

J-PARC E16実験に向けた シリコンストリップ検出器の 性能評価及び開発の現状

2024.3.21 山田蓮斗^A

広島大^A, 京大理^B, 高工研^C, 阪大RCNP^D, GSI^E, 理研^F, 東大理^G,
落合秀太^B, 青木和也^C, 山口頼人^A, 小沢恭一郎^C, 高橋智則^D,
M. Teklishyn^E, D.R. Garces^E, 延與秀人^F, 市川真也^B, 中須賀さとみ^B,
長房俊之介^B, 角永丈^{C,G}, for the J-PARC E16 collaboration

目次

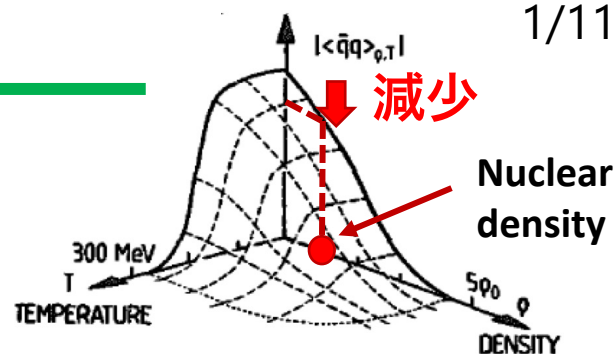
1. J-PARC E16実験の概要
2. STS(Silicon Tracking System) Overview
 - センサの基本性能
 - DAQ回路
3. KEK PF-ARテストビームラインでのテスト実験
4. 実験結果
 - 時間分解能の評価
 - 検出効率の評価

1. J-PARC E16実験

1/11

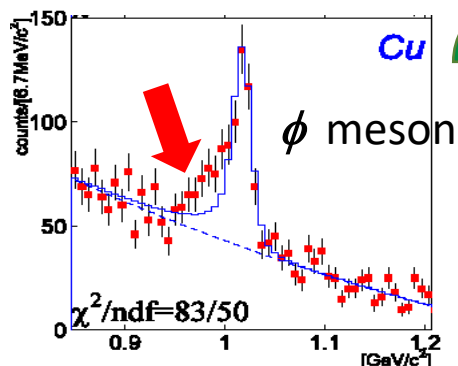
目的 真空中における $\langle \bar{q}q \rangle$ の変化の探索

方法 原子核で崩壊するベクトル中間子の質量スペクトルとその変化を測定 $30 \text{ GeV } p + A \rightarrow \rho, \omega, \phi \rightarrow e^+ e^-$



W. Weise. Nuclear aspects of chiral symmetry. Nuclear Physics A, Vol. 553, pp. 59–72, 1993.

■ 先行実験 KEK E325



100倍の統計量を目指す!

J-PARC E16実験の戦略

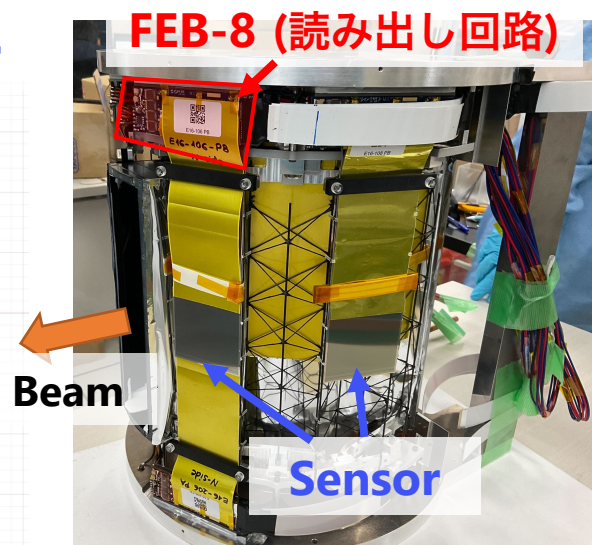
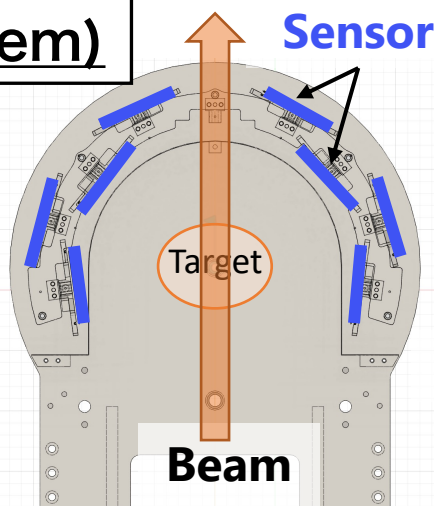
1. 検出器アクセプタンスとビームエネルギー増強によるE325の**10倍**の統計量
2. **10倍**のビーム強度 (1×10^{10} 陽子/スピル(2秒))

E16 最内層飛跡検出器 STS (Silicon Tracking System)

STS Chamber (Top view) →

■ 要求性能

位置分解能 : **30 μm**
時間分解能 : **6 ns**

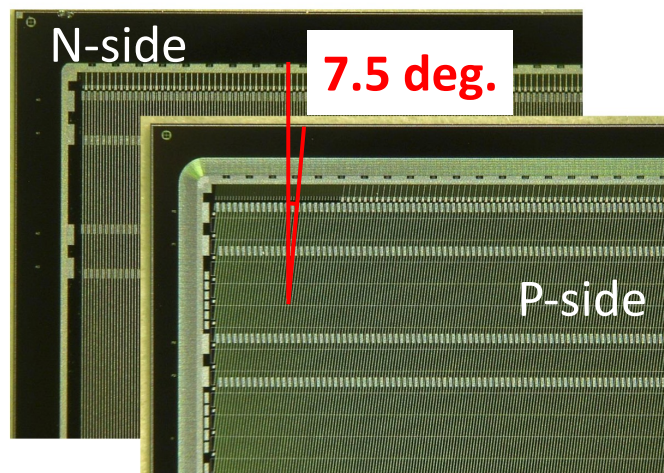


■ STS : Silicon Tracking System

CBM(@GSI)主力飛跡検出器のセンサを使用

➤ 両面読み出しストリップ

- ✓ p側のストリップは7.5度傾斜



13.Christian J. Schmidt. The CBM Silicon Tracking Station and CBM- related ASIC developments.

Parameter	Value
有感領域	60 x 60 mm ²
厚さ	320 μm (~0.37% X ₀)
ストリップピッチ	58 μm
ステレオ角	7.5 deg.
ストリップの数	1024
位置分解能	(x)15 μm (y)110 μm *
時間分解能	~5 ns*
逆バイアス電圧	150 V (p:-75V/n:+75 V)

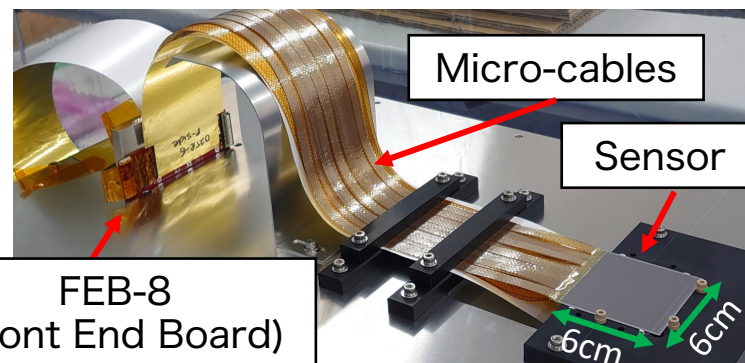
➤ 読み出し回路

✓ FEB-8

- Board with 8 **SMX chips** (ASIC)
- センサ片面(1024 ch) をFEB1台で読出



SMX



*Johann M.Heuser 「The CBM experiment at FAIR –Overview of detector and technologies」 <https://sites.google.com/view/j-parc-hi-evening/>

2. STS Overview : ASIC SMXについて

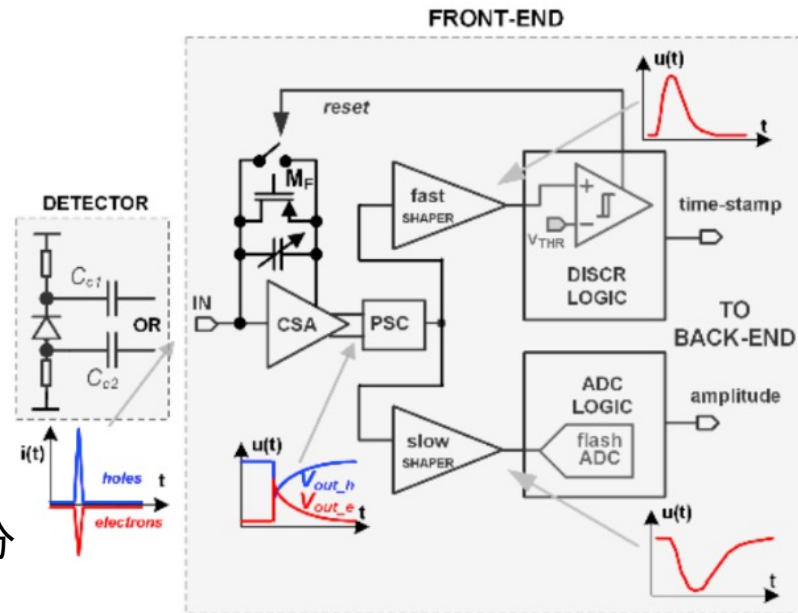
3/11

■ SMX : STS/MUCH-XYTER

- ✓ CBM開発のセルフトリガーで動作する連続読み出し用のASIC

Parameter	Value
チャンネル数	128+2(test channel)
ADC bit	5 bit
TDC bit	14 bit

- 🔑 検出器で生成された電荷信号はCSAによって積分され、その後出力信号は2つの経路に分けられる
→ **fast SHAPER**, **slow SHAPER** へ



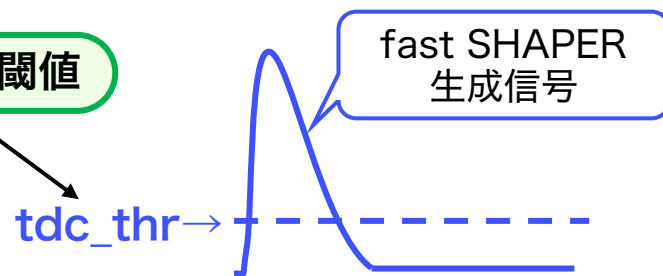
K.Kasinski, et al. SMX2.0, SMX2.1, SMX2.2, Manual v4.00. 2021.

