

反K中間子束縛原子核探索のための 円筒型ドリフトチェンバーの性能評価(II)

東北大先端量子, 理研^A, 東北大理^B

木村佑斗, 大西宏明, 佐々木舜世, 佐久間史典^A, 橋本直^A, 七村拓野^B,
For the J-PARC E80 collaboration

JPS Meeting @Online, 2025/03/20

20pV1-2

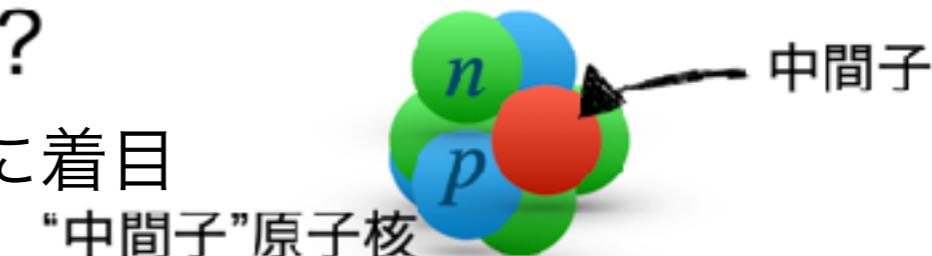
1. 反K中間子原子核
2. 円筒型検出器システム (CDS)
3. 円筒型ドリフトチェンバー (CDC)の製作
4. CDCの現状
5. まとめと展望

反K中間子原子核

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？

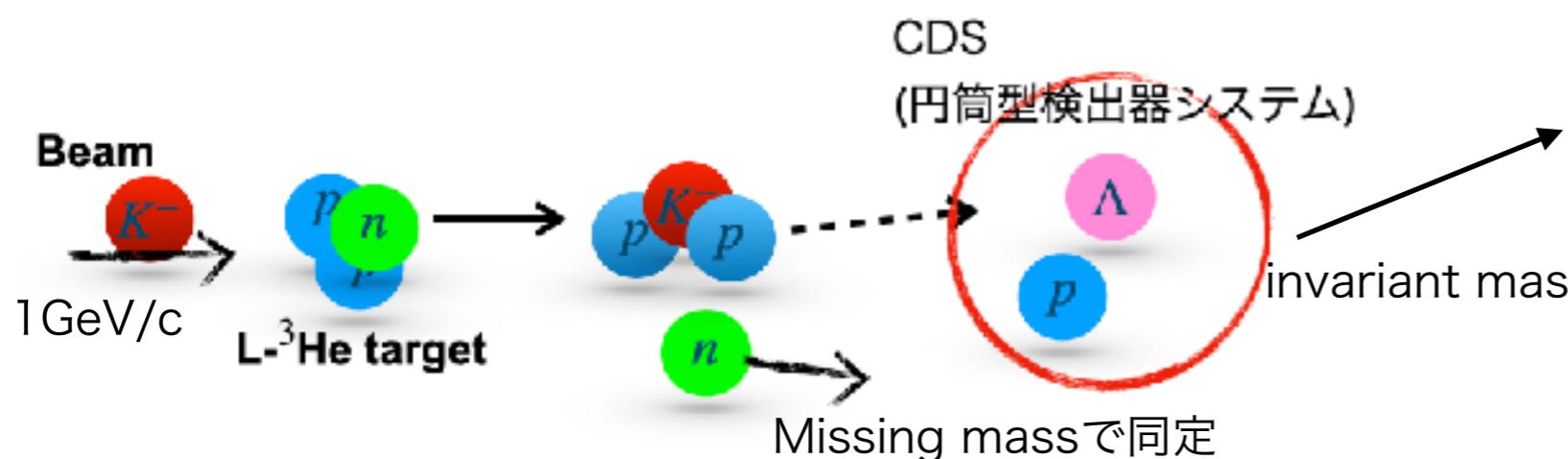
存在するならば、どんな性質なのか？

→ 核子と強い引力相互作用をする反K中間子に着目



- K⁻pp探索実験(J-PARC E15)

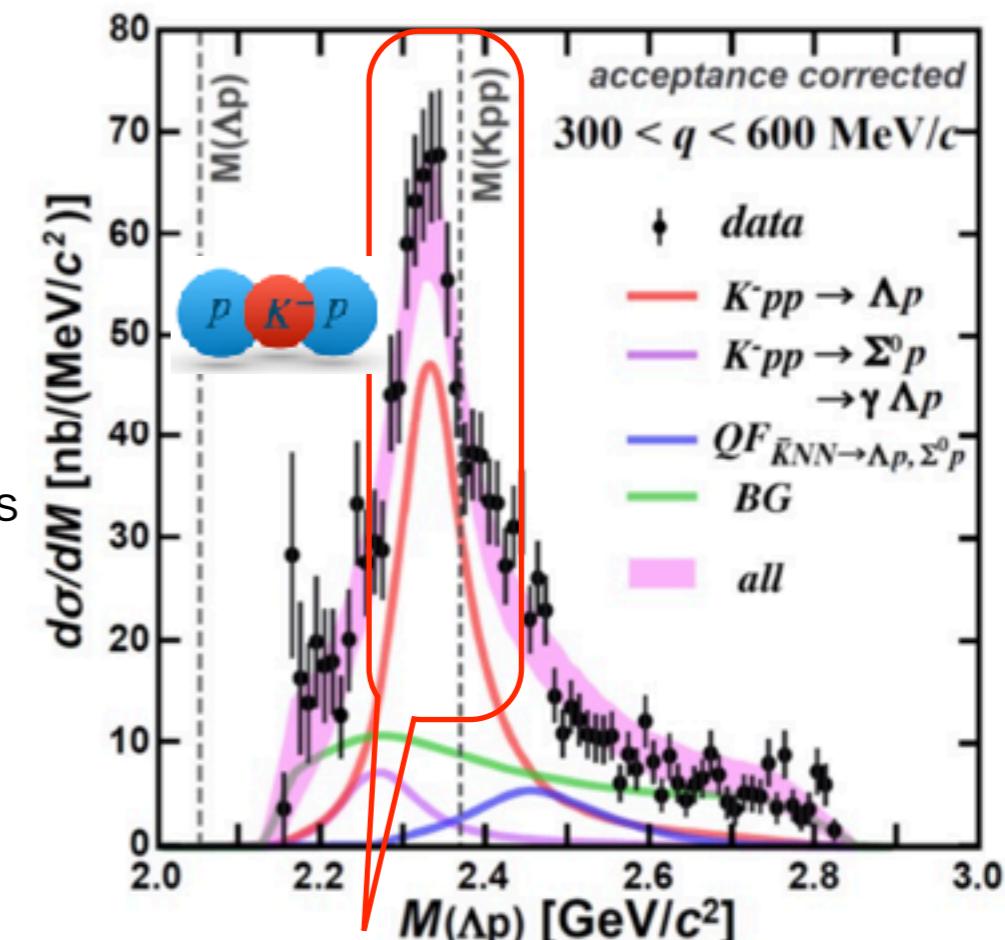
- 反K中間子原子核は存在するのか？



- 全ての終状態粒子を同定し、4元運動量を完全に再構成。

- 反K中間子原子核K⁻ppは存在する

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



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

次期反K中間子原子核実験

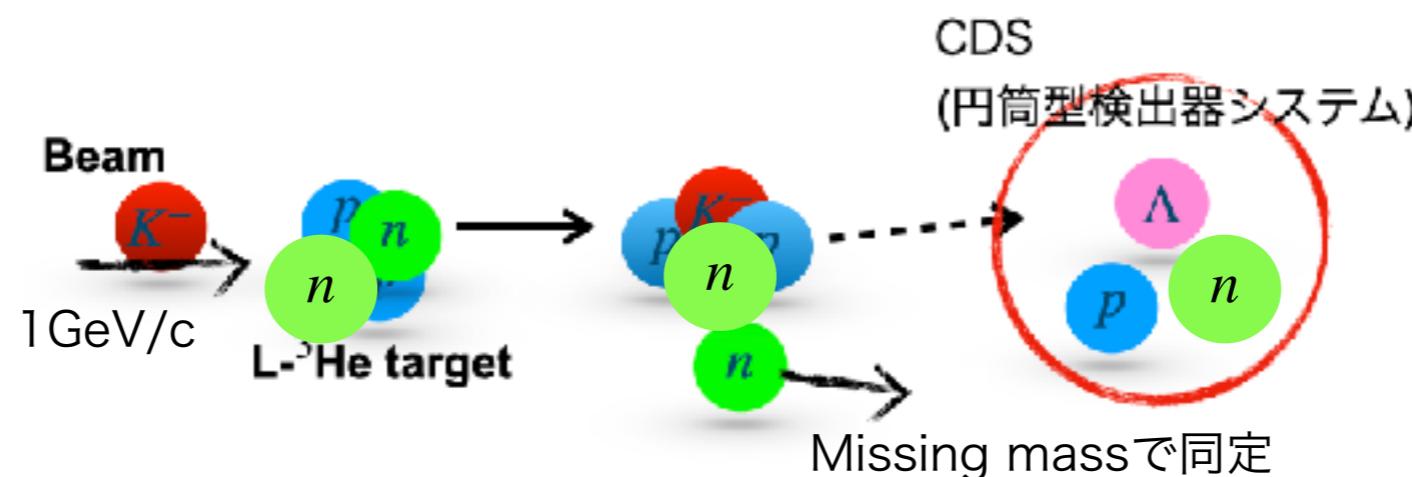
- 次の課題: 反K中間子原子核の性質, 内部構造を調査

- 核子数を増やしたとき、束縛するか？
- K⁻ppのアイソスピンパートナーは存在するか？
- K⁻ppの спинparityは？



- 次のステップ: 反K中間子原子核K⁻ppnの調査 (J-PARC E80)

- 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実験と同様に全崩壊粒子を検出する必要がある。

検出すべき粒子数増加 (中性子数含む)。
新たな検出器システムを開発。

円筒型検出器システム (CDS)

反K中間子原子核からの全ての崩壊粒子の検出

超伝導ソレノイド :

- ・ 中心磁場0.7 Tで運転

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

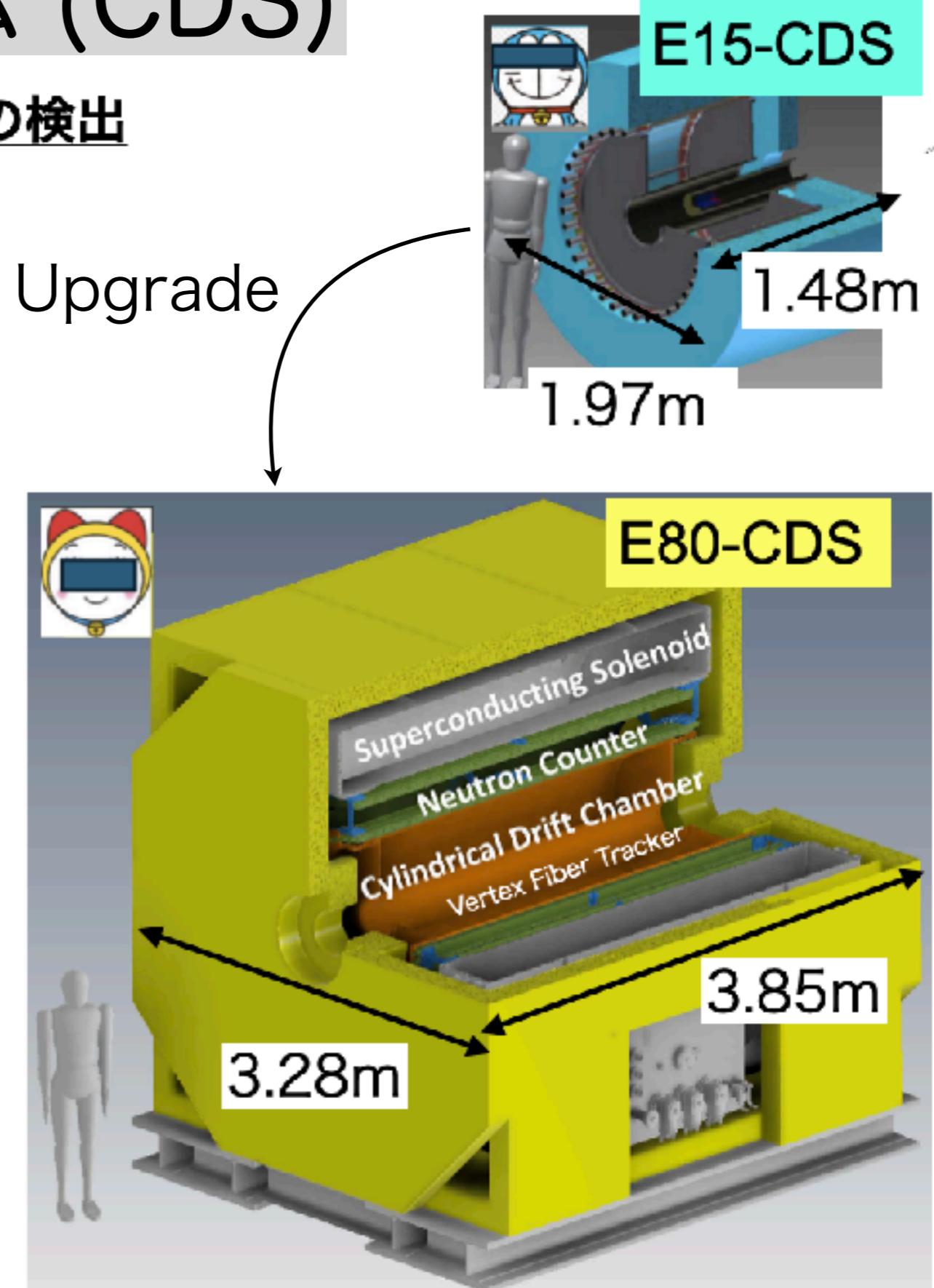
円筒型ドリフトチェンバー

Cylindrical Drift Chamber:

- ・ 飛跡の曲率から運動量解析

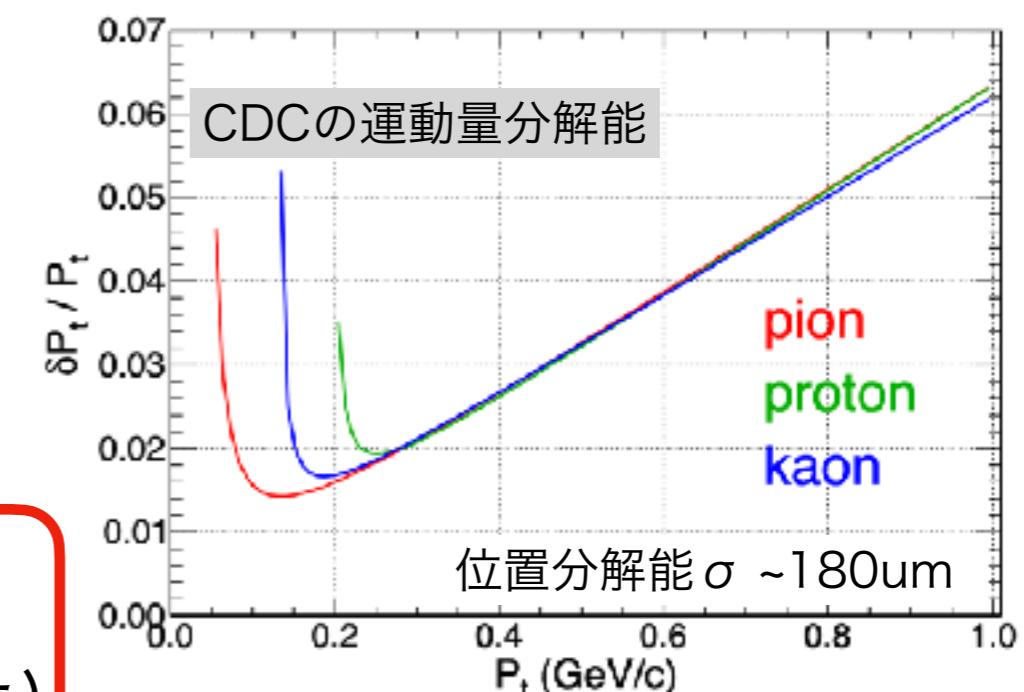
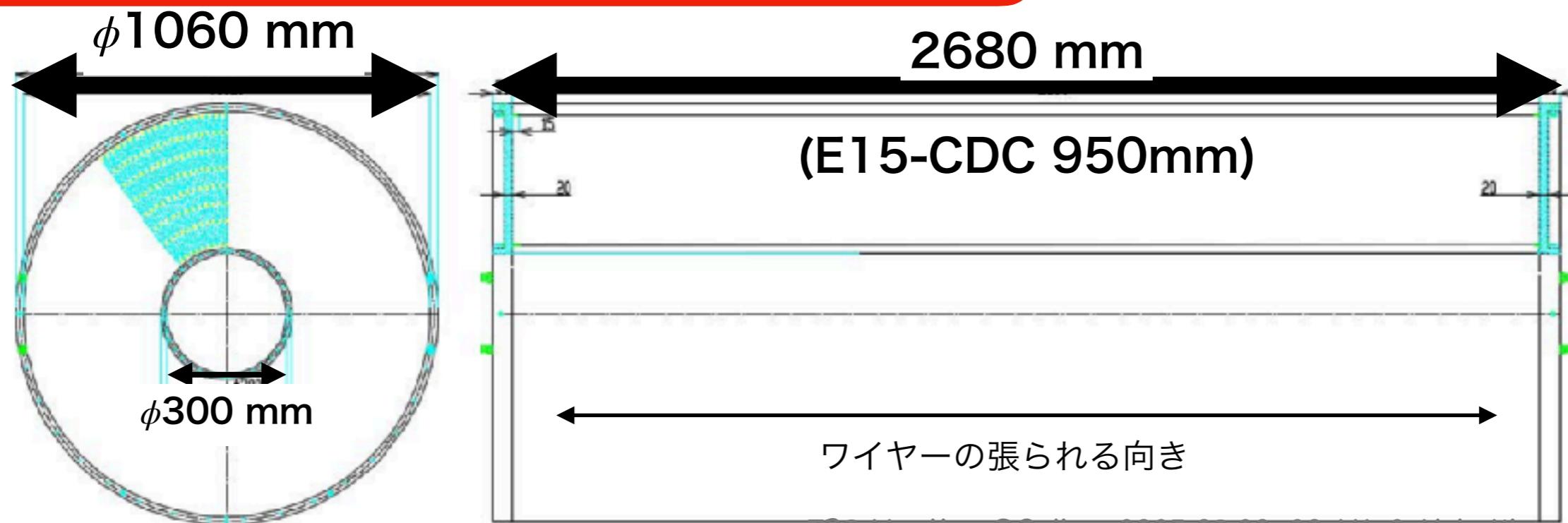
Vertex Fiber Tracker :

- ・ 崩壊点決定の精密化



円筒型ドリフトチェンバー(CDC): 要求性能⁶

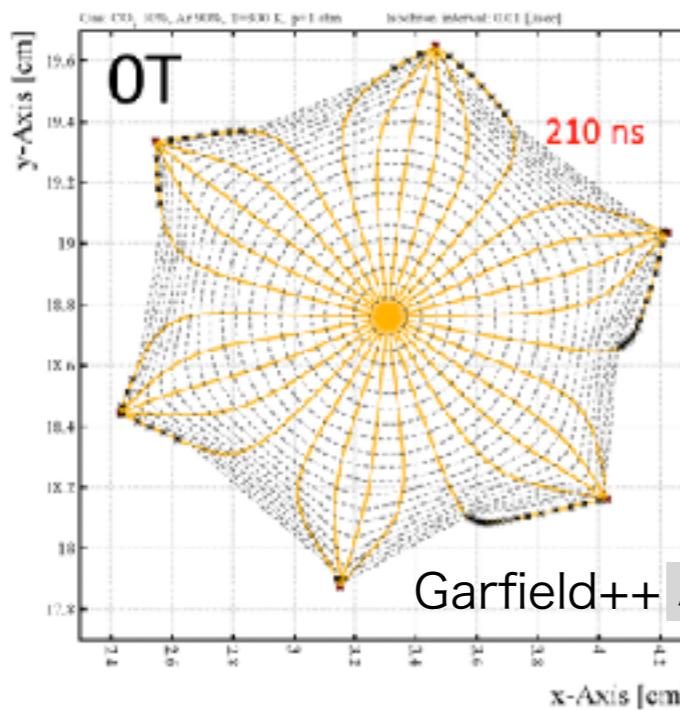
- E15の検出器システムではMass Resolution (σ) $\sim 10 \text{ MeV}/c^2$ 。
 - CDC運動量分解能はすでに十分な値。
 - 基本設計はE15のCDCと同様に。
- ソレノイドが大きくなるため、合わせてできるだけビーム軸方向に長くして立体角を稼ぐ。



