

# T2K実験における 電子増倍管による ミューオンビーム測定と 陽子ビーム軌道再構成の改善

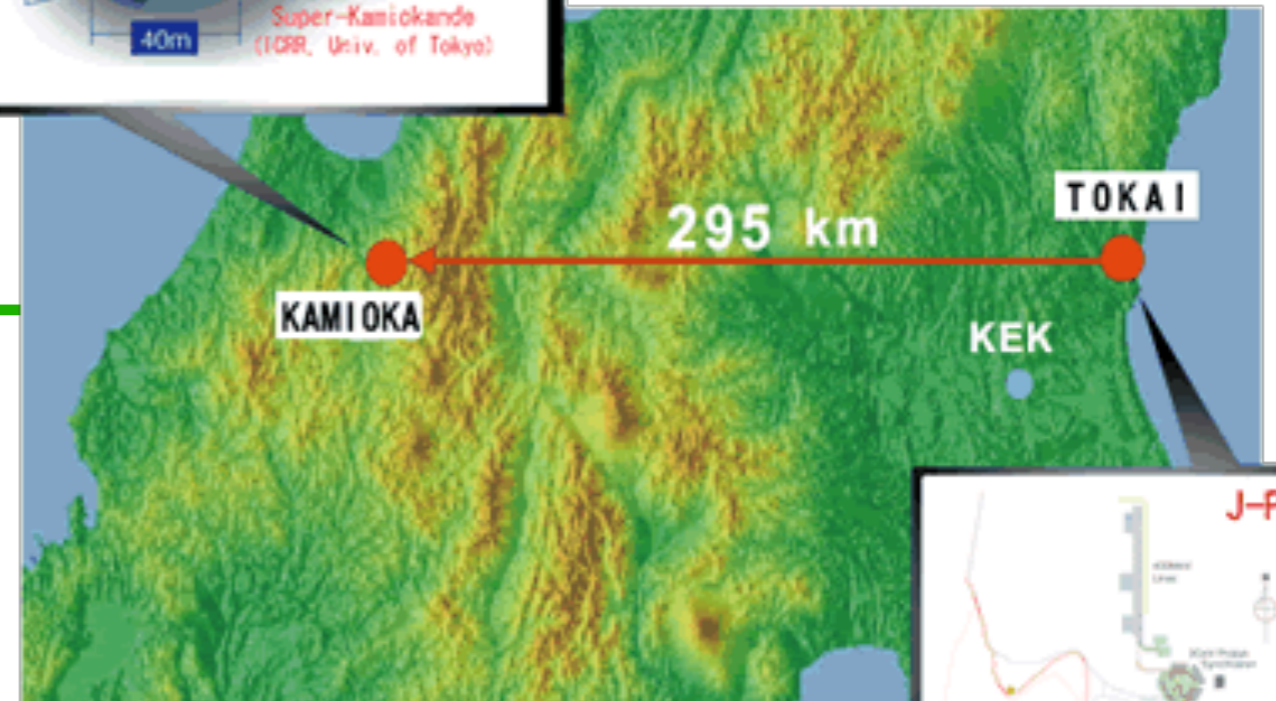
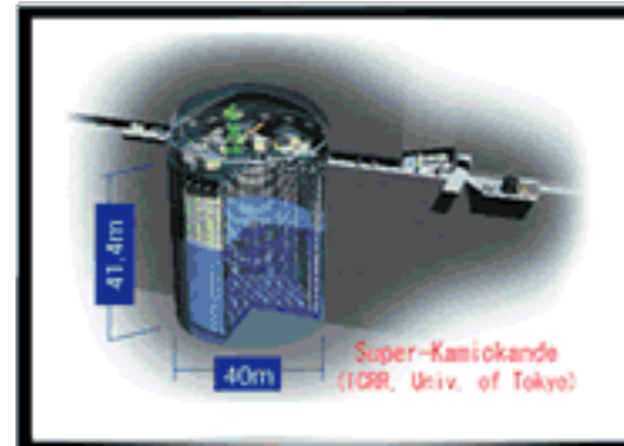
東北大学大学院理学研究科物理学専攻  
素粒子実験（加速器）研究室  
小林綜太

2026年2月2日 11:30~12:10

# T2K実験 (Tokai to Kamioka)

## ❖ 長基線ニュートリノ振動実験

- ▶ J-PARCで $\nu_\mu$ ( $\bar{\nu}_\mu$ )ビームを生成
- ▶ 295 km先のスーパーカミオカンデでニュートリノの観測



✓  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  の振動確率から**CP対称性の破れを探索**

✓ CP対称性の保存 ( $\delta_{CP} = 0, \pi$ ) を**90%信頼度で棄却**

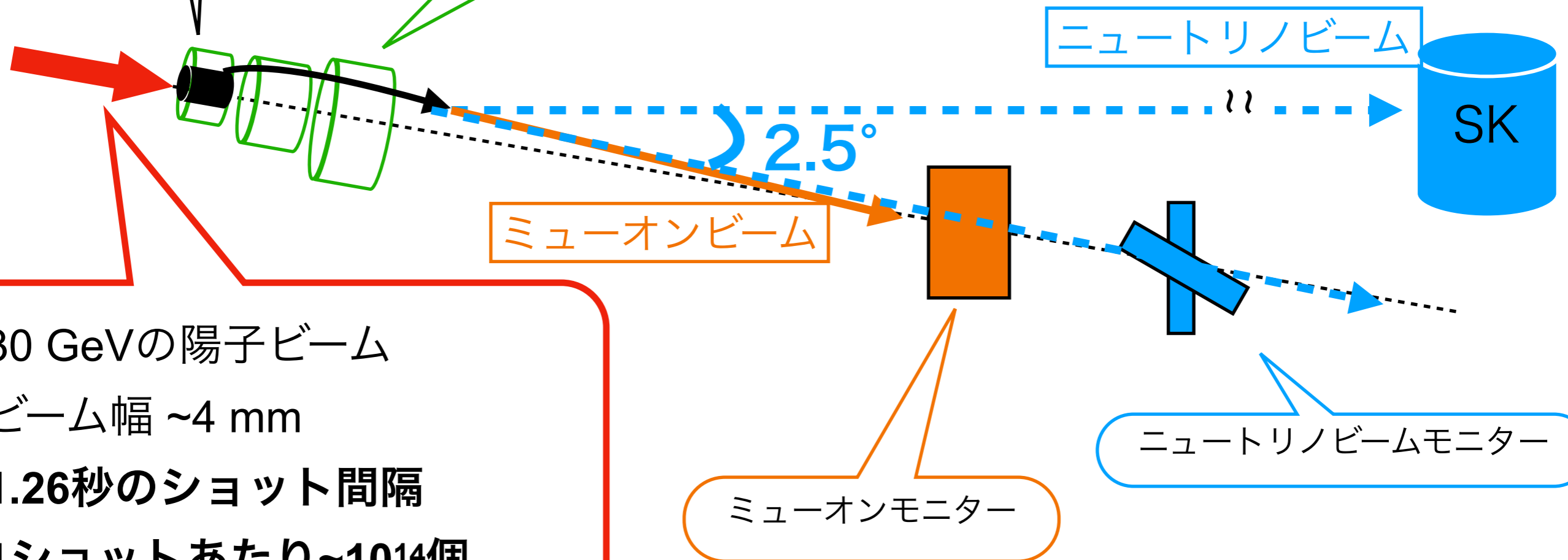
✓ 2028年からはハイパーカミオカンデ実験が開始  
後置検出器の大型化とビーム強度増大  
→統計量が飛躍的に向上する予定

# ニュートリノビーム生成

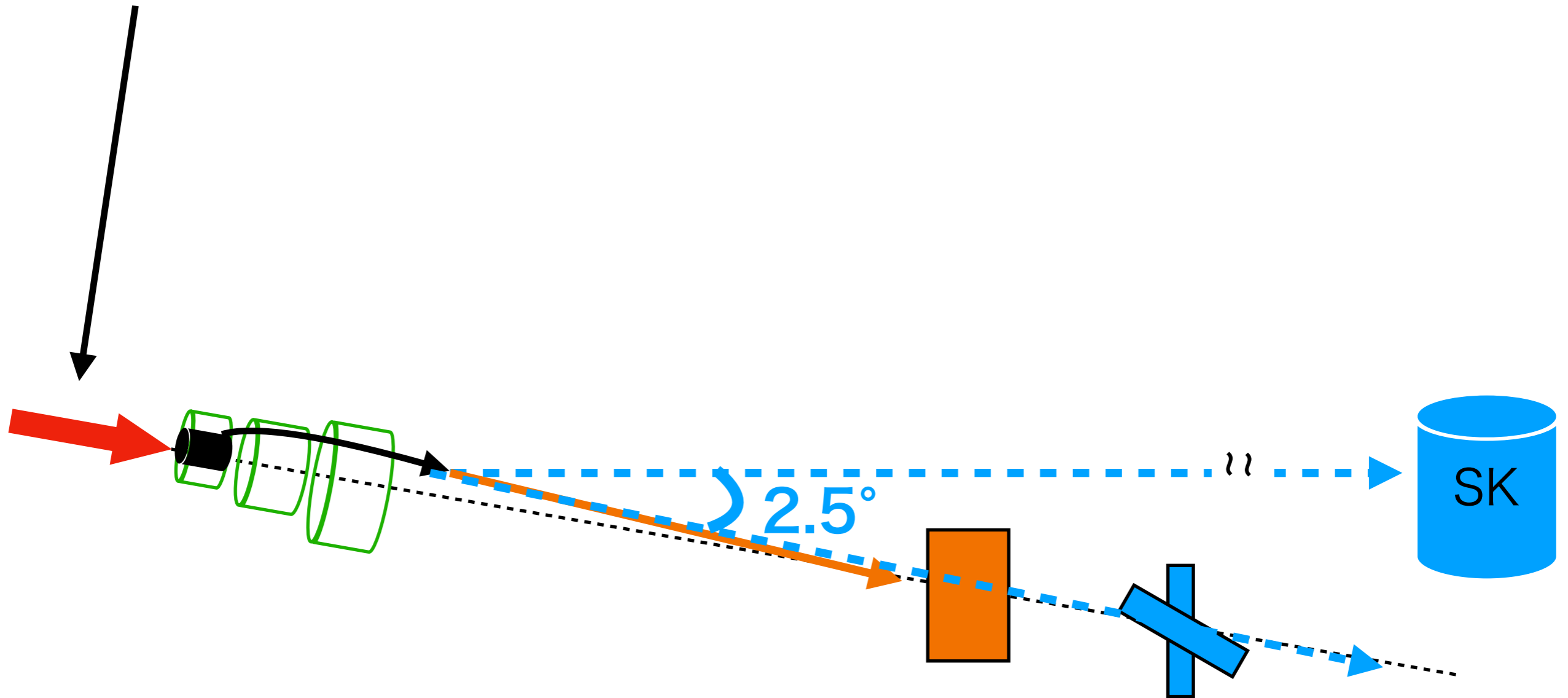
- 炭素標的
- 直径26 mm,長さ900 mm

- 3つの電磁ホーン
  - 最大±320 kA
  - 荷電パイオンを収束/発散
- $\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ ビームを選択

- 30 GeVの陽子ビーム
- ビーム幅 ~4 mm
- 1.26秒のショット間隔
- 1ショットあたり~ $10^{14}$ 個
- 現在の最高強度 ~ 900 kW



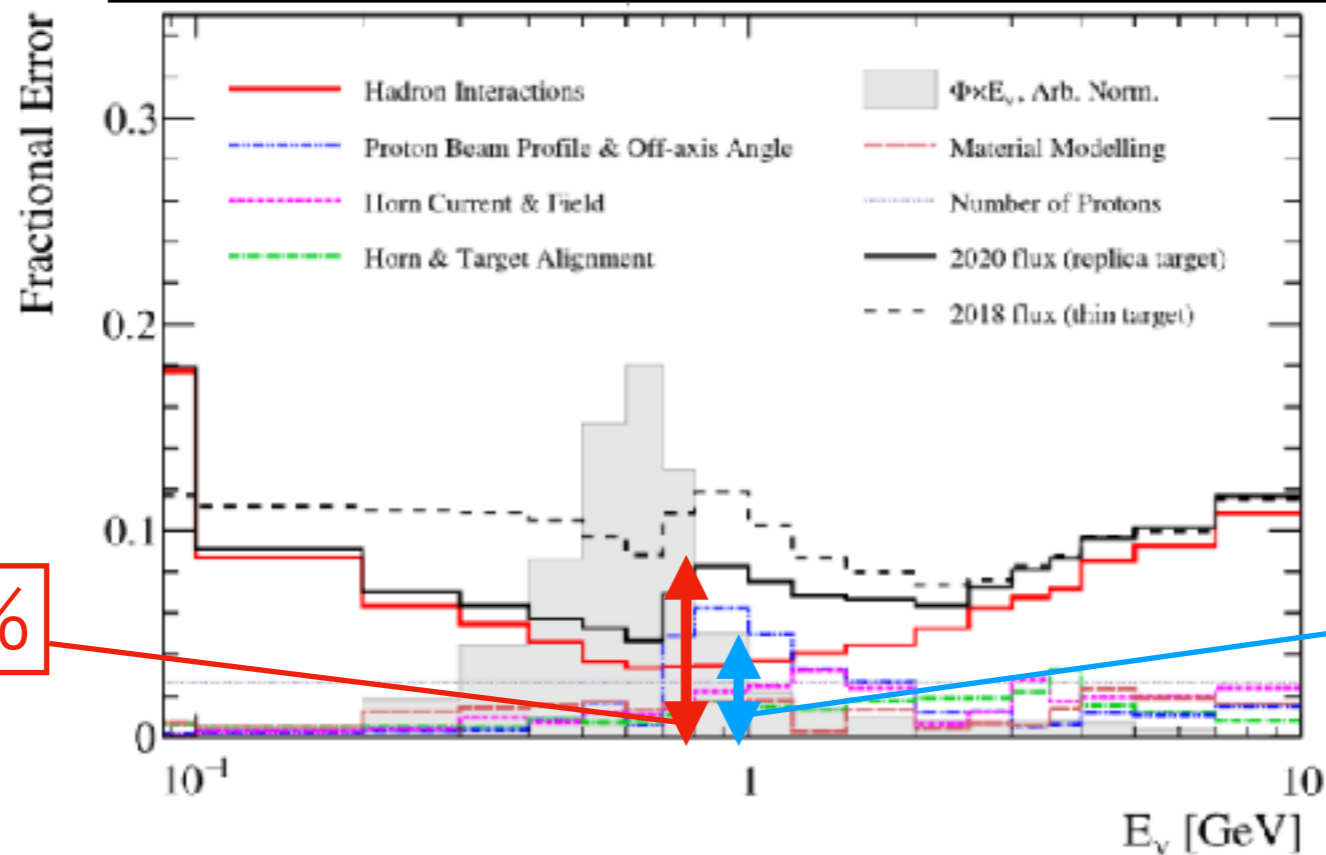
# 前半：陽子ビーム軌道再構成の改善



# 陽子ビーム軌道再構成の改善

# ビーム軌道再構成の重要性

## ニュートリノフラックスの不定性



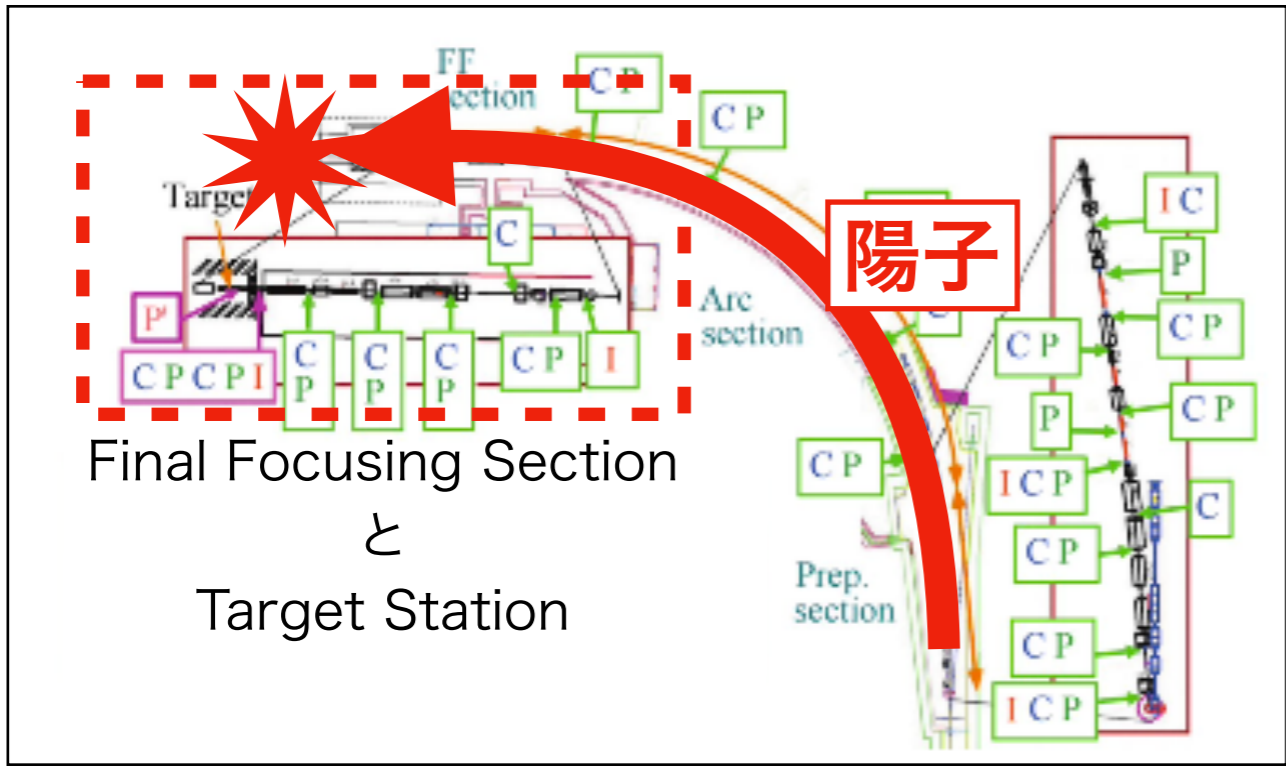
合計 ~8%

陽子ビーム ~4%

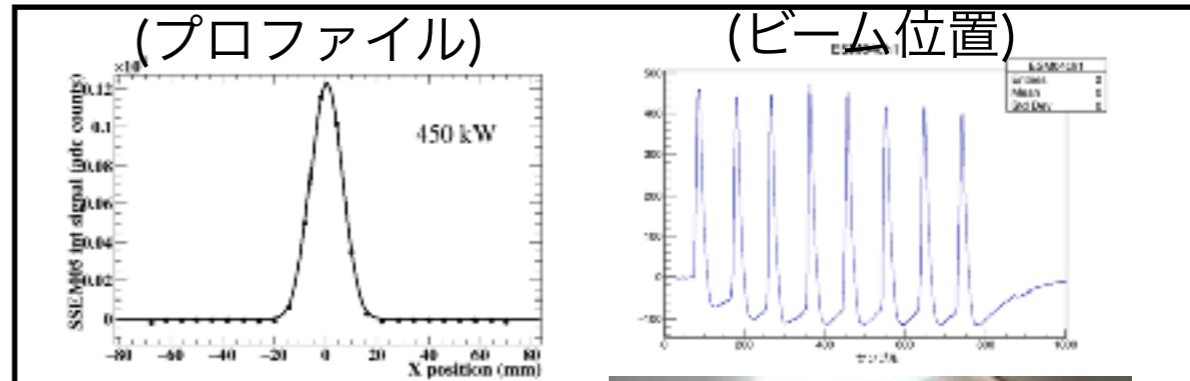
- 精度良いビーム再構成が求められる
  1. 加速器の保護の要請 → ターゲット中心で  $\pm 1.5$  mmの精度
  2. ニュートリノフラックスの不定性削減  
→ ジオメトリーの関係で垂直 (y) 方向の精度が重要
- エネルギーピーク (0.6 GeV) の高エネルギー領域 (0.7~1.1 GeV) で全体のフラックス不定性 8.0% に対して 4.1% の不定性.

# ニュートリノビームライン

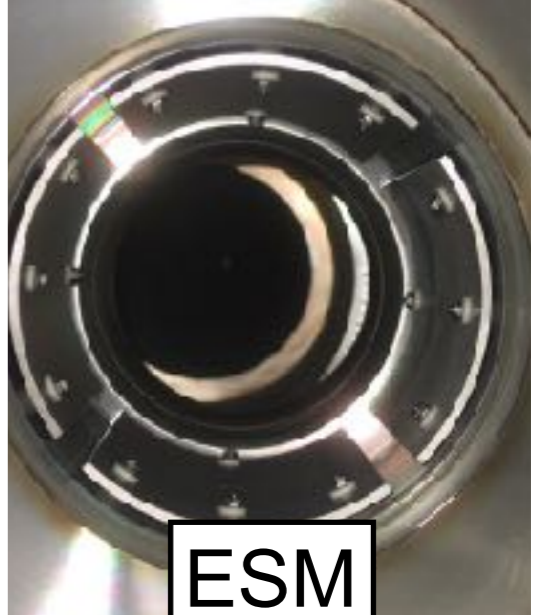
↓ビームラインを上から見た図



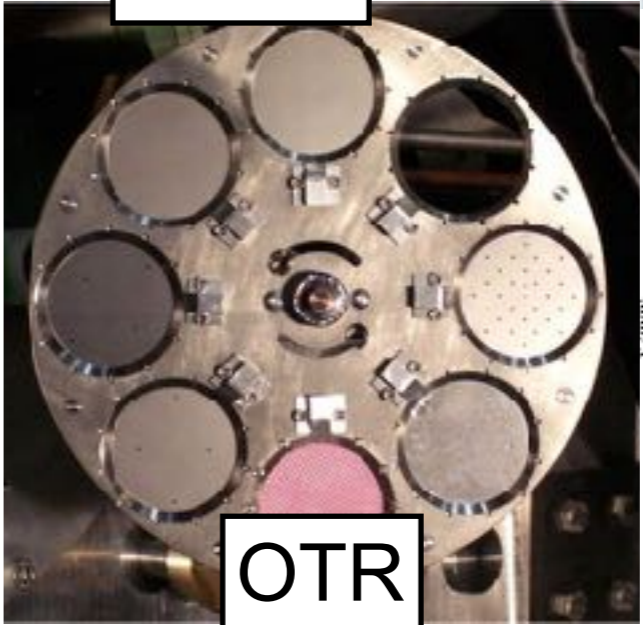
ターゲット



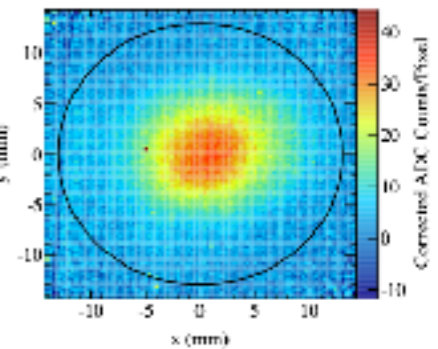
SSEM



ESM

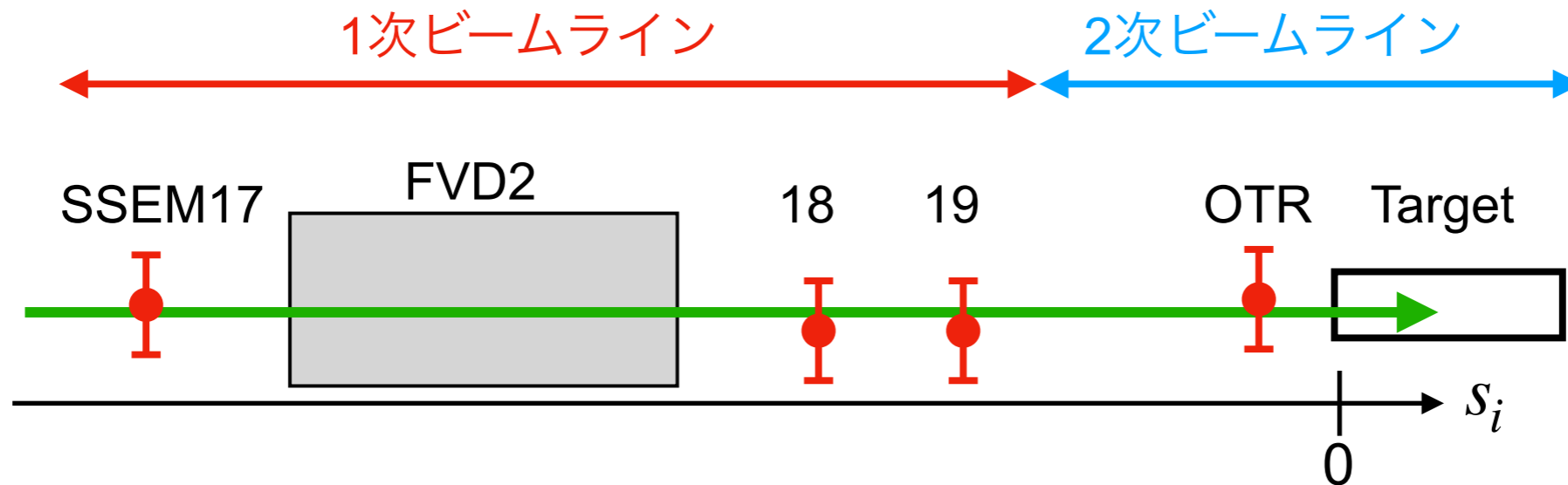


OTR



ビームモニター

# 再構成の手法



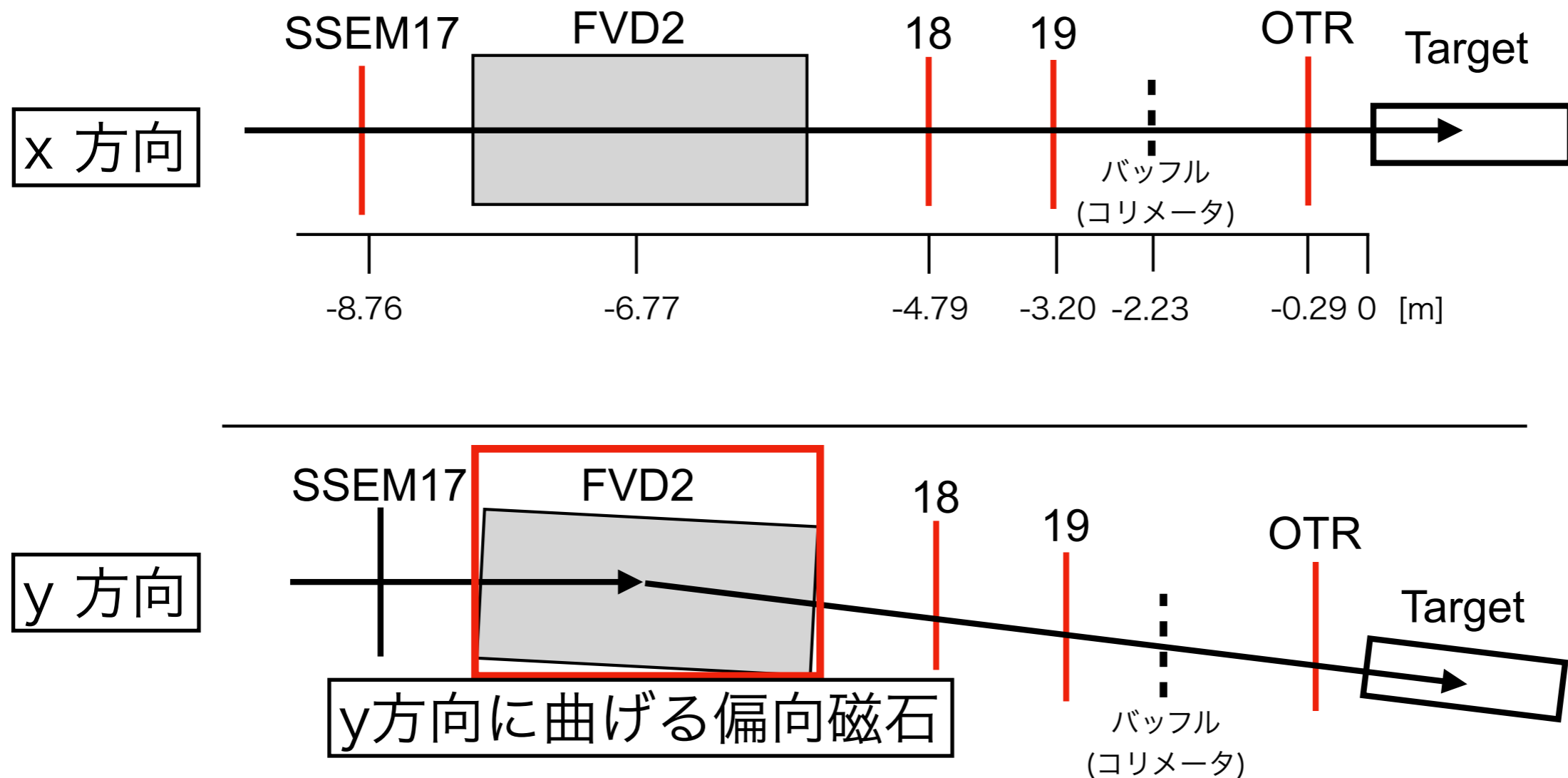
- モニターの測定値と  
測定誤差・アライメント誤差を用いて直線でフィッティング
- ビームライン上の建屋の違い  
→ビームラインオフセットとその誤差
- 立入りの難しい建屋であり特にy方向ではオフセット誤差が大きい

y方向に関する誤差要因とその値

モニター	測定誤差 [mm]	アライメント誤差 [mm]	オフセット誤差 [mm]
SSEM17	0.1~0.4	0.4	1.0
SSEM18	0.1~0.4	0.4	1.0
SSEM19	0.1~0.4	0.4	1.0
OTR	0.43	0.21	0

x 方向は0.3 mm

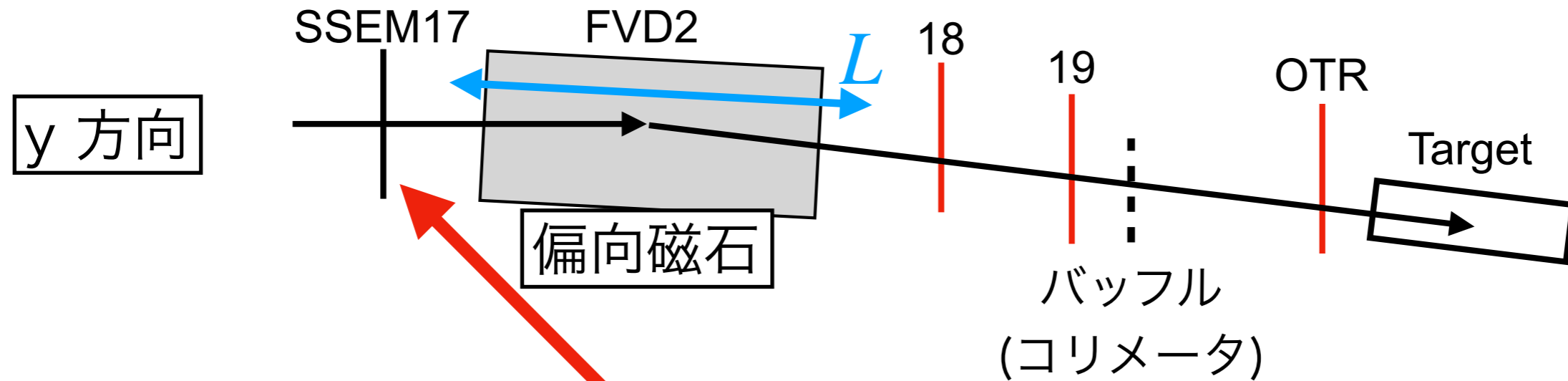
# ビーム軌道再構成(従来)



