不 燃 変 圧 器

近藤喜久雄*

Noninflammable Transformers

By Kikuo Kondō Kokubu Branch Works of Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Recent gradual but steady extension of power houses and substations especially in such areas and services as businesss quarters, mines, ships, congested street areas, etc. has given rise to the demand for the transformers that are noninflammable. Hitachi's "Silicone Transformers" and "Hitafunen Transformers" have been developed to answer the above demand and the former are provided with Class H insulation (using silicone resin) and the latter make use of noninflammable synthetic insulating liquid, "Hitafunen".

Entirely free from fire hazard, these noninflammable transformers need not fire preventive installation at the site of their service, which means a noticeable cut in installation cost and it further simplifies the maintenance and operation to a great measure. Owing to these merits, the demand for them is now steadily increasing.

[I] 緒 言言 mentioniti

送変電施設不燃化の要望は久しく、特に発電所所内設備、ビルディング、鉱山、船舶、市街地、地下変電施設あるいは屋外でも無人の自動変電所などには、不燃性が強く望まれている。

従来の鉱物性絶縁油(以下鉱油と記す)はきわめてす ぐれた絶縁性と冷却効果を有するため,変圧器には欠く ことのできない一要素であるが,その可燃性は大きな欠 点である。最近の変圧器は著しく信頼度が向上している ので,それ自体からの火災はほとんどありえないが,他 からの延焼を想起すると一抹の不安を伴う。

したがつて、からる火災の懸念を一掃するには、可燃性の鉱油を使用しないいわゆる乾式とするか、あるいは鉱油に代つて不燃性絶縁油を使用することによつて目的は達せられる。

日立製作所では,不燃化の要望にこたえ,不燃変圧器として,日立シリコーンワニスを用いた「シリコーン変圧器」と,日立不燃性絶縁油ヒタフネンを用いた「ヒタフネン変圧器」を完成し,すでに各分野で実用に供されている。

米国においては,第二次大戦中シリコーンの実用化に

* 日立製作所日立国分分工場

成功し、工業生産に移され軍需材料として重要な役割を演じたが、戦後その耐熱性の高いことと、耐湿性の優秀な点から、応用方面が著しく開拓され、変圧器にも応用されH種絶縁変圧器として大量に製作されている。すでに 10年前において 15 kV, 1,000 kVA のものまで量産に移されているといわれている。(1)

一方不燃性絶縁油は1930年頃すでに変圧器およびコンデンサに相当量使用され、米国における Pyranol, Inerteen, Aroclor, 欧洲における Clophen, Permitol, Pyroclor, Nepolin, 本邦におけるシバノールなどの名前は、よく知られている。戦後の調査によれば、欧米ともにその使用実績は増加しており(2)(3)、研究報告も幾多発表されてその活況の一端をうかぶうことができる。

以下「シリコーン変圧器」および「ヒタフネン変圧器」 につき概要を述べる。

[II] シリコーン変圧器

現在乾式変圧器に使用される絶縁物としてA種,B種,H種の絶縁物が考えられるが、耐熱、耐湿においてシリコーンワニス使用によるH種絶縁が最もすぐれている。日立製作所は古くからこの点に着目し、1941年シリコーンの研究を開始し、苛烈な戦争に災され一時中断されていたが、戦後逸早く再開して、合成、応用の両面におい

てその実用化に成功した。**第1表**は変圧器に使用される 日立シリコーンワニスの種類を示し**,第2表**はその特性 を示す。従来の輸入品にもまして**,**耐熱屈曲性**,**耐溶剤 性に特にすぐれた特性を有している。シリコーン変圧器 の特長を列記すればつぎの通りである。

