



T2K実験ビーム方向測定のための 電子増倍管の 多チャンネル運用に向けた研究

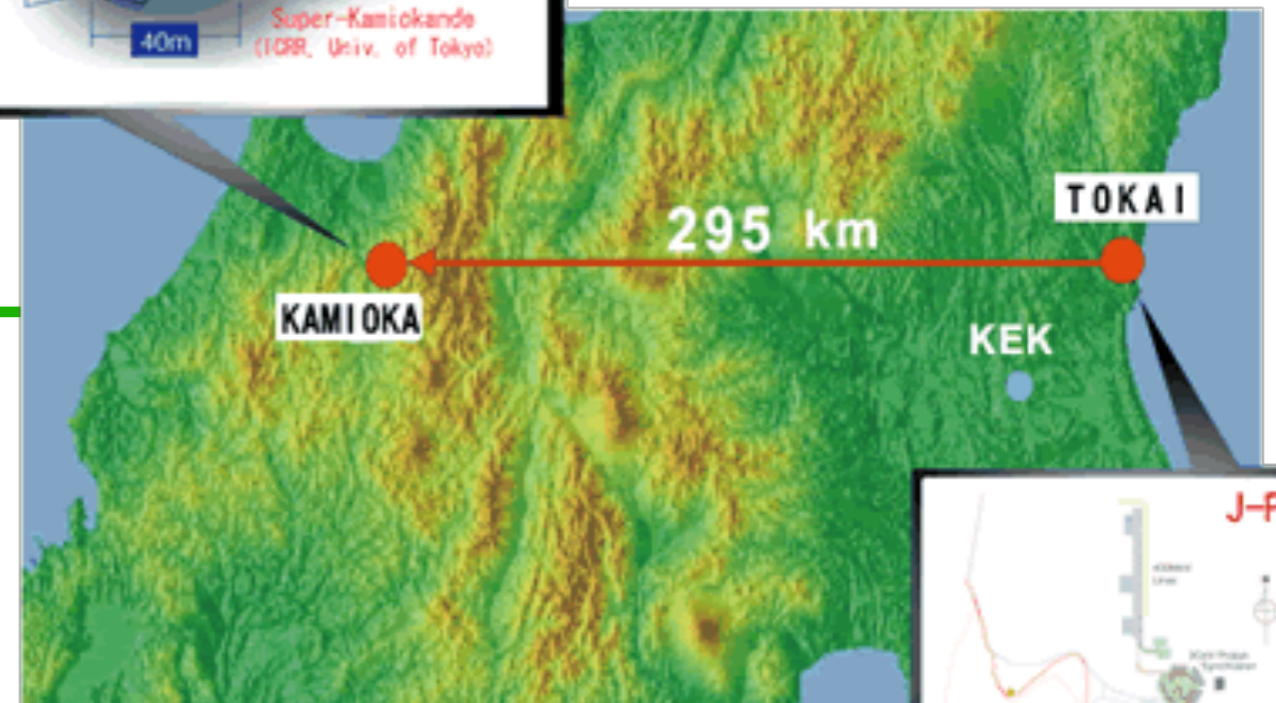
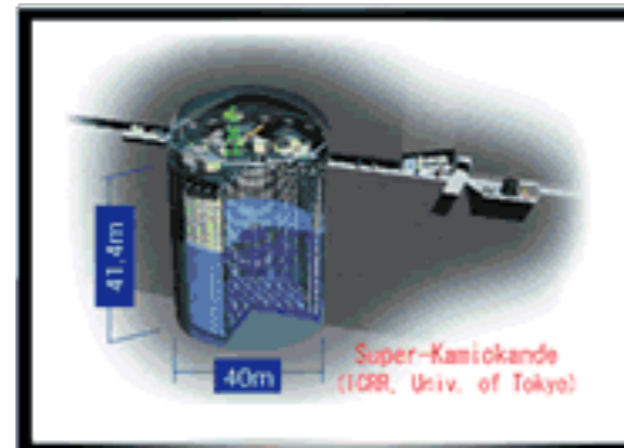
小林綜太, 市川温子, 中村輝石, Ian Heitkamp, Megan Friend ^A, 坂下健 ^A, 中平武 ^A, 佐藤幸音 ^B,
石塚正基 ^B, 山本和弘 ^{C,D}, 木河達也 ^E
東北大, KEK^A, 東理大理 ^B, 阪公大理 ^C, NITEP^D, 京大理 ^E

2025日本物理学会秋季大会, 広島大学, 東広島キャンパス

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
- ▶ 295km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

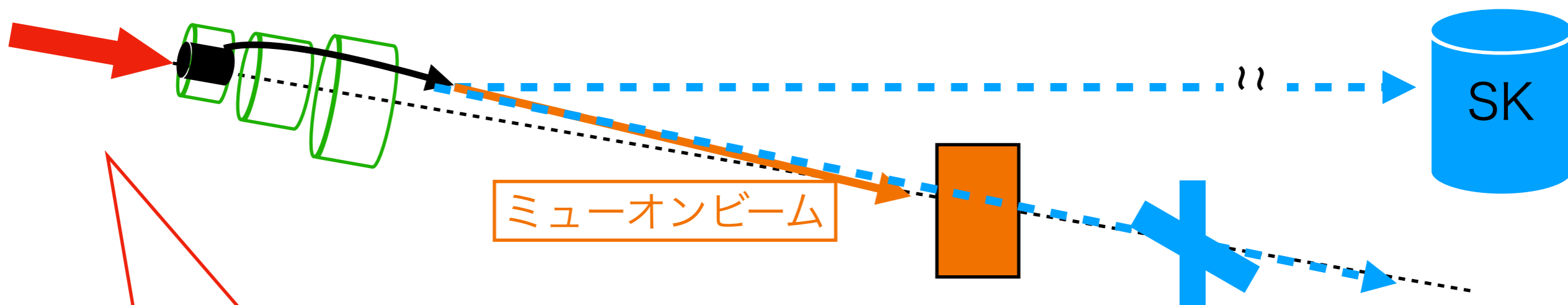
後置検出器の大型化とビーム強度増大

→統計量が飛躍的に向上する予定

ニュートリノビームライン

- ・炭素標的
- ・直径26mm,長さ900mm
- ・ビームが中心から約**1.5mm**外れると危険とされる

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



ミュオンビーム

ニュートリノビーム

SK

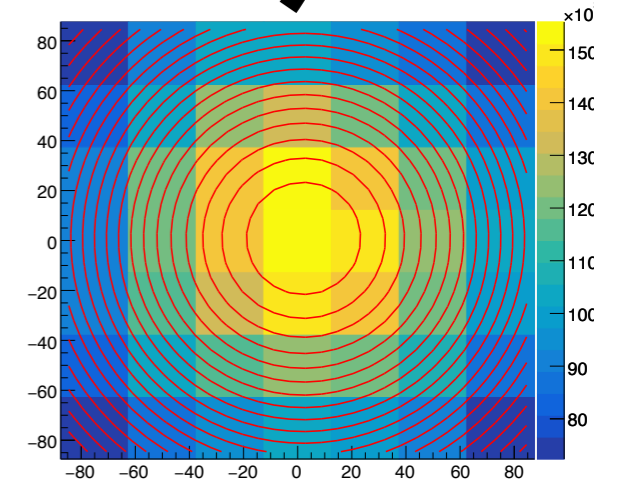
ニュートリノビームモニター

ミュオンモニター(後述)

- ・30GeVの陽子ビーム
- ・ビーム幅~4mm
- ・**1.32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 ~830kW

ミュオンモニター(MUMON)

- 1.5m×1.5m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
- 1ショット毎に約 10^7 個/cm²のミュオンが入射
- **3.3cm(0.28 mrad)**の精度で方向測定が可能(要求値0.3mrad)

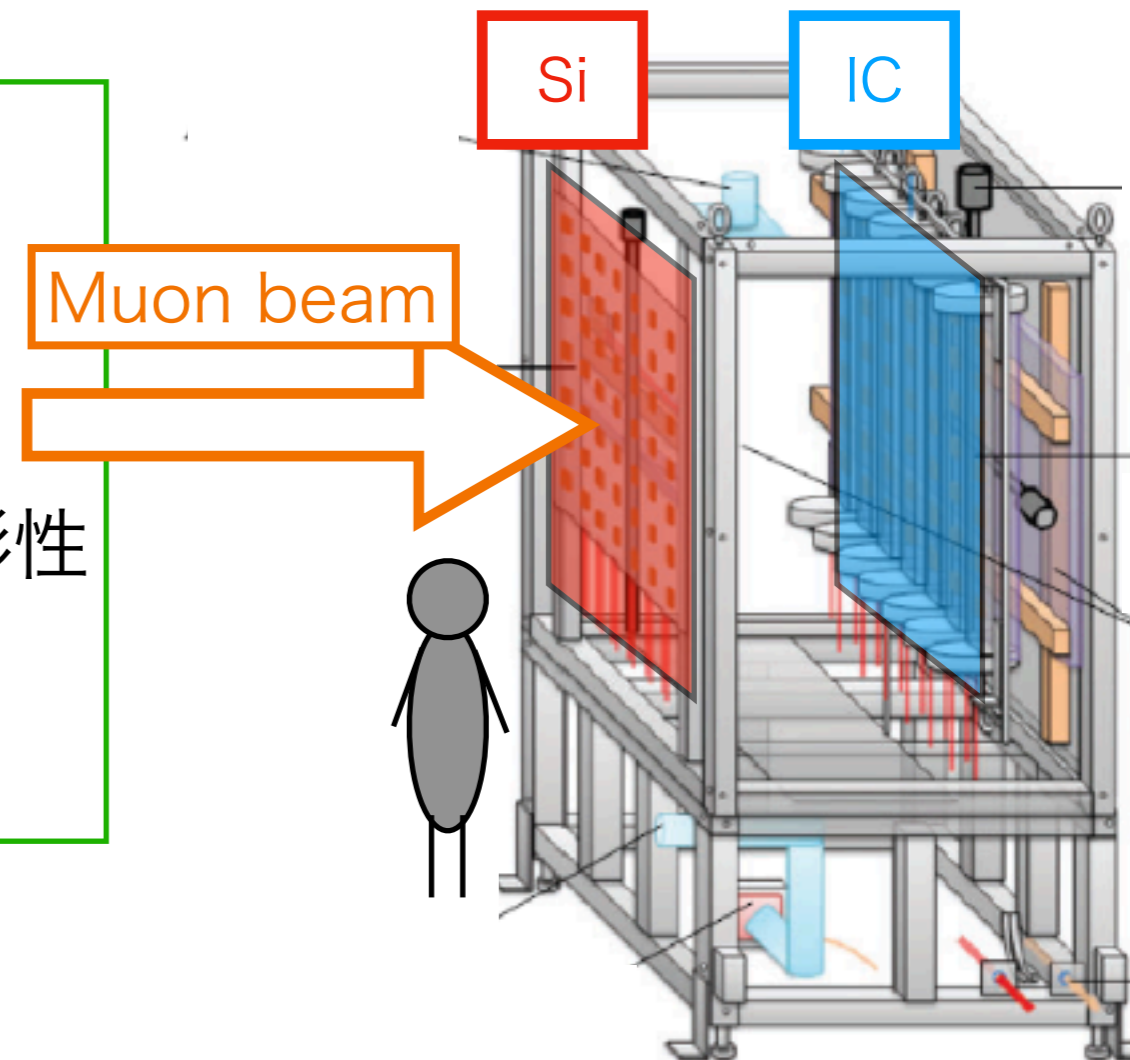


ミュオンビームプロファイル

[現在の課題]

