

東京電力株式会社，城北線向け

洞道内布設275kV強制水冷OFケーブル線路の建設

Installation of Water Cooling 275kV Oil filled Cables in Tunnel for Johoku-Line of Tokyo Electric Power Co., Inc.

都市部の電力需要の増大に対処するため，超高圧地中送電線の容量増加が必要となってきた。このたび東京電力株式会社では，都内，城北線275kV OFケーブル線路に洞道内布設トラフ内間接冷却方式，及び外部直接冷却方式を適用し，冷水循環装置，水冷管などを日立電線株式会社から納入した。本冷却システムは昭和56年6月から運転されている。

本線路の建設に当たっては，それぞれの冷却方式に適した水冷管を適用し，洞道内温度，ケーブル表面及び冷却水の温度を検出して効率良く冷却システムを運転する制御方式を導入した。また，直接冷却方式では，ケーブルの熱伸縮吸収方法について検討し，熱応力を水冷管内スネークとマンホール内オフセット部及び接続部が分担して吸収する新しい複合吸収方式を採用した。

これらの強制冷却技術は，今後の地中送電線路の容量増加に広く活用されると思われる。

神永建二* Kenji Kaminaga
山田和郎** Kazurô Yamada
風間洋治** Yôji Kazama
深沢正名*** Masana Fukasawa
鈴木伸孝*** Nobutaka Suzuki
緑川宮文*** Miyabumi Midorikawa

1 緒 言

大都市中心部での電力需要の増大に対処するとともに地中送電ルートの有効活用を図るため，地中送電線の容量増加が必要となる。その対策として各種の強制冷却方式が検討されており，特に東京電力株式会社では，都内導入基幹線路はそのほとんどが洞道内布設275kV OFケーブル線路であることから，これに適した強制冷却技術の開発が急務となっている。

従来の洞道内布設ケーブルに対する強制冷却は，送風による風冷が主であるが，風冷だけでは容量増加に限度がある。そこで，東京電力株式会社は日立電線株式会社と共同で，更に容量増加が可能となるトラフ内間接冷却方式，及び外部直接冷却方式について技術開発を行ない，それぞれ約半年間の実証試験後，このたび城北線に適用し運転に入った。

トラフ内間接冷却方式(以下，間冷と略す。)とは，密閉形防災トラフ内に布設されたケーブルの発生熱を，同じトラフ内に併設された水冷管により奪い間接的に冷却する方式である。外部直接冷却方式(以下，直冷と略す。)とは，水冷管内にケーブルを布設し，管内の隙間に冷却水を流してケーブル外表面から直接的に冷却する方式である。これらの冷却方式の容量増加効果に関しては既に多くの報告があり^{1)~3)}，ここでは主に水冷管材とケーブル熱伸縮吸収対策，及び冷却システムの運転制御について述べる。

2 線路概要

城北線は埼玉県新座変電所と都内豊島変電所とを結ぶ全長約21km，275kV OFケーブル3回線の地中送電線路である。本ルートは熱抵抗の大きな深部洞道部分が多く，併設される二次系ケーブルも多いことから，1回線当たり440MW(1回線故障時660MW)の送電容量に対して，当初から全線に風冷及び間冷を実施する計画で建設が進められてきた。しかし，最近になり，間冷に比べて更に送電容量の増加が期待できる

直冷の実用化の見通しが得られたことから，実線路での経験を積むために一部の区間(2.5km，1回線)に直冷を試験的に採用した。直冷，間冷併用区間を中心に線路の概要を図1に示す。日立電線株式会社では，このうち併用区間の直冷1回線，間冷1回線を建設した。また，板17マンホール～板共34マンホール間約6.5kmの2回線につき将来間冷を適用するため，水冷管布設までの工事を行なった。なお，本線路では直冷部，間冷部とも275kV 1×1,600mm² OFケーブルを使用している。

3 水冷管の仕様

3.1 間冷用水冷管

間冷では，トラフ内に収納した水冷管を冷却水の往路とし，トラフ外の洞道床部に布設した水冷管を復路とする方式を採用しており，往路用を冷却管，復路用を帰路管と呼ぶ。

これらの間冷用水冷管に要求される条件は，

- (1) ケーブルの近くに布設されるため，誘導による種々の障害が生じぬよう非金属管であること。
 - (2) 循環圧力損失を小さくし，冷却区間長を長くするために，内面が平滑で摩擦係数が小さいこと。
 - (3) 往路用冷却管に関しては，トラフ内に接続部を設けることが困難なため，長尺可とう管で，しかもケーブルの熱挙動を妨げるようなたわみを生ぜぬ適度な剛性をもつこと。
- などであり，更に，本線路のトラフの大きさや冷却水の温度上昇，圧力降下などから決まる管寸法，及び使用条件は，