## [従来手法]

- x 方向 : 4つの測定点 (SSEM 17, 18, 19, OTR)
  - y 方向 : **偏向磁石**があるため 3つの測定点(SSEM18, 19, OTR)
- ➡ y 軌道の再構成は特に重要だが x 方向の再構成よりも精度が悪い。

# ビーム軌道再構成(本研究)



y 方向の軌道再構成にSSEM17を追加。

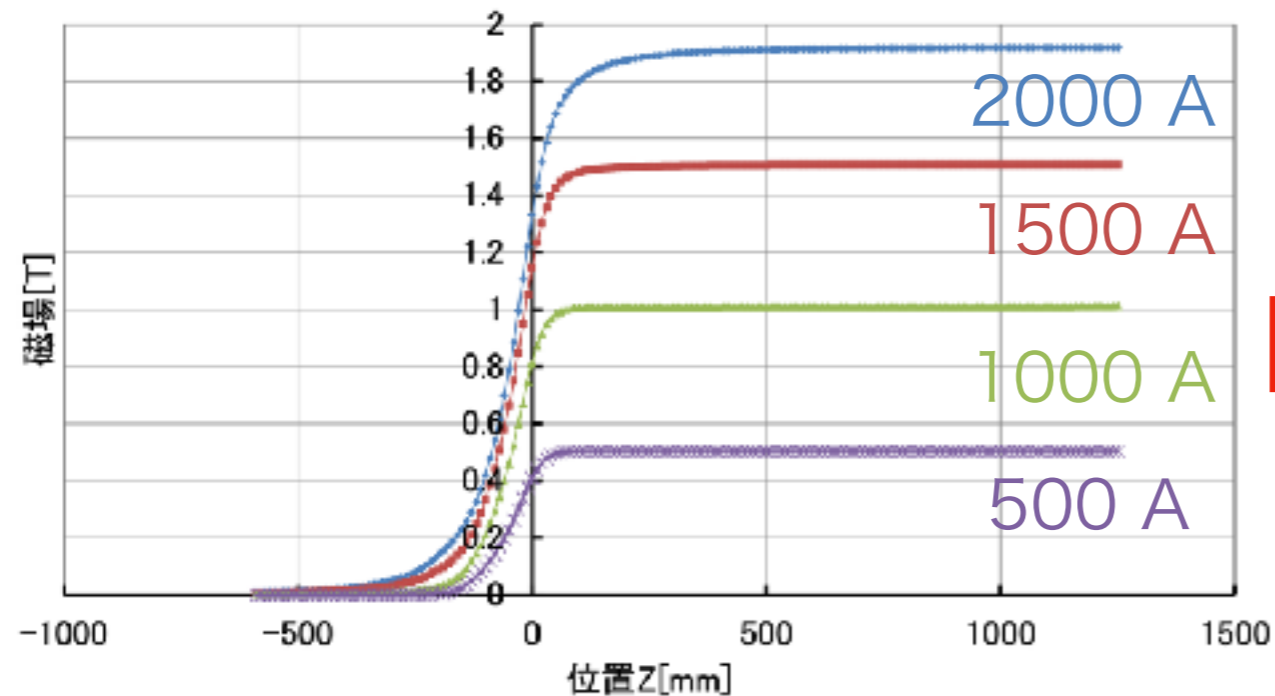
➡磁場中を進む陽子ビームの曲げ角( $\theta_{\text{calc}} = BLc/p$ )を

考慮するため偏向磁石のモデル化

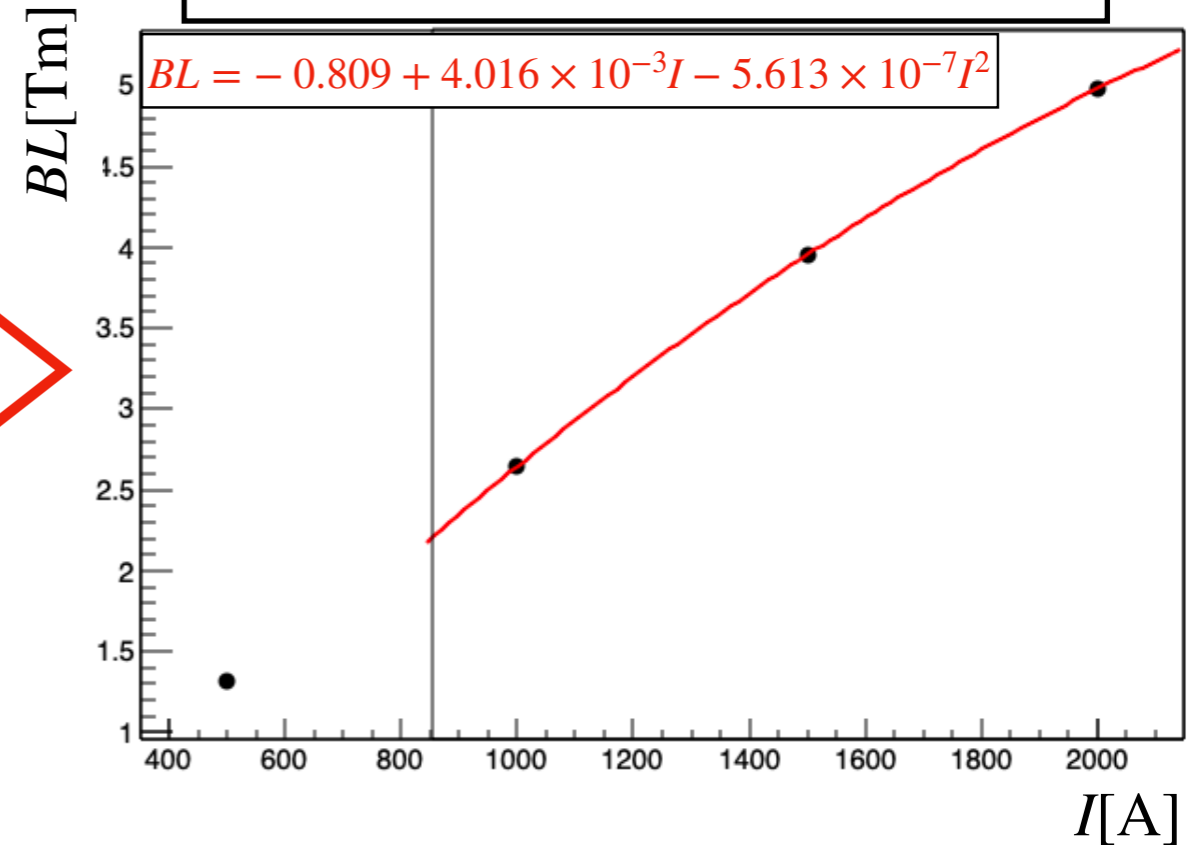
$B$ : 磁場の大きさ  
 $L$ : 磁場の長さ  
 $c$ : 光速  
 $p$ : 運動量

# $\theta_{\text{calc}}$ のための偏向磁石のモデル化

偏向磁石の印加電流と磁場分布の関係



磁石の電流値とBLの関係



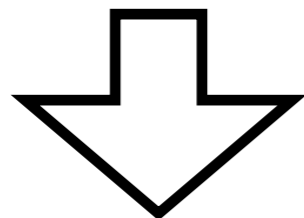
- 曲げ角の計算には、電流ごとの (磁場)×(長さ) =  $BL$ が必要
- 磁石の印加電流と磁場分布の関係→積分して電流値毎の  $BL$  を計算
- 1000, 1500, 2000 [A]の値を  $(a+bx+cx^2)$  でフィッティング
  - 偏向磁石の典型的な運転電流は約1540 A
- $BL(I) = -0.81 + 4.0 * 10^{-3} I - 5.6 * 10^{-7} I^2$

# BLの不定性の考慮 (修論から修正)

- ▶  $BL$  の測定には1%程度の誤差。
- ▶  $BL$  の補正項  $\beta$  をフィットパラメータとして追加： $BL \rightarrow BL(1 + \beta)$

## [修正前]

- 統計を貯めて $\beta$ の不定性を削減
- 精度良く $\beta$ を決定
- $\beta$ を固定して軌道再構成

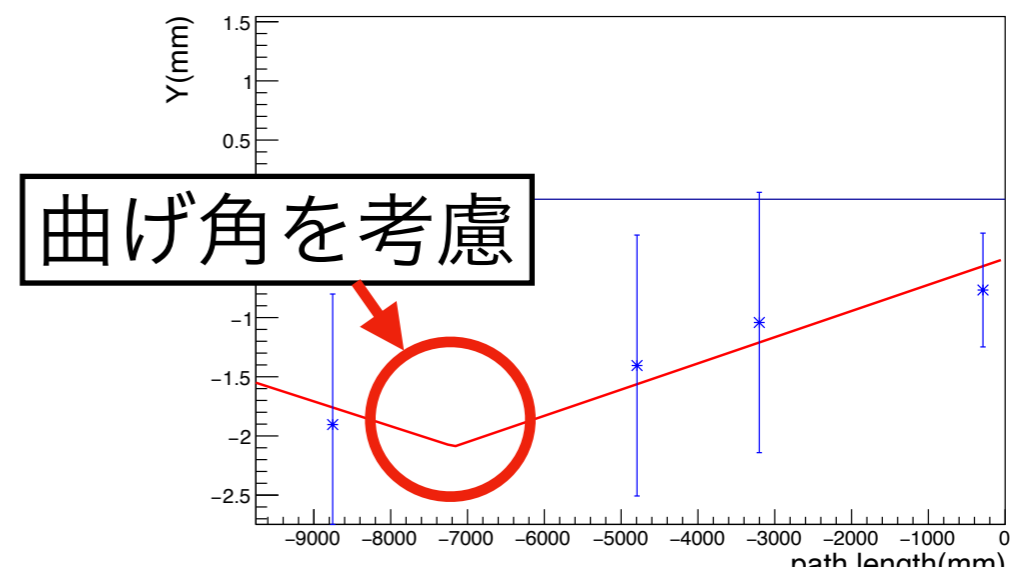


$\beta$ の系統誤差も誤って削減してしまっていた

→  $\beta$ を固定して得た軌道再構成誤差は、  
 $\beta$ の系統誤差を無視してしまっていた

## [修正後]

- $\beta$ を固定しない
- $\beta$ もフィットパラメータとした軌道再構成で精度改善を評価



# SSEM17を追加した軌道再構成

- あるRunの38 データセット(1980ショット)

✓フィット結果はSSEM17無しの時のフィット誤差の範囲で一致

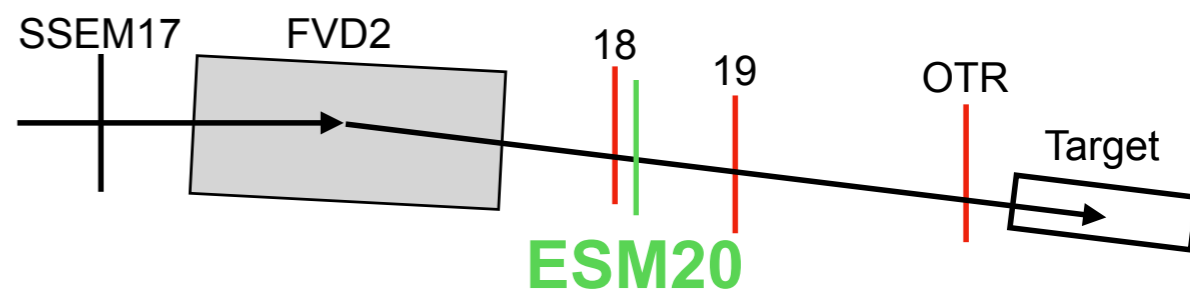
✓パラメータ誤差が削減

- ビーム位置誤差  $\delta y$  : 0.49  $\rightarrow$  0.46 mm
- ビーム角度誤差  $\delta y'$  : 0.25  $\rightarrow$  0.14 mrad

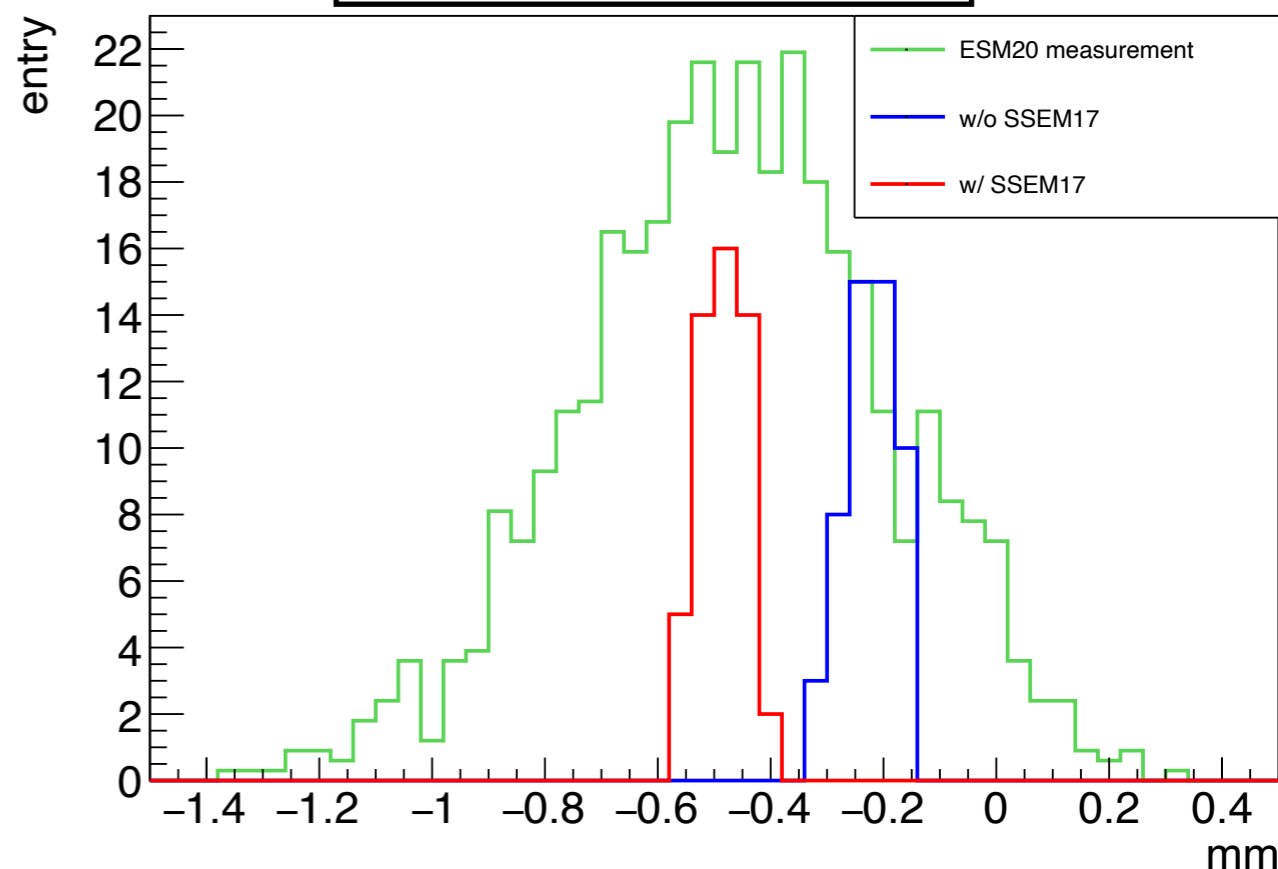
- 再構成に使用していないモニター (ESM20)の測定値と軌道再構成による予測値の比較

- ESM20 の平均値 : -0.47 mm
- SSEM17有りの予測値 : -0.49 mm
- SSEM17無しの予測値 : -0.23 mm

✓SSEM17有りは良く一致

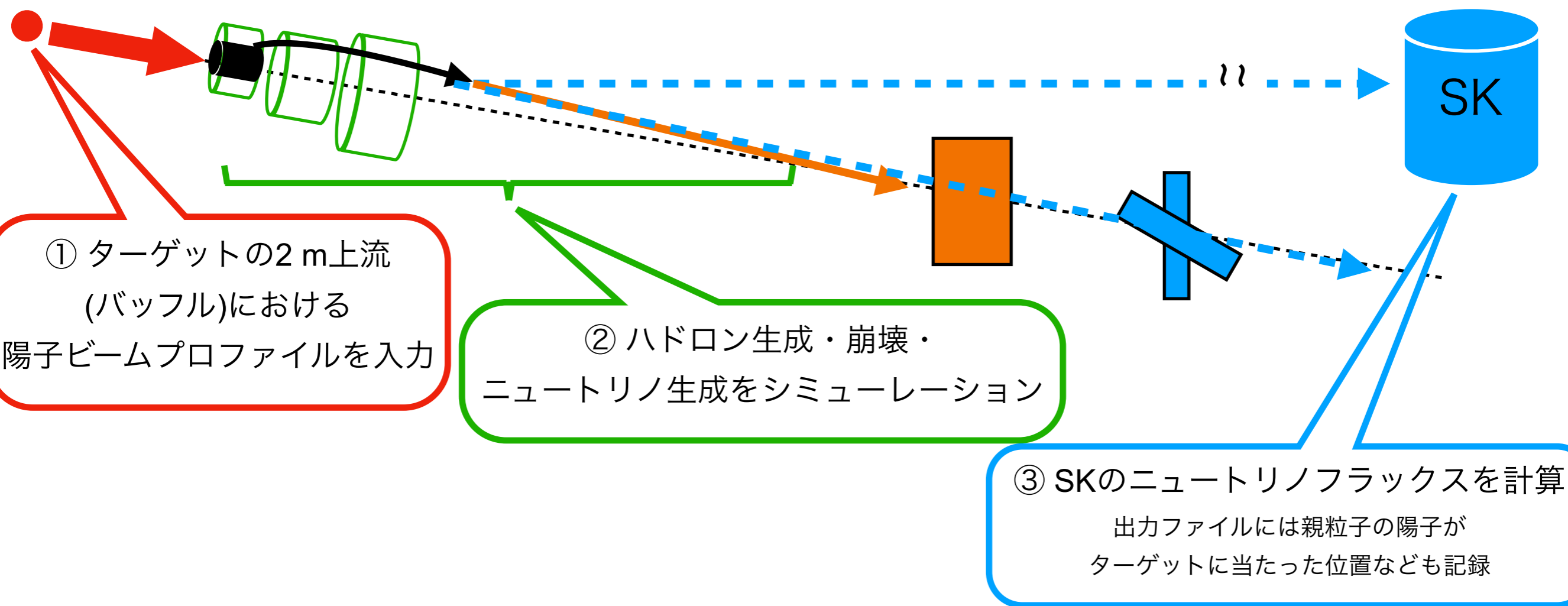


ESM20との比較



# ニュートリノフラックスのシミュレーション

- T2K実験ではニュートリノフラックスをシミュレーションで推定する



複数のパラメータ誤差についてシミュレーション → **長時間**

➡ 先行研究に従って“re-weighting”という手法で②を省略

# シミュレーションパラメータ

## [比較条件]

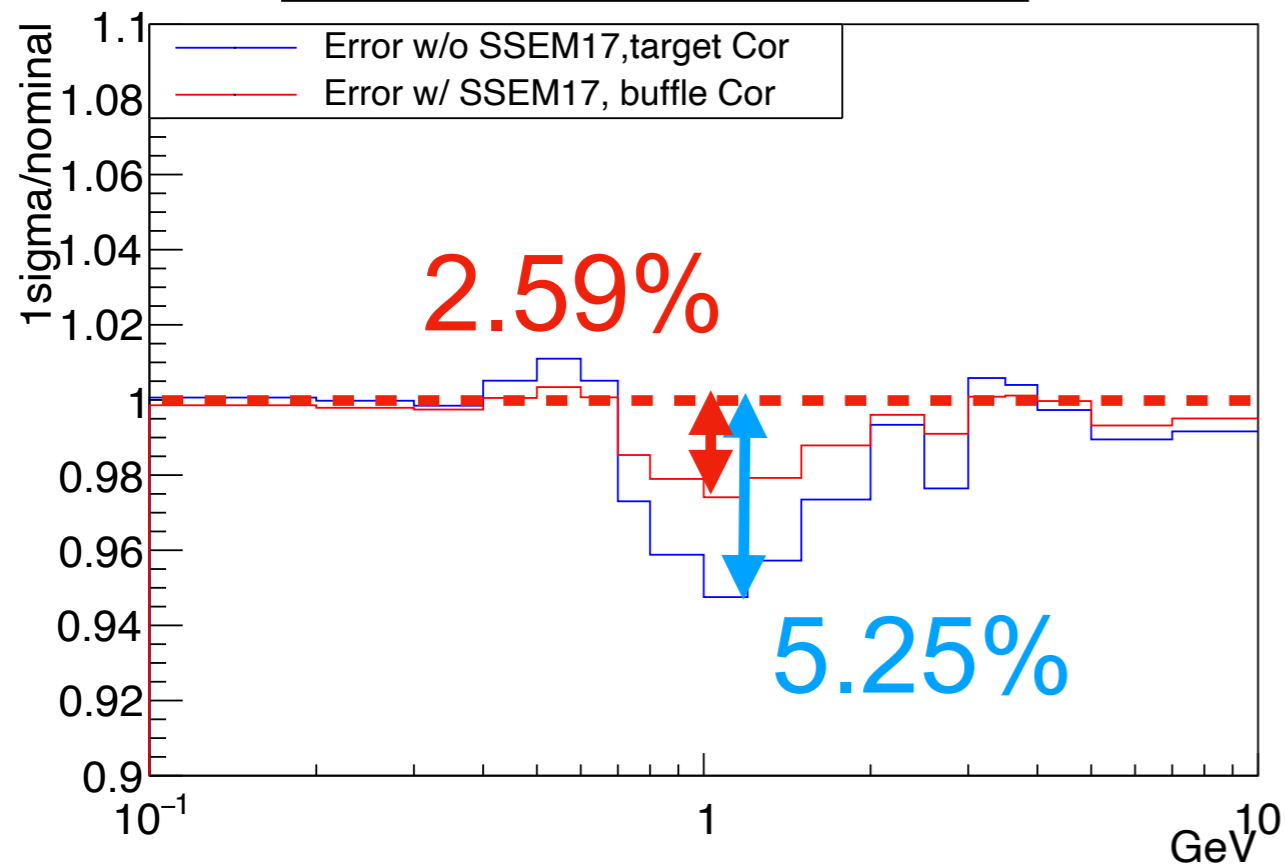
- ・ バッフルにおける陽子ビーム位置  $y_b$ , 角度  $y'_b$  の平均値は共通。
- ・ パラメータ誤差はSSEM17有無の軌道再構成の結果で異なる。
- ・ **従来解析ではパラメータ誤差の相関係数を間違えていたことが分かった**
  - ・ バッフルにおける相関係数であるべきだが、ターゲットにおける値を使用していた。
- ・ SSEM17無し → 従来通り **ターゲット**における相関係数を使用。
- ・ SSEM17有り → **バッフル**における相関係数を使用。

### バッフルにおけるパラメータセット

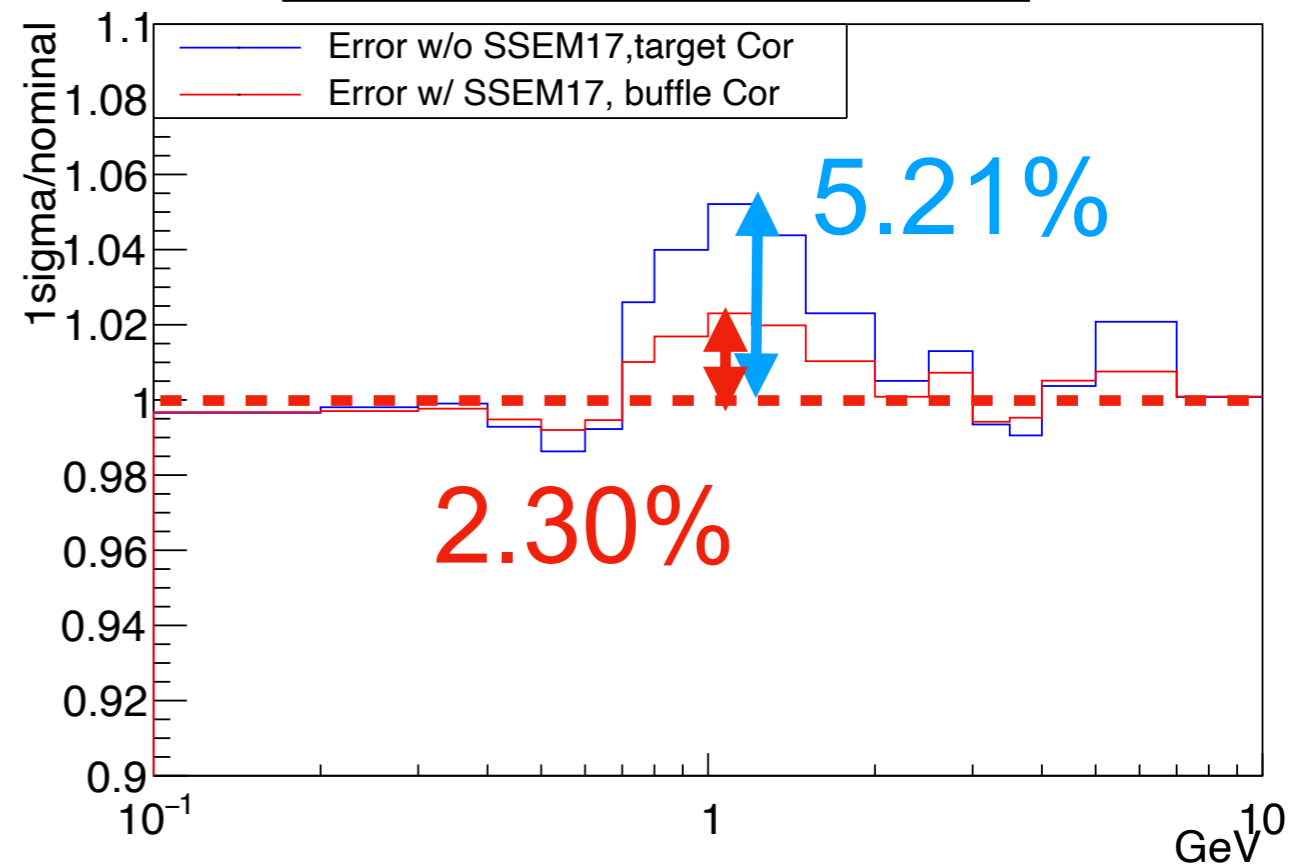
	SSEM17 無し	SSEM17 有り
ビーム位置 $y_b$ [mm]	-0.71 ± 0.54	-0.71 ± 0.47
ビーム角度 $y'_b$ [mrad]	0.08 ± 0.25	0.08 ± 0.14
相関係数 ( $y, y'_b$ )	0.43	-0.35

