

トリニダード・トバゴ電気局納め 長亘長33kV高ガス圧海底ケーブルの布設 Laying of the 33kV High Pressure Gas Filled Submarine Cable to Trinidad and Tobago

Hitachi completed recently the laying of an AC 33 kV high pressure gas filled type submarine cable between Trinidad and Tobago for a noteworthy long distance of 45 km.

In accomplishing this unusually long distance high pressure submarine cable installation Hitachi developed several new products and engineering techniques including a new 3-core flexible joint, method of cable laying on the deep sea bed, etc.

沢 孝雄* Takao Sawa
阿部 保* Tamotsu Abe

1 緒 言

日立電線株式会社は、トリニダード・トバゴ電気局と西インド諸島南端に位置するトリニダード島とトバゴ島を連係する33kV 3心100mm²高ガス圧海底ケーブル45.6kmの製造および布設納入の契約を結び、昭和47年10月無事その引渡しを完了した。

本海底ケーブルは、交流としては世界で最も長いものでトリニダード島とトバゴ島間に布設されたが、亘長（こうちよう）45km、最大水深102mという条件から、わが国では初めての高ガス圧海底ケーブルが選ばれた。

ケーブルはその絶縁性能およびガス伝播（でんば）特性の点より、前含浸紙を絶縁体に使用した。また水深の点よりねじれを考慮して3.26mmφ鉄線がい装が施された。また、長条長のために16個所に可撓（かとう）接続がなされた。このため事前に十分な電氣的、機械的強度の検討が行なわれた。

一方、長亘長かつ深海に対する布設を安全に行なうため、わが国では初めての油圧式キャプスタン形ブレーキ装置をはじめ多数のコントロール機器が開発され使用された。船の誘導には、ショランを主体とする電波測位法を採用し成功した。

布設は現地の海象が最も良い9月中旬に行なわれた。航行時間6～8時間という長時間を予想して、二重、三重の安全対策を準備して臨んだため、布設途中からの天候悪化という困難な状況にもかかわらず無事予定どおり布設を完了した。

ケーブルは陸上1個所の直線接続と両端にケーブルヘッドを施した後、17.6kg/cm²のガス耐圧テストおよび電気試験に合格し、無事に引渡しを完了した。本系統は急速に開発されているトバゴ島への電力供給源として、今後活躍する予定である。

2 海底調査

今回布設されたルートは図1に示すとおりトリニダード島のトコ湾からトバゴ島のミルフォード湾に至るものでルート長は45kmであった。同区間の海底調査は顧客であるトリニダード・トバゴ電気局の手により約8年前に実施され、ある程

