

アメリカ・ロスアンゼルス市水道電気局納

230 kV 1,000 MCM 高油圧パイプケーブル

230 kV 1,000 MCM High-pressure Pipe-type Cable for Department of Water and Power of the City of Los Angeles, U. S. A.

水上 徳五郎* 橋本 博治** 比企野 恭二***
 Tokugorô Mizukami Hiroji Hashimoto Kyôji Hikino
 千葉 佐武郎*** 池上 久也***
 Saburô Chiba Kyûya Ikegami

要 旨

アメリカ・ロスアンゼルス市水道電気局 (Department of Water and Power of the City of Los Angeles) より、230 kV 1,000 MCM (500 mm²) 高油圧パイプケーブルを 28,293 m 受注し、昭和 39 年 4 月より製造を開始し、昭和 40 年 6 月その全量の布設を完了した。
 本報告は、このケーブルの製造から布設までの経過と、ケーブルの諸特性について取りまとめたものである。

1. 緒 言

わが国の 66 kV 以上の地下ケーブルでは主として OF ケーブルが使用され、一部にパイプ形のガス圧ケーブルも使用されている。一方世界的にはこれらケーブルが相半ばして実用されており、とくにアメリカではパイプ形のガス圧または油圧ケーブルが最近ではとくに多く使用されている。

今回日立製作所がアメリカ・ロスアンゼルス市水道電気局向に納入した 230 kV 1,000 MCM (500 mm²) パイプ形高油圧ケーブルはわが国で製造された初めてのこの種のケーブルであり、電気的にもわが国 275 kV 級に匹敵し、その長さは約 30 km に達するものである。またアメリカ内でもニューヨーク市内の 345 kV ケーブル⁽¹⁾に次ぐものである。

このように国内的にはまったく未経験のケーブルであり、日立製作所にとっても新しい経験であるが、納入に先だち昭和 37 年より試作検討を開始し、必要性能の確保と同時に、長期にわたる実負荷試験をも実施し、使用者側の要求を十分満たして受注納入することができた。

製造、試験、輸送にあたっては予備的検討段階で経験しえなかった、量的要因からくる多くの問題に直面したが、製造設備の改善などでこれも解決しえた。

本報告ではこれらの経過についてとりまとめたものである。

2. ケーブルの設計

2.1 設計条件

本ケーブルの設計は、Department of Water and Power of the City of Los Angeles 規格番号 8188 に準拠し、本規格に記載されていない事項に関しては、Specification for Impregnated-Paper-Insulated Cable, High-Pressure, Pipe Type, 1st Edition (1951) of the Association of Edison Illuminating Companies (AEIC)⁽²⁾ に準拠した。

上記の規格はともにきわめてきびしい規定であるが、特に顧客の規格は顧客独自の考え方をとり入れた詳細なものである。すなわち、絶縁厚さに関しても AEIC 規格によれば、230 kV 1,000 MCM に対し 21.2 mm と定めてあるが、顧客の規格においては、23.5 mm とさらに安全率を高くとっている。

表 1 ケーブルの構造

項目	仕 様	外 径 (mm)
導 体	構 成 91 本より: 1,000 MCM (500 mm ²) 素 線 半硬銅 (ASTM B-2) より方向 全層同方向右より 形 状 円 形 圧 縮	26.95
絶 縁	構 成 0.150 mm カーボン紙 } 0.125 mm クラフト紙 } 突合せ巻 0.150 mm クラフト紙 } 0.150 mm カーボン紙 } 0.100 mm 軟銅テープ } 共 巻 0.150 mm カーボン紙 }	27.45 74.0 74.3 74.8
	絶縁厚さ 平均 23.5 mm 以上 最小 22.3 mm 以上 巻 方 向 最 外 層 右 巻 巻方向変更 9 回 以下	
絶縁油	鉱 油	
防 湿 層 お よ び 補 強 層	構 成 0.055 mm メタライズドマイラテープ 2 枚共巻 (金属面向き合わせ) 0.050 mm マイラテープ } 共 巻 0.125 mm 半硬銅テープ }	75.02 75.4
	2.54 mm × 5.1 mm D 形スキッドワ イヤ 2 本 左巻 ピッチ 38.1 mm 以下 (材質 コマーシャルブロンズ)	80.5

表 2 ケーブルの使用条件

項 目	使 用 条 件
運 転 電 圧	230 kV
最 高 電 圧	運転電圧の 106%
回 路 周 波 数	三相 60 c/s
中 性 点	有 効 接 地
標 準 導 体 温 度	70°C
最 高 許 容 温 度	90°C (ただし 12 箇月中 300 時間)
布 設 条 件	外 径 216 mm 厚 さ 6.35 mm A 級鋼管内布設
鋼 管 内 油	ASTM Tentative Spec. Elec. Ins Oil for High Pressure Cable System D 1619
運 転 油 圧	ゲージ圧 14 kg/cm ² (200 psi)
送 電 容 量	常 時 160 MVA/回線 (3 回線) 緊急時 200 MVA/回線 (2 回線)
使 用 電 位 傾 度	平均電位傾度 5.67 kV/mm

