

# T2K実験ミュオンモニターの ための新型検出器・電子増倍管 の電子ビーム照射試験

2020/2/16

第26回 ICEPPシンポジウム

大阪市立大学 本條貴司

# 目次

- T2K
- ミューオンモニター
- 新型検出器
- ビームテスト
- まとめ

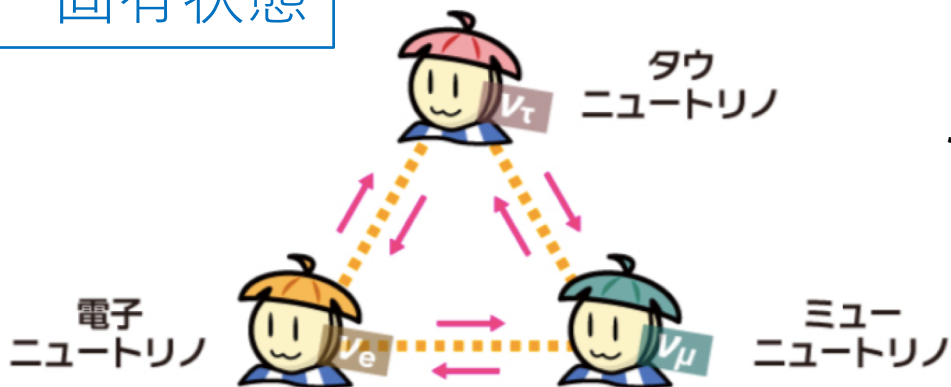
# ニュートリノ振動

- ニュートリノが量子状態の混合を通じて種類を変える現象
- 以下のような行列で混合
- 振動現象を記述するパラメータの精密測定が世界中で行われている

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

フレーバー固有状態

質量固有状態

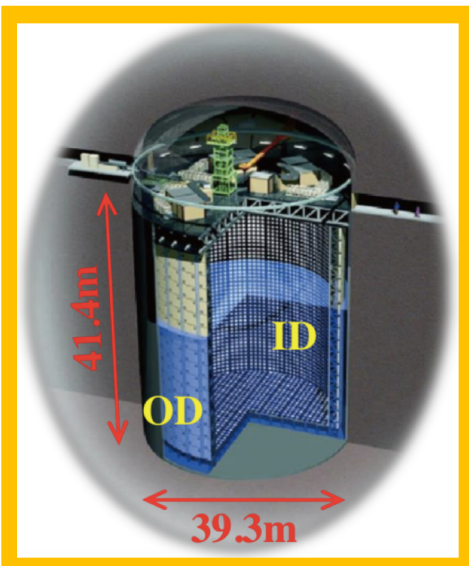


$$s_{ij} = \sin\theta_{ij} \quad c_{ij} = \cos\theta_{ij}$$

# T2K実験

T2K

スーパーカミオカンデ



J-PARC

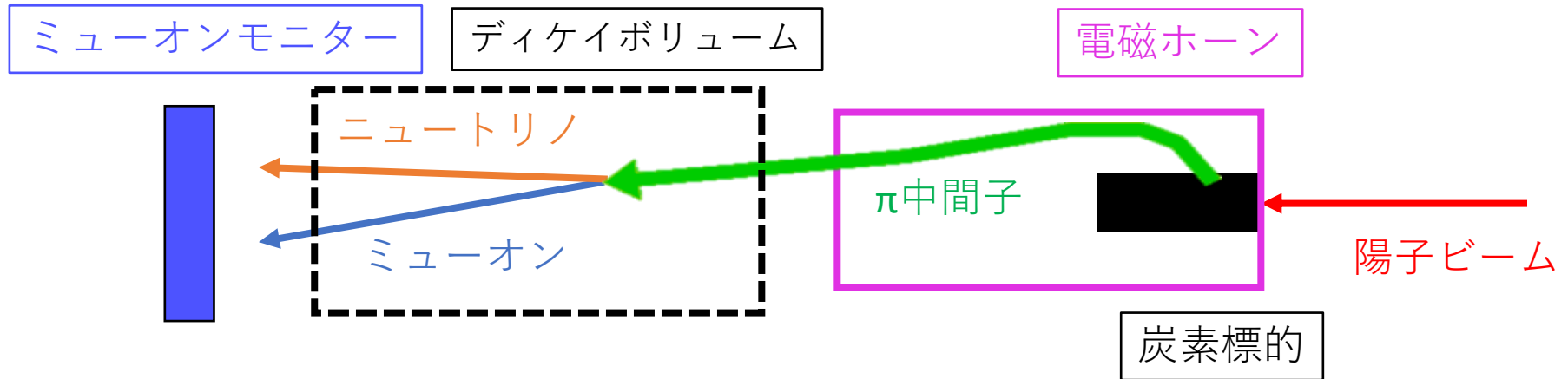
- J-PARCで生成したニュートリノをJ-PARCとスーパーカミオカンデで検出し、振動パラメータを精密に測定
- 現在は、物質優勢宇宙の謎を解明する鍵となるCP対称性の破れを探索中
  - これまでに世界最高感度でレプトンにおけるCP対称性の破れの兆候を得ている (有意度 $2\sigma$ )



# ビームラインとモニタリング

## ビームライン

1. 陽子ビームをグラフィット標的に照射
2. 発生したハドロン(主に $\pi$ 中間子)の方向を電磁ホーンで収束
3.  $\pi$ 中間子がニュートリノとミューオンに崩壊

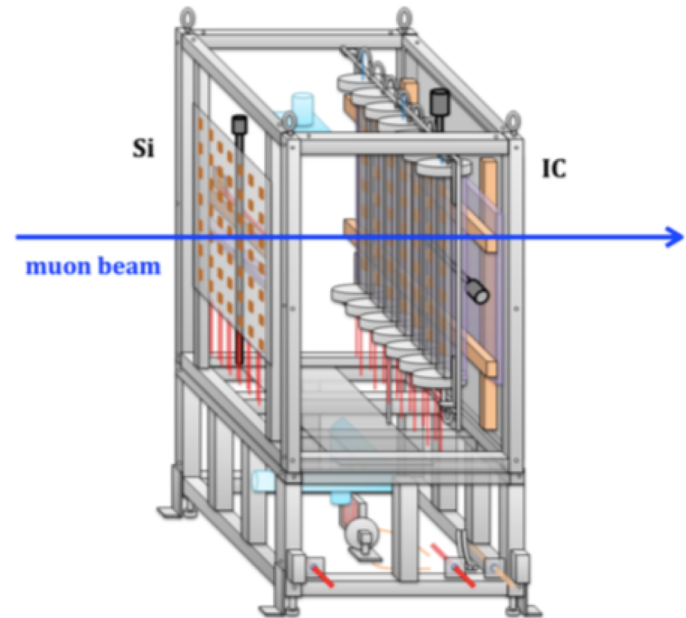
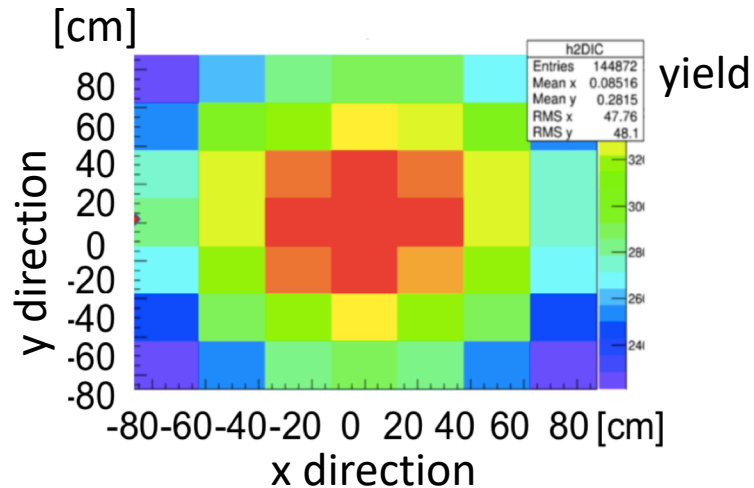


## ミューオンモニター

- $\pi$ 中間子は2体崩壊のため間接的にニュートリノビームの測定が可能
- 標的後に生成された2次ビームのリアルタイムモニタリングが唯一可能

# ミュオンモニター

- 2種類の検出器  $7 \times 7$  chで  $150 \times 150 \text{ cm}^2$  をカバー
  - シリコンPINフォトダイオード (Si)
  - イオンチェンバー (IC)

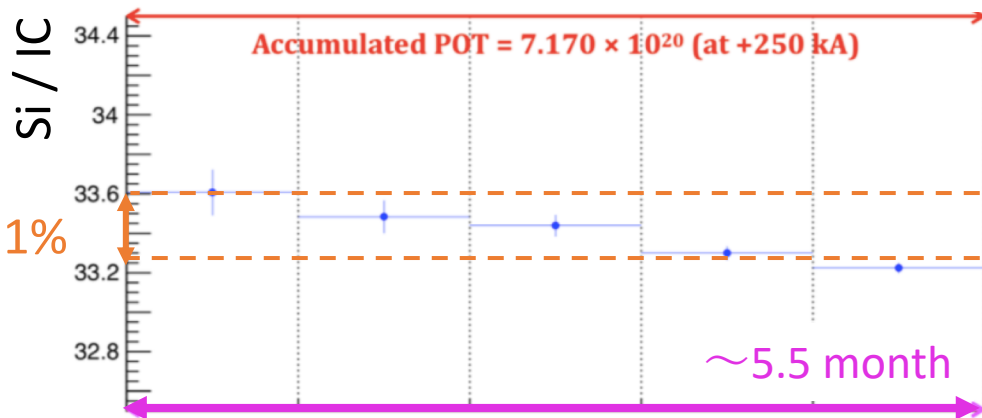


- 2010年の実験開始以降重要な役割を果たしてきた
- 統計誤差の削減のためビームのアップグレードが計画中

加速器ビーム強度 :  $500 \text{ kW} \rightarrow 1.3 \text{ MW}$  (ビーム強度  $\times 2.6$ )  
電磁ホーンの電流 :  $250 \text{ kA} \rightarrow 320 \text{ kA}$  (ビーム強度  $\times 1.1$ )

# 現状の問題点

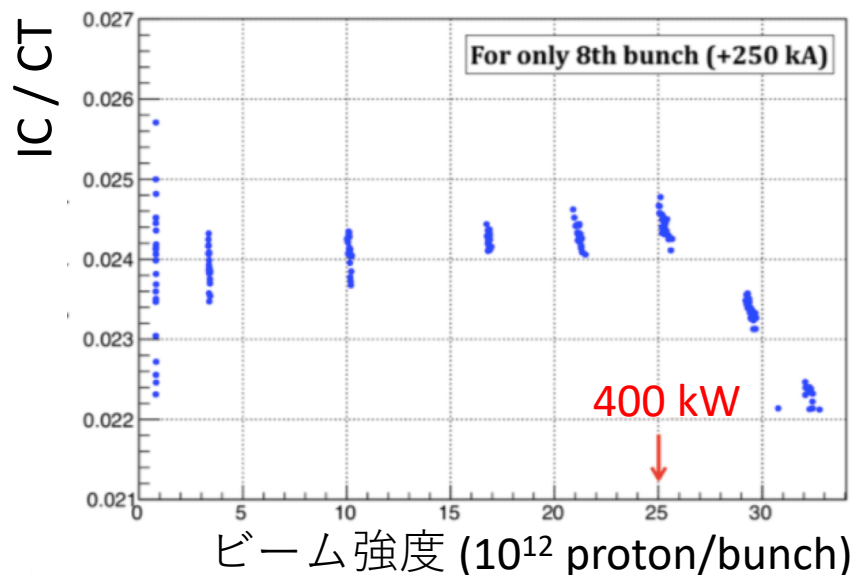
SiとICの信号比 (ICは0.2%程度で安定)



