

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の 高放射線環境の画像化による放射能モニタリング

園田真也, 水村好貴, 高田淳史, 谷森達  
京大理

# 背景

## 1Fの廃止措置における6つの重要研究開発課題

1. 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明
2. 特殊環境下の腐食現象の解明
3. 画期的なアプローチによる放射線計測技術
4. 廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明 ( $\alpha$ ダスト対策を含む)
5. 放射性物質による汚染機構の原理的解明
6. 廃炉工程で発生する放射性物質の環境中動態評価

放射能の正確な情報収集が重要

- 放射線量
- 放射能分布
- スペクトル分析に基づく核種の同定
- 放射性物質の動態把握と拡散影響

**ETCCはすべての課題に  
重要な進展をもたらす可能性**

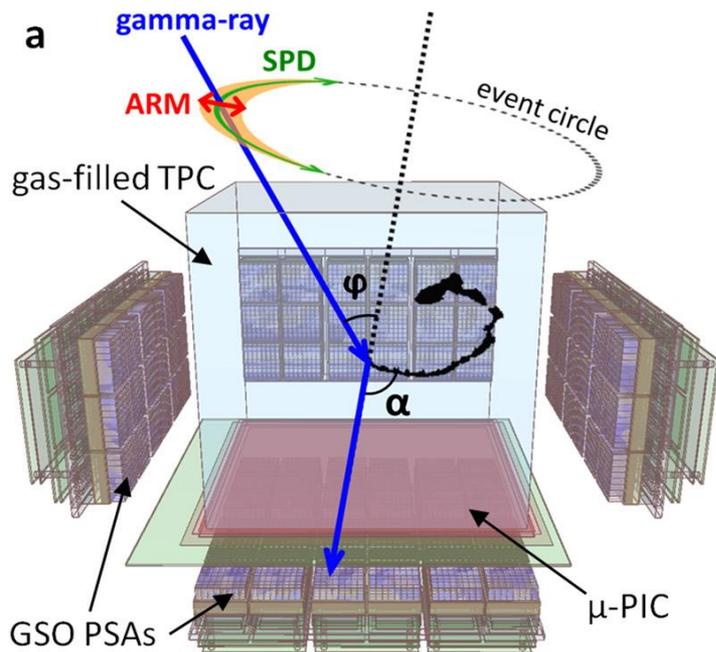
$\gamma$ 線画像からの大気中3次元核種分布及び放出量の逆解析手法 (JAEA担当)

- 核種分布と放出量を定量解析することで高精度な拡散予想
- 課題4, 5, 6に大きな進展

平成30年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
課題解決型廃炉研究プログラムに採択

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

ETCCの概念図



## ETCCの主要コンポーネント

### ■ μ-PIC (Time Projection Chamber: TPC)

コンプトン散乱で生成される反跳電子の三次元飛跡とエネルギーを測定

### ■ シンチレーションカメラ (Pixel Scintillator Array:PSA)

Pixel Scintillator Array + Multi anode PMT  
散乱γ線の吸収点とエネルギーを測定

散乱ガンマ線 + 反跳電子の情報

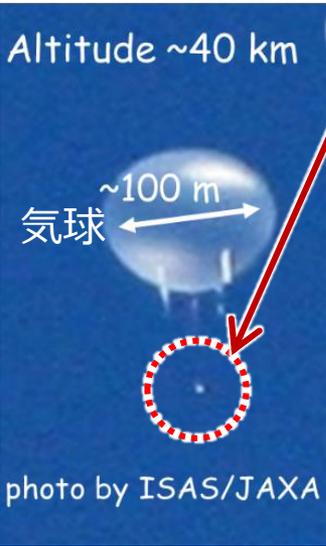


入射ガンマ線の到来方向を1光子ごとに一意に決定可能

ETCCの特徴	環境放射線モニタリングへの期待
ガンマ線エネルギー広測定領域	複数線源を同時にイメージング
広視野角 (3str)	少ない台数で3次元撮像可能
ガンマ線の到来方向を完全に決定	2次元PSFを定義, 定量的なイメージング可能
運動学的手法による雑音除去	高感度化, 高線量環境下でのイメージング

# 銀河中心由来のガンマ線(拡散成分と511keV)観測結果

JAXA気球で銀河を観測



(30×30×30)cm<sup>3</sup>-ETCC(SMILE2+)搭載

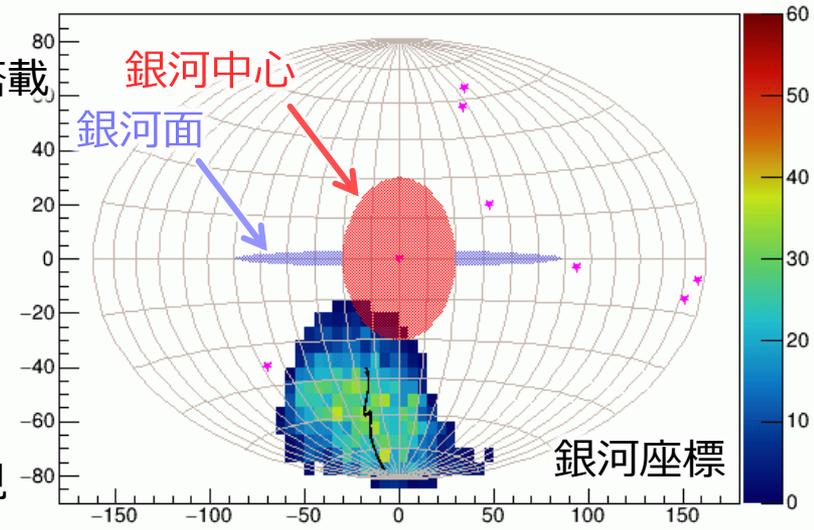
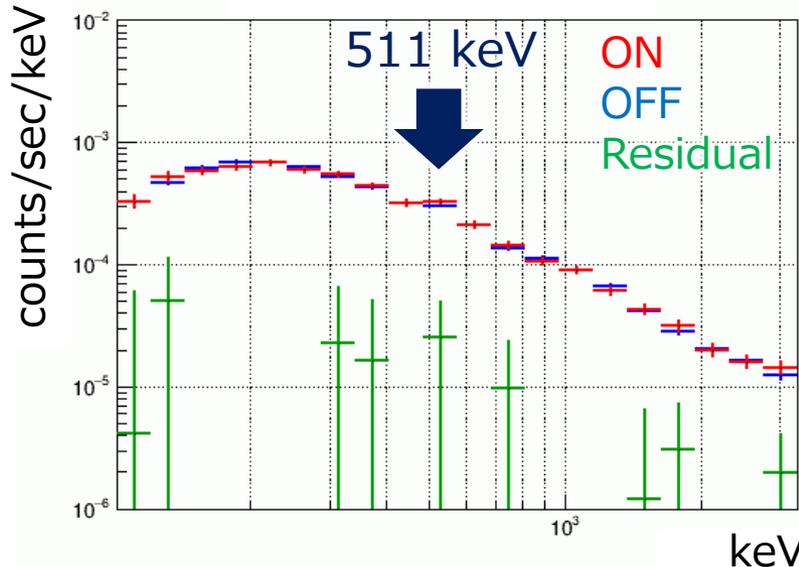
銀河中心ガンマ線の観測に成功  
 (観測時間 ~3時間程度)