CDC: セル構造

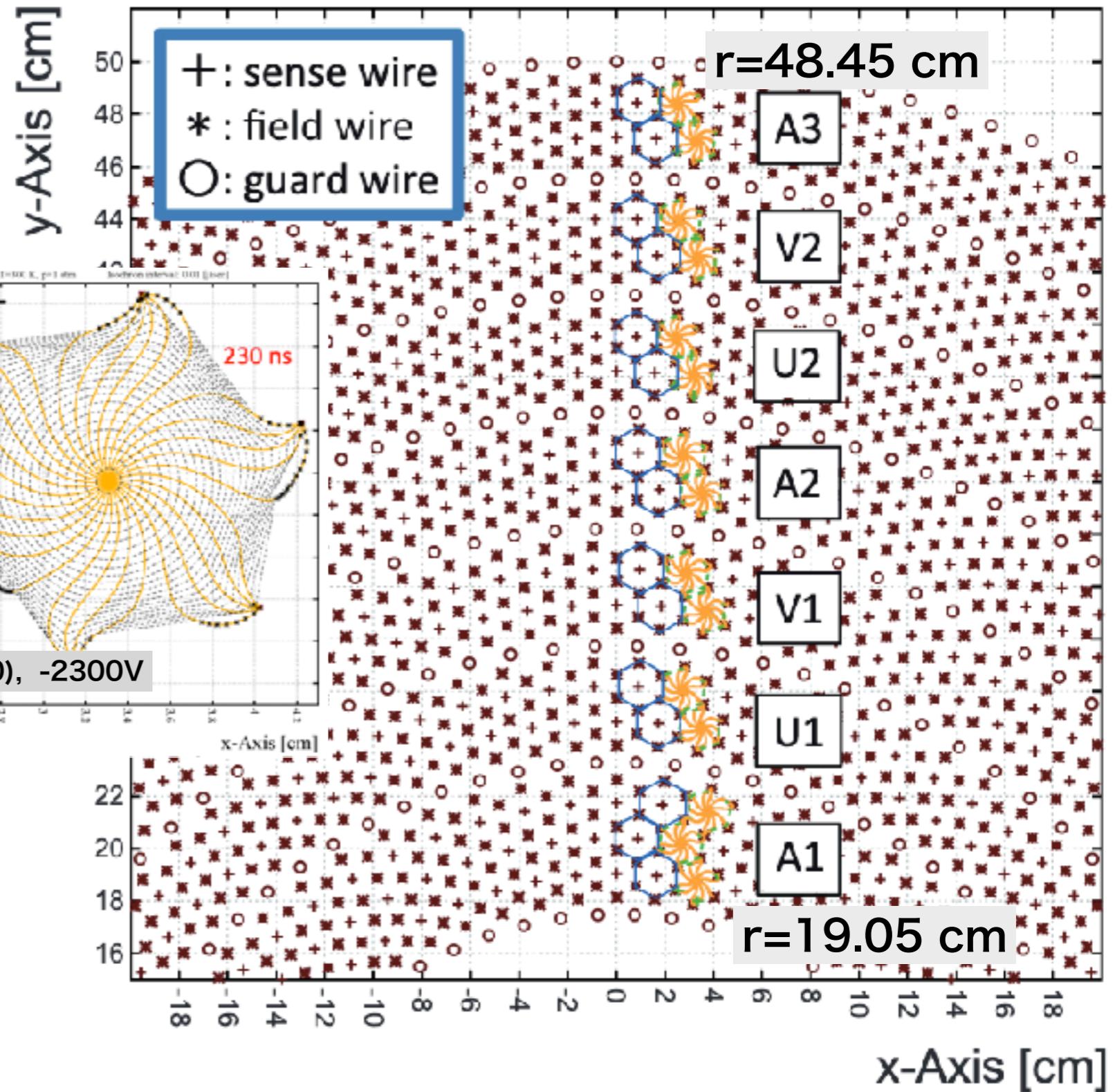
*セル構造はE15-CDCと同じ

- 六角形セル
(drift length ~9mm)



- 15 layers
(3 axial & 4 stereo super layers)

- ステレオ角 は 約 2.7°
- Sense wire 1816本、Field·Guard wire 6428本



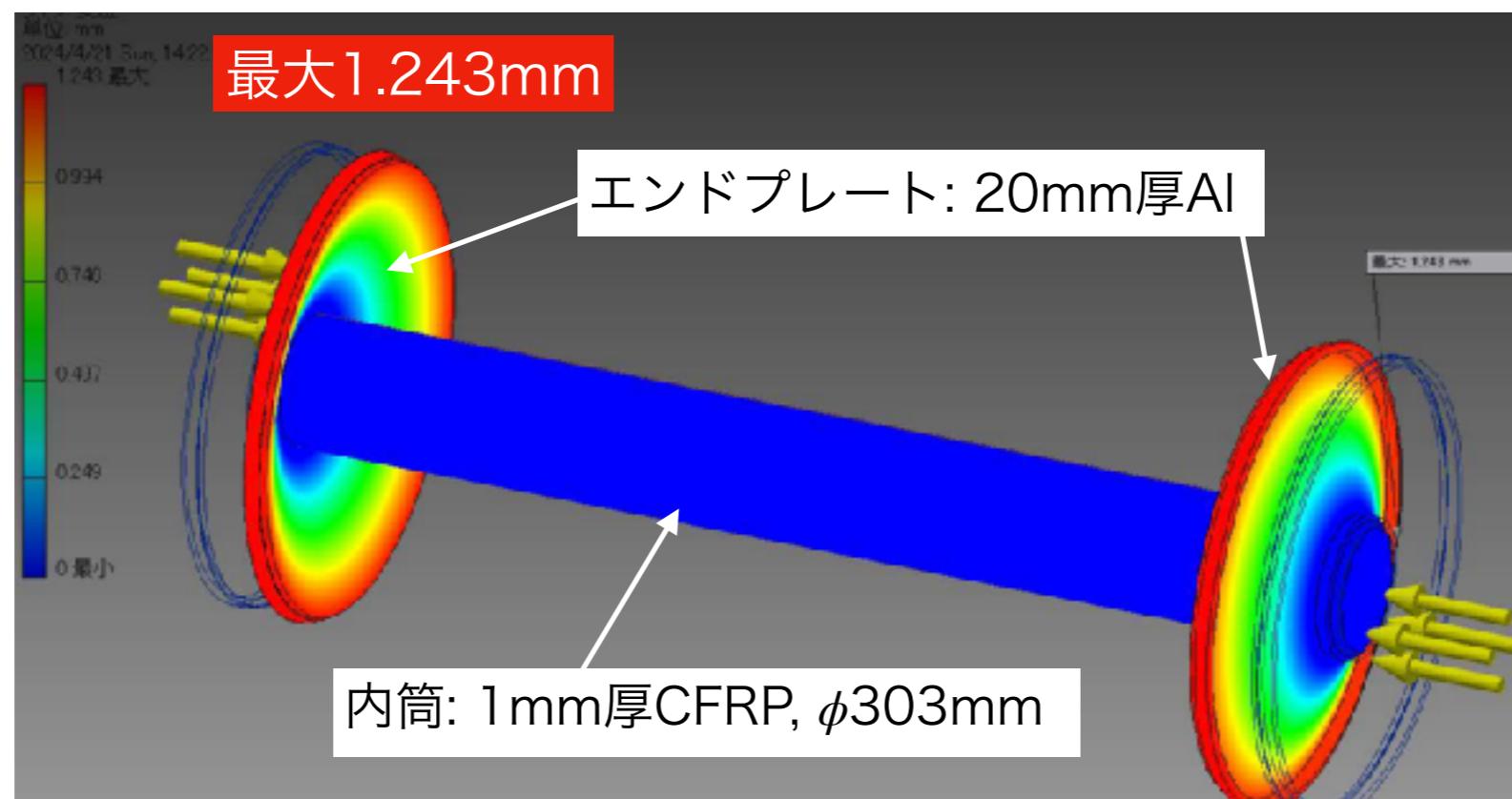
CDC: 構造設計

- 重力によるワイヤーのたるみ $< 200 \mu\text{m}$ となるように張力を決定

Wire type	Wire diameter	Wire material	Number of wires	Wire tension
Sense	$\phi 30 \mu\text{m}$	Au-W	1,816	70 g
Filed	$\phi 80 \mu\text{m}$	Be-Cu	5,376	240 g
Guard	$\phi 80 \mu\text{m}$	Be-Cu	1,052	240 g
In total			8,244	1.67 tons

計算値

- 1.67トンを十分耐えられるように1mmCFRP内筒 (軸方向ヤング率120GPa)
- 有限要素法による構造解析 (Autodesk Inventor 3D CAD):
 - 両側から1.67/2 トンをエンドプレート全体に均等にかける
 - 拘束条件: 内筒CFRP固定, エンドプレートと内筒の接続も固定



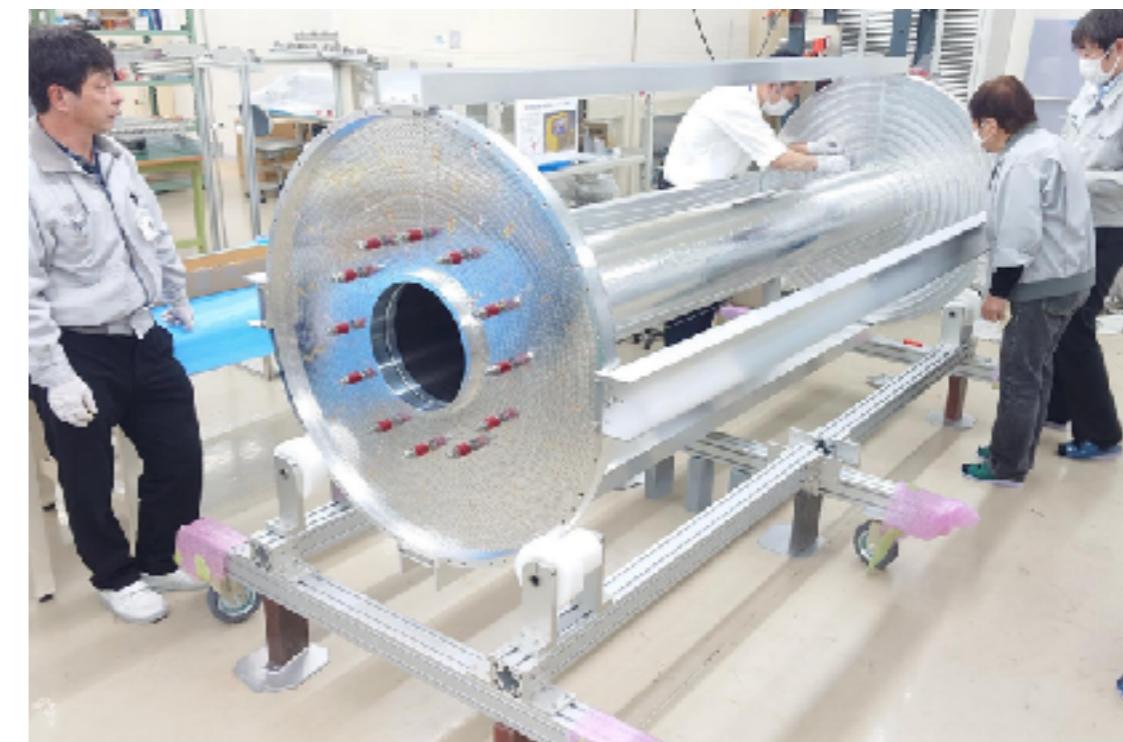
CDC: 製作工程1

1. エンドプレートと内筒の接着

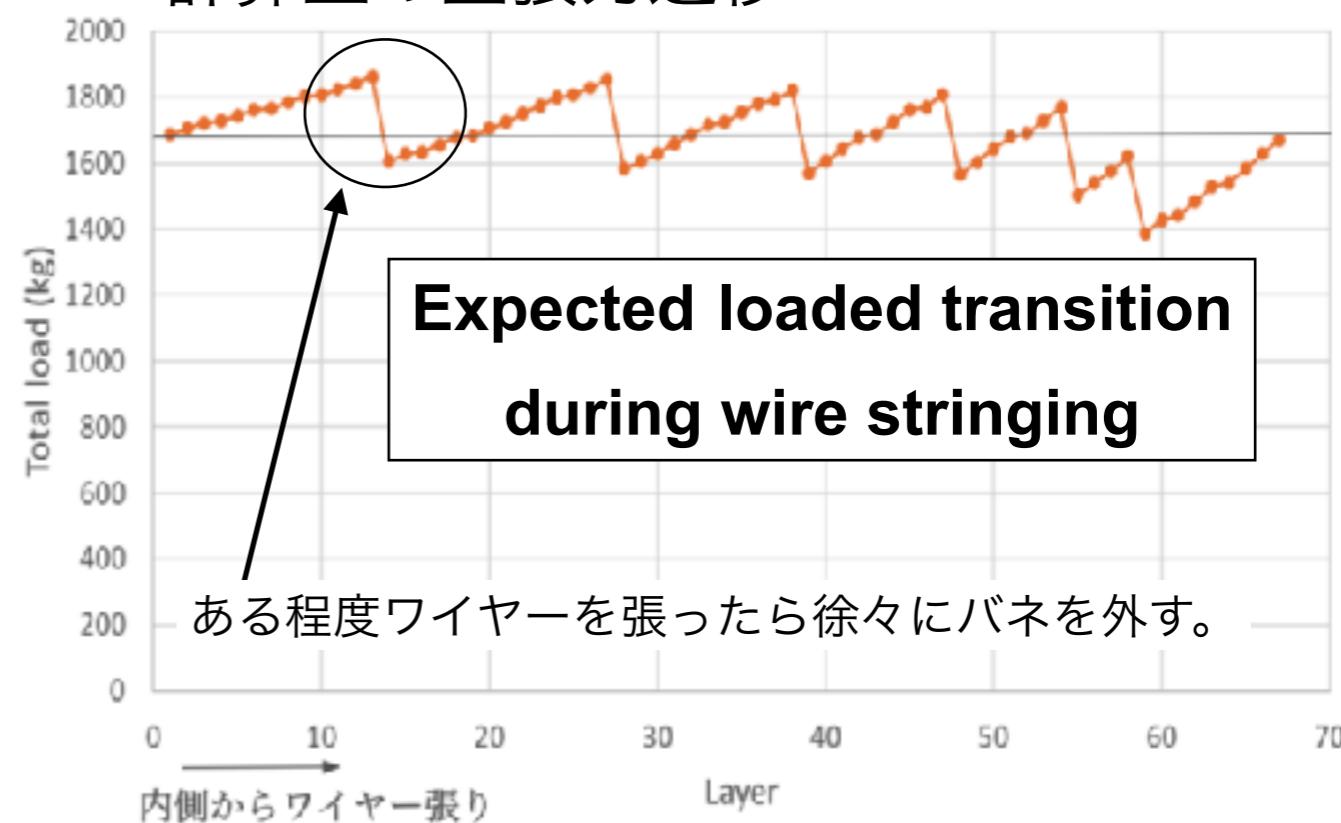
(Cチャンネルはその位置決めのため)

