

電子線照射フッ素系絶縁材料中の電荷蓄積特性

三好 雅仁*, 聖生 航大, 土方 規実雄, 三宅 弘晃, 田中 康寛(東京都市大学)

Charge Accumulation Characteristics in Electron Beam Irradiated Fluorine Insulating Material Masahito Miyoshi*, Kouta Seiryu, Kimio Hijikata, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

Abstract

The spacecraft is covered with insulating materials such as multilayer insulation and sunlight reflector. When exposed to high-energy charged particles on orbit, charging and discharging are caused, which may lead to operational abnormality. For the purpose of grasping charged properties, in this study, an electron beam irradiation test with different irradiation current density was carried out using OSR and fluorine insulating material which is a wire harness material. As a result, it was found that charge accumulation behaviors in the material are different depending on irradiation current density. We also reported the relationship between deterioration progress of materials due to repeated irradiation and charge accumulation.

Key Word: Fluorine Insulating Material, Electron Beam irradiation, OSR, Space charge, Charge Accumulation

1. はじめに

人工衛星などの宇宙機は温度変化の激しい宇宙環境下で運用されているため、機内の温度を一定に保つ必要がある。そこで宇宙機表面には、ポリイミド系絶縁材料を用いた多層断熱材(Multi-Layer Insulation)やフッ素系絶縁材料を用いた太陽光反射材 OSR(Optical Solar Reflector)などが覆われている。しかし、宇宙機は、電子・陽子等の高エネルギー荷電粒子に曝されているため、宇宙機表面で帯電し、帯電量が大きくなると放電事故が引き起こされる。帯電・放電現象により搭載機器の誤作動や故障を引き起こし、宇宙機の運用不能に陥る危険性もある[1]。したがって、宇宙機設計において、宇宙機表面材料の電気絶縁特性を把握することは重要となる。また、宇宙機の信頼性の向上のために宇宙環境に優れる材料の開発が重要となっている。これまでの研究では、圧電素子誘起圧力波(PIPWP)法やパルス静電応力(PEA)法[2, 3]を用いて電子線照射中における絶縁材料の内部帯電現象の解明を試みてきた。しかし、これまでの研究では電子線の照射電流密度が比較的高い条件で行われており、電子線の照射電流密度による電荷蓄積の依存性について検討していない。そこで本研究では、OSR やワイヤーハーネスなどの材料であるフッ素系絶縁材料に着目し、複数の電流密度において電子線照射試験を行い、照射電流密度による空間電荷蓄積量・挙動の検討した。さらに、電子線の繰り返し照射による材料の劣化進度と電荷蓄積との関連についても検討を行ったので以下に報告する。

2. PEA 法原理

図1にパルス静電応力法の原理図を示す。電極で挟んだ試料にパルス電界を加えることにより、空間電荷の蓄積した各位置で電荷密度に比例したパルス静電応力が瞬間的に発生し、試料に蓄積している電荷が微小変位し、圧力波が発生する。これが接地電極を伝搬して圧電センサー素子に到達し、電圧信号に変換される。このとき、圧電素子に到達する圧力波は試料内の電荷蓄積位置(=圧力波発生位置)によって到達時間が異なるため、検出する信号の時間差より空間電荷分布を、また信号強度は蓄積電荷量に比例する為、空間電荷蓄積量の分布を取得する事が出来る。圧電素子より出力された電気信号は、増幅器で増幅して、オシロスコープで計測する。また、測定結果は電圧信号波