- 拡散成分: 11.5 $\sigma$
- 511 keV: 4.9 $\sigma$

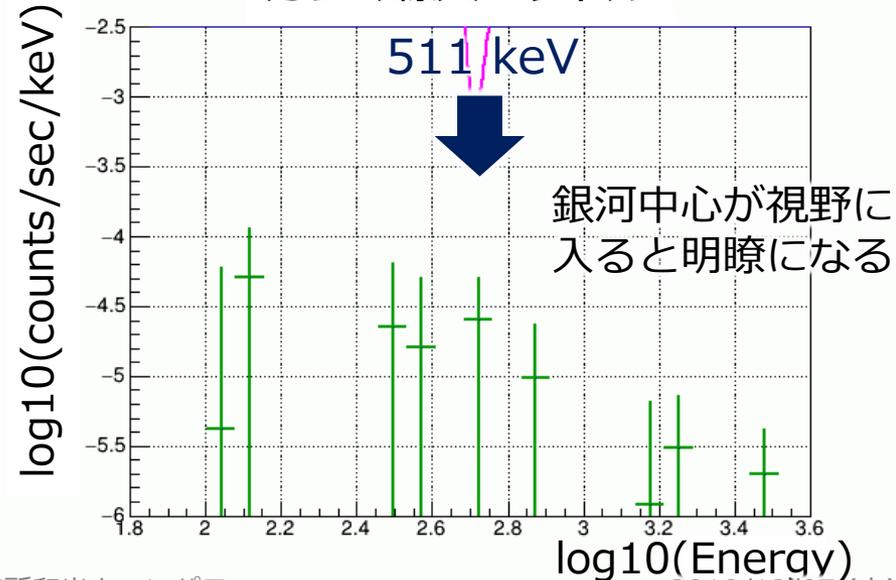
T. Tanimori TAUP@2019 資料から引用

ETCCによりイメージング分光を実現  
 宇宙雑音を完全除去に成功

ガンマ線スペクトル



ガンマ線スペクトル



# γ線画像から3次元核種分布と放出量を逆解析する手法の開発 (JAEA担当)

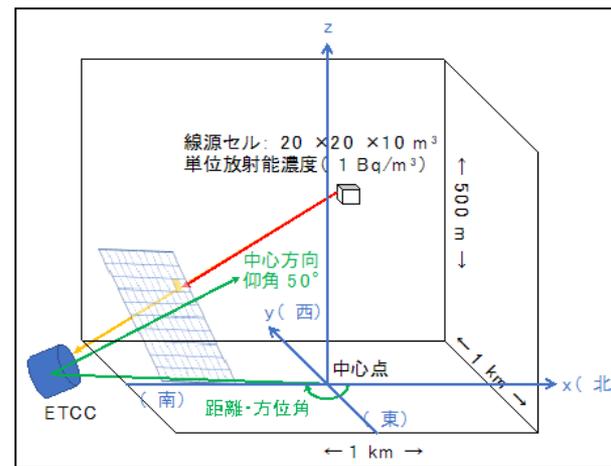
## 目標

ETCCにより得られるγ線の定量的画像から，建屋周辺大気中の放射性核種の3次元分布，及び放出量を逆解析する手法を開発する。

## 方法

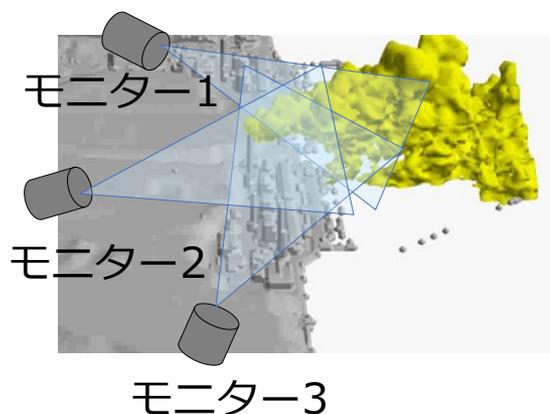
シミュレーションベースの手法開発，現地観測データによる試験 (沈着核種利用)

1. **大気拡散予測**: 1F建屋周辺の様々な大気中核種濃度分布生成
2. **放射線輸送計算**: 大気中核種分布からγ線画像データを計算する応答関数を構築
3. **逆解析手法**: 応答関数の逆解析によりγ線画像データから濃度分布を復元

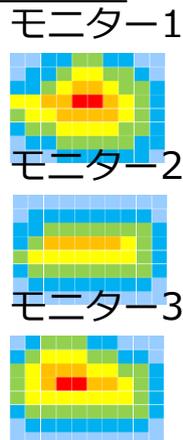


応答関数行列を計算する体系の模式図

## プルームのγ線計測

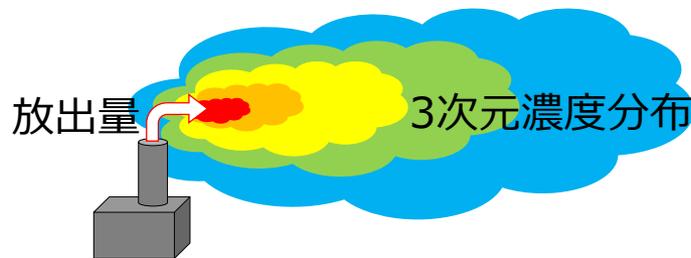


## γ線画像

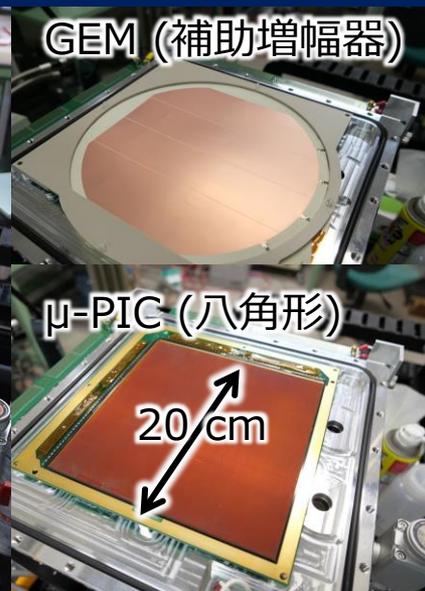
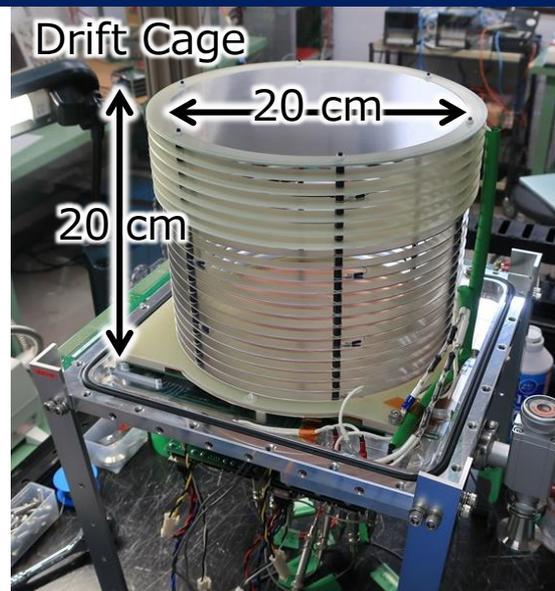
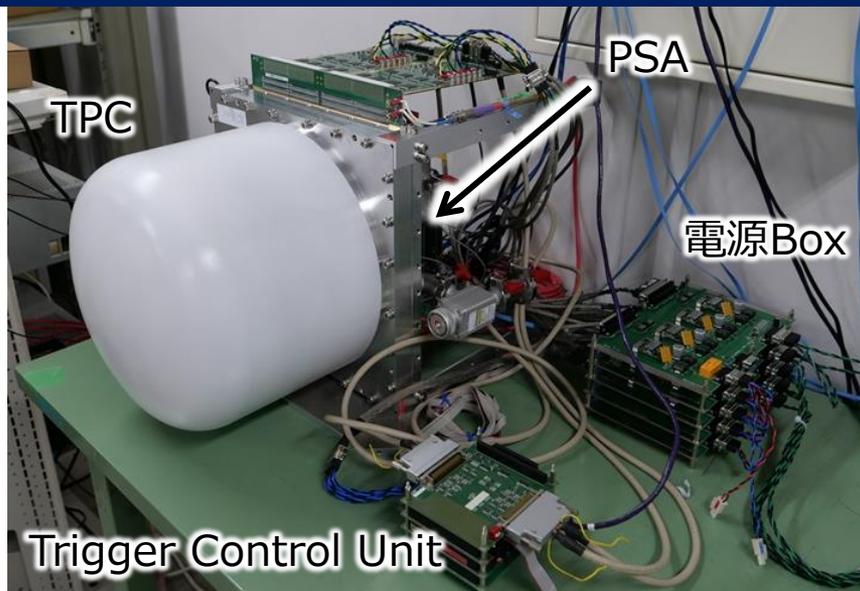


