

耐冷媒性自己融着エナメル線の開発

吉田 健吾*・杉本 裕示・三木 剛
外山 茂・紀平和伸・松浦 裕紀

Development of Self-Bonding Magnet Wire with Refrigerant Resistance — by Kengo Yoshida, Hiroji Sugimoto, Takeshi Miki, Shigeru Toyama, Kazunobu Kihira and Yuki Matsuura — Self-bonding magnet wire can contribute to solving environmental issues by alternating the varnish impregnation process. But till now, two technical challenges restrict the application of self-bonding wire to refrigeration compressor motor. One is to combine heat resistance property with low-temperature bonding property. Another is to achieve material design that provides strength against the insert process. The authors succeeded in accomplishing these challenges by using a new modified epoxy. The modified epoxy was molecularly designed in an optimal manner by using the copolymerization method. The Company has started supplying to the market a new self-bonding wire named SSB®-41 that uses this new modified epoxy resin.

1. 緒言

エアコンや冷蔵庫などの冷凍機器に使用されるハーメチックモーター*1は、冷媒および冷凍機油環境下で運転されるものであり、出力の高い大型モーターではコイル振動を抑制するために巻き線後にワニス（以下含浸ワニスと記載）処理を行うのが一般的である。しかしながら含浸ワニス工程は長時間の熱処理を必要とし、溶剤揮発による環境悪化を引き起こすという点で問題も多い。

この含浸ワニス工程を省くことが可能なエナメル線としては自己融着エナメル線が挙げられる。当社も SSB® (Sumitomo-Self-Bonding Wire) というブランドで製造・販売しており、その歴史は古い。自己融着エナメル線とは絶縁皮膜の上に融着層を形成したエナメル線であり、巻き線後、融着層を加熱溶融、線間を固着させることで含浸ワニスを代替することができる。自己融着エナメル線の融着メカニズム模式図を図1に示す。

融着層はブチラール・ナイロン・エポキシと言った材料からなり、ユーザーの使用目的に合わせ絶縁皮膜との最適

な組み合わせを行う必要があることから数多くの品種が存在する。代表的なものとしては電子レンジ用コイルに使用される SSB®-11（絶縁層：エステルイミド/アミドイミド）テレビ・ディスプレイ用の偏向ヨークコイルに使用される SSB®-98（絶縁層：ハンダ付エステルイミド）などがあり、多くのユーザーの製造工程簡略化に貢献してきた歴史を持つ。

融着皮膜の材料として熱可塑性樹脂を選択した際、製造上材料として融着に必要な溶融温度が、モーターに組み込まれて運用する際の運用温度より大幅に高いことが必要条件となる。運用温度を 120℃ と想定し、安全を見ると 200℃ 以上の融着温度が必要となるが、そのような温度で加熱処理を行った場合モーター鉄心に使用されている絶縁樹脂や、リード線被覆樹脂などを劣化/融解させ、モーターの絶縁性能を低下させてしまう問題が生じる。一方でモーターの効率を向上させようとした際、モーター鉄心のスロット内により多くのエナメル線を巻き線する（高占積率化する）ことが必要となってくる。しかしながら熱可塑性樹脂は架橋構造をとらないため、熱硬化性樹脂と比較すると機械的強度に劣る。その結果、巻き線時に融着皮膜が削れやすくなることから高占積率仕様のモーターへの適用は技術的に非常に困難であった。

以上をまとめると、高占積率タイプハーメチックモーターへの融着線適用における大きな課題は下記の2つとなる。

- A) 高耐熱性と低温（160℃以下）融着性の両立
- B) 機械強度に優れること

今回我々は、最適な分子設計に基づきこれらの課題を克服、冷媒/冷凍機油環境下でも高い信頼性を有し、高占積率モーターへの適用が可能な高い耐加工性を有する耐冷媒

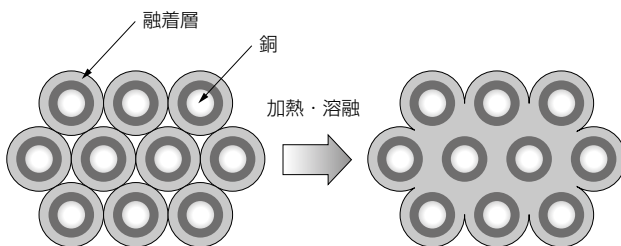


図1 自己融着エナメル線融着メカニズム模式図

性自己融着エナメル線SSB®-41の開発に成功したので報告する。

開発品SSB®-41と当該分野における当社現行品ATZ®-300との比較を表1に示す。

表1 開発品SSB®-41の構成(従来品との比較)

