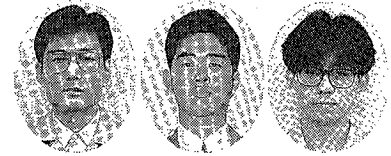


グラスライニングの絶縁破壊

The Dielectric Breakdown Behavior of Lining Glass



技術開発本部
 原 龍 雄
 Tatsuo Hara
 金 澤 浩 二
 Kouji Kanazawa
 (化)第2製造部 焼成課
 宮 内 啓 隆
 Hirotaka Miyachi

The dielectric breakdown voltage of lining glass has been measured by alternating voltage, at a commercial power frequency (60 Hz) under 1 kV/sec at 25 °C. The 'two-layer model' was found to be one of methods to clear the dielectric breakdown behavior.

まえがき

グラスライニング機器は気密性のある複合材料として他に類を見ない。ガラス層のピンホールなど欠陥の有無は、直流2万ボルトの電圧をかけてその破壊に耐えるかどうかでチェックしている。グラスライニング機器の静電気現象による破壊の場合、これ以上の高電圧がかかっていることが予想される。欠陥のないグラスライニングでもこのような絶縁破壊が起こる場合がある。その都度、種々検討を行ってきたが、適切な対策の無いのが現状である。電気的な用途も増えつつあることもふまえると再度そのメカニズムに触れて詳細検討する必要がある^{1,2)}。本稿ではその研究開発の一端を紹介する。

1. 絶縁破壊の事例

写真1は実使用中のグラスライニング機器において生じた静電気破壊の一例である³⁾。図中央の小さな黒点はその破損箇所である。グラスライニング機器の静電気破壊に関する研究は今まで数多くあるが、発生の現象自体が複雑である^{4,5,6)}。そこでまず既知の電圧をかけた際の破壊挙動を調べることが基本である。

2. 絶縁破壊のメカニズムについて

最近、絶縁破壊に関する研究例は比較的少ない。それは次のような理由によるものと思われる。

- 一般に絶縁材料はぜい性材料が多いため、例えば曲げ試験の数多いデータが必要である。
- 電気分野と材料科学分野との学際領域であるため研究が進みにくい。
- ライニングガラス層が1mmのオーダーと比較的厚いため、高電圧の試験装置が必要である。例えば、1kHz以上の高周波領域で数10kV以上の絶縁破壊試験を行うと仮定すると、高压送電線の鉄塔を屋外に配置するような設備を建設する必要がある。現在では高周波領域は商用周波数のテストで代用している。
- 最近では、高電圧を取扱う分野における設備が少なくなってきた。

絶縁破壊のメカニズムについては定説がなく現在でも未解決な部分が多い。従来から知られている理論を下表に示す⁷⁾。大きく分けると、短時間と長時間破壊になるが、長時間の場合は、主として樹脂や塗装など有機材料の放電劣

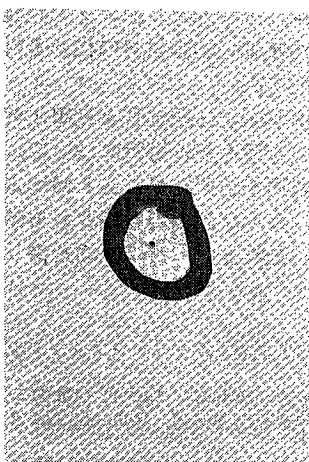
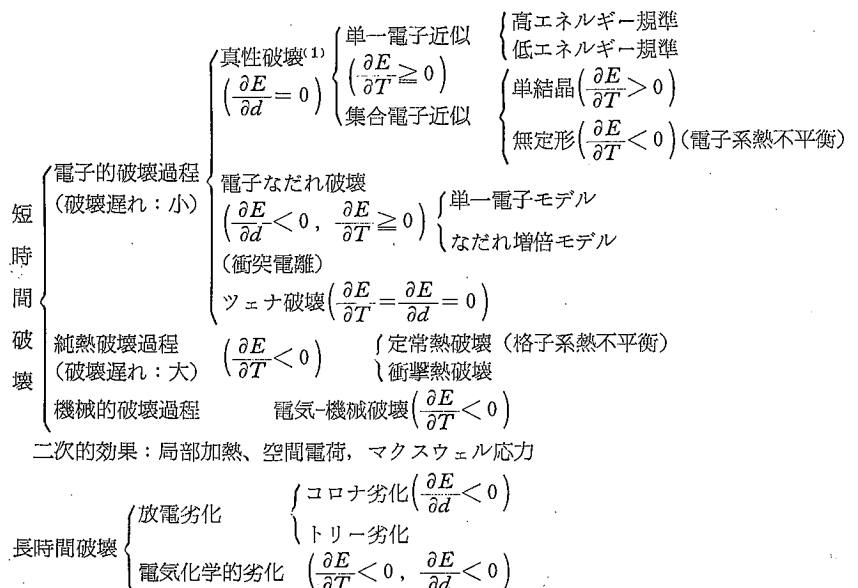
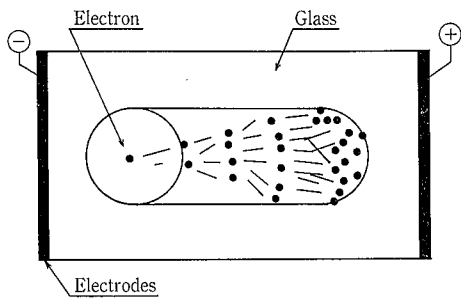
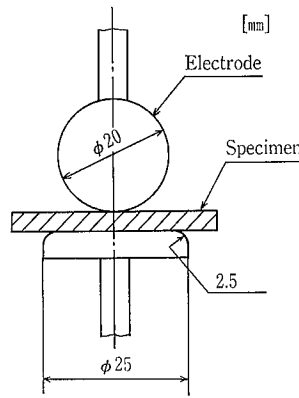