## プルームの3次元濃度分布・放出量

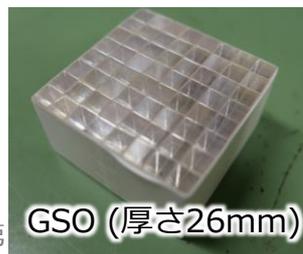
プルーム中核種からの放射線輸送過程を多数のγ線モニター画像から逆解析し核種の3次元濃度分布と放出量を復元



# 試作型ETCCの開発状況



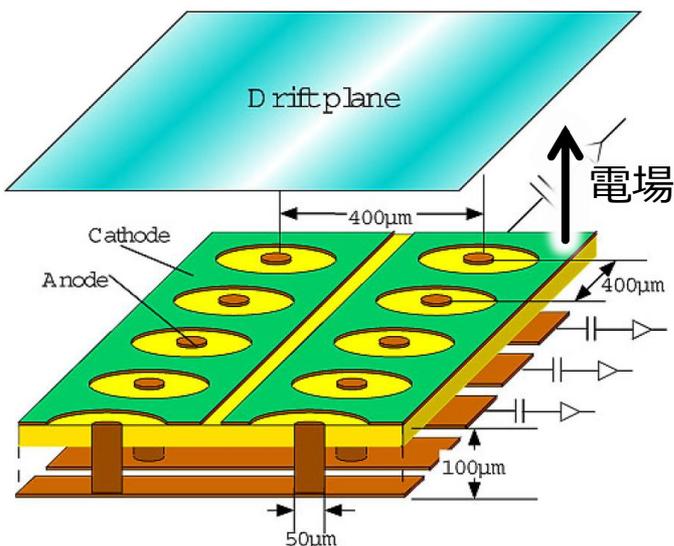
~10時間程度駆動



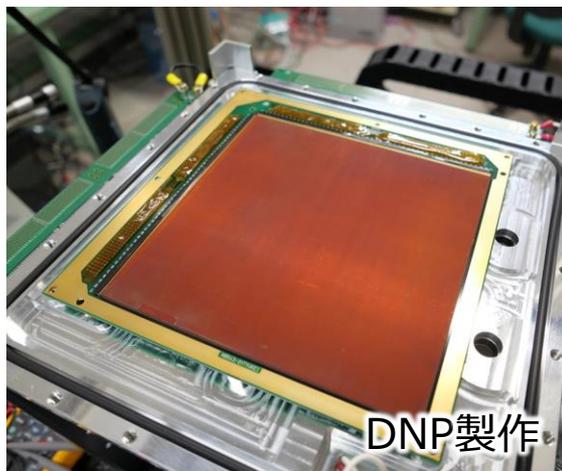
- AC電源不要で持ち運び可能な重量 (~30kg)
- ネットワークで遠隔操作可能

# 前段検出器 (Time Projection Chamber)

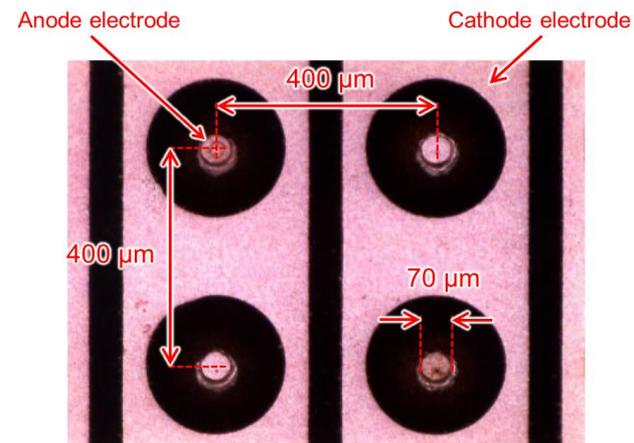
TPC 概念図



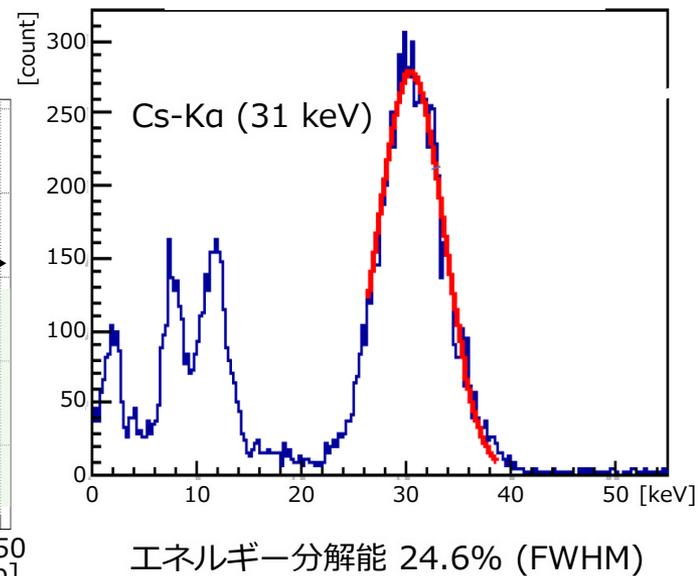
$\mu$ -PIC 写真 (20cm $\times$ 20cm)



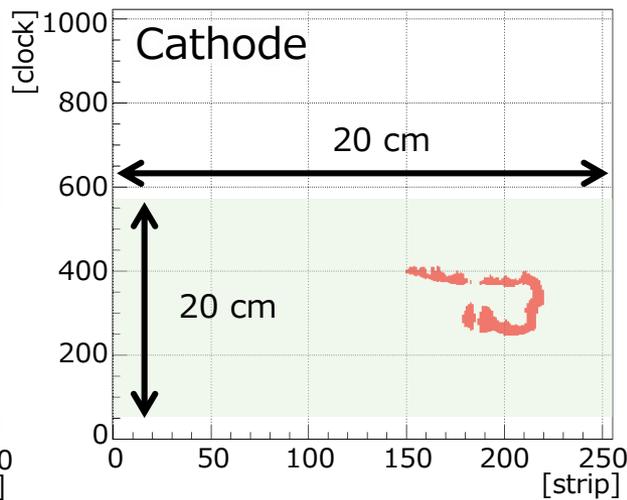
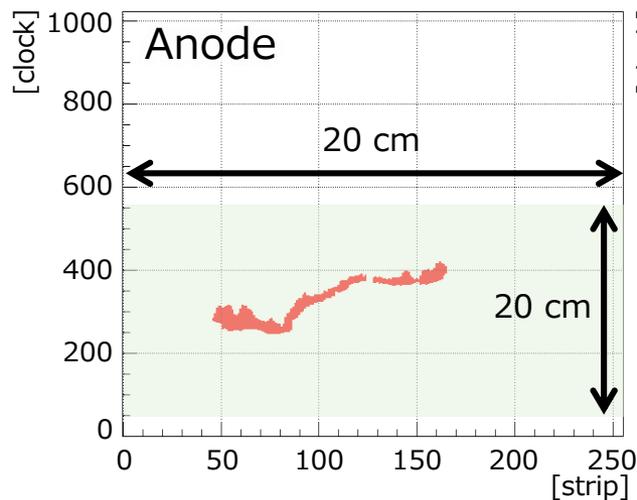
$\mu$ -PIC 電極拡大写真



