GIS スペーサ内部モデルの繰り返しインパルス絶縁特性

正 員 岡部 成光 (東京電力)	正 員 青柳 浩邦 (東 芝)
正 員 大野 高宏 (東京電力)	正 員 村瀬 洋 (東 芝)
正 員 財満 英一 (東京電力)	正 員 大島 巖 (東 芝)

Deterioration Characteristics of Insulating Spacer Model toward Repeating Impulse Voltage
 Shigemitsu Okabe, Member, Takahiro Ono, Member, Eiichi Zaima, Member (Tokyo Electric Power Co. Inc.)
 Hirokuni Aoyagi, Member, Hiroshi Murase, Member, Iwao Oshima, Member (Toshiba Corp.)

In order to discuss the UHV GIS test voltage, the deterioration characteristics of GIS insulating spacer model was studied by repeating lightning or switching impulse voltage. Deterioration factor in which indicates the decrease of lightning or switching impulse breakdown voltage up to 1000 times applications was found to be 35.7/45.5. And, the relation between partial discharge inception voltage and breakdown voltage was studied after 1000 times impulse application. As the result, it was found that partial discharge inception voltage was increased in spite of breakdown voltage decrease due to the impulse voltage.

Moreover, in order to make clear the deterioration phenomenon, breakdown characteristics of models with various boundary conditions between electrode and epoxy resin was studied and the relation between the boundary conditions.

Furthermore micro-discharge was also studied. From the investigated results, the deterioration by repeating voltage was caused by micro-discharge due to electric field intensification on micro protrusion of the electrode surface.

キーワード：GIS、絶縁スペーサ、V-N特性、部分放電、劣化メカニズム、インパルス試験電圧

1. まえがき

電力需要の増大に対応しUHV送電プロジェクトが推進されて技術開発が進められている。⁽¹⁾ その中の一つに、機器の試験電圧の検討が挙げられている。試験電圧については、以前から検討されているが、⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ ガス絶縁開閉装置(GIS)の雷/開閉インパルス試験電圧値を決定するためには、GIS絶縁の要になる絶縁スペーサ内部の繰り返し課電に対する絶縁劣化特性(V-N特性)の把握が必要である。

絶縁スペーサの絶縁構成材料であるエポキシ樹脂のV-N特性は、モデルで調査されているが、⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾ データの数が少なく、インパルス耐電圧レベルを検討するために必要な統計的パラメータは明確に評価されていないのが実状である。

そこで、著者らは絶縁スペーサの埋め込み電極と同じ界面処理を施したエポキシ注形品を用いて、雷/開閉インパルスの課電回数1000回までのV-N特性を調査し、ワイブ

ル確率分布の統計的パラメータを詳細に求めるとともに、絶縁劣化の程度を表す劣化係数(V-N特性の傾きn値)を明らかにした。⁽⁹⁾ その後、課電回数1000回に耐えたモデルについて、絶縁劣化の状況を把握する目的で部分放電(PD)開始電圧と絶縁破壊電圧の関係を調査し、課電前の初期特性と比較した。更に、繰り返し課電による絶縁劣化現象を明らかにするため、埋め込み電極の表面粗さや界面処理を種々選定したモデルで、絶縁劣化特性に及ぼす電極界面状態の影響について調査した。本論分では、これらの検討結果について述べる。

2. 試験方法

〈2.1〉 供試モデル 絶縁スペーサの貫通絶縁破壊調査の供試モデルを、図1に示す。供試モデルは、直径80mm、高さ100mmの酸化アルミ(Al_2O_3)充填のエポキシ注形品で、直径40mmの高電圧及び接地電極が埋め込まれている。この供試モデルの絶縁厚さ(電極間距離)

