

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 不感時間削減のための新トリガー方式の開発

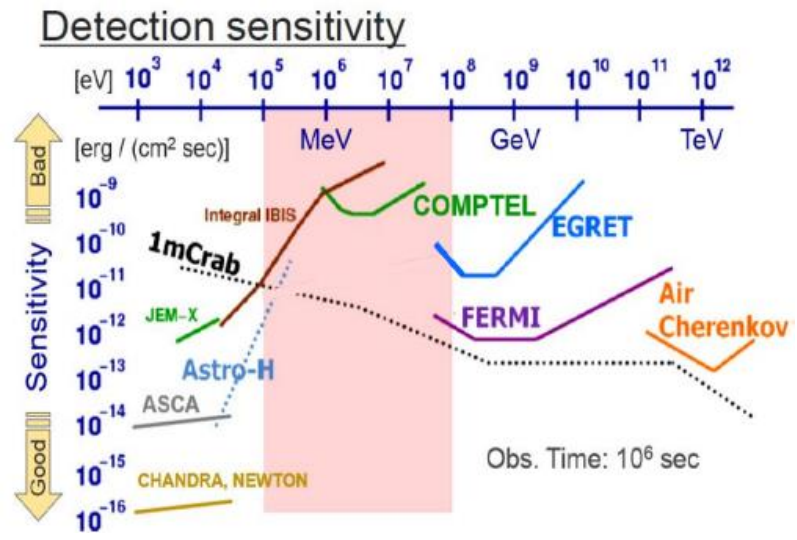
MPGD & Active媒質TPC2021研究会

京都大学大学院 理学研究科

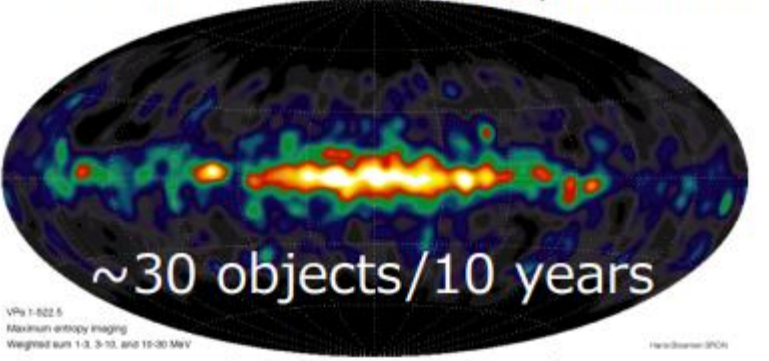
田原 圭祐

# MeVガンマ線天文学

- 元素合成：SNR, 銀河面
- 粒子加速：ジェット(AGN)
- 強い重力場：Black hole
- Etc. :  
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



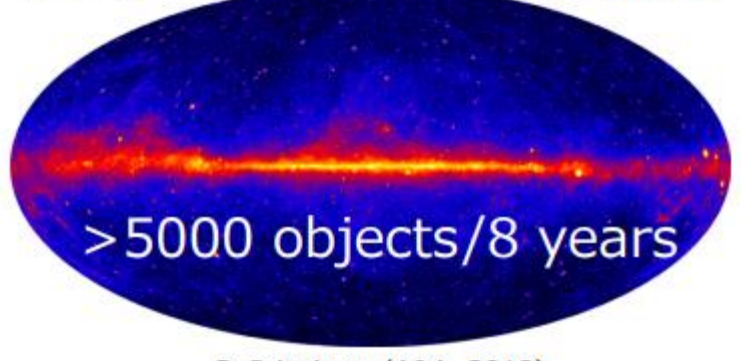
1-30 MeV CGRO/COMPTEL



V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

MeV sky map

> 1 GeV Fermi/LAT



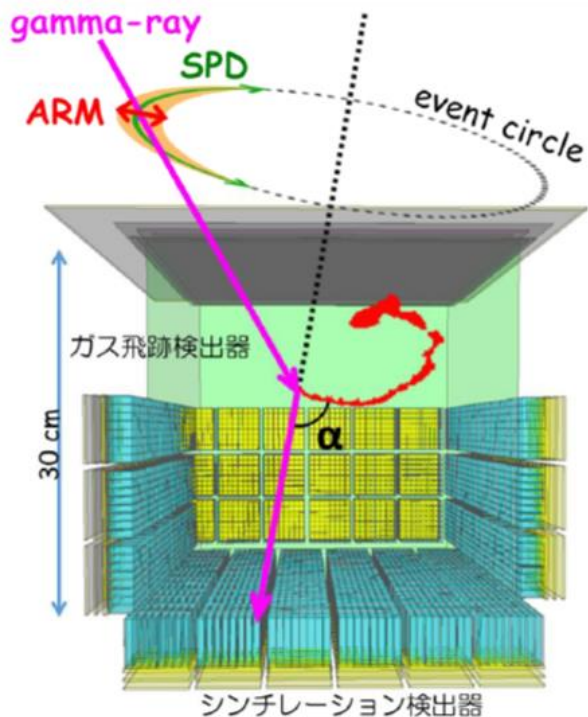
G. Principe+ (A&A, 2018)

GeV sky map

次世代望遠鏡への要請

- ◆ 数百keV~100 MeVの広帯域
- ◆ 全天探査のための広い視野
- ◆ 高S/Nの鮮明な画像

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)



## ガス飛跡検出器(TPC)

反跳電子のエネルギー + 飛跡

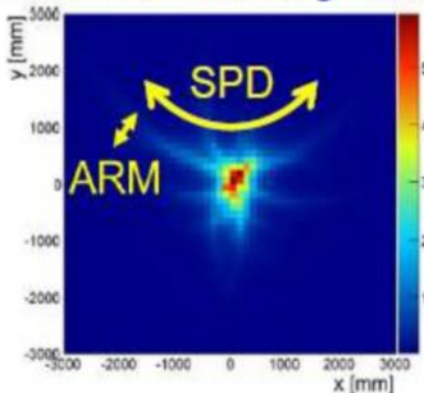
## シンチレーション検出器(PSA)

散乱ガンマ線のエネルギー + 吸収位置



個々の光子の到来方向を**一意に**決定

### Electron Tracking method



- 大きな視野 (~3 sr)
- 電子飛跡による鋭いPSF  
⇒ 範囲外の雑音をイメージングで除去
- $\alpha$ 角によるコンプトン散乱運動学テストと  $dE/dx$ による粒子識別による雑音除去能力  
→ 重いVETO検出器が不要

# SMILE計画

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging  
Loaded-on-balloon Experiment

## SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)
- dE/dXによるバックグラウンド除去の成功 A. Takada+. ApJ,2011

SMILE-II: 地上試験のみ T. Tanimori+. ApJ,2015

## SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

- MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立
- 明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Now!

## SMILE-3

- 長時間気球を用いた科学観測
- COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測 ~ sub-mCrab sensitivity

# トリガー方式の変更

## SMILE-I (VME, Common-Start)

→VMEの通信速度でトリガーレートが律速

## SMILE-2+ (Gbit通信, Common-Start)

→シンチをトリガーに

→不感時間増加

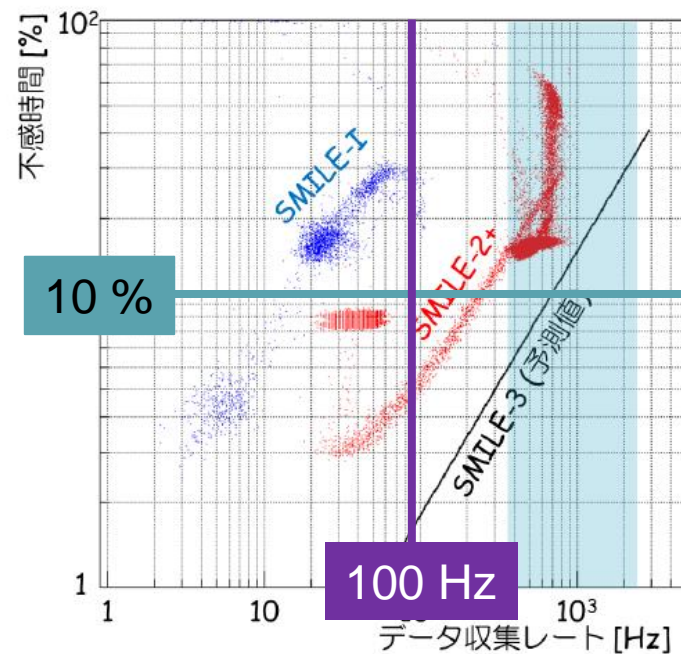
$10^4 \text{ Hz} \times 20 \mu\text{s} \sim 20\%$

