

# 管路間接水冷方式によるOFケーブルの送電容量増大

## Transmission Capacity Increase of Oil-filled Cable by Separate Pipe Cooling

近年、都市部の電力需要の増加に対処するため、超高压地中線路の増容量化が進められているが、その一つとして既設の275kV OFケーブル系統に管路間接水冷方式を適用することを考えた。この報告は、冷却設備の設計、製造及び据付、並びに送水管としてこの工事のために開発したビニル防食波付ステンレス管の実用化について述べたもので、間接水冷によるケーブル増容量化工事を無事完了させることができた。更に、この設備の冷却効果を検証するため、運転中の各部の温度実測を行ない解析した。これらの工事と解析を通して、ビニル防食波付ステンレス管の製造方法や布設工法を確立したこと、間接水冷方式が予想どおりの効果を発揮し、当初の目標送電容量を確保できることを実証できたことなどにより、今後の超高压強制冷却線路の設計と建設に対し有益な結果を得た。

谷沢克憲\* Tanizawa Katsunori  
 小川勝徳\*\* Ogawa Katsunori  
 管野 洋\*\*\* Kanno Hiroshi  
 岩崎 力\*\*\* Iwasaki Tsutomu  
 金丸公春\*\*\*\* Kanemaru Kimiharu  
 富田浩庸\*\*\* Tomita Hironobu

### 1 緒 言

近年の電力需要の増加に伴い、送電系統の増容量化の必要性が増加している。特に都市部では、電力需要の増加が著しく、これに対処するため新たに大容量回線の新設を進めつつあるが、これとともに既設回線の容量増加を図ることも必要となり、強制冷却方式をはじめとする種々の増容量化の方法を検討してきた。

このほど東京電力株式会社では、既設の重要回線の一つである城南線275kV OFケーブル系統の増容量化を図る目的で、同一ルート内の空管路を利用して冷却水を通水し、強制冷却を行なう管路間接水冷方式を採用した。ここでは、その冷却

方式、工事の概要及び冷却効果を検証する目的で行なった現地実測結果と解析内容について報告する。

### 2 ケーブル及び冷却設備

#### 2.1 ケーブル系統及び通水方式

城南線275kV OFケーブル系統は、都内城南変電所と江東変電所を結ぶ巨長約15kmのOFケーブル3回線の系統である。この系統は、昭和46年に建設されて以来、都内の主幹送電系統として運転されてきたが、最近の都内の電力需要の増加に伴って330MVA/回線(合計990MVA)にまで増容量化する必要

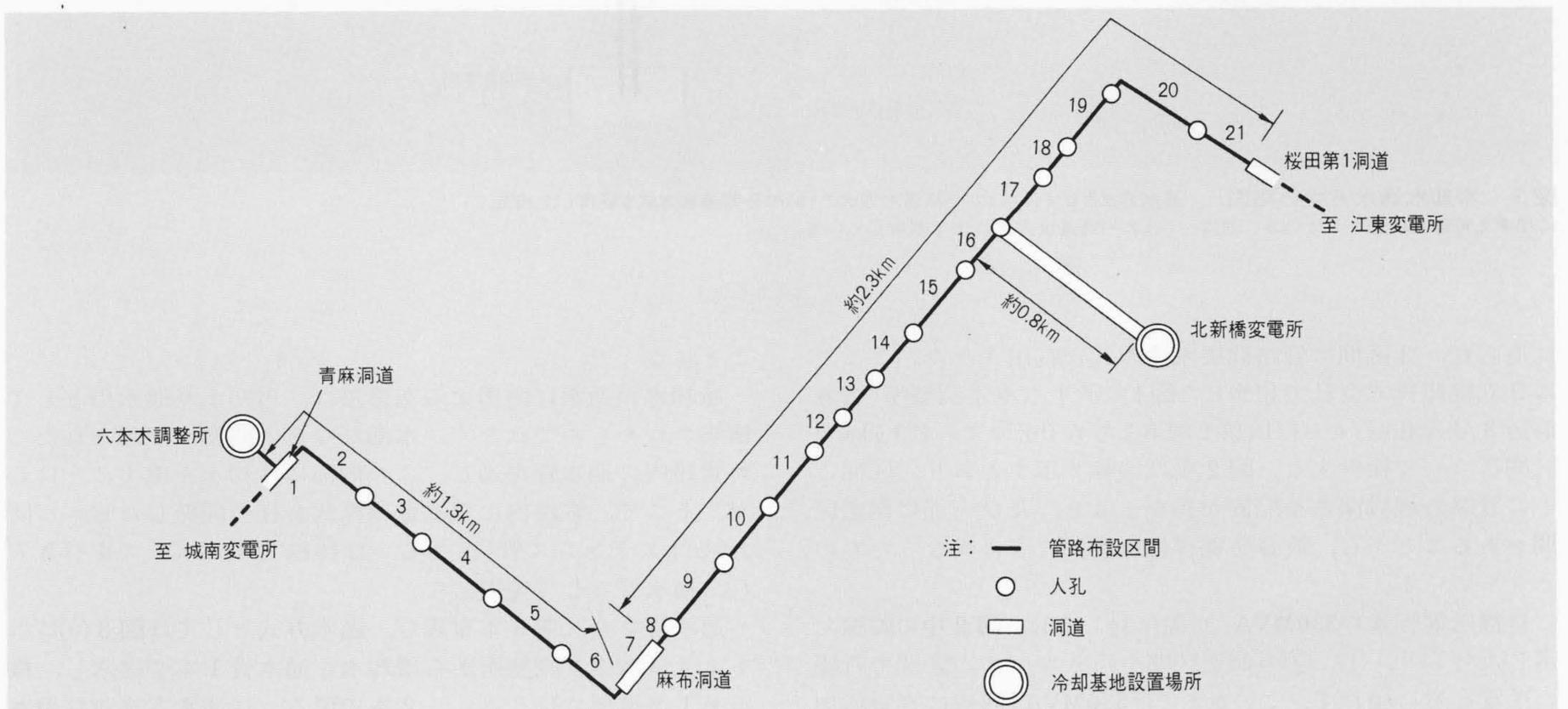


図1 対象区間のルート略図 対象区間はNo.1, No.7の洞道布設部と他の管路布設部より成る。

\* 東京電力株式会社送変電建設本部地中線建設課 \*\* 東京電力株式会社 地中線総建設所東京南工事事務所電気課 \*\*\* 日立電線株式会社日高工場  
 \*\*\*\* 日立電線株式会社研究所