図1 供試モデル

Fig. 1. Experimental model

は3 mmである。そして、埋め込み電極の界面は、絶縁スペーサの埋め込み電極と同一の処理が施されている。

GIS用の絶縁スペーサは、工場の耐電圧試験でPD発生が無いことを検証する。そのため、最初に、供試モデル全数について、電圧45 kVrms（平均電界強度15 kVrms/mm）でPD（ ≥ 0.1 pC）の発生が無いモデルを選別した。

このPD試験時の電界強度は、絶縁スペーサの耐電圧試験時のそれよりも裕度を見込んで高くしている。

〈2.2〉初期絶縁破壊試験 供試モデル30個ずつについて、雷/開閉インパルス（正極性標準波形）絶縁破壊特性を調査する。その結果から、50%累積確率の絶縁破壊電圧（ V_{50} ）、ワイブル分布の形状パラメータm値及び標準偏差（ σ ）を求める。

〈2.3〉V-N特性試験 雷インパルスについては、繰り返し課電電圧が（ $V_{50}-1\sigma$ ）～（ $V_{50}-3\sigma$ ）の範囲の4条件で、開閉インパルスでは（ $V_{50}-0.68\sigma$ ）～（ $V_{50}-1.5\sigma$ ）の3条件で、各30個の供試モデルにつき、繰り返し課電1000回までの絶縁破壊特性を調査する。その結果から、各繰り返し課電電圧での50%累積確率の課電回数を求め、V-N特性の回帰直線を算出する。

〈2.4〉残存絶縁破壊試験 1000回までの繰り返し課電に耐えた供試モデル（課電品モデル）について、PD開始電圧と雷/開閉インパルス絶縁破壊電圧の関係を調査する。その結果から、繰り返し課電試験前の供試モデル（無課電品モデル）の初期特性と比較して、繰り返し課電による絶縁劣化の有無を検証する。

3. 試験結果

〈3.1〉初期絶縁破壊特性 図2に、雷/開閉インパル

スの絶縁破壊電圧のワイブル確率分布特性を示す。確率分布P（V）は、（1）式で表される。

$$P(V) = 1 - \exp[-(V/V_s)^m] \quad \text{----- (1)}$$

V_s : 尺度パラメータ

m : 形状パラメータ

この結果から、 V_{50} は290/261 kVで、m値は13.2/9.1である。この値より、 σ を推定すると9/13.4%である。

上記の特性から、雷/開閉インパルスの50%累積確率の絶縁破壊電界強度（ E_{50} ）は、97/86 kV/mmである。また、絶縁スペーサの設計に必要な低確率の電界強度、例えば、（ $E_{50}-3\sigma$ ）は71/52 kV/mmになる。

図2 初期絶縁破壊特性

Fig. 2. Initial breakdown characteristics of model

〈3.2〉V-N特性 図3に、課電回数Nに対する絶縁破壊のワイブル確率分布特性を示す。但し、雷インパルスの（ $V_{50}-3\sigma$ ）での課電電圧については、供試モデル30個中2個しか絶縁破壊しなかったため、図中に記載していない。確率分布P（N）は、（2）式で表される。

$$P(N) = 1 - \exp[-(N/N_s)^a] \quad \text{----- (2)}$$

N_s : 尺度パラメータ

a : 形状パラメータ

雷/開閉インパルスのa値は、0.37～0.53/0.21～0.38で、共に初期破壊モードである。

図4に、V-N特性を示す。●、▲印は絶縁破壊で、○、△印は1000回まで未破壊を示している。また、それぞれの印の数字は、その課電回数までの供試モデルの個数を示している。図中の実線は50%絶縁破壊回帰直線を示す。この特性から、V-N特性は雷インパルスで、

$$V_{50} = 285 \cdot N^{-1/35.7} \quad (\text{kV}) \quad \text{-----} \quad (3)$$

N: 課電回数 (回)

開閉インパルスは、

$$V_{50} = 257 \cdot N^{-1/45.5} \quad (\text{kV}) \quad \text{-----} \quad (4)$$

