

ガンマ線撮像分光による 高放射線場モニターの開発

素核宇の実験にも有効な
核ガンマ線の撮像分光装置をご紹介します

水村好貴

園田真也, 谷森達, 高田淳史, 水本哲矢
(京大理)

プロジェクト背景

◆福島第一原子力発電所の廃炉状況

- 1～3号機: 使用済燃料棒 & 燃料デブリが残存
- 4号機: 燃料棒取り出し済み、燃料デブリなし

◆廃炉措置等に係わる6つの重要研究開発課題

(廃炉研究開発連携会議 研究連携タスクフォース中間報告(平成28年)において選定)

- 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

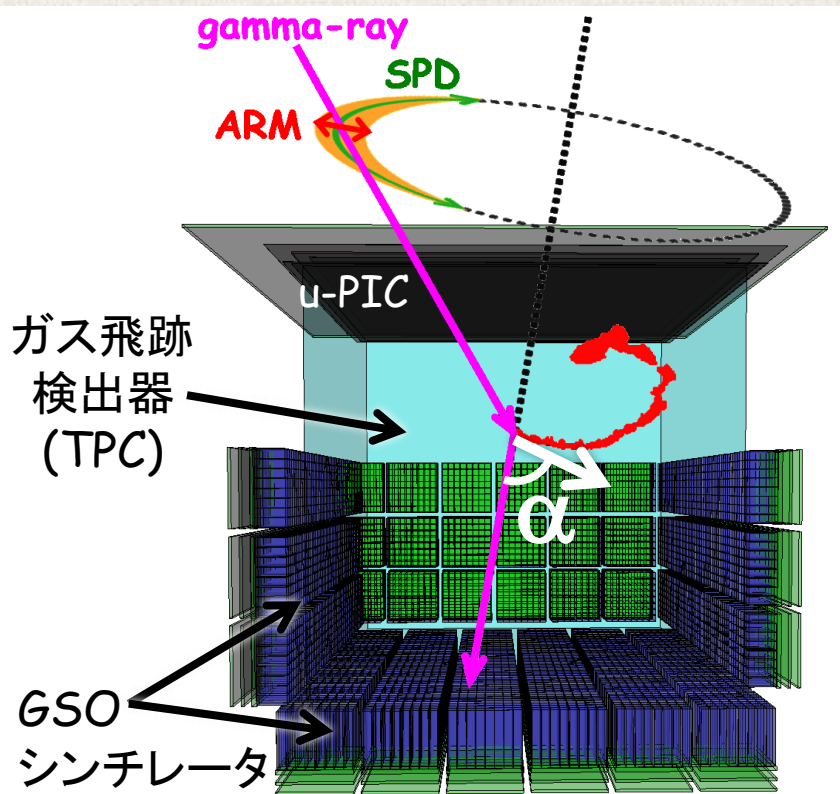
↑ まさに、**ガンマ線撮像分光モニター!**

- ④ 廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明
- 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

↑ **ガンマ線撮像分光モニターが有効**

電子飛跡検出型コンプトンカメラ の応用を提案
Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

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

◆ GSOシンチレータアレイ

散乱ガンマ線のエネルギー + 吸収位置

検出事象ごとに
コンプトン散乱を完全に再構成

● 到来方向とエネルギーを一意決定

➢ 鋭い2D-PSF:

推定手法に頼らない撮像分光
背景雑音の強力除去

● 広視野(~3 sr)

● 冗長性のある雑音除去能力

➢ コンプトン散乱運動学テスト(α 角)

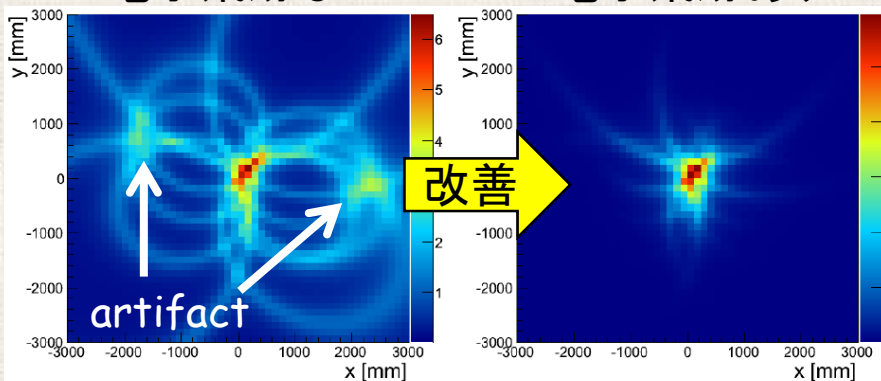
➢ 粒子識別(dE/dx)

