

変圧器絶縁の開閉サージ耐力とコロナ劣化

Switching Surge Strength and Corona Deterioration in Transformer Insulation

鎌田 譲* 堤 泰行* 平野 三百里**
 Yuzuru Kamata Yasuyuki Tsutsumi Mihori Hirano

要 旨

超々高圧変圧器の絶縁構造を決定するうえできわめて重要な要因となる、開閉サージ絶縁耐力とコロナ劣化特性について、いままで研究されてきた成果のいくつかを紹介し、これらに対する考え方を述べたものである。

1. 緒 言

超高压変圧器の絶縁設計を行なううえで、重要な要因となるものは、なんとといっても開閉サージとコロナであろう。最近の超高压変圧器はかなり、BILを低減しており、この点からさきにあげた二つ

の要因が絶縁特性にどのような影響を及ぼしているのか明確にしておく必要がある。ここではわれわれが行なった研究結果より得たいくつかの知見を述べる。

2. 開閉サージ絶縁耐力

2.1 油中における開閉サージ絶縁耐力の基礎的特性

変圧器の絶縁構造を考える場合、まずその基本材質はクラフト紙、プレスボード、油であろう。そこでこれら材料の開閉サージ絶縁耐力を波頭長1 μ sから500 μ sまで変えてv-t特性として求めたのが図1, 2, 3, 表1, 2である。試料はすべて真空乾燥、真空注油の行なわれたもので、電極形状は図4に示すようなものである。

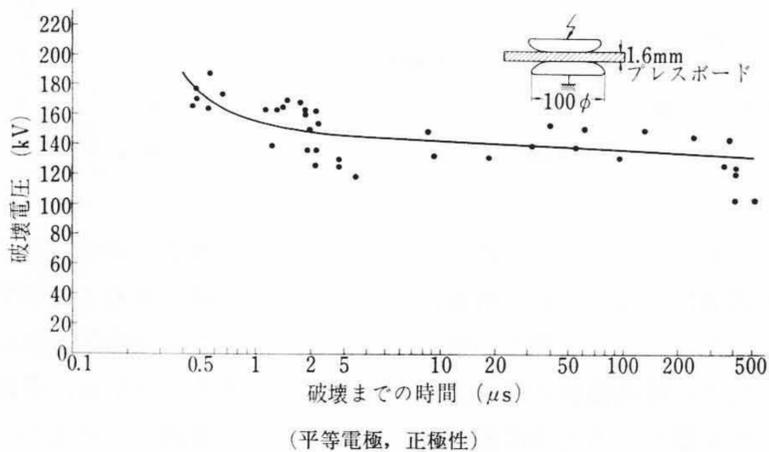


図1 1.6mm油浸プレスボードのv-t特性

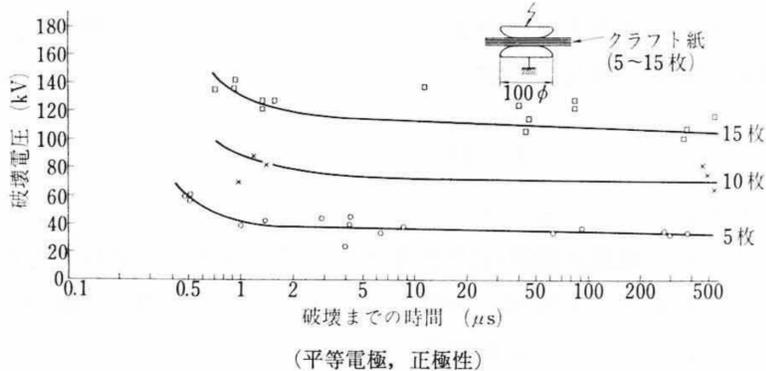


図2 油浸クラフト紙(55 μ)のv-t特性

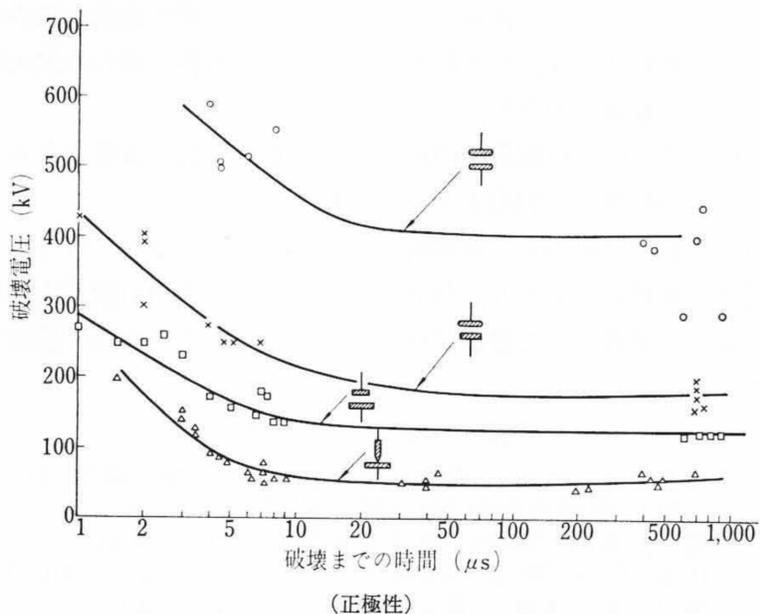


図3 油中ギャップ(10mm)のv-t特性

表1 油浸紙の標準波(1 \times 40 μ s)および開閉サージ(波頭長500 μ s)の絶縁耐力の比較

紙の種類	条 件	標準波破壊電圧 (kV)	500 μ s開閉サージ破壊電圧 (kV)	500 μ s開閉サージと標準波の比 (%)	差の検定 (危険率5%)	
プレスボード	平等平板電極	165	120	72	有意差あり	
	円板電極	165	135	82	有意差あり	
クラフト紙	平板平等電極	5枚	43	35	81	有意差あり
		10枚	80	77	96	有意差なし
		15枚	126	111	88	有意差あり
	円板電極	5枚	47	41	87	有意差なし
		10枚	78	76	99	有意差なし
		15枚	120	111	92	有意差なし

表2 油ギャップの各種電極構造と開閉サージ絶縁耐力の比較

電極番号	電極の種類	標準波破壊電圧 (kV)	500 μ s開閉サージ破壊電圧 (kV)	500 μ s開閉サージと標準波の比 (%)	差の検定 (危険率5%)
1	針-円板	69	59	85	有意差あり
2	円板-円板	183	129	71	有意差あり
3	平等平板-円板	259	179	69	有意差あり
4	平等平板-平板	506	382	76	有意差あり

