

# 液体窒素による変圧器コイルの冷却特性《第二報》

## Cooling Characteristics of Liquid Nitrogen as Applied to Transformer Coils

清水 教之<sup>\*1</sup>  
Noriyuki Shimizu  
堀井 憲爾<sup>\*1</sup>  
Kenji Horii  
柴田 克巳<sup>\*2</sup>  
Katsumi Shibata

We investigated several cooling methods as part of our design work for liquid nitrogen cooled transformers. We finally selected a method in which hollow conductor is used for the low-voltage winding. Liquid nitrogen is passed through this conductor for cooling. Poly vinyl formal copper wire is used for the high-voltage windings. The two are molded together with epoxy resin for insulation.

With such a design, the low-voltage winding is directly cooled by liquid nitrogen and the high-voltage windings are only indirectly cooled through the epoxy resin (mold material). Therefore it is necessary to take particular care to see that the temperature rise in the high-voltage windings doesn't become excessive.

In order to verify this, we let direct current flow through the high and low-voltage windings and investigated temperature rise characteristics. As a result of our tests, we found that the indirect cooling method described above is effective for cooling the high-voltage windings.

## 1 まえがき

冷却媒体として液体窒素を使用した変圧器は、導体の電流密度を高くとることができるため、小形軽量化に大きな効果があるばかりでなく、通常の油入変圧器と異なり、不燃性、無公害性という利点も得られる。更に1986年に発見されて以来、急速に研究開発が進められている酸化銅高温超電導体による線材が実用化されるようになれば、直に超電導変圧器に応用することも可能となる。

このように液体窒素による変圧器コイルの冷却特性についての研究は、将来有用な結果をもたらすものと考えられる。そのため前回の技術レポートにおいて述べたように、変圧器コイルを直接液体窒素に浸漬する方式及び導体内に液体窒素を流通させる方式について、基礎的な実験を行い、液体窒素の冷却特性について検討を進めてきた。

今回これらの結果を基にエポキシ樹脂モールド絶縁内部冷却変圧器のモデルを製作し実験を行った。

## 2 冷却方式の検討

前回の結果から、通常の油入変圧器の巻線をそのまま使用しても、液体窒素中に浸漬して冷却することによって、定格電圧の5倍程度までは、安定した通電のことが分った。しかしこの場合は発熱によって、巻線近傍の液体窒素が蒸発し、内部に気泡が発生する。この

気泡は冷却能率の低下につながるばかりでなく、高電界部分に気泡が溜ることによる、部分放電発生の懸念もある。その対策として、気泡が発生してもそれが冷却、絶縁に余り影響をおよぼさないような構造とする、液体窒素を過冷却として気泡の発生を抑制する、などの方式が考えられる。これらの方式をまとめて表1に示す。

次に鉄心の冷却方式に関しては、巻線と同様液体窒素中に浸漬する方式、鉄心は常温中に置いて巻線のみ断熱冷却する方式などが考えられる。しかし前者の方式は常時鉄損分を冷却するための冷媒損失が発生する上、初期冷却の際に時間がかかる。また後者の場合は容器の構造が複雑となり、鉄心、巻線間のギャップが広がるなど、それぞれ一長一短がある。これらをまとめたものを表2に示す。

一方巻線を直接液体窒素中に浸漬するのではなく、巻線導体中に液体窒素を流通させる方式も考えられる。この場合、巻線自体はエポキシ樹脂にてモールド絶縁し、これを断熱容器内に収納するにすれば、電気絶縁は絶縁性能の優れた固体絶縁のみによることとなり、液体窒素中における気泡発生などの影響を心配する必要がなくなる。

またこの場合は前回のモデルコイルによる実験からも分るように、液体窒素の流量4.5g/sに対し、発生損失約900Wまでの冷却が可能である。すなわち液体窒素の蒸発潜熱200J/gに相当した損失まで冷却することができるので、有効な冷却方式であると言える。

