

液体窒素による変圧器コイルの冷却特性

Cooling Characteristics of Liquid Nitrogen as Applied to Transformer Coils

清水 教之^{*1}

Noriyuki Shimizu

堀井 憲爾^{*1}

Kenji Horii

柴田 克己^{*2}

Katsumi Shibata

A superconductive oxide material was discovered whose critical temperature exceeds that of liquid nitrogen (77K). The material is expected to be used in power equipment applications. Accordingly, two tests were conducted to ascertain the basic characteristics of liquid nitrogen when used to cool transformers. In the first test, the transformer coil was dipped in liquid nitrogen, and the second, liquid nitrogen was forced to flow in the coil made from hollow conductor. These tests clarified the cooling characteristics of transformer coil and thermal behavior of liquid nitrogen.

1 まえがき

超電導の電力用機器への適用は、現在世界各国で開発が進められている超電導同期発電機を始め、「夢の超特急」と言われ、明日にでも実現しそうなニュースも伝えられているリニヤモーターカーに採用されるなど、幅広い分野が考えられている。特に1986年酸化銅高温超電導体が発見されるに及んで、これらの研究にもいちだんと拍車のかかった感がある。

変圧器に対しても、1981年にWH社において超電導変圧器の実用性についての検討がなされて以来、幾つかの小形モデルによる検討や、概念設計などが行われている。変圧器のような交流機器においては、常電導より超電導に移る臨界温度以下においても導体中の損失が完全に零となるわけではなく、ヒステリシス損、渦電流損等の交流損失が発生する。この損失を低減するために、キプロニッケル(CuNi)の母材中に直径1 μ m以下のニオブチタン(NbTi)線を多本数埋め込んだ極細多心線が開発されている。しかしNbTiの臨界温度は9K以下であるため、液体ヘリウムによって冷却する必要があって実用上幾つかの問題点を抱えている。そのため液体窒素による冷却が可能な高温超電導体に大きな期待が寄せられており、現在のところ酸化銅超電導体による線材開発の努力が続けられている状態である。もしこれが実用化されるようになれば、窒素は化学的に安定した物質であり、資源的にも空気容積の78%を占めていて安定した供給が得られ、更にヘリウムに比べて沸点が高いため熱絶縁が容易となって冷凍機の効率向上にもなるなど多くの利点が得られる。

通常の銅導体変圧器においても、液体窒素冷却を採用することによって不燃性且つ無公害性となる上、液体窒素温度における銅の導電率は常温時の8倍程度となるため損失が大幅に低減されて、変圧器の小形軽量化を図ることができ、また絶縁物の劣化も低温のため著しく抑制されるので長寿命を期待することができる。

このように変圧器コイルの液体窒素冷却について研究することは、将来予想される超電導変圧器において、短絡時のような過大電流の流れた場合に発生するおそれのあるクエンチ時の挙動について重要な情報をもたらすばかりでなく、現在の変圧器に適用することも有用であると考えられる。

2 液体窒素の特性

液体窒素の諸特性を表1に示す。なお比較のため電気絶縁油の特性も並記した。

表1 / 液体窒素の特性

Tab. 1/Characteristics of liquid nitrogen

項目	液体窒素	絶縁油
沸点 °C	-195.7 (1 atm)	280~450
比重	0.808	0.88
蒸発潜熱 J/g	200	—
比熱 J/g °C	2.07	2.1 (60°C)
熱伝導率 W/m °C	0.137	0.122 (60°C)
粘度 cSt	0.19	42.0 (0°C) 124.5 (-15°C)
比誘電率	1.4	2.26
比容積 ^{*1}	647	—

備考：液体窒素の数値は1気圧、77.3Kにおける値。

注^{*1}：比容積とは1気圧、77.3Kの液体窒素と1気圧0°Cの気体窒素との体積比。

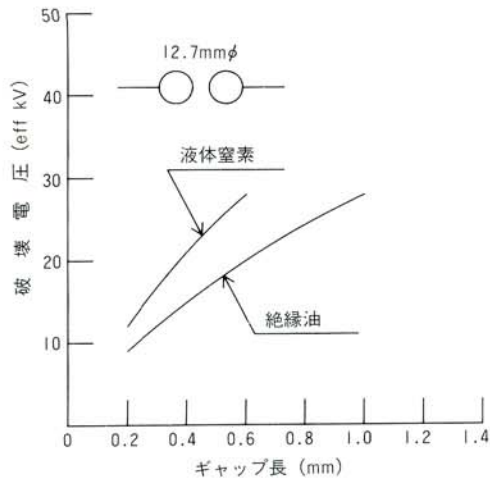


図1/液体窒素、絶縁油の破壊電圧
Fig. 1/Breakdown voltage of liquid nitrogen and insulatingoil

また液体窒素の絶縁強度は図1に示すように絶縁油と同等以上であると言われている。しかし加熱により気泡が発生し、それが高電界部分に集中するようなことになると、電気絶縁に悪影響を及ぼすことも考えられ、且つ冷却効率も低下するため極力気泡の発生しないような対策が必要となる。

