

(1) 要約 (英文)

In this R&D project, further sophistication of the component technologies of the germanium (Ge) semiconductor Compton camera that had been being developed at RIKEN, and the silicon (Si) and cadmium telluride (CdTe) semiconductor Compton camera that had been being developed at JAXA, have been performed to examine the feasibility of proposed multiple molecular imaging technology with the semiconductor Compton camera, in combination with the new nuclear medical imaging agents developed in the joint R&D project administered by the Ministry of Health, Labour and Welfare. Recent progress in life science research has revealed that various common diseases, including cancer, cranial nerve disease, and other lifestyle-related diseases, are multi-factorial diseases that are complicatedly related to some genetic factors and environmental factors. If we can realize simultaneous imaging of multiple molecular probes that specifically trace each factor that related to the diseases, and make simultaneous use of these factors for advanced imaging analysis, ultimately accurate and specific medical diagnosis is possible, and this will cause innovative advancement in new drug development and study of diagnosis of diseases by use of molecular imaging technology.

We have succeeded in Compton camera imaging of more than ten radionuclides for labeling at RIKEN: for example, high-energy gamma-ray emitting nuclides of Fe-59, Mn-54, Zn-65 and Sr-85; PET nuclides of F-18, Ga-68, Cu-64; and SPECT nuclide I-131. Moreover, we have achieved the world's first successful demonstration of multiple molecular simultaneous imaging by use of our Ge semiconductor Compton camera. We held a press briefing on the results along with publication in a scientific journal, to expedite the circulation of the results, and the news was appeared on several news media.

By the joint research of RIKEN and JAXA, the problems of Si/CdTe Compton camera when it is applied to molecular imaging, which had been originally developed for astronomical study, have been clearly extracted and analyzed. We have succeeded in showing the imaging performance of the Si/CdTe Compton camera by small animal imaging experiments, and valuable information has been obtained that is especially useful for near-field high-resolution imaging. This achievement has shown a good example of outspread application of aerospace technology seeds, and a press briefing was held by the lead of JAXA.

Through the results of the imaging experiments and other investigation, nine component technologies were extracted for further improvement. Further R&D on each component technology has been carried out in this project, and important technologies were applied for domestic and international patent. Furthermore, we were able to implement some improved component technologies in our Compton camera imaging system, and have succeeded in demonstrating their effectiveness through some imaging experiments.

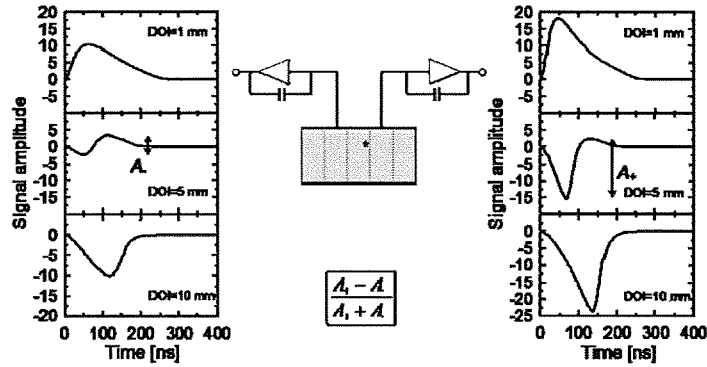
(2) 本文

1. Ge 半導体コンプトンカメラの研究開発

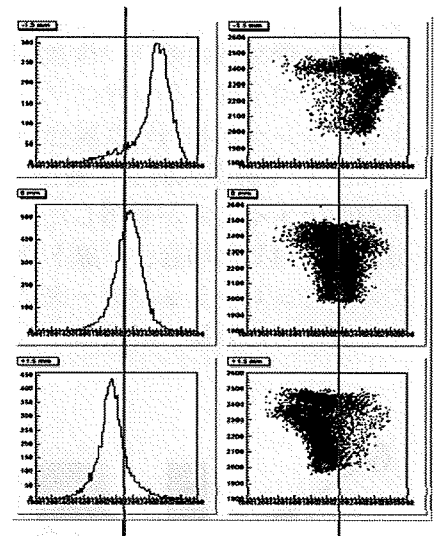
理化学研究所が研究開発を行ってきた Ge 半導体コンプトンカメラをさらに改良し、複数分子同時イメージングの実現可能性を評価するため、次に示す開発項目に切り分け、それぞれの要素技術の高度化開発を行った (①- ⑤)。

① Ge コンプトンカメラの空間解像度向上

両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器における検出信号処理法の高度化により、 $\gamma$  線相互作用位置の高精度測定法の開発を進めた。信号波形解析の結果から、信号波高を比較と信号積分値を比較する方式を考案した。電子回路シミュレーション結果と比較しながら信号処理回路を試作し、現有装置と組み合わせた実証実験を行った。その結果、1 mm 以下の分解能が得られることが明らかになり、実際に撮像装置に組込んで実証実験を行うための試作回路の作製を行った。

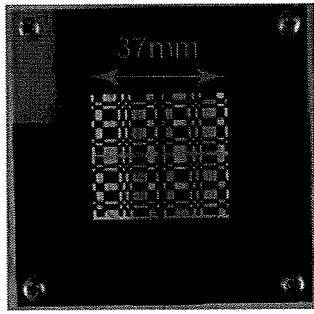


$\gamma$  線の相互作用位置に依存した信号波形の変化

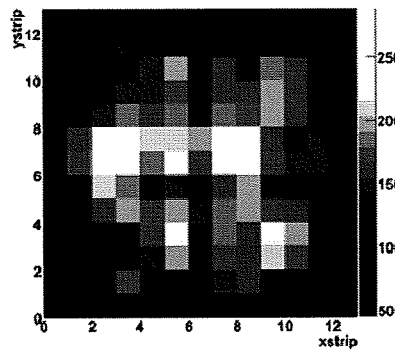


試作回路を用いた相互作用位置の検出

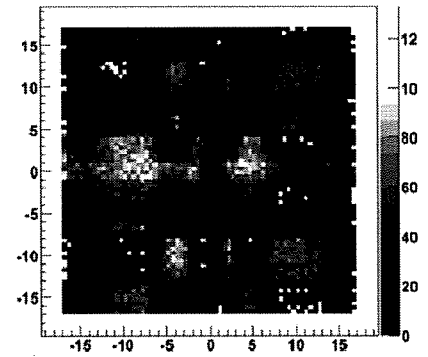
平成 21 年度には、GREI の全ての信号出力に対して試作回路を接続し、撮像システムへの組み込みを完了した。この撮像システムの固有空間分解能を確かめるため、厚さ 0.8 mm のタングステン製のマスクを GREI の全面に設置し、そのマスクを通して  $^{57}\text{Co}$  の 122 keV の  $\gamma$  線を計測した。この計測で得られたデータを解析した結果、従来のシステムでは確認できなかったマスクパターンを明確に描出することが可能になり、ミリオーダーの固有空間分解能の実証に成功した。



**タンゲステン製マスク**



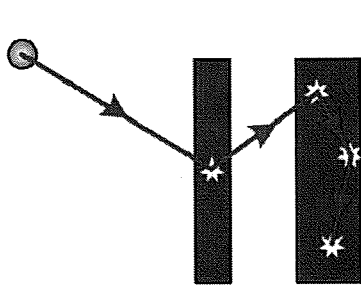
**位置検出法実装前の投影像**



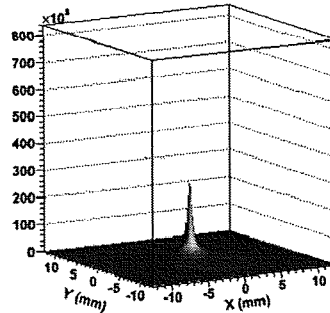
**位置検出法実装後の投影像**

② Ge コンプトンカメラの感度向上

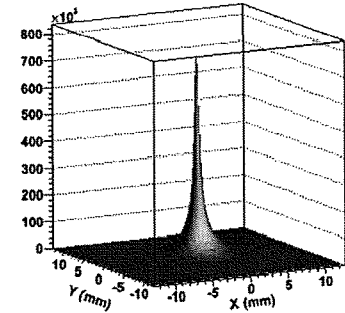
入射  $\gamma$  線が検出器内で複数回相互作用した事象を有効なデータとして処理し、検出感度を向上させるための  $\gamma$  線トラッキング法の開発を行った。まずモンテカルロシミュレーションを行い、 $\gamma$  線トラッキング法を用いた場合の感度の向上率を評価した。GREI の後段検出器 ( $39 \times 39 \times 20$  mm) に、500keV の  $\gamma$  線が入射した場合、現 GREI に  $\gamma$  線トラッキング法を採用すると最大約 3.4 倍の測定効率の向上することが判明した。また、同シミュレーションにより、デジタル波形処理等による信号分解を適用した場合、 $\gamma$  線トラッキング法により最大約 7.6 倍の測定効率向上が可能と試算した。このシミュレーションデータに基づいて  $\gamma$  線トラッキング法のアルゴリズム開発を行い、実測データに適用した結果、現段階でもエネルギーに依存して 3~5 倍程度の感度の向上に成功した。



