

500kV OFケーブル管路直接水冷実証試験

Actual Proof Test on Direct Water Cooling of 500 kV OF Cable laid in Duct

An actual proof test on the direct water cooling of a 500 kV OF cable in duct was conducted at the Higashi-Tokyo Cable Test Yard, Tokyo Electric Power Co., using a test specimen installed over a distance of 170 meters. The target test specifications for this test of almost one year duration were: Cable line length, 5 km; current rating, 1,800A; and transmission capacity, 1,500MVA. Cooling water for the test was cooled by the refrigerating equipment down to 10~35°C and was supplied at the rate of max. 20l/s/3φ.

This cooling test which was divided in the following four categories; winter cooling, continuous cooling, summer cooling, and cyclic load cooling, each lasting about two months, was aimed at studying water cooling characteristics of cables, circulating characteristics of water, stability of cables, and long-range reliability and serviceability of a cooling and circulating apparatus.

As to cable phase, to prevent local temperature rise of the cable joint oil slow circulation cooling was applied by means of a tentatively manufactured sealed type pump to check the effectiveness of the method.

渡辺達雄* Tatsuo Watanabe
岡 皓一** Kôichi Oka
片上浩三** Kôzô Katakami
山口正幸** Masayuki Yamaguchi
吉田博通** Hiromichi Yoshida

1 緒 言

東京電力株式会社と電線メーカー5社との共同になる大容量送電技術開発の一環として、東京電力株式会社と日立電線株式会社とは管路直接水冷の研究を行ない、東京電力株式会社東京実証試験場において500kV OFケーブルでの実証試験を実施した。

試験線路は、東東京変電所の隣接地に布設され、線路構成は500 kV 1×1,200 mm² アルミ被OFケーブル（一部分1×2,000 mm² 鉛被OFケーブル）管路および洞（どう）道部合わせて500m 三相1回線である。ケーブルは昭和45年5月に施工完了し、同年11月、初期誘電正接を測定した後、昭和46年1月より約1個年間、実証試験を実施した。

2 管路直接水冷方式の特性

管路内直接水冷方式は、ケーブル強制冷却方式の一つで下記の特徴を持っている。

- (1) 非冷却時送電容量を概略2倍にできる。
- (2) 絶縁系統と冷却系統が完全に分離されている。

今回は500kV OFケーブルによりシステムを構成し、管路内直接水冷の実証試験では1,500MVA/回線の送電容量を目標とした。表1は線路設計定格容量を、図1は本論文末尾記載の付記1.の計算式により計算した冷却水流量と許容電流の関係を示すものである。

3 冷却実証線路の構成

図2は、試験線路のレイアウトを示すものである。ケーブル線路は、全長500m 三相1回線より成る。主要部は、1×1,200 mm² アルミ被OFケーブル外径145mmφから成り、両端それぞれ約30mは1×2,000 mm² 鉛被ケーブルとなっており、冷却を施していない。

表1 線路設計定格容量 本表を想定してその200m分を試験線路とみなした。

Table 1 Ratings of Test Cable Line

項 目	記 号	設 計 値
電 流	I	1,800A
想定実線路亘(こう)長	L	5 km
二 次 冷 却 水 流 量	Q	20 l/s/3φ
二次冷却水入口水温	T_w	5 °C
熱 交 換 器 容 量	W	58 kW