(1) 耐熱,耐湿性

シリコーンワニスは俗に岩石結合と呼ばれる

$$-\frac{1}{5}i - 0 - \frac{1}{5}i - 0$$

第 1 表 日立シリコーンワニスの種類 Table 1. Kinds of Hitachi Silicone Varnishes

種工具具具質	話	号
仕上用シリコーンワニス	HS-	-101
シリコーンコイルエナメル	HS-	-105
華通加熱的幅シリコーンコイルワニス	HS-	-201
超耐熱加熱乾燥シリコーンコイルワニス	HS-	-202
特殊加熱乾燥シリコーンコイルワニス	HS-	-203
速乾性加熱乾燥シリコーンコイルワニス	HS-	-204
シリコーン電気鉄板ワニス	HS-	-301
エナメル線用シリコーンワニス	HS-	-401
ガラス巻線用シリコーンワニス	HS-	402
接着用シリコーンワニス	HS-	-501
フレキシブルマイカ接着用シリコーンワニス	HS-	-601
マイカプレート接着用シリコーンワニス	HS-	-602
布管用シリコーンワニス	HS-	-701
積層成型用シリコーンワニス	HS-	-801
防湿, 撥水用シリコーンワニス	HS-	-901

結合を構造の根本としているので、耐熱性がすぐれ、H種として 180 °C の使用温度に耐えるものである。

本邦におけるH種絶縁の許容温度上昇は,抵抗法により 105 °C,最高許容温度は 180 °C と JEC-86 に暫定的に定められている。第3表は,AIEEによる絶縁の種類と温度との関係を示すものであるが $^{(4)}$,米国においても,この使用限度については種々実験がなされ $^{(*)}$ 1、一般に確定していないが,温度上昇限度を 180 °C とする案も提案されている $^{(5)}$ 。

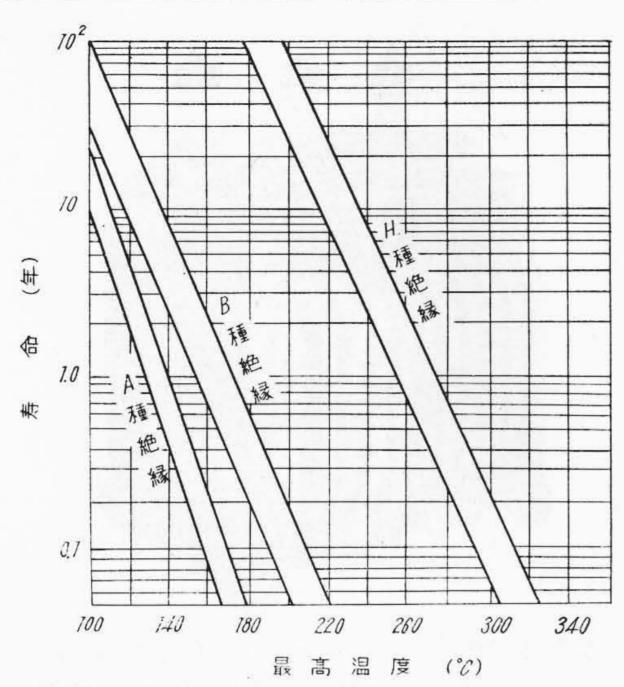
本邦における値 **105** °C は著しく控え目の値であつて **第1図**に示すごとく, H種絶縁は, A種, B種に比し, それぞれの最高温度で使用した場合著しく寿命が長く, 本邦でも **120~140** °C 程度の温度上昇を許容すべきとの 意見も相当にある。

つぎに耐湿性の問題であるが、本邦のごとく湿度の高い土地では特に重要であり、B種では完全な耐湿性を有しないため、長期放置すれば絶縁低下を来すことがある。しかるにシリコーンワニスはいわゆる撥水性が大きいので、これを以てガラス繊維、石綿などを含浸し、加熱処理を行えば、きわめて耐湿性のある絶縁となり、その特性も長年月の間確保される。また注水試験においても、絶縁特性になんら変化のないことが報告されている(5)(6)。

第 2 表 日 立 シ リ コ ー ン ワ = ス 特 性 表 Table 2. Characteristics of Hitachi Silicone Varnishes