表1 / 気泡発生を考慮した容器の概念設計

Tab. 1/Concept design of container taking account of bubble formation


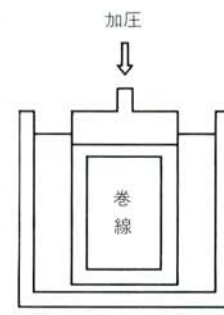
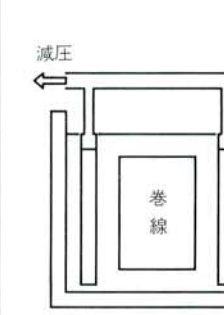
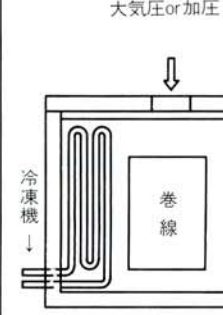
方式	大気圧 直接浸漬方式	加圧方式	減圧方式	冷凍機方式
気泡 巻線近傍の 温度と圧力	あり 77K 大気圧	なし 77K 大気圧以上	なし 77K以下 大気圧	なし 77K以下~77K 大気圧~大気圧以上
概念的特徴	 <p>絶縁耐力と冷却能力を低下させないよう、気泡量を抑え通路も工夫する。</p> <p>↑容器壁 高圧巻線 低圧巻線 ↑鉄心</p>	 <p>加圧</p> <p>↑巻線</p> <p>加圧されたLN<sub>2</sub>の沸点は上昇する。 77KのLN<sub>2</sub>で冷却すれば過冷却となり気泡の発生は無い。</p>	 <p>減圧</p> <p>↑巻線</p> <p>減圧するとLN<sub>2</sub>の温度は下がる。 これにより大気圧のLN<sub>2</sub>を冷却し沸点以下とすると過冷却となり気泡の発生は無い。</p>	 <p>大気圧or加圧</p> <p>↓冷却機</p> <p>↑巻線</p> <p>冷凍機によりLN<sub>2</sub>を過冷却とする。</p>

表2 / 鉄心の冷却

Tab. 2/Cooling of iron core

方式	直接浸漬方式	完全断熱方式	簡易断熱方式
特 徴	鉄心、巻線共浸漬	鉄心と巻線間に真空断熱層を設け鉄心は室温、巻線は低温に保つ	鉄心を断熱材で覆って直接浸漬
鉄 心 温 度	77K	室温	77K~室温
容 器 構 造	簡単	複雑	簡単
起動時の冷媒消費	大	小(巻線に要するのみ)	小(巻線に要するのみ)
起動時の冷却時間	大	小(巻線に要するのみ)	小(巻線に要するのみ)
運転中の冷媒消費	鉄損分を消費	鉄損分はなし	鉄心からの熱伝導があるので大
備 考			短時間の運転で有利(鉄心からの熱伝導の時定数程度)

### 3 エポキシ樹脂モールド絶縁内部冷却変圧器

内部冷却方式を変圧器に適用する場合、低圧巻線は導体断面積が大きいので、中空導体を使用することが可能であるが、高圧巻線に対しては導体断面積が小さくなるため中空導体を適用することが困難となる。そこで低圧巻線のみ中空導体を使用し、高圧巻線は低圧巻線により間接的に冷却する方式を採用することとした。

間接冷却方式とした場合は、高圧巻線内に発生した熱は、エポキシ樹脂モールドを介して低圧巻線に伝導されるため、高圧巻線の温度はエポキシ樹脂の熱伝導率に大きく影響される。従って高圧巻線の温度上昇について十分検討する必要がある、そのため図1に示すエポキシ樹脂モールド絶縁変圧器巻線において各種試験を行った。図1の巻線の諸元は次の通りである。

低圧巻線導体 10×8×厚2mm(無酸素銅中空導体)

低圧巻線巻数 16×1層

低圧巻線寸法 φ290×φ273×高160mm

高圧巻線導体 φ1.6mm(ホルマール銅線)