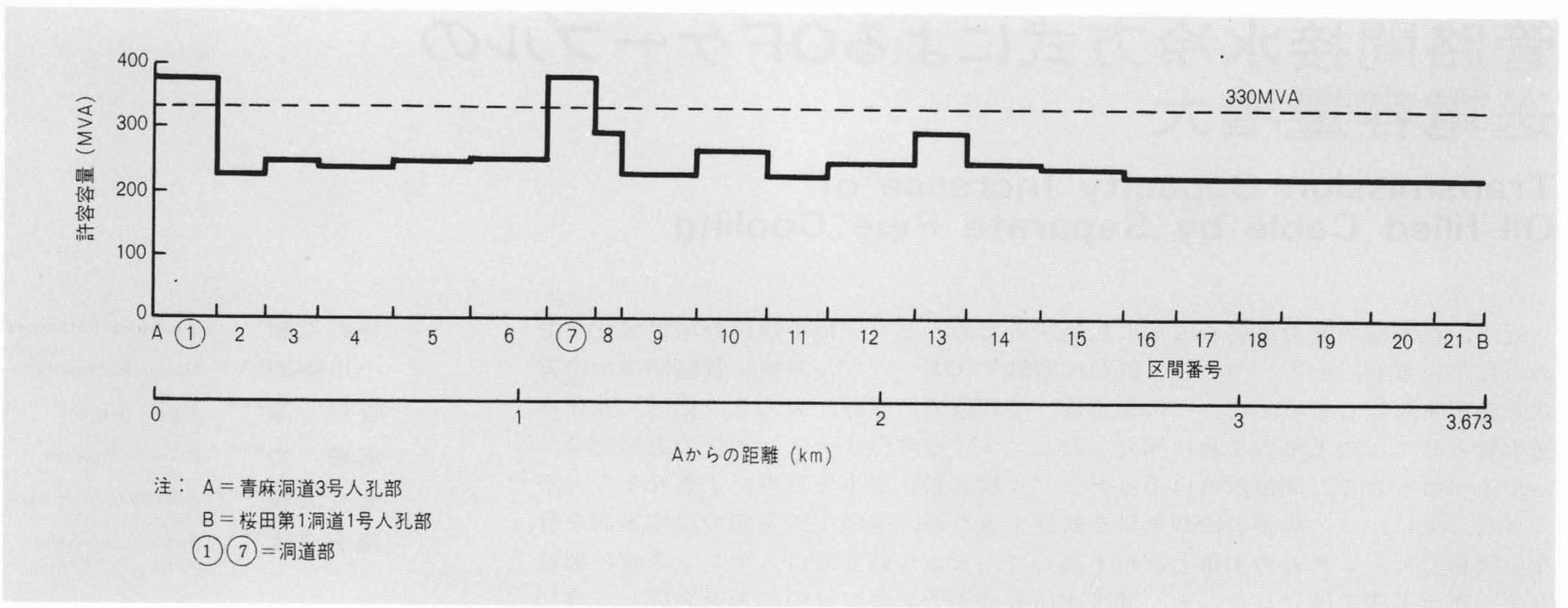


図2 非冷却時の許容送電容量 許容送電容量は区間ごとに異なり、全体として220MVA/回線に制限される。

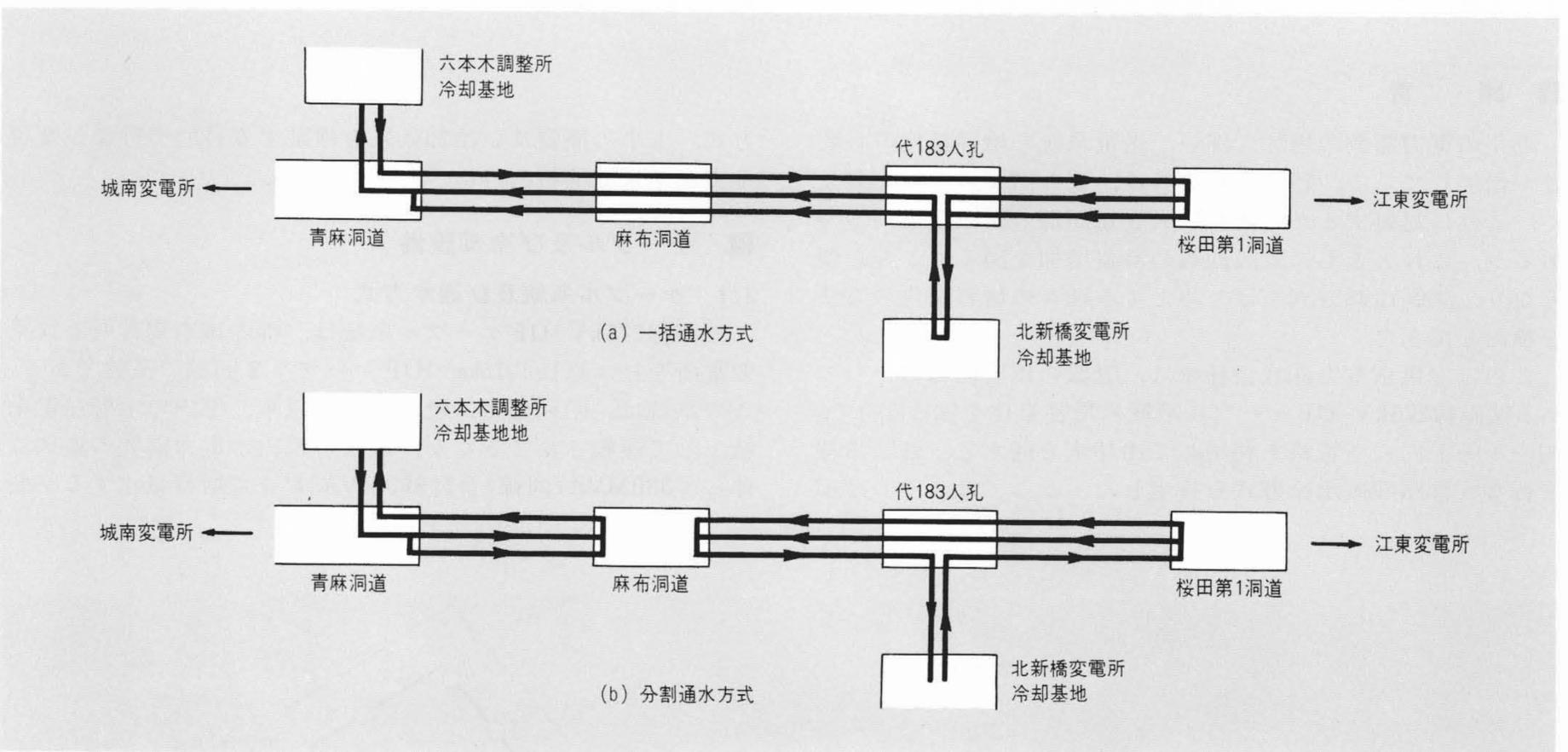


図3 冷却水通水方式の略図 通水方式としては(a)の一括通水方式と(b)の分割通水方式を採用し、相互に切換え可能な構造としている。現在、(a)の一括通水方式により運用している。

に迫られ、3区間に管路間接水冷方式が採用された。ここでは日立電線株式会社で担当した図1に示す六本木調整所(青麻洞道3号人孔部)から桜田第1洞道1号人孔部までの約3.7kmの区間について検討する。図2中に実線で示すとおり、区間ごとに管路の埋設深さや配置が異なること、及び一部に洞道区間があることから、許容送電容量は区間ごとに異なったものとなっている。

目標送電容量の330MVA/回線に対しては、図2中の破線で示したとおり、①、⑦の洞道区間を除きすべての区間で所要の送電容量に満たず、このままでは330MVA/回線に容量増加できないことが分かる。このため、なんらかの冷却方式を採る必要があった。管路布設ケーブルに対する冷却方式として、直接水冷方式と間接水冷方式の二つが考えられたが、近傍の空管路内に冷却水を通水する、管路間接水冷方式を採用する

ことになった。

冷却水の通水に使用する空管路は、当初より通水用として構築されたものではなく、水漏れなどの問題が予想されたため管路内に通水管を通し、この内部に冷却水を流すことにした。そこで、管路内に日立電線株式会社の開発したビニル防食波付ステンレス管<sup>1)</sup>、あるいは特殊ビニルホースを引き入れ、通水管として使用した。

通水管を全区間3本布設し、通水方式としては図3(a)に示すように六本木調整所から冷却水を通水管1本で送水し、桜田第1洞道部で折り返し、2本で戻る一括通水方式が採用されている。なお、冷却基地は六本木調整所と北新橋変電所の2箇所に設置し、同図(b)に示すような通水ルートをも2系統に分けた分割通水方式での強制冷却もできるような設備となっている。

## 2.2 冷却基地設備

冷却システムの概要は図4に示すとおりである。

