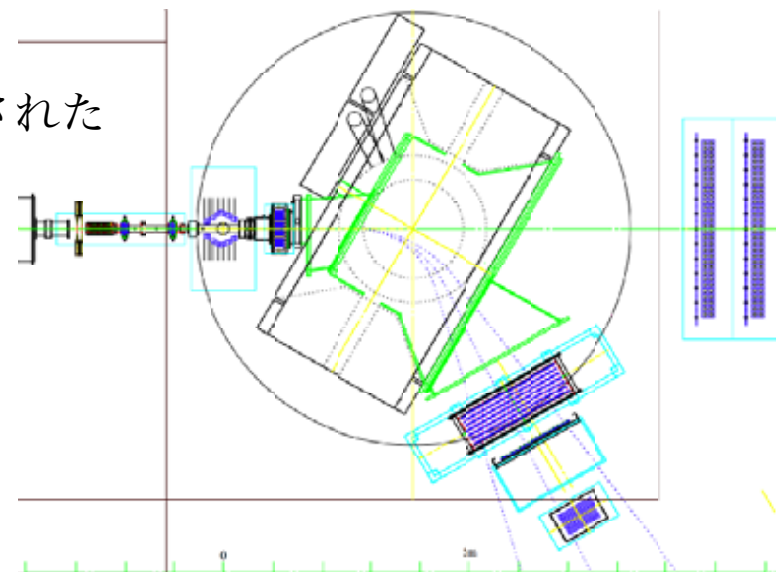


# 重RIビーム粒子識別用検出器のビーム試験 2013年度

東北大: 小林俊雄、千賀信幸、田高義  
理研 : 大津秀暁、清水洋平  
放医研: 高田栄一

## 2011-2013年度

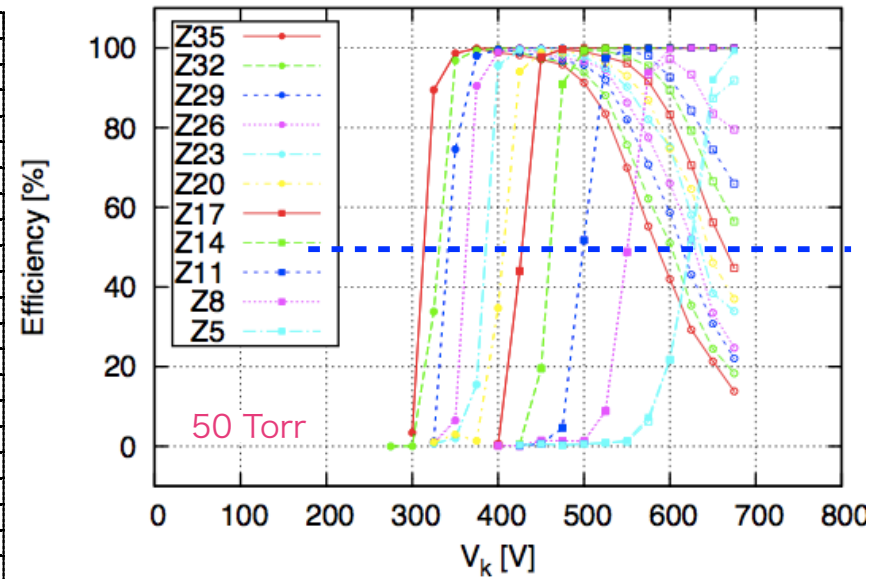
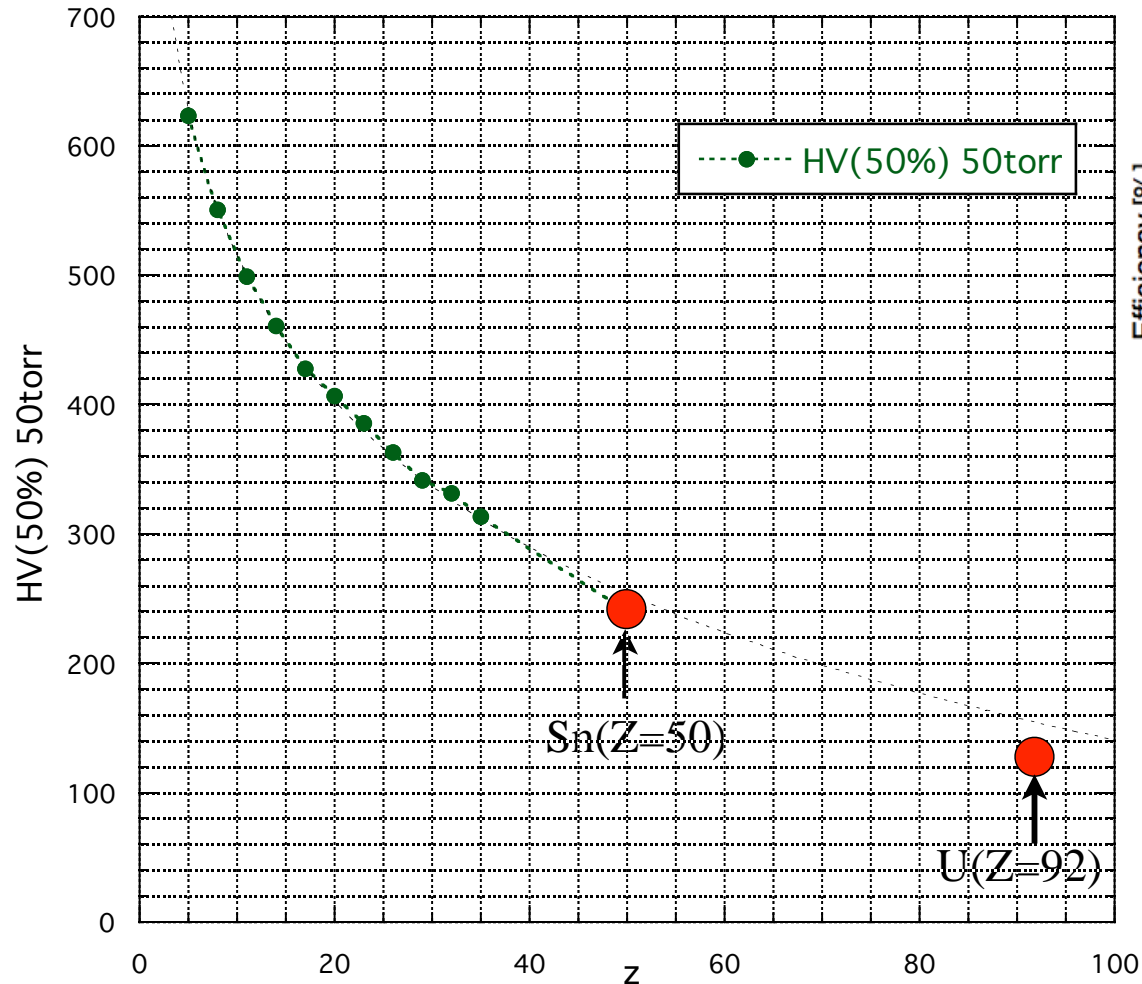
- RIBF SAMURAI Spectrometerに用いる各種検出器の開発/ビーム試験を行ってきた
  - HIMACとエネルギー/質量領域が重複している： 200-300 MeV/A
  - 殆どの検出器は、試作機や実機がHIMACで試験された
    - $Z \leq 36$  での系統的なデータを取得
  - 2012年春に基本部分が完成し、基本性能が確認された
  - これまで6つの物理実験に用いられた。
    - 広範囲のビームに対する動作の最適化
    - $Z \leq 36 \rightarrow Z = 50, 92$ への外挿/予想に非常に有用



- 今年度： 初期計画の残りである2種類の検出器実機の試験を行った
  - 陽子用大型位置検出器 : 陽子ビーム
    - 11月20-21日： 2晩
  - 重破碎片用全エネルギー検出器 :  $^{84}\text{Kr}$ からの2次ビーム：
    - 1月 7- 9日： 3晩
    - 2月25-27日： 3晩