## SMILE-3 (Gbit通信, Common-Stop)

→TPCをトリガーに

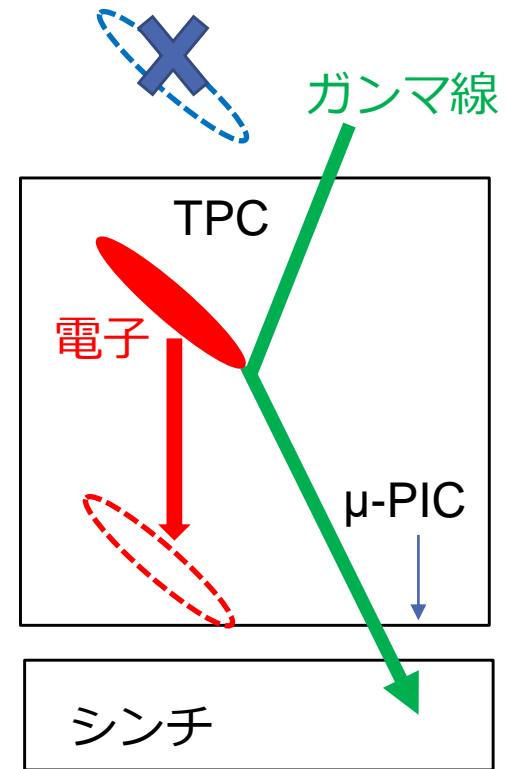
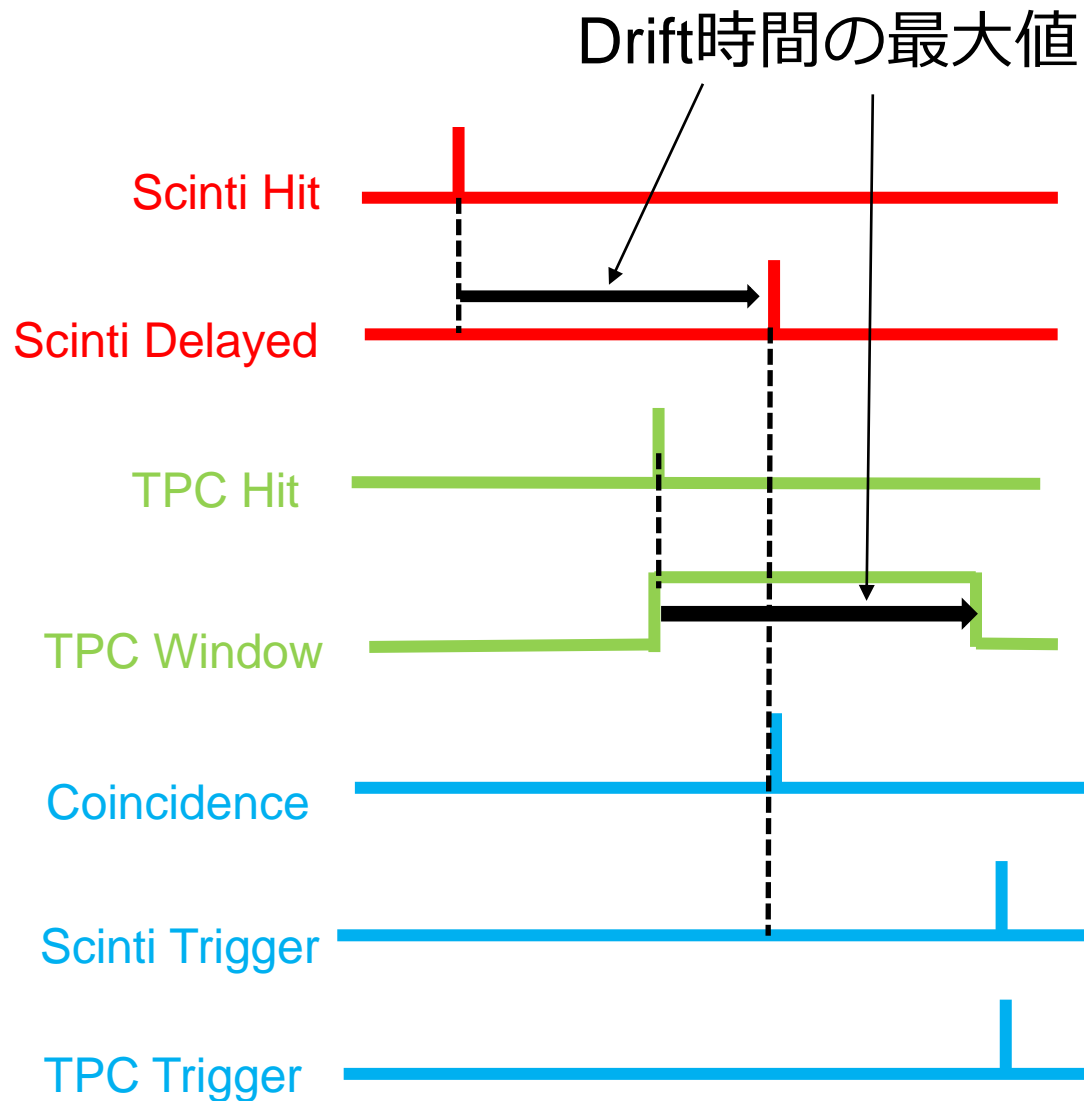
→デットタイム削減

$10^2 \text{ Hz} \times 10 \mu\text{s} \sim 0.1\%$



ヒットレート シンチ : TPC  $\cong 10^4 \text{ Hz} : 10^2 \text{ Hz}$

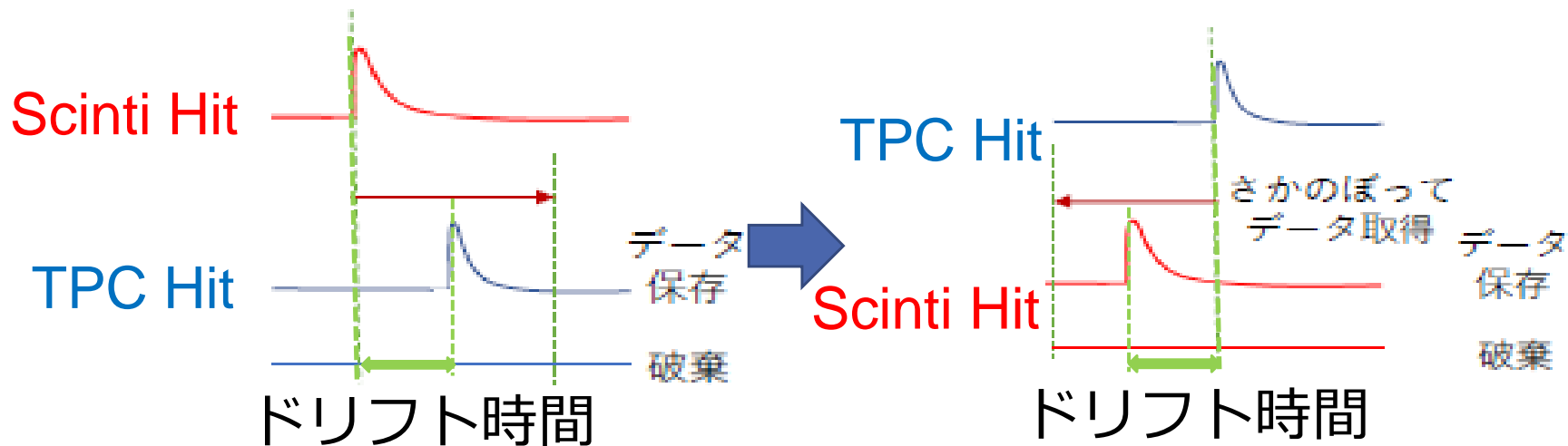
# 新トリガー方式のロジック



# トリガー方式の変更

SMILE-2+  
Common-Start型

SMILE-3  
Common-Stop型



- シンチの波形取得にPeak Hold式ADCは不可
- TPC単体ではドリフト時間は求まらない  
(シンチの時間分解能が大事)

