

関西電力株式会社奥吉野揚水発電所向け

高落差布設500kV アルミ被OFケーブル

500kV Aluminum Sheathed, High Pressure Oil-Filled Cables for OKUYOSHINO Pamped-Storage Power Station

関西電力株式会社奥吉野揚水発電所用電力幹線500kV単心1,000mm²高油圧アルミ被OFケーブルが、亘長約600m、高低差約94m、最大斜度22度の斜坑に中間接続なしで布設された。ケーブルは、10.5kg/cm²の常時最大油圧に耐えるように3.4mmの厚肉波付アルミ被を採用し、熱伸縮によるケーブルの滑落防止及び防災対策として全長砂埋めを行なった。波付アルミ被ケーブルでは、ケーブルコアとアルミ被間の摩擦が小さく、両者間の熱伸縮現象の差がケーブル端部に集中するのを防ぐため、斜坑ではスネーク布設が一般に採用されていたが、今回新しい解析手法により理論検討を行ない、大部分のスネークが省略できることを確認して実線路に適用した。なお、この論文では、ケーブル及び付属品の特性、布設接続工事の実際についても紹介する。

服部正美* Hattori Masami
清水昭二* Shimizu Shōji
千葉佐武郎** Chiba Saburō
林田克哉** Hayashida Katsuya
安倍宏** Abe Hiroshi

1 緒言

関西電力株式会社奥吉野揚水発電所は、奈良県吉野郡十津川村に建設された発電所出力1,206MWをもつ我が国有数の大容量純揚水式発電所である。

この発電所の地下変圧器室と屋外開閉所とを結ぶ電力幹線として、1回線当たり680MVAの送電容量をもつ500kV単心1,000mm²高油圧アルミ被OFケーブル2回線を布設した。

ケーブルは亘長600m、高低差約94mの斜坑内に砂埋め布設された。

また、外径約144mm、重量30kg/mにも及ぶ500kV OFケーブルを単長600mの長尺で布設した例は過去にもなく、現地へのケーブル搬入方法、布設接続工法、工事機材更には斜坑布設ケーブルの滑落防止対策など、十分な事前検討を行ない、第1期工事を昭和52年11月に、また、第2期工事を昭和53年10月にそれぞれ無事完了した。

2 ケーブルルートの概要

今回のケーブル布設ルートのプロフィール及び代表的布設断面を図1に示す。

ケーブルは単長600mで布設され、中間接続部はない。屋外開閉所側は気中終端箱、地下変圧器室側は変圧器直結形油中終端箱が設置された。

ケーブル系統としての総落差は105mに及び、OFケーブルの常時最大油圧は10.5kg/cm²の高油圧になるが、ケーブルの軽量化と機械的強度の向上を期して、高油圧補強鉛被に代わり厚肉アルミ被ケーブルを採用した。

3 ケーブル及び付属品の構造

3.1 ケーブルの構造

(1) 絶縁厚さ

最高電圧550/√3 kVに対する最大ストレスを16kV/mm以下

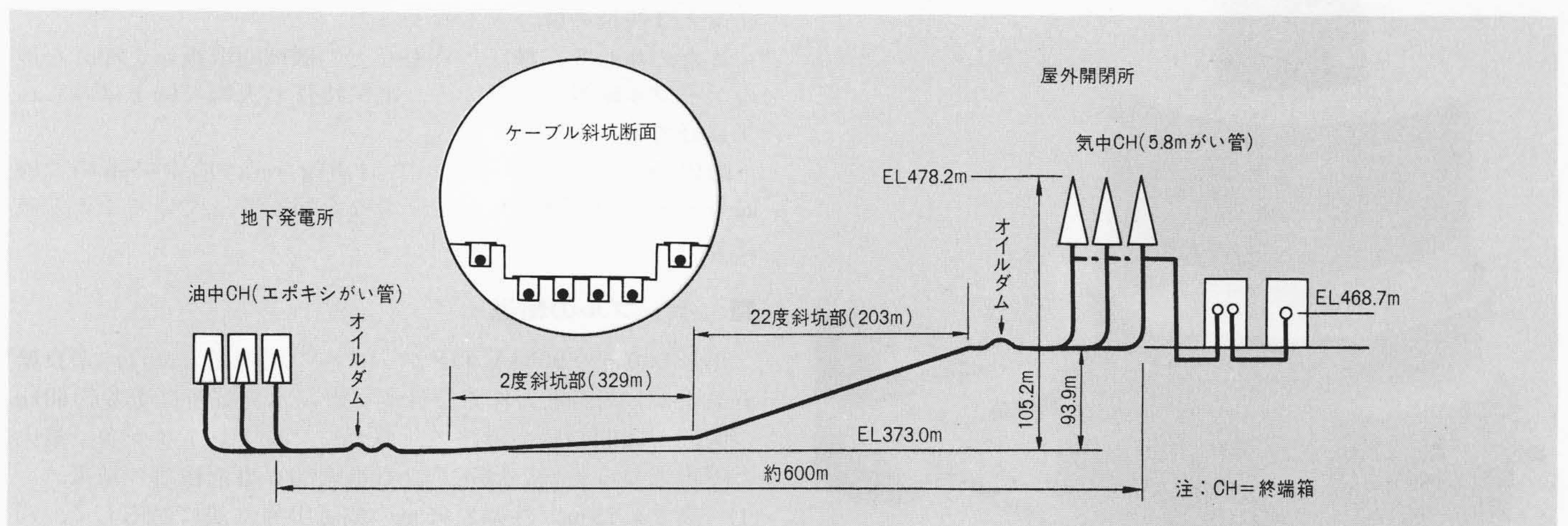


図1 関西電力株式会社奥吉野揚水発電所500kVアルミ被OFケーブル布設ルート図 最大斜度22度の斜坑内にケーブルは単長600mで布設された。

* 関西電力株式会社 ** 日立電線株式会社日高工場

とする設計とし、絶縁厚さは33mmとした。
この場合、定格電圧 $500/\sqrt{3}$ kVに対するストレスは14.5 kV/mmとなる。

一方、衝撃電圧面では、系統BIL (Basic Impulse Insulation Level: 基準衝撃絶縁強度) 1,550 kVに対し、77.6 kV/mmと従来実績から判断して十分に余裕のあるストレスである。
(2) アルミ被厚さ