Si

485 kW, 250 kAで5.5ヶ月照射した結果、信号量が1%程度減少 (要求量は3%以内)

ICの信号/陽子ビーム強度 vs. 陽子ビーム強度

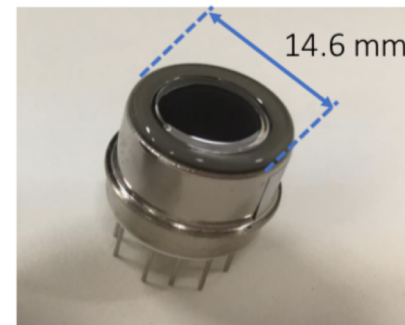


IC

電子イオンペアが多数作られることによって、400 kW以上で信号収量が減少する効果が見られた

-> 新しい検出器の研究を行なっている

# 新型検出器



- 電子増倍管 (EMT)

-> 既検出器に比べ高い放射線耐性を持つと期待される

電子増倍管 = 光電子増倍管 (PMT)の光電面素材を金属 (Al)に変更

- 信号は表面と各ダイノードでの二次電子を放出したもの
- 金属の方が放射線耐性が高い

PMT (と EMT)には二次電子放出率を上げるためにダイノードにアルカリ金属-Sbが塗布されている。

-> アルカリ金属-Sbは放射線劣化の原因となる

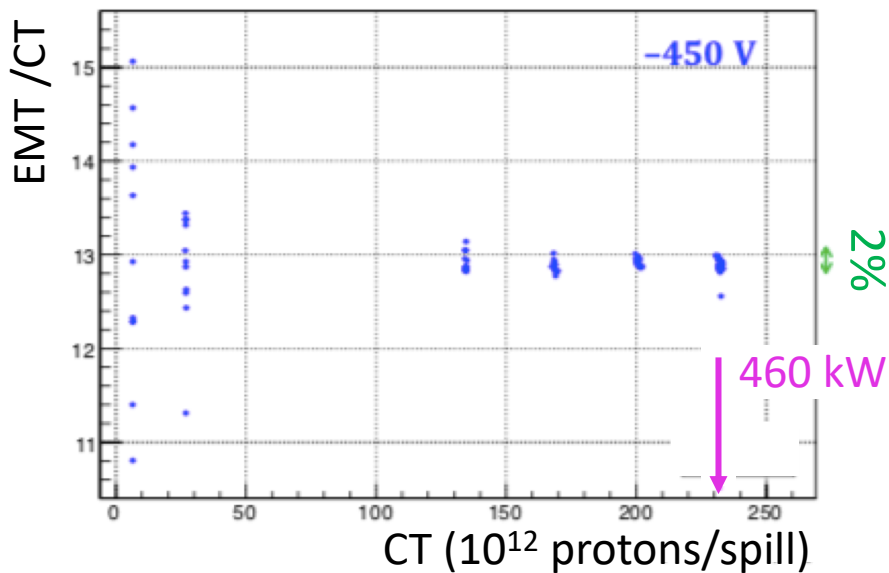
-> アルカリ金属-Sb無しのEMTの信号も研究

アルカリ金属-Sb無しのゲインは有りと比べ $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 倍と想定

# T2K実験サイトにおけるテスト結果 2016年11月～2017年4月 2017年10月～2018年5月

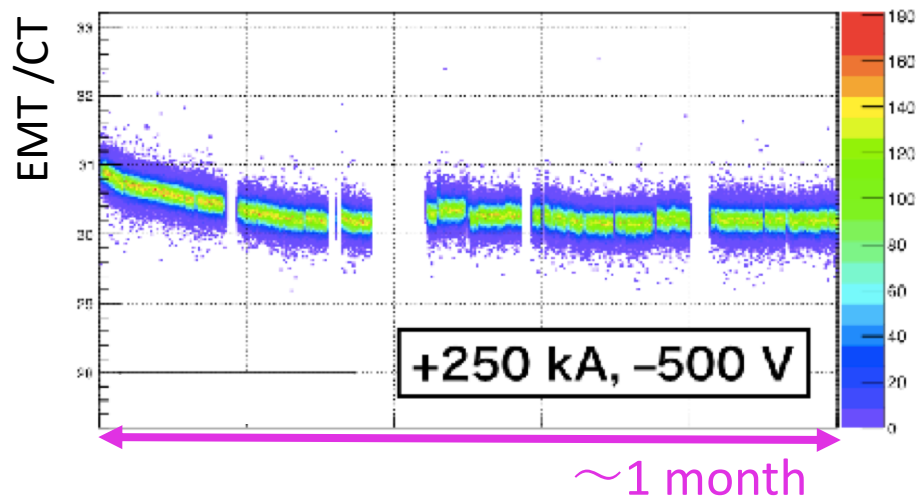
Y. Ashida et al Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 103H01

## EMTの線型性



- 250 kW ~ 460 kWの範囲で1%程度で線型性を保持
- 電圧印加直後から信号が5%程度低下
- その後は1%程度で安定(約2ヶ月)

## EMTの安定性



現在のT2Kビームに対する結果は良好で、将来の検出器候補として有望

-> 将来強度による性能評価が必要

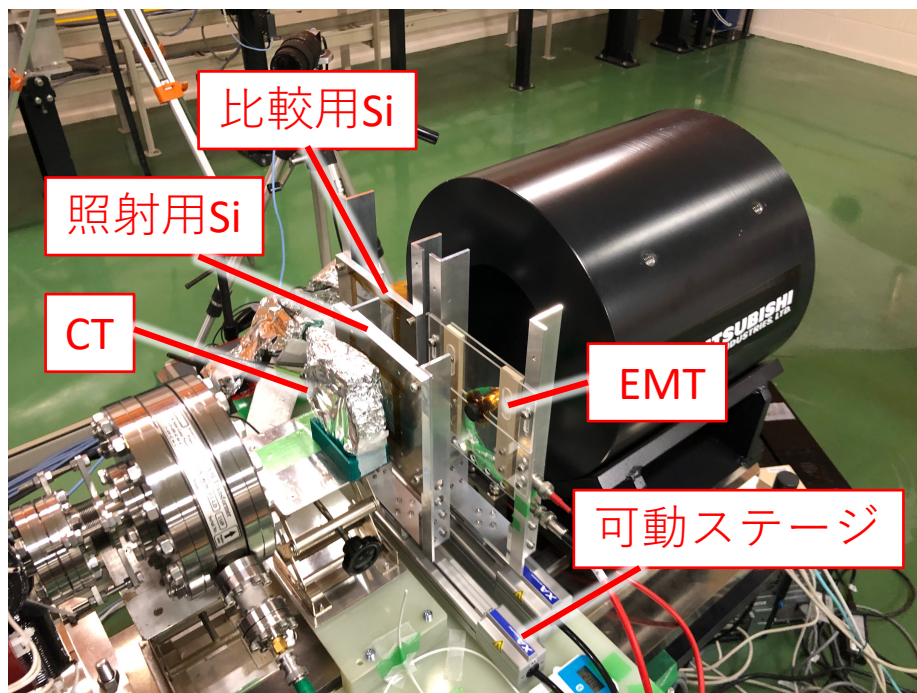
# ビームテスト

目的：将来強度における性能評価 (線形応答性、安定性)

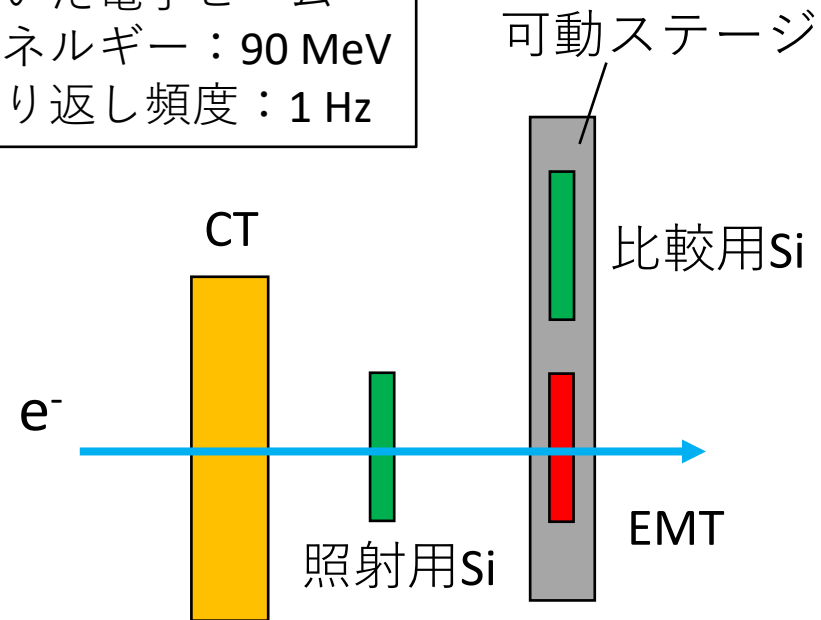
2019年11月にELPHにおいて電子ビームによるビームテストを行った  
異なる強度のビームを交互に照射

