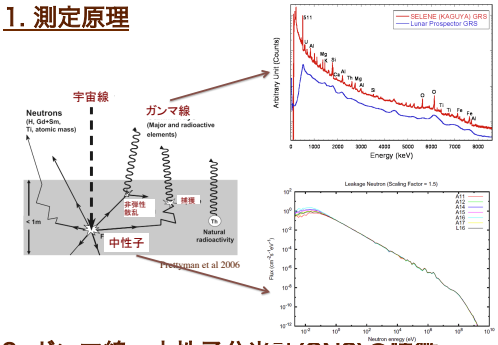
SELENE-2搭載を目指したその場元素分析のためのガンマ線・中性子分光計の開発

長谷部信行(早稲田大学)、三谷烈史(JAXA)、唐牛譲(早稲田大学)、小林進悟(JAXA)、他GNSチーム　E-mail: mitani@planeta.sci.isas.jaxa.jp

月の起源と進化を理解するためには月表層の物質組成は有用な情報であり、さらに月深部物質の情報が得られると、月の三次元的な物質分布を推定することにつながり、月起源に関わる月バルク組成や月初期進化を解明する上で重要なマグマオーシャンとその後の月火山活動のメカニズムに対して制約を与えることができる。今後、月深部物質の情報を獲得するため、月深部が露出していると考えられている特徴的な地点（クレータ中央丘、SPA、溶岩流上）、あるいはこれまで着陸探査の行なわれておらず、月の形成・進化を考える上で重要と思われる新しい地域（Apennine Bench Formation やコーン・ドーム、コペルニクスクレータの内部など）に着陸し、ガンマ線・中性子分光計（GNS）を用いて表面のレゴリスや岩石を調査し、元素分析を行なうことを目指す。

1. 測定原理



月ガンマ線スペクトルは連続ガンマ線成分とラインガンマ線成分がある（左図はかぐや搭載ガンマ線分光計で観測されたスペクトル）。ラインガンマ線は月面の物質の原子核の脱励起に伴い発生したものであり、そのエネルギーは元素の種類を示し、その強度は元素の濃度と関係するため、ラインガンマ線ピークを解析することで月レゴリスの元素分析が可能である。月表面で観測されるガンマ線スペクトル(0～3MeV)は、月レゴリスの厚み約0～30 g/cm^2（レゴリス密度が1.7g/cm^{3}とすれば深さ0～18cm）の平均的な元素組成を示している

熱中性子（～0.4eV）、熱外中性子（0.4eV～）の強度比を測定することでレゴリスのFeとTiの総量を見積もることができる。また熱外中性子の強度はレゴリスに含まれる水の量に非常に敏感であり、実際にルナープロスペクタの中性子分光計は、熱外中性子強度を測定することで月極域に水の存在が指摘している。中性子スペクトルは、深さ約0～200g/cm^2(同0～118cm)の元素組成を反映する。SELENE-2ではローバ搭載の中性子分光計で熱・熱外中性子強度を測定し、レゴリスのFe、Tiの総量を求め、レゴリスを形成したベッドロックの岩石種を判定する。また漏洩中性子強度は、ガンマ線分光計の元素存在量の算出時の補助情報として用い、ガンマ線分光計の元素定量のバックアップをする

2. ガンマ線・中性子分光計(GNS)の特徴

1) 自然放射性元素（K, Th, U）の濃度測定が非常に容易に行えること…(ガンマ)
2) 主要元素の分析が可能なこと…(ガンマ)
3) 約１m厚のバルクのレゴリスのFe+Ti量の推定ができる…(中性子)
4) サンプルの切断・研磨が必要なく、バルクの組成を推定できること…(ガンマ・中性子)

3. 搭載、運用方針

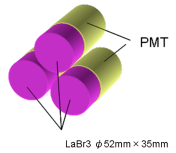
表面移動探査機(ローバ)に搭載し、常に測定モードを保つことにする。ローバで移動しながら着陸点周辺のレゴリスの元素組成分布の測定をガンマ線分光計と中性子分光計を用いて行う。