高油圧OFケーブルにアルミ被を適用する場合には、ケーブル内油圧に対する許容フープストレスからアルミ被厚さを決定しなければならない。
アルミ被の許容フープストレスは過去の実験データから 2.0 kg/mm^2 とされており、必要なアルミ被厚さ t は次式により決定した。

$$t = \frac{PD}{2\alpha K} \dots\dots\dots (1)$$

ここで P: ケーブル内油圧
D: アルミ被平均内径
 α : 許容フープストレス
K: 厚さ公差係数(0.9)

今回は、ケーブル内油圧 10.5 kg/cm^2 、アルミ被平均内径117mmから3.4mmのアルミ被厚さとした。
ケーブルの構造を図2及び表1に示す。

3.2 付属品の構造

- (1) 気中終端箱
気中終端箱は、屋外設置であるが、関西電力株式会社奥吉野揚水発電所が、海岸から離れた山間部に位置し、汚損度の低い一般地区(塩分付着密度 0.01 m/cm^2)に属することから、5.8mがい子を採用し、内部絶縁はコンデンサコーン方式とした。
(2) 変圧器直結形油中終端箱
変圧器直結形油中終端箱は、ケーブルルートの低所側に設

表1 500kV 1×1,000mm²高油圧アルミ被OFケーブル構造表
33mmの絶縁層は80～200μの絶縁紙のグレーディングにより構成した。

項 目		数 値
油 通 路	内 径	14.0 mm
	外 径	15.6 mm
導 体	公 称 断 面 積	1,000 mm ²
	形 状	6 分割圧縮円形
	外 径(約)	43.4 mm
絶 縁 厚 さ		33.0 mm
しゃへい層厚さ(約)		0.8 mm
アルミ被	厚 さ	3.4 mm
	山 外 径(約)	129 mm
ビニル防食層厚さ		6.0 mm
概 算 外 径		144 mm
概 算 重 量		30 kg/m

置され、常時約 10.5 kg/cm^2 の高油圧にさらされるため耐油圧性及びがい子寸法縮小を目的として、エポキシがい子を採用した。
内部絶縁はコンデンサコーン方式である。また、万一のがい子破損時にケーブルから絶縁油が噴出するのを防止するため、導体引出し棒は、急激な油流噴出をブロックする特殊セミストップ機構を内蔵している。
図3に変圧器直結形油中終端箱を示す。

4 ケーブル及び付属品の主要特性

ケーブル及び付属品の主要特性を表2に示す。
電気特性面では、商用周波長時間耐電圧910kV以上、雷インパルス耐電圧2,260kVと良好な特性を確認した。
一方、機械的特性としては、ケーブルの曲げ試験をケーブル外径の約20倍に相当する2.5m直径で2往復及び3往復の試験を実施したが、解体検査の結果異常は全くみられず、2往復と3往復の間の差もなかった。
また、ねじり、横圧、外傷などの機械的取扱いを加えた後のケーブル耐電圧試験でも、電気特性の大幅な低下はみられず良好であった。
耐内油圧強度はケーブルで 54.5 kg/cm^2 、油中終端箱で 98 kg/cm^2 と実使用条件に対し十分な余裕をもっていることが確認できた。

5 ケーブルの輸送

- 単長600mの500kV OFケーブルの現地搬入には、奈良県五条市から関西電力株式会社奥吉野揚水発電所に至る約60kmの区間が山間の狭い道路で、急カーブやトンネルが多く最大の障害となったが、試送を含む徹底的な事前検討の結果、
(1) 高さ4.15m、外幅2.95mの輸送限界寸法に対応して、鋳径3.9m、外幅2.95m、胴径2.5m(ケーブル外径の20倍相当)のドラムを使用する。
(2) ドラム吊り式トレーラーを用い、ドラムの最低地上高を250mm程度に低くする。
(3) 急カーブ対策として、トレーラは後車輪も方向切換可能