六本木調整所と北新橋変電所の冷却基地設備は、常時一定流量の冷却水を送水し、同時に冷却水水温を一定温度以下に冷却する装置である。一括通水時には青麻3号の貯水槽の水を水中ポンプで六本木調整所に揚水して水槽に蓄え、送水ポンプで通水管に送水する。図3(a)及び図4で冷却水が北新橋基地を経由するのは、冷却水の熱源を暖房に利用するためである。このため、北新橋基地と六本木基地の送水ポンプは直列運転されている。

分割通水は六本木と北新橋両基地をベースとした2系統で水冷を行なうもので、両系統とも冷却水は閉回路で循環される。このとき冷却水の水温を所定の値以下に保つため、六本木基地には冷却塔が設置され、復水が冷却される。冷却塔は飛散水が少なく、低騒音タイプの流下式向流型を採用している。また送風機騒音を下げるため、送風機をファンルームに収納し、同時に吐出し口は消音器を通して冷却塔に接続している。一方、北新橋基地ではビル内の温度制御用の冷水(10℃)と熱交換することにより復水が冷却される。熱交換器は向流型を採用し、温度制御は混合三方弁による比例制御となっている。

いる。北新橋側の通水管は麻布洞道で六本木側と接続されており、北新橋側冷却水の水量が不足すると六本木側から自動的に補給される構成となっている。

## 2.3 通水管

管路内通水管には、従来テトロンを心材にして内外層にポリエチレンやビニルをかぶせたホースが使用されてきたが、今回の通水管の全長約12,000mのうち5,000mには日立電線株式会社が開発したビニル防食波付ステンレス管が採用されている。この通水管の構造を図5に示す。

ビニル防食波付ステンレス管は、1mm以下の薄い帯鋼をパイプに成形したのち溶接し、外側からスパイラル状に波付けた管に地中ケーブルと同等のビニル防食層を施したものである。金属管のため機械的強度に優れ、OFケーブルと同等以上の可撓性を持ち、管の接続金具も構造が簡単であるなど多くの長所を持っている。

人孔内の通水管には重鉛めっき鋼管が使用されており、これは運転中のケーブルが10本以上布設された狭い人孔内に通水管を3本通し、全管に塞止弁、自動空気抜き弁及び排水弁を取り付けるため、配管をコンパクトにする必要があったためである。

