

MPGD & Active媒質TPC2025研究会

電子飛跡検出型コンプトンカメラの 核物質管理に向けた応用試験

園田 真也¹, 高田 淳史¹, 谷森 達¹, 古村 翔太郎¹, 水本 哲矢¹,
土屋 兼一², 菅谷 駿², 田辺 鴻典², 秋葉 教充², 角田 英俊², 佐藤 大樹³

¹京都大学, ²科学警察研究所, ³日本原子力研究開発機構

定量的ガンマ線画像解析の実現

原子力などの数値規制が必要な分野では定量性の担保が必要

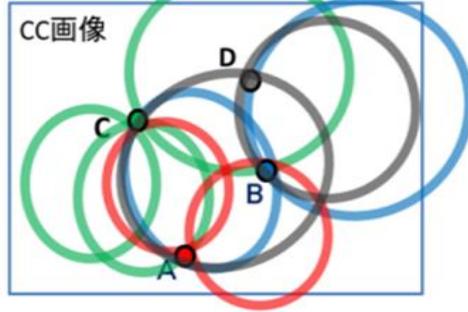
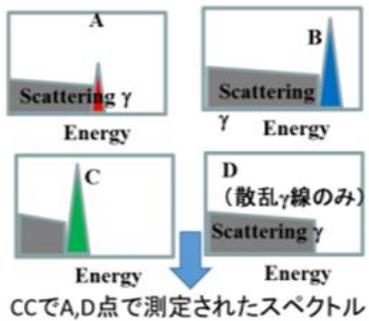
定量的3次元画像の取得

- 複数方向から測定した線形画像を合成するステレオ法が基本
- RI拡散の3次元画像は空間全体の3次元化が必要

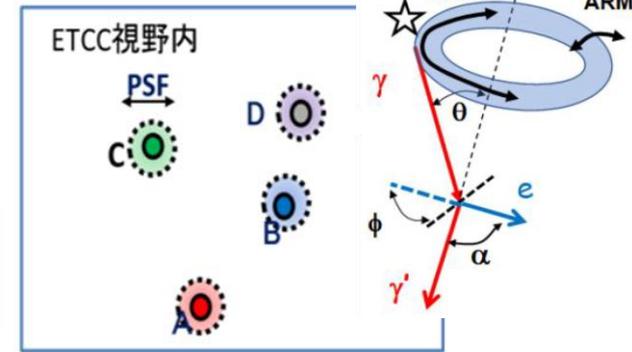
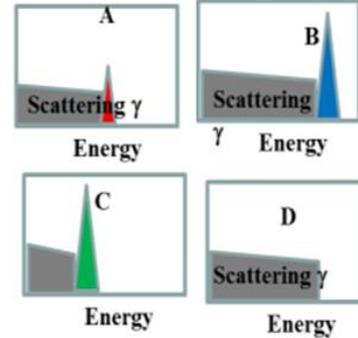
線形画像の取得が不可欠

従来型コンプトンカメラ (非線形画像)

各点のスペクトル

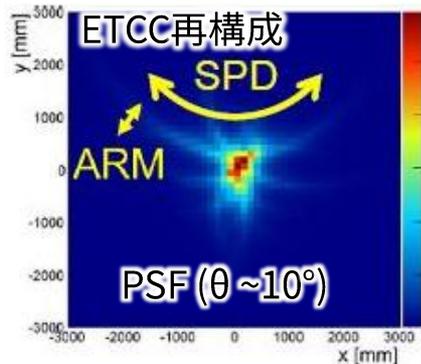
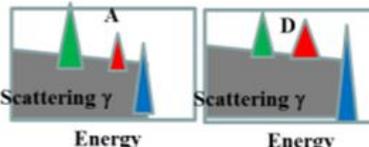


ETCC (全単射による線形画像)



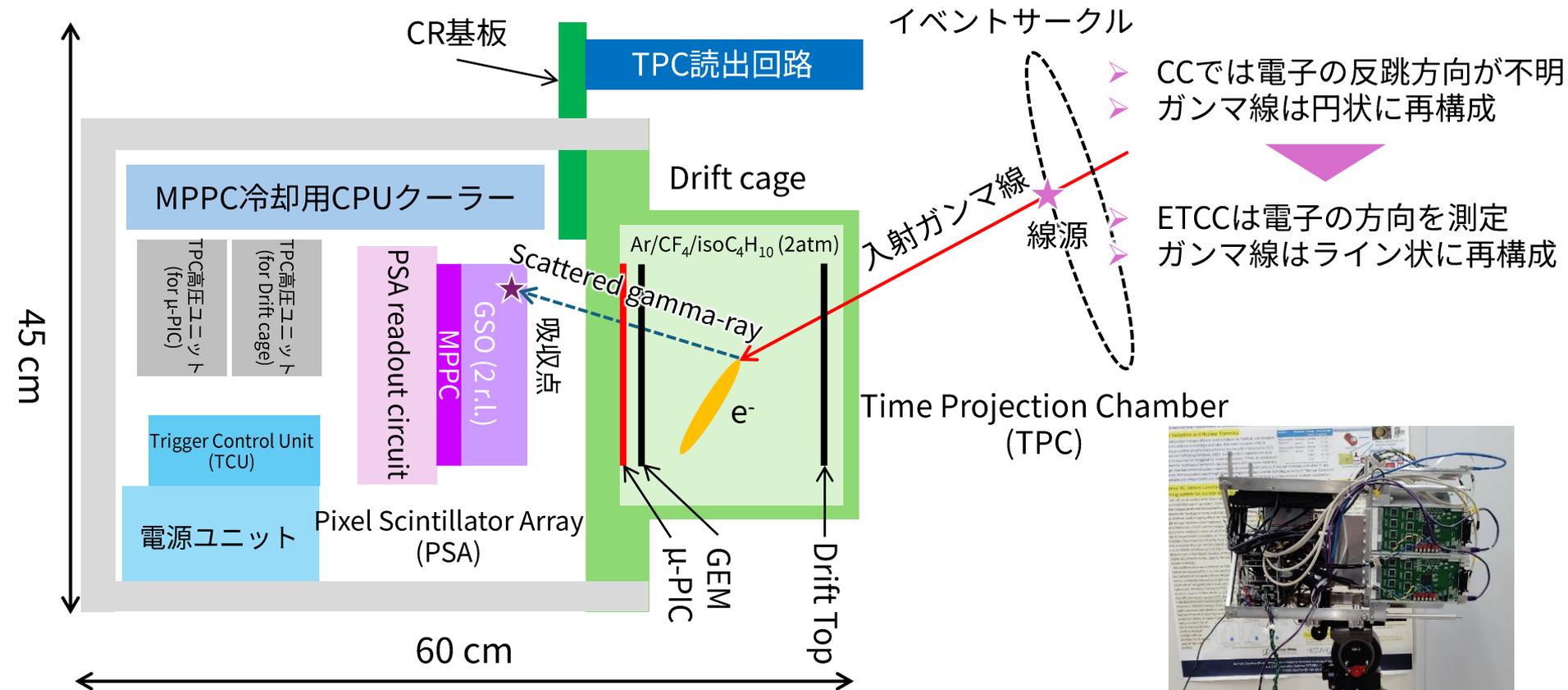
Point Spread Function (PSF): A, B の分離可能な最小角度

- 各線源のガンマ線がその点に集光
- 各点ごとに正しいエネルギースペクトルが測定可能
- PSFの範囲内であれば線形画像を取得可能



- 従来の γ カメラ: 非線形画像, 擬似的3次元画像で原理的に定量性は無い → 法令関連の測定に不適
- ETCC: 全単射による線形画像を取得, 空間も含めた定量的3次元化が可能 → 法令関連に適している

