

低物質量子位置検出器の開発

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻原子核物理

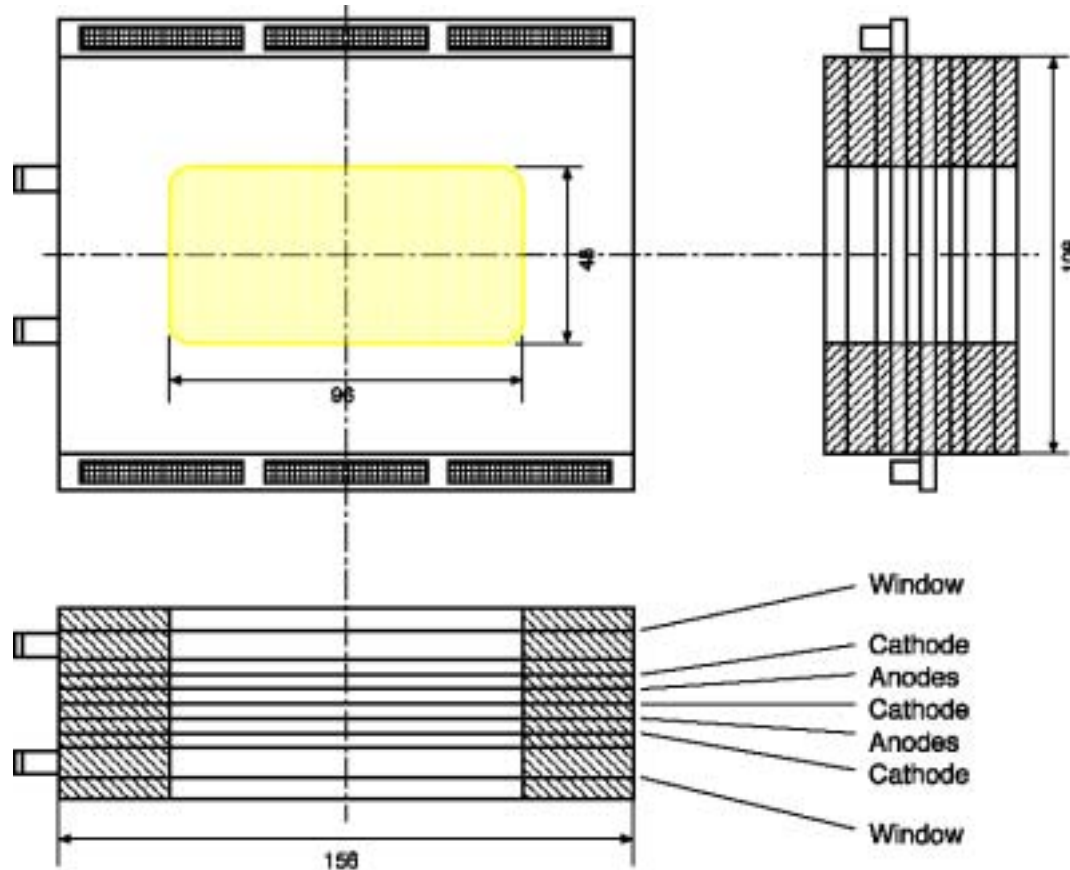
三木俊也

1. 目的
2. 低圧力MWPCの動作特性
3. ガス増幅率測定
4. カソード読出型DCの開発
5. まとめ

研究の目的

- RIビームを用いた実験 不安定核の構造の理解に有効
核子ロックアウト反応における分離エネルギー分解能を
現在の約2 MeV(rms) 0.4 MeV程度まで改善したい
ビームエネルギー、標的前後での位置 / 角度の決定精度向上が必要
Z=1の粒子への感度も必要
- RIビームの運動量分散は $\pm 3\%$ 程度
従来は焦点面間のTOF測定から運動量決定
運動量分散焦点面での位置測定により運動量分解能の向上が可能
低圧力MWPC
これまでに iC_4H_{10} を用いて開発。動作条件の最適化のため
さらなるガス(CH_4 、 C_2H_6 、 CF_4 、 C_3F_8)を用いて動作特性を調べた。
- 標的前後での角度分解能を1 mrad以下としたい
高位置分解能、低物質質量（真空中でも動作）を満たす位置検出器が必要
低圧力カソード読出型DC
新たに開発し、基本的な動作特性を調べた。

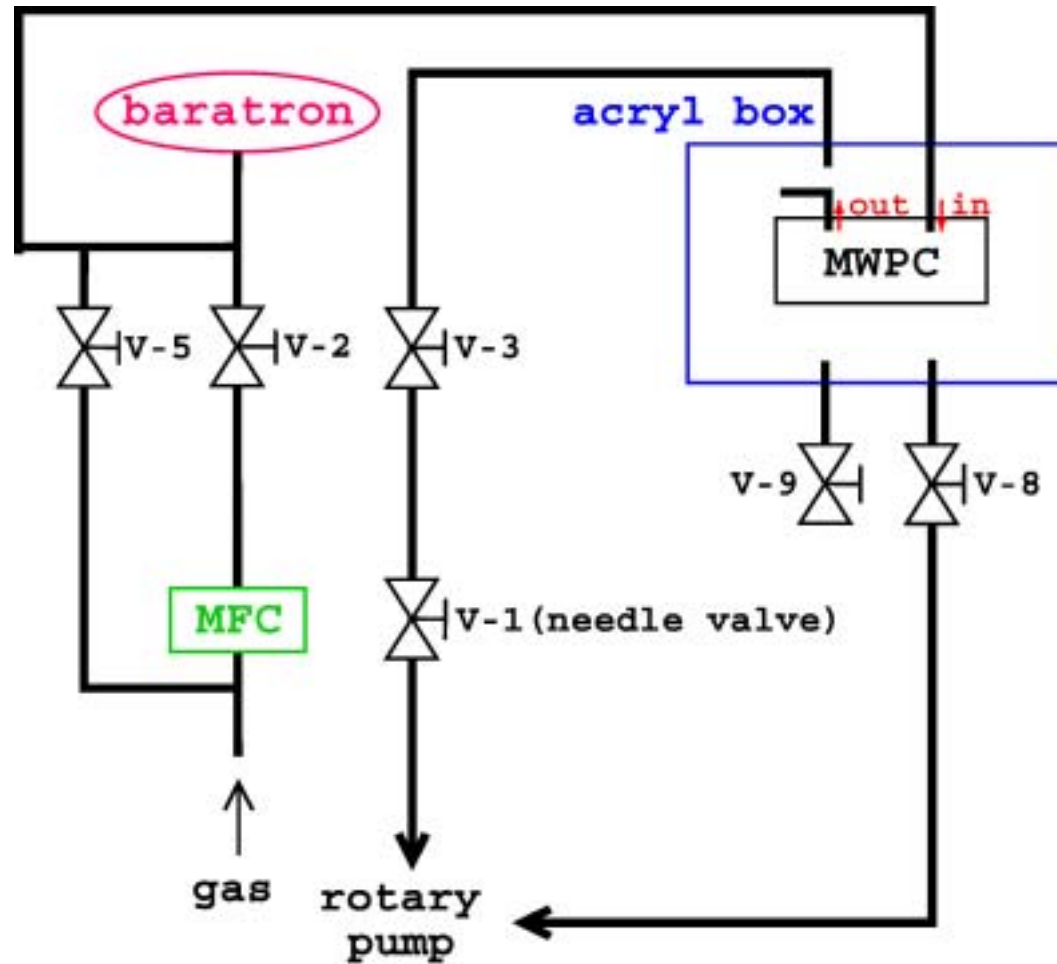
低圧力MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)



- 構成
XX(1面あたりアノード48本)
- 有効領域
96 mm(横) × 48 mm(縦)
- アノード
間隔2 mm 20 μm Au-W-Re
- カソード
12.5 μm厚
両面Cu-Cr蒸着カプトン
- アノード-カソード間隔
4 mm
- ウインドウ
125 μm厚カプトン

