

# 絶縁油中CO, CO<sub>2</sub>, フルフラールの生成速度におよぼす絶縁紙含水率の影響

Effect of Moisture Contens of Insulating Paper to Evolution Rate of CO, CO<sub>2</sub>, and Furfural in Insulating Oil

宮島 極<sup>\*1</sup>  
Kiwamu Miyajima  
林 幸雄<sup>\*1</sup>  
Yukio Hayashi  
佐藤 一昭<sup>\*1</sup>  
Kazuaki Satoh

## 1 まえがき

油入変圧器の寿命を絶縁油中のCO, CO<sub>2</sub><sup>(1)(2)</sup>やフルフラール<sup>(3)</sup>の分析値により推定することが試みられている。これは、変圧器の絶縁紙が経年劣化してその機械的強度がある値以下に低下したときがその変圧器の寿命であり、この寿命に達したことを、主として絶縁紙から絶縁油中に生成されたCO, CO<sub>2</sub>, フルフラールなどの分解生成物量により推定しようとする考え方である。

絶縁紙の劣化は油中において、有機物であるセルロースが加熱分解されることにより進行する<sup>(4)</sup>。その分解により生成されるCO, CO<sub>2</sub>の発生速度には、温度が最も大きい影響を与えるが<sup>(1)(2)</sup>、その他に、絶縁紙中の水分も影響を与える<sup>(5)</sup>と考えられる。変圧器の製造時に絶縁紙は、絶縁性を良くするために乾燥工程において例えば水分含有率(以下、含水率)0.1%まで全体がほぼ均一に乾燥されるが、その後の組立工程において大気と直接接触する部分では1~2%にまで吸湿することがある。このような場合は、1台の変圧器内の絶縁紙含水率は場所によって異なるので、含水率が絶縁紙の劣化に影響を与えるのであれば、絶縁紙の劣化速度は、温度が同じであっても、場所によって異なることになると考えられる。

絶縁紙の含水率がCO, CO<sub>2</sub>の生成速度に影響をおよぼすことを調査した例は、N<sub>2</sub>中で加熱した場合については報告されているが<sup>(5)</sup>、絶縁油中で加熱した場合についてはないようである。本報告は、含水率を0.1%, 0.4%, 1.9%に調整した絶縁紙を、80~160°Cの絶縁油中で180日間まで加熱したときに生成されるCO, CO<sub>2</sub>, フルフラールの量を、その平均重合度(以下、重合度)および引張強さとともに調査した結果である。

## 2 実験方法

### 2.1 絶縁紙試料

JIS C 2304で規定されている厚さ0.18mmの2種コイル絶縁紙を幅65mmの細長いテープ状に切り、これを重さ120g、直径約13cmのロール状に巻いた。このロール状試料を表1に示す条件で加熱乾燥して、含水率が0.1%, 0.4%, 1.9%の3種類の絶縁紙試料とした。乾燥させた試料は、直ちに絶縁油を合浸させて空気中水分の吸着を防いだ。

\*1 機器開発事業部 技術研究センタ

表1 絶縁紙試料の乾燥条件

Table 1. Desiccating conditions of insulating paper

含水率	0.1%	0.4%	1.9%
乾燥条件	105°C-24時間 20 Pa 真空乾燥	105°C-24時間 大気中乾燥	105°C-2時間 大気中乾燥

### 2.2 加熱方法と分析試料採取方法

図1に示す内容積が1.5Lのステンレス製密封容器に、真空脱気処理をした1.0Lの絶縁油とともに銅線100g、および含水率を調整した絶縁紙試料1個を入れ、油面上の気相部0.4Lには真空脱気後1気圧のN<sub>2</sub>を封入した。このステンレス容器を表2に示す条件で恒温槽中で加熱し所定の日数が経過するごとに、分析試料として5mLの絶縁油および1mLのN<sub>2</sub>を容器の蓋に取り付けた採取口からシリンジを使って採取した。設定した最長の加熱日数が経過した絶縁紙試料は、容器から取り出し常温の脱気処理した絶縁油中に保存した。

### 2.3 調査項目と分析方法

#### (1) 絶縁油中CO, CO<sub>2</sub>およびフルフラール

油中のCO, CO<sub>2</sub>をストリッピング法で気中に抽出してから、水素炎イオン化型検出器を使ったガスクロマトグラ

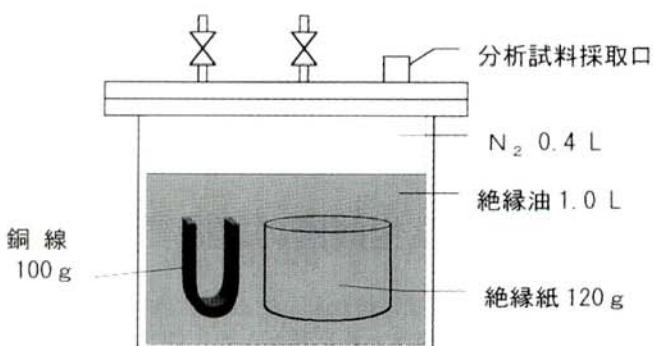


図1 絶縁紙の油中加熱実験容器

Fig. 1. Sealed containar used for aging of insulating paper in insulating oil

**表2 絶縁油中絶縁紙の加熱条件**

Table 2. Aging conditions of insulating paper in insulating oil

温度(℃)	加熱日数(日)
80	0, 15, 30, 60, 120, 180
100	0, 15, 30, 60, 120, 180
120	0, 15, 30, 60, 120
140	0, 10, 20, 30, 40, 60
160	0, 5, 10, 15, 20, 30

フ(以下、ガスクロ)で定量分析した。また、油中フルフラールはn-ペンタンで希釈した試料油を固相抽出カラム(商品名:セップパックシリカ)に通過させて分離し、メタノール中に抽出したもの高速液体クロマトグラフで定量分析した。

