

FWモールド変圧器

FW Mold Transformer

佐藤 亘^{*}
Wataru Satō
甲斐 義信^{*}
Yoshinobu Kai
奥村 顕治^{**}
Kenji Okumura

Considerable research has gone into developing various structures and manufacturing methods of the mold transformers, used for power supply. Thus these transformers are now in the “mature” stage of them. This report summarizes the manufacture, structure and features of mold transformers which utilize the filament winding method.

1 まえがき

ヨーロッパで開発された電力用モールド変圧器は我国においても約20年ほど前から採用され、その優れた防災性、保守の容易さが認識されて、現在では乾式変圧器の主流を占めるほどになった。この間に変圧器巻線のモールド方法も、金型を使った金型方式（注型モールド）から、金型方式の基本的考えを発展させた金型レス方式（含浸モールド）が開発され、更にそれぞれの特長を生かすべく工夫が凝らされるようになった。

当社においても金型方式、及び金型レス方式モールド変圧器を製造販売し、好評を得ているが、本稿では金型レス方式の中でも独特な製法といわれる当社のフィラメント・ワインディング（Filament Winding、以下FWという）モールド変圧器の概要を紹介する。

2 製品開発の経緯

ビル、病院、公共施設、地下街などに設置される受電設備の変圧器には不燃防爆対策が要求され、従来、不燃性油入変圧器、シリコンワニス乾式変圧器などが使用されてきた。しかしPCBを使用した不燃性絶縁油は環境汚染など公害問題のために製造が禁止され、また、シリコンワニス乾式変圧器は湿気や塵埃に弱いという欠点があり、保守点検には特別な配慮を必要とした。

このような背景から、優れた絶縁性能と耐湿性を持つエポキシ樹脂などで巻線をモールドする固体絶縁方式のモールド変圧器が目ざされることとなり、当社においても時代の趨勢に対応するため、1980年4月に西ドイツASEA LEPPER社と技術提携を行い、FWモールド変圧器の開発に成功し、量産体制を整え1982年6月に販売を開始した。図1は3相 60Hz 6600/460V 2200kVA FWモールド変圧器の外観を示す。



図1 / FWモールド変圧器
Fig. 1 / FW mold transformer

3 FWモールド

当社がモールド変圧器に採用しているFW法は、長繊維（フィラメント）を巻回しプラスチックマトリックスと複合化するもので、強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics、以下FRPという）製法の中でも独特の成形技術であり、以下に概要を説明する。

3.1 フィラメント・ワインディング

FRPのうち、GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）は銅よりも強くアルミよりも軽いというキャッチフレーズで工業界においては構造部材として、また優れた絶縁性能を有する点より電気絶縁材料として脚光をあび、目覚ましい技術開発ともあいまって電気機器に広く使用される複合材料となってきた。しかし一般的には、GFRPはガラス繊維が連続でない状態で補強材として用いられていたため、ガラス繊維の持つ150kgf/mm²以上という大きな引張強度など、本来の特性が十分発揮できなかった。

FWはガラス繊維の持つ優れた機械的物性を引出すた

めに研究されたもので、FRPの先進国アメリカにおいてロケット用材料から発展確立されたFRPの理想的な技術である。Dr. Richard E. YoungはアメリカにおけるFW成形の元祖として知られている。彼が航空機用圧力容器として開発に着手したのは1947年といわれ、軍及び宇宙開発関係からの膨大な研究費をバックにして、FW成形法による画期的な比強度（強さ/比重）を持つ圧力容器の開発に成功し、以来、軍需で蓄積された技術が民需用に振向けられた。¹⁾

民需におけるFW成形の用途は、電気工業材料関係、工業用パイプ類、工業用タンク類、スポーツ用具類、その他工業用など多岐にわたっている。

このFRPの中でも最も優秀な性能を有するFW法に着目したASEA LEPPER社は、変圧器巻線の絶縁層をFW法によるGFRPで形成する技術を確立し、FWモールド変圧器の製品化を1976年に開始した。なお、表1は主な材料の機械的特性を比較したものである。

表1/主な材料の機械的特性

Tab. 1/Mechanical characteristics of materials

| 材 料 | 比重 d | 引張強さ σ (kgf/mm ²) | 縦弾性率 E (kgf/mm ²) | 比 強 度 σ/d | |
|-----------|---------|---|----------------------------------|---------------------|-----|
| 金 属 | 鋼 SS 41 | 7.8 | 42 | 21100 | 5.4 |
| | アルミ合金 | 2.7 | 19 | 7000 | 7.0 |
| FW+エポキシ樹脂 | 2.0 | 130 | 6000 | 65.0 | |
| 注型用配合樹脂 | 1.8 | 8 | 1400 | 4.4 | |

