

月探査を見据えた衛星用絶縁材料の帯電物性の解析

Analysis of the Dielectric Properties of Satellite Materials Intended for Lunar Exploration

三宅 弘晃¹⁾

Hiroaki MIYAKE

榎 海星²⁾

Kaisei ENOKI

木内 麻稀¹⁾

Asaki KIUCHI

田中 康寛¹⁾

Yasuhiro TANAKA

¹⁾ 東京都市大学²⁾ 国立研究開発法人情報通信研究機構

(概要)

本論では、宇宙機に用いられるポリイミド系およびフッ素系絶縁材料の陽子線照射による導電率変化や直流高電界下での空間電荷蓄積挙動を、外部回路電流密度測定及びパルス静電応力法による空間電荷分布測定を行うことで調査した。今後、拡大していく宇宙開発の安全性・信頼性を担保するためには、陽子線による絶縁材料の帯電挙動への影響を明らかにする必要がある。絶縁材料の導電率は宇宙機の帯電量推定に用いられるが、陽子線による導電率変化に関する報告例はわずかである。また、宇宙空間での直流高電圧送電が検討されているが、陽子線環境及び直流高電界下といった複合的な環境における空間電荷蓄積挙動の報告例はほとんどない。そこで本研究では、陽子線照射下での外部回路電流密度測定、及び陽子線環境下かつ直流高電界下における空間電荷分布測定を行った。その結果、陽子線による導電率変化は吸収線量率や吸収線量と一定の関係を示すことが明らかとなった。また、陽子線照射かつ直流高電界下においては、絶縁破壊の前駆現象と言われるパケット状電荷が発生し、それに伴う電界強調が確認された。これらの結果より、宇宙機の帯電量推定や高電圧設計への導電率及び空間電荷分布測定の重要性を示唆された。

キーワード：陽子線、導電率、空間電荷分布、Polyimide、FEP

1. 目的

スマートフォンから得られる位置情報や気象情報など、様々な情報やサービスが人工衛星等の宇宙インフラによって支えられる時代が到来している。また、宇宙基本計画工程表（令和7年12月23日）には、我が国のアルテミス計画への主体的参画や、民間衛星やロケットの利用拡大が示されており、地球近傍に留まらず、月面探査やその他宇宙開発の更なる拡大も予測される^[1]。

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^[2]。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^[3]。そのため、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、絶縁材料の荷電粒子による帯電および放電に関する知見を深める必要がある。

ここで、絶縁材料の導電率は宇宙機の帯電量の推定に利用される重要なパラメータである^{[4], [5]}。一般的に絶縁材料に放射線が照射されると、絶縁材料の導電率は増加する^{[6]-[9]}。この現象は放射線誘起伝導 (radiation induced conductivity: RIC) と呼ばれ、絶縁材料の帯電量を減少させる働きをする^[10]。そのため、利用される材料の RIC 特性を把握することは重要である。また、近年は宇宙開発の拡大に伴い、宇宙空間での数 kV オーダーの直流高電圧送電が検討されている^[11]。一般に地上での直流高電圧送電では、使用される絶縁材料の絶縁破壊等が問題視されているが^{[12], [13]}、宇宙空間での利用する場合、高電圧かつ放射線環境における絶縁材料の電荷蓄積特性を把握することが求められる。

そこで、本研究では、地球磁気圏外での宇宙機運用を見据え、荷電粒子線の中でも陽子線に着目し、陽子線照射による絶縁材料の導電率の変化や、陽子線及び直流高電界が絶縁材料の電荷蓄積挙動へ与える影響の調査を行った結果を報告する。

2. 陽子線照射による宇宙機絶縁材料の導電率変化

2.1 測定試料

測定試料として、公称厚さ 50 μm の Kapton®-200H、および公称厚さ 25 μm の NEOFロン®FEPNF-0025 を用いた。以下の説明では各材料を Kapton®、FEP と記す。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^[14]。

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。このエネルギーによる各材料への計算飛程は SRIM (the stopping and range of ions in matter) を用いて算出すると Kapton®、FEP でそれぞれ 58 μm 、46 μm であり、陽子線は各試料を貫通し、試料全体に照射することができる^[15]。

図 1 に各照射電流密度で陽子線照射された試料内の吸収線量率分布を示す。同図(a)、(b)に Kapton®、FEP の分布をそれぞれ示す。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^{[8], [15], [16]}。

