

# 直流プラスチックケーブル用絶縁材料の電気特性

Electrical Properties of Plastic Insulating Materials for DC Power Cables

遠藤 桓\* 柳生 秀樹<sup>†</sup>  
Takeshi Endô Hideki Yagyû

The authors measured DC electrical properties of a few typical polyethylene insulating materials whereby to obtain a criterion for the selection of suitable insulation materials for DC cable use. These cross-linked polyethylene insulation materials were similar in DC breakdown strength, which was around 200 kV/mm at room temperature and 120 kV/mm at 100°C. However, some specimens prepared under a certain curing condition showed a low insulating strength and their DC breakdown strength was as low as about 80 kV/mm both at 100°C and room temperature, indicating the importance of curing conditions. Also, it was found that these cross-linked polyethylene insulating materials showed different properties under DC applied water immersed condition depending on their chemical composition.

Analysis of these experimental results has led to a conclusion that non-filled cross-linked polyethylene is best suited as an insulating material for DC cables.

## 1. 緒 言

これまで、わが国では電力輸送手段としてもっぱら三相交流方式が用いられてきたが、最近サイリスタを用いた交直変換装置の性能向上その他により直流送電実用化の気運が高まってきている<sup>(1)</sup>。特にケーブルによる長距離の大電力送電の場合、直流方式は(1)送電損失が少ないこと、(2)交流の場合の誘電体損および充電電流を無視できること、(3)一般に絶縁耐力が交流より直流のほうが高くケーブル絶縁体を薄くできることなどの長所を持つため、たとえば北海道～本州間連系を直流で行なう計画が進められている。

一方、直流送電では送受電端に高価な交直変換装置が必要なこと、送電線がいしが汚損に対し特に問題なこと、ケーブル絶縁体内の電界分布が絶縁抵抗で決まり、この絶縁抵抗が課電時間、温度、電界あるいは空間電荷により複雑に変化することおよび連系間の電力輸送方向を変えるごとにケーブルへの印加電圧極性が反転され、ケーブル絶縁体内に局部的な高電界を生ずる可能性のあることなど多くの問題を持っている。

これらの直流ケーブルには従来油浸紙絶縁体を使用され、それに関する報告は数多く発表されているが、プラスチック絶縁体についての報告はわずかであり<sup>(2)~(5)</sup>、必ずしも直流ケーブル用絶縁体として油浸紙よりすぐれているとはいえなかった。しかし、最近の高電圧プラスチックケーブルの性能向上は著しく、このため直流ケーブル絶縁体としても有望視されてきている。このような情勢から直流プラスチックケーブルの開発研究が各所で行なわれているが、ここでは数種の直流用ポリエチレン絶縁体に関する検討結果を述べる。

## 2. 供 試 料

供試絶縁体としては表1に示す代表的な4種のポリエチレン(以下PEと略称する)を用いた。ここで試料Aは一般架橋ポリエチレンであり、試料Dは純粋ポリエチレンである。これら4種の絶

縁体をシート状および小サイズケーブルの試料にして検討した。

表1 供試ポリエチレンの諸特性

試料	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	誘電率	誘電正接 (%)	耐熱変形性順位
A	2.6	450	2.3	0.02	2
B	2.5	450	2.3	0.02	3
C	2.1	450	2.5	0.18	1
D	1.5	550	2.3	0.001	4

## 3. 実 験 結 果

### 3.1 絶縁抵抗特性

#### 3.1.1 シート状試料

絶縁抵抗特性を測定するため、厚さ1mmのシート状試料を電熱プレス方式により作製した。これらの試料を有効直径60mmのガード電極付き平板電極にセットし、電極周囲にシリコン油を満たして絶縁抵抗を測定した。測定温度は30°C、50°C、80°Cおよび100°Cであり、測定電圧は0.25~40kVである。一試料の測定には3日間を要した。測定法はすでに発表してある油浸紙の場合と同様である<sup>(6)</sup>。

図1は各試料の電流-時間特性である。試料Aの場合、電流は全般的には課電時間とともに減少しているが、ある条件では課電時間とともに逆に上昇する異常な現象も見られた。試料Bではこれがさらに顕著であり、しかも電流最低になるまでの時間が温度および電界により変わり、高温、高電界ほど短くなる傾向にある。一方、試料CおよびDの場合にはそのような異常現象は認められていない。図よりわかるように試料BはCに比べ高温、高電界で電流が多い反面、低温、低電界では逆に低くなっており、電流の電圧依存性は大きくなっている。