⇒ 重いVETO検出器(雑音源)不要

核ガンマ線の真の撮像分光が可能

電子飛跡なし

電子飛跡あり



ETCC
実証例

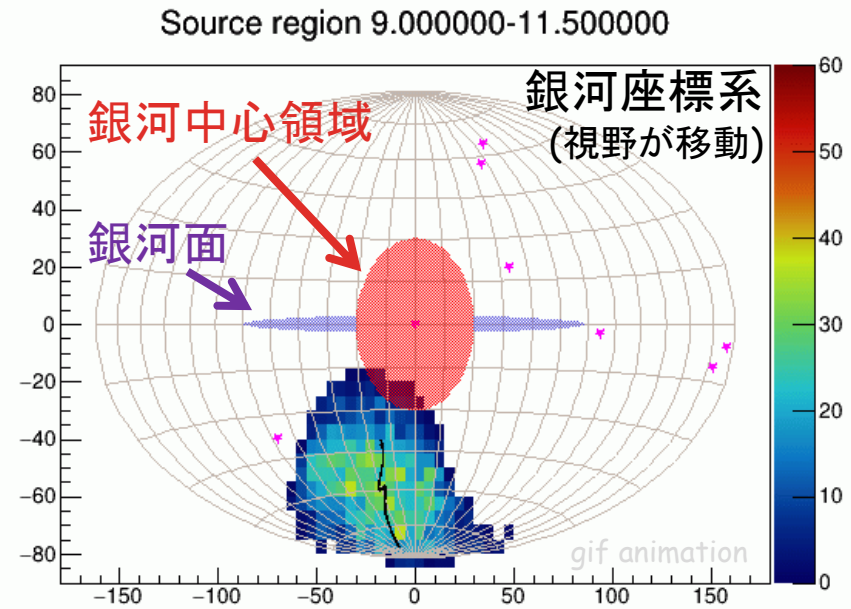
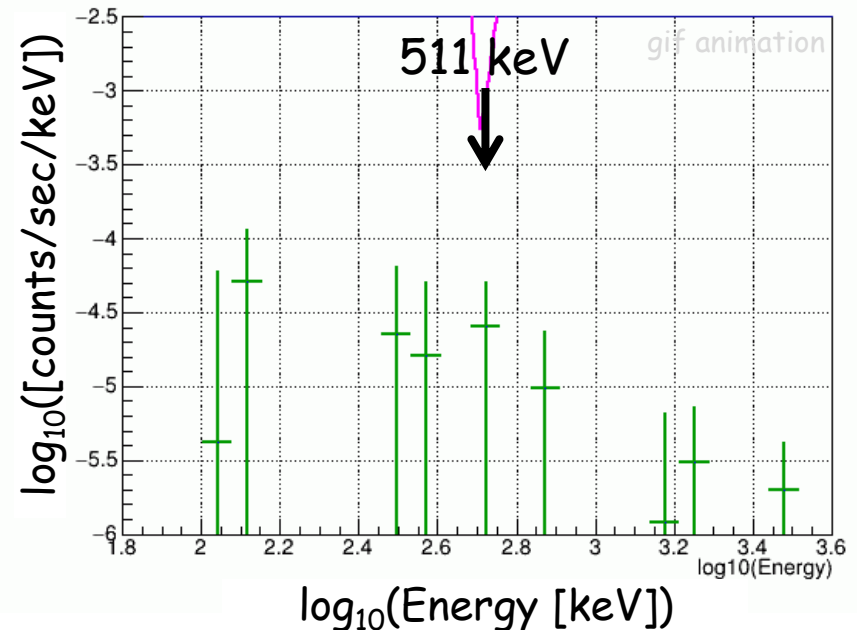
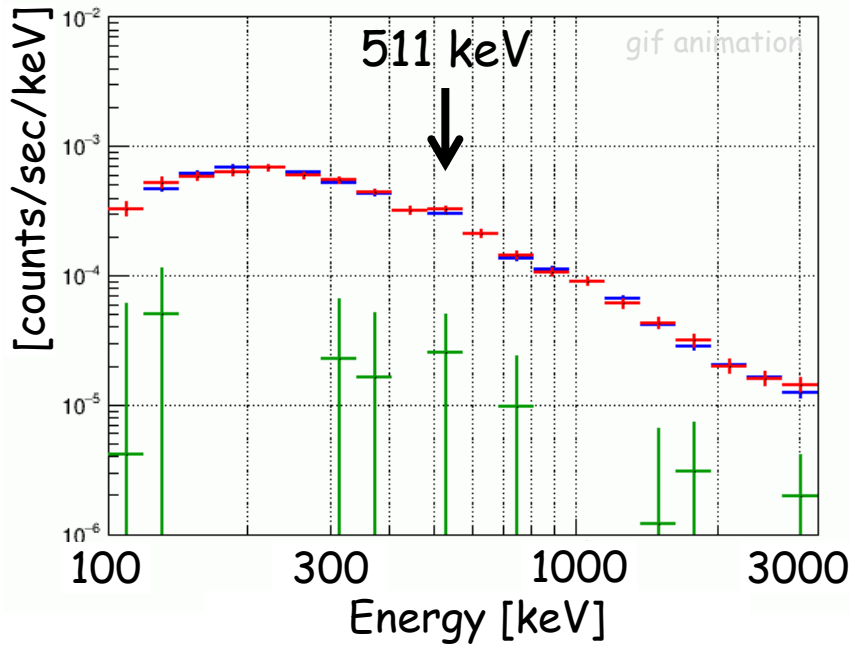
SMILE-2+による 銀河面観測

詳細は、吉川・中村講演(20pT13-7 & 8)にて

- (30 cm)³ TPC を用いた ETCC
- JAXA大気球で高度 ~39 kmで観測
- 銀河中心方向からのガンマ線を確認
 - 銀河面拡散ガンマ線: $\sim 10\sigma$
 - 511 keVラインガンマ線: $\sim 5\sigma$

Tanimori+ 2019 @TAUP

真の撮像分光と冗長性のある雑音除去で
宇宙雑音を2桁低減することに成功



gamma ray spectrum

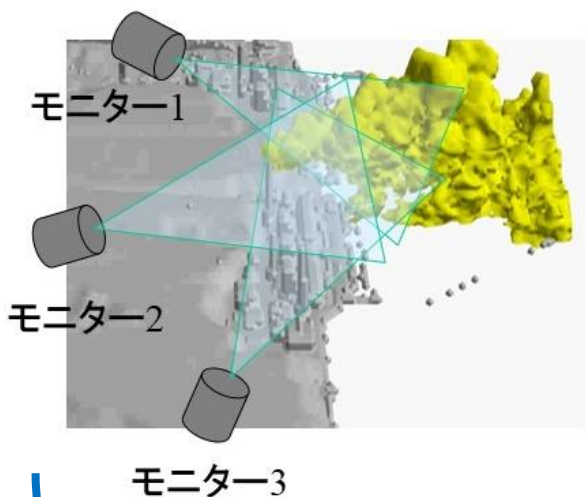
今回のプロジェクトの全体概要

◆原子炉の廃炉に向けたガンマ線カメラ(ETCC)応用

➤ETCC を廃炉基礎技術(飛散物監視, 内部調査)の獲得に使いたい

- ✓ 定量的画像分析: 真の撮像分光能力、広視野でのマッピング
- ✓ 高環境耐性: 高線量場(~ mSv/h)、屋外でも使用
- ✓ ニーズへの対応: 小型・軽量・遠隔型、非専門家が操作、画像がすぐ出る

