

6 kV地中配電用ケーブル

Cables for 6kV Underground Distribution Lines

This report introduces the development of heat-resistant cross-linked polyethylene (XLPE) for large load distribution systems based on the study to meet the recent tendency in 6 kV underground distribution. In the study a long term heat cycling test was conducted on AL conductor cables yielding valuable design data. In a survey on its performance the newly developed heat-resistant XLPE was applied to the insulation of the cables for long-term load cycling tests, and it was confirmed that this new insulation material can be used at maximum conductor temperature ratings, 110°C (operating) and 130°C (emergency.)

齊藤 栄喜* Eiki Saitō
塚越 博康* Hiroyasu Tsukagoshi
村木 浩二** Kōji Muraki
佐藤 祈美男** Kimio Satō
水谷 禎男*** Michio Mizuya
塙 勝利*** Katsutoshi Hanawa

1 緒 言

6 kV高圧地中配電系統は、電力需要の増大に伴います重要度が増加し、その形態も複雑多岐になりつつある。筆者らは6 kV地中配電用として適したケーブル形態について検討を加え、トリプレックス形（単心3個より形）ケーブルがすぐれていることを検証してきた⁽¹⁾。

最近の顕著な傾向は、負荷の増大による系統の大容量化がある。このため、ケーブル構成材料や構造を含めて総合的に見直しをして行くことが必要である。さらに6 kVで使用電界は低いといえども、水トリ劣化現象⁽²⁾などの要因をも考慮して上記の傾向に対処しなければならない。

本稿はアルミ導体ケーブルの熱伸縮ならびに今回開発した耐熱架橋ポリエチレンケーブルの特性を中心に6 kV地中配電ケーブルの全般につき最近の検討結果をとりまとめ報告するものである。

2 6 kV地中配電ケーブルの動向

図1は最近の配電系統の動向を概念的に示したものである。このうち、大容量化に対する手段としては、

(1) 導体サイズを大きくする。

(2) 耐熱絶縁材料を使用する。

が考えられる。(1)はケーブルの電流容量増大に対する最も簡単な方法であり、すでに現場ではトリプレックス形500～600 mm²ケーブルも一部に使用されているが、ケーブル外径や重量が従来の250～325 mm²に比較して極端に大きくなるため、その取扱いに関して製造技術面はもちろん、布設時のケーブル運搬および適用管路の選定など、慎重な施工管理が要求される。したがって、後者のアプローチ、すなわち導体許容温度（現在の架橋ポリエチレン絶縁体の温度定格は常時90°C、短時間過負荷時105°Cである）を上げることが有効である。もちろん、この場合ケーブルの形状、しゃへい層の構造面からケーブルの構造を見直すことが必要である。形状自体はトリプレックス形ケーブルが適していることは明らかである⁽³⁾。

図2は一例として短時間過負荷温度定格を130°Cとしたときの電流容量（短時間定格）を求めたものである。大容量系統では短時間定格でケーブルサイズが決定することが多く、この点現在の105°Cを130°Cにすることはかなり有効であることがわかる（同一容量に対しては、2サイズ小さいケーブルで良い）。

