

電子線を照射した宇宙機用絶縁材料における内部帯電 および電気絶縁劣化評価

菊池寛*、谷貝健太、三宅弘晃、田中康寛（東京都市大学）

Study on Internal Charging Phenomena and Change of Electrical Properties in Electron Beam Irradiated
Insulating Materials for spacecraft
Yutaka Kikuchi*, Kenta Yagai*, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

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において、機内の温度を一定に保つために、絶縁材料フィルムを積層したサーマルブランケットと呼ばれる積層の熱制御材料(MLI: Multilayer Insulator)が使用されている。しかし、MLIは銀河宇宙線と称される星間空間を飛び交う高エネルギー荷電粒子や放射線帯、プラズマ環境下などに曝されることによって、帯電およびそれに起因する放電現象が発生し、絶縁材料の劣化や宇宙機に搭載されている機器の誤作動・故障を引き起こすといわれている。特に宇宙環境に起因する静止衛星の事故のうち、過半数以上が帯電・放電現象が原因であるという報告もある[1]ことから、宇宙機を設計する際には、MLIなどに使用される絶縁材料等の帯電特性など、電気的特性の評価が重要な要因となっている。しかし、現在検討されている宇宙機設計のガイドラインでは高エネルギー荷電粒子が照射された絶縁フィルムの電気的特性変化は、あまり考慮されていない。

そのため、宇宙環境に起因する事故を防ぐためにも、放射線を照射した高分子絶縁材料内で生じる電荷蓄積のメカニズムを解明することが重要となっている。また、この帯電現象は表面帯電と内部帯電に分類され、表面帯電に関してはこれまでに多くの報告がなされているが、現状では内部帯電に関する報告例は少ない。そこで、本研究では、高エネルギー荷電粒子線の一つである電子線を照射した絶縁材料内部の電気的特性を調査することを目的としている。本稿では、宇宙機誘電体として多く用いられているポリイミド系およびフッ素系高分子絶縁材料に着目し、宇宙環境を模擬できる真空チャンバーと内部帯電計測装置を用いて電子線照射中における各種絶縁材料の空間電荷分布測定を行った。また、電子線を照射したことによる導電率の変化を調査するために、未照射、照射材料を用いた伝導電流測定を行ったので以下に報告する。

2. 実験装置

〈2・1〉電子線照射用真空チャンバー

図1に電子線照射用真空チャンバーの写真および概略図

を示す。電子の照射には電子顕微鏡用のタングステンフィラメントを用い、加速エネルギー100keVまでの電子線照射が可能であり、チャンバー内の真空度は約 1.0×10^{-5} Pa まで到達可能である。

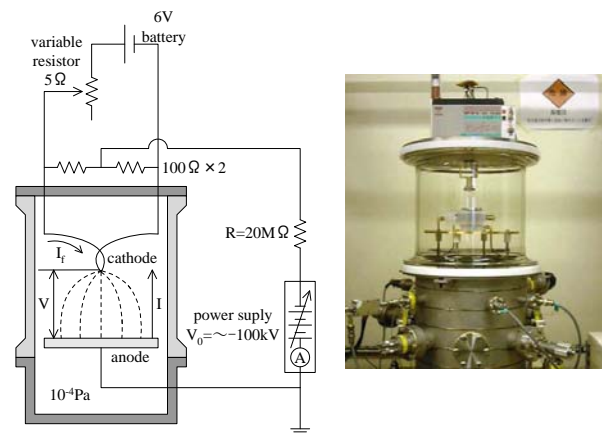


図1 電子線照射用真空チャンバー

〈2・2〉PIPWP 測定装置

図2にPIPWP測定装置の写真および概略図を示す。本装置には、電子線を試料に照射するための直径10mmの照射孔が照射側電極に設置され、試料表面に蒸着されたアルミ電極とともに、接地電極を構成している。また、下部電極として石英ガラス上面にNi-Crを蒸着して、信号検出電極として用いている。なお、この石英ガラスは、信号検出用の電極を接地導体から絶縁するために用いている。さらに、真空中で試料と電極の密着性を高めるために、ガラス上面に空気抜き用の溝を加工し、試料と電極間の空気を排気する構造にしている。現在、本測定装置の位置分解能は約6μmであり、厚さ60μm程度以上の試料であれば、位置分解能約10%で測定が可能である。[2]