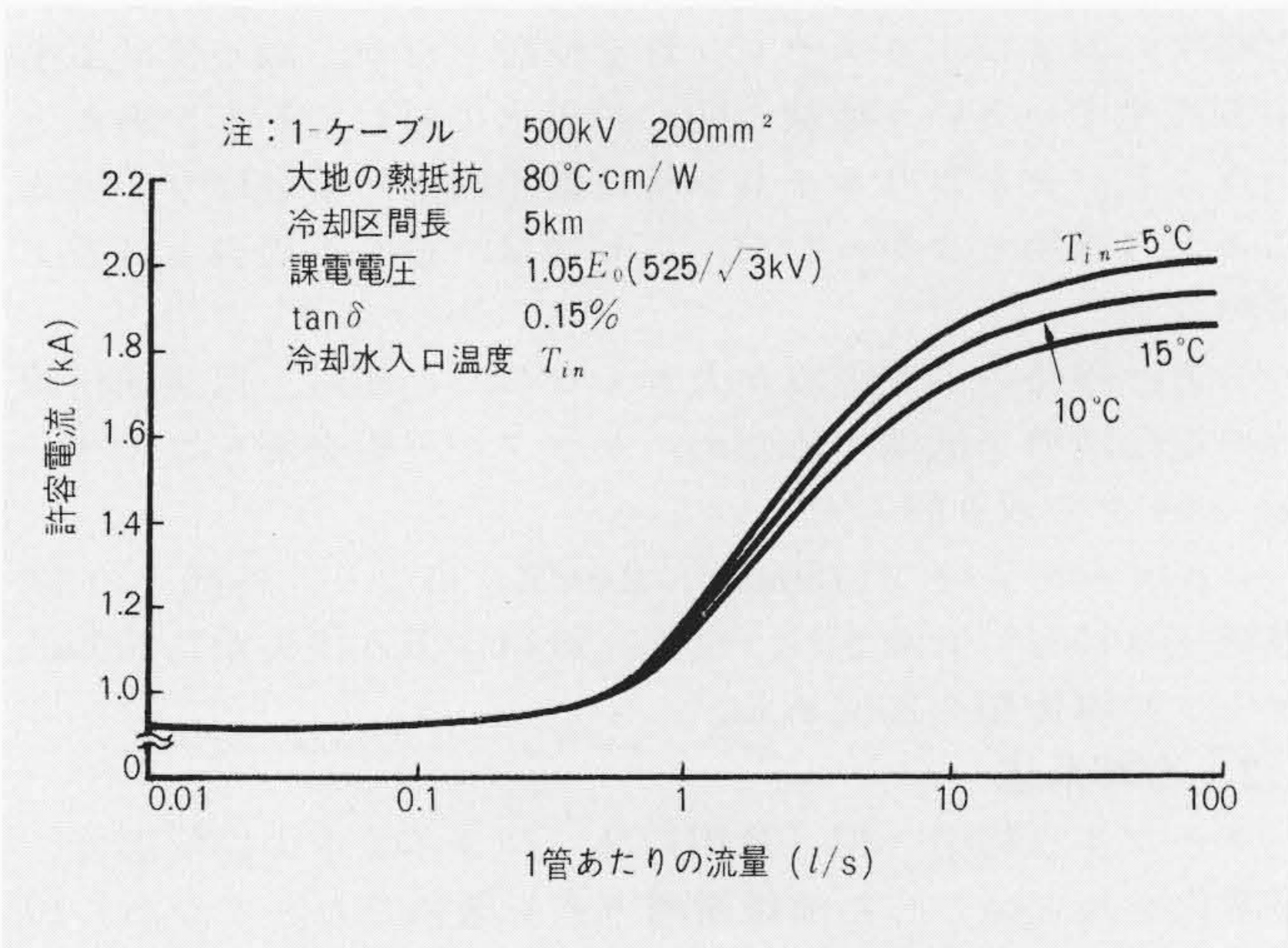


図1 管路直接水冷方式の冷却効果 非冷却時許容電流：920A、導体温度：80°Cである。

Fig. 1 Cooling Effect of Cable in Direct Water Cooling

* 東京電力株式会社技術開発研究所 ** 日立電線株式会社研究所

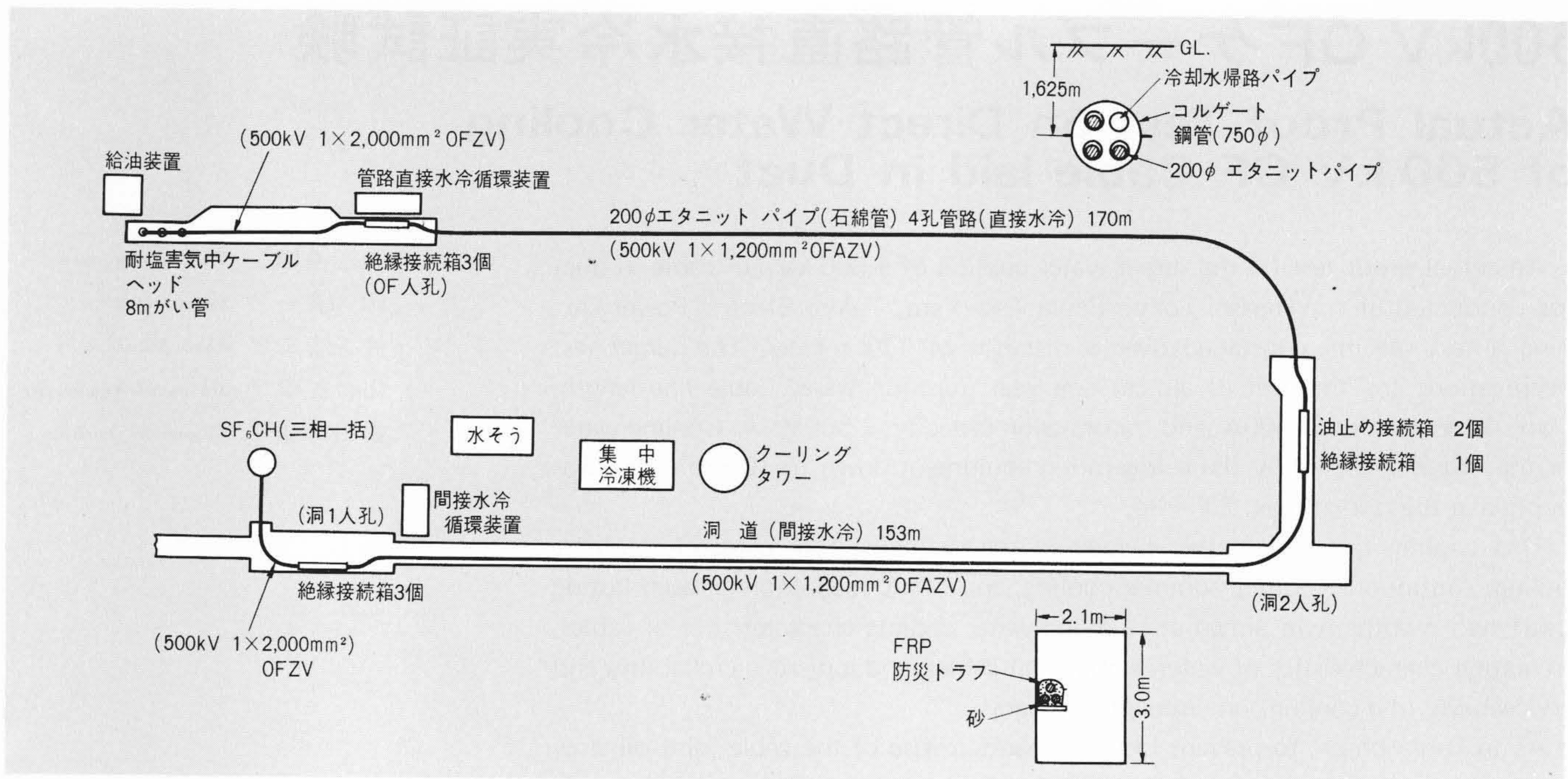


図2 500kV OF ケーブル実証試験レイアウト (千葉県野田市東東京変電所) 全線路長のうち半が管路布設, 他の半が洞道布設である。

Fig. 2 Layout of 500 kV OF Cables Actual Proof Test

全線路のうち, 半が管路布設方式, 他の半分は洞道布設となっているが, 本報告は管路布設部分について述べるものである。

ケーブルおよび付属品の詳細については別に報告されているので省略する。

3.1 ケーブル管路

管路は通常のケーブル用管路としての機能のほかに, 水密性が要求される。さらに一般的には水温 60°C 程度まで許容されるものが望ましく, かつ1孔1条布設線路では非磁性が要求される。この条件を満たすものとして, 継手にカラージョイントを使用した石綿セメント管(内径 $200\text{mm}\phi$)を採用した。管路材料としては, その他に, 塩化ビニル管(以下, 塩ビ管と略す)およびポリエチレン管を検討したが, 塩ビ管は工事中割れやすいという経験と 60°C の温水に対して不安があるということ, またポリエチレン管は継手内面に溶融ばりが出ることから採用しなかったが, 塩ビ管は, 全く不適当とは考えていない。