#### (2) N<sub>2</sub>中のCO, CO<sub>2</sub>

容器の気相部から採取したN<sub>2</sub>をガスクロに直接注入しN<sub>2</sub>中のCO, CO<sub>2</sub>を定量分析した。

#### (3) 絶縁紙重合度と引張強さ

所定の最長加熱日数経過後に容器から取り出した絶縁紙試料について、JEM 1455 電機工業会法により平均重合度を測定した。また、JIS C 2111に規定されている方法で引張強さを測定した。なお、各試験片に付着した油はアセトンで洗浄した。

#### (4) 絶縁紙含水率

乾燥直後および油中加熱後の絶縁紙の含水率は、カールフィッシャー電量滴定法で測定した。この測定は、測定中に試料が大気中の水分を吸収するのを防ぐために、乾燥空気を入れたグローブボックス中で行った。

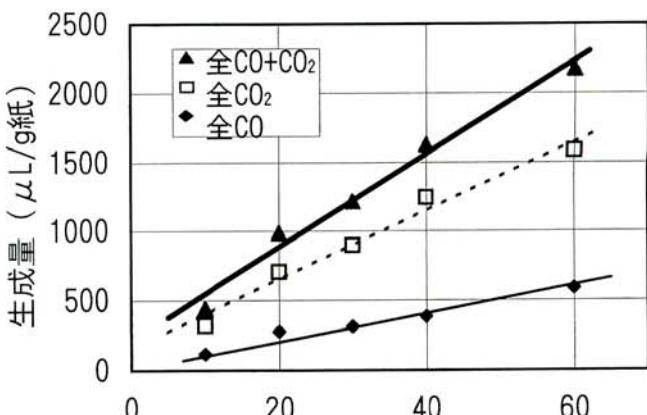
#### (5) 絶縁紙中のフルフラール

大気中に数分間吊るして油を滴下除去した絶縁紙試料を、メタノール中に浸漬し、冷暗所に100時間放置して、紙中のフルフラールを抽出した。このメタノールを水で希釈してから、高速液体クロマトグラフでメタノール中のフルフラール濃度を定量分析した。このメタノール中には、紙に付着した油中のフルフラールも同時に抽出されているので、別に測定した油中フルフラール濃度と紙への油付着量から絶縁紙中フルフラール分析値を補正した。

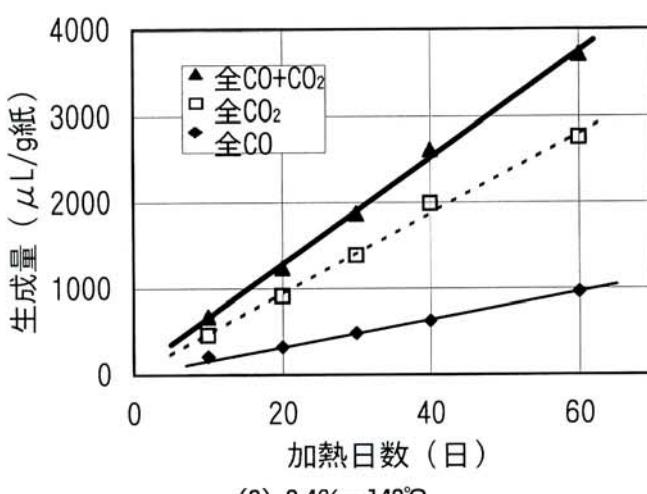
## 3 実験結果

### 3.1 CO, CO<sub>2</sub>生成量の経時変化

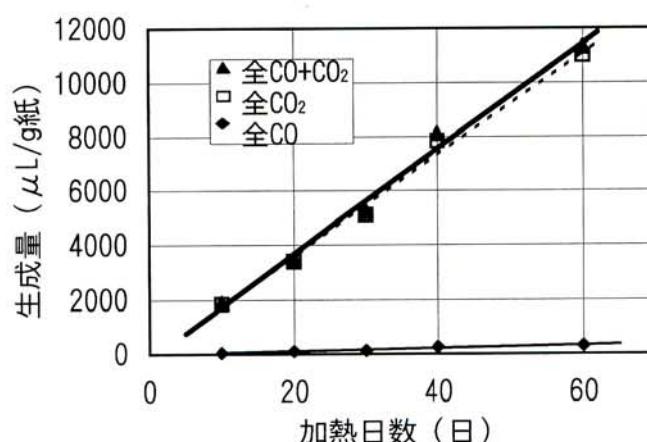
図2に含水率が0.1%, 0.4%および1.9%の絶縁紙を140°C絶縁油中で60日間加熱したときの、CO, CO<sub>2</sub>生成量の経時変化を示す。また、図中には絶縁紙の劣化指標として使用されることが多いCO+CO<sub>2</sub><sup>(1), (2), (6)</sup>の経時変化も同時に示す。COとCO<sub>2</sub>の生成量は、それぞれの油中濃度と氣



(1) 0.1% - 140°C



(2) 0.4% - 140°C



(3) 1.9% - 140°C

**図2 140°Cにおける加熱日数とCO, CO<sub>2</sub>, CO+CO<sub>2</sub>の生成量との関係**Fig. 2. Relation between aging period and the amount of CO, CO<sub>2</sub>, CO+CO<sub>2</sub> evolved in insulating oil at 140 °C

中濃度から絶縁紙1g当たりについて求めた。図に示すように、含水率試料全てでCOとCO<sub>2</sub>およびCO+CO<sub>2</sub>は加熱日数に比例して単調増加した。

