

直流500 kV 光複合海底OFケーブルプロジェクトの完成

Completion of a 500-kV DC Optical Fiber Composite Submarine OF Cable Project

| | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 中西 豊 [*] Yutaka Nakanishi | 藤井宏一郎 ^{*2} Koichiro Fujii | 五嶋泰洋 ^{*3} Yasuhiro Goto | 石井 登 ^{*4} Noboru Ishii |
| 福 唯志 ^{*5} Tadashi Fuku | 佐藤 修 ^{*5} Osamu Satou | 中村成輝 ^{*5} Seiki Nakamura | 荒谷 武 ^{*5} Takeshi Araya |
| 木村健吾 ^{*5} Kengo Kimura | 粕谷正春 ^{*6} Masaharu Kasuya | 織戸 寿 ^{*3} Hisashi Orito | 高松 研 ^{*3} Migaku Takamatsu |

概要 関西と四国間の電力連系を目的に、阿南紀北直流幹線として直流海底ケーブルの建設が進められてきた。本海底ケーブル線路は直流500 kV 双極1回線導体帰路方式で2800 MWの送電容量で設計されており、1条当たり2800 Aという世界最大容量の直流海底ケーブルである。この直流海底ケーブルは、関西電力（株）、電源開発（株）並びにケーブルメーカー4社で開発したものであり、約50 kmの海底ケーブル4条はケーブルメーカー各社で1条ずつ約2年の歳月をかけて製造が行われた。その後、平成10年4月から12月にかけて海底ケーブルは1条ずつ布設専用船及び布設同時埋設機等により布設、埋設された後、陸上ケーブルとの接続を行い、平成11年8月に-700 kVの直流耐電圧試験を無事終了した。今後、系統連系試験を経て平成12年7月に運転開始の予定である。なお、古河電工製海底ケーブルは、2L本線に用いられる。

1. まえがき

関西と四国間の電力連系を目的に建設が進められてきた阿南紀北直流幹線99.8 km（ケーブル部48.9 km、架空部50.9 km）のうち、ケーブル区間に世界最大容量の直流500 kV 海底ケーブル（46.5 km）が適用されている。（図1及び表1参照）

この直流海底ケーブルは関西電力（株）、電源開発（株）並びにケーブルメーカー4社で開発したものであり、約50 kmの海底ケーブル4条はケーブルメーカー各社で1条ずつ約2年の歳月をかけて製造が行われた。また、その後の布設工事においては、布設ルートは紀伊水道では通航船舶が多いことにくわえて盛んな底引き網漁業での漁具による外傷が心配されたことからケーブルは全長埋設とし、布設専用船及び布設同時埋設機により布設精度の向上と布設期間の大幅な圧縮を図った。

本報では、世界最大容量である直流500 kV 直流海底ケーブルの製造から布設及び直流耐電圧試験について、その概要を報告する。



図1 ケーブルルート
Route of submarine cables

表1 ケーブル線路概要
Outline of the cable line

| | |
|--------|-----------------------------|
| 送電容量 | 2800 MW |
| 定格電圧 | 直流 ± 500 kV（当初 ± 250 kV運用） |
| 送電方式 | 双極1回線導体帰路方式 |
| 定格電流 | 2800 A |
| ケーブル条数 | 4条（本線2条、帰線2条） |
| 巨長 | 48.9 km（海底46.5 km、陸上2.4 km） |
| 最大水深 | 75 m |

^{*} 関西電力（株）中央送変電建設事務所
阿南紀北直流幹線海底ケーブル建設所 所長
^{*2} 電源開発（株）橋湾送変電建設所 所長代理
^{*3} 電力事業部 TAプロジェクトチーム
^{*4} 電力事業部 電力技術部
^{*5} 電力事業部 電力製造部
^{*6} 電力事業部 第一品質保証部

2. ケーブル

2.1 ケーブルの構造

本海底ケーブル線路は直流500kVで1条当たり2800Aの送電容量が要求されることから、導体許容温度が高く、かつ長年の実績があり信頼性の高いOFケーブルとした。しかしながら、絶縁紙に従来のクラフト紙を適用すると絶縁厚が厚くなり熱放散性が低下し、結果として製造能力を大きく超える大サイズケーブルになってしまうことから、絶縁紙には電気的特性に優れた半合成絶縁紙（PPLP: Polypropylene Laminated Paper）を採用し、絶縁厚の低減を図っている。

