

125kV油浸サイリスタバルブ用 電磁結合式ゲートパルス変圧器

Gate Pulse Transformer for 125kV Oil-Immersed Thyristor Valve

Hitachi manufactured its first epoxy mold type magnetic gate pulse transformer in 1960 for use with the air-cooled type thyristor valve supplied to the Sakuma Thyristor Converter Testing Laboratory, Electric Source Development Co. Making best use of production experience with this mold type transformer, Hitachi developed recently a gate pulse transformer for oil-immersed thyristor valve use. Built in the valve this new transformer is presently undergoing reliability tests at the installation site. Its construction, the stress absorbing layer of the epoxy resin mold components, the insulating characteristics of the epoxy resin impregnated insulating paper, and the results of factory tests are described.

池本徳郎* *Norio Ikemoto*
 中沢正光* *Masamitsu Nakazawa*
 田口和夫* *Kazuo Taguchi*
 磯貝時男** *Tokio Isogai*
 石川栄一** *Eiichi Ishikawa*
 尾形文夫*** *Fumio Ogata*

1 緒 言

近年、電力需要の増大は著しく、系統は急速に巨大化、複雑化してきており、安定した電力供給確保のため、すぐれた特長を有する直流送電技術の導入が世界的に脚光をあびている。直流送電は、昭和29年スウェーデンゴットランド島系統に始まり、昭和45年には、北アメリカ太平洋岸南北連系系統が完成し、1,440MW、1,330kmの本格的な大電力長距離主幹送電を開始するに至った。わが国においても電力の伸びはめざましく、系統連系や大電力輸送に直流送電採用の必要性が高まりつつある。

一方、半導体技術の最近の進歩は、高性能の高電圧サイリスタ交直流変換装置開発の優位性を高めている。日立製作所は財団法人機械振興協会の助成のもとに昭和45年DC125kV、37.5MWというサイリスタ変換装置としては当時世界最大定格のものを製作、電源開発株式会社佐久間サイリスタ変換装置試験所に納入した。このサイリスタバルブは以来、実用試験を好調に続けているが、乾式絶縁方式の屋内形であった。その後わが国でも各地で直流送電計画が立案、具体化されるにつれ、屋外形機器の必要性が高まり、ここに油浸形サイリスタバルブを開発した。昭和48年3月より前記試験所において実用運転試験が行なわれているが、このバルブのゲート点弧回路用に、先の乾式のゲートパルス変圧器に続き、油浸式のそれを開発した。ここでは、バルブ駆動にきわめて重要な位置を占める油浸サイリスタバルブ用電磁ゲートパルス変圧器について紹介する。このゲートパルス変圧器を使用すれば各サイリスタの電位にはゲート信号の電力増幅器を設置する必要がなく、次のような利点がある。

- (a) 各サイリスタ近くに特別の電源をおく必要がない。
- (b) 各サイリスタ電位におけるゲート回路が単純化され信頼度が向上する。
- (c) 電力増幅回路は1バルブに一組でよい。

2 電磁ゲートパルス変圧器の構造

パルス変圧器の絶縁構成には、一次導体を大地電位とする

方式と一次導体を高電位として絶縁変圧器などを介して一次導体に信号を伝送する方式とがある。図1、2はそれぞれのサイリスタ点弧回路の絶縁構成を示すものである。油浸絶縁方式では、パルス発振器などを大地電位にすることが望ましい。したがって、一次導体を大地電位とした図1の絶縁構成を採用した。この構成はサイリスタバルブ全体を油タンクに収め、その油タンクを接地することができるので、雪害、地震などの天災に強い耐候性の構造とすることができる。また、サイリスタバルブを屋外に設置できるので変換所建設費の点でも有利であろう。図3は電磁ゲートパルス変圧器を示す。また、このゲート変圧器の試験電圧は表1に示すとおりである。

油浸絶縁方式の場合、一次導体とパルス変圧器との間の油隙付近の電界調整方法に二つの方法がある。図4、5はその構造を示すもので、その一つは、一次導体の表面付近を電界調整し、パルス変圧器の最外層シールドと接続して同電位にする方法である。他のものは、パルス変圧器の最外層シールドの形状を工夫することによって、油隙付近の電界を調整する方法である。いずれも、それぞれ特徴があり、前者のほうが構造は複雑であるが運転時の信頼度が高い。特に一次導体に侵入するサージ電流は直流線路側からの場合と交流線路側からの場合とが考えられる。サージ電流が直流線路側から侵入した場合は、電界があまり高くないが、交流線路側から侵入すると直流側より高い電界となる。一方、サイリスタ変換装置にサージ電圧が侵入すると、その電位分布は分布容量が存在するためにサージ侵入側の分担電圧が大きくなる。したがって、サージ侵入側に高い電位分布を作らない構造とすべきであり、接地電極の入れ方なども工夫を要するところである。

次に、ゲートパルス変圧器の絶縁材料をみると油浸クラフト紙によるものと樹脂モールドによるものとが考えられるが、製作技術の進歩によっていずれも信頼度の高い製品を得ることは容易である。前者の場合、油浸クラフト紙によるものは、

