#### 先端計測

H24年度採択課題



宇宙を観る技術を地上に
ーホットスポットの可視化から医療応用まで一

# 革新的超広角高感度ガンマ線可視化装置の開発

チームリーダー 高橋忠幸

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

主な共同研究者

三菱重工業 誘導・推進事業部

宇宙航空研究開発機構

名古屋大学

黒田能克(サブリーダ)

渡辺伸, 武田伸一郎, 池田博一

田島宏康

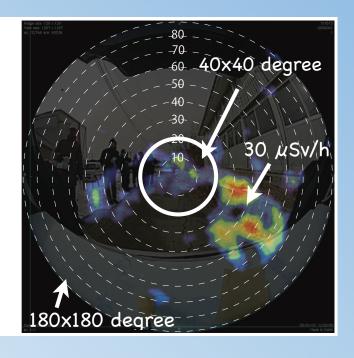
#### 本日の内容

- 1. 研究の背景と目的
- 2. ASTRO-H衛星
- 3. ガンマ線の可視化技術とコンプトンカメラ
- 4. 本研究の成果
- 5. 地上用途への応用
  - 1. 油ガス田における低濃度NORM可視化
  - 2. 医療応用
- 6. おわりに

### 研究の背景

ASTRO-H衛星のガンマ線観測装置の要素技術を応用して、「超広角コンプトンカメラ」の原理実証機を福島原子力発電所の事故後直ちに製作。世界ではじめて「コンプトンカメラ」を福島の現場で現地実証した。





超広角コンプトンカメラで取得したガンマ線の到来方向の像に実際の景色に重ねて映し出す(放射性物質の分布の可視化)

### 研究の目的

除染現場で貢献する放射性物質分布の可視化装置の 実現を目的として、装置の

「高感度化」

「小型・軽量化」

「GUI操作ソフト開発」

「要素技術の国産化」

「民生用の低コスト設計」

に取り組む。

宇宙技術を発展させ、地上用途の成果につなげる

#### 装置に対する要求条件

- 1. <sup>134</sup>Csや<sup>137</sup>Csから放出されるエネルギーの決まったガンマ線を識別するエネルギー分解能
- 2. 効率よいマップ作成のための広い視野
- 3. 10m先の1-2m程度のホットスポットを識別可能なガンマ線のイメージング能力
- 4. 0.5から数マイクロSv/hの環境放射線強度に寄与するホットスポットの分布を短時間で製作可能な感度をもつこと。

#### 現地調査を繰り返して、設定した要求条件

#### ASTRO-H衛星

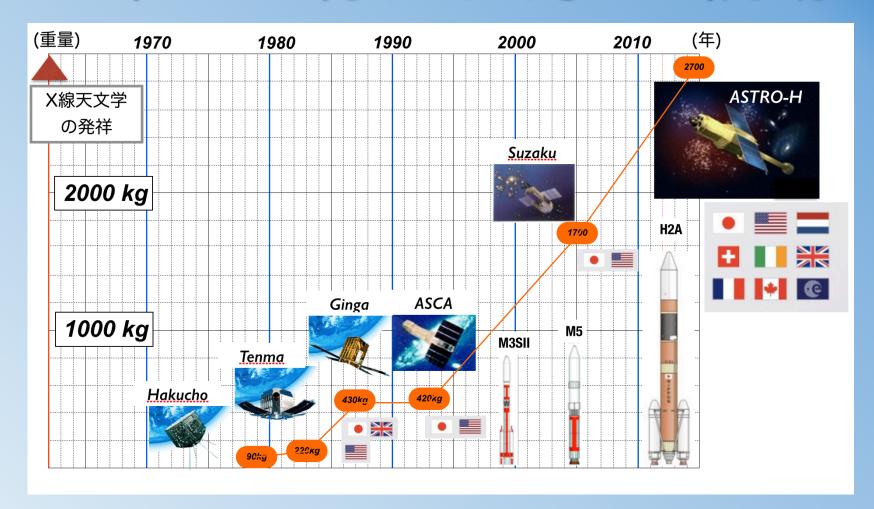


全長14 メートル 重量 約 2.7 トン



ブラックホール, 超新星残骸,銀河団など, X線やガンマ線で観測される高温,高エネルギーの天体の研究を通じて、宇宙の構造とその進化の解明を行う。 2015年度打ち上げ予定のJAXAのX線天文衛星。

