

SF₆ ガス含浸架橋ポリエチレンケーブルの絶縁特性

Insulating Characteristics of Cross-linked Polyethylene Cable
Impregnated with SF₆ Gas

池田 忠 禧* 高橋 憲 司*
Chūki Ikeda Kenji Takahashi

要 旨

SF₆ ガスをポリエチレン絶縁体に含浸する効果を、新しく考案したトリイーニング試験法によりトリイーニング特性で示し、ガスの含有量、ガスの圧力と、50% トリイー開始電圧との関係を明らかにした。

次に11kV、33kVおよび66kV級架橋ポリエチレンケーブルにSF₆ ガスを含浸した結果を詳細に述べ、交流破壊強度がいちじるしく増大することを示し、絶縁厚の低減、超高压ケーブルへの適用について考察を加えた。

1. 緒 言

架橋ポリエチレンケーブルをさらに高電圧で使えるようにするためには、絶縁強度をさらに高めると同時に、長期安定性を増すことが必要である。このため一つの手段として、ケーブル絶縁体中のボイドに電気的負性ガスを満たしてコロナ開始電圧を高めるという方法が以前から考えられていた。

具体的な着想は1956年Oudin⁽¹⁾によって示された。その後、堤、加子⁽²⁾がモデルケーブルを用いた実験で効果のあることを示した。またKreuger⁽³⁾は実際のケーブルにおいても長期安定性が増し、ケーブルの寿命が格段に長くなることを報告している。

筆者らはポリエチレン絶縁体にSF₆ およびそのほかの電気的負性ガスを含浸し、その影響をトリイーニング試験で調べてトリイー開始電圧、トリイー形状、トリイー進展速度などが含浸ガスによって大きく変わることを見いだした。またSF₆ ガスを含浸したケーブルの交流破壊電圧が大幅に高くなることを報告している^{(4)~(6)}。

現在までに行なった諸検討の結果から、SF₆ ガスを含浸することは通常のボイド(10μ以上の巨視的ボイド)のコロナ開始電圧を高める働きがあるが、さらに、いわゆるボイドフリーといわれるように、巨視的ボイドがない場合でも、ポリエチレン絶縁体には微視的な空隙(くうげき)(ガス分子の拡散、透過を許すような大きさ)が存在し、この微視的空隙にSF₆ ガスが入ることによって全体としての絶縁耐力が増加する効果があると筆者らは考えている。

この考えによれば、SF₆ ガスを含浸することは検出することができなかった欠陥部分を守るという消極的な意味だけでなく、積極的にポリエチレン絶縁体の絶縁耐力を向上させる意味がある。

本報告の結果によれば、SF₆ ガス含浸架橋ポリエチレンケーブルの破壊時最大電位傾度は、交流長時間破壊試験で50kV/mm以上、インパルス破壊試験で約100kV/mmであり、また交流で最大電界25kV/mmの課電が長時間続いているので、現在のポリエチレンケーブルの使用電界を大幅に上げ、絶縁厚をほぼOFケーブルと同程度に低減することが可能である。

超高压、超々高压への適用もじゅうぶん可能であると考えられる。

2. トリイーニング試験によるSF₆ ガス含浸効果の検討

ポリエチレン絶縁体中に通常のいわゆるボイド(数十マイクロメートルの大きさ)が存在する場合にはSF₆ ガスをその中にみだせばコロナ開始電圧が上昇し、結果的にその絶縁体の破壊電圧が上