2. プリテンションバー装着

- pre-tensionをかけることであらかじめこの歪みを再現。
- この歪みを維持させたままワイヤーを張っていく。

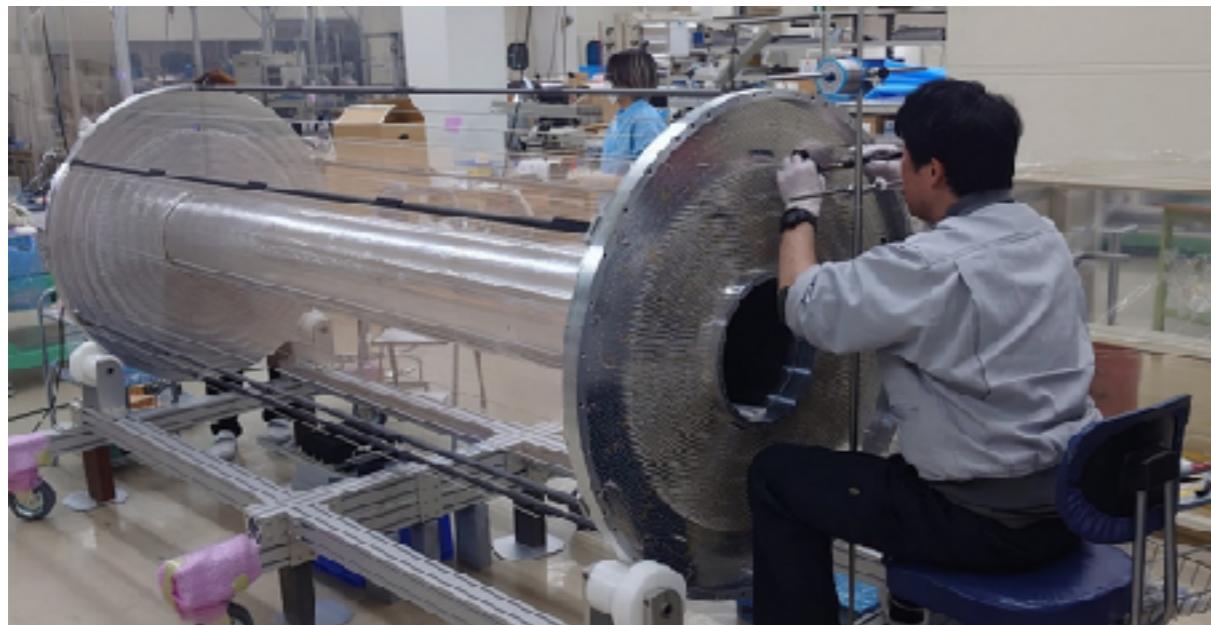


計算上の全張力遷移

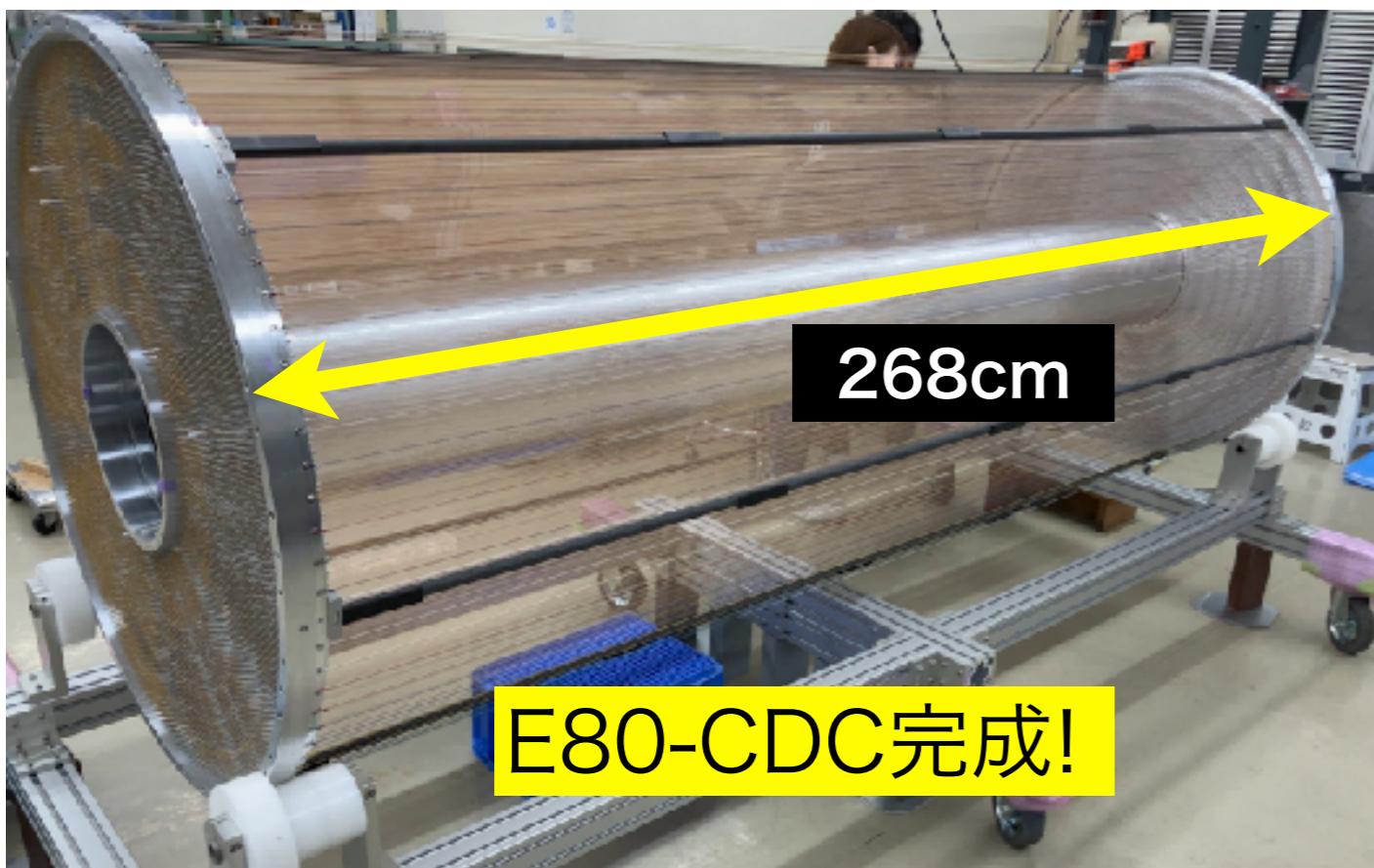


CDC: 製作工程2

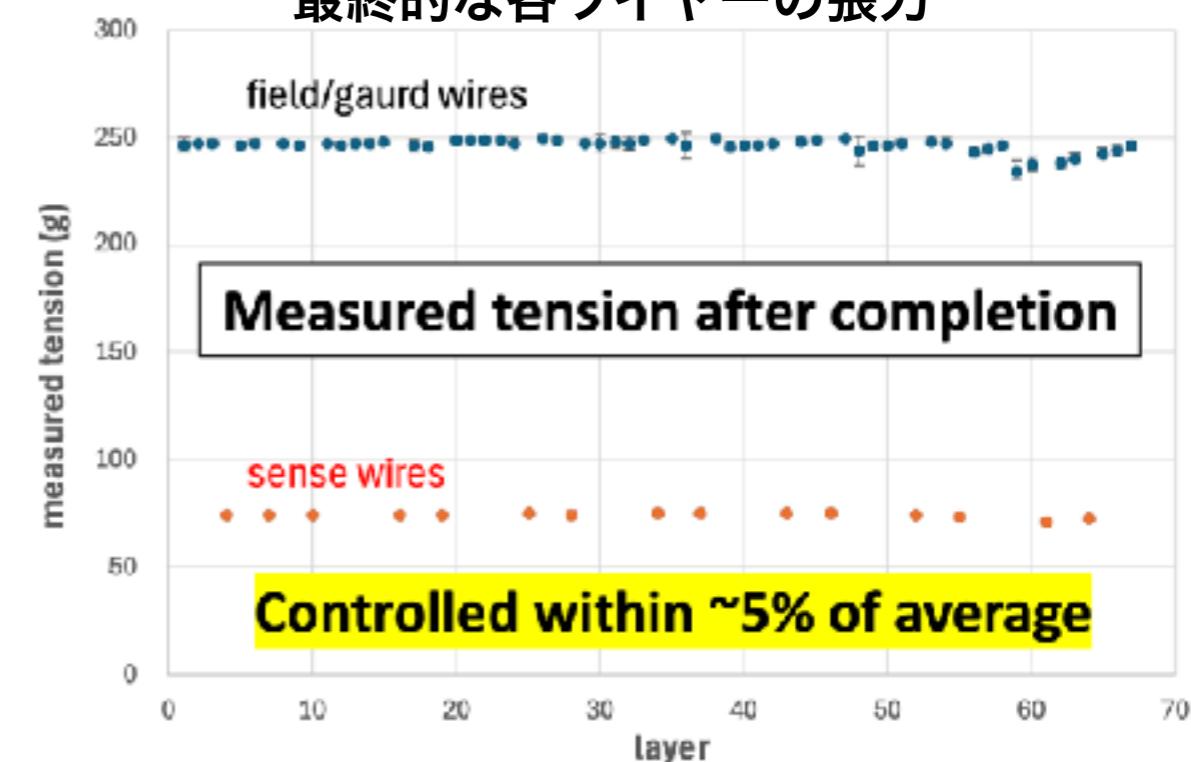
3. 内側からワイヤー張り



張られたワイヤー数の変遷



最終的な各ワイヤーの張力

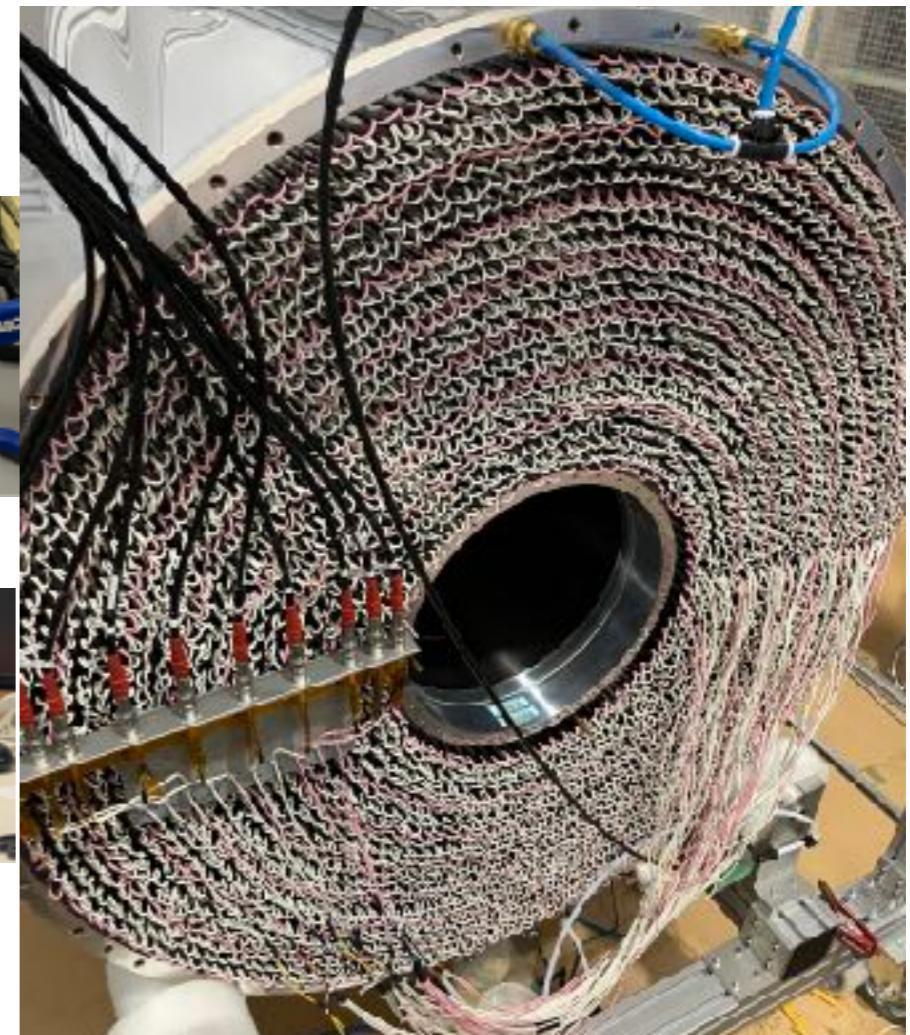
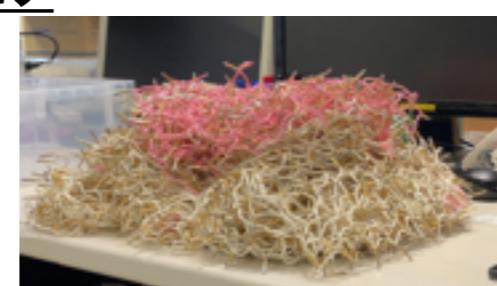


CDC: 立ち上げ@J-PARC

11

- 2024.6: 館山からJ-PARCへ

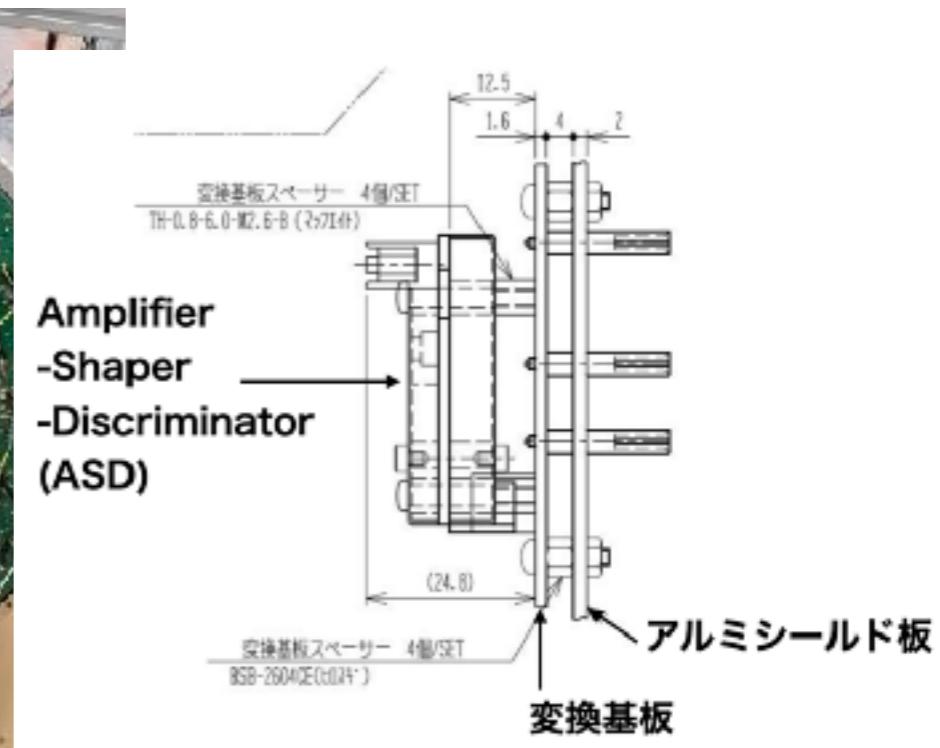
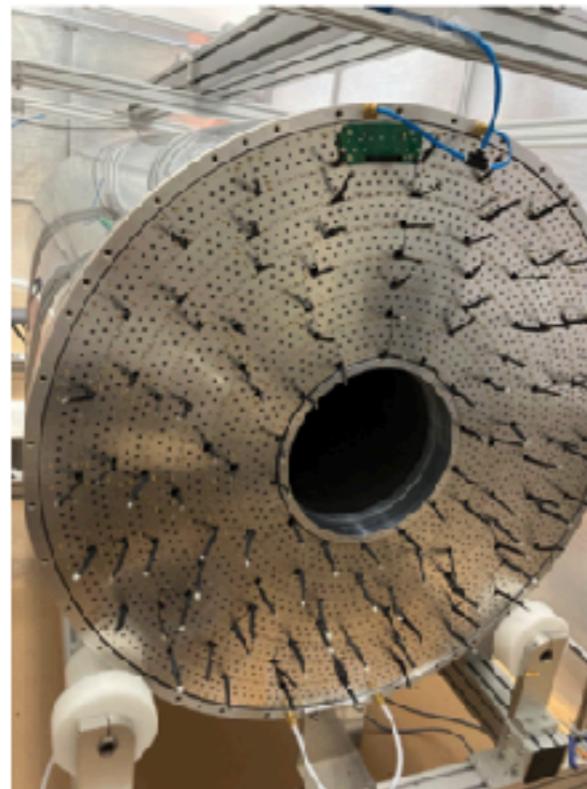
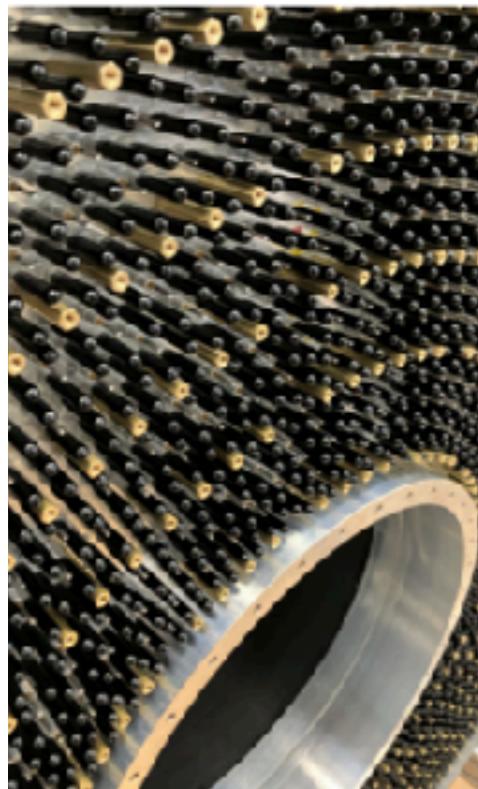
- 2024.7~2024.10:
HV分配用ケーブル作成・取り付け
Signal用変換基板等取り付け



フィードスルー
保護キャップ

アルミシールド板

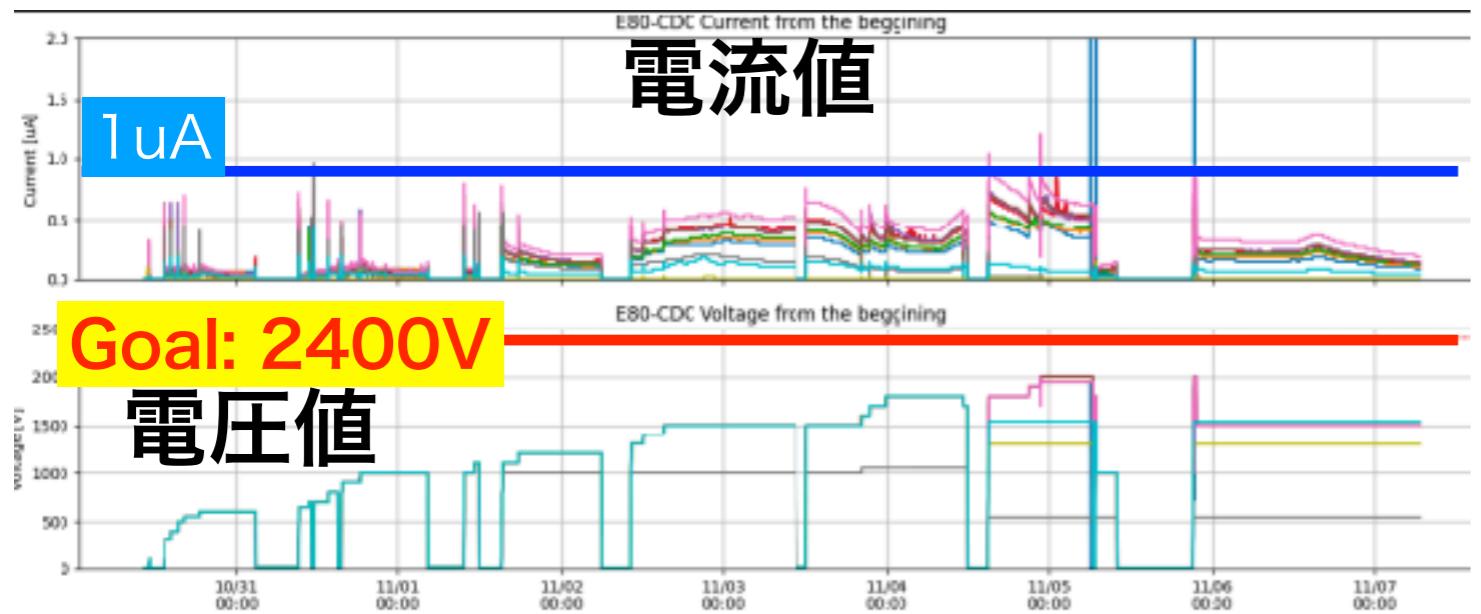
シグナル変換基板



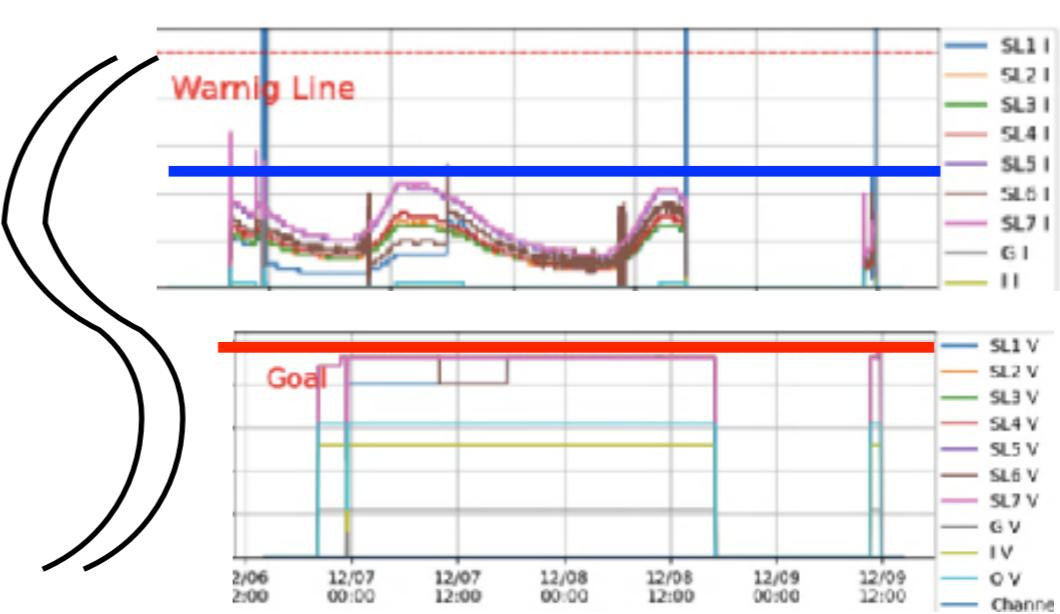
CDC: 立ち上げ@J-PARC

- 2024.11~2025.12: HVコンディショニング
充填ガスはAr-CO₂ (90:10)

2024.12上旬: 目標HV達成

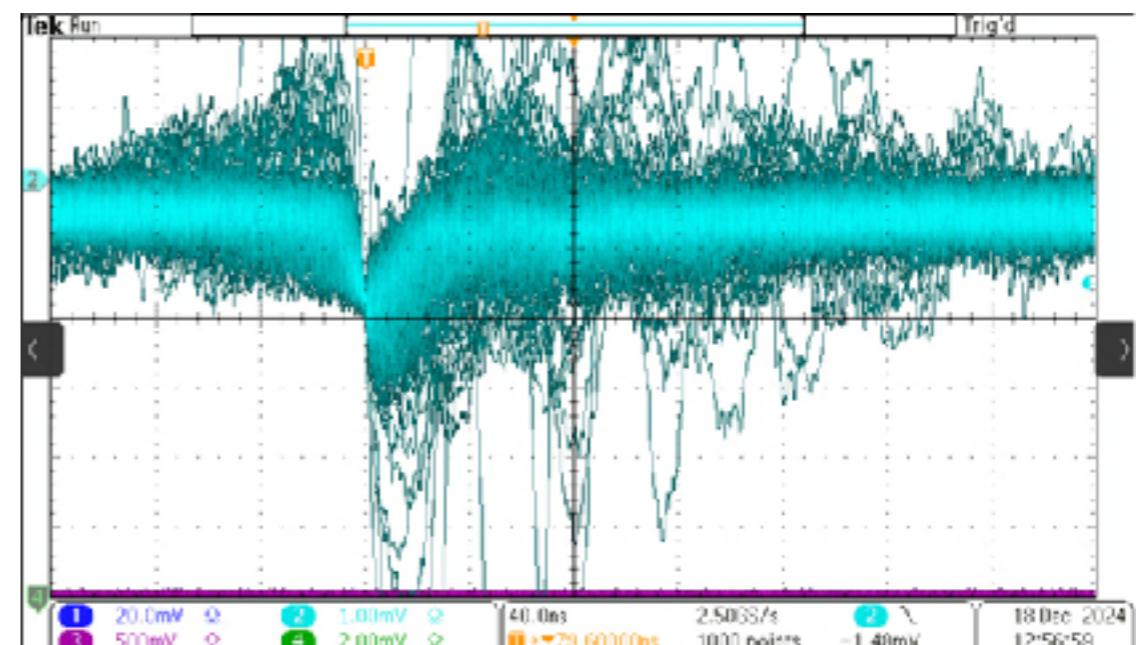


2024.10.31 ~ 2024.11.07



2024.12.06 ~ 2024.12.09

- ワイヤーからの生信号確認(90Sr, Ar-CO₂(90:10), 2300V)



