

惑星探査機搭載に向けた元素分析装置の開発

研究代表者 草野 広樹

(理工学研究所 理工研が募集する次席研究員)

1. 研究課題

岩石惑星や衛星・小惑星などを対象とした探査において、天体表層物質の元素組成を取得することは極めて重要である。元素組成やその分布に関する情報は、地質学・惑星化学の観点から天体の形成起源や進化過程を解明するための手掛かりとなるほか、基地建設や資源利用などの将来の宇宙利用の推進につながる。惑星探査は、これまでに周回軌道上からの遠隔探査、表面着陸探査、地球への試料回収と段階的に進められており、今後もこれらを統合的に実施すると考えられる。日本においても、月や火星衛星、小惑星などを対象とした探査が計画されており、地形や鉱物の情報とともに、元素組成の取得も重要になる。元素組成を計測する手法としては、蛍光 X 線分光や核ガンマ線・中性子分光が最も有力である。惑星探査のための蛍光 X 線分光計やガンマ線・中性子分光計では、多くの元素を高精度で計測できることのほかに、装置が小型軽量、低消費電力であることが強く要求される。本研究では、将来の惑星探査機搭載に向けた元素分析装置として、着陸探査のための能動型蛍光 X 線分光計と、周回探査のためのガンマ線・中性子分光計を開発することを目的としている。

能動型蛍光 X 線分光計は、X 線源である焦電結晶 X 線発生器 (Cu および Mo ターゲット) と、X 線検出器であるシリコンドリフト検出器で構成する。主な開発課題は、焦電結晶 X 線発生器の高性能化 (高輝度化・安定化) である。一方ガンマ線・中性子分光計では、ガンマ線の主検出器として高純度ゲルマニウム (HPGe) 検出器を使用し、中性子検出器としてはリチウムガラスシンチレータとホウ素入りプラスチックシンチレータを組み合わせ使用して使用する。主な開発課題は、小型軽量の冷凍機を使用した高純度ゲルマニウム検出器の冷却システムの開発や、熱・熱外・高速中性子検出器および反同時計数用のプラスチックシンチレータの基礎的な動作特性評価である。

2. 主な研究成果

能動型蛍光 X 線分光計に用いる焦電結晶 X 線発生器の X 線発生特性評価を昨年度に引き続き行った。発生 X 線強度は、結晶の大きさ、結晶・ターゲット間距離、内部気体の圧力に依存することが分かり、それらの大まかな傾向が得られた。現状最適な条件下では、発生 X 線強度は約 2.5×10^7 cps であり、既存の焦電結晶 X 線発生器と比較して約 60 倍の強度が得られた (図 1 左)。また、月探査ミッションへの提案・検討のために、能動型蛍光 X 線分光計の設計案を作成し、元素組成の計測性能について PENELOPE コードを用いて計算で評価した。試料表面から 3 cm の距離に検出器を置き、X 線は入射角度 60 度で直径約 25 mm の領域に照射されると仮定した。X 線強度は実験で得られた値を使用した。計測試料として上部マントル物質である Dunite を仮定すると、Fe や Ca は比較的短時間で十分な統計精度が得られるが、Mg のような軽元素で時間がかかるため、Mo ターゲットの X 線発生器をさらに高輝度にする必要があることが分かった (図 1 右)。

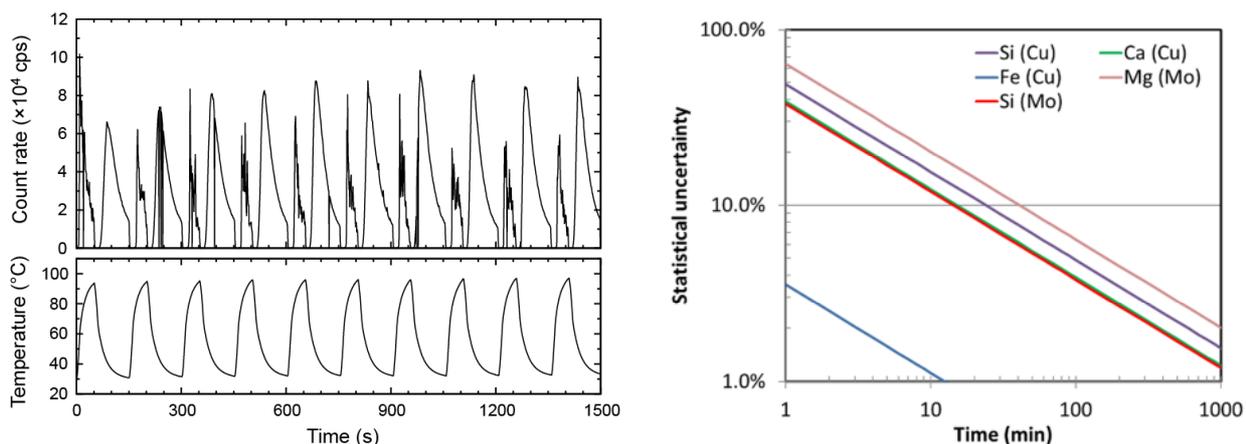


図 1. 左：X 線計数率と結晶温度の時間変化。この時の実験条件は、 LiTaO_3 結晶（直径 7.1 mm × 高さ 4 mm）、銅ターゲット（厚さ 10 μm ）、結晶・ターゲット間距離 12 mm、内部気体 N_2 （圧力 0.1 Pa）である。右：観測時間と統計精度の関係。括弧内は X 線発生器のターゲットを表す。