写真1 グラスライニング機器の静電気破壊
 Photo. 1 The breakdown failure of glass lined equipment

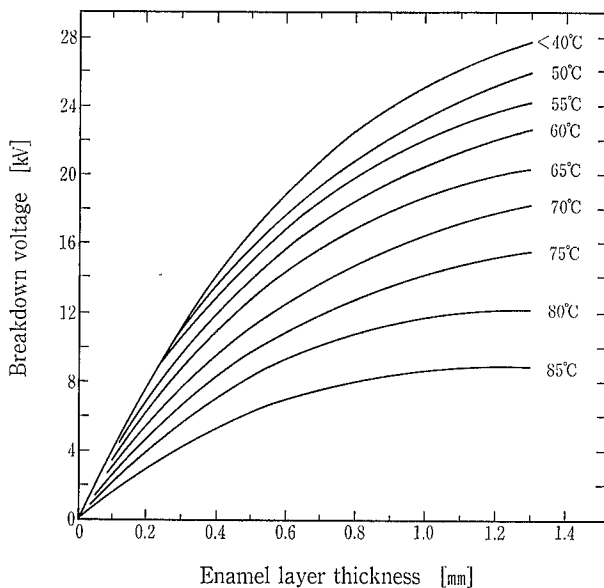




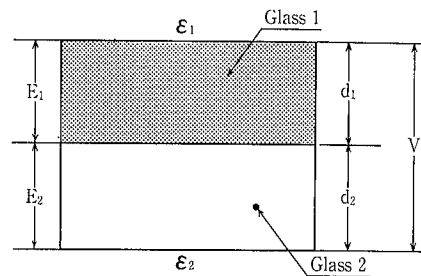
第1図 ザイツの絶縁破壊理論
Fig. 1 One of the mechanism of dielectric breakdown behavior by Seitz



第3図
J I S C 2110 による絶縁破壊試験用電極
Fig. 3
The electrode of breakdown test by JIS C2110 standard



第2図 ライニングガラスの直流電圧下における絶縁破壊電圧 (ISO 2746)
Fig. 2 The breakdown voltage of special enamel, as a function of layer thickness and temperature, measured with a spherical electrode by direct-voltage (ISO 2746)



第4図
2層モデルの断面図
Fig. 4
The 2-layer model

化に起因する遅れ破壊である。グラスライニングは有機材料と比べ放電劣化を生じにくい。短時間破壊の中には、電気的および熱的破壊に分けられる。熱的な破壊の場合には、材料の耐熱衝撃性などが関連するため、絶縁破壊のメカニズムがさらに複雑になる。電気的な破壊に関する一つの説は、「電子なだれ破壊」で、ザイツによる『40世代説』が有名である。そのメカニズムを第1図に示した⁸⁾。高電圧をかけると絶縁材料の構造内で本来動けない電子がまず一個だけプラス極の方向へ動き始める。次にその電子が隣の電子に衝突する。この衝突電離現象が約40回起これば材料は破壊に至るといふ説である。この電子なだれは1マイクロ秒程度の短時間で起こるため、直流でも交流電圧でも大きな差はない。図では円筒形の電子なだれ現象が起こり始めるとその部分に電流が集中し、そのジュール熱で材料が昇華して破壊に至ると言われている。しかし最初に電子なだれが起こる場所すなわち破壊の起点がどこにあるかという事は全くわからず、材料としての対策がないと言える。