**入射  $\gamma$  線の複数散乱事象**



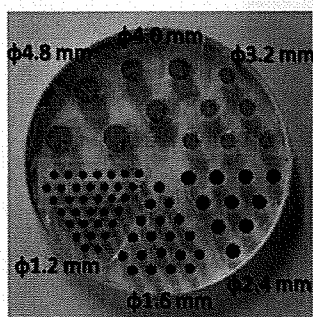
**トラッキング法適用前**



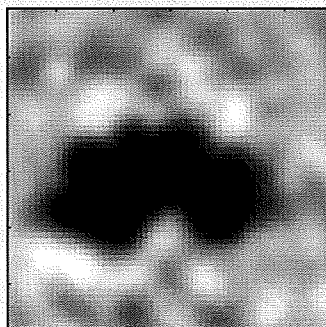
**トラッキング法適用後**

平成 21 年度には撮像システムの改良も行い、このトラッキング法の実装により感度と計数率特性が大幅に向上した。この撮像システムの性能を示すため、Data Spectrum 社製 Micro Hot Spot Phantom™ と同じ穴の径と配置を有する 2 次元の RI ファントムを作製し、この撮像実験により従来の撮像システムとの性能の比較を行った。その結果、従来は 10 時間程度の撮像時間を要して得られていた画質の画像を 2 時間で取得する事に成功し、実用性能が大幅に向上した事が示された。

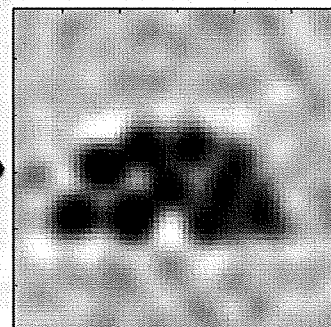
線源:  $^{64}\text{Cu}$  (511 keV)、ファントム図の赤い穴のみに充填  
 総放射線量: 1.5 MBq、撮像時間: 2時間



2次元ファントム ( $^{64}\text{Cu}$ , 1.5 MBq, 赤い穴に充填)  
 穴の径と配置は、Data Spectrum 社製 Micro Hot Spot Phantom™と同じ。



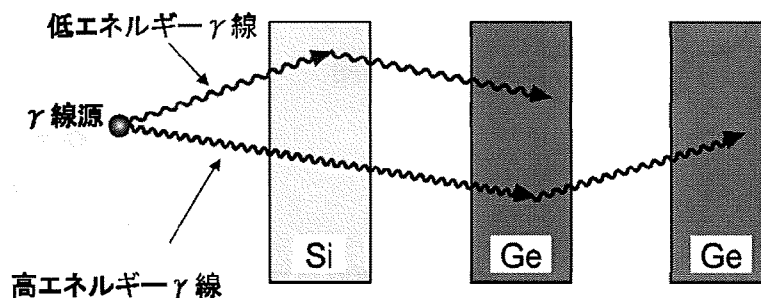
従来型による撮像結果



現在のシステムによる撮像結果

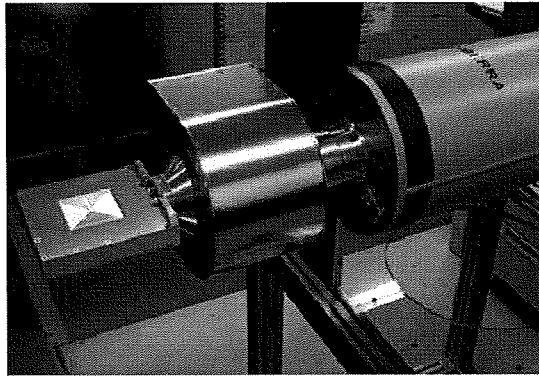
### ③ Si/Ge コンプトンカメラの開発

現有の Ge コンプトンカメラの前面に位置感応型 Si 検出器を追加することにより、SPECT 核種、PET 核種および新核医学核種の同時撮像を可能にする新しい撮像装置の創出を推進している。これまでにこの装置の原理の検証と設計のためのモンテカルロシミュレーションを行い、100 keV 程度の低エネルギーの  $\gamma$  線に対して、感度が約 6 倍に向上することが明らかになった。この技術を適用することで、広いエネルギー範囲の  $\gamma$  線に対して高い感度を保持した撮像装置が実現されることが期待され、積極的にこの技術の普及を図るため、特許の国内および国際出願を行った。



Si/Ge コンプトンカメラ

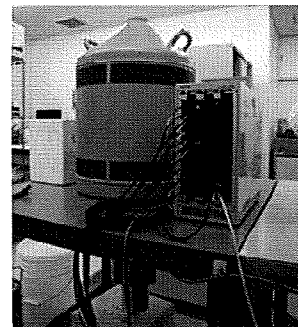
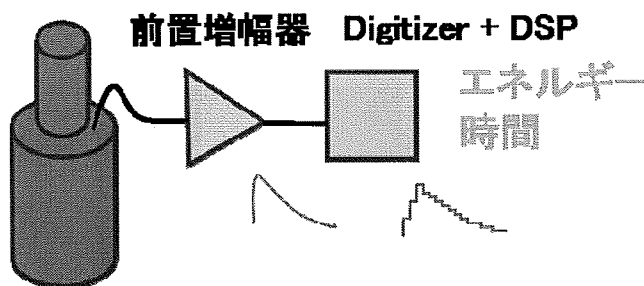
平成 21 年 4 月より、JAXA で大学院博士課程の研究を行っていた研究者が理研の任期制研究員として着任し、JAXA が保有する宇宙用センサー技術の導入が本格化した。JAXA が開発を行ってきた、室温でも動作可能な Si-Pad 検出器が GREI に組込可能なシステムとして作製され、その正常な動作を示す実証データの取得に成功した。また理研でも、両面ストリップ電極式のリチウムドリフト型 Si 検出器が準備され、当該技術の実装が可能になった。この検出器は特に低エネルギーの  $\gamma$  線に対して極めて優れたエネルギー分解能と高い検出効率を有しており、1 つのコンプトン散乱事象に対しては散乱角推定精度の理論限界である、ドップラーブロードニングの影響も補正することが可能になると考えられ、コンプトンカメラを用いた低エネルギーガンマ線イメージングのブレークスルーとなる事が期待される。



**両面ストリップ電極式リチウムドリフト型Si検出器**

④ デジタル波形処理手法の開発

①の空間解像度向上のためには連続する3本のストリップ電極を必要とするため、②のトラッキング事象の大部分は信号が重なり合う。現在実装されているアナログベースの信号処理系では、重なり合った信号を処理することは不可能であるため、解像度と感度の両方を同時に最大限向上させることは困難である。この問題の解決策として、デジタル波形処理による信号分解法を考案した。この手法は、信号波形をAD変換器でデジタル化して取り込み、複数信号の重りを波形解析により分解するものである。既にこの手法を実装するための試作機の作製を進めており、この手法の有用性の実証に成功した。この技術の普及を促進させるため、国内特許の出願を行った。



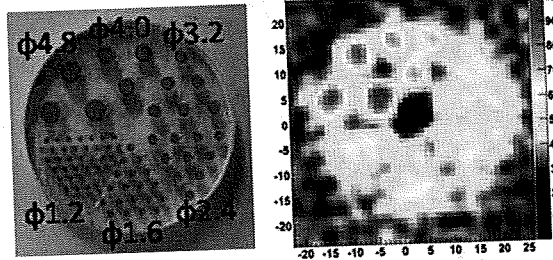
**デジタル波形処理**

平成 21 年度は、理研で GREI の全ての信号出力数分のデジタル波形取得装置を準備した。この装置を用いて信号波形解析手法の実装に成功し、これまでに例のない、リアルタイム波形解析を実現したデジタル半導体コンプトンカメラシステムの構築に成功した。この撮像システムを用いて実際に RI ファントムの撮像実験を行い、デジタルシステムで初の画像の取得に成功した。

