# 変圧器絶縁におけるコロナ

Corona in Transformer Insulations

鎌	E	H	譲*	Ш		雅	教*
	Yuzuru	Kamata		Ma	sanori	Yamaguchi	

In the study of insulations for extra high voltage large capacity transformers the problem of partial discharge carries most weight. This article takes up this problem, reporting some of the results of researches which were conducted recently at the Hitachi Research Laboratory concerning long-duration volt-time characteristics under AC voltage, triggering of AC partial discharge by super position of lightning impulse, relationship between lightning impulse partial discharge and breakdown, a damaging effect by lightning impulse discharge, and some others.

言

1. 緒

全体構造概略

現段階ではコロナ(部分放電)にあるといえる。10年ぐらい前ま では破壊電圧が根幹となっていたことを考えると、ここ数年来の コロナに関する研究のウエートの置かれ方は異常ともいえるくら い大きく、かつ絶縁技術の質的内容が急速に高度化し、技術的困 難度も高まってきたといえる。コロナといえばただちに交流電圧 下でのコロナというように考えられているが、筆者は将来のこと も考慮して、これに雷インパルス電圧下でのコロナも含めて考え ていくべきであると主張したい。

本章ではここ2~3年間,日立製作所において行なわれた変圧 器絶縁のコロナに関する研究成果のあらましを紹介し,超高圧変 圧器の絶縁に関心を持っておられるかたがたへのご参考に供した い所存である。

## 2. 超高圧変圧器における絶縁上の問題点

図1は超高圧変圧器において絶縁を考慮すべき部分がどこにあ るかを概念的に示したものである。使用する巻線の種類(円板巻 線か円筒巻線か)によって、巻線内絶縁のキーポイントが多少異 なる点を除けば、主絶縁、対地絶縁、端部絶縁、リード絶縁など は共通の問題である。これら6種類の部分の絶縁はどれをとって も超高圧変圧器という観点から甲乙つけがたい重要度を有してお り、破壊電圧を含めてコロナとの関係がどのようになっているか、 どのような違いがあるかを把握(はあく)することが最も重要である。

## 3.得られた研究結果

## 3.1 主絶縁および端部絶縁における交流長時間課電時のV-t特性

最近の超々高圧変圧器において、絶縁試験をより合理的に行な うため、従来の1分間課電試験に代わって、コロナ測定を併用し た低電圧の長時間課電試験が提案<sup>(1)(2)</sup>され、そのよりどころとな る変圧器絶縁の V-t特性を求める必要が生じてきた。そこでわれ われは実際の変圧器に、きわめて近い構造を有する試料を用いて V-t特性を求めた<sup>(3)(4)</sup>。 図2(a)および(b)は主絶縁および端部絶縁モデルを示したもので



図1 絶縁を考慮すべき部分の概略

ある。これらの図において高圧電極はリング構造であり、両端は 実変圧器巻線のクランプリングを、中央部は巻線のコイルをそれ ぞれ模擬している。そして絶縁構成は超高圧変圧器と同一の油隙 (ゆげき)細分割方式になっている。

上述のような試料について、はじめに10kVステップで各ステッ プ1分間ずつ課電し、1分間破壊電圧の80~90%まで課電しノイ ズメータ(JRTC規格)を用いてコロナ特性を測定している。こ れは低電圧で微小コロナが発生するか否かを確認するために行な ったものである。その後1分間破壊電圧の60%程度の電圧から10 kVステップで各ステップ4時間課電する長時間課電テストを行な っている。実験結果によれば1分間階段上昇法によって得られた コロナノイズ特性は平坦(へいたん)であり、微小なコロナは発生 しないことがわかった。この特性は後述のリード線の場合と同様 である。このような試料について長時間課電試験を行なうと課電 中微小なコロナは発生せず、10<sup>4</sup>pC程度のコロナが間欠的に発生

