

高電圧極低温ケーブル用液体窒素含浸絶縁の開発

Development of Liquid-Nitrogen-Impregnated Wrapped Dielectrics for Cryogenic Cable

深沢正名* Masana Fukasawa

永野宏郎** Hiroo Nagano

To find out best high voltage insulation for cables for cryogenic temperature service various forms of insulation including gas-, liquid-, solid-, and vacuum-insulation and impregnated insulation were studied, and as a result, liquid nitrogen-impregnated insulation was found most suitable for cryogenic cables.

In the experiment, a specimen cable was immersed in liquid nitrogen kept in a pressurized, sub-cooled condition. The liquid nitrogen-impregnated polyethylene synthetic paper-wrapped insulation, with a dissipation factor of 0.001% or less, an AC breakdown stress of 53 kV/mm, and an impulse breakdown stress of 102 kV/mm, suffered almost no deterioration under the repeated charge of impulse, proving its high adaptability to E.H.V. application.

1 緒言

5,000kVAの超電導発電機が試作され⁽¹⁾、500kV級と称する極低温ケーブルの実験が行なわれる⁽²⁾など、最近の極低温機器の開発研究は急速に大容量化、高電圧化している。これらに対応し、われわれも極低温および超電導ケーブルの開発を進めており、すでに66kV、 $1 \times 100\text{mm}^2$ 、1,000A定格の液体窒素冷却極低温ケーブルの課・通電試験を終え⁽³⁾、さらに高電圧化を目指して検討中である。

極低温ケーブルまたは超電導ケーブルとは導体を強制的にある一定温度以下に保って送電するケーブルであり、図1に示すように導体を冷却するための冷媒通路と外部からの侵入熱を防ぐ断熱層を持っている。

極低温における高電圧絶縁では破壊強度とともに、冷却時の固体の熱収縮によるき裂および冷却効率が低いことから誘電体損などが問題となる。本報告は極低温における各種の電気絶縁の比較を行ない、高電圧極低温ケーブル用電気絶縁として液体窒素含浸複合絶縁を選び、モデルケーブル試料にて行なった実験結果をまとめたものである。

2 極低温における各種電気絶縁の検討

一般に極低温では、材料固有の絶縁特性および誘電特性は良好となる。しかし、機械的特性の低下や熱収縮、熱応力が大きいことを考えると実際の極低温機器の電気絶縁は必ずしも楽観的ではない。絶縁方法を大別すると表1のようになる。以下、各方法について概説する。

2.1 気体絶縁

極低温では大部分の気体が液化するので、絶縁用気体としては水素(H_2)、ヘリウム(He)などに限られる。これらの極低温における誘電特性は常温と同様非常にすぐれている。絶縁破壊に関しては極低温でもパッシェンの法則が成り立ち、密度増加分だけ破壊電圧は上昇する。しかし、ギャップ長の大きい領域では破壊電圧は飽和し、データもばらついてくる。

H_2 ガス、超臨界 He ガスは絶縁性にすぐれ、5atg加圧状態で40~50kV/mmの破壊強度を持っており、数十ケルビン絶対温度以下の絶縁に有用と思われる。

2.2 液体絶縁

図2は大気圧、沸騰状態における低温液体の絶縁特性を示すものである。液体ヘリウム(L. He)の破壊電圧がやや低いが、液体水素(L. H_2)、液体窒素(L. N_2)は絶縁特性、誘電特性とも絶縁油よりすぐれ、さらに粘性が著しく低い液体であることから冷却媒体としてもすぐれている。

加圧して沸点以下の温度に冷却すると破壊強度はさらに増加し、ばらつきも少なくなる。たとえば、 L. N_2 では5atg加圧状態の破壊強度は約47kV/mmとなり、大気圧の場合よりも50~60%上昇する。

以上のように低温液体自身は絶縁体としてすぐれているが、これを機器やケーブルに適用する場合は気体絶縁や真空絶縁と同様に導体を支持するためのスペーサを必要とし、スペー