で表される。両者の回帰直線の傾きを比較すると、開閉インパルスの方が僅かに平坦である。実フィールドでの雷サージ及び開閉サージの回数を苛酷に考え、それぞれ50回、

100回と想定する。その場合の絶縁強度の低下は、ともに10%以下である。

〈3.3〉 残存絶縁破壊特性 図5に、雷/開閉インパルス課電品モデルのPD開始とインパルス絶縁破壊特性を示す。但し、課電品モデルの課電電圧は、雷インパルスが $(V_{50}-3\sigma)$ で、開閉インパルスが $(V_{50}-1.5\sigma)$ である。図中には、無課電品モデルの特性も示し、比較している。この結果から、雷/開閉インパルスの絶縁破壊電圧のV50は、無課電品モデルのそれよりも4/3%程度低下しているが、有意差がない。しかしながら、PD開始電圧について、課電品モデルのV50は、13/10%高くなっており、有意差があることが分かった。このように、雷/開閉インパルスの繰り返し課電により、絶縁破壊電圧が僅かに低下するものの、0.1 pCの感度で測定したPD開始電圧は高くなることが分かった。

(A) 雷インパルス電圧

(B) 開閉インパルス電圧

図3 繰り返し課電での絶縁破壊分布

Fig. 3. Breakdown probability distribution against repeating voltage

(A) 雷インパルス電圧

(B) 開閉インパルス電圧

図4 モデルのV-N特性

Fig. 4. V-N Characteristics of insulating spacer model

図5 課電品の部分放電／絶縁破壊特性

Fig.5 Partial discharge inception/breakdown characteristics of model withstood to 1000 impulses

4. 考察

〈4.1〉ワイブル分布の評価 絶縁破壊電圧と課電回数に対する確率分布 $P(V, N)$ を (5) 式のワイブル分布で検討してみる。⁽¹⁰⁾

$$P(V, N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{V_s} \right)^m \left(\frac{N}{N_s} \right)^a \right] \\ = 1 - \exp \left[- \left\{ \frac{V^m N}{V_s^m N_s} \right\}^a \right] \quad \text{----- (5)}$$

$$m = n \times a \quad \text{----- (6)}$$

(6) 式で求めた m 値が $< 3.1 >$ の実験で直接求めた m 値に等しければ、絶縁スペーサ内部の絶縁破壊確率が (5) 式で評価できることを意味する。表1に、雷/開閉インパルスの $V-N$ 特性に関する統計的パラメータを示す。

この検討結果より、雷/開閉インパルスの (5) 式の m 値は、 $< 3.1 >$ の m 値と概略一致していることが分かる。そのため、インパルス耐電圧レベルを検討するに当たって、工学的に十分な精度で (5) 式のワイブル分布を適用することができる。

〈4.2〉埋め込み電極界面調査 繰り返し課電による絶縁劣化現象を把握するため、雷インパルス課電品モデル6個の埋め込み電極界面を詳細に調査した。調査方法は、埋め込み電極の対向部分を切断し、更に、電極間断面を3mm片に細かく切断した。そして、各切断面をバフ仕上げし、各切断面を光学顕微鏡で観察した。

この調査から、放電による侵食痕が観察された。図6に、放電侵食痕の状況を示す。放電痕の侵食深さは、約 $5 \mu\text{m}$ で、電極部から伸びている。今回の調査の対象となった切断片は60個であったが、放電侵食痕は、図6に示した一

ヶ所しか観察されなかった。次に、各切断片を高温加熱し、強制的に、電極とエポキシ樹脂の接着を剥し、電極表面を観察した。その結果、6個の課電品全てに、5～10個の微小放電痕が観察された。放電痕の大きさは、まちまちであるが、直径(広がり)として $40 \sim 110 \mu\text{m}$ であった。図7に、電極表面の微小放電痕の状況の一例を示す。尚、開閉インパルスの課電品モデル1個についても調査したところ、同様な微小放電痕が観察された。