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

J_{irrad} は照射電流密度、 ρ は試料の密度、 Δx は TRIM で算出された単位長さを示す。図 1 に示す吸収線量率分布は 1 μm 毎に計算された結果である。同図より吸収線量率は試料内の陽子の侵入深さによって異なるが、本論文では材料中を流れる電流値を評価するため、以下の議論ではこれらの平均値を使用する。30 nA/cm² 照射時から順に、Kapton®は 5.9 kGy/s、0.59 kGy/s、0.059 kGy/s、0.0059 kGy/s、FEP は 4.4 kGy/s、0.44 kGy/s、0.044 kGy/s、0.0044 kGy/s を用いた。各試料の最大吸収線量は Kapton®、FEP それぞれ、10620 kGy、7920 kGy である。ここで、静止軌道で 10 年間運用した場合、総吸収線量は約 5000 kGy に達する(Al 遮蔽：0 mm、材料：Si)^[17]。

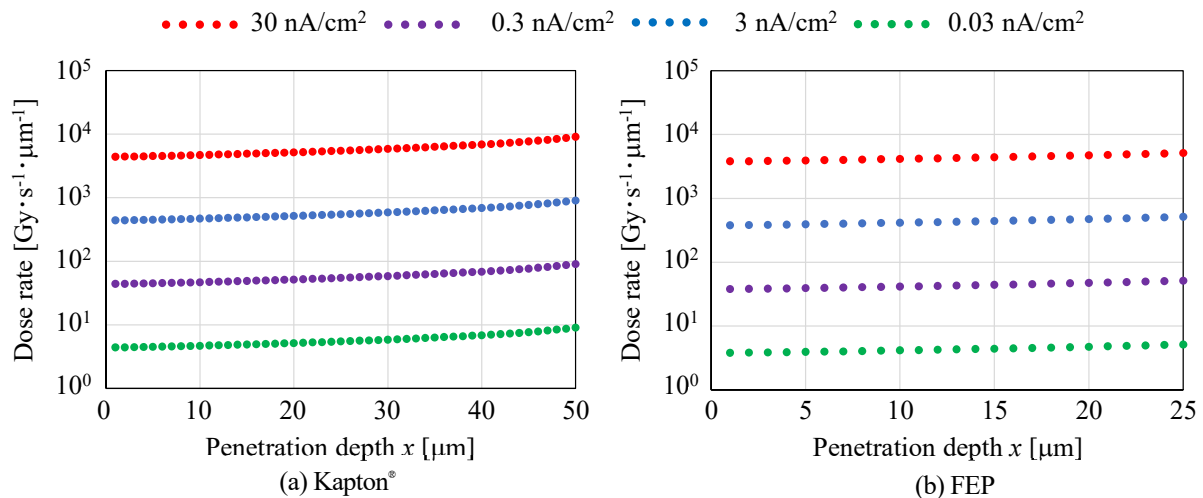


図 1 各照射電流密度の陽子線照射時の各試料内吸収線量率分布

2.3 外部回路電流密度測定システムおよび測定条件

図 2 に外部回路電流密度測定システムの概略図を示す。測定試料を高電圧電極及び検出電極の間に配置し、測定試料の両面に設けられている蒸着電極を介して任意の電界を試料に印加可能な構造となっている。試料表面を流れる電流の検出を防ぐため、リング状のガード電極は接地されている。検出電極には微小電流計が接続されており、外部回路電流を測定することができる。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。そのため、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^[14]。

図 3 に本試験の測定シーケンスを示す。印加電界 20 kV/mm に相当する直流電圧を 120 分間印加し、その間の電流を 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。