最近、電気と材料分野の学際領域での研究として絶縁破壊のメカニズムを取上げている例がある^{9,10)}。これは材料の破壊力学を絶縁破壊へ応用した新しい試みである。材料内の欠陥に関連した「応力拡大係数」の代わりに「電界拡大係数」なるものを導入している。以上一般的な絶縁破壊について述べたが、グラスライニングの場合はさらに難しい。例えばライニングガラス層内で電界の集中する可能性のある項目を次に挙げる。

- (1) グラスライニングは複数の組成のガラス層からなる。
- (2) ライニングガラス層内には泡が存在する。
- (3) 鉄生地とガラス層との界面が存在する。
- (4) ライニングガラス層は鉄生地からの残留圧縮応力によって強化されている。

以上のような要因があるため、整理してメカニズムを究明していく必要がある。ここでは、(1)項に注目して検討を行ったので次に報告する。

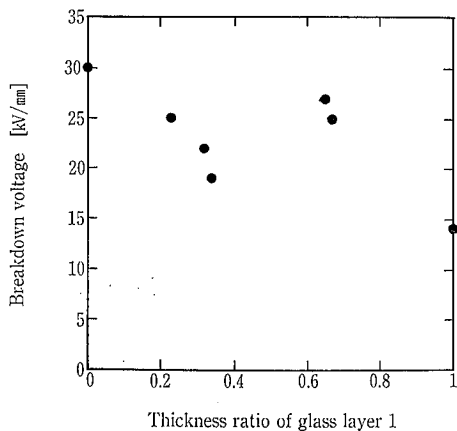
3. 絶縁破壊試験

3.1 試験法

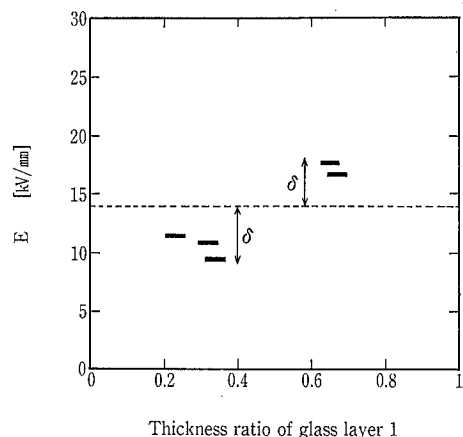
J I S R 4201 に規定される工業用グラスライニング機器では、J I S 1 種 1 号で20 kV の直流試験電圧による欠陥検査を行う。その基準となるデータは第2図に示されている (ISO 2746)。これによると絶縁耐力は、ガラス層の厚みと温度に大きく依存するため、試験データにはこれらの値を明示する必要がある。交流 (商用周波数60 Hz) に関しては A S T M D 149 に規定されている。その場合の周波数の適用範囲は 25~800 Hz とされている。第3図は、J I S C 2110 に規定されている試験用電極の形状の一例を示したものである。

3.2 2層モデルによる試験

グラスライニングの絶縁破壊では複雑な因子が多く単純



第5図 2層モデルにおける絶縁破壊試験結果
Fig. 5 The result of breakdown test by 2-layer model



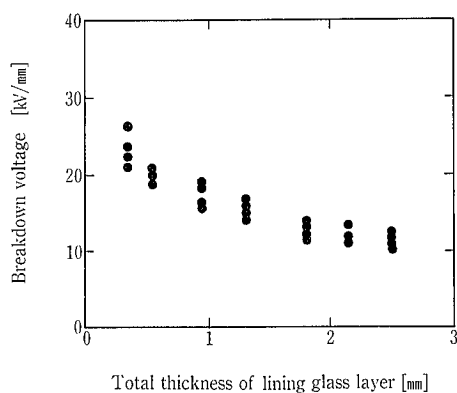
第6図 2層モデルによるガラス層1のE値と全体厚みに対するガラス層1の厚み比率との関係
Fig. 6 The E value vs. thickness ratio for glass layer 1 by 2-layer model

