

管路布設ケーブルの強制水冷

Forced Water Cooling of the Duct Installed Power Cables

沼 尻 文 哉* 網 野 弘*

Fumiya Numajiri

Hiroshi Amino

内 容 梗 概

この論文は流水管路をもうけて管路布設ケーブルを間接的に冷却する強制水冷方式の理論と、実規模のモデル管路を用いた冷却実験の結果を記述したものである。実験によって得られた冷却の効果は理論から求めたものとよく一致することが確認された。

さらに、140kV 地中ケーブル回線の送電容量を検討した。送電容量は、この冷却方式によれば、約 20% 近く増加することが期待できる。

1. 緒 言

最近、超高圧ケーブルが開発され、地中ケーブルが超高圧系統に使用されるようになって、ケーブルの電流容量を増大させることが重要な研究課題となっている。

超高圧ケーブルにおいては誘電体による電力損失が増加するため、この損失に基因するケーブルの温度上昇が超高圧ケーブルの送電容量あるいは使用こう長に限界を与えている。

一方、発電所単位で送電容量は増大の傾向を続け、最近では最大サイズのケーブルを使用しても 2 回線布設のケーブル回線では必要な送電容量が得られない事態が起こっている。

これを解決する手段は低損失のケーブルを開発するか、ケーブルを強制冷却するかのいずれかであろう。

ケーブルの強制冷却は古くからの問題で、過去に強制風冷が実用化された例があるが⁽¹⁾、強制冷却を大容量の送電幹線系統に実用した例は過去にない。これは高度の信頼性が要求されるからにほかならない。

ケーブルの強制冷却には次の三つの方式が考えられる。

- (1) 内部冷却 導体内部に冷却通路を持つ。
- (2) 外部冷却 ケーブルの外側を直接冷却する。
- (3) 間接冷却 ケーブル近傍の土壤を冷却する。

この論文で述べられる冷却方式は第 3 のもので、ケーブル近傍の土壤中に冷却管路を埋設し、これに通水して、土壤を通してケーブルを冷却しようとするものである⁽²⁾⁽³⁾、ケーブル自体は従来と全く同一の製造、布設を行なうことができるので、この方式は技術的に最も容易に行なうことができるものである。

この論文は一般の管路布設ケーブルにおいて空管路に通水して強制冷却する場合について解析を行なっているが、特長とする点は

- (1) 実用規模のモデル管路を用いて実験的検討が行なわれている。
- (2) 冷却理論式が確立されている。
- (3) 140kV, 1×1,500 mm² OF ケーブルの水冷時の温度上昇・送電容量が検討されている。

などである。

記 号 表

T_i :	ケーブル管路表面温度 (°C)	冷 却 時
T'_i :	ケーブル管路表面温度 (°C)	無冷却時
T_a :	周囲土壤温度 (°C)	
T_N :	水管路表面温度 (°C)	
T_{N0} :	入口水温または入口点水管路温度 (°C)	
T_c :	導 体 温 度 (°C)	

T_s : ケーブルシース温度 (°C)

T_{sd} : ケーブルシースと管路表面間の温度差 (°C)

W : ケーブル発熱量 (W/cm)

W_0 : 水管路吸収熱 (W/cm)

W_d : 誘 電 体 損 (W/cm)

R_{ii} : ケーブル管路の自己熱抵抗係数 (°C・cm/W)

R_{ij} : ケーブル管路の相互熱抵抗係数 (°C・cm/W)

R_{iN} : 水管路の相互熱抵抗係数 (°C・cm/W)

R_{NN} : 水管路の自己熱抵抗係数 (°C・cm/W)

$R_A = \sum_{k=1}^n R_{ik}$ (無冷却時の土壤熱抵抗)

$R_B = \sum_{k=1}^n R_{kN}$ (水管路とケーブル管路との間の熱抵抗)

R_{int} : 導体と管路表面との間の熱抵抗 (°C・cm/W)

ρ_e : 土壤固有熱抵抗 (°C・cm/W)

H_i : i 管路中心と地表面との距離 (cm)

H_j : j 管路中心と地表面との距離 (cm)

D_i : i 管路の外径 (cm)

d_{ij} : i 管路と j 管路との距離 (cm)

x : 入口よりの距離 (cm)

L : ケーブル全長 (km)

Q : 流 水 量 (cm³/s あるいは l/s (4 節))

V : 送 電 電 圧 (kV)

I : 通 電 電 流 (A)

R_{ab} : 導体交流抵抗 (Ω/cm)

$\cos \theta$: 力 率

C : 水 の 熱 容 量 (Ws/°C・cm³)

