CVケーブルの絶縁性能と課電劣化特性

Insulation Performance and Electrical Deterioration of Cross-linked Polyethylene Cable

電力ケーブルは,長年月にわたって安定した性能を保持することが要求されており,信頼性の高いケーブルの設計を行なうには絶縁性能や課電劣化特性を明らかにする必要がある。

CVケーブルの絶縁性能は種々の要因の影響を受けるが、それらのうちで特に重要と考えられる製造方法と性能の関係について述べるとともに、温度特性について説明した。また、雷インパルス電圧、及び交流電圧長期課電下の劣化特性についても考察し、CVケーブルのV-n特性やV-t特性を明らかにした。更に、CVケーブルの必要性能や性能保証試験に言及し、絶縁性能や課電劣化特性を勘案した所要絶縁厚について考察した。

関井康雄* Sekii Yasuo 村木浩二** Muraki Kôji 高橋憲司** Takahashi Kenji

11 緒 言

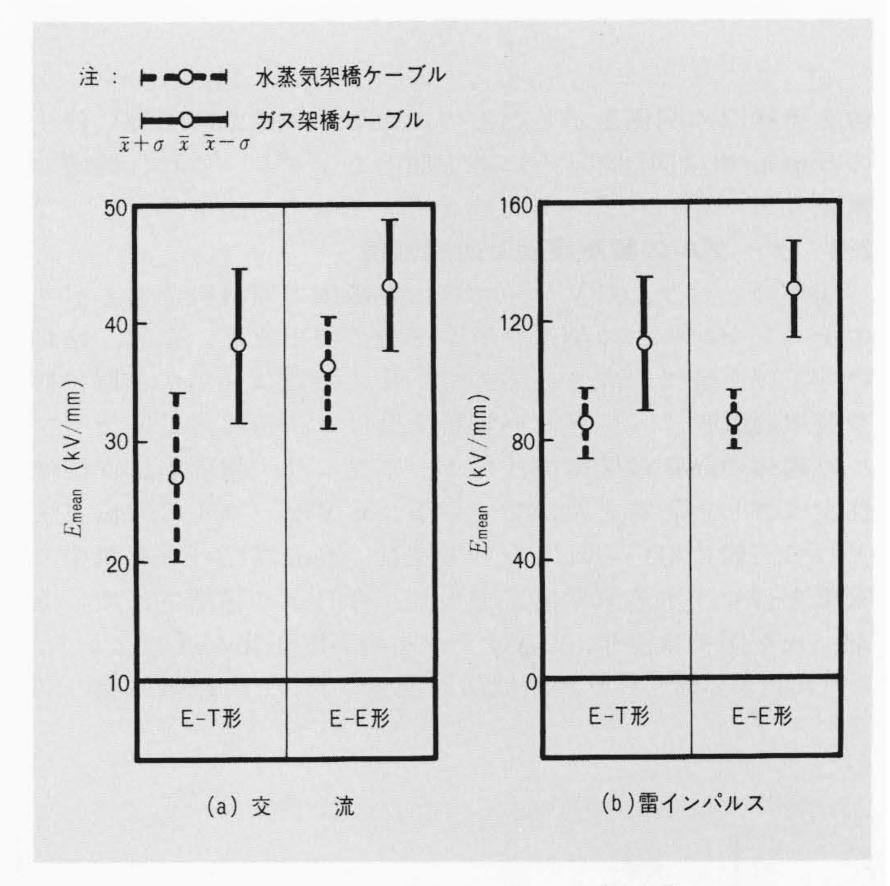
電力ケーブルは長い耐用年限の間,安定した絶縁性能を保持することが要求される。したがって,信頼性の高い絶縁設計を行なうためにはケーブルの初期性能や課電劣化特性を明らかにする必要がある。このような観点から本稿ははじめに架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル(以下, CVケーブルと略す)の初期絶縁性能と課電劣化特性について述べ,このケーブルの特徴を明らかにする。加えてこのケーブルが具備すべき必要性能について述べ,性能保証試験や所要絶縁厚の算定方法に論及する。

2 CVケーブルの絶縁性能

高電圧ケーブルが、具備すべき要件のうちで最も重要なものはその絶縁性能である。この絶縁性能は、ケーブル絶縁体の品質(絶縁体中での微視的欠陥の有無や、絶縁体の均一性など)や絶縁体と導体の境界面の状態(境界面の接着状態や凹凸の有無など)によって定まるので、使用される絶縁材料はもちろん、ケーブル構造や製造履歴の影響を受ける。これらの要因によって、CVケーブルの絶縁性能がどのように変化するかについて述べ、その特徴を明らかにする。

2.1 ケーブル構造と絶縁性能

絶縁性能に影響を及ぼすケーブルの構造因子としては、しゃへい構造(内外半導電層の構造)、導体寸法、絶縁厚などが挙げられるが、これらのうちで絶縁破壊強度に特に大きな影響を与えるのはしゃへい構造である。図1は異なる二つの架橋方法(水蒸気架橋法とガス架橋法)により製造したしゃへい構造の異なる22kV CVケーブルの交流、及び雷インパルス破壊の平均破壊ストレス(Emean)である(平均値 \bar{x} 及び \bar{x} + σ , \bar{x} - σ , σ :標準偏差)。同図中のE-E形ケーブルは、導体しゃへい層、絶縁体しゃへい層が共に押出形導電層から成っており、これの製造には内外半導電層と絶縁層を一工程で構成する三層同時押出法が採用されている。一方、E-T形ケーブルは導体しゃへい層だけが押出形導電層から成っており、絶縁体しゃへいには半導電性テープが用いられている。同図で明らかなように、E-E形ケーブルのEmean値はE-T形ケーブルに比べていずれも高く、特に交流Emean値はE0%(ガス架橋 ケ



ーブル)~40%(水蒸気架橋ケーブル)と大幅に上昇している。加えて、ばらつきも減少している。これはE-E形ケーブルの絶縁体としゃへい層とが欠陥の少ない良好な境界面を形成しているためである。