* 日立製作所国分工場

** 日立製作所日立研究所

*** 日立製作所日立工場

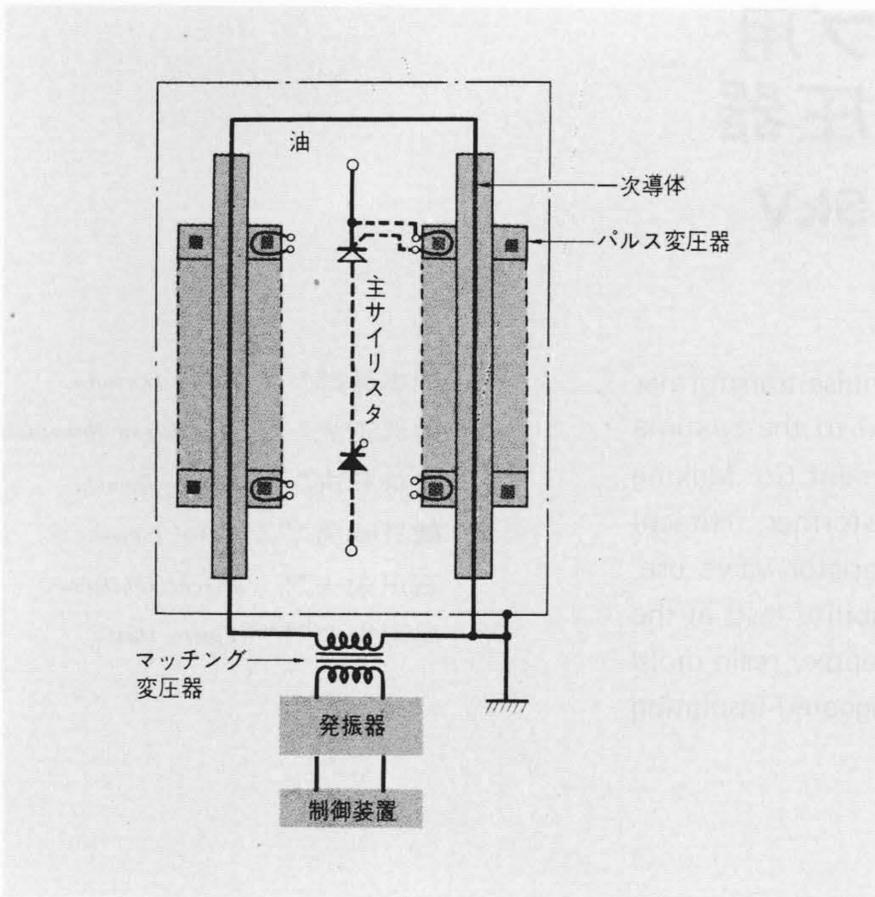


図1 ゲート点弧回路(大地電位方式) 一次導体をマッチング変圧器を通して大地にアースする方式である。

Fig. 1 Gate Firing Circuit of Ground Potential

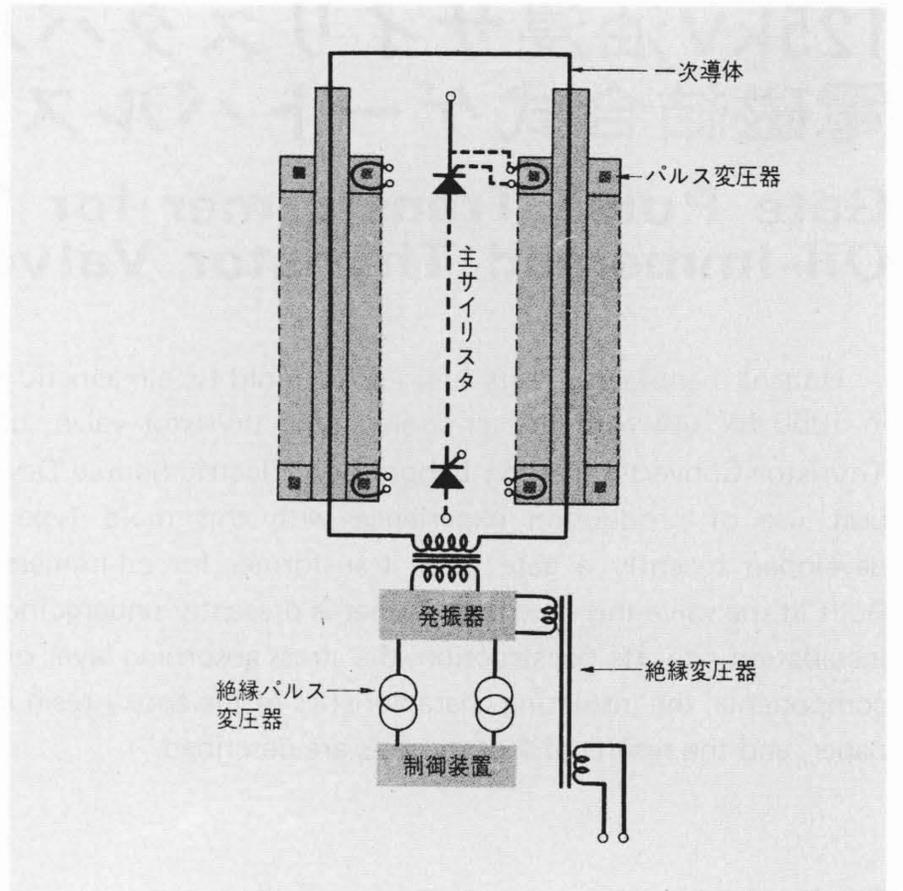


図2 ゲート点弧回路(絶縁変圧器方式) 一次導体が絶縁変圧器、絶縁パルス変圧器で大地からフロートする方式を示す。

Fig. 2 Gate Firing Circuit with Insulating Transformer

超高压変換器の製作技術と同様に製作され、長年の安定した技術によるため信頼度が高い。後者の場合、現在ではほとんどがエポキシ樹脂系のモールド品であり、特に樹脂硬化時の収縮および熱収縮応力に対する検討が必要である。これらの発生応力を除去しないと鉄心の磁気特性が変化する可能性がある。そのために特殊な応力吸収層を設ける。この応力吸収層については別に説明する。

次に、パルス変圧器の構造について概要を説明する。この変圧器は絶縁的に安定であるほかに、ノイズに対してサイリスタが誤動作しないことが絶対条件となる。ノイズには、

- (a) インパルス電圧が入った場合、漂遊静電容量を通して充電電流が流れ、それによって二次巻線に電圧が誘起する。

(b) バルブトレイ中のサイリスタに流れる電流やコンデンサ放電電流によって磁界を生じ、二次巻線に起電力を生ずる。などがある。これらのノイズはいずれも補償巻線、差動巻線によって完全に防止されている。図6はその一例を示すものである。

また、パルス変圧器と一次導体の組合せ状態に対し詳細な電界解析を実施し、各部とも十分、安全かつ信頼性が高い余裕のある構造となっている。すなわち、(a)沿面電位分布調整用電極の採用、(b)シールドリングの採用などである。

次に、二次巻線側について紹介する。前述したように高信頼度が要求されるので、鉄心には高周波領域における磁気特性の良好なものが必要である。このため鉄心形状も磁気特性の安定なものが使用される。エポキシモールド方式の場合、エポキシ樹脂のすぐれた特性のため、絶縁層を合理的寸法に選択することが容易である。そのため、上記の鉄心を樹脂中

表1 電磁ゲートパルス変圧器の要求仕様 超高压大容量電力変換装置のため信頼性確認項目が厳しく要求されている。

Table 1 Specification Requirements for Gate Pulse Transformer

No.	項目	仕様
1	交流対電圧試験	230 kV (1分間)
2	直流耐電圧試験	225 kV (30分間)
3	インパルス耐電圧試験	±400 kV (1/40 μs)
4	開閉インパルス耐電圧試験	±400 kV (100/2,500 μs)
5	部分放電試験	AC160kW 30分間, 無コロナ
6	周囲温度	-20 ~ 105 °C
7	耐震強度	0.3 G 共振正弦3波
8	その他, 試験	一次電流, 電圧の立上り時間 二次電流, 電圧の立上り時間 冷熱試験 (温度差 100 °C) サーマルショックテスト 漂遊静電容量測定 鉄損測定 諸試験後のB-H特性