$\alpha = CR_{NN}Q$

η : 管路温度冷却係数

$K_1 = (R_{iN}/R_{NN}) \times (R_A/R_B)$

$K_2 = R_{iN}/R_{NN}$

$k = 1/CR_{NN}$

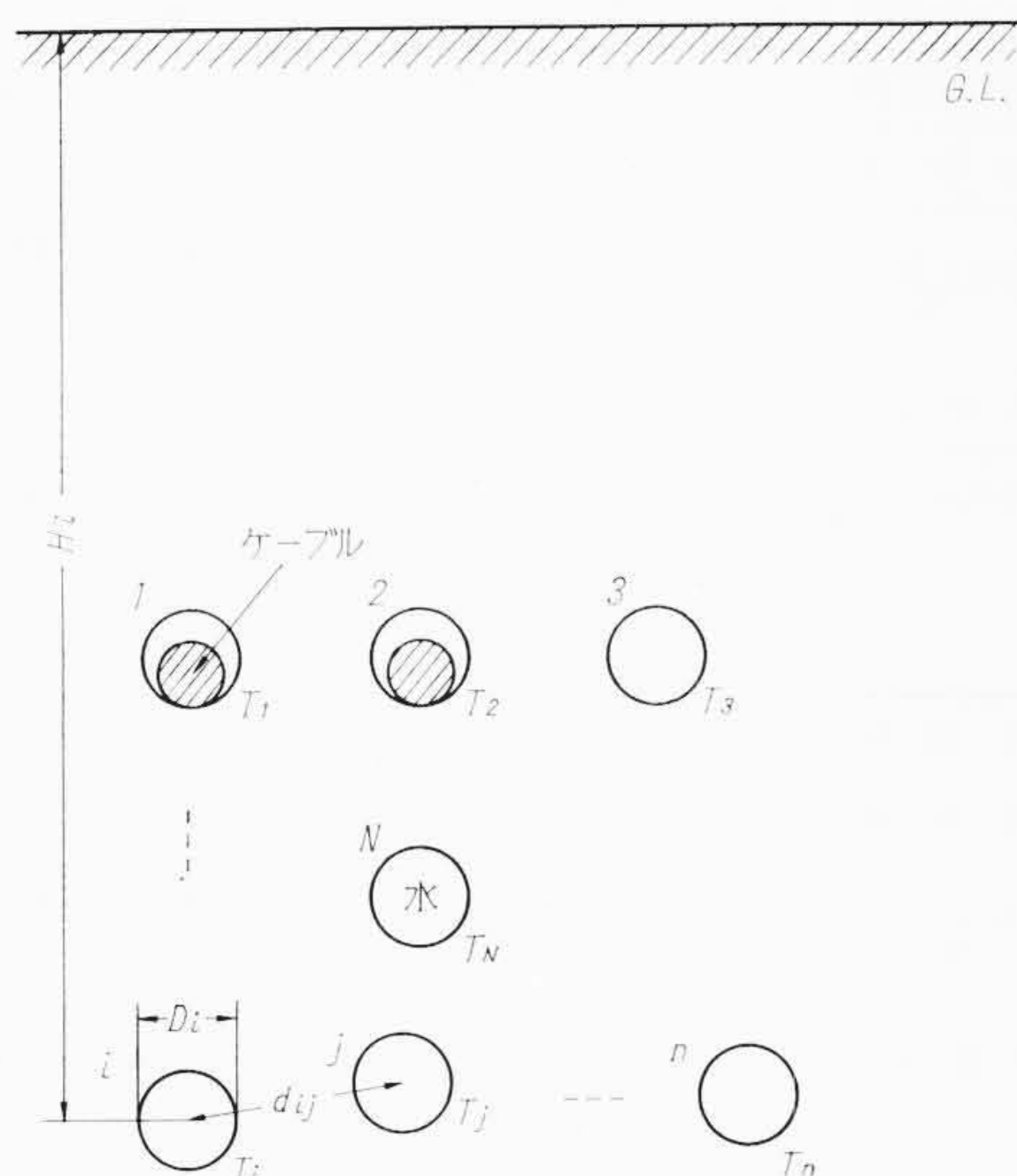
2. 冷 却 理 論

2.1 管路温度上昇

第 1 図に示すとおり、 n 本の単心ケーブル用地中埋設管路と番号 N で示す 1 本の通水管路を考える。各管路外表面の温度を $T_1, T_2, \dots, T_n$ および T_N とする。