## 「デジタル信号処理法」による撮像に成功

フルデジタル信号処理により信号波形のリアルタイム解析を実現した。

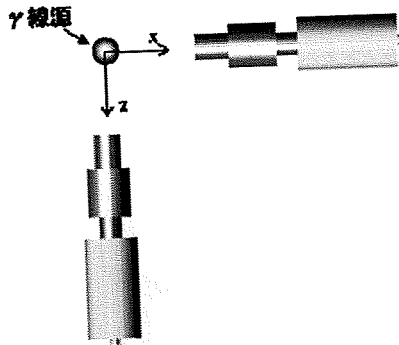
これにより、高精度でガンマ線相互作用位置を導出することが可能となり、解像度が約1.5倍向上した。



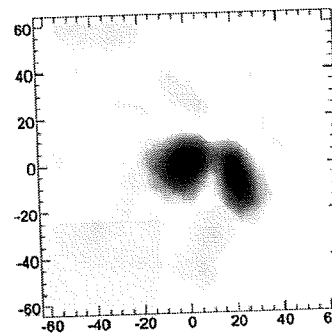
ファントム撮像例 ( $^{64}\text{Cu}$ , 3 MBq, 12時間) 単位mm

### ⑤アレイ型半導体コンプトンカメラの開発

コンプトンカメラは機械的なコリメータを用いないため、コリメーションによる感度の低下が無く、単一のカメラによる一方固定撮像でも複数の方向へ投影した3次元分布の情報を得ることが出来る。そこで、複数のカメラを被検体の周囲に配置したアレイ型コンプトンカメラを用いると、さらに感度を向上させることが可能になると同時に、より広範囲の方向への投影情報を得ることが可能になる。平成20年度には理研の分子イメージング科学研究センターに2台目のコンプトンカメラが導入され、既存の装置と組み合わせた撮像装置の構築に着手した。モンテカルロシミュレーションによる検討の結果、深さ方向の分解能と感度の向上がもたらされることが確認された。また、撮像データの線源位置に対する依存性を考慮した画像再構成法の開発も進められ、高精度の3次元断層画像撮像の可能性が示された。



アレイ型半導体コンプトンカメラ

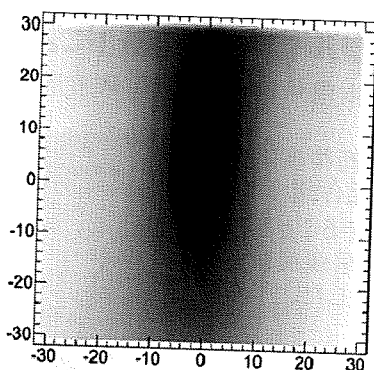


3次元断層画像撮像

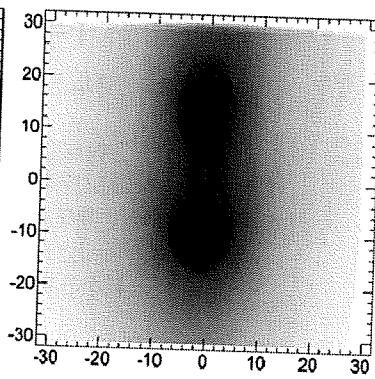
平成21年度には、理研で設置した2台のGeコンプトンカメラを用いてアレイ型半導体コンプトンカメラの実証を行うための撮像システムの構築を完了し、このシステムを用いて当該手法の有効性を実証する事に成功した。1台のGeコンプトンカメラの前段の検出器の中心から69mm離れた軸上の点を中心として2つの球状RIファントムを配置し、1台のコンプトンカメラだけで撮像した画像と、その2つのRIファントムの中心を通り、軸に垂直な方向に配置されたもう1台のコンプトンカメラを同時に用いて撮像した画像を比較した。ここでは中間画像である3次元単純逆投影画像を用いて比較したが、1台のコンプトンカメラでは判別困難な軸上の2つの球状ファントムが、2台のコンプトンカメラを用いたアレイ型半導体コンプトンカメラでは、その2つが明確に判別可能であることが示された。



アレイ型半導体コンプトンカメラ



1台のコンプトンカメラで撮像



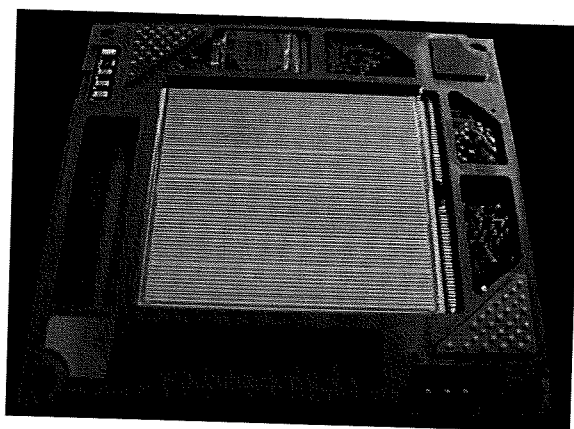
アレイ型コンプトンカメラで撮像

## 2. Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの研究開発

JAXA がこれまで宇宙ガンマ線観測用に開発してきた Si/CdTe 半導体コンプトンカメラを分子イメージングに適した形に応用するための研究開発を行った (⑥- ⑧)。

### ⑥Si/CdTe、Si/Ge コンプトンカメラに適用可能な Si 検出器の開発

Si (シリコン) は、原子番号が小さいため、原子核の周りの電子が持つ運動量が小さく、コンプトン散乱に対して自由電子に近い振る舞いをする。そのため、コンプトン散乱の原理を使って入射ガンマ線の方向を決める際の系統誤差 (ドップラー効果) を小さくすることができる。そのため、コンプトンカメラの散乱体として用いるのに適している。JAXA がこれまで開発を進めてきた Si 両面ストリップ検出器を用い、Si 内での低エネルギーのコンプトン散乱を確実に検出できるように、読み出し系の改良をはかった。さらに、ガンマ線各種のガンマ線源での基本特性の評価の他、検出器の内部での応答を、半導体内部でのガンマ線の反応や、生成した電子やホール の拡散過程まで考慮したシミュレーションによって研究し、検出効率やスペクトルなどの計算が、実測値と一致することを確認した。これによって、我々は検出器内部の反応をよく理解していることが示された。この結果は、イメージの濃淡などの定量的評価が必要な分子イメージングにおいて極めて重要である。



Si 両面ストリップ検出器

### ⑥小型 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの実証実験 (JAXA) (H21 年度事業)

JAXA 宇宙科学研究本部がこれまで宇宙ガンマ線観測用に開発を行ってきた Si/CdTe 半導体コンプトンカメラを分子イメージング装置に適用する場合、最適設計において、宇宙用と異なる点がある。それを洗い出すために、検出器内でのガンマ線の振る舞いを正確に模擬できるモンテカルロシミュレータを開発し、検討を行った。無限遠からのガンマ線を検出する宇宙用では、角度分解能を重視

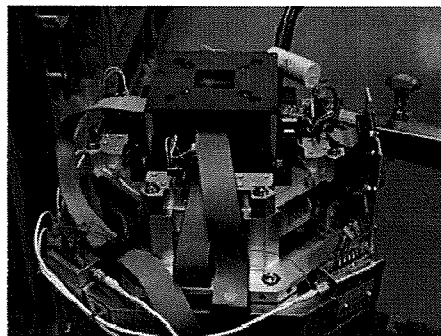
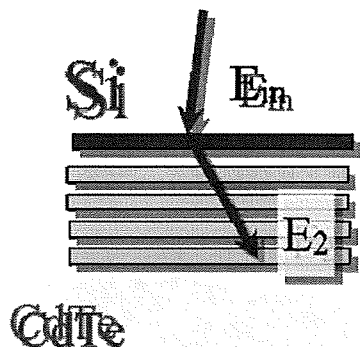
するのに対し、分子イメージング用では、高い位置、空間分解能を得られるような最適化が求められる。そのための検出器構成についての知見が得られた。