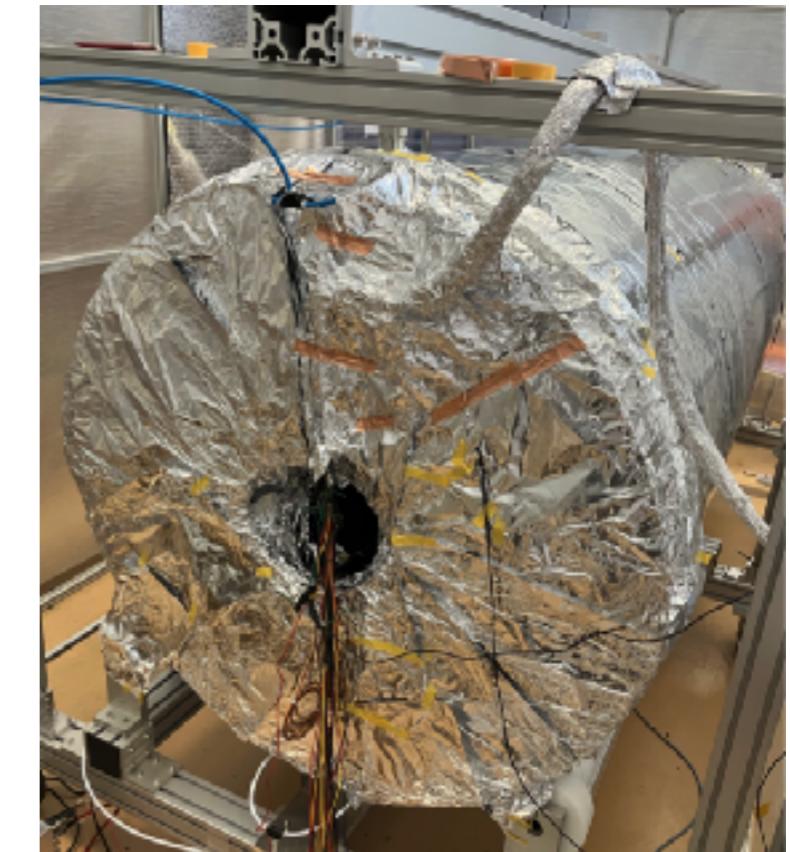
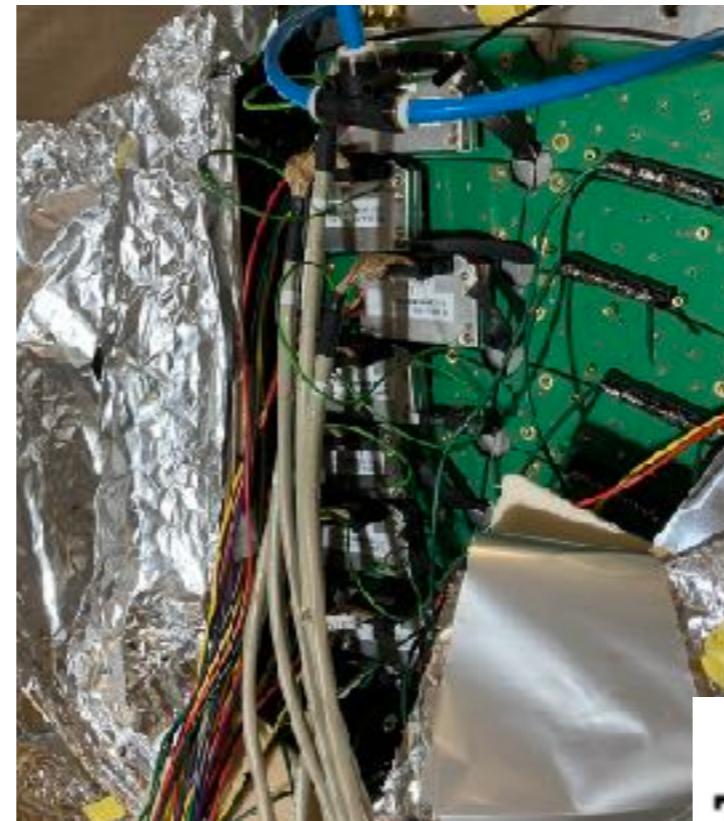
CDC: 現状

2024.12.25: 宇宙線データ取得 → ト ラック再構成

Pre-Amp基板

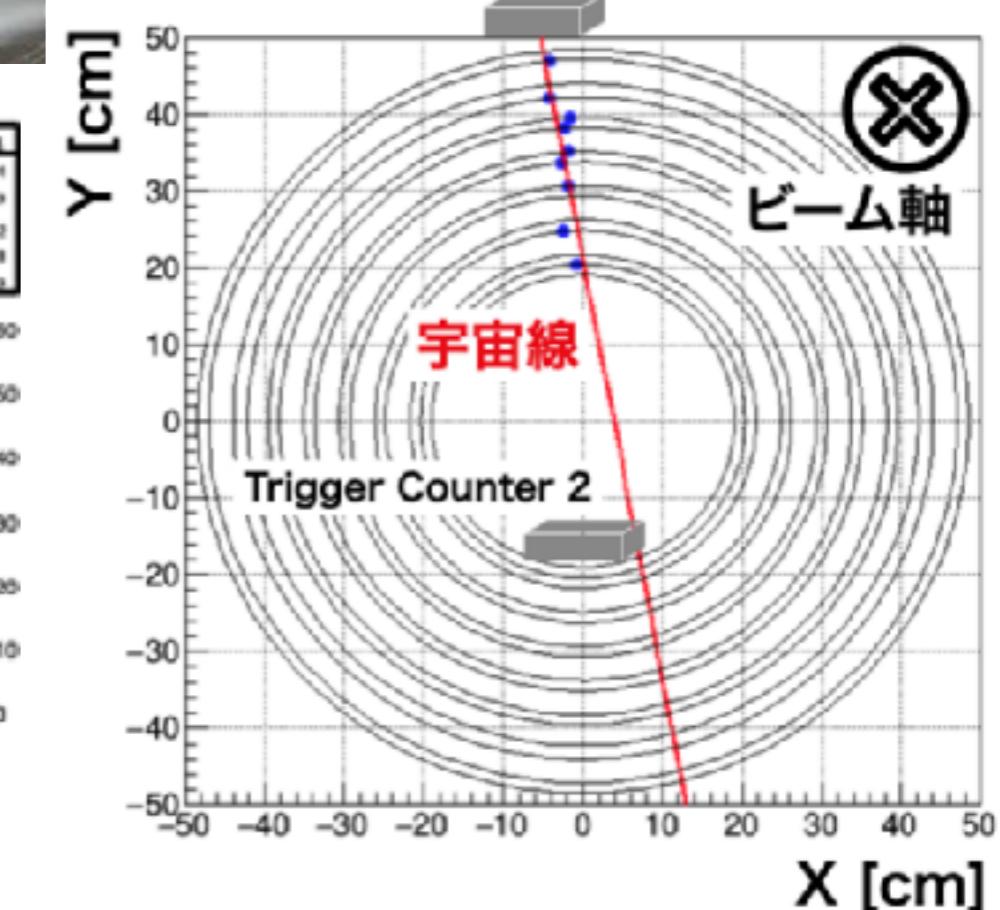
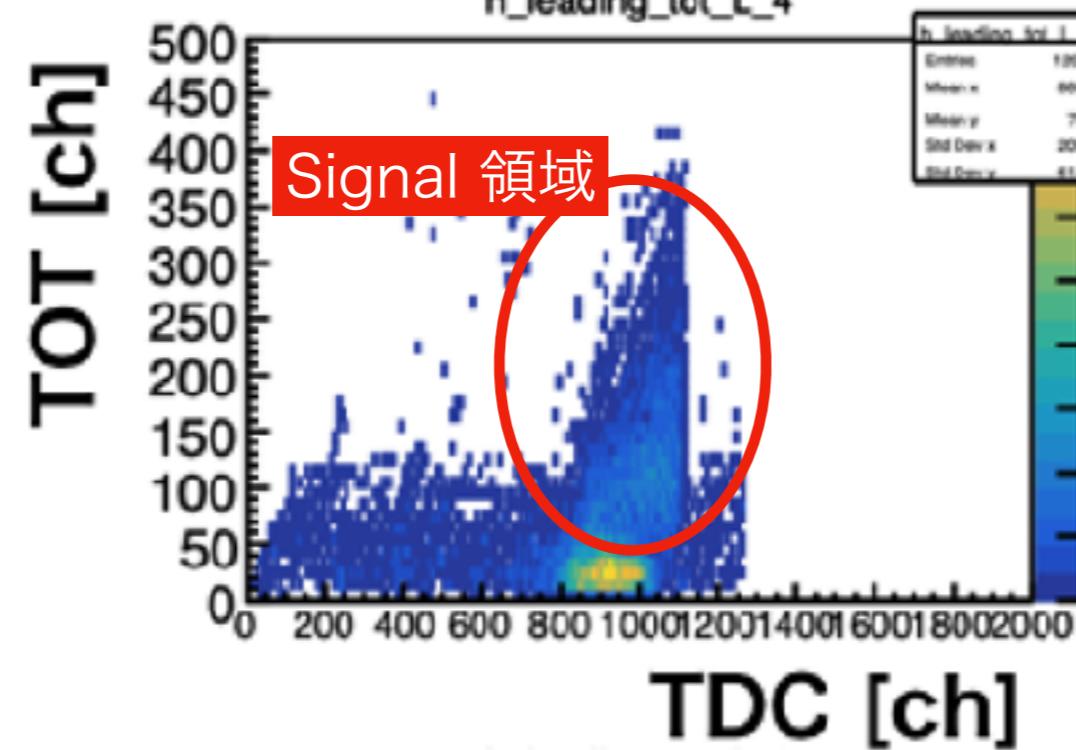
(Amplifier-Shaper-Discriminator,
SONY CXA3653Q)

- 16 ch
- 積分時間 16 ns
- pre-amp ~0.8 V/pC, main-amp Gain = 7



Trigger Counter 1

TOT vs TDC
(SLayer#4)



まとめ

- 次期反K中間子原子核の実験のため、大立体角検出器システムを建設中である。
- 2024年6月に円筒型飛跡検出器CDC実機が完成した。
- 宇宙線シグナルを確認できた。

今後の展望

- CDCについてさらに以下の検討を進める。
 - 充填ガス
 - Pre-Amp基板
- 2026年秋、インストールを目指している。
- 2027年、J-PARC E80実験のデータ収集のため順調に準備が進んでいる。



超伝導ソレノイド磁石



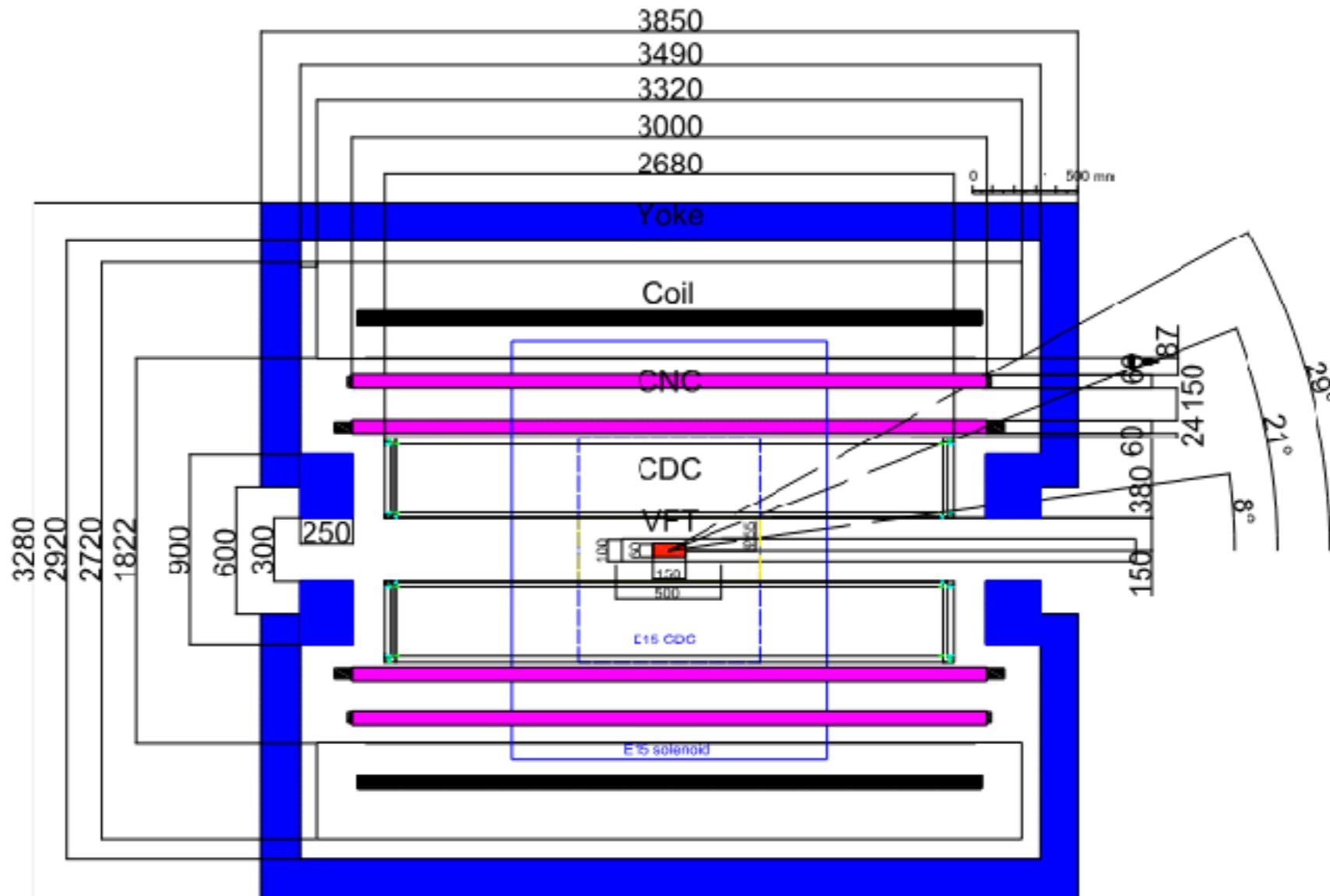
鉄ヨーク

有難うございました

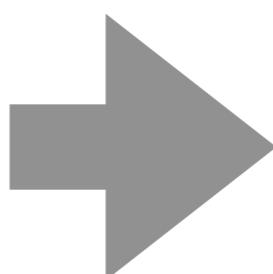
Back Up

Back-Up

17



- 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 ($59\% \rightarrow 93\%$)
- 4倍の中性子検出能力 ($3\% \rightarrow 12\%$ 以上)

Back-Up

3. 円筒型ドリフトチェンバー (E80-CDC)

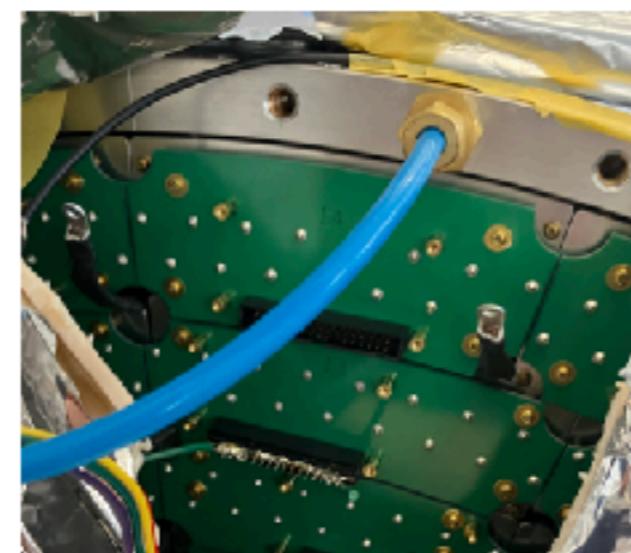
2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 16

信号読み出しの流れ

ASD (SONY CXA3653Q):

Amplifier-Shaper-Discriminator

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



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

Back-Up

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	??