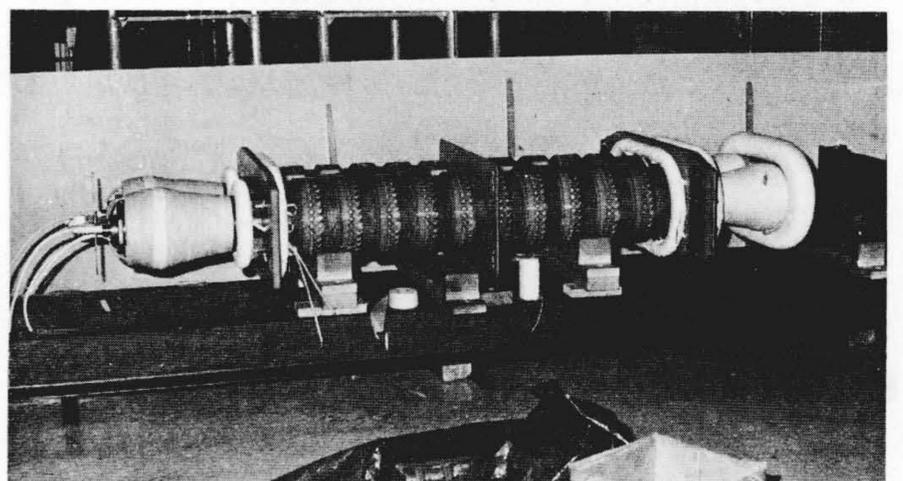


図3 電磁ゲートパルス変圧器 組み立てられたゲートパルス変圧器の上下端をシールド絶縁した完成姿を示す。

Fig. 3 Gate Pulse Transformer

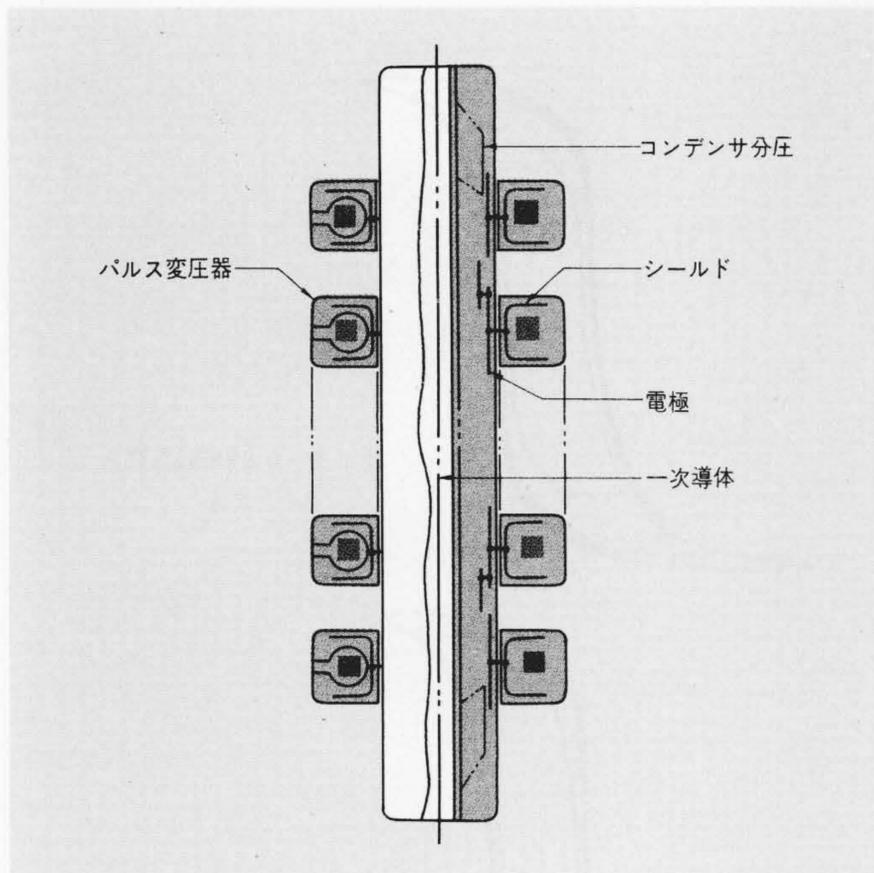


図4 表面電極を埋設した構造 各パルス変圧器に対応して分圧電極をもつ方式の構造を示し、一次導体とパルス変圧器間の油隙を無電界にしたものである。
Fig. 4 Sectional View of Gate Pulse Transformer with Partial Condenser Layers

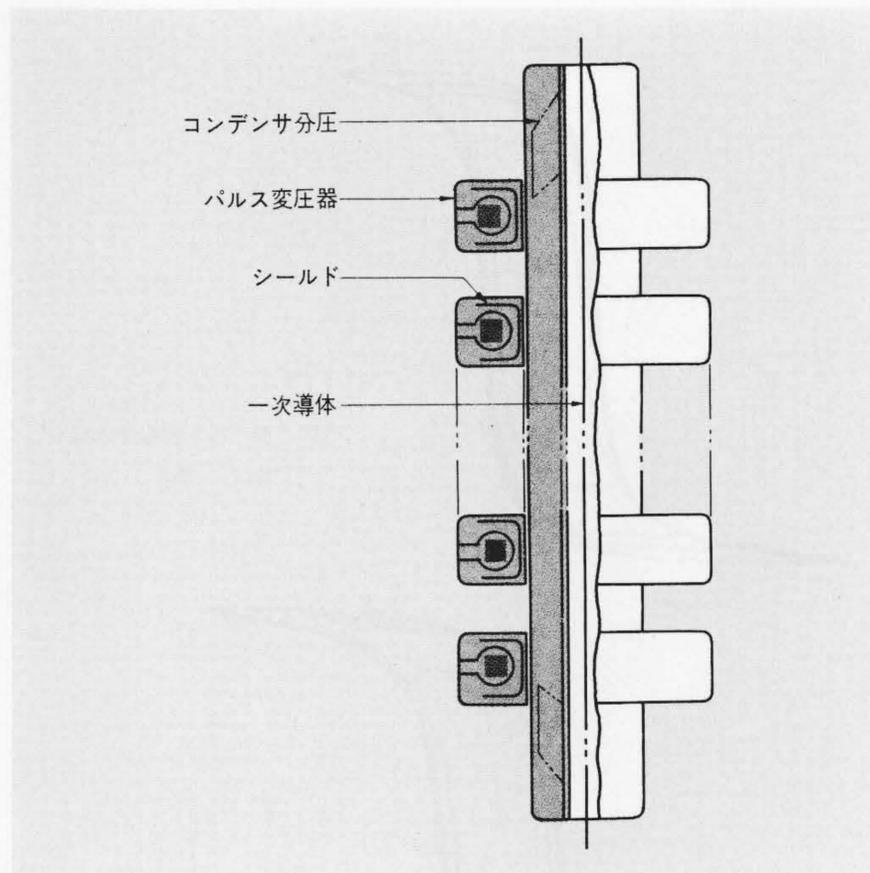


図5 表面電極を設けない構造 上下端のみ分圧をしたゲートパルス変圧器の構造を示し、油隙を絶縁物で埋める方式である。
Fig. 5 Sectional View of Gate Pulse Transformer without Partial Condenser Layer

に埋め込んだ構造にする必要がある。しかしながら、高周波特性のよい鉄心を直接埋め込みモールドすると、樹脂の硬化時に発生する応力および樹脂と鉄心との熱膨張係数の差によって生ずる熱応力などにより磁気特性が低下する。また、鉄心の角部に応力が集中し、角部付近の絶縁層に割れを生じコロナ放電の原因となる。これらの応力による影響を防ぐために、鉄心の周囲に応力吸収層を設けることが大切である。

応力吸収層は、いろいろの方法で作られるが最も重要なことは、次の2点である。

- (a) 構造が簡単で、作業性が良いこと。
- (b) 鉄心の特性を保護し、き裂防止の構造であること。

われわれは、特殊なワックスを使用し、エポキシ樹脂硬化時に発生する応力を鉄心に伝えない分離した構造とした。そのときのB-H曲線の代表例は図示のとおりで、図7は応力吸収層を付けない場合のモールド樹脂注入前後を示し、図8は応力吸収層を付けた場合の特性を示すが、後者ではB-H特性に変化が見られないことがわかる。