この対策として、

- (1) コイル配置を工夫して気泡量を抑え、気泡の溜らない構造とする。
 - (2) 液体窒素を加圧すると沸点が上昇するため、これを77Kの液体窒素で冷却することにより、過冷却として気泡の発生を抑える。
 - (3) 逆に大気圧の液体窒素を、減圧して温度の低くなった液体窒素で冷却することにより、過冷却とする。
 - (4) 冷凍機によって液体窒素を過冷却とする。
 - (5) 液体窒素は冷却のみに使用し、絶縁は他の方式を採用する。
- などが考えられる。

3 5kVA小形変圧器

最初に液体窒素の冷却効果及び損失低減の目安を立てるため、単相、5kVA、6300/210Vの柱上変圧器中身を液体窒素中に直接浸漬して、短絡試験及び無負荷試験を行った。その結果を表2に示す。

この結果から、77Kにおける負荷損(銅損)は常温時の約1/8となり、抵抗値の減少に相当した損失低減となっていることが分る。なお交流磁界中に置かれた導体中の渦電流損の割合は導電率の2乗に比例するので、大容量器の場合はこの点留意する必要がある。

一方無負荷損(鉄損)は10%程度増加しているが、これも珪素鋼板の導電率が増えることに伴う、渦電流損の増加によるものと考えられる。

続いて短絡試験時において過電流通電を行い、電源電

表2/変圧器を液体窒素で冷却した場合の特性

Tab. 2/Characteristics of 5kVA transformer

温度	77K	常温	比
負荷損 W	12.5	94.9	1 / 7.6
無負荷損 W	38.4	34.6	1.1 / 1
巻線直流抵抗			
1次 Ω	10.9	78.3	1 / 7.2
2次 mΩ	6.5	68.0	1 / 10.5
リアクタンス*2 Ω	113.8	127.6	1 / 1.1

注*2:リアクタンスは1次換算値。

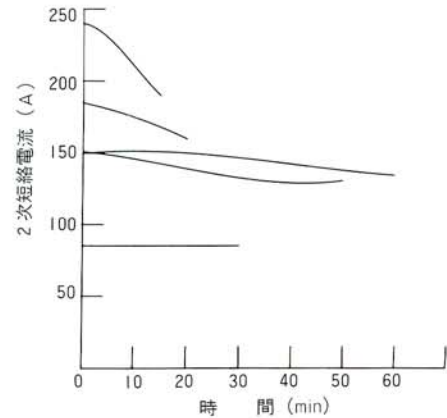


図2/短絡電流の時間変化

Fig. 2/Time variation of short circuit current

圧を一定に保って、電流値と時間の関係を求めた。その結果を図2に示す。

この結果、90~135A程度までは電流値は殆ど一定であるが、180~240Aでは時間と共に急激に減少していることが分る。これは電流の小さい間は、発生するジュール熱は液体窒素の蒸発潜熱により全て除去されるため、導体温度は一定に保たれるが、電流が大きくなると除去し切れず、その結果、導体温度が時間と共に上昇して抵抗が増え、電流は減少するためであると考えられる。

4 大形変圧器用板状コイルによる冷却特性

次に大形変圧器に使用する板状コイルによる試験を行った。コイルの諸元は次の通りである。

導体寸法 2×12mm(被覆厚0.35mm)

巻回数 348

コイル寸法 内径384×外径444×高530mm

抵抗 室温にて0.34Ω

このコイルを液体窒素中に浸漬し、直流電流を通电して通電開始5分後の抵抗及び巻線温度を測定した。その結果を表3に示す。

表3から分るように350A及び526Aを通电した場合の巻線温度は定常値に落ち着いている。ただし巻線温度が液体窒素の温度77.3Kより高くなっているのは、導体の被覆によるものであって、試みに被覆の熱伝導率を0.1