フィラメントのワインディング法の基本パターンには4方式あり、それぞれ次のような特長がある。

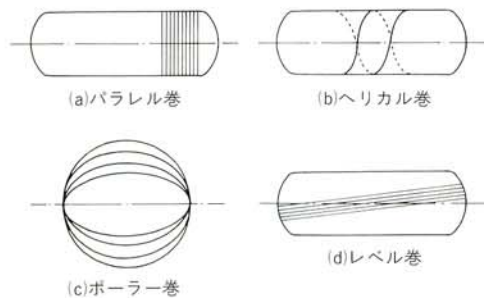


図2/フィラメント・ワインディングの基本パターン
Fig. 2/Basic pattern of filament winding

(a) パラレル巻……最も単純な巻き方で、ガラス含量が4方式中最も高く、回転軸にほぼ直角に巻かれ周方向の力に対し強固である。 図2(a)

(b) ヘリカル巻……FWの基本として最も一般的に利用される巻き方で、回転軸に対してある角度を持って巻かれ、ガラス繊維の優れた機械的特性を周及び軸の両方向に対して発揮させている。 図2(b)

(c) ポーラー巻……球を成形するときのみ用いられる。 図2(c)

(d) レベル巻……回転軸に対してほぼ平行に巻かれる巻き方で、軸方向の力に対し強固である。パラレル巻と併用し、ロケット燃料タンク製造などに用いられる。 図2(d)

FWモールド変圧器巻線の絶縁層は、前述のパラレル巻、及びヘリカル巻を合理的に組合せたもので、電氣的、機械的に理想的な変圧器を製作することができる。FWは巻芯を回転させて、それに繊維を巻付けるのであるが、巻芯の回転数と繊維供給ガイドの軸方向移動量の比を変えることにより所定の軌跡に繊維を巻くもので、原理としては比較的簡単であるが、

(1) 所定のワインディング角で巻付けること

(2) 繰返し巻によって、ある幅を有するガラス繊維の束がシリンダーの表面に均一に巻かれること

という二つの条件を満たさなければならない。そのため高度な制御技術を必要とし、コンピュータ制御FW設備を用いるのが普通である。

なお、パラレル巻FW板の機械的特性を表2に示す。

表2/パラレル巻FW板の機械的特性²⁾

Tab. 2/Mechanical characteristics of parallel FW board

| 項 目 | 特 性 値 |
|----------------------------------|-------|
| 厚 み (mm) | 2.86 |
| 引 張 強 さ (kgf/mm ²) | 132.2 |
| 引 張 弾 性 率 (kgf/mm ²) | 4875 |
| 曲 げ 強 さ (kgf/mm ²) | 138.3 |
| 曲 げ 弾 性 率 (kgf/mm ²) | 4280 |
| 圧 縮 強 さ (kgf/mm ²) | 75.1 |
| せん断強さ (kgf/mm ²) | 27.3 |
| 引張せん断強さ (kgf/mm ²) | 1.44 |

3.2 ガラス繊維

FWの基材は、必ずしもガラス繊維とは限らないが、具備する性能と価格の点より、ガラス繊維が強化材としては最適な材料である。

ガラス繊維は素材配合によって性質が異なり、一般のFRP用としては、無アルカリガラス(Electrical glassまたはEガラスとも呼ばれる)と含アルカリガラスが使用されている。前者は良好な電氣的、機械的性質を生かした用途に、後者は耐熱性を生かした用途に用いられる。

一般に、直径十数ミクロンのガラスの単繊維数百本を集束させたものをストランドと呼び、更に、このストランドを所定の番手(g/km)になるよう均一に揃えて束にしたものをローピングと呼んでおり、当社では絶縁性の優れた無アルカリガラスで、FWに適する繊維径のローピングを選定し、エポキシ樹脂との密着性、含浸性を向上させる処理を施したものを採用している。表3にEガ

ラス繊維の特性を示す。

表3/Eガラス繊維の特性⁽³⁾

Tab. 3/Characteristics of E glass fiber

| 項目 | 特性値 |
|--------------------------------|--------------------------|
| 比重 | 2.54 |
| 硬度 (Mohs) | 6.5 |
| 引張り強さ (kgf/mm ²) | 150 |
| 弾性率 (kgf/mm ²) | 7400 |
| 軟化点 (°C) | 840 |
| 比熱 (kcal/kg°C) | 0.19 |
| 熱伝導率 (kcal/mh°C) | 0.89 |
| 線膨張係数 (10 ⁻⁶ ・1/°C) | 5 |
| 体積固有抵抗 (Ωcm) | 10 ¹⁵ (20°C) |
| 体積固有抵抗 (Ωcm) | 10 ¹³ (250°C) |
| 誘電率 | 6.43(100Hz) |

3.3 FW用樹脂

FW作業はガラスロービングに樹脂を含浸させながらワインディングする湿式法と、ガラスロービング・プリプレグ（ガラスロービングに熱硬化樹脂を含浸、乾燥の上、半硬化させたもの）をワインディングする乾式法に分けられるが、一般には湿式法が用いられる。