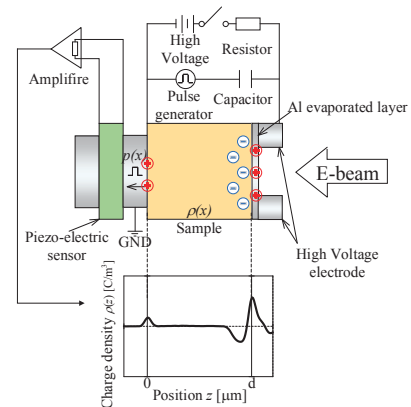


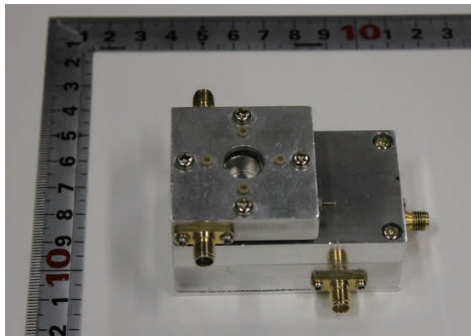
図1 PEA 法原理図

形であるため、電荷量に校正し空間電荷分布を得ている。

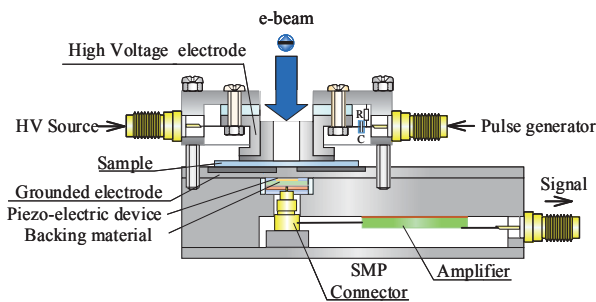
3. 実験装置

3.1 空間電荷測定装置

図 2 に PEA 法を用いた空間電荷測定装置の概略図を示す。本装置は荷電粒子を試料に照射するため、高電圧電極に照射孔を設けており、照射下での空間電荷分布計測を可能としている。装置は縦 60 mm、横 40 mm、高さ 25 mm と従来の装置より小型であり、比較的小さなチャンバーにも対応できるようになっている。圧電素子には厚さ 9 μm のポリフッ化ビニリデン (Poly Vinylidene Fluoride: PVDF) を使用しており、位置分解能は約 10 μm である。



(a)写真

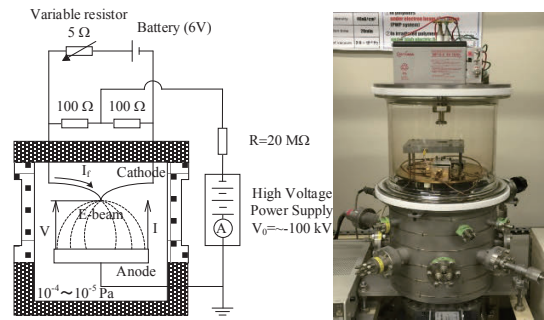


(b)概略図

図 2 小型空間電荷測定装置

3.2 電子線照射装置

図 3 に電子線照射用真空チャンバーの概略図を示す。真空排気時は、大気圧から 10^{-2} Pa まではロータリーポンプ、 10^{-2} Pa 以下ではターボ分子ポンプを用いる事により、チャンバー内圧力を 10^{-5} Pa まで排気可能となっている。電子線照射時は、陰極に接続されたフィラメントに直流電源を用いて電流 I_f を流すことで加熱し、同時に電子加速用高電圧 $V(<0)$ を陰極に印加すると、陰極から、接地した陽極に向かって電子が照射される。このとき、陰極と接地電極間の電位差が電子の加速電圧 V となり、回路を流れる電流が電子線の電流 I となる。このシステムを用いることで、本装置では加速エネルギーが 100 keV までの電子線照射が可能となっている。



(a)概略図



(b)写真

図 3 電子線照射用真空チャンバー

4. 測定試料および実験条件

測定試料には、照射面に Al 蒸着が施された公称厚さ 100 μm の ETFE および FEP フィルムを用いた。加速エネルギーは 40、60 keV、照射電流密度は 5、10、20 nA/cm^2 で電子線を 2×10^{-4} Pa 以下の真空環境下で照射し、電子線照射中に 20 分、照射停止後 20 分間で空間電荷分布測定を行った。また、測定間隔はいずれも 30 秒間隔である。

5. 測定結果および考察

5.1 電子線照射絶縁材料中の空間電荷分布

図 4、5 に電子線照射 ETFE、FEP の空間電荷分布測定結果を示す。同図中の(A)、(B)はそれぞれ加速エネルギー 40 keV、60 keV を、(a)~(c)はそれぞれ照射電流密度 5 nA/cm^2 、10 nA/cm^2 、20 nA/cm^2 の電子線照射時の空間電荷分布測定結果を示している。また、同図中の赤線、緑線、青線、橙線はそれぞれ電子線照射直後、最大負電荷蓄積時、照射終了直前時、照射終了 20 分後における波形である。図中破線は、(1)式に示す Kazt-Penfold の実験式より算出した電子の最大飛程である。(1)式中、 E は加速エネルギー [MeV]、 ρ は密度 [g/cm^3] であり、 R は最大飛程 [μm] を表している。

$$R = \frac{0.412}{\rho} \times E^{1.26-0.00954 \ln E} \quad (1)$$

また、電子線は図の右側から照射しており、試料/電極界面の正電荷ピークは試料内部の蓄積負電荷による誘導電荷である。同図より各試料内の負電荷蓄積部が(1)式で算出した電子の最大飛程付近に多量に蓄積していることが分かる。ETFE および FEP のいずれの結果においても電子線照射により計算飛程近傍に多量の負電荷が蓄積するが、蓄積する電荷量は時間経過とともに飽和し、さらに電子線照射中にも関わらず、減少している。試料内の負電荷分布は、ETFE においては図 4 より 40 keV 照射時には、全て