図2は各試料の50°C、20kV/mmにおける電流の時間特性である。課電1分値は各試料とも大差ないが、課電時間とともに試料による差が大きくなり、真の体積抵抗率(電流が一定となり漏えい電流のみになったときの体積抵抗率)は約2けた変化している。

\* 日立電線株式会社研究所

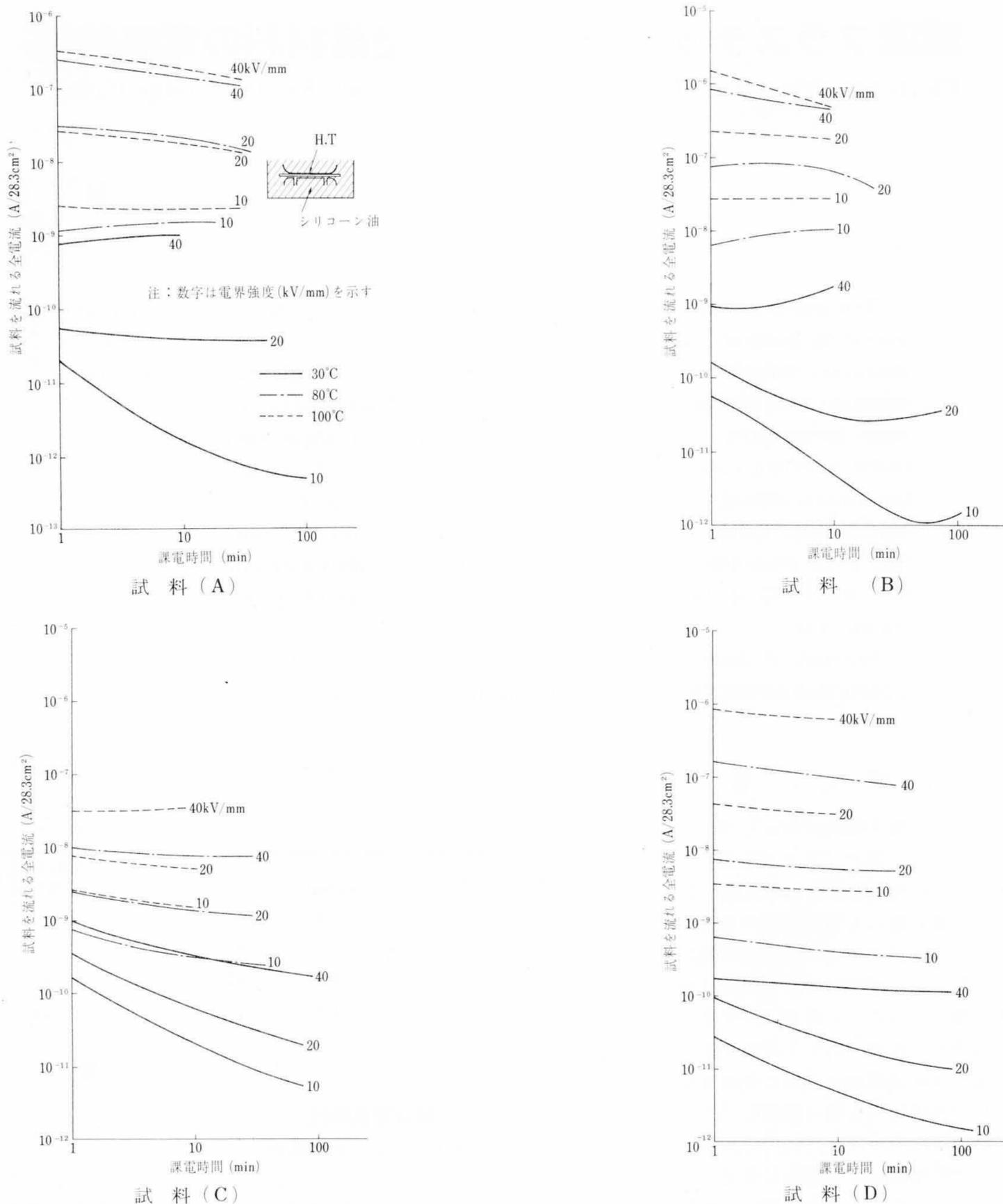


図1 各ポリエチレンの直流漏えい電流—時間特性

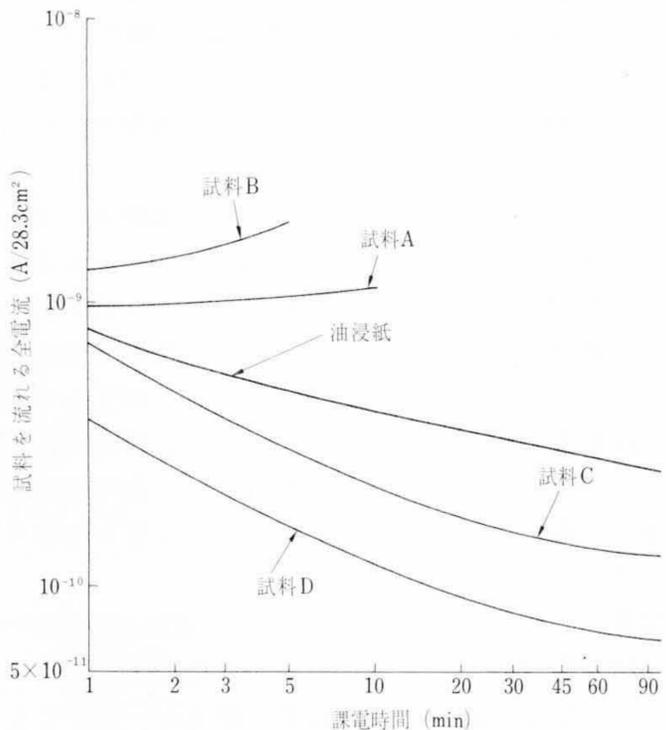


図2 50°C, 20kV/mmにおける各試料の電流—時間特性

### 3.1.2 ケーブルサンプルによる測定

電流が時間とともに複雑に変化する現象は平板電極による測定法自体に問題があるためとも考えられるので、絶縁厚さ5mmの試料A配合のケーブル(内外半導電性コンパウンド遮蔽(しゃへい))により60kV(G mean=12kV/mm)までの絶縁抵抗を測定した。電流と課電時間との関係は図3に示すとおりである。電流の傾向はシート状試料のそれと類似しており、電流が時間とともに複雑に変化する現象は材料の本質的なものとも考えられる。なお、本ケーブルは蒸気架橋方式により製造されたものであるが、架橋条件により絶縁抵抗が大幅に変化することがあり、ある架橋条件では体積抵抗率が低く、しかもその電界係数βは非常に大きくなることがあった。

図4は各試料の80°Cにおける体積抵抗率の電界特性で、PE絶縁体の電界係数βは油浸紙よりかなり大きいことがわかる、<sup>(6)</sup>またケーブルサンプルの電界係数は上述したように特に大きくなっている。