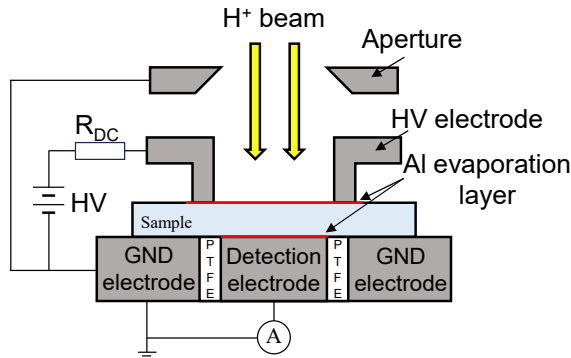


図2 外部回路電流密度測定システム

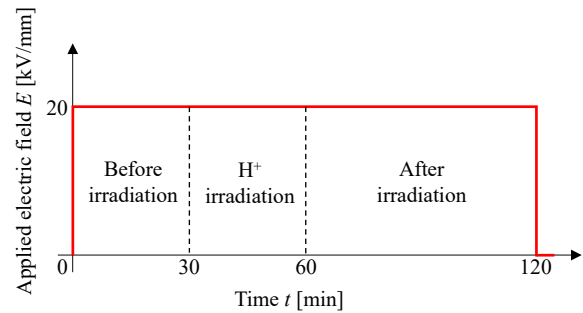


図3 外部回路電流密度測定の測定シーケンス

2.4 測定結果、考察および今後の展開

図4に各試料の導電率の経時変化、図5に各試料の吸収線量と導電率の関係を示す。各図(a)にKapton®、(b)にFEPの結果をそれぞれ示す。図4および図5中「K-1」や「F-1」等の記号は以降の

