

東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所向け

500kVアルミ被OFケーブル

500kV Aluminium Sheathed Oil-Filled Cable for Sodegaura Power Station of Tokyo Electric Power Co., Inc.

Sodegaura Thermal Power Station, which was recently added to the huge generation network of Tokyo Electric Power Co., Inc., is worthy of special mention because of its use of entirely sulfur-free LNG. For power transmission from No. 1 generating unit of this LNG-fired power plant, Hitachi Cable, Ltd. supplied 500 kV 1 x 1,200 mm² aluminium sheathed OF cable to make the first instance of a 500 kV class aluminium sheathed OF cable put to practical use in this country. The cable was installed at site in March, 1974.

Specifications and performance of the same cable, with an insulation thickness of 33 mm and outside diameter of 150 mm, 6.5 m indoor pot head, oil-immersed pot head, etc. and the outline of cable installing work are described.

渡辺 達雄*	Tatsuo Watanabe
佐藤 直樹**	Naoki Satô
渡辺 義治***	Yoshiharu Watanabe
宮原 明雄****	Akio Miyahara
加藤 静男*****	Shizuo Katô
比企野 恭二*****	Kyoji Hikino
卜部 義清*****	Yoshikiyo Urabe

1 緒言

昭和45年に東京電力株式会社と電線メーカー間の共同研究として大容量送電技術開発研究が発足し、その一環として東京変電所における500kVケーブルの長期実証試験が実施された。

日立電線株式会社は500kV OFケーブルの開発と冷却方式の研究を担当し、約3年間にわたる長期エージング試験においてケーブルの信頼性を実証した⁽¹⁾⁽²⁾。東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所(以下、袖ヶ浦火力発電所と略す)においては大容量電力を長距離送電するためには従来の方式によると、送電線ルート数が増加し系統が単純ではなくなり、且つ用地も幅広く必要となるため、発電所において直接500kVに昇圧し送電する方式が採用された。袖ヶ浦火力発電所1号機用500kV OFケーブルの納入に際しては、これらの開発研究の成果を基盤とし、更に現場条件を十分に加味して、ケーブル及び付属品の設計製造にあたった。またケーブルの大形化ということで現地工事も万全を期し、入念な事前準備と徹底した機械力の導入により無事完成させることができた。布設及び接続工事は昭和49年3月に完了し引き続き好調裏に試運転が実施され、昭和49年8月1日より営業運転が開始された。

2 設計条件

2.1 定格事項

ケーブル及び付属品の使用定格並びに要求性能は表1に示すとおりである。

2.2 布設条件

袖ヶ浦火力発電所は今回の1号機600MWに引き続き、昭和51年までに2、3号機(それぞれ1,000MW)の設置が予定されている。

1号機用ケーブルは、図1に示すように、発電機棟側の主変

表1 使用定格と要求性能 設計の基準となる電圧には550kVを、所要絶縁強度(雷インパルス)には1,550kVを採用した。

Table 1 Ratings and Requirements

項 目	数 値	備 考						
電 圧	500kV	-						
使 用 定 格	最高回路電圧	550kV	設計の基準となる電圧					
	雷インパルス	1,550kV		所要絶縁強度				
	開閉インパルス	1,090kV						
	連続電流容量	790A	所要電流容量					
短時間電流容量	50kA / 2s							
主 要 要 求 性 能	交流耐電圧(わく試験)	420kV / 10minに耐え得ること	この電圧でわくtanδ測定					
	交流長時間耐電圧	690kV / 6hに耐え得ること	-					
	衝 撃 耐 電 圧	常温	1,860kV / 3回に耐え得ること	-				
		85°C	1,710kV / 3回に耐え得ること					
	開閉インパルス耐電圧	常時	1,310kV / 3回に耐え得ること	100μ × 2,500μs				
		85°C	1,200kV / 3回に耐え得ること					
誘電正接温度電圧特性	(1) 288kV, 500kV, 577kVの測定値が下表以下であること。 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>常 温</td> <td>40°C</td> <td>0.22%</td> </tr> <tr> <td>60°C, 70°C, 80°C, 90°C</td> <td></td> <td>0.20%</td> </tr> </table> (2) 288kV及び500kVによる測定値の差が0.1%以下。		常 温	40°C	0.22%	60°C, 70°C, 80°C, 90°C		0.20%
常 温	40°C	0.22%						
60°C, 70°C, 80°C, 90°C		0.20%						
防食層交流耐電圧	30kV / 1minに耐え得ること	試料試験						
防食層衝撃耐電圧	60kV / 3回に耐え得ること							

* 東京電力株式会社技術開発研究所 ** 東京電力株式会社大火力建設本部 *** 東京電力株式会社工務部地中線課
 **** 東京電力株式会社火力部火力設計課 ***** 東京電力株式会社袖ヶ浦火力建設所電気課
 ***** 日立電線株式会社日高工場

