極低温絶縁系の電気絶縁特性に及ぼす液体窒素流動の影響

正員 水野 幸男 (名工大)
 学生員 水野 要 (名工大)
 正員 内藤 克彦 (名城大)

Effect of Forced-flowing Liquid Nitrogen on Electrical Insulation Characteristics of Cryogenic Insulation Systems

Yukio Mizuno, Kaname Mizuno (Nagoya Institute of Technology),
 Katsuhiko Naito (Meijo University)

The effect of forced-flowing of liquid nitrogen on (1) breakdown voltage of liquid nitrogen, (2) surface flashover voltage along polymeric rod immersed in liquid nitrogen and (3) lifetime to breakdown of polymeric film by partial discharges in liquid nitrogen were examined.

Breakdown voltage of forced-flowing liquid nitrogen was a little higher compared with that of liquid nitrogen without forced-flowing. A slight increase of surface flashover voltage along acrylic rod was observed in forced-flowing liquid nitrogen. Lifetime to breakdown of polyethylene film subjected to partial discharges is longer in forced-flowing of liquid nitrogen. Considering the results of partial discharge measurements, the phenomena may be attributed to restraint of propagation of discharges by forced-flowing liquid nitrogen.

キーワード：流動，液体窒素，高分子，沿面放電，部分放電，寿命

1. はじめに

酸化物超電導体の出現以来，超電導現象の電力機器などへの応用を実現するため，調査・研究が国内外で鋭意行われている．超電導電力機器の実現のためには，解決すべき課題が幾つかあるが，極低温という過酷な環境に曝される電気絶縁はその一つである．極低温における電気絶縁方式として，スパーサと低温冷媒あるいはフィルムと低温冷媒といった高分子材料と低温冷媒との複合系が提案され，絶縁破壊⁽¹⁾，部分放電劣化⁽²⁾，沿面放電⁽³⁾などに関する基礎的研究が行われてきた．これらの報告においては低温冷媒の流動に関する明確な記述が無く，低温冷媒は容器への流入熱により自然対流しているものと推測される．

超電導電力機器の中には電気絶縁を兼ねる低温冷媒が強制流動している場合もあり，冷媒の流動が複合系の電気絶縁特性に及ぼす影響を評価することは，機器の絶縁設計上，極めて重要と考えられる．しかしながら，低温冷媒の流動が電気絶縁特性に及ぼす影響を系統的に調査した報告は無いように思われる．

本論文では，液体窒素自体の絶縁破壊電圧，液体窒素に浸漬した高分子表面の沿面放電電圧，液体窒素中の部分放電を介した高分子フィルムの絶縁破壊までの寿命に及ぼす

液体窒素流動の影響を，自然対流の場合と比較して実験的に評価した，さらに，部分放電測定結果に基づき，液体窒素流動の効果を検討した．

2. 実験方法

<2.1> 液体窒素の絶縁破壊電圧 液体窒素自体の電気絶縁特性に及ぼす流動の影響を評価するため，流動時および自然対流時の液体窒素の破壊電圧を測定した．電極系として，ステンレス製半球棒電極（直径 6mm）－ステンレス製円盤電極（直径 30mm）を使用した．また，真鍮製球（直径 25mm）－真鍮製球（直径 25mm）電極系も使用した．

電極系を液体窒素に浸漬して定常状態に達した後，電圧上昇率 1kVrms/sec，周波数 60Hz の交流上昇電圧を印加して電極間隔 2mm までの液体窒素の破壊電圧を測定した．一定条件下で 10 回の測定を実施した．

<2.2> 沿面放電電圧 図 1 に示すように，直径 100mm のステンレス製円盤電極系の中心部にアクリル円柱を挟んだ．アクリル円柱の長さは 10mm，直径は 10，20，40mm とした．

電極系を液体窒素に浸漬し，電圧上昇率 1kVrms/sec，周波数 60Hz の交流上昇電圧を印加してアクリル表面の沿面放電電圧を測定した．同一条件下で 10 回の測定を実施した．

図1 沿面放電電圧測定用電極系

Fig. 1. Electrode system for measurement of surface flashover voltage.