高強度 (1-10 nA) : J-PARCのRun数ヶ月分を数回に分けて照射

低強度 (0.1-1 pA) : Si、EMTの性能を測定



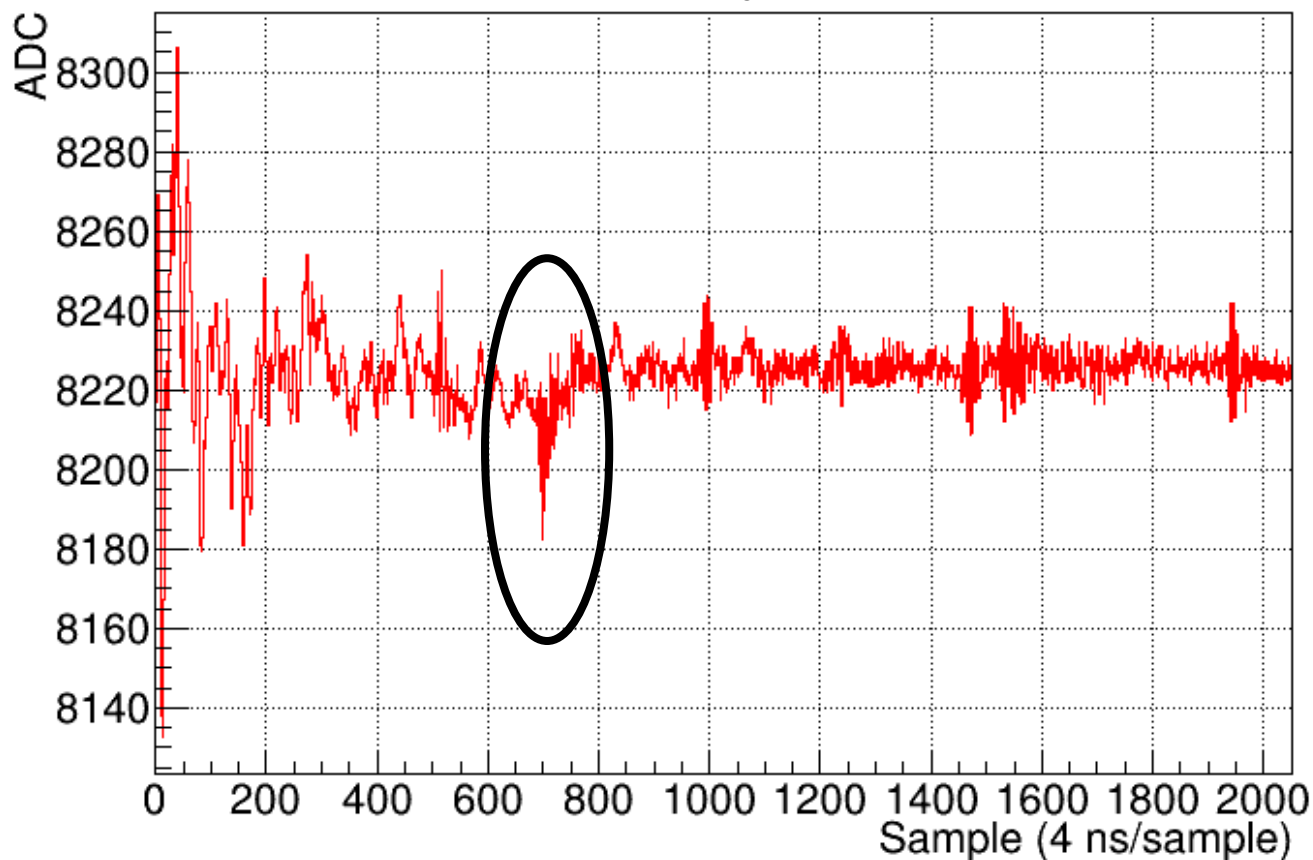
用いた電子ビーム  
エネルギー：90 MeV  
繰り返し頻度：1 Hz



# アルカリ金属-Sb無しEMTの信号

アルカリ金属-Sb無しEMTの信号を初めて確認

現在のJ-PARC強度におけるEMTの信号

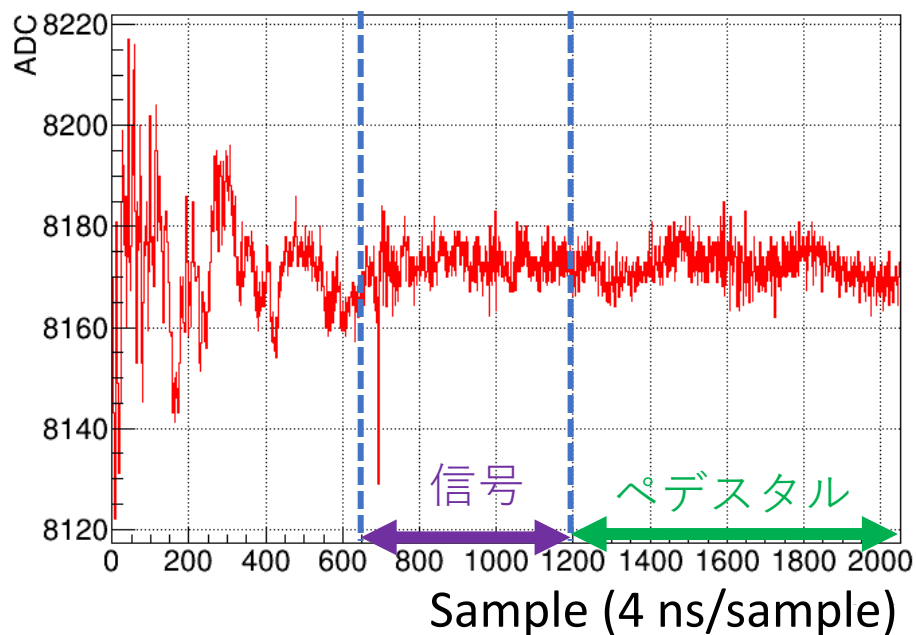


印加 1000 V  
アンプ × 10

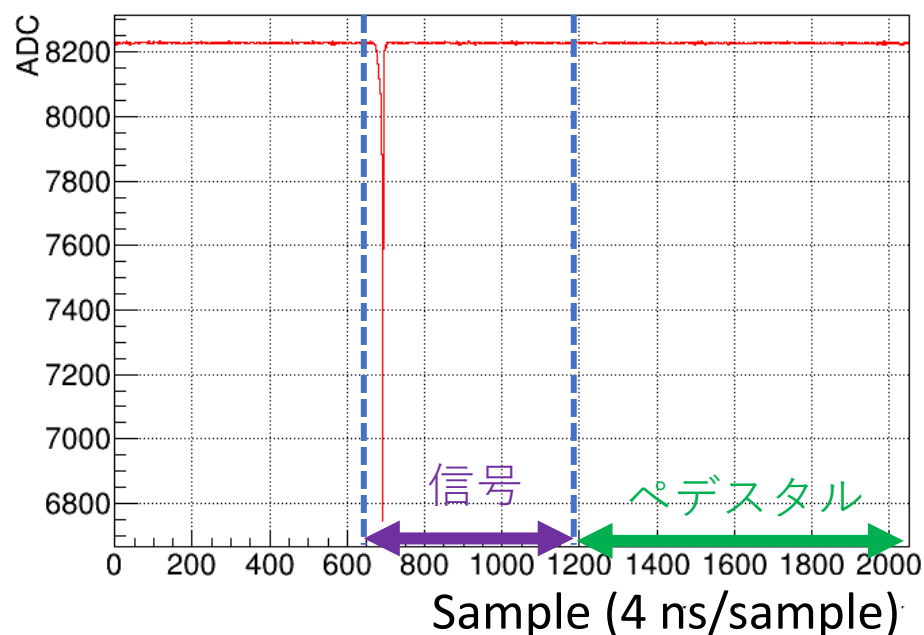


# 信号の解析

CTの信号



EMTの信号



1. FADCのサンプルの#1200以降からペDESTALを決定
2. #650～#1200のADCカウントのうち最小のADCカウントを選び、ペDESTALとの差を信号とした



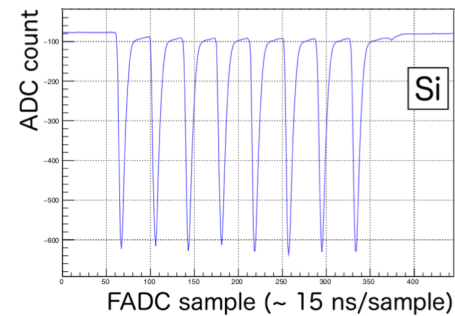
# ビーム照射量の計算

- ELPHでの照射量をJ-PARCの運転量に換算

CTの信号から、大強度照射時の照射量を計算し、  
 ビームプロファイルの測定結果から、電子ビームフラックス ( $e^- flux$ )を計算

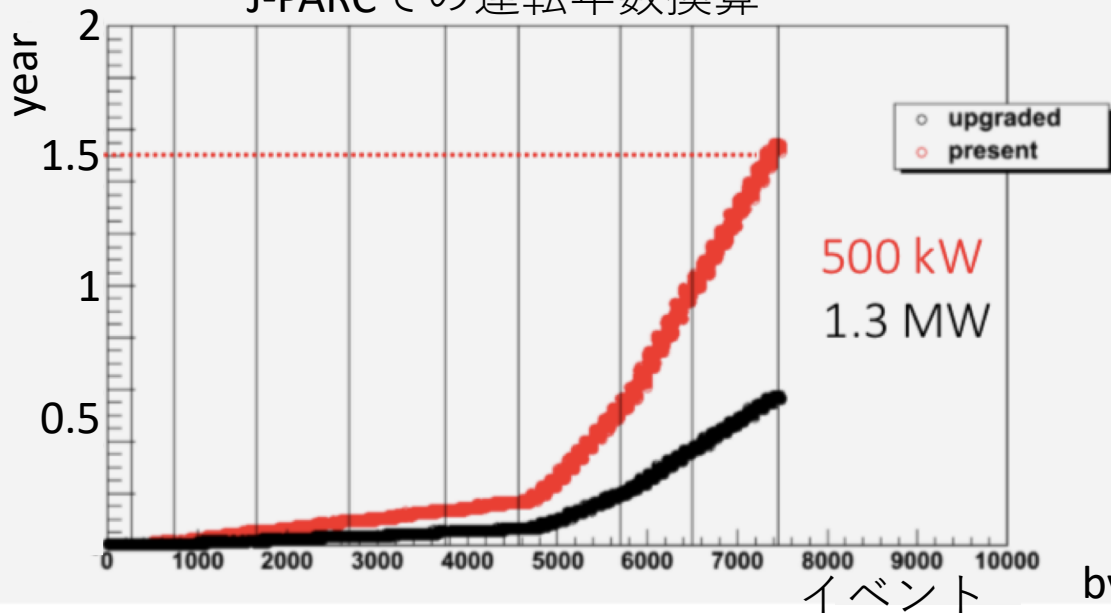
現在のJ-PARCのミュオンフラックス： $2.8 \times 10^7 / cm^2 / spill (3\mu s)$

$$\text{運転年数} = \frac{e^- flux [ / cm^2 ]}{2.8 \times 10^7 / cm^2 / 2.5s} \div (86400 \times 100) \quad (\text{T2K運転1年} = 100 \text{日})$$

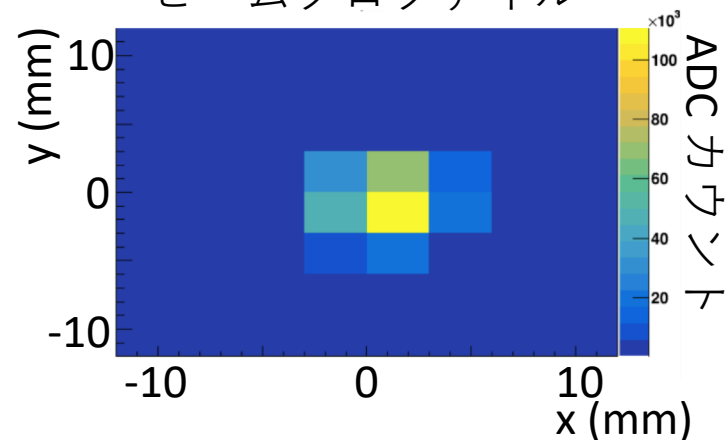


J-PARCのビーム(1 spill)