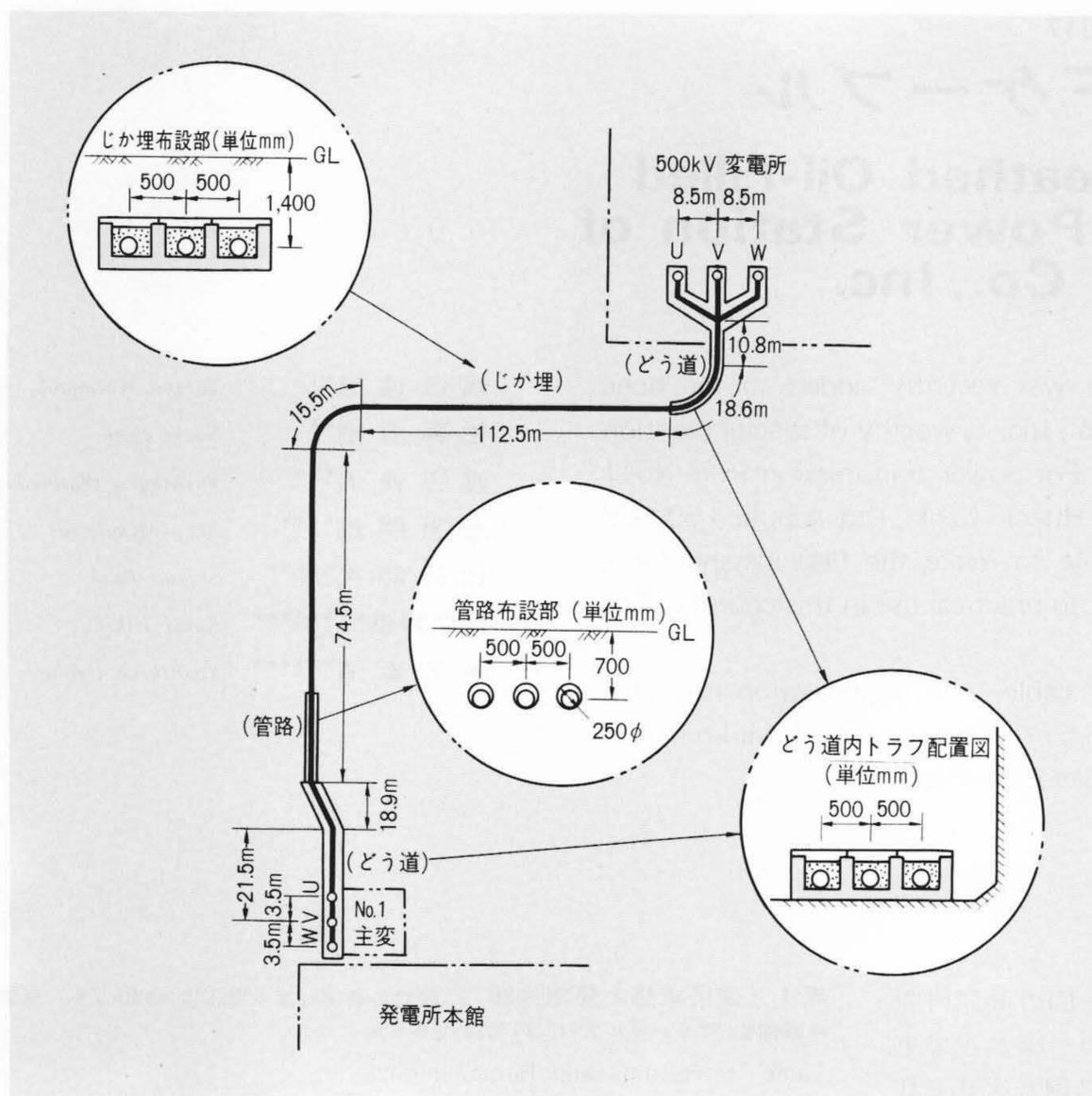


図1 500kV OFケーブル概略ルート図 布設ルートは全長300mで、両端がどう道、所内道路横断部は管路、その他はじか埋布設方式となっている。

Fig. 1 Outline of Cable Route

圧器(525kV/17.55kV, 680MVA)と変電所を結ぶ巨長約300mのルートに布設され、両端がどう道、所内道路横断部は管路、その他はコンクリートピット内じか埋布設方式が採用されている。臨海発電所のため塩害を考慮して、気中終端箱は他の開閉機器とともに屋内に収納されている。

3 絶縁設計

表1に示した耐電圧目標値及び常時最高使用電圧に対する絶縁厚と、導体上の最大電位傾度との関係は、図2に示すとおりである。インパルス及び交流長時間耐電圧試験においては、それぞれ110kV/mm及び40kV/mm以上の破壊強度が期待できるものとする絶縁厚は30mmで約10%の裕度を得られる。

本線路の所要インパルス強度は1,550kVに低減されているため、インパルス設計で絶縁厚を求めると従来のケーブルに比べて、常時使用電圧に対する電位傾度が高くなる。従って、本ケーブルの設計上常時の交流最大電位傾度を、どの程度まで許容するかがポイントになった。常時使用電圧に対する電位傾度は、モデルケーブルによる油浸紙の長期劣化試験結果からは20~25kV/mmの電位傾度までは使用可能とみなすことができるが⁽³⁾⁽⁴⁾、実用ケーブルの設計に際しては過去の実績に対する評価、あるいは実規模ケーブルの長期実証試験による確認が必要である。同社東東京変電所における実証試験では、導体温度80~105℃、最大電位傾度15~21kV/mmの範囲の加速劣化により、絶縁厚30mmの500kVケーブルが60℃ベース、7℃半減則換算で約40年間相当以上の寿命を有することが実証された。この結果より、従来の実績(275kVで10~13kV/mm)より高い15~16kV/mmの常時ストレスは十分に許容し得るものと判断される。

今回のケーブルは初回納入品であり、最高使用電圧550kVに対する最大電位傾度を15~16kV/mmに抑え得る33mmの絶縁厚を

採用することにより、インパルス及び交流長時間耐電圧特性に対しては裕度をもつ設計とした。

他方、絶縁紙の選定に際しては500kVケーブルに要求される低損失性能が許容する範囲で機械的特性の優れた紙を採用し、紙巻条件の吟味によってケーブルの耐電圧性能の向上を図った。

