

22 kV 発電所主幹ケーブルの内部強制水冷

Forced Water Cooling of Conductor for 22 kV Power Cable in Power Station

岡 皓 一* 山 口 正 幸*
 Kōichi Oka Masayuki Yamaguchi
 大 堀 利 之** 市 毛 敏 明**
 Toshiyuki Ōbōri Toshiaki Ichige

要 旨

発電所主幹ケーブルとして、発電機電圧 15~22 kV、所要電流 10 kA の規模を目標にして、22 kV ソリッド形内部強制水冷ケーブルを開発した。

ケーブルには通水路に銅パイプを使用し、完全水密形の構造として、可とう性の検討、通電特性の確認を行った。

特に技術的なかなめとなるケーブル端末には、スパイラル状に巻いた絶縁性流水管をエポキシモールドした堅ろうでコンパクトな導水部を試作し、良好な特性を得ている。

本ケーブルによって、非冷却ケーブルの 3~5 倍の電流容量をとることができる。

1. 緒 言

近年、大容量発電所の出現によって、これらの発電所に用いられる主幹ケーブルの電流容量も大幅に増加してきている。特に電流容量が 10 kA 程度になると、従来のソリッドケーブルではかなり多条のケーブルを布設するか、密閉母線を用いる必要があり、設備、工事の経費が膨大になる。

これに対して、設備の簡易化、コンパクト化を意図して開発したのが、ここに述べる導体内部を直接冷却する、いわゆる内部水冷式ソリッドケーブルである。

2. ケーブルの構造

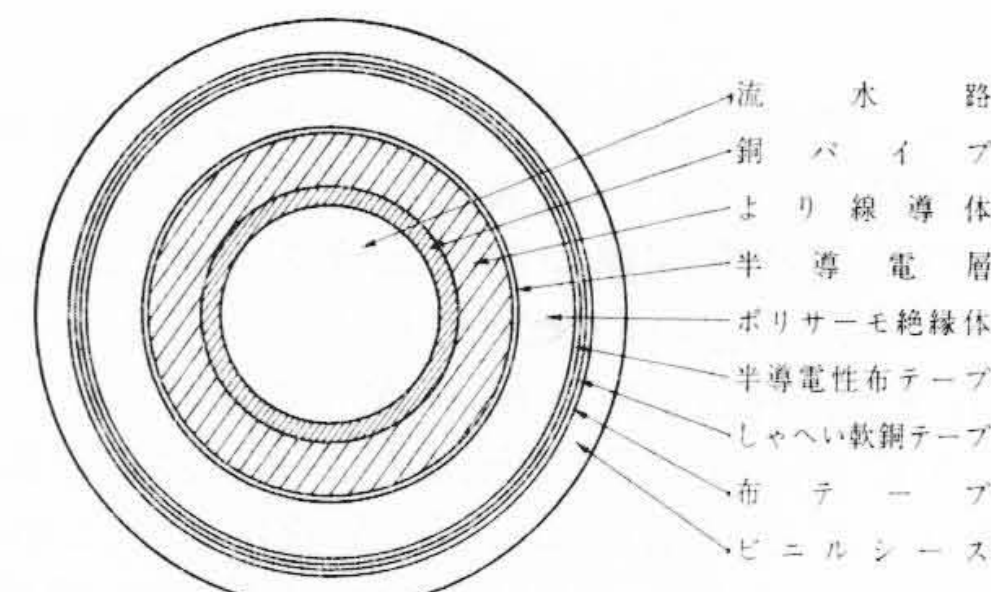
ケーブルの断面構造は図 1 に示すとおりである。高圧ケーブルであるため絶縁体への浸水は許されないので、導体内の通水路に銅パイプを使用し、その周囲により線層を設けた導体とした。

電流容量をできるだけ大きくするため、絶縁体には、ポリサマーモ（連続許容温度 95℃、短時間許容温度 130℃）を使用した。

銅パイプは、1 条約 60 m が限界であるため、銀ろう付けによる銅パイプの接続方式を確立した。接続部の屈曲試験を行なった結果によれば、接続部は銅パイプ本体よりもむしろ補強された状態になっていることが確認された。

導体サイズ 325 mm² の規模のもので、導体より線時の作業性や、機械的強度を検討するため、銅パイプとして、肉厚 1.0 mm, 1.5 mm, 1.8 mm（外径はいずれも 20 mmφ）の 3 種類のパイプについて試作を行なった。その結果、パイプの変形、作業性の面から、肉厚 1.5 mm のパイプが最適であることが判明した。

この種ケーブルの可とう性は通水用銅パイプがあるために、通常より線導体ケーブルよりもかなり劣るが、布設曲げ半径 1 m 程度では特に支障はない。図 2 は可とう性のデータを通常より線導体ケーブルと比較して示したものであるが、これによれば EI（曲げかたさ）は通常より線導体ケーブルより 1 けた高い。なお、1 m R（20 倍）にまで曲げたのち、破壊試験を実施したが、実用上、布設時にそれほど多くの繰返し曲げはないと考えれば、1 m R（20 倍）の布設は可能である。