すべてのケーブルが同一の発生熱 W を持つものとし、上記の管路温度 T_i が流水の入口点より x だけの距離の点の温度を示すものとすれば次式が成立する。

* 日立電線株式会社日高工場



第1図 地 中 管 路 系

$$\begin{pmatrix} T_1 - T_a \\ T_2 - T_a \\ \vdots \\ T_n - T_a \\ T_N - T_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} & R_{nN} \\ R_{N1} & R_{N2} & \cdots & R_{Nn} & R_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W \\ W \\ \vdots \\ W \\ W_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 T_N は入口より x 点の水管路表面温度、 W_0 は水管路に吸収される熱、すなわち負の発生熱である。 R_{ii} および R_{ij} で示されるものは熱抵抗係数といえることができるもので、上式の成立する定常的熱分布の領域においては

$$\left. \begin{aligned} R_{ii} &\simeq \frac{\rho_e}{2\pi} \log_e \frac{4H_i}{D_i} \\ R_{ij} &\simeq \frac{\rho_e}{2\pi} \log_e \sqrt{\frac{d_{ij}^2 + (H_i + H_j)^2}{d_{ij}^2 + (H_i - H_j)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表わされる。 $R_{ij} = R_{ji}$ である。

(1)式より、 i 番目のケーブルの管路表面温度 T_i は

$$T_i - T_a = \left(\sum_{k=1}^n R_{ik} - \frac{R_{iN}}{R_{NN}} \sum_{k=1}^n R_{Nk} \right) W + \frac{R_{iN}}{R_{NN}} \cdot (T_N - T_a) \quad (3)$$

となる。

一方、水管路の負の発生熱 W_0 が流水に吸収される熱に等しいものと仮定すれば、

$$W_0 dx = -CQd(T_N - T_a) \quad (4)$$

となる。ここで、 C は水の熱容量、 Q は流量であり、 $d(T_N - T_a)$ は dx 区間における水管路の温度変化である。(4)式は近似的に成立するものである。実際には管路表面と水との間に熱抵抗が存在するため⁽⁴⁾、(4)式は正確なものではない。しかし、この熱抵抗を R_{NN} に含ませて考えることによって(4)式が近似的に成立するものと考えられる。

(1)、(4)式より次の微分方程式が得られる。

$$\frac{d(T_N - T_a)}{dx} + \frac{T_N - T_a}{CQ \cdot R_{NN}} = \frac{\sum_{k=1}^n R_{Nk}}{CQ \cdot R_{NN}} \cdot W \quad (5)$$

$x=0$ のときの水管路温度 T_N を T_{N0} とすれば、上式より

$$\begin{aligned} T_N - T_a &= W \left(\sum_{k=1}^n R_{Nk} \right) \left\{ 1 - \varepsilon^{-\frac{x}{CQR_{NN}}} \right\} \\ &+ (T_{N0} - T_a) \varepsilon^{-\frac{x}{CQR_{NN}}} \quad (6) \end{aligned}$$

となる。したがって、(3)、(6)式より

$$\begin{aligned} T_i &= WR_A \left[1 - \frac{R_{iN}}{R_{NN}} \frac{R_B}{R_A} \varepsilon^{-\frac{x}{\alpha}} \right] + \frac{R_{iN}}{R_{NN}} (T_{N0} - T_a) \\ &\times \varepsilon^{-\frac{x}{\alpha}} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし、} R_A &= \sum_{k=1}^n R_{ik} \\ R_B &= \sum_{k=1}^n R_{kN} \\ \alpha &= CQR_{NN} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

である。

ついでに、導体表面と管路表面の熱抵抗を一括して R_{int} とすれば、導体温度 T_c は

$$T_c = W \cdot R_{int} + T_i \quad (9)$$

となる。 T_i は i 番目のケーブル管路の表面温度で、このとき T_c は i 番目のケーブル導体の温度である。

2.2 冷 却 係 数

管路外表面の温度は入口水温および水の流量によって変化する。いま、管路表面の強制冷却のよさを示す量として管路冷却係数 η を考えよう。 η は、冷却時と無冷却時の管路表面温度上昇の比で示されるものと定義されれば、次のようになる。

冷却しないときの管路温度上昇 ($T_i' - T_a$) は、(7)式において $Q=0$ とおいて、

$$T_i' - T_a = W \cdot R_A \quad (7)'$$

となる。したがって、(3)、(8)、(7)'式より、入口より x 点における管路冷却係数 η は

$$\eta = \frac{(T_i - T_a)}{(T_i' - T_a)} \quad (10)$$

$$= 1 - \frac{R_B}{R_A} \cdot \frac{R_{iN}}{R_{NN}} \left[1 - \frac{T_N - T_a}{W \cdot R_B} \right] \quad (10)'$$