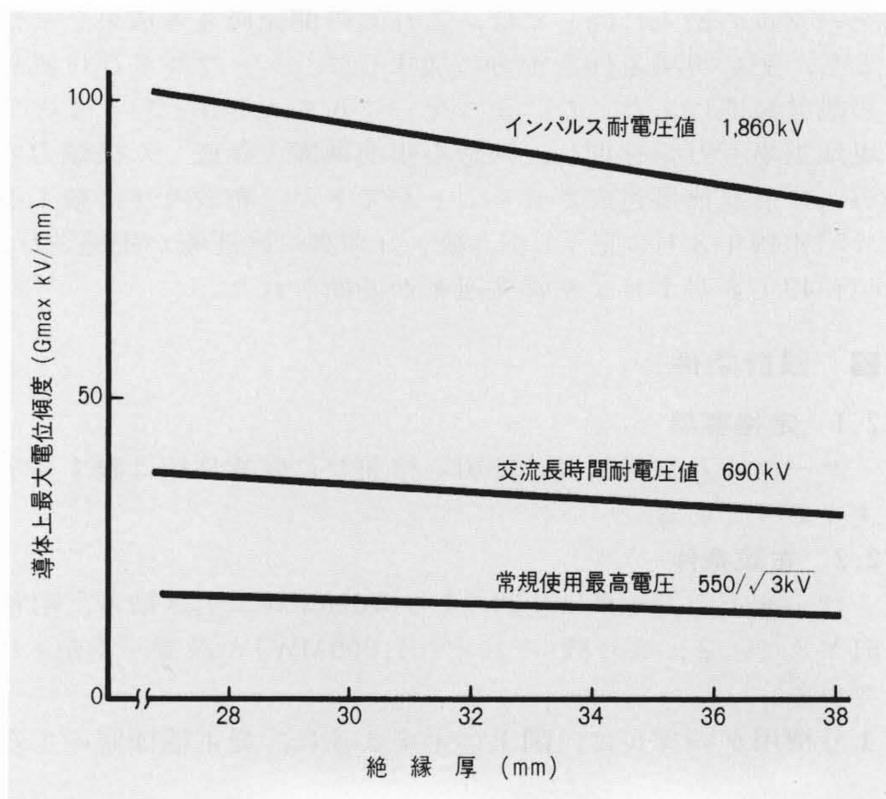


図2 絶縁厚と導体上最大電位傾度の関係 (500kV×1,200mm²OFケーブル) 絶縁厚33.0mmで常規使用最高電圧(550/√3 kV)における導体上最大電位傾度は15.5kV/mmとなる。

Fig. 2 Maximum Dielectric Stress Versus Insulation Thickness

4 ケーブルの仕様

表2は、前項3の絶縁設計に基づいたケーブルの構造を、図3は、完成ケーブルの外観を示すものである。

送電容量680MVAを確保するために必要な導体サイズとして、6分割銅導体1,200mm²を採用した。絶縁体は紙厚80~200μのグレーディング設計とし、紙巻張力の理論計算⁽⁵⁾結果と超高压ケーブル製造経験の両者を勘案した適正な紙巻条件の設定を行なうとともに製造環境の改善にも特別の配慮を払った。

表2 500kV アルミ被OFケーブル構造表 ケーブルは低損失紙及びアルキルベンゼン系合成油を使用したアルミ被OFケーブルである。

Table 2 Construction of the 500kV Corrugated Aluminium Sheathed Oil Filled Cable

項	目	単 位	数	値
油 通 路	内 径	mm		18.0
	厚 さ	mm		0.8
	外 径	mm		19.6
導 体	公 称 断 面 積	mm ²		1,200
	形 状	—		6分割圧縮円形
	バイнда巻き厚さ(約)	—		0.5
	外 径 (約)	mm		47.9
絶 縁 体 厚 さ		mm		33.0
しゃへい層巻き厚さ(約)		mm		0.3
銅線織込布テープ巻き厚さ(約)		mm		0.5
被アル ミ	厚 さ	mm		2.9
	山 径 (約)	mm		133.8
ビニル防食層厚さ		mm		5.5以上
概 算 外 径		mm		149
概 算 重 量		kg/km		32,900
最 大 導 体 抵 抗(20°C)		Ω/km		0.0151
最 大 静 電 容 量		μF/km		0.24
最 小 絶 縁 抵 抗(20°C)		MΩ-km		30,000

アルミ被は外径134mmと記録的サイズになるが、アルミプレス大形ダイボックスの導入とコルゲーション技術の拡張によって十分な可撓性を備えた大サイズアルミ被の被覆を行なった。半硬質ビニル防食層は外径及び重量の増加とシースサージ電圧の上昇を考慮して、275kV級ケーブルより1mm厚い5.5mmを最小厚さとして採用した。単長320mの納入ケーブルは、つば径4mの大形鉄ドラムに巻き取り、つりトレラによって日立~袖ヶ浦火力発電所間約200kmをおよそ7時間で輸送することができた。



