

[2024202020]

次世代衛星・航空機の高信頼化に資するプロトン照射衛星材料の帯電物性 に関する研究

Study on charging phenomena of dielectric materials irradiated by proton for consideration to next-generation satellite and aircraft

三宅弘晃 ^{A)}, 木内麻稀 ^{A)}, 榎海星 ^{B)}, 田中康寛 ^{A)}
Hiroaki Miyake ^{#,A)}, Asaki Kiuchi ^{A)}, Kaisei Enoki ^{B)}, Yasuhiro Tanaka ^{A)}
^{A)} Tokyo City University

^{B)} National Institute of Information and Communications Technology

Abstract

The number of spacecraft operated in an environment with high-energy protons (H^+) is currently increasing. Therefore, it is important to investigate the impact of protons on the insulation properties of spacecraft insulation materials. We focused on the increase in conductivity irradiated by radiation called radiation-induced conductivity (RIC). The conductivity of the insulating material is an important parameter for charging and discharging. In this study, we investigated the relationship between the RIC and proton irradiation dose rates by measuring the external circuit current. As a result, we observed that the conductivity increased from 10^{-13} to 10^{-11} S/m immediately after the start of irradiation in each irradiation condition. Furthermore, the results showed that the conductivity can be expressed as a power of the absorbed dose rate. We also observed an increase and a decrease in conductivity during constant proton irradiation.

Keyword: radiation-induced conductivity, proton, polyimide, spacecraft insulation material, charge, discharge

1. はじめに

測位・気象観測・通信といった広い分野で多くの人工衛星が運用され、インフラの一部として利用されている。これらの人工衛星をはじめとする宇宙機は荷電粒子が存在する環境下で運用される。宇宙機には断熱や電気絶縁の観点から、多くの絶縁材料が使用されている。これら絶縁材料は、宇宙空間に存在する荷電粒子により帯電し、帯電量がある閾値を超えると、放電が発生する。放電によって発生する電磁パルス等は、精密機器を多数搭載している宇宙機の誤作動や故障を引き起こす可能性がある^[1]。実際に、宇宙環境起因の衛星障害統計の内、過半数を静電放電が占めると報告されている^[2]。宇宙機の誤作動や故障は大きなインフラ障害や人命に関わる事故に発展する可能性が十分に考えられることから、帯電および放電に関する知見を深める必要がある。

一般に放射線が絶縁材料に照射されると、放射線誘起伝導 (radiation-induced conductivity: RIC) と呼ばれる導電率の上昇が発生する。導電率の上昇が発生すると、帯電した電荷は接地電極へ流出しやすくなる。この効果は宇宙機の帯電緩和に働く為、材料の特性として把握することが必要である^[3]。X線や電子線による RIC についてはいくつかの測定及び数値計算の例はあるものの^{[4]-[7]}、陽子線による RIC は数値計算のみとなっており、測定例はほとんどない^[8]。しかしながら、月や惑星探査が活発化しており、陽子線が存在する環境での宇宙機の運用が増加傾向にある。そのため、陽子線による RIC を把握することは、今後の衛星設計や運用に必須である。そこで、本論では宇宙機が多層断熱材に使用されるポリイミド系絶縁材料の陽子線照射下における導電率に着目し、異なるフラックスの陽子線照射時の外部回路電

流測定結果を報告する。

2. 測定条件

2.1 測定試料

測定試料として、公称厚さ $50\ \mu\text{m}$ の Kapton[®]-200H を用いた。試料への電圧印加及び電流取得のため、試料の照射面には $\phi 25\ \text{mm}$ 、裏面には $\phi 15\ \text{mm}$ の Al 蒸着電極を設けている。以下、本測定試料を Kapton[®] と示す。

2.2 照射施設及び照射条件

陽子線照射は国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所の 3 MV タンデム加速器を用いた。陽子線の加速エネルギーは 2 MeV、照射電流密度は 0.03、0.3、3、30 nA/cm²、照射時間は 30 分とした。このエネルギーの Kapton[®] 内計算飛程は SRIM (the stopping and range of ions in matter) を用いて算出すると $58\ \mu\text{m}$ であり、陽子線は $50\ \mu\text{m}$ の Kapton[®] を貫通し、試料全体に照射することができる^[9]。

