

ガス架橋・水蒸気架橋ポリエチレン ケーブルの吸水現象

Moisture Absorbing Properties of XLPE Cables Manufactured by GAS or STEAM Curing Process

架橋ポリエチレン ケーブルの「水トリー劣化」の最大の要因は水分の存在であり、この劣化機構を知るには絶縁体内の水分の挙動を解明する必要がある。ここでは、水蒸気架橋ポリエチレン ケーブル、ガス架橋ポリエチレン ケーブル各絶縁体中の水分量及び吸水現象について検討した。この結果から、(1)ガス架橋・水蒸気架橋ポリエチレン ケーブル各絶縁体中の初期水分量は、それぞれ100ppm以下、3,000ppmであり、乾燥後の吸水量もガス架橋ポリエチレン ケーブルのほうが少ないこと、(2)架橋ポリエチレン ケーブルの飽和吸水量と密度の間には密接な関係があること、(3)架橋ポリエチレン ケーブル中において25～90℃における吸水時の水の拡散係数は $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 、過飽和水分揮散時の拡散係数は $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ であることなどが分かった。

杣謙一郎* Kenichirô Soma
関井康雄* Yasuo Sekii
遠藤 桓* Takeshi Endô
池田忠禧** Chûki Ikeda

1 緒 言

架橋ポリエチレン ケーブル(以下、XLPE ケーブルと略す)が実用化されて以来、既に10年以上が経過し、その優れた電気特性、取扱いの容易さから、その需要はますます伸びつつある。しかし、XLPE ケーブルを浸水下で使用した場合、いわゆる「水トリー」による劣化が生ずることが明らかとなり⁽¹⁾、関係者の一大関心事となっている。この水トリーは、もともと水中モートルに用いられているポリエチレン電線に生ずる劣化として見いだされたものであり⁽²⁾、その形態は樹枝状であるが、電気トリーとは異なり、劣化部分に高濃度の水分が存在しているのが特徴である。この水トリー劣化には、ケーブルの絶縁体内外に存在する水分が大きな影響を及ぼしていると考えられる⁽³⁾ので、この劣化機構を明らかにするにはこれらの水分の挙動を解明する必要がある。特に絶縁材料の吸水特性が水トリー劣化と密接に関連しており、ケーブルの絶縁体が吸水しにくいほど水トリーが生じにくいと考えられる。このような観点から、筆者らはXLPE ケーブルの吸水現象について調べた。本稿は、その検討結果について述べる。

2 水蒸気架橋XLPEケーブルの吸水特性

2.1 水蒸気架橋XLPEケーブル中の水分量

XLPE ケーブルの吸水現象を検討するため、製造後の放置日数の異なる未乾燥ケーブル中の水分量を測定した。測定には赤外分光光度計⁽⁴⁾を用い、 $3,400 \text{cm}^{-1}$ 付近に表われる吸収スペクトルが、 H_2O によるものであることを利用して水分濃度を算出した。図1(a)がこの方法で測定した3種の水蒸気架橋XLPE ケーブル絶縁体中の含有水分量である。供試ケーブルはE-E型(内部半導電層、外部半導電層とも押出し型)22kV級ケーブルであり、同図の横軸は内部半導電層からの距離、縦軸は含有水分量を示している。同図中①に示すように、製造直後のケーブル絶縁体中にはかなりの水分が残存している。この水分はケーブルを気中に放置すると、②に示すように減少する。しかし、同図中の③の結果から明らかとなり、未

乾燥のケーブルを浸水状態で放置した場合には水分の揮散は起こらず、製造直後の値にほとんど等しい。このように未乾燥ケーブル中にはかなりの水分が存在しているが、これらの水分もケーブルを高温で乾燥すると外部に揮散し、しかもその後浸水させても再吸水は起こらない。図1(b)は未乾燥ケーブル(製造後2ヶ月)を(1)未乾燥状態、(2)80℃で乾燥後、(3)80℃で乾燥後水中浸せき後の各水分量を測定した結果である。この結果から明らかなように、乾燥後には水分は著しく減少し、これを浸水しても水分量はほとんど増加しない。

2.2 水蒸気架橋XLPEケーブルの吸水現象

2.1で述べたように、未乾燥水蒸気架橋XLPE ケーブル中には多量の初期含有水分が残存しており、この水分の揮散は周囲条件によって異なる。これらの様相を更に明らかにするため、絶縁厚0.8mmのXLPE電線を用い、乾燥温度の異なるXLPEの吸水現象及び水分揮散現象について調べた。すなわち、上記の電線をあらかじめ、80℃で約1週間乾燥した後、高圧蒸気罐中で強制的に吸水させ、これらを室温気中、室温水中に放置したとき、及び乾燥後吸水処理は行わずに室温の水中に浸せきさせたときの各水分量の変化を調べた⁽⁵⁾。水分量の測定には固体水分計を用いた。図2にその実験結果を示す。吸水処理を行なった試料の初期水分量は約7,000ppmであったが、同図中の実線で示すように気中に放置した試料④中の水分は時間の経過とともに減少し、約800時間後に飽和値(250ppm)に達した。この時点でこの試料を再度室温の水中に浸せきした結果、含有水分量は再び増加し、同図で明らかなように浸水後、約3,000時間経過後には3,600ppmに達している。このように、常温で気中に放置して水分が揮散した吸水試料(常温乾燥XLPE)は水中に再浸せきすると再吸水が起こる。また、同図中の一点鎖線で示すように、気中放置せずに室温の水中に浸せきした吸水試料⑤中の水分は一度上昇した後、減少の傾向を示すが3,000時間経過後にも初期水分量に比べてあまり大きく変化していない。これらの結果は、どれも図1(a)