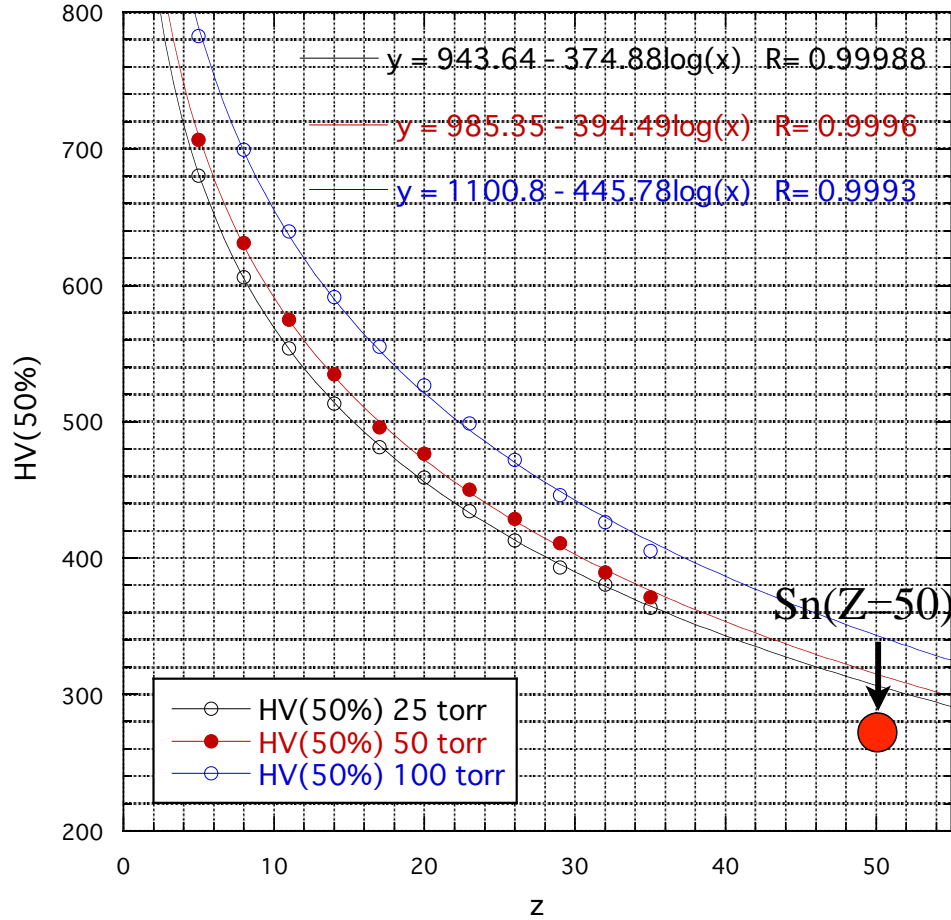
# これまでの系統的データと最適動作点の外挿

- Beam Drift Chamber (BDC) :  $p=50$  torr,  $V_{th}=0.4V$

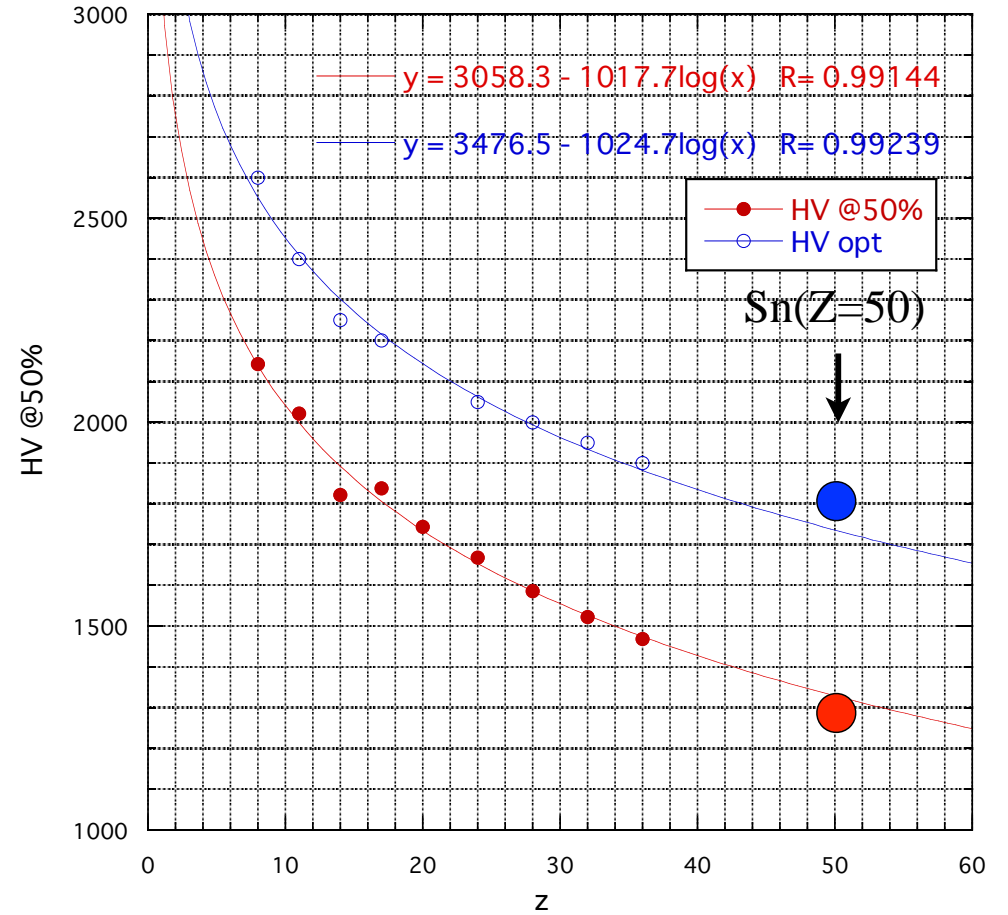


# 動作点の外挿

## • Forward Drift Chamber 1 (FDC1): 50 torr

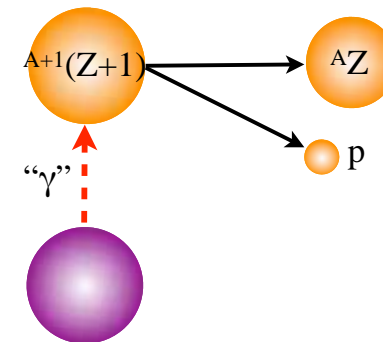


## • Forward Drift Chamber 2 (FDC2)

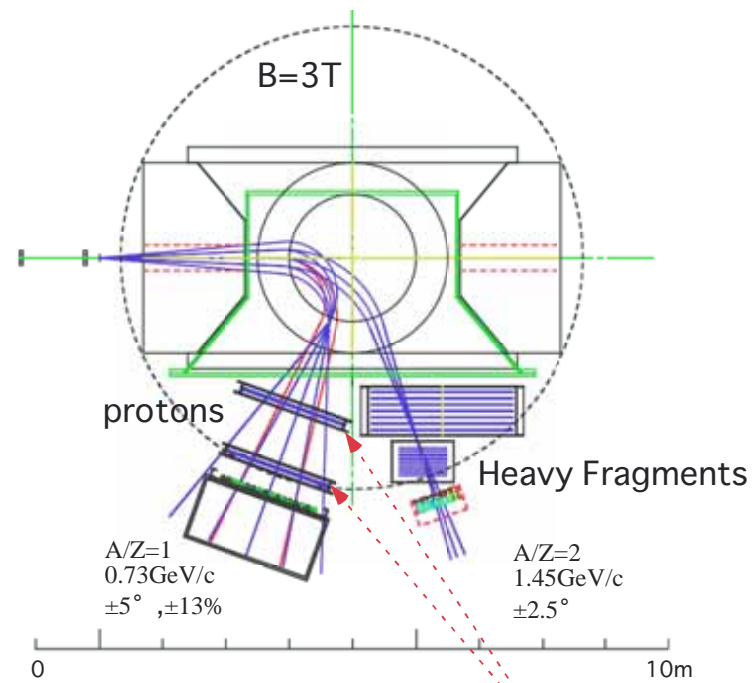


# 初期計画に含まれる検出器の残り部分- 1 : Proton Drift Chamber (PDC)

- $(\gamma, p)$ 型クーロン分解反応実験に用いる陽子用大型位置検出器, Proton drift chamber (PDC)
  - 恒星内での低エネルギー陽子の  $(p, \gamma)$  放射捕獲反応の逆反応
    - detailed balanceにより 2 過程の断面積が関係する
  - 重標的 (Pb, 仮想光子) を用いたクーロン分解反応
    - $\gamma + A \rightarrow A^* \rightarrow (A-1) + p$  反応の不変質量の測定
      - 重破碎片(A-1)と陽子(p)のエネルギー／運動量測定が必要
      - 崩壊後、陽子は広い運動量／角度に広がるので大きな位置検出器が必要



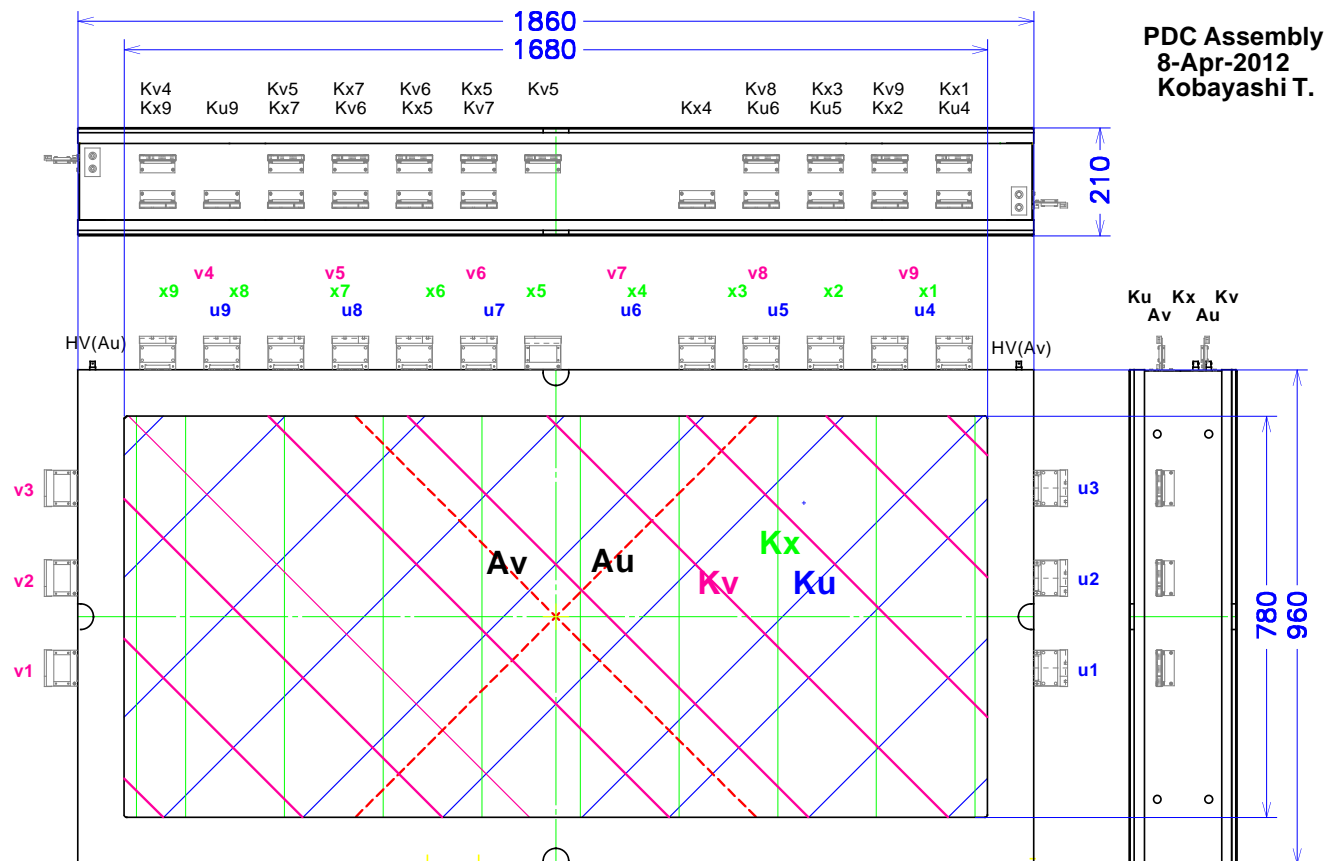
$$\Delta p/p < \pm 13\%, \theta < \pm 6^\circ @ E_{rel} = 3 MeV$$



Proton Drift Chamber (PDC)

# Proton Drift Chamber (PDC)

- 目的 : projectile-rapidity protonの運動量解析
  - 2台構成 : 2つの位置 (ベクトル) 情報 :  $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$
  - multi track用に  $u, v + x$
- 有効領域 : 1.7 m (H) x 0.8 m (V)
- Cathode読出 : Ku1, Kx1, Kv1, Ku2, Kx2, Kv2, ~820 channels
- Gas : He+60% CH<sub>4</sub> or P10 (Ar+10%CH<sub>4</sub>)



## PDC Parameters

- アノード

- Walenta-type drift chamber

- drift distance= 8mm
- half gap= 8mm

- wire

- anode : 30 $\mu$ m $\phi$  Au-W/Re (+HV)
- potential : 80 $\mu$ m $\phi$  Au-Al (-HV)

- カソード

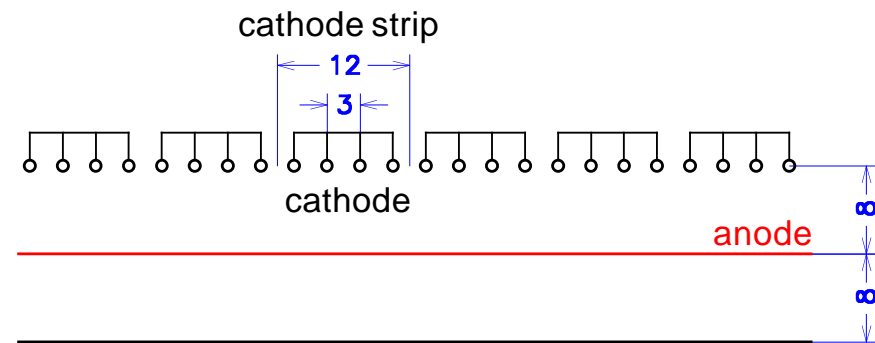
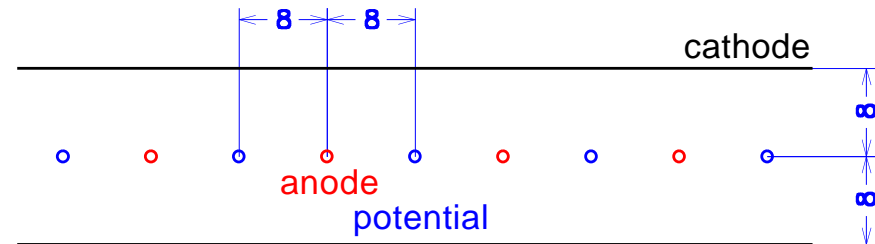
- wire : 80 $\mu$ m $\phi$  Au-Al (ground level)
  - wire pitch= 3mm
  - strip pitch= 12mm (4 wires)

- 配置 :

- Ku(+45°)-Av(-45°)-Kx(0°)-Au(+45°)-Kv(-45°)
- for 2-dim. information + multi-particle capability

- 読出

- cathode readout : DC coupled
- 136 (144) ch / plane  $\rightarrow$  816 (864) ch / 2 PDC's
  - ASD (16ch x 54 modules)
  - ASD-PS (10ch x 6 modules)

