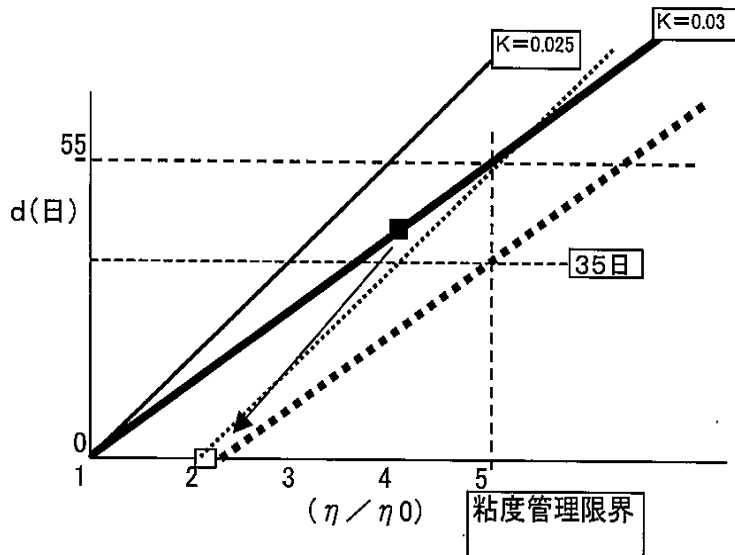


この意味は 反応速度係数が 0.03以上になる事は 粘度管理として望ましくないという事です。従って Kが 0.03に 近づいたら 新たな新鮮な 含浸樹脂を添加して反応を遅延させる 必要になります。

(2) 樹脂粘度の管理の実際

$$K = (1/t) * \ln(\eta / \eta_0)$$

この式から 粘度と時間の関係をグラフ化すると以下になる。



① 粘度と経過時間 の関係 把握

上図のイメージになる。Kが小さくなれば粘度管理限界に至る時間は長くなるので それだけ 安心できる事がわかる。

たとえば 上図で K=0.025 の場合は 粘度管理限界に至る時間は55日を越えている。

② 初めて 新たな含浸樹脂を使用して 何日か後に 粘度測定したら $\eta / \eta_0 = 4$ であった。K=0.03の状態です。そろそろ 粘度限界に近いので 新たに含浸樹脂を 添加した。すなわち ■ → □ に 移行させた。

③ この要に新たな樹脂を添加した後の樹脂の粘度変化は

K=0.03を 維持した反応であれば 粘度管理限界まで 35日

K=0.025に低下した反応であれば 粘度管理限界まで 55日

と 予想される 事がわかります。

含浸樹脂成分、保管温度もまったく まったく同じで あれば その反応速度係数は 新たな含浸樹脂を添加してもほとんど変わらない可能性もありますが 実際には 作業時に 他の溶出成分・水分・温度条件が変化するので 反応速度 係数を 当初設定の K=0.03以上にするような 要因は 管理して除外しておく事が 重要です。

すなわち 新樹脂添加後の反応速度係数は 当初設定の最大値(今回例ではK=0.03) で推移するように管理すべきでありましょう。

材料25 液状樹脂の注入含浸機構について

複雑な構成部材の組み合わせからなる装置は、液状樹脂を空隙無く含浸することが必要とされる。この含浸についての基礎的な含浸理論を理解していないと無駄な心配をしたり、無駄な多大な費用での確認試験をしたりで難渋します。よりよきものの追求に実用的な実践含浸法について示しました。

液状樹脂の狭隘部への含浸挙動について

電気製品などでは絶縁という観点から電圧がかかる部位全体を液状の絶縁樹脂を注入して硬化させて成型する。

特に絶縁体を積層した内部の空隙ポイドをいかに皆無とするかが絶縁性能の確保に大切である。この為には、液状樹脂の含浸に関しての要因が何であるかを知って、樹脂の挙動を把握しておくことが必要である。この例を以下に示しましょう。

1. 含浸モデル

図1. のように簡略モデルとして考える半径R1と半径R2の隙間に樹脂を加圧注入含浸させる。

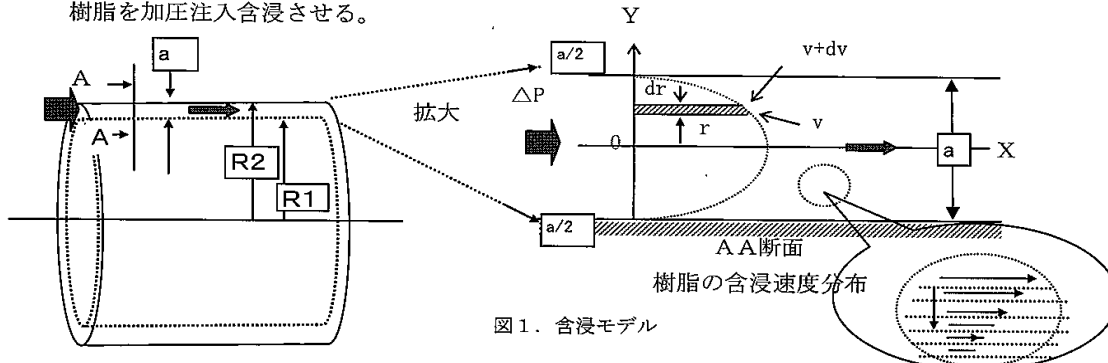


図1. 含浸モデル

実際の樹脂の含浸状況は絶縁積層に対して沿層方向(x方向)だけでなく、貫層方向(r方向)からもあるが、絶縁層内はポーラスで右上図のように沿層定常層流とした。含浸時間等との関係は実測値を把握して係数換算するなどの工夫をすればよい。

2. 含浸要因解析

上記をモデルとして樹脂の含浸状況は圧力差(沿層方向の両端の)と樹脂の粘性力と釣り合う。

$a/2 \geq y \geq 0$ において

$$\Delta P \cdot dy = -dF = -d[\eta \cdot x \cdot (dv/dy)]$$

圧力差 粘性力

$$\text{従って、} \Delta P \cdot y = -\eta \cdot x \cdot (dv/dy) + C_1 \dots\dots\dots ①$$