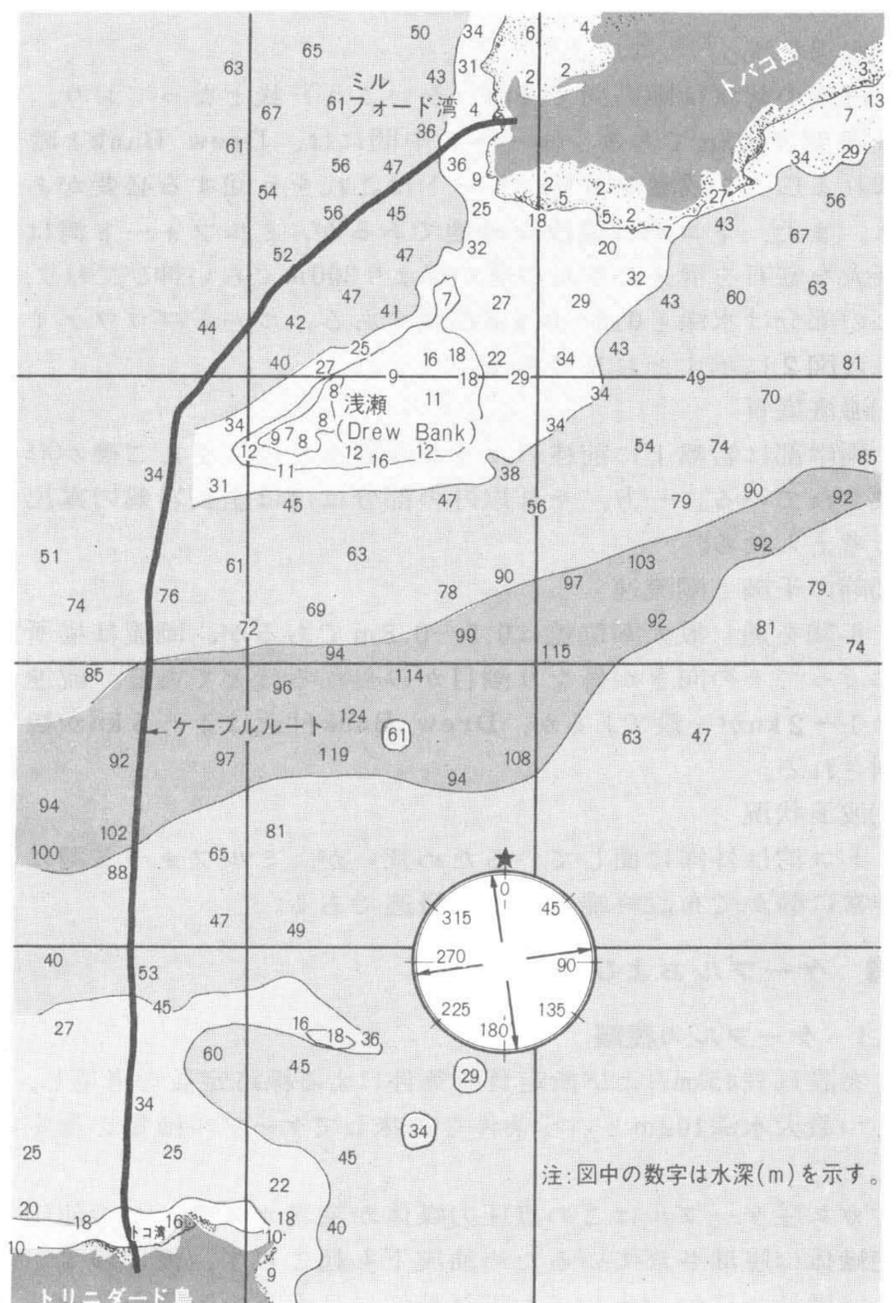


図1 ケーブル布設ルート図 トリニダード島とトバゴ島間33kV 3心海底HPGFケーブルの布設ルートを示し、布設亘長は45kmである。

Fig. 1 Trinidad-Tobago Island Interconnection Route

*日立電線株式会社日高工場

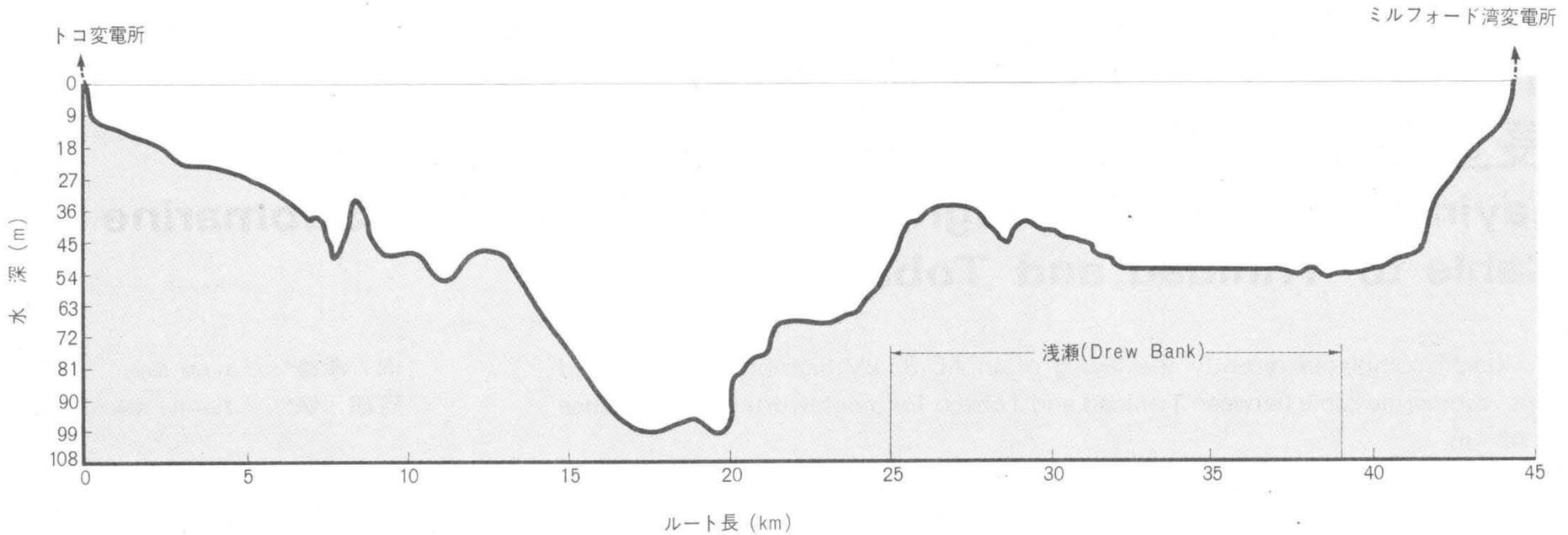


図2 ルートプロファイル ルート中、最大水深は102mで、海底質はほとんど全長が岩礁および砂地帯である。また、潮位差は約1mで流速は最大4～5knである。

Fig. 2 Profile of Route

度の状況がわかっていたが予定ルートについて、昭和47年1月詳細な調査を行なった。長亘長のため測位は両島の見通しの良い場所に発信局を設け、ショラン電波測位器を使用した。この調査結果は次のとおりである。

(1)水深状況

海底の起状は両島間で海溝(かいこう)状となっており、最深部は102mである。ルートの中には、Drew Bankと呼ばれる広大な浅瀬があり、ルートはこれをう回する必要がある。また、トコ湾は遠浅な砂地であるが、ミルフォード湾は巨大な転石を混えたさんご礁が岸より300mぐらい伸びており、この部分は水深も0.2～0.5m程度である。ルートプロファイルは図2に示すとおりである。

(2)海底底質

両岸部は岩盤上に前述のような砂層または、さんご礁が形成されている。一方、それ以外の部分はほぼ全長岩盤の露出と考えられる。

(3)潮の干満と潮流速

年間を通じ最大潮位差は0.5～0.8mであるが、潮流は場所によってその向きが異なり潮目がみられるほどである。流速は1～2knが一般であるが、Drew Bank付近は4～5knが観測される。

(4)波浪状況

トコ湾は外洋に面しているため荒いが、ミルフォード湾は非常に静かで布設終端としては最適である。

3 ケーブルおよび付属品

3.1 ケーブルの種類

布設亘長45kmおよび指定負荷条件による線路定数を考慮し、かつ最大水深102mという条件を加味してケーブル種類を選定した。

ガス圧ケーブルはこの点圧力媒体が窒素ガスで、かつ使用絶縁体は脱油されているため油流下も起こらず、仮にわずかの絶縁油の移動が生じてても電気特性には大きな影響を及ぼさず海底ケーブルに適している。また、高ガス圧ケーブル(使用ガス圧14.0kg/cm²)にすることによりイオン化開始電圧が上昇し、絶縁体厚さを薄くすることができ経済的である。また、外水圧を軽減できるとともに万一の事故時にもケーブル中への海水の浸入を緩和させることができる。