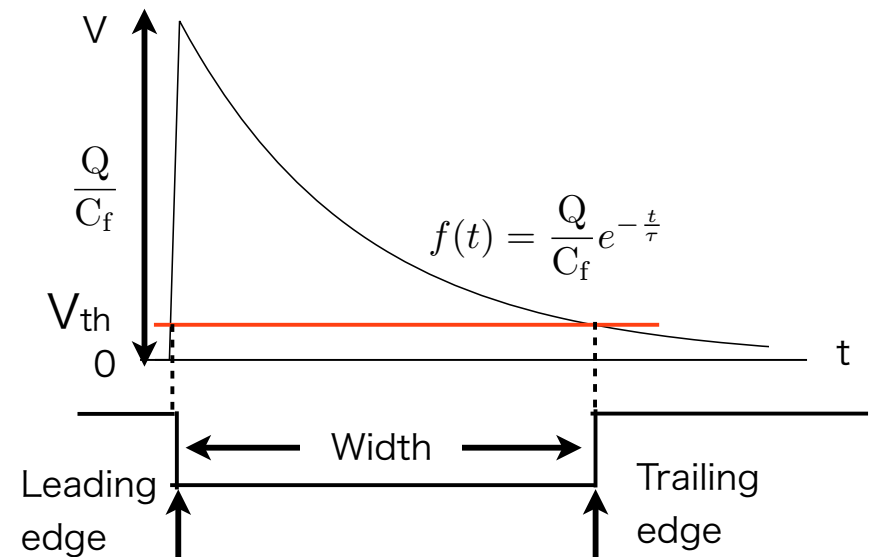
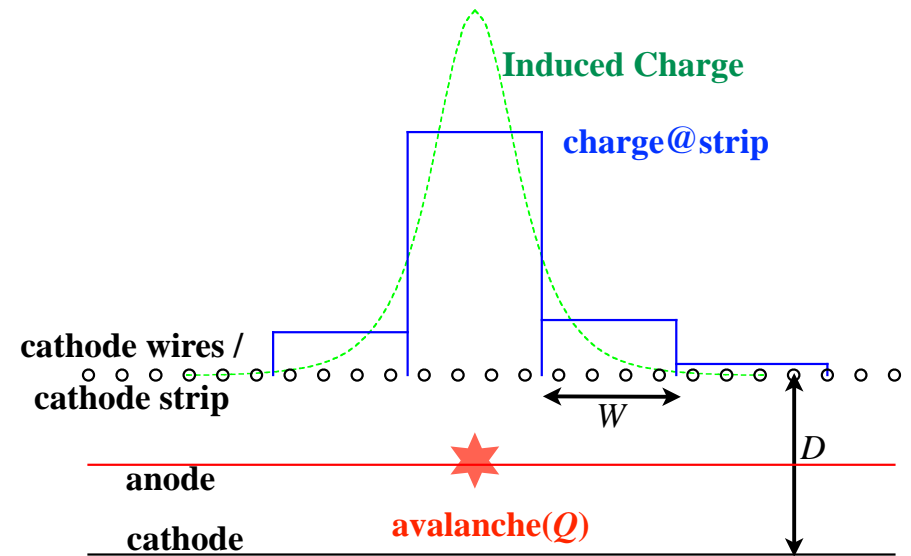


# Cathode 読出

- 通過粒子の位置決定
  - 2面のみで2次元位置情報が得られる
  - stripでの誘起電荷分布 → avalanche位置
  - 1000ch規模のアナログ読出が必要
    - 通常の方法
      - charge-sensitive PreAmp + Amp/Shaper + Peak-sensitive ADC
    - 電荷分割法
      - $\sigma \sim 1 \text{ mm}$
      - 2粒子分離が悪い



- “デジタル”読出
  - ASD discriminator (time over threshold) + TDC (width encoding)
  - logic signal width ( $w$ ) → charge  $Q$ 
    - $Q \approx C_f V_{th} \exp(w/\tau)$   $\tau = 80\text{nsec}$
  - drift time 情報も得られる





# 位置の決定方法

- 誘起電荷分布

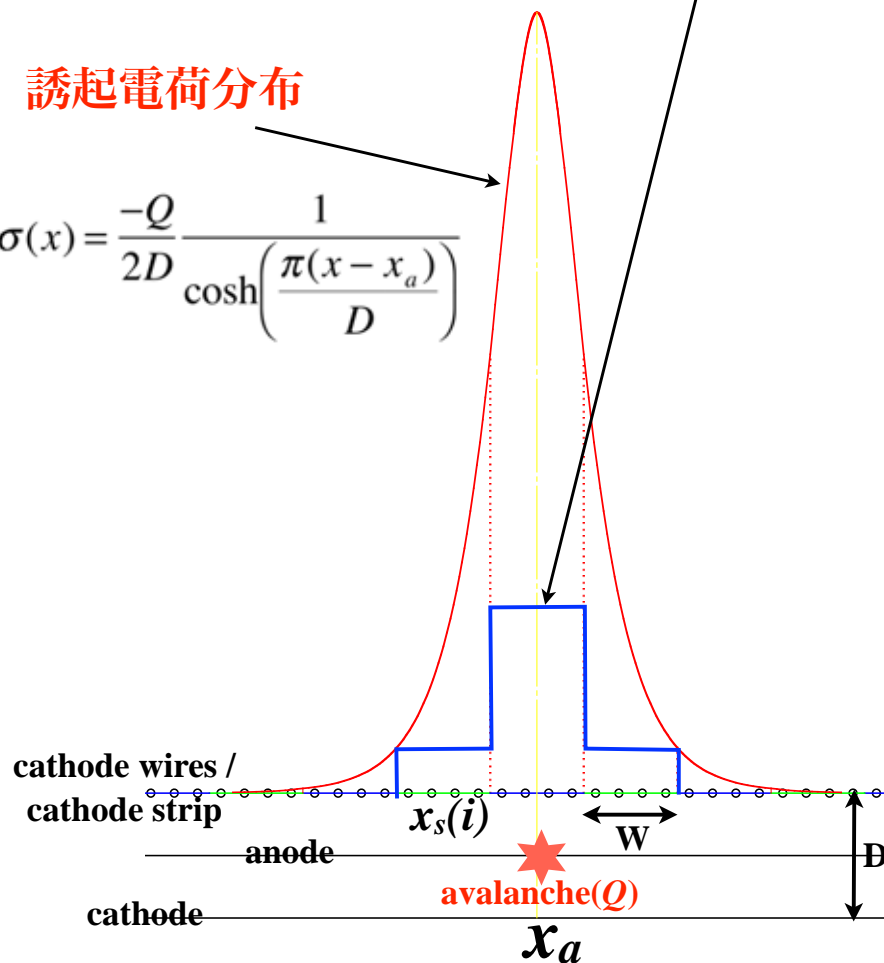
## strip上の電荷

$$q_i(x_s(i)) = \frac{-Q}{\pi} \left[ \tan^{-1}\left(e^{\frac{\pi(X+W/2)}{D}}\right) - \tan^{-1}\left(e^{\frac{\pi(X-W/2)}{D}}\right) \right]$$

$$X \equiv x_s(i) - x_a$$

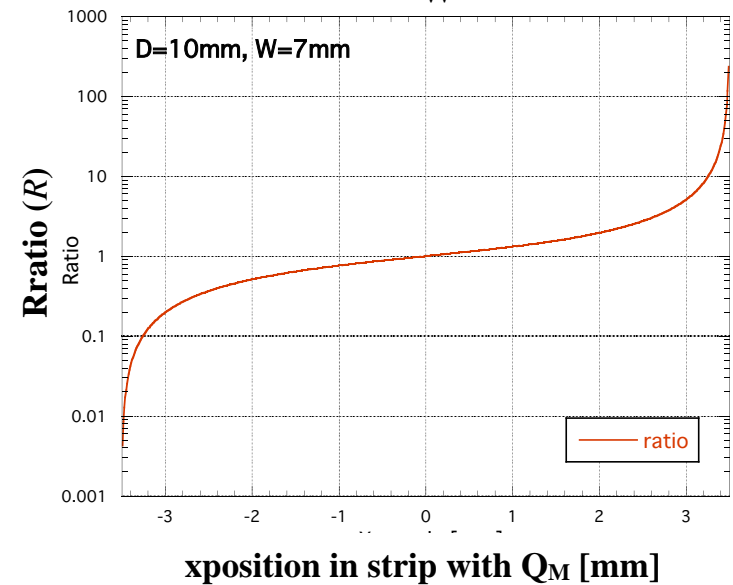
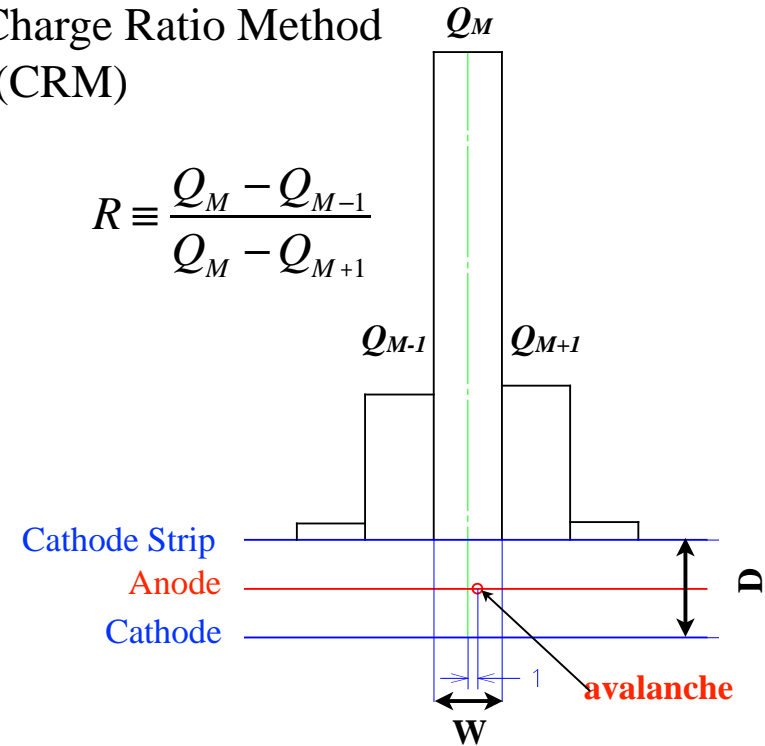
## 誘起電荷分布