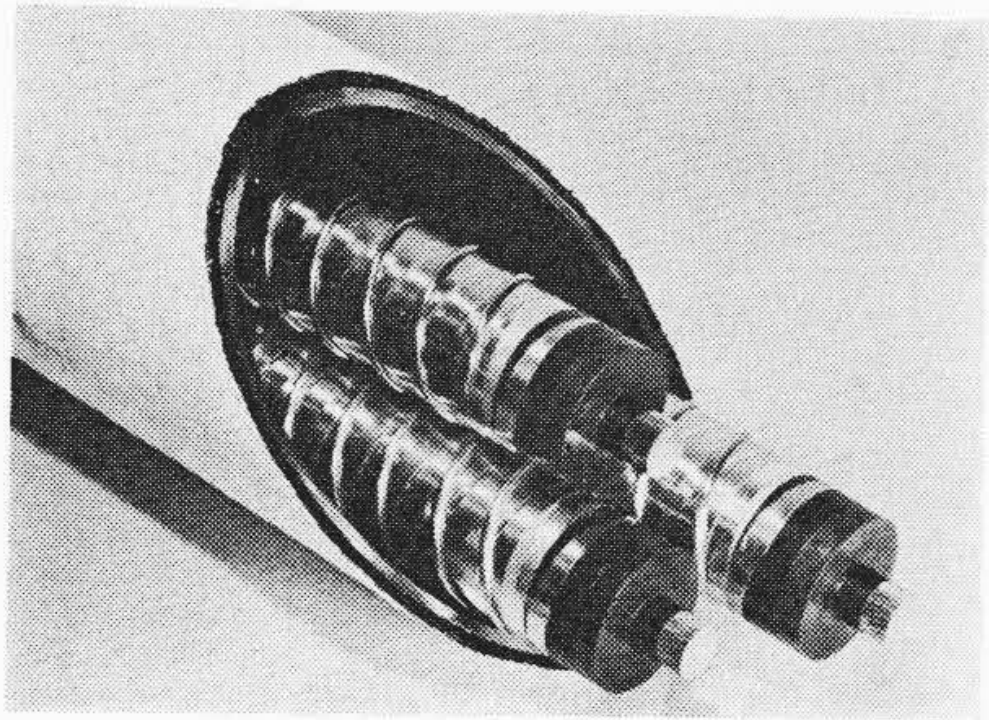
2.2 ケーブルの構造および使用条件

ケーブルの設計構造を表 1 に示す。本ケーブルは表 2 の使用条件を前提としたものである。また本ケーブルの外観構造を図 1 に示す。

3. ケーブル製造上の問題点

ケーブルの製造は顧客が派遣した技師による各製造工程の厳格な立会のもとに行なわれ、構造的に非常に高度の要求がなされた。

* 日立電線株式会社土浦工場
 ** 日立電線株式会社日高工場 工博
 *** 日立電線株式会社日高工場



(防食鋼管に3心一括入れた状態)
図1 ケーブルの外観構造

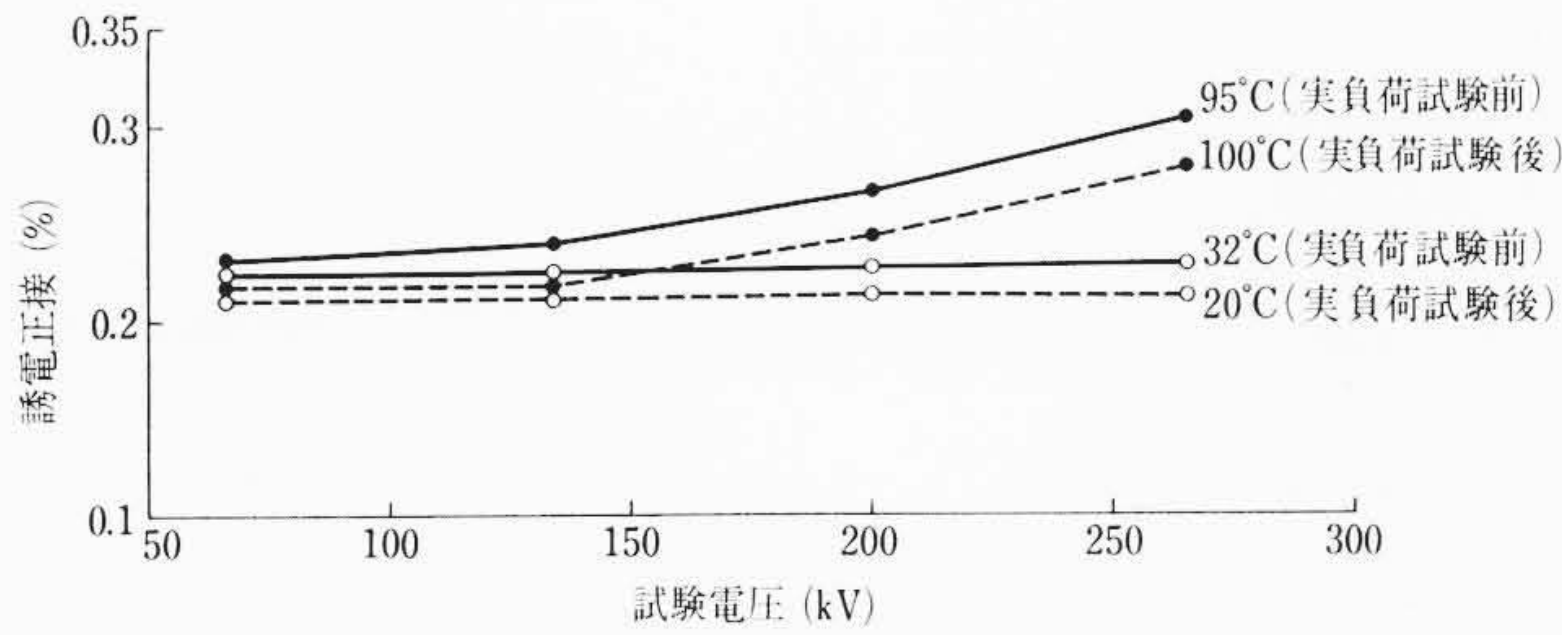


図2 実負荷試験前後の誘電正接特性

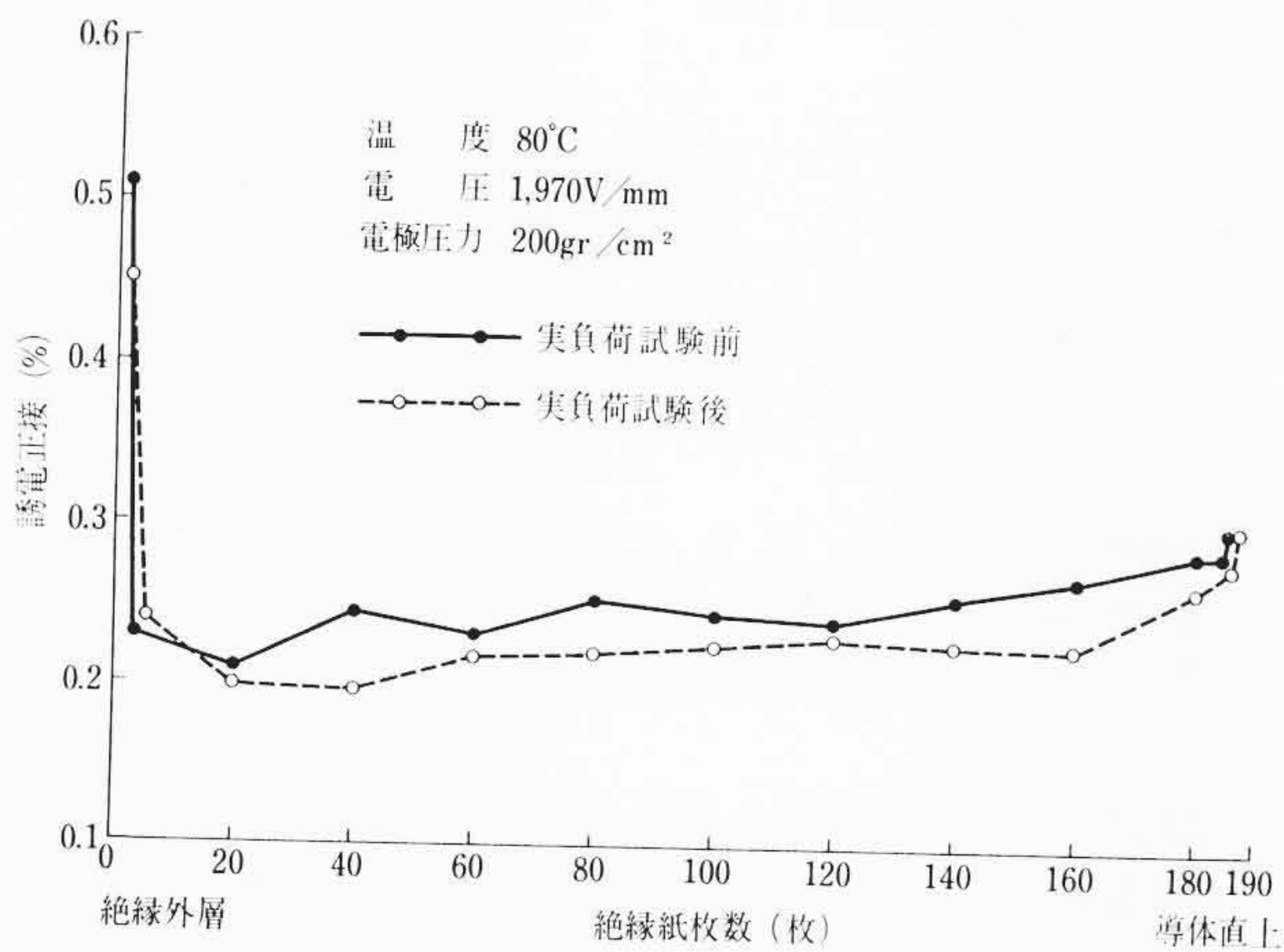


図3 実負荷試験前後の絶縁紙誘電正接

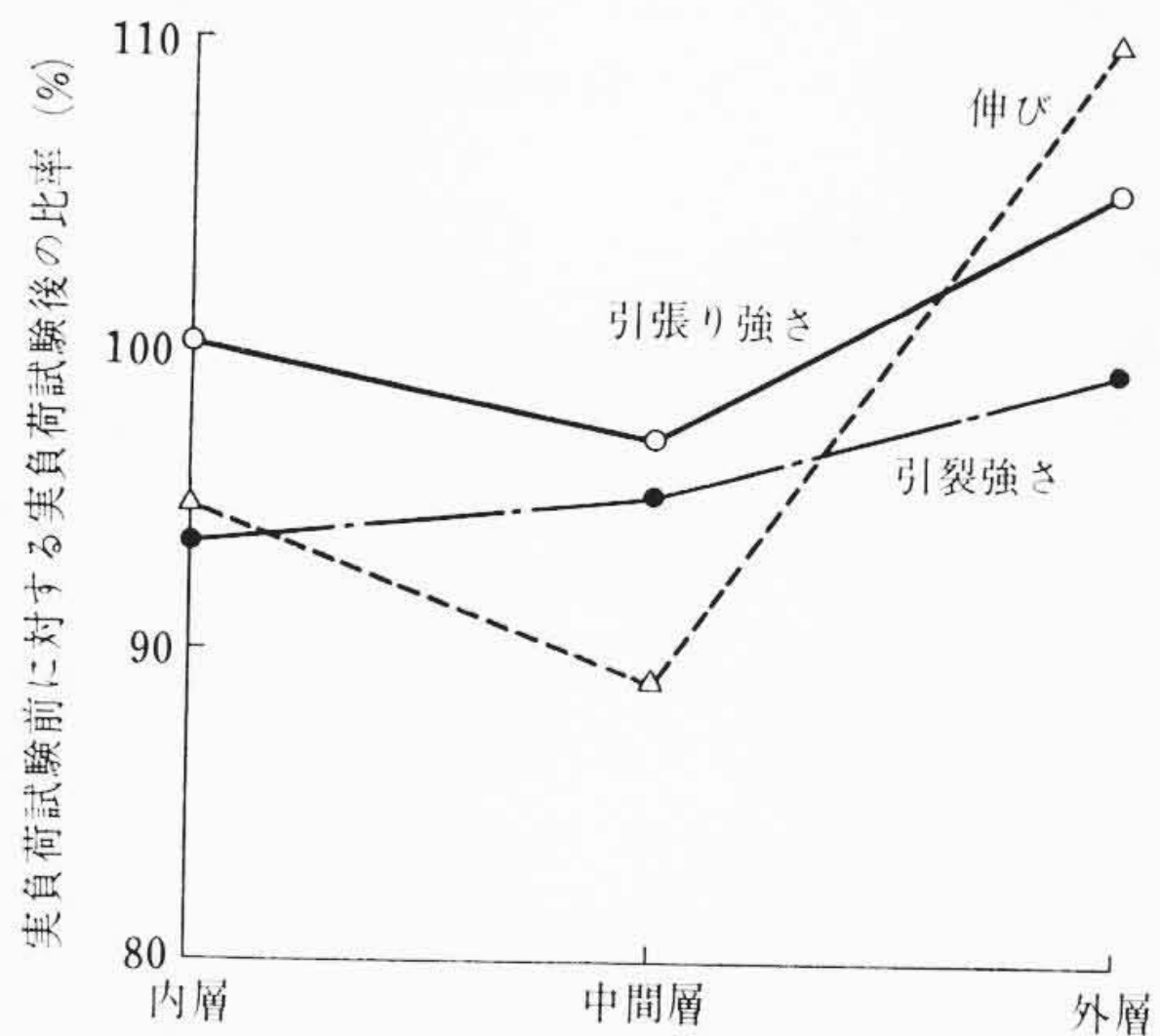


図4 絶縁紙の機械的強度

特に重要と目された点について記せば次のとおりである。

3.1 半硬銅素線を用いた圧縮導体

本ケーブルの納入単長はパイプケーブルの特長を生かして非常に長く、標準長 618 m である。このケーブルを3条一括で引き入れるため、抗張力の大きい半硬銅素線が採用された。半硬銅素線による

表3 実負荷試験の条件

項目	試験条件
課電方法	連続課電 173 kV (1.3 E ₀) 210 日
熱サイクル	加熱 8時間, 冷却 16時間 加熱は導体通電方式による。
誘電正接の測定	毎日通電前に課電電圧において測定 1 個月ごとに1回 66.5, 133, 200 kV および 266 kV の各電圧, ならびに 40, 60, 80°C および 100°C の各温度で測定
油圧絶縁紙の誘電正接の測定	7.0 kg/cm ² 実負荷試験前と試験後に温度 80°C, 電圧 1.97 kV/mm で測定

