

# 液体窒素冷却変圧器に使用する エポキシモールドコイルの耐クラック性試験

## Anticrack Test of Epoxy Molded Coil for Liquid Nitrogen Cooled Transformer

清水 教之<sup>\*1</sup>  
Noriyuki Shimizu  
門谷 建蔵<sup>\*2</sup>  
Kenzō Kadotani  
高橋 誠<sup>\*3</sup>  
Makoto Takahashi

We found that some cracks are produced on the epoxy resin mold at the start of liquid nitrogen flow during the development of a low voltage coil of direct-cooling type for liquid nitrogen cooled transformer. To select materials and a structure which can prevent such cracks, we conducted the spring washer test and liquid nitrogen flow test, and obtained a means which assures better anticrack characteristics.

## 1 まえがき

電力用変圧器の小形化，低損失化を目的として，現在液体窒素冷却変圧器の開発が進められている。この変圧器は低圧巻線として中空導体を使用し，この中に液体窒素を流通させることによって，低圧巻線自身を冷却すると共に，絶縁用エポキシモールド層を通して，高圧巻線をも冷却するもので，その冷却性能に関しては満足すべき結果が得られている。

一方，エポキシ樹脂モールドを使用しているため，運転開始時において，常温から液体窒素温度（ $-196^{\circ}\text{C}$ ）まで冷却する際にクラックの発生する場合がある。このことは電気絶縁上問題となるので，液体窒素温度においても十分な信頼性をもつ材料，構造を選定するため，耐クラック性試験として，4種類の樹脂によるばね座金試験，及び，2種類のモデルコイルによる液体窒素流通試験を行ったので報告する。

## 2 熱収縮率の測定

最初，表1に示す4種類の樹脂について熱収縮率の測定を行った。

表1 / 供試樹脂

Tab. 1 / Resins used for measurement

樹脂	エポキシ主剤	硬化剤	充填剤	可塑剤	ガラス転移温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
A	ビスフェノール系	酸無水物	結晶シリカ	有	59.7
B	ビスフェノール系	酸無水物	結晶シリカ	有	51.6
C	ビスフェノール系	脂肪酸アミン	結晶シリカ 熔融シリカ	無	50.0
D	ビスフェノール系	脂肪酸アミン	結晶シリカ	有	51.6

\*1 名古屋大学 工学部

\*2 日立化成工業(株)

\*3 変圧器事業部 技術部

愛知電機技報No.11

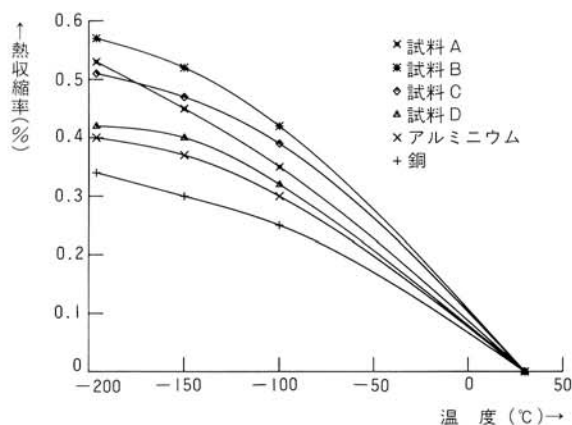


図1/熱収縮率の温度特性

Fig.1/Temperature characteristics to percentage of heat contraction

これらの樹脂ならびに銅，アルミニウムにて $\phi 5 \times 20$  mmの試料を作成し，各試料を熱応力ひずみ測定器を使用し， $30^{\circ}$  から $-196^{\circ}\text{C}$ の範囲で熱収縮率を測定した。

この結果を図1に示す。

図1から樹脂Dの熱収縮特性が銅に最も近く，次いでA及びCの近いことが分る。従って銅線をモールドして使用するには，樹脂Dが適していると考えられる。

## 3 ばね座金試験

耐クラック性の検証方法としては，ばね座金法，ボルト埋込法その他各種の方式が発表されているが，今回は図2に示すように，樹脂にばね座金を埋め込んだ円板状試料により，所定の冷熱サイクルを行い，サイクル毎にクラック発生の有無を確認する方法を採用した。