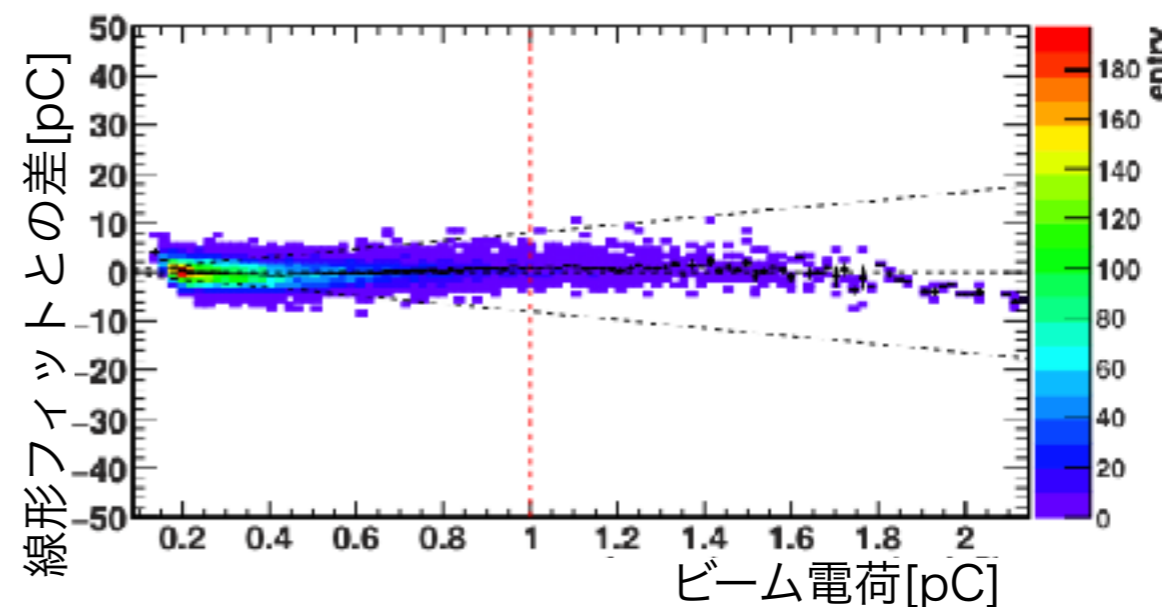
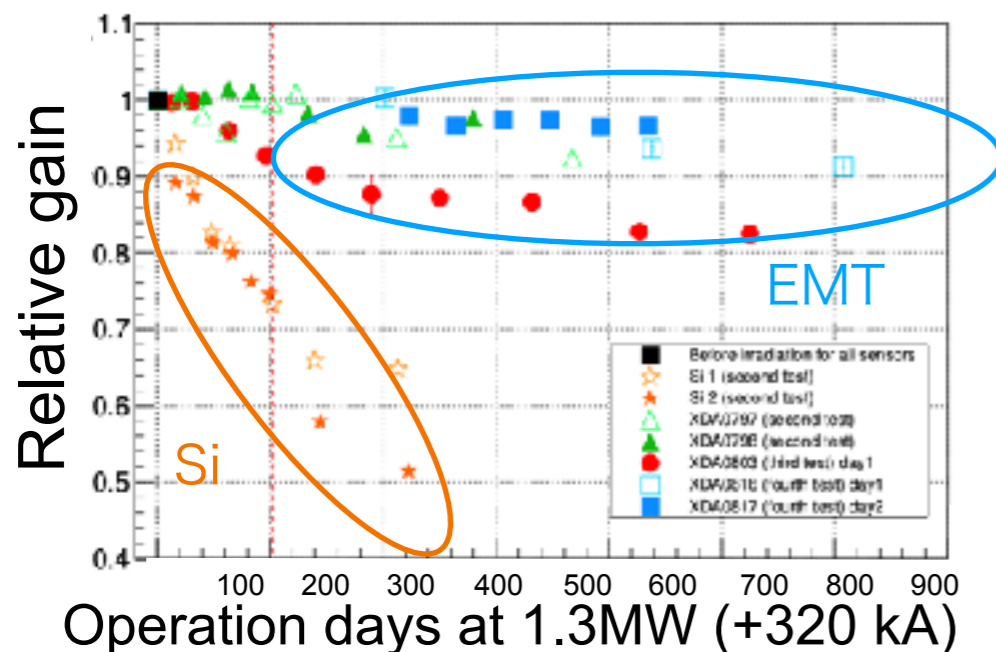
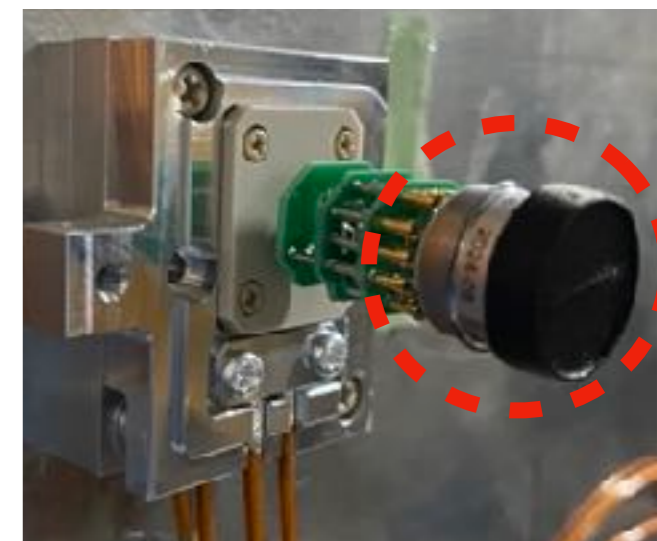
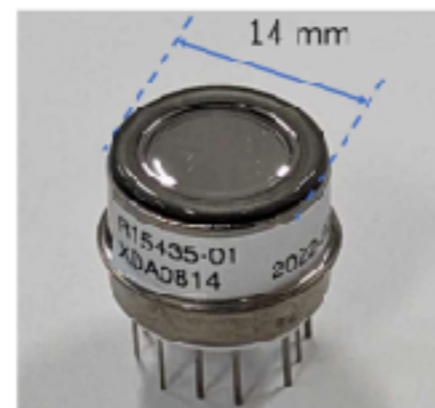
- ▶ 将来の1.3MWに対応できない
 - Si: 放射線耐性が弱く信号強度が劣化
 - IC: 空間電荷効果などで高強度で非線形性
- 高放射線耐性、高強度での線形性
両方を持ったセンサーが必要

→新センサー”EMT”



電子増倍管 (EMT)

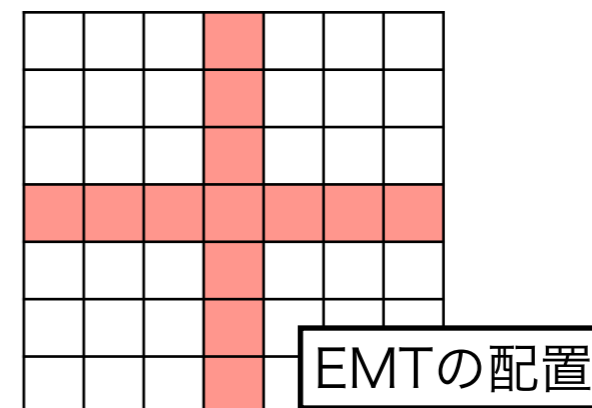
- PMTの光電面にアルミを蒸着
→荷電粒子から二次電子が放出
- 2019~2022年ビームテスト@東北大学 ELPH(電子ビーム)
 - Siに比べてEMTはビーム照射後も信号強度を保っている
 - 1.3MW相当のビームに対して±5%以下線形性



[1]Takashi Honio et al., PTEP (2024)123H01

[1]Takashi Honio et al., PTEP (2024)123H01

◎ 2024年11月からは13個のEMTで実証実験



EMTの配置

EMTの開発状況

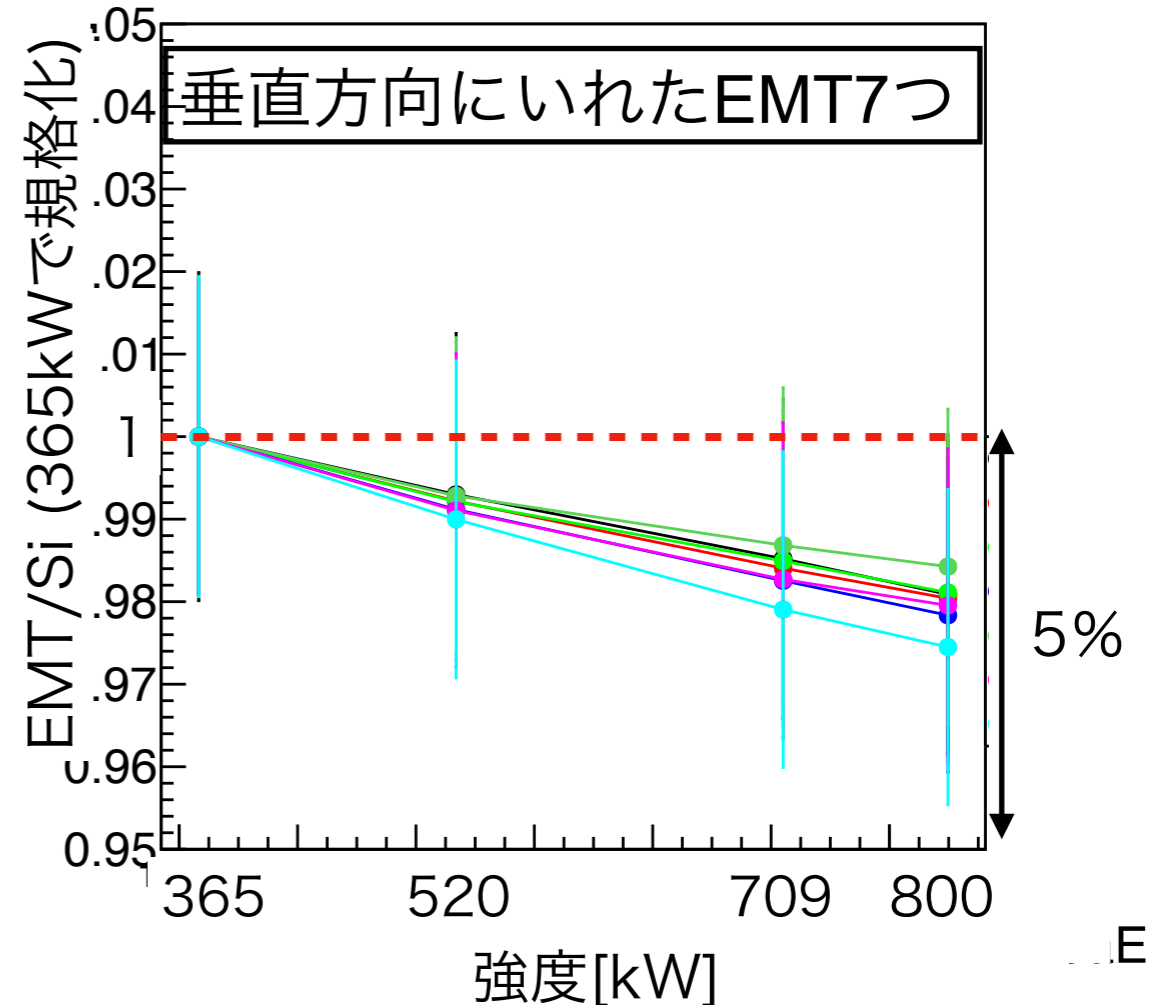
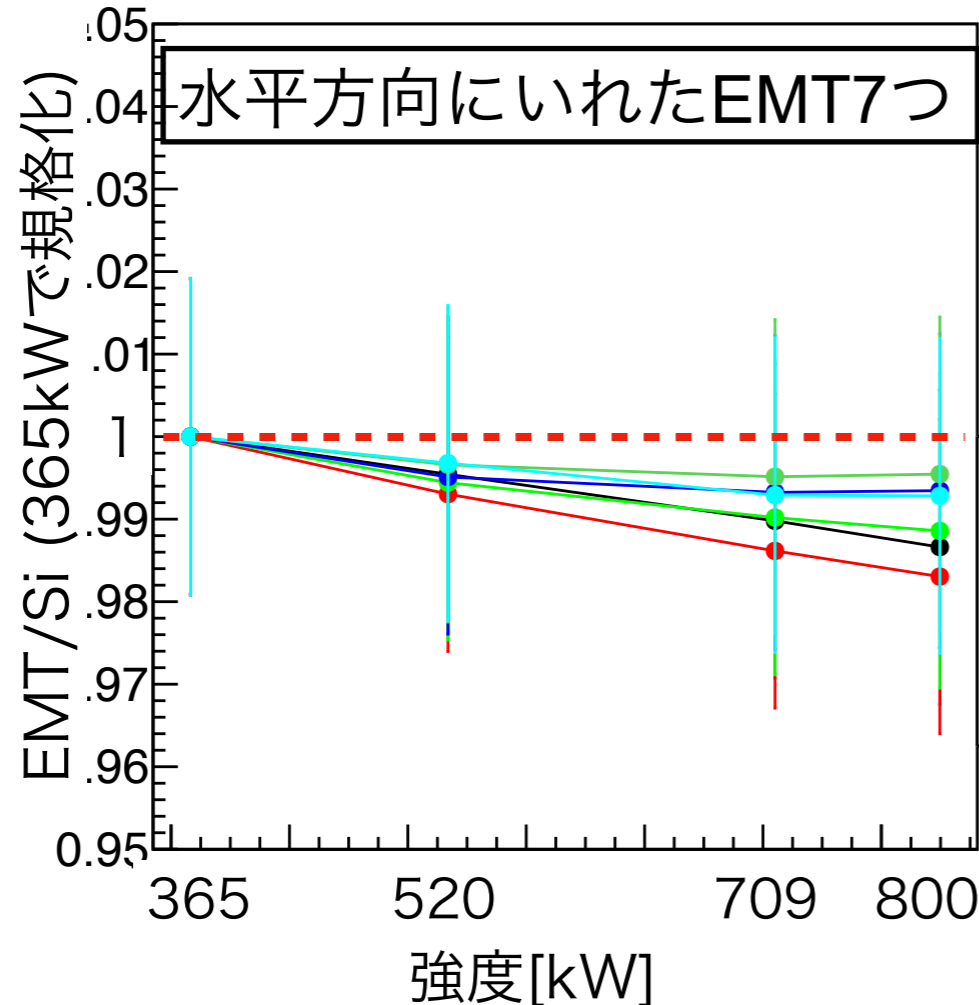
- 電子ビームでの線形性・放射線耐性測定→PTEP(2024)123H01
- ミューオンビームでの線形性測定→本講演①
- キャリブレーションセンサーとしての利用→本講演②
- 高強度ビーム測定→精度が良いことを2025春期大会で報告済み
- 低強度ビーム測定→本講演③
- 実際のビーム環境での放射線劣化→今後長期的に測定