* 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

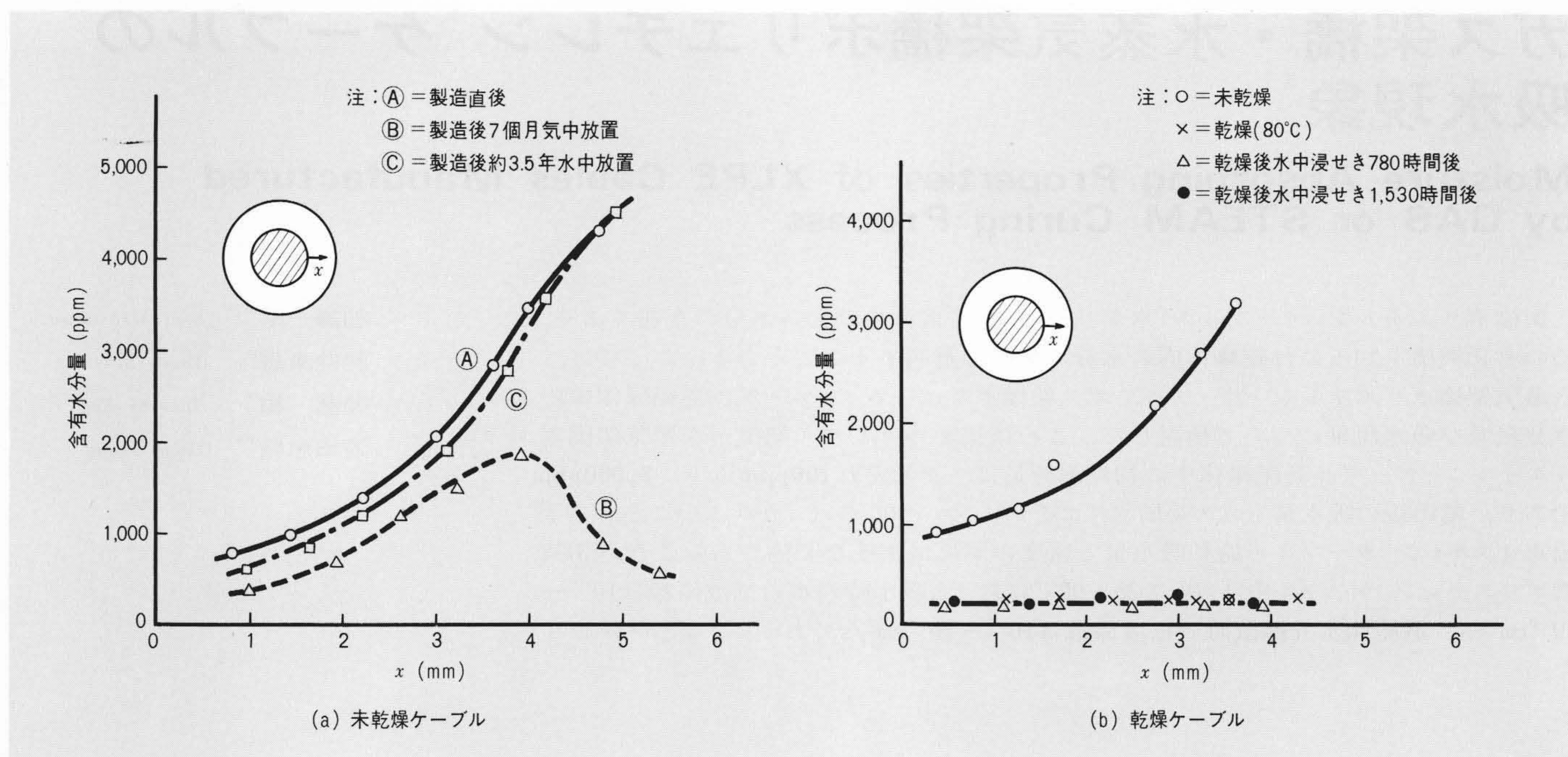


図1 水蒸気架橋XLPEケーブル中の水分量 (a) 未乾燥の水蒸気架橋ケーブル中には、相当量の水分が残存しているが気中放置すると減少する。しかし水中に放置するとほとんど減少しない。(b) 水蒸気架橋ケーブルを高温で乾燥後、水中に浸せきしてもほとんど吸水しない。

の実測結果と符合している。一方、高温乾燥を行なった後に室温の水中に浸せきした試料③中の水分量はわずかに上昇する傾向にあるが、たかだか200ppm程度である。すなわち、高温乾燥により水分を揮散させたXLPE中への再吸水はほとんど生じない。このように、同じ水蒸気架橋XLPEケーブルでも未乾燥ケーブルと乾燥ケーブルとでは吸水現象に著しい差がある。

2.3 水蒸気架橋XLPEケーブルの吸水現象の考察

XLPEは疎水性のポリマーであるため、自然の状態では材料中に溶解している水分はごく微量(100ppm以下)である。しかし、周囲の水蒸気圧の上昇につれて水分溶解量は増加す

る。図3はXLPE中の溶解水分量の温度特性の実測結果を示すものであるが、同図から明らかなように、溶解水分量は著しい温度依存性を示し、高温で急増する。従って、高温・高圧の蒸気中でXLPE中に溶解した水分は常温においては過飽和状態となり、この過飽和水分がXLPE中で凝縮し、マイクロボイドを形成している。常温で水分が揮散する場合には、これらのマイクロボイドは消滅せずに残存しているが、高温で乾燥を行なえば、一部の大きなマイクロボイドを除いて大半が縮小する。常温乾燥XLPEと高温乾燥XLPEの再吸水現象の著しい相違は、このマイクロボイドの有無の差によるものと考えられる。更に常温乾燥の場合の再吸水量は初期水

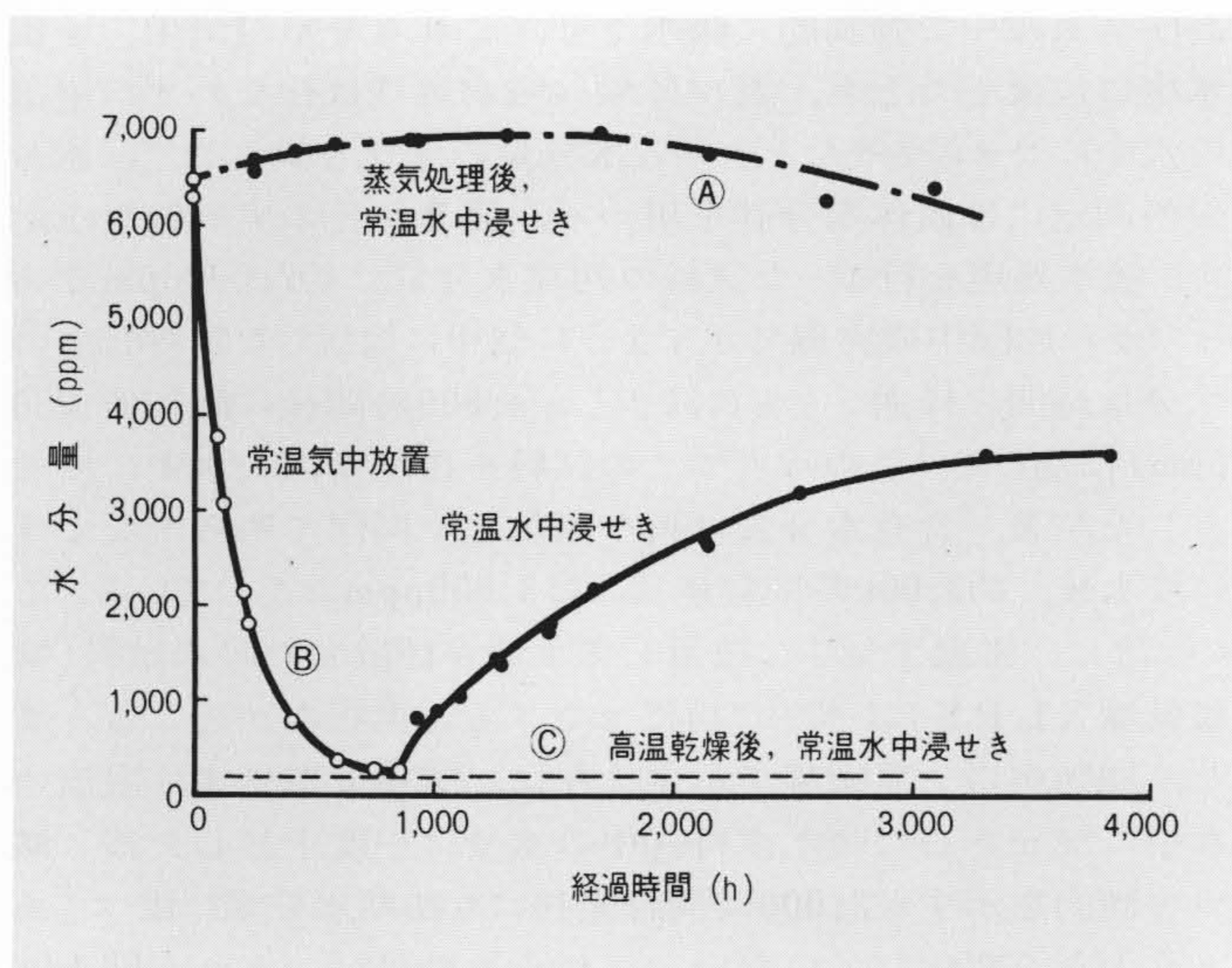


図2 XLPEの吸水特性に及ぼす乾燥温度の影響 水分を含有しているXLPEを常温で乾燥した後、水中に浸せきすると再び吸水するが、高温で乾燥した後、水中に浸せきしてもほとんど吸水は起こらない。