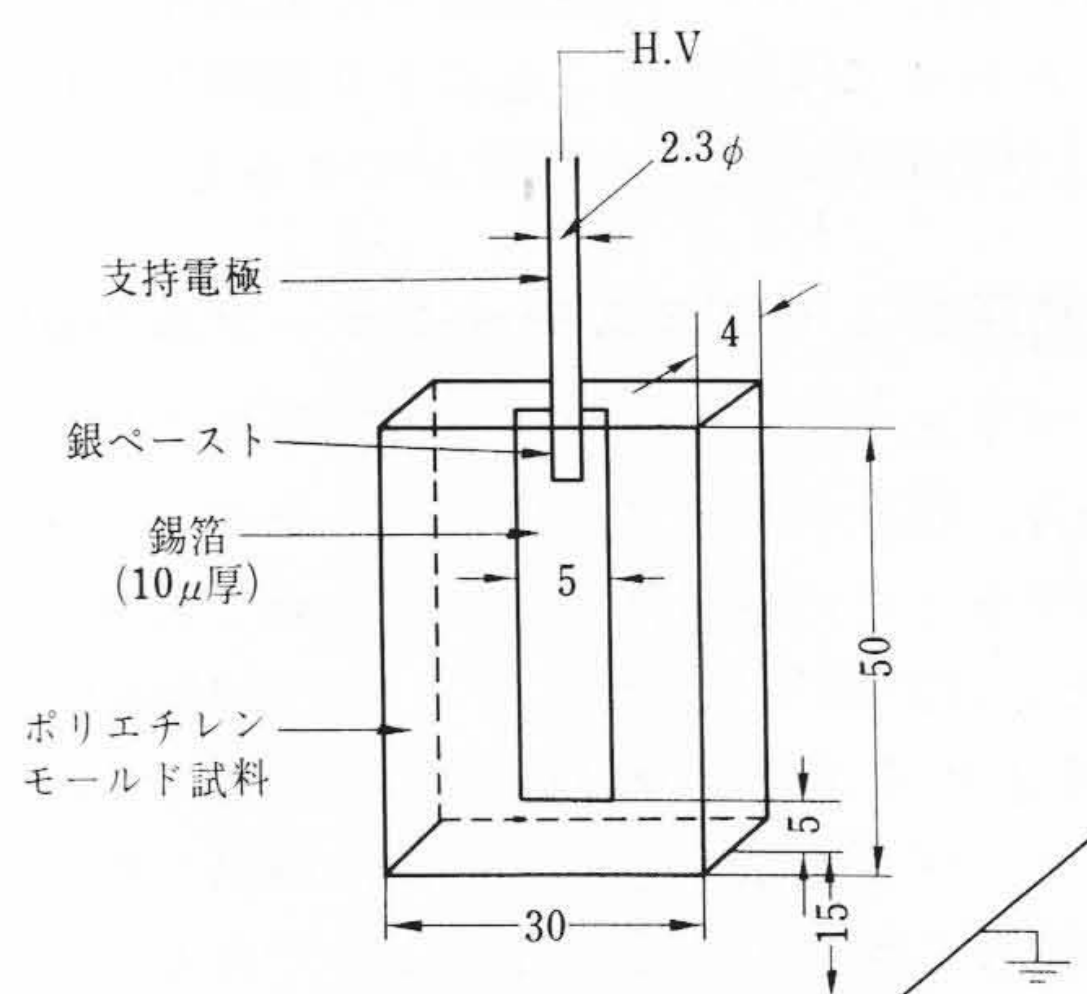


図1 トリイーニング試験試料形状ならびに実験概略図

昇することはじゅうぶん予想される。またこのことはポリエチレンテープ巻SF₆ 充てんケーブルで実際にみられるとおりである。

しかしながらわれわれが問題としている高电压架橋ポリエチレンケーブルは高度の製造技術と品質管理により通常の意味においてボイドフリーであり、ボイド放電によるコロナは検出されない。

このようなポリエチレン絶縁体中にSF₆ ガスを「含浸」したことによる電気的破壊強度の変化を明確に、かつ簡易に調べる目的でトリイーニング試験を行なった。

従来行なわれてきたニードルテストでは針端にボイドが存在することは避けられず、また針をそう入することにより、針端付近のSF₆ ガスが大気中に飛散していくと考えられる。

このため筆者らは特にガスの「含浸状態」を変えずに試験ができ、電極先端にボイドがないと考えられる試験法を考案し、その方法で試験を行なった。

2.1 トリイーニング試験法

試験用の試料は次のようにして作製された。

照射ポリエチレンシート(10μ厚)を重ね合わせ、中間に電極として10μ厚の錫箔(スズハク)をそう入する。

この試料をプレス板にはさみ、モールド容器に入れる。これを真空(10⁻²~10⁻³ Torr)中で約15時間脱気し、常温で絶縁ガスを充てんし、ガス中でポリエチレンを加熱溶融(160°C, 約5時間)する。

