

# 3G11 衛星設計標準の制定に向けた 宇宙用絶縁材料の絶縁破壊試験（第3報）

○林寛（HIREC）、國中均、宮崎英治、佐藤哲夫（宇宙航空研究開発機構）  
村松丈志（NT スペースシステム）、藤井治久（奈良高専）、村上洋一（三菱電機）

Electrical Breakdown Tests on Space Insulating Materials for Spacecraft Design Criteria (3<sup>rd</sup> Report)  
Hiroshi Hayashi (HIREC), Hitoshi Kuninaka, Eiji Miyazaki, Tetsuo Sato (JAXA)  
Takeshi Muramatsu (NT Space Systems), Haruhisa Fujii (NNCT) and Yoichi Murakami (MELCO)

Key Words: Spacecraft Design Criteria, Insulating Materials, Breakdown Test

## Abstract

The working group (WG5) of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has been obtaining the electrical breakdown properties of the satellite insulating materials to establish the spacecraft equipment design criteria since 2006. WG5 was completed all breakdown tests of 13 insulating materials samples and obtained the derating rate for spacecraft equipment design in 2007. In 2008, the authors carried out the supplementary test to evaluate the voltage aging properties and breakdown voltage properties against the sample thickness and RF region frequency. In addition, we investigated the breakdown properties of Kapton against electron beam irradiation without the air exposure. The paper presents the experimental results and the status of the electric breakdown test of space insulating materials as the 3<sup>rd</sup> report of the research.

## 1. はじめに

電源装置などの電気システムでは、電圧の印加部分を絶縁・支持するために、その随所に様々な絶縁材料が使用されている。その絶縁性能は、それらが使用されている電気システム全体の性能や信頼性に大きく関わり、極めて重要な役割を果たしている。過酷な宇宙環境下で、高い性能や信頼性が要求される人工衛星などの宇宙用電気システムにおいても、この事は例外ではない。信頼性の高い宇宙システムを構築する上で、その電気絶縁部分の信頼性向上は必須の課題となっている<sup>1)</sup>。

絶縁材料の絶縁性能を決定づける要因は、材料自身の電気的特性と使用環境による絶縁劣化に大別できる。絶縁材料はその厚さや温度、印加電圧の周波数などの要素に応じて、その材料固有の異なる特性を示し、これが各々の材料の本来の絶縁性能を決めている。一方、絶縁劣化は長時間の電圧印加に伴うコロナ劣化やトリッキング劣化、放射線や紫外線の被曝などの使用環境によって絶縁材料の絶縁性能が、次第に本来の性能に比べて低下してくるものである。絶縁材料の電気的特性は、主に短時間領域での絶縁

破壊特性に大きく影響を及ぼすのに対して、絶縁劣化特性はその寿命を左右する要因となるため、実用上は両方の特性を把握する事が求められる。

さらなる宇宙システムの信頼性の向上が要求されている今日、様々な衛星用絶縁材料の絶縁破壊特性データを蓄積し、これに基づく宇宙システムの絶縁設計ガイドラインの整備が待ち望まれている。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、電気絶縁を「緊急性を要する課題」の一つと位置付けて、絶縁設計に関する設計標準の制定を目的とするワーキンググループ（WG5）を設置して、活動を進めている。その一環として、平成18年度より13種類の衛星用絶縁材料を対象とする絶縁破壊試験に着手しており<sup>2)</sup>、平成19年度までに当初から計画されていた試験を完了した。しかしながら、これらの試験データに対して以下に示す課題が指摘された。

- ① 厚さ特性は、データを取得した厚さ範囲が狭く、厚さによる絶縁破壊特性を十分に評価できていないと難しい。
- ② 周波数特性は、データを取得する周波数範囲を数百kHzまで拡張する事が望ましい。

- ③ 課電劣化特性の一部（熱収縮チューブ、solithane、parylene）で、封入樹脂中や試料と電極の間に残留した大気のコロナ放電によるものと思われる影響が見られる。
- ④ uralane の課電劣化は、長時間領域におけるデータが不足しており、十分なデータを得る必要がある。
- ⑤ Kapton は電子線照射後に大気曝露すると特性が変化する事が指摘されており<sup>3)</sup>、本試験においても大気曝露による影響の有無を確認する必要がある。

