

GEO 環境電子線劣化によるフッ素系絶縁材料の二次電子放出係数特性及び陽子線誘起二次電子計測システムの構築

小森 あかね*, 永田 浩二郎, 三宅 弘晃, 田中 康寛, 羽倉 尚人 (東京都市大学)

Secondary Electron Emission Yield Characteristics of Fluorinated Polymer by Electron Beam Irradiation in GEO Environment and Construction of Proton Beam Induced Secondary Electron Measurement System

KOMORI Akane*, NAGATA Kojiro, MIYAKE Hiroaki, TANAKA Yasuhiro, HAGURA Naoto (Tokyo City University)

Abstract

Charging and discharging by electron beam and proton beam account for most of the causes of spacecraft inoperability, and charging analysis at the design stage is required. This time, we measured the secondary electron emission yield (SEEY) of the fluorinated polymer when it was irradiated with electron beam equivalent to the operation on GEO, and investigated the change in SEEY before and after the irradiation. In addition, since we are currently devising a SEEY measurement system by proton beam, we will report on future research plans.

1 はじめに

通信衛星や気象衛星など宇宙機が運用されている宇宙空間は非常に温度変化の激しい環境であり、そのような環境下で搭載機器を正常に作動させるためには、宇宙機内の温度を一定に保つ必要がある。そのため、宇宙機の表面は MLI (Multi-Layer Insulation) と呼ばれる、多数の絶縁フィルムから成る熱制御材料で覆われている。また、太陽光反射材やワイヤーハーネスの被覆材など、宇宙機の表面には多くの絶縁材料が使われている。しかし、宇宙空間には高エネルギー荷電粒子やプラズマなどが存在し、これらに宇宙機が曝されることによって表面材料が帯電していく。帯電が進行していくと、表面の絶縁材料や帯電特性の異なる材料間で電位差が発生し、静電放電 (Electro Static Discharge: ESD) が発生する。ESD は材料の破壊や機器の故障の原因とされ、宇宙機の運用不能を招く可能性がある。そのため、設計段階から帯電解析を実施し、帯電・放電を考慮した材料選定が必要であり、本研究では帯電解析に必要な電気物性値の 1 つである二次電子放出係数 (Secondary Electron Emission Yield: SEEY) σ に着目して研究を行っている。

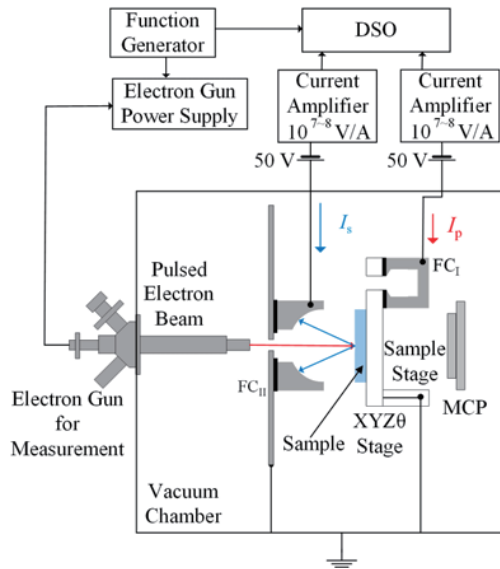
また、宇宙機は運用開始時から運用終了時まで常に宇宙環境に曝され続け、表面材料が劣化する。SEEY は材料の劣化に伴い変化する可能性があるため、宇宙機の長期運用には宇宙環境に曝された後の SEEY 特性を考慮した解析や設計が必要となる。今回は、GEO 環境で 1,3 年間の運用に相当す