Ba-133 スペクトル

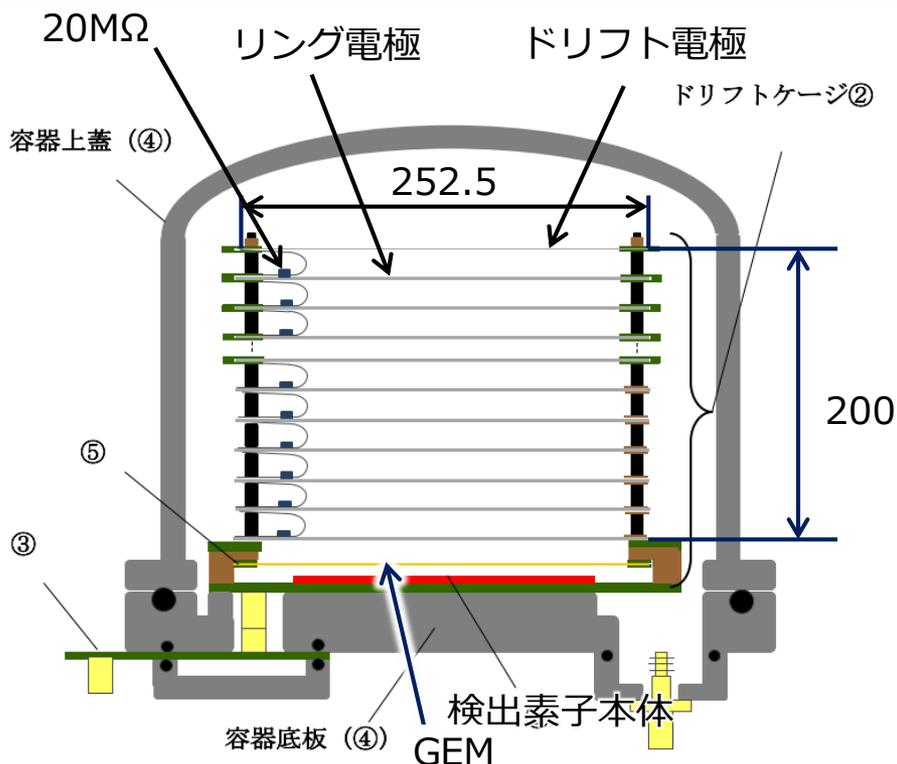


典型的な電子飛跡の例



エネルギー分解能 24.6% (FWHM)

# TPC 構造



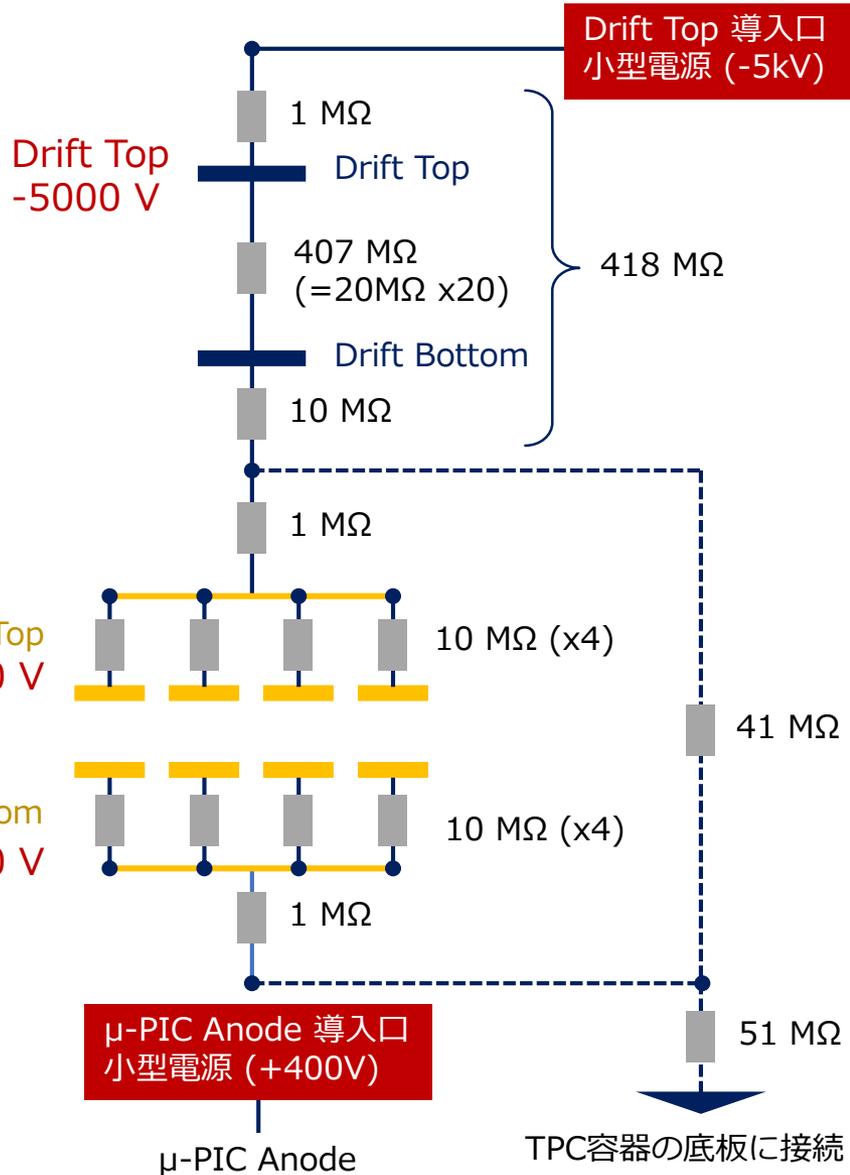
- リング電極は等間隔 (=1cm) に配置
- 20MΩの抵抗で接続
- 上から下に向かって一様な電場を生成

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

電場の強さ ~200 V/cm

飛跡のドリフト速度 ~4 cm/μsec



Drift Top 導入口  
小型電源 (-5kV)

Drift Top  
-5000 V

Drift Top

407 MΩ  
(=20MΩ x20)

418 MΩ

Drift Bottom

10 MΩ

1 MΩ

GEM Top  
-900 V

10 MΩ (x4)

GEM Bottom  
-500 V

10 MΩ (x4)

41 MΩ

1 MΩ

μ-PIC Anode 導入口  
小型電源 (+400V)

