交流電圧の長時間印加における真空ギャップ絶縁破壊特性と その放電コンディショニングによる改善

正員 佐藤 伸治* 正員 小山 健一*
正員 糸谷 孝行** 非会員 宮本 聖一**

Breakdown Characteristics of Vacuum Gaps under Continuous AC Voltage Application and their Improvements by means of Discharge Conditionings

Shinji Sato*, Member, Kenichi Koyama*, Member,
Takayuki Itotani**, Member, Seiichi Miyamoto**, Non-member

In order to identify the long span reliability of vacuum gap insulation under continuous AC voltage application, characteristics of breakdown strength versus breakdown time (long time E-t characteristics) were measured for a uniform and a non-uniform field gap. The breakdown strength of these gaps before the discharge conditioning treatments did not depend on breakdown time. However, after the discharge conditioning treatments, the breakdown strength became describable as an experimental formula $E=A \cdot t^{-1/n}$. The value of drop index (life index) n in the formula was a maximum of 75 for the uniform field gap, while a maximum of 25 for the non-uniform field gap. In addition, with repeating the discharge conditioning treatment, the long time E-t characteristics of both gaps shifted to higher electric field. In particular, the value of n for the uniform field gap became larger. Breakdown modes (failure modes) of these gaps before and after the discharge conditioning treatments, evaluated by the value of shape parameter m in Weibull probability distribution function, were classified into decreasing failure rate mode and constant failure rate mode, respectively.

キーワード：真空，絶縁破壊，長時間 E-t 特性，放電コンディショニング

Keywords : vacuum, breakdown, long time E-t characteristic, discharge conditioning

1. はじめに

SF₆ ガスが温室効果ガスに指定されたことを背景に，開閉装置では真空絶縁の適用範囲が拡大している。真空絶縁は真空遮断器の接点間絶縁だけでなく，断路器や接地開閉器の接点間や対地間絶縁にも適用され始めている^{(1)~(3)}。これらの新たな真空絶縁では，交流電圧の連続印加時間が真空遮断器の接点間絶縁よりも長くなる。すなわち真空遮断器接点は常時閉の状態で運用されることが多く，その場合電流遮断のため接点を開極した後に絶縁が必要になる。これ

に対し，対地間絶縁および常時開極状態で用いられる接地開閉器の接点間絶縁では，その機能上，長期間の連続的な絶縁が必要になる。このような背景から，真空絶縁の長期信頼性に対する検討が必要になっている。

真空絶縁の長期信頼性を検討するには，交流課電時間に対する破壊電圧または破壊電界の特性(本論文では長時間 V-t 特性または長時間 E-t 特性と呼び，印加電圧波形の影響検討のために測定するμs~ms 領域の V-t, E-t 特性と区別した)を取得し，その特性に基づいて長時間課電時の破壊電圧を見積もる必要がある。しかしこの点を検討した報告は少ない。長時間課電に伴う破壊電圧の低下は知られているが^{(4)~(6)}，その低下割合を表し絶縁裕度見積もりに重要な垂下係数(または寿命係数)の値は不明確である。実用面では，短時間破壊特性の向上に効果がある放電コンディショニングの，長時間破壊特性に対する効果の検討も必要と思われる。さらに，長時間課電に伴う破壊電圧の低下が，電極表面状態の劣化に起因するかの検討も必要である。これらに

* 三菱電機(株) 先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

** 三菱電機(株) 受配電システム事業所
〒763-8516 丸亀市蓬萊町 8 番地
Power Distribution Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation
8, Horai-cho, Marugame 763-8516

関する報告は見当たらない。

本研究では、平等電界と不平等電界の真空ギャップについて最長 220 時間までの長時間 E-t 特性を測定し、両ギャップの垂下係数を明確にした。また、放電コンディショニングの長時間破壊特性に対する効果を、放電コンディショニング回数による垂下係数の変化から検討した。さらに、長時間課電時の電極表面状態の劣化について検討するため、長時間 E-t 特性の測定データをワイブル統計処理し、同処理から得られる形状パラメータ m の値から長時間課電時の破壊モードを調べた。