また、鉄心の磁束密度の低下率を測定したが、応力吸収層のないものは、あるものに比べてモールド完了後、常温になった時点で約10%低下が見られた。ここでも応力吸収層の効果が示された。

また、鉄心部でのひずみは、大部分が樹脂の硬化中の縮みのひずみで $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ 程度であり、樹脂徐冷時において応力吸収層の効果が顕著である。応力吸収層がない場合は、常温まで冷却した状態で円周方向の縮みが 15×10^{-4} 程度と大きくなる。ひずみの曲線の実測例は図9に示すとおりである。ひずみと応力の関係は、次の(1)式、または(2)式で表わされる。

$$\sigma_x = 2 G \left(\epsilon_x + \frac{\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z}{m - 2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

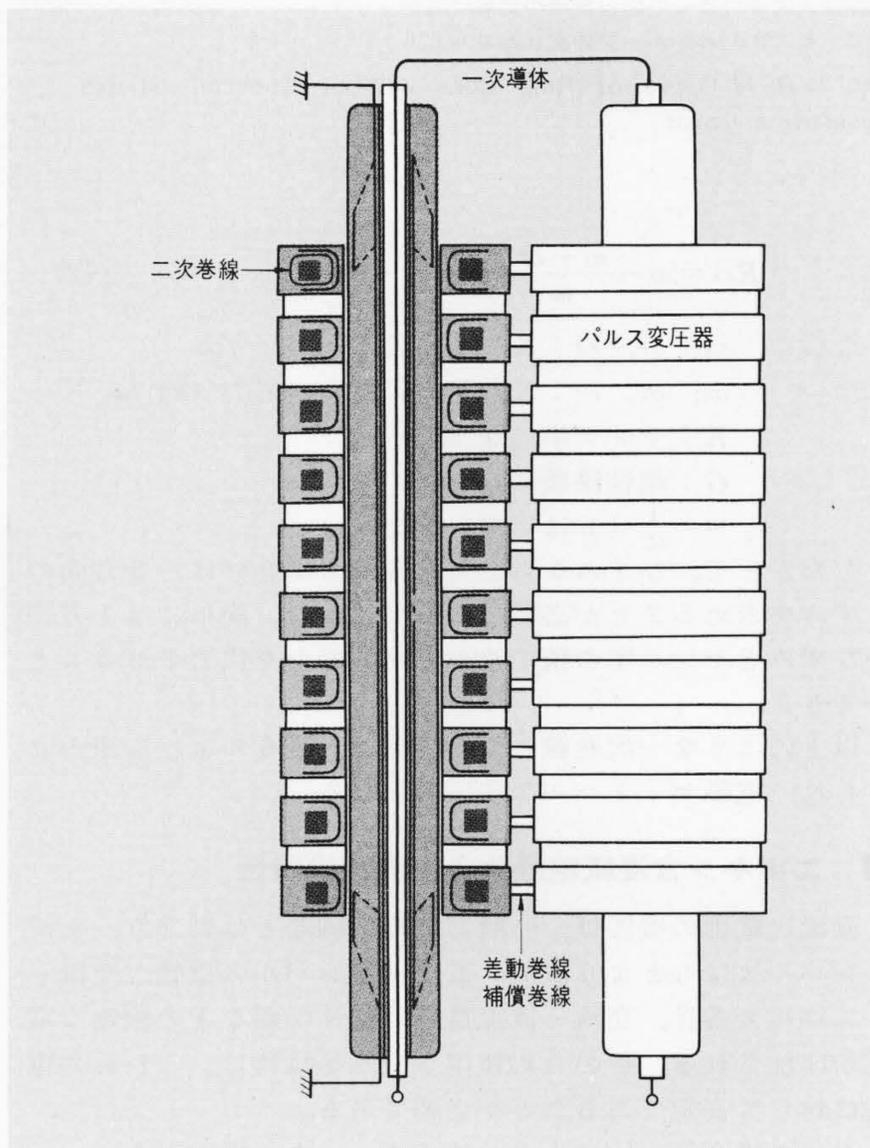


図6 電磁ゲートパルス変圧器の構造例 パルス変圧器の構成を示す一実施例を示すもので、絶縁的に安定であるほかに、ノイズに対してサイリスタが誤動作しないことが絶体条件である。
Fig. 6 Construction of Gate Pulse Transformer