17

\* 日立製作所日立研究所

変圧器絶縁におけるコロナ 日立評論 VOL. 54 No.8 682



接地電極

図2 (a) 主 絶 縁 モ デ ル



図2 (b) 端部絶縁モデル

し試料破壊に至っている。コロナ発生のV-t特性は図3に示すとおりである。本図の横軸はコロナ発生の時間間隔であり、縦軸は試料の1分間破壊電圧を1とした場合の試料のコロナ開始電圧である。図示されているようにV-t特性は非常に平坦であり、また大部分のコロナは100分以内に発生している。

図を $t = A(V/V_B)^{-n}$  (ただし, t:寿命(分), V:印加電圧(kV)  $V_B$ : 1分間破壊電圧(kV), A(G):ばらつきを考えた値であるが本 来は1分になるはずのもの, n: V-tの傾斜を表わす定数)の形で 表わすと, t=3.6 ( $V/V_B$ )<sup>-55</sup>となる。

また信頼性工学によれば多くの試料の故障までの時間とその累 積頻度(ひんど)をとり、ワイブル確率紙上にプロットした場合、 その傾きmがm<1の場合には初期不良形の故障であり、m=1の 場合は偶発形、m>1の場合には摩耗形の故障と分類されている。 ここでは横軸に一定電圧印加後、コロナ発生までの時間をとり縦 軸に累積頻度をとってワイブルプロットすると図4のようになり、 その傾きは1より小さい。したがってコロナ発生の状況は初期不 良形であり、この範囲では課電による摩耗形ではないことが明ら かである。以上のことから長時間課電試験として常規対地電圧の 1.5倍で1~2時間課電すれば30年程度の寿命を保証することが



18



できると考えられる。

### 3.2 雷サージによる交流コロナ誘発の検討

変圧器の運転状態で交流電圧に雷インパルス電圧が重畳した場合、インパルスにより誘発された油中コロナが交流により持続され、コロナによる破壊がひき起こされる可能性があるかを検討するため、われわれは前述のモデルを用いて重畳試験を行なった<sup>(5)</sup>。

図5は実験回路で、交流電圧は図の左側から、電インパルス電 圧は図の右側からギャップを通して印加した。電インパルス電圧 は正極性で交流電圧の正の波高点に重畳するようにした。また交 流電圧と電インパルス電圧の比率は実系統のことを念頭において 5.0~6.5にとった。

実験結果は表1に示すとおりである。実変圧器との対応をつけ るため商用周波電圧および衝撃電圧ともに耐電圧試験時の油隙の 電界強度を100%として示した。同一モデルを用いた実験結果に よれば耐電圧試験時の125%まで印加してもコロナは発生せず、 また残留電荷法により電インパルスコロナを検出した結果では耐 電圧試験時の電界強度の135%を印加すれば雷インパルスコロナ が発生しうることをあらかじめ確認した。実験結果によれば雷イ ンパルスにより誘発されたコロナは交流電圧によって持続するこ とはなく、破壊はすべてインパルス電圧によって起こり、その



図5 重 畳 試 験 回 路 図

破壊値は電インパルス単独の場合とほぼ等しかった。このモデル の実変圧器に対する等価性を考慮すると実変圧器の運転電界強度 の2~3倍で重畳試験を行なっていることになる。この実験結果 から考えれば超高圧大容量変圧器の運転状態において電インパル ス電圧によって誘発された油中コロナが交流電圧によって持続す ることはないと推定される。また重畳した場合の破壊値に差がな いことから考えて、現行の電インパルス電圧単独での試験法は妥



当なものであると考えられる。

表1 重畳試験結果

試 料	商用周波 ストレス[%]	雷インバルス ストレズ[%]	N	実 験 結 果				
	45	100	5	インパルス5回印加して異常なし。				
主 絶 縁 モ	56	120	10	インパルス4回目まで異常なし。 5回目印加後,間欠的に油中部分放電発 生,6回目~10回目は5回目と同様油中 部分放電が発生した。				
デ	67	140	10	インパルス10回印加して異常なし。				
N	79	165	10 インパルス10回印加して異常なし。					
	90	170	2	2回目のインパルス印加により試料破壊				
主モ	67	140	10	インパルス10回印加して異常なし。				
絶デ	79	160	10	インパルス10回印加して異常なし。				
縁 ル	90	183	3	3回目のインパルス印加により試料破壊				
端 部 絶 汞 元	76	145	5	インパルス5回印加して異常なし。				
	83	155	5	インパルス5回印加して異常なし。				
	90	180	3	3回目のインパルス印加により試料破壊				