μ-PIC Anode

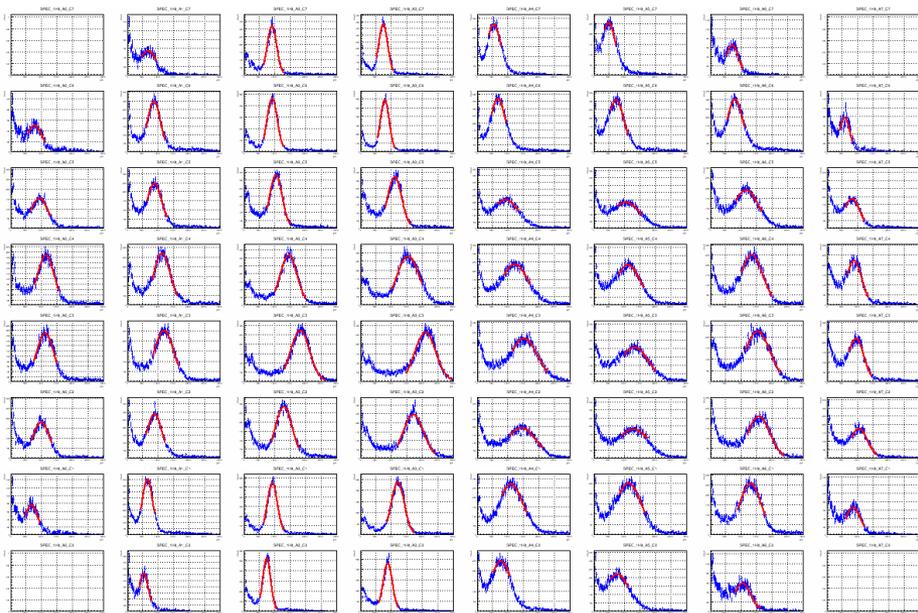
51 MΩ

TPC容器の底板に接続

# TPC ゲイン

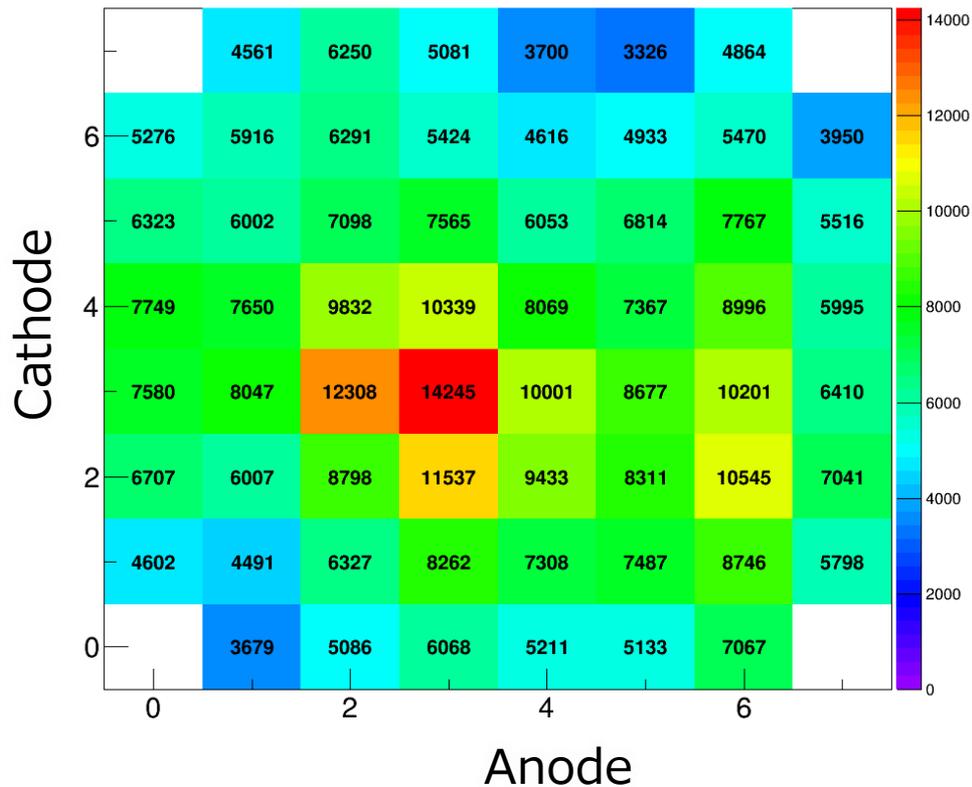
## Ba-133 スペクトル (31keV)

## ゲインマップ



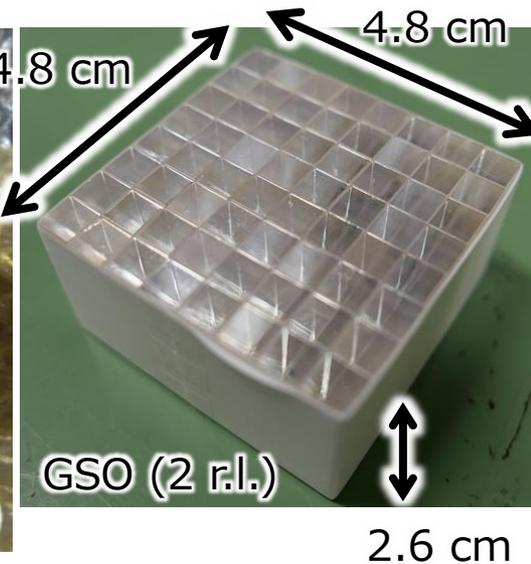
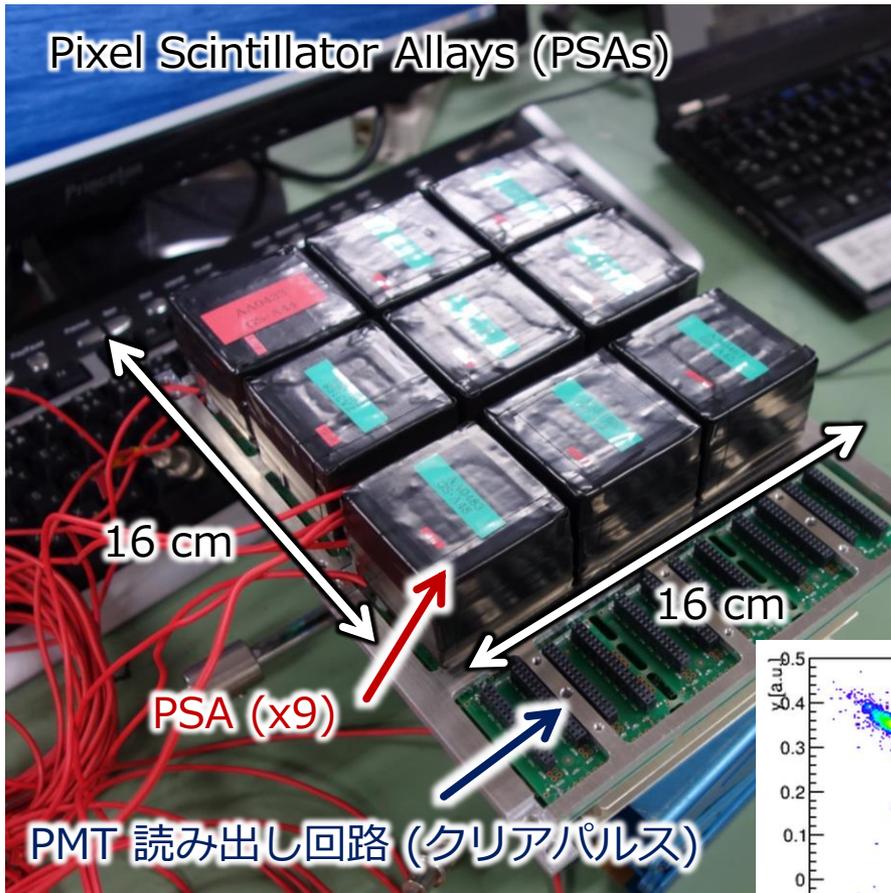
- $\mu$ -PIC領域を  $8 \times 8$  に分割
- 各領域ごとにキャリブレーションを行う