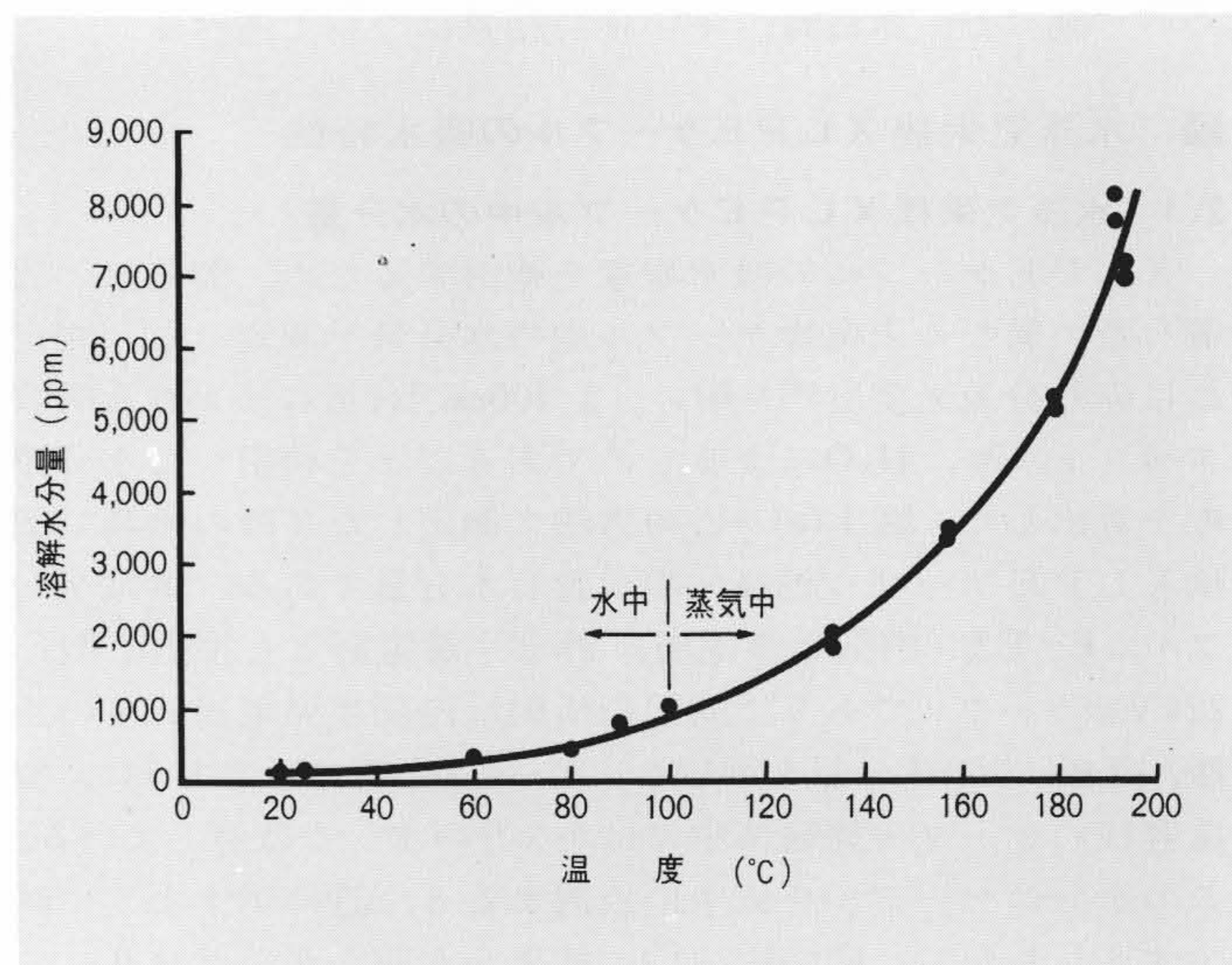


図3 XLPEの溶解水分量の温度特性 100°C以上の飽和蒸気中では、XLPEの溶解水分量は急激に増加する。

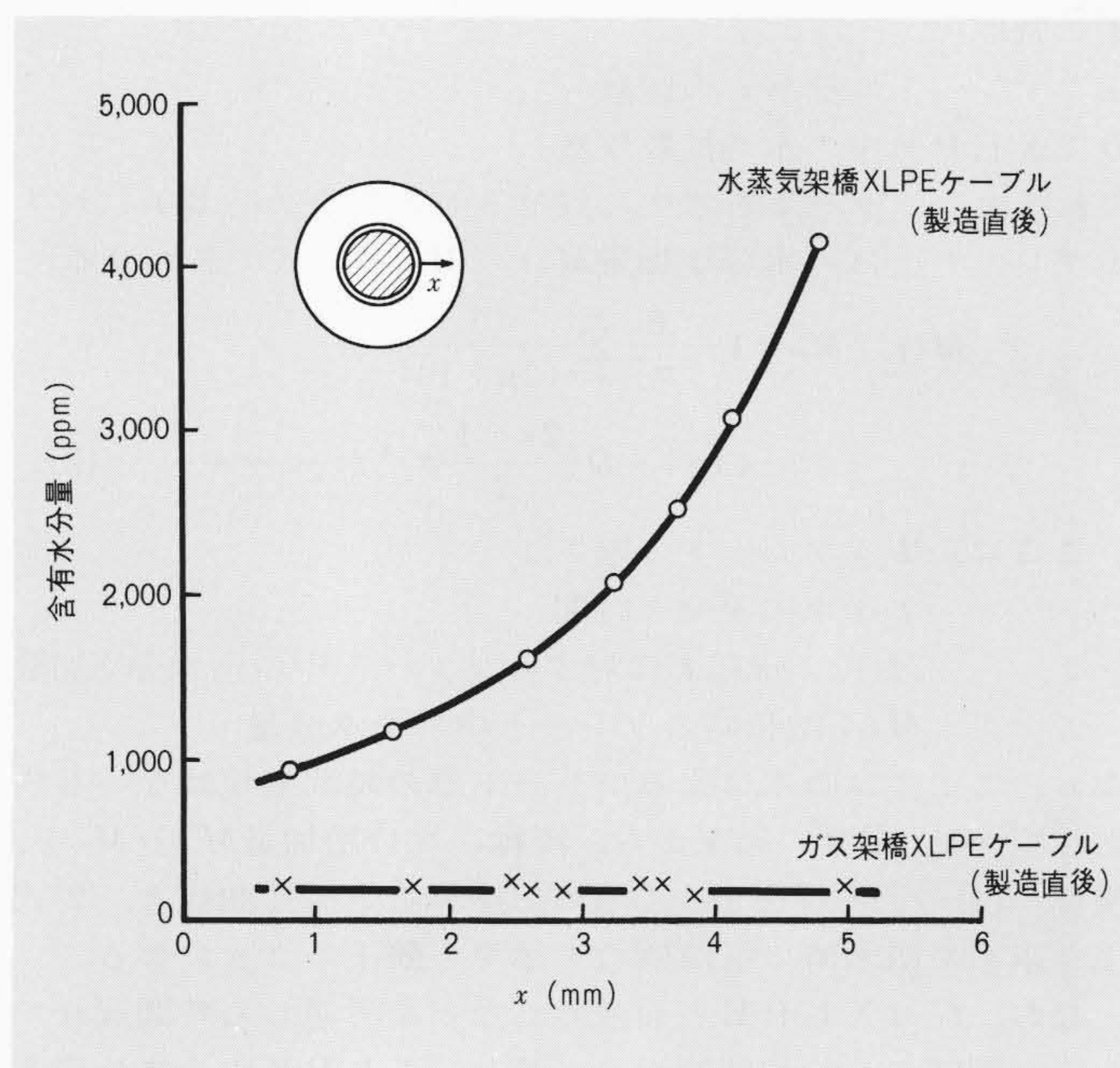


図4 ガス架橋XLPEケーブル中の水分量 ガス架橋XLPEケーブル中の含有水分量は、水蒸気架橋XLPEケーブルに比べて非常に少ない。

分量にまで達していないが、これは室温領域がXLPEのガラス転移温度(T_g)以上であるため、水分が揮散していく過程でマイクロボイド周囲のストレスが緩和され、ボイドの縮少が生じているためと考えられる。

3 ガス架橋XLPEケーブル中の水分量と吸水特性

水蒸気架橋XLPEケーブルの吸水特性に引き続き、ガス架橋XLPEケーブルの吸水特性を調べた。ガス架橋プロセスは従来の水蒸気架橋プロセスと異なり、高温・高圧ガス流中で架橋が行なわれるため、架橋時に絶縁体が水蒸気に接することはない⁽⁶⁾。このプロセスで製造した22kV級ケーブル中の水分を図1と同じ方法で測定した。図4にその結果を示す。同図中には比較のために同一寸法の水蒸気架橋XLPEケーブルの結果も併せ示した。同図から明らかなように、ガス架橋XLPEケーブル中の初期水分量は非常に少ない。カール・フィッシャー式水分測定器⁽⁷⁾による正確な定量分析の結果によれば、供試ケーブル中の初期水分量は100ppm以下であった。水分量がこのように少ないのは、もちろんガス架橋プロセスが水分に接していない製造法であるためである。

初期含有水分量の少ないこのガス架橋XLPEケーブルを水中に浸せきさせたときの吸水量を調べるため、ケーブルを高温で乾燥した後、室温及び高温の各水中に浸せきしたときの飽和吸水量について調べた。実験にはガス架橋プロセス及び水蒸気架橋プロセスで製造した275kV級XLPEケーブルを用い、それらのケーブルをあらかじめ90℃で450時間乾燥を行なった後、絶縁体各層から試料を切り出し、各温度の水中に浸せきさせたときの飽和吸水量を測定した。測定には固体水分計を用いた。この結果を図5に示す。同図の横軸は内部半導電層からの距離、縦軸は飽和吸水量である。同図で明らかなように、各温度どれにおいてもガス架橋XLPEケーブルのほうが水蒸気架橋XLPEケーブルより吸水量が少ない。この飽和吸水量の差は、特に高温になるほど大きい。また、同図に示されているように両ケーブルとも飽和吸水量は半径方向に分布をもっており、どの部分においてもガス架橋XL

