

(別 紙)

研究の進捗状況等について

1. 実施内容

(1) 研究進捗状況

本研究の目的は、今後人類の宇宙活動の拠点となるだろう月や火星において、水資源がどこにどのくらいあるか特定するための、軽量・コンパクトかつ低消費電力な革新的中性子・ガンマ線センサを開発することにある。我々は2年の研究計画で実施し、1年目では特に中性子・ガンマ線が検出できるかについて検出器を計算機上で構築し、シミュレーションを行うとともに、並行して2年目に行うセンサの組み上げ・性能試験のための設計・準備を行うことである。システムはセンサおよび信号処理部分からなり、ほぼ一体化する構造のため、キーポイントは構造と電気系を含めて全体のシステム成立の整合性をとりつつ、個々のパーツを設計することにある。我々のセンサは図1のようなものである。

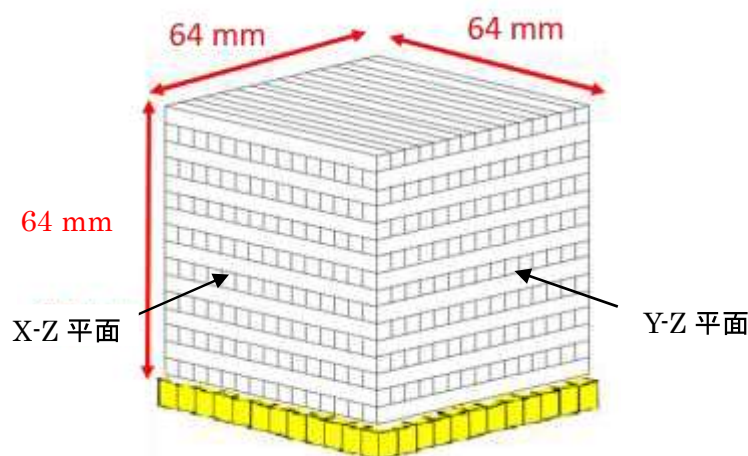


図 1: 開発中の中性子・ガンマ線センサの概念図(断面)。大きく2つのパートからなり、上部の積層プラスチックシンチレータバー(白色)と下部の GAGG シンチレータアレイ部(黄色)である。この2つのパートから中性子・ガンマ線を検出できる。シンチレータで発生した光は半導体光センサ MPPC で読み出される。信号処理部も含めたセンサ全体の大きさとして超小型衛星に容易に搭載できる 10 cm 程度を予定している。

以下①から④が1年目に行う予定の研究・事業内容の具体的な状況である。

- ① 検出器シミュレーションとセンサ形状の決定

計算機上で中性子・ガンマ線双方に感度をもつ検出器モデルを構築し、中性子やガンマ線を入射して、その応答を確認し、センサ性能を確認することである。

Geant-4と呼ばれる、公開の放射線シミュレーションソフトウェア(C++言語ベース)を用いて、図2のようなシミュレーションモデルを構築し、中性子100 MeVとガンマ線1 MeVを入射した時の反応の例を図3に示す。この図は上側にプラスチックシンチレータを2次元平面(X-Z, Y-Z : 図1参照)に投影した飛跡を、下部にGAGGアレイ上の反応位置を示したものである。中性子の場合には原子核との反応で複雑であるが、主要な反応が、プラスチックシンチレータを構成する水素原子との弾性散乱である。水素原子が電離し(反跳と呼ぶ)、シンチレータバーの中で連続的に運動エネルギーを失いながら停止するまでシンチレータ中を走行する。シミュレーションで確かにその飛跡をとらえることができている(図3左)。また、ガンマ線の場合にはプラスチックシンチレータでコンプトン散乱(E1)を、下部のシンチレータで光電吸収(E2)を起こし、全エネルギー $E(=E1+E2)$ を失う。ガンマ線は中性子と比べて離散的な分布となる(図3右)。この違いを利用して中性子かガンマ線かを識別できることが分かった。