一方, 線路の通電電流が大きくなることから, 仮想通信線への電磁誘導を低減するため, ケーブル三相全部をコルゲートパイプで取り囲んだ。

コルゲートパイプ($750\text{mm}\phi$, 2mm 厚)により, 外部への誘導電圧は15%に低減され, 反面, 鉄損による損失が $1,200\text{mm}^2$ ケーブル導体損の20%ある。

3.2 冷却系統

ケーブル三相中一相(B相)は, ジョイントの局部温度の平準化をねらいとした油緩循環方式を適用した。すなわち $10\sim 20\text{cc/s}$ の緩循環油を SF_6CH 側から送り込み8m気中ケーブルヘッド側から引き出した。駆動ポンプにはモータとインペラを磁力結合した完全密封形のポンプを自社製作した。

その他の相は, 油緩循環を適用していないので, ジョイントボックスには冷却胴管をかぶせて外部水冷した。

外部冷却水は, 図2のOF人孔側から洞2人孔側へ流し,

リターンパイプで帰して閉ループとした。

3.3 冷却循環装置

実証試験は, 線路長5kmを想定し, その中の一部200m分を試験線路で実証するという考え方を採り, 送水ポンプには線路長5kmの冷却可能な規模のもの, 熱交換器には, 200m分の発熱量を吸収する規模のものを設置した。

熱交換器には, 点検容易ということから日阪プレート式熱交換器EX-7-T形を使用し, 送水ポンプは, 最大流量 $1.2\text{m}^3/\text{min}$, 所要全揚程50mを満たすため, 日立GME形多段タービンポンプ $100\times 4-515$ 形4段(15kW)を用いた。

3.4 マンホール内ケーブル水管

マンホール内ケーブルオフセット部分には, 可とう性塩ビホースを用いたケーブル冷却用水管をかぶせた。ジョイント組立てのため, 水管は $200\text{mm}\phi$ および $250\text{mm}\phi$ 管をテレスコピックにスライドし, 異口径継手を用いて組み立てる構造とした。水管の常用水圧は $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下である。一方, 冷却水圧はケーブル油圧との関連から $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下と想定した。

ケーブルの伸び出しは可とう性塩ビ管の伸縮で吸収する。

止水部は, ケーブルビニル防食層に, ビニル製フランジを溶接して水密性を持たせ, 鉛工部を気中へ露出させた。

4 接続部および終端部の温度上昇

接続部および終端部は, 熱抵抗が大きいため, 管路水冷線路の許容電流は, 実質的にこの部分で制約される。

表2は500kV OF $1\times 1,200\text{mm}^2$ または $1\times 2,000\text{mm}^2$ 付属品の工場における温度上昇実験から, みかけの熱抵抗 R_{th} を求めて示したものである。

$$R_{th} = T/W$$

ここに, R_{th} : みかけの熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$)

T : 導体温度上昇 ($^{\circ}\text{C}$)

W : 導体発生損失 (W/cm)

図3は $1,200\text{mm}^2$ および $2,000\text{mm}^2$ 絶縁接続部の温度分布であ

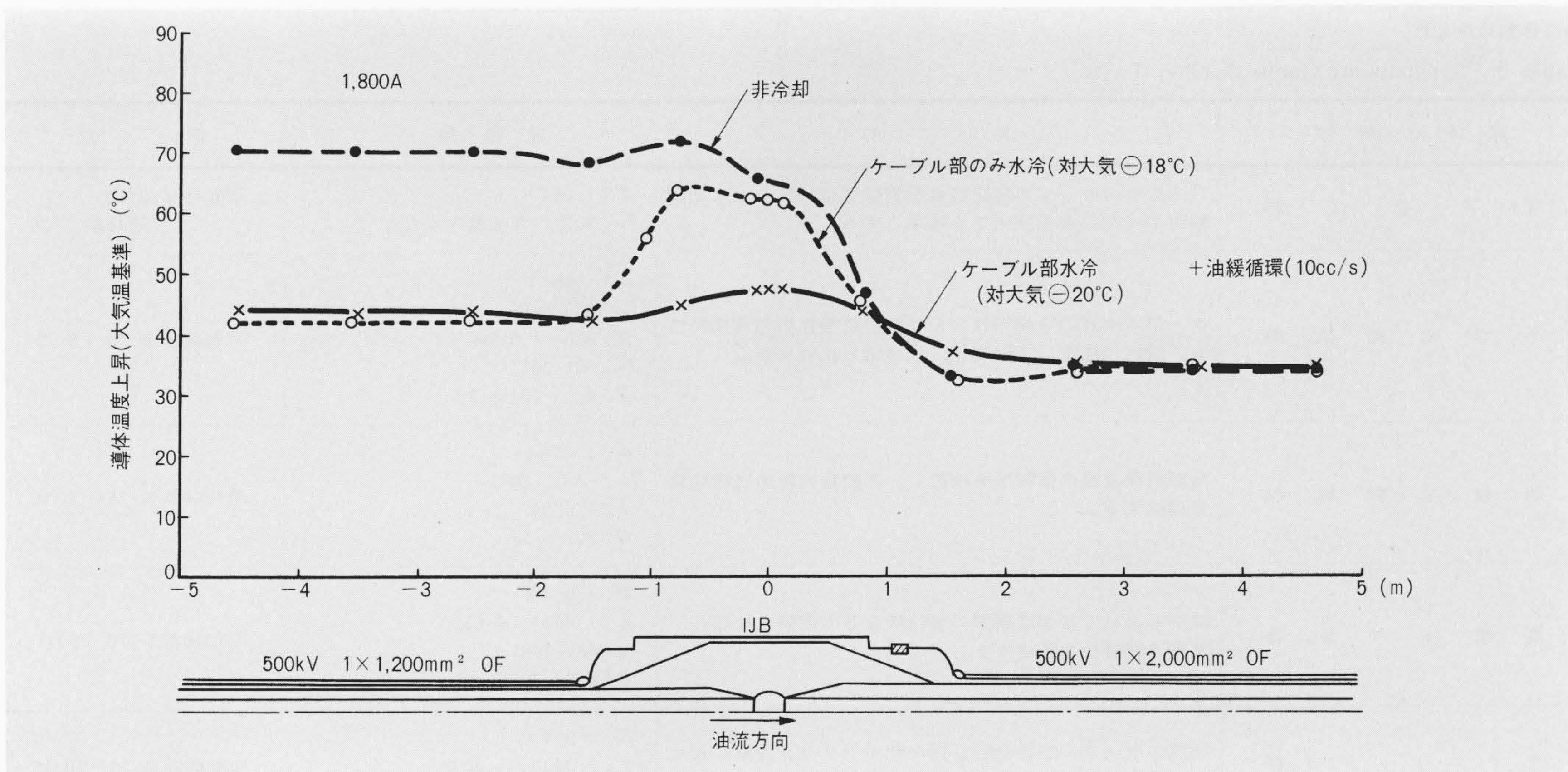


図3 500kV OF ケーブル絶縁接続箱の温度上昇(大気温基準) 外部冷却した場合、油緩循環の
ならし効果がある。

Fig. 3 Temperature Rise of 500 kV OF Insulating Joint (Based on Ambient Temperature)