以上、シートおよびケーブルによる体積抵抗率測定結果をまと

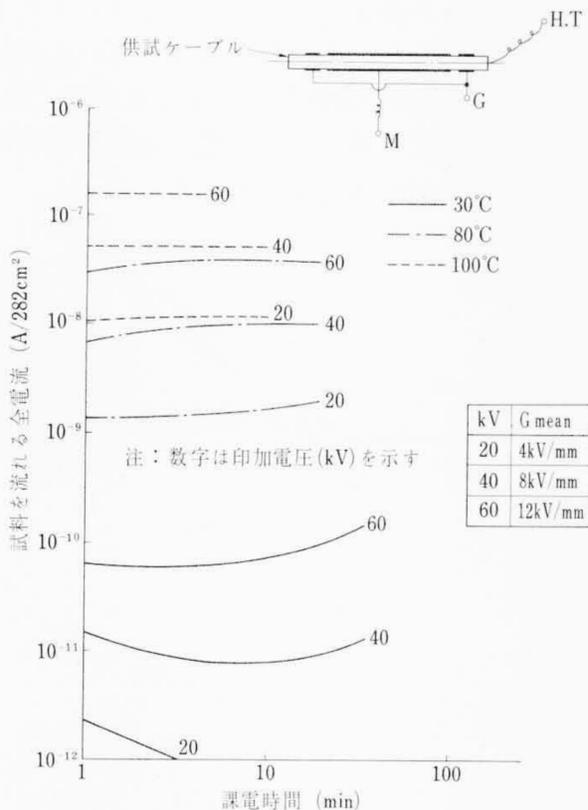


図3 A配合ケーブルの電流-時間特性

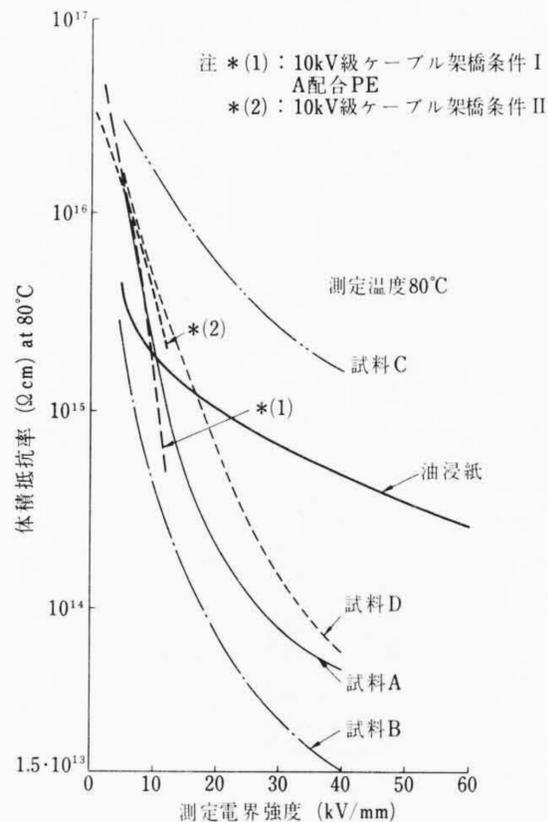


図4 各試料の体積抵抗率-電界特性

表2 各種プラスチックの体積抵抗率およびその温度、電界係数

項目	体積抵抗率(Ωcm)		α (1/°C)					β (mm/kV)					
	ρ₀, 0°C, kV/mm	ρ, 50°C, 20kV/mm	平均	5kV/mm	10kV/mm	20kV/mm	40kV/mm	平均	30°C	50°C	80°C	100°C	
試料 A	7.77×10¹⁹	6.04×10¹⁵	0.126	0.089	0.166	0.123	0.124	0.159	0.150	0.184	0.151	0.151	
試料 B	3.58×10¹⁹	4.61×10¹⁵	0.128	0.129	0.131	0.131	0.123	0.128	0.174	0.144	0.119	0.071	
試料 C	1.99×10¹⁹	5.13×10¹⁶	0.085	0.092	0.088	0.081	0.079	0.084	0.095	0.088	0.081	0.072	
試料 D	3.80×10²⁰	1.12×10¹⁷	0.104	0.076	0.118	0.119	0.105	0.145	0.108	0.194	0.141	0.137	
A配合ケーブル	架橋条件 I	2.63×10²⁰	1.00×10¹⁵	0.079	(2kV/mm) 0.092	(4kV/mm) 0.089	(8kV/mm) 0.075	(12kV/mm) 0.060	0.425	0.470	0.598	0.391	0.241
	架橋条件 II	3.95×10²⁰	1.00×10¹⁶	0.113	(2kV/mm) 0.106	(4kV/mm) 0.117	(8kV/mm) 0.117	(12kV/mm) 0.110	0.225	0.257	0.210	0.232	0.199
油浸紙	9.9×10¹⁸	3.1×10¹⁶	0.103	0.101	0.102	0.103	0.105	0.040	0.038	0.042	0.040	0.041	

注 ρ = ρ₀ e<sup>-(αT+βG)</sup> とする。

めて示すと表2になる。表よりわかるようにρ₀はおおむね油浸紙より高い。体積抵抗率の温度係数αは種類によらずほぼ等しく油浸紙と同様0.1程度であるが、電界係数βは前述したように大幅に異なり、ρ₀の高い試料はβが大きく、ρ₀の低い試料はβも小さかった。また試料の架橋条件によっては油浸紙よりβが1けた程度大きくなるのがわかる。

### 3.1.3 ケーブルの電界分布

これら体積抵抗率特性から実ケーブルの定常時電界分布を計算により求めてみた。体積抵抗率は表2に示したρ₀および平均のα、βとした。ケーブルは250kV 1×1,000mm²で絶縁体はA配合および比較のための油浸紙である。計算結果は図5に示すとおりである。図よりわかるようにPEケーブルはβが大きいため、油浸紙ケーブルより電界が均一化されており、電界分布の点からみた限りではβの大きいほうが良いといえる。

### 3.2 直流絶縁破壊電圧

厚さ0.6~1.1mm、有効直径20mmの埋込み平板試料により直流破壊試験を行なった。試料両面にはシルバーペイントを塗布し、シリコン油中で課電した。

破壊試験結果は図6に示すとおりである。常温の破壊強さは試

ケーブル絶縁体内径 45.6mm } 絶縁厚22mm  
 ケーブル絶縁体外径 89.6mm }  
 ケーブル印加電圧 DC250kV  
 ケーブル基準温度 25°C