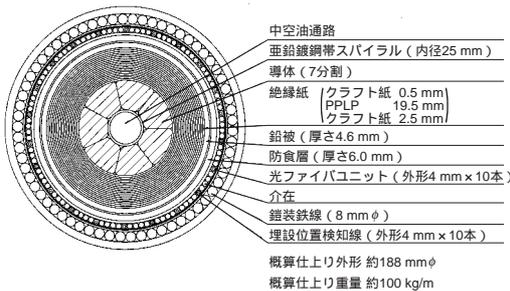


図2 光複合海底ケーブル
Construction of submarine cable integrating optical fiber

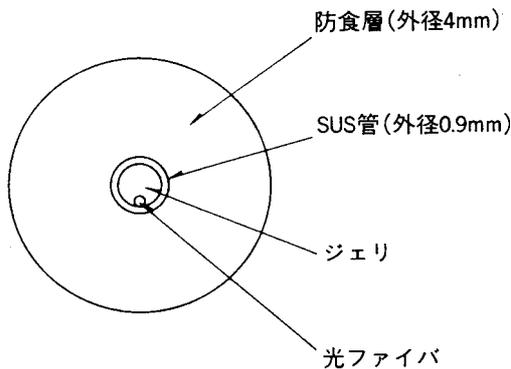


図3 光ユニットの基本構造
Construction of the optical fiber element



写真1 海底ケーブルの外観
Appearance of the submarine cable

また、本海底ケーブルは、情報伝送用、温度センサ用、外傷センサ用及び保守通信用として計12本の光ユニットを複合するとともに、ケーブル埋設位置の探索を目的とした埋設位置検知線（ポリエチレン被覆銅線）を10本複合した構造となっている。（図2、図3及び写真1参照）

2.2 ケーブルの製造

古河電工では平成8年6月に製造を開始し、約25km×2条を工場で接続し、平成10年6月に製造を完了した。

主要製造工程は、導体製造～紙巻き～乾燥～油浸～被鉛（鉛シース）～補強層（ステンレス鋼帯巻き）～防食被覆～鉄線鍍装（光複合）である。

導体上に半合成絶縁紙を巻いたケーブルコアを、直径約20mの大型乾燥油浸釜に巻き取った。乾燥は、導体通電と釜本体の蒸気加熱によって温度コントロールを行い、真空引きすることで絶縁層に含まれるガスと水分を除去した。長尺のケーブル全体を均一に加熱するため、コンピューターシミュレーションにより温度コントロール条件を設定し釜全体を72ゾーンに分割して自動温度調節を実施した。油浸は、釜内全体を脱気処理した絶縁油で満たし加圧含浸を行った。積層されたケーブルの乾燥・油浸状態を正確に把握するため、平衡蒸気圧、静電容量のモニタリングを行った。

被鉛工程は、油浸釜からケーブルコアを絶縁油が満たされたガイドパイプを通して被鉛機に引き込み、鉛シースを施した。鉛シースは全長を連続超音波探傷装置で欠陥のないことを確認している。

鍍装工程では、12本の光ファイバユニット及び、埋設位置検知用のポリエチレン被覆銅線を鉄線鍍装の下に撚り合わせ、全長約50km（総重量約5000ton）を直径30m、6000ton仕様の大型ターンテーブル上に巻き取った。光ファイバユニット全芯の伝送損失変化を常時監視し、性能変化が無いことを確認した。

2.3 工場ジョイント

工場ジョイント（FJ）は、以下の2項目を目標性能として開発された。

- (a) 電気的にはケーブル部とほぼ同等な性能を有すること
- (b) 機械的にはFJ部が受ける機械力に対し性能低下が無いこと

このため、ジョイント構造は出来る限りケーブル構造に近い



写真2 大型乾燥油浸釜へのケーブルコア巻き込み
Storing the cable core to a large kettle for oil impregnation after drying