DISCR LOGIC

- tdc閾値を超えた **fast SHAPER**生成信号を使ってtimestampを記録

※ tdc閾値を超えなければ、正しいtdcを記録しない

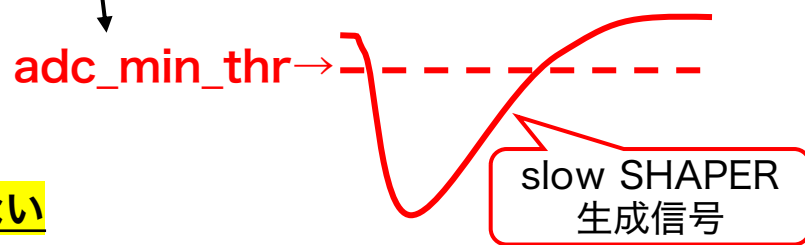
2種類の閾値



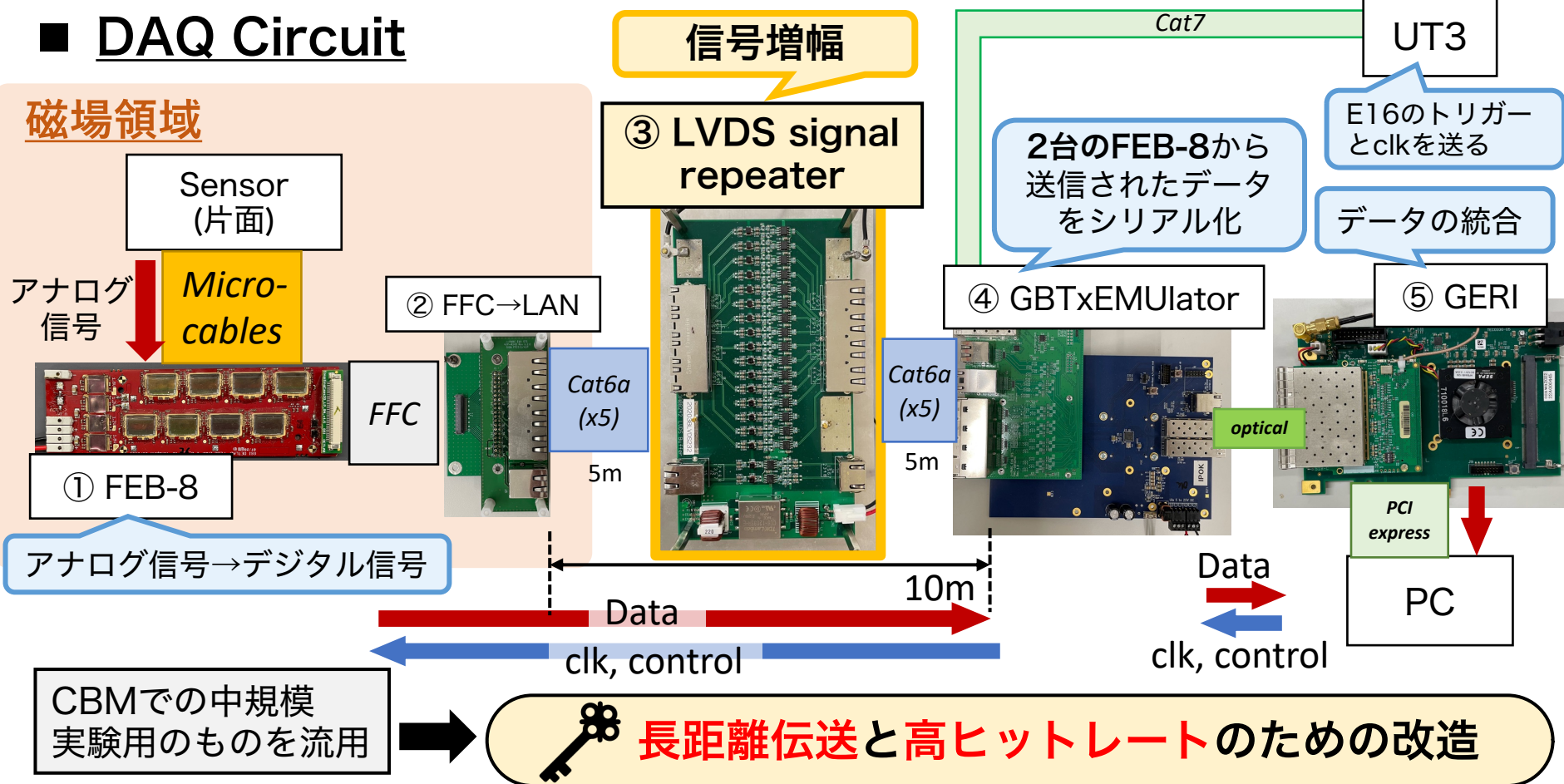
ADC LOGIC

- 最低adc閾値を超えた **slow SHAPER**生成信号のadc値を記録

※ 最低adc閾値を超えなければ、hit情報を記録しない



■ DAQ Circuit



● Hardな改造

- ✓ GBTボードは磁場や放射線から避ける必要がある
 - 長距離伝送が必要
 - リピーターとCat6aケーブルを使用

● Softな改造

- ✓ GBTxEMUにおけるE16想定時のデータサイズ削減 (合計1Ghits/sec)
- ✓ E16トリガー情報を記録するためのGERI&GBT firmwareの改良

3. PF-ARでのテスト実験

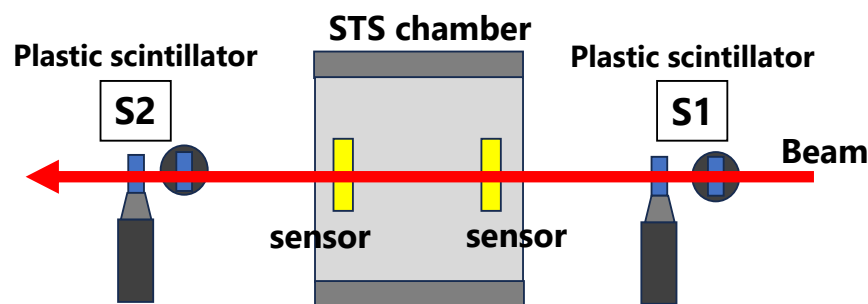
5/11

- ✓ 2023.11.17-21にKEKのPF-ARテストビームラインにてテスト実験を実施

実験 目的

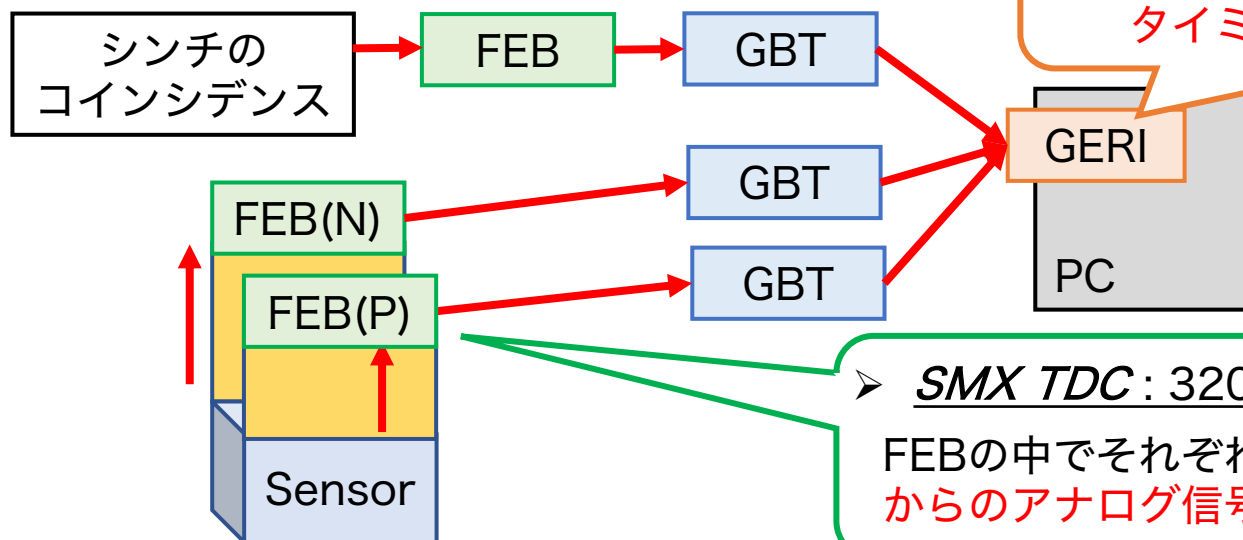
- ✓ ビームを用いたストリーミングDAQのテスト
- ✓ センサの性能評価：時間分解能、検出効率

■ Setup (Side View)



- ✓ STS chamber + 4scintillators
- ✓ 4つのシンチを用いてビームを1cmx1cmのスポットに制限
- ✓ ビーム運動量：3.0 GeV/c
- ✓ コインシデンスレート：平均30 Hz

■ 回路設計とtimestampの種類



➤ geriTimestamp : 40 MHz, 32 bit

geriがデータを受け取った
タイミングを記録

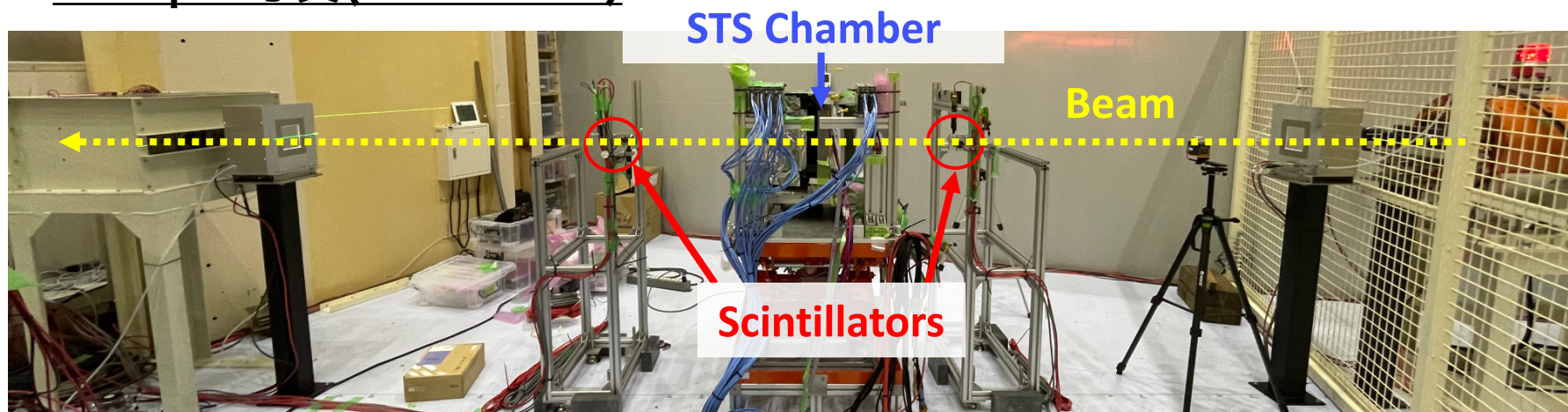
➤ SMX TDC : 320 MHz, 14 bit

FEBの中でそれぞれ周っているtdc。センサ
からのアナログ信号が来たタイミングを記録

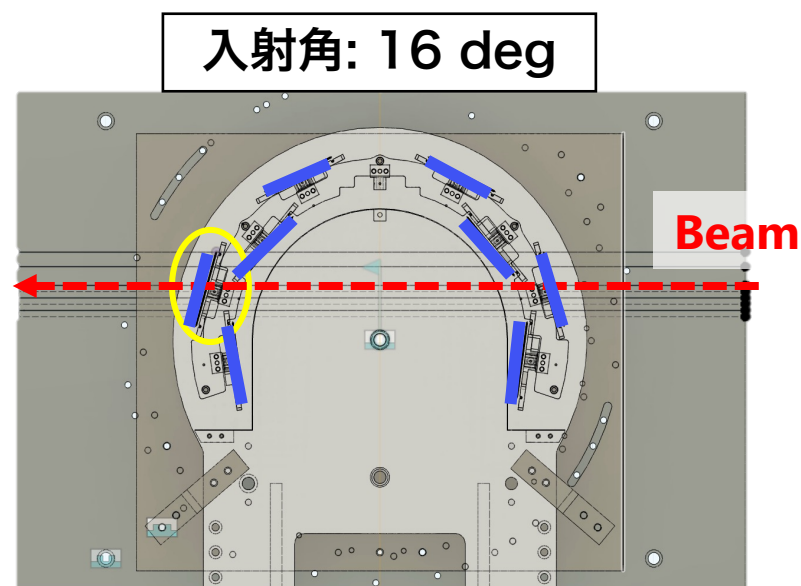
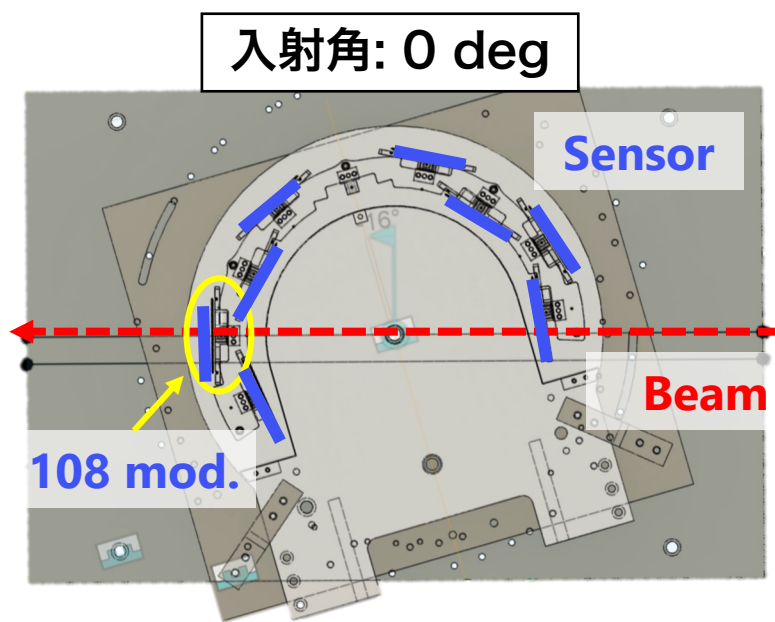
3. PF-ARでのテスト実験