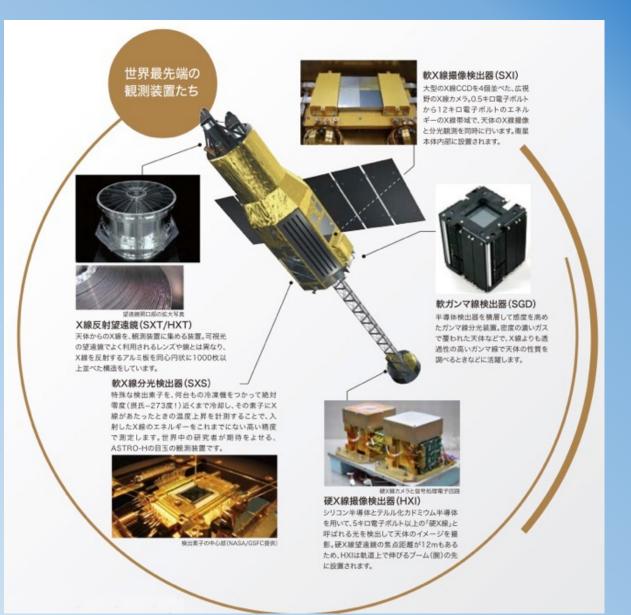
### 日本のX線天文学の軌跡



日本は、X線天文学の黎明期より、世界のX線天文学を牽引してきた。ASTRO-Hは国内外の大学、研究機関の200人を超える研究者が開発に参加しているX線天文学の旗艦ミッションである。

### 世界ではじめての道具立て

ブラックホールの周囲 や星が爆発したあとに 残る高温プラズマ、銀河 団を満たす膨大な量の 高温ガスなどから放出 される「X線」や「ガン マ線」を過去最高感度 で測定し、高エネルギー 現象に満ちた宇宙の構 造やその進化を探る。



### 宇宙ガンマ線観測の壁

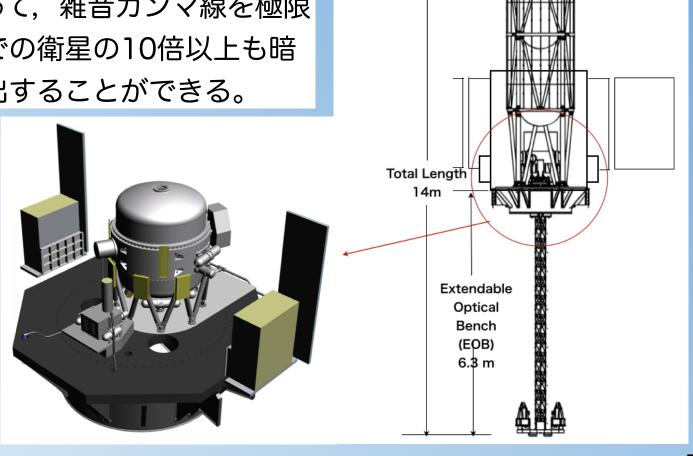
- 1) 天体から来るガンマ線の数 (フラックス) はX線などに比 べてはるかに少ない。
- 2) ガンマ線を止めよう (検出しよう) とすると, 重くなる (有効面積が稼げない)。
- 3)測定の邪魔となる雑音(バックグラウンド)\* が天体からの信号に比べて遥かに高く,防ぎにくい。
- (\*) 宇宙線が地球大気, 衛星にぶつかることによって作り出されるガンマ線など。



#### ASTRO-H衛星のガンマ線検出器

ASTRO-H衛星のガンマ線検出器は、コンプトンカメラの原理を用い、ガンマ線が観測天体の方向からやってくる事を光子毎に確認する。この新しい手法によって、雑音ガンマ線を極限まで低減し、これまでの衛星の10倍以上も暗いガンマ線天体を検出することができる。

