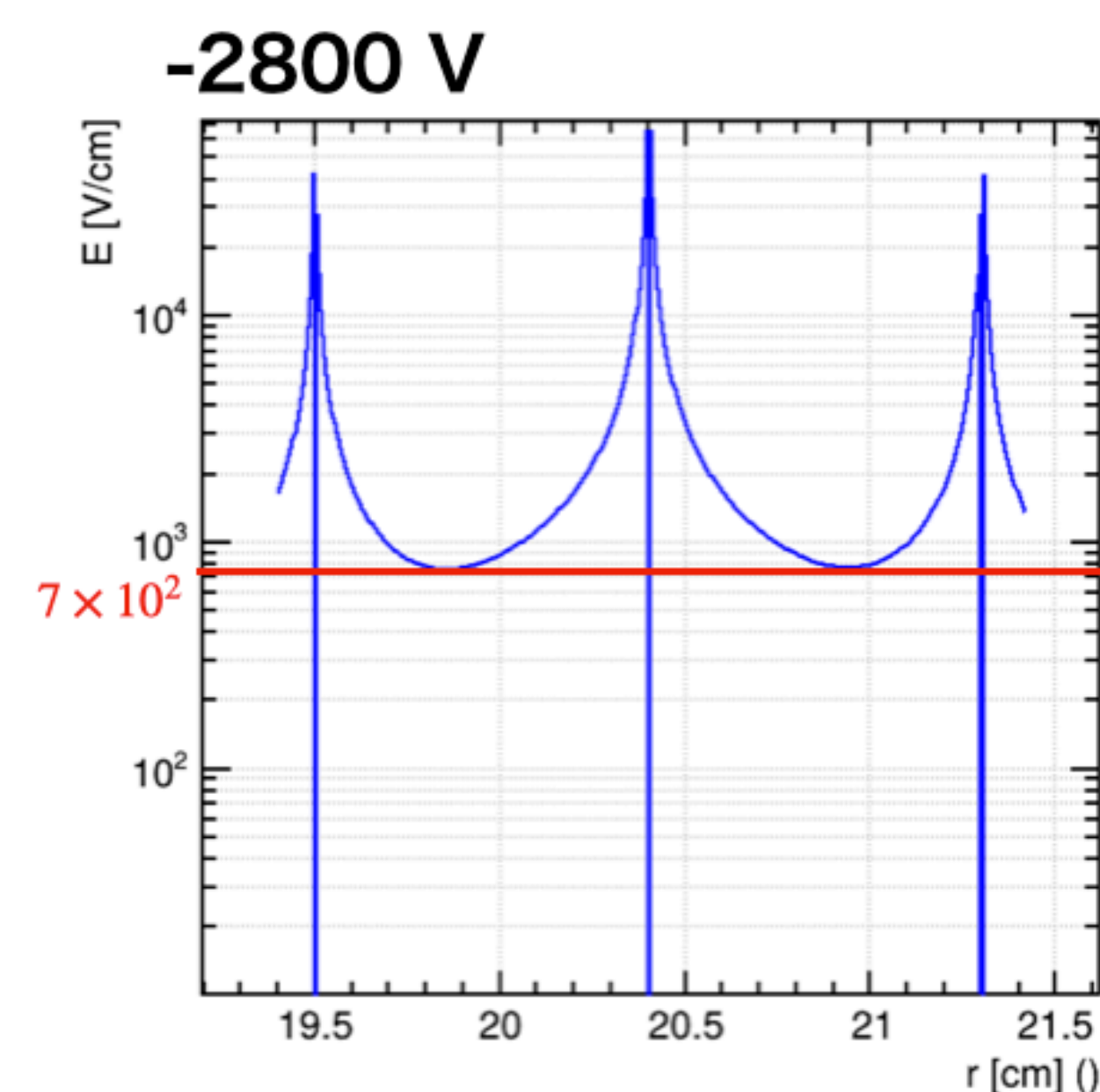
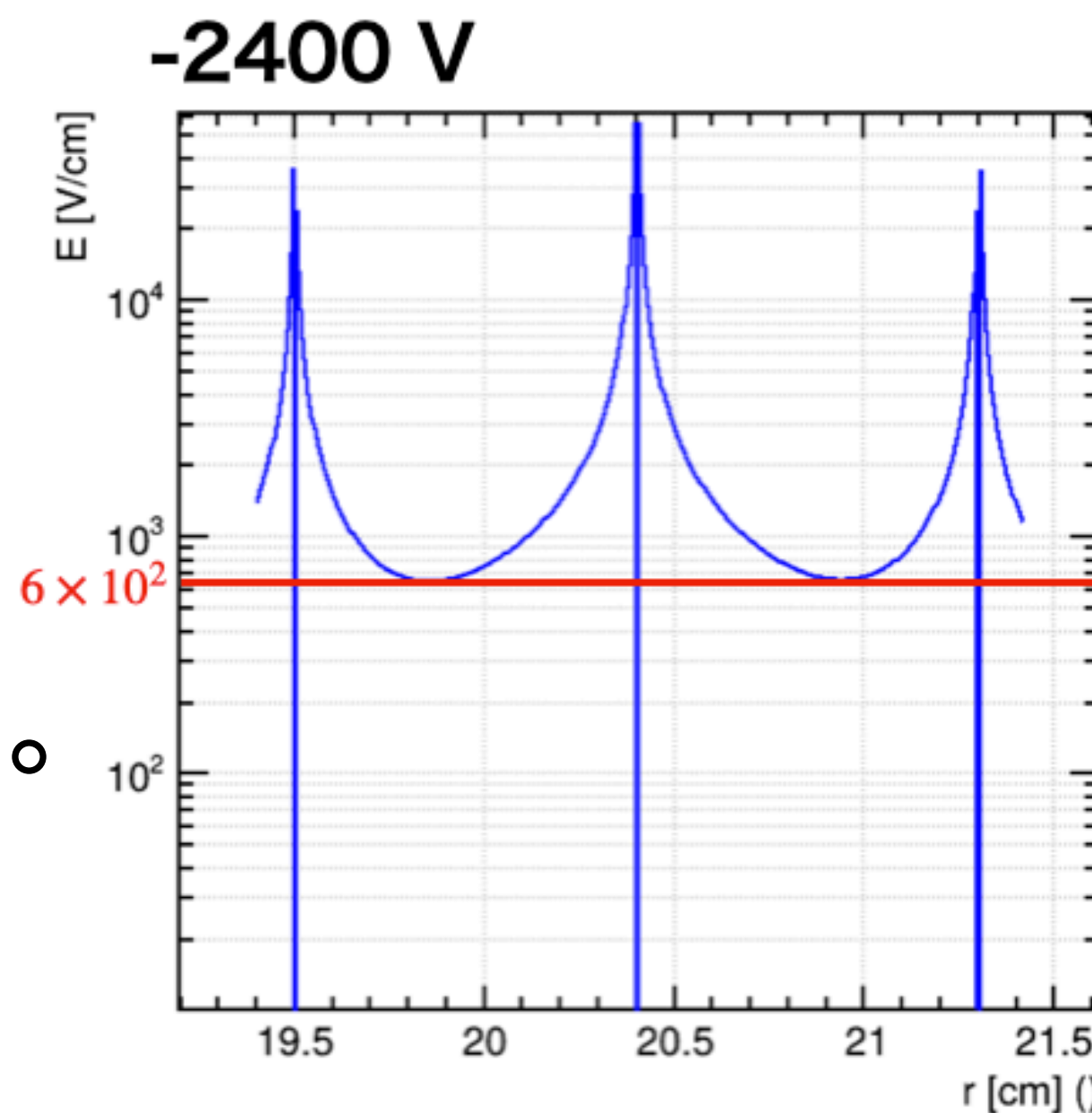
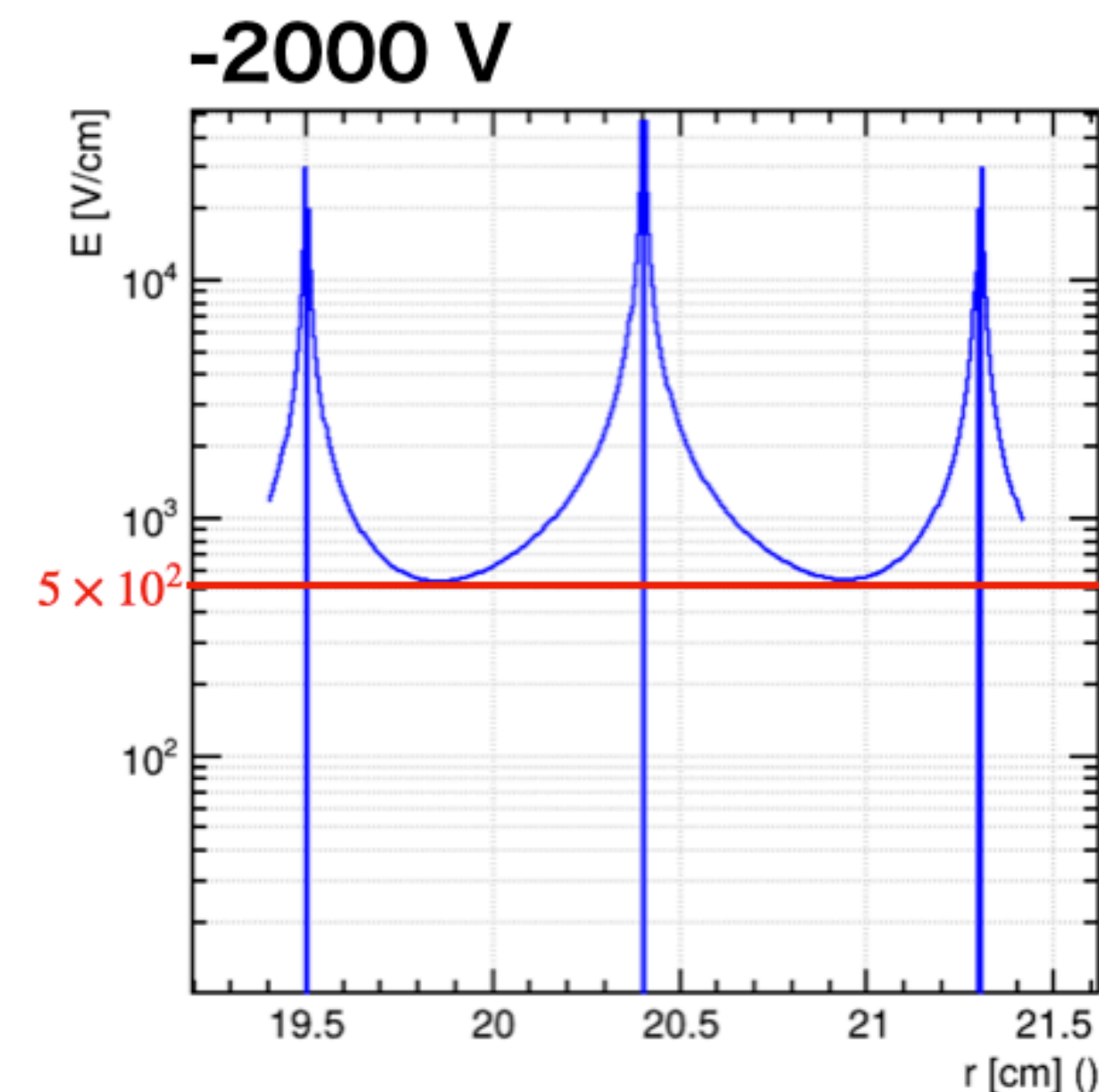
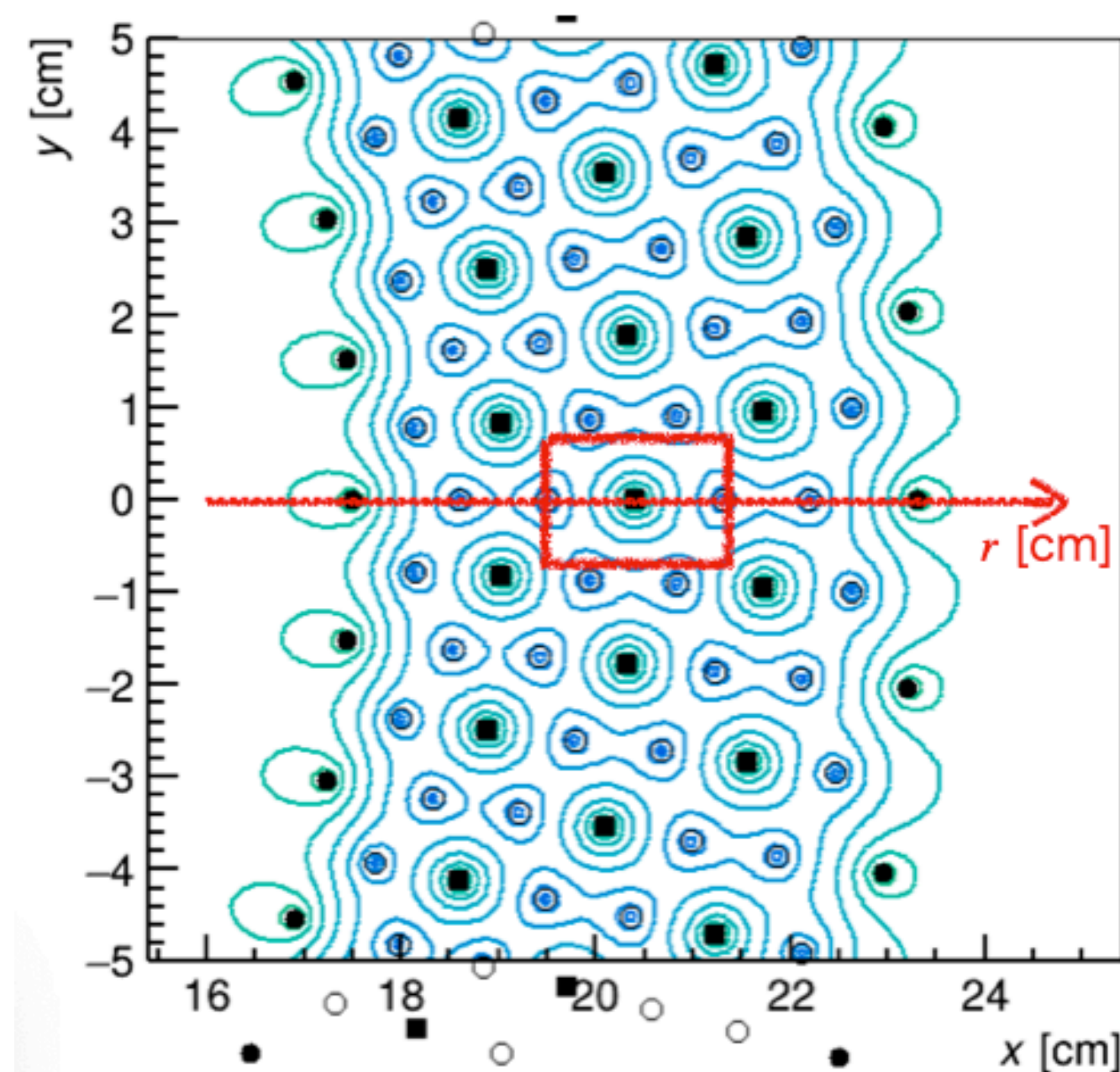
-2800 V ~ -2000 Vまで変化させても
ドリフト領域の下限は $5 \sim 7 \cdot 10^2$ 程度。