高圧巻線巻数 105×3層×2ブロック

高圧巻線寸法 (内) φ229×φ212×高180mm  
(外) φ351×φ334×高180mm

完成寸法 φ353×φ205×高210mm

巻線全体はシリカ充填エポキシ樹脂(ビスフェノールA形エポキシ;シリカ充填量60w%)を含浸し、更に発泡スチロール製断熱容器に収納し、熱侵入量を最小限に抑えている(約70W)。

実験は低圧巻線の中空導体内に液体窒素を窒素ポンペより直接流入せしめ、高圧、低圧巻線にそれぞれ直流電流を通电して、各部に埋め込んだ熱電対により温度を測定した。

最初、非通電状態で液体窒素のみを400g/minの割合で

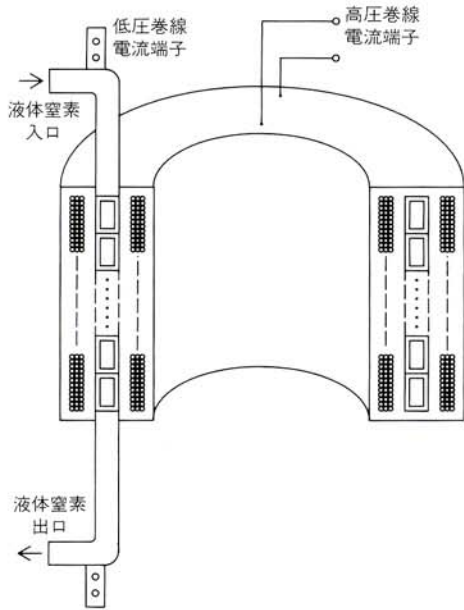


図1 / エポキシ樹脂モールド絶縁内部冷却変圧器  
Fig. 1/Internally cooled transformer winding with epoxy resin molded insulation

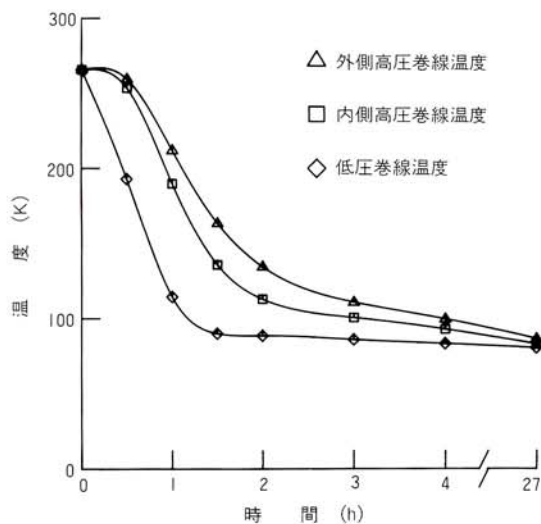


図2 / 初期冷却特性  
Fig. 2/Initial cooling characteristics

流通させた場合の各部温度の時間変化を求めた。その結果を図2に示す。

図2から低压巻線は比較的短時間で定常状態に達するが、高压巻線に対しては4時間以上を必要とすることが分る。

次に低压巻線だけに通電し、液体窒素流量と最大通電電流(熱暴走直前の電流値)との関係を求めた。その結果を図3に示す。

暴走を開始する電流は、発生ジュール熱が液体窒素の蒸発潜熱に等しく、液体窒素が完全に気化する時点であると仮定して計算すれば、

$$I^2R=L \cdot F/60$$

ただし、I：通電電流 (A)

