電力ケーブル技術発展の系統化調査

2

Study on Systematic Development of Power Cable Technology

吉田　昭太郎 *Shotaro Yoshida*

■要旨

電力ケーブルの技術発展は、低損失化、コンパクト化、長尺化、高信頼度化、高品質化など電力会社の明確なニーズと主導のもとにケーブルと接続箱の新規技術を積極的に導入して進められた。1980 年以降は日本独自技術で世界トップクラスのケーブル線路が完成した。ケーブルは数十 km 線路の長手方向に一箇所でも欠陥を造らない高品質化技術がより重要であり他の電力機器と異なる点である。

火力、原子力発電所などで発電された電力は、変圧器で高電圧化され、架空送電線を経由して地中に布設された電力ケーブルにより都市内の需要地へ送られる。電力ケーブルはライフラインを支える基盤製品である。本調査は 60kV 級以上電力ケーブルの OF ケーブル (Oil-Filled cable)、POF ケーブル (Pipe type Oil Filled cable) および CV ケーブル (Cross-linked polyethylene insulated cable) を対象として行った。電力ケーブルの技術開発は、主に高電圧化および大電流化に対する材料とその構造の改善の歴史であり、いかにしてコンパクト化ができ、低損失化できるかにある。ケーブルと接続箱の技術発展に主眼を置き系統化調査を行い、以下の 5 期に分類し技術発展過程をまとめた。

(1) 模倣技術による国産化（1950 年代後半 (昭和 30 年代前半）まで)

日本最初の OF ケーブルは、1928 年にイタリア・ピレリー社から技術導入を受けて、1930 年に日本電力 (株) 尾久変電所向けに製造、布設された。66kV 鉛被 OF ケーブル (絶縁厚 10mm) である。第二次世界大戦中はほとんど生産されなかったが、1951 年以降産業の復興とともに 66kV 以上 OF ケーブルは急激に増加した。コンパクト化のため 66kV 3 心 OF ケーブルが実用化された。1955 年頃には日本の技術は独り立ちできた。

(2) 海外技術をベースとした国産技術の発展（1950 年代後半 (昭和 30 年代前半) ～ 1970 年 (昭和 45 年) 頃）

フランスのリヨン社から薄紙絶縁ケーブル技術の導入を行い、1960 年に 287.5kV OF ケーブル線路が建設された。その後鉛被に代わって波付きアルミ被を実用化し、絶縁体の低損失化を図るため脱イオン水洗紙および合成油を実用化するなど国産技術による高電圧化と低損失化が進められた。架橋ポリエチレン材料自体はアメリカ GE 社の特許で、1960 年頃に各社がライセンス契約を結び CV ケーブルを実用化した。1964 年には 70kV CV ケーブル (絶縁厚 20mm) が布設された。日本独自の内外半導電層と絶縁層の 3 層同時押出方式を開発し、絶縁性能を向上させた。日本が常に先行して CV ケーブルの実用化を進めた。

(3) 自主技術で国産化（1970 年 (昭和 45 年) 頃～ 1980 年 (昭和 55 年) 頃）

長距離 275kV OF ケーブルおよび POF ケーブル線路が建設され、長距離 500kV OF ケーブル線路建設を目標に日本独自の低損失の半合成紙の開発が進められた。一方、CV ケーブルについては、日本独自の乾式架橋製造方式が開発され、CV ケーブルの絶縁性能を著しく向上させた。これらの技術は、世界に先んじた技術であり、CV ケーブルの絶縁信頼性を向上させ、超高圧 CV ケーブルの実用化に貢献した。1979 年に世界で初めての 275kV CV ケーブルが布設された。

(4) 日本独自技術で世界トップレベルへ（1980 年 (昭和 55 年) 頃～ 1990 年 (平成 2 年) 頃）

絶縁体の低損失化のため 275kV 半合成紙 OF ケーブルを実用化した。導体の低損失化のため、世界で初めての酸化第二銅皮膜を有する素線絶縁導体が開発され、275kV POF ケーブルに適用され大電流化を果たした。500kV CV ケーブルを目指して開発が進められた。絶縁性能に対して欠陥となる異物混入を阻止するため、材料から製造まで徹底したクリーン化が進められ、1988 年には、発電所の引出し線として 500kV CV ケーブルが世界で初めて実用化され、1989 年には長距離 275kV CV ケーブル線路 (絶縁厚 27mm) が実用化された。

(5) 世界トップレベルの製品化（1990 年 (平成 2 年) 頃～ 2005 年 (平成 17 年))

世界トップレベルの 500kV ケーブル技術を確立し、これをベースに大容量線路として、本四連系線 500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブル (絶縁厚 25mm)、紀伊水道横断直流 500kV 海底 OF ケーブル (絶縁厚 22.5mm)、新豊洲線 500kV CV ケーブル (最小絶縁厚 27mm) が実用化された。既に 10 年以上の運転がされている。

Study on Systematic Development of Power Cable Technology

Shotaro Yoshida

■ Abstract

The development of power cable technologies is the history of developing lower power loss, smaller cable dimensions, longer distance transmissions, better reliability and higher quality overall in accordance with the requirements of power utilities in Japan, in the course of which new technologies relating to power cables and its accessories were proactively introduced to Japan. In the 1980s, Japan became successful in installing world-class power cable transmission lines using own technology. The big difference with other power equipment was cable technology that guaranteed high quality and reliability, particularly for defect free transmission over distances of several tens of kilometers.

Electricity generated by thermal, nuclear and other types of power plant is transmitted through overhead transmission lines and underground cables to urban areas where the demand for electricity is very high. Power cables are thus key to modern living. This study focuses on oil-filled cable (OF cable), pipe-type oil filled cable (POF cable), and cross-linked polyethylene insulated cable (CV cable), with voltage ratings of 60kV or more. The development of power cable technologies is the history of developing insulation materials and power cable construction able to handle higher voltages and larger current, and also developing smaller dimensions and lower loss. This study focuses primarily on technology development for power cables and its accessories, and addresses its development in the following five stages.

(1): Domestic production through imported overseas technologies — Until latter half of 1950s

Technology imported from Pirelli Cables of Italy was used in 1928 to manufacture OF cables for the first time in Japan. OF cable rated 66kV (10 mm thick insulation and lead-sheathed) was subsequently installed in the Ogu Power Substation of Nippon Electric Power Co. in 1930. However, the development of cable and related technology, and cable production was virtually halted throughout Second World War. After 1951, the demand for OF cables rated 66 kV and higher sharply increased. Three-core OF cable rated at 66 kV was developed to meet the market requirements for smaller diameter power cable and was produced commercially. By 1955, Japan was self-reliant in power cable technology.

(2): Development of own technologies on the basis of imported technologies from overseas — From latter half of 1950s to around 1970

During this phase, thin paper insulation cable technology from Les Cables de Lyon in France was used. 287.5 kV OF cable lines were installed underground in 1960. Corrugated aluminum-sheathing was then developed in Japan to replace lead sheathing, and was produced commercially. Domestic cable technologies were successful in achieving higher power voltage and lower dielectric loss with de-ionized water-washed Kraft paper and synthetic oil. CV cable was commercialized around 1960 with licensing agreements for cross-linked polyethylene materials with GE in America, and 70 kV CV cable (20 mm thick insulation) was subsequently installed in 1964. Cable with a triple layer simultaneous extrusion process for the insulation and two semiconducting screens was then developed in Japan, enhancing cable insulation. Japan had now taken the lead in the commercialization of CV cable.

(3) Domestic production with Japanese technology — From around 1970 to around 1980

During this phase, long-distance 275 kV OF cable and POF cable power transmission lines were installed throughout Japan, and low-loss semi-synthetic insulating paper was developed domestically to make viable commercial long-distance 500 kV OF cable power transmission lines. Japan developed its own dry-cured insulation process to achieve better insulation performance and higher reliability. These world-leading technologies achieved greater insulation reliability for CV cable, and also contributed to the commercialization of ultra-high-voltage CV cables. The world's first 275 kV-rated CV cable was installed in Japan in 1979.

(4) Japan as world leader in power cable market with own technology— From around 1980 to around 1990

The 1980s saw the commercialization of OF cables with semi-synthetic insulation paper for lower dielectric loss. The world's first strand-insulated cupric oxide film-coated conductor wire was developed, achieving a further reduction

in current loss. This technologies were applied to 275 kV POF cable and enabled high current power transmission. Crowning this technology was CV cable rated for 500 kV. To prevent contamination of the insulation layer, clean production control was applied, from the raw materials stage and right through the manufacturing process. In 1988, Japan installed the world's first 500 kV CV cable in power plants. In 1989, it was successful in installing commercially operated long-distance 275 kV CV cable transmission lines (27 mm thick insulation).

(5) Japan becomes top-ranking power cable manufacturer — From around 1990 to 2005

During this phase, Japan led the world in 500kV power cable technology. This technology made possible the commercialization of high-capacity transmission lines, such as the 500 kV OF cable with semi-synthetic paper insulation (25 mm thick insulation) in the transmission line connecting Honshu and Shikoku, in the direct current 500 kV submarine OF cable (22.5 mm thick insulation) across the Kii Channel, and in the 500 kV CV cable (27 mm minimum thickness insulation) of the Shin-Toyosu line. These power lines have been operating for more than 10 years.

■ Profile

吉田 昭太郎 *Shotaro Yoshida*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和 45 年 3 月　東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻卒業
昭和 45 年 4 月　株式会社フジクラ（旧藤倉電線株式会社）入社
超高圧電力ケーブルの開発に従事
平成元年 7 月　研究開発本部電力開発部長
平成 4 年 4 月　工学博士（東京工業大学）
平成 4 年 7 月　電力事業部電力技術部長
電力ケーブルの設計に従事
平成 10 年 7 月　電力事業部長
電力ケーブル事業全般を担当
平成 23 年 8 月　株式会社フジクラ　退職
平成 24 年 4 月　国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

■ Contents

1．はじめに …… 106
2．電力ケーブルの概説 …… 107
3．模倣技術による国産化 …… 110
1950 年代後半（昭和 30 年代前半）まで
4．海外技術をベースとした発展 …… 120
1950 年代後半（昭和 30 年代前半）～ 1970 年（昭和 45 年）頃
5．自主技術で国産化 …… 138
1970 年（昭和 45 年）頃～ 1980 年（昭和 55 年）頃
6．日本独自技術で世界トップレベルへ …… 153
1980 年（昭和 55 年）頃～ 1990 年（平成 2 年）頃
7．世界トップレベルの製品化 …… 167
1990 年（平成 2 年）頃～ 2005 年（平成 17 年）
8．系統化調査のまとめ …… 187
9．あとがきと謝辞 …… 196
登録候補一覧 …… 197

1 はじめに

火力発電所、原子力発電所、水力発電所などで発電された電力は、変圧器で高電圧化されて送電用の線路を通って消費者のもとに送られる。送電用の送電線は、架空送電線と地中に布設される電力ケーブルとがある。

架空送電線は、海岸の火力・原子力発電所、山あいの水力発電所などから都市や工業地帯などの需要地の近くの超高圧変電所まで、高い鉄塔に電線を架け渡して電力を送る送電線路である。発電所の大容量化、電力需要の増大にともない、220 ～ 500kV の架空送電線が運用されている。架空送電線により超高圧変電所に送られてきた電力は、都市内で地中に布設された電力ケーブルにより需要地近くの超高圧変電所へ送られる。超高圧変電所で降圧され次の変電所へ電力ケーブルで送電され、最終的には配電系統につながれる。

一般的に発電所から架空送電線までの電力ケーブルは短距離であり、架空送電線から都市内近くの変電所までの電力ケーブルは長距離となる。電力ケーブルには、OF ケーブル (Oil- Filled cable)、POF ケーブル (Pipe type Oil Filled cable) および CV ケーブル (Cross-linked polyethylene insulated cable) などが使われている。

電力ケーブルの送電容量を上げるには送電電圧と送電電流を大きくすれば良いが、送電電圧を大きくするためにはケーブル絶縁を厚くし、送電電流を大きくするには導体断面積を大きくする必要があり、ケーブル外径を大きくせざるを得ない。一方電力ケーブルは、架空送電線より高価格であり、都市内での布設ルートの確保は難しく、布設する場所の収容スペースを低減するためケーブル外径は小さい方が良い。布設施工のためにもケーブルは可とう性を有する必要があり、更にケーブルの運搬時のドラムの大きさと重量の制約がある。従ってケーブルは外径と重量の制約を受けるため可能な限りケーブルサイズのコンパクト化が求められる。

電力ケーブルの技術開発は、主に高電圧化および大電流化に対する材料とその構造の開発の歴史であり、いかにして高電圧化のためケーブルをコンパクト化ができ、大電流化のため低損失化できるかにある。更にケーブルの導体、絶縁体および金属シースを数百 m 以上の一連長に渡って品質管理されてケーブルの製造および接続箱の組立施工ができるかにある。この観点からケーブル材料とケーブル構造の発展を主眼に置き系統化調査を行った。

本報告は、電力ケーブルとして、60kV 級以上で使用実績が多い OF ケーブル、POF ケーブルおよび CV ケーブルを対象として、大容量化即ち高電圧化と大電流化の発展過程をまとめた。発展過程は第 3 章から第 7 章まで以下の 5 期に分類し整理した。

第 3 章　模倣技術による国産化
　　1950 年代後半（昭和 30 年代前半）まで
第 4 章　海外技術をベースとした発展
　　1950 年代後半（昭和 30 年代前半）～
　　1970 年（昭和 45 年）頃まで
第 5 章　自主技術で国産化
　　1970 年（昭和 45 年）頃～
　　1980 年（昭和 55 年）頃
第 6 章　独自技術で世界トップクラスへ
　　1980 年（昭和 55 年）頃～
　　1990 年（平成 2 年）頃
第 7 章　世界トップレベルの製品化
　　1990 年（平成 2 年）頃～
　　2005 年（平成 17 年）

系統化調査のまとめとして、第 8 章に、高電圧化および大容量化の推移を示し、電力ケーブルの技術発展の変遷を導体、絶縁体、金属シースに絞ってまとめた。

2 電力ケーブルの概説

2.1 電力ケーブル

「電力ケーブルとは、導体上に絶縁体を施し、更に遮蔽層を設け、シースによって被覆したもの」[(1)]と定義されている。本調査では、電力ケーブルとして、60kV 級以上で使用実績が多い OF ケーブル、POF ケーブルおよび CV ケーブルを対象とした。なお、架橋ポリエチレンケーブルは一般に CV ケーブルと呼ばれているため、ここでは CV ケーブルと記述した[(1)]。

2.2 電力用送電線の種類

火力発電所、原子力発電所、水力発電所などで発電された電力は、図 2.1 に示すように送電用の線路を通って消費者のもとに送られる。発電所から消費地へ電力を送る線を送電線と呼んでいる。送電線は布設場所の地形により、空中に架設される架空送電線、地中に布設される地中ケーブル、海底 (水底) に布設される海底 (水底) ケーブルがあり、それらに使用される電線の種類もさまざまである。

送電線で送ることのできる電気の量を送電容量という。単位は W(または VA) である。送電容量が大きいほど一度にたくさんの電気を送ることができる。送電容量 P(MW) は、送電電圧 V(kV) と電流 I(kA) として 2.1 式で表せる。

$$P=V \times I \qquad (2.1)$$

送電容量を大きくするため、高電圧化、大電流化が必要である。

2.2.1 架空送電線

架空送電線は、海岸の火力・原子力発電所、山あいの水力発電所などから都市や工業地帯などの電力需要地に近い郊外の超高圧変電所まで、図 2.2 に示すように高い鉄塔に電線を架け渡して電力を送る送電線路である。この電線は一般に常時張力が加わるため、軽くて強度の強い ACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced) 線[(1)]が用いられる。亜鉛メッキ鋼線を中心にして、その周りにアルミ素線を巻いた 2 種の金属の撚り線からなる。

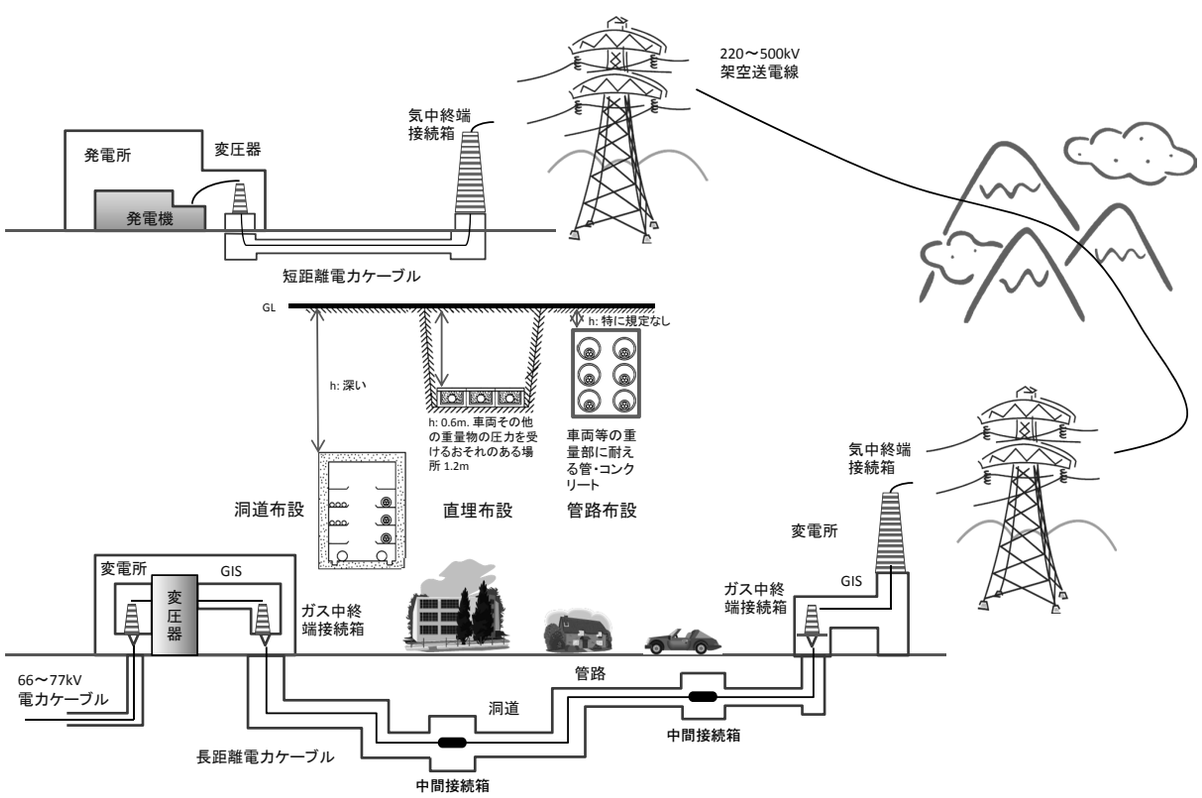
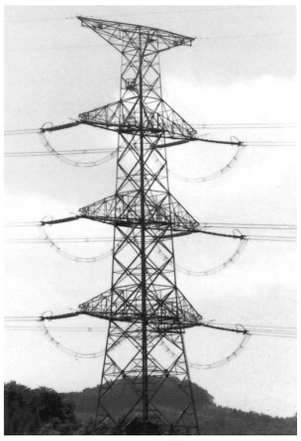


図 2.1　送電用の線路



(a) 鉄塔

(b) ACSR 線

図 2.2　架空送電線 [2), 5)]

電力需要の増大にともない、発電所の大容量化が図られ、架空送電線も超高圧、大容量のものになり、220 ～ 500kV の架空送電線がほとんどの電力会社で使用されている。高電圧化のため電流を流す電線と鉄塔との間を絶縁するため、電線を吊る懸垂碍子、長幹碍子を長くする必要があり、鉄塔が高くされる。碍子は高い絶縁能力と大きな強度が必要で、太陽光や温度変化による自然劣化が少ない磁器製が使われている。

架空送電線の送電電圧は、154kV が 1923 年に、275kV が 1951 年に､500kV が 1973 年に運開している。この建設に伴って電力ケーブルが先ず発電所の引出し線として使用され、高電圧化がなされた。

2.2.2　電力ケーブル

架空送電線により超高圧変電所に送られてきた電力は、電力ケーブルにより都市内の変電所へ送られる。一般的に、発電所から架空送電線までの電力ケーブルは短距離線路であり、架空送電線から都市内変電所までは長距離線路となり、両方共に地中に布設された電力ケーブルが使用される。

電力ケーブルの建設コストは、架空送電線と比較して非常に高価格であるため、架空送電線が布設できない都市部に使用されている。日本では地中送電線のルート確保が厳しく、多種多様な布設形態が使用されている。布設する形態として、地中に布設する場合、代表的には図 2.1 に示したように直接埋設する方式、管路に埋設する方式、洞道に布設する方式がある。洞道は数十 m の深さにもなることもある。海底に布設される場合は海底ケーブルと呼ばれる。

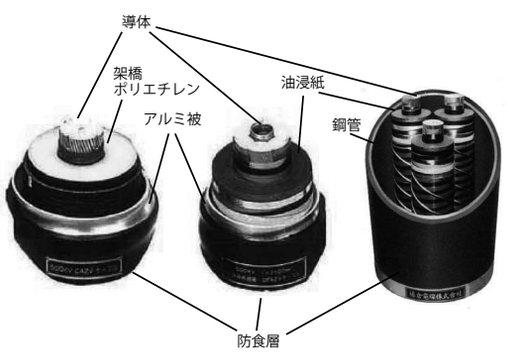
電力ケーブルには、OF ケーブル、CV ケーブルおよび POF ケーブルが使われている。構造は下記の通りである [1)]。

OF ケーブル　;絶縁体に油浸絶縁紙を用い、金属シース内に絶縁油を常に大気圧以上に加圧保持した構造のケーブル

POF ケーブル ; 絶縁体に油浸絶縁紙を用いた線心 3 条を、鋼管に収納し、絶縁油を加圧充填した構造のケーブル。

CV ケーブル　;絶縁体に架橋ポリエチレンを用いたケーブル構造。

代表例として、各種 500kV ケーブルの写真を図 2.3 に示す。



CV ケーブル　　OF ケーブル　　POF ケーブル

図 2.3　電力ケーブルの構造 [2), 5)]