2mm spacingのMWPCの位置分解能 $\sigma_x = \frac{2}{\sqrt{12}} = 0.58 \text{ mm}$

低圧ガス処理系

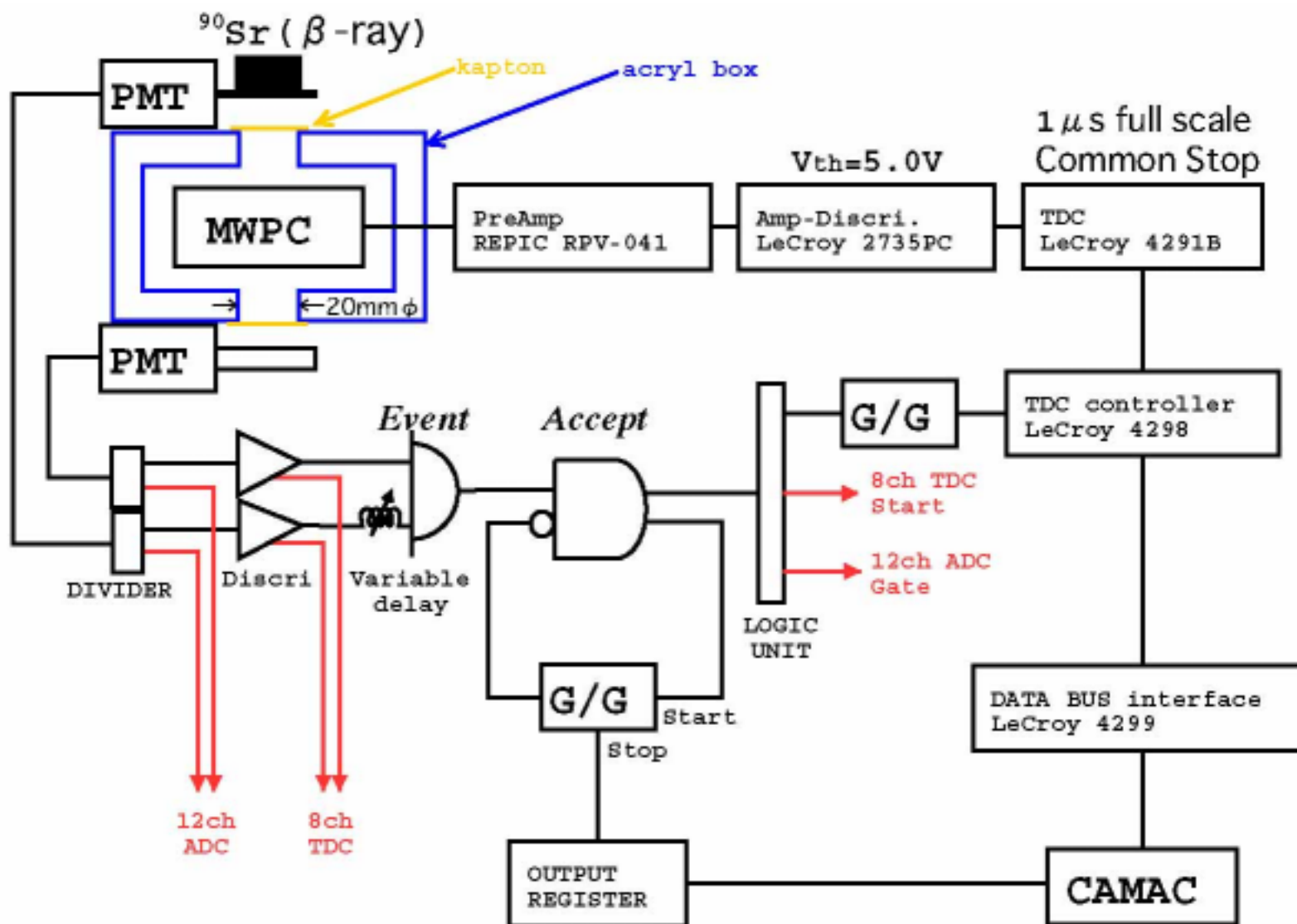


アクリル箱とMWPCは等圧で
アクリル箱ごと低圧に引く

- MFC ガス流入量調整
- V-1 ガス排気量調整

低圧力で固定

測定回路



検出効率、クラスタの定義

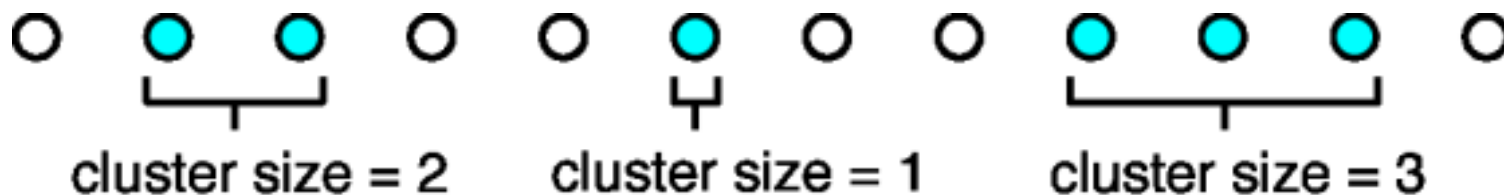
- **定義** : $\text{Efficiency}[\%] \equiv \frac{\text{MWPC hit events}}{\text{Trigger events}} \times 100[\%]$

ε_{tot} : 全検出効率

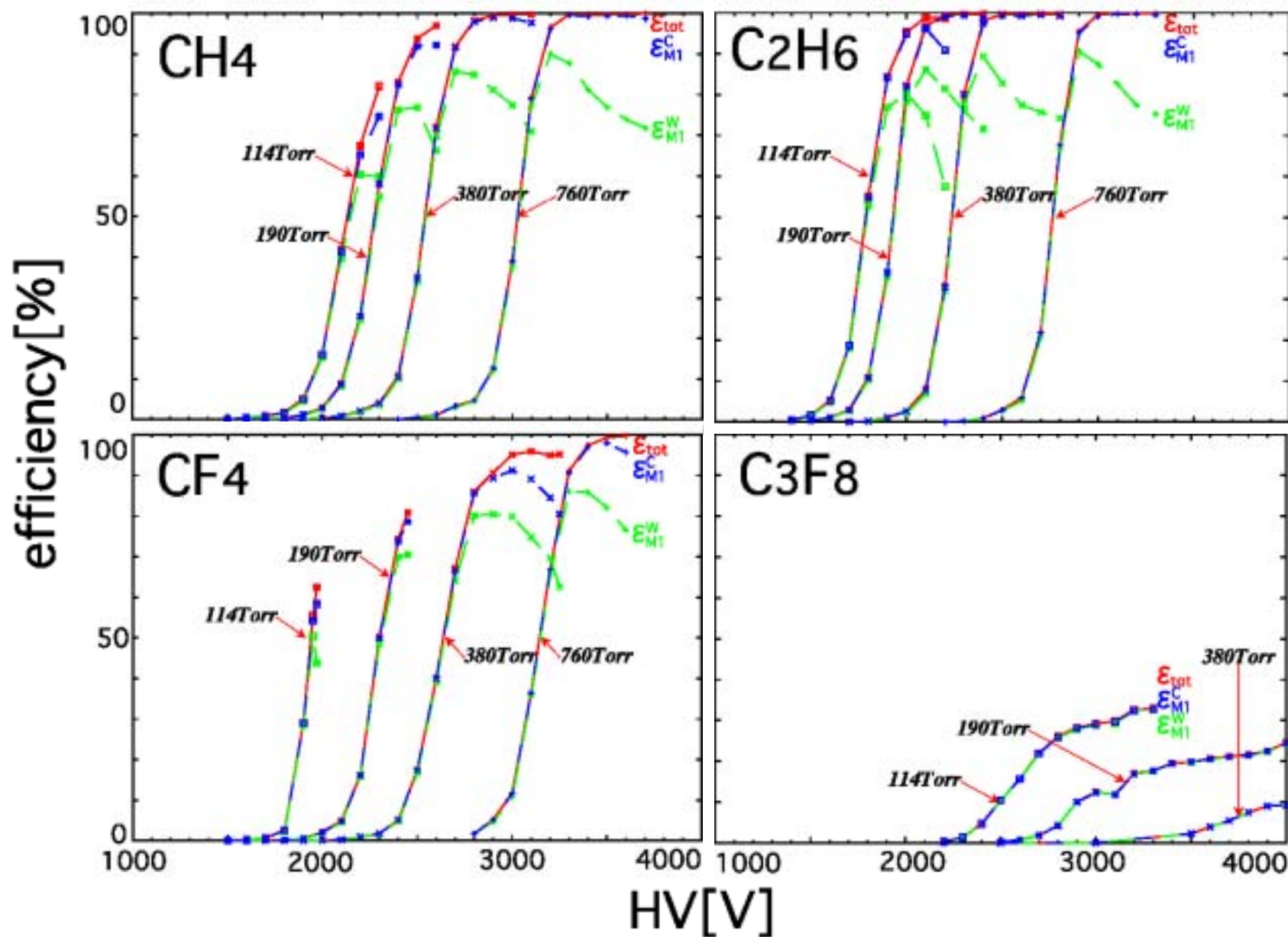
$\varepsilon_{\text{M1}}^{\text{W}}$: ワイヤー多重度1の検出効率