表3/板状コイルの通電試験結果

Tab. 3/Temperature rise of disk-coil

通電電流(直流分)	A	350	526	618 → 551
印加電圧(直流分)	V	18.8	30.8	36.7 → 37.9
定格電流との比		4.9	7.3	8.6 → 7.7
通電時間	min	5	5	5
抵抗	mΩ	54	58	59 → 69
巻線温度	K	86.8	89.5	90.2 → 97.2

W/mKとして計算してみると、それぞれ83.9K及び93.5Kとなって、測定値に近い結果となる。

電流を更に618A迄増加させると、巻線温度はもはや定常値に止まらず時間と共に増加する傾向となる。この結果から定格電圧の5倍程度までは安定した通電の可能であることが分る。

5 液体窒素冷却変圧器

これまでの試験結果を基にして、1000kVA~10000kVA液体窒素冷却変圧器の試設計を行ってみた。その結果の一例として、図3に全損失及び中身重量を油入変圧器と比較して示す。なお電流密度は通常の5倍にとり、磁束密度及びインピーダンス電圧は同一として計算した。

図3から分るように液体窒素冷却とすることにより、全損失は約75%、中身重量は約50%となり、変圧器容量にして1/3相当の大きさとなる。ただし損失の中には冷凍機効率(1/7~1/10)を考慮していないため、油入変圧器に比べて高効率になるとは言い難い。しかし冷凍機効率が理論値(1/2.9)に向かって改善されればこの限りではなく、またLNGなどの低温エネルギーを利用することも考えられる。またこの他に、変圧器容器に断熱を施す必要がある、液体窒素補給用のタンクまたは冷凍機を必要とするなどの点を考慮すると当面経済的効果は期待できない。したがって液体窒素冷却変圧器の大きな特長は小形・軽量化及び省スペースにあるとすることができる。

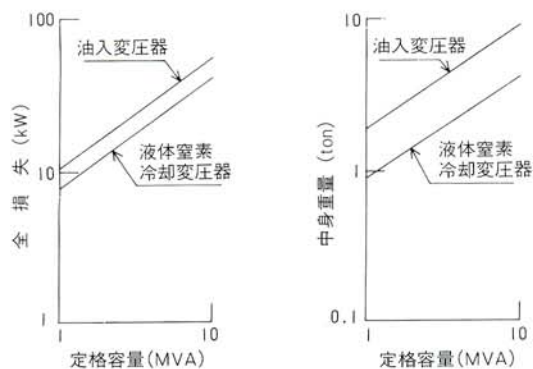


図3/全損失及び中身重量

Fig. 3/Loss and weight

6 内部冷却コイルの冷却特性

これまでは変圧器中身全体を液体窒素中に直接浸漬する方式で検討してきた。しかしこの方式では前述したように、

- (1) 気泡発生のため絶縁に悪影響を及ぼす恐れがある。
- (2) 熱容量の大きい鉄心まで冷却する必要があるため、冷凍機に余分の負担を掛けることになる。
- (3) 大量の液体窒素を必要とする。

などの欠点がある。

鉄心の冷却に関しては、コイルのみを別容器とする方式も考えられるが、これは鉄心とコイル間を断熱する必要があり、容器構造が複雑となって得策ではない。そのためコイルに中空導体を用いて導体の内部に液体窒素を流通させ、直接冷却する方式を検討した。この方式によれば前記の欠点が解決されるばかりでなく、高い冷却効果を得ることができる。

最初に外径6.35mm、内径4.75mm(断面積14mm²)の円筒形中空導体による予備実験を行った。

断熱被覆を施した全長19.4mの中空導体を19ターン巻いて、全体を更に断熱材で覆い、導体中に液体窒素をポンペより流入させた。一例として液体窒素流量4.5g/s、電流0~270Aとした場合における導体各部の温度を図4に示す。

図4の結果から、コイルの熱的挙動は次の3つの電流領域に分けて考えることができる。

- (1) 完全安定領域：150A未満の領域であって、この範囲では導体全長にわたって一定温度を示す。
- (2) 熱平衡領域：150A~250Aの領域であって、導体温度は入口から出口に向かって上昇しているが、一定の熱平衡状態を保っている。この範囲では導体温度の上昇と共に電気抵抗、したがって発生ジュール熱が増加するが、管壁での熱伝達率も増加するため一定温度で平衡状態となる。