J-PARCでの運転年数換算



ビームプロファイル

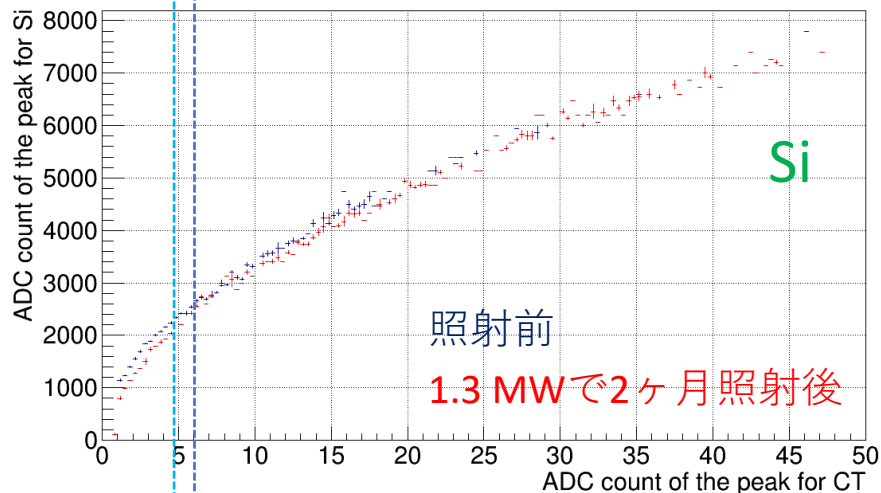


# SiとEMTの線型性

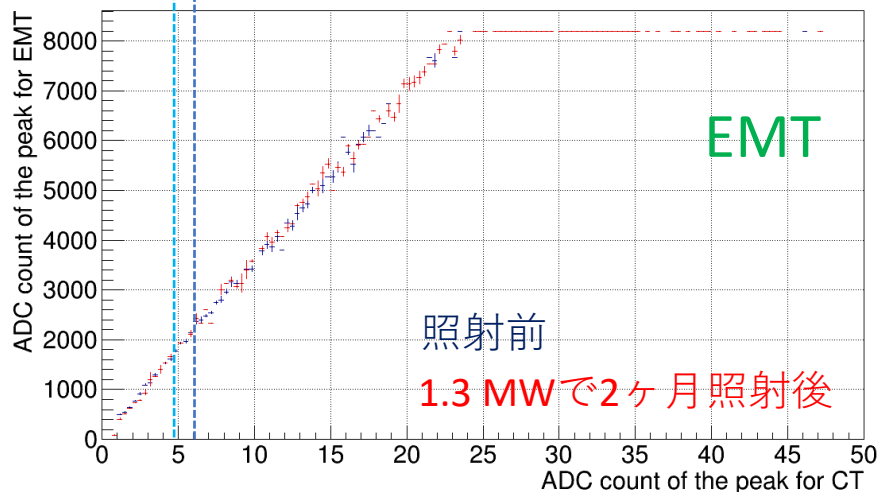
500 kW

1.3 MW

linearity for Si (start and end)



linearity for EMT (start and end)



## Si

- Siは強度が上がるにつれて線型性が崩れていく傾向が見られた
- 信号が下がる傾向が見られた

## EMT

- 現在から将来にかけてのビーム強度に対して線形性が見られた
- 照射後の信号の低下はほとんど見られなかった

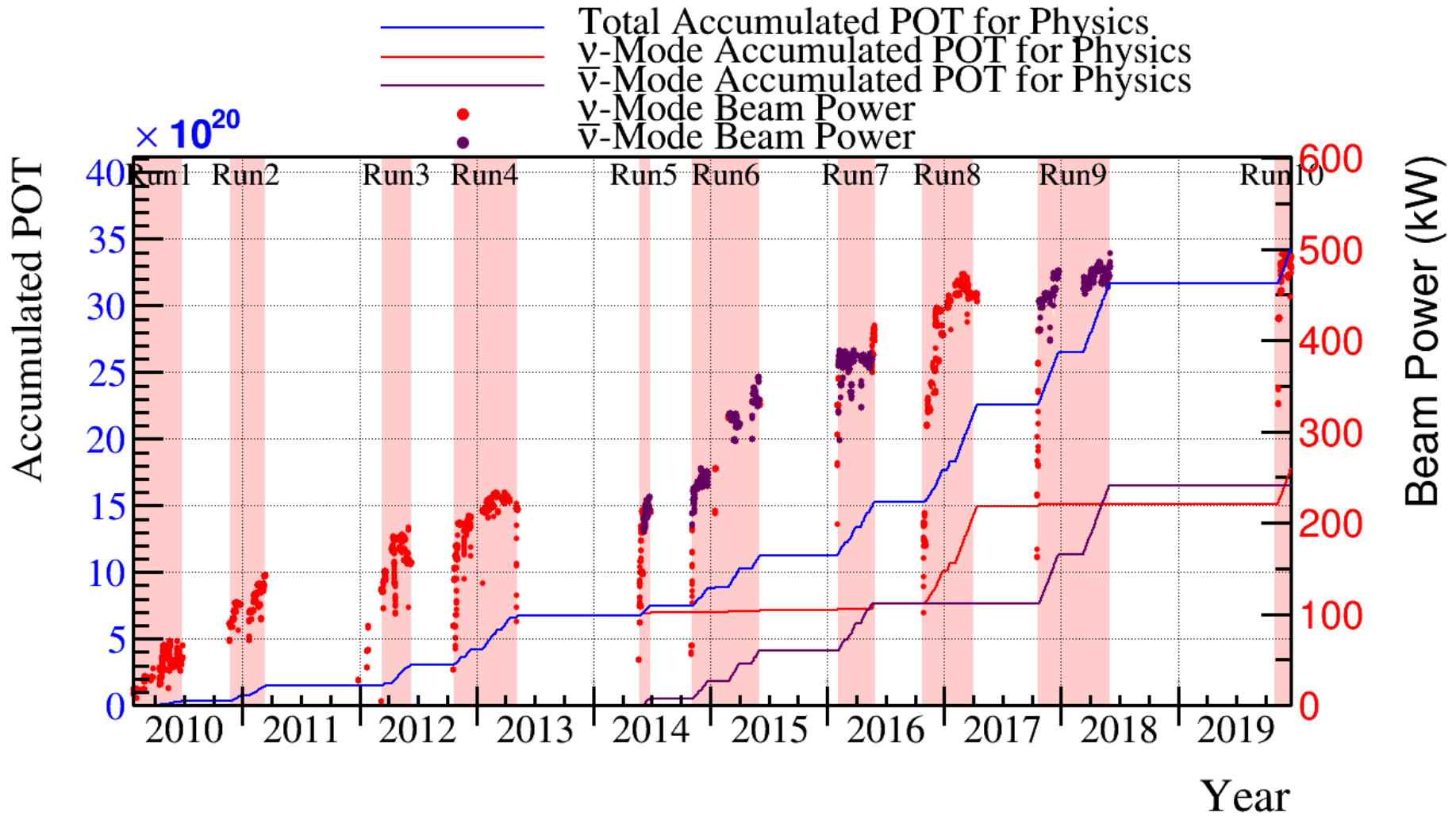
# 今後の計画

- EMTの安定性の評価
- 今年2回目のビームテストを予定している  
実施予定内容
  - 将来強度における統計量の増加
  - アルカリ金属-Sb無しEMTの将来強度付近の線型性の調査
  - EMTの最初に5%信号が低下することの調査
  - セットアップのアップグレード

# まとめ

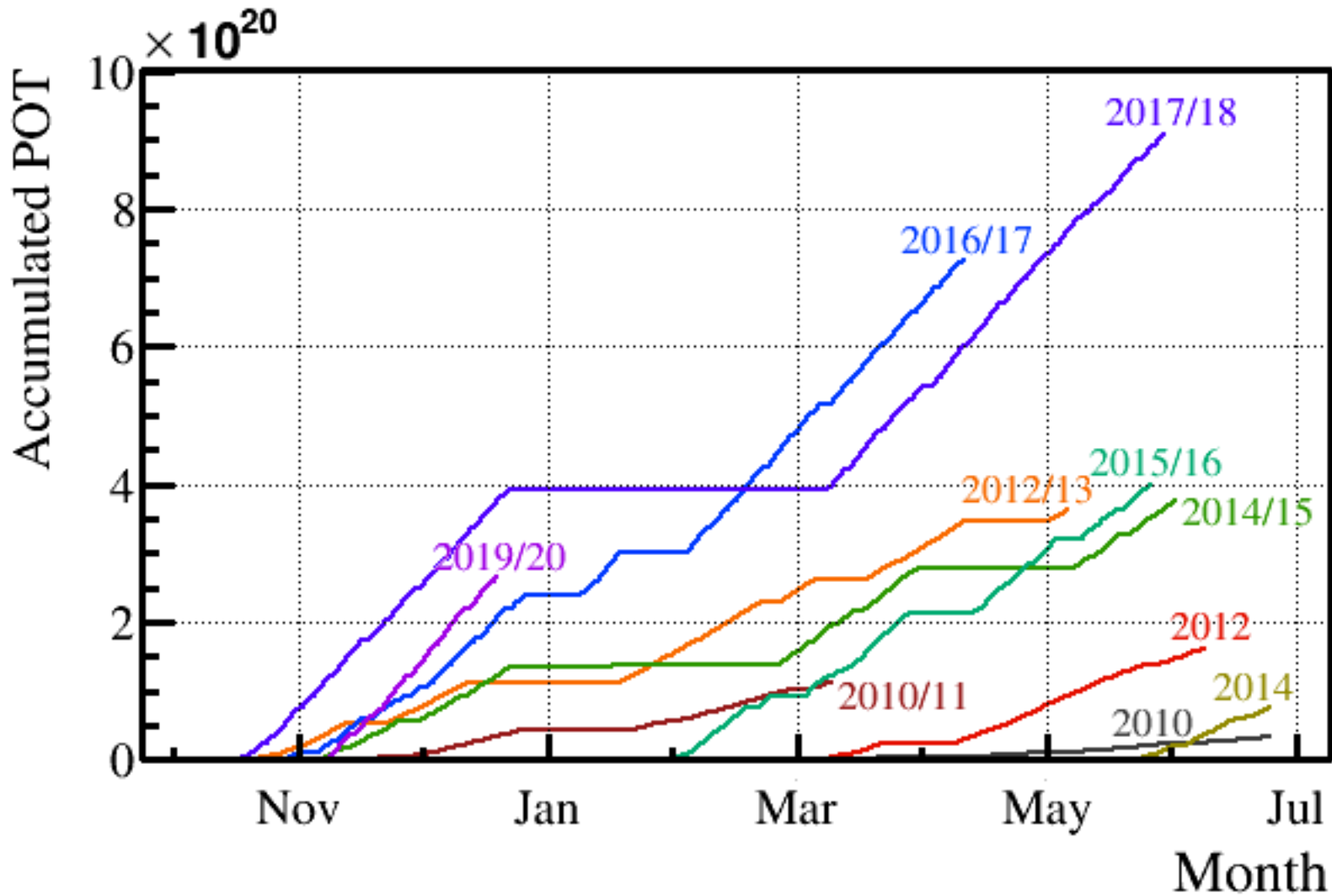
- EMTは新しいMUMONの良い検出器候補
- アルカリ金属-Sb無しのEMTの信号を初めて確認
- EMTの線形性はSiに比べ非常に良い
- EMTの安定性はSiに比べ良い傾向が見られる
- 引き続き解析を続けていく
- 次回のビームテストを今年に行う予定