上記の電極界面の観察結果より、供試モデルの絶縁破壊電界強度に近いインパルスが多数回繰り返し課電されると、電極界面で微小放電が発生していることが分かった。この微小放電が絶縁劣化に影響を与えているものと考えられる。

〈4.3〉微小放電の発生要因 部分放電開始電圧は、埋め込み電極界面状態に影響される。⁽¹¹⁾ そこで、繰り返し課電による絶縁劣化現象が電極界面の接着処理法または電極表面粗さに起因するのかを明らかにするため、 $V-N$ 特性の供試モデルと埋め込み電極及びエポキシ注形方法が全く同一で、電極表面粗さと界面処理を種々選定した4種類のモデルで、微小放電の発生要因を調査した。4種類のモデルの特徴は、下記の通りである。

- ・モデルA ----- 電極界面の接着強度を増すため、電極表面を多少粗にしている。
- ・モデルB ----- 電極表面を機械加工のままで、表面を比較的平滑にしている。
- ・モデルC ----- 電極表面に強制的に突起を設けている。突起部分の表面は非常に滑らかで、それ以外の電極表面は、モデルBと同じである。
- ・モデルD ----- 電極表面に強制的に離型剤を塗布し、電極界面を強制的に剥離させている。表面粗さは、モデルAと同じである。

図6 電極界面の放電侵食痕の状況

Fig.6. Discharge erosion trace of boundary between electrode and epoxy resin

表1 V-N特性に関する統計的パラメータ

Table 1 Statistical coefficients that represent V-N characteristics

	V50 (kV)	m値	n値	a値	$m = n \times a$
雷インパルス	290	13.2	35.7	0.37~0.53	13.2~18.9
開閉インパルス	261	9.1	45.5	0.21~0.38	9.6~17.3

表1に、それぞれのモデルの電極表面粗さの測定結果の一例を示す。また、図8に、モデルCの突起部の状況を示す。

これらの4種類のモデル各10個について、雷インパルスの($V_{50}-3\sigma$)の課電電圧で、1000回の繰り返し課電を行った。この繰り返し課電に対して、絶縁破壊までの課電回数に違いがあるものの、4種類モデルとも各1個ずつ絶縁破壊し、各モデルの絶縁劣化特性に顕著な相違がみられなかった。

図7 電極表面の微小放電痕の状況

Fig.7. Micro-discharge trace on electrode surface

そこで、課電回数1000回に耐えた4種類のモデルについて、〈4.1〉項の課電品モデルと同様な電極表面の微小放電痕の観察を行った。これらの観察結果より、下記のことが分かった。

- ・モデルAの各切断片の電極表面には、微小放電痕が観察された。放電痕の広がり、は、 $40 \sim 80 \mu\text{m}$ である。
- ・モデルBの大部分の切断片の電極表面には、微小放電痕が観察されなかった。微小放電痕が観察されたのは、1個のモデルにつき、切断片1個程度である。その放電痕の広がり、は $20 \sim 50 \mu\text{m}$ である。
- ・モデルCの電極表面の微小放電痕は、モデルBと同様の傾向を示す。但し、微小放電痕は、突起先端部で観測されていない。
- ・モデルDの各切断片の電極表面には、微小放電痕が観察

表2 電極表面粗さ

Table 2 Electrode surface roughness of each model

種類	測定結果
モデルA	<p>最大粗さ: $30 \mu\text{m}$ 縦: $20 \mu\text{m}/\text{div.}$, 横: $0.5 \text{mm}/\text{div.}$</p>
モデルB	<p>最大粗さ: $9 \mu\text{m}$ 縦: $10 \mu\text{m}/\text{div.}$, 横: $0.5 \text{mm}/\text{div.}$</p>
モデルC	<p>最大粗さ: $2 \mu\text{m}$ 縦: $5 \mu\text{m}/\text{div.}$, 横: $0.5 \text{mm}/\text{div.}$</p>