- 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。

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

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。

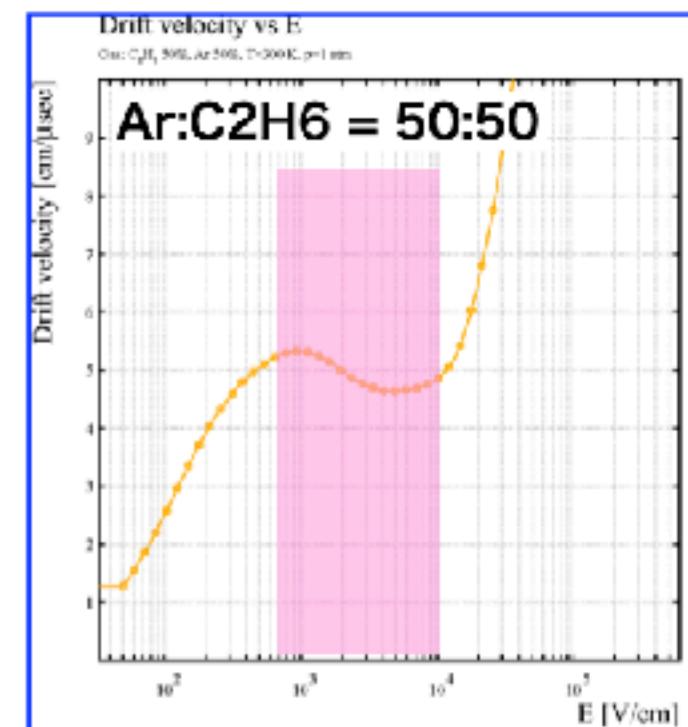
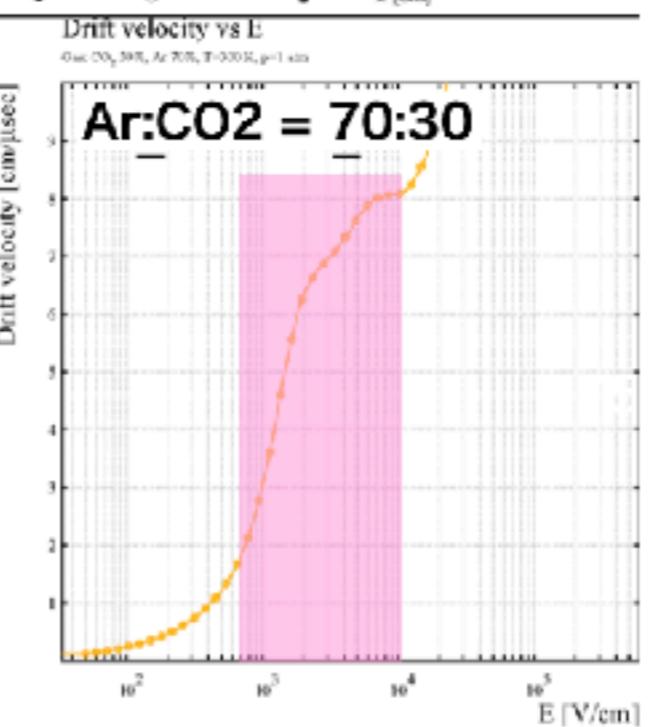
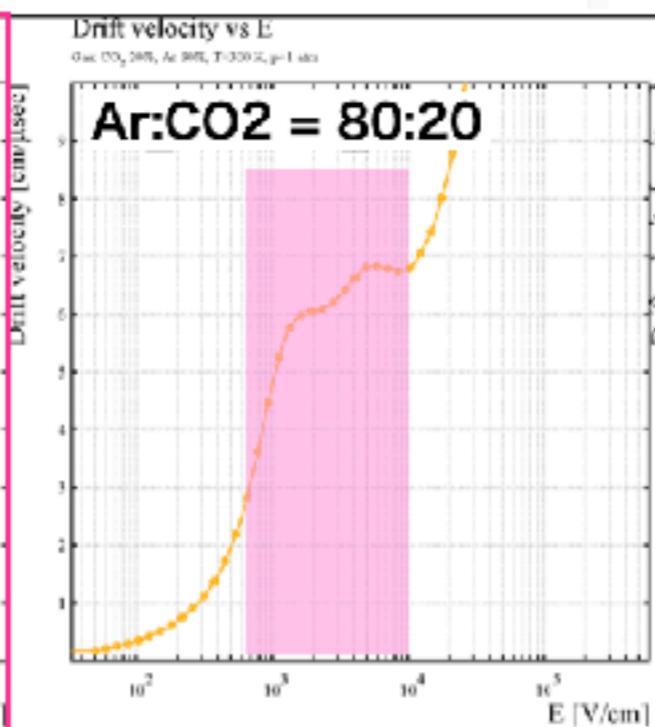
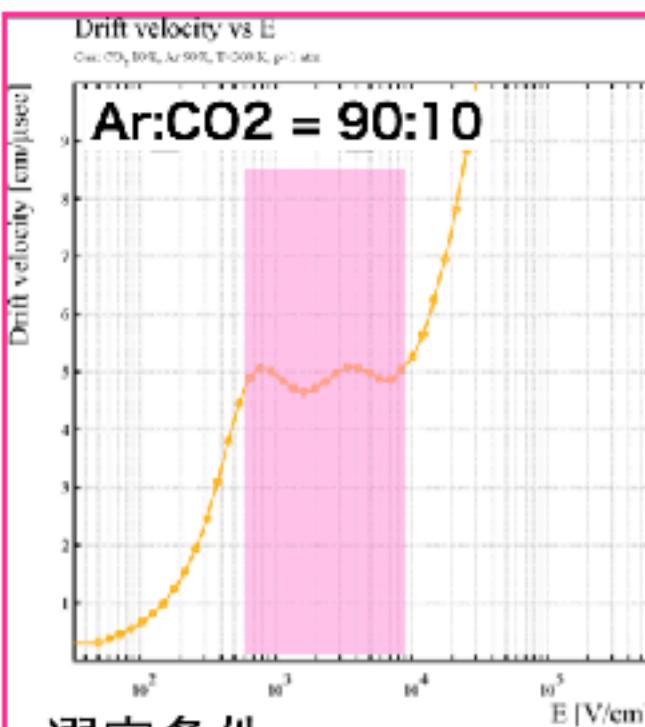
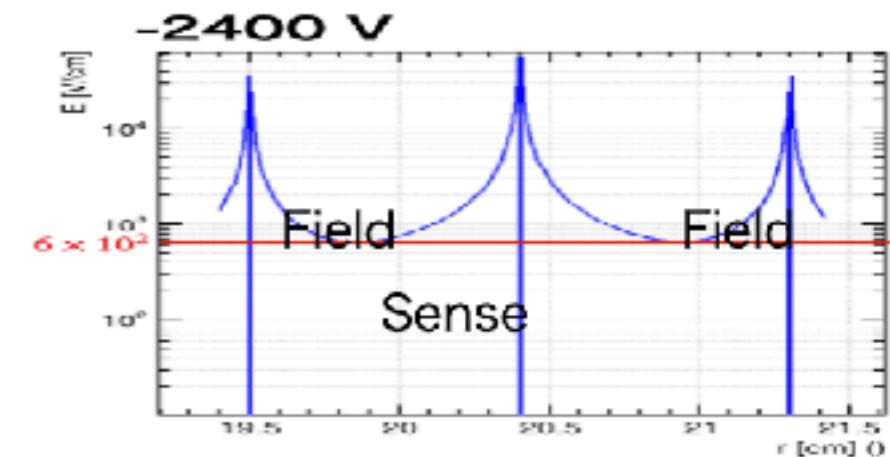
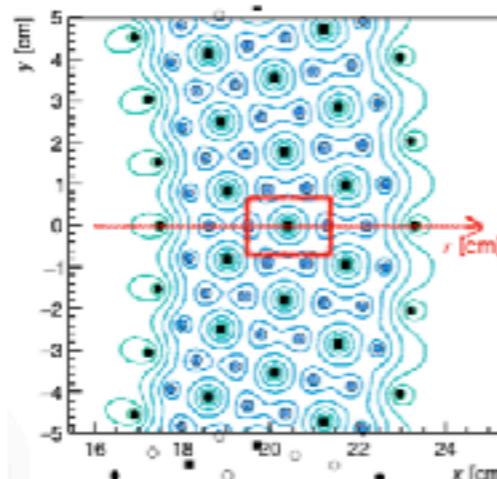
Back-Up

3. 円筒型ドリフトチャンバー (E80-CDC)

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 18

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。

Back-Up

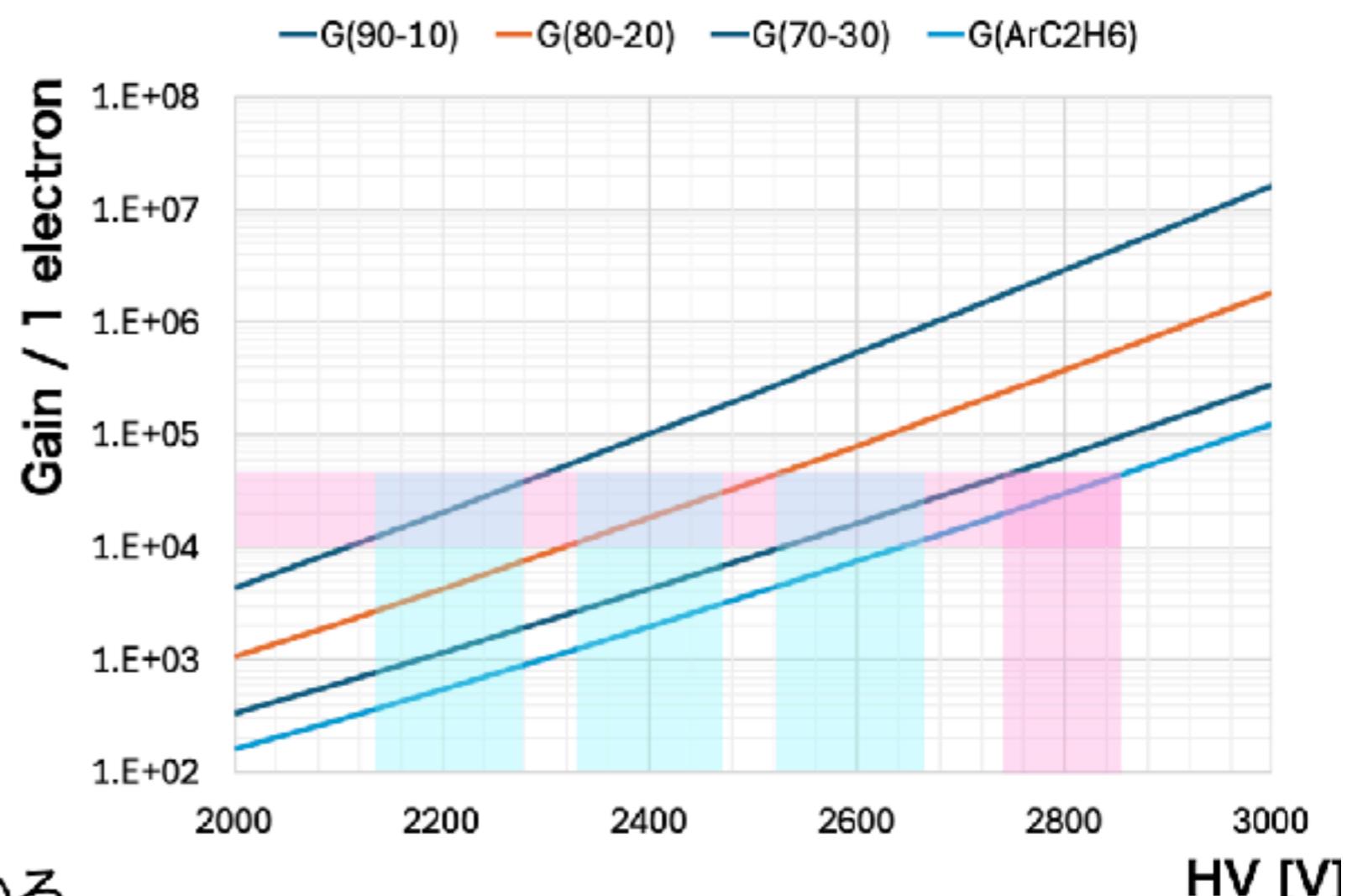
4. ガスシミュレーションによるガス混合比の選択

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。

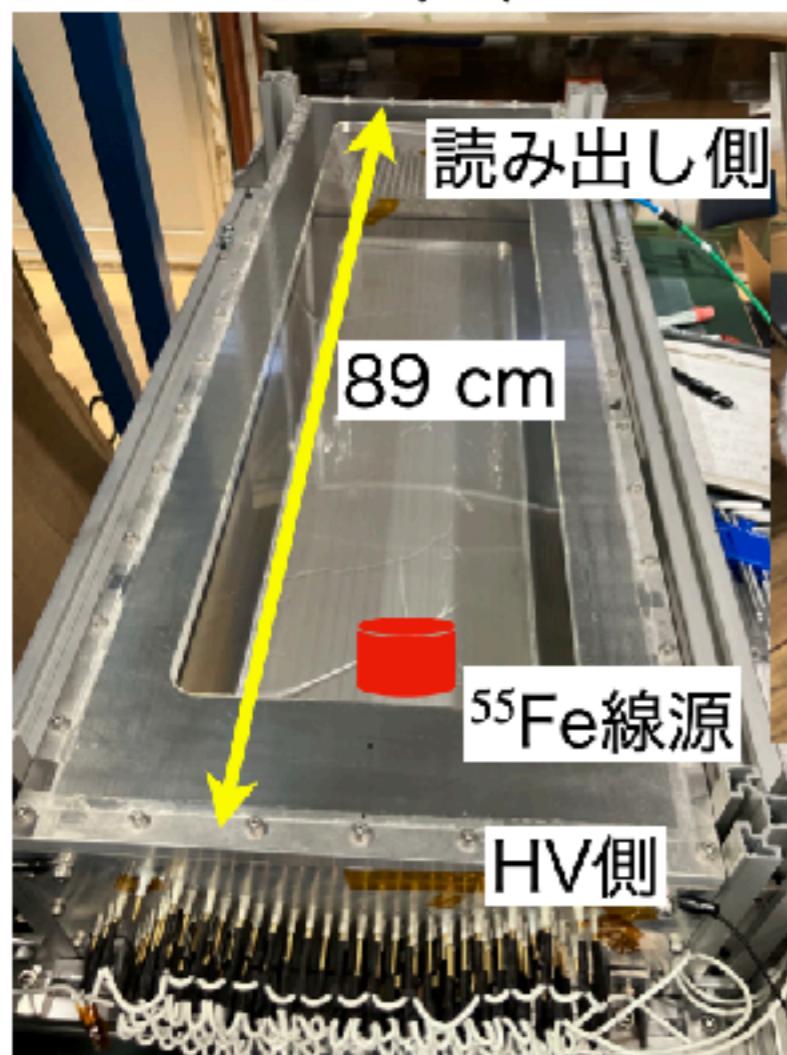


Back-Up

5. テストチャンバー実験によるガス混合比の決定

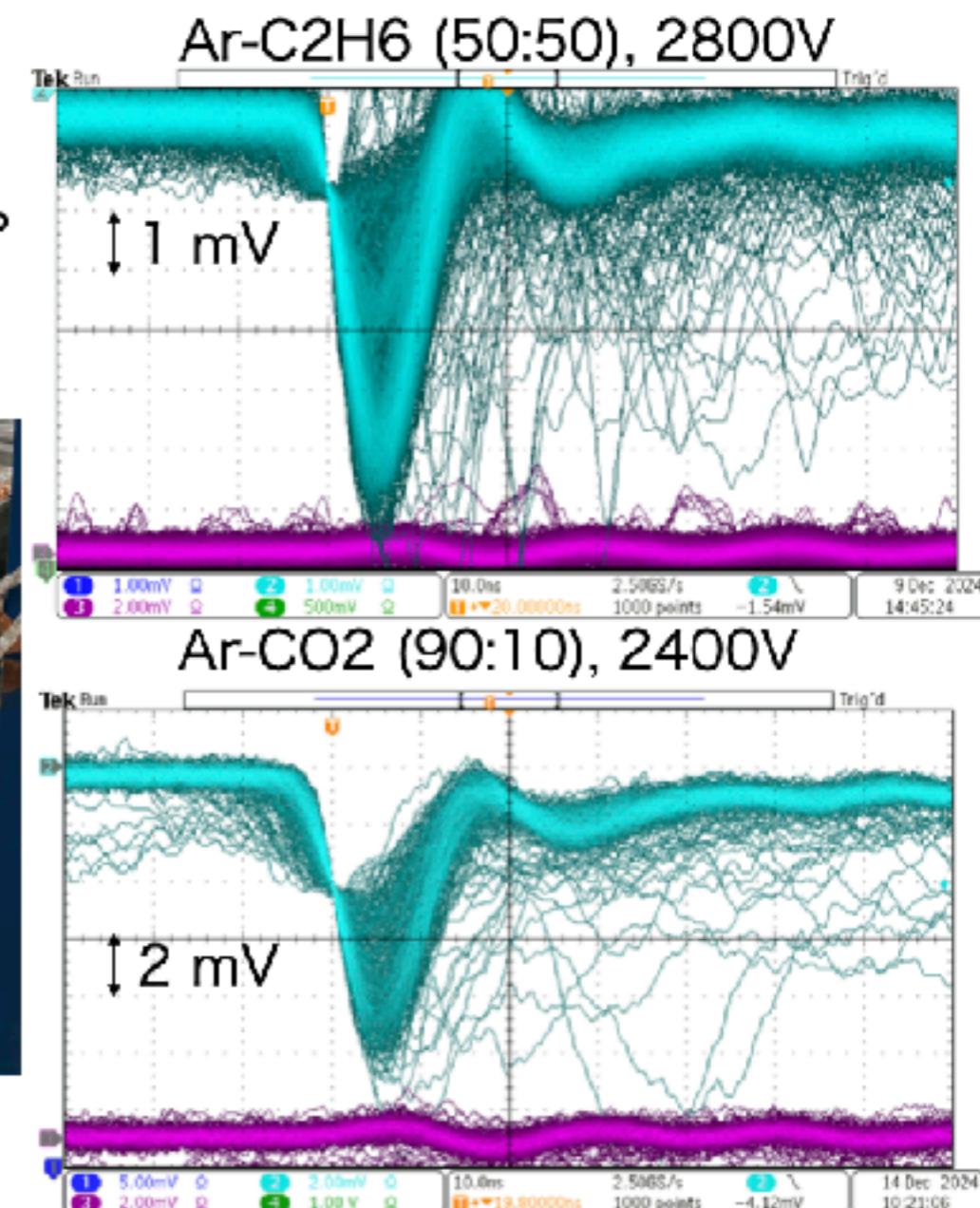
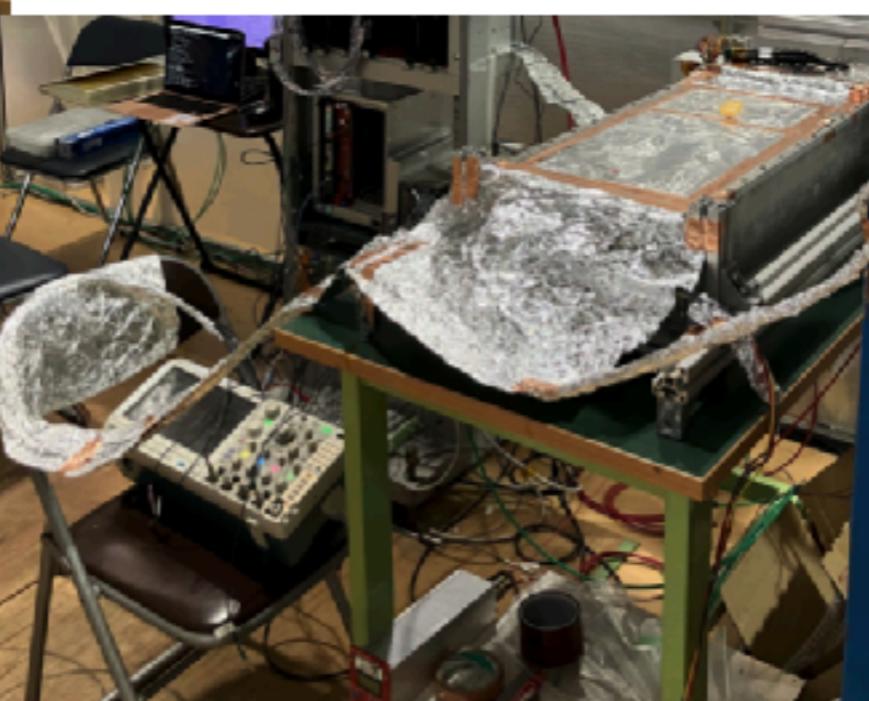
信号波形確認