6/11

■ Setupの写真(Side View)



■ Setup (Top View) ✓ Sensor 108に対してビーム入射



4. 実験結果 : Hit profileと時間分解能

7/11

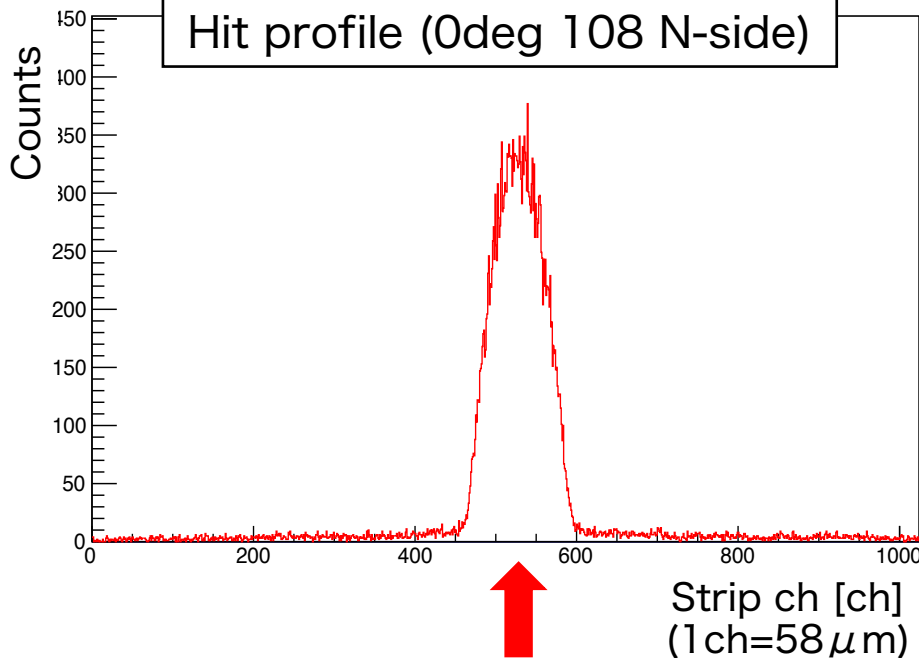
E16要求性能

時間分解能 : 6ns

■ Hit profile

- シンチ信号とのSensor coin. hit

シンチ信号の *geriTimestamp* の前後
20tick ($\pm 0.5 \mu s$) のセンサhit

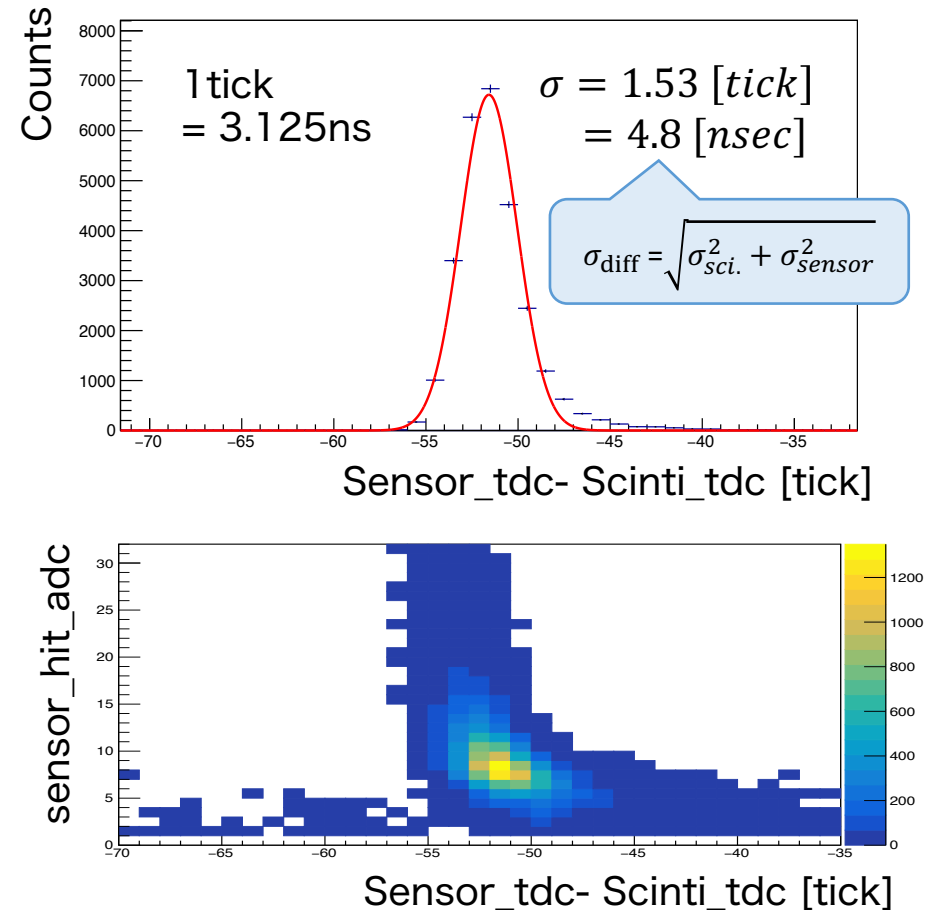


4枚のシンチを通過した電子のセンサhit

- 時間情報によりイベント選択ができた
- トリガー情報でイベント選択ができる

■ 時間分解能

- SMX TDC* を用いて解析
- 時間分解能 : **4.8 nsec** (0deg108N)
→ E16実験の要請を満たす



→ 右側のテールは低adchitによるもの

4. 実験結果：検出効率

8/11

■ 検出効率

シンチ信号の *geriTimestamp* の前後
20tick ($\pm 0.5 \mu s$) のセンサhit

Geometrical cut 済

$$\text{検出効率} = \frac{\text{シンチhitに対応した
センサhitのイベント数}}{\text{シンチhit数}}$$



0deg 108N

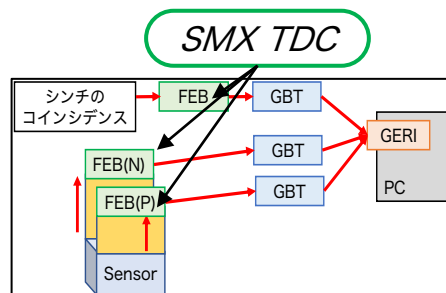
99.85 +/- 0.03 %

16deg 108N

99.77 +/- 0.02 %

■ 検出効率の入射角依存の謎

- ✓ FEBのtimestamp, *SMX TDC* を使って検出効率を算出



✓

Red

上記条件

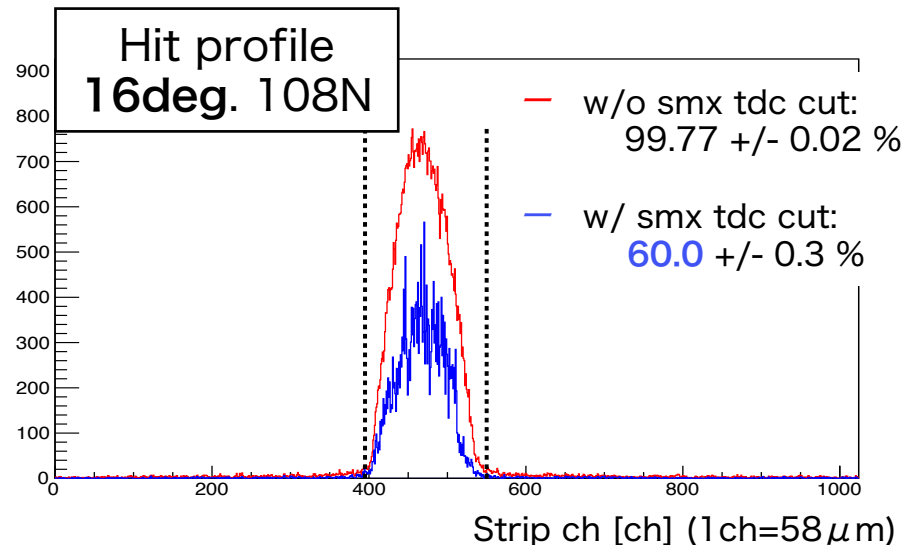
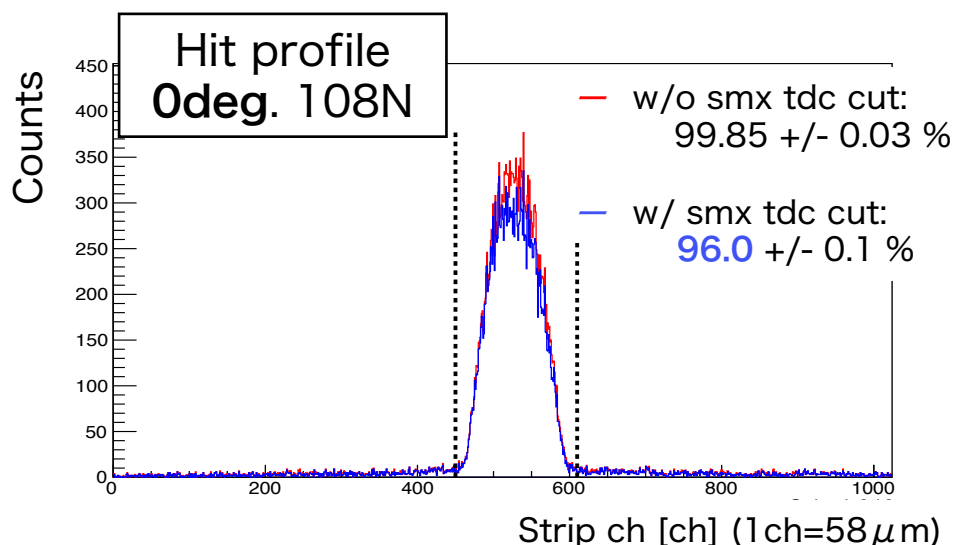
✓

Blue

上記条件 &&

シンチ信号 *SMX TDC* の
前後10 tick ($\pm 31.25 ns$)