図2 寿命試験用電極系

Fig. 2. Electrode system for measurement of lifetime to breakdown.

図3 実験系

Fig. 3. Experimental setup.

<2.3> 絶縁破壊までの寿命 厚さ $100\mu\text{m}$ の低密度ポリエチレンフィルム 1 枚の単層試料, 厚さ $60\mu\text{m}$ と $40\mu\text{m}$ の低密度ポリエチレンフィルムを 1 枚ずつ重ねた積層試料を実験に供した。図 2 に示すように, 半球棒 (ステンレス製, 直径 6mm) - 円盤 (ステンレス性, 直径 30mm) 電極系に試料を挟んだ。円盤電極とフィルムとの間に液体窒素が侵入するのを防ぐため, 円盤電極上にシリコングリースを薄く塗布してフィルムを貼り付けた。また, 液体窒素流

動時にもフィルムが円盤電極から剥離しないよう, 押え板を用いてフィルムを軽く押えつけた。棒電極先端は, ばねを用いてフィルム表面に軽く接触させてある。なお, 積層試料は 2 枚のフィルムを重ねただけであり, 液体窒素浸漬時にはフィルムとフィルムとの間 (層間) に液体窒素が侵入する⁽⁴⁾。

電極系を液体窒素に浸漬し, 60Hz の交流定電圧を棒電極に印加して部分放電開始・消滅電圧を測定した後, 液体窒素中の部分放電によりフィルムが絶縁破壊に至るまでの寿命を求めた。寿命試験中には部分放電測定装置 (松栄電子製, PD-Phase KHG-2) を用いて放電電荷, 放電発生頻度などを測定した。同一条件下で 10~15 個の試料の測定を実施した。

上記 3 種類のいずれの実験においても, 120 リットルの液体窒素タンクを加圧することにより液体窒素を流動させた。実験系を図 3 に示す。液体窒素タンクからのホースを低温容器に引込み, 液体窒素を放出させて低温容器内で流動させた。低温容器の大きさは $200\times 400\times 700\text{mm}$ であり, 液体窒素供給用ホースは容器の壁面中央から低温容器内に導入した。液体窒素放出ノズルは直径 7mm で, 実験時には低温容器内に溜まった液体窒素中にある。液体窒素注入口の反対側の低温容器壁面下方には, 直径 25mm の液体窒素排出パイプが取り付けられている。電極系を液体窒素放出ノズルから約 150mm 離れた場所に設置することにより, 液体窒素放出時に含まれる気泡の影響を除いた。電極付近では, 液体窒素がほぼ一様に流動していること, 気泡はほとんど無いことを目視で確認した。

本実験系において液体窒素の流速を測定するのは困難であり, 便宜上, 液体窒素タンクの圧力を流動状態を表す指標とした。 3kgf/cm^2 加圧時の流速は 1m/sec 程度である。液体窒素の流動方向は各電極系の中心線に対して垂直方向であり, 液体窒素タンクの加圧圧力は 2~3 通り変化させた。なお, 低温容器への熱流入により液体窒素が自然対流している状態においても同様の実験を実施し, 液体窒素流動時の結果と比較した。

3. 実験結果

<3.1> 液体窒素の絶縁破壊電圧

電極間隔 1mm および 2mm の棒-円盤電極系における液体窒素の破壊電圧に及ぼす液体窒素流動の影響を, それぞれ図 4 に示す。図中の印は, 20%, 50% および 80% 破壊電圧を表す。電極間隔が 1mm の場合には, 液体窒素の破壊電圧は流速にほとんど依存しない。しかしながら, 電極間隔が 2mm の場合には, 自然対流時に比べて流動時の方が, わずかに破壊電圧が高くなる。球-球電極系においても, 同様の実験結果が得られた。