2. 実験方法

〈2・1〉 供試ギャップ 長時間 E-t 特性の測定には 2 種類のギャップを用いた。ひとつは図 1(a)に示した平板対平板ギャップである。電極の材質は無酸素銅、表面の中心線平均粗さ(Ra)は約 $1.0\mu\text{m}$ である。もうひとつは、同図(b)(c)のように銅箔を重ね合わせた電極に、平板電極を対向させた銅箔対平板ギャップである。このギャップは銅箔を重ね合わせた構造の可とう導体が真空中に配置された場合を想定しており、極端な不平等電界下での長時間 E-t 特性取得を目的としている。ギャップの銅箔側は厚さ 0.2mm の銅箔を 10 枚重ねあわせている。同図(c)のように銅箔の間に隙間ができるようにたわませ、銅箔抑え板(銅製)にボルトで固定した。銅箔の端部には丸め処理は行っていない。どちらのギャップも、内部圧力約 10^{-4}Pa のベローズ付きセラミック管に封入されている。

〈2・2〉 測定回路 図 2 に測定回路を示す。セラミック管は絶縁架台上にセットされ、手動スライダックで調節された 60Hz 交流電圧を印加できる。測定回路の高圧側には供試ギャップと直列に $50\text{k}\Omega$ の制限抵抗が挿入されている。接地線には放電電流測定用の高周波 CT が取り付けられ、CT 出力は 50Ω BNC ケーブルによりトランジェントレコーダに入力される。トランジェントレコーダはトリガレベルを超える信号が入力された場合に自動的に検出波形と検出時刻を記録できる。なお、一連の測定の前に大気中でコロナ放電が発生していないことを確認している。

〈2・3〉 長時間 E-t 特性の測定方法 真空ギャップに一定交流電界をある適切な値で印加すると、ある長さの時間遅れ後に絶縁破壊が発生する。そのときに流れる電流が抵抗などによって小さく制限されていれば直ちに消弧され、ギャップ間の絶縁が回復する。その後、ある時間遅れ後に再び絶縁破壊が発生し、同様に直ちに絶縁回復する。このように破壊と消弧を繰り返させ、破壊時の電流を高周波 CT で検出すれば、ある破壊から次の破壊までの時間間隔 $T_1, T_2, T_3, \dots$ が測定できる。この時間間隔 T を破壊までの時間とする。印加電界を変化させて同様の測定を行い、印加電界と破壊までの時間の関係をグラフ化すれば、長時間 E-t 特性を得ることができる。

上記考え方に基づき次の手順で長時間 E-t 特性を測定した。

図 1 長時間 E-t 特性の測定に用いた電極構成

Fig. 1. Electrode arrangements for measurements of long time E-t characteristics.

図 2 測定回路の概略

Fig. 2. Experimental circuit.

- (1) 放電コンディショニング前の予備的な長時間 E-t 特性測定 (平板対平板ギャップのみ)
- (2) 1 回目の放電コンディショニング (交流電圧 10 分間)
- (3) 1 回目の長時間 E-t 特性測定 (1 回目の放電コンディショニング電界以下の範囲)
- (4) 2 回目の放電コンディショニング ($1.15/3.8\text{ms}$ 開閉インパルス電圧。破壊回数 100 回以上)
- (5) 2 回目の長時間 E-t 特性測定 (2 回目の放電コンデ

イショニング電界以下の範囲)

ここで、1, 2 回目測定および予備測定では電界印加の大小順は決めていない。また放電コンディショニング電圧は、1 回目は最大 65kVrms (85kVpeak), 2 回目は 90~120kV として、2 回目のほうが高くなるようにした。1 回目の放電コンディショニングでは昇圧中に絶縁破壊が多発した。設定電圧到達後も約 1 分間は破壊頻度が 5~10 秒に 1 回程度発生したが、その後は減少した。

本研究のように、単一ギャップを繰り返し破壊させて得たデータから破壊特性を検討する場合、ある時点で発生した破壊がその次の破壊に影響を与えていないことが前提となる。この点を確認するため、図 3 に平板対平板ギャップの長時間 E-t 特性における、破壊までの時間と破壊番号の関係の一例を示す。両者の間に何等かの相関関係が見出せる場合、ある時刻の破壊がその次の破壊に影響を与えている可能性がある。しかし、同図から破壊番号に対する破壊までの時間の減少や増加は特に認められない。同様の結果が他の測定条件でも確認された。設定電界への昇圧後破壊時間の記録をこの結果から、ある時刻の破壊がそれ以降の破壊に特に影響を与えていることはないかと判断した。なお、図 3 の傾向は放電コンディショニング前の予備測定でも、印加電界を所定の値に設定してから 1~2 分経過すれば確認することができた。