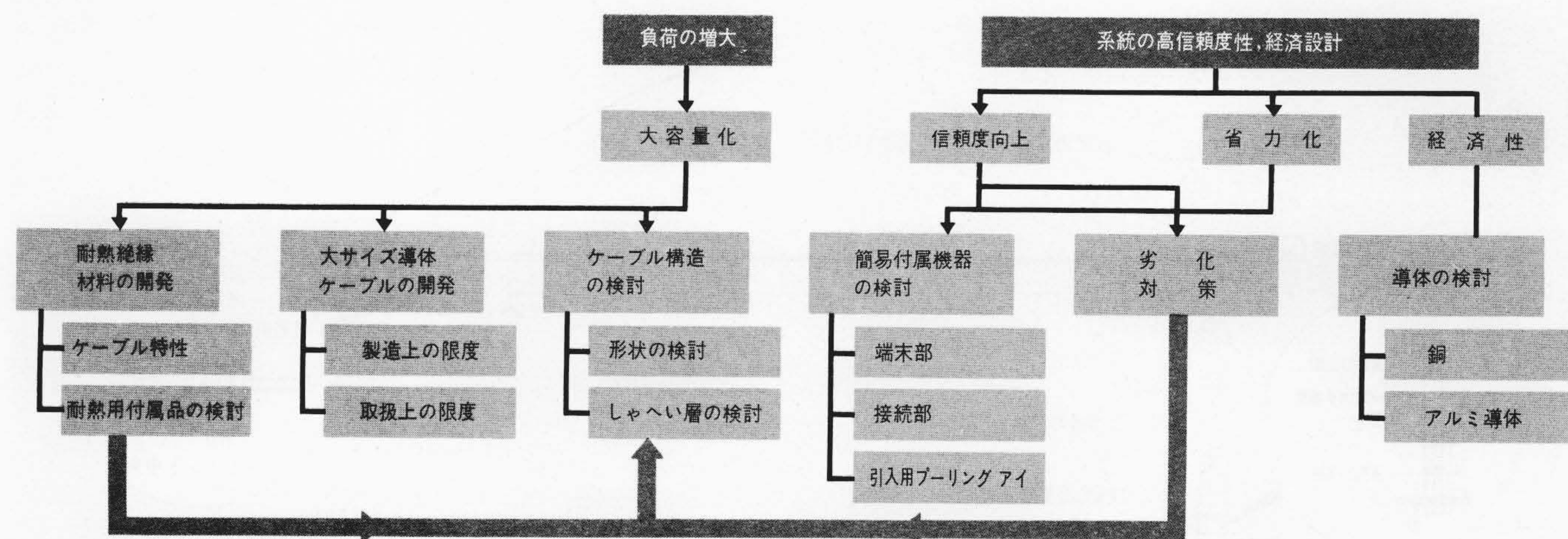


図1 6 kV地中配電ケーブルの動向 負荷増大、信頼度の向上、経済性など総合的な検討を進める必要がある。

Fig. 1 Tendency of 6 kV Underground Distribution Cables

* 東京電力株式会社

** 日立電線株式会社日高工場

*** 日立電線株式会社研究所

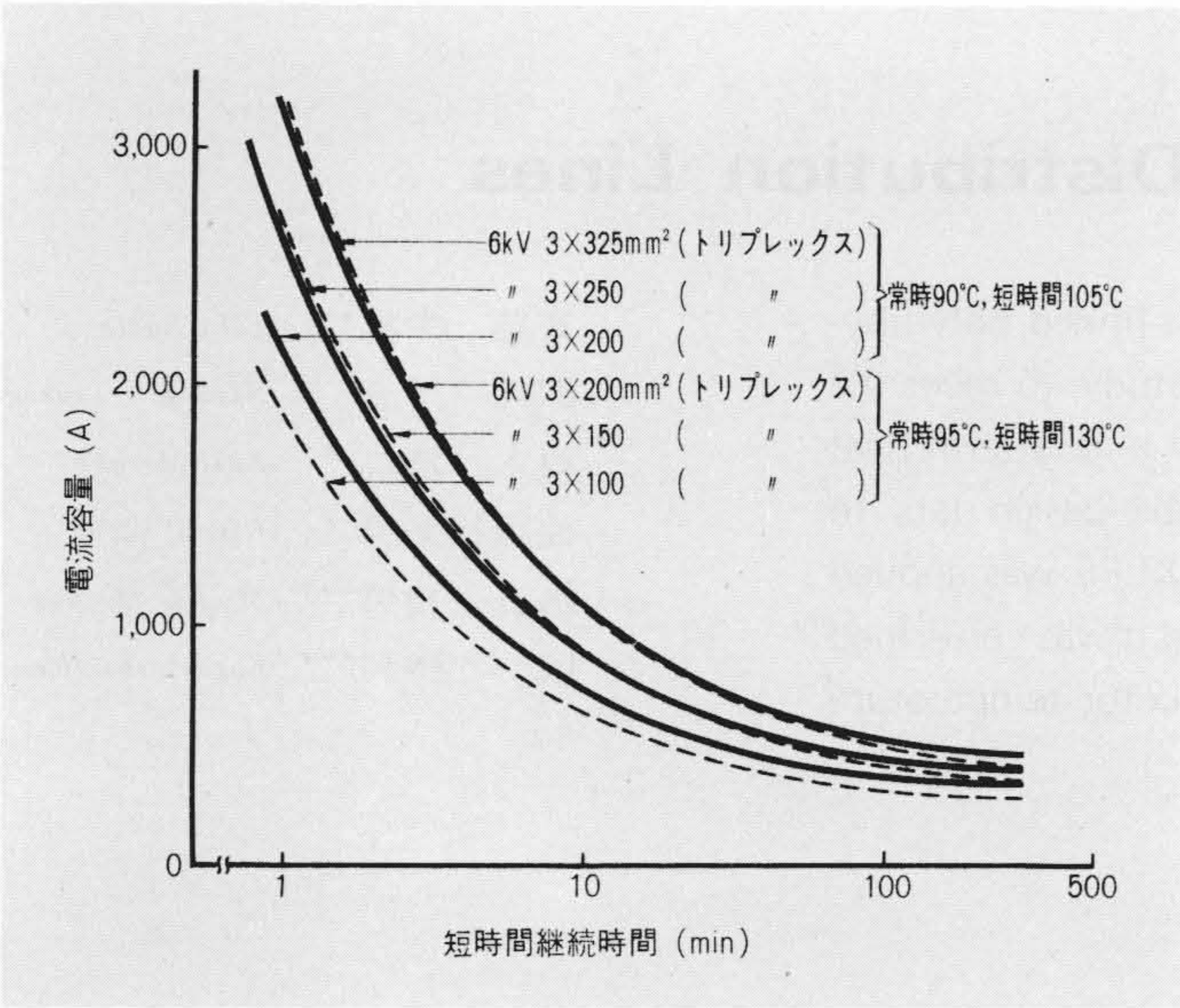


図2 短時間許容電流計算例 許容温度を上昇すればその効果は大きい。
Fig. 2 Examples of Short-Time Overload Ampacity Calculation

次に信頼性の面では、ケーブルのみならず付属品についても考慮しなければならない。この点省力化の問題と関連して差込形接続部などの簡易接続部が開発されている。本件については別に報告したい。

3 導体の検討

ケーブルの導体には通常銅が用いられているが、アルミ導体とすることによる導電率の低下が大容量化の傾向と相対するが、取扱い性(軽量)、経済性の点から、使用量の多い低～高压地中ケーブルの導体として適していることは確かである。しかしアルミ導体の場合、銅よりも線膨張係数が大きい(約1.35倍)ので、布設後の運転時の熱伸縮現象にやや懸念もある。従来この問題に対する検討例が少ないため、今回模擬管

路による長期通電試験を実施した。その結果を次に述べる。

3.1 供試試料と布設ルート

供試試料は表1に、実験ルートは図3に示すとおりである。ルート全長は約100mであり、内径100φのヒューム管を使用し、中間にはハンドホール部を設け、ここに直線接続部を組み立てて砂埋めした。一方、ルート片端には高さ10mのコンクリートポールを立て架空線への立上りを模擬してあり、布設時の総合的作業性も検討できるように考慮した。

