

Research on repetition electrical discharge on high voltage cable for SSPS

Yusuke Sadakane, Hirokazu Masui, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho

Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata-ku, Kitakyushu, 804-8550, JAPAN

Tatsuhito Fujita

JAXA/ISTA

Abstract:

In M-SSPS, electrical power generated by solar cells transmits from a electric power generation part to a transmission part. The electric power has to be sent at 10kV to decrease the joule heating loss in the electric power cable. The high insulation performance in the space environments is needed for an electrical power cable. Moreover, the electric power is conditioned with switching on and off the shunt in the SSPS. Therefore the switching of high voltage is performed when the shunt works. The purpose of this study is to examine the influence of high voltage on the electrical power cable in vacuum environment.

The Spec55 used as an electric power cable for space was used for the experiment. When a high voltage was applied to the cable core, the electrical discharge was generated near the contact point of the conductor with the cable covering. The electron discharged from the conductor charged the insulator surface. Moreover, when the cable core was grounded after the surface charging, the electron was discharged from the surface to the conductor. The influence of the repetitive electrical discharge on the cable surface was examined by the electrical discharge breakdown test. The dielectric breakdown of the cable coating was confirmed on Spec55 cable.

貞包悠佑、増井博一、豊田和弘、趙孟佑(九工大)、藤田辰人(JAXA)

1.はじめに

増加し続ける電力需要、二酸化炭素による地球温暖化などへの対応策として、宇宙太陽光発電衛星(SSPS: Space Solar Power System)の研究及び開発が行われている。SSPSとは、軌道上に発電衛星を打ち上げ、宇宙空間で発電した電力をマイクロ波で地上に送電し、地上の受電設備で電力に変換して商業利用するシステムである。軌道上に打ち上げられる発電衛星は、太陽電池により発電をおこなう発電部、マイクロ波で電力を地上に送電する送電部から構成される。発電部で発電された電力は、電力ケーブルにより送電部に電送される。電送時のケーブルによる損失を少なくするため10kV程度の高電圧による電送が検討されている。電力ケーブルは、衛星本体表面に配線されるため、熱や紫外線など宇宙環境による劣化を起こすと考えられる。また、衛星運営中は、シャントのオンオフにより電力の調整が行われるため、電力ケーブルでは高電圧のオンオフが繰り返される。本論では、電力ケーブルへの高電圧印加が及ぼす影響について述べる。

2.実験装置

実験は真空チャンバー内で行った。

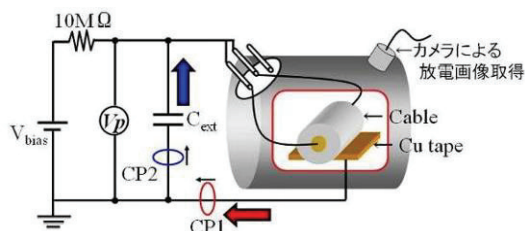


図1. 試験回路

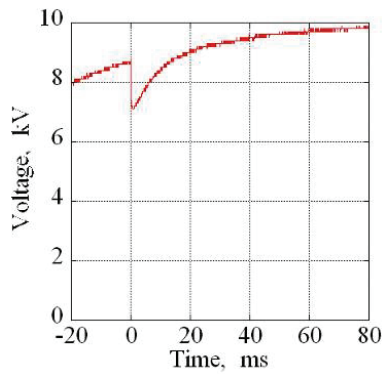
試験回路を図1に示す。接地した銅テープをチャンバー内に配置し、銅テープ上に試験サンプルである電力ケーブルを設置し、SSPS本体表面に電力ケーブルが配線された状態を模擬した。高電圧電源はTAKASAGO製のGLASSMANを使用し、電力ケーブルに高電圧を印加した。高電圧プローブで、ケーブル芯線-GND間の電圧を測定した。電流プローブCP1をトリガとし、高電圧印加によりケーブル上で発生する放電の電流波形の取得を行った。また電流プローブCP2により、放電時に外部コンデンサC_extから供給される放電電流の波形を取得した。試験サンプルはRaychem社のSpec55(AWG22)と定格電圧が低い300VUL耐熱機内配線用ビニル絶縁電線で実験を行った。Spec55は衛星用太陽電池パドルの電力ケーブルとして広く使用されている。