と表わされる。 T_N は x 点における水管路表面温度である。

3. 実 験 的 検 討

3.1 実 験 の 概 要

実験は超高压研究所実負荷試験場のモデルケーブル管路を用いて行なわれた。第2図に管路の概略とケーブル配置ならびに温度測定用熱電対位置を示す。管路は二つに分れているので、水管路の位置を変えて配置し、A・Bの二つの場合について同時に検討された。第1次実験では60kV、 $1 \times 600 \text{ mm}^2$ OFケーブルを布設して実験を行なったが、電流変圧器の容量不足から管路表面温度が十分な値にまで上昇せず、誤差が大きく混入した。そこで、さらに、600V、 200 mm^2 ビニル電線を布設して実験を行なった。

通電電流は700A一定、通水量は0.5 l/sである。通水は地上3mの位置に給水タンクを置いて行なわれた。したがって、通水量は常に一定に保たれた。

3.2 実 験 結 果

第2図に示した管路番号にしたがって、各ケーブルおよび管路表面温度を示すことにする。温度測定点はケーブル・シース、ケーブル管路表面、水温および水管路表面である。温度はA・B管路構成とも中央部で測定される。

第3、4図は管路A、Bの中央部で測定したケーブル・シース温度 T_s 、管路表面温度 T_i および水管路表面温度 T_N を周囲土壌温度 T_a に対する上昇値として示したものである。なお、点線はシースと管路表面間の温度差を示すものである。

第3、4図において、6/19日における温度の低下は豪雨によるものである。

なお、土壌温度および水温は第5図に示すとおりである。

管路は9孔式で寸法は第6図に示すものである。アスベストパイプ使用。

(3) 各 定 数

土壌固有熱抵抗 $\rho_e = 80^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$

各種材料の固有熱抵抗 ($^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$)