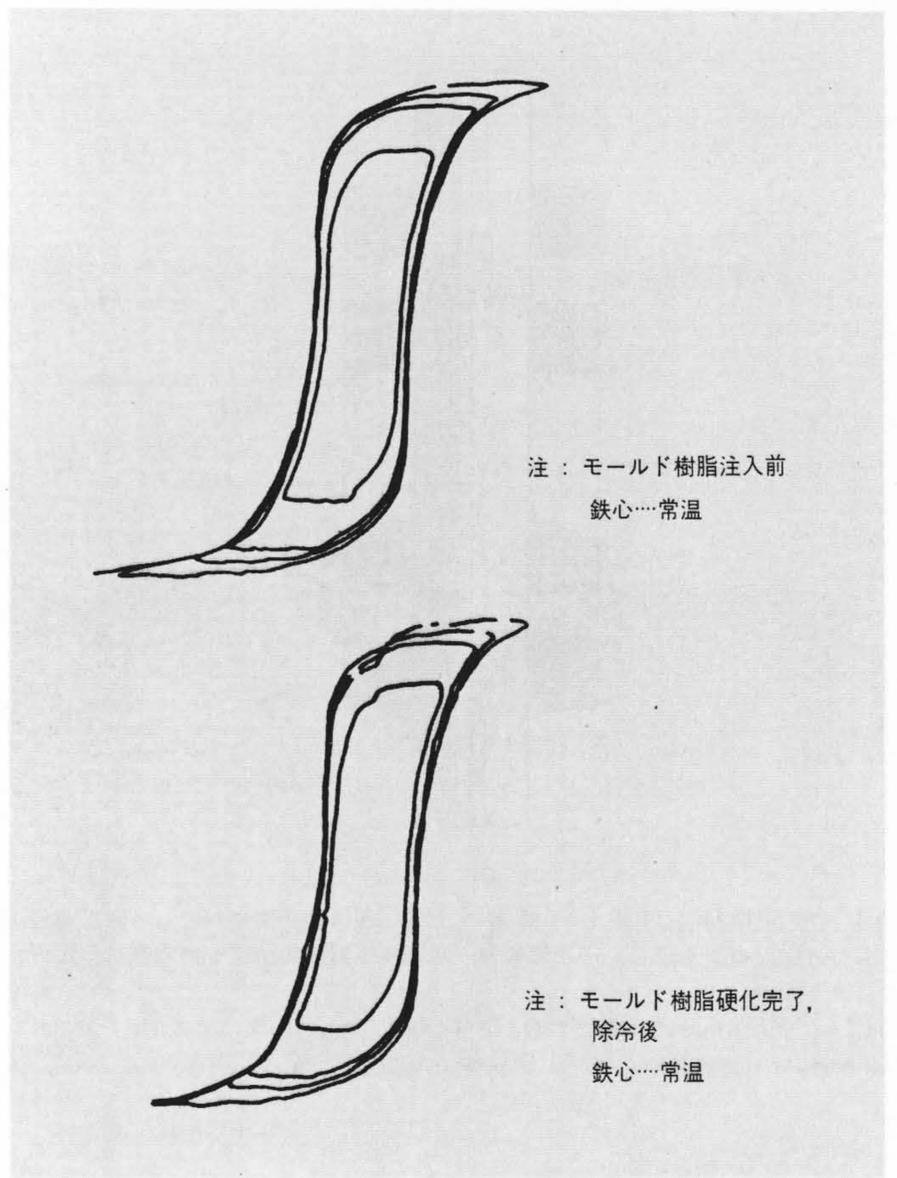
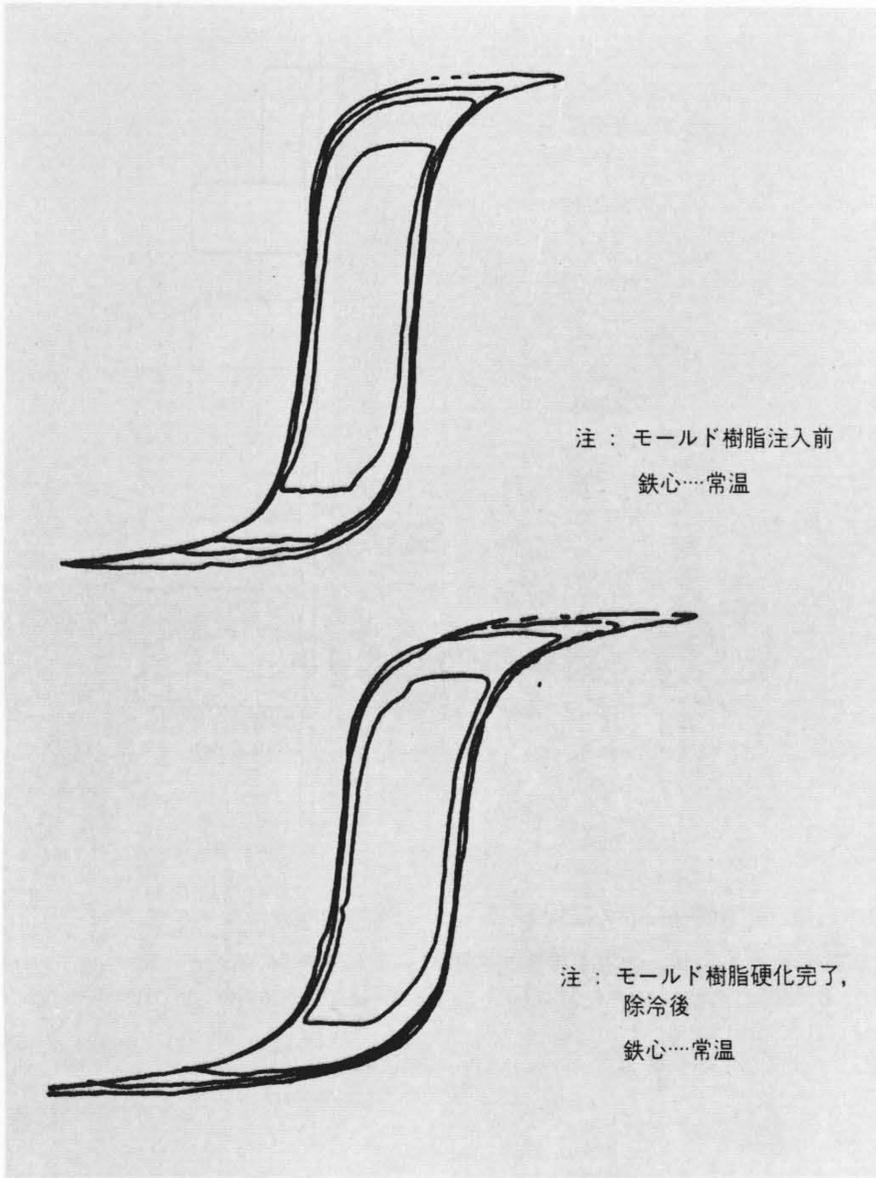


図7 応力吸収層を付けない場合のB-H曲線の代表例 モールド樹脂注入前後の鉄心のB-H曲線の比較代表例を示すもので、注入前と硬化完了後で、ヒステリシスループの変化がみられる。

図8 応力吸収層を付けた場合のB-H曲線の代表例 モールド樹脂注入前後の鉄心のB-H曲線の比較代表例を示すもので、図7と比べてB-H特性の変化は見られない。

Fig. 7 B-H Curve of Ring Core without Thermal Stress Absorption Layer

Fig. 8 B-H Curve of Ring Core with Thermal Stress Absorption Layer

$$E\epsilon_x = \sigma_x - \frac{\sigma_y + \sigma_z}{m} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: X, Y, Z方向のひずみ
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: X, Y, Z方向の応力 (kg/mm²)
 E : ヤング率 (kg/mm²)
 G : 剛性係数 (kg/mm²)
 $m = \frac{1}{\mu}$ (μ はポアソン比)

したがって、ひずみから応力を求める場合には、3方向のひずみを求めることが必要である。しかし、簡単には1方向のひずみとヤング率の積でその方向の応力を代表させることができる。

以上のような一次巻線と二次巻線が、図6のように組み立てられ、電磁ゲートパルス変圧器となる。

3 エポキシ含浸紙絶縁物の直流絶縁特性

直流送電用の機器は、一般の高電圧機器とは異なり、交流インパルスはもとより直流、直流-インパルス重畳、交流-インパルス重畳、交流-直流重畳、極性反転などの複雑な電圧が印加される。そのため使用される絶縁物は、これらの電圧に対して安定であることが必要である。

直流の場合、交流に比較して次のような差異がある。

(1) 交流、インパルスの電位分布は誘電率によって決定されるが、直流の場合、抵抗率によって大きな影響を受ける。また空間電荷の形成についても十分考慮しなければならない。

