

T2K実験におけるビームの大強度化に向けた ビームインターロックモジュールの開発

平船 精大^A, 坂下 健^B, 他T2K Collaboration

東北大学^A, KEK^B

2021.10.28

ニュートリノCP対称性の破れ

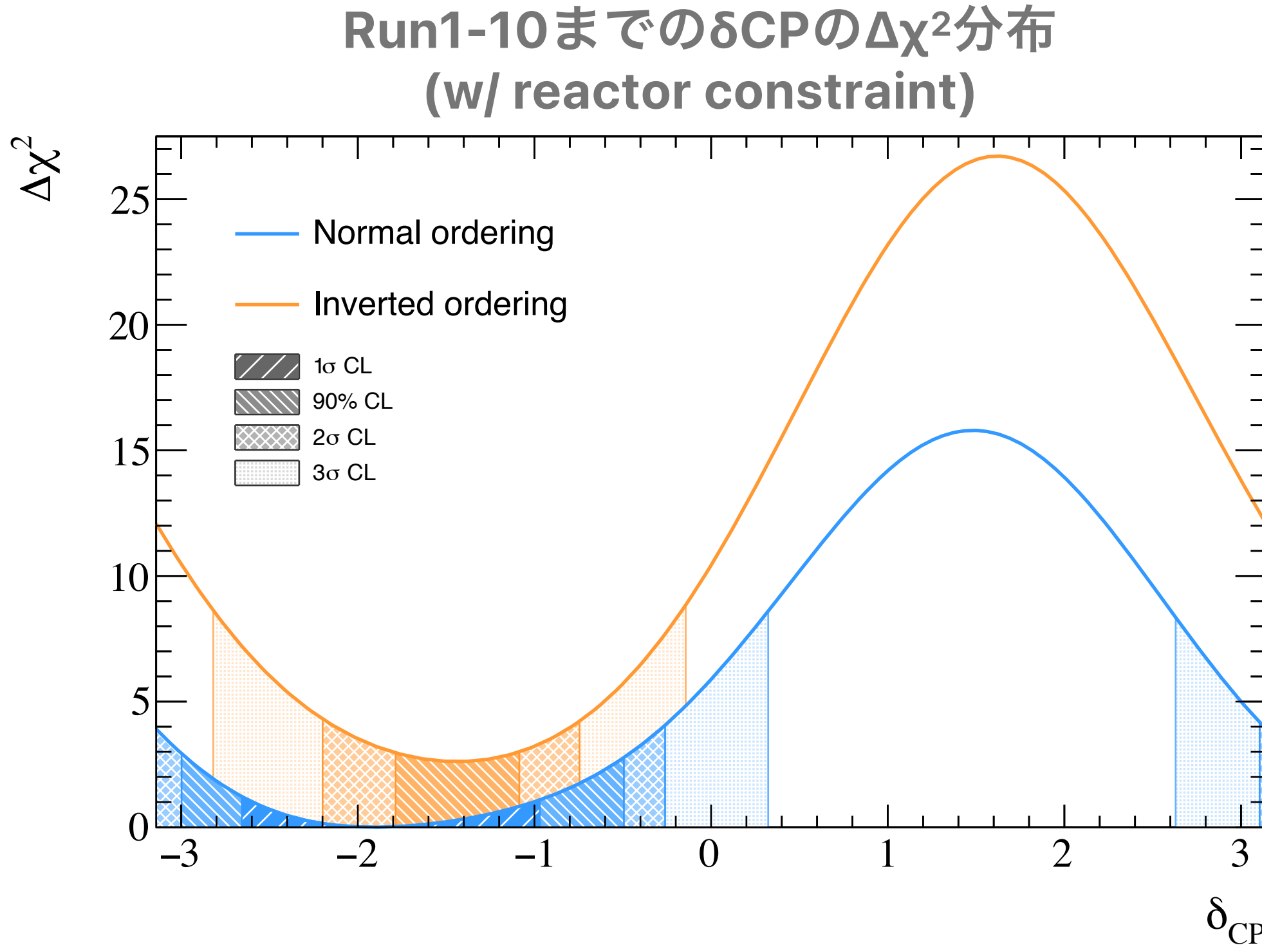
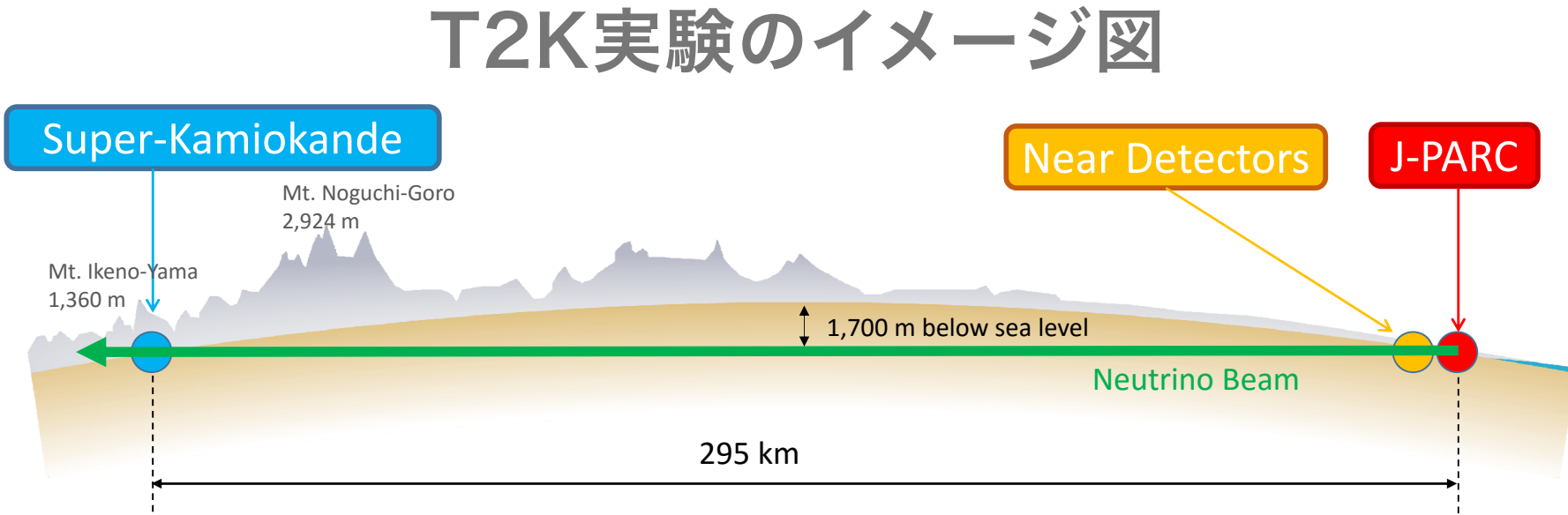
- 物質-反物質非対称性を説明するための3条件：
CP対称性の破れ・バリオン数の破れ・熱平衡の破れ
- ニュートリノCPVはクォークの~1000倍大きい可能性がある
→まずは**ニュートリノCPVの発見・理解が第一歩**
- T2K実験ではニュートリノ振動を観測、
振動パラメータ(δ_{CP} など)を測定する

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance mode

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

L : 長基線の距離 [km]
 E : ν_μ のエネルギー [GeV]
 θ_{ij} : 混合角
 δ_{CP} : CP複素位相
 - for ν_μ , + for $\bar{\nu}_\mu$

$$\left(J_{CP} = \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin \delta_{CP} \right)$$



Taken from slides of Patrick Dunne (Neutrino2020)

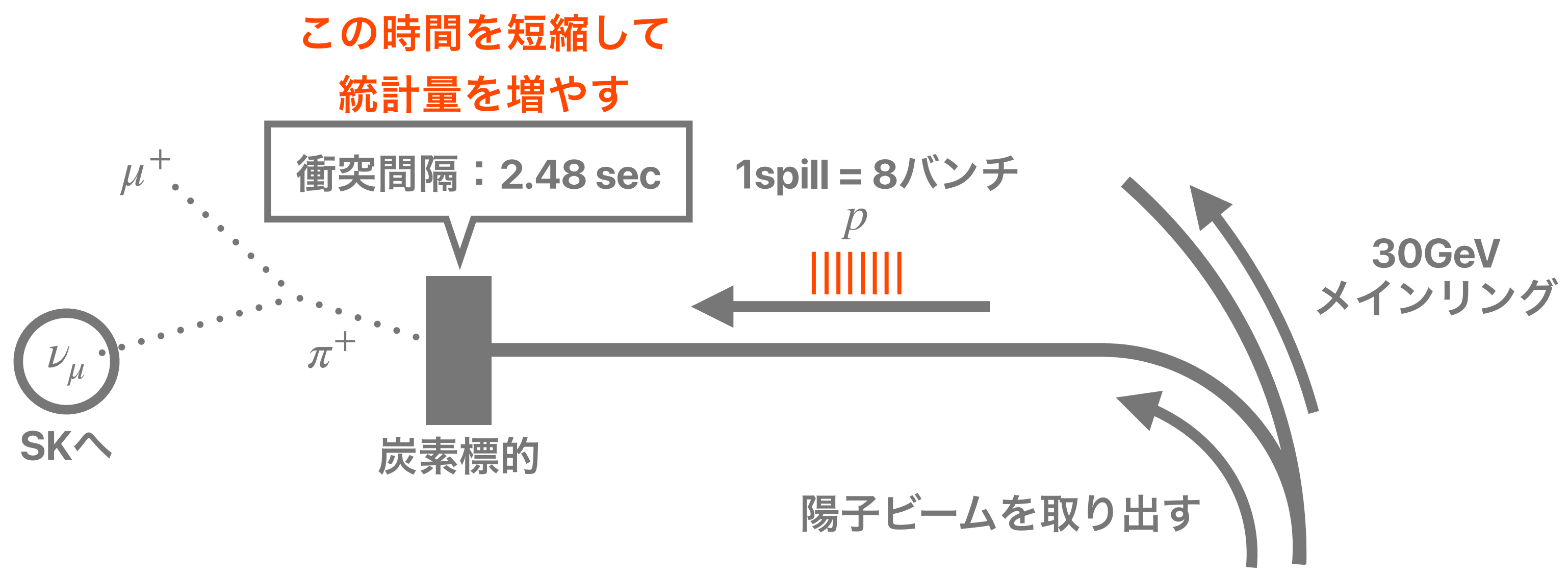
T2Kのビーム大強度化

■ 統計量を上げるためビームの大強度化を予定

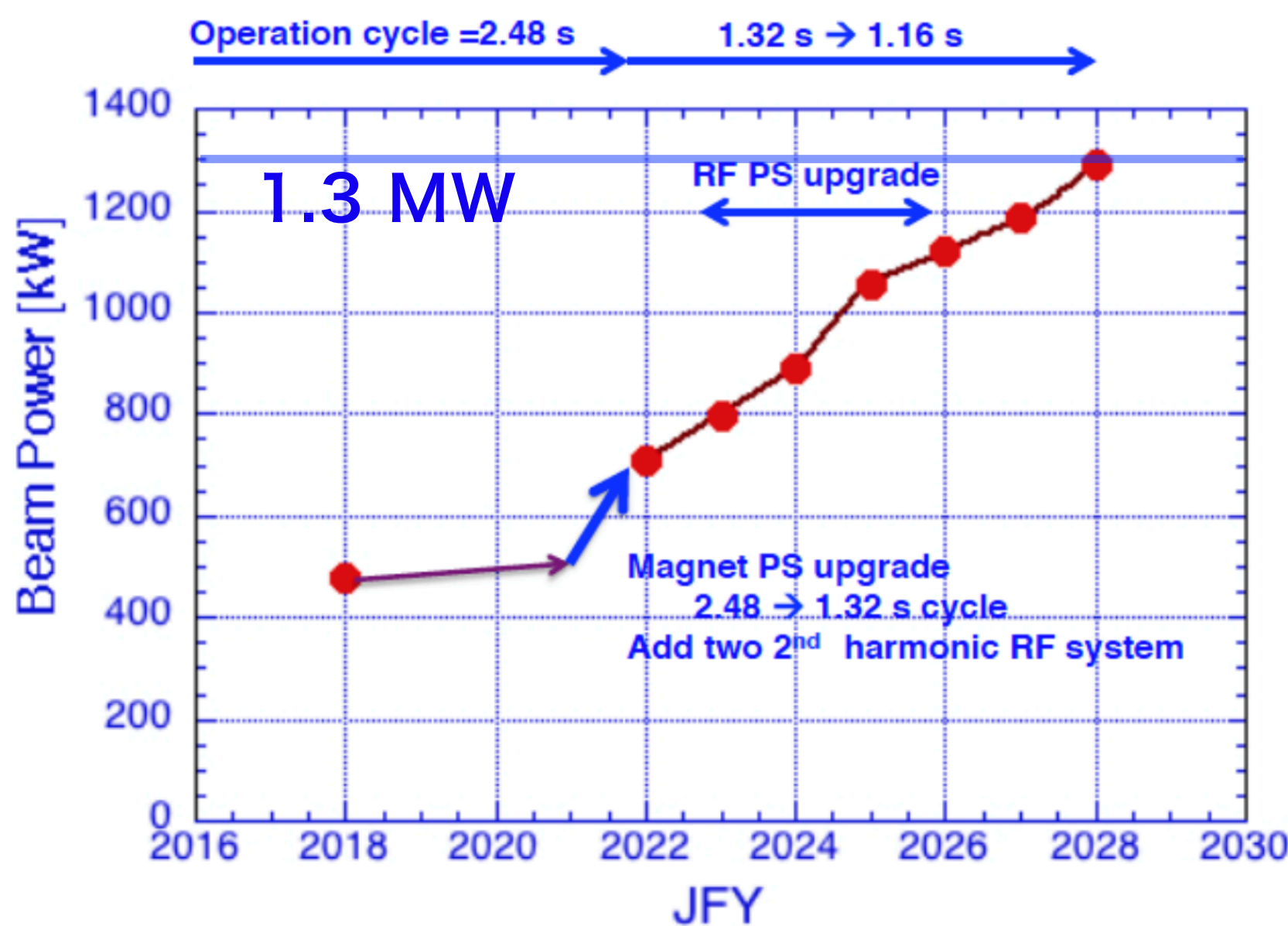
■ 単位時間あたりの
2次粒子生成数 $\propto \frac{(\text{陽子のエネルギー}) \times (\text{陽子の数})}{(\text{実験時間})} \text{ [J/s = W]}$ — 陽子ビームの強度

標的への衝突頻度を2.48 sec→1.16 sec、バンチ毎の陽子数を $2.7 \times 10^{14} \rightarrow 3.3 \times 10^{14}$ にして

ビーム強度を515 kW→1.3 MWへアップグレードしたい



ビーム強度アップグレードの計画



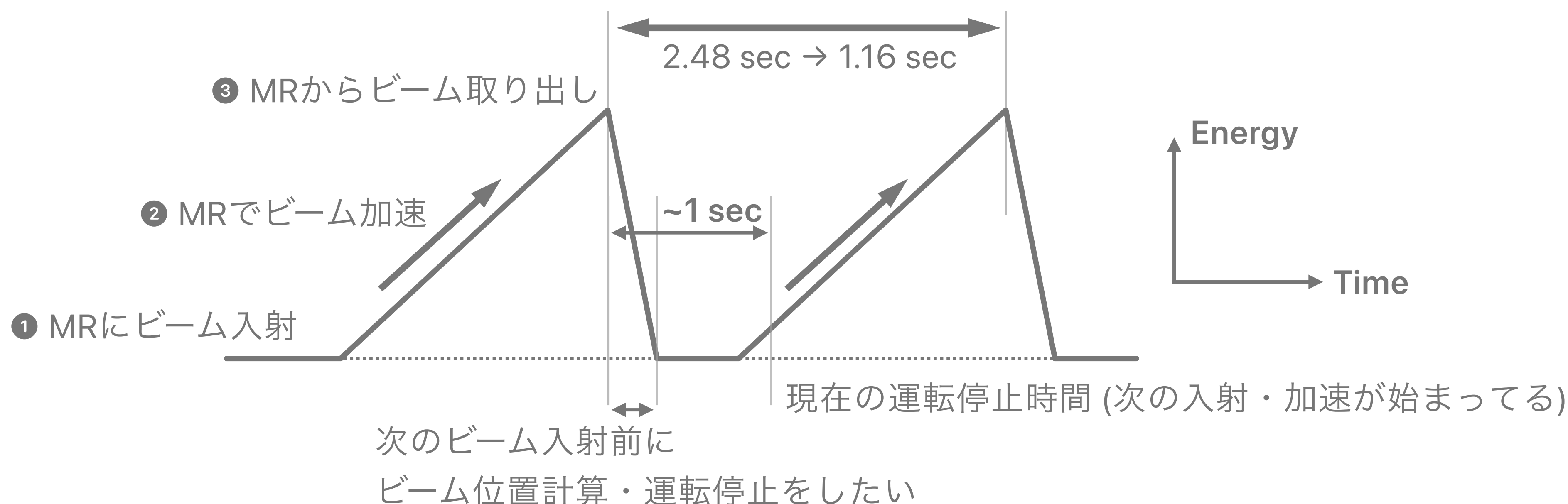
ビーム大強度化に伴う課題

- 高強度の陽子ビーム：照射位置がズレたり幅が狭くなりすぎると標的を損傷する可能性あり
→常にビーム位置・幅をモニタリングし、閾値を超えた際には直ちにビーム運転を停止させる