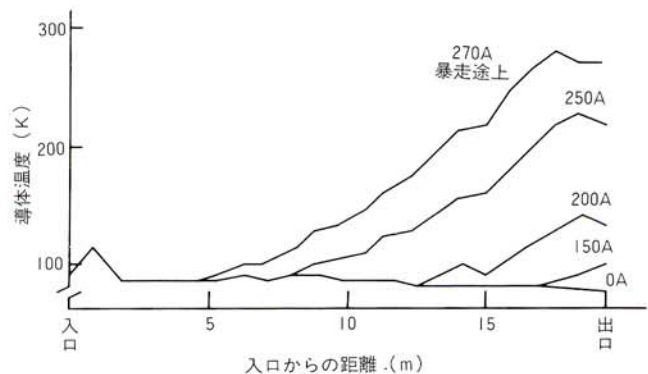


図4/導体上の温度分布

Fig. 4/Temperature distribution along conductor

(3) 熱暴走領域：270A以上の領域であって、発生ジュール熱が冷却能力を上回る結果、熱暴走状態となる。

液体窒素の蒸発潜熱は200J/gであるから流量が4.5g/sの場合の全蒸発潜熱は900J/sとなり、また暴走直前の250Aにおける損失の測定結果は約900Wであるから、全部の液体が気体化することによって熱伝達率が下がり暴走が始まるものと考えられる。

上記の実験で中空導体のコイルの内部に液体窒素を流通させた場合の、冷却特性及び窒素の熱的挙動を確認することができたので、続いて実機に近いホローコンダクタを用いて同様の実験を行った。コイルの諸元は次の通りである。

寸法	10×8mm、厚2mm
導体断面積	56mm ²
中空面積	24mm ²
全長	20m
巻数	11.5
抵抗	6.16mΩ (於 20℃) 0.77mΩ (於 77K)

また前回同様、導体に断熱被覆を施し、コイル全体は断熱材で覆った。測定系の概要を図5に示す、

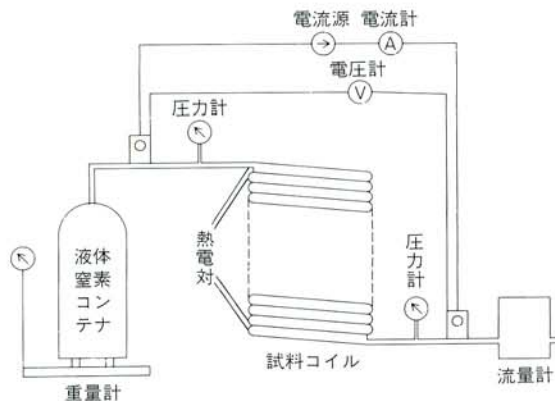


図5/測定系の概要

Fig. 5/Outline of measurement system

表4/通電特性

Tab. 4/Test results

電流	A	1418
電圧	V	1.56
導体表面温度	℃	-169.4~-162.2
導体抵抗	mΩ	1.1
導管入口圧力	kgf/cm ²	8.8
導管出口圧力	kgf/cm ²	3.2

表5/負荷変化に伴う状態変化

Tab. 5/Relations between load and flow state of liquid nitrogen

負荷	導体出口における状態	圧力	導体温度	図6
低負荷	気体と液体の混合流	入口、出口共圧力小、圧力差も小	-185~-180	③
中負荷	気体と液体が繰り返して流出	出口圧力の増減大	-180~-170	④
高負荷	気体窒素が流出	出口圧力が最も上昇する	-170~-160	⑤
過大負荷	//	-	-160~	⑥

結果の一例として液体窒素流量を20g/s、電流を1418Aとした場合の測定結果を表4に示す。

試験の結果、電流1300A~1400Aの範囲では、導体表面温度は-160℃~-170℃で非常に安定していることが分かった。

次に電流の変化に伴う導体出口における窒素の流出状態を観察した結果をまとめると表5のようになる。

7 導体内窒素の流通状態

導体内の流れの様相については、表5に述べたような状況から判断して、水-水蒸気系における気液二相流に対比できるものと推察される。すなわち垂直蒸気管の場合、管入口における液単相流から、管壁温度の上昇にしたがって単独の気泡が多数流体中に混じった気泡流、大きな気泡が生じて断続的に流れるスラグ流、それが何個か繋がったフロス流、更に気泡が全部繋がって中央に気相が流れ、液相は壁面に押しつけられて流れる環状噴霧流を経て、気相が主として流れる中に液体が噴霧状になって流れる噴霧流へと遷移する。熱伝達率は乾き度（蒸気の重量比）の上昇と共に管壁面上の液体の核沸騰のため上昇するが、噴霧流に遷移して液膜が消失すると熱伝達率は急激に低下し、管壁温度が上昇する。