るが、油緩循環方式はケーブル内油通路の油をゆっくり流すことにより、接続部の局所的な高温部分をならそうとするものである。必要な油緩循環量は実験的検討の結果、油緩循環量10～20cc/sが適当で、それ以上ふやしても、ならし効果は飽和してしまうことが判明している。反面、油止め接続箱が油緩循環の出口側になった場合、油緩循環はかえって温度を上げるように作用して逆効果となる。したがって、油止め接続箱のはいった実線路では、さらになんらかの工夫をしなければ油緩循環方式は適用できない。

東東京変電所における実証試験では、接続部および終端部の温度はケーブル本体と全く同等には押え得ないため、ケーブル部最高温度80℃、接続および終端部のそれを85℃とした。

5 冷却実証試験とその結果

5.1 冷却試験の概要

昭和45年12月より約1個年間にわたり、各種の冷却試験を行なったが、その概要は表3に示すとおりである。おもな目的は、

- (1) 冷却可能送電容量を確認すること。

- (2) ケーブル冷却線路が異常のないことを確認すること。

- (3) 冷却循環装置の長期信頼性を確保すること。

結果的には、洞道部との関係で最大1,650 Aまでの冷却試験を約1個年間実施し、そのうえ2ヶ月間は導体温度変化 $\delta T_c=37^\circ\text{C}$ (1,600 A ON, OFF)のサイクリック試験を行なった。

5.2 小流量実験

冷却水温度上昇の定量的な検討を行なうため、冷却水流量を装置定格20l/s/3φより大幅に減らし、0.9l/s/3φで小流量実験を行なった。大地との熱流入について実験値を計算値と比較したところ、土壌固有熱抵抗80℃・cm/W、基底温度30℃として計算したものがよく一致した。なお、土壌熱抵抗は別途実測では、100～120℃・cm/Wが得られており、実測大地温度は、地表下500 mmの地点(管路の上750mm)のそれが28℃、管路と同一レベル地点(管路より750mm離れた点)は20℃であった。また、実測データから、線路両端の配管部分および人孔内水管部分ではおのおの2 kW程度ずつの熱量が吸収されていると考えられる。

5.3 冬季と夏季の冷却実験比較

試験最大電流1,650 A、常規使用電圧525kV/√3 課電のもとに、装置設計流量ほか二、三の点で、冬季冷却試験と夏季冷却試験を行ない両者の比較を見るとともに、線路の実証性を確認した。

また、冷却試験と対比させるため、冬季非冷却試験として計算値許容電流890 Aに対して、通電初期950 A、定常時840 Aを1ヶ月間通電し、定常時導体温度68℃(土壌温度15℃)を得ている。このことは、許容電流計算値890 Aが実際にも、ほぼ妥当であることを示している。

図4は、1,600 A 通電時のケーブル表面温度の夏季および冬季の分布を示すものである。同図(a)では水温上昇が小さいため、測定誤差がからんで表面には出ていないが、(b)では、夏季と冬季の差がはっきり出ている。

表2 500kV OF ケーブルおよび付属品の熱抵抗

Table 2 Thermal Resistance of 500 kV OF Cable and its Accessories

ケーブル (1,200mm ²)	普通接続箱 (1,200 : 2,000mm ²)	油止接続箱 (1,200mm ²)	気中ケーブル ヘッド (2,000mm ²)	SF ₆ ケーブル ヘッド (2,000mm ²)
82.7 *	114 (99) **	121	124	99 ***

注：*ケーブルのみ導体-防食層表面間熱抵抗、他は導体-大気間熱抵抗

** ()内は油緩循環 10cc/s のときの熱抵抗

*** ガスタンクなしで測定した値

表 3 冷却試験の概要 試験期間（昭和45年12月10日～同46年10月15日）における試験の種類、目的、試験条件別に示した。

Table 3 Synopsis of Cable Cooling Tests

試験の種類	目的	試験条件	期間
非冷却試験	非冷却時のケーブル電流容量を実験的に検証し、冷却試験時の冷却効果を評価する基準とする。	$E: 1.05E_o$ $T_c: 80^\circ\text{C}$ 以下管路内水なし	昭和45年12/10～ 同46年1/25
冬季冷却試験	ケーブル線路の冷却特性ならびに熱交換器の熱交換特性を実験的に検証して計算値、設計値と比較する。	$E: 1.05E_o$ $T_c: 80^\circ\text{C}$ 以下 $I: 850\sim 1,650\text{A}$ $T_w: 10\sim 26^\circ\text{C}$ $Q: 4.5\sim 20\text{l/s/3}\phi$	昭和46年1/25～5/3
連続冷却試験	冷却循環装置の信頼性を検証し、連続負荷時の送電容量を確認する。	$E: 1.05E_o$ $T_c: 58^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}$ $I: 1,650\text{A}$ $Q: 20\text{l/s/3}\phi$	昭和46年5/15～7/15
夏季冷却試験	線路および冷却循環装置の熱特性を冬季実験と比較し、夏季冷却特性を確認する。	$E: 1.05E_o$ $I: 1,400\text{A}, 1,650\text{A}$ $T_c: 54\sim 76^\circ\text{C}$ $Q: 0.9\sim 20\text{l/s/3}\phi$	昭和46年8/10～9/7
サイクリック試験	実際のケーブル使用状態に近いサイクリック通電に対して、線路の異常の有無を確認する。	$E: 1.05E_o$ $I: 1,000\text{A}, 1,600\text{A}$ 14時間ON+10時間OFF	昭和46年9/17～10/15
初期誘電正接測定	同左	$E: 0.5E_o, 1.0E_o, 1.25E_o, 1.38E_o$ $T_c: 20, 60, 80, 95^\circ\text{C}$	昭和45年11/9～11/25
中間期誘電正接測定	同左	$E: \text{上に同じ}$ $T_c: 80^\circ\text{C} (I=1,350\text{A})$	昭和46年7/19
冷却試験終了時誘電正接測定	同左	$E: \text{上に同じ}$ $T_c: 20, 60, 80, 95^\circ\text{C}$	昭和46年11/22～12/10