ガンマ線のスペクトルを精度よく観測することで、どのような物理的な機構で、X線やガンマ線という高いエネルギーの光子が作り出されるかを知る事ができる。



### 最新宇宙ガンマ線観測技術

- 1. 極めて微弱な天体からの信号をとらえるために求められる感度(低いバックグランド、高いエネルギー分解能)を実現する検出器技術
- 2. 限られれた重量、電力で、最大限の性能を引き出す技術
- 3. 激しい宇宙環境で、メンテナンス無しに数年間動作させる技術

テルル化カドミウム(CdTe)半導体技術

低雑音CdTe撮像検出器

低雑音シリコン(Si)撮像検出器

多チャンネル低雑音アナログ信号処理LSI(ASIC)

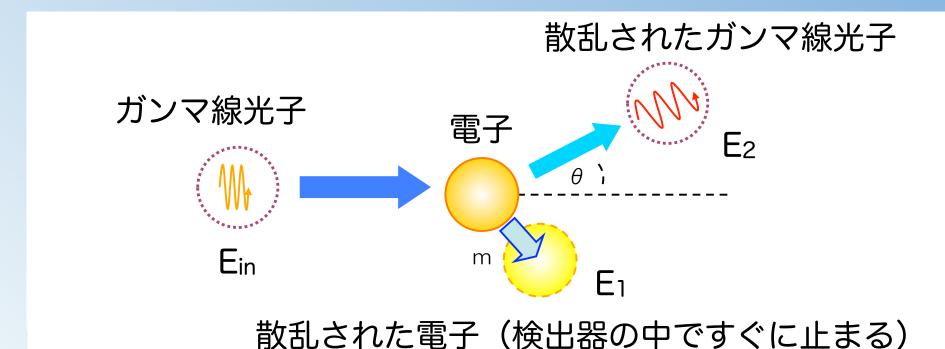
高密度実装技術

高性能データ処理電子回路技術

ASTRO-H 軟ガンマ線 検出器 (SGD)

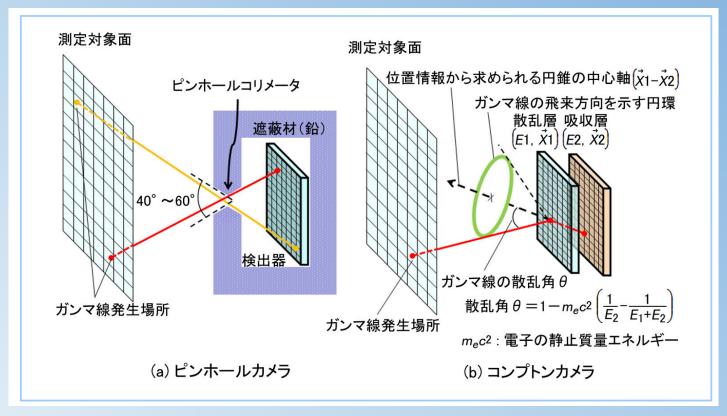
## ガンマ線の可視化

ガンマ線で「風景」を撮るカメラを作るのは難しい。 可視光ー>レンズ+フィルム(最近ではCCD) ガンマ線は光子(粒)としての性質が顕著。レン ズで集光したり鏡で反射させたりすることが困難。