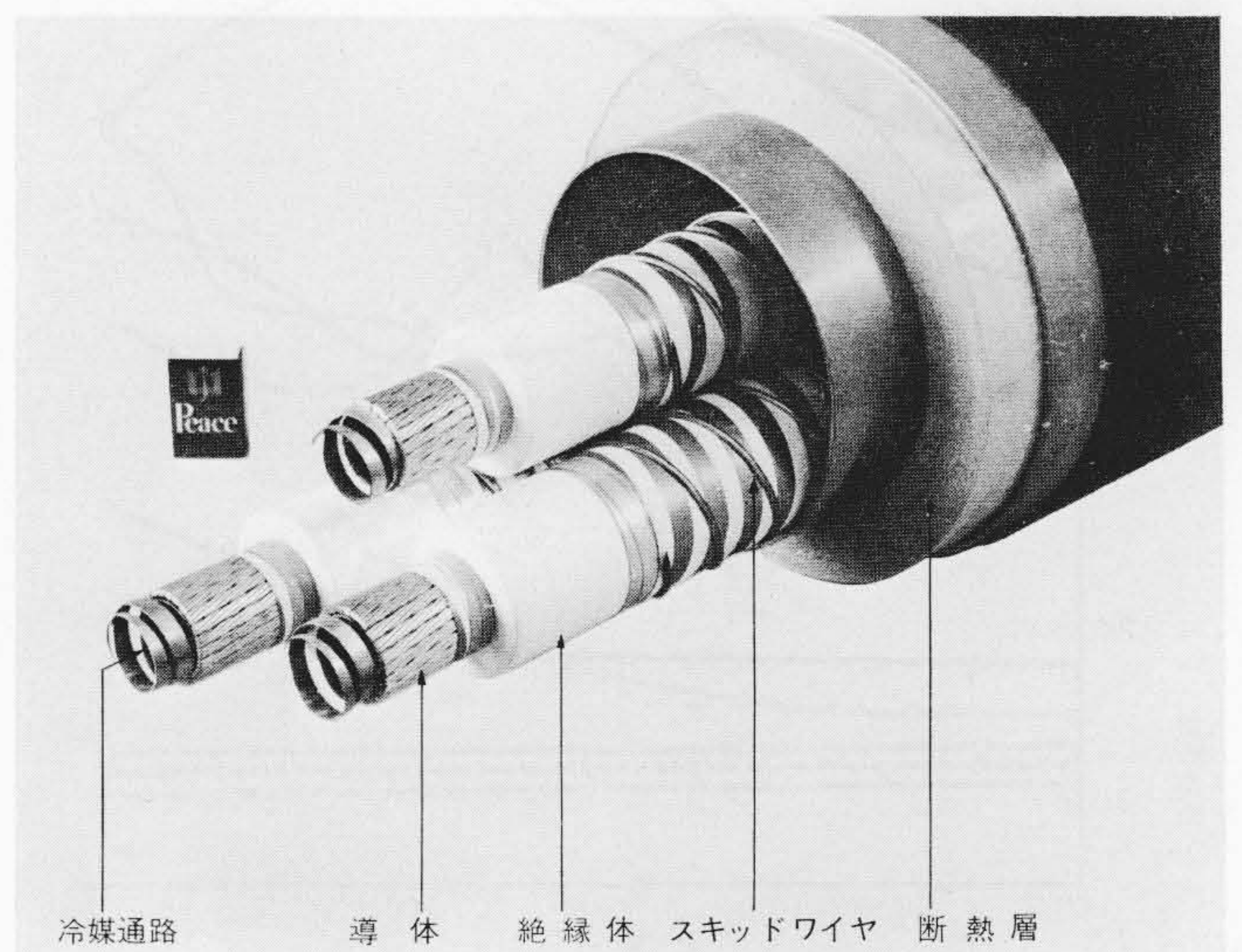


図1 極低温ケーブル概念図 ケーブルは断熱管路内に引き込まれ、導体は冷媒により強制的に極低温に保たれる。

Fig. 1 Conceptual Cryogenic Cable

* 日立電線株式会社研究所

** 日立電線株式会社研究所 工学博士

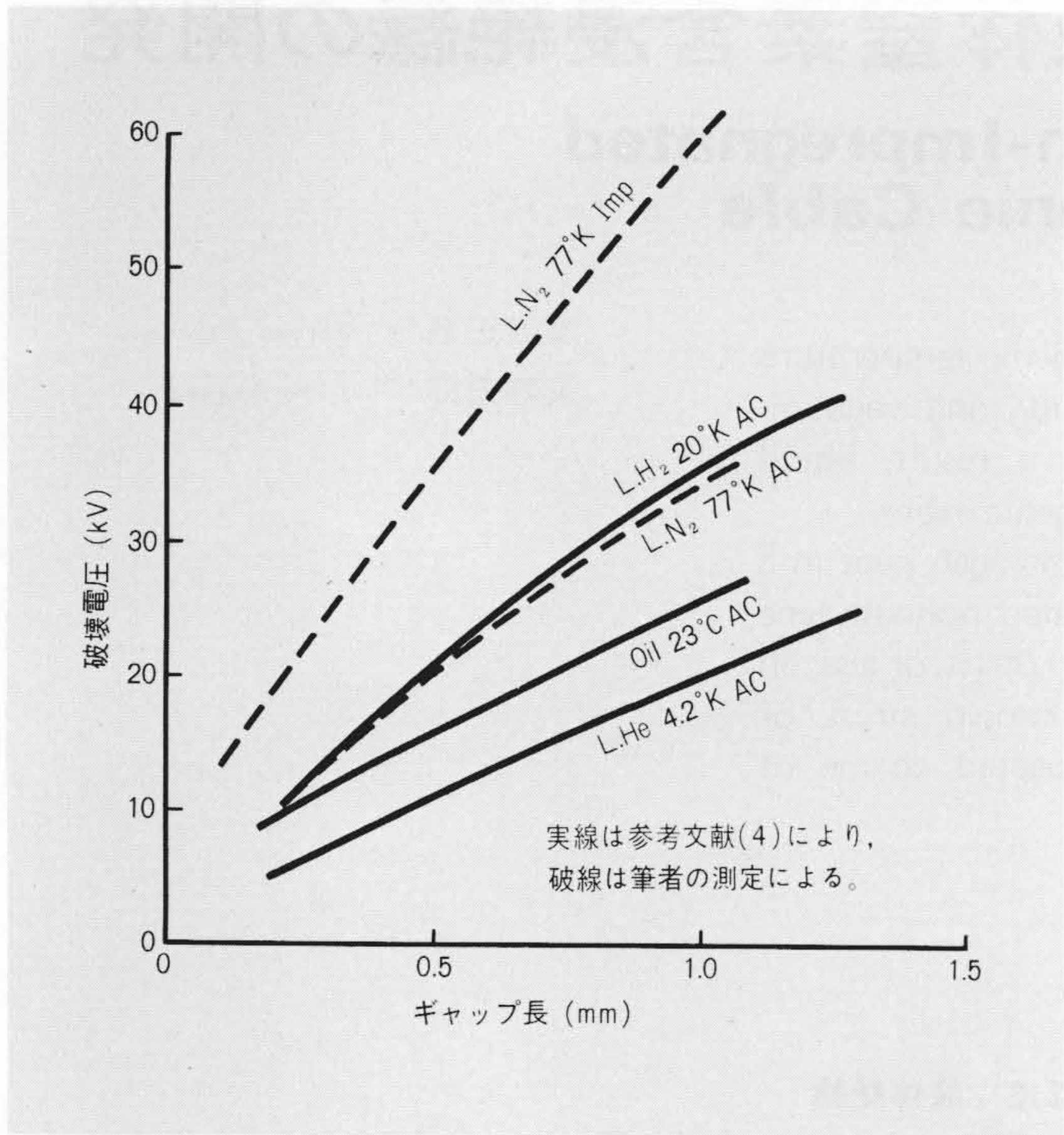


図2 低温液体の破壊電圧 12.5φ球ギャップによる大気圧中での破壊電圧である。液体窒素、水素は35kV/mmの破壊強度を持つ。
Fig. 2 Breakdown Strength of Cryogenic Liquid

