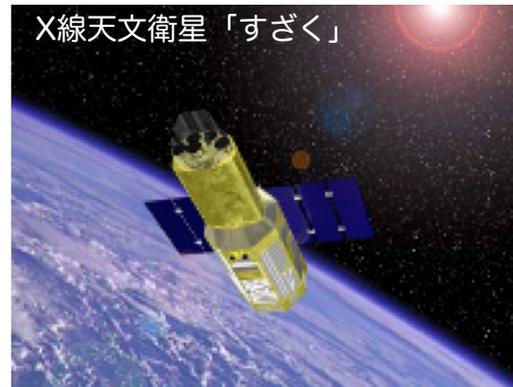
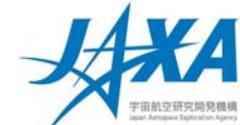


宇宙エックス線・ガンマ線検出 テクノロジーの異分野への展開

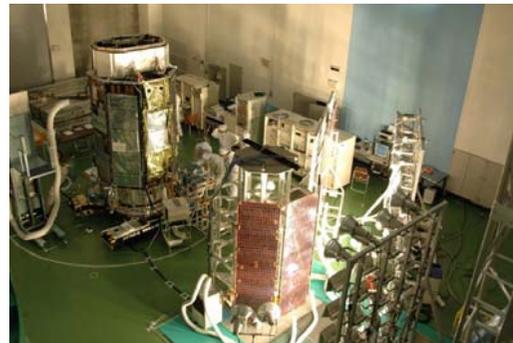


平成20年8月20日
宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究本部
高橋 忠幸

宇宙科学研究における 宇宙エックス線・ガンマ線検出テクノロジー



X線天文衛星「すざく」



「すざく」の地上試験

X線とは

- ・電磁波(光)の一種
- ・可視光の1000倍ものエネルギーを持ち、透過力が極めて強いが地球大気には吸収されるため、観測は衛星軌道上でのみ可能(すざく衛星など)

軟X線：10 keV 以下

硬X線：10 keV以上 数10 keV以下の高エネルギーX線(レントゲン撮影のエネルギー帯)

ガンマ線とは

硬X線の上、数10 keV以上のエネルギーを持つ電磁波(1 MeV以下を軟ガンマ線と呼ぶ)
地上では放射線治療、PET、骨シンチなどのがん診断や非破壊検査などに用いられる

宇宙エックス線・ガンマ線観測のための先端技術

1. 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
2. 限られた重量、電力で、最大限の性能を引き出す技術
3. 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

1cm²あたり10万秒に1個のフォトンの検出

宇宙は日本が世界をリードする技術を生み出す可能性を秘めた場。

宇宙科学は、10年先、20年先の宇宙開発をリードする最先端技術を要求する。

シーズの結晶

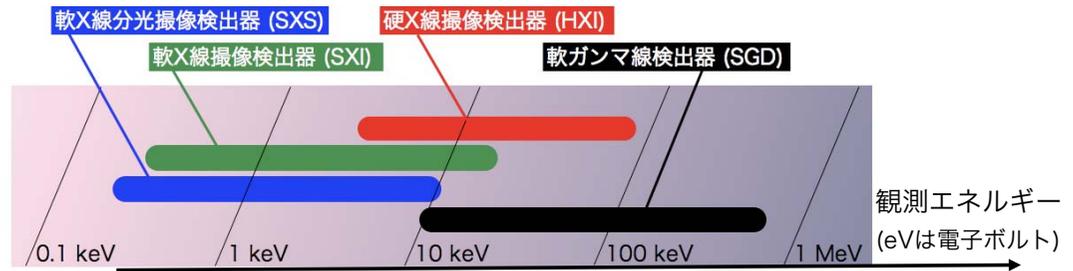
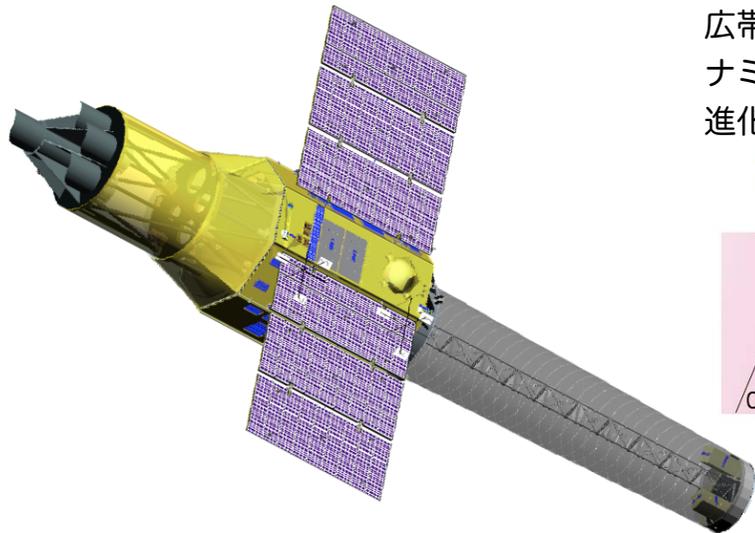