管 径：冷却管……内径70～80mm

帰路管……内径150mm程度以上

常時使用最高温度：40℃

常時使用最高圧力：5 kg/cm²

となる。

これらの条件に対して，冷却管として，長尺製造が可能な

* 東京電力株式会社北東京電力所

** 東京電力株式会社東京地中線建設所

*** 日立電線株式会社日高工場

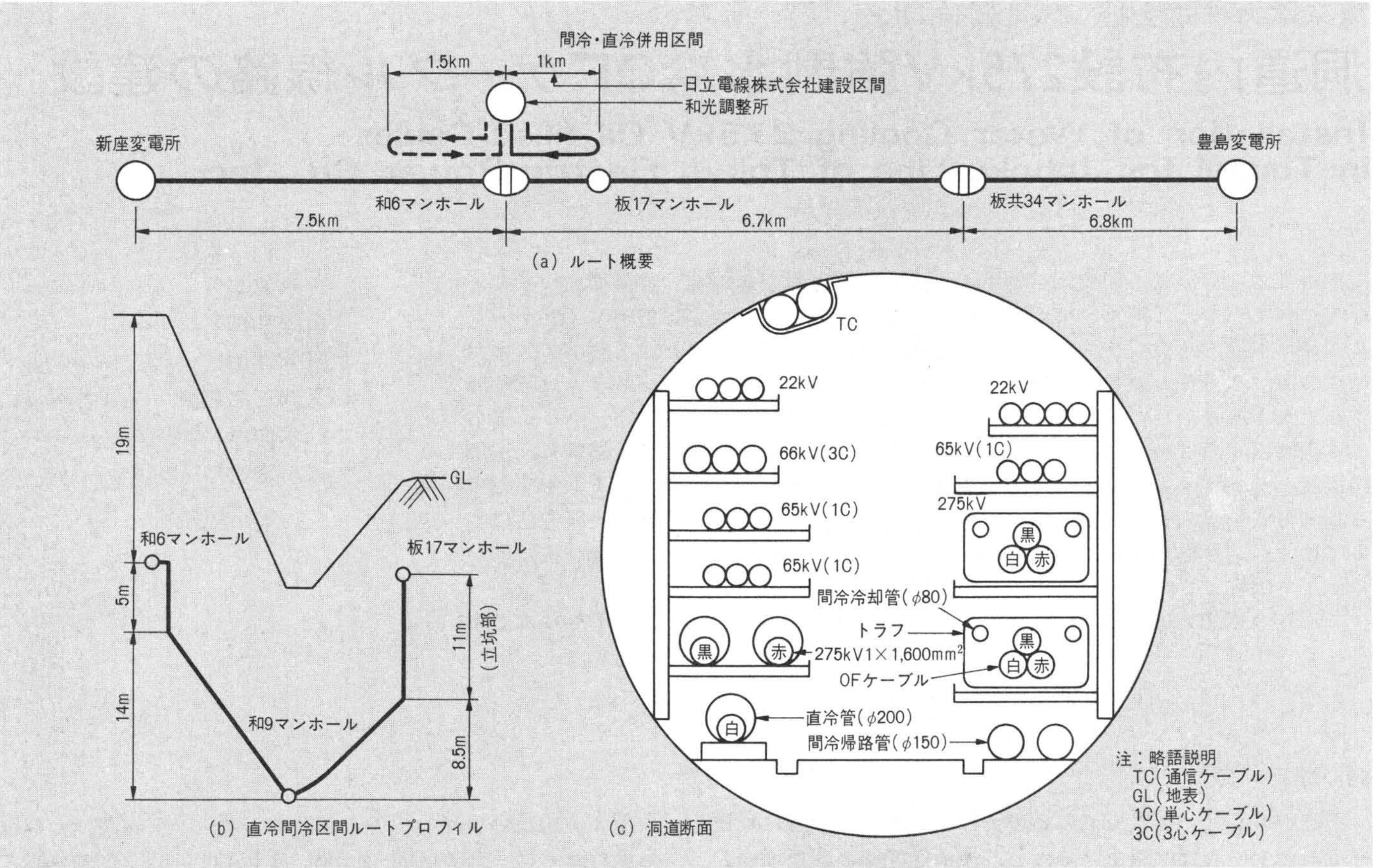


図1 線路概要 本線路は全長約21km、275kV OFケーブル3回線の都内導入線路で、トラフ内間接冷却(間冷)及び外部直接冷却(直冷)の併用区間の冷却システムの建設が完了し、運転に入った。

表1 水冷管の仕様及び性能 高温クリープ試験は40℃で40年使用相当の寿命試験であり、接続部を含んで実施している。

項 目	間 冷 用 水 冷 管			直 冷 用 水 冷 管
	ト ラ フ 内 冷 却 管		帰 路 管	洞 道 内
呼 称	φ70冷却管	φ80冷却管	φ150補強ゴムホース	φ200 FW管
内 径 , 厚 さ (mm)	69(8.0)	82(10.0)	152(7.0)	200(7.0)
材 質 ・ 構 成	中密度ポリエチレン		ビニロンコード補強 内外面ゴムモールド	ポリエステルFRP
単 長 (m)	300～700		30	5.4及び1.8
使用最高圧力及び 全 数 試 験 圧 力 (kg/cm ²)	5.0(7.5)		5.0(7.5)	10.0(15.0)
破 壊 圧 力 (kg/cm ²)	39～41(40℃で)		28～31	80～110
引 張 り 強 さ (kg/cm ²)	210(20℃で)		—	2,700
曲 げ 特 性	外径の20倍の曲げ良		良	2,500kg/cm ² (曲げ弾性率)
圧 壊 特 性	外径の $\frac{1}{3}$ にの扁平良		良	3,000kg/cm ² (圧壊強さ)
硬 さ	60～62(ショアD)		68～72(ショアA)	50～55(バーコール硬度計)
高温クリープ試験	80℃, 5 kg/cm ² , 265h 良		120℃, 5 kg/cm ² , 20h 良	—
耐 炎 性	可 燃 性		難 燃 性	自 己 消 炎 法
接 続 方 法	バ ッ ト 溶 着		スリープ差込みバンド締め	樹脂含浸テープ巻バット接続

注：略語説明 FRP (ガラス繊維強化プラスチック), FW管 (Filament Winding Pipe)

MDPE^{*1)}管を、帰路管として、大口径であることから布設作業性を重視して、軽くて可とう性に優れた補強ゴムホースを採用した。これらの水冷管の構造、及び性能を表1に示す。

※1) 中密度ポリエチレンで、一般に密度が0.925～0.940g/cm³程度のポリエチレンを指す。

3.2 直冷用水冷管

直冷では、単心ケーブルが水冷管内に布設されるため、前述の間冷用水冷管に要求される条件(1), (2)を満たし、更にケーブル布設やスネーク時の横圧に耐え、地絡事故時にも著しい損傷や燃焼のない水冷管が要求される。

本線路及び将来の直冷線路を考えると、具体的な管径及び使用条件は下記ようになる。

管内径：150～300mm

常時使用最高温度：50℃

常時使用最高圧力：10kg/cm²

このような厳しい条件を満たす水冷管として、可とう性はないが、耐熱性と内圧強度に優れたFW管(Filament Winding Pipe)を採用した。FW管はフィラメントワインディング法によるFRP管(ガラス繊維強化プラスチック管)で、表1に示すように機械的に優れた性能をもっている。破壊圧力は80～110kg/cm²と高く、しかも破壊状況はガラス繊維のずれによる発汗状又は糸状の漏水であり、大きく破裂することはない。直冷線路を模擬して行なった地絡実験でも、82kg/cm²の発生圧力に対して漏水などの異常は生じないことが確認された。