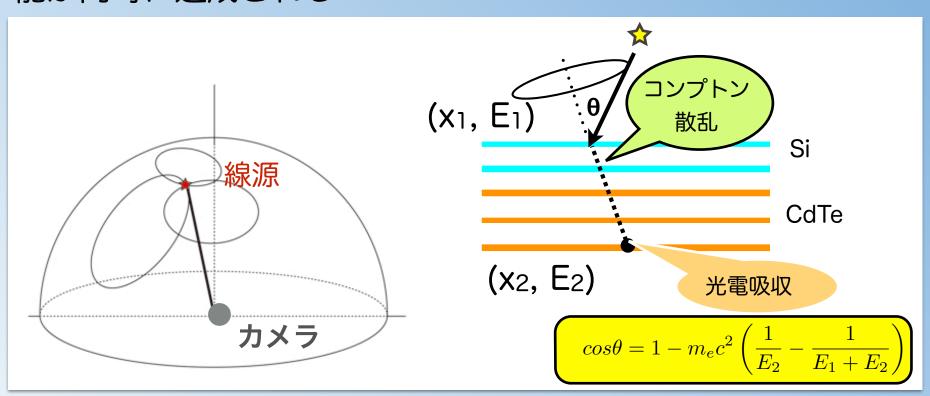
### コンプトンカメラ

コンプトンカメラは、1973年に提案され、コンプトン散乱の原理を用い、運動学を用いてガンマ線の到来方向を知るガンマ線カメラである。イメージを得るのにコリメータやピンホール、また、これらを実現するための遮蔽を必要としない。



## Si/CdTeコンプトンカメラ

ASTRO-Hに搭載されるコンプトンカメラは散乱体をシリコン (Si)半導体, 吸収体をテルル化カドウム(CdTe)半導体のイメージャで構成した, 我が国独自のカメラである (Si/CdTeコンプトンカメラ)。この構成により十分な検出効率と高い角度分解能が同時に達成される

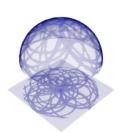


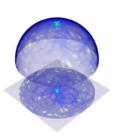
# 超広角コンプトンカメラ

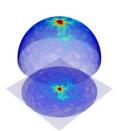
Si/CdTeコンプトンカメラの手法を用い、ホットスポットの探索など、フィールドで用いるために開発された。 ASTRO-Hのために開発した高密度実装の技術を用いているため、様々な方向から飛んでくるガンマ線を検出でき、結果として、広い視野を得ることができる。

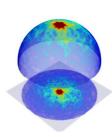
超広角コンプトンカメラによるガンマ線源イメージング

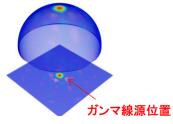












3 event

32 event

**128 event** 

384 event

615 event

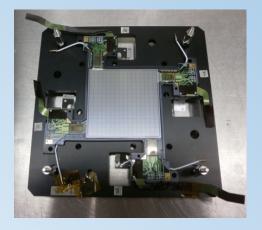
**Data Process Done** 

三菱重工業技報 Vol 51 No.1 (2014)より

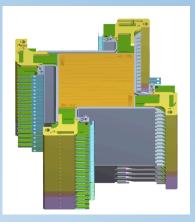
### 成果1:高感度化

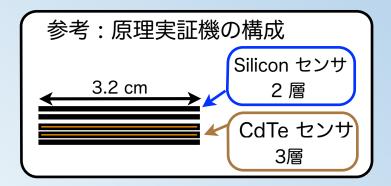
JSTの課題ではASTRO-H衛星搭載予定 SGD検出器の設計資源を利用して、原理実証機に比べて10倍以上の高感度化を実現する新しい試作機を開発、実験室での測定、および実地試験をおこなった。