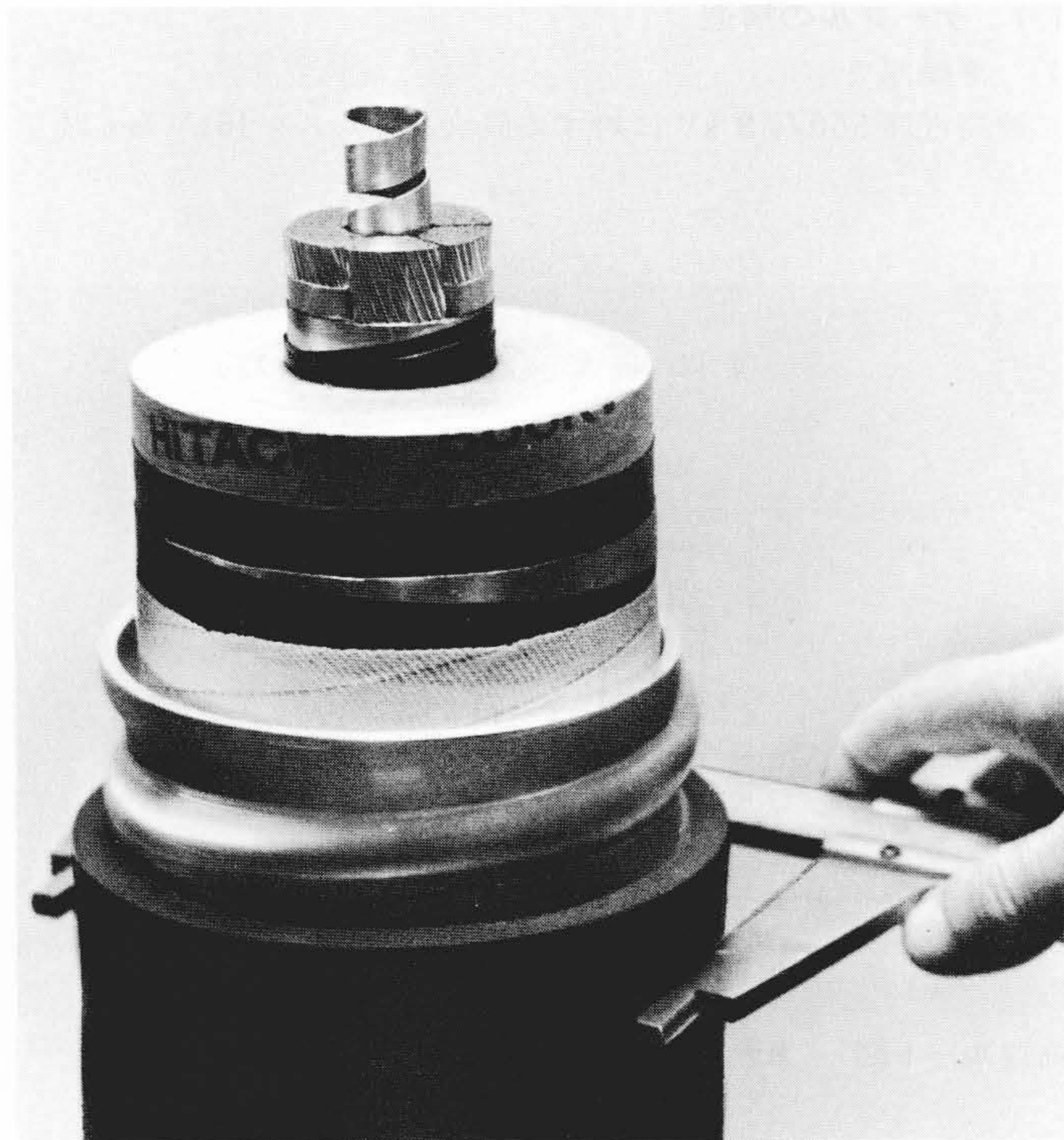


図2 500kV単心1,000mm²高油圧アルミ被OFケーブル 絶縁厚33mm、アルミ被は 10.5 kg/cm^2 の高油圧に耐えるように3.4mm厚さを採用した。ケーブル外径は約144mm、重量30kg/mにも及ぶ。

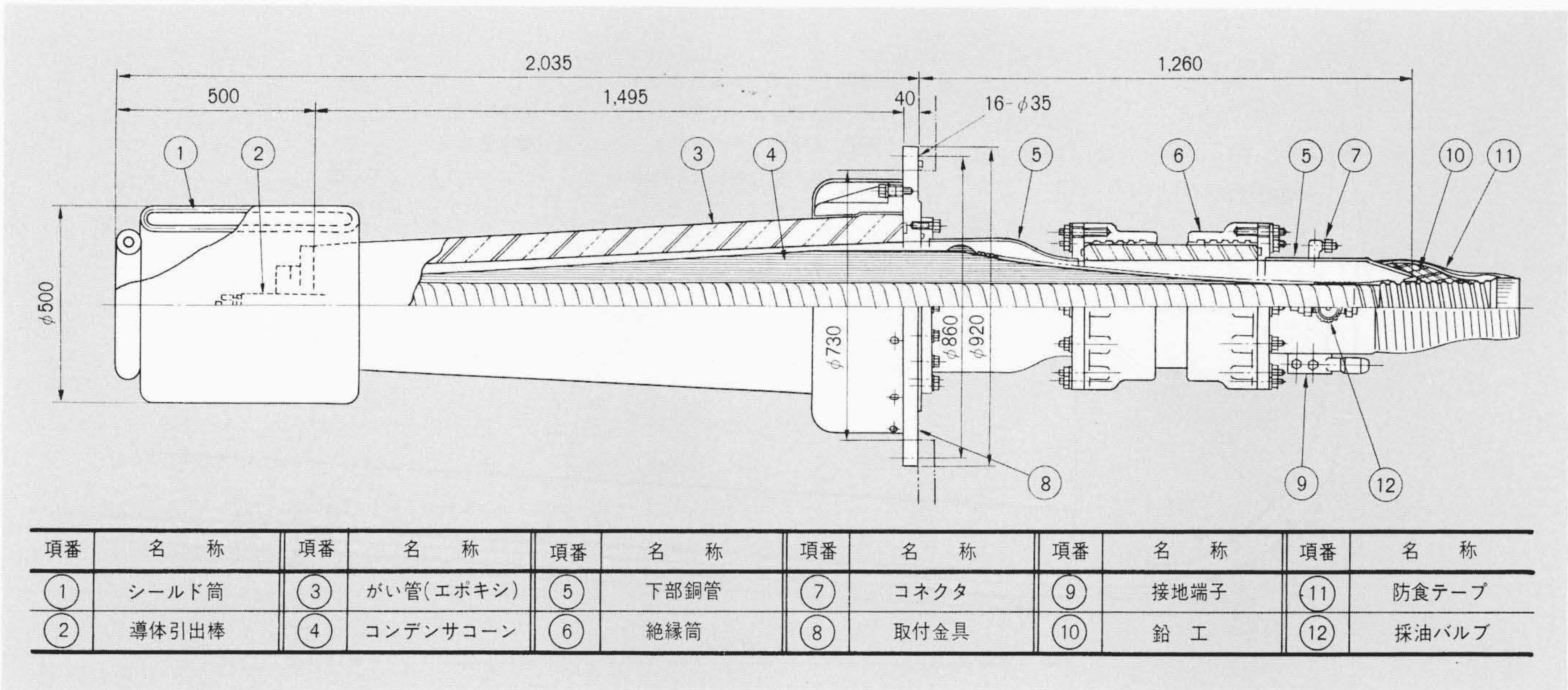


図3 500kV単心アルミ被OFケーブル用油中終端箱 定期的絶縁油特性試験を行なうための採油バルブを具備している。

な構造とする。
などの対策をとることにより、無事搬入することができた。
ケーブルの輸送状況を図4に示す。

6 ケーブルの熱伸縮と滑落防止対策

負荷変動や気温変化などの温度変化によりケーブルは伸び縮み、いわゆる熱伸縮を繰り返す。一方、傾斜のあるルートにケーブルを布設した場合、常に傾斜の下向きに重量成分が働いているため、この熱伸縮に伴い少しずつ落ちてゆく滑落現象が起こる。