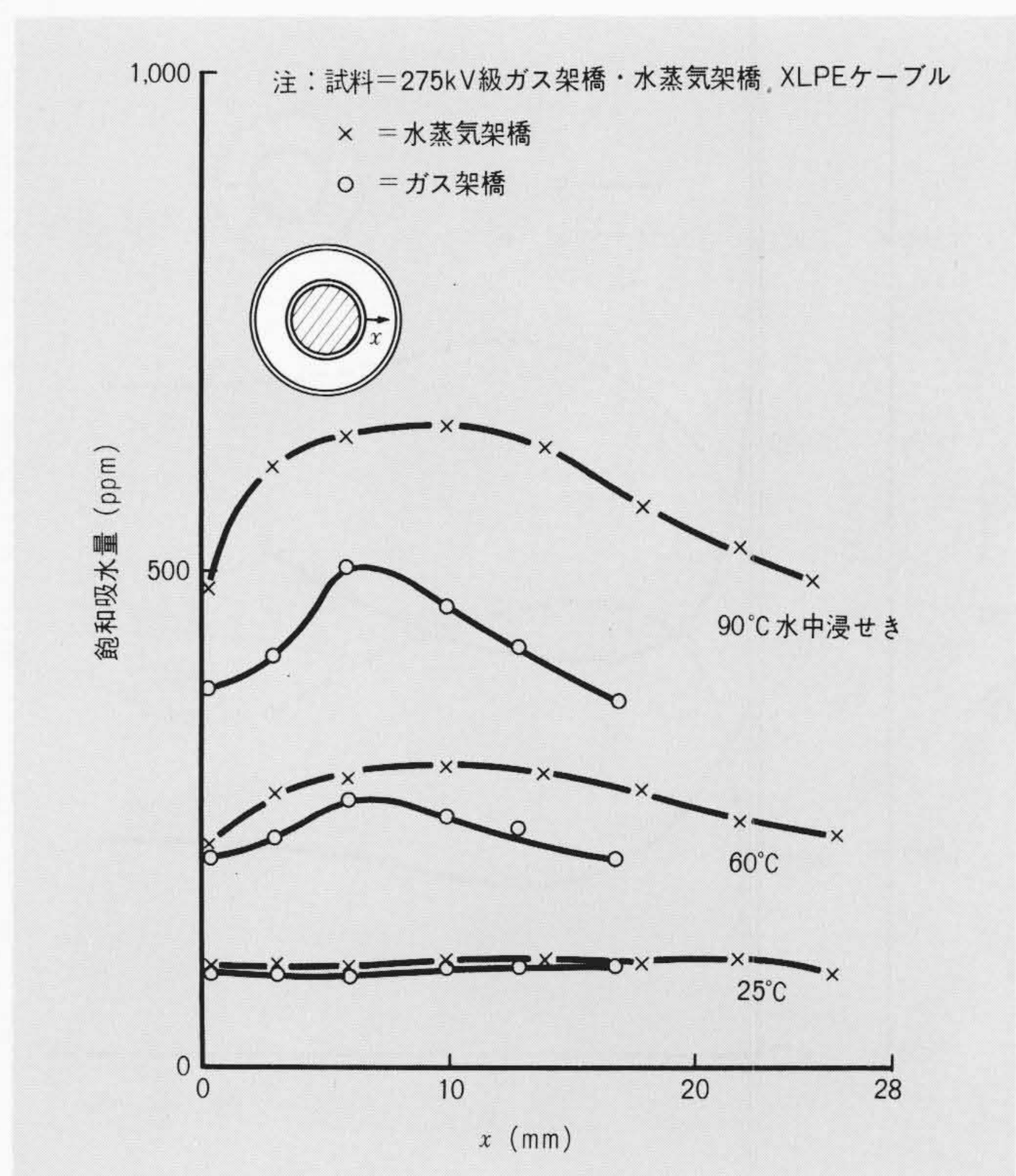


図5 ガス架橋・水蒸気架橋XLPEケーブル絶縁体各層の飽和吸水量 XLPEケーブル絶縁体の飽和吸水量は、半径方向に分布をもつ。この傾向は高温になるほど著しい。

PEケーブルのほうが吸水量が小さい。この両ケーブルの飽和吸水量の差の原因を調べるために、同じケーブル絶縁体の23℃での半径方向の密度分布を測定した。図6がその結果であるが、これによりガス架橋XLPEケーブルのほうが水蒸気架橋XLPEケーブルより全体的に密度が大きいことが分かる。また、飽和吸水量の分布と密度の分布は互に対応しており、両者の間には密接な関係があることが示唆される。図5、6から各浸せき温度(25℃、60℃、90℃)での飽和吸水量と23℃における比容との関係を描いたものが図7であるが、比容と飽和吸水量との間には直線的な関係があり、比容の大きいほど温度の影響を受けやすいことが分かる。同図によれば、ガス架橋XLPEケーブルの測定点は比容の小さい側、すなわち飽和吸水量の小さい側に集中している。このことは、ガス架橋XLPEケーブル絶縁体の微細構造が乾燥した水蒸気架橋XLPEケーブル絶縁体よりも密で、微細な欠陥が少ないことを示唆している。

4 XLPE中の水の浸透及び拡散現象

XLPE中への水分の浸透や含有水分の揮散は、時間の経過とともに進行し定常状態に達する。この水分の浸透、拡散の時間的変化は材料の劣化とも関連して重要である。実ケーブル中の吸水現象の検討に加えて、材料中の水分の拡散挙動について考察した。

4.1 XLPE中の水の拡散現象

XLPE中の水の拡散係数を求めるため、プレス成形したXLPEを初期水分量が20~30ppmになるまであらかじめ乾燥した試料及び乾燥後、吸水させた試料を用い、それぞれ25~90℃の水中及び気中に設置したときの水分量変化を調べた。図8、9にその結果を示す。同図から明らかなように、温度