る電子線を材料に照射した際の SEEY 測定を行い、未照射時の測定結果と比較・考察を行ったので報告をする。

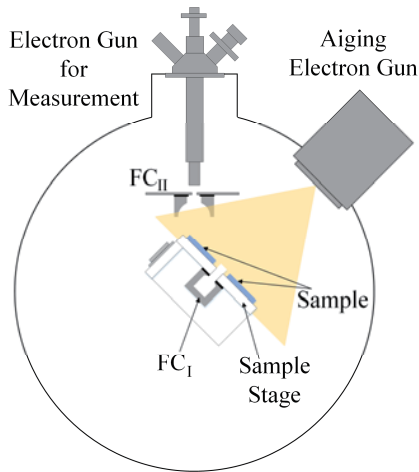
さらに、宇宙環境では電子のみならず陽子も主要構成要素であり、特に今後月探査が推進される環境では、陽子による二次電子も考慮していく必要がある。そこで当研究グループでは陽子線による二次電子計測が実施可能な装置の構築検討を行ったので合わせて報告をする。

2 電子線による GEO 模擬環境照射と二次電子測定装置、及び測定条件

図 1 に照射および測定システムの概略図を示す。(a) は SEEY 測定システムの概略図、(b) は電子線照射システムの概略図を示している。真空チャンバーには測定用電子銃 (Kimball physics 社製: EGG-3101) が取り付けられており、試料にパルス状の電子線 (パルス幅 0.5 ms、一次照射電子エネルギー(以下、一次電子) $E_p = 100 \text{ eV} \sim 10 \text{ keV}$) を照射することが可能である。試料へ入射する一次電子は、試料台に取り付けられた一次電子収集用ファラデーカップ FC_I を用いて直接観測される。また、二次電子収集用ファラデーカップ FC_{II} は試料台の試料設置面から 1 mm の位置に設置されており、電子線は FC_{II} の中央に設けられた照射口を通して試料に照射され、この時に試料から放出された二次電子は FC_{II} によって観測される。 FC_I および FC_{II} からの出力信号はカレントアンプ (Kethley 社製 428 Current amplifier) を通して電圧



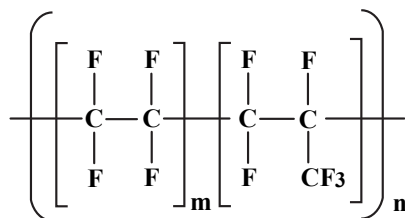
(a) SEEY 測定システム



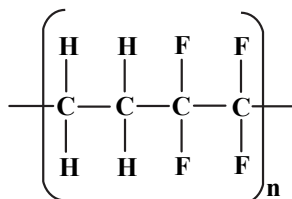
(b) 電子線照射システム

図1 測定および照射システム概略図

Fig.1 Schematic diagram of measurement and irradiation system



(a) FEP



(b) ETFE

図2 測定試料の分子構造

Fig.2 Molecular structure of measurement samples

信号に変換・増幅され、それぞれ I_p 、 I_s としてデジタルオシロスコープ (LeCroy 社製 104MXs) で観測される。本研究では、 I_p 、 I_s から (1) 式を用いて σ を算出した。

$$\sigma = \frac{I_s}{I_p} \quad (1)$$

また、真空チャンバーには拡散型の劣化用電子銃 (オメガトロン社製 OME-0502BW) が取り付けられている。試料台を取り付けた XYZθ ステージを操作し、試料台の向きを変えることで、劣化用電子線照射から SEEY 測定までを真空中で継続して行うことが可能である。