3. 実験結果と検討

〈3・1〉 真空ギャップの長時間 E-t 特性における垂下係数 本節ではまず、長期課電時の絶縁信頼性評価の上で重要になる、長時間 E-t 特性の垂下係数を検討する。放電コンディショニング処理後の平板対平板、銅箔対平板ギャップの長時間 E-t 特性を図 4(a)(b)にそれぞれ示す。ここで、両図の凡例中の 50%破壊時間は各印加電界下での全データのうちの 50%が破壊する時間のことで、後述のワイブルプロット処理により計算した。50%破壊時間については、下

記の一般式⁽⁷⁾で表される最小自乗近似直線を図中に記入した。

$$E=A \cdot t^{1/n} \cdots \cdots (1)$$

ただし、A は定数、n は垂下係数である。破壊電界は、平板対平板ギャップでは(電圧)/(ギャップ長)から計算した。銅箔対平板ギャップの銅箔端部の電界は正確に計算できないので、電界解析ができる類似の形状(厚さ 1mm, 端部半径 0.5mm の丸め処理が行われた箔)における先端電界で表示した。また、電極表面上の絶縁破壊の発生箇所について、真空チャンパ内で行った別の実験により確認している。その結果、平板対平板ギャップでは電極の平坦部で、銅箔対平板ギャップでは銅箔の先端部に加え、図 1(b)(c)中の銅箔押さえ板や台座でも放電していることが分かっている。

図 4(a)(b)から、50%破壊時間の最小自乗近似直線は負の傾きを持っている。この近似直線から計算した垂下係数の値を、SF₆ガス⁽⁷⁾とマイカ/エポキシ複合絶縁系⁽⁸⁾における値と共に表 1 に示す。同表には、真空ギャップと真空沿面ギャップを対象とした、他者による長時間 V-t 特性の垂下係数も記した。なお、文献(4)には垂下係数が記載されていないので著者らが計算した。

同表から、真空ギャップの長時間 E-t 特性の垂下係数について、以下の 3 つの特徴を挙げるができる。第一番目は、垂下係数の値は小さい場合でも 20 台の前半となっている点である。すなわち、本研究における平板対平板ギャップの放電コンディショニング 1 回後の値は 22.3、銅箔対平板ギャップの測定 1, 2 回目はどちらも約 25 である。文献(5)の真空沿面ギャップでの値が 23 である点も含め、真空絶縁系では最小でも 20 以上の値が得られている。固体絶縁材料では同表中のマイカ/エポキシ複合絶縁系のように 20 以下の場合が多く、真空絶縁系の長時間 E-t 特性は固体絶縁材料のそれよりも傾きが緩やかといえる。

第二番目の特徴は、平等電界ギャップでは放電コンディショニング処理を行うほど垂下係数が増大し、SF₆ガスギャップの値と同等になる点である。本研究の平板対平板ギャップの放電コンディショニング 2 回後では垂下係数は 74 であり、同 1 回後から大きく増加している。同表中の SF₆ガスギャップでは、異物の無い場合は 75、異物が存在する場合は 38~62 である。したがって、十分な放電コンディショニング後の平等電界ギャップなら、SF₆ガスギャップと同様の平坦な長時間 E-t 特性が得られる。

第三番目の特徴は第二番目と関連するが、不平等電界ギャップでは十分に放電コンディショニングを与えても、平等電界ギャップほど大きな値の垂下係数は得られない点である。不平等電界分布を含む真空絶縁系では、この点を考慮した長時間課電に対する絶縁設計が必要である。

以上のように、真空ギャップの長時間 E-t 特性における垂下係数は小さくても 20 台の前半で、十分に放電コンディショニングを与えた後の平等電界ギャップでは最大 74 に達した。これらの値は固体絶縁材料より大きく、平等電界ギャップでは SF₆ガスギャップとほぼ同等である。

図 3 破壊までの時間と破壊番号の関係の一例
Fig. 3. An example of relationship between time to breakdown and breakdown number.