このようにしてできた試料をガス中で冷却したのち、空気中に取り出した。試料形状および実験概略図は図1に示すとおりである。

実験はすべて油中に行ない、接地板と試料下端との油間隙を15

* 日立電線株式会社研究所

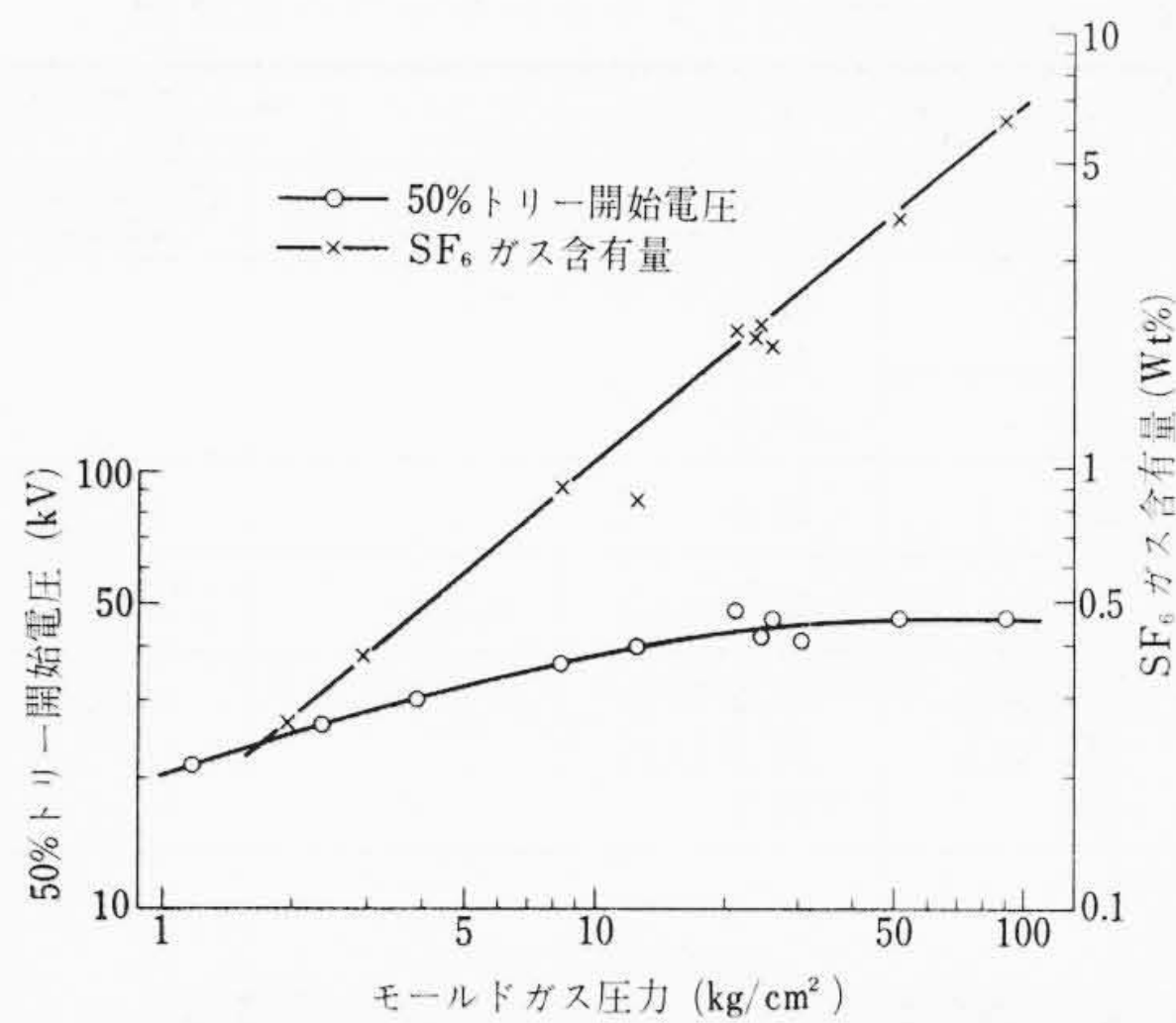


図2 50% トリー開始電圧およびSF₆含有量の
モールドガス圧力依存性

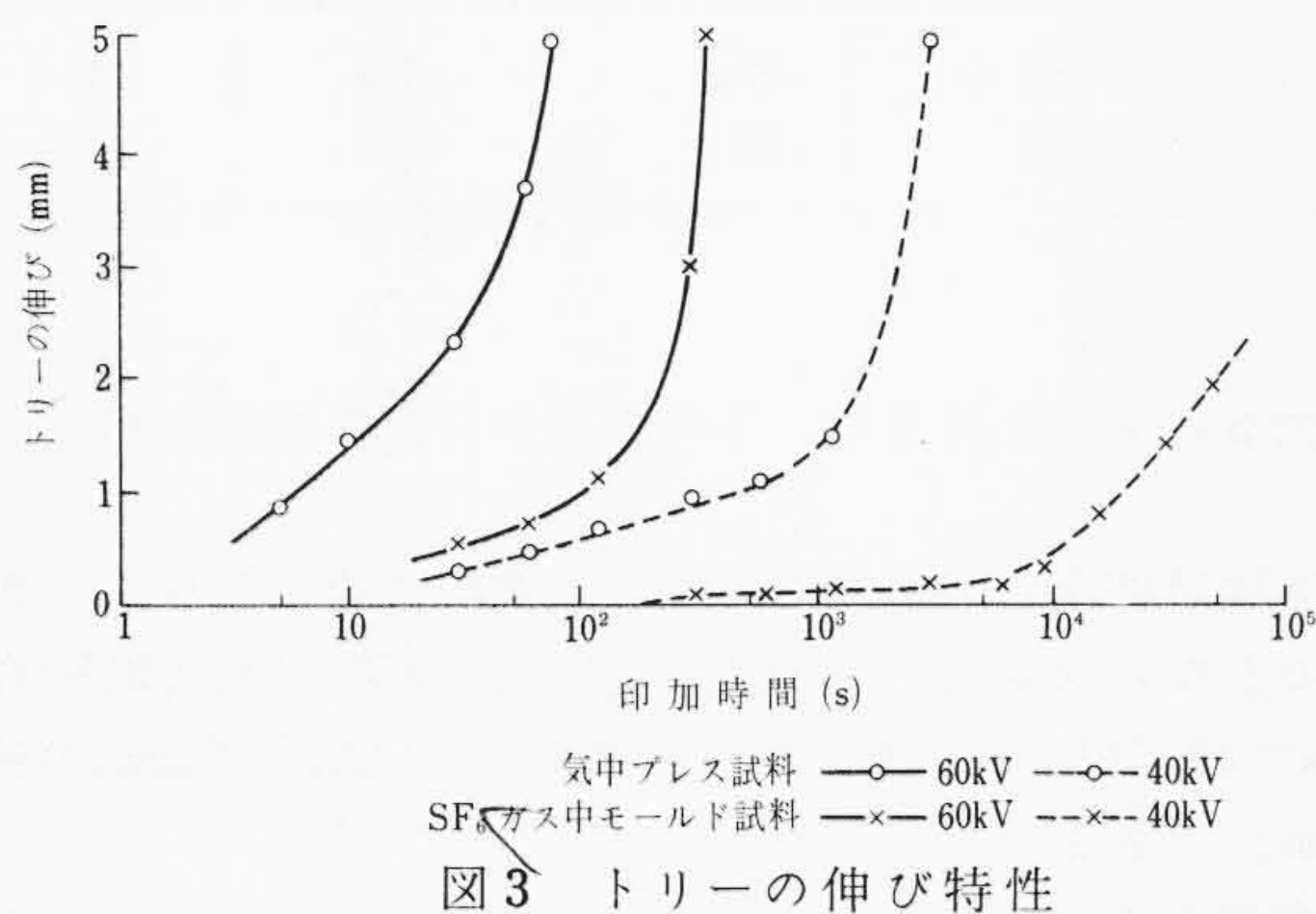


図3 トリーの伸び特性

mmとした。6～10個の試料片に同時に交流電圧を印加した。電圧の印加は昇圧法により、16kVから4kV 2時間ステップでトリーの発生をみるまで続けた。

2.2 SF₆ガス含有量および50%トリー開始電圧

試料をモールドする際のSF₆ガス圧力により試料に含まれるSF₆ガスの量と50%トリー開始電圧が大きく異なる。この関係を示したのが図2である。

ここにおけるSF₆ガス含有量とは、トリーイング試験試料作製時に同材質の重量測定試料にもSF₆ガスを同様に含浸させ、その前後の重量変化から(1)式に従って求めたものである。

$$Q = \frac{(\text{ガス含浸後の試料重量}) - (\text{ガス含浸前の試料重量})}{\text{ガス含浸前の試料重量}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

図2からわかるとおり、SF₆ガス含有量はモールドのガス圧力にはほぼ比例するが、50%トリー開始電圧はガス圧力に対し飽和する傾向にあり、20kg/cm²以上ではほぼ一定となる。

SF₆ガス含有量がほぼモールド圧力に対して比例することは、SF₆ガスがHenryの法則にしたがって溶けていることを示している。

2.3 空気中プレス試料とSF₆ガス中モールド試料

前述の方法によりSF₆ガス中でモールドした試料と大気中でプレスして作製した試料とを比較する。

気中プレス試料の50%トリー開始電圧は18kVである。

これに対して、SF₆ガス中モールド試料では、図2からわかるとおり、ガス圧力7.5kg/cm²で36kV、ガス圧力20.5kg/cm²で43kVであり、それぞれ、2倍および2.4倍である。

