

# C種HIPACT絶縁システムの新H種車両用主電動機

## New Class H Traction Motor with Class C HIPACT Insulation System

近年、車両性能の向上に対応して、これまで無溶剤エポキシ・レジン、フィルム絶縁などの新絶縁システムが車両用回転機の小型・軽量化、信頼性向上に果たしてきた効果は極めて大きい。

今回、日立製作所ではこれら従来絶縁の耐熱性を大幅に上回る連続220°C使用可能なC種絶縁システム適用の新H種絶縁主電動機の開発に成功した。この新絶縁システムはC種無溶剤レジン(「ISOXレジン」)を含浸したもので、各種の過酷試験による多角的な評価により、その優れた耐熱性と実使用状態での信頼性が立証された。この新技術は、車両用主電動機の小型・軽量化、あるいは単機容量の増強及び信頼性の向上に大いに活用することができる。

袴田武司\* Hakamada Takeshi

宮 寿一\* Miya Hisaichi

狩野育志\* Kano Ikushi

### 1 緒 言

車両用主電動機は、台車へ収納されることからくる厳しい重量及び寸法上の制約を受け、しかも、けん引力増強への要請にこたえて出力増大の傾向にある。これらの要請に応ずるため、新絶縁材料とそれをシステムとして適用した絶縁技術が果たしてきた役割は極めて大きく、主電動機の進歩は、絶縁システムの進歩といっても過言ではない。すなわち、図1に示す車両用主電動機の比出力変遷曲線は、そのことを如実に証明していると言えよう。

車両用機器の小型・軽量化のニーズに対応し、同一スペースで現在以上に容量の増大を図るには、いっそうの耐熱性向上、すなわち、H種主電動機の採用を図らざるを得ない。一方、車両用主電動機は振動、ダスト、雨水など過酷な使用条件下で用いられ、更に温度規定に特殊な配慮が払われているため、耐熱性の点でも過酷な条件となっている。これらのことから日立製作所では、C種の耐熱性を持ち、作業性、電気的・機械的特性の優れた新無溶剤レジン、(Isocyanurate Oxazolidone レジン:「ISOXレジン」)を採用した耐熱性220°Cの「C種HIPACT絶縁システム」を開発した。今回、これを適用した「新H種車両用主電動機」を完成したので、その概要を以下に紹介する。

### 2 車両用主電動機の温度規定

車両用回転機に関する温度規定は、国際的には国際電気標準会議(IEC)があり、これに準拠して設計・製作が行なわれている。

H種絶縁に関するIECの規定値は、表1に示すように温度上昇限度と最高周囲温度との和が固定子で220°C、電機子で200°Cとなっている。これは、H種絶縁システムの耐熱許容温度180°Cに対し、各々40°C及び20°Cの超過を意味する。

この矛盾に対しては、周囲温度は必ずしも長期的に40°Cにはならないこと、更に負荷も平均的には定格よりもかなり低いことから、普通の運転条件では満足できる絶縁寿命が期待されると解釈されてきた。

しかし、いっそう高い信頼性を保つためには、H種の車両用回転機としては固定子で220°C以上、回転子で200°C以上の耐熱性をもつ絶縁システムであることが望ましい。