プルームのガンマ線計測

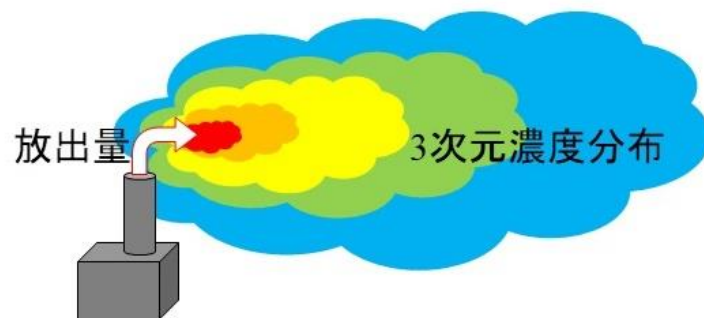


ガンマ線画像



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ガンマ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



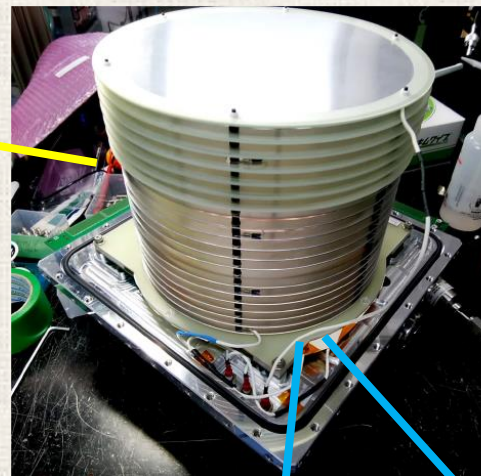
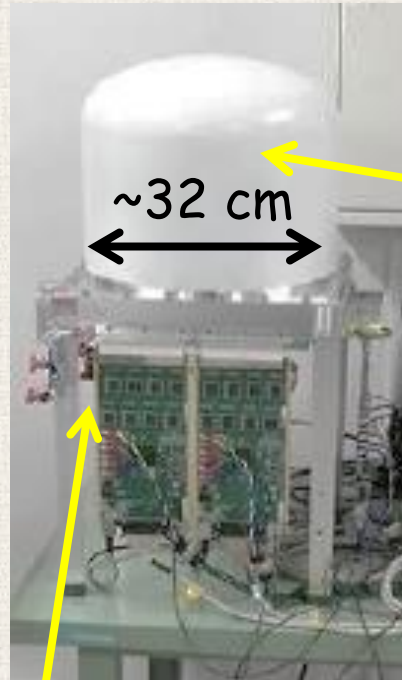
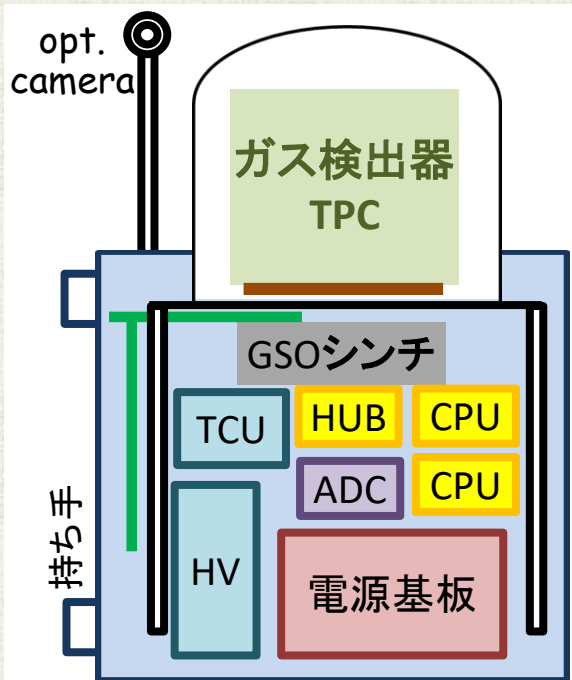
ETCCを使用

共同研究者(JAEA)が担当

既存装置を組み合わせた**試作機**(早期試験)、
新規開発装置を使った**軽量機**、の2台のETCCを開発

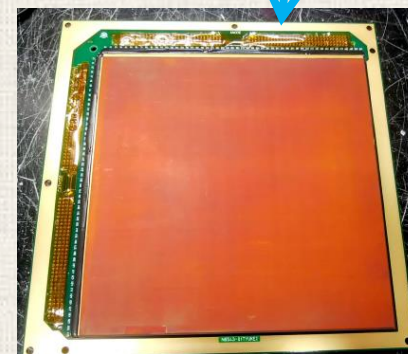
装置構成と開発状況 (1台目: 試作機) 6

- 散乱ガンマ線検出器: MA-PMT(H8500) + GSO (6x6x13 mm³) 576 pixel
- 反跳電子検出器: 20 cm直径 TPC (2気圧, Ar/iso-C₄H₁₀/CF₄ = 95:2:3)
- トリガー: 現状では common startモード (GSO信号でstart, TPC信号を待つ)