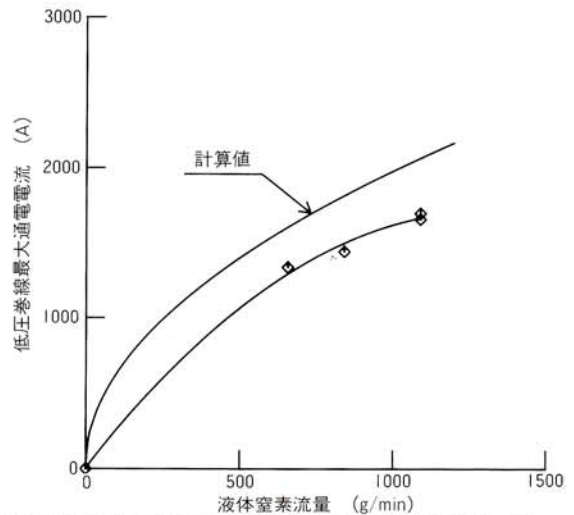


図3 / 液体窒素流量と低压巻線の最大通電電流  
Fig. 3/Liquid nitrogen flow rate and maximum current of low voltage winding

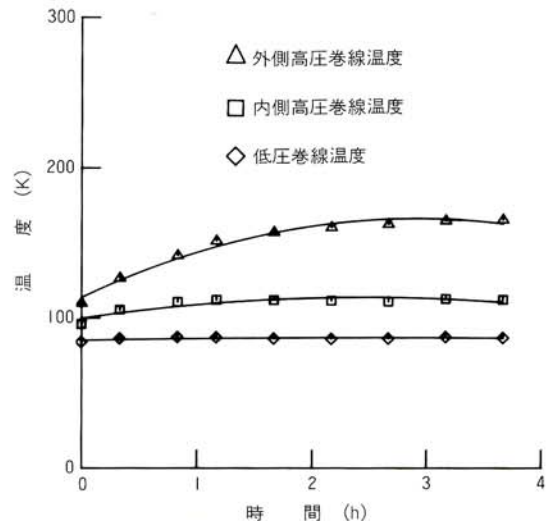


図4 / 高压巻線通電時における各部温度の時間変化  
Fig. 4/Time variation of temperature at each part under current flow through high-voltage winding

- R：低压巻線の抵抗 (Ω)
- L：液体窒素の蒸発潜熱 (200J/g)
- F：液体窒素流量 (g/min)

従って

$$I = \sqrt{200F/(60R)}$$

低压巻線の抵抗を0.00085Ωとした場合の計算結果を図3に併記した。これから試験値は計算値に対し約80%となることが分る。

次に低压巻線に液体窒素を流通させた状態で、高压巻線だけに10Aを通電して各巻線温度の時間的変化を求めた。その結果を図4に示す。この結果低压巻線は最初から定常値でほぼ一定に保たれているが、高压巻線が定常値に達するには、2～3時間必要とすることが分る。

なお低压巻線に対する高压巻線の温度上昇は外側巻線が約80K、内側巻線が約25Kで3倍以上の差となってい

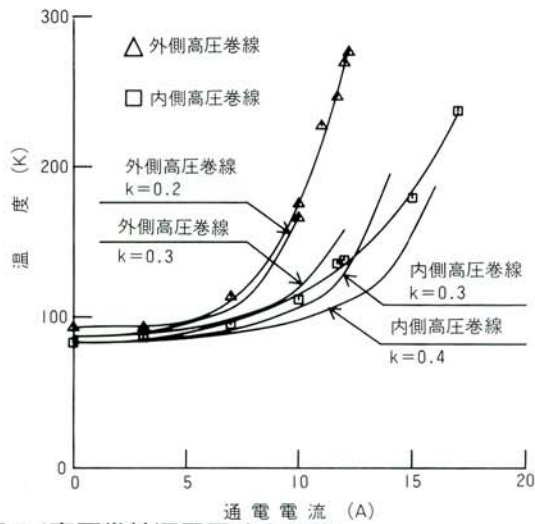


図5 / 高压巻線通電電流と温度

Fig. 5/Current of high-voltage winding and the temperature

る。これは外側巻線の方が直径すなわち平均長が大きい  
ため、抵抗が大きくなること、熱コンダクタンスの差に  
よることのほか、温度が上昇すれば抵抗率が大きくなり、  
ますます発生熱量が増えて更に温度が上昇する、といっ  
た相乗効果によるものである。