今回、日立製作所が開発した「C種HIPACT絶縁システム」は、まさにこの要求にこたえるものである。

### 3 C種無溶剤レジン「ISOXレジン」

含浸レジンには熱放散、機械的強度、耐電圧及び耐環境性(雨水、ダストなど)の基本的特性の面で、絶縁システムを構成す

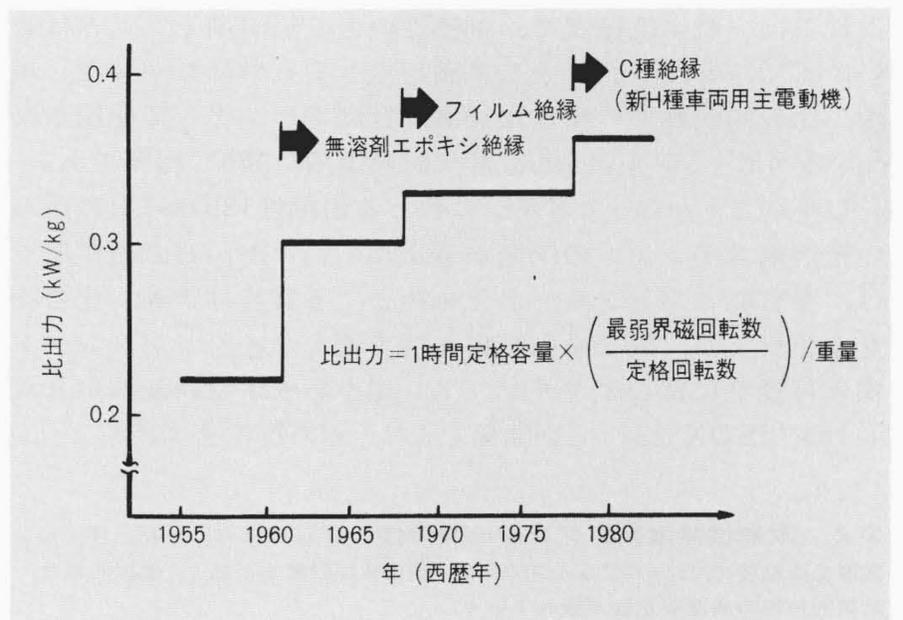


図1 車両用主電動機の比出力変遷曲線 絶縁システムの進歩に伴う比出力の向上効果を示す。

表1 H種車両用回転機の温度規定 H種車両用回転機は、周囲温度+温度上昇の最大値が固定子220°C、回転子200°Cとなり、絶縁の耐熱性180°Cより高い温度での使用が認められている。

No.	項 目	IEC-349	
1	規 格 名 称	車両用回転電機規定	
2	巻線温度上昇限度 (°C)	固定子	回転子
		180	160
3	最高周囲温度 (°C)	40	
4	該当絶縁規格	IEC-85	
5	同上名称	電機絶縁材料の耐熱区分	
6	同上許容温度 (°C)	180	