注:実験条件 (1) 正極性電インパルスを商用周波電圧波高値に印加 (2) 雷インパルス印加時間間隔 5分 (3) (雷インパルス電圧/商用周波実効値)=5.0~6.5 (4) Nは雷インパルス電圧の印加回数

## 3.3 リード線絶縁の交流コロナおよび破壊特性

de

変圧器絶縁の信頼性の確認の一環として、リード線絶縁の検討 を行なった。また、リード線のような単純な電極構造を用いるこ とにより油中の不平等電界中のコロナ特性および破壊特性をつか むことができ、さらに実用上重要な支持部分および接続部分につ いても検討した<sup>(6)</sup>。

古娘如八モデルの形体は**回**C に三ナトンナササルホナ N い

図6 リード線モデルのコロナ特性



る。すなわち、コロナ開始電圧と破壊電圧が等しい。このような 特性をもつリード線の破壊電界強度を示したのが図7である。図 の横軸は油隊長であり縦軸は基礎モデルの破壊電界強度を100% とした場合のリード線絶縁物表面の最大電界である。図に示すよ うに油隊長が変化しても最大電界強度はほぼ一定である。このこ とからリード線のように比較的不平等な長ギャップにおいては油

19

直線部分セアルの形状は図6に示すような構造であり、リード	隊長の変化に対し、最大電界強度一定で破壊が起こると考えられ
線の対タンク絶縁を模擬している。また支持部分モデルは図9に	る。次にリード線の大きさによる破壊強度の変化について実規模
示すように直線部分モデルの中央にリード支持物を模擬した絶縁	モデルと基礎モデルとの比較を示すと図8のようになる。図の横
物をおいたものであり, 接続部分モデルは同図9(後述)に示すよ	軸は基礎モデルの破壊強度の平均値を 100%とした場合の最大電
うに試料の中央に接続部分を形成したものである。	界強度であり、縦軸は破壊確率である。基礎モデルを 2.5 倍に拡
リード線モデルのコロナ特性は図6に示すように、破壊直前ま	大した実規模モデルの場合,破壊強度の低下率は82%である。こ
で全く無コロナであって、油中コロナ発生と同時に全路破壊に至	のような破壊強度の低下の原因として油隙長の増加と電極表面積

の形状によって素線絶縁の V-t特性がどのように違うかを示した

ものである(8)(9)。平角電線は変圧器一般に使用されるものである

が,大容量巻線の漂遊損を低減させる目的で転位電線が使われる。











@ 100

 $\mathbf{20}$ 

の増加と二つが考えられるが,図7に示したように油隙長が増加 しても破壊強度は低下しないこと、また基礎モデルのばらつきか ら2.5倍に拡大した場合の破壊強度の低下率を面積効果として求 めると86%となり、82%とほぼ一致していることなどから電極表 面積の増加が破壊強度低下の主原因であると考えられる。支持部 および接続部の破壊特性は図9に示すとおりである。縦軸は基礎 モデルの破壊強度を100%としている。図のように支持部分モデ ルは実規模直線部分モデルとほぼ同等の絶縁耐力を示すが、接続 部分は作業上の管理を十分行なっても実規模の直線部の約87%に 低下し,破壊はすべてA点つまり接続部の境界層で起こっていた。 これは乾燥時の紙の収縮などにより生じた弱点のためで、作業法 および構造上の改良によってこの弱点をなくしたものでは直線部 と同等の破壊強度を示すことがわかった。