以上により今回のルート条件においては、GFケーブルまたはOFケーブルが考えられるがOFケーブルでは給油上の問題があり、またソリッドケーブルでは経済的でなかった。以上の理由により高ガス圧ケーブルを採用し、油流下およびガス圧伝播を考慮し、油浸材料にはすべて前含浸方式を採用した。

3.2 前含浸処理

高ガス圧ケーブルは原理的には油浸紙絶縁体に直接約14kg/cm²(ゲージ圧)の窒素ガス圧力を印加して、絶縁体中のボイドのイオン化開始電圧を高めたものである。油浸紙絶縁体の種類としては全含浸(Mass-Impregnate)されたものと前含浸(Pre-Impregnate)されたものとがあり、その製造法には大きな差がある。すなわち、全含浸はケーブル導体上に絶縁紙(乾紙)を巻き、乾燥後、含浸処理を施し金属シースを被覆させるものである。一方、今回採用した前含浸はあらかじめ乾燥含浸処理した絶縁紙を導体上に巻き、直接金属

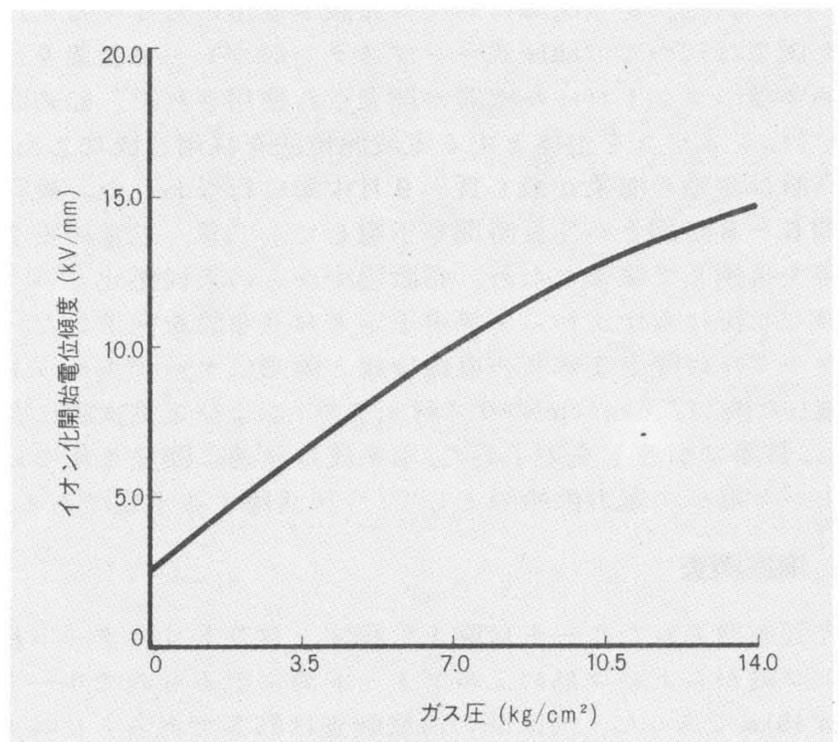


図3 イオン化開始電位傾度とガス圧との関係 イオン化開始電位傾度は、常時使用電圧に対し約2.3倍、常時使用ガス圧に対し約3.8倍となっている。

Fig. 3 Variation in Ionisation Inception Voltage with Gas Pressure

シースを被覆するので、ケーブルコアとしての乾燥作業がなく、1条あたりのケーブル条長を長くすることができる。

また高ガス圧ケーブルは、低ガス圧ケーブルで見られる自己回復作用は、いままでの実験結果よりほとんど期待できないので、ガス圧上昇によるイオン化開始電圧の上昇を最大限に利用することになる。この点よりケーブル内のガス伝播を良くするため、ケーブル内の余剰油および含浸油の一部を完全に脱油する必要があり、特に今回海底ケーブルである点より前含浸方式が有効な製法であった。前含浸処理については製造法もさることながら、含浸油の選定がその処理状況を大きく左右する、含浸脱油特性および電気特性を十分検討し、含浸油として低融点高粘度油を使用した。また製造時の水分（吸湿）には特に配慮し、十分な管理のもとで製造した。なお完成ケーブルにおけるガス圧とイオン化開始電圧との関係は図3に示すとおりである。

3.3 ケーブルの構造と試験

種々、検討の結果、最終的なケーブル構造は表1に、ケーブルの外観は図4に示すようになった。

導体サイズは送電容量10MW ($p \cdot f = 0.95$) で受電端電圧降下率を10%以下に押える点より、3心100mm²と決定した。ケーブル構造は外水圧に十分耐えるように配慮し、かつ内圧補強層は従来の円周方向の補強（横補強）に軸方向の補強（縦補強）を加えた補強層とした。

ケーブル長45kmのケーブルはビニル防食層まで17条に分けて製造し、可撓接続を介して接続後、がい装を施すことにした。なお、がい装鉄線は既設ケーブルの損耗状況および深海ケーブルにつき布設中のねじれおよびキック防止を第一とし、3.26mmφ亜鉛めっき鉄線（引張り強さ34.7~51.0kg/mm²）を使用した。納入品の製造に先だて、可撓接続部の試作を数回くり返し行ない、引き続き総合的な性能確認のため、可撓接続部5個を含む220mのテストケーブルを製造し、IEC（国際電気標準会議）の「海底ケーブルの機械的試験に関する推奨案」に従い、実際の布設条件を模擬した大規模なコイル取り試験を行なった。また実際の布設時のブレイキおよび