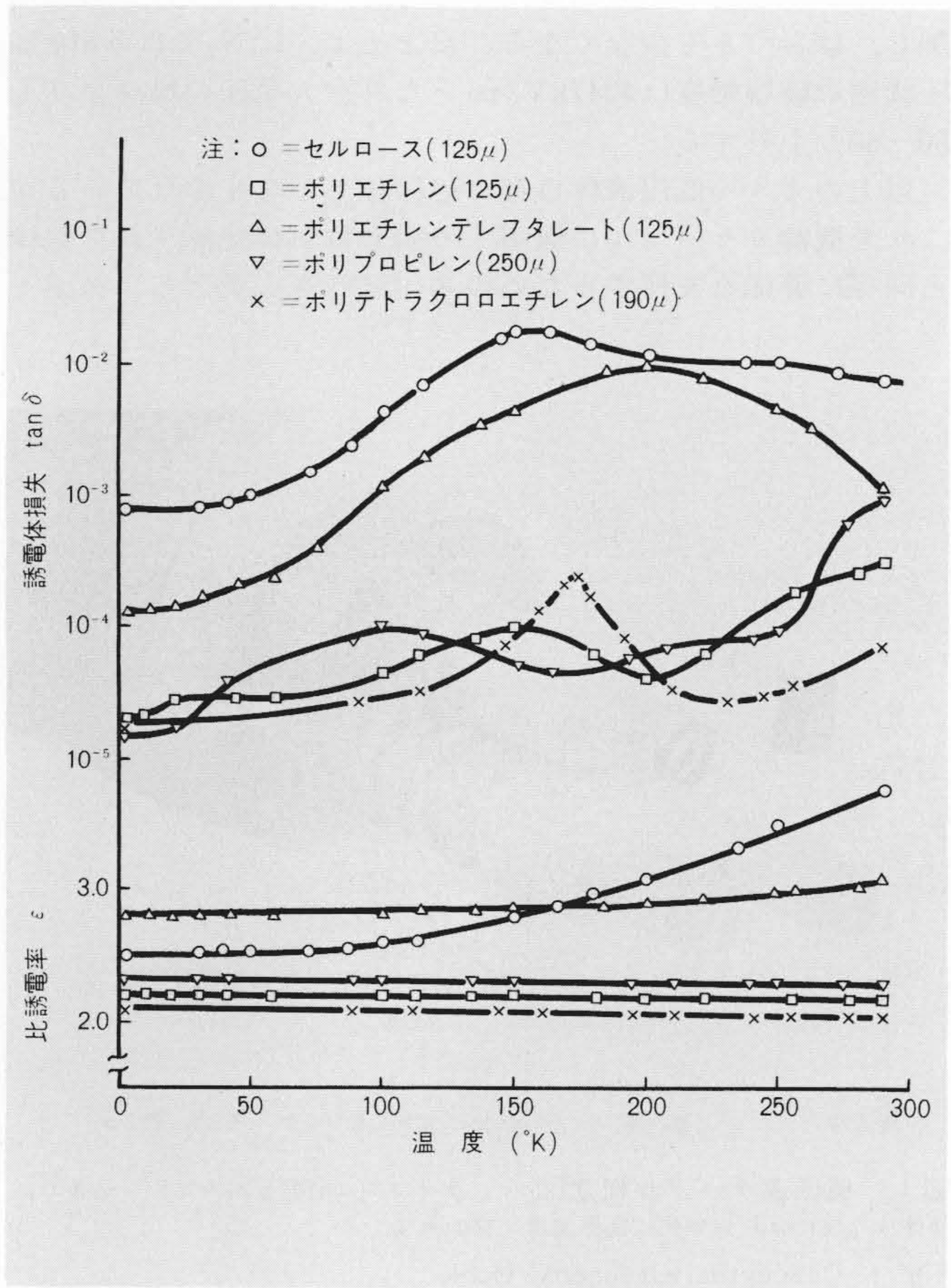


図3 固体絶縁体の誘電特性⁽⁵⁾ 真空中75Hz, 1.3~2.0kV/mmにおける誘電特性である。()内数値は試料厚さを示す。セルロースとポリエチレンテレフタレートは有極性, 他は無極性高分子である。
Fig. 3 Dielectric Properties of Insulating Materials

表1 極低温における電気絶縁方式 電気絶縁方式を5種に大別し, 各方式について常温時との性能比較を行なった。

絶縁方法	材 料	特 性	備 考
1. 気体絶縁	HeおよびH ₂	誘電特性にすぐれる。密度増加分だけ破壊電圧も上昇する。超臨界H ₂ ガス, 高密度H ₂ ガスは, 絶縁性良好である。	絶縁と冷却の兼用も可能である。
2. 液体絶縁	He, H ₂ , N ₂ , LNG	誘電特性にすぐれる。H ₂ , N ₂ は絶縁性も良好である。圧力効果は大きい。	絶縁と冷却の兼用も可能である。
3. 固体絶縁	各 種	常温での特性に比べ誘電率はほぼ同じ, 誘電正接は1~2けた低下, 破壊電圧はやや向上する。	スペーサ不要 冷却時の熱収縮き裂に問題あり。
4. 真空絶縁	—	誘電特性, 絶縁特性きわめて良好, しかし変動因子多くばらつきは大である。	絶縁と断熱の兼用も可能である。
5. 複合絶縁	積層 絶縁+気体, 液体含浸	適当な材料の組合せにより0.001%以下の誘電正接と常温油浸紙並みの絶縁性能が得られている。	スペーサ不要 絶縁と冷媒を兼用または別個にする方式あり。

サ部の沿面せん絡により絶縁性能が支配されることになる。低温液体中の沿面せん絡に関する実験は非常に少ないが, 電極形状や液体の汚損によりばらつくことが予想される。また, 低温液体を電気絶縁と同時に冷媒としても利用する可能性もあるが, 液体の流れによる負圧ボイドなどにより絶縁性能が低下すると思われる。したがって液体のみで高電圧絶縁を行なうことは困難であろう。

2.3 固体絶縁

温度低下とともに, 有極性固体絶縁体の比誘電率 ϵ はしだいに減少し, 無極性のそれは密度増加分だけ増加する。誘電正接 $\tan \delta$ は, ある温度や周波数にピークを示しつつしだいに減少する。図3は数種の代表例を示すものである。これは市販の100~200 μ 厚のシートを試料とし, 1.3~2.0kV/mmの電界のもとでの測定結果である。

絶縁性能は表2のように常温と変わらないか, むしろ上昇する傾向にある。しかし, 同表に示す破壊値は真空中が最も高く, 気体中よりも液体中, He中よりもN₂中のほうが高い。これは媒質の絶縁性能の高低に一致しており, 破壊は固体よりもむしろ媒質から始まっていると予想され, 必ずしも材料自身の温度特性とは言いがたい。

極低温では水分や酸素の固化に伴い耐コロナ性, 耐トラッキング性は向上すると思われるが, これまでの報告はいずれも100 μ 程度のシートを試料とし, 短時間の課電結果である。固体絶縁の場合にはき裂, 熱収縮および熱応力の問題があり, 厚い絶縁体の長時間課電特性が望まれる。

2.4 複合絶縁

低温液体が良い電気絶縁体であるところから複合絶縁の検討が進められている。テープ巻き複合絶縁はき裂がはいりにくいこと, 可とう性を持たせること。積層絶縁による絶縁性向上が期待されることから極低温および超電導ケーブル用絶縁としても適当である。

L.N₂ 含浸, L.H₂ 含浸とも適当な基材を用いることにより

0.001% 以下の誘電正接と、常温油浸紙並みの絶縁性能が得られている。また、水分の影響もほとんどなく、コロナ劣化も起こりにくいが、しゃへい材料に問題があり、カーボン紙などでは交流破壊電圧はしゃへいしないときよりも低下することもある。⁽⁷⁾

なお、複合絶縁として10°K以下の絶縁を目的とする超臨界Heガス含浸や極低温から常温まで使用できる低融点液体含浸なども検討されている⁽⁸⁾。低融点液体としては、石油エーテル（沸点50°C，融点-185°C），フロンR-12（沸点-81°C，融点-181°C）などが適当と言われている。

2.5 真空絶縁

真空は電氣的にも熱的にも本質的絶縁性を持ち、特に L. He 温度ではクライオポンプの効果もあり絶縁性能はさらにすぐれたものになる。

現在、真空絶縁は理化学機器やしゃ断器に利用されているが、さらに電力機器やケーブルにまで使用されるか否かは、いかに高真空を作り維持するかという真空技術ならびに電極およびスペーサの材料や形状、コンディショニングなどによるデータのばらつきをいかになくするかという絶縁技術にかかっていると考える。