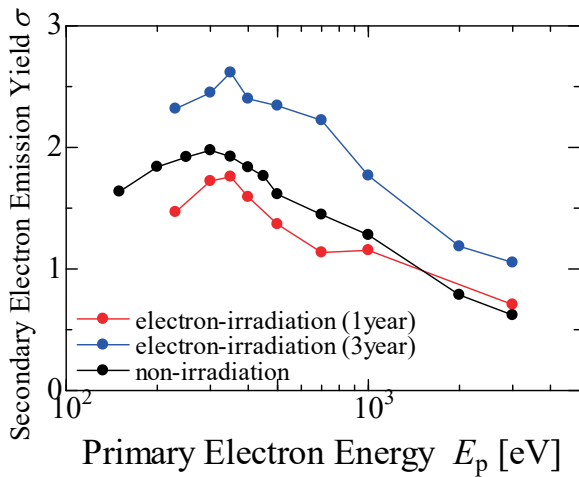
測定試料には、公称厚さ 25 μm の FEP (ダイキン社製) と ETFE (AGC 社製) を用いた。図2にそれぞれの分子構造を示す。試料の寸法は 50 mm \times 50 mm であり、電子線照射前にエタノールとアセトンで超音波洗浄を施している。測定エネルギーは、未照射試料の場合 150 ~ 3000 eV、電子線照射試料の場合 230 ~ 3000 eV とした。また、GEO 上で 1,3 年運用されたと想定し、加速エネルギー 50 keV、照射電流密度 79 nA/cm²、照射時間は 1 年分の場合 30 min、3 年分の場合 90min で試料に電子線を照射した。SEEY の測定は照射終了から 30 min 後に開始し、各測定エネルギーにおいて 5 回測定した。

3 FEP 及び ETFE における二次電子測定結果

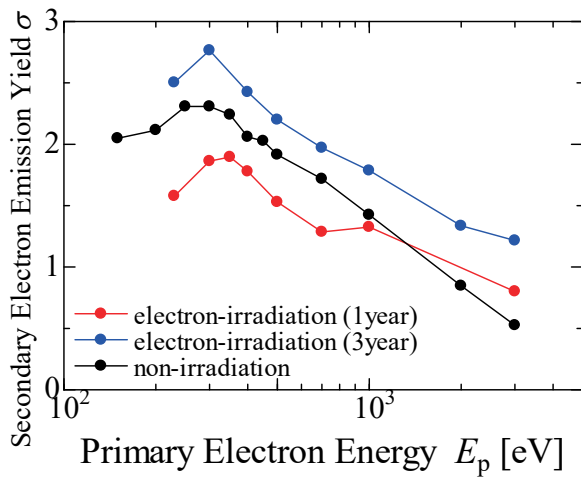
図3に未照射試料及び電子線照射試料の測定結果を示す。同図(a)はFEPの測定結果、(b)はETFEの測定結果である。尚、同図の横軸は一次電子エネルギー E_p [eV]、縦軸はSEEY σ であり、プロットは5回測定の平均値を示している。同図より、両試料ともに未照射時と比較して、1年分照射時に σ は低下、3年分照射時に σ は上昇していることがわかる。また、1年分照射については、特に 1000 eV 以下のエネルギー帯で σ が下降しており、ETFEの方がFEPよりも減少率大きい。一方で、3年分照射については全エネルギー帯において未照射時よりも σ が上昇しており、FEPの方がETFEよりも増加率大きいといえる。また、測定結果から算出した σ のピーク値を表1に示す。表より、両試料ともにピーク値は 300 ~ 350 eV 付近で大きな変化は確認されなかった。

3.1 測定結果の考察及び表面状態の確認

前節より、両試料ともに GEO 環境 1 年分の電子線照射によって σ が低下した事が分かった。これは、電子線照射により架橋反応が発生し、電子が放出されにくくなったことが考えられる。特に、ETFE においてはその分子鎖の主構造としてポリエチレン (以下、PE) を含有しており、PE は架橋



(a) FEP の測定結果



(b) ETFE の測定結果

図3 未照射及び電子線照射試料の測定結果

Fig.3 Measurement results of non-irradiation and electron irradiation samples

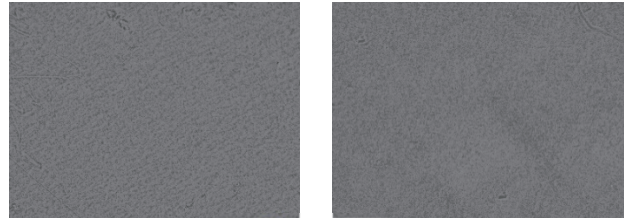
反応を起こしやすいことから、 σ の低下傾向がFEPより顕著に出たのではないかと推察する[1]。