表1 33kV 3心海底HPGFケーブルの構造表 前含浸油浸紙を使用した高ガス圧ケーブルで、内圧補強層には円周方向、軸方向の補強を施している。

Table 1 Construction of the 33kV High Pressure Gas Filled Submarine Cable

項	目	単位	数	値
導体	公称断面積	mm ²	100	(0.155SQIN)
	形状	—		圧縮円形
	外径	mm	12.0	
有効絶縁体厚さ		mm	* 最小3.31以上	
しゃへい層巻き厚さ		mm	0.25	
ガス通路(内径)		mm	8.3	
より合せ径(約)		mm	44.3	
銅線入金幅巻き厚さ(約)		mm	0.5	
鉛被厚さ		mm	最小2.54以上	
補強層巻き厚さ(約)		mm	1.0	
ビニル防食層厚さ(約)		mm	最小2.65以上	
防虫層巻き厚さ(約)		mm	0.2	
ジュート巻き厚さ(約)		mm	2.0	
亜鉛めっき鉄線		mm×本	3.26×60	
ジュート巻き厚さ(約)		mm	3.0	
概算外径		mm	80	
概算重量	気中	kg/m	17.8	
	海中		13.0	

注：* 絶縁体厚さにはカーボン紙厚さを含まない。

シープなどの部分で受ける側圧(最大3 t/m)を模擬した圧壊試験も同時に行なった。テスト後のケーブルについては一連の電気試験を実施し、十分な性能を有していることを確認した。

ケーブルの窒素ガス封入は鉛シース被覆時に封入し、ケーブル補強層を施した後、ガス圧15kg/cm²、24時間のガスリーク試験を実施し異常のないことを確認した。さらに可撓接続により全長45km1条にした後、ガス圧18kg/cm²、24時間の内圧試験を実施した。なおガス封入に際しては窒素ガスの露点管理および鉛シースの伸び、ケーブル含浸油の移動などを考慮し、ガス圧の昇圧、降圧を事前に十分検討を加えて実施し、全長45kmをガス圧18kg/cm²に昇圧するのに連続で2.5日を要した。またケーブルの輸送時、布設時のガス圧は約2.0kg/cm²とした。

完成ケーブルは構造、曲げ、AC長時間耐圧、インパルス破壊および防食層耐電圧の各試験を実施し、良好な結果を得た。また、出荷ケーブル全長にてDC66kV/15minの耐電圧およびDC5kV/1minの防食層耐電圧を実施した。

3.4 付属品の概要

ケーブルの付属品として今回納入したおもなものは、終端接続箱、陸上部直線接続箱、事故時補修用接続箱、給ガス装置およびガス圧警報装置である。これらの特徴は次のとおりである。

(1) 接続箱

ケーブルの接続部としては電氣的な設計のほか高ガス圧に対するシールをいかにするかという点が最も重要であった。そこで鉛工部が外表面からの圧力に対しては強い特徴を利用し、ケーブル鉛被と接続箱との鉛工を接続箱内に入れる、いわゆる内部鉛工方式を採用することにした。また、接続箱内外のシールはOリングパッキンを二重に入れたダブルパッキン方式を採り入れてシールの問題を解決した。なおケーブルよりガスリークを起こした際、防食層を保護する工夫も接続部の設計に採り入れた。