図3 500kV 1×1,200mm²アルミ被OFケーブル ケーブルは外径149mm、重量32.9kg/mの超大形ケーブルである。

Fig. 3 500kV 1×1,200mm² Corrugated Aluminium Sheathed Oil Filled Cable

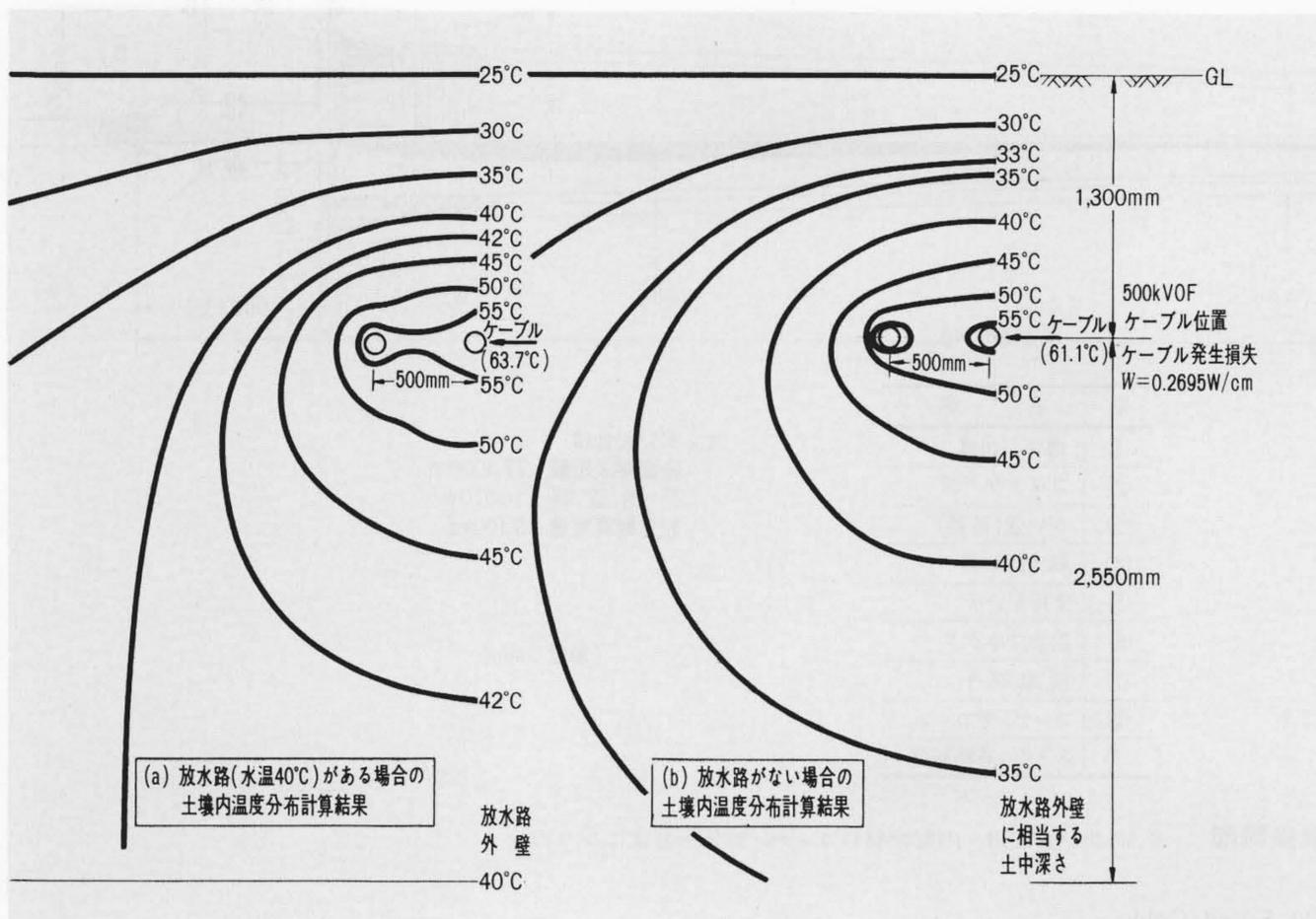


図4 放水路がある場合とない場合の土壌内温度分布計算結果 放水路によるケーブルへの熱的影響は約3°Cとなる。

Fig. 4 The Temperature Distribution of the Cable Field with or without Hot Outlet

5 ケーブルの許容電流

ケーブル布設ルートにはどう道、じか埋及び管路布設部分が含まれるほか、66kVケーブルの併設、ベース鉄筋の発熱、放水路との交さなどの影響についても検討を要した。

土壌固有熱抵抗は探針法による現地実測により、一般的な値 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ の適用が妥当であることが確認され、上記の諸条件を加味した許容電流計算において、所要送電容量790A (680MVA at 500kV) に対して5%以上の裕度が見込まれることが判明した。放水路交さ部の熱的影響に関してはケーブル及び放水路を含む土壌を多数のメッシュに分割し、地表面及び十分離れた個所の土壌温度(25°C)、あるいは放水路表面温度(40°C)を境界条件としてデジタル計算により土壌の温度分布を求めた。放水路有、無の場合について温度分布を比較すると図4に示すようになり、放水路の影響によるケーブル部温度上昇は約 3°C であることが分かった。

6 ケーブルの性能

ケーブルの性能は表1の要求値を十分満足するものであった。なおケーブルの工場試験結果を要約すると次のとおりである。

- (1) わく長試験で得られたC.R値(静電容量×絶縁抵抗)は $12,000\sim 13,000\Omega\text{F}$ と良好な値である。
- (2) 等価誘電率は平均3.34で絶縁材料の特性がそのまま反映されている。
- (3) わく長試験における誘電正接は測定電圧288~420kVの範囲で0.198~0.209%と安定した電圧特性を示した。試料試験による誘電正接温度電圧特性は図5に示すとおりである。
- (4) 交流長時間耐電圧は、690kV/6h耐圧後30kV/3hステップで昇圧し、900kV/3h非破壊であった。

