

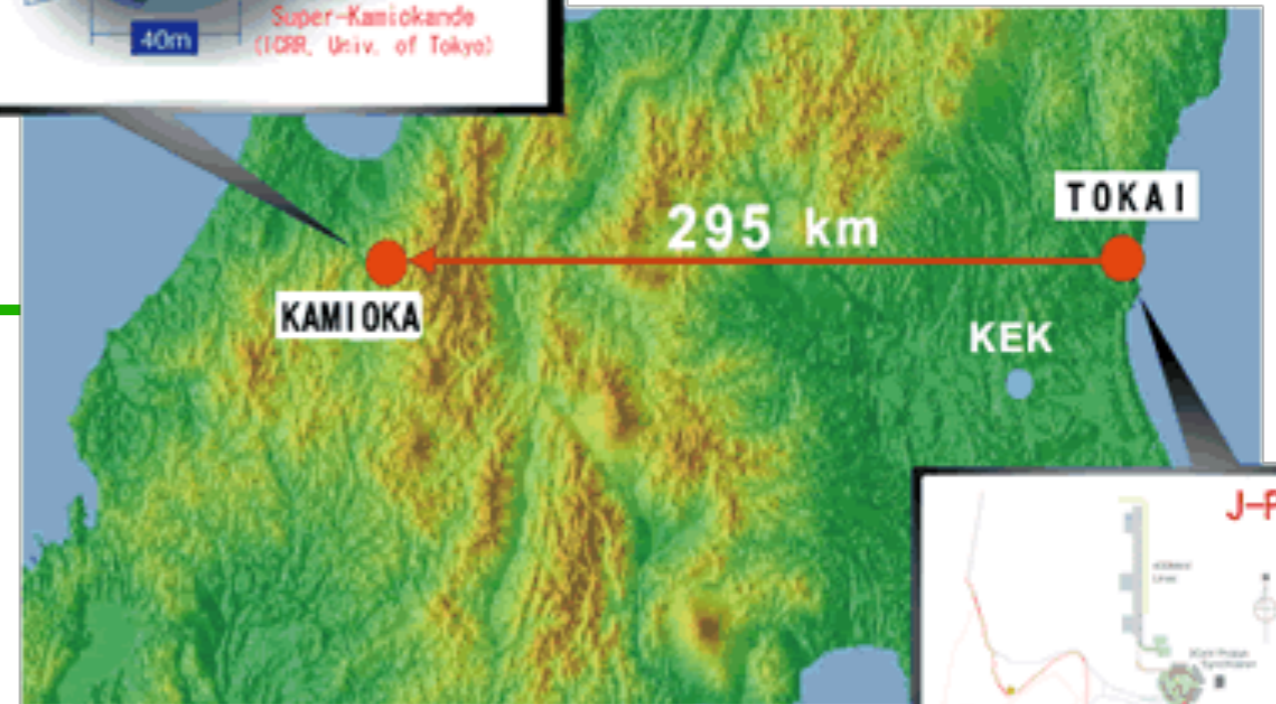
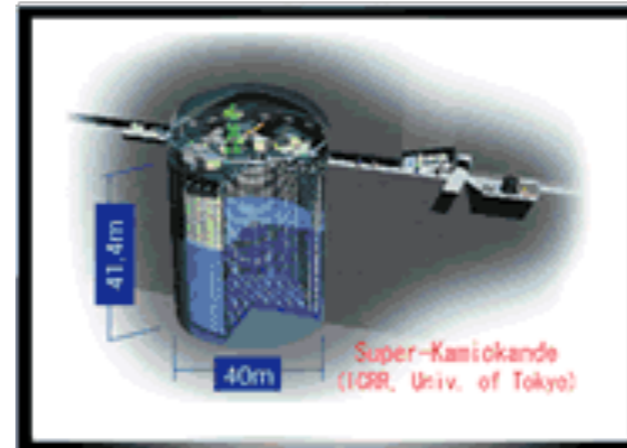
T2K実験における 陽子ビーム軌道 再構成の改善

小林綜太, 市川温子, 中村輝石, Megan Friend^A, 坂下健^A
東北大学, KEK^A

T2K実験 (Tokai to Kamioka)

❖ 長基線ニュートリノ振動実験

- ▶ J-PARCで ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$)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**

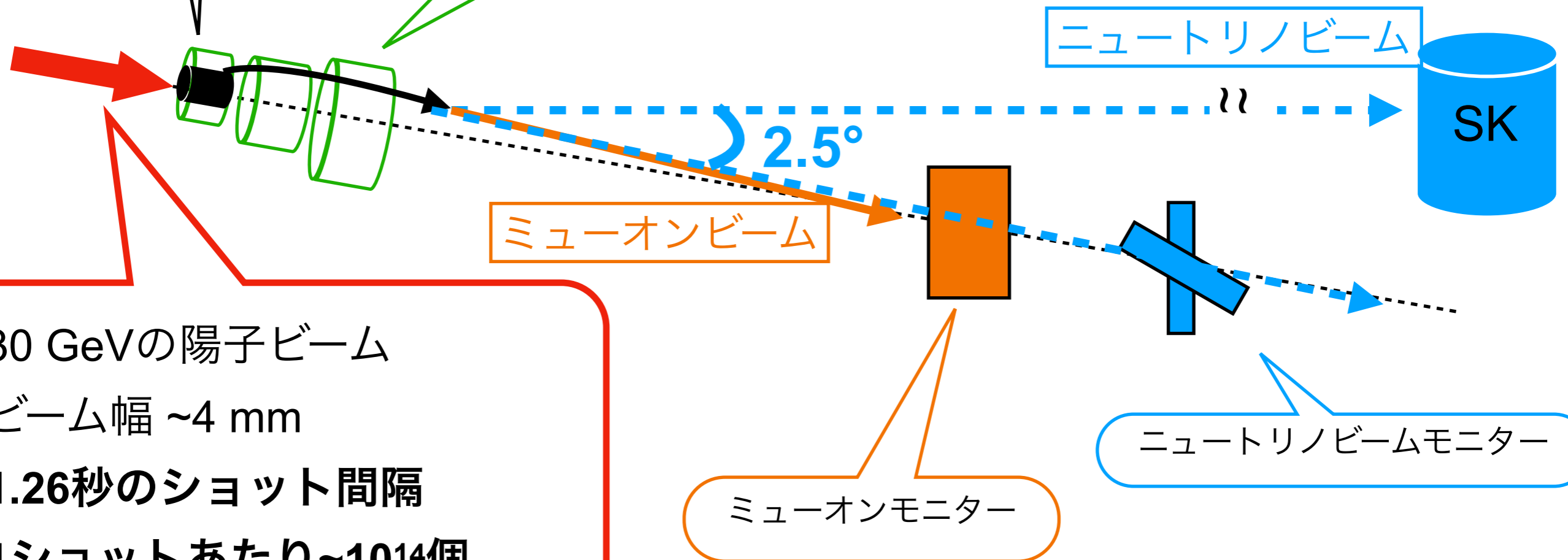
✓ 2028年からはハイパーカミオカンデ実験が開始
後置検出器の大型化とビーム強度増大
→統計量が飛躍的に向上する予定