高線量場用ETCCの模式図

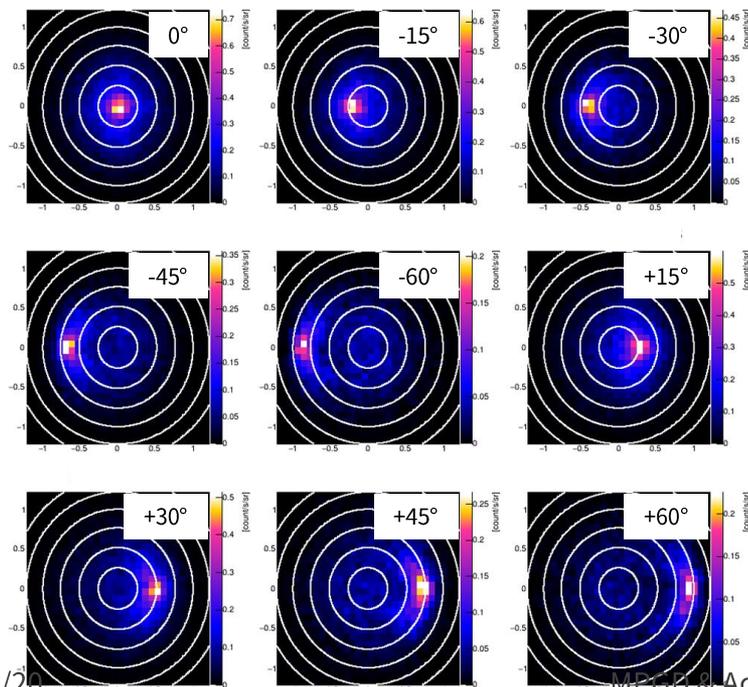


- 小型で持ち運び可能, 三脚に固定して測定
- ノートPC 1台で測定可能
- PSA周辺を鉛 (厚さ5mm) で遮蔽
- TPC周辺に鉛遮蔽板を着脱可能

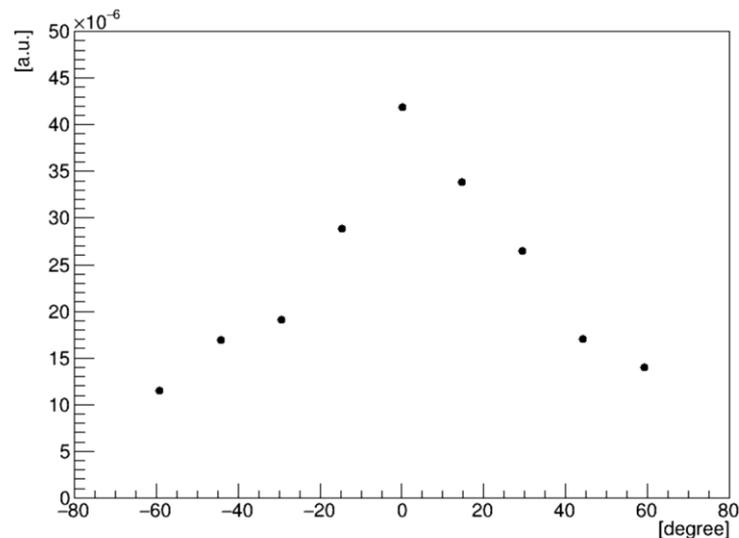
ETCCの基礎性能評価

高線量場用ETCCの仕様	
使用しているガス種	Ar/CF ₄ /isoC ₄ H ₁₀ (95%/3%/2%)
ガスの圧力	2 atm
TPCのエネルギー分解能	25% @31keV
PSAのエネルギー分解能	9.4% @662keV
ETCCのエネルギー分解能	10.99% @662keV
検出効率	4.5×10^{-5} @ field of center, 662keV
ETCCのダイナミックレンジ	high gain: 100 keV-2400 keV, low gain: 2400 keV - 5000 keV
Angular Resolution Measure (ARM)	5.45° @662 keV, 30 cm

角度ごとのCs-137等立体角イメージ



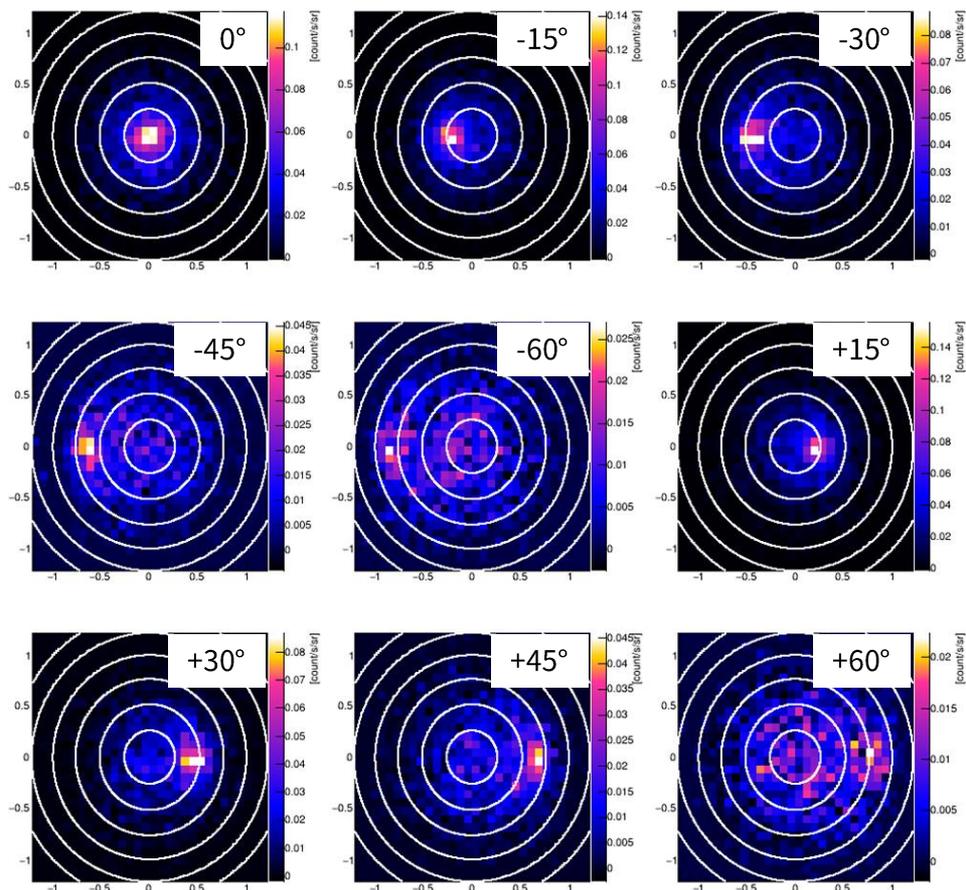
Cs-137の検出効率の角度依存性



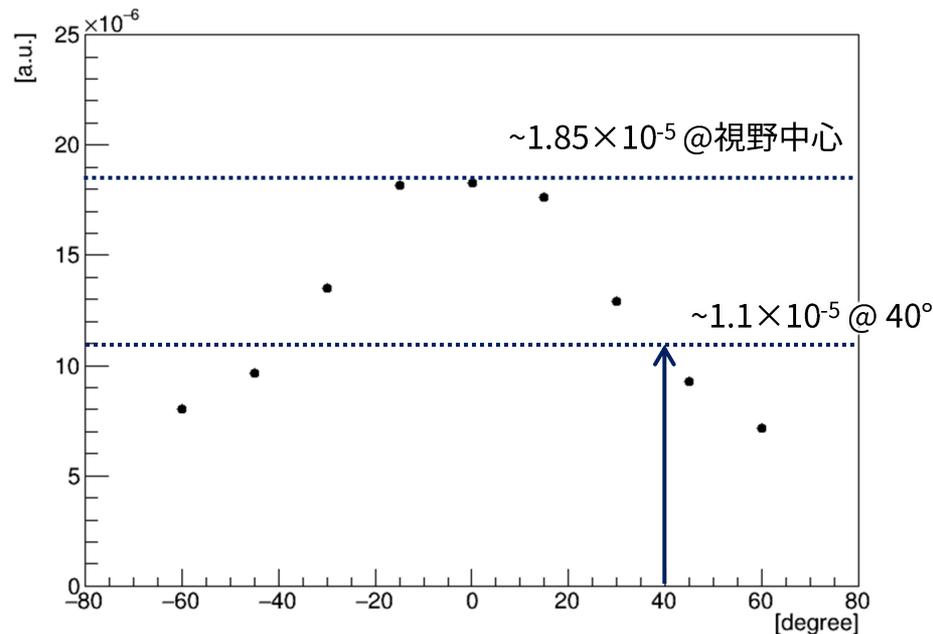
662keV±10%でエネルギーカット

ETCCの基礎性能評価

角度ごとのCo-60等立体角イメージ



Co-60の検出効率の角度依存性

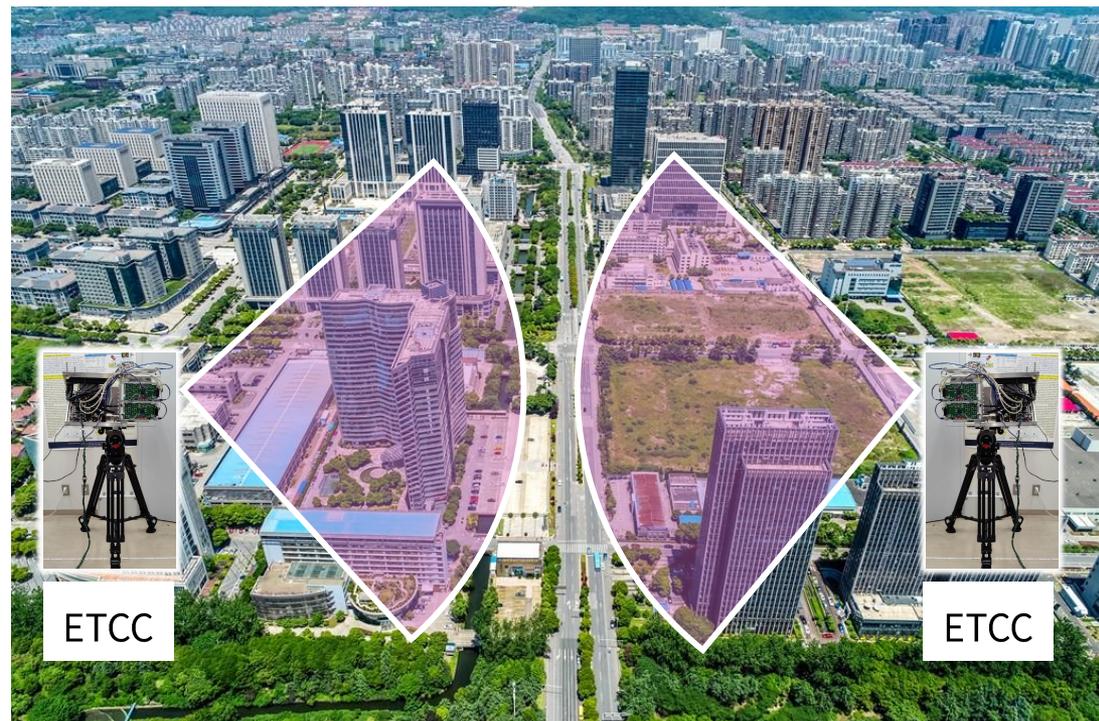


線源を視野中心に設置した場合と40°付近に設置した場合の検出効率を比較すると60%程度減少

- $1000\text{keV} < E < 1500\text{keV}$ でエネルギーカット
- 角度 $\pm 60^\circ$ での位置分解能は悪くなる