$$\sigma(x) = \frac{-Q}{2D} \frac{1}{\cosh\left(\frac{\pi(x-x_a)}{D}\right)}$$



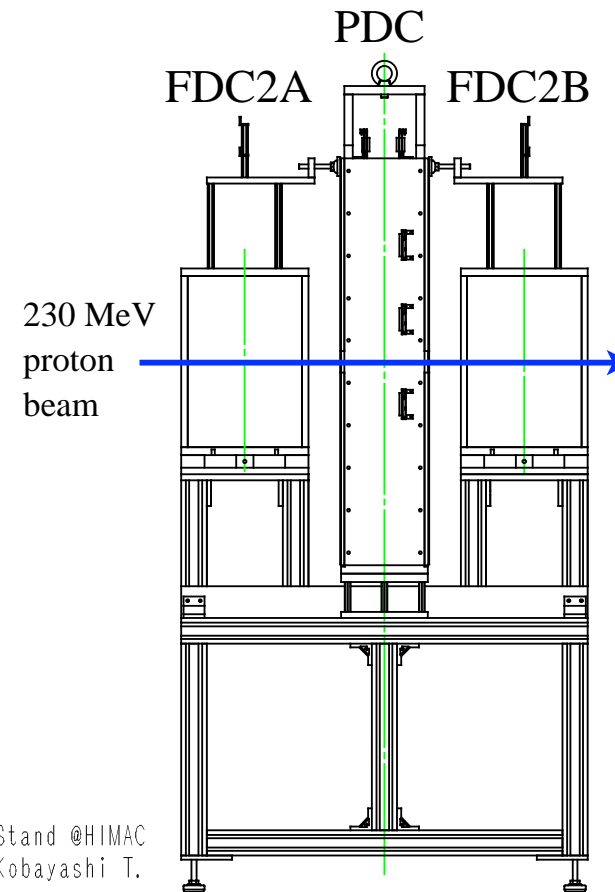
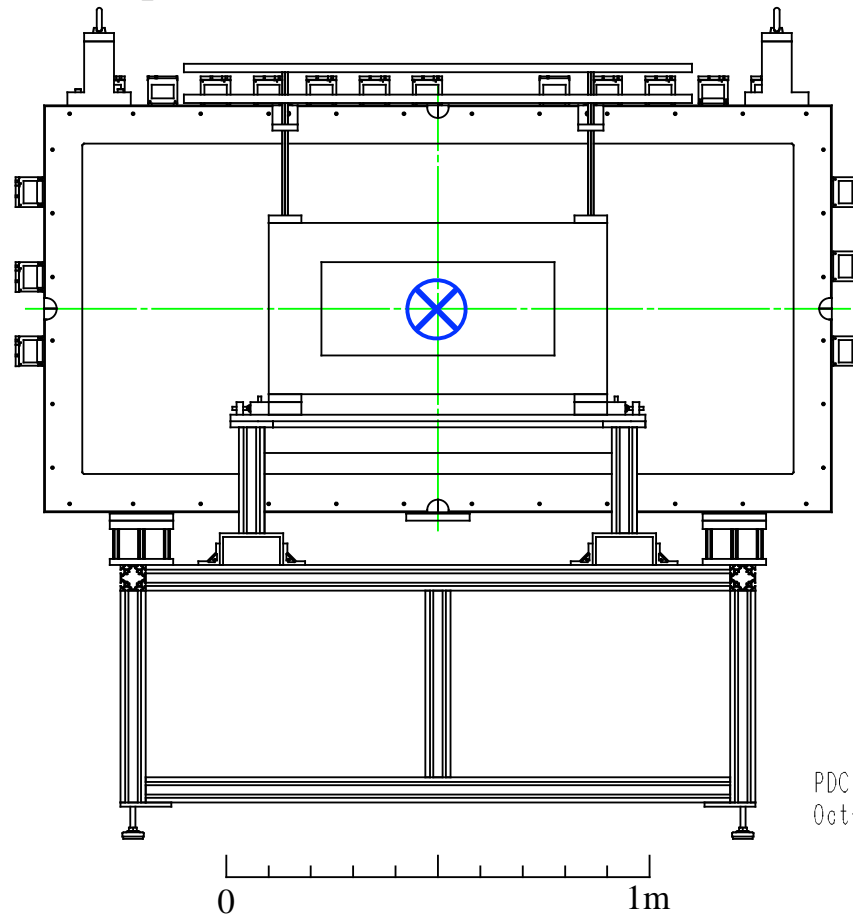
- Charge Ratio Method (CRM)

$$R \equiv \frac{Q_M - Q_{M-1}}{Q_M - Q_{M+1}}$$



# Test @ HIMAC, 230 MeV proton beam

## • Test Setup



PDC Test Stand @HIMAC  
Oct-2013 Kobayashi T.

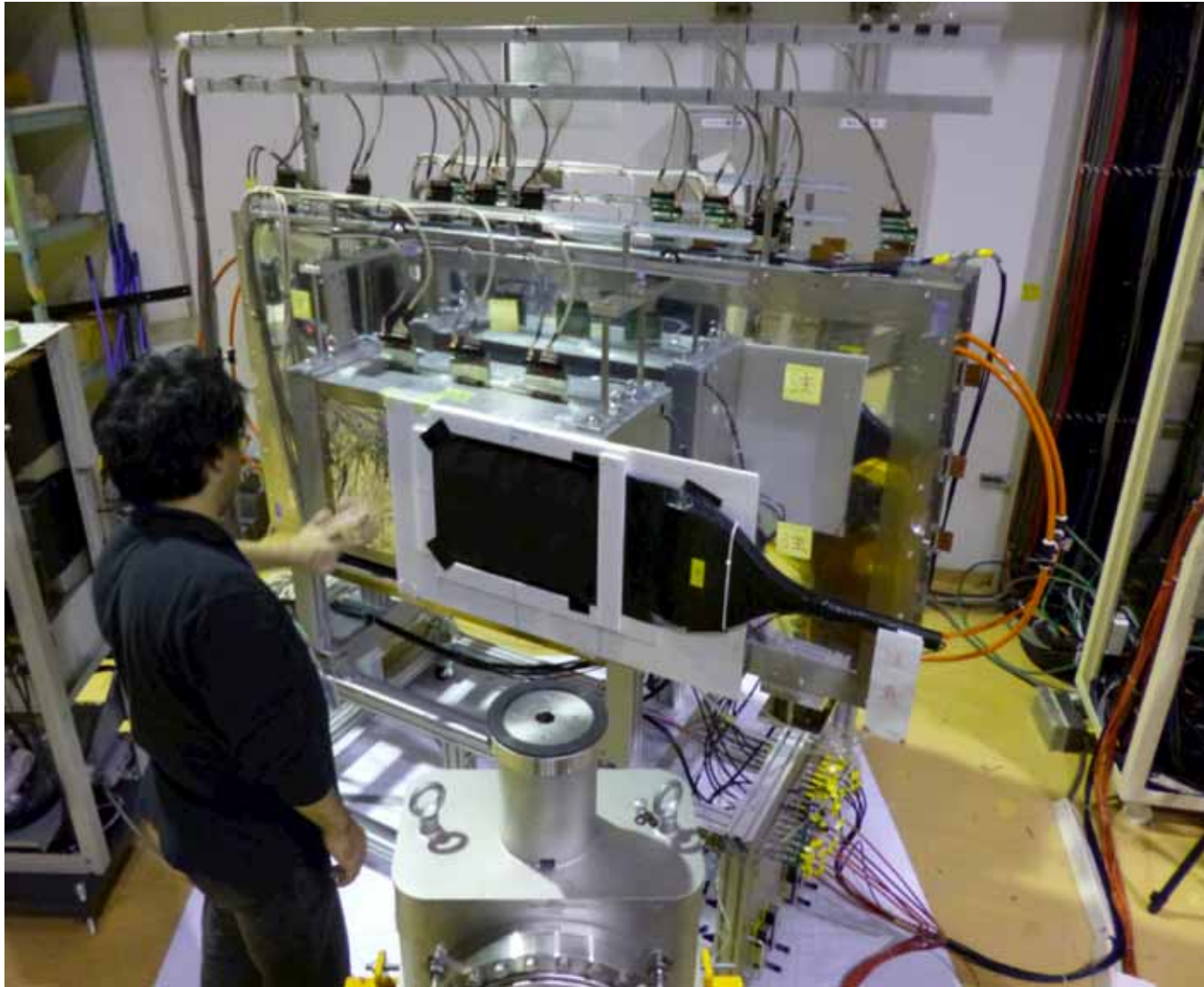
- 検出効率 : HV-依存性
  - 閾値  $V_{th} = +0.8V$  (fixed)
- 位置分解能
  - HV-依存性
  - 入射角度-依存性

- FDC2 : x-y-x'-y'-x'-y'-x-y
  - drift chamber with field shaping
  - drift length=25mm
  - $\sigma < 100 \mu\text{m}$
- PDC : u-x-v, 64 strips/plane
- Gas : He+60%CH<sub>4</sub>