そこで上記の課題が指摘された試料・試験項目に対して、平成 20 年度に追再試験を実施して対応する事になった。

本稿では WG5 における絶縁破壊試験の第 3 報として、平成 19 年度までの試験成果と平成 20 年度の試験計画と進捗状況について報告する。

## 2. 平成 19 年度の試験成果

### 2-1 試験方法

本研究では、これまでに短時間破壊試験で衛星用絶縁材料の厚さ（一部の試料のみ）、温度、周波数、電子線照射、紫外線照射（一部の試料のみ）に対する絶縁破壊特性を、課電劣化試験では課電劣化（時間）に関する特性をそれぞれ取得した。試験対象となる試料は、表 1 に示す 13 種類の絶縁材料である。これらは、実際に宇宙機で使用されている絶縁テープ、熱収縮チューブ、フィルム材、バルク材、各種コーティング又はポッティング材である。短時間破壊試験は、原則として JIS C 2110-1994<sup>4)</sup>で規格された段階破壊試験方法により実施した。その試験系の構成を図 1 に示す。短時間破壊試験は図 1 (a)に示すように試料を 2 本の直径 6mm、長さ 60mm、角部曲率半径 R1 の黄銅製棒電極の間に挟みこみ、これに破壊が生じるまで 20 秒毎に段階的に電圧を上昇させていく事により、絶縁破壊電圧を計測した。ここで述べた電極形態は絶縁テープ、フィルム材などに対する試験の場合であり、試料の形態により電極の形

表 1 絶縁破壊試験用試料リスト

試料名	用途	形態/サイズ
Kapton テープ	絶縁テープ	糊付テープ/ W30xL120xT0.08mm
Kapton フィルム	絶縁フィルム	W25xL150xT0.05mm
テフロンテープ	絶縁テープ	糊付テープ/ W55xL150xT0.1mm
CHO-THERM	クールシート	円板状/ φ 30xT0.38mm
SOLITHANE 113	コーティング材	φ 25 電極に塗布/ T0.1mm
マイカ (2 種類)	絶縁材、コンデンサー	板状/ φ 30xT0.075 or 0.15mm
URALANE	コーティング材	膜状/ φ 120xT1mm
RTV	ポッティング材、絶縁材	膜状/ φ 120xT1mm
ETFE 線	ケーブル	φ 1xL200mm, 被膜厚 0.15mm
熱収縮チューブ	絶縁被覆	棒電極に収縮済/ T0.4-0.7mm, L100mm
PARYLENE	コーティング材	φ 25 電極に塗布/T0.02mm
LUMIRROR	絶縁材	フィルム状/ φ 50xT0.1mm
ガラスエポキシ材	構造材、絶縁材	円板状/ φ 30xT0.2mm
アルマイト材	表面処理	アルミ板片面処理/40 x 40xT0.02mm