一方で、3年分照射によってSEEYが上昇した原因は、両試料に含有されているPTFE部(CとFで構成。図2(a)ではm項、(b)では右側n項の部分)による物と考えられる。PTFEは電子線照射によって分解反応が起きやすい。更にETFEのPE部においても、過度に電子線が照射されると架橋反応から一転して、分子鎖切断が発生し始める。以上の分子鎖切断反応によりラジカルが生成され、電子放出し易い分子構造に変化されたため、 σ は上昇したと考える[2]。

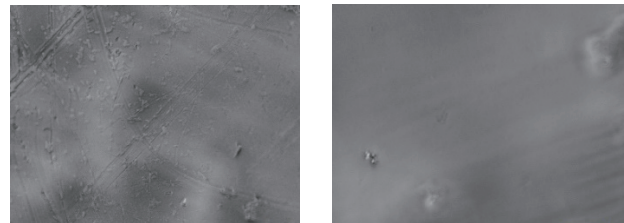
また、照射前後での試料の表面状態において、デジタルマイクロスコープ(キーエンス社製VHX 7000)を用いて観察を行った。図4に倍率2000倍で観測したFEPとETFEの照射前後での試料の表面状態を示す。同図より、FEPでは電子線照射によって試料表面に突起物が確認された。また、照射年数の増加に伴い試料表面が粗くなっ

表1 FEPとETFEのピーク値
Table 1 Peak values of FEP and ETFE

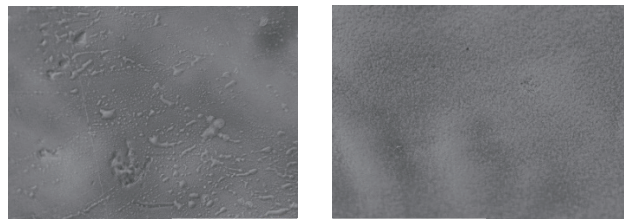
	FEP		ETFE	
	E_{max}	σ_{max}	E_{max}	σ_{max}
未照射	350 eV	1.976	300 eV	2.308
電子線照射1年分	350 eV	1.759	350 eV	1.896
電子線照射3年分	350 eV	2.626	300 eV	2.765



(a) 未照射



(b) 電子線照射1年分



(c) 電子線照射3年分

(A) FEPの試料表面状態 (B) ETFEの試料表面状

図4 電子線照射前後での試料表面状態

Fig.4 Sample surface before and after electron beam irradiation in FEP and ETFE

ていることがわかる。一方でETFEの場合は、1年分照射では未照射に比べて表面が滑らかになっており、3年分照射では再度未照射状態に近づいていることが確認できる。これより、電子線照射による表面状態の変化がSEEYに影響を与えた可能性も考えられる。

3.2 GEO環境劣化材料のSEEY測定の速報結果と今後の課題

今回、GEO環境で1年および3年の運用に想定した線量の電子線を試料へ照射した。その結果、1年分照射ではFEPとETFEともに架橋反応によってSEEYが低下した。3年分照射ではPTFEの分解が進んだことで両試料ともにSEEYは上昇した。また、電子線照射による表面状態の変化がSEEYに影響を与えた可能性も考えられる。

今後は3年以上の長期運用相当量の電子線照射試料の測定を行うとともに、電子線照射試料にお

ける表面状態についてもより詳細に調査していく予定である。

4 陽子線誘起二次電子計測システムの構築

本章では陽子線誘起の二次電子計測システム構築に際しての現在の検討状況について説明をする。

4.1 測定システムの概要と課題

現在考案中である陽子線誘起 SEEY は、図 1 に示した当研究室における SEEY 測定システムを参考に構築する予定である。陽子線発生源には、東京都市大学原子力研究所の 1.7 MV ペレトロン・タンデム加速器を使用する。図 5 にタンデム加速器の画像を示す[3]。