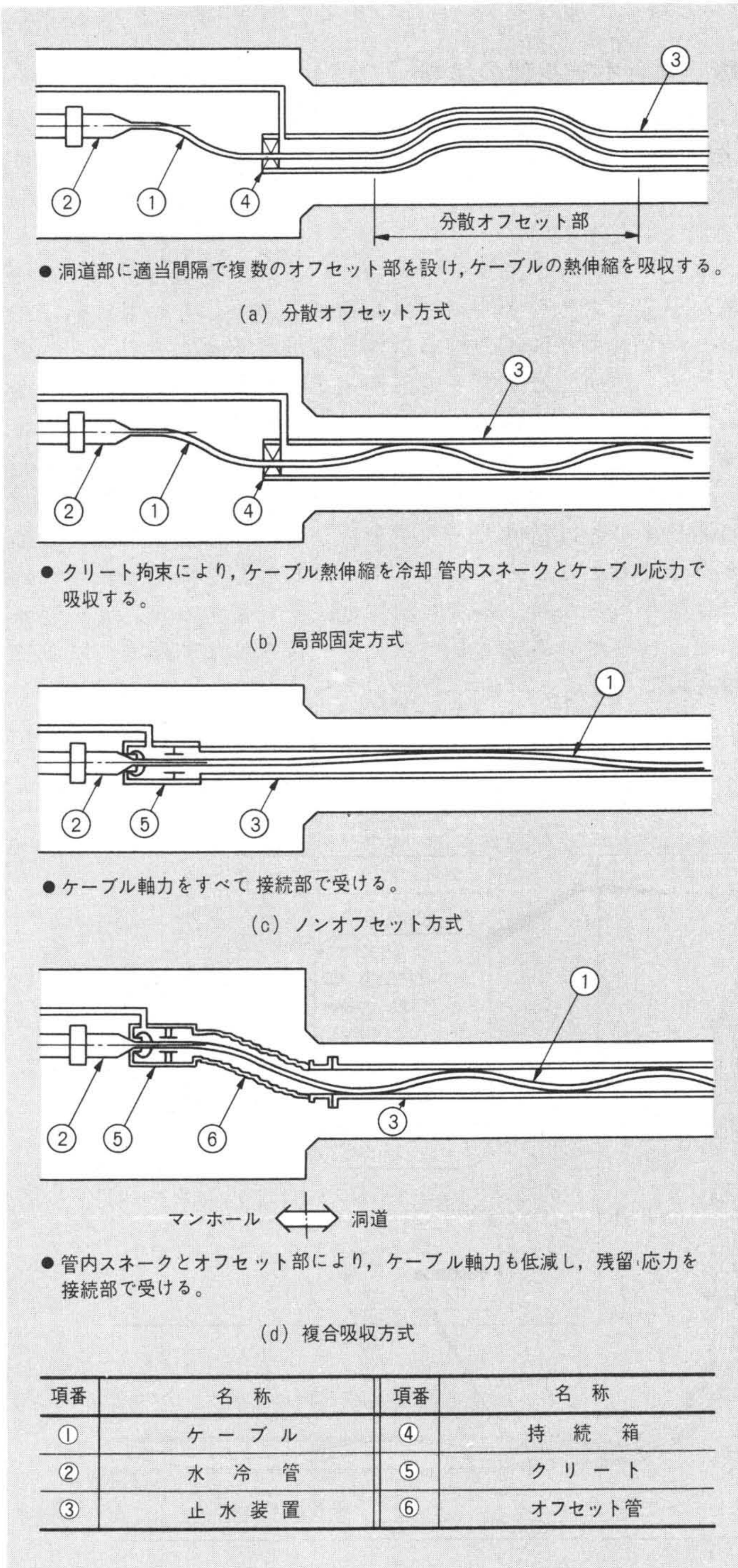


図2 外部直接冷却方式における各種熱伸縮吸収方式 (a), (b), (c)の単一方式では熱伸縮吸収が不十分であり、(d)の複合吸収方式を採用した。

4 ケーブル熱伸縮対策

間冷では、ケーブルはトラフ内にスネーク布設され、洞道端部でクリートで固定されているため、負荷変動による熱伸縮はスネーク形状の変形により吸収され、マンホール部への伸縮は生じない。

しかし、直冷では負荷変動による温度変化が大きく、したがって熱伸縮量が大きくなり、管端部でケーブルを拘束すればケーブルは管内でスネークを生ずるが、熱伸縮をすべてスネークで吸収するには水冷管径を大きくする必要がある。一方、従来の管路布設ケーブルと同様に、熱伸縮をマンホール内オフセットで吸収するためにはオフセット寸法が大となり、通常のマンホールでは収納不可能となる。

通常の大きさの管径及びマンホールで熱伸縮を吸収するには、次の3方式が考えられる。

- (1) 図2(a)の洞道内水冷管に一定間隔ごとにオフセットをとり、ケーブル熱伸縮を洞道内オフセットで吸収する分散オフセット方式⁴⁾。
- (2) 同図(b)のマンホール部で局部的にケーブルを完全拘束して、ケーブル熱伸縮を洞道部の管内スネークとケーブル内の熱応力として吸収する局部固定方式。
- (3) 同図(c)のケーブル熱伸縮を水冷管内に閉じ込め、発生軸力をすべて接続部で受けるノンオフセット方式。

この中で、(a)の分散オフセット方式は、洞道内オフセット部を確保するために他の方法よりもある程度大きな洞道が必要とする。しかし、(b)の局部固定方式では、固定部のアルミ被に過大な応力を生じ、また内部コアの熱伸縮を完全に拘束することができず、(c)のノンオフセット方式では、接続部内部及び鉛工部の補強が問題となる。

したがって、ケーブル熱伸縮を単一方式で吸収することは困難で、本線路では前述(b)と(c)の方法を併用して、図2中に示す(d)のように、次の3部分で複合吸収することを基本的な考えとした。

- (1) 洞道内水冷管部の管内スネークで、熱伸縮の一部を吸収する。
- (2) マンホール内オフセット部でケーブルに水冷管をかぶせ、この水冷管を拘束し、オフセット部全体でケーブル軸力を受け接続部に加わる軸力を軽減する。
- (3) 前記の(1)、(2)で吸収しきれない軸力は接続部で受ける。接続部は固定とし、接続部の両側のケーブル軸力を反撥させることにより打ち消す。