なお、ケーブル引入れ、装柱はきわめて容易であり、張力の実測結果から求めたケーブルと管路との摩擦係数は約0.4であった。ポールへの装柱状況は図4に示すとおりである。

3.2 通電時のケーブル各部の温度変化

ヒートサイクルは管路部(図3のBとC部)の導体温度を3時間で90°Cに上昇させ計8時間通電し、その後16時間停止しこれを1サイクルとし、50サイクルまで実施した。その結果、コンクリートポール立上り部鉄管内(図3のA部)の導体温度が100°C近くになり、この部分が熱的に弱点となることが判明した。この問題を解決するために鉄管の上下にそれぞれ100mm×80mmの窓(通気孔)を設け、窓の有無による温度上昇の差を調べた。結果は図5に示したとおりで、窓を開放す

表1 供試試料 関連付属品も新しいタイプのものを使用している。
Table 1 Cable and Accessories Served for Long Term Heat Cycling Test

分類	試料	仕様
ケーブル (6kV)	アルミ導体サイズ	250mm²(圧縮円形)
	形状	トリプレックス形CV*
	線心外径	35mm
	より合せ外径	74mm
	重量	4.64kg/m
付属品	ケーブルヘッド	耐塩害形(コンクリートポール側)
	直線接続部	差込形

注：* 架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース電力ケーブル

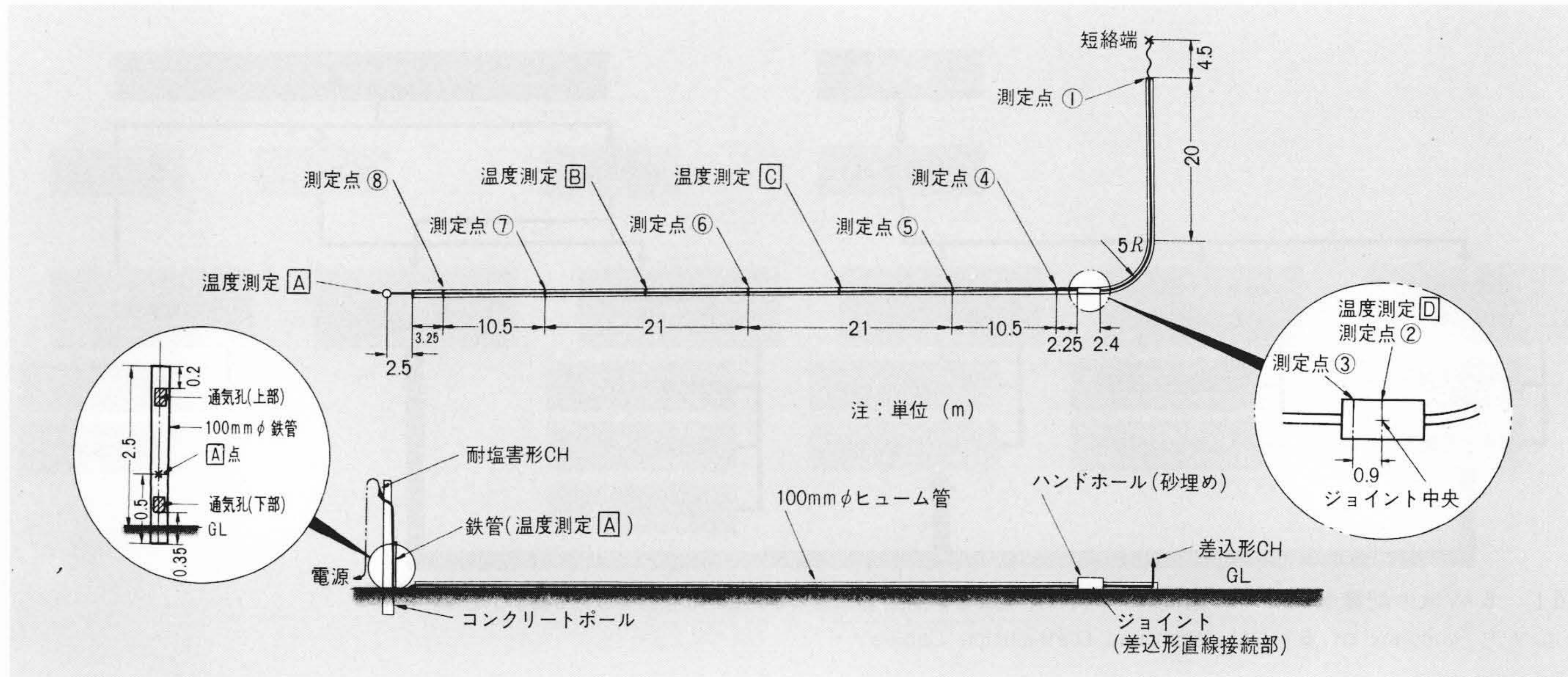


図3 実験ルートと測定点説明図 ルート各部の温度、挙動が観察できるようにしてある。
Fig. 3 Schematic Figures of Cable Route and Observation Points