# フラックス不定性の比較

$(y_b + \sigma_{y_b}, y'_b + \sigma_{y'_b})$ の時



$(y_b - \sigma_{y_b}, y'_b - \sigma_{y'_b})$ の時



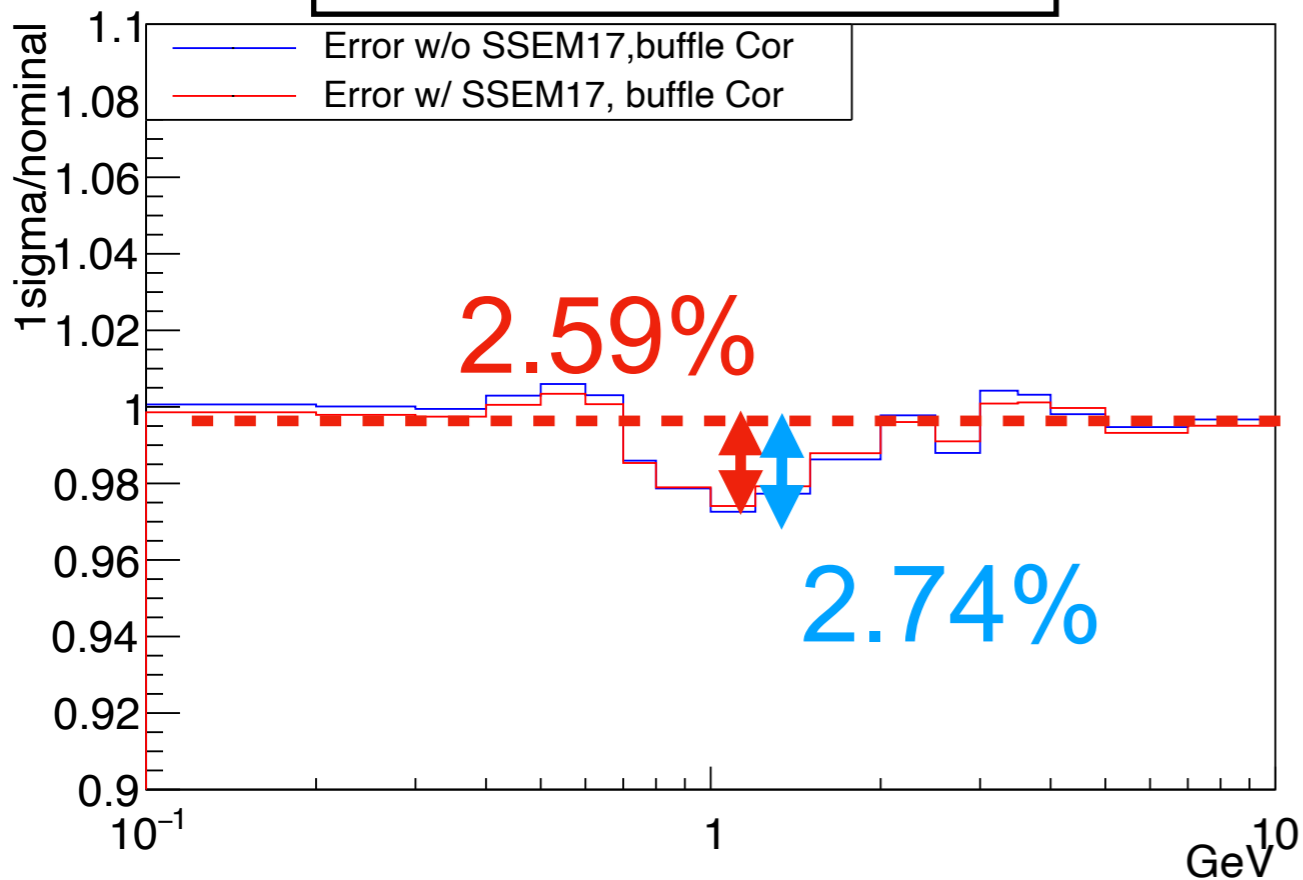
✓ 最大で5.25%だった不定性が2.59%に減少

修論では独立でない $(y_b, y'_b)$ パラメータセットで

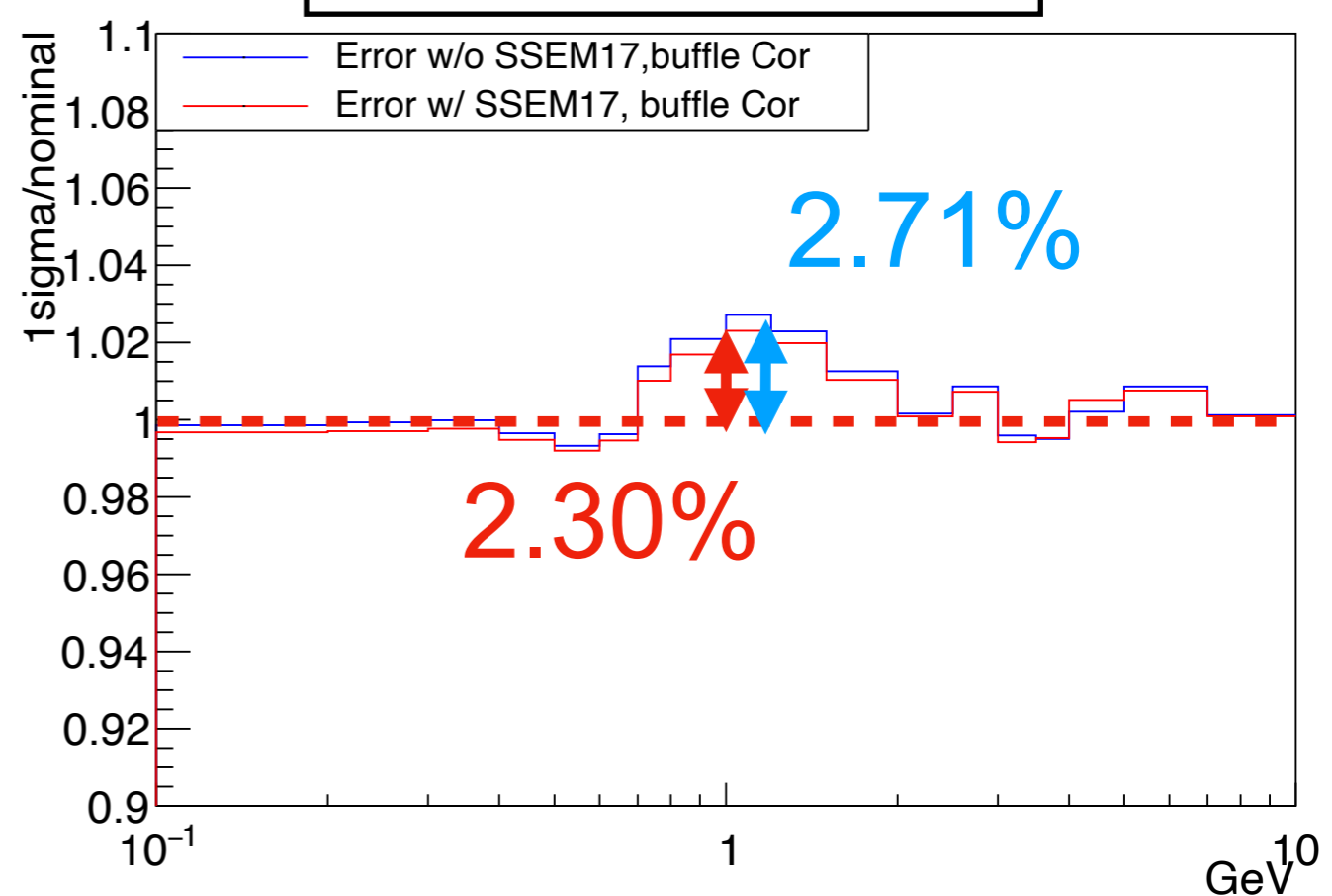
フラックス不定性を足し合わせていましたが、誤りです。

# 相関係数の違いの影響

$(y_b + \sigma_{y_b}, y'_b + \sigma_{y'_b})$ の時



$(y_b - \sigma_{y_b}, y'_b - \sigma_{y'_b})$ の時

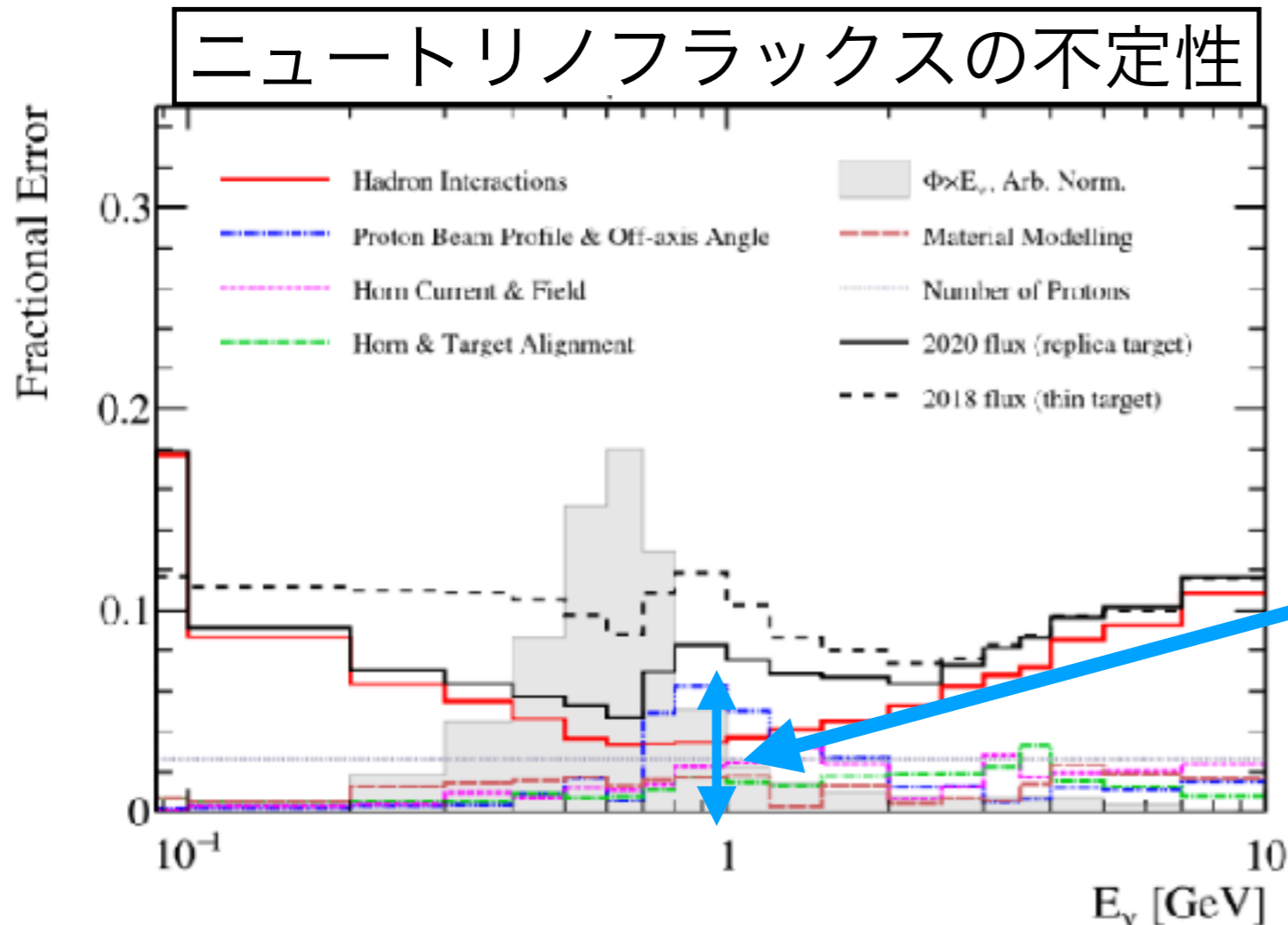


SSEM17無しのシミュレーションにも正しい相関係数を使用

→ SSEM17の有無でフラックス不定性は0.2ポイント削減

→ 本研究の誤差削減の主な寄与は相関係数の選択

# 残る不確定性の評価



陽子ビームとオフアクシス角の誤差に由来するフラックス不確定性 → **6.2%**

修士論文では陽子ビームの不確定性をさらに削減することが動機付けられたとしましたが、計算が不十分でした。

- 本研究で陽子ビーム不確定性が削減

✓ 残る不確定性は5.1%.

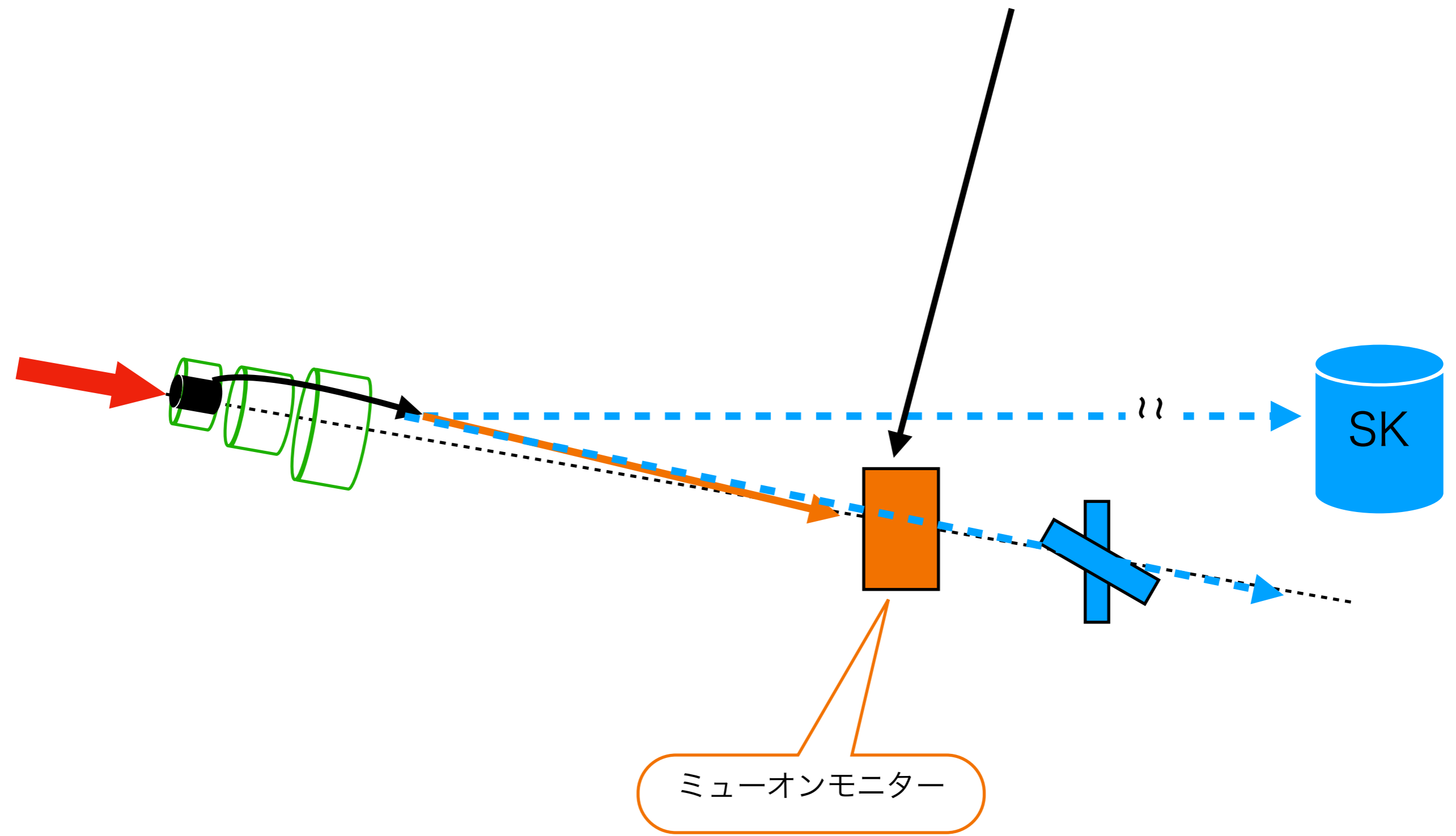
- 陽子ビームによる不確定性を全て削減しても4.7%.

→ 今後は $\nu$ ビーム方向の誤差削減に焦点を当てるべきである ←

# 軌道再構成手法のさらなる改善点

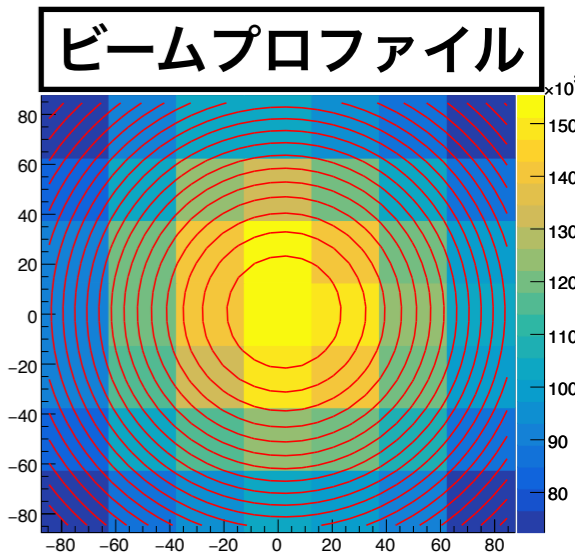
- $\beta$ は磁石の特性を表す→ビームには依存しない
- 連続したデータセット全体で $\beta$ を決める方が実際のビームラインの状況に近い
- ❖ ビーム軌道再構成手法のさらなる改善
  - 例) 50ショットのデータセットを使用
    - ビーム位置と角度はショット毎のパラメータ
    - $\beta$ は50ショットで1つのフィットパラメータ
      - 同様にモニターアライメント, オフセット補正量も1つにパラメータとして扱う

# 後半：電子増倍管によるミュオンビーム測定



# ミュオンモニター(MUMON)

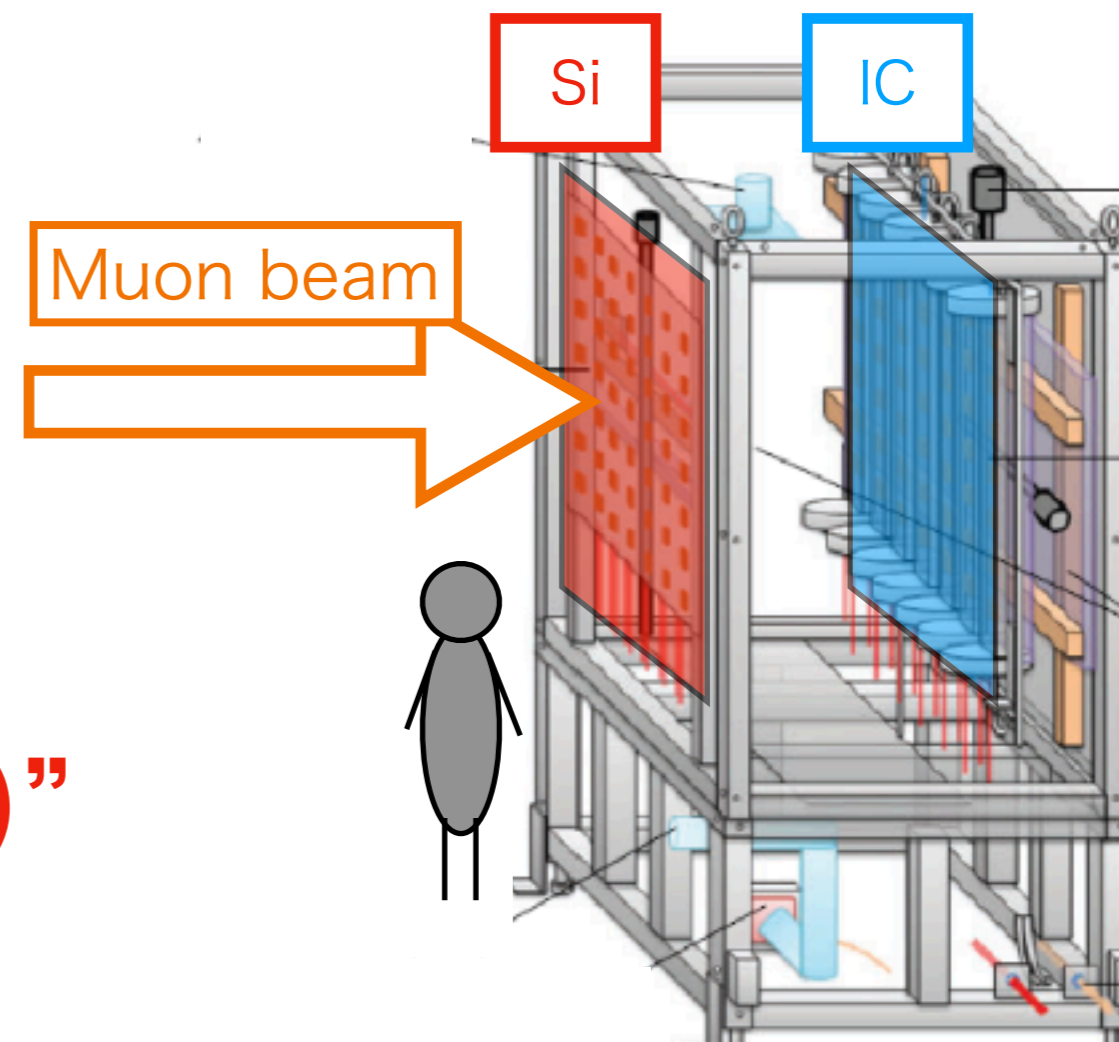
- 1.5 m×1.5 mの範囲に  $7 \times 7 = 49$  個 のセンサー
- シリコンセンサー(Si)とイオンチェンバー(IC)の2種類
- 電荷分布からビーム中心, 幅を再構成
- ターゲット下流でリアルタイム測定が唯一可能
- **3.3 cm (0.28 mrad)**の精度で方向測定が可能(要求値3.5 cm)



## [現在の課題]

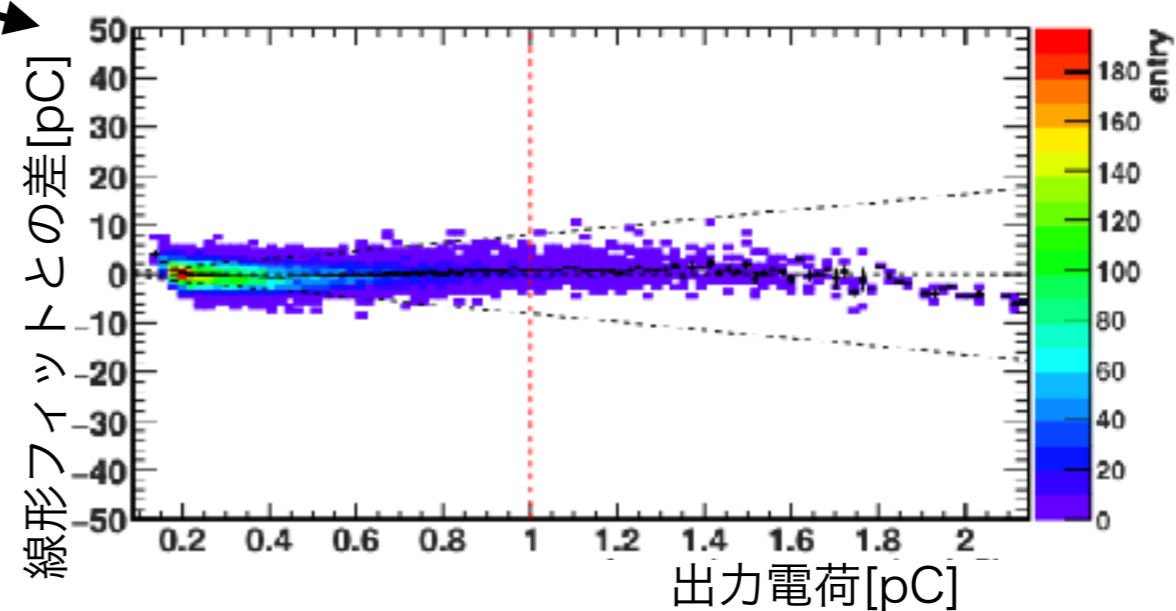
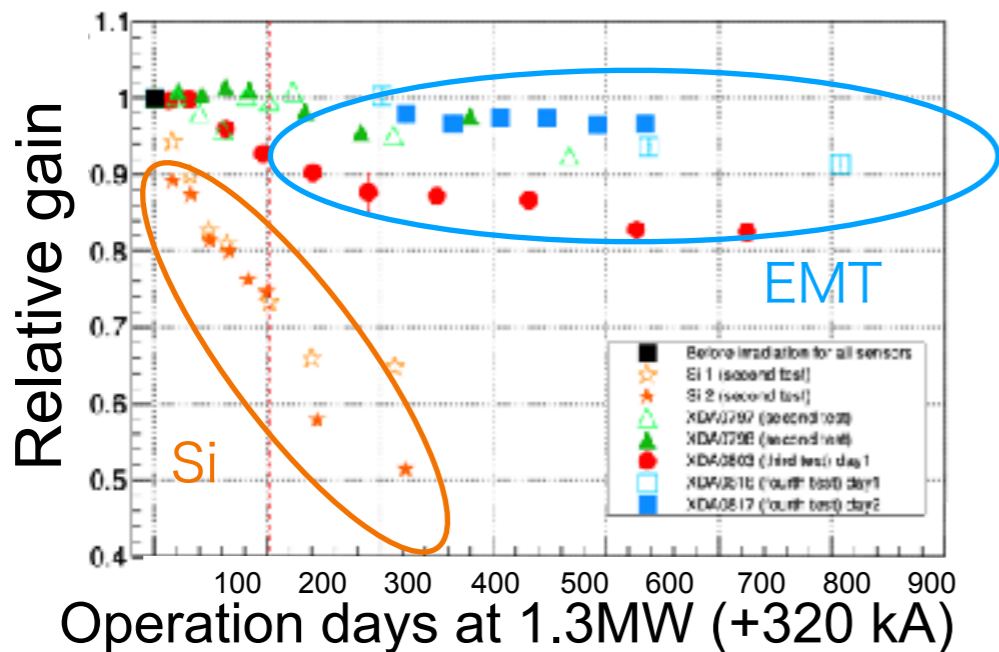
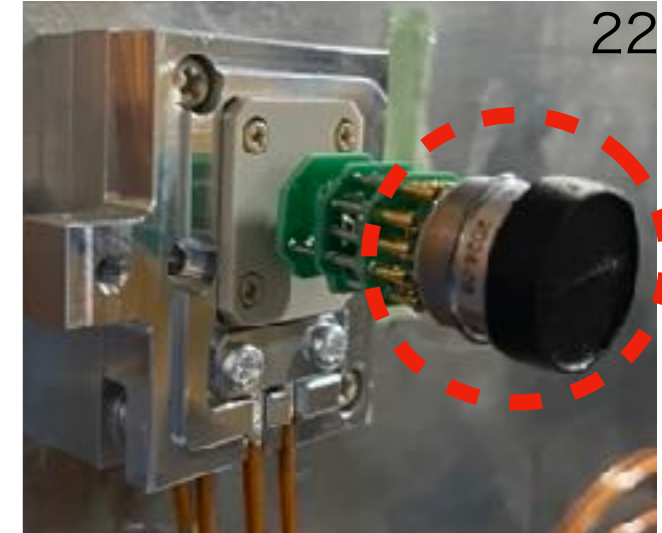
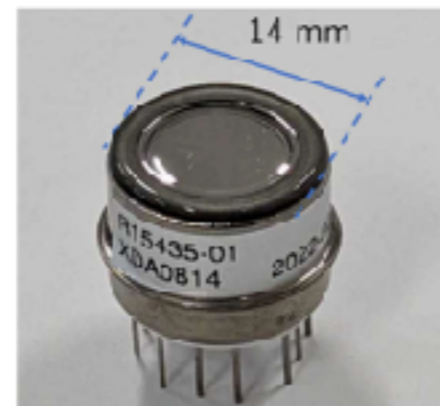
- ▶ 将来の1.3 MWに対応できない
- 高放射線耐性、高強度での線形性  
両方を持ったセンサーが必要

→新センサー”電子増倍管(EMT)”