## 実験Setup

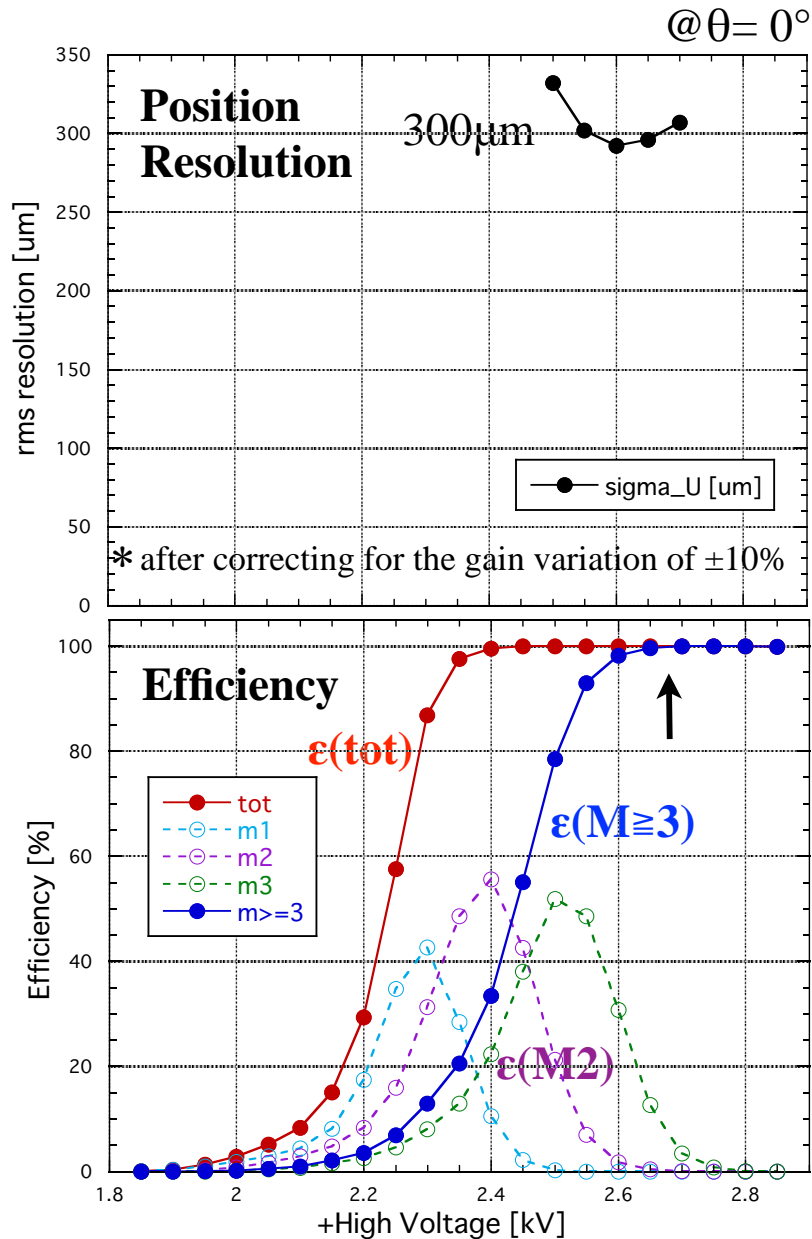
---

- 角度依存性の測定



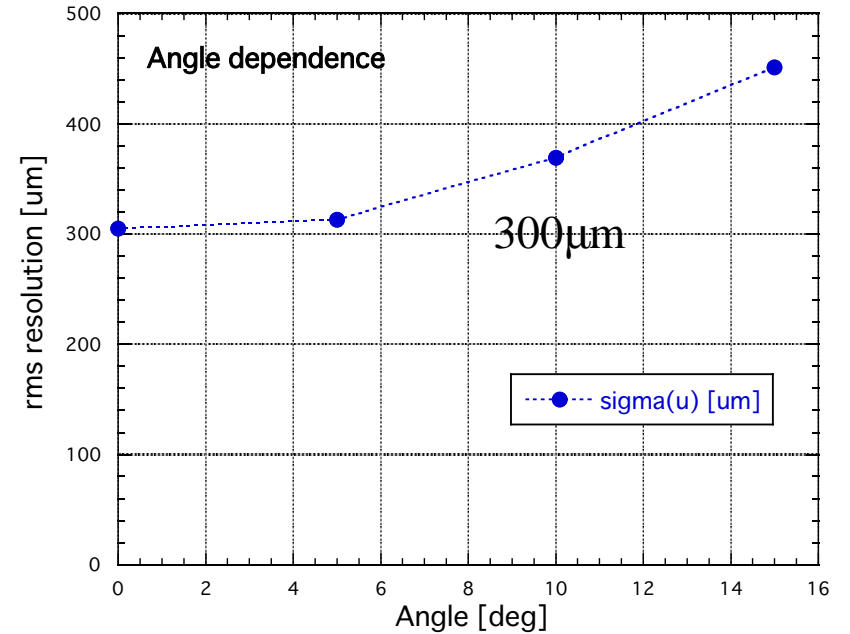
# 230 MeV protonに対する動作特性

- 検出効率、位置分解能



- 入射角度依存性

@+2.70 kV



- 安定したプラトーを持つ

- 位置分解能

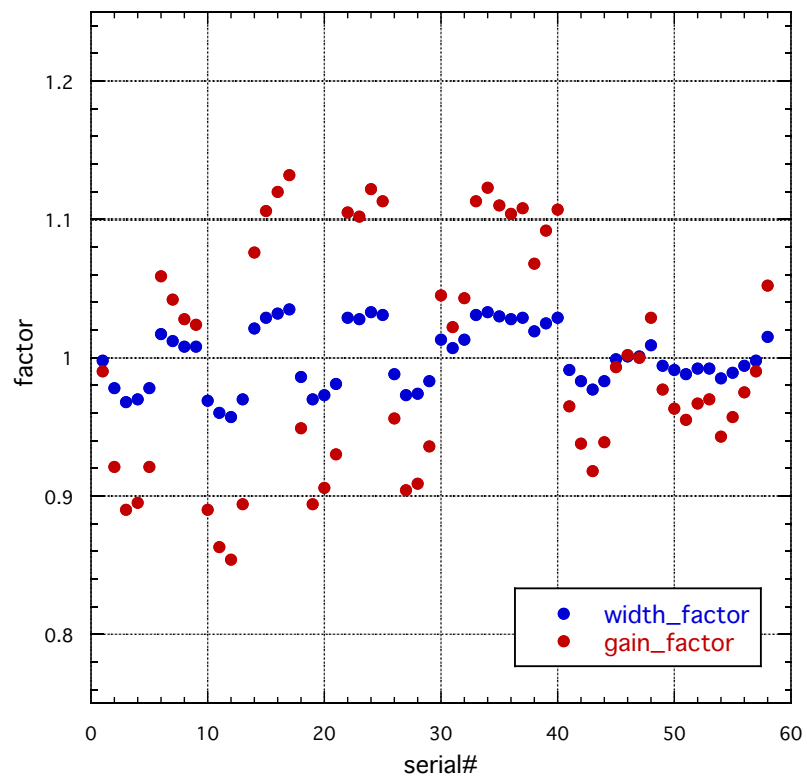
- $\sigma \sim 300 \mu\text{m}$  @  $0^\circ$  by adjusting  $D_{\text{eff}}$
- $\sigma \sim 450 \mu\text{m}$  @  $15^\circ$ , 大きな角度依存性

avalanche : point  $\rightarrow$  distributed

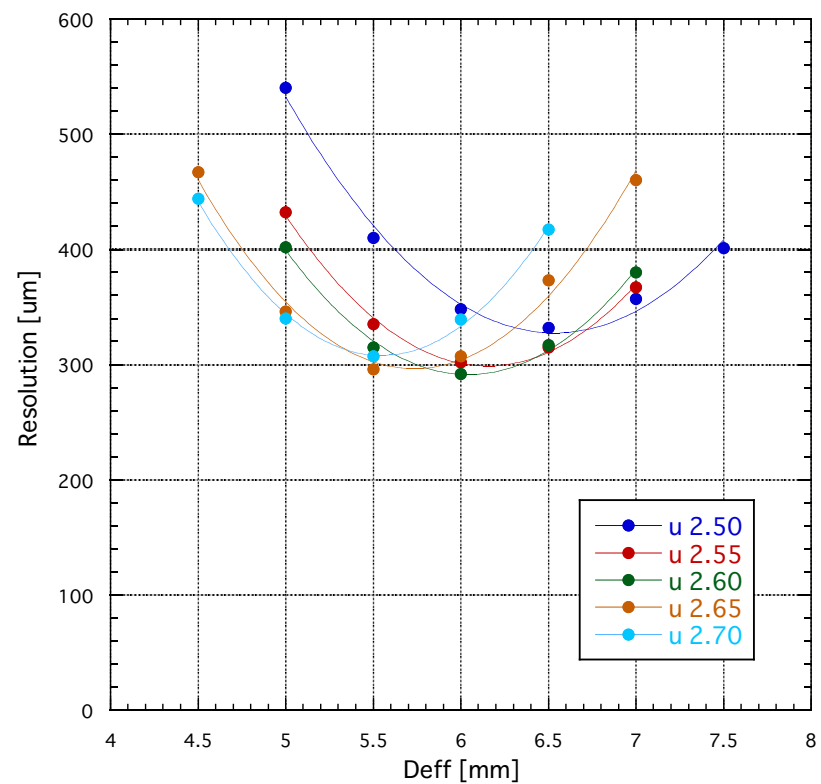
- uniformity (?)

# 補正

- ASDのgain variation : 約±10%を補正

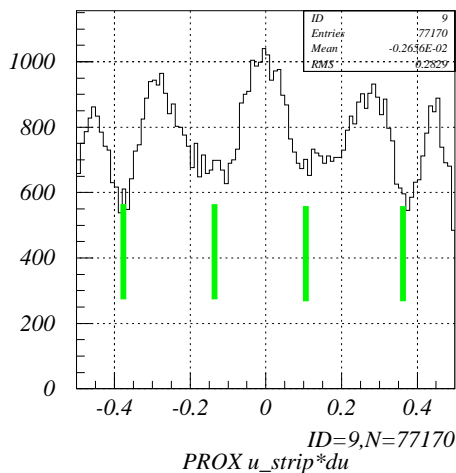
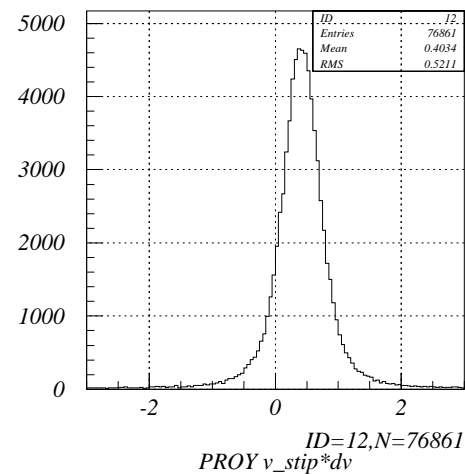
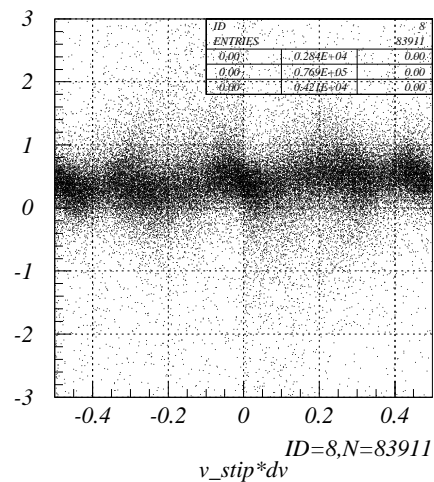
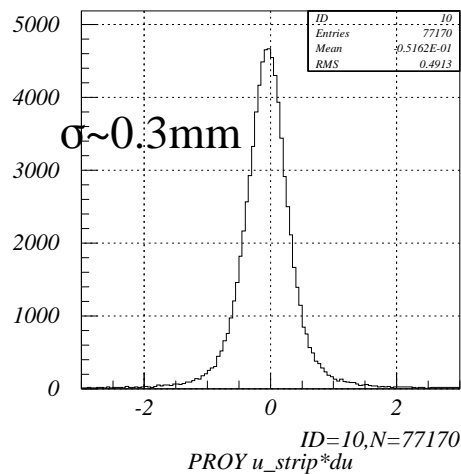
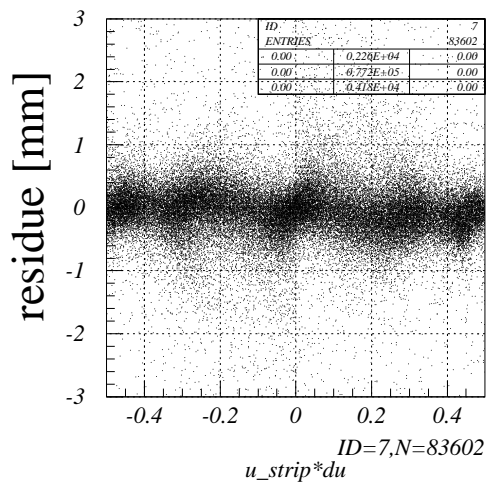


- 有効gap ( $D_{\text{eff}}$ ) 最適化

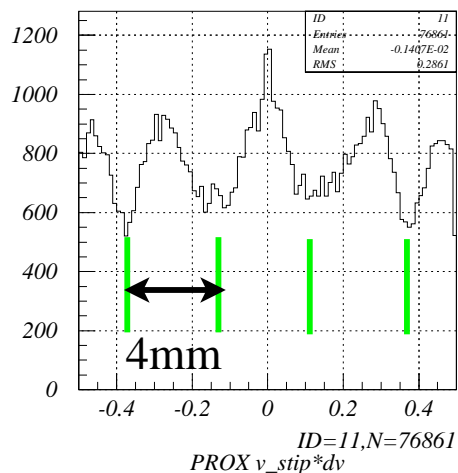


# 一様性(?)

- Cathode wire structure (4 wires/strip) ? @2.6 kV



u-plane



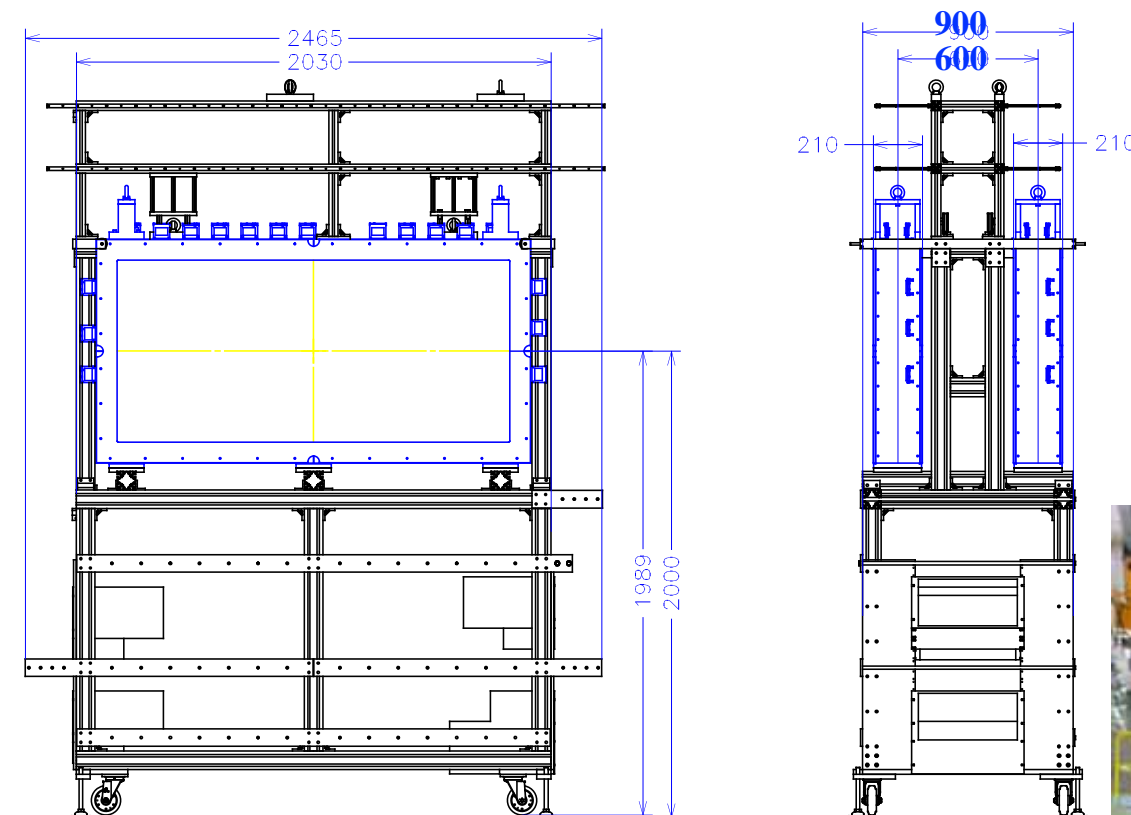
v-plane

$X_{\text{norm}} (\text{strip})$



## SAMURAIへの設置： 2014年2月

- Detector stand & 2 PDC's



- on siteで試験中
- 問題点／改善点など
  - ASD thresholdをさらに低く (ノイズ低減)
  - 角度依存性 (avalanche distribution)
  - 一様性 ( $D_{\text{eff}}$ ?)