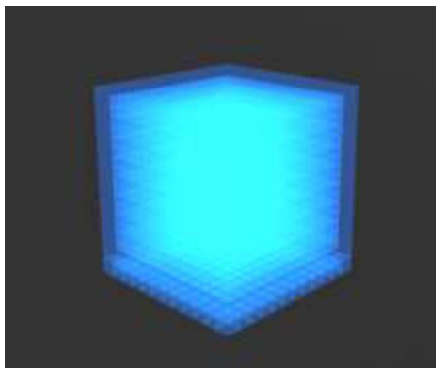


図 2: 検出器シミュレーションモデル

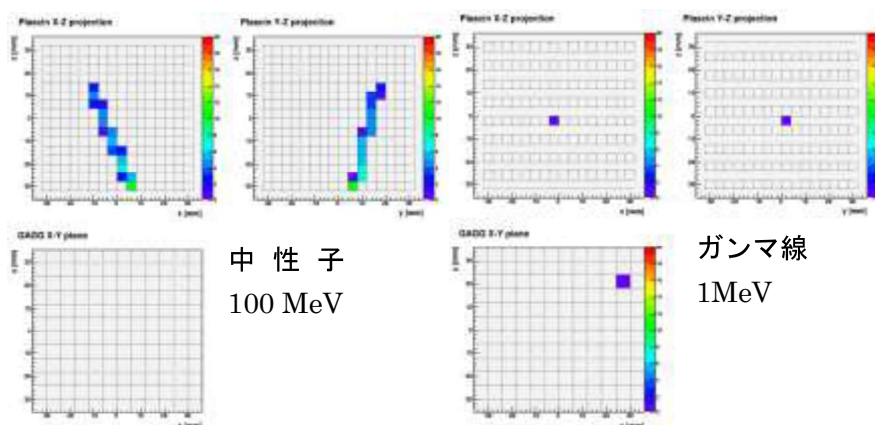


図 3: 計算機で構築したセンサに中性子 100 MeV (左) とガンマ線 1MeV(右)を入射した時の飛跡。左上と右上がプラスチックシンチレータの反応位置をそれぞれ X-Z 面、Y-Z 面に投影したもの。下は GAGG の面。色の濃さはエネルギーを表す。中性子の場合には水素原子が飛び出すため連続的な飛跡となる一方で、ガンマ線の場合は単独位置のみの離散的な分布となることから粒子識別が可能である。

中性子は全エネルギーを一度に失うことがなく、そのエネルギーを測定することは困難であるが、弾性散乱事象および中性子入射方向が分かっているとその方向を仮定して、エネルギーを決定することができる。運動学から $E_n = E_p / \cos^2 \theta$ (ここで E_p は水素原子の損失エネルギー、 θ は反跳角で飛跡から求める)。図4は入射エネルギーが30, 50, 100, 120 MeVにおける、見積もられた中性子のエネルギー分布である。確かにそのエネルギー付近にピークができており、エネルギーを決定することができる。特に注目すべきは、プラスチックシンチレータだけでは不十分で、ガンマ線検出のために配置した底面のGAGGも使用すると、高エネルギー側でピークがより顕著になり、エネルギー決定効率が上がることが分かった。さらに、2回弾性散乱をする事象(図5がその例)を使うと、原理的には中性子の入射方向とエネルギーの両方を決定できるはずだが、複数事象の場合、反応が複雑なため、解析が困難でシミュレーション上でその実証はまだできていない。今後、宇宙線分野の他の専門家と相談しつつ、センサ開発と並行してその実証を行う。