圧縮導体は初めての経験であるばかりでなく、軟銅素線に比較して加工抵抗が大きく、残留応力が生じやすいため製造条件の確立までには多くの困難が伴った。しかしながら徹底した対策により軟銅素線と同様の導体を製造することに成功した。

3.2 絶縁層の巻方向変更に対する制限および幾何学的精度

絶縁紙の突合せ間げきの半径方向での一致による有効絶縁厚の減少を防止しようとする考え方から、突合せ間げきの二層完全重なりが起るレジストレーションはもちろん、それと同等の効果が生ずる巻方向の変更に対しても制限が設けられた。巻方向の変更を制限するためには相隣る紙巻頭の同方向巻が必要であり、レジストレーションを防止するため特別の考慮が必要である。また同方向巻は紙巻後のケーブルにねじれ残留応力を与える原因ともなるので均衡のとれた絶縁構造を決定する必要がある。これらに対し紙巻機の一部改造を行なうとともに、絶縁構成に留意して満足な結果を得ることができた。また 23.5 mm 厚さの絶縁層を紙しわ、ソフトスポットがなく、堅密なものにするために紙巻の幾何学的な精度の向上と、紙巻張力、紙中含有水分量について多くの改善が行なわれた。

3.3 輸送中の絶縁層絶縁油の滴下対策

本形式のケーブルの長距離海上輸送は従来ほとんど経験のないことであり、輸送中の絶縁油の挙動など予想しなかった難問が発生し苦心した。すなわち輸送中の防湿方法として、従来一般に採用されている仮鉛被方式に代わり、油入密閉式鉄製ドラム(特許申請中)を採用した。

4. ケーブルの特性

完成ケーブルの試験は製造工程の検査と同様、顧客立会官の厳格な立会のもとに行なわれた。

本ケーブルの試験の特長は、肉眼による構造精度の試験を非常に重視する点で、ケーブルの品質の評価は主として各わく両端の構造精度により判定し、全長の保証、均一性は各製造工程の検査により判断された。また各わくの電気試験は、肉眼判定によって検出できない使用材料の均一性と、含浸上の欠陥のないことの確認という目的で行なわれた。なお試料試験は実用条件におけるケーブル特性の確認の目的でなされた。以下その試験結果について記す。