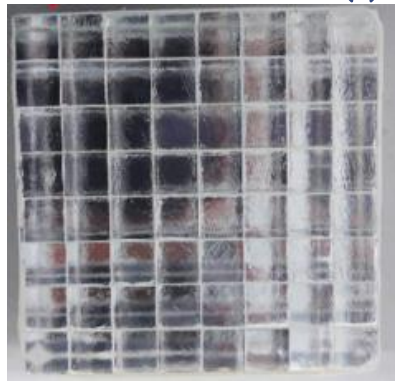
要求値 ~20 ns



ドリフト速度 ~ 4 cm/ $\mu$ secなら  
z方向位置分解能 ~ 800  $\mu$ m

# シンチレーション検出器の改良

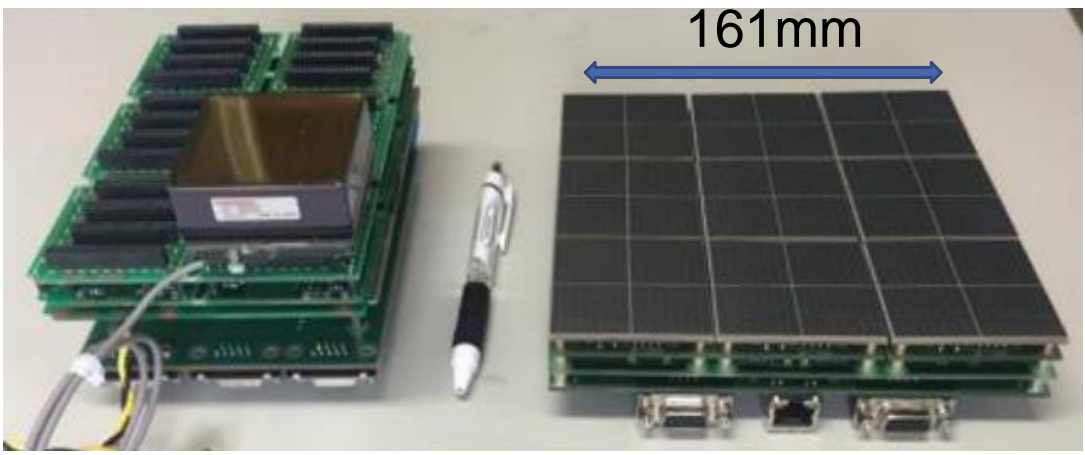
6 mm



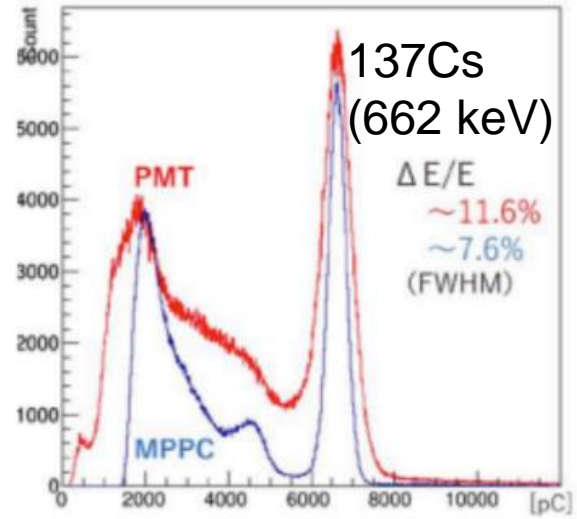
GSO( $Gd_2SiO_5(Ce)$ )

- トリガー改良のための変更
  - ADCをPeak Hold方式→Sampling 方式に

- 科学観測に向けた変更
  - 光読み出しをPMTからMPPCへ
    - エネルギー分解能11%→7.6% (@662 keV)
  - High/Low Gainの2種類のアンプ
    - ダイナミックレンジの拡大 (100keV ~ 5, 6 MeV)



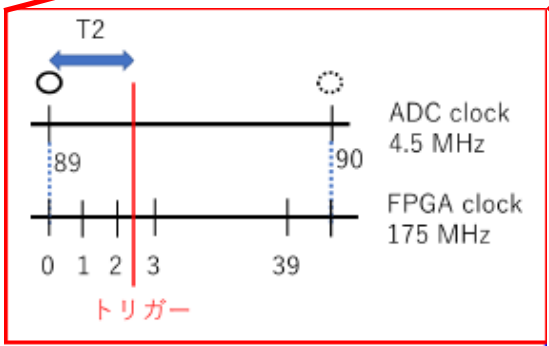
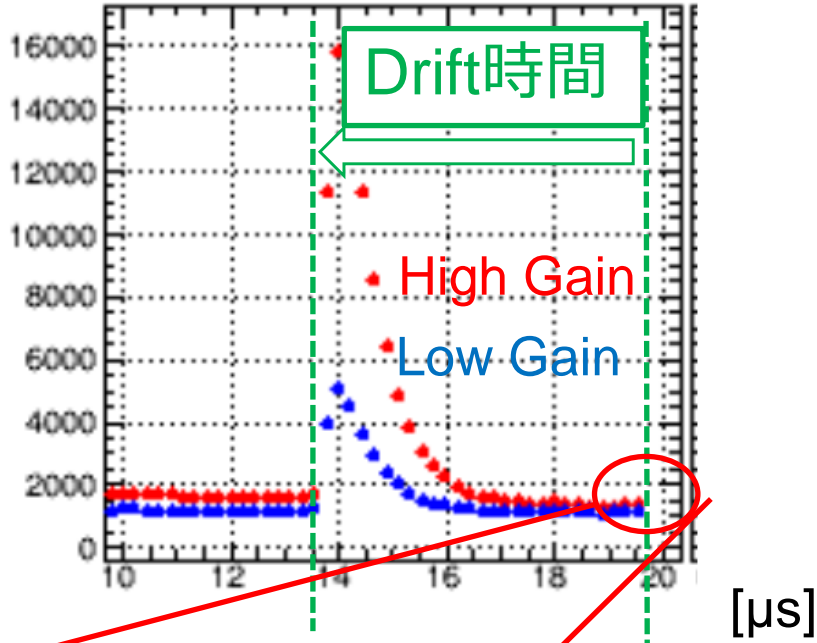
SMILE-2+ → Prototype for SMILE-3



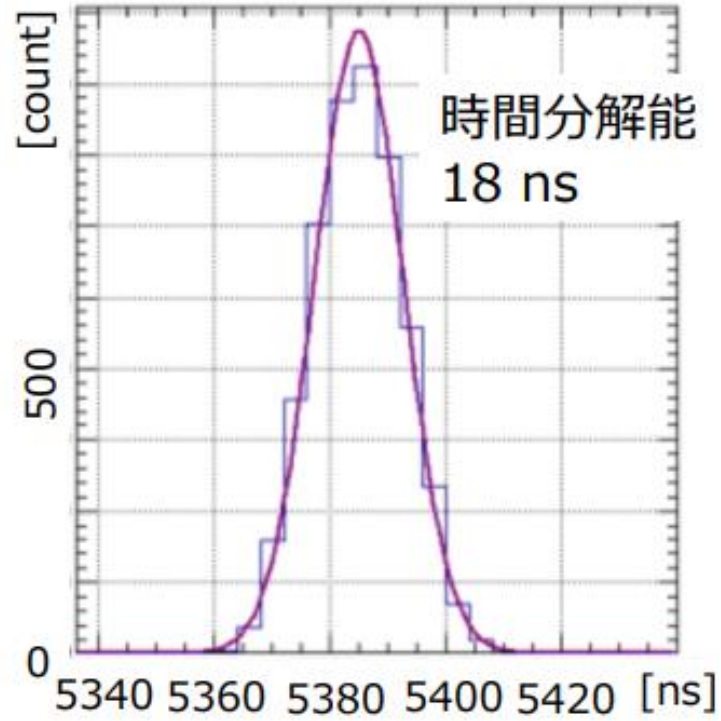


# シンチレーション検出器の時間分解能

[ADC] シンチの波形



ADC Clock + Sub-Clock(FPGA)