①高強度の線形性



- EMTのすぐ上流にSi→電荷の比が線形性の指標
- 365, 520, 709, 800kWのビーム
- 要求される非線形性(5%以下)を満たしている。
 - Siの線形性の不確かさ($\pm 1.9\%$)が大きいため、詳細な理解にはビームスタディーが必要である。

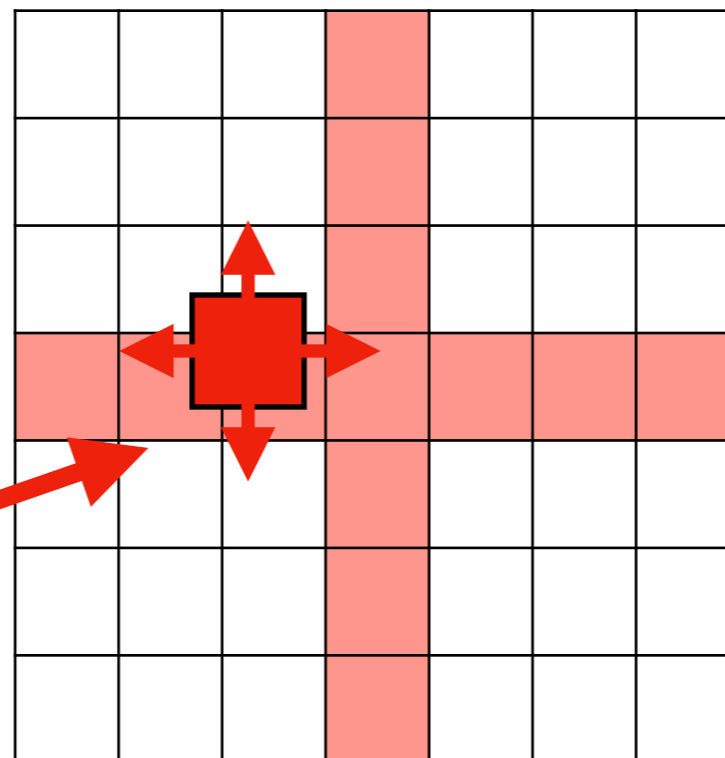
誤差棒はSiの線形性の不確かさを示す



キャリブレーション方法

- 共通のセンサー(リファレンスセンサー)でゲインの個体差を補正
 - 遠隔操作でリファレンスセンサーを各センサーの直下流に移動する
 - 10ショット分の信号比を測定
 - 全チャンネルの測定値で規格化する→補正係数となる
 - **ビームプロファイル**を正しく測定するために重要
- ➡ リファレンスEMTでも正しくキャリブレーションできるか

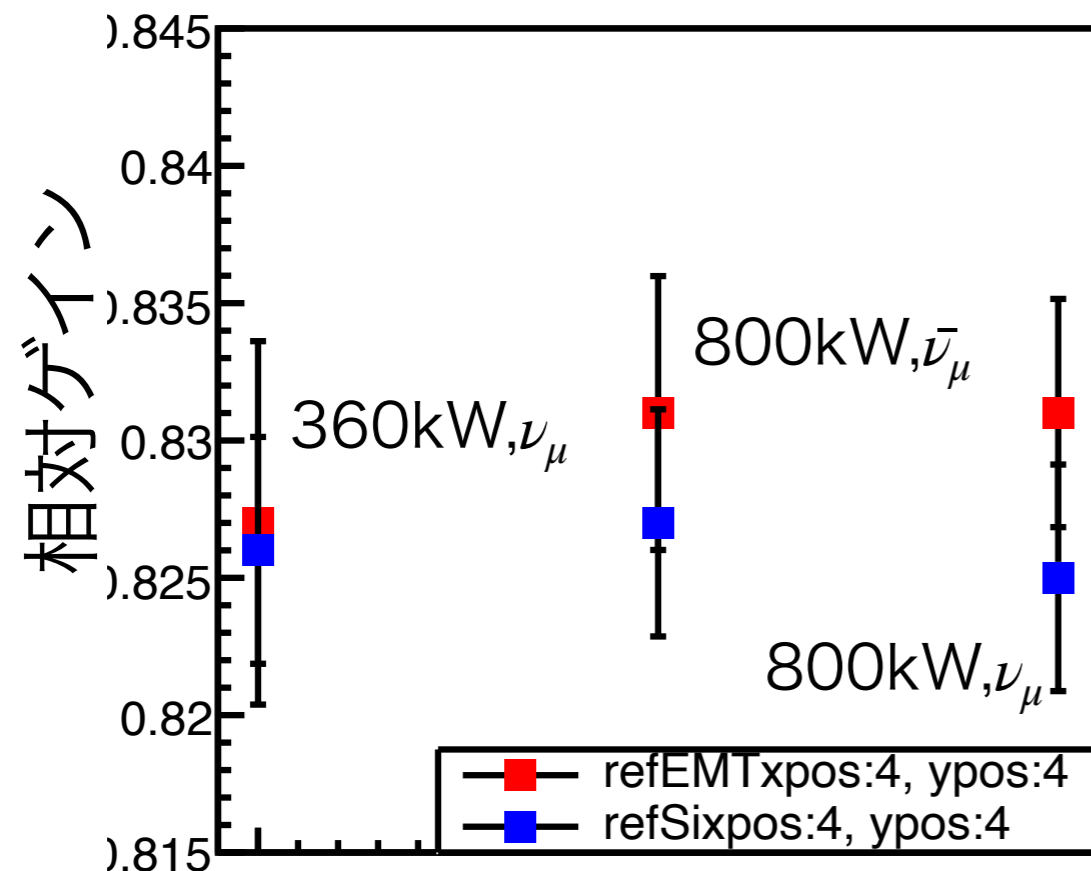
リファレンスセンサー
(refと表記)



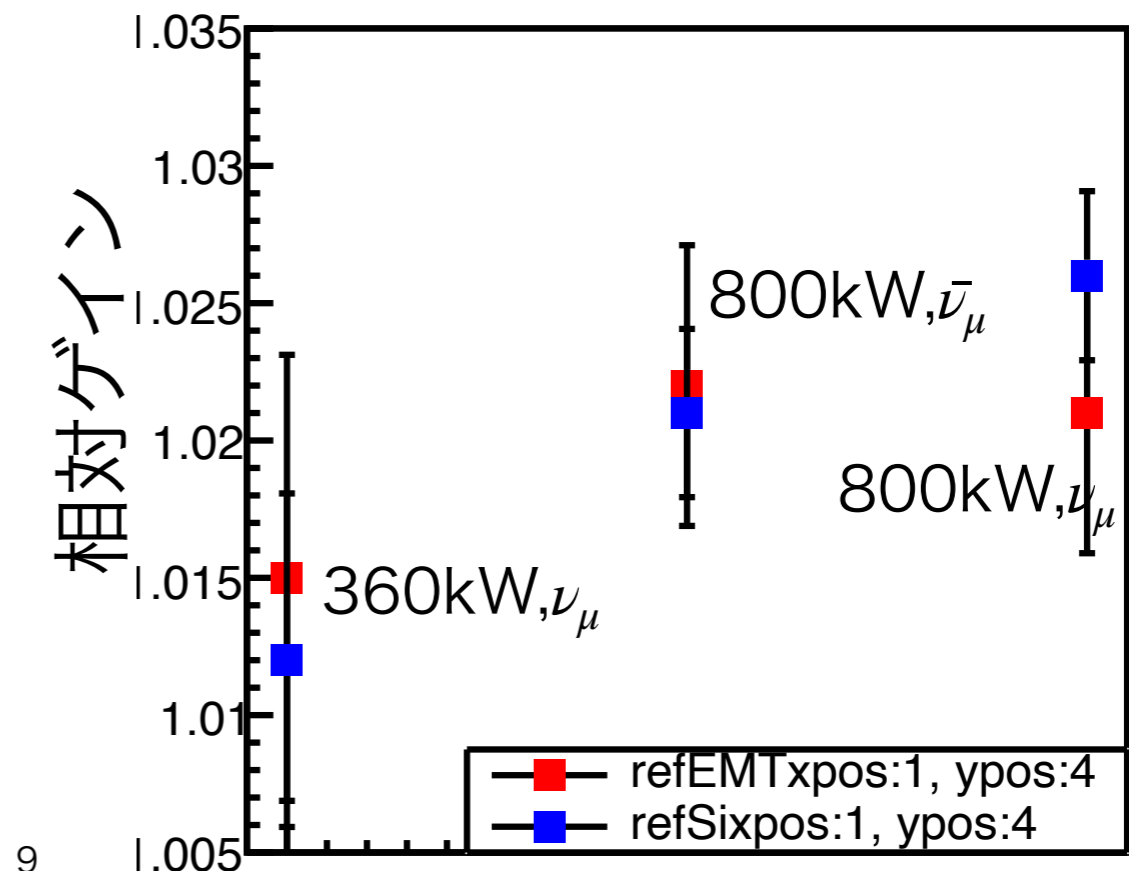
②ref-EMTを用いたキャリブレーション

- 3つの条件でキャリブレーション
 - 360kW(ν_μ モード), 800kW($\bar{\nu}_\mu$ モード), 800kW(ν_μ モード)
- リファレンスSiを用いた時の補正係数とは、測定誤差の範囲（約0.4%~0.8%）で一致
- ✓ リファレンスEMTでキャリブレーションができることが示せた

中心のEMT



端のEMT

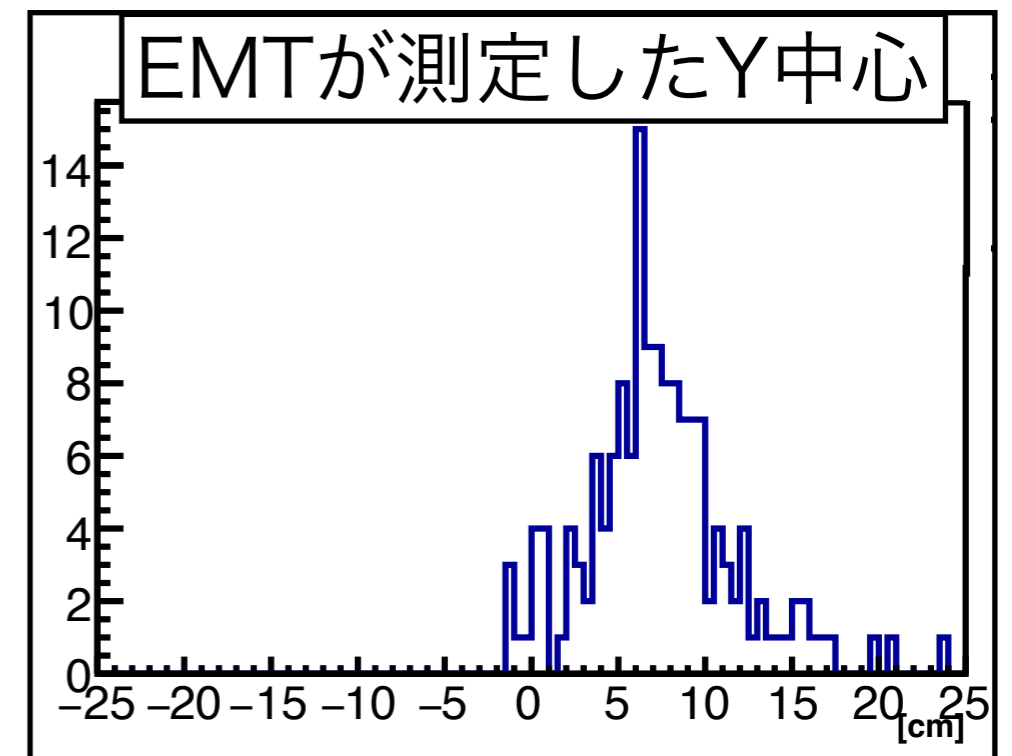
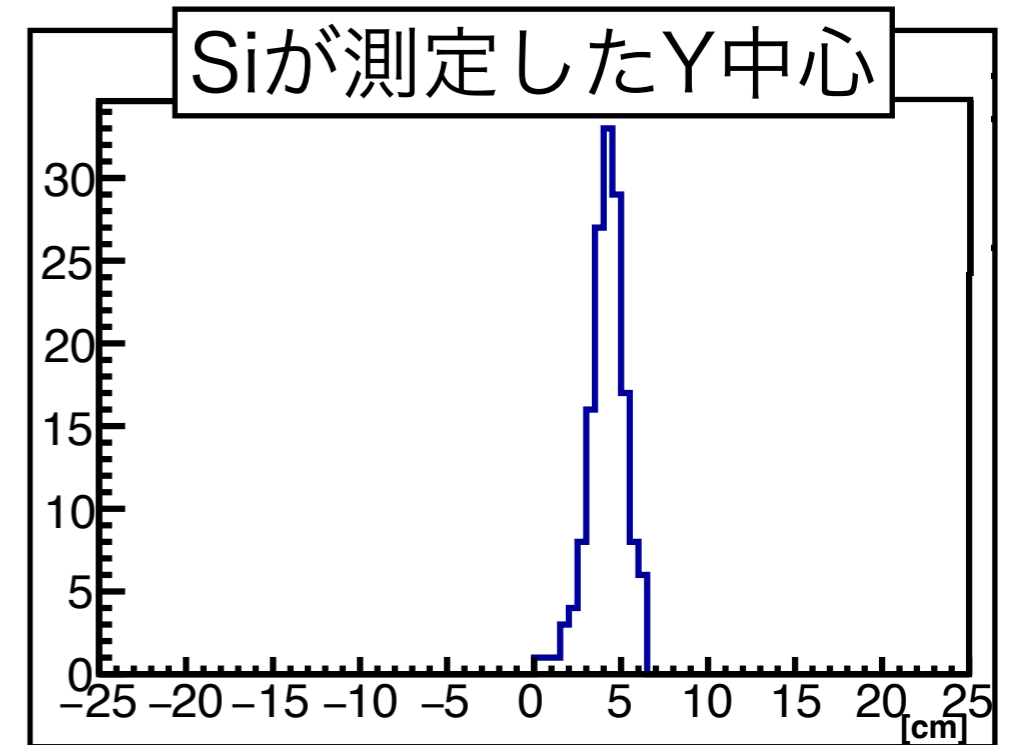