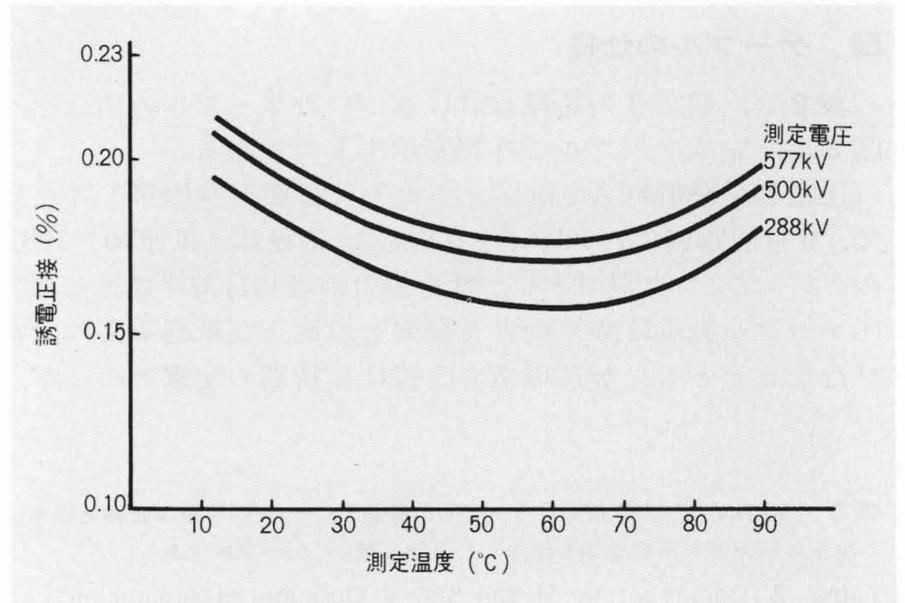


図5 誘電正接温度電圧特性試験結果 誘電正接は温度、電圧特性とも安定した結果である。

Fig. 5 Results of Dielectric Power Factor / Temperature Test

- (5) インパルス耐電圧は1,860kV/3回耐圧後、30kV/3回ステップで昇圧し、2,340kV/2回で油中終端箱で破壊に至った。
- (6) 曲げ試験は、アルミ被平均外径の15~25倍径に対して行なわれた。この結果より20倍の曲げ径までは十分許容できることが明らかになった。
- (7) 総合的にケーブルの試験結果は設計段階で予想したとおりの諸性能を示し、特に耐電圧面で規格値に対して十分な裕度が得られた。

