高温領域へ広がる電磁巻線の 絶縁材料とその応用

正員 美藤 亘 三菱電機(株)中央研究所
正員 築地 真 三菱電機(株)中央研究所

1. はじめに

回転機・静止器などの電気機器は、小形化・軽量化の追求、使用条件の多様化・過酷化の進展など、いわゆる高性能化を図るための研究・開発が絶え間なく続けられている。

例えば、表1に示すように、小形になるほど冷却方式の改善に代表される小形・軽量化や高耐熱化のウェイトが高くなっている⁽¹⁾。小形の低圧開放形電動機は耐熱化の進歩の度合いが大きく、図1に示すように同一フレームに入る最大出力が1950年代以降急激に増大している⁽²⁾。

このように、機器の高性能化の要求をかなえるため、耐熱性の向上は重要なファクタであり、絶縁材料や組織の高耐熱化が大きな役割を担っていると考ええる。

有機絶縁材料の耐熱性は、合成化学の著しい進歩による新しい絶縁材料の出現ともあいまって着実に向上してきた。発電機、電動機、変圧器や電磁石などの電磁巻線（以後、巻線）に用いる有機絶縁材料の本格的な耐熱性の向上は、1950年代に工業化されたPET（ポリエチレンテレフタレート）フィルムの出現により始まったと考えられる。

また無機絶縁材料は、1950年代の宇宙開発を機に、有機絶縁材料では達成不可能な250～300℃以上の高温分野での使用に対して開発され始めた。当時は、人工衛星・ロケットやミサイルなどへの運用を目的としていた。現在では、特殊な用途ではあるが、大気中350℃以上でも電気絶縁性が保たれる機器も工業化されており、特にセンサ用としては800℃程度までの実

表1 大形回転機の技術的進歩の度合

機 種	技術的進歩の度合			
発 電 機	高	大	小形	高
大形高压交流機	電	容	軽	耐
一般産業用電動機	圧	量	量	熱
車 両 用 電 動 機	化	化	化	化

図1 電動機の同一フレームに入る最大出力の変化

用化も報告されている。

ここでは、高耐熱絶縁材料と回転機を中心とした電気機器への適用例について、その現状と課題について紹介する。

2. 耐熱性とは

2.1 絶縁材料の耐熱性

絶縁材料において、耐熱性は最も重要な性質の一つである。有機絶縁材料の耐熱性を表わすパラメータは、

①高分子鎖の熱運動に起因し、軟化・熔融などの変化を反映するもの（例えば、ガラス転移温度や融点など）

②高分子鎖の分解や酸化などの化学変化を反映するもの（例えば、熱分解温度）

に大別される。

Insulating Materials for Electric Apparatus at High Temperature.

By Wataru Bitoh, Member and Makoto Tsukiji, Member (Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp.)

キーワード：電気機器、電磁巻線、高耐熱絶縁、耐熱材料、絶縁特性

図 2 ポリイミドフィルムの各種特性の半減時間

表 2 IEC 規格による耐熱区分

Y	90°C
A	105°C
E	120°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C
200	200°C
220	220°C
250	250°C

(注) 250°C 以上は 25°C 間隔で区分し、耐熱クラスはその温度を示す数字で表示する。

電気機器における絶縁材料の耐熱性は、上記の①に関する特性も考慮されるものの、②の化学変化に基づく特性値の変化によるものを示す場合が多く、特性値が半減する時間により耐熱性を表わすことが一般化している。有機材料では、図 2 に示すように特性値により耐熱寿命が異なることが知られており⁽³⁾、機器への使用に際してはこれらを考慮する必要がある。

一方、無機絶縁材料においては、一般的には有機絶縁材料に対するような化学変化に起因する耐熱性の概念は適当ではないため、電気・機械的な特性などの中からそれぞれの用途に対し適切な指標を用いている。

2.2 耐熱区分と表示方法

絶縁材料の耐熱区分については、IEC Publication 85(1984)によって表 2 に示すように区分されている。これは以前は 180°C 以上を C 種と称していた (1957 年版)。

絶縁材料の耐熱区分の決め方は IEC Publication 216-1~5(1990-1993)に示されている。これによれば、耐熱特性の表示方法には、TI (温度指数)、HIC 半減温度幅) が用いられることになった (表 3)。