第26号科学衛星

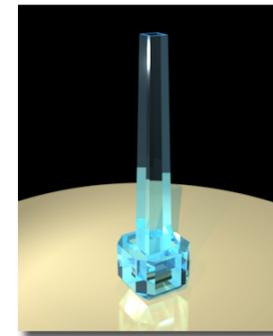
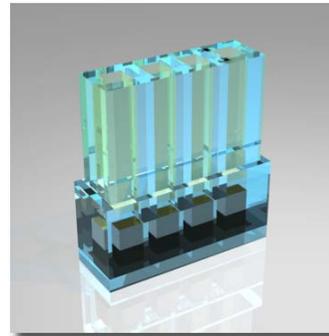
ASTRO-H (次期X線天文衛星)

ASTRO-H衛星 (旧称 NeXT衛星)

X線超精密分光と軟X線・硬X線撮像分光/軟ガンマ線観測とによる広帯域観測を、これまでにない高感度で実現し、世界に先駆けてダイナミックな宇宙の歴史を探り、宇宙科学究極の目標「宇宙の構造と進化」の解明に迫る。



硬X線撮像分光/軟ガンマ線観測を行う検出器
軟ガンマ線検出器 (SGD) 硬X線撮像検出器 (HXI)



ASTRO-H衛星計画

- ・ 2013年打ち上げをめざす
- ・ 高度550km, 傾斜角31度
- ・ 総重量: 2.4t
- ・ 全長(伸展後): 14m

ここでは硬X線撮像分光/軟ガンマ線観測のための検出器のシーズとその展開について報告する

宇宙科学先端基盤技術



ASTRO-Hの硬X線撮像検出器(HXI)、軟ガンマ線検出器(SGD)は10年以上にわたるSiやCdTe(テルル化カドミウムあるいはカドテル)の半導体センサー技術、低雑音アナログ信号処理LSI技術、高密度実装技術などに関する研究を統合して開発された独自技術です。JAXA宇宙科学研究本部と大学、研究機関を横断したチームで行われた先端技術研究は、すでに35編以上の論文、10回にも及ぶ国際会議における招待講演などの成果を生み出しました。

最近の研究によってこれらの検出器およびその性能を引き出すための先端的基盤技術は、医療、創薬、生命科学、環境、新素材と広い分野の検出器に対しても有効であることが、明らかになりました。

ASTRO-H衛星軟ガンマ線検出器 (SGD)/硬X線検出器(HXI)の技術

テルル化カドミウム(CdTe)半導体技術

CdTe撮像検出器

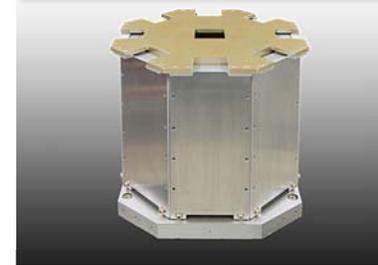
低雑音シリコン(Si)撮像検出器

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

超小型コンピュータ(Space Cube)

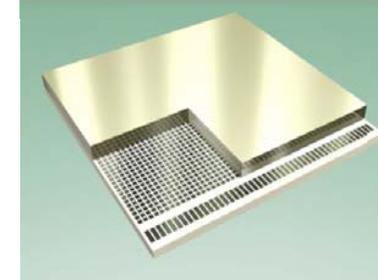
次世代コンプトンガンマ線望遠鏡



ASTRO-H
軟ガンマ線検出器
実証モデル
(JAXA,2008)



高輝度対応CdTeイメージャー



ASTRO-H
硬X線検出器
を発展させた
硬X線撮像検出器

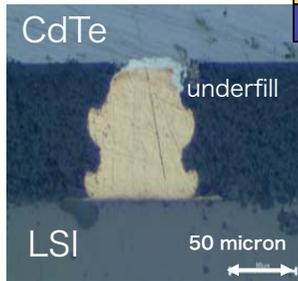
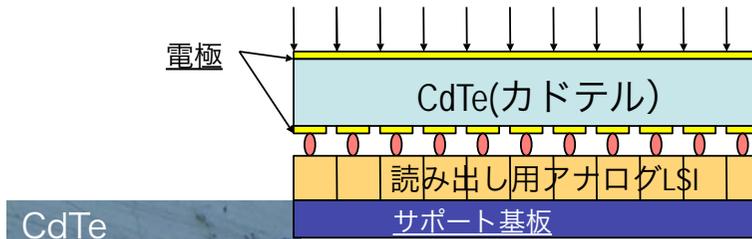
宇宙科学先端基盤技術