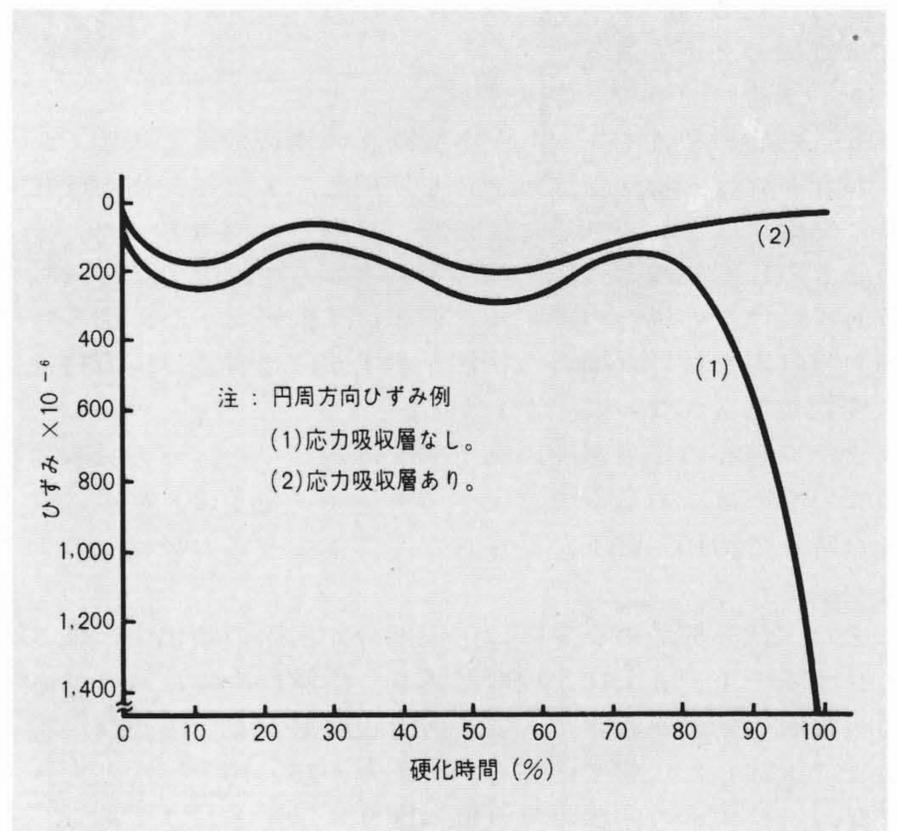


図9 円周方向ひずみ測定例 鉄心がモールド樹脂で硬化されるときの円周方向のひずみの変化状態を示すもので、応力吸収層の効果がわかる。

Fig. 9 Strain of Ring Core During Hardening Process of Epoxy Resin Mold

(2) 絶縁物を数種組み合わせて用いた場合、その誘電率の比、あるいは抵抗率の比が重要な値となるが、誘電率比の場合、10を超えることはまずまれであるのに対し抵抗率比の場合、100~1,000程度になることはきわめて普通である。

(3) 抵抗率の場合、同一材料でも温度、湿度、汚損などの影響を受け把握がむずかしい。

次に、上述のような背景をもとにエポキシ含浸紙絶縁物の直流課電下での $V-t$ 特性を交流の場合と比較検討したものを示すことにする。

3.1 エポキシ含浸紙絶縁物の抵抗率

高分子材料に直流電圧を印加すると時間とともに減少する電流 I が流れる。

$$I = I_{SP} + I_a + I_d \text{ (A)} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 I_{SP} ：電極系の幾何学的寸法を充電する電流および電子、原子分極に基づく瞬時的に減衰する電流

I_a ：比較的緩慢な分極現象（配向分極、界面分極など）あるいは空間電荷形成に基づく電流成分

I_d ：平衡漏れ電流

電圧印加当初あるいは常温付近では、 $I_a \gg I_d$ であるため、試料に流れる電流は大きく変化する。そして常温付近では、吸収電流が大きく、温度上昇とともに平衡漏れ電流がでてくる。図10は貫層方向の場合の電圧印加後の電流密度-時間特性を示したものである。

また、試料の幾何学的形状、印加電圧および測定された試料に流れる電流 I から、抵抗率 ρ を下記により求める。その抵抗測定試料は図11に示すとおりである。

$$\rho_a = \frac{\pi D^2}{4t} \cdot \frac{E}{I} \dots\dots\dots(4)$$

$$\rho_p = \frac{2\pi L}{\log D_2/D_1} \cdot \frac{E}{I} \dots\dots\dots(5)$$

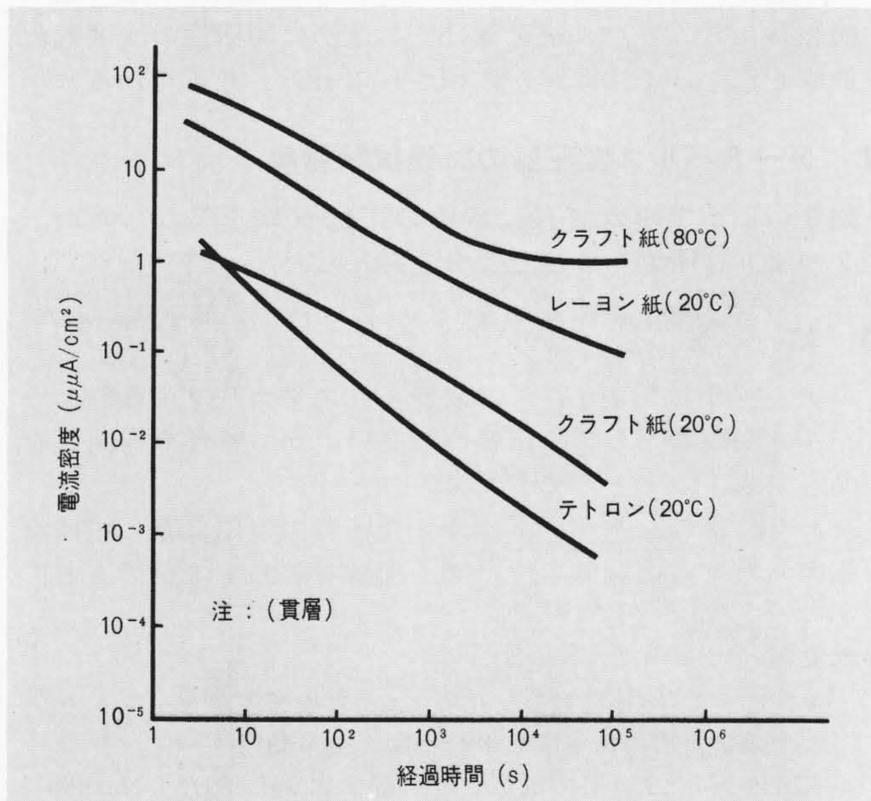


図10 含浸紙電圧印加後の電流密度-時間経過特性 エポキシ含浸紙に、直流電圧を印加した後の電流の減少状況を示し、クラフト紙では常温付近では吸収電流が大きく、温度が高くなると平衡漏れ電流が検出される。
Fig. 10 Current Density vs Time Lapse after Applying DC Voltage to Epoxy Resin Impregnated Paper