さらに50%トリー開始電圧だけでなく、一定電圧印加時のトリーの伸びも大きく異なる。

図3は60kVおよび40kVを印加した際における気中プレス試料

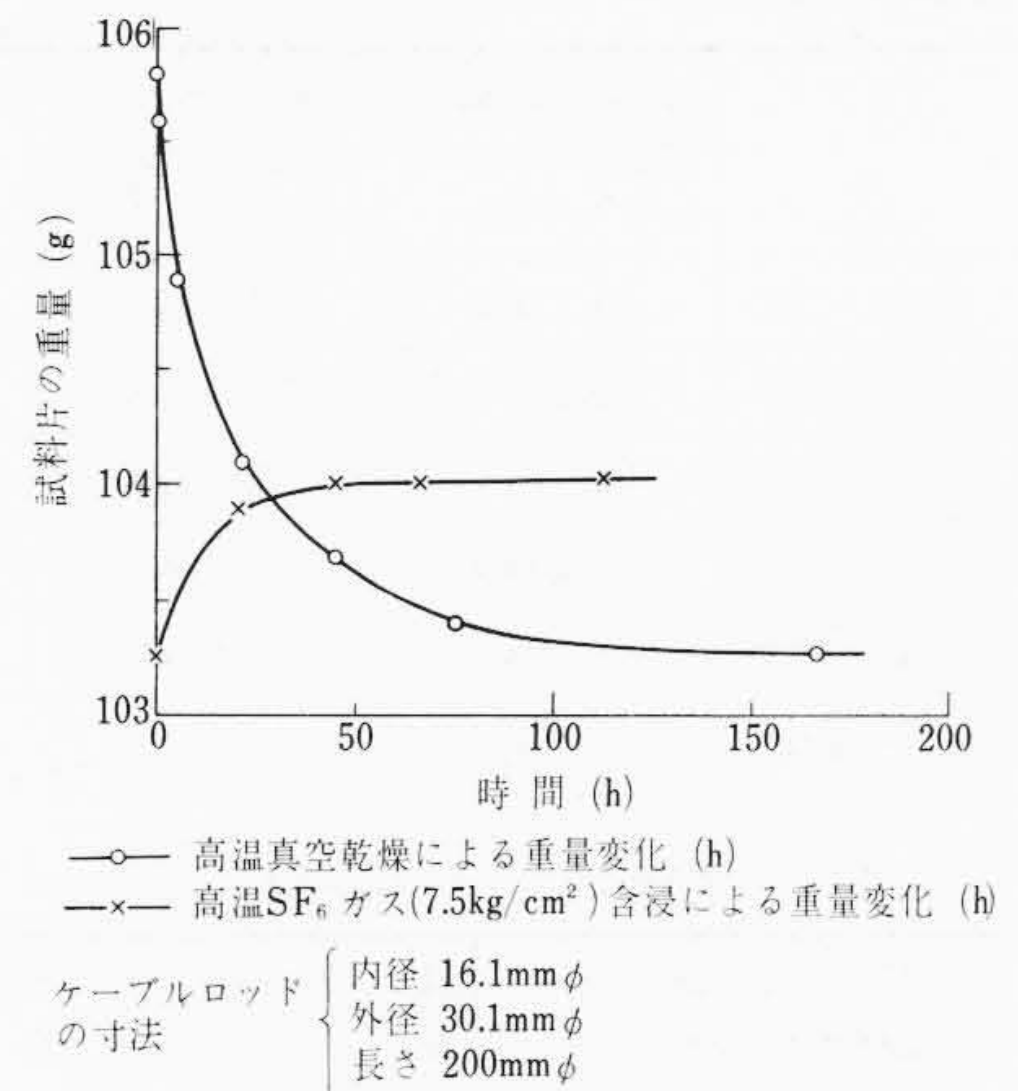


図4 ケーブルロッドの重量変化

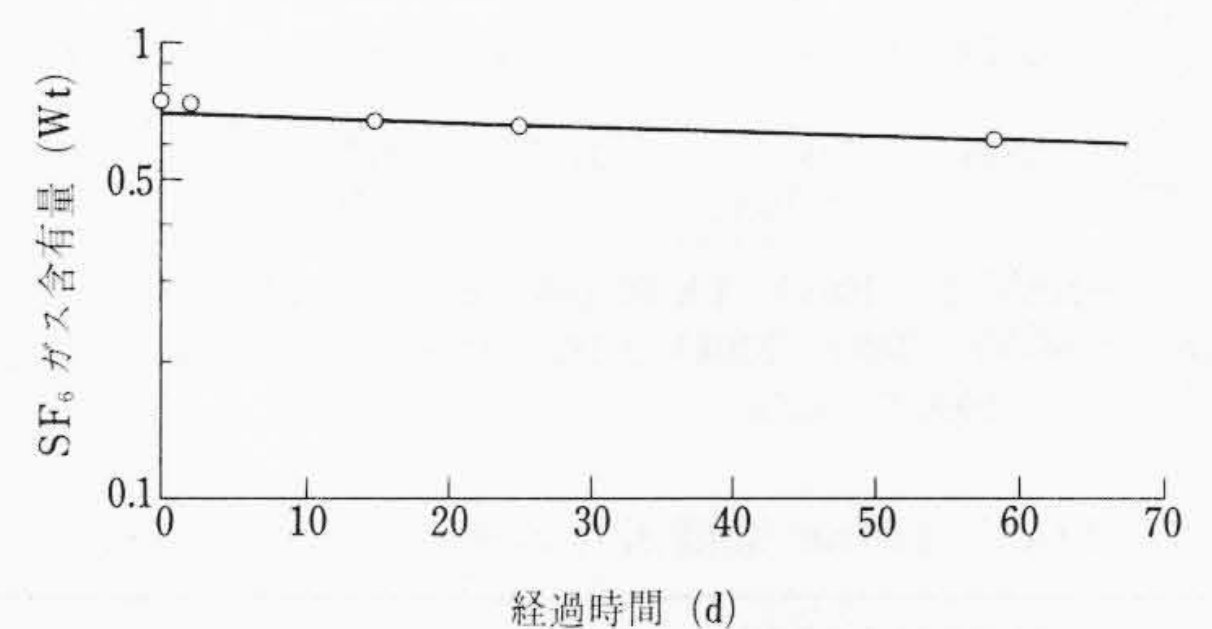


図5 SF₆ガス含有量の経時変化

およびSF₆ガス中モールド試料(160℃, 7.5kg/cm²)のトリー伸展を示したものである。

気中プレス試料ではトリーの出始めはまばらな枝状であるが、時間の経過とともに密集してくる。その後、密集しているトリーの一部が急速に伸び破壊に至る。これに対して、SF₆ガス中モールド試料では最初に細い1本のトリーが観察され、それがわずかな屈折、数少ない分枝を生じながら進展し、かなりの時間経過後枝状トリーとなるが、そのまま進展して破壊に至る。