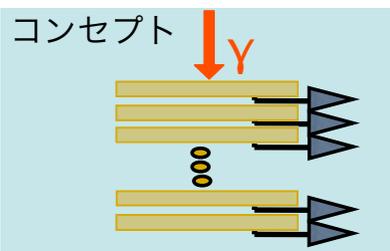
高密度実装技術

イメージング用ピクセル検出器

ストリップ検出器のイメージ 硬X線/ガンマ線

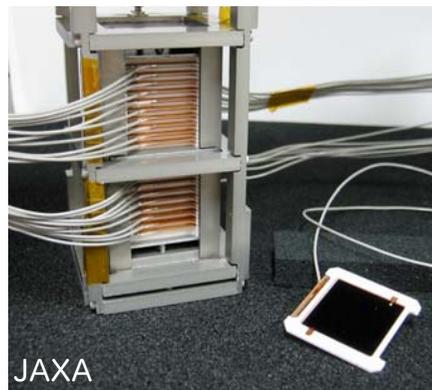


CdTe半導体の性能を劣化させることなく、読み出し用のアナログLSIに接合する低容量性バンプ接合の実装技術（左写真：バンプの断面図）

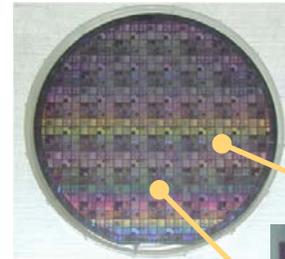


高いエネルギーのガンマ線検出のために薄い検出器を何十層にも積み重ねるための実装技術（右写真：0.5mm厚のCdTe素子を40段重ねた検出器）

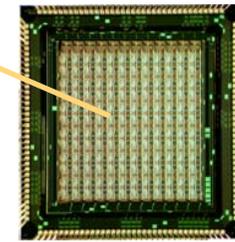
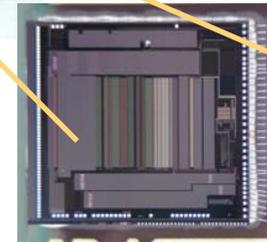
積層型CdTe検出器 (独自コンセプト)



多チャンネル低雑音アナログ信号処理LSI



何100、何1000チャンネルからのセンサーからのアナログ信号を同時に処理するためのLSI。数pFの入力容量で、約1 keV（全値半幅）のエネルギー分解能が必要。次世代センサー技術の鍵。



超小型コンピュータ技術



衛星内の高速ネットワーク化をはかるための標準規格「スペースワイヤー」を実装した超小型データ処理コンピュータ技術（左写真：スペースキューブと名付けられたセンサー信号処理用コンピュータと、CdTeピクセル検出器）

JAXA

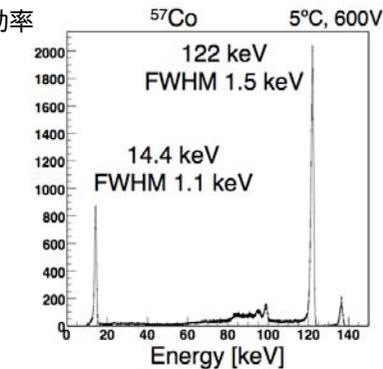
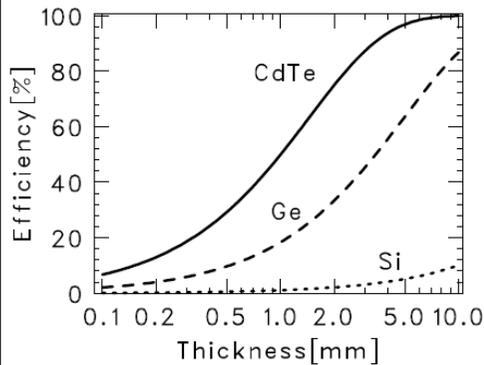
宇宙科学先端基盤技術を用いた 高いエネルギー分解能を持ったCdTe撮像検出器

硬X線イメージング←位置とエネルギーの正確な測定が必要

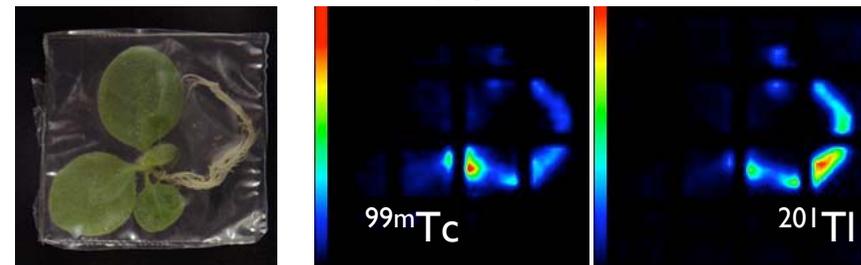
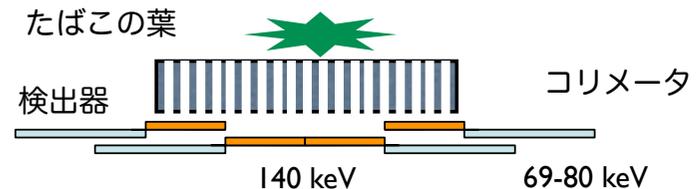
- ➡ ショットキー障壁を用いたCdTeダイオードを開発（1998）。
- ➡ CdTeイメージング検出器に必要なバンプ実装技術を開発（2000）。
- ➡ 5 cm 角の大面積CdTeピクセル撮像検出器を開発（2005、右写真）。
- ➡ より大面積化、より低消費電力化を可能とする、CdTe両面ストリップ撮像検出器を世界に先駆けて開発、ASTRO-HのHXIに使用予定（アクロラド/三菱重工（名誘）との共同研究）（2008）



下) 100keV硬X線に対する半導体の検出効率

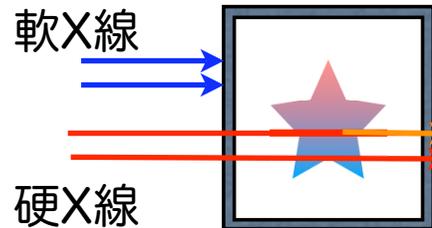


上) 開発したCdTeピクセル検出器のエネルギースペクトル



JAXA/群馬大学/原子力機構との共同研究, 2005
コリメータとCdTeピクセル検出器を用いた「たばこの葉」の複数核種同時イメージング（2006年5月、群馬大学にて）。