7 終端接続部の設計

7.1 気中終端箱

気中終端箱は塩害を考慮して屋内変電所内に設置され、6.5

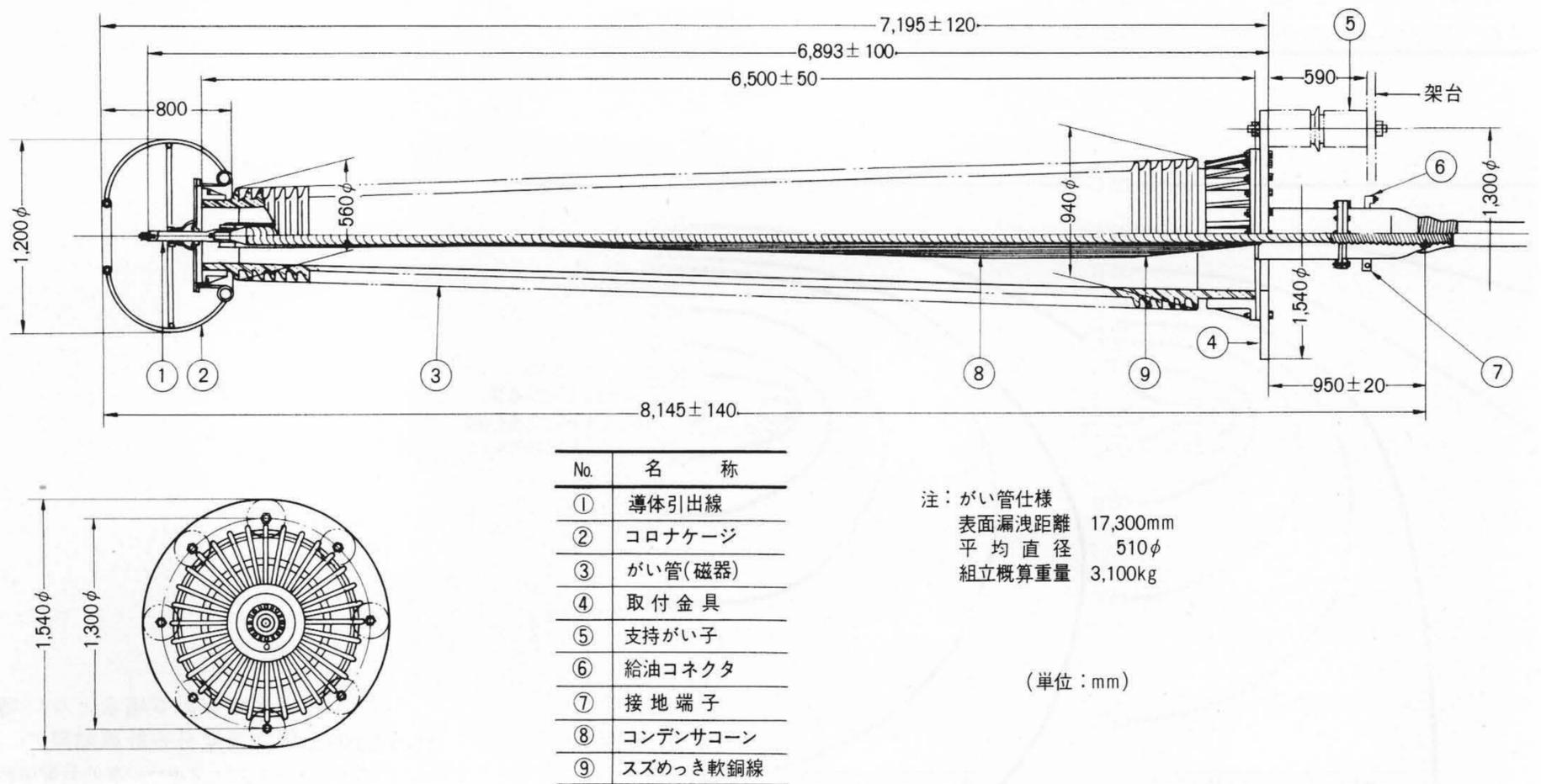


図6 500kV OFケーブル用気中終端接続部 6.5mがい管使用、内部絶縁はコンデンサ分圧方式により行なわれている。

Fig. 6 Indoor Pothead for 500kV Oil Filled Cable

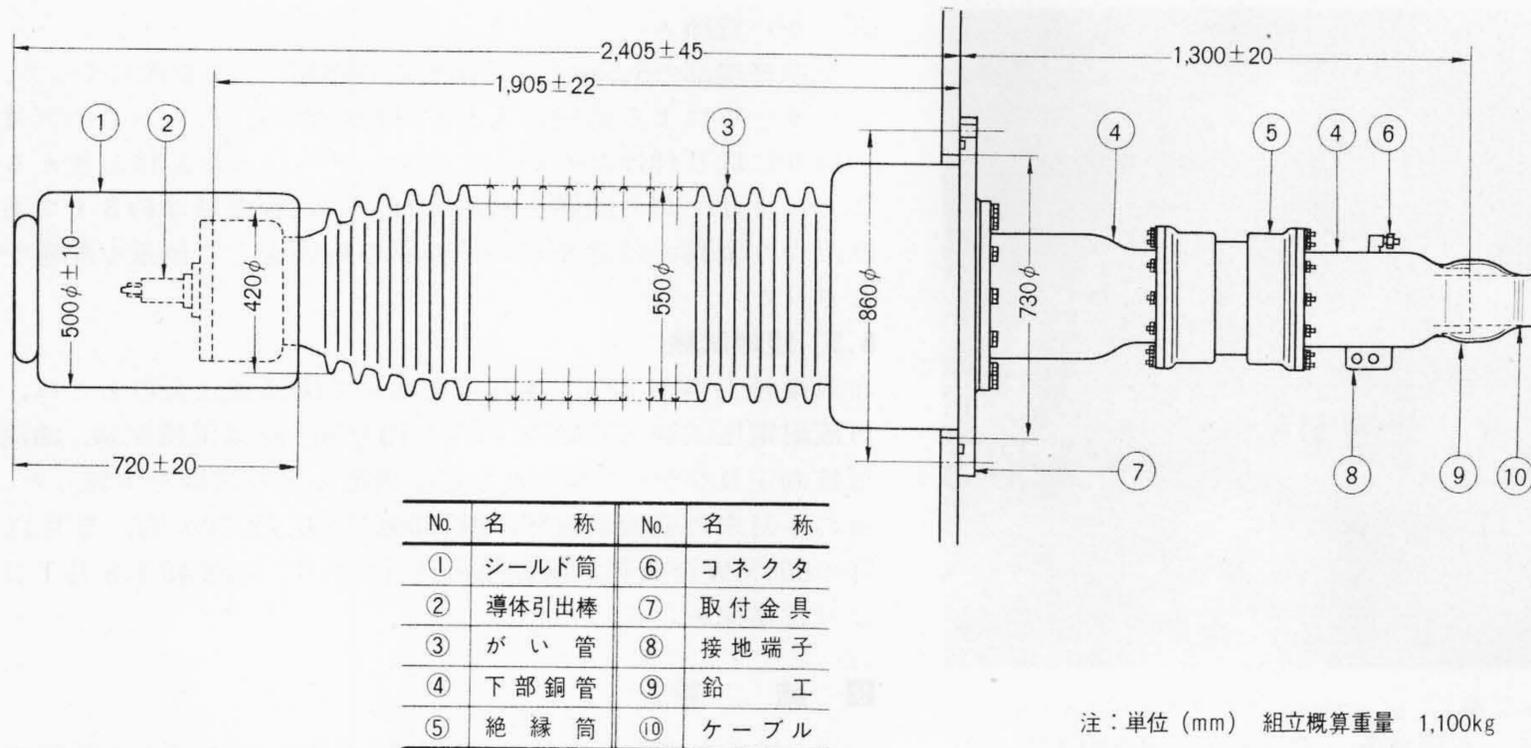


図7 500kV単心OFケーブル用油中終端接続部 内部絶縁はコンデンサ分圧方式により行なわれている。
Fig. 7 Oil Immersed Pothead for 500kV Oil Filled Cable

mがい管が採用された。このがい管は屋内機器の設計汚損度 $0.02\text{mg}/\text{cm}^2$ において500kV系統の耐汚損設計目標電圧364kV ($500\text{kV}/\sqrt{3} \times 1.15$) に十分耐え得る設計となっている。

電気的要求からがい管が長くなると下部外径が増大するが、肉厚には限界があるため内圧許容値を高くすることができない。その対策としては、ガラス繊維強化プラスチック(FRP)製内圧補強筒の使用が考えられるが、今回のものについては油圧をがい管の許容値 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下に抑えるよう、給油設計面で配慮した。

がい管の耐震強度は、長大がい管であることから地震波に対する共振をも考慮した設計がなされている。電線5社で構成された500kV Bushing Working Groupで、6.5mがい管と全長以外は全く同寸法の、いわゆる8mがい管を使用して耐震実験を実施しており、水平震度0.3Gの地震が3波継続しても耐え得ることが確認されている。