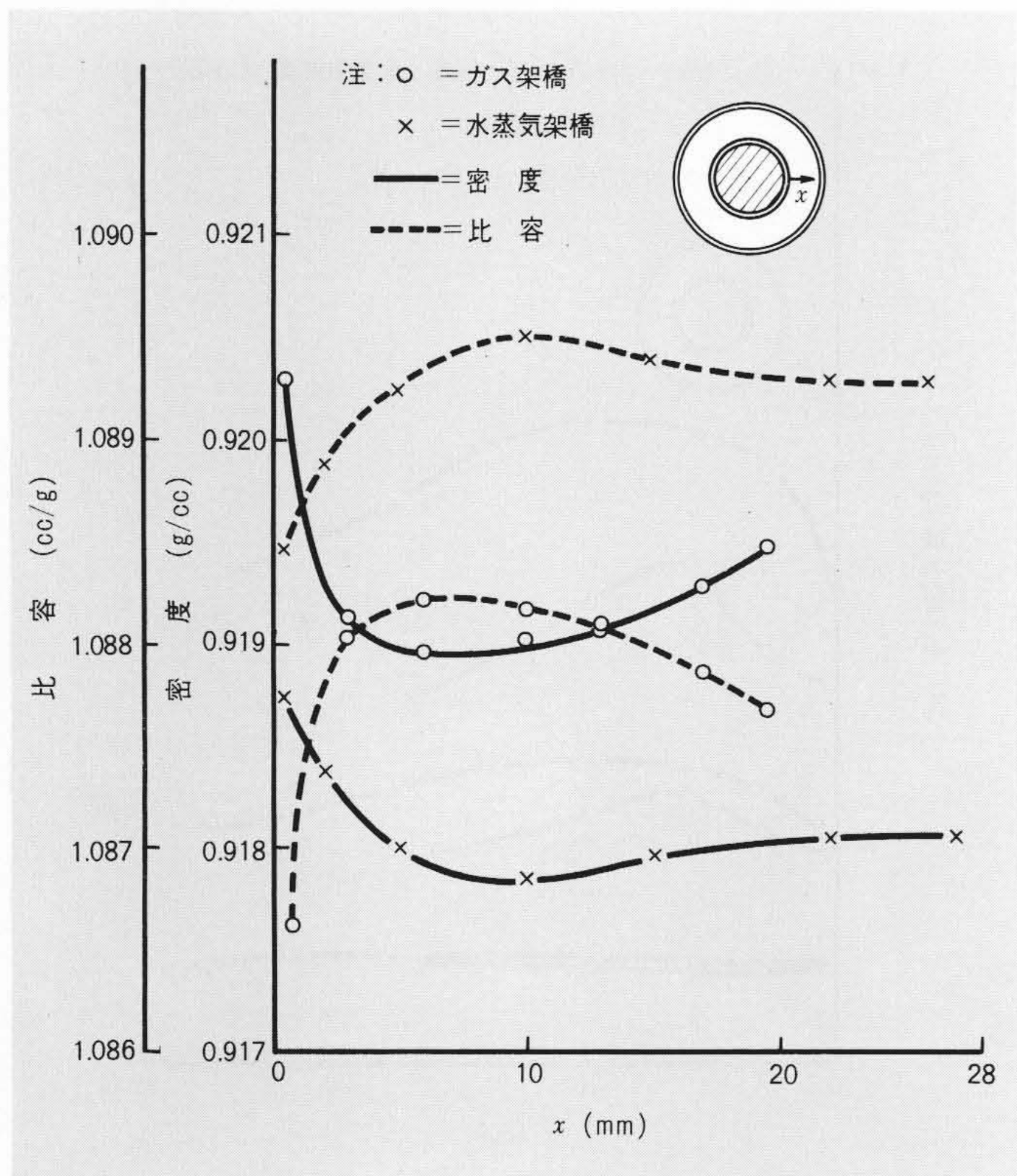


図6 ガス架橋・水蒸気架橋XLPEケーブル絶縁体の密度及び比容分布 XLPEケーブル絶縁体の密度及び比容は、半径方向に分布をもつ（但し、密度は23℃で測定）。

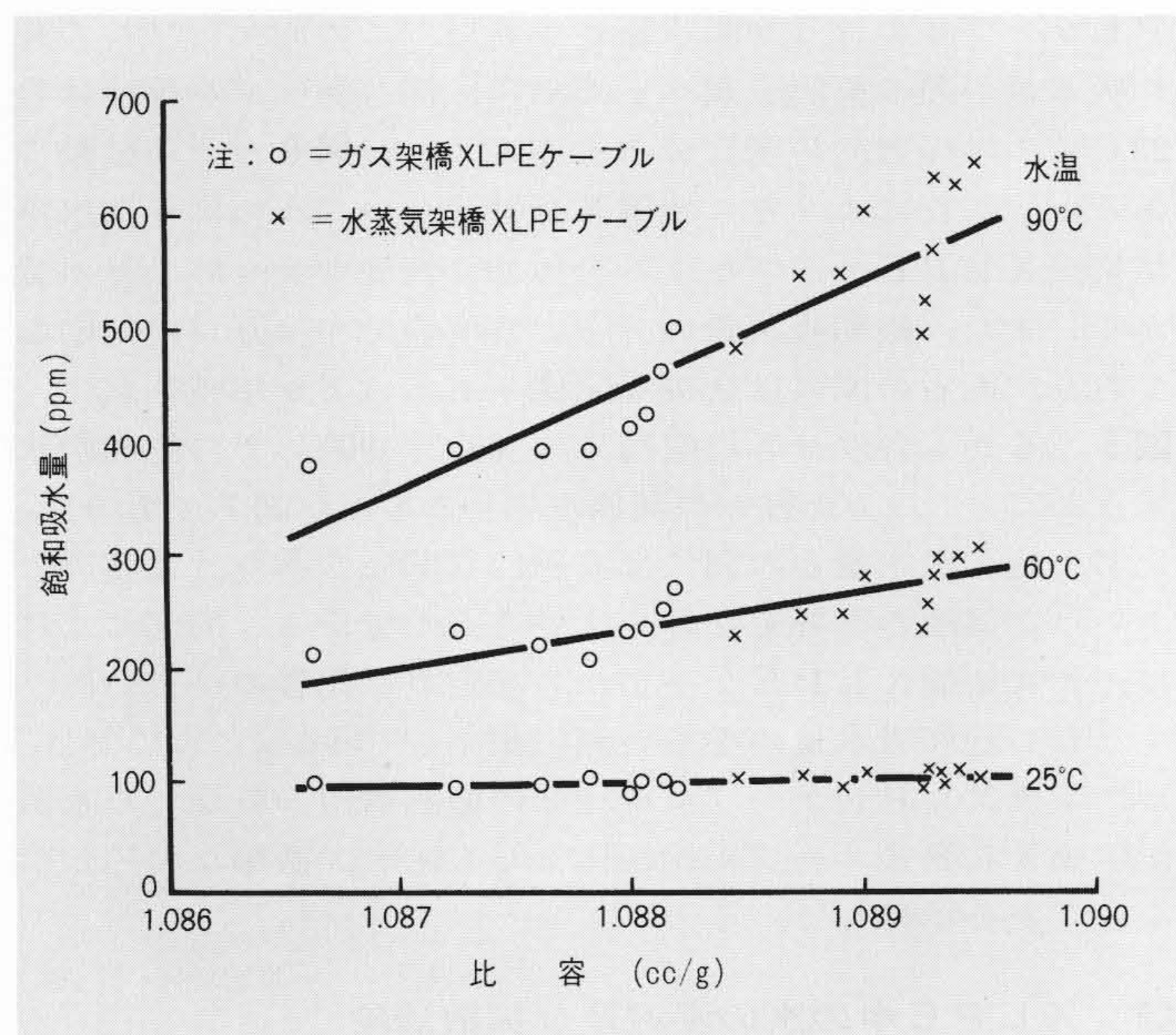


図7 XLPE絶縁体の飽和吸水量と比容との関係 XLPE絶縁体の飽和吸水量と比容との間には直線関係があり、比容が大きいほど飽和吸水量の値は大きい。また、温度が高くなるほどこの傾向は顕著である。

が高くなるほど飽和吸水量は増加し、吸水速度、水分揮散速度は速くなっている。ところで、無限に広いプレートを仮定し、等温的な拡散が一次元的に起こっている場合の拡散方程式は(1)式で表わせる⁽⁸⁾。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 C : XLPE中の水の濃度

t : 時間

x : プレート片面からの距離

D : XLPE中の水の拡散係数

これより、プレートを水中に浸せきした場合の時刻 t に対するプレート全体の水分増加量 $M(t)/M_{\infty}$ は次式で表わせる。

$$M(t)/M_{\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ -D \left(\frac{2n+1}{l} \pi \right)^2 t \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 l : プレートの厚さ

t : 水中浸せき時間

$M(t)$: 時刻 t に対するプレート中の全水分増加量

M_{∞} : 飽和時のプレート中の全水分量

なお、ここでは吸水によるプレート厚の時間変化はないものとしている。図8の結果から、縦軸に水分増加量 $M(t)/M_{\infty}$ を、横軸に $(t-t_0)^{1/2}/l$ をとって求めた換算吸水特性曲線と、(2)式より求めた吸水時の拡散係数を示すと表1のようになる。

なお、 t_0 はXLPE表面のぬれなどを考慮した時間遅れである。同図で、飽和時間近くには達し、XLPE中の水分濃度が高くなると水分の拡散速度は遅くなる。これは、XLPE中を拡散してきた水分子同士が互いに結合してクラスタを形成し、拡散する単位が大きくなってしだいに動きにくくなるためと考えられる。一方、図9から分かるように過飽和水分