表 3 耐熱特性を表わす指標

TI (温度指数)	耐熱グラフ (アレニウスグラフともいう。試験結果を絶対温度の逆数と終点に到達する時間の対数の関係としてプロットした図) 上で一定の時間 (IEC では通常 20,000 時間) に相当する摂氏の温度に対応する数字。
HIC (半減温度幅)	耐熱グラフ上において、TI または RTI の温度における終点までの時間 (IEC では通常 20,000 時間) の半分に相当する摂氏の温度の数字と、TI または RTI との差の数字。 $HIC \sim (TI + 273)^2 \cdot (\log 2) / b$ ただし、 $b = \Delta E / R$ (ΔE : 活性化エネルギー、 R : 気体定数) の関係がある。
RTI (相対温度指数)	試験材料と参照材料との比較試験において、両者を同時にエージングし、同一の基準で判定したとき、参照材料の既知の温度指数に対応した時間を用いて得られた試験材料の温度指数。

2.3 機器の耐熱性

一般的に、機器絶縁の耐熱区分は絶縁材料の耐熱区分とは同一ではなく、実機の状態のように複合化したいわゆる絶縁システムとしてとらえられている。現在、絶縁システム関連の試験・評価方法に関する規格を IEC Pub. 505 として統合する作業がすすめられており⁽⁴⁾、耐熱性評価に関連した規格もこの中に含まれる予定である。

3. 高耐熱絶縁材料とその絶縁特性

一般的に 250~300°C を境に、使用される絶縁材料は有機から無機に変わる。ここでは、耐熱温度 200°C 以上の有機および無機絶縁材料とその絶縁特性について紹介する。

3.1 有機絶縁材料

合成高分子材料の耐熱性と適用開始年代を図 3 に示す。180°C 以上の絶縁材料としては、ノーメックスに代表されるメタ系アラミドとケブラーで知られるパラ系アラミドがあり、これらの材料は、現在も新規商品群としてフィルム化を含む開発が精力的に行われている。また、有機材料中で最も耐熱性の高い材料とされるポリイミドは、ポリアミック酸系、ビフェニル系やベンゾフェノンテトラカルボン酸系が開発されている。前二者の開発は一段落し、その用途展開もほぼ峠にさしかかっていると思われるが、後者は熱融着性などの特異な特性もあり、現在でも開発が継続している。

表 4 に、最高の耐熱性を有する薄葉材料であるポリイミドフィルムの一般特性を示す。ポリアミック酸タイプのポリイミドの耐熱性は、図 2 のような特性を示すが、最高の耐熱性を示すビフェニル系のポリイミド

図 3 高分子絶縁材料の適用開始年と耐熱性の目安

は、含浸レジンなどの複合化を行って 250°C 以上の使用が可能である。

250°C を超えてさらに使用限界を拡大するための方法としては、例えば酸化劣化を生じさせない無酸素の環境での利用がある。図 4 で示すように 300°C を超える温度でも十分な特性を発揮させられる⁽⁵⁾。なお、この場合に使用する含浸レジンとしては、フィルム材料と同等のものを使用することが望ましい。

3.2 無機材料

250～300°C 程度を超える絶縁材料としては、無機材料あるいは無機ポリマが使われている。無機材料は、有機材料のようにフィルム化させることが困難であるのが、成形体や繊維・粉体としての利用や有機材料との複合などを行って形成し、焼成工程を経て絶縁体の完全無酸化を図っている。また、運転時の高温により焼成する方法もある。したがって、本項では、機器絶縁という観点から、絶縁体としての特性を中心に述べる。

高温における絶縁を構成するものとしては、

- 接着や含浸用無機材料
- 無機繊維やテープシート材料
- コーティング材料
- 無機絶縁電線

などがある。

重要な構成材料である接着・含浸用無機材料としては、ケイ酸塩系塗料、リン酸系塗料、コロイダルシリカやコロイダルアルミナがある。また、例えば図 5 に示すような反応過程を経て、高温での焼成により無機化するシリコーン樹脂（セラミック化シリコーン）も