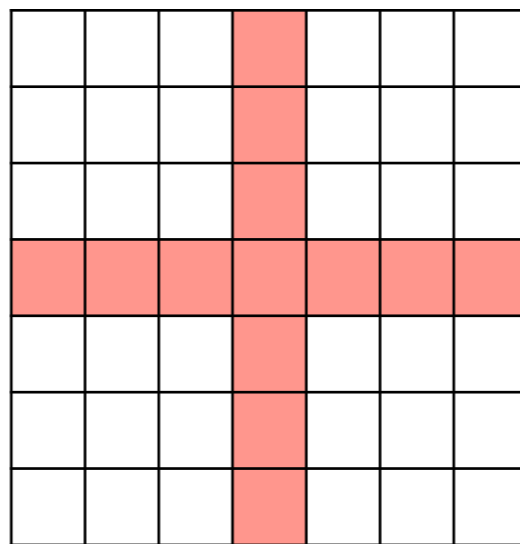


# 電子増倍管 (EMT)

- PMTの光電面にアルミを蒸着  
→荷電粒子の通過で二次電子が放出
- 2019~2022年ビームテスト@東北大学 ELPH(電子ビーム)
  - 高い放射線耐性
  - 1.3MWでも要求を満たす線形性

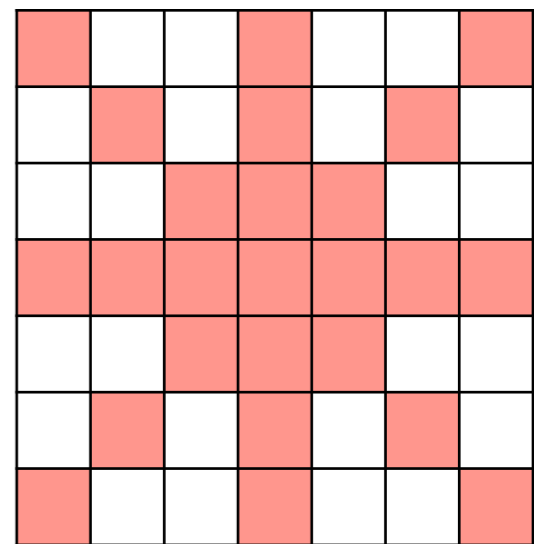


2024年：13個で十字型配置  
(本研究で主に議論)  
2025年：25個で星型配置



EMTの→  
星型配置

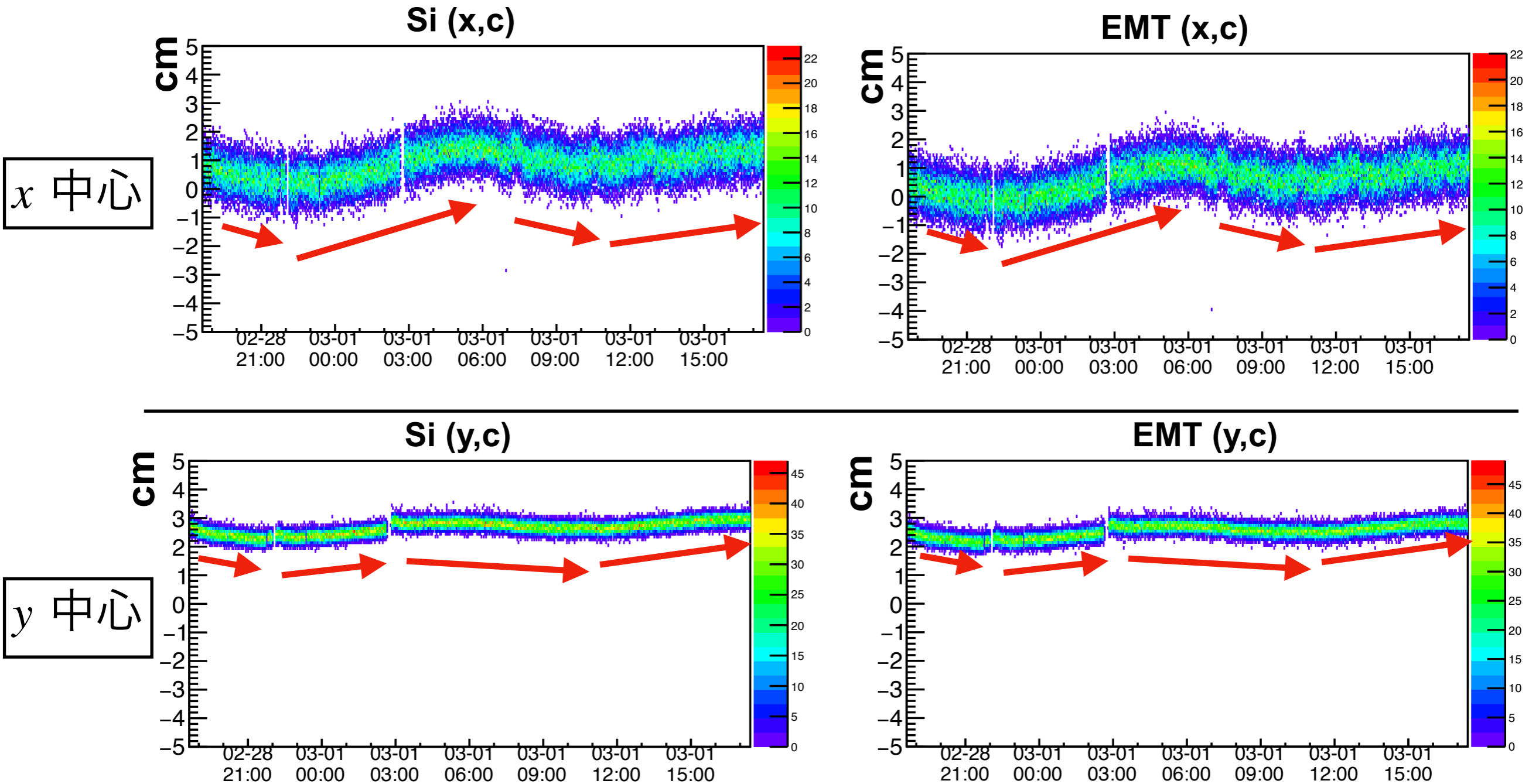
←EMTの  
十字型配置



# 高強度ビームの測定

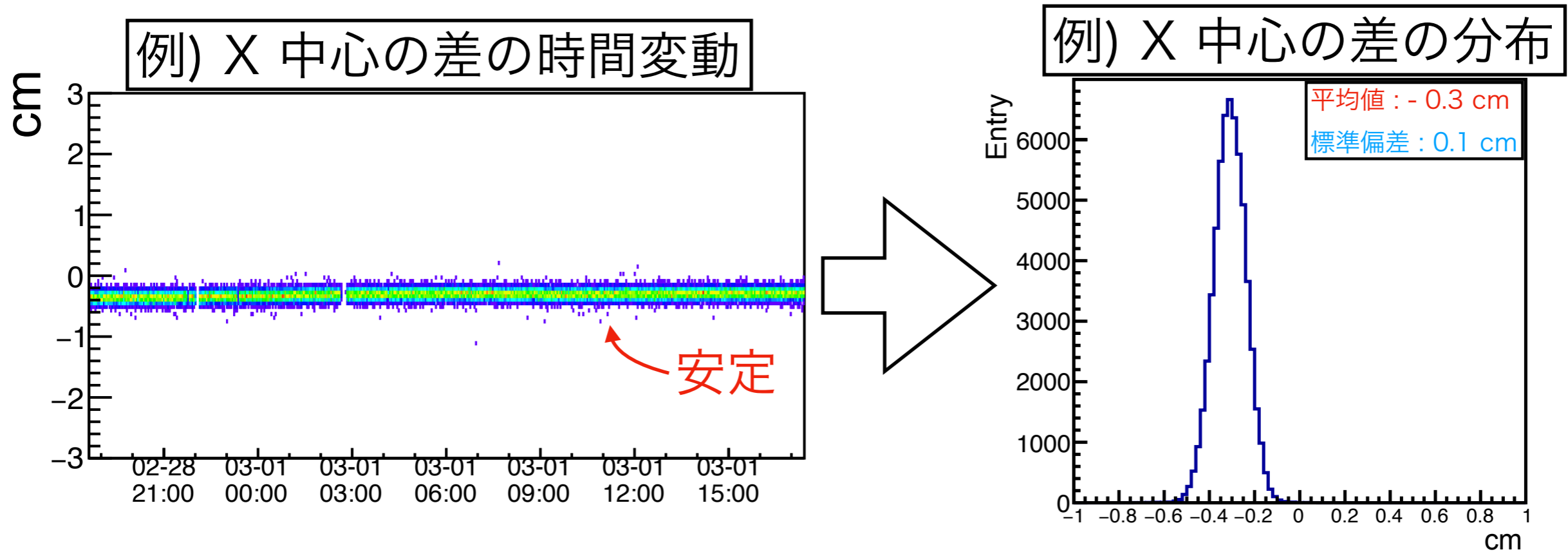
- ビーム強度が約100 kW以上
- 主に物理データ測定に使用
- 3.5 cm(0.3 mrad)以上のビーム方向測定精度が要求

# ビーム中心の時間変動への感度



✓ SiとEMTで同じような時間変動が見られる。

# Siの測定値との差 (EMT - Si)



[cm]	差の平均値	差の標準偏差
X 中心	-0.3	0.1
Y 中心	-0.1	0.1
X 幅	2.3	0.1
Y 幅	1.1	0.1

MUMONの  
系統誤差(3.3 cm)よりも小さい

✓ 要求精度を満たす

測定したビーム幅(約85 cm)に  
対して大きな差とは言えない

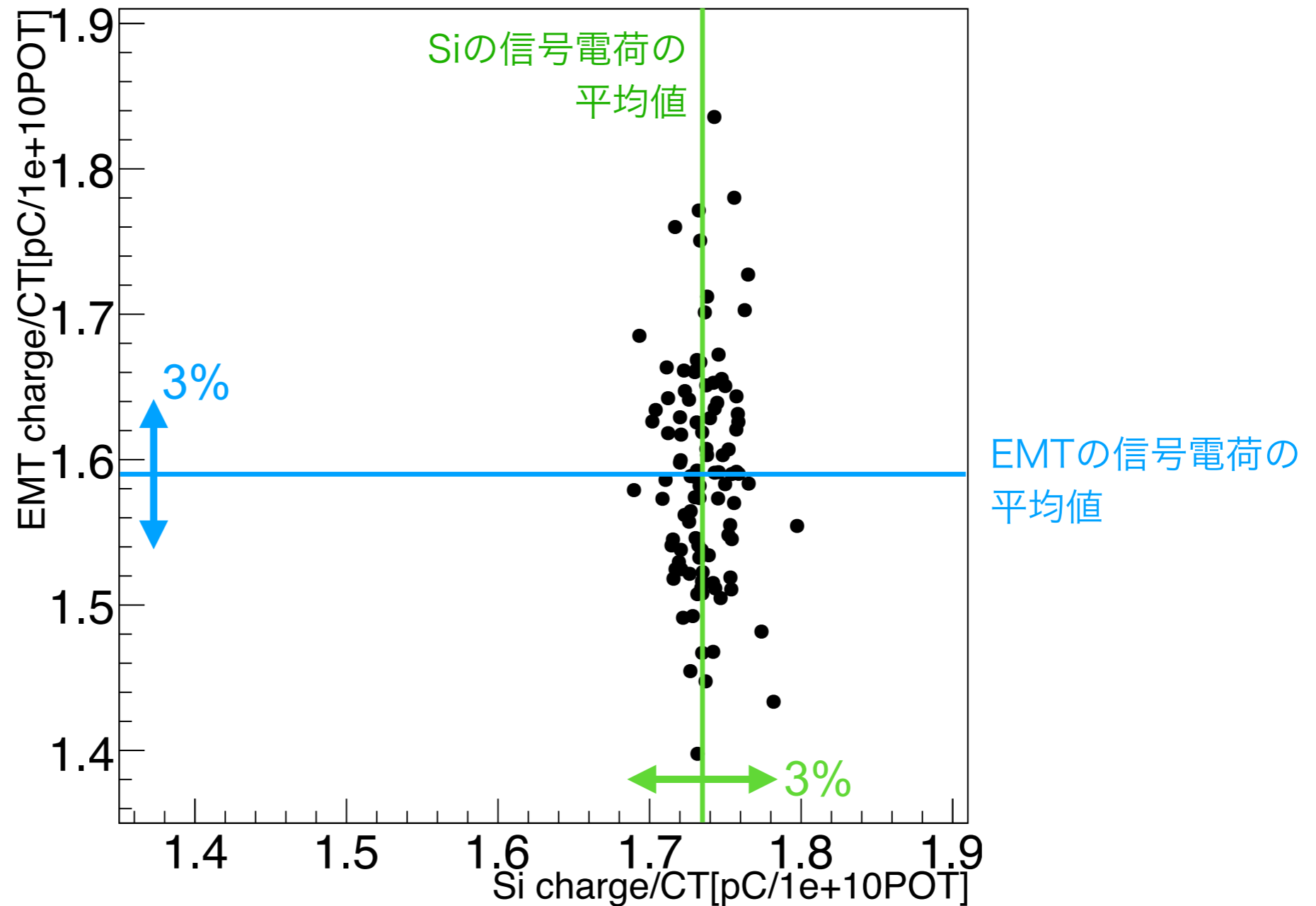
✓ 今後の測定の注目点

# 低強度ビームの測定

- 低強度(~1 kW)でも精度良いプロファイル測定が必要
  - 高強度ビームがターゲットの中心を外れると  
加速器設備の**安全が担保できない**
  - 比較的安全な低強度からビームを中心に合わせていく

# 低強度ビームの電荷測定

低強度ビームにおけるSiとEMTの信号電荷の関係

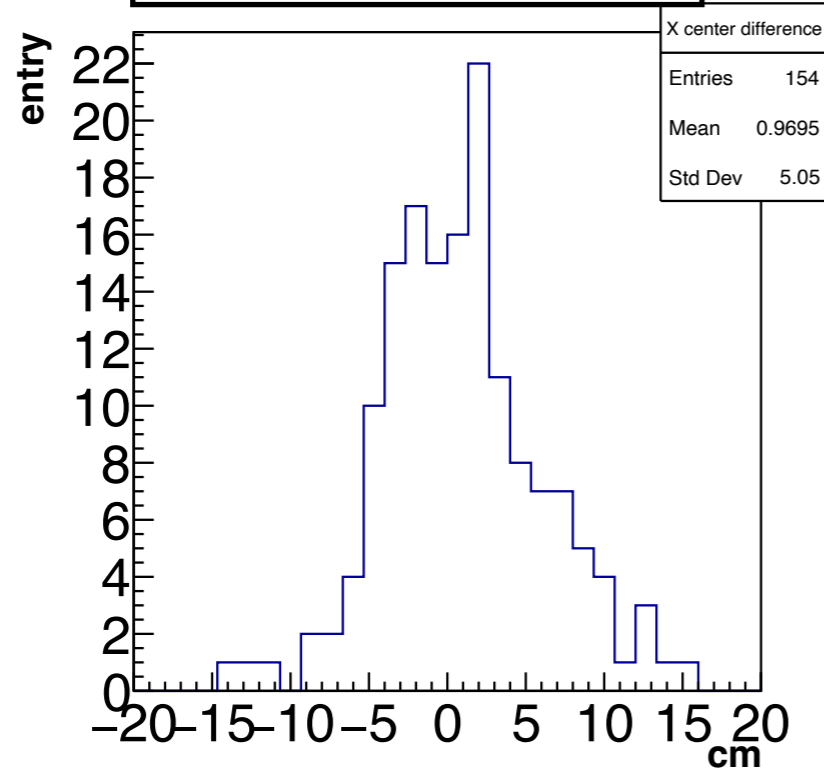


中心のEMTとSiの信号電荷の関係

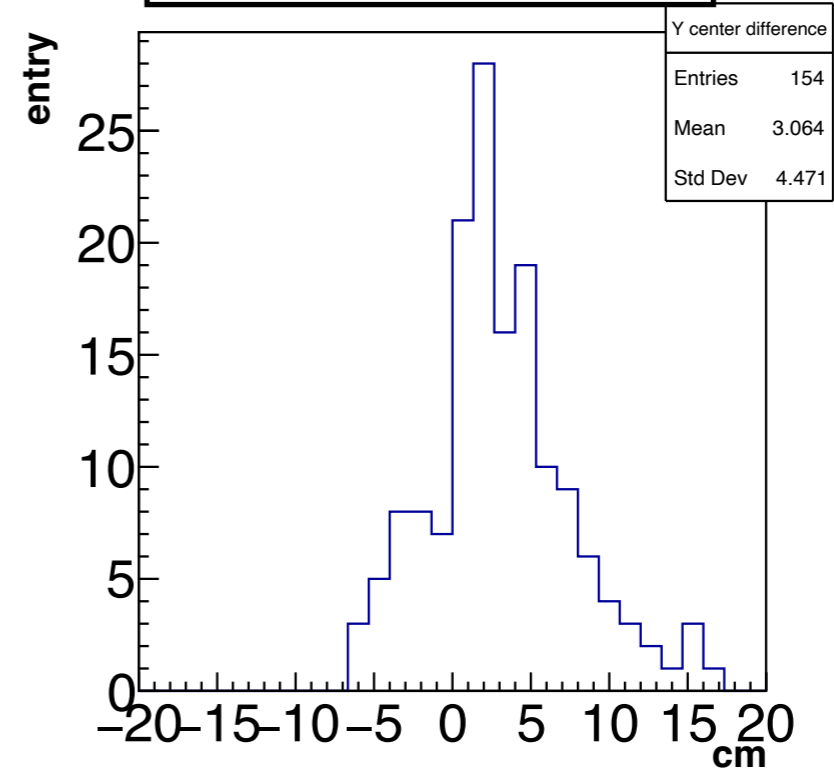
→ EMTは低強度では電荷が不安定で1ショット毎にばらつく

# Siの測定値との差 (EMT - Si)

例) X 中心の差



例) Y 中心の差



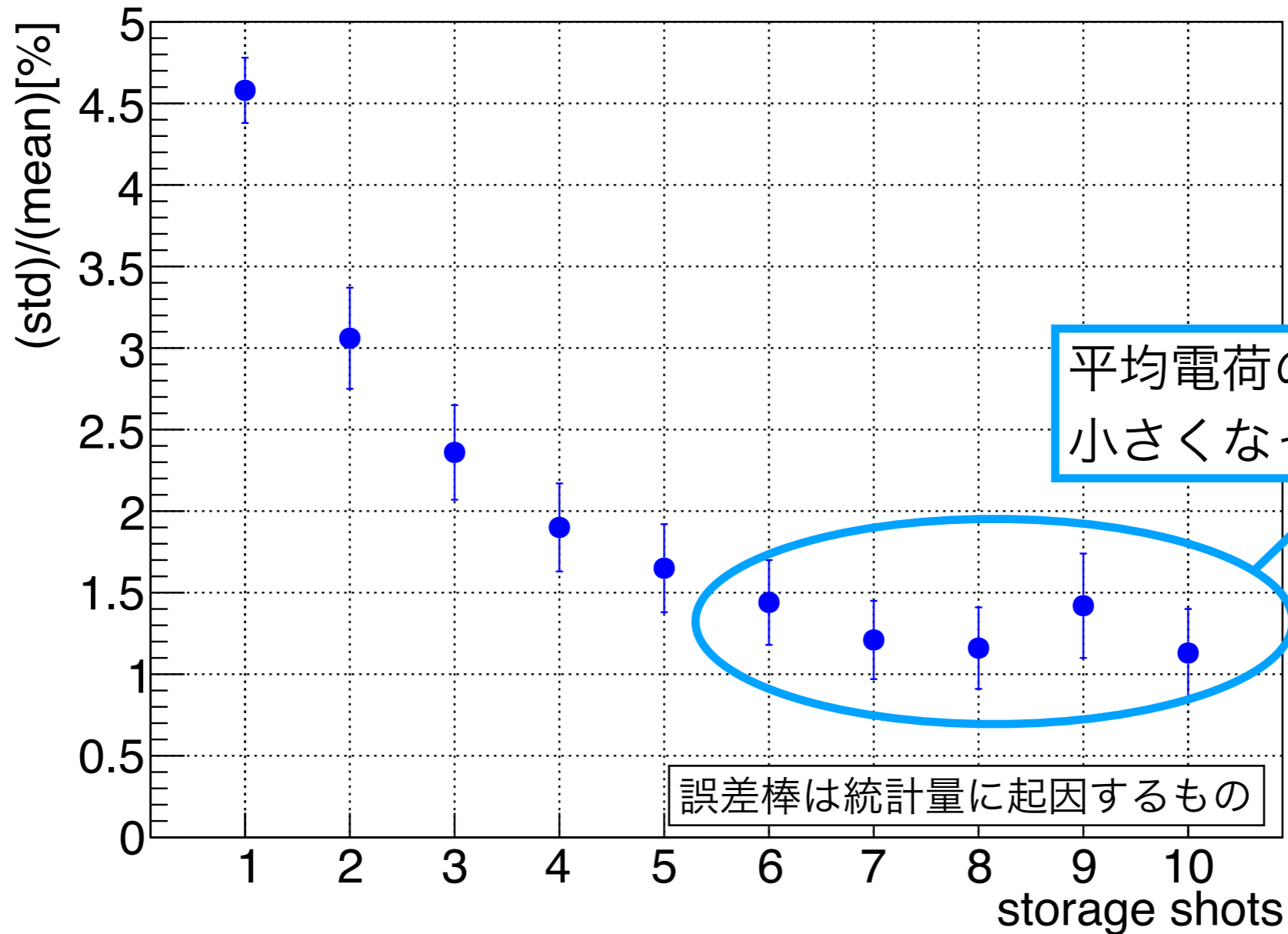
[cm]	差の平均値	差の標準偏差
X 中心	1.0	5.1
Y 中心	3.1	4.5
X 幅	1.1	8.0
Y 幅	0.9	9.3

EMTはSiに対して測定値が  
5 cm程度不安定である。

±1.5 cmの安定性が要求される  
→ 1ショットごとの測定では  
この変動に感度がなく問題

# 測定不安定性への対策

貯めたショット数とその平均電荷の分布のばらつきとの関係



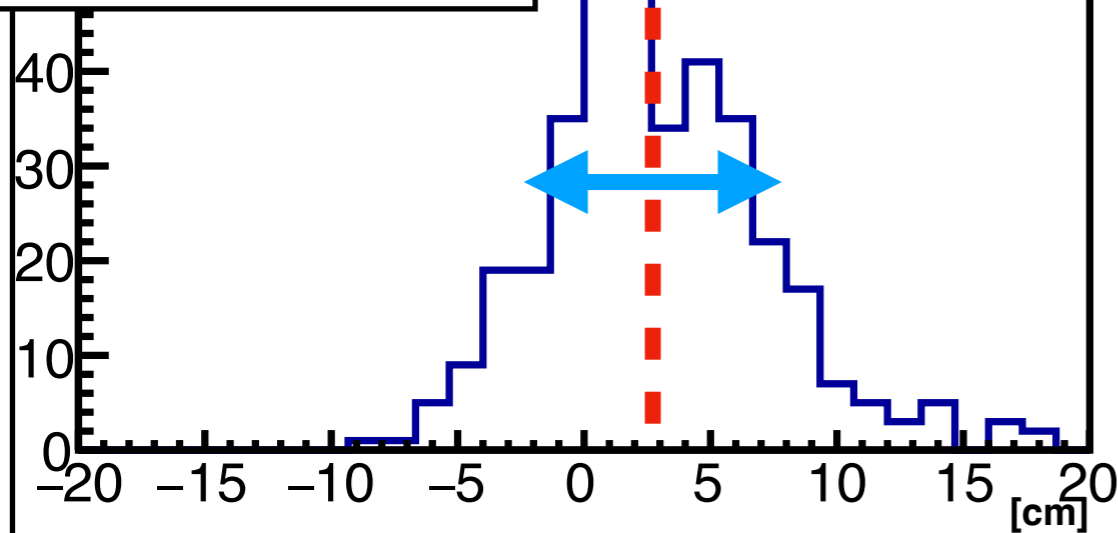
ショットを貯めることは可能 → 平均電荷の安定性を確認

→ 数ショットの平均電荷でビームを測定

# 例)4ショットの平均電荷で測定

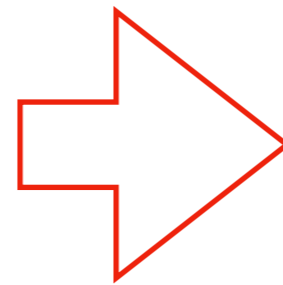
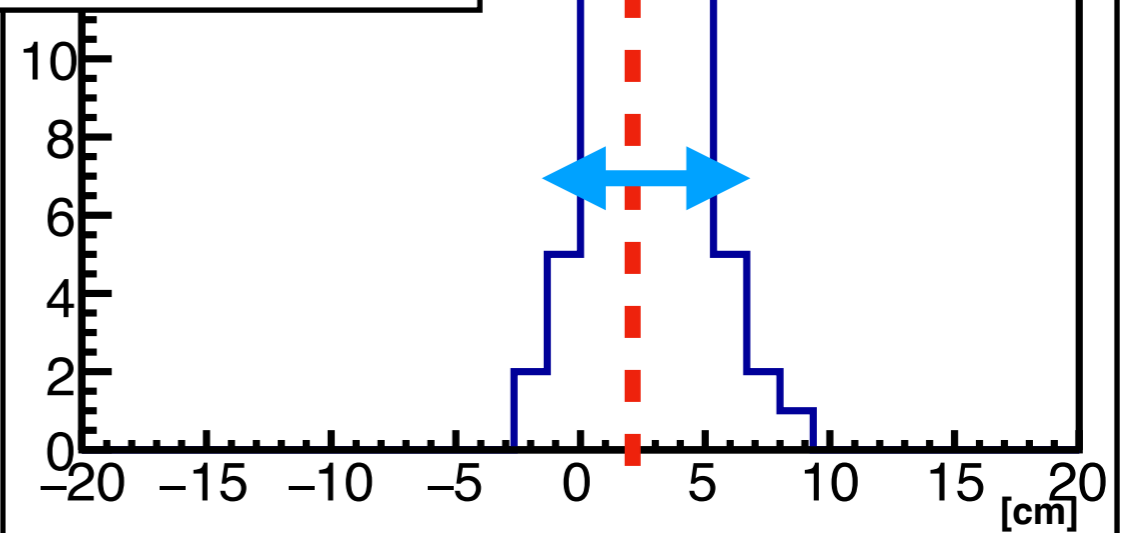
y中心における1ショット毎のEMT-Si