2.2 絶縁性能の寸法効果

ケーブルの絶縁破壊強度が導体寸法や絶縁厚によって異なることは、既にOFケーブルなどでよく知られている¹⁾ところであるが、CVケーブルでも同様な寸法効果が観測される。 図2は一例として使用材料、製造履歴の等しいE-E形ケーブル(水蒸気架橋ケーブル)について雷インパルス破壊のEmean

^{*} 日立電線株式会社研究所 工学博士 ** 日立電線株式会社日高工場

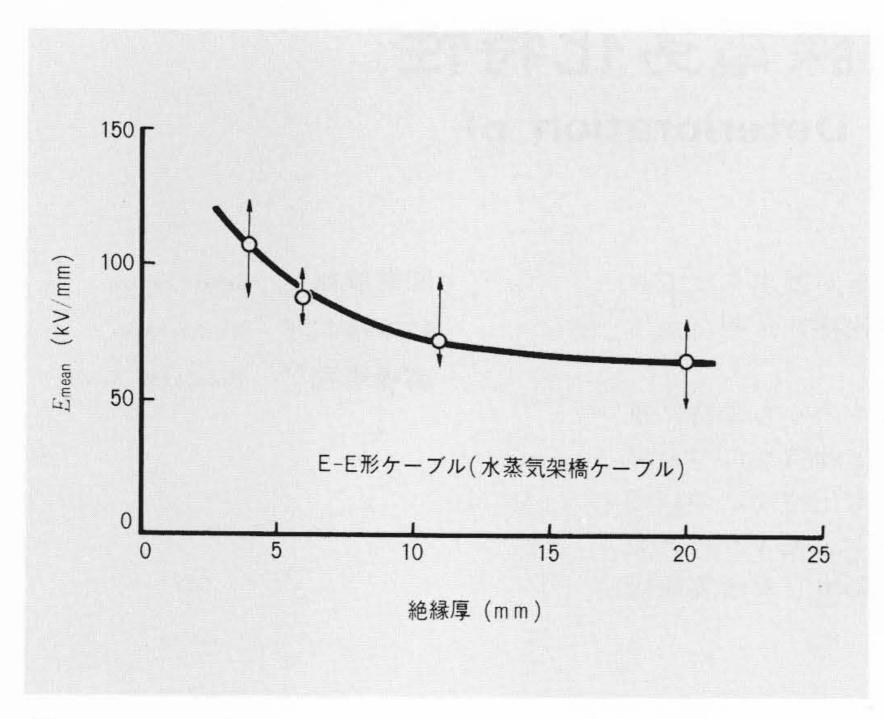


図 2 絶縁厚と雷インパルス破壊のEmean値 絶縁厚とともに、Emean 値は漸減する傾向にある。これは破壊に及ぼす寸法効果と考えられる。

値と絶縁厚の関係を示したものである。絶縁厚の増加に伴ってEmean値は同図のように減少傾向を示すが、これは破壊の体積効果が現われているためと考えることができる。

2.3 ケーブルの製造履歴と絶縁性能

周知のとおり、CVケーブルの絶縁体は原材料であるポリエチレンがケーブル製造プラント中の押出成形、架橋、冷却の各工程を経て形成されるので、その品質は使用する原材料や製造履歴によって著しい影響を受ける。特に、CVケーブル絶縁体の品質は架橋方法によって異なり、架橋方法が絶縁性能に著しい影響を及ぼしている。CVケーブルの架橋方法として一般に用いられている方法は、高温高圧の水蒸気中で架橋を行なう水蒸気架橋法であり、今日広く採用されているが、我が国では近年、CVケーブルの高電圧化が進むなかで、これに代わる新しい乾式架橋法が開発され、20~50 絶縁性能の向

上にひと役買っている。その一つであるガス架橋法は,高温 高圧力の窒素ガス流中で架橋を行なう方法²⁾である。このガス 架橋法で製造されたCVケーブルは,優れた絶縁性能を示す。

図3はガス架橋法で製造した66kV E-E形ケーブルの交流,及び雷インパルス破壊強度(Emean値)の分布を水蒸気架橋法で製造したケーブルの分布と比較して示したものである。交流,雷インパルス,いずれのEmean値もガス架橋ケーブルのほうが高ストレス側に分布していることが分かる。この絶縁性能の向上は既に報告されているように、ガス架橋法が乾式架橋法で水分の浸透に伴うミクロボイドの生成がないことや、ガス架橋法によってもたらされる絶縁体の微細構造が密で欠陥が少ないことに由来すると考えられている。。

2.4 絶縁性能の温度特性

一般に絶縁材料の絶縁破壊強度は、高温領域で低下するのでCVケーブルの雷インパルス破壊のEmean値は、その影響を受け高温度で低下する。

図4は水蒸気架橋法で製造したE-E形ケーブルについて実測した室温,及び90℃での雷インパルス破壊のEmean値の分布であり平均値 \hat{x} で比較した(Emean)室温/(Emean)90℃はほぼ1.2となる。CVケーブルの常時使用の許容温度は90℃であるので、常温下での絶縁破壊強度(BDS)値に基づいてケーブルの絶縁設計や性能保証試験を行なう場合には、高温度でのBDS値の低下を勘案した安全係数を与える必要がある。ちなみに、同図よりEmean値の平均値(Emean)を求め、この雷インパルス電圧に対する係数(E(Emean)室温/(Emean)90℃)を求めて1.2が得られる。一般にE00℃でのE00の低下を補償する安全係数としてE0000のが見込まれておりE000の低下を補償する安全係数としてE000のが見込まれておりE000の低下を補償する安全係数としてE00のが見込まれておりE00の低下を補償する安全係数としてE00のが見込まれておりE00の低下を補償する安全係数としてE0のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のが見込まれておりE1のであるを全係数としてE20のでのの記録法に関する推奨案ではこの安全係数としてE25のが採択されているE1ののでは、E1のの記録法に関する推奨案ではこの安全係数としてE25のが採択されているE1ののでは、E1ののでは、E1のの記録法に関する推奨案ではこの安全係数としてE25のが採択されているE1ののでは、