測定システムの構築にあたり、大きな課題が現在 2 つ存在する。まず、陽子線誘起の SEEY は、約 50 ~ 150 keV 付近にピーク値があると推測されるが、使用予定のタンデム加速器の照射範囲は数 100 keV ~ 3.4 MeV である[4]。そのため、測定可能エネルギーの下限を拡張する必要がある。また、絶縁材料の帯電抑制として入射陽子線をパルス照射する必要がある。



図 5 1.7MV ペレトロン・タンデム加速器

Fig.5 1.7MV Pelletron Tandem Accelerator

4.2 測定可能エネルギー下限の拡張

前述したように、使用予定のタンデム加速器では、数 100 keV ~ 3.4 MeV のエネルギーでの照射が可能であるため、約 500 keV までについては加速器側でエネルギーを落とすことにより測定を行う。ピーク値近傍である約 500 keV 以下のエネルギーについては、減衰材を用いることでエネルギーの下限の拡張を考えている。図 6 に、減衰材とエネルギー減衰の概略図を示す。減衰材は、35 μm のアルミ箔に 1.5 μm のアルミ箔を 5 枚重ねる形状であり、この減衰材に 2 MeV で陽子線を照射することで、透過後の陽子線を求める加速エネルギーにまで減衰させることが可能である。例として、最も薄い 35 μm を透過した陽子線は約 590 keV、最も厚い 42.5 μm を透過した陽子線は約 40 keV ま

で減衰される。

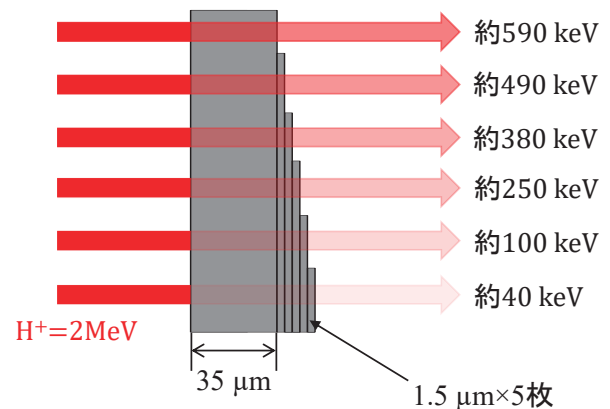


図 6 減衰材とエネルギー減衰の概略図

Fig.6 Schematic diagram of damping material and energy damping

4.3 測定入射陽子線のパルス化

パルス化方法として、シャッターを用いた機構と磁界による偏向を組合せたシステムを検討している。まず、ビームラインから放出された陽子線を電磁石によって偏向させておく。その後、電磁石の磁界を解除して陽子線を試料に照射し、シャッターを用いて陽子線を遮断することでパルス化を実現させる。なお、シャッターにはカメラで使われているフォーカルプレーンシャッターを用いることを考えている。

4.4 陽子線誘起二次電子測定システム構築のまとめ

陽子線誘起二次電子計測システムにおいて、2 つの課題が存在した。エネルギーの下限の拡張については減衰材を用いることで、入射陽子線のパルス化についてはシャッター機構と磁界での偏向を組み合わせることで解決した。

将来展望としては、構築予定のシステムについてさらなる検討を行い、実際に組み上げて測定を行いたいと考えている。

文 献

- [1] 辻 良夫,「電子線照射によるポリエチレンの架橋」, 日本原子力学会誌, 21(2), pp.184-190, 1979 年
- [2] 山岡 仁史,「放射線分解性高分子材料」. 繊維学会誌, 47 巻, 9 号, pp.504-509, 1991 年
- [3] TCU-Tandem,
http://www.nuc.tcu.ac.jp/nhagura/box/TCU-Tandem_Pamphlet_201801.pdf
- [4] A.K. Fazlul Haque, M.M. Haque, Sanjida Sultana, M. Atiqur R. Patoary, M. Sohag Hossain, M.Maaza, M.Alfaz Uddin, “Proton – induced secondary electron emission from elemental solids over the energy domain 1 keV – 1000 MeV”, Result in Physics 15 (2019) 102519