UDC [621.315.611+621.315.615]: 621.3.015.51

論 文

58-A77

液体窒素と固体絶縁物の並列・直列形 複合絶縁系における破壊特性

正 員 金 子 正 光 (九州大)

准 員 吉 田 幸 正 (九州大)

正 員 原 雅 則 (九州大)

正 員 赤 崎 正 則 (九州大)

1. ま え が き

近年、超電導ケーブルならびに液体窒素冷却極低温ケーブルなどの極低温・超電導電力機器と超電導マグネットの研究開発が進むにつれ、極低温条件下における電気絶縁が注目されるようになってきた。これに伴い、極低温における各種絶縁物の電気絶縁特性について数多くの研究が行なわれている⁽¹⁾。

著者らは、核融合炉用超電導マグネットのコイルの電気絶縁に関して、巨大な機械的応力下における固体絶縁物の破壊と固体ならびに冷媒絶縁物が複合する系の破壊が、主要な絶縁破壊機構になることを指摘した⁽²⁾。固体絶縁物の破壊電圧に及ぼす各種機械応力の影響に関しては、既に一連の研究を行ないそれらの成果は報告した⁽²⁾⁽³⁾。一方、複合絶縁系の絶縁破壊に関しては、これまで主に電力用超電導ケーブルならびに液体窒素冷却極低温ケーブルの電気絶縁方式に関連して、極低温液体中でこれらの構成系における沿面放電の研究が各方面で行なわれている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、冷媒液体と固体絶縁物の複合絶縁系における絶縁破壊に関する基礎的な研究は少ない。

ところで、実用の極低温・超電導電力機器と超電導

マグネットのコイルの電気絶縁構成として、例えば、(1)導体の周りに絶縁テープを巻いて冷却チャネルを作る場合と、(2)冷却効果を良くするために溝付導体(Serrated superconductor)間に絶縁物を挟む場合などが考えられている⁽⁶⁾。これらの複合絶縁系をながめると、原理的には絶縁物の界面が印加電界に対して平行に配置(並列形)される場合と、印加電界に対して直角に配置(直列形)される場合に分類できる。

本研究では、極低温機器の上述のような絶縁系の基本構成となる並列・直列形複合絶縁系の絶縁破壊電圧に及ぼす圧力 P と固体材料の影響を液体窒素(LN₂)中で調べた。その結果、二、三の新しい知見を得ることができたので報告する。

2. 実験の装置と方法

図1は、クライオスタットと電極支持装置の概略図を示す。クライオスタットは外径 340 mm ϕ 、内径 150 mm ϕ 、高さ 1,370 mm のステンレス鋼製压力容器で、液体ヘリウム温度まで実験できる構造になっているが、今回は液体窒素で実験した[図1(a)]。また、図1(b)で示されるように、電極支持装置には1回の冷却で8個の試料について測定ができるように工夫した。すなわち、高電圧は電極選択装置に直結した接触子と電極系の高電圧側端子が接触しており、電極選択装置を回転させることにより、8個の電極配置のうちの任意の一つの電極配置に印加される。

図2は、今回の実験に用いた電極の構造と構成を示す。高電圧電極は直径 25 mm ϕ の黄銅製で、電極端の曲率半径を 2.5 mm とし、接地電極も黄銅製でそれぞれの電極表面は鏡面仕上げとした。更に、高電圧電極はスペーサによる平行平板電極配置の実現と電極縁

Characteristics of Electrical Breakdown in Composite Insulating Systems: LN₂-Solid Interface in Parallel or Series with the Field.
By *Tadamitsu Kaneko*, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University), *Sachimasa Yoshida*, Associate (Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University), *Masanori Hara*, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University) & *Masanori Akazaki*, Member (Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University).

金子正光：正員，九州大学工学部電気工学科

吉田幸正：准員，九州大学総合理工学研究科

原 雅則：正員，九州大学工学部電気工学科

赤崎正則：正員，九州大学総合理工学研究科

図1 クライオスタットと電極支持装置の概略図

Fig. 1. Schematic illustrations of a stainless-steel cryostat and arrangement of test samples in holder.