問題意識：ビーム位置計算の処理時間は次の衝突までに十分余裕があるか？

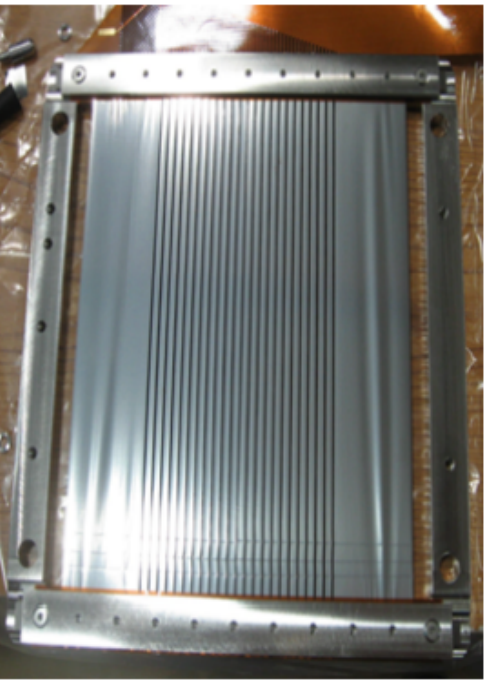
→現在の計算方法ではギリギリ (~1 sec)

より高速に計算・インターロック発報をできるモジュールの開発が必要：本研究の目的

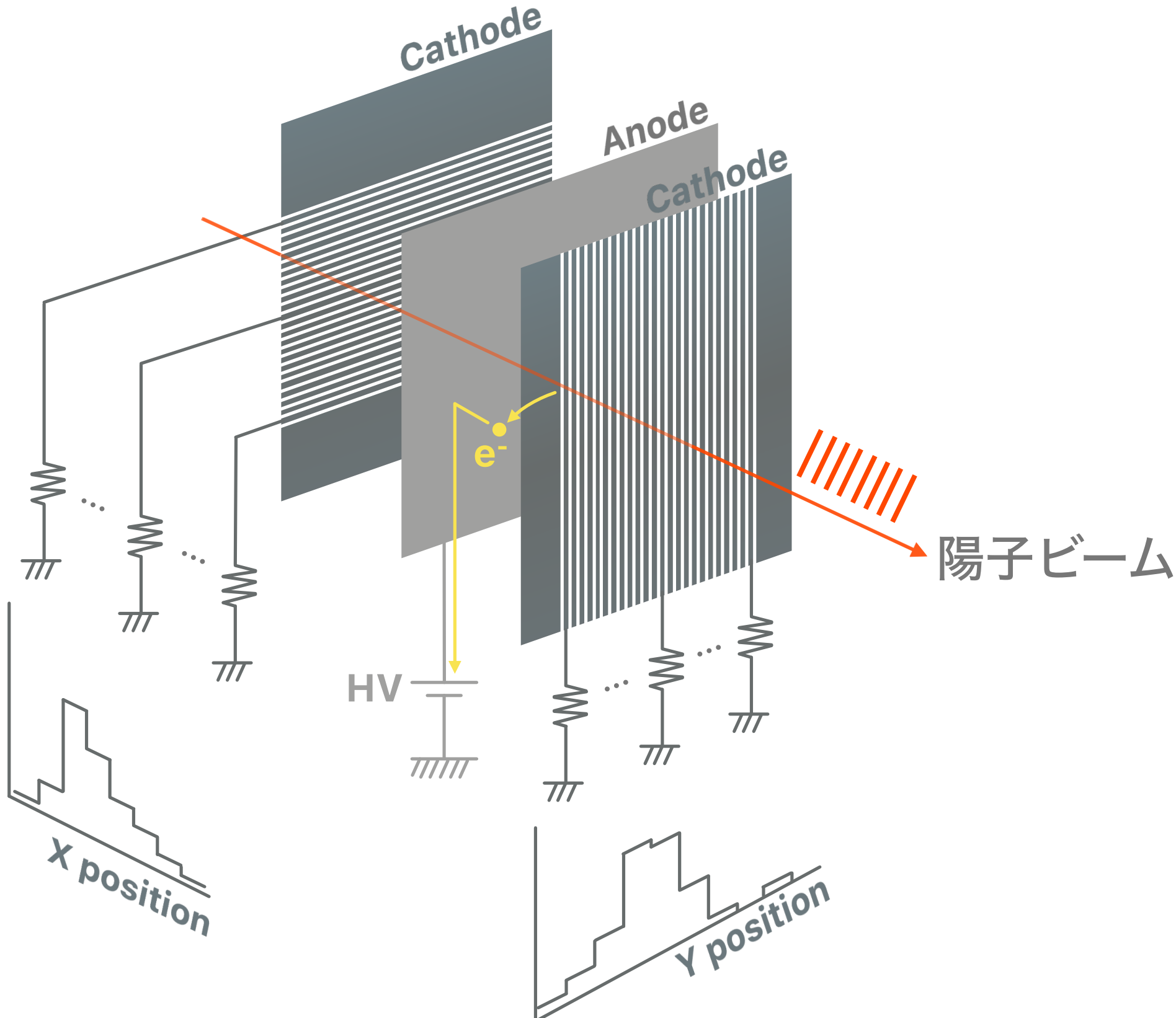
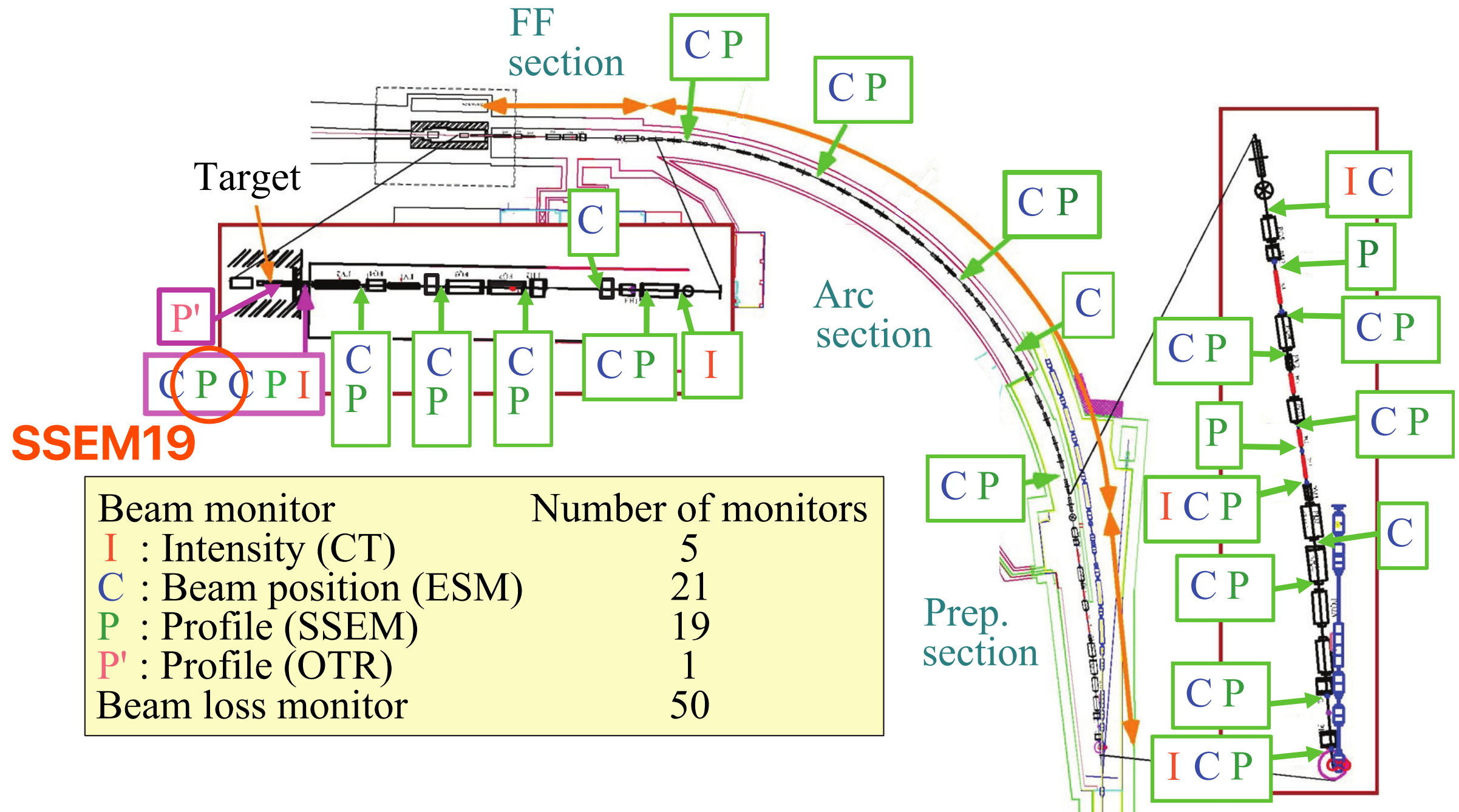


ビームプロファイルモニター (SSEM)

- ビーム位置計算に用いるモニター：ビームプロファイルモニター
Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM)
- 19個配置されており、実際のビームタイム中は標的直前の
SSEM19のみがビームライン上に入ってモニタリングする



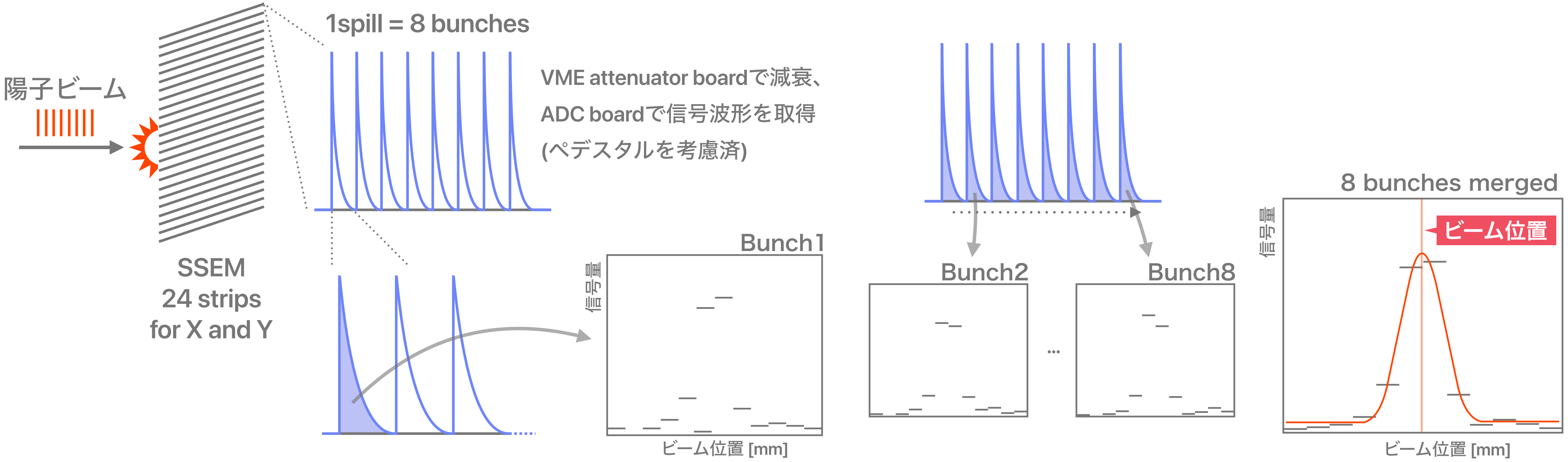
5 μm Ti ホイルが
24本ずつ縦横にある



信号量 ∝ 2次電子量 ∝ ビーム強度

従来のビーム位置計算方法

■ T2K offline analysisでのビーム位置計算：処理時間 1 sec (最終衝突頻度1.16 secギリギリ)



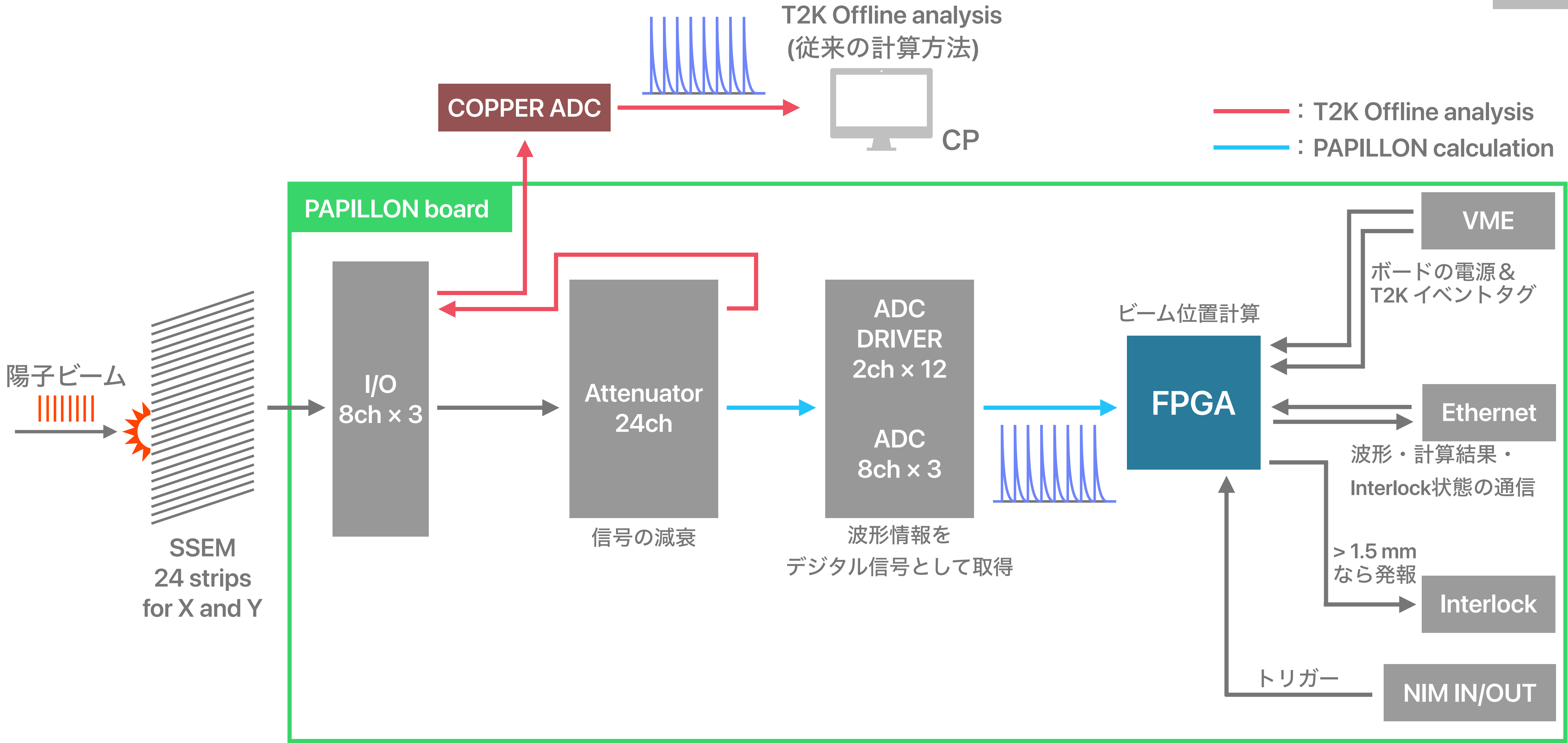
STEP ①
1 bunchについてピークの
周辺[-5 bin, +15 bin]の
信号量を求める