3.1.高電圧印加実験

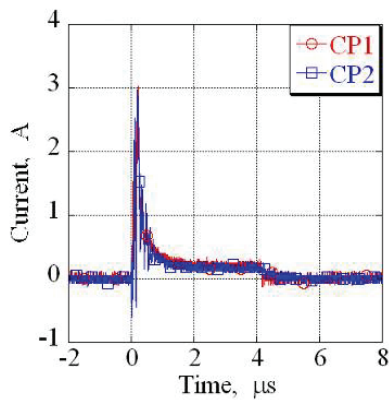
図1の試験回路で、電圧印加時間は15分間、外部コンデンサの容量1nFとし実験を行った。試験時の圧力は $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ [Pa]である。試験サンプルはSpec55(バージンサンプル、熱劣化サンプル)及び、ビニル絶縁電線を3本ずつ使用した。

高電圧を印加するとケーブル被覆と接地された銅テープ間で放電の発生が確認された。印加電圧10kV時に発生した放電の電圧及び電流波形を図2に示す。図2より放電は8.5kV程度で発生したことが分かる。

注1 第12回SPSシンポジウム、京都大学にて2009年11月13、14日開催



(a) 電圧波形(V_{bias} On 時)



(b) 電流波形(V_{bias} On 時)

図 2 放電波形

また放電時に電流プローブ CP1、CP2 で取得された電流波形が一致していることから、放電により流れた電荷量と同じ電荷量が外部コンデンサ C_{ext} から被覆へ流れていることが分かる。元絵を図 3 に、放電発生時に取得された放電画像を図 4 に示す。接地された銅テープとその上に配置された電力ケーブルの接触点付近で放電による発光が確認された。

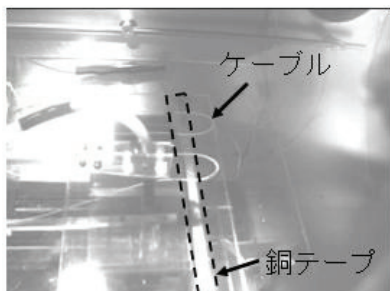


図 3 元絵



図 4 放電画像

各サンプルにおける放電回数を表 1 及び表 2 に示す。

表 1 実験結果

V_{bias} [kV]	Spec55			ビニル絶縁電線		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
10	1	0	0	10	5	6
12	1	0	0	12	2	12
15	1	1	1	15	10	18

表 2 実験結果(熱劣化サンプル)

V_{bias} [kV]	Heat degradation					
	H-01	H-02	H-03	H-04	H-05	H-06
10	0	1	0	1	1	0
12	0	0	0	1	0	0
15	-	-	-	1	1	1

Spec55、ビニル絶縁電線ともに図 2 のような放電波形が取得された。Spec55 ではバージンサンプル、150°C で 30 年間の熱劣化を与えた熱劣化サンプルを用いて実験を行ったが、放電の発生なし、もしくは電圧印加による放電 1 回のみであった。ここで、高電圧印加時に発生する最初の放電を初期放電と定義する。ビニル絶縁電線では初期放電の発生後、15 分間で複数回の放電の発生が確認された。Spec55 において電圧印加時間を 10 時間とし実験をおこなったが、バージンサンプル、熱劣化サンプルともに、初期放電の発生 1 回のみを確認した。放電回数の違いは被覆抵抗値の違いが影響していると考えられる。

放電メカニズムは、ケーブル芯線に高電圧が印加されることで、被覆表面と銅テープの

間に電界が発生し、接地された銅テープから電子が放出される。放出された電子がなだらかに増加し放電が発生する。Spec55 では被覆抵抗値が高く、放電により発生した電子が被覆表面に帯電しその電荷が抜けにくいいため、初期放電の1回のみであったと考えられる。ケーブル表面の電位測定を行った測定結果を表3に示す。 V_{bias} オン時の表面電位は印加電圧15kVより低い値となり、 V_{bias} オフ時には芯線電位の0Vより負の値となった。表面電位測定より、高電圧印加によってケーブル表面が帯電していた。

表3 表面電位測定結果

高圧電源	ケーブル 芯線電位[kV]	ケーブル 表面電位[kV]	帯電 [kV]
On	15	3	-12
Off	0	-2.5	-2.5

ビニル絶縁電線の場合、被覆抵抗値がSpec55に比べ低いため、放電時に発生した電子がケーブル被覆中を通り帯電が緩和されてしまうため、再び電界が発生し、初期放電後も放電が発生すると考えられる。