の電流密度において、電子の計算飛程極近傍に負電荷蓄積ピークが観察される。

60 keV 照射時においては、照射開始初期においては 40keV 同様に最大飛程の照射側手前の位置に負電荷蓄積のピークが観察され、5nA/cm²では計算飛程を超えて照射面から 40.9 μm の位置に負電荷ピークが観察されるが、10、20nA/cm² 照射においては計算飛程の手前 24.7 μm の位置に負電荷ピークが観察され、照射電流密度によって負電荷蓄積分布が異なる現象が得られた。また、この電荷分布は照射時間の経過とともに、計算飛程を中止に 2つのピークに分離していく事が確認される。

FEP においては、図 5 より 40 keV 照射時は全ての電流密度において、計算飛程近傍であるおよそ 16.7 μm に負電荷蓄積のピークが観察される。

また、60 keV 照射時においては、計算飛程の位置を中心に 9.2 μm 程度に渡って分布している事が分る。

5.2 各試料における蓄積総電荷量の経時変化

前節の図 4、5 より ETFE、FEP においては、電子線照射中に内部に負電荷蓄積した後、減少する傾向であることが観測された。この現象を明確にするために、図 6、7 に図 4、5 中の各試料の試料内部の負電荷蓄積部の積分電荷量の経時変化を示す。これらは、図 4、5 の試料内負電荷蓄積部の積

分量である。

図 6(A)より ETFE の 40 keV 照射時において、照射電流密度 5 nA/cm² では電子線照射開始 5 分で -0.09 mC/m² で飽和し、その後照射中にも関わらず蓄積電荷量がわずかではあるが減少していることが分かる。

照射電流密度 10 nA/cm² では、電子線照射により照射開始 2 分 30 秒で -0.12 mC/m² まで蓄積し、照射開始 5 分に蓄積電荷量が -0.10 mC/m² まで減少し、照射開始 17 分 30 秒で -0.12 mC/m² まで蓄積した後に飽和していることが分かる。

20 nA/cm² では、照射開始 1 分程度で飽和に達し、その後約 -0.065 mC/m² で一定値を取っていることが分かる。

更に同図(B)より 60 keV 照射時においては、5 nA/cm² では照射開始 4 分 30 秒で -0.17 mC/m² まで蓄積し、その後照射後 10 分 30 秒で -0.13 mC/m² まで一度減少するものの、初期飽和値まで蓄積し飽和していることが分かる。

10、20 nA/cm² では共に同様の傾向が得られており、照射開始 1 分でおおよそ -0.22 mC/m² まで蓄積し、その後照射中にもかかわらず減少する物の、10 分には -0.18 mC/m² と一定値を取っている。以上より、電子線の照射電流密度が大きい方が、電子線照射