端効果の除去のために Stycast 1266 でモールド後、平らな部分を磨き出したものを使用した。同図において、(a)図は液体窒素自体の破壊、(b)図はこの電極

(a):液体窒素の破壊、 (b):固体絶縁物の破壊、
(c):並列型複合絶縁系の破壊、 (d):直列型複合絶縁系の破壊。

図2 電極の構造と構成

Fig. 2. Electrode and composite insulation systems.

構造における固体絶縁物の貫通破壊、(c)図は並列形複合絶縁系の破壊および(d)図は直列形複合絶縁系の破壊に用いた電極構成である。電極間に挟んだ固体絶縁物(供試料と言う)は、超電導マグネットのコイルの絶縁材料として広く用いられているポリエチレンテレフタレート(PET)と綾織のガラス繊維強化エポキシフィルム(FRP)である。それらの公称厚さはそれぞれ0.25mmと0.30mmである。表1は、供試料と液体窒素の電気的特性を示す。なお、LN₂の比誘電率 ϵ_r は $P=0.1\sim 1.1$ MPaで1.431~1.455の範囲にあり⁽⁷⁾、ここでは $\epsilon_r=1.44$ を用いた。供試料は蒸留水で清浄にし、かつ十分に乾燥させた後、対向する電極間にOリングを用いて固定した(図1(b)参照)。

クライオスタットの内層を油回転ポンプで約 10^{-3} Torrまで排気したのち、窒素ガスを大気圧まで封入後、市販のLN₂を電極支持装置より約15cmの高さまで入れた。LN₂の移送時において、特にフィルタを通すなどの処置は講じていないが、電極近傍のLN₂は図1(b)に示したように、電極支持装置の下部に取付けられたステンレス鋼製400番網を通して被測定ギャップ間を満たす。LN₂の加圧は、外部から窒素ガス(純度99.9%)を設定圧力まで送入することによって行なわれた。実験中の設定圧力の制御は、接点付圧力計に結線した電磁弁をオン・オフさせる方式で、そのときの圧力精度は約 ± 0.001 MPaである。圧力の測定には、ブルドン管圧力計を用いた。温度の測定には銅-コンスタンタンの熱電対を用い、図1(b)に示されているように電極支持装置の外側に設置して行なっ

表1 供試料と液体窒素の電気的特性

Table 1. Electrical properties of samples and LN₂.

試料	比誘電率 ϵ_r	誘電正接	体積抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	表面抵抗率 (Ω)	密度 (g/cm^3)	厚さ (mm)
PET (300K)	3.2 (at 1MHz)	0.01 (at 1MHz)	10^{18}	10^{16}	1.40	0.25
FRP (300K)	3.5~4.5 (at 1MHz)	0.025~0.035 (at 1MHz)	$10^{13}\sim 10^{14}$	$10^{12}\sim 10^{14}$	1.80~1.90	0.30
LN ₂ (77K)	1.44	$<10^{-8}$	$\geq 10^{19}$	—	0.831	—

た。

印加電圧は交流 60 Hz で破壊するまで約 3 kV/s の割合で上昇させた。ところで、本研究での供試絶縁系では一度破壊を生じたとき、次の電圧印加で絶縁耐力が回復する場合としない場合がある。前者の場合には、電圧印加回数をすべて 20 回とし、破壊電圧の平均値および最大・最小値の幅を実験データを示すグラフに縦棒で示した(図3～図6)。電圧印加の時間間隔は1分として繰返し、電圧印加を行なった。一方、絶縁回復しない固体絶縁物と直列形複合絶縁系の貫通破壊および並列形複合絶縁系の沿面破壊の場合には、その都度新品の供試料と交換して実験を5回繰返し、破壊電圧の平均値と最大・最小値の幅を縦棒で示した(図3, 図6, 図9, 図10 のデータの場合)。ただし、個々の測定値で 15% 以上平均値からはずれているものがあれば、液体窒素中のバブルなどの弱点部による破壊電圧の低下が考えられるので、そのデータは捨て、更に5回の実験を行なった。本研究における破壊電圧はすべて実効値を示す。