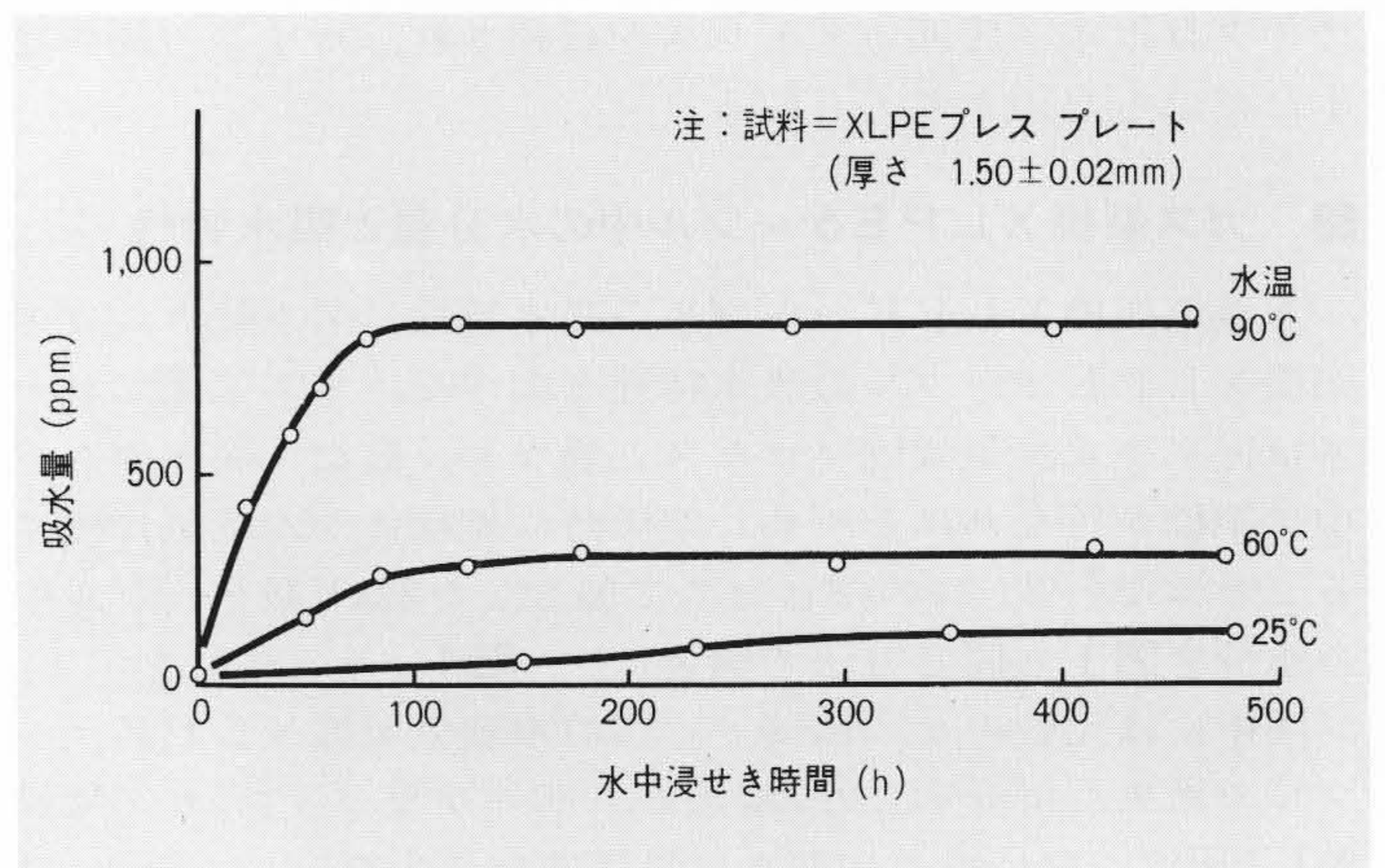


図8 XLPEの吸水特性 温度が高くなるほど、XLPEの吸水量は多くなり吸水速度も大きくなる。

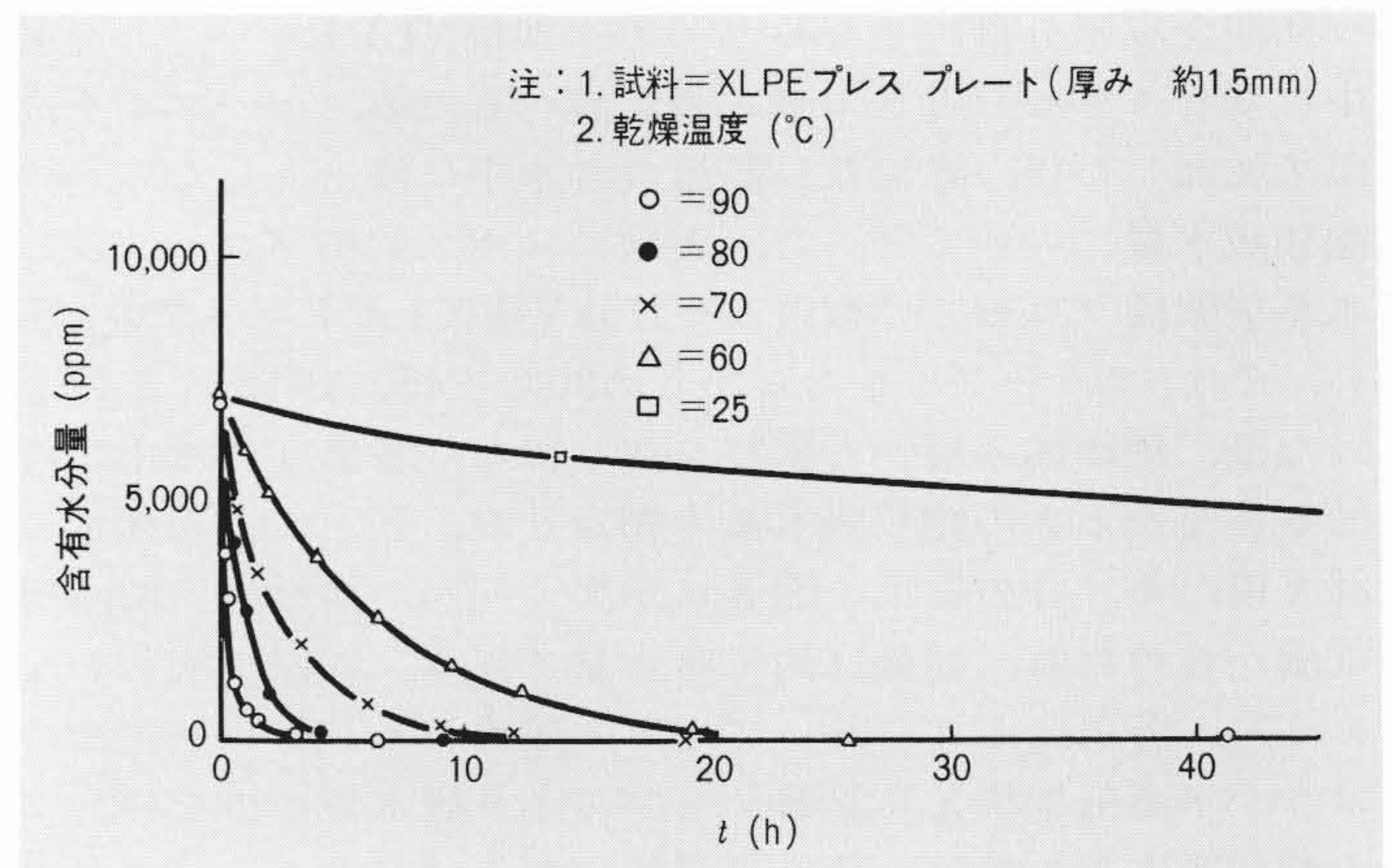


図9 XLPEの水分揮散特性 XLPE中の水分の揮散速度は、高温になるほど大きい。

表1 XLPE中の水の拡散係数 吸水時・水分揮散時の拡散係数とも、高温になるほど大きい。

温度(°C)	25	60	70	80	90
項目					
吸水時	5.2×10^{-9}	1.1×10^{-9}	—	—	1.8×10^{-8}
過飽和水分揮散時	5.0×10^{-9}	7.8×10^{-8}	1.9×10^{-7}	4.7×10^{-7}	1.6×10^{-6}

注：単位(cm^2/s)

の揮散は温度が高いほど速い。図9より換算脱湿特性曲線を求め、過飽和水分揮散時の拡散係数を求めると、表1に示すように25～90°Cの範囲では $10^{-9} \sim 10^{-6}$ まで変化している。これらの値と吸水時の場合とを比較してみると、25°Cの場合はほとんど変わらないが、25°C以上では過飽和水分の揮散は水分浸透時よりも1～2けた大きくなっている。この差は両者の水分濃度の違い、プレート自由端に接しているふん囲気の違い(吸水時には液相、水分揮散時には気相)などによるものと考えられる。