BI CVケーブルの課電劣化特性

CVケーブルの課電劣化特性として特に重要なのは、繰返 し雷インパルス電圧による劣化(雷インパルス疲労劣化)特性

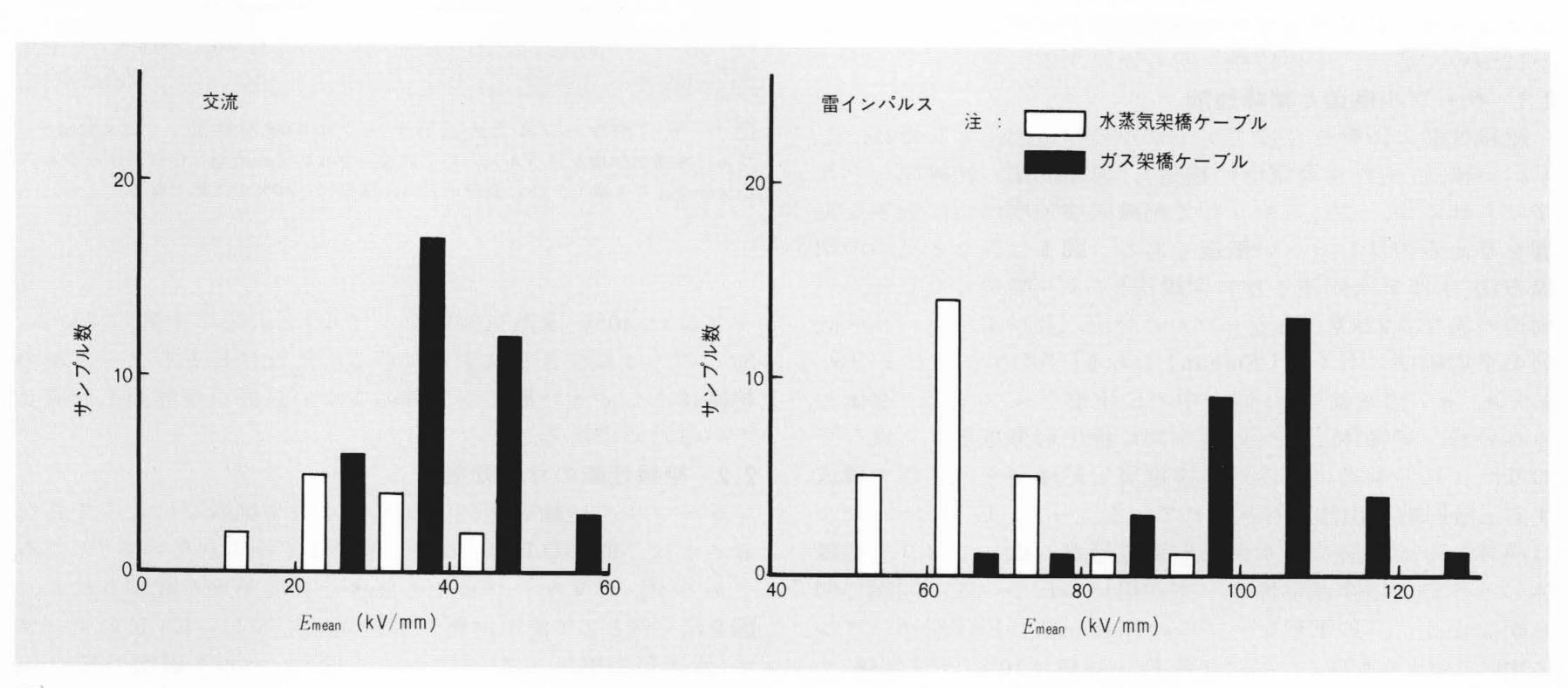


図3 水蒸気架橋ケーブルとガス架橋ケーブルのE mean値の分布(66kVケーブル) 交流破壊,インパルス破壊、いずれのE mean値もガス架橋ケーブルのほうが高ストレス側に位置している。

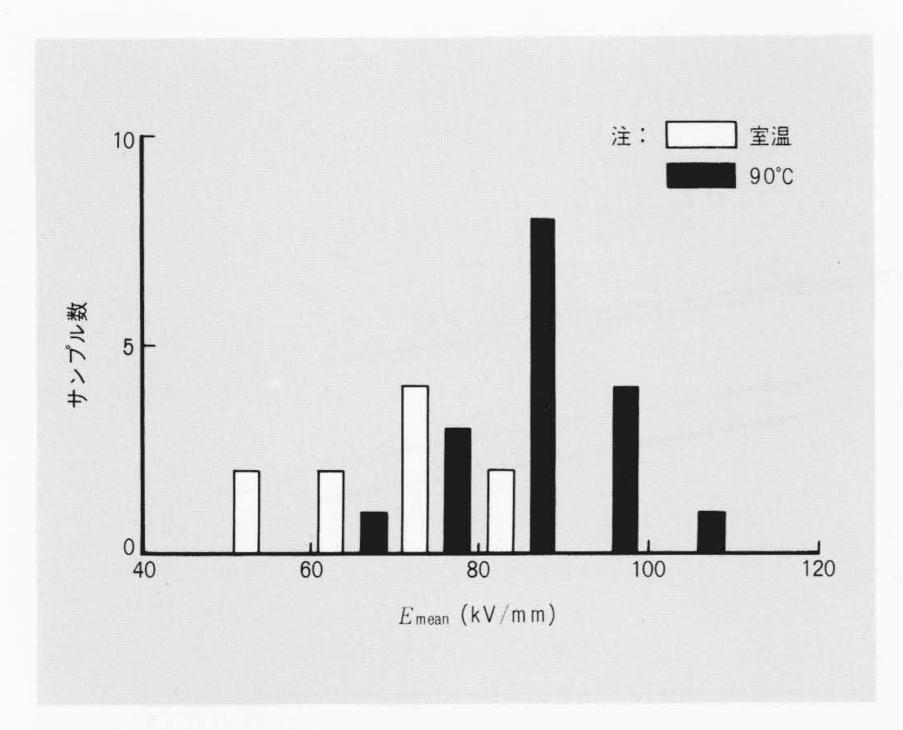
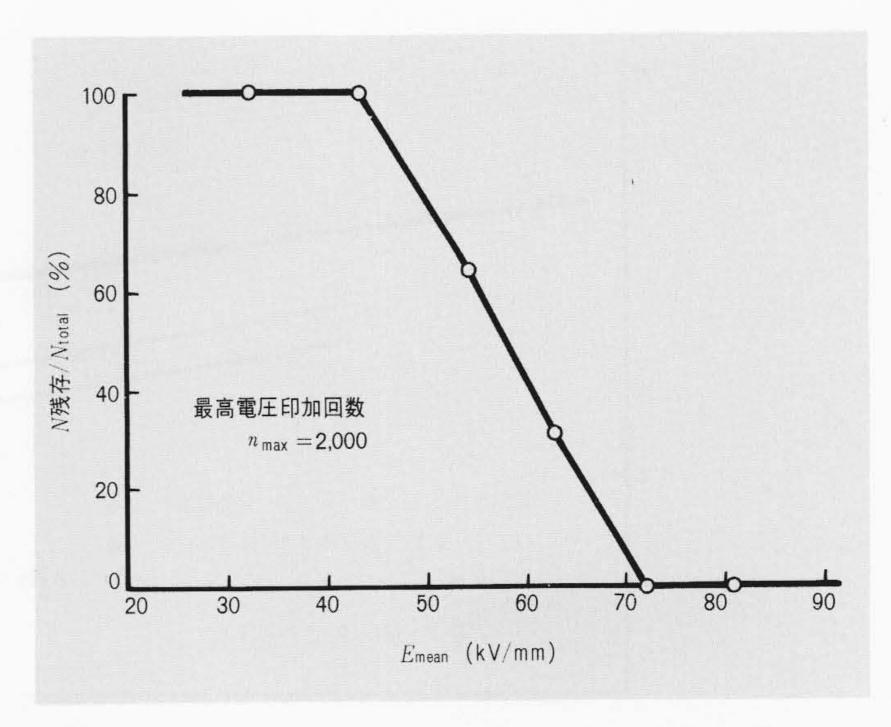