更に高压巻線の電流を変化させた場合の温度を図5に  
示す。

高压巻線から低压巻線への熱伝導は両巻線に充填され  
たエポキシ樹脂モールド材を通して行われる。これを簡  
単な同軸円筒と考え、軸方向の熱伝導は無視するもの  
とすれば、平衡状態においては次式が成立する。

$$I^2 \cdot \rho (l/A) + Q = (T - T_0) \cdot \delta$$

ただし、

I : 高压巻線通電電流 (A)

$\rho$  : 高压巻線導体の抵抗率 ( $\Omega \cdot m$ )

l : 高压巻線の全長 (m)

A : 高压巻線導体の断面積 ( $m^2$ )

Q : 外部侵入熱量 (W)

T : 高压巻線温度 (K)

$T_0$  : 低压巻線温度 (K)

$\delta$  : 高压、低压巻線間の熱コンダクタンス (W/K)

100~300 Kにおける高压巻線導体の抵抗は図6の如く  
なる。

図6から高压巻線温度Tと導体の抵抗率 $\rho$ との関係は次  
式で表すことができる。

$$\rho = \alpha T - \beta$$

$$= (7.0T - 311) \times 10^{-11} \Omega \cdot m$$

これらの式から高压巻線温度は電流の関数として次の  
ように表される。

$$T = \frac{T_0 - \beta/\alpha + Q/\delta}{1 - \alpha I^2 L / (A \delta)} + \frac{\beta}{\alpha}$$

ここで高压、低压巻線間の熱コンダクタンス $\delta$ は次式で表

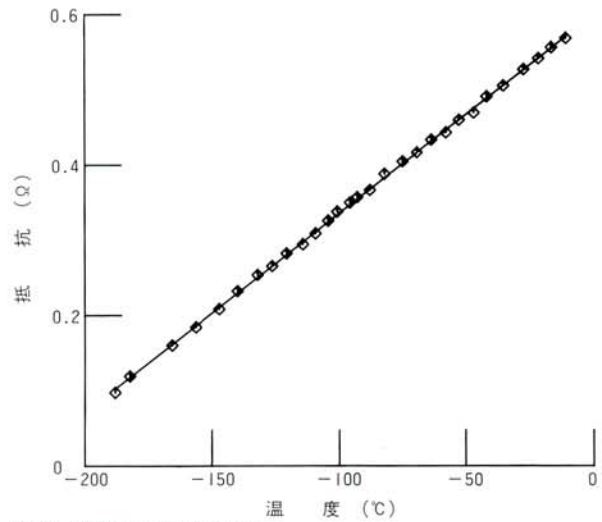


図6 / 導体温度と抵抗

Fig. 6/Temperature of conductor and the resistivity

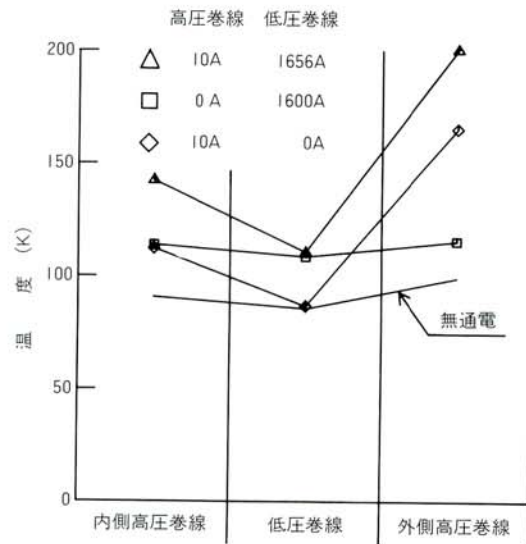


図7 / 通電条件による温度分布の変化

Fig. 7/Temperature distribution as a function of condition of current flow

わされる。

$$\delta = \frac{k \cdot 2\pi \cdot h}{\ln(ro/ri)}$$

ただし、

k : シリカ充填エポキシ樹脂熱伝導率 (W/mK)

h : 円筒高さ (m)

ro : 円筒外径 (m)

ri : 円筒内径 (m)

