SF₆ガスの雷サージに対する V-t 特性の検討

正員 吉田 智朗

正員 藤波 秀雄

正員 河本 正

(電力中央研究所)

V-t Characteristics of SF₆ Gas for Lightning Surges

Tomoaki Yoshida, Hideo Fujinami, Tadashi Kawamoto, Members (Central Research Institute of Electric Power Industry)

The waveform of a standard lightning impulse greatly differs from those of actual lightning surges coming on GIS. This raises a problem on the equivalence of the standard lightning impulse. This report describes the effect of the voltage waveforms on an insulating performance in SF₆ gas gap subjected to fast oscillating impulse voltages simulating actual lightning surges, and the evaluation of V-t characteristics by applying the equal area criterion.

キーワード：ガス絶縁開閉装置、SF₆ガス、雷サージ、V-t特性、絶縁破壊電圧

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置 (GIS) は、機器の小型化、密閉構造による信頼性・安全性・環境調和性などの利点を有し、66～500kV の全電圧階級での変電所の主要設備となっている。さらに、1000kV UHV GIS の開発も進められている。

一方、高性能酸化亜鉛形避雷器の適用ならびに過電圧解析技術の進歩により絶縁設計の合理化が検討され、最近電気規格調査会において試験電圧標準の改訂が行われた^[1]。このなかで、特に GIS の絶縁設計に関しては SF₆ ガスの絶縁特性が最大電界依存性を有することから、電圧波高値の最も高い雷サージに対する絶縁協調が重要となる。特に、GIS に侵入する雷サージ波形はこれまでの解析例によると高周波振動分を含む急峻な波形であり^[2]、機器試験電圧である標準雷インパルス波形と相当に相違することから、絶縁特性上の雷サージの評価方法ならびに破壊電圧-時間 (V-t) 特性の明確化が重要な課題として取り上げられている^[3]。

GIS に侵入する雷サージの波形は変電所形態や回路構成などによって異なるが、電気協同研究会「絶縁設計合理化専門委員会」^[4]での EMTP を用いた解析によると、雷サージと試験電圧である標準雷インパルスとは次のような相違点がある。

- 波頭部が急峻である (波頭長 0.2～1.0μs)。
- 高周波振動を含む (周波数 0.5～2.0MHz)。

これらの特徴に対して、GIS の V-t 特性を把握することが絶縁協調上重要であるが、従来の検討では標準波形に対するものが多く、実際の雷サージの波形効果を評価するには十分なデータとはいえない。最近、断路器サージが注目されてから急峻波形の特徴がいくつか報告されているが、その

なかで 1μs 以下の急峻波領域の V-t 特性は、雷インパルスで得られた V-t 特性の外挿曲線よりも低下するという特徴が報告されている^[4]。一方、V-t 特性の評価では、面積則^[5]の適用による検討が行われ^[6]、定量的な扱いが議論されているが、評価方法の確立には至っていない。

以上の背景から、本論文では、雷サージを模擬した振動性急峻インパルス波形での V-t 特性を調べ、雷インパルスとの差異ならびに波形の違いを考慮した V-t 特性の定量的評価について検討した結果を述べる。

2. 実験装置および方法

<2.1> 実験装置 図1に実験装置の概要を示す。インパルス発生器の出力は、実験タンク内の直列ギャップ (D)、同軸母線モデルを通じて供試ギャップへ印加される。振動性インパルスを発生する場合は、発生電圧に応じた直列ギャップ長を設定し、さらにインダクタを挿入した。非振動性インパルスの場合は、直列ギャップとインダクタは使用していない。供試ギャップの印加電圧波形は、実験タンク内に設置した容量分圧センサ^[7]とデジタルオシロスコープ (SONY Tektronix 2440) により計測した。

図2に供試ギャップの形状を示す。ギャップは直径 15cm の球電極と平板電極とで構成し、ギャップ長は 1cm である。このとき電界利用率 η (平均電界強度/最大電界強度) は 0.917 となる。