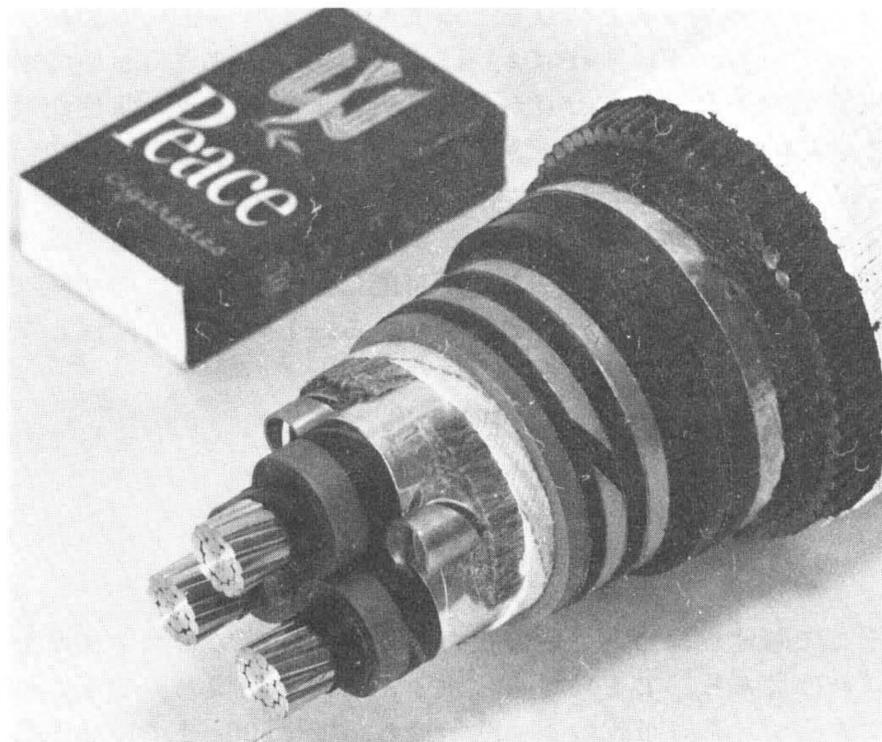
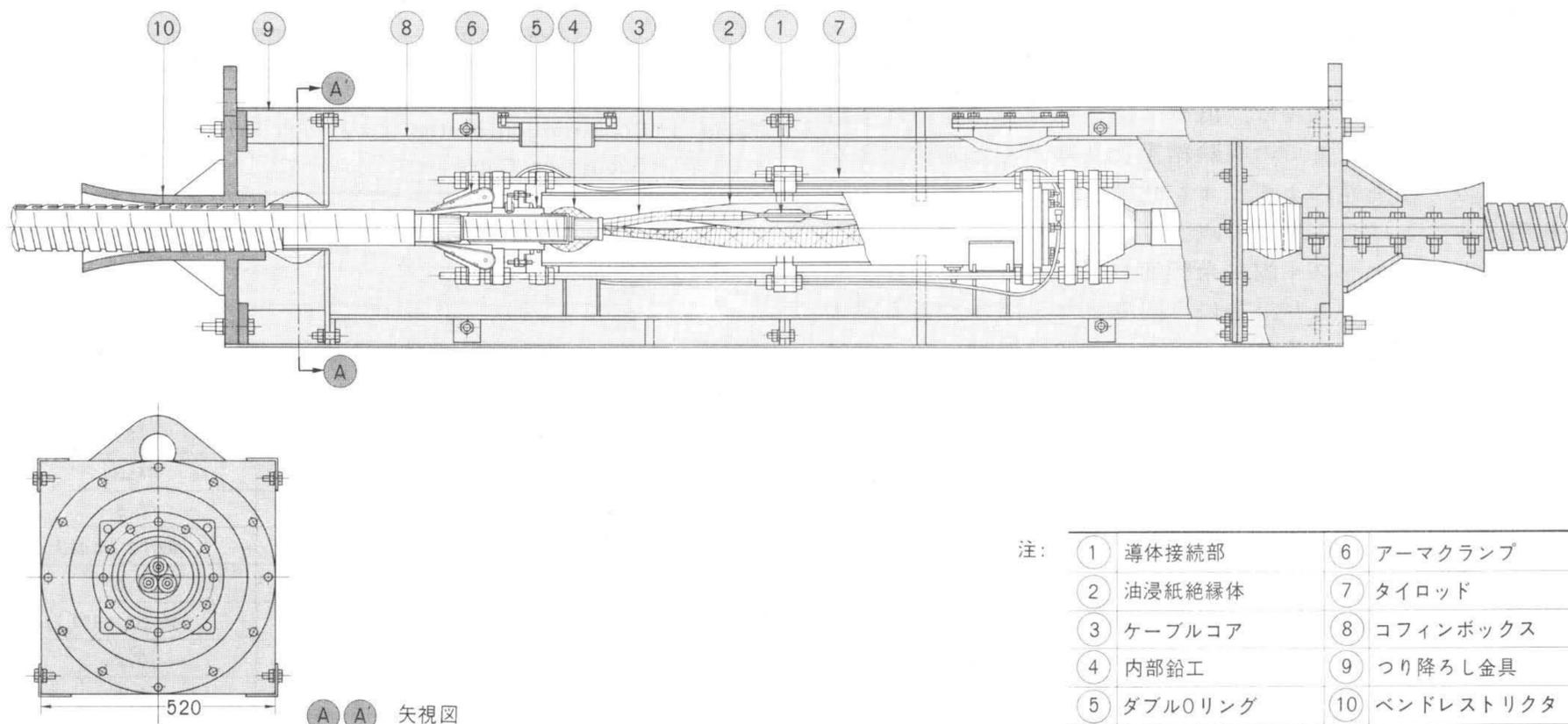


図4 33kV海底HPGFケーブル 納入ケーブルはケーブル長45km、総重量約800tである。

Fig. 4 33kV High Pressure Gas Filled Submarine Cable



注:

1	導体接続部	6	アーマクランプ
2	油浸紙絶縁体	7	タイロッド
3	ケーブルコア	8	コフィンボックス
4	内部鉛工	9	つり降ろし金具
5	ダブルOリング	10	ベンドレストリクタ

図5 事故時補修用接続箱 深海につり降ろす際の機械的強度の点および接続箱の防食方法で特殊構造となっており、さらにケーブルの過小屈曲を避けるため、らせん管構造のベンドレストリクタを装着した。

Fig. 5 Submarine Repair Joint

事故時の補修用接続箱としては深海につり降ろす際の機械的強度の点および接続箱の防食の方法が検討された。さらに隣接するケーブルの過小屈曲を避けるため、らせん管構造のベンドレストリクタを開発し装着させた。接続箱の設計概要は図5に示すとおりである。

(2) 給ガス装置

ケーブル内のガス圧は常時14.1kg/cm²で運転されるが、ガス圧の低下時に自動給ガスできるように給ガス装置が納入された。本装置はプレッシャレギュレータ、レリーフバルブ、接点付圧力計などより成り、一定圧力まで給ガスが進むと警報を発するようになっている。ガス量はケーブル両端末に5本ずつの窒素ガスポンペを接続し、そのうち3本は常時給ガスできるようにし、残り2本ずつのポンペは系統の圧力が第一次警報点に達してから給ガスできるよう配慮された。

4 工法の検討

今回の長巨長で水深100m以上というルート条件での布設は電力ケーブルではわが国で初めての経験となるため、工法についても十分な事前検討が必要となり新工法、新設備の開発が行なわれた。

4.1 ルートの決定

海底調査のデータを検討した結果、

- (1) ルートは極力直線とする。
- (2) 浅瀬(Drew Bank)の西側をう回する。
- (3) 両湾内では布設船を岸から500m以内に接近できるようにする。