			HS-	-201	HS-	-202	HS-	-203	HS-	-701
特		性	日立規格	試験結果	日立規格	試験結果	日立規格	試験結果	日立規格	試験結果
外		淡黄色	色透 明	淡黄鱼	色透明	淡黄色	色 透 明	淡黄色透明		
比 重 (20°C) 粘 度, ポ イ ズ (30°C) 不 揮 発 分 (%) 酸 価, 不 揮 発 分 に 対 し			1.00±0.04 0.4~1.5 50±2 <4	1.012 1.30 49.4 1.2	1.00±0.04 0.4~1.5 50±2 <4	1.009 0.98 50.5 1.3	0.97±0.04 0.4~1.5 50±2 < 4	1.005 1.21 48.68 2.46	1.00 ± 0.04 $0.5\sim1.5$ 50 ± 2 < 4	1.005 1.20 50.5 3.0
厚さのつき方 (mm)	10 M - 1 W -		> 0.03 <130%	0.037 113	> 0.03 <130%	0.033 121	> 0.03 <130%	0.034 123	> 0.03 <130%	0.035 119
乾燥時間	指触	200 °C 250 °C	< 40分 < 20分	25分 12分	< 90分 < 20分	70分 17分	< 40分 < 20分	30分 18分	< 90分 < 20分	80分 17分
	完 全	250 °C	<1時間	40分	<4 時間	2.5時間	<2 時間	40分	<3 時間	2.5時間
常態 絶縁破壊電圧の強さ (kV/0.1 mm) 常態 180°C 浸水後		> 7.5 > 6.5 > 7.0	8.3 7.4 8.1	> 8.0 > 7.0 > 7.5	8.3 7.2 7.7	> 7.5 > 6.5 > 7.0	8.7 7.2 8.6	> 8.0 > 7.0 > 7.5	8.3 7.4 7.6	
体 積 固 有 抵 抗 (Ω/cm) 常 態 180°C 浸 水 後		>10 ¹⁵ >10 ¹¹ >10 ¹⁵	1.3×10 ¹ 6 4.71×10 ¹ 2 4.76×10 ¹ 5	>1015 >1011 >1015	6.1×10^{15} 8.74×10^{12} 8.3×10^{15}	>1015 >1011 >1015	7.87×10 ¹ 5 1.29×10 ¹ 3 6.47×10 ¹ 5	>1015 >1011 >1015	4.32×10^{13} 9.55×10^{13} 6.18×10^{13}	
耐熱屈曲性, 250 °C 加熱, 3 φ 屈曲合格時間 低 温 亀 裂 性, 5°C 水 中 加熱減量, 250 °C 72 時間後 (%) 耐溶剤性, 25°C キシロール中		>100時間 - < 8 > 1分	264時間 一 4.5 2分15秒	>300時間 - < 8 > 1分	>580時間 - 5.6 2分40秒	>100時間 2 ¢ < 8 > 1分	168時間 2¢, OK 4.0 2分10秒	>200時間 2 ¢ < 8 >1 分	>264時間 2 ø, OK 4.2 3分10秒	

本表は JISC 2103 (絶縁ワニス試験方法) に準じたものである。



第1図 各種絶縁物の使用温度と寿命の関係

Fig. 1. Thermal Life of Various Insulations

第 3 表 絶縁の種類と温度の関係
Table 3. Classification of Insulation by
Temperature (AIEE)

絶縁の	最高温度	温度上昇	(°C)	TT ASA
種 類	(°C)	温度計法	抵抗法	材料
O	90	35	45	綿,絹,紙などワニス処理せぬもの
A	105	50	60	綿絹紙ワニス処理、フエノール樹脂
В	130	70	80	など 雲母,石綿,硝子に若干の有機物
H	180	100	120	同上,シリコーン樹脂処理,テフロ
С	制限せず		-	無機材料