<2.2> 実験方法 実験は、次の4種類の波形を用い、それぞれに対する V-t 特性と 50% フラッシュオーバー電圧を求めた。

- (a) 雷インパルス (Lightning Impulse : LI)
- (b) 0.75MHz 振動性急峻インパルス (0.75MHz Oscillating Impulse : 0.75MHzOI)

	A	B	C	D
雷インパルス	抵抗 200Ω	波頭調整用 コンデンサ1000pF	抵抗分圧器 5kΩ	短絡
0.75MHz振動性 急峻インパルス	抵抗 80kΩ	波頭調整用 コンデンサ1000pF	開放	ギャップ+ インダクタ 0.27mH
1.45MHz振動性 急峻インパルス	抵抗 80kΩ	波頭調整用 コンデンサ1000pF	開放	ギャップ+ インダクタ 0.046mH
非振動性 急峻インパルス	抵抗 200Ω	開放	抵抗分圧器 5kΩ	短絡

図1 実験装置の概要
Fig.1. Sketch of the experimental setup.

図2 供試ギャップの形状
Fig.2. Test gap arrangement.

(c) 1.45MHz 振動性急峻インパルス (1.45MHz Oscillating Impulse : 1.45MHzOI)

(d) 非振動性急峻インパルス (Steep-Fronted Impulse : SFI)

(b) と (c) の振動性急峻インパルスは、雷サージを模擬したもので、非振動性急峻波は、波頭の短い単発波形の効果を調べるために使用した。図3に各波形、表1には各波形

表1 実験値に用いたインパルスの特性値
Table 1. Characteristics of test impulses.

波形の種類	波頭・波尾	波頭長(μs)	波尾長(μs)
(a) 雷インパルス		1.93	65.2
(b) 振動性急峻インパルス (0.75MHz)		0.48	
(c) 振動性急峻インパルス (1.45MHz)		0.25	
(d) 非振動性急峻インパルス		0.74	55.6

の波頭長・波尾長を示した。なお、表1 (a) の雷インパルスの波形は、機器試験電圧として定められている標準雷インパルス波形の規格（波頭長1.2μs [誤差±30%]、波尾長50μs [誤差±20%]）から若干ずれているため、本論文でこの実験波形に言及する場合は、単に「雷インパルス」と呼称する。

(a) 雷インパルス波形(1.93μs/65.2μs)

(b) 振動性急峻インパルス波形(0.75MHz)

(c) 振動性急峻インパルス波形(1.45MHz)

(d) 非振動性急峻インパルス(0.74μs/55.6μs)

図3 実験波形
Fig.3. Waveforms of test impulses.

雷インパルスと非振動性急峻インパルスの50%フラッシュオーバー電圧は、30～40回の昇降法により求めた。一方、振動性急峻インパルスの場合は、直列ギャップ（図1参照）における絶縁破壊の制御が困難であるため、波高値を予め特定することができず、昇降法を用いることができない。そこで、便宜上、次に述べるような（簡易補間法と呼ぶ）方法を用いた。すなわち、試験データの波高値を、一定電圧幅の電圧レベルグループに整理し、各レベルの中で破壊・非破壊の回数から、破壊確率を求めた。ただし、ここで注意しなければいけないのは、第一波ピーク以前に破壊した場合は、印加電圧が特定できないので実破壊電圧値を用いて分類しており、このため破壊電圧レベルが幾分低めに評価されるという点である。しかし、簡易補間法でも、正規確率による整理の結果、著しく正規分布から逸脱した傾向は見られないので、これらのデータから内挿して50%フラッシュオーバー電圧と標準偏差を推定した。