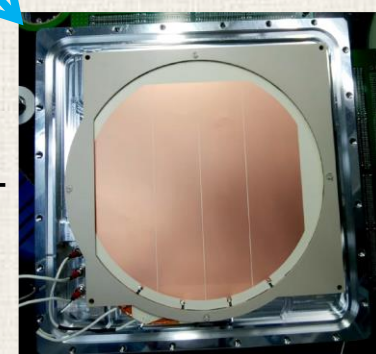


20 cm 直径
TPC

drift-cage
(20 cm長)



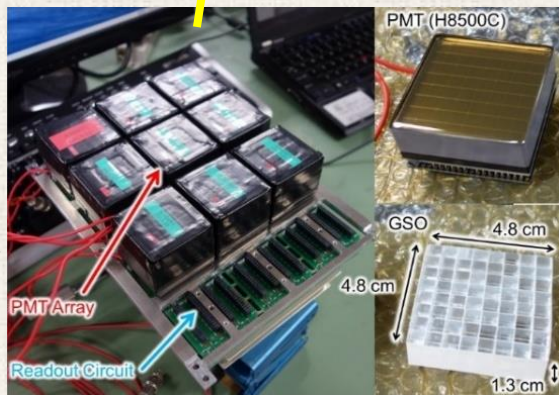
20 cm u-PIC



20 cm 直径 GEM

MA-PMT + GSO

PMT 6本用回路2台で
PMT 9本分をカバー

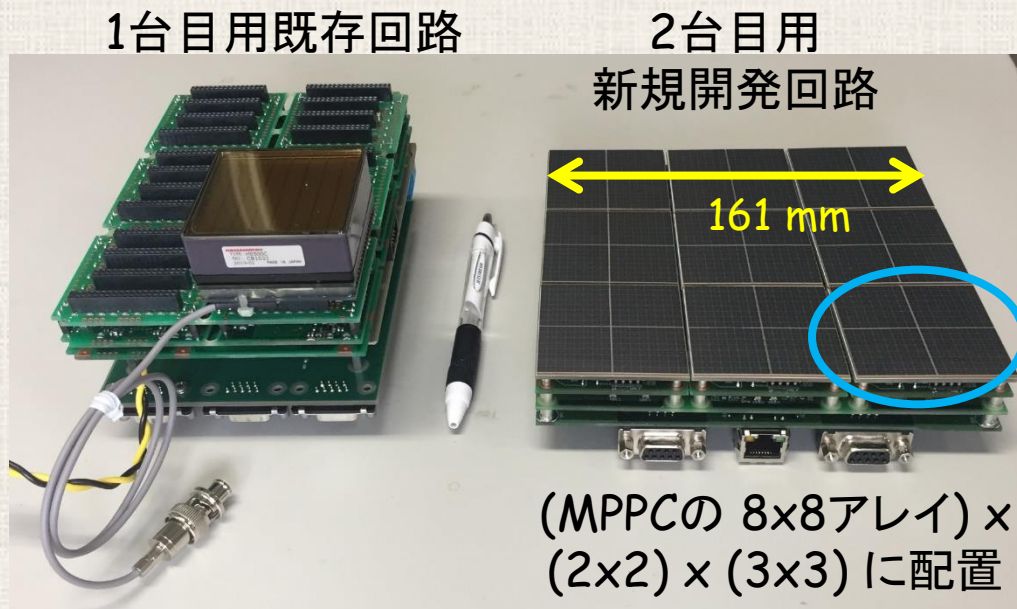


装置構成と開発状況 (2台目: 軽量機) 7

- 散乱ガンマ線検出器: **MPPCアレイ + GSO (6x6x26 mm³) 576 pixel**
- 反跳電子検出器: **20 cm直径 TPC (2気圧, Ar/iso-C₄H₁₀/CF₄ = 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)