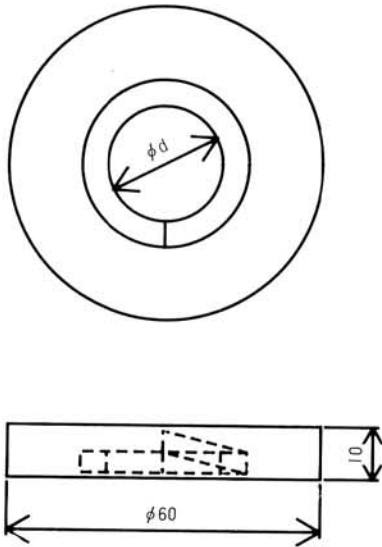


図2/試験試料

Fig./Test piece for spring washer test

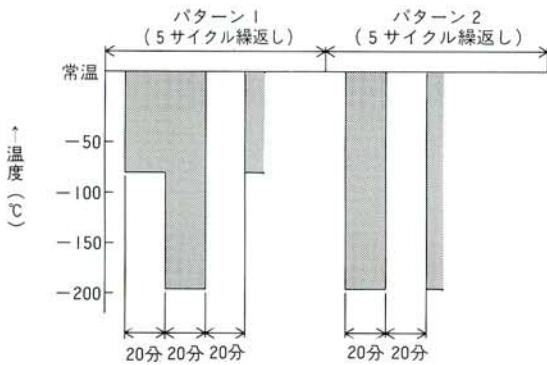


図3/ばね座金試験パターン

Fig./Heat pattern of spring washer test

ばね座金の寸法は表2に示すように、φ12mm及びφ22mmの2種類とし、合計8種類の組み合わせについて、各5個ずつ合計40個の試料を用いた。

試験方法は図3のパターンに示されるように、常温、-80°C保持、-196°C保持、常温のパターン1にて5サイクル繰り返し、続いて常温、-196°C保持、常温のパターン2にて5サイクル繰り返し、常温気中に戻すごとに目視により、クラックの有無を確認する方法にて行った。

試験の結果を表3に示す。なお表中の数値は当サイクル中においてクラックの発生した個数である。

表3の結果から、常温、低温を繰り返した場合の耐クラック性は、パターン1ではクラックの全く発生しなかった樹脂C、Dの良いことが分る。また、CとDを比較すると、パターン2において残存試料個数の多いDの方が優れている。しかし、予冷を行うことを前提とすればCでも問題はないと考えられる。

表2/ばね座金寸法

Tab. 2/Spring washer size

座金	呼び	内径 (d mm)
a	12	12.2
b	22	22.5

表3/ばね座金試験結果

Tab. 3/Test result of spring washer test

樹脂	座金	パターン1 サイクル					パターン2 サイクル					残存 試料 個数	評価
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
A	a	4	0	0	1	-	-	-	-	-	-	0	×
	b	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
B	a	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	0	×
	b	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
C	a	0	0	0	0	0	1	0	2	2	-	0	○
	b	0	0	0	0	0	2	3	-	-	-	0	
D	a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	◎
	b	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	3	

## 4 液体窒素流通試験

ばね座金試験の結果、液体窒素冷却変圧器の巻線モールド用には、樹脂CあるいはDが有望であると考えられる。そこで、これらC、Dの樹脂を用いてモデルコイルを作成し、実際に巻線中に液体窒素を流通させて、クラック発生の有無を検証した。

モデルコイルの概要は下記のとおりである。

- 低圧巻線 巻数 8ターン  
材料 銅中空導体 (φ10×φ8×t2)
- 高圧巻線 巻数 20ターン×6層  
材料 平角銅線 (2.2×4.6)
- 絶縁 エポキシ樹脂モールド
- 外形寸法 φ170×φ76×高145 (低圧内側)  
φ160×φ76×高145 (低圧外側)