図4 アルミ導体CVケーブルの布設
装柱状況 軽量のため布設、装柱作業性は良好である。

Fig. 4 Installation of Al Conductor CV Cable

れば導体温度は96℃から80℃へ16℃低下し、管路部より温度を低くできることが確認された。

3.3 ケーブルの熱伸縮

ヒートサイクル中、朝（通電前）、昼（導体温度が最高に到達したとき）、夕（通電停止直前）の3回、図3の各部のケーブル移動量、周囲長さの変化を測定した。移動の状況は図6に示すとおりで同図から次のことがいえる。

- (1) ケーブルの1日の移動量は、ルート両端（測定点①⑧）で大きく約18～25mmであるが、直線部の中央（測定点⑥）ではほとんど移動していない。ケーブル周囲長さの変化はこれとは逆に測定点⑥では線心の「笑い」（通電の温度上昇に伴い、ケーブル線心が半径方向にふくらみ中央部にギャップが生ずる現象）が観測された。
- (2) ルート直線部中央に向かってケーブルが少しずつ収縮する現象がみられる。図6の①⑧の「朝」の測定点に着目すると、17サイクルまでで30～35mm収縮していることがわかる。この値は、50サイクル後もほぼ同一であり飽和している。
- (3) 15サイクル以降、ポール側の管路口でケーブルをクリートで固定した。その結果、固定端側の測定点⑦⑧の移動量が極端に小さくなり、クリートの押え効果が明確である。また固定した影響は管路口から約15mまでで、それから奥の部分はほとんど影響を受けていない。

3.4 実験結果の検討

(1) ケーブル伸び出し量の検討

図6からケーブルの伸び出し量を20mmとして、不動域が存在する場合の一般的計算式^(*)からケーブルのヤング率を求めると（温度変化を85℃として）約50kg/mm²となった。この値は短尺サンプルを機械的に圧縮して求めた見掛けのヤング

(*) 不動域が存在する場合、移動量 m は次式で表わされる。

$$m = \frac{AE}{4\mu w} \left(\alpha t - \frac{K}{AE} \right)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 A ：ケーブル導体断面積 t ：温度変化
 E ：ケーブル弾性係数 K ：管路口拘束力
 （ヤング率） μ ：摩擦係数
 α ：線膨張係数 w ：ケーブル単位重量

温度測定点	導 体	絶縁体	シース
A部(立上り鉄管部)	①	②	③
C部(管路部)	④	⑤	⑥
D部(ジョイント)	⑦	⑧	⑨
大気温	⑩		

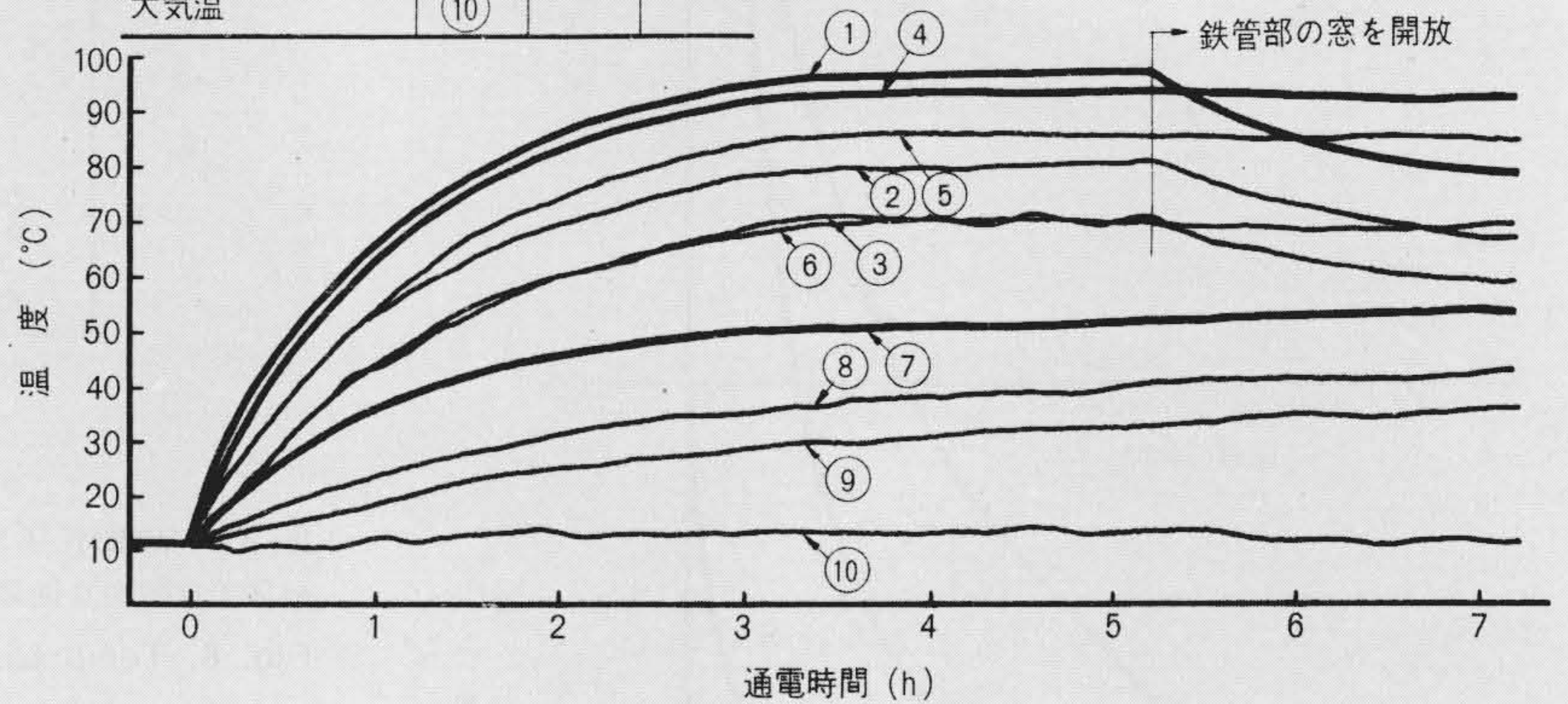


図5 各部の温度変化と鉄管部の窓の効果
窓を開放することにより、鉄管部の温度は管路部と比べて低くすることができる。

Fig. 5 Temperature Change of Each Part

率とよく一致している。すなわち、トリプレックス形ケーブルは膨張に対しては半径方向に線心が広がる（笑う）現象があるためにヤング率が小さく、伸び出し量が非常に少ないといえる。ただし、このヤング率はケーブル絶縁体厚さによって影響を受け、66～77kV級では約500 kg/mm²となる。