第 4 表 米国における乾式変圧器の試験電圧値

Table 4. Test Voltage of Dry Type Transformer in America

電 圧 階 級 (kV)		式 験 値 実効値)	衝撃電圧全波試験 (1.5×40 μs kV 波高						
1.20	4	(10)	10	(45)					
2.50	10	(15)	20	(60)					
5.00	12	(19)	25	(75)					
8.66	19	(26)	35	(95)					
15.00	31	(34)	50	(110)					

(注) () 内は油入変圧器の試験値 ただし衝撃電圧試験値は 500 kVA 以上のもの

(2) 耐火性,防爆性

従来の鉱油入変圧器では、変圧器内部に事故を生じた場合、爆発、火災を惹起する危険があるが、シリコーン変圧器では不燃性の材料のみで製作されているので、たとえ事故が生じても、事故が拡大される心配がない。したがつて屋内、地下室、坑内、船舶などの設置される変圧器として最も適したものと考えられる。

第 5 表 シリコーン変圧器試験電圧推奨値

Table 5. Recommended Test Voltage of Silicone Transformer

公 称 回 路 電 圧 (kV)	商用周波試験値 (kV)	衝擊電圧全波試験値 (1×40 μs kV 波高値				
3	10	30				
6	15	45				
10	25	75				
20	50	120				
30	70	160				

(3) 絶 縁

シリコーン変圧器の絶縁構造には、空気絶縁が介在するために、衝撃電圧に対する強度が問題である。すなわち衝撃比は油入変圧器の2.0~2.4程度に対して、H種絶縁の場合は1.1~1.5程度のため、油入変圧器並の衝撃試験電圧に耐えるようにするには、多くの固体絶縁物を要し、高価なものとならざるをえない。

シリコーン変圧器の利用は,直接雷電圧の侵入しない場所たとえば市街地,坑内などのケーブルによつて配電される場所が適している。この場合の衝撃試験電圧値は系統に生ずる開閉サージによる異常電圧を考慮して定めればよく,第4表は米国における乾式変圧器の試験電圧を示す。

日立製作所ではシリコーン変圧器の信頼度の確保と, 保護機器の特性を考慮して, **第5表**の衝撃試験電圧値を 推奨するものである。

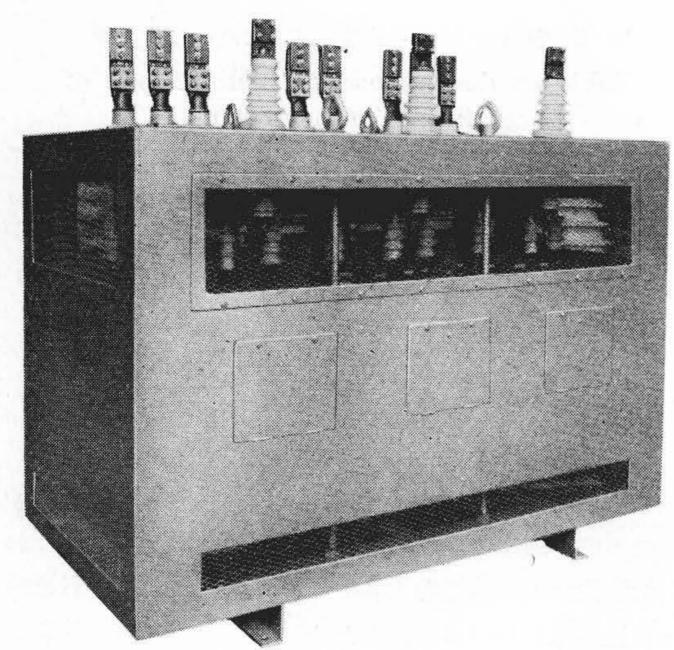
(4) 運搬・設置,保守・点検

シリコーン変圧器は小型軽量で油がないため,現地へ の運搬,設置および据付後における保守点検はきわめて 容易である。すなわち火災の危険がないため,特別な防 火壁を設ける必要なく,負荷近くに設置できるため経済 的な配線が可能で,油入変圧器におけるごとく,油の濾 過,検油,吸湿剤の取換えなど保守・点検上の煩雑さが なく,中身も外函を外すことによつて容易に点検,清掃 することができる。