\* 日立製作所日立工場

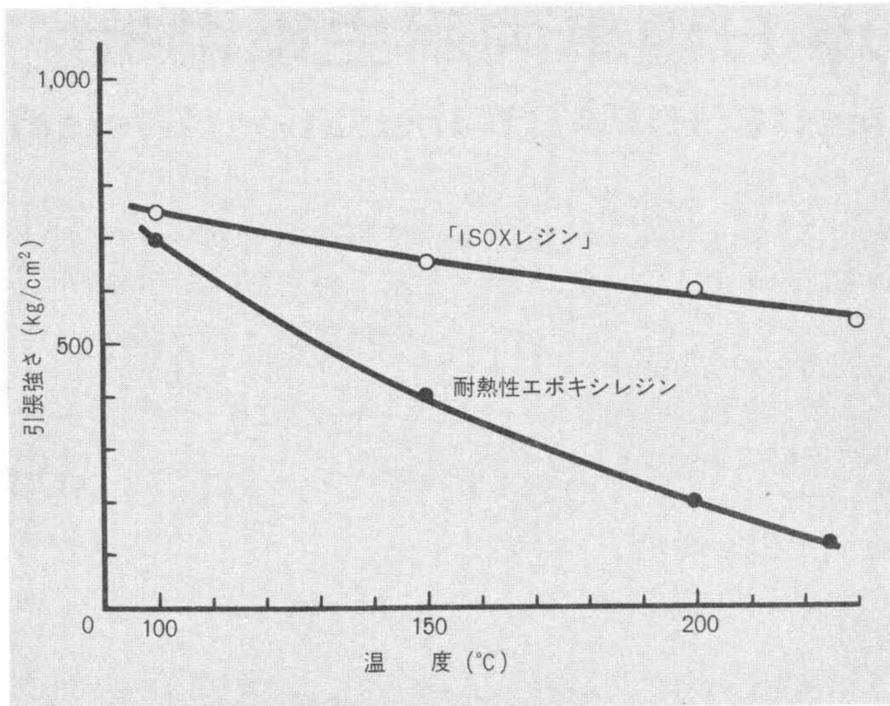


図2 引張強さの温度特性 「ISOXレジン」の引張強さは、230°Cの高温でも500kg/cm<sup>2</sup>以上の高強度をもっている。

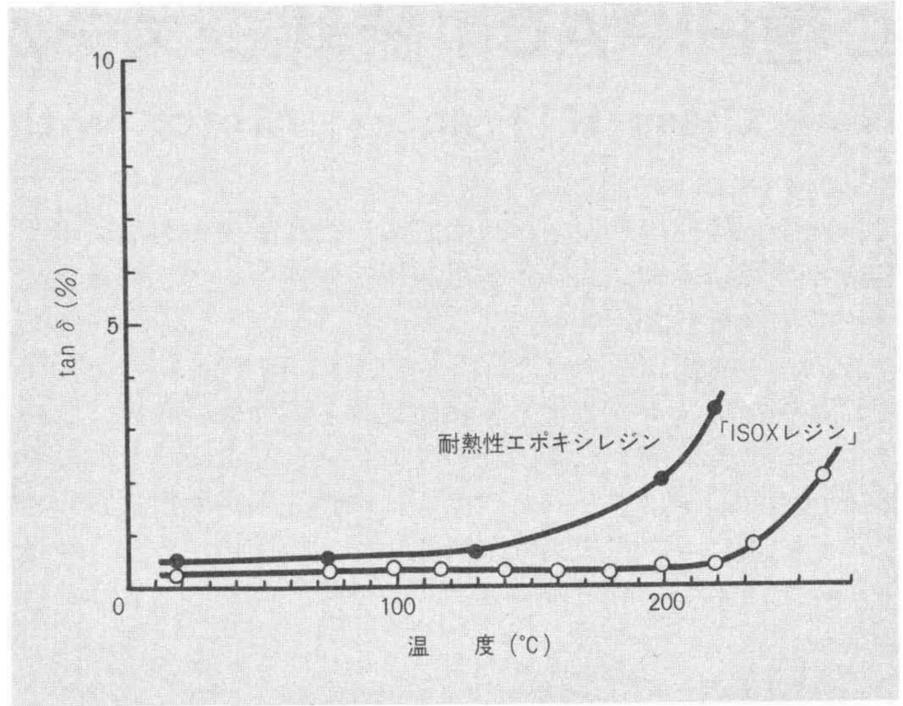


図3 tan δ(誘電正接)の温度特性 「ISOXレジン」の誘電正接は、220°Cまで立上りがなく、高温の安定性が極めて優れている。

る材料の中で最も重要な役割を果たしていることは、溶剤系ワニスが無溶剤エポキシ・レジンに切り替えたことにより絶縁システムの信頼性が飛躍的に向上した事実からも裏付けられている。

現在、ポリイミド、ポリアミドイミド、シリコーン、ポリジフェニルエーテルなど優れたレジンが開発されているが、これらは一般に低粘度で、可撓性のある無溶剤レジンとは言いきく、含浸レジンとして満足できるものはなかった。現在、比較的耐熱性の優れた無溶剤含浸レジンとして使用されているエポキシ・レジンも、最大耐熱温度は180°C程度である。

以上のことから、エポキシに代わる耐熱性180°C以上の新しい無溶剤含浸レジンが開発が望まれていたが、日立製作所では、多官能イソシアネート化合物と、多官能エポキシ化合物を主原料とし、同一系内に耐熱性の優れたイソシアヌレート環と可撓性に富むオキサゾリドン環を形成する新無溶剤含浸レジン「ISOXレジン」を開発した<sup>1)</sup>。その特性をエポキシ・レ

ジンで最も耐熱性の優れているものと比較して表2及び図2、3に示す。このレジンには以下に示す各種の優れた特性をもっている。

- (1) 硬化前の液状状態では、常温で低粘度であるため真空含浸に適し、含浸効果が優れている。
- (2) シェルフ・ライフが長いので反復使用ができる。
- (3) 高温強度が高く、また常温での可撓性が良いので、振動に強い。
- (4) 無溶剤レジンであるため熱放散が良く、雨水・ダストなどの耐環境性に優れている。
- (5) ガラス転移点が285°Cであり、220°C以上の耐熱性をもっている。

#### 4 C種HIPACT絶縁システムの信頼性

車両用主電動機は、熱ストレスのほかに台車搭載による外部振動や高速回転による機械的ストレス、雨水などの環境的ストレスを受ける過酷な条件で使用される。そこで各種の過酷試験を実施し、多角的に絶縁システムの信頼性を確認した。これら信頼度試験のモデルは、すべて、コイル寸法が最大となる大形主電動機の実物コイルを用いた。以下に信頼度試験の概要について述べる。