平均値 : 2.8 cm  
標準偏差 : 4.3 cm



y中心における4ショット平均のEMT-Si

平均値 : 2.7 cm  
標準偏差 : 2.2 cm

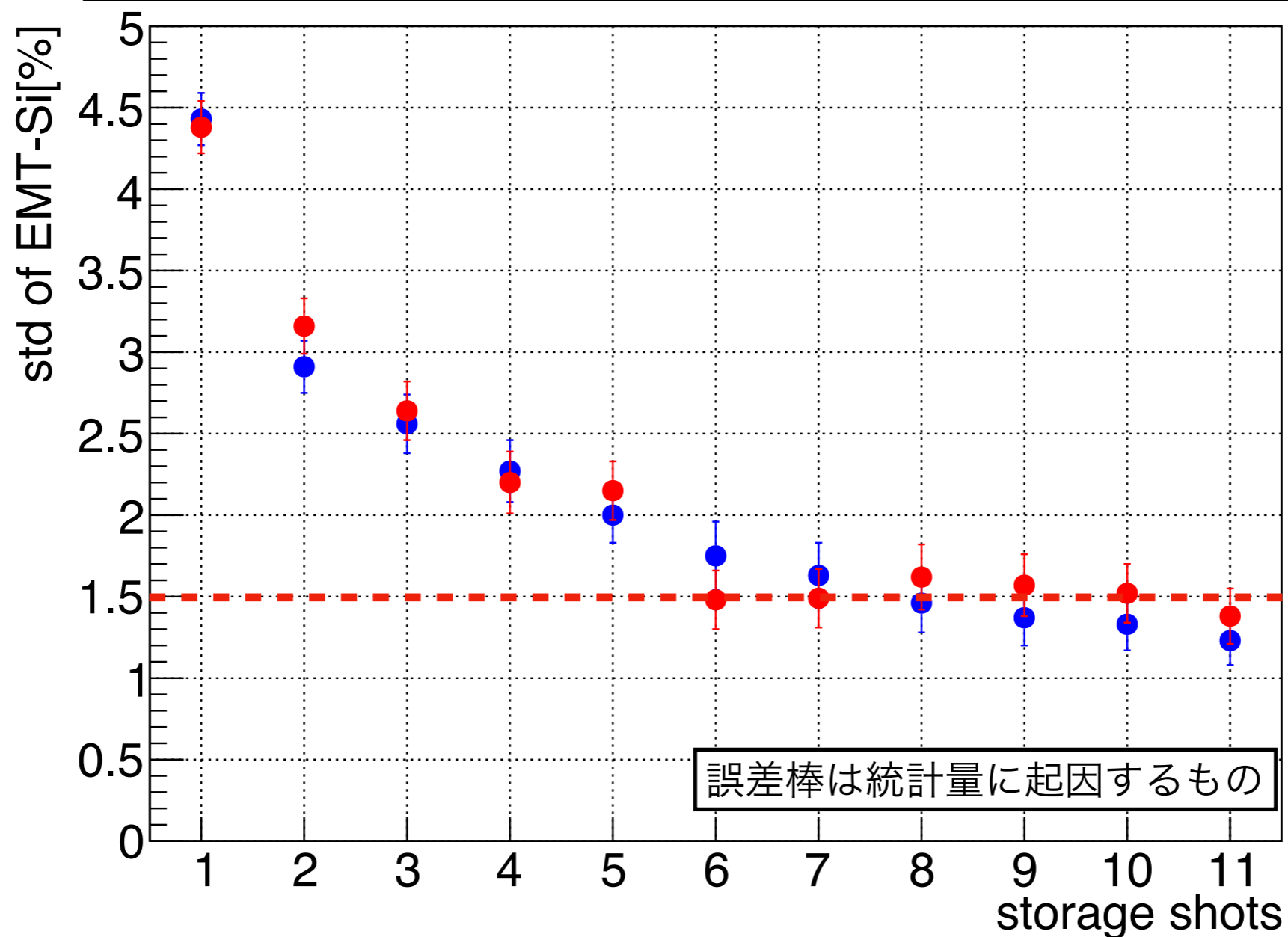


SiとEMTの測定値の差の標準偏差は約50%に減少

✓ SiとICの測定値の違いに起因する系統誤差(2.2 cm)に近い値

# 平均ショット数と差の標準偏差の関係

貯めたショット数とSiに対するEMTの測定の安定性の関係

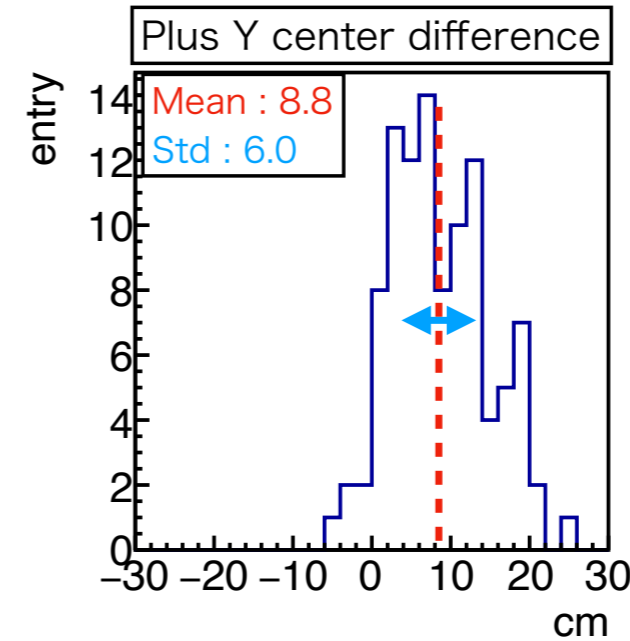
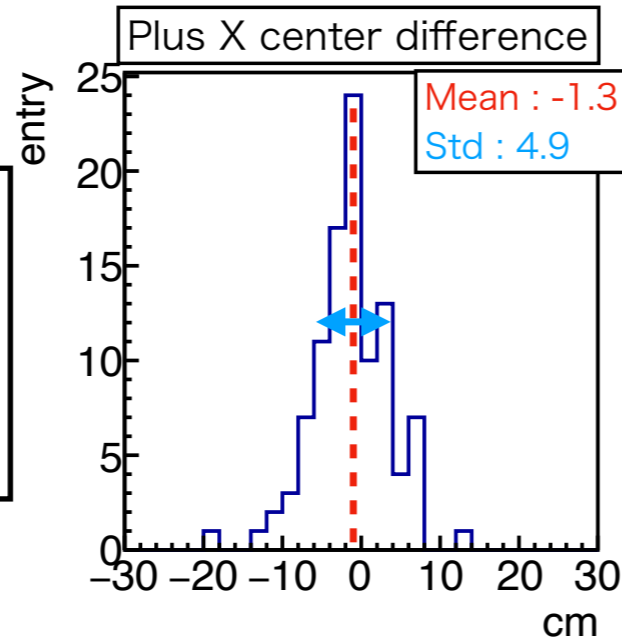


MUMONへの要求値は $\pm 1.5$  cmの安定性

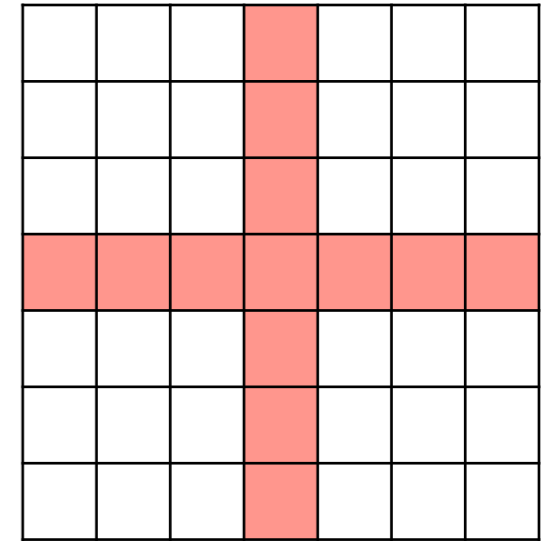
✓ 7ショット程度の平均電荷を取れば要求精度に到達

# 十字型・星型配置の性能比較

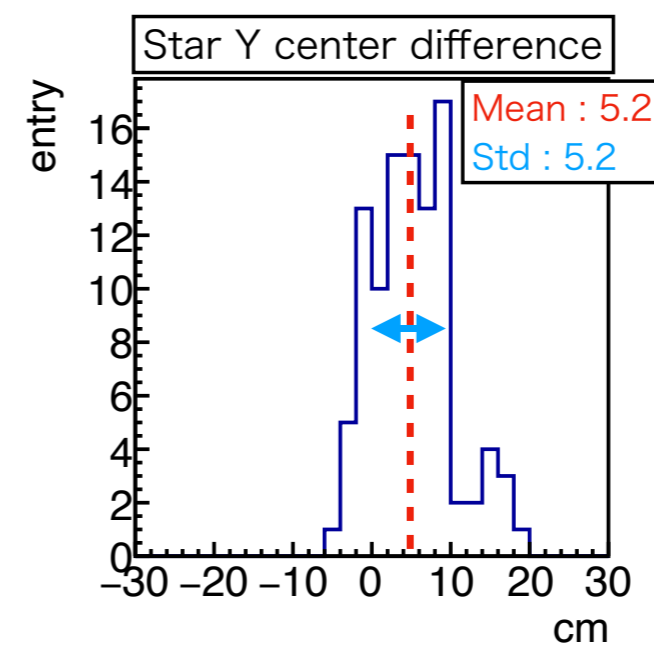
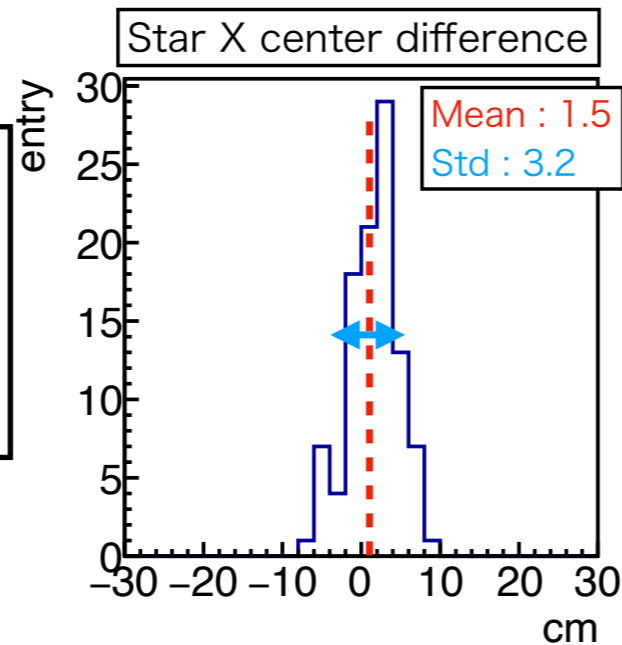
十字型配置の  
測定  
(1ショット毎)



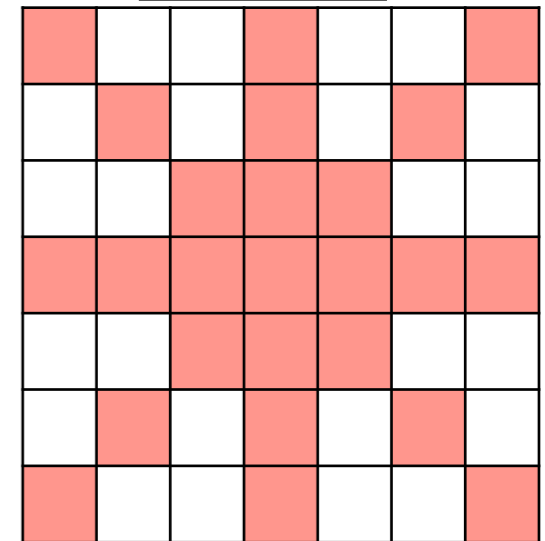
十字型配置



星型配置の  
測定  
(1ショット毎)



星型配置



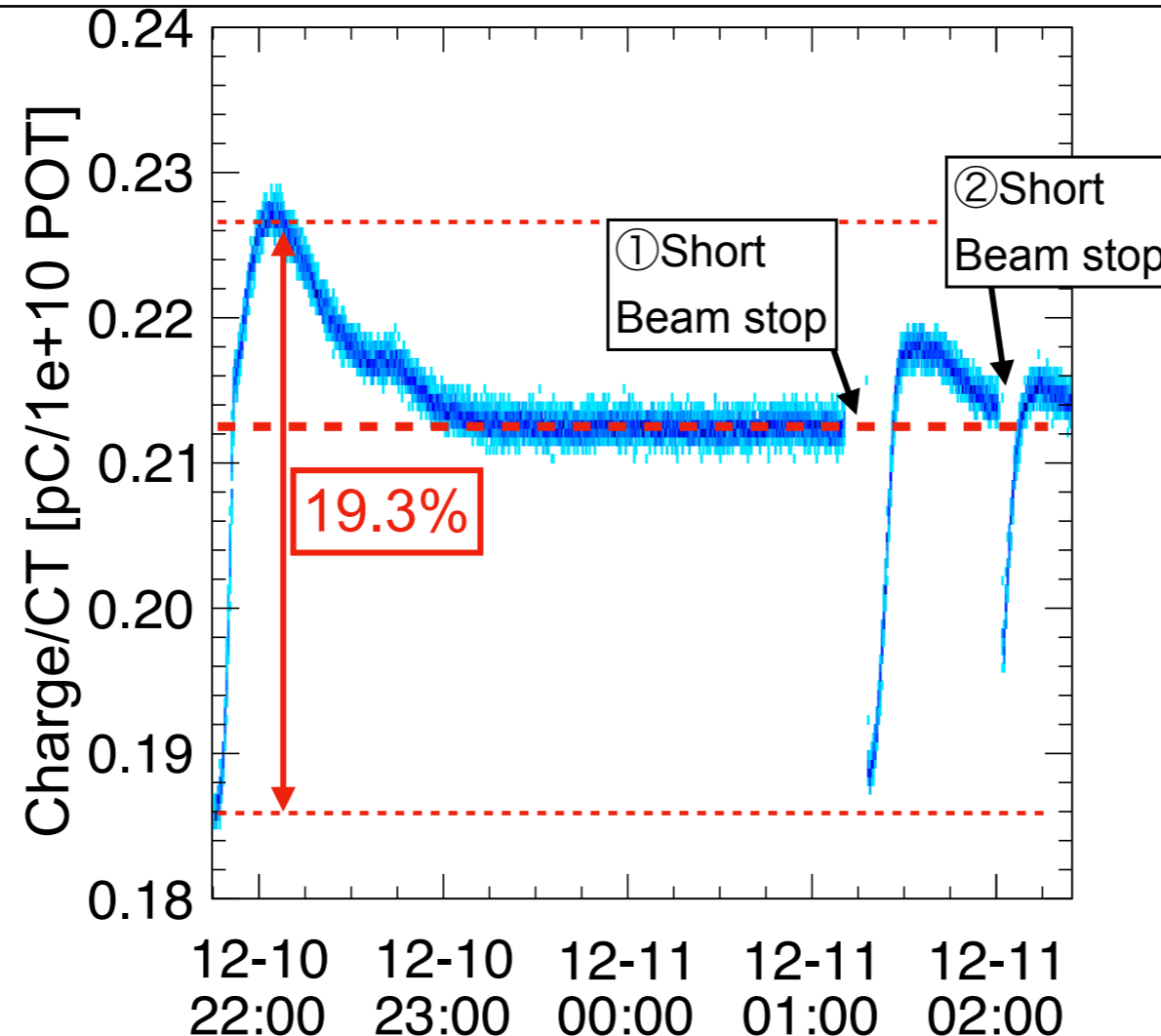
Si全49chの測定値と、十字型配置・星型配置の測定値を比較

✓ 星型配置の方が測定の安定性が**約1 cm**向上

➡ EMT全49ch導入することでさらなる精度向上が期待

# 2025年11月のEMTの問題点

2025年に導入したEMTにおける信号電荷の時間変動



- 2025年の新しいEMTは信号電荷が非常に不安定
  - ビーム開始時に急激な信号電荷の増加、その後減少して定常状態
- ケーブル, 治具, 回路など様々な入れ替え作業

➔ EMT自体に何らかの問題か

# 全体のまとめと展望

- T2K実験はニュートリノ振動によりCP対称性の破れを探索
- 統計量増大のためビームラインを改良中
- ❖ 陽子ビーム軌道再構成の改善
  - ✓ Y 軌道再構成に使われていなかったモニターを追加
  - ✓ ターゲットにおける位置・角度の誤差を削減
  - ✓ 正しいパラメータを使いフラックス不定性を削減
    - ➡(展望) さらに現実のビームラインに近いフィッターの作成
- ❖ 電子増倍管によるミュオンビーム測定
  - ✓ 高強度ビームでは要求精度を満たす
  - ✓ 低強度ビームでは1ショット毎では測定が不安定
  - ✓ 7ショット程度の平均電荷によるビーム測定では要求を満たす
    - ➡(展望) 新しいEMTの問題の解決とEMT全チャンネルの運用

# Backup

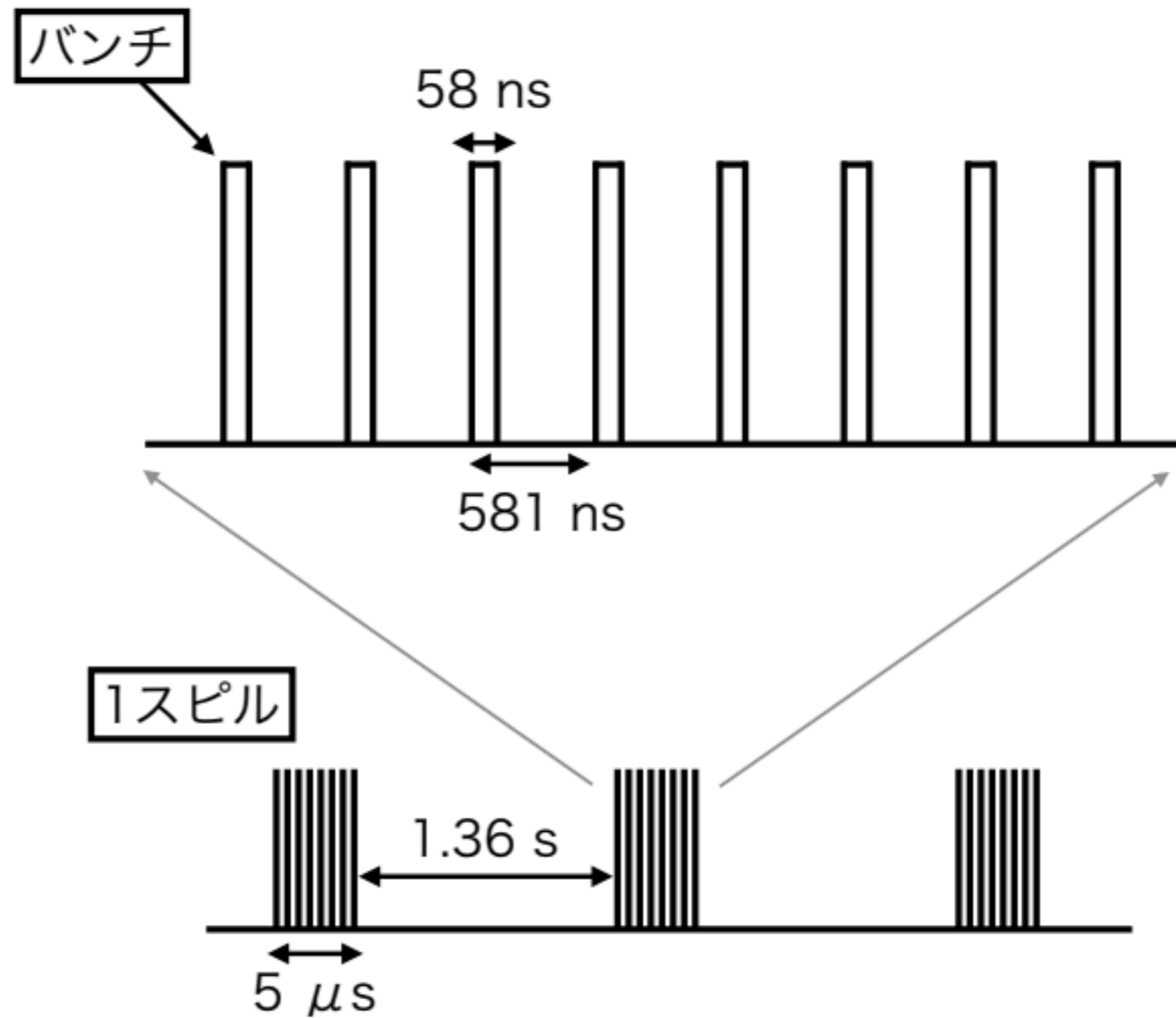
# ニュートリノ振動確率

$$\begin{cases} \Delta m_{jk}^2 = m_j^2 - m_k^2 \\ J_{\text{CP}} = \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin \delta_{\text{CP}} \end{cases}$$

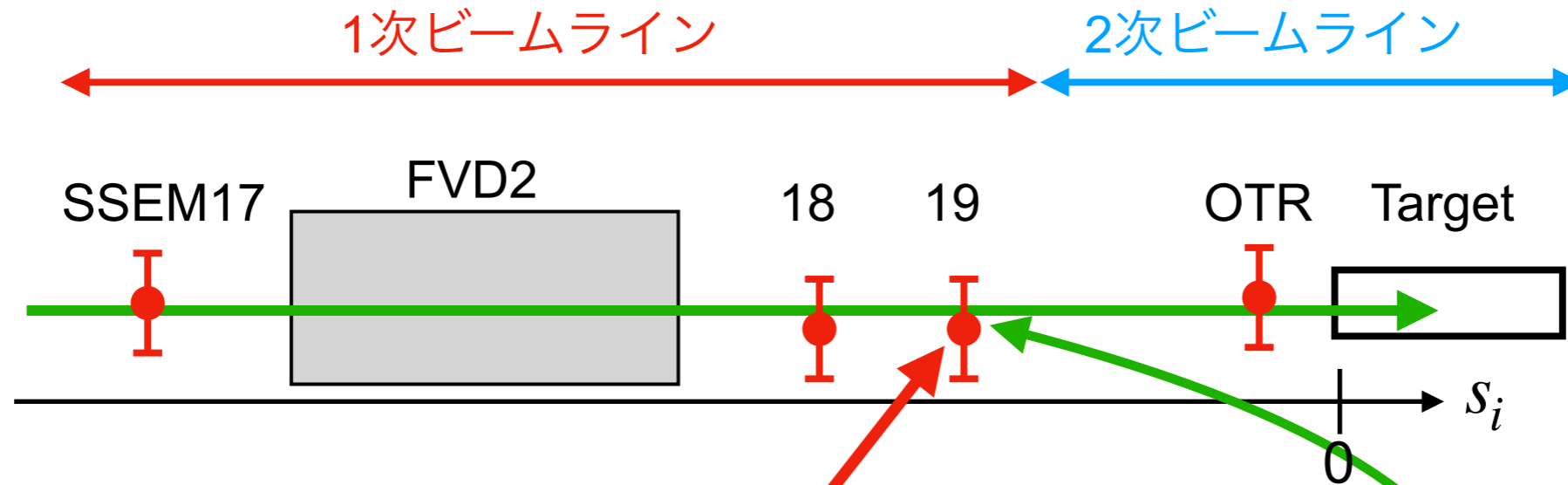
$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E} \right) \\ &\mp \frac{1.27 \Delta m_{21}^2 L}{E} 8 J_{\text{CP}} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E} \right) \end{aligned}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - 4 \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \times (1 - \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{32}^2 L}{E} \right)$$

# J-PARC陽子ビームの構造



# 再構成の手法

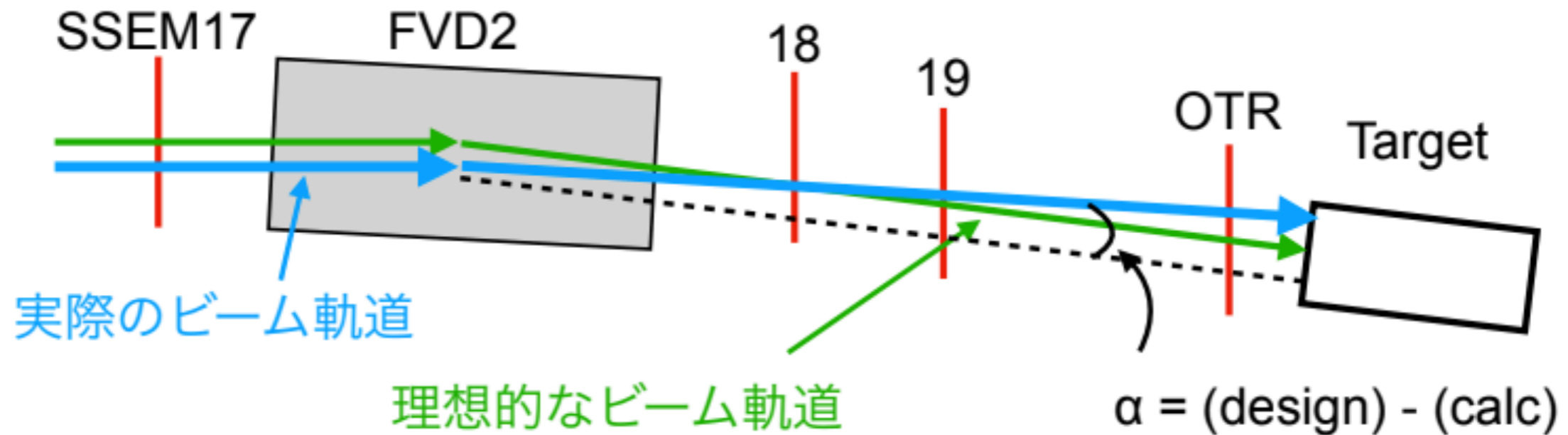


- $i$  番目のモニターの測定値を  $m_i$ , 測定誤差を  $\delta m_i$ .
- $i$  番目のモニターの場所における再構成ビーム位置を  $C_i$ .
- $C_i = k + k's_i + k_0$ 
  - ターゲットを原点とした時のモニターの位置  $s_i$
  - ターゲットにおけるビームの位置と角度を  $k, k'$ .
  - ビームライン間のオフセットの補正量  $k_0$ , オフセットの測定誤差を  $\delta k_0$ .

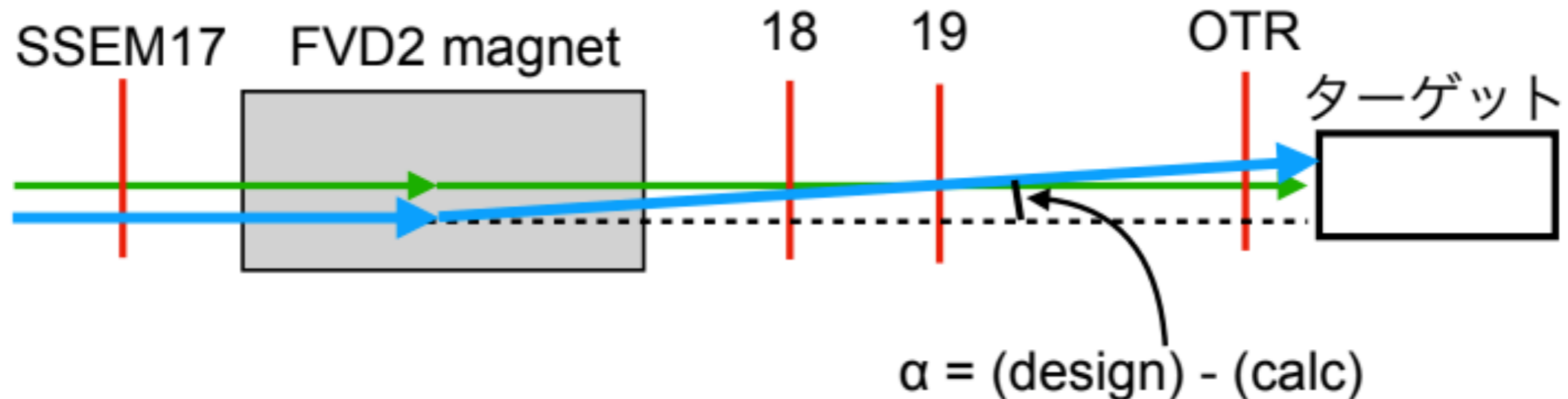
$$\rightarrow \chi_i^2 = \frac{(C_i - m_i)^2}{\delta m_i^2} \text{ として、 } \chi^2 = \sum_{i=0}^n \chi_i^2 + \frac{k_0^2}{\delta k_0^2} \text{ を最小化し } k, k', k_0 \text{ を得る}$$

# 実験室系と直交座標系から見たビームライン

実験室系から見た図

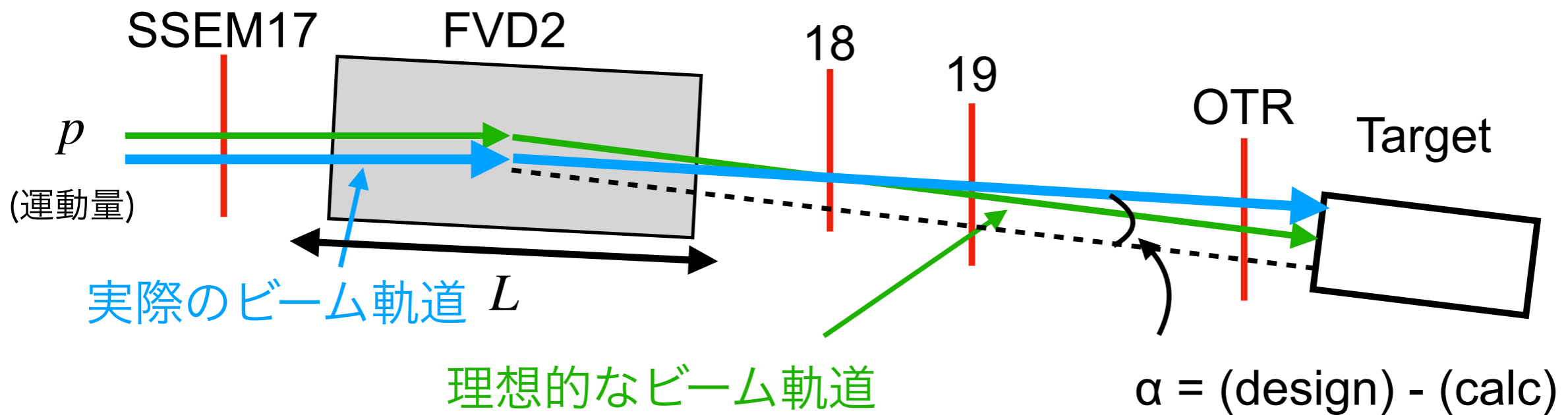


設計されたビーム軌道の直交曲線座標系から見た図



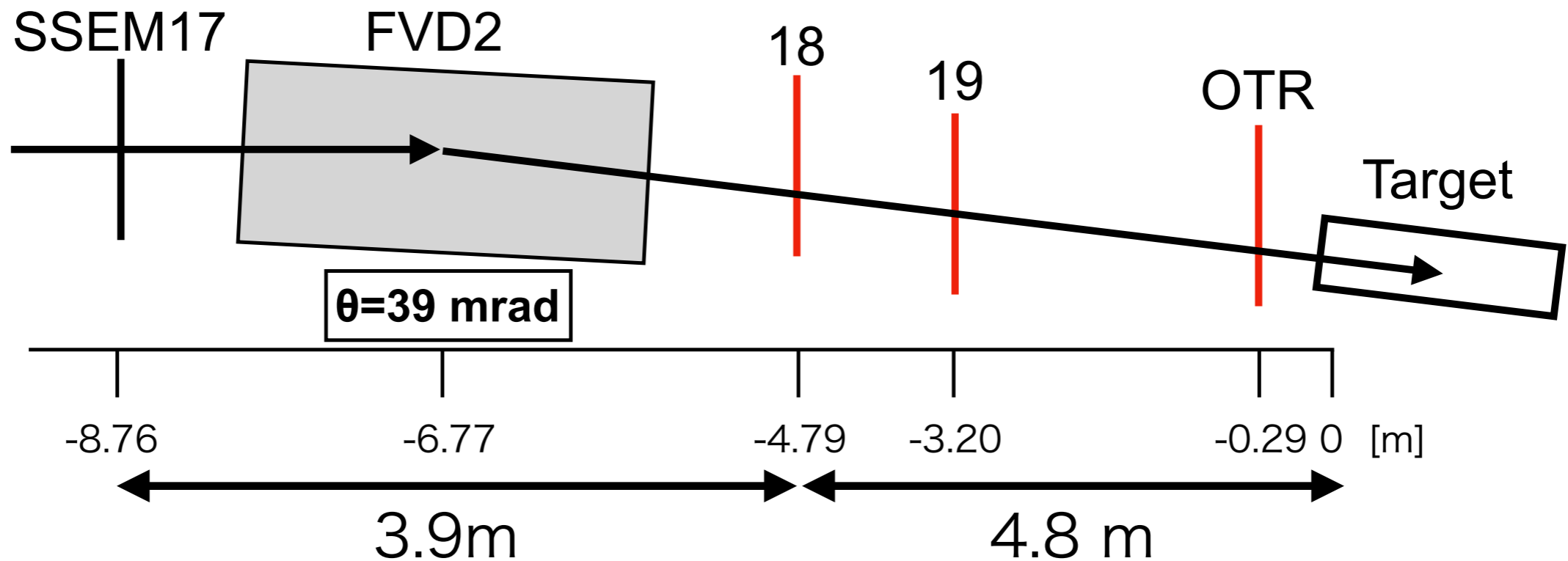
# SSEM17の追加の準備

実験室系から見た図



- FVD2の曲げ角の設計値  $\theta_{\text{design}}$  は39 mrad.
- しかし実際の角度は $\theta_{\text{design}}$ とは異なる
- ➔ FVD2の実際の曲げ角  $\theta_{\text{calc}} = BLc/p$  を計算する必要がある。
  - ショット毎の  $p$  のばらつきは0.1%程度で十分小さい
- SSEM17での  $C_i$  を修正  $\rightarrow C_i = k + \left\{ k' - (\theta_{\text{design}} - \theta_{\text{calc}}) \right\} s_i + k_0$