* ドリフト領域 : $E_{\min} < E < 1 \cdot 10^4$ V/cm

次ページで議論する

ドリフト速度と拡散については

ここで得られたドリフト領域に注目する。

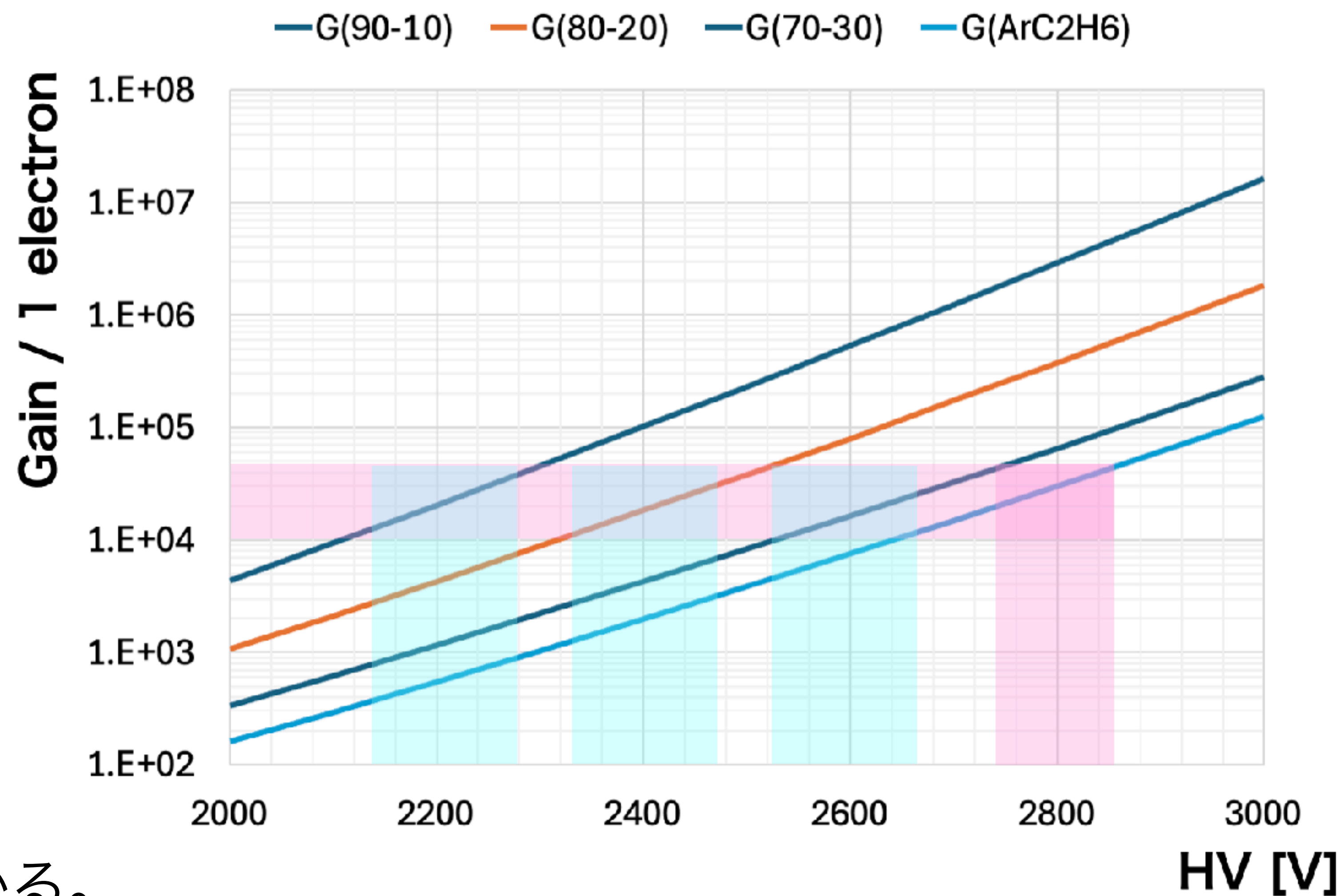


増幅率計算

E80-CDCにおける増幅率を
シミュレーションツール
Garfield++を用いて見積もった。

E15-CDCではAr-C2H6 (50:50)を
増幅率 3×10^4 程度の電圧値で
動作させていた。

例えばAr-CO₂ (90:10)では
2200 V印加すると
適切な増幅率が得られることがわかる。



増幅率測定

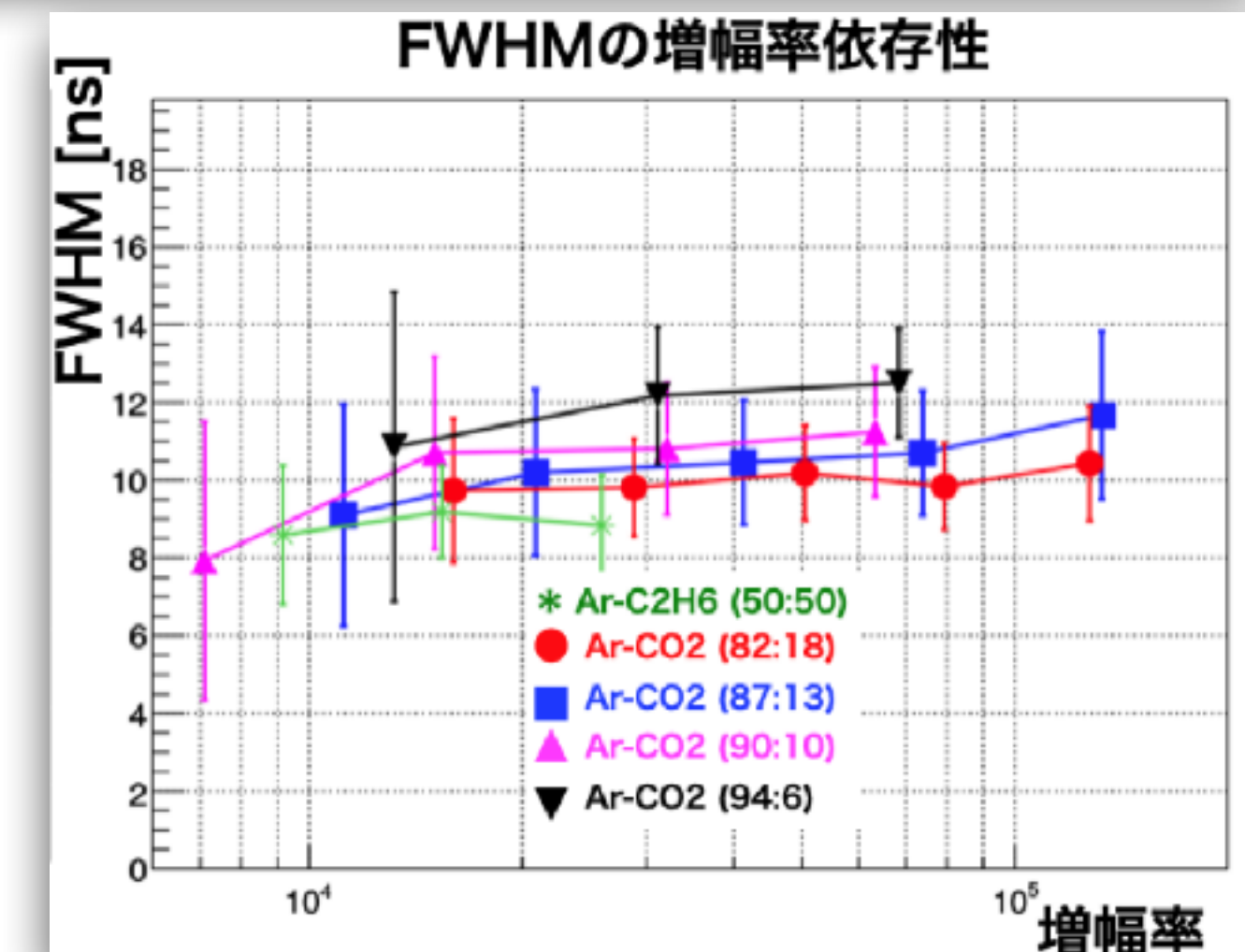
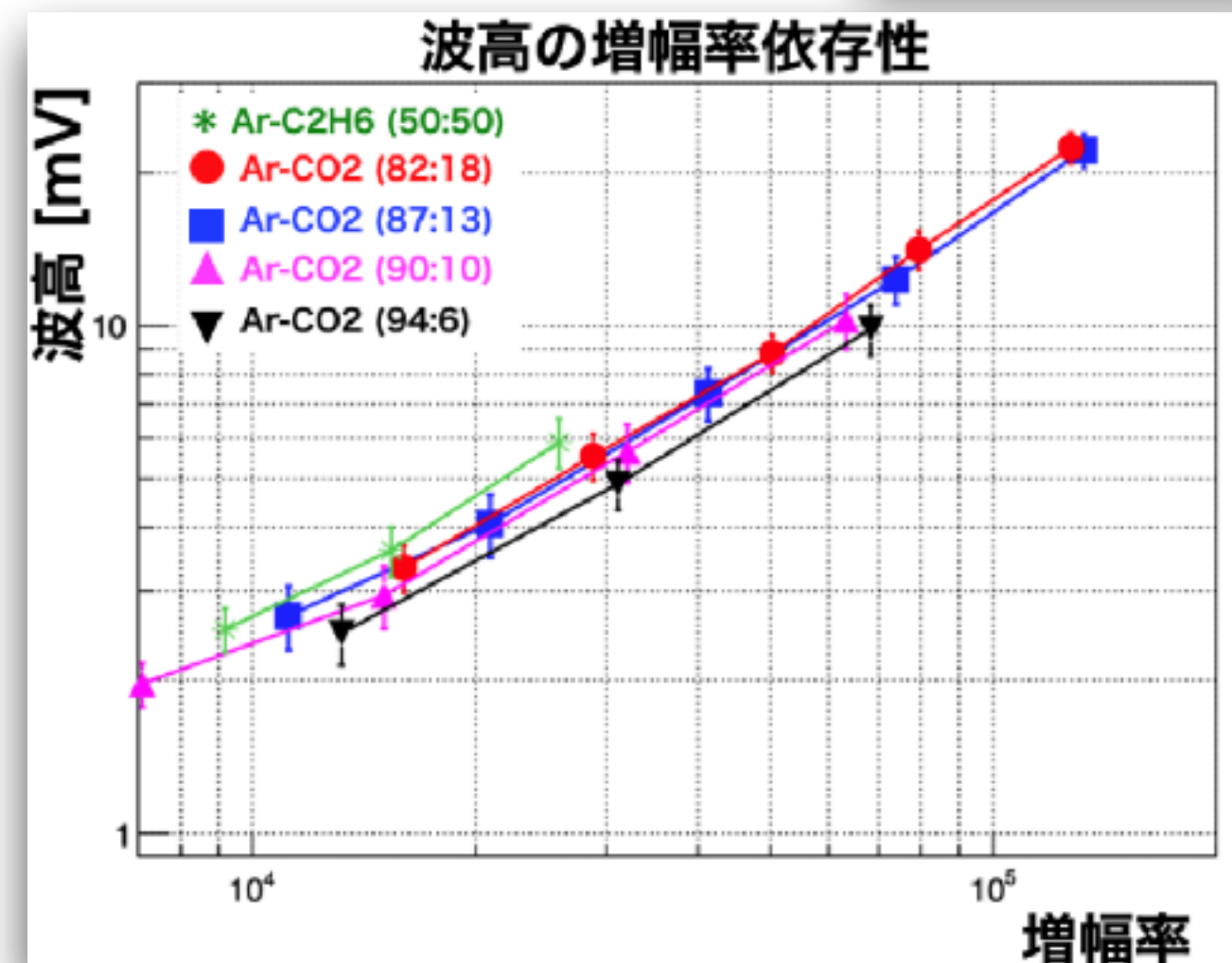
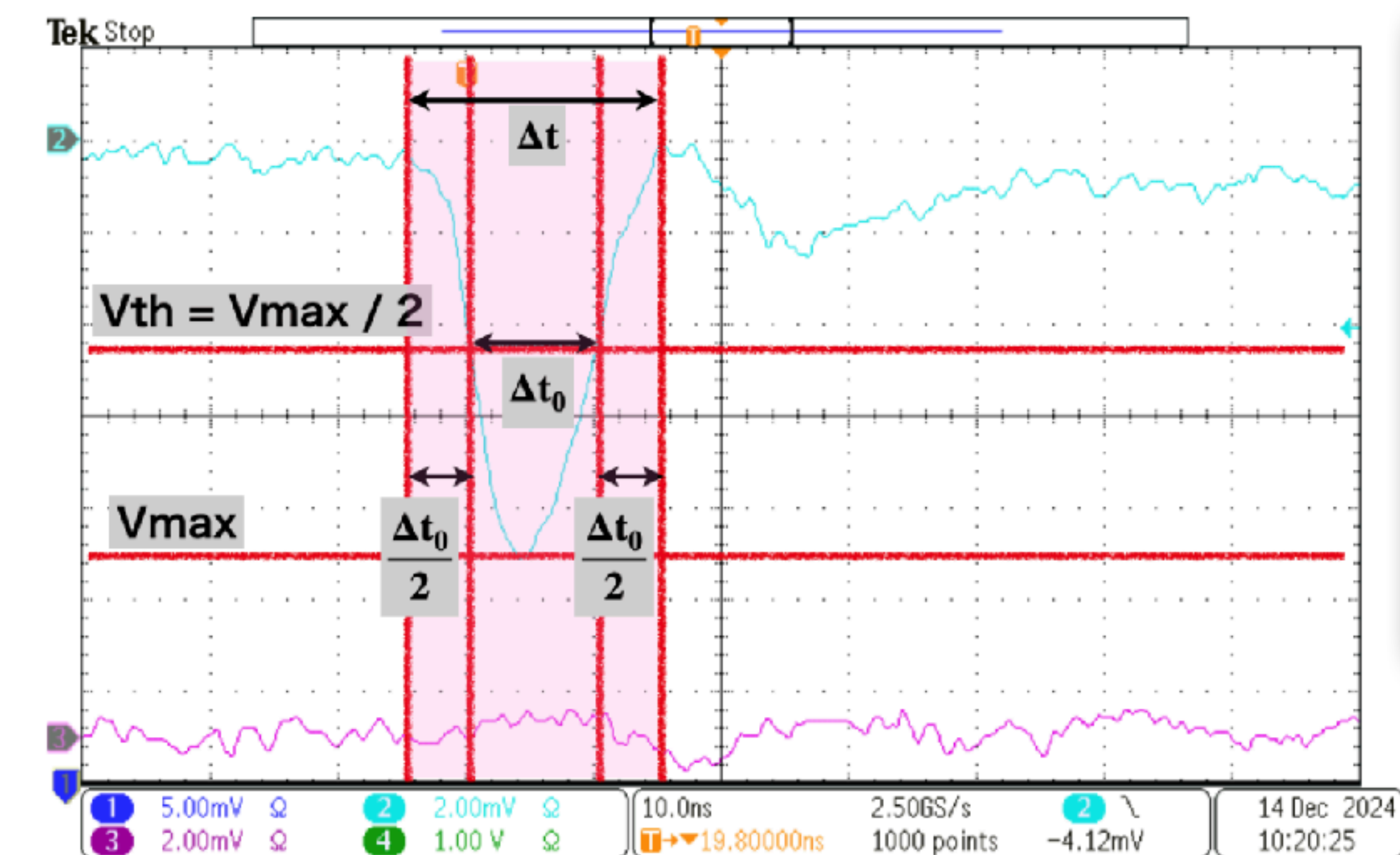
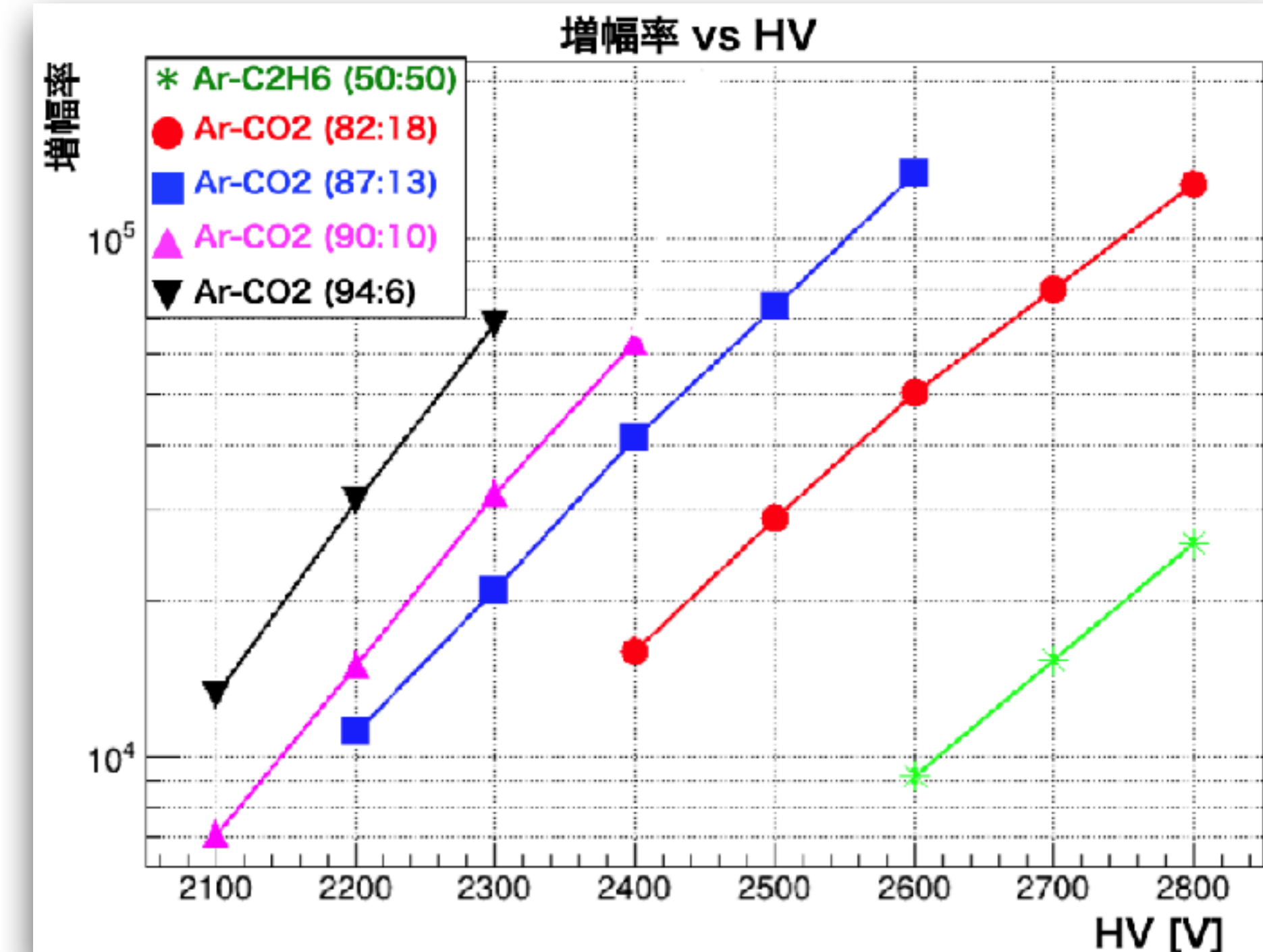
ガスの基本的性質として増幅率を調査した。

Ar-C2H6 (50:50)と90:10付近の複数の混合比Ar-CO2について、波形(電圧値)を0.4ns刻みで取得
→ 積分して電荷量 Q を得た。

積分範囲は下図の通り Δt

$$\text{増幅率 } G = \frac{Q}{e \cdot n_T}$$

n_T 1次電子数はガスの平均イオン化エネルギーから得た。



統計後さの範囲内で明確な違いはない

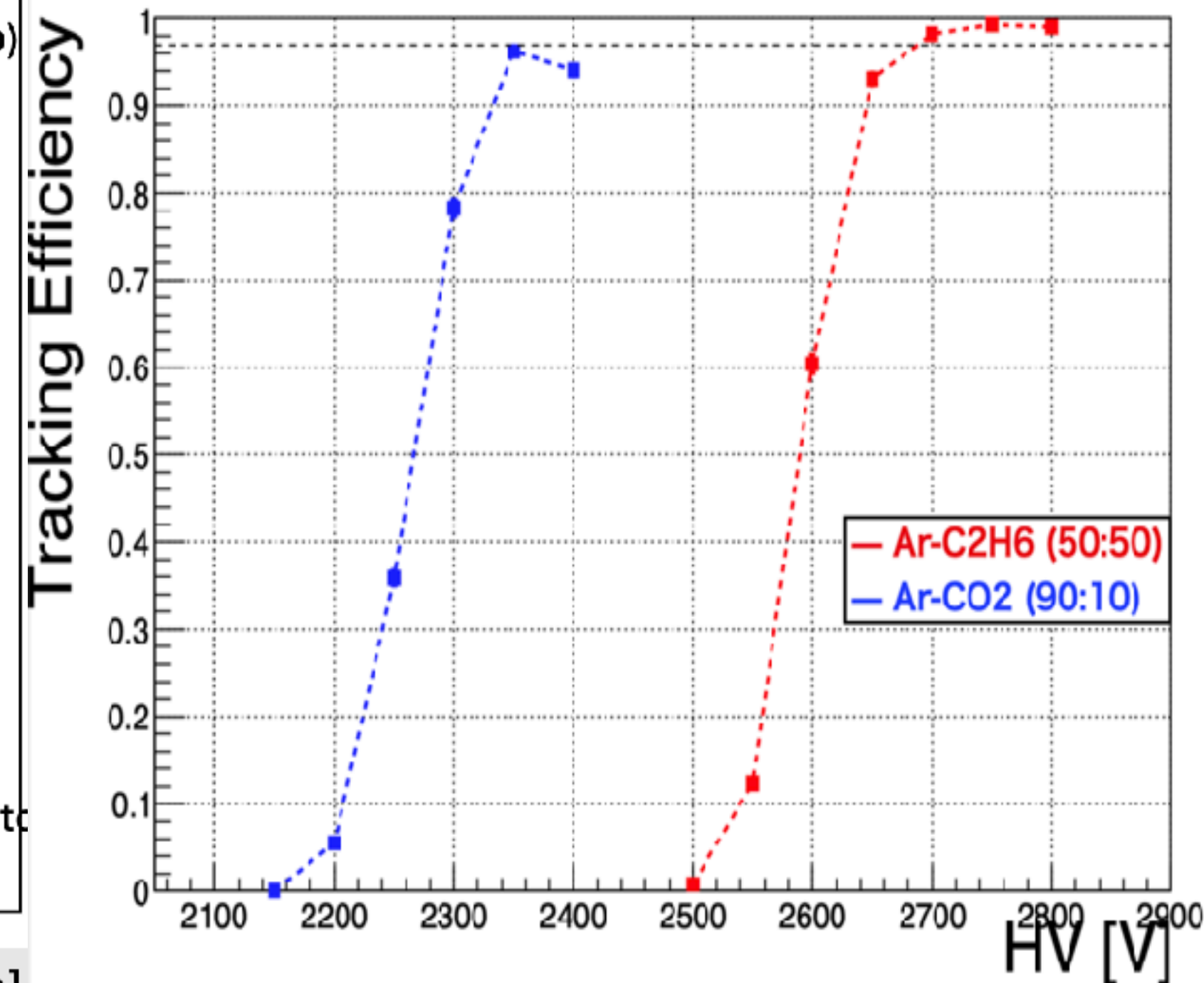
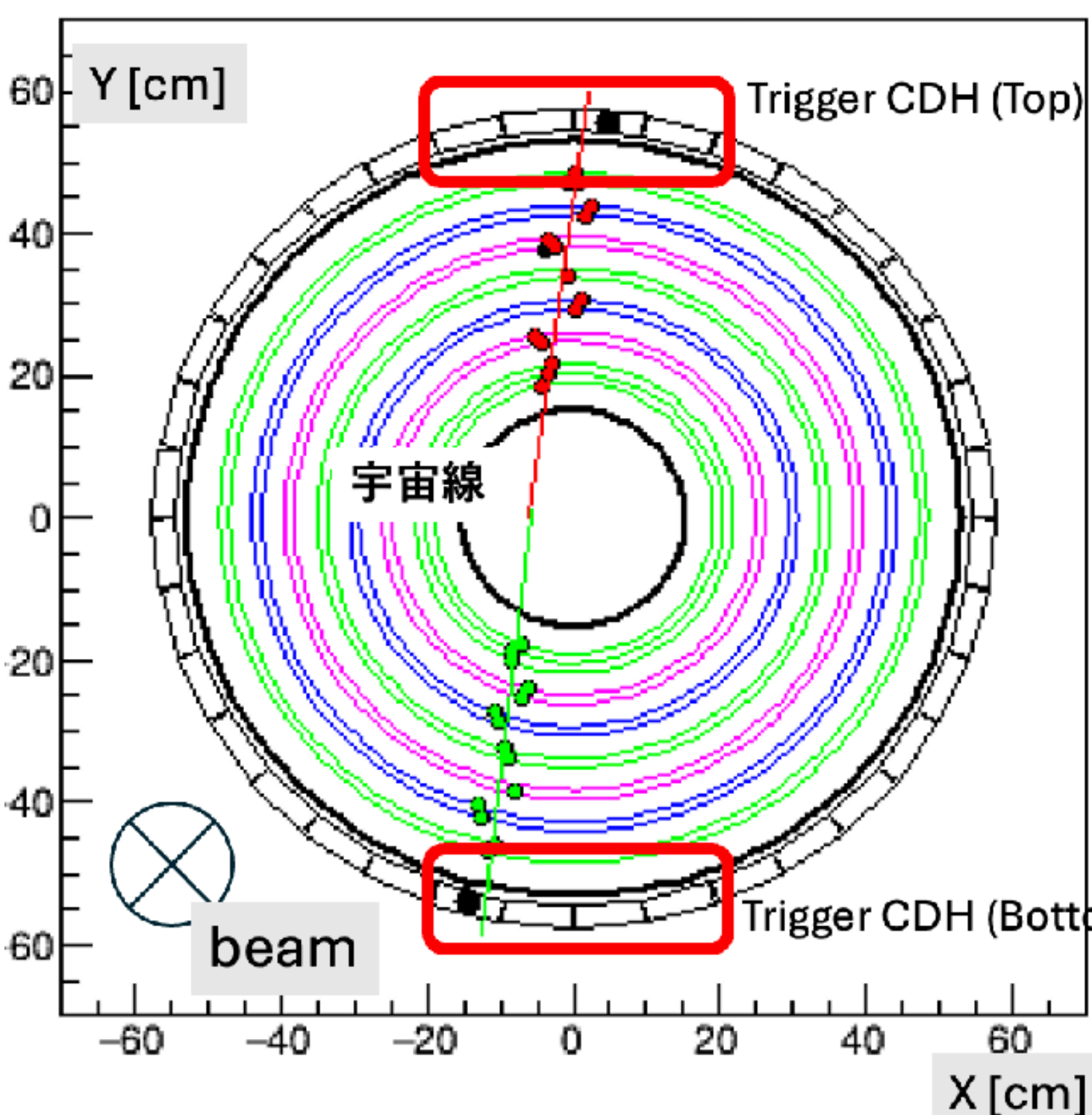
旧CDCによる宇宙線テスト