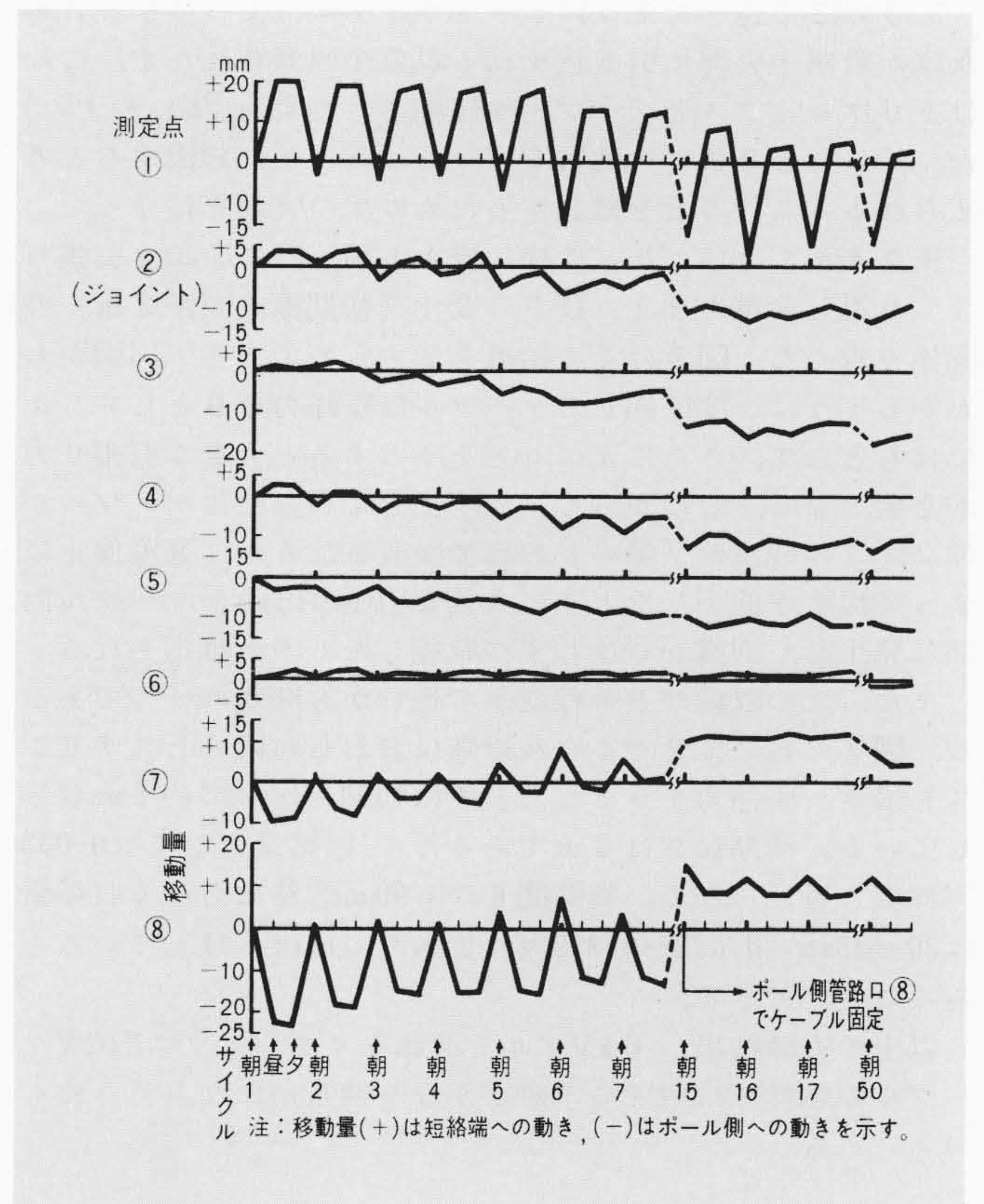


図6 ケーブルの移動量の測定 両端部が中心に向かってわずかではあるが動いている点は興味ある現象である。

Fig. 6 Measurement of Cable Movement by Heat Cycling

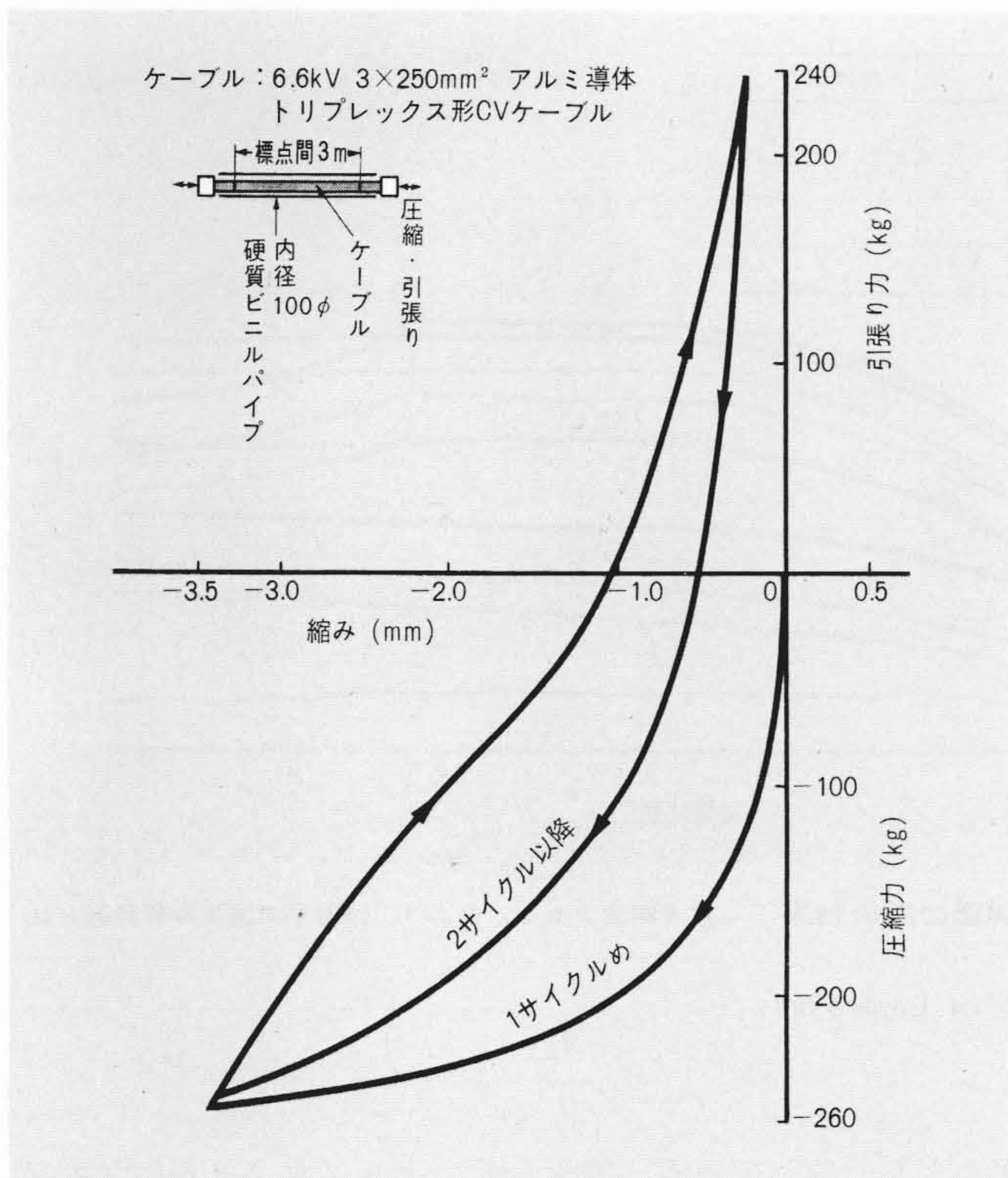


図7 ケーブルの圧縮、引張りくり返し試験結果 圧縮したケーブルを元にもどすには非常に大きな力を必要とする。

Fig. 7 Test Results of Compression & Pulling of Cable

(2) ケーブル収縮に関する検討

3.3の(2)で述べたようにヒートサイクルによってケーブル両端が管路中央部に引き込まれる現象が観測されたが、これはトリプレックス形ケーブルが圧縮されやすい(笑いやすい)が、元にもどりにくい性質を持っていることに起因すると考えられる。このことを確認するために次の実験を行なった。

