

# Beam Dynamics Study of a PRISM-FFAG magnet using a Standard Alpha-ray source

---

久野研 栗山靖敏 (D4)

# 標準線源を用いた リング電磁石ビーム光学系評価手法の開発

---

久野研 栗山靖敏 (D4)

## 内容

- FFAG加速器
- 荷電粒子輸送実験の概要と目的
- $\alpha$ 粒子-位置検出器開発
- $\alpha$ 粒子輸送実験からチューン、平衡軌道の導出
- まとめ

# FFAG加速器

---

## 加速器応用分野の拡大

- 医療, 工業
  - 放射線医学、加速器駆動未臨界炉
- 不安定粒子加速
  - ミューオン・電子転換実験、ニュートリノファクトリー

## FFAG (= Fixed Field Alternating Gradient) シンクロトロン加速器

- 固定磁場による早い繰り返し周期、運転の容易さ
- 強収束の原理による大アクセプタンス
- 磁場形状  $B(r) = B_0 (r/r_0)^k$  から来る大きなnon-linear成分
  - ベータトロン振動数が運動量によらず一定、異なる運動量に対する閉軌道が相似

# PRISM-FFAG電磁石

## ● C型機能結合マグネット

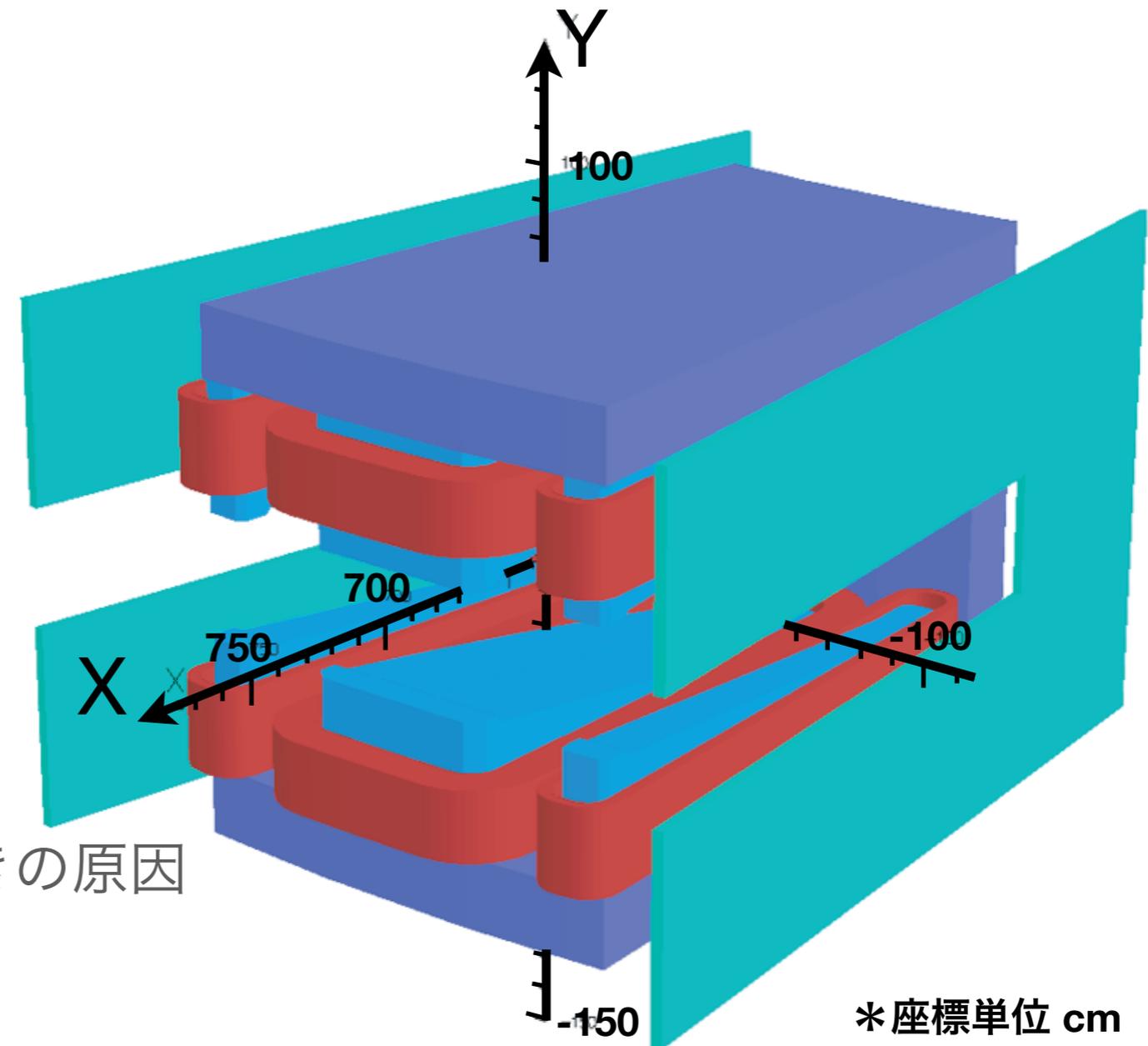
- 発散・収束用磁極が交互にある
  - 発散-収束-発散の順
- 半径外側のリターンヨーク無し

## ● 磁極形状で磁場に勾配を付ける

- R方向で磁極間隔が異なる
- 漏れ磁場の影響が半径方向で違う
  - ベータトロン振動数のふらつきの原因

## ● 諸元

- Beam duct size : 1 m x 0.3 m
- 平衡軌道 : 6.5 m @ 68 MeV/c



# 荷電粒子輸送実験の概要と目的

- 標準線源を用いたリング電磁石の評価

- 利点

- 1 cellの電磁石完成時点で評価可能
    - 前段加速器が不要

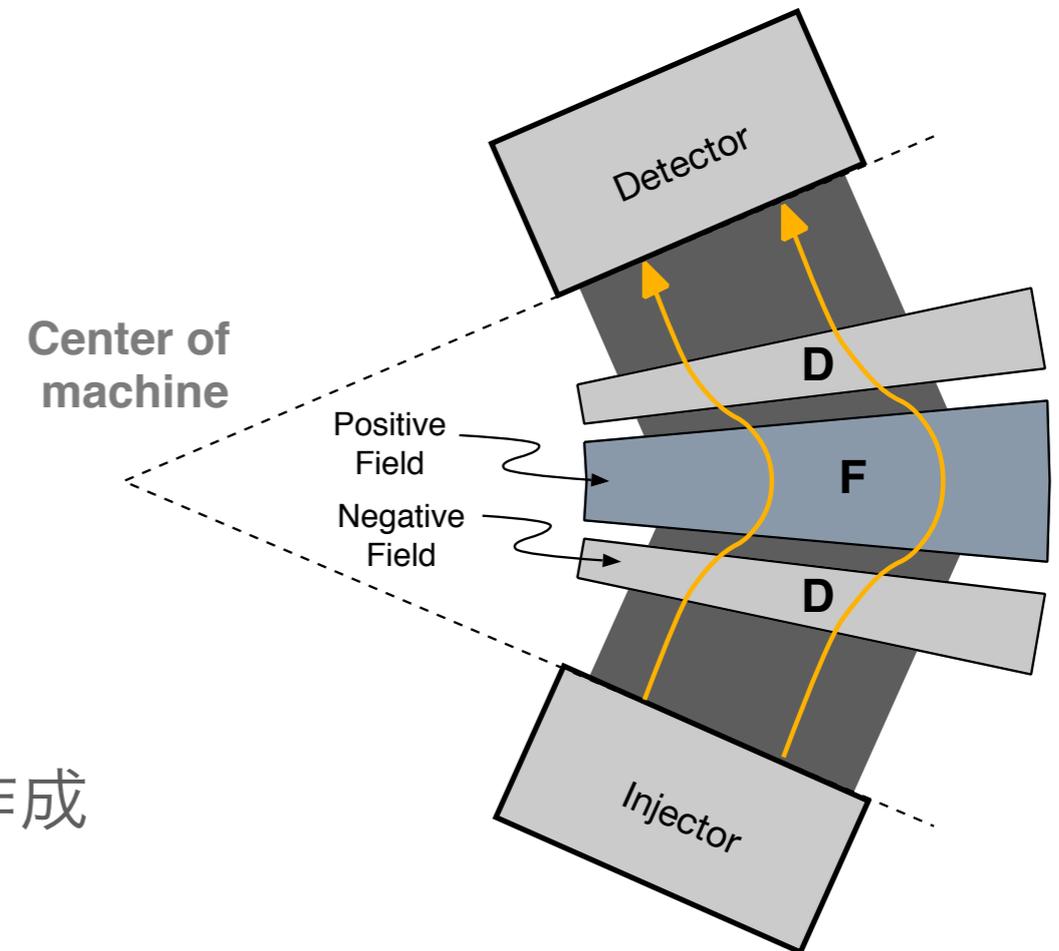
- 方法

- 1セルでの輸送実験から輸送マップ作成
    - マップからリング性能評価

- チューン, 平衡軌道, アクセプタンス...