図8 モデルCの電極表面突起の状況

Fig.8. Protrusion on electrode surface of model C

された。放電痕の個数は、モデルAよりも多く、その放電痕の広がりには $10 \sim 100 \mu\text{m}$ である。図9に、電極と接したエポキシ樹脂表面の微小放電痕の状況を示す。電極表面と同様に多数の放電痕がみられる。その放電痕の広がりには、 $10 \sim 120 \mu\text{m}$ である。

上記の調査結果から、電極表面の粗さが大きくなると、微小放電痕の発生が著しくなり、その放電痕の広がりも多少大きくなる。そして、電極界面に剥離が生じると、更に微小放電痕の発生が増大することが明らかになった。また、モデルCの突起先端の電界強度は、電界解析結果より、平坦部の約3倍になる。しかし、突起先端表面が滑らかなため、その部分では微小放電は発生しないことが分かった。

〈4.4〉 絶縁劣化メカニズムの推定 多数回繰り返し課電された埋め込み電極界面には、微小放電痕が観測される。その微小放電痕の発生は、電極表面粗さと電極界面の剥離に著しく影響されることが明らかになった。これらの検討結果から、供試モデルの繰り返し課電による絶縁劣化現象は、電極表面の微小突起とその先端部の微小剥離部での電界強化で、課電される毎に、突起先端部で微小放電が発生し、その放電による熱的又は衝撃エネルギーで微小放電痕の広がりとともに、侵食に移行するものと推定される。更に、放電侵食が進行して、絶縁破壊に至るものと考えられる。

尚、課電品モデルのPD開始電圧（検出感度 0.1 pC ）が無課電品モデルよりも高くなった原因は、微小放電により、微小突起先端部の微小剥離部分がエージングされたためと考えられる。

直径（広がり）：約 $10 \sim 120 \mu\text{m}$

図9 エポキシ樹脂表面の微小放電痕の状況

Fig. 9. Micro-discharge trace on epoxy resin surface

5. むすび

UHV GISの雷/開閉インパルス試験電圧レベル検討の一環として、GIS絶縁スペーサ内部モデルでV-N特性を詳細に調査するとともに、絶縁劣化現象についても考察した。その内容を要約すると、下記の通りである。

(1) 初期の E_{50} は、 $97/86 \text{ kV/mm}$ で、ワイブル分布の形状パラメータ m 値は $13.2/9.1$ (σ は $9/13.4\%$)である。

(2) 繰り返し課電電圧が、雷インパルスで ($V_{50}-1\sigma$) $\sim$ ($V_{50}-3\sigma$)、開閉インパルスで ($V_{50}-0.68\sigma$) $\sim$ ($V_{50}-1.5\sigma$) の領域の課電回数のバラツキを表すワイブル分布の形状パラメータ a 値は、 $0.37 \sim 0.53/0.21 \sim 0.38$ である。そして、V-N特性の回帰直線の傾き n 値は、 $35.7/45.5$ である。これらの特性値は、雷及び開閉インパルス試験電圧設定の基礎データとして有効である。

(3) 課電回数1000回に耐えた課電品モデルの雷/開閉インパルスの V_{50} は、無課電品に比べ $4/3\%$ 低下するが、PD開始電圧は、 $13/10\%$ 上昇する。

(4) 課電品モデルの電極界面には、放電侵食痕が観察された。侵食痕の深さは約 $5 \mu\text{m}$ で、電極表面の放電痕の広がりには $40 \sim 110 \mu\text{m}$ である。この微小放電痕が絶縁劣化に影響を与えているものと考えられる。

(5) 微小放電痕の発生は、電極表面/界面状態を種々選定したモデル調査から、電極表面粗さと界面剥離に著しく影響強されることが明らかになった。

(6) 繰り返し課電による絶縁劣化は、電極表面の微小突起とその先端部の微小剥離部での電界強化による微小放電の発生現象が原因と考えられる。尚、繰り返し課電によりPD開始電圧が上昇したのは、エージングのためと考えられる。