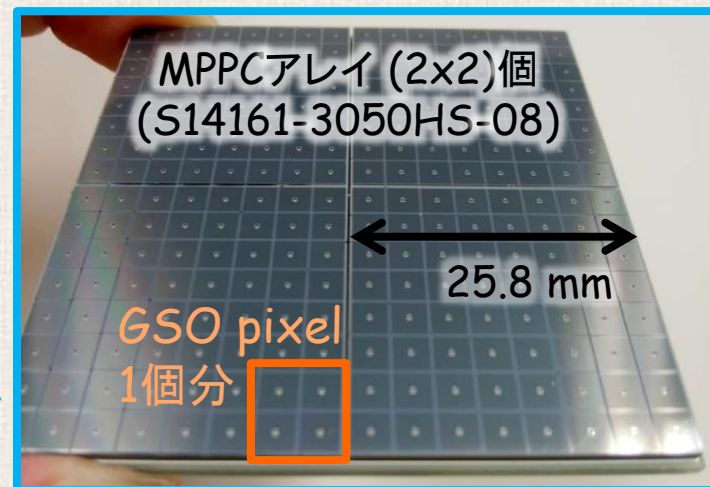


common stop 非対応
読み出し回路が別途に要

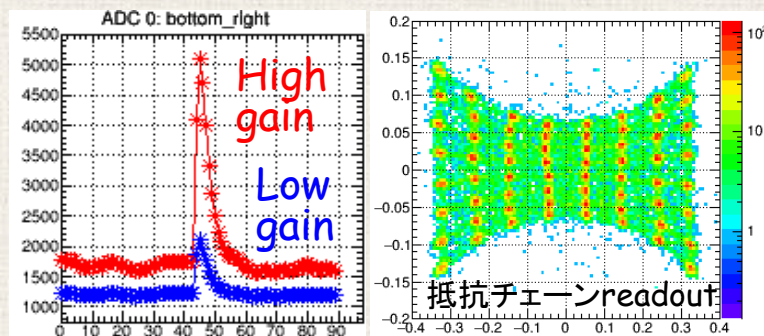
HV ~1200 V

common stop可
GbE(SiTCP)読み出し

HV ~160 V (40V x 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



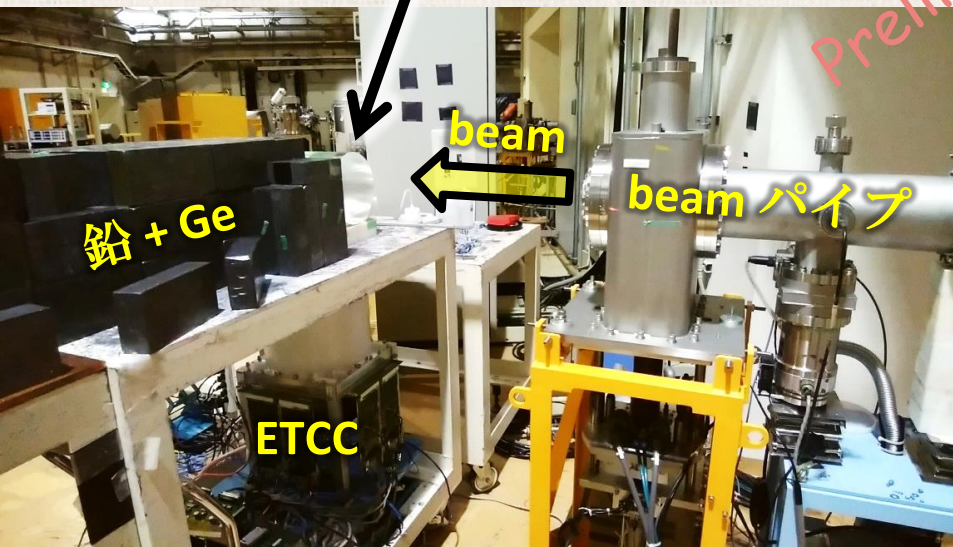
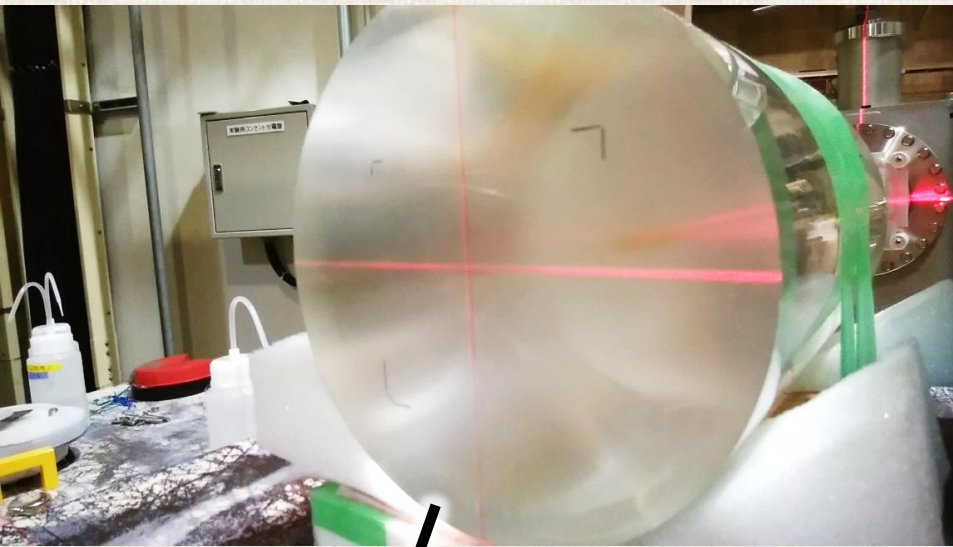
現在、温度補償 (HV制御) を実装中

高放射線場での試験(1台目:試作機)

HIMAC 炭素ビーム(290 MeV/u)をアクリルに照射、高放射線場を作成

標的: アクリル円柱(20 cmφ × 30 cm)

ETCC (1台目: 試作機)