## 初期計画に含まれる検出器の残り部分-2： Total Energy Detector (TED)

- 重破断片の粒子識別

- $(A, Z) \leftarrow (\text{エネルギー損失 } \Delta E, \text{磁気剛性 } R=p/Z, \text{速度 } \beta)$  又は

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Z}{Z}\right)^2 + \left(\gamma^2 \frac{\sigma_\beta}{\beta}\right)^2}$$

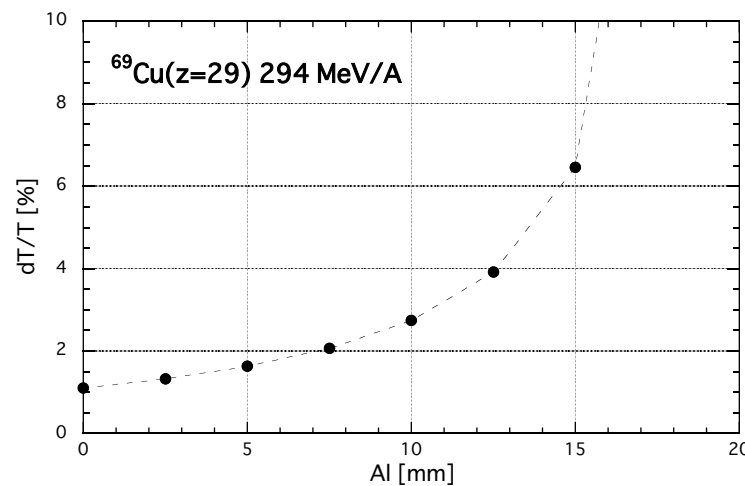
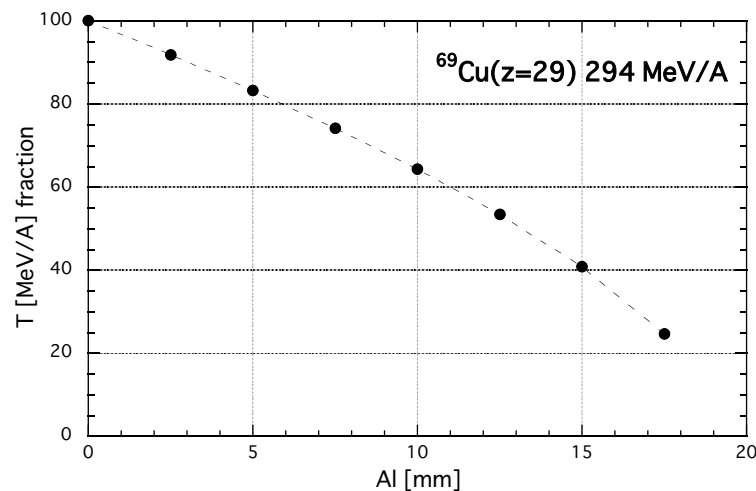
$\leftarrow (\text{エネルギー損失 } \Delta E, \text{磁気剛性 } R=p/Z, \text{全エネルギー } T)$

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{(\gamma+1)\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{(\gamma+1)\sigma_Z}{Z}\right)^2 + \left(\gamma \frac{\sigma_T}{T}\right)^2}$$

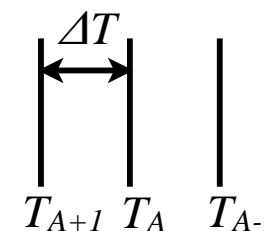
- $A=100, A/Z \sim 2.6, 250 \text{ MeV}/A$  で  $\sigma_A=0.2 \rightarrow \frac{\sigma_R}{R} \sim \frac{1}{1600} \quad \frac{\sigma_T}{T} \sim \frac{1}{900} \quad @T=25 \text{ GeV}$

- 全エネルギー 25 GeV に対し 0.1% のエネルギー分解能を得るのは難しい

- 同じ磁気剛性  $R$  (運動量解析) を持つ粒子をエネルギー損失させ、全エネルギー差を増加させて分離する方式を採用



$^{69\pm 1}\text{Cu} (Z=29)$   
294 MeV/A





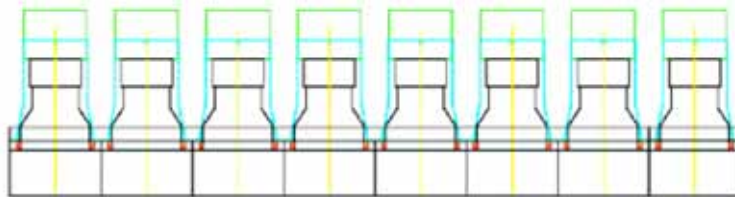
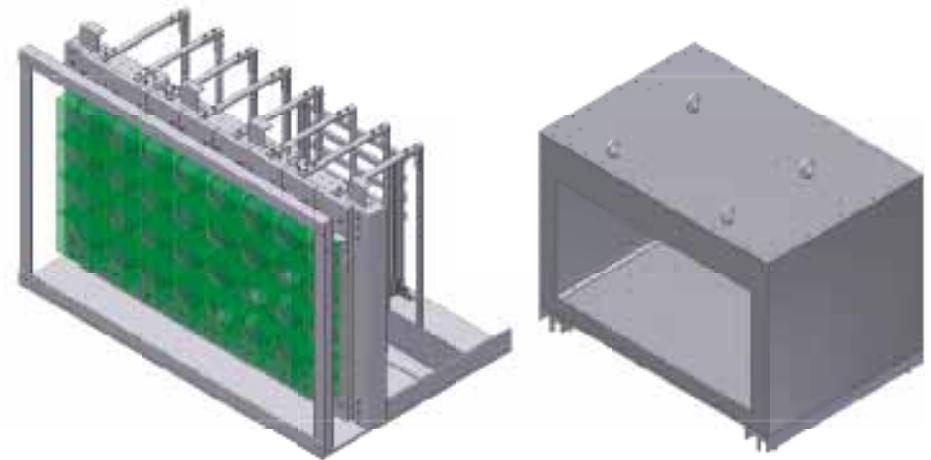
# 全エネルギー検出器 (Total Energy Detector, TED)

\* 目的 :  $\sigma_A \sim 0.2$  @  $A \sim 100$ ,  $E_{tot} = 25 \sim 30 \text{ GeV}$

\* 構成

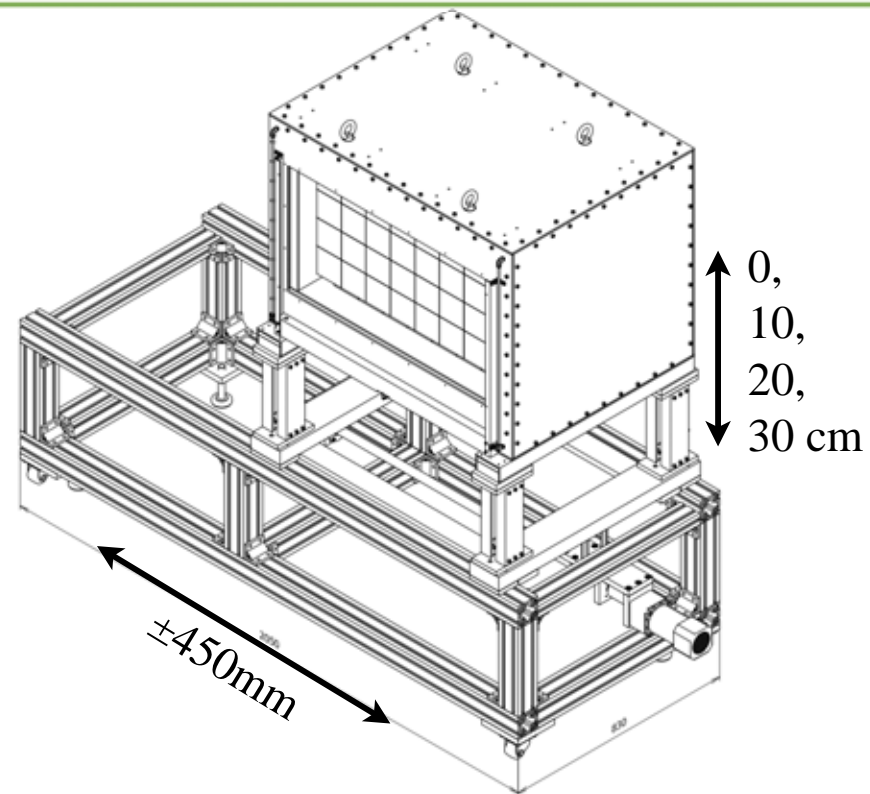
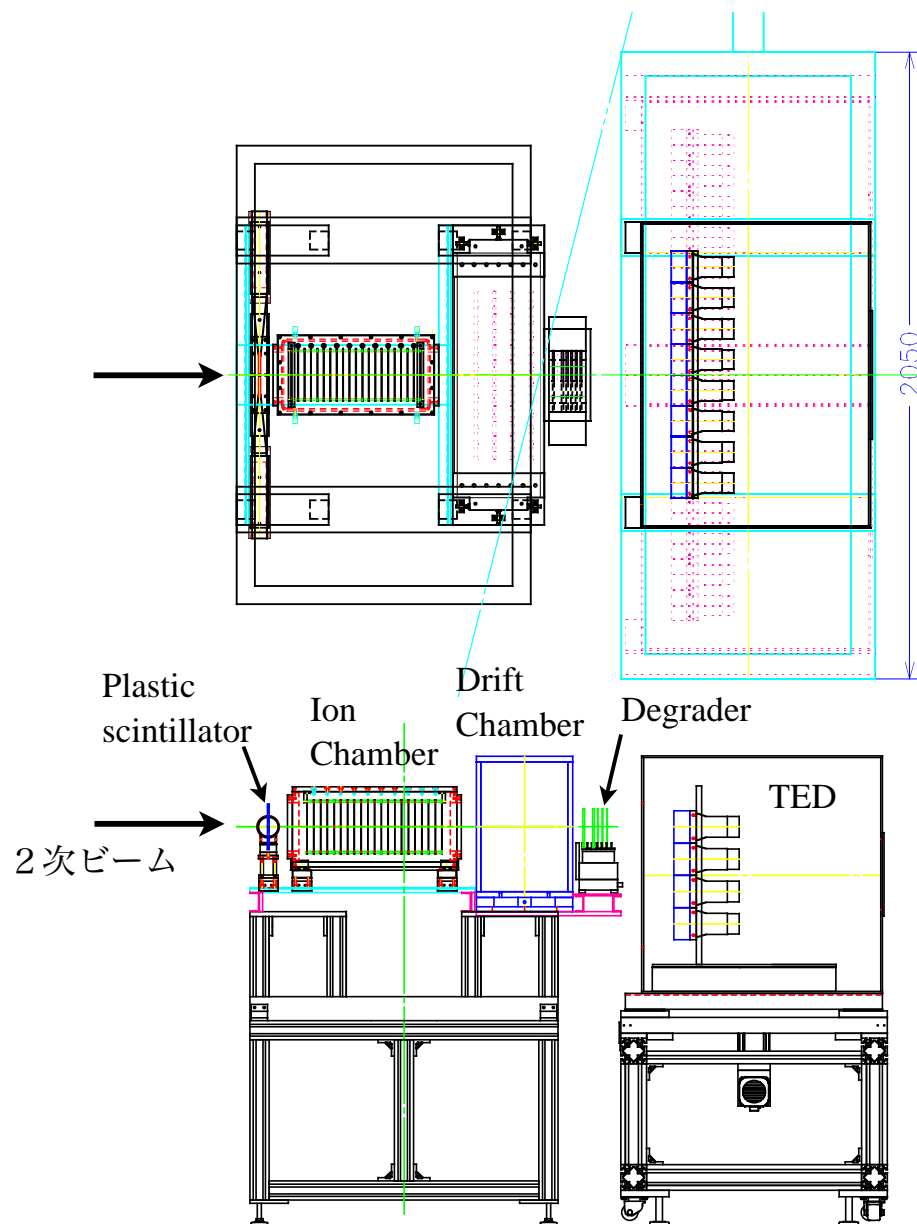
CsI(pure) :  $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3 \times 32$   
有効領域 :  $800 \text{ mm (H)} \times 400 \text{ mm (V)}$