3. SF₆ガス含浸架橋ポリエチレンケーブルの諸特性

3.1 1架橋ポリエチレンケーブルの乾燥およびSF₆ガス拡散

架橋ポリエチレンケーブルは製造直後においては、化学架橋剤分解残査および架橋時の高圧力水蒸気が拡散した水分を含んでいる。

SF₆ガスとポリエチレン中に拡散させるにはこれらの化学架橋剤分解残査および水分を飛散させることが必要である。

筆者らはこのためにまず架橋ポリエチレンケーブルを高温で真空脱気し、続いて高温でSF₆ガス加圧を行なった。

ここで重要であるのは、ケーブルの乾燥およびSF₆ガスの拡散がどのくらいの速度でおきるかということである。この乾燥および拡散状態を調べるため、実際の11kVケーブルを長さ200mmに切断し、導体を引き抜いてポリエチレン絶縁体のみとし、この絶縁体の重量を100℃における真空脱気時およびSF₆ガス加圧時に一定時間ごとに測定した。測定試料3本の平均値を示したのが図4である。

この結果から、絶縁厚10mm、外径28.1mmφのこのケーブルでは高温における真空脱気を100時間以上行なえばポリエチレン絶縁体中の架橋剤分解残査および水分はほぼ完全に飛散し、また同じ温度において7.5kg/cm²のSF₆ガスは約50時間で完全に拡散浸透していくことがわかる。

SF₆ガスがポリエチレン中に完全に拡散し、平衡に達した状態では0.7%(重量)含まれている。

次にこのようにしてSF₆ガスを含浸したケーブルサンプルを大

表1 実験に用いた三層同時押出ケーブル

	11kV 150mm ² 架橋ポリエチレンケーブル	33kV 200mm ² 架橋ポリエチレンケーブル	66kV 200mm ² ポリサマー* ケーブル
導 体 外 径	16.1mmφ	17.0mmφ	18.2mmφ
内部半導電性コンパウンド外径	18.1mmφ	19.0mmφ	21.2mmφ
絶 縁 体 外 径	28.1mmφ	37.0mmφ	48.2mmφ
外部半導電性コンパウンド外径	30.1mmφ	39.0mmφ	50.2mmφ
絶 縁 厚	5.0mm	9.0mm	13.5mm

注：*無機充てん剤入り架橋ポリエチレンケーブル

表2 試料ケーブルの試験方法

		11kV 150mm ² 架橋ポリエチレン ケーブル	33kV 200mm ² 架橋ポリエチレン ケーブル	66kV 200mm ² ポリサマーモ ケーブル
交印 加 流時	SF ₆ 含 浸 の 場 合	100kV + 10kV/h	150kV + 10kV/h	200kV + 10kV/h
	SF ₆ を含浸 しない場合	200kV + 10kV/h	250kV + 10kV/h	350kV + 10kV/h
インパルス印加時		230kV + 40kV / ±10回	310kV + 40kV / ±10回	430kV + 40kV / ±10回

注：1. 100kV + 10kV/h; 100kV 1h 印加後 1h ごとに 10kV 昇圧
2. 230kV + 40kV / ±10回; 230kV ±10回印加後 40kV Step で上昇し、
各 Step で ±10回ずつ印加

表3 11kV 150mm² 架橋ポリエチレンケーブル破壊値

項 目 ケーブル	交流長時間破壊値		インパルス破壊値			
	常 温		常 温		高 温	(90℃)
	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)
未 乾 燥	170	42.5	390	97.4	255	63.8
	170	42.5	395	98.5	235	58.8
			378	94.4		
			392	97.7		
真 空 乾 燥	130	32.5	430	107.4		
SF ₆ ガス 常温加圧*	220	55.0				
SF ₆ ガス 含 浸	290	72.5	470	117.5	370	92.4
	280	70.0	420	105.0	398	99.3
	270	67.5			426	106.3
	270以上	67.5以上				

注：*常温でSF₆ガス 3kV/cm²g をケーブル導体側に加圧

気中に取り出し、常温で放置すると、SF₆ガスが再び飛散していく。この経過を示したのが図5である。図5によれば、SF₆含有量Qの経時変化は(2)式で表わされる。

$$Q = Q_0 \exp(-0.00243t) \cdots \cdots (2)$$

ここに、t：時 間 (day)

上式よりSF₆ガス含有量が半分になるのに要する日数は約 300 日である。

3.2 初期絶縁破壊特性

3.1 で得た知見をもとにして、実際のケーブルを下記のように乾燥し、ガスを含浸した。

ケーブルを加流筒の中に入れ、高温で真空脱気する。その後、同一温度にて、SF₆ガスを封入し、ケーブル絶縁体中にSF₆ガスを含浸する。

実験に用いたケーブルはすべて内部および外部半導電層押出しの型であり、三層同時押出しケーブルである。

表1に示すとおり、11kV 150mm²、33kV 200mm²の架橋ポリエチレンケーブルおよび66kV 200mm²の充てん剤入り架橋ポリエチレンケーブルを用いた。試験方法は表2に示すとおりである。