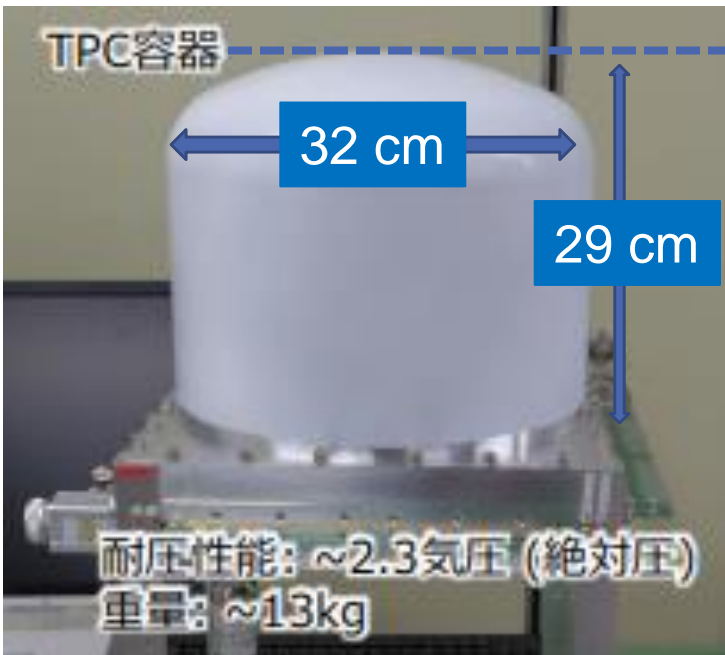
トリガーからパルス  
立ち上がりまでの時間

**時間分解能20 nsを達成!**

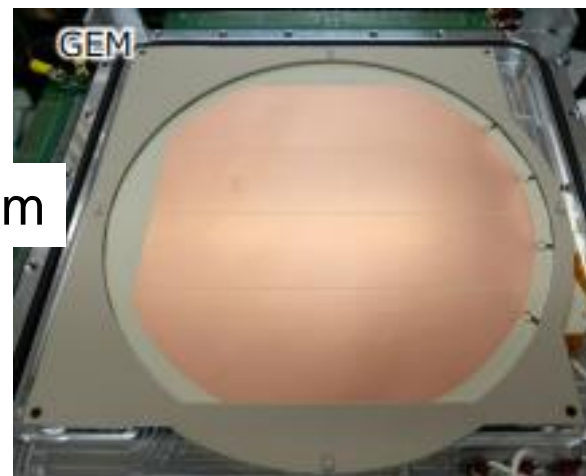
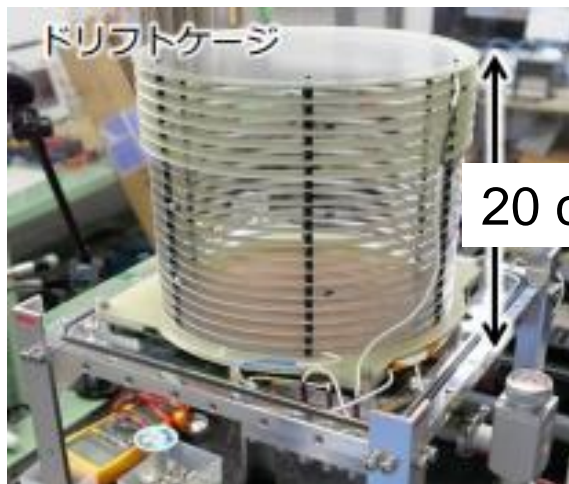
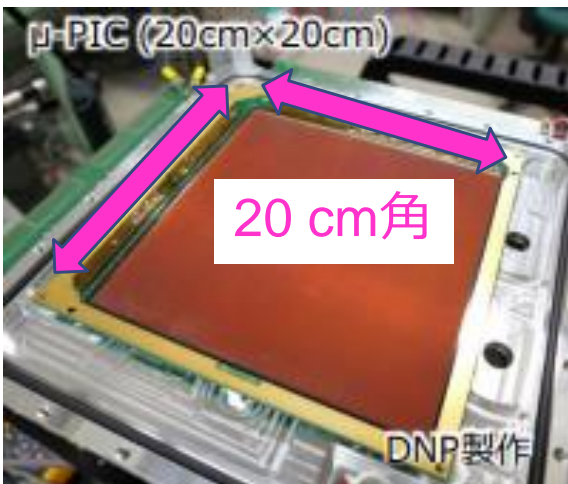
# 新ETCCでの動作チェック