PMT : R6233HA (3"φ)  
light / magnetic shield box 中



## 2次ビームを用いた試験

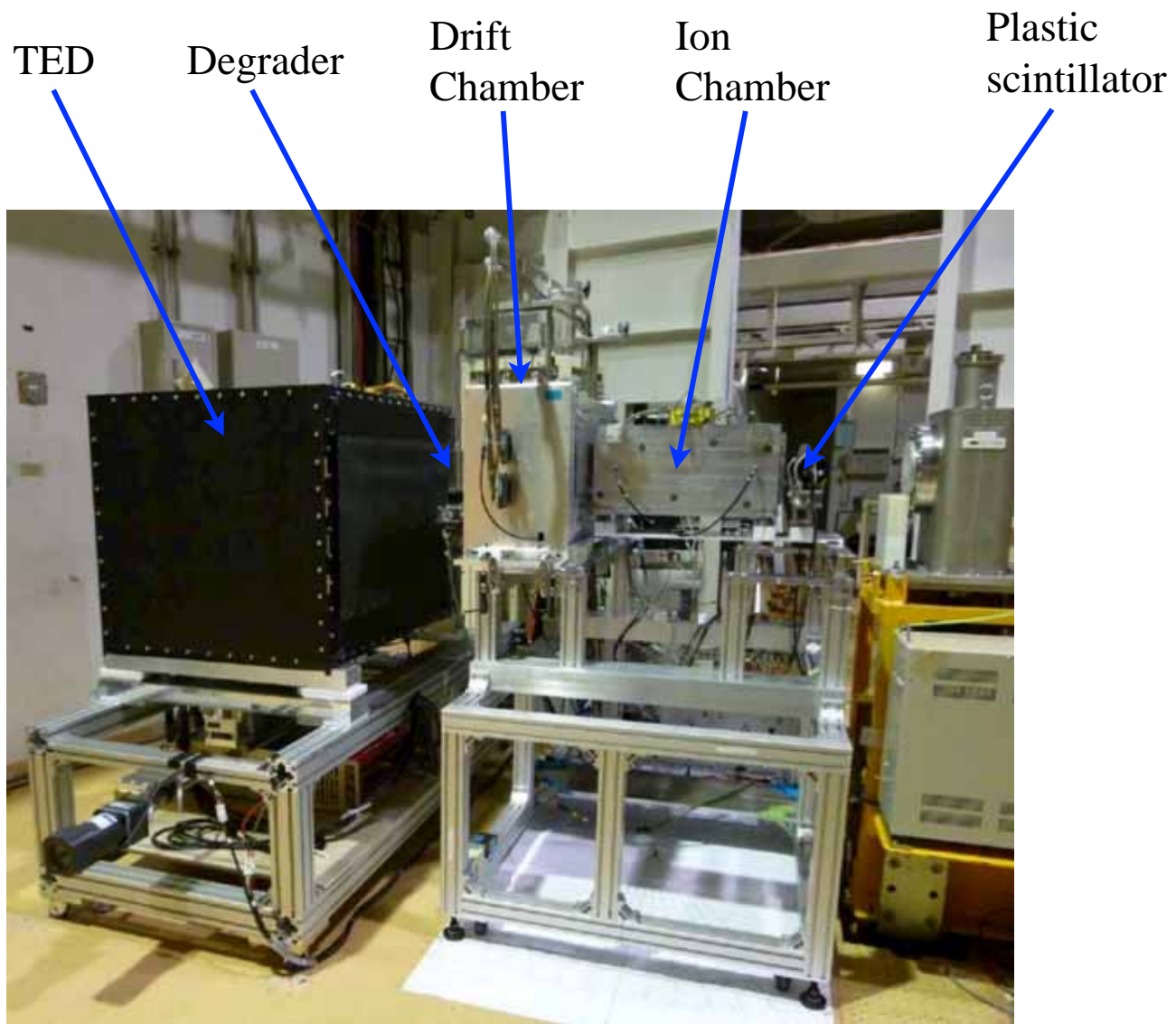
- Setup @SB2



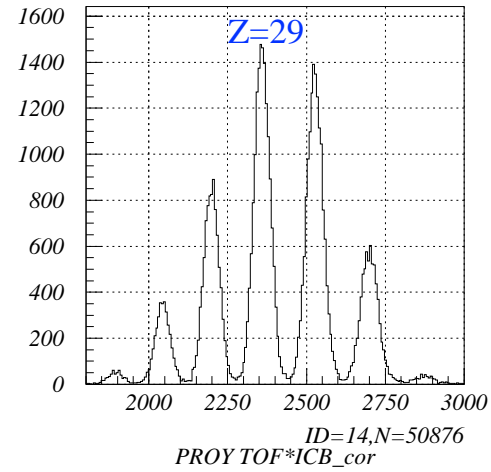
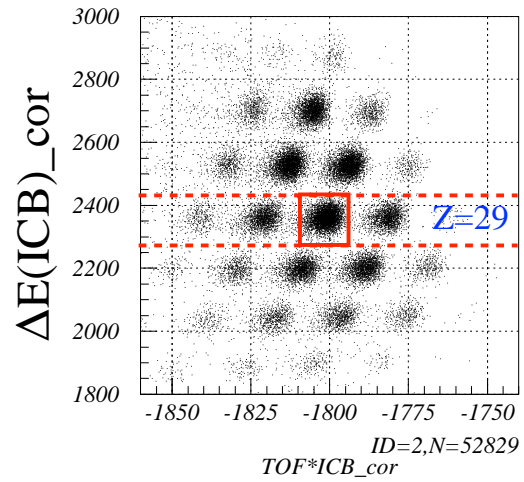
- 32個全ての結晶にビームを当て  
波高と位置依存性を調べる
- 1次ビーム : 400MeV/A  $^{84}\text{Kr}$
- 2次ビーム :  $\sim 290$  MeV/A,  $A \sim 70$

# Setup

- 実験setup

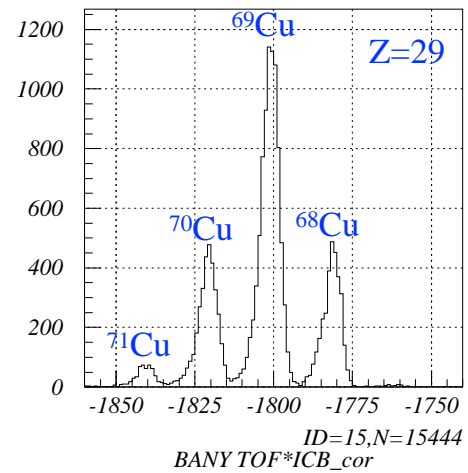


# 入射RIビームのPID



## • 2次ビームのPID

- F1 slit :  $\Delta p/p \sim \pm 0.5\%$
- TOF(F1-F3)
- Ion chamber ( $\Delta E$ )

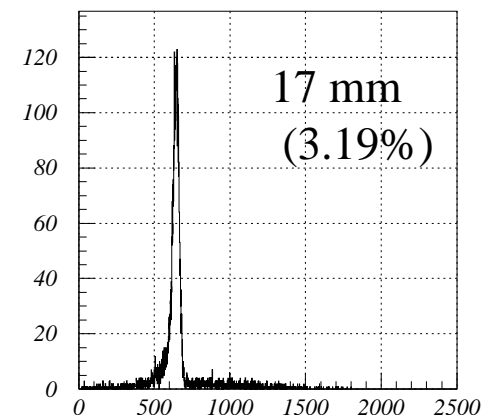
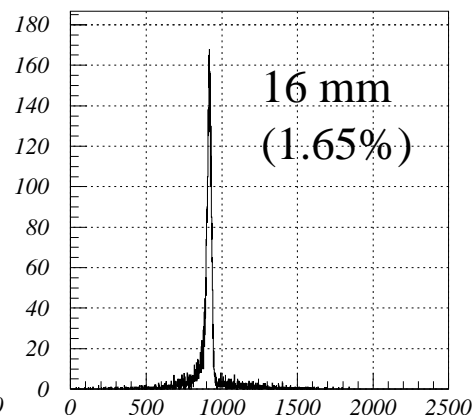
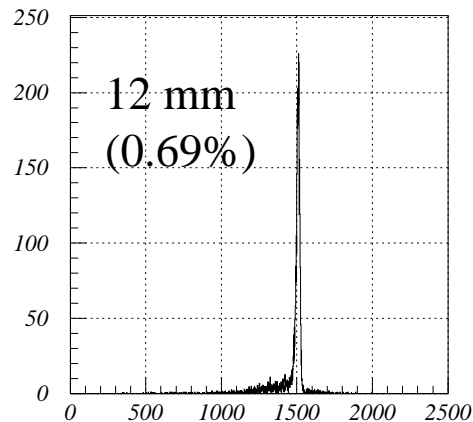
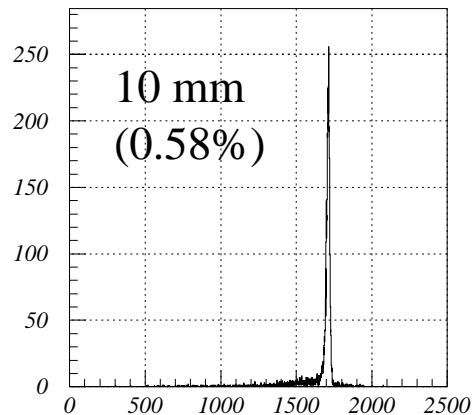
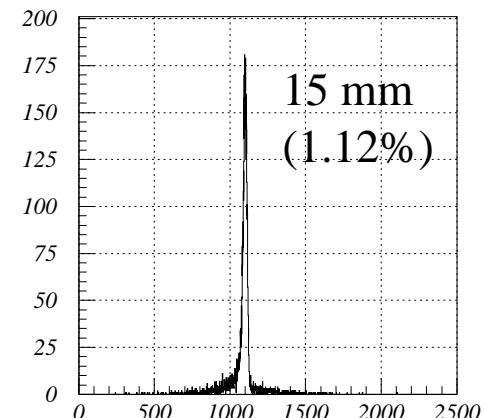
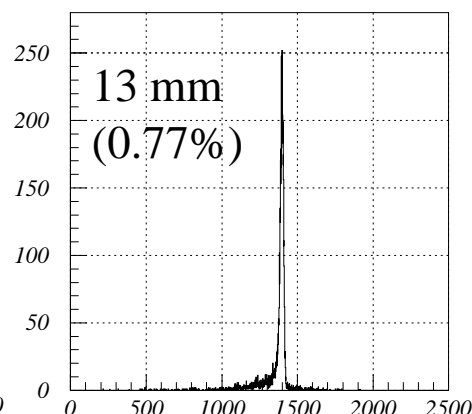
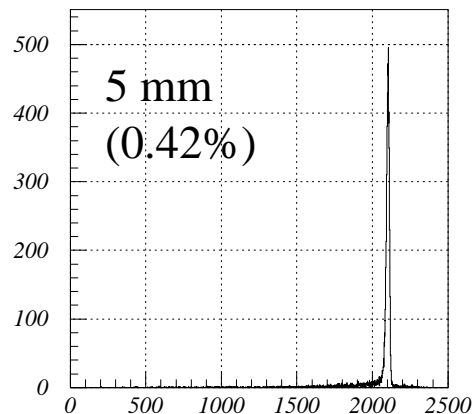
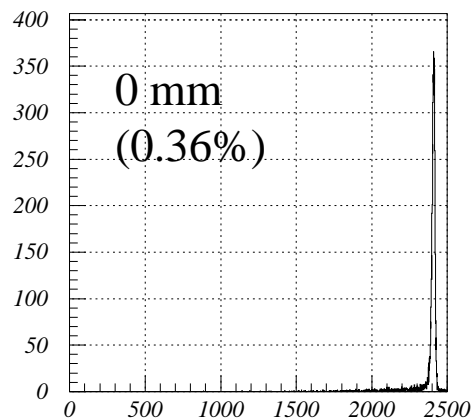