4.2 XLPEケーブル中の水分浸透時拡散係数

ケーブルが水中に浸せきしているときの絶縁体中への水分の浸透も、境界条件の違いはあるが4.1の結果と本質的には異なる。図10は乾燥した6kV級XLPEケーブルを30～90°Cの水中に浸せきしたときに得られた吸水特性である。ところで、無限長の同心円筒の場合には拡散方程式は、

$$\partial c / \partial t = D \cdot (\partial^2 c / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial c / \partial r) \dots \dots \dots (3)$$

である。ここに、 r ：円筒中心からの距離

t 、 c 及び D ：それぞれプレートの場合と同様

プレートの場合と同様にして、時刻 t に対するケーブル絶縁体全体の水分増加量 $M(t)/M_\infty$ を(4)式より求めると次式のようにになる。

$$M(t)/M_\infty = 1 - \frac{2}{b^2 - a^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \exp(-\alpha_n^2 D \cdot t) \dots \dots \dots (4)$$

但し、 A_n ：定数

図10の結果より、縦軸に水分増加量 $M(t)/M_\infty$ を、横軸に $(t - t_0)^{1/2} / (b - a)$ (b ：絶縁体の外半径、 a ：絶縁体の内半径)をとってプロットした換算吸水特性曲線と、(4)式に基づく理論曲線とにより各温度での水の拡散係数を求めると、90°C、60°C 及び 30°C の場合、それぞれ 1.64×10^{-8} 、 8.26×10^{-9} 、及

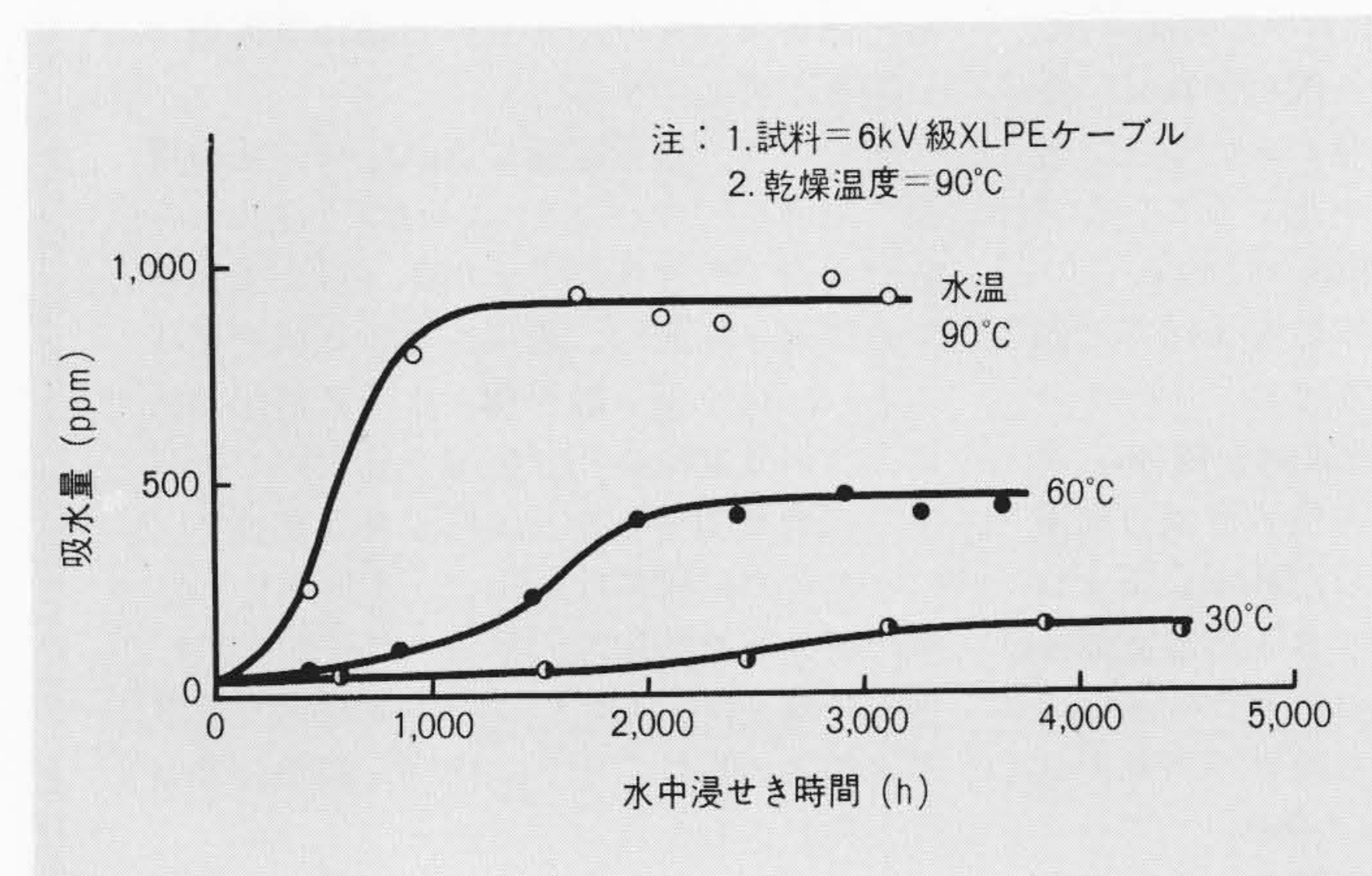


図10 水蒸気架橋XLPEケーブルの吸水特性(高温乾燥後)
XLPEケーブル絶縁体の吸水量は、高温になるほど多く、吸水速度も大きい。

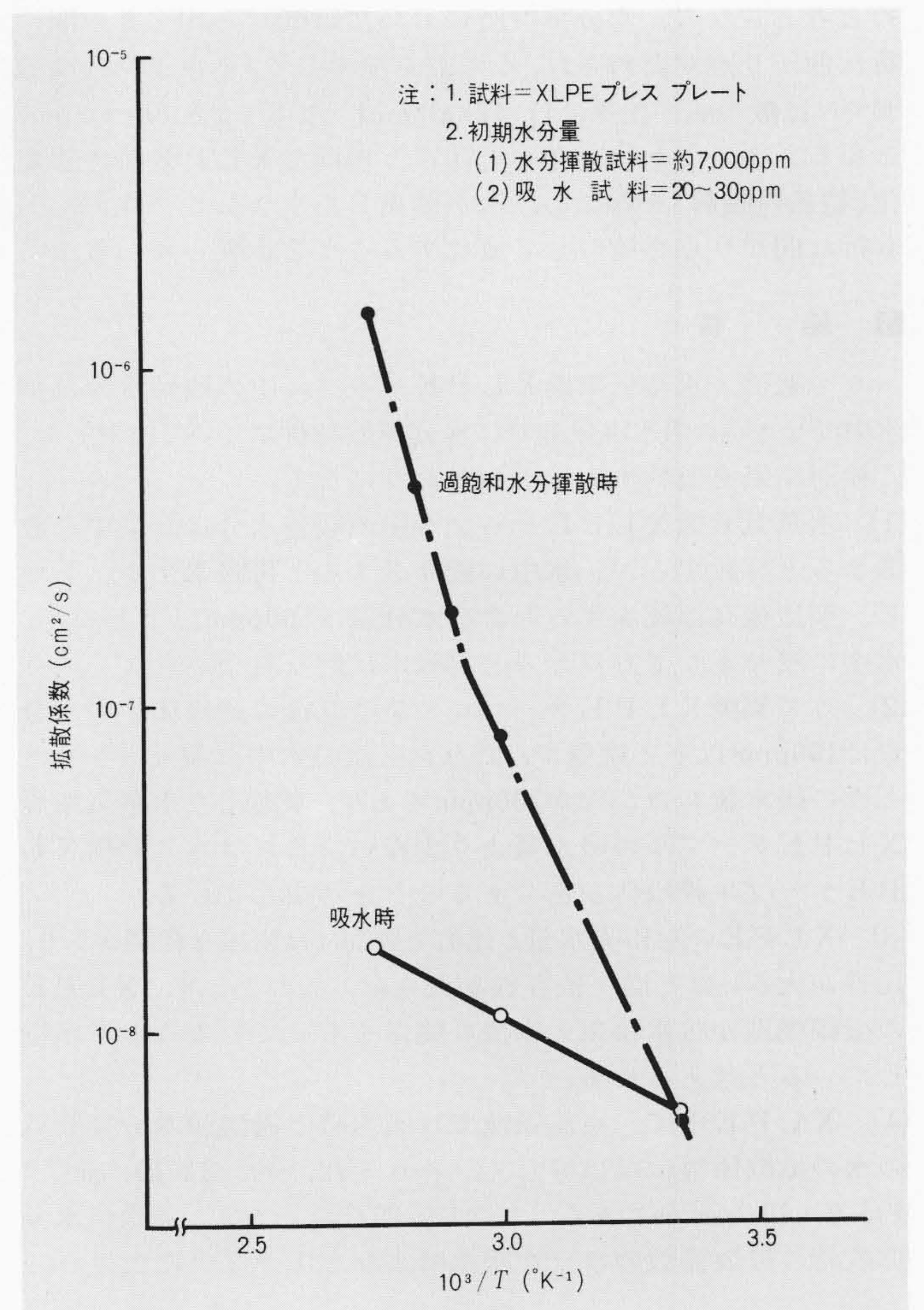


図11 XLPE中の水の拡散係数の温度特性 吸水時及び過飽和水分揮散時の拡散係数は、高温になるほど大きい。また、過飽和水分揮散時では60°Cと70°Cの間に折れ曲がり点がみられる。