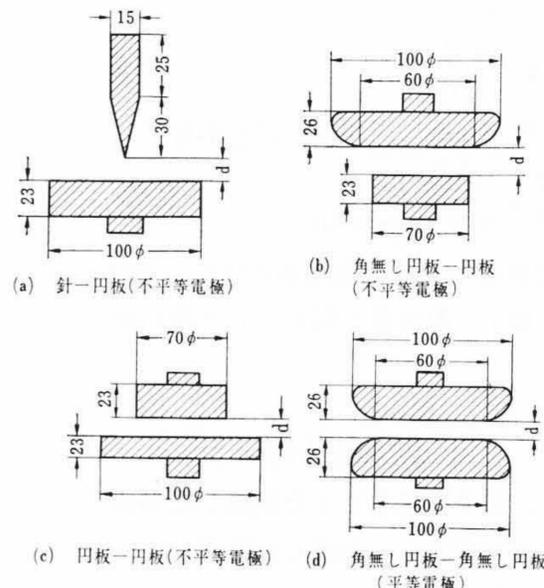


図4 電極構造

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所国分工場

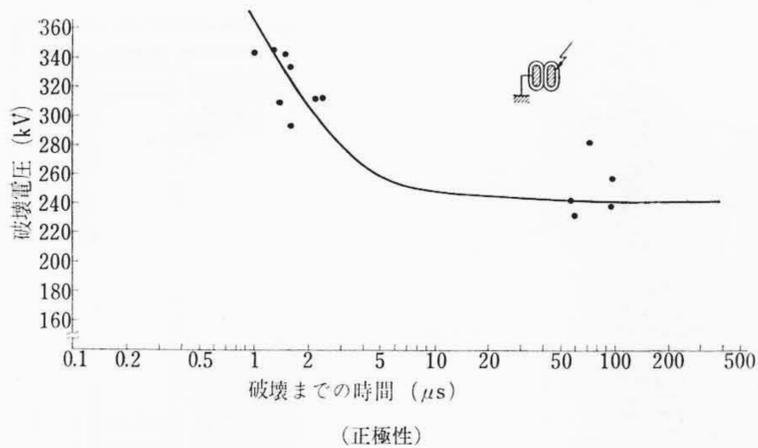


図5 巻線素線絶縁のv-t特性

表3 変圧器巻線素線絶縁の標準衝撃波および開閉サージ絶縁耐力の比較

標準波破壊電圧 (kV)	500 μs 開閉サージ電圧 (kV)	500 μs 開閉サージと標準波の比(%)	差の検定 (危険率5%)
306	244	80	有意差あり

図1, 2, 表1から判明するよういわれる固体絶縁物の場合は、開閉サージ波形の波頭長の増大につれて絶縁耐力が極端に低下する傾向がなく、標準衝撃電圧と波頭長500 μsの開閉サージ電圧との比は総合平均で標準波の87%程度になっており、一般に報じられている83~85%の値とほぼ一致している⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながらプレスボードとクラフト紙では、内容的に違っているため表1を詳細に検討すると、プレスボードでは明確に両者の差異を判定しうるが、クラフト紙ではその大半が差異ありと判定できない結果となっている。もちろんこれのみの結果からクラフト紙では絶縁耐力に差異なしとただちに判定するのは危険であるが、紙の種類により開閉サージ耐力の低下率が異なってくることも予想される。実測結果では標準波および開閉サージ領域にわたり、表1に示すように両電極で著しい差はなく逆に円板電極において、耐圧の高い場合も若干みられた。これは両電極とも破壊の半数以上がストレス集中点以外の平等電極部および電極外の位置での弱点破壊であり破壊経路が類似しているためと考えられる。

図3, 表2は油中ギャップの開閉サージ耐力を示すもので前述した油浸紙とは異なった特性があらわれている。図中にかかげた電極形状は変圧器電極構成のほとんどを含むものであり、いずれも波頭長10 μs以下になると絶縁耐力が急激に増加しているのがわかる。

逆にいえば標準衝撃電圧に対して開閉サージ電圧の絶縁耐力が急激に低下することを意味するわけである。したがって表2から明らかかなように電極形状によっては70%前後まで開閉サージ絶縁耐力が低下するものもあり、これは油中の微小浮遊物の影響によるものもあるためと考えられる。また電極形状の影響が大きいのは最大ストレス部分で破壊を生じているため、前述の油浸紙とは破壊形式が異なっているためと説明できる。

次に実際の変圧器絶縁構造の代表的なものの一つである素線絶縁について開閉サージ領域までのv-t特性を求めたのが図5である。試料としては変圧器巻線を取り出し、クラフト紙を巻回絶縁した導体2本を並列に巻き、一方を接地して他方に電圧を印加した。これらはすべて普通の製作工程に従って処理を行なったものである。図から明らかかなように開閉サージ領域で著しい低下は認められないが、波頭長500 μsの開閉サージ耐力は表3から明らかかなように80%になり、表1で求められたクラフト紙の開閉サージ耐力よりは低目である。これは簡単な構造でありながら破壊経路が貫通、沿面破壊、貫通の形態をとるため、かなり複雑な破壊方式となっているからである。