3. 液体窒素と固体絶縁物の破壊電圧に及ぼす圧力の影響

複合絶縁系の絶縁破壊の場合、どこで破壊が生じるかは複合絶縁系を構成している各種絶縁構成要素における電圧分布に関連すると考えられる。これまで、液体窒素の破壊電圧とその破壊電圧分布に及ぼす圧力の影響⁽⁸⁾⁽⁹⁾が調べられているが、それらの結果は電極条件のわずかな違いなどのために測定者によって必ずしも一致していない。本研究の場合、各種複合絶縁系の絶縁破壊発生点を検討するうえで、液体窒素と固体絶縁物自体の破壊電圧とその変動幅が必要であり、上述のようにこれらの値に必ずしも良い一致が得られていないことから、ここでは著者らの電極系でそれらを測定した。

図3は、ギャップの長さ 0.25 mm と 0.30 mm における液体窒素の破壊電圧、および PET と FRP の貫通破壊電圧に及ぼす圧力の影響を示す。液体窒素の破壊電圧は、圧力の増加と共に増加し、ある圧力以上になると飽和する傾向となっている。これらは、従来の結果と一致している⁽⁸⁾。一方、固体絶縁物の破壊電圧は、媒質に加えた圧力の増加に対してはほとんど無関係で一定である。

図4は、各圧力における液体窒素の破壊電圧とギャップの長さの関係を示す。液体窒素の破壊電圧は、ギャップの長さの増加と共に増加すると同時に、圧力の増加によっても増加する。同図に、著者らの値〔有効電

図3 LN₂ 媒質に加える圧力の関数として LN₂ と PET および FRP の破壊電圧

Fig. 3. Breakdown voltages of LN₂, PET and FRP as a function of pressure applied to LN₂ medium.

図4 ギャップの長さの関数として平行平板ギャップの LN₂ の破壊電圧

Fig. 4. Breakdown voltages of LN₂ in parallel plane gap as a function of gap length.

極面積 (3.14 cm²)〕と比較するために平行平板電極系〔有効面積 (3.1 cm²)〕の Kawashima 氏の値⁽⁹⁾と、直径 62.5 mmφ の球対球電極系での Lehman 氏の値⁽¹⁰⁾も併せてプロットした。この図からわかるように、著者らの測定は Lehman 氏の値より低い、Kawashima 氏の値とほぼ一致している。ゆえに、今回得られた測定値と従来の面積の小さい電極で得られている値との差は電極面積効果によるものと考えられ

る。

4. 複合絶縁系の破壊電圧特性

〈4・1〉 並列形複合絶縁系の実験結果と検討

(1) 実験結果 第2章で述べたように、供試料の絶縁耐力が絶縁破壊の都度回復する場合は、一つの圧力条件のもとで電圧印加を繰返した。このようにして、破壊電圧とその変動幅を測定した後、供試料ならびに電極上の放電こん分布を入念に調べた。その結果、放電こんが供試料の切断面に分布する場合（沿面破壊と呼ぶ）と沿面から離れた LN_2 中に露出した電極表面部分に、放電こんがランダムに分布する場合（ LN_2 中の破壊と呼ぶ）の二つの現象が認められた。以下の図中において、沿面破壊の破壊電圧を●と△印で、また LN_2 中の破壊の破壊電圧を○と△印で示す。

図5は、固体絶縁物として PET を用いた場合の図2(c)の絶縁構成における破壊電圧の測定値で、比較のために図3に示した LN_2 自体の破壊電圧の変動幅も斜線で示した。図から明らかなように、PET の並列形複合絶縁系の場合、 $P=0.1\sim0.25\text{ MPa}$ までは LN_2 の圧力の上昇と共に破壊電圧は上昇し、図2(a)の電極系を用いて測定した LN_2 自体の破壊電圧より平均値で約 $0.6\sim1.6\text{ kV}$ ほど高い。更に圧力が上昇すると破壊電圧の平均値は $P=0.4\text{ MPa}$ 程度までに飽和の傾向を示し、 $P=0.4\sim0.5\text{ MPa}$ で急に低下する。 $P=0.5\sim1.0\text{ MPa}$ の間では破壊電圧の平均値は P の上昇と共に徐々に上昇する。また、破壊電圧の P に対する飽和の傾向が出現し始めると破壊電圧の変動幅が低い圧力の場合の約2倍以上になる。PET の場合、全圧力領域で絶縁耐力は破壊の都度回復した。

図5 圧力の関数として LN_2 と PET の並列配置された絶縁系の破壊電圧

Fig. 5. Breakdown voltages of a composite insulation system of LN_2 and PET arranged in parallel as a function of pressure.