品名	SSB®-41 開発品	ATZ®-300 従来品
断面構造図		
1層目	エステルイミド	エステルイミド
2層目	アミドイミド	アミドイミド
3層目 (最外層)	自己融着層開発材料 (本報告)	-
含浸ワニス処理	不要	必要

2. 自己融着層材料開発

A) 耐熱性と低温(160℃以下)融着性の両立

これらは相反する特性であり、従来の融着システムではこれらの両立は不可能である。耐熱性を向上させるためには熱硬化させる必要があるが、低温で融着を行うためには熱可塑性であることが必要となるからである。そこで、我々は熱可塑性樹脂(ベース樹脂)に潜在性を有する硬化剤を配合、未硬化にて焼付け、融着処理時に熱硬化させることで耐熱性を向上させるべく検討を行った。

・ベース樹脂

低温融着可能な熱可塑性樹脂として我々は高分子量エポキシであるビスフェノールA(以下BisAと記載)型フェノキシに注目した。BisA型フェノキシ樹脂は下記構造(図2)で示され、各ユニットは下記に示す通り優れた特徴を有する(1)。

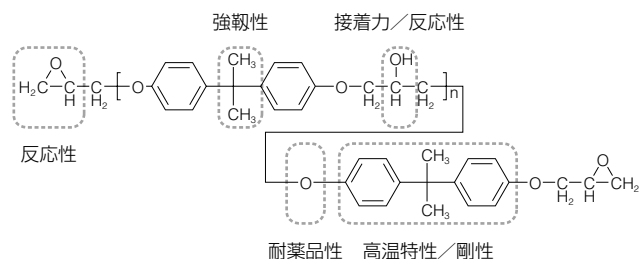


図2 BisA型フェノキシ樹脂構造式とその特徴

本材料はBisA骨格に起因する強靱性に特筆すべきものがあり、エポキシ部、水酸基を介して容易に熱硬化させることが可能である点に優位性がある。しかしながら熱硬化させたBisA型フェノキシ樹脂のガラス転移温度(以下Tgと記載)は、硬化剤の種類にもよるが、約110℃と低く、最高120℃近くにまで達すると言われるハーメチックモーターユニット内において長期信頼性に大きな不安を残す。そこで我々はスルホン骨格に起因する優れた耐熱性を有するフェノキシとしてビスフェノールS(以下BisSと記載)型フェノキシ樹脂(図3に構造を示す)に注目、両者をブレンドすることにより解決可能か検討を行うこととした。パラ置換ビスフェノール類の熱安定性に関する順位を図4に示す(2)。

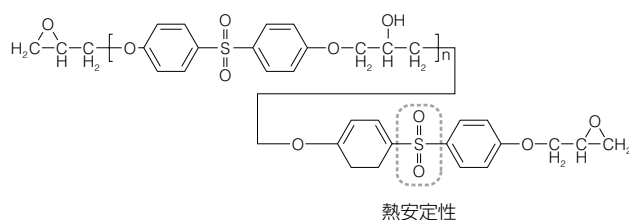


図3 BisS型フェノキシ樹脂構造式とその特徴

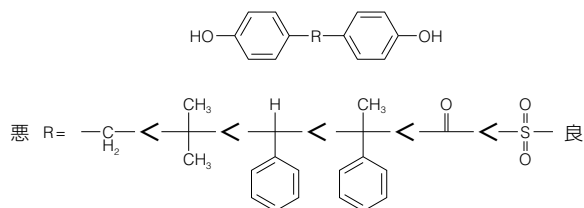


図4 パラ置換ビスフェノール類の熱安定性

・硬化剤

種々の硬化剤を検討した結果、I)優れた潜在性(140~150℃まで安定)II)硬化物の耐抽出性という2つの観点からブロックイソシアネートを選択、添加量についてはメタノール抽出試験において最も抽出量が少なくなる添加量を調査して決定した。試験サンプルは160℃×2h加熱硬化させたものを用い、ソックスレー法にて実施した。ベース樹脂は暫定的にBisA/BisS=50/50として実験を行った。

図5に示す通り、硬化剤量に対し、抽出率は変曲点を有する結果となった。硬化剤が少ないと未硬化のベース樹脂が抽出され、多いと余剰な硬化剤自身が抽出されていることをフーリエ変換赤外分光光度計*2(以下FT-IRと記載)にて確認した。