15分間の電圧印加後に高圧電源をOffにするとケーブル上で発光を伴う放電の発生を確認した。 V_{bias} Off後に取得された放電波形を図5に示す。

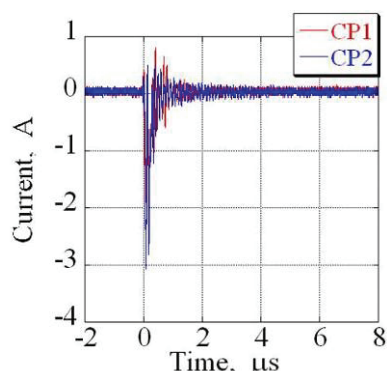


図5 放電波形(V_{bias} Off後)

電流のピーク値が負であることから、高電圧印加により表面に帯電した電子が、高電圧電

源をオフにすることで、接地された銅テープへ放電していると考えられる。 V_{bias} オフ後にケーブル表面の残留負電荷で放電が発生するとケーブル表面に帯電した電子が放電され次の V_{bias} オン時に放電が発生しやすくなる。

3.2.放電耐久試験

SSPSの太陽電池パドルではシャントのオンオフにより電圧が頻繁にオンオフされ、その際にケーブル被覆の初期放電も繰り返し発生すると考えられる。そこで高電圧スイッチを使用し、シャントのオンオフを模擬した。高電圧スイッチはKilovac社の25kV耐圧、真空リレーK62Cを使用した。試験回路を図6に示す。

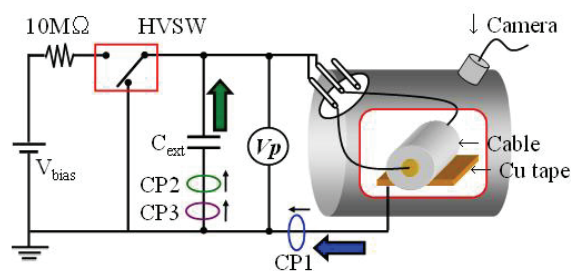
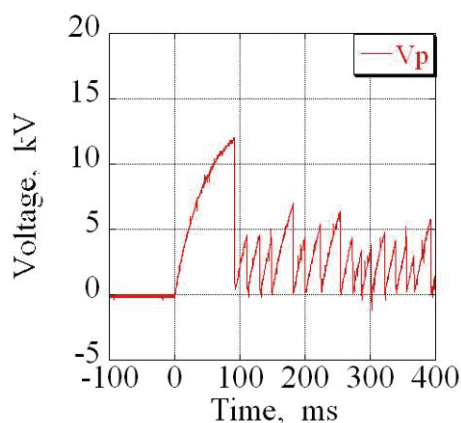


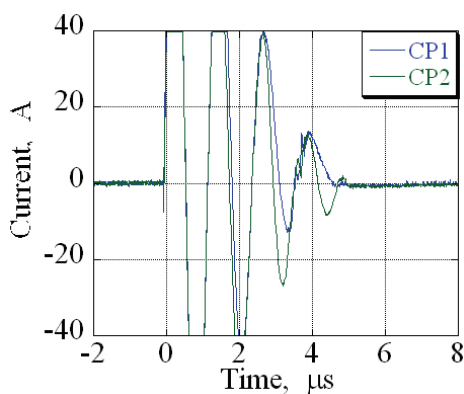
図6 放電耐久試験回路

高電圧スイッチを切り替えることにより試験サンプルで V_{bias} オンオフが繰り返される。電流プローブCP1をトリガとし、放電時の電流波形を取得した。試験サンプルはSpec55のバージンサンプルを使用した。

高電圧スイッチのオン時間10[sec]、オフ時間10[sec]を1サイクルとし、高電圧スイッチのオンオフを繰り返した。試験電圧は10kV、15kVの2ケースで実験を行った。試験時の圧力は $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ [Pa]で行った。試験電圧15kVにおいて被覆が絶縁破壊して完全に短絡する放電が発生した。取得された放電波形を図7に示す。

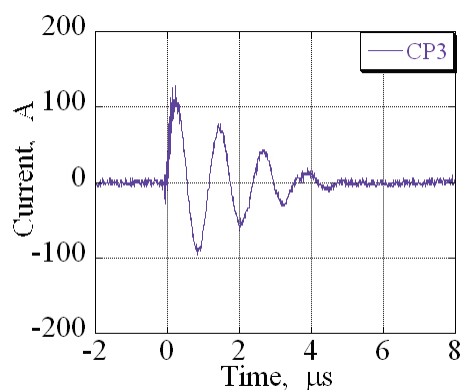


(a) 電圧波形($V_{bias}=15kV$ 、短絡時)



(b) 電流波形($V_{bias}=15kV$ 、短絡時)