樹脂に要求される特性は、

- (1) 低粘度でガラス基材への含浸性が良く、脱泡性があるもの
- (2) ポットライフが長く、硬化が短時間で完了するもの
- (3) 揮発分がないもの
- (4) 電気絶縁特性、耐薬品性が優れたもの
- (5) 耐熱性が優れたもの

などであり、これらを満足するものとして主にエポキシ樹脂が採用される。

エポキシ樹脂は1分子中にエポキシ基を2個以上もった化合物をいい、大別して表4のような種類がある。

表4/エポキシ樹脂の種類

Tab. 4/Typical epoxy resins

| エポキシ樹脂の種類 | 特徴 |
|------------|---|
| ビスフェノールA型 | 機械的、電気的特性や耐薬品性に優れている。エポキシ樹脂需要の約70%を占める。 |
| 脂環式エポキシ | 電気絶縁上での屋外耐候性、耐トラッキング性に優れている。 |
| 長鎖脂肪族型 | 可撓性があるが、耐熱性が低い。 |
| ノボラック型 | 耐薬品性、耐トラッキング性に優れている。 |
| グリシジルエステル型 | 耐候性、耐トラッキング性に優れている。 |
| ヘテロサイクリック系 | 耐熱性、耐トラッキング性に優れている。 |

当社では信頼性の高いビスフェノールA型樹脂を使用しており、これに低粘度の酸無水物硬化剤を組み合わせることによりロービングへの樹脂含浸が十分行われるようにしている。なお、ビスフェノールA型エポキシ樹脂の特性例を表5に示す。

表5/ビスフェノールA型エポキシ樹脂の特性例⁽⁴⁾

Tab. 5/Example of bisphenol-A type epoxy resin characteristics

| 項目 | 特性値 |
|--------------------------------|-----------|
| 曲げ強さ (kgf/mm ²) | 13 |
| 弾性率 (kgf/mm ²) | 475 |
| 線膨張係数 (10 ⁻⁶ ・1/°C) | 67 |
| 熱伝導率 (kcal/mh°C) | 0.101 |
| 体積固有抵抗 (10 ¹⁵ Ωcm) | 40(20°C) |
| 誘電率 | 3.3(20°C) |
| 交流破壊電圧 (kV/2mm) | 40(20°C) |

4 構造

モード変圧器は、図3に示すようにモード巻線、鉄心、クランプなどで構成され、堅牢かつシンプルな構造である。なお、FWモード変圧器の製作工程は図4に示す。

4.1 鉄心構造

鉄心は良質の方向性珪素鋼帯を使用し額縁形積鉄心構造として、無負荷損失の低減を図るとともに、鉄心表面に耐熱性樹脂塗料を塗布含浸して鋼板を固着し、騒音を低減している。

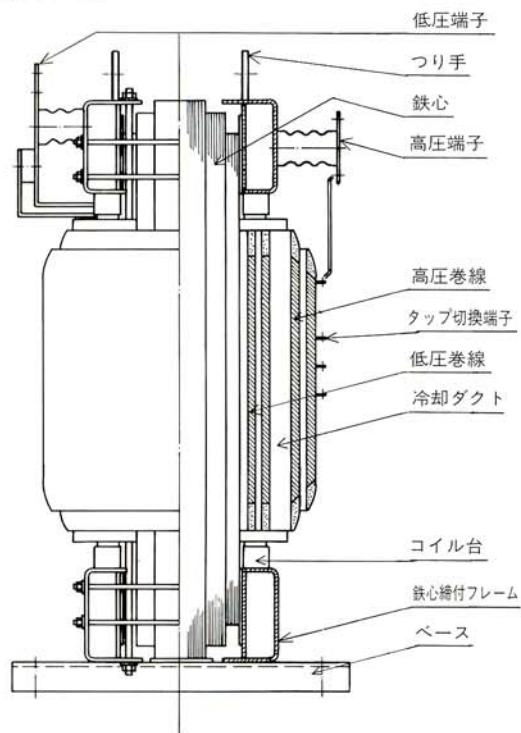


図3/FWモード変圧器構造図

Fig. 3/Construction of FW mold transformer

4.2 巻線構造

高圧巻線導体には丸線または平角線を、低圧巻線には平角線または条導体をそれぞれ使用し、円筒巻構造としている。丸線、平角線の絶縁層はロービングに樹脂を十

分含浸させ、前述のコンピュータ制御された高精度の自動ローピング装置で所定厚みまで巻回し、FRP層を形成させる。このローピング巻回作業は図5に示すように常圧(大気圧)下で行っているため、数mmHgの真空下で樹脂注型するいわゆる真空注型モールドで問題となるような希薄なボイドは生じない。また、条導体巻線には層間絶縁物としてガラス布プリプレグを使用している。