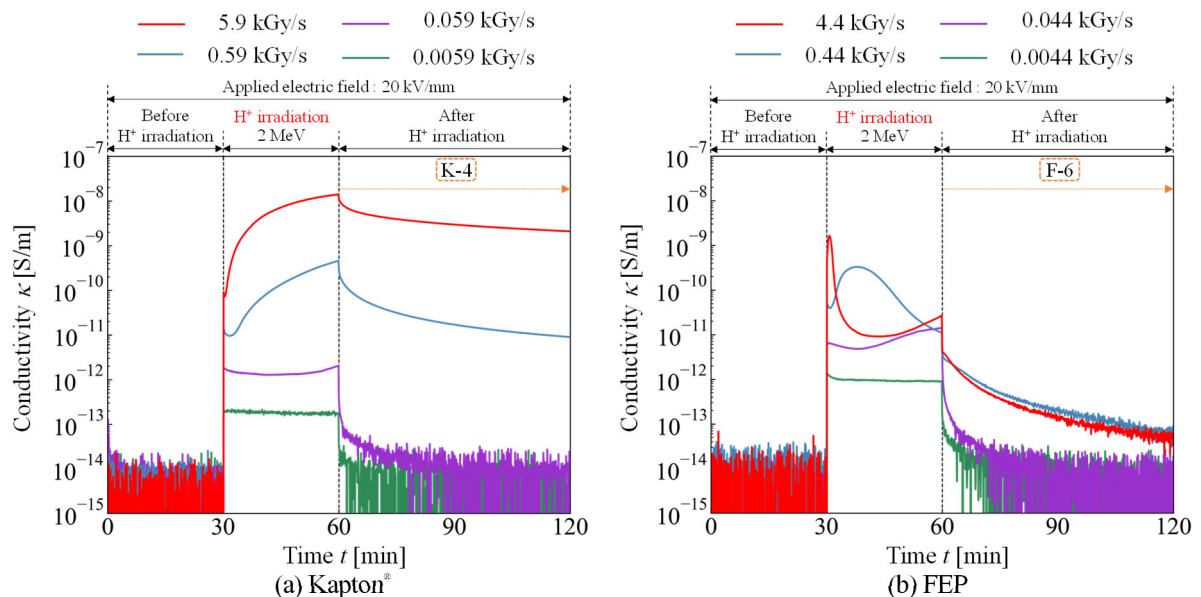


図4 各吸収線量率における陽子線照射前・照射中・照射後の導電率の時間変化

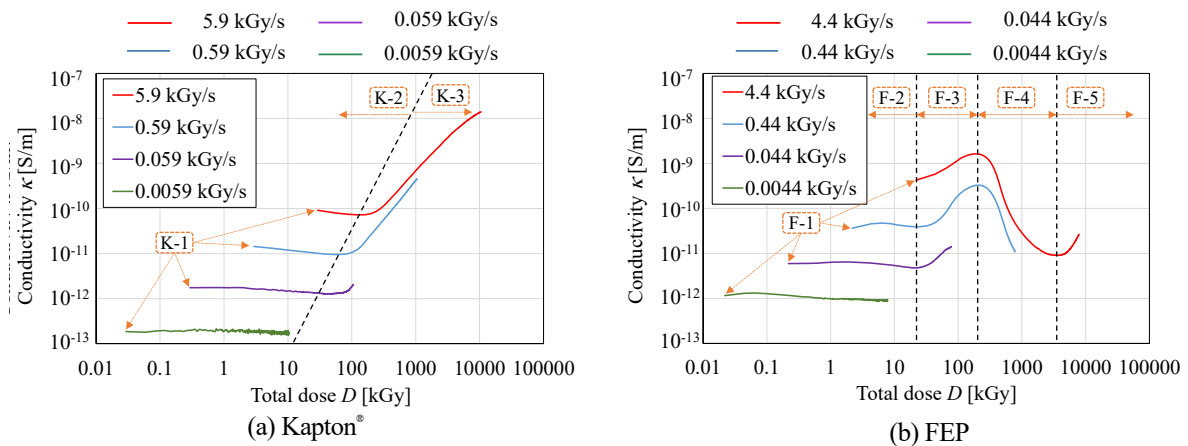


図5 各吸収線量率における吸収線量と導電率の関係

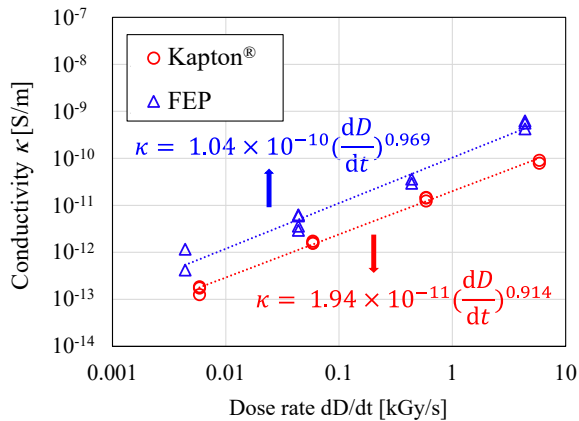


図6 各材料の吸収線量率と導電率の関係
(照射5秒後)

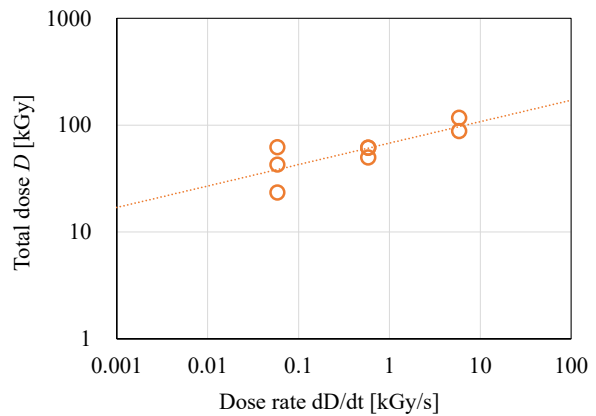


図7 吸収線量率と Kapton® の導電率上昇
発生時の吸収線量の関係

考察で用いる。また、図6に各材料の吸収線量率と照射開始5秒後の導電率の関係を示す。同図各プロットは再現性の結果も含めて示しており、各点線は最小二乗法により算出された近似直線を示す。

各導電率の増減挙動を照射直後、照射中、照射後の3つに分けて説明する。まず、照射直後の導電率に着目する。図4より、各試料で導電率は陽子線照射直後に急上昇すること明らかとなった。ここで、電子線やX線によるRICは以下の(2)式で示すことのできる^{[8], [9]}。

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

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6に示す通り、照射直後の陽子線によるRICにおいても上述の(2)式に従うことが明らかとなった。しかしながら、Kapton®とFEPでは1桁程度FEPのほうが大きいといったように材料毎で陽子線に対する感度が異なることも明らかとなった。

続けて照射中の導電率の増減挙動に着目する。Kapton®は照射初期の増加後、徐々に導電率は減少もしくは一定を保ち、ある点を超えると上昇へ転ずる傾向が得られた。この再上昇の現象は、5.9 kGy/sから0.059 kGy/sで確認された。図7に吸収線量率と導電率減少傾向から再上昇へ転じた吸収線量の関係を示す。同図より、導電率上昇への変曲点は各線量率で異なるが、一定の関係性があることが示唆された。対してFEPでは、照射初期の増加後、吸収線量率4.4 kGy/sでは、上昇を続け、吸収線量約200 kGyで最大値 1.6×10^{-9} S/mを迎え、その後約3600 kGyで 9.0×10^{-12} S/mまで減少し、再上昇した。0.44 kGy/sでは、導電率の値は異なるものの、吸収線量と導電率の関係は4.4 kGy/sと類似した挙動が観測された。その他の低吸収線量率の場合は、吸収線量が各変曲点に達していないものの、同様の傾向となることが示唆された。