備考
 1. 銅パイプ仕様
 日立無酸素銅（軟質）
 外径 20mm、肉厚 1.5mm
 2. ケーブル仕上り外径
 約 56mm

図 1 内部水冷ケーブルの断面構造

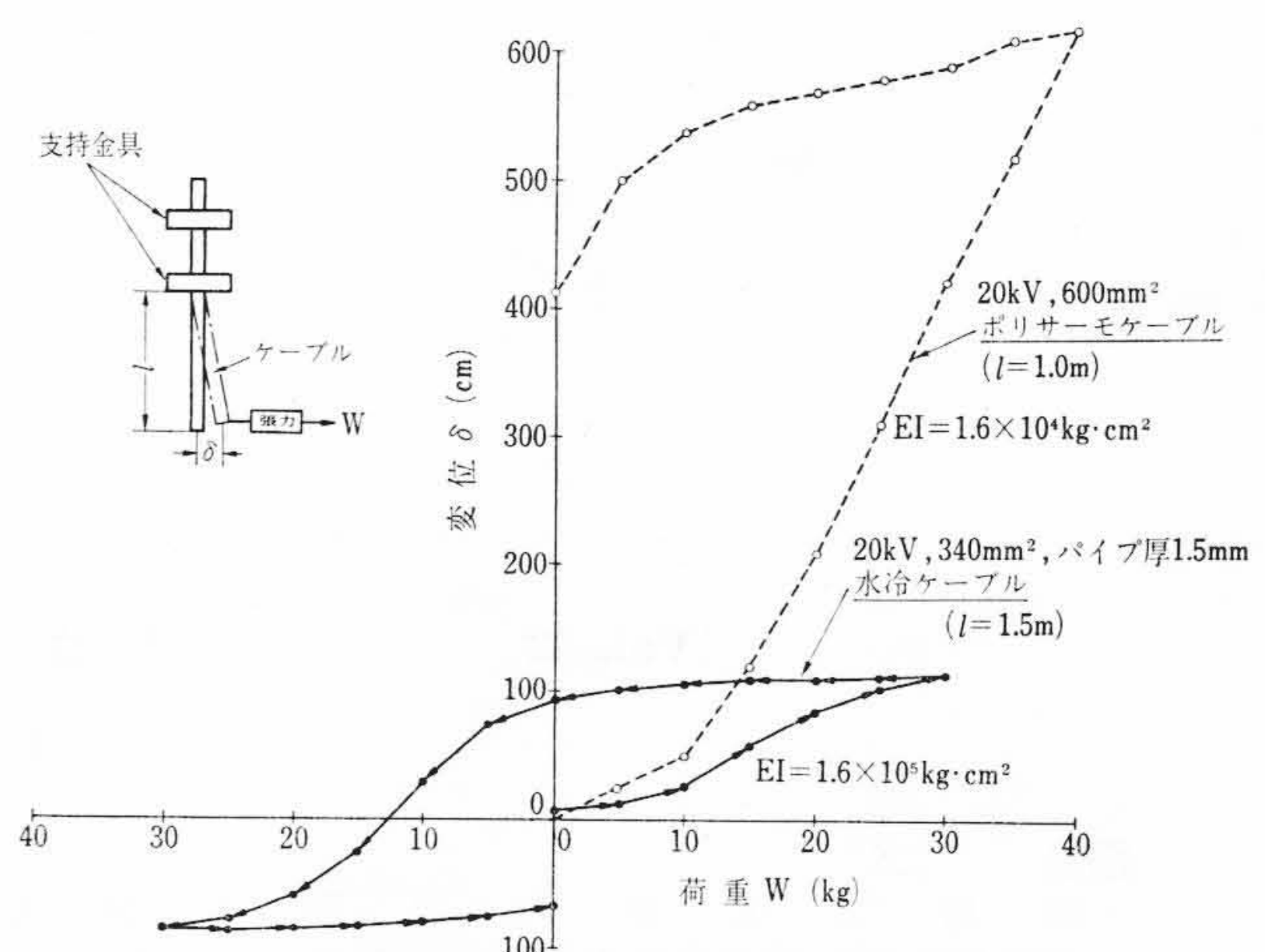


図 2 水冷ケーブルの荷重-たわみ特性

3. 通 電 特 性

通電に供したケーブルは全長 45 m であるが、製造上の検討を主体としてパイプ厚さを 3 種類としたため導体サイズは 325 mm², 340 mm², 370 mm² の 3 種類が接続された形となっている。