CO, CO<sub>2</sub>の生成量は含水率の大きいものほど大きくなつた。また、0.1%と0.4%ではCOはCO<sub>2</sub>の約3分の1生成されたが、1.9%では約20分の1であった。その他の試験条件でも全て、COとCO<sub>2</sub>の生成量は加熱日数に比例して単調増加し、COの生成量は常にCO<sub>2</sub>より小さかった。

### 3.2 CO+CO<sub>2</sub>生成速度におよぼす加熱温度と含水率の影響

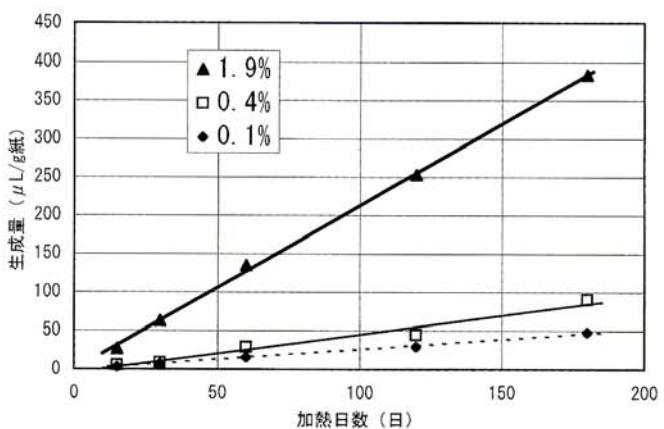
図3に、80°C, 120°C, 160°Cで加熱した試料について、加熱日数とCO+CO<sub>2</sub>生成量の関係におよぼす絶縁紙含水率の影響を示す。CO+CO<sub>2</sub>生成量は加熱日数に比例して単調増加したが、その生成量には加熱温度が最も大きい影響をおよぼしており、160°Cの生成量は80°Cと比較して2桁大きい値となった。

含水率もCO+CO<sub>2</sub>生成量に大きい影響をおよぼし、これが大きくなるのにしたがって、全ての加熱温度において生成量は大きくなつた。

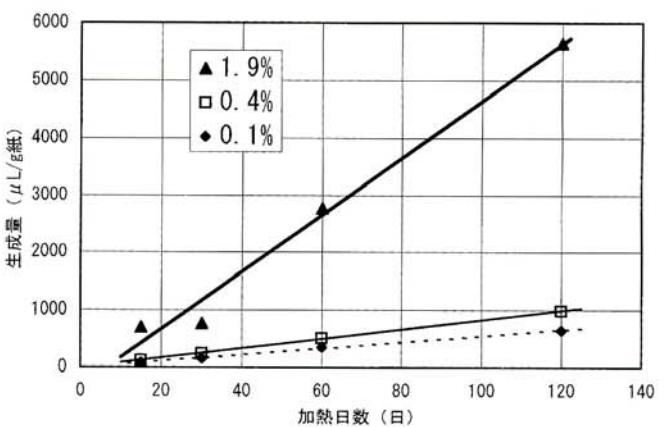
図4は加熱温度とCO, CO<sub>2</sub>, CO+CO<sub>2</sub>の生成速度(μL/g紙・h)との関係を各含水率ごとに示したもので、どの含水率でも加熱温度が高くなるとこれらの生成速度は大きくなつた。図4(3)に示す0.4%の場合の加熱温度とCO+CO<sub>2</sub>生成速度との関係は、宮本ら<sup>⑥</sup>が行った含水率0.5%以下の絶縁紙を65~160°Cの油中で加熱した場合の報告とはほぼ一致する。

図4(1)に示すように、CO生成速度におよぼす含水率の影響は加熱温度により異なる傾向が認められ、1.9%の生成速度は80°Cでは最も大きいが、160°Cでは逆に最も小さかつた。田村ら<sup>⑤</sup>は、N<sub>2</sub>中で含水率が0.2~4.4%の絶縁紙を80~180°Cで加熱した場合、160°Cと、180°Cの高温では、含水率はCOの生成速度に影響を与えないが、140°C以下の低温では含水率が大きいものほどCOの生成速度は小さくなるとしている。この結果は今回の試験結果とは異なる。これは、絶縁紙をN<sub>2</sub>中で加熱する場合は、紙の熱分解と同時に紙に含まれる水分が蒸発して含水率が小さくなるのに対し、油中加熱の場合は水分はそのまま紙中に留まるためではないかと考えられる。すなわち、油中では、紙中含水率が、加熱後でも減少しないため、紙の熱分解速度も減少しないためではないかと考えられる。

一方、CO<sub>2</sub>あるいは、CO+CO<sub>2</sub>の生成速度には含水率は大きい影響をおよぼし、全ての温度で含水率の大きい方が生成速度は大きくなつた。図4(2)(3)に示すように、含水率がCO<sub>2</sub>, CO+CO<sub>2</sub>の生成速度におよぼす影響は、加熱温度が低くなるほど大きくなる傾向が認められるので、絶縁油の温度が80°Cよりも低い実機の変圧器では、含水率の影響はさらに大きくなることが考えられる。水が紙の油中にお