ΔP : 圧力差

x : 沿層方向距離

y : 絶縁厚さ方向厚さ

v : 樹脂の流速

η : 樹脂の粘性率

①において $y=0$ で $dv/dy=0$ よって $C_1=0$ となるので

①式は $\Delta P \cdot y \cdot dy = -\eta \cdot x \cdot dv$ となる。これを解くと

$$\Delta P \cdot y^2/2 = -\eta \cdot x \cdot v + C_2$$

ここで $y=a/2$ で $v=0$ よって $C_2 = \Delta P \cdot a^2/8$ となるので

$$\Delta P \cdot y^2/2 = -\eta \cdot x \cdot v + \Delta P \cdot a^2/8$$

ここで $v = dx/dt$ を代入して

$$(\Delta P/2)(y^2 - a^2/4) = -\eta \cdot x \cdot dx/dt \text{ これを解いて}$$

$$(\Delta P/2)(y^2 - a^2/4) t = -\eta \cdot x^2/2 + C_3$$

ここで $t=0$ で $x=0$ より $C_3=0$ よって

$$t = \frac{[-\eta \cdot x^2]}{[\Delta P (y^2 - a^2/4)]} \dots\dots\dots ②$$

②において $y=0$ で x は最大となる。この時が含浸最短到達時間 (t_0)で

$$t_0 = (4\eta \cdot x^2_{max}) / (\Delta P \cdot a^2) \dots\dots\dots ③$$

この式が樹脂含浸最短到達時間の一般式である。

又、 $y=a/4$ において 平均的樹脂含浸到達時間 (t_{av})と定義すると

$$t_{av} = (5.3\eta \cdot x^2) / (\Delta P \cdot a^2)$$

上式は簡易法なので実際に絶縁層全体が樹脂含浸される時間はこれよりも大きい。

以上から次のことがわかる。

電機機器の積層絶縁層は有機フィルム、ガラス等の薄層積層である事が多い事などから

樹脂含浸必要時間はコイル長の2乗と樹脂粘度に比例し、絶縁厚さの2乗と

圧力差に反比例する。従って、樹脂含浸必要時間の短縮化には例えば

1) 絶縁層内部をフィルムなどの分割層流化する。(見かけ上 a を小さくすること) 絶縁は極力避けて樹脂含浸しやすいガラステープ等を絶縁中間層に設けて貫層含浸性を増大させること。(見かけ上、 a を大きくすること)

2) 加温含浸でかつ、加圧力を上げる設備構造とすることである。

実際の生産設計上、樹脂粘度 η 、コイル長 x は大きく改善出来ないので含浸圧力 ΔP 、絶縁厚さ a を工夫する。

こうして物理現象をまず理論的に解明してその主要因を把握して絶縁設計、設備、生産設計に反映することが大切である。

以下 適用具体例を示す。

(凡例1) 絶縁積層厚さ フィルム $0.13 * 半掛け5回 * 2 = 1.3mm = 0.13cm$

電機絶縁機器長さ $L = x \text{ (max)} = 200cm$

樹脂粘度 $\eta = 5poise = 5 * 10^{-3} kg/cm \cdot s$

加圧圧力 $\Delta P = 5kg/cm^2$ とすると

樹脂含浸最短到達時間 $t_0 = 4 * 5 * 10^{-3} * 200^2 / 5 * (0.13)^2$

$= 9467sec = 2.6h$

(凡例2) 絶縁積層厚さ フィルム $0.13 * 半掛け4回 * 2 = 0.13 * 4 * 2 = 1.04mm = 0.104cm$

と絶縁厚さを半掛け1回分だけ(厚さを $1/5 = 20\%$) 小さくして、他の条件は(凡例1)と同じとすると

樹脂含浸最短到達時間は $t_0 = 4.1h$ と(凡例1)より1.6倍も長くなる。

之は一見するとイメージが異なる?。絶縁層を薄くすると含浸時間がより長く必要。

このようなときには一層 Y方向(貫層方向)に含浸しやすい絶縁構造処置が含浸時間縮小に有効である。

ただし、上記は絶縁厚さがある程度までで、絶縁厚さが大きくなると貫層方向からの含浸も大きく影響するので含浸長さ方向の中位部かつ絶縁厚さの中間部で閉止ボイドが残留して未含浸部が発生することがあるので実機機器での検証確認の注意が必要である

3. 樹脂含浸度確認

樹脂含浸度は、絶縁層中の空気が樹脂に置換えること、即ち、静電容量(誘電率)の変化で捕らえればよい。

樹脂含浸前の絶縁層の静電容量は $C_0 = K\epsilon_0 S/d$

樹脂含浸後の絶縁層の静電容量は $C = K\epsilon S/d$ で示される。

C_0, C : 樹脂含浸前後の絶縁層の静電容量

K : 係数

ϵ_0 : 空気の比誘電率 (1.0)

ϵ : 樹脂の比誘電率 (3.0~)

d : 含浸絶縁厚さ(積層厚さ)

従って、理論的には $C/C_0 = \epsilon/\epsilon_0 = 3.0$ を確認して含浸完了することが必要である。

以上より

樹脂含浸度は樹脂含浸前後の絶縁層の静電容量を傾向比較してその比(C/C_0)が

3以上あれば(樹脂含浸前の絶縁層の静電容量基準)良好といえる。実際にはこれは目安であり、この値が飽和に至ること、その絶対値が異常でないことの確認が必要である。絶縁層中の空隙を概ね空隙率などで確認する方法で検証するのが適切であろうこの方法には 空隙自体を直接調べる X線透過解析、空隙存在を拡大して相対評価する方法として 電圧印加によるボイド放電検出法などがある。

材料30 表面張力の算出法(パラコール法?とは)

液体材料の表面張力が知りたい。しかし 実測する事はとても大変難しい。
 おおよその傾向値でもよいので 何とか求めたい。こんな場合に分子構造が明確であれば
 机上計算で概ね 算出できます。これが パラコール法です。さあ 挑戦してみましょう。

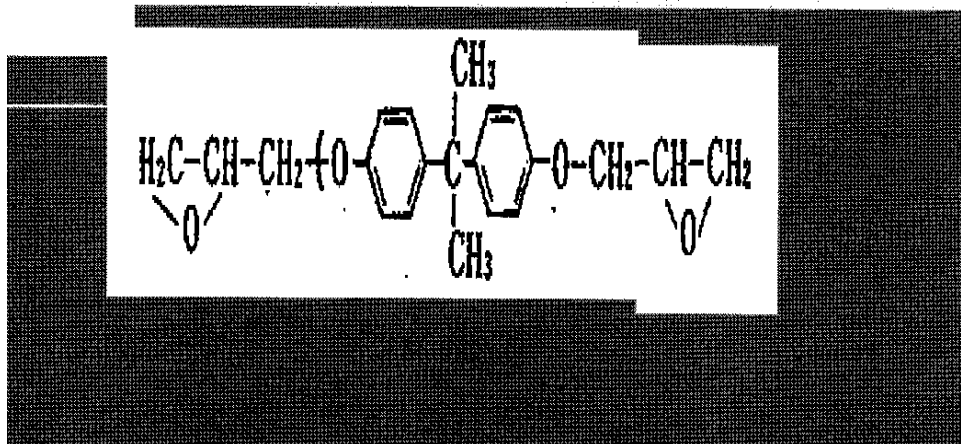
液状樹脂の表面張力の算出法・・・1
 (パラコール法による概算)