核物質モニタリングの必要性

- 放射性物質を使用したテロの危険性が高まっておりホームランドセキュリティの重要性が提唱されている
- 公的なイベント会場や空港・港湾など、人や貨物が集まる場所が標的になる可能性



シンチレーション検出器で調査

- 放射性物質の種類の特定は可能だが線源の位置特定に時間がかかる
- 測定者が線源に近づく必要があり被爆する恐れがある



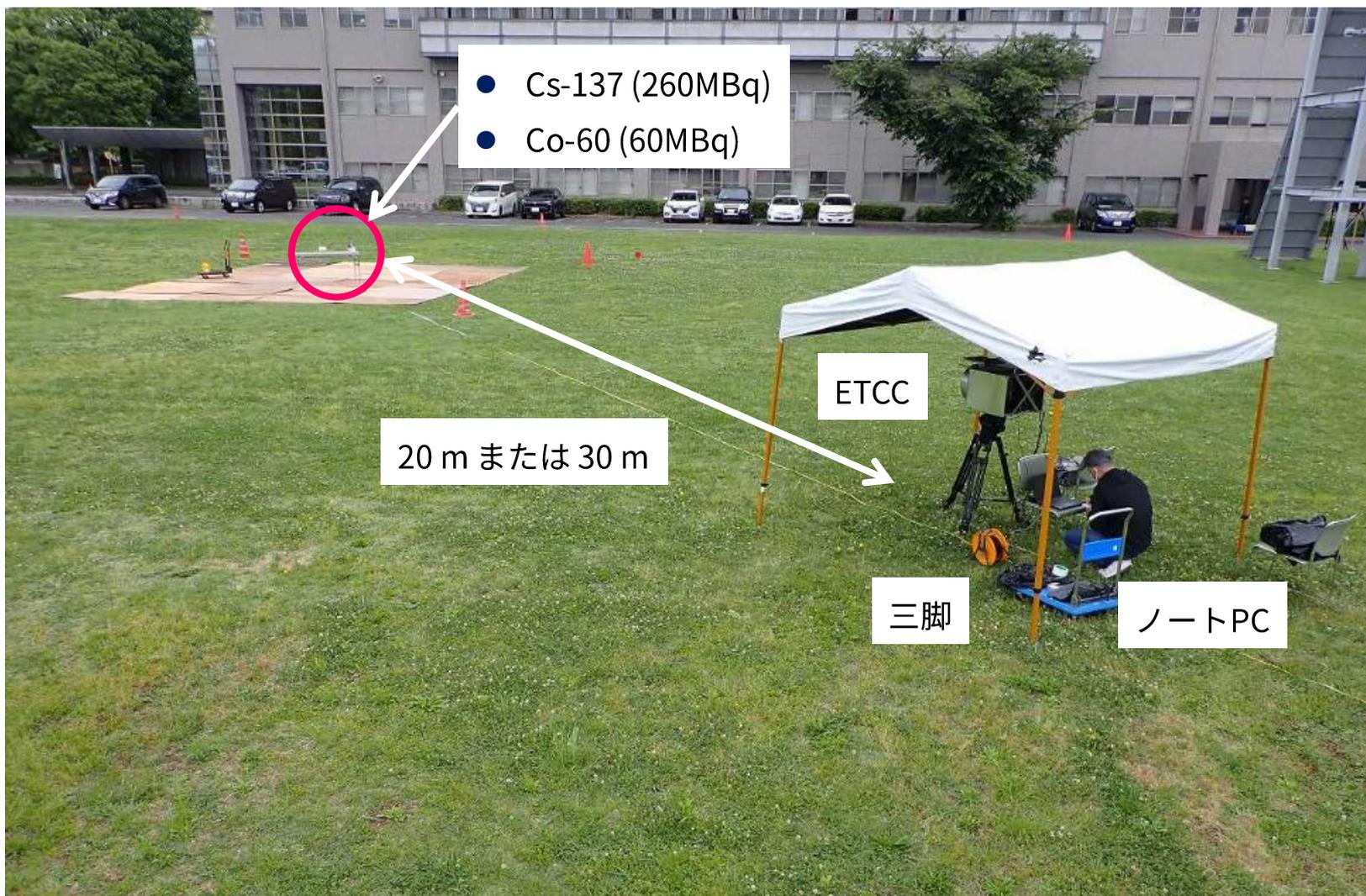
ETCCで調査

- 線源の位置をイメージングで特定してスペクトルから線種の特定も可能
- 遠方から測定するので被爆の可能性が少なく安全性が高い

- ETCCをイベント会場などに複数台設置
- ガンマ線を常時モニタリングし安全性を確認

核テロを未然に防止するためにETCCが応用できるか可能性を調査する試験を実施

Cs-137とCo-60点線源のイメージング試験を実施

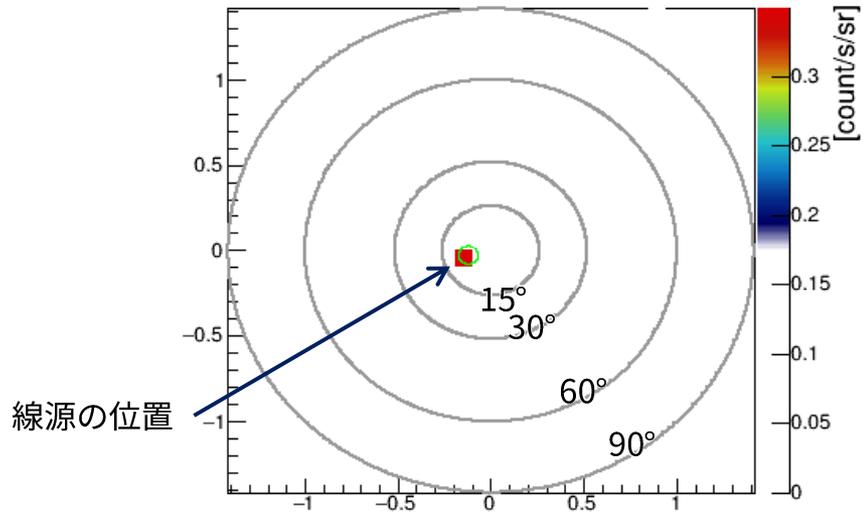


2025年5月27日 (火)

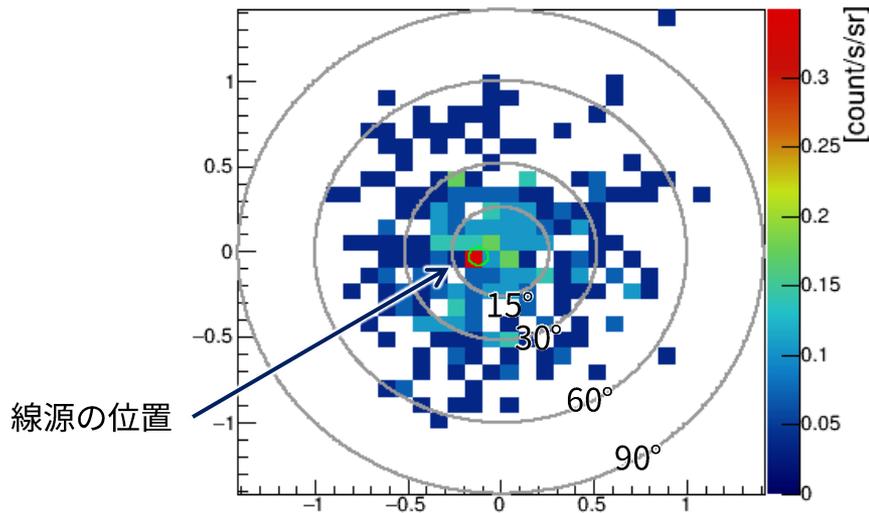
科学警察研究所の協力のもと Cs-137 (260MBq), Co-60 (60MBq) 点線源のイメージング試験を実施

