

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な？

存在するならば、どんな性質なのかな？

→ 核子と強い引力相互作用をする反K中間子に着目

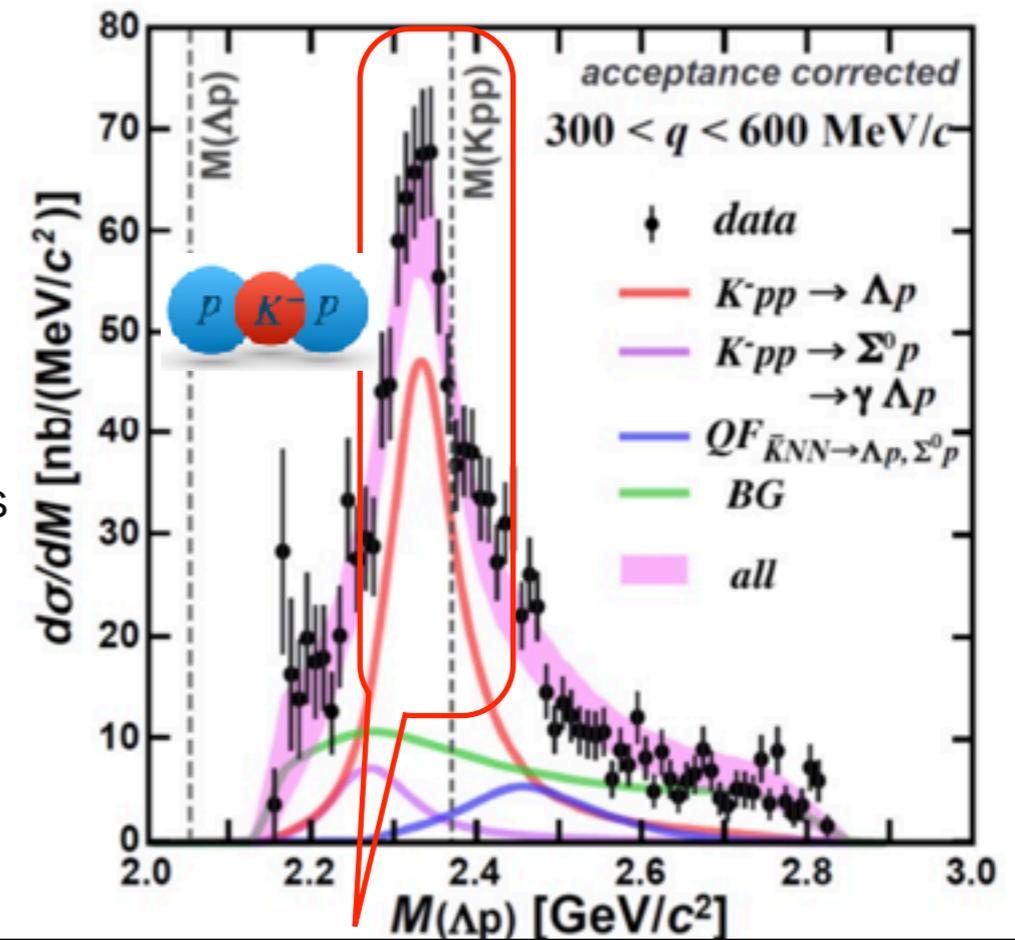
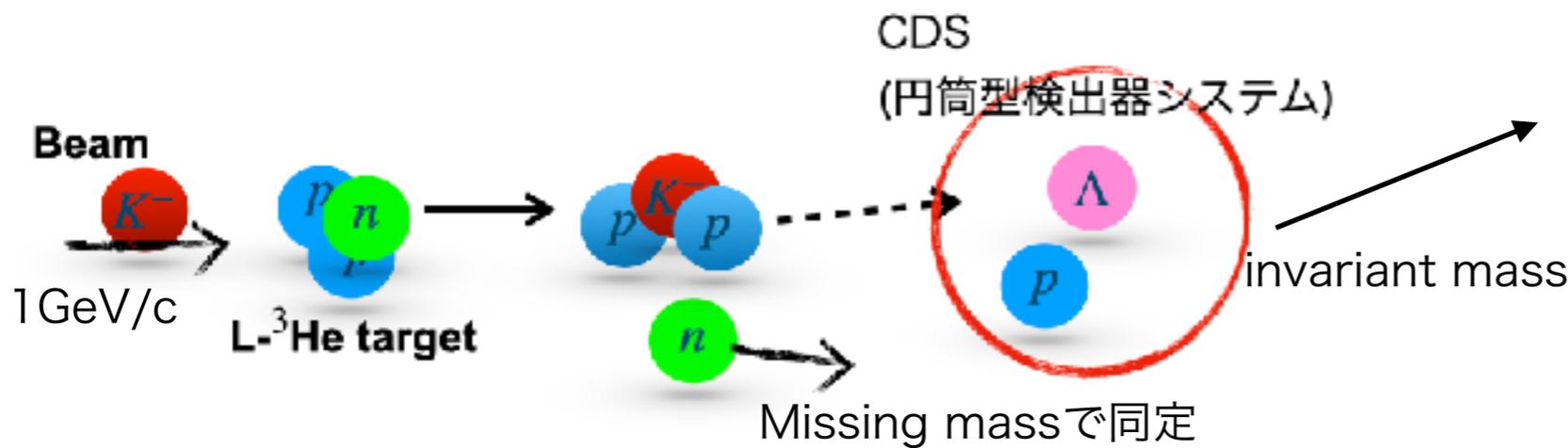
“中間子”原子核



● K⁻pp探索実験(J-PARC E15)

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

● 反K中間子原子核は存在するのかな？



● 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

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

次期反K中間子原子核実験

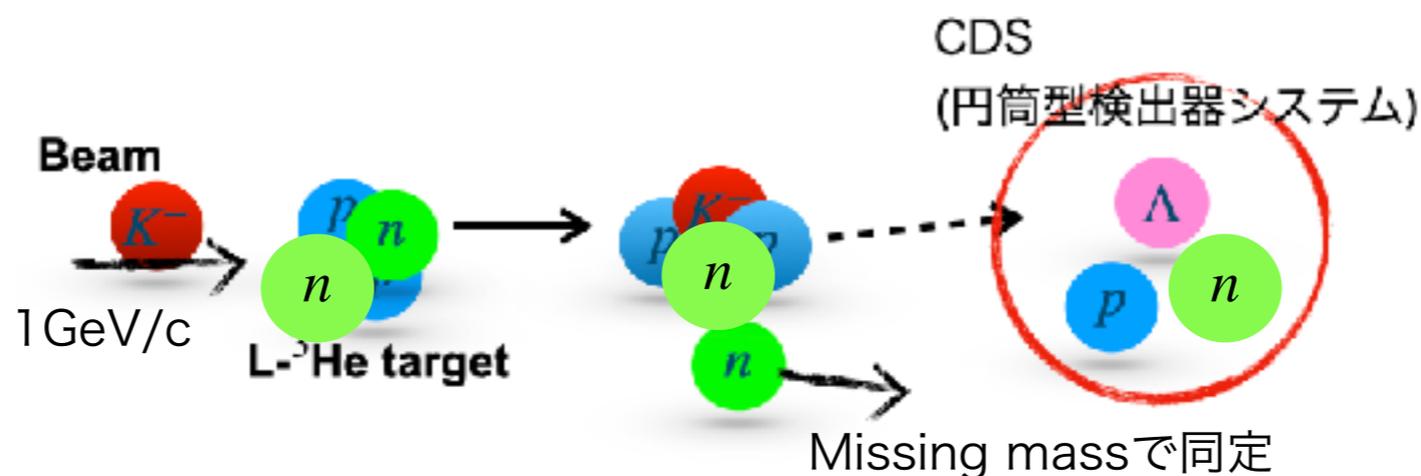
次の課題: 反K中間子原子核の性質, 内部構造を調査

- 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 のスピンのパリティは？



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

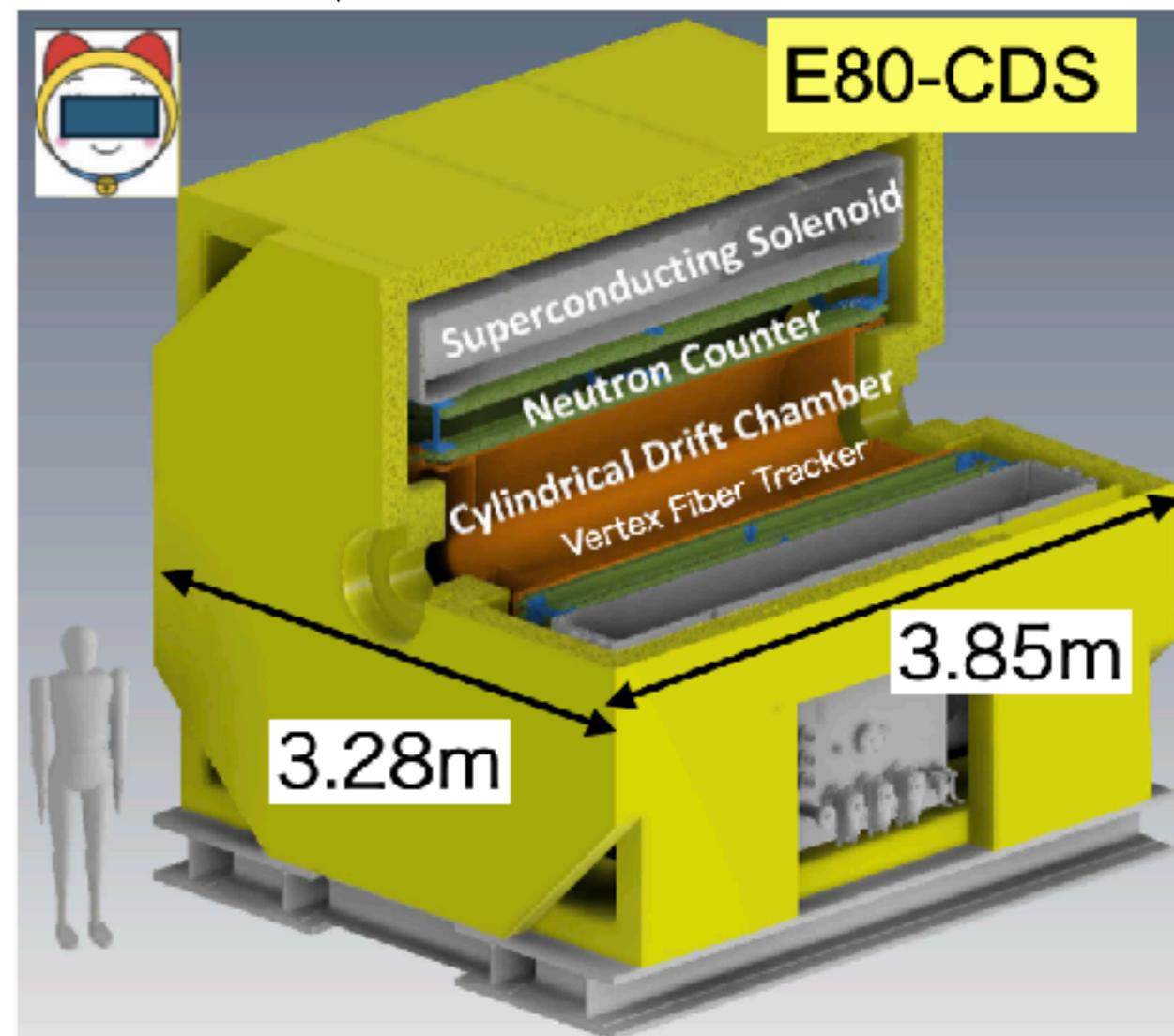
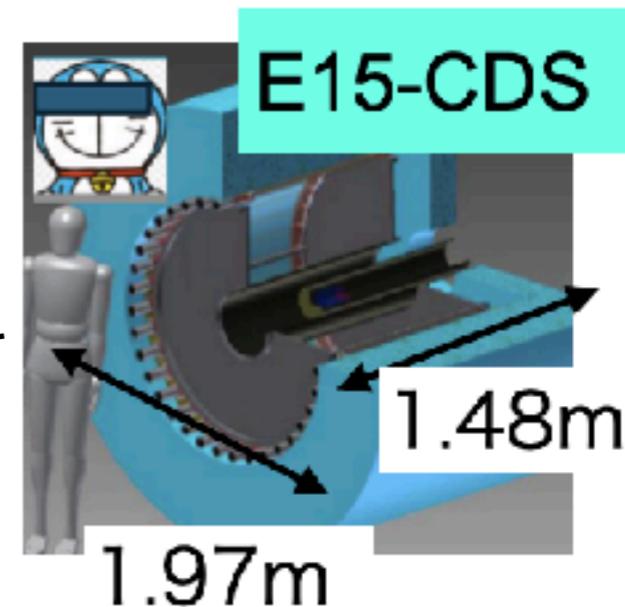
Cylindrical Drift Chamber:

- ・ 飛跡の曲率から運動量解析

Vertex Fiber Tracker :