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



ニュートリノビーム

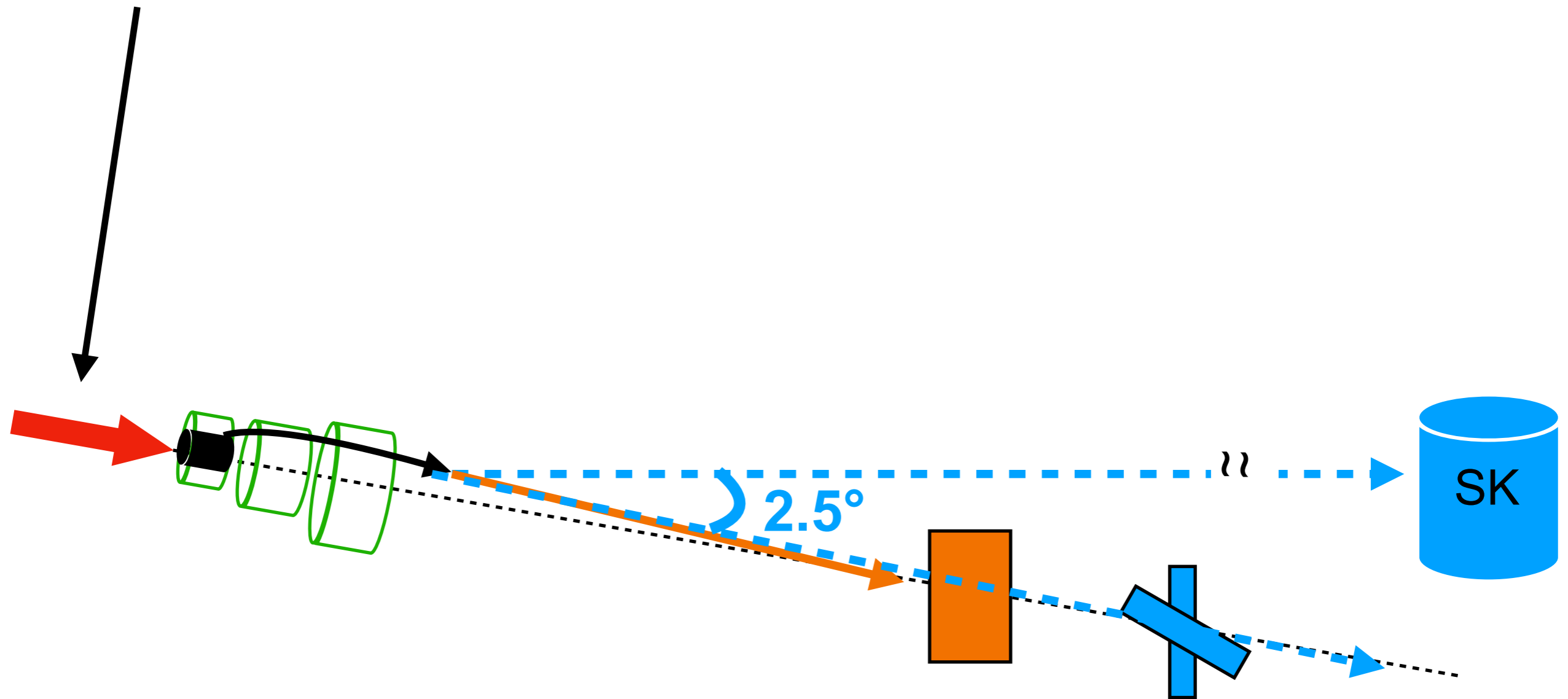
SK

ミュオンビーム

ミュオンモニター

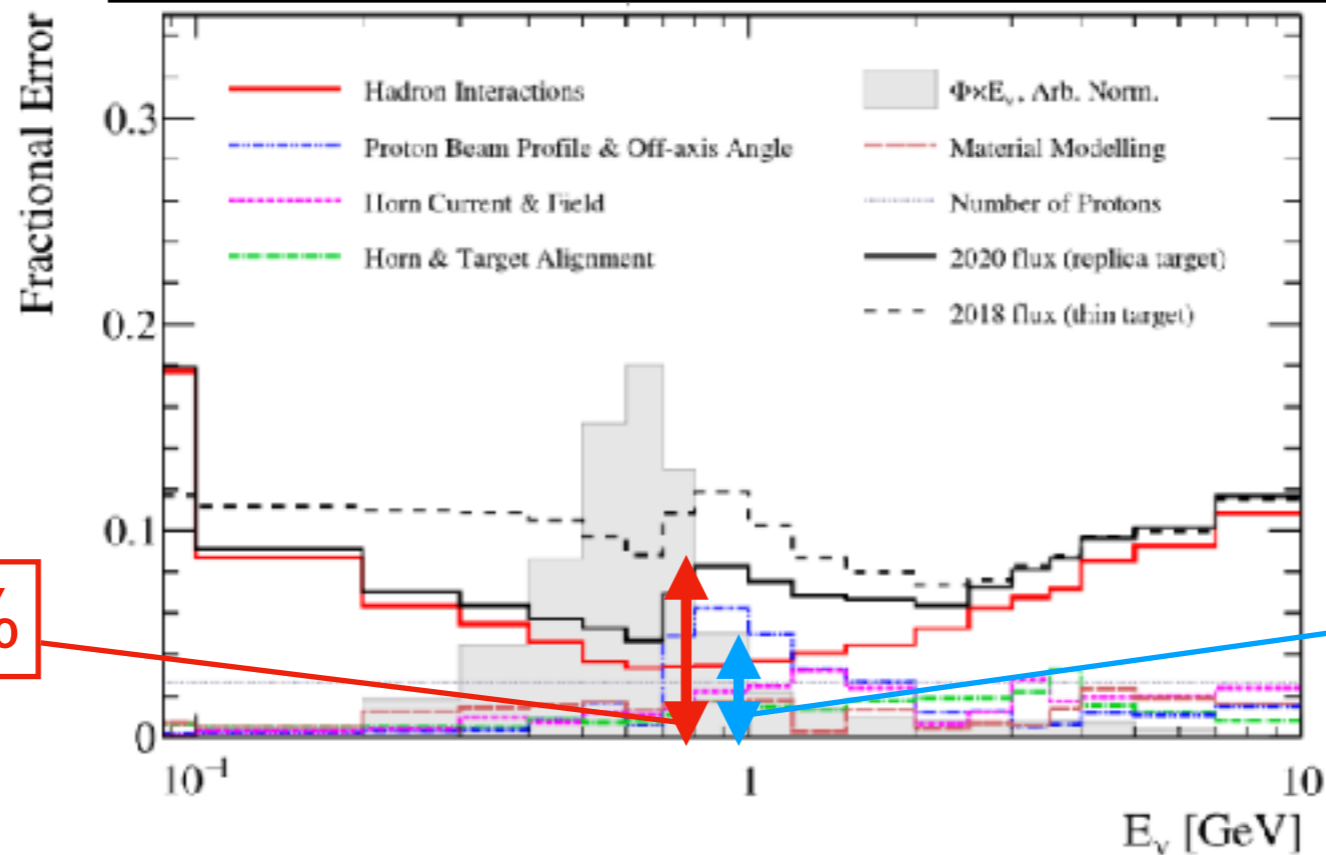
ニュートリノビームモニター

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%

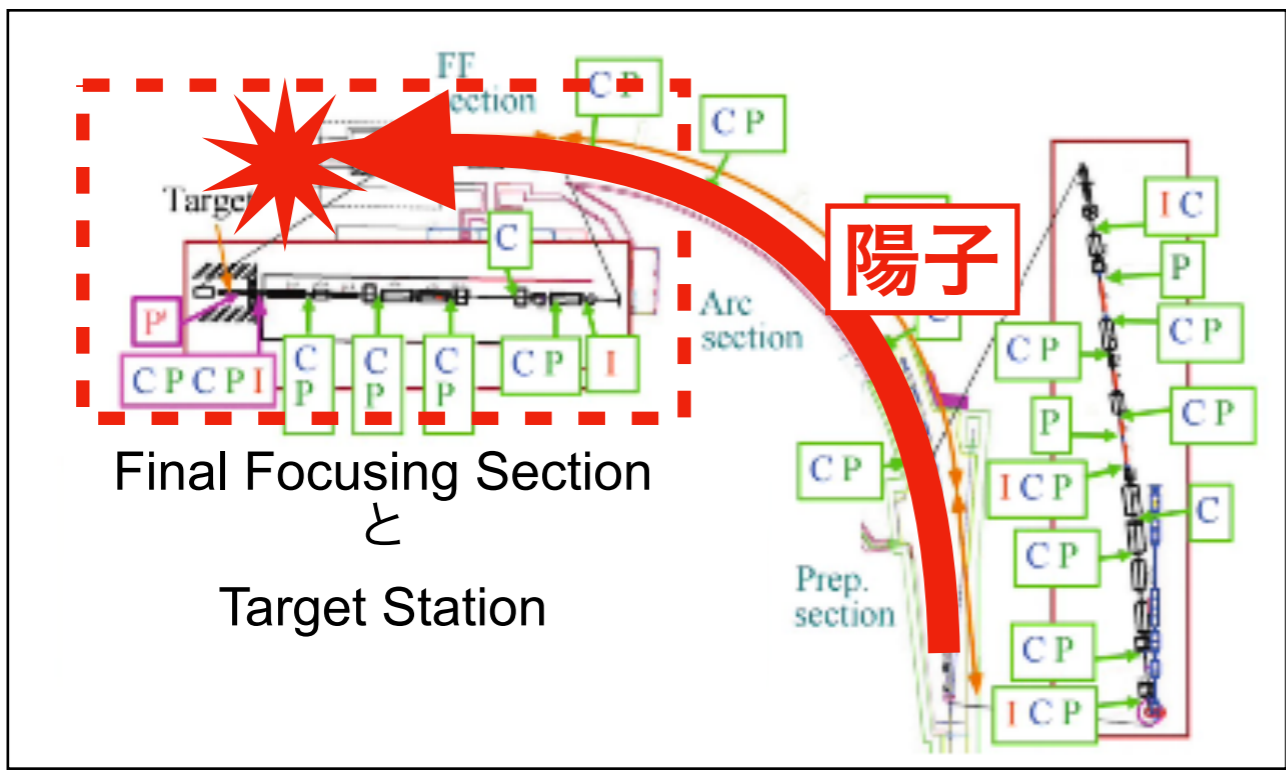
陽子ビーム ~4%

❖ 精度良いビーム再構成が求められる

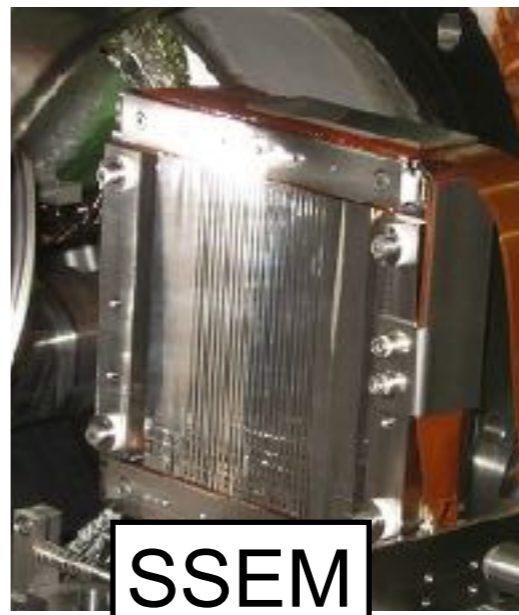
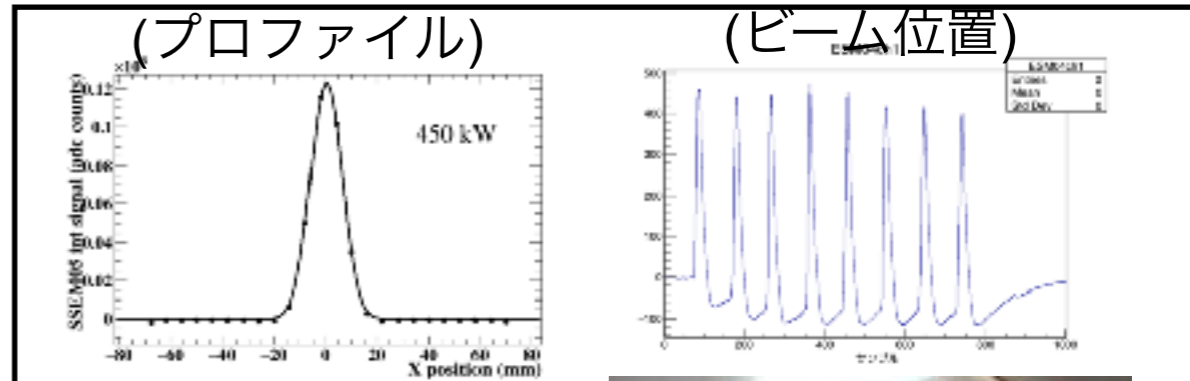
1. 加速器の保護の要請 → ターゲット中心で ± 1.5 mmの精度
2. 実験精度の要請 → ニュートリノフラックスの不定性削
 - ジオメトリーの関係で垂直 (y) 方向の精度が重要
 - エネルギーピーク (0.6 GeV) の高エネルギー領域 (0.7~1.1 GeV) で全体のフラックス不定性 8.0% に対して 4.1% の不定性.

ニュートリノビームライン

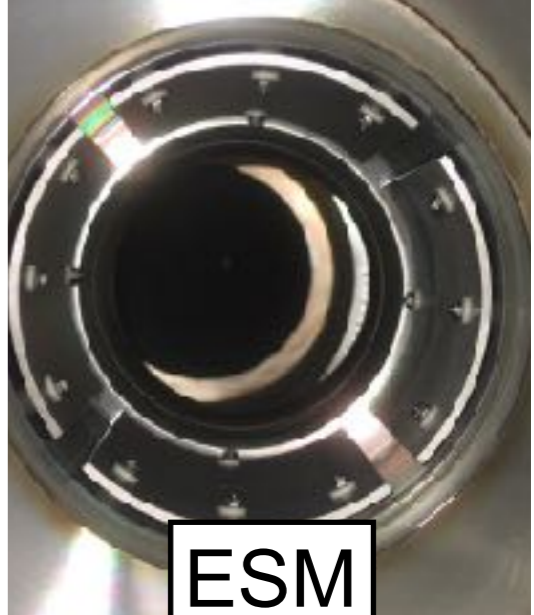
ビームラインを上から見た図



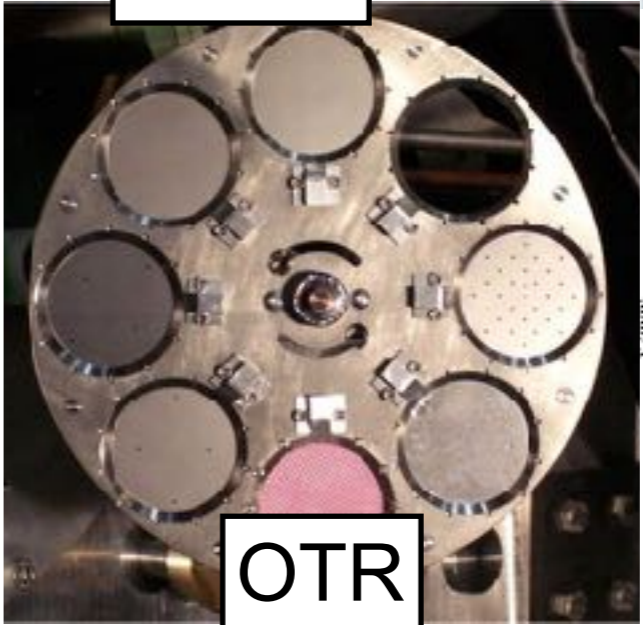
ターゲット



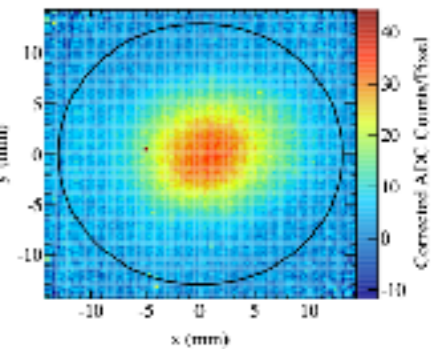
SSEM



ESM



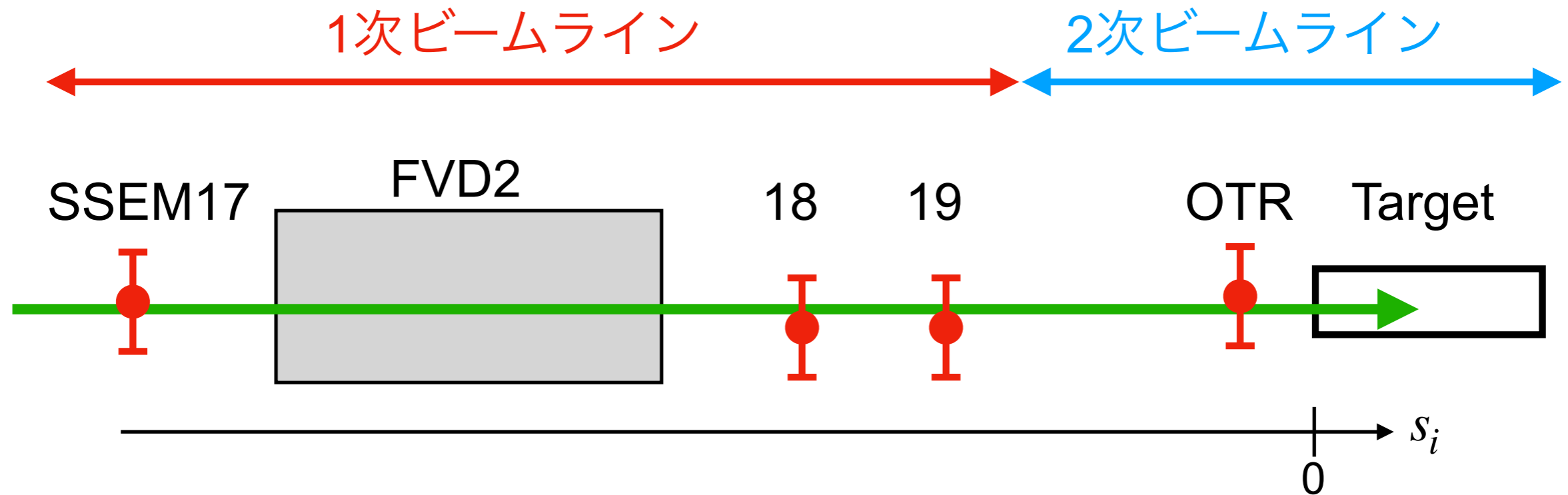
OTR



(プロファイル)