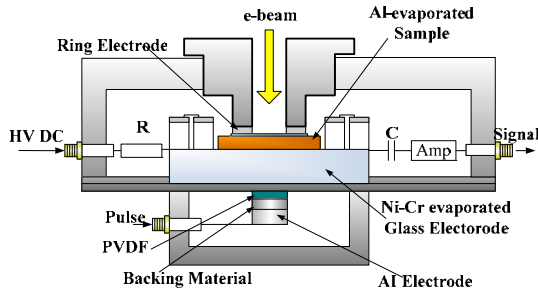
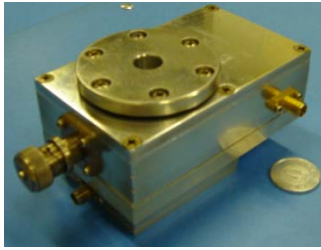


図2 PIPWP 測定装置

〈2・3〉 導電率測定装置

図3に導電率測定装置の写真および概略図を示す。装置は上部電極と下部電極(検出電極)、ガード電極の3つの電極で構成されている。測定試料には、上部電極を介して直流高電圧 V_{dc} が印加され、試料内部のみを通過した電流がデジタルエレクトロメータで測定される。導電率は、測定された電流密度の120分値を用いて算出した。

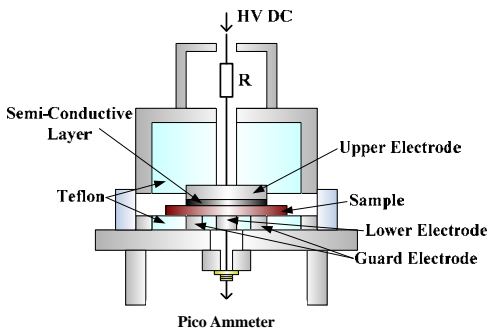
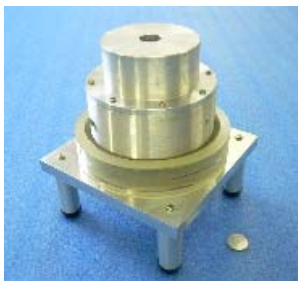


図3 導電率測定装置

〈2・4〉 PEA 測定装置

図4に PEA 測定装置の写真および概略図を示す。測定試料は直流高電圧電源とパルス発生器に接続された上部電極と下部電極で挟むことで、前述に示した PEA 法により空間電荷分布測定を行っている。

この測定装置では圧電素子に厚さ $17 \mu\text{m}$ のニオブ酸リチウム(LiNbO_3)を用いており、パルス発生器は幅 5 ns 、電圧値 500 V である。したがって、本測定装置の位置分解能は約 $10 \mu\text{m}$ となり、厚さ $100 \mu\text{m}$ 以上の試料が測定可能となっている。また、印加可能電圧は最大で 15 kV である。[3], [4]

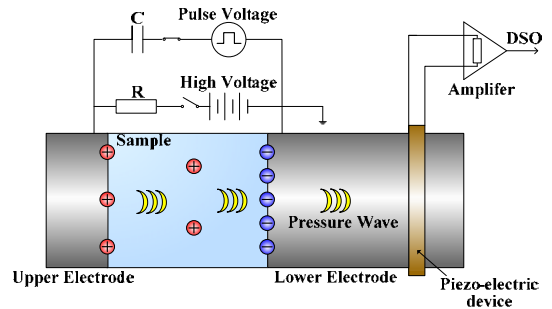
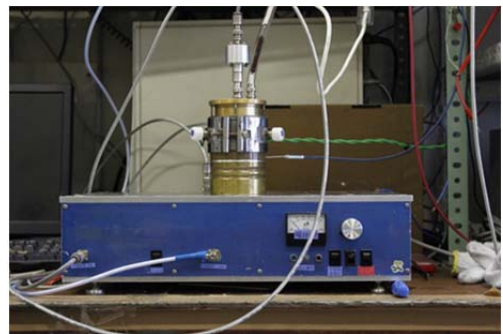