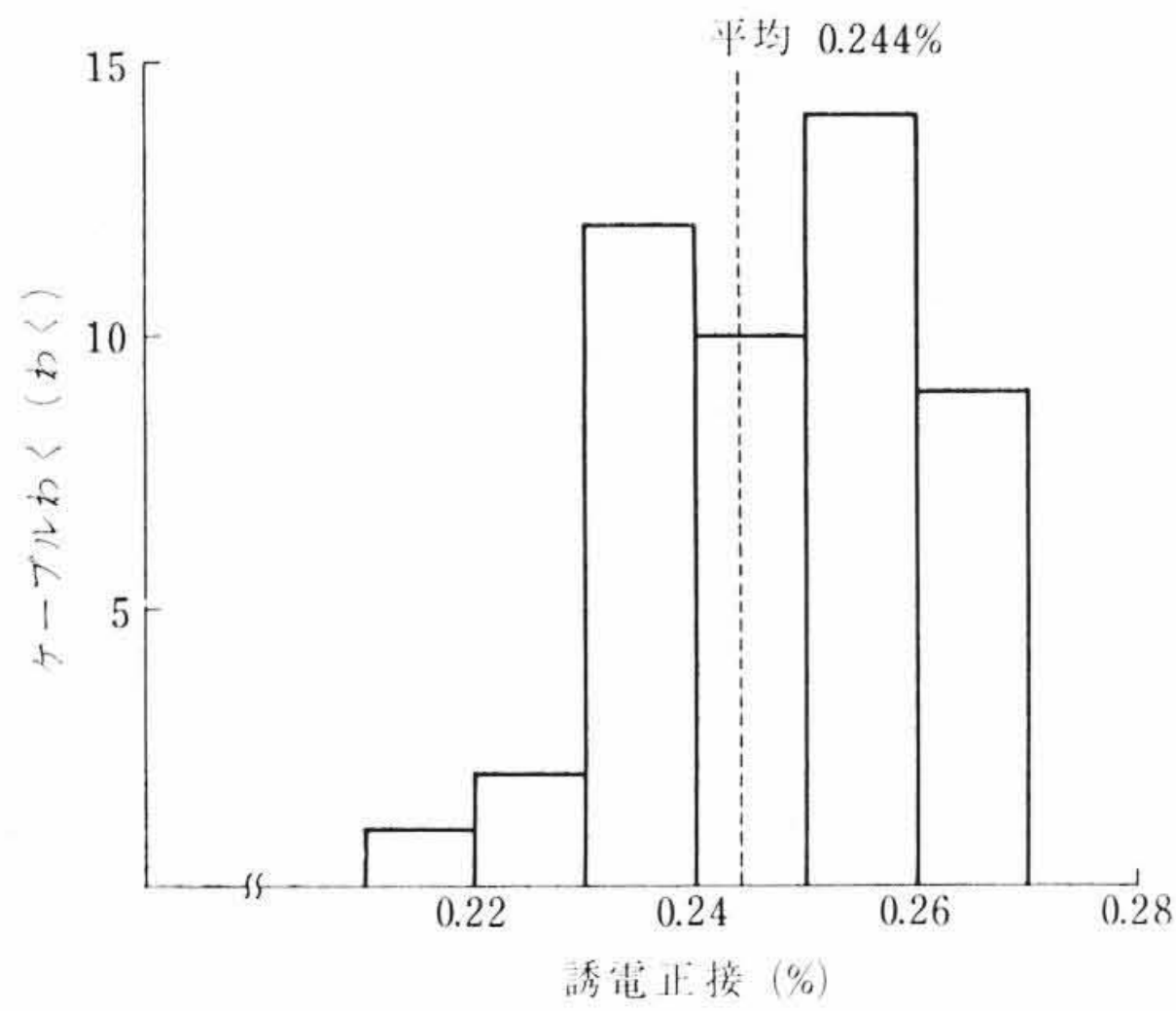
4.1 実負荷試験

ケーブルの製造に先だち、試作ケーブルで長期の実負荷試験を行ない使用状態におけるケーブルの品質を確認した。実負荷試験の条件を表3に示す。

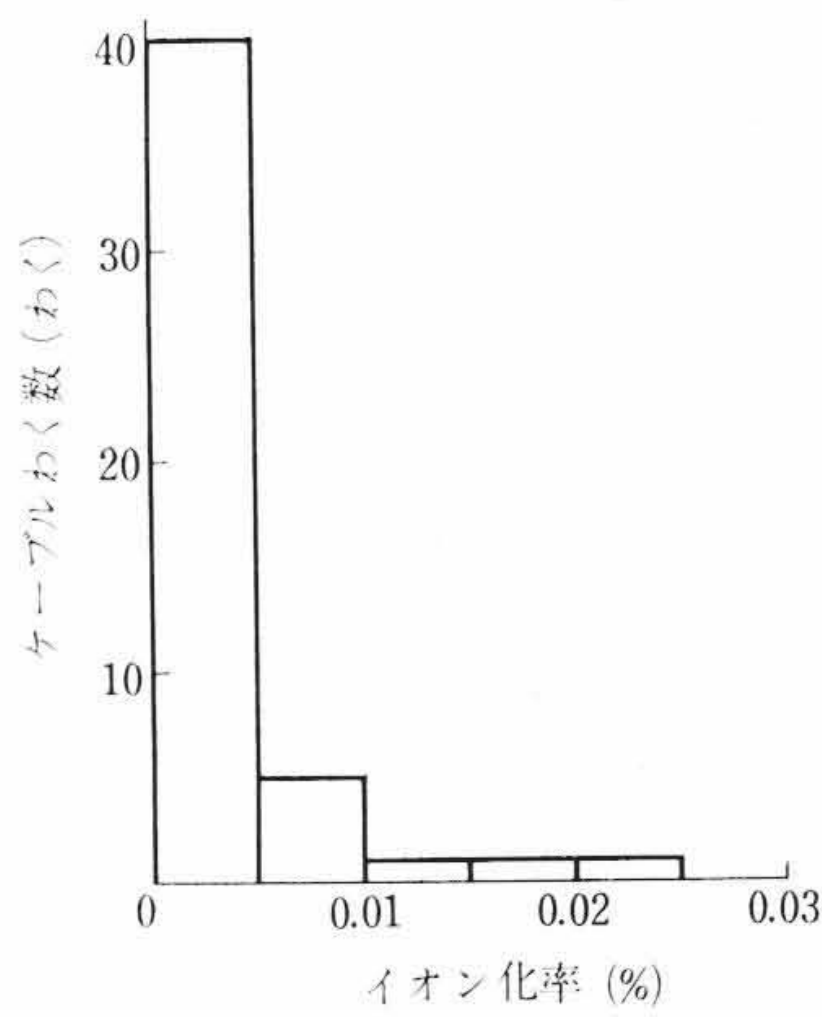
実負荷試験前後のケーブルの誘電正接特性を図2、絶縁紙の誘電正接を図3、ならびに絶縁紙の機械的強度を図4に示す。これらにより本ケーブルは十分実用に供し得ることが確認された。

4.2 わく長試験

完成ケーブルのわく長試験は AEIC 規格および顧客の仕様により行なわれたが、その特性は表4に示すとおりである。



(電圧 92.5 kV 大気圧, 温度 25°C 換算)
図5 わく長ケーブルの誘電正接



(電圧 18.5~92.5 kV の誘電正接の差, 温度 25°C 換算)
図6 わく長ケーブルのイオン化率

電気特性の中で特に重要視されたのは、誘電正接のイオン化率特性である。これを正確に測定するためケーブル末端には特殊なガードリングを取り付け、外部誘導やコロナの影響を除去した。また試験温度は5~19°Cと変化しているため誘電正接の比較は基準温度に換算して行なう必要がある。そこで納入ケーブルの大気圧における誘電正接温度特性をとり、25°Cに換算して比較した。

図5は納入ケーブルの誘電正接分布図であるが、電圧92.5 kV、大気圧における誘電正接は、48わく平均で0.244%であった。

ケーブル絶縁層の含浸状態に異常があったり、使用材料に不均一な部分があれば、誘電正接は電圧上昇に伴い立ち上がりを示す。納入ケーブルのイオン化率は図6に示すように非常に小さい値でありイオン化は認められなかった。

構造試験の要点は次のとおりである。この構造試験は出荷各わくの両端について行なわれた。

- (1) スキッドワイヤの巻付状況の調査
- (2) 防湿層, 補強層の点検
- (3) 平均絶縁厚さ, 最小絶縁厚さの測定
- (4) 絶縁紙の重なり状況の調査
- (5) 油浸状況の点検
- (6) 紙しわ, ソフトスポット有無の調査
- (7) 導体圧縮状況の良否の点検

これらの項目について微細にわたる検査が行なわれた。たとえば絶縁層については絶縁紙一枚一枚のしわの有無や重なり状況の調査、突合せ間げきの油枯れの有無に至るまでおもに肉眼判定を重視して実施された。また絶縁紙の品質を確認するため、各わくの両端

表4 わく長試験項目とその結果

試験項目	規格値	特性	試験条件
耐電圧	AC 100 kV 15分間	良	常温, 大気圧
誘電正接	0.6%以下	平均 0.244% (図6参照) (0.210~0.27%)	常温, 大気圧 92.5 kV
イオン化率	0.1%以下	良 (図6参照)	常温, 大気圧 18.5 kV と 92.5 kV の差
導体抵抗	標準値 0.0347 最大値 0.0367	0.0337~0.0347	Ω/km 20°C
構造	絶縁厚さ 平均 23.5 mm 最小 22.3 mm 紙の重列 30~40% 紙しわ, ソフトスポットのないこと。	23.8~24.1 mm 23.6 mm 良 良	各わく両端末について試験する。
絶縁紙の誘電正接	各わく両端末について測定する。	良	1.97 kV/mm 80°C
輸送ドラムの窒素ガス露点	-30°C以下	-34~-39.5°C	窒素ガス充てん後 24時間後に測定
輸送ドラムの絶縁油水分量	35 ppm	11.9~19.1 ppm	ドラムに充てん後に測定

表5 試料試験項目とその結果

試験項目	規格	特性例	試験条件
イオン化率	0.08%以下	0.003% (14°C)	油圧 14.1 kg/cm ² 電圧 19 kV と 176 kV の誘電正接の差
誘電正接温度特性	0.5%以下	図7参照	油圧 14.1 kg/cm ² 電圧 147 kV
長時間耐電圧試験	315 kV 6時間 400 kV 3時間 480 kV 3時間	良 良 良	油圧 7.0 kg/cm ²
曲げ特性	ケーブル外径の18倍径	良	-10°Cに冷却して曲げる
長時間破壊試験	参考試験	610 kV でがい子表面せん絡	油圧 7.0 kg/cm ²
衝撃電圧破壊試験	参考試験	-1,850 kV でがい子表面せん絡	油圧 7.0 kg/cm ²