この基本的な考えを実現するために、ケーブル軸力、オフセット部での吸収量及び接続部の許容軸力を求めて、管径、オフセット形状及び接続部構造を決める必要があり、それぞれについて実験の結果、次の結論を得た。

(1) ケーブル軸力

管内ケーブルの軸力は、管径とケーブルの温度上昇に依存して図3に示すように変化する。この特性は次の理論式とよく一致する。すなわち、温度上昇 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ のときのケーブル軸力 $T(\text{kg})$ は、

$$T = \frac{\alpha \Delta T}{\left\{ \frac{W^2}{12(EI)} + \frac{1}{EA} \right\}}$$

ここに α : 線膨張係数 $16.7 \times 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$
 W : スネーク幅 管内径とケーブル外径の差(cm)
 EI : 曲げ剛性 $2.5 \times 10^7 (\text{kg} \cdot \text{cm})$
 EA : 縦剛性 $8.0 \times 10^6 (\text{kg})$

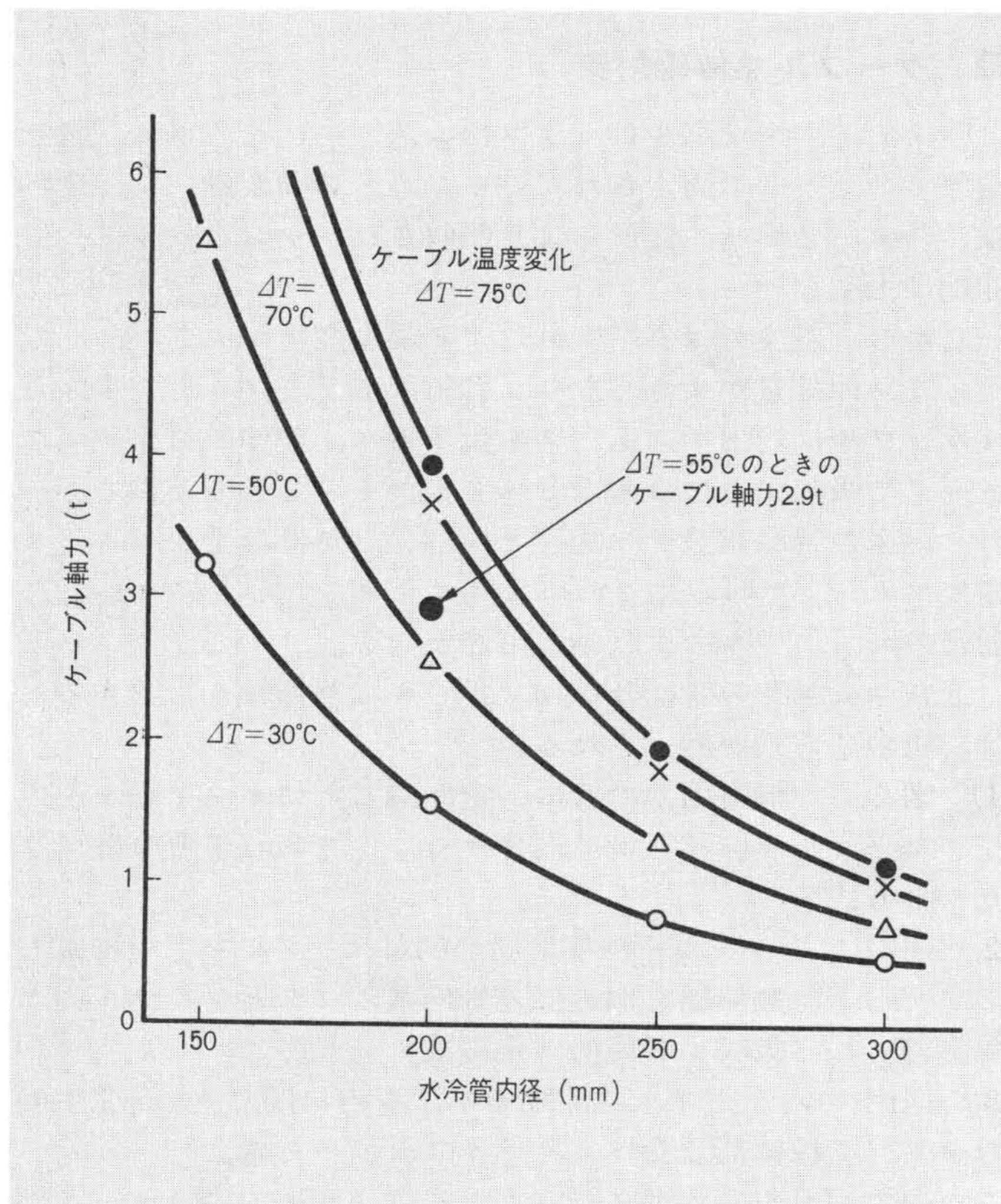


図3 水冷管内径とケーブル軸力の関係 管径を大きくすれば軸力は低減するが、管材の選択、設置スペース及び経済性が問題となる。

なお、上記各定数は275kV 1×1,600mm² OFケーブルに対する値である。

(2) オフセット部の軸力吸収

洞道部からのケーブル軸力のうち、約90%はケーブルコアの軸力である。幅0.5～1.2m、長さ5m程度のオフセット形

状に固定された水冷管内にケーブルを布設することにより、このコア軸力の20～30%が吸収される。

(3) 接続部許容軸力

現用接続部の内部コアは、5,000kgまでの軸力に対して弾性限界内であり、最大軸力2,500kg、5,500回の繰返し印加に対しても異常は見られず、許容軸力は2,500kg以上である。

これらの実験結果から、接続部許容軸力を2,500kg、オフセット部の軸力吸収を20%とすると、洞道部からの許容ケーブル軸力は約3,000kgとなる。そこで、本線路の最大送電容量時のケーブル温度上昇55°Cに対してケーブル軸力が3,000kg以下になるように水冷管内径を200mmとした。この場合のケーブル軸力は、前式から2,900kgとなるが、設計上は10%の裕度を見込んで、洞道部から3,200kgの軸力が加わっても接続部には2,500kg以上加わらないようにオフセット形状を決定した。