(1) 加熱温度 80°C



(2) 加熱温度 120°C

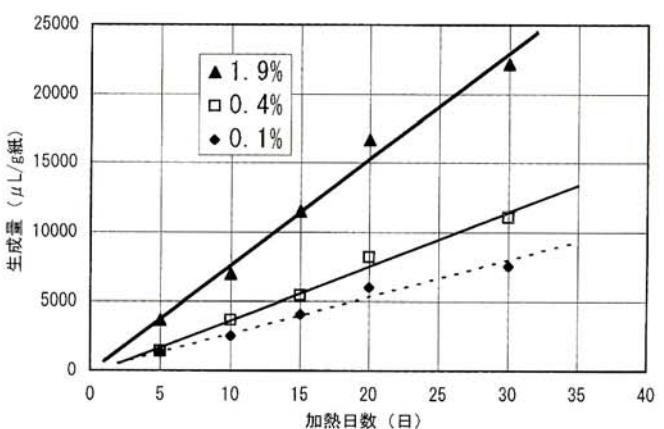
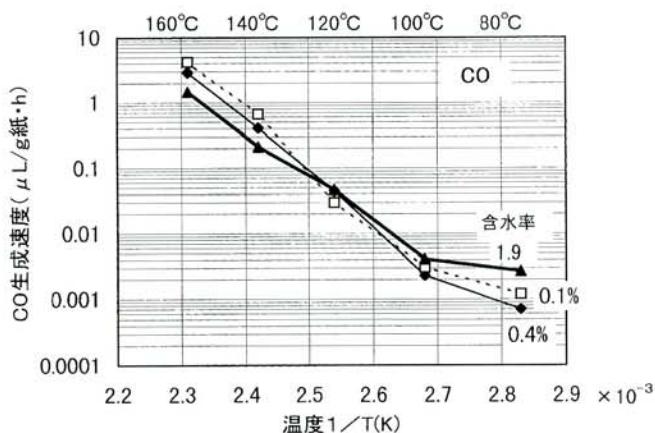
図3 加熱日数とCO+CO<sub>2</sub>生成量との関係におよぼす加熱温度と含水率の影響

Fig. 3. Effect of the aging temperature and the moisture content in insulating paper on the relation between aging period and the amount of CO+CO<sub>2</sub> evolved from the paper



(1) COの生成速度

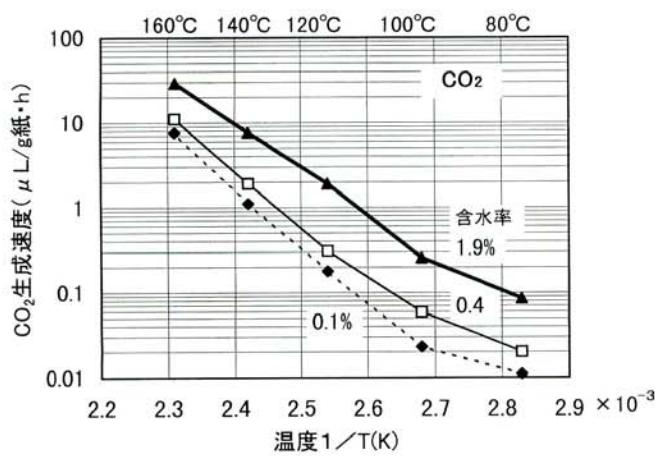
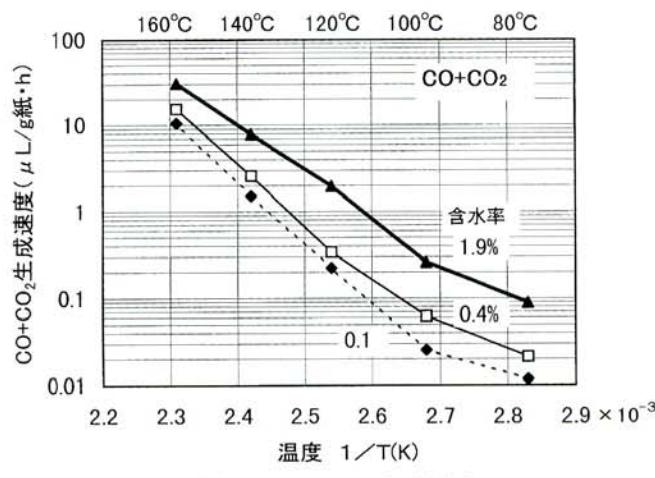
(2) CO<sub>2</sub>の生成速度(3) CO+CO<sub>2</sub>の生成速度図4 加熱温度とCO, CO<sub>2</sub>, CO+CO<sub>2</sub>生成速度との関係におよぼす絶縁紙含水率の影響

Fig. 4. Effect of the moisture content in insulating paper on the relation between aging temperature and the evolution rate of CO, CO<sub>2</sub>, CO+CO<sub>2</sub>

ける熱分解を加速するのは、水が一種の触媒として熱分解に影響を与えるためではないかと考えられる。

### 3.3 CO/CO<sub>2</sub>生成速度比におよぼす加熱温度と含水率の影響

図5に加熱温度とCO/CO<sub>2</sub>生成速度比との関係を各含水率ごとに示す。このCO/CO<sub>2</sub>比は実機の変圧器の絶縁油では一般的には0.1以下になっている。図に示すように、含水率が1.9%ではCO/CO<sub>2</sub>比は全ての加熱温度で0.05以下である。含水率が0.1%および0.4%では、加熱温度の上昇に伴ってCO/CO<sub>2</sub>比は大きくなり、140°C, 160°Cでは0.35以上に増大した。このCO/CO<sub>2</sub>比が含水率の小さいほど、加熱温度の高いほど大きくなる傾向は、田村ら<sup>5)</sup>が行ったN<sub>2</sub>中加熱の結果と同様である。しかし、このN<sub>2</sub>中加熱実験では加熱温度が80°Cの低い場合にも、含水率が小さいとCO/CO<sub>2</sub>比は0.4の大きい値になっていたが、今回の油中加熱実験では、加熱温度が80°Cの低い場合には全ての含水率でCO/CO<sub>2</sub>比は0.1以下の小さい値であった。

I E C<sup>⑦</sup>は油中絶縁紙の過熱診断の指標として、CO/CO<sub>2</sub>比0.33以上を推奨している。図5に示すように、含水率が0.4%以下の場合はCO/CO<sub>2</sub>比が0.33以上になる温度は140°C以上である。この結果は、絶縁紙含水率が通常の変圧器を対象とするI E Cの過熱診断指標と一致すると考えられる。