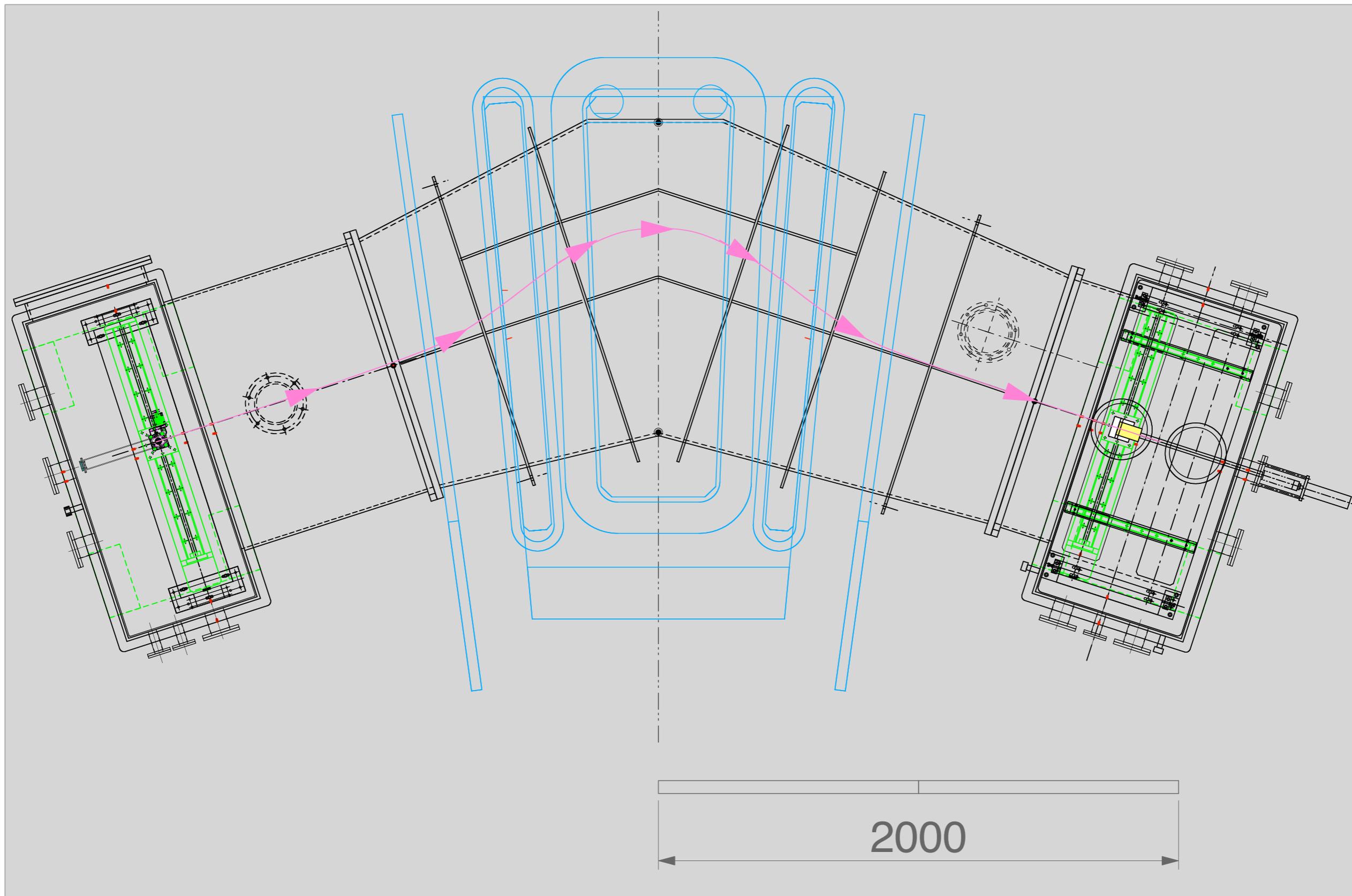
- 手法の確立が目標 (初の試み)

- 水平方向の運動(median plane上)に限定



$$Y(s) = \begin{bmatrix} Y(s) \\ Y'(s) \end{bmatrix} = M(s | s_0) Y(s_0)$$

《点 $s_0 \rightarrow$ 点 $s$ への粒子の輸送》



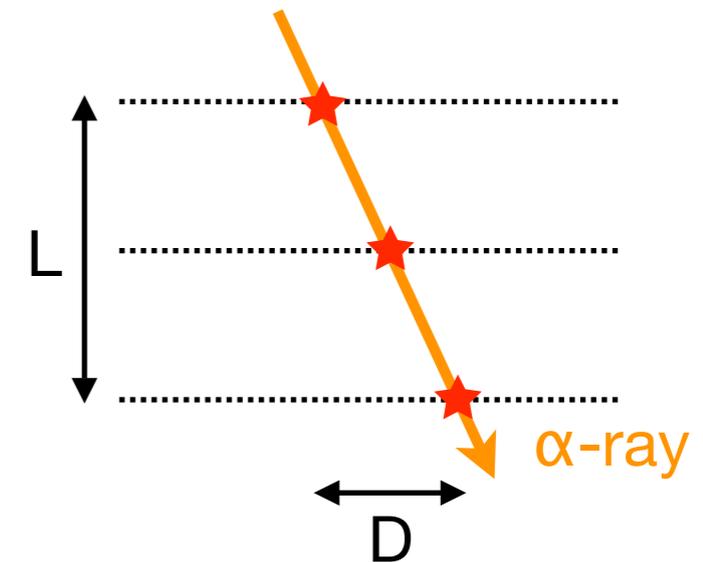
1セル  $\alpha$ 線輸送実験概略図



# $\alpha$ 粒子-位置検出器

# 検出器への要求

- 低レートアルファ粒子の識別
  - バックグラウンド事象（宇宙線ミュオン,環境放射線等）との分離
- 位置検出精度 0.1 mm
  - アルファ粒子の位置分布中心の決定精度
  - チューン決定精度  $\delta v = 0.01$
- 角度測定
  - ビーム進行方向の異なる2点で位置を測定することで角度を計算
- 大口径ダクト（水平方向800 mm）の範囲を検出
  - リニアステージで検出器を移動
- 真空中で動作



# 検出器設計

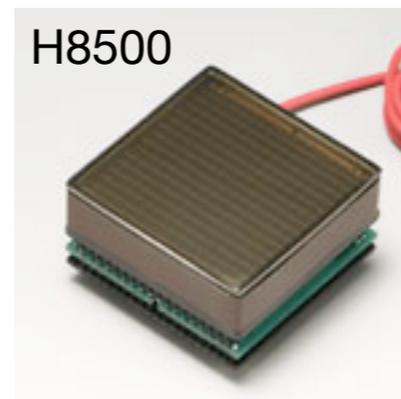
## • ホスイッチ型検出器

### • 薄膜シンチ張り合わせ

- ZnS(Ag) powder : 10 mg/cm<sup>2</sup>  $\tau=200$  nsec
  - 酢酸セルロースシートにコーティング
- NE-102 : 0.5 mm<sup>t</sup>  $\tau=2.4$  nsec