(5) 構造

電気的構成において油入変圧器と変つた点はないが, 冷媒として空気を使用することおよび絶縁物に空気と耐 熱固体絶縁物を使用するため,これらの特長に適した構 造となる。すなわち大容量器には送風装置を取付け,冷 却結果と塵埃払拭の効果を挙げている。

耐熱絶縁材料としては、シリコーンワニスで処理を行ったガラスクロス、ガラスマイカ、マイカ板、アスベスト板、磁器などを使用している。鉄心は表面に特殊耐熱被膜を施した珪素鋼板を使用し、締付ボルトは、耐熱絶縁材料で完全に絶縁されている。鉄心の切口面および金具類には耐熱性塗料を塗布して十分防銹効果をあげてい



第2図 250 kVA 三相シリコーン変圧器 11.5-11-10.5-10 kV/210-105 V

Fig. 2. 250 kVA Three-Phase Silicone Transformer 11.5-11-10.5-10 kV/210-105 V

る。導体の絶縁被覆は、シリコーンワニスを含浸してこれを高温乾燥し、また鉄心と低圧巻線間、高低圧巻線間にはすべて上記耐熱材料よりなる絶縁筒が使用されている。導体の接続には一切半田を使用せず、電気熔接、銀鑞付またはクランプ接続により熱的機械的損傷を防止している。

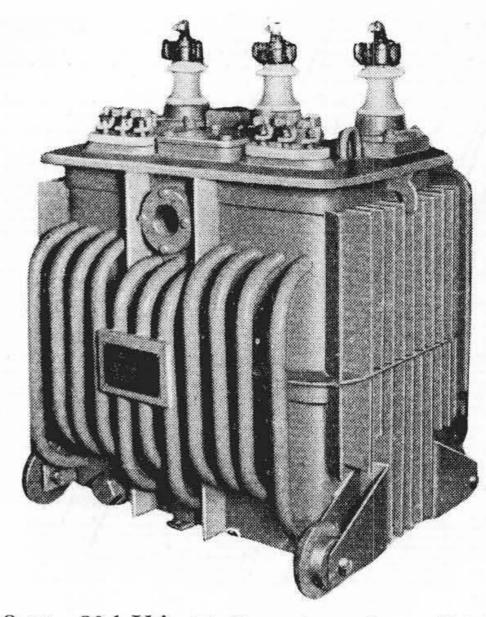
第2図は 250 kVA 三相シリコーン変圧器の外観を示す。

[III] ヒタフネン変圧器

日立製作所は戦前すでに不燃性絶縁油の合成製造と,その実用化に成功し,これに「ヒタフネン」の名称を付してコンデンサに利用した実績を有している $(^{7})(^{8})$ 。戦後もヒタフネンおよび変圧器構成材料の研究を継続して来たが,最近の不燃変圧器の需要にこたえて,従来の経験と研究を活用してヒタフネン変圧器を完成しすでに実用に供されている。第3図は $20\,\mathrm{kVA}$ 三相ヒタフネン変圧器,第4図は $\frac{11}{\sqrt{3}}\,\mathrm{kV}$ 単相ヒタフネン P.T. の外観を示す。

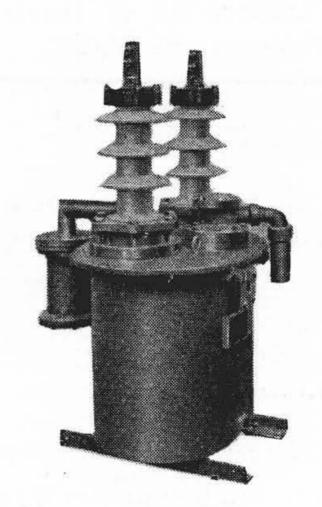
ヒタフネン変圧器のおもな特長は,ヒタフネン自体が 難撚性であるため,火災を受けても引火して事故が拡大 されることがなく,万一変圧器内部でアークを生じヒタ フネンが分解しても,分解生成物は非爆発性,不燃性の ため火災の危険を有しないことである。