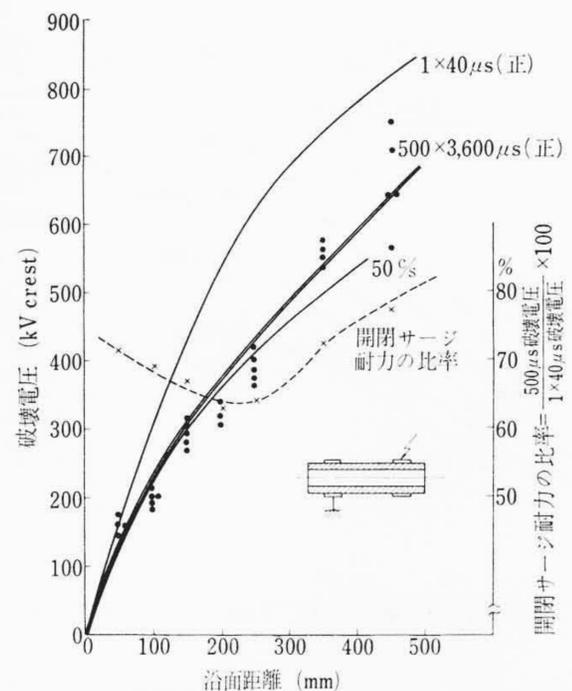


図6 絶縁筒沿面の開閉サージフラッシュオーバー特性

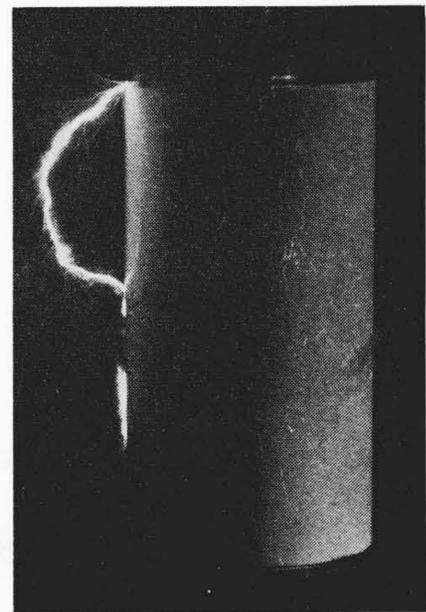


図7 絶縁筒沿面の開閉サージ破壊経路

変圧器の絶縁破壊を行なった際に生ずるいわゆる破壊経路は非常に複雑であるが大別すると貫通破壊、沿面破壊(クリープとも称されている)、両者の混った破壊の三つの場合をあげることができる。そこで沿面破壊の開閉サージ絶縁耐力を種々検討してみると、標準衝撃波に対して前述した値より低下することが判明した。特に乾いた固体絶縁物(レジンと紙で構成された絶縁物で、油が内部に含浸しない材料)沿面の油中における開閉サージ耐力は60%程度の値になることが図6から明らかである。試料はフェノール系の樹脂とクラフト紙からなる絶縁筒でフラッシュオーバー経路も従来とは異なった形態をとる。この様子を図7に示す。また油によくぬれる固体絶縁物沿面の開閉サージ耐力は乾いたものほど低下しないが、それでも貫通破壊の場合より低くなるのがわかった。

いずれにせよ油入変圧器の開閉サージ絶縁耐力は沿面破壊を行なうとき、もっとも低くなると思われ、極端な場合には標準衝撃波の60%程度になるが、一部に固体絶縁(油浸紙絶縁)をとり入れ、貫通に対する絶縁耐力分が大きくなるようにすればその比率を高くとることができ、場合によっては表1からも明らかかなように90%程度を達成できると考えられる。このことは次節の絶縁構造モデルでの実験でも確認された。

実際の超高压変圧器の絶縁構造は寸法的にも非常に大きなものであり、また油中破壊の絶縁特性は非直線性なので小さな試料での開閉サージ耐力を、そのまま実規模のものに適用できるかどうかある程度検討しておく必要がある。本来ならば実規模の変圧器を多数製

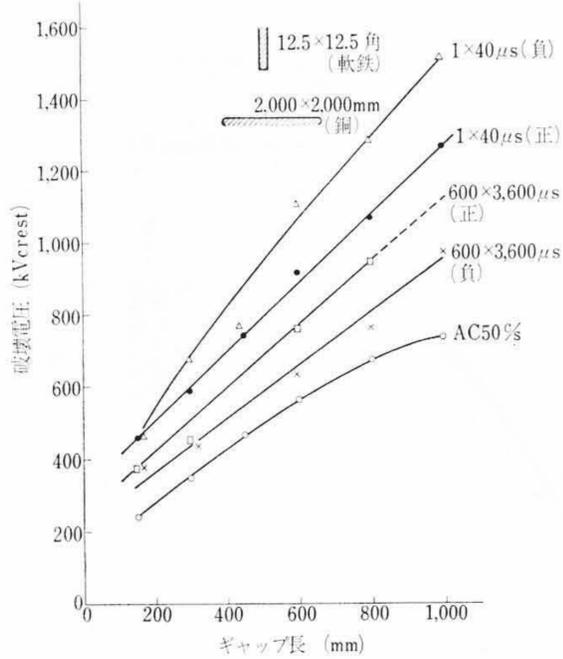


図8 油中棒-平板電極のフラッシュオーバー特性

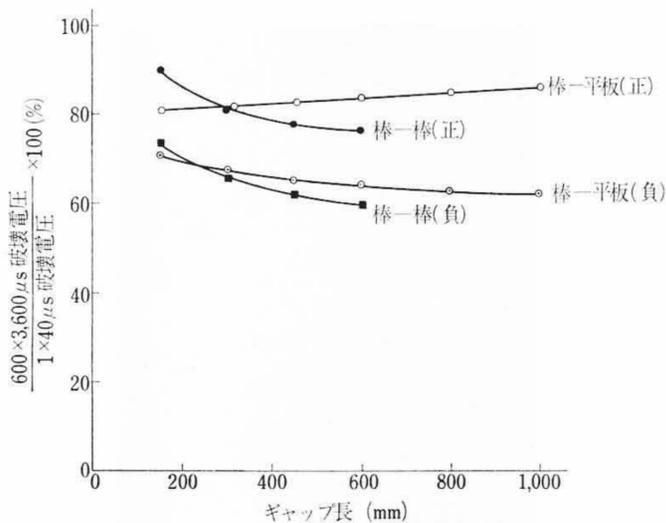
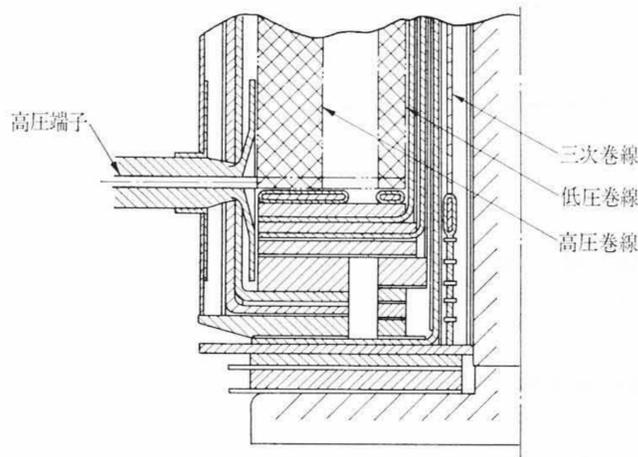