Drift Top	-5000 V
GEM Top	-900 V
GEM Bottom	-500 V
$\mu$ -PIC	+400 V



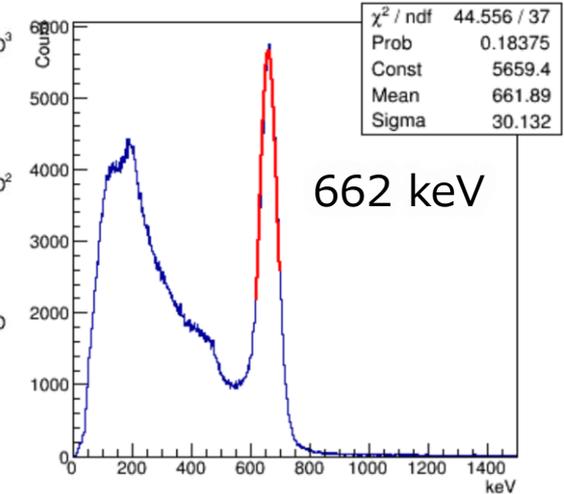
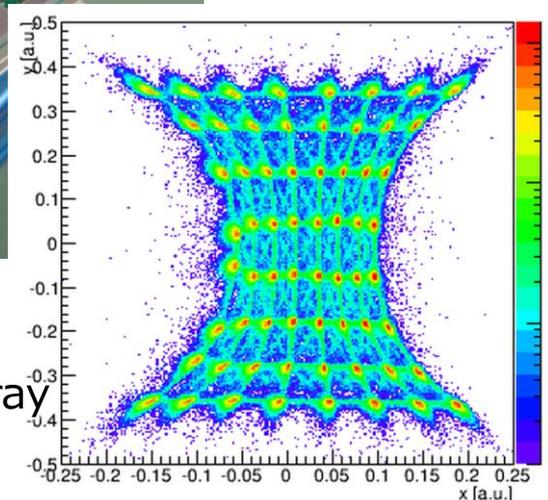
ゲイン: 5000 ~ 14000

# 後段検出器 (Pixel Scintillator Array)



ヒット分布

Cs-137 エネルギースペクトル



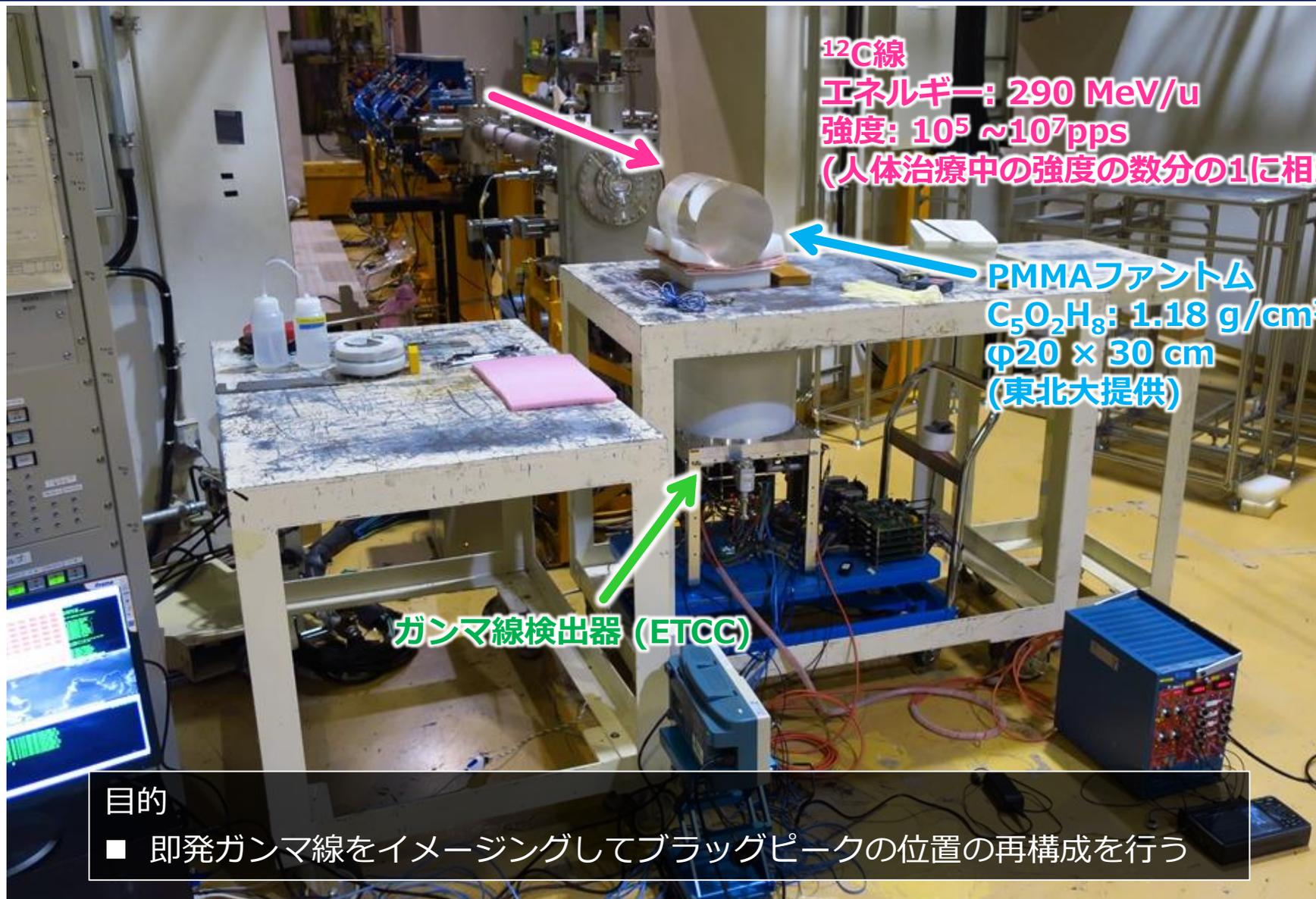
エネルギー分解能 10.7% (FWHM)