今回, 実験を行った電極間隔および液体窒素流速の範囲では, 液体窒素の絶縁破壊電圧に及ぼす顕著な流動の効果は認められなかった。

図4 半球棒-円盤電極系の液体窒素の絶縁破壊電圧に及ぼす液体窒素流動の影響 (a)電極間隔 1mm (b)電極間隔 2mm

Fig.4. Effect of forced-flowing on breakdown voltage of liquid nitrogen measured with hemispherically-tipped rod - disk electrode system. (a) gap distance 1mm (b) gap distance 2mm

<3.2> 沿面放電電圧 アクリル円柱の沿面放電電圧に及ぼす液体窒素流動の影響を、図5に示す。図中の印は、20%, 50%および80%沿面放電電圧を表す。直径10mmのアクリル円柱の場合には液体窒素流動の影響はほとんど認められないが、直径20mm, 40mmの場合には、流速の上昇とともにわずかな沿面放電電圧の上昇が認められる。

<3.3> 絶縁破壊までの寿命 絶縁破壊孔は、液体窒素流動の有無に拘わらず、棒電極をフィルムに投影した直径6mmの円内に存在した。液体窒素に流動時には、自然対流時に比べて下流側に絶縁破壊孔が存在する場合は多少増加したが、液体窒素流動と絶縁破壊孔の位置との間に顕著な相関は認められなかった。

寿命試験の結果はワイブル確率紙を用いて処理した。流動時(タンク圧力0.3kg/cm²)と自然対流時の平均寿命およびワイブル分布の形状パラメータmを比較して表1に示す。また、逆n乗則 $V^n t = \text{一定}$ (V: 印加電圧, t: 寿命)のn値も併せて示す。

同一電圧印加時には、液体窒素が流動している場合の方が絶縁破壊に至るまでの寿命が長くなることわかる。積層試料においても同様の傾向が認められるが、単層試料の場合より流動の影響が顕著に現れているようである。形状パラメータmは1程度であり、偶発的故障形態を示唆する。n値は液体窒素流動の無い場合について報告されている値⁽²⁾と同程度である。

図5 アクリル円柱の沿面放電電圧に及ぼす液体窒素流動の影響 (a)直径10mm (b)直径20mm (c)直径40mm

Fig.5. Effect of forced-flowing of liquid nitrogen on surface flashover voltage along acrylic rod. (a) 10mm ϕ (b) 20mm ϕ (c) 40mm ϕ

表1 寿命試験の結果
Table 1 Results of life tests.

	流動	印加電圧 [kVrms]	平均寿命 [sec]	m	n
単層	なし	12	995	1.1	12
		13	380	1.3	
	あり	12	1520	1.2	13
		13	535	1.3	
積層	なし	12	1436	1.1	11
		13	588	1.1	
	あり	12	2921	1.1	10
		13	1357	1.3	

流動なし: 自然対流

流動あり: タンク圧力0.3kg/cm²

寿命に及ぼす液体窒素流動の影響を単層試料について調べた結果を、各電圧印加時の自然対流時の寿命を1として規格化して図6に示す。タンク圧力0.1kg/cm²時には液体

図6 寿命に及ぼす液体窒素流動の影響

Fig.6. Effect of forced-flowing of liquid nitrogen on lifetime to breakdown.

図7 部分放電開始・消滅電圧に及ぼす液体窒素流動の影響

Fig.7. Effect of forced-flowing of liquid nitrogen on partial discharge inception and extinction voltages.