硬X線を用いた検査



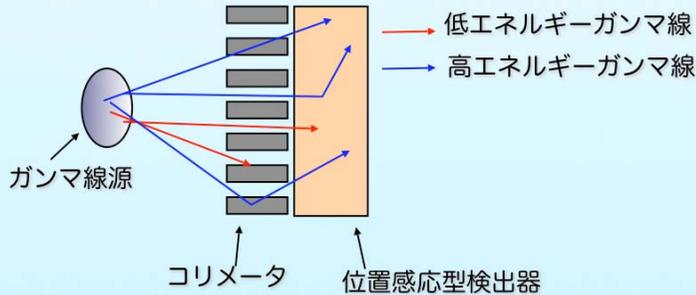
軟X線はアルミや鉄の箱を通り抜けないので、箱の中の検査ができない。硬X線は通り抜けるため、透過度の違いから検査可能。ただし、硬X線撮像検出器が必要

ASTRO-HのSGD検出器に使われるガンマ線望遠鏡技術 コンプトンカメラ



医療等で用いられている従来検出器

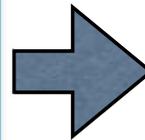
■SPECT



- ・ γ 線の光電効果を利用
- ・ コリメータによる一定方向への投影
- ・ 360°データが断層像再構成に必要
- ・ コリメータを通過してしまう高エネルギーガンマ線の撮像は困難

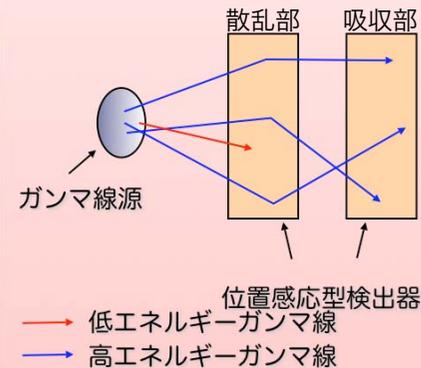
■PET

- ・ 陽電子の消滅ガンマ線($e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, 511 keVのガンマ線が2個反対方向に放出される)の同時計測を利用
- ・ 現状では複数核種を同時識別できない

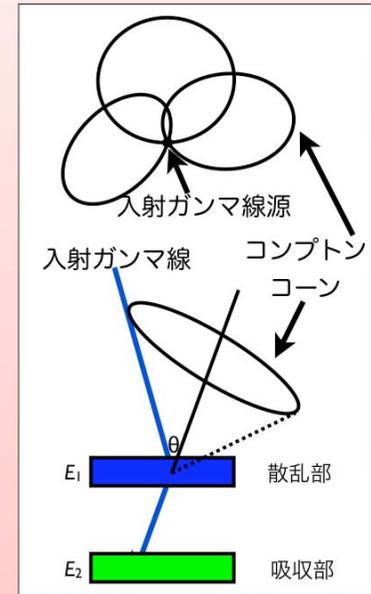


■コンプトンカメラ

コンプトン散乱を用いた
カメラ



- ・ 宇宙での応用が最初 (GRO衛星COMPTELガンマ線望遠鏡(1991-2000))
- ・ ガンマ線のコンプトン散乱を利用してガンマ線の入射方向とエネルギーを求めることができる。
- ・ コリメータ不要 \Rightarrow 高感度、近接して設置することができる (高い位置分解能)
- ・ 入射方向を精度よく求めるためには、エネルギー分解能と位置分解能の高い「位置感応型検出器」が必要 (ASTRO-Hにおける開発)。



宇宙科学先端基盤技術を用いた Si/CdTeコンプトンカメラ

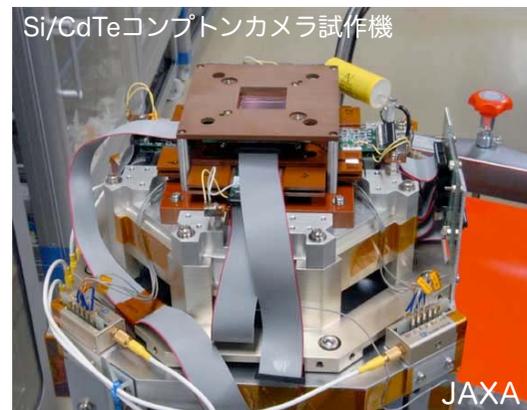


独自技術（コンセプトから素材、要素技術まで）として開発

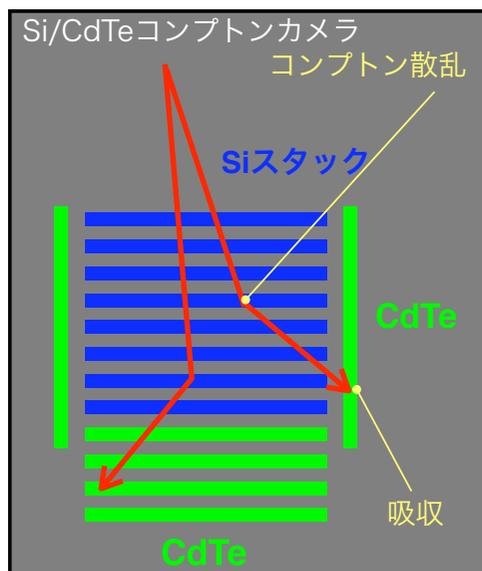
高精度のコンプトン再構成 ← 位置とエネルギーの正確な測定が必要

- ➔ 薄いシリコン撮像素子（散乱部）とCdTe撮像素子（吸収部）を多層に並べたSi/CdTeコンプトンカメラのコンセプトを提唱（2002）。
- ➔ 世界ではじめてSi/CdTeコンプトンカメラを開発し、60 keVから600 keVまでの広い範囲で、理論限界に迫る高い角度分解能を実証(2008)。
- ➔ NDIP08他、各種国際会議にて招待講演、口頭発表（2002-2008）