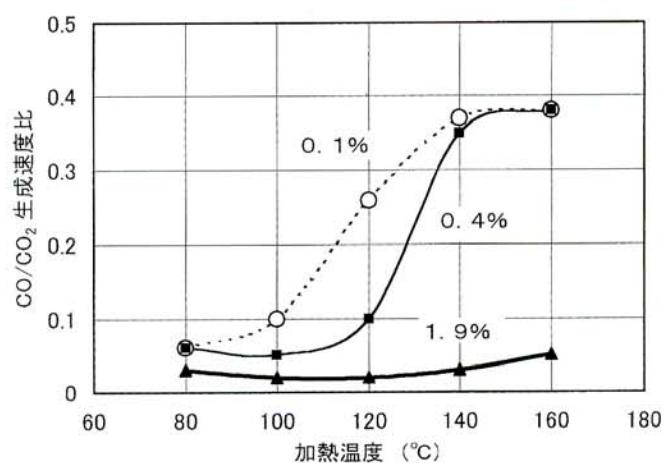
図5 CO/CO<sub>2</sub>生成速度比におよぼす加熱温度と絶縁紙含水率の影響

Fig. 5. Effect of the moisture content and aging temperature of insulating paper on CO/CO<sub>2</sub> ratio of their evolution rate

### 3.4 N<sub>2</sub>中と絶縁油中とのCO, CO<sub>2</sub>の濃度比

一般に、気体と液体とが接触していると気体の一部が液体に溶解し、閉じた空間の中では液体に溶解する気体の量は一定値になる。本試験において、絶縁紙の熱分解により生成したCO, CO<sub>2</sub>は、一度絶縁油中に溶解するが、油中とN<sub>2</sub>中の量比が一定値になるまで、その一部がN<sub>2</sub>中に移動する。表3に今回の試験条件におけるCOとCO<sub>2</sub>のN<sub>2</sub>中と油中の濃度比(N<sub>2</sub>中濃度(μL/L)／油中濃度(μL/L))を示す。この表から、気相と液相の容積比が4:10になる本試験条件では、気中には油中に比べて、COは3~12倍、CO<sub>2</sub>は0.4~1.3倍の量が存在することがわかる。

COの気中／油中濃度比がCO<sub>2</sub>よりも大きくなる理由は、COの油中溶解度がCO<sub>2</sub>よりも小さいためである。たとえば、20°Cでの油中溶解度はCOの12 vol%に対しCO<sub>2</sub>は108 vol%<sup>⑧</sup>である。表3に示すように、気中と油中の濃度比におよぼす加熱温度および含水率の影響には一定の傾向は認められない。

以上の結果は、絶縁油が大気と接触する開放型の変圧器では、油中に生成したCOやCO<sub>2</sub>のうちの多くが大気中に拡散することを示す。また、密閉型変圧器であっても気相部の容積によっては、多量のCO, CO<sub>2</sub>が気相部に移動することを示す。したがって、絶縁油中のCO, CO<sub>2</sub>分析値により変圧器の異常診断や寿命予測を行う場合には、その変圧器が開放型か密閉型かを考慮する必要がある。

### 3.5 油中フルフラール濃度におよぼす加熱条件と含水率の影響

絶縁紙を油中で加熱すると、紙が分解してCO, CO<sub>2</sub>などとともに、フルフラール、アセチルフラン、メチルフルフラールなどのフラン化合物が生成される。本報告では、これらのうちフルフラールを定量した。

表3 COおよびCO<sub>2</sub>のN<sub>2</sub>中／油中濃度比  
Table 3. The amount ratio of CO and CO<sub>2</sub> in N<sub>2</sub>/in oil

加熱温度(°C)		80	100	120	140	160
含有率(%)	CO	14	12	6.5	14	13
	CO <sub>2</sub>	1.6	2.0	2.1	1.2	1.1
0.1	CO	6.4	11	7.3	12	15
	CO <sub>2</sub>	1.3	1.6	2.3	15	1.1
0.4	CO	5.7	12	7.8	20	2.9
	CO <sub>2</sub>	0.9	2.0	1.5	1.1	3.2
1.9	CO					
	CO <sub>2</sub>					

図6は含水率が1.9%の絶縁紙を、100~160°Cに加熱した場合の、加熱日数と油中フルフラール濃度との関係を示したものである。図に示すように、加熱温度が低くなるほど油中フルフラール濃度の増加速度は小さくなつた。また、CO, CO<sub>2</sub>と異なり、油中フルフラール濃度は加熱日数とともに単調増加しなかつた。

図7は加熱温度が160°Cの場合の含水率が油中フルフラール濃度におよぼす影響を示すが、含水率の大きいものはほど油中フルフラール濃度は大きくなつた。同様の傾向はその他の加熱温度でも認められた。

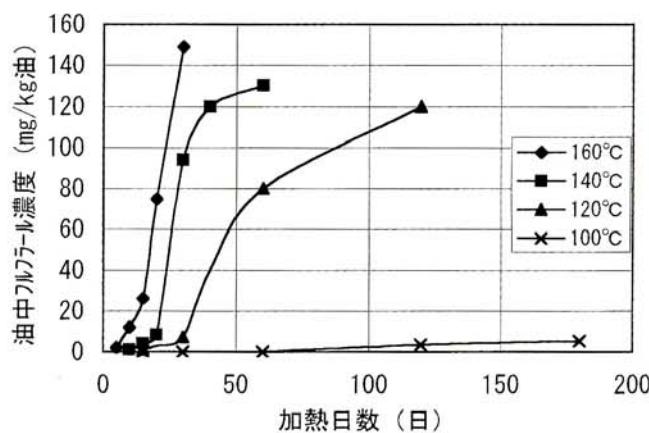


図6 油中フルフラール濃度におよぼす加熱温度の影響(含水率1.9%)  
Fig. 6. Effect of the aging temperature and aging period on the amount of furfural in insulating oil (moisture content 1.9%)