STEP ②
そのbunchのビーム位置
プロファイルを作る

STEP ③
8 bunchに対して同様に
プロファイルを作る

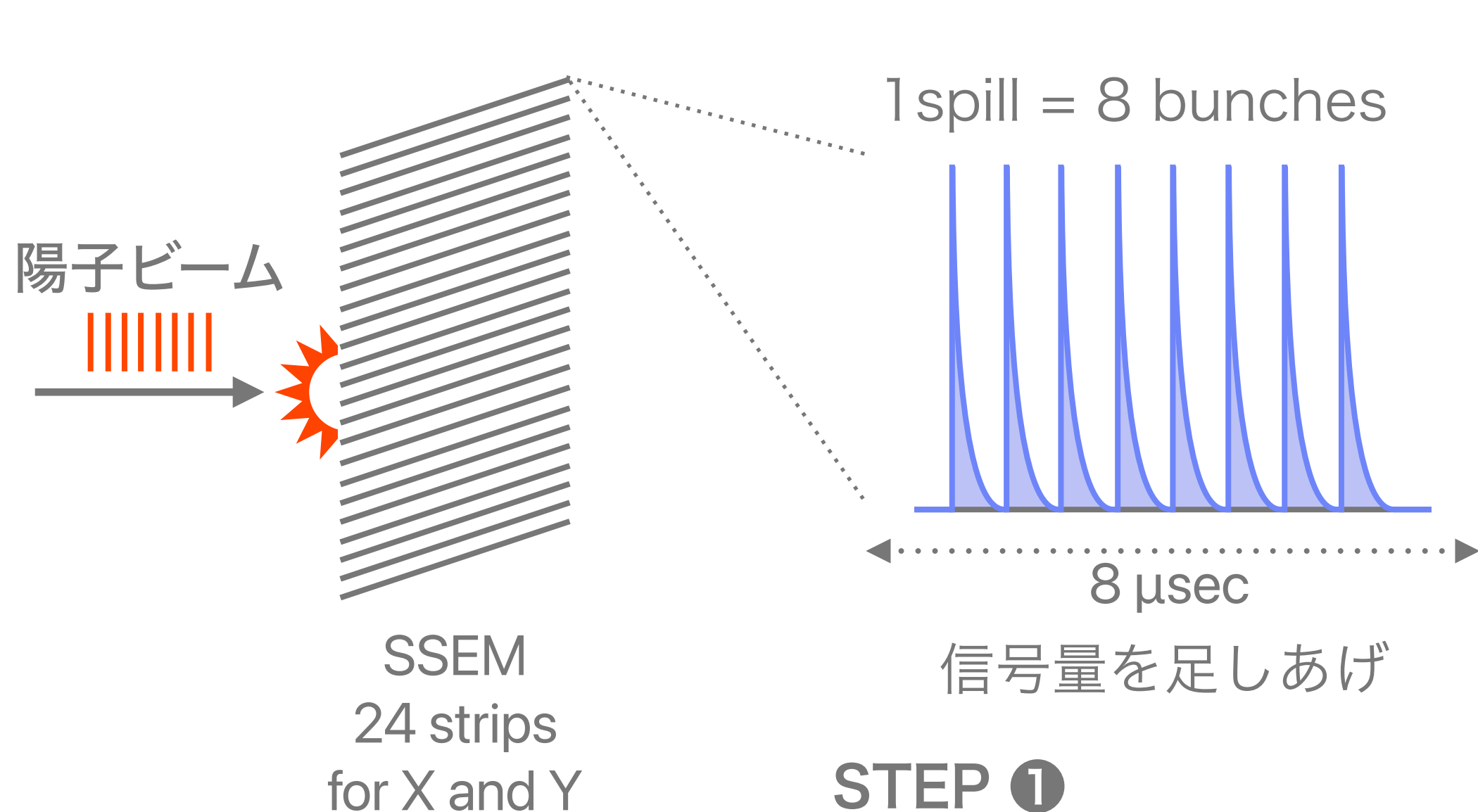
STEP ④
8 bunch分のプロファイルを
足し合わせ、フィットする

PAPILLON board

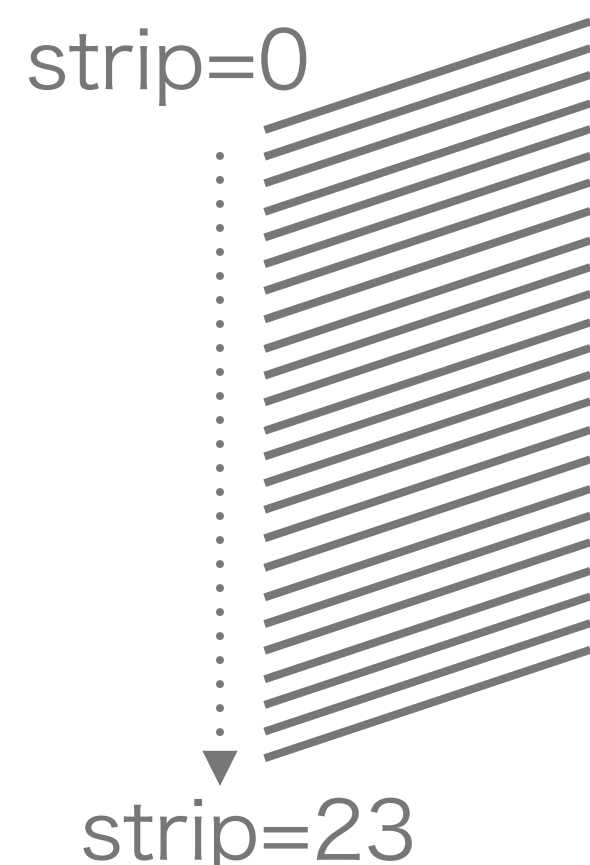


PAPILLONのビーム位置計算方法

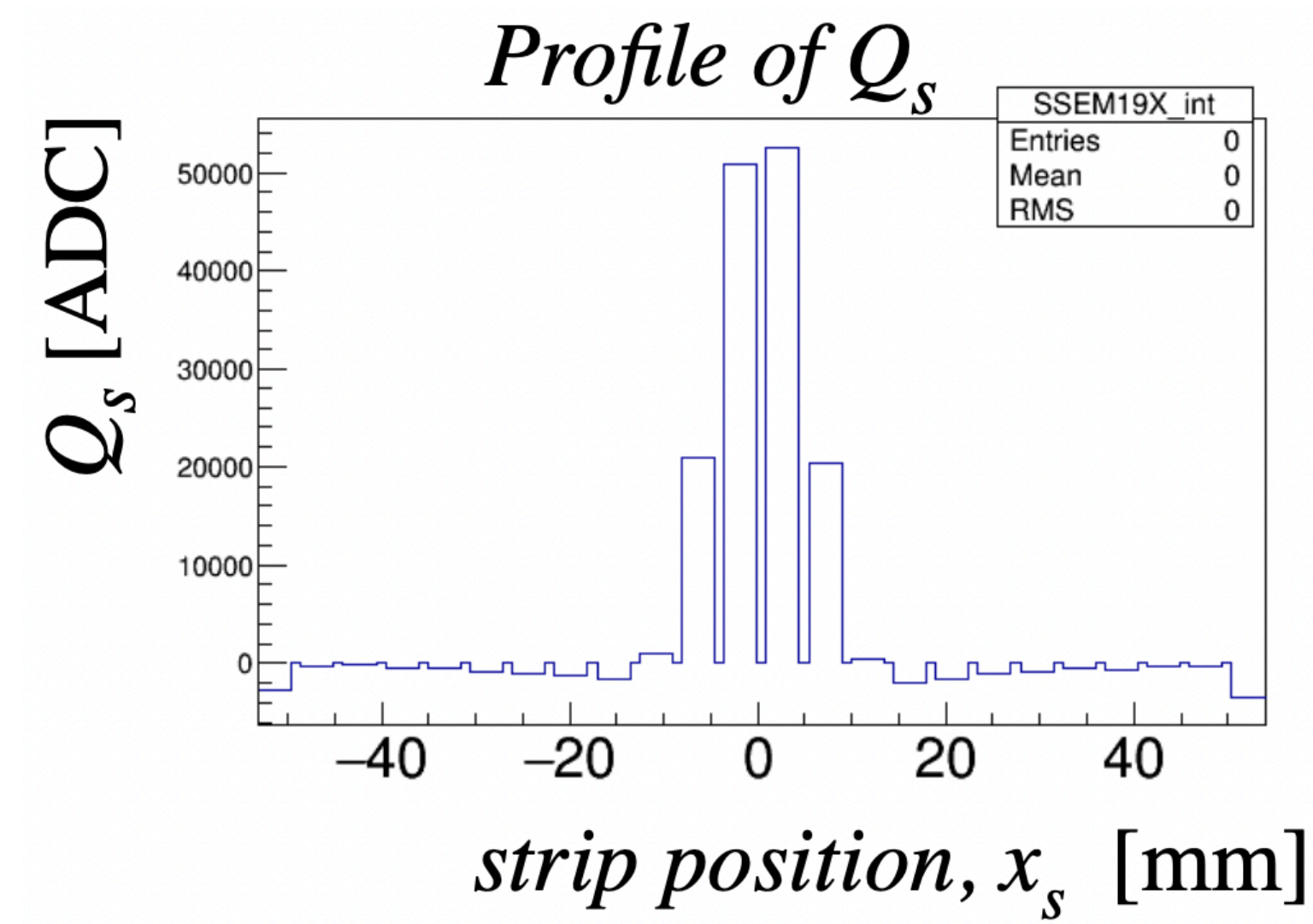
■ PAPILLONでのビーム位置計算



STEP ①
8 μsecの時間幅で信号量を積算する = Q_{strip}
(1spillの時間幅は~5 μsec)



STEP ②
24本の各ストリップで積算信号量を求める = Q_{strip}



STEP ③
ストリップ位置の加重平均としてビーム位置を計算

$$X[\text{mm}] = \frac{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip} \times x_{strip}}{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip}}$$

PAPILLONビームテスト

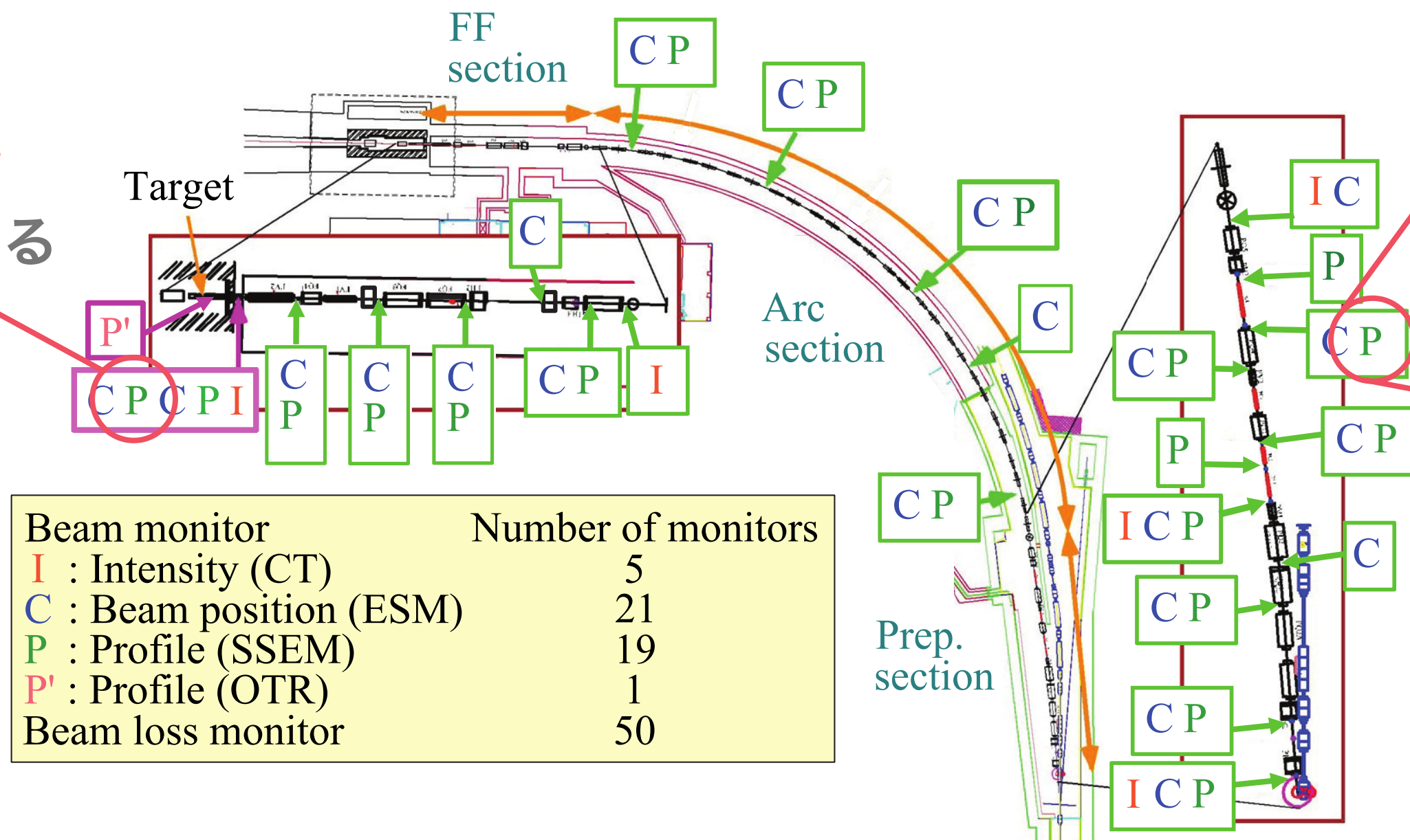
■ 既にPAPILLONが上流のビームモニタ (SSEM06)の結果を再現することは確認済