複数分子同時イメージング実測に向けて、最適設計を行ったコンパクトな Si/CdTe 半導体コンプトンカメラシステムを開発した。これは、高いエネルギー分解能を持つシリコンストリップ検出器と CdTe ピクセル検出器からなるコンプトンカメラであり、我々が大気球による宇宙観測用に開発してきたものを基に、本研究事業向けに構築した。国内外を問わず、要求される性能を持つシステムを製作、販売できる所は存在しないため、センサーのみならず、組み込み型高速データ収集システム、ハイテク新素材をつかった冷却システムなどをインハウスで構築した。

SPring8 のシンクロトロン放射光施設における実験、また、理研のグループと共同で行われたマウスを用いた実験が行われ、広いエネルギー範囲でイメージングが可能であることを確認した。

#### ⑦可搬型 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの製作

- 10 度程度の温度で動作させ、データ収集からデータ処理までを一貫して行うことのできる可搬型カメラユニットを分子イメージング実験のために製作した。SPring8 のシンクロトロン放射光施設における実験、また、理研のグループと共同で行われたマウスを用いた実験が行われ、広いエネルギー範囲でイメージングが可能であることを確認した。

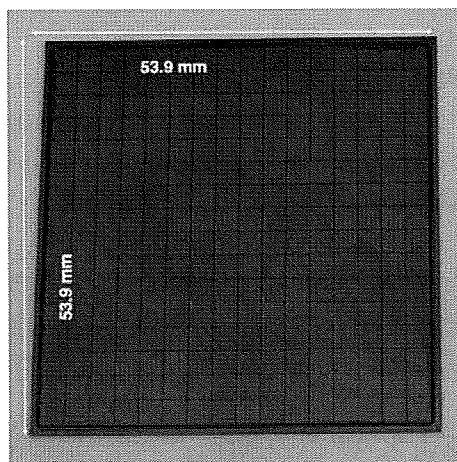


可搬型 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラのプロトタイプ

#### ⑦大面積、高効率 Si 半導体検出器モジュールの開発 (JAXA) (H21 年度事業)

JAXA 宇宙科学研究本部が取り組む ASTRO-H 衛星の硬 X 線撮像検出器、軟ガンマ線検出器の開発研究の過程で、大面積の Si 半導体パッド型検出器や厚型大面積 CdTe 半導体両面ストリップ検出器などの開発に成功した。これら新規開発の検出器を分子イメージング向けのコンプトンカメラに適用できれば、高性能化に寄与できる。特に、Si 半導体パッド型検出器は、構造が単純なことから、大面積化が可能で、Ge 半導体コンプトンカメラに合った位置分解能を得ることも容易である。そこで、本研究事業向けに、これらの試作検出器の設計、製作を行った。分子イメージング用装置への適用も容易になるように、読み出しアナログ LSI、後段の信号処理も含めた検出器モジュールという形で構築した。

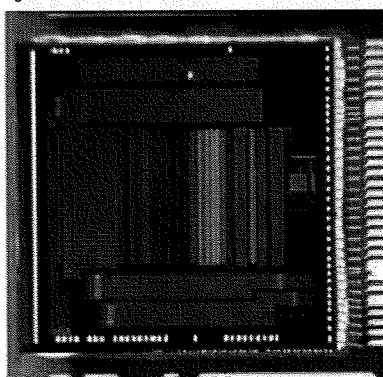




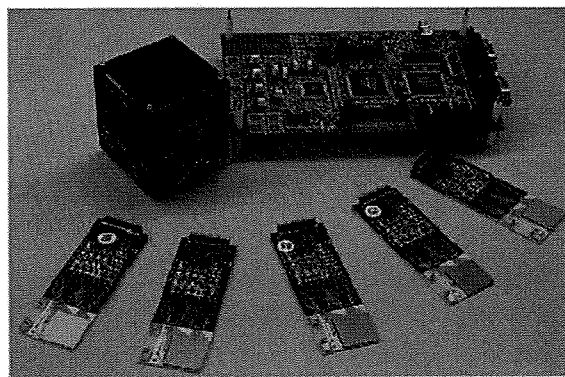
大面積Si半導体パッド型検出器素子

⑧Si 検出器の理研グループへの技術移転

本研究で開発された Si 検出器部は、最終的に、理研グループの Si/Ge コンプトンカメラの Si 部に用いられることとなっており、組み合わせが容易な検出器の検討が行われた。アナログ VLSI を用いた読み出し回路を製作し、スペースワイヤと呼ばれる、次世代衛星内ネットワークによるデータ転送を組み込むことで、コンパクトで、切り分けが容易なモジュールを製作するめどがたった。また、本検出器の開発で博士論文を取得したものが、来年度より理研グループの PD として加わることとなった。



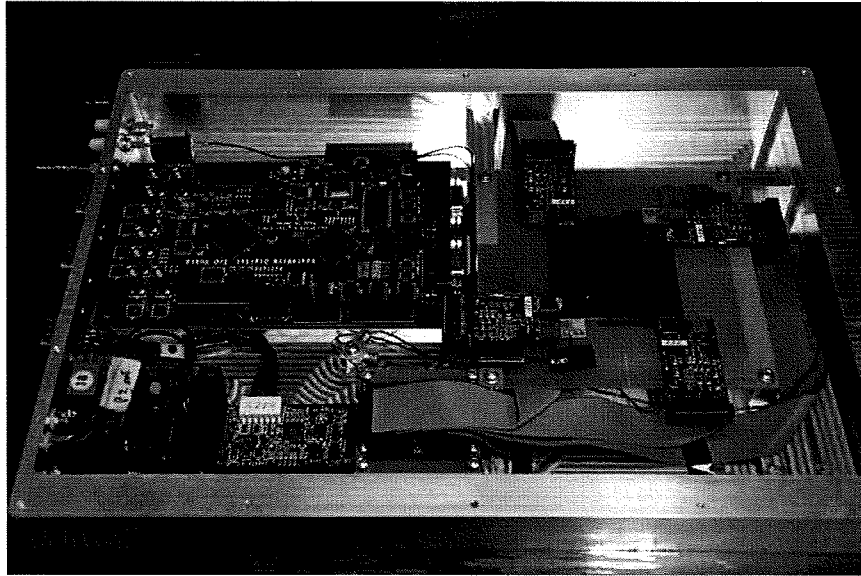
低雑音アナログ LSI



スペースワイヤを用いたセンサー

⑨Si 半導体検出器モジュールの Si/Ge コンプトンカメラへの技術展開 (JAXA) (H21 年度事業)

本研究で開発された Si 検出器部は、最終的に、理研グループの Si/Ge コンプトンカメラの Si 部に用いられることとなっており、組み合わせが容易な検出器の検討を行った。アナログ VLSI を用いた読み出し回路を製作し、コンパクトで、切り分けが容易なモジュールの製作を行った。Si 半導体検出器としては、⑧で開発を進めた大面積 Si 半導体パッド型検出器を採用し、検出器モジュールを開発し、それを理研の Ge コンプトンカメラに組み合わせられるように改良した。実際に理研の Ge コンプトンカメラシステムに導入し、実証データの取得を開始するに至った。また、JAXA 宇宙研において、Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの開発で博士論文を取得したものが、21 年度より理研グループの PD として加わり、技術展開を行った。



理研への技術展開を行ったSi半導体パッド型検出器モジュール

### 3. Ge 半導体コンプトンカメラと Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの性能評価

理化学研究所の Ge 半導体コンプトンカメラと JAXA の Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの性能評価のための実験を行った (9)。

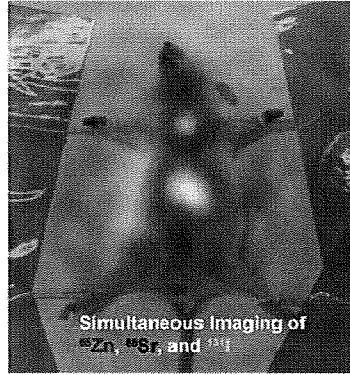
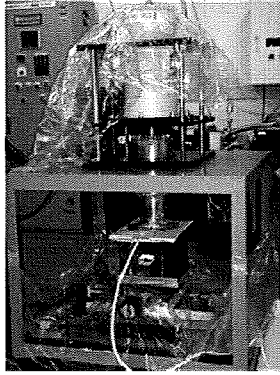
#### ⑨ Ge と Si/CdTe による小動物実験と既存モダリティとの比較、臨床用装置開発のための先導研究