OF ケーブル、海底 OF ケーブル、POF ケーブルおよび CV ケーブルの製造工程を図 2.4 に示す。工程毎にドラム又はターンテーブルに巻き取られてから次

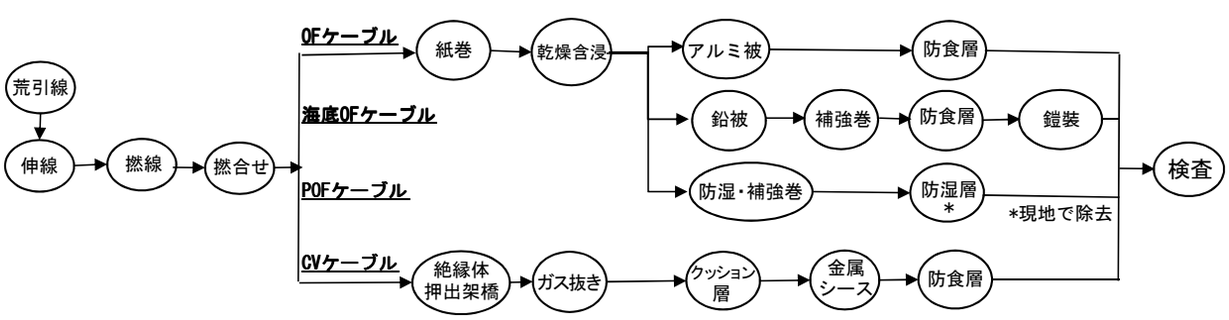


図 2.4　ケーブルの製造工程図

工程にて加工される。ケーブル製造設備の一例としてOF ケーブルおよび POF ケーブルで使用する紙巻機と 6.5m 乾燥含浸缶の写真を図 2.5 および図 2.6 に示す。OF ケーブルおよび CV ケーブルの製造には電圧および長さにもよるが半月～２ヶ月程度の製造日数を要する。特に 275kV 以上の長尺ケーブル製造の場合、OF ケーブルでは乾燥含浸工程、CV ケーブルでは絶縁体押出架橋工程が重要な工程である。

図 2.5　紙巻機 [2]

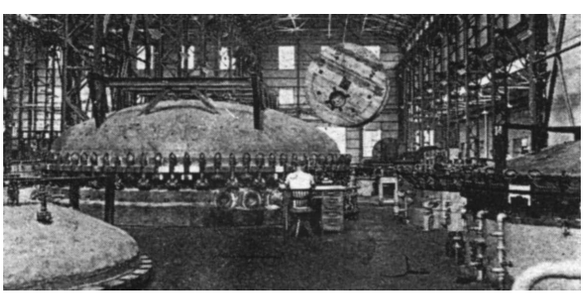


図 2.6　乾燥缶 [3]

地中送電線の送電電圧を上げるためにはケーブル絶縁体を厚くする必要があり、送電電流を大きくするには導体サイズを大きくする必要があり、ケーブル外径が大きくなる。導体温度には制約があり (例えば CV ケーブルでは 90℃)、電流を大きくするためには、導体、絶縁体および金属シースの発生損失をできる限り小さくする必要がある。

地中送電線の技術開発は、主に高電圧化、大電流化を果たすための導体、絶縁体および金属シースの開発の歴史であり、各構成部をいかにコンパクトにして実用運転に耐えるものを製造および施工できるかにある。

電力ケーブルは、輸送するドラムの大きさと重量に制約があり、ケーブル運搬長は制限され、一般的には、数百 m 程度に分けて運搬し、図 2.1 に示したように中間接続箱を設けてつなげられる。他の設備へ接続するための終端接続箱も必要である。これらの接続箱はケーブルと同等以上の耐電圧特性を有し、かつコンパクトで施工性の良いことが必要である。現在では、CV ケーブルが油を使わないメンテナンスフリーであるという理由から OF ケーブルに代わって主に使用されている。

OF ケーブルについては、1930 年に我が国初の 66kV OF ケーブル線路が布設されて以来、1994 年に長距離 500kV OF ケーブルが実用化された。CV ケーブルについては、1964 年に 70kV CV ケーブルが布設されて以来、2000 年に長距離 500kV CV ケーブル線路が実用化された。日本発の技術である管路気中送電線 (GIL Gas Insulated Transmission Line) が、短距離線路で 1979 年 154kV 線路に布設されて以来 500kV 線路まで使用されている。1998 年中部電力 (株) 新名古屋火力発電所の引出し線として 275kV 管路気中送電線 亘長(こうちょう)3.25km(定格電流 6300A) が実用化されている [4]。世界最長の GIL 線路である。

引用参考文献

(1)　電気学会電気専門用語集　No.21: 送電線路　コロナ社　(1988)

(2)　フジクラ 100 年の歩み : 藤倉電線　(1987)

(3)　新電力ケーブル工場 : 藤倉電線技報　第 8 号　p1 (1955)

(4)　五味ほか :「275kV 長距管路気中送電線 (GIL) の建設」古河電工時報　第 101 号　p47 (1998)

(5)　フジクラ製品案内 : (株) フジクラ　(2000)

3 模倣技術による国産化 1950年代後半(昭和30年代前半)まで

電力ケーブルはEdisonにより1879年に米国ニューヨーク市に布設されたエジソンチューブにはじまる[1]。1910年代からのソリッドケーブルの使用を経て、海外からの技術導入を行い、1930年に日本で初めてOFケーブルが66kV以上ケーブルに使用された。世界第二次大戦中はほとんど生産されなかったが、1951年以降経済の安定化と産業の復興とともに66kV以上OFケーブルは急激に増加した。

3.1 ソリッドケーブルの時代

1812年にロシアのSchillingが鉱石爆破にゴムとワニスを絶縁としたケーブルを使用したことが始まりとされている。1879年にEdisonが電力伝送を目的で銅棒にジュートを巻き鉄管に入れコンパウンドを詰めたケーブルを発明しニューヨークに布設したのが電力ケーブルの始まりと言われている。1889年にFerrantiが10kV油浸紙絶縁ケーブルを製造しDeptfor～London間に布設した[1]。このケーブルが送電用の電力紙ケーブルの起源と言えよう。

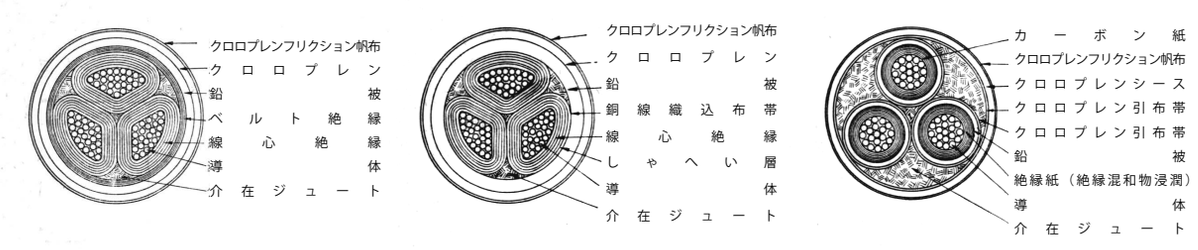
日本の最初の電力ケーブルとして、1903年に6.6kV 152mm^2 3心鎧装(がいそう)ケーブルが東京電車鉄道会社の大崎発電所から今川橋・浜松町変電所に布設した。輸入品であつた[2]。国産初の電力ケーブルとして、1911年に京都電灯の伏見火力発電所に11kV紙絶縁ケーブルが(株)住友電線製造所(現住友電気工業(株)、以下1938年まで住友電線と記述)により布設された[2]。絶縁厚は9mmであった。その後1922年には22～33kVのHケーブルやSLケーブルなどが使用されるようになった。1923年以降この種のケーブルの一部が66kV級ケーブルに使用されたが普及しなかった。

図3.1に示すように3心ケーブルで、ベルトケーブル、Hケーブル、SLケーブルに分けられ、これらを総称してソリッドケーブルと言われている[3]。ベルトケーブルはケーブルコアの表面に遮蔽層がない。一方Hケーブルは遮蔽層に金属織込布帯、SLケーブルは鉛被を使用している。

ベルトケーブルは遮蔽層がないため、ケーブル絶縁紙の沿層方向に電界が発生し絶縁上の弱点となり10kV以下のケーブルにしか使用されない。SLケーブルについては、1928年に藤倉電線(株)(現(株)フジクラ、以下1991年まで藤倉電線と記述)が山口県電気局宇部第二発電所向け44kV 3×300mm^2 鋼帯鎧装SLケーブル亘長2.5km 1回線を納入した。ケーブル外径は120mmと当時最大径のケーブルであった[4]。

しかし、SLケーブル、Hケーブルの構造は、導体上に絶縁紙を巻いて乾燥し、粘度の高い絶縁油あるいは絶縁混和物を含浸して絶縁層を形成するものであり、ベルトケーブルに比べ耐電圧性能は向上するが、ケーブル導体電流の変化や、布設形状で高低差があると絶縁油が移動し、絶縁体内に空隙が発生する。従って、ある程度以上の高電圧になると絶縁体中の空隙でイオン化し絶縁層が劣化し、耐電圧特性低下の問題があった[3]。

これらの理由により、電力需要の増大に伴う使用電圧の上昇に対して、高い電圧までイオン化しないケーブルが要求されるようになった。このイオン化を抑えるための手段として、流動しやすい油に常時内部から圧力または外部から圧力をかけるか、絶縁体にガスを入れてガス圧を高くするかなど、圧力を加える方法によりそれぞれ異なるタイプのケーブルが開発された。大きく分けると、ガス圧力型ケーブル(ガス圧ケーブル、パイプ型ガス入ケーブル、パイプ型ガスコンプレッションケーブルなど)と加圧油入りケーブル(OFケーブル、扁平型OFケーブル、POFケーブル)に分けられる。275kV以上の超高圧に使用されたケーブルは、

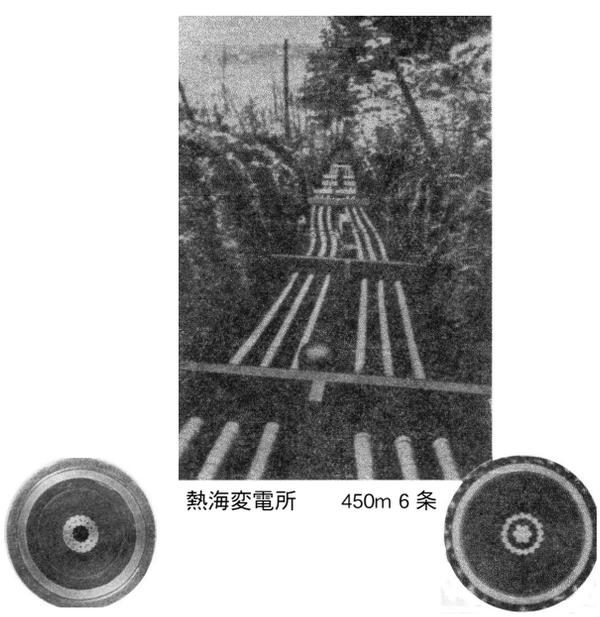


(a) ベルトケーブル　(b) Hケーブル　(c) SLケーブル

図3.1 ソリッドケーブルの構造[1]

含浸油を直接加圧するOFケーブルとPOFケーブルが使用された。

我が国最初の66kV電力ケーブルは、1928年に東京電燈(株)の熱海変電所に布設された[2), (5)]。架空送電線から変電所への引込には用地問題により地中に埋設した電力ケーブルが使用された。古河電気工業(株)(以下古河電工と記述)により「Hケーブル」、住友電線により現在のOFケーブルに近い内部油通路を有する「油充填ケーブル」が布設された。高粘度油が使用されている等いわゆるOFケーブルと異なる点がある。最大使用温度は住友電線製ケーブルが50℃(⊿T=20℃)、古河電工製ケーブルが37℃(⊿T=7℃)と記されている[(5)]。布設箇所は、線路長450mのうち最大33度平均16度の急傾斜地で高低差105mあることも特殊である。布設状況と使用されたケーブルの断面写真を図3.2に示す。両ケーブル共に導体サイズ、絶縁厚はほぼ同じであった。



第1號ケーブル(住友電線)　第2號ケーブル(古河電工)
導体サイズ　125mm^2　絶縁厚　約 16mm
ケーブル外径　約65mm

図3.2 日本最初の66kVケーブル[(2)]

この線路は、15年間支障なく運転されていたが、1942年8月にケーブルの傾斜部にて故障が発生し、撤去調査された。故障したケーブルが第1号線(住友電線製)か第2号線(古河電工製)かは記されていない。第1号線、第2号線について、ワックス試験、マゼンダ試験が行われている。「第2號ケーブルは電気的特性に於いて布設當時と殆ど變化なく又採取試料と現場試験結果に大差なき處局部的に劣化進行せる部分は先ずないものと判断され、第1號ケーブルは油の浚潤良好な變電所側終端部附近に於ては布設後の劣化は認められないが、ワックス生成の甚だしい急傾斜地附近では電氣的特性が全般的に低下して居り、使用電壓以下にて電離現象が生じてゐることが明瞭となった。但しワックス自體は電氣的特性に著しい影響も及さぬことも同時に明らかにされた」[(6)]と記されている。第1号ケーブルは高粘度が使用されており、OFケーブルに近い構造であるがこれがワックス化の原因と考える。

3.2 日本におけるOFケーブルの創生

ソリッドケーブルの問題を解決するものとして、OFケーブルが1917年にピレリー(Pirelli)社のL.Emanueliにより発明された。1923年に初めて米国Clevelandで66kV OFケーブルが布設され、1924年には、イタリアに132kV 単心OFケーブル、70kV 3心OFケーブルが布設されている[(1)]。

日本では、1928年にOFケーブルの特許実施権を住友電線がイタリア・ピレリー社から取得した。1930年に住友電線から藤倉電線が前記特許のサブライセンスを取得し、1933年に古河電工が同様にサブライセンスを取得している[(2)]。

日本の最初の66kV OFケーブルは、1930年に住友電線により日本電力(株)の尾久送電線の一部区間(亘長270 m)に布設された[(7)]。東京の尾久変電所への引込みに際し、町内に架空線を使用できず地中化したケーブルで、66kV 単心675mm^{2}鉛被OFケーブル（以下単心ケーブルの場合単心を省略する）が使用された。ケーブル6条が直埋布設された。変電所の容量は15MVAで使われたが、将来45MVAでの使用可能な設計となっていた。

日本最初のOFケーブルである東尾久線のケーブル構造を図3.3に、写真を図3.4に示す。導体上及び絶縁層外側の遮蔽層がない。現在のようにカーボン遮蔽紙は使用されていない。金属シースは二重鉛被となっており、内側の鉛被は絶縁遮蔽の役割を果たしている。二つの鉛被間には圧力対策として0.4 mm厚×10 mm幅の硬銅帯が巻かれている。硬銅帯の内側には紙が1枚と外側には紙3枚と綿テープ1枚が巻かれている。ケーブルの乾燥は予備乾燥を行った後に被鉛され、高度の真空状態で約100℃に於いて長時間乾燥を施し、後特殊に処理を施した流動性絶縁油を浸潤している[(7)]。

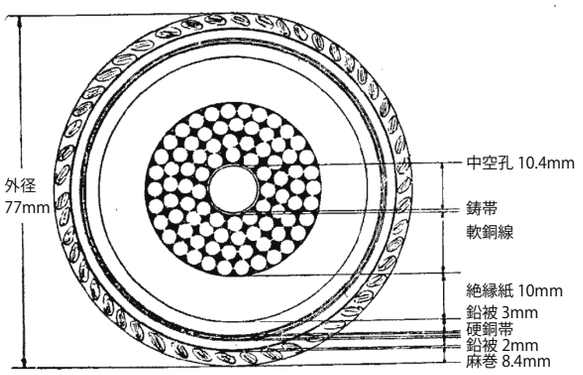


図 3.3　尾久変電所 66kV OF ケーブル [7]

図 3.4　我が国最初の OF ケーブル [9]

使用された絶縁紙、絶縁油が日本製であるかは不明である。この OF ケーブル線路の建設費は架空送電線の 5 倍であったと記されている。

1930 年に布設した我が国初の東尾久線のケーブルについて、55 年後の昭和 60 年にケーブルの電気特性、絶縁紙特性、絶縁油特性、機械特性を調査した [8] が、若干劣化傾向が見られるがいずれも良好な特性を示しており安定した長期性能を有していたことが確認されている。

3.3　1930 年代の OF ケーブル技術

1920 年以降関東大震災からの復興、満州事変後の軍需産業の伸びにより電力需要は急激に増加した。5 大電力会社 (日本電力 (株)、宇治川電気 (株)、大同電力 (株)、東邦電力 (株)、東京電燈 (株))、九州水力電気 (株) および関西共同火力 (株) が 66kV 級 OF ケーブル線路を建設した。

3.3.1 ケーブル構造と特性

66kV 級ケーブル線路の概況と初期性能を表 3.1 にまとめた [7],[11],[12],[13],[14],[15],[16]。1930 年代の OF ケーブル技術の詳細については、(株) フジクラ中山の論文がある [10]。1930 年代の 66kV 級の OF ケーブルは図 3.3 に示したような単心ケーブルであり、細部の相違はあるものの構造はほぼ同じである。導体上及び絶縁層外側の遮蔽層がなく、二重鉛被となっており、内側の鉛被は絶縁遮蔽の役割を果たしている。二つの鉛被間には圧力対策として補強金属帯が巻かれていると共に絶縁油を含浸した紙或いはアスファルト系混和物を含浸したものが用いられている。補強テープは硬銅が使用された例があるが後期には黄銅に集約されている。二重鉛被外側の防食層はアスファルト系混和物を含浸した綿テープ、ジュート等を巻回し、更に同混和物を塗布している。ゴムおよびプラスチックの防食層はない。当時の鉛は純鉛が使用されているが、橋梁部の振動対策或いは高油圧対策として、一部の線路には既に錫 3%[11]、アンチモン [14] を入れた合金鉛が使用されている。

OF ケーブルの耐電圧安定性検証のため tan δ (誘電正接) の電圧特性の試験が行われており、表 3.1 に示すように良好な特性を有していた。交流絶縁破壊強度が現在のレベルに比べ低い原因は導体及び絶縁面に遮蔽がないこと、紙巻方向、絶縁紙および絶縁油の差であると思われる。OF ケーブルの絶縁厚さは H ケーブル、SL ケーブルの半減となった。

表 3.1　1930 年代に布設された 66kV 級 OF ケーブル概要と電気特性 [10]

竣工年	電圧 (kV)	発注社	場所	線路 (km×条)	ケーブル製造社	導体 (mm^2)	絶縁厚 (mm)	絶縁耐力 (kV)	tanδ (%)/℃	高低差 (m)	ジョイント 種類	ジョイント 数/条
1930	66	日本電力(株)	東尾久	0.28×6	住友	675	10	>152	0.60/80			0
1935	55	宇治川電気(株)	三国	3.73×3	住友、古河、藤倉	400	7.2	130〜150	0.30/80	15	NJ,IJ,SJ	38
1937	66	九州水力電気(株)	中原	2.14×6	住友	150	8.5	170	0.23/80	14	NJ,IJ,SJ	8
1938	77	大同電力(株)	春日出	2.4×4	住友、藤倉	400	10	180〜200	0.35/80	8	NJ,IJ,SJ	19
1938	85	関西共同火力(株)	尼崎	0.4×6	住友、古河	500	10.5	220	0.26/60			1
1938	66	東邦電力(株)	佐世保	2.12×6	住友、藤倉	108	8.5	160〜200	0.25/80	68	NJ,IJ,SJ	10
1939	66	東京電燈(株)	六郷	0.8×6	藤倉	300	8.5	>200	0.25/80			2

条;布設条数　　NJ;普通接続箱　IJ;絶縁接続箱　SJ;油止接続箱　FT;重力油槽　PT;圧力油槽
住友 : ㈱住友電線製造所　　古河 : 古河電気工業㈱　　藤倉 : 藤倉電線㈱

3.3.2 絶縁体

当時は電力ケーブルの絶縁紙は (株) 巴川製紙所 (以下巴川製紙所と記述) にて抄造されていたが、原料のクラフトパルプは輸入品であった。0.1mm、0.12mm、0.15mm の厚さの異なる絶縁紙が使用されている。絶縁紙については、大同電力 (株) の 77kV 線路で「静岡縣所在の巴川製紙製クラフト紙」[11] と述べその特性も記載されている。表 3.2 に示すように現在の絶縁紙に比べ、密度が高く、気密度が小さい。密度、気密度は絶縁破壊特性に影響する。ソリッドケーブルの時代は、密度が高い程絶縁耐力は高いとされていたが、1935 年頃気密度も高い方が良いとされスーパーカレンダー処理 (金属ロールと弾性ロールを組み合わせて積み重ねてできたロール間に圧力をかけて通す処理) 紙が使用された [17]。現在は交流用には高電圧化に伴い、低誘電率、低 tan δ 化を図るため低密度・高気密度紙が使用されている。

表 3.2　絶縁紙の特性 [10]

項目		77kV用絶縁紙		現在の絶縁紙	
公称厚さ(mm)		0.125	0.150	0.125	0.150
厚さ(mm)		0.126	0.151	±0.005以内	
灰分(%)		0.5以下		0.30～0.32	
密度(g/cm^3)		0.93	0.86	0.88	0.87
気密度(10^{6}C.G.S)		1.68	1.47	2.0	1.7
抗張力(kgf/mm^2)	縦	9.5	8.7	13.3	12.9
	横	3.3	3.9	2.9	3.1
伸長率(%)	縦	3.0	3.4	2.8	2.8
	横	10.3	10.0	8.7	8.9

パルプは世界第二次大戦前から輸入できなくなり、ケーブルメーカー 3 社と製紙会社 3 社が絶縁紙用パルプ改善協議会を設立し絶縁紙用パルプの国産化を進め、1941 年には実用にできるようになった [18]。日本の自主技術により絶縁紙の国産化は達成した。戦後も絶縁紙の研究は続けられ tan δ の改善がなされた。

絶縁油も、大同電力 (株) の線路で「絶縁油は日本石油製のもの」[11] を使用したとの記述がある。国産変圧器用絶縁油は日本石油 (株) 製で既に開発されており、ケーブル絶縁油に変圧器用のものをそのまま使用したのか、異なった油を使用したのかは不明である。

3.3.3 線路技術

長尺線路に対応した絶縁接続部や給油設備が設置されている。高低差の大きい線路 (例えば表 3.1 東邦電力佐世保) では油止め接続箱が設けられている。給油設備としては、重力油槽 (FT)、圧力油槽 (PT) が給油設計に基づき設置されている。これらの給油設計の考え方は現在とほぼ同じである。

日本で初の OF ケーブル長距離線路として、1935 年に竣工した宇治川電気 (株) の 55kV OF ケーブル 3.73km 線路 [12],[15] が布設された。表 3.1 に示すように 1 回線 1 条当たり、普通接続箱 16 個、油止め接続箱 3 個、絶縁接続箱 19 個と全接続箱数は 38 個でケーブル単長は約 100m と短く、絶縁接続箱が現在より多く使用されていた。ケーブル鉛被端の誘起電圧を 12V 以下に下げるため約 200m 毎に絶縁接続箱か設置されている。鉛被損失を打ち消すため、鉛被接地変圧器を最初に適用した線路である。この対策として現在ではクロスボンド方式が採用されている。