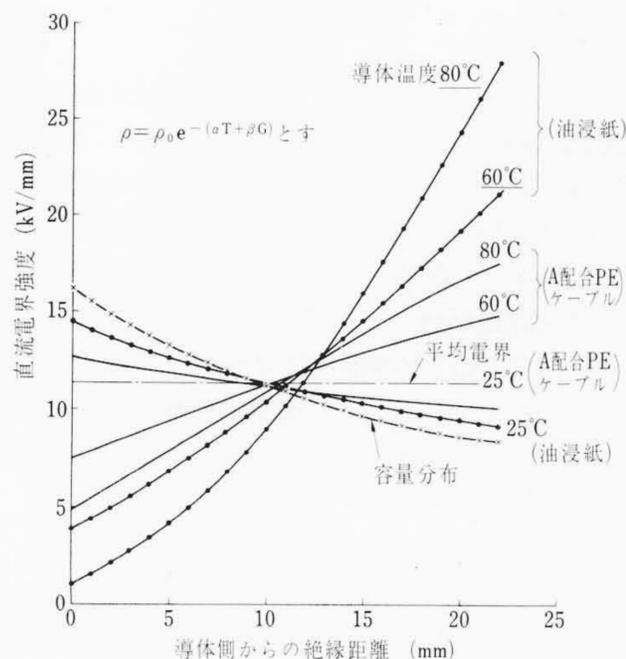


図5 DC250kV 1×1,000mm²ケーブルの各温度における電界分布

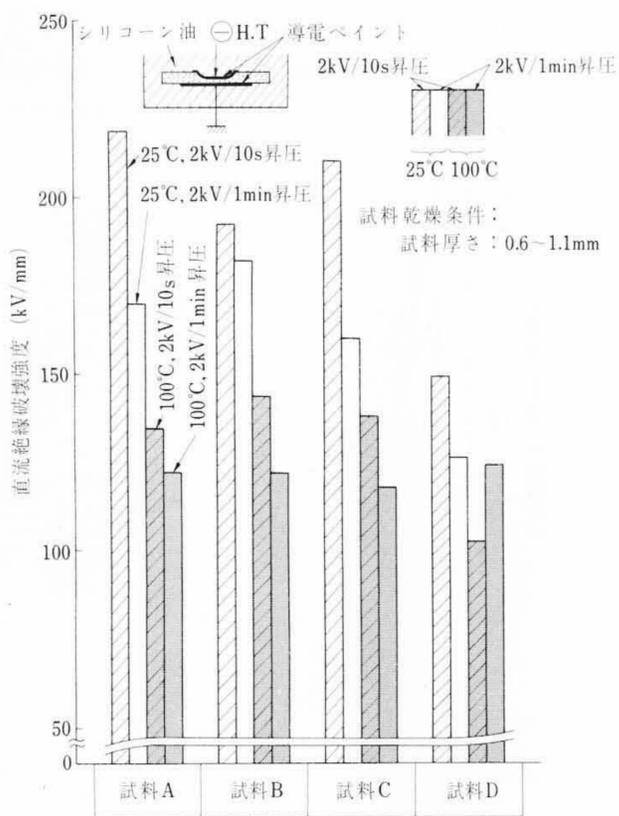


図6 各種ポリエチレンの直流破壊特性

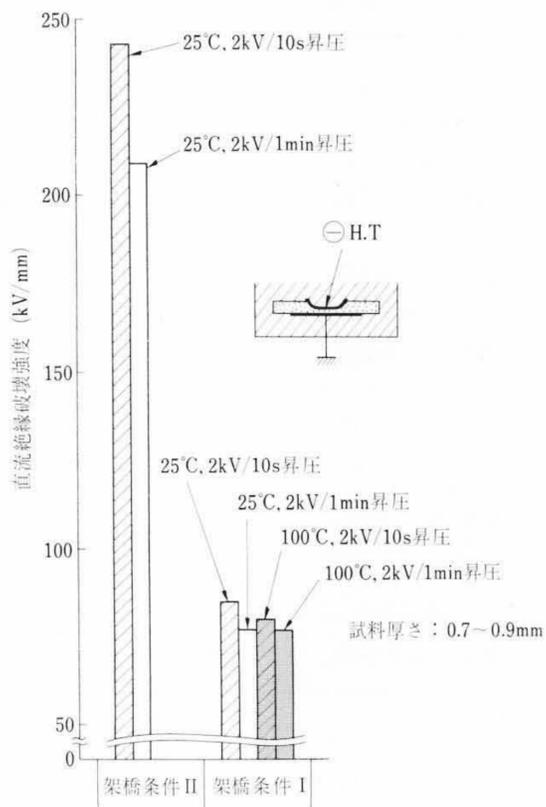


図7 試料Aの直流破壊電圧に及ぼす架橋条件の影響

料Aが最も高く、Dは低かった。一方、100°Cでは架橋PE系がいずれも120kV/mm程度で常温の50%に低下している。

図7は試料の架橋条件と直流破壊強さとの関係である。図よりわかるように架橋条件の直流破壊電圧に及ぼす影響は非常に大きく、直流破壊強さは条件により4倍も変化している。

### 3.3 直流浸水課電特性

PE絶縁体の交流浸水課電特性については従来より検討されているが、直流については一、二例報告されているのみである<sup>(7)</sup>。このためシート状あるいは小サイズケーブルにより直流浸水課電特性を検討した。