斜め入射(16度入射)では検出効率が **60%** に落ちた

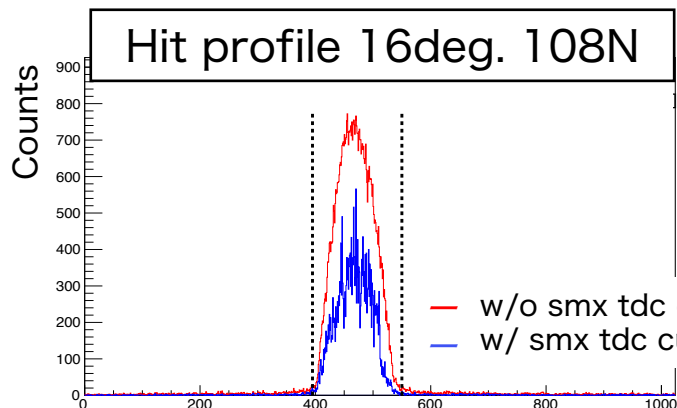


4. 実験結果：検出効率 入射角依存の謎

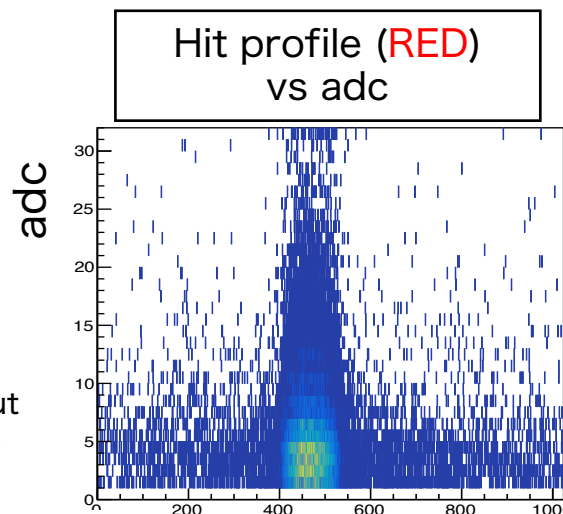
9/11

SMX TDCで
拾えなかったhit

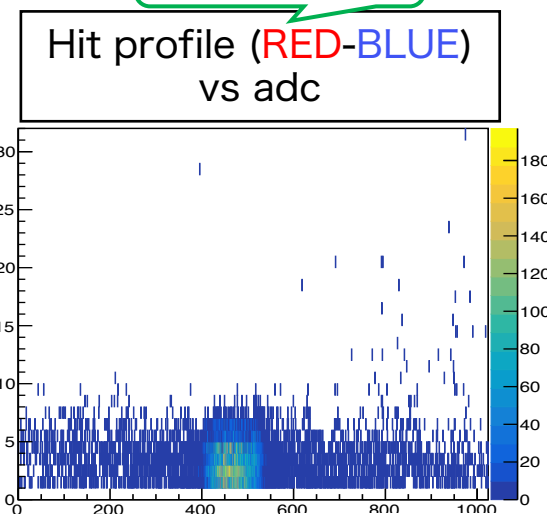
■ 16deg hit のadc分布



Strip ch [ch] (1ch=58 μ m)



Strip ch [ch]



Strip ch [ch]

■ 閾値解析

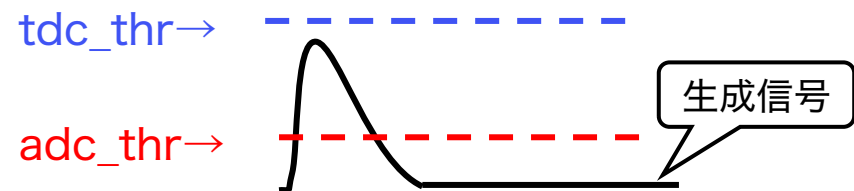
- ADC閾値：1.4 fC
- TDC閾値：**2.8/3.2 fC** (偶/奇 strip)

→ TDC閾値がADC閾値よりも高すぎた

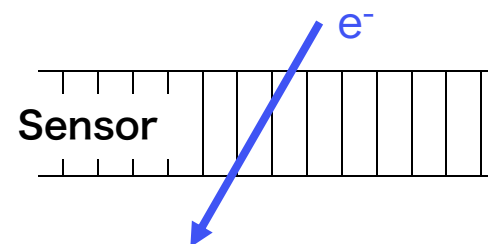


- ✓ 低adc hitでは正しいtdcを記録できていなかった
- ✓ 斜め入射では、1ストリップに落とす電荷が少なくなり、より低検出効率に..

低adcのhitのtdcがおかしい？



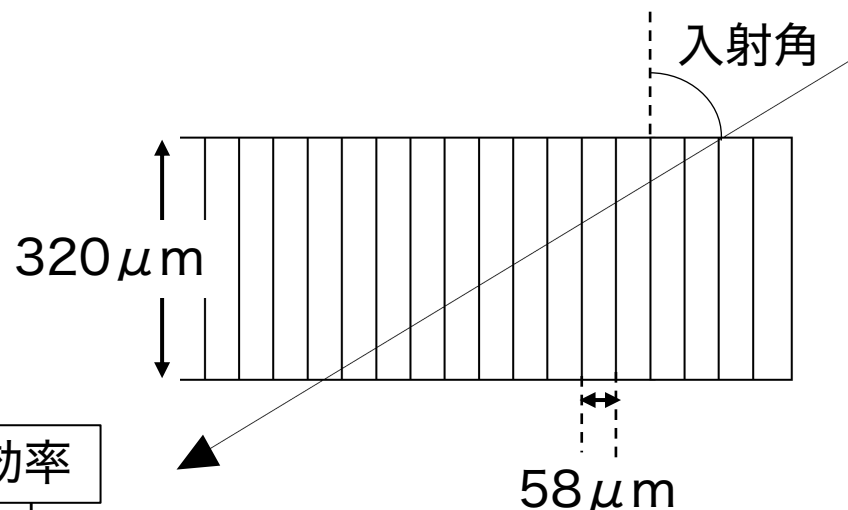
→ hitとして記録するが正しいtdcを記録しない



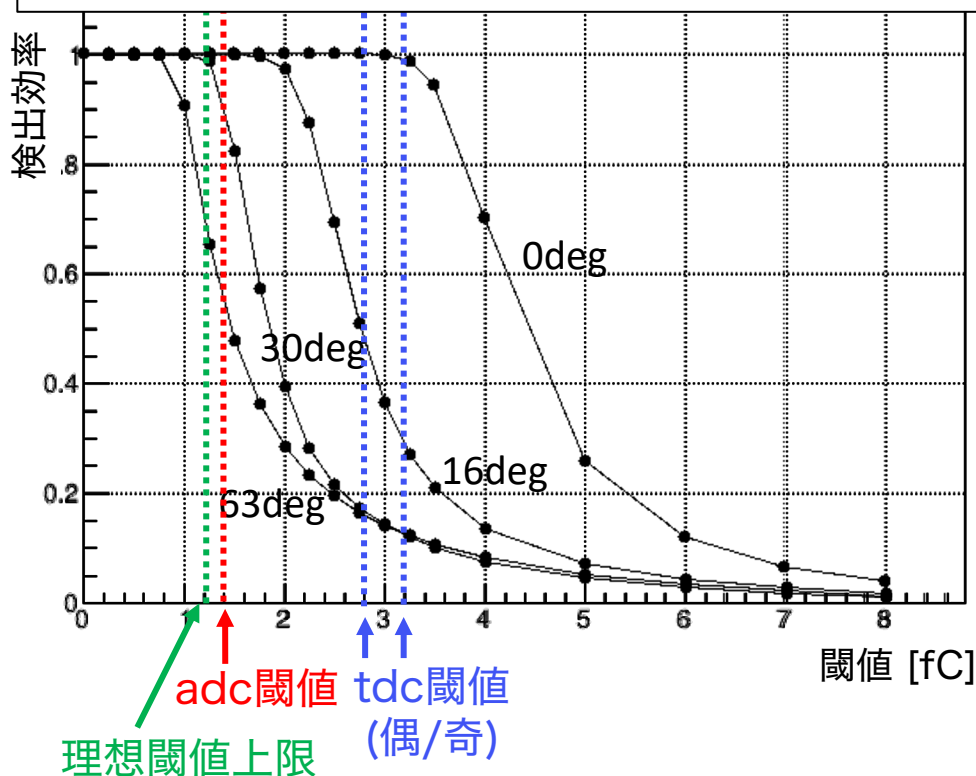
■ ラフな検出効率シミュレーション

➤ Heed (Garfield)

- ✓ センサを右図のように設定
 - 入射電子のエネルギーは通過したストリップに落とす
 - 拡散なし



任意の入射角における閾値に対する検出効率



- ✓ シミュレーションによれば、16degにおいて、検出効率は実験値より若干低い

- ✓ ADC/TDCの閾値は1.2fC未満が高検出効率のため、望ましい
(E16での入射角最大値は30deg程度)

→ ノイズレベルは $\sim 800e^- = 0.13fC$ であり、このような低閾値設定は達成可能

➤ STS (Silicon Tracking System)

- ✓ J-PARC E16実験の最内層のシリコンストリップ飛跡検出器
- ✓ GSIと共同開発, ストリップピッチ: $58\mu\text{m}$, 両面読み出し, セルフトリガーのASIC

➤ KEK PF-ARテストビームラインでのテスト実験 (2023.11)

- ✓ timestampを用いたイベントセクションが機能し、DAQシステムの成功が実証された
- ✓ 時間分解能 4.8 nsecが得られ、E16の要請を満たすことを確認できた
- ✓ *geriTimestamp* のみを使用した検出効率は、16度でも、99.7% 以上と非常に高かった
 - *SMX tdc* を使用した場合、斜め入射での検出効率が低かった (60%)
→tdc閾値が高すぎたことが原因

➤ Status

- ✓ 来月(2024.4)の J-PARC E16 commissioning run (Run 0e)に向けてエリアにチェンバーを再インストール中

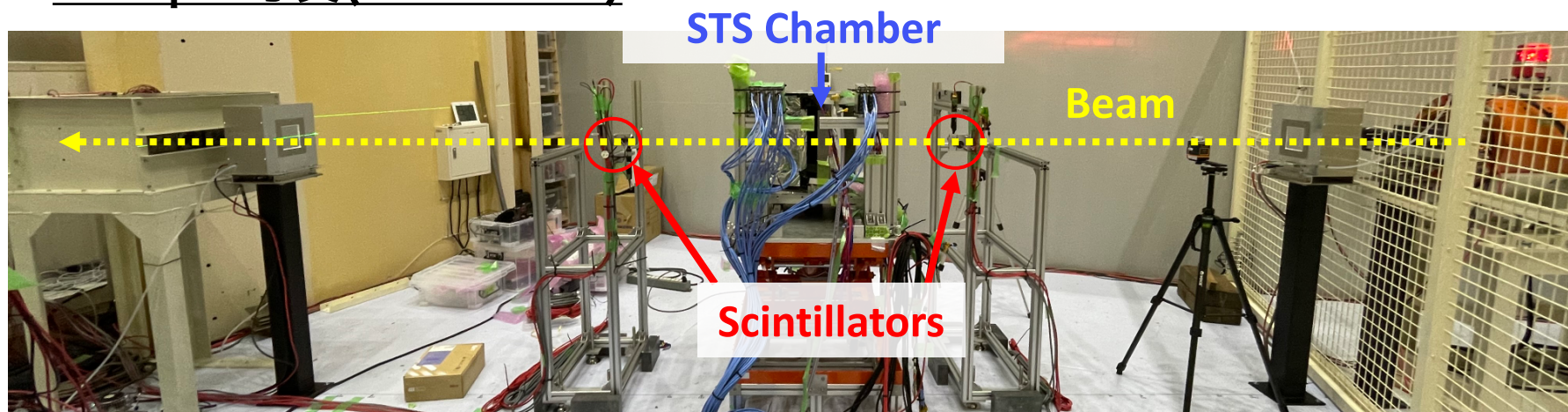
■ 謝辞

PF-ARテストビームラインの皆さま、テスト実験ではお世話になりました。ビームラインは非常に使いやすく、良い結果を得ることができました。

Backup

3. PF-ARでのテスト実験

■ Setupの写真(Side View)