$\varepsilon_{\text{M1}}^{\text{C}}$: クラスタ多重度1の検出効率

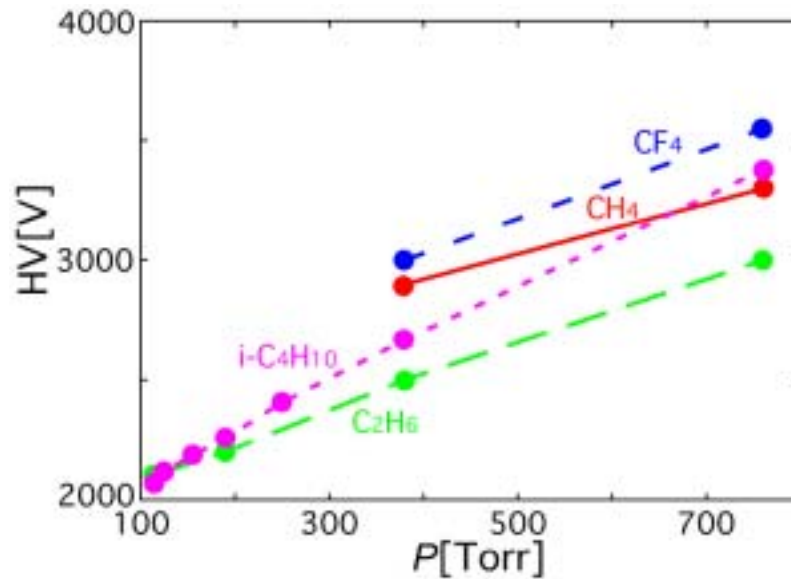
- クラスタの定義



線(最小電離)に対する検出効率：HV、 P 依存性

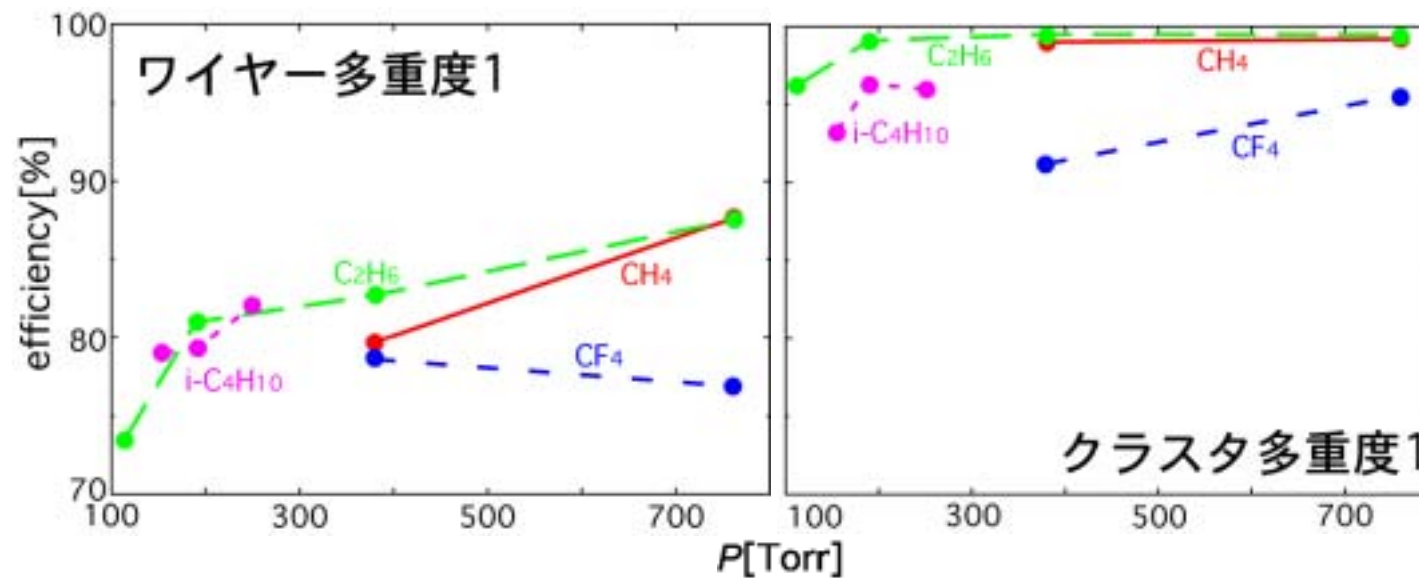


最適動作電圧： P 依存性

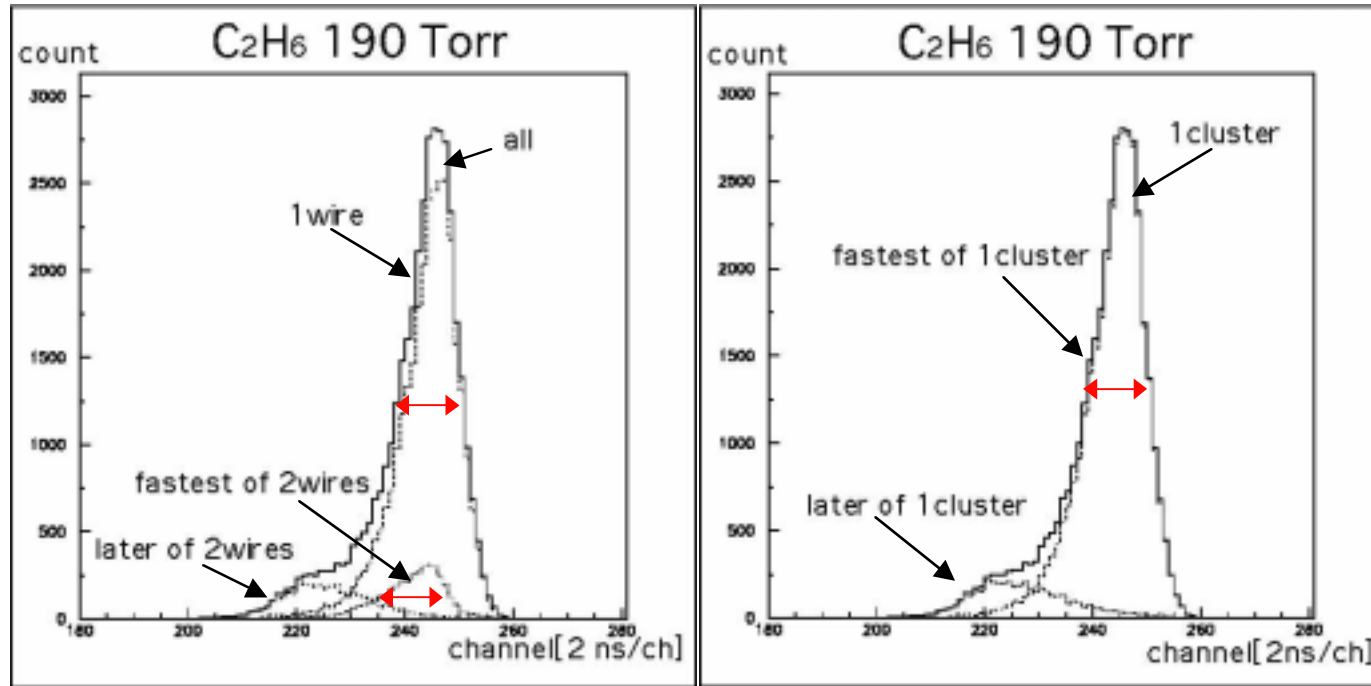


C₂H₆が最も動作電圧低

多重度： P 依存性

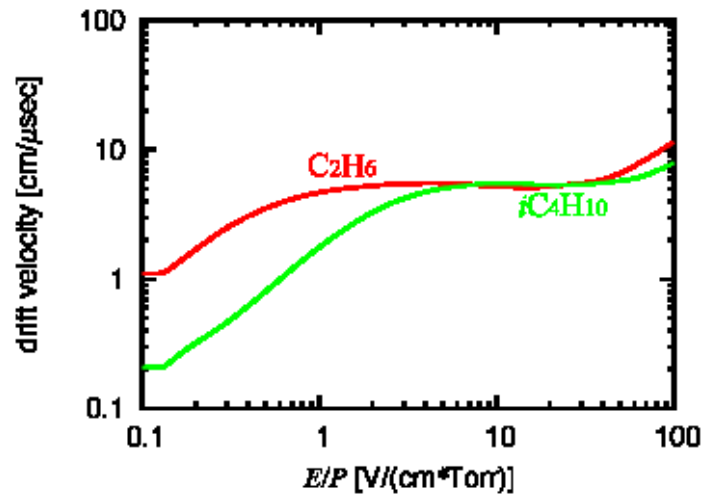


時間分布



FWHM
~ 16 nsec

*i*C₄H₁₀の場合と
ほぼ同じ



C₂H₆と*i*C₄H₁₀の飽和ドリフト速度は
ほぼ等しい

ガス増幅率測定

円筒形比例計数管

- ・陽極： 20 μm Au-W-Re
- ・陰極：内径23 mm アルミパイプ

ガス
 C_2H_6

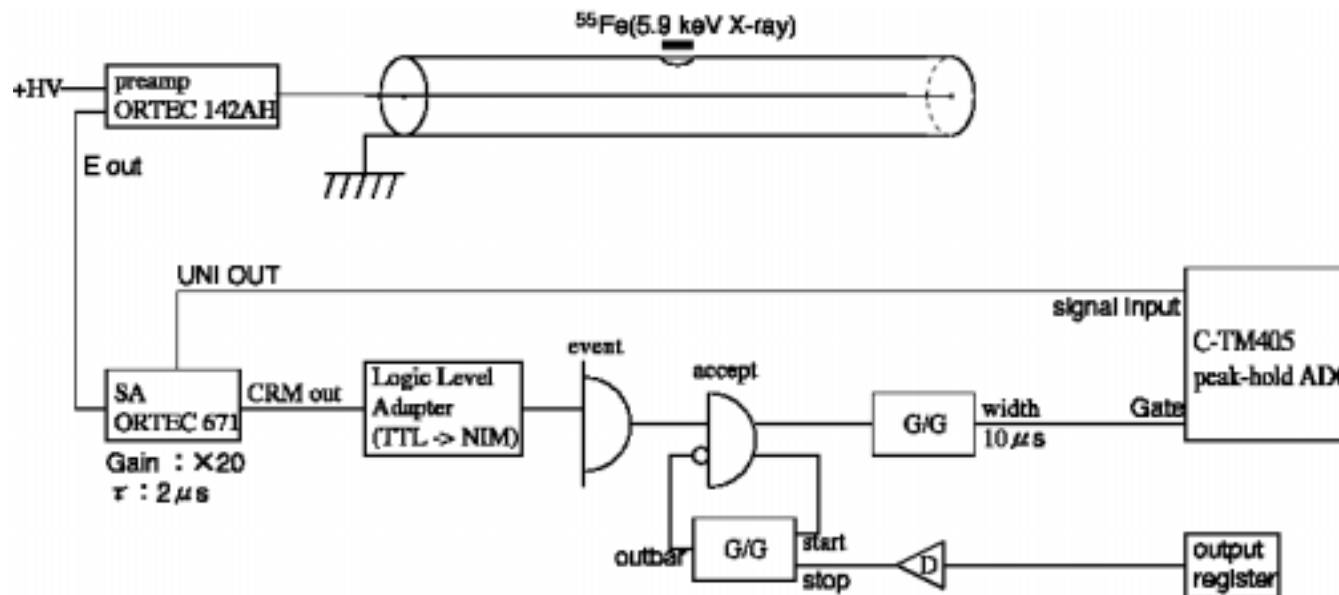
線源

^{55}Fe 5.9 keV X-ray

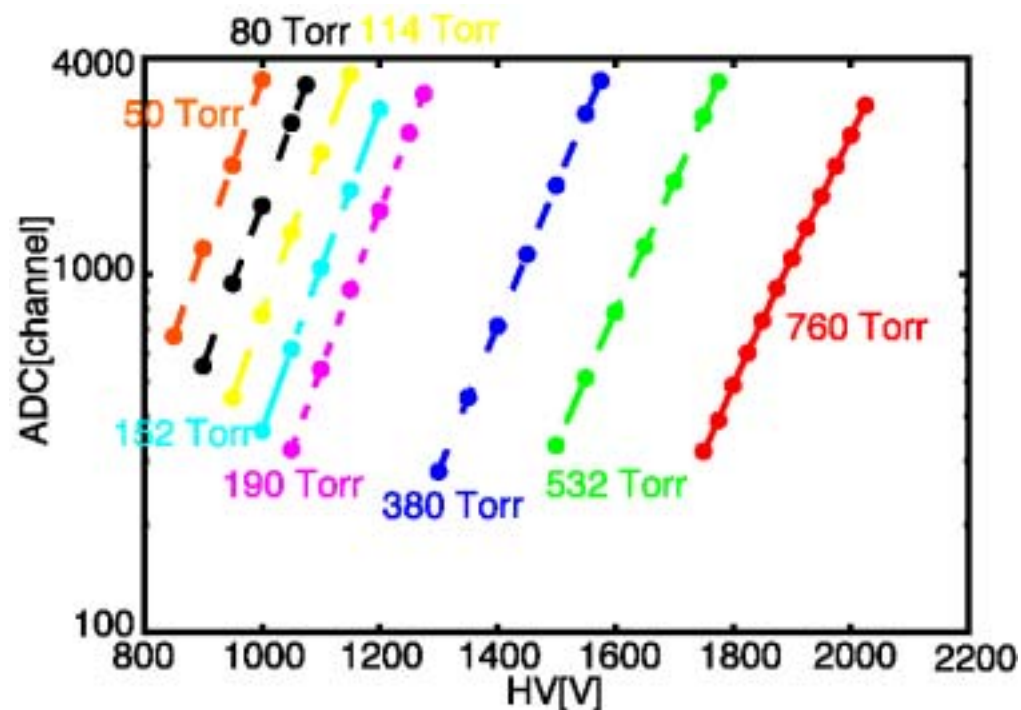
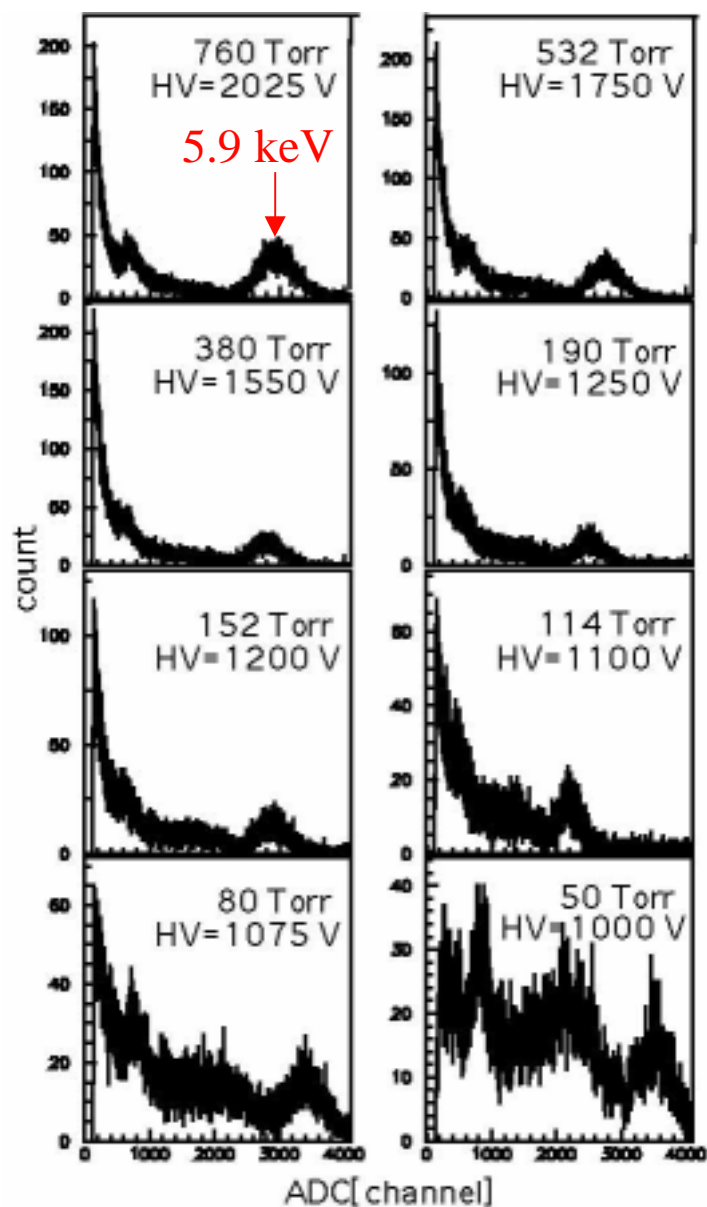
圧力設定

低圧力MWPCと同じガス処理系

測定回路



波高分布：HV、 P 依存性



HV値に対して
波高は指数関数的に増加

圧力の低下
同じ波高を得る為に必要な
HV値が低下

第一タウンゼント係数のフィッティング

Aoyamaによる第一タウンゼント係数 α_T 、ガス増幅率 M

$$\frac{\alpha_T}{P} = \alpha S^\gamma \exp\left(-\frac{\beta}{S^{1-\gamma}}\right)$$

$$\ln M(S_a) = PaS_a \left\{ \frac{\alpha}{\beta} \frac{1}{1-\gamma} \exp(-\beta S_a^{\gamma-1}) + \delta \right\}$$