液状の樹脂を取り扱う場合に 樹脂と接触する界面での状態の改善に 樹脂の表面張力が大いに関係する。このためにも樹脂の表面張力を 知る事が必要になることが多い。この場合に 表面張力の実測値が無いときに 概ねの概算値を計算で求める方法がある。今回は この方法を示しましょう。それは 樹脂の化学構造と 樹脂の構成元素の固有値であるパラコールから求める方法である。

接着剤や電気部品をモールドするときに使用する エポキシ樹脂というのがあります。この エポキシ樹脂についての事例です。

エポキシ樹脂 (ビスフェノールA系エポキシ樹脂)の分子構造は以下です。

: DER332 ダウケミカル社 製品名



パラコール値は 下記の数値と Sugdenの式から 求めます。

パラコール値 一覧

構成	パラコール値	構成	パラコール値
C	4.82	重結合	46.6
H	17.13	3員環	16.7
O	20	6員環	6.1
N	12.5	エステル中の酸素 O	60

Sugdenの式

$$[P] = (M/d) * (r)^{(1/4)}$$

ここで P: パラコール
M: 分子量 (g/mol)
d : 密度 (g/cm³)
r : 表面張力 (dyn/cm)

以上から

$$[P] = 24 * 17.1(H) + 4 * 20(O) + 21 * 4.8(C) + 2 * 16.7(3員環) + 2 * 6.1(6員環) + 6 * 46.6(2重結合) = 916$$

$$d = 1.2 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$M = 340 \text{ (g/mol)}$$

従って 表面張力 $r = 109.2 \text{ (dyn/cm)}$ となります。

エポキシ樹脂とは実際に使う場合には 上で示した構造のエポキシ樹脂の 主材 に さらに硬化剤を混合配合して これらを加熱反応させて不溶不融の熱硬化性樹脂を 生成させる こととなります。

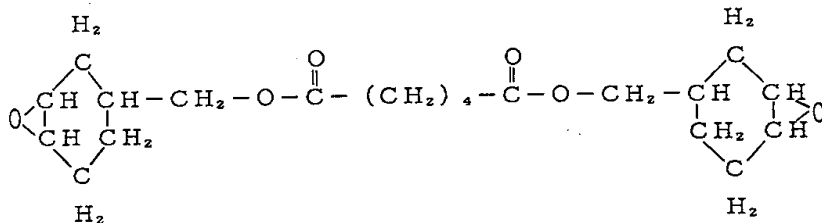
エポキシ樹脂にも いろいろなタイプがありますので詳しくは 後日 述べたいと思います。

材料31 表面張力の温度依存性

液体の表面張力は 温度が上がると大きな変化をするのでないかと気にします。そこで 表面張力の温度依存性を計算してみましょう。これも計算できます。先人がすばらしい記録を残しており、これを活用しましょう。

液状樹脂の表面張力の算出法……その2 (温度依存性の計算法)

液状樹脂の表面張力 r は 加熱されると 低下する。この温度依存性は以下の Ramsay, Shieldの式であらわされる。今度は 注入用の耐熱性エポキシ樹脂として使用されている 下記で示される、脂環式エポキシ樹脂(Unox289)について 調べてみましょう。



$$\text{表面張力 } r = K(A - T) / (M/d)^{(2/3)} \dots\dots\dots$$

ここで A = 2537 (エポキシ樹脂の場合)
 K = 2.1 (定数)
 M = 分子量 (g/mol) = 366 (Unox289:エポキシ樹脂)
 d = 密度 (g/cm³)
 T = 絶対温度 (K)

前報の液状樹脂の表面張力の算出法(その1) では
 エポキシ樹脂 (DER332) の T = 20 で 表面張力 r = 1.09 (dyn/cm)
 であったので 之をベースにして 温度依存性を計算してみよう。

式の 物性で温度依存性があるのは 密度(d)です。従ってまず 密度の温度
 依存性評価が先です。エポキシ樹脂の密度は 一般にこの場合も 20 程度で
 d = 1.2 (g/cm³)です。通常の樹脂類 の体膨張係数は 1.0 * 10⁽⁻³⁾
 程度とすると密度の温度依存性は

$$\text{密度 } d(T) = 1.2 / (1 + 1 * 10^{(-3)}(T - 20)) \dots\dots\dots$$

、式を活用して 20 から 180 までの 密度、表面張力の
 温度依存性を計算してまとめたのを 表に示しました。

表

温度	20	50	80	120	140	180
密度 d g/cm ³	74	73	72	71	70	69
表面張力 dyn/cm	1.2	1.17	1.14	1.09	1.08	1.04

この結果から 樹脂の表面張力の 温度依存性は小さく、 温度が上昇すると
 表面張力も小さくなるが 実用上最高温度の 180 でも 常温の10%低下で
 実測値のない、加熱した場合の表面張力は 常温値を 適用しても
 あまり 差し支えは無いようです。皆さんは 使い分けてください。

なお その1のビスフェノール系エポキシ樹脂に対して その2の脂環式エポキシ樹脂
 は 表面張力が小さく、 含浸する場合には 温度を上昇すると流失
 しやすいことを示している。

材料33 液状樹脂のポットライフ(粘度寿命) 管理

液状樹脂の保管中の粘度の上昇は 樹脂の反応速度如何で決まる。
 この反応速度論じるには 反応次数が大きな意味合いを持つ。反応次数の計算が大切である。
 この算出法を覚えよう。

注入含浸樹脂のポットライフ（粘度寿命）管理技術

— 反応次数の算出・粘度上昇管理に実際—

電気機器は多くの絶縁材料が使用されている。特にこれらの絶縁材料は有機材料が多く、電圧が高いと空隙のある部分で放電が発生してこれらの有機材料（特に薄葉材料）を放電劣化させて 電気機器の寿命を短くする。この防止のために樹脂を空隙部に樹脂を含浸する手法が多く採られる。一般的には含浸しやすい液状で、電氣的に熱的に優れた樹脂としてエポキシ樹脂が注入含浸樹脂として使用されている。