(平成6年8月26日受付)

文南大

- (1) 田邊：「100万V昇圧に向けた技術開発・建設について」、平5電気学会電力・エネルギー部門大会、No. 575
- (2) 山田：「UHV交流送電」、電気学会誌、昭和57年5月
- (3) 電力中央研究所 UHV送電特別委員会 機器部会「UHV交流機器の試験電圧に関する検討」、第8次報告、昭和57年
- (4) 電気共同研究会 「絶縁設計の合理化」、電気共同研究第44巻第3号、昭和63年
- (5) S. Zolodowski, S. Soar: "Life Curve of Epoxy Resin Under Impulses and Breakdown Parameters" IEEE Trans. Electr. Insulation, Vol. EI-7, No. 2, p. 84 (1972-6)
- (6) 三浦、丹、蒲田、森内：「エポキシ注形品のインパル

ス疲労破壊」、昭48電気学会全大、No. 280

- (7) 小屋、青柳、毛受、大塚、田村：「エポキシ含浸絶縁物のV-t、V-N特性」、第10回電気絶縁材料シンポジウム、p. 159 (1977)
- (8) 鶴瀬、青柳、大久保、小林：「エポキシ注形品のインパルス繰り返し課電劣化特性」、昭60電気学会東支大、No. 31
- (9) 緒志、財満、青柳、村瀬、大島、今井：「絶縁スペーサモデルのインパルス課電劣化特性」、平5電気学会電力・エネルギー部門大会、No. 34
- (10) 岡部、財満、河野：「ワイブル分布関数による変電機器の絶縁の信頼度評価について」、電論誌、Vol. A-11 3、No. 11、p791 (平成5年)
- (11) H. Honda, H. Aoyagi, M. Koya, N. Kobayashi, M. Tamura: "V-T Characteristics of Epoxy Mold Insulation for Sustained AC Voltage" IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No. 5, (1984-5)

岡部 成光

(正員) 1958年9月18日生。1981年3月東京大学工学部電気工学科卒業。1986年3月同大学大学院博士課程終了。同年4月東京電力(株)入社。主として、変電機器の診断技術及び絶縁協調の研究に従事。現在、技術研究所電力研究室主任研究員。工学博士。1993年電気学会論文賞受賞。

大野 高宏

(正員) 1964年10月9日生。1988年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。1990年3月同大学大学院修士課程終了。同年4月東京電力(株)入社。主として、変電機器診断技術の研究に従事。現在、技術研究所電力研究室勤務。

財満 英一

(正員) 1949年10月28日生。1974年3月東京大学工学部電気工学科卒業。1990年6月マサチューセッツ工科大学修士課程終了。1974年4月東京電力(株)入社。主として、変電技術及びUHV等の絶縁協調の検討、研究に従事。現在、技術研究所電力研究室副研究室長。1993年電気学会論文賞受賞。IEEE会員。

青柳 浩邦

(正員) 1941年8月12日生。1960年3月鶴見工業高校電気科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として、ガス絶縁開閉装置のSF6ガス及び固体絶縁現象の研究に従事。現在、重電技術研究所勤務。

村瀬 洋

(正員) 1952年7月9日生。1980年3月東京工業大学大学院電気工学専攻博士課程卒業。同年4月(株)東芝入社。主として、高電圧絶縁現象、GIS中の急峻波サージ現象の研究に従事。現在、重電技術研究所勤務。工学博士。IEEE会員。

大島 巖

(正員) 1946年4月28日生。1969年3月九州工業大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として、高電圧開閉装置、真空遮断器、高電圧サイリスタバルブ、及びパルスパワー技術に関する研究に従事。現在、重電技術研究所勤務。工学博士。IEEE会員。