(P : 圧力、 $S=E/P$ (E は電場強度)、 S_a : アノード表面における S 、 a : アノード半径、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: ガスによる定数)
測定データへフィッティング

円筒形比例計数管の電場強度 S_a の変換

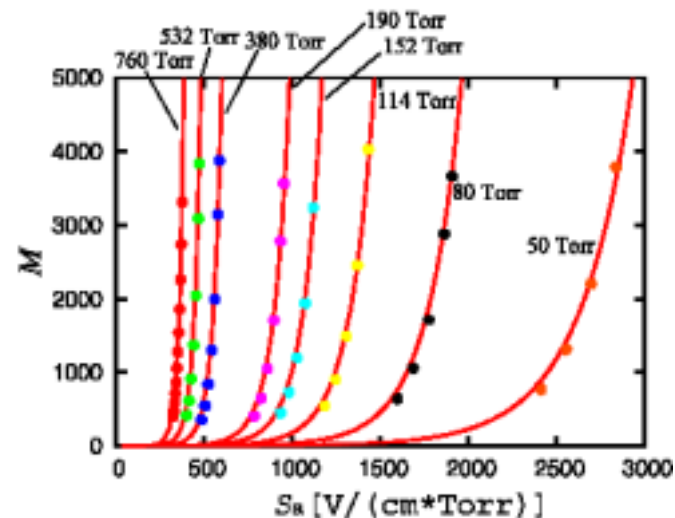
$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad \therefore S_a = \frac{V}{P a \ln(b/a)}$$

(r : 半径、 V : 印加電圧、 b : カソード半径)

波高 M の変換(パルサーを用いて較正)

$$M = \frac{W}{eE_{\text{loss}}} (C_1 \times \text{ADC}[\text{ch}] + C_2) \times C$$

(W : 電子-イオン対生成あたりの必要エネルギー、
 e : 素電荷、 E_{loss} : 入射粒子のenergy deposit、
 C_1, C_2 : 較正直線の係数、 C : 較正用コンデンサ容量)



最も残差自乗和の小さい組み合わせ

=3.7

=66.51

=0.26

=-0.0047

MWPCの動作電圧の計算

MWPC内の電場強度（アノード近傍）

$$E(r) = \zeta \frac{V}{r}$$

($\zeta = 0.1026$: 検出器形状による)

$$\rightarrow S_a = \zeta \frac{V}{aP}$$

計算原理：

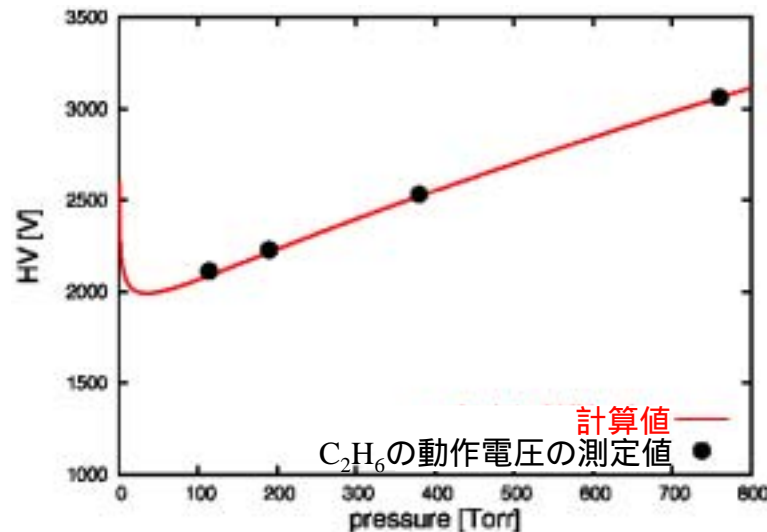
(仮定)

各圧力での動作電圧において

(1次電離電子数) × (ガス増幅率) = 一定

760 Torrにおける動作電圧を V_{760} として得られる圧力と動作電圧の関係式：

$$V(P) = \frac{aP}{\zeta} M^{-1} \left(M \left(\zeta \frac{V_{760}}{a \cdot 760} \right) \cdot \frac{760}{P} \right)$$



測定値を良く再現

動作電圧の圧力依存性を説明できた。

カソード読出型DC(Drift Chamber : KDC)