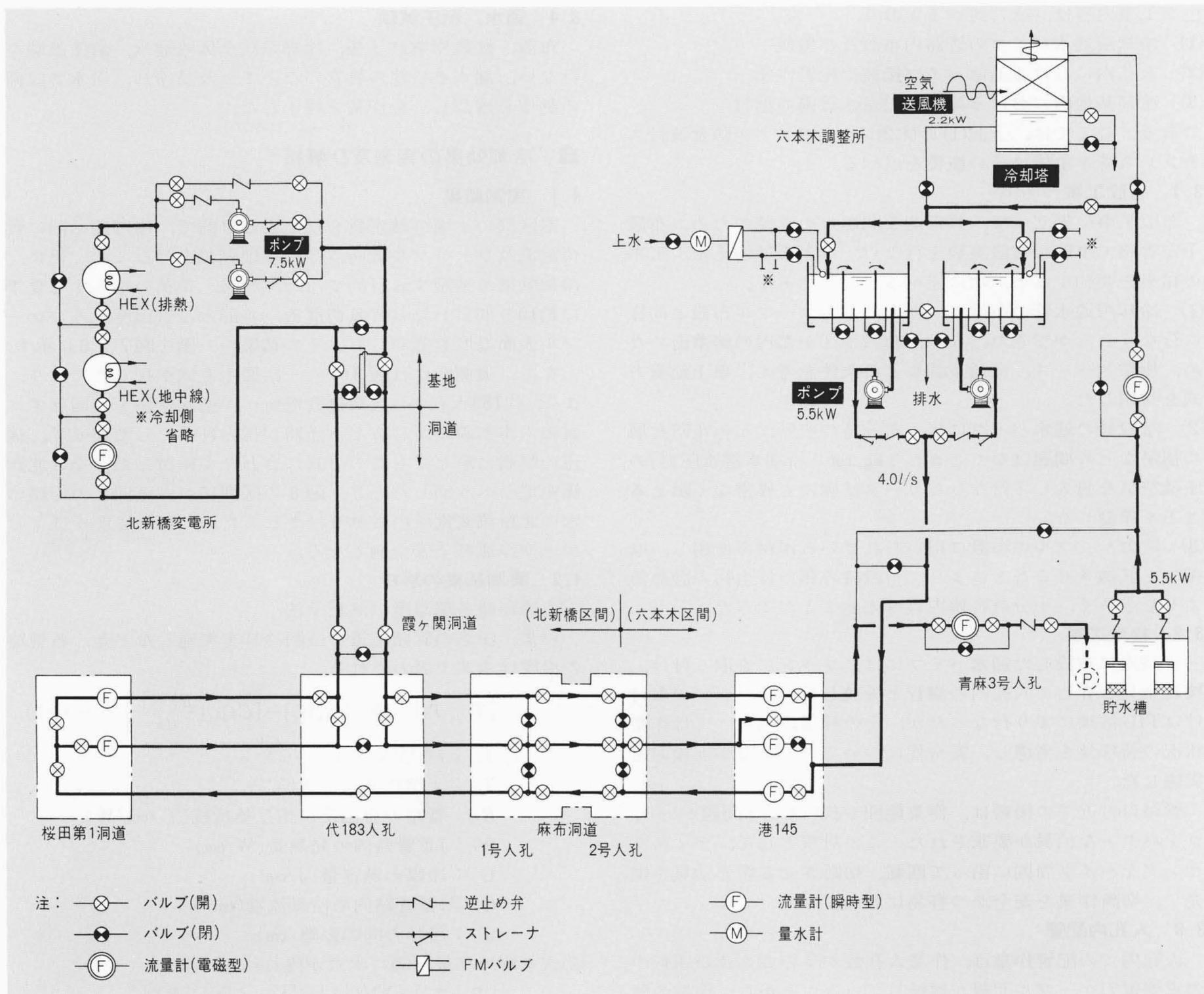


図4 冷却系統図 太線で示している系統が現在運用中の一括通水方式である。

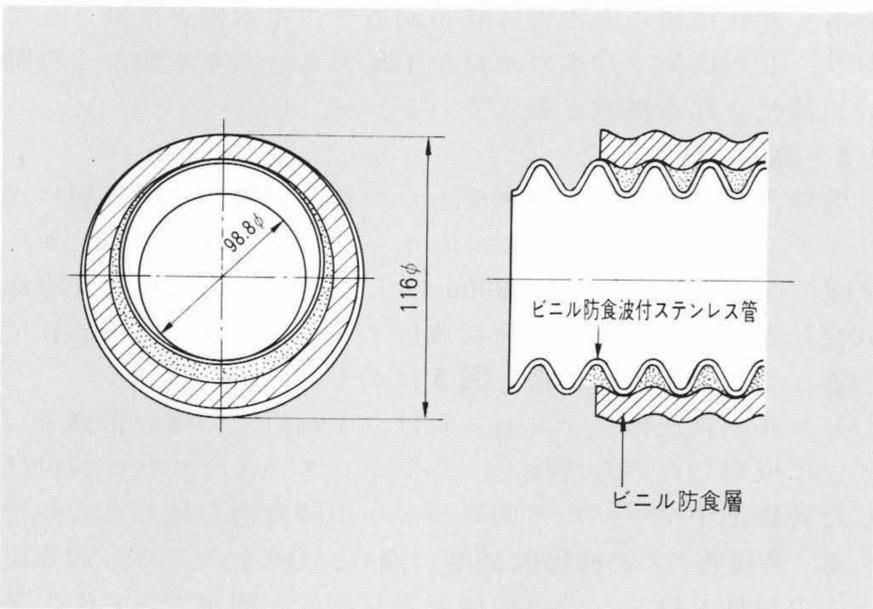
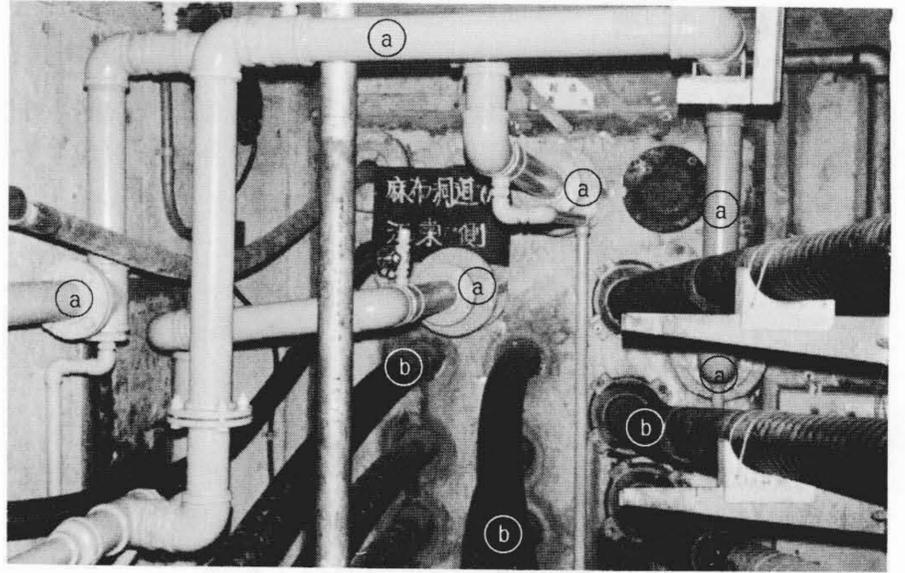