ことを条件に図1に示すルートが決定された。またルート平面長に対するスラック長は4%にすることが決まった。

4.2 布設船の選定とぎ装

わが国から現地まで就航する船としては一般的には通常6,000~10,000ton級であるが、作業の特殊性から極力小形船が良いこと、また新開発したキャプスタン形ブレーキ装置を船尾に設置できるスペースがあること、ホールドが十分広いことなどの条件により最終的に繁王丸(3,500ton)が選定された。

ケーブルコイルは幅11m、長さ13m、高さ3.6mの長円筒状とし太平洋、カリブ海の荒波にも荷くずれしないよう十分な強度の鋼材によるラッシングを行なうことにした。

ぎ装については強度を有しながら作業性の良いものということで軽量形鋼を使い組立ても容易であるよう配慮した。なおコイル立上り上部シーブは、ケーブル上11m高さとした。

ブレーキ装置はキャプスタン形を主機とし、その前段に予備として松丸太製でこブレーキ6丁を付けた。各種の自動制御器、計測器はすべて布設船のブリッジに集中させた。また船尾シーブは側圧の点から半径2mとした。

4.3 張力制御とブレーキ装置

深海にケーブルを布設する際、最も重要なことはキंकをさせずにケーブルを降ろすことである。このキंकはケーブルのねじれにより誘発されるものであるから、カテナリ形状をとるケーブルのどの点をとってもケーブル内部に張力がかかっているようにすればよい。すなわち、着地点においての内部張力がちょうどゼロから若干大きくなるような状態が最も理想的であり、このときの入水角を臨界入水角と呼んでいる。しかし実際の布設では海底面に起状があること、波浪による船の上下動、潮流によるケーブルの移動、その他の条件により臨界状態にすることは不可能に近く、もしこの状態がくずれるとキंकを起こす危険もある。したがって、適正ブレーキ力は次式で求めることになる。

$$T = WH + T_0$$

ただし、

- W : ケーブル水中重量
- H : 水深
- T₀ : 残留張力

そこで着地点において残留張力T₀がある状態で布設すればよいわけである。T₀をいくりにするかは種々論議のあるところであるが、深海布設の多い欧米においては500~1,000kg程度が採られているようである。T₀があまり大きいとブリッジオーバを助長するので、今回は測深図を基に起状の幅と深さを考慮して4段階に分け、最深部でT₀=1,000kgとなるよう事前

にチャートを作成し、これにより各位置での張力を船上のブレーキ装置によりコントロールするようにした。なお、入水角も船速に合わせて計算し、臨界入水角以下であることを確認できるようにした。このように重要なコントロール装置としてのブレーキ装置については、従来わが国においては木製でブレーキが主流をなしている。しかし、今回のような長巨長で連続運転時間が6～8時間に及ぶ場合には使用に耐えない。そこで欧米の例などを参考に検討を進めた結果、動力源としては無段変速ができ、かつ停止時にも力を維持できる油圧ポンプ式を採用することにした。また、ケーブル把持(はじ)装置としては長時間運転に機械的信頼性のないキャタピラ形をやめ、わが国では初めてのキャプスタン形を採用した。本装置の仕様は表2に示すとおりであるが、陸揚げ時の送り出し、既設ケーブル引揚げ時の逆回転などもできるよ

表2 油圧式キャプスタン形ブレーキ装置の仕様 本ブレーキ装置は油圧を利用したキャプスタン形ブレーキで、ケーブル陸揚げ時の送り出しおよび逆回転運転も可能である。

Table 2 Specification of the Oil Motor Drive Capstan Type Brake Unit

項 目	仕 様
最大ブレーキ力	3,500kg
使用速度範囲	0～150m/minの線速
キャプスタン径	3m
動力伝達機構	特殊鋼によるチェーン
線寄せ機構	リング式(逆転時用とも2枚装備)
操 作	手動バルブおよび遠隔電動操作
冷 却	300ℓ/min程度の海水
張 力 測 定	トルクメータ式

にした。本装置は油圧系統とキャプスタンとの間に電磁クラッチによる切離し装置を入れ、故障に備えるとともに2段のディスクブレーキを装備した。さらに第3段として前述の木製でブレーキを準備し、故障に備えたバックアップ装置を整えた。ケーブルにかかる張力は、ブレーキ装置より取り出して検出するようにした。図6はブレーキ装置を示したものである。

4.4 電波測位

従来、短巨長の場合やルート中間近くに目標物、たとえば陸地、灯台、ブイなどがある場合には、六分儀測角、トランシット誘導などにより布設船の位置測量が行なわれた。しかし本ルートは巨長が45kmもあり、出発側のトコ湾から到着側のミルフォード湾を望むことができない状態であり、布設途中で雨、霧などにより見通しがきかなくなることも考えられた。そこで電波測位方式を採用することにした。使用機器としてはアメリカで広く使われているショランを採用した。本器は両島の見通しの良い位置に発信器をおき、布設船上に受信器をおいて両発信地からの距離を円座標で表わし、その交点から受信地の位置を求めるもので、その精度は±15～23mと今回のスケールからみて十分高精度である。海底調査の際本器を試験的に使用したが、十分使用できる確信が得られたため、本布設の際にも使用することが決定された。なおショラン故障時の場合を想定し、布設船のレーダを使用することも考慮した。この場合には距離にもよるが、今回の場合300m以内の誤差が予想された。さらに水深の深い所を除きルートマーカブイを入れて2段めの安全策とした。

5 布設工事

製造されたケーブルは昭和47年7月28日～31日にわたり「繁王丸」に積み込まれ現地に向け送られた。現地近くのポートオブスペイン港には9月6日に入港し、直ちにぎ装が開始されるとともに布設準備作業が行なわれた。