長さ4mのケーブル(仕様は表1と同一)に圧縮、引張りのくり返し荷重を加え、長さの変化(初期標点間距3m)の関係を求めた。図7はその結果を示すものである。同図からわかるように一度圧縮したケーブルは圧縮力を0としても元にはもどらず、さらに元にもどそうとすると大きな引張り力が必要となる。したがって、温度上昇でいったんケーブルが伸び、この伸びが「笑い」の形で吸収されると、通電停止によって温度が低下したときに大きな引張り応力がケーブル内部に発生し、両端から少しずつ収縮したものと推定される。

また、この収縮がどの程度まで進むかも問題の一つであるが、図7において2サイクル以降はおおむね同一ヒステリシスを描き、圧縮力を0としたときは初期と比べて約1mm収縮している。初期長さは3mであるので、収縮量としては0.033%程度と考えられる。実際図6から90m管路における収縮量は30~35mm(0.033~0.039%)であり、ほぼ一致しているといえる。

以上の実験結果、6kVアルミ導体トリプレックス形CVケーブルの熱伸縮に対する挙動がかなり明らかになってきたものといえる。

4 絶縁体材料の検討

大容量化に対処するには、絶縁体材料の耐熱性を向上させるのが有効な手段であることは前述のとおりである。現在使

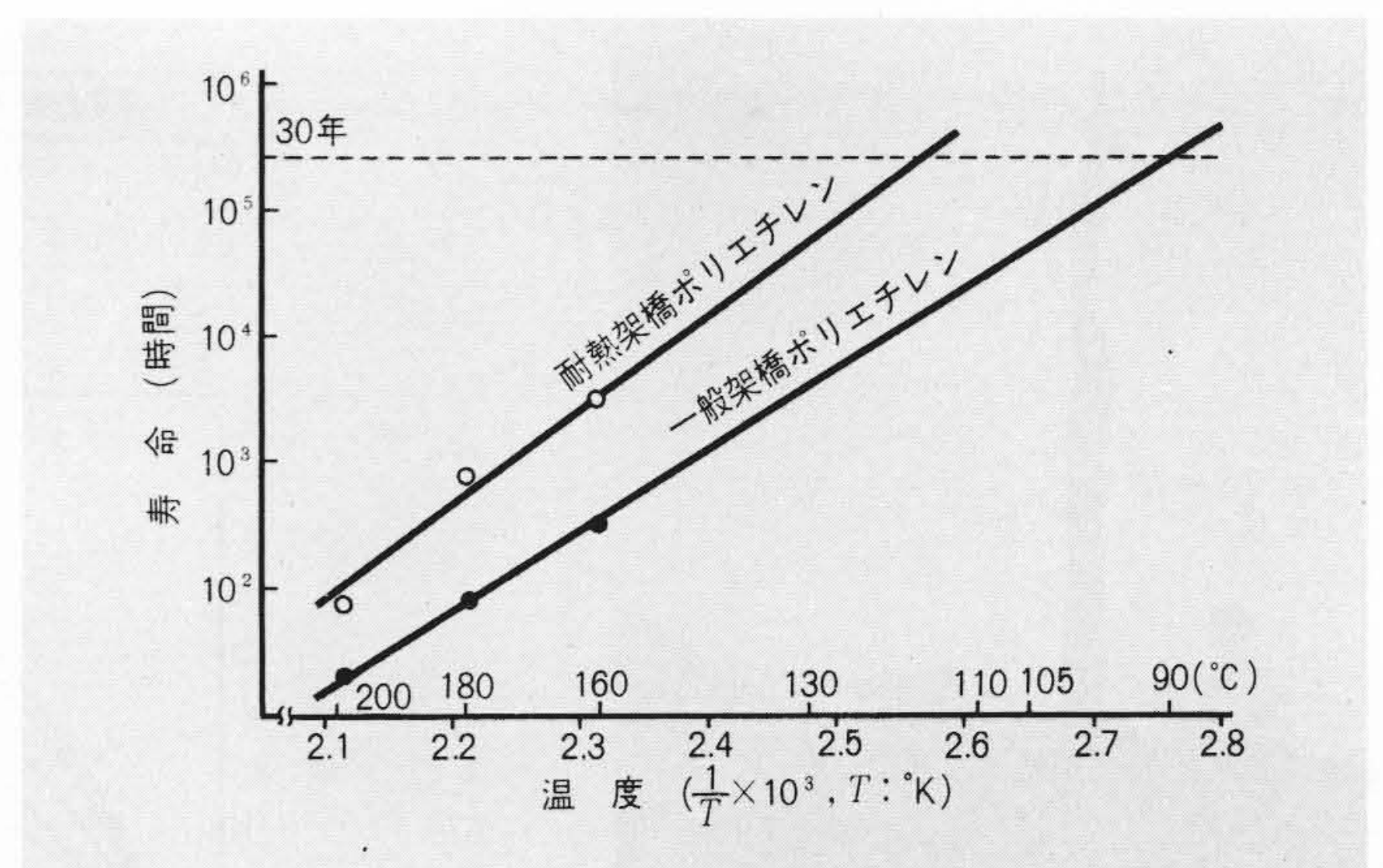


図8 架橋ポリエチレンの耐熱寿命特性 このアレニウスプロット結果では約20℃従来より高い特性となっている。

Fig. 8 Temp-Life Characteristics of Heat Resistant XLPE and General XLPE

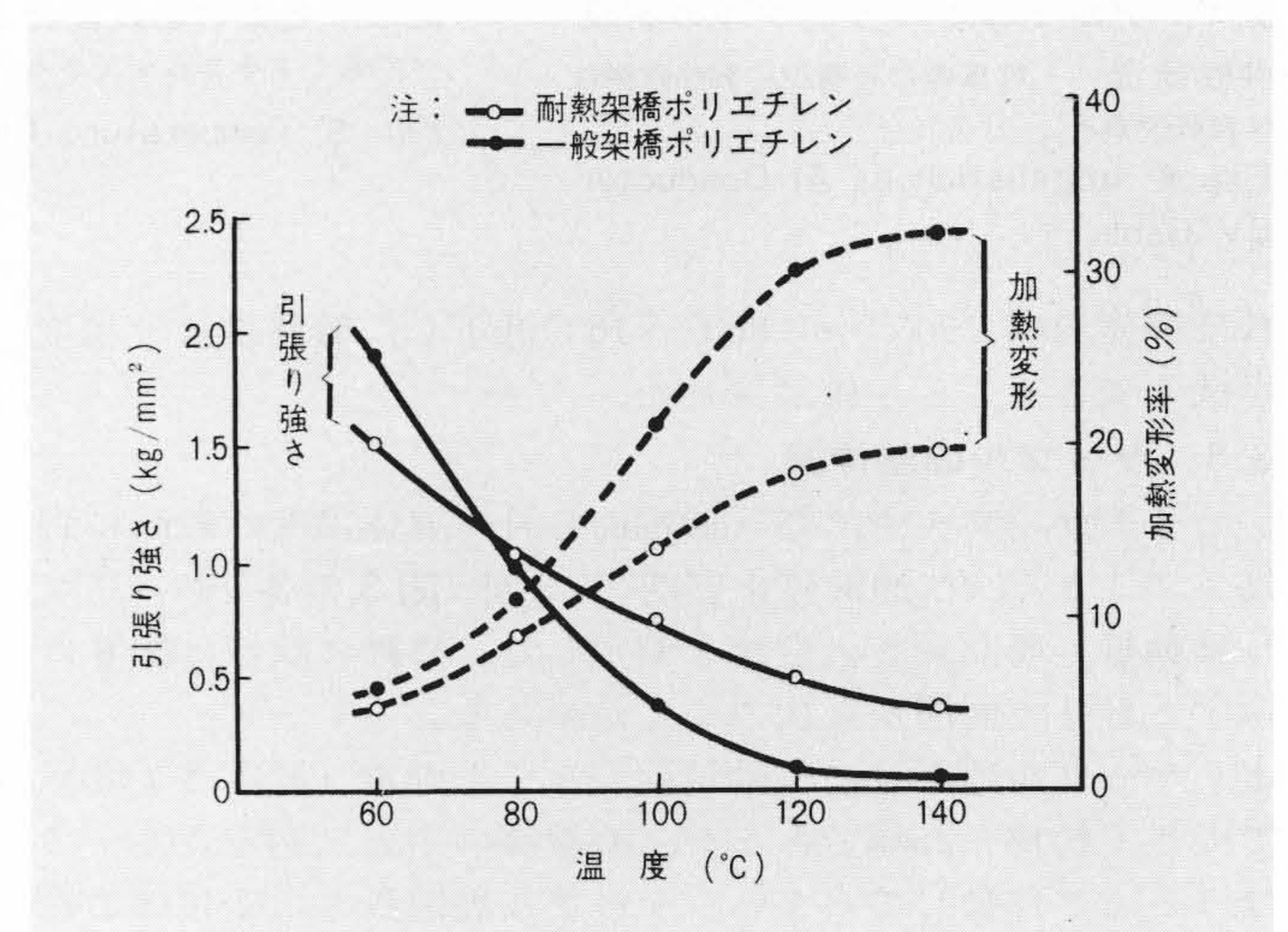


図9 引張り強さ、加熱変形率-温度特性 耐熱架橋ポリエチレンは高温の物理特性が特にすぐれている。

Fig. 9 Tensile Strength and Heat Deformation V.S. Temperature Characteristics

用している一般架橋ポリエチレンは、常時90℃、短時間許容温度105℃であるが、これらをそれぞれ105~110℃、130℃まで許容可能な絶縁材料(以下、耐熱架橋ポリエチレンと称す)の開発を行なった。開発は電気特性をそこなわずに耐熱老化特性、物理特性を向上する点に重点を置いた。

4.1 耐熱寿命特性

図8は耐熱架橋ポリエチレンの温度-寿命特性(アレニウスプロット)を一般架橋ポリエチレンと比較して示したものである。ここでは寿命として伸びが50%に低下するまでの時間を考えた。図8は一般架橋ポリエチレンの現在の連続許容温度定格(90℃で30年間使用)と比較的よく合致しているため、同様に耐熱架橋ポリエチレンの常時許容温度は105~110℃であるといえる。すなわち、耐熱架橋ポリエチレンは一般架橋ポリエチレンより15~20℃高い温度で使用できると考えられる。

4.2 物理特性

一般にケーブル絶縁体は高温で使用されるため、高温における物理特性、電気特性はケーブルの常時、短時間過負荷時の許容温度を考える際に重要な要素である。

図9は温度に対する物理特性の変化を示したものである。

ここで加熱変形率は JIS K 6723 に準じて、厚さ 2 mm、幅 10 mm の試験片を用い、試験片の下に 5 mm φ の金属棒をおいて荷重 4.5 kg を 1 時間加えた後の変形率を測定したものである。この結果をみると、耐熱架橋ポリエチレンは一般架橋ポリエチレンに比べ常温付近の引張り強さが約 80% と低くなっているが、80℃ を越えると逆転し、130℃ においても約 0.5 kg/mm² とかなり高い値を保持している。加熱変形率も高温ほど耐熱架橋ポリエチレンの優位性がでてきている。このすぐれた物理特性は、特殊処理剤の使用と架橋密度が高いことに起因している。

5 耐熱架橋ポリエチレンケーブルの検討

4. で得た耐熱架橋ポリエチレンを実際のケーブル絶縁体に適用し、その諸特性を検討してみた。表 2 は試作したケーブルの構造を示すものである。No. 2 は主として付属品の検討用に供したものである。構造上の特徴としては高温における熱変形を防止するために、内部半導電層を押出し形（2 層同時押し出しタイプ）としたこと、外部半導電層は絶縁体の膨張収縮を吸収できる多層特殊テープ構造とした点にある。

5.1 初期電気特性

表 2 中 No. 1 ケーブルの初期電気特性は表 3 に示すとおりである。コロナレベル、AC 破壊強度は押し出し形内部半導電層の効果が表われ良好な値である。またインパルス破壊強度も高温における低下もなく高温特性にすぐれていることがうかがえる。

5.2 ヒートサイクル試験

今回開発した耐熱架橋ポリエチレンは、許容温度として常時 105~110℃、短時間 130℃ を目ざしている。したがってヒートサイクルによってこの点を確認することが不可欠である。すでに表 2 に述べたケーブルに先だち、モデルケーブル（250 mm²）で 100℃-50 サイクル + 130℃-50 サイクルの一般的試験を実施して実用化の見通しを得たが、さらに短時間定格に関して総合的検討を行なうことにした。試験条件は表 4 に示すとおりである。

この 130℃ のヒートサイクル試験結果は表 5 に示したとおりであり、いずれの特性にも低下がみられず安定したものである。図 10 は試験後のケーブルを解体し、構造上の変化の有無を調査しその状況を示すものであるが、導体上、絶縁体上とも大きな変形は認められなかった。