図9 油中の棒-平板および棒-棒電極の開閉サージ絶縁耐力の比率

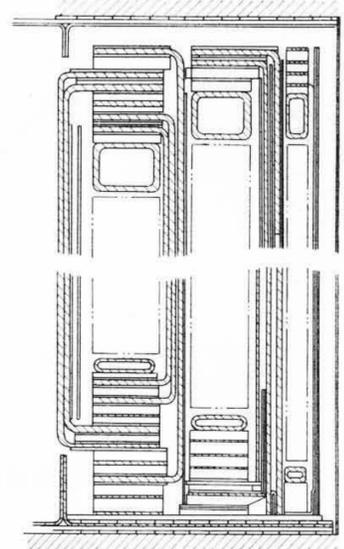
作して破壊試験を行えばよいのであるが、そのような実験は費用の点からもきわめて困難であるので、電界集中の最も大きいと考えられる棒-平板電極および棒-棒電極で、距離の大きな油中ギャップの開閉サージ耐力を求めたのが図8, 9である。図から明らかなように開閉サージ領域では負極性の破壊電圧が正極性より低くなることわかる。これは従来の衝撃電圧、直流電圧領域で求められたフラッシュオーバー特性の常識とは逆である。またギャップ長が大となると開閉サージ絶縁耐力の比はわずかに低下するものもあるが、上昇するものもあることが明らかである。いずれにしても小さな試料で得られた結果に、ある程度の変化分を見越しておけば問題ないとみなせる。

2.2 変圧器絶縁構造モデルにおける検討

図10は絶縁階級200号相当の巻線端部の絶縁構造モデルである。まず試験の前に十分な乾燥処理と油含浸を行なって標準衝撃電圧1x40 μs 正極性電圧を950 kV から1,350 kV まで印加し、電圧、電流波形、超音波波形を測定して異常のないことを確認してから、550x2,800 μs の開閉サージ電圧波形を正、負両極性1回、それぞれの電圧レベルで印加した。開閉サージ電圧レベルの設定は200号のBIL 1,050 kV の83%つまり870 kV を100%とし、50%から10%ごとにそれぞれの極性で電圧を印加したが電圧、電流波形、超音波波形に異常はみとめられず、現行のBILによって設計製作された変圧器モデルが、一般にいわれている開閉サージ耐圧レベルBILの83%に十分耐えるものであることが立証された。さらに電圧を上昇してBILの100%つまり1,050 kV 正負を印加したところ電圧、電流波形にはなんらの変化も認められなかったが超音波波形



(絶縁階級200号)
図10 端部絶縁構造モデル



(絶縁階級200号, 140号)
図11 変圧器巻線絶縁構造モデル

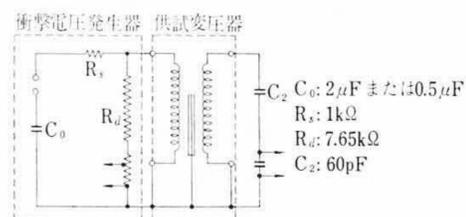


図12 誘導法による開閉サージ試験回路

にかすかな変化があらわれ、微小なコロナ放電を生じていることが判明した。次にBILの100%レベルで何回か開閉サージ電圧を印加したが電圧、電流の波形上では異常なく十分耐えるという確信が得られた。

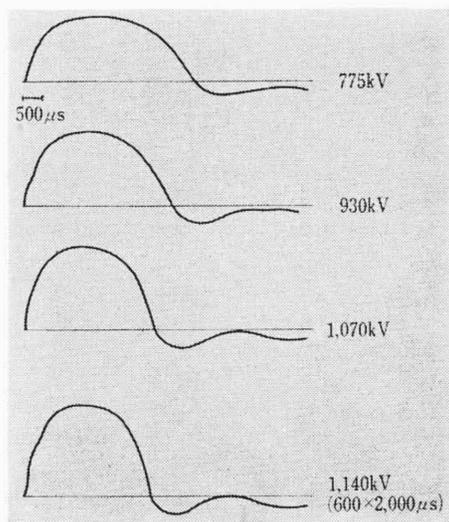
図11は絶縁階級200号および140号相当の巻線構造モデルで、これを用いて主絶縁および端部絶縁の開閉サージ絶縁試験を行なった。開閉サージ波形は500x3,800 μs で電圧レベルは200号側BIL (1,050 kV) の83%つまり870 kV を100%として、40%から10%ごとにステップアップしたがBILの100%でも破壊せず最終的にはプッシングの外部フラッシュオーバーを生じ、内部絶縁を破壊させるまでには至らなかった。また140号側はBIL (750 kV) の83%つまり622 kV を100%として同一波形で40%から電圧を上昇したが、110%つまり685 kV で端部絶縁の沿面破壊を生じた。すなわちBILの91%で破壊したことになる。標準波形1x40 μs 破壊電圧との比率をみると、72%になることがわかった。そこで破壊の起点になっている巻線の素線絶縁を一部強化して破壊経路の絶縁耐力の配分を固体絶縁物の貫通分が多くなるよう置換すると、72%のものが85%以上になった。これは前節で述べたように沿面破壊の場合の開閉サージ耐力は標準衝撃電圧に対して比較的lowく、固体絶縁物の貫通は逆に高いので、この両者の組合せにより開閉サージ耐圧レベルをある程度コントロールできることを意味している。

2.3 実際の変圧器における開閉サージ試験

開閉サージ絶縁耐力の基本的な特性および絶縁構造モデルの絶縁試験から得られた資料をもとにして400~500 kV 級変圧器のいくつかを設計製作し、開閉サージ試験を実施した結果について述べる。

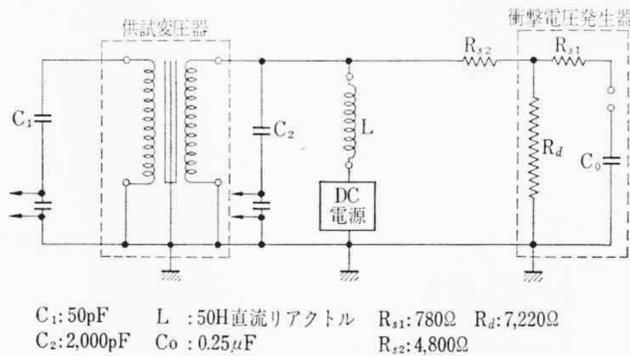
(1) 520 kV 変圧器の開閉サージ試験

鉄心と巻線を有する場合の開閉サージ試験としてはいくつかの方法が考えられるが、衝撃電圧発生装置を利用できる点で図12に示す誘導法と呼ばれる回路方式をとった。この方法ではC₀, R_s, C₂を変えて所定の波形を出そうとするものである。まず供試変圧器に対して商用周波のコロナ試験を行ない、その後開閉サージ試験を実施した。得られた開閉サージ波形を図13に示す。鉄心飽和のため電圧が高くなるにつれて波尾が短くなっているが、