図 4 真空ギャップの長時間 E-t 特性
Fig. 4. Long time E-t characteristics of vacuum gaps.

表 1 各種絶縁方式における長時間 E-t (V-t) 特性の垂下係数 n
Table 1. Drop index n in long time E-t (V-t) characteristics of insulation systems.

	Measuring conditions	Drop index n	Longest time of voltage application
Vacuum gap	Plate-to-plate gap (this work) (Copper, $d=1\text{--}3.5$ mm)	22.3 (After AC discharge conditioning) 75 (After AC+Impulse discharge conditioning)	28 hours
	Foils-to-plate gap (this work) (Copper, $d=3.5\text{--}7$ mm)	25.6 (After AC discharge conditioning) 25.1 (After AC+Impulse discharge conditioning)	5 days
	Plate-to-plate ⁽⁴⁾ (Nickel, $d=7.5$ mm, DC)	47.6	80 minutes
Insulator surface in vacuum	Electron beam irradiation toward a glass plate ⁽⁵⁾ (10 mm long, DC)	23	200 minutes
SF ₆ gas	With needle particles, 0.35 MPa.abs. ⁽⁷⁾	38-62	1.5 hours
	Without particles, 0.3, 0.44 MPa.abs. ⁽⁷⁾	74	100 hours
Solid	Model mica/epoxy compound coil ⁽⁸⁾	7-10	14 months

〈3・2〉 放電コンディショニングに伴う長時間 E-t 特性
の変化 図 5 に、平板対平板ギャップの放電コンディ
ショニング処理前の長時間 E-t 特性を示す。同図より 50%破
壊時間と破壊電界の間に明確な相関関係は見出せず、前記

(1)式でのこの特性の近似はできない。本節では放電コンデ
ィショニングに伴う長時間 E-t 特性の変化を検討するにあ
たり、まず図 5 が(1)式で表現できない理由から検討する。
同図における電界の印加順序は 2.0, 5.0, 4.0, 4.4kV/mm

図5 放電コンディショニング処理を行う前の平板対平板ギャップの長時間 E-t 特性

Fig. 5. Long time E-t characteristics of plate-to-plate gap before conducting the discharge conditioning treatment.

である。後者 3 つの電界だけで長時間 E-t 特性をプロットすると、ある程度時間依存性を持った特性とみなすこともできる。そこで、2.0kV/mm 印加を放電コンディショニング処理とみなすと、コンディショニング電界よりも長時間 E-t 特性の測定電界が高い場合は(1)式に従わないと考えることができる。一方、5.0kV/mm 印加を同処理のひとつとみなすと、処理電界よりも測定電界が低い場合なら(1)式に従うと考えることができる。

このことから図 5 全体で破壊電界と破壊時間の間に明確な相関関係が見出せない理由は、ある印加電界での測定がその後の別電界での測定における放電コンディショニング処理として作用している場合と、していない場合が混在しているためと考えられる。言い換えると(1)式で表現可能な長時間 E-t 特性を得るには、その測定における最大電界より高い電界で放電コンディショニングを行う必要がある。この点は図 4(a)(b)が全て放電コンディショニング電界よりも低い範囲で測定されていることから裏付けられる。長時間 E-t 特性が(1)式で表現できれば破壊電界の低下量が予測可能になり、この意味でギャップ間を運転電界よりも高電界で放電コンディショニングすることが重要である。

このような長時間 E-t 特性の変化の原因には、電極表面状態の放電コンディショニングによる変化が挙げられる。放電コンディショニング前の電極表面には吸蔵ガスや微小異物が残留している⁽⁹⁾。これらが放電コンディショニングで除去されると長時間 E-t 特性が(1)式で表現可能な形態に変化すると考えられる。この電極表面状態の変化については次節で検討する。

さらに図 4(a)(b)から、放電コンディショニング処理の回数増加による長時間 E-t 特性の変化については、次のように説明することができる。放電コンディショニング 2 回後のほうが長時間 E-t 特性は高電界側にシフトし、特に平等電界ギャップでは垂下係数が増大している。2 回後のほうが 1 回後よりも破壊回数と総課電時間は増大し、コンディショ