5.3 短時間定格温度に関する一検討

一般にケーブル短時間定格温度は電氣的、物理的特性の両

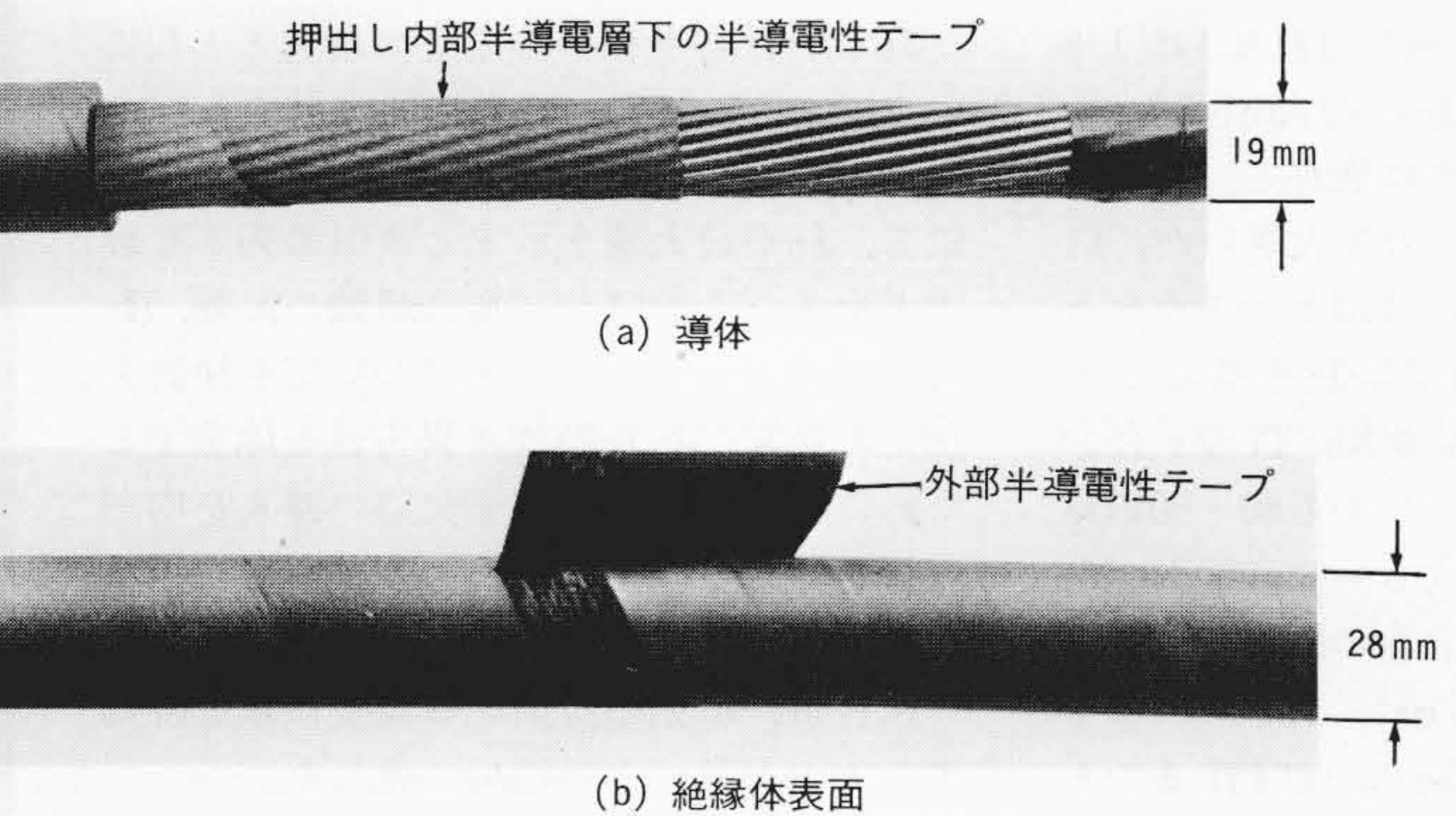


図 10 ヒートサイクル後のケーブル解体状況 130℃ のヒートサイクル後も変形などはなく良好であった。

Fig. 10 Cable Status after Heat Cycling Test at 130℃

表 2 試作大容量ケーブルの構造 汎用サイズである 150mm², 250mm² にて試作を行なった。

Table 2 Construction of Cables Insulated with Heat Resistant XLPE

区 分		No. 1	No. 2
構 造	サ イ ズ	250mm ²	150mm ²
	形 状	圧縮円形	同 心
	外 径	19.0mm	16.1mm
内部半導電層を含んだ絶縁体厚		4.5mm	4.0mm
外部半導電層厚		0.6mm	
シ ー ス 厚		2.5mm	2.5mm
外 径		35mm	32mm

表 3 試作大容量ケーブルの初期電気特性 高温特性も合わせ考えると、従来の一般 CV ケーブルと同等以上の性能といえる。

Table 3 Initial Electrical Characteristics of Cable No. 1

項 目	特 性	備 考
コロナレベル	20 ~ 30kV	感度 30pC
交流破壊値	70 ~ 120kV	常温
インパルス破壊値	160 ~ 190kV	常温
高温インパルス破壊値	170 ~ 190kV	90℃

表 4 ヒートサイクル試験条件 温度は 130℃ で各種条件にてヒートサイクルを行なった。

Table 4 Conditions of Heat Cycling Tests

区 分	No. 1	No. 2
項目	温度 130℃（2 ~ 3 時間で飽和するよう通電） 通電時間：8 時間 ON 16 時間 OFF	
通 電 条 件		
サイクル数	32	30
備 考	試験前にケーブル外径の 10 倍の直径にて 9 回屈曲。 屈曲状態でヒートサイクル	付属品（ジョイント、端末）を組み込んで総合的に実施。

表 5 ヒートサイクル試験結果 ケーブル性能の低下はみられない。

Table 5 Results of Heat Cycling Tests

区 分		No. 1			No. 2（ケーブル部）
項目	屈 曲 前	20.5	23	24	20 以上
	屈 曲 後	22	22	30.5	—
	2.5, 10, 15, 22 32 サイクル後	いずれも 20 以上			20 以上 (30 サイクル後)
ヒート サイクル 後の特性	交 流 破 壊	97	—	—	90
	イ ン パ ル ス	—	185	—	—
	高温インパルス (90℃)	—	—	185	—

注：物理特性のヒートサイクル前後における変化はなかった。

者を考慮に入れて論じなければならない。ここでは設計上問題となるインパルス強度と物理特性の二面から若干検討を加えてみた。

この場合、問題になるのは電氣的には高温時の破壊強度の低下と物理的には熱変形であるが、次の関係式が成立するとき、ケーブルはインパルスに対して裕度があり安全といえる。

$$BIL \times k_1 \times k_2 < k_3 \times k_4 \times V \dots \dots \dots (2)$$

上式で BIL : 6 kV 系統では 60 kV

k_1 : 経年劣化に対する裕度 (1.1 とする)

k_2 : 不確定要素に対する裕度 (1.1 とする)

k_3 : インパルス強度の温度による低下係数

k_4 : 厚さの減少残率

V : 常温破壊強度

k_4 を図 9 から求め、上式の両辺を求めると図 11 のとおりとなる。計算条件は同図中に示してある。ただし、不等式の裕度は 50% みている。同図からわかるように短時間許容温度は一般架橋ポリエチレン 105°C、耐熱架橋ポリエチレン 130°C とするのが妥当であるといえる。

6 結 言

以上、6 kV 級地中配電ケーブルの最近の傾向、開発検討状況について述べた。すなわち、

- (1) アルミ導体トリプレックス形 CV ケーブルの熱伸縮現象、各部の温度分布の測定を行なった。この種データは従来なかったものであり、有用なデータを得ることができた。
- (2) 送電容量の大容量化に対処するために耐熱架橋ポリエチレンを開発した。
- (3) この耐熱架橋ポリエチレンをケーブル絶縁体に適用し、常時許容温度は 110°C、短時間許容温度は 130°C にとれることが確認された。

今後も引き続き、現場への適用性を考慮して、各種試験を続行中である。

終わりに本研究開発にあたり、種々ご指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げますとともに、ご協力いただいた日立電線株式会社日高工場および研究所の