内部絶縁補強は、従来の275kV以下の終端箱に実績があり、且つ東京変電所における実証試験で性能が確認されているコンデンサ分圧方式が採用された。

図6は、気中終端箱の構造を示すものである。

7.2 油中終端箱

油中終端箱の構造は図7に示すとおりである。

内部絶縁補強は、気中終端箱と同様コンデンサ分圧方式が採用された。エレファント ケース内径は、交流試験電圧における頭部シールド筒上ストレスが、従来の275kV以下の終端箱と同程度となるよう選ばれ、1,500mmとされた。

油中終端部は、変圧器本体からの熱伝達などを考慮すると、ケース内油温が 60°C 程度まで上昇することが予測されるが、半径方向及び長さ方向への熱伝達を考慮し、デジタル計算で導体温度上昇を求めた結果、油温 60°C の場合にジョイント中央部の最高導体温度は 74°C となり、許容温度 80°C に対し十分な裕度があることが分かった。

8 現地布設工事及び試験

8.1 延線

ケーブルの延線は気中終端部から変圧器側に向かって行なわれた。ルートは変電所側どう道部、じか埋布設部、道路横断管路部及び変圧器側どう道部から成り、水平直角曲り2箇所と両端の立上り垂直曲りを含む構成となっている。

外径150mm、重量33kg/mの大形ケーブルであるため、図8に示すように電動式、又は油圧式キャタピラ6台、電動ローラ7台を(総合力約4,200kg)分散配置して、同期駆動による完全な機械延線方式を採用した。

延線中のケーブル保護対策としては、次に述べる点が挙げられる。

- (1) 開閉所側どう道入口に3mRの二つ割りベンドパイプを装着してケーブルを導入。(2)曲り部にはアルミ製ベアリング入りシーブころを使用。(3)全長にわたり布設レベルを極力水平に保つよう機器の据付けを調整。(4)キャタピラの適正把持力の基準設定。(5)延線中の外径変化、ねじれ角測定管理。

8.2 接続

(1) ケーブルの切断

ケーブルの切断工法として、銅、アルミニウムの切粉が端末部より混入することを防ぐため、エンドミル(18mmφ)をケーブル周囲に回転させる切削機を開発した。また本機をケーブルに沿って上下させることよりアルミシースはく離作業にも威力を発揮した。



図8 ケーブル布設 ケーブル布設には、電動又は油圧式キャタピラ6台及び電動ローラ7台を分散配置して、同期駆動による完全な機械延長方式を採用した。
Fig. 8 Cable Laying

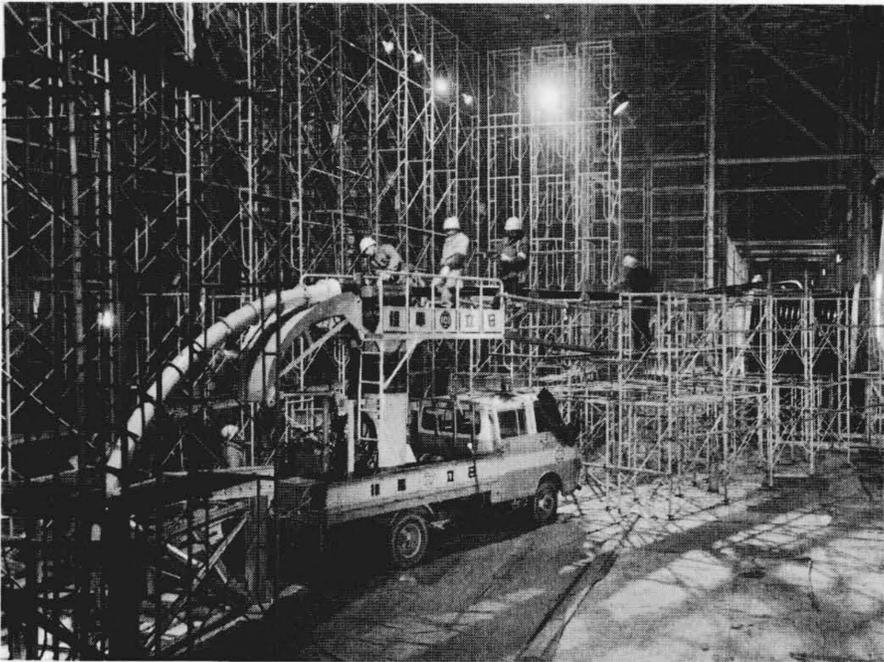


図9 ケーブル引入れ工事 ケーブルは、開閉所側より引き入れた。引入れ口には3mRのベンドパイプを使用し、引入れ口での過小曲りを防止した。
Fig. 9 Cable Pulling

(2) 作業環境

ケーブルの接続作業性及び安全の確保を十分考慮のうえ、気中側はビティ式わく組立足場で三相一括形とし、変圧器には各相独立にパイプ組立足場を形成し、高所作業に対処した。作業時は周囲をシートでしゃへいし塵埃の侵入を防止するとともに、空調により相対湿度を調整した作業環境のもとで行なった。