大型の電気機器等への注入含浸樹脂 は含浸タンク内で繰り返し使用される。

繰り返し使用されると絶縁材中の硬化触媒の混入や微量水分などの吸湿などで注入樹脂の一部が反応して粘度の上昇を招く（いわゆるポットライフが短くなる）現象が生じる。このために 注入樹脂の粘度がある程度大きくなった時点で新たな注入樹脂を追加して粘度低下を復旧させて 再度含浸に適した粘度に調整する。

このように 注入樹脂の粘度管理は とても重要な管理技術である。

この粘度の変化には注入樹脂の反応状況が関係するので 反応速度係数の把握が理論的に必要で それに従った 取り扱い規準等が必要である。

そこで、注入含浸樹脂の反応速度係数の算出とその適用法について整理してみました。実践的に 活用される事を望みます。

1. 注入樹脂の 反応速度係数の算出

エポキシ樹脂などの注入樹脂は 硬化剤や硬化触媒の存在で主成分が反応して高分子化が進みます。このときのこの進み方は反応速度係数という、樹脂固有の特性を有します。従って この反応速度係数を把握することがとても重要です。さらに この反応形態は 反応次数という、反応の進み方の早さを示す指数を把握すると その後の粘度管理に有効です。そこでこの反応次数を調べましょう。

1.1 反応次数の実測

含浸樹脂の含浸タンク内保管時の粘度上昇反応の次数を求め、この次数に従う反応速度係数の算出をする。

一般の含浸樹脂（概ね 注入含浸樹脂は2成分系のエポキシ樹脂が主体）で次数は1次又は2次である。これらの反応速度係数は下記で示される。

$$\text{1次反応の場合} \quad K1 = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a-x} \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

$$\text{2次反応の場合} \quad K2 = \frac{1}{a t} \frac{x}{a-x} \quad \dots\dots\dots \text{②}$$

ここで
t : 保管日数
a : 含浸レジン初濃度(未反応量)
x : t時間後の含浸レジン反応量
K1, K2 : 反応速度係数

この反応次数の簡易決定法として 反応量が3/4に至る時間(t3/4)と1/2に至る時間(t1/2)との比を採ればよい。

反応量が3/4に至る時間(t3/4) というのは 実務では 粘度の経日変化で初期値とある時点での粘度変化状況から その期間で 粘度が3/4変化するに至った時間を求めればよいのです。

$$\text{1次反応の場合 } t_{3/4} = \frac{1}{K_1} \ln \frac{a}{a - (3/4)a}$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{K_1} \ln \frac{a}{a - (1/2)a}$$

ですから これらの比は $(t_{3/4}) / (t_{1/2}) = 2$ と 一定値に成ります。
一方で

2次反応の場合 も同様に計算すると $(t_{3/4}) / (t_{1/2}) = 3$ となります。

これらにより この比の値を目安にしてゆけば 注入樹脂が 一次反応系か 2次反応系か 判断できるわけです。これは理論的にいえるので 経験など一切不要です。

従って、反応量表示を反応粘度に置き換えて、実用の注入含浸樹脂の粘度上昇データ (図1) を例として $(t_{3/4}) / (t_{1/2})$ を求めて見ましょう。

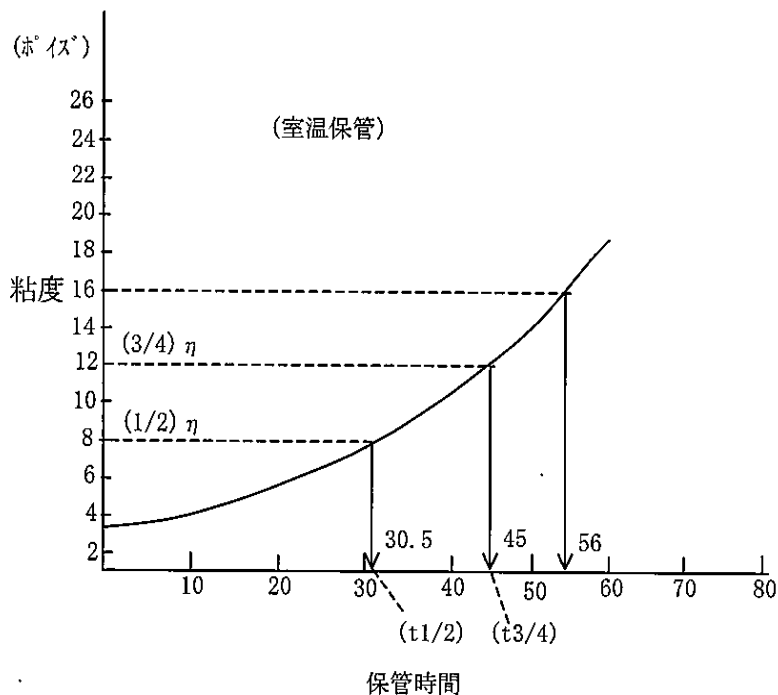


図1. 含浸樹脂の粘度上昇変化

$$t_{3/4}(\eta) / t_{1/2}(\eta) = 45 \text{日} / 30.5 \text{日} = 1.5 \approx 2$$

(ただし図1で初期粘度を $\eta = 3.3$ ポイズ, 寿命粘度を16ポイズとした)

従って、図1の注入含浸樹脂の粘度上昇反応は 1次反応であるといえます。

反応次数が 2次である場合には 粘度の上昇傾向が加速するので より粘度管理に 留意することが必要である。

1. 2 反応速度係数の決定

含浸樹脂の粘度上昇反応は一般に $\eta = \eta_0 \exp(kt)$ で示される。
従って、反応速度係数 K_1 は

$$K_1 = \frac{1}{t} \ln \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{56} \ln \frac{16}{3.3} = 0.028$$

反応速度係数 K_1 の管理限界は $K_1 = 0.028$ 以下である。

K_1 をある保管時点で測定してみて 0.028 周辺になると 反応が加速的に進む恐れがある
と考えて この反応係数よりも小さいときに新たな注入樹脂を加えて粘度低下を図るこ
とが必要である。