V-t特性の求め方は、JEC規格の「インパルス電圧電流試験一般」^[8]に準拠し、V-t特性の表示は電圧波高値対実破壊時間で行なった。いずれの波形の場合も波頭領域（短時間領域）のV-tデータを得るために過電圧を印加した。過電圧率は、雷インパルスと非振動性急峻インパルスの場合、ガス圧力0.1MPaのとき4.3～5.2、0.3MPaのとき約2.5、0.5MPaのとき1.7～2である。ただし、振動性インパルスの場合は、上に述べた理由により印加電圧波高値を特定できないため、過電圧率を正確に知ることはできない。実験条件は、SF₆ガス圧力を0.1MPa、0.3MPa、0.5MPa、の3通りとし、それぞれの圧力において正・負両極性で実験を行なった。

3. 実験結果

<3・1> 50%フラッシュオーバー電圧 表2に50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} 、標準偏差 σ 、最低フラッシュオーバー電圧 V_{min} 、および $V_0 = V_{50} - 3\sigma$ を示した。 V_0 はV-t曲線を描く際、最低フラッシュオーバー電圧を決定するのに参照する値で、次節に述べる面積則による検討のなかで用いる値である。ただし、振動性インパルスの V_{50} と σ は、前節で述べたように粗い推定値に過ぎないため、あえて V_0 は記さなかった。各波形に対する V_{50} 、 V_{min} を比較すると、一般的に雷インパルスのデータが最小となる傾向にある。

<3・2> V-t特性 図4に、各波形のV-t特性を示す。

図4(a)は、ガス圧力0.1MPa、0.3MPa、0.5MPaの場合の雷インパルスのV-t特性である。雷インパルスのフラッシュオーバー電圧は、全般に負極性の方が正極性よりも低くなる傾向を示しており、この特徴はガス圧力が高くなるほど顕著になる。

(b)は各ガス圧力に対する0.75MHz振動性急峻インパルスのV-t特性、また、(c)は1.45MHz振動性急峻インパルスのV-t特性である。立上りの速い振動性急峻インパルスのV-t特性は、大部分が第一波目のピーク付近に存在しており（0.75MHzの場合0.4μs前後、1.45MHzの場合0.2μs前後）、それらより長い領域のデータは、第二波目以降でフラッシュオーバーしたものに相当する。振動性急峻インパルスの場合も負極性のフラッシュオーバー電圧の方が全般的に低くなる傾

表2 各波形での50%フラッシュオーバー電圧

Table 2. 50% flashover voltage for test impulses.

ガス 圧力 P [MPa]	正極性[kV]				負極性[kV]			
	V_{50}	σ	V_{min}	V_0	V_{50}	σ	V_{min}	V_0
雷インパルス								
0.1	90.8	4.8	87.1	76.4	90.2	3.0	87.9	81.2
0.3	284.	15.3	264.	238.1	274.	18.0	252.	220.0
0.5	437.	17.5	416.	384.5	415.	24.7	390.	340.9
0.75MHz 振動性急峻インパルス								
0.1	140.	40.	94.0	/	123.	23.	104.	/
0.3	310.	49.	279.	/	304.	54.	256.	/
0.5	485.	16.	451.	/	430.	30.	374.	/
1.45MHz 振動性急峻インパルス								
0.1	134.	42.	118.	/	138.	28.	119.	/
0.3	340.	67.	287.	/	323.	35.	294.	/
0.5	442.	19.	428.	/	412.	22.	405.	/
非振動性急峻インパルス								
0.1	93.9	2.5	88.6	86.4	95.7	3.7	88.6	84.6
0.3	286.	11.1	275.	252.7	280.	13.9	260.	238.3
0.5	444.	14.8	420.	399.6	366.	22.6	355.	298.2

向を示しており、かつガス圧力の高い方ほどこの特徴が顕著に表れている。

(d)は、非振動性急峻インパルスのV-t特性である。非振動性急峻インパルスのV-t特性は、立上りが速いことから主に1μs以下の領域（0.2～0.5μs）に多く存在することを除けば、雷インパルスと同様、正極性よりも負極性のフラッシュオーバー電圧が全体的に低くなる特徴を持つ。また、短時間領域では、負極性のフラッシュオーバー電圧が正極性のそれと比べて急激に上昇する傾向にある。このこともガス圧力が高くなるほど顕著に表れる。