この熱伸縮及び滑落の点からみた今回のケーブル構造、布設上の特徴は、次のようなものであった。

(1) アルミ被ケーブルの特質として、アルミ被とケーブルコアとの間にはケーブル製造時の加工公差として、わずかなが

ら空隙を生ずる。このため、ケーブルを外側から押えてもコアだけが熱伸縮で滑落することが懸念された。
(2) その対策として従来は、ケーブルをスネーク状に布設し、ケーブルコアとアルミ被間の摩擦を増加させる工法が一般に採用されていたが、今回は、布設工事の合理化と布設寸法縮小の観点からケーブルを直線状に布設することを検討した。
(3) ケーブルは全長砂埋め布設された。
(4) 万一の漏油事故時にケーブル内の油と外気の置換を局部的に抑えるための対策として、ルート両端にはケーブルの一部を高さ30～75cm程度持ち上げたオイルダムを形成した。

6.1 アルミ被ケーブルの熱挙動の理論解析

図5に、ケーブル布設状態のモデルを示す。ケーブルはトラフ内で砂の中に埋められているため、両者間の摩擦係数は見掛け上 $\mu_{as}=1.0$ 程度となる。一方、直線状に布設された

表2 500kV OFケーブル及び付属品の主要特性 電気特性、機械特性とも十分満足できる特性である。

試 験 項 目		試 験 結 果
ケーブル及び終端箱	雷インパルス耐電圧試験	1,860kV×3回→2,260kV×1回でケーブル部破壊
	商用周波長時間耐電圧試験	660kV×6時間→910kV×3時間25分非破壊
	開閉インパルス耐電圧	1,490kV×3回→1,740kV×3回非破壊
ケーブル	曲 げ 試 験	20D(φ2,500mm)×2往復：良, 3往復：良
	ねじり, 横圧, 外傷及び商用周波長時間耐電圧試験	36°/mのねじり(張力3.5t)→1.25mR×7tの横圧→20kg・mの外傷→440kV×6時間→840kV×1時間5分でケーブル部破壊
	油 圧 試 験	16.5kg/cm ² ×30分→54.5kg/cm ² で破壊
終端箱	油中終端箱の油圧試験	98kg/cm ² で破壊
	気中終端箱の注水コロナ試験	65dB(550/√3 kV) : BGN=10dB