W; Width, L; Length, T; Thickness

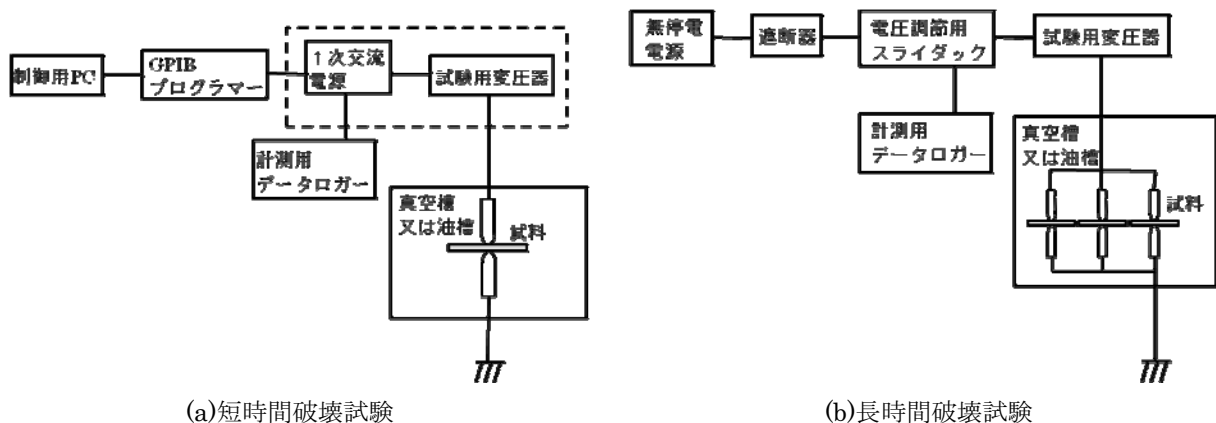


図 1 絶縁破壊試験系の構成

態も変更する。例えば、solithane や parylene のようなコーティング材の場合は、直径 25mm、角部曲率半径 R2.5 の金メッキ処理を施した黄銅製電極に塗布した状態で前述の 6mm 径電極を突き立てて電圧を印加した。熱収縮チューブや ETFE ケーブルの場合は、その周囲に幅 15mm の銅テープを巻き、内部導体（高圧側）と銅箔テープ（接地側）の間に電圧を印加した。印加する交流電圧は、容量が 135V/5A の 1 次交流電源から出力された交流電圧を最大容量 50kV/10mA 又は 30kV/10mA の試験用変圧器で昇圧させることによって発生させ、出力電圧はコンピュータにより制御した。標準の試験条件は、絶縁油（シリコンオイル）中とした。印加電圧の周波数は 50Hz を基準とした。いずれの試験でも各試験条件で 3 回若しくは 5 回ずつ試験を行い、その平均値を計測値とした。

課電劣化特性を取得する長時間破壊試験は、図 1 (b) に示す試験構成で実施した。本試験では油槽または真空チャンバー内に置かれた 3 つの試料に対して一定の交流電圧（50Hz）を継続的に印加して、破壊が生じるまでの時間（寿命）を計測する。破壊時間を特定する為に破壊発生時に交流電源の遮断器が作動し、その作動時間はデータロガーにより記録する。又、破壊が生じた際には破壊した試料を取り除き、残りの健全な試料に対して電圧印加を再開する。本試験では試料への印加電圧を変える事によって 1000 時間までの課電劣化特性を取得した。取得した特性データは逆 n 乗則 ( $t=kV^{-n}$ : 絶縁耐力  $V$ 、寿命  $t$ ) で評価し、絶縁劣化が生じると式中の n 値が小さくなり、特に n 値が低い場合は部分放電等による絶縁劣化と判断される。

既述のとおり、平成 19 年度中に当初から予定されていた試験をすべて完了した。それらの試験成果の大部分はすでに文献<sup>2),5)</sup>で報告している。しかし、一部の試料の課電劣化特性、紫外線特性、電子線照射特性については報告していない。そこで、以下にこれらに結果について報告する。

## 2-2 課電劣化特性

図 2、図 3、図 4 にそれぞれ油中におけるアルマイト、RTV、uralane の課電劣化特性を示す。なお、図中で→を付記しているマーカーは、破壊が生じず、試験を打ち切った事を示している。いずれの試料の V-t 曲線でもその n 値が十分に高いことから、試料の弱点箇所に起因する偶発的な破壊と判断され、絶縁劣化が殆ど生じていないように見える。しかしながら、RTV や uralane の場合のように試験電圧が非常に