3 液体窒素含浸絶縁の検討

われわれは大容量極低温ケーブルの絶縁方式として、各種の絶縁方法の中から低温技術的に比較的容易で、しかも高電圧絶縁の可能なものとして L. N₂ 含浸複合絶縁を選んだ。

表 2 各種フィルムの絶縁破壊強度⁽⁶⁾ 30φ球対平板電極によるシート状試料の交流および直流破壊試験結果である。試料厚さはすべて 100μである。

Table 2 Breakdown Strength of Insulating Materials

材料	電圧 媒質 温度 (°K)	交流破壊電圧(波高kV/mm)					直流破壊電圧(kV/mm)				
		空気	LN ₂	GN ₂	LHe	GHe	真空	LN ₂	GN ₂	LNe	GHe
クラフト紙	293	77	77	4.2	4.2	10	77	77	4.2	4.2	
ポリエチレン	140	140	127	163	127	317	240	180	260	190	
ポリエステル	127	127	112	144	115	254	210	170	220	160	
ナイロン	119	119	99	120	85	212	210	160	210	150	
ポリテトラフロエチレン	102	102	106	92	70	145	180	120	180	110	
	113	113	97	134	99	302	200	170	230	140	

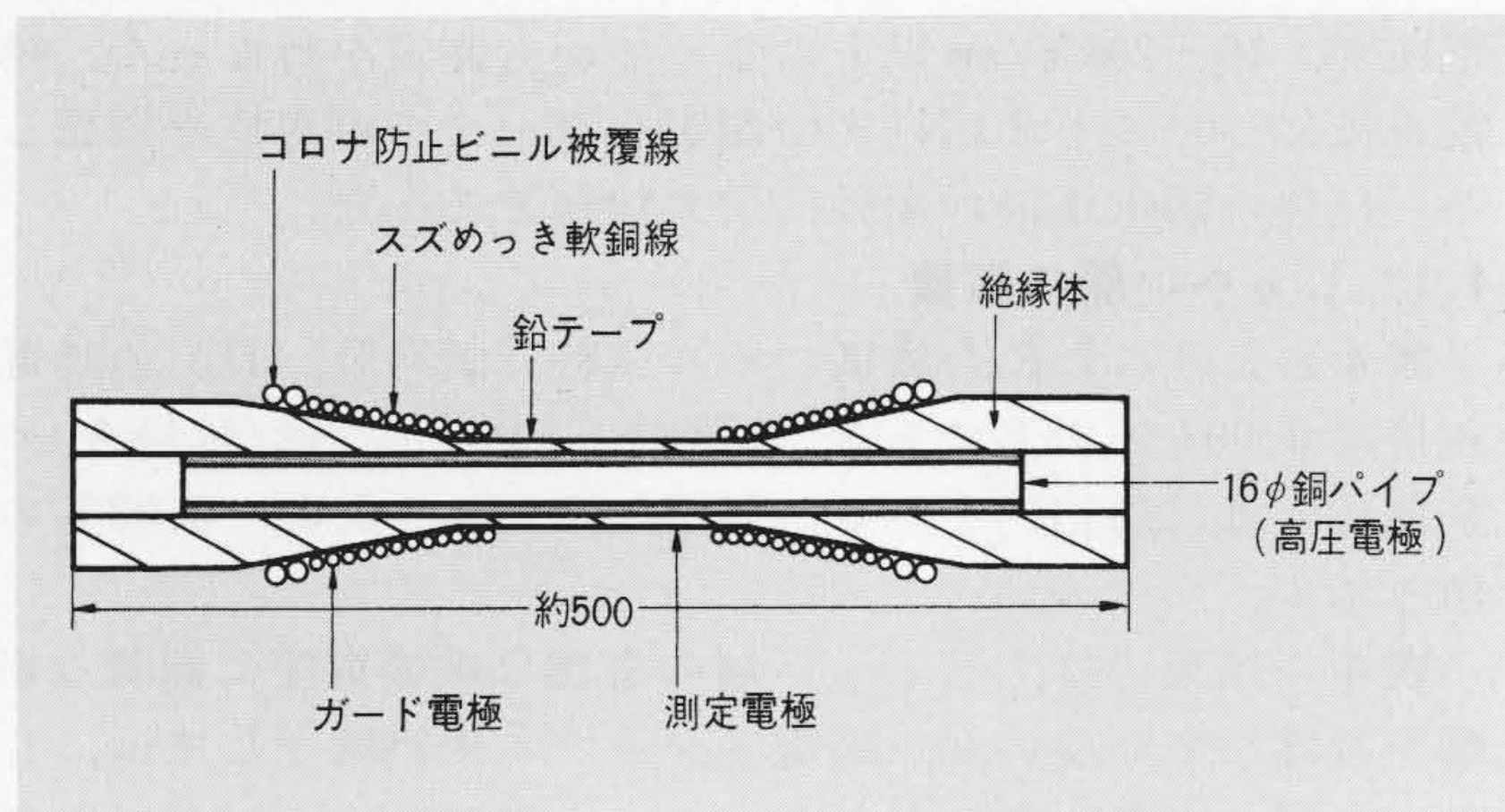


図4 モデルケーブル試料の構造 両端を補強し軟銅線を巻いてストレスコーンを形成している。ケーブル部分の有効長は約15cmである。

Fig. 4 Construction of Model Cable Specimen

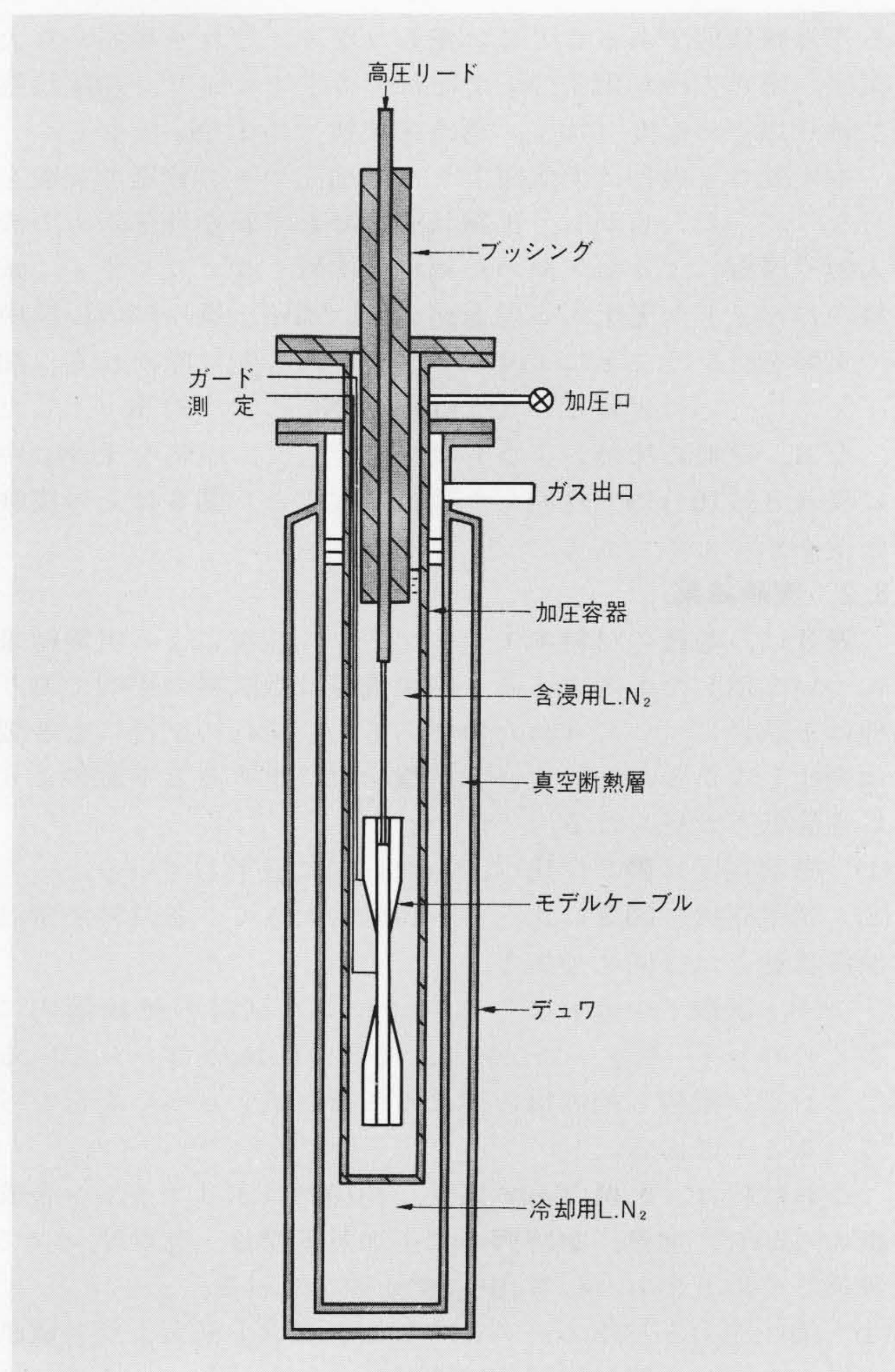


図5 実験用クライオスタットの構造 モデルケーブル試料が浸せきされている部分の含浸用液体窒素は加圧され、冷却用液体窒素により冷却されて加圧、過冷却状態となっている。

Fig. 5 Cross Section of the Test Apparatus

L.N₂はすぐれた絶縁体であることがすでに確認されており、含浸基材の特性が良ければ L.N₂ 含浸絶縁もすぐれた特性を持つことが期待される。L.N₂ 含浸絶縁用基材としては誘電率、誘電正接が小さく、かつ破壊強度の高いものであることはもちろんであるが、その他に L.N₂ 中で亀裂など発生せず機械的にも強いこと、L.N₂ の含浸性にすぐれていることが望まれる。これらの条件を満たす材料を捜すために数種の絶縁材料につき実験検討した。