なお、高圧巻線は冷却ダクトを介して低圧巻線に引続き同心に巻回され、樹脂で硬化させるので高低圧巻線は完全に一体化され、強固な構造となる。

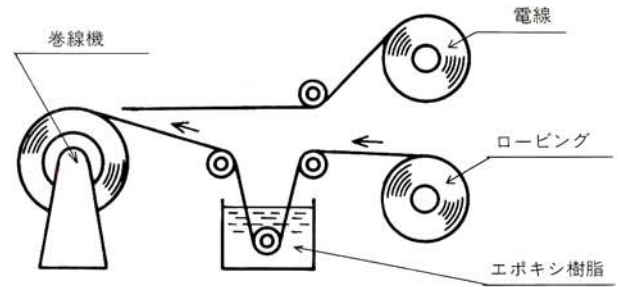


図5 /FW装置概念図
Fig. 5/General equipment of filament winding

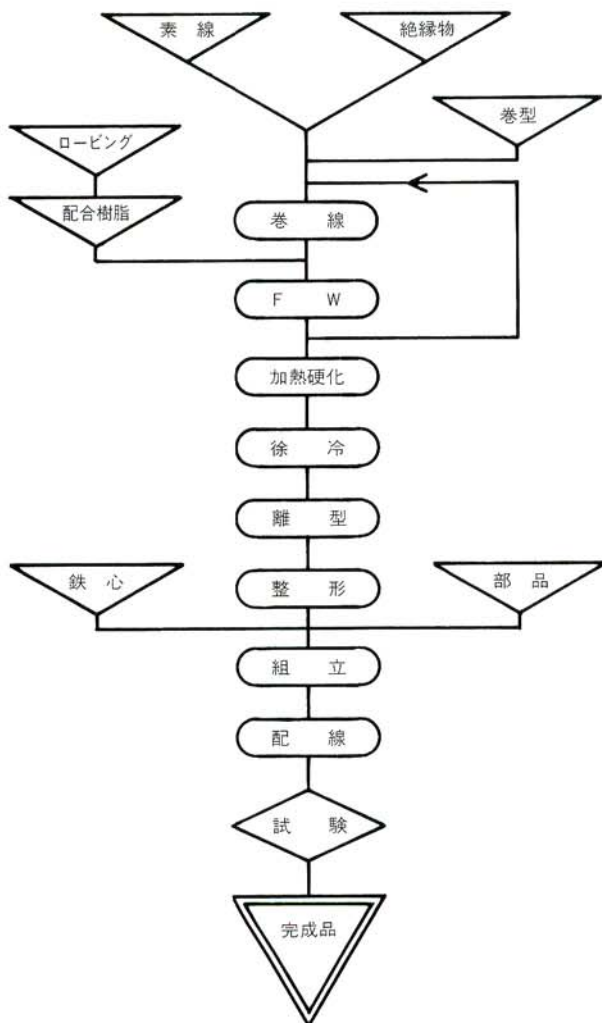


図4 /FWモールド変圧器製作工程
Fig. 4/Manufacturing process of FW mold transformer

5 FWモールド巻線の部分放電特性

FW モールド巻線の層間絶縁は高強度絶縁層いわゆるFRP層で形成され、またエポキシ樹脂がガラスファイバに十分に含浸するよう細心の注意を払って製作されている。

しかし、大気圧の下でその作業を行うため、絶縁樹脂層中に微小ボイドが残存することが考えられ、当該部の部分放電特性はボイド部の電界と空気の火花電圧特性より下記の通り求められる。

5.1 ボイド部の電氣的等価回路

絶縁物に交流電圧を印加した場合、その一部分(ボイド部)にて放電が生ずる現象は、簡易的に図6(b)の等価回路によって説明できる。

ただし、図6(a)、(b)において、

- d: 絶縁物の厚み
- dG: ボイドの厚み
- C_G: ボイドのキャパシタンス
- C_R: C_Gと直列の絶縁物部分のキャパシタンス
- C_{R'}: C_G、C_R以外の電極間のキャパシタンス
- ε_{SR}: 絶縁物の比誘電率
- ε_{SG}: ボイドの比誘電率

である。

図6(b)において印加電圧をUとすれば、ボイドにかかる電圧U_Gは、

$$U_G = \frac{C_R}{C_G + C_R} \cdot U$$

$$= \frac{\epsilon_{SG} \cdot dG}{\epsilon_{SG} \cdot (d - dG) + \epsilon_{SR} \cdot dG} \cdot U \quad \dots\dots(1)$$

で表すことができる。

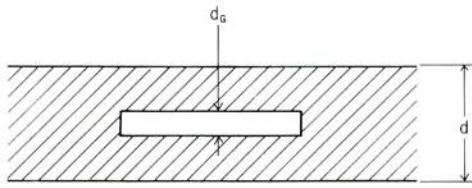


図6(a)/ボイドを有する絶縁物
Fig. 6(a)/Insulating layer containing air void

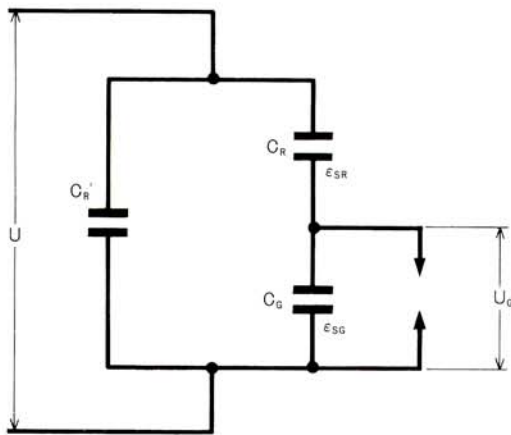


図6(b)/ボイドを有する絶縁物の電気的等価回路
Fig. 6(b)/Electrical equivalent circuit of insulating layer containing air void