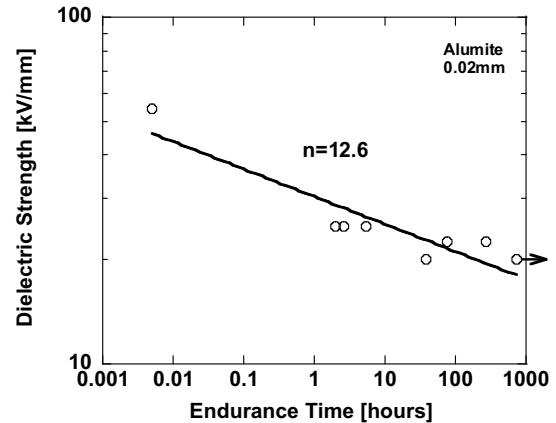


図 2 アルマイトの課電劣化特性

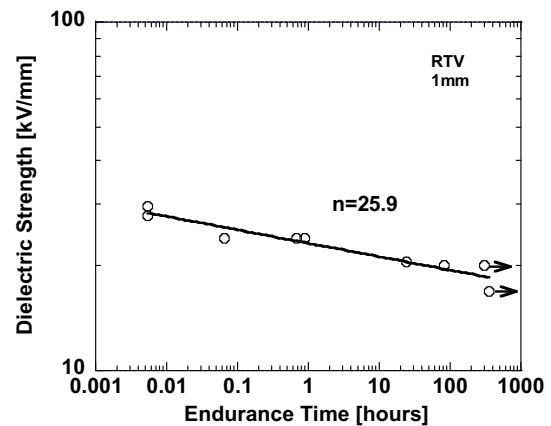


図 3 RTV の課電劣化特性

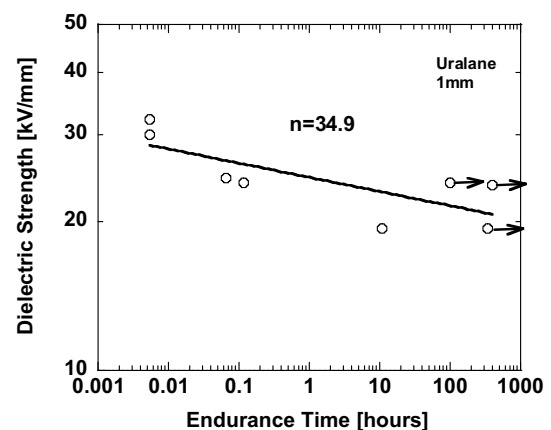


図 4 uralane の課電劣化特性

高い場合では、電界が集中する電極の角部近傍でのコロナ放電によって、試料表面が浸食されて抉り取られていた。このような場合、このまま浸食が進行すると次第に実効的な厚さが薄くなり、ある厚さに

達したところで貫通破壊に至ると推測される。コロナ放電による絶縁材料表面の浸食は、その周辺媒質が変わると、その進行速度などが異なってくるので、実際の軌道上のような真空中の場合ではこのような浸食が全く発生しないか、或いは発生してもその進行速度が変わってくる事が予想される。従って、真空中における課電劣化特性についても確認することが必要であると思われる。

### 2-3 紫外線照射特性

Kapton テープと ETFE ケーブル (Raychem SPEC 55) の紫外線照射特性を図5に示す。本試験では、照射量が 8、80、800ESD の3パターンで照射した試料の絶縁破壊特性を取得した。ここで ESD (Equivalent Sun Day,  $1\text{ESD}=1.02 \times 10^3 \text{J/cm}^2$ ) は紫外線照射量の単位であり、例えば 8ESD は8日間にわたって1日中大気圏外で太陽光が垂直に入射された時に相当する紫外線の照射量である。なお、本試験での照射条件はキセノンランプを照射光源として、波長範囲は 200~400nm、加速率は 10ESD/day である。

図5に示されるように、いずれの試料においても紫外線照射による絶縁耐力の著しい低下は見られない。その一方で、図6に示されるように ETFE 電線では紫外線照射によって、絶縁被覆材の表面が次第に褐色に変色する現象が確認された。この変色は、紫外線が照射された絶縁被覆材の表面のごく浅い部分で起っており、被覆内部では変色は見られない。また、破壊発生箇所は紫外線が当たっていない部分に多い傾向があった。そのため、紫外線を照射した試料でもあまり絶縁特性が変わらなかったと思われる。絶縁被覆が変色した理由については、まだ明らかになっていないが、X線光電子分光 (XPS : X-ray Photoelectron Spectroscopy) を用いて絶縁被覆表面の元素組成を分析したところ、図7に示すように炭素 (C) の組成率が上昇し、フッ素 (F) が減少している事が判っている。この変色のメカニズムや絶縁特性への影響について明らかにするには、今後さらに研究を進める必要がある。