■ PAPILLONのビームテスト項目：

1. 最下流のビームモニタ (SSEM19)の結果を再現できるか？
2. ビーム位置計算の安定性はどうか？

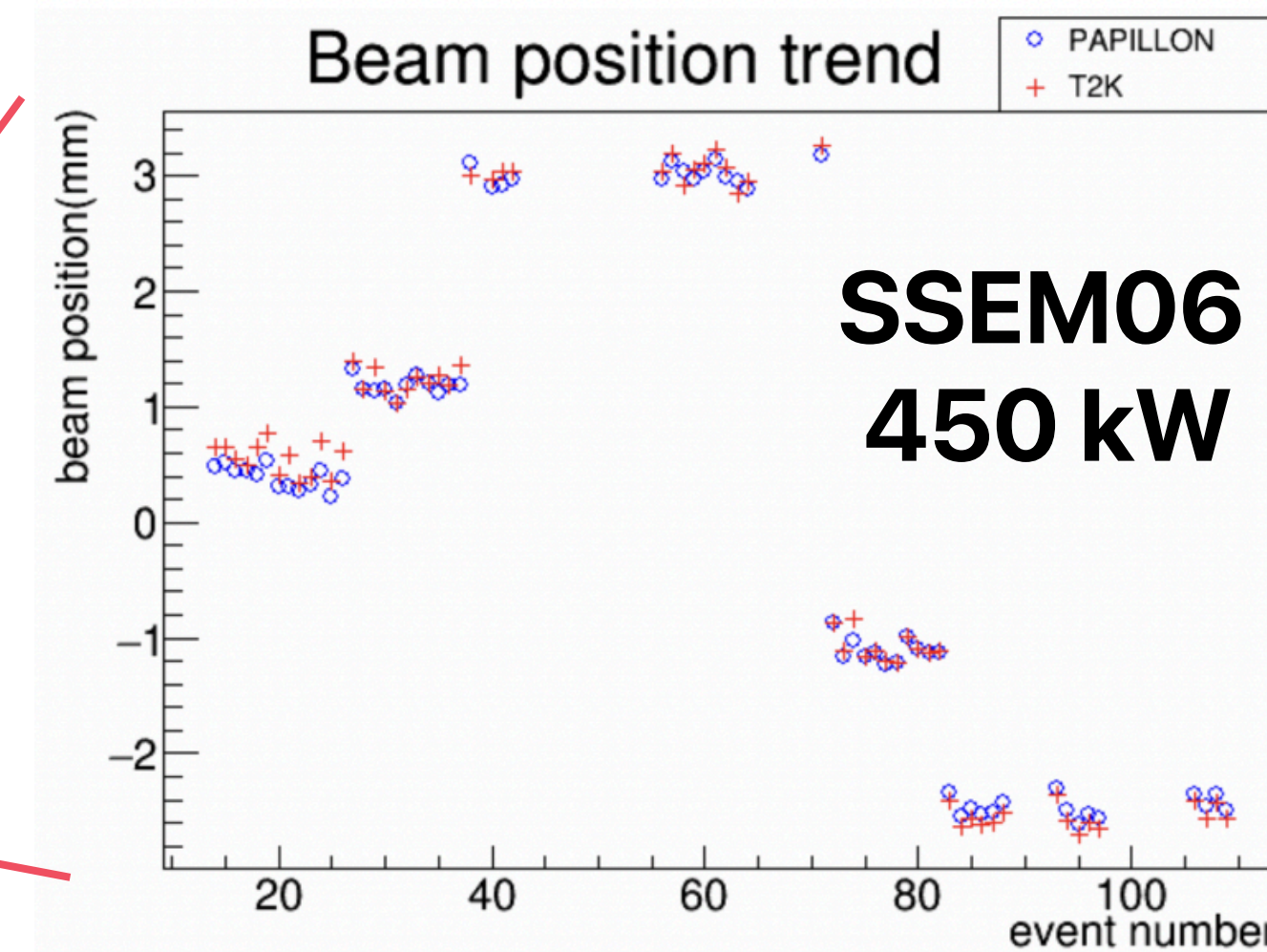
Run11(2021.Apr)にてビームテストを行なった

今回は標的直前のモニター・
ビーム強度510 kWでテストする



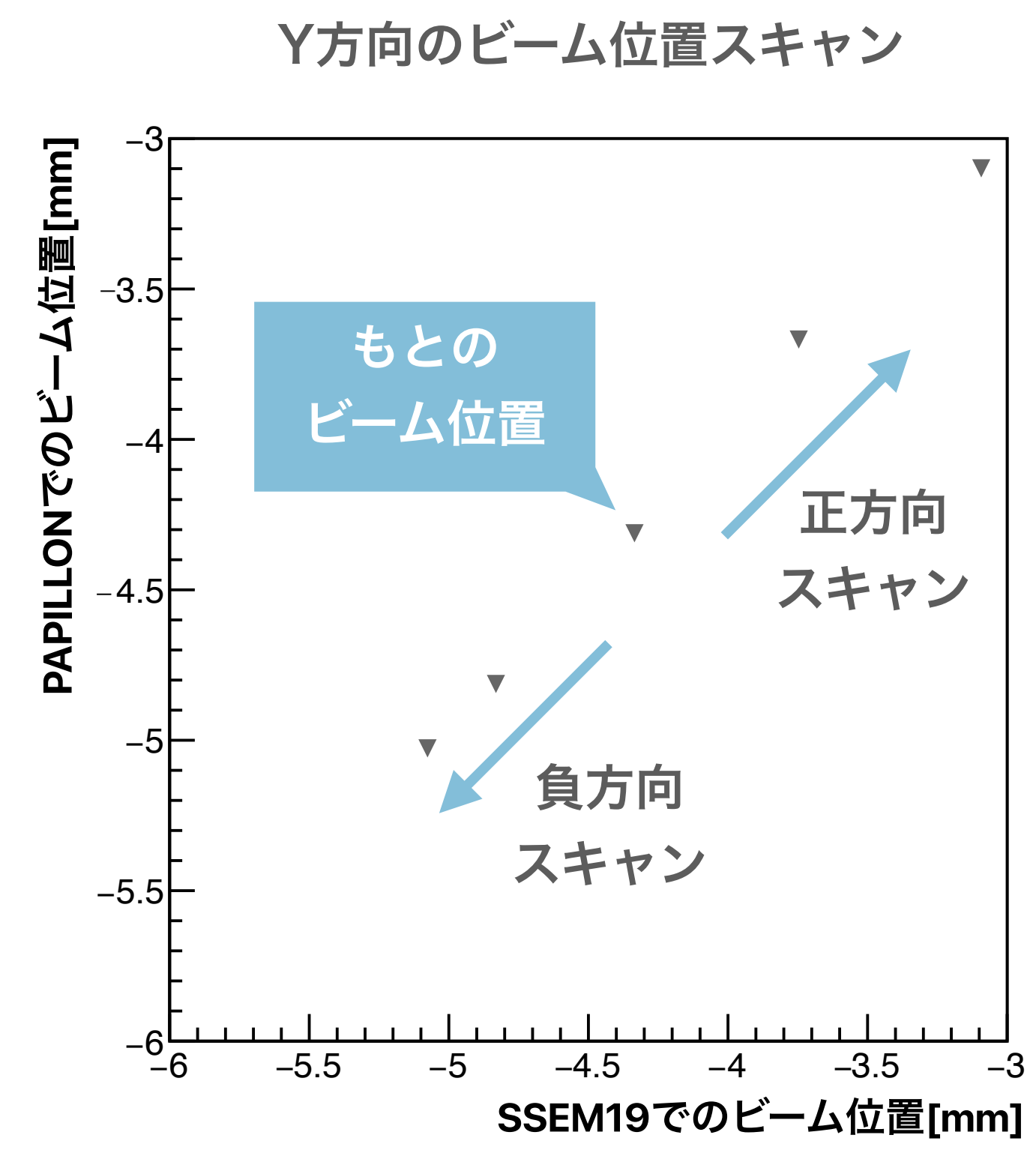
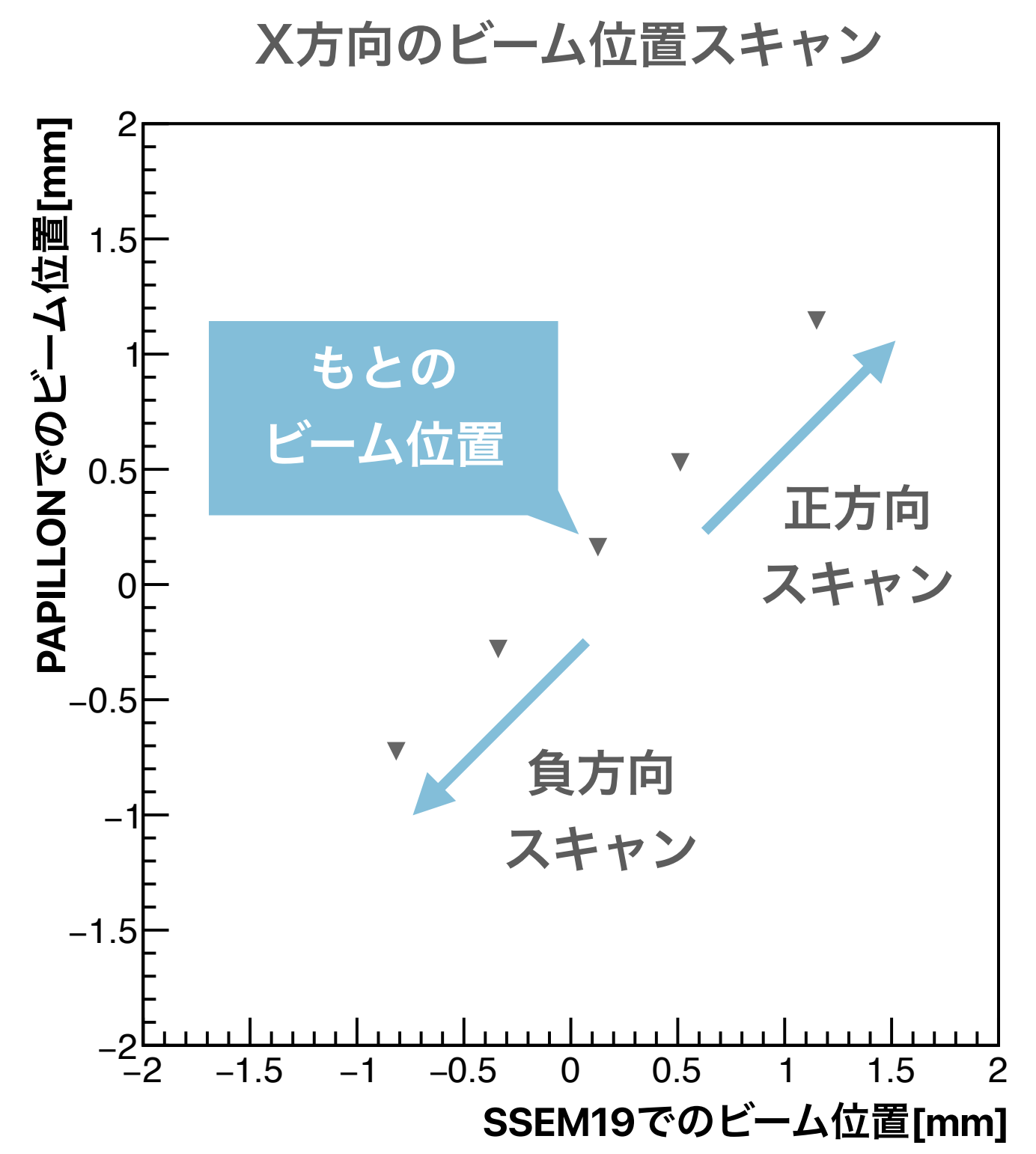
Beam monitor	Number of monitors
I : Intensity (CT)	5
C : Beam position (ESM)	21
P : Profile (SSEM)	19
P' : Profile (OTR)	1
Beam loss monitor	50

先行研究でのより上流の
モニターを使った結果



ビーム位置スキャンテスト

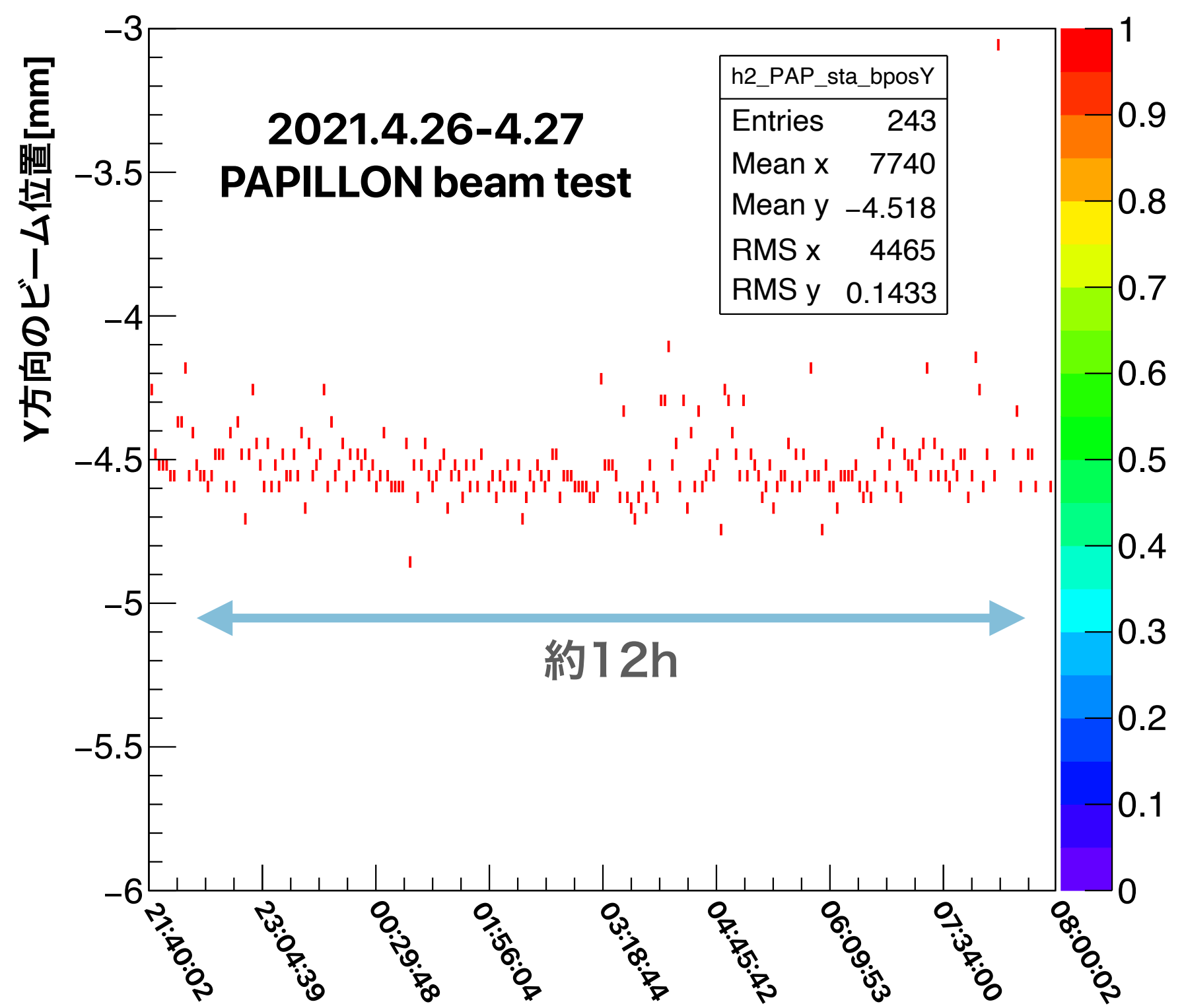
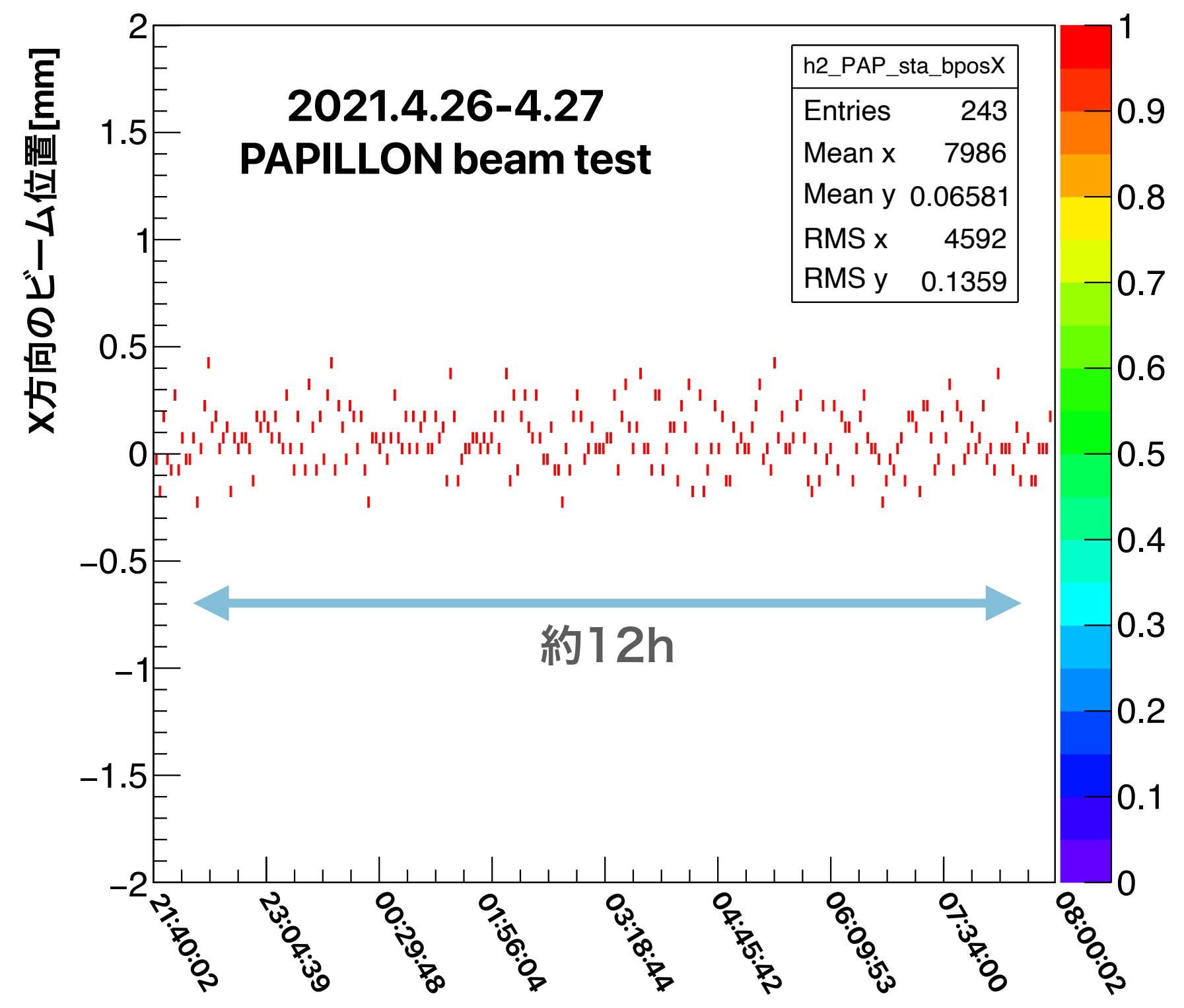
- Nominal positionから± 0.5 - 1 mmずらしてそれぞれ10 shotずつデータを取った
- **PAPILLONの結果はT2K off line analysis(w/ SSEM19)の結果と良い線形相関があることが確認できた**