図4 ドラム吊り式トレーラによる輸送 トレーラは、ドラムを積載したまま直接ケーブルの延線が可能な特殊構造となっている。

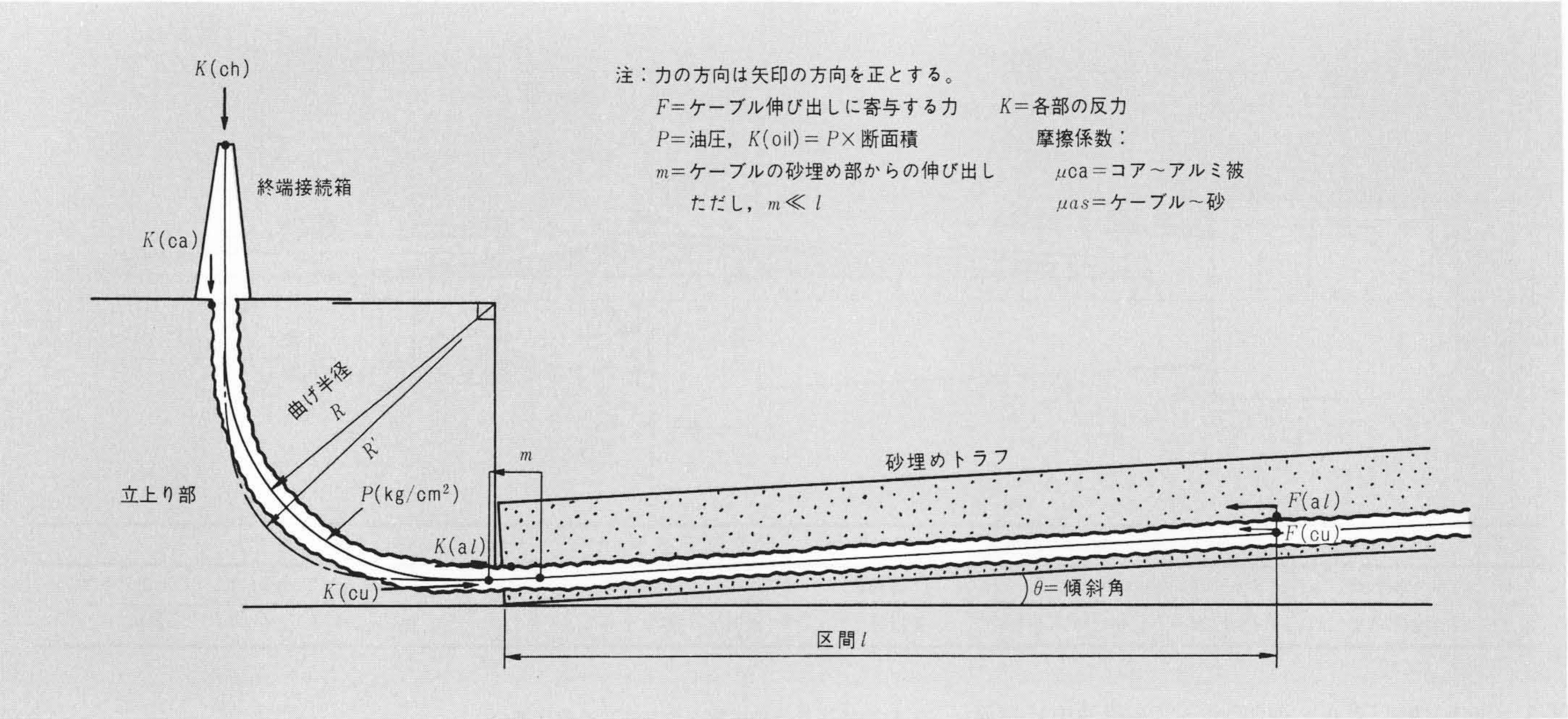


図 5 ケーブル布設状態のモデル ケーブル伸び出し時のルート端部での熱応力の授受状況モデルを示す。

表 3 アルミ被ケーブルの熱伸縮理論解析の基本式 コア及びアルミ被の末端部での伸び出し量が等しくなる平衡条件を求めることにより、熱伸縮の解析が可能となる。

力の種類	コ ア (導体)	ア ル ミ 被
熱伸縮に寄与する力 F	$F(cu) = (\alpha TEA)cu - K(cu) - \sum_{n=1} Gcu(n) \cdots \cdots (1)$ (αTEA)cu : コアに発生する熱伸縮力 K(cu) : 砂埋め端より終端部までの間でコアの受ける反抗力 Gcu(n) : 砂埋め区間でアルミ被との摩擦によりコアの受ける反抗力 n : 布設形状(直線, スネーク, 曲り, など)の種類の数	$F(al) = (\alpha TEA)al - K(al) - \sum_{n=1} Gal(n) + \sum_{n=1} Gcu(n) + K(oil) \cdots \cdots (2)$ (αTEA)al : アルミ被に発生する熱伸縮力 K(al) : 砂埋め端からアルミ被固定端までの間でアルミ被の受ける反抗力 Gal(n) : 砂埋め区間で、アルミ被と砂の間の摩擦による反抗力 K(oil) : 油圧によりアルミ被の受ける力
砂埋め部末端から、コア又はアルミ被固定端までの間で発生する反抗力 K	$K(cu) = K(ch) + K(ca) \cdots \cdots (3)$ K(ch) : 終端部からコアの受ける反抗力 K(ca) : 砂埋め端から終端部までの間でコアとアルミ被間の摩擦でコアの受ける反抗力	$K(al) = -K(ca) \cdots \cdots (4)$
端末部でのケーブルの伸び出し量 m	$m = \frac{1}{(EA)_{cu}} \int_0^l dF(cu) dx = \frac{1}{(EA)_{al}} \int_0^{l'} dF(al) dx \cdots \cdots (5)$	
端末立上り部でアルミ被に加わる軸方向応力 σ	$\sigma = \left\{ \frac{K(ca)}{Aal} \pm Eal \frac{m}{R^4(4-\pi)} \right\} + \frac{K(oil)}{Aal} \cdots \cdots (6)$ (繰返し応力) (静応力)	

注：記号の説明
 α = 線膨張係数
 T = 温度変化
 E = ヤング率
 A = 断面積
 dal = アルミ被平均径
 l, l' = 伸び出しに寄与するコア, アルミ被長さ
 R = 立上り部半径
サフィックスの cu はコア, al はアルミ被を示す。

ケーブルコアとアルミ被間の摩擦係数は $\mu_{ca} = 0.3$ であることが予備実験で確かめられた。いま、ケーブルの温度が $T^\circ\text{C}$ だけ上昇すると、 αTEA で求められる熱応力が発生し、これにより αTL だけ端末に伸出してくる。アルミ被について考えてみると、外側では砂との摩擦によってこの伸び出しを抑制するような反抗力が働き、内側からはコア(導体)の伸が出しに伴って、同じようにコアとの間の摩擦を介して伸び出しを増すような力が加わる。この砂-アルミ被-コア間の応力授受を解析すると、表 3 に示すように表わすことができる。

計算によれば、アルミ被は外側の拘束力が大きいため熱伸縮量は小さく、また滑落もしない。ところが導体のほうは、アルミ被による拘束力が小さく傾斜による重力の影響もあって、特にルート下側への伸び出しが大きく、終端接続部へ突き出してることが分かった。

6.2 実線路での具体的設計

ケーブルを正弦曲線状に布設(スネーク布設)すれば、コア-アルミ被間の等価摩擦は極めて大きくなり、コアの突き出しを防ぐことができる。今回の線路では、斜坑の大部分の区間でケーブルを直線状に布設し、斜坑の最下部端の地下変圧器室入口近くの区間 60m だけにピッチ 6m のスネークを 10 個設けることとした。

このほかルート両端には、万一のケーブル事故に対処するためオイルダムが設けられているので、これらを考慮して熱伸縮量を理論式に基づいて計算した結果を図 6 に示す。この計算結果から分かったこと及び実際の布設設計に反映したことは、次に述べるとおりである。

- (1) アルミ被、コアとも局部スネーク及びオイルダムの設置により、ルート中間に熱伸縮のない不動域が生じ伸縮量を小さくすることができるとともに、滑落を防止することができる。
- (2) ルート端部に出てくるケーブル伸び出し量は最大 34mm で、立上り部でのケーブル曲り半径の変化で十分吸収できる。
- (3) コアの終端部での突出し力は 1,800kg で、このうち 1,123kg は終端箱内のコア固定点に加わる。一方、今回使ったものと同種のコンデンサコーンを使用しての実験では、座屈力は 3,500kg であったので 3 倍の安全率が確保できる。