注：E＝課電電圧， T_c ＝導体温度，I＝電流， T_w ＝水温，Q＝冷却水量， $E_o=500\text{kV}/\sqrt{3}(289\text{kV})$

管路を冷やす冷却水（熱交換器二次側冷却水）が管路から奪ってくる熱量 W_1 （必要冷却量）と熱交換器一次側冷却水が奪っていく熱量 W_3 を水温実測値から算出すると、 W_1, W_3 ともに夏季は冬季より10kW多い。

計算では、大地基底温度を15℃と30℃にとった場合、その差は7～8kWとなる。測定値はこれより大きくなっているが配管部での熱損失を考えれば妥当な値といえよう。

また、 W_3 と W_1 の差を比較してみると、夏季と冬季とではほとんど違いはない。これは熱交換器周辺の熱損失が、夏季と冬季とで大差ないことを示しており、冷却装置は熱損失の面で問題がないといえよう。

5.4 境膜熱抵抗

冷却水とケーブルシース間の熱抵抗、すなわち境膜熱抵抗 R_w は、実験結果は図5のようになり、実用的には発生熱量、冷却水流量（流速）にあまり関係なく、 $R_w=4\sim 5^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ の値が得られている。

一方、円管内の流体と管との間の熱伝達率を示す諸式としていくつかあるが、これらは数値的には似かよっており、一例としてColburnの式、

$$Nu \equiv hd/\lambda = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3}, (10_4 < Re < 1.2 \times 10^5, 0.7 < Pr < 120)$$

から R_w を算出すると0.38℃・cm/Wとなり、実測値より1けた低い。

その差が、管外流体と管内流体の差異か、あるいは水あかによるよごれの影響であるのかとも思われるが、境膜熱抵抗 R_w は、流量、断面サイズにあまり関係なく5℃・cm/W程度と

みるのが実用的であろう。

5.5 損失水頭

付記2. に冷却水による損失水頭計算式を、また図6に実測値との対比を示した。

管路出入口の高低差は1.3mあり、一方、圧力損失実測値は0～0.1kg/cm²と小さいため、測定誤差は大きい。

B相はケーブルに5本の熱電対が付いており、管路出口付近で束になって圧力損失を増している可能性がある。

一般に、冷却水圧の制限から管路水冷の単位冷却区間長は制約され、冷却水圧がケーブル油圧3kg/cm²Gを越えないように考慮すれば、一冷却区間長は最大5km程度となる。

5.6 ケーブル移動量

ケーブル移動量は図2の管路布設ルートの両端、すなわちOF・Manhole（以下、MHと略す）と洞2MHの管路口でγ線撮影により実測した。

ルートには5mRの直角曲り部が洞2MH近傍にあり、MH内ケーブルオフセット部分には冷却水管がかぶせてあるだけゆえ、管路口における反抗力は、きわめて小さいものと思われる。表4は、実測結果を計算値と対比して示したものであり、比較のため管路内水なしで実測したデータも載せてある。

その結果、管路内に水がはいった場合は、水なしの場合の約2倍の移動量が出ていること。実測値を計算値と比べれば、ルート中央を静止点とみた計算値に近く、それより若干小さめに出ている。