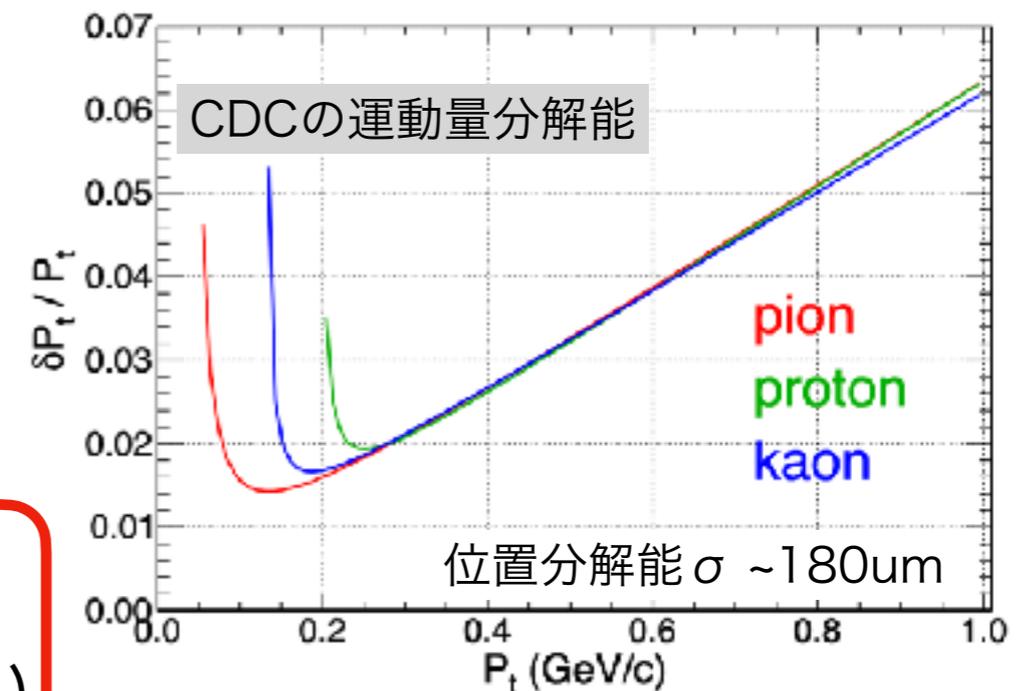
- ・ 崩壊点決定の精密化

Upgrade



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。



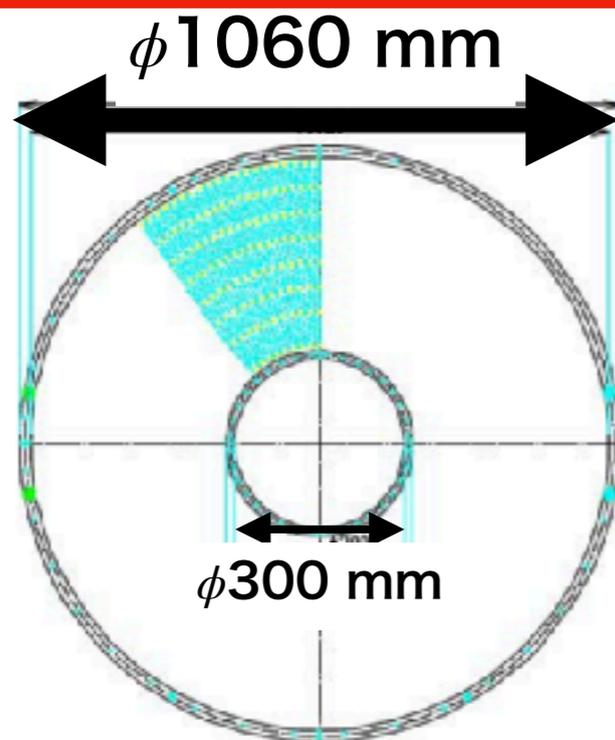
E15-CDC

立体角 2.6π



new-CDC

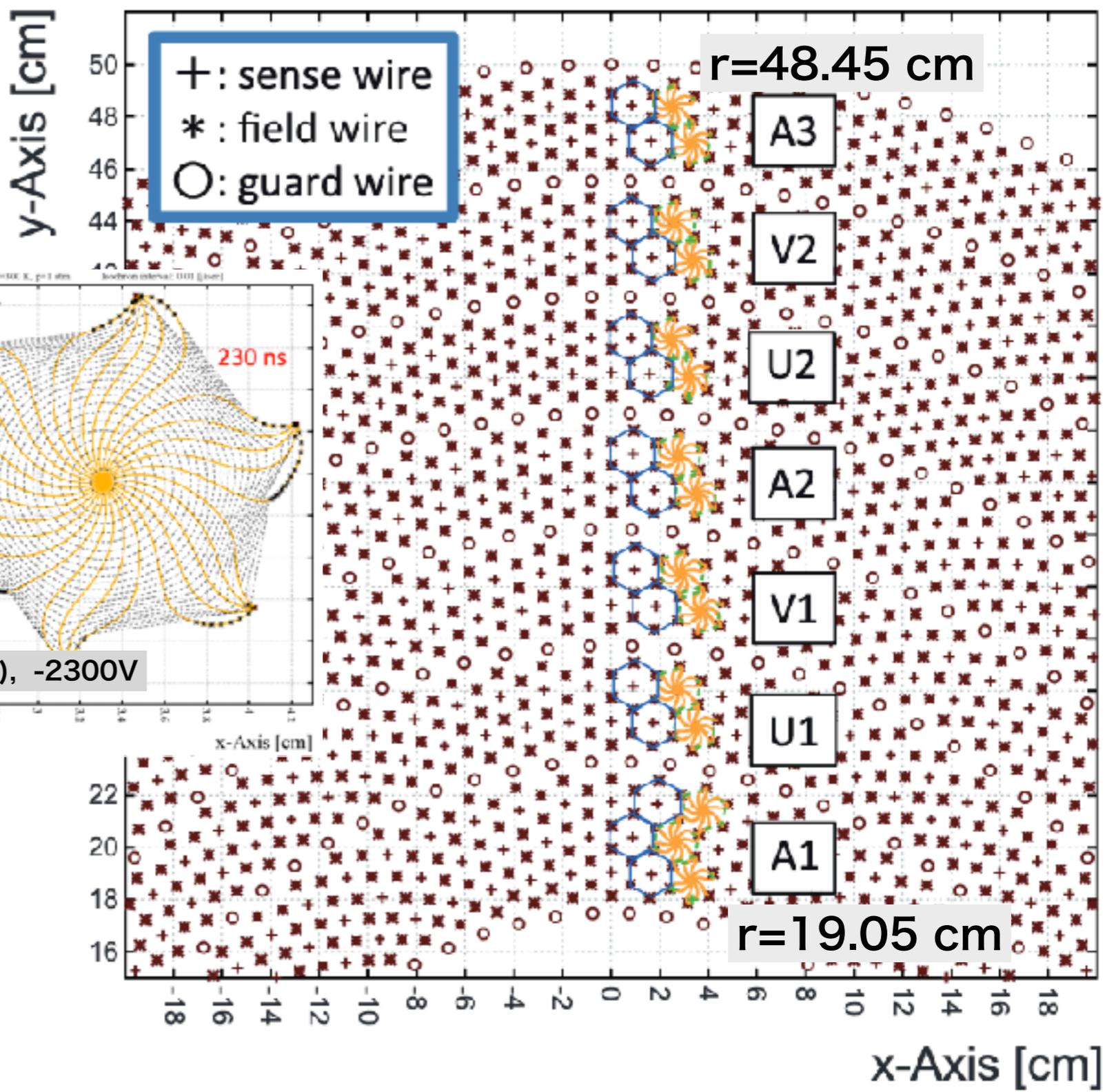
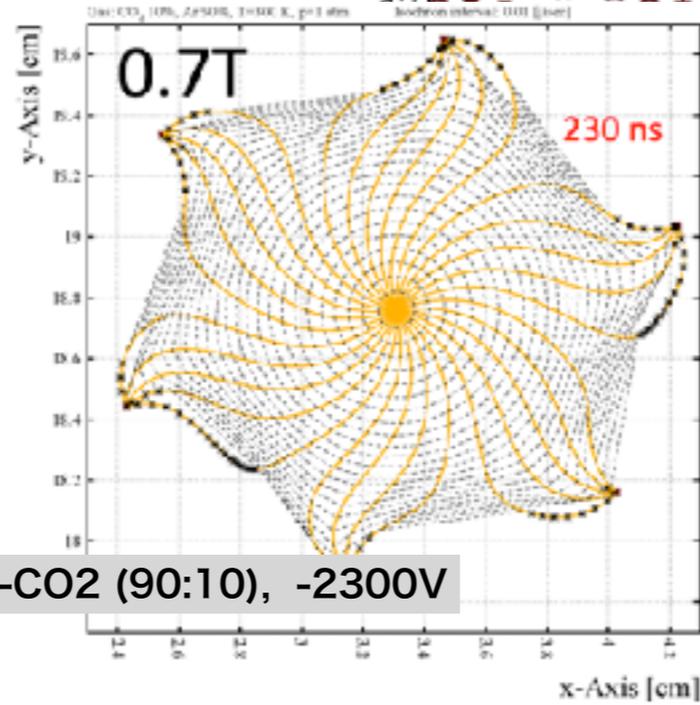
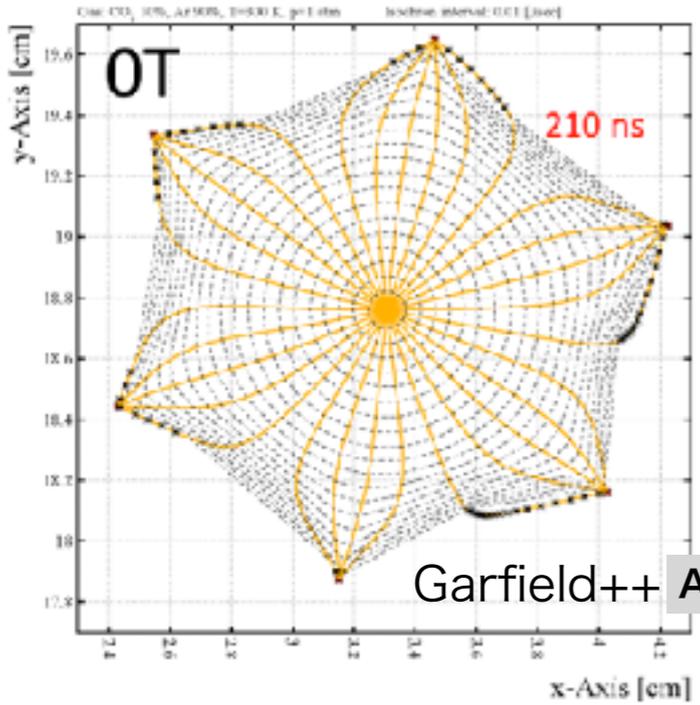
立体角 3.9π (93%/ 4π)



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

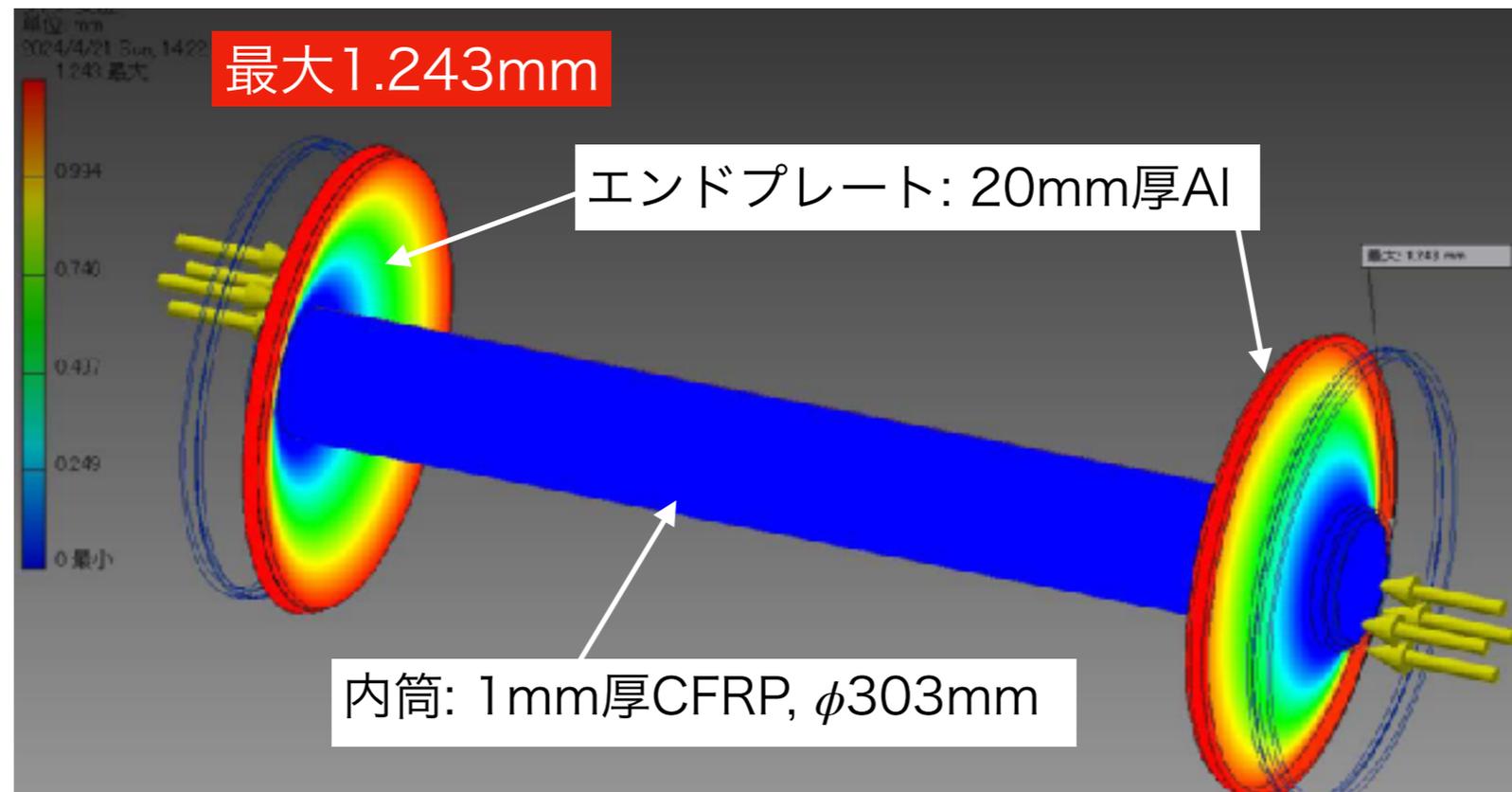
CDC: 構造設計

- 重力によるワイヤーのたるみ < 200 μm 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

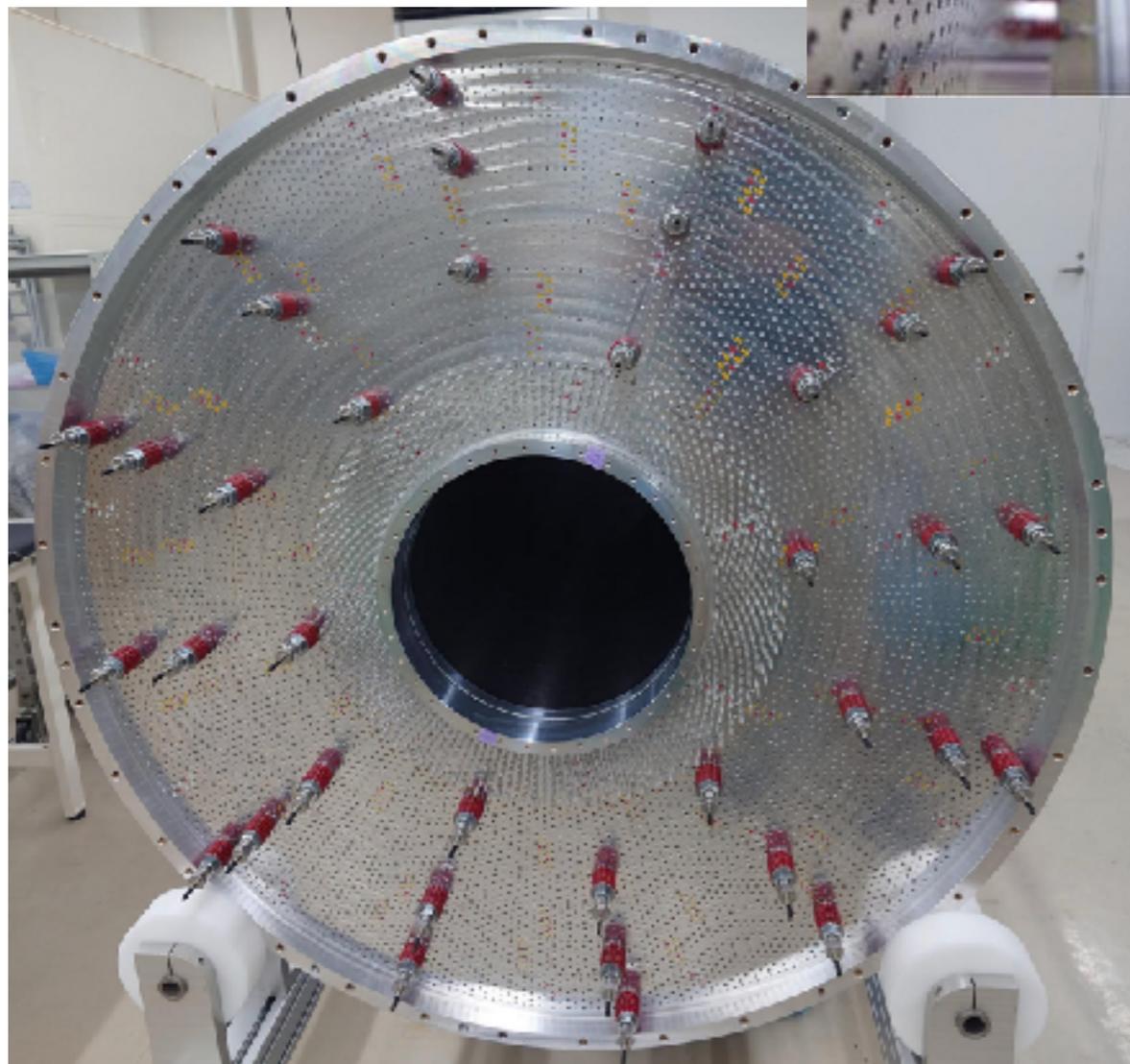
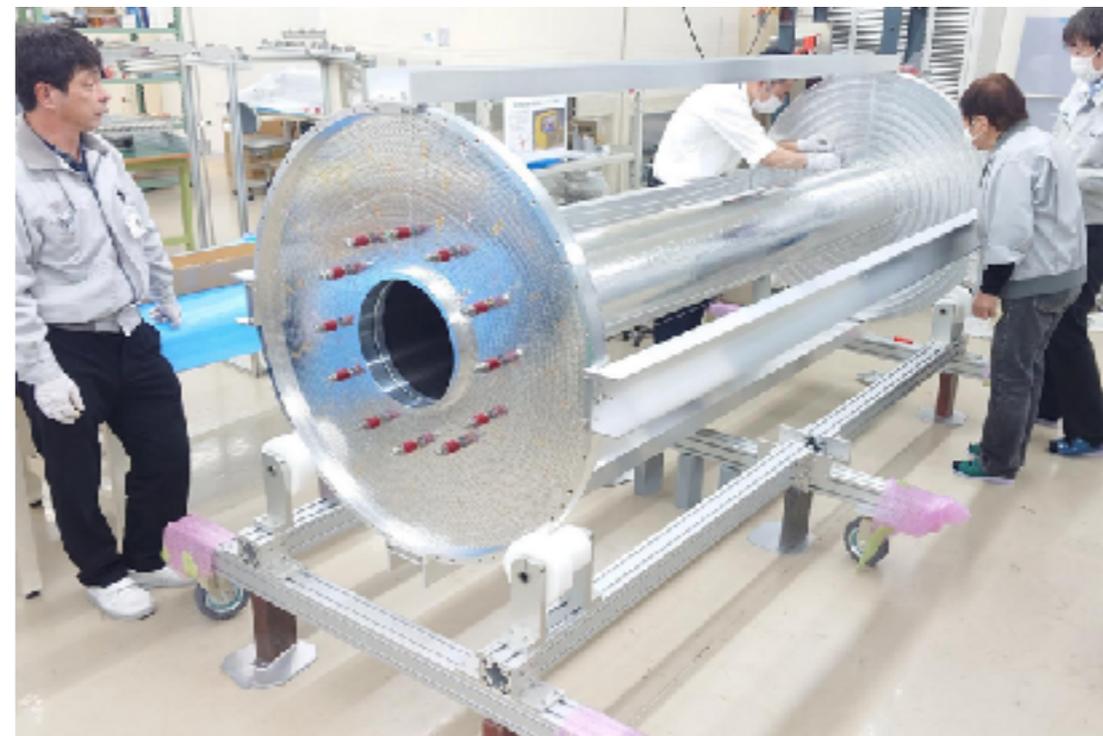
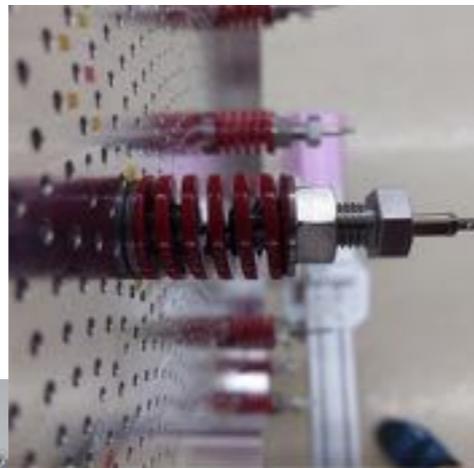


CDC: 製作工程1

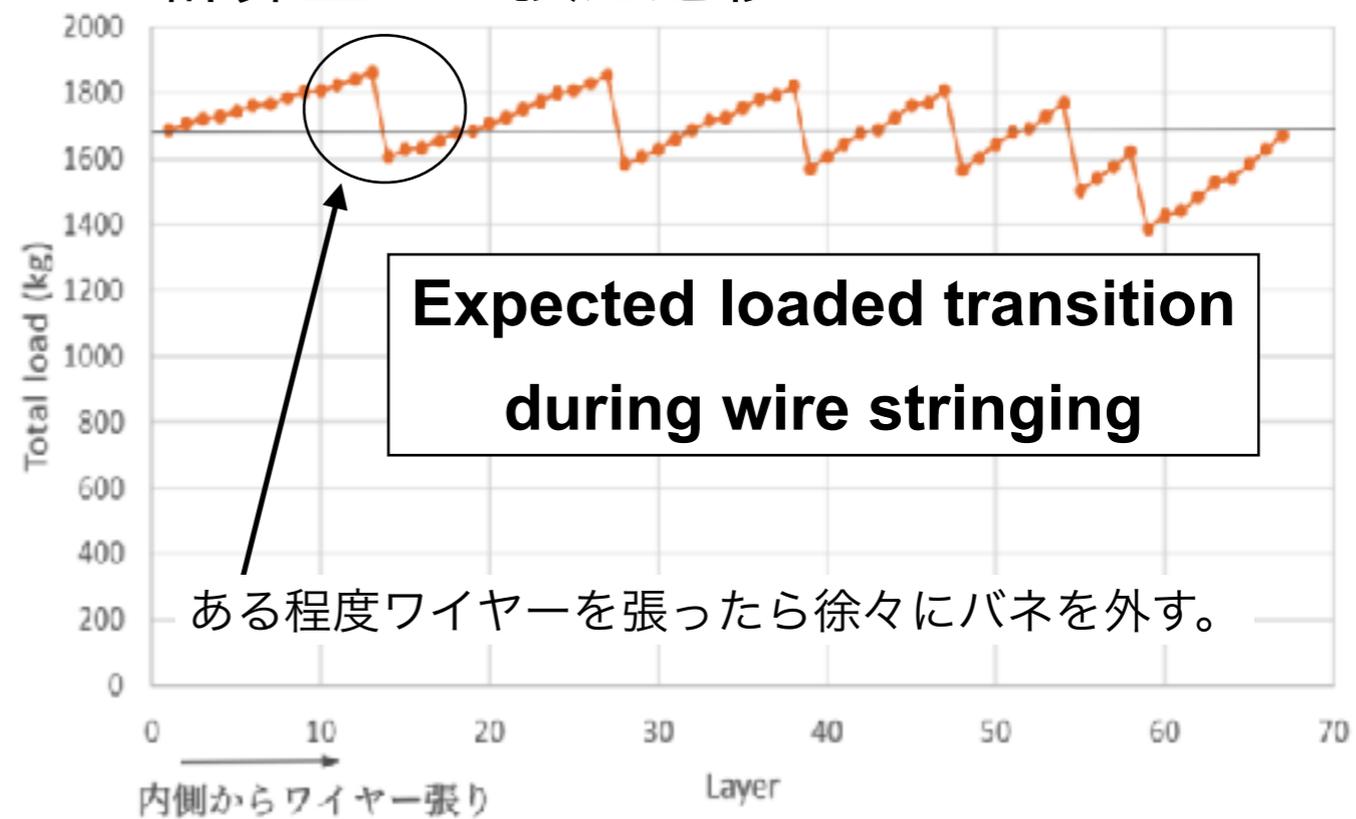
1. エンドプレートと内筒の接着 (Cチャンネルはその位置決めのため)