3.3.4 製造技術

製造技術は各社各様で多岐にわたる。絶縁性能を支配する紙巻と乾燥も各社異なり一部紹介されている。紙巻方法は図 3.5 に示すように、重ね巻き (ポジティブ巻き)、突合せ巻き (ネガティブ巻き)、ギャップ巻きがある [10]。当時の絶縁構成状況を表 3.3 に示す。1938 年の大同電力の 77kV 線路では、住友電線のケーブルは全層右巻きで突合せ巻きだけであった。藤倉電線は同じく全層右巻きであったが、導体側と絶縁遮蔽側を重ね巻きとし、中間部を突合せ巻きとしている [11]。図 3.5 の突合せ巻きのギャップ部分と重ね巻きの重なり部分は最大 1.5mm と記されており、この寸法で管理されて製造されたことはかなりのレベルの紙巻き技術を有していたと思われる。交流破壊試験の結果から耐電圧特性は、一般的に重ね巻き > 突合せ巻き > ギャップ巻きとなっており [19]、耐電圧特性を重視した設計になっている。現在は機械的特性を考慮してギャップ巻きが採用されており、20 枚未満の枚数

表 3.3　絶縁層の構成 [10]

竣工 (年)	電圧 (kV)	布設地	製造社	導体 (mm^2)	絶縁厚 (mm)	絶縁層の構成				
						紙厚(mm)	幅(mm)	巻き方	巻き方向	枚数
1930	66	東尾久	住友	675	10.0	0.15	26～35	−	全層左	−
1935	55	三国	住友	400	7.2	0.12	23～34	−		62
			古河			0.1/0.125	20～24			60
			藤倉			0.125	20.5～22			55
1938	77	春日出	住友	400	10.0	0.125/0.15	25	Nのみ	全層右	80
			藤倉			0.125	20～24	P+N+P	全層右	77

P;重ね巻き　N;突合わせ巻き

毎に巻き方向を変えている。戦前に OF ケーブル絶縁体の耐電圧特性について電気学会雑誌および各社技報に定性的かつ定量的にまとめており[19],[20]、技術の高さが伺える。

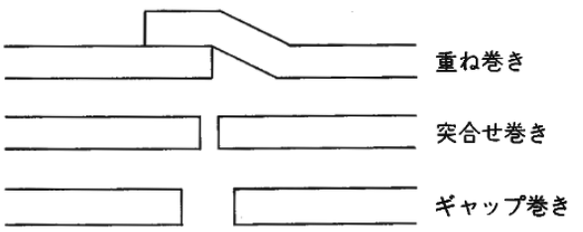


図 3.5　紙の巻き方式[10]

1930 年代のケーブル紙絶縁体の乾燥方式については、各社異なっているが、基本的には最初の一次乾燥 (仮乾燥とも呼ぶ) の後に鉛被を施し、その後再び真空下で高温にて二次乾燥 (本乾燥とも呼ぶ) を所定の時間施し絶縁油を含浸する方法が行われていた。乾燥と含浸に長時間を要し、更に製造できるケーブル長さの制限があった。

本乾燥の条件は 100 ～ 110℃、100 ～ 180 時間の条件、およびこの時の真空引きは導体の油通路から行われており最終真空度は 0.2 ～ 0.3mmHg であった[11]。加熱方法は、スチームによる乾燥缶のみの場合や導体通電加熱による併用が行われており、更に乾燥終点後 CO_2 処理している社もあった。これらの乾燥条件によりケーブルの tan δ 温度特性が若干異なっている。tan δ の値を表 3.1 に示したが、これから分かるようにわが国の OF ケーブルの tan δ 特性は 1930 年代の後期に既に Pirelli 社に並ぶレベルに達成していた。

3.3.5 付属品

気中終端箱は、1930 年に竣工した日本電力 (株) 東尾久送電線の一部に建設された日本初の 66kV OF ケーブル線路[7] に納入されている。この時代の終端箱の構造はほぼ同一である。一例として 1938 年に竣工した大同電力 (株) 向け 77kV 線路[11] の気中終端箱を図 3.6 に示す。内部絶縁は電界遮蔽型である。この終端箱には雷対策として球ギャップ (放電電圧 280kV ～ 290kV) が取り付けられているのが特徴である。

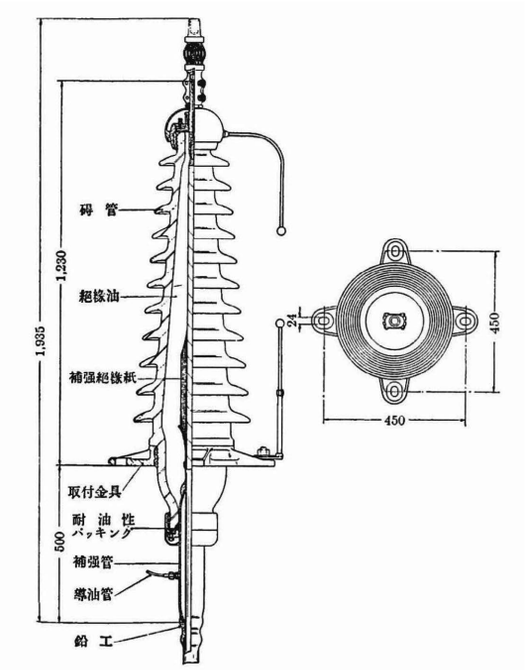


図 3.6　終端箱構造図[11]

OF ケーブルの製造では、乾燥含浸工程など設備能力の制約から製造できるケーブル長さに制限があった。当時の最大ケーブル製造長は約 400m であり[16]、数 km の線路にするためには接続箱が必須となる。

1935 年に竣工した宇治川電気 (株) 向け 55kV 線路では、約 100m 間隔で接続箱が設けられている 。当線路では「附属品は Pirelli の原設計のもの内で、内地工員の技能、體格を考慮して適黨に設計を變えた」[12] と記しているが海外設計からの変更点はわからない。接続管の電気性能と品質の維持のためにはジョインターの技能に依存する面が強かった。図 3.7 に「普通接續順序圖」の導体接続の仕方が示されている。現在と異なり銅スリーブに予め凹凸を設け圧縮接続している。接続管の外管には銅管を用いており、ケーブル鉛被との接続には鉛工 (鉛を溶解して接続) 方式を採用しており、特殊技能が必要である。絶縁接続箱の外部絶縁筒には、住友電線が碍子を古河電工がベークライト[15] を使用している。藤倉電線はケーブル部分にベークライト絶縁筒を設置する方式を用いていた[12]。当時はユーザーが各製造社独自の設計を認めていた。その後絶縁接続箱は碍子絶縁筒の仕様に集約されていく。

この時期での接続箱の例として、大同電力 (株) 向け 77kV 線路における絶縁接続箱、油止め接続箱を図 3.8 と図 3.9 に示す。この線路のケーブルは住友電線と藤倉電線が納入しているが、接続箱はすべて住友電線が納入施工している。

昭和 30 年代まで 66kV 級 OF ケーブル用接続箱として基本的に同様な構造のものが使用されていた。油止め接続箱の構造は現在と異なり、襞のない碍管を対向させて油止めを行い、その間を油浸紙で谷埋め使用した構造であった。長さが 1840mm、胴径が 255mm と極めて大きかった。OF ケーブルの油止め接続箱は、当時油止めのため碍管が使用されていたが、現在ではエポキシ套管又は FRP 套管が使用され、コンパクト化が図られている。

接続箱の電気性能はケーブルと同等又は同等以上の電気特性など信頼性を要求されている。接続箱の構造は各社異なる設計をしていたが接続箱の寸法は仕様で決められていた。ケーブルの使用電圧の上昇に伴い 500kV まで接続箱の信頼性アップとコンパクト化の開発が長年続けられた。

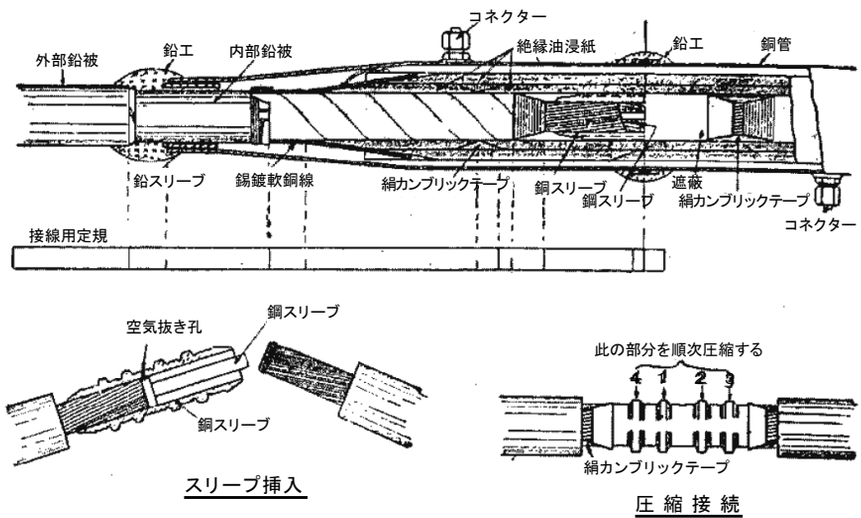


図 3.7　導体接続作業順序図 (12)

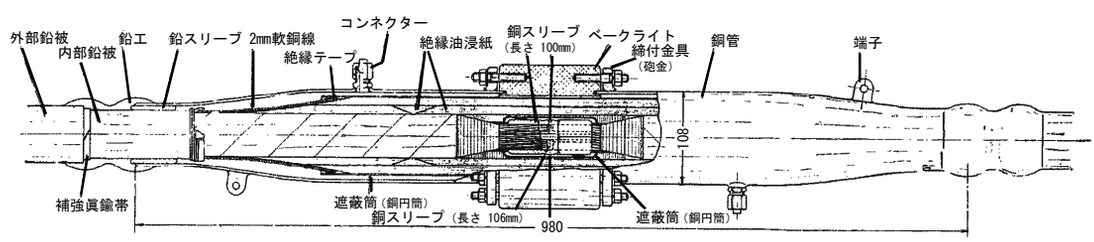


図 3.8　絶縁接続箱構造図 ((11)

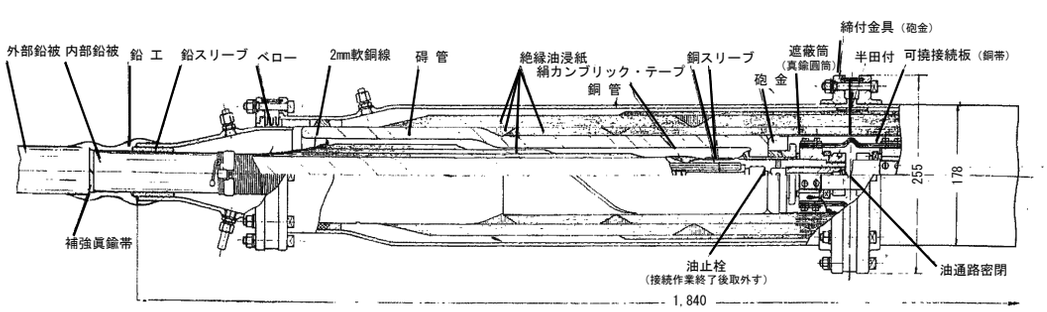


図 3.9　油止め接続箱構造図 (11)

3.4　戦後の OF ケーブル

3.4.1. 戦後復興期の OF ケーブル線路

世界第二次大戦による戦災で各電線会社の工場は再建に時間を要した[2]。所蔵の書類も多数喪失している。

1948 年になって電線需要は戦前の水準に戻ったが、1940 年代後半はまだ SL ケーブルが主に製造され、OF ケーブルの量は少なくその合間をぬって製造されていた。戦後初めての OF ケーブルは 1950 年に大阪市内に布設された。日本発送電 (株) 向け春 2 新線 77kV 400mm^2 OF ケーブル (亘長 2.7km) 及び東春 2 連絡線 77kV 150mm^2 OF ケーブル (亘長 2.7km) である。住友電気工業 (株)(1939 年に (株) 住友電線製作所が社名変更：以下住友電工と記述) と古河電工が納入した[2]。

1951 年以降経済の安定化と産業の復興とともに電力需要は増大し、66kV 以上 OF ケーブルは急激に増加した。1952 年に日本国有鉄道は、電力増強のため 66kV 200mm^2 OF ケーブルを大量に布設した。新鶴見、大井町間亘長 14.5km 3 条 1 回線で、住友電工、古河電工、藤倉電線の 3 社が納入施工した[2],[21]。このケーブルを図 3.10 に示す。この線路は長く、ケーブルの充電電流 (誘電体に電圧を印加した時に流れる電流) は当時世界最大のものであった。負荷電流によるケーブルの温度上昇、油圧変化、ケーブルの伸縮などの課題が検討され実用化された。更に同年に亘長 16.6km の堺、新大久保間 66kV 200mm^2 OF ケーブル 1 回線も実用化された。

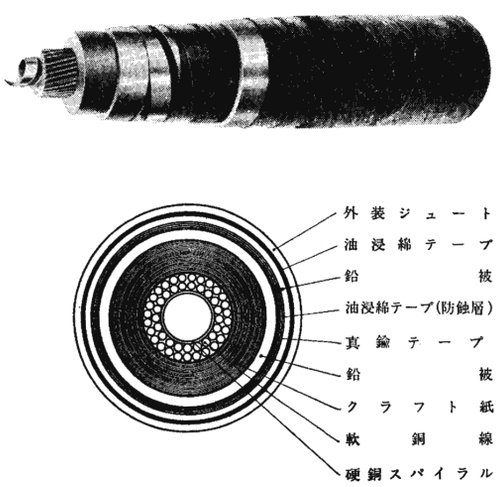


図 3.10　66kV 200mm^2 OF ケーブル[2]

1953 年以降は、東京電力 (株)(以下東京電力と記述) は、東京都心への電力供給設備として 20kV 系統では余力がなくなり、60kV 系統での直接都心部へ導入する計画となった。このため都心の変電所を日比谷に設置し電力を供給する計画となった。

従来は 66kV 単心 OF ケーブルが使用されていたが、管路条数の削減と既設管路の有効活用のため、ケーブル条数を極力減らす必要があり、日本最初の 66kV 3 心 OF ケーブルが採用された。ケーブル 1 回線の送電容量は 30MVA である。この線路の亘長は 9.6km、ケーブルは 2 条で図 3.11 に示す 66kV 150mm^2 3 心 OF 2 重鉛被ケーブル (絶縁厚 8.0mm) が使用され、2 重の鉛被の間には銅テープと防食のための含浸テープが巻かれた。1952 年に住友電工、古河電工、藤倉電線が納入した[2],[21],[22]。このケーブルの tan δ 特性は、図 3.12 に示すように温度 80℃ と電圧 38kV の条件で 0.26(%) であり、戦前の OF ケーブルと殆ど変化はなく、絶縁設計と製造の変更はされていないことがわかる。

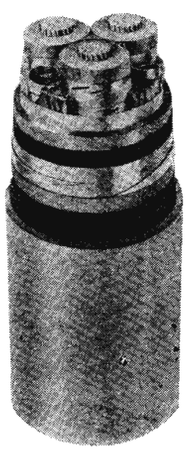


図 3.11　66kV　3 心 OF ケーブル[2],[22]

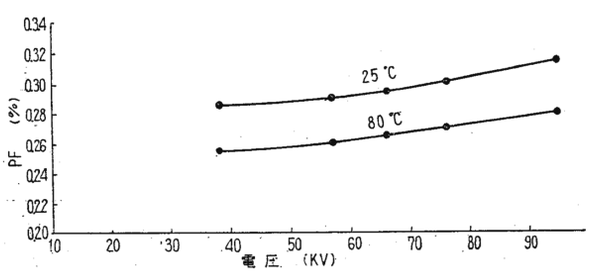


図 3.12 日比谷線 66kV　OF ケーブルの tan δ - 電圧特性[22]

1954 年以降、多数の 66kV 及び 77kV 3 心 OF ケーブルが布設された。1955 年になって東京電力では火力発電所増強の計画を進め、新設した新東京火力発電所 (132MW) の電力を内輪線に送電する計画となった。このため 1955 年に同発電所から南鞘町変電所までの

亘長約 5km 及び田端変電所までの亘長約 10km に、66kV OF ケーブル (550mm^2/5km,500mm^2/10km:2 回線) が、古河電工、住友電工、藤倉電線、昭和電線電纜 (株)(以下昭和電線と記述) により布設された [2),(23)]。ケーブル布設は 3 条一括で 200mm 管路に引き入れた。ケーブル接地方式としてはクロスボンド方式が採用されている。この線路の隅田川横断には図 3.13 に示すような 66kV 550mm^2 OF クロロプレン防食銅線鎧装ケーブルが使用された。この区間のケーブルの製造施工は古河電工により行われた [(2)]。

図 3.13　66kV 河底 OF ケーブル (2 重鉛被)[(2)]

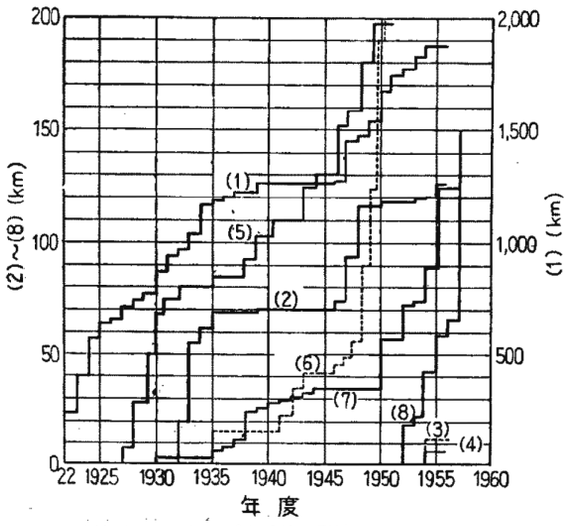
1950 年以降の OF ケーブルの増加は著しく図 3.14 に示すように 1957 年までの 8 年間で日本における全 66kV OF ケーブル布設量の約 90% を占めている [(24)]。当時の日本における布設量は、フランス及び米国に近い布設量となっており、日本の高度経済成長期の始まりの時期にあたる。しかし高電圧化については、スウェーデンでは既に 380kV OF ケーブルまで実用運転されており、またフランスでも 220kV 級ケーブルが多数運転されており [(25)]、日本の OF ケーブルの高電圧化技術は遅れていた。

3.4.2 海外技術の導入

戦前から復興期までのケーブルの新技術は、海外メーカーからの技術提携によるものもあるが、文献などの情報から独自に調査したもの、全く自主技術で実用化したものもある。以下にこの時期に実用化された主な技術を記す。

(1) クロロプレン防食

クロロプレン防食ケーブルは既に海外で実用化されていた。クロロプレンが 1951 年に輸入許可され、ケーブルの防食用被覆として使用検討がなされ、日本で初



パリ地区 63kV ケーブル系統の発達
（1）ソリッド形ケーブル，（2）OF 形ケーブル，
（3）パイプ形ケーブル，（4）ガス入鉛被ケーブ
アメリカにおけるパイプタイプの進出
（5）OF ケーブル，（6）パイプ形ケーブル
日本における 60kV，70kV OF ケーブルの発達
（昭和 32 年現在）
（7）単心ケーブル回線延長 135,680m，
（8）3 心ケーブル回線延長 157,483m

図 3.14　欧米との 66kV 以上ケーブルの布設量比較 [(24)]

めて 1958 年に日本国有鉄道 66kV 200mm^2 1 重鉛被クロロプレン防食 OF ケーブル (納入社 ; 古河電工、住友電工、藤倉電線、昭和電線電纜 (株)(以下昭和電線と記述) に使用された [(2),(21)]。従来 2 重鉛被であった構造がクロロプレン防食を採用することにより 1 重鉛被とすることができ、従来 66kV 単心ケーブルとの比較では約 20% の重量が軽減された。昭和 30 年代にはクロロプレン防食が標準となっている。

(2) クロスボンド方式

ケーブルの鉛被の循環電流に伴うシース損を低減するため、海外で実施されていたクロスボンド方式が 1954 年に関西電力（株）（以下関西電力と記述）木津川線 77kV 400mm^2 OF 防食ケーブル線路 (古河電工納入) に日本で初めて採用された [(2)]。クロスボンド方式は、図 3.15 に示すように絶縁接続箱を設け、各相のケーブル金属シースをクロスに切り替え接続して 3 区間毎に接地するもので、3 相導体電流による各相金属シースの誘起電圧を 1 区間毎に切ってキャンセルし減少させ、シース電流を抑制させるものである。当時はシース損を減少するため特殊な接地用変圧器を設置していたが、この装置が当時トラブルの多く問題となっていた。このクロスボンド方式は線路の信頼性向上に大きく貢献している。ケーブルシース損低減の方式としてクロスボンド方式が現在でも広く使用されている。

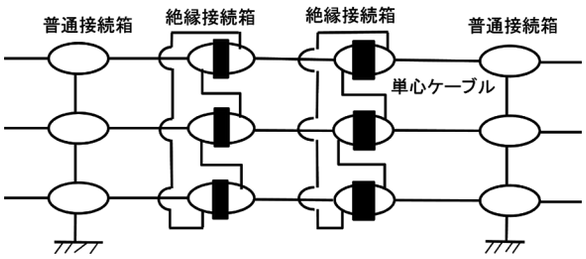


図 3.15　クロスボンド方式

3.4.3.　ケーブル製造設備の増強

送電電圧の上昇、ケーブルの長尺化、大導体化、品質向上に対応するため、1955 年頃から電線メーカー各社は製造設備の増強を実施した。1955 年に藤倉電線は、建坪 8300m^2、棟の高さ 15.5m の建家を新設し、180 枚の紙巻を一度にでき、紙巻きコントロールのできるスイスのマイファー社製新型紙巻き機を導入し、自主技術で直径 6.5m 大型乾燥缶と大型真空排気装置などを新設し、超高圧試験設備も拡充した[(4),(26)]。これらは 1960 年代の長距離 275kV ケーブル線路建設を睨んだ設備増強であった。

3.5　まとめ

1928 年にイタリアピレリー社から OF ケーブル特許の実施権を受けて、1930 年に日本で初めての 66kV OF ケーブルが日本電力 (株) 尾久変電所に布設された。その後宇治川電気 (株) 三国変電所に接続箱入り長距離 55kV OF ケーブルが布設された。1930 年代の OF ケーブルの絶縁特性は既に先行していたヨーロッパメーカーと遜色ないものであった。

紙巻き機など主要の製造装置は海外製のものを使用していた。絶縁体については、紙のもとになるパルプは輸入品であったが、巴川製紙所製造の絶縁紙が使用され、日本石油 (株) 製造の絶縁油も使用されていた。パルプは世界第二次大戦前から輸入できなくなり、国産化を進め、1941 年には実用にできるようになった。日本の自主技術により絶縁紙の国産化を達成した。

1930 年代には既に OF ケーブル絶縁体の耐電圧特性について電気学会雑誌、各電線メーカーの技報にも定性的かつ定量的にまとめており、技術の高さが伺える。このような取組みが、電力ケーブルの技術を世界トップクラスに発展させた礎になったと考える。