サイクリック通電期間中、ジョイントの軸と垂直方向の移

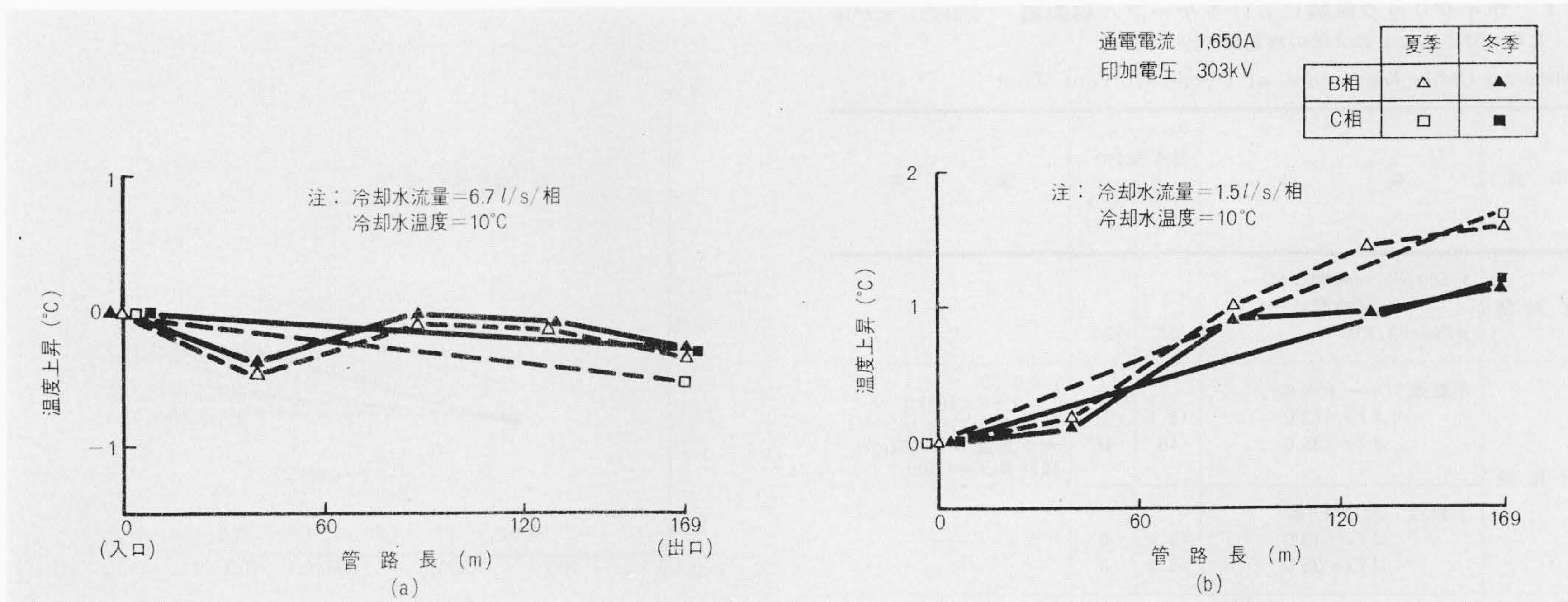


図4 ケーブル表面温度 夏季と冬季の場合の冷却実験比較を示したものである。

Fig. 4 Cable Surface Temperature Comparison of Summer and Winter

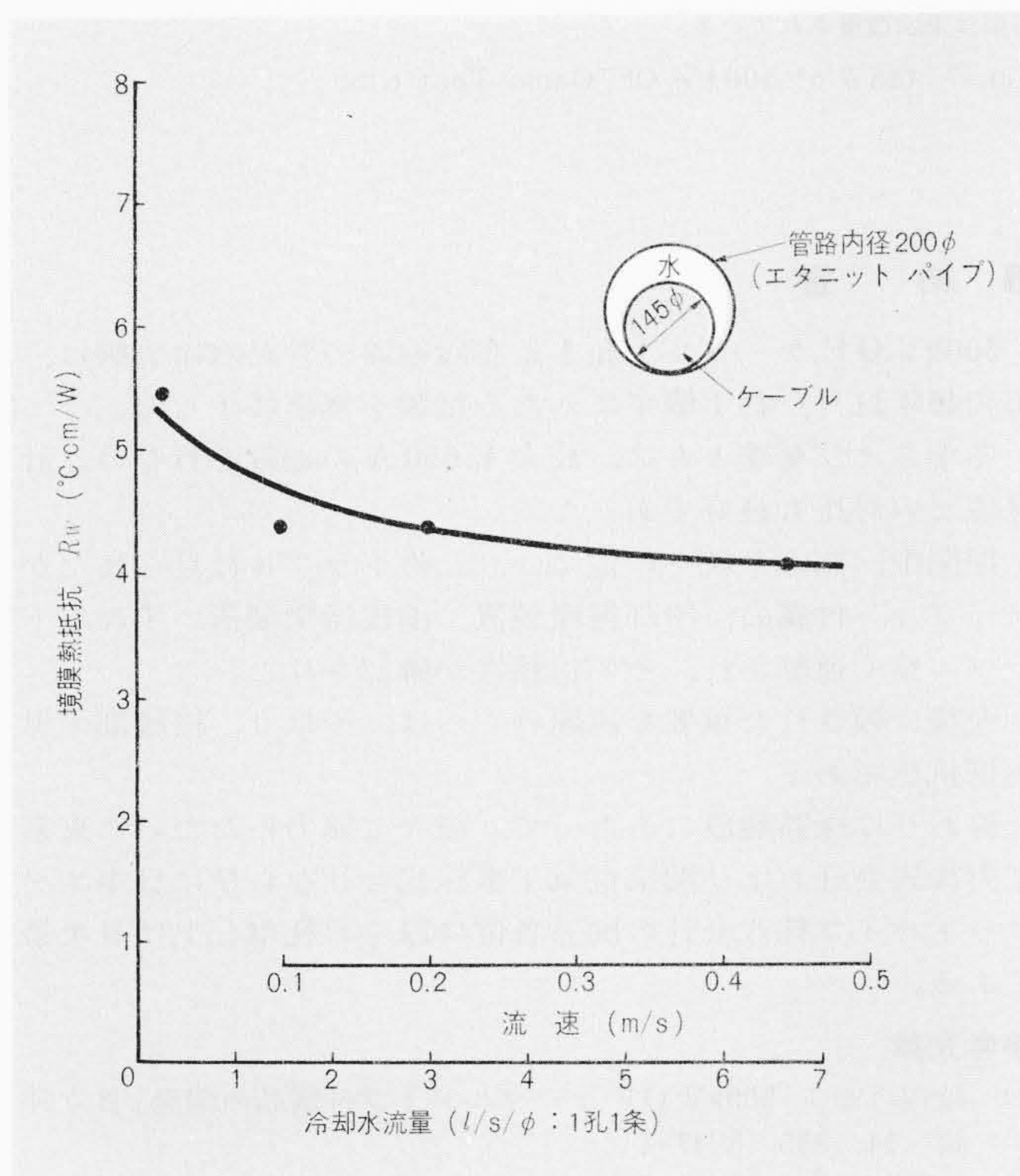


図5 境界熱抵抗実測値 冷却水流量によりあまり大差ない。

Fig. 5 Interface Thermal Resistance of Cable and Water

動量を実測した結果、Insulation Joint Box（以下、IJBと略す）の移動量は最大3mm、Stop Joint Box（以下、SJBと略す）は全く移動しなかった。

ジョイントの布設はいずれも可動形としてあるが、IJBはサイクリック試験以前の通電で、すでに腕金ストッパにつかえた格好(かっこう)になっていて動き得ない。また、SJBは可動形であるが、重量が大きいため、移動していない。