##### 4.1 初期特性

図4に「C種HIPACT絶縁システム」の初期特性を示す。220°Cのtan δ(誘電正接)も10%前後であり耐熱性が優れていることを示している。また、浸水24時間による絶縁抵抗は全く低下が認められず、耐水性も極めて優れている。

##### 4.2 高温熱安定性及び劣化特性

この絶縁システムの信頼性試験の数例を次に示す。

###### (1) 熱応力特性

起動・停止の繰返しに伴うヒートサイクルによる熱応力耐量を導体温度60~220°C、実機相当の通風状態で1,000回確認する。

###### (2) 高温熱安定性

電機子コイルと比較して導体寸法が非常に大きい界磁コイルを、目標の220°Cより10~50°C高い状態で連続通電し、温度安定性を確認する。

###### (3) 課電劣化特性

電機子コイルは、スロット内に収納されるため、絶縁上も寸

表2 耐熱性無溶剤レジン的一般特性 「ISOXレジン」は、硬化前は常温で低粘度で、シェルフライフが長く、硬化後は耐熱性が高く、機械的特性、電気的特性の高温安定性が優れている。

項目	品 種	「ISOXレジン」	耐熱エポキシ	
		(超耐熱グレード)	レジン	
硬 化 前	外 観	赤褐色透明	淡黄色透明	
	比 重	25°C	1.21	1.19
	粘 度	25°C (P)	1.4	1,500
	ゲル化時間	100°C (min)	262	40
硬 化 後	シェルフライフ	—	反復使用可能	反復使用可能
	比 重	25°C	1.25	1.20
	体積収縮率	(%)	3.4	3.3
	線膨張係数	(/°C)	5 × 10 <sup>-5</sup>	7.8 × 10 <sup>-5</sup>
硬 化 後	ガラス転移点	(°C)	285	210
	曲げ特性 (25°C測定)	モジュラス(kg/cm <sup>2</sup> )	3.3 × 10 <sup>4</sup>	3.2 × 10 <sup>4</sup>
		曲げたわみ(%)	2.1	1.5
		曲げ強度(kg/cm <sup>2</sup> )	1,000	920
誘電率	25°C	3.0	3.3	
	220°C	3.0	5.0以上	
体積抵抗率	25°C (Ω・cm)	5 × 10 <sup>16</sup>	5 × 10 <sup>16</sup>	
	220°C (Ω・cm)	3 × 10 <sup>13</sup>	2 × 10 <sup>12</sup> 以下	