紙 550, クロロブレン 500, アスベストパイプ 480

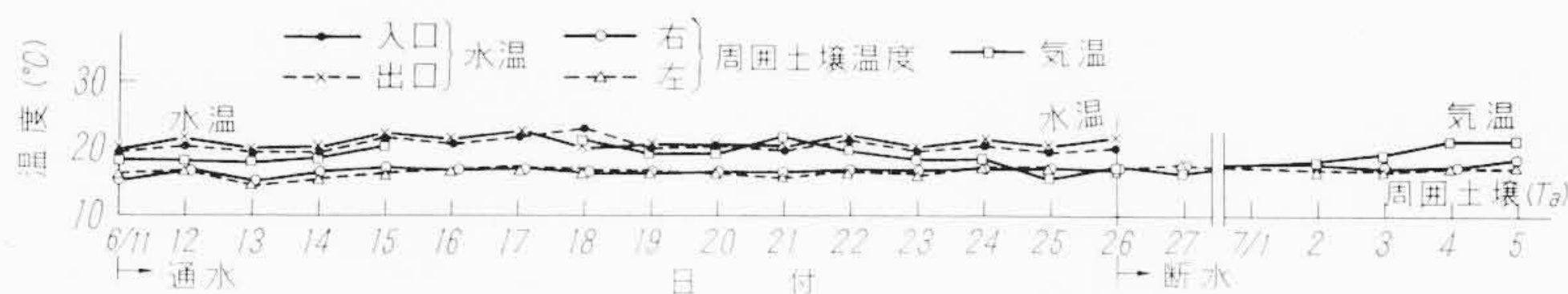
周囲土壌温度 $T_a = 20^\circ\text{C}$

4.2 導 体 温 度

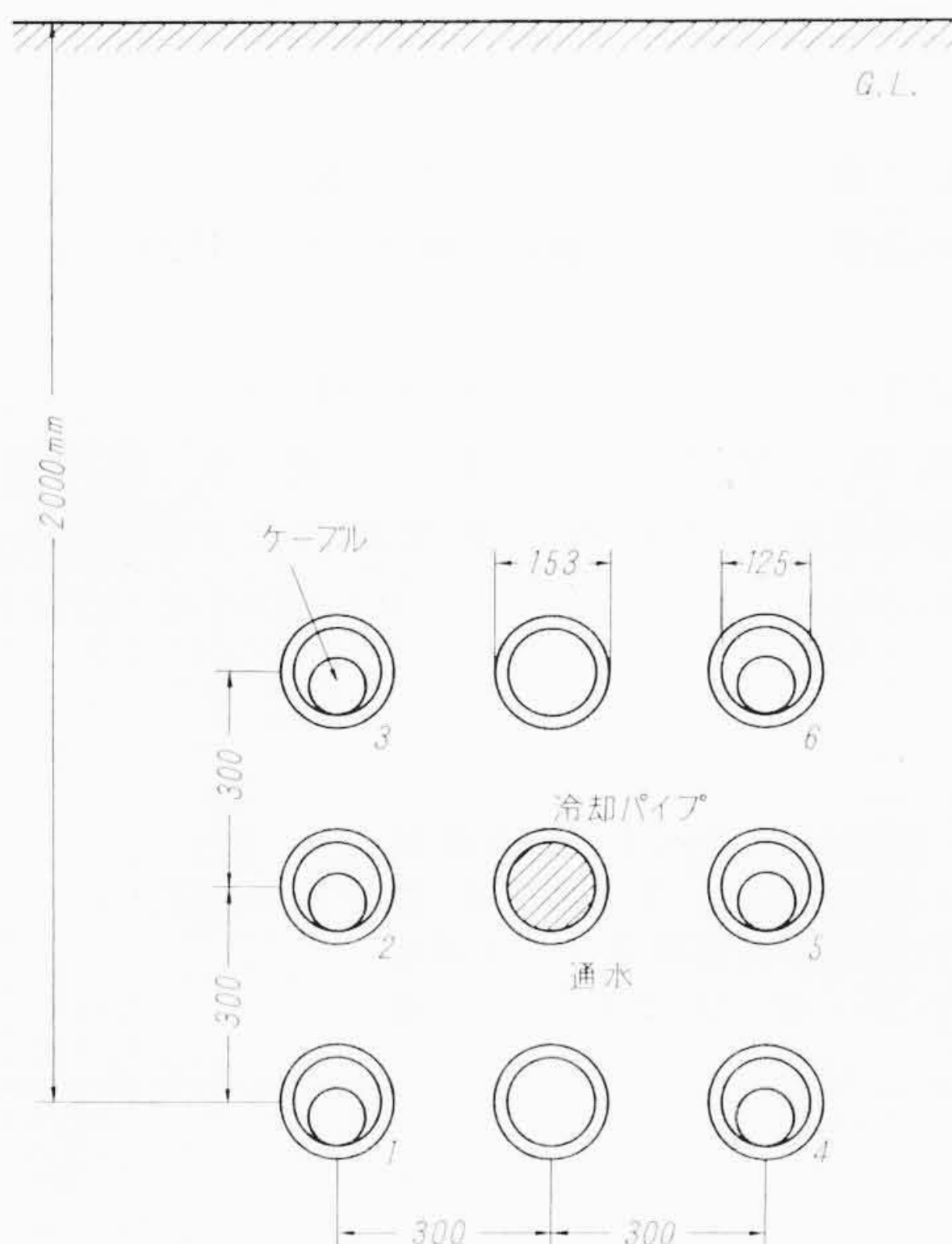
管路は第6図に示すとおり9孔式管路とし、ケーブルは2回線布設して、その中央の管路を水管路にとって強制水冷するものとする。