次に照射終了後の導電率の減少に着目する。放射線照射後の導電率の上昇はRICに対して、遅延放射線誘起伝導 (delayed radiation-induced conductivity: DRIC) と呼ばれる。各試料において、高吸収線量率の場合、照射終了後60分間においても、導電率が照射前の値に戻らず、DRICが発生していることが確認された。Kapton®の場合は5.9 kGy/s、0.59 kGy/s時に顕著に確認され、照射直後に減少が確認されたものの、照射終了後60分でそれぞれ 10^{-9} S/m、 10^{-12} S/mのオーダーを維持していることが分かった。対して、FEPにおいては、Kapton®と比較して照射終了後により顕著に導電率が減少し、照射終了後60分で 10^{-14} S/mのオーダーとなっていることが分かる。

各導電率の増減挙動について考察する。各試料の導電率の増減の領域を次のように区分して考えた。図4および図5に示したようにKapton®の導電率の照射直後の増加を「K-1」、その後の減少または一定の領域を「K-2」、再上昇領域を「K-3」、照射後を「K-4」とした。また、FEPの導電率の照射直後の増加を「F-1」、その後の減少または一定の領域を「F-2」、上昇領域を「F-3」、減少領域を「F-4」、再上昇領域を「F-5」、照射後を「F-6」とした。ここで、電子線やX線のRICについて、照射直後の急上昇、およびその後の減少については、放射線照射時に発生した電子正孔対の生成と電荷補足準位への捕縛、再結合によって議論されている^{[9], [10], [18]}。Kapton®では、照射直後に導電率が急上昇、その後一度減少し、再上昇した。導電率の急上昇「K-1」及びその後の減少「K-2」は、その他放射線と同様に、陽子線照射により電子正孔対が生成され、伝導キャリア増加により導電率が

急上昇し、伝導キャリアが材料内の電荷補足準位に捕縛、もしくは再結合したため、導電率が減少したと考える。電子正孔対の生成される量は吸収線量率に依存するため、吸収線量率の増加に伴いと導電率も増加したと考えられる。導電率の再上昇「K-3」については、0.059 kGy/s から 5.9 kGy/s で観測された。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、高吸収線量率の場合に、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^[19]。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と考えられる。照射後「K-4」では高吸収線量率の場合に、DRIC が観測された。高吸収線量率の場合、電子正孔対の生成量は増加するため、トラップされている電荷の量も増加し、その電荷が脱トラップされることで導電率が維持されたと考えられる。

対して FEP では、照射直後の導電率増加「F-1」、その後の「F-2」、「F-3」については、Kapton®と同様に、陽子線照射による電子正孔対生成、再結合、およびトラップが寄与していると考えられる。一方で「F-4」、「F-5」のような導電率の増減は Kapton®では確認されなかった。導電率の増減の要因には上述したようなキャリア密度の増減や、材料の移動度等も関与する。現段階では、明確な要因は不明であるが、多種材料の測定を行うことで、材料と導電率の関係を明らかにしていく予定である。

これらの結果より、陽子線照射による導電率は、吸収線量率、吸収線量、材料に依存することが明らかとなった。また、吸収線量率および吸収線量については、導電率と一定の関係があることが示唆され、宇宙機の運用環境での放射線量により、導電率の変化量の把握及び推定が可能であることが示された。

3. 陽子線照射下かつ高電界下における宇宙機絶縁材料の空間電荷蓄積挙動

3.1 測定試料

測定試料として、公称厚さ 127 μm の Sheldahl® FEP film を用いた。試料には片側の全面に Al 蒸着が施されており、裏面には試料への電圧印加のため、 $\phi 20\text{ mm}$ の Al 蒸着を施している。以下の説明では FEP と記す。

3.2 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 30 nA/cm²、照射時間は 60 分とした。このエネルギーによる FEP への計算飛程は前章と同様に 46 μm である。本論では陽子線が照射される領域とされていない領域を作り出し、電荷蓄積挙動を確認するため、陽子線が FEP を貫通しない条件で設定した。

3.3 空間電荷分布測定システムおよび測定条件

図 8 に陽子線照射下及び高電界下における空間電荷分布測定システムの概略図を示す。ここで、空間電荷分布測定にはパルス静電応力 (pulsed electroacoustic: PEA) 法を用いており、陽子線照射を