雷インパルスのV-t特性について下限包絡線を考えると、前述のように1μs以下の短時間領域へ向かうほどこの包絡線は上昇傾向を示す。今回の実験で得られた、雷インパルスの短時間領域における特性は、ガス圧力0.1MPaのとき0.3μs付近まで、0.3MPaのとき0.5μs付近まで、0.5MPaのとき1μs付近まで得られている。それより短い時間領域のV-t特性については、IG発生電圧の制限のためデータとしては得られなかった。このような短時間領域におけるV-t特性は、振動性・非振動性に関わらず、上の包絡線を0.1μs付近まで外挿することにより推定できると考えることもできる。しかしながら、各波形のデータを観察すると、振動性急峻インパルスや非振動性急峻インパルスのV-t特性は、雷インパルスの外挿曲線を下回る傾向にある。その特徴が顕著な例として、図5に、ガス圧力0.5MPaにおける雷インパルスと1.45MHz振動性急峻インパルスのV-t特性を比較した。振動性急峻インパルスのV-t特性が、雷インパルスの下限包絡線の外挿曲線よりも下回っている様子が明確に認められる。他のガス圧力条件の場合や、非振動性急峻インパルスの場合も同様である。以上の考察から、GISの絶縁設計において、雷サージのような振動性急峻インパルスに対するV-t特性を標準雷インパルスのV-t特性から直接

図4 各波形でのV-t特性
Fig.4. V-t characteristics for the test impulses.

Fig.5. V-t characteristics of lightning impulse and 1.45MHz oscillating impulse(0.5MPa).

Fig.6. Equal area criterion.

評価することは難しく、別途波形の相違を考慮する必要があると考えられる。

4. V-t特性の定量的検討

<4・1> 面積則の概要 本章では、V-t特性の定量的評価法として面積則の適用を検討する。面積則は最初に気中の球ギャップに対して提案され、Kindの法則あるいはKindの(等)面積則と呼ばれている^[9]。放電路(リーダ)の進展速度が過電圧に比例し、対電極にリーダが達したときにフラッシュオーバーが起これと仮定すると、図6において、次式によりV-t特性が評価される。

$$\int_{t_0}^{t_0+t_f} \{V(t) - V_0\} dt = A_f \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 V_0 は最低破壊電圧、 t_0 は $V(t) = V_0$ となる時間、 t_f

は、 t_0 からフラッシュオーバーに至るまでの時間で、放電の形成遅れ時間に相当する。 A_f は図の斜線部の面積であり、ギャップ条件に依存する定数である。印加電圧の波形 $V(t)$ が既知のとき、適当な V_0 と A_f を与えて、(1)式を満足する t_f を求めると、その波形に対するV-t特性が計算される。(1)式の適用にあたっては、 V_0 、 A_f の2つのパラメータを決定する必要があるが、現在のところ明確な決定法は存在しない。特に A_f は、ギャップ形状、ガス圧力、電界条件などの多くの因子により影響を受ける。これら2つのパラメータについては、あらたに(2)式

$$\alpha_f = \frac{A_f}{V_0} \quad \dots \quad (2)$$

で定めるパラメータ α_f を考え、各因子に対する影響を準平等電界での実測結果から検討した例がある^{[6]・[10]}。

<4・2> 面積則を適用したV-t特性の特徴 上述の面積則を、雷インパルス、振動性急峻インパルス、非振動性急峻インパルスにそれぞれ適用して、定量的評価手法としての妥当性を検討した。面積則の計算を行なうためには、各波形のデータと、 V_0 、 A_f の値が必要である。波形データは、実際に実験で測定したものを用いることにし、図3に示した4波形を入力として与えた。 V_0 の値としては、実際の機器への適用を考慮すると耐電圧値が重要となることから、雷インパルスの50%フラッシュオーバー電圧から標準偏差の3倍低い電圧、すなわち