シンチレーション検出器&トリガー方式が  
改良されたETCCでの動作試験

# 用いたTPC

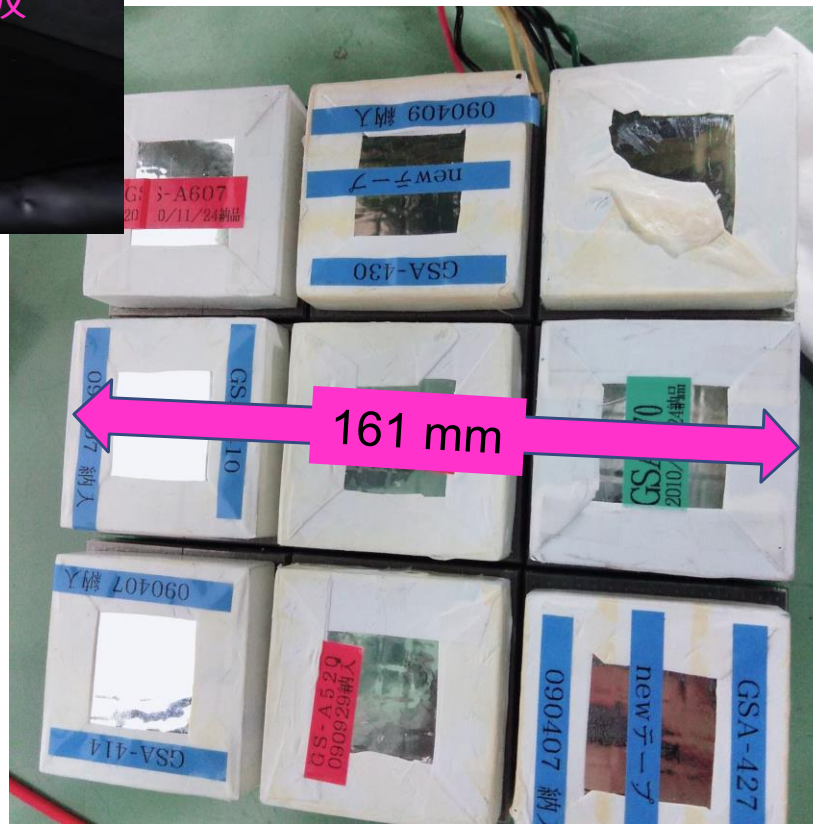
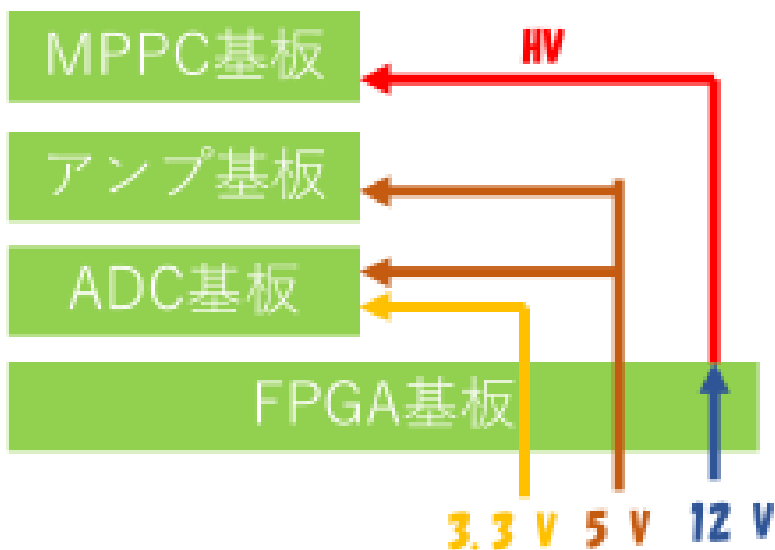
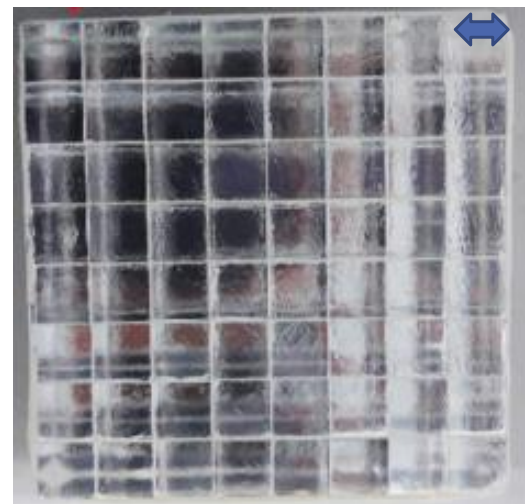
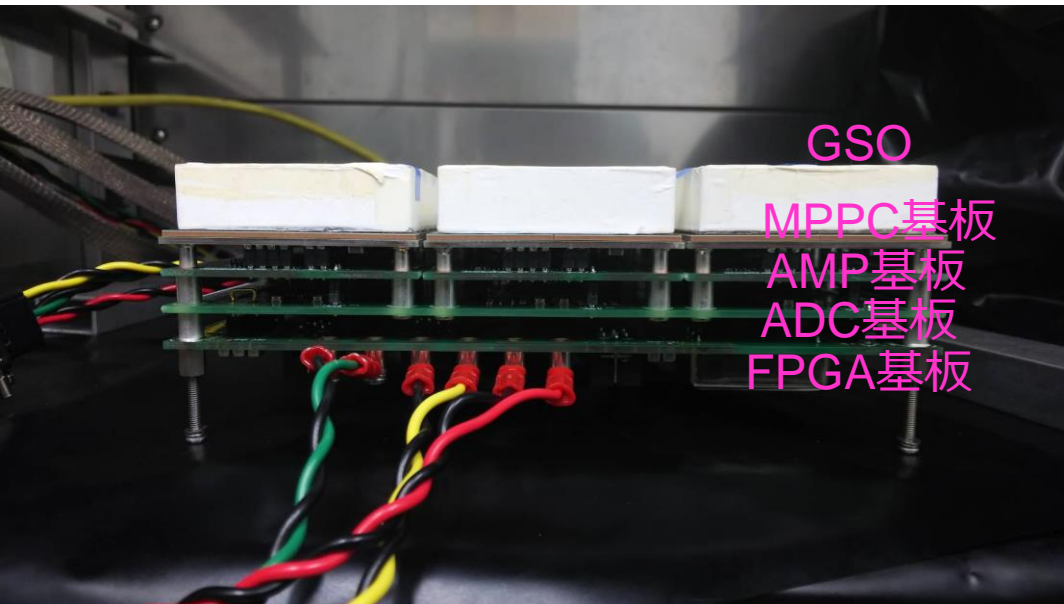


ガスの種類	Ar/CF <sub>4</sub> /iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (= 95 : 3 : 2)
ガス圧	2 atm (絶対圧)
インダクション電場	~ 1100 V/cm
ドリフト電場	~ 200 V/cm
ドリフト速度	~ 4 cm/usec
Drift Top	- 5000 V
ΔGEM	400 V
μ-PIC	400 V



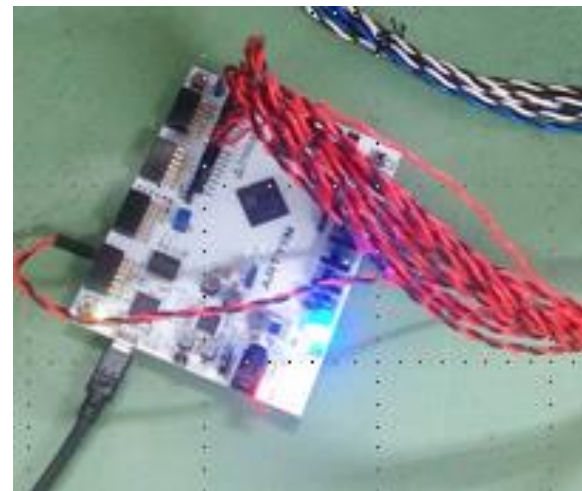
6 mm角

# 用いたシンチ & MPPC

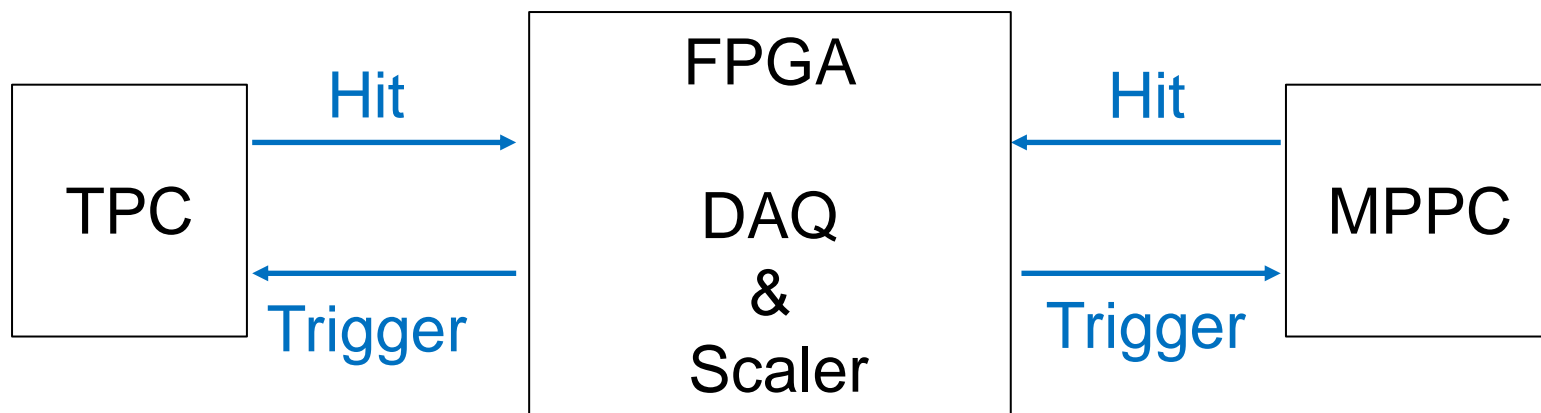


# Trigger Control Unit (TCU)

- DAQ部分
  - Hit信号からトリガーを作るロジック
- Scaler 部分
  - Hit, トリガー, デットタイムのカウンタ (を1から作成した)