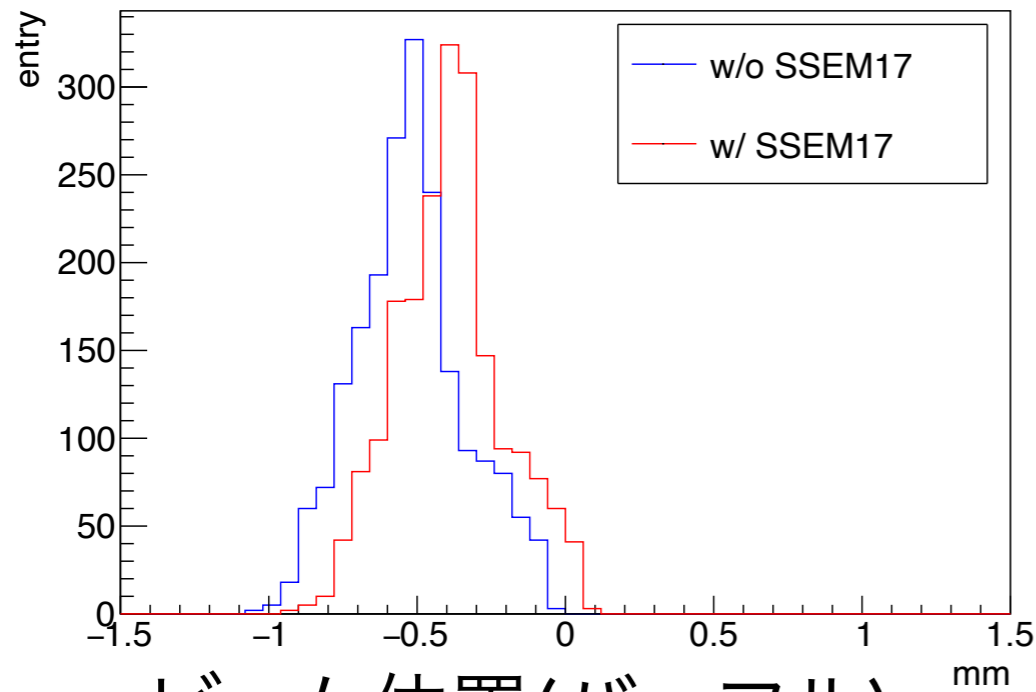
# SSEM17による精度改善の見込み



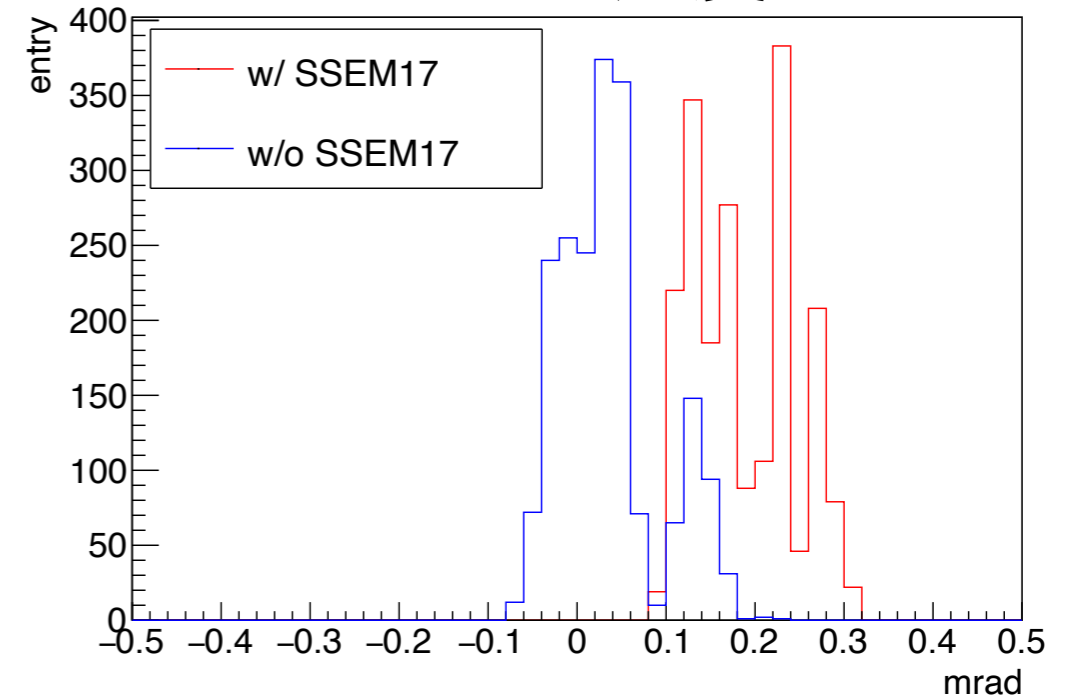
1. SSEM17はSSEM18の約4 m上流 → ビーム角度に大きな制限
2. FVD2に中心とSSEM17間は2 m程度 →  $\delta\beta = 1\%$  だとしても、SSEM17のビーム位置不定性の合計は0.25 mmしか増加しない。
  - オフセット誤差が1.0mm, アライメント誤差が0.4 mm.
  - 測定精度は0.1mmと仮定 (典型値は0.2 mm程度)。

# SSEM17追加によるフィットパラメータの変化

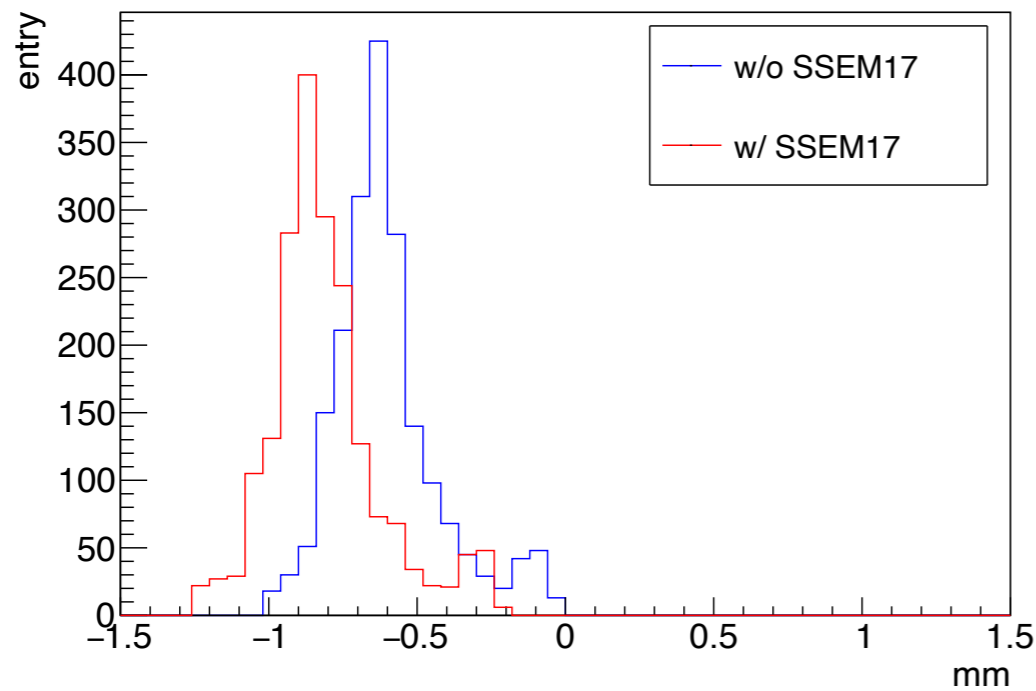
## ビーム位置(ターゲット)



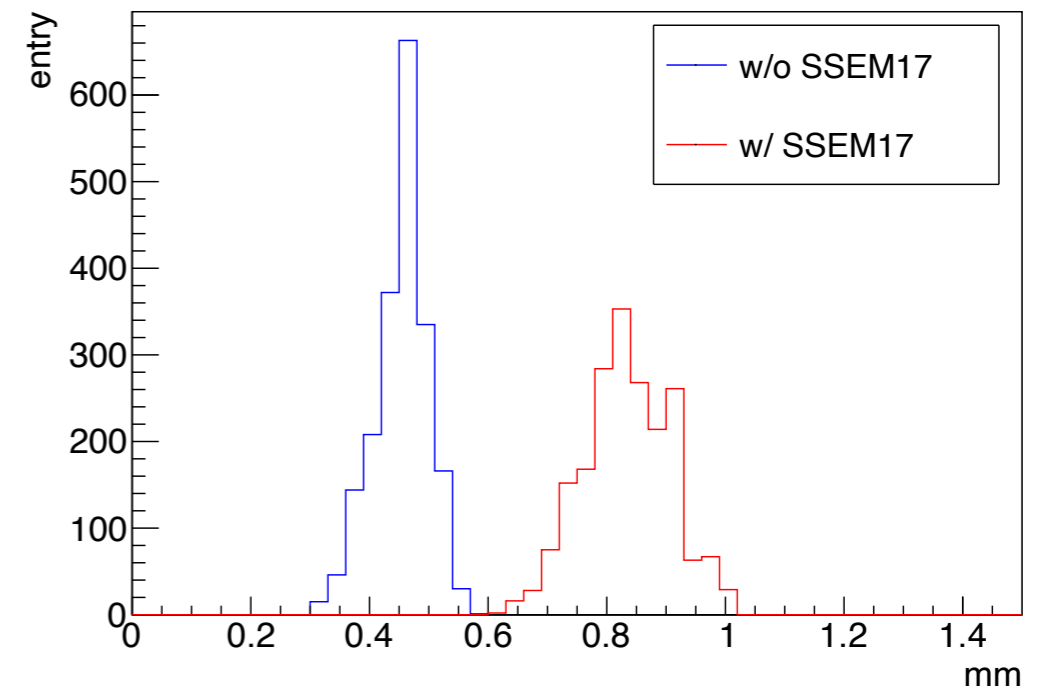
## ビーム角度



## ビーム位置(バッフル)

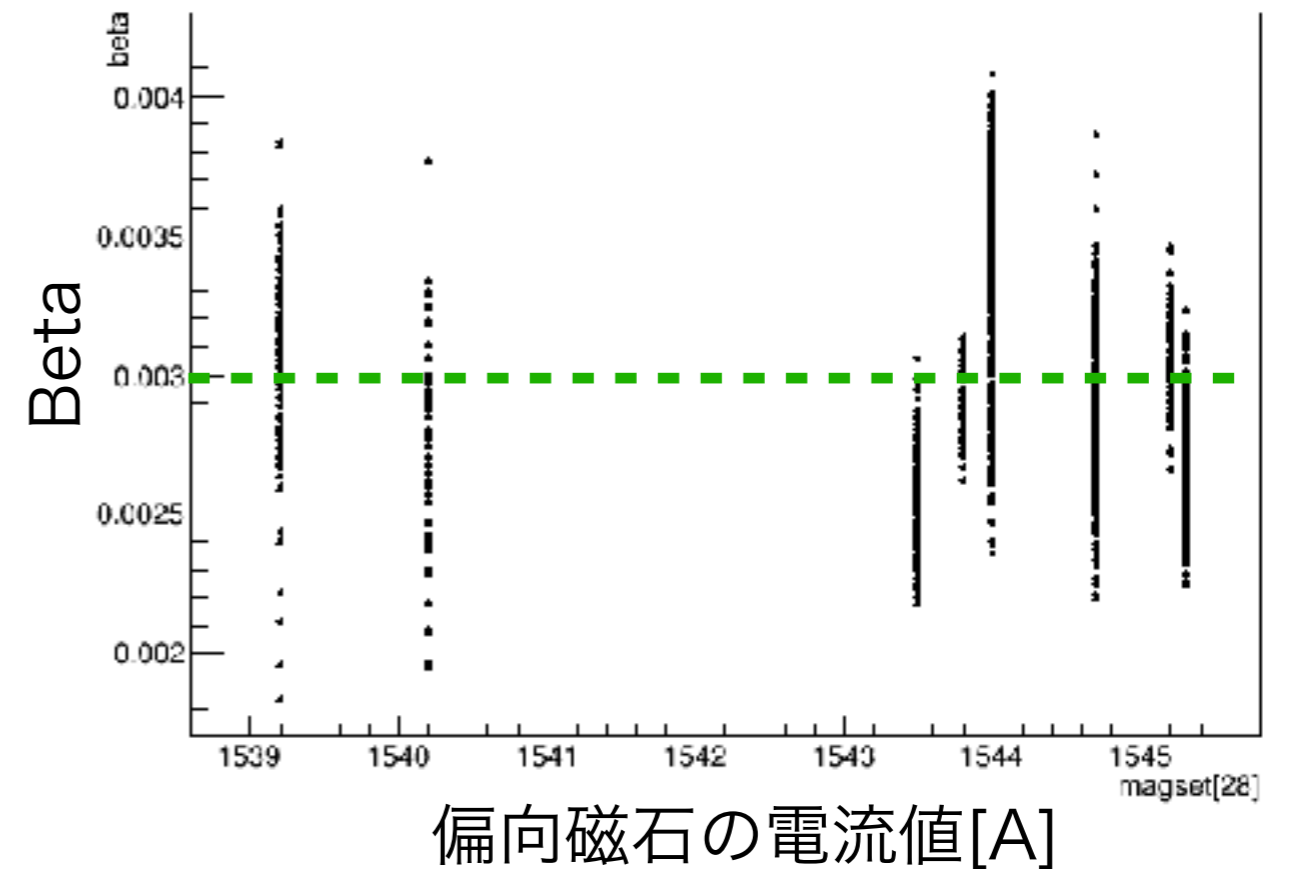
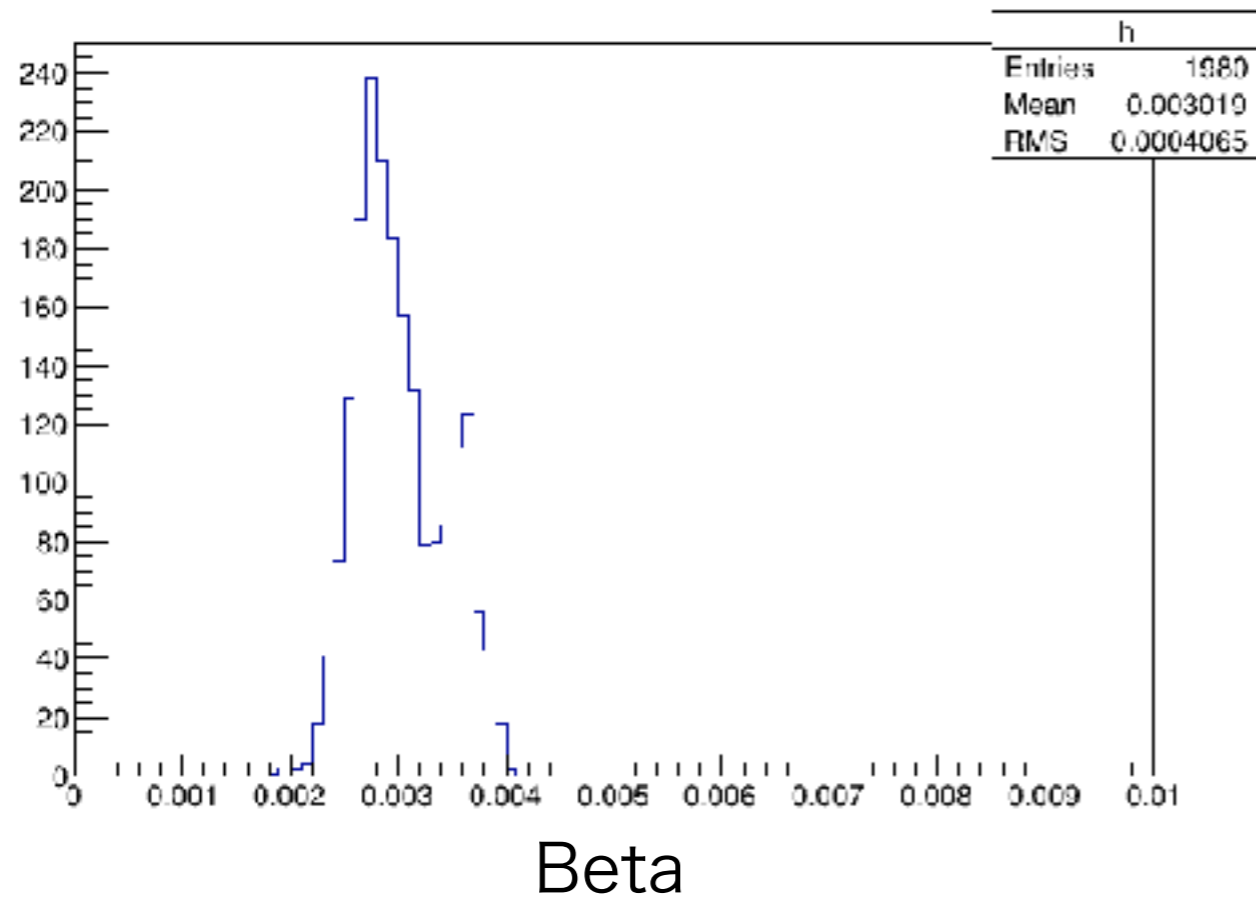


## ビームラインオフセットの補正量



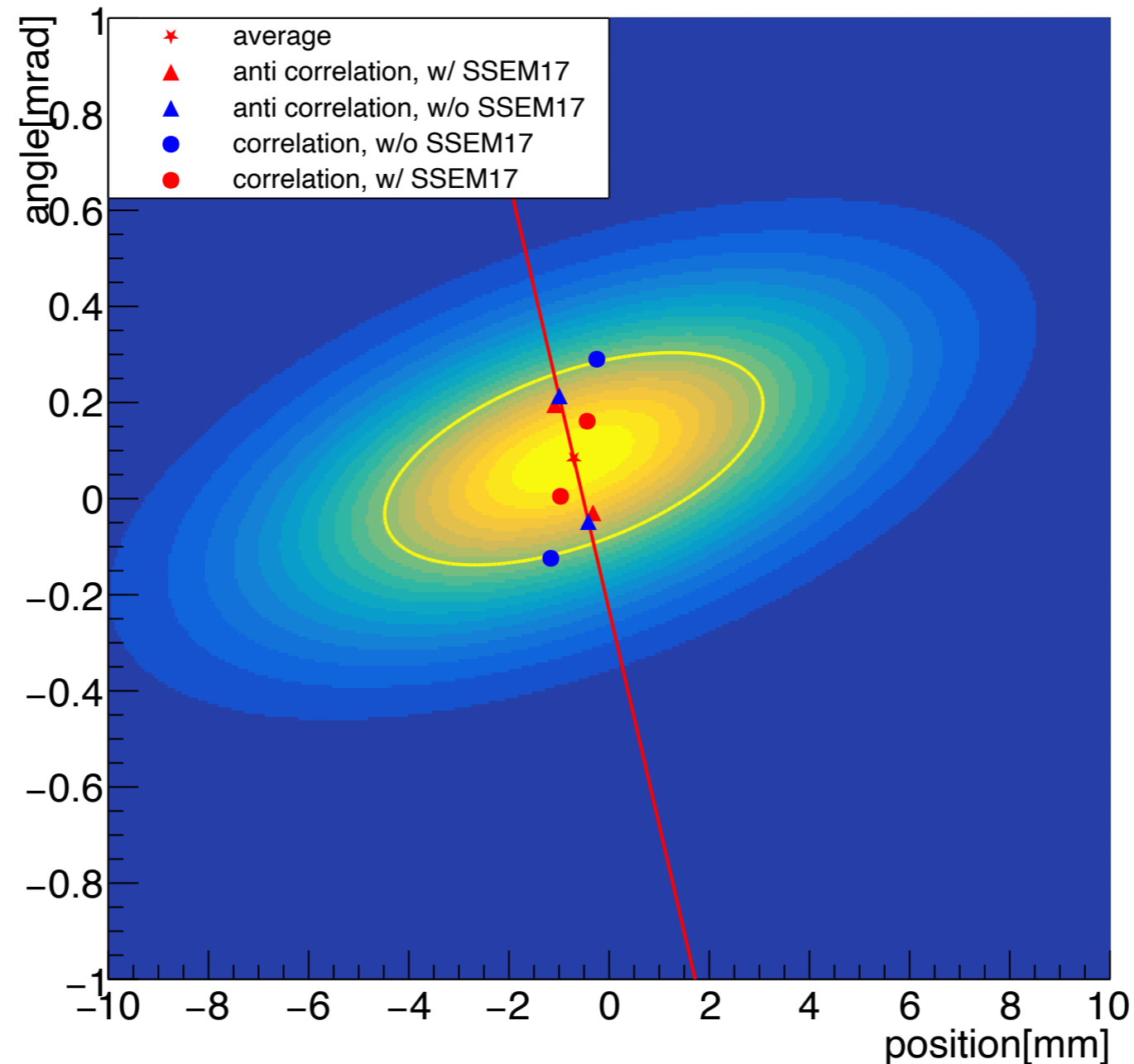
SSEM17無しの時のパラメータ誤差の範囲で一致

# Betaと磁場の関係



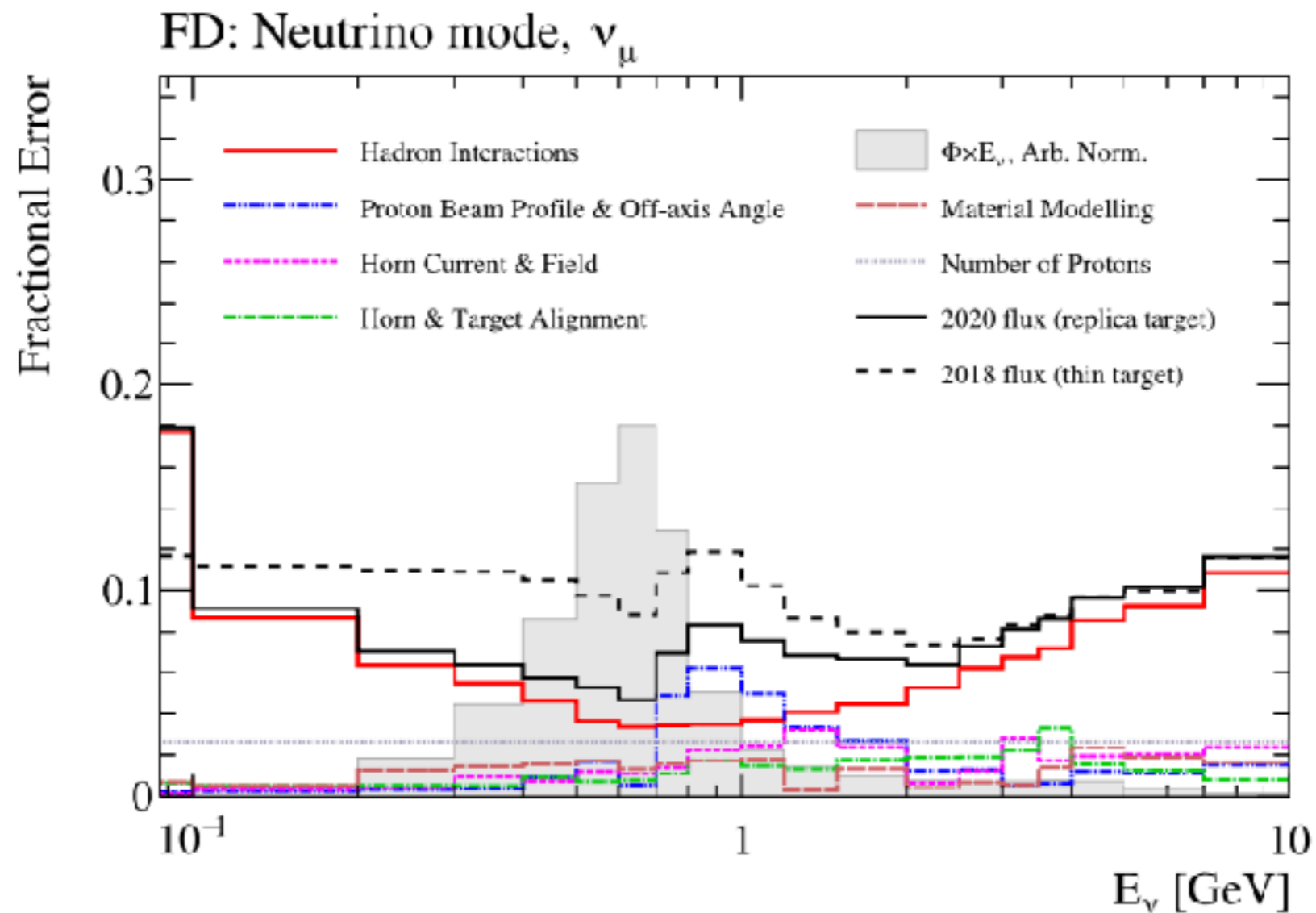
- 磁石の電流値が異なってもbetaはあまり変化しない
- 平均値はおおよそ0.003。

# バツフルにおける粒子分布とビーム中心の配置



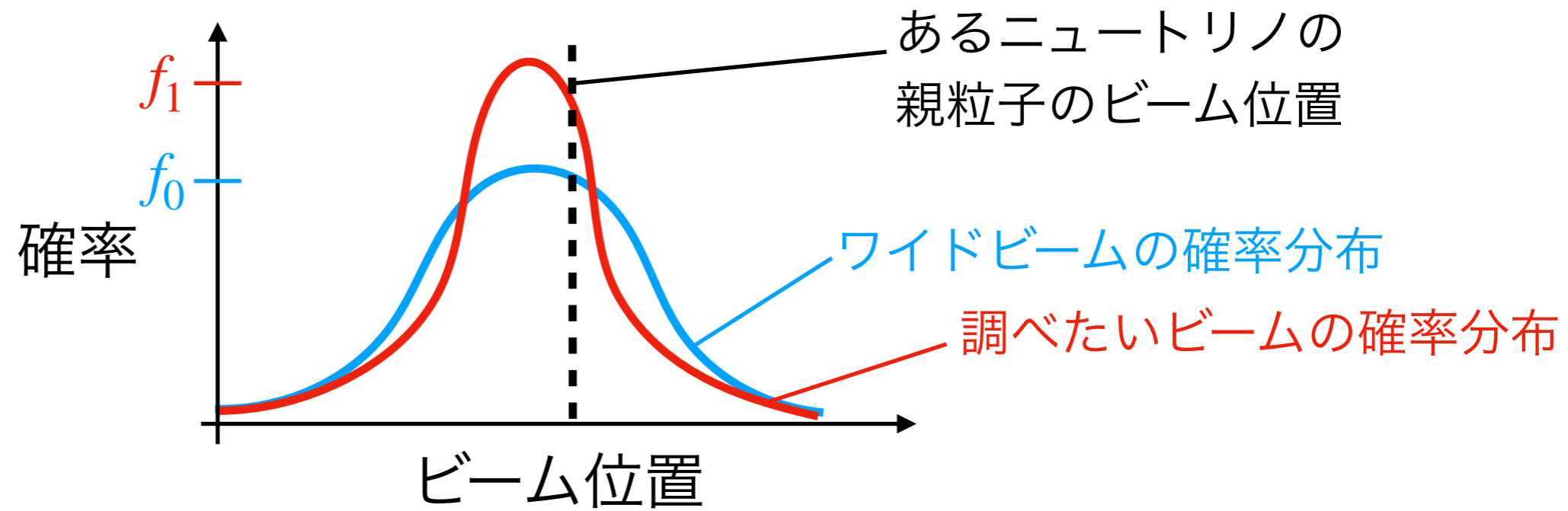
- ヒートマップはバツフルにおけるビーム位置と角度の粒子分布
- 各点は誤差だけパラメータを動かした時のビーム中心・角度
- 黄色い線は1sigma エミッタンスを満たす閉曲線

# ニュートリノフラックス不定性



- Blue : 陽子ビーム軌道 と オフアクシス角度の不定性
- 0.8 ~ 1.0 GeVで、総不定性8.0%に対して6.2%
- ハドロン相互作用不定性は4.0%.
- そのうちビーム軌道不定性は4.1%, オフアクシスは4.6%.