これまでに、理化学研究所に既設の Ge コンプトンカメラを用いて、高エネルギー  $\gamma$  線放出核種である  $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$  や、PET 用核種である  $^{18}\text{F}$ 、 $^{68}\text{Ga}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、SPECT 用核種である  $^{131}\text{I}$  など、10 種類以上の標識核種を用いた撮像実験を行ってきた。特に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の実証にも世界で初めて成功し、この成果の学術論文誌上での発表に併せてプレスリリースを行った。この内容は各社報道メディアで取り上げられ、広く一般に向けて情報発信することが出来た。

これまでにやってきた撮像実験の結果から、実用化の妨げとなるいくつかの問題点が抽出された。小動物イメージング実験などの長期間継続的な撮像実験の経験から、当初の Ge コンプトンカメラの信号処理回路には増幅率安定性の問題があることが明らかになり、当該問題の解決には、より信頼性の高いスペクトロスコーピーアンプを導入する必要があることが分かった。また、PET 用核種などの 500keV 程度以下の  $\gamma$  線を撮像すると、画像中に  $\gamma$  線の後方散乱事象の影響が顕著に現れることが明らかになった。この後方散乱事象を  $\gamma$  線エネルギースペクトルの情報を用いて除去する方法を考案し、後方散乱事象の影響を除去した画像を生成することに成功した。さらに、短寿命核種を撮像する場合、撮像開始時に放射能強度の強いトレーサーを投与する必要があるが、既設の Ge コンプトンカメラは取得データの転送装置の部分に問題があり、計測時間の多くがデッドタイムになってしまうことが明らかになった。この解決のため、データ処理装置や転送装置を改善したシステムの導入に着手した。平成 21 年度には上記問題の解決のため撮像システムの改良も行い、さらに、高度化が実現した要素技術の実装も行い、実際の撮像実験を通してそれらの有効性を実証する事に成功した。

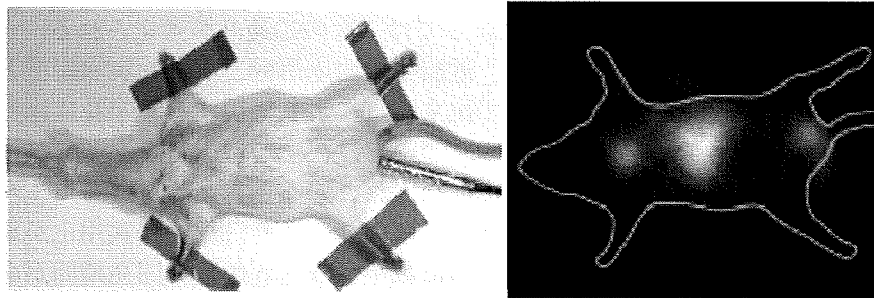
また、既存分子イメージング機器との比較として、理化学研究所分子イメージング科学研究センターに設置されている小動物用 PET 装置を用いた撮像実験を行った。その結果、Ge コンプトンカメラ撮像データのより高精度な 3 次元画像再構成法やスループット向上の必要性が明らかとなった。また、担癌動物モデル撮像によって、解像度向上が必要ではあるが、PET 画像と同様に Ge コンプトンカメラにおいても腫瘍部位への放射能集積を明確に捉えられることを実証した。

Si/CdTe コンプトンカメラによる、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  などの放射性核種を用いた小動物複数分子同時イメージングを理研と JAXA が共同して行った。この撮像実験では、投与した放射性薬剤の期待通りの挙動が可視化され、Si/CdTe コンプトンカメラの撮像性能の実証に成功した。この撮像実験における経験等から、特に近接した Si/CdTe コンプトンカメラによって対象物を高い分解能でイメージングするための最適な検出器の配置等の検討が進んだ。この成果は、JAXA が保有する宇宙技術シーズの異分野への展開の好例であり、JAXA 主導の記者発表を行って一般に向けた情報発信も行った。



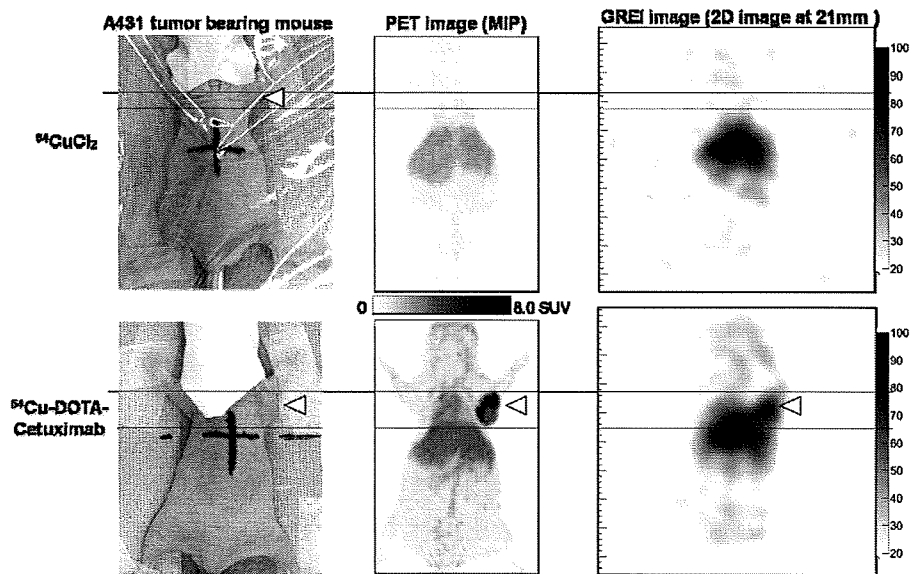
ヨウ化メチルノルコレステノール( $^{131}\text{I}$ )注射液(アドステロール $^{131}\text{I}$ 注射液)、塩化ストロンチウム( $^{85}\text{SrCl}_2$ )、塩化亜鉛( $^{65}\text{ZnCl}_2$ )をマウスに同時投与し、生きたままそれぞれの薬剤の挙動の違いを画像化することに成功した。

Ge 半導体コンプトンカメラによる撮像



ヨウ化メチルノルコレステノール( $^{131}\text{I}$ )注射液など3種類の放射性薬剤を同時投与した生きたマウスの撮像実験

Si/CdTe 半導体コンプトンカメラによる撮像



GREIによるPET用放射性薬剤の撮像結果

## 2. 目的に照らした達成状況

本先導研究プロジェクトでは、目標としていた要素技術の高度化達成に加え、それらの高度化された要素技術を実際に半導体コンプトンカメラシステムに実装して撮像データの取得に成功するなど、当初の目標以上の成果が得られた。これらの高度化が達成された要素技術を用いれば、実用的な撮像性能を有する小動物撮像用もしくは撮像部位を限定した用途のプロトタイプは比較的早期に構築可能であると見込まれる。そこで、今後は始めから広視野全身撮像用の臨床用システムの構築に着手するよりも、数台のカメラユニットに高度化された技術をフル実装した、小動物・部位限定撮像用プロトタイプを用い、複数分子同時イメージングの有効性・革新性を明確に示し、関連する分野の需要を誘導してゆく方が得策であると考えられる。これにより、関連分野の研究開発の活性化を促し、より多方面の研究者の関心を集める事が出来れば、複数因子の分子病態発生機序の解明や複数因子同時解析診断法の開発、さらに新規薬剤の開発が飛躍的に進展し、医療分野における新規需要・市場の開拓につながり、事業化の下地が形成されてゆくと期待される。

Ge コンプトンカメラの具体的な利用形態としては、次の二通りが考えられる。一つは、現在のプロトタイプと同等のサイズの装置を用いた、近接撮像臨床用機、小動物実験用機としての利用である。二つ目は、現在のプロトタイプをアレイ化する事により実現する、全身臨床用機としての利用である。近接撮像臨床用機、小動物実験用機については、すでにプロトタイプ機により小動物実験に成功しており、広い意味での実用化はすでになされていると言える。さらに、今年度および来年度に開発を予定している要素技術を実装することにより、より汎用的な実用化が実現すると考えている。全身臨床用機の実用化については、さらに数年（4-5年）の開発期間が必要と見込んでいる。これは、大型化のための技術開発および低コスト化が必要であるとともに、これからの社会情勢、社会ニーズへの対応を包含した問題となるからである。

本プロジェクトを事業化するにあたっては、製造コストが大きな課題となると考えられる。現在使用している Ge コンプトンカメラは、開発中のプロトタイプであり、生産の初期費用、開発費を含んでいるために、汎用化するにはやや高価な装置となっている。しかし、同型の装置を量産することにより大幅なコストダウンが可能となる。また、全身撮像用の大型化に際してはコスト面がさらに大きな問題となると考えられるが、他項目で述べた通り、現在我々は、Ge コンプトンカメラのガンマ線検出器部および信号処理部において国内外の企業からの技術供与の申し出を受けており、これらの企業と共同生産することによる大幅なコストダウンが見込まれる。