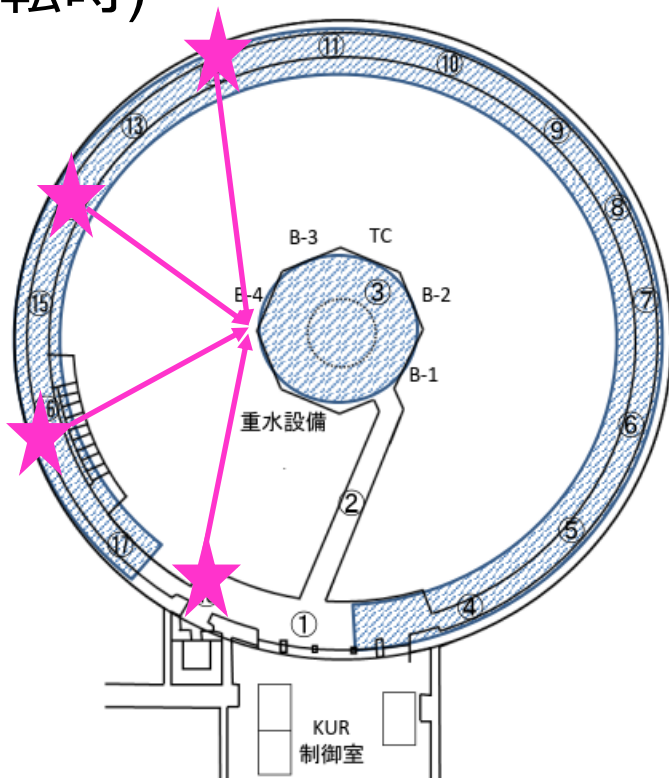
Trigger用FPGA  
(Arty S7-50)



# 試験を行った場所

高線量下での試験→原子炉

- ガンマ線 : 1.0 ~ 4.5  $\mu\text{Sv/h}$
- 中性子 : 1.5 ~ 6.0  $\mu\text{Sv/h}$   
(5MW運転時)



- cf. 環境放射線  
(@京大理学部5号館)
- ✓ ガンマ線 : ~ 0.05  $\mu\text{Sv/h}$
  - ✓ 中性子 : 0  $\mu\text{Sv/h}$



@京大複合研 (12/2, 9, 16)  
(大阪府熊取町)

# 環境放射線モニタリングへの応用

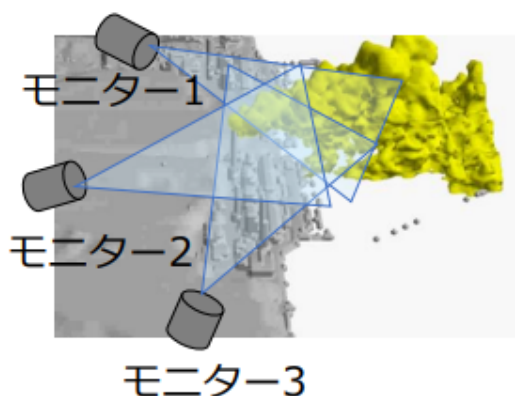
1Fの廃炉措置

→核種分布と放出量の定量解析が必須

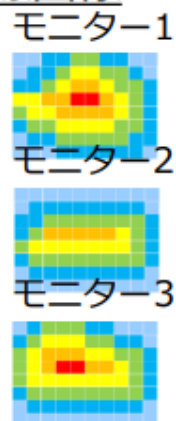
ETCCなら...

**たった数方向の測定でガンマ線3次元分布の  
可視化が可能！**

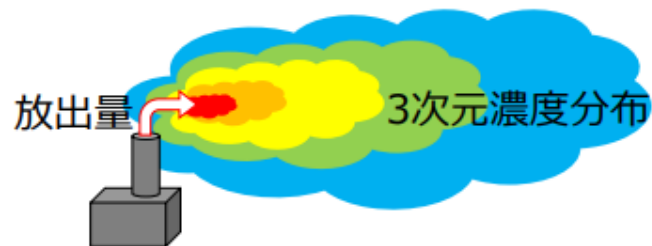
プルームのγ線計測



γ線画像



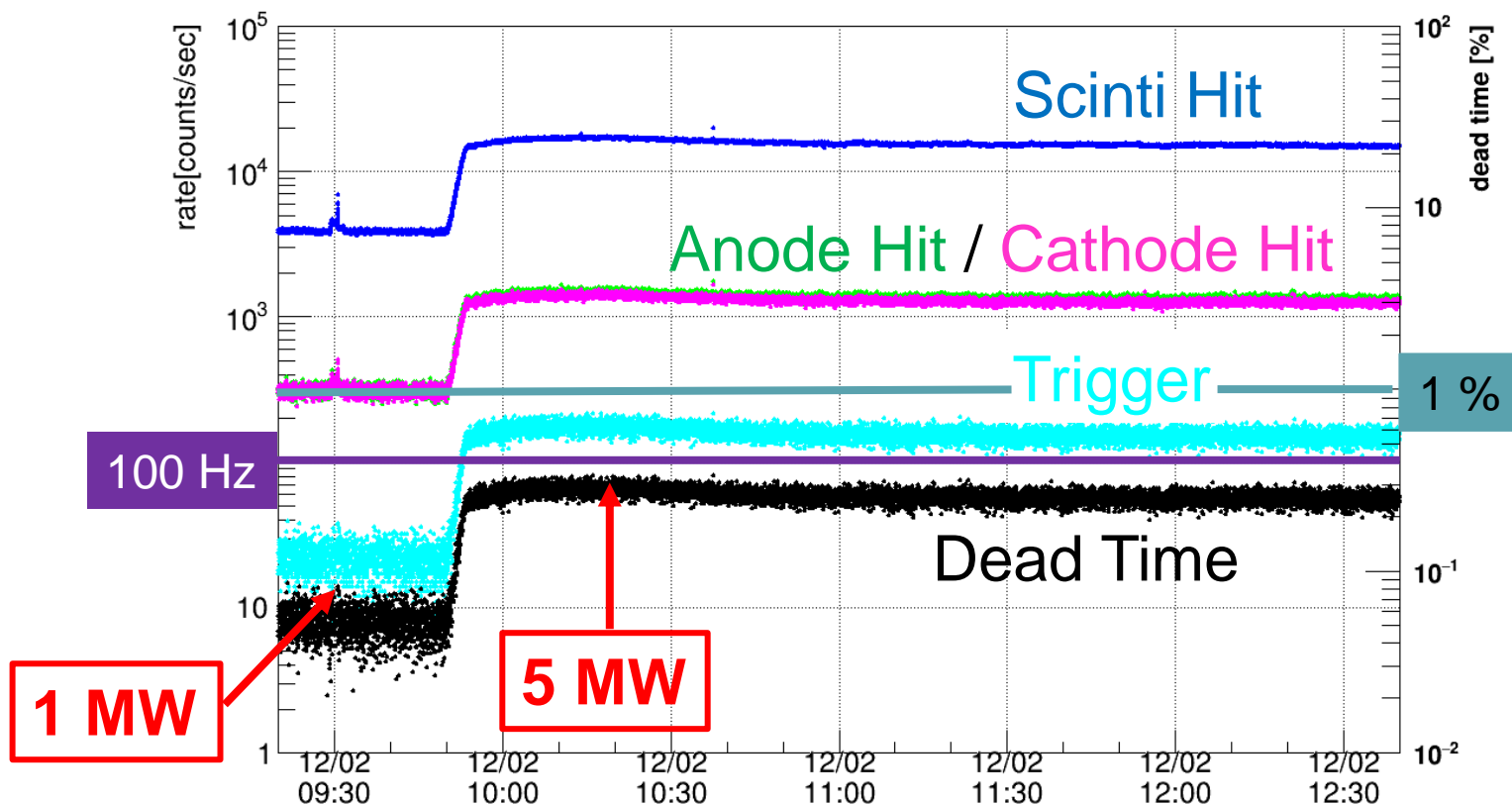
プルームの3次元濃度分布・放出量  
プルーム中核種からの放射線輸送過程を  
多数のγ線モニター画像から逆解析し核  
種の3次元濃度分布と放出量を復元



# Scaler測定結果

トリガーレート  $\cong$  150 ~ 300 Hz (5 MW運転時)

cf.  $\cong$  2, 3 Hz (by 環境放射線)