5 マンホール部の冷却

接続部については計算機による温度上昇の検討の結果、現用接続部で、冷却なしでも1回線当たり930MWまで送電可能であることが判明したので、間冷、直冷両線路とも接続部の冷却はなしとした。

またオフセット部ケーブルについては、送電容量面では冷却が不要であるので間冷では非冷却とした。しかし、直冷ではケーブルの熱伸縮のために洞道端部で止水することが困難なので、前述のオフセット部拘束を兼ねて可とう水冷管をかぶせ、ケーブルの移動のない接続部側端部に止水部を置き冷却する構造とした。

オフセット部用水冷管としては、複雑なオフセット形状に追従できる曲げ特性と、内圧力及びケーブル横圧に耐える強度を必要とするため、波付きステンレス管を採用した。これは金属であるため、多少の誘起電圧が発生するが、使用場所が限られ短尺であることから従来の接続部と同程度の防食で対応可能である。

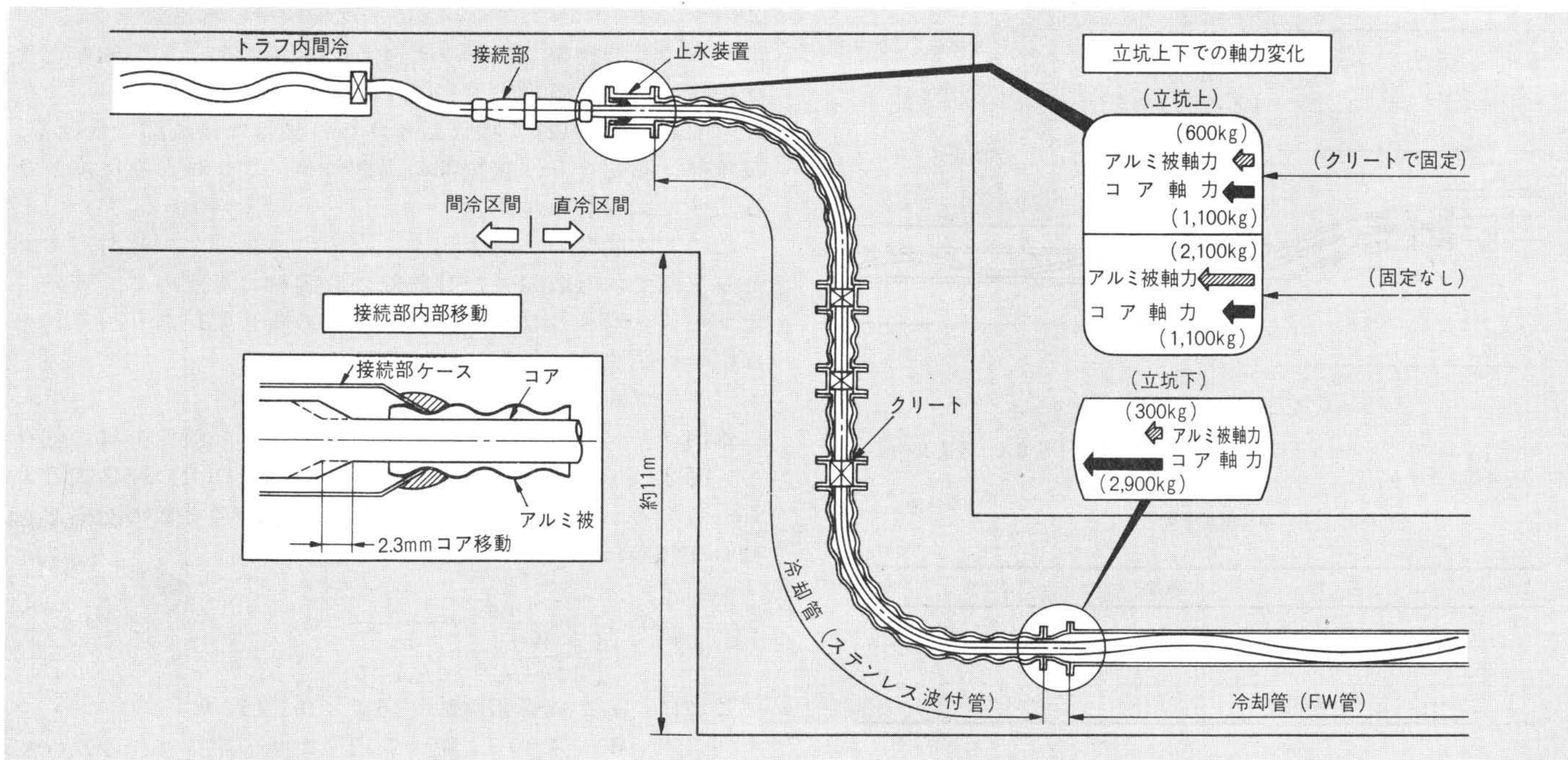


図4 立坑部の構成と各部の軸力 洞道部からのケーブル軸力、立坑上部の接続部など特殊な条件に対して、ケーブルコア、アルミ被の軸力につき検討し、中間部に3組みのクリートを設けて水冷管内でケーブルを固定した。