ものとするよう設計され、ケーブルとほぼ同径、等価な曲げ剛性であることが要求された。FJの構造図を図4に示す。

1) 導体接続

7分割のセグメントを個々にTIG溶接で接続した。導体溶接時は、FJ両脇のケーブル部を凍結することにより、油の流出及びケーブルへのガス混入を防止した。

2) 絶縁層

ケーブルと同質、同厚、同幅の紙を使用し、除湿された室内で同径になるよう紙巻きを行った。

3) 鉛被

ケーブルと極力同径に仕上げるべく、1重鉛被構造を採用した。また、溶接部は超音波探傷による健全性確認を行った。

4) 補強層

鉛被溶接部への応力を緩和する目的から、縦方向の補強を施した。

5) 防食層

PEテープモールドによりケーブル外径と極力差が出ないよう形状の仕上げを行った。

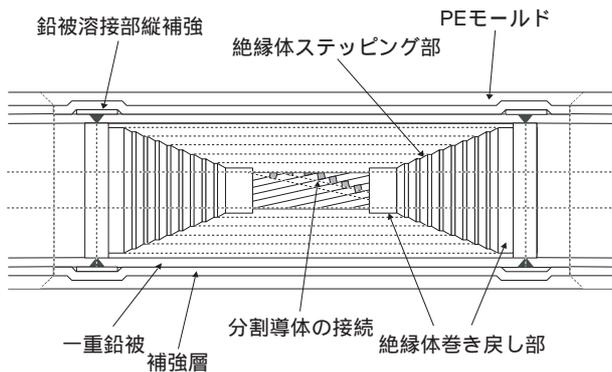


図4 工場ジョイント (FJ) の構造
Structure of factory joint

表2 出荷試験結果
Results of shipping inspection

| 項目 | 特性 (規格) | 試験成績 (データ) | 判定 |
|--|-------------------------|-----------------------|----|
| 外観検査 (点検) | ケーブルの損傷がないこと | 損傷なし | 良 |
| 直流導体抵抗試験 (/km 20) | 0.00610以下 | 0.00603 | 良 |
| 静電容量試験 ($\mu\text{F}/\text{km}$) | 0.37以下 | 0.347 | 良 |
| 絶縁抵抗試験 ($\text{M} \cdot \text{km} 20$) | 27,000以上 | 103,200 | 良 |
| ガス試験 | 放出係数 0.07以下 | 平均放出係数 0.026 | 良 |
| 絶縁体直流耐電圧試験 | DC1000 kVに15分間耐える事 (常温) | 異常なし | 良 |
| FJ防食層直流耐電圧試験 | DC25 kVに1分間耐える事 (常温) | 異常なし | 良 |
| 油流抵抗試験 (参考試験) | 計算値 | 7.86×10^{-5} | 良 |
| | 測定値 | 8.73×10^{-5} | |

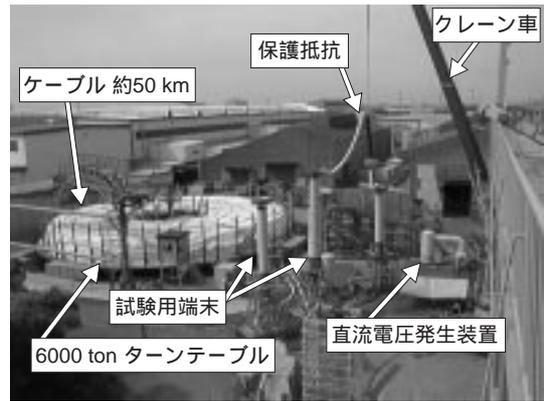


写真3 直流耐電圧試験状況
DC withstand voltage test

2.4 出荷試験

出荷試験は、鎧装後の全長 47.6 km のケーブルに対し、表2に示す試験を実施した。試験状況を写真3に示す。試験項目としては、従来から行われている試験であるが、今回のような長尺ケーブルへ適用することは初めてであり、従来の測定装置や試験方法では試験実施が難しく、実施するにあたり、測定器、試験装置などの改良、日射による温度上昇対策、直流端末構造などの検討を事前に実施した。

特に、直流耐電圧試験は、全静電容量が約 16 μF となり、1000 kV 課電時にケーブル中に蓄えられエネルギーは莫大なものとなり、安全確保にも十分な配慮がなされた。

また、直流発生装置は古河電工の GIL 技術が生かされたガス絶縁タイプのコンパクトな装置を使用することで、中間試験時の装置移動を容易に行うことができ、かつ安全性を確保できた。

3. ケーブル船積み

本ケーブルの船積みは、6000 ton ターンテーブルから、中間台船を介して、ピレリ社所有の布設船ジュリオ・ヴェルネ号まで約 300 m のルートを通り、5 日間、昼夜を徹して行われるという大規模なものであった。ルートは、中間台船と布設船の間でケーブルをたるませて海中に水没させ、過度の張力が加わ