セル構造はE80(15)-CDCと同じ



ワイヤーから直接信号を
オシロスコープで観測した。

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。

2024年度 脊十論文発表会、2025/2/4

Back-Up

5. テストチャンバー実験によるガス混合比の決定

増幅率測定

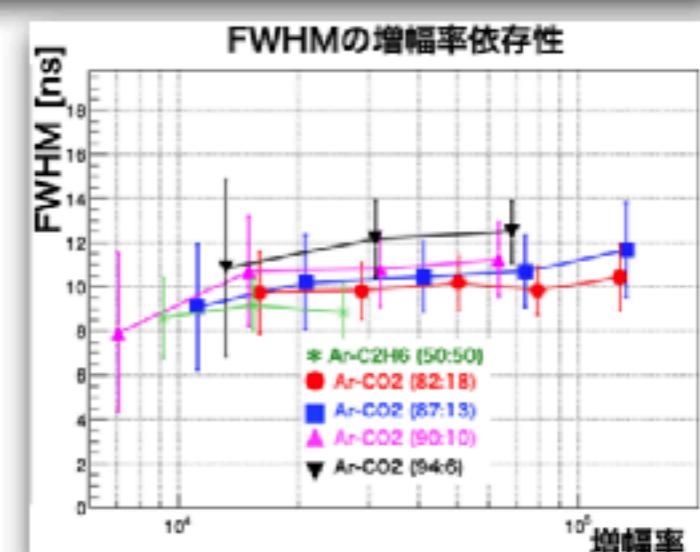
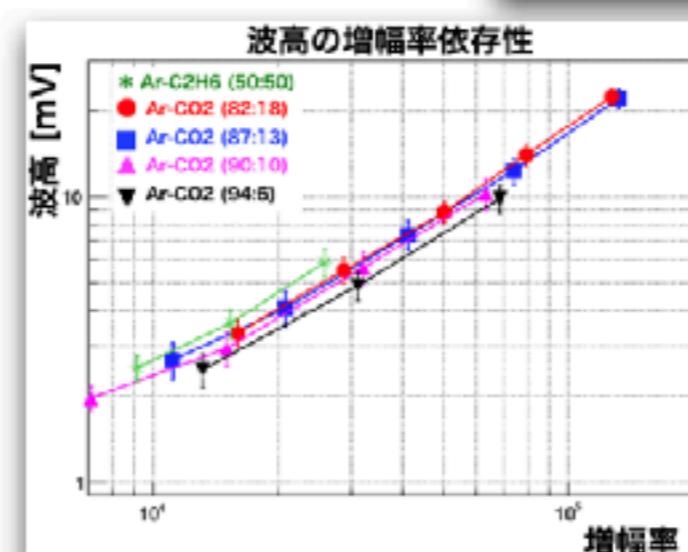
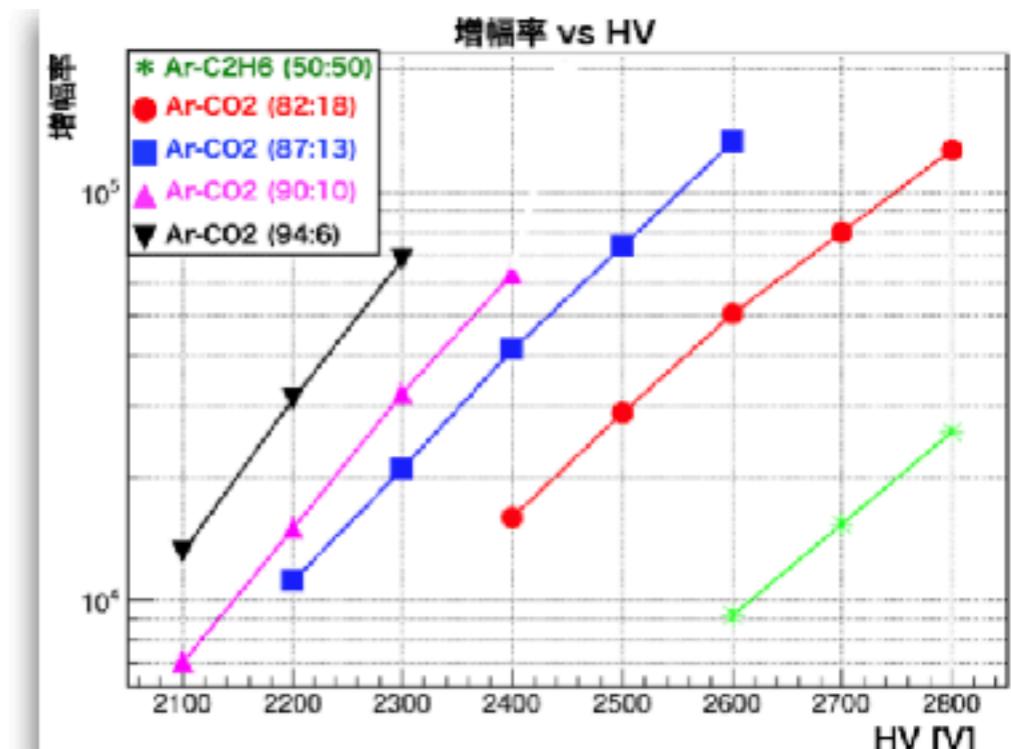
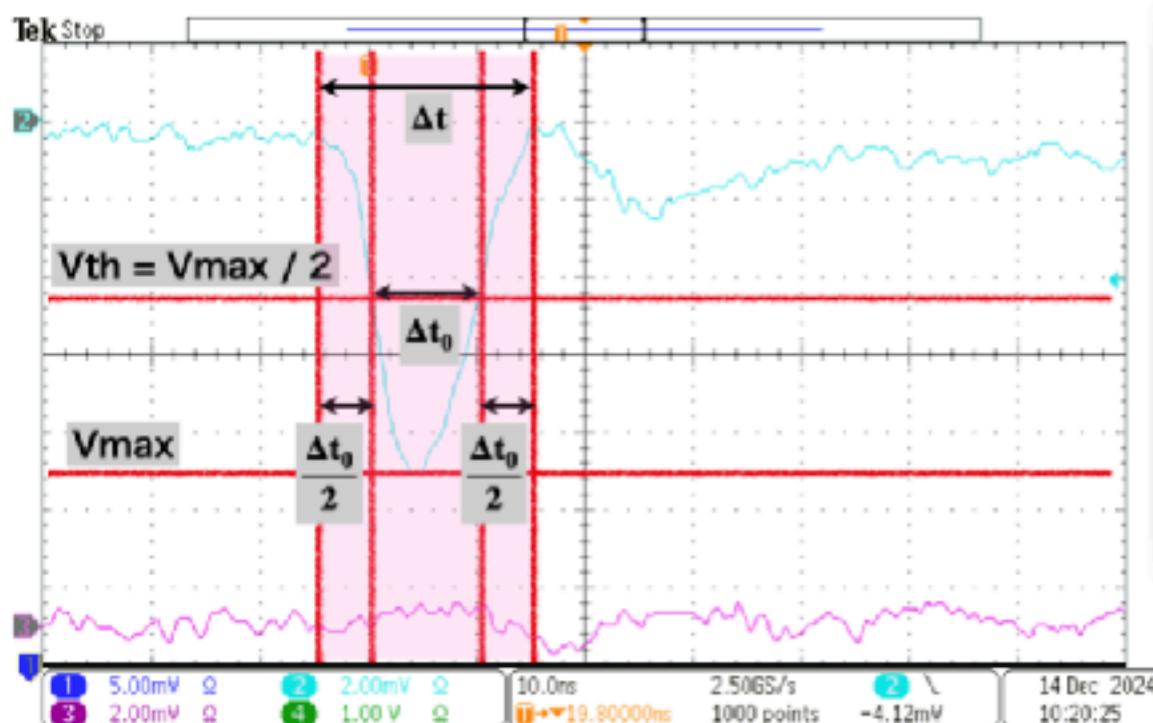
ガスの基本的性質として
増幅率を調査した。

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。



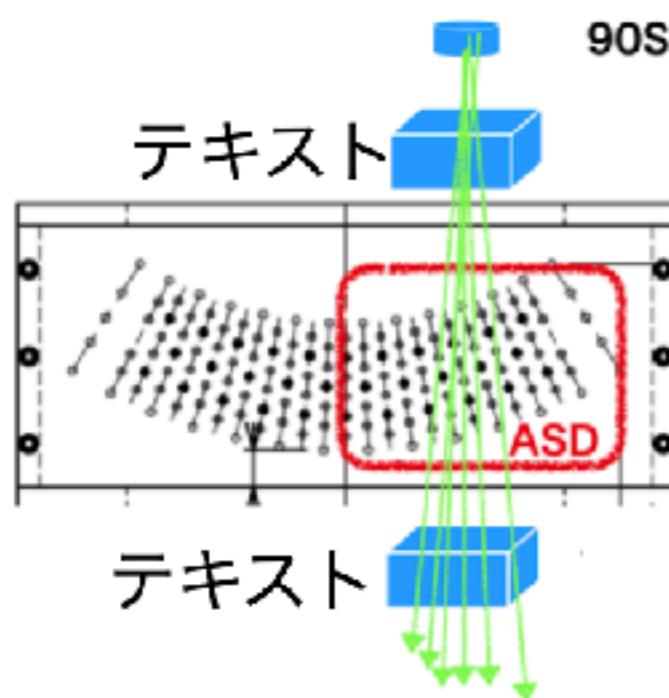
統計後さの範囲内で明確な違いはない

Back-Up

5. テストチャンバー実験によるガス混合比の決定

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。



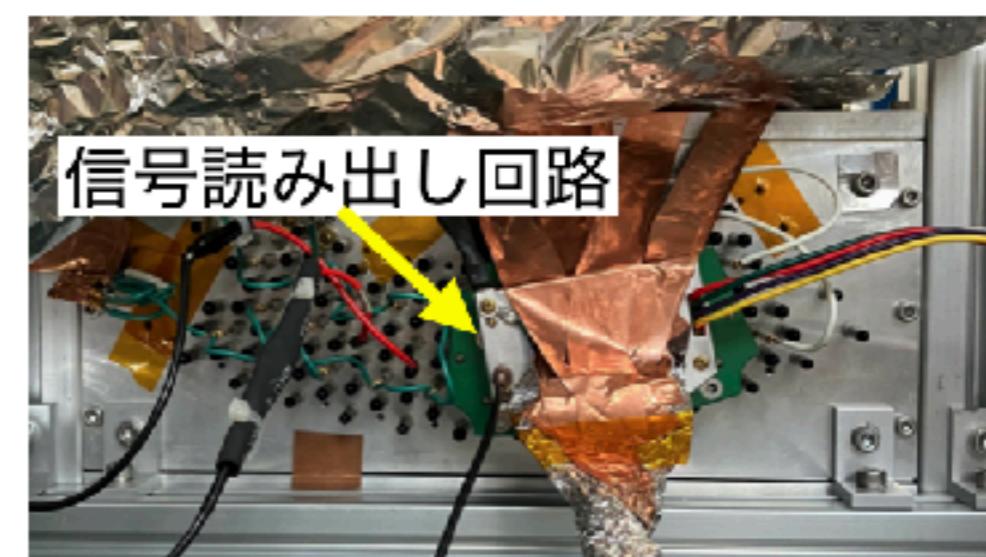
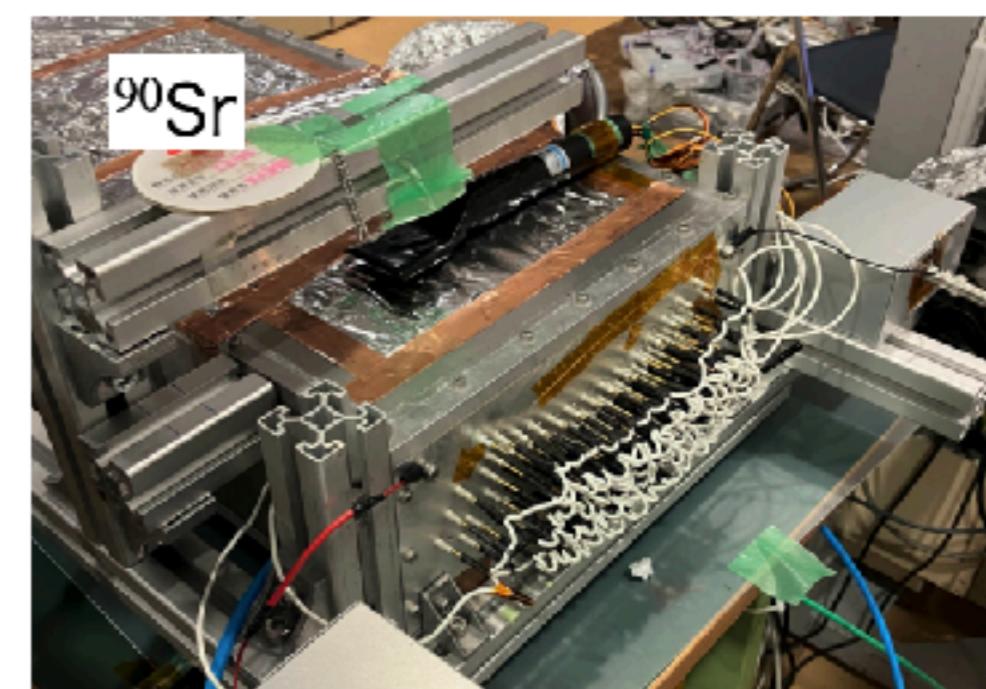
検出効率の定義

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

むしろこの部分のセル構造



実機

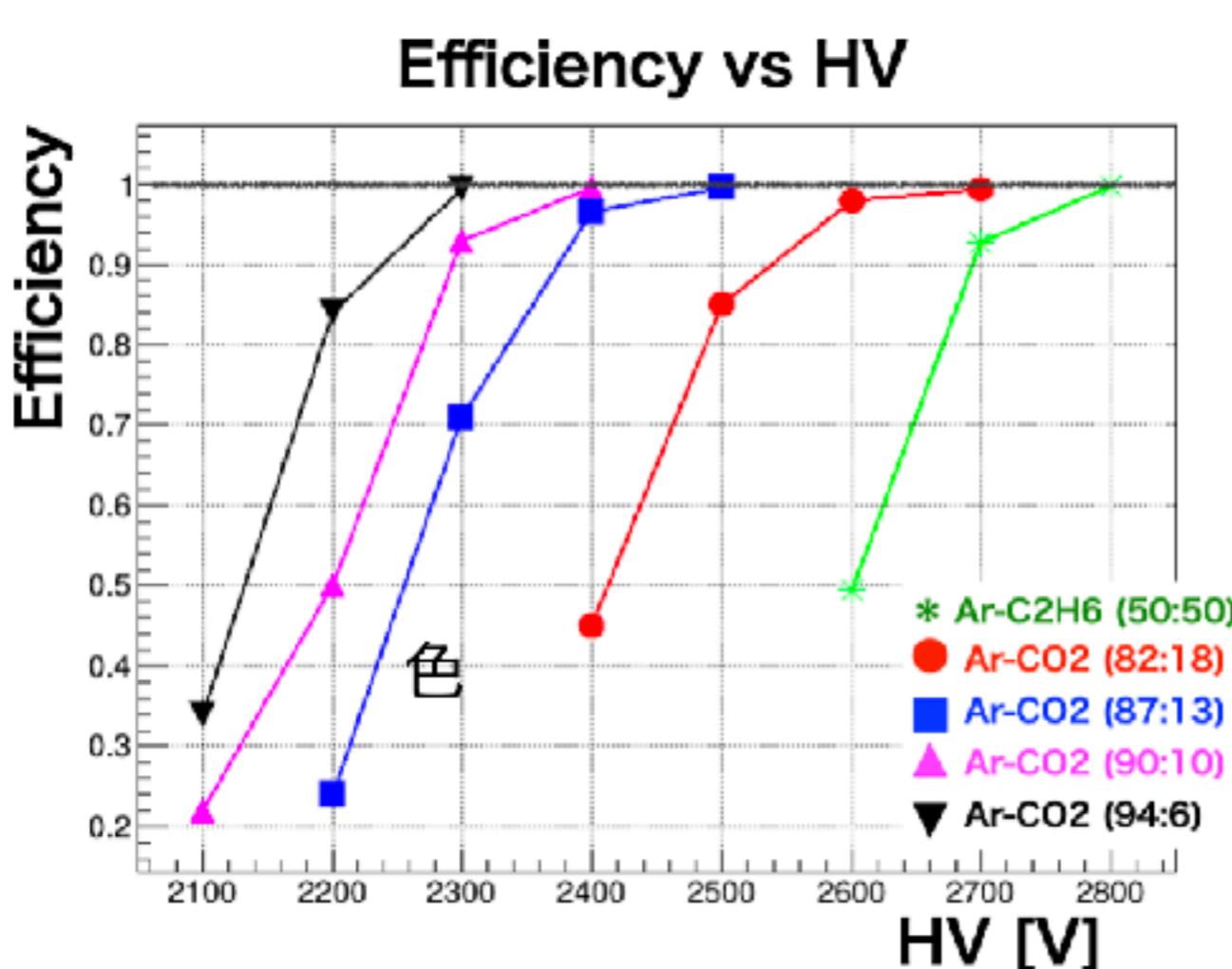


Back-Up

5. テストチャンバー実験によるガス混合比の決定

検出効率測定結果

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



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。

Back-Up

6. 旧CDCによる性能評価

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 20

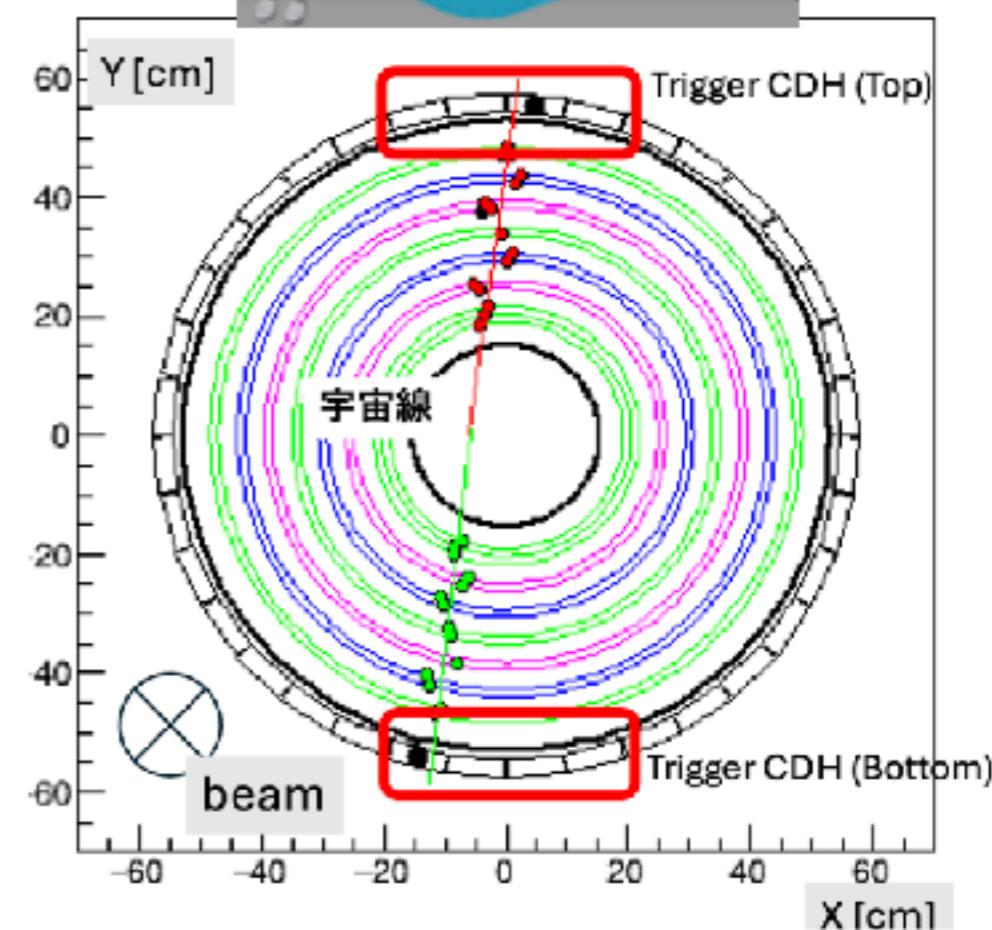
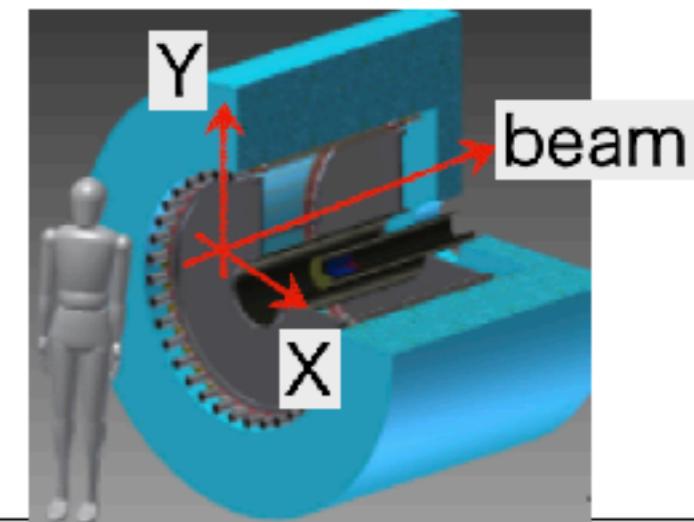
E15-CDCによる宇宙線テスト