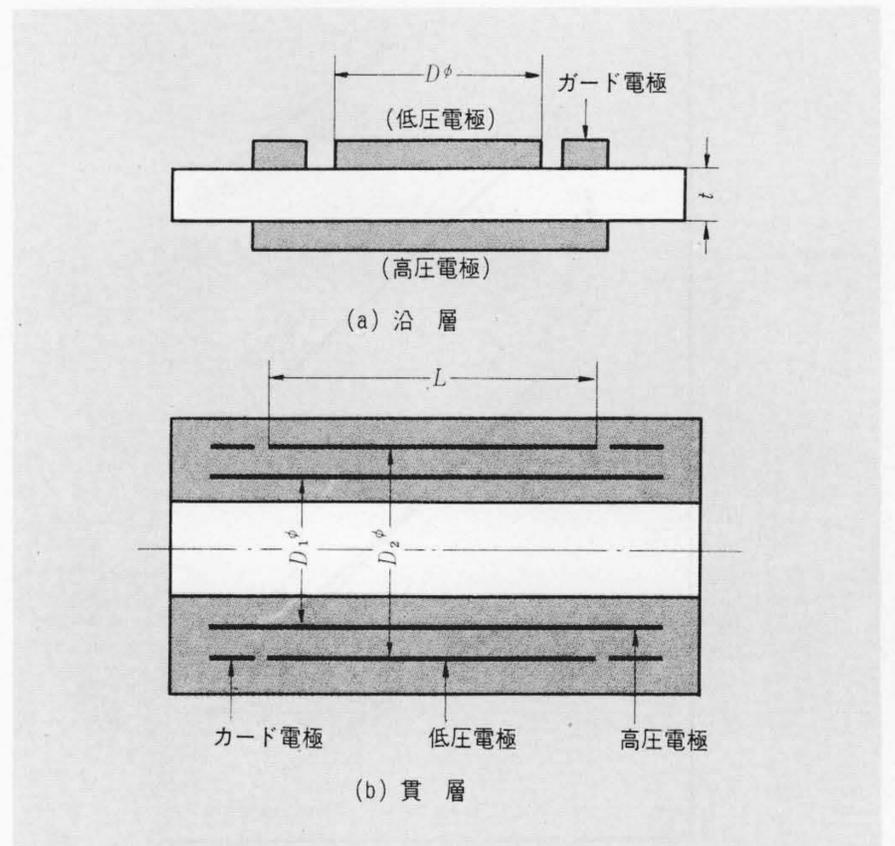


図11 抵抗測定試料 沿層、貫層の抵抗測定試料構造を示す。沿層方向の試料は、基材を積層し、貫層方向の試料は、円筒状に紙を巻回してアルミはく電極を挿入し、それぞれ樹脂含浸加熱硬化したものである。

Fig. 11 Specimen for Specific Resistance Measurements

ここに、 ρ_a ：沿層方向の抵抗率 ($\Omega\text{-cm}$)
 ρ_p ：貫層方向の抵抗率 ($\Omega\text{-cm}$)
 D ：低圧電極の直径 (mm)
 L ：電極長 (mm)
 t ：試料の厚み (mm)
 D_1 ：内側電極はくの直径 (mm)
 D_2 ：外側電極はくの直径 (mm)

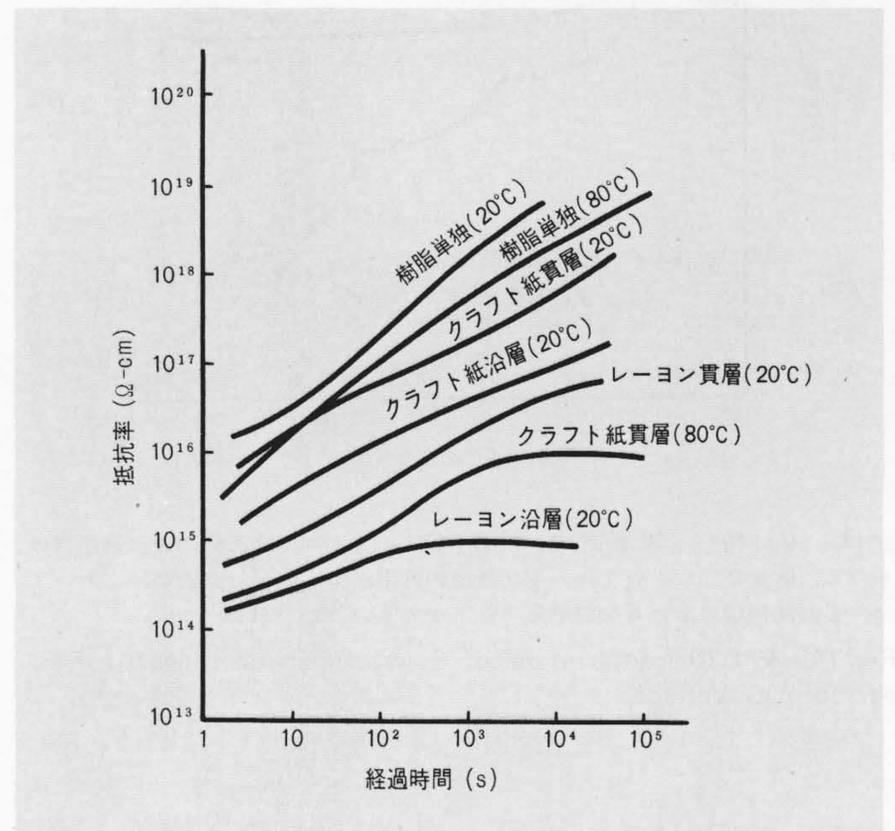


図12 抵抗率の時間経過 材料別に温度をパラメータとした抵抗率特性の変化を示し、抵抗率は樹脂単独の場合が最も高く、クラフト紙、レーヨンの合成紙順であることが分かる。
Fig. 12 Specific Resistance vs Time Lapse after Application of DC Voltage