ケーブル技術の発展は、第二次世界大戦における戦中と戦後において約 10 年間のブランクがあった。日本の復興とともに電力ケーブルの需要は増え、1952 年に布設された日本国有鉄道向け 66kV 単心 OF ケーブルの線路長は 14.5km と当時の 66kV 級として世界最大のものであった。更に 1952 年に、東京電力日比谷線向けに、管路条数の削減と既設管路の有効活用を目的として、日本最初の 66kV 3 心 OF ケーブルが建設された。

クロロプレン防食などまだ海外技術の模倣もあったが、施工まで含めたケーブル、付属品、給油システムについて日本固有の設計法も確立され、この頃には、日本の技術は独り立ちできたと考える。

1955 年頃から電線メーカー各社は競って製造設備の増強を実施し、自主技術による製造技術の改善が進められた。1960 年代後半の長距離 275kVOF ケーブル線路の建設を睨んでの先行投資と技術開発を進めた。

引用参考文献

(1)　電線ケーブルハンドブック　電気書院 第 1 版 1974 年
(2)　電線史　日本電線工業会　昭和 34 年　(1959)
(3)　加賀谷 : 超高圧送電　日刊工業新聞社　昭和 36 年 (1961)
(4)　藤倉電線社史　　藤倉電線 (株)　(1973)
(5)　佐藤 :「熱海変電所の六万六千ヴォルト地中ケーブル」 電学誌 48 巻 6 号 p589　(1928)
(6)　菊池 :「本邦最初の 66kV ケーブルの實積」電学誌 64 巻　673 号　p247　(1944)
(7)　山本 :「尾久変電所の 66,000 ヴォルト油充填式地中電纜」電学誌 51 巻　521 号 p857　(1931)
(8)　大野ほか :「日本で初めて布設した 66kV OF ケーブルの特性」昭和 61 年電気学会全国大会 No.1373 (1986)
(9)　小島 :「OF ケーブルの技術進歩と将来展望」住友電気　第 117 号　p175　(1980)
(10)　中山ほか :「今日から見た 1930 年代の OF ケーブルの技術」 フジクラ技報　第 88 号　p18　(1995)
(11)　出井 :「大同電力の 77kV OF 式地中送電線の概要」電学誌 58 巻　601 号　p626　(1938)
(12)　鳥居ほか :「三国大仁両変電所間の 55kV O.F. ケーブル式地中送電線路に就いて」電学誌 55 巻 12 号 p1021　(1935)
(13)　鈴木 :「日本最初の長距離直埋式 66,000V O.F. ケーブル」住友電線彙報　第 15 号　p43　(1937)
(14)　佐藤 :「東邦電気佐世保附近 66kV 油入ケーブル工事概要」 電学誌 59 巻 12 号　p646　(1939)
(15)　洞沢 :「宇治川電気株式会社納入油入式ケーブル」

古河電工時報　第 4 号　p108　(1935)
(16) 鈴木ほか :「77,000V 用 O.F. ケーブルと油量指示並びに警報装置について」住友電線彙報　第 16 号　p37　(1937)
(17) 小杉ら :「O.F. 式ケーブルの電壓破壊」電学誌 55 巻第 8 冊 565 号　p646　(1939)
(18) 斎藤、武共編 :「電気絶縁紙」 コロナ社　(1969)
(19) 北川ほか ;「O.F. ケーブルの電壓破壊」電学誌 63 巻 662 号　p634　(1943)
(20) 末光 :「高油壓の OF 式ケーブルに就いて」藤倉電線彙報　第 7 号　p7　(1938)
(21) 有馬 :「電力ケーブルの趨勢」住友電気彙報　第 56 号　p1　(1955)
(22) 武藤ほか :「日比谷送電線用 60kV 150mm^2 3 心 OF ケーブル」藤倉電線技報　3 号　p20　(1953)
(23) 加賀谷ほか :「東京電力新東京火力送電用 60kV OF ケーブルの試験結果」藤倉電線技報　第 9 号 p40　(1956)
(24) 加賀谷ほか :「高壓ケーブルの最近の動向」 電学誌 80 巻 864 号　p111　(1960)
(25) 加賀谷 :「欧州の電力ケーブル事情見聞記」藤倉電線技報　第 13 号　p1　(1957)
(26)「新電力ケーブル工場」: 藤倉電線技報　第 8 号 p1　(1955)

4 海外技術をベースとした発展 1950年後半(昭和30年前半)～1970年(昭和45年)頃

自主技術により1958年に154kV OFケーブル線路を建設した。フランスのリヨン社(Les Cable de Lyon)から薄紙絶縁技術の導入を図り、1960年に287.5kV OFケーブル線路を建設した。波付きアルミ被が実用化され、日本の自主技術により低損失の脱イオン水洗紙および合成油を実用化した。

架橋ポリエチレン材料自体はアメリカGE社の特許であるが、日本ではこの材料に早くから着目して1960年頃に電線メーカー各社ともGE社とライセンス契約を結びCVケーブルの実用化を進めた。製造方式の改善を進め、日本独自の内外半導電層と絶縁層の3層同時押出方式を開発した。常に日本が先行してCVケーブルの実用化が進められた。

4.1 OFケーブルの高電圧化

4.1.1 長距離154kV OFケーブル線路

1955年頃になり、電力の需要が急激に増大し、水力および火力の発電所が随所に建設された。発電された大電力を需要地に輸送するため、架空送電線として1951年に275kV超高圧架空送電線が実用化され、多導体化による送電容量のアップが図られた。一方都市内においても従来の60～70kV級の電力ケーブルだけでは電力系統間の連系及び電力の都市中心部への導入などは技術的に困難になり、154kVの線路が必要となった。東京電力は都心の東北部に位置する蔵前変電所から花畑変電所に至る一部架空線区間を除く約9.5kmの間に154kV OFケーブル2回線を計画した。

1952年頃から、住友電工、古河電工、藤倉電線、昭和電線の各社が140kV OFケーブルの試作試験を行った[(1),(2),(3)]。各社とも新技術として、①導体遮蔽及び絶縁体遮蔽にカーボン紙を使用、および②薄紙を導体側に使用し漸次厚さを増すグレーディング方式を採用した。0.055mm薄紙を使用したケーブルの試作試験を行い、140kV級ケーブルとして充分な性能を有することを確認した[(2)]。

この結果を踏まえ、上記4社が1958年に東京電力蔵前線　154kV 600mm^2 鉛被OFケーブルを納入した[(3),(4),(5)]。ケーブル構造は表4.1に示す通りで、0.07～0.125mm絶縁厚紙でのグレーディング(導体上から絶縁表面に向かって漸次紙厚さを増す方法)を行い、絶縁厚は14mm(内外遮蔽含む)である。ケーブルの写真を図4.1に示す。接続箱については基本的な絶縁構成は66kV級接続箱と変わらない。絶縁接続箱を図4.2に示す。ケーブルと接続箱の大きさは表4.2に示すように、油止め接続箱が胴径350mm、長さ2500mmと66～77kV級と比べると比率で大きくなっている。油止め接続箱の寸法はおおきく改善が必要であった。

表4.1　蔵前線　154kV OFケーブルの構造[(5)]

油通路	内径	14mm	亜鉛鍍鋼
	外径	15.6mm	0.8×6mm
導体	公称断面積	600mm^2	撚り線構成
	計算断面積	608.7mm^2	124/2.5mm
	外径	35.6mm	
絶縁体	導体遮蔽	14mm	カーボン紙2枚
	絶縁厚		70μ, 100μ, 125μ
			グレーディング
	絶縁遮蔽		カーボン紙2枚
鉛被厚さ		3.4mm	純鉛
補強層	テープ構成	1/2ラップ	クロロプレン綿テープ1枚
		0.2mm	真鍮テープ　1枚
		1/2ラップ	クロロプレン綿テープ1枚
		0.2mm	真鍮テープ　1枚
防食層		4.0mm	クロロプレン
概算外径		約85mm	
概算重量		20kg/m	

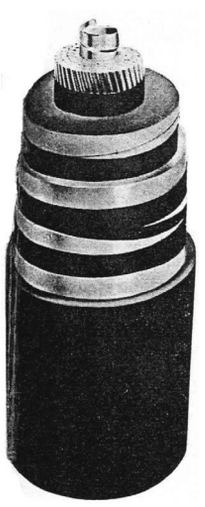


図4.1　蔵前線154kV OFケーブル[(5)]

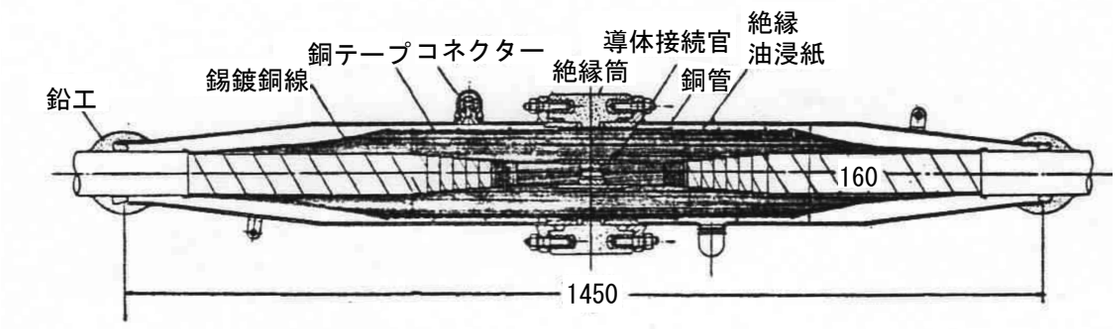


図 4.2　蔵前線 154kV 絶縁接続箱の構造 [5]

表 4.2　77kV と 154kV OF ケーブル及び接続箱の寸法比較

会社名	線路名	電圧	ケーブル			直線接続箱		油止め接続箱	
			導体サイズ	絶縁厚	外径	胴間直径	長さ	胴管直径	長さ
		kV	mm^2	mm	mm	mm	mm	mm	mm
大同火力	春日出発電所	77	400	10	72	108	980	178	1840
東京電力	蔵前線	140	600	14	85	160	1450	310	2500
比率		1.82	1.50	1.40	1.18	1.48	1.48	1.74	1.36

4.1.2 短距離 287.5 kV OF ケーブル線路

(1) リヨン社からの薄紙絶縁電力ケーブル技術導入

1956 年に住友電工がフランスのリヨン (Lyon) 社と契約して、「交流 60kV 以上、直流 100kV 以上の薄紙絶縁電力ケーブルに関する技術導入」[6] を行った。古河電工および藤倉電線は前記薄紙ケーブル技術の再実施権を得た[6]。当時日本では電力ケーブル用絶縁紙の厚さには 0.125mm 紙を使用して、特別な場合だけ 0.07mm 紙を使用していた。リヨン社では、0.02mm までの絶縁紙を使用し更にグレーディングをする設計を行い、0.100mm 紙だけ使用したケーブルよりも図 4.3 に示すように衝撃波 (インパルスとも言う) 破壊ストレスを約 50% 向上させ、交流でのイオン化ストレスを約 30% 程度上昇させている。OF ケーブルだけでなくパイプ型ケーブルなど他の紙ケーブルにも薄紙を巻くことにより絶縁厚を薄くできる[7] のでその利点は著しかった。

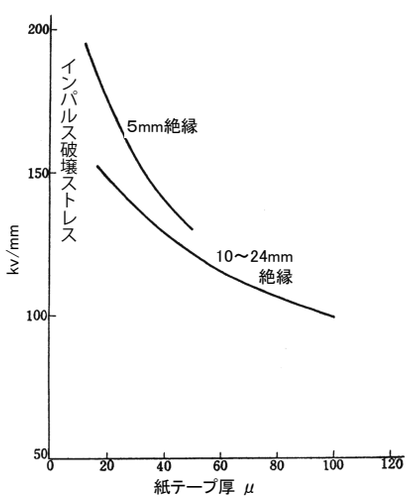


図 4.3　紙テープ厚とインパルス破壊ストレス [7]

(2) 奥只見発電所　287.5kV 高油圧 OF ケーブル

電源開発 (株)(以下電源開発と記述) 奥只見発電所では、発電出力 360MW(高圧側 287.5kV) を架空送電線へ接続する引出し線 (3 回線) として OF ケーブルが必要であった。日本でも各社は 1957 年頃より、287.5kV 高油圧 OF ケーブルの試作を始めていた[8],[9]。

海外では、1950 年代前半にはスウェーデンにおいては、既に 380kV および 425kV、カナダにおいては 300kV の OF ケーブルが布設されていた。前者は Lyon 社製 (フランス) および ASEA 社製 (スウェーデン) が使われ、後者では Pirelli General 社 (イギリス) および Canada W.C. 社製 (カナダ) が採用されていた。これら欧米の超高圧ケーブルと 287.5kV 試作ケーブルの比較した結果を表 4.3 に示す。ケーブル構造および特性的には遜色ないものであった[9],[10] が、高電圧化については海外に比べ 10 年程度の遅れがあった。

日本各社は、短尺モデル OF ケーブルなどを用いて絶縁特性の検討をしている[8]。絶縁紙に関する衝撃波電圧特性の改善結果の一例として図 4.4 に示す。絶縁体に関する技術上の改良点は以下の通りである。

- 0.025mm までの薄紙を使用し、0.125mm 紙に比べ衝撃波電圧で約 60%、交流で約 35% 耐電圧性能が向上。
- 低密度、高気密度紙を採用し、従来のクラフト紙より耐電圧性能が約 10% 向上。
- 導体上にカーボン紙を使用し、衝撃波電圧で約 10%、交流で約 15% 耐電圧性能が向上。

表 4.3　欧米の 400kV 級 OF ケーブルとの比較 [9],[10]

項目		スウェーデン		カナダ		スウェーデン	日本
電圧	kV	380	380	301	300	425	287.5
導体断面積	mm^2	500	600	570Al	258	1096	200
布設場所		Harspranget P.S.		Kitimat P.S.		Lasele P.S.	試作品
年		1951	1950	1954	1954	1954	1957
製作者		ASEA	Lyon	Canada W&C	Pirelli General	Lyon	藤倉
導体遮蔽		なし	なし	なし	カーボン紙3枚	カーボン紙3枚 +片面カーボン紙	カーボン紙2枚 +片面カーボン紙
絶縁体	mm	28	25.4	27.7	24.1	22	22
	構成	約500枚	14μ以上	62.5μ/125μ	89μ～190μ	12μ以上	55μ,100μ,125μ
外部遮蔽		あり	アルミ箔紙	銅テープ	カーボン紙3枚 +金属化紙	カーボン紙 +金属化紙	カーボン紙2枚 +金属化紙
鉛被	mm	5.5+3.5	6.0	4.4	2.9	5.5+2.8	3.2
補強層		軟銅テープ及び 硬銅テープ	ステンレス鋼 テープ	なし	珪鋼テープ	ステンレス鋼 テープ	ステンレス鋼 テープ
防食層		PVCテープ	なし	なし	ゴムサンドウィッチ	なし	PVCシース　3.5mm
外径	mm	118	99	98	97.2	110	90
油圧	kg/cm^2	4～10	14～23	2.0	3.5	15	5～15
送電容量	MVA	360	—	240	240	—	206
最大使用電界	kV/mm	14.4	15.5	11.3	12.0	15.7	13.0
交流耐圧		782kV OK	850kV OK	540kV OK	500kV OK	800kV OK	640kV 3hr OK
インパルス耐圧		1950kV B.D.	1755kV OK	1440kV OK	1250kV OK	1900kV OK	1650kV B.D.

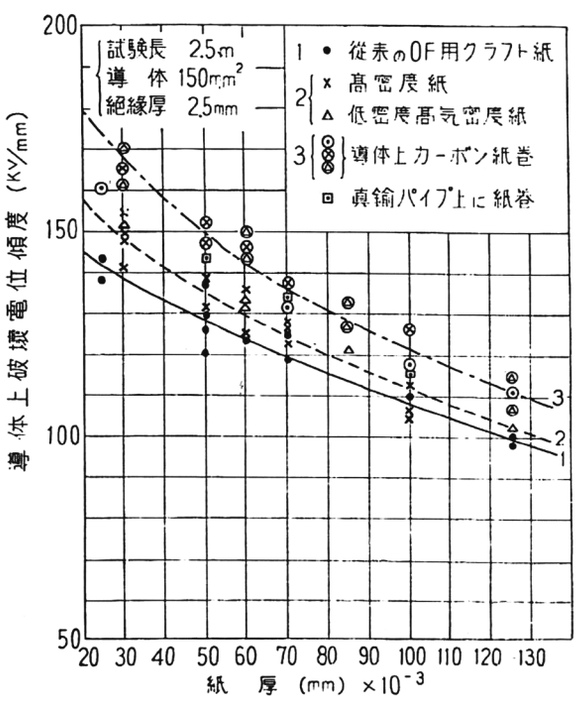


図 4.4　短尺 OF ケーブルの衝撃波電圧破壊特性 [8]

これらの試作試験結果を踏まえ、住友電工、古河電工および藤倉電線は、1960 年に電源開発奥只見発電所向け 287.5kV 200mm^2 OF ケーブル亘長 300m・3 回線を布設納入した [8],[11],[12]。ケーブル構造を表 4.4 に、写真を図 4.5 に示す。

ケーブル絶縁体の特徴は以下の通りである。

導体遮蔽：絶縁体への銅の触媒としての作用を防止するため、錫鍍金銅線を使用。

表 4.4　奥只見 287.5kV OF ケーブル [12]

導体断面積		200mm^2	錫鍍銅線
油通路		15mm	ステンレス・スチール
絶縁体	導体遮蔽	21mm	カーボン紙及び片面半導電紙
	絶縁厚		25μ, 40μ, 70μ, 125μ グレーディング
	絶縁遮蔽		カーボン紙及び金属化紙
鉛被厚さ		3.6mm	純鉛
補強層	構成 横方向	0.4mm 1枚	ステンレステープ
	構成 縦方向	0.5mm 1枚	ステンレステープ
	構成 縦方向	0.5mm 1枚	ステンレステープ
	構成 横方向	0.4mm 1枚	ステンレステープ
防食層		3.5mm	クロロプレン
概算外径		約91mm	
概算重量		22.5kg/m	

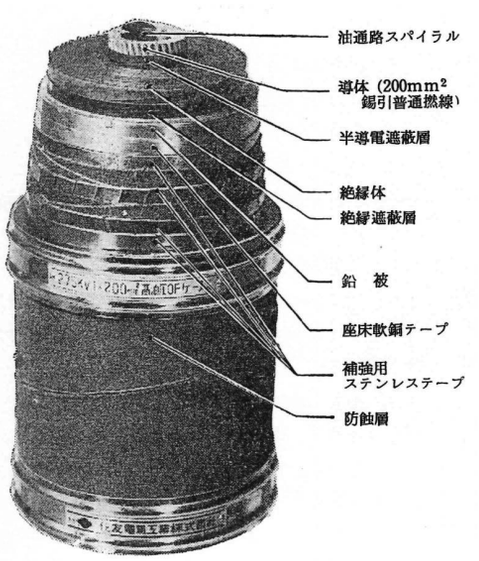


図 4.5　287.5kV 高油圧 OF ケーブル [8]

絶 縁 体: 導体遮蔽として、カーボン紙と絶縁紙の間に片面半導電紙を使用。
絶縁構成は 0.025mm 紙からの薄紙を使用し、グレーディングを実施。
絶縁遮蔽 : 半導電紙と金属化紙を使用。

引き続き住友電工が、関西電力黒部川第四発電所に 287.5kV 850mm^2 高油圧 OF ケーブル 300m 2 回線を納入した[8]。古河電工も東京電力横須賀火力発電所に 275kV 500mm^2 OF ケーブルを発電所の引き出し線として布設した[13]。その後も 1970 年頃まで発電所の引き出し線として 275kV OF ケーブルは使用された。

薄紙 25 μm の絶縁紙は、ケーブルの曲げに弱く、紙幅も狭くせねばならず、紙巻など製造での取り扱い性が悪いという課題があり、更に tan δ 特性が悪いこともあり、見直されていった。0.025mm 厚の絶縁紙はその後使用されず、日本では 0.04mm あるいは 0.045mm 絶縁紙が 1960 年代後半迄使用された。

4.1.3 OF ケーブルの低損失化

1960 年以降、ケーブルの最高使用電圧は、275kV になった。電力需要の増大に伴い、都市内への地中送電線路について技術的ならびに経済的理由から一回線当たりの送電容量の増大が更に必要となってきた。このため、①大導体ケーブルの採用、②絶縁体の誘電体損の低減、③ケーブルの強制冷却の採用が検討され実用化されていった。ケーブルの大容量化の方法は図 4.6 に示す通り、高電圧化と大電流化が必要である。

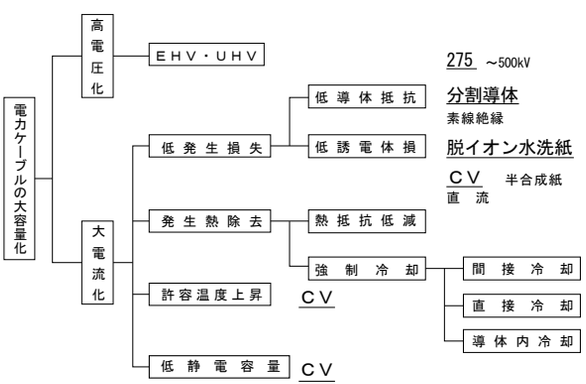


図 4.6 大容量化の方法

許容電流 I(A) は下式で求められる。

$$I=\sqrt{\frac{Tc-To-Wd(\frac{1}{2}R_1+\Sigma_{i=2}^{4}R_i)}{Rac\{R_1+(1+P)\Sigma_{i=2}^{4}R_i\}}} \qquad (4.1)$$

Tc ; 導体温度 (℃)、To ; 外部温度 (℃)
R_1 ; 絶縁体熱抵抗 (℃・cm/w)
R_2 ; 防食層熱抵抗 (℃・cm/w)
R_3 ; ケーブル表面放散熱抵抗 (℃・cm/w)
R_4 ; ケーブル外部の周囲土壌やトラフなどの熱抵抗 (℃・cm/w)
Rac ; 導体交流抵抗
P ; 金属シース損／導体損

絶縁体の誘電体損 Wd は次式で示される。

$$Wd=2\pi f C (E^2/3) \tan\delta \times 10^{-5} \quad [W/cm] \quad (4.2)$$

f ; 周波数, C; 静電容量 [μ F/km],
E ; 線間電圧 [kV] tan δ ; 誘電正接

$$C=\varepsilon/(18 \ln_e(d_2/d_1)) \qquad (4.3)$$

ε ; 誘電率 d_1 ; 絶縁体内径 d_2 ; 絶縁体外径

導体抵抗 Rac、誘電率 ε および tan δ の低減が許容電流の増大に必要である。

1960 年から 1970 年にかけて、高電圧化においては 287.5kV OF ケーブルが実用化され、大電流化のための導体抵抗低減のため分割導体が実用化された。また、ε および tan δ の低減を目的として、OF ケーブルの絶縁体として脱イオン水洗紙、66 ～ 77kV プラスチックケーブルの絶縁体として架橋ポリエチレンが実用化された。