2. 含浸レジンの粘度上昇管理の実際

$$K_1 = \frac{1}{t} \ln \frac{\eta}{\eta_0}$$

式を用いて、 K_1 と $\ln(\eta/\eta_0)$ の関係を図示化する。

この実例を図2に示す。

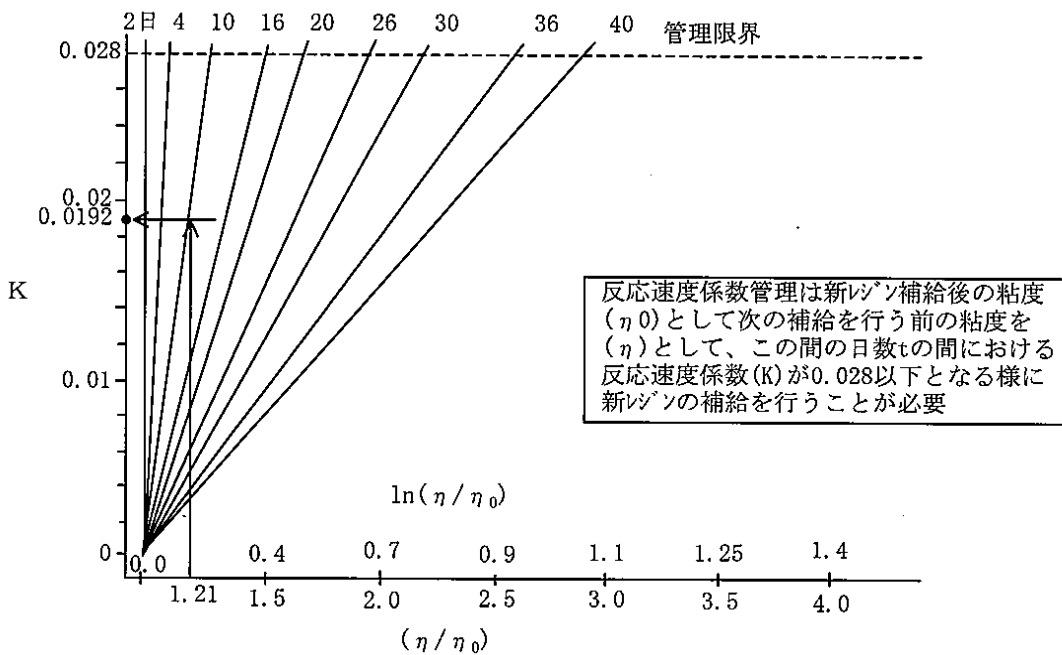


図2 反応係数 K と 粘度変化比 (η/η_0) の関係

実例 1

図2で10日経過後の粘度変化が $\eta/\eta_0 = 4.0/3.3 = 1.21$ とすると
 η/η_0 軸で1.21を求め、これから K_1 を求める。この結果、
 $K_1 = 0.0192$ で $K_1 = 0.028$ 以下でありまだ新たな含浸レジンを追加せずにこのまま
使用してよいと言える。

1.6 吸湿・溶解・漏洩・分解に関する技術

材料24 気体/液体の漏洩(リーク)現象

気体・液体のリークについて

大型電気機器の多くは容量の増大化にともない、通電コイルなどの冷却に液体あるいは気体を活用している。

これらの気体・液体は流動するので容器の封止構造が十分でないと外部に漏れるなどの問題を引き起こす有害物質であればその耐環境リスク性においてより厳しく管理しなければいけない。

ここではこの漏れ(リーク)現象について少し知識をつけましょう。

1.1. 液体の漏水量とリーク穴の大きさの算出法

$$\Delta P = \frac{\sigma}{2g} \cdot V^2$$

ΔP : ゲージ圧 ($9.8 \times 10^2 \text{Mpa}$)
 σ : 水の比重 (9.8MPa)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 V : 流速 (m/s)

ここで、水の場合 $\sigma = 9.8 \text{MPa}$, $g = 9.8/\text{s}^2$ であるから

$$V = 0.14 \sqrt{\Delta P}$$

で表わされる。

ここで、リーク部の穴径を d (m) とすると

$$\text{漏水量は } Q = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V = 0.11 d^2 \sqrt{\Delta P} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

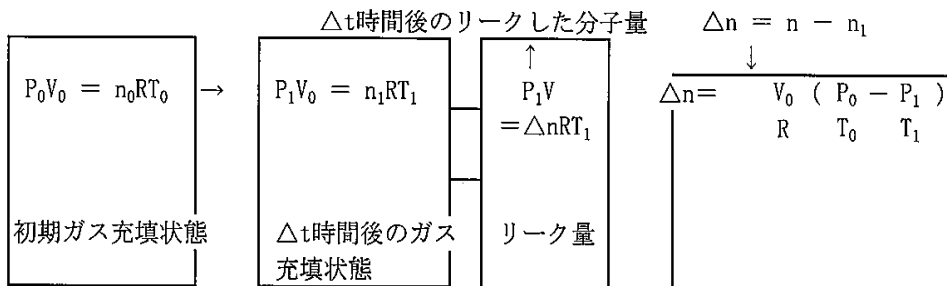
穴径 d は

$$d = 3 \sqrt[0.5]{Q / (\Delta P)^{0.25}} \quad (\text{m})$$

2.2 気体ガスリークの場合

N_2 や He などの気体での試験でのリーク穴の大きさやリーク量の算出はリークの程度の把握が必要である。この場合について示そう。

2.2.1 リーク穴径算出



リーク量の標準状態(20°C, 1気圧での)への換算

$$V = \frac{\Delta n R T}{P} = \frac{\Delta n}{P} \cdot V_0 \cdot \frac{(P_0 - P_1)}{T_0 - T_1}$$

但し、 P_0, P_1 : 封入ガスのゲージ圧+大気圧(mmHg)

ここでゲージ圧は単位(kg/cm^2)をmmHgに換算することが必要であり、この場合は1ゲージ圧に($1000/1033.23 \times 760$ (mmHg)) = 735.6 (mmHg)を掛けて表示する。

即ち 例えば $P_0 = (\text{ゲージ圧}) \times 735.6 + \text{大気圧 (mmHg)}$ となる。又、単位時間あたりのリーク量(L) = $V/\Delta t$ となる。

一方、リーク部の穴径 d は以下に求める。

ゲージ圧 (Pg) は

$$(Pg) = \frac{\gamma P}{2g} \times v^2 \quad (\text{kg/m}^2)$$

ここで γ : 0°C, 1気圧における比重 ($N_2=1.25\text{Kg/m}^3$)

P : 絶対圧=ゲージ圧+大気圧 (Kg/m^2)

g : 重力加速度 (9.8m/s^2)

v : 流速 (m/s)

$$v^2 = \leq \frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{Pg}{P} \quad \text{よって } v=3.96 \frac{Pg}{P} \quad (\text{m/s})$$