図 4 雷インパルス破壊の温度特性 90°C における雷インパルス破壊のE mean値は、室温におけるE mean値よりも低く、平均値(E mean)で比較した比はほぼ1.2となる。



(V-n特性)と交流課電下の劣化特性である。E-E形ケーブルを対象にこれらについて述べる。

3.1 CVケーブルの雷インパルス疲労劣化とV-n特性

CVケーブルではケーブルの破壊ストレス以下の雷インパルス電圧が繰り返し印加されると、ケーブルが絶縁破壊をひき起こす。この現象は押出成形絶縁体から成るゴムプラスチック ケーブルに特有のものであり、印加電圧Vと印加回数nとの関係、すなわちV-n特性と劣化限界ストレス E_∞ を把握することが実用上重要である。 \mathbf{Z} 5 は水蒸気架橋法で製造した $\mathbf{Z}\mathbf{Z}$ 66k \mathbf{V} の \mathbf{E} - $\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{F}$ ケーブルを用い、最高 \mathbf{Z} ,000回まで雷インパルス電圧を課電する実験を行なって得た \mathbf{V} - \mathbf{N} 特性である。この結果から明らかなように、 \mathbf{E} - $\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{F}$ ケーブルの \mathbf{V} - \mathbf{N} 特性は、内外部半導電層が共に導電性テープから成る \mathbf{T} - $\mathbf{T}\mathbf{E}\mathbf{F}$ ケーブルに比べて高ストレス側に位置している。 \mathbf{Z} 6 は電圧印加回数

2,000回でも絶縁破壊せずに残存した② 5 の供試料のパーセンテージ (N残存/N全試料)を求め、課電ストレスEmeanとの関係として示したものである。これより、繰返し雷インパルス課電によっても劣化を生じない劣化限界ストレス E_∞ は、水蒸気架橋ケーブル (E-E形ケーブル) の場合45~50kV/mmと推定できる。ちなみに、②5中の文献デー<math>97 によれば E_∞ ~40kV/mmとなる。

この劣化限界ストレスは、ケーブルの絶縁性能と密接な関係があり、雷インパルス破壊ストレスの高いケーブルでは一般に高レベルにある。実際、雷インパルス破壊ストレスの高い22kV CVケーブル(絶縁厚 $6.0 \, \mathrm{mm}$)の実験データでは $E_\infty = 80 \, \mathrm{cm}$ $90 \, \mathrm{kV/mm}$ という値が得られている 80 。