以上、いずれもジョイントは固定布設と同等の実験となっているが、ケーブルおよびジョイントとも異常はなかった。

今回の実験に対するシースひずみを計算すると、

$$\varepsilon_m = \frac{6rM}{F\sqrt{L^2 + F^2}}$$

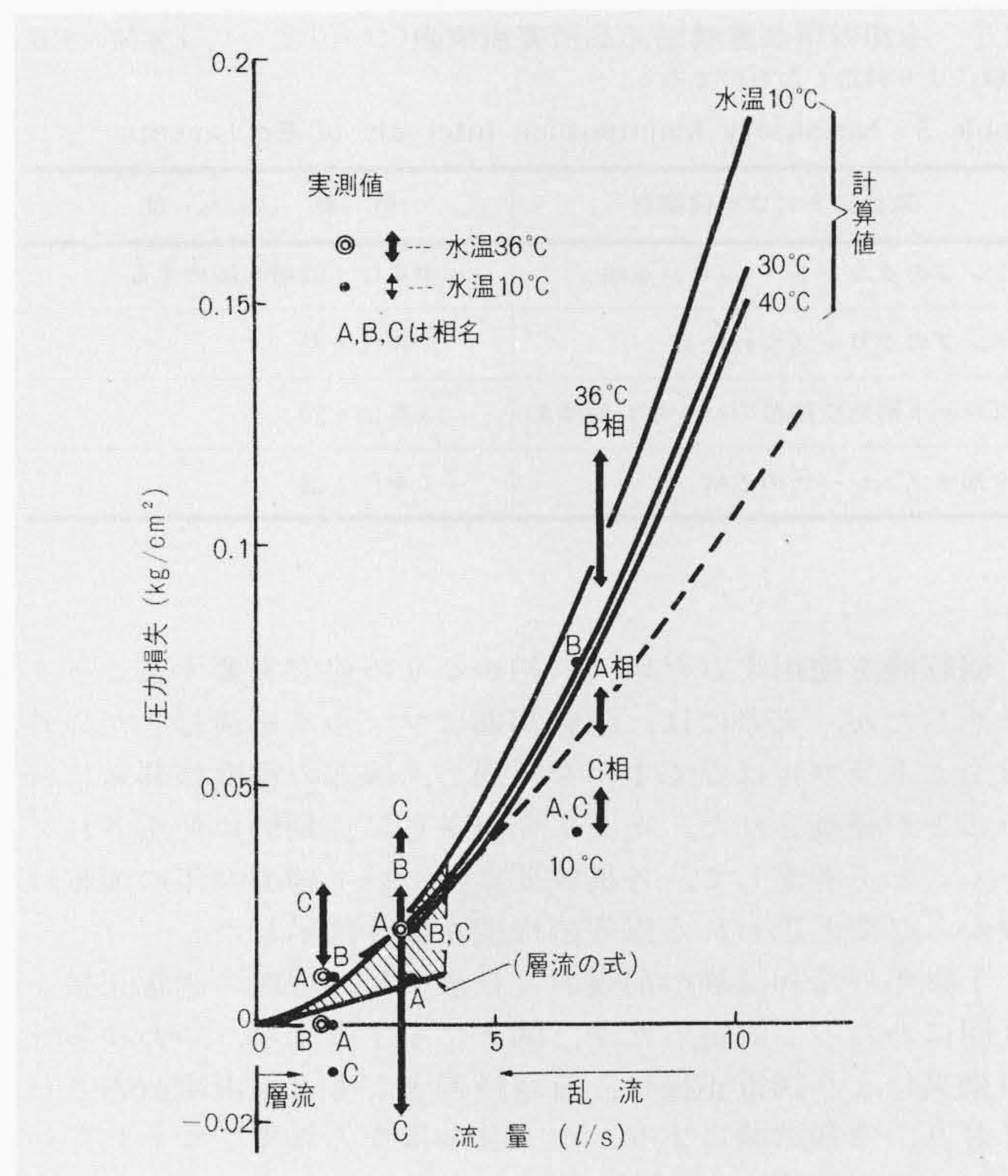


図6 管路の圧力損失 測定絶対値が小さく誤差が大きいが、理論値と一致しているとみなせる。

Fig. 6 Pressure Drop of Water Cooling Pipe

F (オフセット幅)=1.5m, L (オフセット長さ)=5.2m
 M (ケーブル移動量)=35mm, r (ケーブル半径)=72.5mm
を用いて、 ε_m (最大ひずみ)=0.187% となり、アルミシースの許容ひずみ0.25%以下となっている。

また、オフセット形状は、最小曲げ半径=3.5mとして布設した。

5.7 長期安定性

冷却循環系統は昭和46年1月より約1年間にわたって、ほとんど連続的に運転されたが、その間、設計上一、二の問題点が散見されたほかは全く無事故で運転され、管路水冷方式の実用性が検証された。

表4 サイクリック試験におけるケーブル移動量 管路内に水がはいった場合は、水なしの2倍の移動量が出ている。

Table 4 Cable Movement at Cyclic Current Test

項目	条件	ケーブル移動量(mm)		備考
		OF MH	洞2 MH	
実測値	I, 600A 14時間ON 10時間OFF $\Delta T_c=33.7^{\circ}\text{C}$	35	20	
計算値	不動点：ルート中央 $\Delta T_c=13^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_c=35^{\circ}\text{C}$	13.1 46	13.1 46	$\mu=0.35$ $E=0.52\times 10^4\text{kg/mm}^2$ 重量 $W=29\text{kg/m}$ 水中重量 $W'=13\text{kg/m}$ 線路長 $l=170\text{m}$
	不動点：洞2 MH側 $\Delta T_c=13^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_c=35^{\circ}\text{C}$	16.4 83.2	0 0	
実測値 管路内：水なし	$\Delta T_c=35^{\circ}\text{C}$	12	—	非冷却試験

表5 冷却循環装置構成部品所要点検頻(ひん)度 1年間の実証試験により判定したものである。

Table 5 Nessesary Maintenance Intervals of Equipments

取換えまたは点検箇所	所要ひん度
ポンプのグランド パッキン点検	半年に1回増し締めする。
ポンプのグリースつめ換え	1年に1回
プレート形熱交換器のパッキン取換え	3年に1回
冷却水ストレーナの点検	1年に1回

回転機を使用するため、当初かなりの保守を要することを予想したが、実際には、運転初期にフィルタを清掃した以外は全くトラブルはなく1年を経過し、保守の程度は非常に軽いことが経験された。そこで今後さらに長期的に使用されていくことを考慮して、各構成要素について約1個年の運転経験から必要と思われる保守の程度を表5に示した。

1個年の冷却試験の前後および最中に、線路の誘電正接を3回にわたって測定したが、図7に示すように、いわゆる経年効果により誘電正接は、日時経過とともに、漸次改善されており、冷却試験により、ケーブルはなんらそこなわれていないことを確認することができた。

付 記

1. 冷却時許容電流

許容電流 I は導体温度を $T_c(=80^{\circ}\text{C})$ として下式で表わされる。

$$I = \sqrt{\frac{W - W_d}{\{1 + 0.00393(T_c - 20)\}(1 + p)k_s R_{20}}}$$
$$W = \frac{T_c - T_a(1 - e^{-\frac{L}{CQR_5}}) - T_{in}e^{-\frac{L}{CQR_5}}}{R_5(1 - e^{-\frac{L}{CQR_5}}) + R_1}$$