#### 3.3.1 シート状試料による試験

ビニルシラン処理した直径60mm、厚さ100μmのアルミ箔(はく)を電極とし、その両側に厚さ0.9mm(一部0.5mm)の供試PEを電熱プレスした試料により直流浸水課電試験を行なった。試験結果を

まとめて表示したのが表3である。試料Cはいずれも数日の課電により絶縁破壊しており、またDも端部とはいえ10日前後で破壊した。さらに厚さ0.5mmの試料Bも非常に短時間で破壊している。

図8は絶縁抵抗測定結果で、試料Cは絶縁破壊直前に抵抗の低下が認められたが、試料Aでは認められなかった。

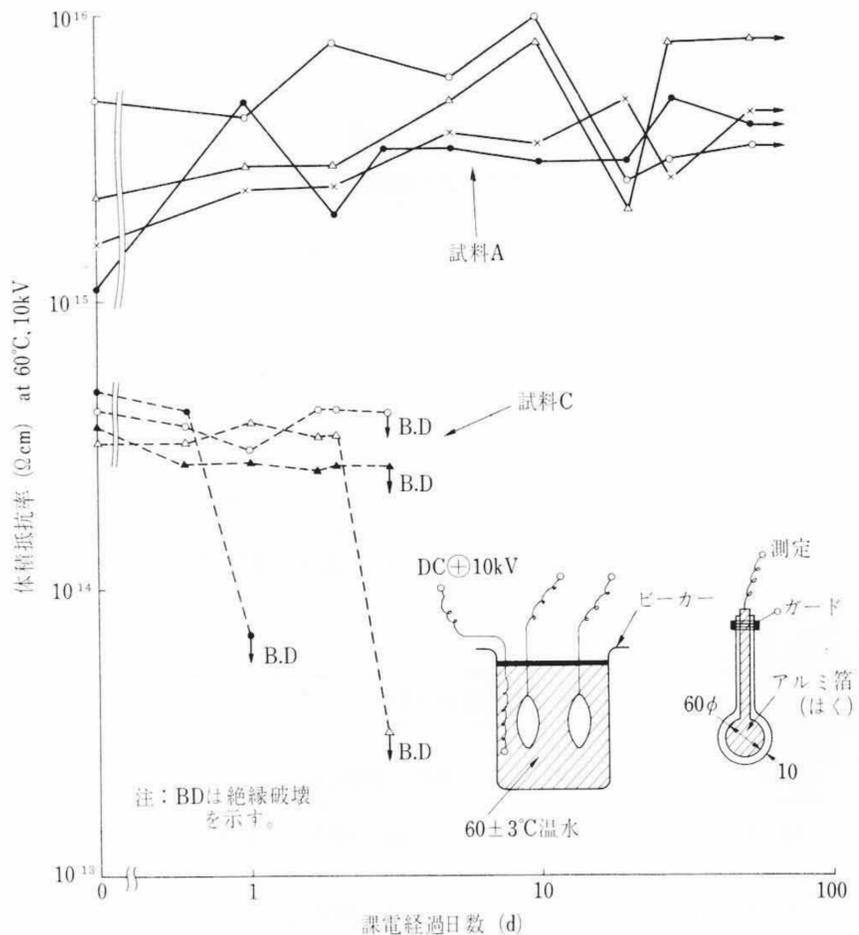


図8 シート状試料の直流浸水課電による絶縁抵抗変化

表3 各種プラスチックのシート状試料による直流浸水課電試験結果  
絶縁破壊までの時間 (d)