図6 圧力の関数として LN_2 と FRP の並列配置された絶縁系の破壊電圧

Fig. 6. Breakdown voltages of a composite insulation system of LN_2 and FRP arranged in parallel as a function of pressure.

一方、FRP の場合、図6に示すように破壊電圧の平均値は $P=0.1\sim0.25\text{ MPa}$ では PET の場合と同様な傾向を示すが、更に P が上昇したとき破壊電圧の平均値の顕著な低下が認められず、また破壊電圧の変動幅も小さい。FRP の場合、 $P=0.1\sim0.3\text{ MPa}$ では絶縁耐力が回復したが、 $P>0.3\text{ MPa}$ ではほとんどの場合、1回の絶縁破壊で絶縁回復能力を失った。

放電こん分布の観察によれば、PET の場合 $P=0.1\sim0.35\text{ MPa}$ では LN_2 中の破壊であり、 $P>0.4\text{ MPa}$ では沿面破壊になっていた。また FRP の場合は、 $P=0.1\sim0.25\text{ MPa}$ では LN_2 中の破壊であり、 $P>0.3\text{ MPa}$ では沿面破壊になっていた。

(2) 検討 図5、図6のような特性が現われる理由を調べるために、電圧印加回数と破壊電圧の関係を調べた。その結果が図7（供試料として PET を用いた場合）と図8（供試料として FRP を用いた場合）である。

PET に対する図7で、 $P=0.2\text{ MPa}$ における破壊電圧の変動は、放電を繰返すことによってやや上昇するが、やがて一定値に落ち着く傾向を示す。このとき PET の絶縁耐力が絶縁破壊の都度回復し、切断面における炭化は認められなかった。前項で述べた放電こん分布と上述の放電特性から、破壊は LN_2 中で起こったものと考えられる。そのときの破壊電圧の平均値が、 LN_2 自体のそれよりやや高くなる理由として、〈3・1〉節で述べた電極面積効果によるものと考えられる。すなわち、図2(a)の電極構成を用いて LN_2 中で破壊する場合、 LN_2 にさらされた面積は 3.14 cm^2

図7 電圧印加回数に対する破壊電圧の変動 (PET と LN₂ の並列配置)

Fig. 7. Variation of breakdown voltages with the number of voltage application (parallel arrangement of PET and LN₂).

図8 電圧印加回数に対する破壊電圧の変動 (FRP と LN₂ の並列配置)

Fig. 8. Variation of breakdown voltages with the number of voltage application (parallel arrangement of FRP and LN₂).

であり、同図(c)の場合のそれは 0.8 cm^2 となる。この面積の違いによる破壊電圧の面積効果による変化を Kawashima 氏の式 ($\bar{E}_1 - \bar{E}_2 = 9 \log_{10} A_2/A_1$, ただし、 $\bar{E}_1, \bar{E}_2$ はそれぞれ有効電極面積 A_1, A_2 の場合の破壊電界強度) を用いて $P=0.2 \text{ MPa}$ の場合の破壊電圧 (7.9 kV) に対して求めると (9.3 kV) となり、図5の液体窒素中の破壊電圧と複合系の破壊電圧の差とほぼ同じになる。また、図7の $P=0.4 \text{ MPa}$ と 1.0 MPa での沿面破壊電圧は、最初の電圧印加時に最大値を示し、2回目の破壊電圧は急に低下し、それ以降の破壊電圧の変動は1回目と2回目の差より小さい。図5の $P>0.5 \text{ MPa}$ において、第1回目の破壊電圧は、各圧力における破壊電圧測定値の上限に対応しており、図から明らかなように、この値は圧力の増加と共に増加するが圧力以上で飽和する。一方、2回目以降の破壊電圧は LN₂ 中の破壊電圧より約 20~30% 低下しているが、弱い圧力依存性を有している。前にも述べたように、PET では後に述べる FRP におけるような放電による沿面の顕著な炭化は認められないが、偏光顕微鏡観察によると、沿面放電によって PET の一部が溶融して黒化しており、20回の放電ころは数箇所集まって分布して生じている。このように沿面放電によって著しい絶縁劣化が生じたために2回目以降の破壊電圧が低下し、この破壊電圧は LN₂ 中の圧力にほとんど影響されないために、図5、図7のような特性になったものと考えられる。