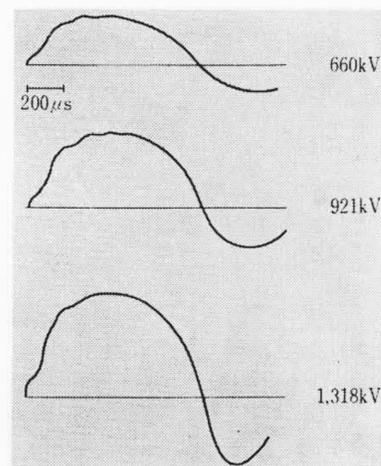
(正極性)

図13 520 kV, 4.4 MVA 変圧器の開閉サージ試験電圧波形



$C_1: 50\text{pF}$ $L: 50\text{H}$ 直流リアクトル $R_{11}: 780\Omega$ $R_d: 7,220\Omega$
 $C_2: 2,000\text{pF}$ $C_0: 0.25\mu\text{F}$ $R_{12}: 4,800\Omega$

図14 逆励磁誘導法による開閉サージ試験回路



(正極)

図15 525 kV, 10 MVA 変圧器の開閉サージ試験電圧波形

1,140 kV で波頭長 600 μs , 波尾長 2,000 μs の波形が得られた。これ以上 2,450 kV まで印加したが外部フラッシュオーバーして、内部の破壊までに至らなかった。なんらかの方法で波尾を大きくしてやる必要がある。なお、この変圧器には標準衝撃電圧試験も行なっており、BIL 1,925 kV が保証されることを確認している。

(2) 525 kV 10 MVA 変圧器の開閉サージ試験

実際の電力用超高压変圧器は鉄心の磁束密度が高くとられており開閉サージ試験の際、誘導法で行なうと鉄心飽和のため波尾が高電圧になるほど短くなる欠点を有していた。これを改善するため低圧側へ衝撃電流を通ずる前に、直流電源とインダクタンスを用いて逆励磁しておけば約 2 倍の磁束密度をとることができ、波尾を長くすることができる。この回路方式を図 14 に示す。また、この逆励磁誘導法によって得られた開閉サージ電圧波形を図 15 に示す。この変圧器は BIL 1,550 kV を保証したものであり、BIL の 85% つまり 1,318 kV 正極性、波形 (360 x 1,000 μs) に十分耐えたことを示すものである。また問題の波尾は電圧が高くなってほとんど変化していないことが明らかである。

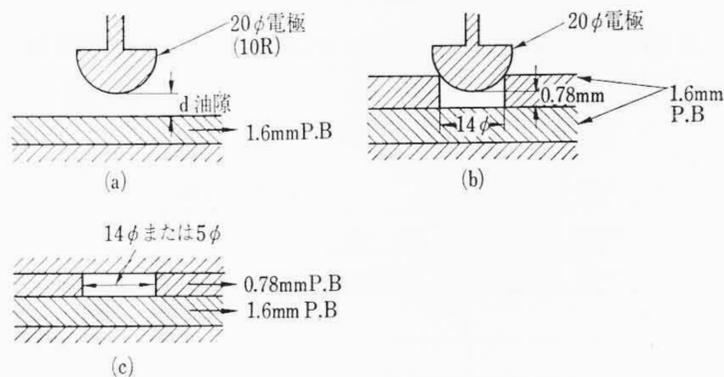


図16 試料構成

3. コロナ劣化特性

変圧器内部のコロナ放電の様子は絶縁構造によりかなり異なるものであるが、代表的な構成は油浸紙と油ギャップの複合絶縁である。電圧を上昇させていくと、それぞれの部分に加えられる電界は誘電率に逆比例するため、まず最初に油ギャップのところでコロナが発生し、これが油浸紙を劣化させてついに全路破壊に至ることが考えられる。ここでは、1960 年以來研究されてきたものの中から、いくつかの基礎実験例と実際の変圧器での例をあげて説明する。

3.1 コロナ劣化の基本的性質

3.1.1 油ギャップの配置と劣化の関係⁽³⁾

試料の構造を図 16 に、実験結果を図 17 および図 18 に示す。図 17 において、(b) と (c) は油ギャップが油浸紙でかこまれた場合の劣化特性で、コロナ放電によって油から発生する分解ガスは、油浸紙の中に閉じ込められるため、当初は油中コロナであったものが次第に気中コロナになり、したがって放電エネルギー密度も小となって、油浸紙の寿命が比較的長くなる。これに反して (a) は分解ガスが容易に逃げ出すため油中コロナの形が保持され、油浸紙の寿命が短くなっている。このことは実際の変圧器において油が容易に流入、流出する部分でのコロナ放電の方が油浸紙層の間で生ずるコロナ放電よりも劣化の点で過酷になることを意味している。図 18 は油ギャップの面積および油浸紙の厚さと寿命との関係をあらわすもので、まずガスを閉じ込める場合に