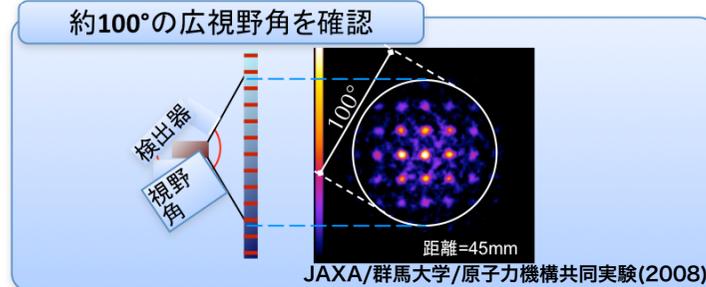
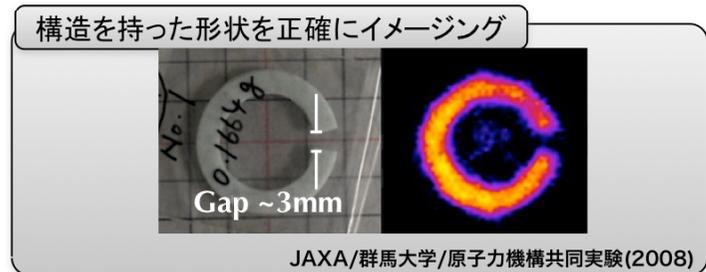
高いイメージング能力、広い視野、小型化への
道がひらける



上写真) SPIE国際学会の
News Roomで紹介された
シリコン両面ストリップ検
出器をスタックにしたもの
(Si スタック) (2008)



Si/CdTeコンプトンカメラの優れた性能



Si/CdTeコンプトンカメラを用いた動物実験

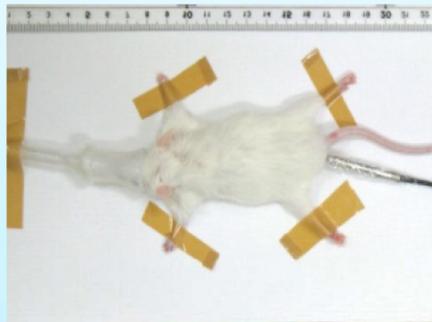


新たに開発したSi/CdTeコンプトンカメラは、国産技術を中心としており、小型、軽量化が可能、数10キロ電子ボルトという低いエネルギーからコンプトンカメラとして撮像可能、また、常温動作可能という特徴を持つ。➡ Si/CdTeコンプトンカメラおよびその性能を引き出すための先端的基盤技術を、生体複数分子イメージング検出器開発等に応用することで、異分野における研究の発展に資する可能性が大きい。

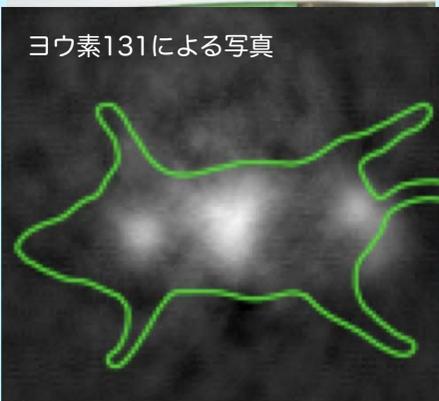
生体複数分子同時イメージング：理研グループが世界に先駆けて実証したコンプトンカメラを応用した次世代診断技術(P.10)。

JAXA/理研共同によるSi/CdTeコンプトンカメラを用いたマウスの複数分子同時イメージングの実証実験（理研にて実施）

ヨウ素131など3種類の薬剤を注射し、マウスの器官に集積する様を撮像



ヨウ素131による写真



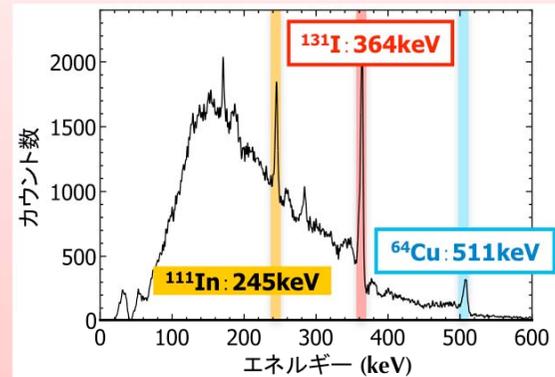
JAXA/理研 (NEDO委託事業)