び $4.96 \times 10^{-9} (\text{cm}^2/\text{s})$ となり、表1に示したプレス成形試料で求めた拡散係数よりわずかに小さい。この差はケーブルとプレス試料の実験条件の差に起因するものと思われる。すなわち、ケーブルでは外導側にだけ水が接触していたため、内導側から水分が揮散していたと考えられる。どちらにしても、ケーブル試料で得られた拡散係数とプレス試料で得られた拡散係数の差はわずかで、プレス試料で求めた拡散係数は、実ケーブル中への水の浸透速度を求める際にも適用できると考えてよい。

4.3 拡散係数の温度特性

(ポリエチレン+水)系のように水が高分子の非溶媒である場合には、拡散係数 D は通常、次式で示すArrhenius型の式で表わすことができる⁽⁹⁾。

$$D = K \cdot \exp(-E_d/R \cdot T) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 R ：気体定数

T ：絶対温度

K ：温度によらない定数

E_d ：拡散の活性化熱

図11は表1から得られたArrhenius Plotであるが、同図より、吸水時の拡散の活性化熱を求めると、 1.74 kcal/mol となり、PE(ポリエチレン)の活性化熱 2.33 kcal/mol より小さい。XLPEの活性化熱がこのようにPEより小さいのは、微細構造の差によるもので架橋した場合、水の拡散を促進するた

めと考えられる。水分揮散時においては60°Cと70°Cとの間に折れ曲がり点が認められ、その点を境にして、それよりも高温側では拡散の活性化熱は11.4kcal/mol、以下では6.8kcal/molとなる。このことは、60°Cと70°Cとの間でXLPEが状態変化(結晶の融解)を起こし、水が凝集して生じたマイクロボイドも折れ曲がり点を境にして変化することを示唆している。

5 結 言

ガス架橋・水蒸気架橋XLPEケーブル中の残留水分及び水中浸せき時の吸水現象並びに水分揮散特性について検討した。

検討結果を要約すると次のとおりになる。

- (1) 水蒸気架橋XLPEケーブル中の残留水分は、気中に放置すると揮散するが、水中に浸せきすると再吸水する。しかし、製造後高温乾燥すると含有水分量は500ppm以下となり、水中に浸せきしてもほとんど再吸水は起こらない。
- (2) ガス架橋XLPEケーブルの製造直後の絶縁体中の水分量は100ppm以下と微量で、これを室温の水中に浸せきさせたときの吸水量もただか100ppmであり、乾燥した水蒸気架橋XLPEケーブルの吸水量より少ない。これはガス架橋XLPEケーブル絶縁体が密であることを示唆している。
- (3) XLPEの飽和吸水量と比容との間には密接な相関があり、比容が大きいほど温度依存性が高い。このことは、XLPEの微細構造が吸水現象と密接な関係をもっていることを示唆していると考えられる。
- (4) XLPE中で、室温領域では吸水時と過飽和水分揮散時の水の拡散係数はほぼ等しく、それぞれ、 $約5.2 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $約5.0 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ である。しかし、25°C以上では、過飽和水分揮散時の拡散係数のほうが吸水時よりも1～2けた大きい。

拡散係数の活性化熱は、吸水時で1.74kcal/molとほぼ一定であるが、水分揮散時では70°C以下で6.8kcal/mol、70°C以上で11.4kcal/molである。

参考文献

- (1) 例えば、福田ほか「絶縁破壊事故架橋ポリエチレン電力ケーブルの水トリートメント」電中研技研報告 No.71061 (昭47) 関西電力株式会社「6kV CVケーブル経年性能調査に関する研究(第1部 既設ケーブルの経年劣化実態調査)」総研資料 No.73-062 ('73)
- (2) 宮下、井上「浸水課電ポリエチレン電線のTreeing現象」電気学会誌 90, 5, 937 (昭45)
- (3) 関井、池田「吸水架橋ポリエチレンの交流課電劣化」第7回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 171 ('74)
- (4) 島内、倉谷ほか「最近の物理化学実験法」南江堂 ('57)
- (5) 柚、関井ほか「ガス架橋PEケーブルおよび水蒸気架橋PEケーブルの吸水特性」電気学会全国大会講演論文集, 2, 287 (昭50)
- (6) 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」電学誌, 94-A, 7, 281 (昭49)
- (7) 例えば、室井「カールフィッシャー法による微量水分定量法」JAPAN ANALYST 12, 858 ('63)
- (8) J.Crank "Mathematics of Diffusion" Oxford ('56)
- (9) 高分子学会編「高分子と水分」(昭47-9)

論文抄録

3電極方式単管カラーカメラ用ビジコン

日立製作所 笹野 晃・中野寿夫, 他4名
テレビジョン 29-6, 485 (昭50-6)

業務用、教育用などの撮像機器として、単管カラーカメラが普及しつつあり、主として、周波数分離方式及び位相分離方式を中心として発展している。しかし、これらはストライプ状色フィルタにより変調された光学像を、電子ビーム走査により多重化信号電流として検出するため問題が多く、色一様性、ダイナミックレンジなどの特性面で3管式とは大きな差がある。これらの欠点を解決する方法としては、各色ごとに信号電極を分割した3電極方式が最も優れており、既に1950年代末にRCA社のWeimerらにより基本構造が発表されている。これは、3管式カメラの3本のビジコンを1本にまとめたのと等価な撮像管を使用するため、色の一様性などについては3管式相当の特性が得られる。しかし、3電極ビジコンのフェースプレート構造が他方式に比べ著しく複雑になり、高度な微細加工技術が必要となるため実用化されるに至らなかった。

3電極ビジコンでは、3原色のフィルタが多数並列して繰り返し配列されており、そのフィルタに対応して、ストライプ状の信号電極が形成されている。信号電極は、各色ごとに相互接続され、管球の外部へは3原色のそれぞれ独立した信号を取り出すことができる。この方式における問題点は、極めて近接して信号電極が配列されているため信号電極間の静電容量が大となり、各色信号間にクロストークを生ずることとフェースプレート構造の複雑さにある。

筆者らは、信号電極の本数を648本(20 μm ピッチ)とし、S/N比とクロストークの関係から、信号電極幅の最適値を12 μm と決定した。更に、フィルタと信号電極の間隔を色一様性の点から検討し、50 μm 以下とした。実際の構造は、フィルタと信号電極及びその相互配線構造を別々のガラス基板に製作し、信号電極を形成したガラス基板を研磨して、厚さ50 μm 程度の薄板としてから両者を接着剤ではり合わせる形とした。

この構造のうち、信号電極は極めて高精度にストライプ化されていることが必要であり、もし、この精度が不足していれば、再生画像にむらが表われる。また、その相互配線も完全であることが要求される。相互配線における1点の断線は、画面では1線の色むらとなり、1点の短絡は3電極の分離を不可能とする。

筆者らは、信号電極に SnO_2 の透明導電膜を使用し、スパッタエッチング法により全画面内での寸法誤差 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以下で製作する技術を開発し、更に、ガラス膜を絶縁体とし、Auを第2層導体とする2層配線法により信号電極の相互配線は無欠陥で形成する技術を開発した。試作した3電極ビジコンの光導電膜には、 Sb_2S_3 を使用した。本ビジコンを使用した単管カラーカメラは、色の一様性、ダイナミックレンジの点で3管式相当の特性を示し、保守、調整は非常に容易であった。