窒素の流動が不安定で、信頼性のあるデータを得ることができなかった。実験を行った範囲では、印加電圧の大きさに関係なく、液体窒素タンク圧力と寿命との間に直線関係が認められるが、印加電圧が低いほど液体窒素流動の影響が大きいことがわかる。

以下、部分放電測定の結果について述べる。部分放電開始・消滅電圧に及ぼす液体窒素流動の影響を、単層試料の場合について図7に示す。液体窒素流動時には自然対流時に比べて部分放電開始・消滅電圧ともに高くなるが、液体窒素タンク圧力が高いほど上昇の程度は大きい。

1サイクル当りの平均放電パルス数と印加電圧位相との関係の典型例を図8に示す。これは液体窒素流動時（タンク圧力 0.3kg/cm²）に単層試料に13kVを印加した場合の結果である。印加電圧の位相が20-80度付近および190-280

図8 1サイクル当りの平均放電パルス数と印加電圧位相との関係

Fig.8. Relation between average number of pulses per cycle and phase angle of applied voltage.

度付近で放電が発生していること、負極性放電の方が多く発生していることがわかる。自然対流時の単層試料および積層試料においてもほぼ同様の傾向が認められた。

単層試料における自然対流時および流動時の典型的な累積放電電荷量および累積放電パルス数の時間変化を図9に示す。流動時のタンク圧力は 0.3kg/cm²、印加電圧は 13kVである。液体窒素流動時には、自然対流時に比べて放電電荷、放電パルス数が少ないことがわかる。また、自然対流時には累積放電電荷および累積放電パルス数は、時間とともに増加しているが、液体窒素流動時には時間に対して増加しない時間帯があり、部分放電が発生していないことを示唆する。積層試料についても同様の傾向が認められた。

以上述べたように、液体窒素中の部分放電を介したフィルムの絶縁破壊までの寿命および寿命試験中の部分放電特性には、顕著な液体窒素流動の影響が認められた。

4. 液体窒素流動の影響

まず、部分放電を介したフィルムの絶縁破壊までの寿命に及ぼす液体窒素流動の影響について検討する。前章で述べたように、液体窒素流動時は自然対流時に比べて、部分放電開始・消滅電圧が高く、放電電荷量、放電パルス数が少ない。液体窒素流動により部分放電が進展しにくくなるため、このような結果が得られるものと考えられる。この場合、液体窒素の流動が激しいほど効果が顕著になると予測されるが、図6に示した寿命試験結果にはその傾向が認められる。

図9において、液体窒素流動時には累積放電電荷および累積放電パルス数が時間に対して増加しない時間帯があり、液体窒素流動により部分放電が停止していることを意味する。自然対流時にはこの現象は認められない。これらの結果は、液体窒素流動により部分放電発生が抑制されて

図9 累積放電電荷および累積放電パルス数の時間変化

Fig. 9. Time variation of cumulative charge and cumulative number of pulses. (a) without forced-flowing of liquid nitrogen (b) with forced-flowing of liquid nitrogen

いることを示唆する。累積放電電荷を累積放電パルス数で除した放電パルス当りの平均放電電荷は、液体窒素流動時の方がはるかに大きい。このことから、液体窒素流動により放電電荷の比較的小さい放電が抑制されるものと推測される。

次に積層試料における液体窒素流動の影響を検討する。自然対流状態では、印加電圧が低い場合には積層試料の方が単層試料よりも寿命が長く、印加電圧が高い場合には逆の傾向を示すことが報告されている⁽⁴⁾。印加電圧が低い場合には層間にある液体窒素中で放電は発生せず、棒電極先端の放電が上のフィルムを破壊すると層間で広がり、次いで下のフィルムを破壊するのに対し、印加電圧が高い場合には層間に存在する液体窒素中でも放電が発生するため、上のフィルムは棒電極先端の放電と層間の放電とに曝されて劣化が促進されるためである。

表1を見ると、積層試料の方が単層試料に比べて寿命が長いことから、本実験で使用した印加電圧では層間の液体窒素中ではほとんど放電は発生していないものと推測される。この場合、液体窒素流動により棒電極先端の放電は単層試料と同様に抑制される、さらに、上のフィルムが絶縁破壊して層間の液体窒素中で放電が発生した場合には、層