トラッキング効率の比較

要求性能

$$E_{\text{Tr}} = \frac{N_{\text{Tr}}}{N_{\text{CDH}}} > 97\%$$

Tracking Efficiency vs HV



Ar-C2H6 (50:50)と同様のトラッキングの手順では要求性能に達しなかった。(中央図)

ノイズが多いとトラッキング条件に抵触する。

なるべくシグナルのみを選択する必要がある。

TOT閾値を調節した時のトラッキング効率が右図。

横軸をTOTにして

2400V、2350V

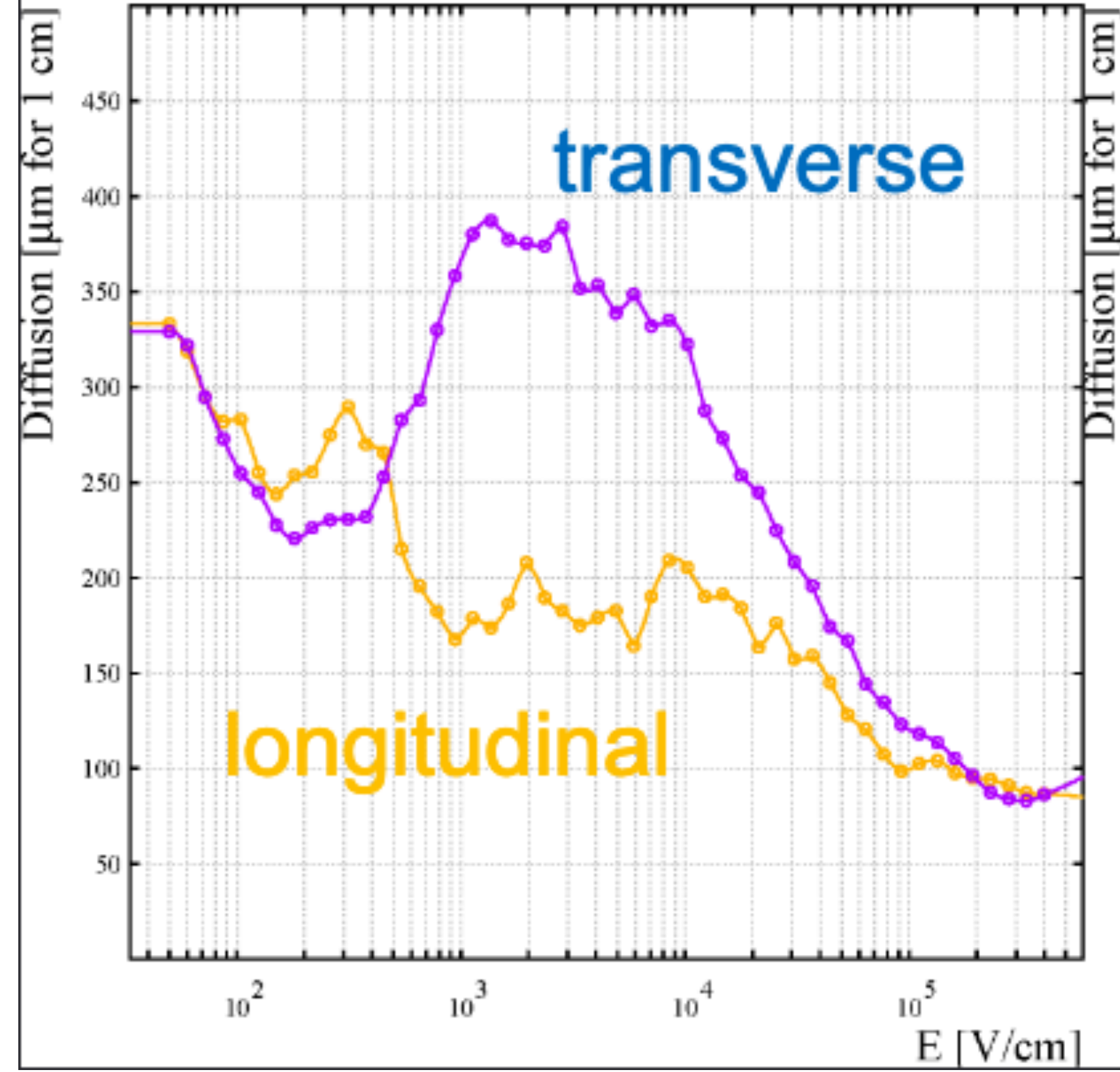
Ar-CO2 (90:10) においては2400 V印加時に

TOT > 50 (70) というカットのもとで要求性能を満たした。

拡散

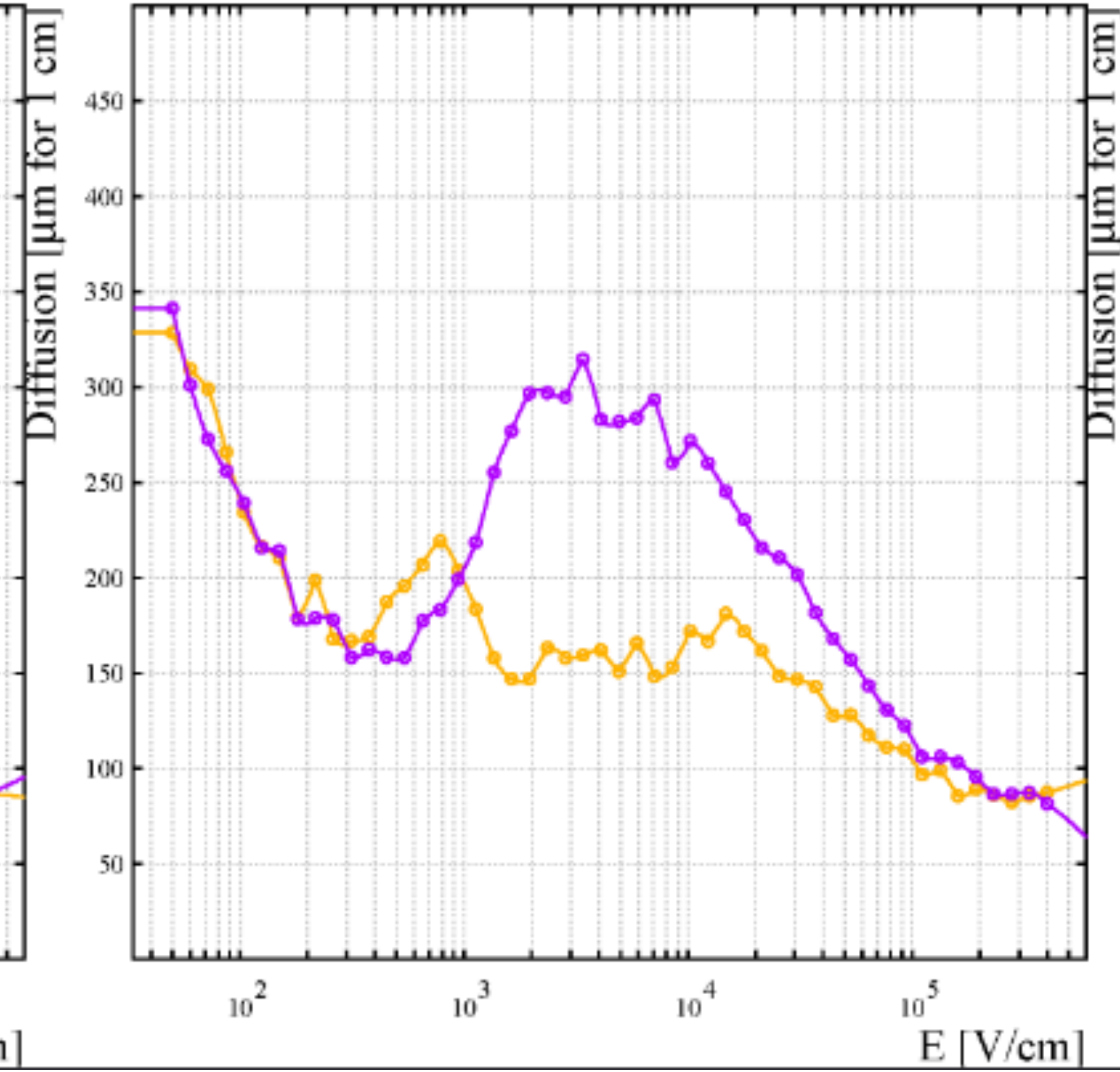
Diffusion coefficients vs E

Gas: CO₂ 10%, Ar 90%, T=300 K, p=1 atm



Diffusion coefficients vs E

Gas: CO₂ 20%, Ar 80%, T=300 K, p=1 atm



Diffusion coefficients vs E

Gas: CO₂ 30%, Ar 70%, T=300 K, p=1 atm

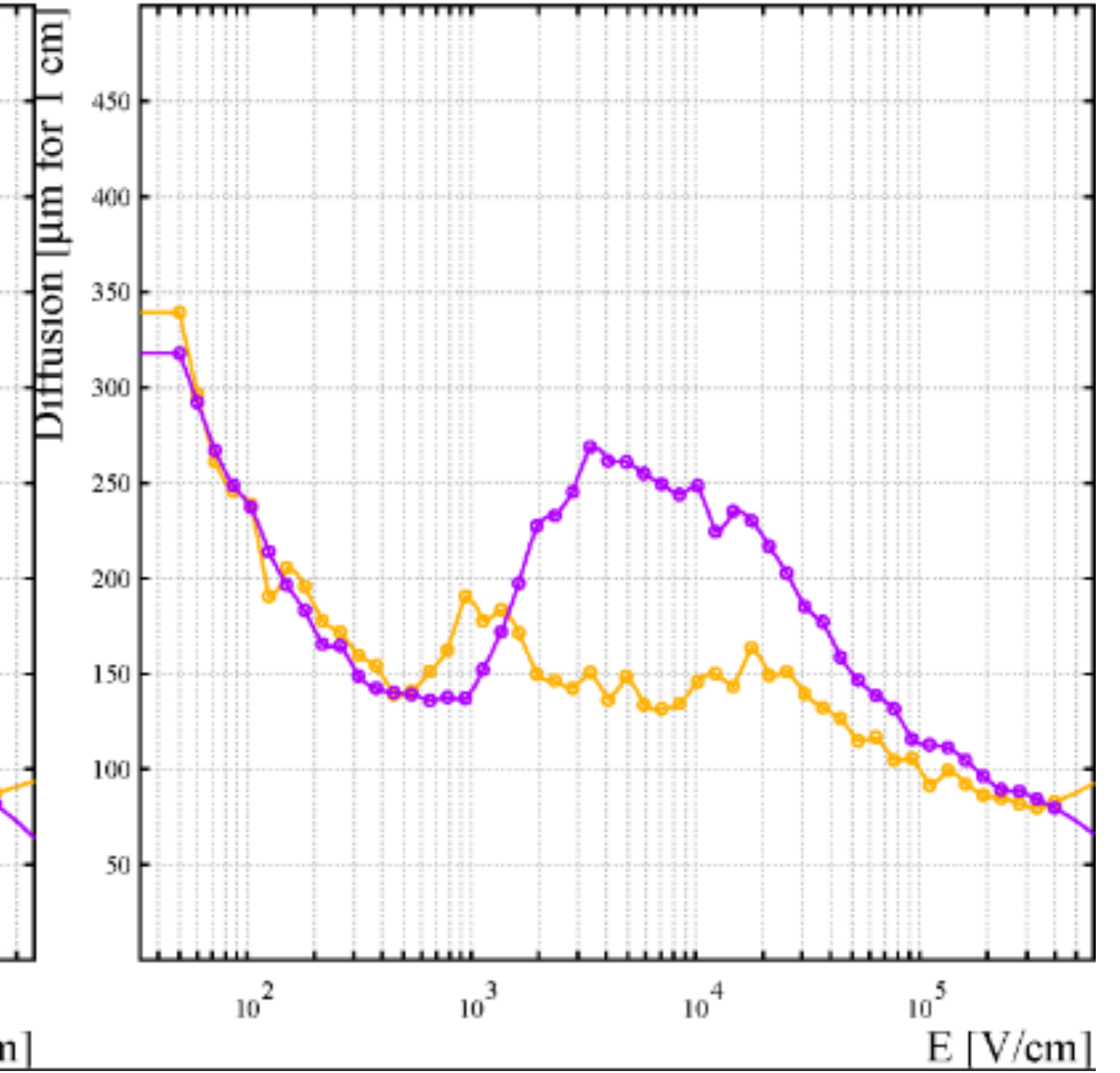
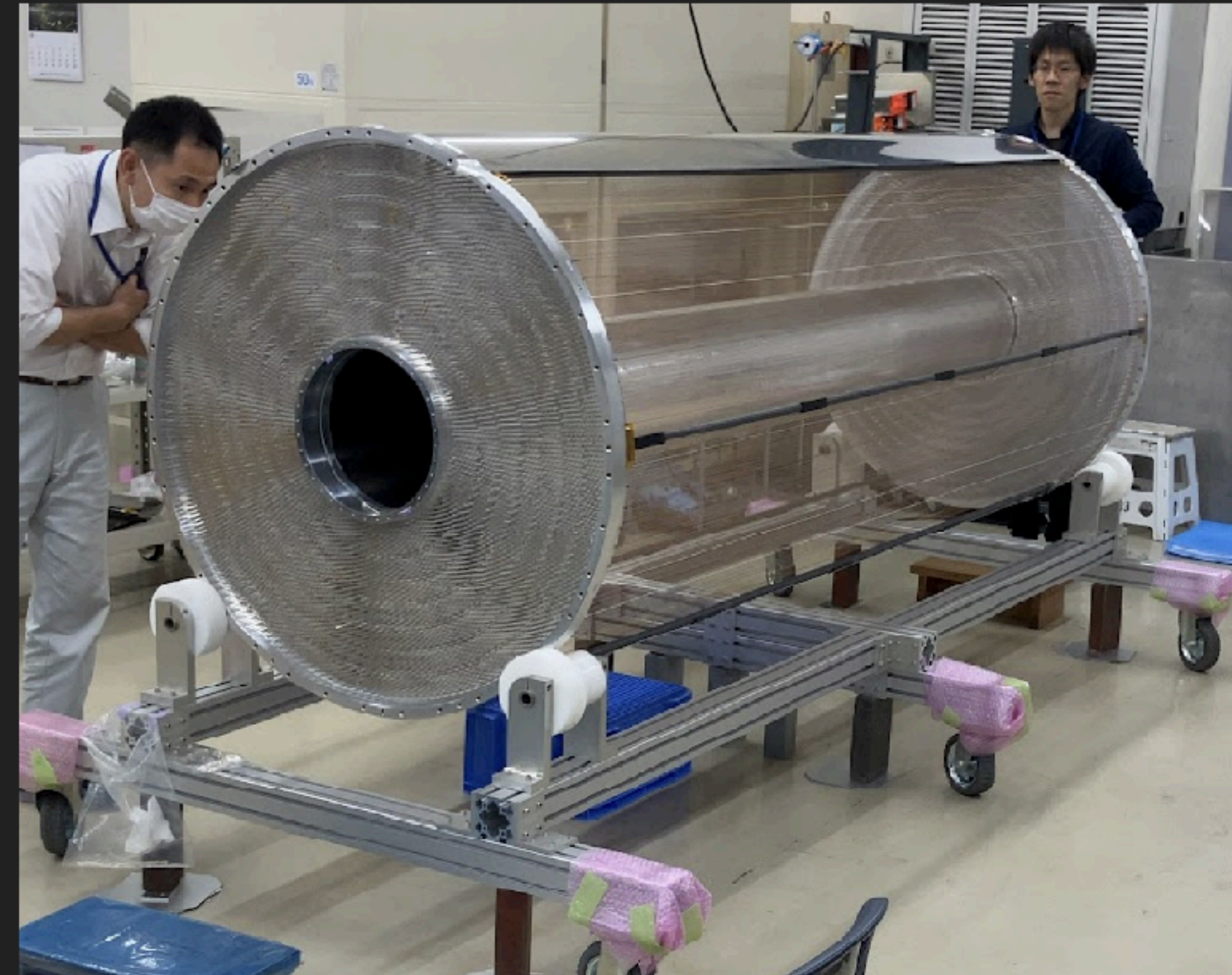
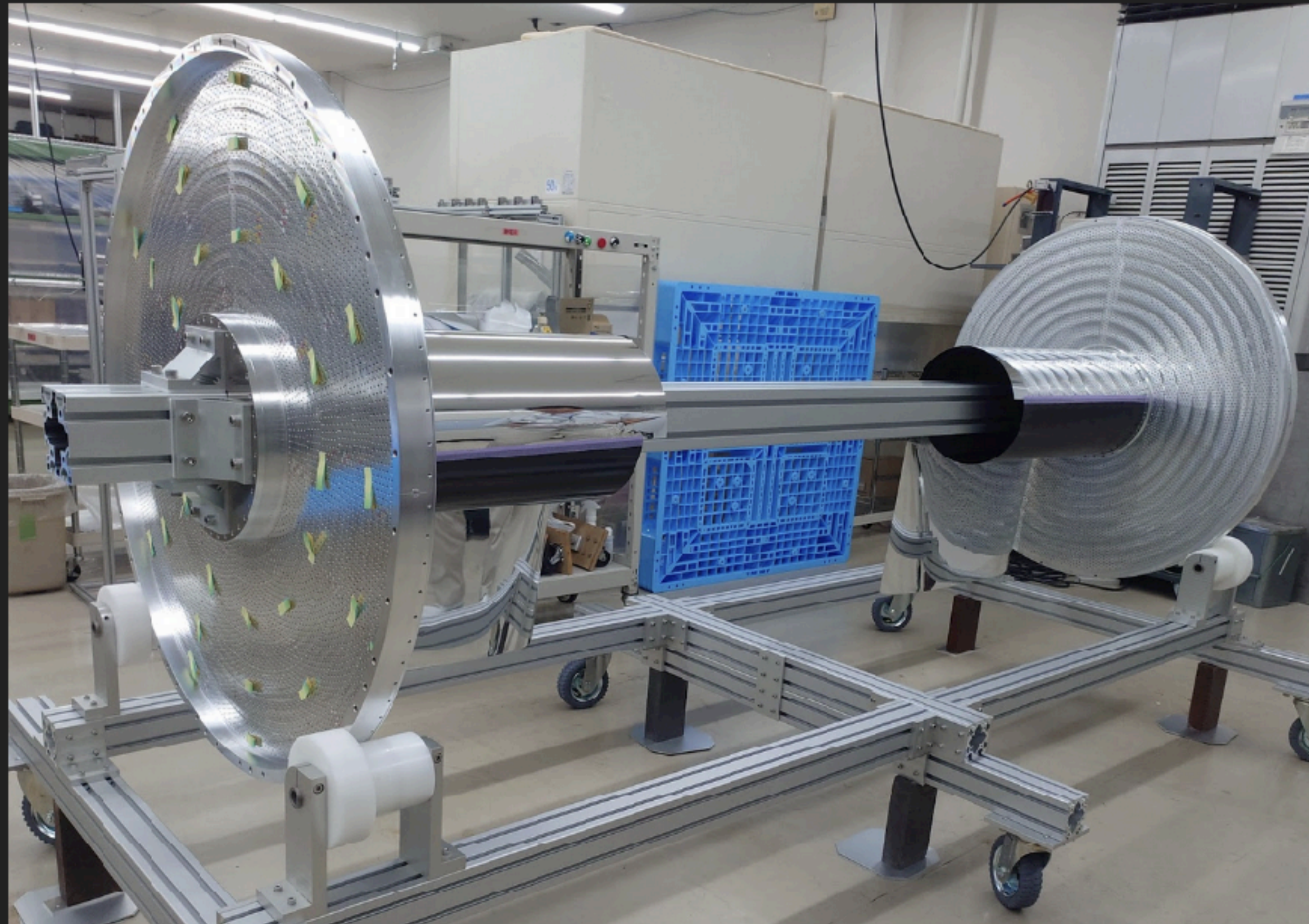