3.2 C V ケーブルの交流課電劣化と V-t 特性

CVケーブルの交流電圧長時間課電下での劣化特性は、印

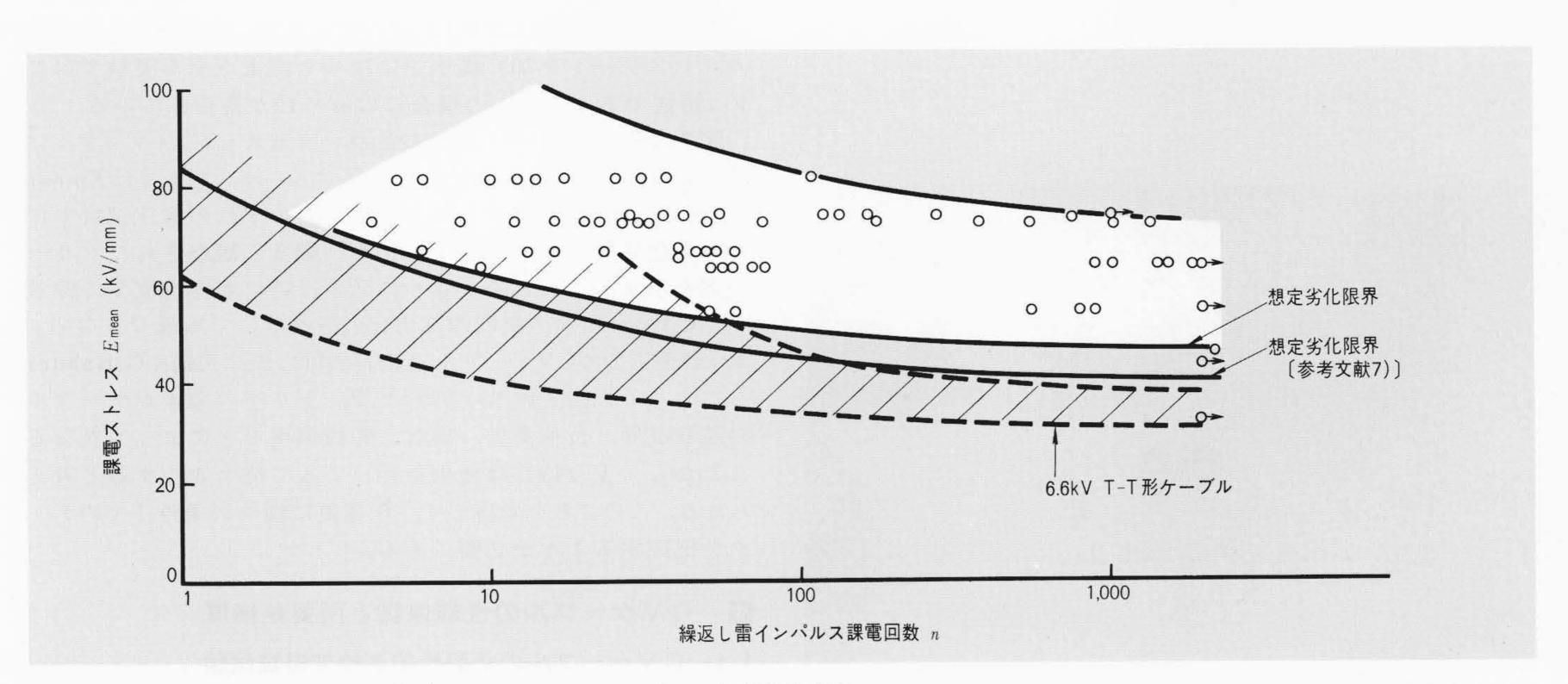


図 5 E-E形CVケーブルのV-n特性(22~66kV CVケーブル,水蒸気架橋) E-E形ケーブルのV-n特性は,T-T形ケーブルに比べて高ストレス側に位置している。E-E形ケーブルの劣化限界ストレス値は,ほぼ45 kV/mmと推定できる。

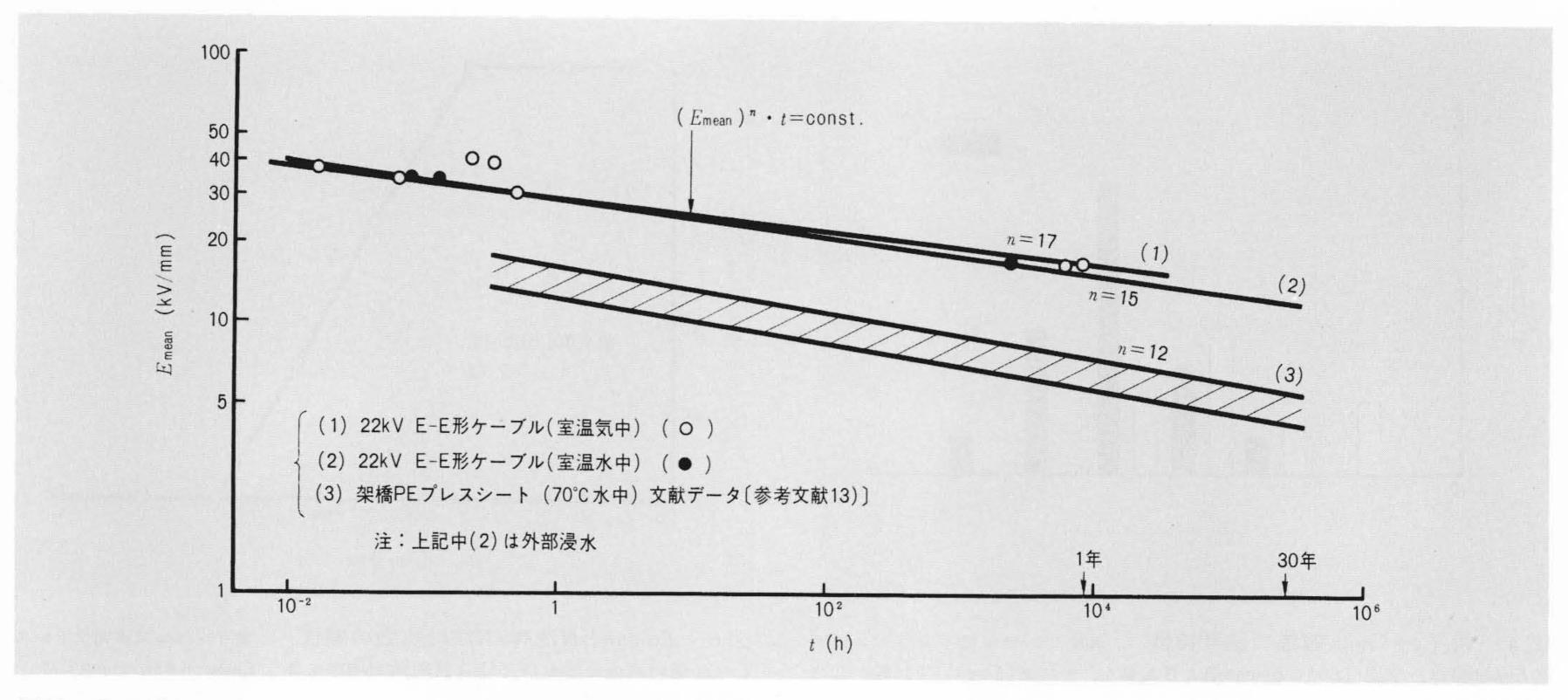


図 7 E^-E 形ケーブルの V^-t 特性 V^-t 特性を $(E_{mean})^n \cdot t = const.$ と表わしたときの指数nの値は、 $12 \sim 17$ となる。いずれの場合もn > 9となり、9乗則は成立していない。

加電圧Vとその電圧下での寿命 t の関係を示すV-t特性で特徴づけられるが、このV-t特性は交流課電下でCVケーブルに生ずる劣化の機構と密接に関係している。CVケーブルの交流課電劣化の原因として、