距離20m, Cs-137のイメージング結果 (測定時間: 53.8分)

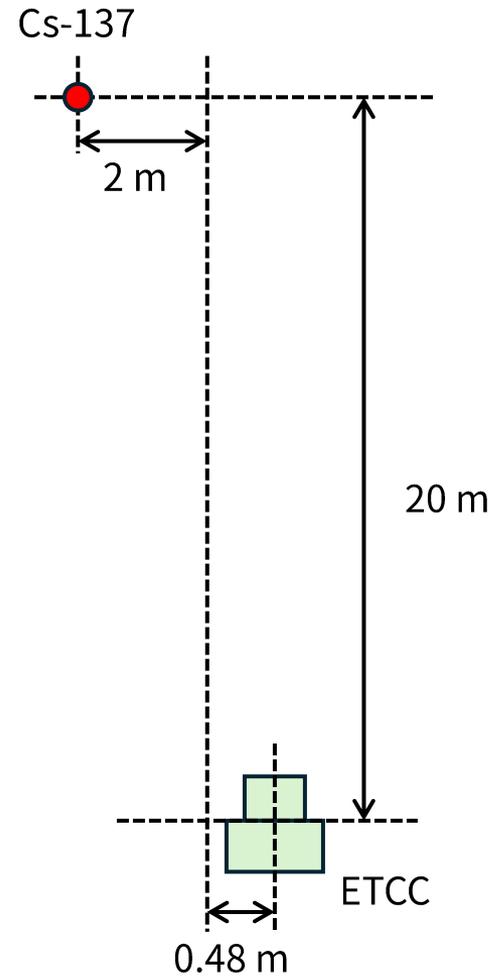
Cs-137の等立体角イメージ
half-scale



full-scale



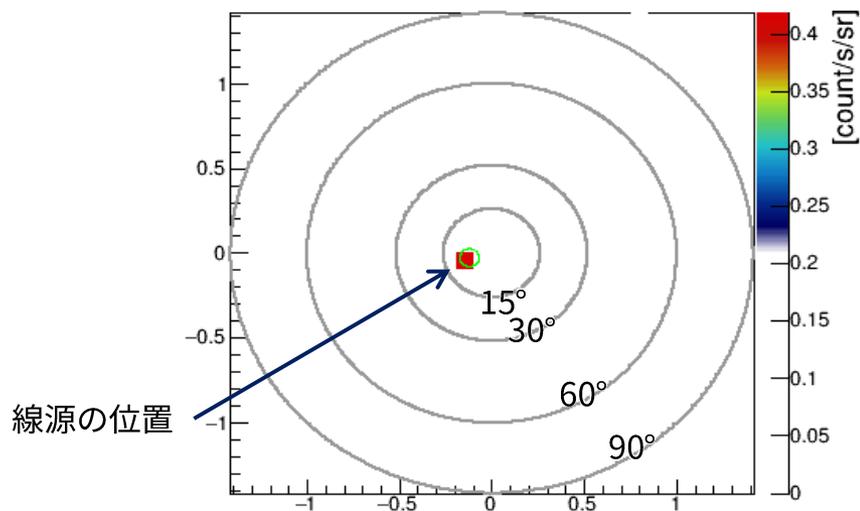
Setup 1:
Cs-137のみを測定



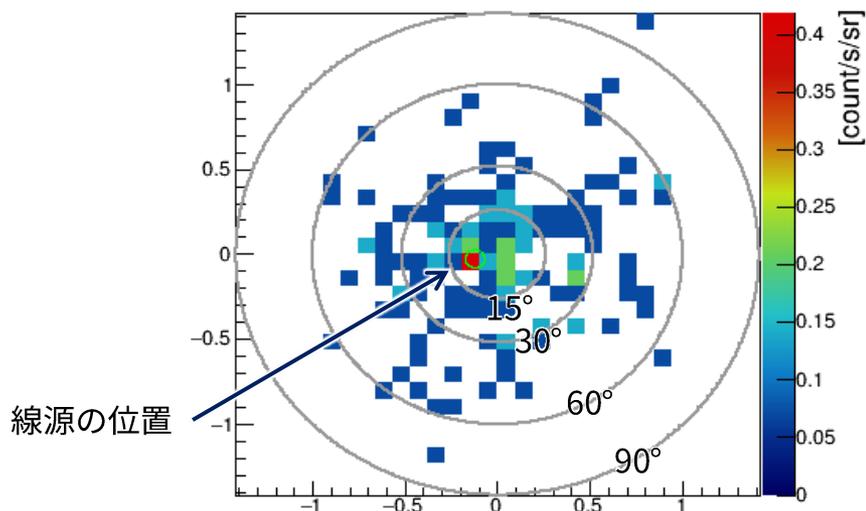
角度8°程度で線源の位置を特定

距離20m, Cs-137のイメージング結果 (測定時間: 27分)

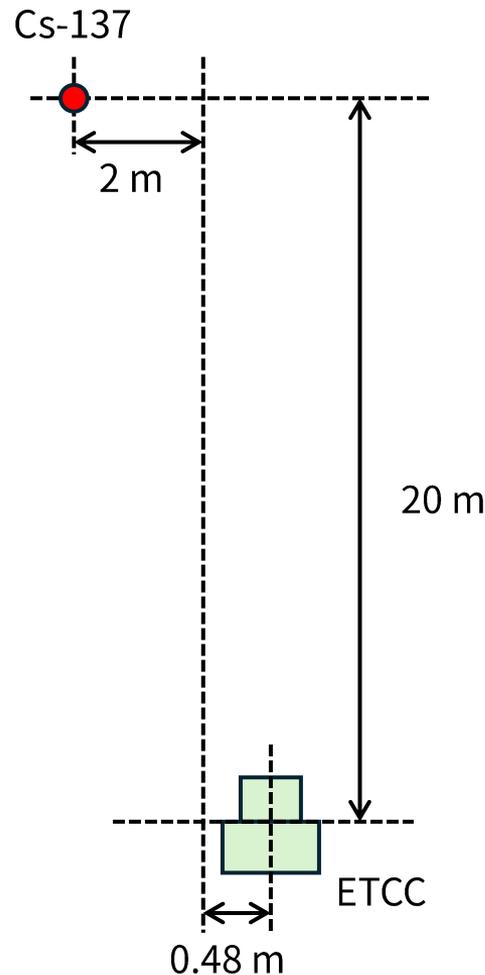
Cs-137の等立体角イメージ
half-scale



full-scale



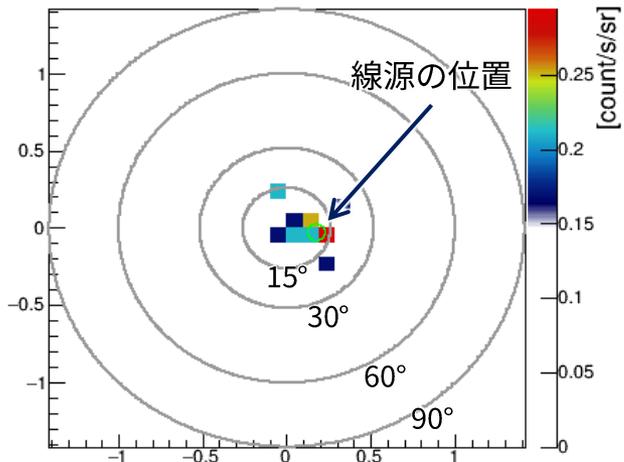
Setup 1:
Cs-137のみを測定



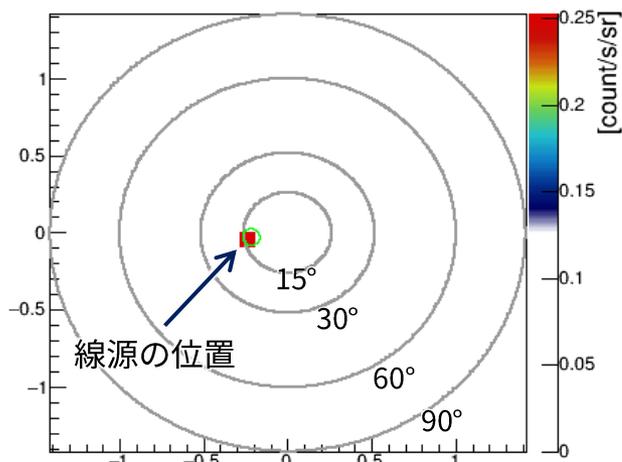
測定時間が半分でも角度8°程度で線源の位置を特定可能

距離20m, Cs-137とCo-60のイメージング結果 (測定時間: 44.6分)