2. プリテンションバー装着

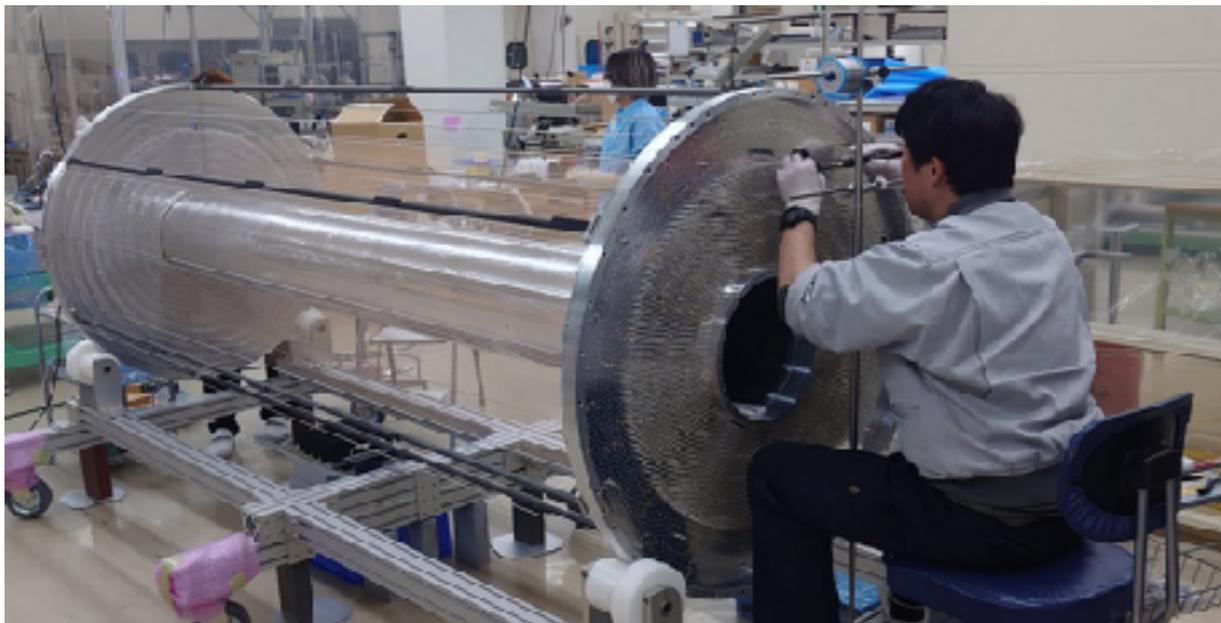
- ・ pre-tensionをかけることであらかじめこの歪みを再現。
- ・ この歪みを維持させたままワイヤーを張っていく。



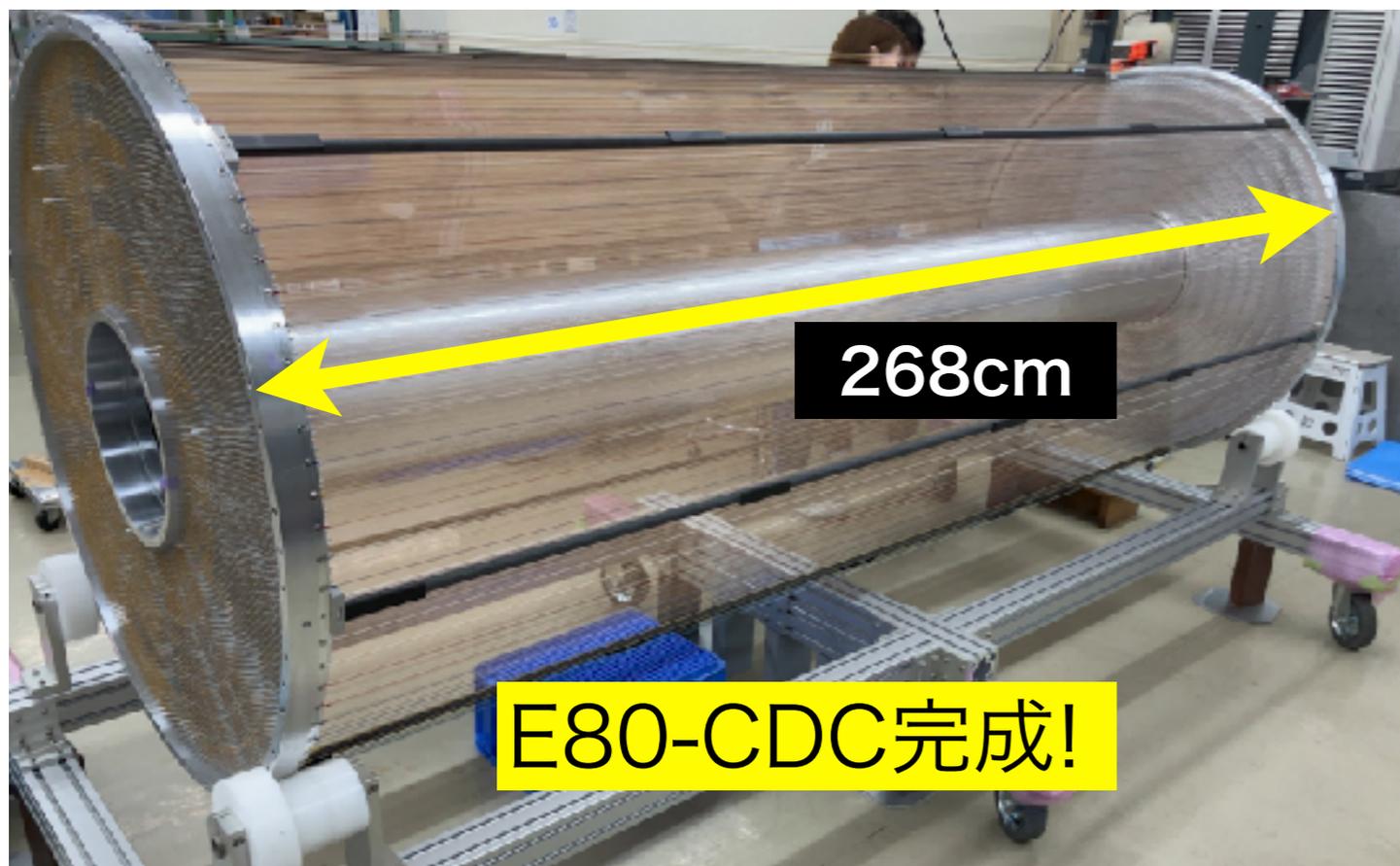
計算上の全張力遷移



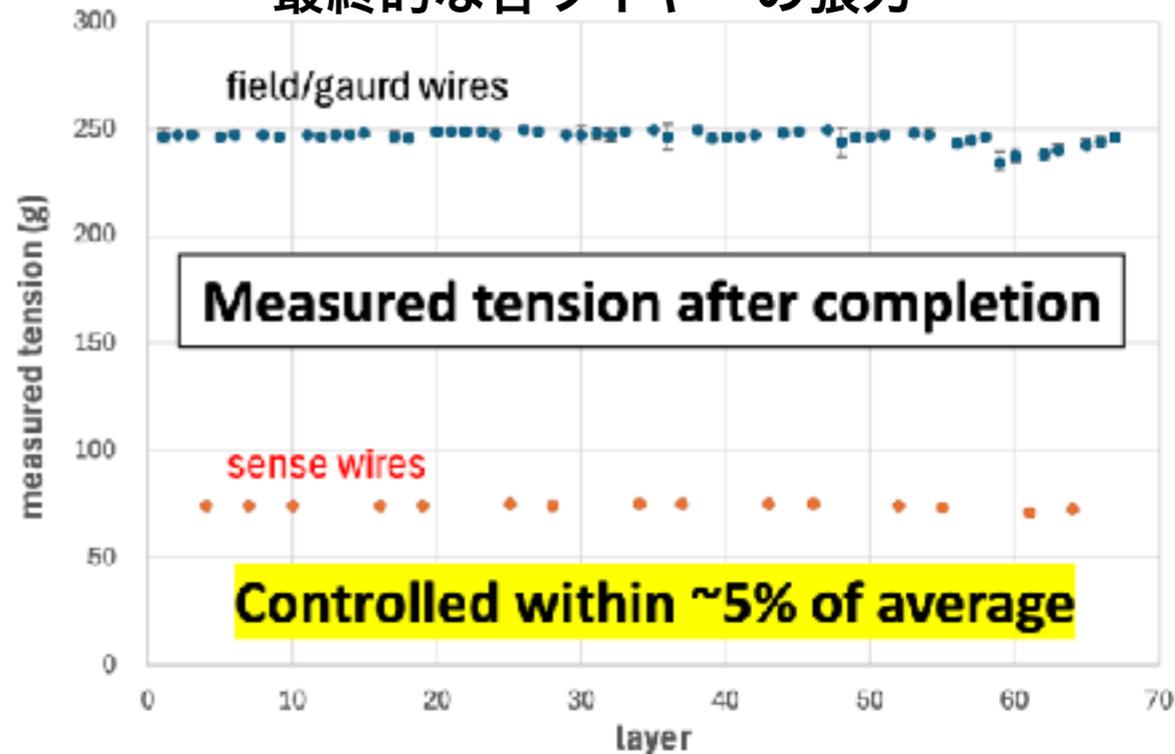
3. 内側からワイヤー張り



張られたワイヤー数の変遷

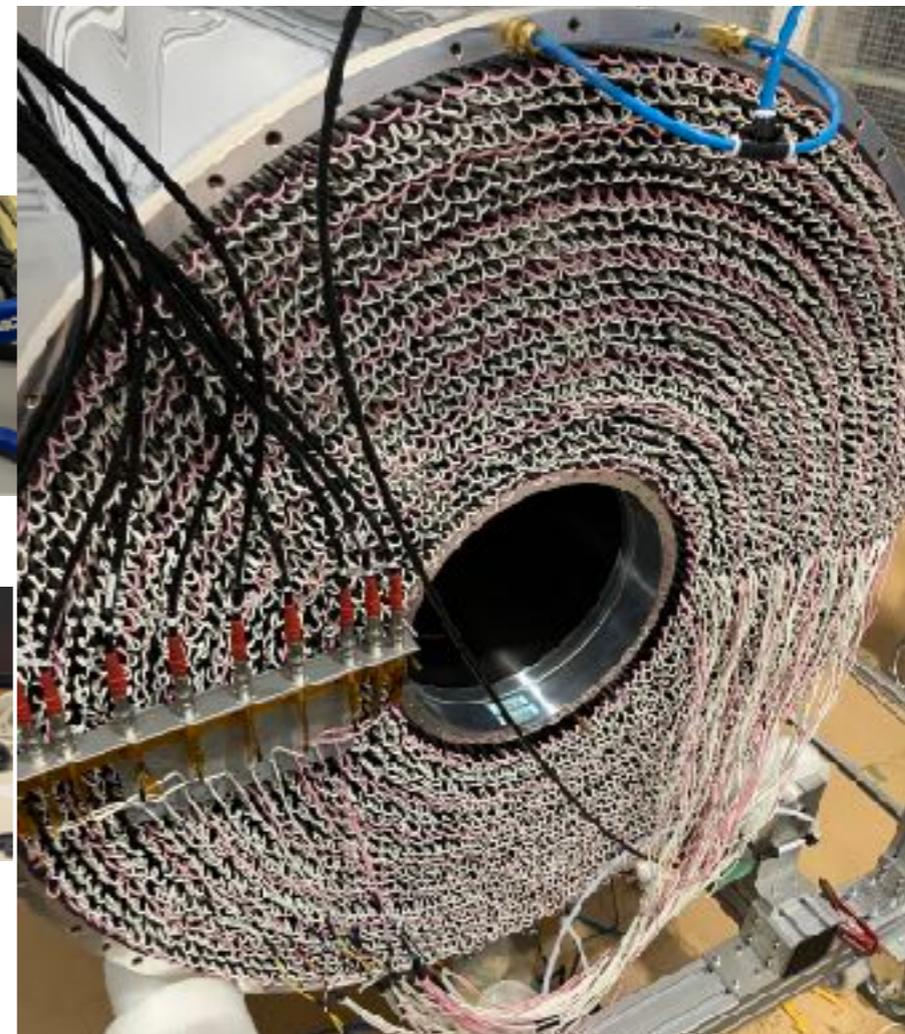


最終的な各ワイヤーの張力



CDC: 立ち上げ@J-PARC

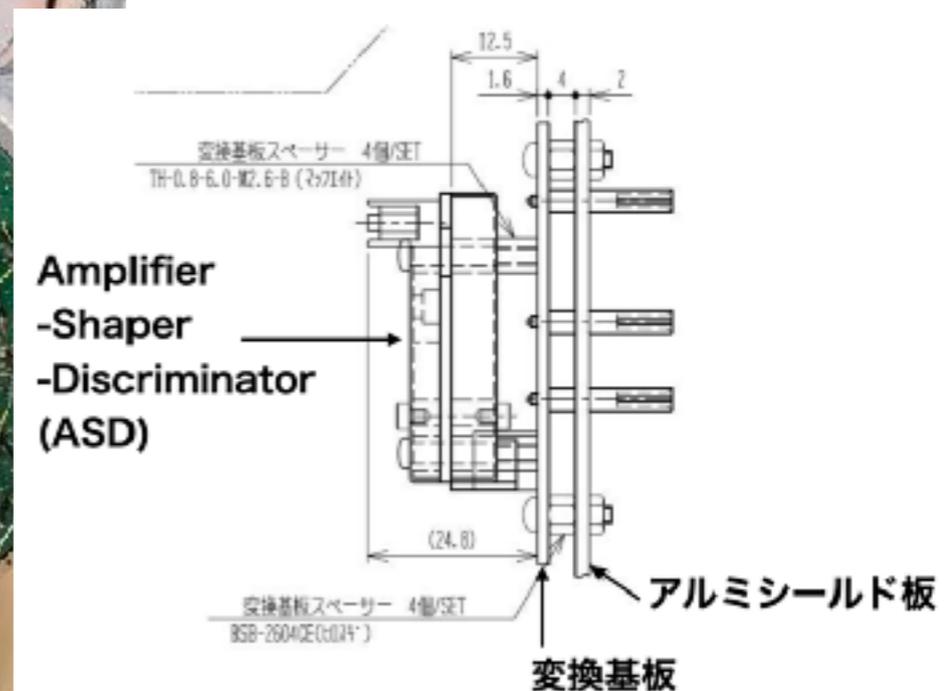
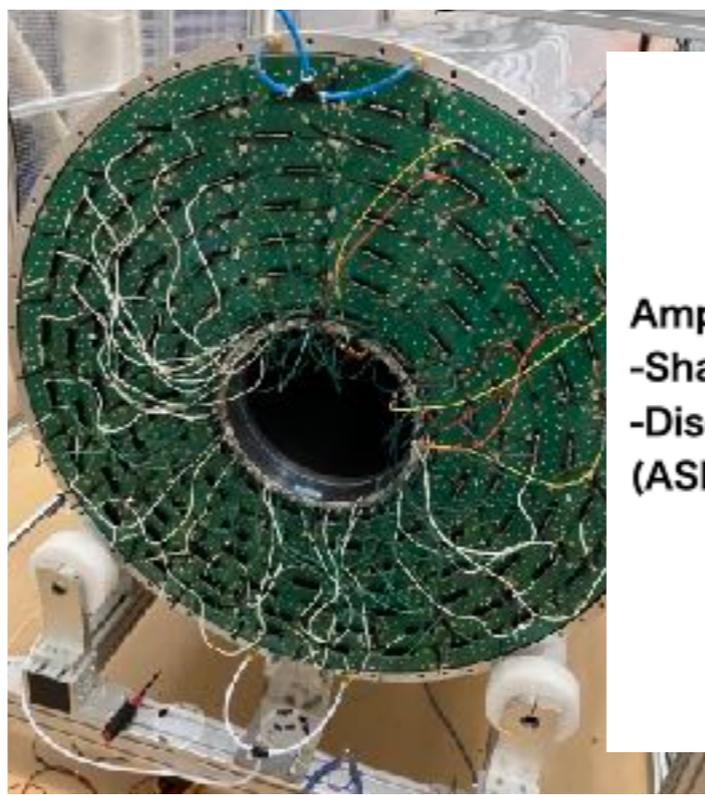
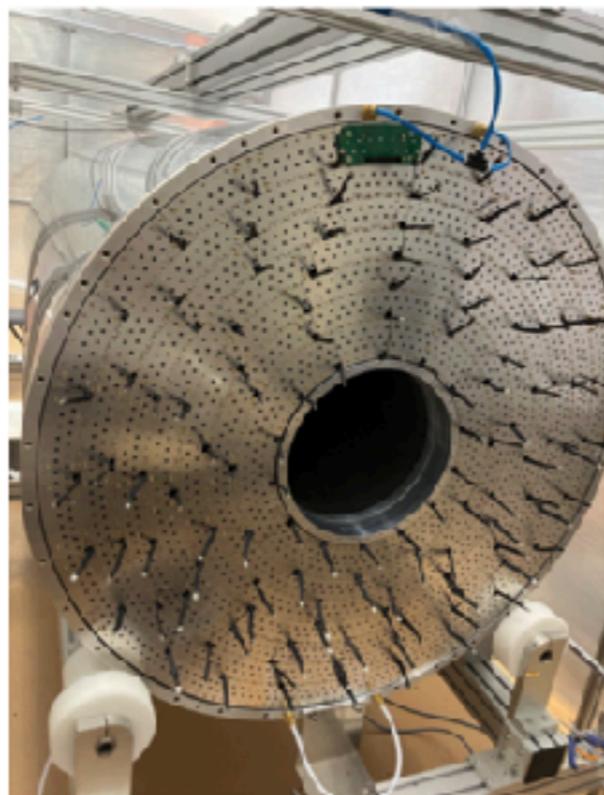
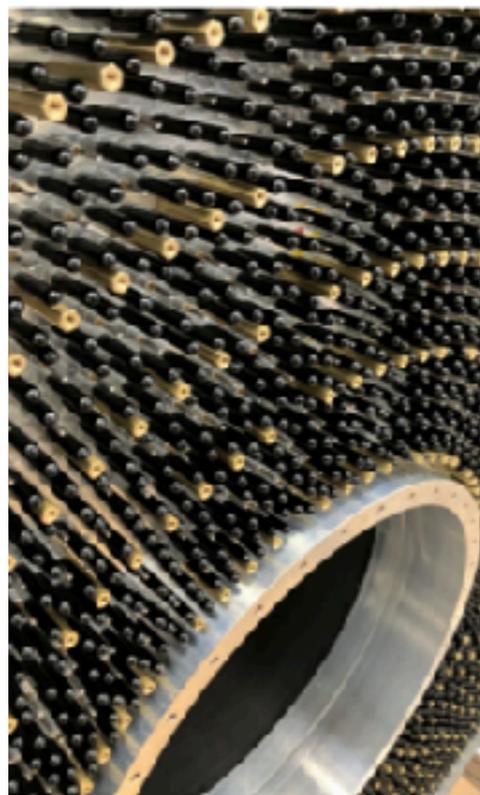
- 2024.6: 館山からJ-PARCへ
- 2024.7~2024.10:
HV分配用ケーブル作成・取り付け
Signal用変換基板等取り付け