ヒタフネン変圧器の電気的構成においては,従来の鉱油入変圧器と同じであるが,絶縁油の性質が違うため, 変圧器の材料,構造が異つたものとなる。



第3図 20 kVA 三相ヒタフネン変圧器 3.45-3.3-3.15-3.0-2.85 kV/210-105 V

Fig.3. 20 kVA Three-Phase Hitafunen Transformer 3.45-3.3-3.15-3.0-2.85 kV/210-105 V



第4図 $\frac{11}{\sqrt{3}}$ $kV/\frac{110}{\sqrt{3}}$ V 一相ヒタフネン計器用変圧器

Fig. 4. $\frac{11}{\sqrt{3}}$ kV $\frac{110}{\sqrt{3}}$ V Single-Phase Hitafunen Potential Transformer

ヒタフネンはすぐれた絶縁性と、鉱油に劣らぬ冷却効果を有し、かつ化学的にきわめて安定で、酸化生成物、スラッジなど有害な不純物を生じない利点がある。以下ヒタフネンの性質および変圧器実用上の問題について概要を述べる。

(1) ヒタフネンの性質

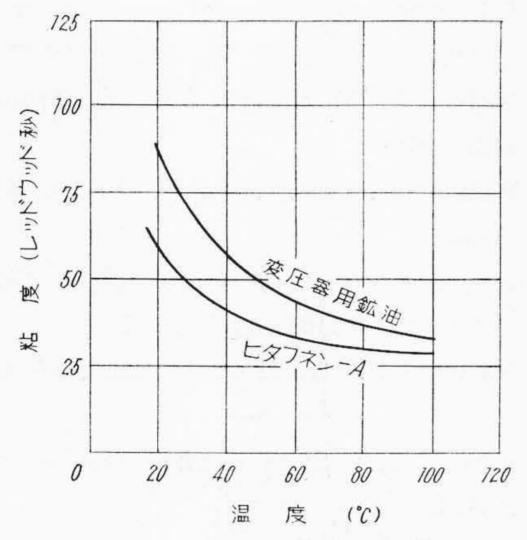
(A) 組 成

変圧器用不燃性絶縁油ヒタフネン-Aは,塩化ジフェニールと塩化ベンゾールを主成分とし,絶縁物劣化防止および金属腐蝕防止用の添加剤な微量混入せしめたものである。

第 6 表 ヒタフネン-A と鉱油の特性比較

Table 6. General Properties of Hitafunen-A (for Transformer) and Mineral Oil (for Transformer)

特性	絶縁油	絶 縁 油 ヒタフネン -A			
比	重 (20°/4°C)	1.50~1.56	0.92		
粘	度) (30°C)	82 以下	82 以下		
レツドウツ	′ド秒∫ (75 °C)	39 以下	39 以下		
流動	点 (°C)	-37.5 以下	-27.5 以下		
引 火	点 (°C)	なし	130 以上		
蒸発	量 (%)	2.0 以下	0.4 以下		
熱容量	(cal/cm3deg)	0.40	0.41		
絶緣破壞冒	註压 (kV/2.5 mm)	45 以上	30 以上		
誘電	率 (50°C)	4∼ 5	2.2~2.4		



第5回 ヒタフネンの粘度――温度特性

Fig. 5. Viscosity-temperature Relation of "Hitafunen"