(9)式に示される導体温度 T_c は冷却水出口において

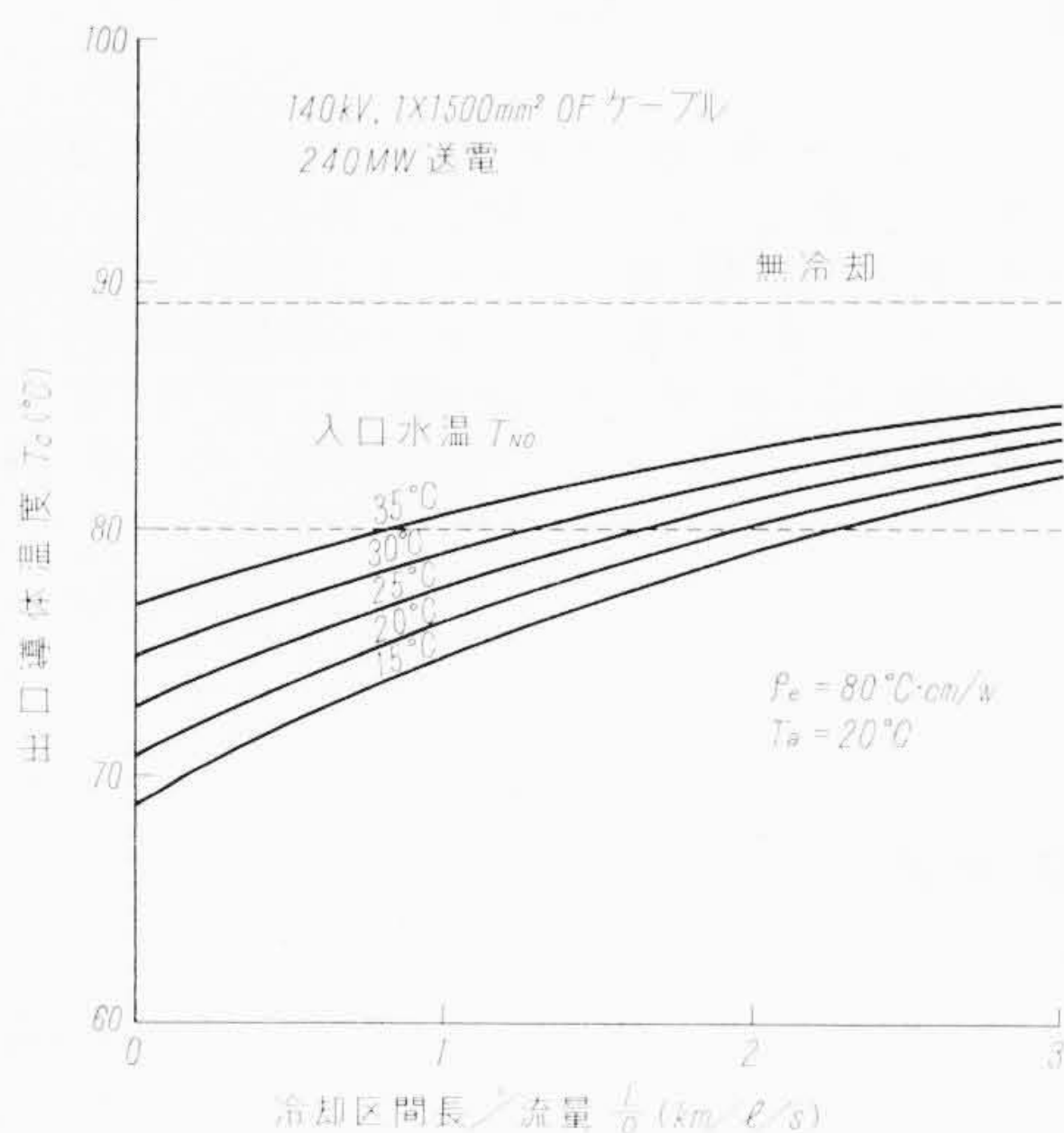
$$T_c - T_a = W \left[R_{int} + R_A \left(1 - \frac{R_{iN}}{R_{NN}} \frac{R_B}{R_A} \varepsilon^{-\frac{L}{CQR_{NN}}} \right) \right]$$



第5図 気温、水温および周囲土壌温度



第6図 140 kV ケーブル管路配置



第7図 出口導体温度

$$+ \frac{R_{iN}}{R_{NN}} (T_{N0} - T_a) \varepsilon^{-\frac{L}{CQR_{NN}}} \dots\dots\dots (11)$$

となる。 L は冷却するケーブルの全長である。上式は L/Q の関数として表示される。

第6図の管路より各部の熱抵抗を求め、4.1の計算条件を用いて計算すれば、(11)式は次のとおりになる。ただし、第6図の管路1のケーブルについて計算されたものである。

$$T_c = T_a = 24.1 + 45.0 \left(1 - 0.406 \varepsilon^{-\frac{1}{283.4} \frac{L}{Q}} \right) + 0.408 (T_{N0} - T_a) \varepsilon^{-\frac{1}{283.4} \frac{L}{Q}} \dots\dots\dots (11)'$$

ただし、 $W = 0.267$, $R_{int} = 90.2$, $R_A = 168.5$,
 $R_B/R_A = 0.996$, $R_{iN}/R_{NN} = 0.408$

第7図は $T_a = 20^\circ\text{C}$ としたときの導体温度 T_c を入口水温 T_{N0} をパラメータにして描いたものである。ケーブル導体の最高許容温度を 80°C とすれば、 25°C の水温に対して L/Q を 1.5 以下に押えればよい。無冷却のときには導体温度は 89°C になる。

4.3 許容電流および送電容量

ケーブルの発熱量 W は

$$W = R_{ac} I^2 + W_d \dots\dots\dots (12)$$

であるから、導体電流 I は (11), (12) 式より

$$I = \sqrt{\frac{1}{R_{ac}} \left\{ \frac{T_c - T_a - K_2 (T_{N0} - T_a) \varepsilon^{-\frac{kL}{Q}}}{R_{int} + R_A \left(1 - K_1 \varepsilon^{-\frac{kL}{Q}} \right)} - W_d \right\}} \dots\dots (13)$$