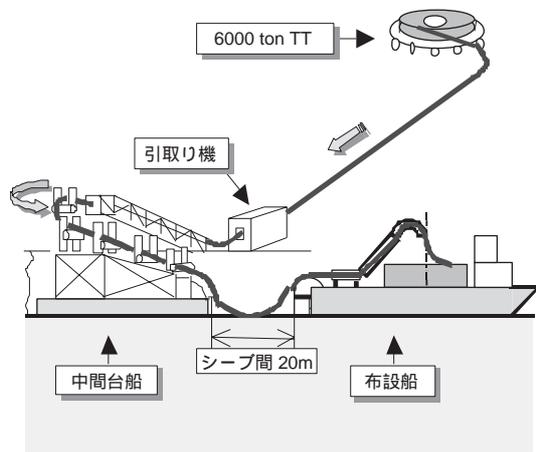


図5 海底ケーブル船積み時のレイアウト
Layout of the submarine cable shipment



写真4 海底ケーブルの船積み
Shipment of the submarine cable

ることを防止しており、各所にケーブルの線形や光ファイバユニットの損失を連続で監視する警報システムを用い、電力ケーブル・光ユニット双方の健全性を保証した。

当初懸念された、ピレリ社のイタリア人スタッフとのコミュニケーションによる工場側ケーブル送り出し装置と布設船側ケーブル巻取り装置との関係操作も問題無く順調に進み、無事船積みを終了した。

4. 布設工事

4.1 布設工法概要

4.1.1 海峡横断部の布設・埋設工法

海峡横断部の布設方式は図6に示すようにケーブルを繰り出すと同時に埋設する同時布設埋設工法を適用し、GPSと水中音響測位システムを用いて、常時、ケーブルの埋設位置を測定しながら、布設工事を実施した。

従来の埋設機（ウォータージェット式）で2～3mの深さに埋設する場合、海峡横断に約2週間を要することが想定された。そこで、ユーザーとの共同研究により写真5及び表3に示すウォータージェット付加型鋤式埋設機を開発し、2日間で海峡横断することとした。

布設船は50km/5000tonの長尺/重量ケーブルを積載・布設できるターンテーブルを保有し、かつ、埋設機を牽引する能力がある布設専用船として、イタリアPirelli社のジュリオベルネ号を使用した。

4.1.2 橋湾内の布設・埋設工法

徳島側橋湾内約5kmの区間では、水深が浅く布設専用船が進入不可能であるため、図7に示す橋港堺付近で、布設専用船から布設台船にケーブルを積み替え、WJ式埋設機を使用して

同時埋設工法によりケーブルを2～3mの深さに布設・埋設した。

橋湾内には5カ所の岩盤部が点在している。この岩盤部にケーブルを埋設するため、写真7及び表4に示す岩盤掘削機を使用して先行溝掘削を行った。各条合計約1kmの溝に布設台船にてWJ埋設機を誘導してケーブルを布設した。

WJ埋設機を先行溝へ誘導するため、布設台船及びWJ埋設機の位置を光波を用いて精密に測量するとともに、埋設機前方の掘削溝位置をソナーで監視しながら布設を行った。

4.1.3 沿岸部の布設・埋設工法

和歌山沿岸部のケーブル揚陸地点付近では、布設専用船による同時埋設に必要な水深が得られないため、徳島沿岸部で使用したWJ式埋設機による後埋設工法を採用した。また、後埋設区間の両端部では、ダイバーによるハンド埋設を実施した。

徳島沿岸部では、ケーブル積替え地点と揚陸地点における埋設機で埋設できない部分に対してハンド埋設を行った。また、



写真5 ウォータージェット付加型鋤式埋設機（通称 ホール号）
Plow type high speed embedding machine with water jet

表3 ウォータージェット付加型鋤式埋設機仕様
Outline of plow type high speed embedding machine with water jet

| 項目 | 仕様 |
|------|-----------------------------|
| 掘削方式 | ウォータージェット付加型鋤式掘削 (鋤段数:6) |
| 掘削深さ | 0～3.3m(可変) |
| 機体寸法 | 長さ13.5m, 幅8.2m, 高さ7.1m |
| 重量 | 空中105t, 水中31～87t |