次に BisA/BisS ブレンド比率を変更したベース樹脂を用い、自己融着エナメル巻線を作成、ベース樹脂ブレンド比の最適化を行った。

評価サンプルの概要を表2に、特性評価結果を表3に示す。

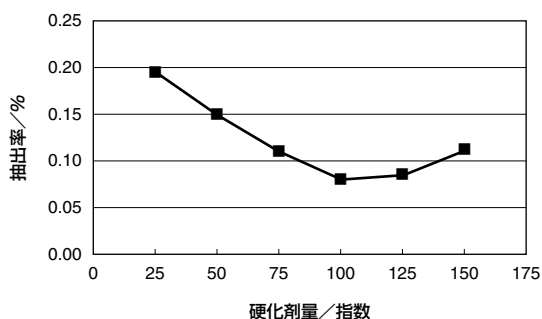


図5 硬化剤量とメタノール抽出量の関係

表2 評価サンプル概要

1層目	材料	エステルイミド (以下 EsI と記載)
	膜厚	0.016 mm
2層目	材料	アミドイミド (以下 PAI と記載)
	膜厚	0.0065 mm
3層目	材料	ブレンドフェノキシ+ブロックイソシアネート
	膜厚	0.0120 mm
導体径		0.745 mm
仕上径		0.814 mm
皮膜厚		0.0345 mm

表3 BisA/BisS ブレンドワニス特性評価結果

融着ワニス	I	II	III	IV	V	
BisA型比率/%	100	75	50	25	0	
BisS型比率/%	0	25	50	75	100	
硬化剤種	A	←	←	←	←	
硬化剤量/指数	100	←	←	←	←	
初期融着力 [N]	145	145	140	125	115	
高温下 (100℃) 融着力 [N]	45	62	75	59	45	
冷媒処理後 プリスター	100℃	0	0	0	0 白化	0 白化
	110℃	0	0	0	0 白化	0 白化
	120℃	0	0	0	0 白化	0 白化
	130℃	1	2	2	1 白化	2 白化
	140℃	3	3	3	3 白化	4 白化

各評価方法を下記に解説する。

【融着力】

直径6.4mmのステンレス棒にエナメル線を巻付けヘリカルコイルを作成、200gの荷重をかけながら160℃×2h加熱処理を行った後、折り曲げ力の測定を行った。折り曲げ力は3点曲げ試験で実施した。

【高温下融着力】

160℃×2hで融着処理したヘリカルコイルを作成、試験環境が目標温度に到達したら、その温度にて5分保持した後3点曲げ試験を行い測定した。

【冷媒処理後プリスター】

オートクレーブに所定量の冷媒と巻線試験片を入れ85℃、72時間かけて処理する。取り出し後1分以内に高温槽に入れ10分加熱を行い、試験片に発生した膨れの個数をカウントする。

I～IIIにおいて BisS 型フェノキシ樹脂の配合比と共に高温下融着力について明確な向上が確認できたが、 BisS 型フェノキシがある比率を超える (IV～V) と初期・高温下融着力の低下、冷媒処理後のプリスター試験における白化 (微小発泡) 現象が見られた。これは BisS 骨格を導入することにより Tg と弾性率が上昇したことと起因すると考えられる。融着条件は 160℃×2hrs に固定しているため、その温度における弾性率が、樹脂の流れやすさを決定し融着力の発現に効いてくる。 BisS 型フェノキシを配合することにより高くなった Tg、弾性率が線間への樹脂の流れ込みを悪化させ、結果として融着力が低下したものと考察する。

プリスターに関しても BisS 骨格の導入により Tg、弾性率が高くなった結果皮膜に浸透した冷媒が抜け難くなり、皮膜を押し上げることで発泡を引き起こしたものと考察する。

各種特性について最もバランスがとれた配合比は BisA/BisS = 50/50 であり、以上の結果は大枠で我々の設計思想を支持するものである。

B) 機械強度に優れた材料設計

耐加工性を向上させるためには、融着層の機械強度の向上が最も重要な課題である。先述した通り、機械強度を向上させるための代表的な手法の一つに熱硬化による架橋密度のアップが挙げられる。しかしながら未硬化にて焼付ける必要がある自己融着エナメル線において本手法は不相当であり、熱可塑状態で樹脂骨格自身の機械強度を向上させる必要がある。そのためには分子量を極力大きくすることが必要となるが、このような観点から考えると、「ブレンド」という手法が不利であることは明らかである。また、 BisA 型フェノキシと BisS 型フェノキシは非常に相溶性^{*3}が悪く各機能性ユニットが均一になり難い問題点があり、熱硬化 (融着処理) 後もそれぞれの樹脂に起因する Tg 点が残ってしまう。 BisA/BisS = 50/50 ブレンド品の動的粘弾性測定 (Dynamic Mechanical Spectroscopy 以下 DMS と記載) 結果を図6に示すが、120℃近傍に BisA に由来する 1st Tg、200℃近傍に BisS に由来する 2nd Tg が確認できる。このこ