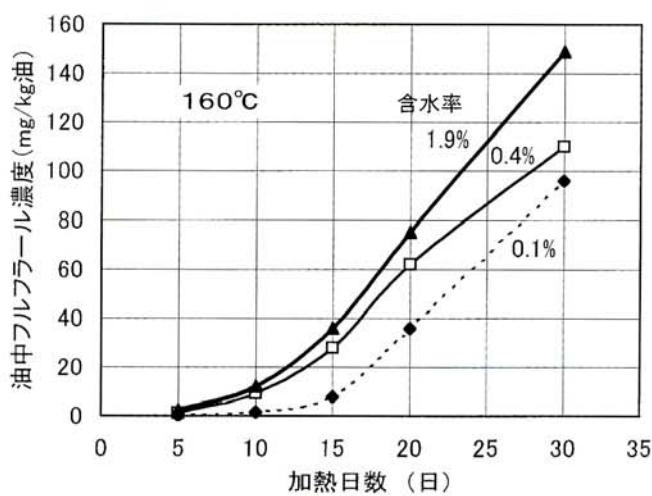


図7 加熱日数と油中フルフラール濃度の関係におよぼす含水率の影響(加熱温度160°C)  
Fig. 7. Effect of the moisture content in insulating paper on the relation between aging period and the amount of furfural in oil (160°C)

以上の加熱温度と含水率が油中フルフラール濃度におよぼす影響は、図2、図3に示すCO、CO<sub>2</sub>生成量におよぼす影響と同様の傾向であるので、フルフラールはCO、CO<sub>2</sub>と同時に、紙の熱分解により生じていると考えられる。ただし、CO、CO<sub>2</sub>生成量は加熱日数に比例して単調増加するのに対し、油中フルフラール濃度は図6、図7に示すように単調には増加しない。これは紙が熱分解して生成するフルフラールは、加熱日数が少い間の分解初期には次節で述べるように大部分が紙に吸着し<sup>10</sup>、生成量の一部分だけしか油中に溶解しないためと考えられる。

### 3.6 絶縁紙へのフルフラール吸着率

表2に示す条件で加熱した各絶縁紙は、最長の加熱日数経過後に加熱容器から取り出し、その引張強さ、重合度とともに紙に吸着されているフルフラール量を測定した。この紙中フルフラール量と油中フルフラール量の合計をフルフラール生成量(μg/g紙)とした。

図8に絶縁紙へのフルフラール吸着率(紙中/(油中+紙中))と重合度との関係を示すが、張替らの報告<sup>10</sup>と同様に、両者には良い相関のあることが認められる。この図は、加熱日数が少く重合度が大きい分解初期には、生成したフルフラールの大部分が劣化の少ない紙に吸着して油中にはほとんど溶解しないが、紙の分解劣化が進んで重合度が小さくなるにつれて吸着率が小さくなり、油中のフルフラール溶解量が大きくなることを示している。この紙の劣化の進行にともなって吸着率が小さくなる理由は、劣化によりフルフラール生成量が大きくなるのにともなって紙への吸着量が飽和するのと同時に、劣化に伴って紙が変質して吸着力が弱くなるためではないかと考えられる。

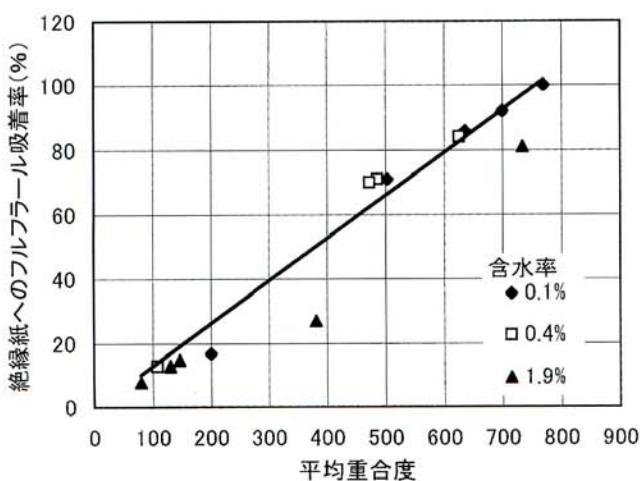


図8 平均重合度とフルフラール吸着率の関係  
Fig. 8. Relation between the degree of polymerization of insulating paper and absorption rate of furfural to the paper

図8の結果は、油中フルフラール分析値により絶縁紙の劣化度を推定しようとする場合は、フルフラールの活性アルミナへの吸着<sup>10</sup>と同様に絶縁紙への吸着も考慮しなければならないことを示すと考えられる。

### 3.7 フルフラール生成速度とCO、CO<sub>2</sub>生成速度の関係

図9にCO+CO<sub>2</sub>生成速度とフルフラール生成速度との関係を示すが、両者には良い相関がある。ただし、図に示すように、CO+CO<sub>2</sub>生成速度(X)とフルフラール生成速度(Y)との間の関係を近似式  $Y = A X^B$  とした場合、その傾きの係数Bは1.0よりも大きい値である。これは、フルフラールとCO+CO<sub>2</sub>との生成速度の間には一定の比例関係が成り立たないことを示すが、その理由は不明である。