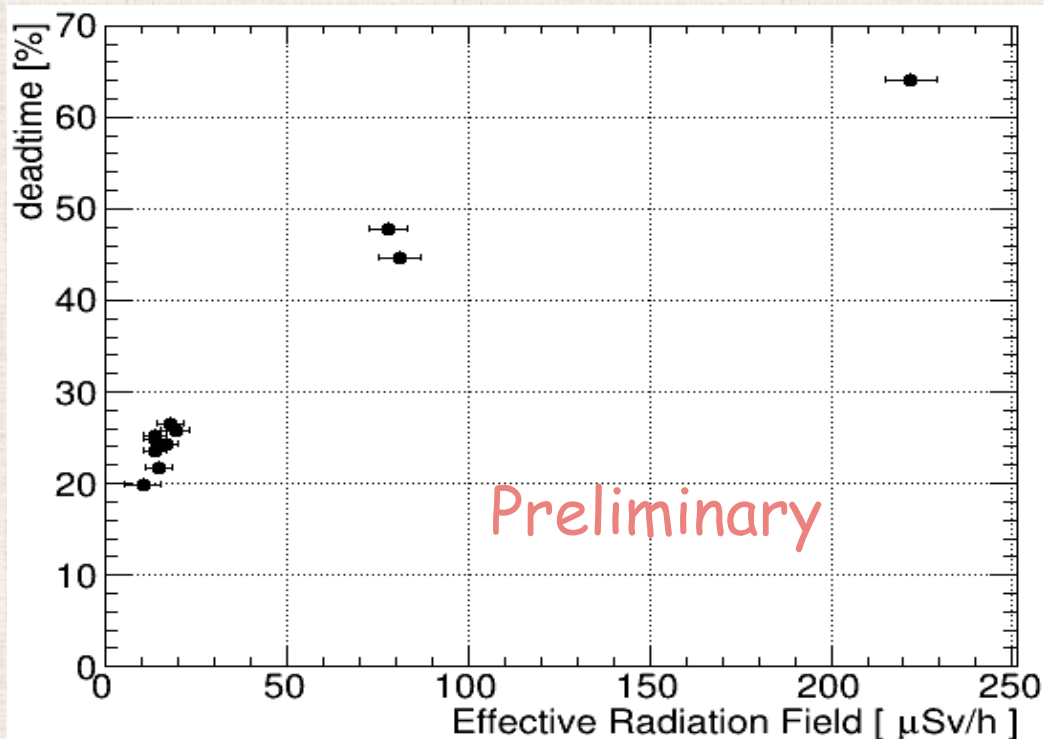


Preliminary

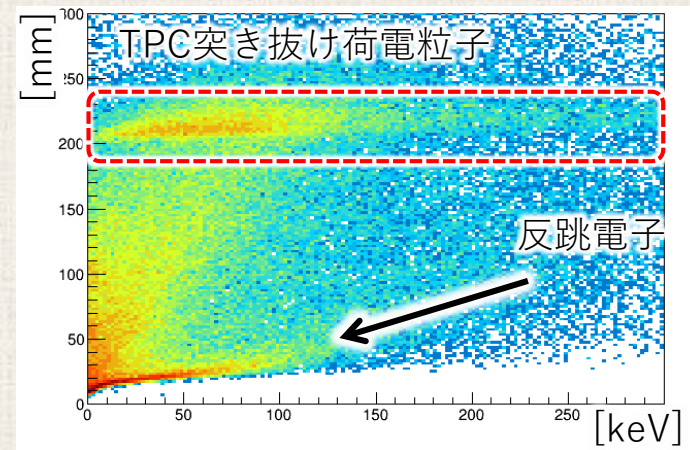
リフトアップ用の台車

高放射線場での試験(1台目:試作機) 9

HIMAC 炭素ビーム(290 MeV/u)をアクリルに照射、高放射線場を作成



common startモード動作で、
数十～数百 $\mu\text{Sv/h}$ の
高放射線場でデータ収集できている



ガンマ線の撮像分光結果は、
詳細解析中(乞うご期待)

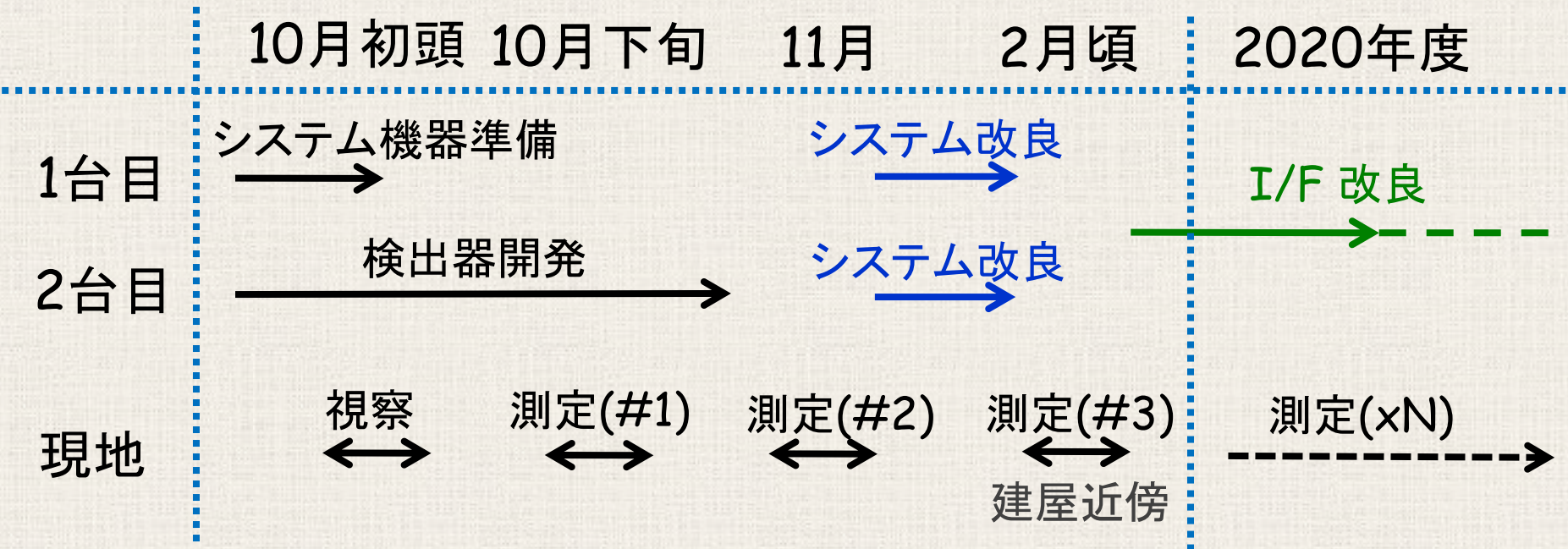
ヒットレートの典型的な大小関係
GSO シンチ (0~10) \gg TPC (0~1)

↓
TPCトリガーを用いた
common stopモード(2台目回路)で
更に deadtime の改善が見込める

現状のレート耐性でも
社会実装として有能

数 mSv/h 環境にも
チャレンジしたい

スケジュールと周辺機器



実装済み or 準備済みのシステム機器

電源基板+充電電池



Trigger Control Unit (scaler機能含む)