フィードスルー
保護キャップ

アルミシールド板

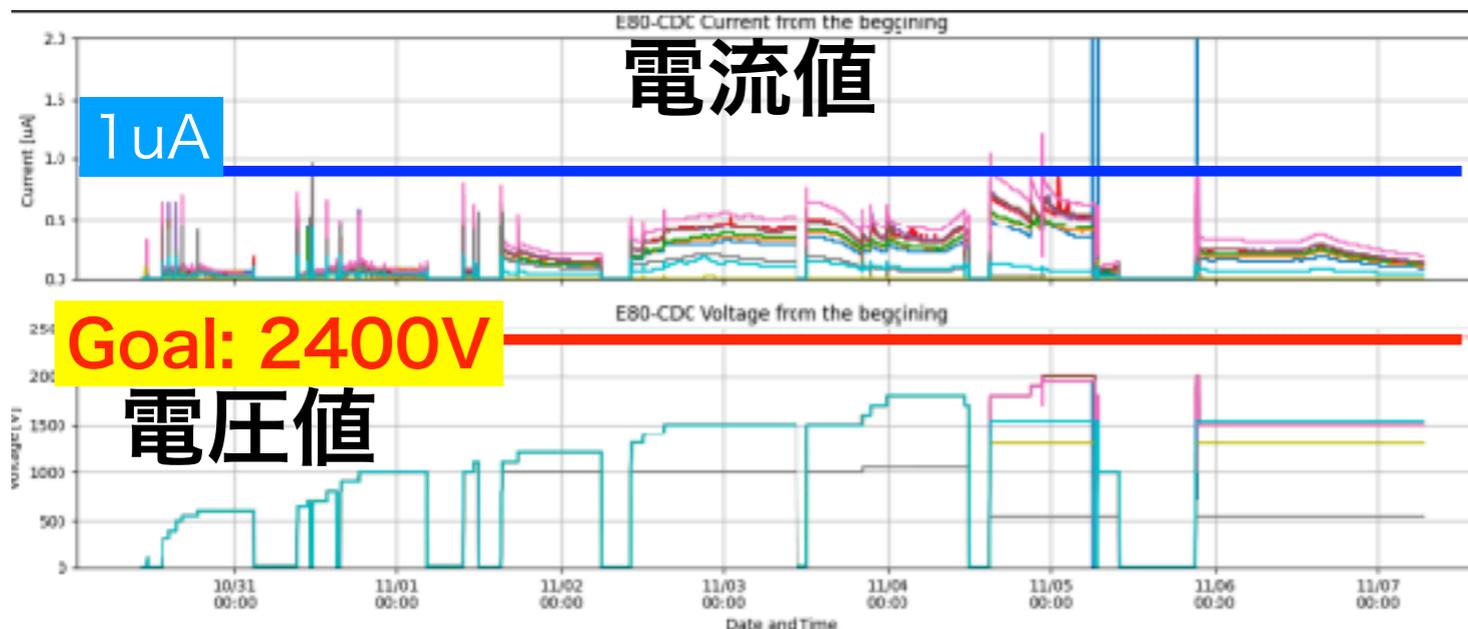
シグナル変換基板



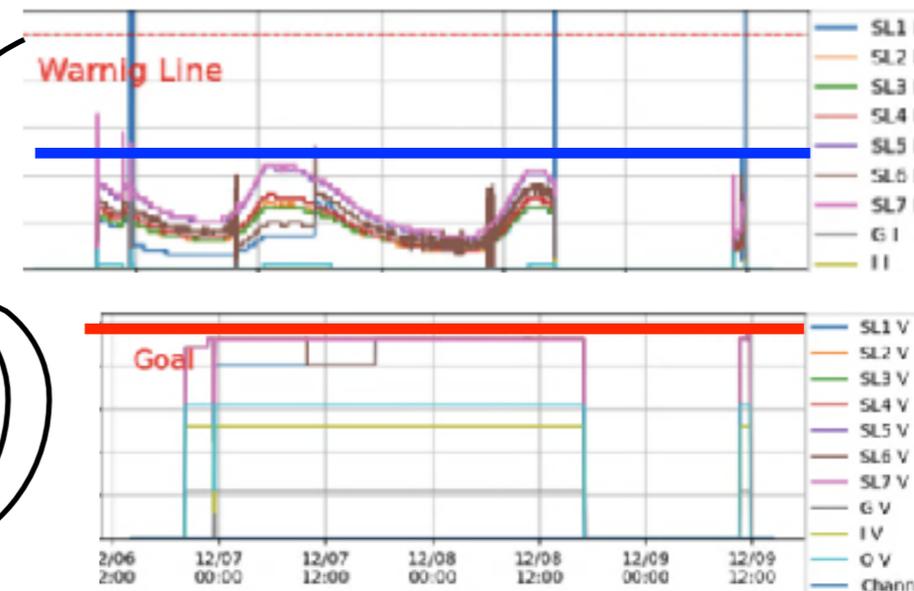
CDC: 立ち上げ@J-PARC

- 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月上旬: 目標HV達成

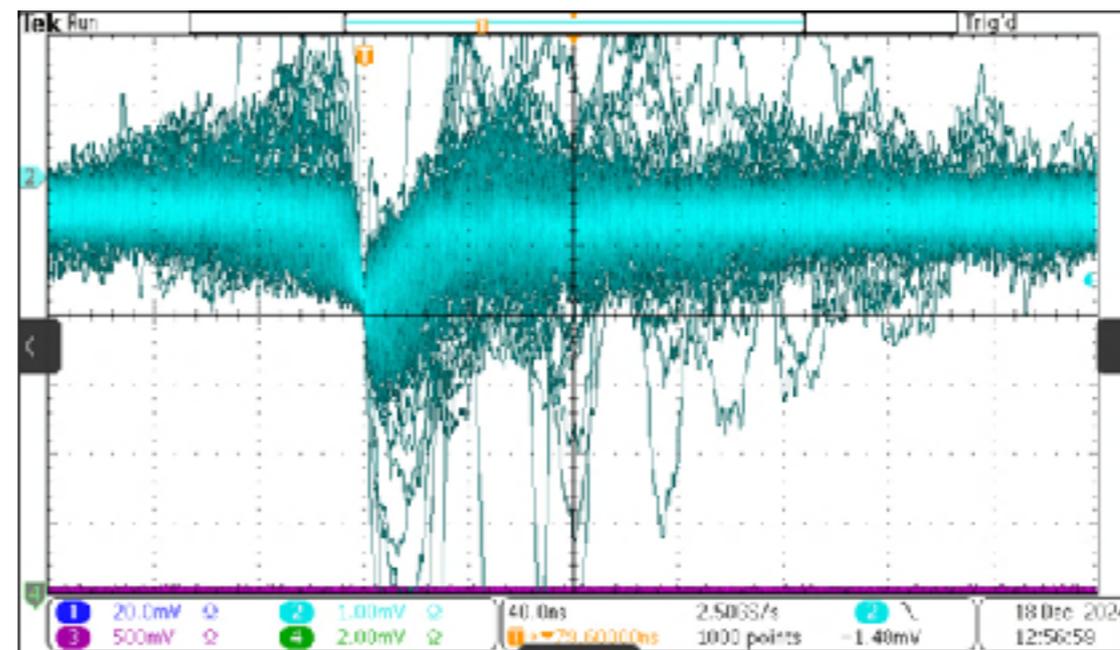


2024.10.31 ~ 2024.11.07



2024.12.06 ~ 2024.12.09

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



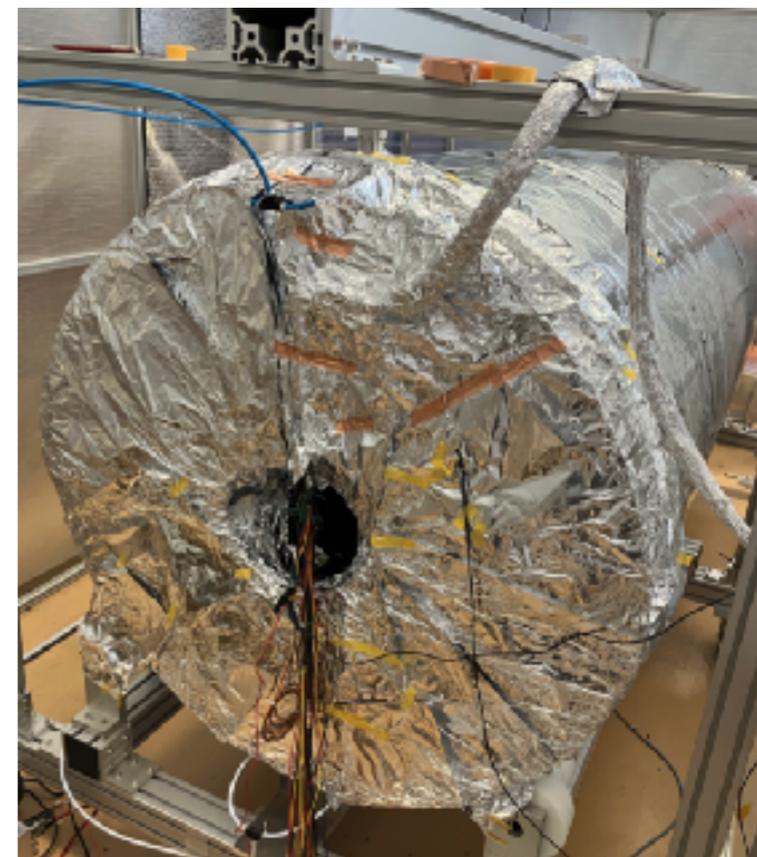
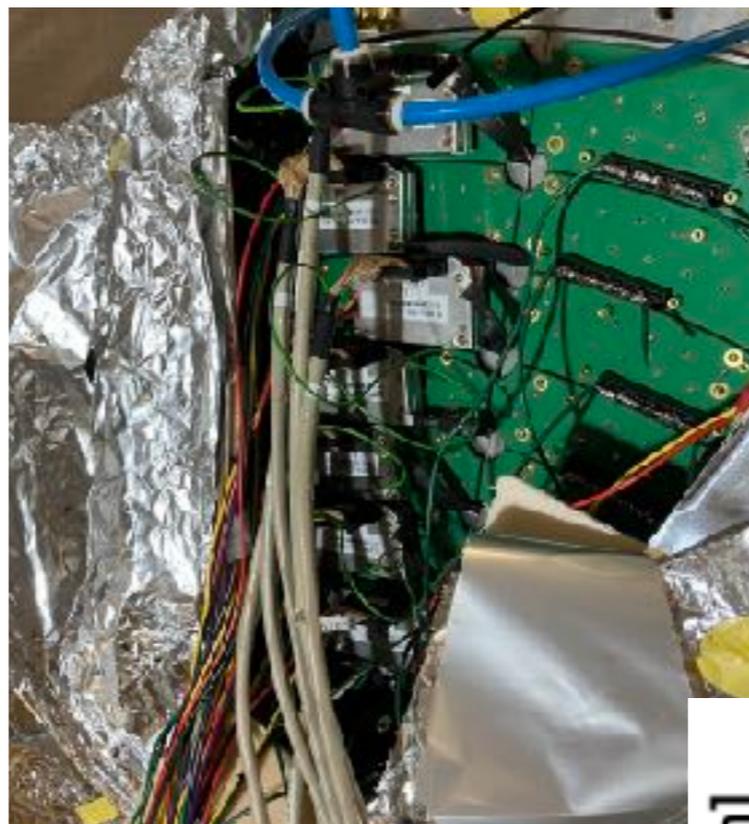
CDC: 現状

2024.12.25: 宇宙線データ取得 → トラック再構成

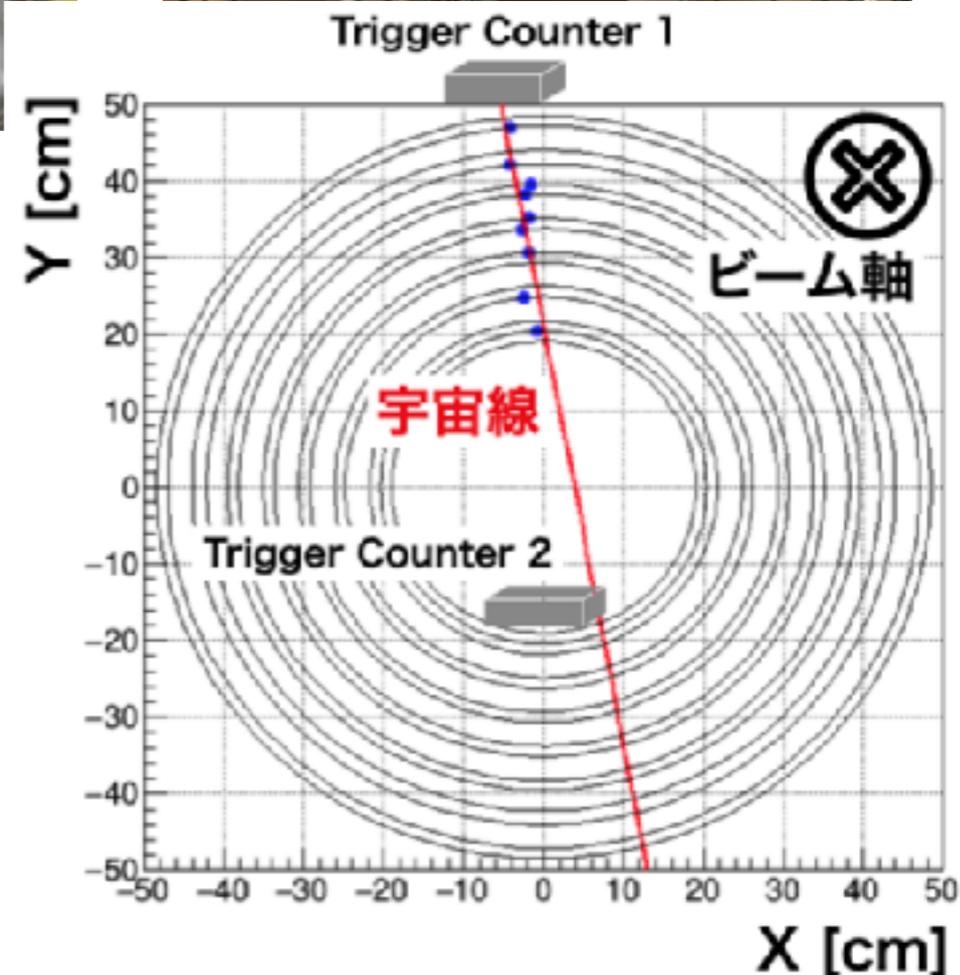
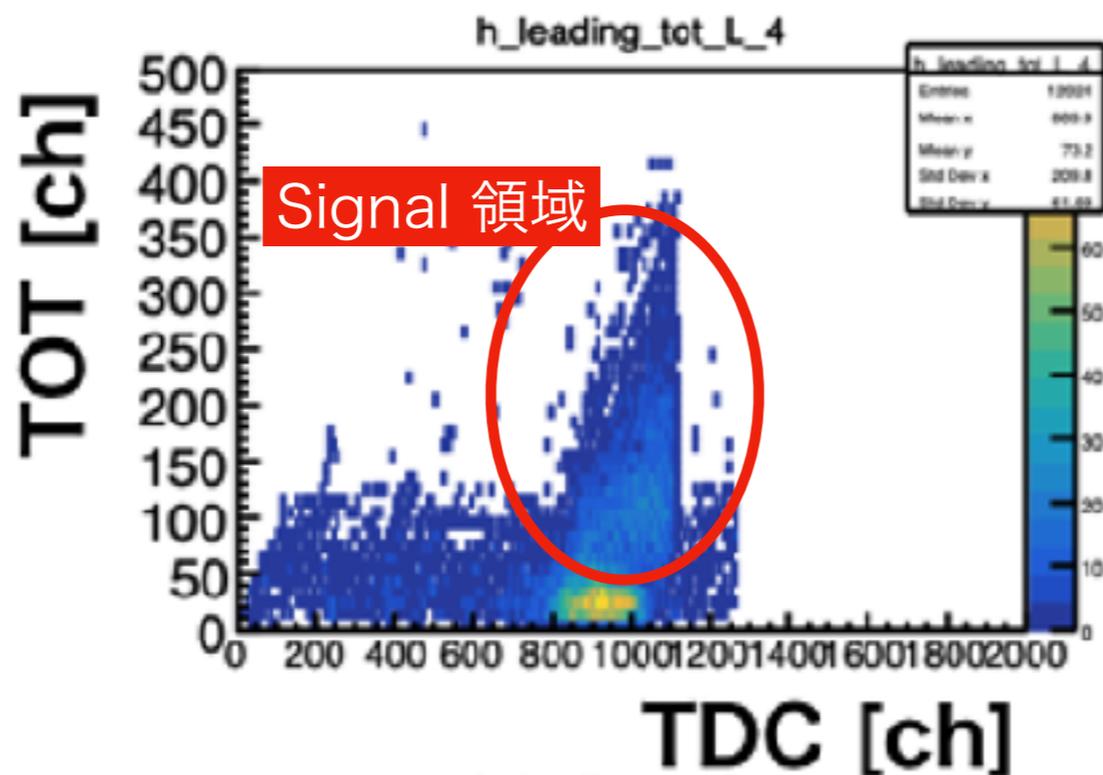
Pre-Amp基板

(Amplifier-Shaper-Discriminator,
SONY CXA3653Q)

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



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。



有難うございました

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

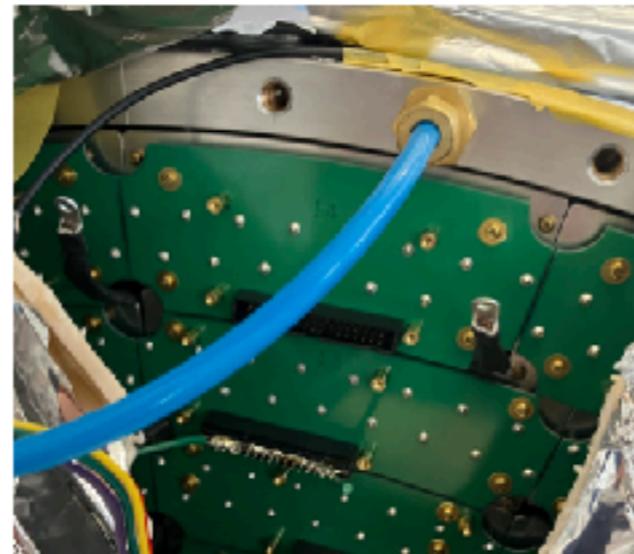
ASD (SONY CXA3653Q):