表 4 ポリイミドフィルムの一般特性

項 目	単 位	カプトン (東レ・ デュポン)	ユービレックス (宇部興産)	ラーク TPI (三井東圧)
比 重		1.42	1.47	1.40
引 張 強 度	kgf/ mm ²	17.6	40	16.6
引 張 伸 度	%	70	30	8.5
引張弾性率	kgf/ mm ²	302	800	360
屈 曲 回 数	回	10,000 (D 2176-63 T)	>100,000 (25 μm, D 2176)	
端 裂 抵 抗 (Graves)	kg/mm		20	
ガラス 転移温度	°C	420	—	259
長期 耐熱温度	°C	230 (UL 電気) 200 (UL 機械)	240 (50 μm >) 220 (50 μm)	
燃 焼 性		自己消火性	自己消火性	
加熱収縮率	%	0.3 (250°C, 30 分)	0.07 (250°C, 2 時間)	0.16 (150°C, 30 分)
線膨張係数	cm/cm /°C	2.0×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵
温度 膨張係数	cm/cm /%RH	2.2×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻⁵	
吸水・ 吸湿率	%	1.3 (23.5°C, 50 % RH)	1.2 (23°C, 水中 24 時間)	1.8 (23°C)
絶縁 破壊電圧	kV/mm	276	272	
誘 電 率 at 1 kHz		3.3	3.5 (50 Hz)	3.4
損 失 係 数 at 1 kHz		0.0025	0.0013 (50 Hz)	0.0022
耐薬品性	酸	○	○	×
	塩 基	×	△	×
	有機溶媒	○	○	○

多く使用される⁽⁶⁾。

無機繊維やテープシートとしては、E ガラス、R ガラス、S ガラスや石英ガラス、繊維およびテープや、アルミナクロス、ネクステル、マイカなどがある。これらは単独で 사용되는ことは少なく、接着剤や補強材とを合わせて用いられることが多い。図 6 にテープ材料の加熱後の引張り強さを示す。E ガラスは高温での強度低下が著しく、ネクステルやフラシルも徐々に強度低下がみられる。これに対して、シリカクロスは加熱による強度低下はみられないものの、絶縁値は低い⁽⁷⁾。

コーティング材料としては、金属表面に無機絶縁を

表 6 電線の一般特性

		有機電線		無機電線	
		ポリイミド フィルム巻線	SHR-2	SHR-3	
構造	絶縁体	ポリイミド フィルム巻	セラミック ポリマ2/ エナメル	セラミック ポリマ3/ セラミック ファイバ巻	
	寸法				
mm	仕上り外径	1.139	1.106	1.595	
	導体径	1.000	1.004	1.004	
	セラミック厚さ	—	0.041	0.031	
特*2 性	絶縁破壊	2個捲り法	8.61	0.83	2.81
	電圧(kV)	金属箔法	12.3	—	—
	可とう性	3 d 良	2 d 良	3 d 良	
	密着性(回)	14	7	20	
	耐熱衝撃性 (450°C×12 h)	3 d 良*2	2 d 良	3 d 良	

*1 300°C×12 h

*2 試片数は各 15 個。絶縁破壊電圧は平均値で他は最低値で示す。

図 8 長時間絶縁特性の変化(絶縁破壊電圧)

4. 機器への適用例

電磁巻線の高耐熱化の機器への応用を図 9 にまとめた。これらの中から数例について紹介する。

4.1 有機絶縁の適用例

(1) 車両用電動機

収容スペースに制約があり、かつ小形、軽量化の歴史ともいえるこの機種種の巻線の温度上昇は、IEC Pub. 349(1991)に規定されており、*H* 種電動機の場合には固定子で 180°C、回転子で 160°C である。これに周囲温度を加算するので、通常の回転機に比べて 20~40°C の超過となる。

絶縁構成の例を表 7 に示すが、適用にあたっては運転中に受けるさまざまなストレスを模擬した加速評価試験に合格することが必須である。車両用電動機は整流子があるため耐熱性の限界が指摘されたこともあつ

図 9 高耐熱機器への応用例

表 7 車両用電動機絶縁の構成例

絶縁使用	回転子		固定子	含浸レジン
	素線絶縁	対地絶縁	対地絶縁	
A	ポリイミド フィルム	ポリイミド フィルム ポリイミド マイカ	ガラスマイカ	複素環系
B	電着マイカ	ポリイミド フィルム	ガラス ポリイミド	イミド系
C	ポリイミド フィルム	ポリイミド マイカ	ポリイミド マイカ	イミド系