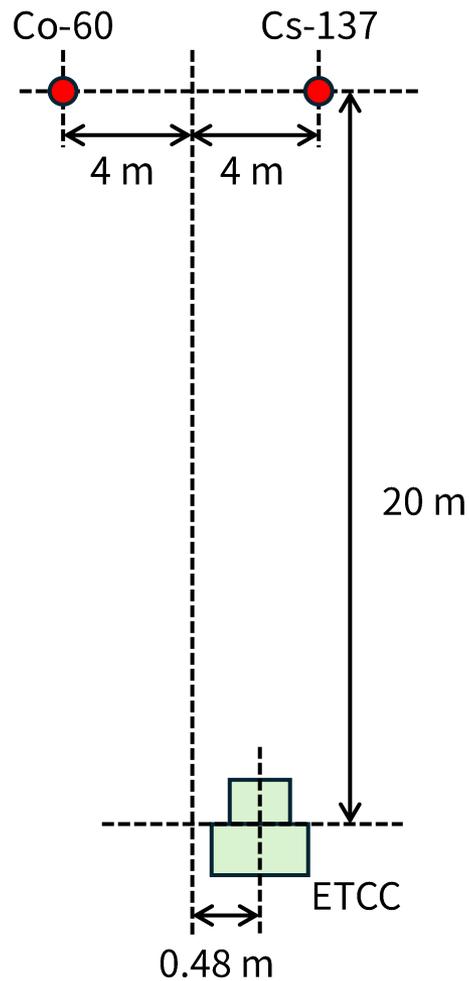
Cs-137の等立体角イメージ
half-scale



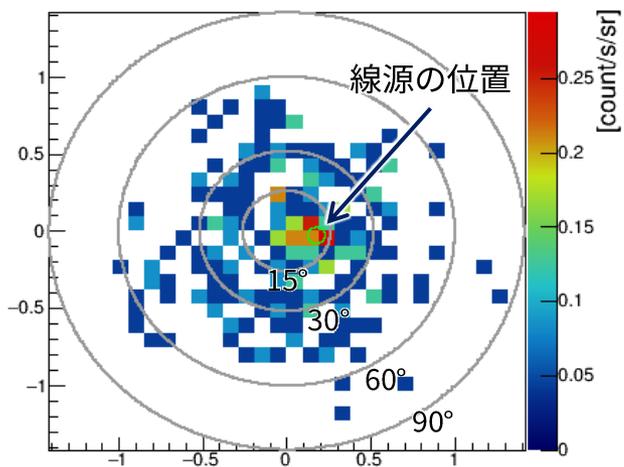
Co-60の等立体角イメージ
half-scale



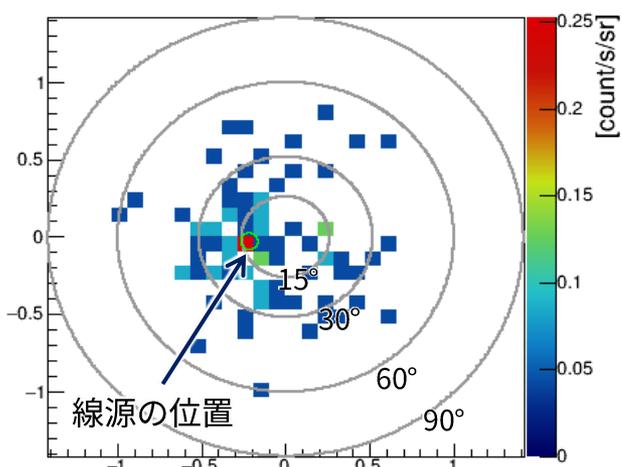
Setup 2:
Cs-137とCo-60を同時に測定



full-scale

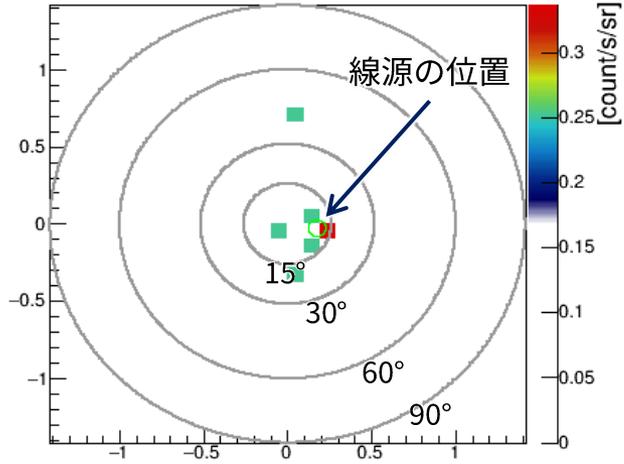


full-scale

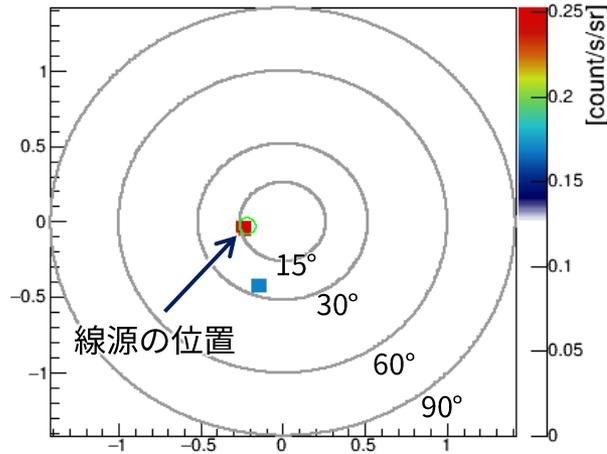


距離20m, Cs-137とCo-60のイメージング結果 (測定時間: 22.3分)

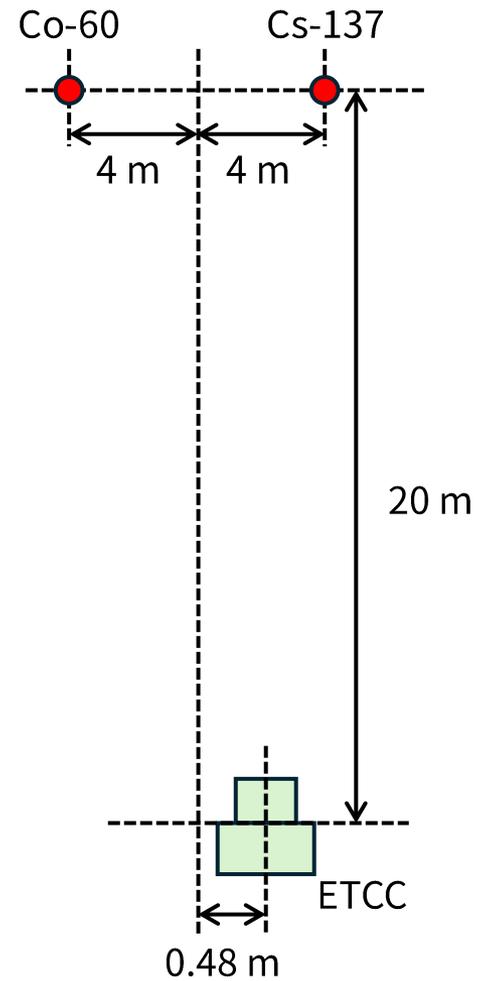
Cs-137の等立体角イメージ
half-scale



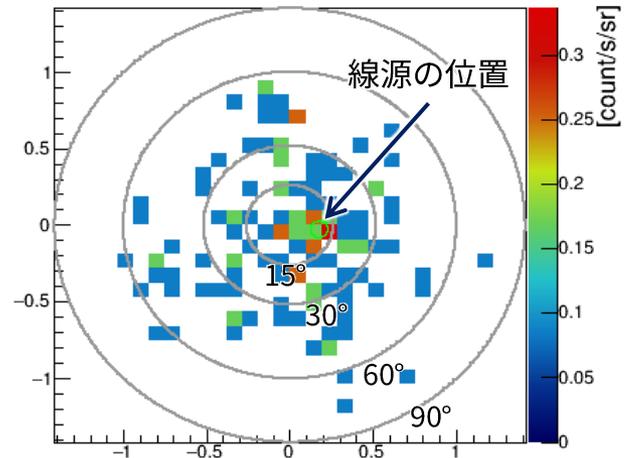
Co-60の等立体角イメージ
half-scale



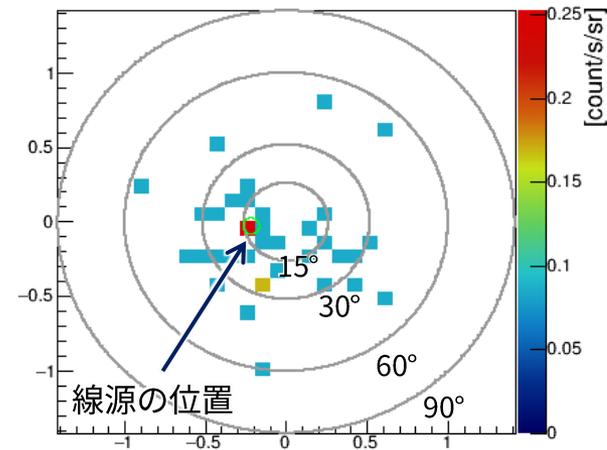
Setup 2:
Cs-137とCo-60を同時に測定



full-scale



full-scale



距離30m, Cs-137とCo-60のイメージング結果 (測定時間 101.4分)