電力ケーブルを管路へ 2 回線布設した時の許容電流容量と ε × tan δ の関係を図 4.7 に示す。当時の OF ケーブルでは ε × tan δ (%) = 1.85 (ε =3.7, tan δ (%) = 0.5) であり、許容電流は、この損失分により 154kV で約 10%、275kV で約 30% 減少する。500kV ケーブルに使用するには ε × tan δ の値を 1/5 ～ 1/10 に低

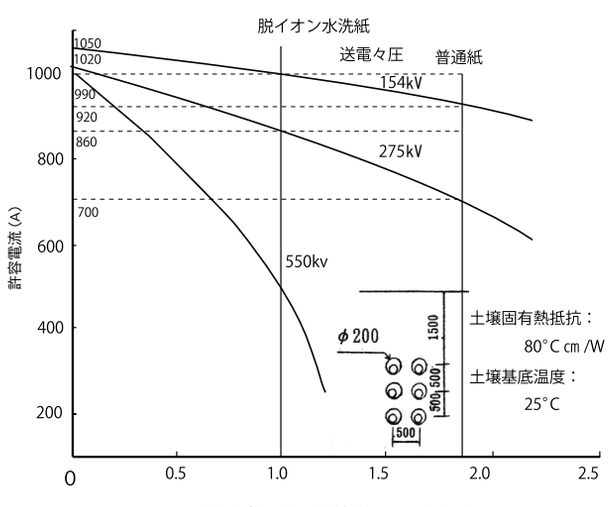


図 4.7 ε ・tan δ と許容電流の関係

減し、275kV OF ケーブルでも少なくともほぼ半減する必要があり、絶縁紙の ε と tan δ の低減が必要であった。分割導体、低損失紙による低損失化が主に進められた。

(1) 分割導体の適用

交流が導体に流れる場合、表皮効果により導体内の電流密度の分布は一様ではなく、中心部が疎、導体表面に近づくほど蜜となる現象が表われ、見かけ上交流抵抗が上昇する。1000mm^2 以上の導体サイズになると商用周波数でもこの表皮効果現象が無視できなくなる。日本では、従来円形撚り線導体が使われていたが、1000mm^2 の導体サイズになると交流抵抗 Rac と直流抵抗の比 Rac/Rdc(80℃ ,50Hz) は 1.15 と大きくなり、海外で使用されていた分割導体の検討が進められていた。分割導体化することにより、表皮効果係数が小さくなる理由は、素線に僅かな接触抵抗があることと、分割された導体内 (セグメント) で素線が撚られることにより、各素線の電流が均一化されるようとする作用が働くためである。素線間の接触抵抗がゼロならば、分割導体でも円形撚り線導体と交流抵抗は同じとなる。

大阪市中央部の急激な電力需要増大に対処するために 1962 年に関西電力豊崎線 140kV 1,200mm^2 OF ケーブルが布設された [14]。OF ケーブルでは導体の中央に油通路が必要であり、この形状に合う 6 分割導体が加撓性と屈曲性から選択された。ケーブル断面の写真を図 4.8 に示す。1,200mm^2 で 6 分割導体を採用することにより、80℃ および 60Hz の条件で非分割導体に比べ交流抵抗が 14% 低減し、電流容量は 7% 増加した。

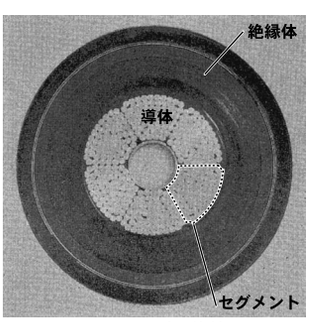


図 4.8　140kV 6 分割導体 1,200mm^2 OF ケーブル [14]

分割導体では、セグメントをまとめるためのバインダー (ステンレステープ) が使用される。この対策として、機械的強度アップのため導体遮蔽をカーボン紙 3 枚とし、絶縁遮蔽をカーボン紙 2 枚とした。

(2) 低損失脱イオン水洗紙

絶縁紙の低損失化が進められた。絶縁紙については、耐電圧特性、ε および tan δ の特性が特に重要である。OF ケーブルの絶縁体は図 4.9 に示すような絶縁紙と絶縁油の複合絶縁である。油隙の大きさは、紙の厚さに比例して変化し、巻き方向の替りでの油隙厚の倍増などや、油隙の位置の電極との直接接触界面の問題があり、耐電圧特性に及ぼす影響は各々異なる。また、絶縁紙と絶縁油自体の耐電圧特性および誘電特性が相互に関係する。

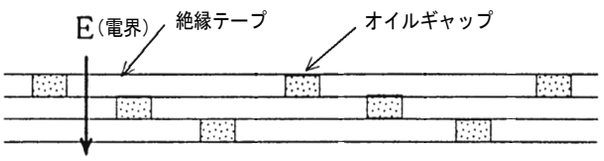


図 4.9　OF ケーブル絶縁構成

絶縁紙は紙の種類の中では西洋紙に分類される。木材を原料としてクラフトパルプが製造される。クラフトパルプは、その製法から通常の製法では絶縁紙の電気特性に悪さをするイオン物質が多く含まれており、そのままでは絶縁紙とならない。木材には純セルロースの他にヘミセルロースと繊維間を接着するリグニンが多く存在する。このリグニンとヘミセルロースの量が tan δ を悪化させる作用があり、製造上の課題であり、巴川製紙所にて検討された [15],[16],[17],[18]。このためヘミセルロースの少ない樹種を選定し、蒸解をより高度に行い、リグニンをより多く除去することにより、tan δ の低減を行った。tan δ の改善効果を図 4.10 に示す。蒸解工程にてできたパルプはまだかなりの金属イオンを含むため水による洗浄が行われていた。絶

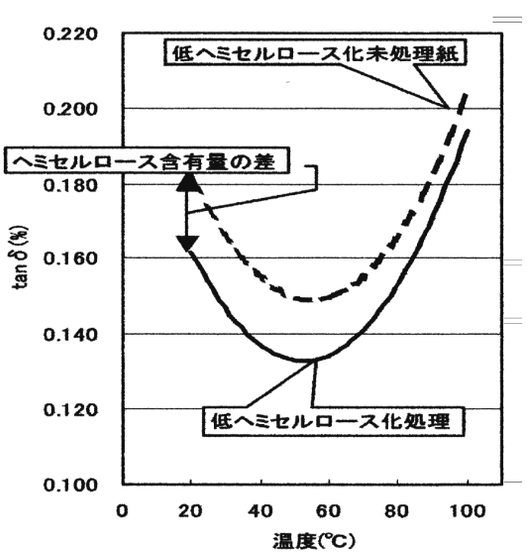


図 4.10　ヘミセルロースの tan δ への影響 [19]

縁紙の耐電圧特性の向上のためにパルプの繊維を細かく、また極微細なヒゲ様のものを発生させる(フィブリル化)いわゆる叩解処理の仕方が重要である。フィブル化した繊維が多量の水に分散した状態をスラリと言い、これを抄造して絶縁紙が作られる。詳細は、斎藤、武の共編「電気絶縁紙」[18]に記載されている。

1963年に更なるtan δの改善のためパルプの水洗、叩解、抄紙のすべての工程で脱イオン水を使用する方式を巴川製紙所が実用化した[18]。脱イオン水洗紙は1961年頃には海外で既に開発されていたが、日本では更に特性を改善した脱イオン水洗紙の開発に成功した。これによりtan δの特性が表4.5に示すように改善された。絶縁紙の材料物性について踏み込んだ研究がなされ、世界トップレベルの技術を有していた。tan δの高温での値は導電性イオンによる損失、低温のtan δは紙繊維の双極子による損失で発生するが、ベースのイオン性物質を除去することはtan δ低減に最も有効である。なお、tan δの温度特性のカーブは同じ絶縁紙で製造されたケーブルでも乾燥含浸の製造方法により異なる。

表4.5　脱イオン水洗紙と普通紙の特性比較[20]

種類 / 特性		薄紙		厚紙	
		普通紙	脱イオン紙	普通紙	脱イオン紙
厚さ（μ）		70	69	125	124
密度（g/cc）		0.89	0.70	0.86	0.71
気密度（ガーレー　秒）		1000	650	450	520
tanδ（%）	120°C乾紙	0.345	0.216	0.364	0.297
	100°C油浸紙	0.251	0.181	0.282	0.214

低誘電率化を目的として、絶縁紙の低密度化が併せて検討された。誘電率、tan δは紙の密度により小さくなるが、耐電圧特性が低下する欠点があった。このため、気密度(透気度ともいう)を高くした低密度紙が検討され採用された[19]。気密度と電気特性の関係を図4.11に示す。

この脱イオン水洗紙は1965年東京電力横曽根線66kV 3 × 150mm^2 POFケーブル線路に初めて使用された[18],[20]。脱イオン水洗紙を使用したケーブルのtan δ－温度特性を図4.12に示す。

脱イオン水洗紙の長期tan δ特性は熱劣化に対しても普通紙に比べて優れた安定性を有している[20]。この脱イオン水洗紙は154kV以上OFケーブルおよびPOFケーブルで使用され、500kV OFケーブル用にも使用された。現在でも電力ケーブル用絶縁紙として脱イオン水洗紙が使用されている。

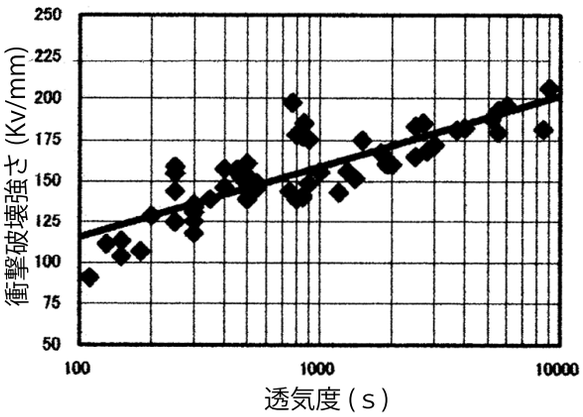


図4.11　透気度（気密度）と衝撃波破壊強度の関係[19]

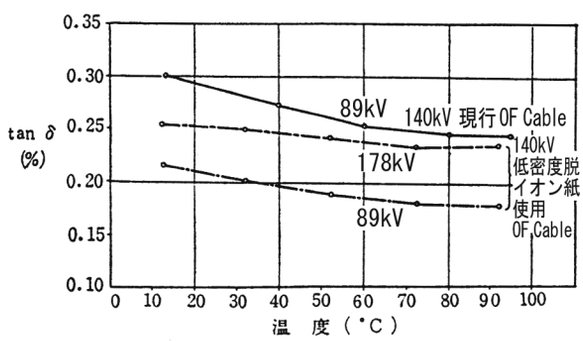


図4.12 脱イオン水洗紙のtan δ特性[20]

(3) 合成油

電力ケーブルは古くから鉱油が使用されていた。鉱油は原油の蒸留精製工程において、大気圧で沸点200～400℃のものを精製したもので、炭化水素が主成分の「パラフィン」、「ナフテン」、「芳香族」の混合物である。OFケーブルで使用する絶縁油はガス吸収性が重要な特性である。1960年以降触媒を利用して硫黄を除去しイオン性不純物の混入を少なくしていたが、残留した微量の遊離硫黄による銅腐食の問題があった。銅共存下での加熱劣化試験では、絶縁油および油浸紙のtan δが大きくなり[20]、改善が必要であった。

1963年にイタリアでは全面的にアルキルベンゼン系の絶縁油(DDB油)が採用された[20]。日本でも各社が合成油の開発を始めていた[21],[22],[23],[24],[25]。この絶縁油は芳香族炭化水素が主成分であり、水素ガス吸収性が極めて優れ、鉱油で問題となった硫黄などの不純物が皆無となった。この材料は戦後発達した合成洗剤の原料であるため、価格的にもそれ程高価でないという利点もあった。アルキルベンゼン油の特性を表4.6に示

す。アルキルベンゼンには化学構造の異なる、ハード型 (長鎖系アルキルベンゼン) およびソフト型 (直鎖系アルキルベンゼン) があるが、一般的に用いられたのはハード型アルキルベンゼン油である。ソフト型アルキルベンゼンは粘度が低いので海底ケーブルに用いられた。

表 4.6 アルキルベンゼン油の電気特性 [20]

特性＼種類		アルキルベンゼン A	アルキルベンゼン B	アルキルベンゼン C	鉱油 (OF 油)
80°C	tanδ(%)	0.001	0.001	0.001	0.001
	ρ(Ω-cm)	8×10^{15}	2×10^{15}	2×10^{15}	5×10^{15}
	ε	2.29	2.28	2.29	2.24
水素ガス試験 Thornton 型 50°C, 8 kV ml/120 分		94.5	70.5	57.0	50.0
115°C × 96hrs 銅共存劣化後 (80°C)	tanδ (%)	0.24	0.13	0.24	5.0<
	ρ (Ω-cm)	7×10^{13}	1×10^{14}	6×10^{13}	1×10^{13}

1966 年に脱イオン水洗紙と DDB を使用した 154kV 600mm^2 OF ケーブルを東京電力南大田線の一部に住友電工と古河電工が納入した [22],[26]。このケーブルの tan δ—温度特性を図 4.13 に示す。従来クラフト紙にくらべ tan δ の値は約 30% 低減した。

引き続き藤倉電線 [21]、昭和電線も同時期に 154kV OF ケーブルを納入している。脱イオン水洗紙と DDB を使用した OF ケーブルがその後も主流として使われていった。DDB 油は、鉱油と初期特性の差は認められないが、長期の銅存在下での高温 tan δ 特性が鉱油と異なり安定した特性を示し、長期安定性を有している [20]。

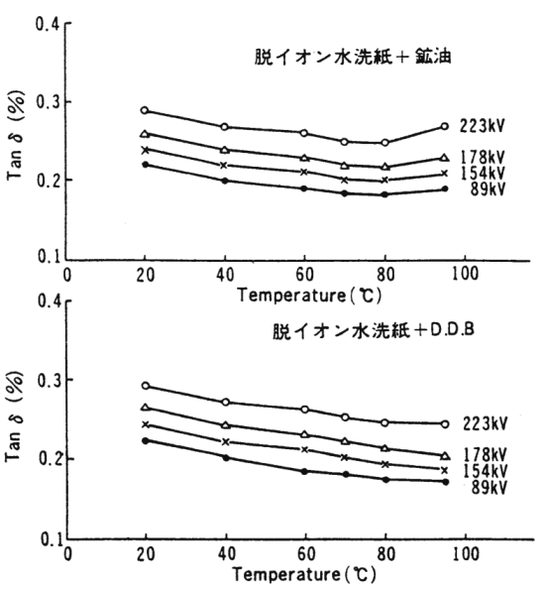


図 4.13 tan δ—温度特性 [22]

154kV 以上 OF ケーブルは、脱イオン水洗紙と DDB 油が標準として使用された。

(4) カーボン遮蔽体による tan δ 改善

導体上にカーボン紙を巻くことにより交流および衝撃波破壊電圧が改善された。また、カーボン紙のイオン化物質に対するカーボンの吸着効果により、OF ケーブルの長期安定性を向上させた。

一方、使用電圧の上昇に従って絶縁体の導体直上の電界が上昇し、カーボン紙遮蔽に起因する OF ケーブルでの tan δ の増加が無視できなくなった。この原因のひとつは、電界の上昇による右肩上がりの tan δ 増 (⊿ tan δ) が油隙幅および油層の大きさに起因して大きくなる現象である。特に 5kV/mm を超えると顕著となる。もうひとつはカーボン紙の存在自体が⊿ tan δ を大きくする現象であり、海外でも検討されていた。

カーボン紙による tan δ 増については、単なる電極と絶縁体の間にある抵抗値から算出される tan δ の値より極めて増大することが判明していた。このため、片面半導電紙が導体遮蔽として奥只見 287.5kV OF ケーブルに使用されていた [12]。

この⊿ tan δ を更に改善する方法として、住友電工は図 4.14 の結果が示すようにアルミ蒸着膜をカーボン紙の片面に施した金属蒸着カーボン紙を実用化した [27]。

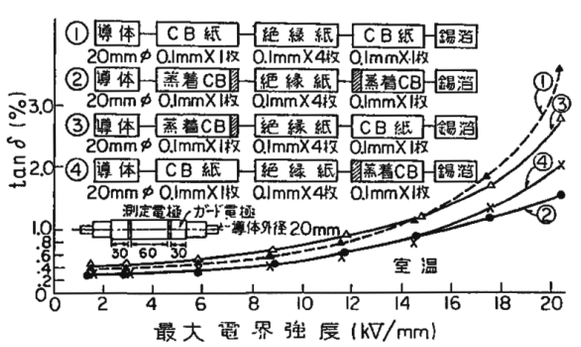


図 4.14 蒸着カーボン紙遮蔽ケーブルの tan δ - 電圧特性 [27]

藤倉電線は図 4.15 に示すようにカーボン紙上に絶縁塗料を薄膜に塗布した片面絶縁処理カーボン紙を実用化した [20]。⊿ tan δ の発生原因はカーボン粒子自身またはこれに付随する荷電粒子による現象と考えられる。

上記 (1) ～ (4) の日本の自主技術改善により、ケーブルの低損失化が図られ、高電圧化と大電流化が可能となり、275kV OF ケーブル線路が実用化された。

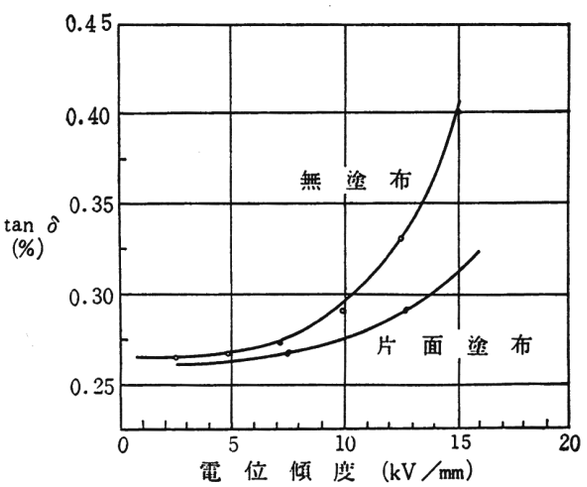


図 4.15　片面絶縁処理カーボン紙の tan δ - 電圧特性 [20]

4.1.4　製造技術

(1) アルミ被 OF ケーブル

OF ケーブルの金属被は、戦前から加工性と化学的安定性から鉛被が用いられていた。しかし、鉛被は機械的強度およびクリープ疲労特性に弱く、ケーブルが重く、更に鉛被のクリープ疲労による漏油の問題があり、特に保守面で課題であった。60kV 以下のソリッドケーブルでも漏油による問題が大きかった。

鉛被については各種合金鉛の適用による疲労特性の改善が各社で行われ、合金鉛 (E 合金) の適用により純鉛に比較して許容歪が改善された [28],[29]。しかし E 合金で使用中の温度上昇により、亀裂による油漏れが多発した。これは E 合金中の結晶粒が粗大化してクリープ特性の急速な低下を招き亀裂を生じたものである。

アルミ材料自体の振動疲労特性は図 4.16 に示すように合金鉛と同レベルであるが、アルミシースは機械的特性が優れかつ軽量化という点で魅力があった。これらの背景から、鉛被の代替としてアルミシースケーブルが検討され、1951 年には 3kV ケーブルで実用化された [6]。アルミの押出は鉛に比べ融点が高く押出温

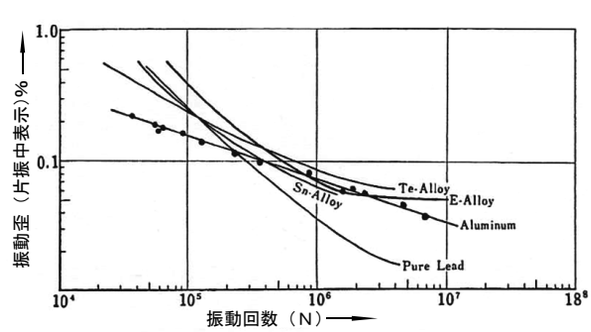


図 4.16 振動疲労特性の比較 [29]

度を高くせねばならず、製造技術的に難しさがあった。

大日電線（株）(1964 年に大日日本電線へ社名変更 ; 現三菱電線工業（株）) は 1956 年に西ドイツのフェルテンギローム社と技術提携を行い、この社が使用していたアルミプレス機と同一のヒドロリック社製 4,500 トンアルミプレス機を購入した。日本で最初のアルミプレス機の導入であった [6],[30]。図 4.17 は上記竪型のアルミプレス機の写真を示す。

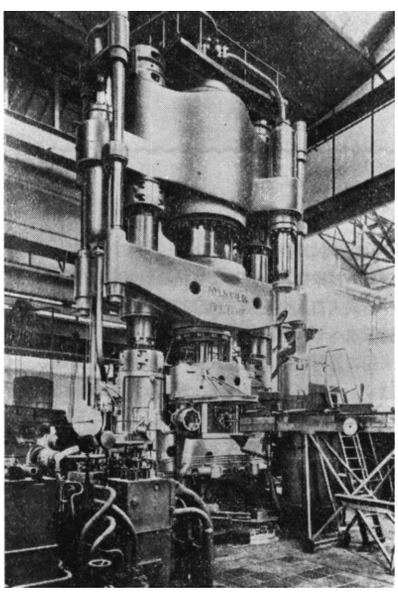


図 4.17　ヒドロリック型アルミプレス機 [6]

大日電線 (株) が各線心にアルミシースを施し、これを 3 心撚りあわせた 60kV 3 心 150mm^2 SA 型 (Separately Aluminum Sheathed) OF ケーブルを 1960 年に北海道電力（株）向けに納入している [31]。しかし円筒形状のままでは可撓性、曲げ時の座屈の機械的問題があり広く使用されなかった。

この機械的問題を解決するため、アルミシースの波付け化が検討された。その形状については図 4.18 に示すように蛇腹形のＯＫＤ形と正弦波に近い波形があったが、正弦波に近い波形の形状が伸縮疲労および加工性も良く適用された [29], [32]。アルミシースを波付けすることによりケーブル状態での振動疲労特性は合金鉛に比べて図 4.19 示すように許容歪は倍以上に向上した [32]。特に繰り返し回数が 10^5 回以上において改善された。また、波付きアルミシース化することにより、ケーブルの曲げ剛性は鉛被並みになり [33] 取り扱いも改善された。

ケーブルの設計では、金属シースに疲労破断が生じないような繰り返し歪の許容値をアルミニューム 300 × 10^{-6} 、合金鉛の 150 × 10^{-6}、純鉛 100 × 10^{-6} とされている [34]。

OKD 波形

等連切り円波形 (正弦形)

図 4.18　アルミ被の形状 [29]