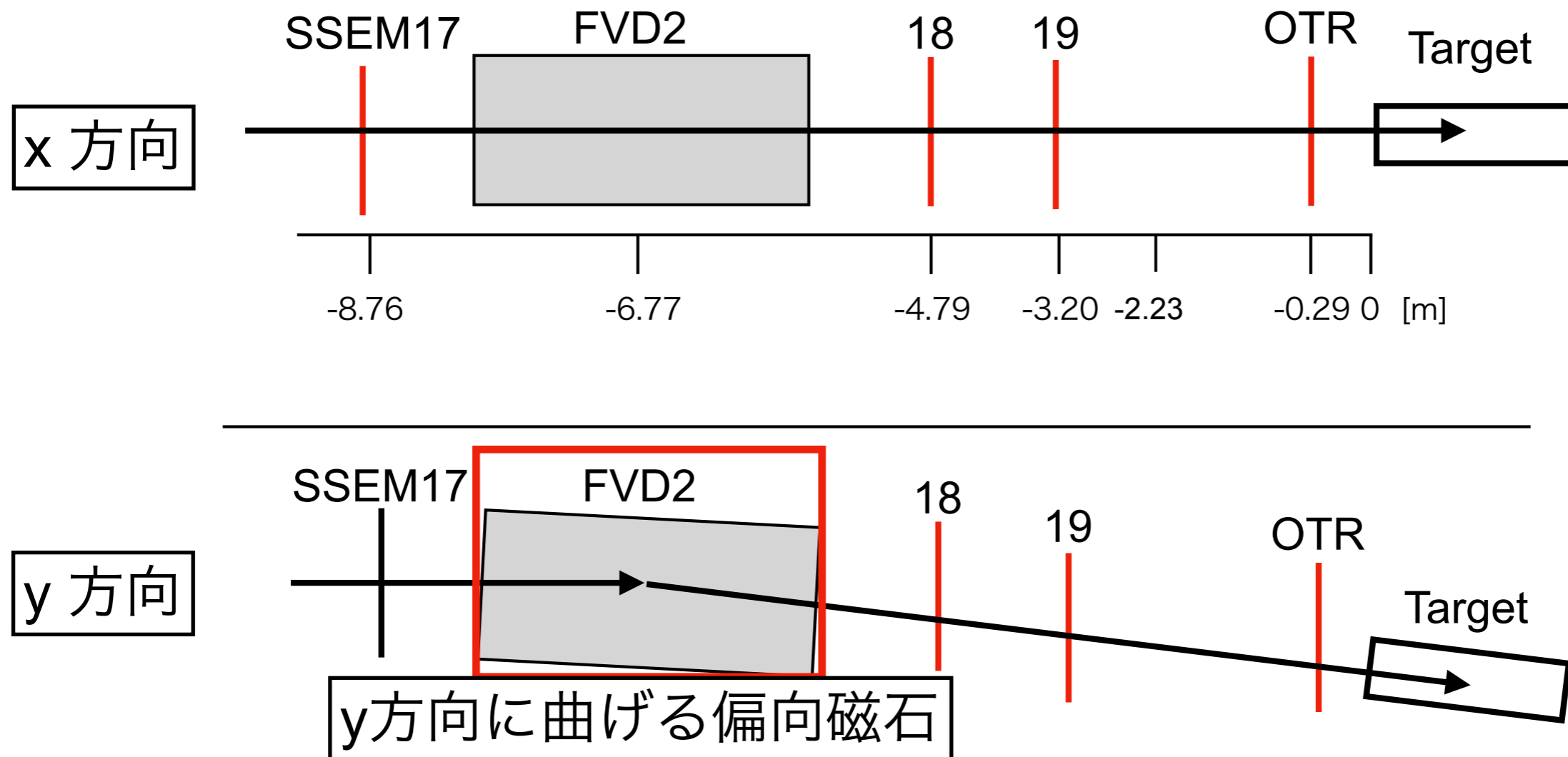
ビームモニター

再構成の手法



- モニターの測定値と測定誤差 (0.1~0.4 mm),
アライメント誤差 (0.2~0.4 mm)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
 - 特にy方向では誤差が大きい(x 方向 0.3 mm, y 方向 1.0 mm).
- オフセットの誤差分を**補正項**として導入
 - 誤差の大きさに基づいた罰則項を最小化関数に追加

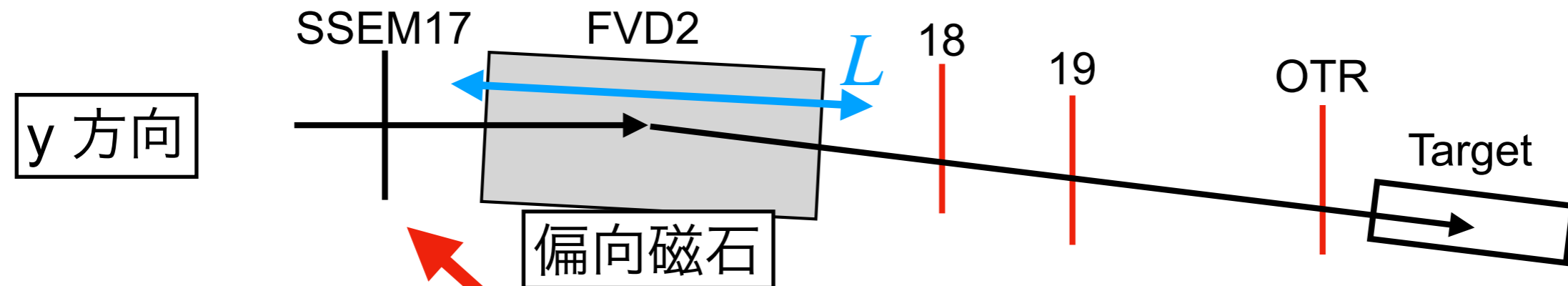
ビーム軌道再構成(従来)



[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

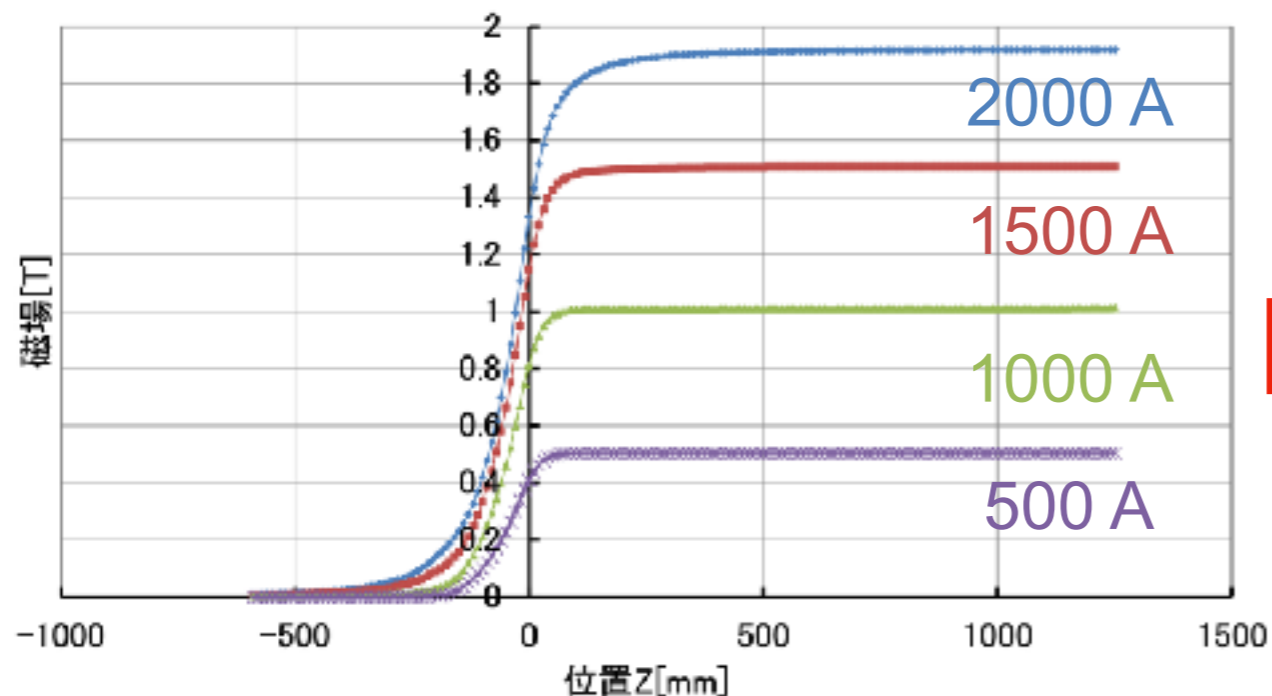
L : 磁場の長さ

c : 光速

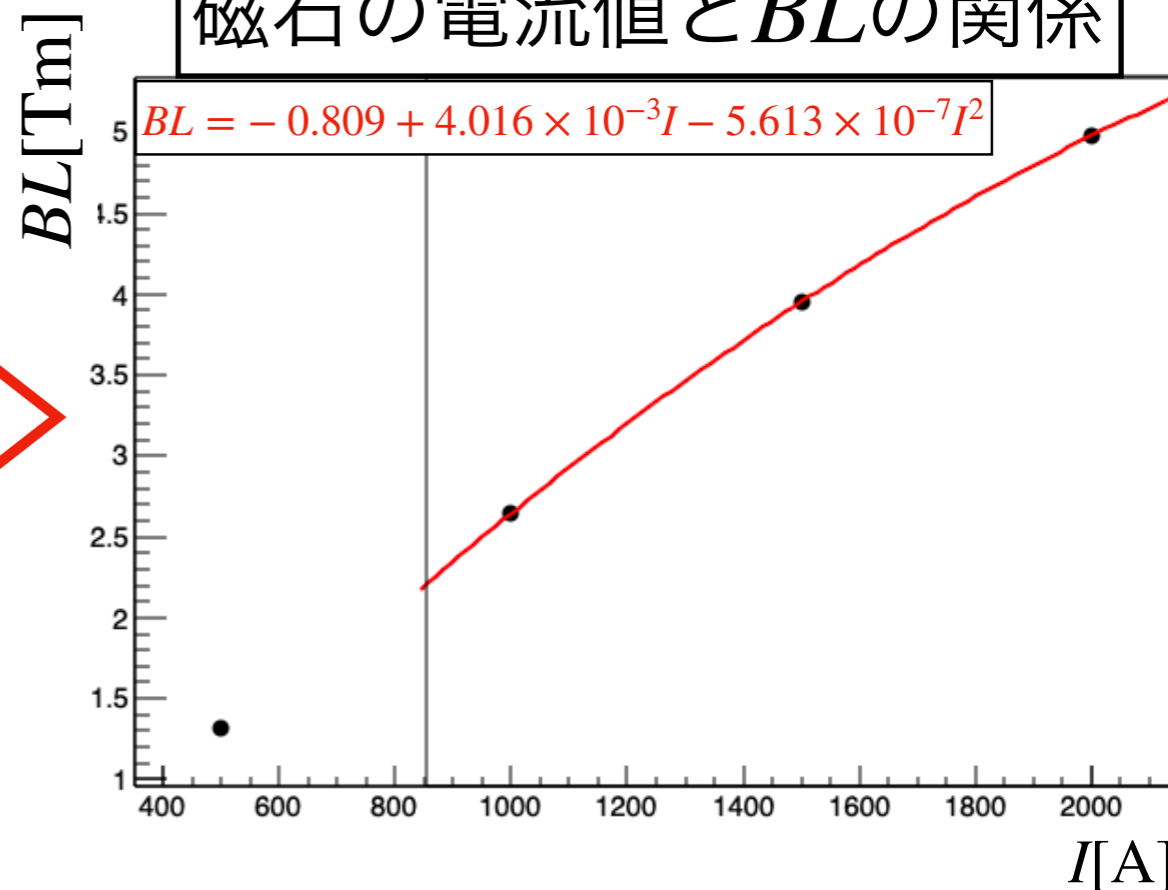
p : 運動量

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

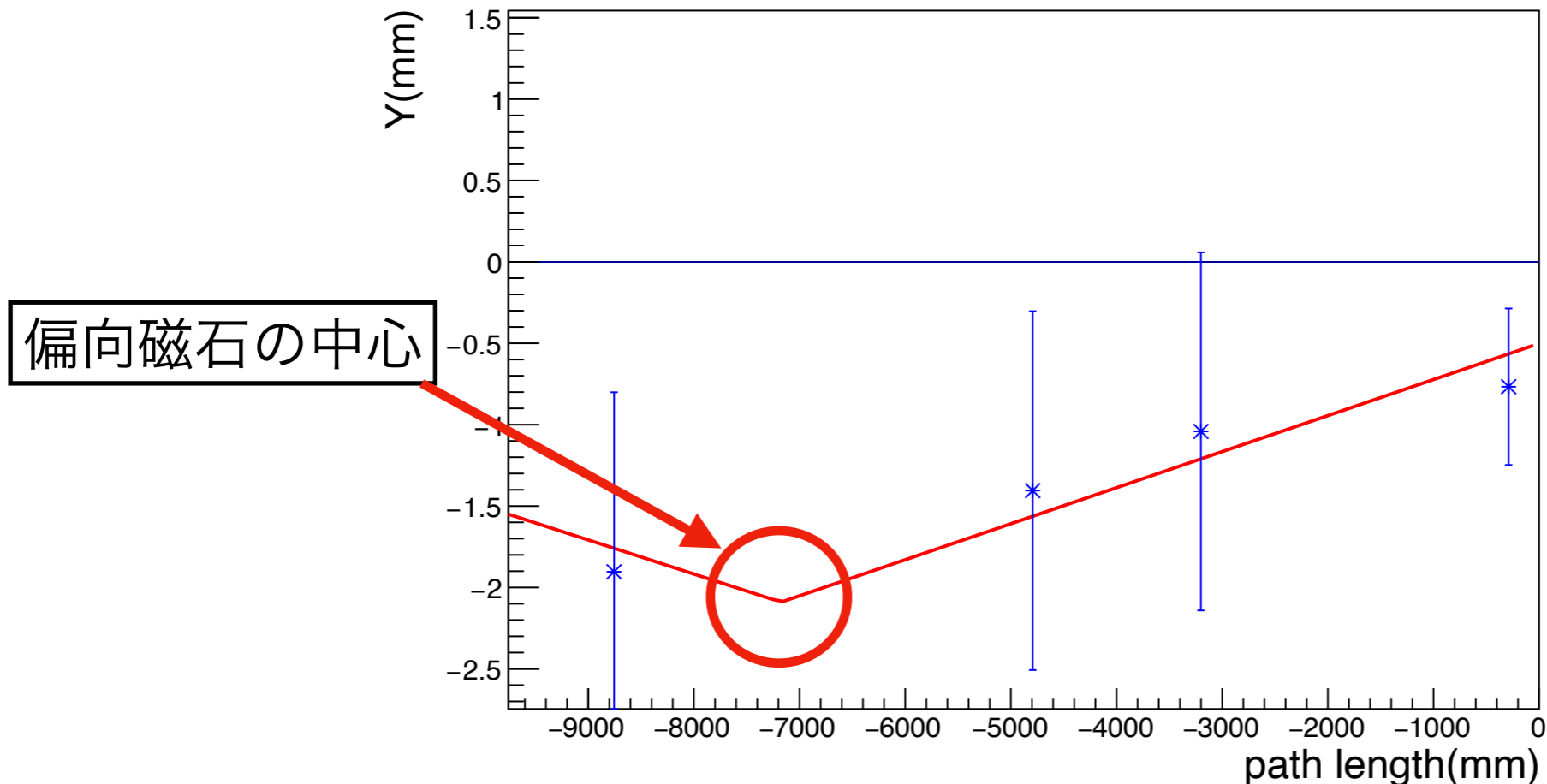


- 曲げ角の計算には、印加電流ごとの (磁場) \times (長さ) = BL が必要
- 磁石の印加電流と磁場分布の関係 \rightarrow 積分して電流値毎の BL を計算
- 1000, 1500, 2000 [A]の値を $(a+bx+cx^2)$ でフィッティング
 - 偏向磁石の典型的な運転電流は約1540 A
- $BL(I) = -0.81 + 4.0 * 10^{-3}I - 5.6 * 10^{-7}I^2$