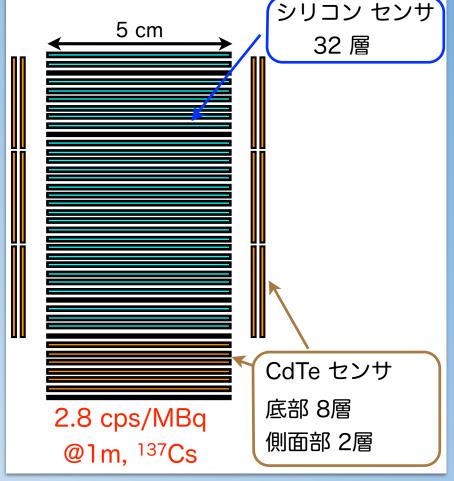
#### シリコンセンサ



#### 高感度カメラ

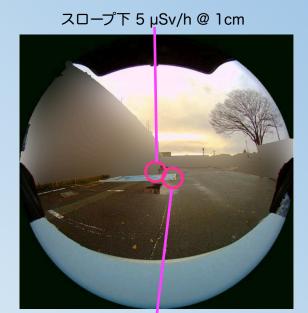


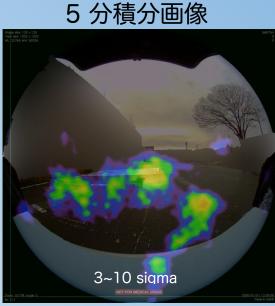


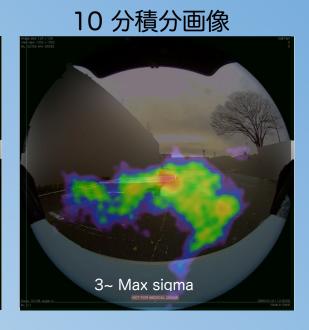


### 成果1:高感度化

#### 20 km 圏内での実地試験例







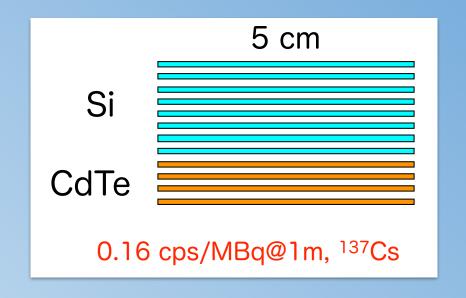
実証モデルでは 60-120 分の撮像時間を必要とした約1.5 マイクロSv/h の空間線量の場所で撮像を行い、高感度化モデルを用いると、数分の測定でホットスポットを画像化できることを示した。

17

#### 成果2:商品化

JSTの課題では、コンプトンカメラを早急に市場に投入し、除染の現場で活用することを目的とした研究開発を行い、カメラ部を試作した。

環境放射線レベルと用途に応じて積層枚数を最適化できる商用機に向けた試作品。最大で成果1と同程度の感度を得る(デフォルトの検出器構成はSi8層、CdTe4層)



山林や田畑、家屋裏などへのアクセスを行うためには、可搬性を重視した装置ハウジングが必要となる。装置の冷却機構を検討し、冷却装置と可視光カメラとを組み込んだハウジングを検討,試作した。

#### 成果2:商品化

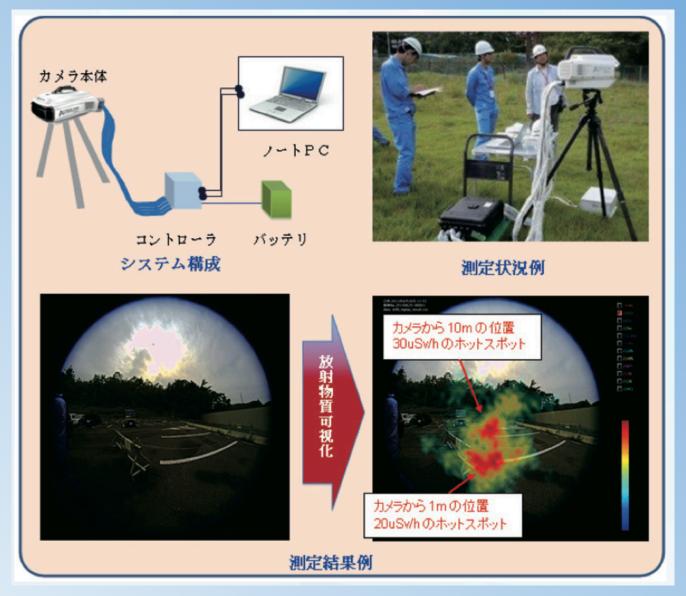


JST開発成果をふまえて三菱重工業が 製品化、H24年度末にリリース。

実地試験の結果をもとに繰り返し改良を加えた独自の解析アルゴリズムを組み込み、民生用途に適した操作性に優れるGUIソフトウェアを備える。

項目	諸元
形状	445L x 340W x 235H (mm) (カメラ本体。 突起物含まず。)
重量	8-13 kg 程度 (カメラ本体。装置仕様による。)
視野	180 x 180 度 (2π ステラジアン)
エネルギー分解能	約 2 % (FWHM) @ 662 keV
角度分解能	約5度 (FWHM) @ 662 keV
検出効率	0.16 cps/MBq @ 1m, 137-Cs (標準タイプ) 2.8 cps/MBq @ 1m, 137-Cs (拡張タイプ)