FRP の場合(図8)、 $P=0.2 \text{ MPa}$ の低い圧力で PET と同様な特性を示す。しかし、 $P=0.3 \text{ MPa}$ と

1.0 MPa の圧力において、FRP は絶縁破壊によって炭化劣化し、絶縁回復能力を失う。

第2章でも述べたように、絶縁回復能力がない場合は、1回目の破壊電圧を五つの供試料に対して測定したので、図6の $P>0.3 \text{ MPa}$ における破壊電圧は、PET の場合の1回目の破壊電圧値、すなわち図5の $P \geq 0.4 \text{ MPa}$ における破壊電圧の上限値に対応している。このような観点から図6の $P>0.3 \text{ MPa}$ における破壊電圧をながめると、FRP の沿面が存在することによって、LN₂ 中の破壊の場合より破壊電圧はわずかに低下する程度であるが、一度破壊を生ずれば絶縁回復能力を失うことがわかる。

以上の PET と FRP の並列形複合絶縁系の破壊電圧特性をまとめると、 $P<0.3 \text{ MPa}$ では沿面が存在しても破壊が沿面から離れた LN₂ 中で生じるため、固体絶縁物が電極表面を覆った部分だけ LN₂ にさらされる面積が減少し、面積効果によって破壊電圧は上昇する傾向がある。これに対し $P>0.4 \text{ MPa}$ では、沿面の存在によって複合系の破壊電圧は LN₂ 中の破壊より低下する。

図5、図6によれば、LN₂ 中の破壊から沿面破壊に移行する圧力範囲は、固体材料によって異なっている。この原因は次のように考えられる。LN₂ と固体材料の破壊電圧の圧力依存性は、図3から明らかなように著しく異なっている。沿面の場合の圧力依存性は実験的には求めていないが、LN₂ ならびに固体材料とは異なると考えられ、この破壊電圧の圧力依存性の違いのために、次のような現象を呈すると考えられる。す

なわち、圧力が高くなると LN_2 中の絶縁耐力が高くなるために放電路は最弱点部としての沿面側に移り、次第に沿面放電の形態を取るようになる。放電の観測によれば、特に圧力が 0.3 MPa 程度になると放電路は固体材料内に潜行するようになる。このように放電路が沿面に接近したときの破壊電圧の圧力依存性は、固体材料の劣化の程度と密接に関連している。すなわち、 P が高くなるに従い固体材料表面の劣化が大きくなるが、FRP の場合は PET の場合に比べて絶縁劣化、特に炭化の程度が大きいため、 LN_2 中の破壊から沿面破壊に移移が始まったときに絶縁回復を失うので、両者間の移移領域が見かけ上 PET の場合より低い圧力側に移行したと考えられる。

〈4・2〉 直列形複合絶縁系の実験結果と検討 実用の極低温・超電導機器で直列形複合絶縁系になっている部分は、多層巻絶縁した導体の巻線間、導体と接地された壁(容器)、または鉄心などの間の絶縁において見られる。この場合の絶縁構成の基本は固体と液体が層をなす二層構造であり、一般には固体絶縁物の厚さは一定で液体層の厚さが変化する構造になる場合が多い。例えば、鉄心上に巻かれたコイルの絶縁を見た場合、コイルが鉄心に接している部分では液体層の厚さは零に近く、接している部分から遠ざかるに従って固体絶縁物層の厚さは同じであるが、液体層の厚さが大きくなる。このような絶縁系における絶縁の最弱点部を調べる目的で、図2(d)の液体層における厚さを変化させ、そのときの破壊電圧がどのような機構で生じるかを調べた。