バックアップ



23<sup>rd</sup> Jan. 2010 – 19<sup>th</sup> Dec. 2019    ν-mode     $1.78 \times 10^{21}$  (51.86 %)

POT total :  $3.43 \times 10^{21}$                     ν̄-mode     $1.65 \times 10^{21}$  (48.14 %)



※2019/20は途中経過

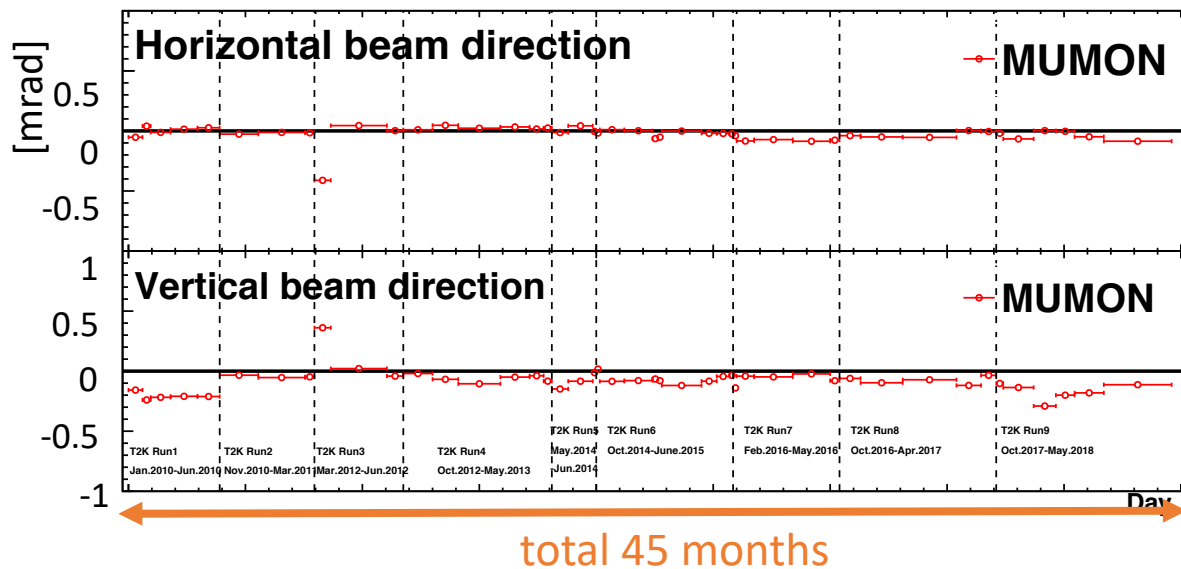
# MUMON

- 分解能

- ビーム中心  $< 0.3$  mm
- ビーム強度  $< 0.1\%$

K. Suzuki et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 053C01

## T2K全Runのビームの安定性





# J-PARCビームアップグレード

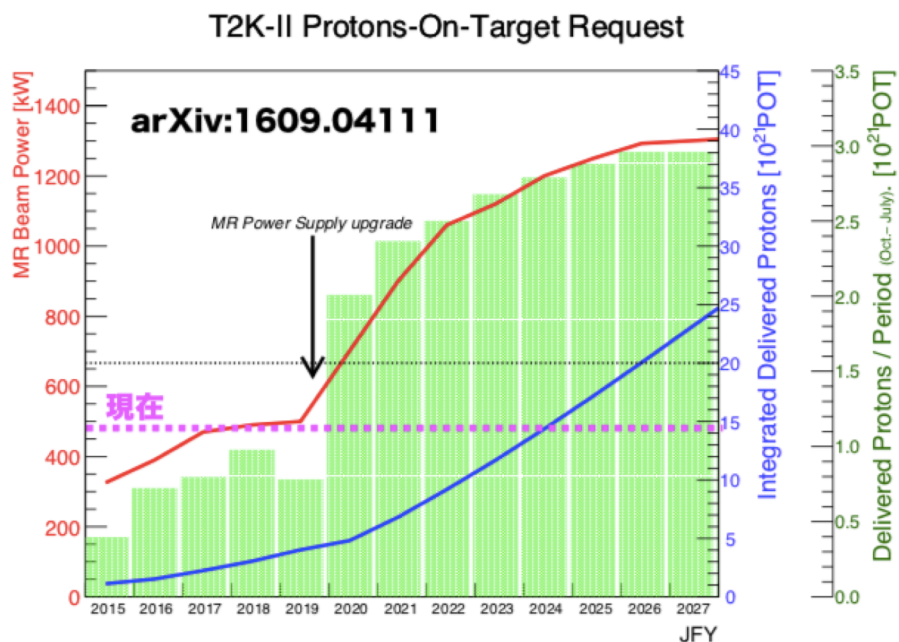
- ビーム周期 2.1379倍 (2.48 s -> 1.16 s)
- 陽子数 1.2692倍 ( $2.6 \times 10^{14}$  ppp ->  $3.3 \times 10^{14}$  ppp)
- >ビーム強度 2.7134倍

ビームパワー	周期	陽子数	バンチ毎の陽子数	RCSのビーム パワー相当
500 kW	2.48 s	$2.6 \times 10^{14}$ ppp	$3.3 \times 10^{13}$ ppb	780 kW
750 kW	1.32 s	$2.1 \times 10^{14}$ ppp	$2.6 \times 10^{13}$ ppb	610 kW
1.3 MW	1.16 s	$3.3 \times 10^{14}$ ppp	$4 \times 10^{13}$ ppb	1 MW

ppb (proton per bunch)  
ppp (proton per pulse)

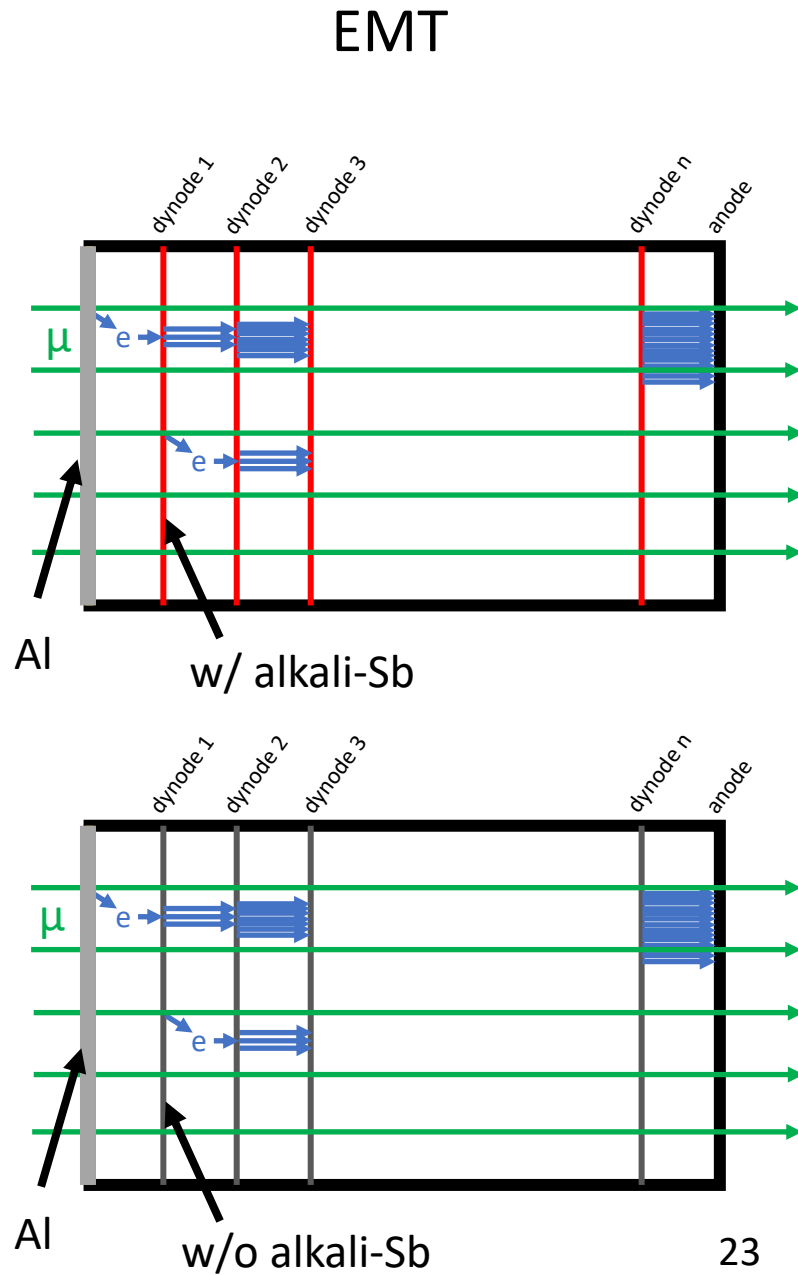
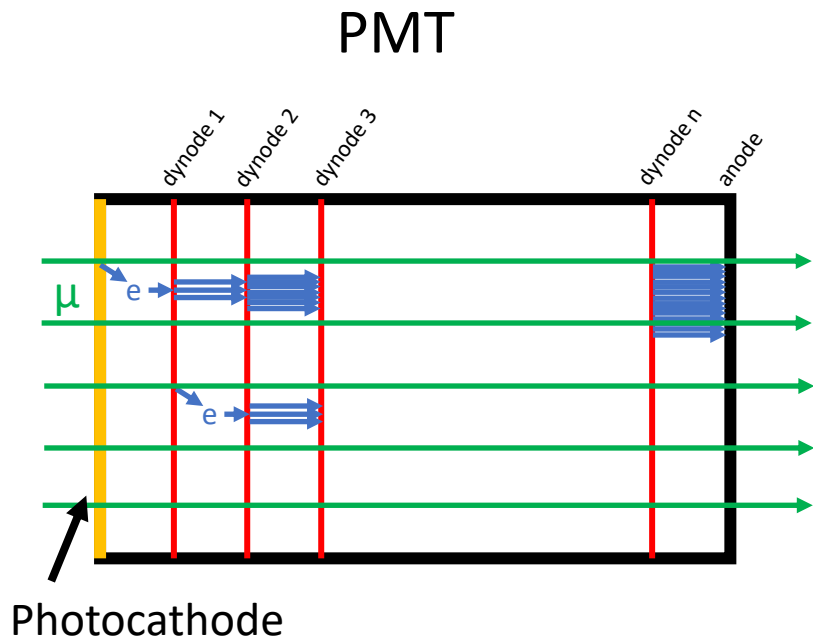
# ビームのアップグレード

- 加速ビーム強度(485 kW → 1.3MW)
- 収束用電磁ホーンに流す電流(250 kA → 320 kA)
- SKからHKへ (有効部分 22 kt → 190 kt)