ビーム位置計算安定性のテスト

■ PAPHILLONのビーム位置計算の安定性を約12 hのlong runで調べた

→ X方向は $0 \text{ mm}^{+0.5 \text{ mm}}_{-0.2 \text{ mm}}$, Y方向は $-4.5 \text{ mm}^{+0.3 \text{ mm}}_{-0.2 \text{ mm}}$ ほどでどちらも基準(< 1.5 mm)内の
ふらつきで安定している



展望：ビーム幅もインターロック基準に加えたい

- ビームの幅が狭くなりすぎると一点にストレスがかかって標的を破損してしまう可能性がある
→ビーム幅もインターロックの基準に入れることを考え、現在暫定版のファームウェアは実装されている
- 炭素標的の安全率(標的の壊れにくさ)の閾値をビーム幅の基準に焼き直す

$$\text{安全率} = \frac{\text{引張強度 [N]} \text{ —— かけられる最大応力を表す物質に固有の値}}{\text{グラファイトにかかる熱応力 [N]}}$$

↑

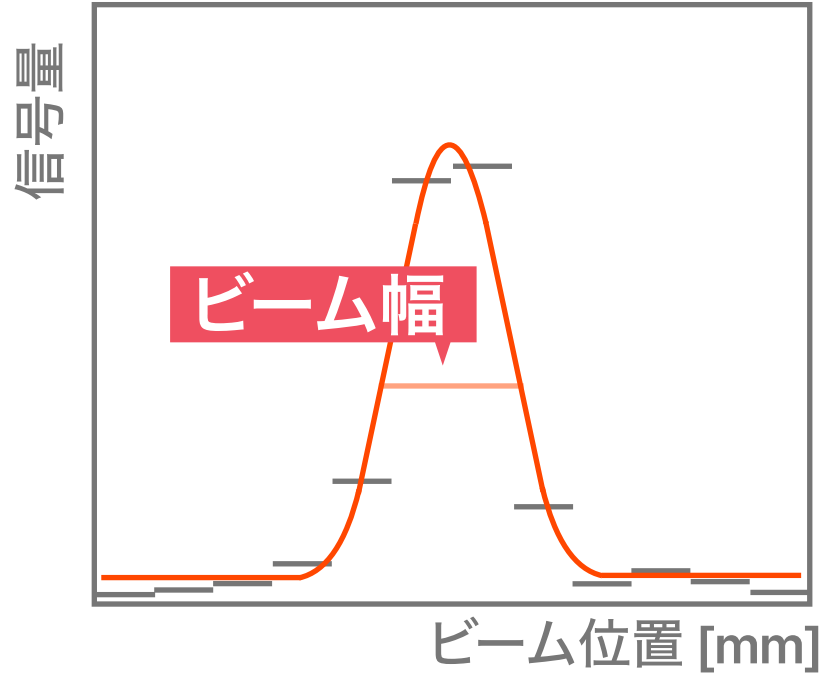
$$\text{ビーム照射によるグラファイトの発熱量} \leftarrow \text{ビーム中心の陽子数密度} = \frac{\text{1スピルあたりの陽子数(既知)}}{\text{ビーム幅 [mm}^2\text{]}}$$

- どこまで安全率が下がることを許容するか？
→ どれくらいまでビーム幅が狭くなってもいいか？

展望：PAPILLONでのビーム幅計算

- event by eventでPAPILLONのビーム位置・幅の計算結果を確認した
- ビーム幅はoffline analysisの結果と0.1 mmほどずれている？

T2K offline analysisの方法：

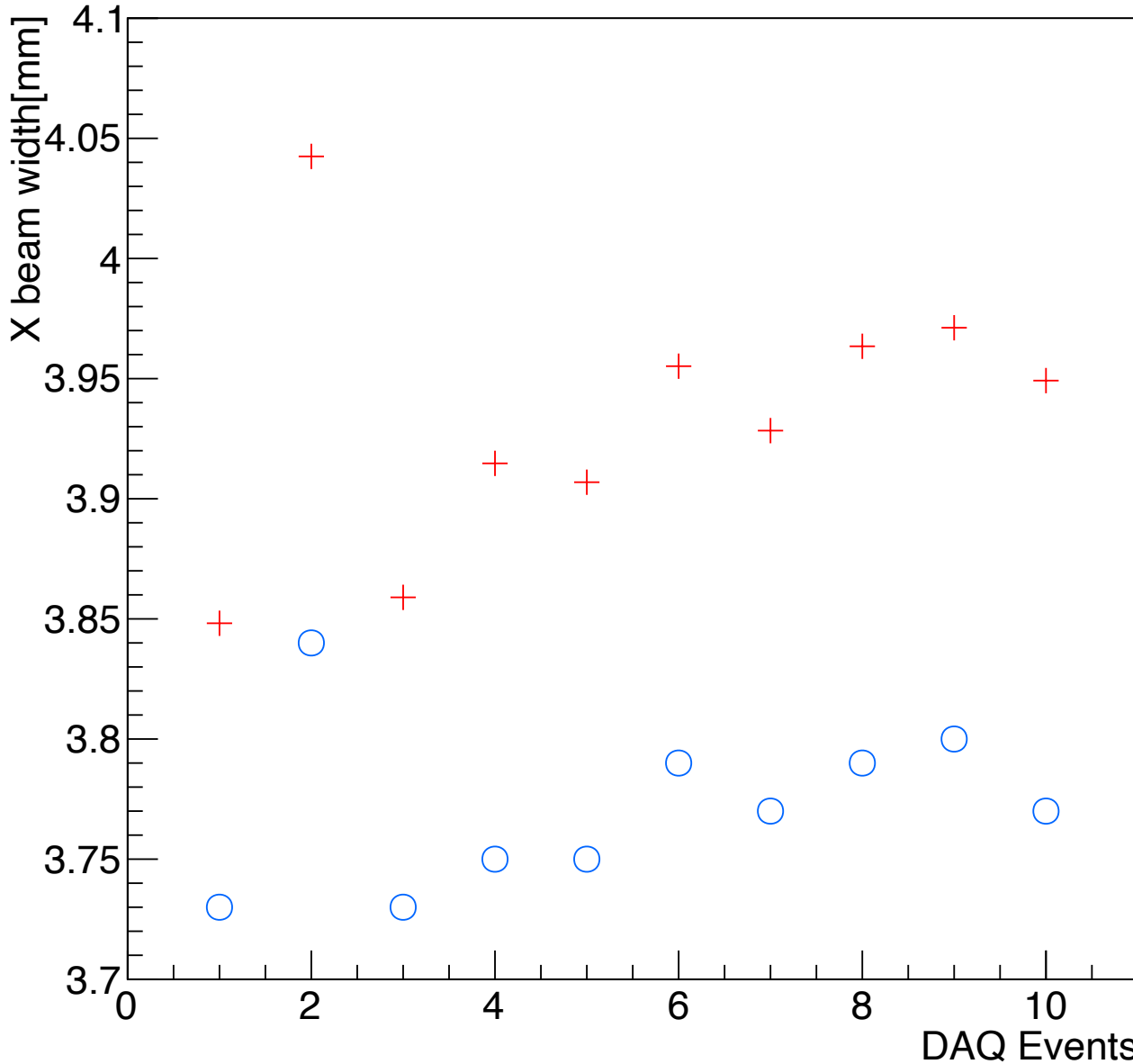
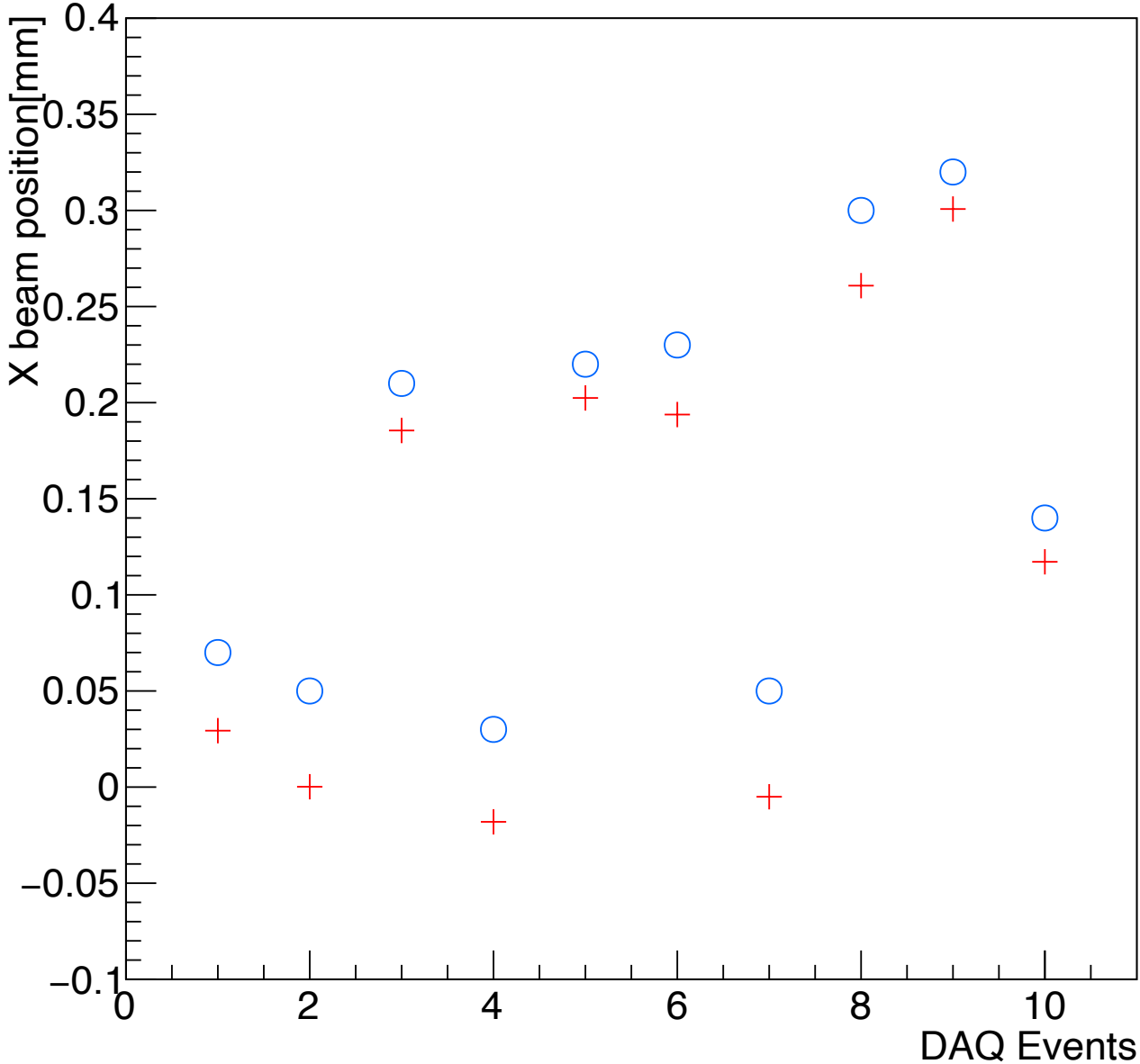


PAPILLONの計算方法：

$$\sigma_X[mm] = \sqrt{X^2 - \frac{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip} x_{strip}^2}{\sum_{strip=0}^{23} Q_{strip}}}$$

X：ビーム位置

○：PAPILLON
+：T2K offline analysis



まとめ

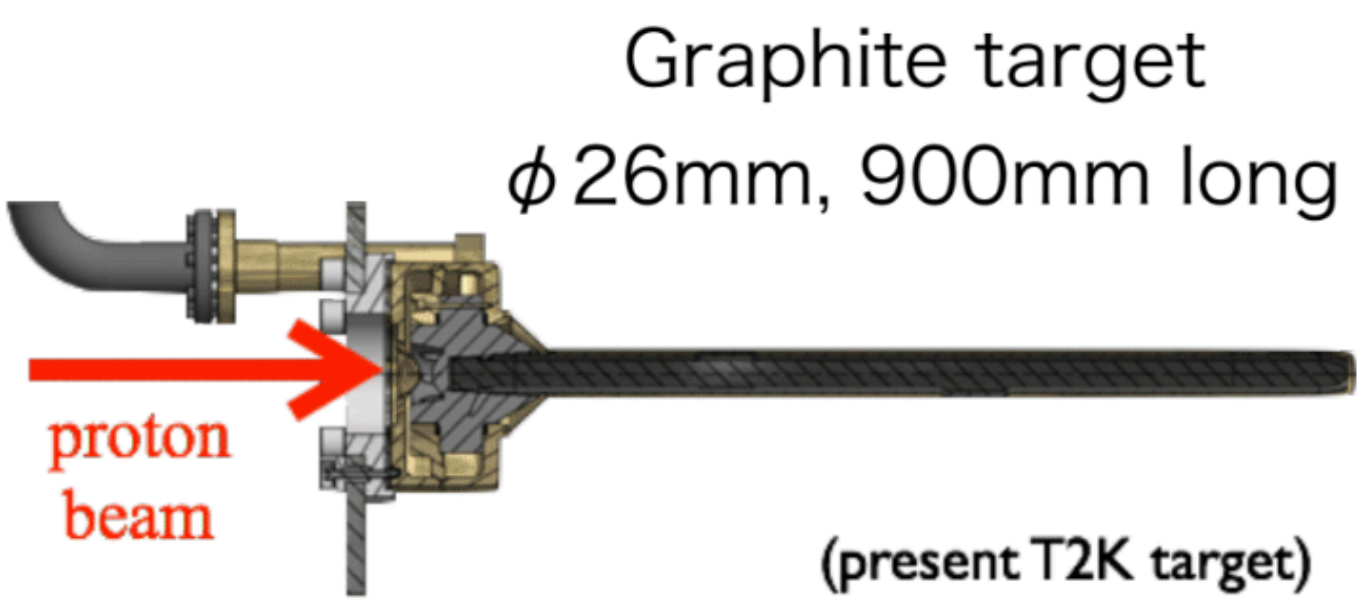
- より高統計量を獲得するためにT2Kでは**1.3 MWへのビームアップグレード**が予定されている
- 大強度ビームには**より高速なビーム位置計算・インターロック発報を可能にするモジュール**が必要＝PAPILLONモジュール
- 今年4月のT2Kランでビームテストを行なった：
 - 結果① PAPILLONとT2K offline analysisの結果には**良い線形相関**がある
 - 結果② PAPILLONの**ビーム位置計算の安定性が約12hの長時間ランで確認された**
- 次はビーム幅や閾値を終えた回数も基準に加えるようファームウェアの修正
来年のT2K runで運用できるようにする