$$V_0 = V_{50} - 3\sigma \cdots \cdots (3)$$

の値を採用するのが妥当である。特に、機器の耐電圧値を考える場合には、電圧極性によらず最低値を選ぶ必要がある。具体的に今回の計算では、表2に示した各ガス圧力に対する正・負それぞれの V_0 のうち値の低い方を選び(表中に下線附記)、ガス圧力0.1MPaのとき正極性の値76.4kV、0.3MPaのとき負極性の値220.0kV、0.5MPaのとき負極性の値340.9kVを採った。 A_f については、文献[6]・[10]を参考にパラメータサーベイをして、各波形の耐圧V-tとして妥当と考えられるものを求めた。表3に、今回の面積則計算で用いた A_f の値をまとめた。ケース1とケース2は、各ガス圧力を通じて α_f の値が共通となるように A_f を決めた場合で、ケース3は文献[6]・[10]を参考にして、ガス圧力が高くなるほど α_f の値が小さくなるように A_f を決めたものである。

表3 面積則計算に用いた A_f の値一覧
Table3. A_f [kV・ μ s]-values used in the calculation with equal area criterion.

ガス圧力[MPa]	0.1	0.3	0.5	α_f [ns]
V_0 [kV]	76.4	220.0	340.9	
ケース 1	1.0	2.88	4.46	1.309
ケース 2	0.6	1.73	2.68	7.853
ケース 3	0.6	1.0	1.5	

図7に、表3の A_f に従って面積則により求めたV-t特性を実験結果と共に示す。前述のように、計算に用いた印加電圧波形は、実際に実験で測定した波形をスムージングして波高値を規格化したもの(図3参照)である。図7では、 V_0 は340.9[kV]、 A_f は4.46(ケース1)、2.68(ケース2)および1.5(ケース3)[kV・ μ s]とした。

計算したV-t特性曲線に(特に振動性急峻インパルスの場合に極端な)凹凸があるのは、計算に用いた印加電圧波形の影響が生じたものである。すなわち、実験で得た波形は、数学的な関数などで与えた滑らかな波形とは異なり、漂遊インダクタンス・キャパシタンスなど、実験回路固有の回路定数に起因する高周波振動成分を含んでいる。図8に、時間軸を対数軸で表した振動性急峻インパルス波形を示す。例えば図8(b)の1.45MHzの振動波形と、それに対する面積則計算結果(図7(c))を比較すると、面積則計算結果中凹凸の生じている部分が、振動波形に勾配変化がある部分(0.07 μ s、0.15 μ s、0.24 μ s付近)に対応していることがわかる。このように、線型時間軸では滑らかに見える波

(a)雷インパルス

(b)0.75MHz振動性急峻インパルス

(c)1.45MHz振動性急峻インパルス

(d)非振動性急峻インパルス

図7 面積則によるV-t特性評価 (0.5MPa)
Fig.7. Estimation of V-t curve with equal area criterion (0.5MPa).

形であっても微妙な勾配変化を持っており、 A_f の値が比較的小さいことも相俟って、計算結果に凹凸を生じることになる。

各ケースの計算では、ガス圧力条件が同じならば、どの波形に対しても等しい V_0 の値を用いている。面積則で得られたV-t特性曲線を実験結果と比較して、実験結果と整合した耐圧V-t特性を与える A_f の値を選べばよいので、計算したケースの中では、ケース3の条件が妥当と考えられる。このように、異なる波形に対しても、ある適切な共通の A_f の値を選べば、面積則を適用してそれらの波形のV-t特性を評価することが可能である。ただし、パラメータ A_f の理論的な選定基準はまだ明確になっておらず、さらに検討の

(a)0.75MHz

(b)1.45MHz

図8 振動性急峻インパルス波形
Fig.8. Waveforms of oscillating impulse.