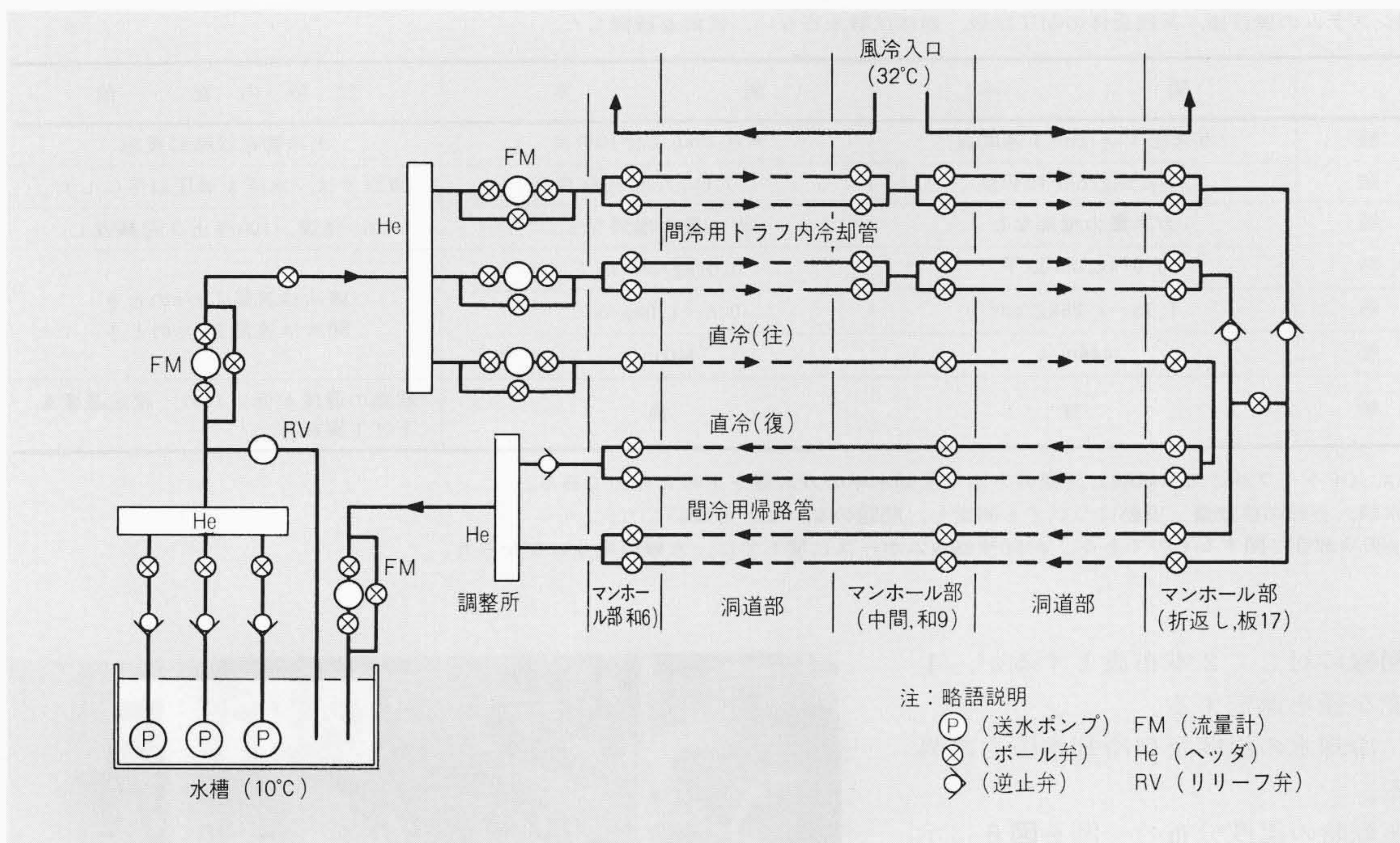


図5 冷却水循環系統
 送水ポンプなどは、所要容量の50%のものを3組み設置し交互運転するシステムとなっている。

6 立坑部の冷却

本線路には約11mの立坑部があり、この部分のケーブルについてもマンホール内ケーブルと同じ理由から、間冷は非冷却、直冷は冷却ありとした。

一般に立坑部では、立坑前後の水平洞道部でオフセットやスネークをとり、立坑部への熱伸縮、軸力の影響を抑えているため、立坑部ケーブルの支持、固定を独立に考えればよく、一定間隔ごとにクリート（固定治具）で固定して滑落を抑制している（長い立坑の場合、直線状に固定するのではなく、スネーク布設することもある）。

図4に、直冷線路での立坑部の構成を示す。本線路では、水平洞道部からのケーブル軸力が大きく、しかも立坑上部には接続部があって、この接続部は直冷、間冷の境界部になるという特殊事情にある。そこで、通常の立坑部の熱伸縮、滑落のほかにケーブルコアの軸力、アルミ被応力、ケーブルコアの移動などの問題を検討し下記の対策を採った。

(1) ケーブルコアの軸力とアルミ被応力

4章で述べたように、洞道端部のケーブル軸力は設計上3,200kgとした。この中のコア軸力は、立坑下部及び上部のほぼ90度の曲り部でアルミ被との摩擦により低下し、立坑上部の接続部では1,100kgになる。このように、コア軸力は曲り部で減衰される反面、接続部のアルミ被に加わる軸力は2,100kgと大きくなり、その応力は許容値を超える。この対策として、立坑中間部の水冷管内にケーブル固定用クリートを設け、アルミ被応力を分散させ、最大応力を未対策時の $\frac{1}{3}$ 以下とした。

(2) ケーブルコアの移動

接続部の直冷側コア軸力が約1,100kgとなり、間冷側コアの軸力がこれとバランスするまでコア及び接続部内部が移動する。この移動量は接続部内部で2.3mm程度であるが、放置すれば接続部絶縁体が損傷されるおそれが残る。このため、接続部内部構造を一部変更し、この移動を許容できる構造を採用した。また、この移動量を監視するために、接続部内部に鉛帯をはり付け、X線で観測できるようにした。