Ge コンプトンカメラを臨床用装置として実用化するためには、装置の高度化と並行した新規プローブの開発が不可欠であるが、Ge コンプトンカメラを用いた動物実験により複数分子同時イメージングの有用性を示した現在、国内外からの複数分子同時イメージングへの期待は大きく、これからのプローブ開発のスピードは加速して行くと考えられる。また、Ge コンプトンカメラの開発基盤を置いている独立行政法人理化学研究所分子イメージング科学研究センターが、小型加速器を用いた RI 製造から、プローブ標識、イメージング実験までを1つの施設で一貫して推進することのできる、国内でも稀有な機関であることも、プローブ開発のために有利な点である。複数分子同時イメージング実現のためには、各々の分子プローブについての機能評価をした上で複数同時使用する必要がある。そのため、プローブ候補分子についてポジトロン核種標識を行い、小動物用 PET 装置を用いた実験により評価したのち、他のガンマ線放出核種で標識することにより Ge コンプトンカメラによるイメージングへ適用する。この手法により、プローブ探索を効果的に推進し、短時間でプローブ開発が可能となる。実際に、この手法により厚生労働科学研究費補助金における本課題のマッチング事業で推進しているプローブ開発において、腫瘍や炎症の診断に利用可能なプローブ候補を発見している。

Si/CdTe 半導体コンプトンカメラは、宇宙ガンマ線の観測を行うために衛星搭載用として開発された技術である。常温から、摂氏 0 度程度で動作し、ASIC などを活用していることで、非常にコンパクトに装置とすることができる。そのため、複数のモジュールを組み合わせた診断装置への応用

が容易である。本プロジェクトで、分子イメージングへの応用が実証されれば、様々な分野での実用化が進むと考えられる。Si/CdTe 半導体コンプトンカメラを構成する Si や CdTe は、常温で動作する検出器であり、我々のこれまでの開発を受けて、現在広い分野でガンマ線センサーとしての応用が検討され、一部は実際に事業化されている。JAXA は、宇宙用に高密度実装技術や低雑音回路の LSI、超小型高速データ収集コンピューターを開発しており、Si/CdTe コンプトンカメラに用いられた技術を応用することによって、装置の格段の小型化、低消費電力化、低コスト化をはかることができる。Si/CdTe コンプトンカメラにおいても、今後とも、さらに小型化、低コスト化を進めることにより、複数の Si/CdTe コンプトンカメラを同時に用いる事ができるようになり、新たなイメージングの手法を適用することが可能となる。JAXA はこうした技術の異分野への展開を積極的に行っており、2008 年 8 月、理化学研究所による分子イメージング実験への応用（本プロジェクト）、群馬大学医学部における重粒子線治療装置への応用、日本原子力機構による植物体内の複数の物質動態のイメージングへの応用、SPring-8 での高エネルギー放射光実験への展開など、すでに様々な分野での応用をめざした共同研究が開始されている（2008 年 8 月 19 日 共同記者発表）。また海外の大学や研究機関、メーカーなどからの協力要請も多い。

Si/CdTe 半導体コンプトンカメラは、検出器の概念から半導体そのもの、読み出し回路、データ処理装置とほとんどが、我が国が他国をリードする国産技術でできている。優れた雑音特性を持つセンサー読み出し用アナログ LSI に関しては、ノルウェーの会社との共同開発であるが、当初より設計に参加し、当方の新規のアイデアと回路技術がとりこまれたものとなっている。また、JAXA 内部での開発も並行して進められており、最終的には必要なコンポーネントが純国産となる。また装置は、モジュール化設計がなされており、大量生産や、性能向上のための改良が容易な構造となっている。そのため適切な技術移転と製造ラインの設定が行われれば、コンパクトな Si/CdTe コンプトンカメラとしての事業化が可能であると考えられる。ただし、分子イメージング実験等において、定常的に使用するためには、今後、画像再構成ソフトウェアや GUI など、専用ソフトウェアの開発が必要である。一方、フラックスの絶対強度を正確に知ることは天体観測には必須であり、2013 年度の ASTRO-H 衛星打ち上げに向け、ソフトウェアの準備、特に検出器のシミュレーションコードの開発が進んでいる。今後は、これらの知見の技術移転も行うことになる。

半導体を用いた次世代コンプトンカメラ開発により医療用イメージング分野に与える波及効果としては、複数分子同時イメージングによる新しい診断技術の確立と他のモダリティとの比較融合が考えられる。がんやさまざまな生活習慣病などの疾病には、複数の要因が複合的に関与していることが明らかになっている。これについて、複数分子同時イメージングでは、これまでの PET、SPECT 等の核医学診断装置では困難であった、複数の分子の動態を同時に追跡することが可能であり、複数の生体関連分子の情報を同時に分析することで、より高度で正確な診断が可能になる。また、核磁気共鳴画像法 (MRI) などと、本研究で開発を進めている Ge コンプトンカメラや宇宙観測技術を転用して製作される Si/CdTe コンプトンカメラを融合させて、同時撮像を行うことにより多元的な診断が可能となると期待できる。

また、Ge や Si あるいは CdTe などの半導体イメージング素子を用いたコンプトンカメラの開発による他分野への波及効果としては、要素技術である、微小信号処理技術、アナログ VLSI 技術、デジタル信号処理技術、画像構成技術等は、他の計測分野や計算科学分野などへの技術応用が可能である。さらには、ガンマ線コンプトンカメラは、一方向撮像でガンマ線源の三次元位置を特定できることから、医療用診断のみならず、非破壊検査、環境測定、物理学実験などの広い分野での応用が期待できる。

## II. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

### (1) 研究発表・講演

1. 榎本 秀一, 本村 信治, 金山 洋介, 羽場 宏光, 石澤 篤: "複数核種同時 $\gamma$ 線イメージング装置の開発と分子イメージング研究の展開", 第 68 回分析化学討論会, 宇都宮, 2007 年 5 月
2. 本村 信治, 金山 洋介, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "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装置の開発: マウスにおける複数核種同時 $\gamma$ 線イメージング", 第 2 回分子イメージング学会総会・学術集会, 福井, 2007 年 6 月
3. 金山 洋介, 本村 信治, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "多核種同時イメージング装置を用いた生体マウスにおける  $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$  同時イメージング", 第 17 回金属の関与する生体関連反応シンポジウム, 京都, 2007 年 6 月
4. 榎本 秀一, 金山 洋介, 榎本 香織, 羽場 宏光: "にがり成分の生体内ダイナミクスと代謝吸収過程のイメージング(1)マルチレーザー法による 1 型糖尿病モデルマウスの微量元素代謝: にがり投与による影響", ソルト・サイエンス研究財団第 19 回平成 18 年度助成研究発表会, 東京, 2007 年 7 月
5. 金山 洋介, 本村 信治, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "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装置の開発: マウスにおける  $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$  同時 $\gamma$ 線イメージング", 第 18 回微量元素学会, 福井, 2007 年 7 月
6. Shin'ichiro Takeda, Shin-nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Shin Watanabe, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa, Hiroyasu Tajima, Yasushi Fukazawa, Hajimu Yasuda: "A new Si/CdTe semiconductor Compton Camera for high-angular resolution", SPIE Optics+Photonics 2007, San Diego USA, 2007 年 8 月 29 日
7. Shin-nosuke Ishikawa, Hiroyuki Aono, Shin Watanabe, Shin'ichiro Takeda, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa: "Performance measurements of Al/CdTe/Pt pixel diode detectors", SPIE Optics+Photonics 2007, San Diego USA, 2007 年 8 月 29 日
8. 榎本 秀一: "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", バイオジャパン 2007, 横浜, 2007 年 9 月
9. 石川真之介、渡辺伸、武田伸一郎、小高裕和、青野博之、高橋忠幸、中澤知洋、田中孝明: "X線・ $\gamma$ 線観測に向けた新しい電極構造による CdTe 半導体撮像検出器", 日本物理学会第 62 回年次大会、札幌、2007 年 9 月 22 日
10. 岸下徹一、池田博一、喜友名達也、田村健一、高橋忠幸: "CdTe 検出器用低雑音 8 チャンネル ASIC の開発", 日本物理学会第 62 回年次大会、札幌、2007 年 9 月 22 日
11. 渡辺伸、国分紀秀、佐藤理江、武田伸一郎、石川真之介、小高裕和、青野博之、高橋忠幸、深沢泰司、安田創、田中琢也、西野翔、中澤知洋、奥山 翔、田島宏康、田中孝明、片岡淳、寺田幸功、玉川徹: "次世代 X 線天文衛星 NeXT 搭載、硬 X 線撮像検出器(HXI)に向けた開発の現状", 日本天文学会 2007 年秋季年会、岐阜、2007 年 9 月 28 日
12. 奥山翔、武田伸一郎、安田創、中澤知洋、石川真之介、小高裕和、渡辺伸、高橋忠幸、深沢泰司、田中琢也、田島宏康、田中孝明、牧島一夫: "硬 X 線の精密な撮像分光観測に向けた多層 DSSD システムの開発の現状", 日本天文学会 2007 年秋季年会、岐阜、2007 年 9 月 28 日