- (1) 部分放電
- (2) 電気的トリー
- (3) 電気化学的トリー(水トリー, 化学的トリー) などが挙げられ、これらの劣化原因に特有のV-t特性を示す

などが挙げられ、これらの劣化原因に特有のV-t特性を示すと考えることができる。V-t特性は、一般に次の実験式で表わされることが多い。

ここに V:課電電圧

t :寿命

n:材料, 劣化機構で定まる定数

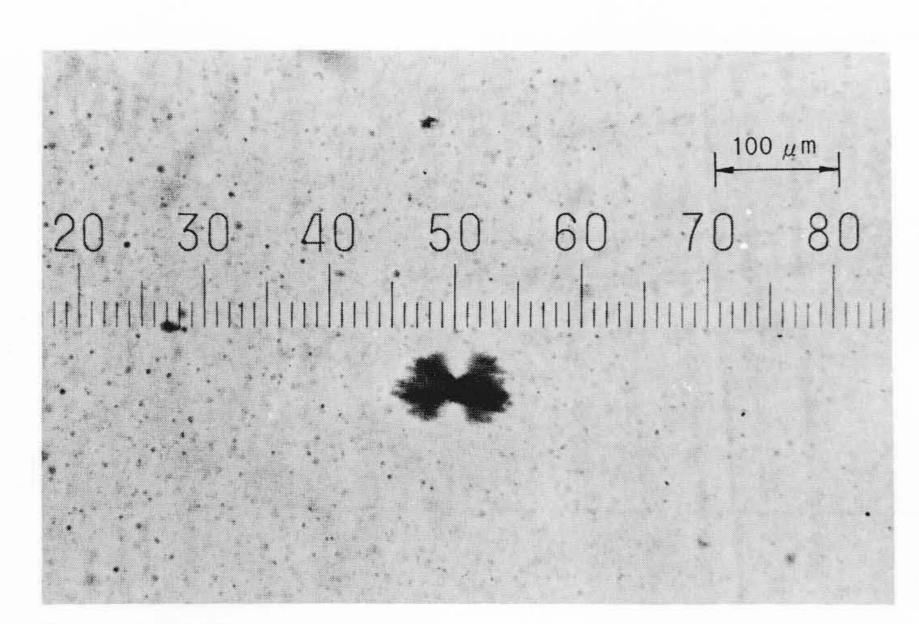


図8 劣化試料中に生じたボータイトリー 水中浸せきで長時間課電した22kVケーブル中に生じたボータイトリーの例である(Emean値=16.6kV/mm)。

(1)式中の指数nについては、ポリエチレン ケーブルに関するJ.M.Oudinらの実験データ 9)に基づいてn=9と考えるのが通例であり、原材料の同じCVケーブルの場合もこの「9乗則」が一般に採用されている。しかし、E-E形ケーブルでは必ずしもこの劣化の「9乗則」が当てはまってはいない。例えば、R.Jocteurらは絶縁厚の厚いポリエチレン ケーブル($66\sim225$ kV)の場合V-t特性は $E^{17\sim25}\cdot t=const.$ (この場合、E:課電ストレスEmax.)であると報告しており 10 , E.Occhiniや金子らもn>9であることを報告している 11 , 12 。

図7は筆者らの実験データであり、22kV E-E形水蒸気架橋 CV_{τ} V_{τ} V_{τ}

図7のデータはいずれも比較的高い課電ストレス(ケーブルに対してはEmean > 16.6 kV/mm,プレスシートに対してはEmean > 5.0 kV/mm)下で得たものであるが,いずれの劣化試料中にも電気化学的トリーが観察された。図8に観察されたトリーの例を示す。これらのトリーの発生は特に水中課電下で顕著で,CVケーブルの交流課電劣化の機構として無視できない。水中課電下でのCVケーブルのV-t特性は,既に長崎やG.Bahderらによって報告されているが $^{14)$, $^{15)}$,トリーの発生がケーブルの運転電界,負荷条件,温度,布設環境などによって異なることから,V-t特性は使用条件によって種々変化すると考えられる。このことを考慮して,今後更に種々の条件下でのデータを把握することが必要である。

4 CVケーブルの性能保証と所要絶縁厚

4.1 CVケーブルの必要性能と性能保証試験

CVケーブルの絶縁厚設計に当たっての必要性能は、その設計耐用年限中(-般に30年)にケーブルが遭遇すると予想される次の諸特性で決定される。

- (1) 常規対地電圧課電下での経年劣化特性
- (2) 系統に発生する商用周波持続性異常電圧の影響
- (3) 開閉過電圧の影響
- (4) 系統に侵入する雷過電圧の疲労劣化特性

上記要因のうち、開閉過電圧による影響については、実際のケーブルの開閉インパルス破壊強度がBIL値(標準雷インパルス電圧に対する系統の所要絶縁強度)よりも高く、しかも系統に発生する電圧(常規対地電圧の4倍以下でBIL値の50%相当)に対し余裕があることから、標準雷インパルスに対する特性を確認しておけば性能保証ができると考えてよい⁷⁾。

以上から,必要性能としては交流強度〔上記(1),(2)〕及び雷インパルス強度〔(4)〕の2種が対象となる。

4.1.1 インパルス破壊強度に対する必要性能と性能保証試験

ケーブル系統に発生を予想される雷過電圧は、回路条件によって異なりBIL値を超過する場合も考えられるが、絶縁協調の面から保護対策がとられているので、基準となる電圧としてはBIL値を適用するのが妥当である。したがって、必要性能は耐用年限中BIL値に相当する雷過電圧に耐えることである。このような雷過電圧の侵入回数としては、最大2,000回をみればよい。

一方、BIL値に温度低下を見込んだ電圧でのストレスが、 E_{∞} 以下である限り3.1で記したように、雷インパルスによる劣化は生じないといえるわけであるが、現在の基準では交流電圧とインパルス電圧の重畳などの劣化を勘案して、経年劣化に対する裕度を10%考慮している。

以上により、雷インパルス電圧に対する性能保証試験電圧を求めると**表1**のようになる。ただし、温度係数として1.25、不確定要素に対する裕度として1.1、及び劣化係数として1.1をそれぞれとった。