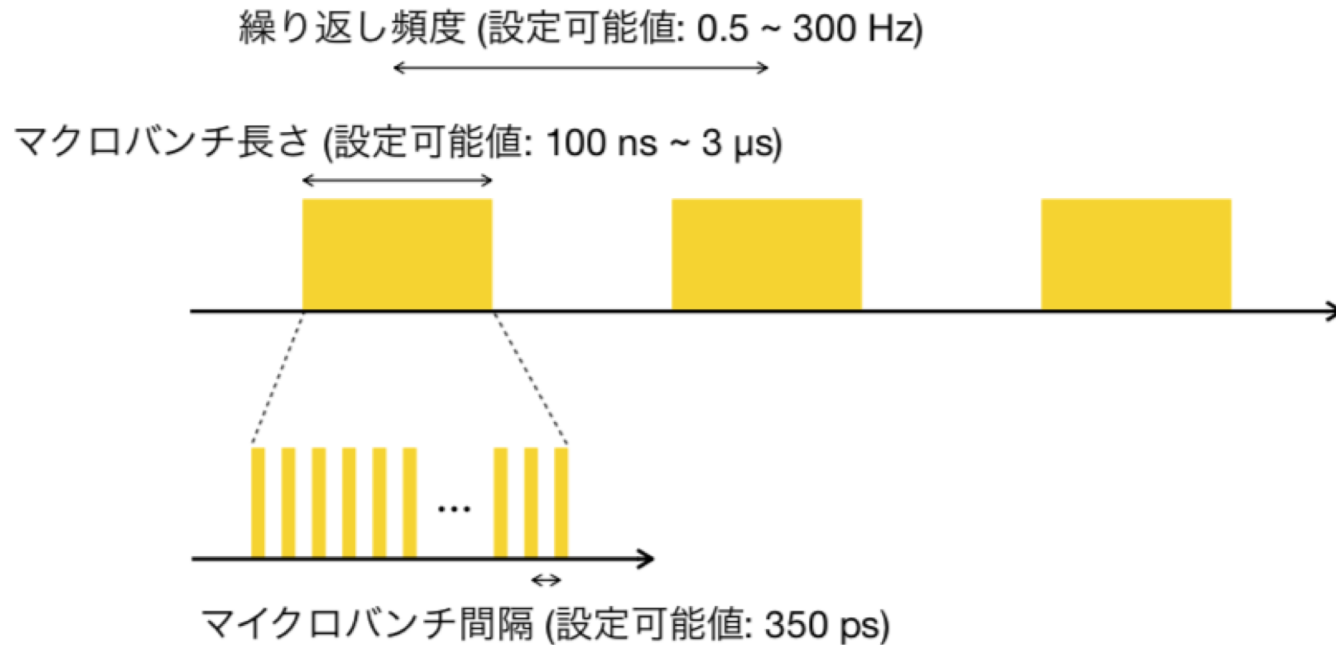
赤：メインリングのビームパワー  
青：累計の陽子の供給量  
緑：一定期間毎の陽子の供給量

ニュートリノのCP対称性の破れの探索感度を上げ、  
破れを $3\sigma$ で示唆することを目指す



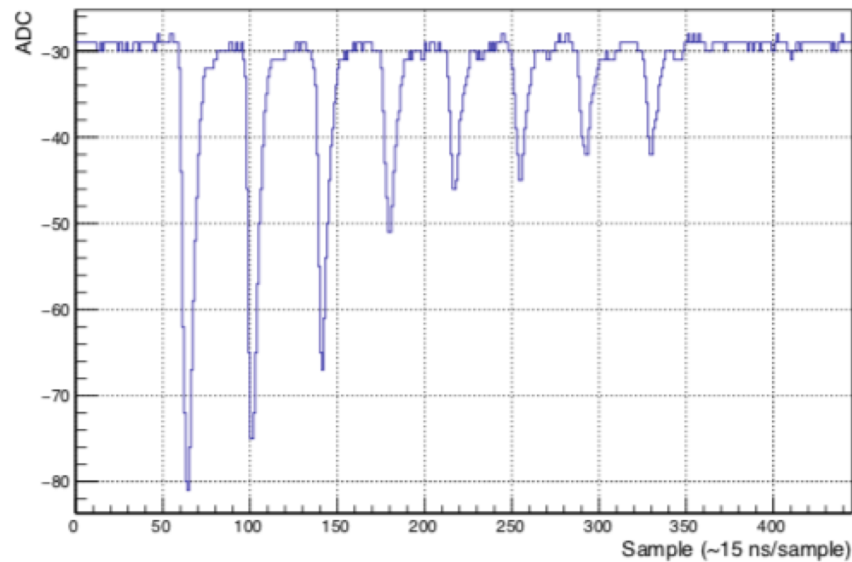
# 電子ビームのエネルギー構造

- エネルギー：90 MeV以上
- 繰り返し頻度:0.5～1 Hz

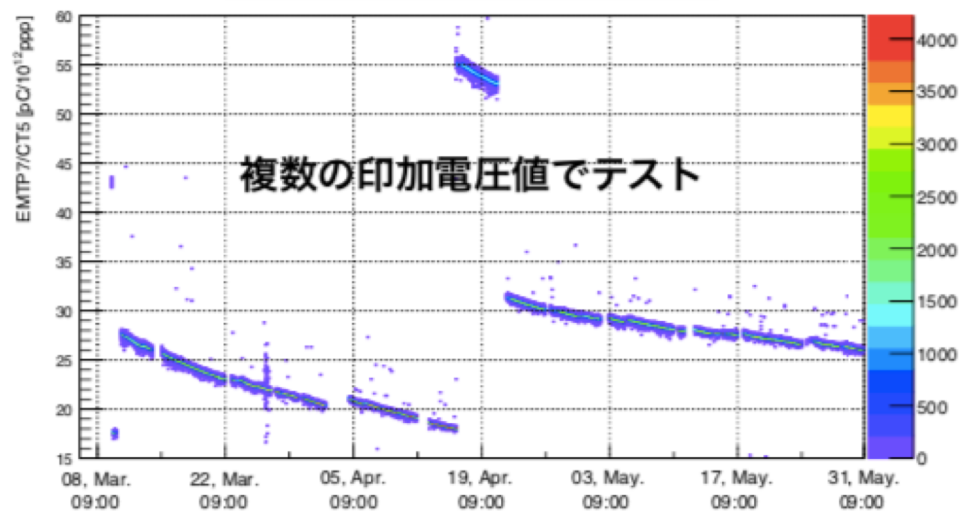


# PMTの試験の結果

470 kW, -250 kA, HV = -350 V

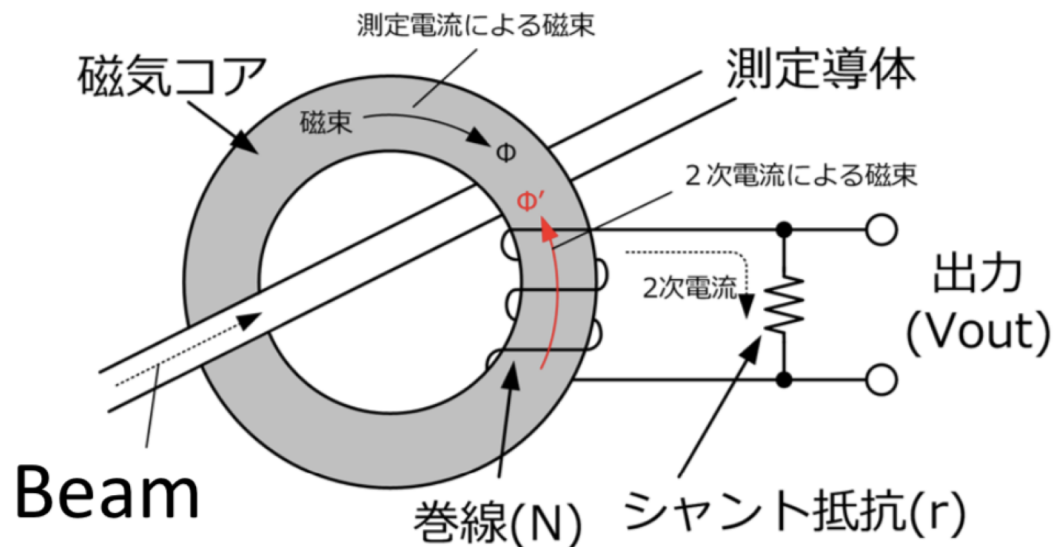
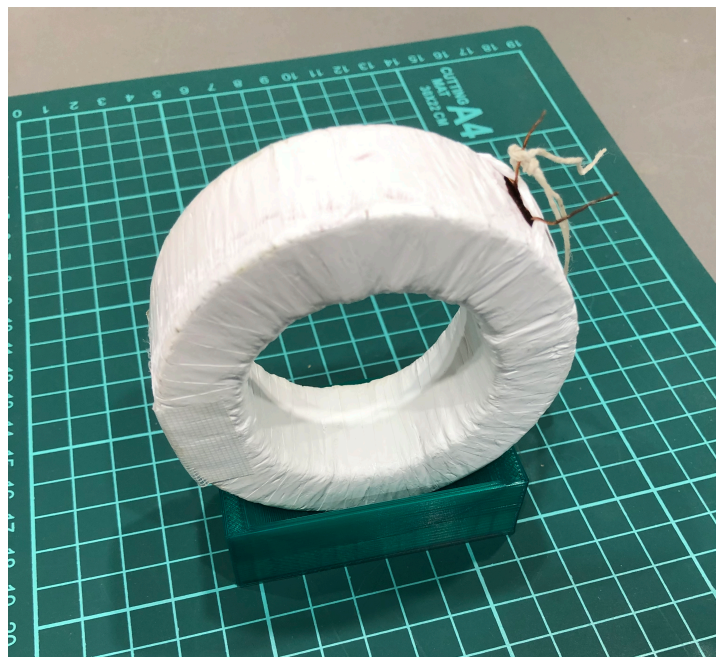


EMTP7 Yield (with HPS correction)



# CT (Current Transformer)

- ビーム強度を測定

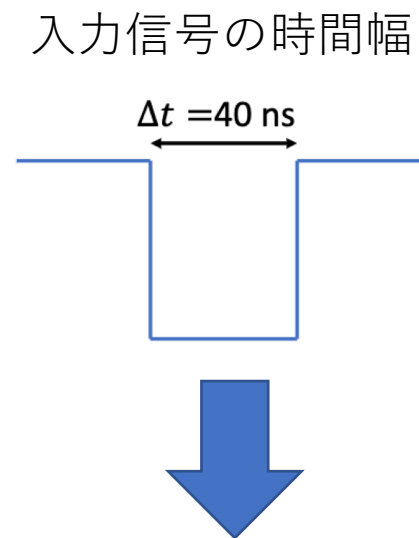
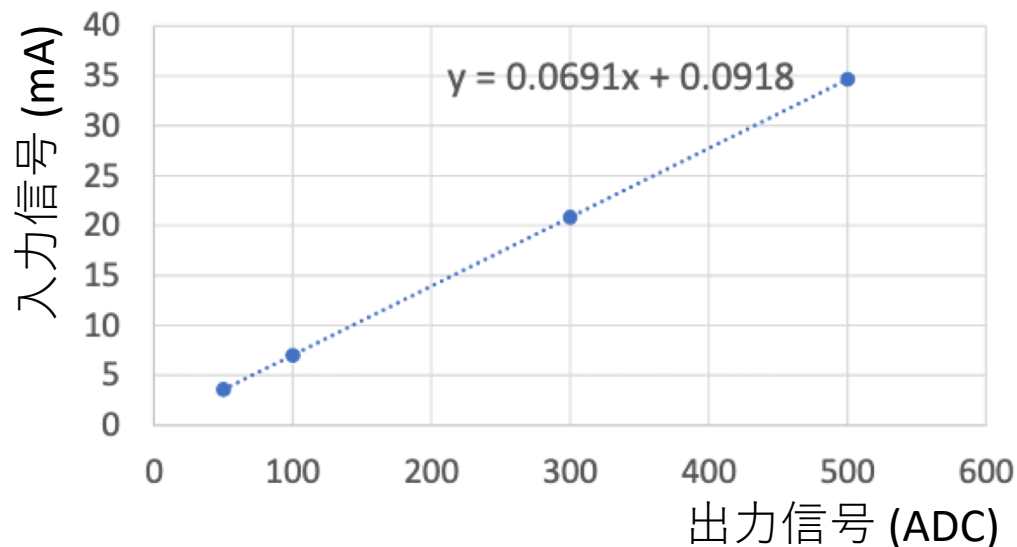