図 1 に陽子線照射された試料内の吸収線量率分布を示す。吸収線量率 dD/dt は TRIM (transport of ions matter) で算出した、陽子線が試料に付与するエネルギー E_{deposit} に基づき、次式から算出した^{[7]-[9]}。

$$\frac{dD}{dt} = J_{\text{irrad}} \frac{E_{\text{deposit}}}{\rho \cdot \Delta x} \quad (1)$$

J_{irrad} は照射電流密度、 ρ は試料の密度、 x は試料厚さを示す。試料内には合計で 1.4 MeV に相当するエネルギーが付与されている。

2.3 外部回路電流測定の実験条件

図2に外部回路電流測定の実験システム図を示す。直流高電圧はリング状の電極から、試料表面に設けられているアルミ蒸着電極を介して試料に印加される。電流の検出電極は $\phi 15\text{ mm}$ であり、この範囲を流れる電流を計測可能である。陽子線の通過経路には $\phi 14\text{ mm}$ の照射孔が設けられており、陽子線は照射孔を通過し、試料に照射される。その為、電流計測範囲である $\phi 15\text{ mm}$ の試料に対して約9割の面積への照射となる。本論では照射面積に関する補正等はない。

図3に本試験の実験シーケンスを示す。印加電界 20 kV/mm に相当する電圧を120分間印加し、その

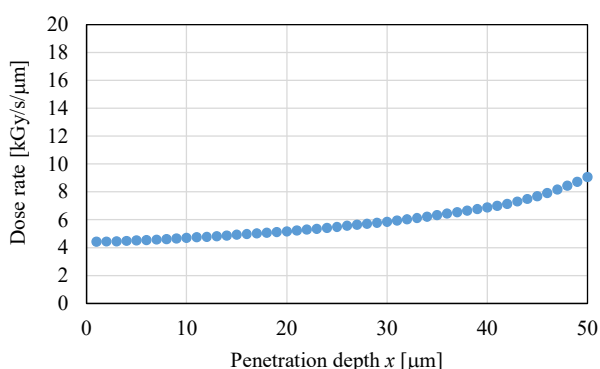


Figure 1. The dose rate distributions of the proton irradiated polyimide film.

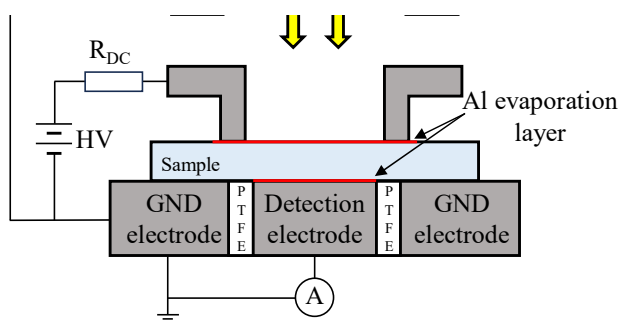


Figure 2. Schematic diagram of the external circuit current density measurement system

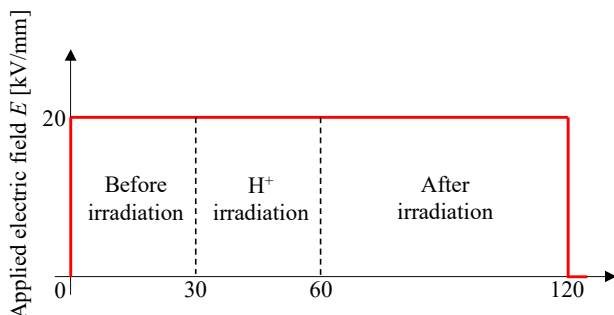


Figure 3. Schematic diagram of the external circuit current density measurement system