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~200um

実験方法

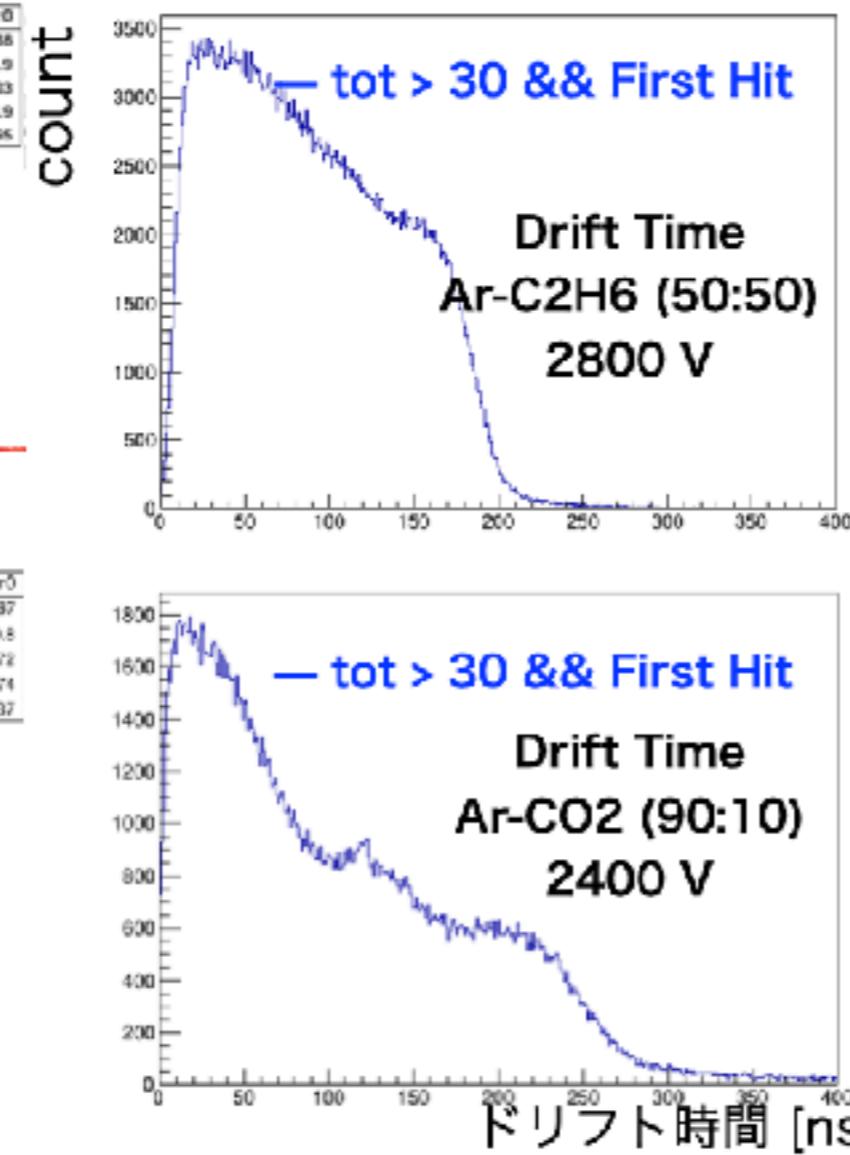
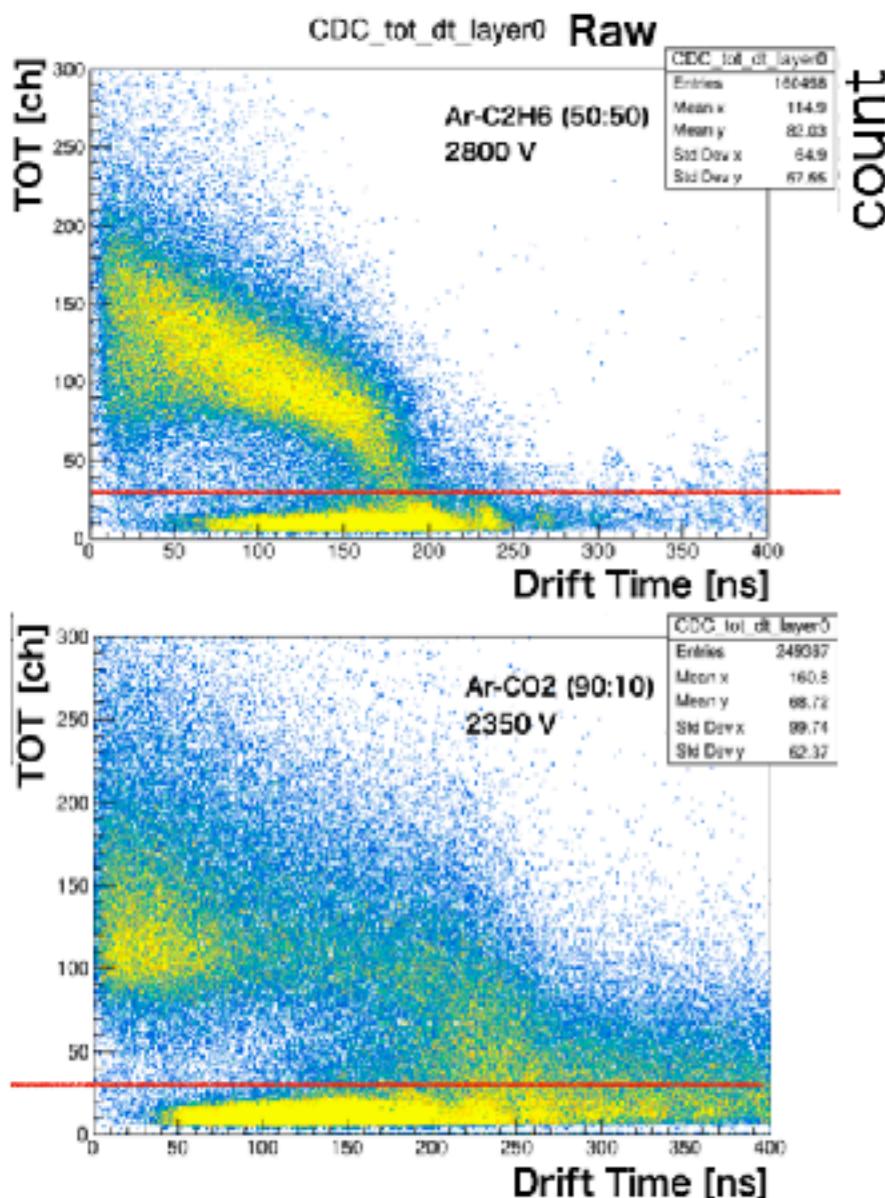
- E15-CDC、磁場ゼロ
- 印加電圧
 - Ar-C₂H₆ (50-50) : -2500 ~ -2800 V
 - Ar-CO₂ (90-10) : -2200 ~ -2400 V
- 読み出し: ASD (SONY CXA3653Q, $\tau = 16\text{ns}$)
- データ取得: Multi-Hit TDC module
時間情報 (TDC)とエネルギー情報 (Time Over Threshold)
- トリガー: 上下のシンチレータ(CDH)の 2 コインシデンス



Back-Up

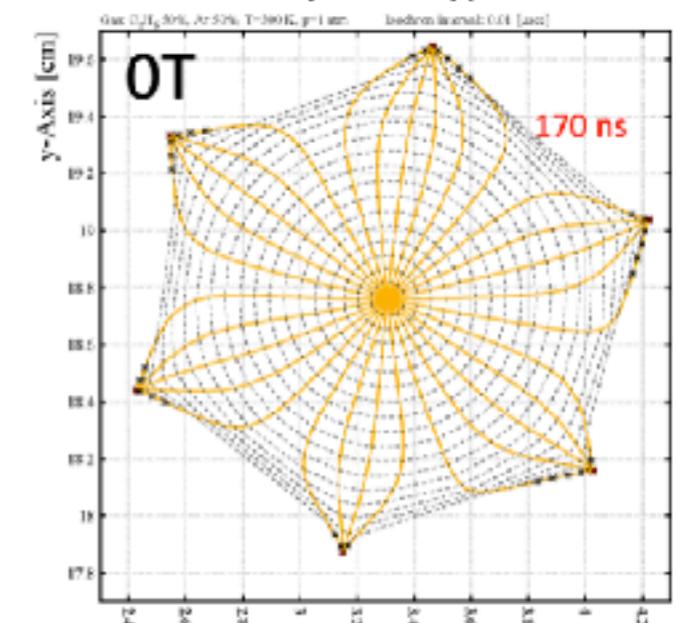
6. 旧CDCによる性能評価

生データとドリフト時間分布

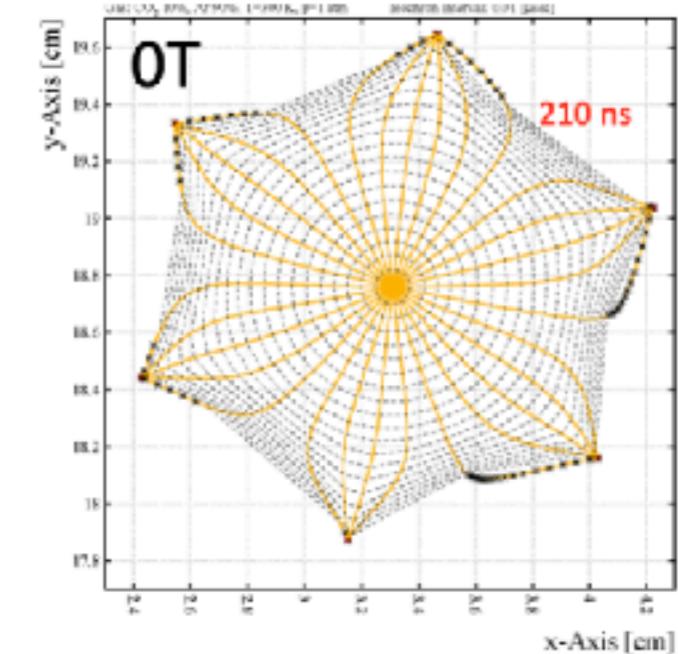


2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 21

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。

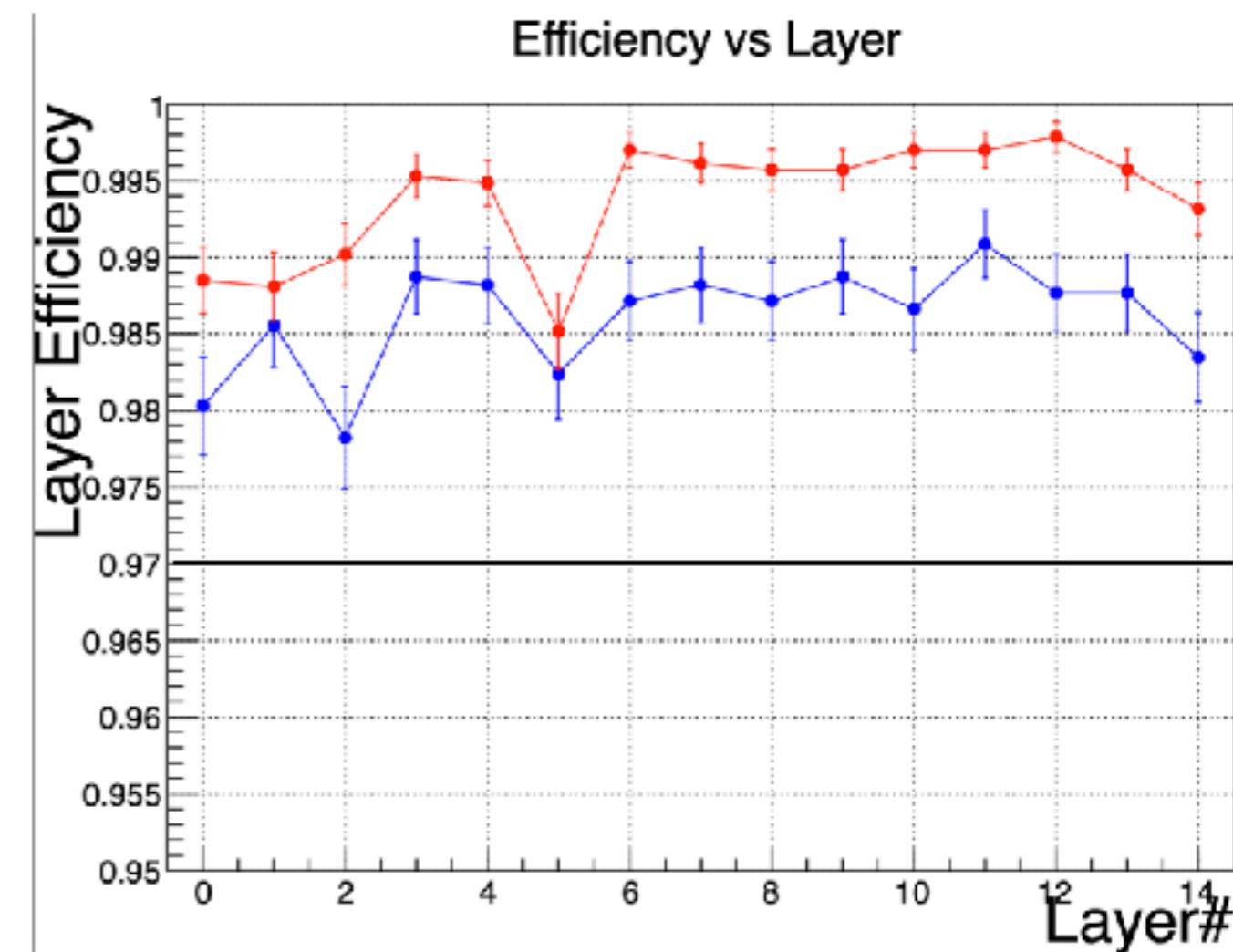
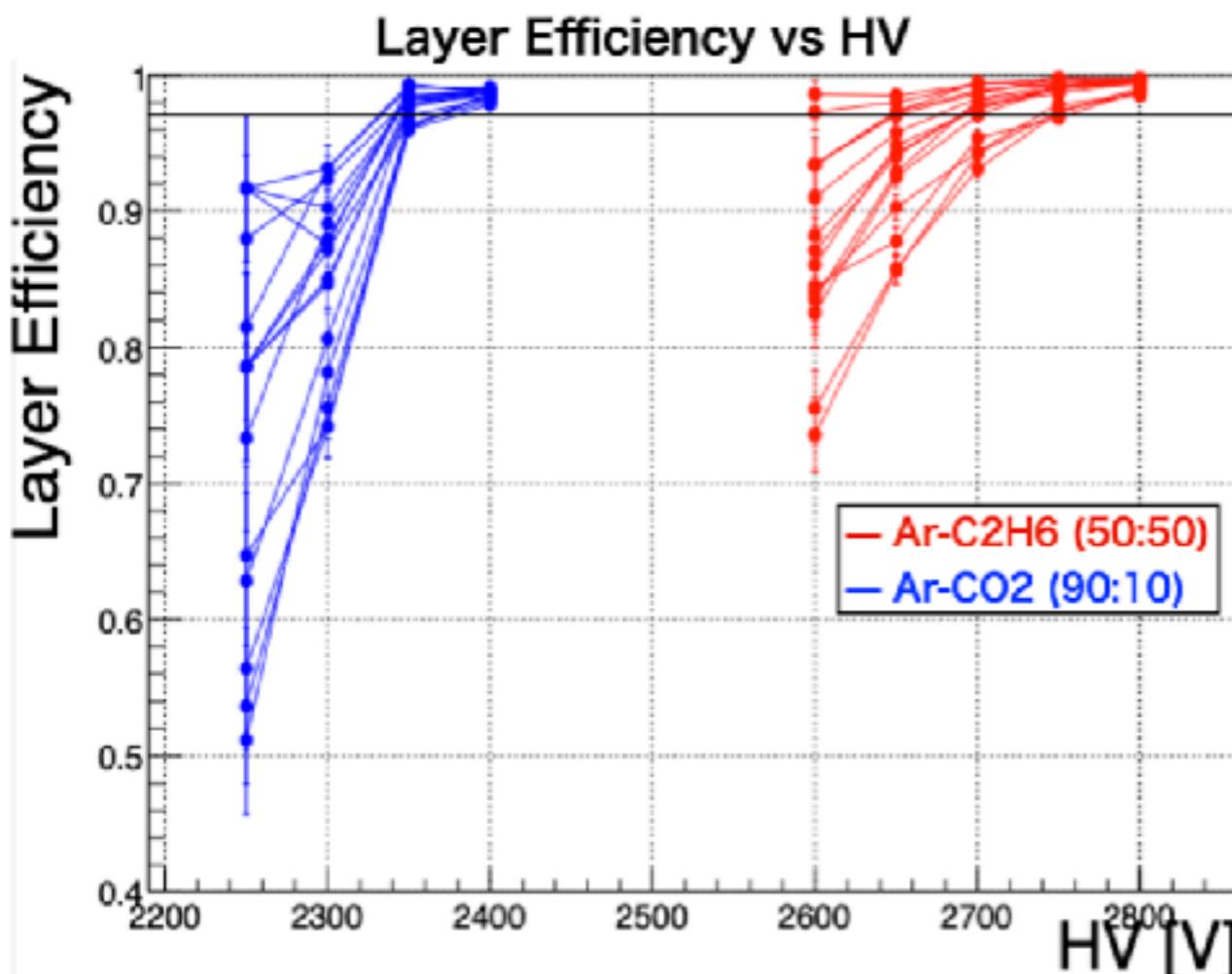
Back-Up

6. 旧CDCによる性能評価

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 23

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。

Back-Up

6. 旧CDCによる性能評価

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 24

位置分解能の評価

Residualの比較

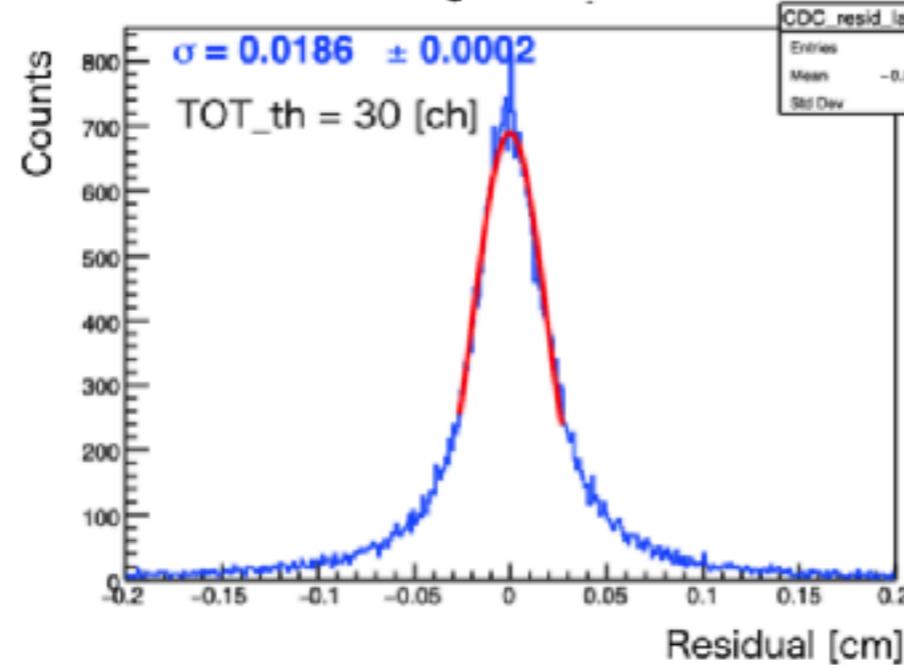
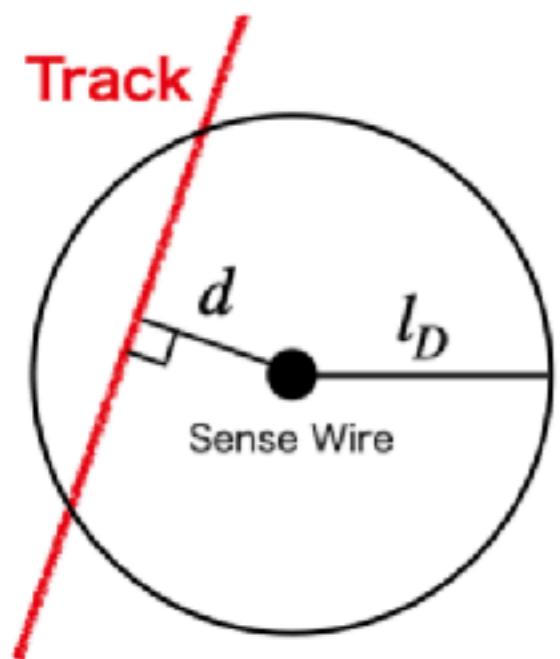
定義 : Residual = $l_D - d$