3.1 実験方法

極低温ケーブル用絶縁を想定し、できるだけ実際に近い状態で電気性能を調べるために、モデルケーブル試料を加圧、過冷却 L.N₂ 中に浸せきし実験した。

図4は、モデルケーブル試料の構造を示すものである。これは16φ銅パイプ電極上に厚さ40～150μ、幅18～30mmのテープをバットギャップ1mmで突合せ巻きし、鉛テープと軟銅線で接地電極およびストレスコーンを形成したもので、絶縁厚は約1mmである。なお、絶縁層の高圧側および接地側ともカーボン紙しゃへいを行なっている。

次に、図5は L.N₂ の加圧、過冷却用クライオスタットの構造および試料のセット状況を示すものである。試料のはいつている加圧容器内の L.N₂ は加圧とともに沸点が上昇す

るが沸騰状態であることには変わりなく、これを周囲から大気圧、沸点の冷却用 $L.N_2$ で冷却することにより、加压状態で沸点以下の温度（加压、過冷却状態）の $L.N_2$ となる。

本実験でも最初は大気圧下または加压のみの状態で実験を行っていた。しかし、沸騰状態ではわずかな外部からの流入熱や課電による発生熱のために核沸騰が起こりやすく、試料内にボイドが発生する懸念がある。加压、過冷却の $L.N_2$ 中で実験を行なうことによりボイド発生心配は除かれる。加压圧力は一応の目安として 5 atg ($L.N_2$ の沸点 94°K) とした。

なお、試料の冷却および含浸を考慮して、試料を $L.N_2$ 中に浸せき後10分以上経過した後に課電した。図6はその実験状況を示すものである。

3.2 実験結果

表3は、数種の材料のモデルケーブル試料による実験結果について示したものである。破壊電圧は数試料の平均であり、他は1試料について求めた値である。いずれの試料にもき裂は発生しなかったが、シート試験結果に比べると下記のように性能低下が見られる。

- (1) 破壊電圧は表2に比べ、 $\frac{1}{2}$ から $\frac{1}{3}$ に低下している。
- (2) 誘電正接は図2に比べ3～10倍も大きく、各試料の常温油浸状態とはほぼ同じである。

シート試験との違いはモデルケーブル試料の絶縁層内に多くのバットギャップがあり、そこに $L.N_2$ がはいっていることおよび電極と絶縁層の間にカーボン紙しゃへいを行なっていることである。

なお試料は、 0.01 Torr 以下、約 100°C (ポリエチレン合成紙のみ 60°C) 加熱、24時間の真空加熱乾燥後、乾燥 N_2 ガスで置換して取り出し、 $L.N_2$ 中に浸せきしている。