より試料をとり、各絶縁紙の半径方向の誘電正接を測定したが、80°C、1.97 kV/mmにおいて0.21~0.24%と良好な結果が得られた。

荷造完了後ケーブルの吸湿の有無を確認するため窒素ガスを封入し24時間放置後その露点を測定したが、-34~-39.5°Cであり問題なかった。輸送ドラムに充てんした絶縁油の水分量を測定したが、11.9~19.1 ppmで、充てん前の絶縁油の水分量とほとんど変わらない値であった。

4.3 試料試験

試料試験は、全わく中4試料について行なわれたが、その結果は表5に示すとおりである。試料はケーブル完成時に顧客立会官に指定されたわくより約25 m採取し、パイプに引き入れて電気的特性を測定した。

イオン化率、誘電正接温度特性測定にあたっては、末端にガードを取り付け、ケーブルをパイプから絶縁して精密な測定を行なった。ケーブルの温度上昇は全体を均一な温度にするため、パイプを外部から加熱する方法をとり、特に両端末はがい子表面からの熱放散のため温度が下がるので、加熱方法に特別の注意を払った。

イオン化率は、油圧 14.1 kg/cm²における電位傾度 0.79 kV/mmと7.5 kV/mmの誘電正接の差で示されるが、イオン化は認められなかった。誘電正接温度特性の一例を図7に示し、その試験状況を図8に示す。

長時間耐電圧試験は、AEIC規格では315 kV 6時間の耐圧を規定し、400 kV, 480 kV 各3時間は参考試験とされているが、顧客の仕様ではこれらはすべて耐圧と規定されておりきびしい要求であっ

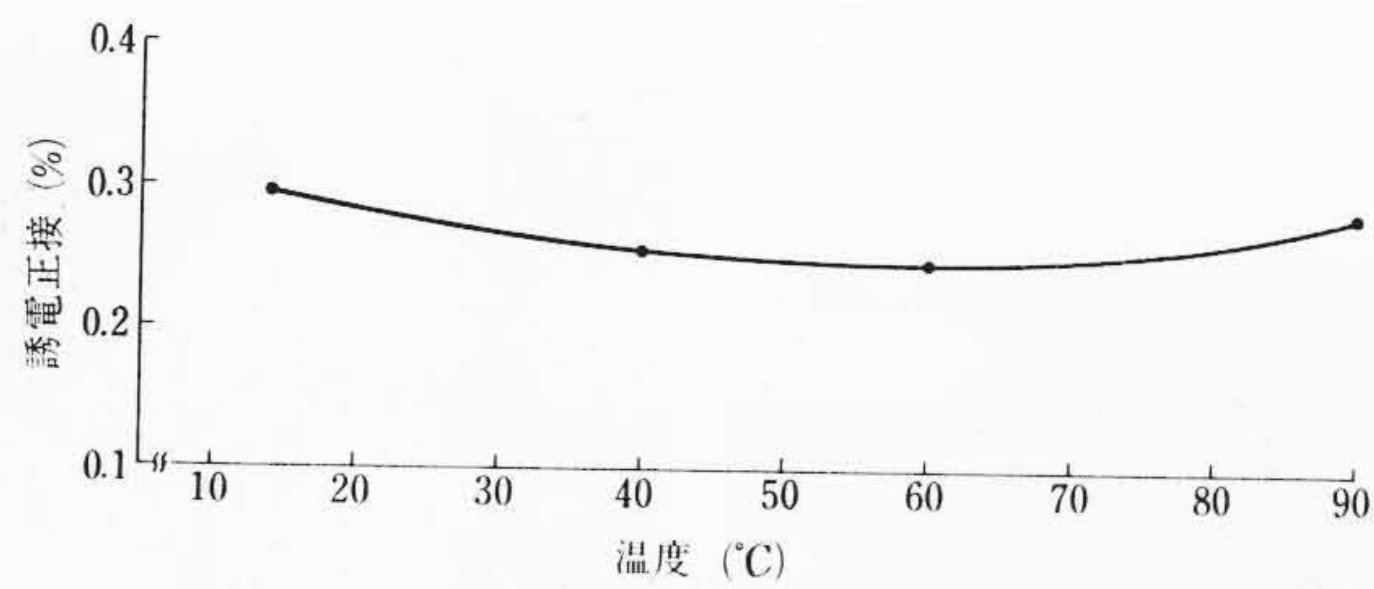


図7 誘電正接温度特性の一例

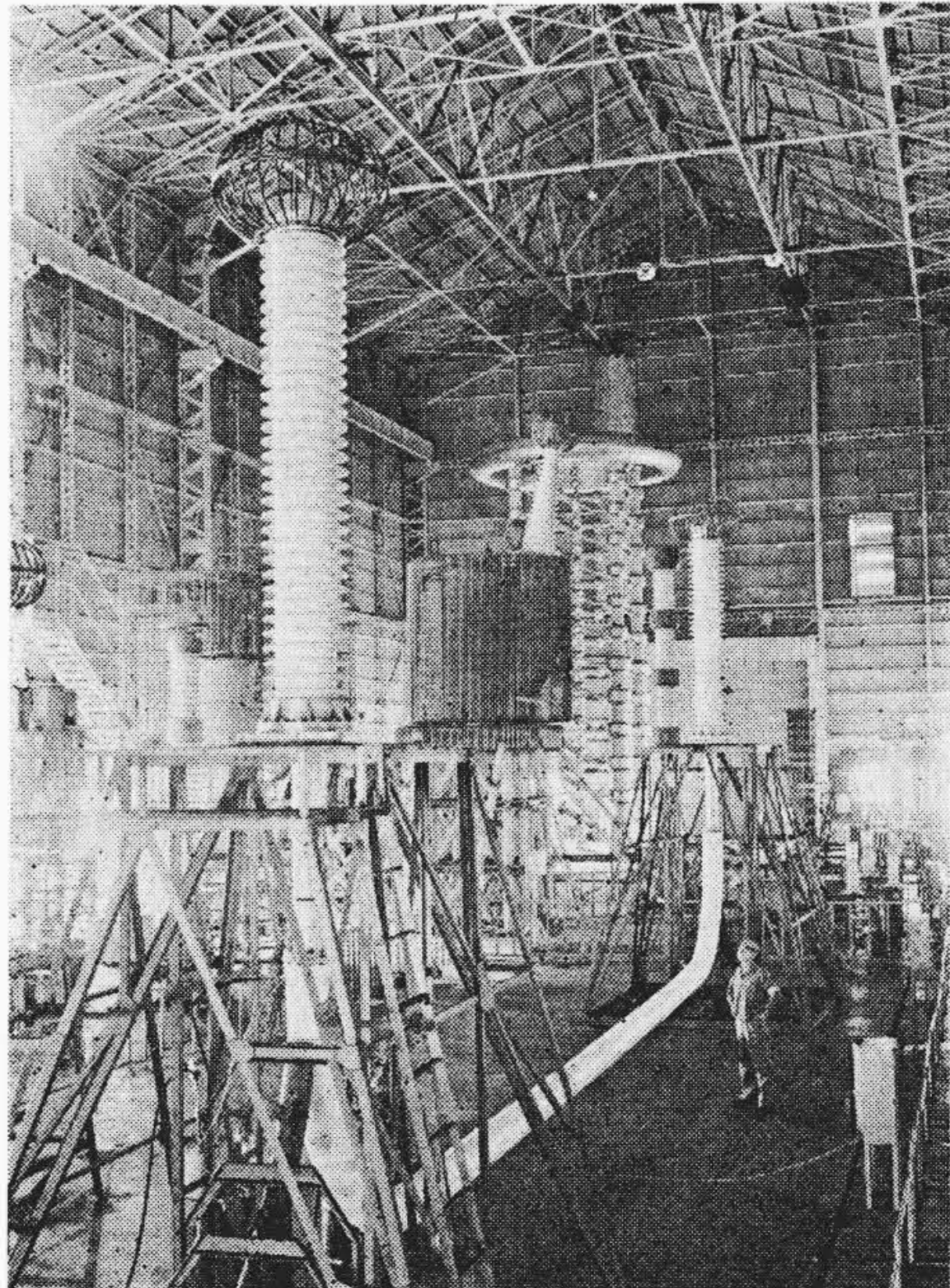


図8 試料試験状況

た。長時間耐電圧試験後同一試料で曲げ試験を行なうため、破壊試験は行なわれなかったが、別の試料で行なわれた結果では、610 kV でがい子表面せん絡が起こった。またインパルス試験の結果は -1850 kV でがい子表面せん絡であり、いずれも 230 kV ケーブルとしては十分な性能をもつことが確認された。