13. 安田創、田中琢也、西野翔、深澤泰司、大杉節、武田伸一郎、渡辺伸、高橋忠幸、田島宏康、田中孝明、中澤知洋、奥山翔、久保信: "0.5mm 厚低ノイズ両面 Si-strip 検出器の開発 II"、日本天文学会 2007 年秋季年会、岐阜、2007 年 9 月 28 日
14. 安田創、田中琢也、西野翔、深澤泰司、大杉節、武田伸一郎、渡辺伸、高橋忠幸、田島宏康、田中孝明、中澤知洋、奥山翔、久保信: "0.5mm 厚低ノイズ両面 Si-strip 検出器の開発 II"、日本天文学会 2007 年秋季年会、岐阜、2007 年 9 月 28 日
15. Motomura S, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Multiple Nuclide Imaging in Live Mouse Using Semiconductor Compton Camera for Multiple Molecular Imaging", 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Honolulu, USA, 2007 年 10-11 月
16. T. Kishishita, H. Ikeda, T. Kiyuna, K.-I. Tamura, K. Nakazawa, T. Takahashi: "Development of a Low-Noise Analog Front-End ASIC for CdTe Detectors", 2007 IEEE Nuclear Science Symposium, Honolulu USA, 2007 年 11 月 1 日
17. Motomura S, Kanayama Y, Haba H, Igarashi K, Hiromura M, Watanabe Y, Enomoto S: "Compton Camera for Multiple Molecular Imaging", International Symposium on Metallomics 2007 (ISM 2007), Nagoya, Japan, 2007 年 11-12 月
18. Enomoto S: "Development of Multi-Elemental Molecular Imaging on Semiconductor Compton Telescope", International Symposium on Metallomics 2007 (ISM 2007), Nagoya, Japan, 2007 年 11-12 月
19. Kanayama Y, Motomura S, Haba H, Enomoto K, Watanabe Y, Enomoto S: "Preliminary study for multiple molecular imaging: simultaneous imaging of  $^{18}\text{F}$ -FDG,  $^{54}\text{Mn}$ - $\text{MnCl}_2$ , and  $^{65}\text{Zn}$ - $\text{ZnCl}_2$  in normal and tumor-bearing mouse", International Symposium on Metallomics 2007 (ISM 2007), Nagoya, Japan, 2007 年 11-12 月
20. Fukuchi T: "Digital signal processing for germanium detector", TORIJIN-EFES-FJNSP LIA Joint Workshop on Next Generation Detector System for Nuclear Physics with RI Beams, Caen, France, 2008 年 2 月
21. 榎本 秀一: "マルチトレーサーの開発と利用" 第 4 回新しいアイソトープの利用等に関する作業グループ報告会, 東京, 2008 年 2 月
22. 榎本 秀一: "複数分子イメージングとメタロミクス研究の展開", 日本薬学会第 128 年会, 横浜, 2008 年 3 月
23. 福地 知則, 本村 信治, 金山 洋介, 榎本 秀一: "ガンマ線コンプトンカメラ高度化のためのトラッキング法開発", 日本物理学会第 63 回年次大会, 東大阪, 2008 年 3 月
24. Enomoto S: "Development and Application Studies of Multitracer Technology" 6th International Conference on Isotopes, seoul, Korea, 2008 年 5 月
25. 本村 信治, 福地 知則, 金山 洋介, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "複数分子同時イメージングのための半導体コンプトンカメラの高度化" 第 3 回分子イメージング学会総会・学術集会, さいたま, 2008 年 5 月



26. 金山 洋介, 廣村 信, 五十嵐 香織, 本村 信治, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "正常および Mg 欠乏マウスにおける  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{43}\text{K}$  の同時イメージング" 第 25 回微量栄養素学会学術集会, 京都, 2008 年 5 月
27. Fukuchi T, Motomura S, Kanayama Y, Watanabe Y, Enomoto S: "Development of a gamma-ray Compton camera for multi-molecular imaging", 6th International Conference on Isotopes, Seoul, Korea, 2008 年 5 月
28. 金山 洋介, 本村 信治, 野崎 聡, 廣村 信, 五十嵐 香織, 福地 知則, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "病態モデルマウスを用いた複数分子同時生体イメージングの検討", 第 3 回分子イメージング学会総会・学術集会, さいたま, 2008 年 5 月
29. 金山 洋介, 本村 信治, 福地 知則, 羽場 宏光, 野崎 聡, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "半導体コンプトンカメラによる PET プロブを用いた複数分子同時イメージングの試み", 第 18 回金属の関与する生体関連反応シンポジウム, 名古屋, 2008 年 6 月
30. Shin Watanabe, Shin-nosuke Ishikawa, Hiroyuki Aono, Shin'ichiro Takeda, Hirokazu Odaka, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa: "High Energy Resolution Gamma-Ray Imagers Using CdTe Diode Devices", the first West Coast meeting of the Symposium on Radiation Measurements and Applications, Berkeley USA, 2008 年 6 月
31. Shin'ichiro Takeda, Hiroyuki Aono, Shin-nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Shin Watanabe, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Sho Okuyama, Kazuhiro Nakazawa, Hiro Tajima: "The Experimental Results of a Gamma-Ray Imaging with a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera", the first West Coast meeting of the Symposium on Radiation Measurements and Applications, Berkeley USA, 2008 年 6 月
32. Tadayuki Takahashi: "Review of the recent CdTe/CdZnTe development", New Developments In Photodetection 2008, Aix-les-Bains France, 2008 年 6 月
33. Hiroyuki Aono, Shin'ichiro Takeda, Shin-nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Motohide Kokubun, Shin Watanabe, Tadayuki Takahashi, Kazuhiro Nakazawa, Sho Okuyama, Hiroyasu Tajima, Yasushi Fukazawa, Naoki Kawachi: "Application of double-sided silicon strip detectors to Compton cameras", SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, Marseille France, 2008 年 6 月
34. 金山 洋介, 本村 信治, 福地 知則, 羽場 宏光, 廣村 信, 五十嵐 香織, 野崎 聡, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "複数分子同時イメージングの実現とその生体微量元素研究への応用", 第 19 回微量元素学会, 東京, 2008 年 7 月
35. 榎本 秀一, 羽場 宏光: "新しい RI の利用促進を目指して理研加速器による Ri の製造とその応用", 第 45 回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京, 2008 年 7 月
36. Enomoto S: "Multiple Molecular Imaging Using the  $\gamma$ -Ray Emission Imaging GREI as a Tool for Metallomics Researches", 4th International Conference on Metals and Genetics, Paris, France, 2008 年 7 月
37. 福地 知則, 本村 信治, 金山 洋介, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "ガンマ線直線偏光を利