7 冷却システム

間冷、直冷併用区間の冷却水循環系統図を図5に示す。本システムは、高い信頼性を保つために次の基本条件を基に設計した。

(1) 系統に必要な冷却水の流量に対して50%の能力をもつ送水ポンプなどを3組み設け、2組みずつの交互運転とする。

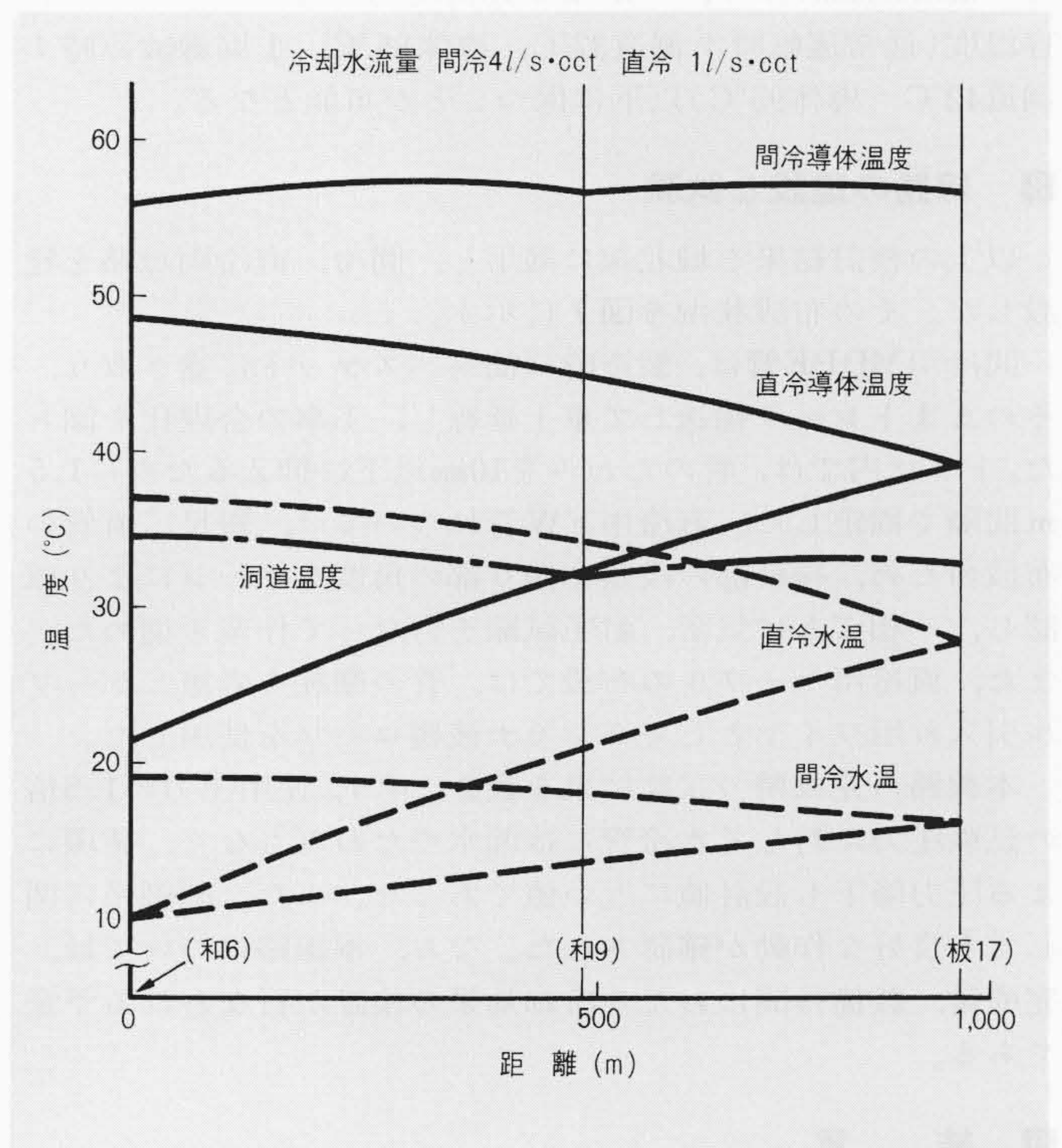


図6 常時最大負荷（440MW/cct）一定流量時の飽和温度分布
 1回線故障時（660MW/cct）に必要な流量で連続冷却すると、常時は本図のように許容温度に対してかなり低いので、冷却効率向上のためにケーブル表面温度、冷却水温などによる冷却水循環制御システムを導入した。

表 2 竣工試験結果 冷却システムの建設後、系統全体の耐圧試験、動作試験を行ない、性能を確認した。

試 験 項 目		間 冷	直 冷	試 験 内 容 ・ 他
気 密 ・ 耐 圧 力 試 験		ガス圧 1 kg/cm ² 1 週間良	水圧 15kg/cm ² 10 分良	水冷管布設時に実施
耐 圧 力 試 験		7.5kg/cm ² 10 分良	7.0kg/cm ² 10 分良	直冷では、水圧を油圧以下にした。
起 動 ・ 停 止 試 験		ガス量の増加なし	ガス量の増加なし	6 h 循環，10h 停止 3 回 繰返し
水 撃 試 験	ポ ン プ 停 止 時	0.01kg/cm ² 以下	0.01kg/cm ² 以下	直冷は流量 1 l/s のとき 間冷は流量 2 l/s のとき
	バ ル ブ 急 閉 時	1.75～2.25kg/cm ²	0.6～1.0kg/cm ²	
	水 撃 伝 搬 速 度	444m/s	632m/s	
制 御 系 の 動 作 試 験		良	良	線路の温度が低いいため、設定温度を 下げて実施

注：1. 起動・停止試験のガス量は、OFケーブルのガス試験と同様の方法で冷却水中のガス量を求めたものである。
2. 上記のほか循環時の損失水頭、各部の移動量、振動についても測定し、問題のないことを確認した。
3. 間冷の水撃試験結果は、φ80冷却管に関するものである。φ150補強ゴムホースに関しては、水撃の発生はなかった。

- (2) 間冷用帰路管は、全回線に対して 2 本布設とするが、1 本でも冷却水の循環が可能な径を選定する。
- (3) 洞道、ケーブル表面、冷却水の温度及び冷却水圧力の異常に対して警報を発信する。

次に、本冷却システム運転時の温度分布の一例を図 6 に示す。これは夏季（風冷入口温度 32℃）、100% 連続負荷時の飽和温度である。システム運転に当たっては最大負荷条件に対して十分対応できるとともに、負荷の変動、外気温度の変化などの諸条件を総合的に勘案した効率的、効果的運転とすることが必要である。そこで本冷却システムでは、効率的な運転を行なうために、次の 3 箇所の温度を測定し、いずれかが下記の起動条件を満たしたとき冷却水の循環を開始し、すべてが停止温度以下になったとき停止する方式を採用した。

洞道温度：起動温度 34℃、停止温度 32℃
間冷ケーブル表面温度：起動温度 40℃、停止温度 38℃
直冷冷却水出口温度：起動温度 39℃、停止温度 37℃

この温度制御により、いかなる負荷変動に対しても線路を許容温度（通常運転時：洞道 37℃、導体 85℃ 1 回線故障時：洞道 42℃、導体 95℃）以下に保つことが可能となる。