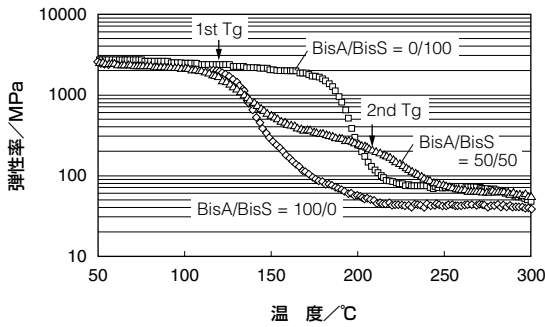


図6 各種フェノキシDMS変化

※本紙に示すDMSは全て160℃×2h熱硬化(融着)処理を行った樹脂に対して測定した。測定装置・環境・条件は下記の通り。
セイコーインスツルメンツ製DMS6100
測定環境：窒素雰囲気下 昇温速度：10℃/min 測定周波数：1Hz

とは熱安定性という観点において非常に不利に働くと想定される。

そこで我々は共有結合を介し、各ユニットを同一骨格に取り込みながら分子量を上げることで両課題を同時に解決すべく検討を行った。(この手法により作成されたフェノキシを以下共重合フェノキシと記載)。高分子量のフェノキシを得る方法としては、一般的にビスフェノール類とエピクロロヒドリンをアルカリ存在下で反応させる手法と、低分子量エポキシとビスフェノール類を触媒存在下で付加重合させる手法の2つが知られている⁽²⁾前者は副反応を起こやすく、副生成物として金属腐食の原因となり得る塩

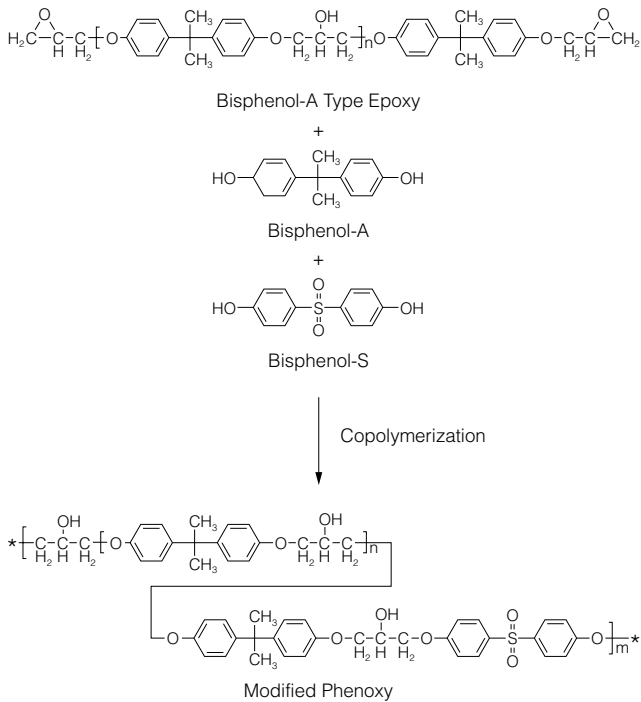


図7 各モノマーと反応スキーム

を生じるという問題を持っている⁽²⁾ため、我々は後者の手法を採用し開発を行った。各種モノマーの構造式と反応スキームを図7に示す。

上記スキームにて作成した共重合フェノキシを用い自己融着エナメル線を作成、ブレンド品対比で、その優位性を確認した。一般特性を表4、融着特性を表5、抽出特性を表6に示す。

図8に高温下固着力、図9に融着温度と融着力の関係を示す。

表4 一般特性比較

試験項目	ブレンド品	共重合品
皮膜構成	1層目	EsI
	2層目	PAI
	3層目	ブレンドフェノキシ 共重合フェノキシ
寸法	仕上径	0.814 mm
	導体径	0.745 mm
	絶縁層皮膜厚	0.0225 mm
	融着層皮膜厚	0.012 mm
ピンホール	0	0
可とう性	1d OK	1d OK
絶縁破壊電圧	12.3	13.0
耐摩耗性(一方向摩耗)	1200 gf	1450 gf
耐軟化試験	385℃	395℃
耐熱衝撃性(220℃×1h)	1d OK	1d OK