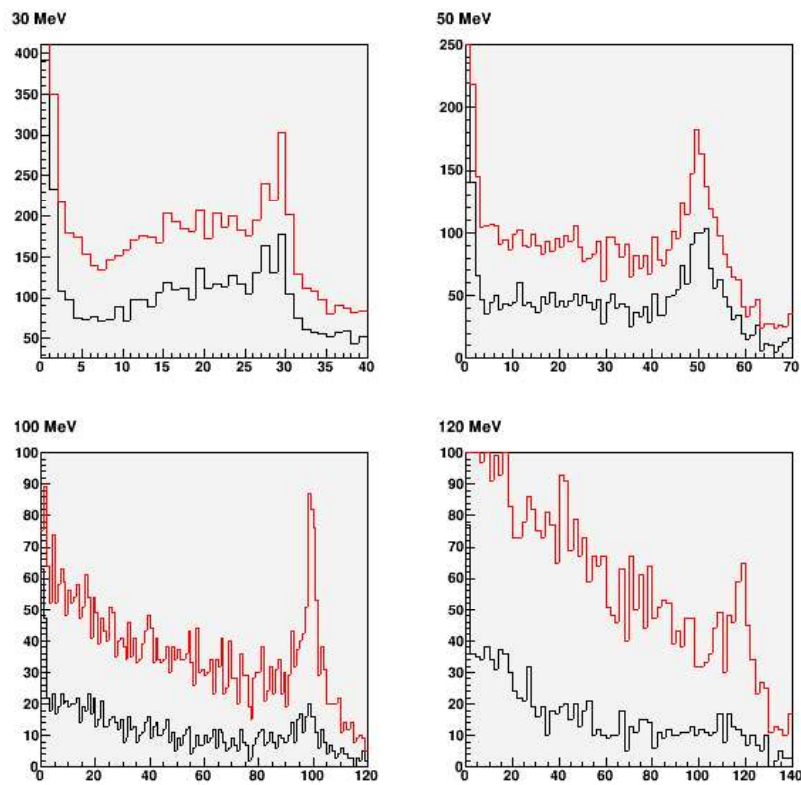


図 4: 弾性散乱を利用した中性子のエネルギー決定。それぞれエネルギーは 30, 50, 100, 120 MeV。黒はプラスチックシンチレータでの反応事象のみ、赤は GAGG シンチレータまで到達した事象も使用した場合。GAGG も合わせるとより高いエネルギーまで決定でき、効果的であることが分かる。

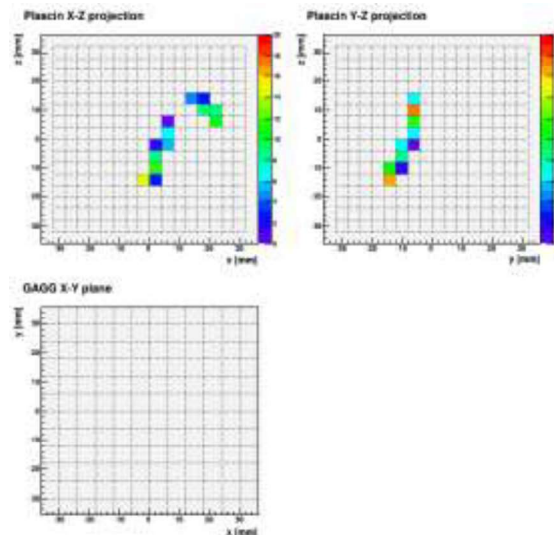


図 5 中性子 100 MeV 入射時に 2 回弾性散乱を起こした事象の例。
 複数反応の場合、その事象の選択も含めて解析が難しい。

また、コンプトン散乱を利用して、プラスチック散乱体 (E1) と GAGG 吸収体 (E2) でのエネルギー損失から、散乱角 θ ($\cos \theta = 1 -$

$0.511 \times (1/E_2 - 1/(E_1 + E_2))$ を求め、入射角を円弧状に制限できる。ガンマ線が撮像・分光できるかどうかを1 MeVのガンマ線を入射し、確認した(図6)。正面と30度ずらした時のイメージ中心は確かにずれており、正しく撮像できていることが分かる。ただし、撮像の角度分解能(画像分解能力)は20度程度であり、今後センサのエネルギー分解能の改善やセンサの上層部を使用することでさらなる改善を図りたいと考えている。