(1) 実験結果 図9中のプロットは、固体絶縁物として PET を用いた場合の破壊電圧対液体窒素層間長さ特性の測定値を圧力をパラメータとして示したものであり、図10は FRP に対する同様な図である。図から明らかなように、固体絶縁物の種類ならびに圧力に無関係に次のような特徴があることがわかる。

(i) LN_2 層の厚さ d_1 を厚くしていくと、最初は d_1 の増加と共に破壊電圧は減少し、ある d_1 の値で極小の破壊電圧を示す。更に d_1 を大きくすると破壊電圧は次第に上昇する。

(ii) 極小の破壊電圧値は P に依存する。極小の破壊電圧が現われる d_1 の値は $0.05 \sim 0.2 \text{ mm}$ の間にあり、その P 依存性は明りょうでない。

(iii) $d_1=0$ のときの破壊電圧 $V_{d_1=0}$ は、図2(b)の電極構成を用いたときの値であるが、 $d_1=0$ のときの破壊電圧と $d_1 \neq 0$ のときの極小破壊電圧 $V_{d_1 \neq 0}$ の差は圧力が低いほど大きい。 $P=0.1 \text{ MPa}$ の場合、その低下率は PET の場合は約 25%、FRP の場合は約

図9 LN_2 と PET の複合絶縁系の破壊電圧の実験値と計算値の比較

Fig. 9. Comparison of experimental and calculated values of breakdown voltage in composite insulation system of LN_2 and PET material.

図 10 LN₂ と FRP の複合絶縁系の破壊電圧の実験値と計算値の比較

Fig. 10. Comparison of experimental and calculated values of breakdown voltage in composite insulation system of LN₂ and FRP material.

図 11 二層直列形複合絶縁系のモデル

Fig. 11. Model of two parallel planes with two different dielectrics in series.

28% であった。

(2) 検 討 図 11 に示すように、二層直列形複合絶縁系の LN₂ 層と固体層の電界強度 E_1 , E_2 は、電極間に交流電圧 V を印加すると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{LN}_2 \text{ 層の電界強度: } E_1 &= \frac{\epsilon_r V}{(\epsilon_r d_2 + \epsilon_r d_1)} \\ \text{固体層の電界強度: } E_2 &= \frac{\epsilon_r V}{(\epsilon_r d_2 + \epsilon_r d_1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 d_1 , d_2 : それぞれ LN₂ 層と固体層の厚さ、 ϵ_r , ϵ_r : それぞれ LN₂ と固体の比誘電率

LN₂ 層と固体層の絶縁破壊電界強度をそれぞれ E_{B1} と E_{B2} とすれば、図 3、図 4 より $\epsilon_r E_{B1} < \epsilon_r E_{B2}$ であるので、LN₂ 層が先に絶縁破壊する。その結果、全電圧が固体層に加わり、 E_{B2} を平等電界と仮定すると $d_2 E_{B2} < V$ であれば、固体層も貫通破壊に至ると考えられる。上述のように、LN₂ 層が先に破壊するので、二層直列形複合絶縁系の絶縁破壊は次式の印加電圧 V_B で始まると考えられる。

$$V_B = \left(1 + \frac{\epsilon_r d_2}{\epsilon_r d_1}\right) d_1 E_{B1} \dots\dots\dots (2)$$

しかし、LN₂ 層が破壊して全電圧が固体絶縁物にかかっても、印加全電圧が固体絶縁物の破壊電圧より低い場合は固体絶縁物層を貫通破壊するとは限らない。すなわち、直列形複合絶縁系の破壊過程は、

① LN₂ 層の破壊 → ② LN₂ 層内の放電柱対平板間に固体絶縁物がある形態の破壊 → ③ 全路破壊になると考えられる。また ③ の過程は、② の過程が完了すれば自動的に形成されると考えられる。一方、LN₂ 層の破壊電圧が固体材料の破壊電圧より高くなる場合にも、① の過程が完了すれば自動的に②が確立され③に移行すると考えられる。すなわち、直列形複合絶縁系の絶縁破壊は、①、②に対する破壊条件の両方が満たされたときに生じる。①に対する確立条件が(2)式で、図 9、図 10 に実線で示した。一方、②の状態では LN₂ 層中の放電火柱の固体絶縁物上の接点にあたる部分にはイオンが集積されるので、必ずしも針 (先