Amplifier-**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。

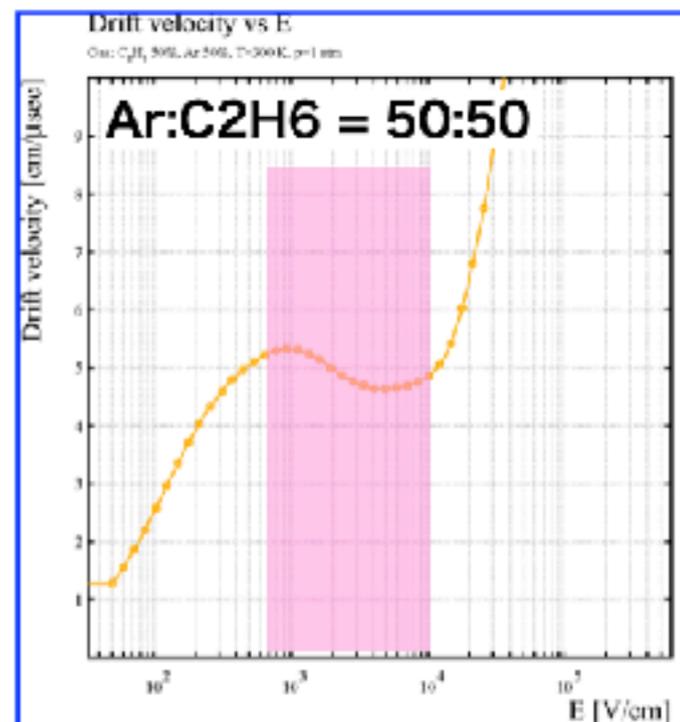
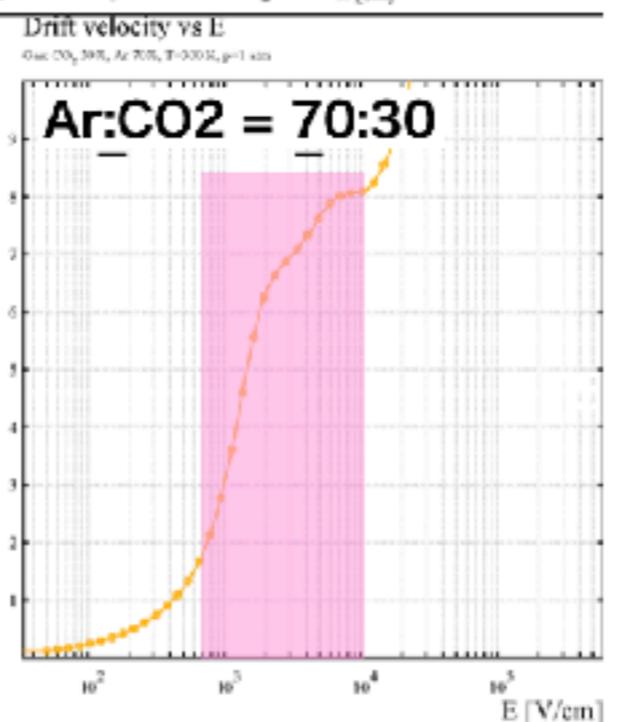
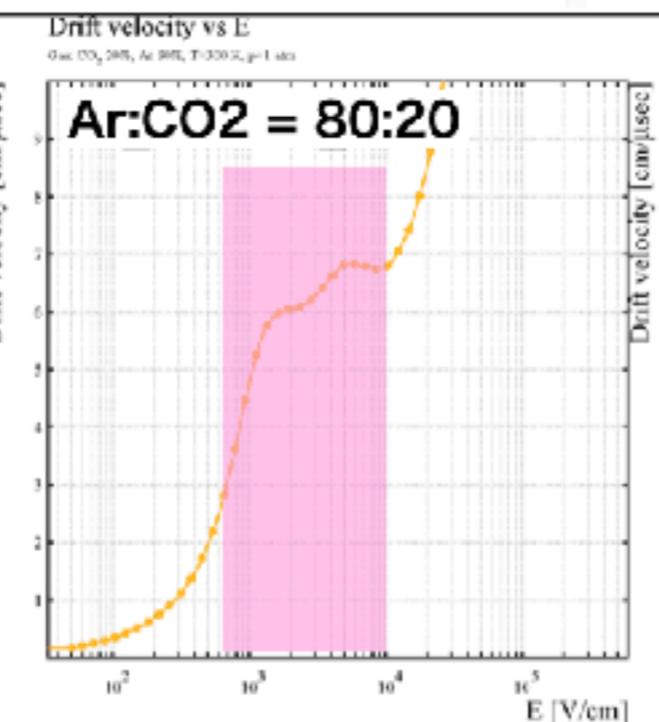
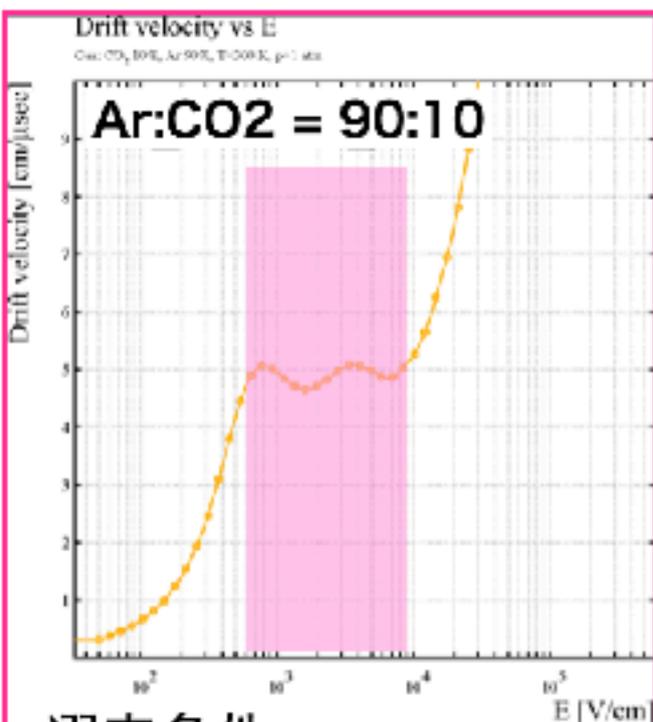
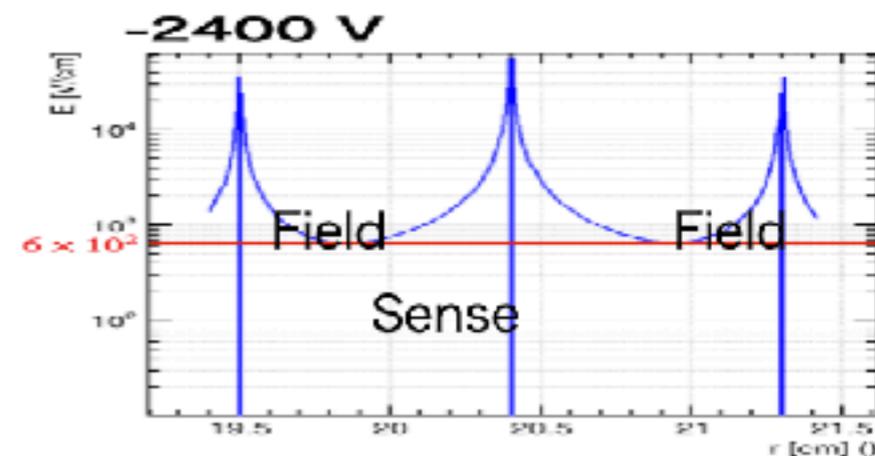
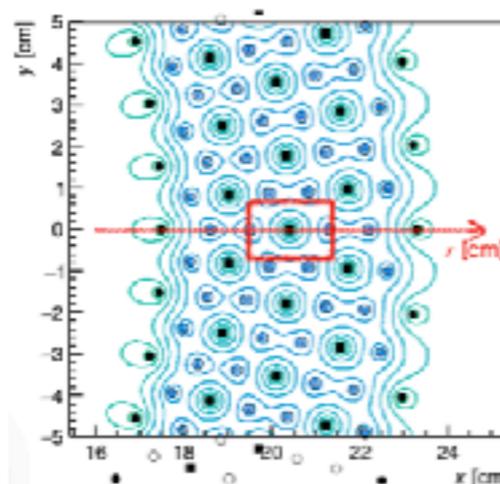
Back-Up

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 | 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。**

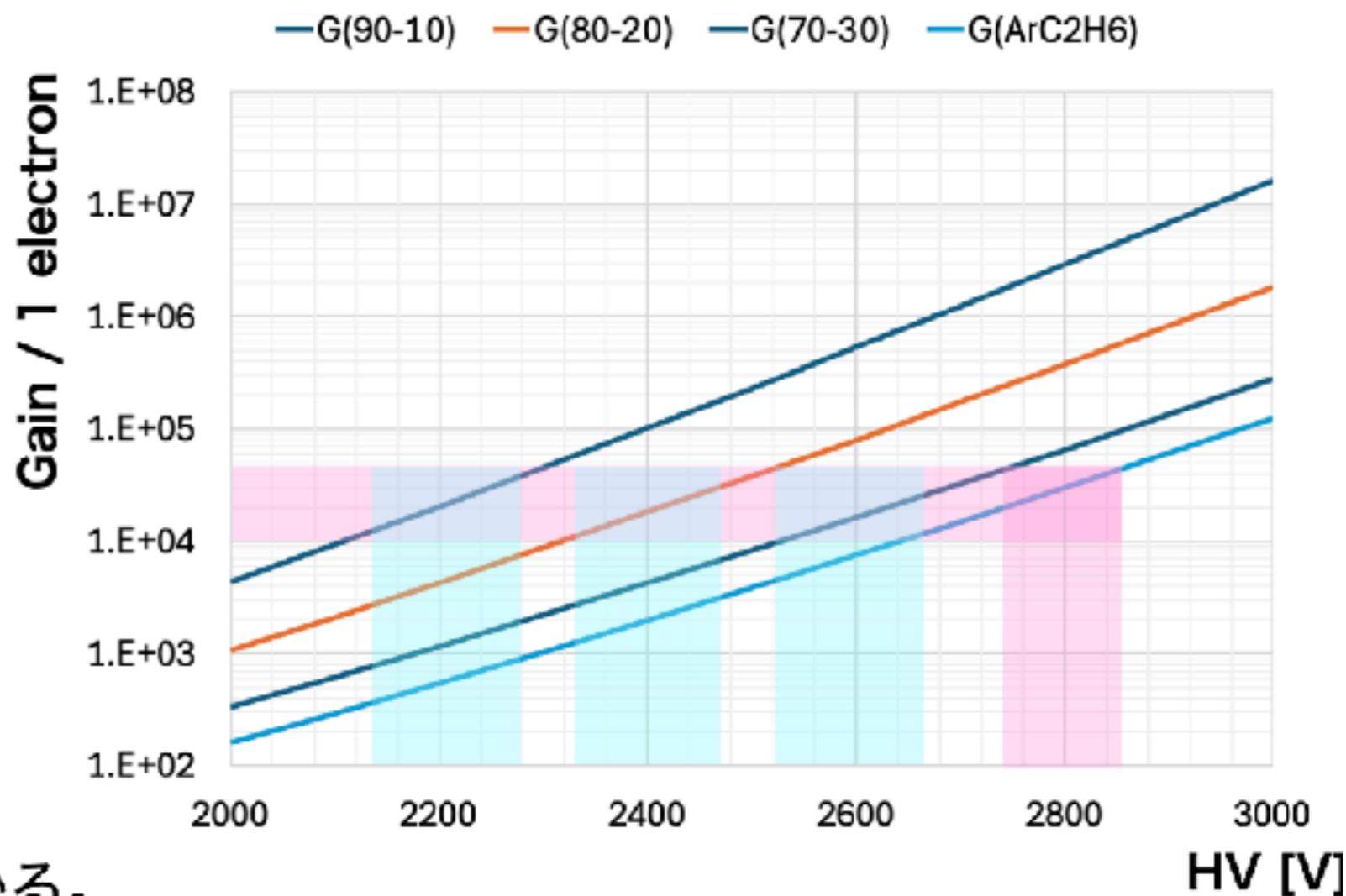
4. ガスシミュレーションによるガス混合比の選択

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。



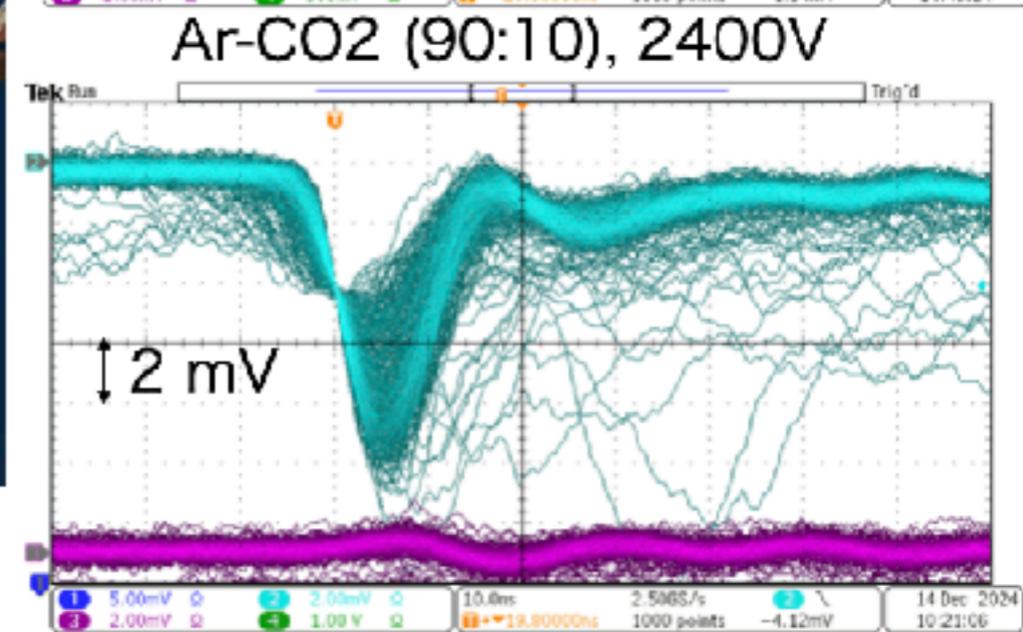
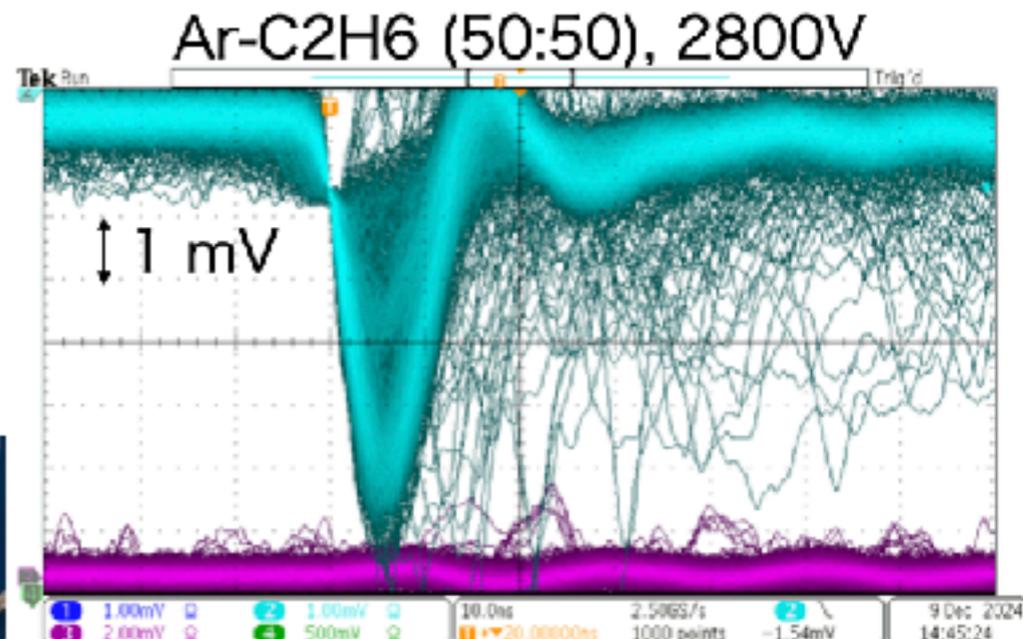
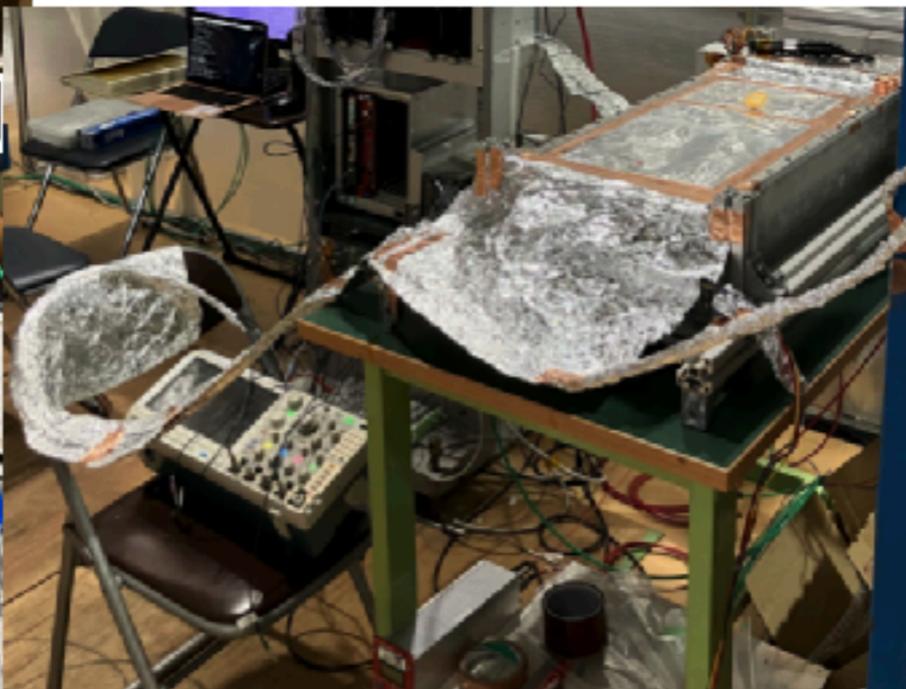
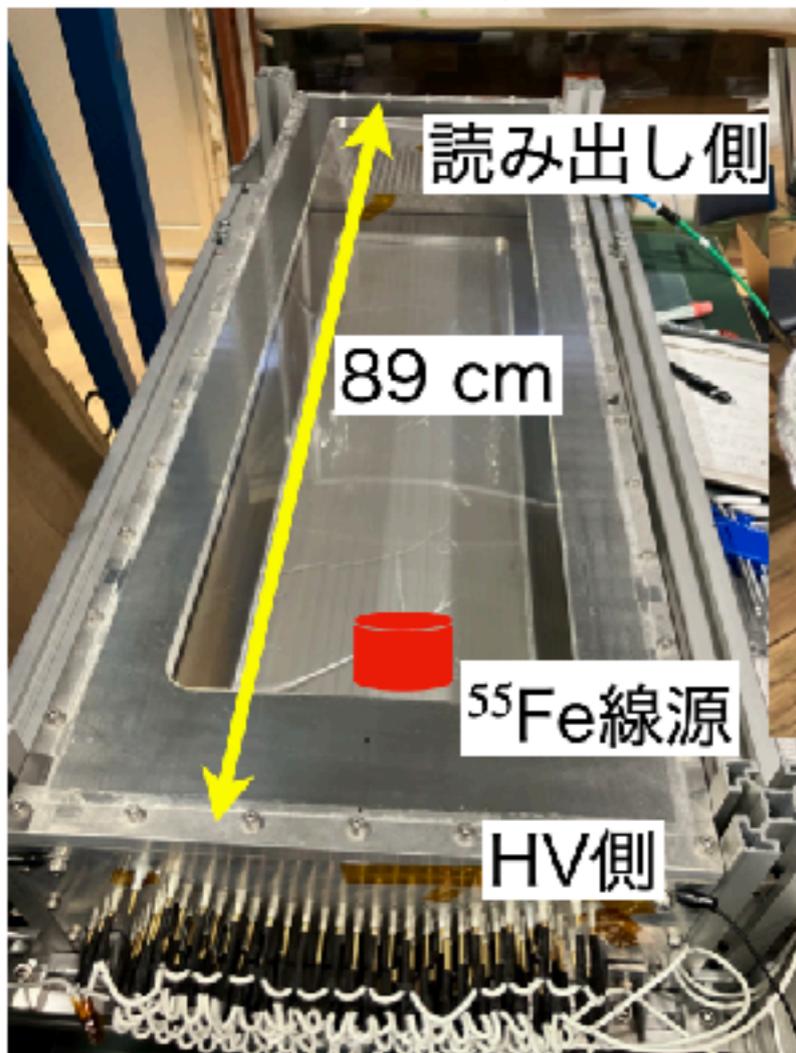
5. テストチェンバー実験によるガス混合比の決定