図5 ビニル防食波付ステンレス管の構造 冷却水通水用パイプとして波付ステンレス管にビニル防食層を被覆したものをを用いた。



注：(a)水冷管、(b)275kV OFケーブル

図6 人孔内における水冷管の布設状況 電力ケーブル管路の近傍の空管路に、通水パイプを引き入れて冷却している。

### 3 工事の概要

冷却システムの設計完了に伴い、現地調査を開始し実験施工を行なうなど、詳細な検討を加えたのち工事に着手した。主な工事内容は、次に述べるとおり、

- (1) 冷却用通水パイプの管路内布設及び接続
  - (2) 人孔内における通水パイプ接続用配管作業
  - (3) 冷却基地内における冷却及び送水設備の据付
- である。ここでは、上記(1)及び(2)についてビニル防食波付ステンレス管を主体にその概要を述べる。

#### 3.1 布設工事

布設工事に先立って、技術的な問題点の確認のため、布設予定管路で事前に布設実験を行ない、本工事に備えた。工事の結果を要約すると、次に述べるとおりである。

- (1) 冷却用通水管の布設は、従来の電力ケーブル布設と同様に行なうことができた。なお、布設地区が都内の繁華街のため、作業スペース、交通規制などの条件を考え、車上延線方式を採用した。
- (2) 布設後の通水パイプには、布設時の変形、ビニル防食層の損傷などの問題はなく、また  $5 \text{ kg/cm}^2$  (冷却水送水圧力)の圧縮空気を封入して行なったリーク試験にも異常なく耐えることを確認した。
- (3) 電力ケーブルの布設に用いられている滑材を使用し、摩擦力を低減させることにより、布設時の張力は当初の計算値よりも小さく、十分許容値内に抑えることができた。

#### 3.2 接続工事

管路内に布設した通水パイプには、フランジを取り付け、接続金具を介して人孔内の鋼管と接続した。フランジの取付けはTIG溶接により行なったが、その採用に当たっては作業状況の特殊性を考慮し、安全性についての十分な事前検討を実施した。

管路口付近での接続は、作業範囲が狭いという問題があり、コンパクトな治具が要求された。この対策として、ディスクサンダをパイプ周囲に沿って回転、切断させる新形治具を開発し、切断作業を安全かつ容易にした。

#### 3.3 人孔内配管

人孔内での配管作業は、作業人孔数が多いこと及び運転中の重要電力ケーブル回線が輻輳していることから、作業の簡略化が必要となった。その対策として、必要部品を含めた配

管をあらかじめ製作し、現地人孔では組立、及び調整作業だけとする工事のプレハブ化を実施した。プレハブ化の導入により作業能率が向上するとともに、配管作業が容易になるなど十分な成果を挙げた。図6に人孔内での配管状況を示す。

#### 3.4 通水、耐圧試験

布設、接続作業終了後、冷却システム全体の通水、耐圧試験を行ない、漏水その他の異常のないこと及び冷却、送水各設備の動作を確認し、全作業を終了した。

### 4 冷却効果の実測及び解析

#### 4.1 実測結果

本区間の土壌の熱定数を推定する目的で、冷却開始前に負荷電流及びケーブル表面温度の現地実測を行なった。更に、冷却効果を検証する目的で冷却開始後、負荷の増加する夏季に約10日間にわたって負荷電流、各部水冷管温度、及びケーブル表面温度を実測した。その結果の一例を図7、8に示す。

なお、実測時には図3(a)の一括通水方式が採られており、また、代183人孔から北新橋変電所への通水径路をう回せずに直接六本木調整所にもどる径路が採られた。したがって、後述の解析に際してもこの方式に合わせて検討した。なお北新橋変電所へう回したとき、図8の区間16から区間1の帰路の水は北新橋変電所内で熱交換されるため、更に温度が低下しケーブル運転上安全側となる。

#### 4.2 実測結果の解析

##### (1) 冷却時各部温度の解析手法

いま、任意の管路配置で強制冷却を実施したとき、各管路の温度は次式で表わされる。

$$[T_i - T_a] = [R_{ij}] \cdot \left\{ [W_j] - [CQ_{ii}] \frac{d[T_i]}{dx} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $T_i$  :  $i$ 番管路の温度( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_a$  : 土壌の基底温度( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_{ij}$  : 管路の自己及び相互熱抵抗( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$ )

$W_j$  :  $j$ 番管路内の発熱量( $\text{W}/\text{cm}$ )

$C$  : 冷媒の熱容量( $\text{J}/\text{cm}^3$ )

$Q_{ii}$  :  $i$ 番管路内の冷媒流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$x$  : 冷却方向の距離( $\text{cm}$ )