5.2 部分放電に対する安全率

FW モード巻線に用いる絶縁樹脂層の比誘電率 ϵ_{SR} は約5、空気の比誘電率 ϵ_{SG} は1であるので(1)式を変形し、 U_G/U を求めると(2)式となり、これを計算すると図7の曲線①となる。

$$\frac{U_G}{U} = \frac{5 \frac{d_g}{d}}{1 + 4 \frac{d_g}{d}} \quad \dots\dots(2)$$

また、巻線作業時に当該樹脂部にボイドを残留したまま硬化した場合、作業が大気圧の下で行われるので、その中の気体はおおむね1気圧(=1.013bar)の空気と考えてよい。空気の放電開始電圧すなわち火花電圧 U_F は図8のバッシュェンカーブとして示される。

したがってボイド内気圧を1、電極間隔 $d = 1 \text{ mm}$ とした場合の内部ボイドの大きさ d_g/d に対する U_F/U は空

気の火花電圧特性(図8)から求められる。これを図示すると図7の曲線②となる。

ボイド部の火花電圧とボイドにかかる電圧の関係は、

$$\frac{\text{ボイド部の火花電圧}}{\text{ボイド部にかかる電圧}} = \frac{U_F}{U_G} = \frac{\frac{U_F}{U}}{\frac{U_G}{U}} \quad \dots\dots(3)$$

となり、図7の曲線③にて表される。この U_F/U_G が部分放電に対する安全率であり、V字形曲線となることより、本方式ではボイド量がいかなる状態になろうとも安全率がある値以上確保できることがわかる。

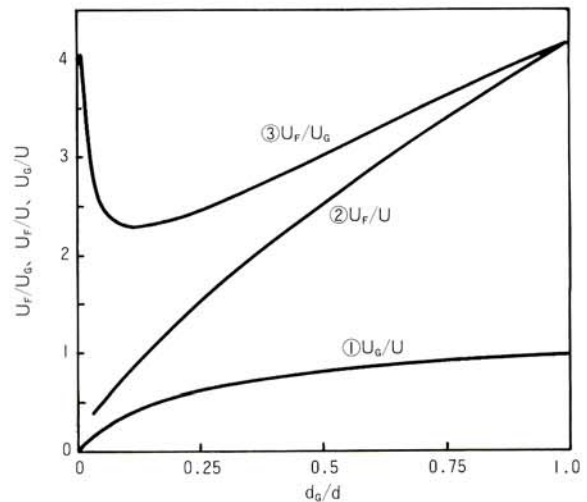


図7/ボイドを有する電極系の電圧特性
(絶縁物の厚みを1mmとした場合)
Fig. 7/Voltage characteristics of insulating layer containing air void
(Layer thickness : 1mm)