③低強度ビームの測定

- 低強度(~1kW)でも精度良いプロファイル測定が必要
 - 高強度ビーム(~800kW)がターゲットの中心を外れるとターゲット周辺機器の**安全が担保できない**
 - 比較的安全な低強度でビームを中心に合わせる

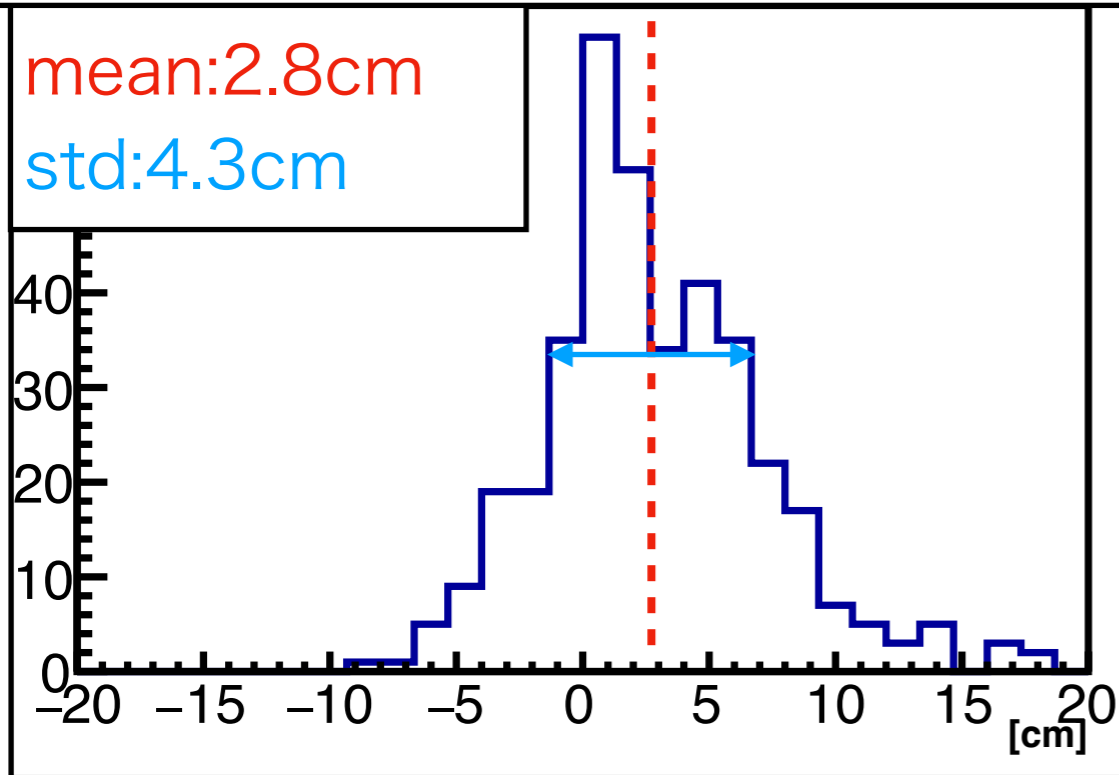
低強度プロファイル測定

- 課題
 - EMTの測定プロファイル中心のばらつきが大きい
- 原因
 - ショットごとにEMTの信号強度が**4~5%**のばらつきをもつ
 - ➔ 信号強度のばらつきが中心測定に大きな影響
 - **二次電子数揺らぎが大きな原因**
 - 1ショットあたり435個の二次電子
 - $1/\sqrt{435} * 100 = 4.8\%$
- 対策
 - 数ショットの平均電荷でプロファイルを測定する

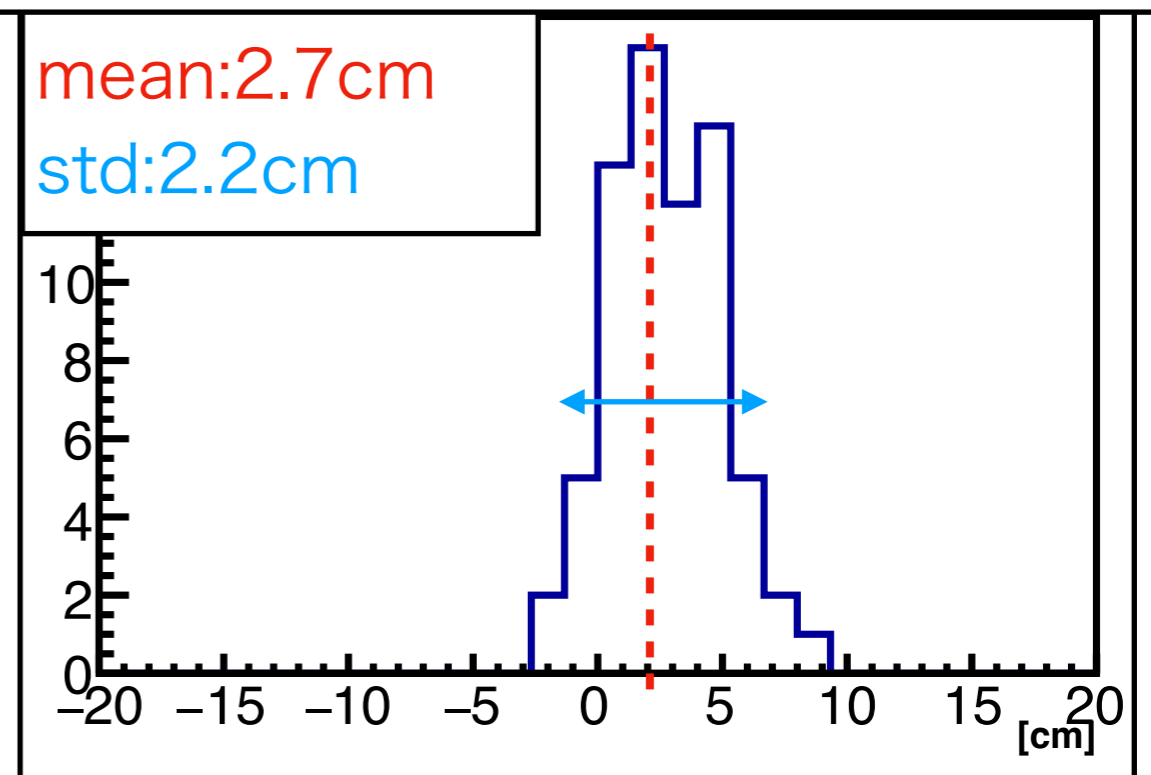


数ショットの平均電荷で測定

1ショット毎のSiとEMTの測定値の差(y)



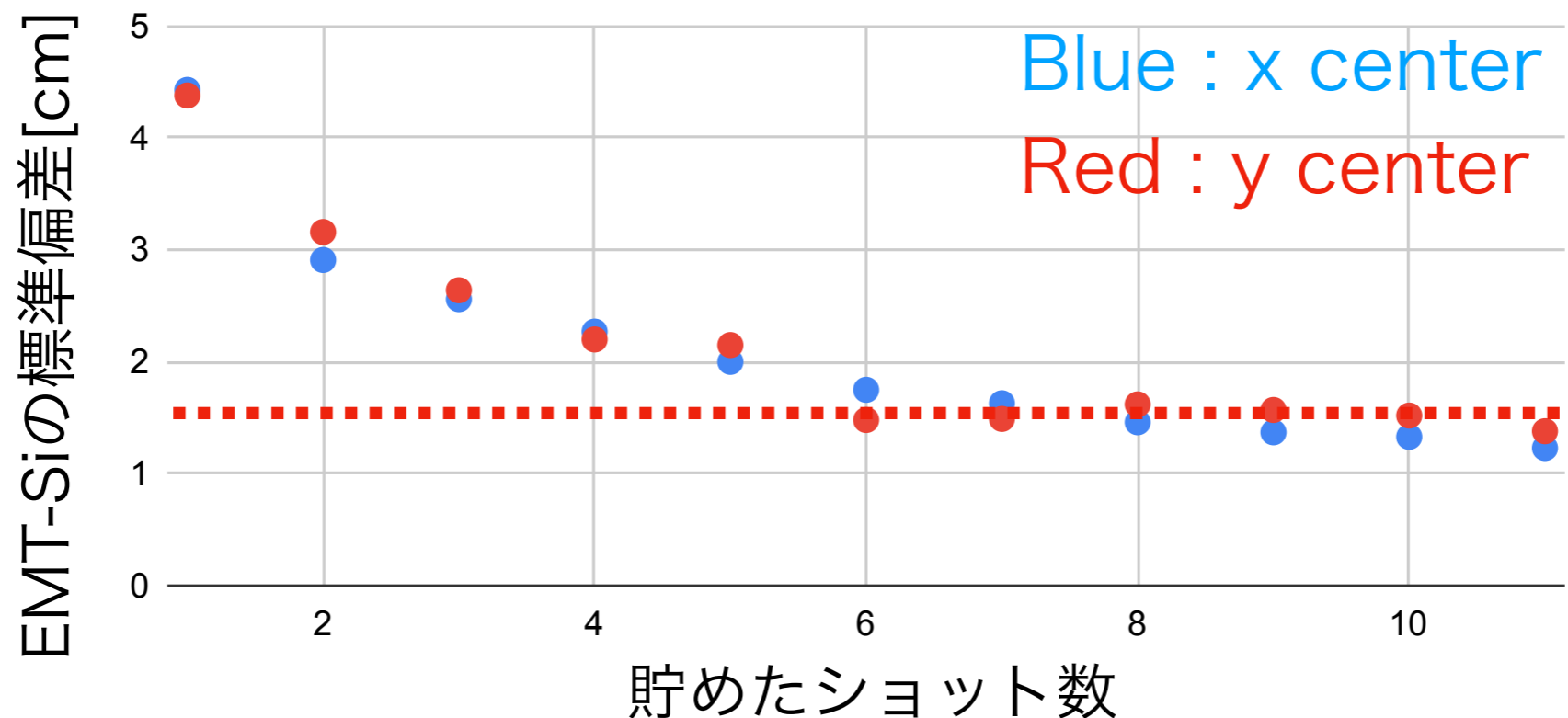
Siと4ショット平均のEMTの測定値の差(y)



- Stdは約50%に減少
- ✓ SiとICのビーム中心の違いに起因する系統誤差(2.17cm)に近い値

平均ショット数とstdの関係

SiとEMTのビーム中心の差の標準偏差と貯めたショット数の関係



[要求]