図4 PEA 測定装置

3. 電子線照射中における空間電荷分布測定結果

〈3・1〉 実験条件

表1 測定試料

Sample	Density [g/cm ³]	Relative permittivity	Molecular architecture
FEP 100 μm	2.20	2.1	$\left[\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array} \right]_m \left[\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{CF}_2 \end{array} \right]_n$
ETFE 100 μm	1.74	2.6	$\left[\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array} \right]_m \left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$
Kapton [®] 125 μm	1.42	3.5	$\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{N} \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_m \left[\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{N} \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_n$

表1に測定に使用した試料の厚さ、密度、比誘電率および、分子構造を示す。照射した電子線の加速エネルギーは40および60 keVであり、電流密度を 40 nA/cm^2 一定として真空チャンバー内の真空度 $2.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 以下において空間電荷分布を測定した。また、測定された電荷分布波形の負電荷蓄積部を積分することにより試料内部に蓄積している電

荷量(蓄積総電荷量)を算出した。測定時間は照射中、照射後ともに 20 分間の測定を 30 秒間隔で行った。

図 5-(a)(b)(c)に加速エネルギー40, 60 keV における各試料の電子線照射中の空間電荷分布図を示し、図 6-(a)(b)(c)に図 5 に示した試料内の負電荷を積分して算出した蓄積総電荷量の経時変化を示す。図 5 において、電子線は図中右側から照射しており、赤線、青線、緑線、黒線はそれぞれ照射後 30 秒、20 分、および照射後 20 分経過時(測定開始 40 分後)の測定結果を示している。なお、照射面側から矢印で示されている破線の位置は、(1)式に示すフェーザの実験式[5]から算出した電子の最大飛程の位置である。(1)式で、E は加速エネルギー[MeV]、 ρ は被照射試料の密度[g/cm³]であり、R が最大飛程[μ m]を表している。

$$R=4070E^{1.38}/\rho \quad (1)$$

〈3・2〉 各試料における空間電荷分布

図 5 より、照射面から最大飛程の範囲内に負電荷が蓄積していることが分かる。なお、試料両電極界面の正電荷は、電子線照射によって試料内部に負電荷が蓄積したことで電

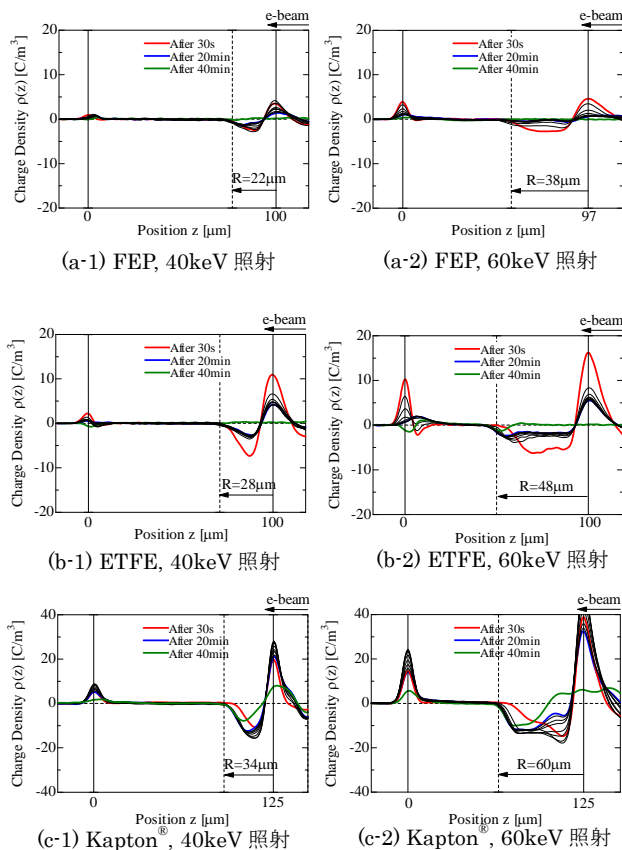


図 5 40, 60 keV 電子線照射中および照射終了 20 分後の空間電荷分布

極に誘電された電荷である。また、加速エネルギー60keV における電荷分布波形において、FEP、ETFE では電子が侵入した範囲内ではほぼ均一に分布しているのに対し、Kapton®で2つのピークが観測された。