従来型のコンプトンカメラでも測定してETCCと比較した

ETCCイメージ

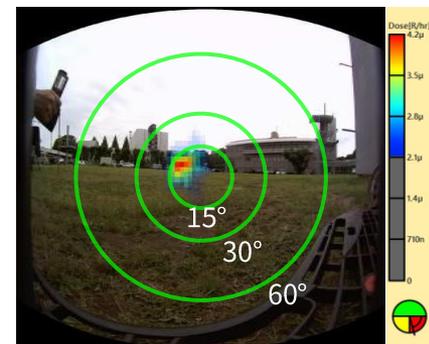
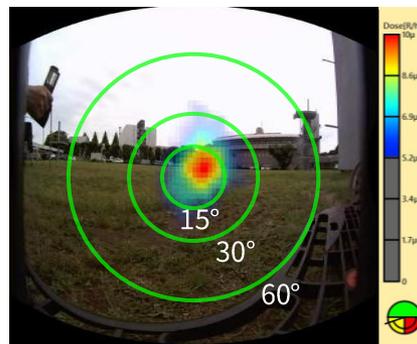
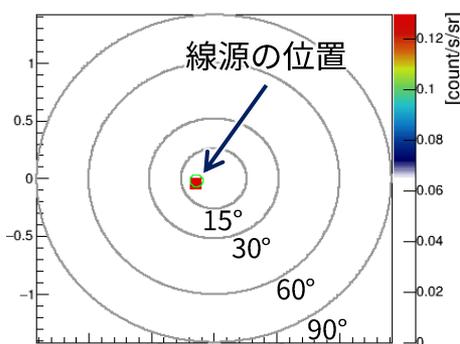
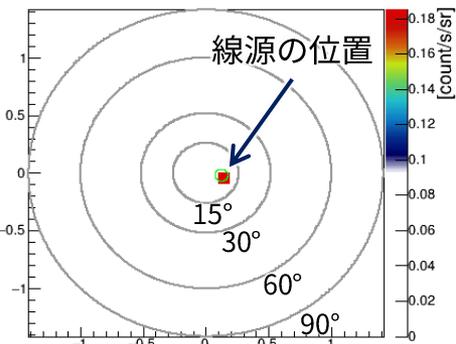
従来型コンプトンカメライメージ

Cs-137等立体角イメージ
half-scale

Co-60等立体角イメージ
half-scale

Cs-137等立体角イメージ
half-scale

Co-60等立体角イメージ
half-scale

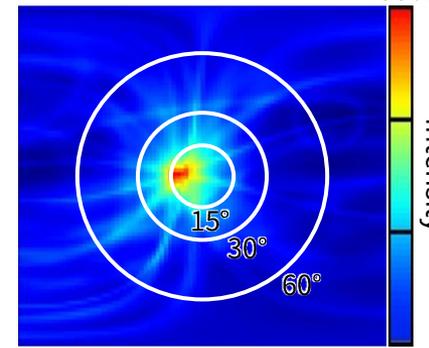
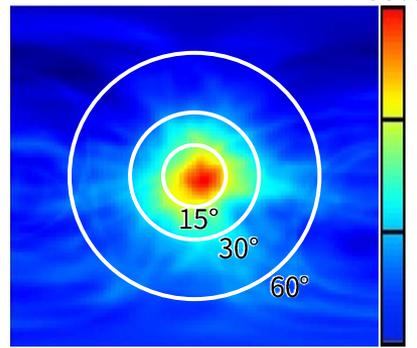
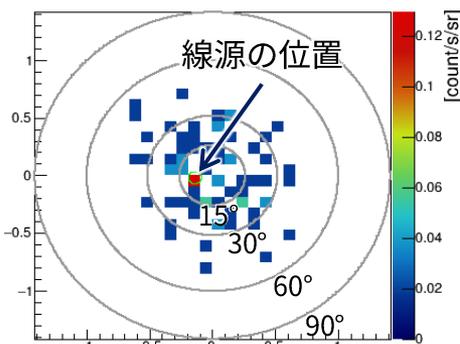
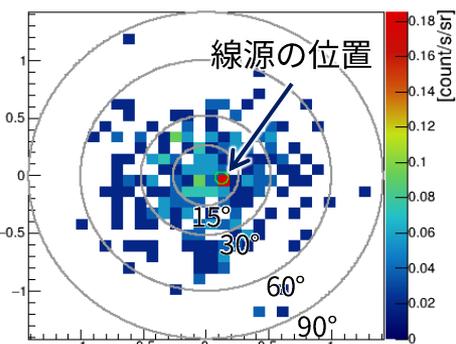


full-scale

full-scale

full-scale 100%

full-scale 100%



測定時間: 21分31秒

- 従来型コンプトンカメラ(CC)で測定したイメージは half scale でも30°から60°に広がっているが、ETCCだと8°程度で特定
- 従来型CCはFull scale では全体に広がっているがETCCでは線源の設置位置を中心に薄く広がって分布
- 従来型CCでは線源が広がっている場合、全体が明るくなり線源位置を特定できない可能性

距離30m, Cs-137とCo-60のイメージング結果 (測定時間: 25.3分)

測定時間を従来型のコンプトンカメラの測定時間と同程度に変更

ETCCイメージ

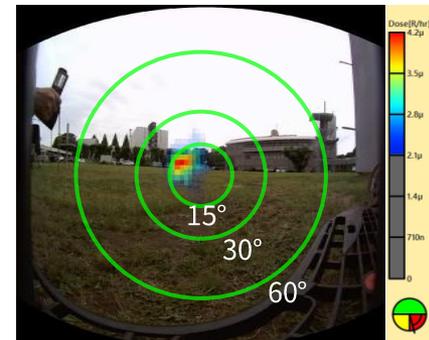
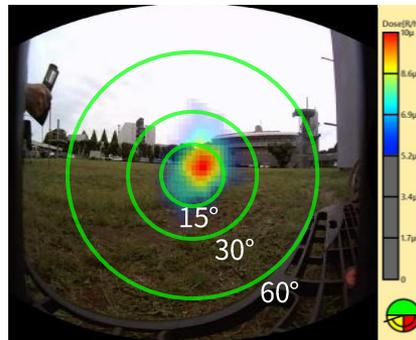
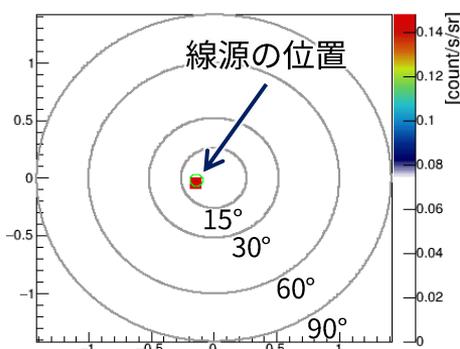
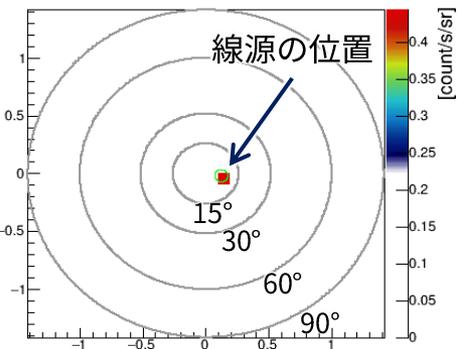
従来型コンプトンカメライメージ

Cs-137等立体角イメージ
half-scale

Co-60等立体角イメージ
half-scale

Cs-137等立体角イメージ
half-scale

Co-60等立体角イメージ
half-scale

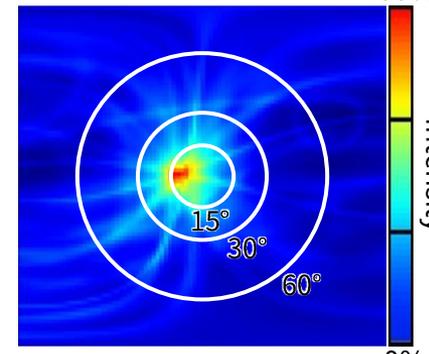
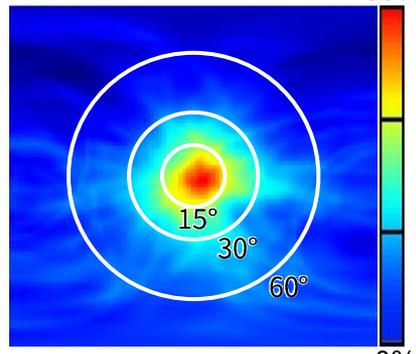
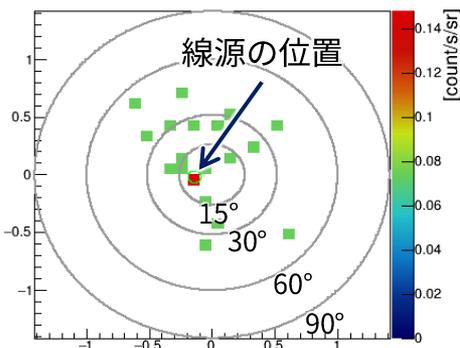
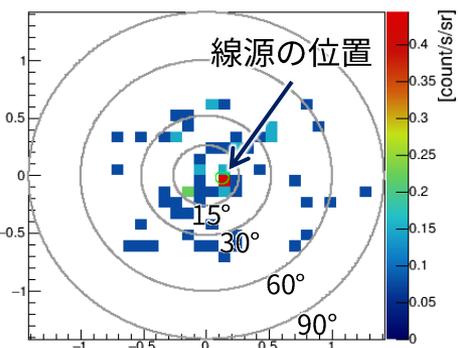


full-scale

full-scale

full-scale 100%

full-scale 100%



測定時間: 21分31秒

- 測定時間を従来型コンプトンカメラと同程度に変更しても線源の位置を8°程度で特定

Cs-137とCo-60点線源のイメージング試験のまとめ

- 20m または 30m離れた位置からCs-137とCo-60点線源を同時に測定し、half-scale で角度分解能 8° 程度でイメージングでき遠方にある線源の位置を特定することができた。
- 放射線源が広がって分布している場合でも分離して位置を特定できる可能性
- 従来型コンプトンカメラはhalf-scale で $30^\circ\sim 60^\circ$ 程度の角度分解能であり、線源が広がっている場合、位置決定が困難
- 線源の検出に時間がかかるため測定機の大型化を進め検出効率向上を目指し、より短時間でイメージングができれば核物質モニタリング装置として使用可能と思われる