ターゲット中心から $\pm 1.5\text{mm}$ の範囲にビームを当てる

➡MUMONでは約 $\pm 1.5\text{cm}$ の安定性でビームを測定する

✓ 6~8ショットの平均を取れば要求精度に到達

まとめ

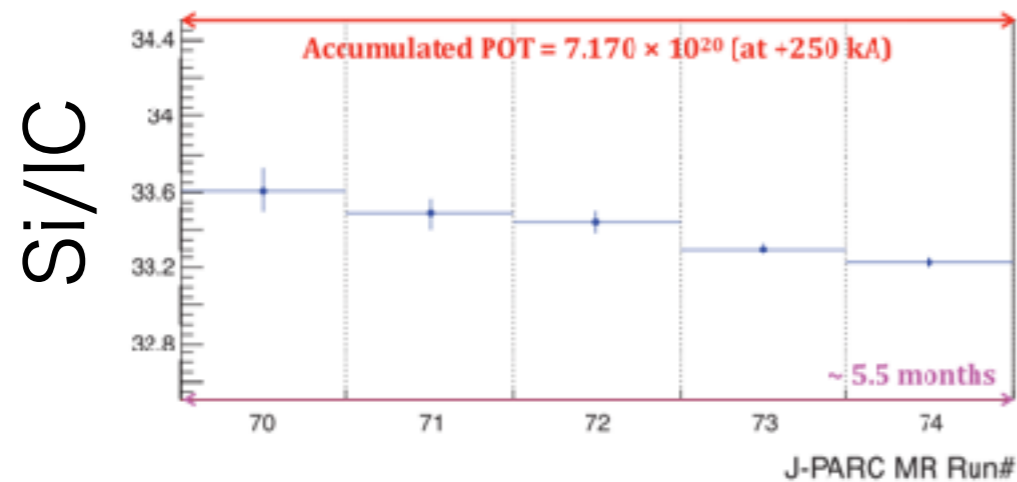
- T2KおよびHK実験
 - T2K実験はニュートリノのCP対称性の破れを探索している
 - 2028年からは有効体積が8倍、最大ビーム強度1.3MWのHK実験が開始
 - ミューオンモニターの新しいセンサー”EMT”
 - 従来のセンサーよりも放射線耐性があり高強度にも対応できる
 - 2023年からJPARCで実証実験
 - 本講演
 - ✓ 線形性は800kWまでで要求を満たしていることを確認
 - ✓ EMTを用いた較正係数はSiを用いたときと比べ誤差の範囲で一致
 - ✓ 低強度ビームの精度は数ショットの信号強度の平均をとって補えることを確認
- ➡11月にはセンサーを追加する予定であり、測定精度の向上に期待

Supplement

Current situation

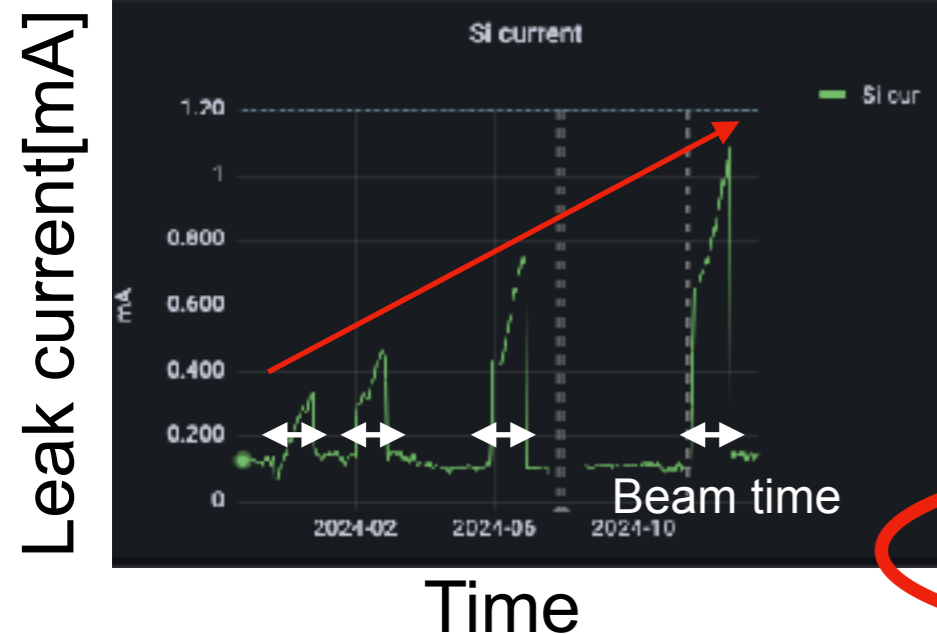
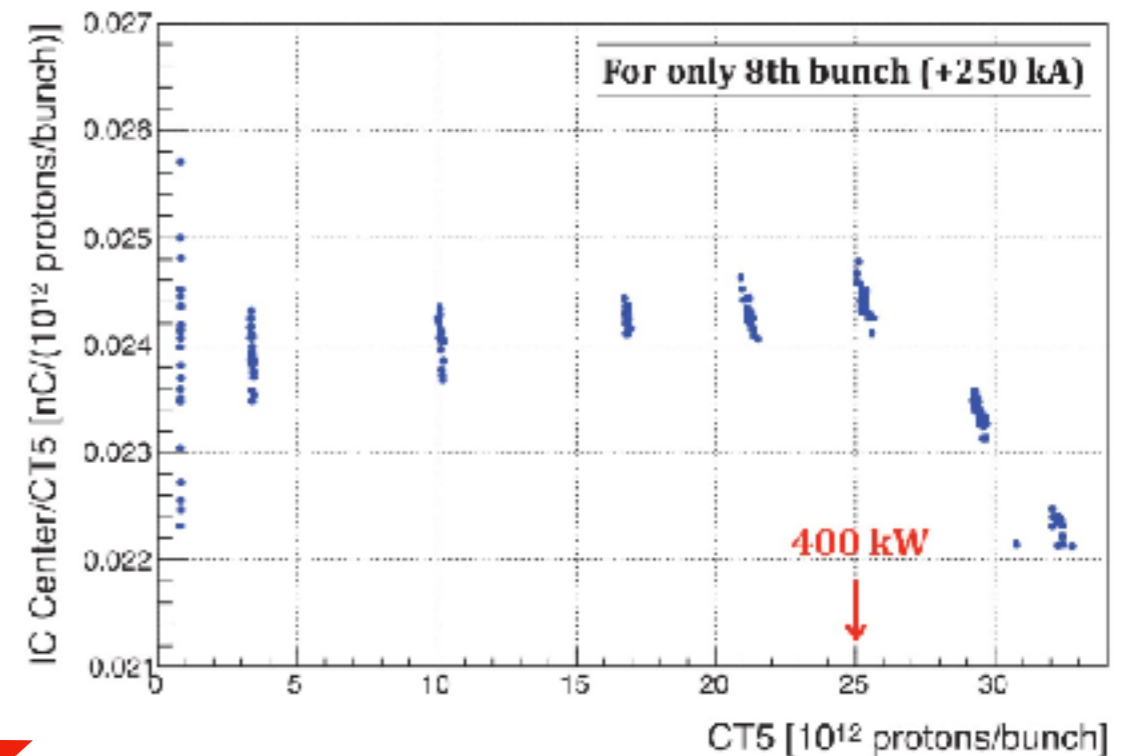
Si Problem

- Si is weak to radiation.
 - Yield become smaller .
 - Leak current increases due to radiation damage.
- But intensity increase is planed.
- In the 1.3MW intensity era, monthly change of Si may be needed.



IC Problem

- Space charge effect.
- IC yield becomes small in higher intensity.



New Detector is Needed !

Horn電流とmuon fluxの関係

- Horn offの時を1とすると、
250kAでは約4倍, 320kA(2.1T)では約6倍
- FHCとRHCではフラックスは約2/3倍

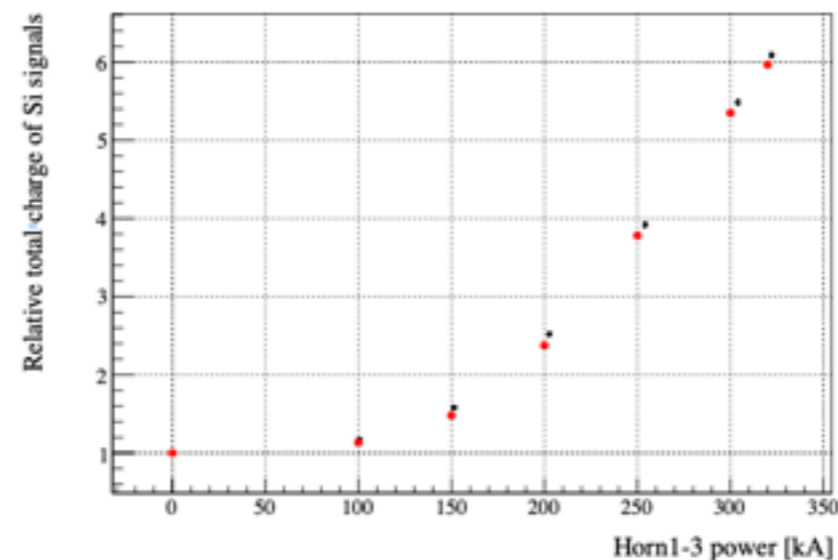


図 6.16: 電磁ホーン電流を変えたときの Si 検出器の信号 (積分電荷) とシミュレーションで得られた入射粒子の比較。図の横軸は 3 つの電磁ホーンに共通して設定した電流値を表す。縦軸は Si 検出器で得られる信号の大きさとシミュレーションで得られた入射粒子数を表し、双方とも電磁ホーン電流が 0 kA の時の値を 1 としている。赤点はシミュレーションによる予測値、黒点はニュートリノビームでの測定値である。

EMT linearity at JAPRC

- 芦田さんの先行研究
- $100\text{kW}=50 \times 10^{12}$
- 500kW程度までしか調べられていない。

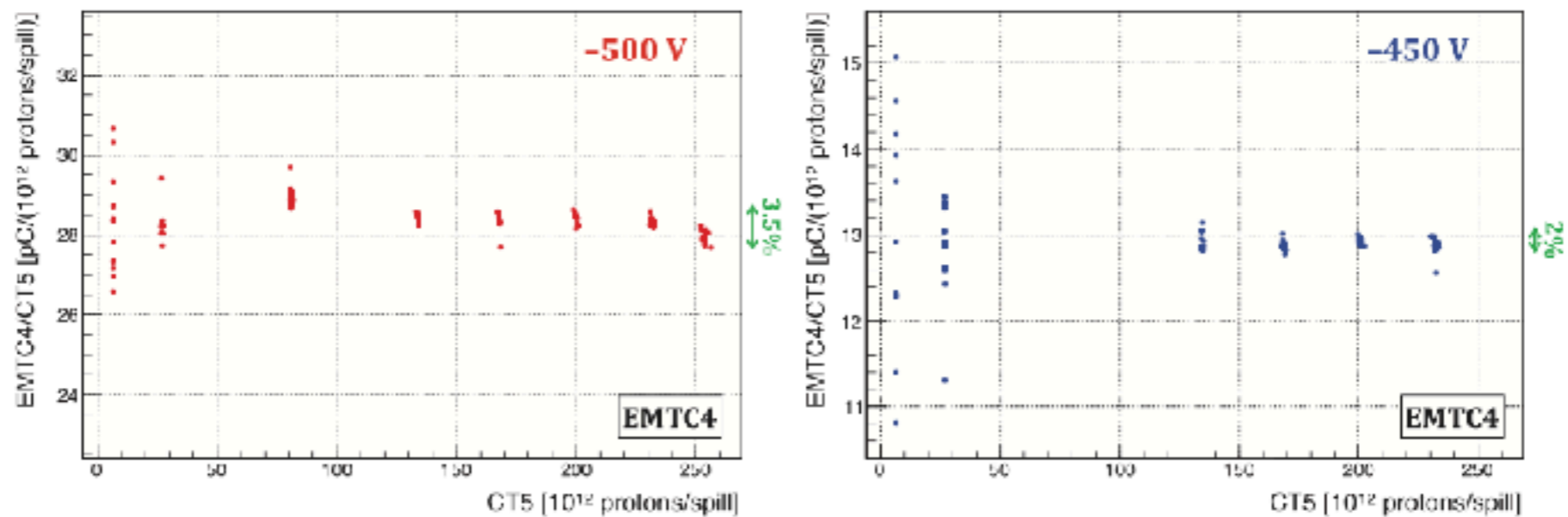


Fig. 16. Results of the beam intensity scan for EMTC4. The left panel shows the result with -500 V applied, and the right panel shows the result with -450 V applied.