図 10 新幹線“のぞみ”用主電動機

たが、交流化の急激な進展が一層の耐熱化を促している。今後、耐熱性は導体である銅の耐熱限界によって決定される程度まで向上するであろう。

図 10 に新幹線“のぞみ”用主電動機を示した。

(2) ダウンホールポンプ(DHP)用モータ

我が国に唯一豊富に存在する地熱エネルギーを発電に利用することが検討され、九州地区をはじめ各地で地熱発電所が稼働している。しかし、自噴力が弱いなどのため未利用となっている高温の地熱水を、高温・高圧力のまま水中ポンプ方式で汲み上げて発電に利用する DHP が検討されている⁽¹¹⁾。このポンプモータは、坑井内に設置するため図 11 のように細径長尺となる(下半分がモータ部)。このような形状で 200°C・50 気圧の熱水中で運転するため、モータに使用する

図 11 ダウンホールポンプ(DHP)用モータ

図 12 CRDM 用モータ

表 8 高耐熱絶縁の例

文献	構	成
(12)	MgMgO 充填銅シースケーブル	
(13)	ボロシロキサン被覆無機ポリマ線 セラミック繊維巻無機ポリマ線	
(9)	シロキサン被覆線	
(7)	セラミック繊維巻無機塗料塗布電線使用 軟質マイカテープ／プリプレグセラミックテープ／無機化 シリコーン塗布	
(14)	シリコーン含有ガラス裏打集成マイカテープ	
(15)	ガラス巻線／特殊シリコーン接着剤含有ガラス裏打集成マイ カテープ 合成フッ素マイカ充填特殊シリコーン樹脂 など	
(16)	DGC (シリコーン処理)／ガラス繊維裏打シリコーン含浸集 成マイカ マイカ粉充填シリコーン樹脂	
(17)	セラミックテープ／セラマディップ 538	

絶縁材料は耐熱性ととともに加工性に優れたもので、かつ小形化のために高電圧化にも対応できることが必須である。このため、モータは全ポリイミド化し、特殊油中で、無酸素雰囲気中で運転できるように設計・製作されている。

4.2 無機絶縁の適用例

250°C以上の高温用の絶縁として発表されている文献は、表8に示すように600°C程度までのものがあるが、後で述べるように、電磁巻線として銅系導体を使用するため、一般には400°Cを超えることが困難であると考えている^{(7)(9)(12)~(17)}。

(1) 小形炉 CRDM 用コイル

現在実用化されている原子炉は、従来から安全評価を要求されていた特定の事故要因に対して、これを設計基準内事象から排除するため、燃料制御棒駆動機構(CRDM)を原子力圧力容器内に内装することが検討されている⁽¹⁰⁾。内装化することにより、CRDMの運転温度は300°Cを超えるため無機絶縁を検討してい

図 13 121 回後の残存破壊電圧のワイブル分布(分割電極)

る。

CRDMのマグネットは、セラミック溶射された金属製ボビン上に、シリコーン系無機レジンを半硬化処理したアルミナクロス層を設け、無機絶縁電線を巻線した絶縁構成である。この状態でセラミック層の硬化処理を行った後、シリコーン系無機レジンを真空注入し、所定のプロセスでセラミック化処理を行っている。

モータは金属製ボビン上にセラミック溶射がない以外はマグネットと同様の絶縁仕様となっているが、高温部での導体の接続による信頼性の低下を防止するため、特殊な巻線法を開発した試作機による特性確認を行っている。図12に試作中の固定子を示す。

(2) 高速増殖炉(FBR)用電磁ポンプ

資源小国日本の次世代エネルギー源として、高速増殖炉(FBR)の開発が期待されている。小形化・高信頼度化のため、冷却材である金属ナトリウムを電磁ポンプで直接駆動する方式が検討されている。500°Cを超える耐熱性が要求されるため、巻線絶縁にはすべて無機材料が使用されている。現在、試験コイルでの絶縁特性変化が報告されているが⁽¹⁸⁾、無機絶縁としては高圧の1.5 kVの定格電圧で2種類の絶縁設計がな

されている。アルミナ繊維補強集成マイカ巻電線を素線絶縁とし、主絶縁にはアルミナ繊維補強マイカテープが選定され、無機ポリマで塗り巻きした後、焼成されている。図 13 に示すように、運転を模擬した 550~200°C の 121 回のヒートサイクルに対し、良好な特性を示し、中でもはがしマイカを用いた系は残存絶縁破壊電圧も高い。

(3) 高温液用キャンドモータ

従来の熱媒搬送システムでは、絶縁の耐熱性の限界のためモータを冷却しながら使用していたため、エネルギー損失が大であった。マイカ、耐熱ガラス繊維とシリコン系樹脂の組み合わせにより、350~400°Cでの実用が可能となったため総合効率の大幅向上が達成されたという報告がある⁽¹⁶⁾。