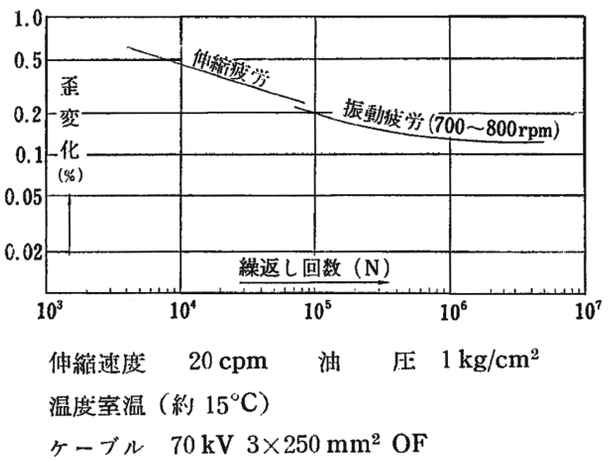


図 4.19　波付きアルミシースの振動疲労特性 [32]

アルミプレス押出機は二つのタイプがある。図 4.17 に示すヒドロリック方式の他にシュレーマン社が製造していた横型のタイプがある。横型のシュレーマン製のアルミプレス機の写真を図 4.20 に示す。

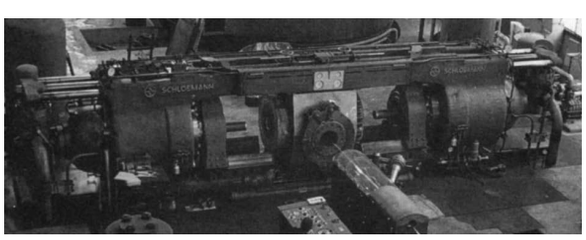


図 4.20　シュレーマン型アルミプレス機 [35]

ヒドロリックタイプとシュレーマンタイプの両方が日本では使われた。シュレーマンタイプのアルミプレス機を 1961 年に昭和電線が導入したのを初めとして他の 4 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線) も設置した。課題であったアルミシースに波付け加工する方法は各社で検討された。両タイプのアルミプレス機は一長一短があり設備導入後に各社独自の技術により設備改良を加えて使用している。

日本で初めて 1962 年に大日電線（株）が中国電力（株）南広島 1 号線向けに 100kV 600mm^2 波付きアルミ被 OF ケーブルを納入した [36],[37]。ケーブル構造を表 4.7 に示す。波付き加工は、ケーブルコア遮蔽上にアルミプレス機によりアルミ平滑管を直接押出した後に、波付け機により正弦波状に加工された。このケーブル防食層にはクロロプレンが使用され、アルミ被の谷部を埋め、表面を平滑に仕上げている。100kV 600mm^2 波付きアルミ被 OF ケーブルと同じ導体サイズと絶縁厚の鉛被 OF ケーブルと比較するとケーブル外径で 10%、重量で 20% 低減した [36]。

表 4.7　100kV 波付アルミ被 OF ケーブル [37]
(単心 600mm^2)

導体	油通路内径	(mm)	12
	撚線構成	(本/mm)	112/2.6
	外径	(mm)	約34.4
	形状		中空円形
絶縁厚		(mm)	11.0
遮蔽層厚		(mm)	約0.25
波形アルミシース厚		(mm)	2.0
防蝕層厚		(mm)	3.5
布テープ層厚		(mm)	約1.0
仕上外径		(mm)	約84(74)
ケーブル重量		(kg/km)	約13,400 (16,900)

( )内の値は鉛被ケーブルの場合

現在でも波付きアルミ被ケーブルは、66kV 以上 OF ケーブルおよび 275kV 以上 CV ケーブルの金属被として広く使用されており、特に機械的特性および信頼度の向上に関して超高圧 OF ケーブルおよび CV ケーブルの実用化に貢献した。

(2) OF ケーブル乾燥含浸方法

OF ケーブルの乾燥含浸技術において、真空乾燥と含浸工程を連続して行い、乾燥時間が約 1/2 以上に短縮され、かつ従来の数倍の長尺ケーブルの製造が可能となった。更に従来の 2 次乾燥における鉛の加熱劣化も防止できた。具体的には、①イタリア・ピレリー社で開発された「乾燥缶でケーブルを乾燥含浸し、その後金属被を被せる方式 (Mass-impregnation)」を日本独自に実用化し、②日本独自に開発した「乾燥缶中で乾燥後、真空下で金属被を被せ両端から油を注油する方式」の 2 方式が実用化された。

4.2 POF ケーブルの高電圧化

4.2.1 66 ～ 154kV POF ケーブル線路

パイプ型ケーブルには、パイプ型ガス入りケーブルとパイプ型ガスコンプレッションケーブルがあり、1950 年代から 1960 年代にかけて 110kV 級ケーブルまで納入されていた[38],[39],[40]。しかし製造時には、油が絶縁紙に充分に含浸されるが、運転中の温度変化、高低差の布設条件では、絶縁体の油浸紙層で微小のガス層が発生し、これを完全に除去することは不可能であり、OF ケーブルに比べて耐電圧の信頼性に劣る欠点があった。このため、更なる高電圧化に対して、パイプ内空間部に油を充填し、加圧含浸するパイプ型 OF ケーブル (以下 POF ケーブル (pipe type Oil filled cable) と呼ぶ) の検討が進められた。

POF ケーブルは、米国オコナイト社の C.E.Bennett 氏が Oilostatic Cable の商品名で実用化されたもので、132kV POF ケーブルが 1935 年に Baltimore の Pennsylvania Railroad で実用化された[41]。欧米では、1960 年代後半には、表 4.8 に示すように 69kV 以上ケーブルにおいて、パイプケーブルが OF ケーブルより多くの実線路に使用されていた[42]。パイプケーブルのうち POF ケーブルが 94% と大半を占めていた。

表 4.8　欧米のケーブル布設比較[42]
(パイプケーブルと OF ケーブル)

地域	パイプケーブル	OFケーブル	合　計
	件	件	件
米　国	477	150	627
カナダ	21	64	85
中南米	15	0	15
西半球合計	513	214	727

POF ケーブルは、OF ケーブルに比較して、①ケーブルの引入れが長くでき、接続箱が少なくてすむ、②外傷に対して安全、③高油圧 OF ケーブルと同じ耐電圧特性を有し、充填油による冷却が容易、④管路布設 OF ケーブルより建設コストが安価、および⑤耐震性が優れているという長所があった。一方①多量の絶縁油が必要、②道路が狭く曲がりが多いと建設費が高くなる、という短所があった。東京電力では、275kV 長距離線路用ケーブルの候補の一つとして 1964 年頃から開発が進められていた。

日本で初めての 66kV 級 POF ケーブルは、1964 年に藤倉電線佐倉工場の受変電設備として布設された。66kV 3 × 100mm^2 POF ケーブル[41] である。ケーブル構造を表 4.9 に示す。POF ケーブルでは、パイプ内圧力を 15kg/cm^2 と高油圧に維持する必要があるのと、パイプ内の油量が OF ケーブルに比べて多量のため、ケーブルの使用状態での温度変化による絶縁油の膨張量も大きく、特殊な装置として加圧ポンプを用いたポンピングプラントが使用される。原理図を図 4.21 に示す。

表 4.9　66kV 3 × 100mm^2 POF ケーブル[41]

導　体	断　面　積	100mm^2
	外　　径	12.0mm
	形　　状	圧縮円形
絶縁紙厚さ（カーボン紙を含む）		7.8mm
遮蔽金属化紙		0.1mm
半硬銅テープ ポリカーボネイトテープ		0.1mm 約0.1mm　組合巻
半硬銅テープ ポリカーボネイトテープ		0.1mm 約0.1mm　組合巻
D 型硬鋼線高さ		1.6mm，2 条
概算線心外径		37mm
概算撚合外径		77mm
概算重量		6600kg/km

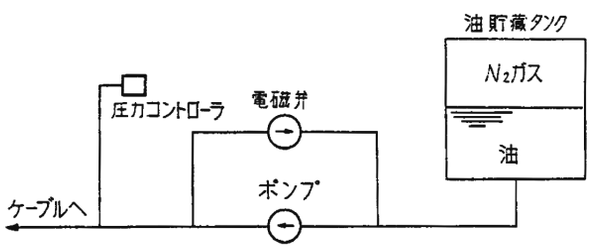


図 4.21　ポンピングプラント原理図[41]

1965 年に藤倉電線が東京電力横曽根変電所―青木開閉所間 1.7km 2 回線に 66kV 3 × 150mm^2 POF ケーブルを布設した[43]。このケーブルは、日本で初めて脱イオン水洗紙[18] および合成油のポリブテン系絶縁油を使用している。この組合せにより、$\varepsilon \times \tan\delta$ が低減し、経年劣化に伴う $\tan\delta$ 上昇の問題も改善した。POF ケーブルでは金属被を被覆せず鋼管中にケーブルを引き入れするため、防湿と機械的保護を考慮して、遮蔽層、防湿層および補強層が設けられる。これが OF ケーブルと異なる点である。この線路では絶縁遮蔽はカーボン紙と軟銅テープを使用し、補強には半硬銅テープと耐油性の良いポリカーボネイトテープの組

合せ巻きとしている。ケーブル引き入れ時の摩擦力軽減のため、D 型のステンレス鋼を使用している。鋼管の厚さはケーブル地絡電流 13kA による過渡圧力上昇を想定して 5 インチ圧力配管用炭素鋼管 Sch20, 2 種を使用した。

1968 年に東京電力花畑変電所―江戸川変電所間を結ぶ 154kV 3 × 400mm^2 および 3 × 500mm^2 POF ケーブル亘長約 5.5km 2 回線の線路が実用化された [44]。納入社は住友電工、古河電工、藤倉電線である。本線路は、ルートの地盤が軟弱であることと、郊外で鋼管工事が容易であることなどの理由で POF ケーブルが採用された。ケーブルの写真を図 4.22 に示す。

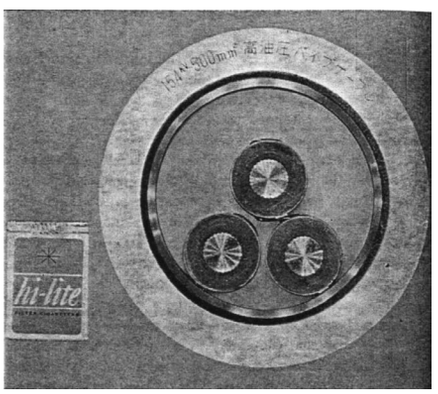


図 4.22　154kV　3 × 500mm^2 POF ケーブル [44]

藤倉電線はこの線路の絶縁構成として tan δ の低減のため片面絶縁処理カーボン紙を使用している [44]。低損失化を目的として脱イオン水洗紙、ポリブテン合成油 HV-15 を使用した。充填油は高粘度のアルキルベンゼン系合成油を使用した。製造から引き入れまでの間の防湿を考慮して、片面金属化ポリエステルテープ 2 枚の組合せ巻を 2 層施している。滑り線は高さ 2.0 ～ 2.5mm の D 型ステンレス線を 2 枚並列巻きとしている。鋼管は JIS 3454 圧力配管用炭素鋼鋼管 Sch20 150A 2 種の継ぎ目なし鋼管、12m 長のものを使用した。鋼管の内外にもコールタールエポキシ系塗料など特殊な防食層を施している。これらの技術は日本の自主技術である。

4.2.2 長距離 275kV POF ケーブルの開発

各社で 275kV POF ケーブルの開発が進められた [45],[46],[47],[48]。275kV POF および OF ケーブルの実用化の前段として、1966 年から東京電力、超高圧電力研究所、電力中央研究所と電線メーカー 5 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線 (株)(以下日立電線と記述)、昭和電線) が共同研究の場として、超高圧電力研究所武山研究所において、275kV POF ケーブルおよび 275kV アルミ被 OF ケーブルの試験線路を建設し長期安定性を検証するため、長期課通電試験を実施した [47],[48]。このうち 275kV POF ケーブルの試験線路は 220m で、住友電工、古河電工、藤倉電線がケーブル、終端箱、準油止め接続箱および普通接続箱を供試し、長期信頼性を確認した。

この試験を初めとして、その後の新規に開発された 275 ～ 500kV ケーブルおよび付属品については、高い信頼性が要求されるため、実線路導入前には長期課通電試験による検証が電力中央研究所、電力会社の試験場などで必ず行われた。

4.3　CV ケーブルの創生

4.3.1　ゴム・プラスチックケーブルの時代

化学架橋ポリエチレンを以下 XLPE(Cross-Linked Polyethylene) と呼ぶ。またこの XLPE 材料を使用した電力ケーブルを CV ケーブルと呼ぶ。XLPE ケーブルはシースがポリ塩化ビニルで構成されていることが多いので一般に CV ケーブルと呼ばれている [49],[50]。

第二次世界大戦後電力ケーブルが大きく変化したのは、合成ゴムやプラスチックの出現である。中低圧の紙ケーブルでも金属シースが必要であり鉛被が使用されていた。鉛の疲労や腐食による亀裂および孔などにより絶縁破壊を起こす頻度が多かったため、金属シースを必要としない油浸紙に代わるプラスチックのケーブルが期待されていた。

天然ゴムは高電圧下で発生するオゾンに弱く使えなかったが、戦争中に目覚しく発展したプラスチック材料は、電気的特性に優れ、耐オゾン性の良い材料であり、欧米特に米国を中心に中低圧の電力ケーブルで使用されていた。これらの中で最も適している材料はポリエチレン (PE) とブチルゴムであった。1950 年頃には米国で BN ケーブル (ブチルゴム絶縁ネオプレン防食ケーブル) が 33kV で、PE ケーブルが 10kV のケーブルで各々使用されていた。PE は 1950 年頃から、ブチルゴムは 1953 年頃から日本で入手できるようになった。1953 年に昭和電線が 10kV 100mm^2 BN ケーブルを布設し、1954 年に古河電工が東京電力向けに 3.3kV PE ケーブルを布設している [6]。ただ PE ケーブルの連続使用温度は 75℃ でかつ短絡時最高許容温度も 140℃ と低く、これがネックとなり電力ケーブルでは使用されなかった。

一方 BN ケーブルは連続使用温度が 80℃ でかつ短絡時最高許容温度も 230℃ と OF ケーブルよりも良好な

ので実用化が進められた。BN ケーブルは 1955 年以降 6 ～ 30kV 級で使用され、1963 年には 66 ～ 77kV 移動用ケーブルまで実用化された[51]。しかし 1965 年頃に、布設後 10 年経過して絶縁破壊を発生する事故が一時多く発生した。破壊原因は浸水課電劣化現象で、端末からのケーブルへの水の浸入が原因であった[52]が、ゴムの充填剤の種類も影響していた。BN ケーブルは絶縁破壊特性が CV ケーブルに比べ劣るため 66kV 級電力ケーブルとしては使用されなかった。

1953 年に原子力の技術が入ってくるとともに、放射線をあてると PE が架橋して XLPE になり溶融しなくなるという情報が海外からあり検討が進められた[52),(53),(54]。この XLPE は PE と同じ性能を持ち、熱に強いという点でブチルゴムに代わる電力ケーブル用絶縁材料になるものと期待された。一方欧州では PE ケーブルの実用化が精力的に進められていた。1950 年頃には米国で 15kV、英国で 11kV の PE ケーブルが製造されていた[6]。

XLPE の製造の仕方として二通りの方式が検討されていた[54]。ひとつは放射線の高いエネルギーを PE に照射して架橋を起こさせるというものであり、他の一つは PE に有機過酸化物を混合し温度を上げ架橋する方法である[55]。海外ではこれらの方法で製造された XLPE を電線に応用した例も既に報告されていた[56),(57]。

日本でも使用温度が高くとれ絶縁厚さが BN ケーブルに比べ薄くできる CV ケーブルに着目し、架橋方法の検討が進められていた。

米国で 1955 年に化学架橋ポリエチレン材料が米国 GE 社の F.M.Precopio と A.R.Gilbert により発明された[55),(58]。日本の各電線メーカーとも、1960 年頃に GE とライセンス契約を結んで[59]、この材料を用いた CV ケーブルの製造を開始した。この XLPE の化学架橋の反応式を図 4.23 に示す。分解物としてアセトフェノン、メタン、ジメチルフェニルカルビノールが生成される[54]。

当時これら生成物の絶縁特性への影響は考慮されなかったが、高電圧化になるに従ってこれらについても研究された。

XLPE の永久変形率は図 4.24 に示すように 105℃を超えても 10% 程度と小さく、その他の機械的特性もポリエチレンに比べ非常に優れている。耐コロナ性、耐トリーイング性など電気的な特性も優れている。

日本では XLPE の利点に着目して世界に先駆けて実用化を進めた。CV ケーブルは、日本では 1960 年に 6kV 用として商用化された[59]。藤倉電線は 1961 年に九州電力 (株)(以下九州電力と記述) に 6kV CV ケーブルを納入している[35]。

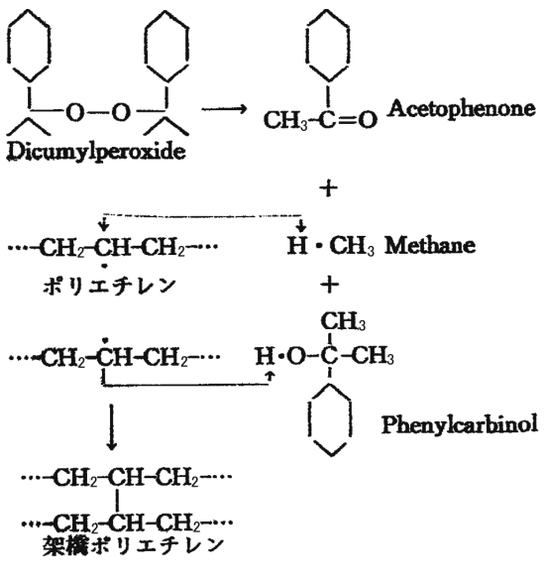


図 4.23　架橋ポリエチレンの反応[54]

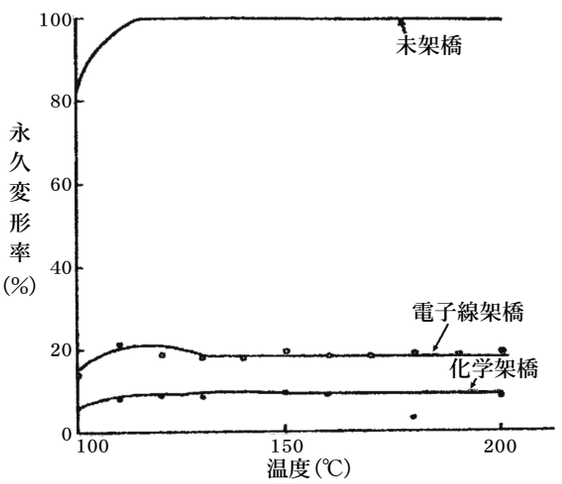


図 4.24　架橋 XLPE の永久変形率 (無荷重)[54]

4.3.2 66 ～ 77kV 級 移動用 CV ケーブルの実用化

CV ケーブルの耐電圧特性は BN ケーブルにくらべ高く 66 ～ 77kV ケーブルの開発が進められた。CV ケーブルの製造については、BN ケーブルで使用していた竪型連続加硫機 (VCV) を多少の改造により使用できたのもその実用化を早くできた要因のひとつであった。ただ、当時の連続加硫機は過熱した水蒸気を使っていたので、XLPE の中に蒸気が混入して閉じ込められ、絶縁体中に残存する問題が後になって判った。これが別章 5.3.3 項で記す水トリー、ボウタイトリーの発生原因の一つとなっている。

66kV 級 CV ケーブルは先ず移動用ケーブルとして使用された。当時、変電所を含む送電線等の昇圧、改

修工事に際して応急用に送電するため、移動変電装置の一部として移動用ケーブルが使用されていた。当時移動用ケーブルとしてOFケーブルが使用されていた。OFケーブルは鉛被ケーブルのため重量が重く、屈曲特性が悪く、更に圧力油槽が必要なため極めて取り扱いが困難なものであった。所要スペース、切り替え時間の短縮のため、可搬式で予め端末処理が可能なBNケーブル及びCVケーブルが検討されていた[60],[61],[62]。乾式の終端が使用でき、可撓性に富み、耐圧特性が優れたCVケーブル及びBNケーブルが1962年に実用化された。

世界で初めて60kV級CVケーブルとして住友電工が東京電力向けへ60kV CVケーブルを移動用ケーブルとして1962年に納入した[60]。60kV移動用ケーブルを図4.25に示す。60～70kV級移動用CVケーブルの絶縁厚(内導厚さ込み)は15mmであった[60],[61]。CVケーブルは耐電圧特性がBNケーブルより優れていたため表4.10に示すように絶縁厚も薄くできて、外径も小さく、重量も軽減できる効果があり、BNケーブルに代わって使用されていった。

図4.25　移動用60kV CVケーブル[60]

表4.10　移動用ケーブルの比較(100mm²)[61]

項目	単位	CVケーブル	BNケーブル
導体サイズ	mm^2	100	100
絶縁厚さ	mm	15	20
シース厚さ	mm	3	4
外径	mm	54	65
重量	kg/km	3090	5200

しかし移動用CVケーブルにおける印加時間は短時間であり、CVケーブルを恒久用ケーブル線路として実用化するためには、出荷試験方法、V-t特性などOFケーブルと異なる課題を解決せねばならなかった。当初の移動用CVケーブルの内部半導電層及び外部絶縁遮蔽層は共に半導電テープが使用されており、ここで絶縁体との界面においてボイド、異物および突起を発生し易く、低電圧破壊電圧の原因となっていた。

4.3.3 66～77kV CVケーブルの実用化

66～77kV CVケーブルの送電線路としての初の恒久設備は、古河電工により1964年に中部電力(株)(以下中部電力と記述)尾鷲火力発電所向けに70kV 100mm^2 CVケーブルが納入された[63]。ケーブル構造を表4.11に示す。特徴として、ケーブルの導体上に半導電架橋ポリエチレンが押出されている。絶縁体上の遮蔽には特殊導電塗料を塗布してコロナ発生を防止している。なお、この塗料層は端末処理時に簡単に除去できるものである。ヒートサイクル、曲げに対する対策として、クッション層として導電布テープを巻きその上に遮蔽用錫鍍軟銅テープを巻いている。絶縁厚さは内部遮蔽層込みで20mmであった。

表4.11　70 kV CVケーブルの構造[63]

Voltage	kV	70
Number of cores		1
Nominal sectional area	mm^2	100
Number /diameter of wires	mm	37/1.8
Conductor diameter	mm	12.6
Curepren insulation thickness (Cont. Strand Shielding)	mm	20
Special conducting painting thickness	mm	0.01
Thickness of semiconducting textile tape wrapping	mm	0.5
Shielding copper tape thickness	mm	0.01
Thickness of textile tape wrapping	mm	0.25
Thickness of PVC sheath	mm	3.5
Approx. overall diameter	mm	61.4
Approx. net weight	kg/km	4070