マウス実証実験の成果をもとに、少し大きなラットによる撮像実験

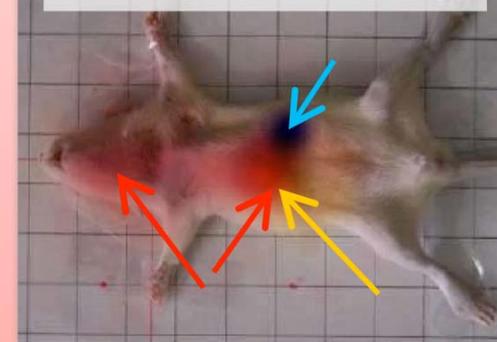


Si/CdTeコンプトンカメラは、理研のゲルマニウム半導体を用いたコンプトンカメラ (GREI) と同等の撮像性能を持つ事が確認された。

ラットの撮像実験（群馬大学にて実施）



各薬品の特徴的な分布が識別可能



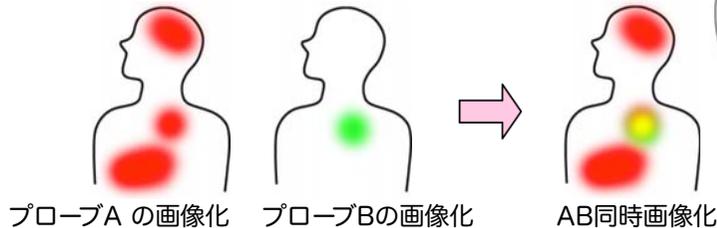
JAXA/群馬大学/原子力機構（理研グループとの連携）

創薬・疾患診断の革新へ向けた分子イメージング装置

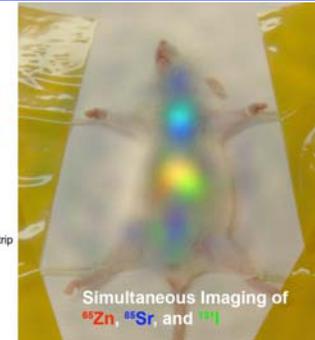
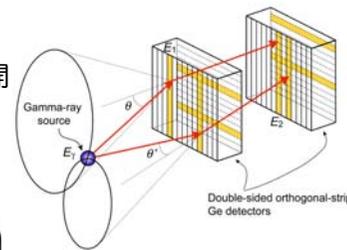
理研の推進事業

■ 複数分子同時イメージング法の研究開発

- 1種類の薬剤では診断が難しかった疾患も、複数の薬剤の同時画像化により情報を絞り込むことで正確な診断が可能に
- 複数の治療薬投与で効果を高める多剤併用研究への展開



- 1999-2003年：世界初、コンプトンカメラによる動植物の複数核種同時イメージングに成功
- 世界初、コンプトンカメラによる複数分子同時リアルタイムイメージングの実証に成功
→ 2008年7月3日プレスリリース
(<http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/press/2008/080703/index.html>)

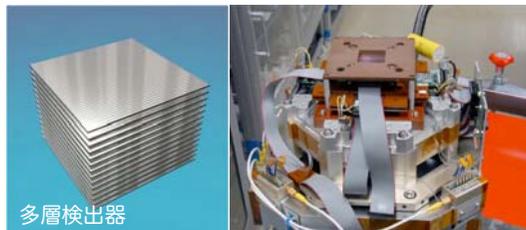


ヨウ化メチルノルコレステロール (^{131}I) 注射液 (アドステロール®-I131注射液)、塩化ストロンチウム ($^{85}\text{SrCl}_2$)、塩化亜鉛 ($^{65}\text{ZnCl}_2$) をマウスに同時投与し、生きたままそれぞれの薬剤の挙動の違いを画像化することに成功した。

S. Motomura et al., *J. Anal. At. Spectrom.*, 23, 1089-1092 (2008)

JAXA衛星の宇宙技術

- 多層半導体センサー実装技術
- ASIC 開発・実装技術
- コンプトンカメラシステム開発・実装技術



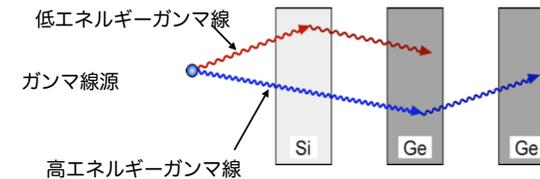
NEDO 委託事業

『半導体コンプトンカメラによる複数分子同時イメージング機器の研究開発に係る先導研究』

- Geコンプトンカメラの実用化に向けた要素技術高度化開発
→ JAXA技術の導入
- 核医学撮像用Si/CdTeコンプトンカメラの開発
→ JAXA技術の分子イメージング研究への寄与

理研Si/Ge コンプトンカメラ

- 位置感応型 Si 検出器の層を現在の GREI の前面に追加 → 低エネルギーガンマ線の感度向上



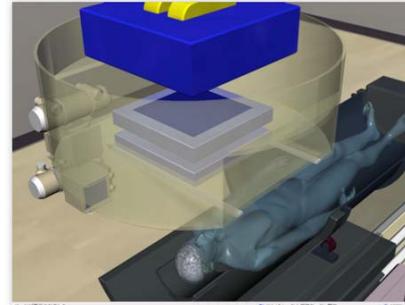
PET用・SPECT用などの既存の放射性医薬品を含む種々のトレーサーを用いた複数分子同時イメージングが可能に