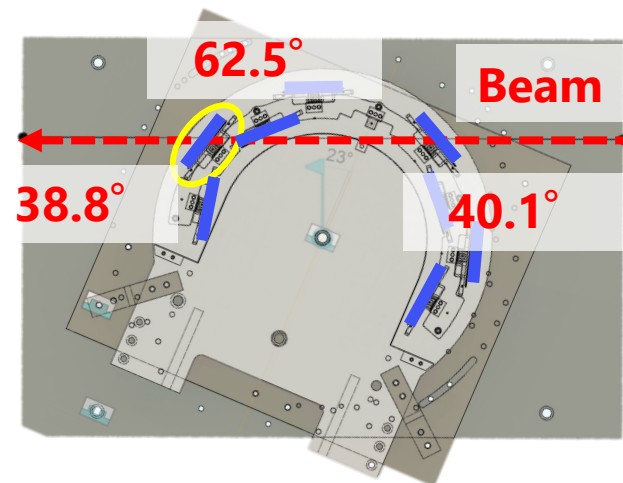
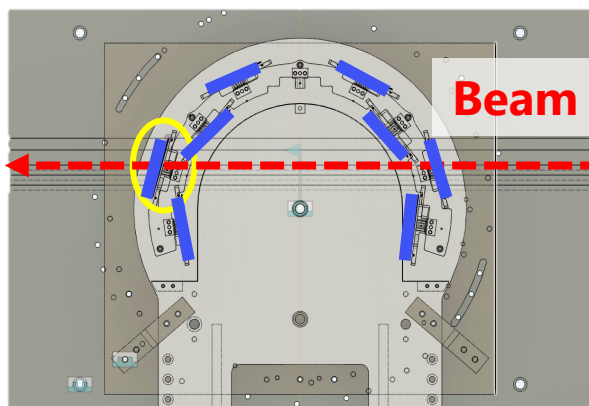
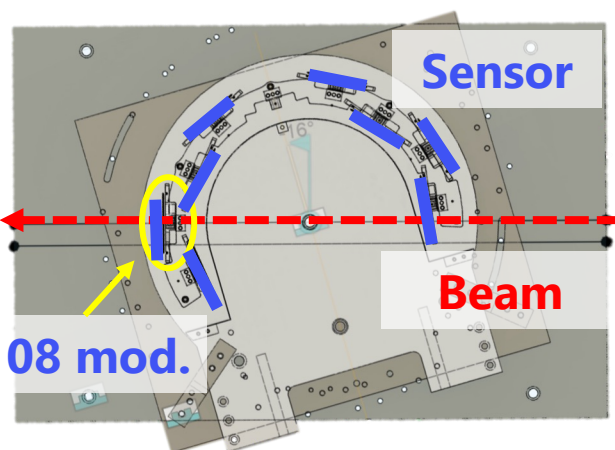
■ Setup (Top View)

✓ Sensor 108に対してビーム入射

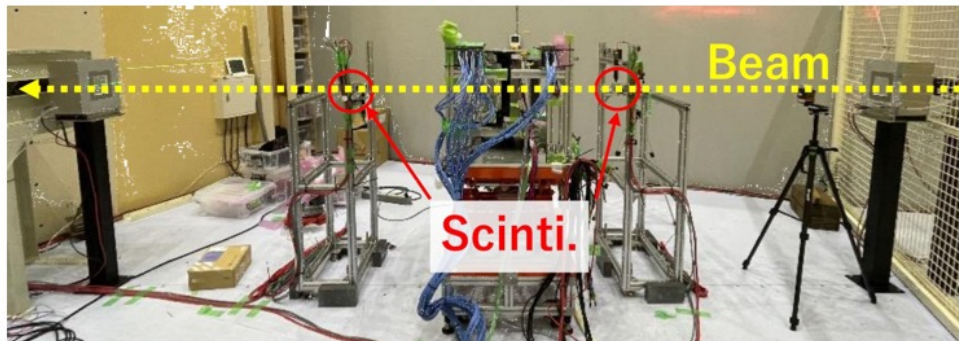
入射角: 0 deg

入射角: 16 deg

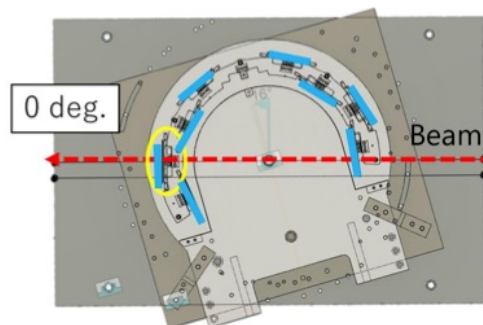
入射角: 39 deg



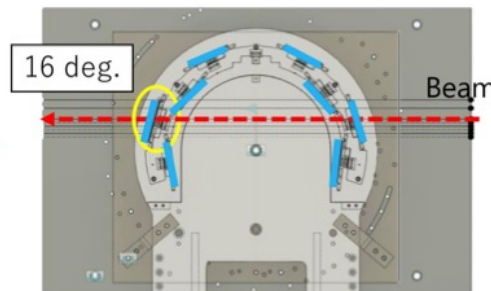
Test beam line Setup



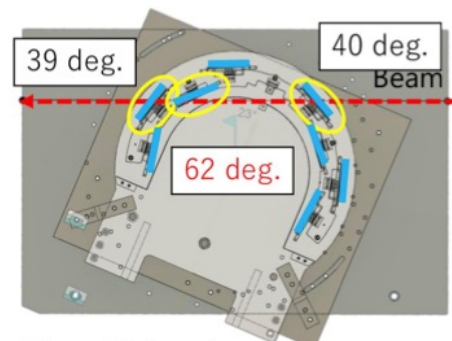
- Electron beam: 3 GeV/c
- Beam rate: ~ 20 Hz
- Setup
 - E16-STC chamber + 4 scintillators
 - 3 different configurations



Run 91



Run 81

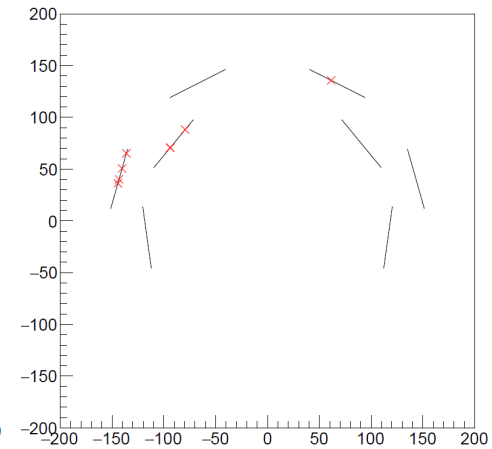
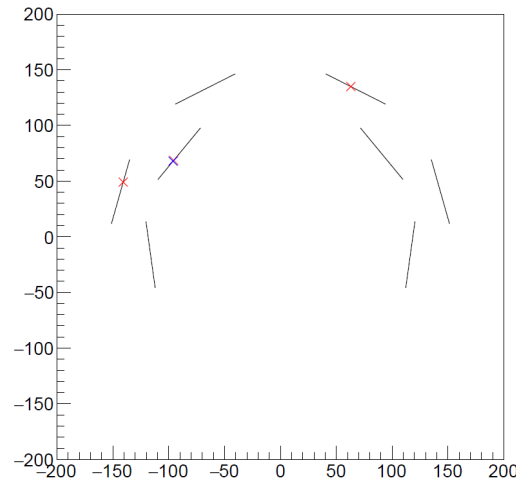
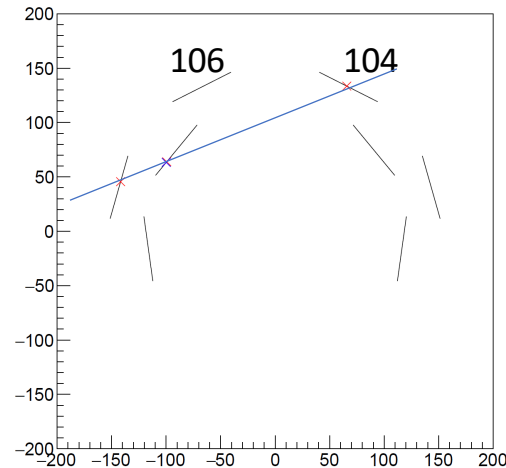


Run 111

Event display for 3-sensor setup.

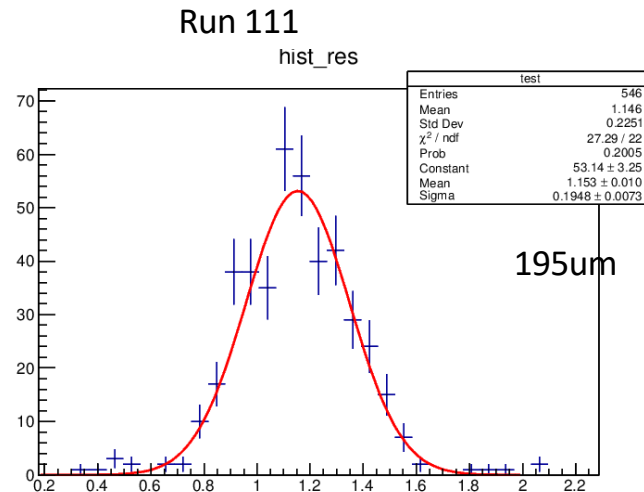
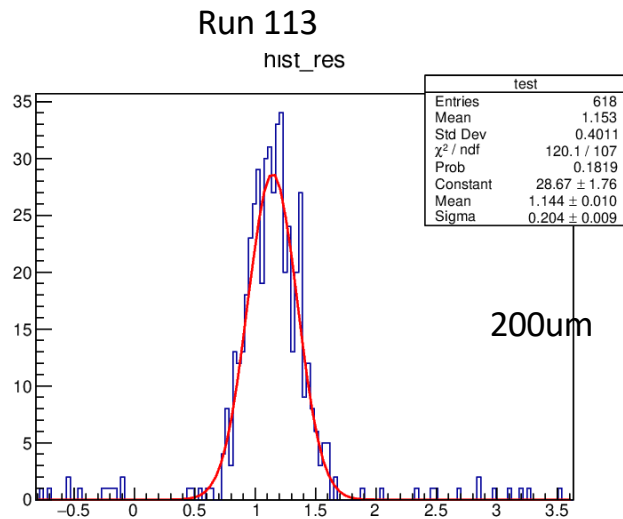
Only N-side is used.

If there are only one hit per sensor, interpolated
points are drawn (BLUE)

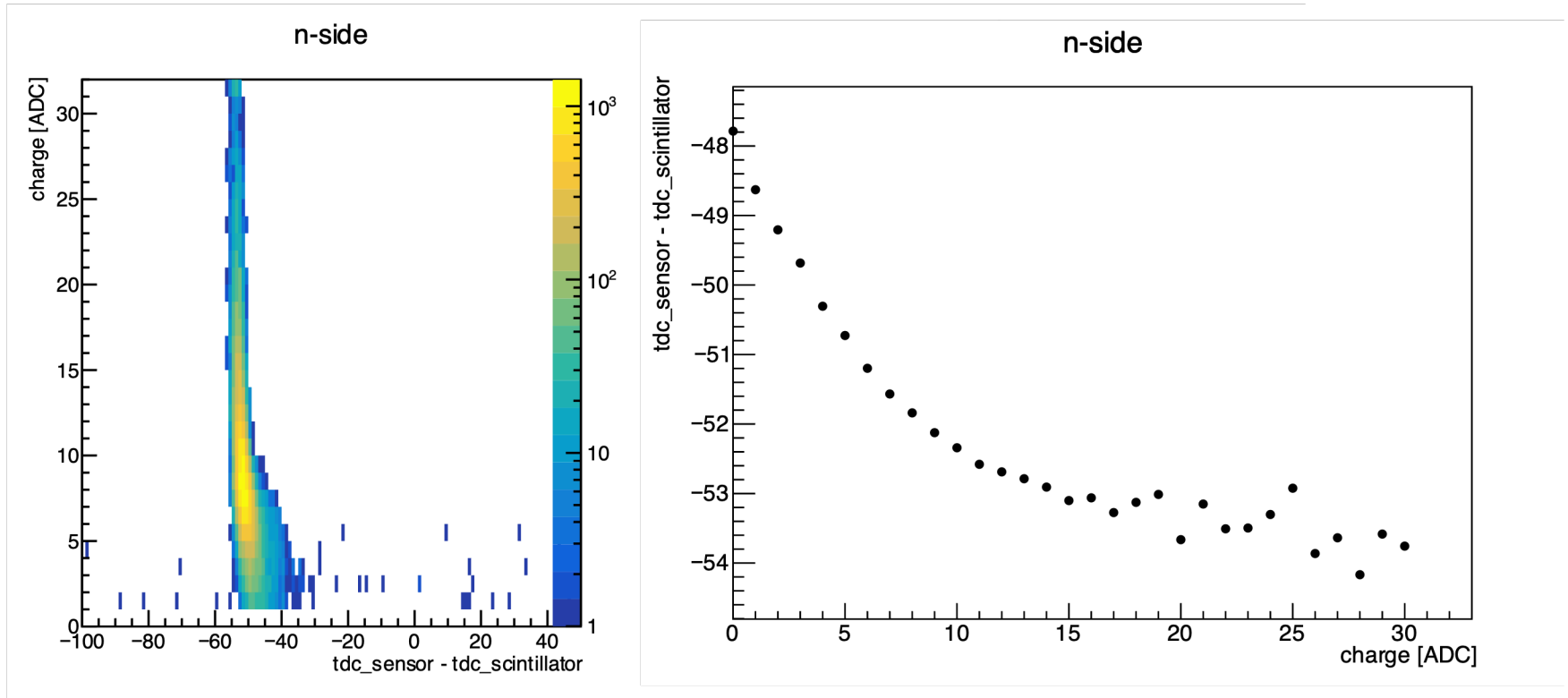


Residual

- Residual calculated using local x coordinate.
- Single cluster is insisted on each sensor.