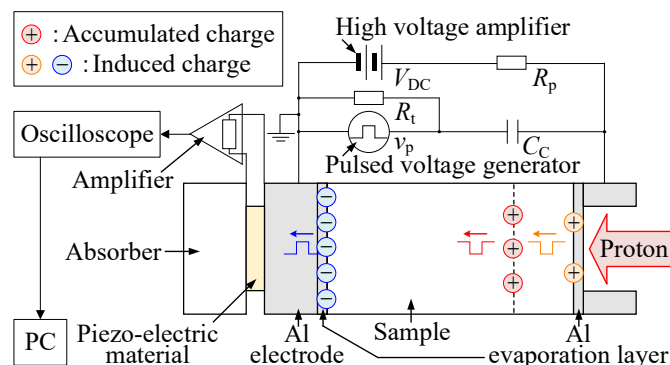


図 8 陽子線照射下及び高電界下における空間電荷分布測定システム

行いながら、空間電荷分布測定を実施するため、装置には照射孔が設けられている^{[20], [21], [22]}。空間電荷分布測定は陽子線照射による影響を明らかにするため、高電界下の空間電荷分布測定および陽子線照射下かつ高電界下の空間電荷分布測定を行った。空間電荷分布測定は、印加電界 50 kV/mm に相当する直流電圧を 60 分間印加し、その後 30 分間短絡状態において、5 秒間隔で測定した。陽子線は直流電圧印加中の 60 分間に $\phi 20$ mm の Al 蒸着電極面へ、真空度 10^{-4} から 10^{-5} Pa オーダーの真空環境下で照射した。印加パルス電圧は半値幅 5 ns、波高値 100 V または 200 V とした。

3.4 測定結果、考察および今後の展開

図 9 及び図 10 に高電界下における未照射 FEP の空間電荷分布測定結果、陽子線照射下および高電界下における FEP の空間電荷分布測定結果をそれぞれ示す。各図(a)、(b)、(c)に空間電荷分布の時間変化を示すカラーチャート、代表時刻の空間電荷分布波形、電界分布波形をそれぞれ示す。陽子線は紙面右側より照射しており、図 10 中の縦黒破線は計算飛程を示している。また、計算飛程より右側を照射領域、左側を未照射領域と定義する。図 9 より、未照射 FEP では 50 kV/mm の電界下において、電極からの電荷注入などによる電荷蓄積および電界強調が見られないことが確認できる。一方で、図 10 より、陽子線を照射したことにより、計算飛程付近から対向電極へパケット状正