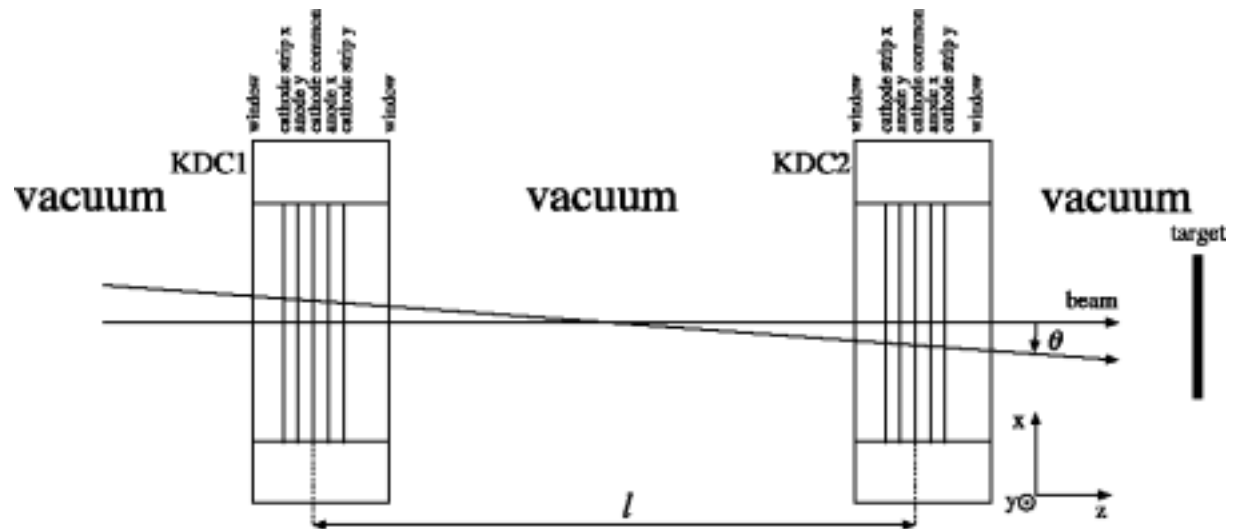
KDCのパラメータ

- アノード : 20 μm Au-W、ピッチ10 mm
- ポテンシャル : 80 μm Au-Al、ピッチ10 mm
- ドリフト距離 : 5 mm
- ハーフギャップ : 5 mm
- カソード : 4 μm 厚アルミナイズドポリプロピレン
- ストリップピッチ : 7 mm (gap:65 μm)
- 有効領域 : 100 mm \times 100 mm
- ウインドウ : 4 μm 厚アラミド

実験で想定されるKDCの構成

物質	L/L_R
ウインドウ	0.135×10^{-4}
ストリップ(x)	0.08×10^{-4}
アノード(y)	0.147×10^{-4}
共通カソード	0.08×10^{-4}
アノード(x)	0.147×10^{-4}
ストリップ(y)	0.08×10^{-4}
ウインドウ	0.135×10^{-4}
合計	0.804×10^{-4}

KDC \times 2台で粒子の軌跡を決定



1 mrad以下の角度分解能

200 μm 程度の位置分解能が必要

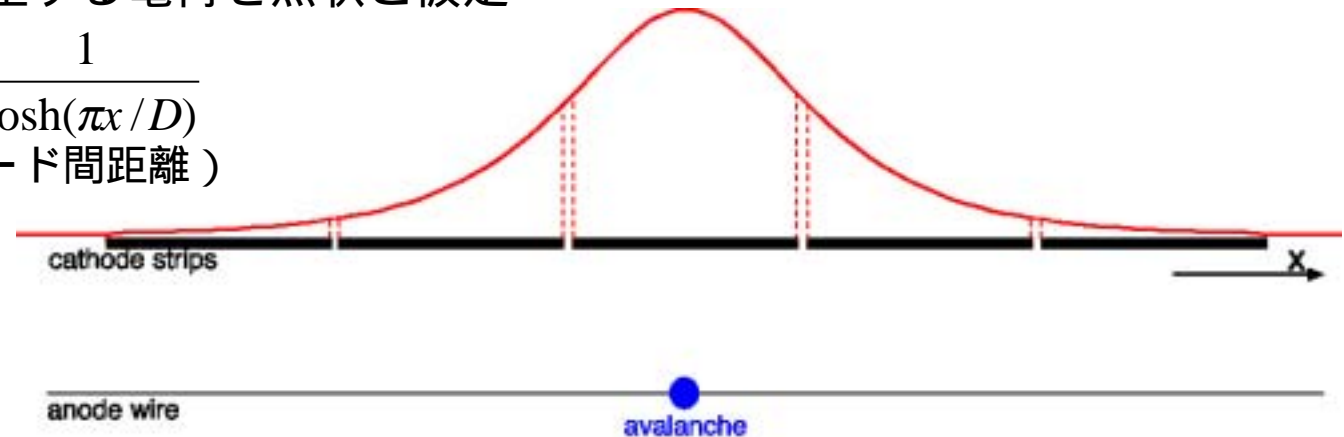
測定原理、位置決定法

誘起電荷分布

Avalancheにより発生する電荷を点状と仮定

$$\text{誘起電荷密度 } \sigma(x) \propto \frac{1}{\cosh(\pi x / D)}$$

(D : カソード-カソード間距離)



位置決定法 : Charge Ratio Method(CRM)

$$R = \frac{q_M - q_{M-1}}{q_M - q_{M+1}}$$

M : 電荷が最大のストリップ

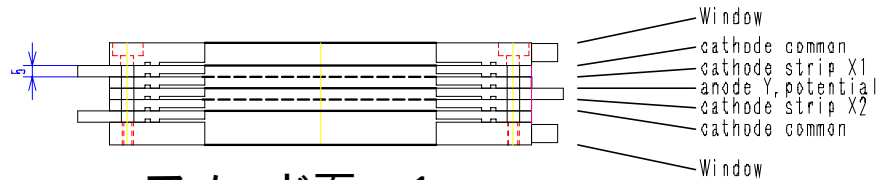
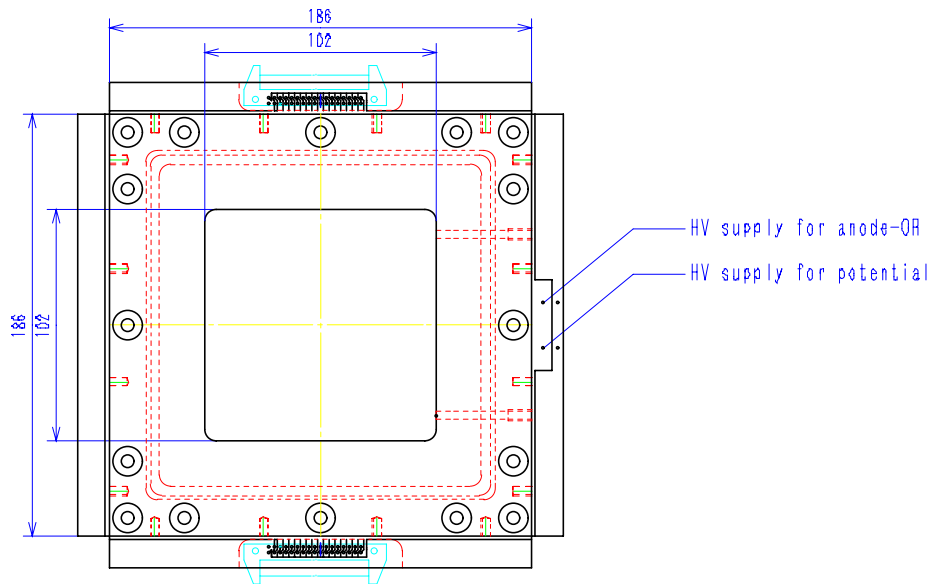
M-1, M+1 : その両隣のストリップ