TOF(F1-F3)

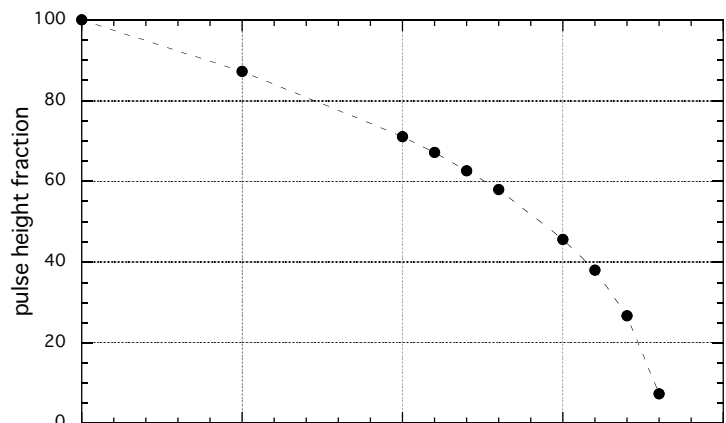
# ピーク位置： Degradер厚依存性（結晶中心）

●  $^{69}\text{Cu}$ (z=29) 294 MeV/A, Al=0~17mm

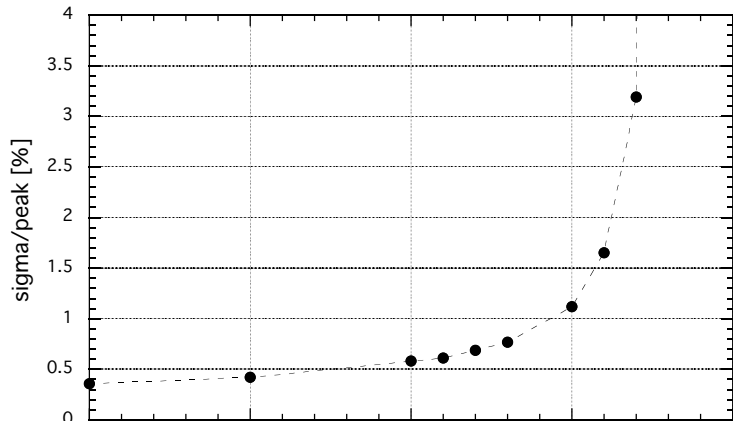
( $^{69}\text{Cu}$  resolution[%])



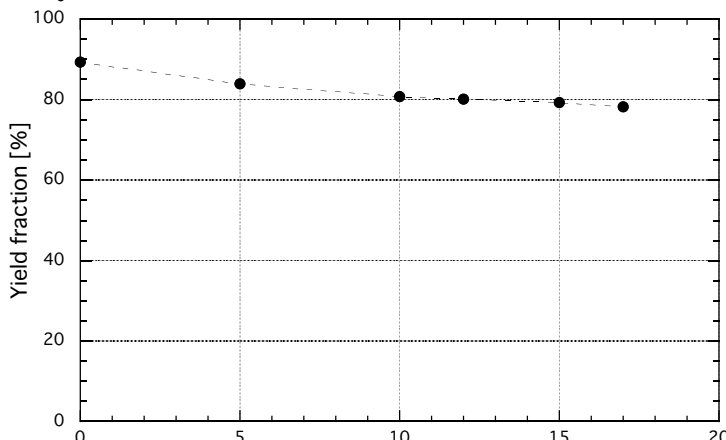
# ピーク位置： Degradation厚依存性（結晶中心）



pulse height ratio [%] for  $^{69}\text{Cu}$



rms resolution [%]



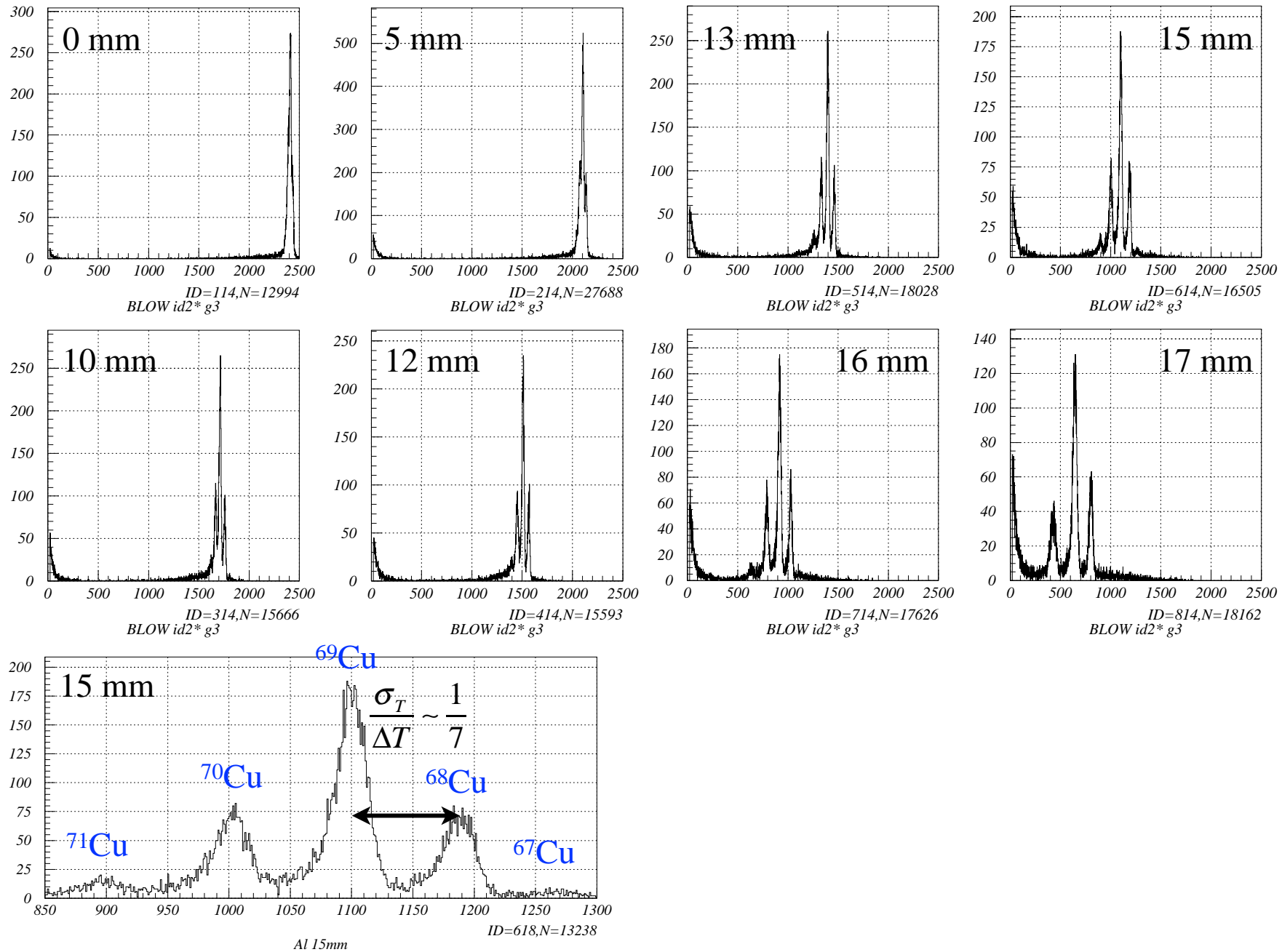
yield (reaction loss) [%]

Al thickness [mm] d [mm]



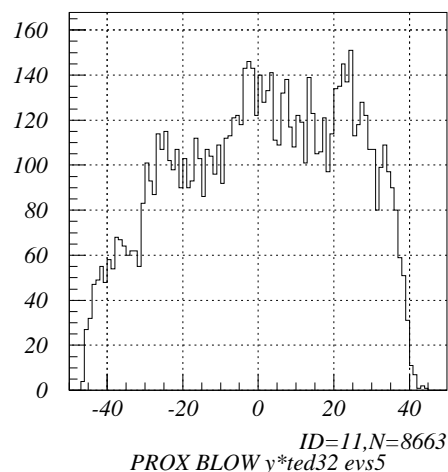
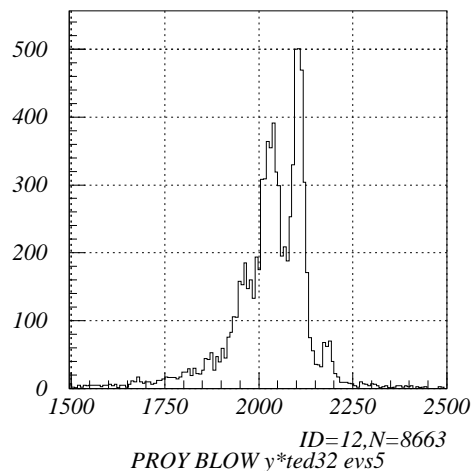
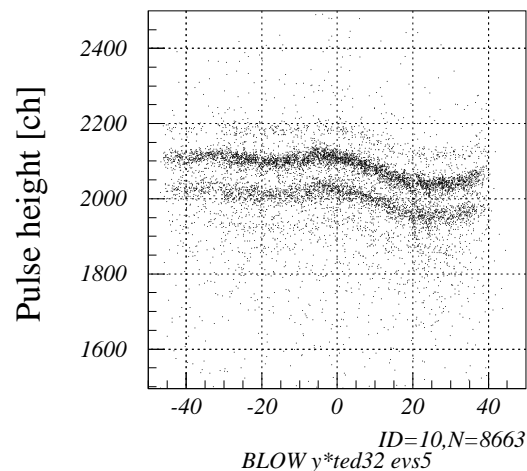
# 質量分離： Degradер厚依存性（結晶中心）

- $^{68,69,70}\text{Cu}(z=29)$  294 MeV/A, Al= 0~17mm



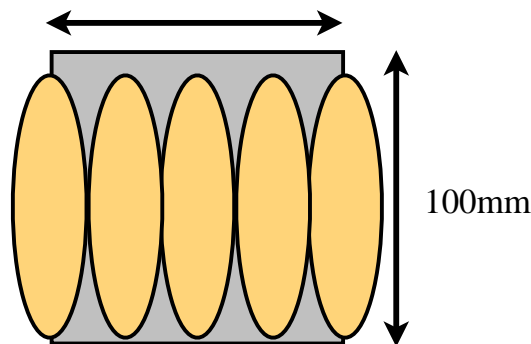
# Pulse Height 位置依存性

- drift chamberの外挿による位置依存性



垂直位置 [mm]

- 3 2 個の結晶に対し
  - 絞ったビームを中心に当てる
  - 縦方向に広げたビームを
    - 中心、 $\pm 25\text{mm}$
    - 一部の結晶は  $\pm 50\text{mm}$  に照射
- 位置依存性は結晶により異なる
  - データは解析中
  - 位置依存性の補正方法を確立したい
- さらに
  - 結晶中での反応率など





## まとめ

---

- これまでHIMACで系統的に調べた最適動作点の情報は、データの外挿を含め、広範囲のRIビーム実験に有効に使われている。
- SAMURAI spectrometerの残りの2種類の検出器系のビーム試験を行った
  - 陽子用大型位置検出器(PDC)： cathode読出型drift chamber, 1.7m x 0.8m
    - 安定なプラトー
    - 垂直入射に対し、位置分解能  $\sigma \sim 300 \mu\text{m}$
    - 斜め入射での位置分解能の悪化： 解析手法の改善が必要
    - HIMACでの試験後、PDC 2台をSAMURAIに設置。現場で最終試験を予定。
  - 重破碎片用全エネルギー検出器(TED)： CsI(pure) x32, 0.8m x 0.4m
    - 32個に対し、中心入射+位置依存性のデータを取得した：解析中
    - 中心付近では、 $A \sim 70$ に対しdegrader厚の調整により $\Delta/\sigma \sim 7$ 程度の分離は可能。
    - HIMACでの試験後、SAMURAIに設置。3月末の実験に使用： $A \sim 130$ 。