### 2-4 電子線照射特性

これまでの電子線照射特性試験で、Kapton や PTFE を基材とする粘着テープに電子線を照射すると、吸収線量が増大するに伴って、その絶縁耐力が向上する結果が示されている。しかし、PTFE の場合では電子線によってその分子鎖が切断されて著しく脆化するので、絶縁特性も低下するはずであり、本来ならこのような現象は考えにくい。今回、その原因を究

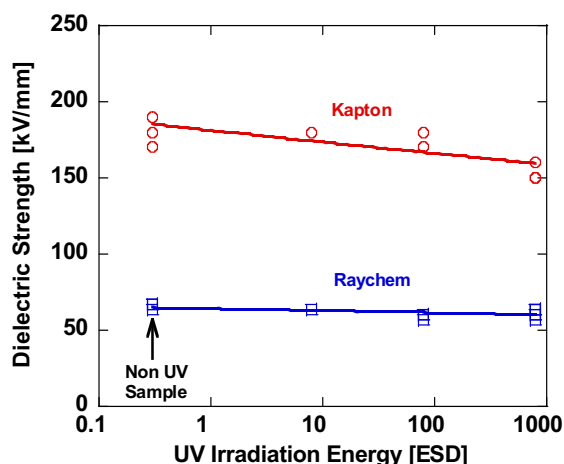


図5 Kapton と ETFE 電線の紫外線照射特性

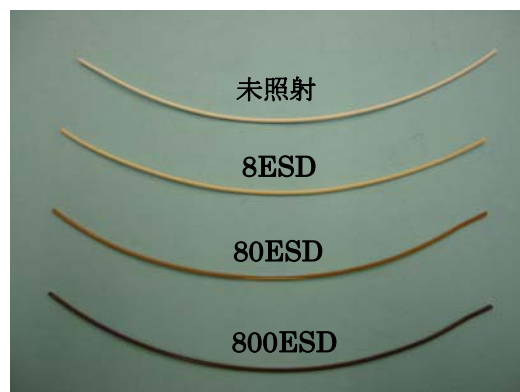


図6 ETFE 電線被覆の紫外線照射による変色

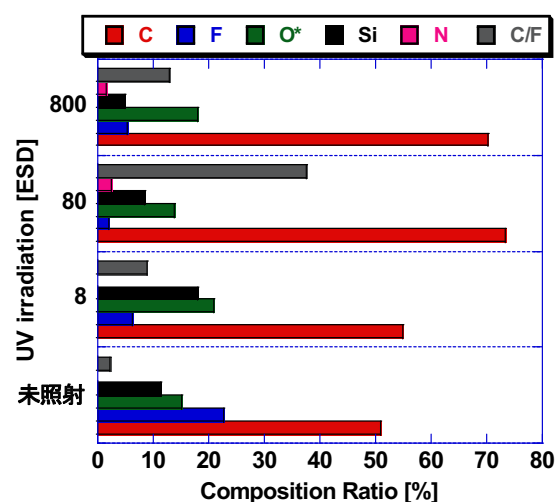


図7 紫外線による ETFE 電線の元素組成の比較

明するために、予備試験を行ったので報告する。絶縁耐力が向上した仮説として、①テープ粘着剤の影響、②基材材料の製品規格 (メーカー、厚さ) による違い、③試料の電子線照射時の温度上昇の影響、

④照射後の大気曝露の影響などが考えられた。そのうち、③については電子線照射時の試料の温度上昇はそれほど高くないと推測されるので、その可能性は低い。そこで今回は①、②について検証するため、以下のような2つの予備試験を行った。

- 1) 粘着剤がない Kapton、PTFE フィルムの絶縁破壊試験および特性比較
- 2) 他社、他規格の PTFE フィルムの絶縁破壊試験および特性比較

1)の予備試験では、同じの厚さの Kapton と PTFE のテープとフィルムに電子線を照射し、その絶縁特性を比較して、粘着剤の有無による絶縁特性への影響を検証した。この試験では、厚さが 0.025mm の Kapton と 0.05mm の PTFE のそれぞれのテープとフィルムを用いて試験を行った。(テープの厚さは、粘着剤の厚さを含まない。)