ケーブルの構成および温度測定的位置は図 3 に示すとおりである。それぞれの点において水温、導体温度、シース温度を熱電対で測定した。

* 日立電線株式会社研究所
 ** 日立電線株式会社日高工場

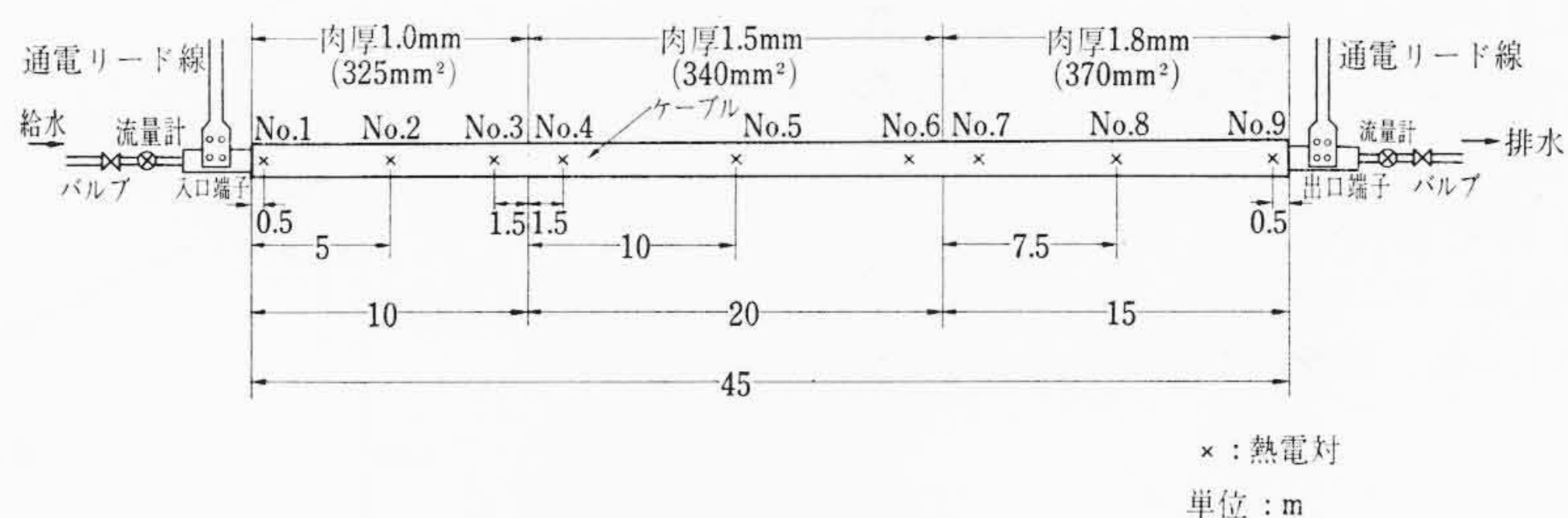


図3 温度測定点

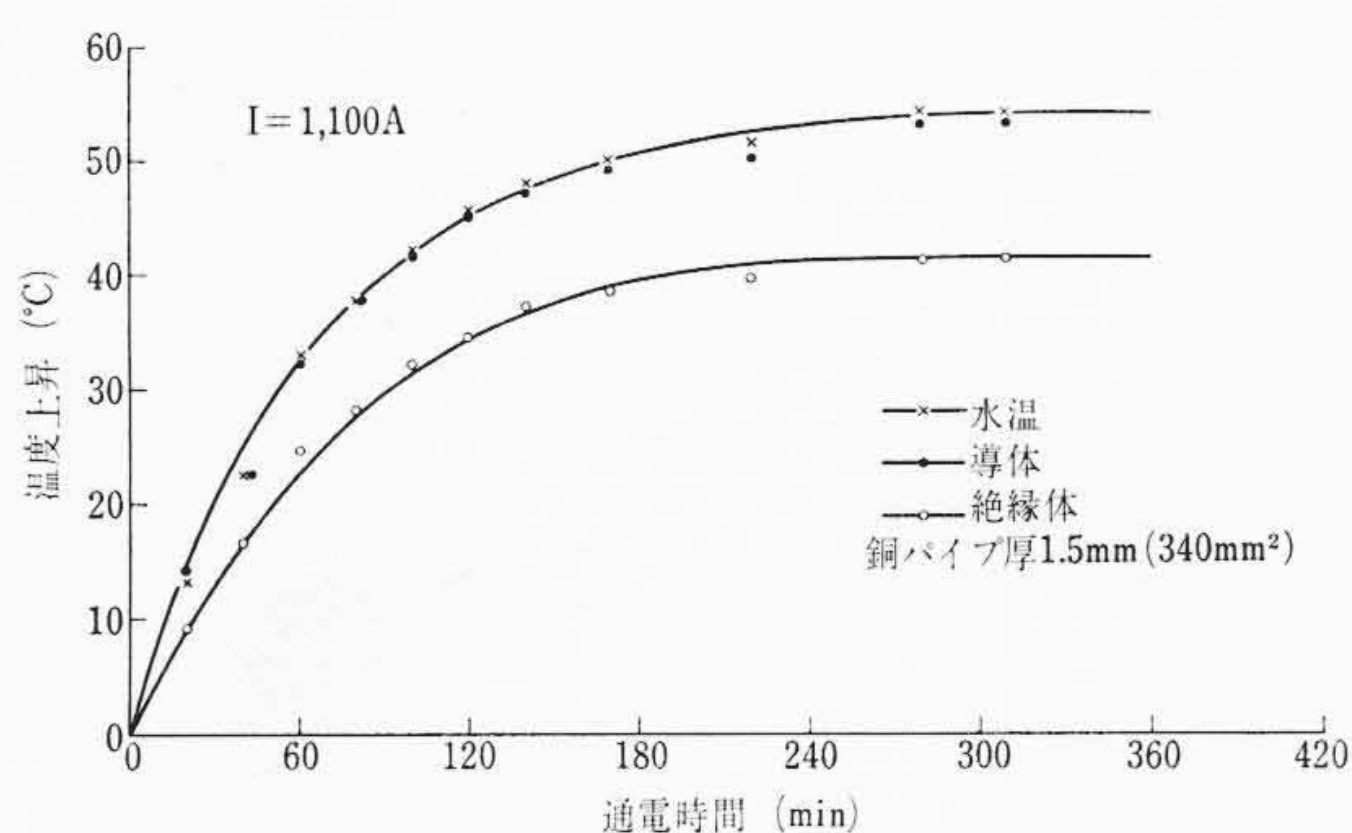


図4 供試ケーブルの非冷却通電特性

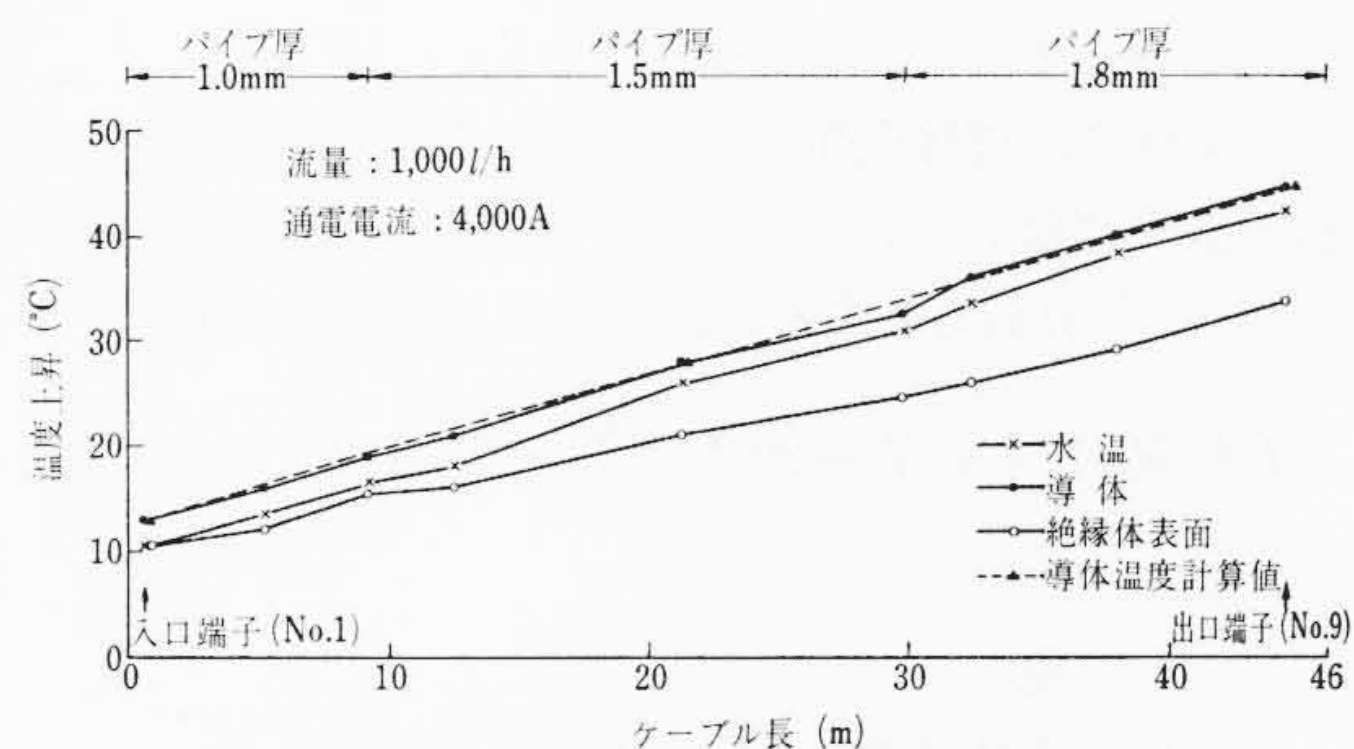


図6 水冷ケーブルの長さ方向の温度分布

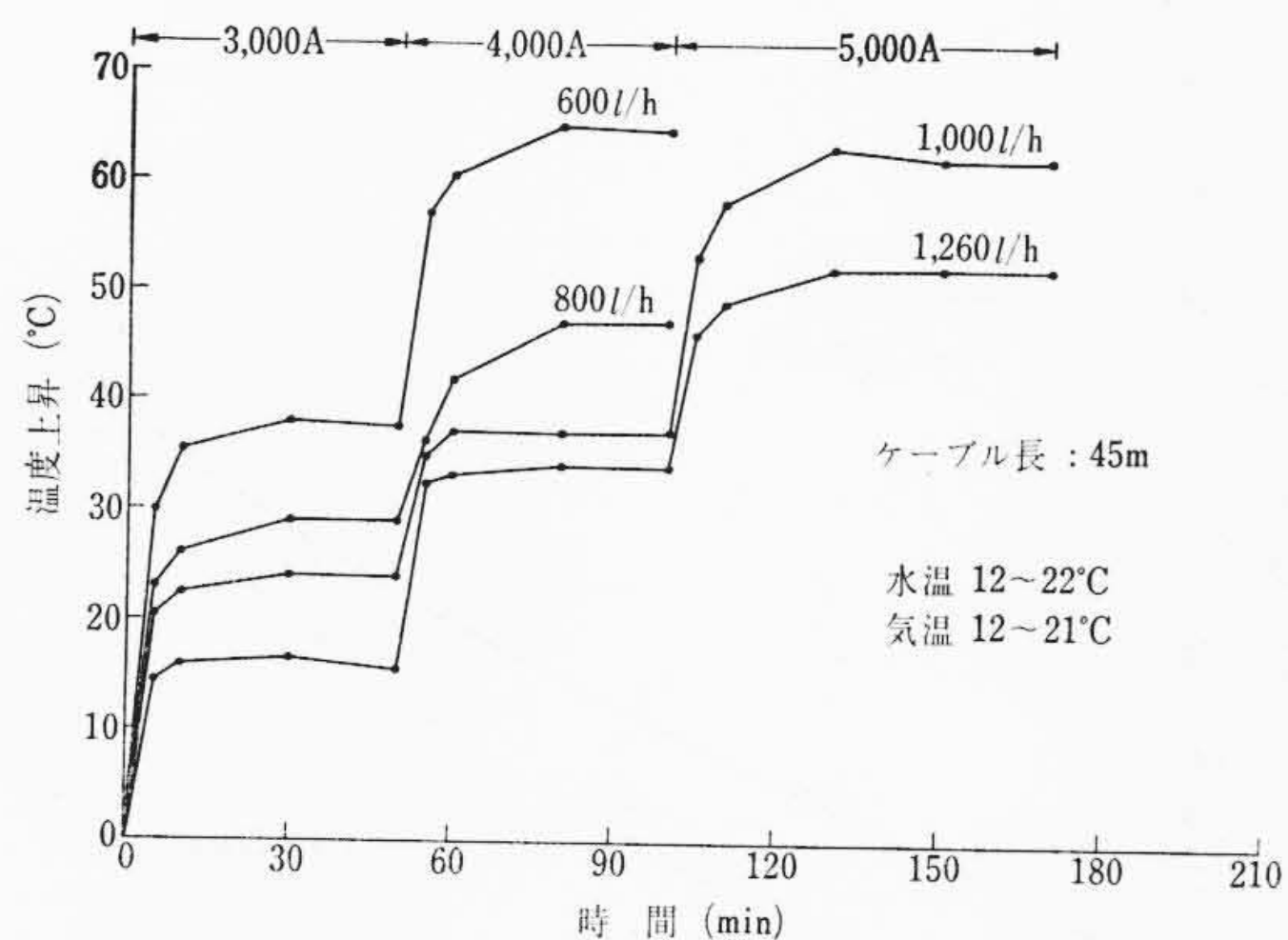


図5 冷却水出口の導体温度上昇

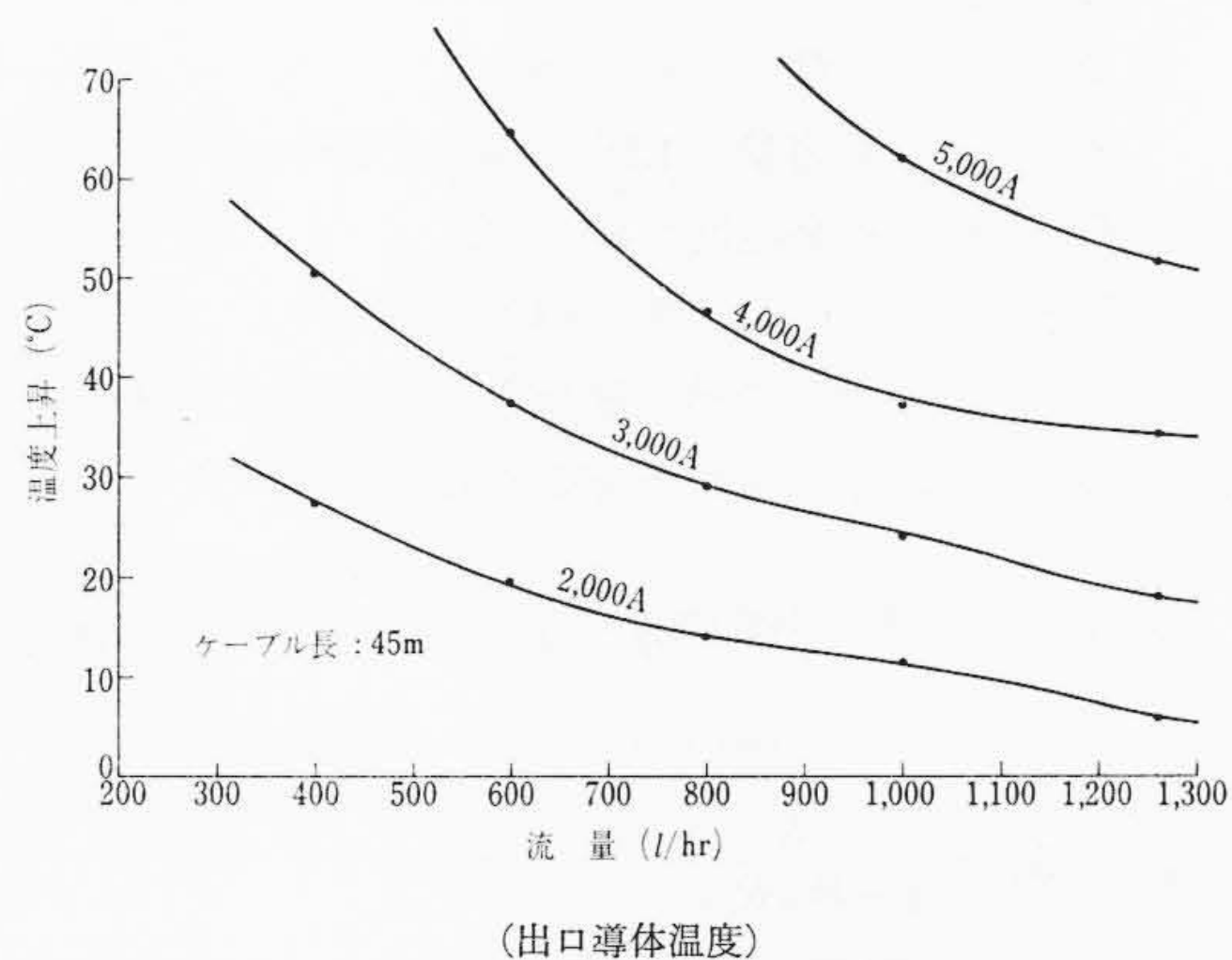


図7 供試冷却ケーブルの流量-温度上昇特性

3.1 導体温度上昇と流量の関係

通水しない場合の導体温度上昇-時間特性を示したのが図4で、特に導体温度上昇 55℃ を目標にして通電電流 1,100A のものが示してある。なお、通水路には静水を満たして通電した。

次に冷却水を流した場合の冷却水出口の導体温度上昇の時間特性は図5に示すとおりである。非冷却ケーブルの飽和時間が4～5時間であるのに対して、水冷ケーブルは20分前後と非常に早いのが特長的である。

図6は流量 1,000 l/h、通電電流 4,000A の場合のケーブル長さ方向の温度分布である。図中、実線は実測値、点線は導体温度上昇の計算値である。計算昇線は後述の(2)式によるものである。実測値と計算値はよく一致し、端末効果も少ないことからケーブル終端部の引出端子が適切な設計であることが明確となった。