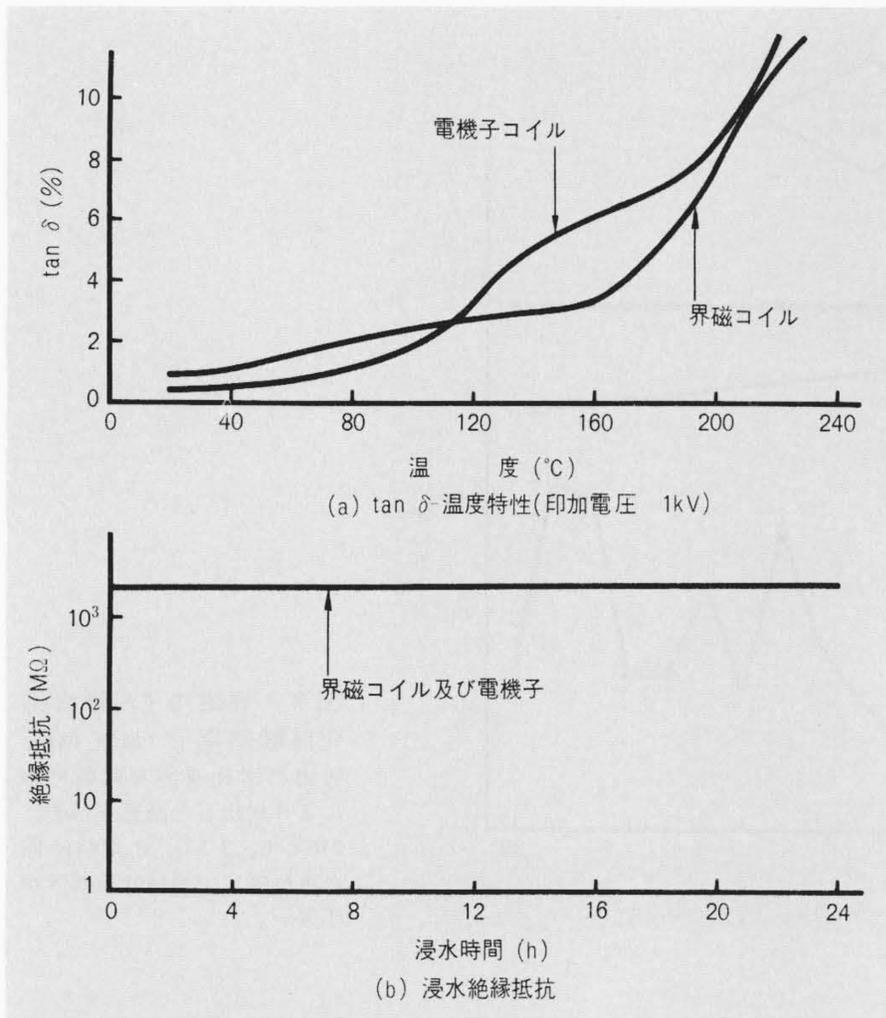


図4 初期特性 C種HIPACT絶縁システムは、 $\tan \delta$ 、浸水絶縁抵抗ともに優れた特性を示す

法制約が厳しい上に電機子の誘起電圧は交流電圧であることから、雰囲気210°Cで周波数加速により課電寿命を確認する。

(4) 複合劣化特性

耐熱性、耐振性及び耐湿性の複合劣化特性評価のため、IEC (国際電気標準会議) 505、IEEE (米国電気電子技術者協会) 304 に準拠して、

- (a) 劣化ストレスを連続的に加えた場合
  - (b) 熱、振動及び吸湿を同時に加えた場合
- について長期劣化特性を確認する。

などの各種評価試験を実施した。その結果を図5～7に示す。

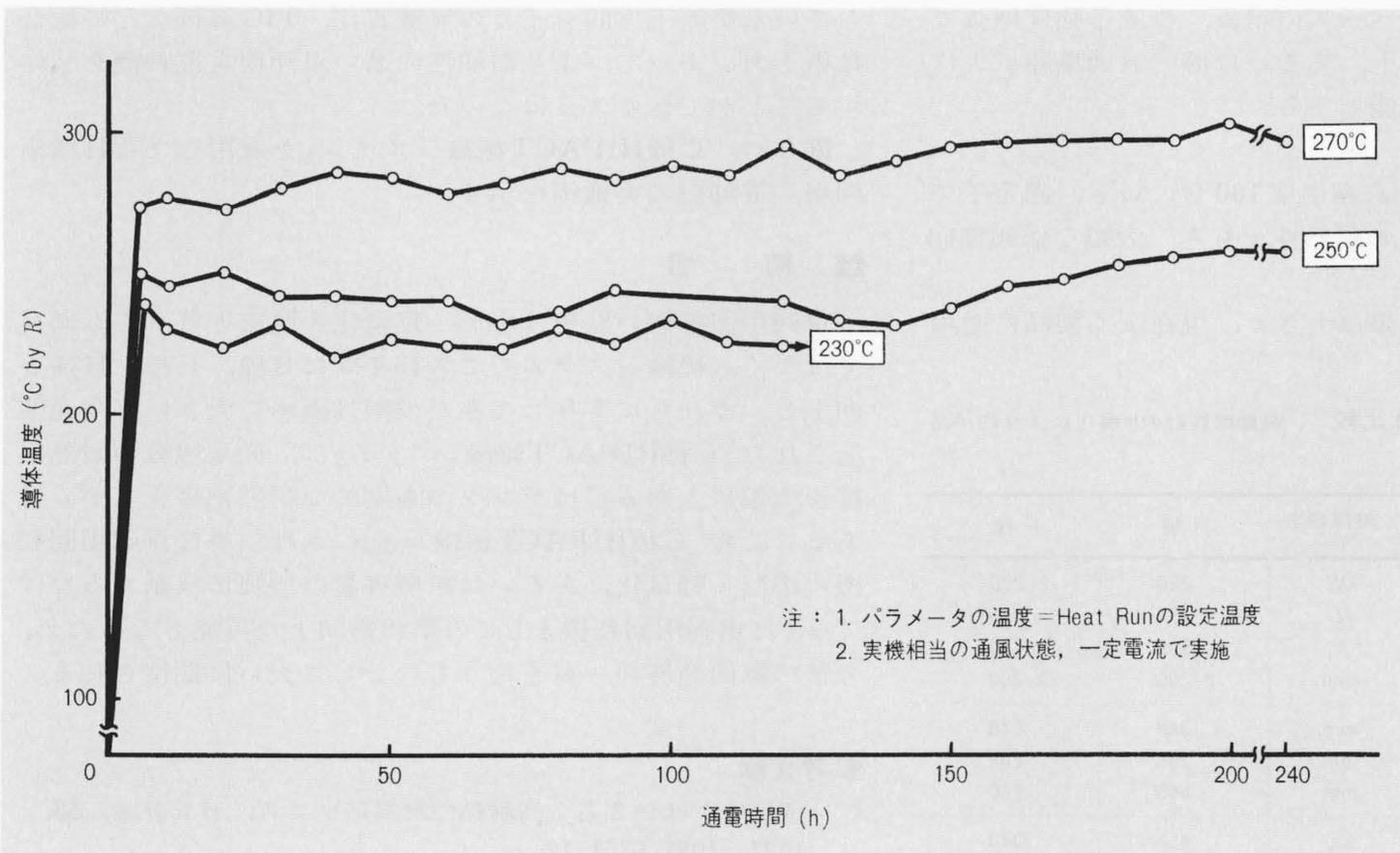