8 線路の建設と試験

以上の検討結果を城北線に適用し、間冷、直冷両線路を建設した。その布設状況を図 7 に示す。

間冷用 MDPE 管は、製造時に簡易バスケットに巻き取り、そのままトレーラ輸送して車上延線し、工事の合理化を図った。トラフ内では、管のたわみを 10mm 以下に抑えるために 1.5 m 間隔で固定した。直冷用 FW 管については、短尺、直管の布設のため、接続部の段差や曲り部の角度をゲージにより確認し、一相ごとに気密、耐圧試験を行なって作業を進めた。また、直冷用ケーブルの布設では、管の摩耗を考慮しケーブル引入れ用ワイヤとしてクレモナ被覆ロープを使用した。

本線路の完成時の試験結果を表 2 に示す。使用圧力の 1.5 倍の試験圧力に対して水冷管には漏水やたわみもなく、循環による圧力降下も設計値に近い値であった。また、制御系に対しても良好な作動が確認された。なお、本線路については、完成後、数箇月間にわたり冷却効果の検証が行なわれる予定である。

9 結 言

洞道内布設ケーブルのトラフ内間接冷却、外部直接冷却方式に対して、それぞれの用途に応じた水冷管を適用し、信頼性と効率的な運転を考慮した冷却システムを建設した。特に、

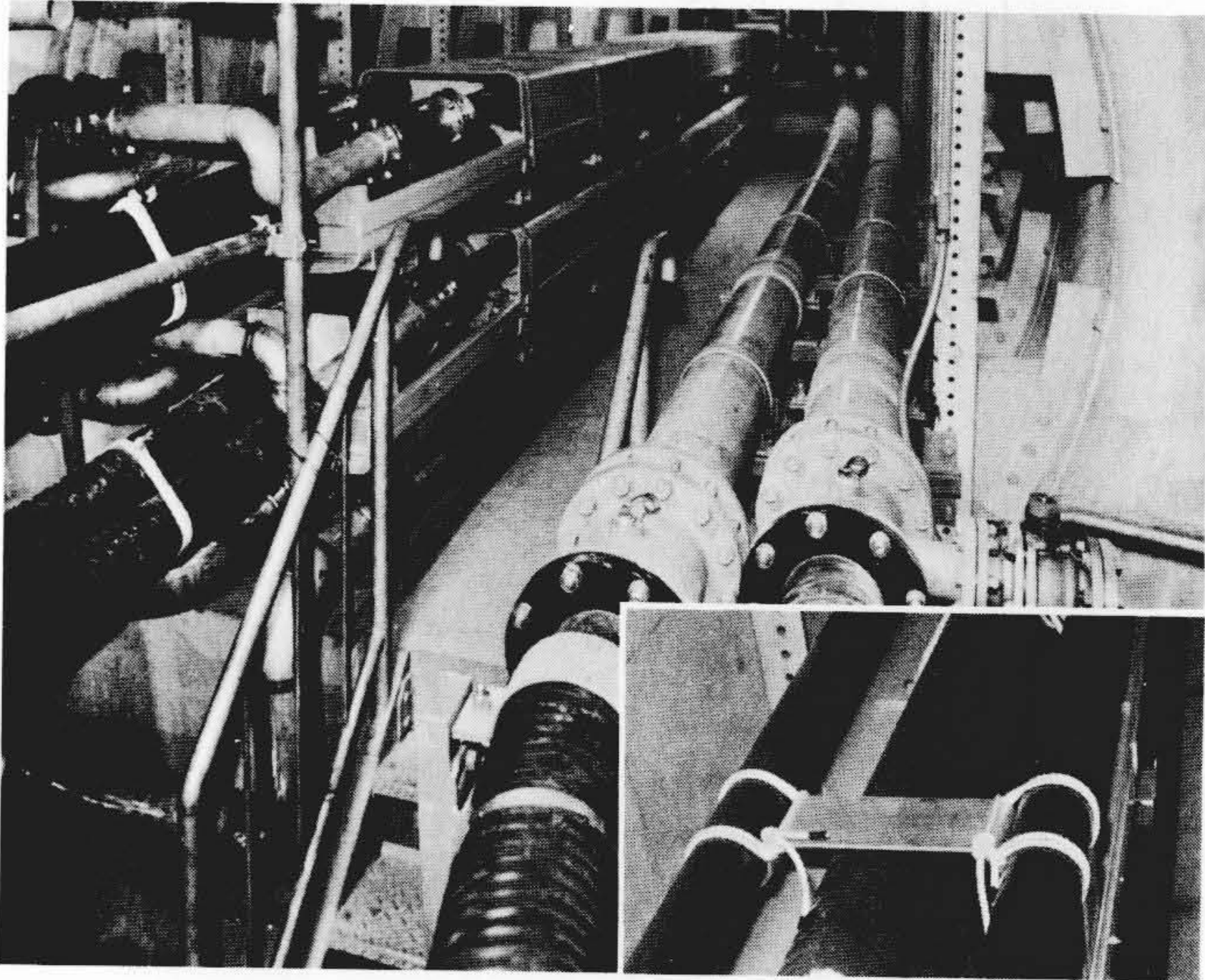


図 7 洞道内布設状況 右が直冷線路、左が間冷線路である。間冷用トラフ内冷却管は、右下の図のように 1.5m 間隔で固定されている。

直冷線路に対しては立坑部を含む線路各部の熱伸縮吸収対策を検討して、将来の大容量送電線路の建設に備えた。

城北線では、今後、全線にわたり冷却システムが建設される予定であり、完成時には都内導入基幹線路としての役割を果たすものと期待される。また、これらの冷却方式は、電圧階級やケーブルの種類に関係なく適用できるもので、今後の地中送電線の容量増加に役立つものと考えられる。

終わりに、これらの冷却システムの開発、及び城北線の建設のために種々の御指導、御援助をいただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

1) 神永，外：トラフ内間接水冷による OF ケーブルの送電容量向上，電気学会・電線研究会資料，EC-74-3（1974 年 7 月）
2) 渡辺，外：500kV OF ケーブル管路直接水冷実証試験，日立評論，55，11，1085～1090（昭 48-11）
3) K. Kanemaru et al.：Integral Pipe Cooling for Oil-Filled Cables，Hitachi Review，28，5，268～273（1979）
1) は間冷に，2)，3) は直冷に関して送電容量増加，各部温度の検討などが述べられている。
4) 五味，外：分散オフセット方式による直接水冷電力ケーブルの熱伸縮吸収，日立評論，61，9，677～682（昭 54-9）