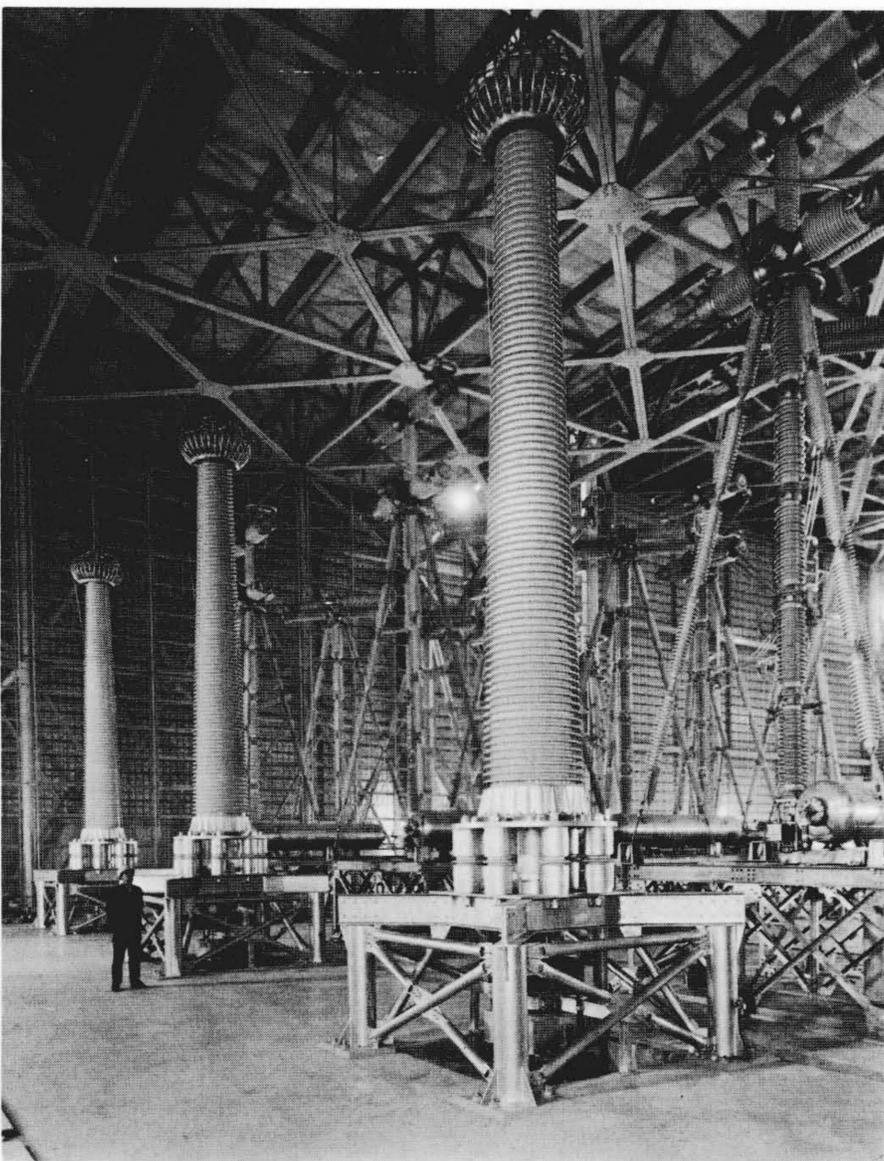


図10 気中終端箱完成状況 屋内開閉所に設置されるため、汚損度 0.02 mg/cm^2 を想定し、6.5mがい管を使用した。
Fig. 10 Indoor Potheads

(3) がい管挿入

気中終端部の6.5mがい管は変電所建屋の高さ制限によって、レッカー車による直接挿入が不可能のため、あらかじめ天井のほりに取り付けたチェーンブロックへいったん移し替えることにより、この問題を解決した。がい管重量は約3tであり、つり金具の設計やがい子表面の防護などに慎重な配慮がなされた。

8.3 現地試験

布設接続工事完了後、3月末現地にて関係者立会のもとに、直流耐電圧試験($550\text{kV} \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$)10分間、絶縁抵抗試験、油流抵抗測定及びケーブルのガス定数測定などの試験を実施した。更に4月末の交流耐電圧試験($550\text{kV} \times 0.72$)10分間、5月以降の600MW全負荷試験結果も良好であり、昭和49年8月1日より営業運転に入った。

9 結 言

袖ヶ浦火力発電所1号機用500kV OFケーブル工事を完遂できたことは、国内のみならず世界的にみても超々高圧ケーブル実用化の第一歩を踏み出したという点で非常に意義深いものである。その技術的内容を要約すると次のとおりである。

- (1) 東京変電所における共同研究にて500kV OFケーブルの信頼性が実証されていたことにより、実用化にあたってはなんら不安もなく行なうことができた。
- (2) 絶縁体厚33mmを採用し、特に耐電圧性能面で裕度をもったケーブル性能が得られた。
- (3) 外径約150mmという超大形ケーブルであるが、波付アルミ被の適用によって機械的にも高い信頼性を確保することができた。
- (4) 導体サイズ $1,200\text{mm}^2$ を選定することにより、所要送電容量680MVAが十分確保できた。
- (5) 6.5m気中終端部及び変圧器直結終部の内部絶縁補強にはともにコンデンサ分圧方式を採用した。
- (6) 全長300mの布設には機械力を駆使した延線方式を採用し、大形化に対処した周到な工事計画と、新規工具及び工法の開発によって無事工事を完了した。

今回の実線路建設によって得られた経験と技術とが今後の500kVケーブル使用計画に対しても、大いに活用されることを期待すると同時に、今後の課題であるケーブルの大サイズ化及び強制冷却の適用など、大容量化に対処する新技術の開発への努力を積み重ねて行きたい。最後に本計画の遂行のために、種々御指導、御援助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深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 渡辺、沼尻ほか「500kV OFケーブルおよび付属品の開発」日立評論 54, 355 (昭47-4)
- (2) 渡辺、岡ほか「500kV OFケーブル管路直接水冷実証試験」日立評論 55, 1085 (昭48-11)
- (3) 遠藤、岡「超高压OFケーブル用絶縁体の高電界長期劣化安定性」、昭44電学会東京支部大会 No. 112
- (4) G.M.LanfranchiほかIEEE T74, 202-8 "Self-Contained Oil-filled Cable for Highpower Transmisson in the 750~1,200kV Range" (Jan/Feb/1974)
- (5) P.Gazzanaほか"Fundamentals of the theory of paper lapping of a single core high voltage cable" Pirell S.P.A (1961)