3.2.1 11kV 150mm²(絶縁厚 5mm)架橋ポリエチレンケーブルの交流長時間破壊試験およびインパルス破壊試験

表4 33kV 200mm² 架橋ポリエチレンケーブル破壊値

項 目 ケーブル	交流長時間破壊値 常 温		インパルス破壊値 常 温	
	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)
未 乾 燥	270	42.7		
	290	45.8		
	240	38.0		
真 空 乾 燥	220	34.8		
SF ₆ ガス 常温加圧	260	41.2		
SF ₆ ガス 含 浸	340 以上 370 以上 390	53.8 以上 58.5 以上 61.7	660	104.3

表5 66kV 200mm² ポリサマーケーブルの破壊値

項 目 ケーブル	交流長時間破壊値 常 温		インパルス破壊値 常 温	
	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)	電 圧 (kV)	最大電界強度 (kV/mm)
真 空 乾 燥	340	39.1	718	82.4
SF ₆ ガス 含 浸	460 以上	52.8	875	100.4
	450	51.7		

結果は表3に示すとおりで、この結果から次の事項が明らかとなった。

- (1) 三層同時押出しであるため、破壊電圧が高く、なんら処理を行なわない状態で、交流破壊電圧 170kV (最大電界強度 Gmax=42.5kV/mm) インパルス破壊電圧390kV(Gmax=97.6 kV/mm) である。
- (2) 真空乾燥を行ない、架橋剤分解残渣および水分を完全に飛散させると、交流長時間破壊値は低下するが、インパルス破壊値は多少上昇する。
- (3) 常温で1週間ケーブルの導体側にSF₆ガスを加圧し導体側から絶縁体内にガスを拡散させると、交流長時間破壊値が若干向上する。
- (4) 前述の高温における真空脱気およびSF₆ガス含浸処理を行なうと、交流長時間破壊電圧は驚くほど上昇し、270kV~290kVとなる。290kVの波高値411kVはインパルス破壊電圧とほぼ等しい。

この最大電界強度は実効値で72.5kV/mm、波高値で102kV/mmである。

まったく処理を行なわないケーブルの 1.7 倍、真空乾燥だけを行なったケーブルの 2.2 倍に達している。

インパルス破壊電圧は交流長時間破壊電圧ほど上昇せず、高温で真空乾燥だけを行なったケーブルとほぼ同じ値を示しており、特にSF₆ガスを含浸した効果はみられない。しかし、破壊時の最大電界強度は 105kV/mm とかなり高い値を示している。

- (5) 未乾燥のケーブルの高温インパルス破壊電圧は常温の60%程度に低下するが、SF₆ガスを含浸したケーブルでは高温においても常温の値からごくわずかに低下するだけである。