導体と水との熱抵抗は実測の結果、流量、水温によって 0.2～0.5℃ cm/W であり、計算にあたっては、1.0℃ cm/W とすればじゅうぶん安全側となる。

図7は通電電流をパラメータにして流量を変化した場合の冷却出口における導体温度上昇特性である。

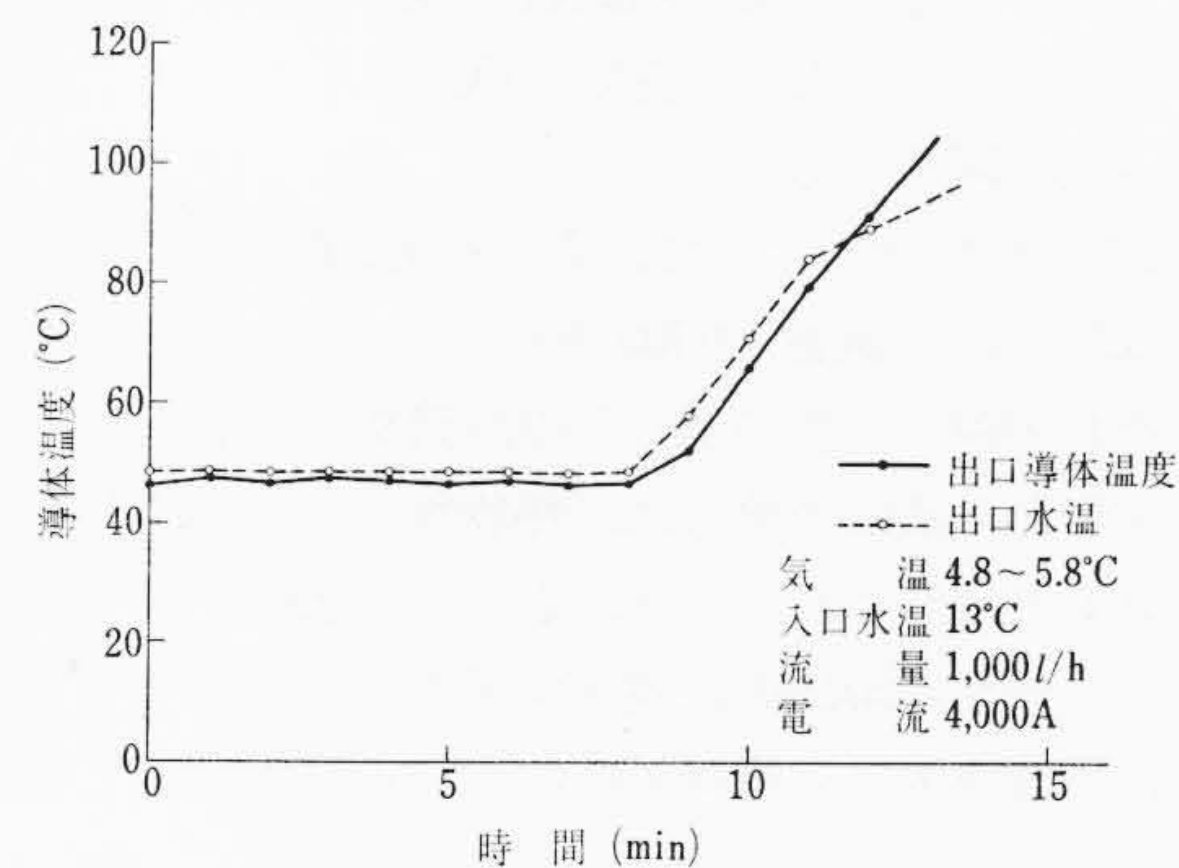


図8 通水停止後の導体温度変化

供試水冷ケーブル（45 m）の導体温度上昇 55℃、流量 1,000 l/h（278 cc/s）のときの電流容量は 4,700A となっている。

3.2 通水停止時の導体温度の変化

図8はポンプなどの故障を想定して通水停止後の導体温度の時間的変化を示したものである。

実験は流量 1,000 l/h, 通電電流 4,000 A にて行なわれ, 導体温度が平衡したのち, 通水バルブを閉じて, その時間的变化を測定したものである。

本ケーブルの使用最高温度を 95°C とすると, 水の沸点 100°C までには, 5°C の余裕しかない。図から, 5°C の変化は, 1 分間ので生ずることがわかるので, 緊急時のしゃ断, 切換は 1 分間以内に行なう必要がある。

4. 許 容 電 流

内部水冷ケーブルは導体の発熱を冷却水が直接熱的介在物なしに運び去るため, 冷却効果も大きく, また, 半径方向の放散熱に比べて, 冷却水が持ち去る熱が圧倒的に大きい。

そこで, 単純に, 導体発生熱がすべて冷却水のみによって持ち去られ, 自熱放熱はないとし, かつ, 安全例に導体温度に全長にわたり, 出口温度 T_c であるとする, 下記の単純な式が成立する。

$$I^2 k_s R_{20} \{1 + \alpha (T_c - 20)\} = \frac{Q}{L} \cdot C \cdot (T_c - T_{w0}) \dots\dots (1)$$

ただし, ここで,

I : 電 流 (A)

k_s : 表皮係数 (325 mm² のとき $k_s=1.1$)

R_{20} : 20°C における直流抵抗 (Ω/m)

α : 抵抗温度係数 = 0.00393 (°C⁻¹)

Q : 流 量 (cm³/s)

L : 線 路 長 (m)

C : 水の熱容量 = 4.16 (W·s/°C·cm³)

T_c : 導体最高温度 = 80 (°C)

T_{w0} : 入口水温 = 40 (°C)

一方, ケーブル半径方向の熱放散ならびに冷却水自身の熱抵抗を考慮した場合の同様の関係式は下記となる⁽¹⁾⁽²⁾。

$$\frac{L}{Q} = C(R_i + R_w) \log \left[\frac{R_i'}{R_i' + R_w} \times \frac{(T_{w0} - T_a) - W_0 R_i'}{(T_c - T_a) - W_0 R_i'} \right] \dots\dots (2)$$

$$\text{ただし, } R_i' = \frac{R_i}{1 - W_0 R_i \alpha}$$

ここで, T_a : 周囲基底温度 = 40 (°C)

W_0 : T_a °C における導体発熱量 (W/m)

R_w : 導体と水との間の熱抵抗 = 0.01 (°C·m/W)

R_i : 導体外部全熱抵抗 (°C·m/W)

T_{w0} : 冷却水入口温度 (°C)

ほかは(1)式と同様である。

以上, (1), (2)式によって, $T_c=95^\circ\text{C}$, T_{w0} (入口水温) = 40°C 導体サイズ 325 mm², 流量 1,000 l/h の場合の線路長と許容電流の関係をそれぞれ実線と点線で示したのが図 9 である。

後者, すわわち点線の曲線は, 熱放散については 1 条のみ布設されているとして計算されており, さらに, 冷却効果, 水圧の面から, この種ケーブルが冷却区間長 300 m 程度であることを考えると, その範囲では許容電流の計算は単純な(1)式を使用してもさしつかえない。

(1)式によって計算した流量 0.3 l/s (1,080 l/h) の場合の導体サイズをパラメータとした許容電流と線路長の関係曲線は図 10 に示すとおりである。

なお, (1)式から許容電流 I は流量 Q の平方根に比例する。

適用例として, 線路長 250 m, 所要電流 10 kA の場合は, 図 10 から導体サイズ 1,000 mm² の水冷ケーブルを使用すれば 1 回線あたり 3.3 kA となり, 3 回線(ケーブル 9 条)布設となる。