但し、音速以上の場合 $v=334$ (m/s)

リーク量は

$$Q = v \cdot s = v \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

以上より

$$d = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{v} = 1.13 \frac{Q}{v} \quad (\text{m})$$

2.2 真空から加圧条件を変えたときの気体リーク量の定圧力での換算算出法

気体分子の小ホールからの流出現象であるので、分子運動論に基づく挙動解析が必要である。この現象は①気体分子重量の拡散挙動、②気体粘性による流出挙動の2つの解析法がある。一般に①よりも②の方法はより厳しい。

気体分子のリークは分子の質量の拡散よりも、原子や分子は振動、並進、回転運動を伴うのでこれらの原子や分子の占有体積空間があるはずで、これに基づく空間体積挙動、すなわち粘性挙動を重視すべきである。この点で②気体粘性による流出挙動解析が適切と推定する。

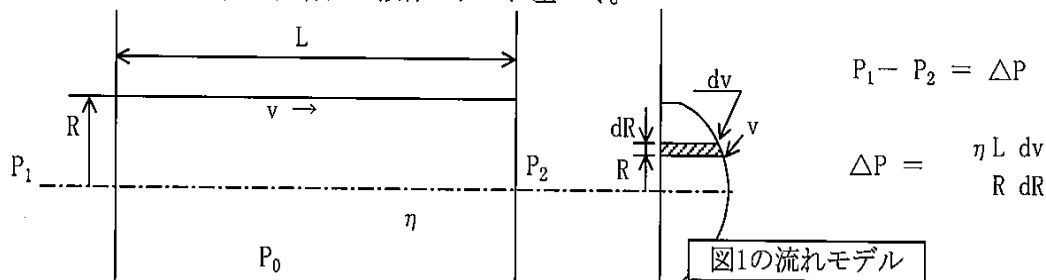
[基礎知識]

(i) 気体の流量速度(Q)は流体の粘性方程式(ポイズの式)から導かれて

$$Q = dV / dt = \pi (P_1^2 - P_2^2) R^4 / 16LP_0\eta \dots (a)$$

$$= K (P_1^2 - P_2^2) \eta \dots (b)$$

ここで上式は下記の円管内の液体モデルに基づく。



P_1 : 左端の圧力(高压側)

, V : 流量体積

P_2 : 右端の圧力(低压側)

, t : 経過時間

R : 円管内の半径

, K : 定数(円管形状一定のため)

L : 円管内の長さ

, P_0 : 測定点での圧力

η : 気体の粘性係数

なお、流体が液体の場合は、液体の体積は圧力に左右されないので粘性方程式(ポイズの式)をそのまま解いて下式となる。

$$Q = dV/dt = \pi (P_1 - P_2) R^4 / 8L \eta \dots (c)$$

上式の気体の場合の(a)式は気体が体積は圧力に左右されるので、圧力測定点での圧力 P_0 における体積(圧力)補正をしたものである。

(ii) 気体の粘性係数 (η) は温度と共に増加する。

$$\eta \propto \eta_0 [(273+c)/(273+t+c)]^{3/2} \cdot [(273+t)/273]^{3/2}, \text{ 但し } t: \text{温度} (^\circ\text{C})$$

この式の意味するところはある温度の気体の粘性係数(η) は 0°C での粘性係数(η_0) が判れば概ね

$$\eta \doteq \eta_0 (T / T_0)^{3/2} \quad : T, T_0 \text{ は絶対温度 (K)}$$

ここで 0°C , 1 気圧での気体の粘性係数 (η_0) は以下の通りである。但し、表 1 は機械工学便覧による

表 1

気体の種類	粘性係数 (η_0) 0°C	粘性係数 (η) 20°C	
H ₂	85 $\times 10^{-6}$ ポイズ	89 $\times 10^{-6}$ ポイズ	(A社値)
N ₂	168 $\times 10^{-6}$ ポイズ	184 $\times 10^{-6}$ ポイズ	
O ₂	192 $\times 10^{-6}$ ポイズ	212 $\times 10^{-6}$ ポイズ	
空気	171 $\times 10^{-6}$ ポイズ	181 $\times 10^{-6}$ ポイズ	
He	189 $\times 10^{-6}$ ポイズ	195 $\times 10^{-6}$ ポイズ	

以上をもとに以下の真空減衰試験データを H₂ 加圧試験でのリーク量換算するにはリーク部(円管形状)からの一定時間後で、それぞれの試験条件での圧力下での気体流量速度の比を採れば異なる気体で、異なる圧力での流量の比となる。

これを流量換算係数(Kv)と定義すると(b)式を用いて(d)式となる。

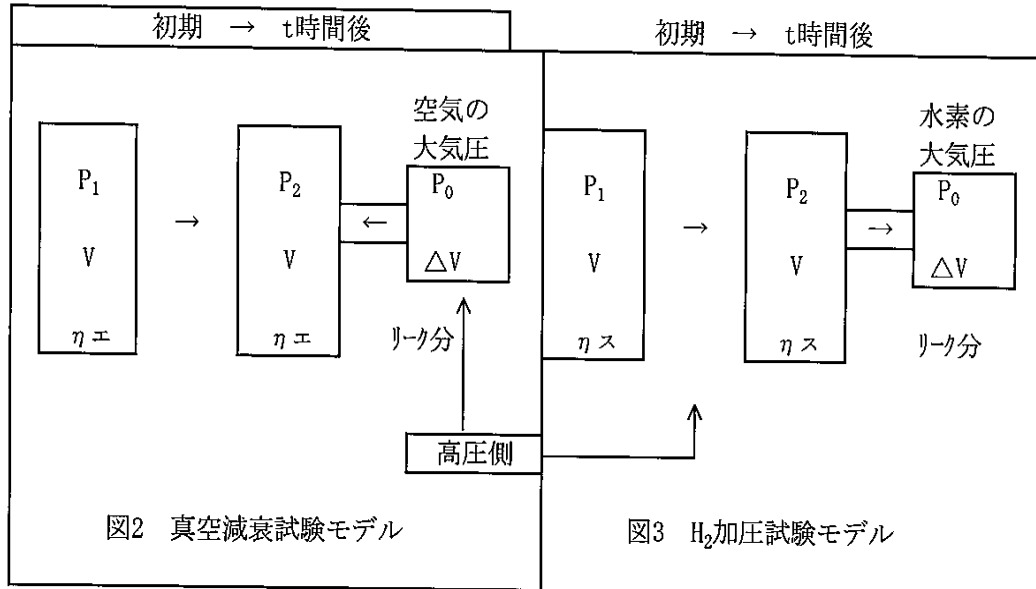
$$\begin{aligned} Kv = Q_v(H) / Q_v(A) &= [(P_1^2 - P_2^2)_H / \eta_H] / [(P_1^2 - P_2^2)_A / \eta_A] \\ &= [(P_1^2 - P_2^2)_H / (P_1^2 - P_2^2)_A] \cdot [\eta_A / \eta_H] \\ &\dots\dots\dots (d) \end{aligned}$$