間の電流を5秒間隔で測定を行った。初期30分間は照射前の電流計測、その後30分間で陽子線照射中、60分間で陽子線照射後の電流計測を行った。測定した電流値を電極面積及び印加電界で除することで、導電率を算出した。また、照射中の電流値については、陽子線照射の電流値を差分している。

3. 測定結果及び考察

図4に各照射電流密度の陽子線照射時の導電率の経時変化を示す。図5に陽子線の吸収線量率と照射直後の導電率の関係を示す。ここで、図1に示したように吸収線量率は試料内で分布を持つが、今回はその値の平均値で比較を行った。図6に陽子線の照射量に対する各照射電流密度の照射時の導電率の変化を示す。

図4より、照射前30分間で計測された導電率は 10^{-15} S/m オーダーであり、Kapton®の公称値と一致している^[10]。30 nA/cm²で照射した場合、導電率は5秒の間に $9.1 \times 10^{-11}\text{ S/m}$ まで急激に上昇し、照射開始から20秒後、 $7.3 \times 10^{-11}\text{ S/m}$ まで減少した。その後は再度増加傾向へ変化し、照射開始30分後には $1.4 \times 10^{-8}\text{ S/m}$ に到達した。照射終了後は60分の間、導電率は減少傾向にあるが、 10^{-9} S/m オーダーを維持していることが分かる。3 nA/cm²で照射した場合、照射5秒後に $1.4 \times 10^{-11}\text{ S/m}$ まで上昇、その後徐々に減少し、照射開始から約2分後に $9.5 \times 10^{-12}\text{ S/m}$ となった。その後、再上昇し、照射開始30分後には $4.6 \times 10^{-10}\text{ S/m}$ となった。陽子線照射中の導電率の増減の挙動は30 nA/cm²と同様であった。照射終了後は30 nA/cm²照射時と比較をすると、大きく減衰し、照射終了後60分では 10^{-12} S/m オーダーとなった。0.3 nA/cm²で照射した場合、照射5秒後に $1.7 \times 10^{-12}\text{ S/m}$ まで急激に上昇し、照射開始12分後まで徐々に減少、その後再上昇し、照射開始30分後には $2.1 \times 10^{-12}\text{ S/m}$ となった。照射終了後は大きく減衰し照射前と同等の値となることが分かった。0.03 nA/cm²照射時には、照射5秒後に $1.9 \times 10^{-13}\text{ S/m}$ まで上昇し、照射中は他の条件で観測されたような、大きな増減は観測されなかった。また、照射終了後は急激に減少し、照射前と同等の値となった。

陽子線照射中の増減の挙動について、着目した。高線量率で照射した場合、導電率は照射直後に増加した後、減少し、再増加する挙動が得られた。この挙動は電子線やX線においても観測されている^{[3][7][11]}。X線や電子線によるRICは、電子正孔対の生成とトラップ、再結合によって議論されている^{[3][4]}。しかし、照射直後の急上昇から減衰挙動までは説明可能であるが、その後の再上昇挙動は説明されていない。

本論では、この増減挙動を3つの変化に分けて考えた。一つ目は照射直後の導電率の上昇である。これは、陽子線照射により試料内に電子正孔対が生成されたためと考える。電子正孔対の生成される量は照射線量率に依存し、照射量が多いと導電率の増加量も多くなると考えた。また、照射終了後においては、電子正孔対が生成されなくなるため、急激に減少すると考えた。二つ目は陽子線照射中の導電率の

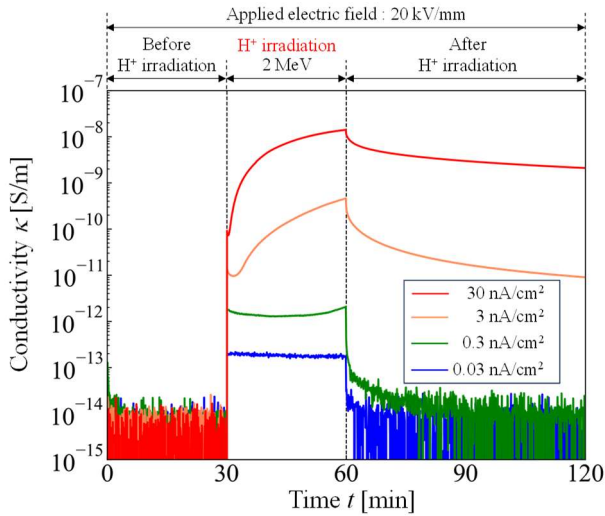


Figure 4. Conductivity with time progress before, during, and after proton irradiation at each irradiation current density