Results from the test beam Run91



Results from the test beam **Run91**

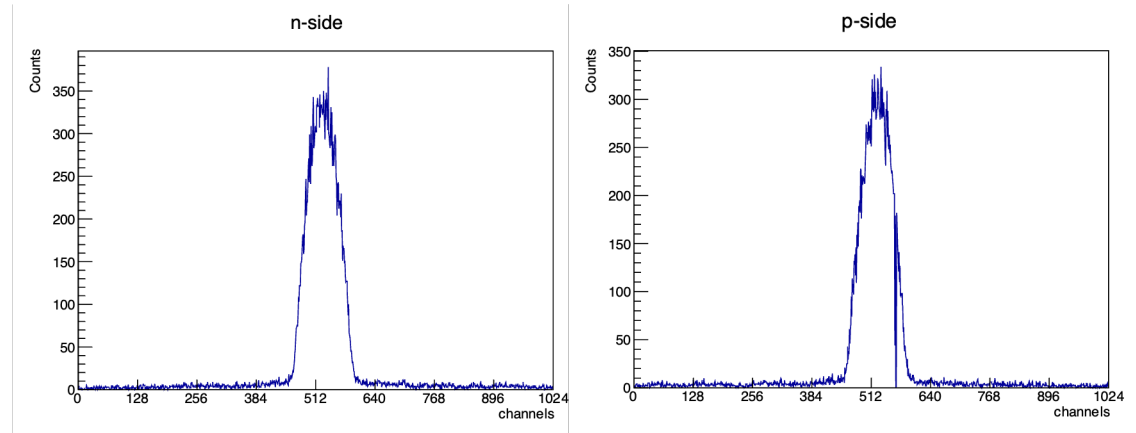
Efficiency:

n-side: 0.995152

- Scintillator hits: 1444
- Sensor hits: 1437

p-side: 0.964681

- Scintillator hits: 1444
- Sensor hits: 1393



time acceptance:

- the first three low rate period of the beam
- difference time sensor-scintillator within

$$-55 < \text{time}_{\text{sensor}} - \text{time}_{\text{scintillator}} < -40$$

geometrical acceptance:

- n-side: from 470 to 600 channel
- p-side: from 450 to 600 channel

time acceptance:

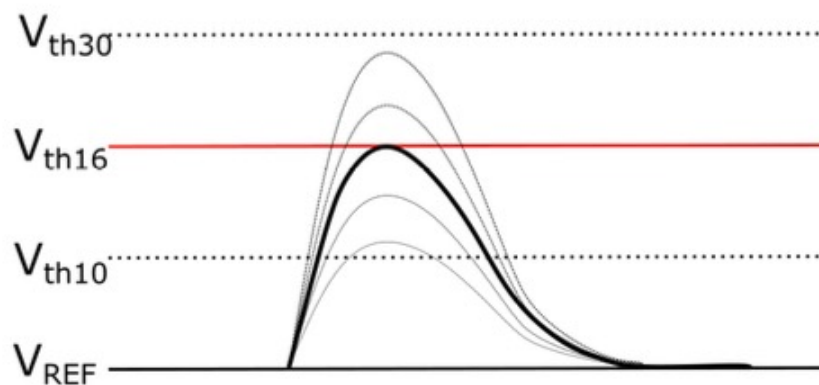
- full low rate period of the beam

Efficiency:

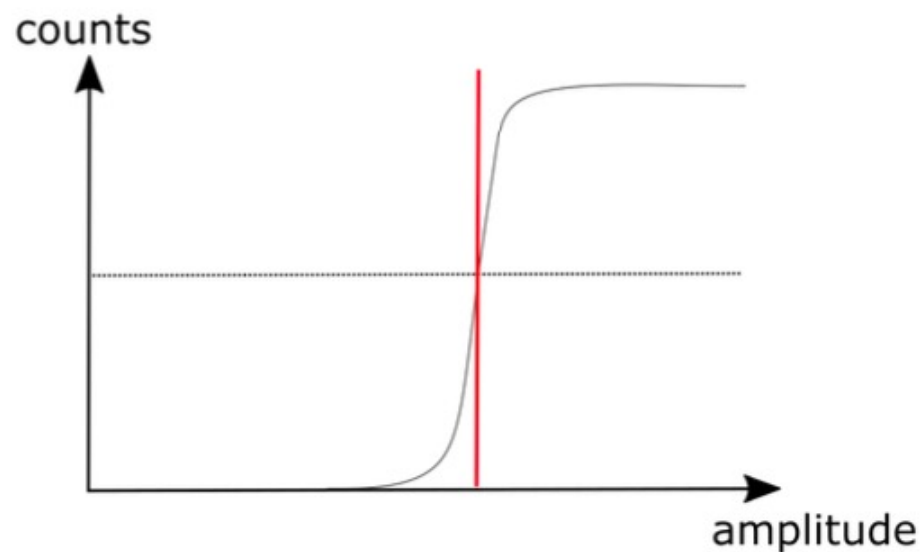
scintillator: 23707 counts

n-side: 0.988484 (counts: 23434)

p-side: 0.961446 (counts: 22793)



(a) 波高を変えながらパルスを発生させる。スレッシュヨルド (赤線) を超えるパルスのみがカウントされる。



(b) あるスレッシュヨルドで得られるグラフ。スレッシュヨルド (赤線) より大きいパルスのみがカウントされた結果、スレッシュヨルド付近でカウント数が大きく変化する。

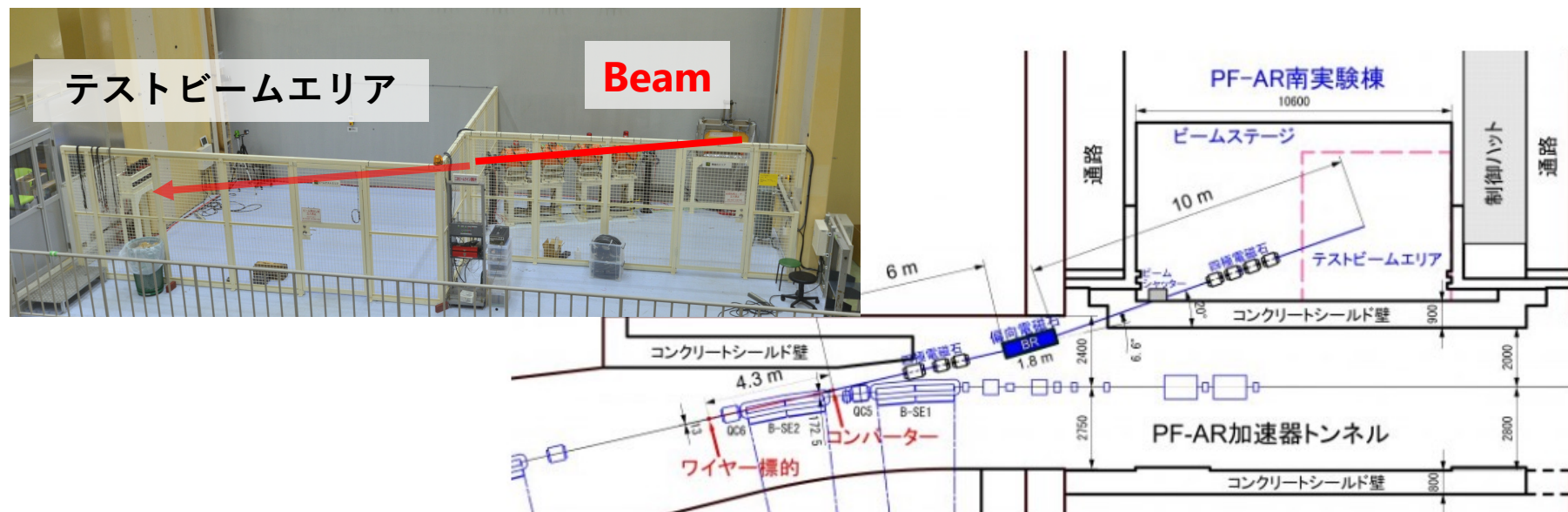
図 5.1: ADC スレッシュヨルドスキャンの概念図

3. PF-ARでのテスト実験

- ✓ 2023.11.17-21にKEKのPF-ARテストビームラインでテスト実験を実施

■ PF-ARテストビームライン

- ✓ KEKつくばキャンパスPF-AR(At Photon Factory - Advanced Ring)に建設された測定器試験のためのテストビームライン
- ✓ PF-ARは、6.5GeV or 5GeV、強度50mA程度の電子蓄積リング
- ✓ この蓄積リングにワイヤ標的を入れ、光子を生成させ、その光子を銅製のコンバータに入射させることで電子陽電子対を生成。4GeV/c までの電子ビームをテストビームエリアに取り出す。



4. 実験結果：検出効率

■ Hit profileと検出効率

$$\text{検出効率} = \frac{\text{シンチhitに対応したセンサhitのイベント数}}{\text{シンチhit数}}$$

- **Red**
シンチ信号の *geriTimestamp* の前後 20tick ($\pm 0.5 \mu s$)
- **Blue**
シンチ信号の *geriTimestamp* の前後 20tick ($\pm 0.5 \mu s$)
&&
SMX TDC の前後 10 tick ($\pm 31.25 ns$)