(4) 熱応力の分布及びルート状況に合わせ、次のようにクリートによるケーブルの支持、固定を行なった。

- (a) オイルダム部：内部拘束力が大きくなるので、ケーブルの浮き上がりは防止するが軸方向には移動可能なルーズクリートを等間隔に取り付けた。
- (b) 22度傾斜部：砂の流下防止とケーブルガイドのため、12m間隔で砂留めクリートを取り付けた。
- (c) 不動域部：2度傾斜と22度傾斜の接合点を中心に、4.75m間隔6箇所ケーブルを固定した。

7 現地布設接続工事及び試験

7.1 布設工事

この線路の布設ルートは、傾斜角22度と2度から成る斜坑で、その落差は約94mである。ケーブルの布設は現場の状況より、引降し方法、すなわち、屋外開閉所から地下の主要変圧器室に向かって行なった(図7)。

22度傾斜部でケーブルが滑落しないために必要な制動力を計算すると、約1,400kg、また2度の斜坑部での必要布設張力は約1,450kgであった。このため、22度斜坑部には3台の制動用キャタピラ(制動能力500kg/台)を分散設置し、更に

スキッドパイプ(4.6m R曲り鋼管)を設置してパイプ内側圧の摩擦力による制御力を得るとともに、ケーブルの過小曲りを防止した。

2度傾斜部には、2台の電動ローラ(引張力100kg/台)を一組みとして40m間隔に8箇所設置した。実際のケーブル布設時の力を測定すると、スキッドパイプ部の制動力が、800kg程度あり、制動用キャタピラはその能力に余裕をもって動作し問題なく布設が完了した。

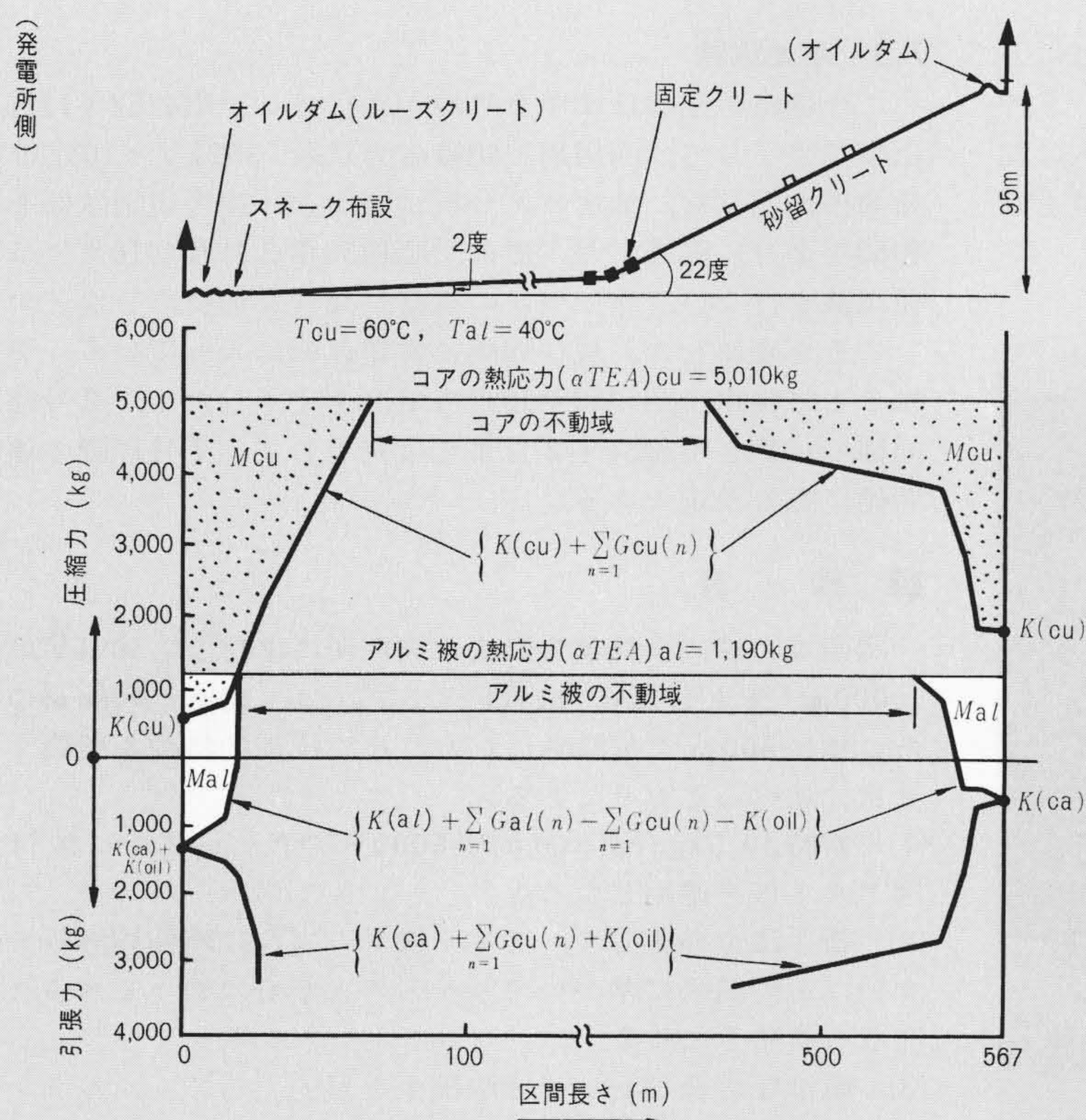
7.2 接 続

(1) 油中終端箱の組立

ケーブル終端間には105mの落差をもっているため、低位置の油中終端箱側では高油圧が加わる。高油圧下での接続作業は困難を極めるので、この工事は「トリチェリーの真空法」を活用し、ケーブル内の油を油中終端箱側から抜き取って油圧を下げ接続作業を実施した。なお、油中終端箱及びケーブルへの注油は他相のケーブルを給油管として使用し、高位置の気中終端箱側から行なった。