電荷比 R を理論値と比較してavalanche位置を決定
 R は共通ノイズが除去でき、高位置分解能が期待

誘起電荷分布が理論式からずれると位置分解能の低下が予想される

- ・ 粒子の(アノードに沿った)入射角度が大きい場合
- ・ avalancheが複数の位置で起きるような場合

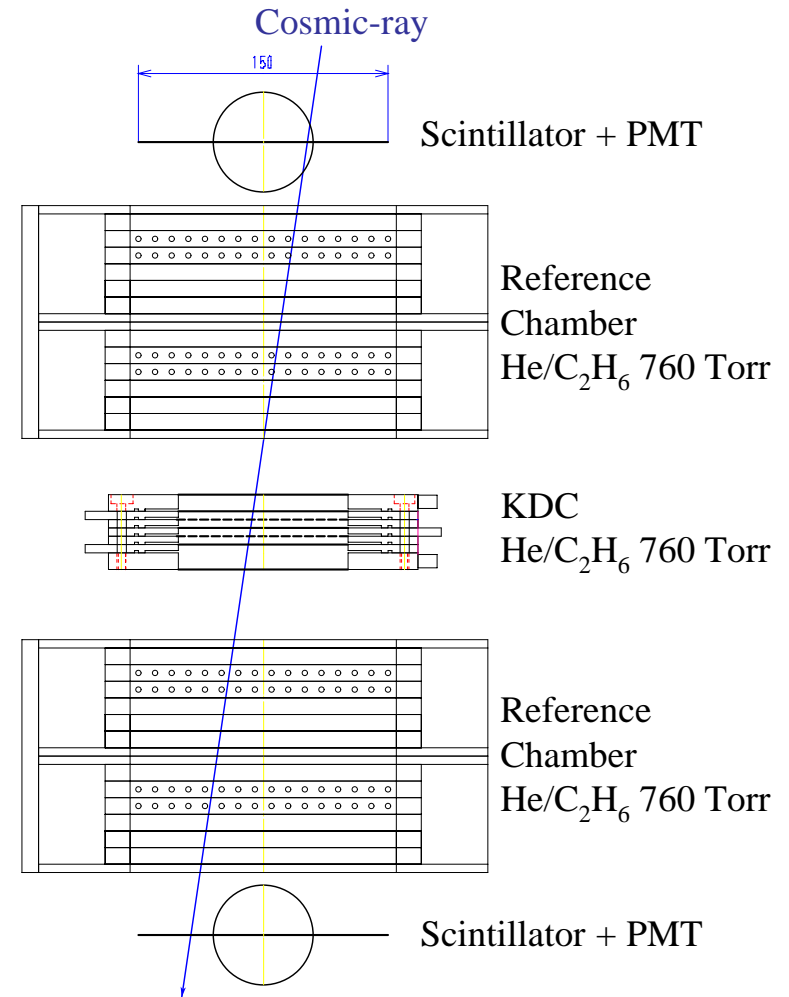
宇宙線試験のセットアップ



アノード面 × 1
ストリップ面 × 2

2面のストリップで求めた位置同士の
差の σ_{res}^a

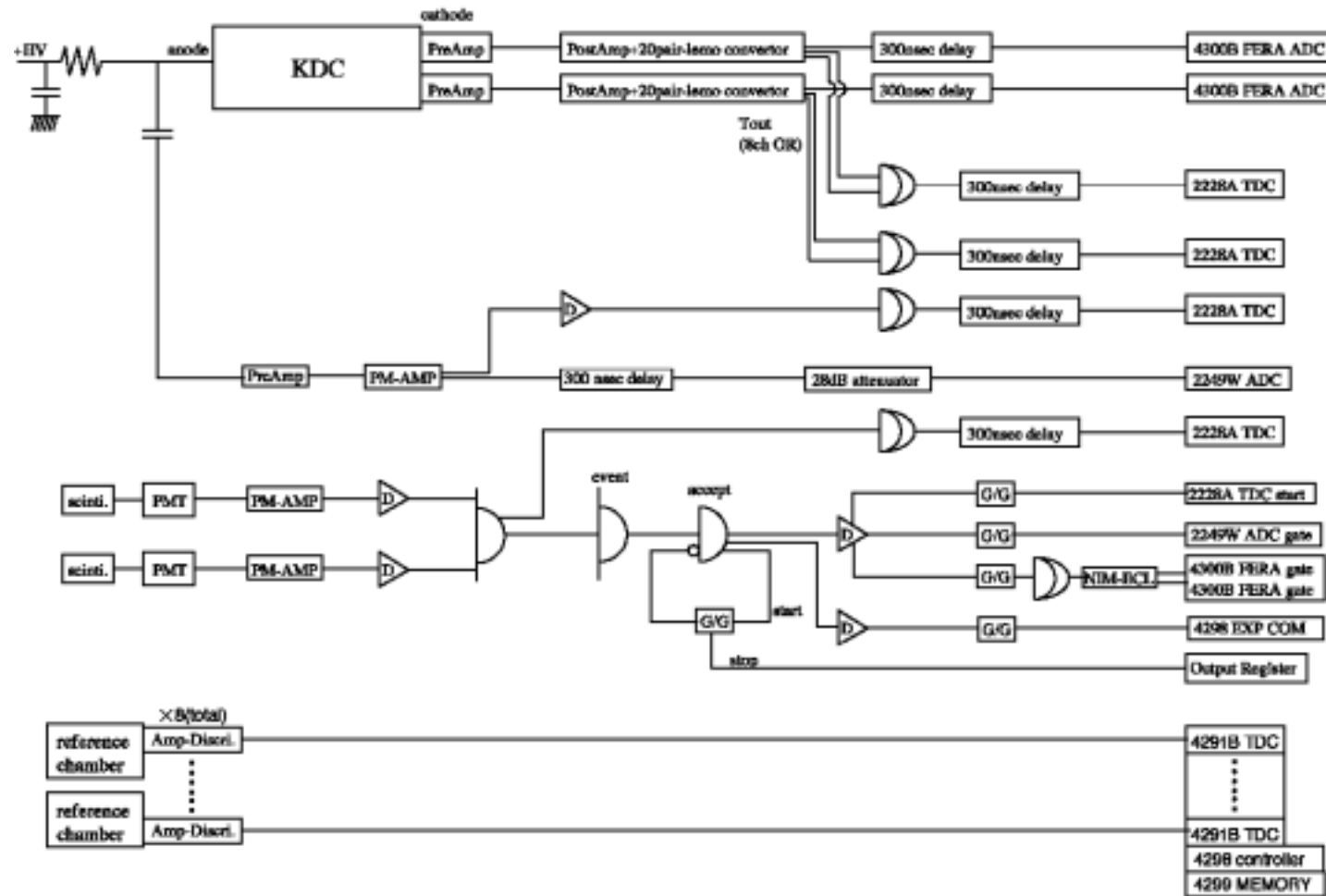
$$\text{Avalanche位置分解能 } \sigma_{\text{avalanche}} = \frac{\sigma_{res}^a}{\sqrt{2}}$$



内挿位置の誤差 σ_{int}
内挿位置とKDCで求めた位置の差の σ_{res}

$$\text{位置分解能 } \sigma_K = \sqrt{\sigma_{res}^2 - \sigma_{int}^2}$$

測定回路



ストリップのアナログ信号：LeCroy 4300B FERAで測定

- CAMAC 読み
- Pedestal subtraction+Zero suppression(閾値 3)

検出効率

[定義]

アノードの検出効率 TDC情報が存在

ストリップの検出効率 閾値以上のADC情報が存在

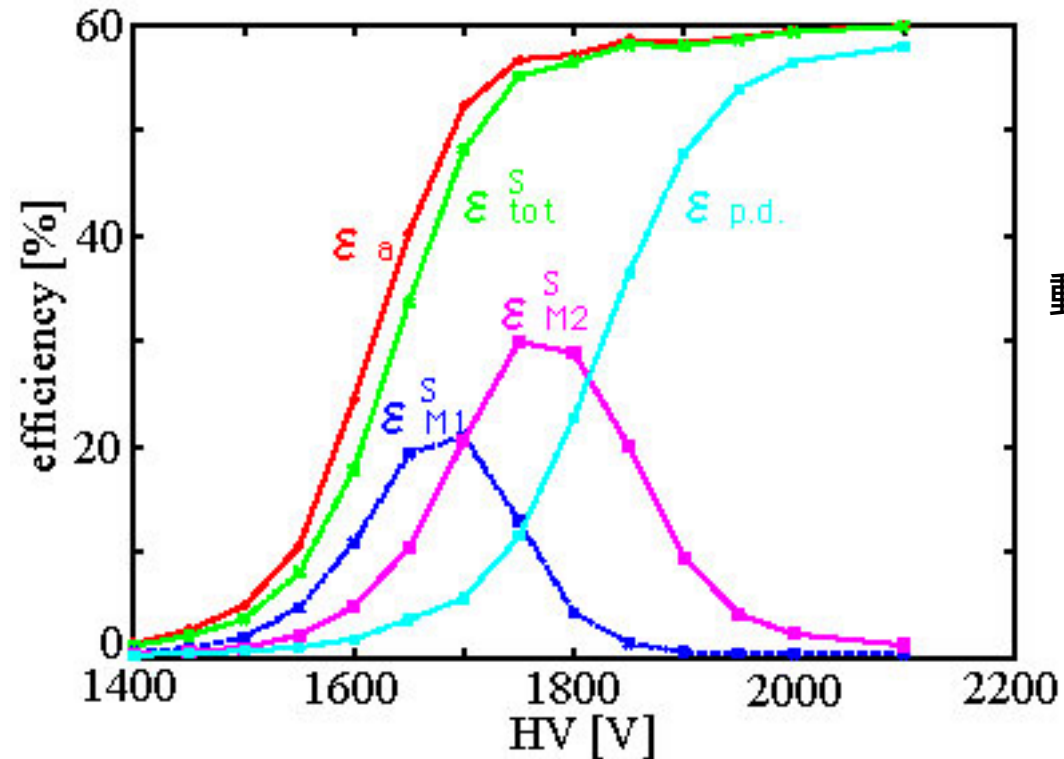
・ ϵ_a : アノードの検出効率

・ ϵ_{tot}^s : 多重度を問わずストリップ面全体での検出効率

・ ϵ_{M1}^s : ストリップ多重度1の検出効率

・ ϵ_{M2}^s : ストリップ多重度2の検出効率

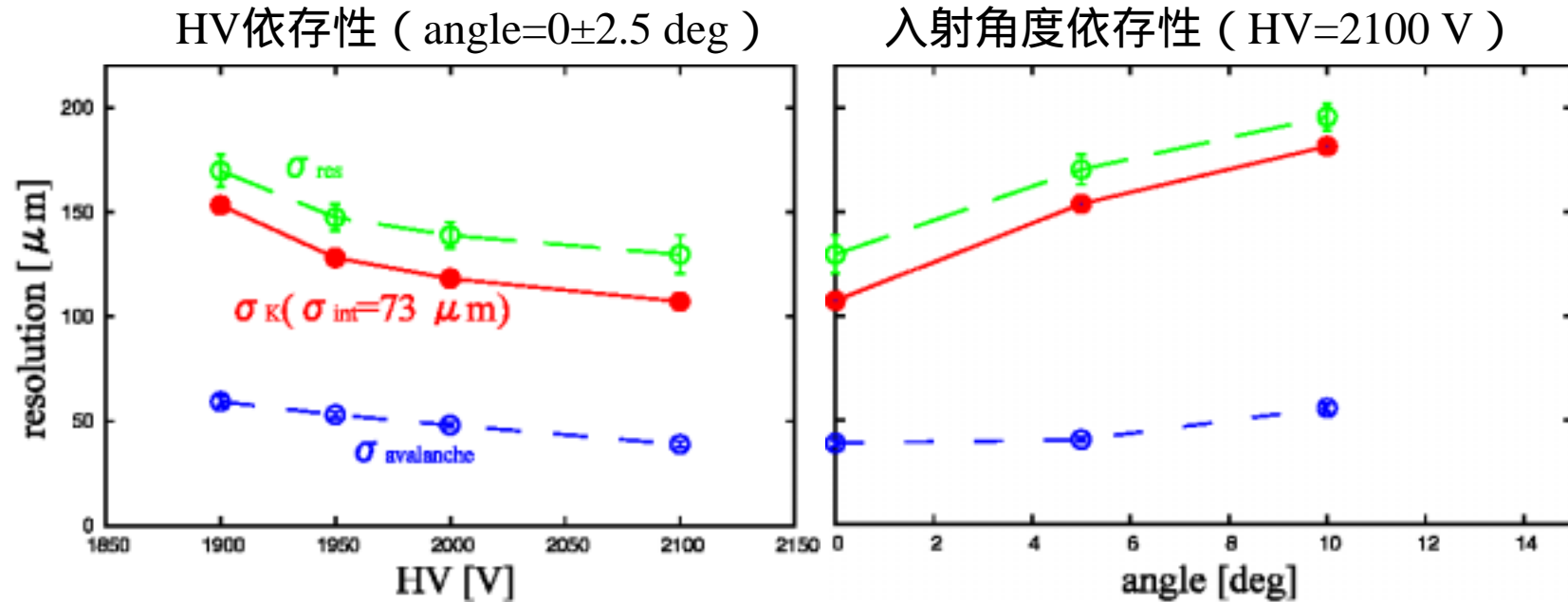
・ $\epsilon_{p.d.}$: 最も電荷量の大きいストリップの両隣も粒子を検出した場合の検出効率 (位置決定可能)