図6 絶縁破壊時の放電波形



(c) 電流波形($V_{bias}=15kV$ 、短絡時)

図7 絶縁破壊時の放電波形

電圧が0Vまで降下し、CP1、CP2の電流波形が一致していることから放電時に被覆が貫通していると考えられる。CP1、CP2の測定レンジは40Aから-40Aまでである。CP3は100

倍の電流プローブであり、放電電流のピークは100A程度である。絶縁破壊後はサンプルに電圧が印加できなくなり、電源で設定した最大電流が出力され続ける。出力された電流で外部コンデンサ C_{ext} が充電され5kV程度まで印加されるとケーブル芯線とGNDで放電し短絡が繰り返されるため図7(a)のような電圧波形が取得された。試験結果を表4に示す。

表4 $V_{bias}=15kV$ での放電発生回数および繰り返し回数

	放電回数	繰り返し回数
N-07	—	122
N-08	—	130
N-09	63	103
N-10	48	135
N-11	25	135
N-12	12	100
N-13	15	147
N-14	16	113
N-15	3	124

放電回数は V_{bias} オン時に放電が発生した回数である。繰り返し回数は各サンプルで高電圧スイッチのオンオフを繰り返した回数である。放電回数は各サンプルにおいてばらついたが絶縁破壊までの繰り返し回数は120回前後となった。被覆の絶縁寿命はオン時の放電回数ではなく繰り返しによる高電圧のオンオフの回数による影響が大きいと考えられる。絶縁破壊後のサンプルの写真を図7に示す。

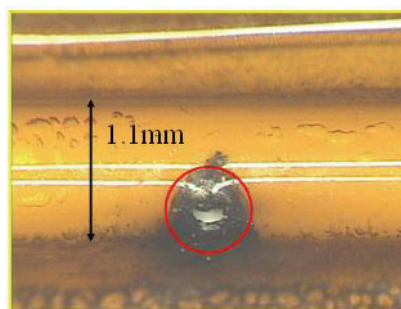


図8 放電痕

図8より、被覆とケーブルを固定しているポ

リイミドテープを貫通して被覆の絶縁性が失われていることが分かる。放電痕の発生箇所を図9に示す。

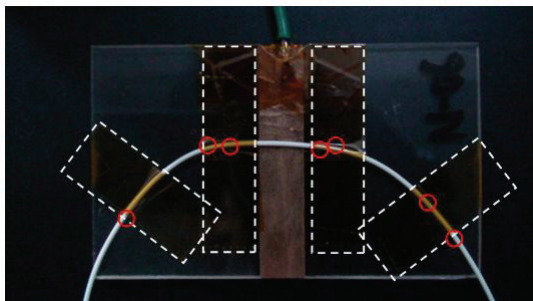


図9 放電痕発生箇所

放電痕の発生箇所は銅テープ上のケーブルではなく、ケーブルの固定のために貼っていたポリイミドテープ上に発生した。原因として、ポリイミドテープ周辺の圧力が高く、オンオフ時に放電が発生しやすいことが考えられるが原因は不明である。印加電圧 10kV で同様の実験を行った結果を表5に示す。

表5 $V_{bias}=10kV$ での放電発生回数および繰り返し回数

	放電回数	繰り返し回数
N-04	50	2000
N-05	47	2000
N-06	34	2000

印加電圧 10kV では各サンプルで高電圧のオンオフを 2000 回繰り返したが、被覆の絶縁破壊は起こらなかった。

各実験ケースの結果を表6に示す。芯線-

GND 間の電界強度は印加電圧と Spec55 の被覆厚さ 0.15mm より求めた。

表6 試験結果

印加電圧 [kV]	電界強度 [kV/mm]	繰り返し回数		
		100	1000	2000
10	66.7	○	○	○
15	100	×	-	-

絶縁破壊の理由として、高電圧オン時は 200ms 程度の立ち上がりで電圧が印加されるが、高電圧 Off 時には $1\mu s$ 以下の時間で電圧がオフになることから電圧の降下速度の影響が大きいと考えられる。

4.総括

Spec55 ケーブルへ高電圧を印加し初期放電の発生を確認した。また、高電圧の印加によりケーブル表面が帯電する。高圧電源オフ後に残留負電荷による放電を確認した。Spec55 の熱劣化サンプルを使用し、高電圧印加試験及び長時間印加試験を行ったが、バージンサンプルとの放電現象の違いはなかった。SSPS におけるシャントのオンオフを模擬した放電耐久試験を行い、印加電圧 15kV において絶縁破壊を確認した。

参考文献

1)2006 年度 宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書