表 A.1: 気体の物理特性 [43]

Gas	Z	A	ρ (g/cm ³)	E_{ex} (eV)	E_1 (eV)	I_0 (eV)	W_1 (eV)	$\frac{dE}{dz}_0$ (keV/cm)	n_p (cm ⁻¹)	n_T (cm ⁻¹)
H ₂	2	2	8.38×10^{-5}	10.8	15.9	15.4	37	0.34	5.2	9.2
He	2	4	1.66×10^{-4}	19.8	24.5	24.6	41	0.32	5.9	7.8
N ₂	14	28	1.17×10^{-3}	8.1	16.7	15.5	35	1.96	(10)	56
O ₂	16	32	1.33×10^{-3}	7.9	12.8	12.2	31	2.26	22	73
Ne	10	20.2	8.39×10^{-4}	16.6	21.5	21.6	36	1.41	12	39
Ar	18	39.9	1.66×10^{-3}	11.6	15.7	15.8	26	2.44	29.4	94
Kr	36	83.8	3.49×10^{-3}	10.0	13.9	14.0	24	4.60	(22)	192
Xe	54	131.3	5.49×10^{-3}	8.4	12.1	12.1	22	6.76	44	307
CO ₂	22	44	1.86×10^{-3}	5.2	13.7	13.7	37	3.01	(34)	91
CH ₄	10	16	6.70×10^{-4}	15.2	15.2	13.1	28	1.48	16	53
C ₄ H ₁₀	34	58	2.42×10^{-3}	10.6	10.8	10.8	23	4.50	(46)	195

CDC立ち上げ

- Designed by F. Sakuma (RIKEN)
- Wire stringing work *by workers of Hayashi Repic corp.* (Dec. 2023 ~ Jun. 2024)



CDC立ち上げ

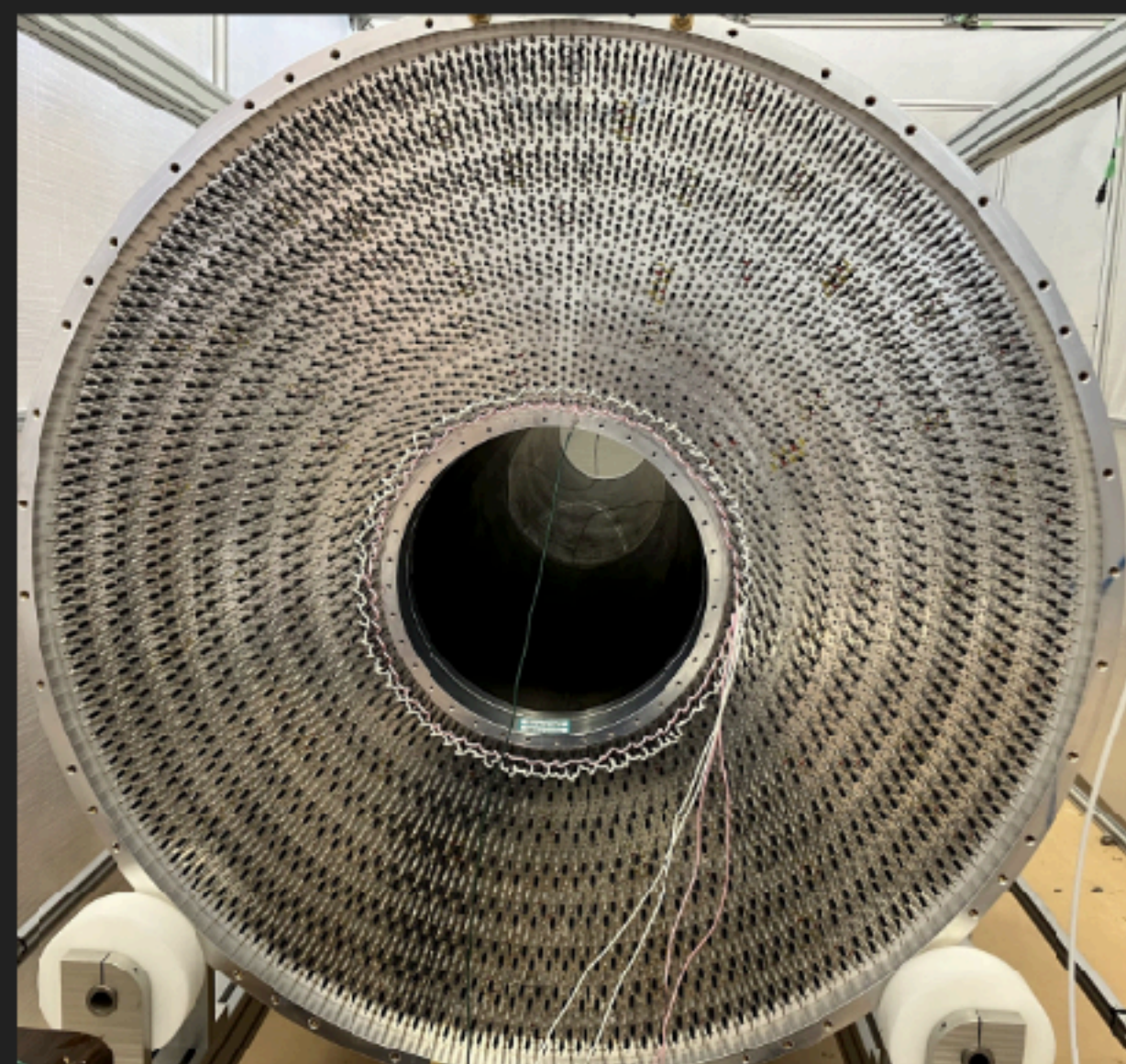
- Designed by F. Sakuma (RIKEN)
- Wire stringing work by workers of Hayashi Repic corp. (Dec. 2023 ~ Jun. 2024)
- Making daisy chains to supply HV to wires **by Y. Kimura (me)** (Jul. 2024 ~ Aug. 2024)



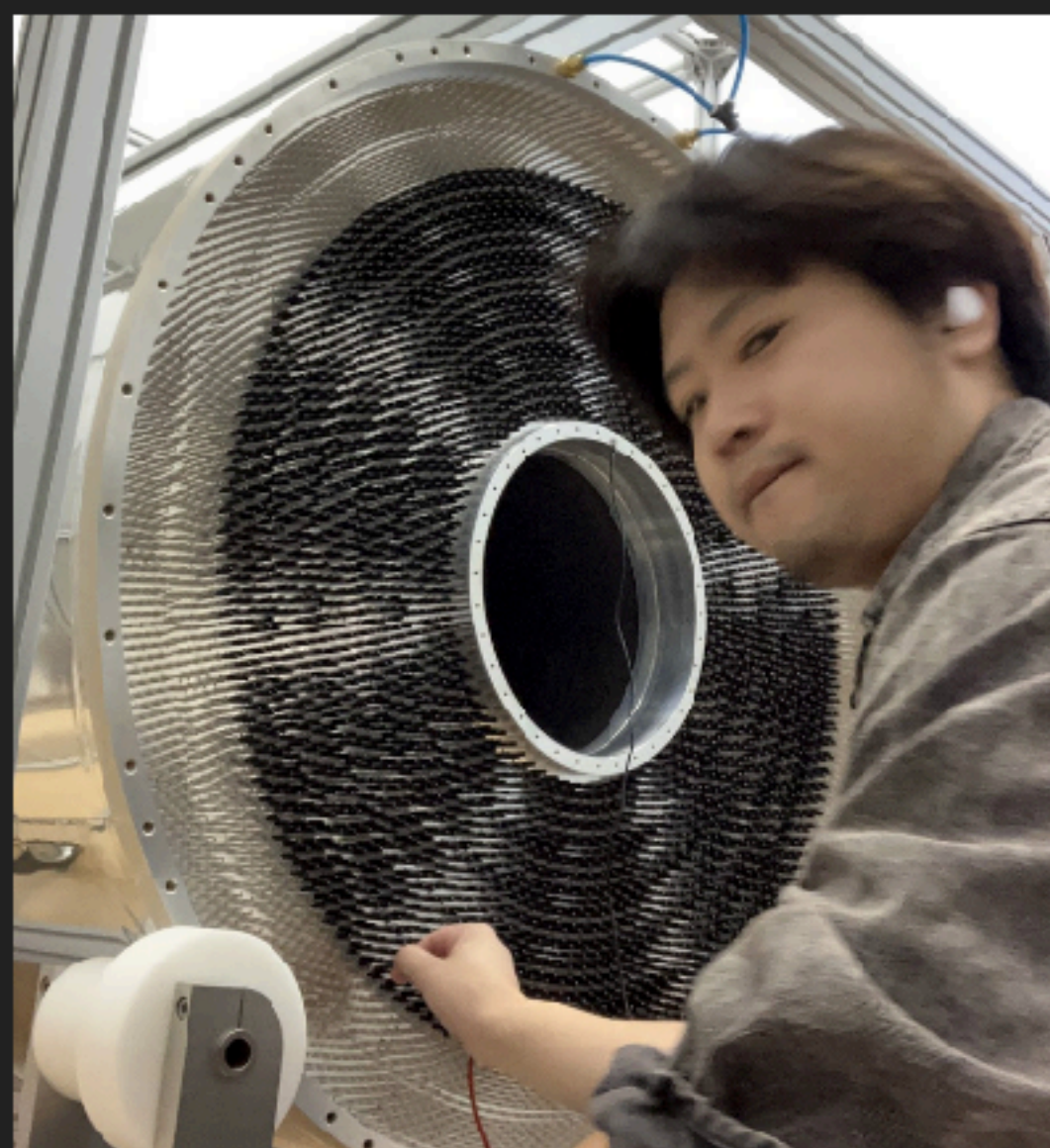
CDC立ち上げ

- Designed by F. Sakuma (RIKEN)
- Wire stringing work by workers of Hayashi Repic corp. (Dec. 2023 ~ Jun. 2024)
- Making daisy chains to supply HV to wires by Y. Kimura (me) (Jul. 2024 ~ Aug. 2024)
- Preparing for wire aging *by Y. Kimura (me) with F. Sakuma* (Sep. 2024 ~ Oct. 2024)

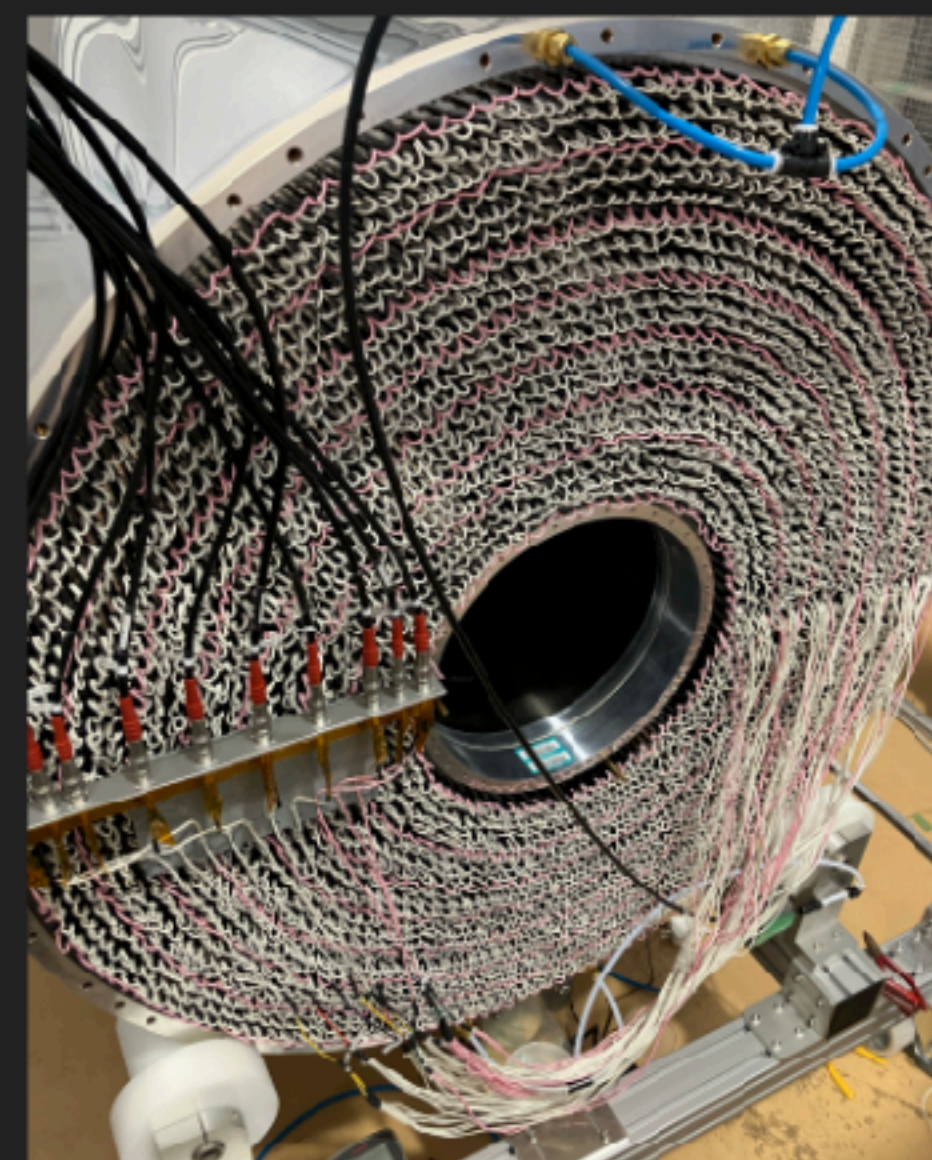
HV side



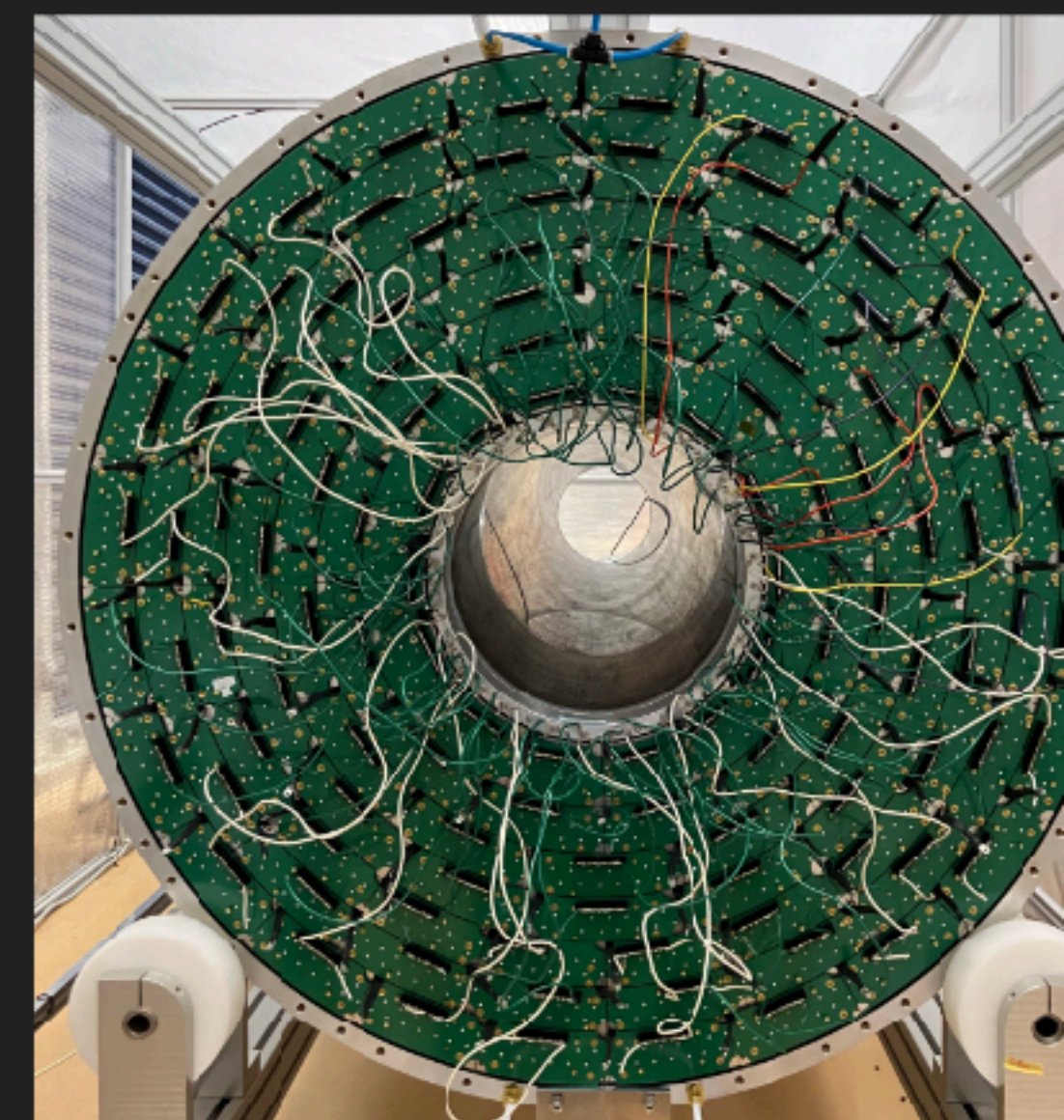
Read-out side



HV side'