- (3) 加压圧力をパラメータとするとクラフト紙および合成紙試料ではコロナ開始電圧、破壊電圧とも上昇しているが、フィルム試料では必ずしも圧力に依存していない。

超高压極低温ケーブル用 $L.N_2$ 含浸絶縁としては破壊電圧が高いこととともに冷却効率が低い ($L.N_2$ 温度の 1 W を汲

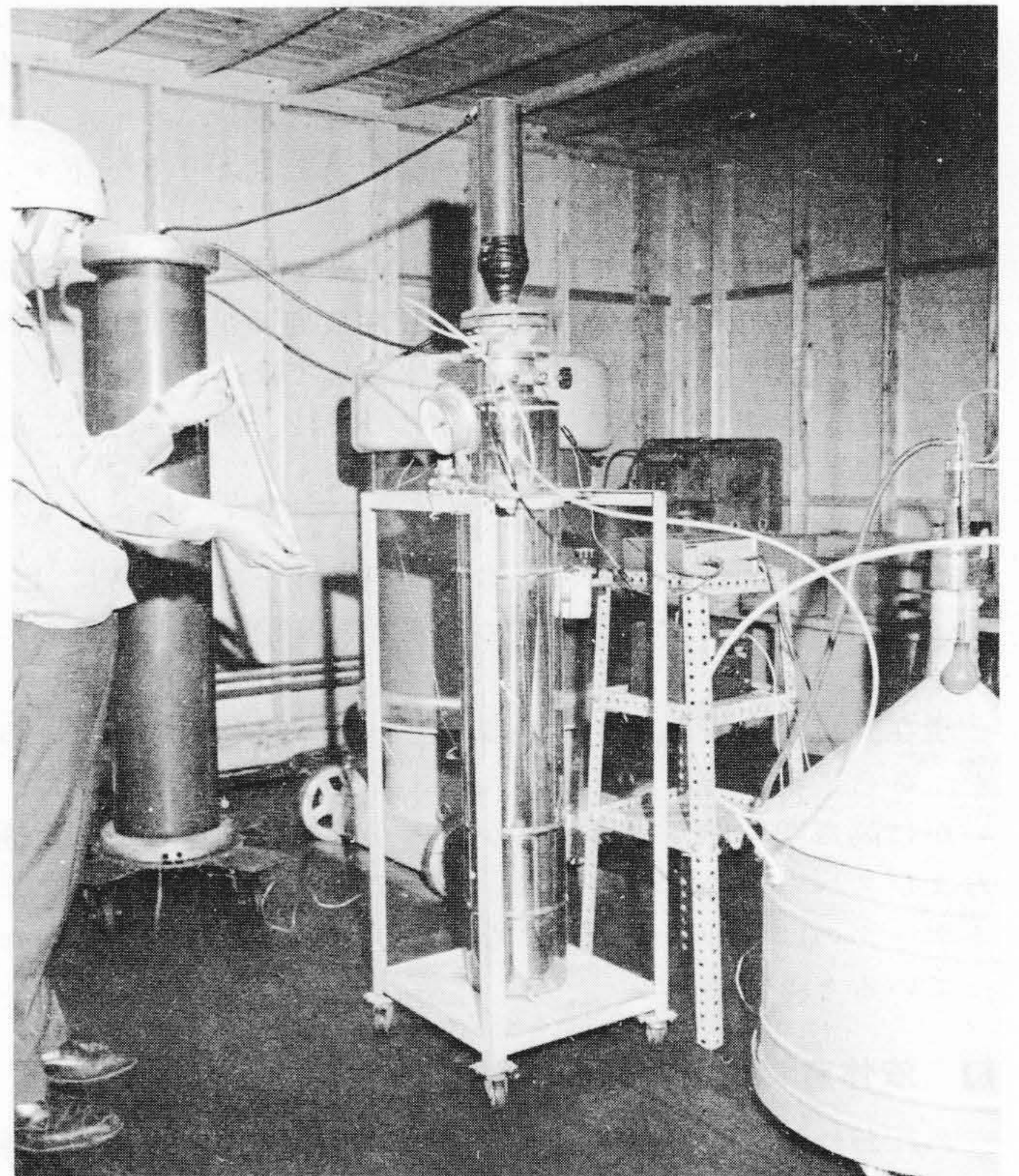


図6 実験状況 中央が実験用クライオスタット、手に持っているのがモデルケーブル試料である。

Fig. 6 Overall View of the Test Facility

み出すのに常温では $7 \sim 10 \text{ W}$ 必要とする) ので誘電損を常温のケーブルと同程度に押えるには 0.01% 以下の誘電正接であることが要求される。

以上の検討から表3中では破壊電圧がやや低い、含浸性、誘電正接の点からポリエチレン合成紙が最も有望であると判断した。

4 液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁の検討

ポリエチレン (P.E.) 合成紙はP.E.樹脂の長い繊維を熱と圧力で自己融着させたP.E. 100% の合成紙であり、 $L.N_2$ 中でも10%の伸びを示し機械的にもすぐれた絶縁体である。

表4は、P.E.合成紙テープ巻き試料について行なった実験結果について示すものである。試料構造、実験方法は3.と同じであるが、コロナ開始電圧につき $L.N_2$ 中への浸せき時間、加压後の時間および測定方法などを検討し、コロナ開始電圧が、 $15 \sim 20 \text{ kV/mm}$ 以上になってから測定を行なった。誘電正接についても2試料ずつ測定しデータの再現性を確認した。試料の誘電正接の変動は最大10%であった。

4.1 シャへい層の影響

表4のようにP.E.合成紙のみの試料 (試料B, D) の誘電正接は 0.001% 以下であるのに対し、カーボン紙 (試料A) や金属化成紙 (試料E) をしゃへい層に用いると $0.02 \sim 0.03\%$ の値を示す。

表4の結果では、しゃへい層の有無は破壊電圧に顕著な影響を及ぼしていないが、高電圧ケーブル用絶縁としては、しゃへい層は必要と考えられる。シート試験によるしゃへい材料の検討結果⁷⁾ は表面処理を施したカーボン紙やアルミ蒸着P.E.合成紙がしゃへい材料として適当であると報告しているが、アルミ蒸着P.E.合成紙はケーブルとして曲げられたとき

表3 液体窒素含浸モデルケーブルの電気性能 試料厚さは約 1 mm 、コロナ検出感度は 1 pc である。いずれの試料にもき裂は発生しなかった。

Table 3 Test Result of Liquid-Nitrogen Impregnated Model Cable Specimens

項目 材料 (厚さ×幅)	加压圧力 (atg)	誘電正接 $\tan\delta(\%)$	コ ロ ナ 開始電圧 (kV)	交 流 破壊電圧 (kV/mm)	比誘電率
ク ラ フ ト 紙 $125\mu \times 22$	0	0.25	9.0	36	2.49
	1	0.10	13.0	43	
	5	"	15.2	50	
ポリエチレン合成紙 $110\mu \times 22$	0	0.80	2.8	33	1.70
	1	0.03	5.2	—	
	5	"	8.0	43	
ナ イ ロ ン $45\mu \times 26$	0	0.30	3.5	55	3.45
	1	0.50	4.8	—	
	5	0.13	12.3	42	
マ イ ラ ー $80\mu \times 22$	0	0.26	5.4	45	3.30
	1	0.09	10.8	—	
	5	0.18	10.8	36	
ポリプロピレン $150\mu \times 30$	0	0.08	2.4	34	2.54
	1	0.09	3.1	—	
	5	0.10	3.0	55	