# 成果2:商品化



# 現地での実施例(1)

ASTROCAM 7000HSによる20km圏内,セシウム (137Cs)分布画像。除染前と除染後のデータに対して、同じ解析処理により画像を作成,除染の効果を可視化。



#### 除染前

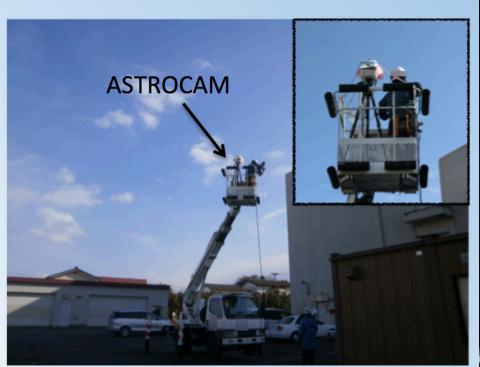


#### 除染後

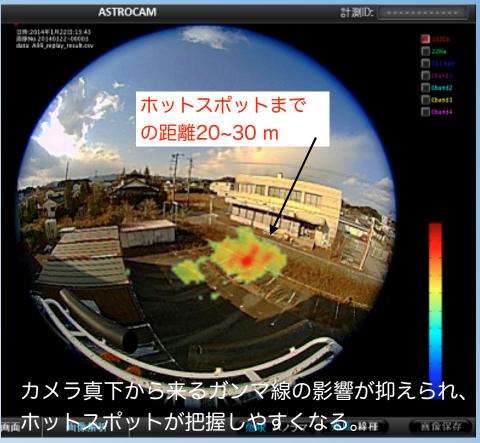


# 現地での実施例(2)

敷地内の全体的な汚染状況を一気に 把握するために、高所作業車を使用 し、高さ6mから撮像を実施。広範 囲の測定に有効である事がわかる (ASTROCAM 7000HS)。







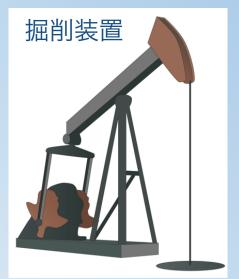
#### 地上用途への発展

#### 環境分野

・石油, 天然ガスの掘削に伴い, 水に溶けたラジウム等の自然起源の放射性物質(NORM)が濃集する場合があり. 管理が必要 環境機関

NORM分布の可視化

(独)石油天然ガス・ 金属鉱物資源機構 「JOGMEC」の技術課題



#### 医療分野

・高精度重粒子線治療において病変部の精密診断を行う際の検査期間・検査工程の短縮が必要

#### 医用コンプトンカメラの開発

群馬大学重粒子線医学研究センター JAXA 宇宙科学研究所 日本原子力機構の共同研究 23

### NORM分布の可視化

NORM (Naturally Occurring Radioactive Material)

天然資源(土壌、岩石、鉱物、オイル、ガス)等に含まれる

自然起因の放射性物質

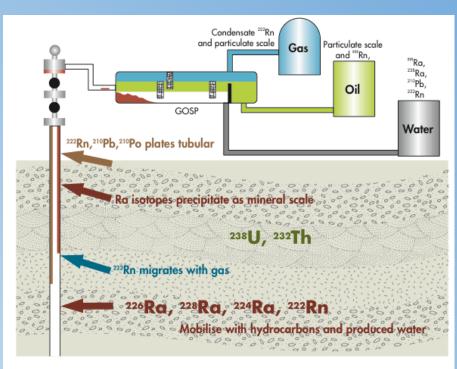
油ガス田の生産現場でNORM濃集

ー>NORMからの放射線が

人体・環境に与える影響

ー>管理の必要性が増大

既存のサーベイメータを使った人 海戦術にかわる測定手段が必要。



OGP, Report No. 412, 2008 (http://www.ogp.org.uk)