藤倉電線も同年に東北電力(株)新庄変電所向けに60kV 80mm^2 CVケーブルを納入した[64]。このケーブルは内部半導電XLPEとXLPE絶縁体を2層同時押出方式によりケーブルコアを製造している。絶縁体上には絶縁体の膨張収縮に対して特殊な半導電性テープを使用していた。更に銅テープを2枚の交互巻きを採用し異常電圧侵入時の銅テープの電位上昇を抑える対策をとっている。絶縁厚さは15mmであった。納入された終端箱を図4.26に示す。終端箱の内部絶縁は、OFケーブルの場合と同じくコンデンサ型油浸紙巻き方式を使用しており、碍子型の終端箱である。この線路ではケーブル布設後の竣工前の試験として、現地部分放電試験を実施し、施工を含めた線路の健全性を確認している。

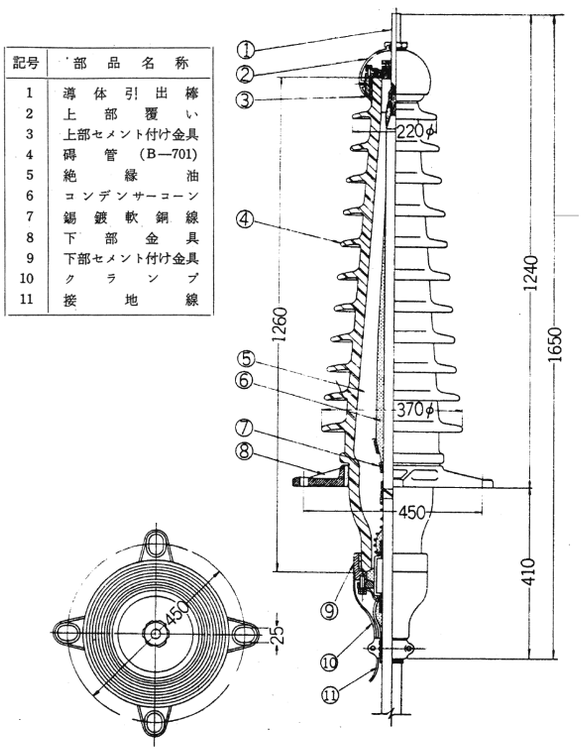
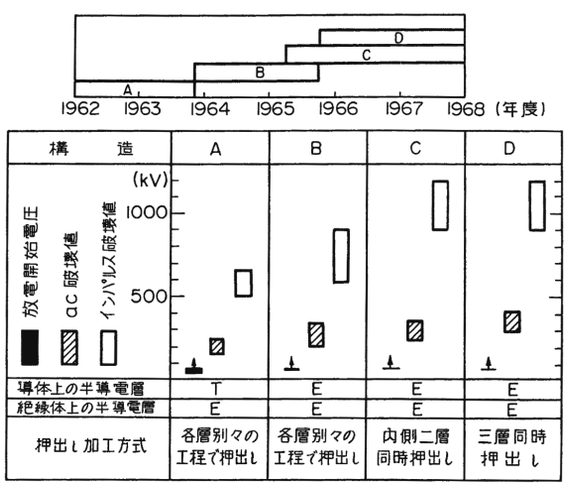


図 4.26　66kV CV ケーブル気中終端箱 (64)

各社 66 ～ 77kVCV ケーブルの内外の半導電遮蔽層材料構造と製造方式による電気性能の向上に関する改善が進められた (65),(66)。3 層同時押出方式の採用により、図 4.27 に示すように交流及びインパルス電圧の耐電圧特性が 1.5 ～ 2 倍に向上した。3 層同時押出方式の概念図を図 4.28 に示す。この方式の採用により、内部導体表面の円滑性を保たれ、かつ内外半導電層と XLPE 絶縁体と界面の異物の侵入及びボイドの形成を排除でき、更に絶縁体との完全一体化が果たされる事により、電気的特性が向上されるだけでなく、曲げ



（図中　E: 押出半導電層 , T: 半導電性布テープを示す）

図 4.27　66 ～ 77kV 架橋ポリエチレンケーブルの構造及び製造技術の改良に伴う電気性能の向上 (65)

など機械的特性が向上するなど性能面で著しく向上した。半導電架橋ポリエチレンの体積抵抗率は、ケーブルの tan δ の値への影響、インパルス電圧印加時の半導電層の電位分担を考慮して 10^4 Ω ·cm 以下にされている (67)。

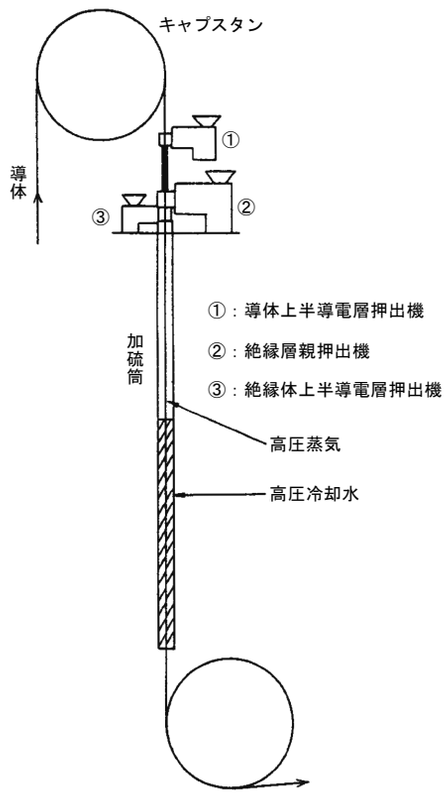


図 4.28　VCV 3 層一括押出装置の概念図 (66)

住友電工は 1965 年に 3 層同時押出製造方式の製造を開始し (65)、九州電力新港火力発電所向けに 66kV 150mm^2 CV ケーブルを納入した (68)。藤倉電線は 1967 年に 66kV CV ケーブルを南部製鋼 (株) に納入してた (69)。3 層同時押出製造方式は CV ケーブルの高電圧化を果すために欠くことのできない技術であり、世界に先駆けて日本独自に開発した重要な技術である。

当時海外の 60kV 級プラスチックケーブルは、ポリエチレンケーブルを使用しており、表 4.12 に示すように実用化されていた。60kV 級で絶縁厚さは 14 ～ 15.7mm、70kV 級で 19.5mm であり (64)、日本における CV ケーブルと絶縁厚はほぼ同じであり、絶縁性能も同等であった。日本では、CV ケーブルの方が PE ケーブルに比べ耐熱性が優れており、これに着眼して世界に先行して実用化が進められた。

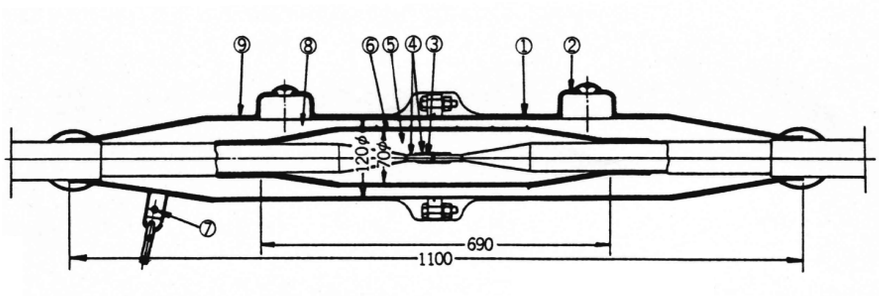
表 4.12　60kV 級ポリエチレンケーブルの海外実施例 (64)

国　名	電 圧 (kV)	導体サイズ (mm²)	絶縁厚 (mm)	使用最大電位傾度 (kV/mm)	長 さ (m)	布設年月
米　国	69	178	15.7	4.4	350	1962年12月
ベルギー	70	180	—	—	—	1959年11月
ベルギー	70	150	19.5	4.5	—	1962年
フランス	63	155	14.0	4.5	2430	1963年8月
フランス	63	340	—	—	100	1963年1月
フランス	63	225	—	—	704	1963年3月

電力会社向け初のジョイント入り 77kV CV ケーブル線路として、藤倉電線が 1970 年に中部電力鈴鹿線 77kV 80mm² CV ケーブル亘長 550m 1 回線を納入した (70)。ケーブルは内外半導電層と絶縁体を 3 層同時押出方式により製造された。絶縁厚さは 17mm(内導厚さ込み) である。絶縁体上に特殊半導電テープを巻き、更に 0.1mm の銅テープを交互巻きして、ケーブルのサージインピーダンスを低減している。ケーブルの写真を図 4.29 に示す。普通接続箱と終端箱の補強絶縁は照射ポリエチレンテープを巻いて加熱モールドする方法により製作された。加熱モールド時に強制的に加圧器具を用いて加圧することによって、ボイドの発生を抑えるモールド方法を採用して、交流破壊電圧が約 25% 向上した。接続箱の構造を図 4.30 に示す。25 年後の 1995 年に本線は撤去され調査されており、特に異常は認められなかった。

66 ～ 77kV CV ケーブルの種類と製造方式の変遷を表 4.13 に示す。詳細は 5.3.1 項で述べるが乾式架橋製造方式も併せて検討された。

図 4.29　鈴鹿線 77kV CV ケーブル (70)
(80mm²　絶縁厚 17mm)



No	名　称
1	防護管
2	絶縁混和物注入口
3	導体接続管
4	半導電層
5	RE モールド
6	しゃへいテープ
7	接地端子
8	絶縁混和物
9	防蝕層

図 4.30　鈴鹿線 77kV 直線接続箱の構造 (70)

表 4.13　66 ～ 77kV CV ケーブルの種類と製造方式の変遷

	年		62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74
ケーブル種類	移動用ケーブル														
	単心ケーブル	接続箱無													
		接続箱有り													
製造方式	蒸気架橋	内外遮蔽テープ													
		2層押出													
		3層同時押出													
	乾式架橋														

2層押出し;内部半導電層と絶縁層同時押出し
3層同時押出し;内外半導電層と絶縁層同時押出

4.4 まとめ

1958 年に長距離 154kV OF ケーブル線路を建設した。次のステップの高電圧化のため 1956 年にフランスカーベル・ド・リヨン社から薄紙絶縁電力ケーブルに関する技術導入を行い、電源開発奥只見発電所向け 287.5kV OF ケーブル線路が完成した。その後、薄紙 25 μmの絶縁紙は、tan δ特性、機械的特性の問題があり、薄紙絶縁設計から自主技術で厚紙絶縁設計へ移行した。

巴川製紙所は、絶縁紙の tan δ改善のため、パルプ中のヘミセルロースに着目して、それを低減した独自の絶縁紙製造技術を確立した。更に 1965 年に低損失の脱イオン水洗紙を実用化した。この絶縁紙は 154 ～ 275kV OF ケーブルおよび POF ケーブルに使用された。翌年にアルキルベンゼン系合成油が実用化され、脱イオン水洗紙ともあわせてケーブルの低損失化と長期安定性が図られた。電線メーカーも独自にケーブル遮蔽に特殊なカーボン遮蔽構造を採用するなど絶縁材料の物性について踏み込んだ研究がなされた。OF と POF ケーブルの絶縁性能、誘電性能は世界に並ぶ特性を有した。

OF ケーブル製造技術においても、1960 年代前半に「乾燥缶でケーブルを乾燥含浸し、その後金属被を被せる方式 (Mass-impregnation)」と「乾燥缶中で乾燥後、真空下で金属被を被せ両端から油を注油する方式」の 2 方式が日本独自に実用化され、乾燥時間が約 1/2 以上に短縮され、かつ従来の数倍の長尺ケーブルの製造が可能となった。金属被においても、海外からアルミプレス機を導入して、国産技術により波付きアルミ被 OF ケーブルを実用化し、ケーブルの機械的信頼性が向上した。

この時期に国産の自主技術が発展し、ほぼ海外の超高圧 OF ケーブル技術に追いついたと言える。

CV ケーブルについては、架橋ポリエチレン材料自体はアメリカ GE 社の特許である。1959 年から電線メーカー各社が GE 社とライセンス契約を結び、この材料を用いた CV ケーブルの製造を開始した。1962 年に東京電力に 66kV 移動用 CV ケーブルが実用化され、1964 年に中部電力の電力用線路に 70kV CV ケーブルが実用化された。しかし絶縁厚さは 20mm(内部半電導層込み) と厚肉であった。

初期の CV ケーブル絶縁体の押出製造法では、半導電層と絶縁層との界面にボイド、異物および突起が発生し、耐電圧特性の信頼性に問題があった。この対策として内外半導電層と絶縁体との界面の不整をなくすため、内外半導電層と絶縁体の三層を同時に押出する製造方式が開発された。日本独自の技術であり、CV ケーブルの高電圧化に貢献した重要な技術である。

日本では CV ケーブルの耐熱性と耐電圧特性に着目し、常に世界に先駆けて実用化を進めた。この時代に日本の CV ケーブル製造技術の礎ができた。

引用参考文献

(1) 津村ほか :「154kV OF ケーブル試作研究 (その一) 住友電気　第 69 号　p1　(1958)

(2) 加賀谷ほか :「154kV OF ケーブル試作試験報告」藤倉電線技報　第 11 号　p10　(1957)

(3) 西島ほか :「当社に於ける 140kV OF ケーブル」昭和電線電纜技報　第 8 号　No.2 p1　(1953)

(4) 今井ほか :「東京電力蔵前線 140kV OF ケーブルについて」 古河電工時報　p88　(1959)

(5) 中村ほか :「東電蔵前線 140kV OF ケーブルの成績」藤倉電線技報　第 16 号　p26　(1959)

(6) 電線史　日本電線工業会　(1959)

(7) 加賀谷 :「欧州の電力ケーブル事情見聞記」藤倉電線技報　第 13 号　p1　(1957)

(8) 藤沢ほか :「287.5kV 高油圧 OF ケーブルの研究 (第 1 報)」住友電気　第 71 号　p57　(1960)

(9) 武藤ほか :「287,500 V 高油圧 OF ケーブルの研究 (第 1 報)」藤倉電線技報　第 14 号　p1　(1958)

(10) 武藤ほか :「287,500 V 高油圧 OF ケーブルの研究 (第 2 報)」藤倉電線技報　第 15 号　p5　(1958)

(11) 製品紹介 :「電源開発㈱会社 奥只見発電所殿 287.5kV OF ケーブル線路の布設」古河電工時報 第 24 号 p77　(1960)

(12) 武藤ほか :「奥只見発電所　287.5kV 超高圧ケーブル (第 1 報)」 藤倉電線技報　第 21 号　p1　(1961)

(13) 製品紹介 :「東京電力㈱会社 横須賀火力発電所殿 275kV OF ケーブル」古河電工時報 第 24 号 p76 (1960)

(14) 鹿間ほか :「140kV 1,200mm^2 6 分割導体 OF ケーブル (関西電力・豊崎線)」藤倉電線技報　第 24 号 p34　(1962)

(15) 武 :「- 私の技術開発の体験 - 超高圧ケーブル用絶縁紙の開発」紙パ技協誌　第 50 巻　7 号　p53　(1996 年 7 月)

(16) 武ほか :「絶縁紙の電気的性質に及ぼすセミセルロースの影響」電学誌　84 巻 907 号　p101　(1964)

(17) 武ほか :「絶縁紙の電気的性質に及ぼすリグニン

の影響」電学誌　84 巻 907 号　p109　(1964)
(18) 斎藤、武共編 :「電気絶縁紙 」コロナ社　p447 ～ p454　(1969)
(19) 片山 :「電気絶縁紙の歴史」電材ジャーナル 600 号　記念電気絶縁材料小史　p81　(2009)
(20) 加賀谷ほか :「低損失 OF ケーブルの研究」 藤倉電線技報　第 30 号　p59　(1965)
(21) 秋山ほか :「東京電力八重洲線 154kV アルミ被 OF ケーブルおよび布設工事」 藤倉電線技報　第 35 号 p1　(1967)
(22) 佐藤ほか :「低損失紙並びに合成絶縁油を使用した OF ケーブルの実用化」古河電工時報 第 42 号 p49　(1966)
(23) 丸山 :「合成絶縁油に関する研究」 住友電気　第 93 号　p29　(1966)
(24) 鳥居ほか :「超高圧 OF ケーブル用合成絶縁油」藤倉電線技報　第 31 号　p23　(1965)
(25) 星井ほか :「超高圧 OF ケーブル用合成絶縁油 (第 2 報)」 藤倉電線技報　第 34 号　p73 (1967)
(26) 飯塚ほか :「低損失誘電体 OF ケーブルを使用した 154kV 地中送電線」住友電気 第 92 号　P11 (1966)
(27) 小島ほか :「OF ケーブルの tan δ―電圧特性に与えるカーボン紙遮蔽体の効果」 住友電気　第 86 号　p67　(1964)
(28) 吉田ほか :「ケーブル鉛被用鉛および鉛合金の耐疲労性」 古河電工時報　第 44 号　p66　(1967)
(29) 笠原ほか :「波付アルミシースケーブルの機械的特性について (その 1)」昭和電線電纜レビュー Vol 13　No.1　p1　(1963)
(30) 岩村ほか :「直接押出法によるアルミ被覆」 大日電線時報　第 24 号　p2　(1963)
(31)「60kV SA 型 OF ケーブル」大日電線時報　第 17 号　(1960)
(32) 金沢ほか :「アルミシース電力ケーブル」 昭和電線電纜レビュー　Vol.13 No.2　p1　(1963)
(33) 倉ほか :「アルミシースの曲げ特性」大日電線時報　第 30 号　p22 (1965)
(34) 電線ケーブルハンドブック　電気書院 第 1 版 (1974)
(35) フジクラ 100 年の歩み　藤倉電線 (株) (1987)
(36) 製品紹介 :「波形アルミシース OF ケーブル」大日電線時報　第 24 号　p111　(1963)
(37) 電力技術部 :「中国電力広島 1 号線地中工事記録―100kV 1 × 600mm^2 クロロプレン防食波形アルミシースケーブル―」大日電線時報　第 25 号 p30　(1963)
(38) 武藤ほか :「パイプ型コンプレッションケーブルについて」藤倉電線技報　第 12 号　p1　(1957)
(39) 福田ほか :「東京電力新城線パイプ型ケーブルについて」古河電工時報　第 19 号　p1　(1959)
(40) 後藤ほか :「60kV 1000mm^2 アルミニュウム導体パイプガス型ガスフィルドケーブル」藤倉電線技報　第 23 号　p23　(1962)
(41) 加賀谷ほか :「高油圧パイプケーブルとその布設 (佐倉工場受電用)」藤倉電線技報　第 29 号　p1 (1965)
(42) 津元 :「アメリカ大陸における 60kV 以上のケーブル布設実績」藤倉電線技報　第 41 号　p81 (1970)
(43) 飯塚ほか :「横曽根線 66kV 高油圧パイプケーブル」藤倉電線技報　第 32 号　p1　(1966)
(44) 松尾ほか :「東京電力花畑・江戸川線 154kV POF(パイプ型油入り) ケーブル (第 1 報)」藤倉電線技報　第 40 号　p9　(1969)
(45) 藤ほか :「超高圧パイプタイプ OF ケーブル用絶縁油の検討」古河電工時報　第 42 号　p46　(1966)
(46) 今井ほか :「275kV 3 × 1400mm^2 高油圧パイプタイプ OF ケーブルの開発」古河電工時報第 43 号 p1　(1967)
(47) 中本ほか :「武山試験線 275kV 1400mm^2 高油圧パイプケーブル」藤倉電線技報　第 36 号　p11 (1968)
(48) 高田 :「武山試験線 275kV 高油圧パイプタイプ OF ケーブル建設における経験」古河電工時報 第 46 号　p77　(1969)
(49) 電気学会　電気専門用語集　No.21 送電線路　コロナ社　(1988)
(50) 速水 : CV ケーブル コロナ社　(1986)
(51) 渡辺ほか :「60kV ブチルゴム電力ケーブル」藤倉電線技報　第 25 号　p65　(1963)
(52) 飯塚ほか :「高電圧電力ケーブルのゴム、プラスチック化」電学誌 90 巻 8 号 p9　(1970)
(53) 鳥居ほか : 昭 34 年電気学会東京支部大会　(1959)
(54) 鳥居ほか :「架橋ポリエチレンの特性と耐熱ポリエチレン電線への応用に関する研究」藤倉電線技報　第 20 号　p55　(1961)
(55) フランク、エム、プレミピオ :「ポリエチレンのキュア方法」特公昭 33-6095
(56) E.R.Kervin:“Chemically crosslinked polyethelene ” 7th Wire and Cable Symposium　(1958)
(57) A.C.Bloestein:“Carbon black loaded crosslinked

polyethylene in wire and cables”7th Wire and Cable Symposium (1958)
(58) F.M.Precopio:“Curable polyethylene composition comprising a peroxide containing tertiary carbon atoms ,and process of curing same”US Patent 2,888,424 Patented by May 26, (1959)
(59) 畑 :「電力ケーブル技術の変遷」電学誌 121 巻 2 号 (2001)
(60) 松田ほか :「60kV 移動用 PEX(架橋) ポリエチレンケーブル」住友電気 第 82 号 p19 (1963)
(61) 和田ほか :「70kV 級移動用 QE ケーブル」藤倉電線技報 第 26 号 p1 (1963)
(62) 佐藤 :「60kV ブチルゴム電力用コンデンサ型ゴムモールド終端」藤倉電線技報 第 24 号 p40 (1962)
(63) 増田ほか :「尾鷲火力発電所 70kV CV ケーブルについて」古河電工時報 第 36 号 p44 (1964)
(64) 和田ほか :「60kV 級恒久設備用 QE 電力ケーブル」藤倉電線技報 第 31 号 p1 (1965)
(65) 藤沢ほか :「66kV ～ 77kV 架橋ポリエチレンケーブルの開発とその性能向上」住友電気 第 100 号 p31 (1964)
(66) 高田 :「特高 QE(架橋ポリエチレン) ケーブルの諸問題」藤倉電線技報 第 39 号 p17 (1969)
(67) 安井ほか :「超高圧架橋ポリエチレンケーブル用半導電被覆層の検討」住友電気 第 91 号 p43 (1961)
(68)「66kV PEX ケーブル 恒久用回路に布設」住友電気 第 91 号 (1966)
(69) 高田 :「三層同時押し出し特高 QE ケーブル」藤倉電線技報 第 35 号 p44 (1967)
(70) 古橋ほか :「77kV 架橋ポリエチレン電力ケーブル (中部電力鈴鹿線)」藤倉電線技報 第 42 号 p19 (1970)

5 自主技術で国産化 1970年(昭和45年)頃～1980年(昭和55年)頃

275kV OFケーブルおよび275kV POFケーブル長距離線路が建設され、大電流化のため冷却システムを導入した線路が建設された。長距離500kV OFケーブル線路建設を目指して各社独自の技術で半合成紙の開発が進められた。

CVケーブルについては、日本独自の乾式架橋製造方式を開発し、併せてトリー現象など絶縁特性の解明を進め高電圧化を果たした。これらの技術は世界に先んじた技術であり、CVケーブルの性能を向上させ、超高圧CVケーブルの実用化に貢献した。