Backup

標的へのストレスのかかり方

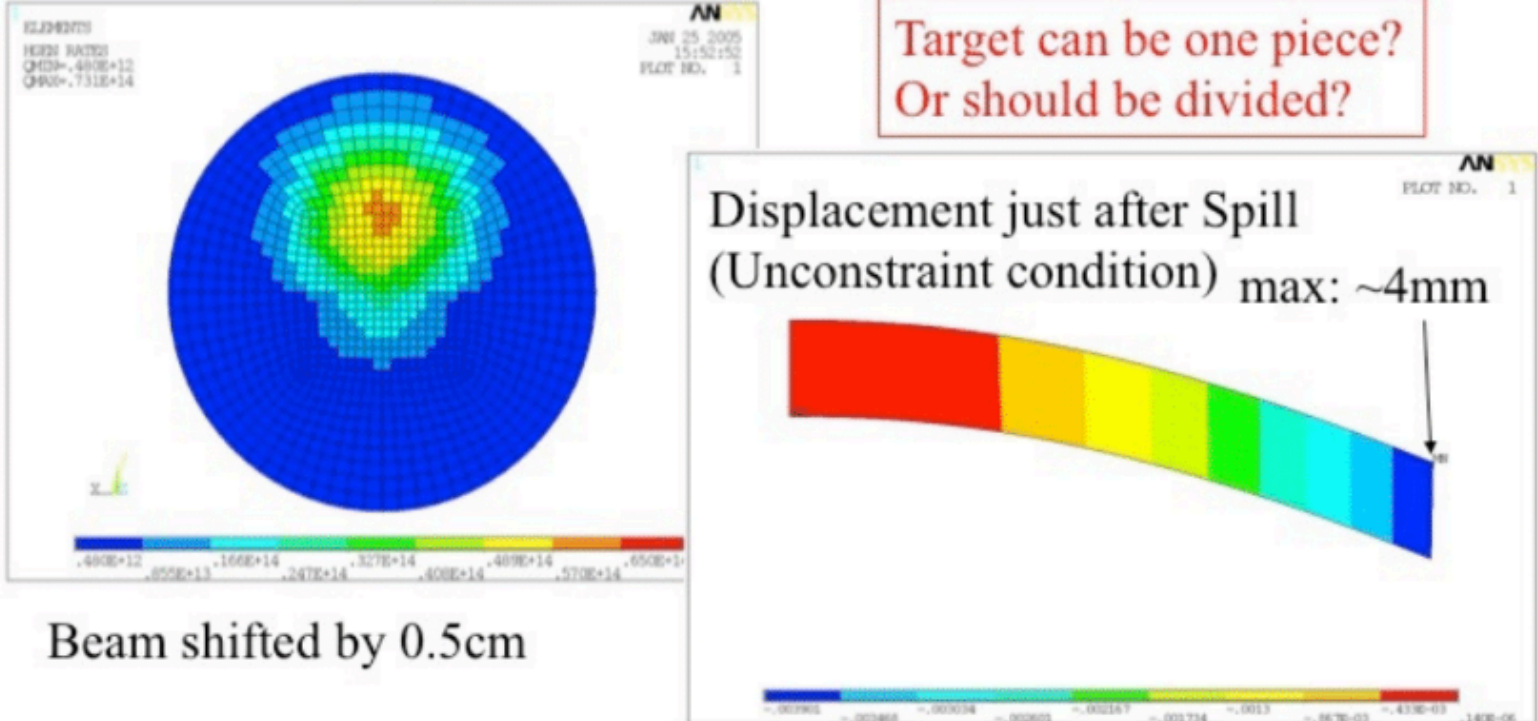
One of MPS upgrade items

Serious damage on the target if beam continuously hits off-centered at the target



Stress Analysis for off-center beam

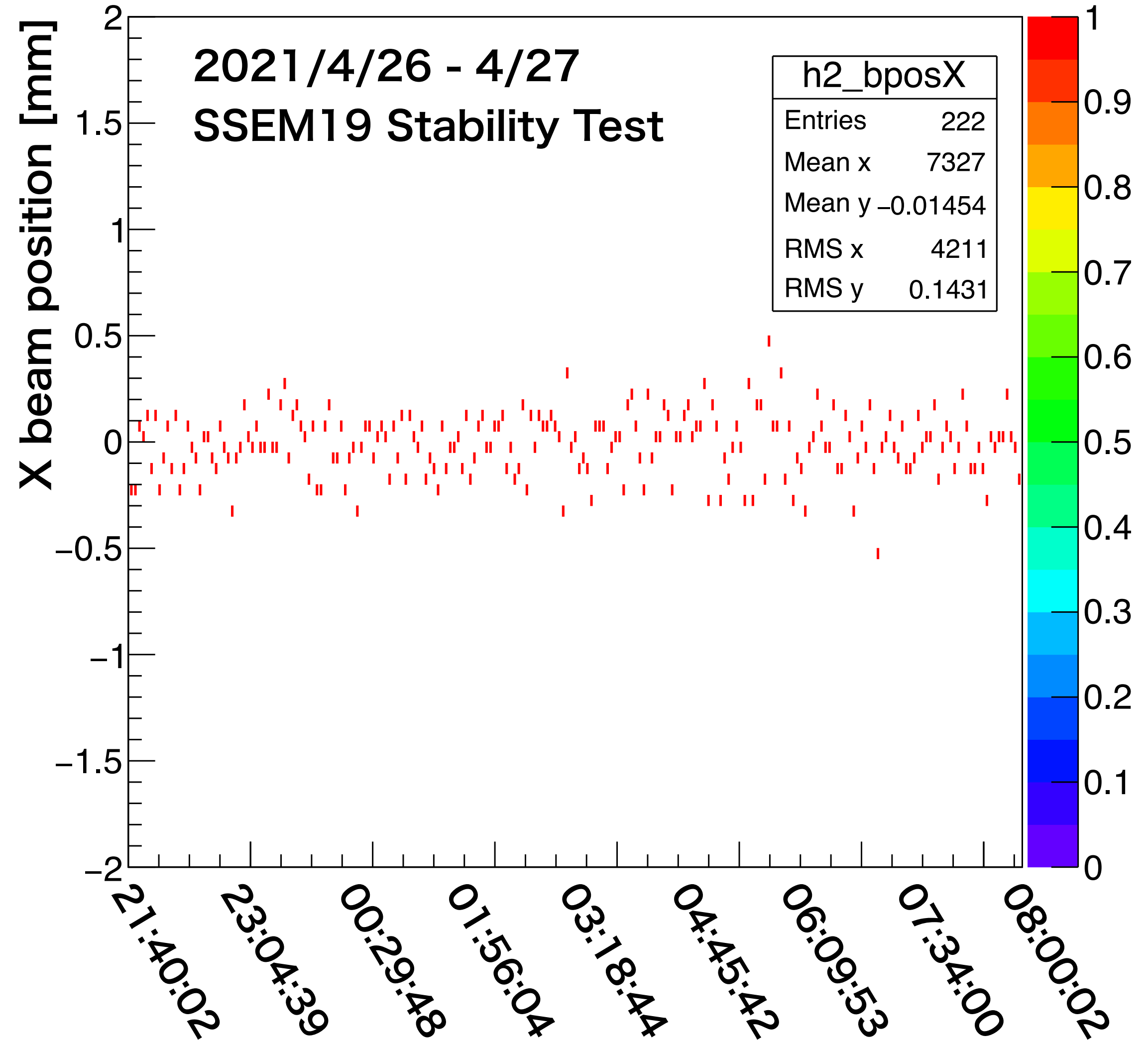
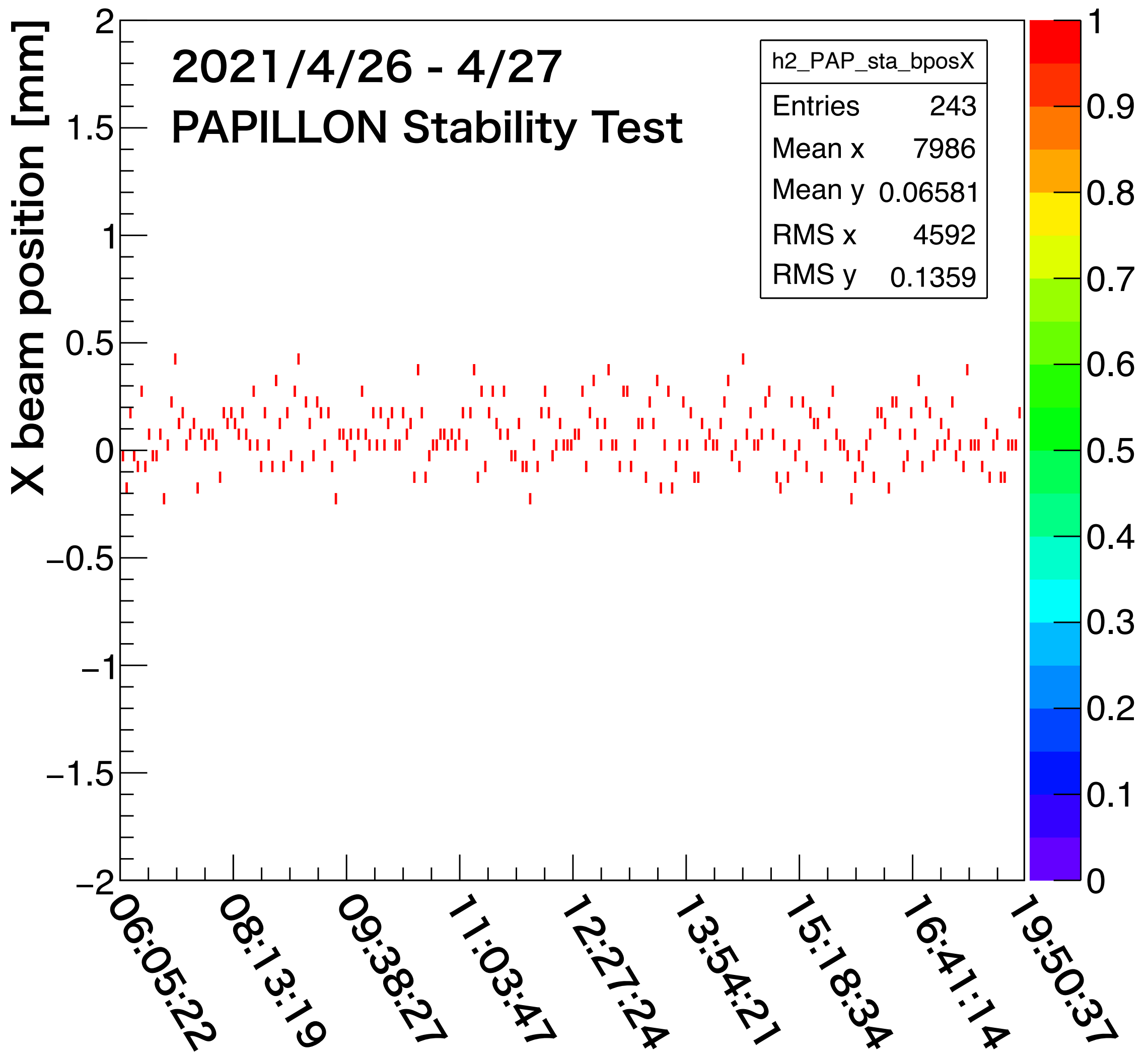
- C. Densham, J. Butterworth (RAL)
- Input: Energy deposit calculated by MARS
- Stress, displacement by ANSYS



In order to avoid this case, we're developing a new interlock for beam position and profile on the target

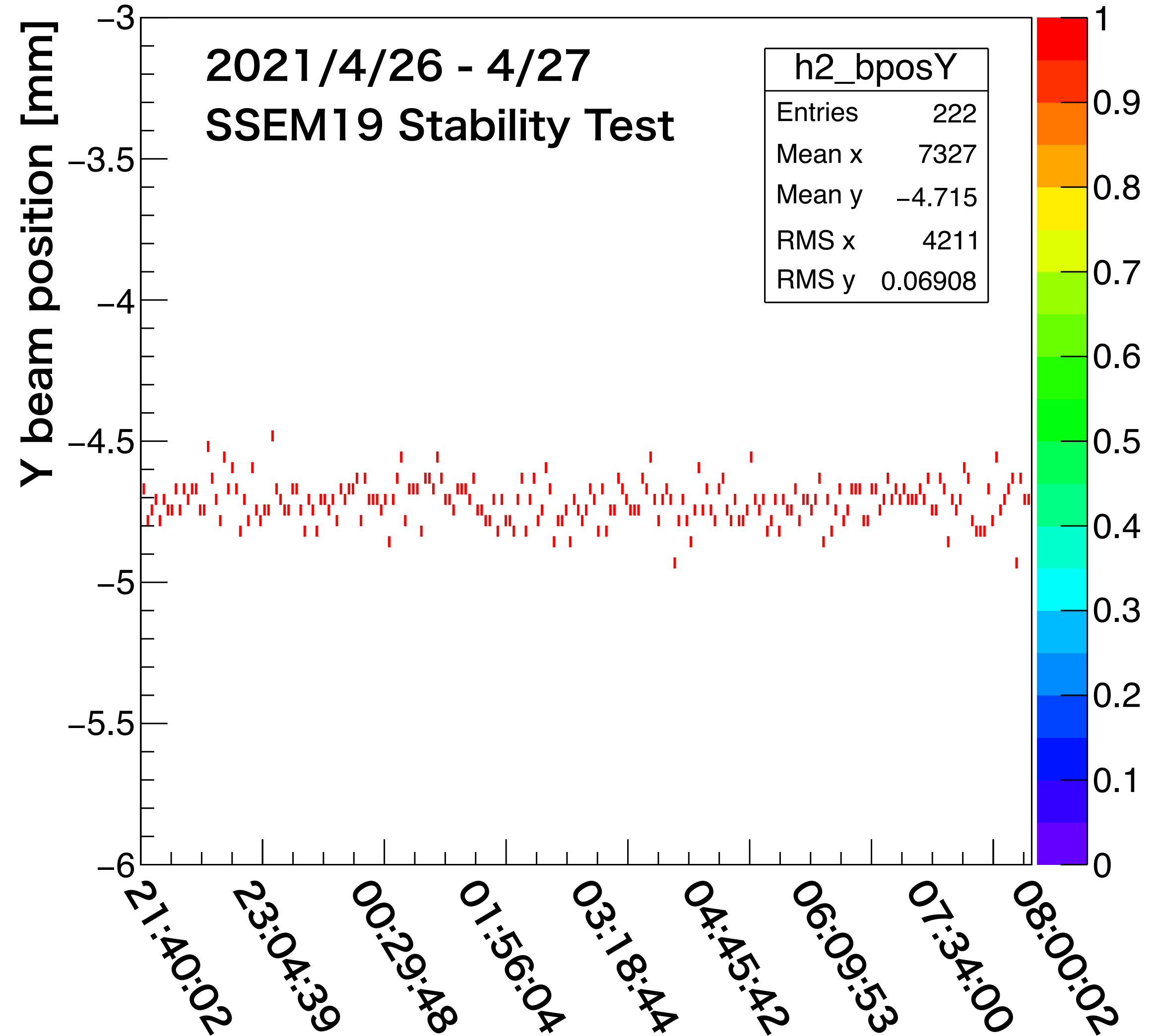
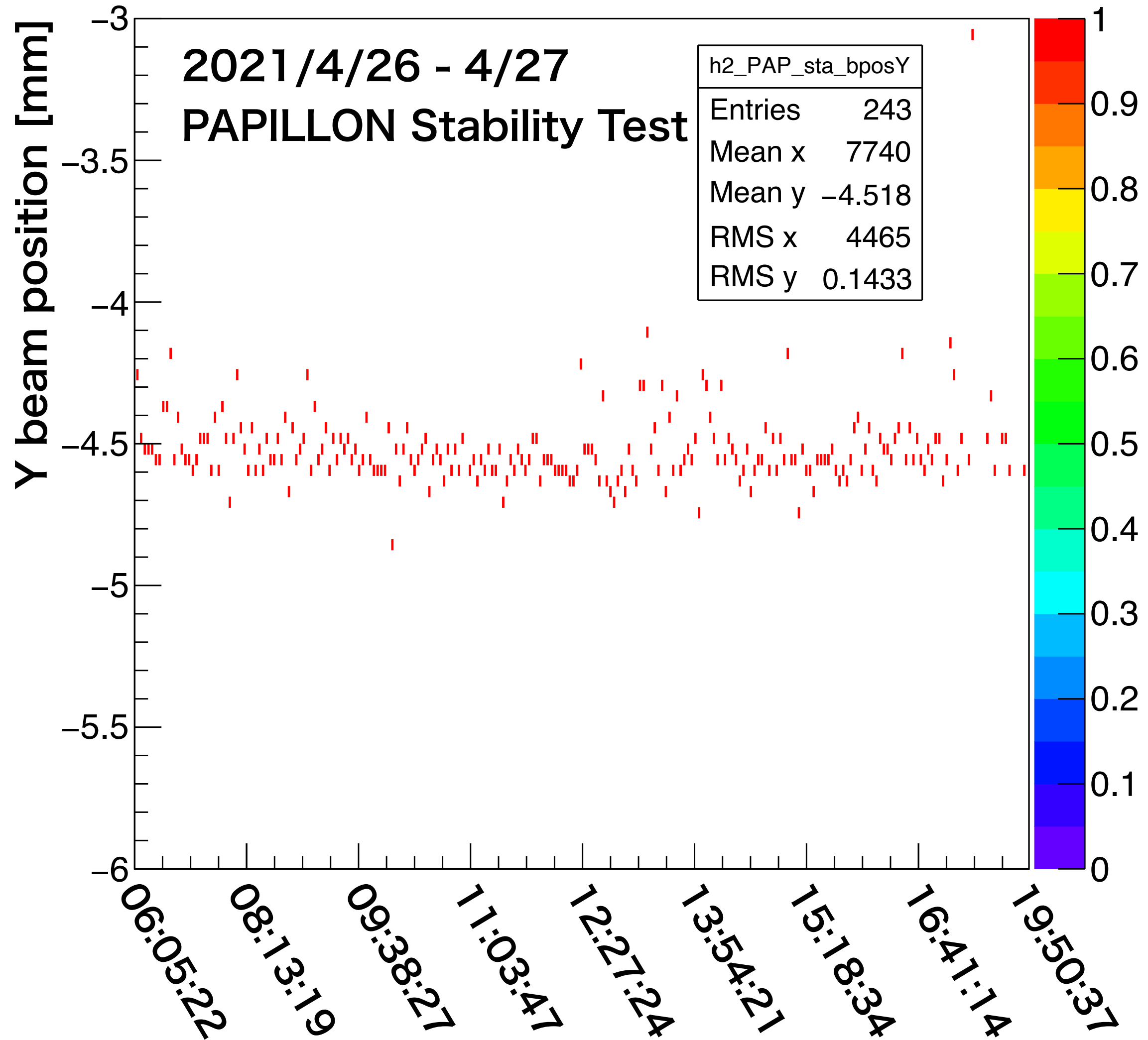
PAPILLON vs Offline analysis ビーム位置計算安定性(X)

■ PAPILLON and SSEM19 are stable through all-day-long run.
(PAPILLON side time is wrong due to miss setting of PC...)