4.1.2 交流破壊強度に対する必要性能と性能保証試験

交流電圧に対しては設計耐用年限(想定寿命)中に,常規対 地電圧及び系統に発生する持続性過電圧に耐えることが必要 である。

ケーブル使用状態ではこの両者が重畳するわけで、劣化の 形態は複雑であるが、前述のV-t特性のn乗則を基本とした L.Simoniの累積劣化則 16 により寿命の減少を検討してみると、 過電圧が寿命に及ぼす影響はわずか0.03~0.3%にすぎないので、想定寿命中に商用周波過電圧が加わっても実使用上の問題はないと推定される。

以上の検討より交流強度に対しては、耐用年限中常規対地電圧に耐えればよいことになるが、実際の製品では出荷時にこのことを短時間に確認するための試験を実施する必要がある。ここで再びn乗則を使用して、種々のnの値に対して初期保証試験値を求め、その結果を表1に示す。ただし、温度係数と不確定要素に対する裕度としてRPT推奨案に採用されている値(それぞれ1.1)及び劣化係数としては想定寿命を30年として初期試験時間1時間に対する値を使用した。

nの値としては一般に9が用いられているが、最近の実測データ¹⁰⁾及び筆者らが得ているデータ(図7)によれば、n=12とみればよいと考える。

なお、出荷全製品について行なう枠試験値としては、持続 性過電圧を保証するための電圧値とするのが妥当であろう。

4.2 CVケーブルの所要絶縁厚の考察

4.1で述べた必要性能を満足するような絶縁厚は、次式で求められる。

(1) 雷インパルス電圧に対する所要絶縁厚(W_{IMP})

雷インパルス電圧に対してはこの W_{IMP} で与えられる厚さまで絶縁厚を低減することが可能である。

(2) 交流電圧に対する所要絶縁厚 (WAC)

ここに (2)~(4)式で,

 $V_T(IMP)$: 雷インパルス試験電圧値

 $V_T(AC)$: 交流試験電圧値

E_D: 設計ストレス

α:温度係数

破壊値分布にワイブル分布を当てはめたときに最低値が存在するものと考えると,最低値はワイブル分布の位置パラメー

表 I CVケーブルの性能保証試験値 雷インパルス電圧と交流電圧試験値を、劣化特性を考慮して 算出したものである。

項目 要素 配圧(kV)	雷インパルス試験(試料)		交流試験(試料)			
	BIL (kV)	試験電圧 V _T (IMP) (kV)	V_0 * (kV)	試験電圧 $V_T(AC)$ (kV)		
				n = 9	n = 12	n = 15
22	150	228	13.28	65	46	37
33	200	304	19.92	97	69	56
66	350	532	39.84	193	137	111
77	400	608	46.48	225	160	130
154	750	1,140	92.95	450	319	259
275	1,050	1,596	165.99	804	569	462

注: * 対地最高電圧 RPT推奨案 gE_L で与えられるので、 E_D としてはこの最低値 E_L を用いることができる。この考え方によれば、サンプル試験により全長の性能をある程度保証できる。

一例として、E-E形水蒸気架橋ケーブルについて絶縁厚を求めてみると**図9**のようになる。ここで、 E_D としては**図2**、3及び最近のデータ¹⁷⁾を参照し、絶縁厚効果をも考慮に入れ E_D (IMP) = $50 \mathrm{kV/mm}$, E_D (AC) = $20 \mathrm{kV/mm}$ とした。また E_∞ = $45 \mathrm{kV/mm}$ とした。

図9より、現在の標準厚はほぼ妥当なところにあるといえる。なお、ガス架橋ケーブルでは破壊値の分布、V-n特性の下限が共に水蒸気架橋ケーブルに比べ高ストレス側に位置するので、更に絶縁厚を低減できる可能性がある。

5 結 言

CVケーブルの絶縁性能と課電劣化特性について述べ、このケーブルの特徴を明らかにするとともに、性能保証試験や絶縁設計について論じた。主な結論を要約すれば次のとおりである。

- (1) CVケーブルの絶縁性能は、ケーブル構造や製造履歴によって異なり、乾式架橋法の一つであるガス架橋法で製造したE-E形ケーブルは交流、雷インパルスとも高いEmean値を示す。
- (2) CV_{τ} ーブルは一定ストレス値以上の雷インパルス電圧が繰返し印加された場合や、交流電圧長時間課電下で絶縁体が劣化しケーブル性能が低下する。この劣化特性を特徴づけているのはV-n特性、及びV-t特性であり、これより、雷インパルス疲労劣化の劣化限界 E_{∞} やn乗則の指数nを求めることができる。E-E形水蒸気架橋ケーブル、及び架橋ポリエチレンプレスシートの実験データから E_{∞} = $45\sim50\,\mathrm{kV/mm}$, $n=12\sim17$ が得られる。
- (3) CV_{τ} で の性能保証試験の試験電圧や合理的な所要 絶縁厚はケーブルの初期絶縁性能や課電劣化特性に基づいて決定することができる。実験で得た V_{t} 特性と V_{t} 特性と V_{t} を考慮して算定した CV_{τ} で の所要絶縁厚と現行の標準絶縁 厚はほとんど異ならず、現行の標準設計絶縁厚は妥当な値であると言える。

なお、本稿中のV-t特性に関する実験データは、比較的高電界下で得られたものである。ケーブルの使用電界付近での劣化機構を解明し、nの値を明らかにすることが今後に残された大きな課題である。

参考文献

- W.A.Del Mar: "Electric Stresses in Cables", AIEE Trans. pt. 3, 81, 10, 1111(1960)
- 2) 水上, 依田ほか:「ガス架橋法による架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能」, 電学論文誌A, 94-A, 7, 281, (昭49-7)
- 3) 長崎, 川崎ほか:「米国PPL納入, 138kV PEXケーブルおよび付属品について」, 住友電工, 106, 1(昭47-5)
- 4) 金子,春田ほか:「MDCVプロセスによる超高圧架橋ポリエチレンケーブルの絶縁特性」,大日事報,57,59(昭49-4)
- 5) 鹿間, 高岡ほか:「新架橋方式で製造したCVケーブル(FZ-CVケーブル)の特性」, 昭和51電学会全国大会No.1090
- 6) 高橋,川神ほか:「架橋ポリエチレン中のミクロボイドの絶縁性能に及ぼす影響」第7回電気絶縁材料シンポジウムIII4 (昭49-9)
- 7) 電気学会RPT委員会編:「特高圧(11~77)kV架橋ポリエチレンケーブルの高電圧試験法に関する推奨案」及び「同上推奨案付録」(昭50-6)