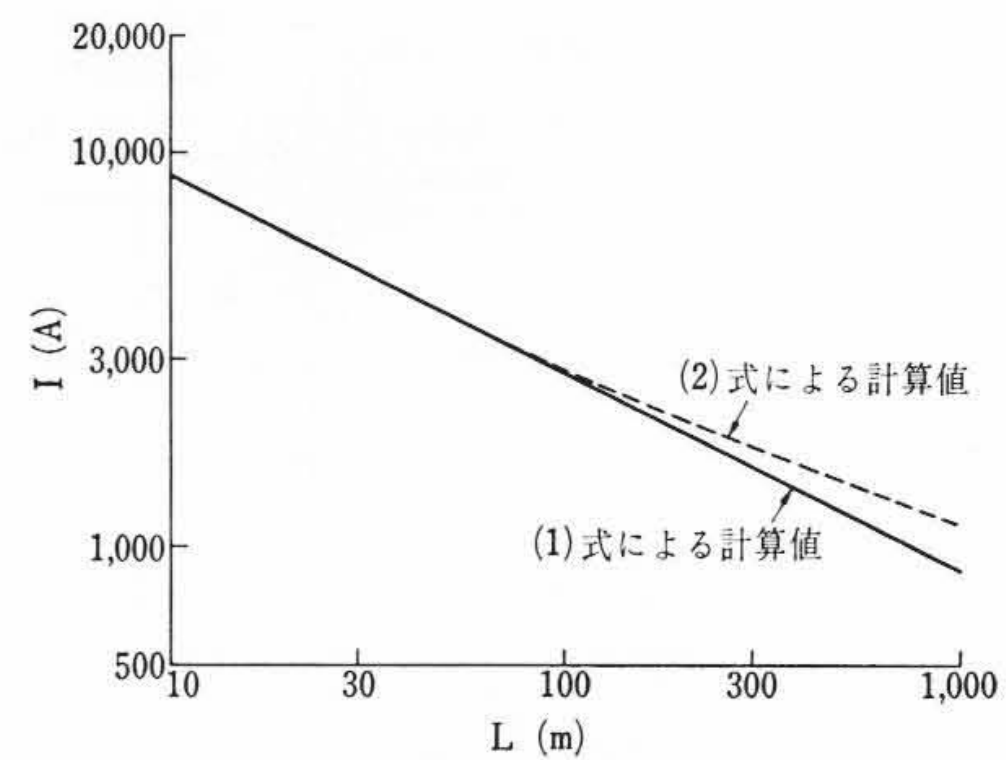


図 9 電流容量計算式の比較

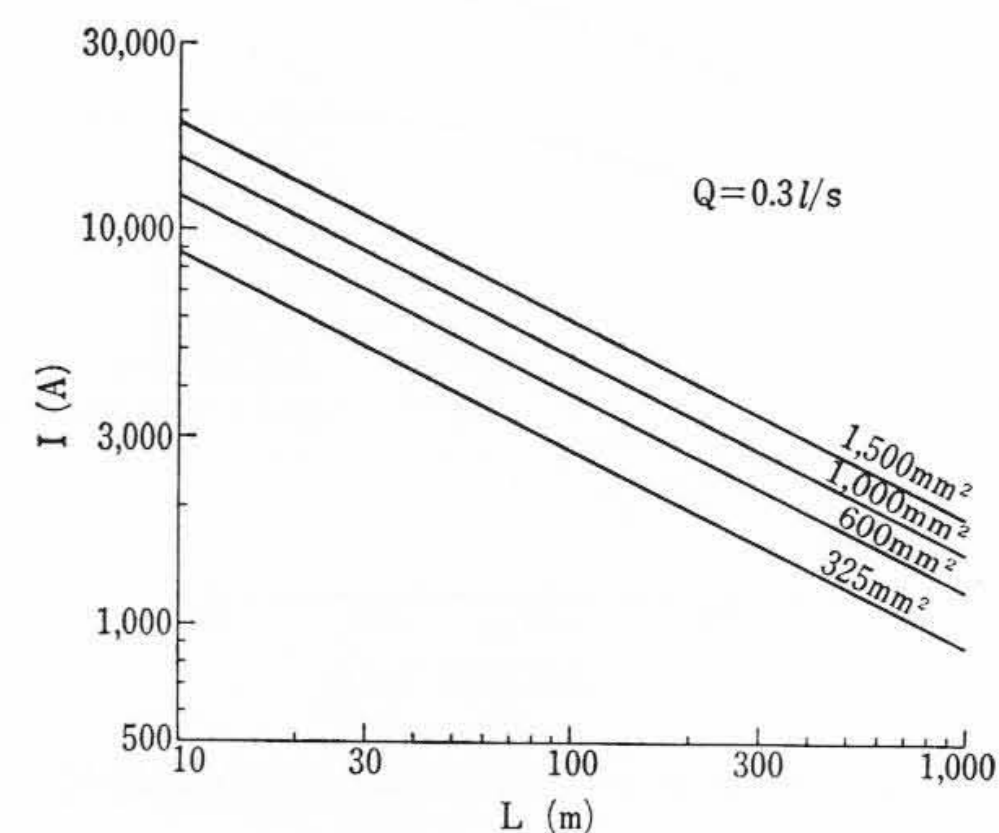


図 10 電流容量計算曲線

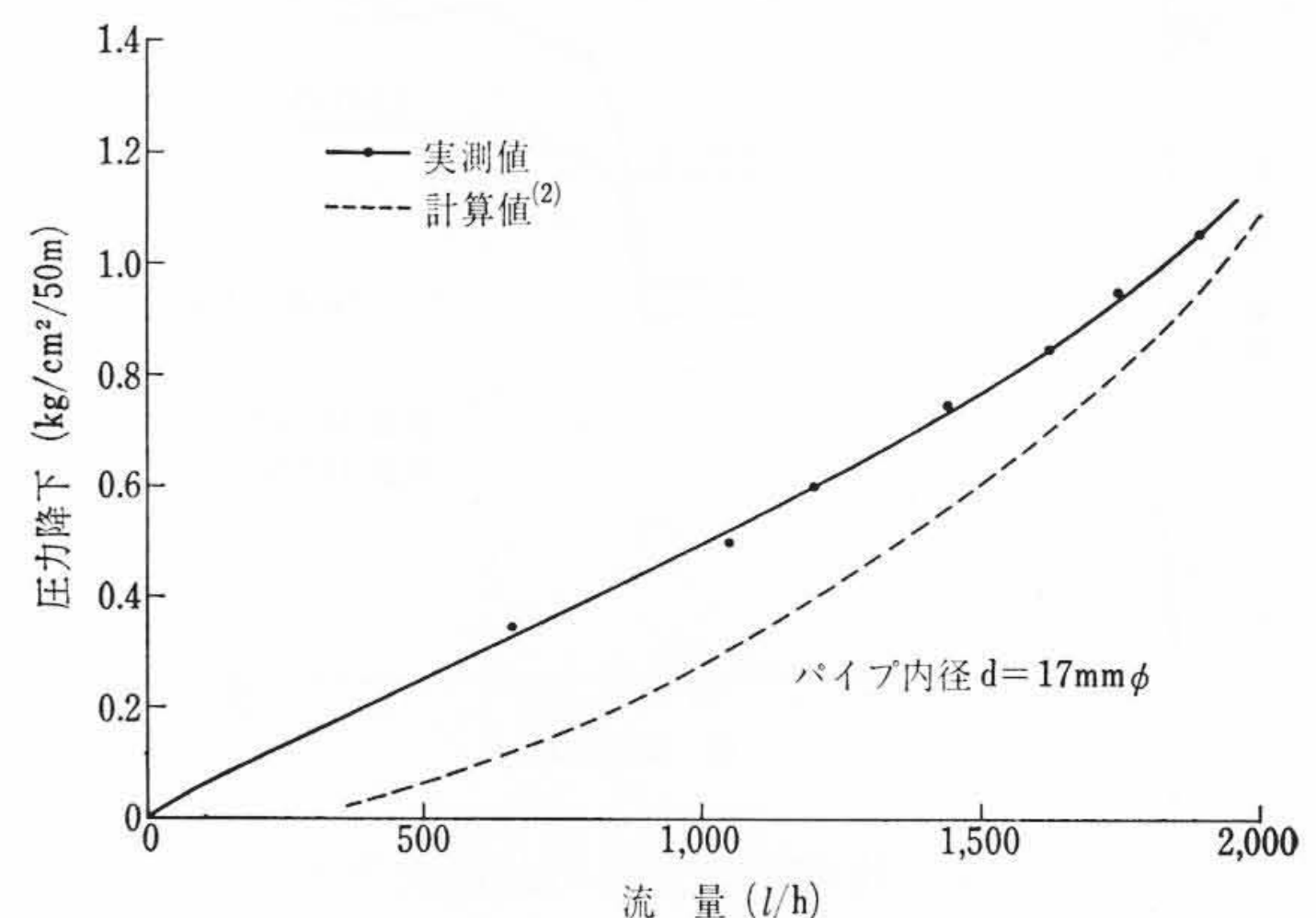


図 11 ケーブルの圧力降下

5. ケーブルの圧力降下

流水円管単位長さあたりの圧力降下 ($\Delta P/L$) は⁽³⁾,

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \dots\dots (3)$$

(3)式で, ΔP : 圧 力 降 下 (kg/m²)

L : 冷 却 区 間 長 (m)

λ : 抵抗摩擦係数

d : 管 径 (m)

ρ : 水の密度 = 95 kg·s²/m⁴

$\bar{u}$: 平均流速 (m/s)

λ はレイノルズ数 $Re = \bar{u}d/\nu$ (ν : 動粘性係数 = 1×10^{-6} m²/s) の関数であり, 適用範囲は乱流域に属するので, ブラジウスの式

$$\lambda = 0.316 / Re^{1/4}$$

を用いる。

一方, 試作ケーブル 45 m を使用して圧力降下を測定し, その結果を, (3)式による計算値とともに示したのが図 11 である。



図 12 水冷端末内部

表 1 試 験 結 果

試 験 項 目	破 壊 電 圧	備 考
交 流	90~105 kV	ストレスコーン先端
イ ン パ ル ス	330~360 kV	がいし表面 内部ケーブル表面せん絡

流量 1,000 l/h で計算値 0.28 kg/cm²/50 m に対し、実測値は 0.5 kg/cm²/50 m となっており計算値の 1.8 倍であるが、流量の増大とともに一致する傾向をみせている。

6. 端 末 部

6.1 端 末 構 造