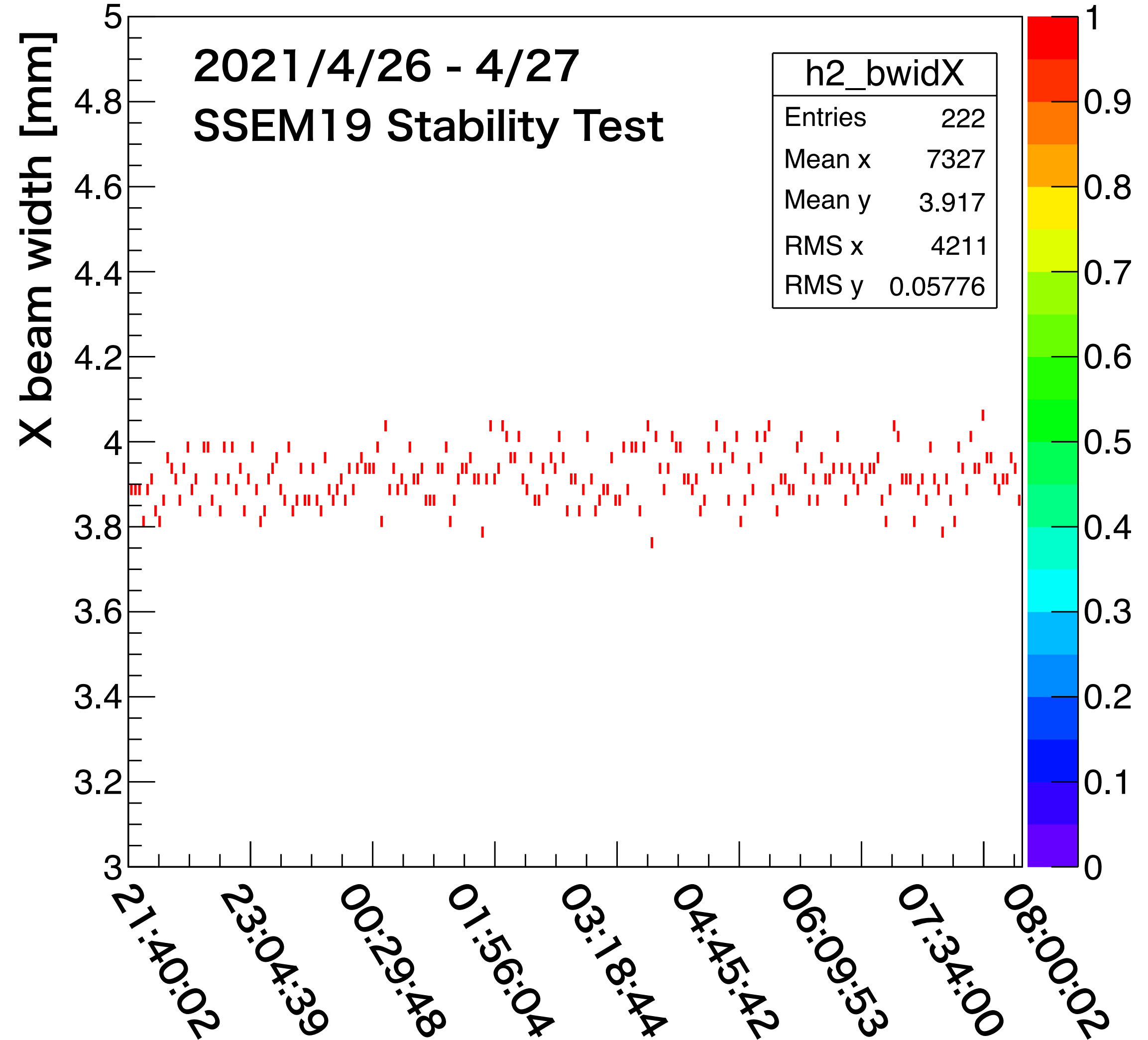
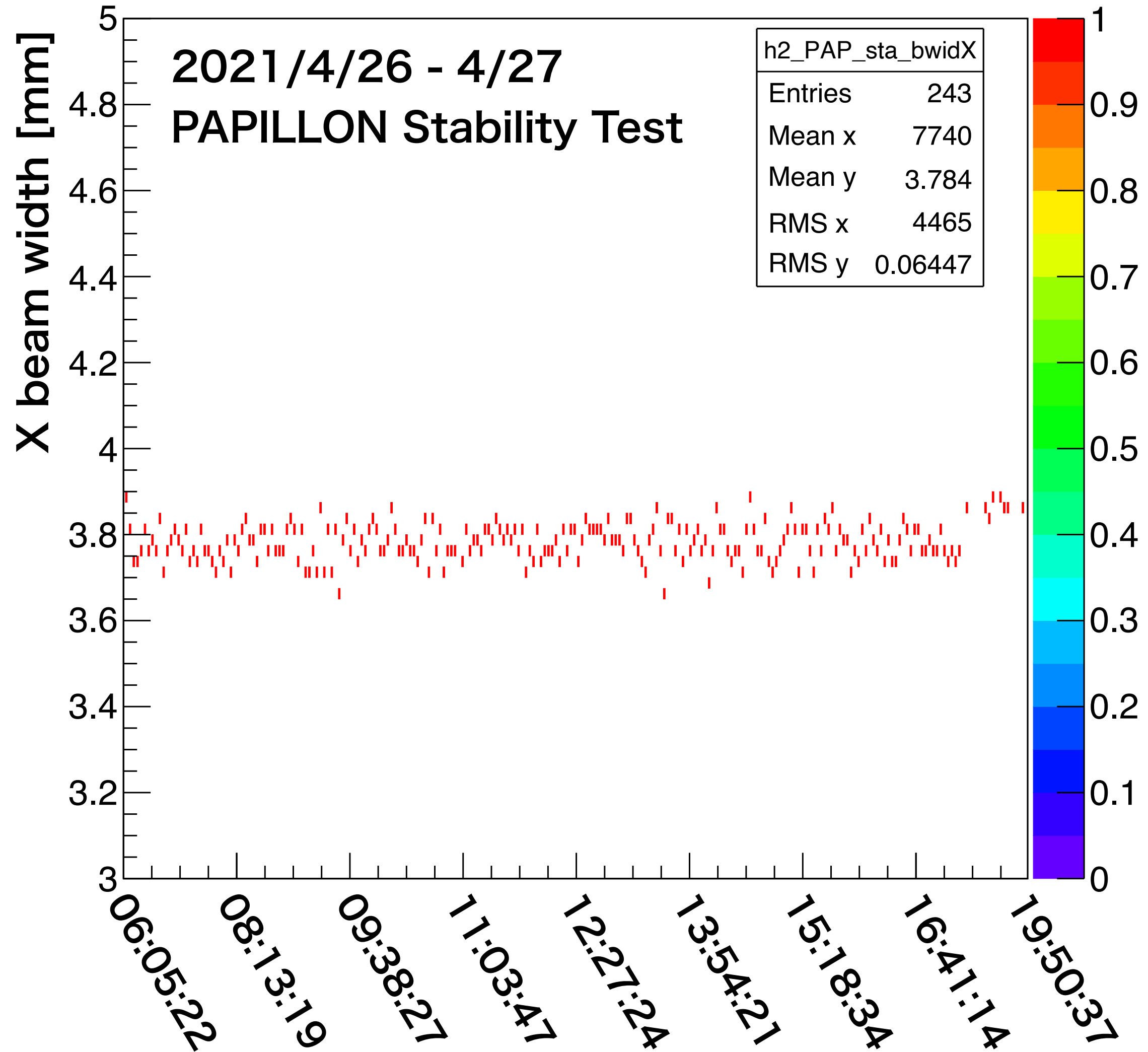
PAPILLON vs Offline analysis ビーム位置計算安定性(Y)

■ PAPILLON and SSEM19 are stable through all-day-long run.
(PAPILLON side time is wrong due to miss setting of PC...)



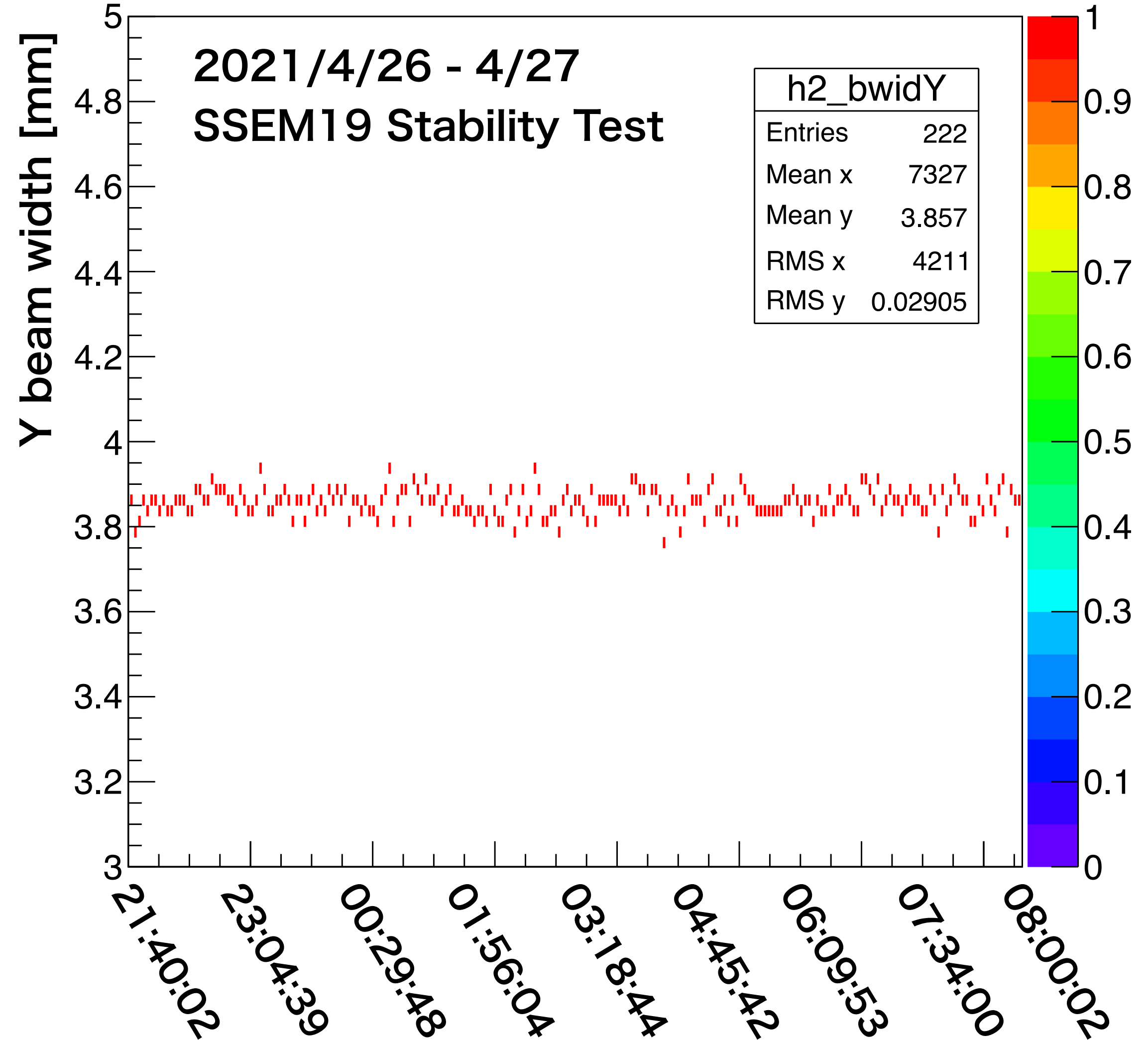
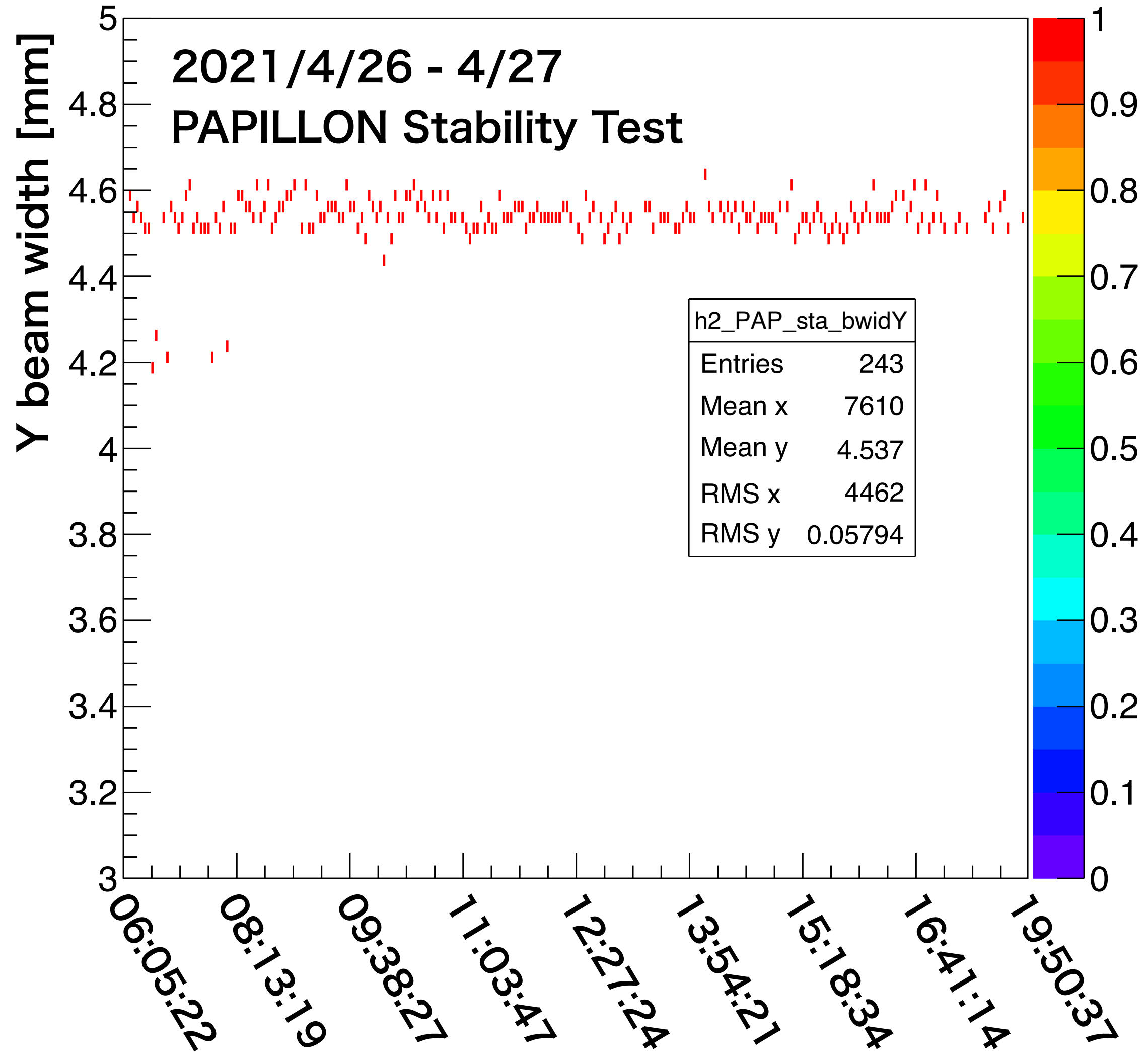
PAPILLON vs Offline analysis ビーム幅計算安定性(X)

■ PAPILLON and SSEM19 are stable through all-day-long run.
(PAPILLON side time is wrong due to miss setting of PC...)