4. GNSセンサ構成

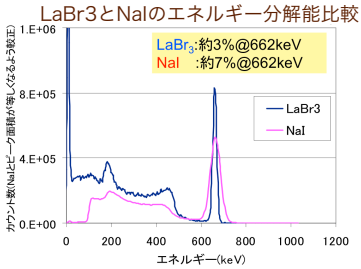
	主検出器	測定対象	目的
GNS-CT	CdTe半導体のアレイ・スタック化	ガンマ線 100~1000 keV	元素同定とその定量
GNS-LB3	LaBr3シンチレータ3台	ガンマ線 500~3000 keV	元素同定とその定量
GNS-NS	Si+LiF Si+LiF+Cd	熱中性子、熱外中性子	レゴリスを構成する岩石種別 CT, LB3の計測サポート

ガンマ線検出器：（選定基準：エネルギー分解能、高温動作可能）
動作環境が月面昼間という高温環境(～120℃)であるため、高温での動作実績がある結晶シンチレータをメインに据えている。結晶シンチレータの中でもエネルギー分解能に優れた**$LaBr_3$**結晶を検討している。
低エネルギー側であれば、CdTe半導体により優れたエネルギー分解能を達成できる可能性があるが、高温側の実績はないので基礎特性を取得中である。

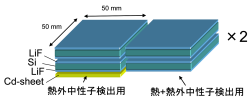
GNS-LB3



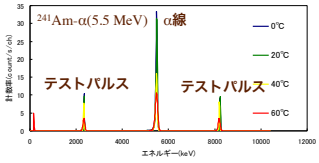
LaBr3とNaIのエネルギー分解能比較



中性子検出器：
^{6}Li(n,t)^{4}He反応を利用し、中性子と^{6}Liで生じる^{4}He、トリチウムをシリコン半導体で計数する。同種のセンサを片方だけCdシートで熱中性子をカットすることで熱中性子、熱外中性子を識別する。



シリコン検出器(48 mm各、280μm厚)の高温での性能



60℃でも200 keV程度のthreshold を確保できた

5. 感度

ガンマ線の計数を10%の精度で測定するのに必要な計測時間を見積もった。
$LaBr_3$は検出器固有のバックグラウンドが高く、特にK付近に影響が大きい。そこで、打上げ前に内在バックグラウンドを精度良く計測しておく必要がある。この必要時間と、月面での必要観測時間の関係を下図に示す。

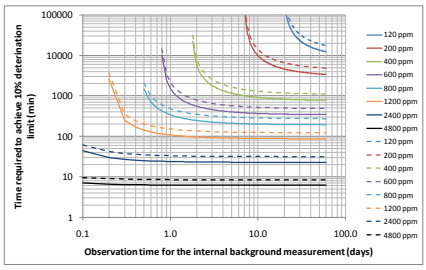


図　内部バックグランド測定時間と決定限界（精度10%）に到達するまでの時間との関係を月面のカリウム濃度ごとに示したもの。LaBr3の体積は226cc (~ 1200 g)とした。またエネルギー分解能2.8%（実線）、4.0%（点線）、連続ガンマ線バックグランドは月面強度（太陽活動最小期Φ324、Masarik and Reedy 1994）の2倍と仮定した。

⇒ 打上げ前に15日間程度、内在バックグラウンドを計測する必要がある

■ 元素を相対誤差10%で定量するのに必要な時間
（エネルギー分解能 4%の場合、内在バックグラウンドを考慮）

K (1461 keV) Ver. 100820	A15 KREEP basalt (5000 ppm)	A16 regolith (934 ppm)	Dho489 (300 ppm)
観測時間	7 min	196 min	2.7 day

Th (2615 keV) Ver. 100820	A15 KREEP basalt (11.8 ppm)	A16 regolith (2.0 ppm)	Dho489 (0.063 ppm)
観測時間	5 min	132 min	—

まとめ

月惑星用ローバー搭載に向け、月ガンマ線(0.1～8MeV)を狙った小型ガンマ線・中性子検出器の開発を進めている
ガンマ線分光計により自然放射性元素、主要元素の測定が可能であり、岩石の加工無しで、バルク組成分析が実現できる。
中性子検出器によりレゴリスのFe+Ti量の推定ができる

◆ 冷凍機不要で、良いエネルギー分解能を実現できる$LaBr_3$シンチレータ(500-8000keV)とCdTe半導体(100-1000keV)の開発を進めている
◆ 搭載を想定した検出器の性能と合わせ、シミュレーションを実施し、最終形状を検討している。
◆ 月面使用に向け、読み出し装置を含めて高温側での特性評価を行っている。