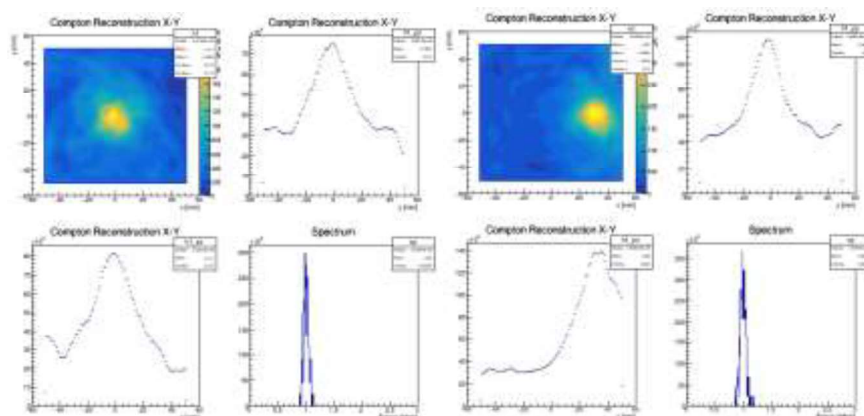


図 6: 1MeV ガンマ線のコンプトン撮像。正面(左)と 30 度ずれたところ(右)からガンマ線を入射した時の画像。それぞれの図の左上はガンマ線像、右上は Y 軸に投影したもので、左下は X 軸に投影したもの、右下はエネルギー分布。コンプトン散乱を利用することで、少なくともシミュレーション上では撮像および分光できることを示した。

②信号処理回路基板設計と発注

信号処理はセンサの周囲や下の空きスペースに、約600程度の光センサMPPCからの信号を取り扱うため、コンパクトかつ高密度設計が不可欠である。我々は宇宙放射線センサに実績のあるノルウエーIDEAS社の集積回路(ASIC)の使用をベースにコンパクト化を図り、全体の信号処理の枠組みの設計を行った(図7左)。その上で、限られたスペースの中に実装可能であること(図7右)、また、約4 W程度の消費電力で信号処理できる見込みを得ている。今後お願いする名古屋大学技術職員を增強し、急ピッチで基板設計・開発を進めていく。基板製造および部品実装は宇宙実績のある基板メーカーにお願いする予定である。

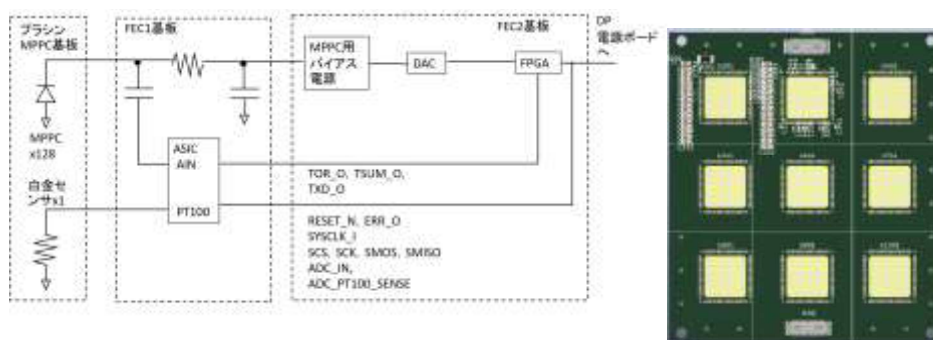


図 7: (左)センサ信号処理のブロック図。点線が各基板に対応する。高圧電源や ASIC、ASIC をコントロールする FPGA(Xilinx 社)を配置する。(右)一つの基板の現在の配置状況。上の中央のみ部品を配置しており、部品実装が可能な見込みを得ている。大きさは 64×72mm で 9 個の ASIC(黄色の四角の部分。大きさは 12×12 mm)を置き、プラスチックシンチレータの各 4 面に配置する予定。

一方で、校費を利用してモックアップやモデル基板(フレキシブル基板とガラスエポキシ基板)を試作し、プラスチックシンチレータからの信号をフレキシブル基板で外部に取り出せ、組み立て可能であることも確認した(図8)。