5. ケーブルの布設

ケーブルの布設は、ロスアンゼルス市水道電気局によって行なわれ⁽³⁾日立電線株式会社からも筆者の1人が現地の布設作業に立会ったので、その概略を報告する。布設作業全般を通じて痛感したことは次のとおりである。

- (1) 布設作業の装備は合理的であり、作業がきわめて機動的に行なわれた。
- (2) 現地における電気試験は実用運転にはいるまでまったく行なわれず、これに代わり完成ケーブルが布設上の取り扱いで性能が低下しないか否かの確認のため、引入中の外観の点検、布設後のケーブルの構造解体試験および水分、空気などの吸着の有無を調べるための管路内の物理的な試験に重点がおかれた。
- (3) すべての動作が細部にわたって定められた作業規準によって正しく行なわれた。

5.1 ケーブルの引き入れ作業

現地におけるケーブルの引き入れ作業状況を手順を追って述べる。

(1) 水分量試験

ケーブルの受入時に密閉ドラム内の充てん油を大気に触れることなく取り出し、水分量が 35 ppm 以下であることを確認する。

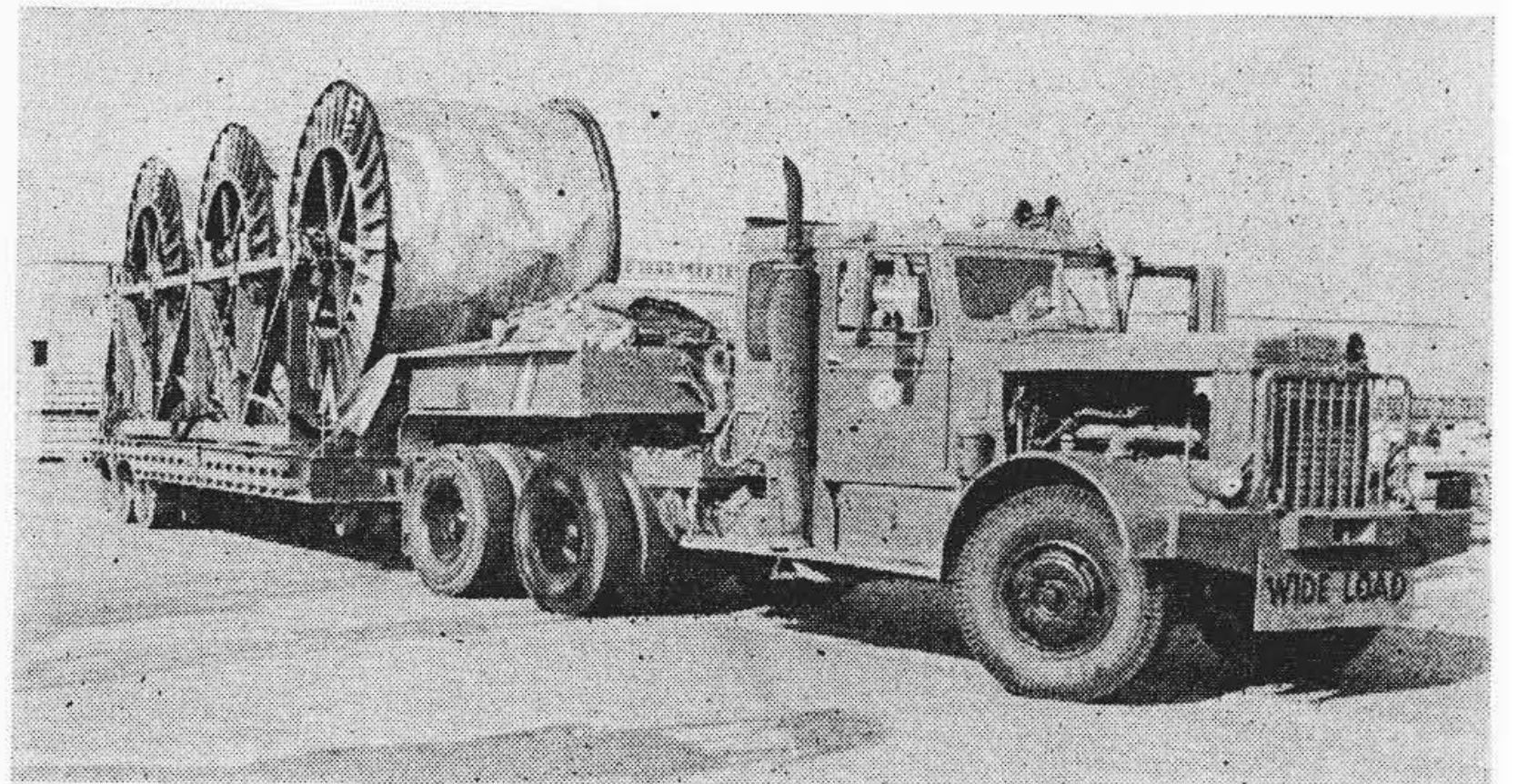


図9 布設現場へのドラム搬入

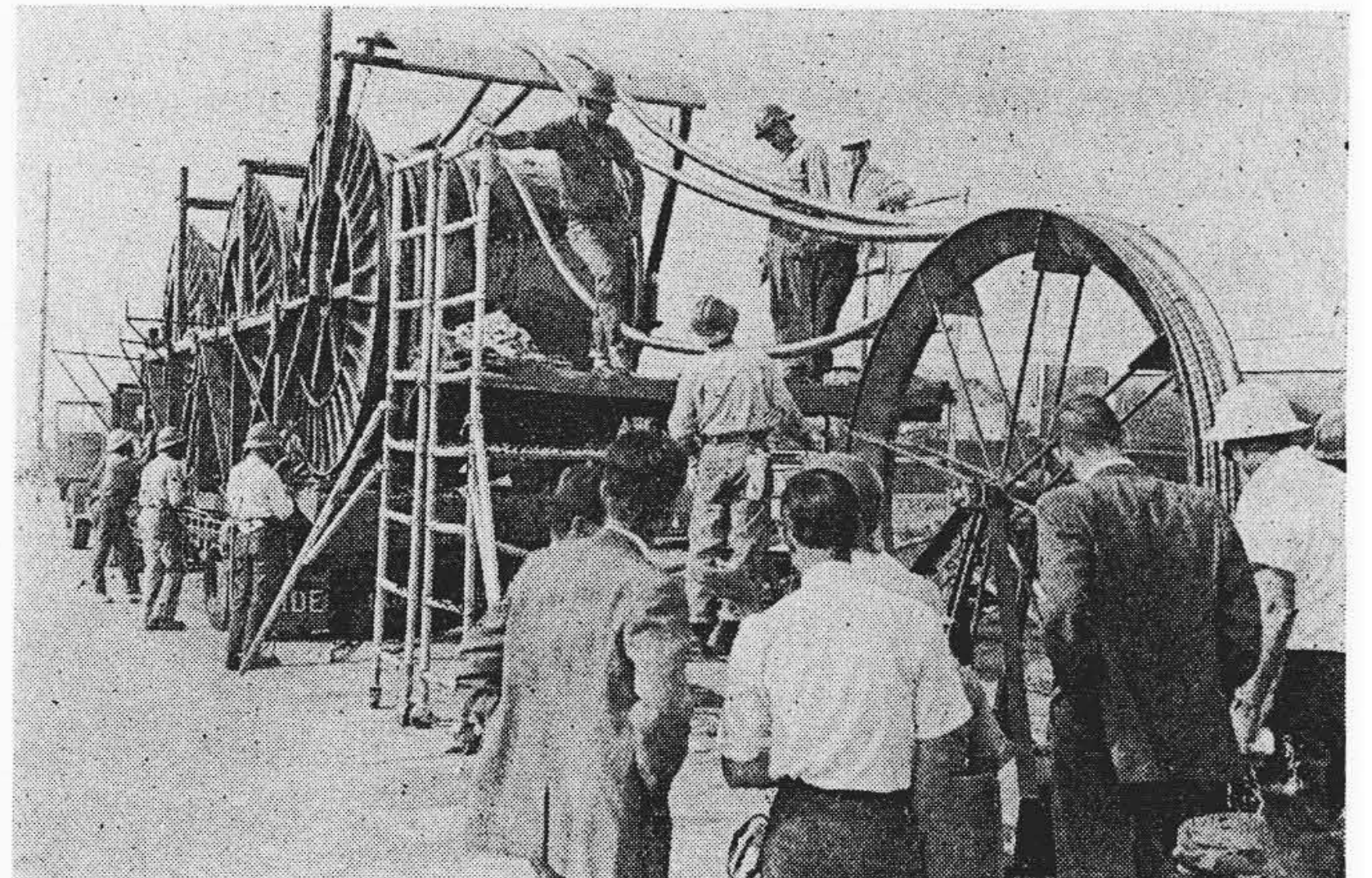


図10 引入作業(送出側)