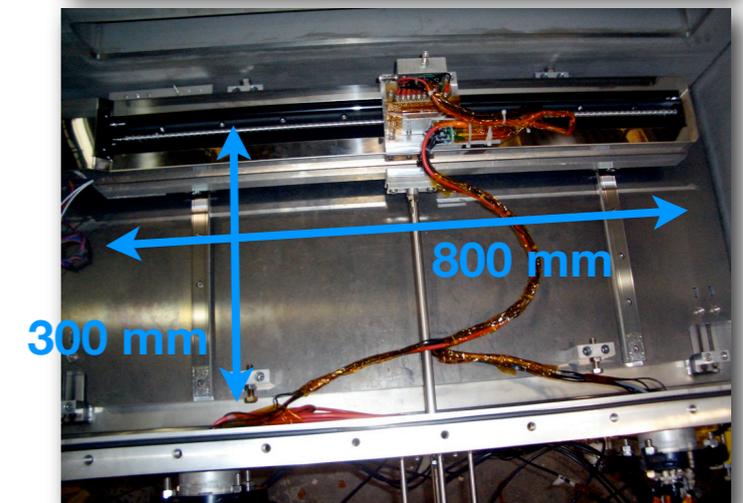
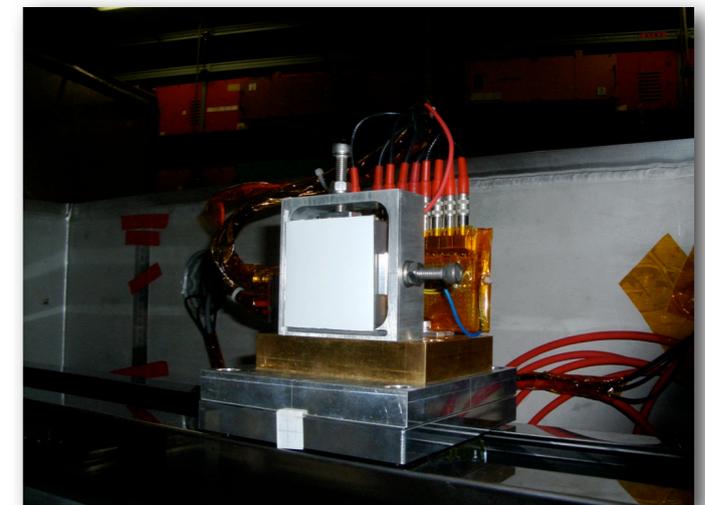
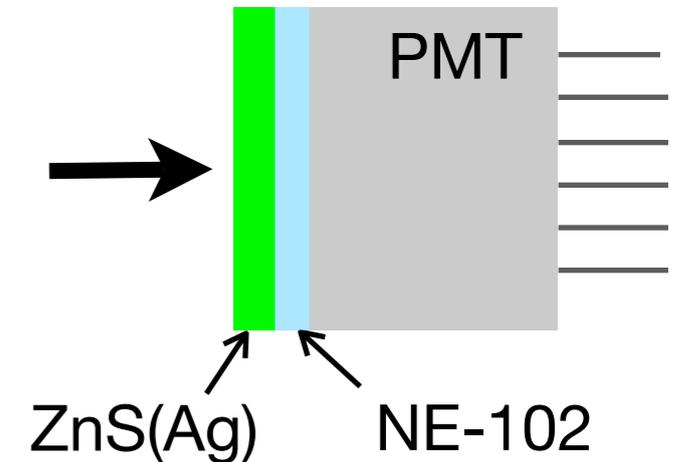
## • 光検出器

- MA-PMT HPK H8500
  - Active area : 49 mm x 49 mm
  - 64 pixel ( 縦 8 ch x 横 8 ch )



## • 駆動ステージ

- 半径方向 800 mm、ビーム方向 300 mm
  - 位置精度 0.1 mm → 角度精度 0.5 mrad
  - 位置精度 0.2 mm → 角度精度 1.0 mrad



# バックグラウンドイベント

- 要因

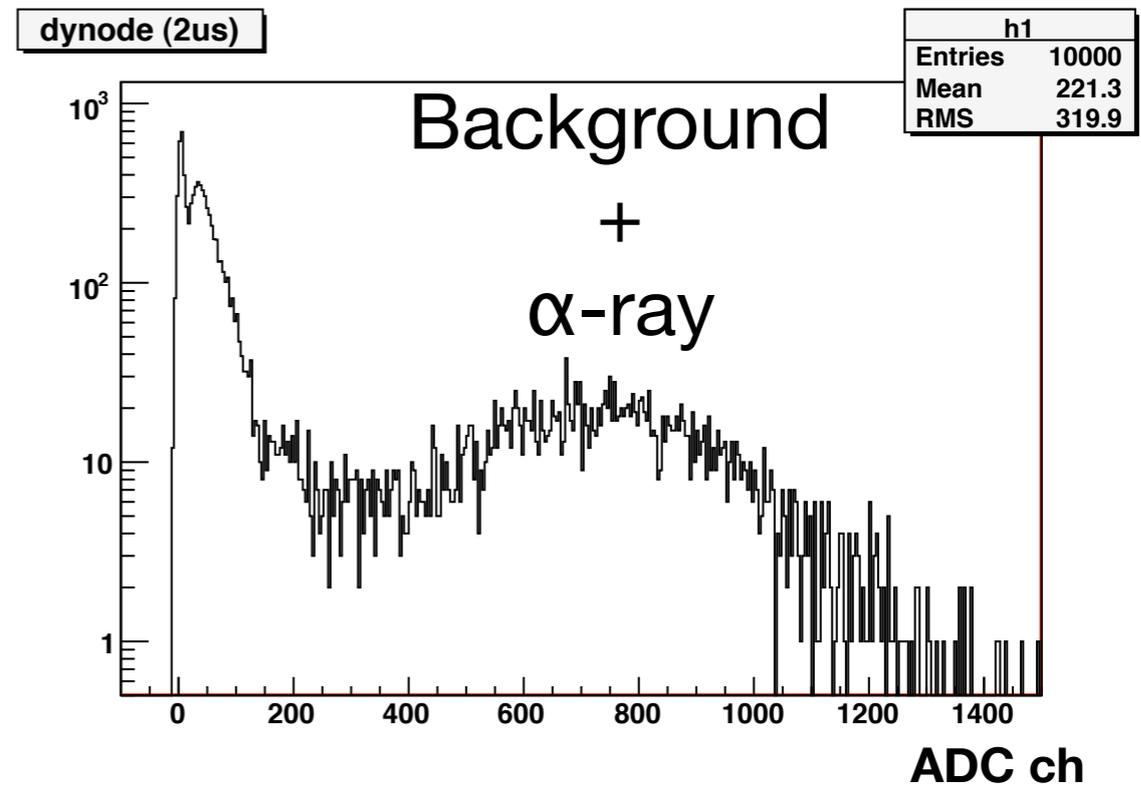
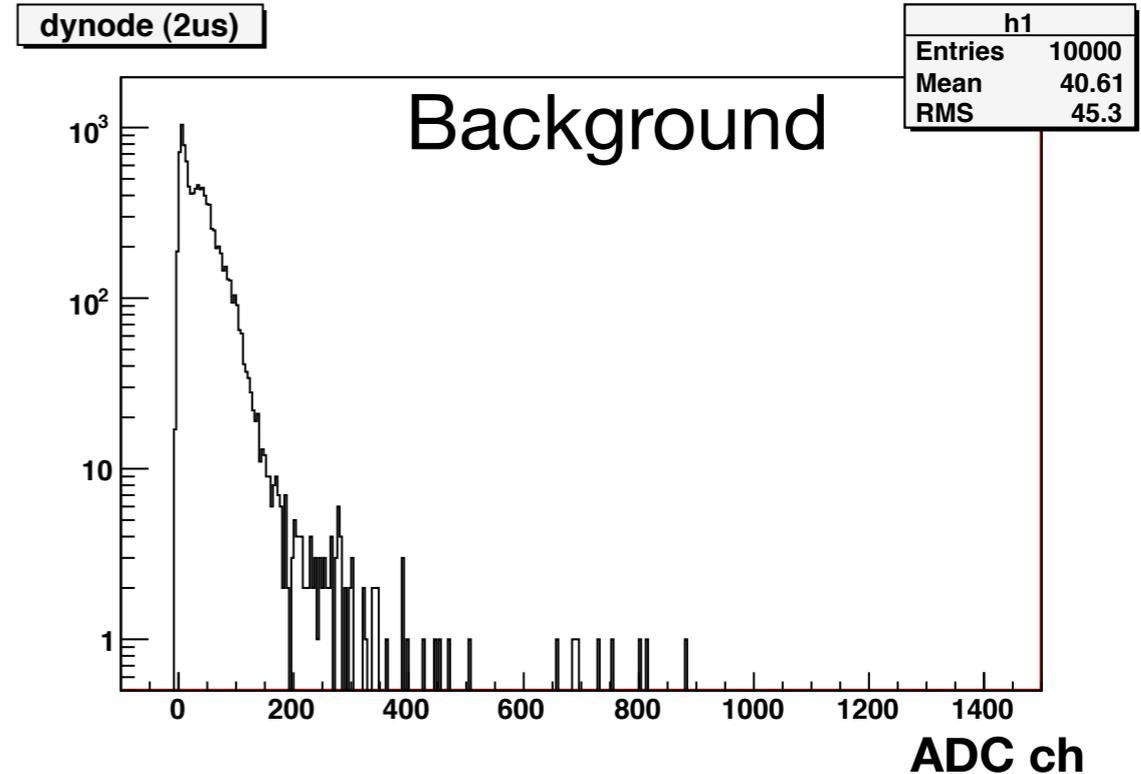
- PMT窓材（硼硅酸ガラス）等からのベータ線（ $^{40}\text{K}$ 起源）
- 環境 $\gamma$ ,暗電流etc