表5 融着特性比較

試験項目	ブレンド品	共重合品
初期融着力 [N] 160℃×2h処理	140	170
高温下融着力 [N]	80℃	98
	100℃	75
	120℃	26
	160℃	10
融着温度と融着力 [N]	100℃	94
	120℃	128
	140℃	135
	160℃	140
	180℃	160
	190℃	160

表6 抽出特性比較

試験項目	ブレンドフェノキシ	共重合品
NEMA抽出試験 [%]	0.06	0.03

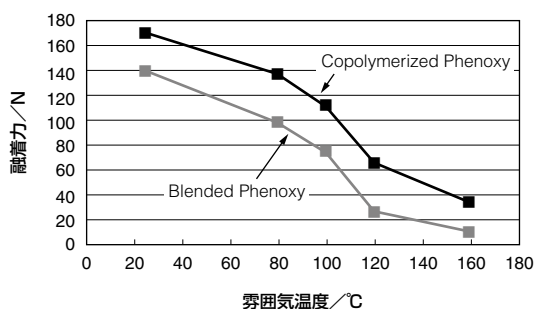


図8 高温下固着力

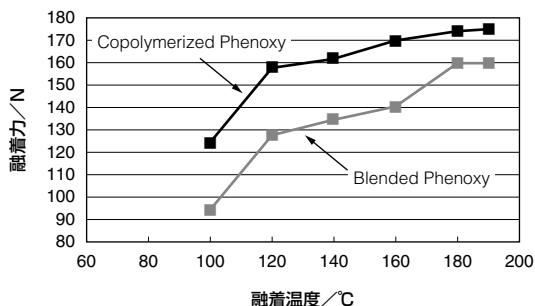


図9 融着温度と融着力

ブレンドフェノキシ対比、共重合フェノキシは下記1)～5)の5点の特性において優れていることが確認できた。

- 1) 耐摩耗：狙い通りの結果であり、両成分を共有結合を介して高分子化させることでブレンドフェノキシ対比、より強靱な樹脂となったものと考察する。共重合フェノキシではブレンドフェノキシにて確認された2つのTg点が消失していることをDMS測定(図10)にて確認、この結果は上記考察を支持する。
- 2) 初期融着力：上記理由と同様、共重合樹脂の強靱性によるものと考察する。
- 3) 高温下融着力：高温下における樹脂の弾性率に依存すると考察する。図10に示すDMSの100～160℃の温

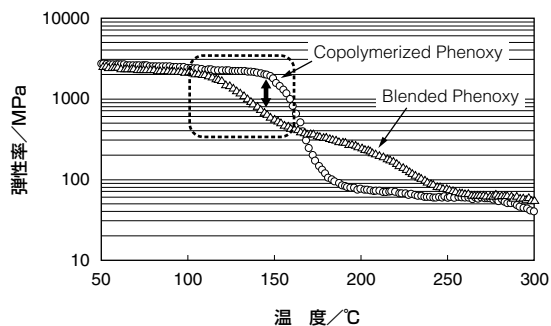


図10 共重合品とブレンド品のDMS変化

度範囲(破線エリア)の弾性率に注目すると、ブレンドフェノキシ対比、共重合フェノキシが高い弾性率を保持していることが分かる。ブレンドフェノキシは1st Tg点である110℃近傍から弾性率が低下し始めるのに対し、共重合フェノキシは150℃近傍にTgを有しているため、当該温度範囲において高い弾性率を保持することができる。

- 4) 融着温度と融着力：初期融着力同様、共重合樹脂の強靱性によるものと考察する。
- 5) 抽出特性：FT-IRを測定した結果、ブレンド品に見られる抽出物はビスAフェノキシであることを確認した。本特性において共重合フェノキシに優位性があることは言うまでもない。

共重合手法をもって始めて可能となった以上の5特性はハーメチックモーターの更なる高占積率化を可能とし、高温連続稼働下での長期信頼性向上に大きく貢献できるものとする。