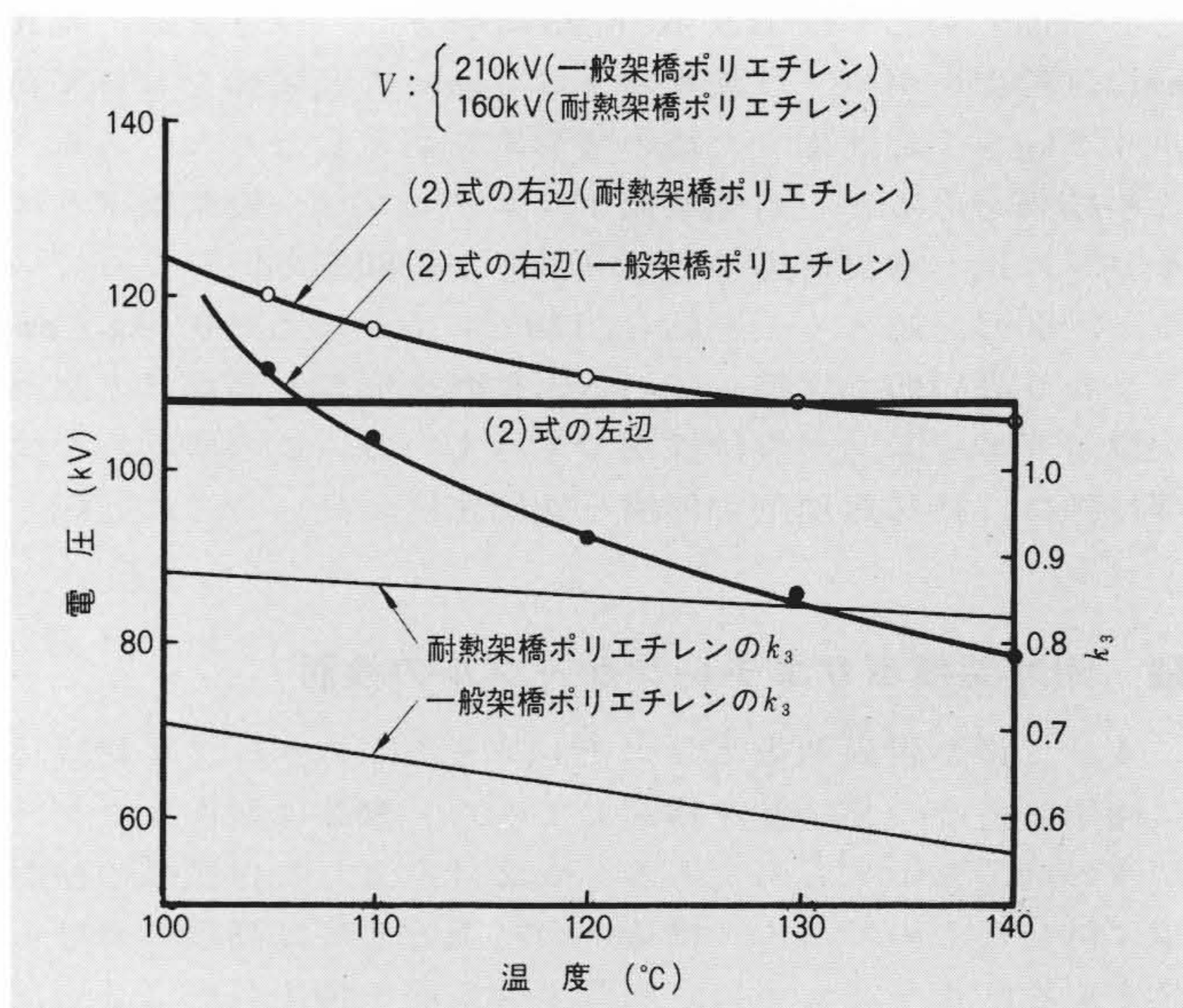


図 11 短時間許容温度の検討 (2) 式の左辺 < 右辺が 50% の裕度をもって成立するのは、一般架橋ポリエチレン 105°C、耐熱架橋ポリエチレン 130°C となる。

Fig. 11 Allowable Short-Time Conductor Temperature

関係各位にもあわせて謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 浜田、村木ほか：「地中配電用 6 kV 級ケーブルおよび付属品の開発」日立評論 51, 945 (昭 44-10)
- (2) 依田、小椋ほか：「架橋ポリエチレンケーブルの浸水加電特性」電気評論 346 (昭 48-2)
- (3) 水上、庄司ほか：「配電近代化用 22 kV 級ケーブルおよび付属品」日立評論 50 周年記念論文集 100 (昭 43-11)

論文抄録

Nb-Ti-Zr 超電導合金板の磁場— 臨界電流密度特性と金属組織との関係

日立製作所 北田正弘

日本金属学会誌 36-11, 1064 (1973)

超電導合金板の磁場—臨界電流密度 ($H-J_c$) 特性には異方性があり、外部磁場の方向と圧延板の面が直角なときの $J_c(\perp)$ は、外部磁場の方向と圧延板の面が平行なときの $J_c(\parallel)$ の数分の一に減少する。このためマグネットを巻いた場合、 J_c の大きさは外部磁場の方向と圧延面が直角をなす部分で支配されて十分大きな電流を流すことができず、これが板の欠点とされている。したがって、磁場と圧延面が直角なときの J_c を線材の J_c と同程度まで大きくすればこの欠点は解消される。

本研究は 80~90 kOe の高磁場で使用することができる Nb-Ti-Zr および Nb-Ti-Ge 合金板の $H-J_c$ 特性の時効条件依存性を調べて十分実用に供することができる合金板を開発するとともに、 $H-J_c$ 特性の異方性を金属組織の面から追求して、異方性をできるだけ小さくするための知見を得ることを目的としている。

Ti を 55~75%、Zr を 5% 含む Nb-Ti-Zr 系合金板および Ti を 55~65%、Ge を 1% 含む Nb-Ti-Ge 系合金板の $H-J_c$ 特性の異方性に及ぼす熱処理条件を調べた結果、Nb-Zr-Ti 系で $H-J_c$ 特性が最も良好であるのは Ti 濃度が 60~65% の合金で、90 kOe での $J_c(\parallel)$ は 3.7×10^4 A/cm²、 $J_c(\perp)$ は 1.8×10^4 A/cm² であった。 $J_c(\parallel)/J_c(\perp)$ の最小値は合金板の Ti 濃度に依存し、Ti 濃度が 55% では 4~5 ときわめて大きい、Ti 濃度が 70~75% では 1.1~1.3 と小さくなる。また、Nb-Ti-Ge 合金板では J_c を最大とするまでに要する時効時間が Nb-Ti-Zr 合金板の 1/10 程度に短縮され、しかも 80~90 kOe における $J_c(\perp)$ の値が大きい。500°C × 10h 時効した Nb-60Ti-1Ge 合金の 90 kOe における $J_c(\parallel)$ は 7.2×10^4 A/cm²、 $J_c(\perp)$ は 4×10^4 A/cm² で $J_c(\parallel)/J_c(\perp)$ は約 1.8 である。これらの合金板の J_c は実用化するのに十分な値である。

一方、Nb-Ti-Zr 合金板の $H-J_c$ 特性と金属組織との関係を調べた結果、 $J_c(\parallel)$ と $J_c(\perp)$ の比は $(a+d)/a$ に比例することが明らかになった。ここで a は圧延板断面において析出物などの多い層の幅、 d は析出物などの少ない層の幅である。 $J_c(\parallel)$ および $J_c(\perp)$ は合金板の加工度の増大とともに大きくなる。また、時効時間に対する J_c の増加と合金板の引張強さの増加の傾向は一致し、 J_c が最大値を示すとき引張強さも最大となる。このほか、集合組織の影響、 $H-J_c$ 特性のピーク効果などについても検討を加えた結果、 $H-J_c$ 特性の異方性を除去するためには加工による格子欠陥の導入を均一に行なうこと、優先析出しやすい α Ti 相などの析出が起こる温度領域での時効は避けて G.P. 帯、 ω 相の析出する温度領域で時効することが良いとの結論に達した。