動作電圧の決定

p.d. の変化を調べる必要がある

宇宙線に対する位置分解能：HV、入射角度依存性



HV増加 分解能向上
 ・ S/N比の改善

角度大 分解能低下
 ・ 誘起電荷分布の形の変化

HV=2100V、入射角度0±2.5°に対し

$$\begin{aligned} \sigma_{res} &= 123 \pm 9 \mu\text{m} \\ \sigma_K &= 107 \mu\text{m} \\ \sigma_{avalanche} &= 39 \pm 1 \mu\text{m} \end{aligned}$$

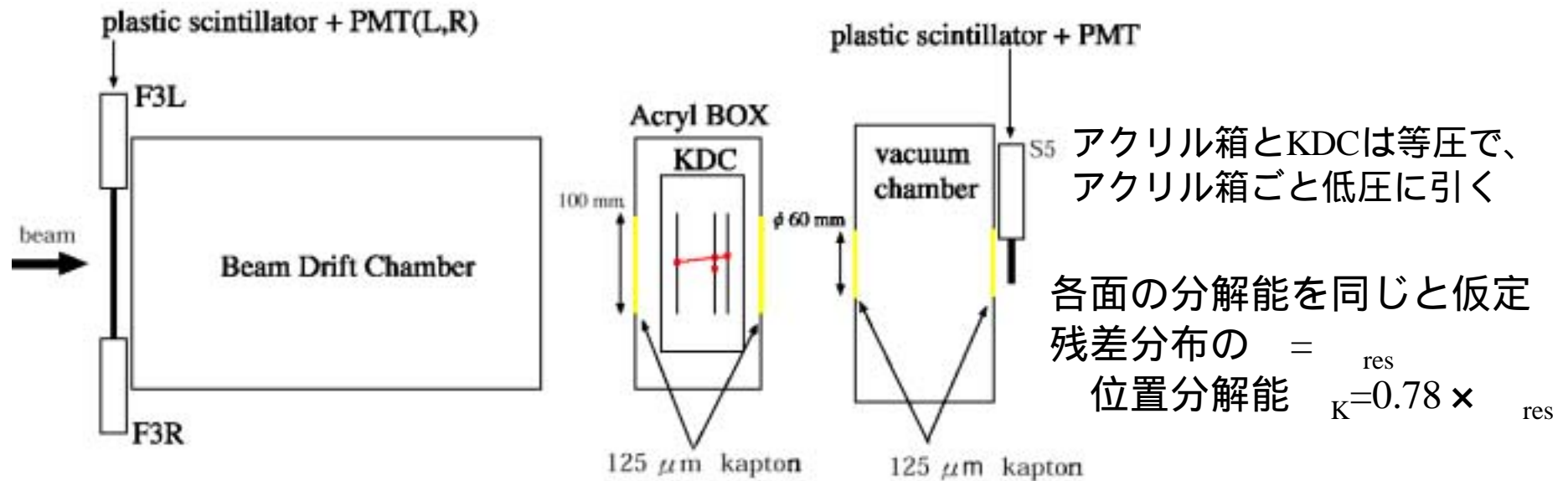
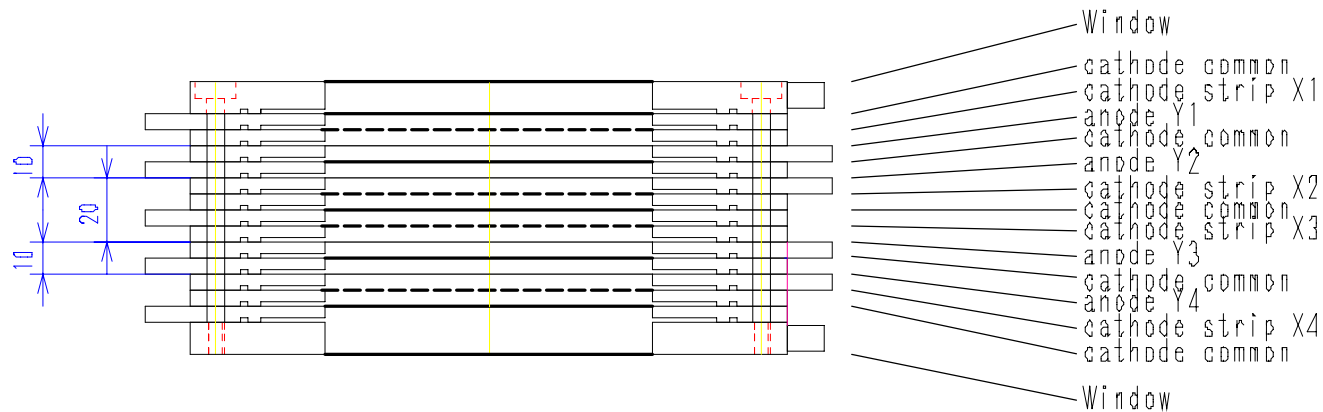
HV=2100V、入射角度5±2.5°に対し

$$\begin{aligned} \sigma_{res} &= 170 \pm 7 \mu\text{m} \\ \sigma_K &= 153 \mu\text{m} \\ \sigma_{avalanche} &= 41 \pm 1 \mu\text{m} \end{aligned}$$