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。

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4

Back-Up

5. テストチャンパー実験によるガス混合比の決定

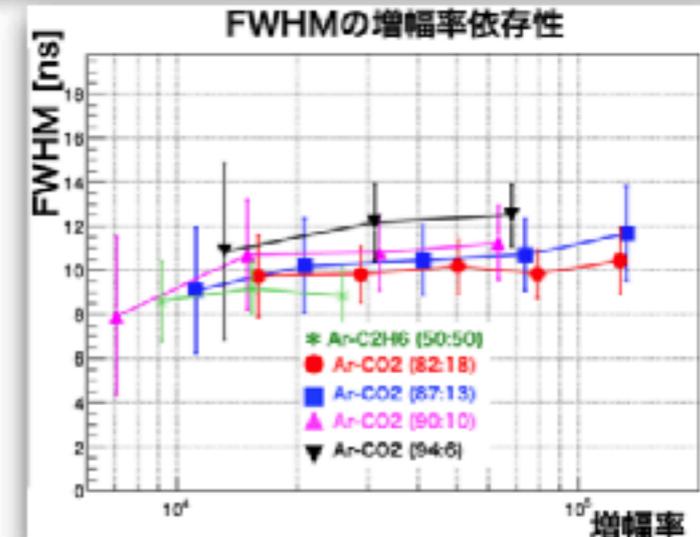
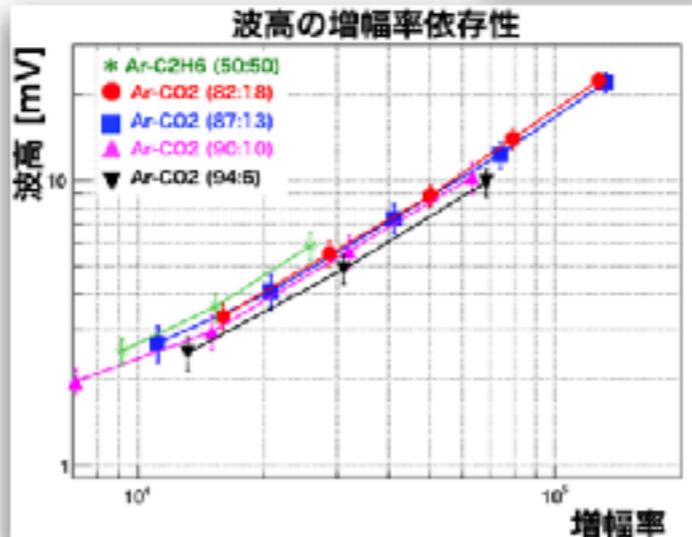
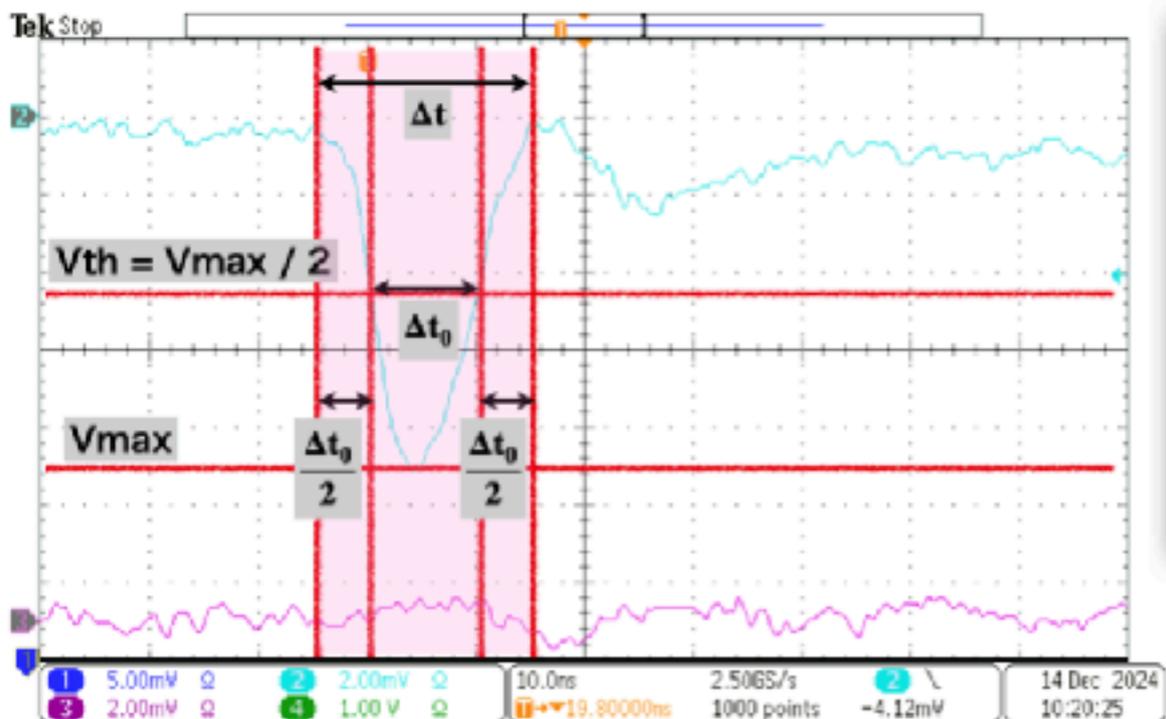
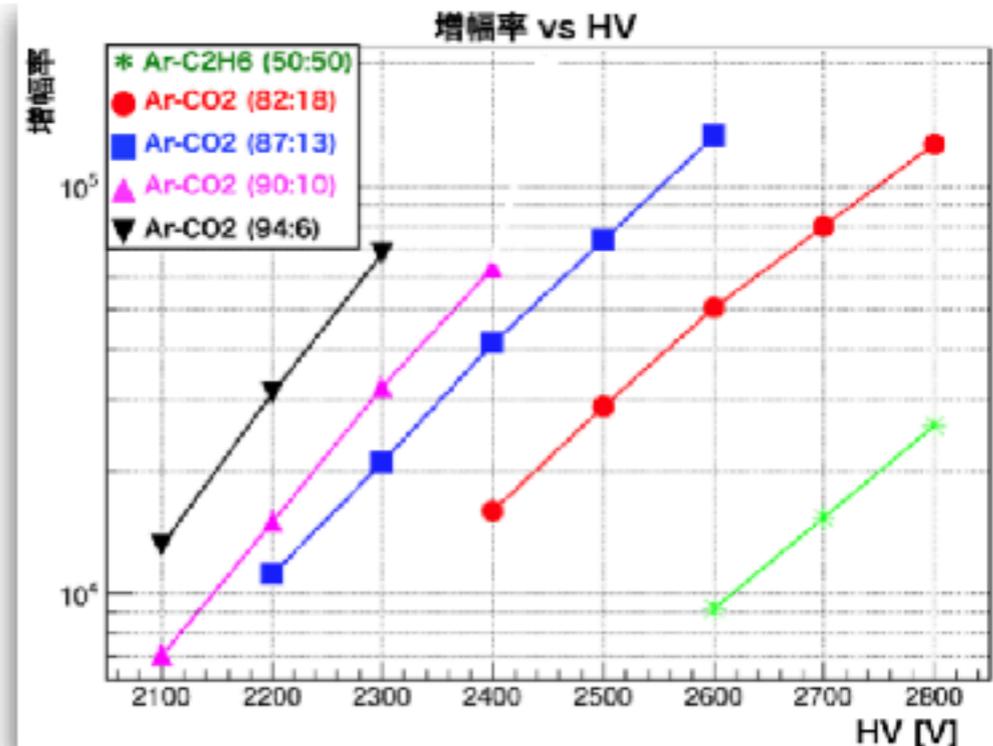
増幅率測定

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

$$G = \frac{Q}{e \cdot n_T}$$

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。

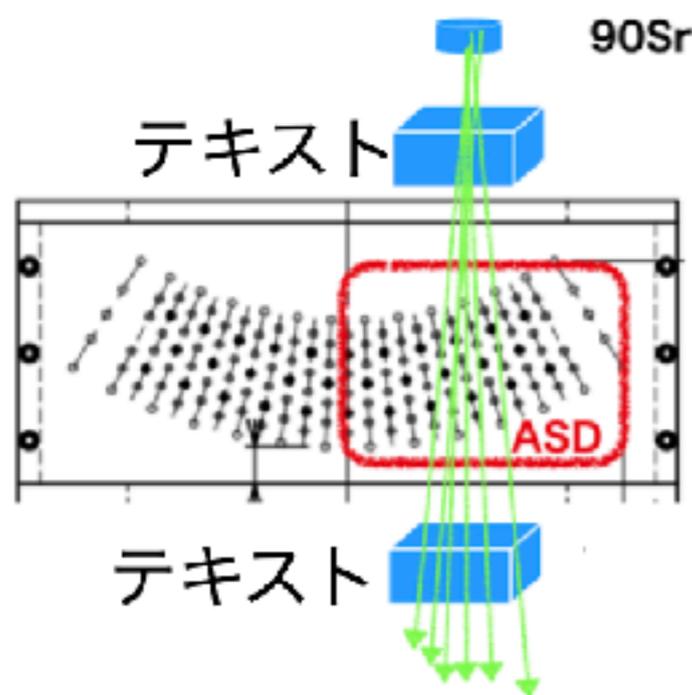


統計後さの範囲内で明確な違いはない

5. テストチェ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

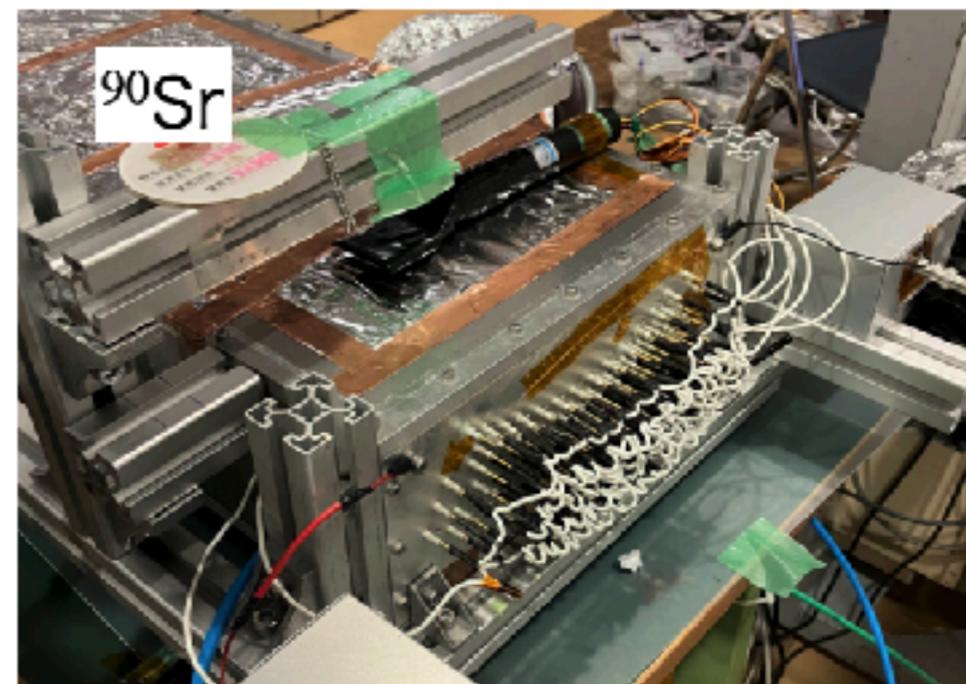
Ar-CO₂の場合に十分な検出効率が得られるかを調査した。



むしろこの部分のセル構造



実機



検出効率の定義

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

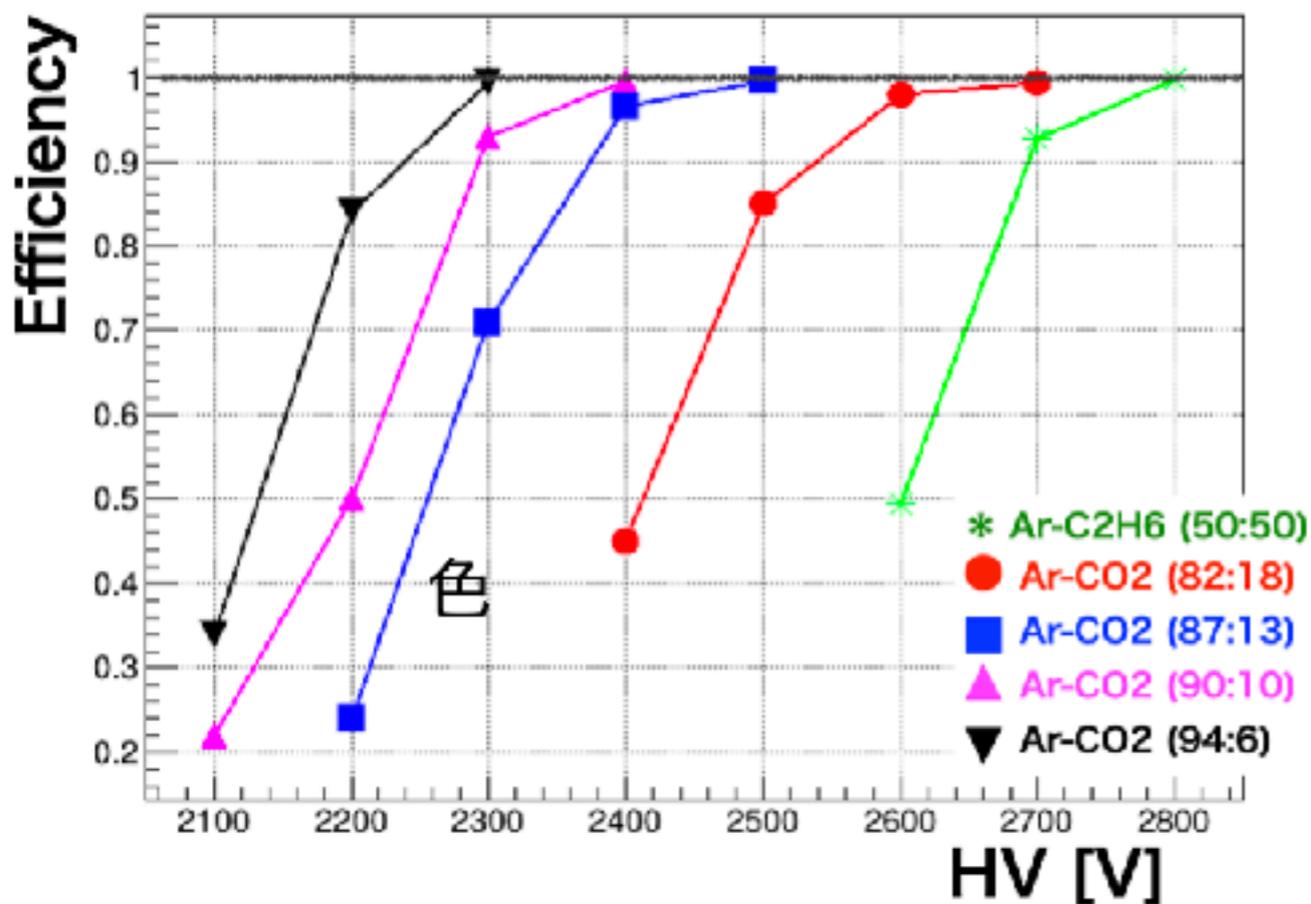
Back-Up

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

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

Efficiency vs HV



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。

6. IB CDCによる性能評価

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4 20

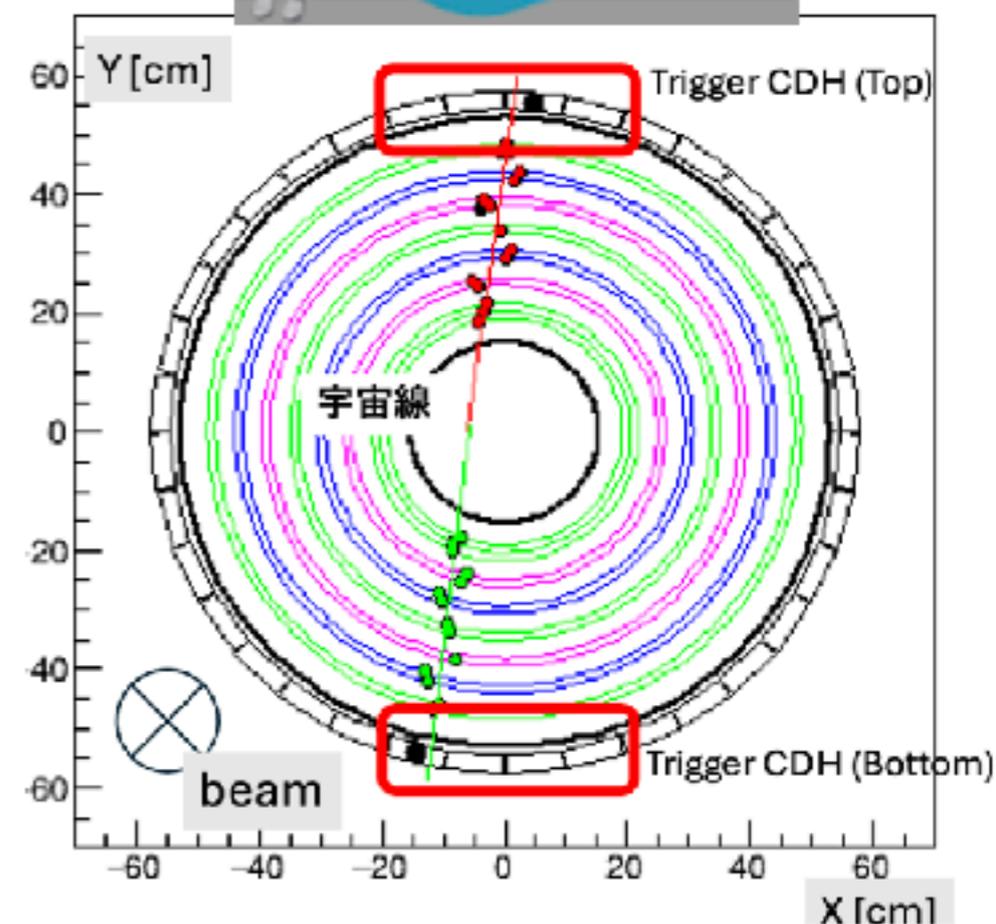
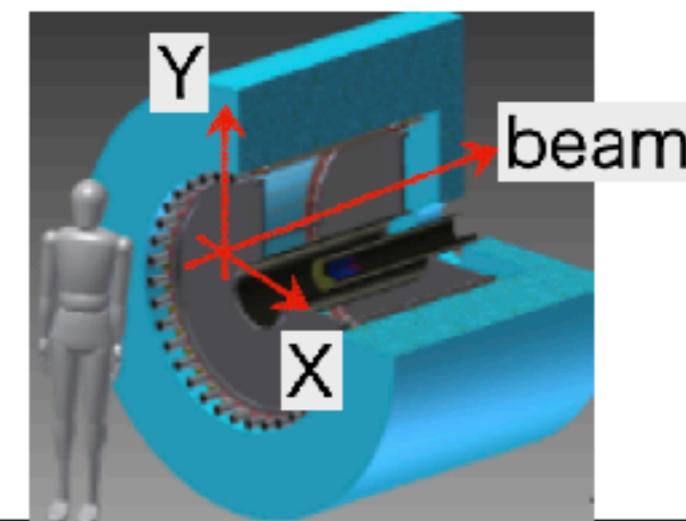
E15-CDCによる宇宙線テスト