端末の導水部は、流水管には絶縁チューブを使用し、これをスパイラル状に巻いたものをエポキシモールドして中空円筒を形成し、これにケーブルをそう入する構造である。

構造を決めるに際しては、絶縁性、機械的強度、耐熱性、耐油性、組立作業性などに留意した。その状況を示したのが図 12 である。端末部は、写真のもので導水部と導体間に流水パイプを結続したのちがいしをかぶせ、コンパウンドを充てんして完成する。

325 mm² の場合の端末部の外形寸法は、高さ 600 mm、外径(がいし笠径)310 mmφ である。

水流抵抗による水圧降下は 1,000 l/h で 0.5 kg/cm² であり、ケーブルの場合と同様、流速の 2 乗にはほぼ比例する。

また、流水管の漏えい電流による消費電力は 1.2 W ($\rho=5\times 10^5 \Omega\text{cm}$) である。

6.2 端末部の電気的性能

電気試験を行なうに先だち、流水管の影響を考慮した場合の端末部の電界解析を行なった。その代表例は図 13 に示すとおりである。

図は $\rho=1\times 10^6 \Omega\text{cm}$ の水がはいった場合の模擬であるが、水抵抗による電圧の等電位分担の効果がかなりあり、ストレスコーン先端の静的電界は流水管のない場合の約 75% になっている。

電気試験は、ケーブルには 22 kV CV ケーブルを用い、導水部にがいしをかぶせたのち、ポリブデン系のコンパウンドを充てんして行なった。

交流試験は、 $5\times 10^5 \Omega\text{-cm}$ のイオン交換水を 1,000 l/h の流速で、循環させ、電圧 40 kV から印加開始して、30 分ごとに 5 kV 昇圧し、破壊させた。

インパルス試験は、負極性にて行なわれた。200 kV 3 回耐圧後、20 kV 昇圧でおのおの 3 回行ない、破壊に至らしめた。

結局 10 回程度の試験を行ない、最終的には、表 1 の試験結果を得た。これによって、通常の 22 kV ゴム、プラスチックケーブルの端末と同等の値を得て主要構造を決定した。