(B) 特性

第6表はヒタフネン-A の特性を,従来の変圧器用鉱油と比較して示したものである。特長としてはつぎの諸点を挙げることができる。

(a) 不燃性

ヒタフネン自体が難燃性であるとともに,この蒸気および分解生成物が不燃性,非爆発性である。

(b) 絶縁性

絶縁破壊電圧は鉱油よりすぐれている。

(c) 誘電率

鉱油の約2倍で絶縁紙の誘電率とほぶ同じであるため,電位分布が良好となる。

(d) 冷却効果

冷却能は、熱容量、粘度などにより定まり、それぞれ 鉱油と同じ程度である。第5図に粘度の温度特性を示す。

(e) 化学的安定性

耐酸化性に富み,空気に接して加熱しても,スラッジ などの有害な不純物を生じない。

(f) 無機物に対する作用

金属材料, 磁器類は一般に安定である。

(g) 有機物に対する作用

溶解力がきわめて強いので、従来使用されて来たワニス類、ワニス処理物、パッキングなどは溶解ないし膨潤する。

(C) アークによる分解生成物

ヒタフネンはアークにより,気体と炭素とに分解し, 遊離した炭素微粒子は沈澱する。発生した気体の主成分 は塩化水素であり,そのうちの一部はヒタフネン中に溶 け込むが,大部分は外部へ排出される。

(2) ヒタフネン実用上の問題

前述のごとく, ヒタフネンは従来の鉱油とは, 本質的 に性質が異るのでつぎの点が問題である。

(A) 材料

有機物に対する溶解力はきわめて強いので,変圧器構成材料の選択には十分注意せねばならない。したがつて 珪素鋼板の絶縁皮膜,電線の絶縁被覆,絶縁紙,ワニス,ワニス処理物,パッキング材などは化学的,電気的,機械的特性を十分吟味検討の上,安定な材料が使用されている。

(B) 構造

ヒタフネンは蒸発率が高いため,変圧器の容器は密封型として,蒸発を防止している。このため,大気中の湿気が侵入する惧れはなく,ヒタフネンの絶縁性はきわめて良好に保持される。

つぎに,変圧器内部で万一アークを生じた場合,相当量のガスを発生するが,これは普通の変圧器の場合と同様に,安全管により直ちに器外へ排出される。この発生ガスは,前述のごとく,主成分は塩化水素で一部はヒタフネン中に溶解するが,大部分は器外へ排出される。

したがつて変圧器が屋内などの換気のよくない場所に 設置される場合には,事故時発生する塩化水素が隣接機 器に影響をおよぼす点を考慮して,ガス通過の途中に強 力な中和剤をおいて,発生ガスから塩化水素を除去する 処置を講じている。

一方,屋外設置の場合あるいは屋内使用の場合でも, 発生ガスをパイプなどで大気中へ導く装置を設ければ, 塩化水素吸収装置の必要はないと考えられ,ASA にも かゝる規定が設けられている⁽⁹⁾。

(3) 保守上の問題

従来の鉱油は使用中に劣化し、水、酸性物質、スラッジなどを生成し、着色および粘度の増加を来して、絶縁性と冷却効果が低下する。これに対してヒタフネンは本質的にからる変質がないので、保守は簡単となる。すなわち従来の油入機器では、吸湿剤、脱酸剤の取換え、油

の濾過,再生処理などを行つて来たが,ヒタフネン変圧器では密封型のため,吸湿剤,脱酸剤は不要であり,濾 過再生の要もほとんどないと考えられる。

米国の使用実績によると、15年間 Askarel 変圧器を使用して、Askarel の酸価を測定した結果、0.03 mg KOH/g になつているに過ぎず、これも変圧器に使用したワニス類から混入したものと認めている(10)。

ヒタフネンは鉱油ときわめて混合しやすく,一旦混合すると分離が困難であるばかりでなく,不燃性の性質も損われるので,ヒタフネンの取扱中,使用中に鉱油の混入することを避けねばならない。