(2) 気中終端箱の組立

気中終端箱の接続作業は高所作業となるため、作業性や安全性を十分考慮し、ビディ式わく組み足場を三相一括で組み



項 目	発 電 所 側	開 閉 所 側
終端部コア反抗力 $K(cu)$	$K(ch) = 349kg$	$K(ch) = 1,123kg$
	$K(ca) = 211kg$	$K(ca) = 677kg$
終端箱内反抗力 $K(ch)$ + アルミ被への伝達力 $K(ca)$	$K(cu) = 560kg$	$K(cu) = 1,800kg$
ケーブル伸縮量 m	34mm	26mm
立上部アルミ被に加える応力 σ	0.68kg/mm ²	0.52kg/mm ²
油圧による応力 $K(oil)/A_{al}$	$\frac{1,130}{1,286} = 0.88kg/mm^2$	
温度変化	$T_{cu} = 60^\circ C$	$T_{cu} = 60^\circ C$
布設条件	オイルダム + スネーク布設	オイルダム

注：計算に使用した定数

$E_{cu} = 5 \times 10^5 kg/cm^2$ $E_{al} = 1 \times 10^5 kg/cm^2$ $A_{cu} = 10cm^2$ $A_{al} = 12.86cm^2$
 $d_{al} = 11.7cm$ ケーブル内油圧 $P = 10.5kg/cm^2$ コアとアルミ被間摩擦係数 $\mu_{ca} = 0.3$
 コア温度変化 $T_{cu} = 60^\circ C$ アルミ被と砂の間の摩擦係数 $\mu_{as} = 1.0$
 アルミ被温度変化 $T_{al} = 40^\circ C$ コアの油中重量 $W_{cu} = 12.1kg/m$
 ケーブル重量 $W = 30.0kg/m$

図6 熱伸縮量及び力の計算値

図中の M_{cu} , M_{al} はそれぞれコア、アルミ被の伸縮により吸収される

応力成分を示す。

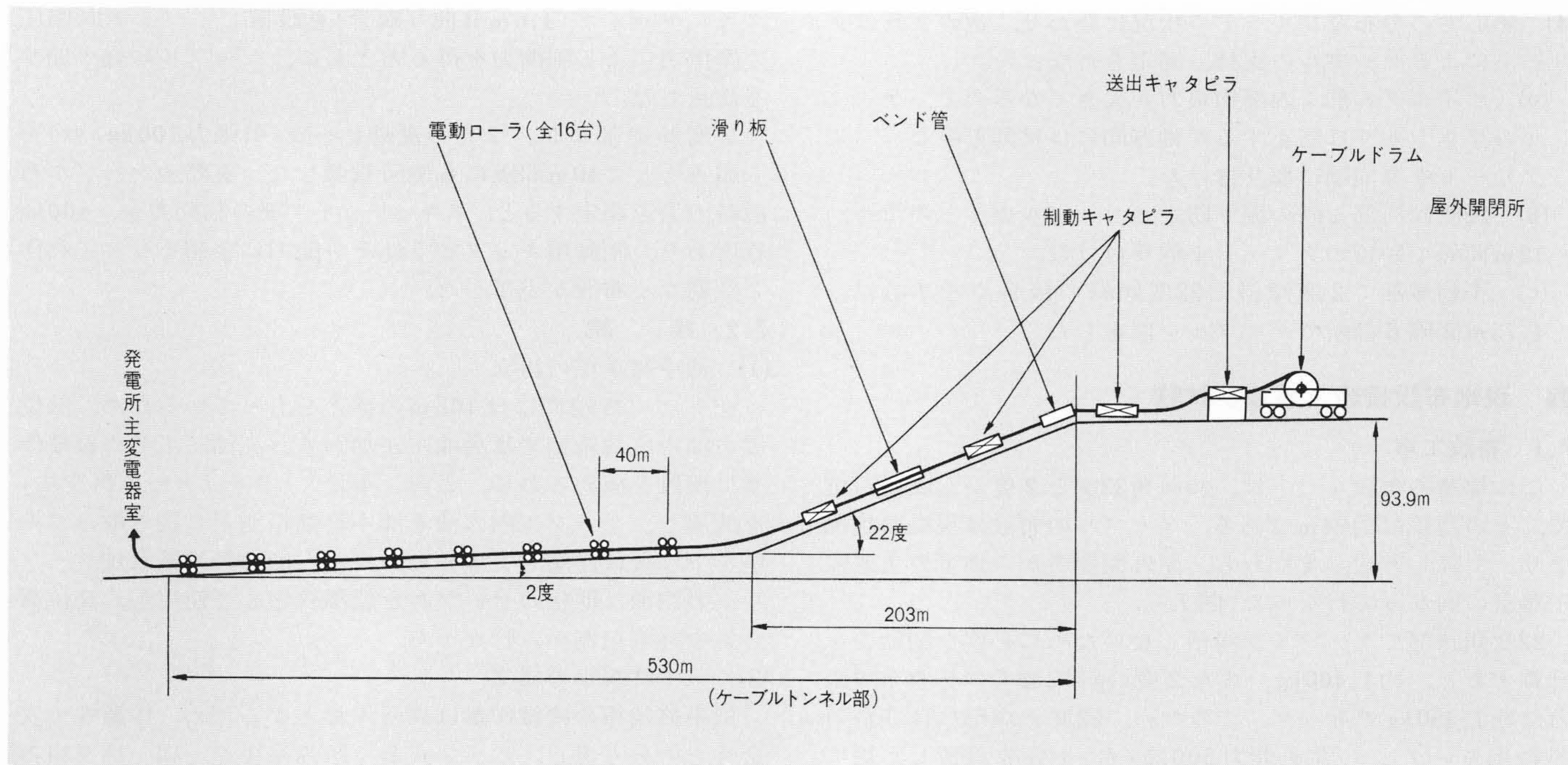


図7 ケーブル引入れ方法 ケータピラ及びベンド管を使用し、22度傾斜部の制動を行なう。2度傾斜部では、電動ローラにより布設を行なった。

立て、かつその内側に金網付安全足場を設置して安全性に万全を期した。接続作業時は終端箱施工部周囲を防水シートで覆い、塵埃、湿気の侵入を防止するとともに、シート内に乾燥空気を送風して相対湿度の調整された良好な作業環境を確保した。気中終端箱の完成状態を図8に示す。