(1)式を解けば最終的に次式が得られる。

$$[T_i - T_a] = \sum_{k=1}^n \left\{ ([1] - [S]_k e^{-\alpha_k \cdot x}) [BX] + [S]_k e^{-\alpha_k \cdot x} [T_{0i} - T_a] \right\} \dots\dots\dots(2)$$

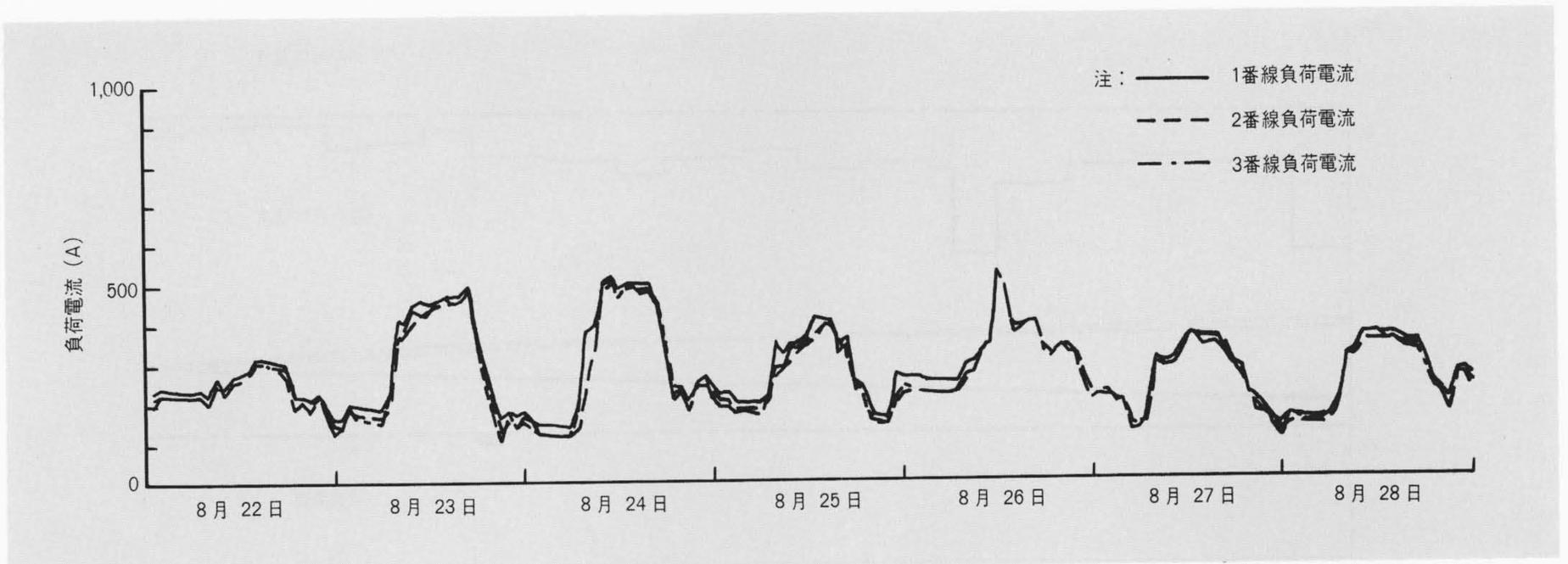


図7 電力ケーブルの通電電流パターンの一例 3回線ともほぼ同様の負荷電流変化を示している。

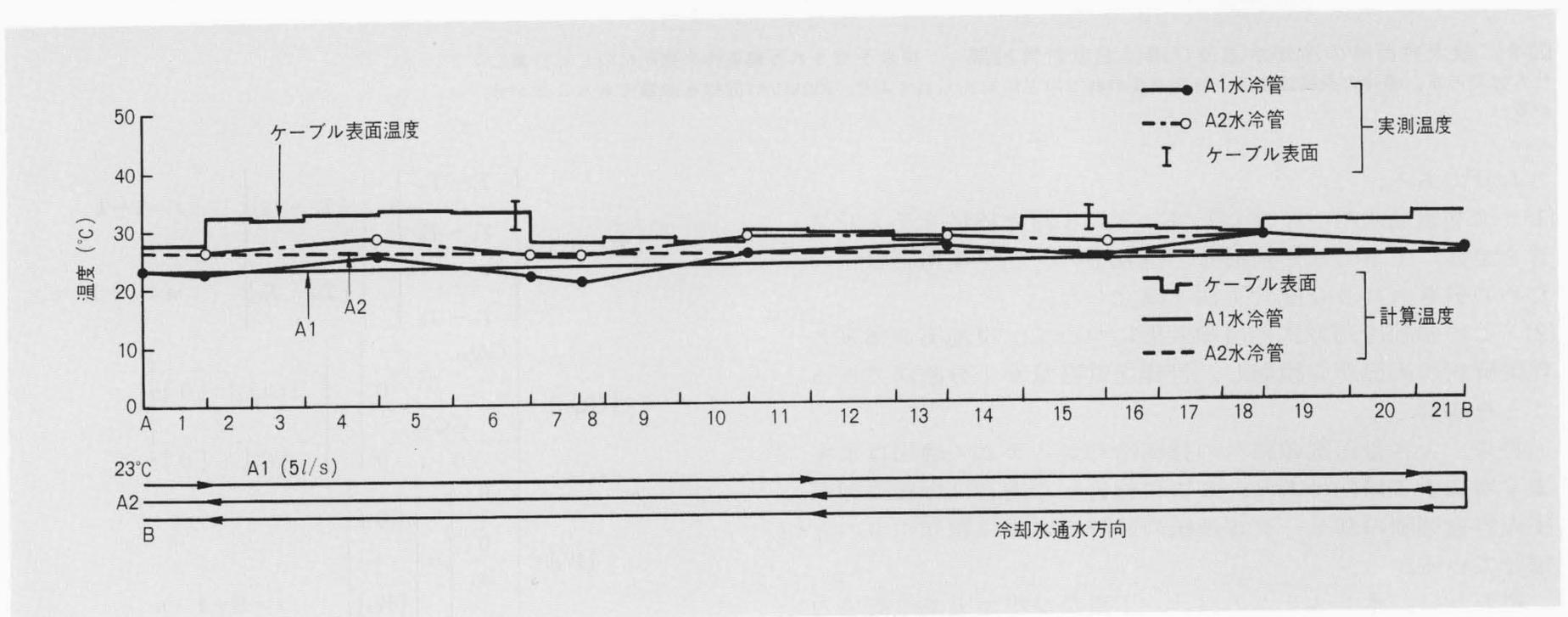


図8 実測値と計算結果の比較 実測値と計算結果は部分的に差があるが、冷却区間全体としては比較的好く一致していることが分かる。A2及びB水冷管実測温度はほぼ等しいために、ここではB水冷管温度を省略した。