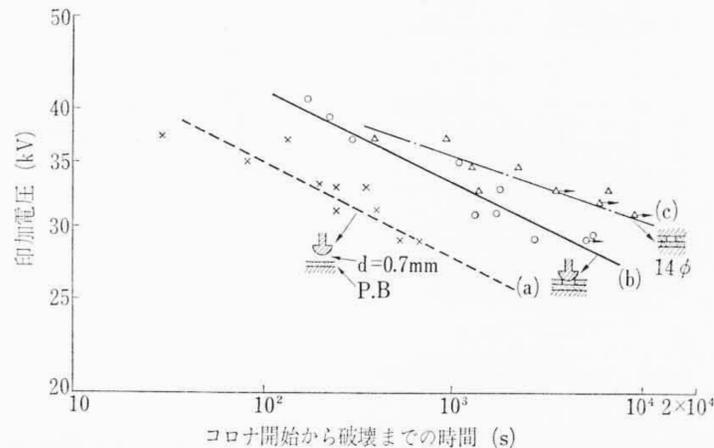


図17 各種構造の電圧-寿命特性

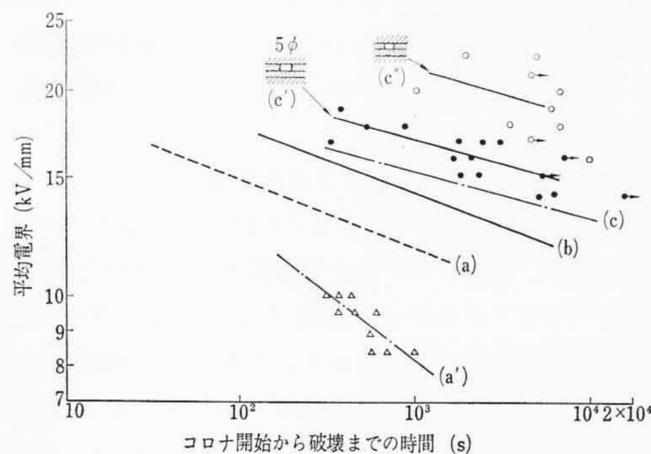


図18 各種構造の電界-寿命特性

ついてみると油ギャップ 5 mm ϕ の試料 (c') が 14 mm ϕ の試料 (c) より寿命が長く、さらに (c') の 1/2 の油ギャップ長さおよび試料厚の試料 (c'') ではより長い寿命となっている。またガスを閉じ込めない場合もギャップ長さおよび試料厚を 4 倍 (電極 125 mm ϕ) とした試料 (a') は、(a) よりかなり短い寿命となって

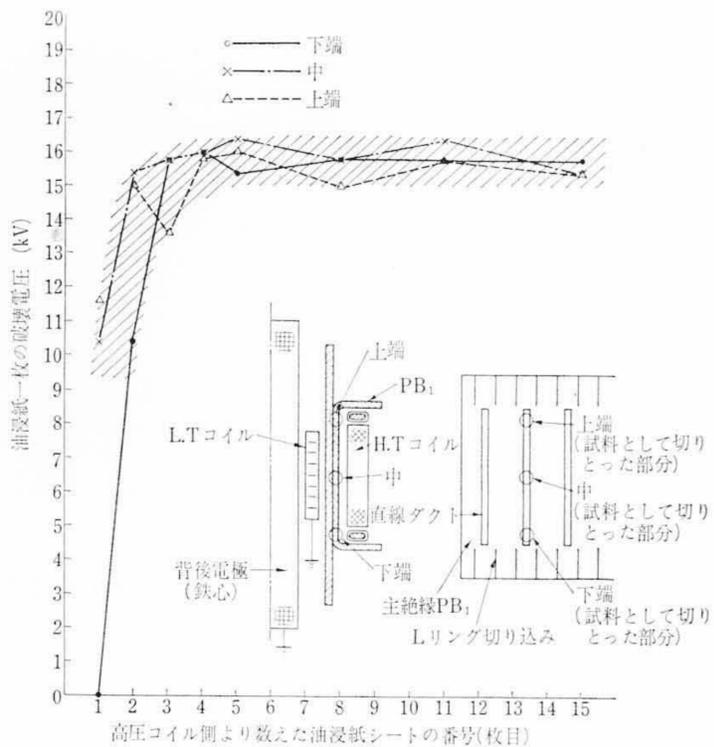


図19 154~168 kV 級モデルにおけるコロナ侵食の例

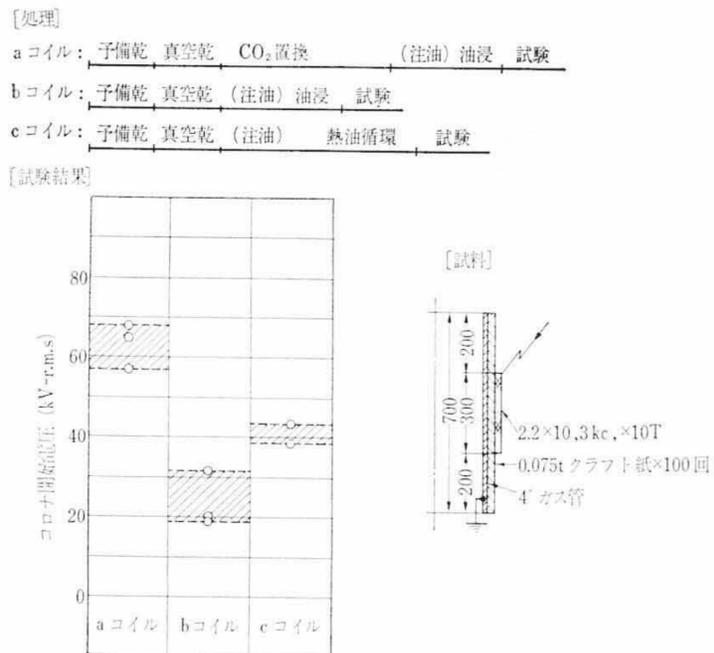


図20 絶縁処理とコロナ開始電圧

いる。このほかガスを閉じ込める形の試料でクラフト紙を重ねたものではギャップ長および試料厚の影響は小さいことが知られており⁽³⁾、油浸絶縁のコロナ劣化の起こり方については細部構造の差異をも含めて材質の影響をうけるが、変圧器絶縁全体についてみれば一般に油ギャップを小さく分割するほど寿命は長くなることわかる。

3.1.2 主絶縁モデルにおけるコロナ侵食

図19は154~168 kV、数千kVA級の変圧器モデルで320 kVの電圧を印加して油中コロナを5分間発生させたとき(最大放電電荷量 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ クーロン、累積パルス数 $7 \times 10^4 \sim 10^5$ 個)、高圧コイル側で発生した油中コロナがどれくらい油浸紙を侵食しているかを示すものである。このモデルを劣化させたのち解体し、油浸紙のサンプルをそれぞれの場所より切り取り、100φの平板電極で残存絶縁耐力を測定した。図から明らかなように、高圧コイル側から5枚目くらいのシートまで侵食されており、かなり激しい油中コロナを発生させたにもかかわらず、案外油浸紙の耐コロナ性のよいことがわかる。

この点について別の電極でマイカ混抄紙、ナイロン不織布、エポキシ樹脂含浸紙などの材料と比較してみたところ、耐油中コロナ性の点では油浸紙を越えるものがないことがわかっている。