Siの線形性

- NuMI ビームラインを用いた試験(FNAL T968)
- 横軸ビーム強度、縦軸Siの電荷量
- 直線にフィットし、データ点との差をとる
- 差は 2.2×10^7 electron/cm²以下で $\pm 1.9\%$ だった。
- EMTの各データはデータセットが異なりビームの状況(中心や幅)も異なるため、同じような解析が難しかった。

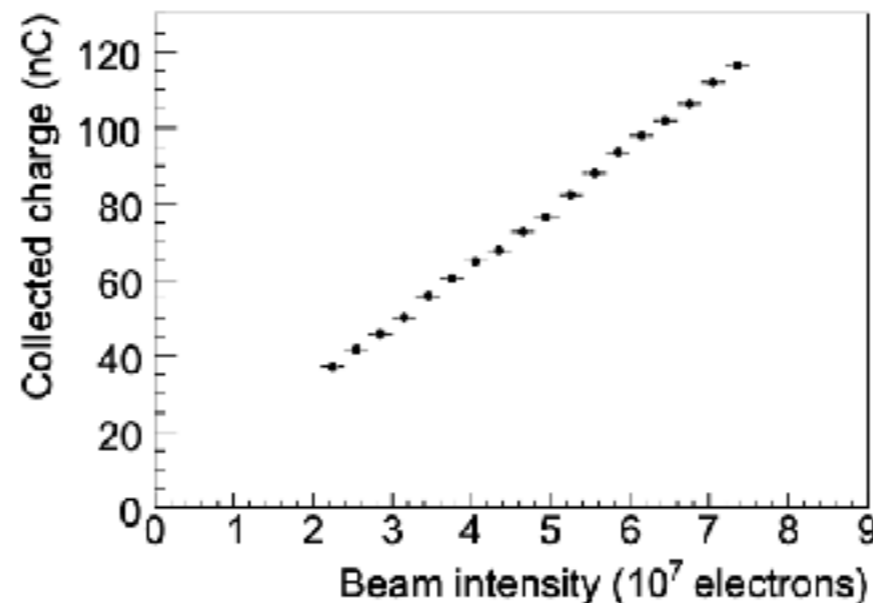


Figure 5.5: Collected charge versus the beam intensity for the silicon PIN photodiode. Approximately 30% of the beam enters the active area.

EMTとSi calibrationの誤差

- Refセンサーと目標センサーの比を10ショット測定
- 平均値を計算する
- 同じ作業を49チャンネルで行う
- あるチャンネルの平均値と
「49チャンネルそれぞれの平均値」の平均値との
比をcalibration constantとする。

- 10ショットの間で比のばらつきが0.4~0.8%
- 全チャンネルの値の平均値の比は $0.8/\sqrt{49}$ ~0.1%
- Calibration constantの誤差はほぼ10ショットの
ばらつきで決まる。

refEMTの線形性測定について

- 本来は位置ごとに同じSiセンサーを使うべきである。
- refEMTの真裏にはrefSiが存在
- refSiはT2K開始から使用し続けているため、放射線ダメージが大きい
- 線形性や信号量は劣化しているはず

- 一方各位置のセンサーは定期的に入れ替えているため、refSiより劣化していない
- Siの線形性の不確かさを全てのSiに適用した。

- 中心とその隣り合うセンサーのフラックスは約4%異なる
- Refの線形性(または電荷不定性)がそれ以上だとキャリブレーションを失敗する可能性

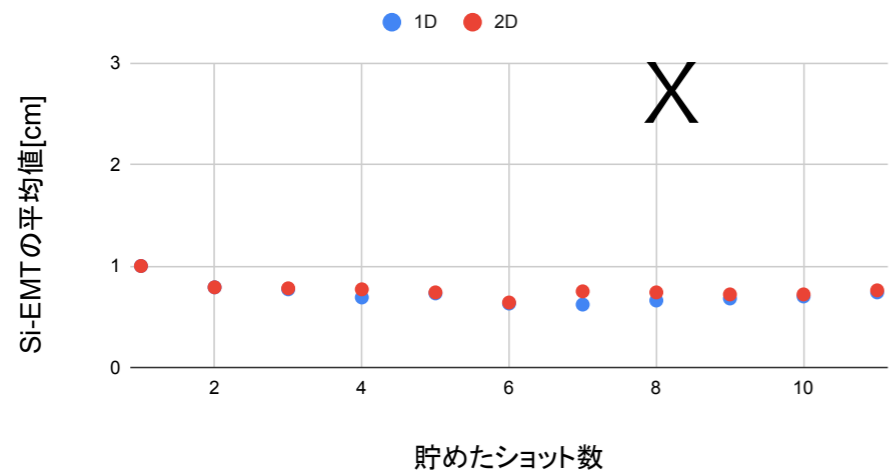
キャリブレーションの系統誤差について

- 久保さんの資料
- 系統誤差は1%程度と見積もられているが確かではない
- 10kWでは出力電荷も小さかったため、
アクシデンタルノイズが誤差の要因の一つ
- 他には
- Si面とrefSi面の違い(22.55cm)→ビーム幅が1~2%異なる
-

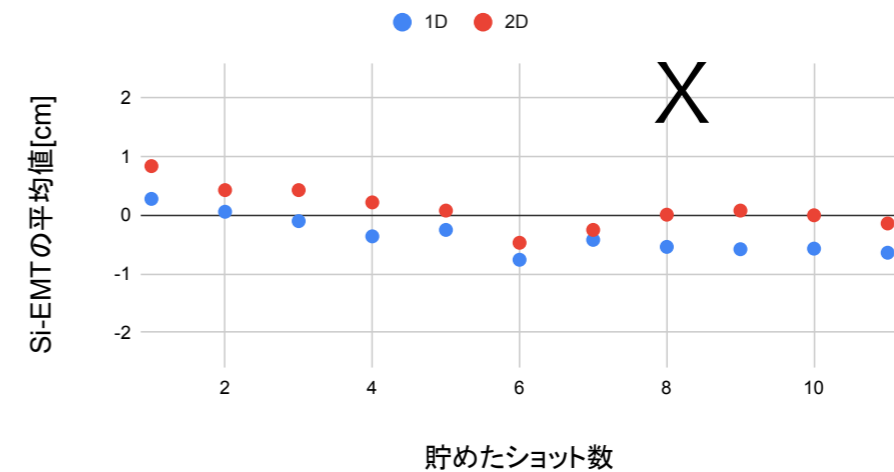
1D vs 2D diff mean

Low intensity → 平均ショット数が増えてもオフセットは解消しない

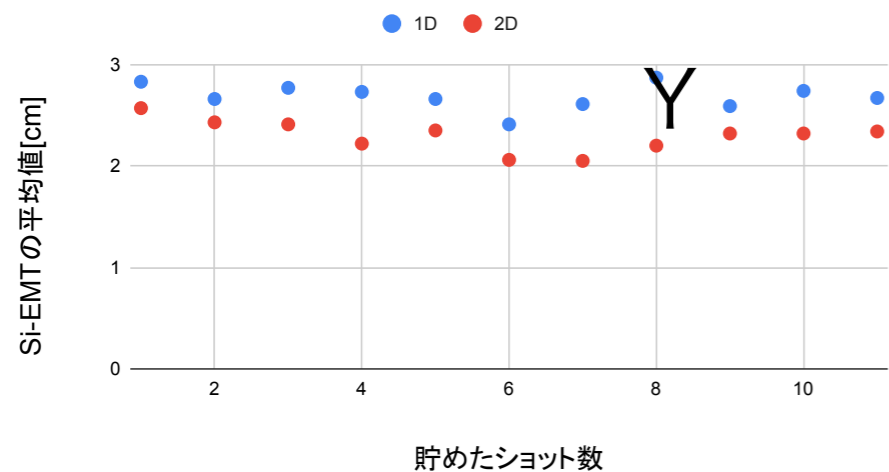
SiとEMTのx centerの差の平均値とショット数の関係



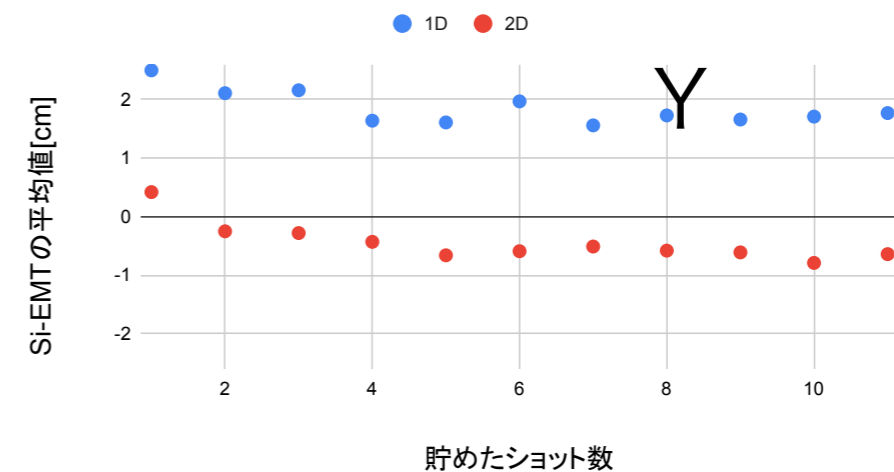
SiとEMTのx widthの差の平均値とショット数の関係



SiとEMTのy centerの差の平均値とショット数の関係



SiとEMTのy widthの差の平均値とショット数の関係



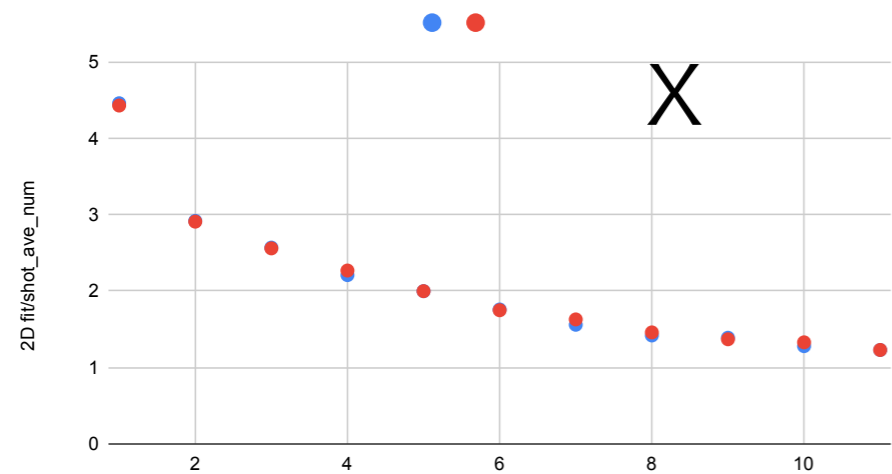
Center, blue:1D, red:2D
stdが1cmオーダーなので
効果は小さい