化した試験法を検討する必要がある。第4図に、2層ガラスの断面モデル図を示した。これは組成や誘電率など性質の相異なる2つのガラスを融着したものである。市販のスライドガラス板上に、粉末をガラスライニングと同様に軟化流動させて作製したものである。この方法を用いるとガラス層と鉄生地との相互作用や含泡構造など他の因子を除外できる。絶縁破壊試験は空気中での放電を避けるため絶縁油中にて行った。第3図の電極に商用周波数 60 Hz の交流電圧を 1 kV/秒で昇圧してガラスが破損する最高電圧（絶縁破壊電圧）を測定した。得られたデータをガラス全体の厚み (mm) で割ったものが絶縁破壊の強さである。第5図は、2層モデルにおける絶縁破壊の強さを測定した結果である¹¹⁾。第4図に示したように、ガラス層の誘電率および厚みをそれぞれ ϵ および d とし、添字 1 および 2 はそれぞれ対応するガラス層とする。そして全電圧 V を印加した時、各ガラス層 1 mm 当りにかかる電圧は次の式で示される¹²⁾。

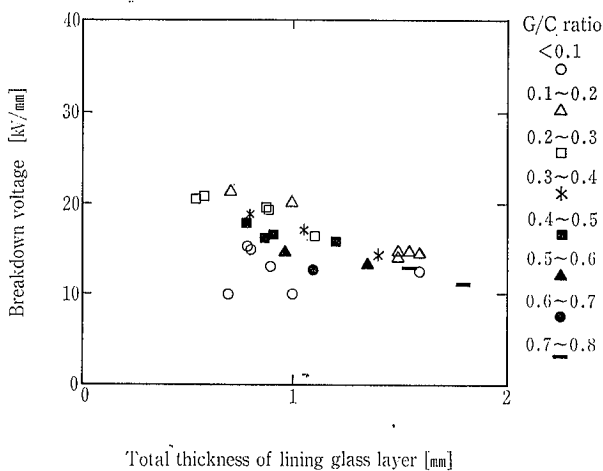
$$\text{ガラス層 1 ; } E_1 = (\epsilon_2 / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)) V \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{ガラス層 2 ; } E_2 = (\epsilon_1 / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)) V \quad \dots\dots(2)$$

2層全体が絶縁破壊した時、各層にかかっていた E (kV



第7図 ライニングガラス層の絶縁破壊試験結果
Fig. 7 The result of breakdown test of lining glass layer



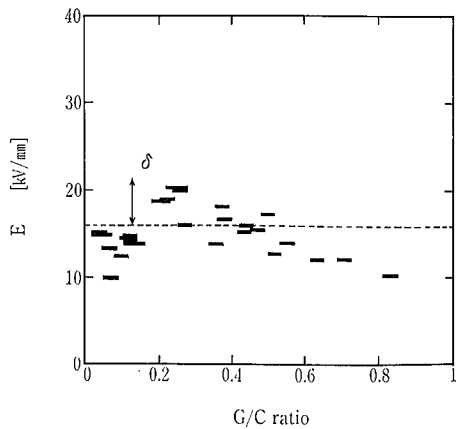
第8図 種々の厚みのライニングガラス層の絶縁破壊の強さ
Fig. 8 The dielectric breakdown voltage of lining glass layer vs. total layer thickness as a function of G/C ratio

/mm) を予測できる。第6図にその結果を示した。横軸は2層全体の厚みに対するガラス層1の厚み比率である。図中の破線で示した 14 kV/mm の値は、第4図のガラス層1単独の破壊電圧である。ここで図中の—マークと破壊値との差を「 δ 」とし、その一例を矢印で表した。この δ 値は、誘電率や厚みなど諸因子が関係している。ガラス層2についても同様にして考察できる¹³⁾。

3.3 グラスライニングの試験結果

第7図に、ガラスライニングの絶縁破壊試験結果の一例を示した¹⁴⁾。横軸にはライニングガラス層全体の厚みを示した。理論的には厚みが増加しても絶縁破壊の強さは、一定であるが厚みとともに低下する結果となった。低くなる理由の一つとしては、絶縁油中における沿面放電が激しく起こりガラス表面へ何らかの影響を及ぼしたためと考えられる。一般にこれは周辺効果と呼ばれている。

次に、2層モデルをガラスライニングにおける上引ガラスと下引ガラス層へ適用することを試みた。例えば実験として、下引ガラス層の厚みを種々変化させた場合の絶縁破壊試験を行った。第8図は、ライニングガラス層全体に対する下引ガラス層の厚み比率 (図中 G/C ratio) をパラメーターとし、全体厚みを変えた場合の絶縁破壊の強さを示したものである。データの中で、○マークは G/C ratio



第9図 2層モデルによる上引ガラス層のEと G/C ratio との関係

Fig. 9 The E value vs. thickness ratio for cover coat glass layer by 2-layer model.