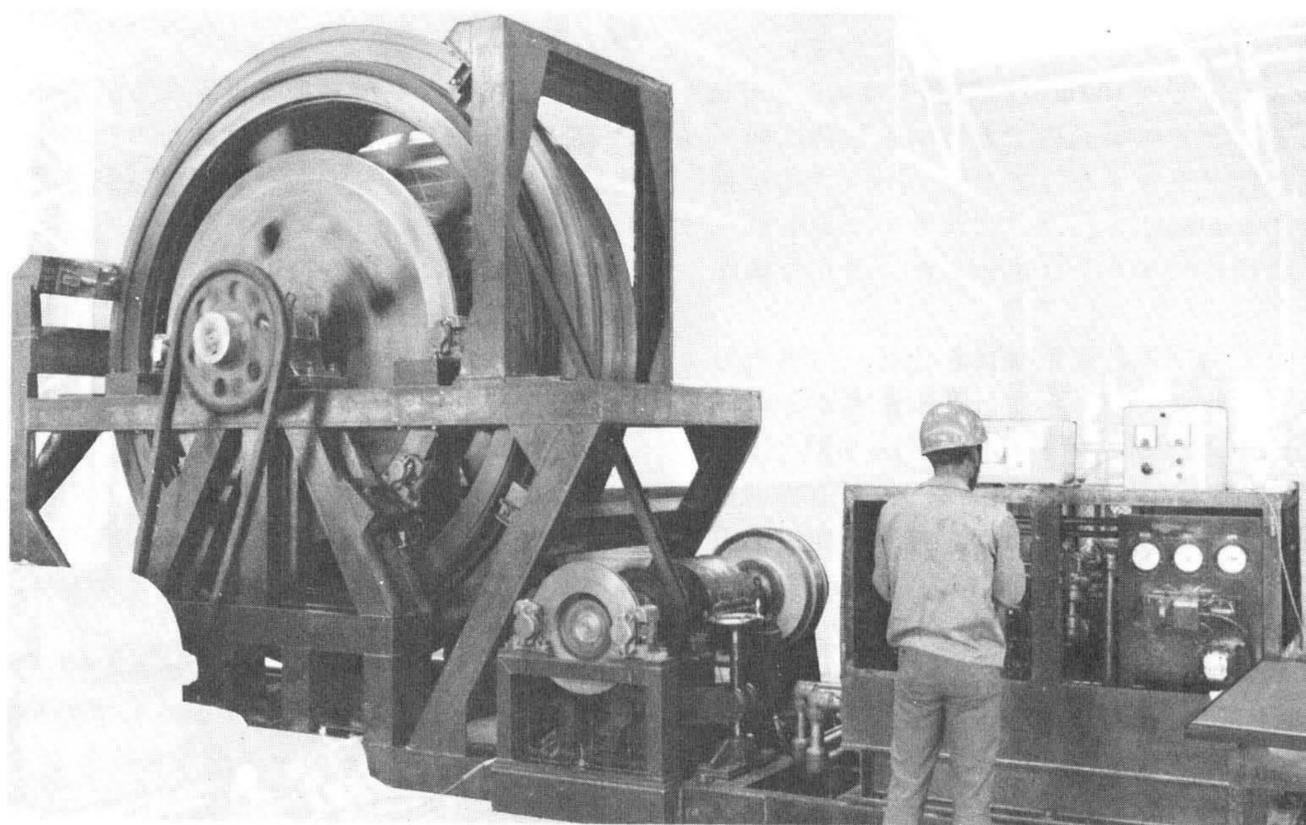


図6 キャプスタン形ブレーキ装置 本装置には故障時に備えて油圧系統とキャプスタンとの間に電磁クラッチおよび2段のディスクブレーキを装備している。

Fig. 6 Brake Unit of the Oil Motor Drive Capstan

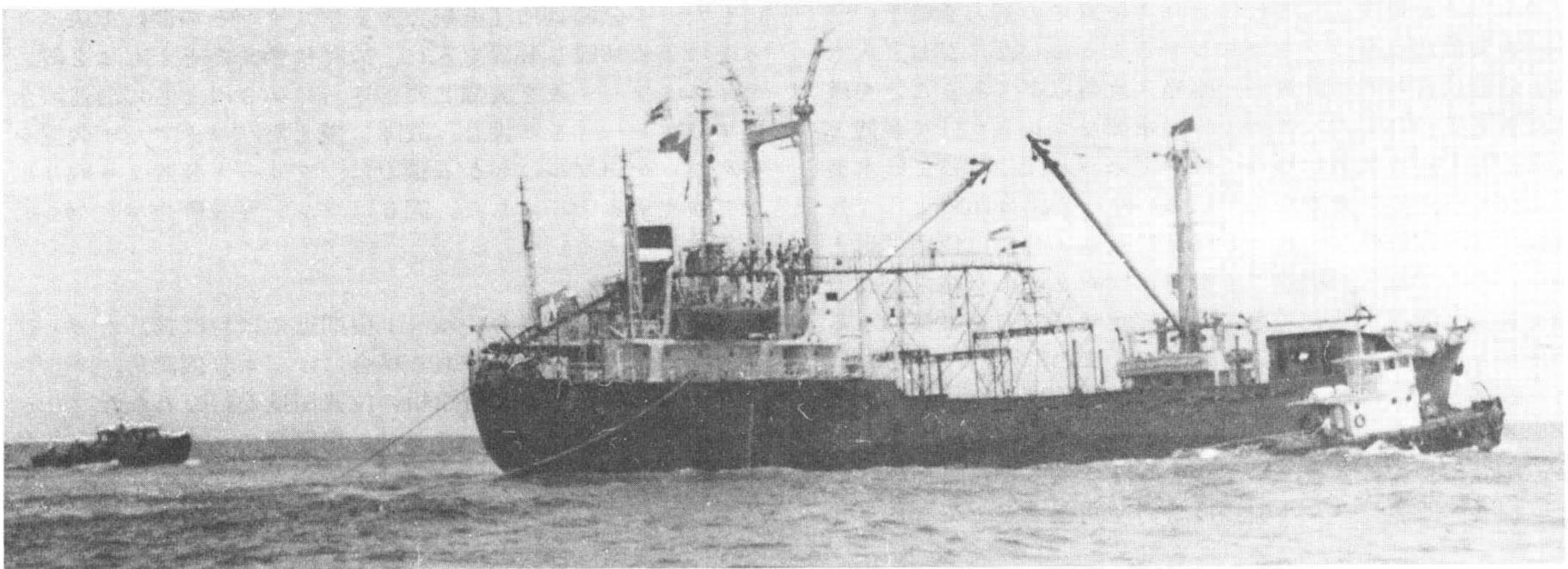


図7 ケーブル布設状況 ケーブル布設は4～5knで、布設所要時間は約6時間であった。
また最深部では約2,200kgのブレーキ力で布設した。

Fig. 7 Laying of Cable

5.1 布設

ぎ装が完了した布設船「繁王丸」は布設始端のトコ湾に回航され、あらかじめ準備した係留設備に係留された。ここでショラン電波測位器の積み込みが行なわれた。

試航は布設船を1,200HPタグボートにより先びきして、4kn程度のスピードで行なわれた。この試航では、ショランによる測位の訓練、刻々変化する潮流の影響の確認、うねりの影響の確認、海底起伏状況の再確認、長時間運航に伴う人員配置の検討、係船訓練などが行なわれ、本布設実施への十分な検討が完了した。

ケーブルの布設は昭和47年9月15日早朝の陸揚げ作業から開始された。当日の海況は波打ちぎわ付近にうねりが碎けるという悪条件であったが無事陸揚げを完了し、直ちに布設航海にはいった。布設状況は図7に示すとおりである。出航後は強風を考慮し、布設スピードは4～5knとした。油圧式キャプスタンプレーキ装置は順調に動作しエコーサウンダによる測深結果、入水角測定値および計算図により適正なブレーキ力を設定した。このようにして102mの最深部では約2,200kgのブレーキ力を加えることで無事通過できた。入水角は40～45度となり、臨界角に比べ小さくなっており、ケーブルが張り気味に布設されたことが確認された。これらのコントロール装置は、すべて布設船のブリッジに集められ、適正な操作が容易に行なわれた。

出航時晴天であった天候はその後急激に悪化し、強風のため波高も1m以上になる状態で、ついには降雨をみるという悪天候となった。このため、ミルフォード湾8km手前でショランのToco側発信器が雨のため発信不能となり、急ぎ布設船のレーダによる操船という問題も生じたが、無事予定どおりのコースを航走してミルフォード湾に到着し、係船を終了した。所要布設時間は約6時間であり、全ルートを通じ予定コースからのはずれは約200m以内であった。ミルフォード湾側の陸揚げ約500mと陸上部用約200mの浮上延線は翌16日朝より開始された。