(4) 蒸気圧力差利用 C 種(耐熱 400°C)の発電機

工場プラント用高压ボイラの減圧弁の代わりや大気排出箇所に発電装置を設け、減圧弁としての機能とともに、この蒸気エネルギーを電気エネルギーとして回収することができる。絶縁は、ガラスマイカ巻無機質電線、ガラス裏打ちマイカとシリコン系無機ワニスなどを用い、400°Cでの実用が可能としている⁽¹⁹⁾。

(5) 自動車用スタータ

無機粉体、シリコン系結合材を半硬化状態にし、さらに上層に耐熱性と巻線加工劣化防止の機能を付与するエナメル層をもつ耐熱電線を使用している⁽²⁰⁾。

5. 今後の方向

電磁巻線を有する電気機器として、ここでとりあげた回転機や電磁石は、機械的エネルギーと電氣的エネルギーの変換という機能もあって、小形・軽量化と、それに伴う耐熱化が欠かせない要因となっている。高耐熱化を図っていく上で、現状の問題点を整理し、今後の方向をまとめる。すなわち、

- ①加工性に優れる絶縁材料は有機系に限られ、300°Cを超えることができない。
- ②無機系は可能性に乏しく、ポーラスでありボイドフリー化が困難である。また、絶縁層が厚くなり絶縁処理プロセスもやっかいなものが多い。
- ③高温使用に耐える電気用導体の材質と接続法に抜本的な解決法がない。
- ④機能評価・性能評価法に簡便なものがなく、検証

に多大の時間と労力を要する。

などがあげられる。

上記の問題点を一挙に解決する方法は、現状では見当たらないが、薄肉絶縁層の多層化や導体-絶縁層間の傾斜機能化など、基礎的で着実な研究・開発が強く望まれる。

(平成 5 年 7 月 9 日受付)

文 献

- (1) 中島：電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-89-28 (平 1)
- (2) 園田：日東技報, 30, 1, 1~8 (平 4)
- (3) 小林：プラスチック, 34, 7, 87~92 (昭 58)
- (4) A. Kelen: *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 9, 2, 31~35 (1993)
- (5) M. Tsukiji & W. Bitoh: *Proc. 1990 IEEE EI Symp.*, p. 88
- (6) 東レシリコン AY 49-208 カタログ
- (7) H. Mitsui, et al.: *5th BEAM International Electrical Insulation Conference*, p. 187-191 (1986-5)
- (8) 諏訪原・山本：平成 3 年電気学会全国大会, No. 350
- (9) 瀬野尾・臼杵・山田・天野・坪井：フジクラ技報, 第 76 号 (平 1)
- (10) 石坂・伊藤：EAERI-M-89-174
- (11) 越後屋：火力原子力発電, 42, 10, 36~41 (平 3)
- (12) 古河電工(株)カタログ, MI-53013
- (13) 森田, 他：昭和電線電纜レビュー, 33, 1, 67~72 (昭 58-6)
- (14) 曾根, 他：電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-83-8 (昭 58)
- (15) 押山・宮崎・山崎・林：安川電機 46, 176, 196~205 (昭 57)
- (16) H. W. Rotter: *Siemens Review*, XLV, 11, 483~485 (1978)
- (17) T. K. Gupta, et al.: *NAECOM '75RECORD* p. 713~719
- (18) 香月・熊沢・黒木・石田・樽原：電気学会誘電・絶縁材料研究会資料 DEI-92-108 (平 4)
- (19) 芳賀・前田・佐藤・竹田：電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-90-39 (平 2)
- (20) 臼杵・遠藤・伊藤・坪井・久保田：特許公報 昭 59-14842

美 藤 亘(正員)

昭和 21 年 8 月 9 日生。40 年 3 月香川県立多度津工業高校電気科卒業。同年、三菱電機(株)入社。現在、同社中央研究所絶縁技術研究部勤務。主に回転機絶縁、電磁石の新絶縁組織開発業務に従事。

築 地 真(正員)

昭和 30 年 9 月 1 日生。53 年 3 月名古屋大学工学部電気工学科卒業。53 年 4 月三菱電機(株)入社。現在、同社中央研究所絶縁技術研究部勤務。主に高電圧機器、特殊環境機器の絶縁開発業務に従事。