このような流動様式と熱伝達率及び管壁温度の概念図を図6に示す。

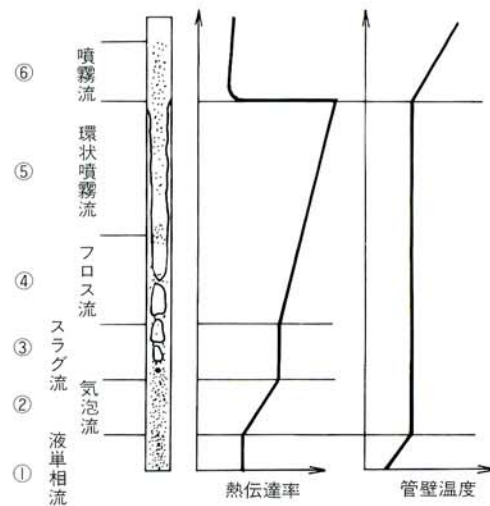


図6/流動様式と熱伝達率及び管壁温度の関係

Fig. 6/Relations between flow state of liquid nitrogen, heat transfer coefficient and wall temperature

8 あとがき

変圧器コイルを液体窒素中に浸漬した場合及び中空導体のコイル中に液体窒素を流通させた場合の通電試験を実施することによって、冷却特性及び窒素の熱的挙動について把握することができた。

続いて固体絶縁方式の変圧器コイルについての試験を実施し、その後実機的设计に入る予定であるが、これらに関しては別の機会に報告したい。

最後にこの研究の遂行にあたり、有益な示唆を戴いた中部電力㈱の小松巖氏を始め、名古屋大学、愛知電機㈱の関係各位の御協力に対し深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) Encyclopedia des gas, p-1019
- (2) K.N.Mathes : Dielectric Properties of Cryogenic liquid IEEE Trans. of Electrical Insulation, April 1967, P-2
- (3) 清水他：液体窒素冷却変圧器の基礎的検討
電気学会全国大会論文集 S62 No.1152
- (4) 清水他：液体窒素を流通させた内部冷却コイルの通電特性 電気関係学会東海支部連合大会論文集 S62 No.118
- (5) 清水他：液体窒素を流通させた内部冷却コイルの通電特性と熱的挙動 電気学会静止器研究会 SA-87-54
- (6) 塩治著：伝熱工学の基礎 P-217、オーム社
- (7) 上田著：気液二相流 P-221、養賢堂

昭和62年度に公開された愛知出願 (I)

特許

公開番号	名 称	発 明 者	共同出願人
62-2174	配電機器の地絡表示装置	沢田 明男	
62-36805	コイルの樹脂モールド方法	磯谷 善次 奥村 顕治 堀部 晃 宇都宮 敦 氏家 憲一	
62-37433	局部洗浄装置の誤操作防止装置	藤井 庄吉 高嶋 修 川地 孝 立松 聡	東陶機器㈱
62-37434	局部洗浄装置の誤操作防止装置	横山 武弘 川地 孝 高嶋 修 立松 聡	東陶機器㈱
62-50534	衛生洗浄装置の温度表示装置	川地 孝 立松 聡 安達 弘之 渡辺 誠	東陶機器㈱
62-77089	単相誘導電動機速度制御装置	岡本 隆生 渡辺 誠	
62-97312	変圧器コイルの加熱整形装置	飯田 淳	
62-117516	暖房便座	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器㈱ 高木工業㈱

公開番号	名 称	発 明 者	共同出願人
62-186881	電動バチンコの打球装置	土本 僚一	
62-188204	ロータリーソレノイド	山田 智	
62-192188	電動バチンコの打球装置	大橋 美夫	
62-193104	ロータリーソレノイド	山田 智	
62-200705	ロータリーソレノイド	宮島 武秀 山田 智	
62-200706	ロータリーソレノイド	宮島 武秀 山田 智	
62-210046	粉体の自動投入・排出装置	内木 明男 安藤 忍	
62-230392	同期モータの速度制御装置	佐藤 徹 安田 徹	
62-252118	巻鉄心の巻回方法	廻間 正樹	
62-274612	巻鉄心の巻回方法	廻間 正樹	
62-279616	巻鉄心の成形装置	磯部 治男 浅井 太成	
62-279617	巻鉄心の矩形成形保持装置	磯部 治男 浅井 太成	
62-293605	巻鉄心の製造方法	廻間 正樹	
62-299224	暖房便座及びその製造方法	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器㈱ 高木工業㈱