〈3・3〉 各試料における蓄積総電荷量の経時変化

蓄積する電荷量とその経時変化については図 6 に示す。同図より、すべての試料において負電荷の蓄積が照射中にもかかわらず飽和値に達した後に減少しており、FEP, ETFE においては電子線照射終了後には負電荷の蓄積は観測されないのに対し、Kapton®は電子線照射終了後も負電荷が蓄積している。この電子線照射中に負電荷の蓄積が減少するという現象は試料内の導電率が電子線照射中に変化しているためであると考えられる。蓄積された負電荷は、電子の通過領域で導電率が上昇した事により、蓄積電荷に対する移動度が上昇し、照射面側の電極へドリフトし、放出されたものと考えられる。この電子線照射にともなう導電率の上昇は、一般に放射線誘起伝導度(Radiation Induced Conductivity: RIC)と呼ばれている。

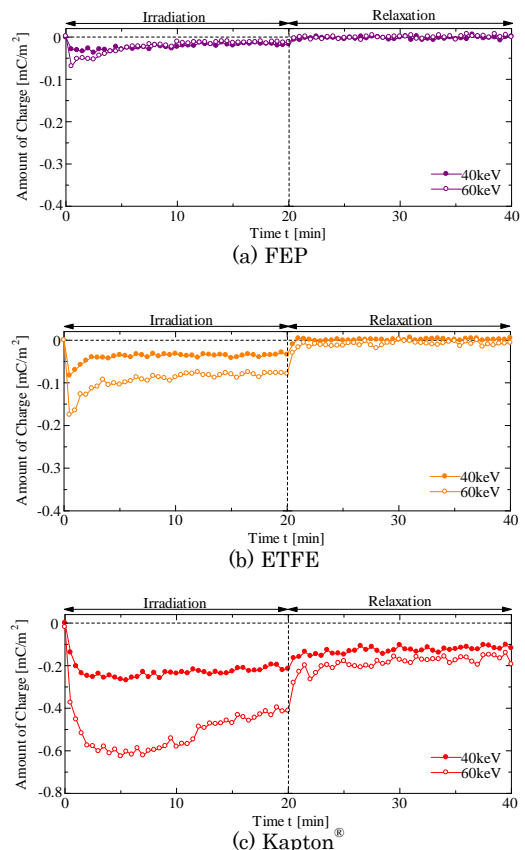


図 6 40, 60 keV 電子線照射中・後における試料内蓄積総電荷量の経時変化

4. 電子線を照射した各種絶縁材料の導電率測定結果

前述で述べた負電荷の蓄積減衰過程の試料毎における相違から、RIC の大きさが試料によって異なると推測した。このことを確認するため、電子線照射後の試料の導電率測定を行い、未照射試料と比較を行った。

〈4・1〉 実験条件

加速エネルギーを40および60 keV、電流密度が40 nA/cm²の電子線を20分間真空チャンバー内で各試料に照射した。照射終了後、15分以内に導電率測定装置に試料を移し、常温、大気圧下で導電率測定を行った。測定条件は、印加電界を100 kV/mm、測定時間を2時間、測定間隔を2.5秒間とした。導電率の算出は測定電界印加2時間後の電流値を用いて行った。

〈4・2〉 各試料における導電率の比較

図7に電子線未照射および照射試料の電流密度の経時変化を示す。また、図8に図7の測定結果より算出した各試料の導電率を示す。

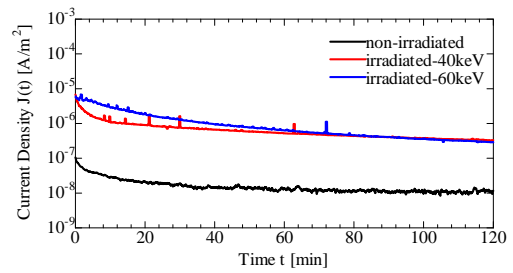
図7より、すべての結果において時間経過とともに電流密度は減衰し、測定終了時に最小となっていることがわかる。また、FEP, ETFE においては未照射試料よりも電子線照射試料の方が電流密度が上昇しているのに対し、Kapton[®]においては電流密度の上昇は見られなかった。