端曲率半径 0.1 mm) 対平板間に固体絶縁を挟んだ電極配置とは一致しない。しかし、このような電極配置で近似できるとして破壊電圧を実測すると、図9、図10中の破線ようになる。図9、図10の実線と破線の高いほうの値を同図に太破線で示したが、この値と実験値を比べると d_1 に対する破壊電圧の傾向が非常に良く合っている。

5. む す び

極低温機器の絶縁特性と関連して、その絶縁系の基本構成となる LN_2 と固体絶縁物の並列形および直列形配列の複合絶縁系の破壊特性を LN_2 に加える圧力を変化させて測定し、検討した。その結果をまとめると次のようになる。固体絶縁物としては PET および FRP フィルムを用いた。

(1) 並列形複合絶縁系の場合、破壊の形態は圧力によって異なり、 P が低い場合は LN_2 中の破壊に、 P が高い場合には沿面破壊になる。沿面破壊が生じる場合、PET と FRP では放電による絶縁劣化の程度が異なるため、破壊電圧の圧力依存性が固体材料の種類によって異なる。特に、FRP の場合には沿面の炭化が生じ、圧力が高くなると1回の絶縁破壊によって絶縁系はほとんど絶縁耐力を失う。

(2) 直列形複合絶縁系の場合、 LN_2 層の厚さ d_1 を変化させて圧力のパラメータとして破壊電圧を調べた。一般に、 d_1 を零から大きくしていくと、破壊電圧はある d_1 まで低下し、極小値を示した後、 d_1 の増大と共に上昇する特性が認められた。これらの特性は LN_2 層が先に破壊して、次に固体材料が破壊すると仮定した破壊電圧の計算値と良く一致した。

終りに、極低温・超電導機器の絶縁構成に関して有意義な御教示をいただいた、本学入江富士男教授に感謝する。また、FRP を御提供いただいた住友電気工業(株)に感謝する。本研究の一部は、文部省科学研究費によって行なった。

(昭和58年2月18日受付、同58年6月4日再受付)

文 献

- (1) 例えば、K.N. Mathes: "Dielectric Properties of Cryogenic Liquids", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-2, 24 (1967)
- (2) C.H. Park, T. Kaneko, M. Hara & M. Akazaki: "Effects of Mechanical Stresses on the Dielectric Breakdown Strengths of PET and FRP", *ibid.*, EI-17, 234 (1982)
- (3) C.H. Park, M. Hara & M. Akazaki: "Effects of Temperature and Voltage on Dielectric Breakdown Strengths of PET and FRP under Mechanical Stresses", *ibid.*, EI-17, 546 (1982)
- (4) R.J. Meats: "The Impulse Voltage flashover of dielectric spacers in a helium-insulated superconducting cable model", *Cryogenics*, 17, 77 (1977)
- (5) D.J. Bosack: "Development of the Dielectric System for a Helium Cooled Superconducting Transmission Line", *NAS Conf. E.I. and Diele Pheno.*, p. 594 (1975)
- (6) R.D. Hay & E.J. Rappaport: "Electrical Insulation in Magnets for Fusion Reactors", 6th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, San Diego Cal. p. 1130 (1975)
- (7) R. J. Jacobsen, R. B. Stewart, R. D. McCarty & H. J. Hanley: "Thermophysical Properties of Nitrogen from the Fusion Line to 3,500 R (1,944 K) for Pressures to 150,000 Psia ($10,342 \times 10^6 \text{ N/m}^2$)", NASA, COM-74-50180 (1973)
- (8) M. Shiraishi, H. Fuji, K. Yoshino & Y. Inuishi: "Pressure Dependence of Dielectric Breakdown in Liquid Nitrogen", *Japan. J. Appl. Phys.*, 20, 2057 (1981)
- (9) A. Kawashima: "Electrode area effect on the electric breakdown of liquid nitrogen", *Cryogenics*, 14, 217 (1974)
- (10) J.P. Lehman: "Mesures dielectriques dans les fluides cryogeniques jusqu'à 200 kV-50 Hz", *Rev. Gen. Elec.*, 79, 15 (1970)