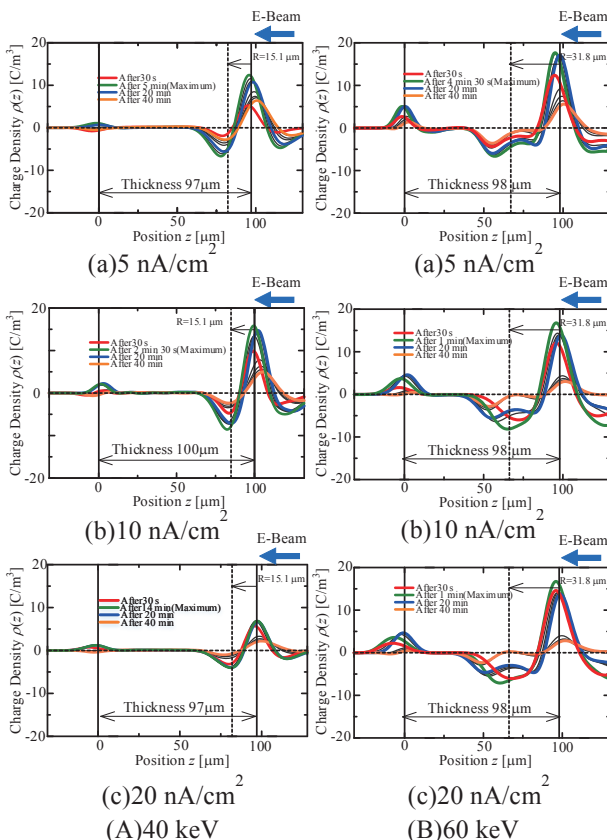


図 4 電子線照射 ETFE の空間電荷分布測定結果

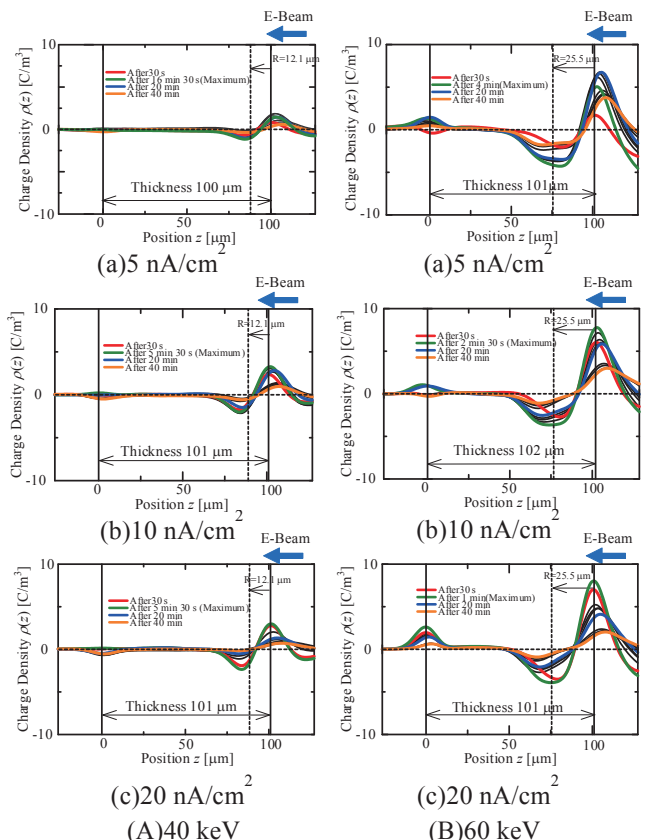


図 5 電子線照射 FEP の空間電荷分布測定結果

後の蓄積電荷量の減衰も早いく、減少量も大きい傾向にある。

図 7(A)より、FEP における 40 keV 照射時において 5、10 nA/cm² では図 5 の電荷蓄積分布からも分るように、蓄積量が少なかったため、積分電荷量の経時変化としては明確な挙動が得られなかったが、20 nA/cm² 照射時においては、照射開始 5 分 30 秒で -0.03 mC/m² まで蓄積し、その後徐々に減少し、照射開始 20 分で -0.01 mC/m² まで減少している。

同図(B)の 60 keV 照射時においては、5 nA/cm² では、電子線照射により照射開始 4 分で -0.12 mC/m² まで蓄積し飽和している。10、20 nA/cm² では、飽和に達するまでの時間は、それぞれ照射開始 2 分 30 秒と 1 分で -0.10 mC/m² まで蓄積し、その後照射中に徐々に蓄積量が減少し、照射開始 20 分でそれぞれ -0.07、-0.05 mC/m² まで減少していることが分かる。これより電子線の照射電流密度が大きいほど、電子線照射中の蓄積電荷量の減衰も早い傾向にある事が分かる。