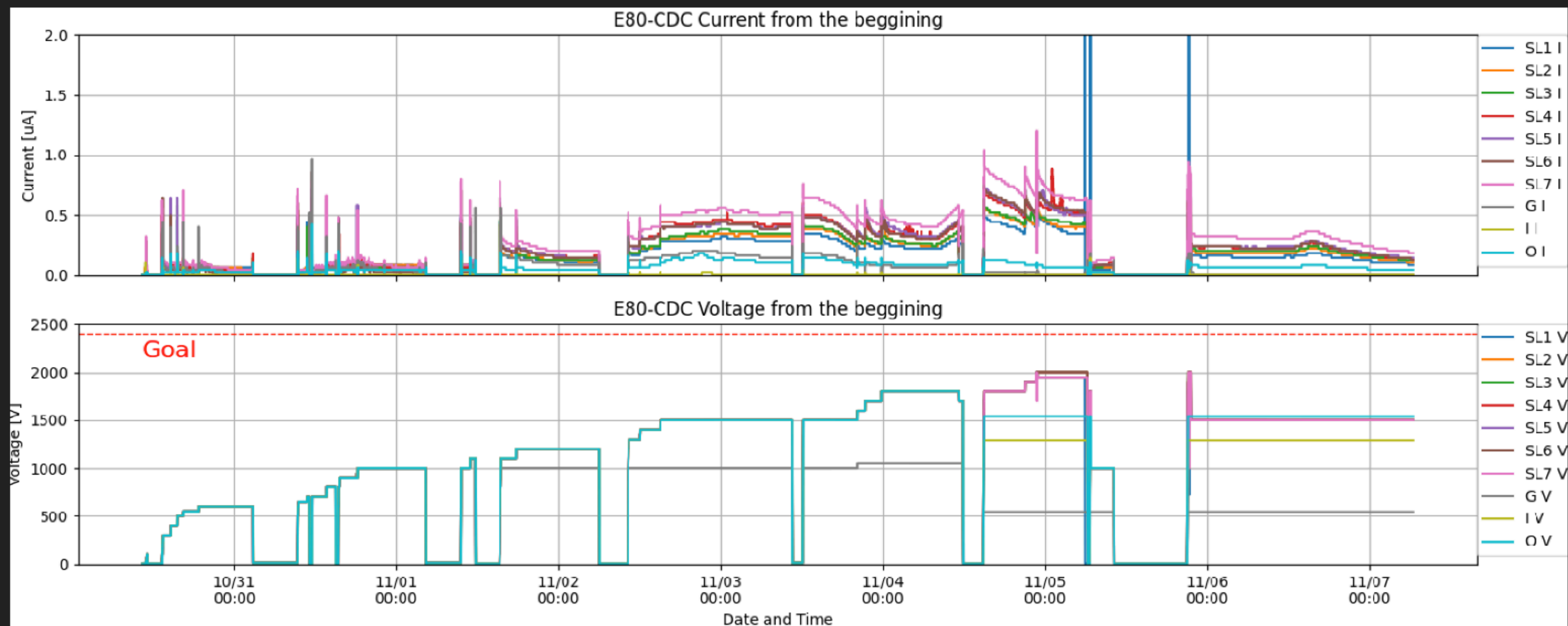
Read-out side'



We thought that finally it's time to apply HV! But, it didn't work well...
We spent a week to find two broken wires.

CDC立ち上げ

- Designed by F. Sakuma (RIKEN)
- Wire stringing work by workers of Hayashi Repic corp. (Dec. 2023 ~ Jun. 2024)
- Making daisy chains to supply HV to wires by Y. Kimura (me) (Jul. 2024 ~ Aug. 2024)
- Preparing for wire aging by Y. Kimura (me) with F. Sakuma (Sep. 2024 ~ Oct. 2024)
- Wire aging **by Y. Kimura (me)** (Oct. 2024 ~)



Back-up

Table 12: Cell configuration of the CDC.

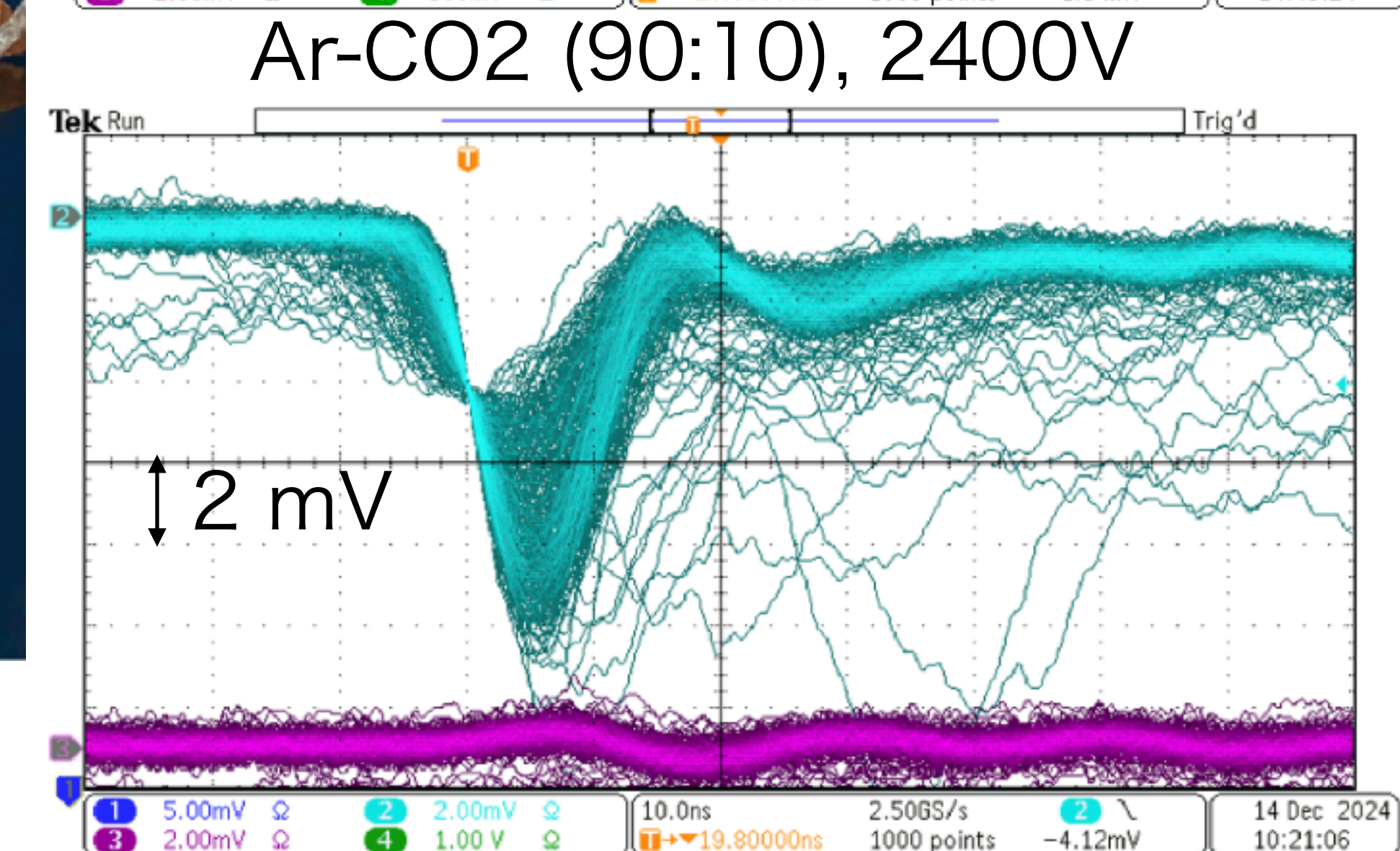
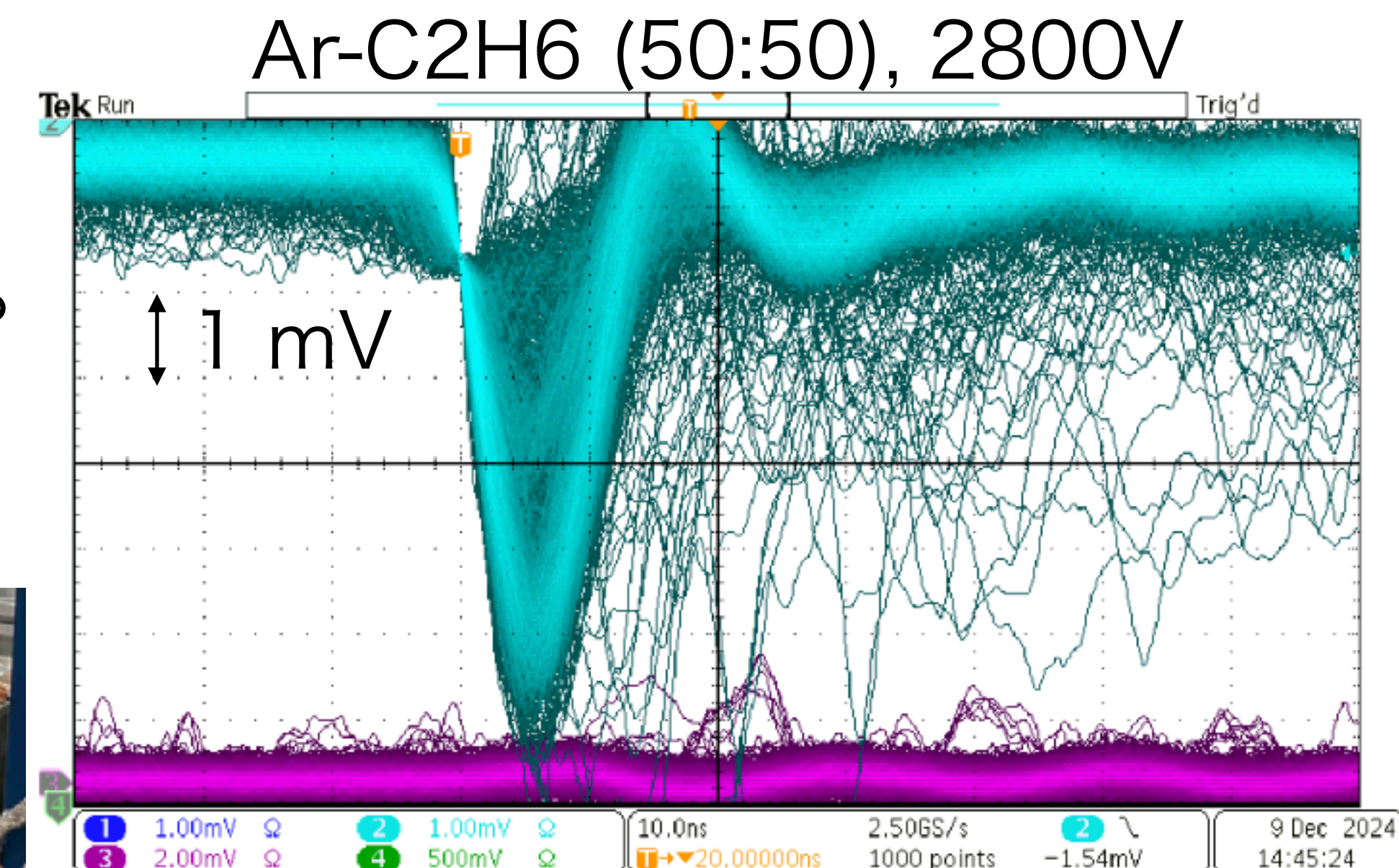
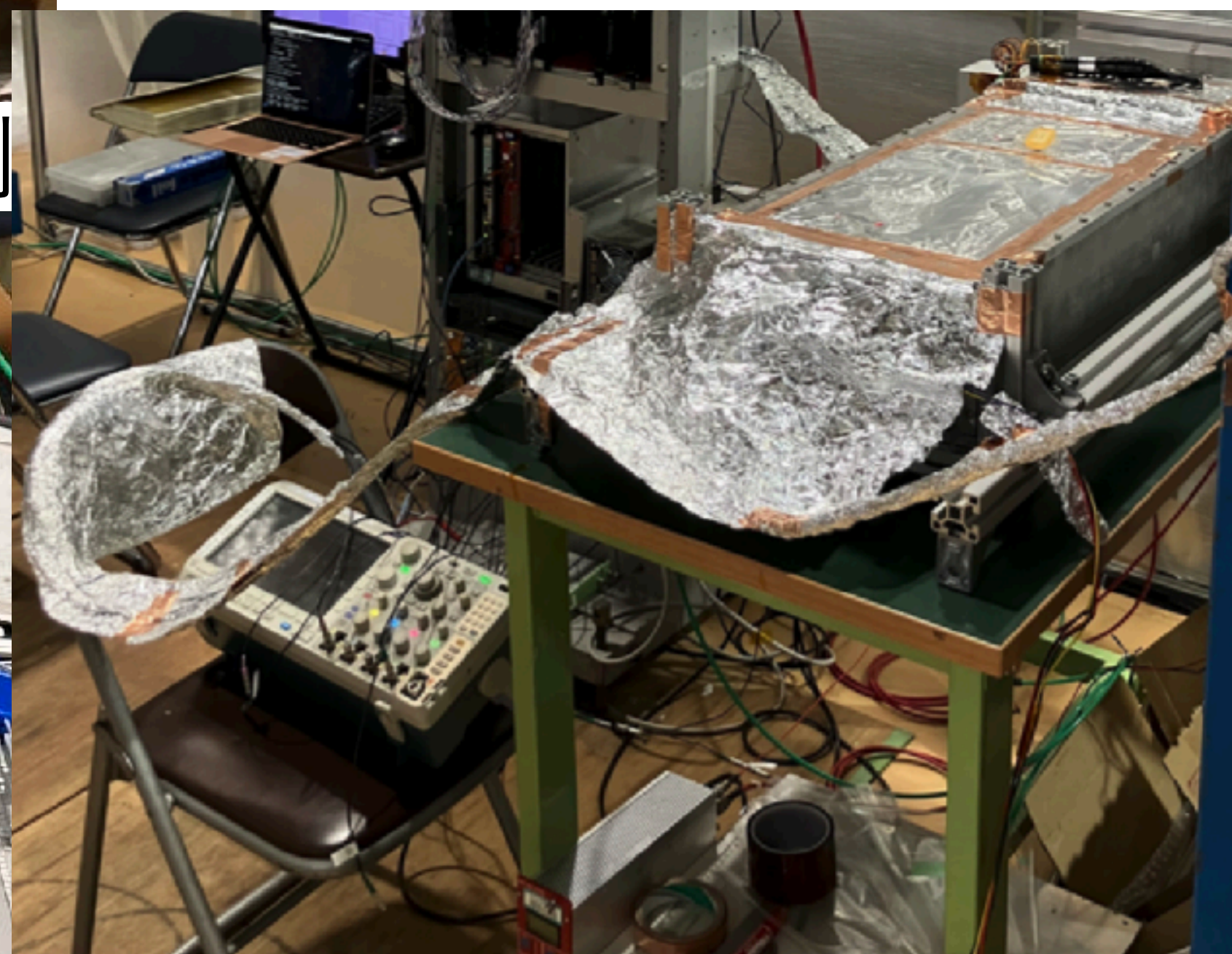
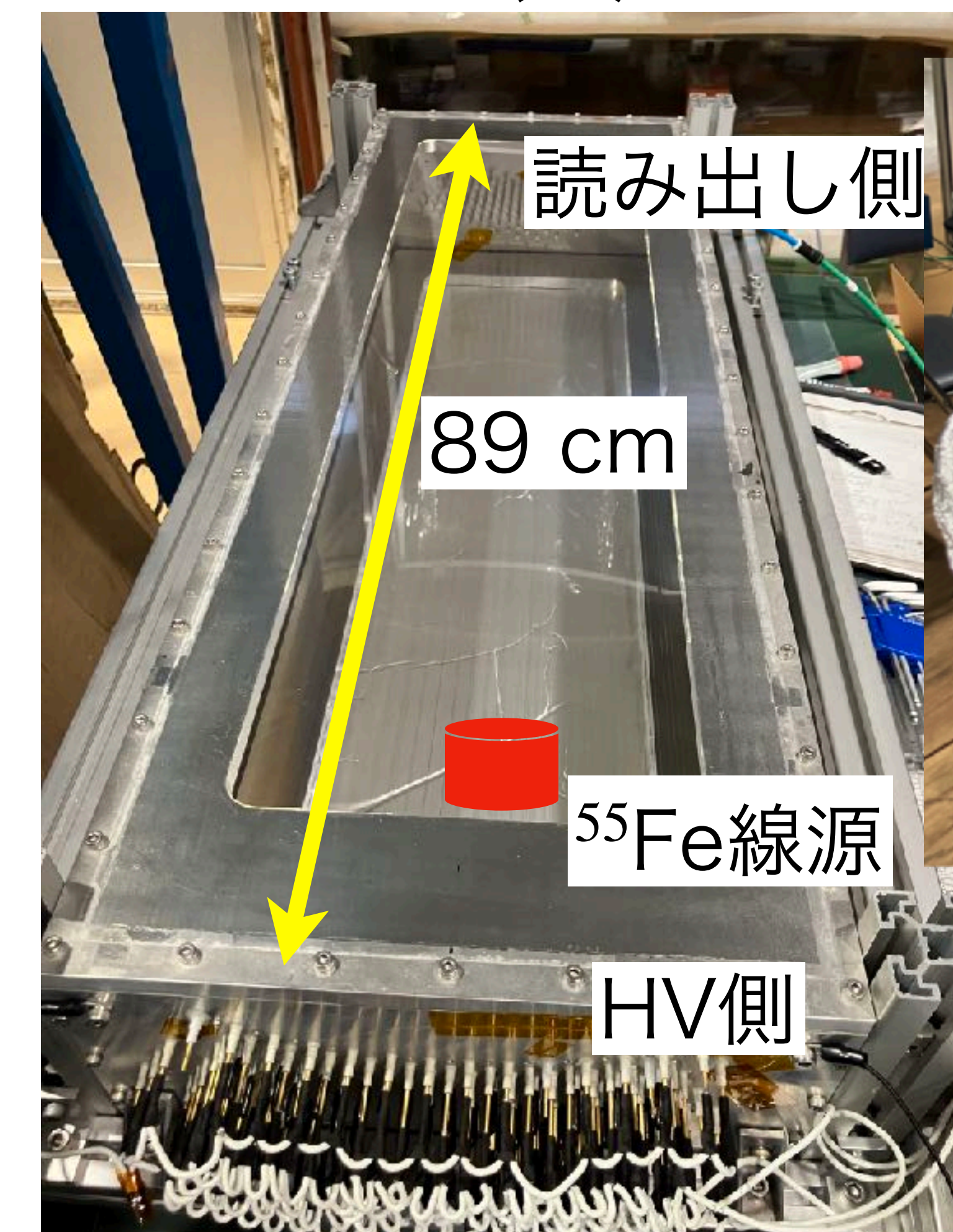
Super-layer	layer	Wire direction	Radius (mm)	Cell width (degree)	Cell width (mm)	Stereo angle (degree)	Signal channels per layer
A1	1	X	190.5	5.00	16.7	0	72
	2	X'	204.0		17.8	0	
	3	X	217.5		19.0	0	
U1	4	U	248.5	4.00	17.3	-2.27	90
	5	U'	262.0		18.3	-2.39	
V1	6	V	293.0	3.60	18.4	2.42	100
	7	V'	306.5		19.3	2.53	
A2	8	X	337.5	3.00	17.7	0	120
	9	X'	351.0		18.4	0	
U2	10	U	382.0	2.40	16.0	-2.82	150
	11	U'	395.5		16.6	-2.92	
V2	12	V	426.5	2.25	16.7	2.96	160
	13	V'	440.0		17.3	3.05	
A3	14	X	471.0	2.00	16.4	0	180
	15	X'	484.5		16.9	0	