- ピクセルサイズ: 6 mm × 6mm
- ピクセル数: 8×8 = 64 pixels/Array
- ピクセル総数: 576 pixels

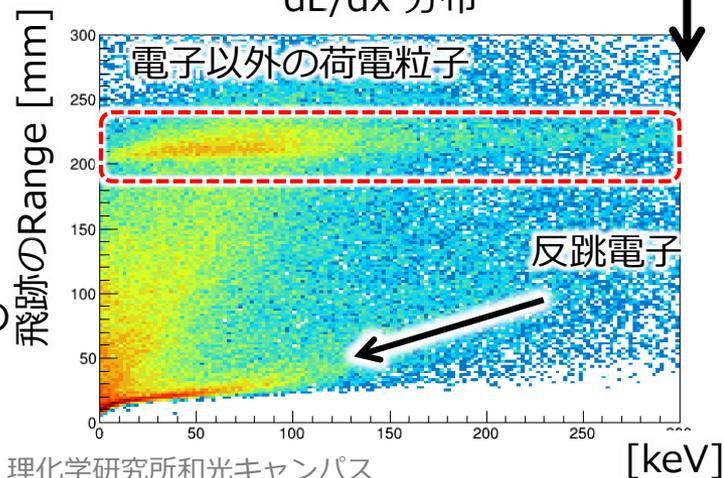
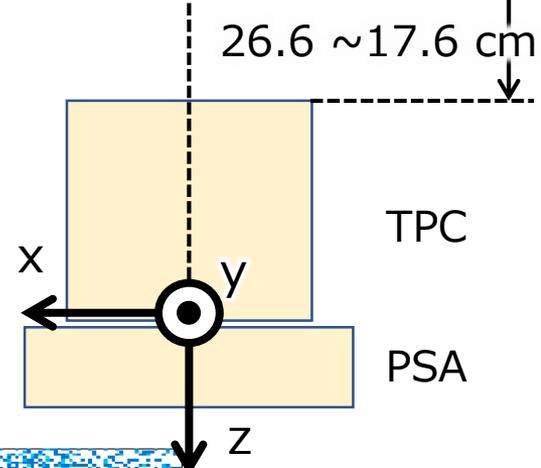
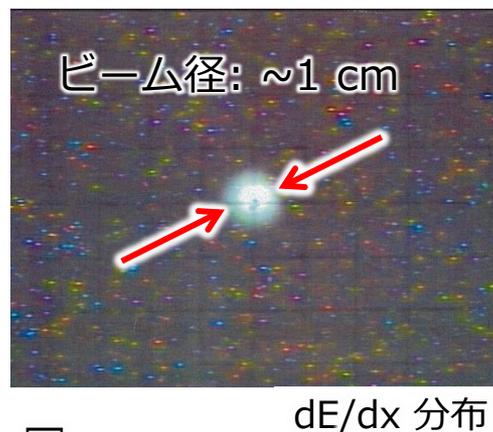
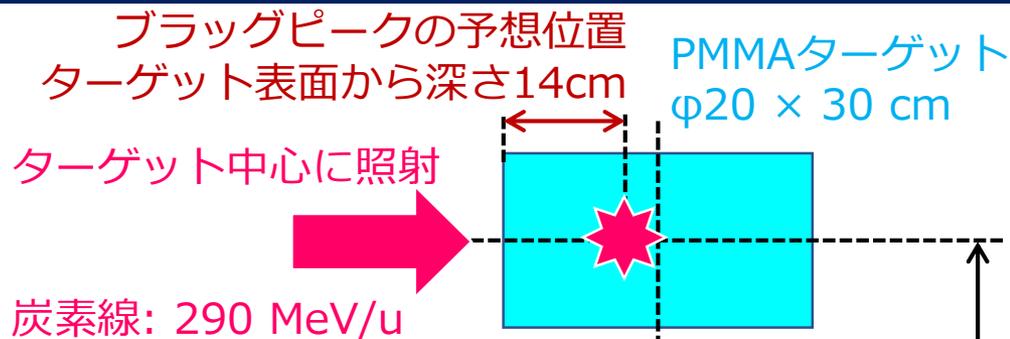
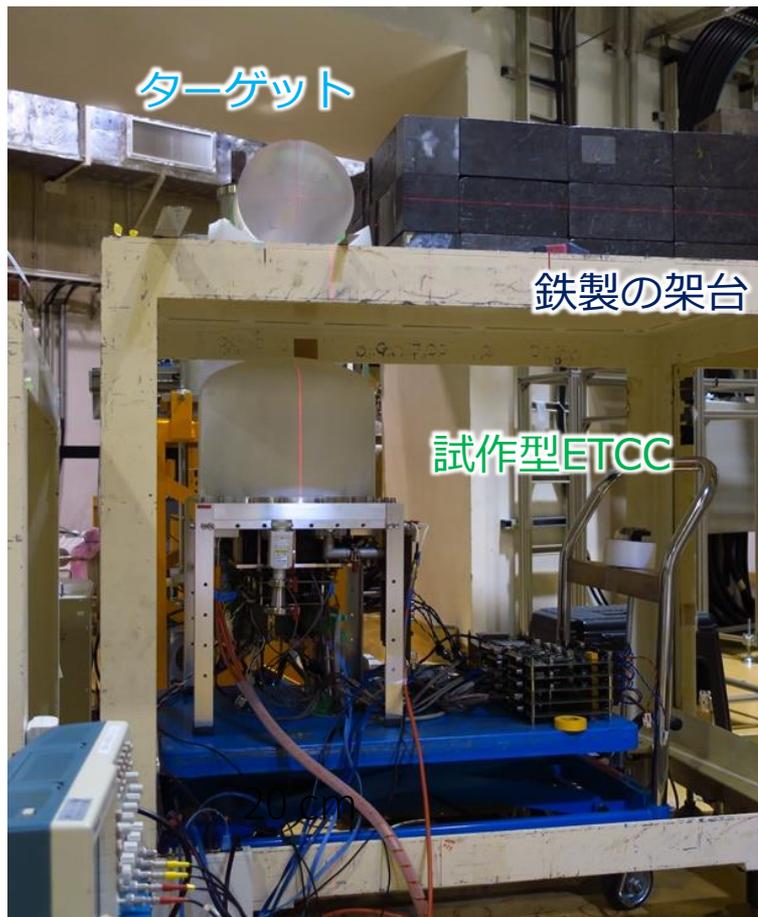
# 試作型ETCC (1台目)



# 高雑音環境下での動作試験 (@HIMAC)



# 高雑音環境下での動作試験 (@HIMAC)



現在解析中

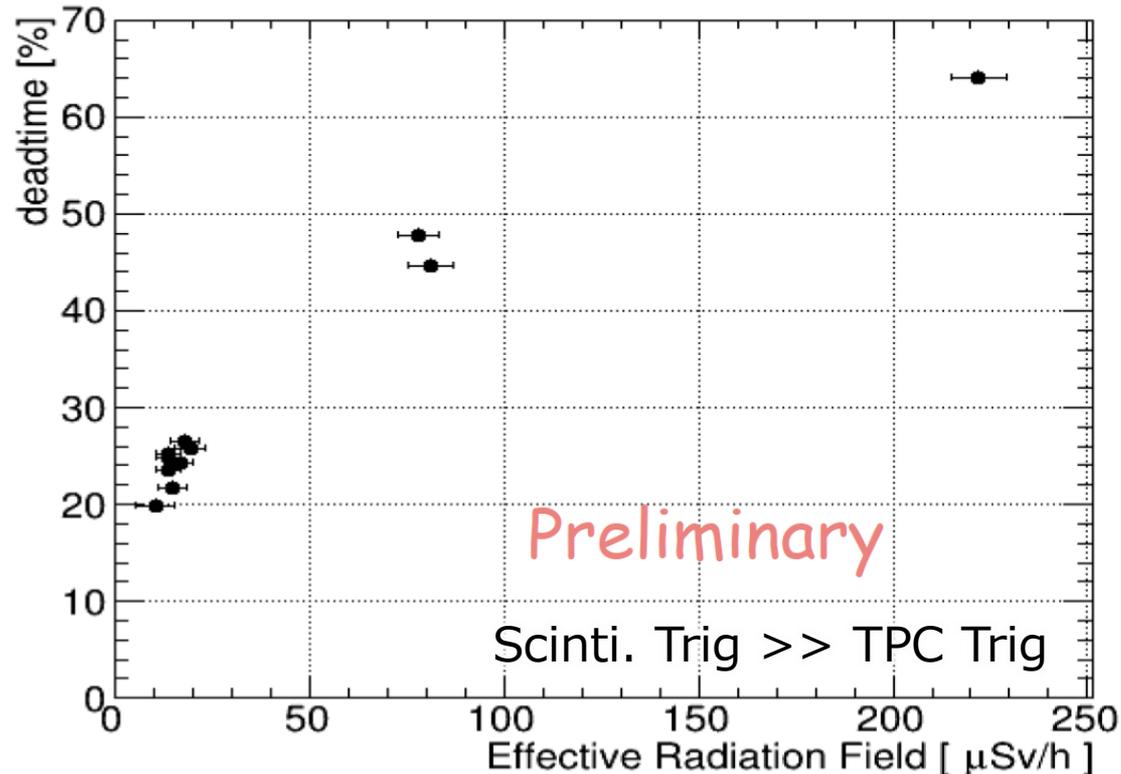
[keV]

2019/12/07 (土)

ビーム強度 ( $5 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7$  pps),  
ターゲットの位置を変更して即発ガンマ線の  
イメージングを行った。