✓ プロット内の検出効率は幾何カット後

■ 閾値の解析結果

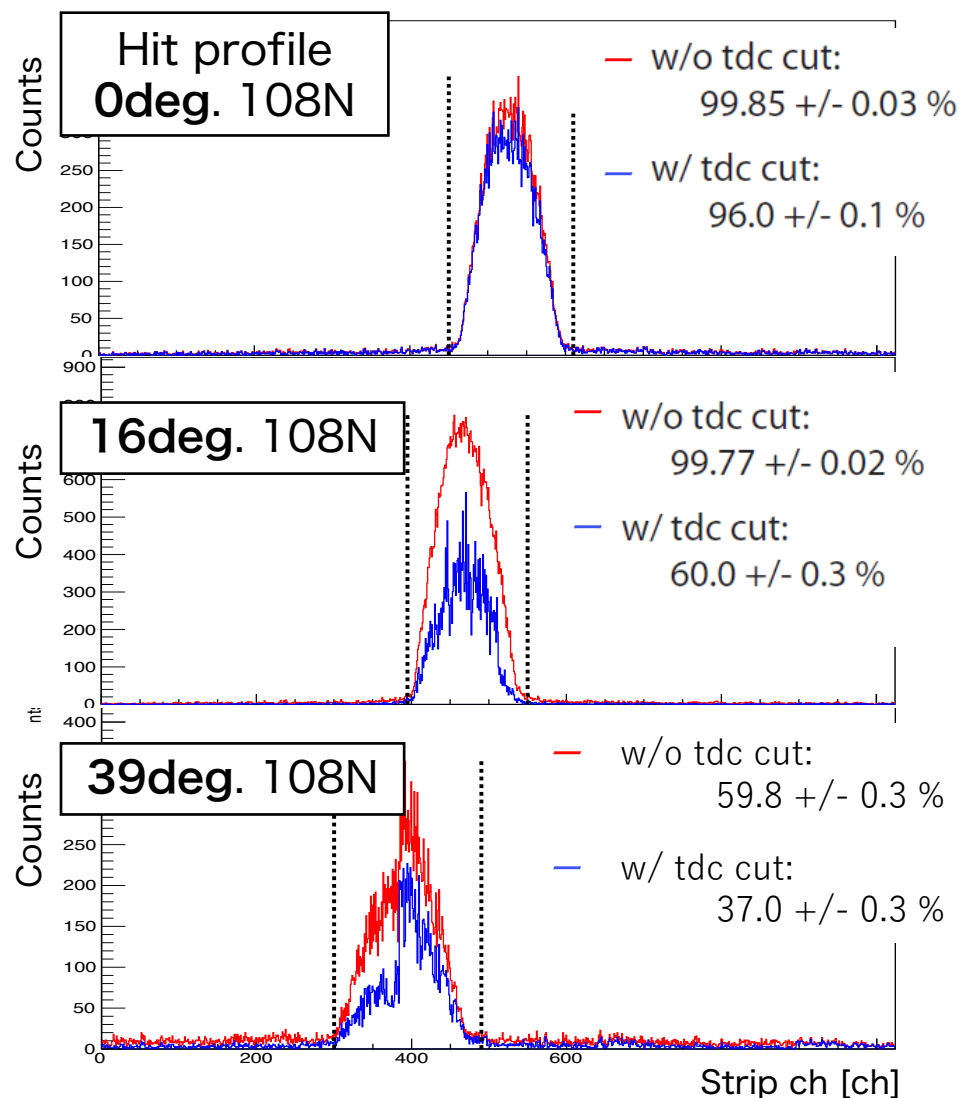
ADC閾値 1.4 fC

TDC閾値：2.8/3.2 fC (偶strip/奇strip)

Strip ch毎でかなり異なっており、一概にここ、とは言えないが..

→ **TDC閾値が高すぎたことが実験後の解析で判明**

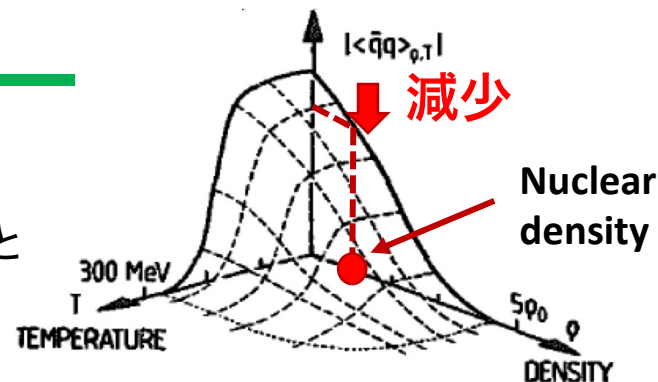
→ 低adc hitでは正しいtdcを記録できていなかった
→ 斜め入射ではより低検出効率に..



1. J-PARC E16実験

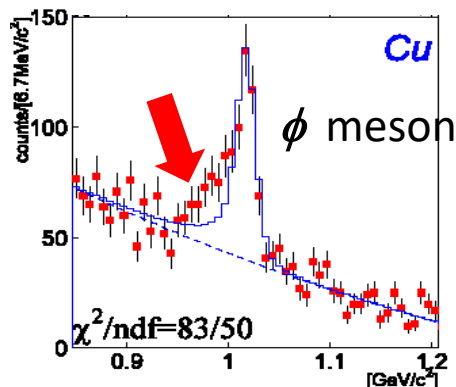
目的 真空中における $\langle \bar{q}q \rangle$ の変化の探索

方法 原子核で崩壊するベクトル中間子の質量スペクトルとその変化を測定 $30 \text{ GeV } p + A \rightarrow \rho, \omega, \phi \rightarrow e^+ e^-$

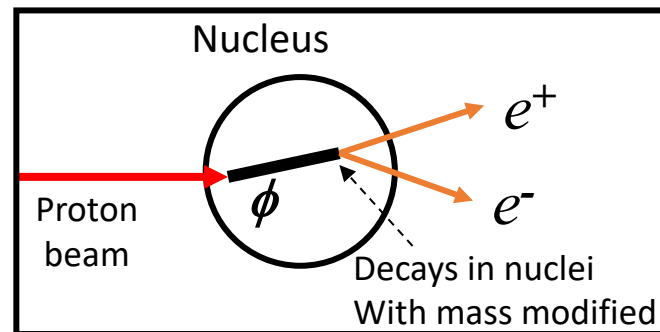


W. Weise. Nuclear aspects of chiral symmetry.
Nuclear Physics A, Vol. 553, pp. 59–72, 1993.

■ 先行実験 KEK E325



質量変化をもっと
はっきりと見たい！



J-PARC E16実験の戦略

1. 検出器アクセプタンスとビームエネルギー増強によるE325の**10倍**の統計量
2. **10倍**のビーム強度 (1×10^{10} 陽子/スピル(2秒))

100倍の統計量を目指す！

■ E16実験スケジュール

JFY	2023				2024				2025				2026				2027				2028			
	4-	7-	10-	1-	4-	7-	10-	1-	4-	7-	10-	1-	4-	7-	10-	1-	4-	7-	10-	1-	4-	7-	10-	1-
E16 plan	study				study	Run 1							E88									Run 2		

✓ 今年(2024年)秋に
1st physics run(Run1)を予定

1. J-PARC E16実験

■ E16 検出器要請

➤ 高レート対応

- ・ 大強度ビームによる大量の ϕ 発生
- ・ 大量のバックグラウンド

➤ 高質量分解能

- ・ 期待する質量変化: $20\text{--}40\text{ MeV}/c^2$
- ・ 目標質量分解能: $5.8\text{ MeV}/c^2$ 程度

➤ 高いPID能力

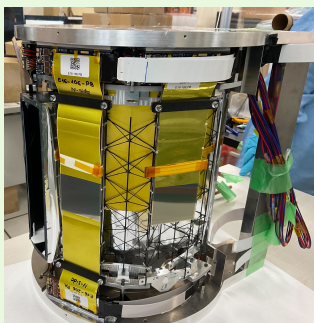


最内層飛跡検出器

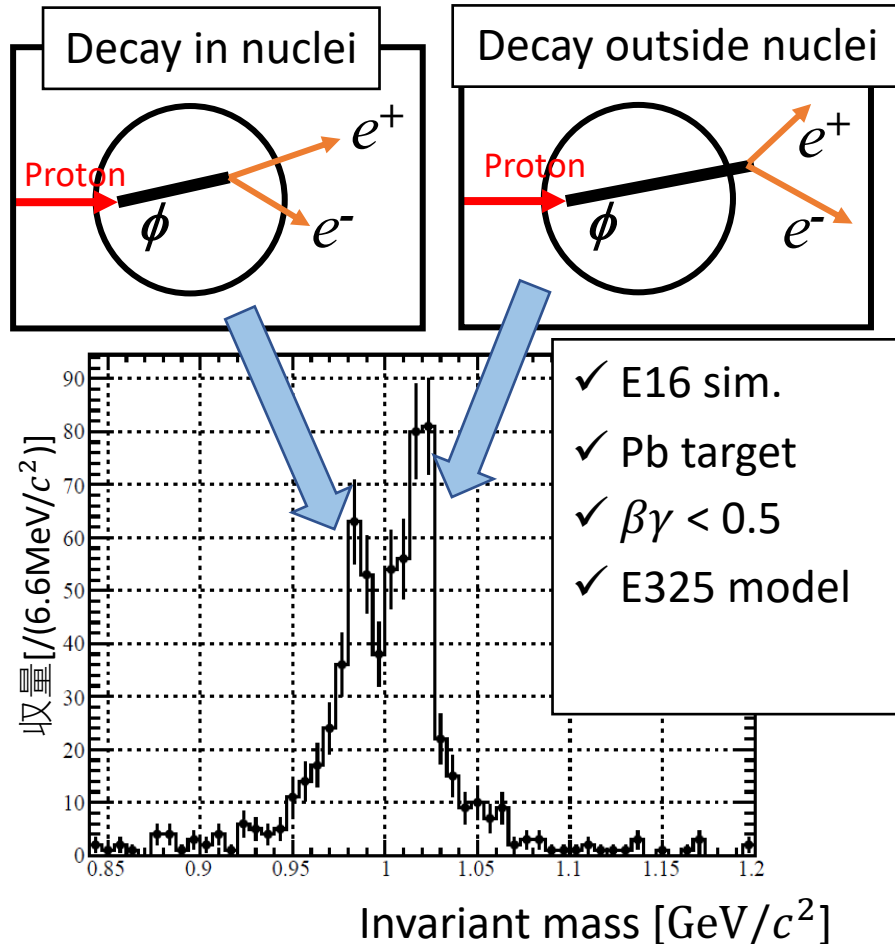
STS (Silicon Strip Detector)
の要求性能

位置分解能 : **$30\text{ }\mu\text{m}$**

時間分解能 : **6 ns**



Run2での期待

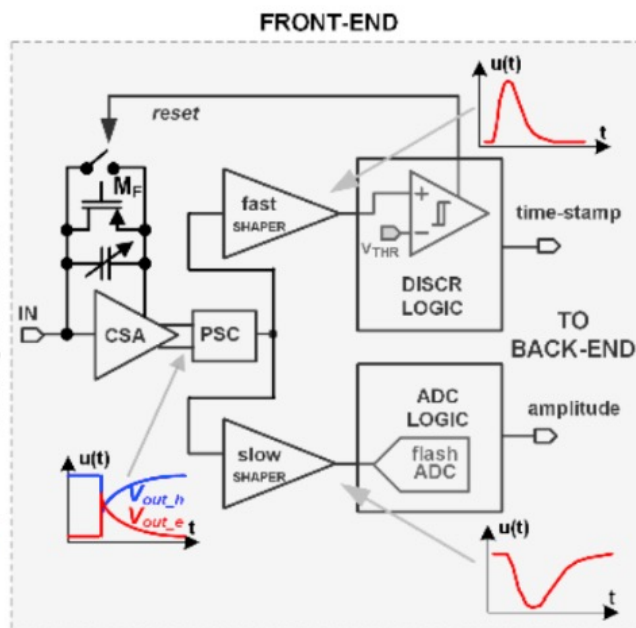
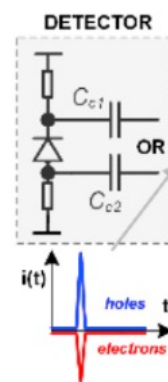


2. STS Overview : 基本性能

■ SMX : STS/MUCH-XYTER

- ✓ CBM開発の**セルフトリガー**で動作する連続読み出し用のASIC

Parameter	Value
チャンネル数	128+2(test channel)
Input capacitance (検出器+ cable)	30pF
ADC bit	5 bit
TDC bit	14 bit