余地が残されている。

5. 考察

<5・1> V-t特性曲線による評価の問題点 雷インパルスに対するV-t特性曲線は、JEC-212 (1981)「インパルス電圧電流試験一般」^[4]で以下のように定義されている。「供試物に加える雷インパルス電圧の波形を一定に保ち、波高値を変化して絶縁破壊させた場合における、裁断された電圧の波高値と、規約裁断までの時間との関係を表す曲線をいう。この曲線を雷インパルスV-t曲線と略称する。」

この定義によれば、波尾部の破壊では印加波形とV-t特性曲線は交差しなくても破壊が生じ(図9)、異なる波形に対しては評価ができない。例えば、図10に示すような波形は波高値が高く破壊を生じる可能性があるが、雷インパルスのV-t特性からは評価できない。図の点Pでの破壊条件は雷インパルスの波尾部の減衰と同等であれば成立するが、異なる場合には判定できない。

図9 波尾部での破壊例

Fig.9. Schematic figure of breakdown at the wave tail.

図10 V-t 曲線とサージ波形

Fig.10. Schematic figure of V-t curve and surge.

図11 機器に想定した急峻波に対する耐圧V-t特性

Fig.11. Withstand V-t characteristics for surges associated with several apparatus.

従来、GISの基準V-t特性曲線(耐圧値)として図11に示す特性^[11]を基に、雷サージに対する絶縁協調はサージ波形が基準V-t特性曲線と交差するか否かで判定する方法で評価されていた。しかし、この評価方法は、上記のV-t特性曲線の定義から間違いであり、機器の合理的な絶縁設計を行うためには、実際の雷サージに対応できる評価手法の確立が必要である。

<5・2> 面積則によるV-t特性の評価 4章で示したように、雷サージのような振動性急峻インパルス波形に対してもV-t特性の下限は面積則により評価できることが確認

図12 面積則により計算した耐圧V-t特性
Fig.12. V-t characteristics calculated with equal area criterion.

された。例として、SF₆ガス圧力0.5MPaのときのV-t特性データと、面積則によるV-t特性曲線の計算結果とを図12に示した。実験データは、雷インパルスと0.75MHzおよび1.45MHz振動性急峻インパルスの3種類を正・負両極性プロットした。一方、面積則による計算は、表3中のケース3におけるガス圧力0.5MPaの場合、すなわち $A_f=1.5$ を、上の3種類の波形について行なった。結果は耐圧V-t特性曲線として図中に示した。また、図11に示したガス絶縁機器に対する基準V-t特性曲線も併せて図中に示した。この基準V-t特性曲線は、4μs以下の領域ではほぼ直線になっており、かつ1μs以下の短時間領域では定義されていない。短時間領域についてもこの基準曲線の直線外挿で基準V-t特性曲線を定めるとすると、電圧値としては400kV前後となって、今回の実験データは一応安全側に包含されている。しかし、その外挿した基準V-t特性曲線の電圧レベルは、面積則により求めた耐圧V-t特性より高いレベルに位置しており、面積則の考え方によると、基準V-t特性曲線より下の電圧レベルでも絶縁破壊確率を残していることになる。

以上のことから、雷サージのように、雷インパルスとは異なるV-t特性を持つ電圧波形に対しては、次の様にして絶縁性能の検討を行なうのが安全側であるといえる。すなわち、図12に示すように雷インパルスの耐圧値($V_0 = V_{50} - 3\sigma$)を基に面積則により同一の破壊条件(A_f)から波形に応じた耐圧V-t特性曲線を求め、これを機器の基準V-t特性曲線として採用する。この場合、当然ながら各波形に共通なV-t特性曲線は存在せず、波形毎の独立のV-t曲線特性が与えられる。振動性の波形の場合には、振動下部(凹部)の V_0 以下の領域では破壊条件が成立しないので、V-t特性曲線が不連続となる。実際の雷サージに対する評価では、過電圧解析結果の波形を使い、 V_0 、 A_f から当該雷サージに対して機器が耐えるか否かを判定することができる。この場合、 V_0 としては、機器に想定される雷インパルス試験電圧(LIWV)を用いるのが妥当と考えられる。