布設後のケーブルは、セメントバッグにより防護された。波浪の影響のあるトコ湾では、バッグ上に垂鉛めっき鉄線ネットで包んだ碎石を30cm厚さに幅広くかぶせて、セメントバッグの移動を防いだ。

5.2 ケーブルの接続とガスチャージ

布設後のケーブルは両端末のケーブルヘッド組立ておよびミルフォード湾陸上部での直線接続が行なわれた。接続時はケーブル内のガス圧を1.5～2.0kg/cm²程度に保つよう給ガスされた。

接続終了後、ガスチャージが行なわれた。チャージはトコ側よりあらかじめ検討された圧力上昇スピードにより行なわれ、総量345m³のガスが55時間かけて封入され圧力バランス後のガス圧が17.6kg/cm² (250psig) になるようにした。この後7日間のガス耐圧試験を行ないガスリークのないことを確認した後、常時運転圧力を14.1kg/cm² (200psig) まで降圧し、給ガス装置との接続を行なってさらに3日間監視した後、ガス圧警報装置をスイッチオンさせた。

10月16日顧客立会いのもとに66kV DC耐圧その他の電気試験が行なわれ好成績で合格し引渡しはすべて完了した。

6 結 言

交流海底ケーブルとして世界でも屈指の長尺ケーブルの33kV高ガス圧海底ケーブルの設計から布設までの契約を無事完遂し、トリニダード・トバゴ国の電気事業に多大の貢献をなし得た。

本契約実施における特筆すべき点は次のとおりである。

- (1)45kmに及ぶ長巨長で、かつ深海の高水圧に耐えるケーブルが製造され布設された。
- (2)前含浸紙を使用した高ガス圧海底ケーブルが製造され、その性能が確認された。
- (3)高ガス圧海底ケーブルの接続箱として内部鉛工方式とダブルOリング方式が採用された。深海部へのつり降ろしを考慮して機械的設計に重点をおくとともに、ベンドレストリクト装置を開発した。
- (4)長時間の運転と深海ケーブルの布設用にわが国では初めての油圧式キャプスタンプレーキ装置が開発された。
- (5)長巨長、かつ深海へのケーブル布設工事技術が確立された。最後に本計画遂行のためご協力いただいたトリニダード・トバゴ電気局関係各位に対し厚くお礼申し上げる次第である。