3. 開発品特性一覧

ATZ®-300は冷媒分野における当社現行品(非融着)。

表7 一般特性

試験項目		ATZ®-300	SSB®-41	
寸法	仕上径 [mm]	0.820	0.814	
	導体径 [mm]	0.750	0.745	
	絶縁層皮膜厚 [mm]	0.0350	0.0225	
	融着層皮膜厚 [mm]	—	0.0120	
機械特性	一方向摩耗 [gf]	1450	1450	
	静摩擦係数 [—]	0.017	0.07	
	可とう性 [—]	1d 良	1d 良	
電気特性	ピンホール [—]	0	0	
	絶縁破壊電圧 [kV]	15.0	13.0	
熱的特性	耐熱衝撃性 [—]	220℃	1d 良	1d 良
		240℃	1d 良	1d 良
	耐軟化温度 [°C]	400	395	

*測定値であって規格値ではない

表8 融着特性

試験項目		ATZ®-300	SSB®-41	
融着特性	初期 [N]	183	170	
	高温下 [N]	80℃	151	137
		100℃	142	111
		120℃	98	65
		160℃	56	33
		180℃	21	19

*ATZ®-300の値は含浸ワニス(ELANTAS社製PD923)固着力

*測定値であって規格値ではない

表9 耐冷媒特性

試験項目		ATZ®-300	SSB®-41
R22浸漬後 プリスター	120℃	0	0
	140℃	3	3
	160℃	4	4
R22浸漬後 絶縁破壊電圧 [kV]	120℃	14.7	13.7
	140℃	14.3	13.6
	160℃	13.6	12.6
NEMA抽出 [%]		0.01	0.03

*測定値であって規格値ではない

表10 冷媒/冷凍機油適合性

試験項目		ATZ®-300	SSB®-41
全酸価*4 [mgKOH/g] 140℃×2000h 加熱後	鉱物油R22	0.02	0.02
	エステル油R410A	0.02	0.02
	エーテル油R410A	0.02	0.02

*測定値であって規格値ではない

4. 結 言

鋭意開発の結果、冷媒/冷凍機油中での長期信頼性に優れ、高占積率タイプハーメチックモーターへの適用が可能な新耐冷媒融着エナメル線SSB®-41の開発に成功した。共重合手法をもって最適に分子設計された融着皮膜を有するSSB®-41はその優れた機械強度をもってハーメチックモーターの更なる高占積率化を可能とし、高い融着力、冷媒/冷凍機油中における長期信頼性による品質向上に大きく寄与できるものと期待する。

*本製品はSumitomo Electric Wintec Malaysia Sdn.Bhdにて既に製造・上市されているものである。特許出願済み。

用語集

※1 ハーメチックモーター

ハーメチックモーターは、空調機器、冷房機器、冷蔵庫等の密閉型圧縮機の駆動に用いられるモーターであり、冷媒に浸漬された状態で駆動される。従って、モーターの内部に搭載されるステータや、その絶縁体も冷媒に浸漬され、かつ室温から100～120℃前後に亘る、非常に厳しい温度条件下で使用される。

※2 フーリエ変換赤外分光光度計

物質に赤外線を当て、得られた赤外吸収スペクトルから原子団や官能基を特定する分析装置。検出器で検出した干渉

光をデジタル化、フーリエ変換することで赤外吸収スペクトルを得るタイプのものをフーリエ変換分光光度計と呼ぶ。

※3 相溶性

2種類または多種類の物質が相互に親和性を有し、溶液または混和物を形成する性質。

※4 全酸価

全酸価とは冷凍機油中の酸成分の割合を示し、過度な酸価の上昇は冷凍機油の粘度上昇、スラッジの生成を招く。スラッジの生成はキャピラリーの閉塞、故障の原因となる。

参 考 文 献

- (1)「エポキシ樹脂ハンドブック」、新保正樹編、日刊工業新聞社、P.20
- (2)「エポキシ樹脂」、垣内弘編著、昭晃堂、P.37
- (3)「エポキシ樹脂ハンドブック」、新保正樹編、日刊工業新聞社、P.34

執 筆 者

吉田 健吾*：住友電工ウインテック(株) 技術開発部
耐熱高分子絶縁材料の開発に従事



杉本 裕示：Sumitomo Electric Wintec (Malaysia) Sdn. Bhd
Chief Engineer

三木 剛：住友電工ウインテック(株) 品質保証部 主査

外山 茂：Sumitomo Electric Wintec (Malaysia) Sdn. Bhd
General Manager

紀平 和伸：住友電工ウインテック(株) 生産技術部 グループ長

松浦 裕紀：住友電工ウインテック(株) 技術開発部 グループ長

*主執筆者