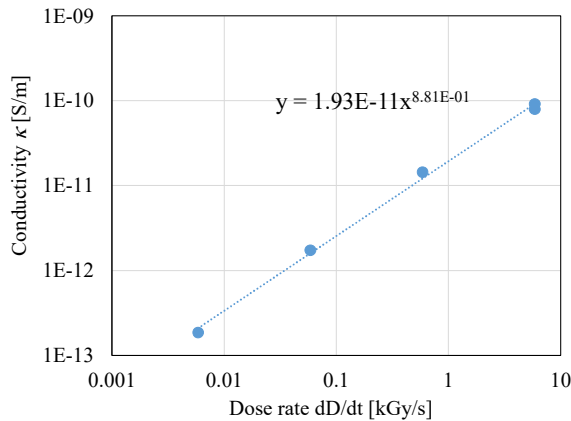


Figure 5. Conductivity immediately after irradiation at each dose rate

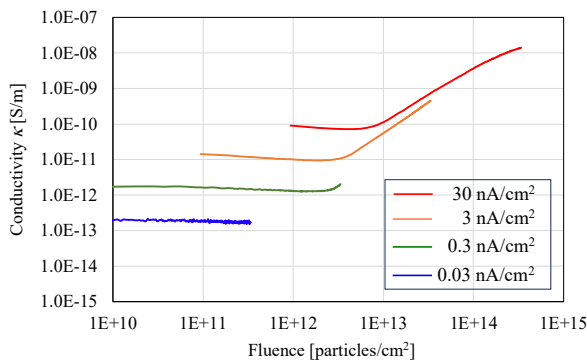


Figure 6. Relationship between conductivity and fluence of each irradiation current

減少である。生成された電子正孔対は徐々に材料内の電荷を捕捉するトラップ準位に捕縛され、伝導キャリアが減少したためと考えられる。三つ目は導電率の再上昇である。この現象は 0.03 nA/cm^2 以外の高線量率照射時、特に 30 nA/cm^2 及び 3 nA/cm^2 照射時に顕著に観測された。この要因にトラップ準位の充満や分子構造の変化によるトラップ準位の変化等が考えられる。トラップ準位が充満すると導電率の上昇に寄与する^[12]。多量に電子正孔対が生成された場合、同様にトラップ準位が充満し、再度導電率の上昇に転じる可能性がある。そのため、高線量率で照射した場合に、導電率の再上昇が確認されたと考える。また、陽子線の照射量が増加すると、分子構造が変化するという結果が報告されている^[13]。トラップ深さは分子構造に起因しているため、分子構造の変化は導電率へ影響を与えている可能性が十分に考えられる。トラップ深さが減少した場合、電気伝導に寄与する電荷量が増加するため、導電率の増加に発展する。図 6 より、照射量が $10^{12} \text{ cm}^{-2} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の間で導電率の再上昇が確認されている。现阶段では、本考察は定性的な部分を含んでいるため、今後詳細に検討を行っていく必要がある。

各照射電流密度での照射開始直後の導電率に着目した。図 5 より、その導電率は、吸収線量率のべき関数で示せることが分かった。ここで、電子線や X 線による RIC は以下の(2)式で示すことができる^{[6][7]}。

$$\sigma_{\text{RIC}} = k_{\text{RIC}} \left(\frac{dD}{dt} \right)^{\Delta} \quad (2)$$

σ_{RIC} は RIC 発生による導電率、 k_{RIC} 及び Δ は材料に起因する定数である。図 5 に示す通り、照射直後の陽子線による RIC も上述の(2)式に従うことが分かった。