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~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

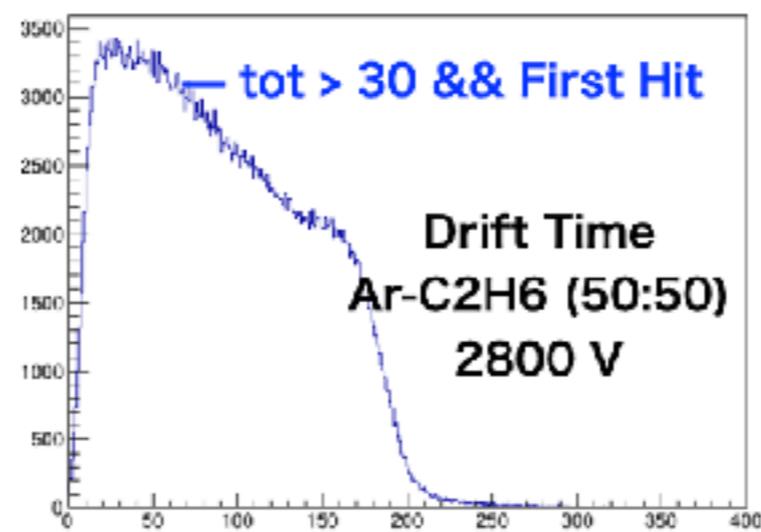
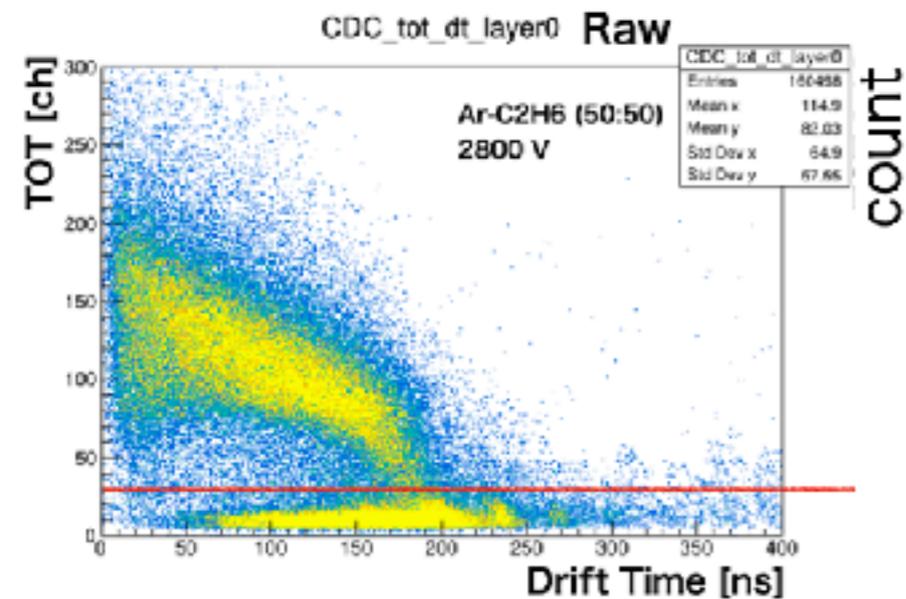


Back-Up

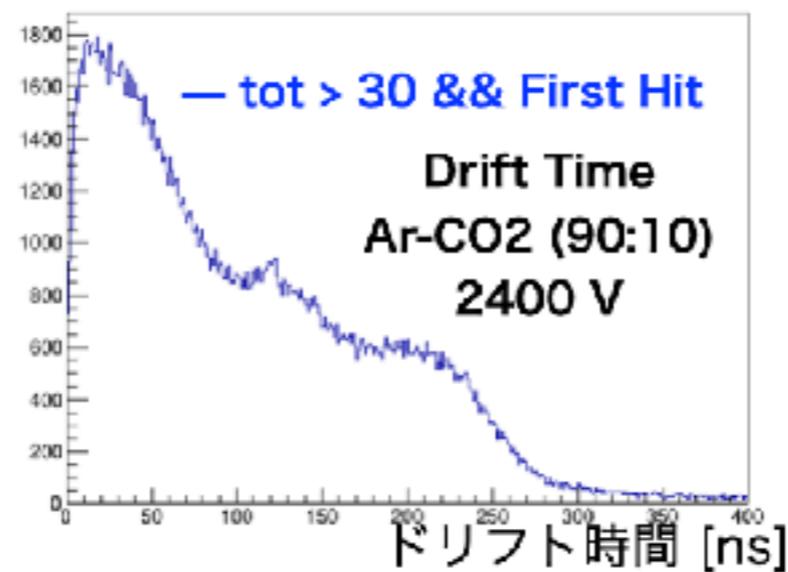
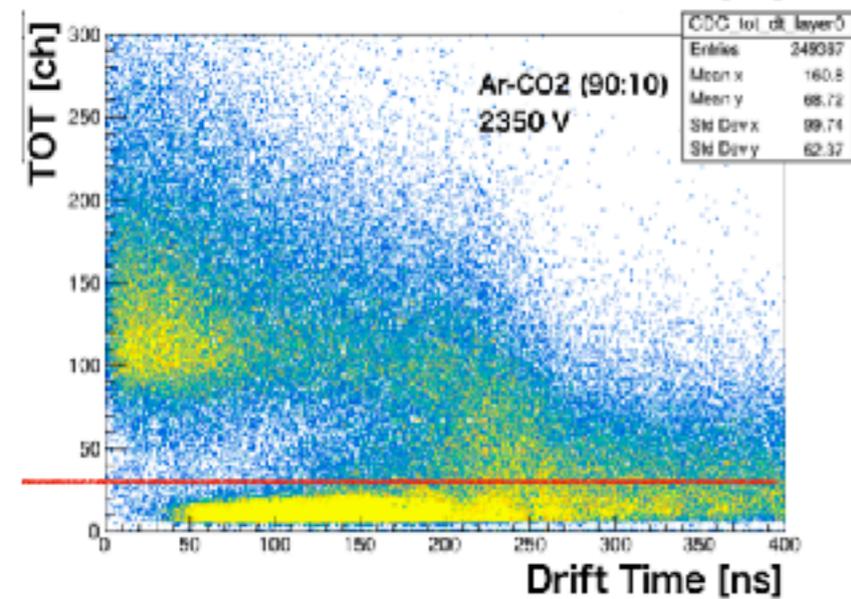
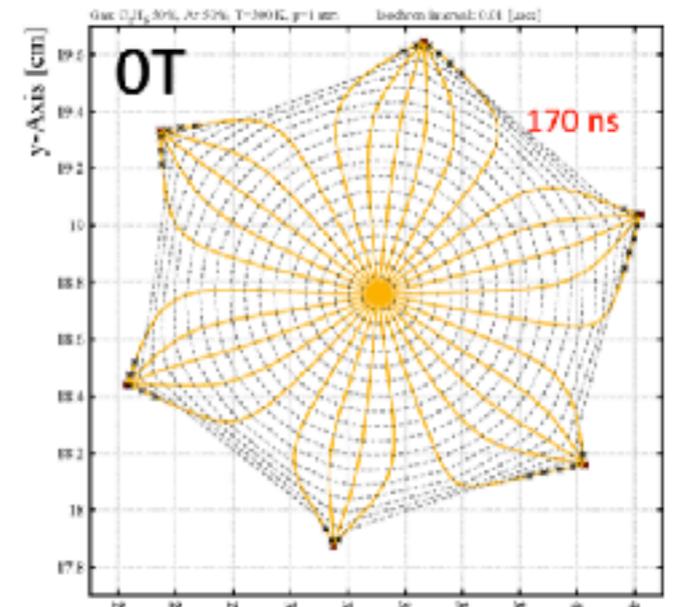
6. 旧CDCによる性能評価

生データとドリフト時間分布

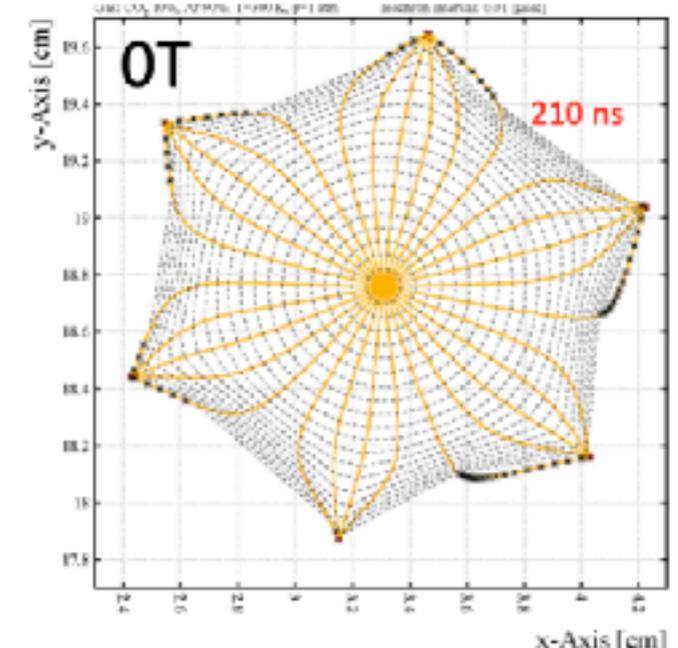
2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4



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。

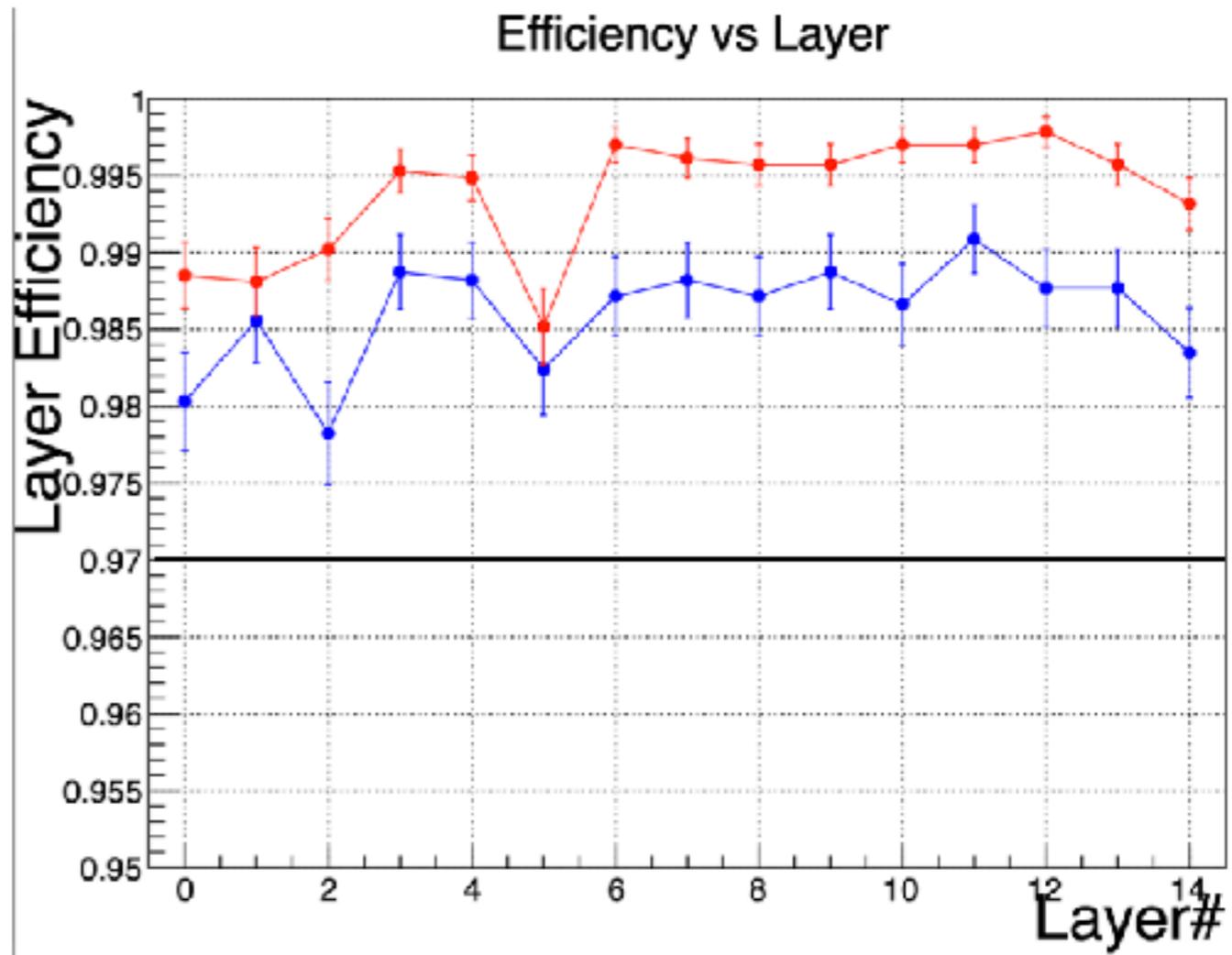
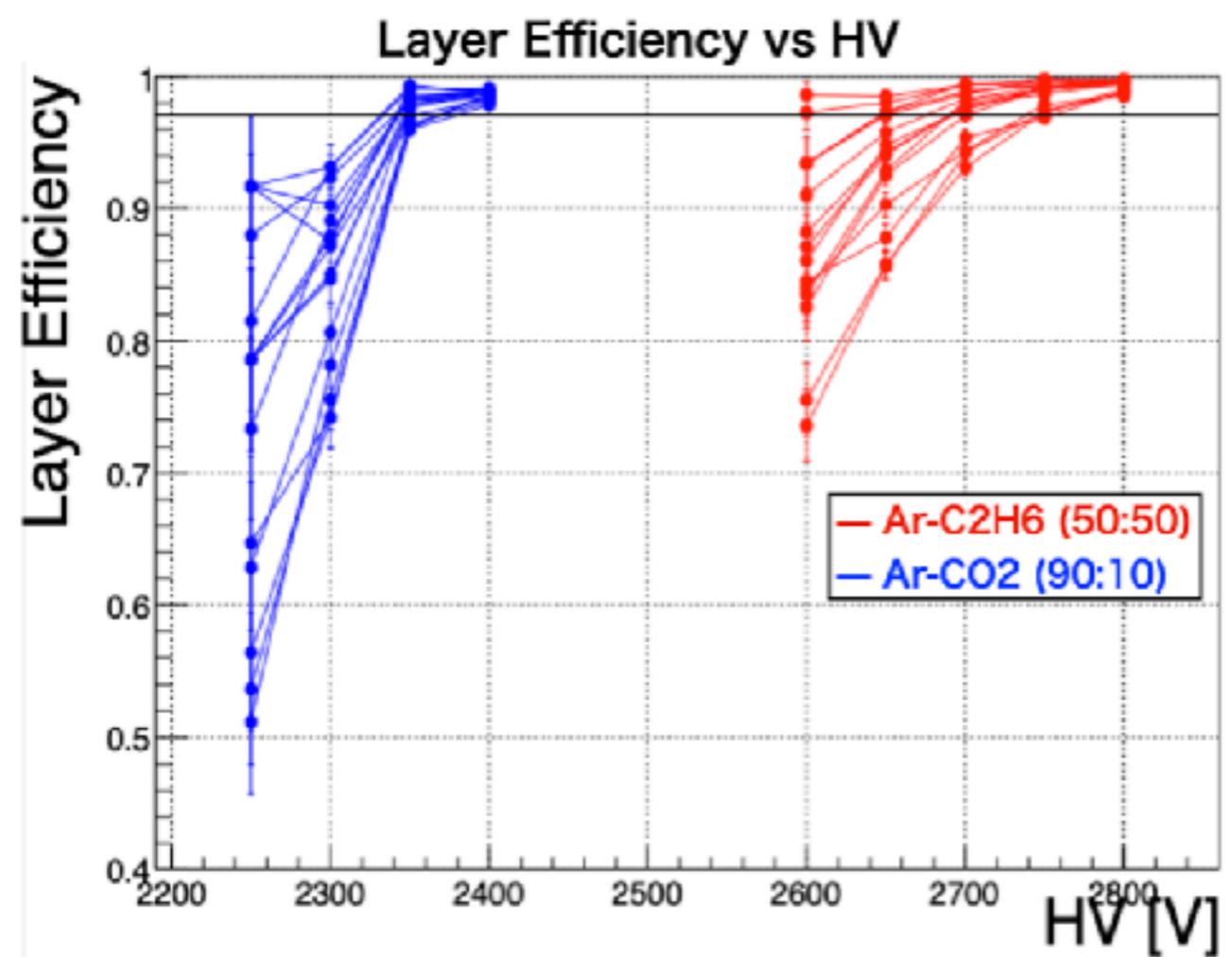
Back-Up