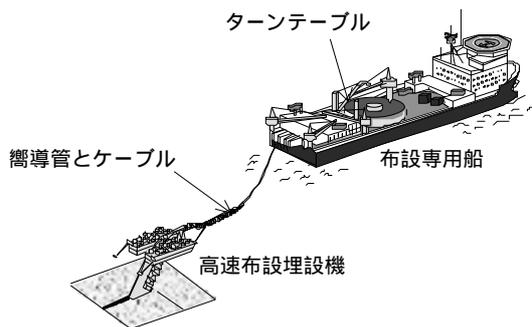


図6 布設工法概要図（同時布設埋設工法）
Simultaneous laying and embedding operation

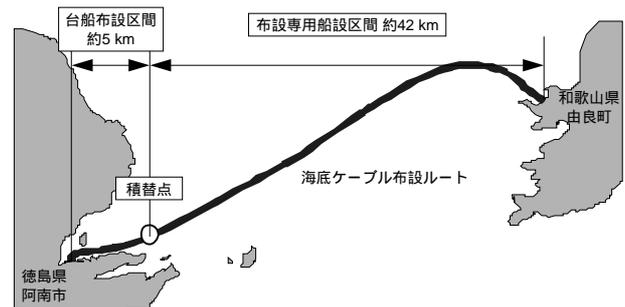


図7 布設ルート図
Cable route (across the Kii Channel)



写真6 ケーブル積替え状況
Transshipment of cable



写真7 岩盤掘削機 (通称 岩掘号)
Rock trencher

表4 岩盤掘削機仕様
Outline of rock trencher

| 項目 | 仕様 |
|------|--|
| 掘削方式 | ドラムカッター式 (不陸除去仕様) チェーンカッター式 (溝掘削仕様) |
| 走行方式 | 自走式 |
| 掘削深さ | 0 ~ 2.2 m (可変) |
| 掘削幅 | 0.65 m |
| 機体寸法 | 長さ11.5 m, 幅5.5 m, 高さ3.4 m |
| 重量 | 空中54 t, 水中14 ~ 38 t |

岩盤掘削機による先行掘削溝とハンド埋設部には、砂を補充して整地し海底面を復元している。

以上の布設・埋設工法により、仕様を満たすケーブル埋設深度が図8に示すとおりに、また予定ルートに対するケーブル布設精度が、布設専用船側では±5 m、台船側では±1 m以内にそれぞれ確保できた。

4.2 布設工程

布設作業作業フローを図9に示す。1条目ケーブルの船積みから1998年4月7日に開始し、このフローを4回繰り返して同年12月17日に4条目ケーブルの布設埋設を終了させた。

古河電工製造のケーブルは3条目であり、表5に示す日程で布設埋設工事を行った。台風が多い時期の工事を避けるため、ケーブル船積み終了から布設準備までの期間は布設専用船を基地港(神戸港)で待機させることになったが、この間も定期的にケーブルの監視・点検を実施した。

5. 竣工検査

平成10年4月から12月にかけて布設された海底ケーブルは、その後、陸上ケーブルと接続され、平成11年8月に - 700 kV × 15分の直流耐電圧試験を実施し、絶縁性能に問題の無いことを確認した。