続いて、照射量と導電率の関係に着目した。前述したが、図 6 より、照射量が $10^{12} \text{ cm}^{-2} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の間で導電率の再上昇が確認された。また、 30 nA/cm^2 と 3 nA/cm^2 を比較すると照射量増加に伴い、その値は徐々に近づいていることが分かる。そのため、短時間の照射時には線量率が導電率変化に大きく寄与するが、低線量率の場合においても、長時間陽子線照射環境下に曝されることで、導電率は高線量率環境と同等レベルまで上昇することが示唆された。

4. まとめ

本論では宇宙機が多層断熱材に使用されるポリイミド系絶縁材料の陽子線照射下における導電率に着目し、異なるフラックスの陽子線照射下による外部回路電流測定を行った。その結果、高フラックスで照射した場合、照射直後に急激な導電率の上昇、その後減少し、再上昇する挙動が確認された。照射直後の導電率に着目すると、X 線や電子線と同様に導電率は吸収線量率のべき乗で示せることが明らかとなった。また、短時間での照射の場合、線量率が導電率の上昇に大きく寄与するが、長時間陽子線環境下に曝された場合、低線量率であっても高線量率と同等の導電率になる可能性が示唆された。高線量

率照射時の導電率の再上昇の挙動は、分子構造の変化やトラップの充満等が一因として考えられる。分子構造の変化が寄与する場合は、電子線やX線では見られない、陽子線特有の挙動となる可能性があるため、この点については、今後詳細に検討をしていく必要がある。

参考文献

- [1] V. Griseri, "Behavior of Dielectrics in a Charging Space Environment and Related Anomalies in Flight," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 3, pp. 689-695, 2009.
- [2] 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.
- [3] A. Tyutnev, V. Saenko, A. Zhadov and E. Pozhidaev, "Radiation-Induced Conductivity in Kapton-Like Polymers Featuring Conductivity Rising With an Accumulating Dose," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 8, pp. 3739-3745, Aug. 2019.
- [4] J. F. Fowler, "X-Ray Induced Conductivity in Insulating Materials," Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Science, vol. 236, No. 1207, pp. 464-480, 1956.
- [5] B. Gross, R. M. Faria, G. F. L. Ferreira, "Radiation-induced Conductivity in Teflon® Irradiated by X rays", Journal of Applied Physics, vol. 52, pp. 571-577, 1981.
- [6] B. Gross, G.M. Sessler, J. E. West, "Charge Dynamics for Electron-irradiated Polymer-foil electrets", Journal of Applied Physics, vol. 45, pp. 2841-2851, 1974.
- [7] G. M. Yang, G. M. Sessler, "Radiation-induced Conductivity in Electron-beam Irradiated Insulating Polymer Films", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 27, no. 4, pp. 843-848, 1992.
- [8] Y. Miyaji, H. Miyake, Y. Tanaka, "A Study on the Estimation of RIC (Radiation-Induced Conductivity) of Proton Irradiated Polyimide", Polymers, vol. 15-2, 337, 2023.
- [9] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The stopping and range of ions in solids", Stopping and ranges of ions in matter, vol.1, Pergamon Press, 1985.
- [10] Du Pont-tray Co., Tokyo, Japan. Internets: Kapton® General Catalog [Online]. Available: <https://www.td-net.co.jp/kapton/data/download/documents/kapton2007r.pdf>
- [11] R. Gregorio Filho, B. Gross, R. M. Faria, "Induced Conductivity of Mylar and Kapton Irradiated by X-rays", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 21, no. 3, pp. 431-436, 1986.
- [12] K. Matsui, Y. Tanaka, T. Takada and T. Maeno, "Numerical analysis of packet-like charge behavior in low-density polyethylene under DC high electric field," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 3, pp. 841-850, June 2008.
- [13] Ruiqi Li, Chundong Li, Shiyu He, Mingwei Di, Dezhuang Yang, "Damage effect of keV proton irradiation on aluminized Kapton film", Radiation Physics and Chemistry, vol. 77, pp. 482-489, 2007.