図5 界磁コイル高温熱安定性試験結果 実機相当の通風状態で、高温長時間の通電試験の結果、高温の熱安定性が極めて良好である。

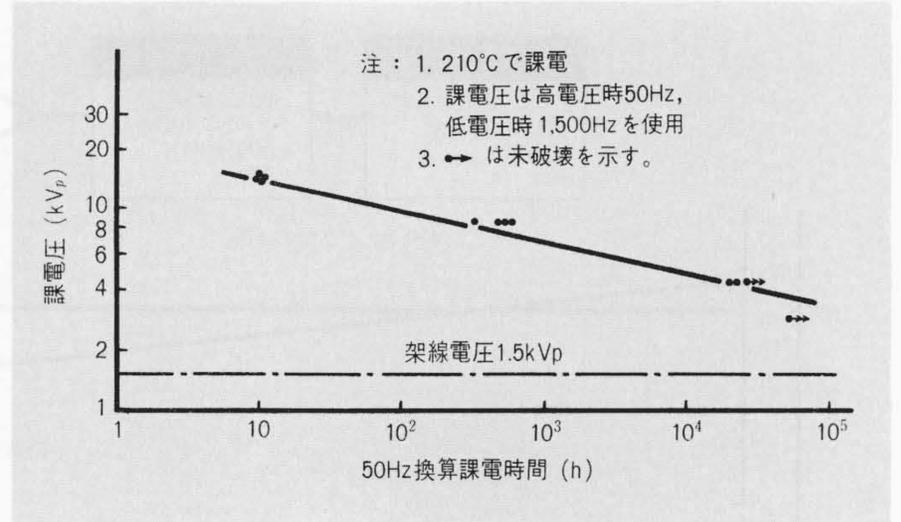


図6 電機子コイル課電寿命試験結果 電機子コイルに誘起される交流電圧による部分放電に対し、十分な耐力をもっている。

いずれの試験結果も各種特性の低下が少なく、電氣的・機械的に極めて優れていることを示している。すなわち、「C種HIPACT絶縁システム」は耐熱性220°Cで、電氣的・機械的特性、耐環境性とも十分な信頼性をもつ絶縁システムであることが実証された。

また、耐熱性向上については、主絶縁だけでなくスロット・ウエッジ、ガラスバインド、充填剤などの周辺部品についても材料の開発を行ない、回転機として十分信頼性のあることを確認した。