ニング電圧も上昇しているの、2 回後のほうが十分な放電コンディショニングとみてよい。このように長時間課電時の破壊電界の絶対値、および課電時間に対する破壊電界の低下割合は、放電コンディショニング履歴に依存する。

以上をまとめると、放電コンディショニング処理には次の二つの効果がある。一つ目は長期課電時の破壊電界の低下に予測を与えるという効果である。ただし、この効果は長時間 E-t 特性の測定電界以上にコンディショニング電界が高くなければ表れない。二つ目は、放電コンディショニング履歴に依存して長時間 E-t 特性は高電界側にシフトし、特に平等電界ギャップでは同特性を平坦化させるという効果である。この他、放電コンディショニング効果は次節で述べるように、ワイブルプロットの傾きから分類できる絶縁破壊モードの変化にも表れる。

〈3・3〉 長時間連続課電時の真空ギャップの絶縁破壊モード

本節では長時間 E-t 特性のデータをワイブルプロット処理し、形状パラメータ m の値の大小から、長時間連続課電時の真空ギャップの破壊モードを検討する。(2)式にワイブル分布関数⁽¹⁰⁾を示す。ここで、 f は破壊確率、 t は電圧の印加時間、 t_0 は尺度パラメータ、 t_{min} は位置パラメータ、 m は形状パラメータである。

$$f = 1 - \exp[-\{(t - t_{min})/t_0\}^m] \dots\dots\dots (2)$$

形状パラメータ m (以下 m) はワイブルプロットにおける直線の傾きであり、破壊までの時間のばらつきが大きいほど小さくなる。また、この値の大小から破壊モードは以下の 3 種類に分類される。

- $m < 1$: 初期故障形破壊
- $m = 1$: 偶発故障形破壊
- $m > 1$: 経年劣化故障形破壊

以下、 m の値の大小から長時間連続課電時の真空ギャップの破壊モードを検討する。なお位置パラメータ t_{min} は実験結果からの算出が困難⁽¹⁰⁾ なので、本論文では 0 とした。

図 6(a)に平板対平板ギャップの 1 回目の長時間 E-t 特性に対するワイブルプロットを示す。また同図(b)に、同ギャップで放電コンディショニング前に測定した長時間 E-t 特性に対する同プロットを示す。両図中には傾きが 1 ($m=1$) の直線を点線で記入した。

図 6(a)(b)を比較すると、破壊までの時間がおよそ 10^3sec 以下の範囲の m 値に違いがある。この違いを明確にするため、上記範囲で特に直線性が高い、累積破壊確率 10~80% の範囲で最小自乗近似を行い、それぞれ m 値を計算した。 m 値の計算結果を表 2 に示す。同表から m 値は放電コンディショニング前は 0.2~0.3 であるが、その後は 0.6~0.9 に増加している。このことから破壊までの時間のばらつきは、放電コンディショニングにより小さくなることが分かる。

放電コンディショニングによる m 値の変化をさらに検討するため、図 7 に平板対平板、銅箔対平板ギャップ両方の m 値の放電コンディショニング回数に対する変化を示す。同図から、 m 値は放電コンディショニング前から 1 回後では増加するが、1 回後から 2 回後では大きな変化はない。ま

(a) After discharge conditioning (using AC voltage)

(b) Before discharge conditioning

図6 破壊までの時間についてのワイブルプロット

Fig. 6. Weibull plots for time to breakdown.

た、1, 2 回後の m 値は最大約 1.4 に達してはいるが、2.0 や 3.0 というように大きく 1.0 から離れていない。

この m の変動は、放電コンディショニング処理による電極表面状態の変化と対応させると、以下のように考えられる。すなわち、放電コンディショニング未実施の場合、電極表面には吸着ガスや微小異物が残留し、鋭い形状の微小突起が存在する場合もある⁽⁹⁾。これらの影響により真空ギャップ本来の絶縁性能が発揮されにくい。これは課電前から絶縁破壊を引き起こす因子が絶縁システムに内在しているという、初期故障形破壊と解釈することができる。このため m が 1.0 よりも小さくなったと考えられる。