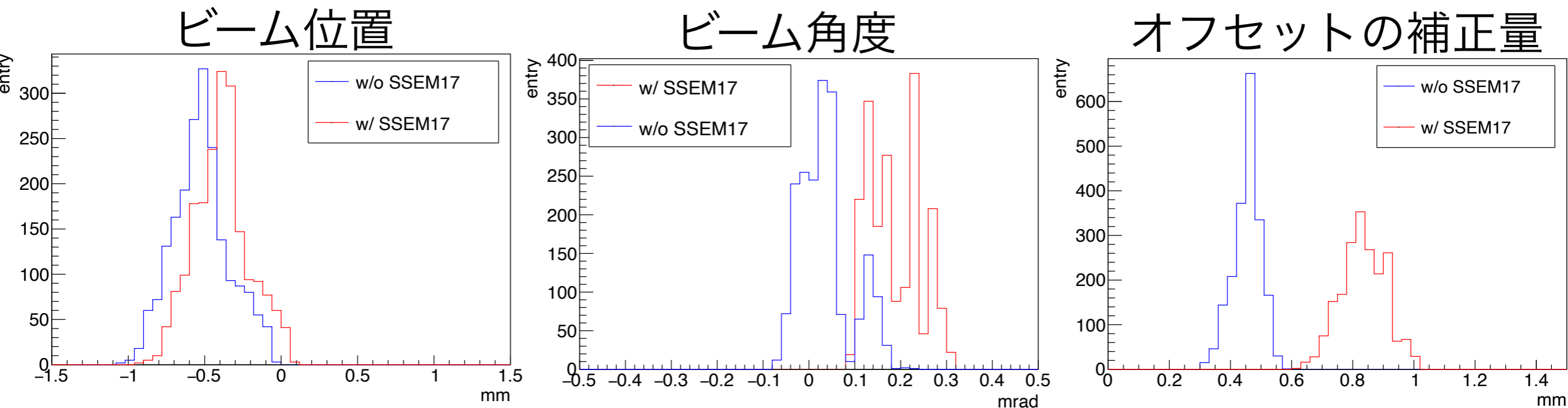
BLの不定性の考慮

- BL の測定には1%の誤差が存在する。
 - キャリブレーション、測定機器のアライメント精度など...
- BL の補正量 “ β ” をフィットパラメータとして導入
 : $BL \rightarrow BL(1 + \beta)$
- “ β ” の罰則項を最小化関数に追加

軌道再構成の1例



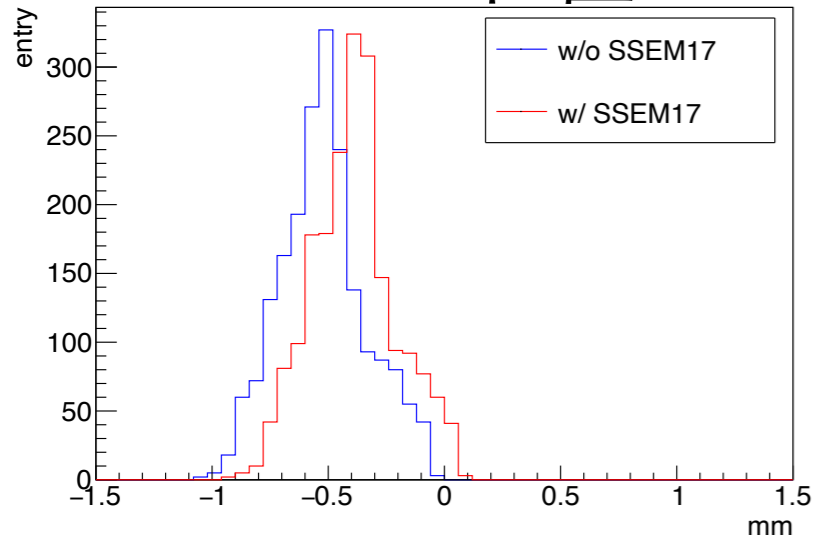
SSEM17追加によるフィットパラメータの変化



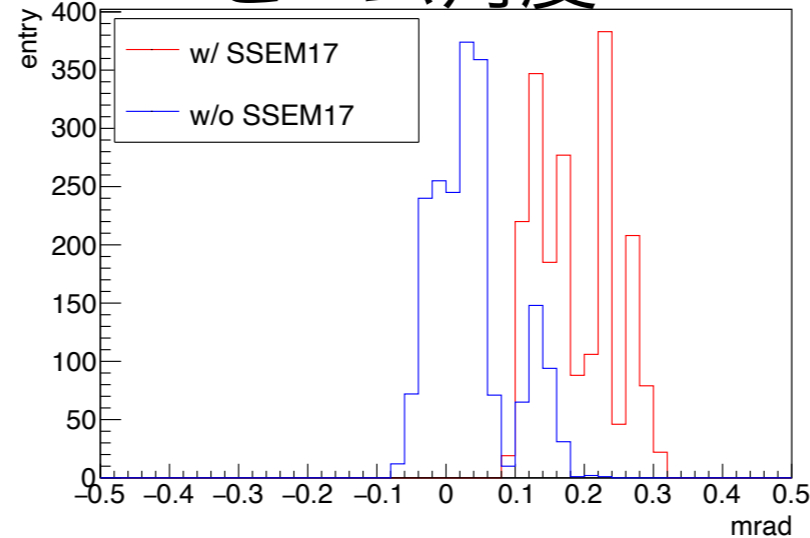
- 使用データ : T2K Run13の38データセット(1980ショット)
- **wo17** : 従来通りSSEM17を使わない再構成
- **w17** : SSEM17を使った再構成
- 分布の平均値とフィット誤差を比較(次ページ)

SSEM17追加によるフィットパラメータの変化

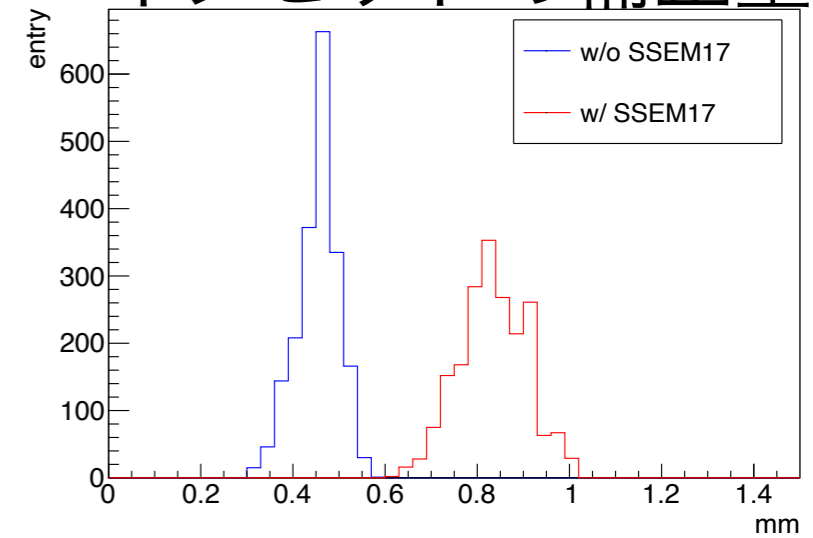
ビーム位置



ビーム角度



オフセットの補正量



	位置 [mm]	位置の誤差 [mm]	角度 [mrad]	角度の誤差 [mrad]	オフセット 補正量[mm]	補正量 の誤差[mm]
wo17	-0.52	0.49	0.04	0.25	0.45	0.85
w17	-0.39	0.46	0.19	0.14	0.83	0.67
w17-wo17	0.13	-	0.15	-	0.38	-

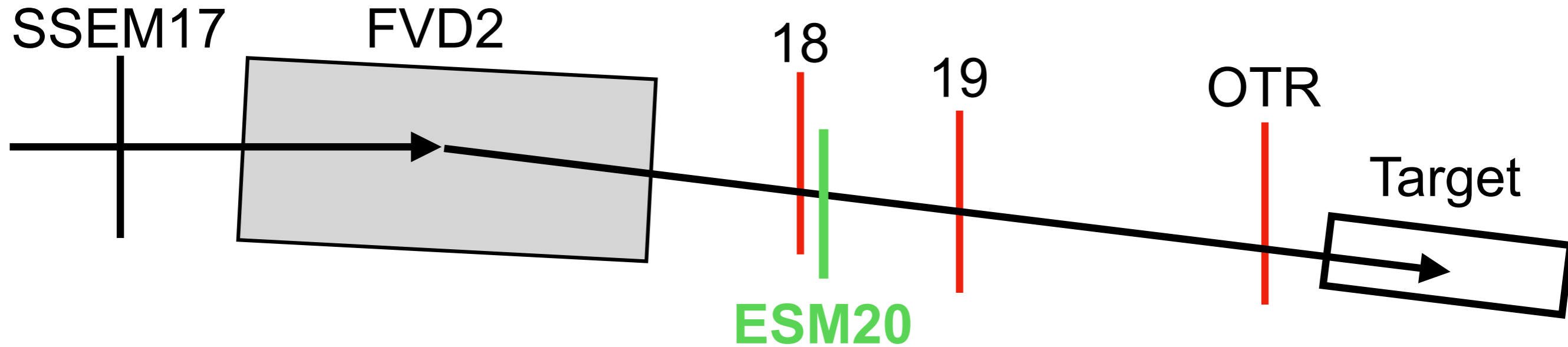
✓ フィット誤差は削減された

✓ 分布の平均値は、w17のフィット誤差の範囲でほとんど一致

◎ しかし、系統的なズレは正しいのか？

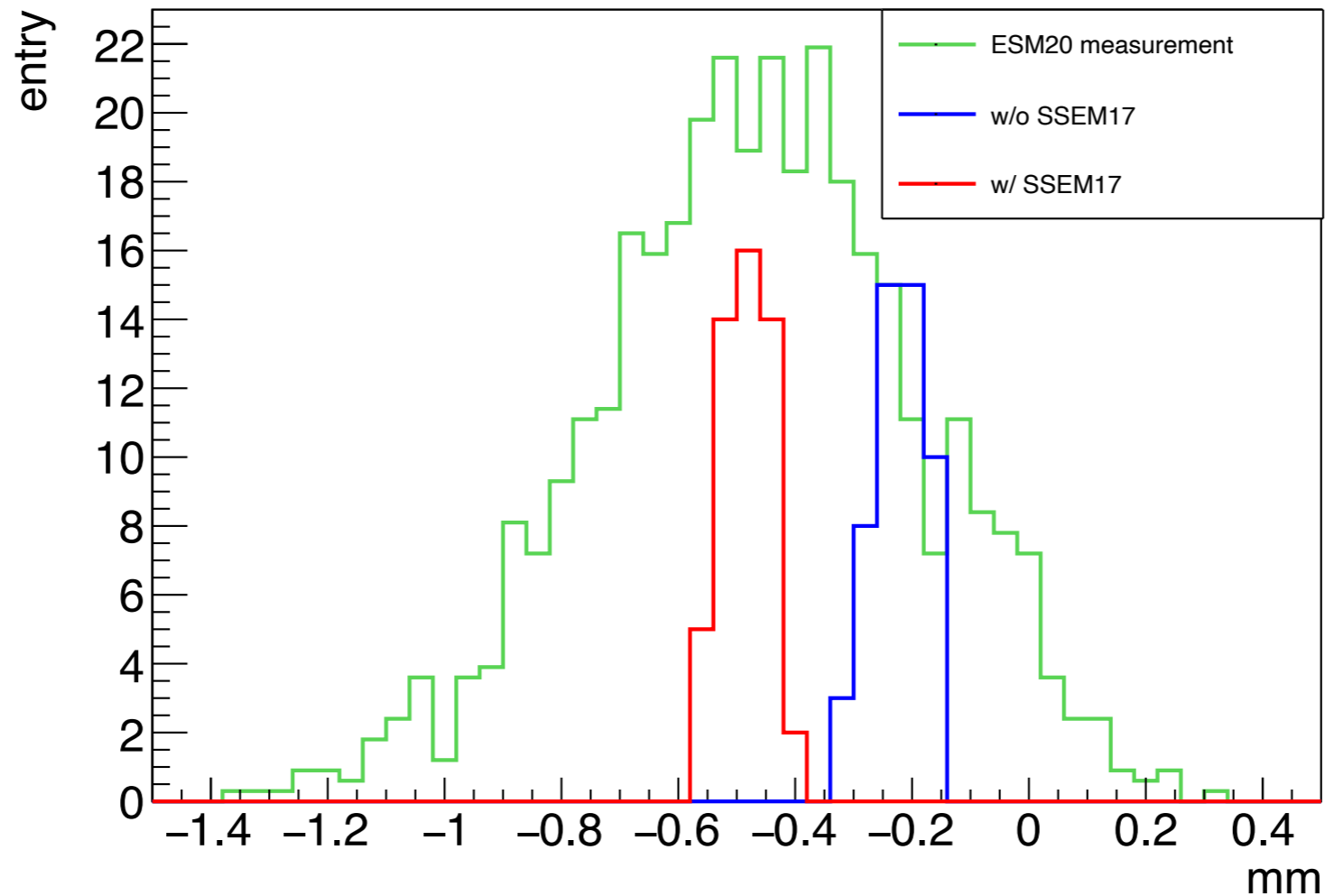
→ 他のモニターの測定値を用いて検証

ESM20の測定値の予測



- ESM20がSSEM18の近傍でビーム位置を測定
- w_{017} と w_{17} のフィット結果を用いて、それぞれでESM20におけるビーム位置を予測
- 予測値とESM20の測定値と比較