となる。ここで、 $k = 1/CR_{NN}$, $K_1 = R_{iN}R_A/R_{NN}R_B$, $K_2 = R_{iN}/R_{NN}$ である。無冷却のときは $Q = 0$ とおけばよい。

一方、送電電力は

$$\sqrt{3} VI \cos \theta \dots\dots\dots (14)$$

で示される。

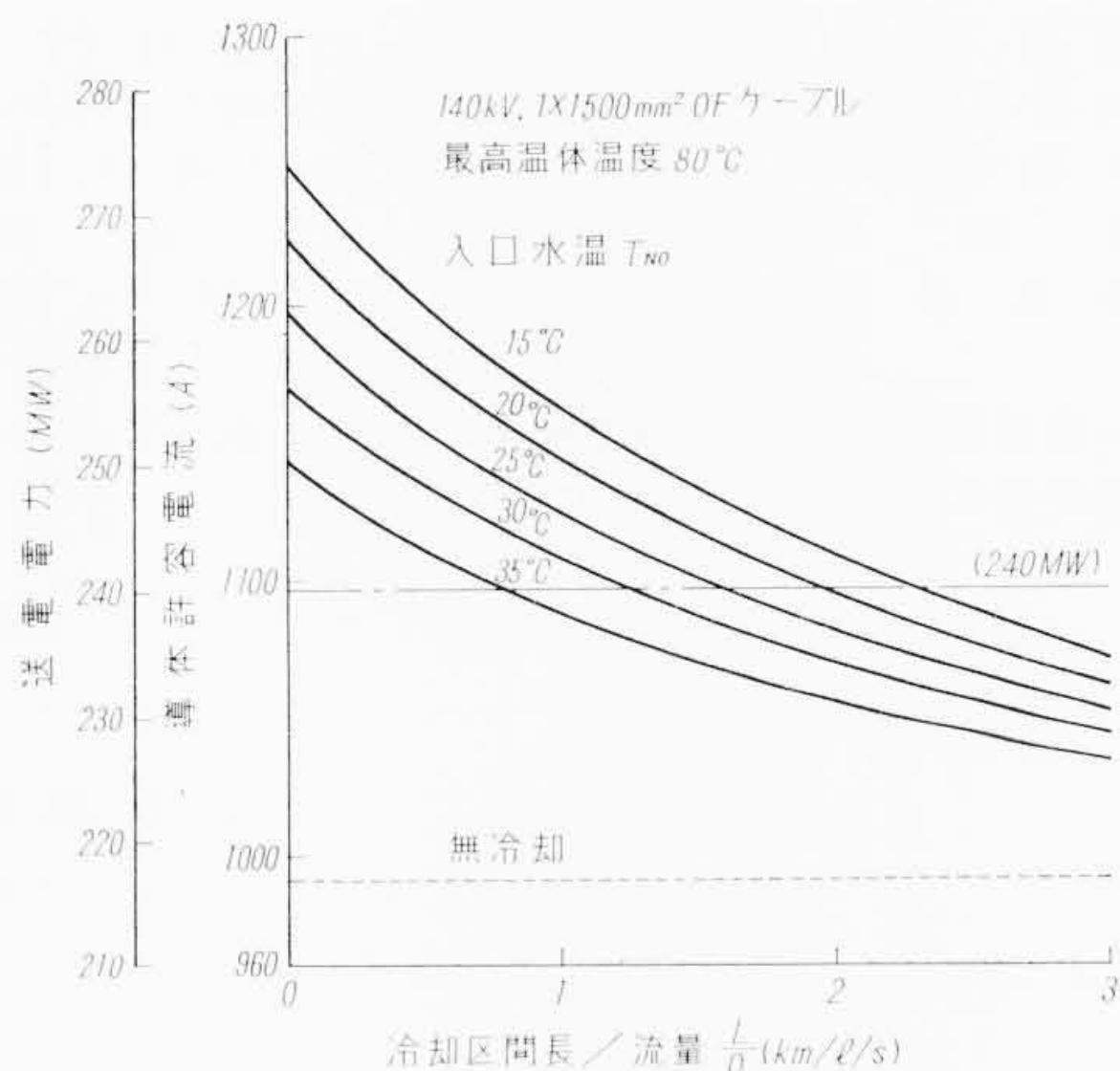
$T_a = 20^\circ\text{C}$, $T_c = 80^\circ\text{C}$ とすれば、(13)式は次のとおりである。

$$I = \sqrt{\frac{1}{0.160 \times 10^{-6}} \left\{ \frac{60 - 0.408 (T_{N0} - 20) \varepsilon^{-\frac{1}{283.4} \frac{L}{Q}}}{90.2 + 168.5 \left(1 - 0.406 \varepsilon^{-\frac{1}{283.4} \frac{L}{Q}} \right)} - 0.0747 \right\}} \dots\dots\dots (13)'$$