- S/N

- バックグラウンド ~ 3 Hz
- アルファ粒子検出レート ~ 1.5 Hz

- 単純な光量によるイベントセレクション

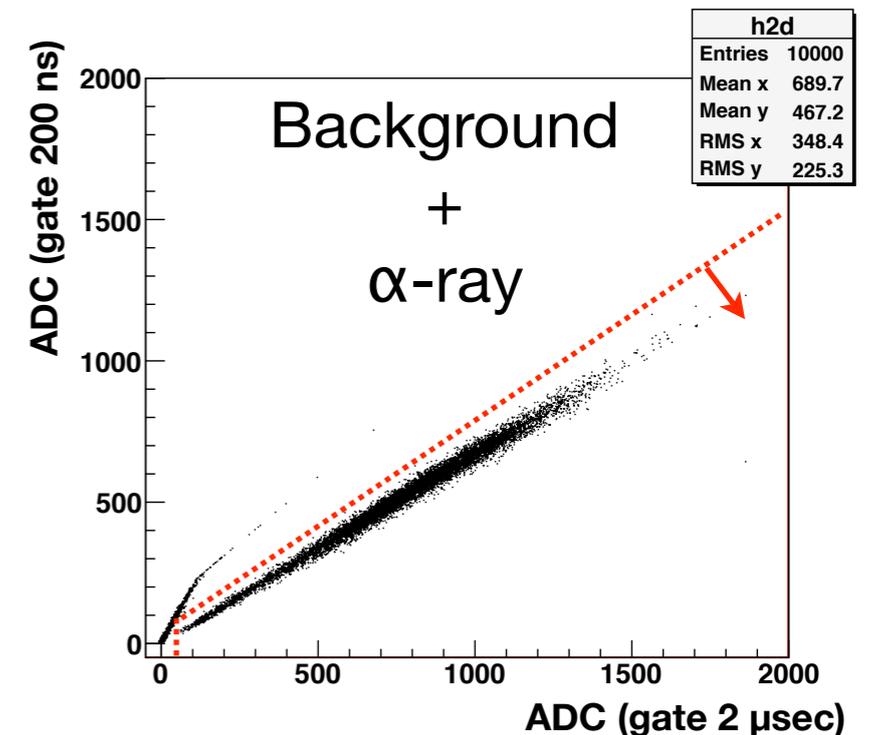
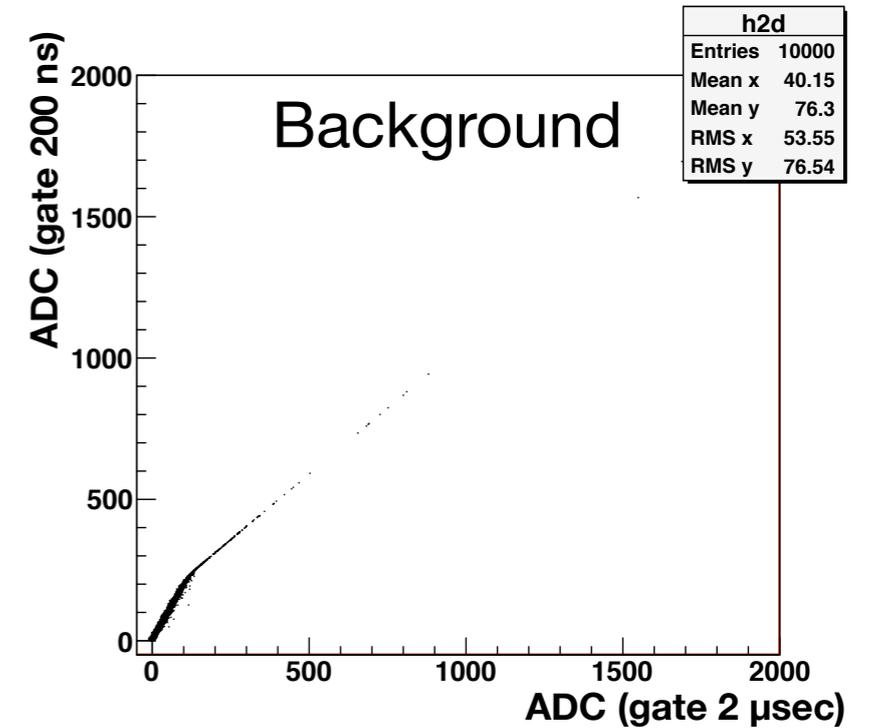
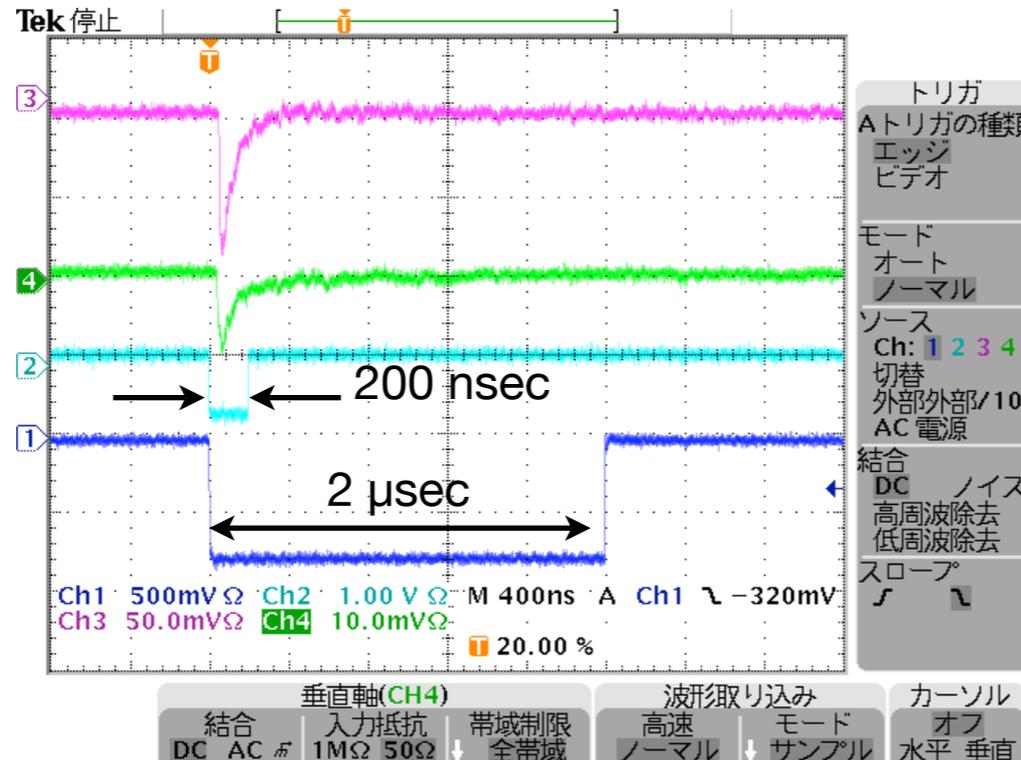
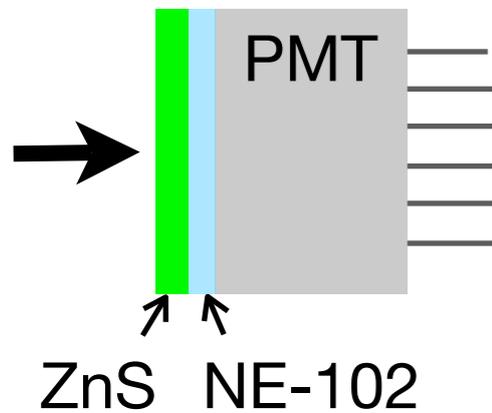
- Efficiency への影響が懸念



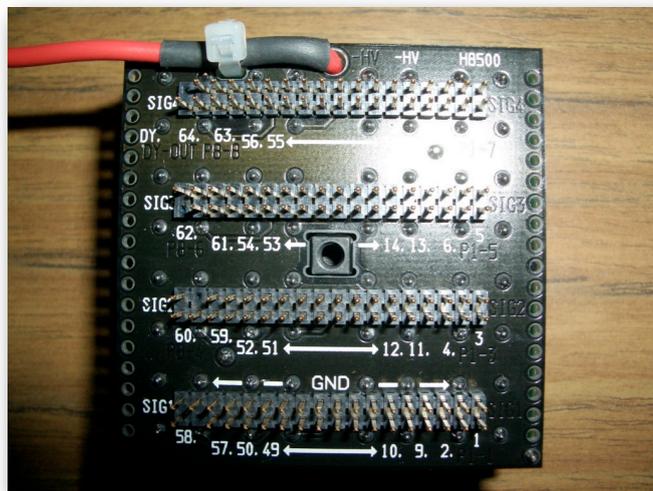
# イベントセレクション

## • Gateの違う2つのADC使用

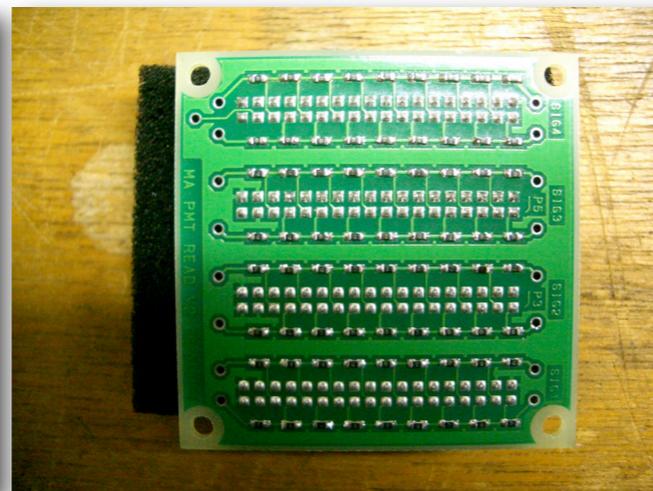
- 減衰時間の異なるシンチレーション光を識別
- $\alpha$ 粒子はZnSのみを光らせる