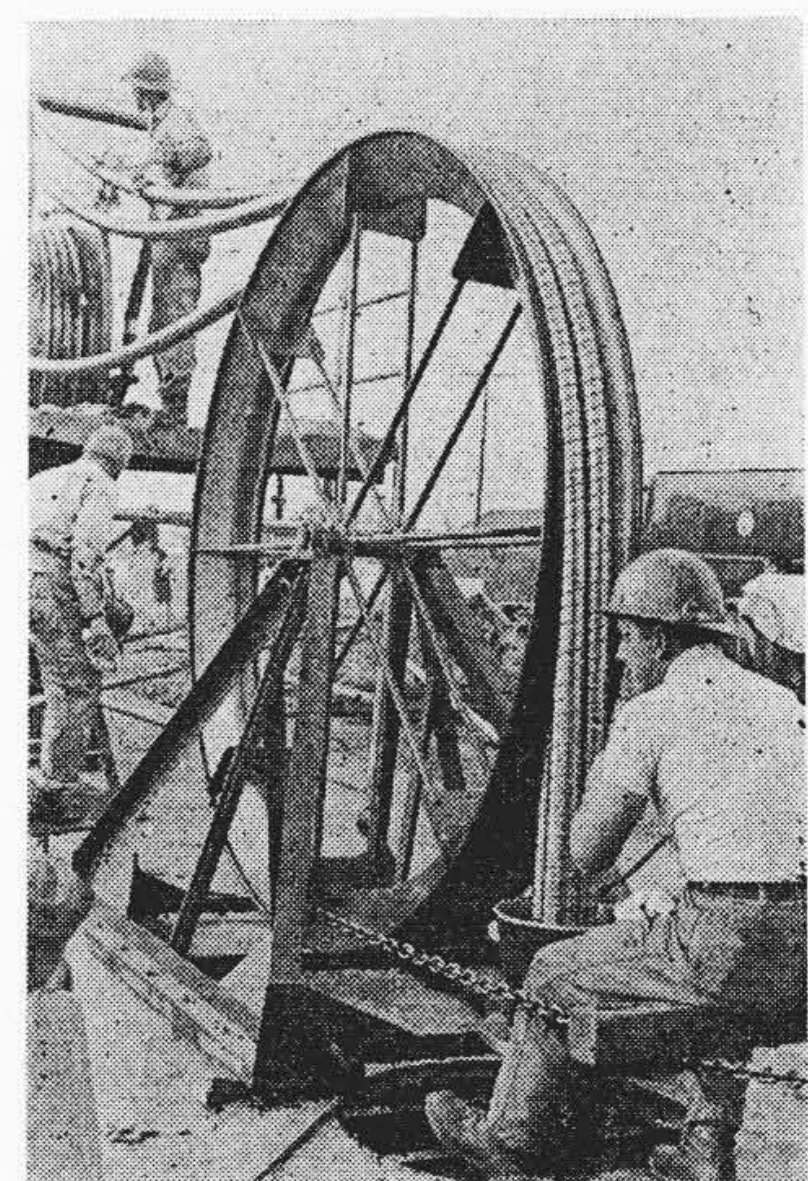


図11 引入作業(マンホール入口)

- (2) 油抜き、小割板はずし、密閉用カバーはずし

水分量試験に合格すれば、布設直前に充てん油を排出し、小割板と密閉用カバーを取りはずす。

- (3) 布設現場への搬入

引き入れを行なうケーブル3ドラムを図9に示す3心一括引き入れ用トレーラに積込み、マンホールのかたわらに運搬して据付ける。

- (4) 引入準備

トレーラに積んだまま、ケーブルの保護層をはぎ取り、ガイド類を取り付けて引き入れ準備を完了する。

- (5) 引入作業

ケーブルの引入単長は両端部スパンを除き 618 m であり、全長 4,900 m 2 回線に布設された。図 10 (送出側)、図 11 (引入口) に示すようにケーブルへの外傷防止、ケーブルの外観検査に留意し

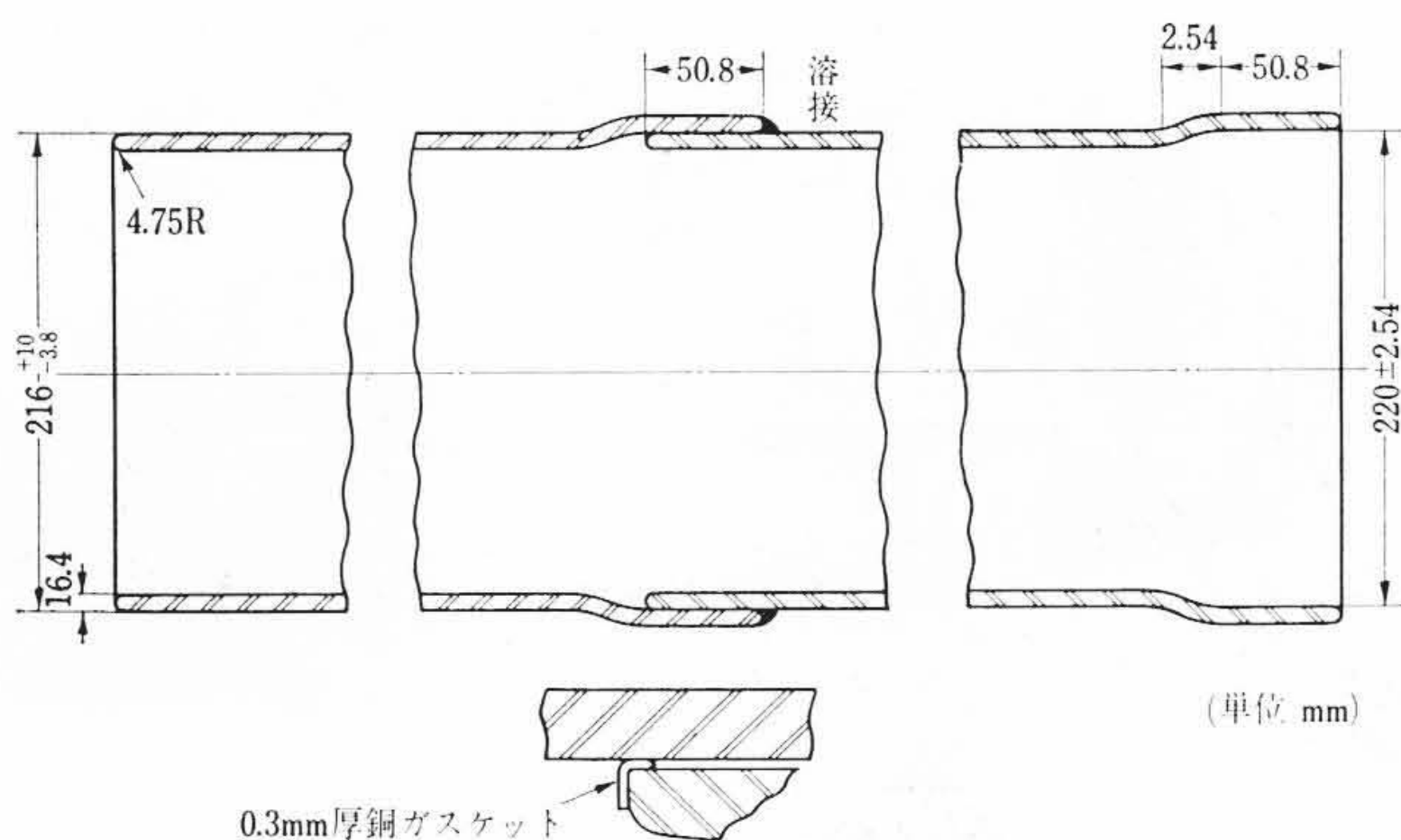


図12 鋼管溶接方式

ながら引入作業を行なう。このときの引入速度は10 m/min, 引入張力は, 5,440 kg, 横圧は, 35.7 kg/cmにおさえられた。

(6) 排 気

引入完了後余長ケーブルを切除しパイプの両端をアルミ製簡易端末によって密封する。その後パイプの一端から真空排気し, 他端の真空度が250 μ Hgになるまで継続する。