重粒子線医学研究センター



21世紀COEプログラム 群馬大学・JAEA共同研究協力協定
「加速器テクノロジーによる医学・生物学研究」

粒子線治療技術の高精度化の検討

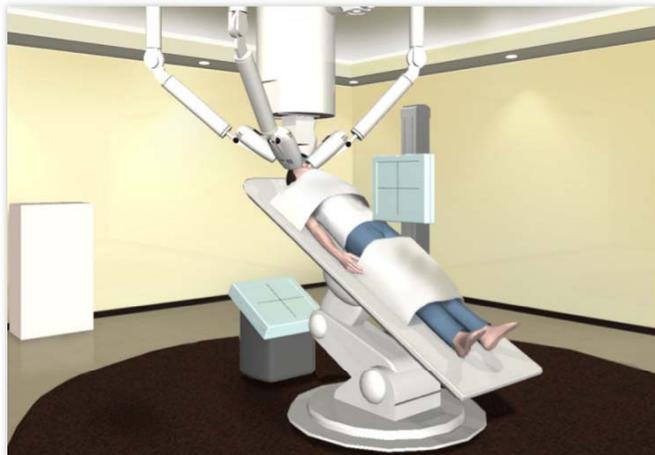


ガンなどの局所性疾患の
微小病変部位を超高精度で切
らずに放射線で治療

- ◆3次元精密照射のためのマイクロ
ビームラインの詳細設計
- ◆3次元精密照射技術の検討

JAXA-群馬大学-JAEA共同研究協定

「最先端粒子線がん治療・生物応用のためのSi/CdTe半導体コンプトンカメラの開発」



重粒子線治療照射とコンプトンカメラの使用イメージ

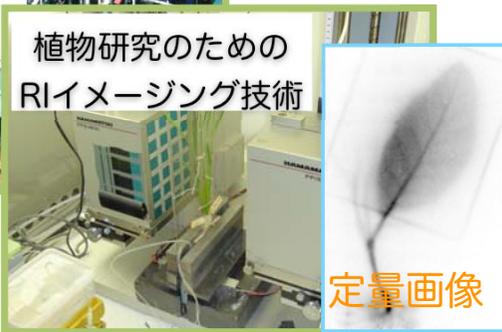
- ①重粒子線治療用精密診断
 - ・微小な病変部位の精密測定
 - ・多核種同時診断による検査時間の短縮
- ②病変部位の大きさ・深さをモニタリングしながら精密治療照射
 - ・病変部位の大きさ・深さに応じた精密照準及び照射
- ③重粒子線の精密体内モニタリング
 - ・重粒子ビームの位置・深さを高精度に実測し、精密な治療を目指す

次世代がん治療

重イオンマイクロサージェリー治療技術の開発

環境・食糧問題の解決をめざした生命科学への展開

JAEAにおける従来の取組



定量画像

単色（単一物質動態）

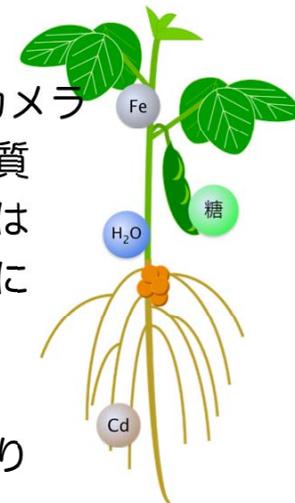
JAXA技術
との融合

コンプトンカメラを用いた構想



Si/CdTeコンプトンカメラ
植物体内の複数の物質
動態（栄養素あるいは
有害物質）を**定量的に**
イメージング

↓
植物の生理機能をより
詳しく解明



カラー化（複数物質動態）

栄養素の輸送・蓄積の促進

有害物質の輸送・蓄積の抑制

CO₂の効率的吸収

温暖化対策

環境浄化

食糧確保

省エネルギー

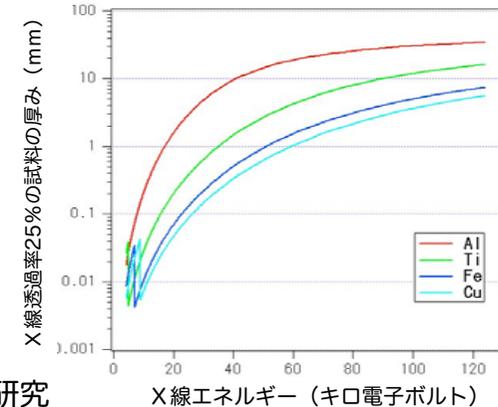
SPring-8での高エネルギー放射光実験への展開



大型放射光施設 (SPring-8など) の大きな特徴は100キロ電子ボルト以上までの高エネルギーX線が利用できる点。SPring-8は蓄積電子エネルギーが20~30億電子ボルトの中規模放射光施設 (10キロ電子ボルト程度までの低エネルギーX線の利用が主) が世界中で建設され稼動し始めている現在、80億電子ボルトと現在でも世界一。今後、**高エネルギーX線の利用技術開発が大型放射光施設での重要課題。**

JAXAで開発されたCdTe 2次元撮像検出器を、SPring-8の特徴である高輝度・高エネルギー放射光実験に応用

1 mm厚の鉄で25%透過させるには50keV以上の高エネルギーX線 (硬X線) が必要。シリコンでは透明。CdTeのような高い効率を持つ半導体検出器が必須。



JAXA/JASRI共同研究



CdTeピクセル検出器は、シンチレーション検出器とイメージングプレートの特長を兼ね備えており、高エネルギー放射光実験用検出器として理想的な性能

↓

逐次スキャン法では数時間を要した回折データを数分で取得可能

↓

従来の検出器では取得困難であった材料深部の構造変化の情報を、非破壊で且つミリ秒オーダーの高速で追跡する画像計測技術の開発を行う

↓

産業界の新素材開発に貢献する

将来への展望



宇宙科学のセンサー技術、特に放射線計測センサーは、シーズの宝庫である。

複数の薬を使い、体内の様々な箇所を集積する核ガンマ線源で全身を一度に計測する事が簡単にできるようになると、がん診断における時間もコストも短縮でき、がんの早期発見、治療のために非常に有益。宇宙科学の目的の元、研究を行ってきた先端的な放射線観測技術が、このような用途に広く展開される事は望外の幸せ。