# 3.4 素線絶縁およびコイル間絶縁におけるインパルスコロナと 破壊の関係

変圧器の線路端に雷サージが侵入すると巻線の有するキャパシ タンスおよびインダクタンスのため、内部に電位振動が発生する。 したがって線路端から中性端へ向かう電位分布は, 交流電圧とは 異なって非直線分布となり, 巻線内絶縁すなわち, 素線絶縁およ びコイル間絶縁(図1でBあるいはC部分)に過電圧が発生する。 逆にいえば素線絶縁およびコイル間絶縁は、 雷インパルス耐電圧 試験で絶縁寸法あるいは絶縁構造が決定されるという性格を持っ ている。したがってその場合、インパルスコロナと関連づけた破 壊の V-t特性が絶縁構造によってどのように変わるかを知らなけ ればならない(7)。図10は巻線を構成する最小ユニットである電線



ものである。

コイル間絶縁(同じく図1のBあるいはC)の場合は,素線絶 縁に比べて油隊長がかなり大であるため,異なったV-t特性を示 す。この一例が図12である。立上りは素線絶縁より急ではあるが, インパルスコロナと破壊の関係という点では,全波電圧であって も興味深い現象が存在する。すなわち図13に示すように,電極間 距離に占める油浸紙の構成比率によってインパルスコロナを経由 して破壊するものと,そうでないものとがある<sup>(10)</sup>。また図14に示 すように寿命期間を考慮したインパルス絶縁の疲労(1年間あた り数回の雷サージが浸入し,寿命期間を30年として 200回繰返し 印加)はインパルスコロナが破壊直前の状態であっても,ほとん ど低下しないことを明らかにした点などはBILに対する考え方の 一助となるものであろう。



### 3.5 インパルスコロナの損傷効果

3.4では主としてインパルスコロナ開始電圧と破壊電圧の関係 について述べたが、いったいインパルスコロナに対しても交流コ ロナでいわれている有害コロナレベルというものがあるだろうか という疑問が生ずる。つまりインパルスコロナの損傷効果は破壊 に至るどの段階で問題になるのかという点である。インパルスコ ロナによる損傷効果の影響を最も受けやすいものは交流コロナで あろう。つまり 3.2 で述べたインパルスコロナによる交流コロナ の誘発と工場試験で考えられるインパルス試験後の交流コロナへ の影響の二項目になる。交流コロナを測定することは感度の点に おいて最もすぐれた非破壊試験法であり,また変圧器絶縁の品質 管理の手段として重要な地位を占めているから、電圧ストレスの 最も過酷な工場試験において, 雷インパルス耐電圧試験の質的内 容を証明するうえでも、本節では後者に関する状況を明らかにす る必要がある。そこで図11などから雷インパルスで破壊する直前 の状態として、残留電荷で10<sup>-5</sup>C ぐらいの値を選びインパルスコ ロナを発生させたあと、ただちに回路を切り換えて交流コロナ開 始電圧が低下しないかどうかを調べた。図15は素線絶縁、図16は コイル間,図17は端部絶縁での試験結果である(11)。これから油中 でインパルスコロナが発生し、それが破壊直前程度のものであっ ても交流コロナを低下させる効果はほとんどないと結論できる。 換言すれば油中のインパルスコロナはコロナが発生する以前の静 電界を変歪(へんわい)させる役目を果たすだけにすぎないことが 明らかである。

逆にもし雷インパルス耐電圧試験後に交流コロナ開始電圧が低下するようであれば、雷インパルス試験には耐えた(正確には全路破壊は生じなかった)が部分的破壊が発生していることを意味しているものである。日立製作所では最近すべての超高圧変圧器に、 雷インパルス耐電圧試験後、再度交流コロナ試験を実施している。 以上3.で述べた研究成果は、変圧器絶縁技術、さらに端的にい うならば超高圧変圧器の絶縁設計をいかに行なうかについての指 針となるものであって、現在日立製作所が製作している変圧器に 十分採り入れられ、以前にもまして絶縁信頼度の向上に効果が上 がっている。



21



範囲

図14 コイル間絶縁のインパルス疲労効果



## 4.結 言

超高圧変圧器絶縁のコロナに関して,最近得られた研究成果の 概要を示した。コロナはそのなかでも根幹となる技術課題である が,交流コロナはもとよりインパルスコロナについてもきめの細 かい検討を加えた。