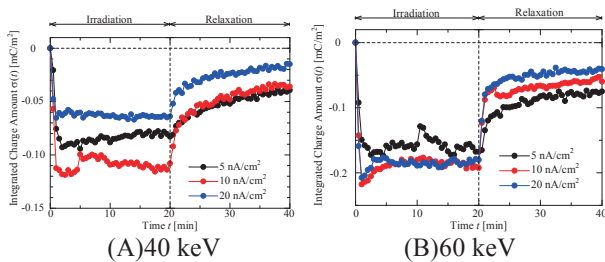


図 6 電子線照射 ETFE の蓄積電荷量の経時変化

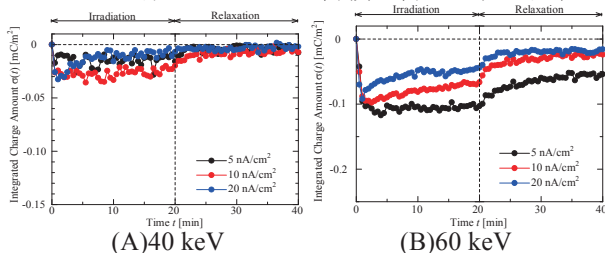


図 7 電子線照射 FEP の蓄積電荷量の経時変化

5.3 照射中における負電荷蓄積の増減

これまでに示した実験結果に基づき、ETFE 及び FEP 内に蓄積する電子の挙動を考察する。まず、試料内に侵入する電子はエネルギーを失いながら、ある侵入深さまで到達するが、本測定によって観察された電荷蓄積位置は計算飛程の近傍となり、電子線の加速エネルギーに依存する。試料内の蓄積負電荷量は照射中に飽和に達するが、これは蓄積した電荷により発生する電界により、照射面の試料内へ注入された電子が電極側に引き戻され、注入電子量と平衡状態になっているものと推察する。

また本試験では飽和に達したのちに、ETFE にお 60 keV 照射時に蓄積電荷量が飽和(本試験の場合-

0.2 mC/m²)に達した後、電荷量が徐々に減少していき、FEP においても、40、60 keV 両照射条件下で蓄積電荷電荷量が照射中に徐々に減少していき、その減少量は照射電流密度が大きい程大きく観察されている。これは電子線照射中に、試料の導電率が放射線誘起伝導 (RIC: Radiation Induced Conductivity)により変化した為と考えられる。RICにより電子が通過した領域の導電率が上昇し、同じ電界においても、電極側に引き戻される電荷の量が増加してしまったために、飽和状態の後に総電荷量の減少が観測されたと考えられる。RICが発生する原因として、電子線照射により試料の構造の変化が考えられる。すなわち、電子のエネルギーが原子間の結合を切断し、ラジカルなどを発生させて、分子構造を変化させたために導電率が変化したと考えられる。

5.4 照射時間による電荷蓄積特性の変化

前節までに、電子線照射により材料の導電率が変化する可能性について示した。電子線を繰り返し照射によりことにより、その減少が顕現化し、電荷蓄積特性も大きく変化する事も考えられる。これを確認するために、電子線照射を複数回実施する繰り返し照射試験を行った。

照射条件は、加速エネルギー及び電流密度は 4 章に示したものと同様である。繰り返し条件は、20 分照射及びそれに引き続き照射終了後 20 分間緩和を設けた計 40 分を 1 サイクルとし、5 nA/cm² で 3 サイクル、10、20 nA/cm² で 2 サイクル実施した。

図 7、図 8 に繰り返し電子線照射した際の ETFE および FEP の試料内蓄積負電荷量の経時変化を示す。各図の(A)、(B)はそれぞれ 40、60 keV を、(a)から(c)はそれぞれ 5、10、20 nA/cm² の結果を示している。同図より殆どのケースにおいて電子線の繰り返し照射により電荷蓄積量が飽和傾向にあることがわかる。ETFE において 40 keV 照射時に、蓄積量が 5、10、20 nA/cm² でそれぞれ、-0.10、-0.08、-0.06 mC/m² と電流密度の増加に伴い、蓄積負電荷量が減少していく事が分かる。したがって、照射電流密度によって照射領域部における RIC が上昇したものと考えられる。FEP においては、5 nA/cm² では 40、60 keV ともに飽和傾向にあったが、10、20 nA/cm² では繰り返し照射により蓄積電荷量が減少していることがわかる。照射時間にともない RIC の発生強度が上昇し導電率が上昇している事が推察され、ETFE と比較し FEP の方が電子線に対する反応が大きい材料であることが考えられる。