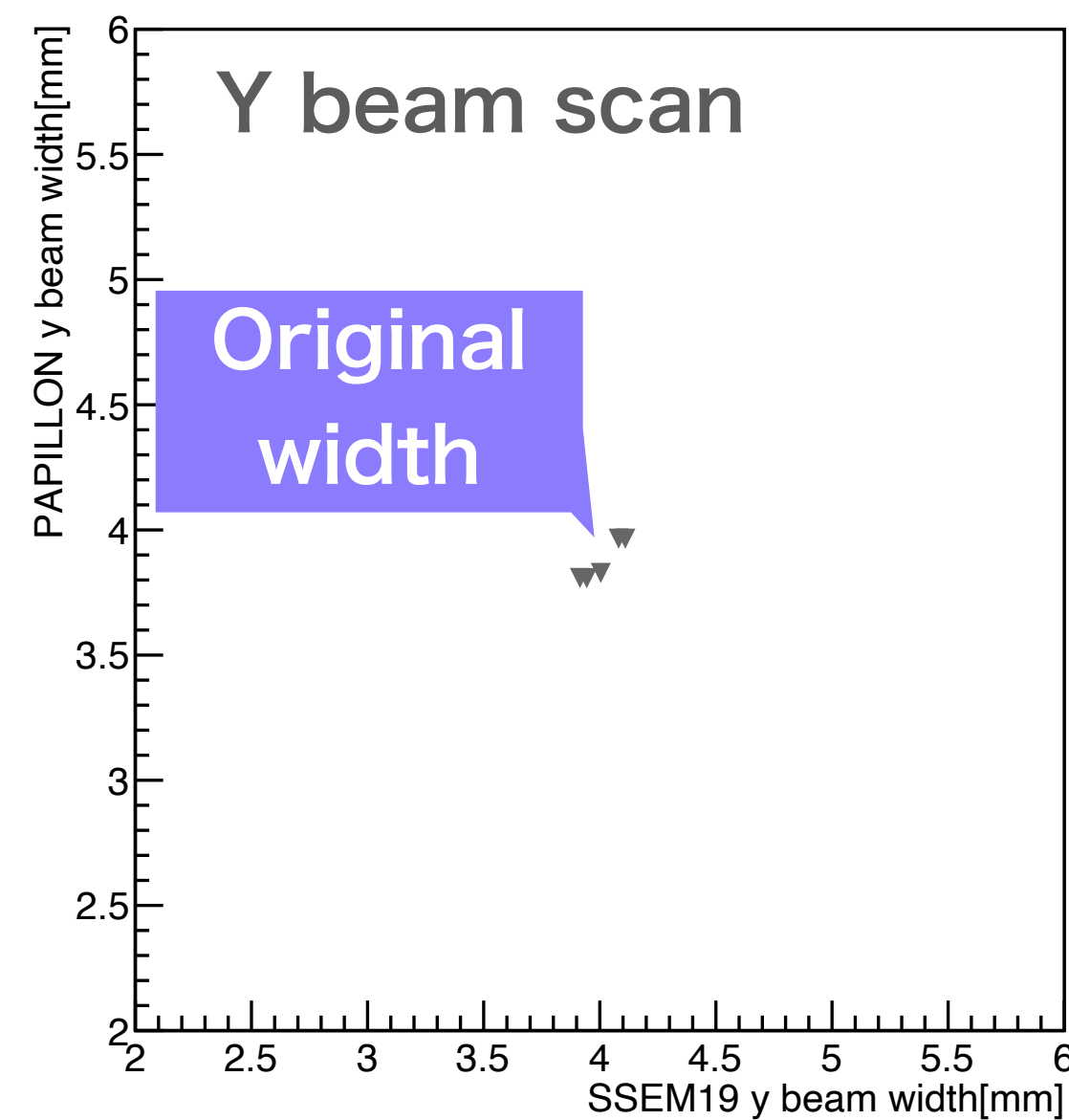
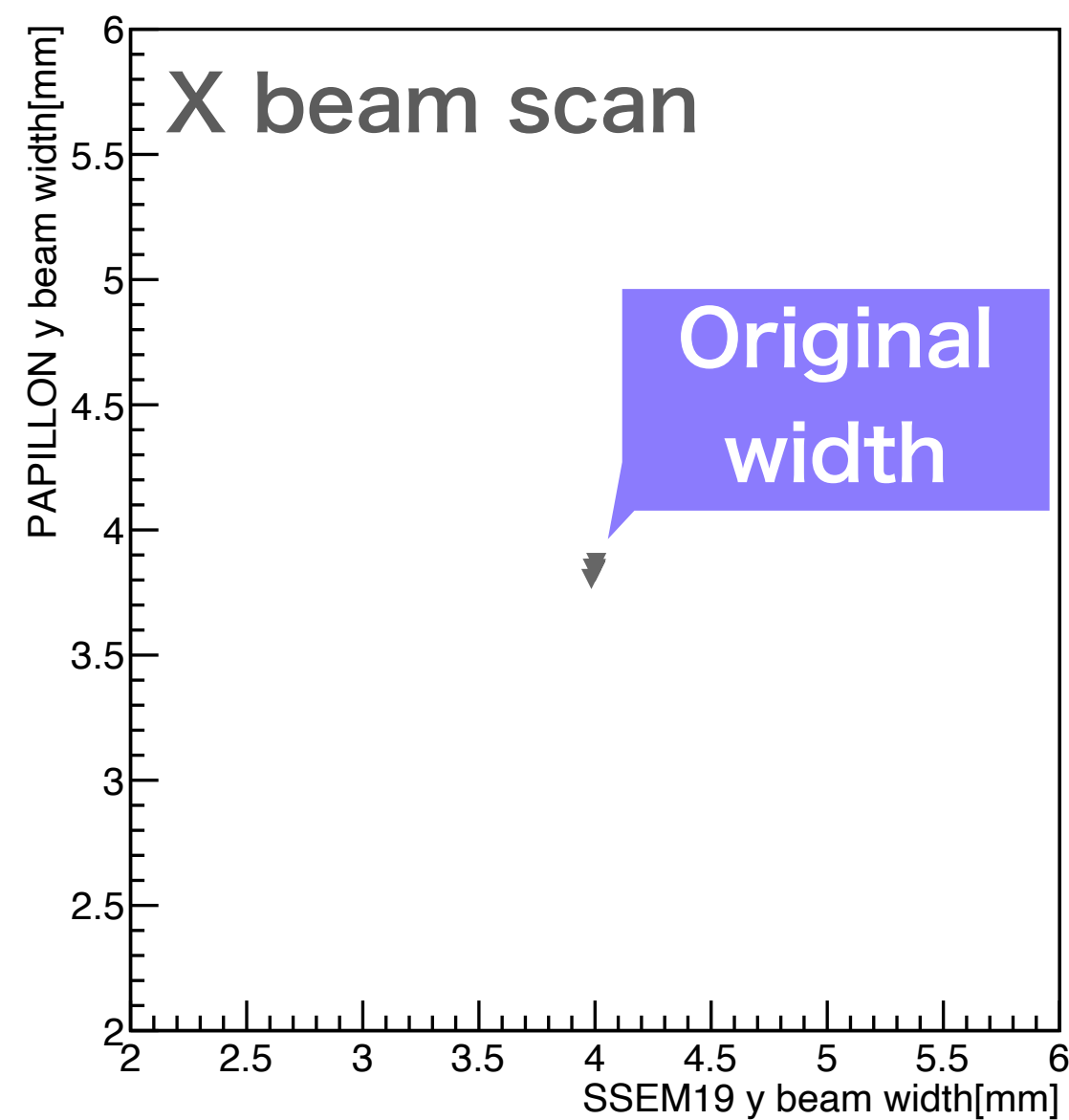
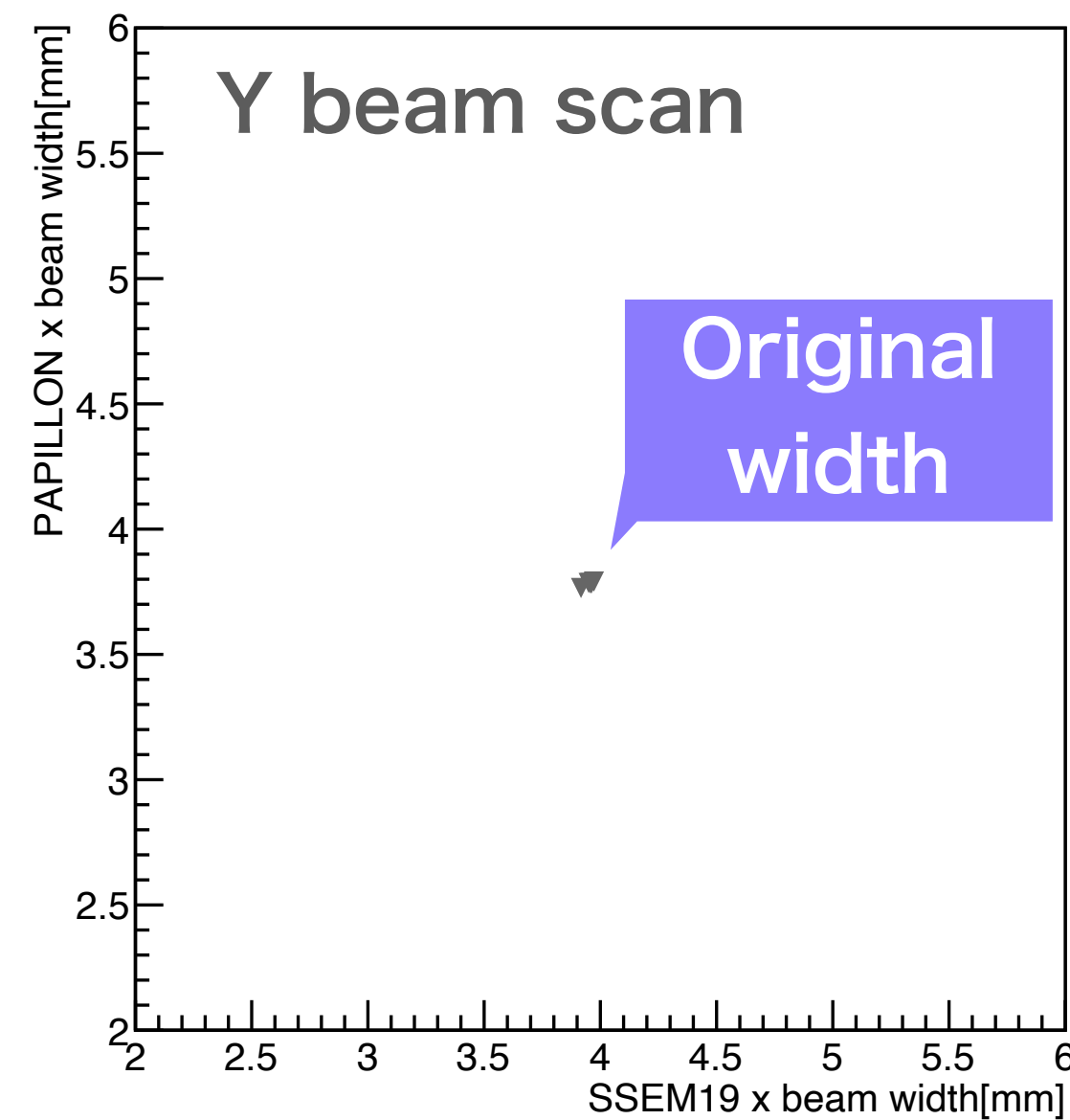
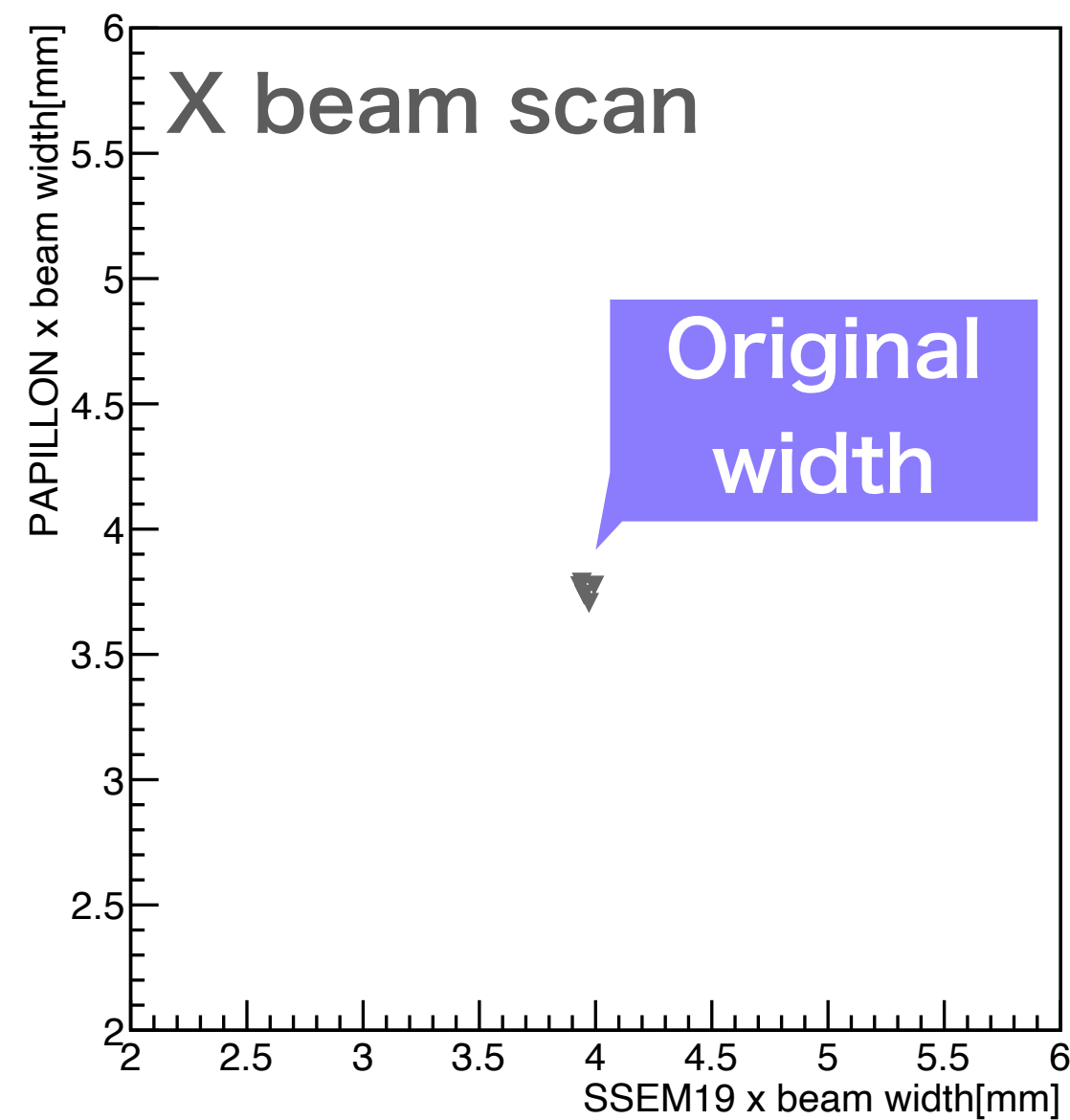


PAPILLON vs Offline analysis ビーム幅計算安定性(Y)

■ PAPILLON and SSEM19 are stable through all-day-long run.
(PAPILLON side time is wrong due to miss setting of PC...)



ビーム位置スキャン時のビーム幅の相関



- Correlation of width's mean between SSEM19 and PAPILLON.
- For each configuration, we can see dot correlation.
→ PAPILLON realize SSEM19 results.