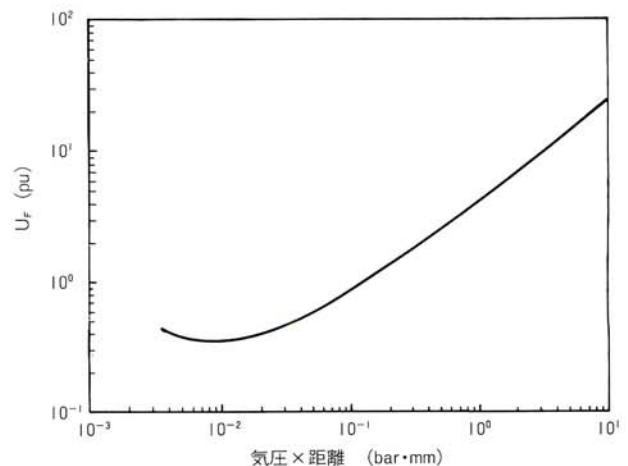


図8/空気の火花電圧特性
Fig. 8/Spark voltage characteristics of air

6 特徴

当社のFWモールド変圧器はGFRP独自の最先端技術を応用しており、従来の注型モールド変圧器との比較を表6に示す。

表6 / 性能比較

Tab. 6 / Comparison of performance

| 項目 | FWモールド変圧器 | 注型モールド変圧器 |
|-------------------|--|--|
| モールド方式 | フィラメント・ワインディング法 | 真空注型法 |
| 樹脂 | エポキシ樹脂と高強度ガラスロービング | 石英粉を約60%含んだエポキシ樹脂 |
| 樹脂の機械的強度 (耐クラック性) | FW方式のFRPであり非常に強い 引張強さ70kgf/mm ² | FWモールドに比べ強度が低い 引張強さ8kgf/mm ² |
| 外殻樹脂厚み | FRPの機械強度が大きく、2mm程度で十分 | 機械強度を確保するため10mm程度は必要 |
| 導体材料 | アルミニウムまたは銅を任意に使用できる | 樹脂の熱膨張によるストレスがクラックの臨界値に近いため、通常、熱膨張係数が樹脂の値に近いアルミニウムが採用される |
| 耐熱性 | 耐熱性樹脂を使用することによりB、F、H種(温度上昇限度75、95、120℃)が製作可能 | 樹脂の熱膨張によるストレスがクラックの臨界値に近いため、温度上昇限度はB種(75℃) |
| 製造設備 | 型は不要 | 注型用の型が必要 |
| 設計 | 設計の自由度が大きく、非標準仕様にも容易に対応できる | 設計が型寸法で制限される |
| 樹脂内部ポイド | 常圧下で樹脂含浸を行うため微小な空気ポイドができる可能性はある | 数mmHgの真空下で樹脂注型するので、製作不良により真空ポイドができる。また樹脂の使用量が多いので硬化収縮によって真空ポイドができる可能性がある |
| 巻線の電氣的強度 | 空気ポイドを考慮して絶縁寸法を決定するので、コロナフリー | 真空ポイドがあると有害コロナが発生する |
| 冷却ダクト | 巻線内に容易に設けられ、効果的な冷却ができる | 巻線内に設けるのは困難であり、巻線電流密度を低くする必要がある |
| 寸法 | FRP層の良好な機械的、電氣的特性により、導体占積率の高いコンパクトな製品の製作が可能である | 導体の占積率が低く、型の制限もあるためFWモールド品より大きくなる |

7 信頼性の検証

変圧器は電気学会 電気規格調査会標準規格 JEC-204-1978(変圧器)で規定された一般特性試験、及び耐電圧試験、短絡試験などで性能を把握することができる。しかし、油入変圧器に比べモールド変圧器は巻線を固体絶縁物で包埋する新しいタイプであるから、実器やモデルコイルを使ってその信頼性を検証しておくことは重要である。

7.1 耐クラック強度の検証試験

巻線を固体絶縁物で包埋するモールド変圧器固有の問題として、樹脂と導体との膨張率の差による応力を考えなければならない。この応力は絶縁破壊などの致命的なクラック発生の原因となるので次の試験を行う必要がある。

(1) 通電ヒートサイクル試験

実器の運転状態を模擬し通電、休止の繰返しによる応力に対する耐クラック性を確認する目的で、短時間過負荷反復試験を行う。

(2) 気中ヒートサイクル試験

モールドコイルが保管中、輸送中、運転中などで実際に遭遇しうる温度変化に対し耐えるかどうかを検証する目的で、一般に最低温度を-20℃、最高温度を絶縁の種類による許容最高温度として、繰返しストレスを加える。

(3) 液中ヒートショック試験

急激な温度変化による応力集中にも耐えることを検証する目的で水中、湯中に繰返し浸漬する。この試験は特に過酷であり破壊試験として扱うこともある。

上記試験におけるクラック発生の有無は目視、染色探傷法、及び部分放電開始電圧を測定するなどで判定している。当社のFWモールド巻線は、この液中ヒートショック試験(0℃水中、100℃湯中浸漬)を3サイクル実施し、クラックの発生しないことを確認している。また参考試験として、筑波学園・日本自動車研究所殿の低温実験室において-35℃雰囲気中に曝したが全く異常はなかった。図9は冷温試験中の試料を示す。

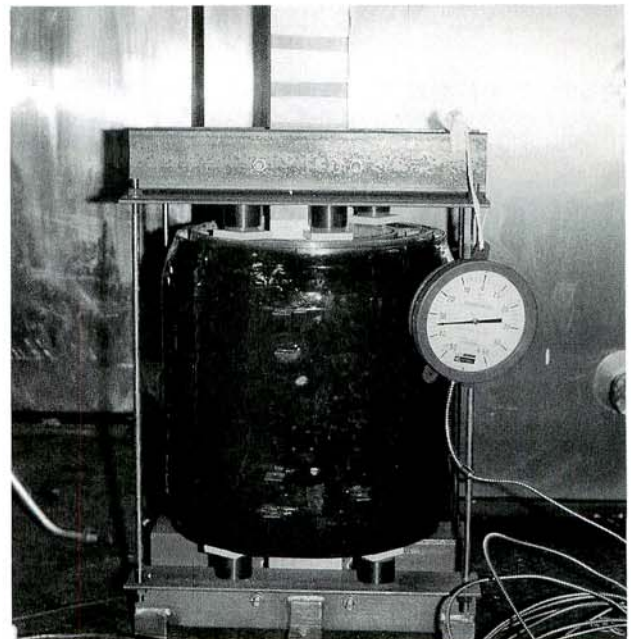


図9 / 冷温試験
Fig. 9 / Cold temperature test

7.2 燃焼試験

モールド変圧器はその使用目的から難燃性、自己消火

性などが要求され、それらを確認する必要がある。モールド巻線の構成材料である樹脂は次の規格に基づいて評価している。

(1) 熱硬化性プラスチック一般試験方法 (JIS K 6911)