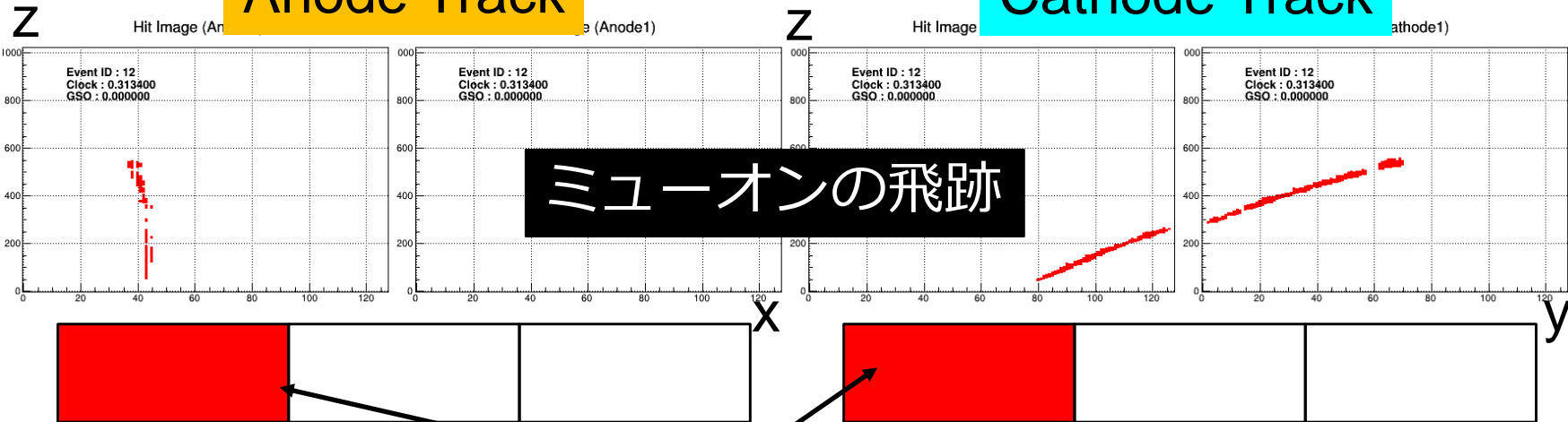




# 同時が取れていることの確認

Anode Track

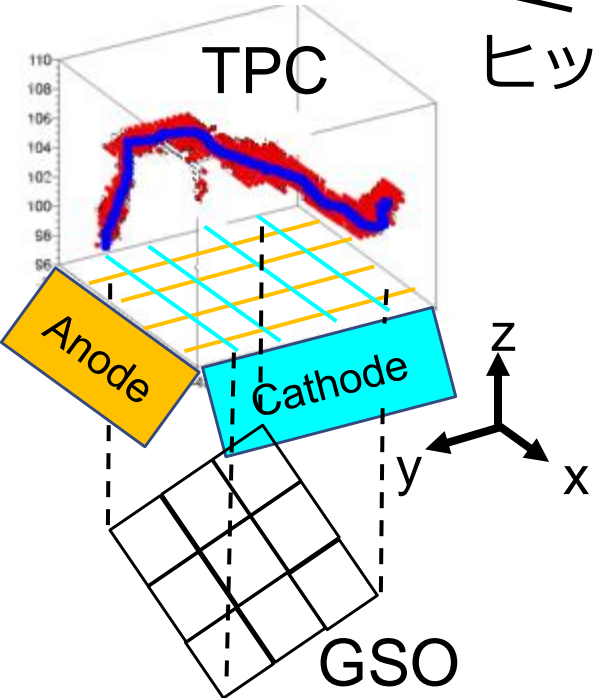
Cathode Track



ミューオンの飛跡

ヒットしたシンチ

シンチ(3x3)



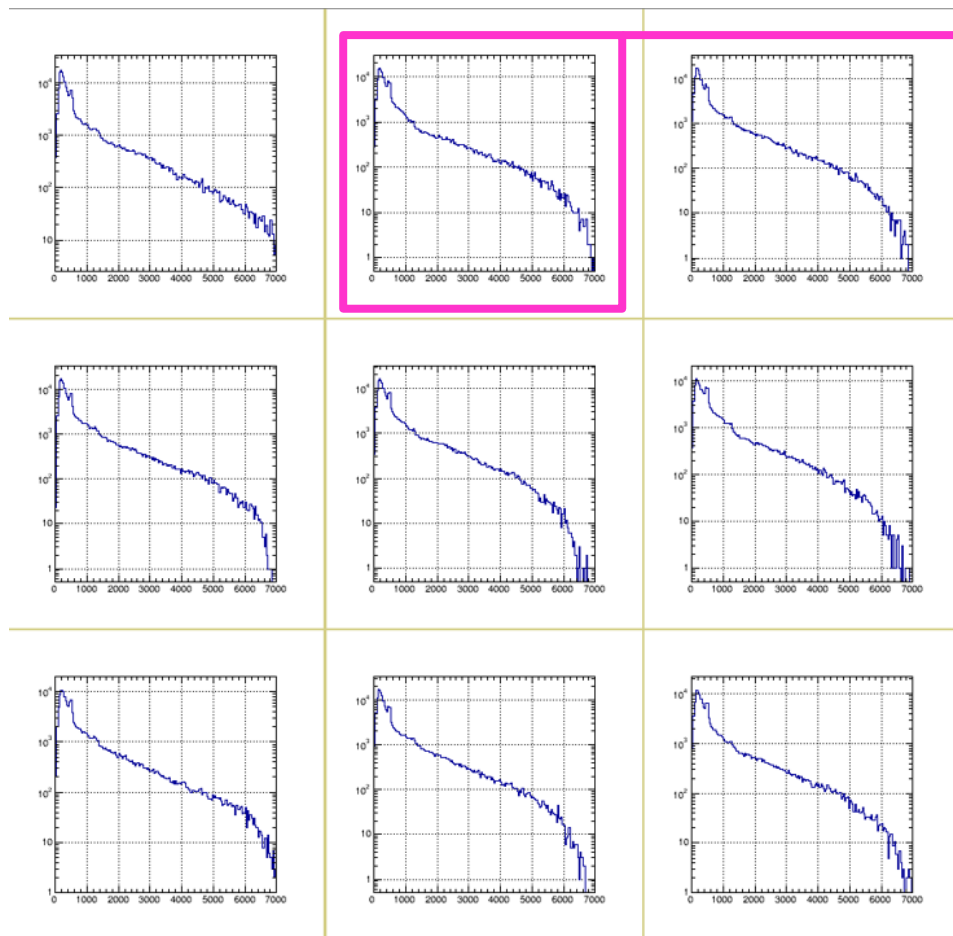
TPCでの飛跡の先にシンチのヒット点



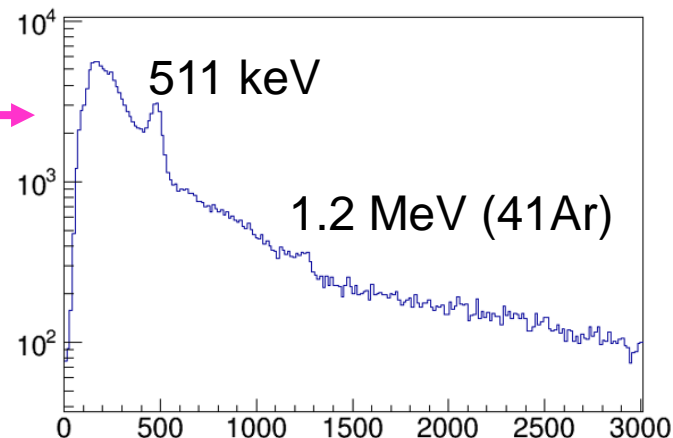
コインシデンスが正しく取られた!