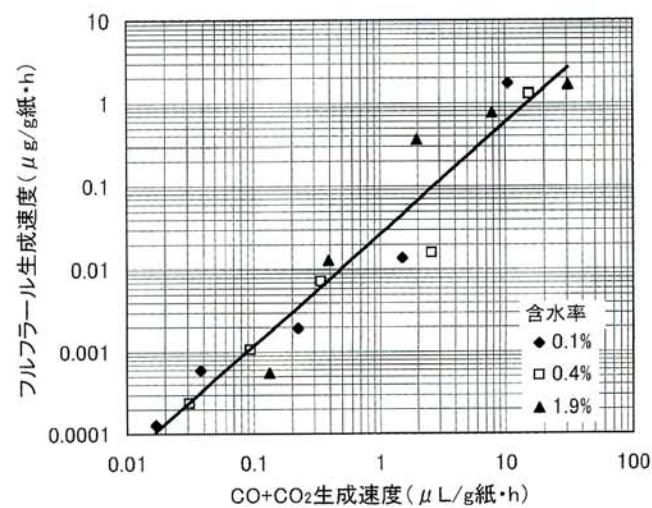


図9 CO+CO<sub>2</sub>生成速度とフルフラール生成速度の関係

Fig. 9. Relation between the evolution rate of CO+CO<sub>2</sub> and the evolution rate of furfural in oil

### 3.8 重合度とCO+CO<sub>2</sub>、フルフラールの生成量および引張強さとの関係

図10、図11に重合度とCO+CO<sub>2</sub>生成量およびフルフラール生成量との関係を示す。これらの図に示すように、重合度はCO+CO<sub>2</sub>およびフルフラールの生成量と良い相関を示す。また、図12に示すように、重合度と引張強さとの間にも良い相関がある。

以上の絶縁紙の劣化度を表す重合度と引張強さが、CO+CO<sub>2</sub>生成量およびフルフラール生成量と、相互に良い相関関係を持つことは多くの報告<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>と一致する。これらの結果が、絶縁油中のCO、CO<sub>2</sub>あるいはフルフラールを定量分析して、絶縁紙の劣化度を重合度や引張強さを推定しようとする根拠となっている。

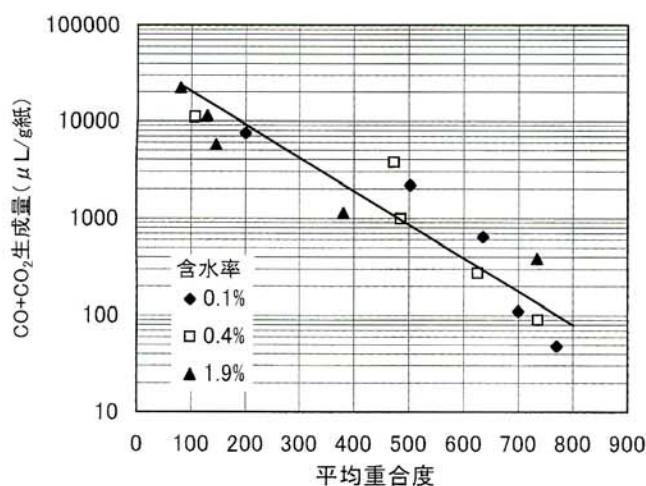


図10 平均重合度とCO+CO<sub>2</sub>生成量の関係  
Fig. 10. Relation between the degree of polymerization of insulating paper and the amount of CO+CO<sub>2</sub> evolved from the paper

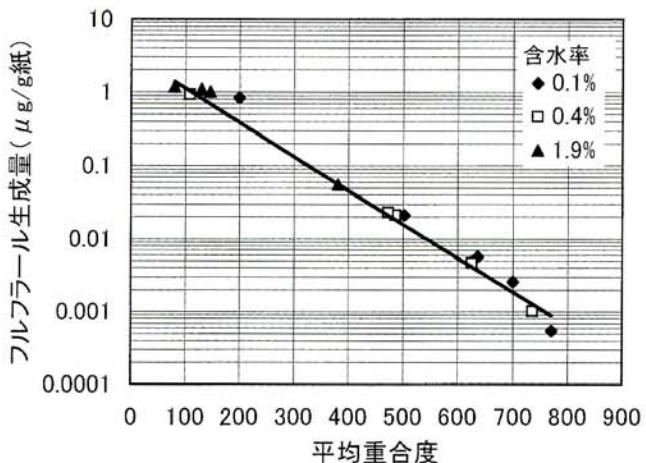


図11 平均重合度とフルフラール生成量の関係  
Fig. 11. Relation between the degree of polymerization of insulating paper and the amount of furfural evolved from the paper

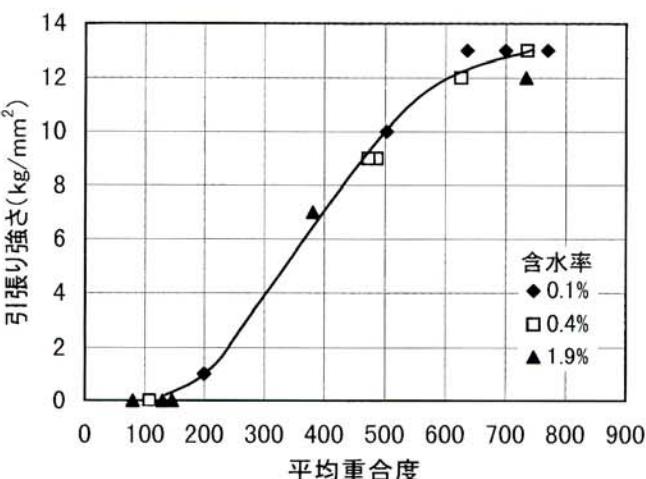


図12 平均重合度と引張強さの関係  
Fig. 12. Relation between the degree of polymerization and tensile strength of insulating paper

### 3.9 油中加熱後の絶縁紙含水率

セルロースを加熱分解するとCO, CO<sub>2</sub>, フルフラールなど以外に水が生成する<sup>④</sup>。したがって、本試験において絶縁紙の含水率は、油中加熱後に初期の値よりも増加することが予想される。表4に油中加熱後の含水率の調査結果を示す。表に示すように、初期含水率によらず、油中加熱後に含水率が大きく増加する傾向が認められた。初期含水率が0.1%と0.4%では、加熱温度が高くなるほど加熱後の含水率が大きくなる傾向が認められた。しかし、各試料の含水率増加量、すなわち水生成量とCO, CO<sub>2</sub>, フルフラールの生成量との間には相関は認められなかった。