小型HV + 制御器



光学カメラ(視野 ~150°)



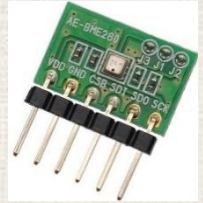
準備中のシステム等

小型CPU



環境計

(温湿度・大気圧)



- オンライン解析
- 非専門家用I/F
- 安全停止装置 など



まとめ

素核字でつちかった
装置技術で社会貢献

◆原子炉廃炉のための重要研究課題

- 画期的なアプローチによる放射線計測技術
 - **ETCC** を用いた **核ガンマ線の真の撮像分光** を提案
 - ✓定量的画像分析: 真の撮像分光能力、広視野でのマッピング
 - ✓高環境耐性: 高線量場(~ mSv/h)、屋外でも使用
 - ✓ニーズへの対応: 小型・軽量・遠隔型、非専門家が操作、ガンマ線画像をその場で出すべし

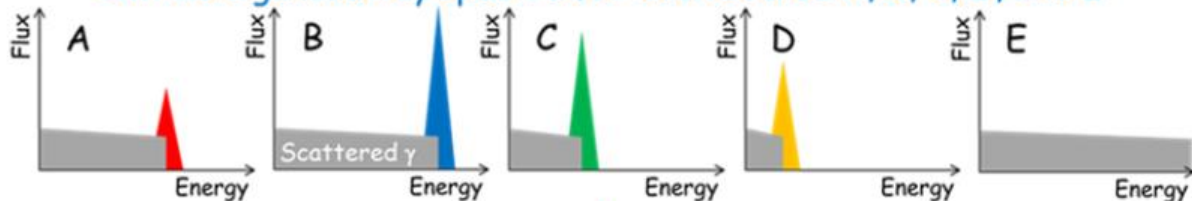
◆開発状況とスケジュールを紹介

- 1台目: 検出器として動作し始め
高放射線場で試験を遂行(詳細解析中)
- 2台目: MPPCを用いたGSO読み出し回路を開発
common stopモードでレート耐性が更に向上見込み
- 福島第一原子力発電所への立ち入り
 - ✓10月初頭に現地視察
 - ✓10月下旬・11月・2月頃に測定を予定

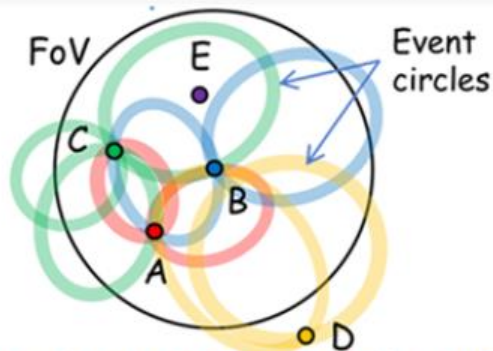
核ガンマ線の撮像分光

ガンマ線イメージング分光の世界初の実証

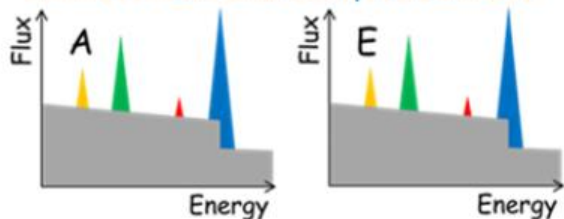
Intrinsic gamma-ray spectra for each source A, B, C, D, and E



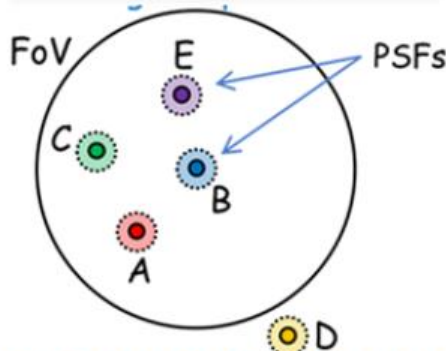
Compton Camera Imaging



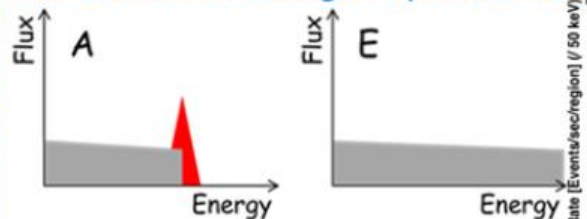
Observed spectra for region of A or E with conventional Compton camera



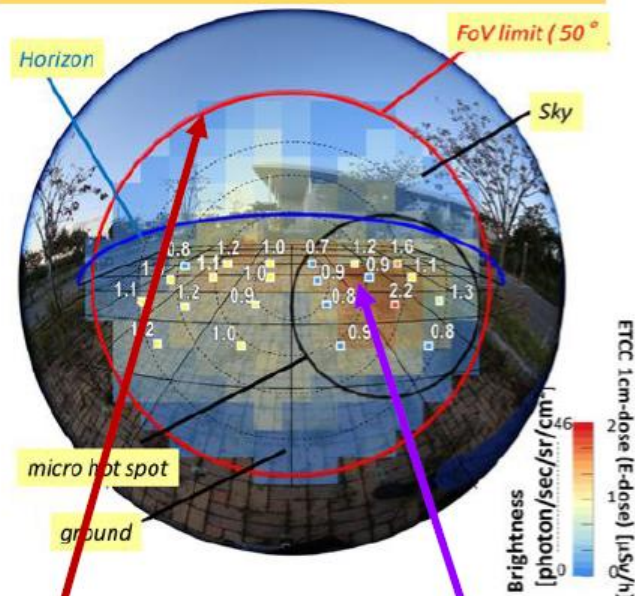
ETCC Imaging



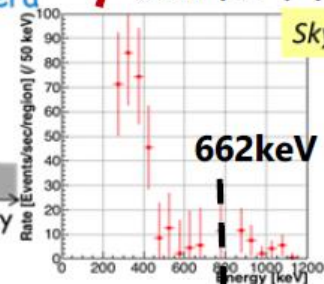
Observed spectra for region of A or E with electron-tracking Compton camera