# フラックス不定性の評価手法

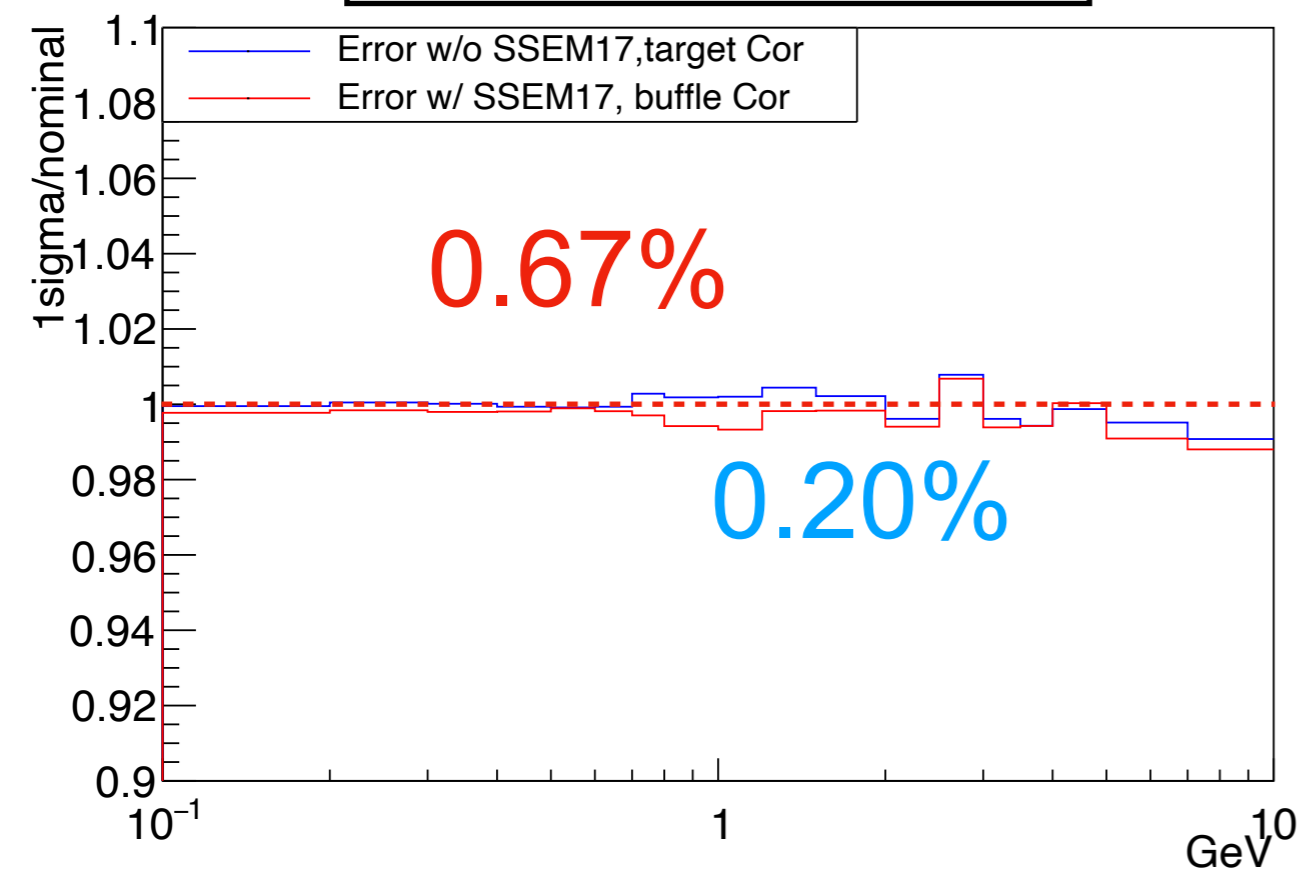


## [re-weightingの手法]

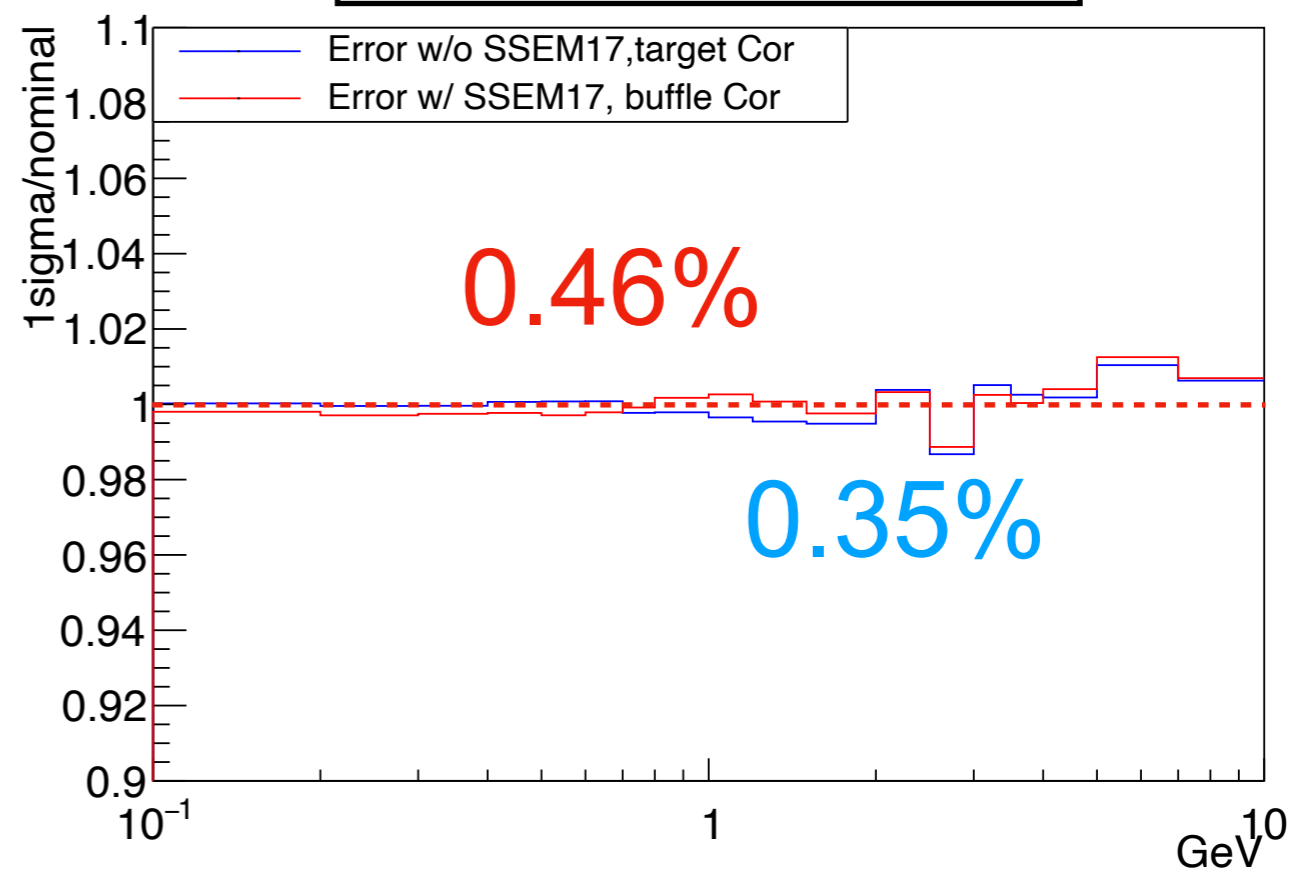
1. 充分大きいエミッタンス・幅の陽子ビーム(ワイドビーム)でSKのニュートリノフラックスをシミュレーション
2. ワイドビームの粒子分布を元にして、SKに到達したニュートリノの親陽子のターゲットにおける位置と角度をとる確率  $f_0$  を計算。
3. 調べたい陽子ビームプロファイルの粒子分布を元にして、同じ位置と角度をとる確率  $f_1$  を計算。
4. 重み  $w = \frac{f_1}{f_0}$  を計算。  
→ 全てのニュートリノで行い、調べたいプロファイルにおけるフラックスを計算。

# フラックス不定性の比較(2)

$(y_b + \sigma_{y_b}, y'_b - \sigma_{y'_b})$ の時



$(y_b - \sigma_{y_b}, y'_b + \sigma_{y'_b})$ の時



# MUMON configuration

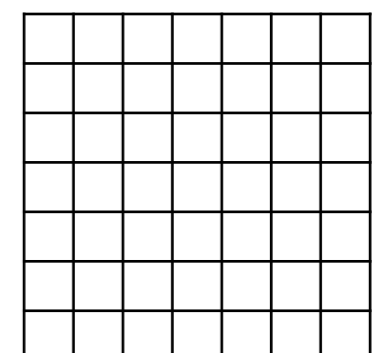
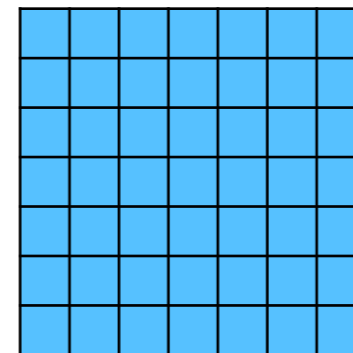
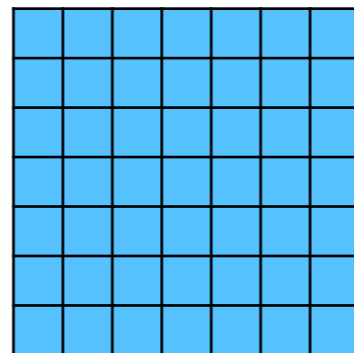
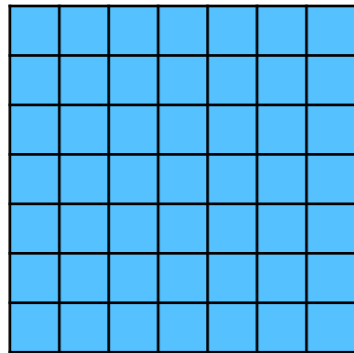
2024

2025

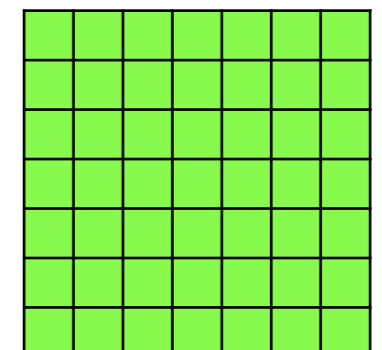
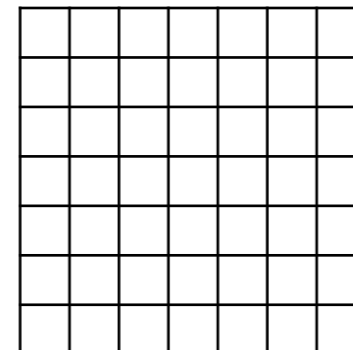
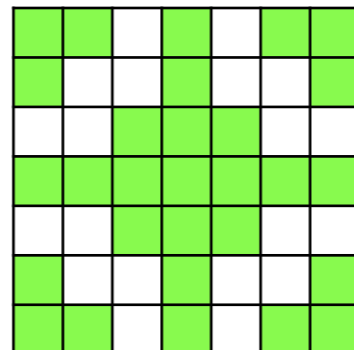
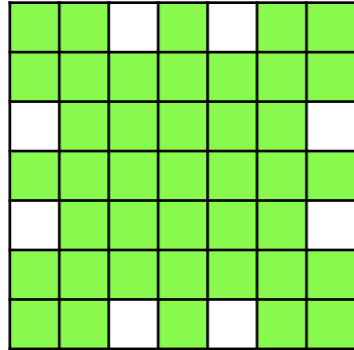
Full EMT test

HK era

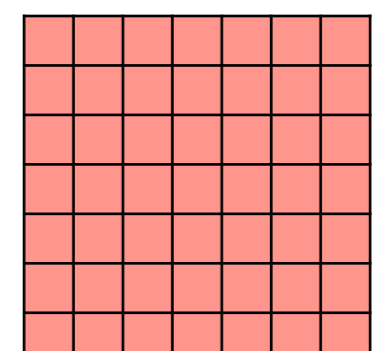
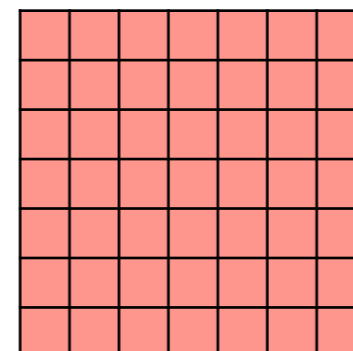
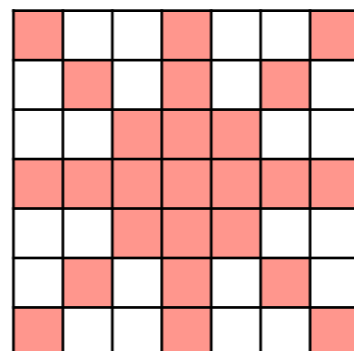
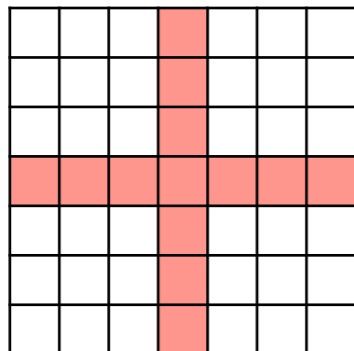
Si