[IV] 結 言

以上不燃変圧器として、シリコーン変圧器と、ヒタフネン変圧器につきその概要を説明したが、両者は既述のごとくそれぞれ独自の特長を有しているため、その使い分けについては、その使用条件と経済的要素により決るべきものと考えられる。シリコーン変圧器は、比較的低電圧、大電流の変圧器にその特長を発揮するので、電力用変圧器においては衝撃比および絶縁物の価格の点から絶縁階級 30 号ないし 40 号以上は、ヒタフネン変圧器に譲るべきものと考える。ヒタフネン変圧器は、電圧の高低、容量の大小に関係なく、従来の鉱油入機器と同様に製作することができる。

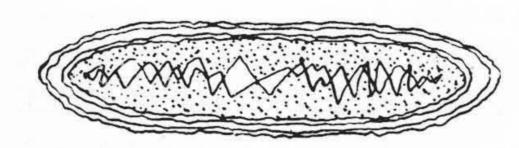
今後はその施設ごとに,使用条件に適した使い分けが

行われ、おのおの実績が積まれて行くこと」思われる。 不燃変電施設に、シリコーン変圧器とヒタフネン変圧器 の二種をえたことは、今後の発展にかならず大きな**貢献** をなすものと信ずる。需要家各位の御支援と御鞭撻をせ つにお願いする次第である。

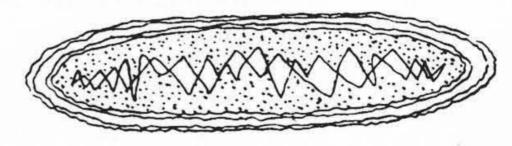
擱筆するに当り,本変圧器の製作に際し種々御指導を 賜つた日立製作所日立工場谷崎変圧器部長,小川変圧器 設計課長,首藤前設計課長,変圧器設計課前川氏,日立 研究所高橋博士を始め関係各位に深甚の謝意を表する。

参考文献

- (1) Paul A. Vance: G.E. Review 46, 627 (1943 11)
- (2) F. Crotogino: E.T.Z. 4, 349 (1952-12)
- (3) R.E. Marburg: Power Capacitors, ix (1949)
- (4) 日月紋次: 日立評論 36, 101 (昭 29-9)
- (5) Melvin L. Manning: A.I.E.E. Trans. 70, 1427 (1951)
- (6) W.W. Satterlee: A.I.E.E. Trans. **63**, 701 (1944)
- (7) 川松,井上: 日立評論論文集 1,116 (1948-2)
- (8) 日本特許: 151154 昭 17.6.17
- (9) National Electrical Code 4522, ASA C-1 (1953)
- (10) F.M. Clark: Symposium on Insulating Oils, 5 (1949)



特 許 と 新 案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その2)

(第12頁より続く)

区 別	登録番号		名				称			I	. 身	易万	31]	E	E	Á	S	登録4	年月日
実用新案	431387	<i>д</i> -	ピン	主機	夕 ·	- =	y 3	が装	置	日	立	エ	場	宮高	崎須		と郎 二	30.	7. 26
"	431388	g -	ビン	主機	のタ	- =	ニン	グ装	置	日	<u>77.</u>	工	場	滑	Ш		清		"
"	431389	g —	ビン	主機	タ	- =	7 9	が装	置.	日	立	I.	場	滑高	川須	徳	清二		"
″	431390	車輛	用自重	力連 結	器の	自重	助 開	放装	置	日	<u> </u>	工	場	小	栗	定			"
"	431398	信	号		灯		装		置	日	立	工	場	吉高	田橋	忠淳。	男之助		″
"	431399	表	示		灯		装		置	日	立.	エ	場	吉高	田橋	忠淳。	男之助		"
"	431409	低	問 波	電	圧	発	生	装	置	日	立.	工.	場	今前	橋川	駒敏	一明		″
実用新案	431413	伸	線	水		冷	装		置	日	立.	I.	場	宮	崎	徳ス	太郎	30.	7. 26