試料	試料数 (個)	0.9 mm厚さ	0.5 mm厚さ	破壊箇所
試料 A	4	いずれも90<	—	—
試料 B	—	いずれも20<	1個: 1h 1個: 6h	中央(内部)
試料 C	—	1個: 1 3個: 4	—	—
—	—	2個: 2 2個: 5	—	中央(内部)
試料 D	4	1個: 2.5 1個: 12 1個: 14 1個: 15	—	端部

#### 3.3.2 6kV級ケーブルによる試験

供試ケーブルは絶縁厚さ4mm、38mm<sup>2</sup>の6kV級のもので、内部遮蔽は絶縁体との同時2層押し出しによるコンパウンドである。試料は全長2m、有効長1mであり、絶縁体外側は自己粘着性導電ゴムテープ1層巻きとし、その外側に導電性布テープを巻き、さらにめっき線で押さえ巻きした。このため絶縁体外側への浸水は容易であり、絶縁体内浸水への外側遮蔽層の影響は無視できよう。

課電圧は導体正の55kVとし、水温は60°Cとした。これまでに得られた試験結果は図9に示すとおりである。図より明らかなように、試料Cの初期誘電正接が0.15%なのに対し、45日間の浸水課電により0.45%に上昇し、浸水課電中に絶縁破壊した。(図に示した破壊時の誘電正接は破壊後その部分を除き測定したもの)このようにシート試験と良い相関性が得られた。

一方、試料Aは150日経過現在絶縁破壊していないが、誘電正接は0.02%から0.15%に上昇しており、無課電試料に比べ大きくなっている。しかし、無課電の60℃浸水の試料でも誘電正接は増加している。

なお、加熱のみで浸水していない試料は誘電正接が変化しておらず、誘電正接の増加は浸水によるものであることがわかる。

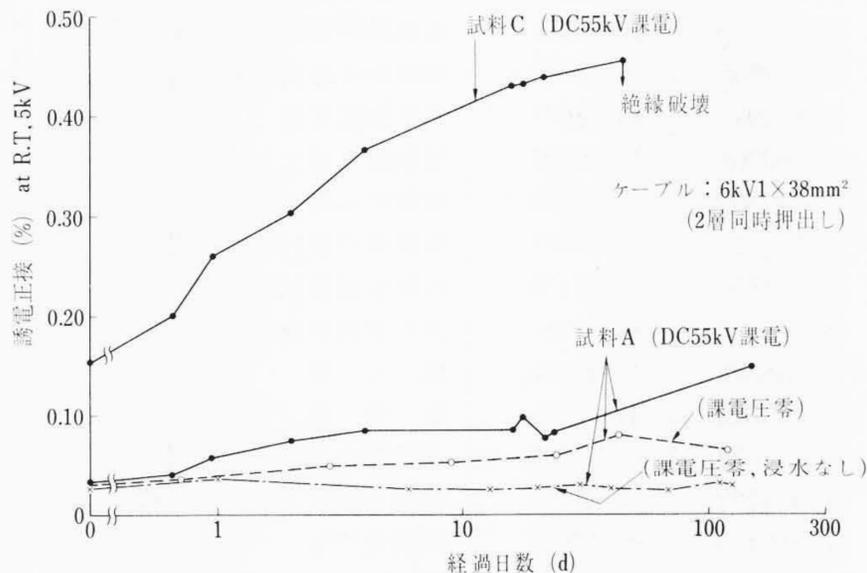


図9 ポリエチレンケーブルの直流浸水課電による誘電劣化

#### 4. 結果に対する検討

##### 4.1 体積抵抗率特性

PE絶縁体の体積抵抗率は低温、低電界で油浸紙より高い傾向にあり測定が非常にむずかしい。しかし体積抵抗率測定から得られる情報は絶縁破壊試験とは異なった観点から価値があり、絶縁体の現象理論解析のためには是非必要である。図1よりわかるように試料CおよびDでは従来から測定されているような吸収電流が観測されたが、試料AおよびBはシート、ケーブルともに吸収電流が複雑な挙動を示した。これは両種ともに若干の配合剤を含んでおり、これがキャリア源になっているとも考えられる。一方試料Dにはこれらの配合剤がほとんど含まれていないこと、また試料Dでは逆に多量の配合剤を含むことによりキャリアがトラップされてしまっていることなどが考えられるが今後さらに検討が必要であろう。しかし、いずれにしてもこのように複雑に電流が変化する場合には真の体積抵抗率の算出が非常に困難になる。また無理に求めてもかなり誤差の大きなものになってしまう。さらに、電流が一定になるまで測定時間を延長すればますます測定に要する時間が長くなり実際的ではなくなってしまう。ただ課電1分値で体積抵抗率を表示しても一応の傾向は得られよう。