6. まとめ

高周波振動成分を持った雷サージに対するSF₆ガスの絶縁特性を検討するため、15cmφ球-平板電極を用いて、雷

インパルス(1.93μs/65.2μs)、振動性急峻インパルス(周波数0.75MHz, 1.45MHz)、および、非振動性急峻インパルス(0.74μs/55.4μs)でのV-t特性を比較検討した。また、波形の違いに起因する絶縁特性の違いを定量的に評価する手段の一つとして、面積則の適用を検討した。その結果は以下の3点である。

- (1) 短時間領域における振動性急峻インパルスの破壊電圧レベルは、雷インパルスのV-t特性から推定されるレベルよりも短時間領域で下回ることが実験的に明らかとなった。従って、雷サージに対する機器絶縁性能を検討する際には、波形によるV-t特性の違いを考慮する必要がある。
- (2) 各波形に対するV-t特性を面積則を適用して検討した。その結果、雷インパルスで得られた絶縁破壊条件(V_0 、 A_f を同一条件とする)を用いて、振動性急峻インパルスに対するV-t特性が評価できることを確認した。
- (3) 従来のGIS機器の基準V-t特性は、雷インパルスに対して1μsより長い時間領域しか定義されていなかったが、以上の結果から、実際の雷サージのV-t特性が面積則を用いて推定できることを明らかにした。

本研究成果のとりまとめにあたり、京都大学工学部宅間董教授には、貴重なご指導、ご討論を賜りました。ここに、厚く感謝の意を表します。

(平成8年1月25日受付)

文 献

- [1] JEC-0102:「試験電圧標準」, 電気学会電気規格調査会(1994)
- [2] 電気協同研究第44巻3号「絶縁設計の合理化」(1988)
- [3] 電気学会技術報告第518号「試験電圧と機器の絶縁に関する諸特性」, 試験電圧の合理化協同研究委員会(1994-11)
- [4] 例えば, W.Boeck, et.al.: "Insulation Behaviour of SF6 with and without solid insulation in case of fast transients", CIGRE paper 15-07 (1986)
- [5] Dieter Kind: "Die Aufbaufläche bei StroBspannungsbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft", Elektro Technische Zeitschrift, 1.Februar (1958)
- [6] W.Knorr et al.: "Voltage-time characteristics of slightly nonuniform arrangements in SF6 using linearly rising and oscillating lightning impulse voltages", CIGRE paper 15-05, 1980
- [7] 八島政史, 藤波秀雄, 宅間董:「ガス絶縁機器の急峻波サージ測定用容量分圧センサの開発」, 電気学会論文誌B, 114巻1号, pp.19-25 (1994)
- [8] JEC-212:「インパルス電圧電流試験一般」, 電気学会, 電気規格調査会(1981)
- [9] 新田東平, 山田直也, 荒畑吉邦:「SF₆ガスの絶縁特性」, 三菱電機技報, Vol.44, No.9 (1970. =)
- [10] 藤波秀雄, 宅間董, 河本正:「波形効果を考慮したGIS

雷インパルス試験電圧の評価法], 電力中央研究所報告, T87037 (昭 63-5)

[11] 電力中央研究所:「発電所耐雷設計ガイドブック」(昭和 51-3)

吉田 智朗

(正員) 1963 年 4 月 17 日生。1989 年 3 月東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。主としてガス絶縁, 核融合炉システムに関する研究に従事。日本原子力学会会員。

藤波 秀雄

(正員) 1952 年 12 月 2 日。1978 年 3 月成蹊大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。1989 年～1990 年カナダ・マニトバ大学客員研究員。工学博士。主としてガス絶縁機器の絶縁技術, 送変電設備の電磁界影響, 雷観測技術に関する研究に従事。1989 年および 1994 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

河本 正

(正員) 1953 年 11 月 26 日生。1974 年奈良工業高等専門学校電気工学科卒業。1979 年 3 月東京理科大学理学部 II 部物理学科卒業。1974 年 4 月(財)電力中央研究所入所。主として電力機器, 送変電設備の電界・磁界解析に関する研究に従事。1989 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。