3.2.2 33kV 200mm²(絶縁厚 9mm)架橋ポリエチレンケーブルの交流長時間破壊試験およびインパルス破壊試験

試験結果は表4に示すとおりである。このケーブルにおいても3.2.1で述べた結果がそのままあてはまり、SF₆ガス含浸により交流破壊電圧は50%増加する。

3.2.3 66kV 200mm²(絶縁厚13.5mm)充てん剤入り架橋ポリエチレンケーブルの交流長時間破壊試験およびインパルス破壊試験

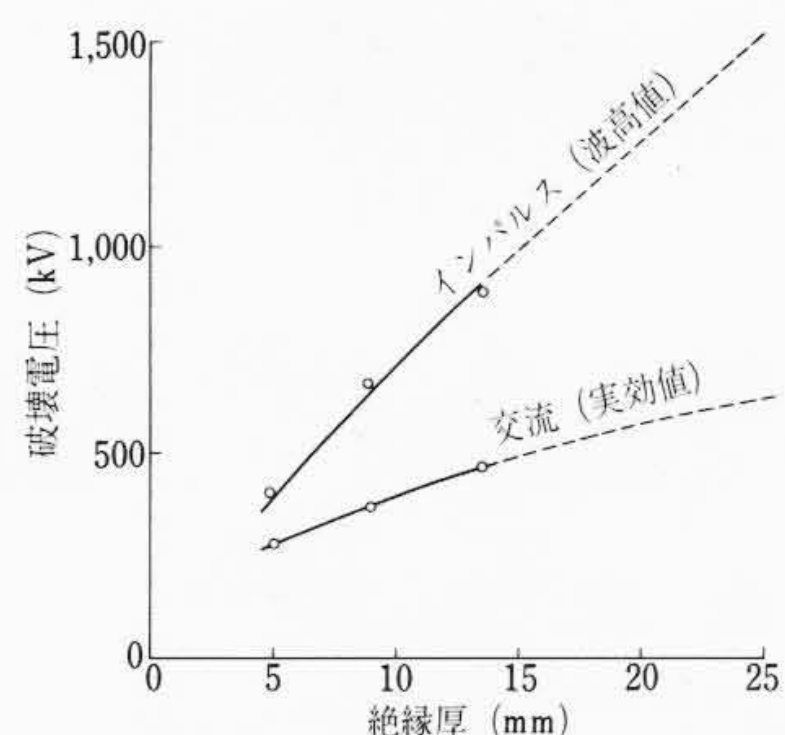


図6 SF₆ガス含浸架橋ポリエチレンケーブルのインパルスおよび交流破壊電圧

このケーブルは特に無機質充てん剤を充てんした架橋ポリエチレンケーブル（ポリサーモケーブル）であり，耐コロナ性，耐熱性にすぐれている。結果は表5に示すとおりである。3.2.1および3.2.2と同じくSF₆ガス含浸の効果が現われており，同一の傾向を示しているが交流破壊電圧の上昇の程度は前二者ほど大きくなく1.35倍にとどまっている。しかし，交流長時間破壊時の最大電界強度が51.3kV/mmインパルス破壊時の最大電界強度97.4kV/mmと非常に高い値を示している。

3.3 長期安定性

SF₆ガス含浸ケーブルの高電界下における寿命を調べるため，3.2.1で述べた11kV 200mm²架橋ポリエチレンケーブルの長期課電試験を行なった。

試料ケーブルは15mであり，前述の方法でSF₆ガスを含浸したのち，金属パイプ中に引き入れSF₆ガス5kg/cm²を加圧した。

課電電圧100kV，最大電界強度25kV/mmの状態に現在（昭和46年9月末日）約2,000時間経過しているが異常は認められない。

もしも，ケーブル絶縁体の寿命と印加電界との関係を(3)式で表わせば，100kVで2,000時間の寿命は58kVで30年の寿命に相当する。

$$L = L_0 (E/E_0)^9 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに， L ：寿命

E ：印加電界

つまり交流長期電圧特性だけからいえば，この11kV級架橋ポリエチレンケーブルはSF₆ガスを含浸することにより66kV級として使用可能であることになる。

3.4 SF₆ガス含浸ケーブルの絶縁厚

前述のとおり，SF₆ガスを含浸することにより特に交流破壊強度が格段に上昇するので，現用架橋ポリエチレンケーブルよりも絶縁厚を低減することが可能であり，超高压ケーブルとしても使用可能である。

前述のSF₆ガス含浸ケーブルのインパルスおよび交流破壊電界

を整理すると図6のようになる。

この図から各電圧階級のケーブルの絶縁厚を想定すれば，66kV級として6～7mm，154kV級として15～16mm，275kV級として，24～26mmとなり，OFケーブルとはほぼ同様の絶縁厚で済むことがわかる。

3.5 実験路布設時の構成

ケーブルの構造

ポリエチレン絶縁体に含浸しているSF₆ガスは長期間には飛散していくので，なんらかの方法でガスを補充する必要がある。

具体的にはKreugerの提唱のように，ケーブルの導体側からSF₆ガスを加圧し，シース側ではSF₆ガス圧力を低く保つ方法とケーブル全体を金属シースパイプ中に引き入れ，SF₆ガスで加圧する方法とが考えられる。前者の方法は特別な金属シースパイプを必要としないのでケーブル自体は構造が簡易であるが，端末およびジョイント構造がSF₆ガス導通のため複雑となる。後者の方法は金属シースパイプは必要であるが，端末およびジョイントはSF₆ガス充てん構造となるため，かえって小形化，プレハブ化が可能である。

どちらが有利であるかは今後の実際の経験によらなければ判断できないが，筆者らはケーブル系統全体としてみた場合，金属シースパイプを使用する方法が，より実用的で安定性に富むと考える。

4. 結 言

- (1) SF₆ガス含浸ポリエチレンのトリージング試験を行ない，含浸の効果が大きいことを示し，含浸ガス量とトリージング性との関係を明らかにした。
- (2) 11kV，33kV，66kVの架橋ポリエチレンケーブルにSF₆ガスを含浸した場合，交流長時間破壊電圧が約1.5倍，インパルス破壊電圧が約1.1倍に上昇し，長期過電圧の課電に対しても安定であることを示した。
- (3) SF₆ガス含浸方式の実用化を検討し，絶縁厚の低減，超高压ケーブルの適用などについて考察した。

研究の推進にあたり，ご教示，激励をいただいた武蔵工大鳥山教授および日立電線株式会社木村研究所長に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) J.M.Oudin : Proc. of the 16th CIGRE Session 1956, 1,394
- (2) 提，加子：昭42 電気学会東京支部大会 365
- (3) F.H.Kreuger : CIGRE, 1970, 21-02
- (4) 池田，高橋：昭46 電気学会全国大会 216
- (5) 池田，高橋：昭46 電気学会全国大会 217
- (6) 池田，高橋：放電研究会資料 ED-71-8 (1971,4,6)