長さ127×幅12.7×厚み12.7mmの試料をスタンドに保持し、ブンゼンバーナの火炎を試料の自由端に30秒間接触させ、炎を取り除いた後の燃焼時間と燃焼距離を測定する。判定は、燃焼距離が25mm以下であれば不燃性、燃焼距離が25mmを超えて100mm以下であれば自己消火性、燃焼距離が100mmを超える場合、あるいは燃焼時間が180秒を超える場合は可燃性とする。

(2) 酸素指数法による高分子材料の燃焼試験方法 (JIS K 7201)

酸素 (O₂) と窒素 (N₂) の混合気体において、その混合比を変化させて着火を起こす限界酸素濃度、すなわち酸素指数を求めるもので、この値が20%以上であれば、通常大気中では燃焼が持続しない。

$$\text{酸素指数} = \frac{\text{O}_2}{\text{N}_2 + \text{O}_2} \times 100 (\%)$$

エポキシ樹脂は単独で使用すれば、他の合成樹脂と同様、本来可燃性であるが、充填材 (FWの場合はガラス繊維) を添加した配合樹脂は難燃性を持つようになる。当社のFW方式FRPをJIS K 6911法で試験した結果、燃焼時間4秒、燃焼距離3mmとなり、難燃度は『不燃性』と判定され、JIS K 7201法の酸素指数は45%以上であった。

更に、実器の難燃性を確認するため、以下の実験を実施した。

(3) 火災想定実験

モールド巻線にガスバーナで火炎 (温度約2000℃) を接触させ所定時間後 (5分間)、火炎を取除いた場合の消炎時間は零秒であった。その結果を図10(a)(b)に示す。

(4) 内部事故想定実験

変圧器運転中の万一の事故として、層間短絡を模擬させるため、巻線内部の一部分に短絡時以上の大電流を30秒間通電し、発煙、燃焼具合を観測したが火炎の発生はなかった。

7.3 耐熱寿命

エポキシ樹脂などの有機絶縁材料は長期使用により、分子結合が切離されたり、分解したりして電氣的、機械的強度などが徐々に劣化する。このような、物理的特性の変化は化学的变化と相関性を持ち、その劣化速度は温度が高くなるほど速くなるという化学反応速度論の考え方が現在広く定着しており、長期間の材料の安定性を確認するため、熱劣化特性から耐熱寿命を推定することは意義がある。

アレニウス (Arrhenius) の化学反応速度式を基にした温度と寿命の関係は次式で示される。

$$\log L = \Delta E / RT + \text{const.}$$

L: 寿命

ΔE: 劣化の活性化エネルギー

R: 気体定数

T: 絶対温度

したがって、実使用温度より高い3～4点の温度における寿命を求め、その寿命の対数と絶対温度の逆数を直線回帰して求めた耐熱寿命グラフ (アレニウスプロットともいう) を実使用温度に外挿し、寿命を推定することができる。

寿命すなわち使用限界時間は電氣的特性 (破壊電圧) 及び機械的特性 (破壊強度) が所定の値に低下するまでの時間、あるいは熱分解特性である加熱重量減少が所定の値に至る時間 (ドイツ規格 DIN 16946 では重量損失の規定境界値は無機質充填材入の場合1.2%とし、寿命が25000時間になる温度を最高使用温度としている) と一般に決められている。

当社のFW方式FRPではAC破壊試験と加熱重量減少試験より図11のような耐熱寿命グラフを得ている。

DINの評価方法によれば耐熱温度は、168℃となり、F種絶縁材料の許容最高温度155℃を満足しており、F種モールド変圧器の定格使用温度の平均値を140℃と仮定すれば推定寿命は50年以上と期待される。

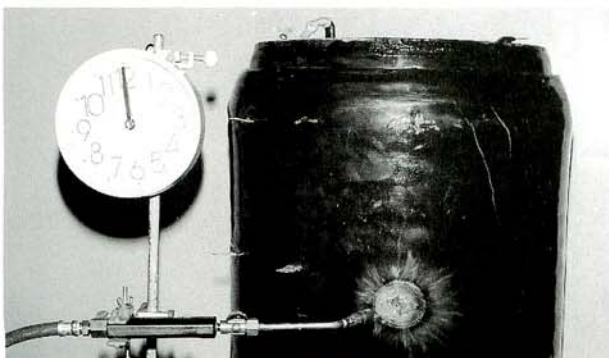


図10(a) 燃焼試験 (バーナ点火後)
Fig. 10(a) Combustion test (burner firing)