図8より、各試料の電子線照射による導電率上昇度を比較すると、FEP, ETFE では約30倍上昇していることがわかるのに対し、Kapton[®]に関しては、顕著な上昇は見られなかった。すなわち、FEP, ETFE はKapton[®]に比べ、電子線照射による導電率の増加が大きく、前節の空間電荷挙動を裏付ける結果が得られた。

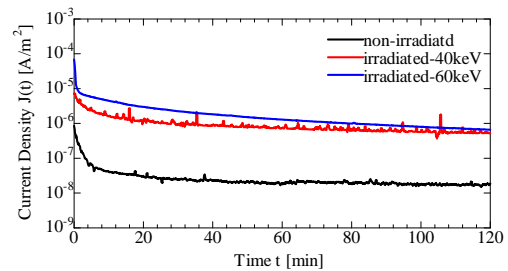
〈4・3〉 直流高電圧印加時の空間電荷分布測定結果との比較

各試料における導電率上昇度と空間電荷蓄積との関連性を調査するため、導電率を測定した条件と同条件下でPEA法を用いて、直流高電圧印加時の空間電荷分布測定を行った。照射試料には加速エネルギー40 keV、電流密度40 nA/cm²の電子線を20分間照射した試料を用い、電子線照射後、15分以内に大気圧下で実施した。測定時間は印加中60分間、短絡中10分間の計70分間とした。また、比較対象として、電子線未照射試料における測定も行った。その結果を図9に示す。なお、横軸が試料厚さ[μm]、縦軸が測定時間[min]を示しており、電荷密度[C/m³]はカラーバーを用いて暖色系を正電荷、寒色系を負電荷としている。また、図中の黒い縦の破線は(1)式から算出した電子の最大飛程の計算値を表している。

同図より、電子線を照射したFEP, ETFE フィルムでは未照射試料と比較すると顕著な空間電荷形成の変化が観測されており、FEPにおいては陽極側(電子線照射面側)から多量の正電荷の注入が観測され、この正電荷は電界印加時間の経過とともに電子の最大飛程位置を越えて試料内部に侵入



(a)FEP



(b)ETFE

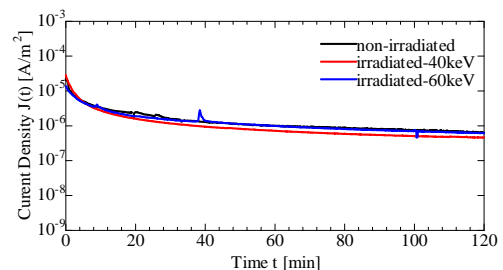
(c)Kapton[®]

図7 各試料における電流密度の経時変化

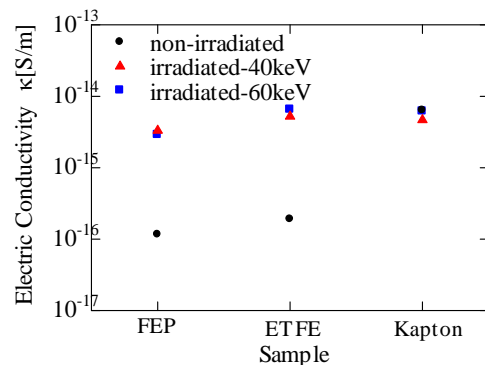


図8 各試料における導電率

していることがわかる。これは電子線を照射したことによる照射面側の界面における電荷注入障壁のレベルが低下した事に起因していると推測される。また、ETFEにおいては、電子の最大飛程位置近傍から発生したように見える多量の正電荷が対向電極側まで到達しており、陽極側には負電荷の蓄積が観測されている。これは、高エネルギー電子が分子鎖を切断することで、正負のキャリアが多量に発生したまま材料内部に残留し、それが直流高電界下で分離したことによる現象があると考えられる。以上の2試料に対しKapton®では、未照射試料の空間電荷形成とほぼ同様であり、顕著な変化は観測されなかった。以上の結果から、FEP、ETFEフィルムはKapton®に比べ、電子線照射による絶縁性の劣化が著しいと考えられる。