図1において課電1分の電流値を見ると、高温・高電界では試料Bが高く、試料Cは低い。しかも試料Cは電界による変化が少ない。このように絶縁抵抗の点からは試料Cは安定な材料であり試料Bは不安定といえる。しかし図5に示した電界強度の点からはβの大きい絶縁体ほど絶縁体内の電界分布が均一化され望ましいことがわかる。

このように直流破壊強度と絶縁抵抗特性とは相反する関係にあるが、現段階ではケーブルの直流絶縁破壊強度と計算により求まるケーブル電界分布との相関性が明らかになっていないため、絶縁体としては絶縁抵抗特性よりむしろ絶縁破壊強度に重点をおくべきであろう。なおこの点については今後さらに十分検討する必要がある。

##### 4.2 直流絶縁破壊電圧

従来交流ケーブルでケーブルの架橋条件によりインパルス破壊電圧が変化することが知られていたが、直流ではさらにその影響

が大きいことが図7から明らかになった。一方、この架橋条件と絶縁抵抗との関係は図4に示されており、直流絶縁破壊電圧の低い架橋条件の試料は絶縁抵抗も低くしかもβは大きくなっており一応相関性は認められる。

##### 4.3 浸水課電特性

図8で浸水課電による絶縁抵抗の変化が試料Aの場合にはっきりしていないが、これは試料Cでわかるように破壊直前になってはじめて急激に低下するためか、あるいは試料の厚さがかなり薄く平等電界に近いからためであろう。図9に示す誘電正接は明らかに浸水とともに増加しており、今後この相関性を調べる必要がある。

表3および図9よりわかるように試料Cは浸水課電特性が劣り直流ケーブル絶縁体に適しないことがわかった。いちばん良い試料Aでさえ直流の浸水課電により誘電正接が増加しており、無課電でも浸水により劣化が進んだことがわかる。しかし、この程度の劣化が実用上問題になるかどうかは今後の検討で明らかにしたい。

#### 5. 結 言

以上4種の直流ケーブル用ポリエチレン絶縁体について直流電気特性の試験結果を述べた。これらを要約すると次のようになる。

- (1) 直流破壊強さは常温、高温とも架橋ポリエチレンのいずれの配合もほぼ同等の性能を有している。
- (2) ポリエチレンの架橋条件により直流絶縁破壊電圧が大幅に変化する。
- (3) ポリエチレンの架橋条件によって体積抵抗率も変化し、直流絶縁破壊電圧の低い架橋条件では体積抵抗率の電界係数βが大きくなる。一方、体積抵抗率の温度係数αは架橋条件や配合の相違によりあまり変化せず油浸紙にはほぼ等しい。
- (4) 今回検討した架橋ポリエチレンのなかで、配合により直流浸水課電特性がかなり劣るのが認められた。今後直流ケーブルに適した配合が見いだせると考えているが、現状では直流浸水課電特性は配合剤の少ないほど特性がよい。
- (5) 以上、これらの特性を総合すると、現在のところ一般架橋ポリエチレンが直流ケーブル絶縁体として最も望ましいといえる。いずれにしても直流ケーブル用のポリエチレン絶縁体としては特殊な配合を開発する必要があり、現在鋭意研究中である。

終わりに臨み本研究に関し種々のご指導をいただいた武蔵工業大学鳥山先生、日立電線株式会社日高工場の依田部長ならびに沼尻、小椋両主任研究員に感謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- (1) 高林, ほか4名: 日立評論 53, 385 (昭46-4)
- (2) G. J. CROWDES et al: CIGRE Report No. 220 (1964)
- (3) C. R. McCULLOUGH: Electrical Insulation Conference P198 (1968)
- (4) R. TELLIER et al: CIGRE Report No. 212 (1958)
- (5) W. G. HAWLEY et al: The Institution of Electrical Engineers Power Division Conference on High Voltage DC Transmission No. 7-70 P338 (Sep '66)
- (6) 遠藤, ほか2名: 電気学会全国大会No. 303 (昭和46年3月)
- (7) 井上, ほか2名: 電気学会全国大会No. 1076 (昭和46年3月)