# 位置検出



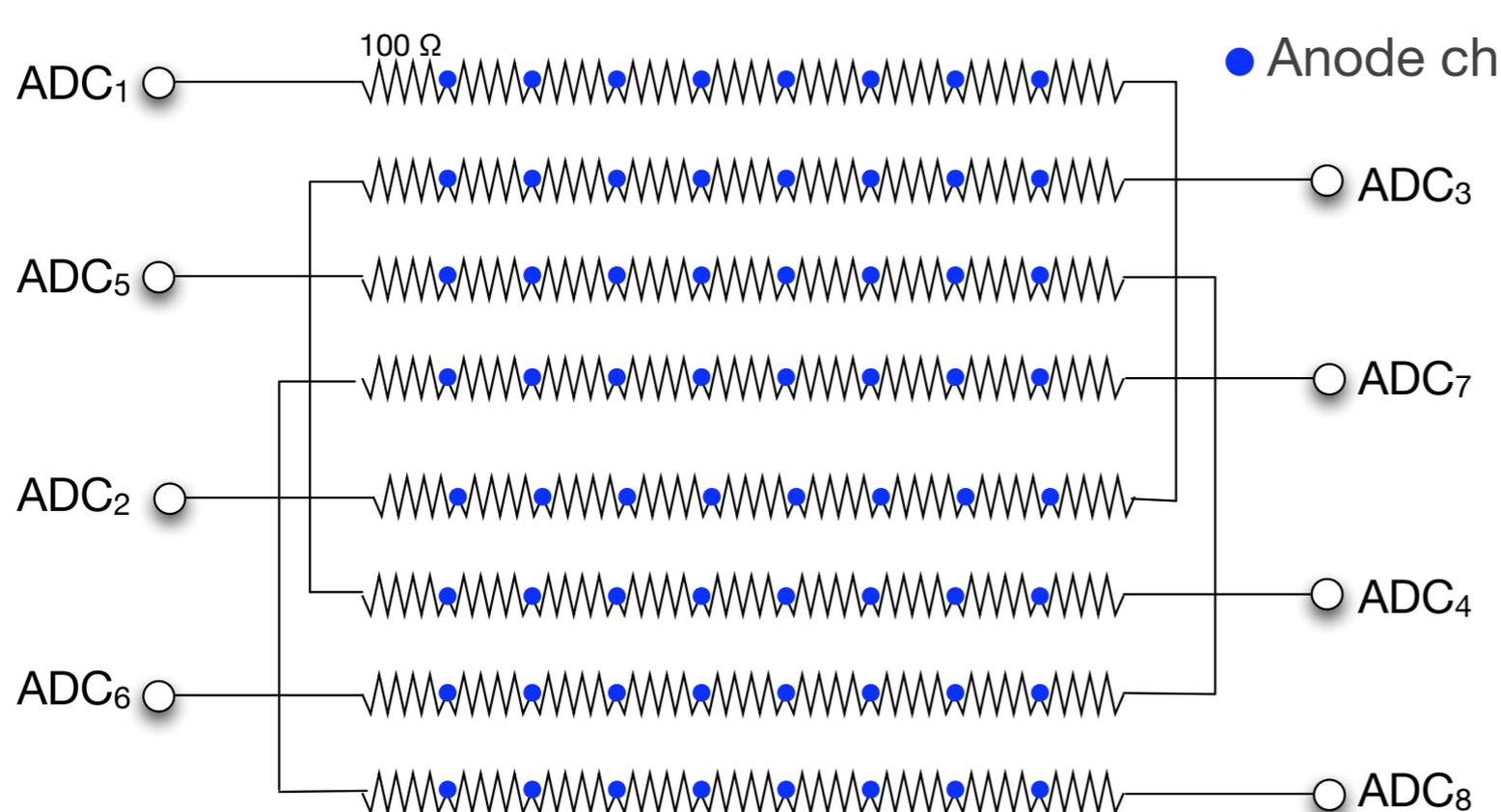
PMT裏側



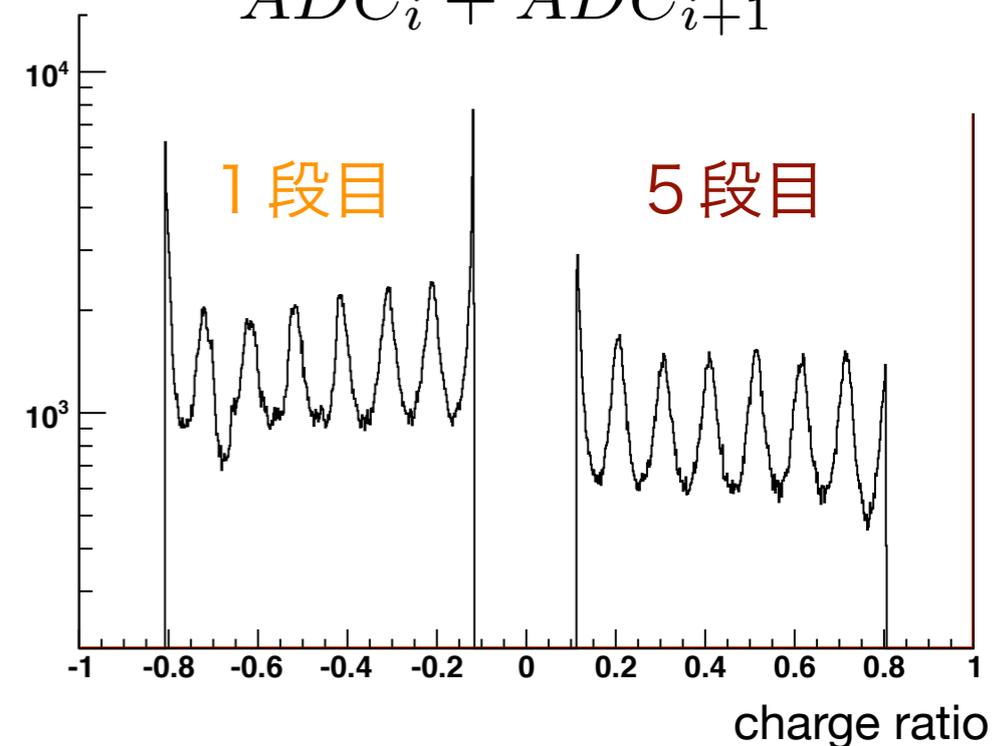
読み出し基板

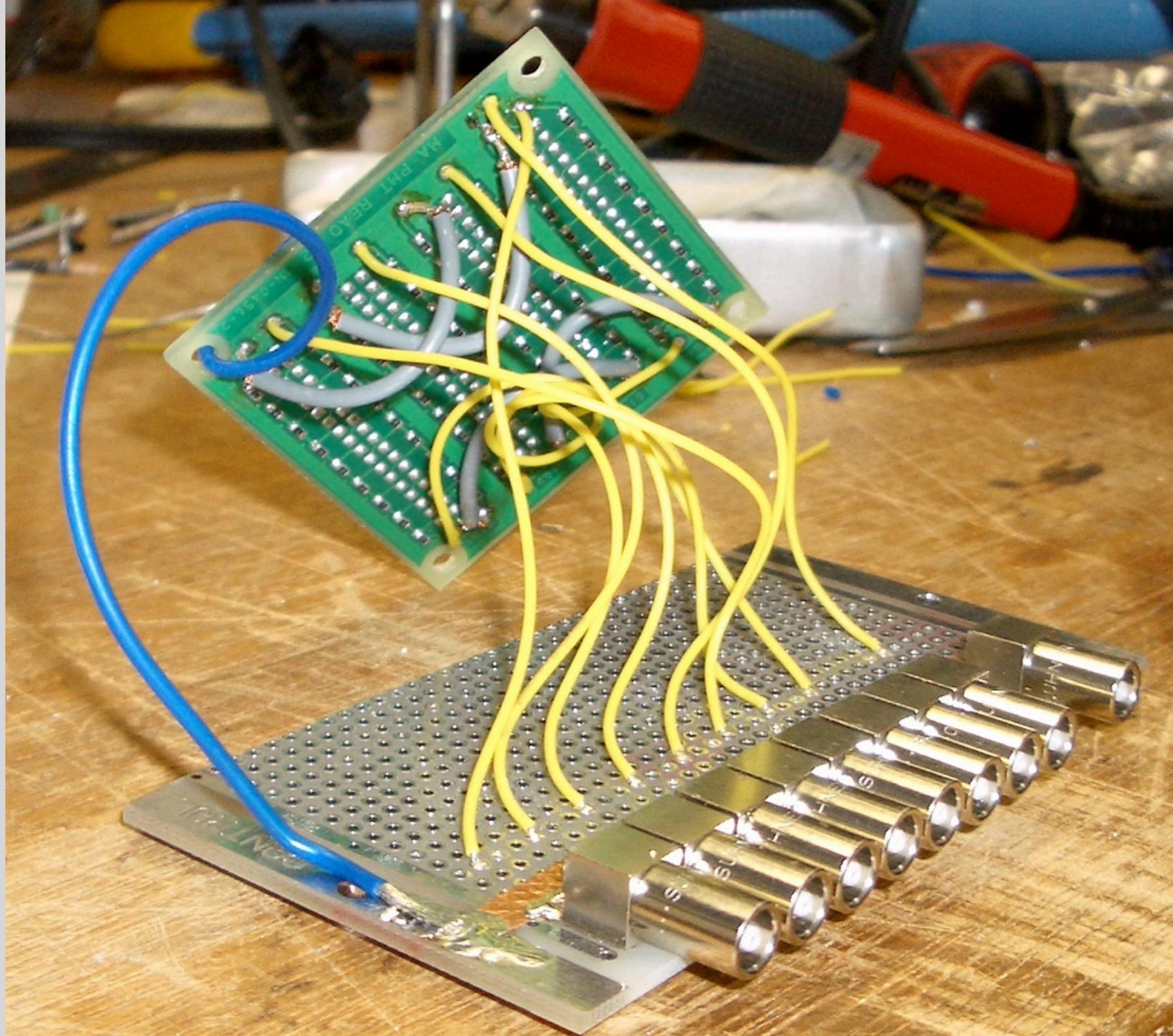
## ● 抵抗電荷分割法

- ピクセル段毎にAnode chを100Ω抵抗で連結
- 2つの抵抗chainを連結