IC

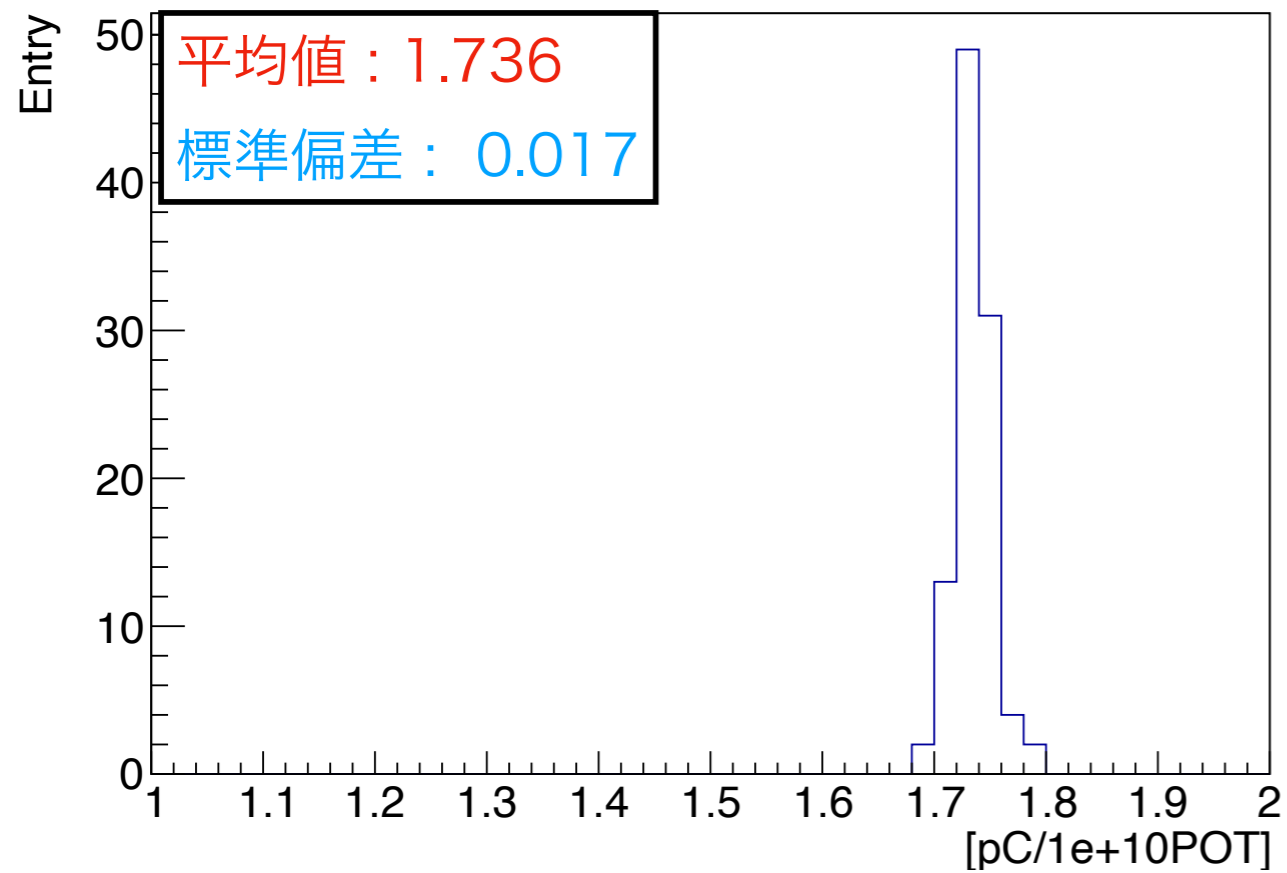


EMT

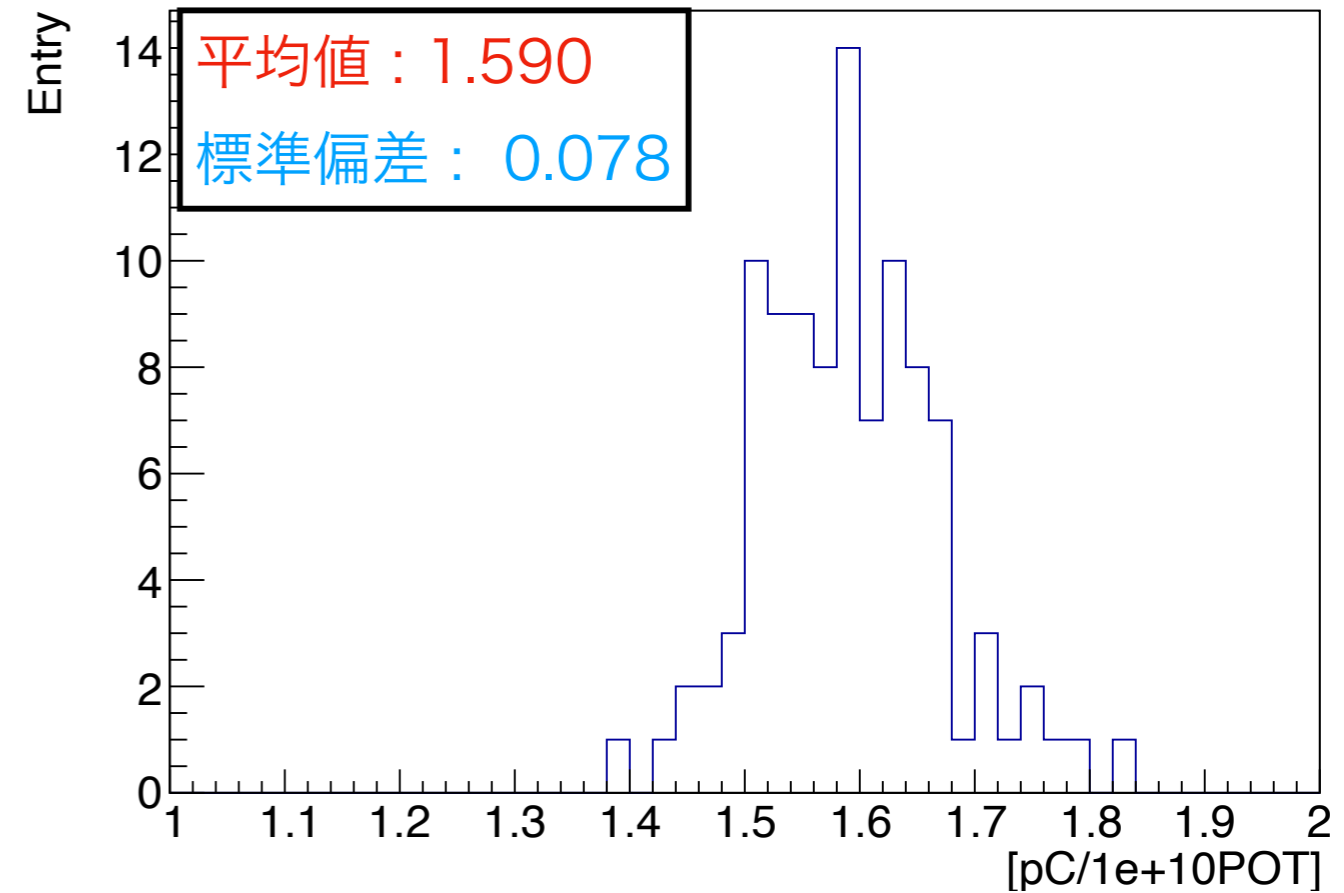


# SiとEMTの信号電荷(低強度)

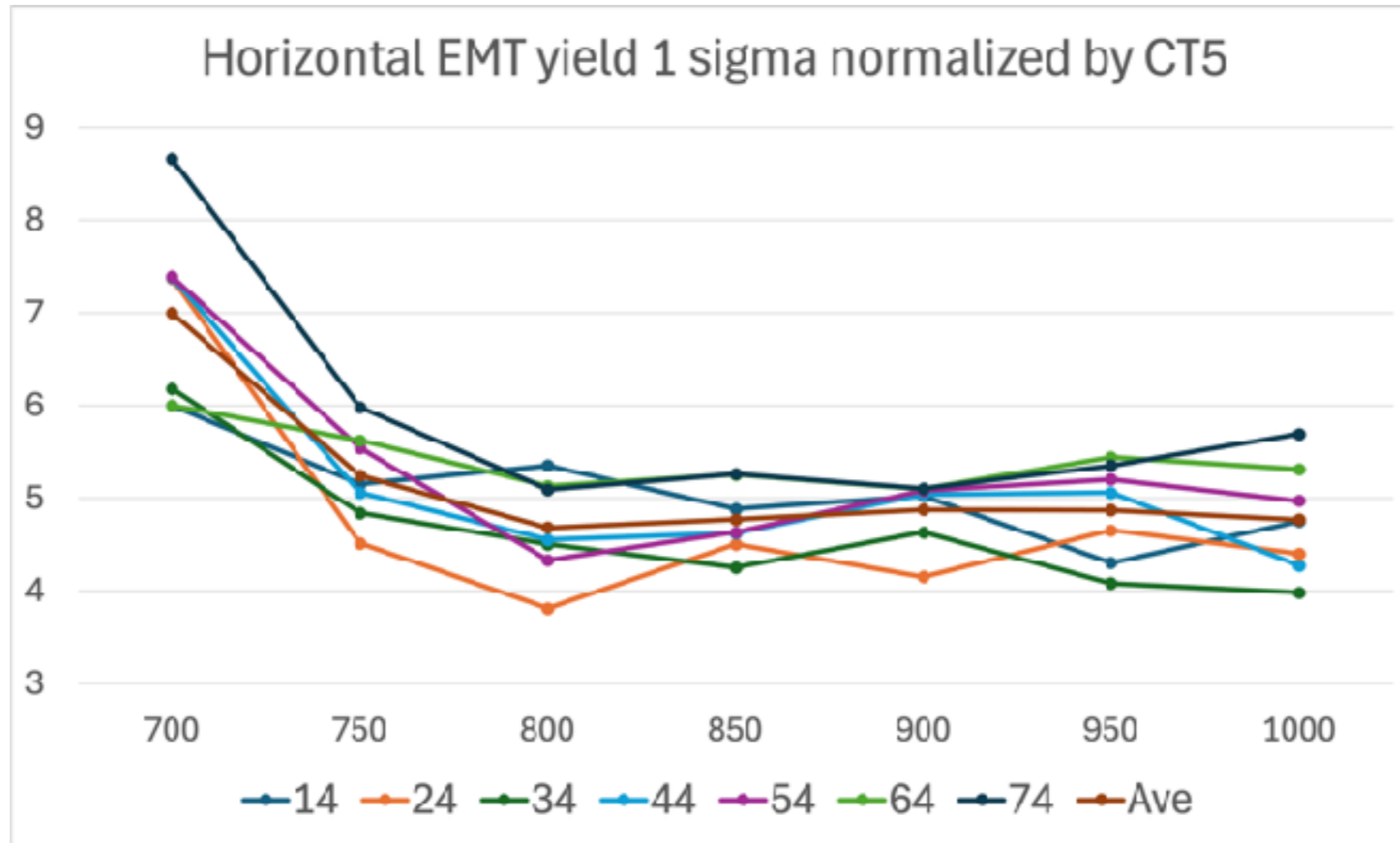
Si 4-7



EMT 4-7

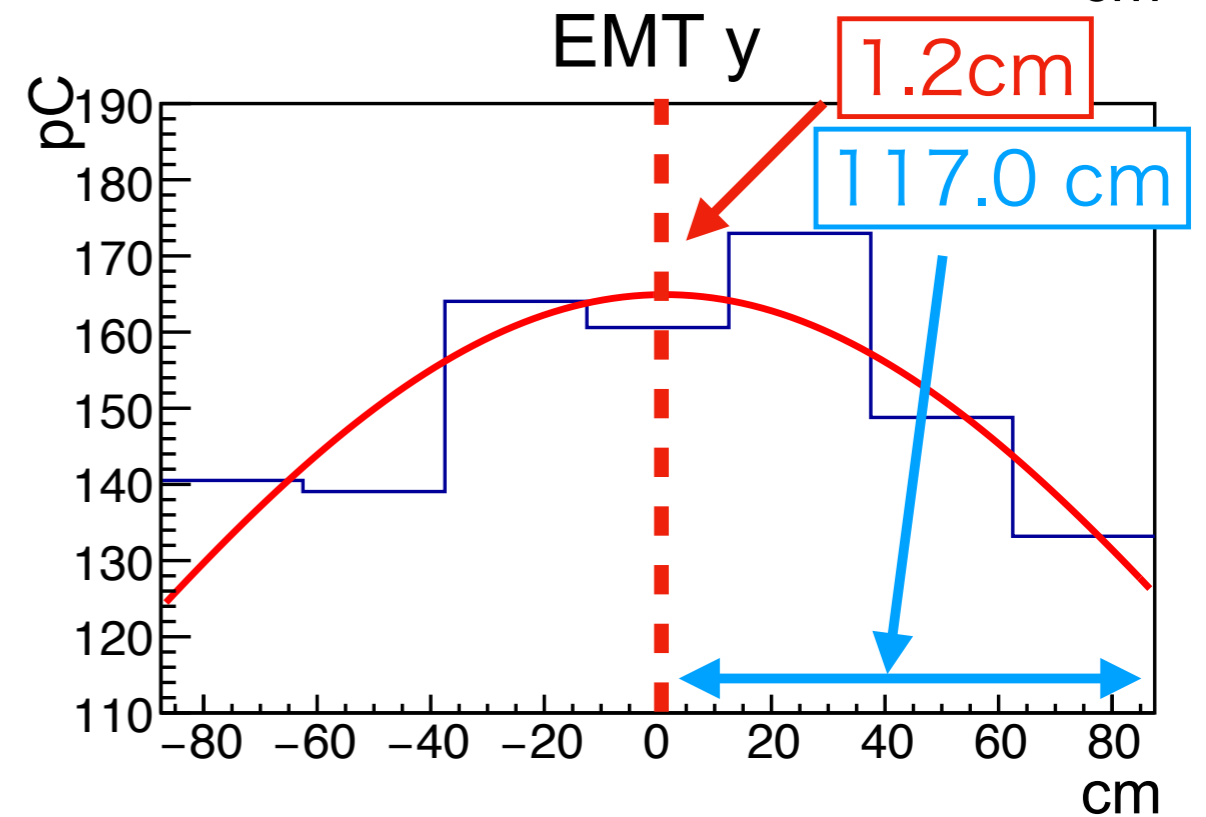
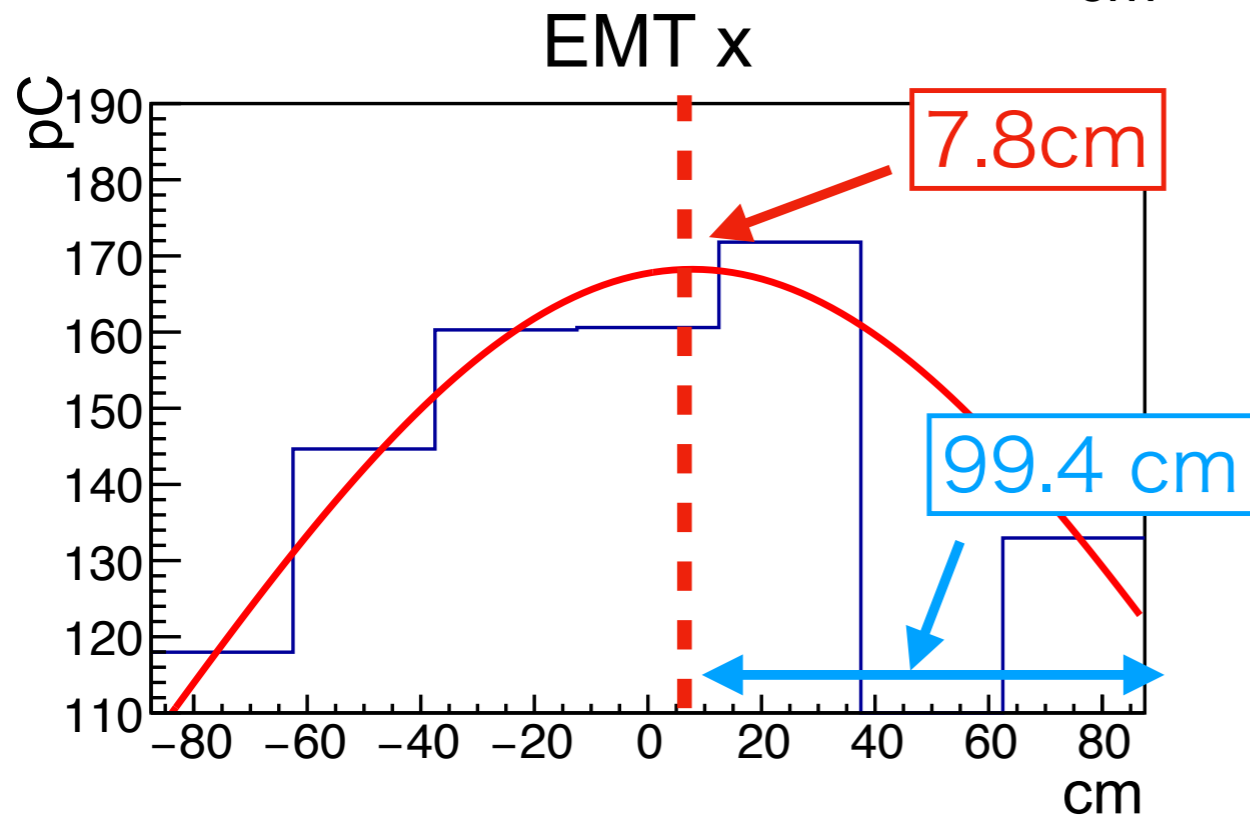
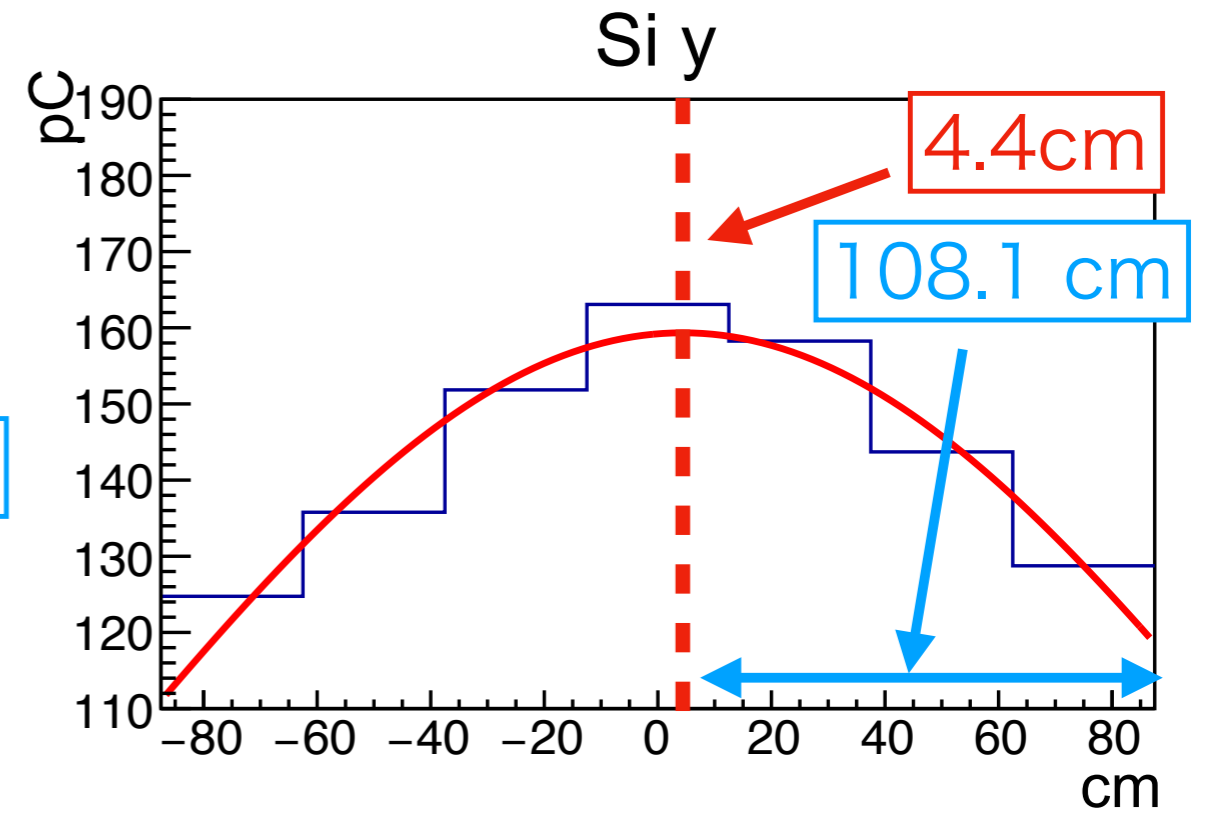
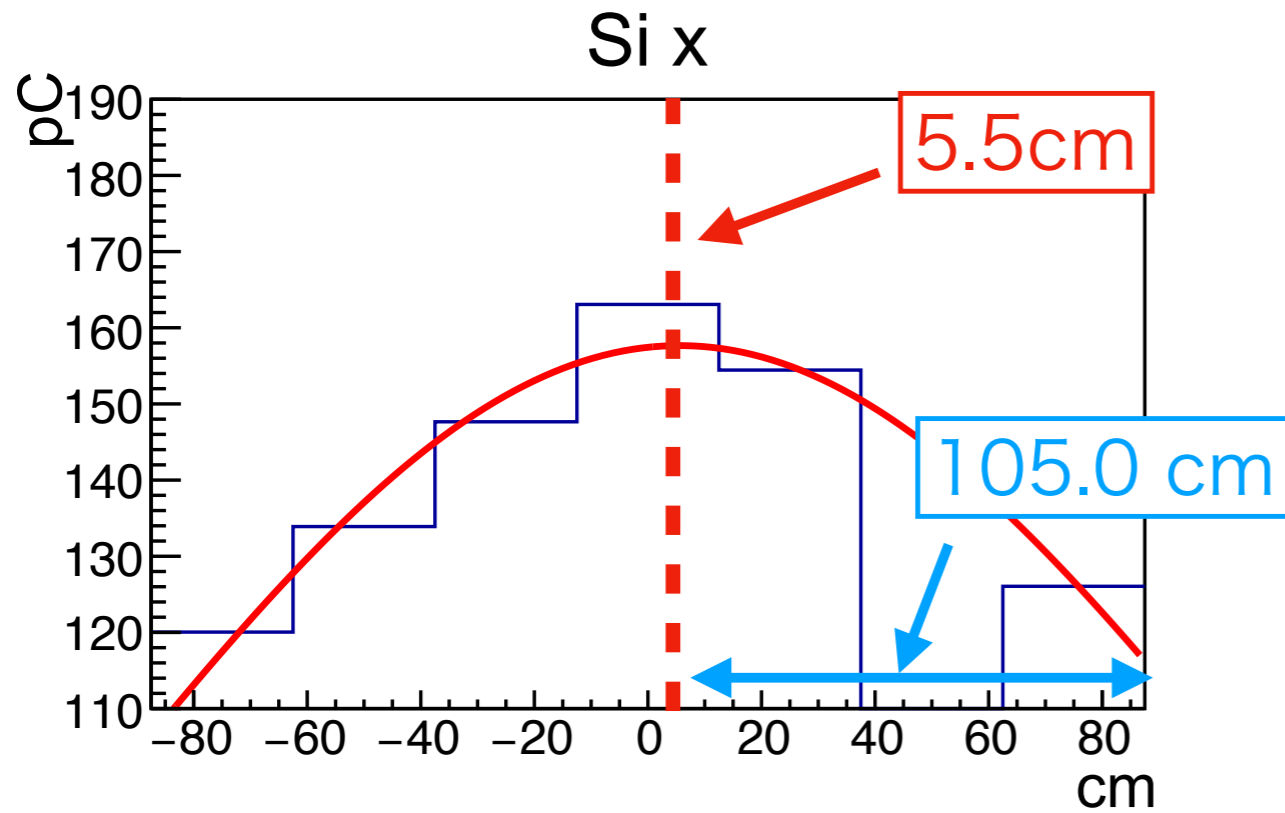


# HVと信号安定性の関係



- 800V以上では信号安定性はほぼ一定
- →信号ノイズ比が主要な原因ではない

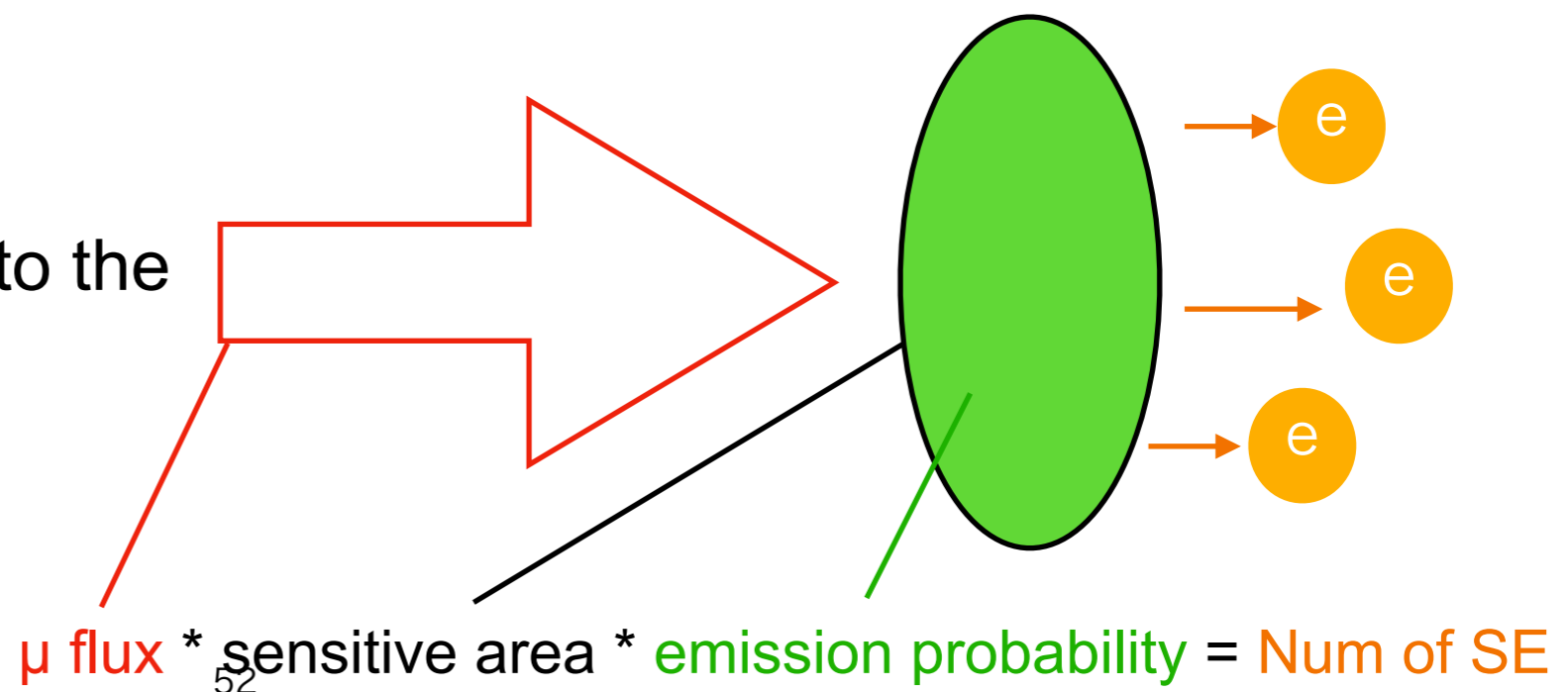
# 低強度ビームのSi,EMTプロファイル



# 信号不安定性の原因

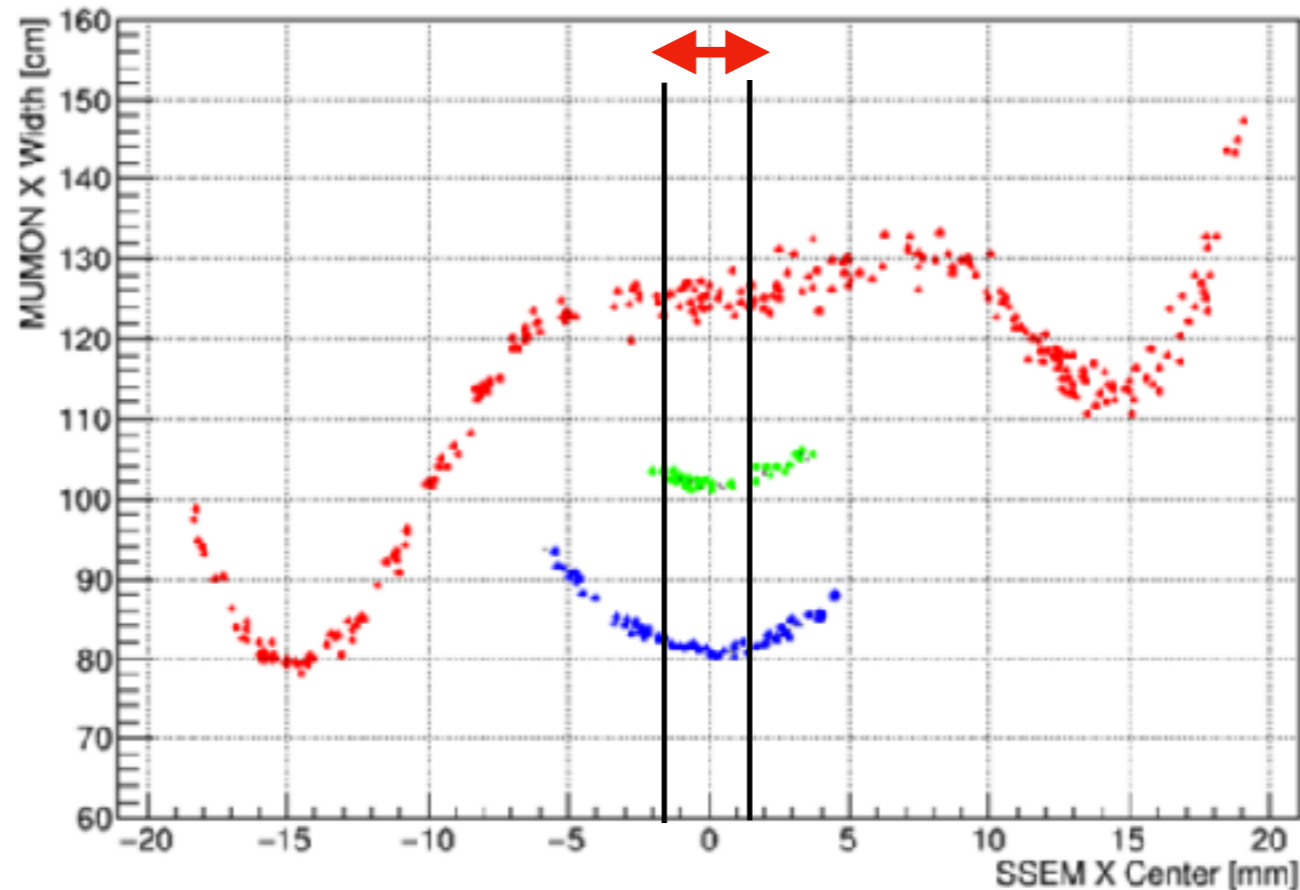
- One of the source may be the number of secondary electron (SE).
- Secondary electron in per bunch is 435 electrons.
- The fluctuation  $\rightarrow 1/\sqrt{435} * 100 = 4.8\%$ .
- The Horizontal (Vertical) EMTs yield fluctuation per bunch  $\rightarrow 6.62$  (  $5.74$  )%
- Then, remained fluctuation is ...  
 $\sqrt{6.62^2 - 4.8^2} = 4.56[ \% ]$ ,  
 $\sqrt{5.74^2 - 4.8^2} = 3.15[ \% ]$
- About half of fluctuation is due to the number of secondary electron.

$\mu$ flux	$1.1 * 10^4 / [\text{cm}^2] / 10^{11} [\text{proton on target}]$
sensitive area	$0.5 [\text{cm}^2]$
SE emission prob.	0.08
Proton on target	$7.9 * 10^{11}$
Num. of SE	435



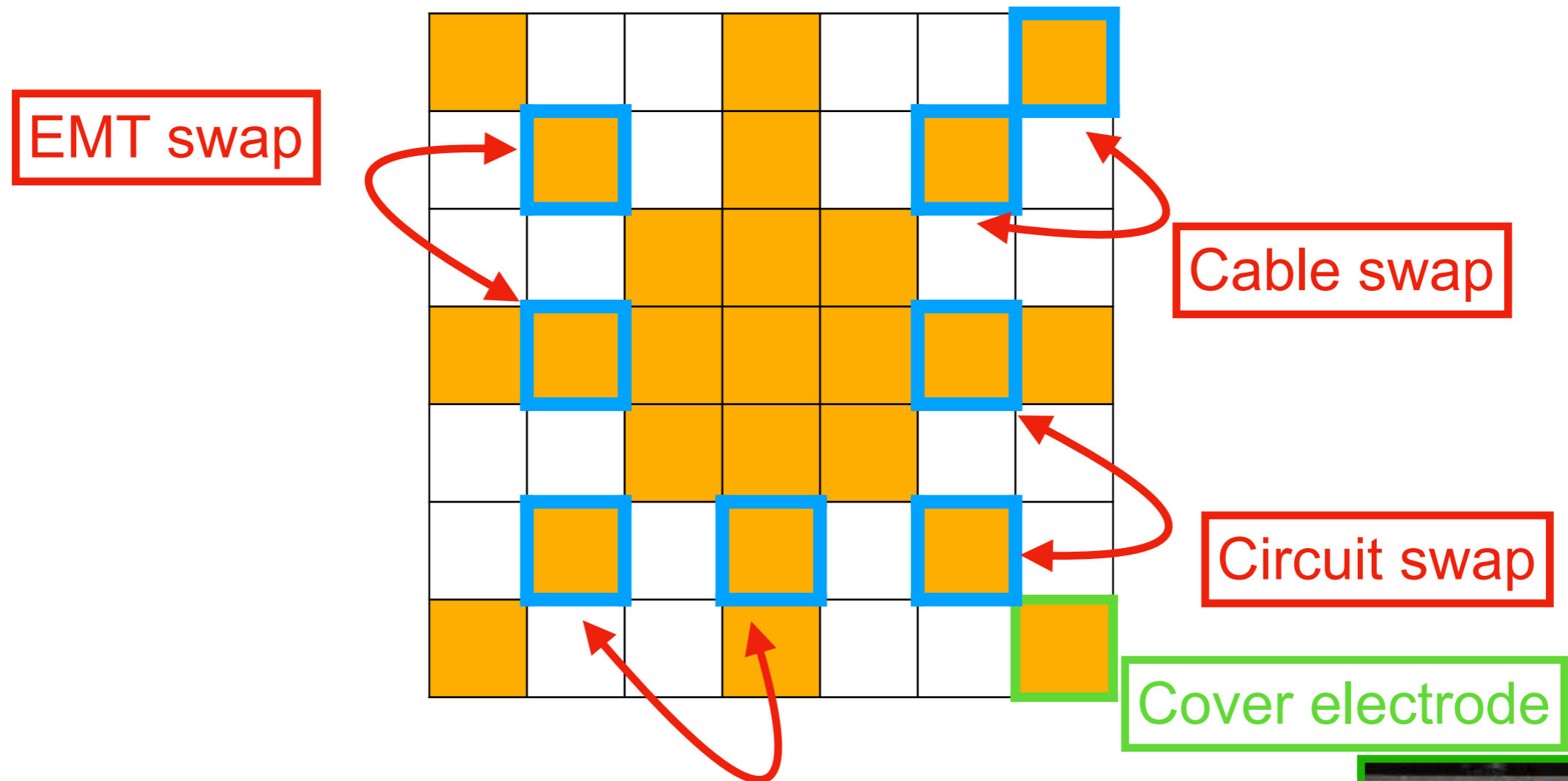
# ビーム幅の感度

Mumon X Width VS SSEM X Center



- 陽子ビームがターゲットを外れるとミュオンビーム幅が大きく変化
- $\pm 1.5$  mmの変動ではミュオンビーム幅は1 cm程度変化
  - やはり低強度ではEMTの測定は1cm以上で不安定
- ビーム幅スキャンのデータは持っていない
  - 陽子ビーム幅とミュオンビーム幅の直接的な関係 $\Delta$

# Remind : EMT swap



- Swapping

- HV and Sig Cable : 7-7  $\longleftrightarrow$  6-6

- EMT itself : 2-6  $\longleftrightarrow$  2-4

- Bleeder circuit : 6-2  $\longleftrightarrow$  6-4

- EMT + Bleeder : 2-2  $\longleftrightarrow$  4-2

- Data : run0930254 (physics run after MUMON calib).

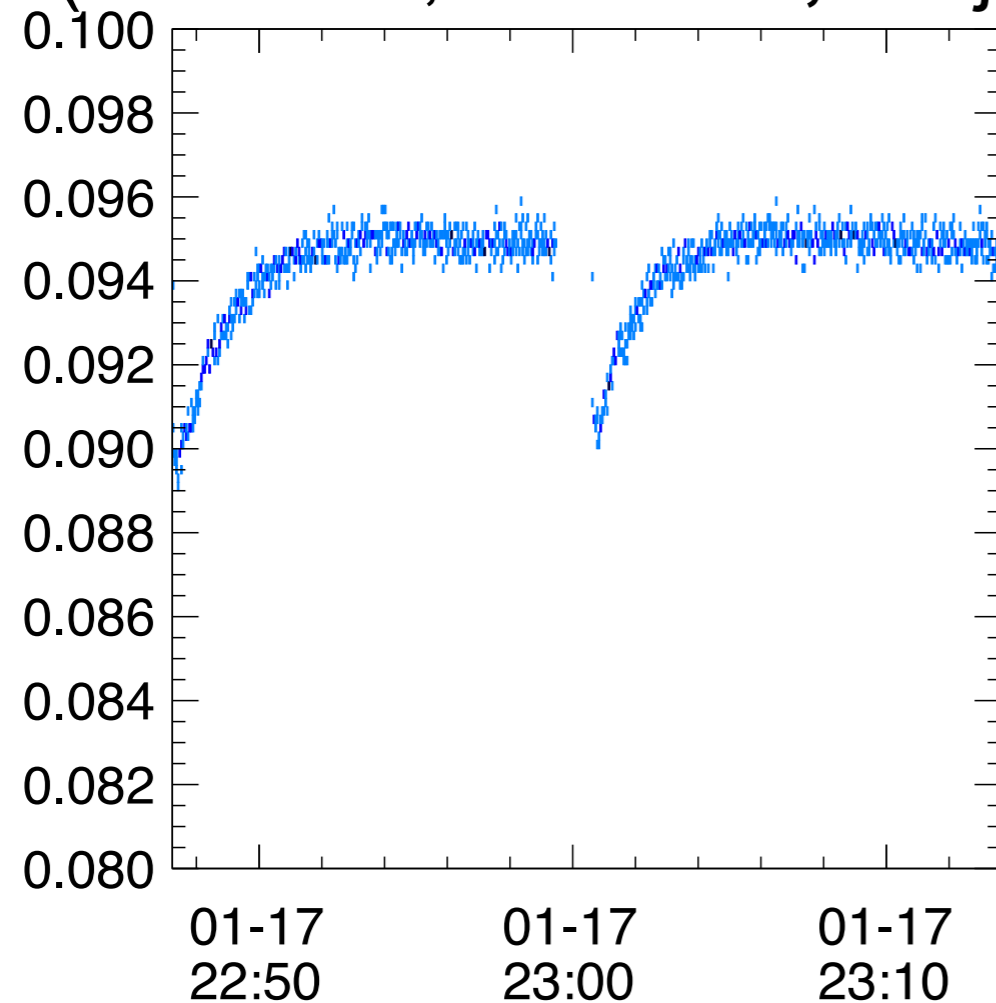
EMT + Circuit swap



# EMT swap

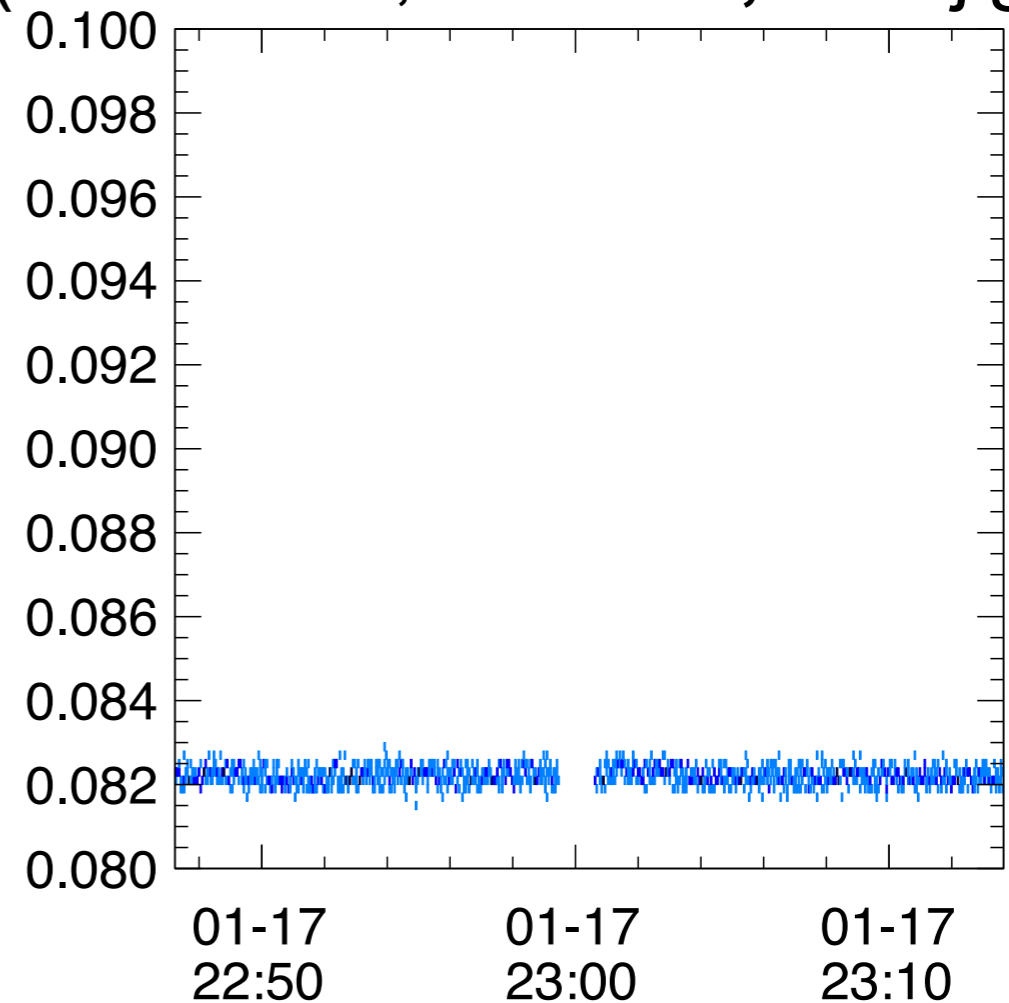
EMT 2-4

(old circuit, **new EMT**, old jig)



EMT 2-6

(new circuit, **old EMT**, new jig)



- New EMT has instability again.
  - Old EMT does not have.
- ➡ **EMT itself is probably the cause.**
- ➡ **Jig is not.**