注：試料厚さは約 1 mm

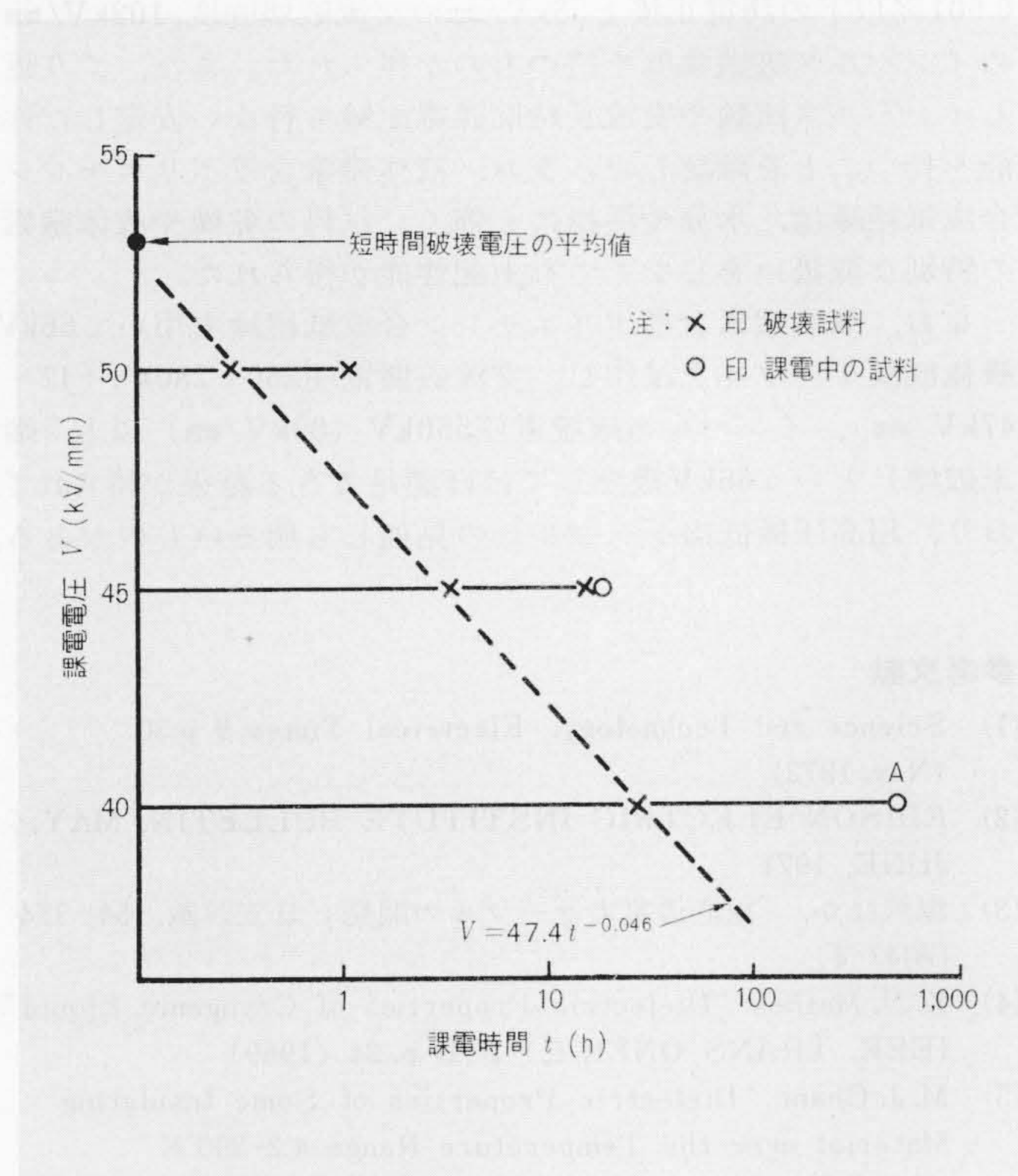


図7 交流長時間課電試験結果 破線は $V-t$ 特性を示す。
Fig. 7 Result of Long Time Test

アルミがはげ落ちる懸念があり、表面処理したカーボン紙を選んでその性能を調べた。表4の試料Fのように表面処理したカーボン紙はP.E.合成紙の性能をそこなわず、0.001%以下の誘電正接を維持しており、L.N₂含浸絶縁のしゃへい材料として有用であることが確認された。

4.2 カレンダ処理の効果

クラフト紙の気密度が約1,000ガール(s/100cc.)であるのに対し、表4の試料A、BのP.E.合成紙の気密度は約10ガールと著しく低い。破壊電圧の低さはこの気密度の低さに起因すると考え、厚紙をカレンダ処理して気密度1,500~8,000ガール(P.E.合成紙はカレンダ処理が困難で、気密度のばらつきが著しく大きい)のP.E.合成紙を試作し試験した。その結果、交流、インパルスの破壊電圧は未処理試料に比べ30~40%上昇し、平均破壊強度はそれぞれ53kV/mm、102kV/mmとなった。これらの値は常温における油浸紙およびL.N₂含浸クラフト紙絶縁とほぼ同じ値である。

4.3 交流長時間課電試験

これまでの交流破壊試験は昇圧速度が500V/sと速く、短時間の課電特性であったので、試料が破壊するまで一定電圧を課電する方法で交流長時間課電試験を行なった。

図7は現在までの結果を示すものである。破壊電界は課電時間とともに減少している。なお、同図中の試料Aについては課電100時間ごとに誘電正接の測定を行なったところ、500時間後にはそれまで0.001%以下であった値が0.1%に急増していた。

L.N₂含浸P.E.合成紙絶縁では、印加電界が40kV/mm以上になると試料内にもコロナが発生していると思われるものの、L.N₂自身やL.N₂中のP.E.のコロナ劣化は考えにくい。上記誘電正接の急増は長時間課電中の多数回のL.N₂補給による

L.N₂の極度の汚損にあると考え、加圧容器内の絶縁用L.N₂を全部新しいL.N₂に取り換えると誘電正接は再び0.001%以下の値にもどった。

図7において破壊電界(V kV/mm)と課電時間(t 時間)の関係を破線のように想定すると、

$$V = 47.4 t^{-0.046}$$

となり、20kV/mm以下の電界では30年間の使用は十分可能である。しかしながら、課電による性能低下は明らかであり、含浸絶縁用L.N₂を極度に汚損せずに長時間課電試験を行なうため検討中である。

4.4 インパルスくり返し課電試験

電力機器やケーブルの絶縁体は、雷サージや開閉サージにさらされており、破壊電圧以下のサージでもくり返されると破壊に至ることがある。使用年限内のサージ侵入回数を実線路の経験から1,000回と仮定し、インパルス破壊電圧の90%および80%の電圧をくり返し課電して破壊電圧が低下するかどうかを検討した。

結果は表5に示すとおりであり、インパルス電圧のくり返し中に破壊した試料はなく、インパルスくり返し課電後の交流破壊電圧にも低下は全く見られない。90kV、1回め破壊の試料は初期性能のばらつきと考えられ、L.N₂含浸P.E.合成紙絶縁はインパルスくり返し課電に強い絶縁と言える。

4.5 その他

実験に使用したL.N₂は普通に入手したものであり、水分や不純物の混入が予想される。実際に、長時間使用した試験装置の底にはL.N₂蒸発後に水がたまっていることがあり、ある実験終了後のL.N₂をガスクロマトグラフィで分析した結果0.1~1.0%の酸素が検出された。

この汚損は空気中から取り込まれたものであるが、L.N₂を全く空気に触れさせずに取り扱うことは至難のことであり、極度の汚損でないかぎり、誘電特性、絶縁特性とも低下させないことから汚損に対する特別な防止策は行なわれなかった。

さらに、モデルケーブル試料についても、初期は3.2に述べたような真空加熱乾燥を行なっていたが、特性は乾燥処理の有無に関係なく、表4では試料の乾燥は行なわれていない。