また巻線配置は図4に示すように、液体窒素を流通させる低圧巻線を内側に、高圧巻線を外側に配置した方式

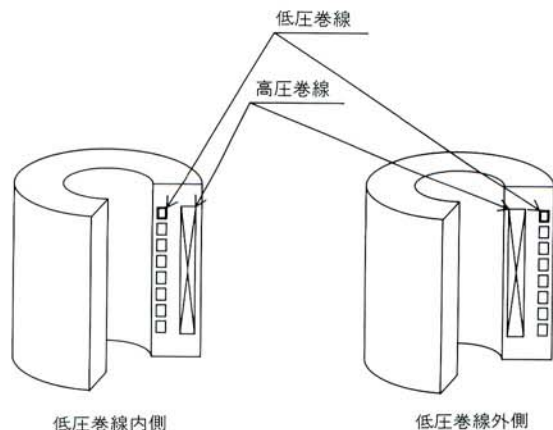


図4/モデルコイルの構造

Fig./Constructions of model coil used for liquid nitrogen flow test

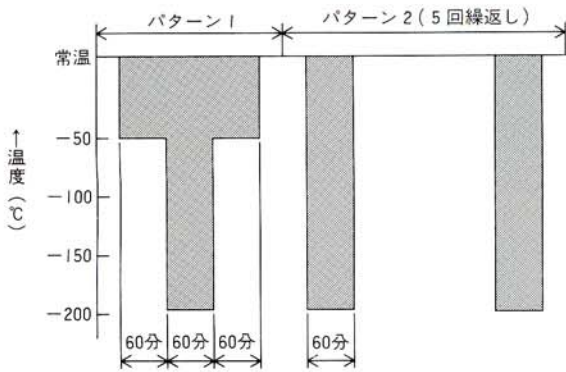


図5 / 液体窒素流通試験パターン  
Fig./Heat pattern of liquid nitrogen flow test

表4 / 液体窒素流通試験結果  
Tab. 4/Result of liquid nitrogen flow test

低圧巻線 配置	樹脂	パターン1				パターン2				
		常温→-50℃	-50℃→-196℃	-196℃→-50℃	常温	1回	2回	3回	4回	5回
内側	C	—	○	×						
	D	—	○	×						
外側	C	—	○	○	○	○	○	○	○	○
	D	—	○	○	○	×				

と、逆に低圧巻線を外側、高圧巻線を内側に配置した方式の2種類について比較した。

試験方法は図5のパターンに示されるように、常温、-50℃保持、液体窒素流通、-50℃保持、常温のパターン1（予冷あり）、並びに常温、液体窒素流通、常温のパターン2（予冷なし）にて行った。なお液体窒素の流量は200g/分である。

試験の結果を表4に示す。なお表中の○印は当該時点でクラックは発生せず、×印は発生したことを示す。

試験の結果、低圧巻線が内側にある場合は、コイルの予冷を行ったパターン1でも、液体窒素流通時にクラックが発生するが、外側にある場合は全く発生しない。

これは、低圧巻線は液体窒素により直接冷却されるので、高圧巻線に比べてより低温となり、収縮率も大きく

なることに起因すると考えられる。

すなわち、低圧巻線が内側にある場合は、モールド材は低圧巻線により内側に引っ張られる結果、引張力が働くが、逆に低圧巻線が外側にある場合には、圧縮力が働くこととなる。ところがモールド材は圧縮力に対し強いいため、低圧巻線を外側に配置した方が有利な結果が得られることになる。

また予冷を行わないで直ちに液体窒素を流通するパターン2では、樹脂Cを用いたモデルコイルは、5回の繰り返し後もクラックは発生しなかったが、樹脂Dを用いたものは1回目にクラックが発生し、前節と逆の結果となった。

## 5 あとがき

エポキシ樹脂を液体窒素温度まで冷却する際の耐クラック性検証のため、ばね座金試験及び液体窒素流通試験を行った結果、表1の樹脂Cを用い、低圧巻線を外側に配置したコイルは、良好な結果の得られることが分った。今後はこれらの結果を基に、実規模の変圧器について更に研究を進める予定である。

最後にこの研究にあたり、貴重な御助言、御協力を頂いた関係の方々に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 清水他：液体窒素冷却変圧器の基礎的特性  
電気学会論文誌D, 108巻 11号 昭63
- (2) 高橋他：液体窒素冷却変圧器に使用するエポキシ樹脂の耐クラック性試験  
1989年電気関係学会東海支部連合大会 No.128
- (3) 高橋他：液体窒素冷却変圧器に使用するエポキシ樹脂の耐クラック性試験  
1990年電気関係学会東海支部連合大会 No.138
- (4) 清水他：液体窒素温度におけるエポキシモールド電気絶縁の耐クラッキング性  
1990年低温工学・超電導学会



図6 / モデルコイル外観  
Fig. 6/Outside view of model coil