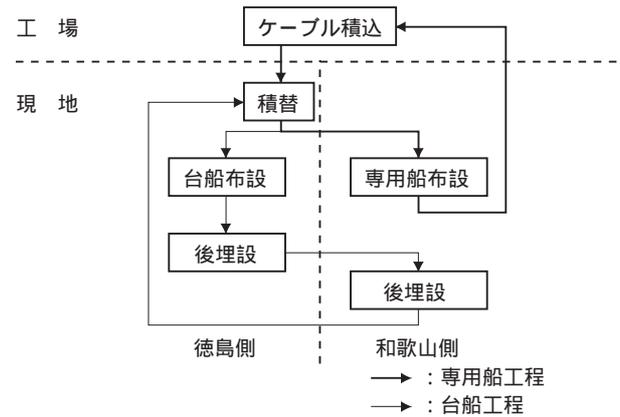


図9 布設作業フロー図
Flow of cable laying

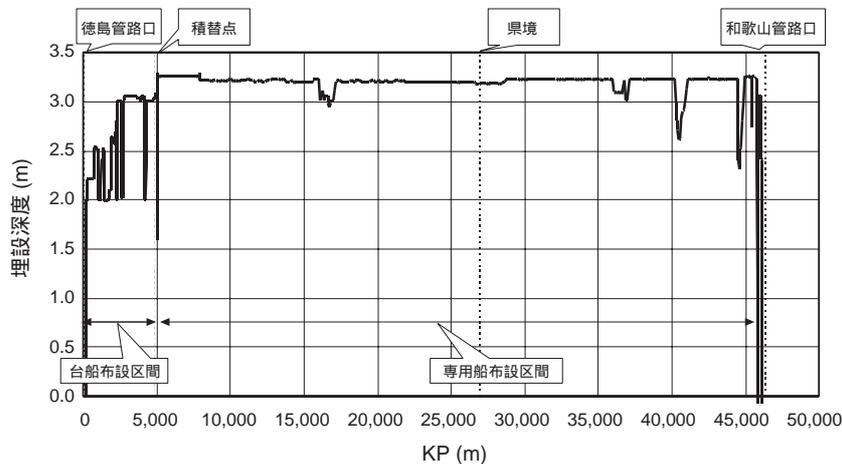


図8 埋設深度図記録 (古河電工製造ケーブル)
Cable laying record of the Furukawa's laying operation

表5 工事実績（古河電工製造ケーブル）
Results of Furukawa's cable laying

| 作業内容 | | 月 日 |
|------------|----|-------|
| ケーブル積み込み | 開始 | 7/3 |
| | 終了 | 7/13 |
| 布設準備（積替え） | 開始 | 10/3 |
| | 終了 | 10/5 |
| 専用船布設（揚陸含） | 開始 | 10/7 |
| | 終了 | 10/12 |
| 台船布設（揚陸含） | 開始 | 10/6 |
| | 終了 | 10/24 |
| 徳島側後埋設 | 開始 | 10/25 |
| | 終了 | 10/28 |
| 和歌山側後埋設 | 開始 | 10/30 |
| | 終了 | 11/2 |

なお、直流耐電圧試験は、以下に示す3ステップの電圧を連続課電して試験が行われた。（図10参照）

ステップ1: - 275 kV (- 250 kV × 1.1)

ステップ2: - 550 kV (- 500 kV × 1.1)

ステップ3: - 700 kV (CIGRE 推奨値)

また、直流耐電圧試験とは別に、ガス定数試験、油流抵抗試験、絶縁油ガス測定などの試験を行い、問題のないことを確認し、竣工検査に合格した。

6. まとめ

世界的な大プロジェクトである直流500kV光複合海底OFケーブルプロジェクトは、約2年の歳月をかけて長尺ケーブルを製造し、平成10年4月から12月にかけて実施されたケーブル布設の後、陸上ケーブルとの接続を行い、平成11年8月に-700kVの直流耐電圧試験を無事終了し、絶縁性能に問題のないことを確認した。今後、系統連系試験を経て平成12年7月に運転開始の予定である。

本プロジェクトを通して、検証、実用化されてきた多くの新技術が、今後の送電技術の発展に寄与することを願いながら本報告を終える。

最後に、本プロジェクトの推進に際し、多くの関係者の御協力、御指導を得て無事、本プロジェクトを完了することができました。改めて、御協力、御指導頂きました関係各位に深く感謝いたします。

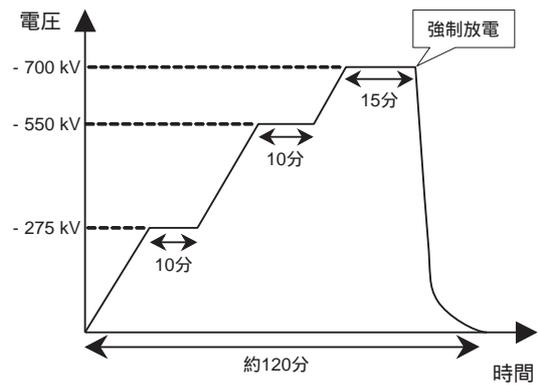


図10 直流耐電圧昇圧ステップ
Stepping-up voltages of withstand DC voltage test

参考文献

- 1) 井上, 他: 「直流500kV海底OFケーブル及び付属品の開発」, 古河電工時報, 第100号, 平成9年7月
- 2) 藤森, 他: 「直流500kV半合成紙(PPLP)絶縁OF海底ケーブルの開発」, 電気学会論文誌B, 116巻9号(平成8年)
- 3) Inoue, et al.: "Installation of 500kV DC PPLP-insulated oil-filled submarine cable", Jicable (1999)
- 4) 中西, 他: 「紀伊水道海底ケーブルの布設」, 平成11年度電気学会電力・エネルギー部門大会, No.329 (1999)
- 5) 小山, 他: 「橘湾内岩盤部海底ケーブル埋設工法の開発」, 平成11年度電気学会電力・エネルギー部門大会, No.330 (1999)
- 6) 宇野, 他: 「海底ケーブル用布設同時埋設機の実用化」, 平成11年度電気学会電力・エネルギー部門大会, No.331 (1999)
- 7) 井上, 他: 「500kV 直流海底ケーブルの開発および布設」, 電気評論, 1998年10月