ただし、 $R_{ac} = 0.160 \times 10^{-6}$, $W_d = 0.0747$,

$k = 1/283.4$, $K_1 = 0.406$, $K_2 = 0.408$ 。

第8図は導体許容電流 I を、 T_{N0} をパラメータとして、 L/Q の関数として表わしたものである。たとえば、ケーブル長 4 km を毎秒 2 l の流量の水で冷却する場合には L/Q は 2 となるので、240 MW 以上の送電電力を得るには入口水温は 20°C 以下に保たなければならないことがわかる。



第8図 許容電流と送電電力

一方、送電電力は(14)式で示されるので、4.1の条件を仮定すれば第8図縦軸のように求められる。

5. 結 言

ケーブルの強制冷却方式のうち、間接冷却方式に対する理論を考察したが、他の考え方も発表されているので⁽⁴⁾、この理論の妥当性は今後十分に検討されることが必要であろう。とくに、(4)式の冷却体の熱吸収をもっと正確な式で表現することは今後の課題である。

おもな結果をまとめれば

- (1) 冷却理論による計算と実験による測定とはほぼ一致する。
- (2) 間接水冷時のケーブル管路温度は(7)式で与えられる。
- (3) 140 kV, 1,500 mm² 単心 OF ケーブルで1回線当たり240 MW を送電するには、間接水冷が必要である。そのとき、入

口水温は25℃以下に押えられることが望ましい。

- (4) 間接水冷方式はケーブル自体の電氣的信頼度を高く保てるので、送電系統への適用に困難な問題を生じない。などである。

終わりに、この研究に当たって多くのご指導、ご援助を与えられた関西電力株式会社岡田課長、広瀬課長、長浜氏ならびに日立電線株式会社の関係各位に心から感謝する次第である。

なお、この研究の取りまとめには日立電線株式会社大島氏および三上氏の労を仰いだことを感謝する。

参 考 文 献

- (1) R. W. Burell, A. J. Falcone, W. J. Roberts: TAIEE, 70, Pt. III, 1798 (1951)
- (2) 沼尻, 網野: 電学会東京支部 310 (昭37)
- (3) 岡田, 三宅, 池田: 電学会連大 1050 (昭38)
- (4) P. Ralston, G. H. West: CIGRE, 215 (1960)

第 25 卷 目 次 第 11 号

- ・高 層 建 築 と 受 変 電 設 備
- ・インド初の国産電車に生きる日立技術
- ・赤 外 線 こ た つ と 電 気 毛 布
- ・道 路 照 明
- ・ビルの騒音を解決した日立低騒音ファン
- ・航空科学を推進する汎用飛行シミュレータ
- ・生 産 に 直 結 す る 化 学 分 析
—発光分光分析とカーボン—

- ・非 破 壊 検 査 の 新 鋭 ス タ ー
- ・明日への道標「石灰石採掘に活躍する日立 U23 ショベル」
- ・日立ハイライト「秋の夜長と日立テレビ」
- ・電線百話 第34話「海を走る電線」
- ・新しい照明施設「横浜銀行東京支店光り天井照明」
- ・読者の声「ニュービスタ・テレビとは」

発行所 日 立 評 論 社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座東京 20018 番

Vol. 24 日 立 造 船 技 報 No. 2

- ・疲れが切欠きじん性に及ぼす影響
- ・熱交換器用管板の強さに及ぼす管穴ピッチの影響
- ・半組立形クランク軸の曲げ強さ(第1報)
- ・流動層における流動化
- ・特殊金属材料に関する研究(第1報)
—超耐塩酸合金—
- ・小型船舶型における模型船と実船との相互関係および推進性能に及ぼすトリムの影響

- ・水門とびら下部形状に関する実験的研究
- ・海水管の防汚方法
- ・原油・重油の放射線しゃへい特性(第1報)
—フリツケ法によるガンマ線量測定法—
- ・ドック中における塗装工程の短縮
- ・日立 B & W デイゼル機関の歩み

……………本誌に関する照会は下記に願います……………

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60