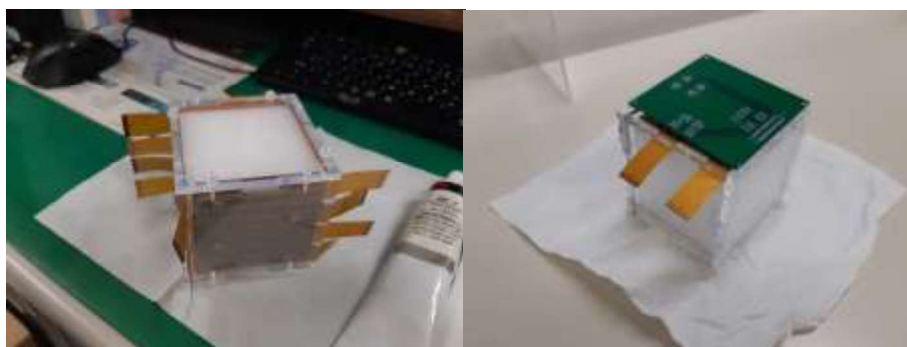


図 7: プラスチックシンチレータからのセンサ信号のフレキシブル基板での引き出し(左)と外側のガラスエポキシ電子回路模擬基板への接続(右)の様子。

③センサ部材の入手

センサ組み立てに必要な部材のうち、特に納期のかかるものを1年目に入手する予定で当初の計画を立てており、現在予定通り進んでいる。3 か月以上納期のかかる半導体光センサMPPCおよびGAGGシンチレータをそれぞれ浜松ホトニクス社およびC&Aコーポレーションにすでに手配済みである。CLLBシンチレータは新規開発のもので魅力あるデバイスであるが、シンチレータ単独での入手や価格の面から今回の使用は困難であることが判明したため、同じく高性能のGAGGシンチレータに切り替えた。プラスチックシンチレータバーについては、シンチレーションファイバ

一を用いることも検討したが、入手性からシンチレータバーを採用し、12月上旬に積層組み立ての目処がたった後、年内に発注する予定である。

1年目入手予定部材の状況

- 半導体光センサMPPC 700個 1400 千円
→ すでに手配済み。ただし、全世界的な半導体不足の影響および設計の観点からMPPC3 mm×3 mm単素子とMPPCアレイの両方を手配している。GAGGシンチレータはMPPCアレイで読み出す予定である。
- CLLBシンチレータ（またはGAGG） 700 千円
→ CLLBシンチレータはサンゴバン社のみで製造可能だが、単独のシンチレータとしては販売不可、また高価であることからGAGGシンチレータに種類を変更して手配済み。
- プラスチックシンチレーションファイバー 1200 千円
→ 12月上旬に別途入手した試作品を使用して組み立ての精度と工程の目処を立ててから、256本+予備のシンチレータの手配予定。バーのサイズは3.95×3.95×64 mmを予定している。

④信号処理回路基板の動作確認

基板入手後、動作確認は来年1月から随時始める予定である。動作確認は来年5月まで継続する。

(2) 研究計画

本研究のスケジュールを1年目も含めて図9に示す。2年目は、主に個々の構成部品(電子回路基板など)の動作確認を行った上で、センサ組み立てと性能評価を行う予定である。

①センサ部材の入手(1年目に引き続き)

センサ信号処理用電子回路部品の主要要素である、多チャンネル信号処理集積回路(ASIC)をノルウエーのIDEAS社から入手する予定である。本ASICは16個の光センサ信号を同時に処理できるばかりか、30 mWという超低消費電力を実現するものであり、放射線への耐久性も実証されている。宇宙環境を目指す本プロジェクトに必須のアイテムである。また、ASICはベアチップで納入されるため、12 mm×12 mmのVQFNパッケージ化を国内メーカーで行う予定である。すでにパッケージ形状・仕様は決定済みでメーカーとも調整済みである。

②回路基板動作確認(1年目に引き続き)

ASIC納入・パッケージ後に電子回路基板を業者とともに実装・組み立て、単体での動作確認を行う。特に内部のデジタル信号処理にはFPGAが使用されており、VHDLコードでのプログラミングをする必要がある。これらは名古屋大学の技術職員・大学院生と行う予定である。

③センサ組み立て

センサは図1にもあるように積層プラスチックシンチレータバー、GAGGアレイからなっている。バーは256本単独で購入するため、構造が打ち上げロケットの振動・衝撃でばらばらにならないように組み立てる必要がある。我々は5 μm の両面テープを使うことで性能面でも問題なく、十分な強度で組み立てられることを確立してきた。また、信号処理回路はセンサ周囲や下部に配置する。それらを含めて、名古屋大学内の技術職員や外部共同研究者と協力することで一つのセンサとして組み立てていく。

④性能評価

センサの性能評価は、組み立て後の最終確認として行う。地上に降り注いでいる宇宙線である荷電ミューオンを使って粒子飛跡の性能を評価するとともに、ガンマ線については ^{137}Cs (662 keV) や ^{22}Na (511, 1274 keV) などの密封ガンマ線源(法律上は線源といえない強度の弱いもの。チェックソースと呼ばれる。)を用い、中性子については ^{252}Cf の中性子線源および中性子・陽子照射施設(福井県敦賀市の若狭湾エネルギー研究センターや名古屋大学中性子ビームラインを予定)にて撮像・分光性能の確認を行う予定である。