ガンマ線分光計では、動作時に HPGe 検出器の温度を 90K 以下に保つ必要がある。本年度は、小型軽量のスターリング冷凍機（Ricor K508）を使用した HPGe 検出器の真空・冷却システムの試作機を製作し（図 2）、HPGe 検出器を模した銅ダミーを用いて冷却試験を行った。軽量化のために容器の材質はアルミ合金とし、検出器の支持構造体には PEEK 樹脂を用いた。容器内の圧力を 10^{-3} Pa 以下にして冷凍機を動作させた結果、検出器ダミーの温度は 90K まで達しなかったが、検出器の支持構造体の伝導熱が想定より大きいことが分かったため、今後その部分を改善することで冷却が可能であるという見通しを得た。また、SiPM 読み出しによるプラスチックシンチレータの動作試験を行った。200×50×3 mm³のプラスチックシンチレータ側面 2 か所に 3×3 mm²の SiPM を取り付け ⁹⁰Sr のベータ線を照射したところ、シンチレーション光は観測できたが、照射位置によって信号の大きさに変化が見られた。これは、シンチレーション光子の SiPM への収集効率が小さいことに起因していると考えられるため、ライドガイドを用いることや、使用する SiPM の個数を増やすことなどを検討する必要がある。

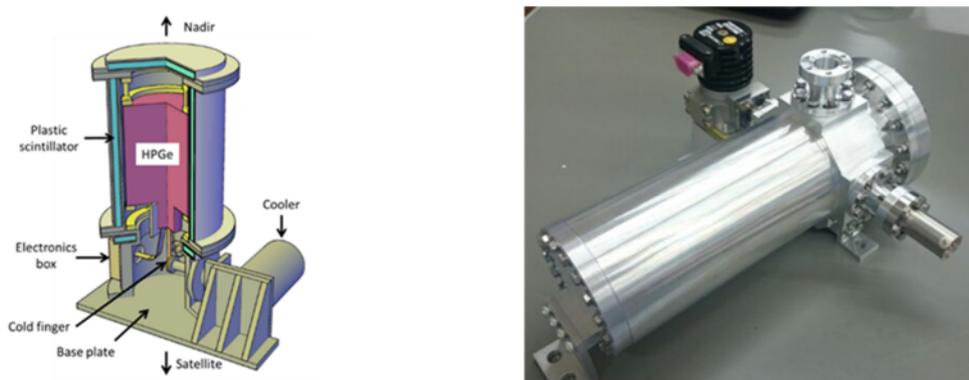


図 2. 左：ガンマ線分光計試作機の概要図。右：製作した試作機。

3. 共同研究者

長谷部 信行（先進理工学部・物理学科・教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

M. Naito, N. Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, M. Kuwako, Y. Oyama, E. Shibamura, Y. Amano, T. Ohta, K.J. Kim, J.A.M. Lopes, “Future lunar mission Active X-ray Spectrometer development: Surface roughness and geometry studies”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 788 (2015) 182-187.

4.2 総説・著書

N. Hasebe, H. Kusano, H. Nagaoka, “X-ray fluorescence spectroscopy for planetary exploration”, Adv. X-ray Chem. Anal., Japan 47 (2016) 59-77. (in Japanese)

4.3 講演

H. Kusano, N. Hasebe, H. Nagaoka, M. Naito, M. Mizone, Y. Amano, E. Shibamura, H. Kuno, “Current development status of an X-ray generator for X-ray fluorescence analysis on space mission”, International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2016), Tsukuba-Ibaraki, Japan, Jan. 18-21, 2016.

草野広樹, 長谷部信行, 長岡央, 柴村英道, 天野嘉春, 太田亨, Timothy Fagan, 久野治義, “月着陸探査に向けた能動型蛍光 X 線分光計”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日-22 日, 東京工業大学

草野広樹, 長谷部信行, 長岡央, 柴村英道, 天野嘉春, 太田亨, Timothy Fagan, 久野治義, “火星衛星探査に向けたガンマ線・中性子分光計”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日-22 日, 東京工業大学

草野広樹, 内藤雅之, 溝根美穂, 長岡央, 久野治義, 柴村英道, 長谷部信行, “焦電結晶 X 線源による発生 X 線強度の測定”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 13 日-16 日, 名古屋国際会議場

他、国際学会共著 17 件、国内学会共著 6 件。

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

2014 年 4 月~2016 年 3 月 応用物理学会 放射線分科会 幹事

2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 分科会企画シンポジウム 世話人・座長

5. 研究活動の課題と展望

能動型蛍光 X 線分光計は、軽元素 (Mg、Al、Si) 計測のための Mo ターゲット X 線発生器の高輝度化を、結晶サイズとターゲットおよび窓の厚さを最適化することで実施する。また、実際に X 線発生器と X 線検出器および回路系を備えたモデルを試作し、試料の分析による動作特性評価を行う。ガンマ線・中性子分光計では、HPGe 検出器の冷却・振動試験により、軽量の装置を実現する。中性子検出器は、実験と計算の両面からの検討により検出器の大きさや処理回路などを最適化する必要がある。将来の惑星探査ミッションへ搭載を提案することを踏まえて、小型化・軽量化を行った能動型蛍光 X 線分光計、ガンマ線・中性子分光計を実際に製作し、性能実証を進めていく。