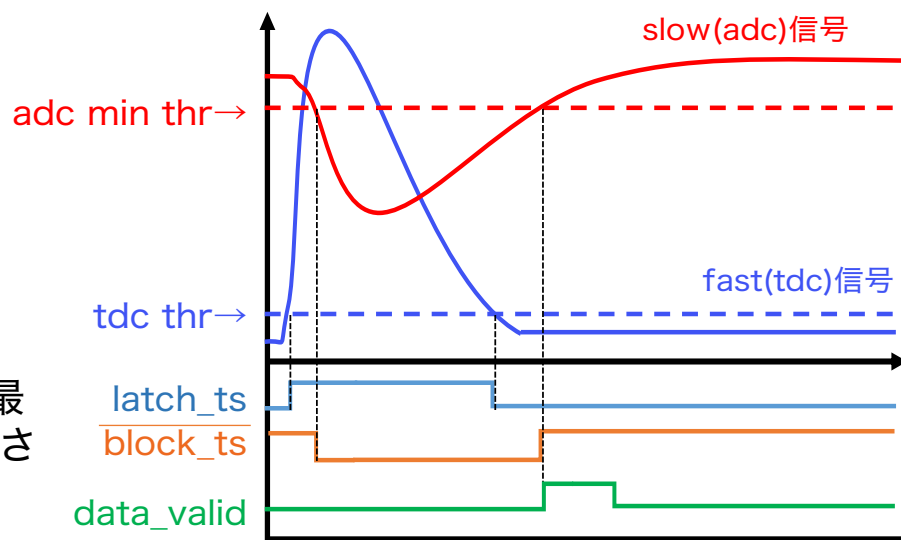


検出器で生成された電荷信号はCSAによって積分され、その後出力信号は**2つの経路**に分けられる
→ **fast SHAPER**, **slow SHAPER** へ

fast SHAPER→DISCRLOGIC : **timestamp**
slow SHAPER→ADC LOGIC : **波形のピーク値(adc)**を記録

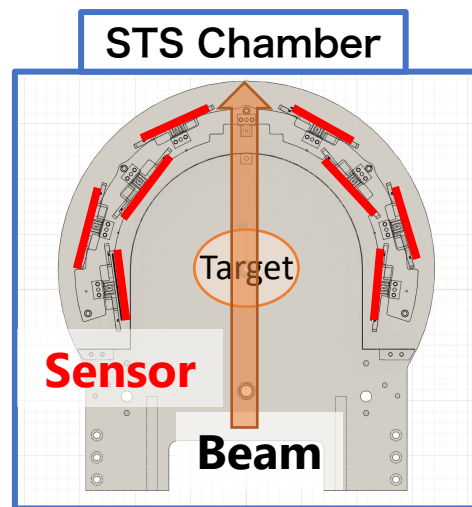
➤ ヒット情報の生成の仕組み

1. fast(**tdc**)信号が、tdc閾値を超える度に、**timestamp**を**latch**に格納
2. slow(**adc**)信号が adc最低閾値を超えると、timestampのlatch格納は **block_ts** 信号によってブロックされる
3. slow(**adc**)信号が、ピークに達し、再びadc最低閾値へ戻ると、**data_valid flag** 信号が出されて、ヒットデータがFIFO に書き込まれる

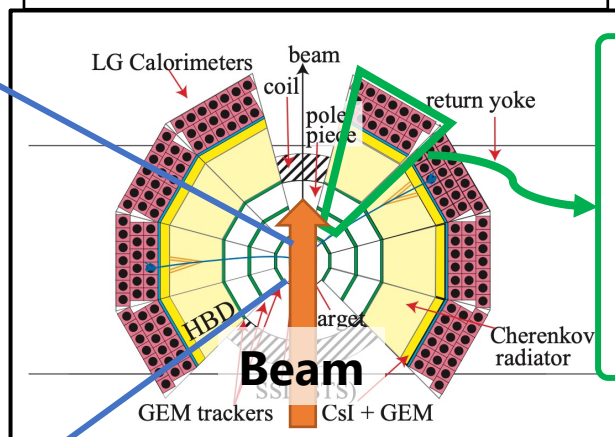


2. STS Overview : E16実験へのインストール

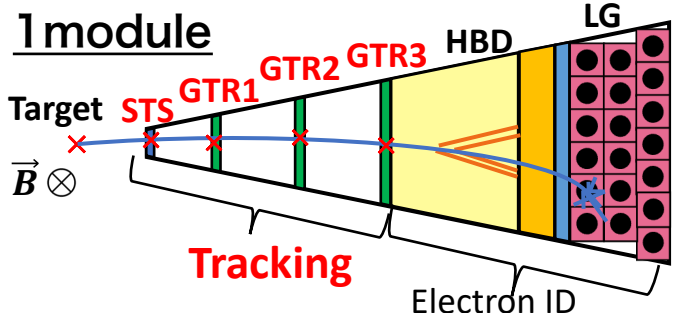
■ STS Chamber



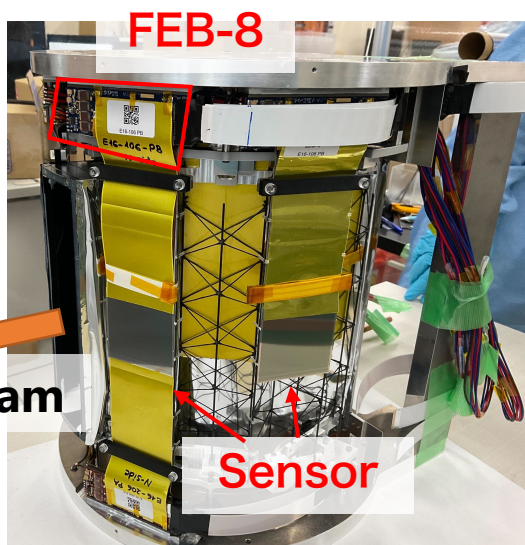
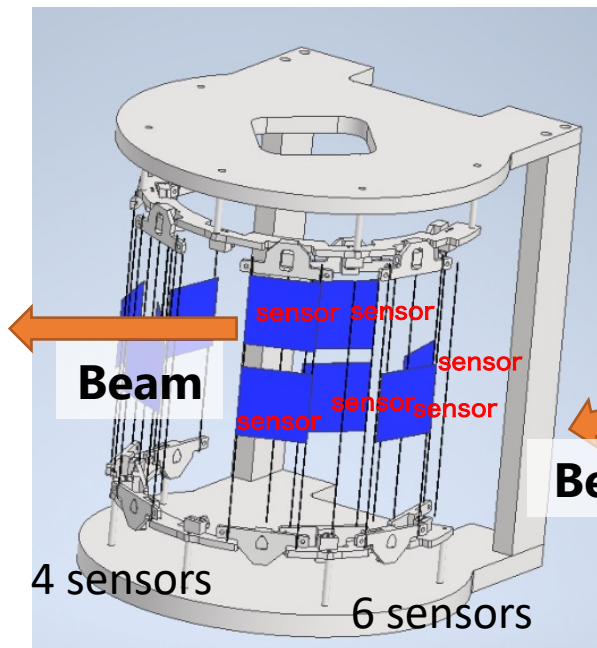
E16検出器群 (Top view)



1 module



STS as the most inner tracking device for the J-PARC E16 experiment

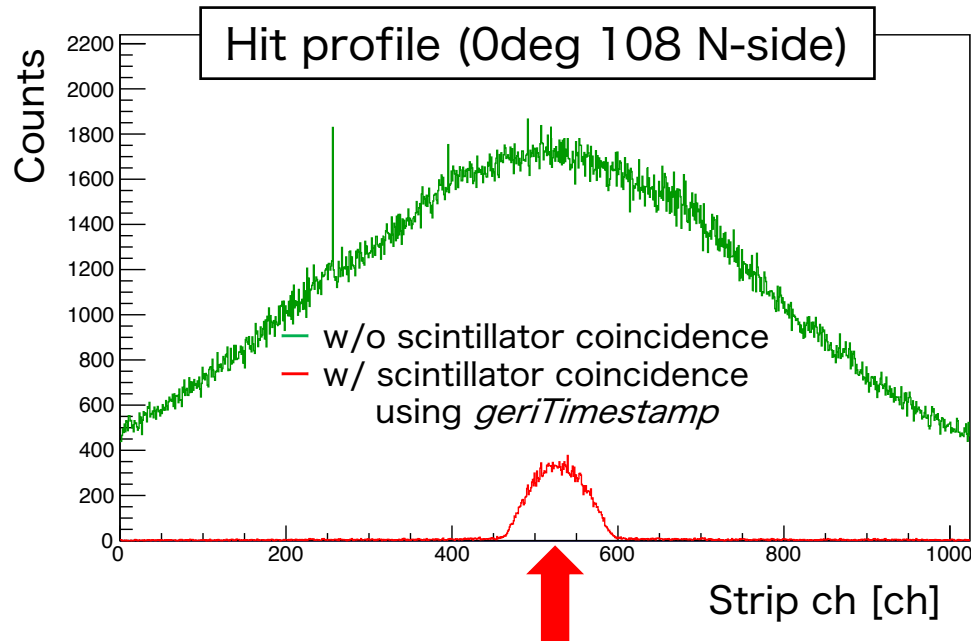


- ✓ E16検出器群は、 $\pm 15^\circ \sim \pm 135^\circ$ の円筒形に配置
- ✓ Run 1ではセンサを10台で構成
- ✓ チェンバーをアルミマイラーとブラックシートでカバー
- ✓ 前回のCommissioning Run (Run 0d: 2023.6)にて初めてインストール

4. 実験結果 : Hit profileと時間分解能

■ Hit profile

- **Green** : w/o selections.
- **Red**: シンチ信号の *geriTimestamp* の前後20tick ($\pm 0.5 \mu s$)のセンサhit.



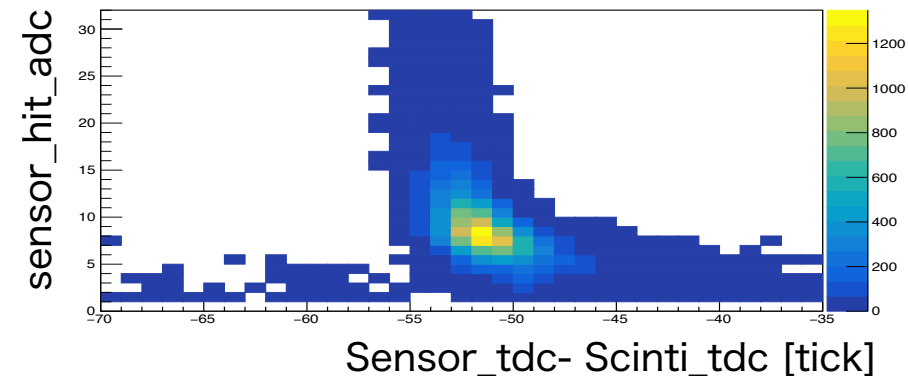
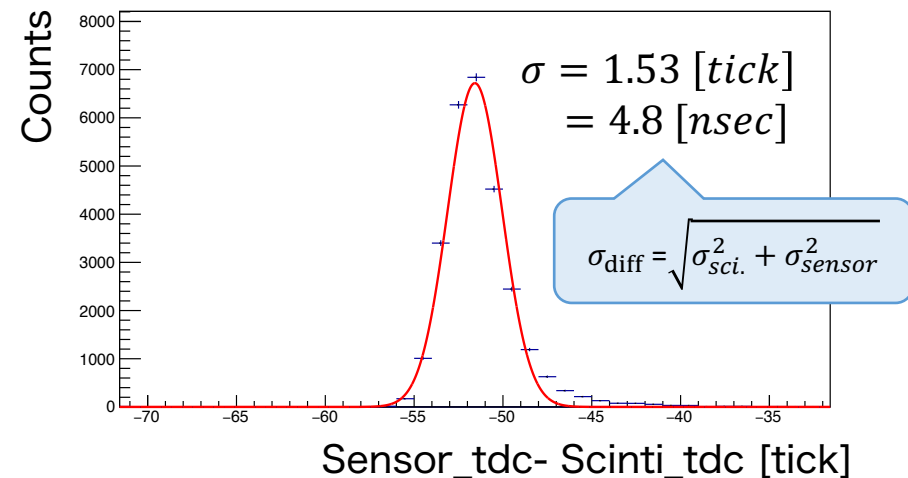
4枚のシンチを通過した電子のセンサhit

✓ Beamの大きさ x:6cm y:4cm

→ DAQシステムが正常に動くことを確認できた

■ 時間分解能

- *SMX TDC* を用いて解析
- 時間分解能 : **4.8 nsec** (0deg108N)
→ E16実験の要請を満たす



→ 右側のテールは低adchitによるもの