絶縁紙と絶縁油との間における水の平衡<sup>⑤</sup>を考えると、水は大部分が紙に吸着して油への溶解量は微量であるので、紙の分解により生じた水は大部分が紙に吸着されていると考えられる。しかし、含水率増加量とCO, CO<sub>2</sub>, フルフラールの生成量との間に相関が認められないことは、CO, CO<sub>2</sub>やフルフラールと異なり、水は紙の分解量に比例して単調増加しないことを示すのではないかと考えられる。

表4に示すように紙の含水率は、油中加熱分解後に初期含水率よりも増加する。一方、図3、図4に示すように、含水率はCO, CO<sub>2</sub>の生成速度に大きい影響をおよぼす。したがって、紙の分解にともなって、CO, CO<sub>2</sub>の生成速度を増大させる水も同時に増加するのであれば、CO, CO<sub>2</sub>の生成速度はしだいに加速されるはずである。しかるに図2、図3に示すように、CO, CO<sub>2</sub>の生成速度は本試験条件の範囲ではほぼ一定であり、加熱日数の増加にともなって生成速度が増加する傾向は認められない。この紙の分解にともなって含水率が増加すると考えられるにもかかわらず、CO, CO<sub>2</sub>の生成速度が変わらない理由については、今後さらに検討する必要がある。

表4 油中加熱にともなう絶縁紙含水率の増加

Table 4. Increase of the moisture content of insulating paper after aging

初期含水率	80°C -180日	100°C -180日	120°C -120日
0.1%	0.5%	1.4%	4.9%
0.4%	1.1%	2.1%	4.5%
1.9%	3.5%	2.1%	3.5%

## 4 あとがき

含水率を0.1%, 0.4%, 1.9%に調整した絶縁紙を、80~160°Cの絶縁油中で最長180日間まで加熱したところ、CO, CO<sub>2</sub>は加熱日数に比例して単調増加した。CO<sub>2</sub>の生成速度には、加熱温度とともに含水率が大きい影響をおよぼし、0.1%に比べて1.9%では5~10倍大きくなかった。

試験容器内のN<sub>2</sub>中と絶縁油中のCO, CO<sub>2</sub>濃度の比率(気中/油中)はCOは6~29, CO<sub>2</sub>は0.9~3.2であり、COは大部分が油中からN<sub>2</sub>気中に移動した。

CO/CO<sub>2</sub>の生成量比は、含水率が1.9%では全ての加熱温度で0.05以下であったが、0.1%では加熱温度が140°C以上で0.37に大きくなかった。

フルフラール生成量(油中+紙中)は、CO, CO<sub>2</sub>と同様に加熱温度、および含水率とともに増加した。

重合度はCO+CO<sub>2</sub>生成量、フルフラール生成量、引張強さと良い相関があった。

フルフラールの絶縁紙への吸着率は、その重合度と良い相関があり、重合度が800の場合にはほぼ100%のフルフラールが絶縁紙に吸着するのに対し、重合度が100の場合には10%が吸着し残りの90%は油中に溶解した。

絶縁紙の含水率は油中加熱後に増加することが認められたが、この増加した含水率がCO, CO<sub>2</sub>, フルフラールの生成速度におよぼす影響は認められなかった。

## 参考文献

- (1) 田村, 姉帶, 石井, 河村:「経時生成ガスによる絶縁紙の劣化診断」電学論A, vol. 101, P30(1981)
- (2) 月岡, 後藤, 森, 鈴木:「CO<sub>2</sub>とCOによる油入変圧器の経年劣化度診断の研究」電学論A, vol. 106, P331(1986)
- (3) 難波, 宮本:「フルフラールによる変圧器寿命診断の基礎試験」電気学会電力・エネルギー部門全国大会, P295(1990)
- (4) 斎藤, 武 共編:「絶縁紙の熱分解性」電気絶縁紙P113(1969)コロナ社
- (5) 田村, 姉帶, 石井, 牧野:「絶縁紙の劣化生成ガスによる過熱診断」電学論A, vol. 100, P409(1980)
- (6) 宮本, 姉帶, 板倉, 牧野:「絶縁紙からの(CO+CO<sub>2</sub>)低温発生速度」電気学会全国大会, P438(1988)
- (7) I E C 1 0 A (central office) P37
- (8) 石油学会編:『電気絶縁油ハンドブック』P73(1989)講談社
- (9) 松永:「絶縁油中の劣化生成物の分析」石油学会絶縁油分科会研究発表会, P41(1993)
- (10) 宮本, 牧野, 難波, 原:「フルフラールと炭酸ガスによる変圧器の寿命診断」電気学会静止器研究会SA-

90-58, (1980)

- (11) 張替, 後藤, 太田, 月岡:「フルフラールによる油入変圧器の経年劣化度診断の実用化検討」電気学会全国大会8-57(1992)
- (12) 栗田, 水野, 上田, 太田, 石井, 月岡:「アセトンによる吸着剤入り開放型変圧器の経年劣化度診断」電学論B, vol. 117 P706(1997)
- (13) (8)と同じ, P240(1989)講談社

## 筆者紹介



宮島 極

機器開発事業部技術研究センタ  
材料研究グループ  
電気機器用材料の研究開発に従事



林 幸雄

機器開発事業部技術研究センタ  
材料研究グループ長  
電気機器用材料の研究開発に従事



佐藤 一昭

機器開発事業部  
技術研究センタ所長  
知的財産グループおよび材料研究  
グループを統括