放電コンディショニングによって吸着ガス、微小異物が除去され、微小突起が滑らかになると考えられているが⁽⁹⁾、これらは初期故障形破壊を引き起こす因子の除去にあたる。その結果、真空ギャップ本来の絶縁性能が表れ始め、破壊電界が上昇する。これは放電コンディショニングにより破壊モードが初期故障形から別のモードへと移行したと解釈できる。放電コンディショニング 1 回後に m が上昇したのはこのためと考えられる。 m の値は 1.0 に近づいていることから、移行後の破壊モードは偶発故障形と考えられる。

表2 図6(a)(b)のワイブルプロットにおける形状パラメータ m

Table 2. Shape parameter m of Weibull plots in Fig.6(a)(b).

After discharge conditioning		Before discharge conditioning	
Electric field (kVrms/mm)	m	Electric field (kVrms/mm)	m
13.3	0.82	2.0	0.21
14.3	0.89	4.0	0.35
15.0	0.58	4.4	0.33
15.7	0.91	5.0	0.25
16.4	0.67

図7 ワイブルプロット形状パラメータ m の放電コンディショニングによる変化

Fig. 7. Variation of shape parameter m in Weibull distribution formula with discharge conditionings.

そして、放電コンディショニング 2 回後も m の値が 1.0 に近い点から、ある程度放電コンディショニングを与えた後は破壊モードは偶発故障形に保たれ、経年劣化形破壊には変化しないと考えられる。ここで、文献(9)のマイカ/エポキシ複合絶縁系では本研究と同様に m を調べているが、その値は 1.2~5.27 の範囲である。この点は同絶縁系では部分放電による経年劣化形破壊が発生することと対応している。真空ギャップでこのような大きな値の m がほとんど見出されなかったことから、長時間の連続的な電圧印加により真空ギャップが絶縁破壊しやすい状態に劣化することはないと考えられる。

以上、交流電圧の連続印加における真空ギャップでは、放電コンディショニング未実施の場合は初期故障形破壊が、放電コンディショニング後は偶発故障形破壊が発生すると考えられた。また、真空ギャップでは経年劣化形破壊

は発生しないと考えられた。

ここで図 4(a)(b)の長時間 E-t 特性は、測定時間範囲内では単一の直線で表現できる特性となっているが、さらに低電界で長時間測定すれば、直線の傾きが途中で変化し屈曲する可能性もある。その場合の傾きの変化については、経年劣化形破壊は発生しない点に留意すると、傾きが屈曲前よりも大きくなる可能性は小さいと推測される。

4. まとめ

平等電界および不平等電界分布の真空ギャップに対し長時間連続で交流電圧を印加し、長時間 E-t 特性を測定した。同特性中の垂下係数の値、および同特性に対する放電コンディショニング効果を検討した。また、同特性のワイブルプロット処理により算出した形状パラメータ m の値から、長期課電による電極表面状態の経時変化の有無を検討した。これらの真空ギャップ絶縁の長期信頼性に関する検討から、以下の結論が得られた。

(1) 放電コンディショニング処理後の長時間 E-t 特性の垂下係数 n は、平等電界ギャップでは最大 $n=75$ 、不平等電界ギャップでは最大 $n=25$ となった。また両ギャップにおける最小値は $n=22$ となった。

(2) 放電コンディショニング未実施のギャップの破壊電界は低く、かつ課電時間に対する依存性は見出せない。依存性が見出せるようにするには、放電コンディショニング処理が必要である。この処理の繰り返しにより長時間 E-t 特性は高電界側にシフトし、特に平板対平板ギャップでは垂下係数が増加する。

(3) 長時間課電時の破壊モードは、放電コンディショニング未処理では初期故障形、処理後は偶発故障形である。電極表面状態の経時変化などによる経年劣化形破壊は生じない。

これらの結論は、真空絶縁を利用した開閉装置の長期絶縁信頼性の向上に有益であると考ええる。

(平成 14 年 8 月 29 日受付、平成 15 年 1 月 22 日再受付)