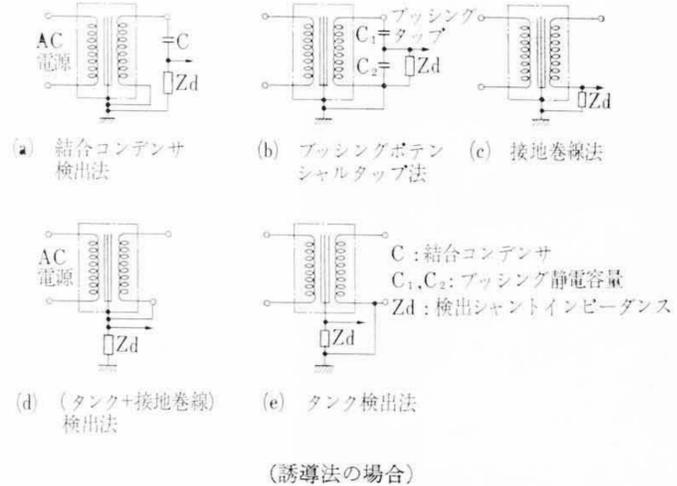


図21 コロナ試験結線図

3.1.3 絶縁処理の影響

絶縁構造の信頼性を向上させる一つの手段として、コロナ開始電圧を高くすることが考えられる。このために良質の絶縁処理を行なうことが提案されている。すなわち、ときにはコロナが絶縁物中に含まれるボイドから発生することがあり、この対策として十分な乾燥と油含浸がコロナ開始電圧を高くするうえで有効である。図20はその例を示すもので、できるだけ早く紙層間のボイドを除去してやることと、低真空処理などの場合は炭酸ガスによる置換が有効であることを示している。

3.2 実際の変圧器におけるコロナ試験の例

コロナ試験は油入変圧器の品質管理の手段として非常にすぐれたものであり、また非破壊検査の点からも欠くことのできないものである。われわれは1964年より超々高圧変圧器のみならず一般の66 kVから275 kVクラスの変圧器にコロナ試験を実施し、試験回路や測定装置の改良、経験の積みかさねに努力し、信頼性の高い絶縁構造を開発してきた。ここではわれわれが実施しているコロナ試験の方法や、今までに得られた経験、コロナに対する考え方などについて記述する。

3.2.1 試験回路および測定装置

変圧器のコロナ試験に関してはいくつかの提案がなされているが、決定的な方法はなく、われわれはいくつかの方法を併用して変圧器内部のコロナ検出を行なっている。図21はわれわれが採用している試験回路の例を示したものである。これらの回路は場合に応じて使われているが、線路端コロナを検出する場合には(a)か(b)を、中性点側のコロナを検出する場合には(c)、巻線間のコロナを検出する場合には(d)、全体的なコロナを検出する場合には(e)を採用している。特に指示がないかぎり(e)の回路を使用することが多い⁽⁴⁾。これらはいずれも電気的な方法であるが、このほかにマイクロホンを利用した音響的方法でコロナ検出を行ない、コロナ発生源の標定にも努めている。測定装置としては狭帯域増幅器方式のラジオノイズメータと広帯域増幅器方式のコロナパルス解析器が主力で、このほかデータレコーダなどを採用して試験時間の短縮を図っている。

3.2.2 コロナ測定例

図22は耐電圧試験中規定の電圧に達してから数秒後にRIVレベルが急増(78 dB)した場合で、解体点検の結果、高圧リードにコロナ放電のこん跡が認められたものである。リード線を修理したのちのコロナレベルは十分低く試験電圧に合格した。

図23は油の含浸処理が十分でなかった場合で、ボイドが残留していて30%でコロナレベルが増大したため注意深く測定を続けたが、RIV値が大きくなったため試験を中止し、さらに追加処理を行なったところ、コロナレベルが改善され100%の電圧に異常なく合格したものである。

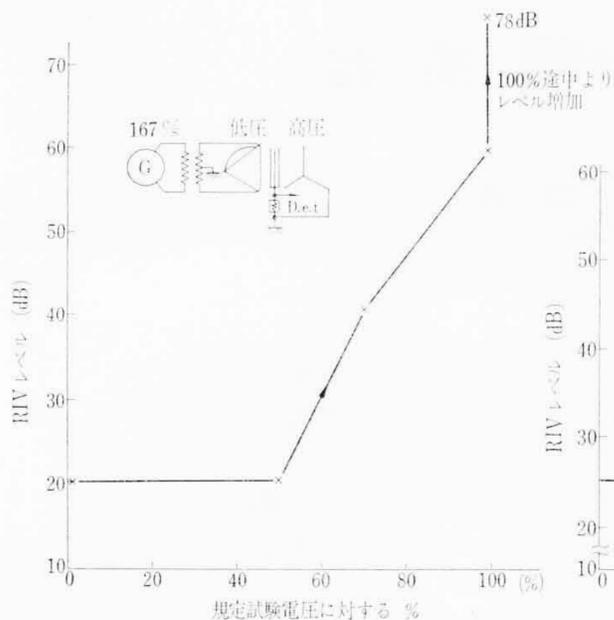


図22 リード線でコロナが発生した例

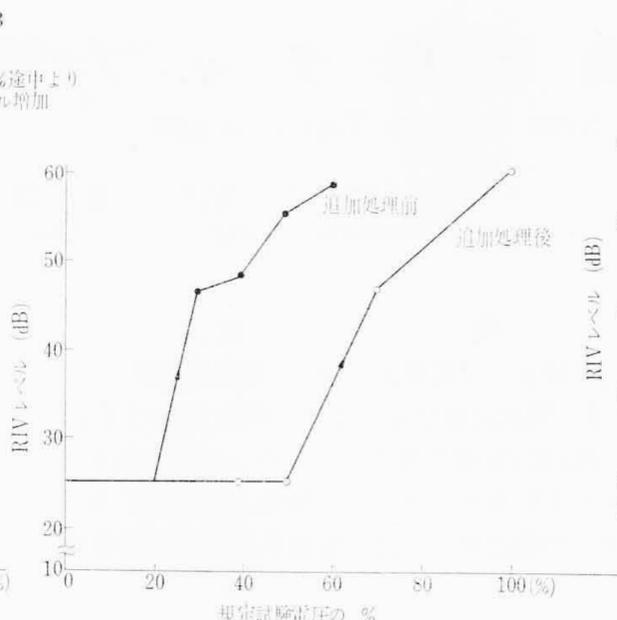


図23 絶縁処理が不十分な例

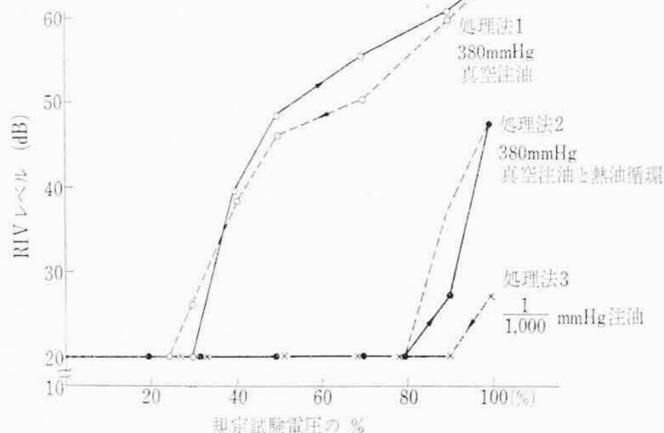


図24 絶縁処理をかえた時の例

図24は同一構造の変圧器3台(絶縁階級60号相当)を、それぞれ処理方法をかえてコロナ試験を行なった例で、ボイドを残留させない方法をとれば、コロナ開始電圧、コロナレベルが大いに改善されることを意味している。