- 抵抗チェーンの左右に流れる電荷量の比から位置を算出



$$\frac{-1 \times ADC_i + 1 \times ADC_{i+1}}{ADC_i + ADC_{i+1}}$$

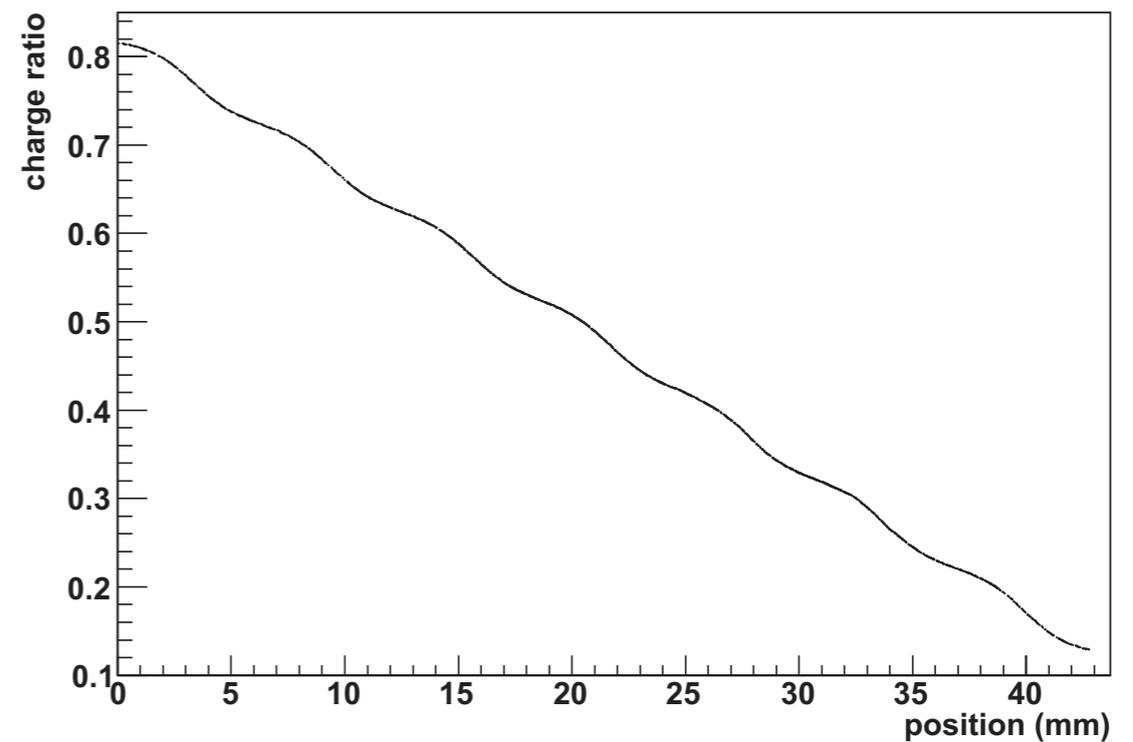
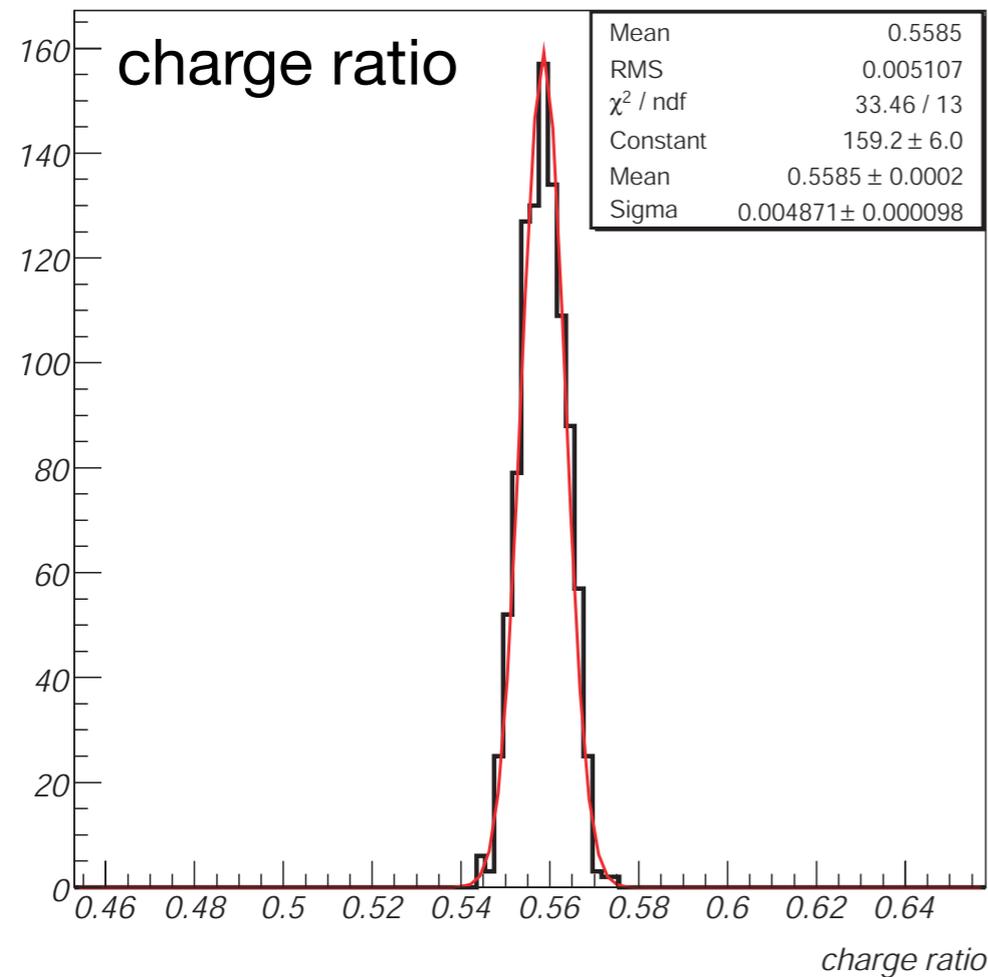
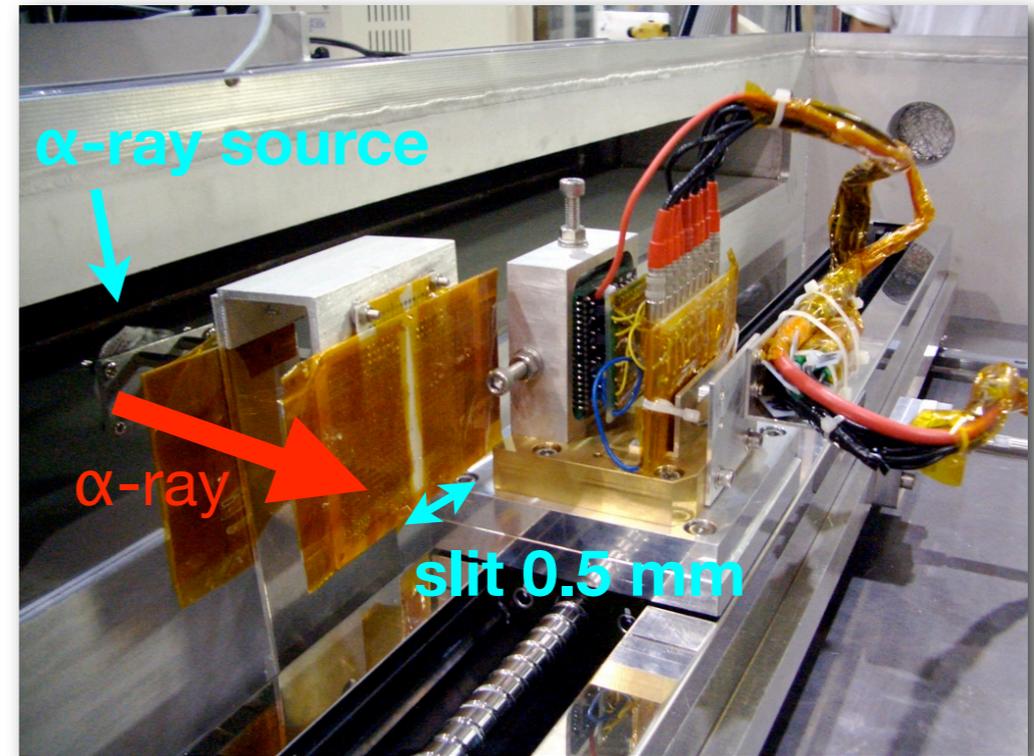