宇宙科学の先端技術が異分野に展開され、事業化され、大量生産されることで、その成果が、大規模化、小型化など、新たな宇宙科学センサーにフィードバックされることが期待される

宇宙科学技術



参考資料：研究グループ



ASTRO-H衛星をテルル化カドミウム (CdTe) 半導体イメージング検出器、Si/CdTe半導体コンプトンカメラ開発に係る研究は、以下に掲げるメンバーによってなされました。

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 高エネルギー天文学研究系

高橋忠幸 (教授)、渡辺 伸 (助教)、中澤 知洋 (現 東京大学理学系研究科 講師)
国分紀秀 (准教授)、高島 健 (現 宇宙プラズマ研究系 准教授)、
三谷烈史 (現 固体惑星科学研究系助教)、田中孝明 (現 学術振興会海外特別研究員)
佐藤理江 (プロジェクト研究員)、武田伸一郎 (博士課程)、岸下徹一 (博士課程)
石川真之介 (博士課程)、小高裕和 (博士課程)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 探査工学研究系

池田博一 (教授)、佐藤悟朗 (プロジェクト研究員)

スタンフォード大学 KIPAC (Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology)

田島宏泰 (研究員)

大阪大学大学院理学研究科

能町正治 (教授)

広島大学大学院理学研究科

深沢泰司 (教授)

本研究は、三菱助成金(1998)、
科学研究費補助金(11440066,
12554006,13304014, 14079207, 17204021,
20244017), NEDO 委託事業(2007-)の支援を受
けて行われました。

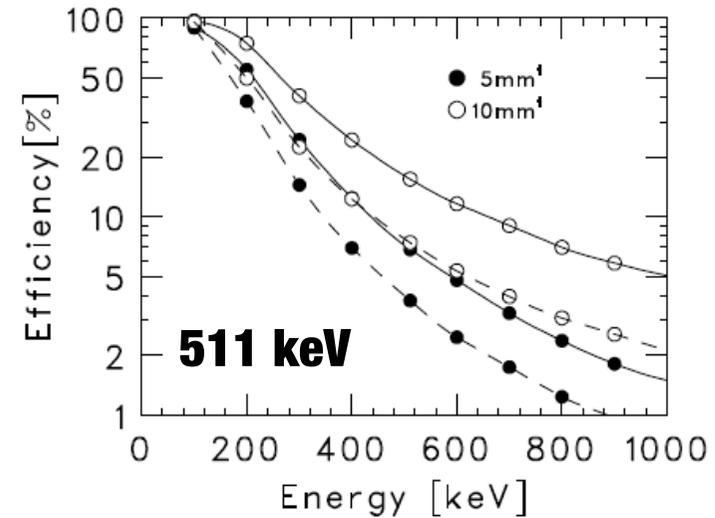
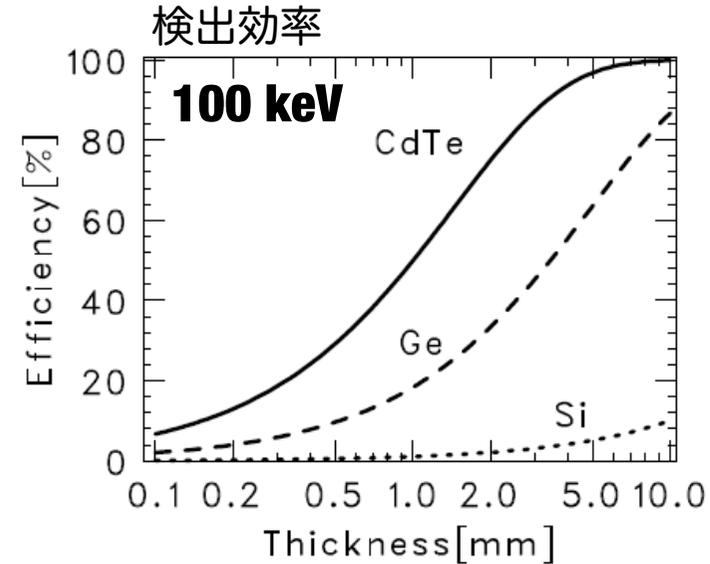
また、本研究は、アクロラド、三菱重工業 (名古屋誘導推進システム製作所)をはじめ、
浜松ホトニクス、クリアパルス、豊和産業、IDEAS (現GMI)、シマフジ電機他多数の会社の協力を得て、
行われました。

参考資料：主な半導体検出器の特性

CdTeの特徴

ガンマ線をとめるために有効な
 高い原子番号 ($Z_{\text{Cd}} = 48, Z_{\text{Te}} = 52$)と高い密度
 ($\rho = 5.9 \text{ g/cm}^3$)を持つ半導体。常温動作可能。

Material	Ge (77K)	Hgl ₂	CdTe	CdZnTe
Atomic number	32	80, 53	48, 52	48, 30, 52
Band gap (eV)	0.74	2.13	1.50	1.57
Energy per e-h pair (eV)	2.97	4.2	4.4	4.6
Fano factor	0.08	0.19	0.11	0.09
μ_e (cm ² /Vs)	40,000	100	1100	1000
μ_h (cm ² /Vs)	40,000	4	100	10
τ_e (s)	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
τ_h (s)	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶



P. Luke (2006)

Takahashi and Watanabe (2000)