6. 旧CDCによる性能評価

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4

Layer検出効率の評価結果

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



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

6. 旧CDCによる性能評価

位置分解能の評価

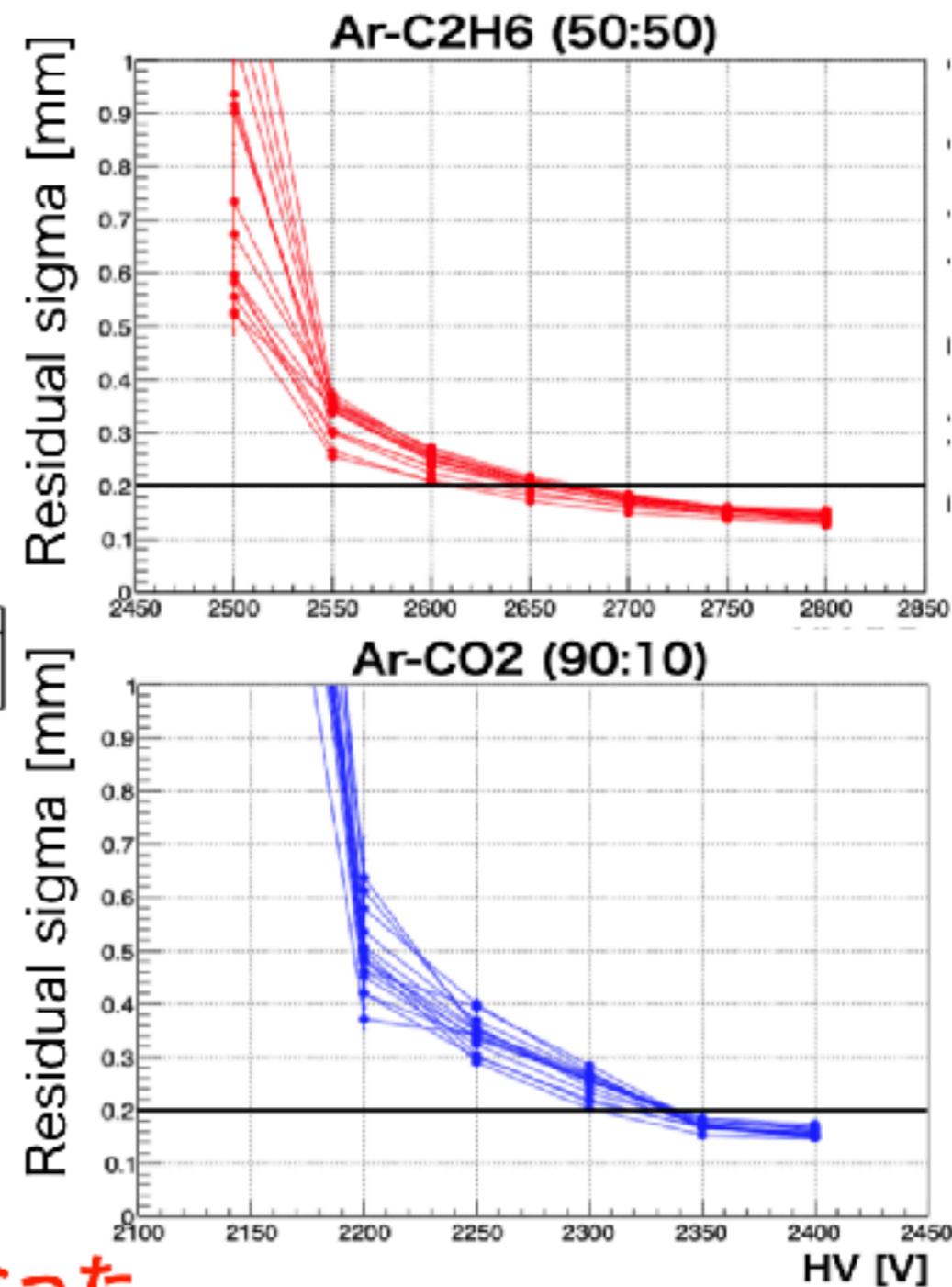
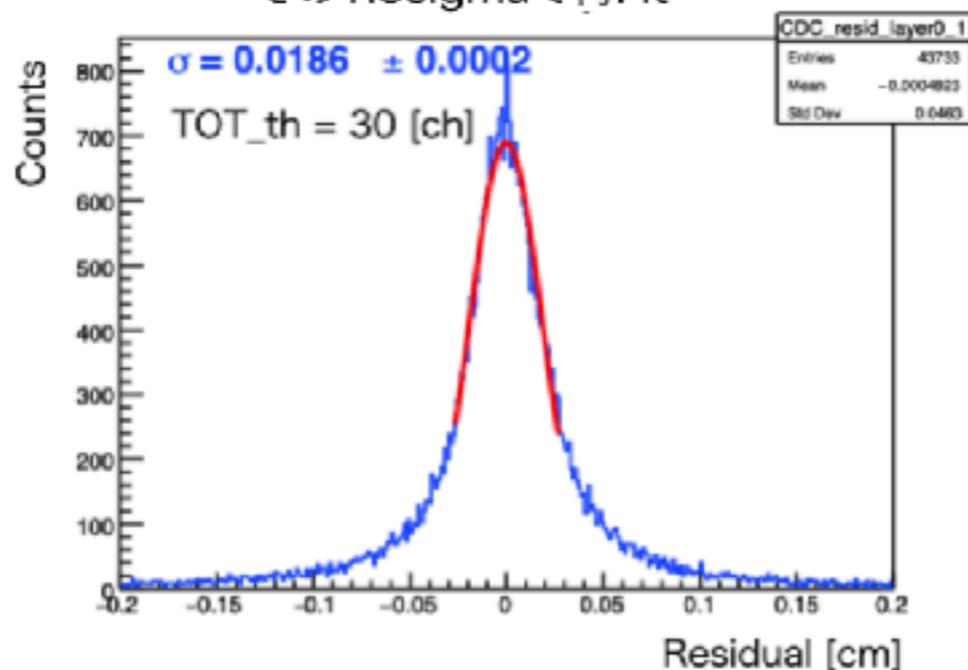
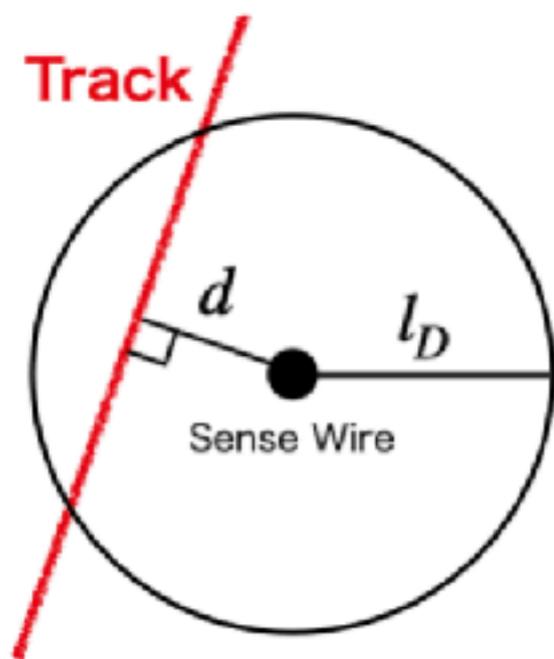
Residualの比較

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。

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

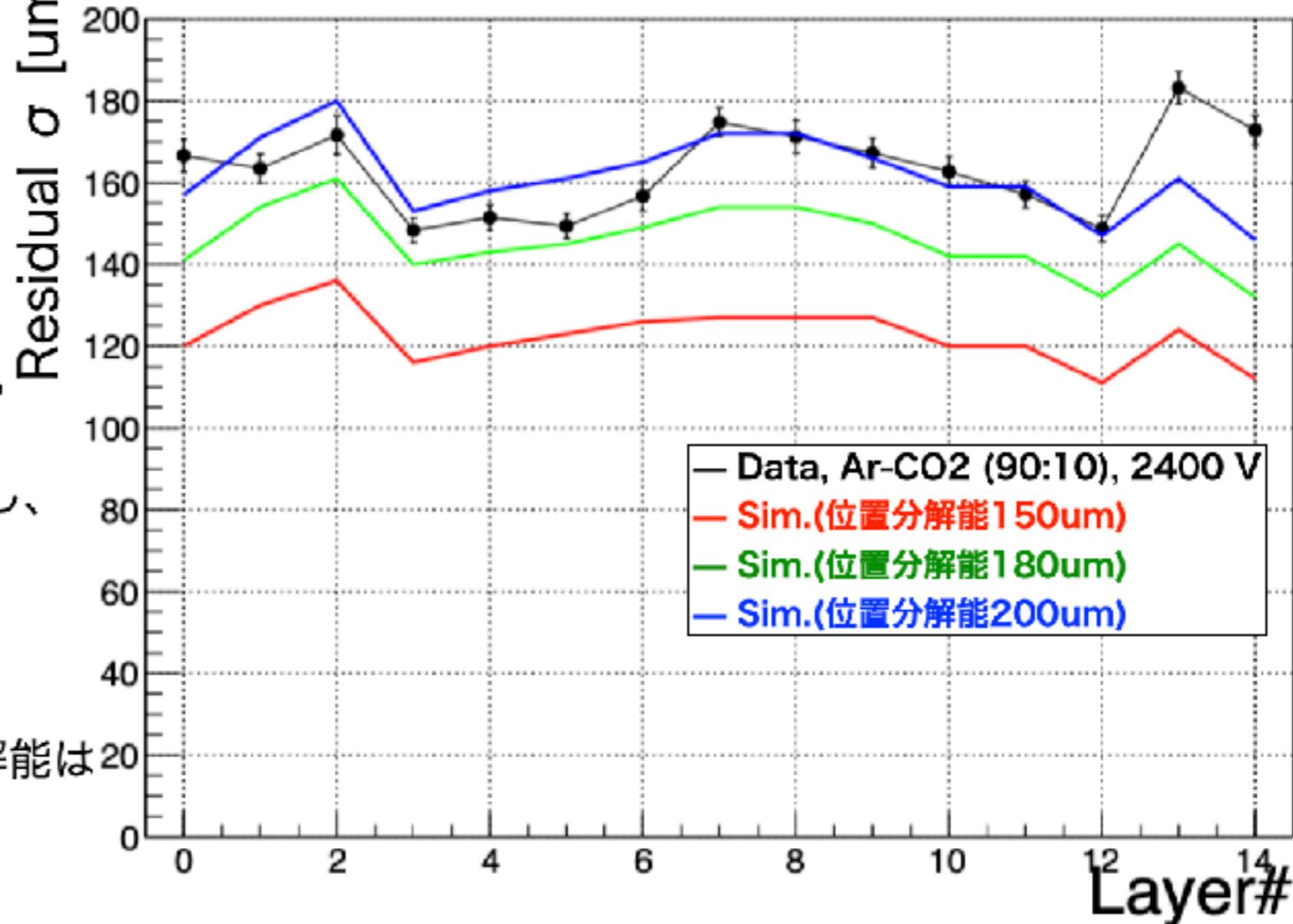
要求性能 : 200 μm

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。

実験とシミュレーション間のResidual σ の比較



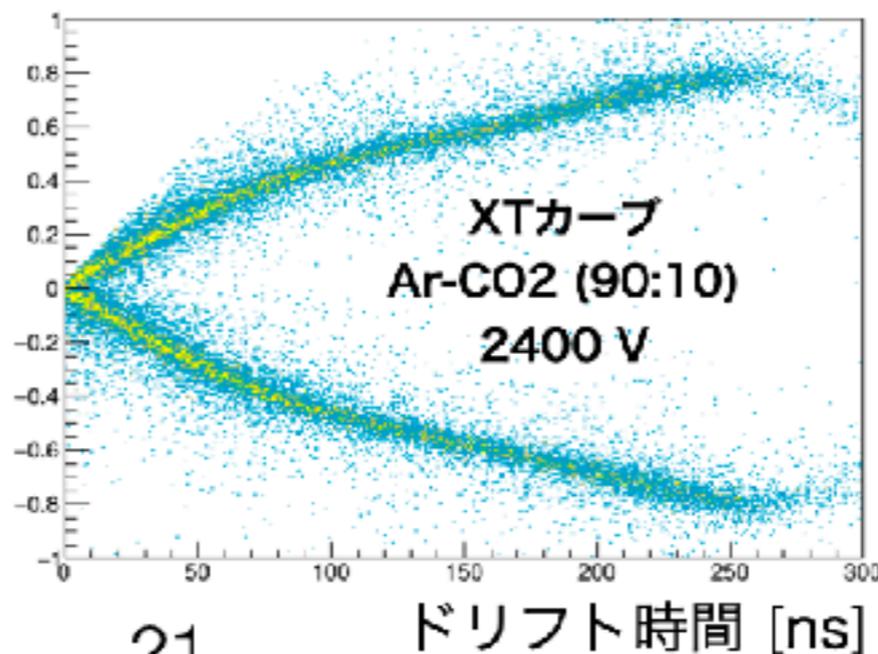
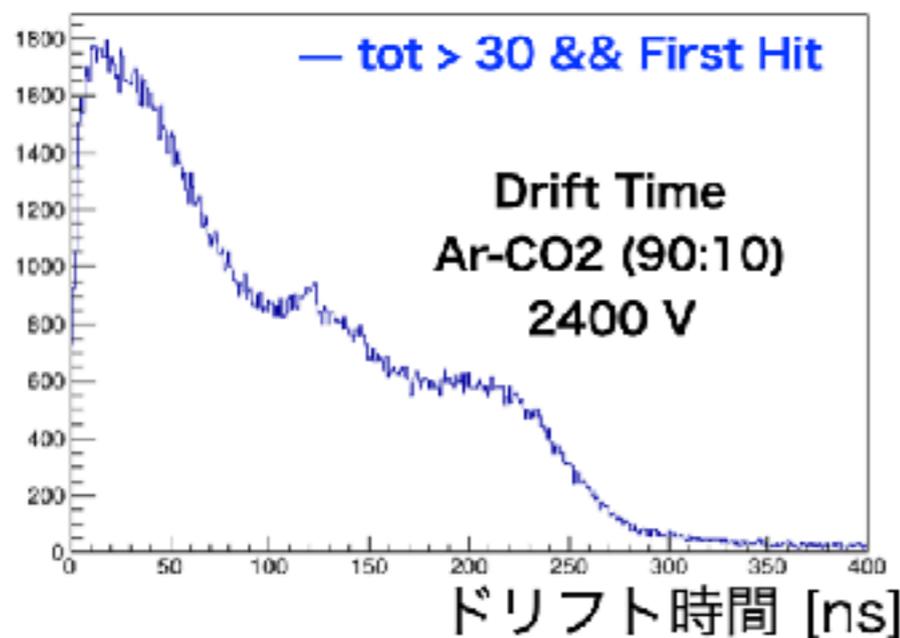
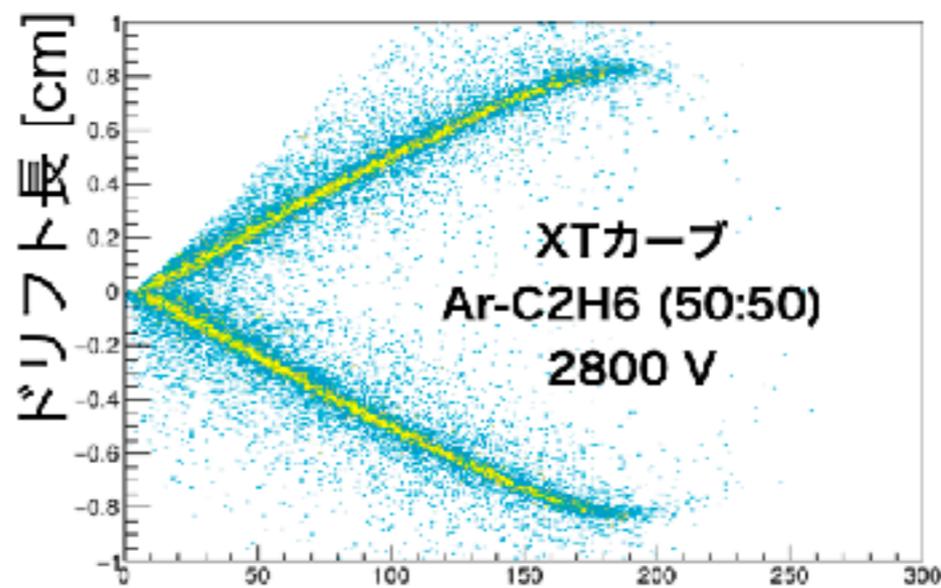
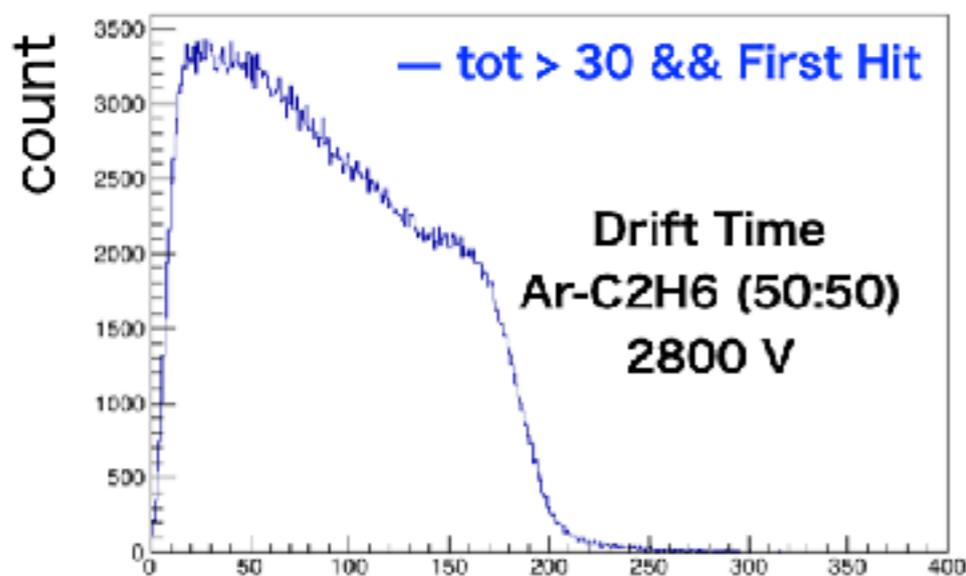
Ar-CO₂ (90:10) においては2400 Vかけたとき要求性能を満たした。

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。

21

2024年度 修士論文発表会, 2025/2/4