5 新H種主電動機

前述のように「C種HIPACT絶縁システム」は、車両用主電動機用絶縁システムとして極めて優れた性能をもち、その高い耐熱性により顕著な効果を発揮することができる。

すなわち、

(1) 小形軽量化

H種化により、回転機の単位重量当たりの容量を、表3に示すようにF種の場合に比べ約10%増強できる。

(2) 有効空間の活用

同上小形・軽量化の方策として、鉄心積厚を縮小することができる。この場合は、整流性能の向上が可能となるばかり

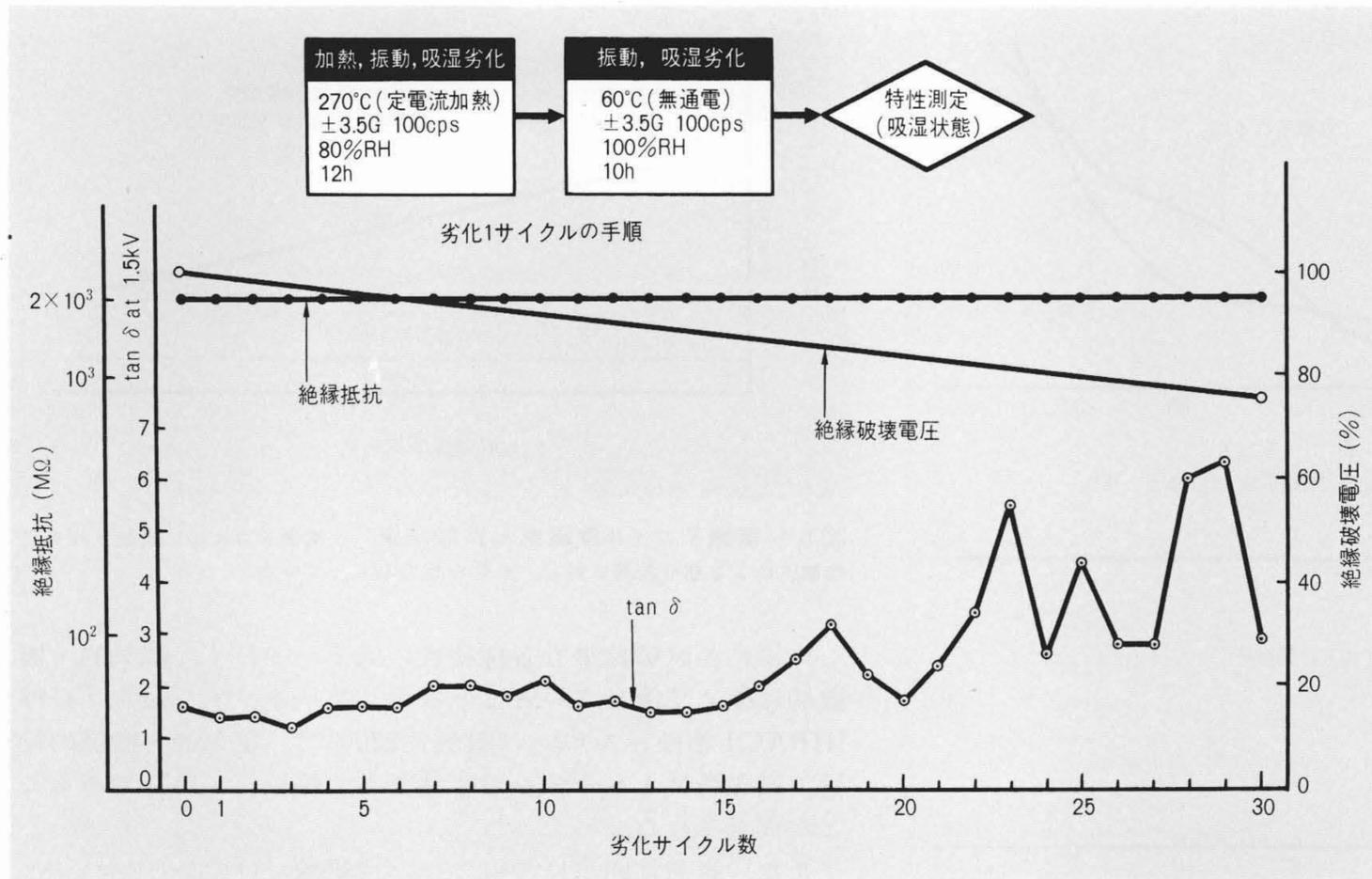


図7 界磁コイル複合劣化試験結果 加熱、振動、吸湿の劣化要因を同時印加により劣化した結果を示す。270°Cで±3.5G、 $2.4 \times 10^8$ 回の振動劣化でも特性の低下が小さい。