間に存在する液体窒素の流動により層間での放電が抑制されると推測される。従って、積層試料では単層試料に比べて液体窒素流動の効果が顕著に現れるものと考えられる。

なお、液体窒素自体の絶縁破壊電圧および高分子の沿面放電電圧に及ぼす液体窒素流動の効果が余り認められないのは、絶縁破壊電圧や沿面放電電圧が寿命試験の印加電圧に比べて高いため放電のエネルギーが大きく、液体窒素流動により放電の進展が抑制されにくいことが原因の一つと考えられる。

5. むすび

液体窒素の絶縁破壊電圧、液体窒素に浸漬した高分子の沿面放電電圧および液体窒素中の部分放電を介した高分子フィルムの絶縁破壊に至るまでの寿命、に及ぼす液体窒素流動の影響を評価し、以下の結論を得た。

- (1) 液体窒素の絶縁破壊電圧は、電極間隔 2mm の場合、液体窒素流動時には自然対流時に比べてわずかに上昇した。実験した流速の範囲では流速依存性は認められなかった。
- (2) 液体窒素に浸漬した高分子円柱の沿面放電電圧は、直径が大きい場合には液体窒素流動時には自然対流時に

比べてわずかに上昇した。

- (3) 液体窒素中の部分放電を介した高分子フィルムの絶縁破壊までの寿命は、液体窒素流動時の方が自然対流時に比べてかなり長くなった。この傾向は、積層試料においてより顕著に認められた。
- (4) 液体窒素流動時には、自然対流時に比べて部分放電開始・消滅電圧は高くなり、累積放電電荷量、累積放電パルス数は減少した。
- (5) 流動液体窒素の流動により部分放電の進展が抑制されるため、電気絶縁特性が向上するものと考えられる。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金ならびに（財）中部電力基礎技術研究所の援助を受けて行われたことを付記し、謝意を表す。また、実験にご協力いただいた名古屋工業大学卒業生の木村貴幸氏、浅田和弘氏に感謝する。
（平成10年9月24日受付，平成10年12月24日再受付）

文 献

- (1) 例えば，A.Bulinski and J.Densley, "The Impulse Characteristics of Electrical Insulation Operating at Cryogenic Temperatures", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.15, No.2, pp.89-96, 1980.
- (2) 例えば，Y.Mizuno, M.Nagao, M.Kosaki, N.Shimizu and K.Horii, "Interaction of Partial Discharge Streamers in Cryogenic Fluids with Polymeric Films", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.23, No.4, pp.689-695, 1988.
- (3) 例えば，Y.Mizuno, T.Kimura and K.Naito, "Surface Flashover Characteristics along Polymeric Rod Partially Immersed in Liquid Nitrogen", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No.6, pp. 809-813, 1998.
- (4) 水野，近藤，清水，小崎，堀井，「液体窒素中の多層ポリエチレンフィルムの部分放電による絶縁破壊」，電気学会論文誌A，105巻，8号，pp.413-420，1985.

水野 幸男（正員）1958年7月8日生まれ。86年3月

名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程終了。同年豊橋技術科学大学 電気・電子工学系助手。93年11月名古屋工業大学電気情報工学科助教授，現在に至る。主として，極低温電気絶縁，外部絶縁に関する研究に従事。工学博士。低温工学会，IEEE 会員。

水野 要（学生員）1976年9月20日生まれ。97年3月

国立明石工業専門学校電気工学科卒業。97年4月，名古屋工業大学電気情報工学科編入学，現在に至る。

内藤 克彦（正員）1934年12月24日生まれ。60年3月

名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月日本碍子株式会社就職。高電圧研究所長，技師長，理事を経て91年11月同社退職。直ちに名古屋工業大学電気情報工学科教授。98年4月名城大学理工学部電気電子工学科教授。主として，外部絶縁，信頼性，電磁環境に関する研究に従事。工学博士。IEEE Fellow，CIGRE 会員。