文 献

- (1) T. Maruyama, S. Miyamoto, K. Koyama, and S. Sato: "Insulating Rod Operated in a Vacuum Vessel", *J. Vacuum Society in Japan*, Vol.43, No.1, pp.32-36 (2000) (in Japanese)
丸山稔正・宮本聖一・小山健一・佐藤伸治:「真空中で使用する絶縁操作ロッド」, 真空, **43**, No.1, pp.32-36 (2000)
- (2) T. Shioiri, H. Sasage, M. Miyagawa, K. Yokokura, and I. Oshima: "Improvement of Reliability on Vacuum Disconnecting Switch for Solid Insulated Switchgear", *Proc. of 2001 National Convention, IEE Japan*, pp.2592-2592 (2001) (in Japanese)
塩入 哲・棒 浩資・宮川 勝・横倉邦夫・大島 巖:「24kV 固体絶縁スイッチギア用真空断路器の信頼性向上」, 平成 13 年電気学会全国大会, 分冊 6, pp.2592-2592 (2001)
- (3) S. Kajiwara, T. Tanimizu, M. Takahashi, and Y. Yotsumoto: "Development of 24 kV Vacuum Switchgear with Multi-Functional Vacuum Interrupter", *The Papers of Technical Meeting on Switchgear Protection, IEE Japan*, SP-98-47 (1998) (in Japanese)

- 梶原 悟・谷水 徹・高橋正行・四元善治:「24kV 配電用集積形スイッチギアの開発」, 電気学会開閉保護研究会資料, SP-98-47 (1998)
- (4) 鶴田浩一:「高真空中の絶縁破壊現象」, 放電研究, No.96, pp.14-35 (1983)
- (5) H. Fujii and S. Hiro: "Surface Flashover of Dielectrics during Low-Energy Electron Beam Irradiation in Vacuum", *T. IEE Japan*, Vol.119-A, No.2, pp.177-182 (1999-2) (in Japanese)
藤井治久・廣 三寿:「電子ビーム照射下の絶縁物の沿面放電特性」, 電学論 A, **119**, 2, pp.177-182 (1999-2)
- (6) G.A.Mesyats and D.I.Proskurovsky: "Pulsed electrical discharge in vacuum", p.17, Springer Verlag (1989)
- (7) 「SF₆ ガスの V-t 特性」電気学会技報(II 部), No.206, p.15 (1986)
- (8) T. Tani, K. Otosaki, S. Isoma, S. Matsuda, and S. Hirabayashi: "Study on the Voltage Endurance and Prediction of the Dielectric Breakdown of High Voltage Rotating Machine Insulations", *T. IEE Japan*, Vol.105-A, No.7, pp.357-364 (1985-7) (in Japanese)
谷 功・乙崎 清・磯間信也・松田禎夫・平林庄司:「高圧回転器絶縁の課電劣化特性と絶縁破壊の予知に関する一考察」, 電学論 A, **105**, 7, pp.357-364 (1985-7)
- (9) 「真空中での放電の利用とその抑制」, 電気学会技報, No.586, p.12 (1996)
- (10) 鳥山四男・堺 孝夫・室岡義広: 高電圧工学, コロナ社 (1980)

佐 藤 伸 治

(正員) 1967 年 8 月 2 日生。1992 年 3 月武蔵工業大学大学院修士課程修了(電気工学)。同年 4 月三菱電機(株)入社。主として真空絶縁技術・ガス絶縁技術の研究開発に従事。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部遮断器グループ所属。

小 山 健 一

(正員) 1959 年 6 月 19 日生。1985 年 3 月大阪大学大学院修士課程修了(電気工学)。同年 4 月三菱電機(株)入社。主として真空遮断器、ガス絶縁開閉装置における遮断、絶縁技術の研究開発に従事。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部遮断器グループマネージャ。

糸 谷 孝 行

(正員) 1970 年 1 月 16 日生。1994 年 3 月徳島大学大学院修士課程修了(電機電子工学)。同年 4 月三菱電機(株)入社。主として真空バルブの開発・設計に従事。現在、受配電システム事業所 開閉装置製造部 遮断器設計課所属。

宮 本 聖 一

(非会員) 1961 年 2 月 11 日生。1983 年愛媛大学工学部冶金学科卒業。同年 4 月三菱電機(株)入社。主として真空バルブの接点材料開発、製造プロセス開発に従事。現在、受配電システム事業所 開閉装置製造部 電力管係長。技術士(金属部門)。日本金属学会、日本材料科学学会会員。