ESM20の測定値の予測結果



- ESM20の測定値の平均値：-0.47 mm.
 - wo17による予測値の平均値：-0.23 mm.
 - w17による予測値の平均値：-0.49 mm.
- ✓ SSEM17有りの軌道再構成の方が良く一致
- ✓ 軌道再構成の系統的なバイアスを除去できたことを示唆

複数ショットの同時再構成

同時再構成のアイデア

[1ショット毎の再構成]

- ▶ フィットパラメータ
 - ① ビーム位置
 - ② 角度
 - ③ ビームラインオフセットの補正量
 - ④ 偏向磁石の補正量

しかし、

- ③はショット毎には変動しないはず
- ④は磁石の設定(もしくは磁石自体)が変わらない限り変動しないはず

同時再構成のアイデア

[1ショット毎の再構成]

- ▶ フィットパラメータ
 - ① ビーム位置
 - ② 角度
 - ③ ビームラインオフセットの補正量
 - ④ 偏向磁石の補正量

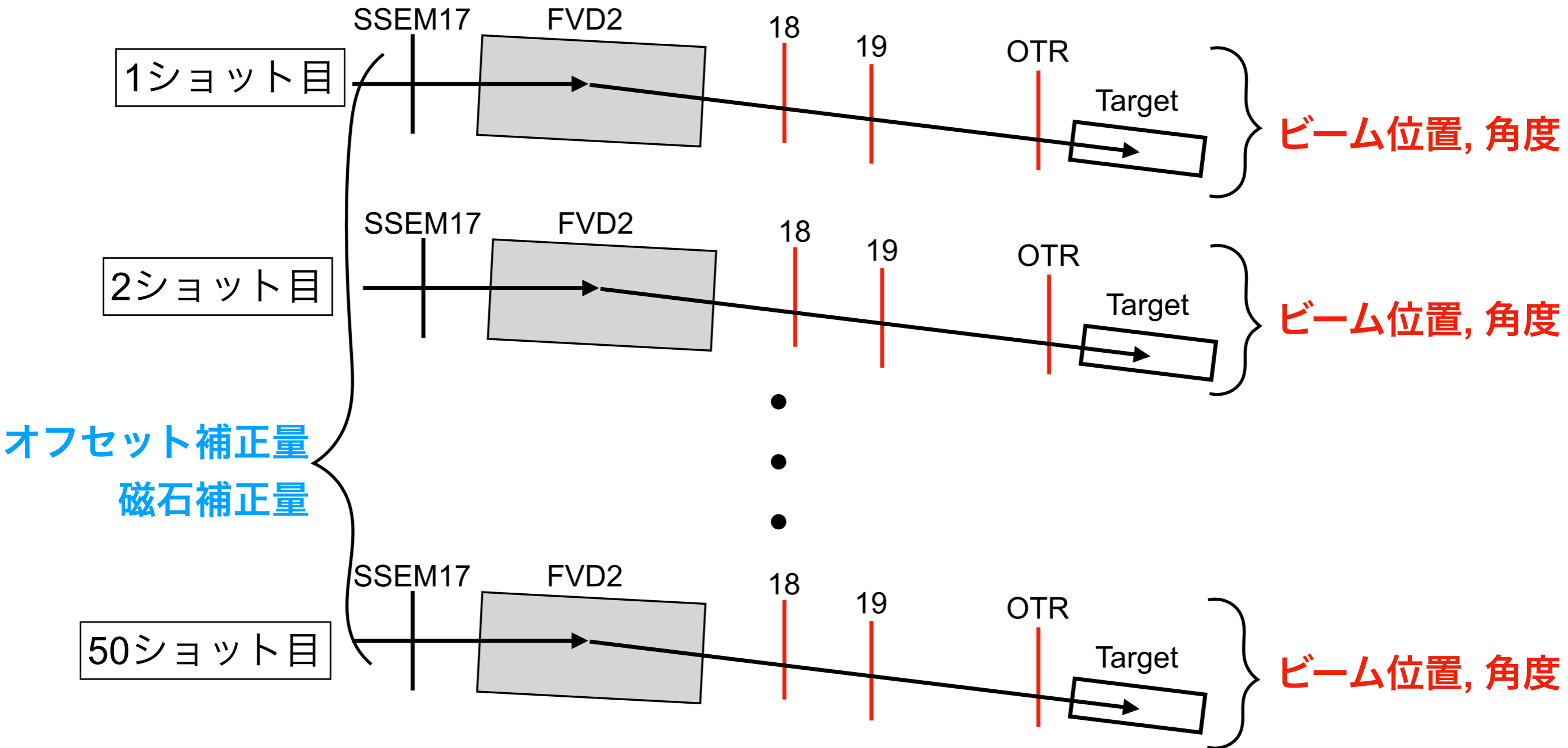
しかし、

- ③はショット毎には変動しないはず
- ④は磁石の設定(もしくは磁石自体)が変わらない限り変動しないはず

[複数ショットの同時再構成]

- ▶ 位置と角度は1ショット毎にフィットパラメータとして追加
- ▶ 2つの補正量は一連のショットで共通のフィットパラメータ

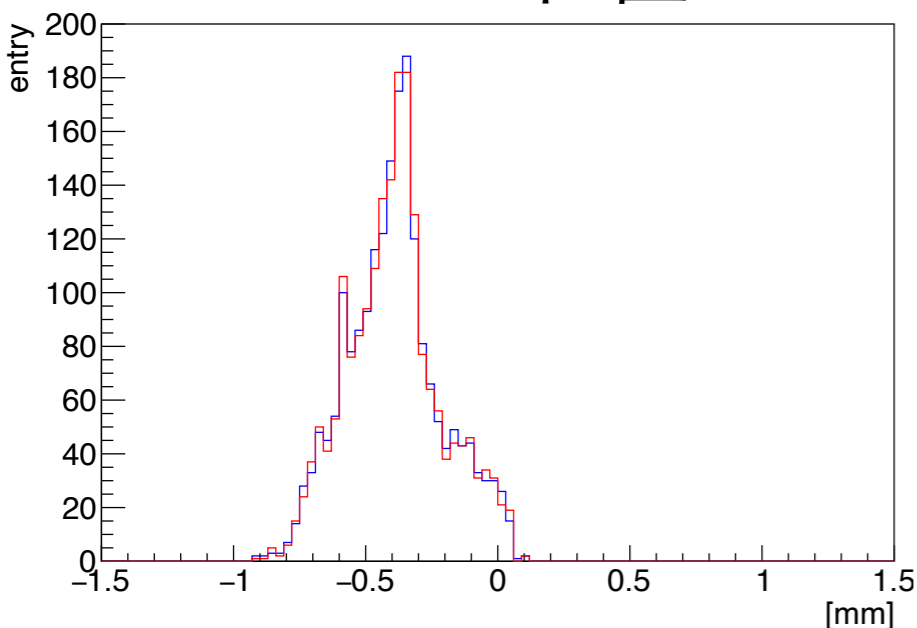
例：50ショット同時再構成



- 測定値の個数： $4 \times 50 = 200$ 個
- フィットパラメータの個数： $2 \times 50 + 2 = 102$ 個
- ✓ データ数増加に伴いフィットの信頼性向上が期待

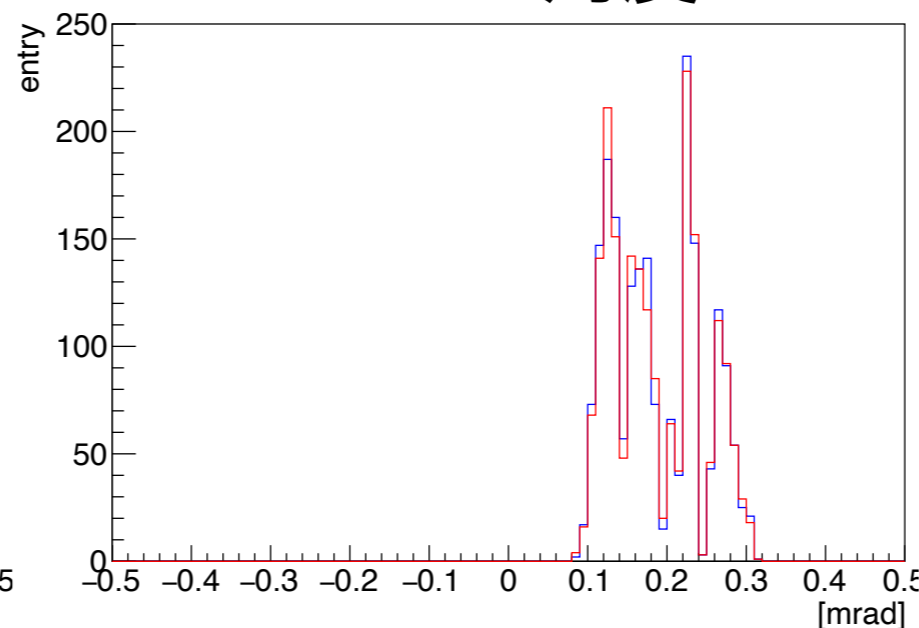
1ショット毎のフィット結果との比較

ビーム位置



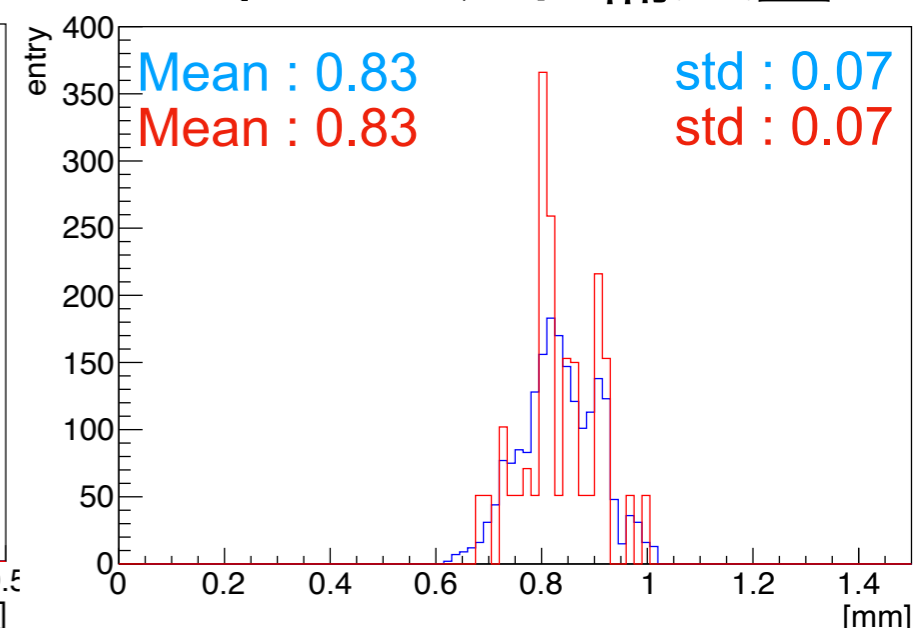
フィット誤差
0.46 → 0.41 [mm]

ビーム角度



フィット誤差
0.14 → 0.08 [mm]

オフセット補正量



フィット誤差
0.67 → 0.09 [mm]

- 同じデータセットを使用
- 1ショット毎のw17と同時再構成のw17を比較
- 分布の形状や平均値はほとんど一致
- ✓ フィット誤差が減少, 特にオフセット補正量が大きく減少
- ✓ ESM20の予測値も先ほどの結果と同様

まとめ

[T2K実験]

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 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
- 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向上]

- y方向の陽子ビーム軌道再構成に
今まで使われていなかったビームモニターを追加
- ✓ ビーム位置, 角度の不定性を削減
- 複数ショットの同時再構成を実装
 - 1ショット毎に変動するはずのないパラメータは一連のショットで1つの値とした。
- ✓ 1ショットの時よりさらにフィット誤差を削減できた

[今後の展望]

- ニュートリノフラックス不定性の影響
- オフセット補正量の推定

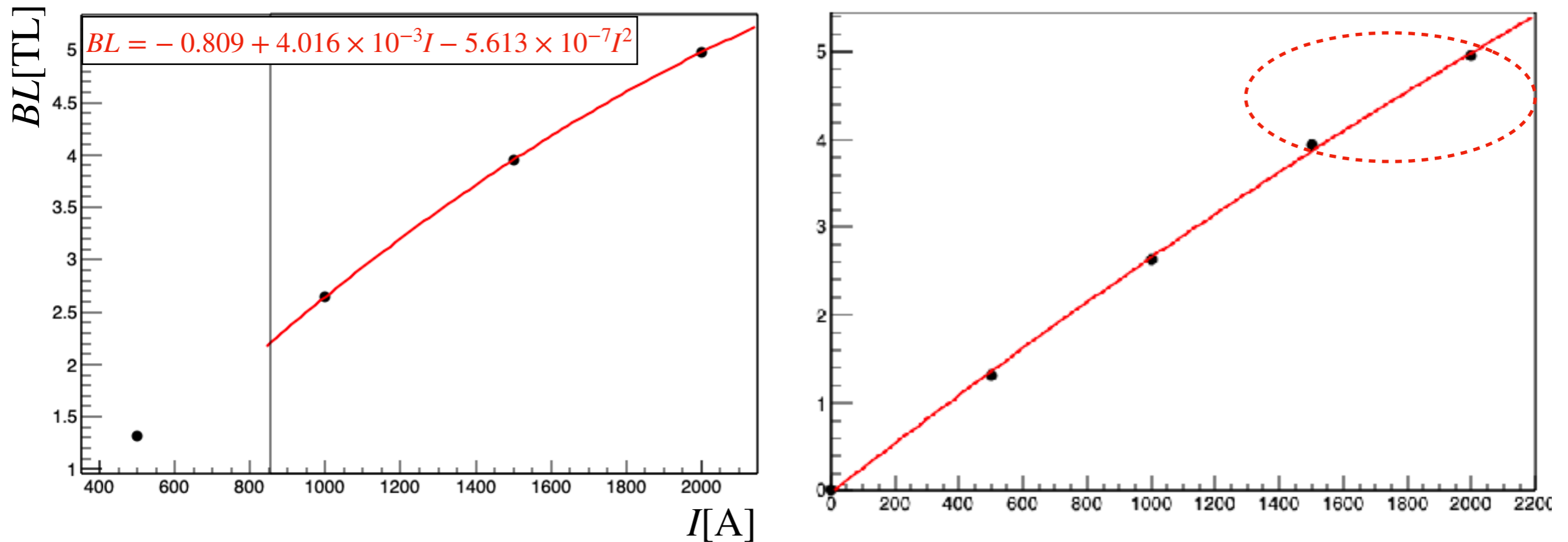
Backup

パラメータエラーの典型値

Table 1. Proton beam uncertainties and their correlations for the position and angle at the baffle