(7) 圧力上昇試験

ケーブル内の含有ガス量を検査するために行なわれるもので, 基準は次のとおりである。

排気によって真空度が250 μ Hgに到達したのちさらに4時間排気を行ない, そのときの真空度 a μ Hg を読む。真空度読み取り後, 真空排気を24時間停止して再び真空度 b μ Hg を読む。ここで圧力上昇(b-a)が250 μ Hg以下でなければならない。

この規準はきわめてきびしいもので, 絶縁層の完全性を確認するのに有効である。またアメリカエジソン電気協会の圧力上昇試験推奨値が, 6時間で1,000 μ Hgである点からみてもそのきびしさが推定できる。

これらの操作が各スパンごとに繰返された後, ケーブルの接続と端末の施工が行なわれる。その後再び全スパンの排気, 圧力上昇試験, 露点試験が行なわれ, 満足な結果が得られれば注油して布設作業を完了する。

5.2 鋼管路の構築

参考のために本ケーブルの鋼管路の構築作業を手順に従って述べる。

(1) トレンチ掘削と鋼管の配置

トレンチを掘削し, その側に単長約13 mの防食鋼管を配置する。鋼管はAPI5L (American Petroleum Institute Specification for Line Pipe) を修正した仕様に準じた, 外径216 mm, 厚さ6.4 mmのGrad AまたはBの Electric Welded Pipe である。また防食は厚さ12.7 mmの Asphalt Mastic が用いられ, 一部に試験的に補強コーラル防食が用いられた。

(2) 鋼管溶接作業

鋼管はトレンチ内に布設される前に約26 mに接続され, さらにトレンチ内で接続される。接続は図12に示すようにベル・アンド・スピゴット形(Bell and Spigot Type)が用いられ, スピゴット端(Spigot End)に銅ガスケットを用い, 治具で締めつけた後, 図13に示すような車に装備された直流溶接器で溶接される。

(3) 接続部の気密試験および防食作業

接続部の気密試験は, 溶接部と銅ガスケットの間の空げきに21.5気圧の内圧をかけて試験する。この模様を図14に示す。接続部の局部的防食は Hot Mix Mastic のモールドによるかまたはテープの手巻きによる。この部分は施工後ホリディ・デテクタで試験される。



図13 鋼管の溶接

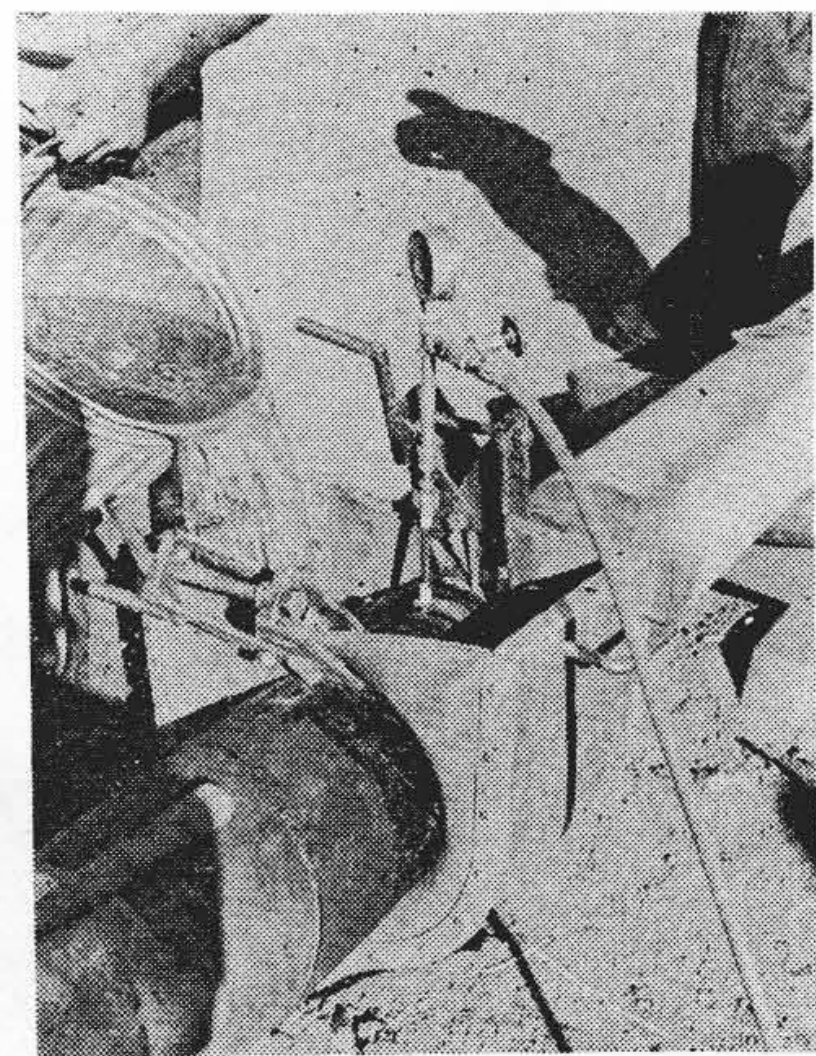


図14 溶接部の水圧試験

(4) マンホール構築

トレンチ内に鋼管が接続された後マンホールが構築され, マンホール内所定位置で鋼管が切断され, 355.6 mm 外径のレジューサが取り付けられる。ケーブル接続後この部分にジョイントスリーブが溶接されるが, それまではアルミ製簡易端末で密閉しておく。各マンホールにはマグネシウム電極による陰極保護装置が取り付けられ, また特に安全上の立場から換気については十分な注意が払われる。マンホール寸法は, 一回線用のものは長さ5.6 m 高さ2.1 m 幅1.7 m, 二回線用のものは幅2.1 m である。

両端立ち上がり部分の鋼管はアンカーで固定され, 温度変化による鋼管の移動によって終端箱に影響を与えないようにしてある。また三心分岐管には114 mm 外径のステンレス管が用いられる。

(5) 鋼管路の気密試験

鋼管路はケーブル引き入れ前に24時間排気され, 到達真空度が100 μ Hg以下であることが必要であり, また真空度読み取り後真空排気を停止し24時間後の圧力上昇が50 μ Hg以下であることが必要である。

6. 結 言

以上230 kV 1,000 MCM 高油圧パイプケーブルの納入経過を報告した。本ケーブルは昭和40年7月以来, 差し当たり138 kVで運転されている。

このような超高圧パイプケーブルの量産はわが国における最初の経験であり, 設計, 製造, 試験および輸送の各部門において多くの貴重な技術を体得することができた。また現地における布設工事においても学ぶべき点が多かった。

わが国においてもパイプケーブルが超高圧に実用されようとする機運にあり, これらの経験が多少なりとも参考になれば幸いである。

最後に本ケーブルの製作に終始ご指導を賜ったロスアンゼルス市水道電気局の各位, 日立電線株式会社小宮副社長, 内藤常務, 今井取締役に厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) C. T. Hatcher, R. W. Gillette: "Design and Installation Features of Consolidated Edison Underground 345 kV Transmission System". American Power Conference [XXVI] 1022 (April 16, 1964)
- (2) Association of Edison Illuminating Companies: Specification for Impregnated-Paper-Insulated Cable, High-Pressure, Pipe Type, 1st Edition. (1951)
- (3) T. F. Stipp, J. L. Mulloy: Conference Paper No. 31 CP 65-126, IEEE Winter Power Meeting. (1965)
- (4) Edison Electric Institute.: Underground Systems Reference Book. (1957)