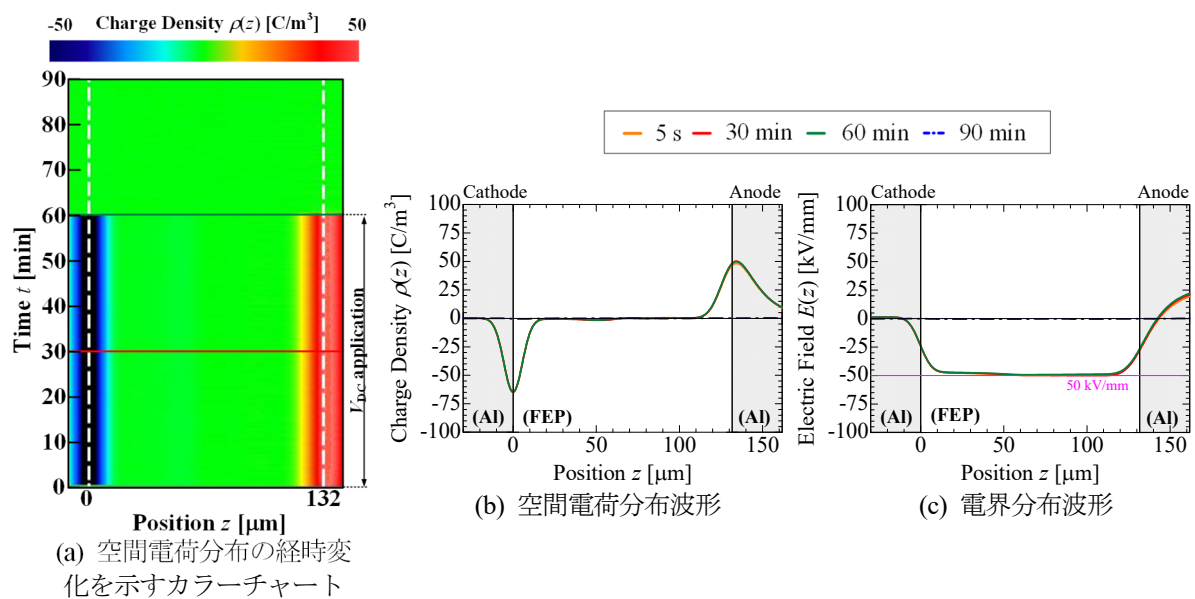


図 9 高電界下における未照射 FEP の空間電荷分布測定結果

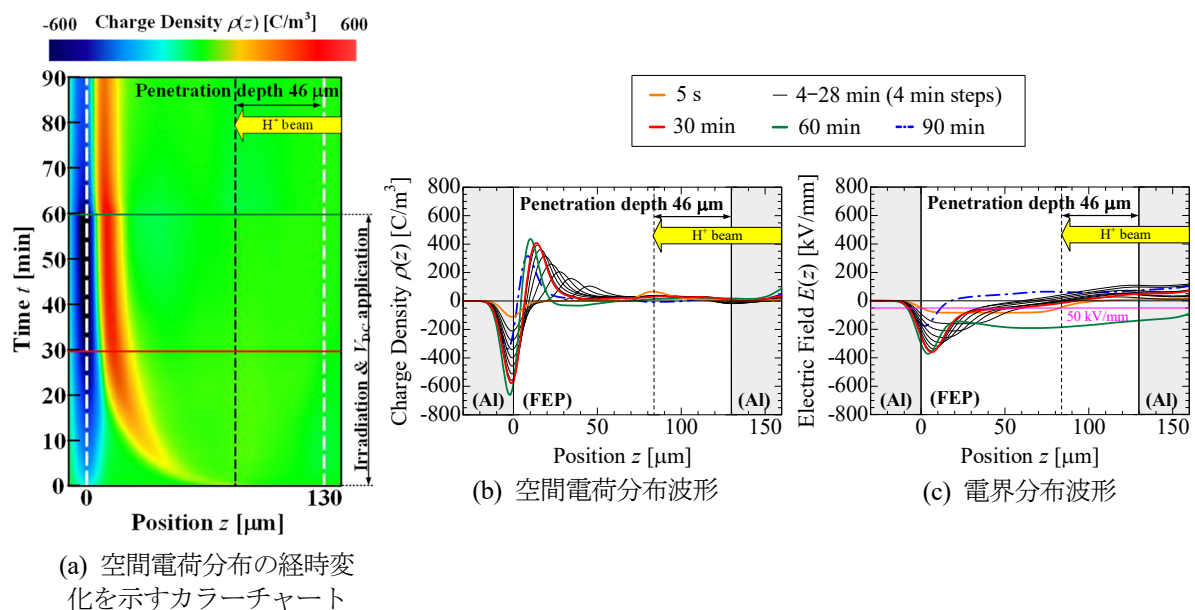


図 10 陽子線照射及び高電界下における FEP の空間電荷分布測定結果

電荷が、ドリフトする挙動が観測された。この現象の発生に伴い、試料内部で印加電界の約 7.5 倍にあたる最大 377 kV/mm の電界強調が観測された。このパケット状電荷は高電界下の低密度ポリエチレン (low density polyethylene : LDPE) においても観測されており、絶縁破壊の前駆現象と言われている^[12]。

ここで、電荷蓄積挙動について考察を行う。まずパケット状電荷の発生位置について議論する。本電荷は、陽子線の計算飛程を始点としていることが分かる。ここで、陽子線が照射された試料の高電界下での空間電荷蓄積挙動は、材料内の導電率分布に影響を受けることが先行研究において確認されている^[23]。前節で FEP は陽子線照射によって、導電率が上昇することが確認されていることから、本試験状況においても照射領域にて導電率の上昇が発生し、未照射領域と導電率差が発生していると考ええる。そのため、パケット状電荷の始点は計算飛程近傍となったと考えられる。パケット状電荷の起源となる正電荷は電極からの電荷注入や照射領域での電子正孔対の生成、陽子線照射起因の正孔等と考えられるが、分別することは現時点では困難であり、パケット状電荷の発生要因においても不明確である。そのため今後、多種材料での同様の試験や照射条件と電荷蓄積挙動の関係を比較することで明らかとしていく予定である。