多少の湿気や汚損に対しても性能が低下しなければ、ケーブルや機器の管理、取扱いが容易となり、L.N₂含浸P.E.合成紙絶縁の利点の一つと考えられる。

表4 ポリエチレン合成紙試料による試験結果 モデルケーブル試料の絶縁厚は1mmである。交流、インパルス破壊電圧はそれぞれ数試料の平均値であり、インパルス破壊電圧は負極性である。

Table 4 Characteristics of Polyethylene Wrapped Insulation

試料	A	B	C	D	E	F
カレンダ処理	なし	なし	あり	あり	あり	あり
しゃへい材料	カーボン紙	なし	カーボン紙	なし	金属化成紙	表面処理カーボン紙
誘電正接 (%)	6	—	以下0.001%	0.020	以下0.001%	0.020
	10	0.03	"	0.021	"	0.023
	15	—	"	0.022	"	0.024
	20	—	"	0.023	"	0.026
交流破壊電圧 (kV)	43	—	54	52	53	52
インパルス破壊電圧 (kV)	—	73	102	102	98	—

表5 インパルスくり返し課電試験結果 試料の絶縁厚は約1mmである。インパルス課電後、交流破壊試験を行なった。

Table 5 Result of Impulse Repeat Test

課電電圧(kV)	試料No.	インパルス課電結果	交流破壊電圧(kV)
+90	1	1,000回破壊せず	59.5
	2	"	56.0
	3	"	55.5
-90	1	1回め破壊	—
	2	1,000回破壊せず	58.2
	3	"	56.0
+80	1	1,000回破壊せず	55.0
	2	"	55.0
	3	"	60.0
-80	1	1,000回破壊せず	58.5
	2	"	56.0
	3	"	57.0

5 結 言

超高圧極低温ケーブル用絶縁体として、気体、液体、固体、真空および複合絶縁などについて検討した。その結果、液体窒素含浸複合絶縁を最も適当と考え、モデルケーブル試料により性能を調べた。

種々の含浸用材料中でポリエチレン合成紙が最もすぐれた特性を示し、液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁により、

0.001%以下の誘電正接と53kV/mmの交流破壊強度、102kV/mmのインパルス破壊強度を持つものが得られた。また、くり返しインパルス試験や交流長時間課電試験も行ない安定した性能を持つことを確認した。なお、液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁は、水分や汚損にも強く、試料の乾燥や液体窒素の特別な取扱いをしなくても上記性能が得られた。

なお、液体窒素含浸ポリエチレン合成紙絶縁を用いて66kV級極低温ケーブルを試作し、交流破壊電圧250~280kV(42~47kV/mm)、インパルス破壊電圧550kV(89kV/mm)以上(端末破壊)という66kV級としてほぼ満足できる結果が得られており、超高圧極低温ケーブルへの見通しも明るいものがある。

参考文献

- (1) Science and Technology. Electrical Times 9 p.30 (Nov. 1972)
- (2) EDISON ELECTRIC INSTITUTE BULLETIN, MAY/JUNE, 1971
- (3) 深沢ほか, 「極低温電力ケーブルの開発」 日立評論, 54, 374 (昭47-4)
- (4) K. N. Mathes "Dielectric Properties of Cryogenic Liquid" IEEE, TRANS ONEI, E1-2 (1) p. 24 (1969)
- (5) M. J. Chant "Dielectric Properties of Some Insulating Material over the Temperature Range 4.2-300°K" CRYOGENICS, p. 351 (Dec. 1967)
- (6) J. Bobo, M. Perrier "Proprietes des Isolants Solides aux Temperatures Cryogoniques" Revue Generale de L. Electrice 77 p. 605 (June. 1968)
- (7) 関井, 川神 電学絶縁材料シンポジウム予稿No.VI-6 (昭47-9)
- (8) 酒井, 永野 電学絶縁材料研究会 No. IM-73-17 (昭48-5)

論文抄録

多環油による絶縁紙耐熱性向上方法に関する検討

日立製作所 三好 昭

電気学会論文誌 93-A, 107 (昭48-3)

クラフト紙は数々の高分子フィルムが出現しているにもかかわらず、依然として油浸絶縁の主流を占めている。これはクラフト紙を油浸状態で使用するとすぐれた電気特性を示すこと、高分子フィルムのように熱軟化しないことおよび作業性が良く安価なためである。

しかしクラフト紙を油浸紙として電気機器に使用すると、通常機器から発生する熱で劣化を生ずる。この場合、空気が存在するとその度合いは一段と激しくなる。したがって、油浸紙を使用した機器の耐熱性、信頼性向上を図るためにはクラフト紙の耐熱性改善が必要である。このためクラフト紙に薬品を添加したり、セルロース分子の一部を化学的に変性したりした、いわゆる耐熱絶縁紙が開発され実用に供されている。前者の代表的なものとしてはアミン添加紙、後者の代表的なものとしてはシアノエチル化紙が知られている。

一方、クラフト紙の空気共存下における

油中熱劣化については古くから研究されているが、絶縁油を検討することによってクラフト紙の耐熱性向上を図った事例は見当らない。しかし油浸紙の劣化は絶縁油の劣化と無関係ではないと推測される。鉱油は組成的にみると芳香族系炭化水素、ナフテン系炭化水素、脂肪族系炭化水素の混合物であり、比較的熱に弱い脂肪族系炭化水素を多量に含有している。ところが最近になって、熱安定性のすぐれた芳香族系炭化水素を主成分とする新合成絶縁油(多環油)が出現した。そこで、これと絶縁紙を組み合わせることで絶縁紙の耐熱性が向上するか否かを検討し以下の諸事項を明らかにした。

(1) 空気共存下にクラフト紙、シアノエチル化紙、アミン添加紙を多環油中と鉱油中で加熱すると、いずれも多環油中加熱品が劣化しにくい。多環油としてはその組成が多環芳香族系、多環ナフテン系、その両者の混合物いずれでもよい。しかし、窒素共存下ではこのような効果は認められない。

また水分はやはり多環油中加熱紙の劣化を促進する。

(2) 空気共存下多環油中加熱シアノエチル化紙の耐熱性を引張強度が初期の50%値として評価すると、鉱油中より少なくとも15°Cの高温使用が可能である。活性化エネルギーは多環油中加熱品23.0kcal/mol、鉱油中加熱品18.8kcal/molを得た。

(3) 空気共存下にシアノエチル化紙を加熱した絶縁油としては鉱油のほうが多環油より誘電正接の上昇、体積抵抗率の低下が大きく、誘電率変化はない。一方、窒素共存下シアノエチル化紙加熱品は多環油、鉱油とも誘電正接、体積抵抗率変化が空気共存下より少なく、しかも両絶縁油の挙動が類似している。

(4) 絶縁油の全酸価、色相変化ならびに絶縁紙上の付着物の赤外吸収スペクトルから、鉱油中でシアノエチル化紙が劣化しやすいのは、鉱油の劣化生成物が関係していると推定した。