ビームテストで用いたものは1回巻き

	F7555G
コア内径 (mm)	51.0 ± 0.7
コア外径 (mm)	79.0 ± 0.7
コア厚さ (mm)	25.0 ± 0.7
有効断面積 (mm <sup>2</sup> )	146.3
平均磁路長 (mm)	205.0
AL 値 <sup>8</sup> ( $\mu\text{H}/N^2$ )	15.2 ± 30 %

# ビーム照射量の計算 (1)

- CTの信号から、ELPHでの照射量をJ-PARCの運転時間に換算した
  1. ビームテストにおけるCTの信号を再現し、その入力電流と出力信号を測定



2. 入力電流 -> 電荷量

電荷量  $Q[\text{pC}] = I[\text{mA}] \times \Delta t[\text{ns}]$

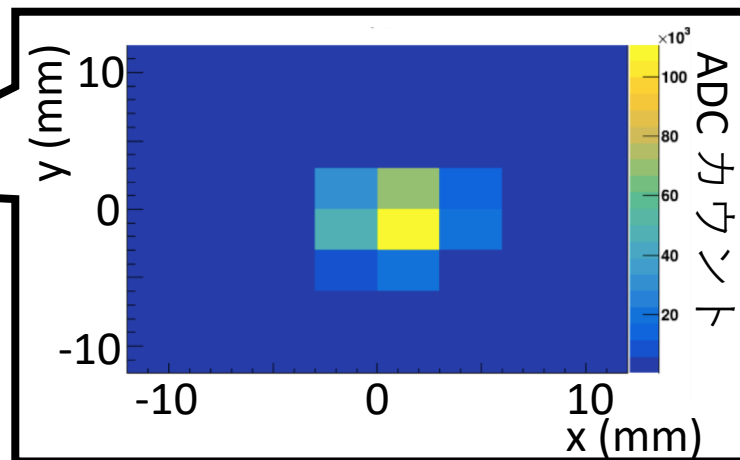
電子数  $N[\times 10^7] = \frac{Q[\text{pC}]}{1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]}$

# ビーム照射量の計算 (2)

## 3. ビームフラックスの計算

$$e^- \text{ flux} [\times 10^7 / \text{cm}^2] = \frac{N [\times 10^{-12}]}{(0.5 \text{ cm})^2 \pi}$$

現在のJ-PARCのミュオンフラックス：  
 $1.7 \times 10^7 / \text{cm}^2 / \text{spill} (3\mu\text{s})$

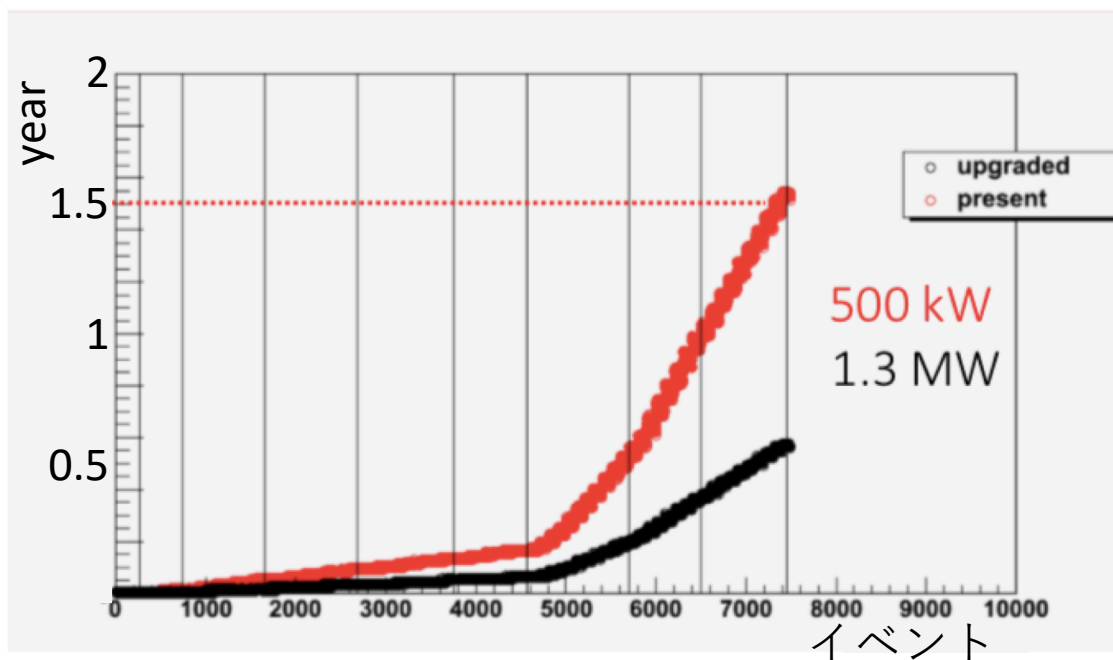


## 4. J-PARCでの運転年数 への変換

運転年数 =

$$\frac{e^- \text{ flux} [\text{/cm}^2]}{1.7 \times 10^7 / \text{cm}^2 / 2.5\text{s}} \div (86400 \times 100)$$

(T2K運転1年 = 100日)

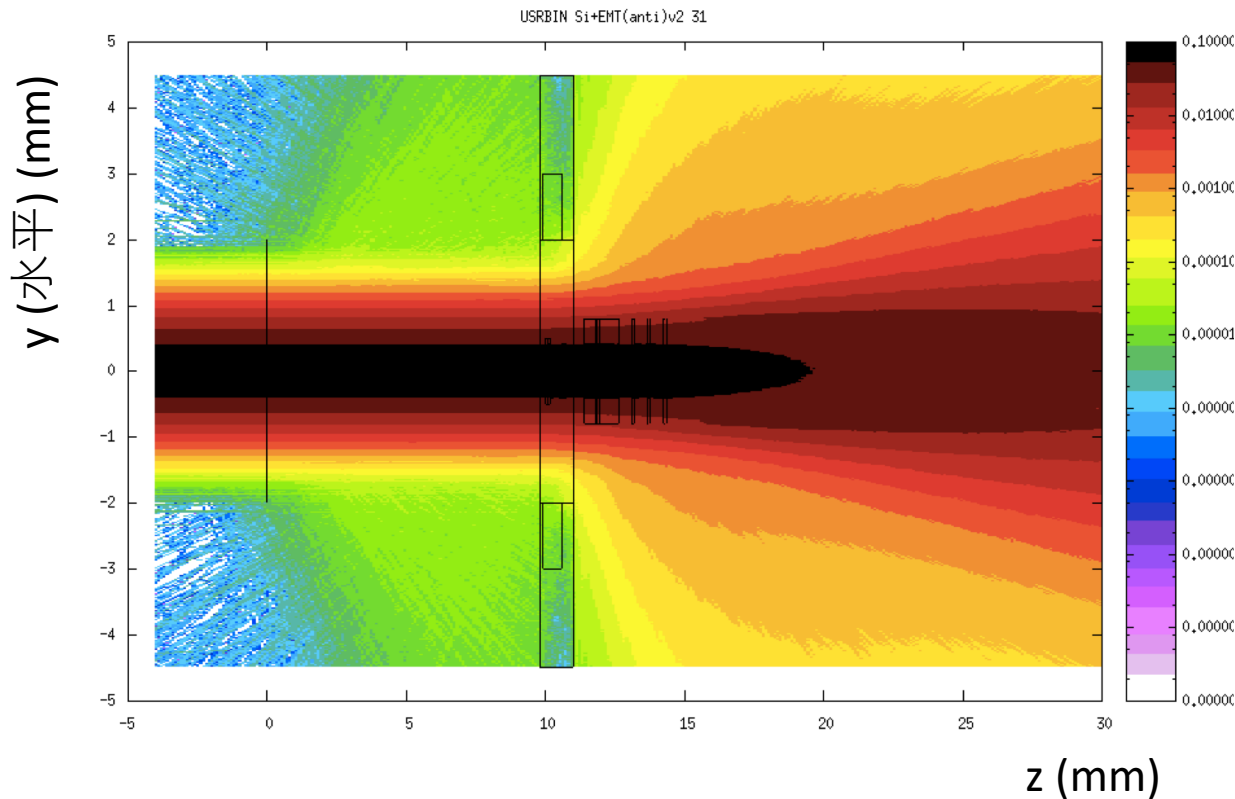


by 和泉さん(理科大)