読み出し基板

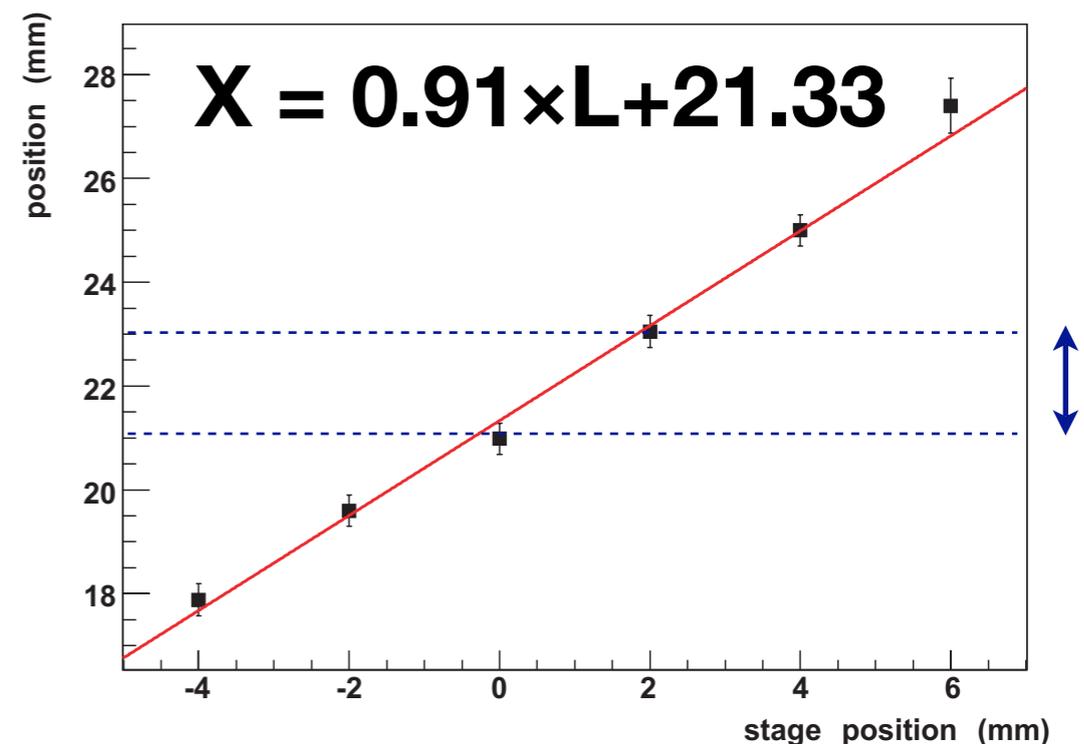
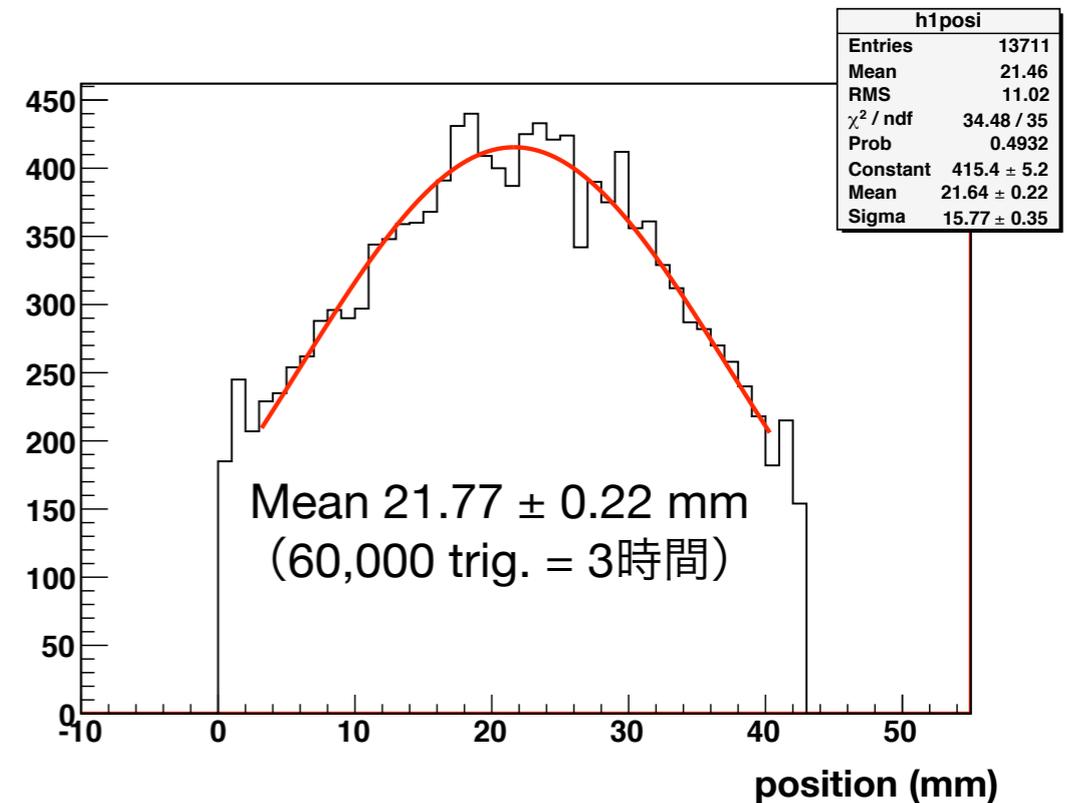
# 位置出しキャリブレーション

- 電荷比と位置の対応表を作成
  - ステップ 0.1 mm (横方向のみ)
- 各ピクセル段毎のテーブルを作成



# アルファ粒子検出

- **FFAG磁場を通過したアルファ粒子を検出**
- 各ピクセル段毎の位置出しの結果を全ピクセル段（8段）マージ
- **3時間の測定**
  - 位置分布決定精度  $\delta x = 0.22 \text{ mm}$ 
    - $\Delta R = 0.16 \text{ mm}$  ,  $\Delta R' = 1.1 \text{ mrad}$
- **検出位置の確認**
  - 入射位置固定で検出器ステージを移動させて測定を実施
  - ステージの移動距離と検出位置の変位量が一致