Width, blue:1D, red:2D
stdが1cmオーダーだけど
y では若干見えていると思う

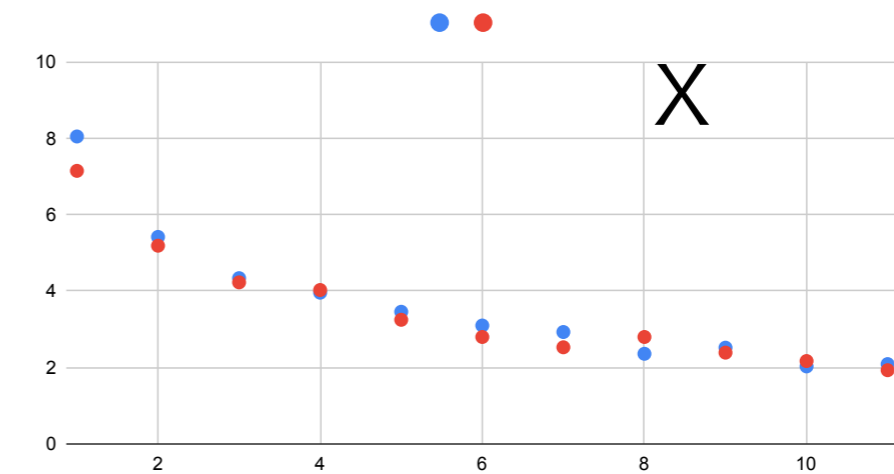
1D vs 2D diff std

Low intensity

2D fit/shot_ave_num



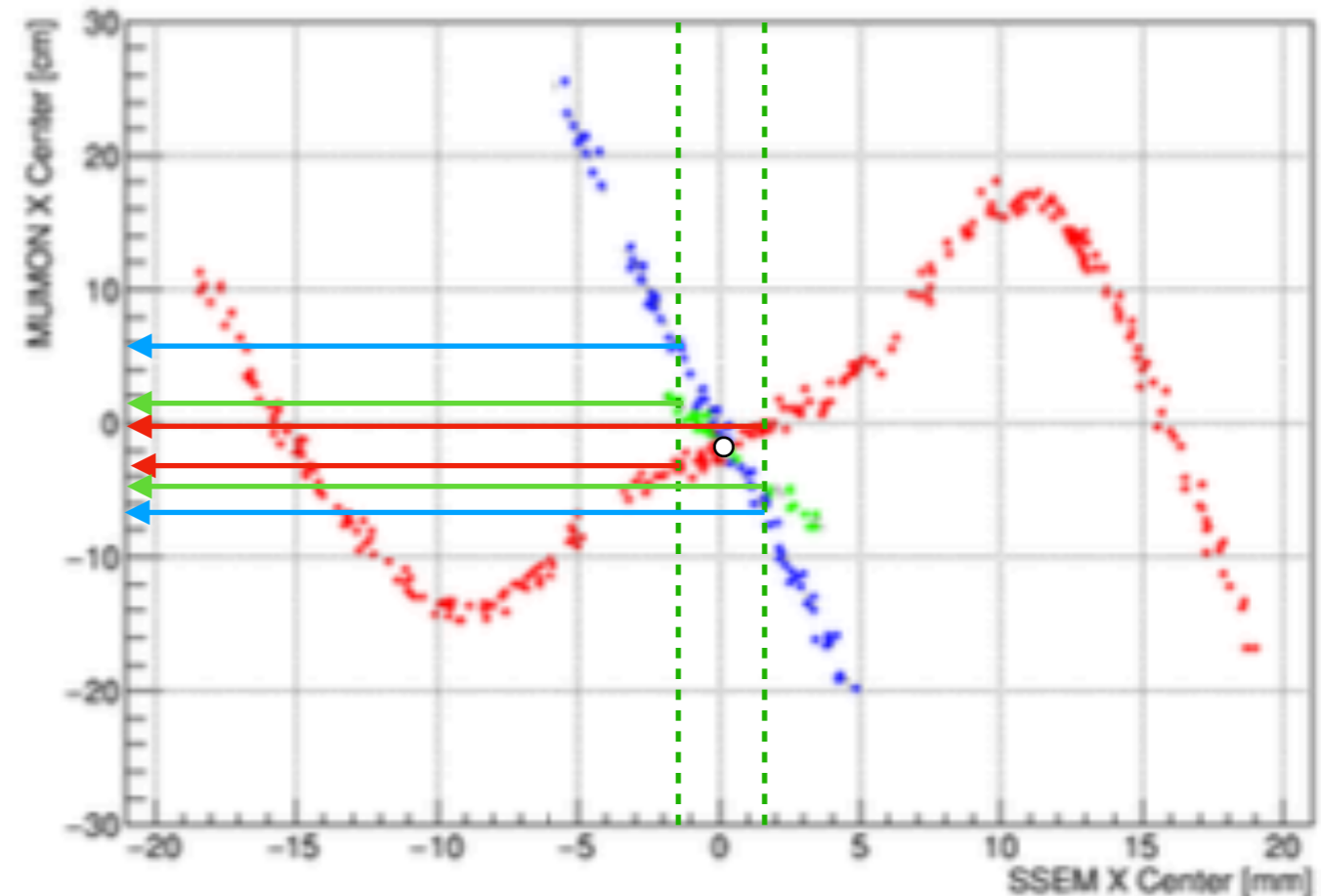
1D_blue vs 2D_red (x width diff deviation)



ターゲット保護のためのMUMON精度

Mumon X Center VS SSEM19 X Center

横軸:SSEM19のx
 (ターゲットから3.5m上流のモニタ)
 縦軸:MUMONのSiが測定したx
 赤 : horn off
 緑 : 250kA
 青 : 320kA



- ターゲット中心から±1.5mmが閾値(ビーム幅は約4mm)
- SSEM19でビームが±1.5mm動いたとする

Horn電流[kA]	MUMONの変位[cm]
0	±1.5
250	±3
320	±6

- MUMONの系統誤差は3 cmなのに、低強度で1.5cmを要求するのはなぜ？
- →要求しているのは**センサーの測定安定性**なので切り離して考えるべき
- 毎ショットで測定値が1.5cmばらつくと、本当にズレた場合と区別がつかないのでビームチューニングが難しい
- →また、Siと交換するので同じくらいの安定性を有してほしい

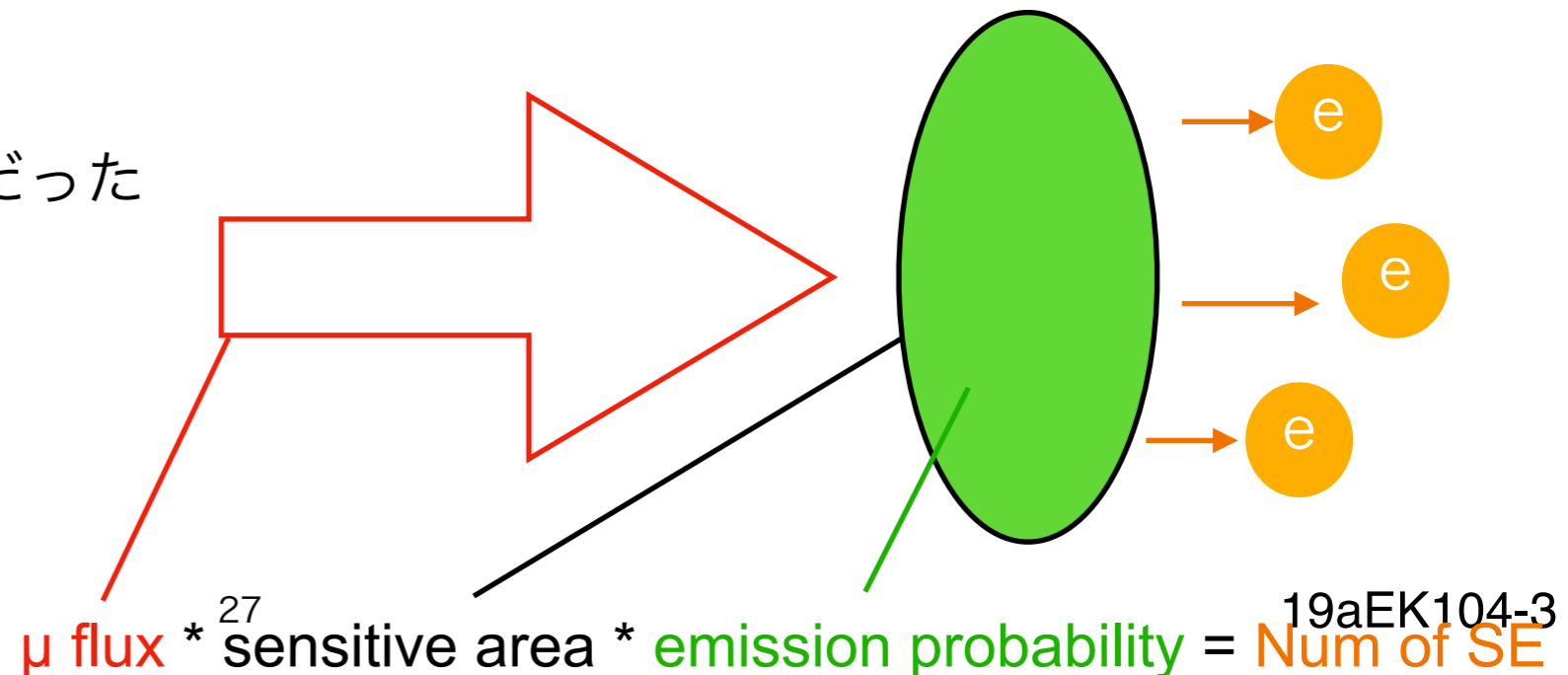
低強度EMT電荷のばらつきについて

[代表してEMT44(-800V)に注目]

- 低強度で100ショット
- この間Si測定を中心は
 $x=-1.99\pm 0.55$, $y=0.65\pm 0.65$
- この時Si44の電荷/CT $5*10^{10}$ は、
 2.05 ± 0.02 , 約1%程度
- これはビーム中心のばらつきかSiの電荷不定性に由来
- 対してEMTの電荷のばらつきは4.27%
- 二次電子放出の数揺らぎは $1/\sqrt{435}*100=4.8\%$

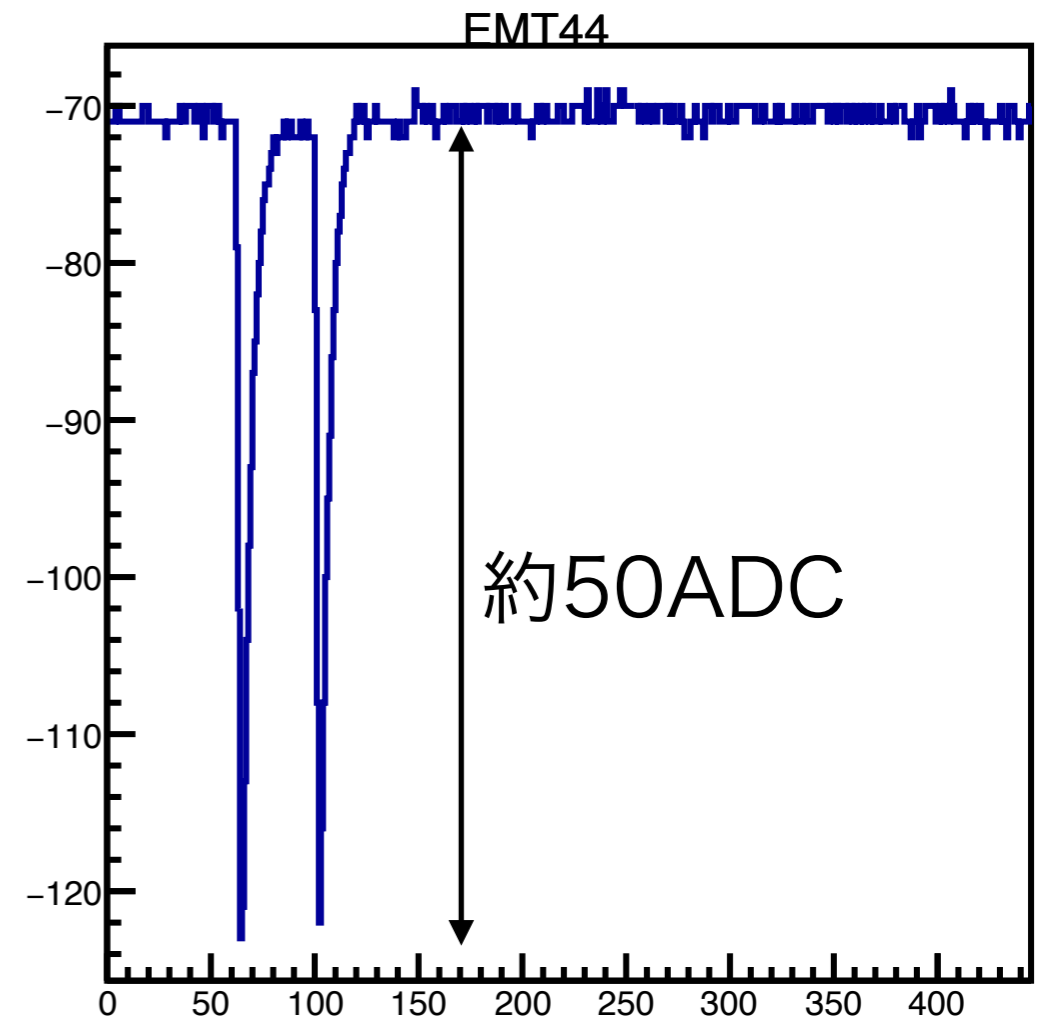
μ flux	$1.1*10^4/[cm^2]/$ $10^{11}[proton\ on\ target]$
sensitive area	0.5[cm ²]
SE emission prob.	0.08
Proton on target	$7.9*10^{11}$
Num. of SE	435

- [その他のEMT]
- EMT74の電荷のばらつきは5.69%だった
- Si74とSi44の電荷比は約0.8
- フラックスも0.8倍とする
- $1/\sqrt{(435*0.8)*100}=5.36\%$



ノイズによる不定性

- Pedestalのstdは大きく見積もって1ADC.
(accidentalを除く)
- 1バンチ37clock
- 2バンチビームの電荷計算は2バンチ分のtime windowのみ
(8バンチじゃない)
- 2バンチのADC積分値:
 $\sim 50 * 37 * 2 / 2 = 1850 \text{ADC}$
- Pedrms由来の不定性: $2 * \sqrt{37} = 12$
- $12 / 1850 * 100 = 0.65\%$
- 印加電圧を下げるとこの不定性はドミナントになってくる