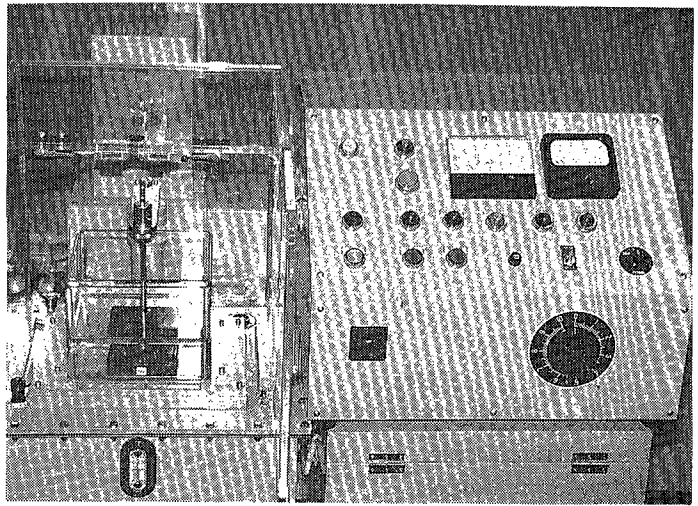


写真 2 絶縁破壊試験装置

Photo. 2] The dielectric breakdown test equipment.

< 0.1 の場合で、下引ガラス厚みが薄すぎるために生じたデータであるため、少し低い値を示した。

2層モデルによる δ 値を第9図に示した。破線の 16 kV/mm の値は上引ガラスに相当するガラス板単独のデータを示している。G/C ratio の変化によって、 δ 値は破線よりいったん高くなりその後低くなる傾向を示した。この原因については現在検討中である。いずれにしても図中の■マークと破線の差は、「上引ガラスを鉄生地にライニングした際に生じる差」に相当する。今後はその他の因子を変化させて δ の変化と対応させていく予定である。

む す び

写真2に、新しく導入した絶縁破壊試験装置を示した。今回得られた2層モデルの結果をもとに、さらに絶縁破壊の要因を少しずつ比較していく。最終的には絶縁耐力を向上させるガラス成分設計へと発展させて行きたい。

最後に、絶縁破壊のメカニズムに関する研究指導をしていただいた、東京工業大学・工学部・無機材料工学科助教授の松尾陽太郎先生に深く感謝致します。また絶縁耐力の測定ならびに絶縁破壊試験装置に関するご指導をいただいた、東京都立工業技術センター・電気機器部・高電圧機器

研究室の小野雅司先生ならびに石井清一先生に深く感謝致します。

〔参考文献〕

- 1) 前背戸ほか, 神鋼パンテック技報, Vol. 34, No. 1 (1990) p. 8-12
- 2) 前背戸ほか, 神鋼パンテック技報, Vol. 35, No. 3 (1991) p. 23-27
- 3) 河野編, 化学機械とメンテナンス (1988) p. 71
- 4) 神鋼パンテック技報, Vol. 25, No. 1 (1981) p. 1-5
- 5) 山本, 沢田, 神鋼パンテック技報, Vol. 34, No. 2 (1990) p. 1-6
- 6) 沢田, 神鋼パンテック技報, Vol. 34, No. 3 (1990) p. 22-27
- 7) 誘電体現象論, (社)電気学会編, (1973) p. 280
- 8) 誘電体現象論, (社)電気学会編, (1973) p. 291
- 9) 鈴木ほか, 日本セラミックス協会秋季シンポジウム予稿集, (1990) p. 596-597
- 10) 鈴木ほか, 日本セラミックス協会学術論文誌, Vol. 100, No. 1 (1992) p. 59-65
- 11) 宮内ほか, 日本セラミックス協会年会予稿集, (1991) p. 276
- 12) 誘電体現象論, (社)電気学会編, (1973) p. 316
- 13) 原ほか, ニューガラス研究会第16回研究会資料 (1991) p. 3-4
- 14) 宮内ほか, 日本セラミックス協会ガラス討論会予稿集, p. 119-120 (1991)