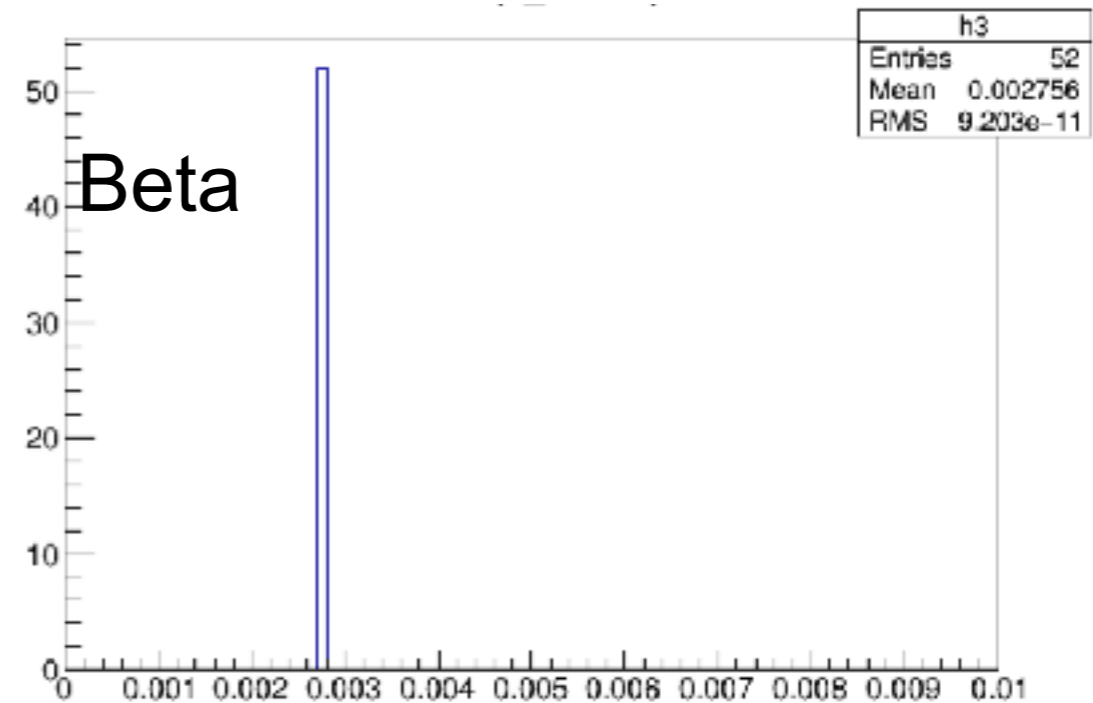
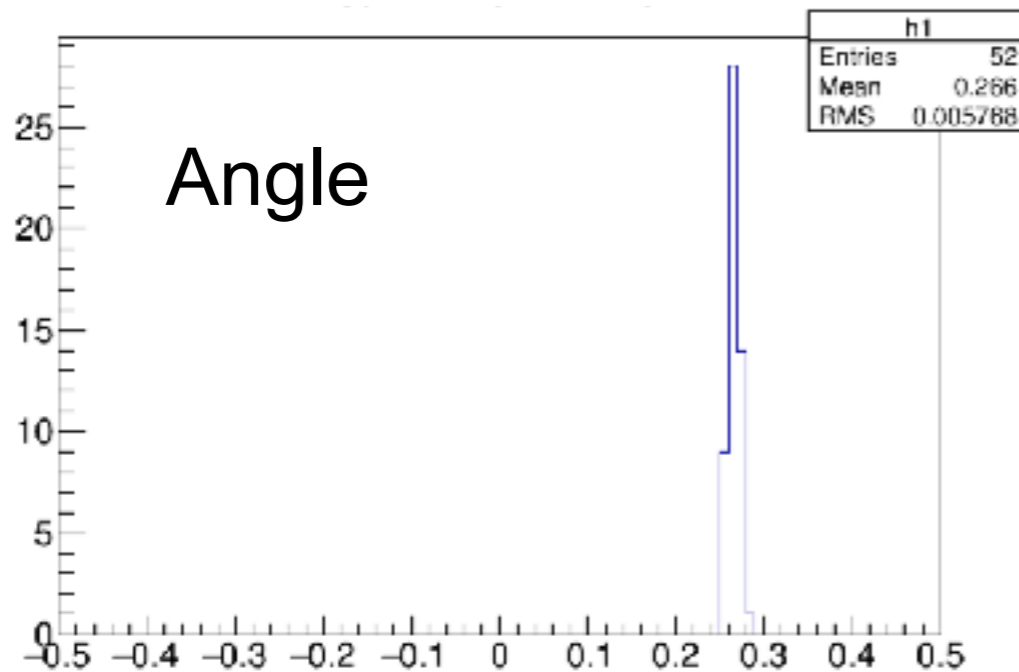
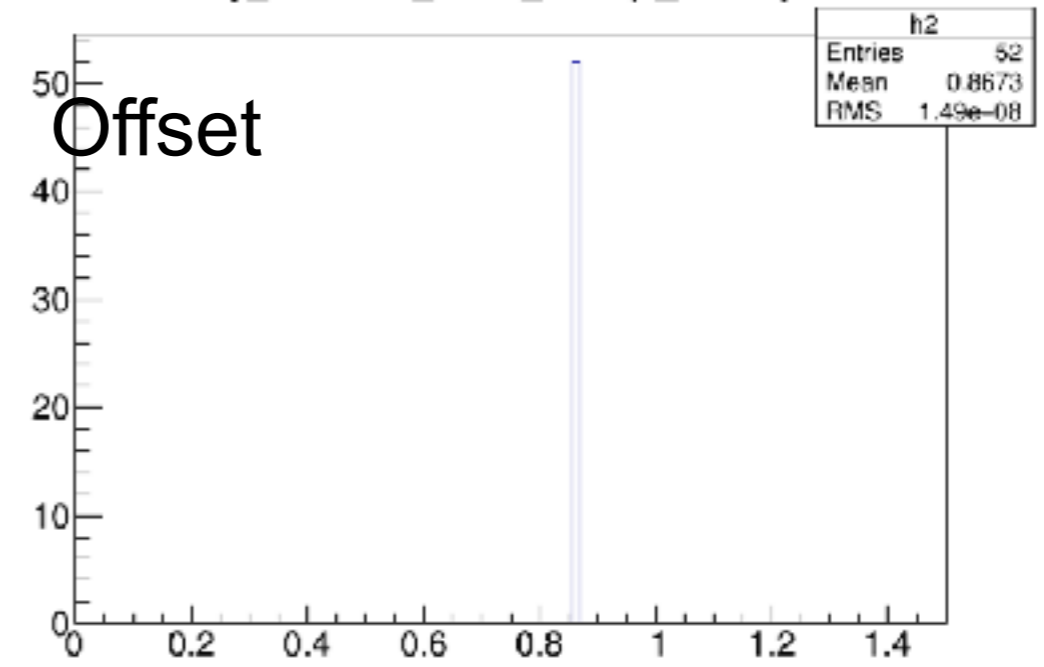
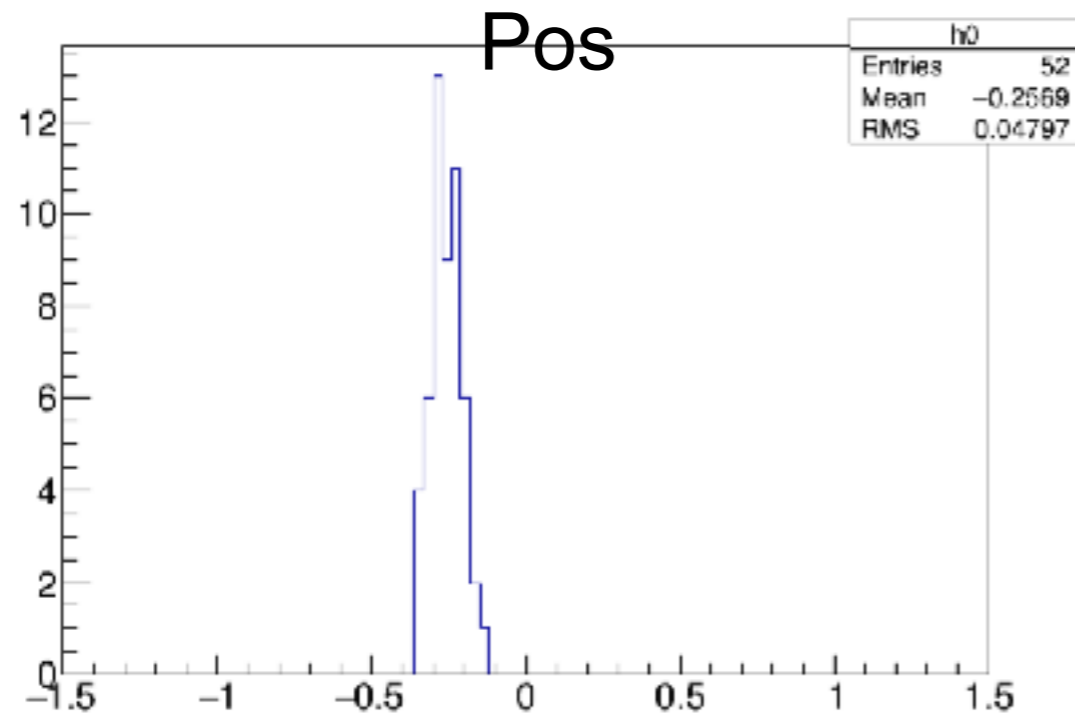
Error source	δX (mm)	δY (mm)	$\delta X'$ (mrad)	$\delta Y'$ (mrad)	corr(X, X')	corr(Y, Y')
Fit error	0.38	0.58	0.056	0.286	0.517	0.392

BLのフィット範囲



- 典型的な運転時電流は1500~1600A程度
 - この範囲のBLを再現する曲線が望ましい
- $I = [0:2000]$ でフィットをすると、1500Aの点をかなり逸脱する。
- $[1000:2000]$ 間の3点を二次関数でフィットする方が、今は望ましい
 - 3点を完璧に通る曲線であっても、限られた範囲の内挿点を求めているので、問題ないと判断した。

同時フィットの実装



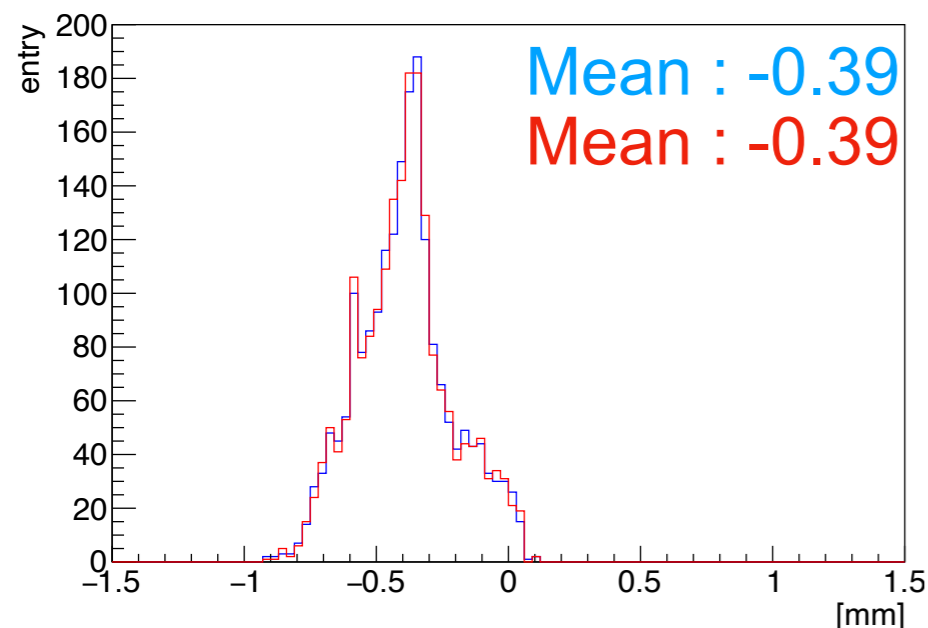
- Shared parameter is just one, OK.
- Even set original method result as initial value, fit result is not changed.