# シミュレーション

- SiとEMTを串刺しのように並べるので、電子の散乱による影響を調べた



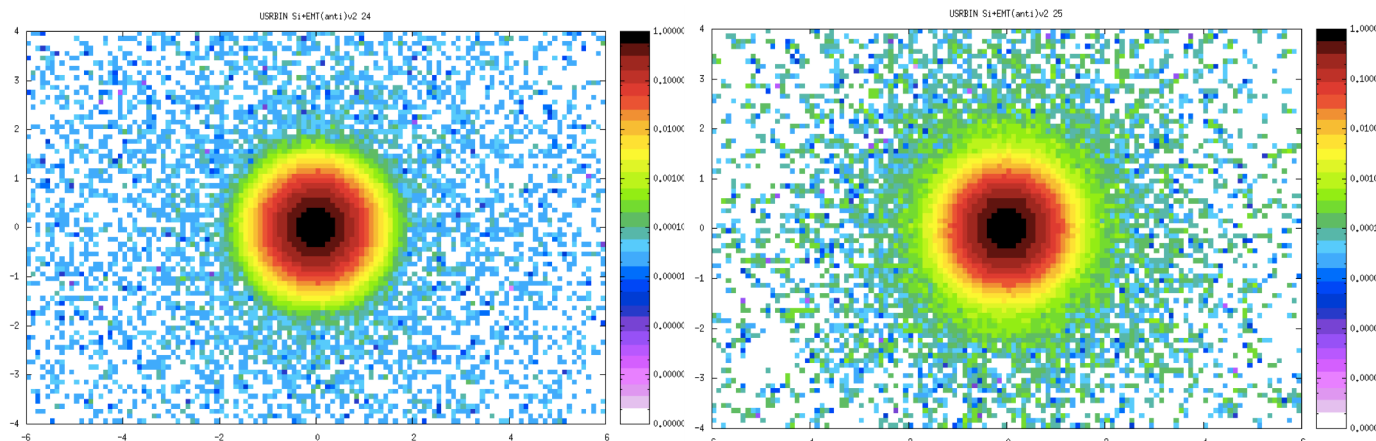
# シミュレーション

Siの前

$z = 9 \text{ mm}$

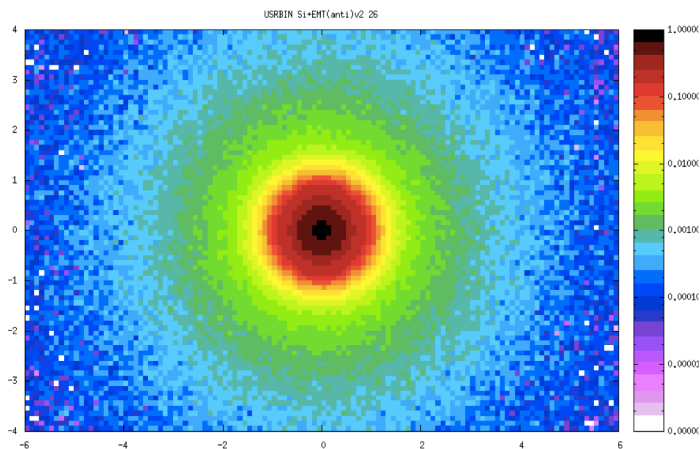
$z = 11 \text{ mm}$

SiとEMTの間



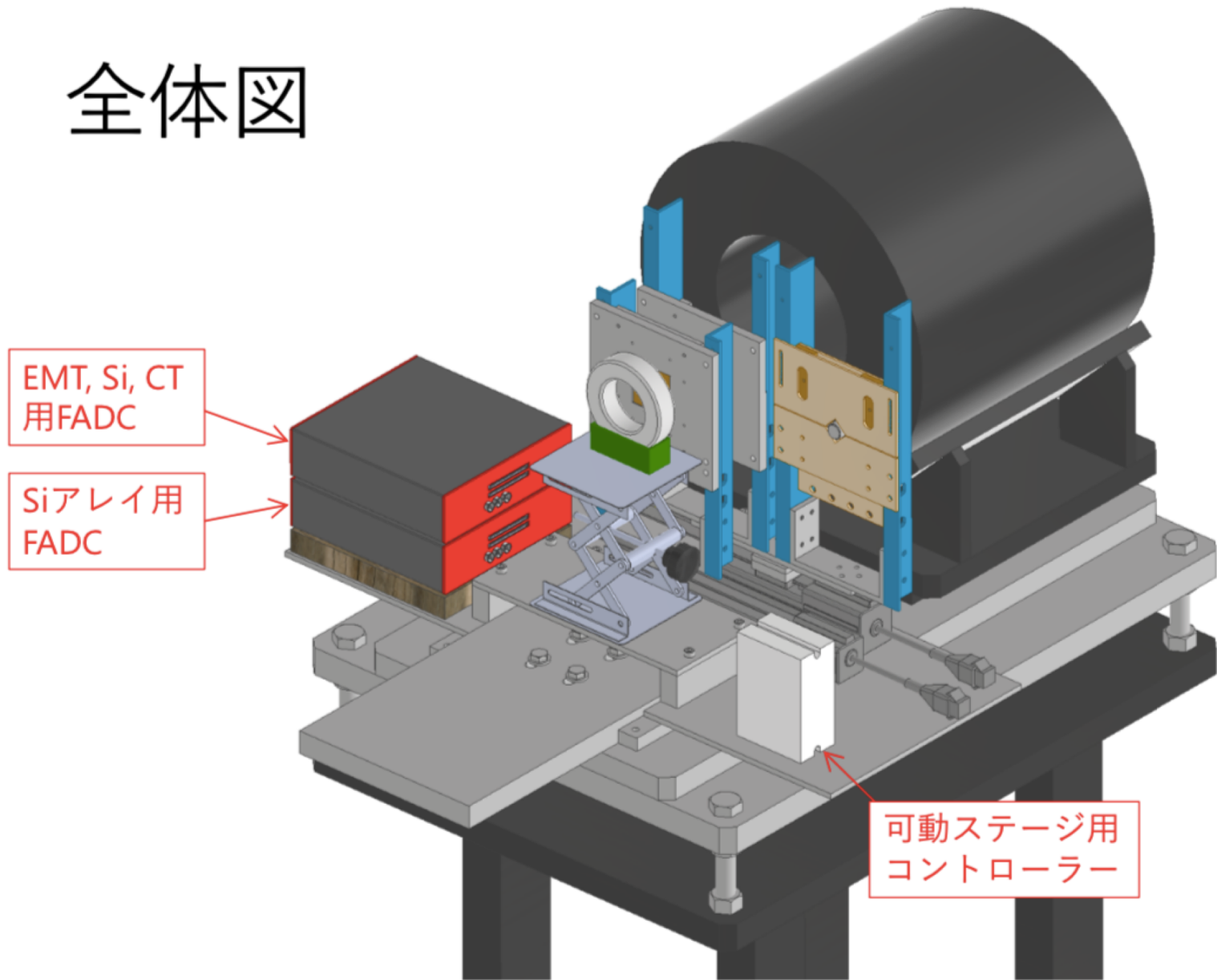
$z = 15 \text{ mm}$

EMTの後ろ



Siとその固定具による散乱の影響はほとんどないことを調べた。(1%未満)

# 全体図

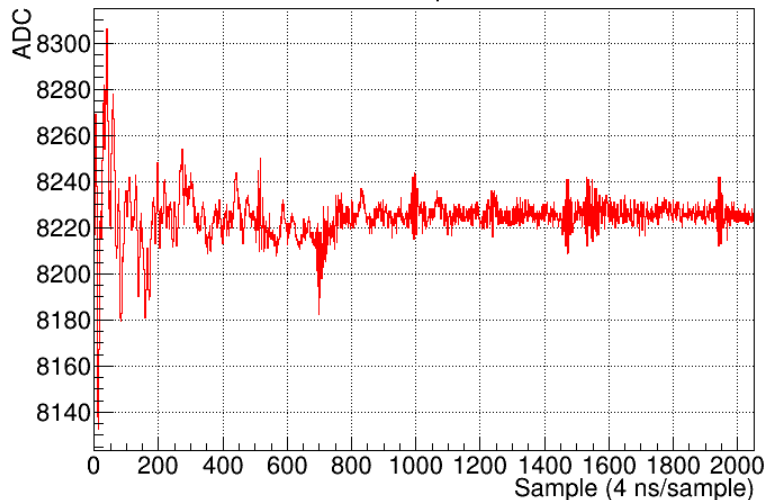


SiやEMTの固定具をデザインした

# EMT w/o alkali-Sbの信号

500 kW相当

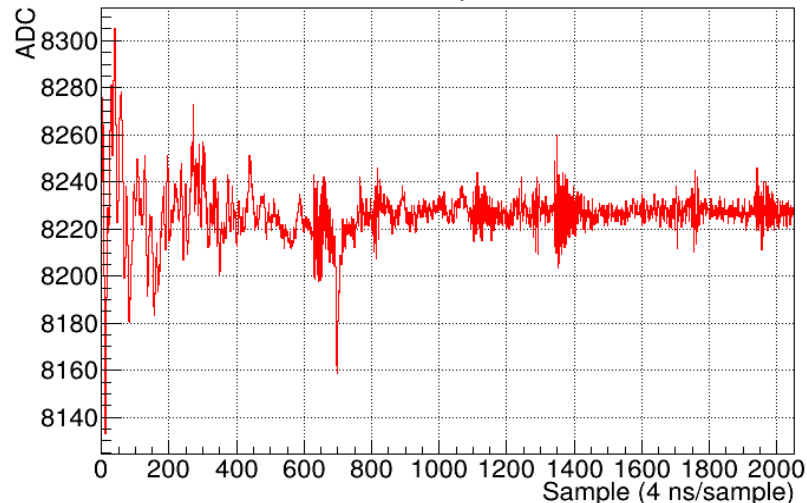
Run81 EMT spill#453



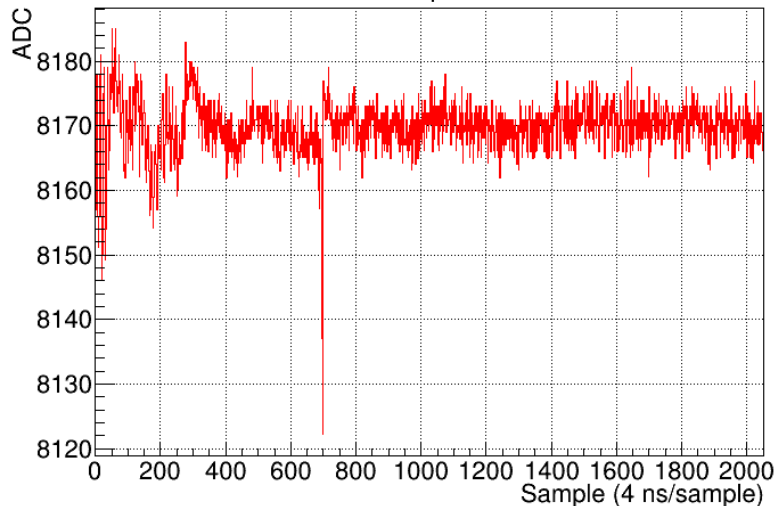
EMT

より大きなビームに対する信号

Run81 EMT spill#154

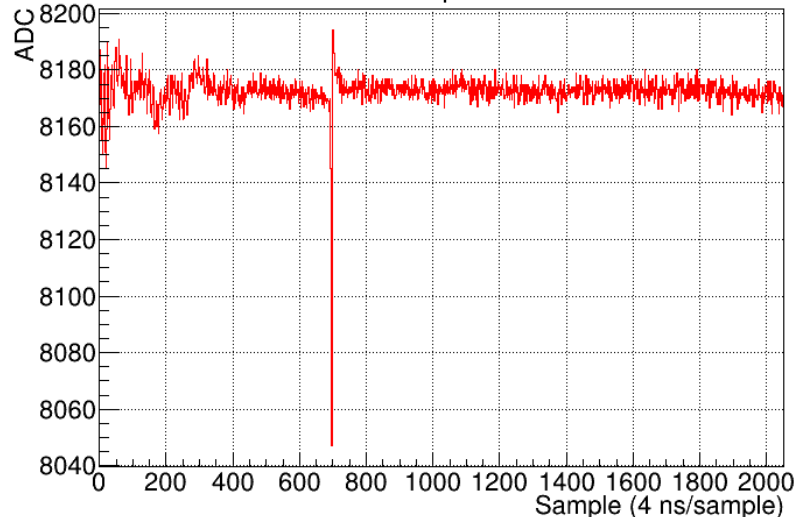


Run81 CT spill#453



CT

Run81 CT spill#154



# 次回のビームテスト

- セットアップのアップグレード

- 下流の可動ステージでEMT, Reference用Siセンサー, Siアレイの3つが入れ替えられるようにしたい。