2)の予備試験では、メーカーや厚さが異なる基材フィルム (PTFE) に電子線を照射し、基材の規格による絶縁特性への影響を検証した。これまで PTFE テープ試料としては、日東電工製の NITOFOLON (ニトフロン) を基材とするテープを用いていたが、これと比較するために日本バルカー工業製の VALFLON (バルフロン) とニチアス製 NAFLON (ナフロン) の絶縁特性を取得した。さらに NAFLON については、厚さによる影響を検証するために、厚さが 0.1mm のフィルムの絶縁特性も取得した。

なお、電子線は JAXA 筑波宇宙センターに設置されている真空複合環境試験設備<sup>6)</sup>を用いて、加速電圧 500keV、線源電流 0.2mA として、吸収線量が 8kGy、80kGy、800kGy の3パターンになるように照射した。吸収線量の計測は、三酢酸セルローズ(CTA)線量計を用いた。

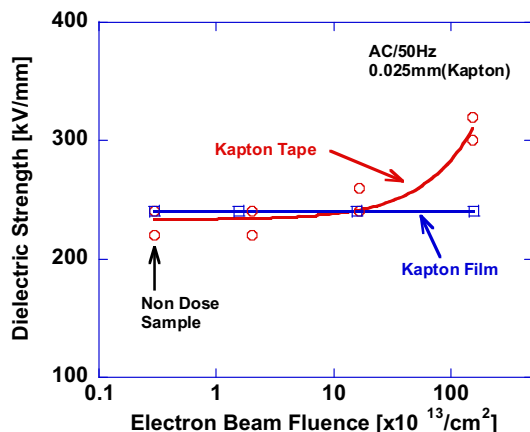


図 8 Kapton の粘着剤の有無による絶縁特性

図 8 と図 9 にそれぞれ Kapton と PTFE の予備試験 1)の結果を示す。又、図 9 には 2)の予備試験の結果も併せて載せた。図中で示されるように、Kapton と PTFE のいずれも、テープのみが電子線照射によって絶縁耐力が上昇している。一方で、フィルムの場合は、今回試験を実施した電子線の照射量範囲では、基材自体の絶縁特性の低下は認められない。又、図 9 に示されるように各規格の PTFE フィルムの電子線照射による絶縁特性を比較すると、いずれのメーカーのフィルムでも電子線照射による絶縁耐力の低下は見られず、ほぼ同等の特性を示した。また、厚さによる特性の違いも認められなかった。これより、②基材材料の製品規格 (メーカー、厚さ) による違いは否定される。このことから電子線照射によってテープ試料の絶縁耐力が上昇する原因は、①テープ粘着剤の影響が有力であると思われる。そこで、これらのテープ試料の断面の様子を走査型電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) を用いて観察したが、特に大きな変化は見られず、現在のところ粘着剤があると何故、絶縁耐力が上昇するのかは、判っていない。

### 3. 平成 20 年度の試験計画と状況

本稿の冒頭で述べたようにこれまで取得したデータにおいて、いくつかの課題が指摘されたため、平成 20 年度はこれらに対する追再試験を行っている。なお、これまで WG5 における絶縁破壊試験は、JAXA 相模原キャンパスで実施していたが、平成 20 年度より JAXA 筑波宇宙センターに変更された。