# 測定されたスペクトル

シンチ9個のスペクトル(0 ~ 7 MeV)

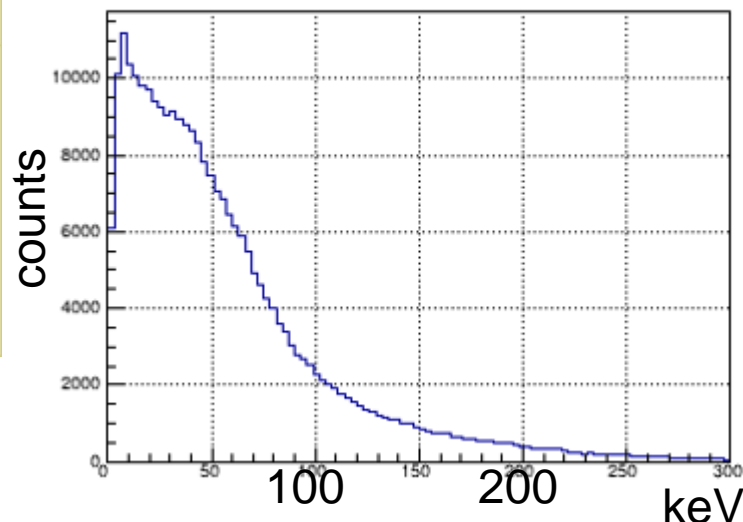


Counts/s



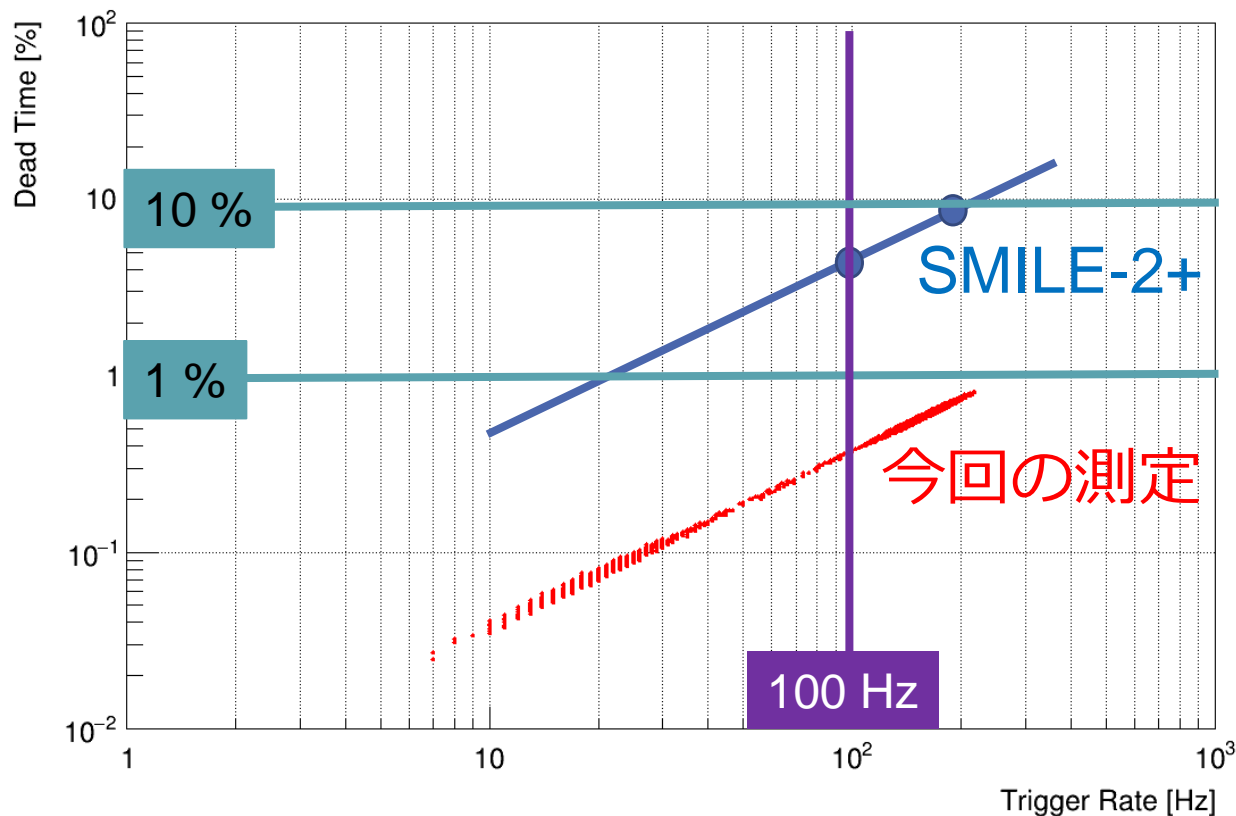
keV

反跳電子エネルギー ( $E_e$ )



現在、鋭意解析中！

# 新ETCCでのデッドタイム



SMILE-2+のDead Time

5%(@Trigger 100 Hz)

10%(@Trigger 200 Hz)



**改良後**

**0.4%(@100 Hz)**

**1%(@200 Hz)**

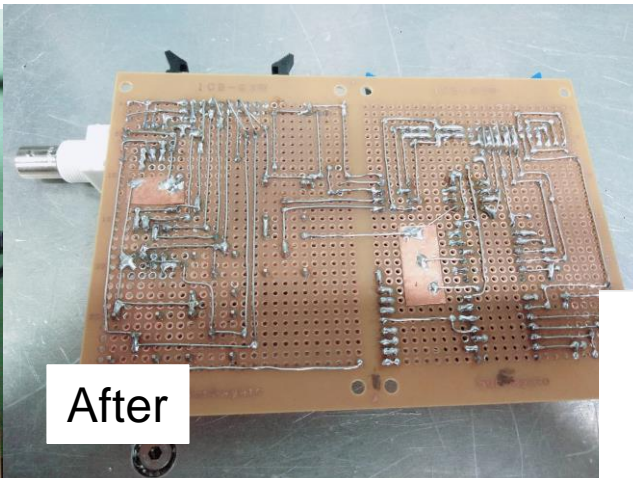
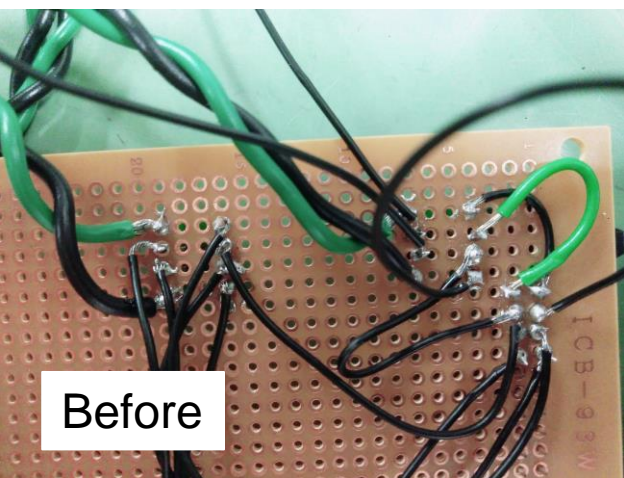
# まとめ

- 進展のないMeVガンマ線天文学を開拓するため、電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を開発している
- 次期気球実験SMILE-3では、COMPTELを上回る感度での科学観測を目指す
- SMILE-3に向けた取り組みの1つとして、TPCトリガーETCCを作製し、デッドタイム1桁削減に成功。  
現在データ解析中

# 余談

熊取での測定準備で自分は大きく成長した。

- はんだ付け・・・下手でしかなかった
- FPGA・・・言葉すら知らなかった



```

Trg_state <= Idle;
end if;
when Trg =>
  if Trg_count = TrgCnt then
    trg_state <= Aft_Trg;
  else
    trg_state <= Trg;
  end if;
when Aft_Trg =>
  if Trg_count = TrgCnt + AftTrgCnt then
    trg_state <= Idle;
  else
    trg_state <= Aft_Trg;
  end if;
end case;
end if;
end process;

```

```

process(clock,reset,trg_state) begin
  if reset = '1' then
    Trg_buf <= '0';
  elsif rising_edge(clock) then
    if trg_state = Trg and veto = '0' then
      Trg_buf <= '1';
    else
      Trg_buf <= '0';
    end if;
  end if;
end process;

```