この実験の温度範囲におけるシリカ充填エポキシ樹脂  
の熱伝導率kの値0.2~0.4 W/mKをこれらの式に  
代入して計算した結果を図5に併記した。図5から分る  
ようにこのような単純なモデルによる計算でも、実測値  
と良く一致した結果が得られる。

最後に実用上重要となるのは、両巻線同時に通電した  
場合であって、図7に高压巻線10A、低压巻線1656Aを同  
時に通電した場合の結果を示す。

なお図7には比較のため、無通電の場合、高圧巻線のみ10A通電した場合及び低圧巻線のみ1600A通電した場合も併記した。

両巻線に通電した場合の高圧巻線の温度は、高圧巻線のみに通電した場合に比べ、低圧巻線のみに通電した場合と無通電の場合の差分に近い値だけ増加することが分る。

## 4 あとがき

液体窒素冷却変圧器の冷却方式として、低圧巻線には中空導体を用い、内部に液体窒素を流通させて直接冷却を行い、高圧巻線はホルマール銅線として、両者をエポキシ樹脂にて絶縁し、高圧巻線の冷却は低圧巻線より間接的に冷却する方式を採用して、実験を行った。

その結果高圧巻線の温度はある程度上昇するが、比較的高い電流密度においても、安定した通電の可能であることが判明した。

今後は更に内部の発熱及び外部からの熱侵入の抑制、絶縁材の熱伝導率の改善、効果的な冷却方式の検討などデータの蓄積を図る所存である。

最後にこの実験の遂行、検討にあたり御協力戴いた名古屋大学、豊橋技術科学大学をはじめ関係各位に対し、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 清水他：液体窒素による変圧器コイルの冷却特性  
愛知電機技報 No.6 p-25
- 2) 清水他：液体窒素冷却変圧器の基礎的研究  
電気学会産業応用部門誌 S63.11

## 最近公告された愛知出願(II)

### 実用新案

公告番号	名 称	考 案 者	共同出願人
62-33289	モールド変圧器の口出線引出装置	水野 弘一	
62-33293	変圧器巻線における口出線折り曲げ装置	磯部 治男	
62-34421	変圧器巻線	羽田 富雄 広江 成致	
62-34422	静止誘導機器の充電部保護装置	甲斐 義信	
62-34432	変圧器巻線の口出線折り曲げ装置	磯部 治男	
62-40413	変圧器巻線	伊藤 宗臣	トヨタ自動車(株) 岐阜愛知電機(株)
62-44741	攪拌装置	安藤 忍 谷口 重夫	愛知電機商事(株)
63-1916	便 座	山本 修	東陶機器(株)
63-1917	暖房便座のスイッチ機構	山本 修	東陶機器(株)
63-2846	電気湯沸装置	山本 修	東陶機器(株)
63-3128	変圧器におけるブッシングポケット部の油充填装置	佐藤 亘 坂入美津郎	中部電力(株)

公告番号	名 称	考 案 者	共同出願人
63-3129	静止誘導機器の充電部保護装置	甲斐 義信	
63-4496	攪拌ドラムの洗浄装置	安藤 忍	愛知電機商事(株)
63-5400	力率改善装置	浮田 義也 田中 雅治	トヨタ自動車(株)
63-7302	攪拌装置	内木 明男 谷口 重夫	愛知電機商事(株)
63-8040	負荷時タップ切換装置における切換開閉器の早切駆動装置	鶴飼 釗	
63-14905	攪拌装置における攪拌ドラムの傾斜角調整装置	安藤 忍	愛知電機商事(株)
63-14906	回転ドラムの挟持・反転装置	新美 正明	愛知電機商事(株)
63-17456	脊柱側弯測定装置	野々村勝巳	日陶科学(株)
63-20954	乾燥装置	新美 正明	
63-20955	乾燥装置	新美 正明	
63-25712	巻鉄心変圧器	大竹 和博	
63-31380	樹脂モールドコイルの層間絶縁	飯田 淳 磯部 治男	