# 高雑音環境下での動作試験 (@HIMAC)

dead time v.s 放射線強度



試作型ETCC (1台目):

- DAQは Scinti.トリガーで common start モードで動作
- 数10 ~ 数100  $\mu\text{Sv/h}$  環境下でデータ取得可能



軽量ETCC (2台目):

- DAQをTPCトリガーでcommon stop モードに変更
- dead time 低減が見込める
- 更に高い放射線環境下で動作が期待

# 装置構成と開発状況 (2台目: 軽量機) 7

- 散乱ガンマ線検出器: **MPPCアレイ + GSO** ( $6 \times 6 \times 26 \text{ mm}^3$ ) 576 pixel
- 反跳電子検出器: **20 cm直径 TPC** (2気圧,  $\text{Ar}/\text{iso-C}_4\text{H}_{10}/\text{CF}_4 = 95:2:3$ )
- トリガー方式: **common stop**モード (TPC信号をトリガーに動作)

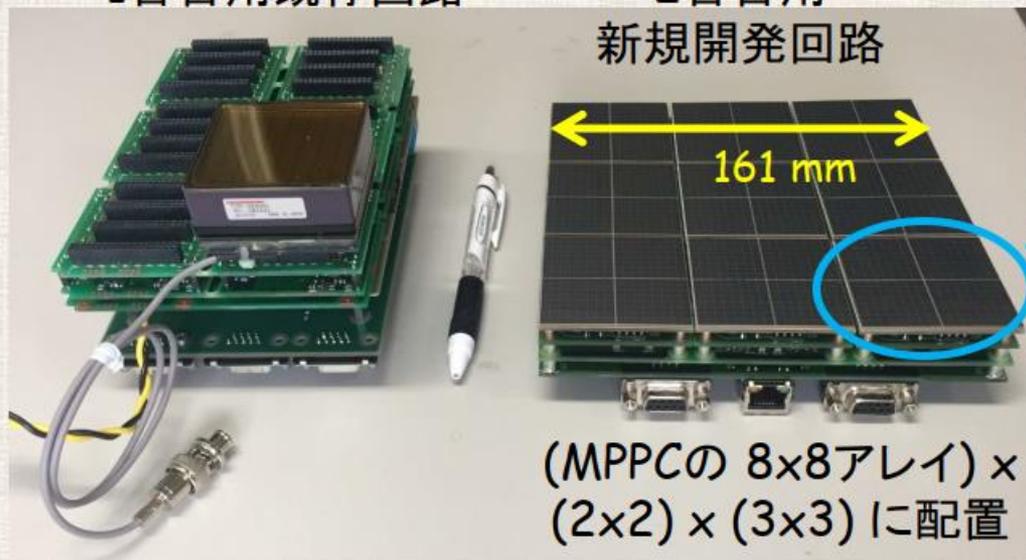
反跳電子検出器: 1台目と同じ設計

散乱ガンマ線検出器 (光読み出し回路部)

1台目用既存回路

2台目用

新規開発回路



(MPPCの  $8 \times 8$ アレイ)  $\times$   
( $2 \times 2$ )  $\times$  ( $3 \times 3$ ) に配置

common stop 非対応

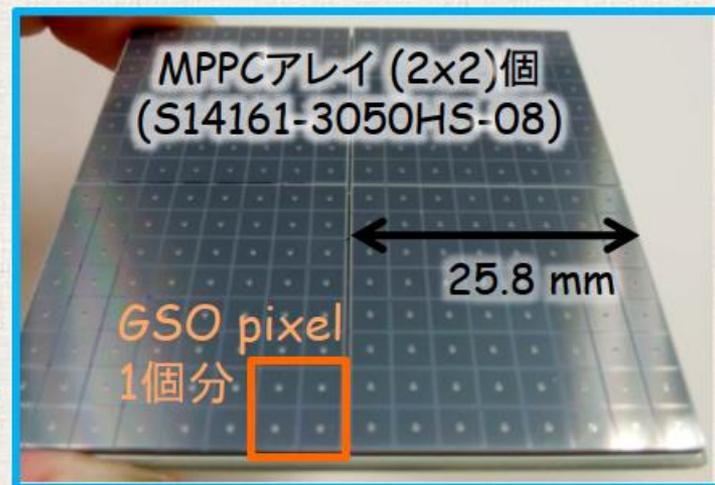
common stop可

読み出し回路が別途に要

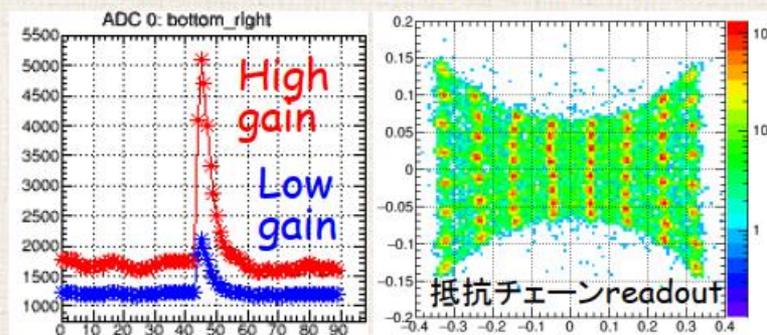
GbE(SiTCP)読み出し

HV  $\sim 1200 \text{ V}$

HV  $\sim 160 \text{ V}$  ( $40\text{V} \times 4$ 直)



アレイ内の4素子を直列接続し、抵抗チェーンの4端から読み出し



現在、温度補償 (HV制御) を実装中

# 年次計画

実施項目	平成31年度	平成32年度
試験用ETCCの制作と放射能定量画像評価 試験用ETCCの制作 試験用ETCCの放射能定量画像評価	試験用ETCC改良 建屋近傍調査	小型ガス純化装置試験 軽量ETCCを加えた3次元計測試験
<b>10月下旬/11月下旬に1F建屋周辺の測定を実施 測定データを解析中</b>		
耐放射線性・利便性に優れた軽量ETCCの開発 軽量ETCCの要素開発 軽量ETCCの制作・調整 軽量ETCCの1F調査 ETCCの性能を生かした調査法の開発	MPPC回路開発 装置制作・調整 建屋近傍調査 事前調査	建屋内遮蔽制作 MPPC回路実装 建屋内外調査 現地でETCC計測調査
ガンマ線画像から待機中3次元核種分布及び 放出量を逆解析する手法の開発 (JAEA担当) 大気中核種濃度分布の作成 仮想ガンマ線データの作成 逆解析手法の開発	様々な濃度分布の作成 様々な画像データの作成 解析手法の試作と試験	気象観測とその拡散計算 画像データの作成 解析手法の最適化

# まとめ

## ETCCが1Fの廃炉措置に係る課題にもたらす進展

### 課題3.画期的なアプローチによる放射線計測技術

- その場で $\gamma$ 線の定量的な画像計測
- 高雑音耐性 (高線量領域の計測)
- スカイシャイン計測
- 炉心隔壁を透過した内部からの微弱な中性子脱励起 $\gamma$ 線の計測
- デブリからの高エネルギー $\gamma$ 線の計測

### 課題4. 廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子の挙動解明

- $\alpha$ 核種崩壊 $\gamma$ 線などの分析

### 放射性物質の高精度な拡散予想

- $\gamma$ 線画像から大気中3次元核種分布及び放出量の逆解析手法の確立

## 開発状況

### 試験用ETCC (1台目)

- HIMACで高雑音環境下での動作試験を実施 (現在解析中)
- モジュールを一体化して可搬型に移行
- 10月下旬 / 11月下旬に建屋周辺の測定を実施 (現在解析中)

### 軽量ETCC (2台目)

- MPPC回路開発中
- 電源回路などを小型化し軽量化を検討中