信号波形確認

ワイヤーから直接信号を
オシロスコープで観測した。

セル構造はE80(15)-CDCと同じ

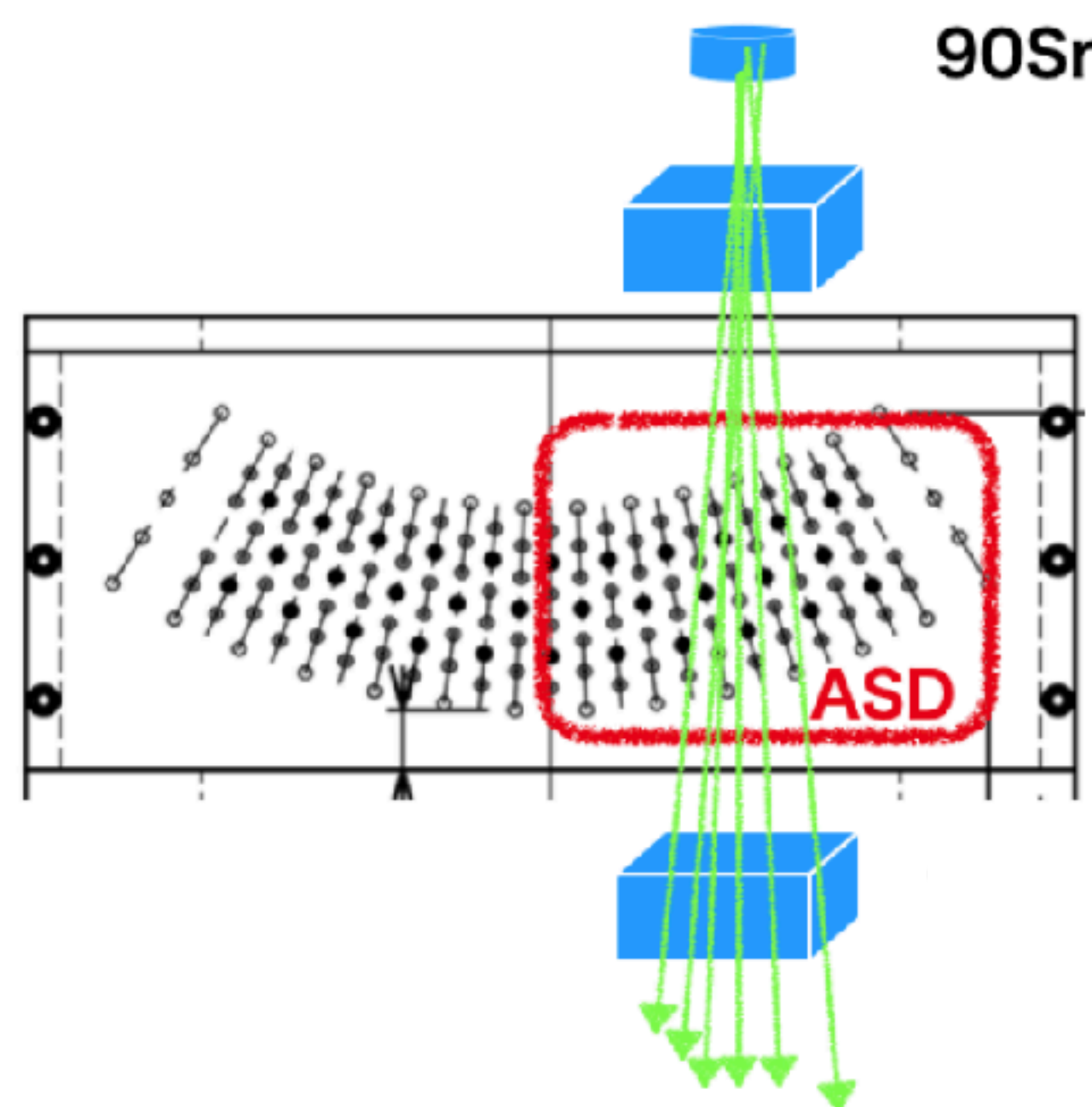
セットアップ図



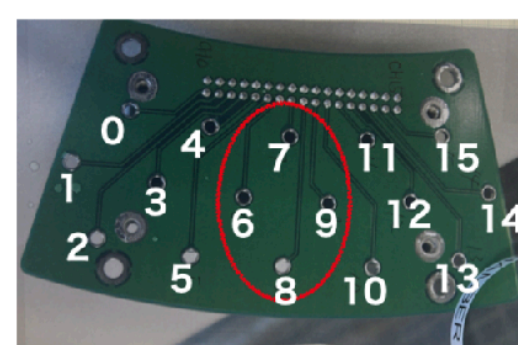
両ガス間で信号の波形に明らかな違いは見られなかった。

線源を使った検出効率測定

Ar-CO₂の場合に十分な検出効率が得られるかを調査した。



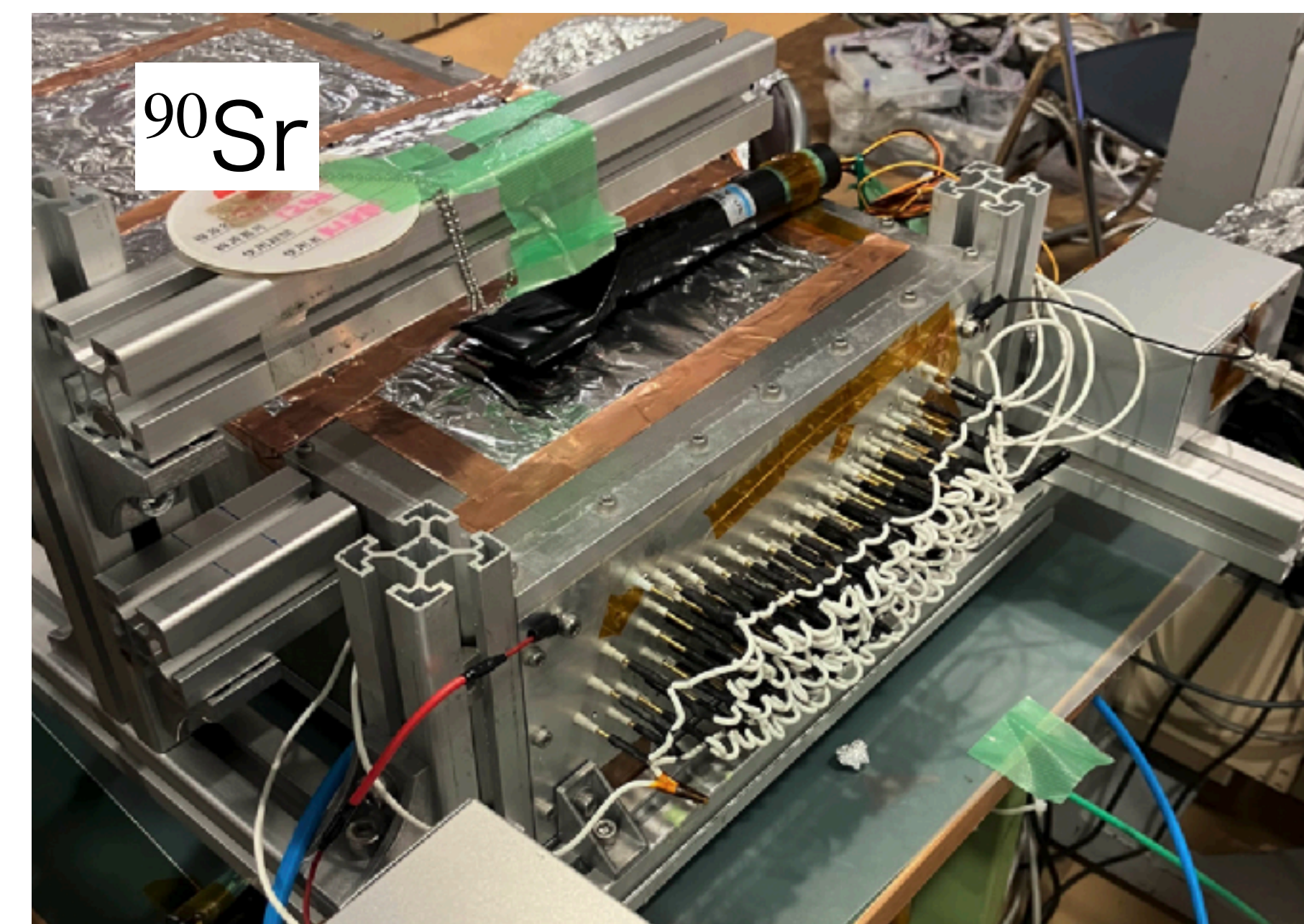
むしろこの部分のセル構造



検出効率の定義

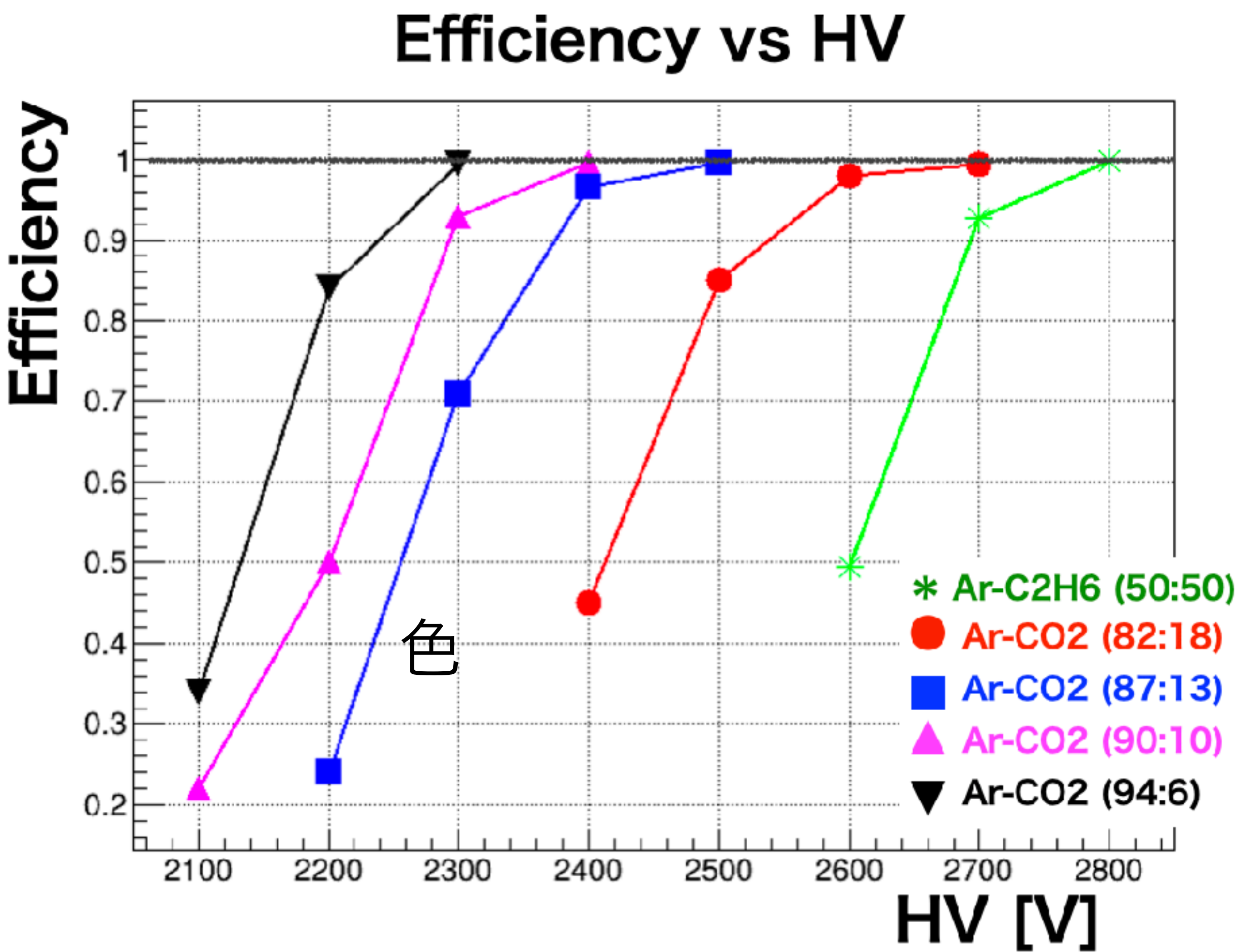
$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Hit1} \ \& \ \text{Hit4} \ \& \ (\text{Hit2} \ \text{or} \ \text{Hit3})}{\text{Hit1} \ \& \ \text{Hit4}}$$

実機



検出効率測定結果

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Hit1 \& Hit4 \& (Hit2 or Hit3)}}{\text{Hit1 \& Hit4}}$$



gas	90:10	Ar-C2H6 50:50	94:6	87:13	82:18
HV	2400V	2800V	2300V	2500V	2700V
Eff	0.996	0.998	0.998	0.996	0.993

いずれの混合比においても検出効率 ~100% が得られることが確かめられた。

ドリフト速度の観点からは90:10が望ましいため、以下でトラッキングを含めたより詳細な評価を行った。

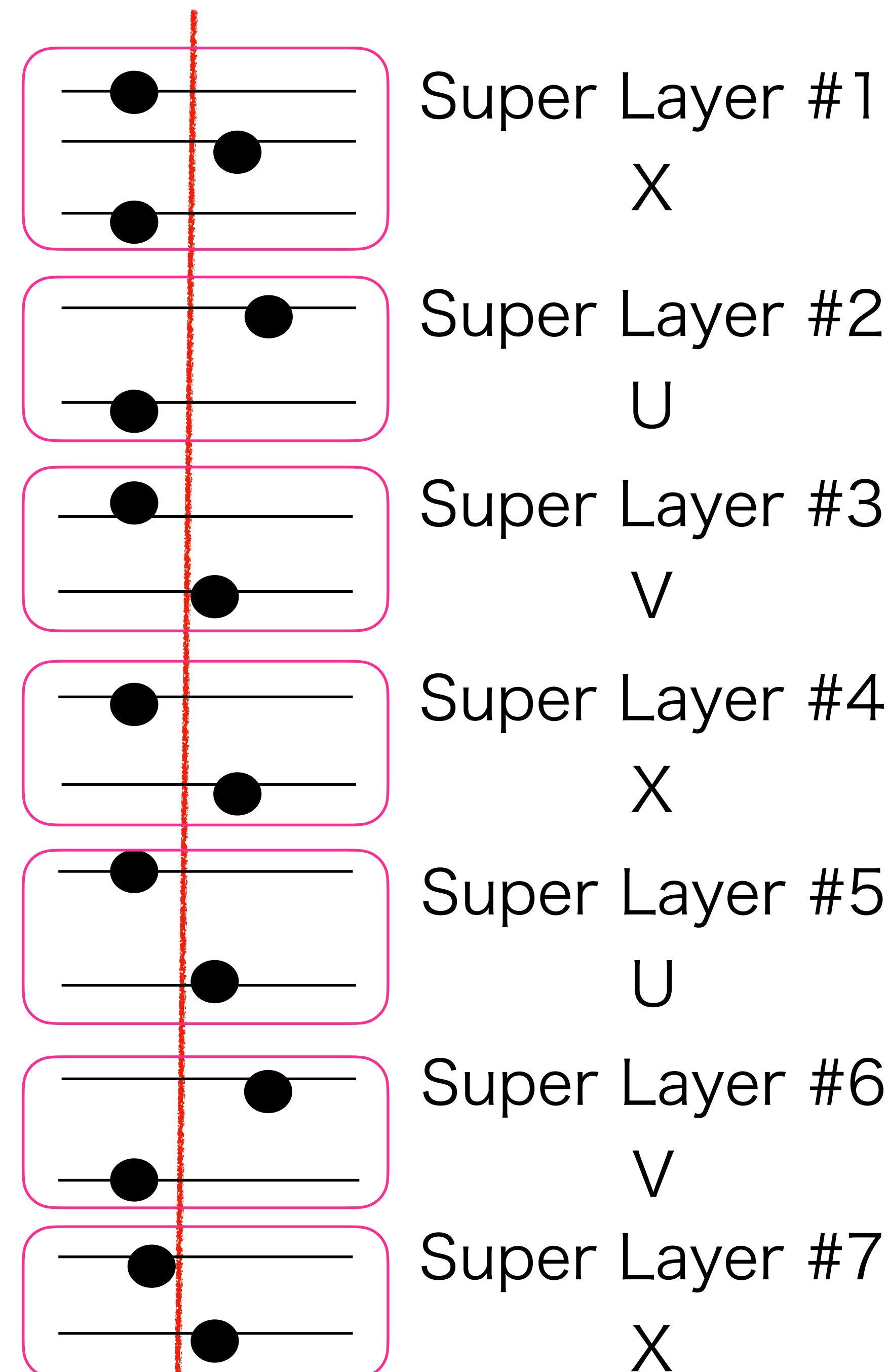
トラッキング条件

手順

1. Super Layerごとにクラスターを作る。
2. ビーム軸と並行に貼られたワイヤー層 (X)のみを使い、トラックを引く。クラスターのなかであらゆる可能性を試し、 χ^2 が最も小さいトラックを採用する。
3. 次に傾いたワイヤー層 (U, V層) に注目する。
X層のみを用いたトラック上に
U, V層のクラスターがあればそのヒット情報も含めて
再度トラッキングをする。
4. 最終的に χ^2 が最も小さいトラックを採用する。