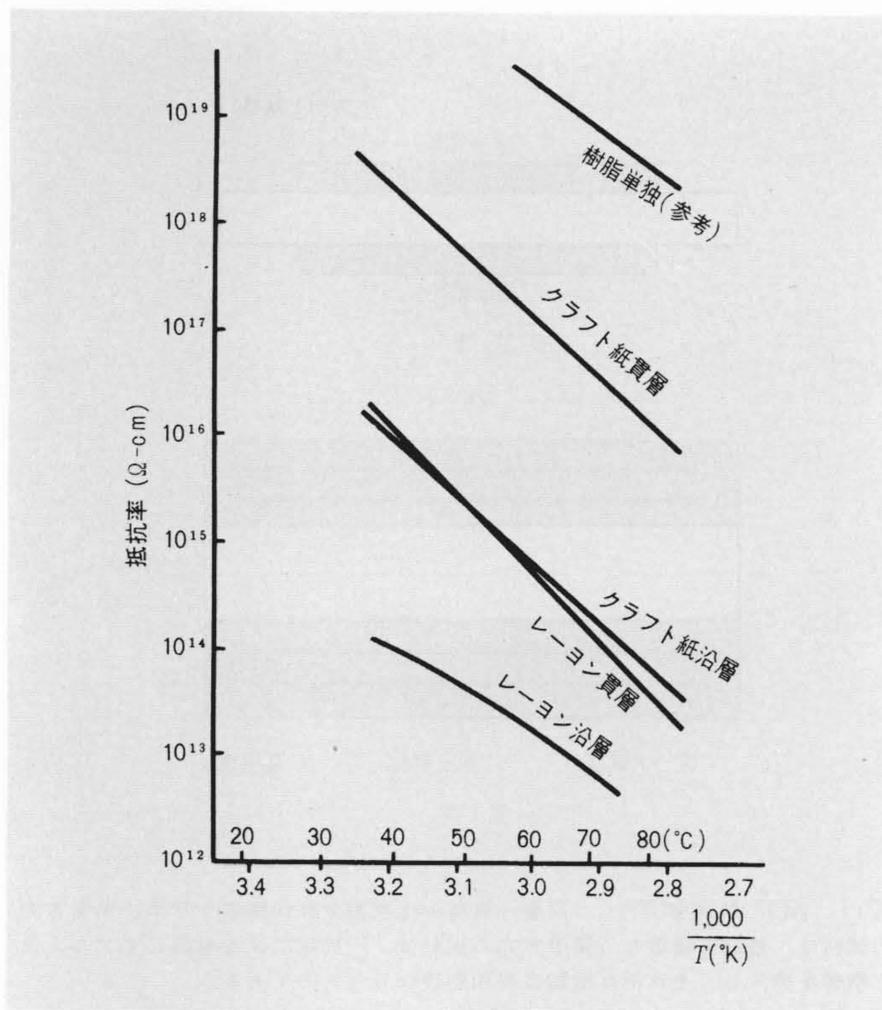


図13 抵抗率の温度特性 材料別抵抗率の温度特性を示すもので、図示のようにほぼ直線関係を満足している。

Fig. 13 Specific Resistance vs Temperature

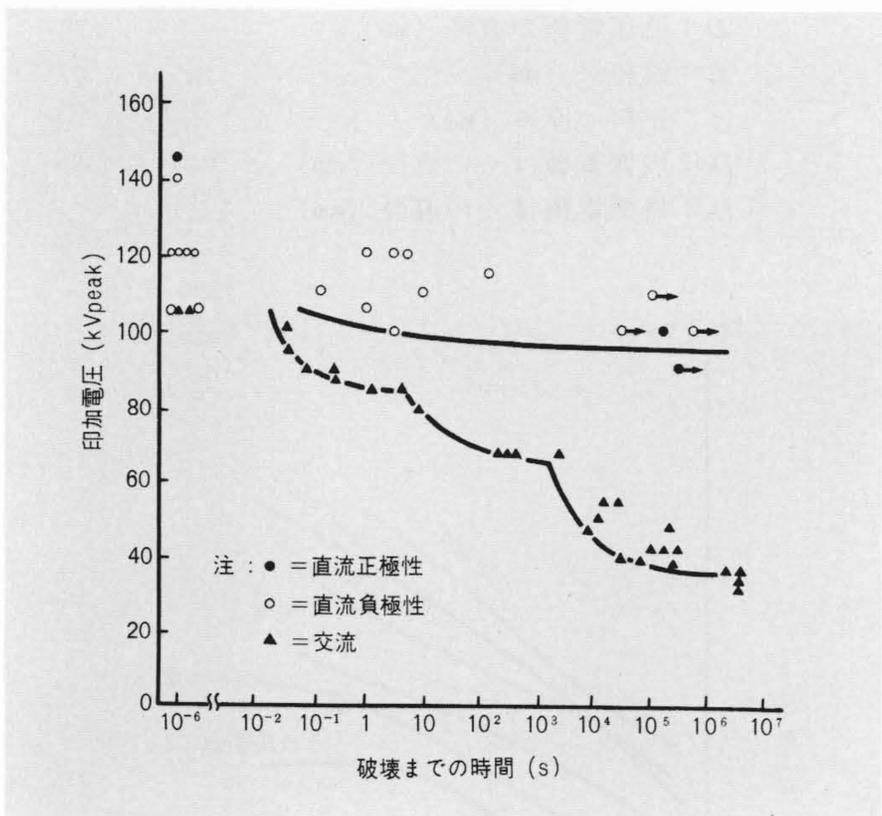


図14 V-t特性(貫層方向)代表例 エポキシ含浸紙の直流電圧特性を示し、直流電圧においては、V-t特性の低下が少ないが、交流電圧においては、長時間領域における破壊電圧の低下が大きいことを示す。

Fig. 14 V-t Characteristics of Epoxy Resin Impregnated Paper for DC Voltage

抵抗率時間変化は図12に、また、抵抗率の温度特性は図13に示すとおりである。図13は縦軸にlogρを横軸に1/Tを逆に目盛ったが、ほぼ直線関係を満足している。なお、含浸基材の量と抵抗率の関係、エポキシ含浸紙絶縁物の吸湿と抵抗率の関係、抵抗率と電界の関係については、次の機会に譲る。

表2 油浸サイリスタバルブ用電磁ゲートパルス変圧器試験結果 厳しい要求項目を満たし、特に部分放電特性、機械的強度に良い結果を得た。

Table. 2 Design Test Results of Gate Pulse Transformer for Oil-Immersed Thyristor Valve

No.	試験項目	試験結果
1	交流耐圧	AC 230kV 1分間OK AC 230kV コロナフリー
2	インパルス耐圧	±400kV (1/40μs) OK
3	部分放電試験	AC 230kV コロナフリー
4	開閉インパルス耐圧	±400kV (100/2, 500μs) OK
5	部分放電試験	AC 230kV コロナフリー
6	直流耐圧	DC ±225kV 30分間OK DC 225kV コロナフリー
7	部分放電試験	AC 230kV コロナフリー AC 160kV 30分 コロナフリー
8	参考試験	(1) 冷熱試験, 異常なし。 (2) サーマルショックテスト, 異常なし。 (3) 漂遊静電容量測定, 異常なし。 (4) 鉄損測定, 異常なし。 (5) B-H特性測定, 異常なし。 (6) 一次, 二次電圧, 電流立上り時間測定, 異常なし。 (7) 耐震強度, 異常なし。
9	長時間課電	DC 125kVの1.2倍で、約150時間連続課電、その後の部分放電試験230kV コロナフリー

3.2 エポキシ含浸紙絶縁物の直流V-t特性

V-t特性の代表例として、図14に貫層方向の特性を示した。沿層方向については割愛するが、直流V-t特性は、交流V-t特性のように低下しなかった。貫層方向も同様な傾向であることが図14よりわかる。直流においてもV-t特性の低下が少ないのは極性が変わらず電圧変動も少ないことや、抵抗率が、一般に電界に対して負特性を示すことから電極はく端の電界が緩和されること、また電極はく端近傍に同極性の空間電荷が形成され、はく端電界が緩和されるためと考えられる。

4 ゲートパルス変圧器の工場試験結果

図3のように組立て後、各種の工場試験を行なったが、表2のように所期の仕様を十分に満足した。

5 結 言

以上、紹介したように、油浸サイリスタバルブ用電磁ゲートパルス変圧器として、信頼度の高い、かつ特性の安定した製品を完成することができた。

終わりに臨み、本ゲートパルス変圧器の製作に際して種々ご指導いただいた関係各位に深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 磯貝ほか：「機振協125kVサイリスタ変換装置用ゲートトランスの開発」昭和46年電気学会全国大会, 537
- (2) 家田ほか：「高分子の電気伝導」電学誌VoL.89-5 No.968
- (3) 川上ほか：「125kV, 37.5MW高電圧サイリスタバルブの開発」日立評論, 53 396 (昭和46-4)
- (4) P.Hessen, W.Lampe: Insulating Problems in H.V.D.C-Converter Transformer: Direct Current, VoL. 2, No. 1
- (5) 尾形ほか：「125kV, 1,200A油浸サイリスタバルブの開発」日立評論 56, 227 (昭49-3)