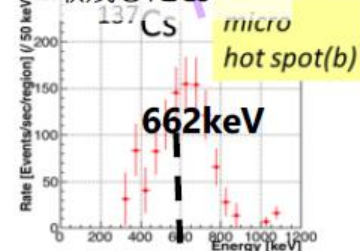
福島除染地区 (1~2 μ Sv/h)
駐車場 (70分撮像)



スカイシャイン



タイルの隙間に
取残したCs



T. Tanimori, et al., Scientific Reports 7 (2017) 41511.
D. Tomono, et al., Scientific Reports 7 (2017) 41972.

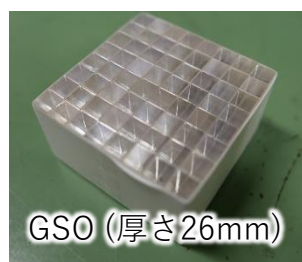
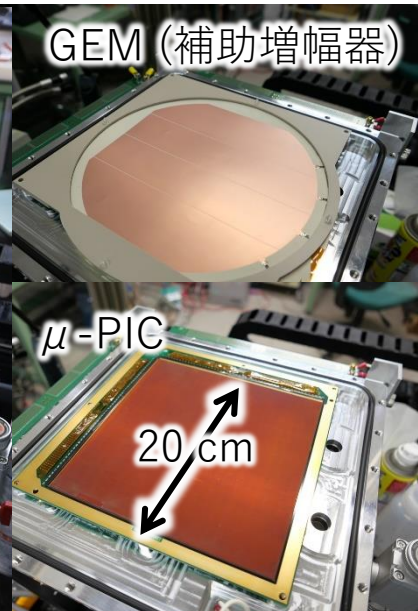
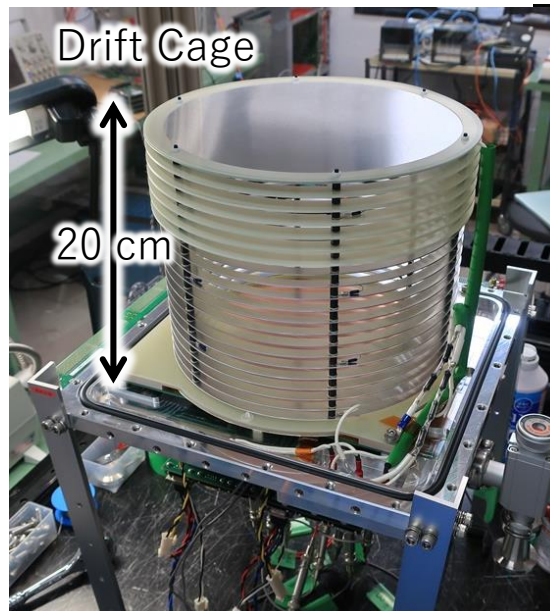
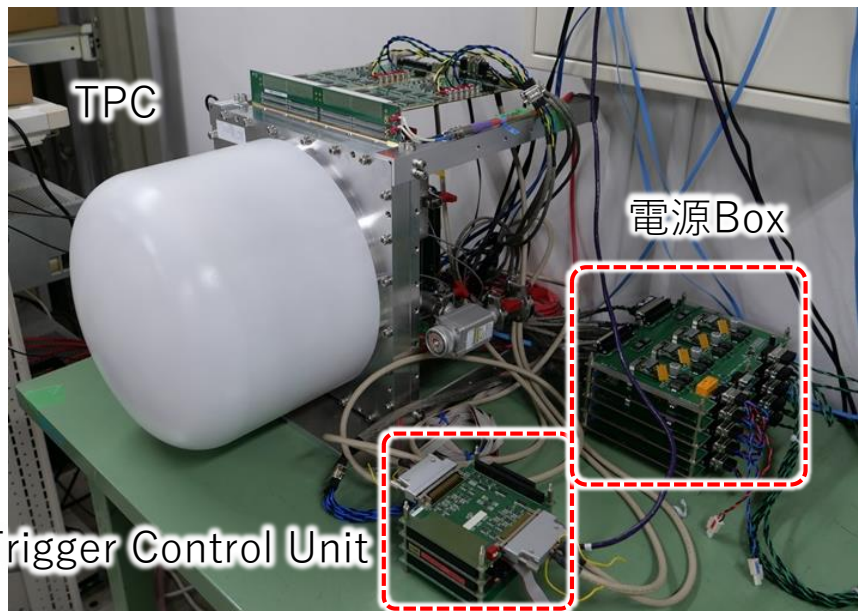
廃炉措置等に係る重要課題の問題意識¹⁴

◆重要課題: 画期的なアプローチによる放射線計測技術

- 福島第一の炉内及び建屋内は事故の影響で非常に高い放射線環境となっている。炉内状況や建屋内状況を調査する上で、**現行の放射線測定装置では性能・機能上限界**がある。そのため、福島第一での**ニーズを踏まえた上で**、**新たな発想、原理を用いた画期的な放射線計測装置の開発を行う必要がある。**

第4回 廃炉研究開発連携会議 研究連携タスクフォース中間報告(平成28年11月28日)より
http://www.dd.ndf.go.jp/jp/decommissioning-research/dr-committee/Pid=4_index.html

試験用ETCC開発状況



- 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な可搬型測定器

TPC