用したコンプトンカメラの高度化", 日本物理学会 2008 年秋季大会 山形 2008 9

38. Kanayama Y, Motomura S, Fukuchi T, Nozaki S, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Simultaneous imaging of  $^{18}\text{F}$ -FDG,  $^{54}\text{Mn}$ -MnCl<sub>2</sub>,  $^{65}\text{Zn}$ -ZnCl<sub>2</sub> in mice using semiconductor Compton camera" 2008 World Molecular Imaging Congress, Nice, France, 2008 年 9 月
39. Motomura S, Fukuchi T, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Sophistication of semiconductor Compton camera for multiple molecular imaging--fast and accurate image-reconstruction method for three-dimensional imaging", 2008 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, Dresden, Germany, 2008 年 10 月
40. Motomura S, Fukuchi T, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Sophistication of Semiconductor Compton Camera for Multiple Molecular Imaging--Fast and Accurate Image-Reconstruction Method for Three-Dimensional Imaging", 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Satellite Workshops: Compton Cameras for Medical and Industrial Application "Compton Camera III", Dresden, Germany, 2008 年 10 月
41. Fukuchi T, Motomura S, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Gamma-ray tracking for Ge telescope Compton camera imaging", 2008 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, Dresden, Germany, 2008 年 10 月
42. Fukuchi T, Motomura S, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Gamma-ray tracking for Ge telescope Compton camera imaging", 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Satellite Workshops: Compton Cameras for Medical and Industrial Application "Compton Camera III", Dresden, Germany, 2008 年 10 月
43. S.-N. Ishikawa, S. Watanabe, H. Aono, M. Kokubun, H. Odaka, S. Sugimoto, S. Takeda, T. Takahashi, S. Okuyama, K. Nakazawa, T. Tanaka: "Performance of double-sided CdTe strip detectors for gamma-ray imaging and spectroscopy", 2008 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, Dresden Germany, 2008 年 10 月
44. 金山 洋介: "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とメタロミクス研究", 第 1 回メタロミクス研究フォーラム, 東京, 2008 年 11 月
45. 金山 洋介: "生体高分子を用いた PET イメージング", 分子イメージング研究シンポジウム 2008 「飛躍を迎えた創薬・疾患診断研究」, 神戸, 2008 年 12 月
46. 榎本 秀一: "先端計測技術の開発と応用研究 分子イメージングによる創薬科学へのアプローチ", 岡山大学創薬科学セミナー, 岡山, 2008 年 12 月
47. 本村 信治: "複数分子同時イメージング法の実用化に向けた半導体コンプトンカメラの高度化開発", 分子イメージング研究シンポジウム 2008 「飛躍を迎えた創薬・疾患診断研究」, 神戸, 2008 年 12 月
48. 榎本 秀一: "種々の $\gamma$ 線放出核を用いた早期疾患診断プローブ開発とコンプトンカメラによる複

数核種同時イメージング", 総合科学技術会議科学技術連携施策群 ナノバイオテクノロジー連携群成果報告会, 東京, 2009年1月

49. 榎本 秀一: "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", 総合科学技術会議科学技術連携施策群 ナノバイオテクノロジー連携群成果報告会, 東京, 2009年1月
50. 本村 信治, 福地 知則, 金山 洋介, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "複数分子同時イメージング実現に向けた半導体コンプトンカメラ GREI による3次元トモグラフィックイメージング", 第4回分子イメージング学会総会・学術集会, 東京, 2009年5月
51. Enomoto S: "Multi-molecular Imaging by Using Compton Telescope as a New Tool for Nuclear Medical Diagnosis", 2nd Asian Congress of Radiation Research (ACRR 2009), Seoul, Korea, 2009年5月
52. 福地 知則, 本村 信治, 金山 洋介, 羽場 宏光, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "複数分子同時イメージング用コンプトンカメラの高度化", 第4回分子イメージング学会総会・学術集会, 東京, 2009年5月
53. Fukuchi T, Motomura S, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Ge semiconductor Compton camera for multiple molecular imaging", 2nd Asian Congress of Radiation Research (ACRR 2009), Seoul, Korea, 2009年5月
54. 金山 洋介, 本村 信治, 福地 知則, 角田 ちぬよ, 松本 恭子, 和田 康弘, 林中 恵美, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "半導体コンプトンカメラを用いた複数分子腫瘍イメージング", 第4回分子イメージング学会総会・学術集会, 東京, 2009年5月
55. Kanayama Y, Motomura S, Fukuchi T, Sumita C, Matsumoto Y, Hayashinaka E, Wada Y, Watanabe Y, Enomoto S: "In vivo tumor imaging using semiconductor Compton camera", International Symposium on Metallomics (ISM 2009), Cincinnati, USA, 2009年6月
56. 金山 洋介, 本村 信治, 福地 知則, 角田 ちぬよ, 松本 恭子, 林中 恵美, 和田 康弘, 渡辺 恭良, 榎本 秀一: "半導体コンプトンカメラのための分子プローブ探索", 第19回金属の関与する生体関連反応シンポジウム, 吹田, 2009年6月
57. 榎本 秀一: "複数分子同時イメージングと創薬: 我が国発の新装置の世界発信", シンポジウム「最先端計測技術のトレンド 2009: 創薬から生体試料や環境試料分析, 犯罪捜査への応用」, 岡山, 2009年6月
58. 榎本 秀一: "生体内金属元素のダイナミクス: 複数分子同時イメージングによるアプローチ", 第20回微量元素学会, 東京, 2009年7月
59. 本村 信治: "半導体コンプトンカメラによる複数分子同時ガンマ線イメージングの開発と現状", 第2回小動物インビボイメージング研究会, 神戸, 2009年7月
60. 榎本 秀一: "生命現象の可視化技術: イメージング技術による創薬プロセスの革新と迅速化", 岡山大学公開講座「第21回現代の薬学」, 岡山, 2009年7月
61. 榎本 秀一: "理研 CMIS 岡山分室開設と今後の分子イメージング研究への期待", 岡山大&理研ジョイントセミナー, 岡山, 2009年9月

62. 本村 信治: "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法の開発とジョイント研究への期待", 岡山大&理研ジョイントセミナー, 岡山, 2009年9月
63. 榎本 秀一: "岡山発の分子イメージング研究の推進: 世界初の複数分子同時イメージングとイメージングプローブ (放射性医薬品) の創薬研究とマイクロドージング", 岡山大学医歯薬学総合研究科創薬生命科学専攻シンポジウム, 岡山, 2009年9月
64. 榎本 秀一: "次世代核医学診断モダリティの創出: 複数分子同時イメージング装置の開発と分子イメージングプローブ創薬", 第18回バイオイメージング学会学術集会, 岡山, 2009年9月
65. Enomoto S, Kanayama Y, Motomura S, Fukuchi T, Sumita C, Matsumoto Y, Hayashinaka E, Wada Y, Watanabe Y: "In vivo Imaging of Tumors with Antibody Probes Using Semiconductor Compton Camera", 2009 World Molecular Imaging Congress, Montreal, Canada, 2009年9月
66. Kanayama Y, Sumita C, Hasegawa K, Wada Y, Hayashinaka E, Enomoto S, Kojima S, Watanabe Y: "PET imaging of proteolytic TGF-beta1 activation reaction in mice", 2009 World Molecular Imaging Congress, Montreal, Canada, 2009年9月
67. 武田 伸一郎: "宇宙用検出器技術の異分野への発展を目指して", 岡山大&理研ジョイントセミナー, 岡山, 2009年9月
68. 渡辺伸: "CdTe半導体を用いた高エネルギー分解能ガンマ線イメージャーの開発", 2009年秋季学術講演会 放射線分科会企画「室温動作半導体放射線検出器の最新動向」, 富山, 2009年9月
69. Fukuchi T, Motomura S, Kanayama Y, Takeda S, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Pulse shape analysis for Ge semiconductor Compton camera", 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2009), Hawaii, USA, 2009年10月
70. 榎本 秀一: "複数分子同時イメージング技術の開発と理化学研究所における分子イメージング研究の展開", 第82回岡山県医用工学研究会, 岡山, 2009年10月
71. Motomura S, Fukuchi T, Kanayama Y, Haba H, Watanabe Y, Enomoto S: "Three-dimensional tomographic imaging by semiconductor Compton camera GREI for multiple molecular simultaneous imaging", 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Orlando, USA, 2009年10月
72. S. Watanabe, S.-N. Ishikawa, H. Odaka, S. Saito, T. Fukuyama, S. Sugimoto, G. Sato, M. Kokubun, T. Takahashi: "Recent Results of CdTe Diode Double-Sided Strip Detectors", IEEE 2009 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Orlando USA, 2009年10月
73. 榎本 秀一: "複数分子同時イメージングのための創薬研究", 分子イメージングシンポジウム 2010, 東京, 2010年1月
74. 本村 信治: "半導体コンプトンカメラ GREI がもたらす分子イメージングの革新", 分子イメージング研究シンポジウム 2010「未来を拓く創薬・疾患診断研究」, 東京, 2010年1月
75. 武田 伸一郎, 榎本 秀一, 福地 知則, 金山 洋介, 齋藤 大地, 廣村 信, 本村 信治: "半導体コン