l_D : ドリフト長、 d : センスワイヤーとトラックの距離

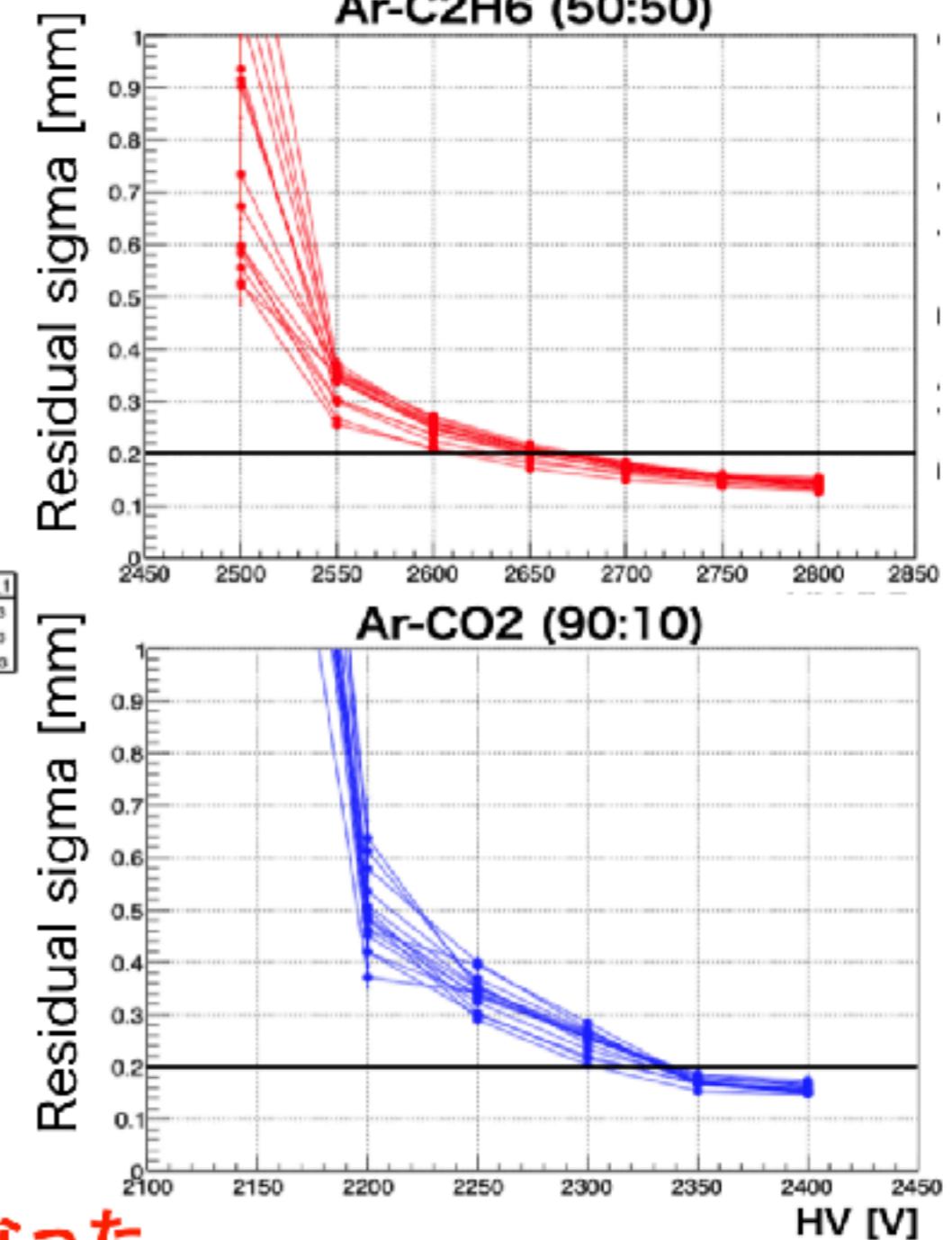
ResidualのFitの例

範囲無限でガウシアンFit

その1.5sigmaで再Fit



両ガスとともにHVを高くするとResidualも小さくなつた。



Back-Up

6. 旧CDCによる性能評価

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 25

位置分解能の評価

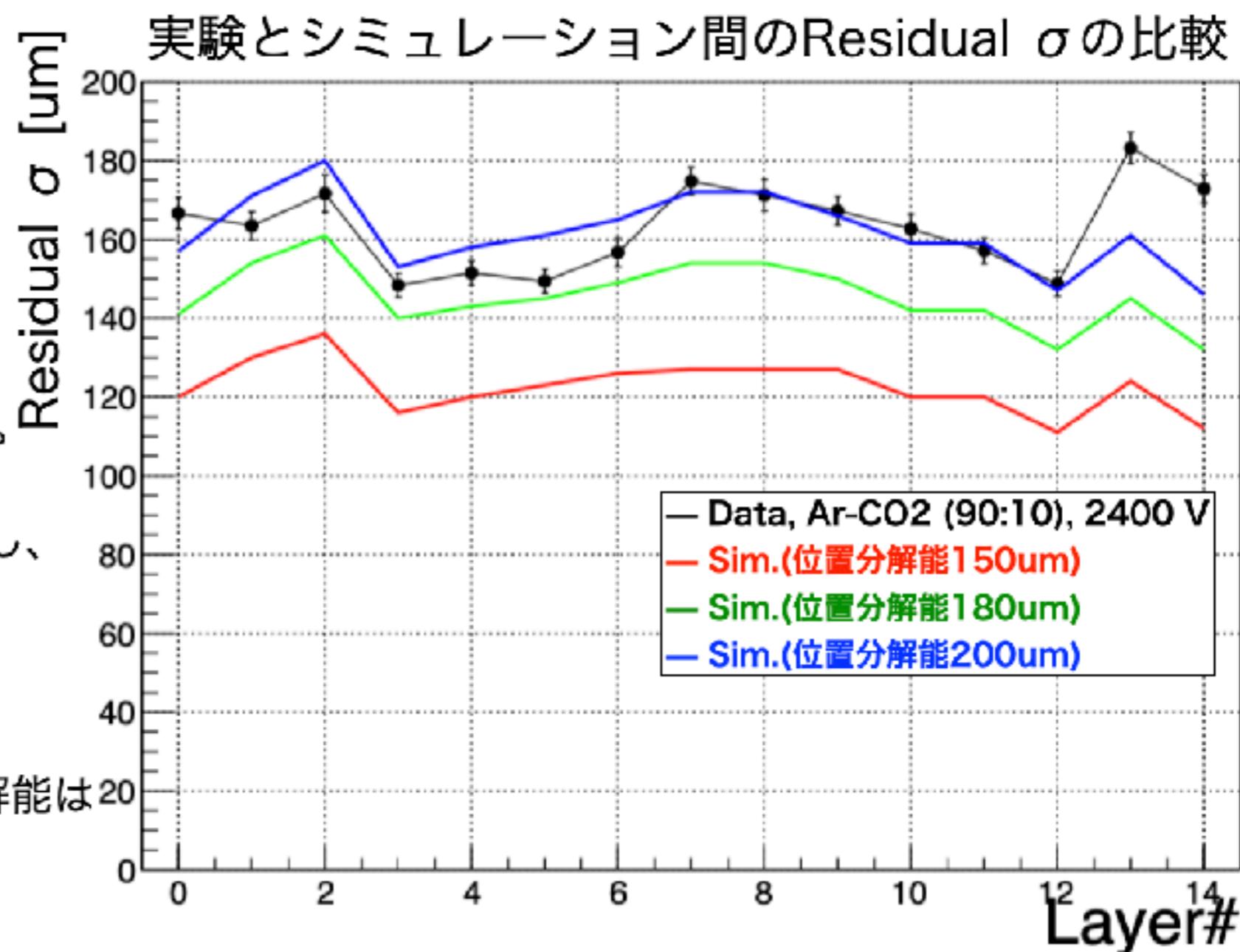
位置分解能 σ について

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。



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。

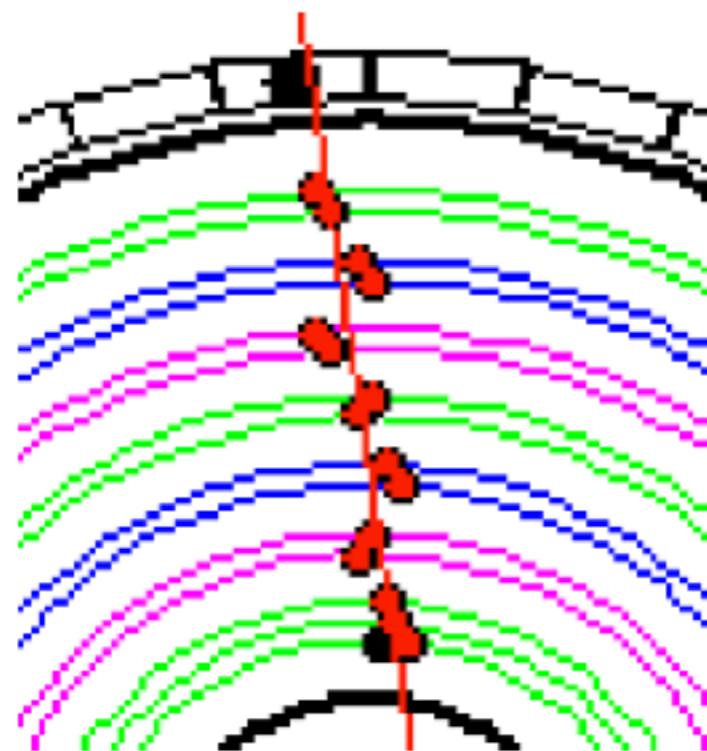
Back-Up

31

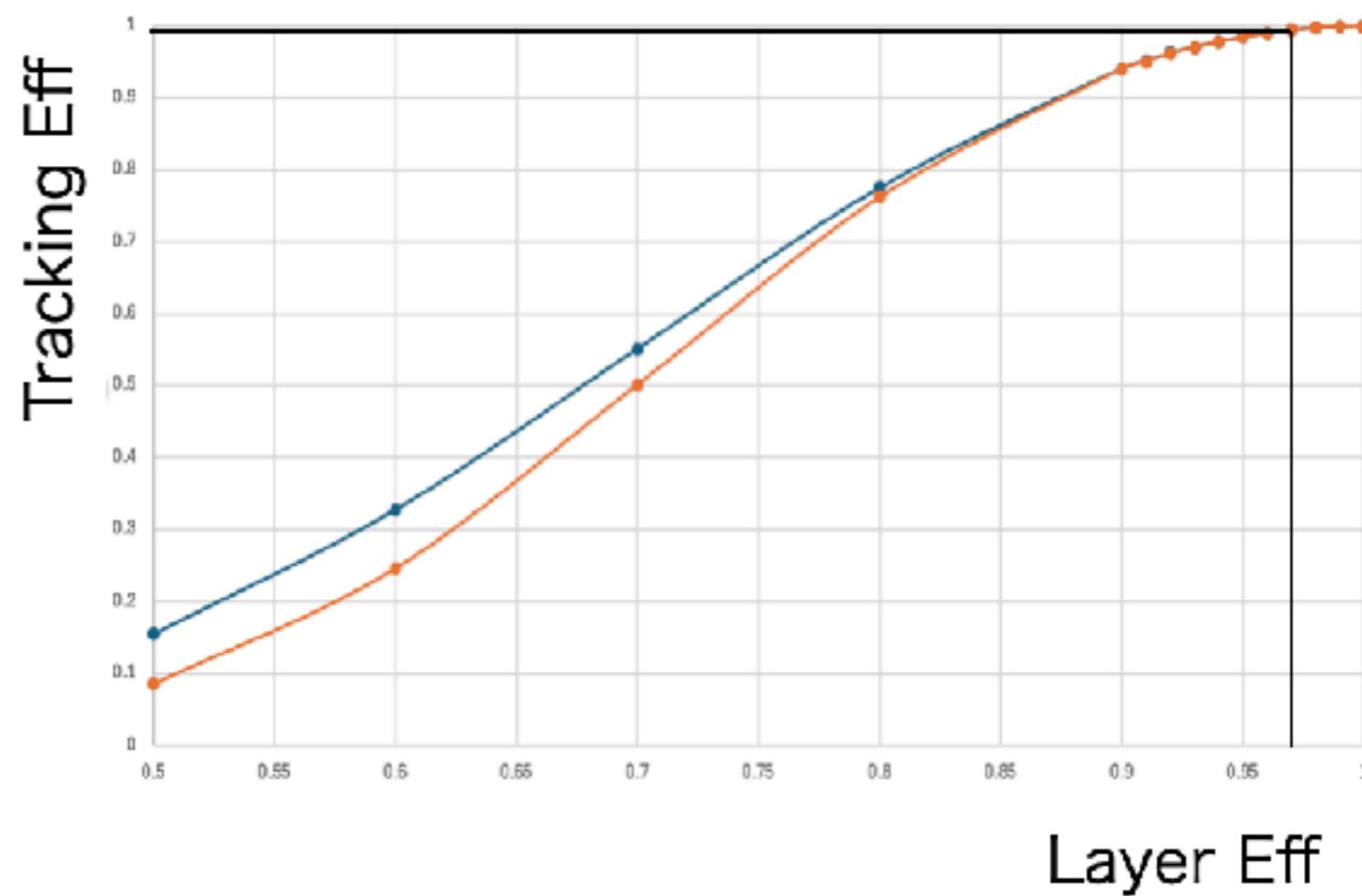
要求性能の決め方

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



32

2024年度 緒論文発表会、2025/2/4

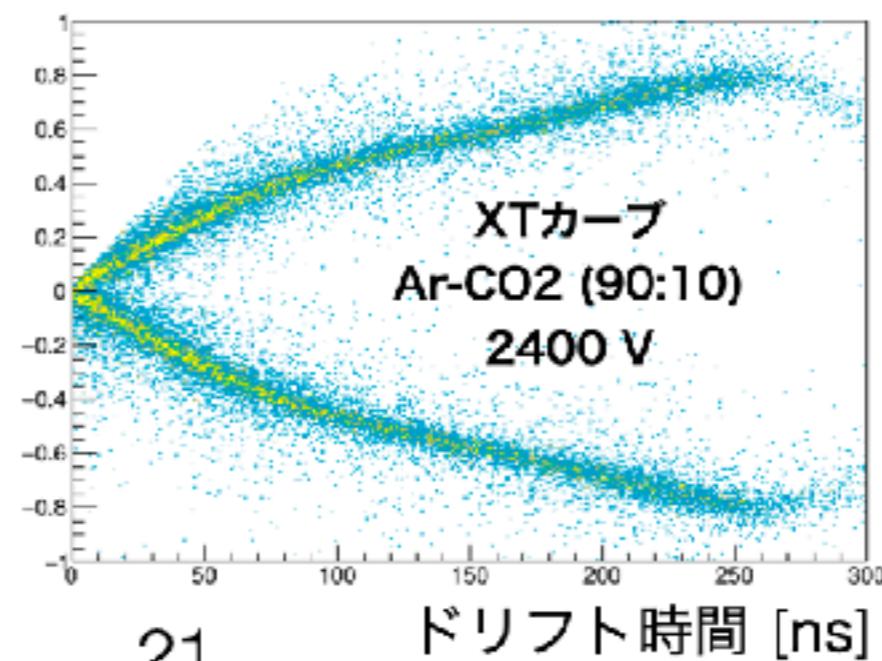
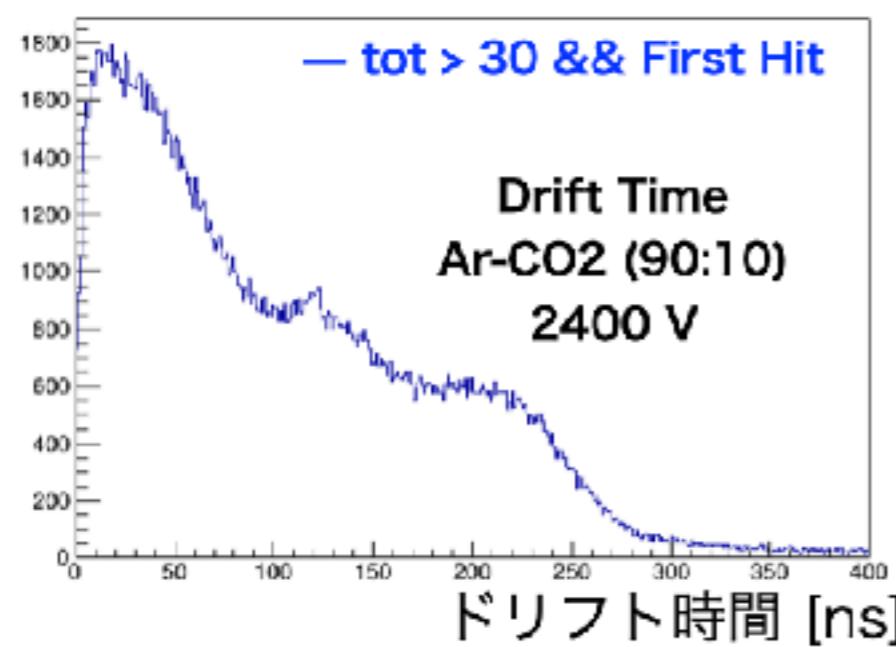
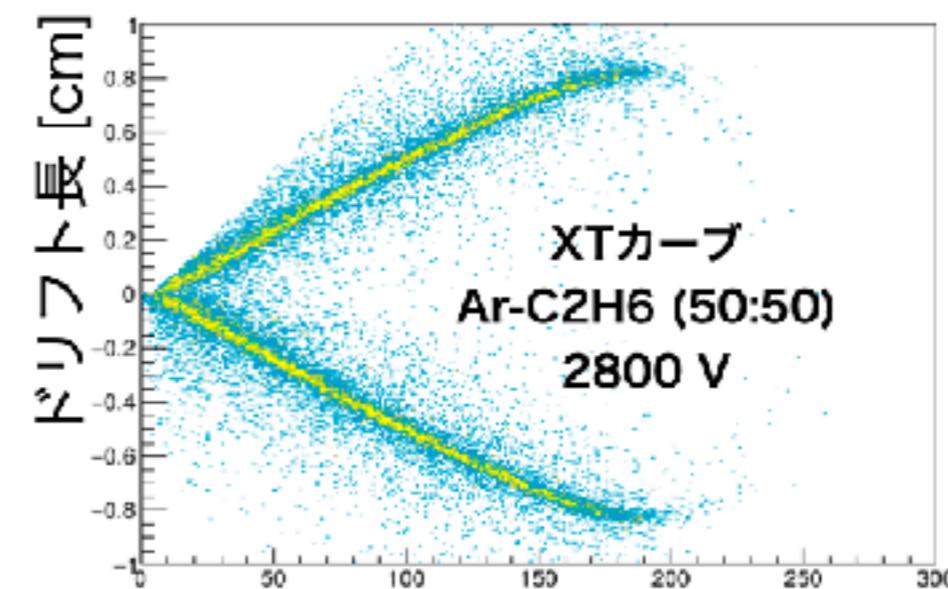
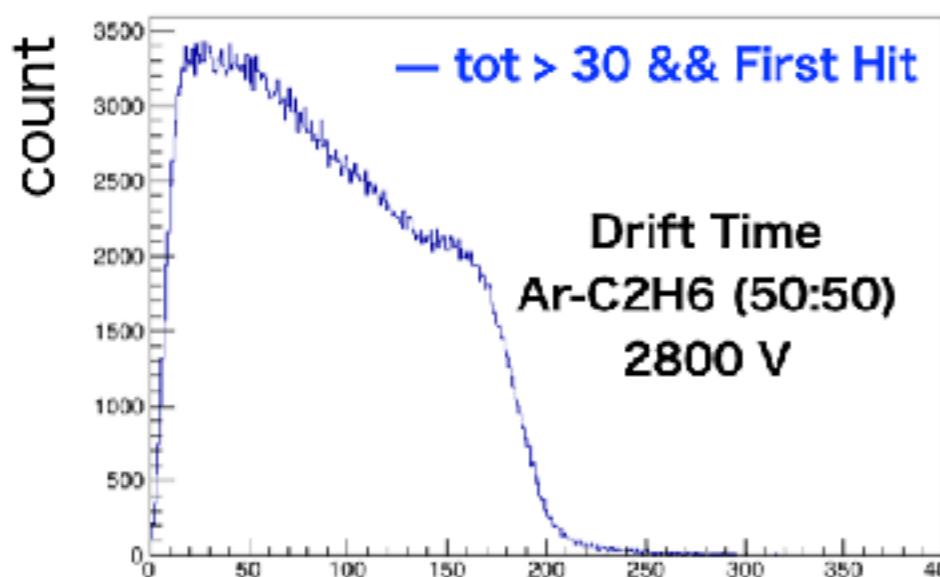
Back-Up

6. 旧CDCによる性能評価

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。