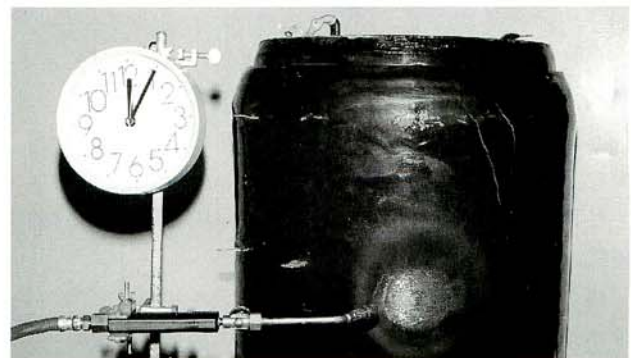


図10(b) 燃焼試験 (バーナ停止後)
Fig. 10(b) Combustion test (after firing)

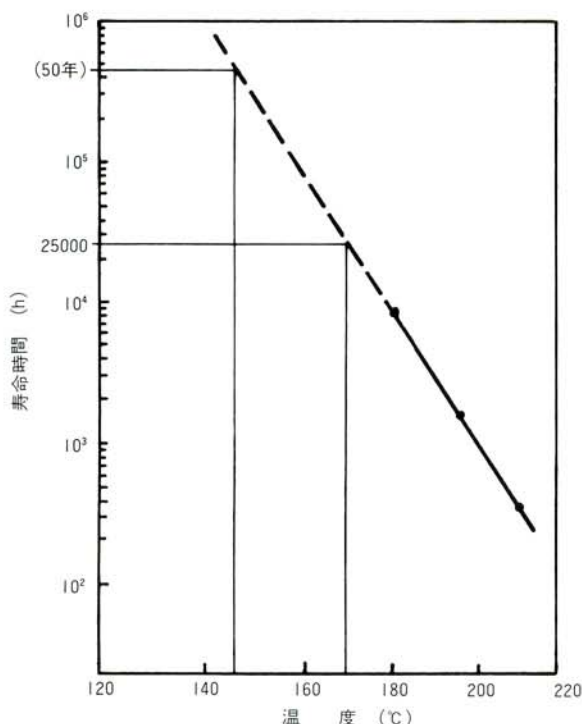


図11/耐熱寿命グラフ
Fig. 11/Thermal life vs. temperature

7.4 複合劣化試験

電気機器には使用中、電界ストレス、機械ストレス、熱ストレスなどが複合して加わるが、これまでは印加電圧と寿命の関係(V-t特性)など、劣化要因が単独で加わった場合の研究が行われていた。しかし、絶縁評価の高精度化などが要求される現在では実際の使用状態における劣化特性、すなわち複合要因劣化特性が重要視される。なお、主な劣化要因は表8に示すものである。

表8/モールド絶縁の劣化要因
Tab. 8/Deterioration factor of resin mold insulation

| 劣化の種類 | 要 因 |
|-------|------------|
| 熱劣化 | 熱 |
| 電界劣化 | ボイド、突起、異物 |
| 応力劣化 | 熱応力、電磁力、振動 |
| 環境劣化 | 湿気、塵埃など |

当社でもこの考え方を尊重し、実器を用いて熱的、電氣的、機械的複合劣化を考慮し、課電5日間、停止2日間を1サイクルとする冷熱ストレスを繰返し発生させ、更に、課電時には過電流により巻線最高点温度を180°Cに上昇させて熱劣化を促し、しかも過電圧を印加する複合劣化試験を行った。

複合劣化の評価は通電ヒートサイクル4回ごとのエンドポイントテストとして、交流耐電圧試験(加圧試験、誘導試験)、衝撃電圧試験、部分放電電圧測定などを実施しながら1年間、正味6000時間通電を行い異常のないこ

とを確認した。

なお、この複合劣化試験と別の試験から得たFW方式FRPの耐熱寿命グラフ図11を基に、モールド変圧器の寿命を予測すれば50年以上に相当しており、信頼性の高さが確認できた。

8 あとがき

モールド変圧器は、主にシリコンワニス乾式変圧器の代替として採用され始めたが、しだいに油入変圧器の分野にも普及し、適用分野が拡大している。

市場に出始めたころのモールド変圧器は、巻線を金型に入れて樹脂注型する金型方式が一般的であったが、最近では金型を使わない金型レス方式も種々開発されている。今回紹介した金型を使わないフィラメント・ワインディング(FW)モールド方式は、特に中大容量機種に適しており、コンパクト化等、そのメリットが十分に発揮できる。いずれにしても、金型方式は標準仕様の大量生産に適し、金型レス方式は仕様の多様化に対応しやすく、多品種、少量生産に適することから、今後はそれぞれの特長を生かしながら共存してゆくものと思われる。

参考文献

- (1) 牧 廣、他、フィラメント・ワインディング、工業技術ライブラリー26、日刊工業新聞社、47、(昭45)
- (2) 日本規格協会編、非金属材料データブック、プラスチック系複合材料、256、(昭60)
- (3) 日東紡績株式会社、
NITTOBO GLASS FIBER NOTE 001
- (4) 日本チバガイギー株式会社、アラルダイトF