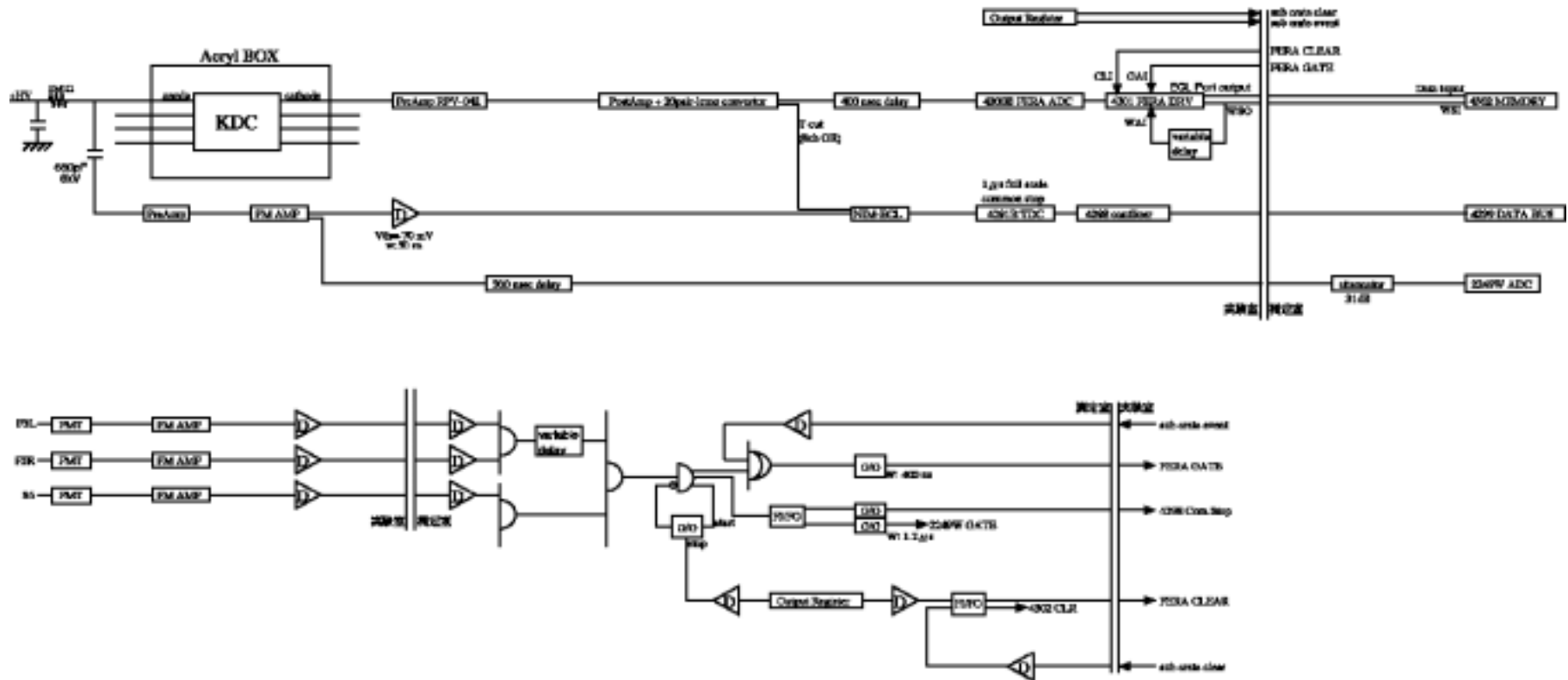
^{40}Ar ビーム試験のセットアップ

ビーム：290 MeV/A ^{40}Ar (Z=18) 1次ビーム、強度 $< 10^3$ count/sec

KDC構成：アノード面×4、ストリップ面×4



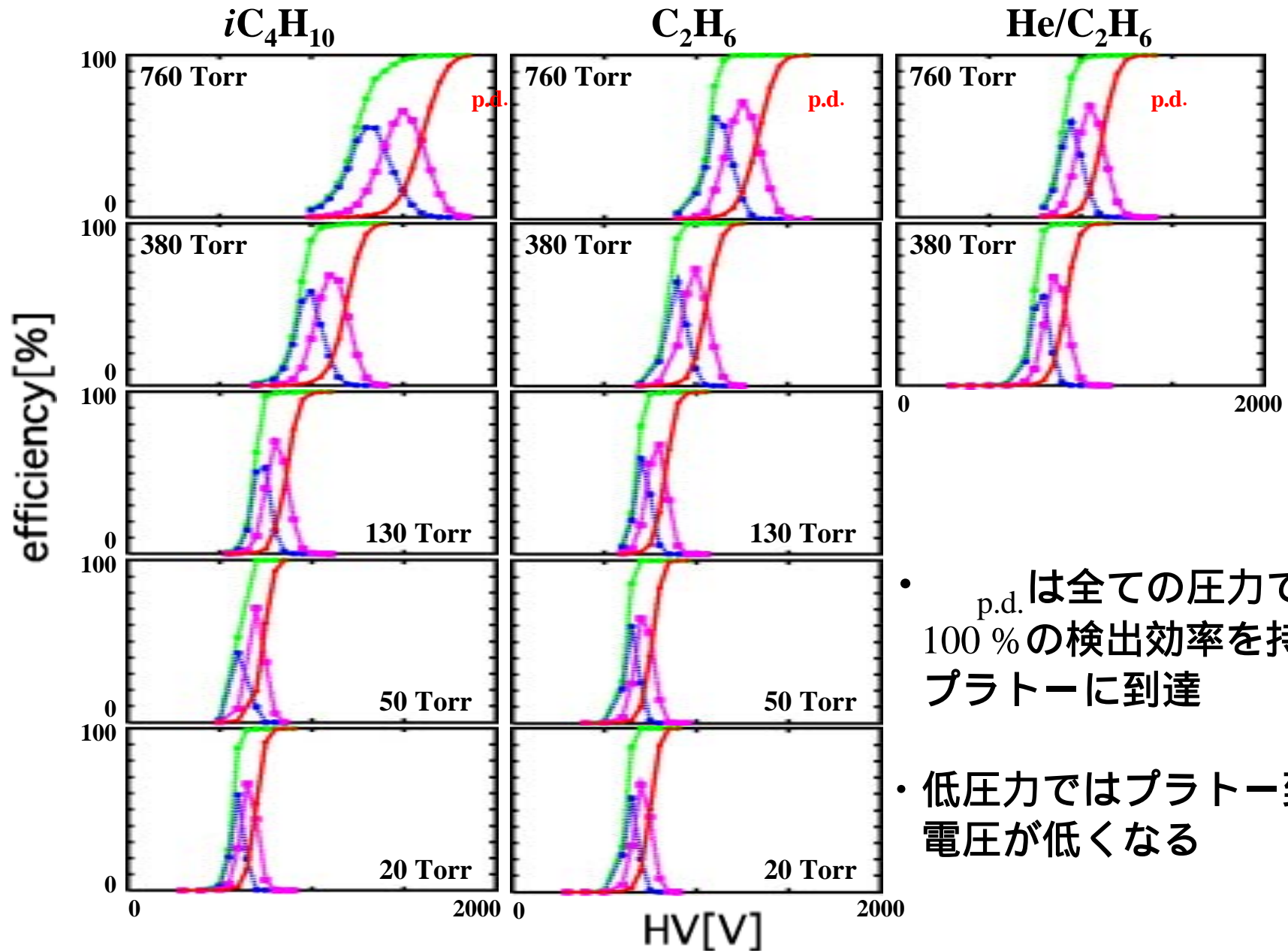
測定回路



ストリップのアナログ信号：LeCroy 4300B FERAで測定

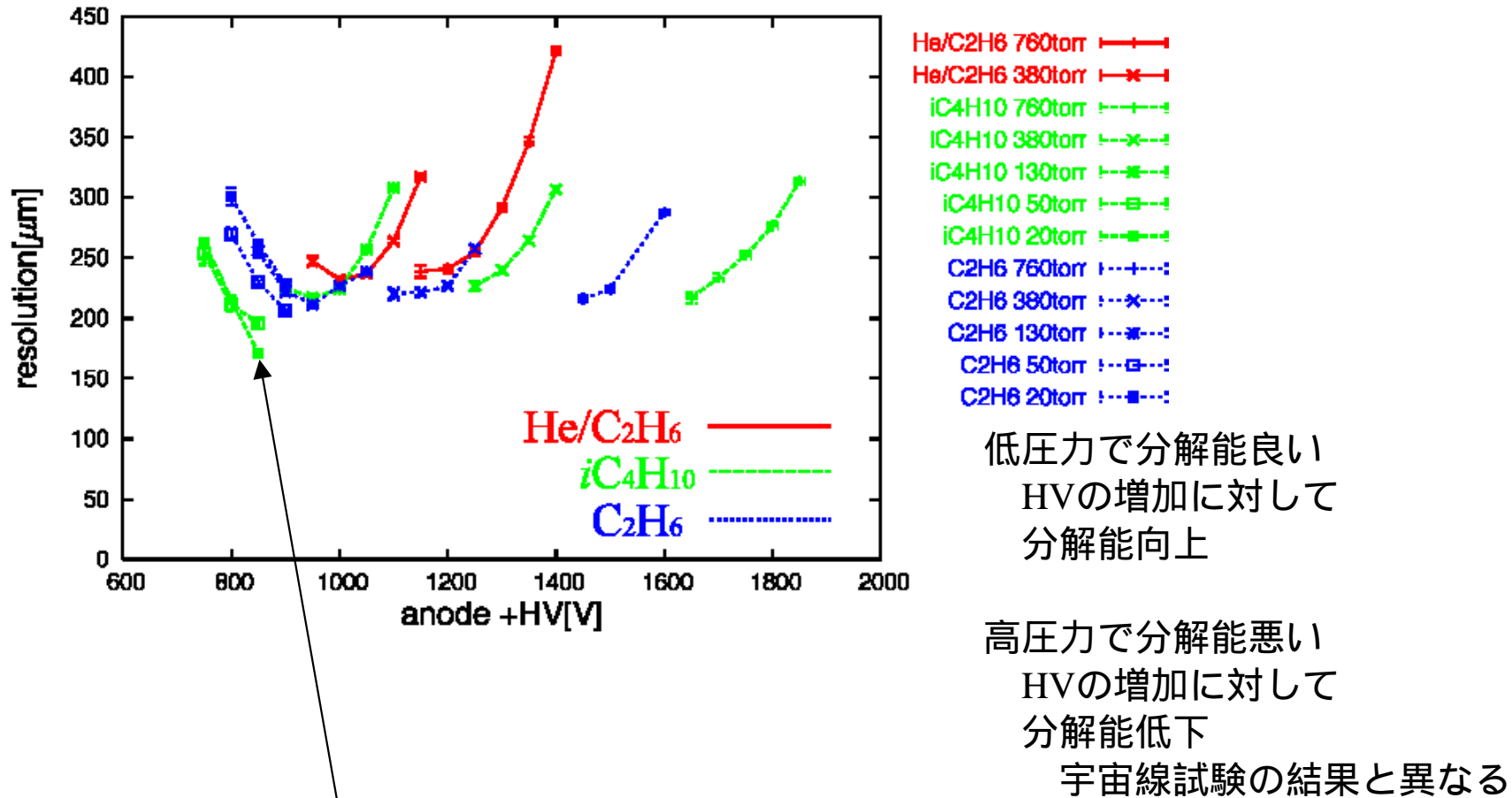
- ECL読み
- Pedestal subtraction+Zero suppression(閾値 3)

^{40}Ar に対する検出効率：HV、 P 依存性



- p.d. は全ての圧力で100%の検出効率を持つプラトーに到達
- 低圧力ではプラトー到達電圧が低くなる

^{40}Ar に対する位置分解能：HV、ガス、圧力依存性



測定点の中の最良値：

iC₄H₁₀、20 Torr、850 V 位置分解能 $K=171\pm1 \mu\text{m}$

まとめ

RIビーム（陽子を含む）を用いた実験で必要となる低物質質量位置検出器の開発

焦点面での位置測定によるビーム運動量決定 低圧力2 mm-MWPC

充填ガス：CH₄、C₂F₆、CF₄、C₃F₈を用いた場合の動作特性を調査

- C₂H₆は114 TorrでZ=1の最小電離粒子に対し100 %の検出効率で安定に動作
250 MeV陽子のdE/dxは最小電離の約2倍、Z>1ではdE/dx Z^2 となる為
問題無く動作すると予想
- 190 Torrでは多重度、時間分布とも*i*C₄H₁₀の動作特性とほぼ同じ
- CH₄、CF₄：190 Torr以下では不安定
- C₃F₈：検出効率が低い

円筒形比例計数管を用いたガス増幅率測定

- C₂H₆の第一タウンゼント係数を調査
- MWPCにC₂H₆を用いた場合の動作電圧圧力依存性を説明できた

標的前後でのビーム角度の高精度測定 低圧力カソード読出型DC

宇宙線試験（大気圧）

- He/C₂H₆ 760 Torrで0°入射の宇宙線に対し位置分解能107 μm
- 5°入射の宇宙線に対し位置分解能153 μm

Arビーム試験（大気圧～低圧）

- *i*C₄H₁₀ 20 Torrで0°入射の290 MeV/A ⁴⁰Arビームに対し位置分解能171 μm
充分な低物質質量と200 μm程度の位置分解能を達成