本試験において確認されたパケット状電荷は前述したように絶縁破壊の前駆現象と言われており、陽子線が照射される環境にて高電圧を利用した場合、同様の事象が発生し、材料の破壊に発展する可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、宇宙機絶縁材料として広く利用されているポリイミド系絶縁材料及びフッ素系絶縁材料の、陽子線照射下における導電率変化に着目し、材料の外部回路電流密度を測定することで、陽子線と RIC の関係について調査した。また、フッ素系絶縁材料の陽子線照射および高電圧印加の複合効果による電荷蓄積挙動に着目し、陽子線照射及び高電界下における空間電荷蓄積挙動を調査した。その結果、陽子線照射により、導電率は数倍変化することが明らかとなった。照射初期の導電率上昇は、電子線や X 線照射時と同様に吸収線量率の累乗で表現可能であることが分かった。吸収線量率および吸収線量については、導電率と一定の関係があることが示唆され、宇宙機が運用環境にて照射される放射線量より、導電率の変化量を把握及び推定可能であることが示唆された。また、材料と RIC の関係については、各材料で導電率の変化挙動が大きく異なるため、多種材料の照射試験を行い、議論を行っていく必要がある。これらの導電率変化は陽子線により生成される電子正孔対や材料内のトラップ等に起因する可能性があるが今後の課題である。陽子線照射下にて高電圧を印加した場合、絶縁破壊の前駆現象と言われているパケット状電荷が観測され、印加電界の 7.5 倍の電界強調が発生することが分かった。また、パケット状電荷の発生始点は導電率分布に従うことが示唆された。パケット状電荷の発生要因は今後、異なる条件での陽子線照射や材料で実験を行うことで明らかとしていく予定である。この結果は宇宙環境下で使用される絶縁材料の高電圧設計において、荷電粒子照射と高電界の重畳効果を考慮する必要性を示している。

5. 引用(参照)文献等

- [1] 内閣府:「宇宙基本計画工程表(令和 7 年度改訂)」, [online] <https://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html>, (参照 2026-05-14)
- [2] 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, June 2009.
- [3] 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.
- [4] T. Muranaka et al., "Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 36, no. 5, pp. 2336-2349, Oct. 2008
- [5] MITIGATING IN-SPACE CHARGING EFFECTS-A GUIDELINE, p. 127, National Aeronautics and Space Administration, June 7, 2022. [Online]. Available: <https://standards.nasa.gov/sites/default/files/standards/NASA/B/0/2022-06-07-NASA-HDBK->
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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
 - [10] 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
 - [11] C. Barth and D. Pike, "Lunar Power Transmission for Fission Surface Power," presented at the Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS-2022), Cleveland, Ohio. Accessed: Mar. 12, 2026.
 - [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] T. Kato, R. Onozawa, H. Miyake, Y. Tanaka, T. Takada, "Properties of Space Charge Distributions and Conduction Current in XLPE and LDPE under DC High Electric Field", IEEJ Transaction on Fundamentals and Materials, Vol. 135, No. 2, pp.75-81 (2014)
 - [14] K. Enoki, A. Kiuchi, H. Miyake and Y. Tanaka, "External Circuit Current Measurements of Polyimide During Proton Irradiation," 2025 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Manchester, United Kingdom, 2025, pp. 519-522
 - [15] A 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.
 - [16] 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.
 - [17] European Cooperation for Space Standardization (ECSS), ECSS-E-10-04A, Space engineering – Space environment, European Space Agency (ESA), 21 Jan. 2000.
 - [18] 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.
 - [19] 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
 - [20] Y. Li, M. Yasuda and T. Takada, "Pulsed Electroacoustic Method for Measurement of Charge Accumulation in Solid Dielectrics", IEEE Trans. DEI, Vol.1, No. 2, pp.188-195, 1994.
 - [21] H. Miyake and Y. Tanaka, "Space Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons," Sensor and Materials, vol.29, no. 8, pp. 1213-1222, 2017.
 - [22] IEC Technical Specification, "Calibration of Space Charge Measuring Equipment Based on Pulsed Electro-acoustic (PEA) Measurement Principle", IEC/TS 62758 (2012)
 - [23] 榎海星, 遠藤和樹, 三宅弘晃, 田中康寛, "陽子線照射フッ素系絶縁材料の直流課電下における空間電荷蓄積挙動", 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 145, No. 10, pp. 330-337 (2025)