#### ASTROCAM 7000HSによる NORMのガンマ線写真

後でも、良質なガンマ線画像 を取得。

平成25年度より ASTROCAM 7000HSによる NORMの集積の可視化の研究 がスタート (三菱重工)

設定されたエネルギー バンド (E-band)内の 検出データのみを使い画像化 ⇒エネルギーの異なる散乱光 を排除し、遮蔽材による減衰

NORM分布の可視化

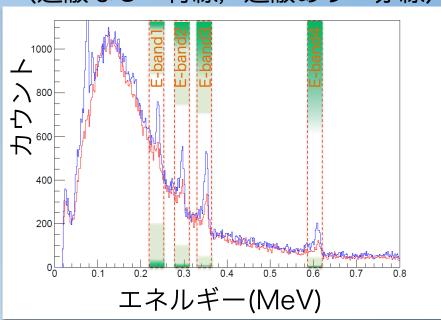
ASTROCAM 7000HSによる

エネルギースペクトル

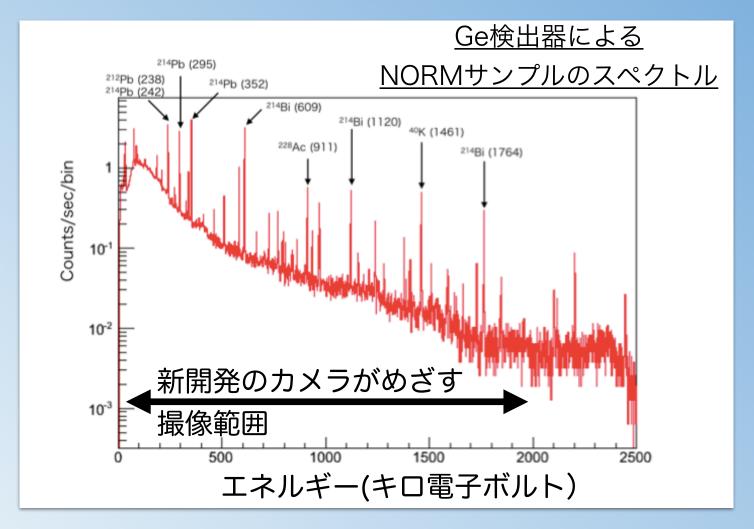
(遮蔽なし:青線,遮蔽あり:赤線)



「NORM可視化技術の開発(三菱重工業)」



JOGMEC 技術課題(H26-H27) 超広角コンプトンカメラの技術を発展させ、多様な NORMを低濃度まで可視化する、高感度ガンマ線カ メラの開発(JAXA)



#### 医用コンプトンカメラの開発

#### 目的

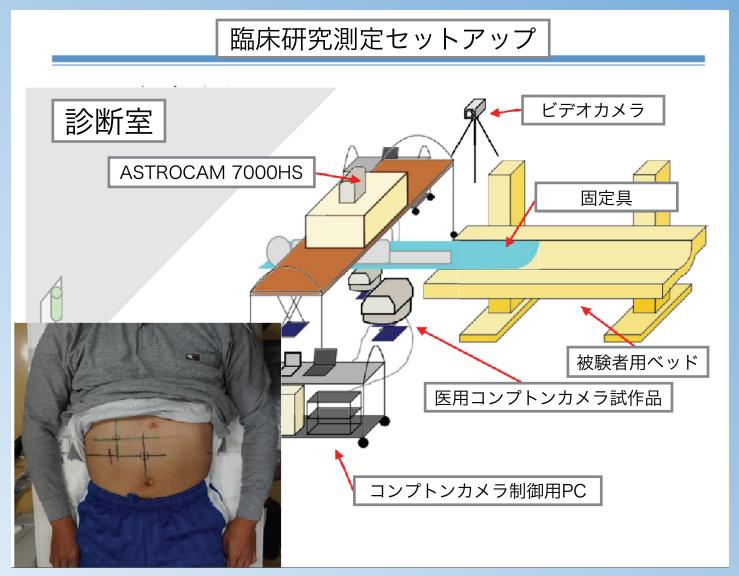
- 1) コンパクト & ハンディな検出機器
- 2) PET薬剤とSPECT薬剤を同時に一つの医用画像機器で可視化(多核種同時診断)
- 3) 3D(X,Y,Z)空間+時間+エネルギー(核種)の軸を持つ5次元イメージングシステム