# 荷電粒子輸送実験

# チューン・平衡軌道の導出

- Small amplitudeでの測定結果を使用
- Linear Transfer Matrixを計算

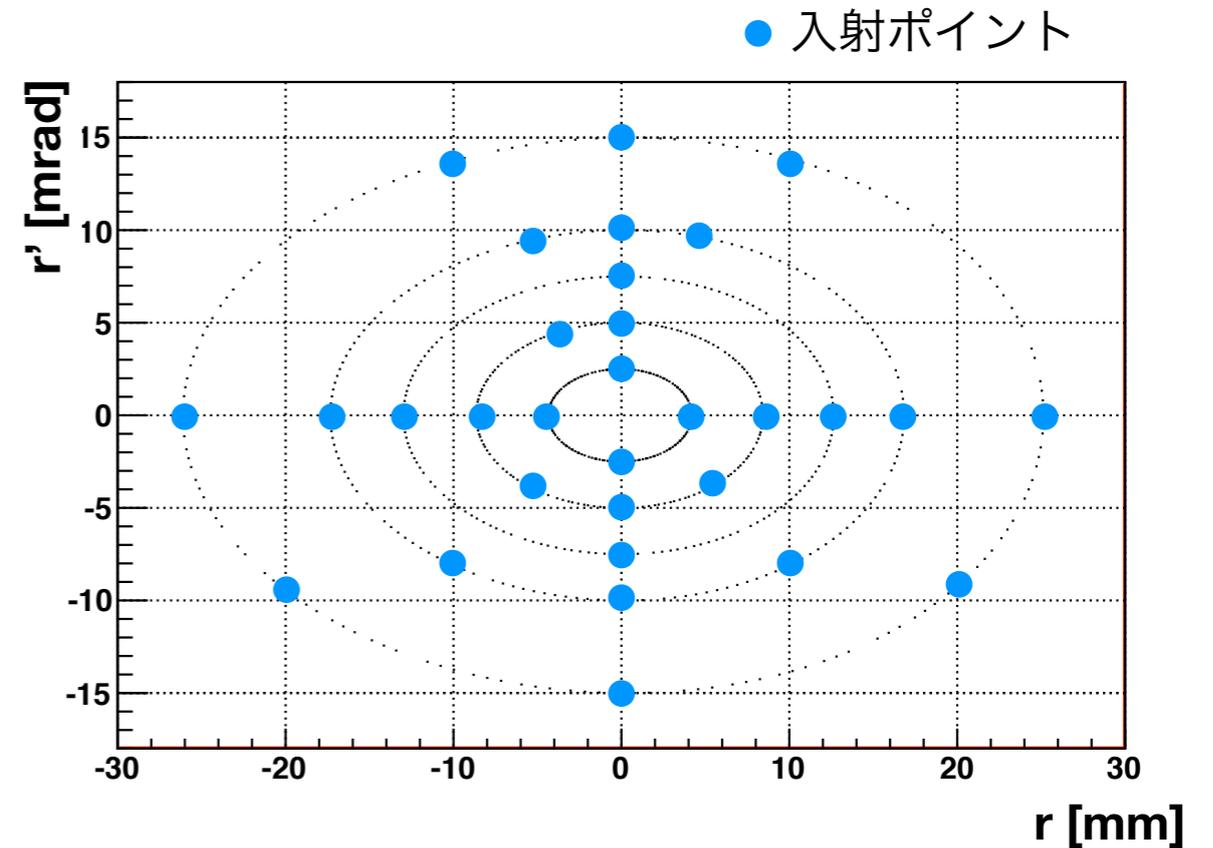
$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}$$

$$\Sigma \chi_i^2 = \left( \frac{X_i^{meas} - X_i^{cal}}{\sigma_X} \right)^2$$

## Linear Transfer Matrix

$$M = \begin{pmatrix} -0.135 & 1.68 \\ -0.588 & -0.112 \end{pmatrix}$$

$$\det M = 1.00 \pm 0.05$$



## 平衡軌道

$$r_0 = 6189.7 \pm 0.3 [mm]$$

$$r'_0 = -0.9 \pm 0.2 [mrad]$$

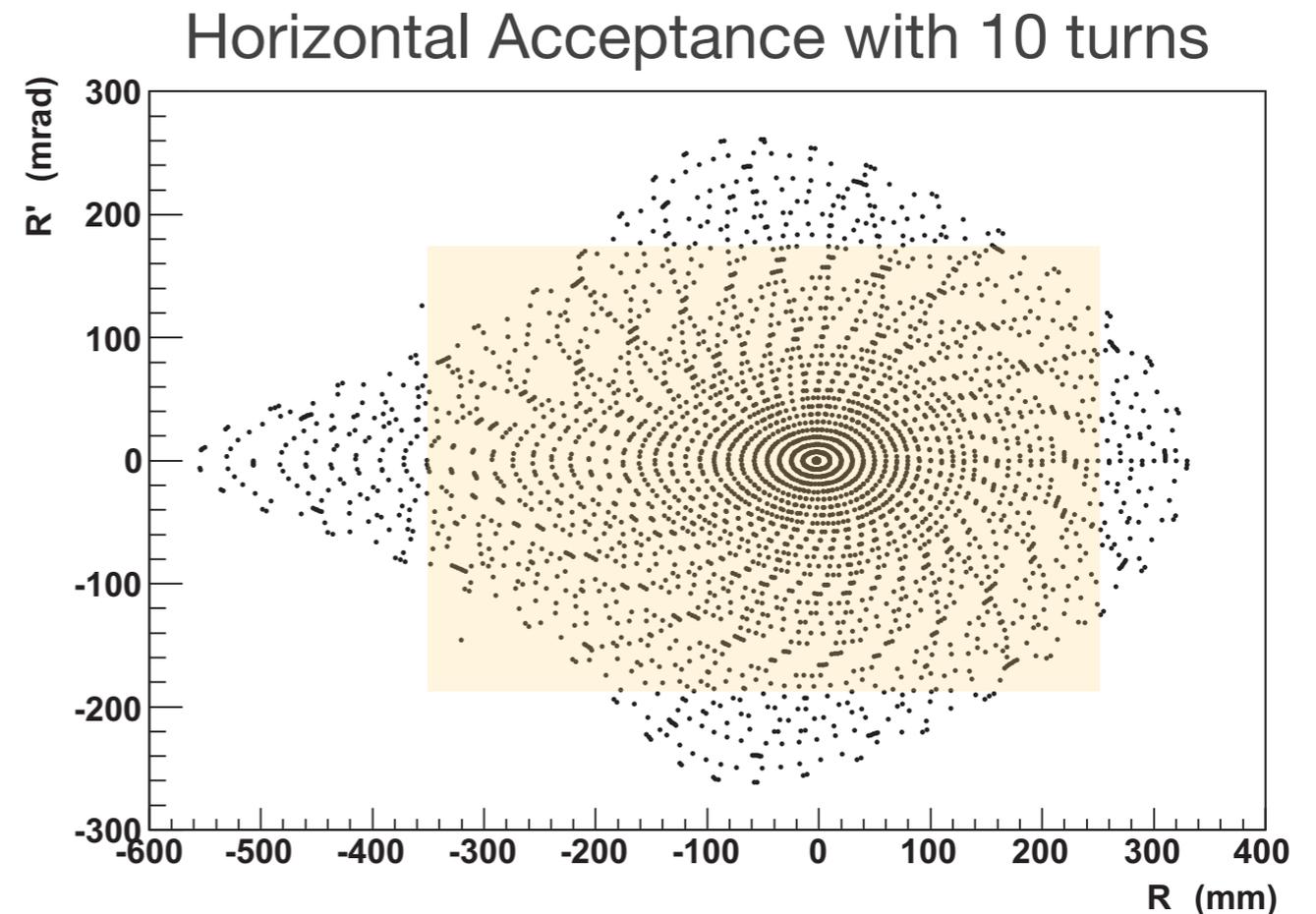
## チューン(Horizontal)

$$\nu_h = 2.70 \pm 0.02$$

$$\langle \nu_h = 2.73 \text{ (design)} \rangle$$

# 測定ポイントとマップ解析

- 全測定ポイント ~230ポイント
- 入射位置
  - $-350 < R < 250$  (mm)
  - $|R'| < 180$  (mrad)
- **Transfer mapの算出**
  - Truncated taylor expansion



$$x_i = \sum_{j=1}^2 \overset{\text{(1st. order)}}{R_{ij}} x_j(0) + \sum_{j=1}^2 \sum_{k=j}^2 \overset{\text{(2nd. order)}}{T_{ijk}} x_j(0) x_k(0) + \sum_{j=1}^2 \sum_{k=j}^2 \sum_{l=k}^2 \overset{\text{(3rd. order)}}{U_{ijkl}} x_j(0) x_k(0) x_l(0) + \dots$$

# まとめ

---

- 荷電粒子輸送実験によるリング電磁石評価手法の確立を目指し実験を計画
- アルファ粒子検出機的设计・開発を行い測定時間6時間で位置精度 0.16 mm、角度精度 1.1 mradを達成
- 230ポイントの測定を実施
  - Small Amplitudeの測定結果からチューン、平衡軌道を導出
- Large amplitudeでの測定結果から高次の輸送マップを導出しリング性能を評価することで手法の確立を目指す