図25は常規対地電圧以下でコロナが発生したためマイクロホンで位置標定したところ、タップ選択器下のリアクトル部分であることが判明した。点検の結果鉄心おさえ金具がフロートしており、これを改造したのちはまったく異状のないことが判明した。

3.2.3 コロナに対する考え方

まず変圧器のコロナで問題になるのはコロナ開始電圧をどのレベルにとればよいかということである。これに関しては種々の議論があり大略的にまとめると常規対地電圧の1.15倍から1.3倍というのが大部分であったが、最近1.5倍という数値もあげられている⁽⁵⁾。しかしわれわれは1.3倍以上あれば耐電圧試験時はもちろん、実際の運転状態にはいってからも問題のないものであると確信している。事実コロナ開始電圧1.3倍以上で耐電圧試験を行なった変圧器を電力システムに入れて運転しているが、コロナによって絶縁破壊したとみられる例は皆無であることがあげられる。問題なのは耐電圧試験時に発生するコロナが有害コロナに進展して、絶縁構造を著しく損傷させるかあるいは無害コロナにとどまっているかである。そのためには試験電圧までコロナレベルを注意深く測定すればよい。有害な効果があったかどうかは、耐電圧試験前後のコロナ開始電圧の比較、コロナレベルと電圧特性のヒステリシスの程度、構造の点検、アエリン染料による染色などにより判別できるが、われわれの経験によれば大略の値であるが放電電荷量で 10^{-9} クーロン以下であれば有害なコロナにならないことがわかっている。とにかく耐電圧試験時に発生するコロナを無害コロナに押えておけば問題はないわけで、そのためにはモデルによる電界解析などを行なって、油にかかる局部電界を小さくし、清潔なふん囲気で組立て、高真空処理すればその目的を達成することができる。

図26はわれわれが試作した500kV級試作変圧器の測定例で、耐電圧試験を実施したのちに1.5倍前後の電圧を長時間印加したものである。図中1は485kVまで、2は525kVまで、3は572kVまでそれぞれ電圧を上昇させて電圧とコロナノズルのヒステリシスをみたものである。これによると長時間課電してもほとんどレベルが変化しないことが明らかである。

4. 結 言

以上述べてきたことをまとめると次のようになる。すなわち開閉

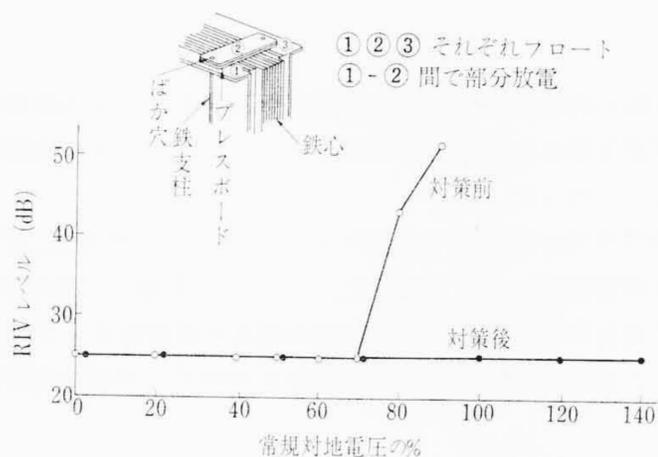


図25 接地部がフロートしていた例

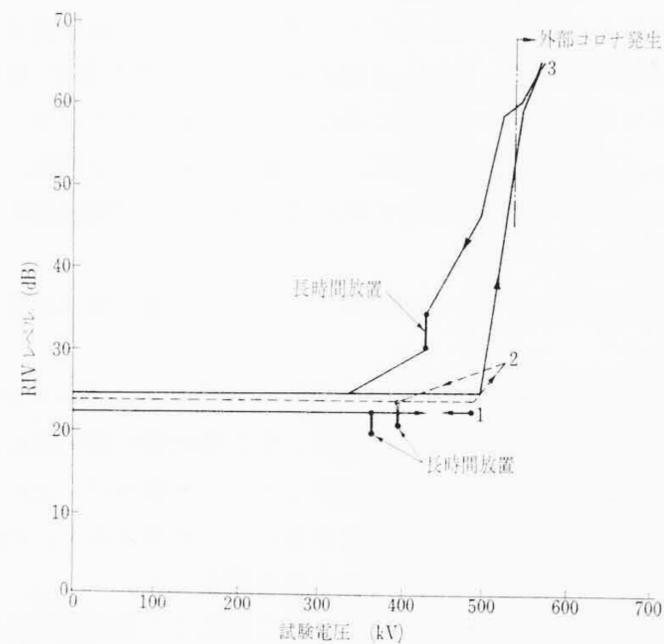


図26 520kV試作変圧器のコロナ特性

サージ絶縁耐力に関しては、基本的な実験結果と実際の変圧器での試験結果からBILの83%以上に耐える標準絶縁構造を確立することができた。またコロナに関しては、品質管理の手段として豊富な経験が積みかさねられた結果、常規対地電圧の1.3倍以上のコロナ開始電圧で耐電圧試験時に異常コロナがなければ高信頼度で長期間安定した運転が期待できる。

参 考 支 献

- (1) H. F. Fiegel: Effects on Transformer Insulation Structures of Long-Duration Waves Representative of Switching Surges: AIEE Power Apparatus and Systems 79 (Feb. 1957)
- (2) 都築, 秋丸: 日立評論 別冊 36 (昭35-6)
- (3) 桧垣, 堤, 加子: 日立評論 49, 522 (昭42-5)
- (4) 平野, 栗山, 中川: 日立評論 49, 818 (昭42-8)
- (5) J. R. Meador, R. B. Kanfman: Corona Testing of Power Transformer IEEE Trans P. A. S., 85 (8) (Aug. 1966)