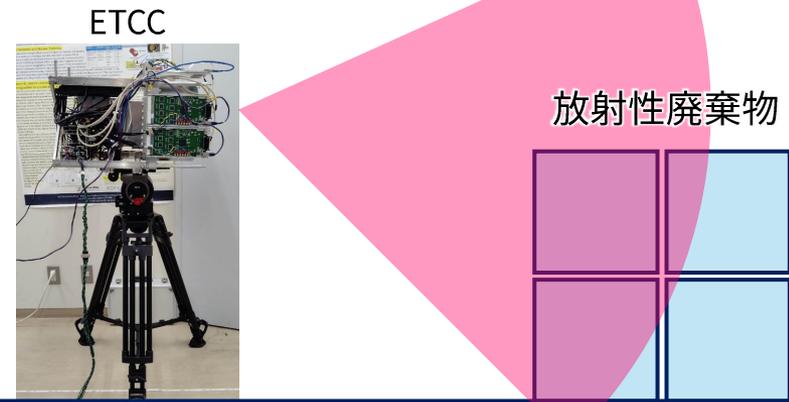
新型転換炉原型炉ふげんのイメージング試験

- 新型転換炉原型炉ふげんは2003年に運転終了後、2008年に廃止措置に着手
- 原子力施設から放射能を取り除き、安全に解体する必要がある
- 廃止措置には合理性と安全性が求められる



- 廃止作業で出る放射性廃棄物を測定台上に載せられるサイズに切り分けて放射性濃度を検査
- 非効率的な作業

- ETCCは視野が広くコンテナに入った放射性廃棄物に対してイメージングスペクトロスコピーを行うことで放射性廃棄物の情報を取得可能
- 放射線量の高い廃棄物のみ抽出することで、これまでの作業を改善できる可能性
- ETCCを用いて効率的で安全な廃止措置を実現



復水脱塩器室での測定

- 2024年のETCCによる測定結果では天井付近のフランジの線量が高くホットスポットが存在していた
- 測定時間が50分程度と短く十分な統計を得ることができなかった。
- 今回も同様の測定を行いホットスポットの詳細な線量測定を実施することが目的

推定 10^5 Bq程度のCo-60による汚染があるはず

フランジ (ホットスポット)
 $0.2\mu\text{Sv/h} \sim 1.2\mu\text{Sv/h}$
配管規格 3B (80A)

2.5 m

1.54 m

直径1.2m

2.8 m

ETCC

$\sim 40^\circ$

ベントフィルタ

1.2m

$0.2\mu\text{Sv/h}$

三脚

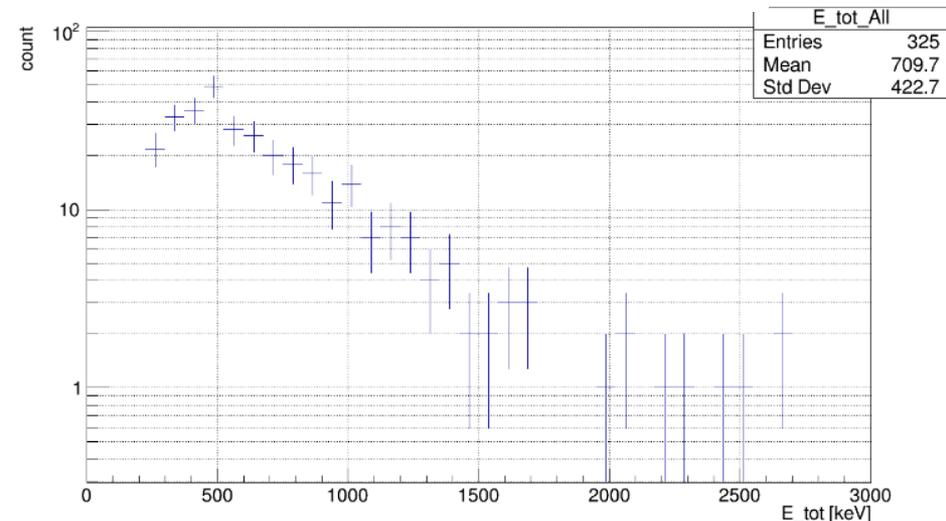
床からTPC中心までの距離
= 1.26 m

0.6m 基礎台 (段差部)