ただし、 $\alpha_k : [AY] = [AX]^{-1} = [[R_{ij}] \cdot [CQ_{ii}]]^{-1}$ の固有値

$$[S]_k : \text{展開係数} \left( = \prod_{\substack{j=1 \\ (j \neq k)}}^n \frac{\alpha_k [1] - [AY]}{\alpha_k - \alpha_j} \right)$$

$T_{0i}$  : 冷媒の入口温度(°C)

となる。この解法をベースとして、間接水冷や直接水冷などの冷却方式の差、及び今回の線路のような条件の異なる多区間にも適用可能な解析手法を確立した。その詳細については、本稿末尾の付録に示すとおりである。

(2) 冷却時の温度実測値と計算値の比較

図8に示した実測結果に、前述の解析手法による数値計算結果を併記した。ここで、計算条件としては、冷却水通水量は実測時の5 l/s、入口水温は23°Cを用い、土壌の熱定数としては非冷却時の実測結果から推定した値を用いた。図8に示すとおり、冷却水温の分布は部分的に実測値と計算値とに差があるが、入口、出口水温(A点)及び折返し点(B点)の水温がよく一致しており、冷却区間全体としては比較的好く一致していることが分かる。また2箇所測定したケーブル表面温度も同図中に示すとおり、計算値と比較的好く一致している。この結果から、前述の推定熱定数及び計算手法を用いて、

本冷却システムの解析が可能であることが確認された。

夏季での実測時には、増容量化後の最大送電容量330MVA/回線には達しなかったため、実測時の冷却条件及び土壌の熱定数を用いて推定計算した結果、裕度をもって330MVA/回線の送電が可能であることが判明した。

更に、長期の運転期間中には冷却条件及び土壌の熱定数が悪化することも予想されるため、設計段階で想定できる最悪条件下の推定計算も行なった。ここでは、基底温度を25°C、冷却水入口水温を30°C、通水量を4 l/sとして計算した。結果は図9に示すとおり導体の最高温度は、連続許容温度の85°C以下に抑えられており、将来予想される諸条件の悪化に対しても所要の330MVA/回線の送電が可能であることが明らかとなった。なお、分割通水時についても同様の推定計算を行ない、目標送電容量が確保されることを確認した。

5 結 言

以上、東京電力株式会社城南線275kV OFケーブルシステムに実施した管路間接水冷方式に関する概要、及びその冷却効果の解析結果について報告した。内容をまとめると次に述べる