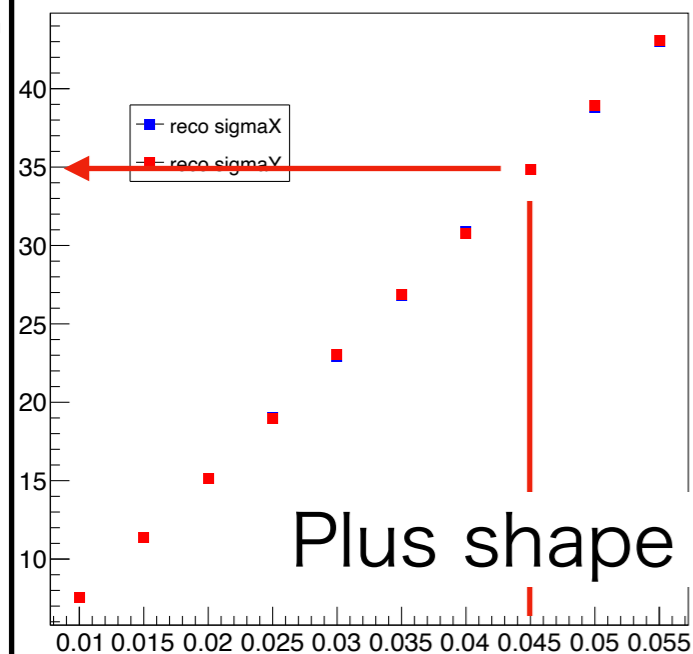


電荷不定性と中心精度の関係(MC)

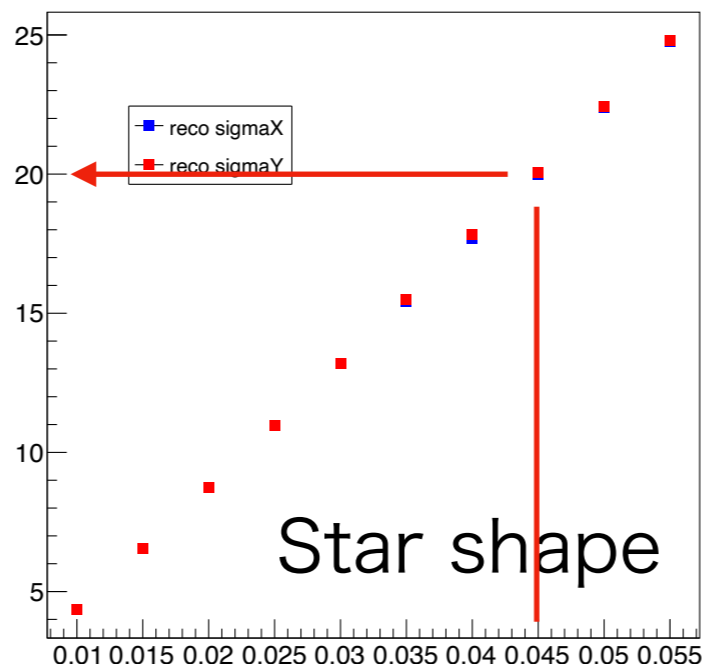
- 150cm*150cmの面に8mm四方のセンサーを49個配置
- ガウシアンを置く(中心をtrue position)
- センサー面の積分値を電荷とする。
- 指定した電荷の不定性をセンサーごとに適用する。
- 不定性適用後の値でガウシアンをフィッティング
- フィット結果とtrue positionの差をヒストグラムに詰める
- 86400回繰り返す(およそ24時間連続運転に相当)
- 電荷不定性を変える

Configuration	4.5%の時の差のバラつき[cm]
Plus shape	3.5cm
Star shape	2cm
Full channel	1cm

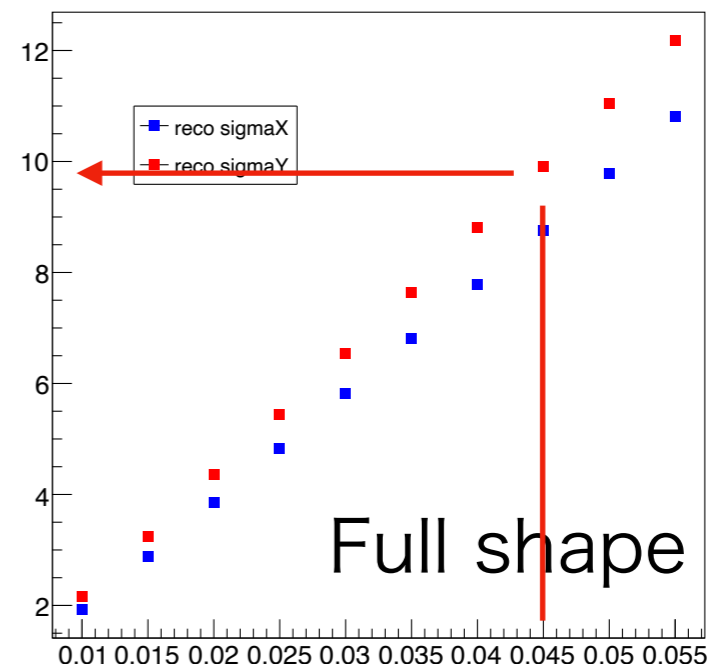
フィット結果とtrueの差のstd[mm]



電荷不定性[%]

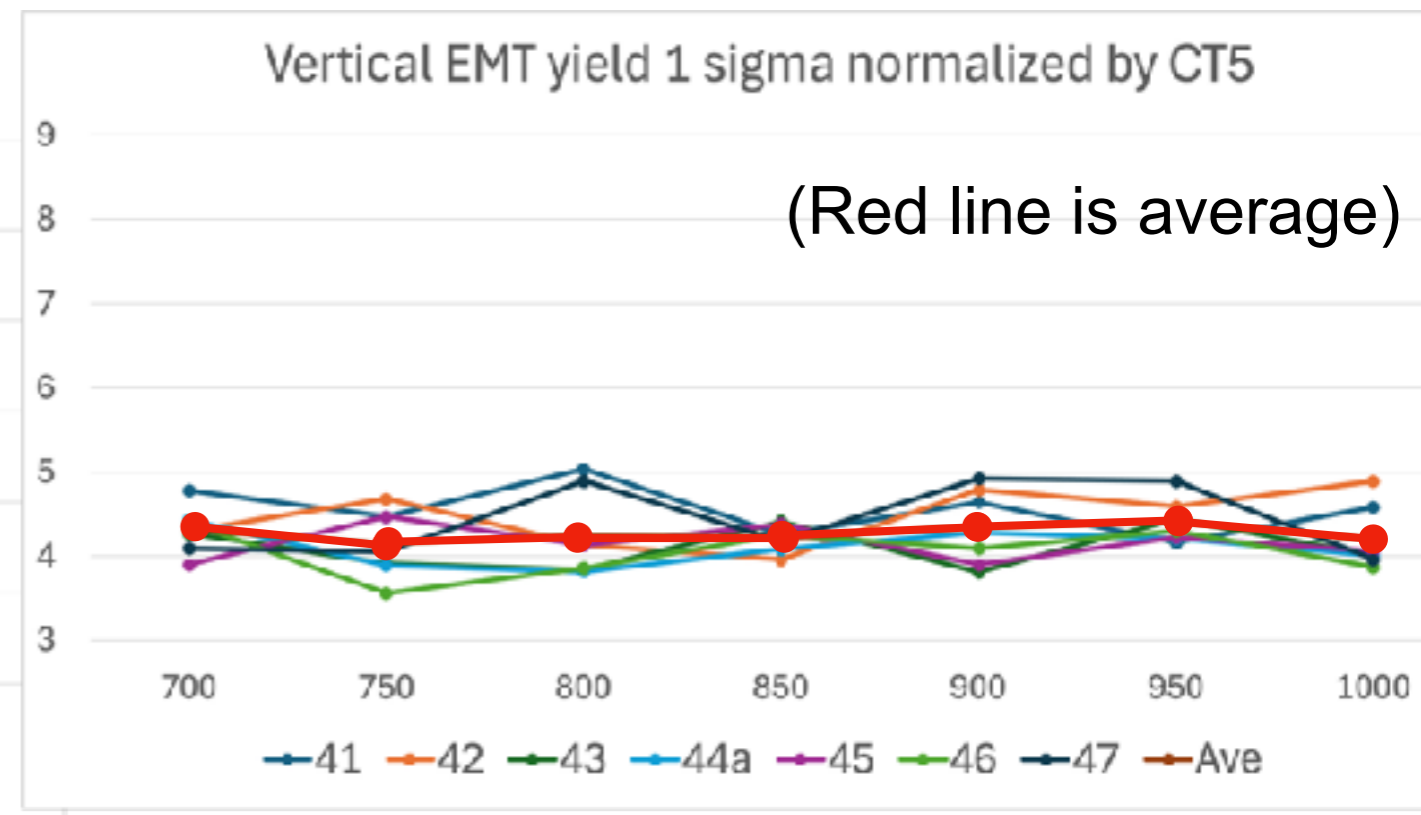
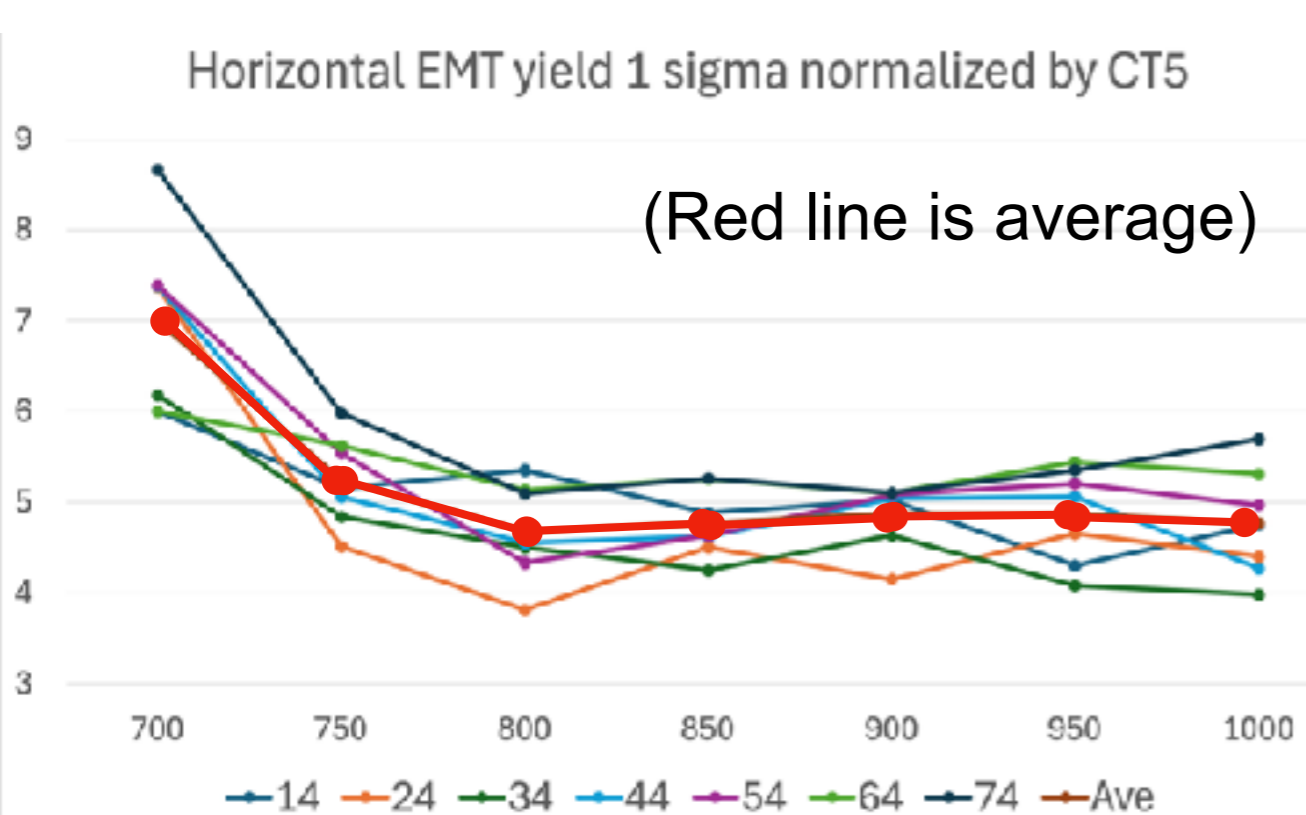


電荷不定性[%]



電荷不定性[%]

HV scan plot



- X axis : HV value
- Each colors : each EMTs.
- In Horizontal EMT, higher HV makes smaller sigma in the range of -700~-800V
- However, in both of EMT arrays, the sigma saturates below -800V.
- 通常の運用電圧以上ではほとんど二次電子の数揺らぎが支配

refEMTを使ったキャリブレーション

- 誤差の範囲で一致
- あるチャンネルはrefSiが毎回大きい
- 別のチャンネルではrefEMTの方が大きい
- キャリブレーション毎に変わるチャンネルも存在