Compare result of shot by shot

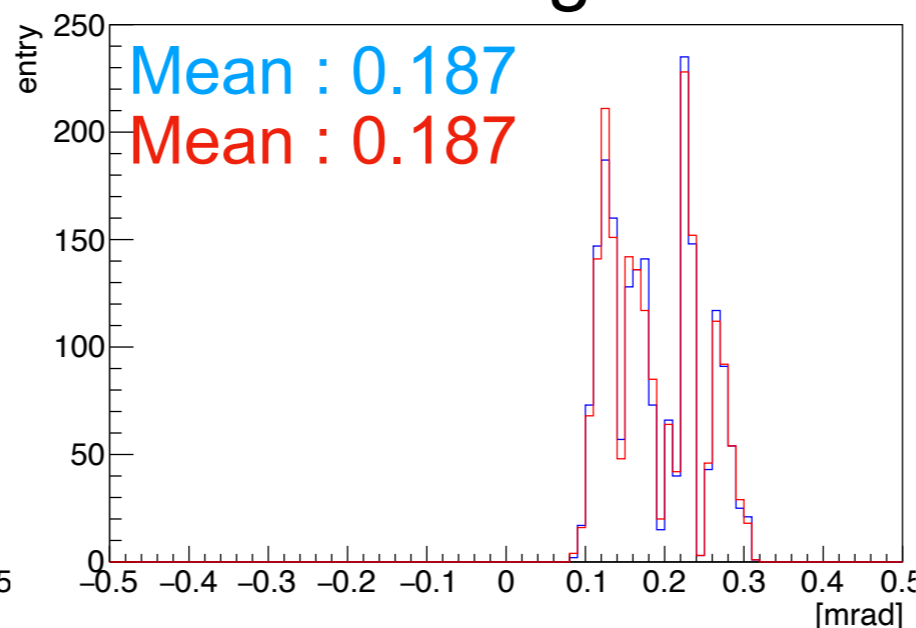
w 17, shot by shot

New

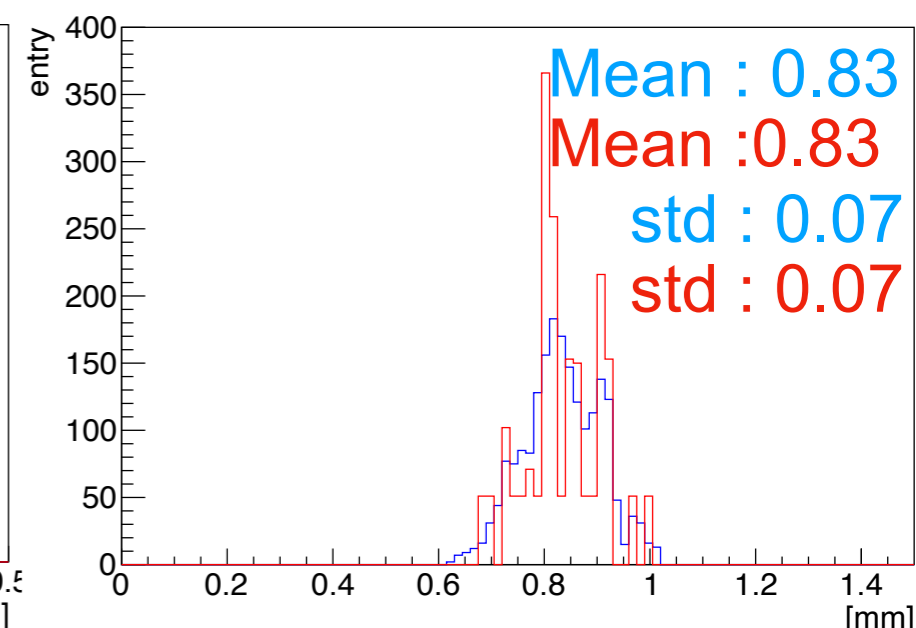
Pos



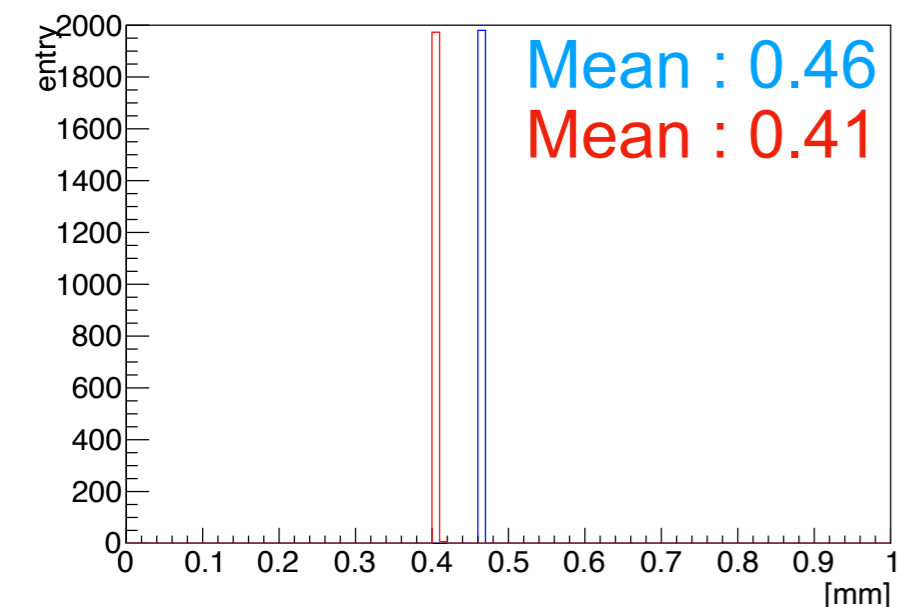
Angle



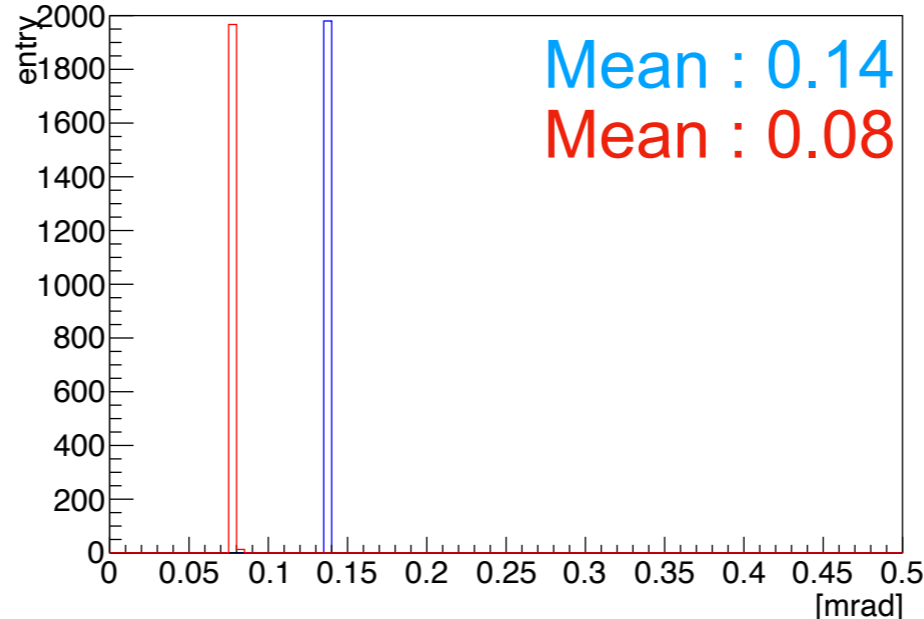
Offset



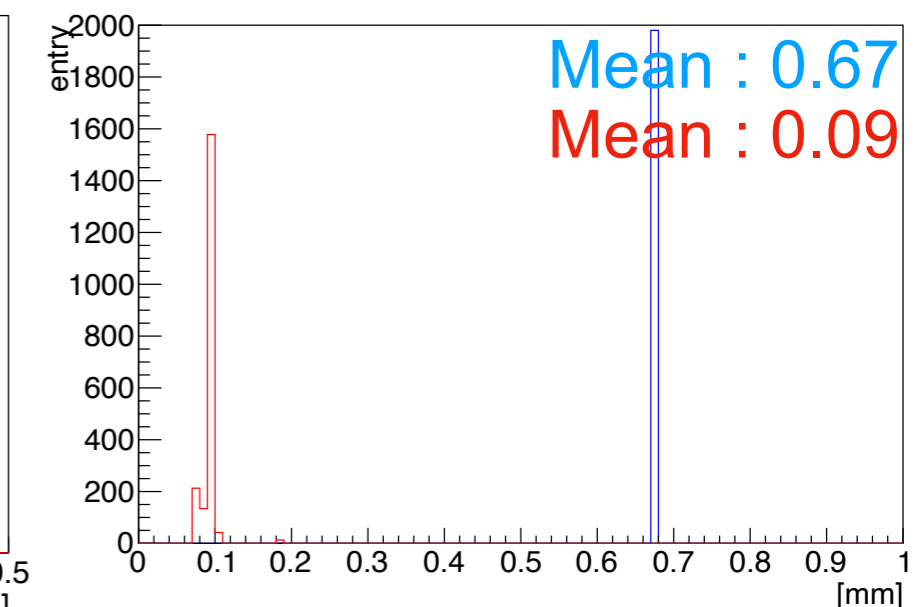
Error



Error



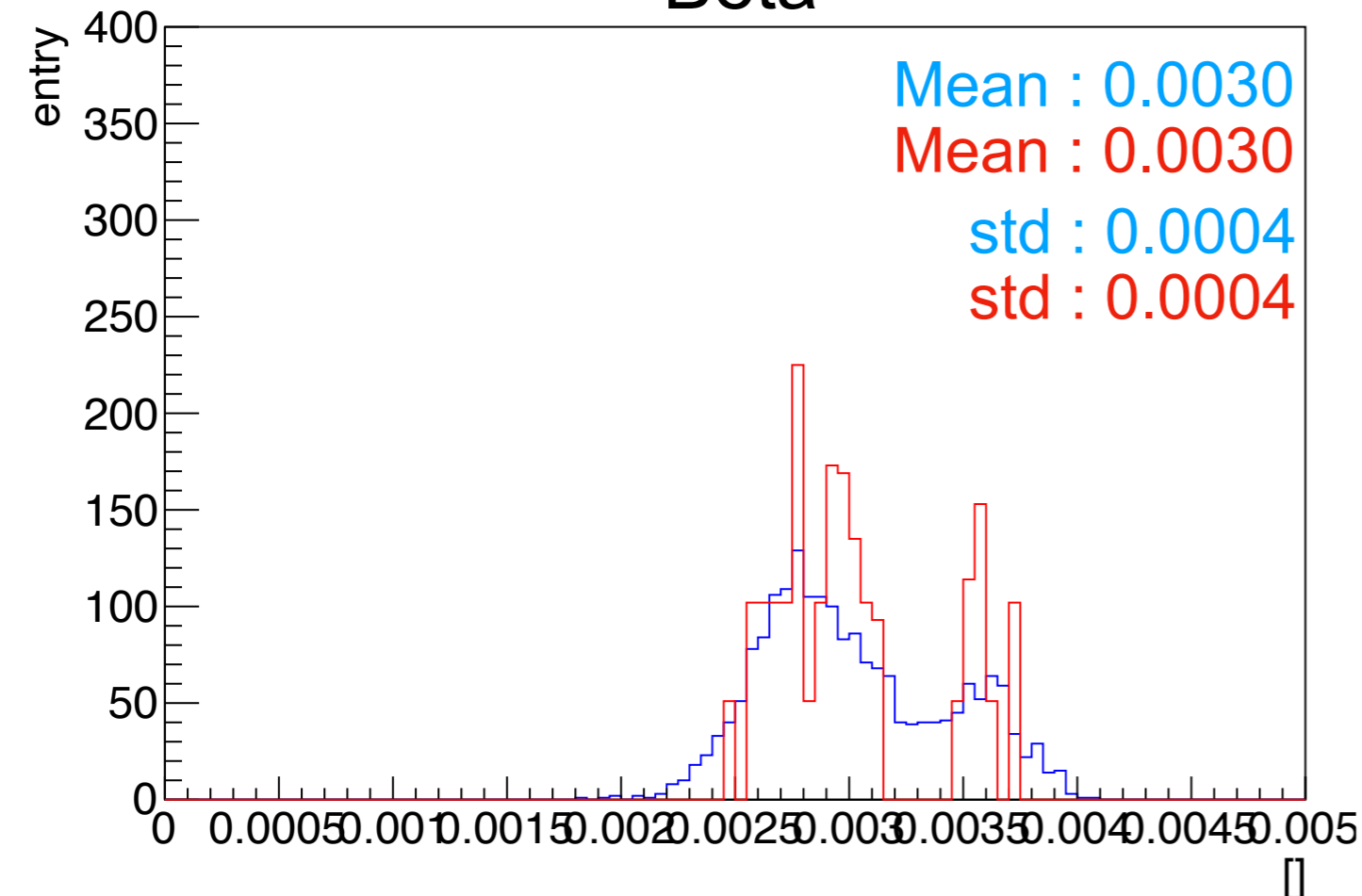
Error



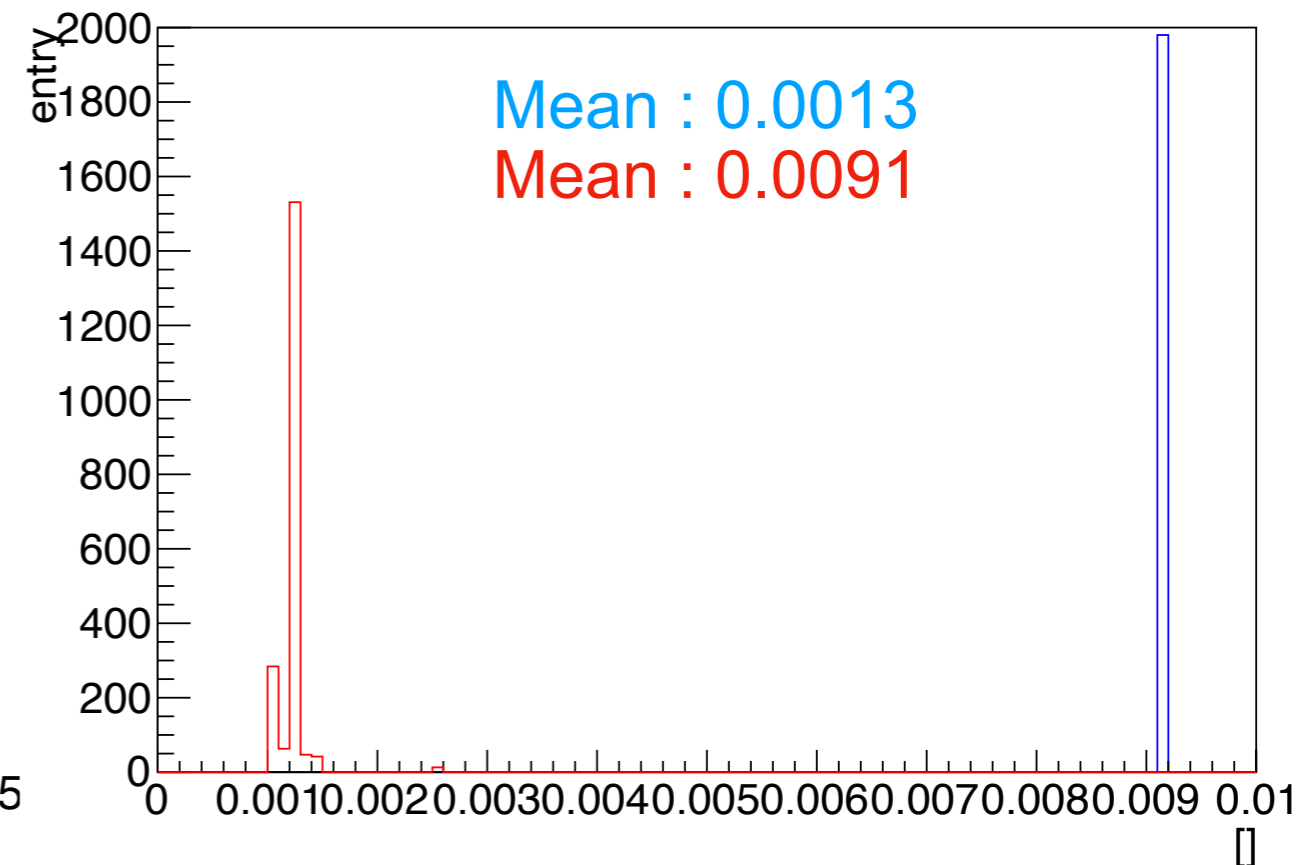
- Fit result is very consistent.
- Angle and offset error is reduced so much.

Beta compare (同時フィット)