平成 20 年度に実施する試験としては、4 件の課電劣化試験と 3 件の短時間破壊試験が計画されている。これまで取得した課電劣化特性データで熱収縮チ

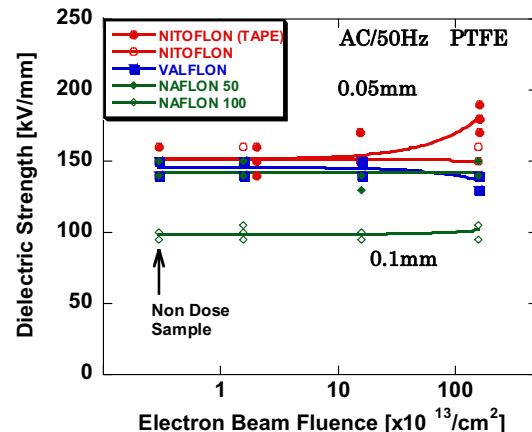


図 9 PTFE の粘着剤と規格による絶縁特性

チューブのデータでは、チューブ試料と内部電極の間に生じる僅かな隙間に残留する大気の放電と思われる影響が見られたため、今回は真空中で再取得を行う。また、樹脂封入によって試験を実施した solithane と parylene についても、樹脂中のボイドの影響が見られるため、樹脂封入を行わずに、試料を油中に浸けて再試験を実施する。uralane については、比較的短時間領域でのデータは十分に取得できているが、長時間領域のデータが十分ではなく、今回は数百時間オーダーのデータの充実を図る。

短時間破壊試験では、厚さ特性、電子線特性、周波数特性の追再試験を実施する。厚さ特性では、現在のところ solithane (0.2mm、0.3mm、0.5mm)、RTV (0.2mm、0.3mm、0.5mm)、Kapton テープ (0.0375mm、0.1mm)、lumirror (0.05mm)、BT レジン (ガラス布積層版、0.2mm) の試験を予定されている。

電子線照射特性試験では、2-4 項で述べた④照射後の大気曝露の影響について検証するため、大気曝露を最小限にして破壊試験を実施する。今回、絶縁破壊試験の実施場所が、電子線の照射場所と同じ筑波宇宙センターに移動した事を活かして、電子線を照射した試料を真空ケースに入れて、速やかに破壊試験の実施場所まで運び、真空中で破壊試験を実施する事によって試料の大気曝露を最小限に抑える。また、照射試料を大気曝露前後で XPS により元素組成や化学結合状態を分析する事によって、大気曝露による影響を評価する。今回は、電子線照射後に大気曝露すると物性が変化する事が指摘されている Kapton<sup>3)</sup>を対象に試験を行う。

周波数特性試験については、これまで 200Hz までの特性データを取得されているが、衛星に搭載される電気部品の中には高周波高圧トランスのように、高周波高電圧で作動するものがあり<sup>7)</sup>、数十～数百 kHz の周波数領域での絶縁破壊特性が要望されている。そこで、今回は 20kHz と 100kHz での絶縁耐力データを、これまで試験を実施した 13 種の試料を対象にして取得する。

平成 20 年 9 月現在、試験設備の筑波宇宙センターへの移動と整備が完了して、熱収縮チューブと solithane の課電試験を実施している。平成 20 年度の試験成果についても、別途報告する予定である。

## 参考文献

[1] P. R. H. Garrett, M. J. Schor : High Voltage in Space  
Innovation in Space Insulation, IEEE Trans. Electrical

Insulation, Vol.28, No.5, pp.855-865, 1993.

- [2] 林寛, 國中均, 佐藤哲夫, 吉田禎二, 藤井治久, 村上洋一: 衛星設計標準の制定に向けた宇宙用絶縁材料の絶縁破壊試験, 第 50 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp.1323-1328, 2006.
- [3] 岩田稔: 薄膜高分子の耐放射線評価に関する検討, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2D07, 2007
- [4] 日本工業規格: 固体電気絶縁材料の絶縁耐力の試験方法, JIS C 2110-1994, 日本工業規格, 1994.
- [5] 林寛, 國中均, 宮崎英治, 佐藤哲夫, 吉田禎二, 藤井治久, 村上洋一: 衛星設計標準の制定に向けた宇宙用絶縁材料の絶縁破壊試験 (第 2 報), 第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2H05, 2007
- [6] 宮崎英治, 島村宏之: 真空複合環境試験設備の現状の能力と課題, 宇宙航空研究開発機構資料, JAXA-RM-07-004, 2007
- [7] 栗田裕, 長谷川武敏, 平沢栄一, 郷内敏夫, 大須賀弘行: 人工衛星搭載用高圧高周波トランス絶縁材料の評価, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-87-154, 1987