トラック条件

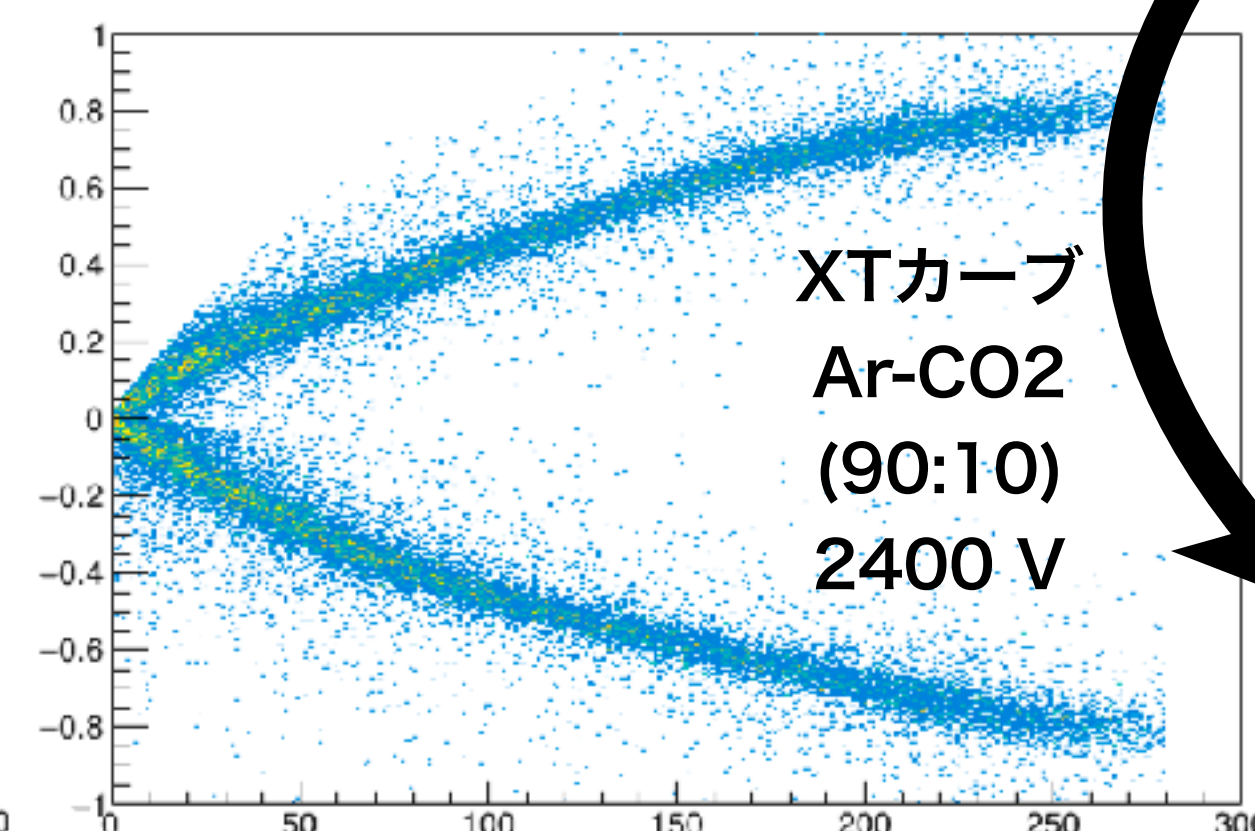
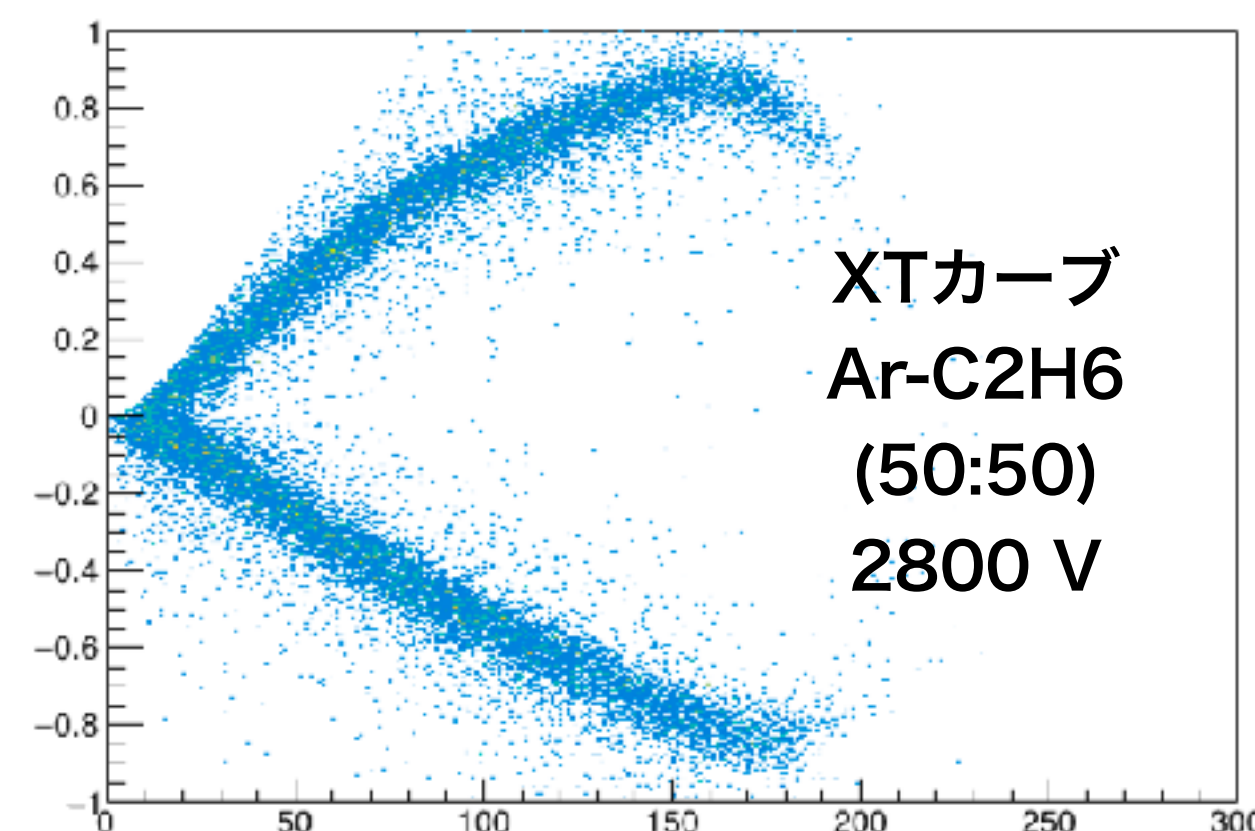
1. 各Super Layerに最低1ヒットある。
10個以上のヒットを使っている。
2. クラスターサイズが100未満かつ、
クラスターサイズの積が10,000未満である。



ドリフト長の補正？

- ・トラッキングのためには
ドリフト時間からドリフト長さへの変換 (XTカーブ)が必要
- ・ドリフト時間からドリフト長さへの変換の関数は
5次関数を使用。

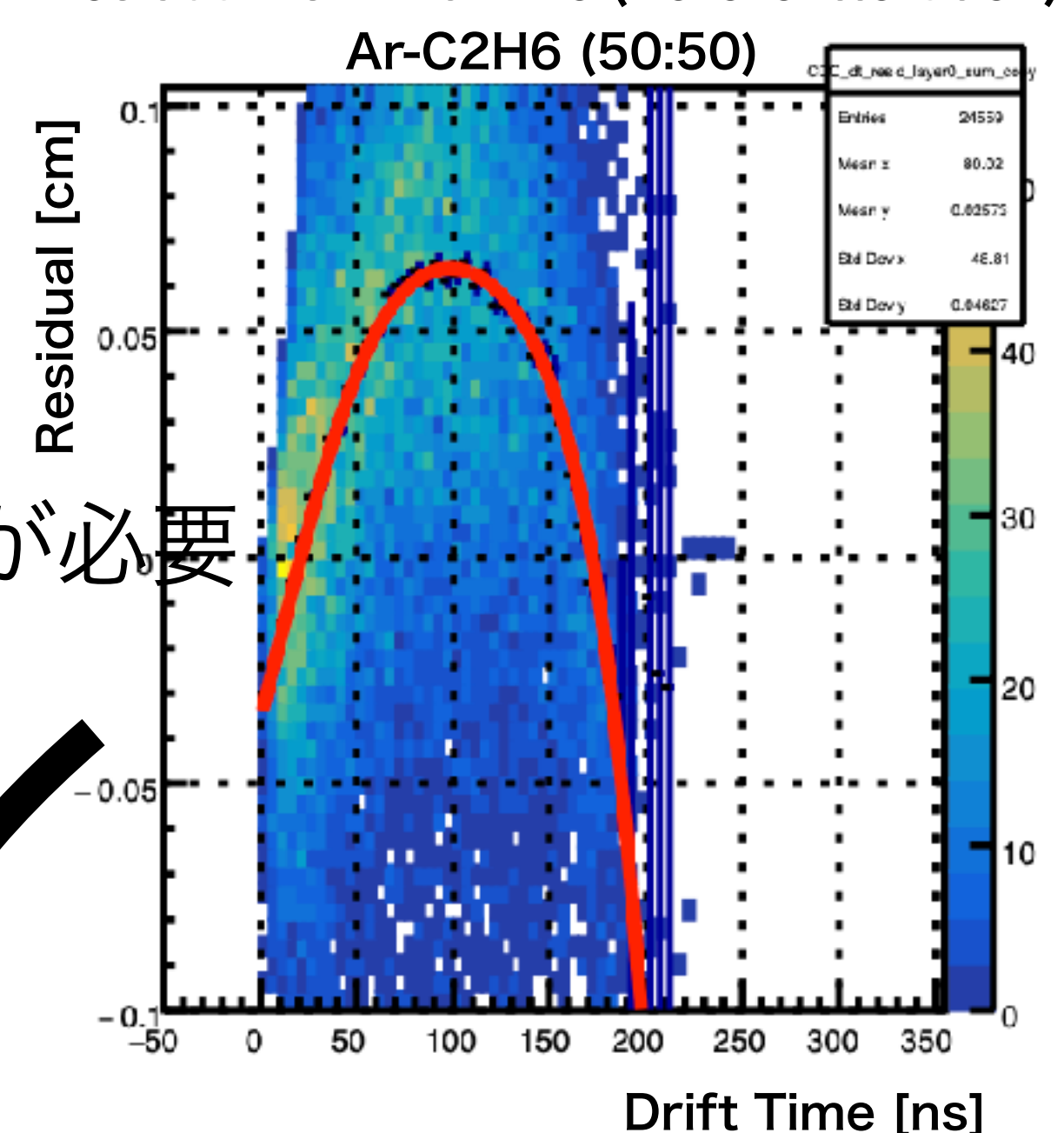
ドリフト長さ [cm]



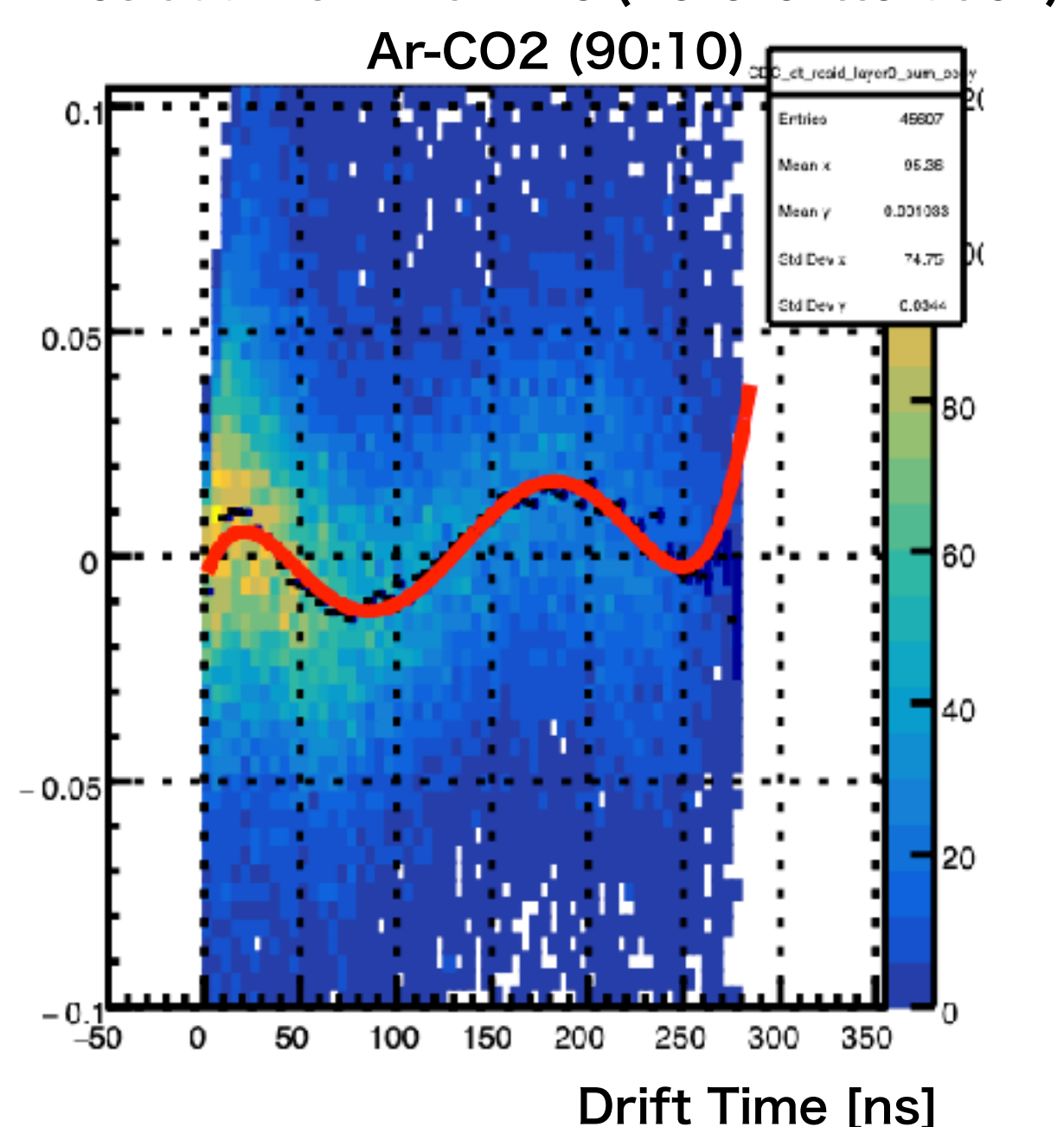
ドリフト時間 [ns]

- ・初期のXTカーブは右上図のように
ドリフト時間とResidualに相関がある。
- ・ドリフト時間とResidualに相関を
5次関数でFitし補正をし、新たなXTカーブとした。

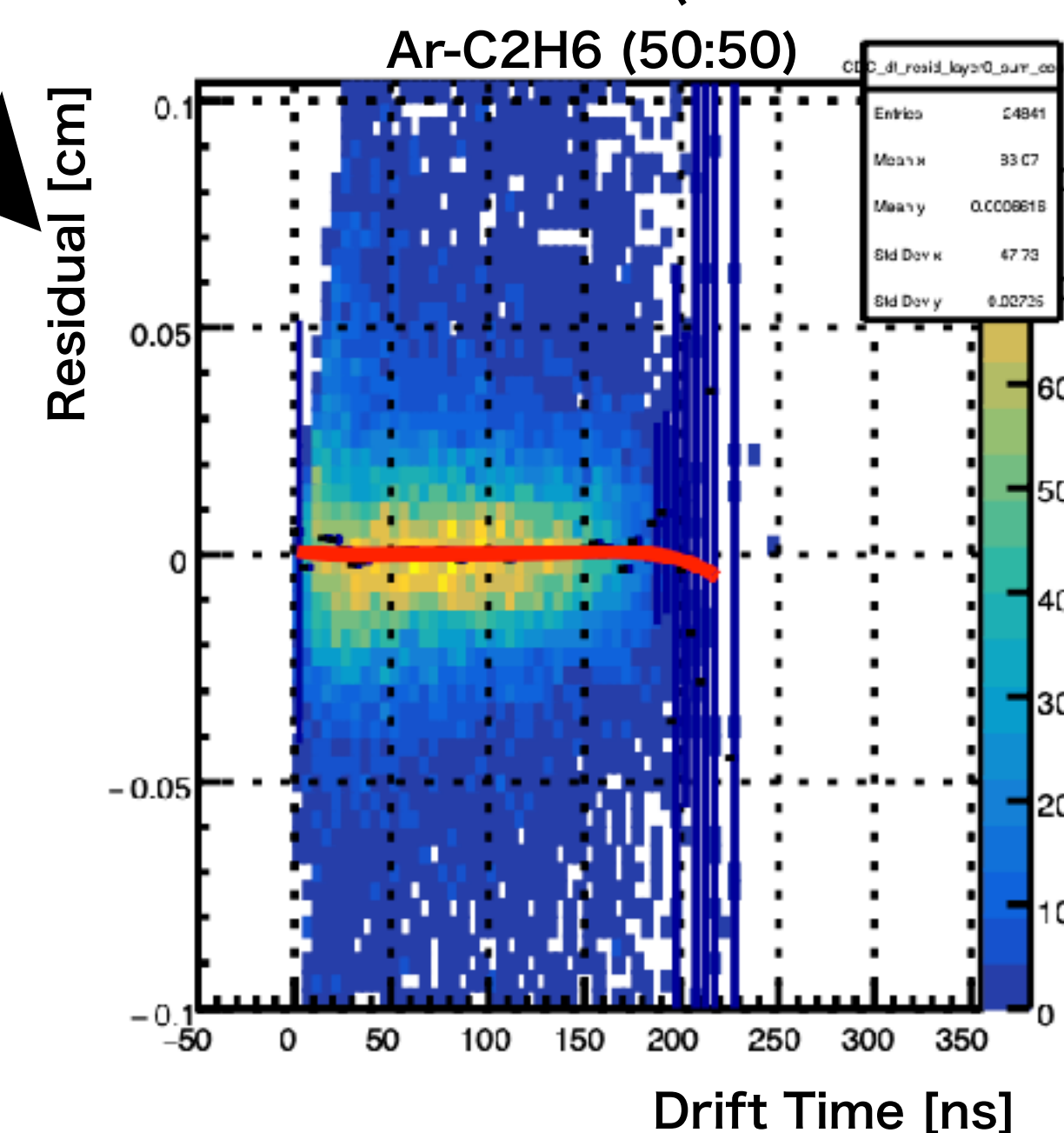
Residual vs Drift Time (Before iteration)