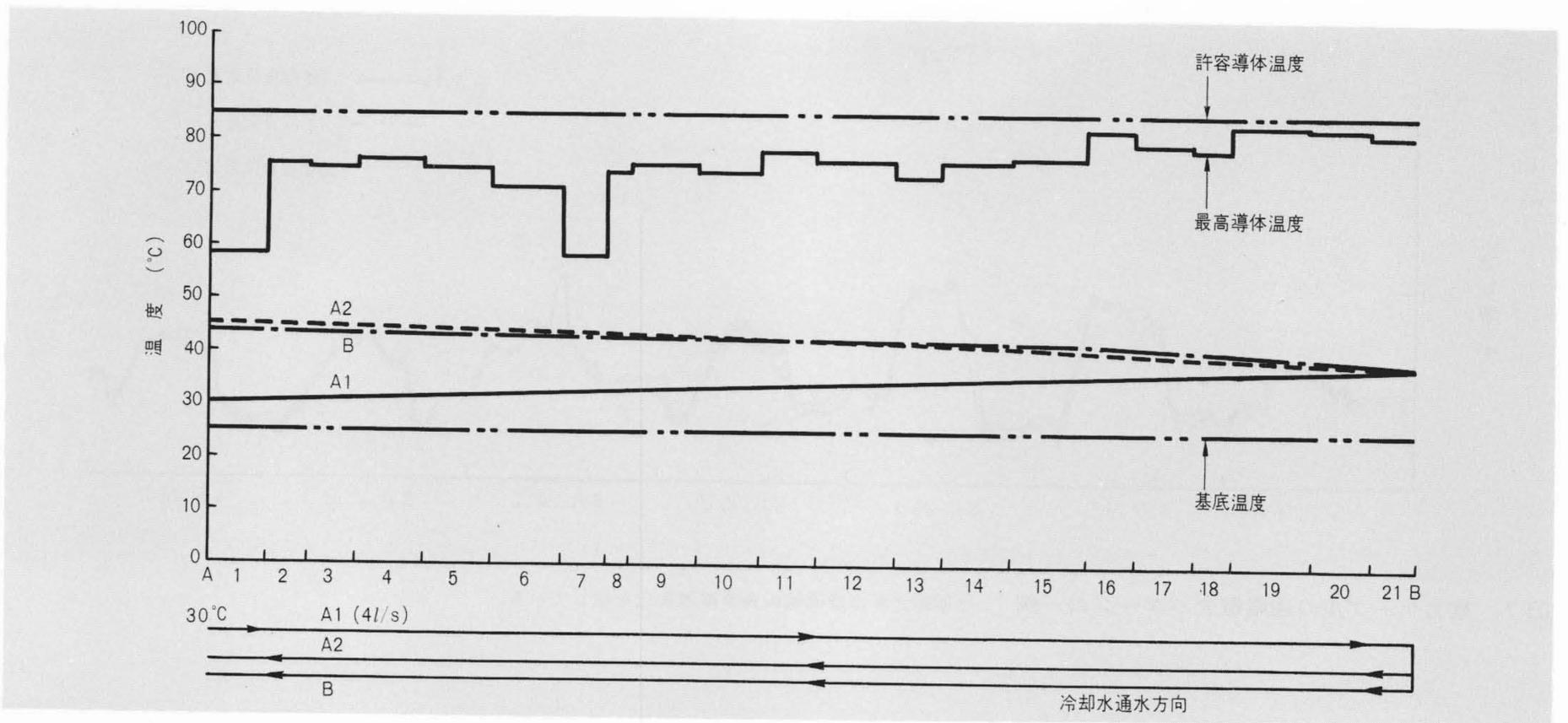


図9 最大負荷時の冷却水温及び導体温度計算結果 将来予想される諸条件の悪化に対して計算したものである。導体の最高温度は、許容温度の85°C以下に抑えられており、330MVA/回線を送電できることが分かる。

とおりである。

(1) 冷却水通水用パイプとして、ビニル防食波付ステンレス管を主体に工事方法を検討し、運転中のケーブル増容量化のための引き入れ及び配管工法を確立した。

(2) この強制冷却方式の冷却効果について、現地実測結果と理論解析の両面から検討し、目標送電容量が十分確保できることを確認した。

将来、大容量送電線路への強制冷却システムの適用はますます増加する傾向にあり、ここに報告した内容は今後の超高压大容量強制冷却ケーブル系統の設計と建設に役立つものと信じている。

終わりに、本システムの設計、工事及び現地実測に御協力をいただいた東京電力株式会社、及び日立電線株式会社の関係各位に対し厚くお礼を申しあげる。

参考文献

- 1) 戸部, 小川ほか: 間接水冷用可とうステンレス管の開発, 昭和51年電気学会全国大会, No.1079

付録 強制冷却時各部温度の解析方法

本文中(1)式より以下に示す置き換えを行ない,

$$[AX] = [R_{ij}] \cdot [CQ_{ii}]$$

$$[BX] = [R_{ij}] \cdot [W_j]$$

これより,  $[AX] \cdot \frac{d}{dx} [T_i - T_a] + [T_i - T_a] = [BX]$

更に,  $[AY] = [AX]^{-1}$  とおけば,

$$\frac{d}{dx} [T_i - T_a] + [AY] \cdot [T_i - T_a] = [AY] \cdot [BX]$$

となる。これを一次微分方程式として解くと,

$$[T_i - T_a] = ([1] - e^{-[AY] \cdot x}) \cdot [BX] + e^{-[AY] \cdot x} \cdot [T_{0i} - T_a]$$

が得られる。ただし、ここでは入口温度  $T_{0i} (i=1 \sim n)$  が境界条件として与えられるものとした。上式はSylvesterの展開定理を用いて、本文中の(2)式となる。

間接冷却では、冷媒が流れる管路と流れない管路がある。このとき、単純に本文中(2)式で  $Q_{ii} = 0$  とおくと  $[AY]$  が求まらず、(2)式の解が得られない。そこで(1)式で、

$$[T_i - T_a] = \begin{bmatrix} T_1 - T_a \\ \vdots \\ T_k - T_a \\ \vdots \\ T_{k+1} - T_a \\ \vdots \\ T_n - T_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_l - T_a] \\ \vdots \\ [T_m - T_a] \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} l=1 \sim k \\ m=k+1 \sim n \end{matrix}$$

$$[CQ_{ii}] = \begin{bmatrix} CQ_{11} & & 0 \\ & \ddots & \\ & & CQ_{kk} \\ 0 & & & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [CQ_{ul}] & [0] \\ & [0] & [0] \end{bmatrix}$$

$$[W_j] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ W_r \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ \vdots \\ [W_r] \end{bmatrix} \quad r=S+1 \sim n$$

ただし、 $l=1 \sim k$ : 冷媒の流れる管路  
 $m=k+1 \sim n$ : 冷媒の流れない管路  
 $r=S+1 \sim n$ : ケーブルの入っている管路  
 とおけば、 $CQ_{ii} \neq 0$  の部分で

$$[T_i - T_a] = [R_{ij}] \left\{ [W_j] - \frac{d[T_i]}{dx} [CQ_{ul}] \right\}$$

が成り立ち、本文中(2)式と同様の解が得られる。 $[T_i - T_a]$  が求めれば(1)式にもどって他の  $[T_m - T_a]$  が求まる。

次に多区間の場合には、第1区間の冷媒の入口温度  $[T_i]_{in}$  と最終区間の出口温度  $[T_i]_{ex}$  の間に次式の関係が成り立つ。

$$[T_i]_{ex} = [A] \cdot [T_i]_{in} + [B]$$

ここで  $[A]$ ,  $[B]$  は各区間ごとに(3)式で決まる既知数である。上式と冷媒の流れの組合せを考えると、下記の連立方程式が成り立つ。ただし、既知の  $[T_i]_{in}$  あるいは  $[T_i]_{ex}$  も未知数として扱っている。

$$\begin{bmatrix} [A] & & & \\ & \ddots & & \\ [C] & 0 & & \\ & & [D] & \\ [E] & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 in \\ \vdots \\ T_k in \\ T_1 ex \\ \vdots \\ T_k ex \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[B] \\ \vdots \\ [\theta_{in}] \\ \vdots \\ [\theta_{ex}] \\ [0] \end{bmatrix}$$

ここで、 $[C]$ : 入口温度  $\theta_{in}$  が与えられる管路No.で1, 他は0  
 $[D]$ : 出口温度  $\theta_{ex}$  が与えられる管路No.で1, 他は0  
 $[E]$ : 入口か出口で冷媒がつながり、往復路を形成するとき熱量の連続を成立させる定数をおく。  
 上式を解けば、既知、未知を問わず全部の入口、出口温度が求まる。