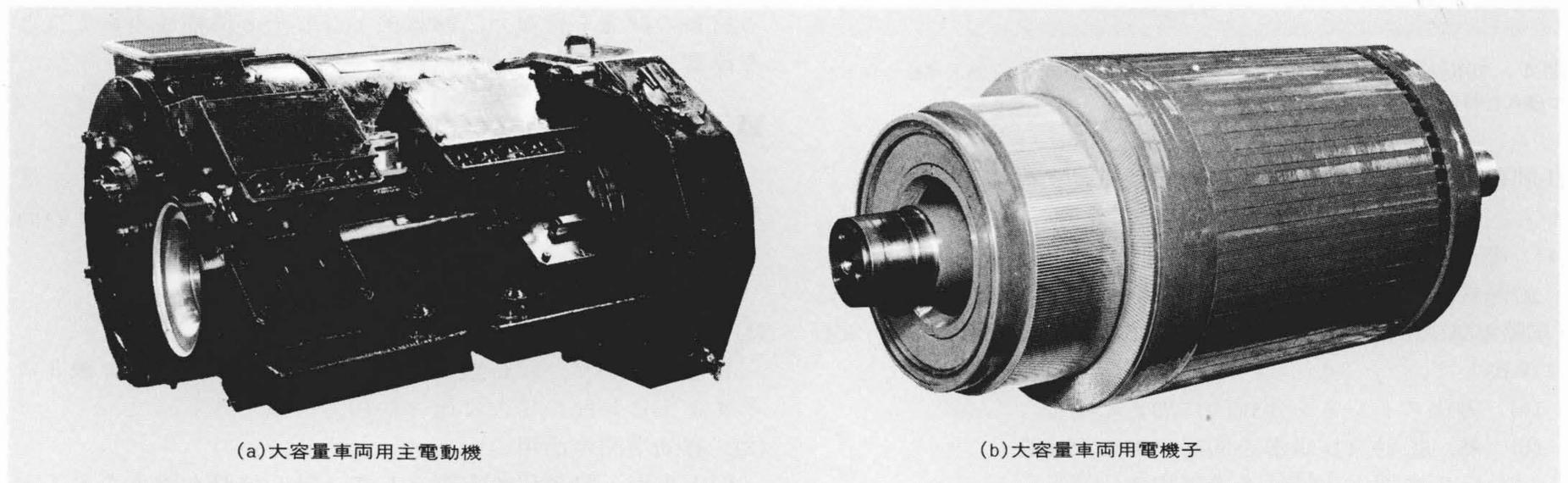


図8 新H種車両用主電動機 C種HIPACT絶縁システムを全面的に実機に適用した新H種車両用主電動機を示す。

でなく、沿面距離・保守スペースの増大、整流子強度増強などの機械的部品の信頼性向上、あるいは機内の通風路拡大による冷却効果改善などが可能となる。

(3) 絶縁の信頼性向上

H種絶縁システムの耐熱許容温度180°Cに対し、固定子で220°C、回転子で200°C以上の耐熱性をもち、大幅な信頼性向上が図れる。

このように、その波及効果は大きく、現在広く製品に適用

表3 H種とF種電動機の設計比較 電動機設計のH種化により約10%の重量低減となる。

仕様	単位	絶縁種別		
		H種	F種	
定格仕様	容量	kW	230	230
	電圧	V	475	475
	電流	A	530	530
	回転数	rpm	2,200	2,200
電機子鉄心外径		mm	340	340
電機子鉄心長さ		mm	245	245
継鉄外径		mm	560	590
重量	kg		855	940

している整流子片間マイカの無機質化、TIG溶接などの総合技術とあいまって、より信頼性の高い車両用主電動機を製作することができるようになった。

図8に、「C種HIPACT絶縁システム」を適用した新H種車両用主電動機の実施例を示す。

6 結 言

車両用回転機の歴史は小形・軽量化の歴史と言っても過言ではなく、絶縁システムもこの15年間にB種、F種、H種と向上し、それらに寄与してきた役割は極めて大きい。今回開発された「C種HIPACT絶縁システム」は、従来絶縁の耐熱温度を大幅に上回るC種ランクの画期的な耐熱絶縁システムである。この「C種HIPACT絶縁システム」は、単に車両用回転機の小型・軽量化、あるいは単機容量の増強に貢献するだけでなく、車両用回転機としての信頼性向上が可能となるため、今後の車両発展の一翼を担うものとして大いに期待される。

参考文献

1) 奈良原, ほか2名: 高耐熱性無溶剤ワニス, 日立評論, 58, 1027~1032(昭51-12)