添字: ス は水素, エ は空気の場合を示す。

P₁ は高圧側, P₂ は低圧側の場合を示す。

(算出実例)

今、真空減衰試験モデル、加圧試験モデルを下図とする。
真空減衰試験モデルより、空気の流量 Q_v (A) を求める。



$$V \times P_1 = V \times P_2 + \Delta V \times P_0$$

P_0 : 1 気圧 (760mmHg = $7.6 \times 10^5 \mu$ mHg)
 V : コイル水系総容積 (l)
 Δt : 減衰試験 (hr)
 ΔP : ($P_1 - P_2$)

$$\Delta V = V(P_1 - P_2) / P_0 \quad \text{従って}$$

$${}_1Q_v(A) = \Delta V / \Delta t (= dv/dt) = (V / P_0) \cdot \Delta P / \Delta t$$

$$= (V / 760) \cdot dp/dt \quad (1/hr)$$

$$= (24V / 760) \cdot dp/dt \quad (1/day) \dots \dots \dots (e)$$

この(e)式が 1 気圧換算の空気リーク量である。(e)式から加圧試験での H_2 リーク量換算は(d)式を用いて ${}_1Q_v(H) = K_v \times {}_1Q_v(A)$ を求めればよい。

$${}_1Q_v(H) = [(P_1^2 - P_2^2)_s / (P_1^2 - P_2^2)_e] [\eta_e / \eta_s] \times (24V / 760) dP/dt \dots \dots \dots (f)$$

ここで $(P_1^2 - P_2^2)_s$ で $P_1 = 5$ 気圧 (4 気圧 + 1 気圧) = 75 PSIG
 $P_2 = 1$ 気圧 = 15 PSIG
 ここで 4 気圧はゲージ圧を示す。

$(P_1^2 - P_2^2)_e$ で $P_1 = 1$ 気圧 = 15 PSIG
 $P_2 = 0$ 気圧 (真空下ということ) = 0 PSIG

η_e は表 1 より 20°C で $\eta_e = 181 \times 10^{-6}$ ポイズ

η_s は表 1 より 20°C で $\eta_s = 89 \times 10^{-6}$ ポイズ

従って

$$(f) \text{式は、} {}_1Q_v(H) = [(5^2 - 1^2) / (1^2 - 0)] [181 / 89] (24 / 760) V dP/dt$$

$$= 1.54 V dP/dt \dots \dots \dots (g)$$

この式(g)式は1気圧(760mmHg)でのH₂リーク換算量であるので5気圧でのH₂リーク換算量は(g)式の₁Qv(H)の1/5となる。

すなわち

空気の大気圧(1気圧)下での真空減衰試験での空気の実測リーク量からの水素ガスの4気圧(ゲージ圧)下での加圧試験での水素のリーク換算量は

$${}_5Qv(H) = {}_1Qv(H) \times 1/5 = 3.08 \times 10^{-1} V \, dP/dt$$

但し、V : (litter)

P : mmHg

t : hr

材料41 プラスチックの吸湿現象

この世の中 プラスチックが多様に使われています。これらのプラスチックも一見水分を寄せ付けないように見えますね。ところがミクロの目で見ると いくらかの水分を吸湿して様々な影響を受けます。この吸湿理論を示してみました。吸湿現象は逆に乾燥させるのにどうすればよいかなどを示してくれます。矢張り 吸湿理論は大切です。少し勉強しましょう。この面も。

プラスチックの吸湿現象

エポキシ樹脂やナイロンなどのプラスチックは表面から吸湿透過する現象があり、使用部位によっては 大きな損害の起因となる事があります。特に 電気配線を内蔵する プラスチックモールド品などでの不具合があります。また 油などの液状態においても同様なことがいえるでしょうね。今回は この 吸湿現象について調べてみました。

プラスチックへの吸湿現象は高分子材料への拡散によるものと考えて フィックの法則が適用できます。 図1のイメージを拡散方程式にて示すと以下となる。

$$C / t = D (\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}) \dots\dots\dots$$

- C ; 水分濃度
- t ; 時間
- D ; 拡散係数
- x ; 表面からの距離

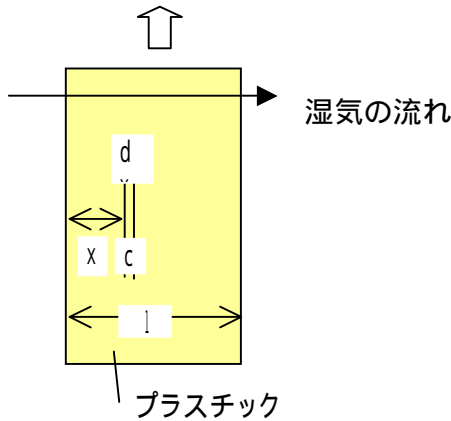


図1 湿気の流れ模式図

Q : 平衡吸湿量
(飽和吸湿量)
q : t1 時間後吸湿量

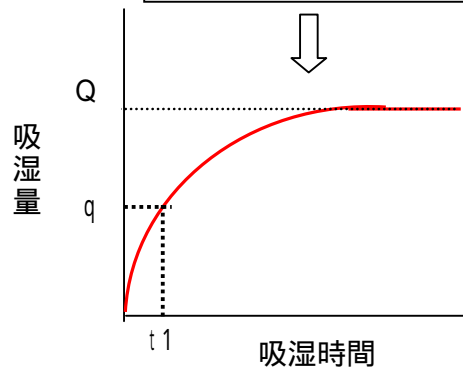
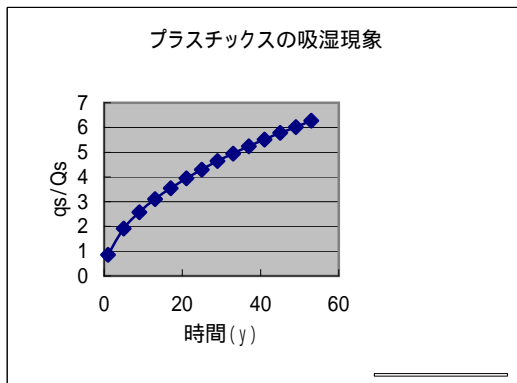