Beta



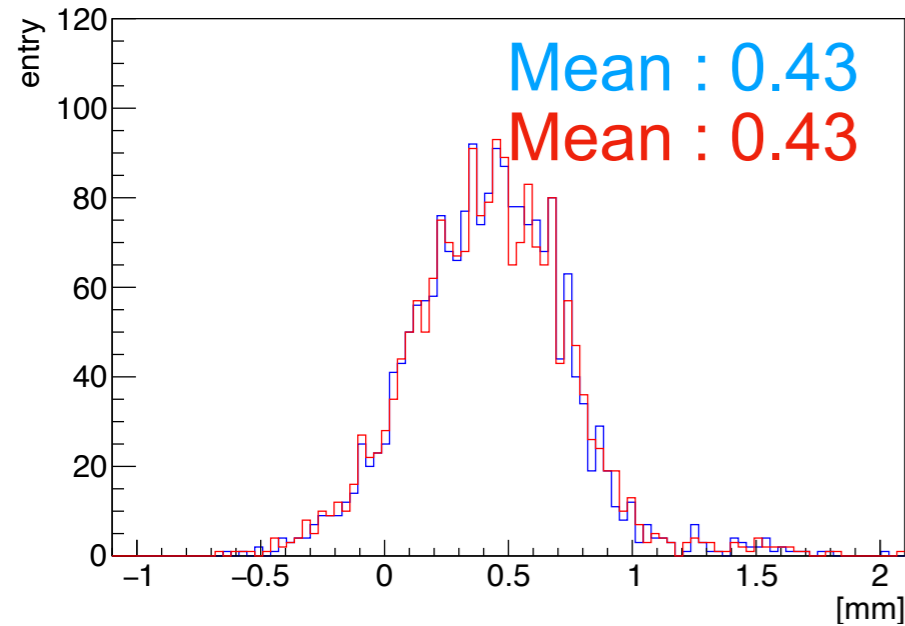
Beta error



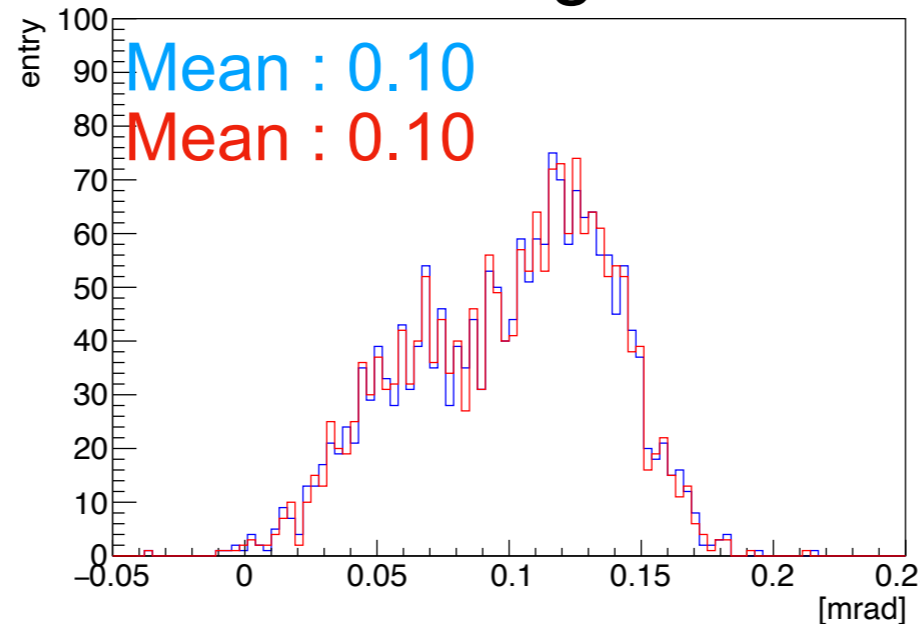
- Beta is consistent but small error.

Compare x orbit fit

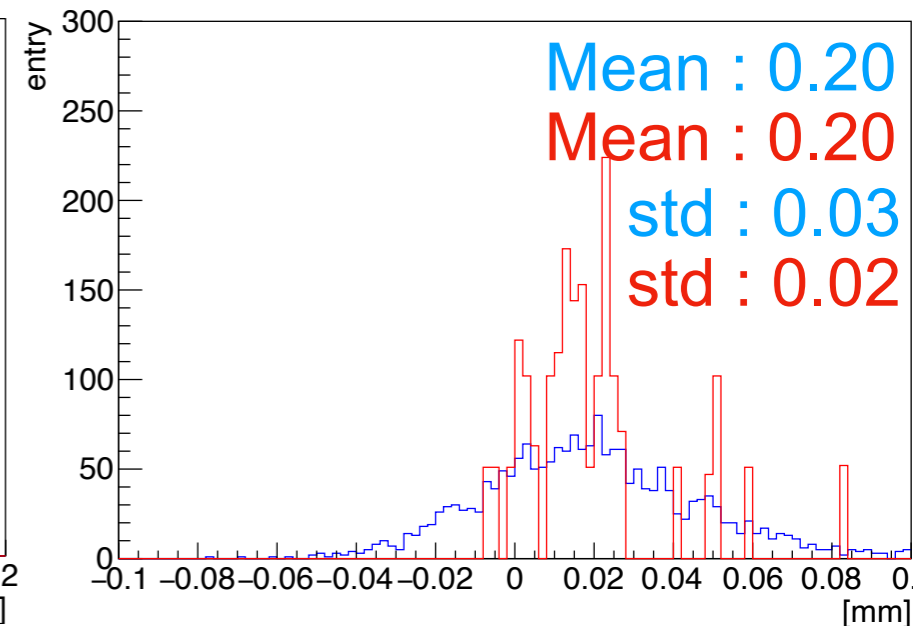
Pos



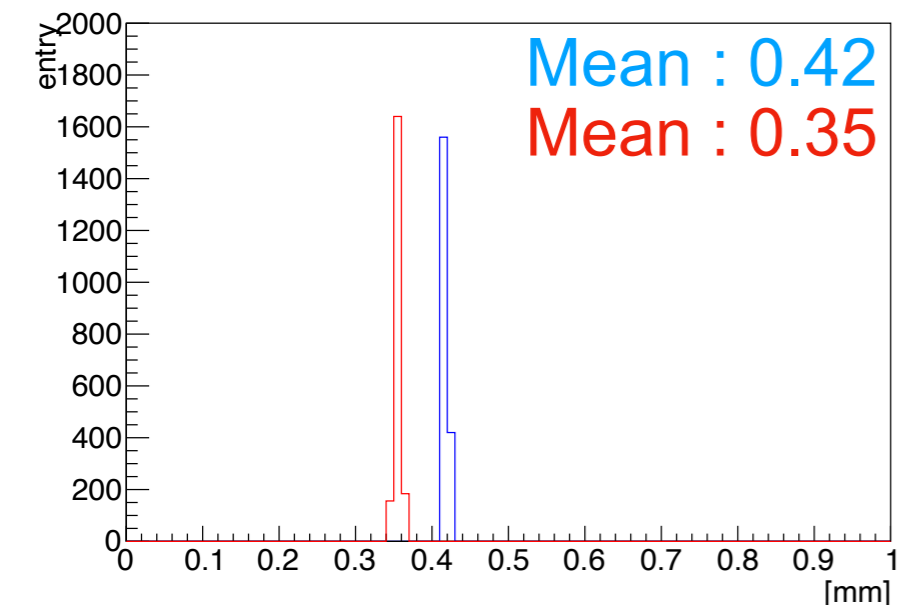
Angle



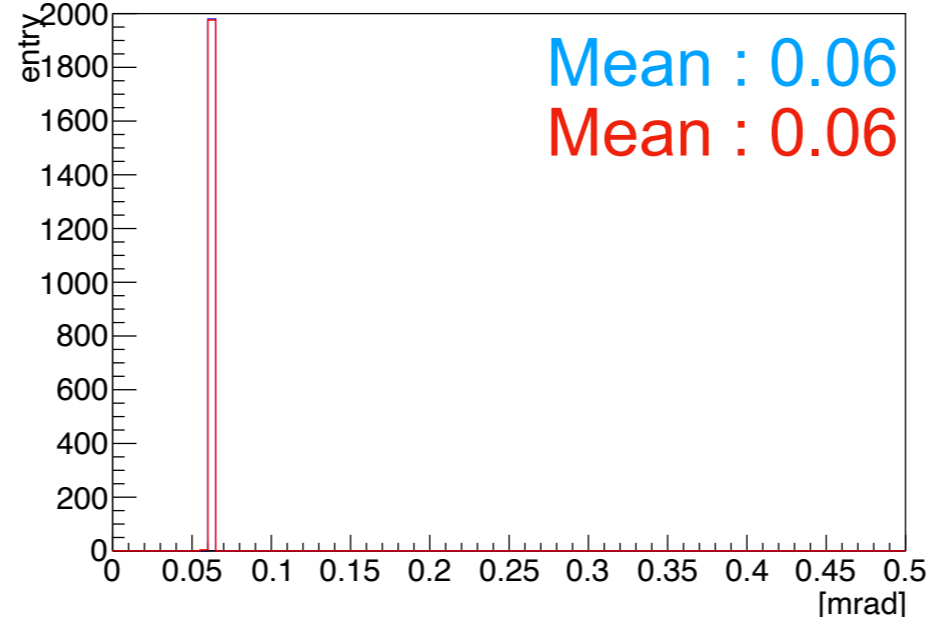
Offset



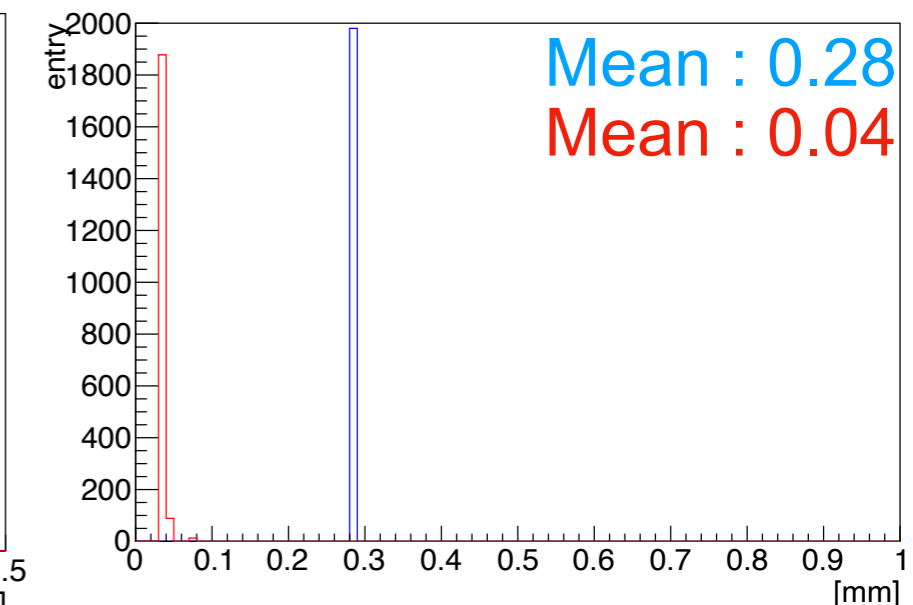
Error



Error



Error



- Fit result is very consistent. —> simultaneous fit is basically OK !
- Angle error is very small.