測定時間は2時間程度

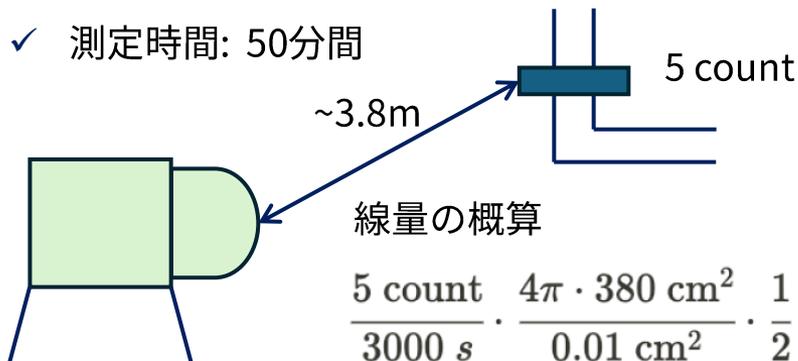
2024年の復水脱塩器室の測定結果

ETCCで測定したスペクトル

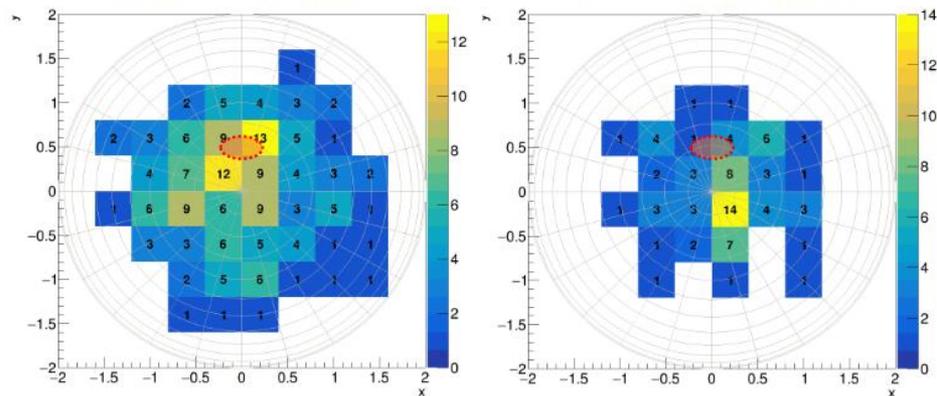


Co-60のエネルギー領域で
フランジ方向に比較的強い放射

- ✓ 有効面積: 0.01 cm²
- ✓ 測定時間: 50分間

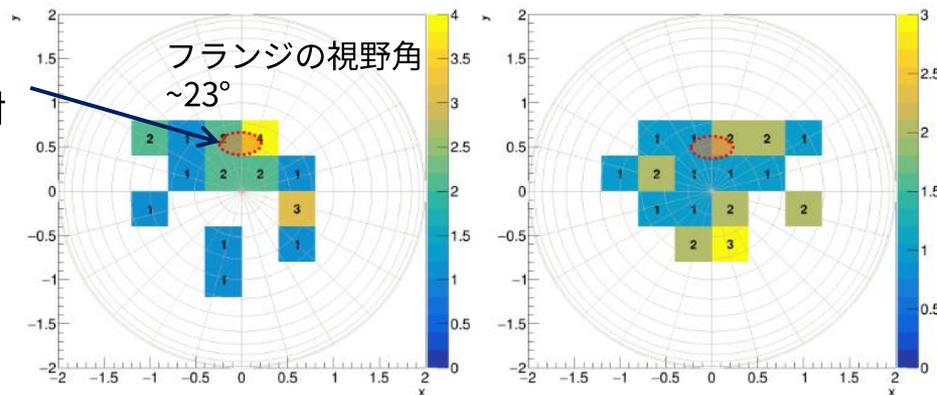


エネルギーごとに区切ったガンマ線イメージ
300 ~ 700 keV 700 ~ 1100 keV



1100 ~ 1400 keV

1400 ~ 3000 keV

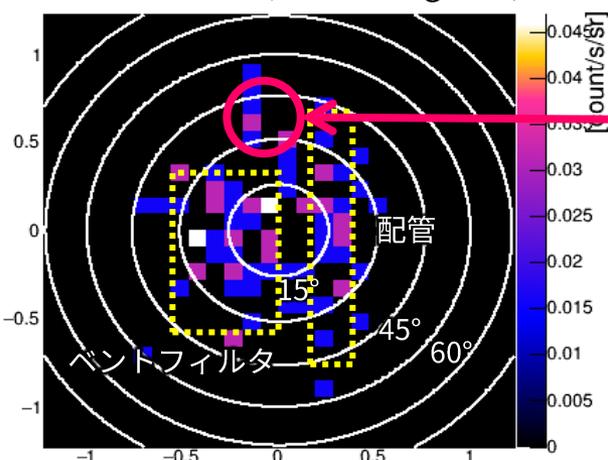


線量計の計測からフランジから10cmで 1μSv/h
= ~10⁵ Bq に相当

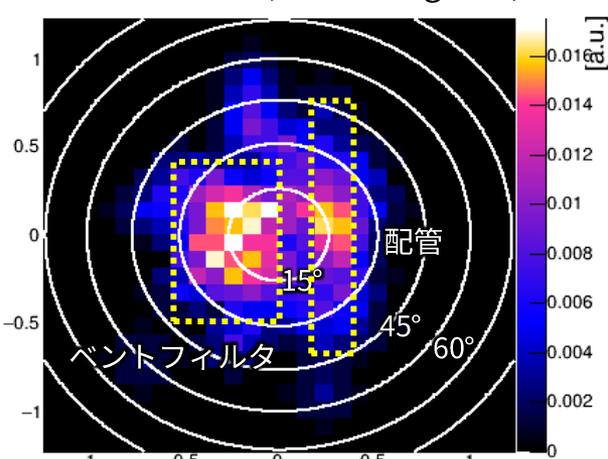
ETCCの測定結果とオーダー計算で一致

2025年の復水脱塩器室の測定結果

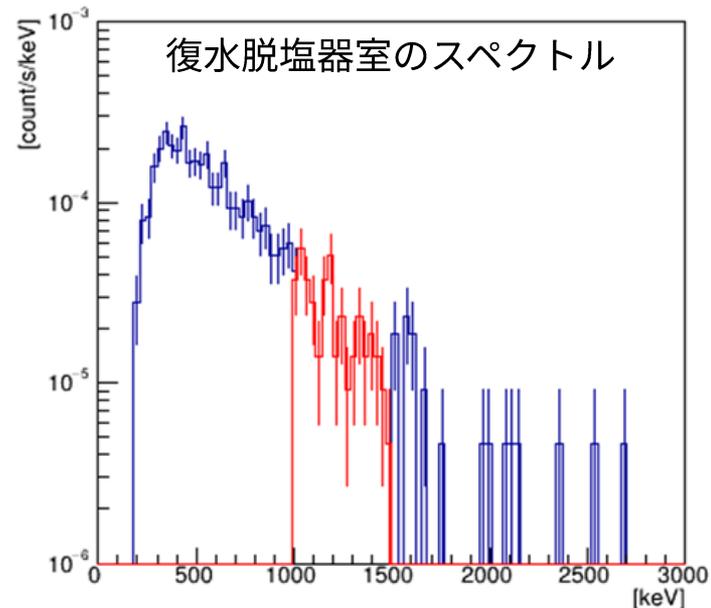
Co-60イメージ (Smoothingなし)



Co-60イメージ (Smoothingあり)



復水脱塩器室



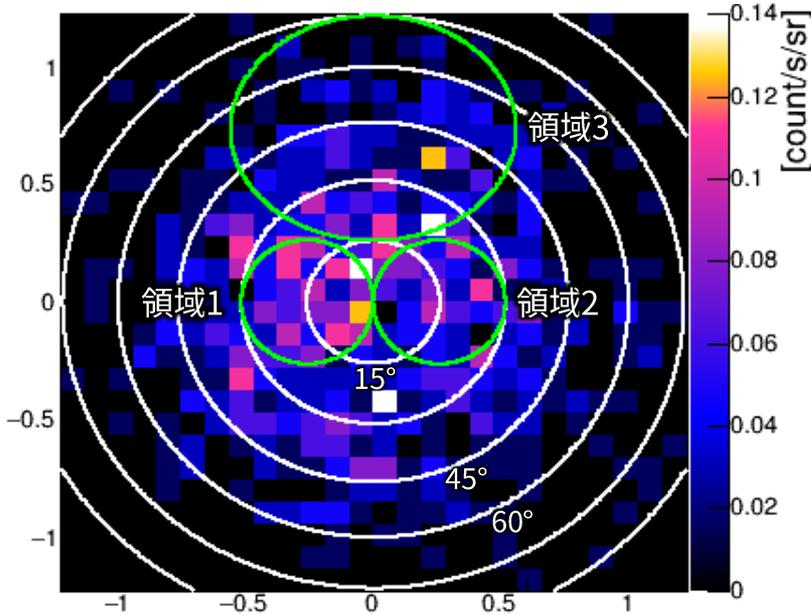
Co-60のエネルギー範囲でカット

- ホットスポットのフランジは視野角が40°と大きく感度不足で2時間程度の測定時間ではイメージングできなかった。
- ガンマ線イメージ内で点線で示したベントフィルタと縦方向に設置された配管から 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の Co-60 からのガンマ線放射の画像化に成功
- 全域のCo-60の存在量も計算可能

復水脱塩器室測定イメージカットスペクトル

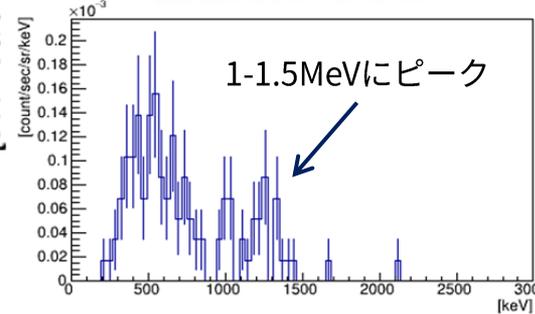
ガンマ線イメージを3つの領域に区切り各領域内のイベントのスペクトルをプロット

全イベントを使用したガンマ線イメージ

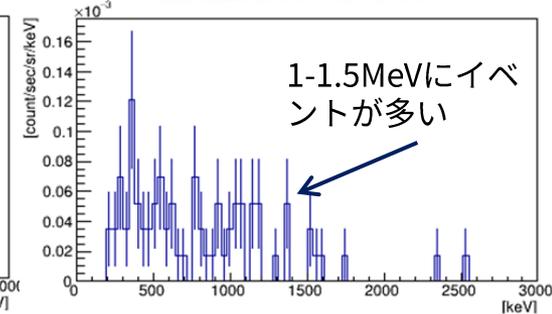


領域1: ベントフィルタ周辺
領域2: ベントフィルタの右奥の縦パイプ周辺
領域3: 上方向のフランジ周辺

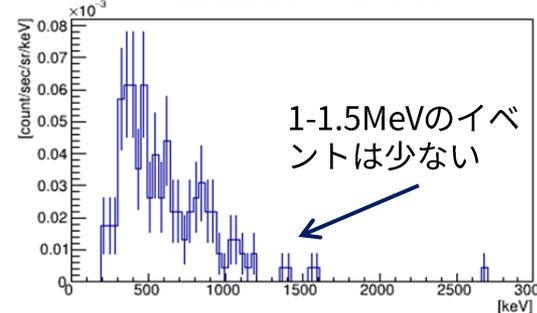
領域1のスペクトル



領域2のスペクトル



領域3のスペクトル



- ベントフィルタ (領域1) と配管 (領域2) は Co-60 のエネルギー領域にイベントが多い
- フランジ付近 (領域3) では Co-60 領域のイベントは少ない
- 視野全域スペクトルの Co-60 領域はベントフィルタと配管の汚染によるものと推定される

復水脱塩器室測定のとまとめ

- 視野中心付近のベントフィルタや縦方向に設置された配管のイメージングに成功した。Co-60で薄く広く汚染されていると推定される。
- 2024年に測定したホットスポットのフランジは視野角が23°に位置していたが、今回は40°程度と大きく、感度が不足し明瞭にはイメージングできなかった。
- 2024年のETCCの感度の視野角依存性のデータはないが、2025年のETCCでは23°と40°の検出効率を比較すると30%程度減少
- フランジ部分でもベントフィルタなど他の箇所と同程度にはガンマ線が来ており検出効率が2倍になればイメージングできると推定
- 次回の測定ではETCCを約10°程度、上方向に向けてフランジを視野中心付近に入れて測定する予定