図2 吸湿特性イメージ

このように プラスチックの t 時間後における 吸湿率を q_s 、飽和吸湿率 Q_s とすると 吸湿初期で $(D \cdot t / l^2) < 0.06$ では
 $q_s / Q_s = (4 / \pi) (D \cdot t / l^2)^{0.5} \dots\dots\dots$ が成り立つ。
 一般的なフェノール積層板 20、RH = 90%での水分の吸湿による拡散係数
 $D = 6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{h}$ である。従って 厚さ $l = 6 \text{ mm}$ の場合には
 q_s / Q_s の 式は 以下のグラフの様相を示す。



t (年)	q _s / Q _s
1	0.86
5	1.92
9	2.58
13	3.1
17	3.55
21	3.94
25	4.3
29	4.64
33	4.94
37	5.24
41	5.51
45	5.78
49	6.02
53	6.27

材料42 絶縁油へのガスの溶解状況

気体のガスは 多くの液体に溶解します。その溶解状況は 気体の種類や液体の種類・成分で大きく 異なることがあります。ココでは 絶縁油に溶解する気体ガスの様子を纏めました。一般に気体の液体への溶解は ヘンリ-の法則に従う。気体は その存在する圧力に比例して液体に溶解する。温度が高くなると溶解量は減少し、ガスの分子量が大きいと その溶解量も多くなる。

絶縁油中の溶解ガスについて

水、てんぷら油、絶縁油などの液体に気体のガスは ガス圧に比例して液体中に溶解します。特に電気機器などは多量の絶縁油を冷却材に使用しています。このため絶縁油中に溶解しているガス成分を分析すると その絶縁油が電気機器から受けた損耗状況を把握する事ができます。これは電機協同研究第36巻 第1号などに示されています。詳細はそれをご覧下さい。ここでは絶縁油の異常時の発生ガス成分と それらのガス成分の絶縁油中での溶解量を示します。

引用文献は JEM-TR164:1988です。

絶縁油の異常時の発生ガス成分

異常の種類	主な発生ガス
絶縁油の過熱	H ₂ , <u>CH₄</u> , <u>C₂H₄</u> , <u>C₂H₆</u> , <u>C₃H₆</u> , <u>C₃H₈</u> (メタン) (エチレン) (エタン) (プロピレン) (プロパン)
油没固体絶縁物の過熱	<u>CO</u> , <u>CO₂</u> , <u>H₂</u> <u>CH₄</u> , <u>C₂H₄</u> , <u>C₂H₆</u> , <u>C₃H₆</u> , <u>C₃H₈</u>
絶縁油中の放電	H ₂ , CH ₄ , <u>C₂H₂</u> , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆ (アセチレン)
油没固体絶縁物の過熱	<u>CO</u> , <u>CO₂</u> , <u>H₂</u> <u>CH₄</u> , <u>C₂H₂</u> , <u>C₂H₄</u> , <u>C₃H₆</u>

備考 —印は特徴ガスを示す。

表10の溶解度をガスの種別で見ると酸素、窒素、炭酸ガス、一酸化炭素ガスを除くとガスの溶解度は分子量の増大とともに大きくなる事がわかる。これらのガスは炭化水素系で 絶縁油と同じ炭化水素系であること、温度が高くなるとガスの溶解量は減少することも注意。

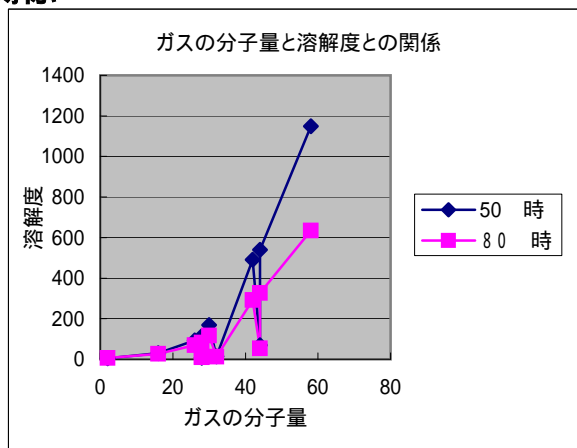
表10 各種ガスの絶縁油に対する飽和溶解度
(ml/100 ml oil), 0.1013 MPa (760 mmHg)

ガスの種類	温度 ℃	50	80
O ₂		14.27	12.16
N ₂		7.22	8.77
CO ₂		69.00	53.77
CO		9.58	11.60
H ₂		4.86	5.69
CH ₄ (メタン)		30.17	27.22
C ₂ H ₂ (アセチレン)		92.98	69.39
C ₂ H ₄ (エチレン)		113.02	82.36
C ₂ H ₆ (エタン)		168.34	116.56
C ₃ H ₆ (プロピレン)		491.20	291.69
C ₃ H ₈ (プロパン)		540.22	326.66
i-C ₄ H ₁₀ (ブタン)		1149.32	635.28

各種ガスの絶縁油への飽和溶解度

1) 全ガスの分子量と溶解度との関係

ガス種類	分子量	50 時	80 時
H ₂	2	4.86	5.69
CH ₄ メタン	16	30.17	27.22
C ₂ H ₂ アセチレン	26	92.98	69.39
N ₂	28	7.22	8.77
CO	28	9.58	11.6
C ₂ H ₄ エチレン	28	113.02	82.36
C ₂ H ₆ エタン	30	168.34	116.56
O ₂	32	14.27	12.16
C ₃ H ₆ プロピレン	42	491.2	291.69
CO ₂	44	69	53.77
C ₃ H ₈ プロパン	44	540.22	326.66
C ₄ H ₁₀ ブタン	58	1149.32	635.28



2) 炭化水素系ガスの分子量と溶解度との関係 (水素含む)

ガス種類	分子量	50 時	80 時
H ₂	2	4.86	5.69
N ₂	28		
CO	28		
O ₂	32		
CH ₄ メタン	16	30.17	27.22
C ₂ H ₂ アセチレン	26	92.98	69.39
C ₂ H ₄ エチレン	28	113.02	82.36
C ₂ H ₆ エタン	30	168.34	116.56
C ₃ H ₆ プロピレン	42	491.2	291.69
CO ₂	44		
C ₃ H ₈ プロパン	44	540.22	326.66
C ₄ H ₁₀ ブタン	58	1149.32	635.28