ここに、 Q ：冷却水流量、 L ：冷却区間長、 C ：水の熱容量（ $=4.18\text{W}\cdot\text{s}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^3$ ）、 R_5 ：外部（大地）熱抵抗、 W_d ：誘電体損、 p ：シース損失率、 T_a ：大地基底温度、 T_i ：冷却水入口温度、 R_{20} ： 20°C における直流抵抗、 k_s ：導体表皮係数、 R_1 ：ケーブル

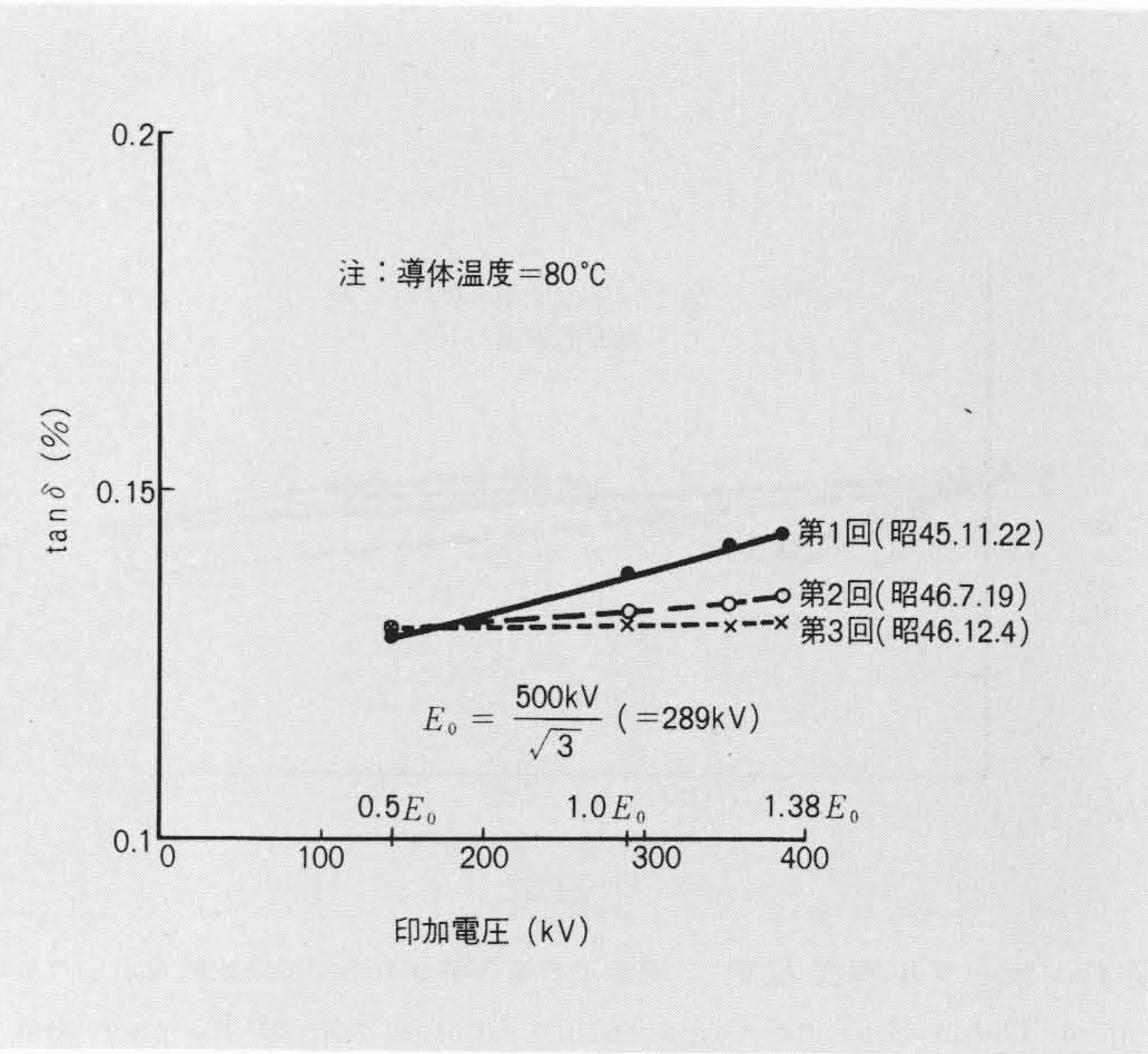


図7 500kV OF ケーブル $\tan \delta$ 特性の推移 経年効果により誘電正接は漸次改善されている。

Fig. 7 $\tan \delta$ of 500 kV OF Cable Test Line

6 結 言

500kV OF ケーブル1孔1条布設線路の管路水冷実験は、昭和46年11月、約1個年にわたる試験を無事終了した。

冬季および夏季ともに、最大1,650Aの通電を行ない、計算値との対比も良好であった。

期間中、測定系統その他に一、二のトラブルは見られたがケーブル、付属品、冷却循環装置、油緩循環装置いずれもトラブルなく運転され、その信頼性が確認された。

今後に残された重要な課題の一つは、やはり、接続部の低熱抵抗化である。

終わりに線路建設にあたって、種々ご協力いただいた東京電力株式会社および関東電気工事株式会社ならびに日本エタニットパイプ株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 渡辺ほか：「500kV OF ケーブルおよび付属品の開発」日立評論 54, 355 (昭47-4)
- (2) 機械工学便覧 8-18 (昭43)

熱抵抗

2. 管路の圧力損失

互いに偏心距離 δ をなす内径 $2a$ の外管と外径 $2b$ の内管の間にある流体(水)の乱流域における損失水頭 $H(\text{m})$ は次式で表される。

$$H = \lambda m \frac{L}{m} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{ただし, } R_{e2} = m \frac{v}{\nu},$$
$$m = \frac{2a-2b}{4}, e = \frac{2\delta}{2a-2b}, \varepsilon = \frac{2b}{2a}$$
$$\lambda m = 0.059(1 - \varepsilon)^{-0.095} (1 - 0.164e^{2.2}) R_{e2}^{-0.25}, \quad \text{適用範囲: } 3,000 < R_{e2} < 41,000, L: \text{長さ}, v: \text{流速}, g = 9.8\text{m/s}^2,$$

ν ：動粘度(水の動粘度は、 $1.31 \times 10^{-6}(10^{\circ}\text{C})$, $0.804 \times 10^{-6}(30^{\circ}\text{C})$)