終わりに臨み変圧器絶縁に関心の深い各位の率直なご討論,ご 批判をいただき,超高圧大容量変圧器をよりいっそう合理的かつ 変圧器絶縁におけるコロナ 日立評論 VOL.54 No.8 686

信頼性のあるものにしたいと願っている次第である。

## 参考文献

- (1) R. B. Kaufmann ほか: Power Apparatus and Systems PAS-87, No. 1, (Jan 1968)
- (2) 試験電圧標準特別委員会, ワーキンググループ I: V-t特性から みた500kV油入変圧器の交流絶縁試験のあり方(第2次案)(昭47-2)
- (3) 山口ほか:電気学会全国大会論文集 No.448(昭47-3)
- (4) 倉橋ほか:昭和46年電気学会東京支部大会論文集 No.168(昭46-10)
- (5) 山口ほか:昭和46年電気学会全国大会論文集 No.608(昭46-3)
- (6) 山口ほか:昭和46年電気学会東京支部大会論文集 No.170(昭46-10)
- (7) Bellasche, Vogel: Insulation Coordination of Transformers: Electrical (Engineering (June 1934)
- (8) 鎌田ほか:昭和46年電気学会全国大会論文集 No.609(昭46-3)
- (9) 鎌田ほか:昭和45年電気学会東京支部大会論文集 No.148(昭45-9)
- (10) 鎌田ほか:昭和47年電気学会全国大会論文集 No.447(昭47-4)
- (11) 鎌田ほか:昭和46年電気学会東京支部大会論文集 No.169(昭46-4)

XX

特許の紹介



特許 第 531366 号 (特許公告昭38-13762号)

西山太喜夫・岡田千里 清水貞一・保坂信義

#### 耐 摩 耗 鋳

この発明は、粉体、砂粒などの固形物を含む流体を取り扱う装置、 たとえばサンドポンプ、粉体ポンプ、あるいはコンクリートスラリ 搬送ポンプのような過酷な摩耗条件にさらされる製品の部品に好適 の耐摩耗鋳鉄に関するものである。

本発明鋳鉄の組成はCr:11~27%, C:2.0~3.55%, Si:0.2~ 2.0%, Mn:0.2~2.0%が基本成分で, これにV:1.0~6.0%含む熱 処理可能な耐摩耗鋳鉄である。

図1は本鋳鉄の顕微鏡組織である。本鋳鉄は在来の高クロム鋳鉄 のように白色の共晶クロム炭化物が針状もしくは棒状に巨大晶出す ることなく、ほぼ均一に晶出している。

実	基本組成(%)		かたさ( $H_RC$ )		耐摩耗性	製造性の問題		
例	С	C r	V	焼 鈍	焼入れ	倍 数	熱処理性	機械切削
1	2.36	16.90		33	61	8	-	可能
2	3.05	17.10		37	62	11	焼割れ	不可能
3	2.80	14.00	0.99	33	66	14		可能
4	3.23	15.49	1.17	"	69	15	_	"
5	3.05	20.69	0.95	33	68	17		可能
6	2.41	24.57	_	35	58	12	焼割れ	困難

表1 本発明鋳鉄の実施例

また、基地はマルテンサイトとバナジウム系微細炭化物からなる。 本鋳鉄は焼鈍を施すと基地はフェライトとバナジウム炭化物とにな り機械加工が可能となる。

鉄

本鋳鉄の耐摩耗性を在来の高クロム鋳鉄と対比して示したのが表 1である。同表中,耐摩耗性倍数とは,同一条件で摩耗試験したと きの軟鋼の耐摩耗性を1として,これに対する当該鋳鉄の耐摩耗性 の比率である。

同表より、本鋳鉄の耐摩耗性倍数は13~17と最高となることがわ かる。また、共晶クロム炭化物の拡大化を抑制したことにより鋳物 としても、さらに製造しやすくなる。