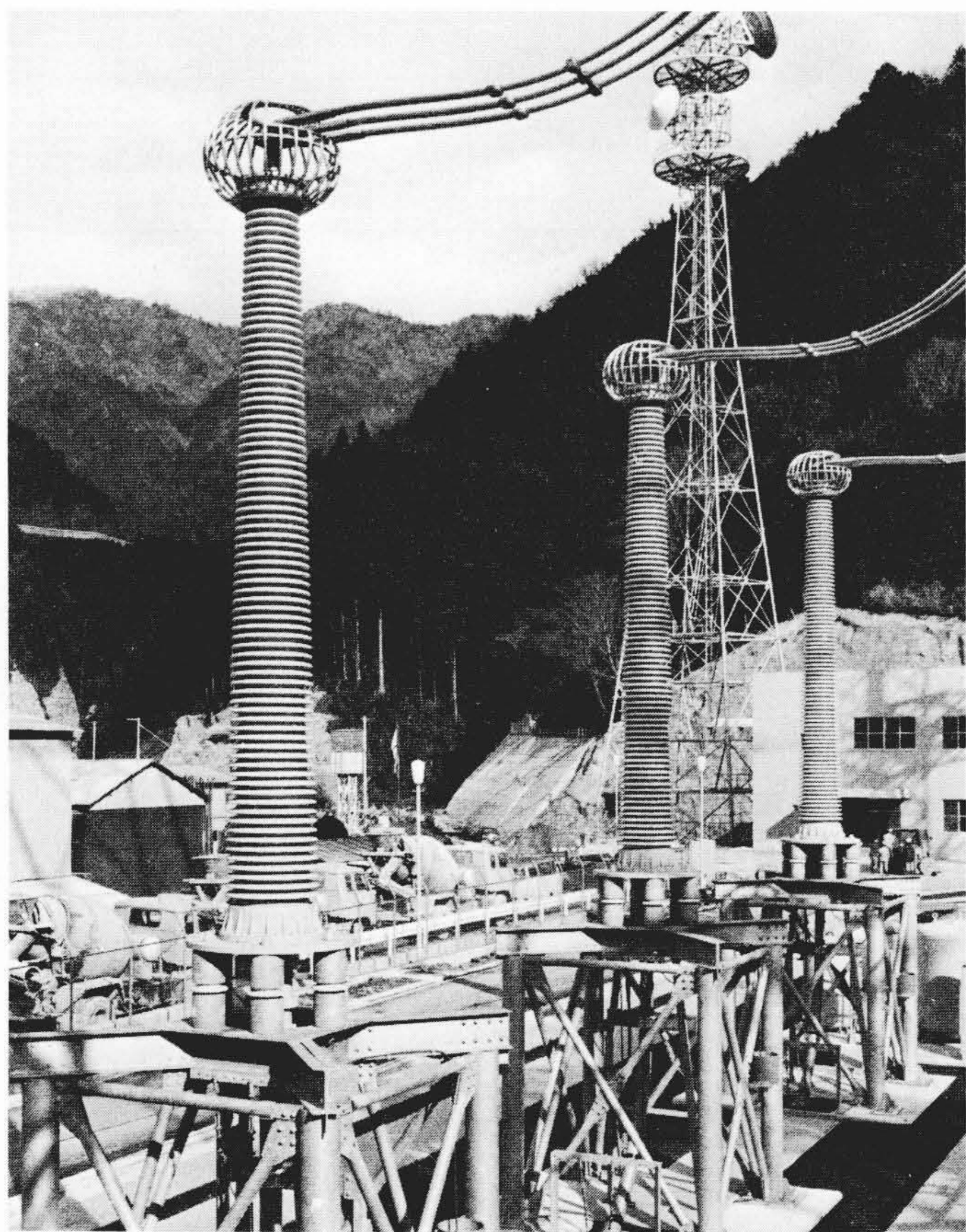


図8 気中終端部の状況 5.8mがい管を使用した気中終端箱の完成状態を示す。

7.3 現地試験

この線路の建設はまず2号線が先行され、昭和52年11月に工事を完了して、商用周波絶縁耐力試験(352kV×10分間)、給油槽油面試験、油中ガス分析試験など一連の現地試験を昭和53年2月に実施した。更に、昭和53年3月及び10月には負荷試験を行ない、ケーブルの滑落、異常な伸び出しなどのないことを確認した。現在順調に営業運転に入っている。引き続き1号線は、昭和53年10月に工事を完了したが、2号線と同様の試験を昭和54年2月までに完了して、7月以降の運転開始に臨む予定である。

8 結 言

関西電力株式会社奥吉野揚水発電所に建設した500kV単心1,000mm²高油圧アルミ被OFケーブルは、高低差約94mの斜坑に単長600mで布設されたが、その技術的特長を要約すると次に述べるとおりである。

- (1) 常時10.5kg/cm²の高油圧500kV OFケーブルに波付厚肉アルミ被を適用したこと。
- (2) 新手法を導入して、アルミ被ケーブルの熱伸縮解析を行ない、その結果に基づいてルート的大部分についてスネーク布設を省略したこと。
- (3) 耐油圧性及びがい子寸法縮小を目的として、エポキシがい子を変圧器直結型油中終端箱に適用したこと。
- (4) ケーブルは防災と滑落防止の目的で砂埋めを行ない、更に、ルート中央の不動域部にクリート固定を施し、滑落防止に万全を期したこと。
- (5) ケーブルの引入れは、曲り部側圧による摩擦力を利用したスキッドパイプとキャタピラ式制動装置を組み合わせる工法を適用したこと。

である。

終わりに、このケーブル布設計画遂行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。