5. 結論

電子線照射中における空間電荷分布測定結果より、全ての試料において蓄積電荷量が電子線照射中にも関わらず減少する傾向が得られた。これは、電子が侵入した領域内でRICが発生したためであると考えられる。また、Kapton®においてはFEP、ETFEに比べ帯電量が大きかったため帯電・放電現象を引き起こす可能性がある。

電子線照射による電気的特性の変化を調査するため、導電率測定および直流高電圧印加時の空間電荷分布測定を行った結果、FEP、ETFEにおいて導電率は未照射試料よりも約30倍増加しており、空間電荷形成にも顕著な変化が観測された。したがって、これらの試料は他の試料に比べ、電子線照射による劣化が著しいと考えられる。よって、今回の実験結果のみから判断すると、Kapton®, FEP, ETFEは宇宙機用絶縁材料として適しているとは言いにくい。よって、帯電がしにくく劣化現象が起きない新たな材料の開発が必要であると考えられる。

文 献

[1]H.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]H.Tanaka, et al, "Development of Real-time Measurement Equipment of Space Internal Charging using Piezo-electric Induced Pressure Wave Propagation Method", IEEEJ Trans. FM, 121, 143-148(2001) (in Japanese)

[3]T. Takada, "Acoustic and optical methods for measuring electric charge distributions in dielectrics", IEEE Trans. Plasma Science., Vol. 34, pp. 2176-2184, 2006.

[4]T. Takada, et al, "Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric Materials for Spacecraft", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 6, pp. 519-547, 1999.

[5]L.Katz, et al, "Range-Energy Relations for Electrons and the Determination of Beta-Ray End-Point Energies by Absorption", Rev. Mod. Phys. 24, 28-44 (1952)

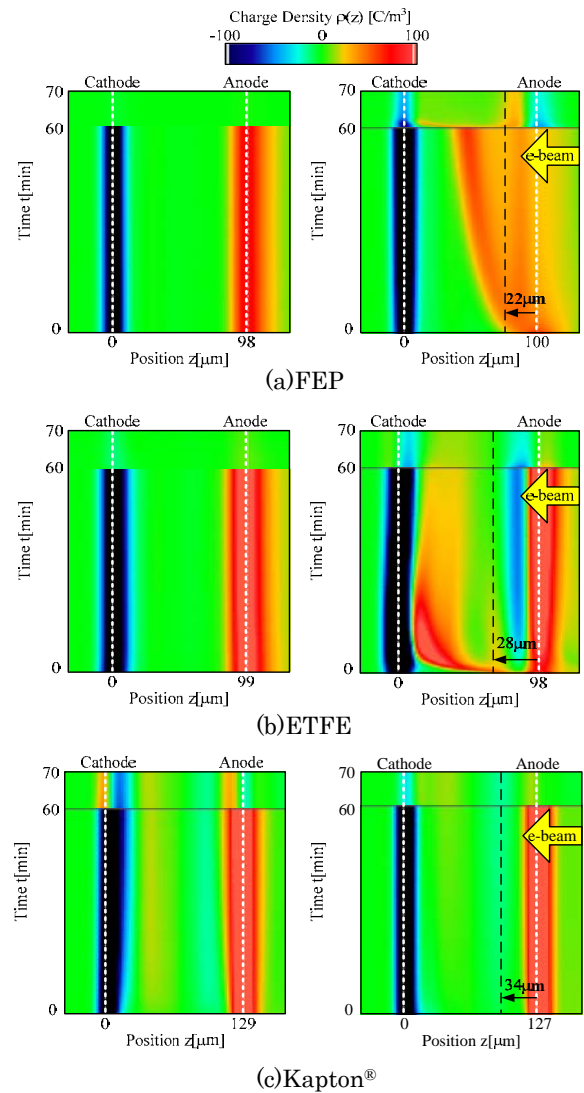


図9 電子線照射試料における 100kV/mm 印加時の空間電荷蓄積の経時変化