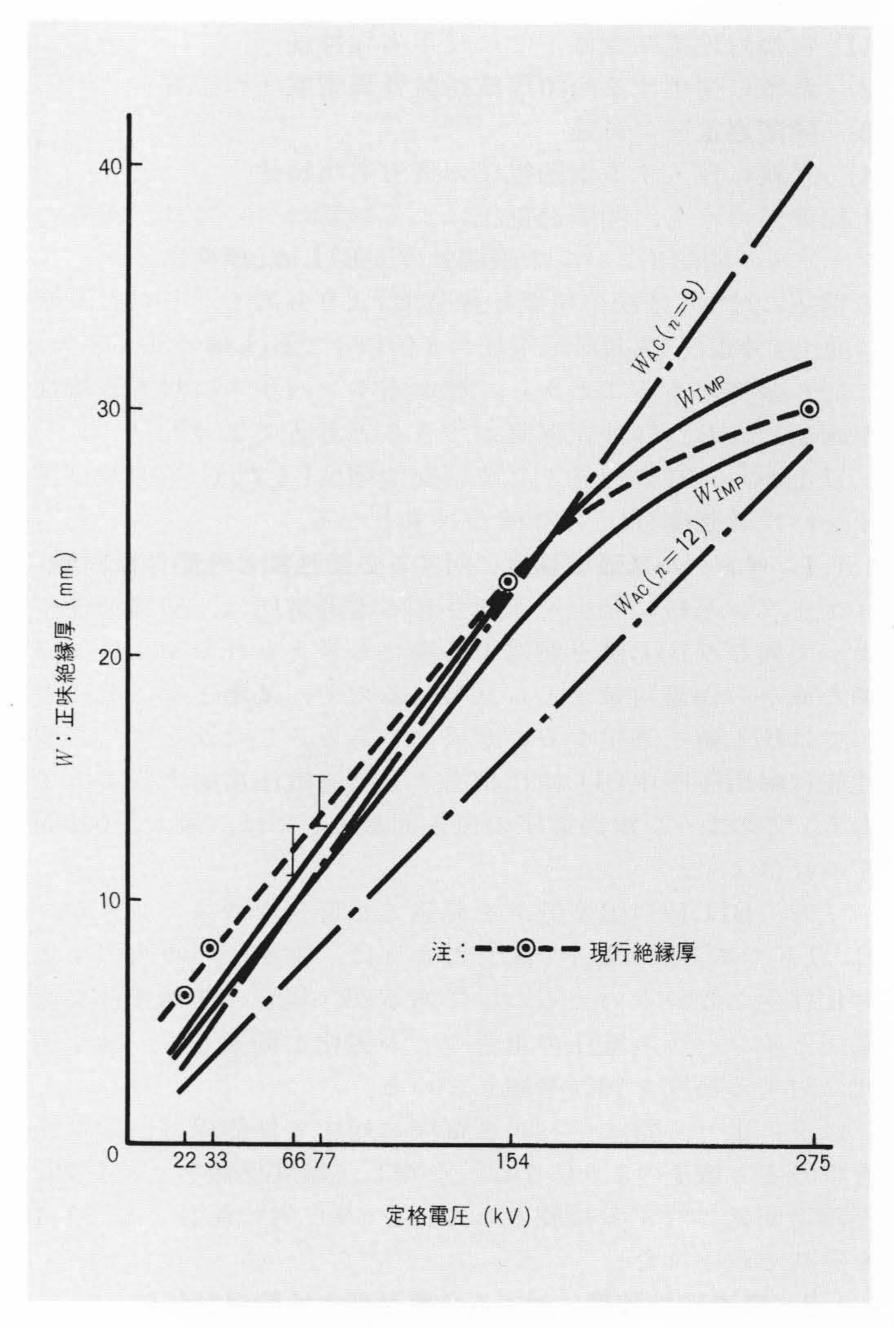


図 9 所要絶縁厚の計算例(水蒸気架橋の場合) 9乗則では,電圧が高くなると非常に絶縁厚を大きくしなければならなくなる。

- 8) T.Mizukami et al: "Insutation Properties of Cross-linked Polyethylene Cables Cured in Inert Gas" IEEE Transactions on P.A.S. PAS-94, 2, 467(Mar./Apr. 1975)
- 9) J.M.Oudin et al: "The Use of Thermoplastic Insulating Material in the Manufacture of Extra High Voltage Cables for DC and AC," CIGRE 209 (1962)
- 10) R.Jocteur et al: "Research and Development in France, In the Field of Extruded Polyethylene Insulated High Voltage Cables", CIGRE 21-07 (Aug. 1972)
- 11) E.Occhini: "A Statistical Approach to the Discussion of the Dielectric Strength in Electric Cables" IEEE Transactions on P.A.S., PAS-90, 6, 2671(1971)
- 12) 金子ほか:「長期間使用後のE-Vケーブルの絶縁特性(2)(寿命の統計的考察)」, 昭和47電学会全国大会No.862
- 13) 依田, 目崎ほか:「架橋ポリエチレンの課水加電特性」, 電気 評論, 58, (2), 50 (昭48-2)
- 14) 長崎ほか:「架橋ポリエチレンケーブルの浸水課電劣化について(内外半導電層の検討)」, 昭和47電学会全国大会No.818
- 15) G.Bahder, C.Katz: "Treeing Effects in PE and XLPE Insulation"1972 Anual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena" pp.190
- 16) L.Simoni, G.Pattini: "A New Research into the Voltage Endurance of Solid Dielectrics", IEEE Transactions on Electrical Insulation E1-10, 1 (Mar. 1975)
- 17) 飯塚,小杉:「高電圧CVケーブルの試験法の現状と問題点」, 昭和50電四学会連合大会No.21