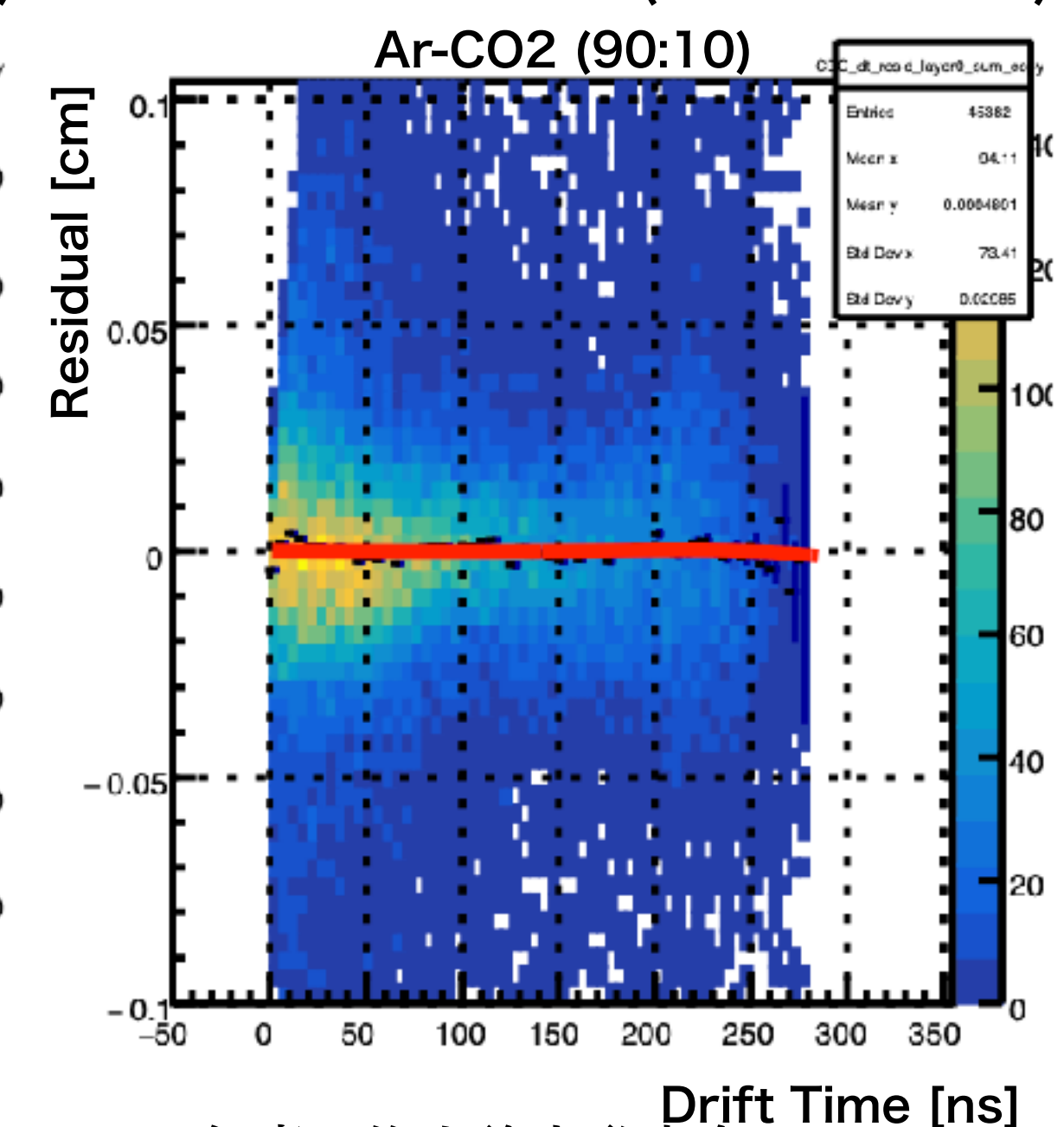
Residual vs Drift Time (Before iteration)



Residual vs Drift Time (After iteration)



Residual vs Drift Time (After iteration)

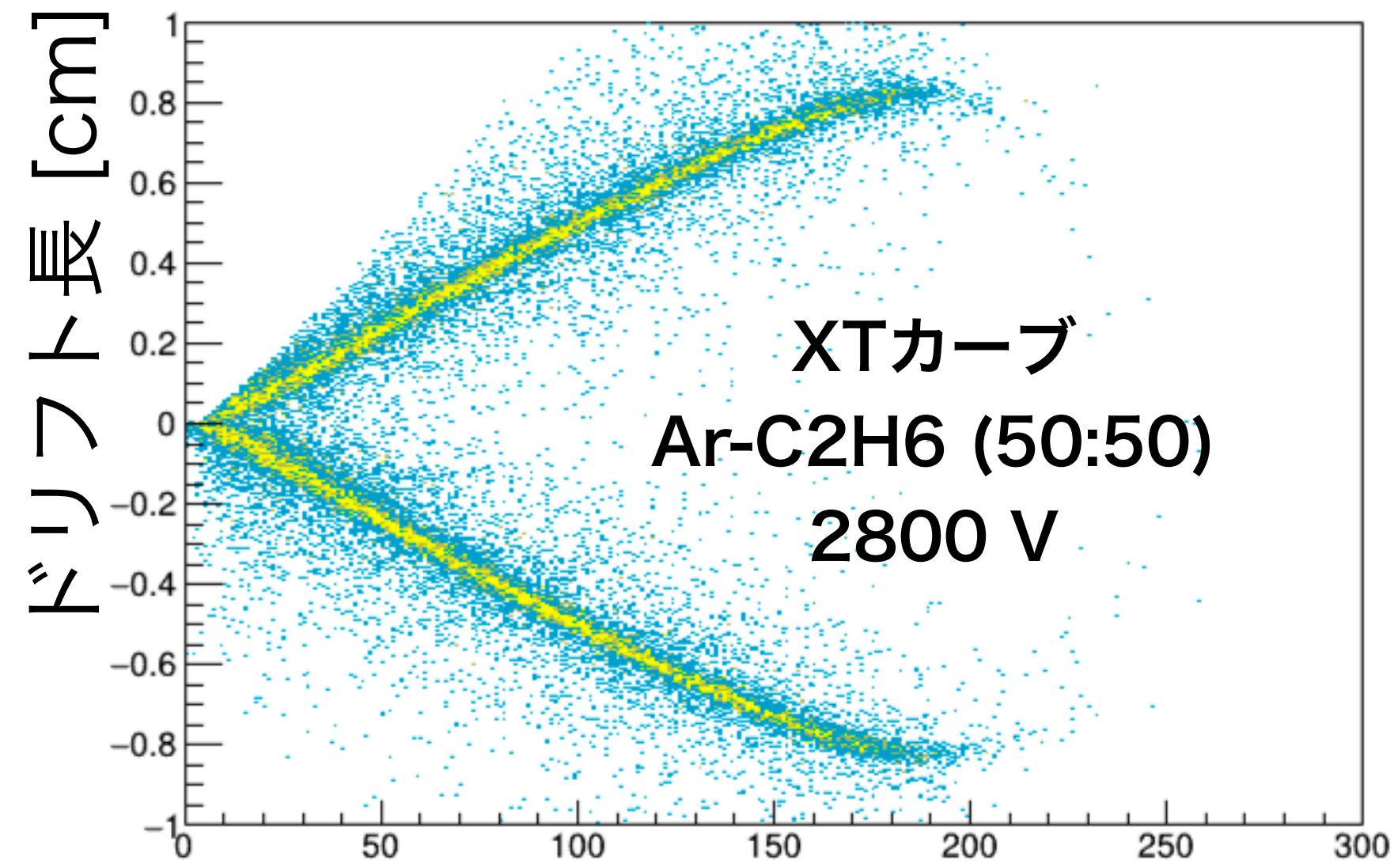
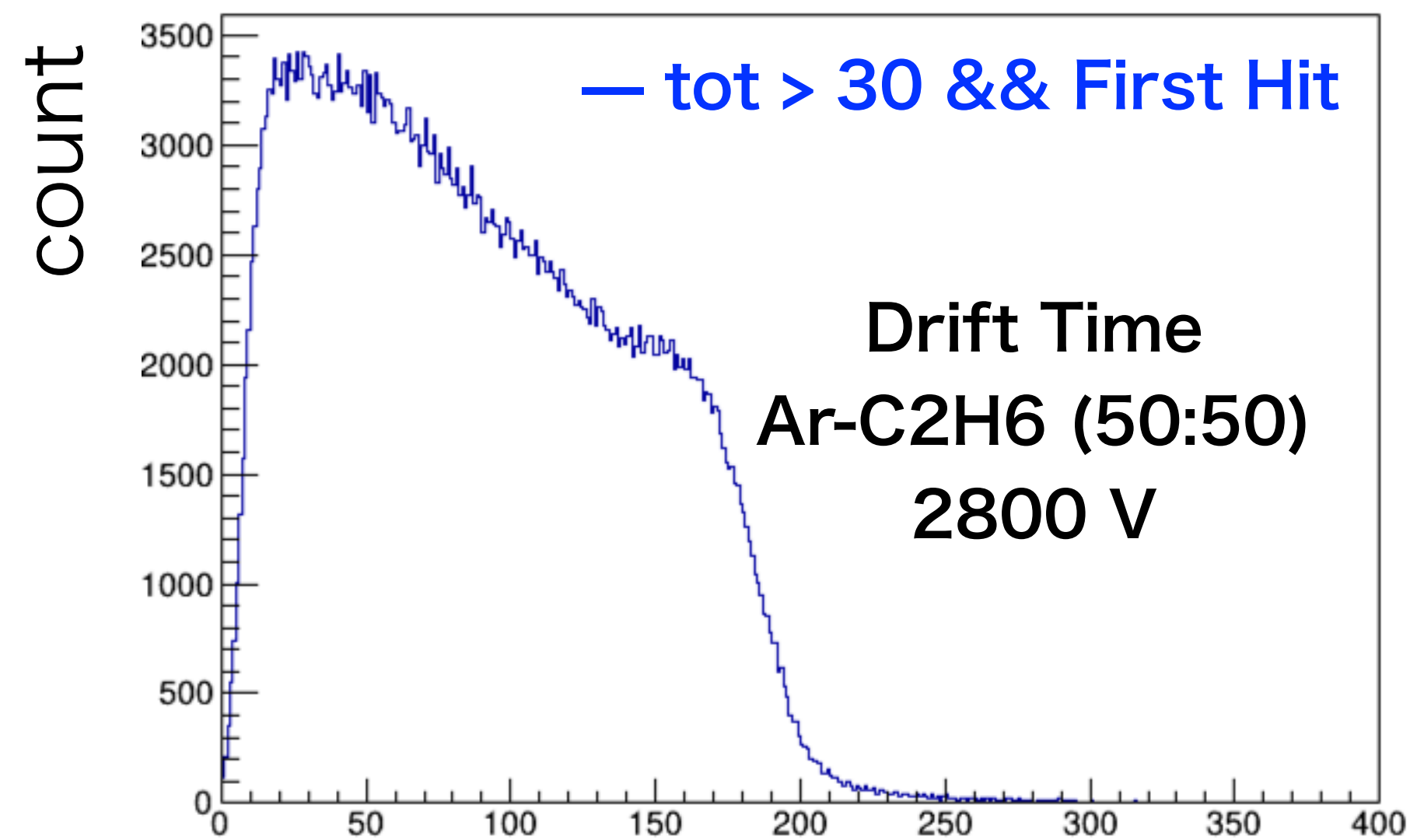


Drift Time [ns]

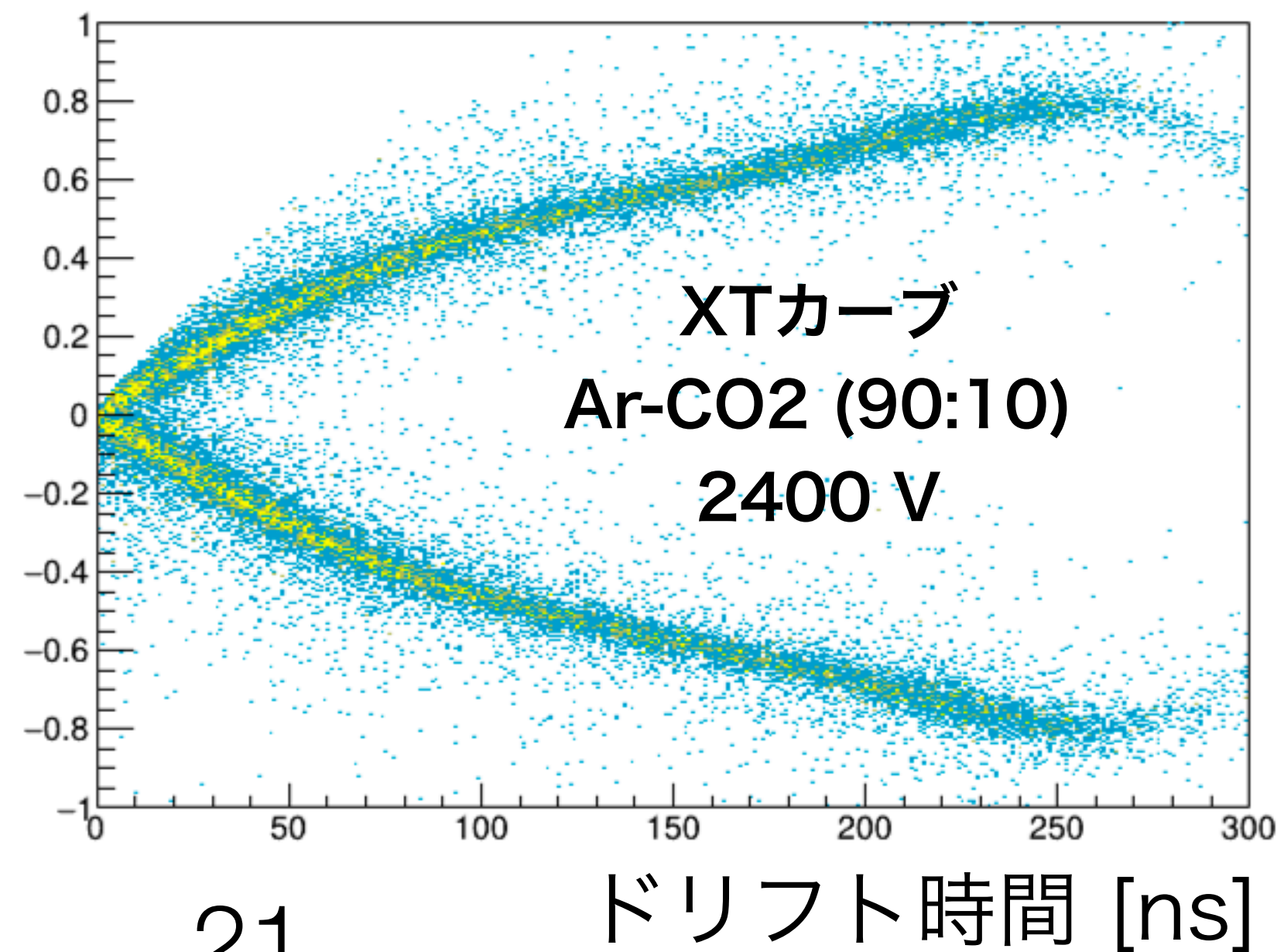
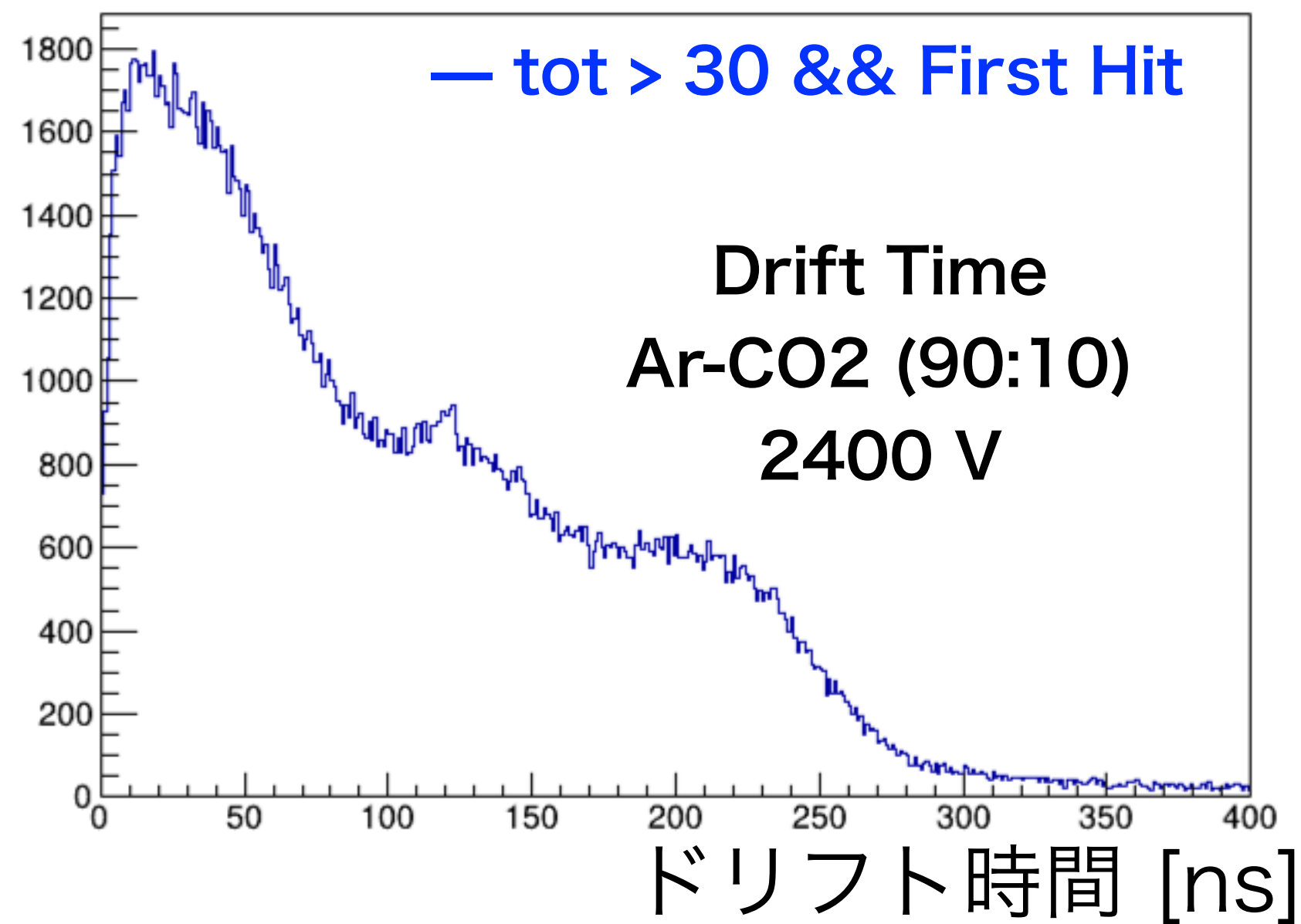
ドリフト時間分布とXTカーブ

XTカーブ：

時間情報から位置情報に変換するための関数



ガスによる違いを
実際に測定できた。



学 生 証

学 籍 号 C3SM2016

所 属 理 学 研 究 科

2023年 4月 1日 入 学

氏 名 キムラ ユウホ

生 年 月 日 1999年 5月 11日

仙 台 市 青 葉 区 片 平 二 丁 目 1 番 1 号

東 北 大 学 総 長

2023年 4月 1日 発 行



TOHOKU

UNIVERSITY

91442301

理学部・理学研究科学生支援係 TEL (022)795-6403

●この証は、常に携帯し、進学定額乗車券又は学生用割引乗車券によって乗車出来る場合に
乗員の請求があったとき又は本学関係者から請求があったときは、提示してください。
(注) ●この証は、他人に貸与し又は譲渡することにはできません。
●この証を紛失したときは、直ちに所轄警察署に届け出てください。
●この証は、学籍を失ったときや直ちに所属学級等に転校してください。
地震、水害等の災害に被災した場合や、事故・事件等の際には、被害状況を所属学級等へ
連絡してください。

現在所 属 学 級 区 片 平 1-141-702

変更1

変更2