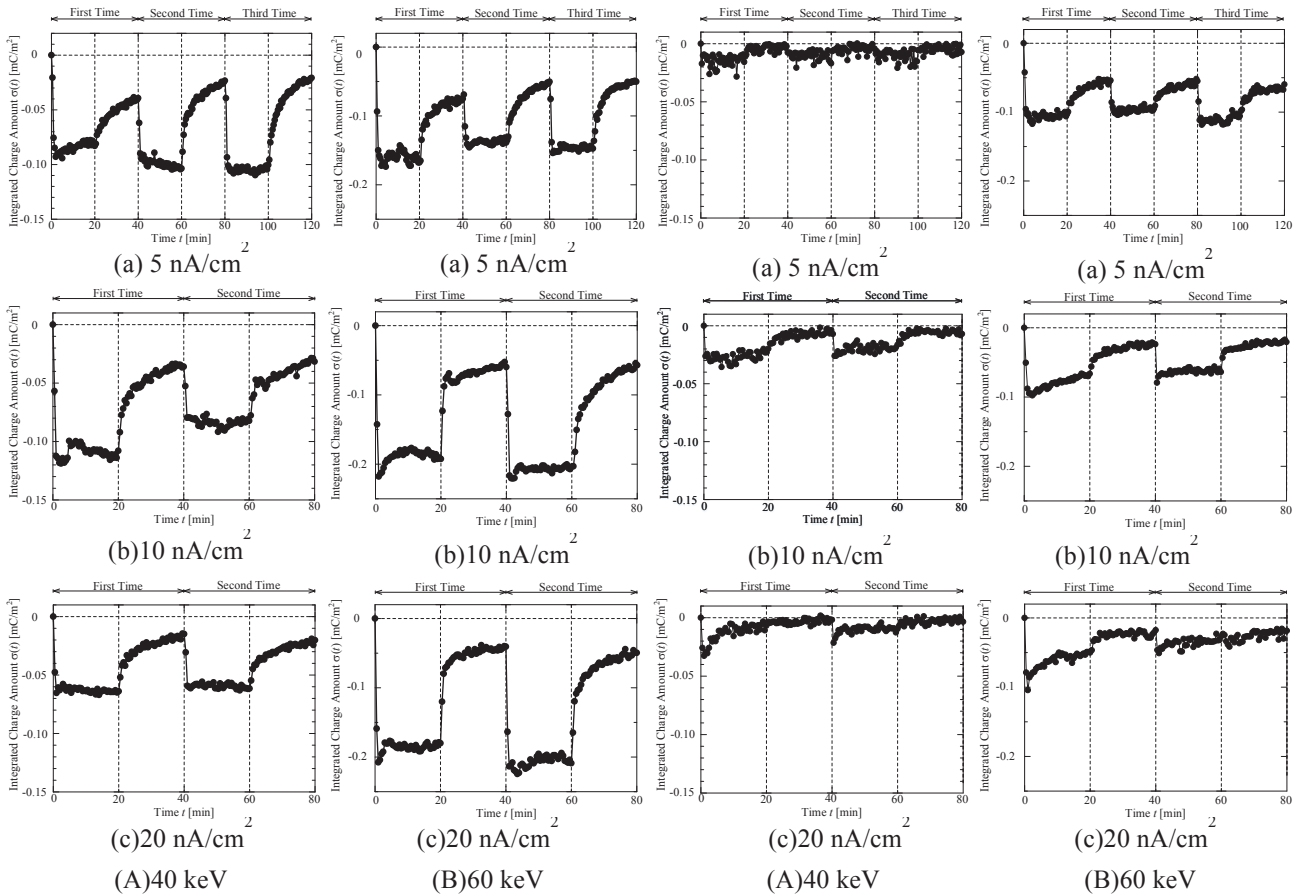


図8 繰り返し電子線照射 ETFE の蓄積電荷量の経時変化

図9 繰り返し電子線照射 FEP の蓄積電荷量の経時変化

5. 結論

電子線照射中における空間電荷分布測定結果から、ETFE,FEPにおいて蓄積電荷量が高電流密度照射時に減少傾向であり、低電流密度照射時には飽和傾向であった。これは電子線照射にともない照射領域部の導電率上昇が発生するが、照射電流密度が高い程導電率の上昇度が高い傾向であることが考えられる結果が得られた。また、蓄積電荷量においては FEP の方が少ないことが分かった。繰り返し電子線を照射することで、FEPにおいては蓄積した負電荷が減少し続けることが分かった。したがって FEP の方が電子線照射時間の増加にともない導電率が上昇する材料であることが考えられる。

6. 参考文献

[1] C. Koons, J.E. Mazur, R.S. Selesnick, J.B. Blake, J.F. Fennell, J.L. Roeder and P.C. Anderson, “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force

Research Laboratory, pp.7-11, 1998

[2] T. Takada, “Acoustic and Optical Methods for Measuring Electric Charge Distributions in Dielectrics”, IEEE Trans. DEI, Vol. 6, No. 5, pp.519-547 (1999).
 [3] Tatsuo TAKADA, Hiroaki MIYAKE and Yasuhiro TANAKA, Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric Materials for Spacecraft, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, pp. 2176-2184, 2006