#### 医学応用のための開発要素

- 1) 医用コンプトンカメラの最適構造・構成
- 2) 位置分解能の向上
- 3) 検出感度の向上・計測時間の短縮
- 4) 3次元画像再構成アルゴリズムの確立
- 5) 放射線損傷の影響とその対応



#### 医用コンプトンカメラの開発

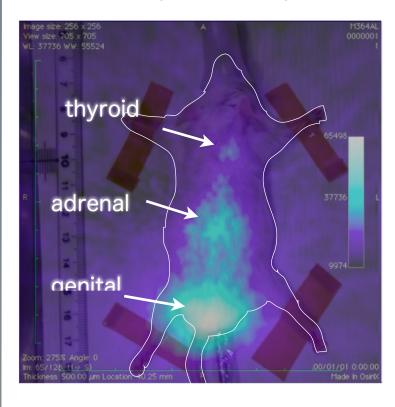


新規放射線診断機器・Si/CdTeコンプトンカメラの有効性に関する臨床研究(群馬大学、2014)

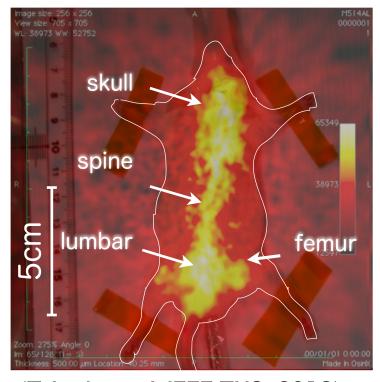
## 参考:マウスの撮像実験

Si/CdTeコンプトンカメラの原理実証機によるマウスへの薬剤投入後のガンマ線写真

131I(364 keV)



85Sr(514 keV)



(Takeda et al. IEEE TNS 2012)

#### おわりに

- 1) 宇宙科学ミッションは、高い科学要求のために、先端技術を要求する (例、ASTRO-H)
- 2) コンプトンカメラを初めて福島のフィールドに導入。放射性物質分布の可視化に有効なことを実証した
- 3) Si/CdTeコンプトンカメラの可搬化および高性能化の研究を行い、民の製造技術とあわせることで商用モデルを開発、販売を開始した。様々なコンプトンカメラの商用化を促した
- 4) 自然起源の放射性物質(NORM)濃集の可視化(JOGMEC) や医療分野(群馬大学重粒子線医学研究センター)などの地上応用に展開がはじまった。
- 5)地上応用で得られる知見から、新たな宇宙用センサーのアイデアが生まれる。

#### 補足資料

ASTRO-Hに関する資料

http://astro-h.isas.jaxa.jp

コンプトンカメラに関する資料

日本物理学会誌 「コンプトンカメラで放射性物質の飛散状況を可視化する」 高橋, 武田, 渡辺 (2013年6月号, Vol. 68, No. 6, pp.382-386)

日本応用物理学会誌 「コンプトンカメラによるガンマ線イメージング」 高橋, 武田 (2014年83巻第10号, pp.820-825)

http://www.astro.isas.jaxa.jp/~takahasi/

ASTROCAM 7000HSに関する資料

三菱重工技報 Vol.51 No.1 (2014) p.80-p.87 放射性物質見える化カメラ"ASTROCAM 7000HS"の開発

https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/511/511080.pdf