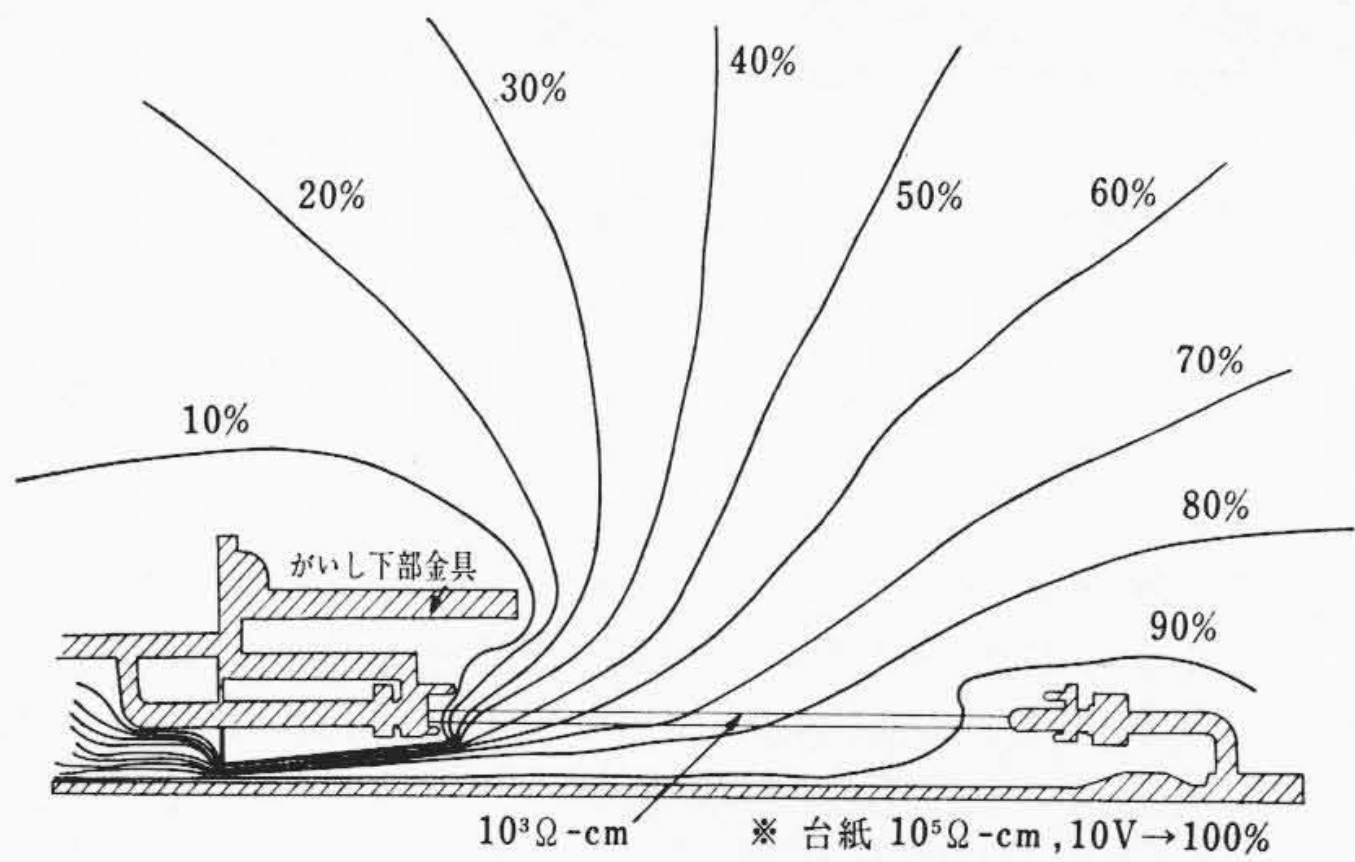


図 13 水冷端末の電界解析

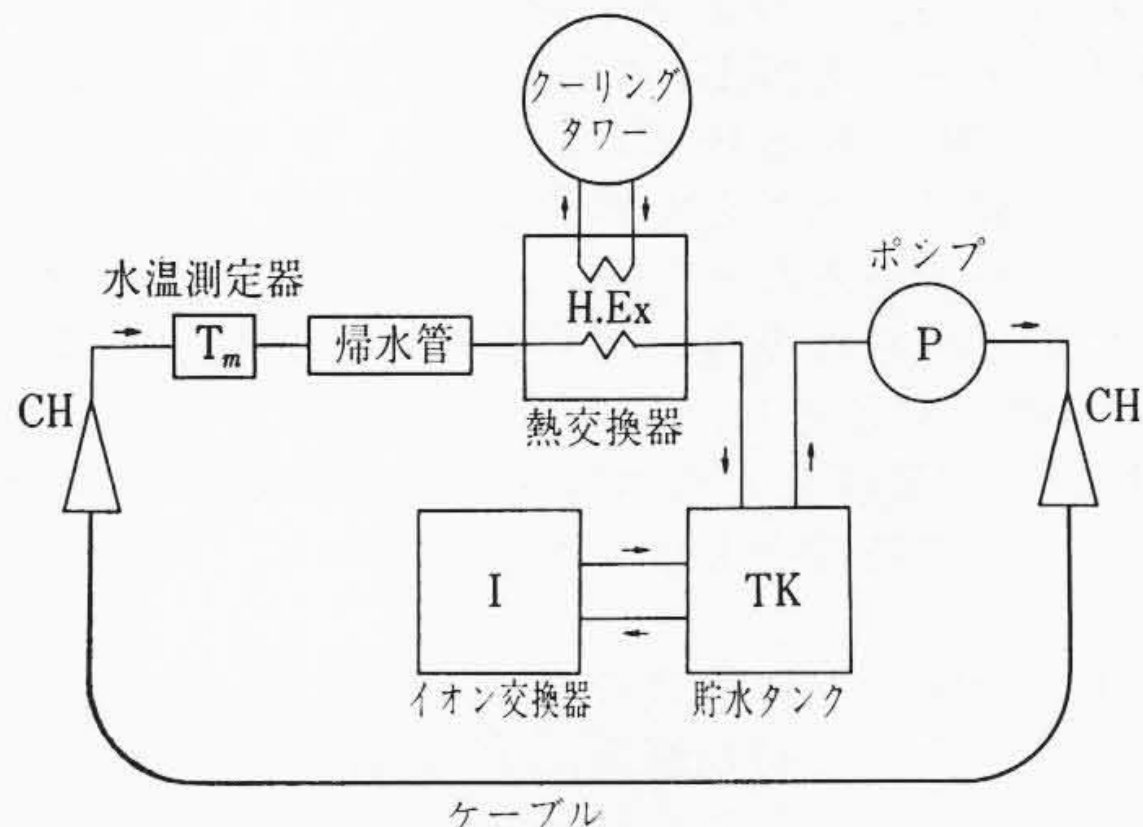


図 14 冷却系統ブロックダイアグラム

7. 水冷系統の構成

水冷系統の構成は図 14 に示すとおりである。

本方式は純水を使用する関係から冷却水循環方式となる。

ポンプは回転機であるため、補機を並置して定期的に交互運転するのが妥当であろう。

系統の監視装置としては、水導電度計があり、これの指示によって、純水装置を適時運転する。さらに、冷却水出口において、水温監視装置、流量監視装置を置き、所定の限界値を越えた場合には警報、ポンプ切換など適宜の処置をとるようにしてある。

水質管理の基準としては、理想的な純水の抵抗が $10^7 \Omega\text{-cm}$ であり、端末の消費電力を考えあわせて、一般的な使用は $10^5 \Omega\text{-cm}$ 以上、使用限界は $10^4 \Omega\text{-cm}$ が妥当であろう ($10^4 \Omega\text{-cm}$ にて端末消費電力 60 W)。

いずれにせよ、最も要求されるのは系統の信頼性であるため、現在、日立電線株式会社内に実規模の装置を組立て、長期的な冷却循環実負荷試験を実施中である。

8. 結 言

以上、報告した高圧内部水冷ケーブルは、全長 300 m 程度まで大容量発電所向主幹ケーブルを意図して開発したものであり、ケーブル 1 条当たりの電流容量を大幅に増大することができる (従来ケーブルの 3~5 倍)。

しかし、半面、水冷方式であるため水源の確保、ポンプ、クーリングタワーなど、保守、点検を要する付帯設備がはいってくる煩雑さがあるが、それらは今後の研究、実績によって漸次克服されていくものと考ええる。

参 考 文 献

- (1) 沼尻：日立評論 47, 103 (昭 40-6)
- (2) 長田：昭和電線レビュー 11(1) 36 (昭 36)
- (3) 空気機械工学便覧, 37 (昭 30, コロナ社)