⑤成果まとめ

本研究成果は、随時国内学会(天文学会や物理学会、JAXA宇宙科学シンポジウム)、2022年7月に予定されている海外国際会議(SPIE astronomical telescopes and instrumentation)で発表するとともに、最終結果は放射線検出器に関する欧文雑誌Nuclear Instrument Method (NIM) Aに投稿する予定である。

その他、予定通りに研究が進まない時の方策として、タスクがいずれも重たいものが多いため、今年度中に2-3名のマンパワーの増強を図り、外部機関との共同研究を進めることで組織を強化することを検討しておく。

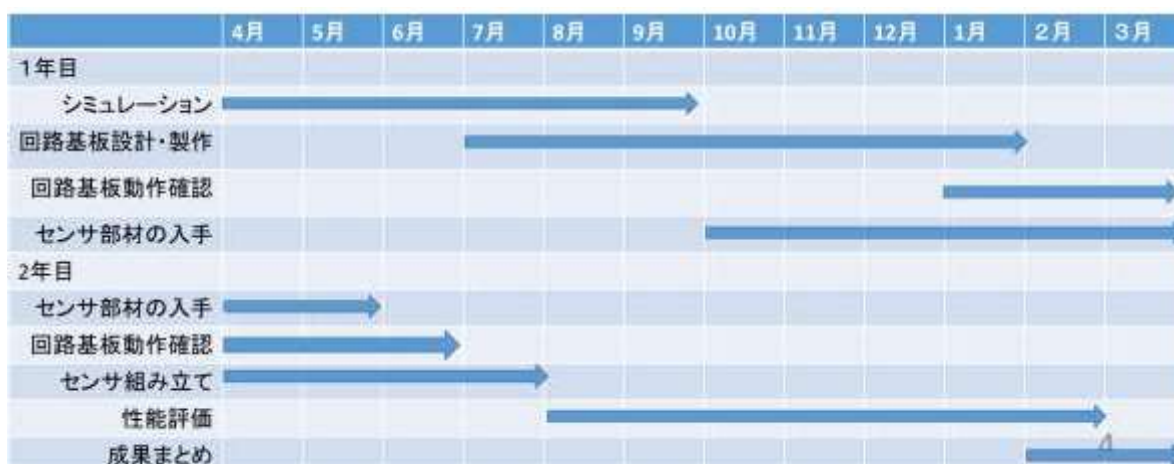


図 9: 2 年間の研究計画

(3) 継続実施の必要性

前述のように、2年目に中性子・ガンマ線センサの組み立て・性能評価を行う予定で当初の研究を組み立てており、1年目で終了すると本開発研究が中途半端な形で終了してしまうため、継続実施は必須であると考えている。

また、我々は本研究で開発したセンサを将来的には月・火星への探査機やローバーへの搭載することを目指しているが、月や火星は温度環境や放射線環境が、地球上や地球周回軌道に比べて過酷であることは間違いない。来年度はJAXA 革新衛星技術実証プログラムの4号機(採用されれば、打ち上げ費用無償で、2024年度打ち上げ予定)の公募があると予想され、まずはその4号機への搭載を目指して、地球周回軌道で確固たる実績を作った上で着実なステップを踏んでいきたい。そのためにも本センサの開発実績および業界へのアピールは不可欠であると考えている。

(4) 論文・学会発表等

これまでに本研究に限定した論文や学会発表は行っていない。今後、以下のような発表を予定している。

- ・ 2022年1月、2023年1月開催のJAXA宇宙科学シンポジウムでのポスター発表
- ・ 2022年3月開催の日本天文学会春季年会での口頭発表
- ・ 2022年7月開催の国際会議「SPIE astronomical telescopes and instrumentation」での発表およびプロシーディングス執筆
- ・ 2022年9月、2023年3月にも物理学会もしくは天文学会への出席を予定

また、私が開催者の一人でもある、名古屋大学宇宙地球環境研究所主催の民間における宇宙利用2週間上級コース(2022年3月中旬実施予定)において、参加者である大学院生や社会人向けに本研究の宣伝を行う。