図5.1に示すようにCVケーブルの設備量(km・cct)は1975年頃から大きな伸びを示したが、逆にOFケーブルは年々鈍化して主に275kV以上の線路しか建設されなくなった。CVケーブルは図5.2に示すように高電圧化が進み110kV以上ケーブルでも広く使用されるようになった。その後1980年以降は、OFケーブルに代わってCVケーブルが使用されるようになった。

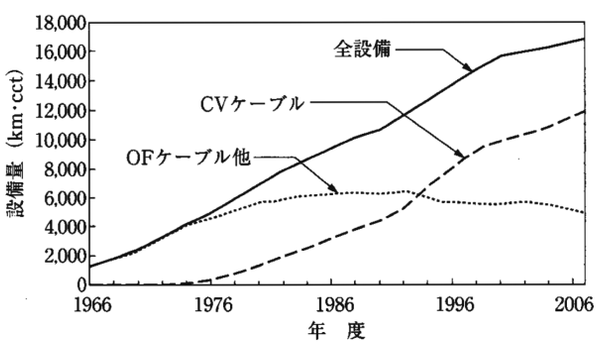


図5.1 電力ケーブルの設備量の推移[1]

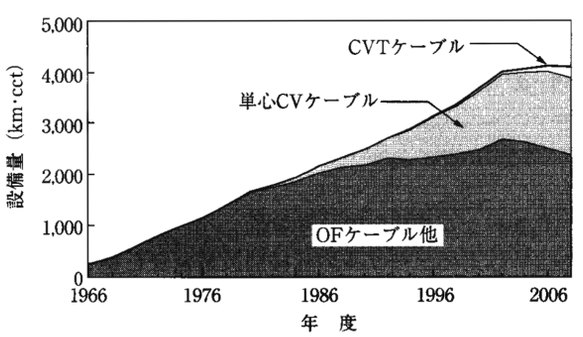


図5.2 110kV以上 ケーブルの設備量 の推移[1]

5.1 OFケーブル線路の大容量化と長距離線路化

5.1.1 長距離275kV OFケーブル線路

4.2.2項の275kV OFケーブルの長期課通電試験の結果を踏まえ、脱イオン水洗紙と合成油(DDB)を使用した275kV OFケーブルの都内導入長距離線路が実用化された。1971年に東京電力が江東城南線275kV 1000mm^2 および1200mm^2 アルミ被OFケーブル 亘長15.5kmを実用化した[2]。納入社は古河電工、藤倉電線、日立電線および昭和電線である。ケーブル構造を表5.1に示す。これまで使用されていた薄紙絶縁紙は機械的強度が弱く紙しわが発生し易く、ケーブル製造面でも紙巻時の難しさがあり、低密度・高気密度の70～200 μ厚の厚紙設計へ移行した。また、ケーブルの大導体サイズ化に伴う製造時の乾燥工程における絶縁紙の収縮対策のため、絶縁遮蔽は金属化紙とカーボン紙の組合せ巻きが使用された。

表5.1 275kV アルミ被OFケーブルの構造[2]

導体	公称断面積	(mm^2)	1,000	1,200
	構成		(40/2.40)×6	(64/2.08)×6
	形状		中空6分割圧縮	中空6分割圧縮
	外径	(mm)	44.4	48.0
バインダ	ステンレス鋼テープ	(mm×層数)	0.15×1	0.15×1
	カーボン紙	(mm×層数)	0.15×2	0.15×2
油通路	内径	(mm)	18.0	18.0
	亜鉛メッキ鋼体厚さ	(mm)	0.8	0.8
絶縁体厚さ(片面絶縁処理カーボン紙含む		(mm)	19.5	19.5
しゃへい層厚さ		(mm)	約0.25	約0.25
波付アルミ被	厚さ	(mm)	2.3	2.4
	高さ	(mm)	約5.1	約5.3
	ピッチ	(mm)	約30	約31
平滑ビニル防食層厚さ(最小値)		(mm)	4.5	4.5
最大外径		(mm)	116	120
概算重量		(kg/m)	19.6	22.0

この頃になると都市過密地域での電力ケーブルの布設工事は交通事情のため、作業時間の短縮と作業場所の制限から新たな工法の開発が必要となり、大型布設車、大型垂直キャタピラなど日本独自の工事工法が適用された。その後多くの220～275kV OFケーブル長距離線路が建設された。

5.1.2 冷却システム導入による大容量化

前章の図4.6に示したケーブルの大電流化の方法の一つとして、ケーブルの周囲温度を下げ発生熱を除去する冷却システムの導入が図られた。冷却方式として、ケーブルを直接冷却する方式(直接冷却方式と呼ぶ)とケーブルに並行して水を通したパイプを布設して間接的にケーブルを冷却する方式(間接冷却方式と呼ぶ)がある。

直接冷却方式は間接冷却方式に比べ送電容量のアップ率が大きく送電容量の増加は2～2.5倍となる[3]。直接冷却方式として代表的なものとして、5.2.1項に述べるPOFケーブル循環冷却システムが例としてある。

管路直接冷却方式は、1978 年に関西電力信貴敷津線 154kV 2000mm^2 OF ケーブル亘長 3.7km 2 回線 500MVA × 2 で実用化されている [4]。管路にはめ込まれた約 200mm 直径の硬質ビニル管にケーブルが引入れられ、そこに水が充填され、循環冷却された。

洞道内トラフ内間接冷却方式ケーブルとは、密閉型防災トラフ内に冷却管を設け、その冷却管に水を流すことによりケーブルの発熱を吸収し冷却する方式である。他の冷却方式より信頼性、保守性、経済性の点で適している。一般的に洞道内風冷と併用して使用される。布設断面の例を図 5.3 に示す。この方式は、1980 年に東京電力北武蔵野豊島線 275kV 1600mm^2 OF ケーブル線路 21km 3 回線に採用されており、送電容量が 1 回線で 300MW(非冷却時) から 460MW に上昇した [5]。この間接冷却方式は約 1.5 倍の送電容量上昇が図れるためその後も 275kV ケーブル線路で広く採用された。

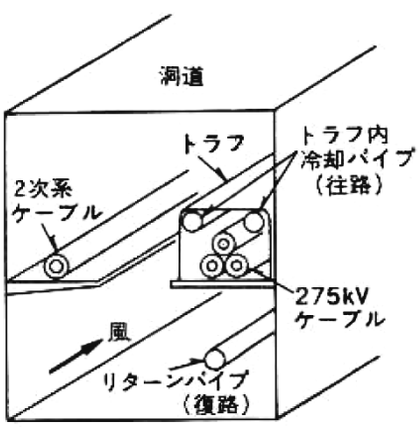


図 5.3　洞道内トラフ内間接冷却方式の布設断面例 [3]

5.1.3　短距離 500kV OF ケーブル線路

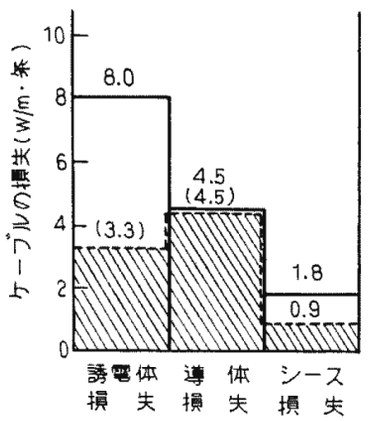
1968 年より東京電力と電線メーカー (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線、昭和電線) とにより、500kV POF ケーブルと共に 500kV OF ケーブルの大容量地中送電技術開発共同研究が開始された。1972 年 2 月より東京電力東東京変電所構内に 500kV OF ケーブルの実規模試験線路が建設され 1 年 10 ヶ月にわたる長期課通電試験が行われ、500kV アルミ被 OF ケーブルの長期信頼性が検証された [6]。日立電線と昭和電線がケーブルおよび付属品を供試した。絶縁紙は脱イオン水洗紙、絶縁油はアルキルベンゼン系合成油 (DDB 油) が使用された。

1974 年に国内初めての 550kV 1000mm^2 鉛被 OF ケーブル (最大単長 490m) が関西電力奥多々良木発電所の高低差 95m のルートに布設された [7],[8]。普通接続箱が施工された。絶縁厚は 33mm であった。ケーブルは高油圧および中油圧設計の OF ケーブルが使われた。ケーブルの写真を図 5.4 に示す。納入社は住友電工である。絶縁紙の機械的強度を考慮して低密度・高気密度の 100 ～ 200 μ m の脱イオン水洗紙を使用している。その後東京電力を初めとして各電力会社で発電所の引出し線として短距離の 500kV アルミ被 OF ケーブルが布設された [9]。

図 5.4　我が国最初の 550kV OF ケーブル [7]
(関西電力 (株) 奥多々良木揚水発電所)

5.1.4　275kV ケーブル用半合成紙の開発

絶縁紙の低密度紙化と脱イオン水洗紙による低損失化が進められたが、それでも誘電体損失 ($\varepsilon \times \tan\delta$) が大きく、500kV の長距離線路への適用には更に低損失化が必要であった。 275kV OF ケーブルでの試算例でも、図 5.5 に示すように従来のクラフト紙の絶縁体損失はケーブルで発生する全損失の約 55% であり、この低減化が必要であった [10]。脱イオン水洗紙に代わって ε と $\tan\delta$ を小さくするため、1961 年から 1969 年にかけて、貼りあわせ紙、合成繊維紙，混抄紙などの改良が行われ、各種合成紙、半合成紙の開発も進められた。この時代の実線路布設例として 1968 年に藤倉電線がマイカ混抄紙を使用した OF ケーブルがある。東京電力君津線向け 154kV 1200mm^2 アルミ被 OF ケーブル (絶縁厚 13.5mm) である [11]。マイカ混抄紙は精製処理されたマイカ微鱗片 (厚さ 1 μ m, 長さ 1mm 以下) とクラフトパルプとを混ぜて抄紙したものである。マイカの混抄率は 20 ～ 40% であった。布設後の実線路での $\tan\delta$ の値は 30% 減、 ε の値は 5% 減にとどまった。



12 孔管路 3 cct 布設，L_f=0.65，上被 1.5 m
——：従来紙 OF ケーブル（ε・tan δ=3.4×0.2%）
……：低損失紙 OF ケーブル（ε・tan δ=2.8×0.1%）

図 5.5 従来紙と低損失ケーブルの損失 [10]
（275kV 1 × 2,000mm²）

一方、飛躍的な低損失化としてオールプラスチックフィルム巻ケーブルの検討を各社実施したが、含浸、膨潤、油への溶解など耐油性の問題、機械的特性の問題などがあり実用化に到らなかった。1970 年頃からプラスチックフィルムの不具合の改善のため、合成繊維紙の開発が進められた。代表的なものとして、PAP[12]、SSP[13] がある。これらはフィルムの欠点を改善したが、耐電圧破壊強度、機械的特性が十分でなく実用化されなかった。1970 年頃からこれらの合成繊維紙の問題を解決するため、プラスチックの良好な電気特性とクラフト紙の優れた機械的特性を有するラミネート構造の各種半合成紙が開発された。

押出ラミネート紙による絶縁紙への最初の試みは、1963 年にポリエチレンラミネート紙でされたが、耐油性、耐熱性、価格の点で問題があった [14]。一方海外ではアメリカの GE 社がポリプロピレン (PP) フィルムと絶縁紙を交互に重ねたコンデンサが開発されていた。また、1970 年頃イギリスの BICC が PPL の名前で PP ラミネート紙を発表している [15]。1974 年には米国では PPP という名称の PP ラミネート紙が開発された [16]。その後改善が進められ BICC 製のものは 400kV OF ケーブル用に使用されている。日本では表 5.2 示すようなプラスチック半合成紙の開発を各社が競って進めた。

住友電工は 1969 年から PP と絶縁紙を貼りあわせた PPLP (Polypropylene Laminated Paper) の開発を始めた。1972 年には 275kV OF ケーブルの試作が行われ長期試験も実施され実用化の見通しを得た [17]。ε、tan δ 以外に DDB 合成油に対する膨潤特性、プラスチックとクラフト紙との剥離強度が評価された。PPLP の開発は住友電工と巴川製紙所との共同で開発を進められた。「PPLP の開発当初は二軸延伸 PP フィルムとクラフト紙とを接着剤を使って複合化されたが誘電特性が悪いものであった。次に PP 溶融押出法によるラミネート化が検討された。当時の PP ラミネート用樹脂はエチレンを含んだポリマのためアルキルベンゼン系合成油による膨潤、溶解が大きく耐油性に問題があった。一方、ホモポリマ (キャパシタグレード品) は耐油性は改善されたが、加工性が悪く、工業的規模でのラミネート製造は困難であった。その後 PP 樹脂の改良研究が行われ 1979 年実用的な PPLP が完成した」[15] と開発の経緯が報告されている。 PP100％の押出ラミネート化と最適な絶縁紙の組合せにより、海

表 5.2 各種ラミネート絶縁紙の特性一覧（厚さ 150 μm相当のラミネート紙）[15]

		SIOLAP	PPLP	DCLP	OPPL	FPPL	PML	FEP/C	クラフト紙
プラスチック特性	材料	グラフト架橋ポリエチレン（シオグラセン）(PE)	ポリプロピレン (PP)				ポリメチルペンテン (TPX)	ふっ化エチレンポリプロピレン共重合体 (FEP)	
	DDB中融点	128～130	165～176				236	275	
	ε (60Hz)	2.25～2.35	2.2～2.3				2.12	2.1	
	tan δ (60Hz・RT)%	<0.05	<0.05				<0.09	<0.03	
	構造	クラフト紙／シオグラセン	クラフト紙／PP	PP 混抄紙／PP 不織布／PP 混抄紙	クラフト紙／PP 延伸フィルム	クラフト 2 層紙／PP	クラフト紙／TPX	クラフト紙／FEP フィルム	クラフト紙
絶縁体	製造方法	押出しラミネート	押出しラミネート	熱カレンダー	熱カレンダー	押出しラミネート	押出しラミネート	熱カレンダー	
	ε ×tan δ (%) (80℃)	2.8×0.08	2.8×0.08	2.7×0.07	2.8×0.08	2.8×0.088	2.7×0.07	2.5×0.05	3.2×0.17
	AC(シート) kV/mm	118	135	121	160	144	118	104	80
	Imp(シート) kV/mm	260	250	220	280	248	214	229	150
	密度 (g/cm³)	0.93	0.88	0.72	0.93	0.89	0.79	1.65	0.6
	気密度 (g/cc)	○○	○○	20～27×10³	○○	○○	○○	○○	1400
	引張強さ (kg/mm²)	6.7	5.9	4.6	8.4	8.7	6.3	5.6	5～6
	伸び (%)	3.5	2.5	2.9	3.5	3.3	4.3	2.7	
	膨潤(絶乾ベース100℃(%)	3.6	4	0	4.4	3.5	3.9	0	
	85～100℃Aging後剥離強度(g/15mm幅)	はく離不可	80	90	>300	>200	80	はく離不可	
	開発メーカー	昭和電線	住友電工	三菱電線	古河電工	フジクラ	古河電工	日立電線	
	最初の半合成紙実用線路	275kV OF 東京電力 城北線 1980年	275kV OF 東京電力 城北線 1980年	——	275kV OF 関西電力 下穂積線 1986年	275kV POF 中部電力 知多第二火力 1998年	——	275kV OF 関西電力 南大阪泉北線 1982年	

外のラミネート紙に比べ、膨潤特性、剥離強度、高温 tan δ特性の優れた PPLP が開発できた。

SIOLAP などラミネート紙についても種々検討をされた[18],[19]。表 5.2 に示すように各種のラミネート紙が 275kV OF ケーブルおよび 275kV POF ケーブル線路に実用化された。PPLP はその後も改良が加えられ、世界初の本四連系線 500kV OF ケーブル線路および紀伊水道横断直流 500kV 海底 OF ケーブル線路に使用された。

5.2 POF ケーブルの超高圧化

5.2.1 長距離 275kV POF ケーブル線路

(1) 長距離線路の建設

4.2.2 項の長期課通電試験の結果を踏まえ、1971 年に東京電力が都内導入線路として日本で初めての新宿線 275kV POF ケーブル亘長 19.9km、275MVA 1 回線の線路を運開した。1972 年に 2 回線目も運開した。住友電工、古河電工および藤倉電線の 3 社が 275kV 3 × 1000mm^2 および 1400mm^2 POF ケーブル[20],[21] を納入した。ケーブル構造を表 5.3、およびその写真を図 5.6 に示す。その後各所に 275KV POF ケーブル線路の建設が進められた。

表 5.3 新宿線 275kV POF ケーブルの構造[20]

項目		内容	
導体	公称断面積	1,000mm^2	1400mm^2
	材質	錫メッキ軟銅線	
	形状	4分割圧縮円形撚り線	
	外径	40.0	47.0
バインダ	ステンレス鋼テープ	0.15mm	
	カーボン紙	0.15mm × 2	
絶縁体	片面絶縁処理カーボン紙 絶縁紙 片面金属化紙（組合せ巻）	19.5mm	19.5mm
防湿層	片面金属化ポリエステルテープ	約0.2mm	
補強層	ステンレス鋼テープ ポリエステルテープ	約0.5mm	
滑り層	D型ステンレス鋼線 4本並列巻	高さ2.5mm 幅5.0mm	
線心概算外径		87mm	94mm
線心概算重量		16.4kg/m	20.9kg/m

(2) 強制冷却線路の実用化

藤倉電線は 1978 年に九州電力向け 220kV 3 × 1400mm^2 POF ケーブル線路 600MW × 2 回線において日本初めての冷凍機を用いた循環冷却システムを実用化した[22]。送電容量は非冷却時の約 2 倍となった。この線路は、新小倉発電所から北九州系統開閉所までを送電する線路で、この一部に鉱滓埋立地盤で土壌熱抵抗が極めて大きく部分的に温度が高くなる場所があり、強制冷却できる POF ケーブルが採用された。

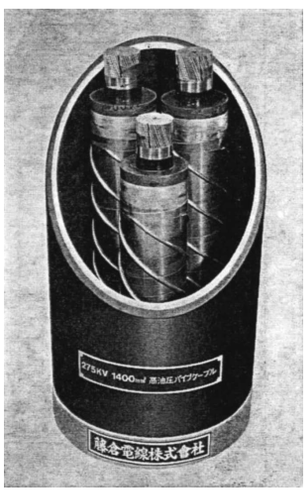


図 5.6 新宿線 275kV POF ケーブル[20]

5.2.2 500kV POF ケーブルの開発

1968 年より東京電力と電線メーカー 5 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線、昭和電線) により 500kV OF ケーブルと共に大容量地中送電技術開発が共同でされた。1970 年 9 月より東京電力東東京変電所構内に 500kV 3 × 2000mm^2 POF ケーブル (絶縁厚 30mm、脱イオン水洗紙) の実規模試験線路 (230m 長) が建設され 3 年余にわたる試験が行われた[23]。住友電工，古河電工、藤倉電線がケーブルおよび付属品を供試した。試験開始から 1 年 3 ヶ月かけて冷却試験が行われた。その後 1 年 9 ヶ月長期課通電試験が行われ長期安定性を検証した。これらの試験から油循環冷却方式により 500kV 1500MVA/1 回線まで送電可能なことを立証できた。しかし、500kV POF ケーブルの実線路は、日本の道路事情などから地下に鋼管を埋設する場所が確保できなくなったこと、多量の油を使用すること、および長距離大容量送電のニーズがなかったことなどがあり実用化に至らなかった。

5.3 独自技術による CV ケーブルの高電圧化

5.3.1 乾式架橋装置開発によるケーブル性能改善

CV ケーブルの耐電圧性能および長期安定性に関して、図 5.7 に示すような絶縁体中の「異物」、絶縁体と半導電層間の「突起」、絶縁体中の微小「ボイド」が有害な欠陥となっていた。

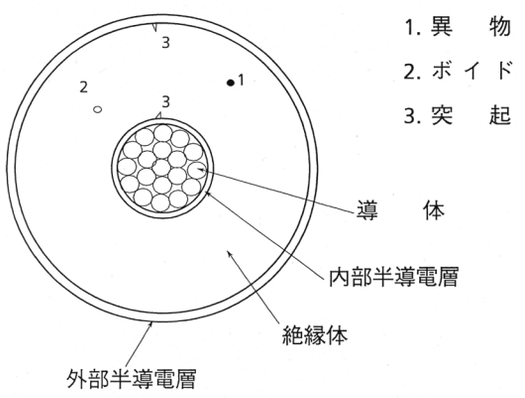


図 5.7　CV ケーブルの有害な欠陥

66kV 級 CV ケーブル製造の初期段階では、ブチルゴム絶縁ケーブル製造の延長で、図 5.8 に示すような VCV(竪型連続加硫機) を用いた蒸気架橋法で製造された。高温水蒸気下での架橋のため、加圧水蒸気が絶縁体の架橋ポリエチレン中に浸透し、冷却工程で凝縮して水となったものが、時間経過とともに蒸発して、微小のボイドが多数形成する。高電圧下でこの微小のボイドからトリーが発生し有害な欠陥となり、ケーブルの電気特性とりわけ長期寿命に影響を与える。

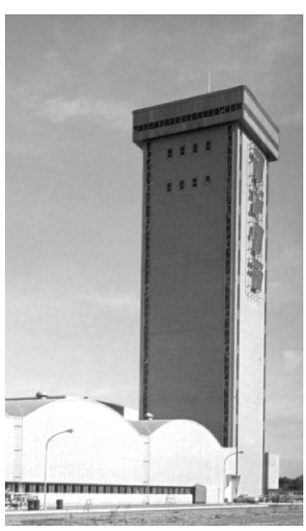


図 5.8　VCV が入っている建屋 (44)

蒸気架橋方式での製造では、架橋速度を上げようとすると蒸気圧を高める必要がある。通常 16kg/cm^2 の圧力下でも温度は約 200℃の温度にしか上げられず、例えば 250℃の温度を得ようとすると 41kg/cm^2 の飽和蒸気圧が必要なため、一般にケーブルの製造線速を上げるため架橋筒を長くする方法がとられていた。VCV の場合では建屋を高くする必要があるため建屋の建設費が高額となる。この対策として、建屋高さの制約のない横型連続加硫機 (HCV)、カテナリー型連続加硫機 (CCV) による製造が検討され実用化された。

住友電工は水蒸気架橋での生産性改善と乾式架橋化の狙いもあり赤外線輻射を用いて架橋温度を上昇させる乾式のガス架橋装置 (RCP) を開発し 1969 年に稼働を始めた (24),(25)。

加圧媒体として窒素ガスを使用した。この熱線架橋方式を図 5.9 に示す。図 5.10 に乾式架橋製造時の各部温度パターンの一例が紹介されている (26)。加熱部温度を 350 ～ 400℃とすることによりケーブル表面温度を 300℃とすることができる。従来方式の約 1.5 倍の線速アップが可能となった (27)。1972 年に米国向け 138kV 500mm^2 CV ケーブルをこの乾式架橋法により製造納入した (24)。

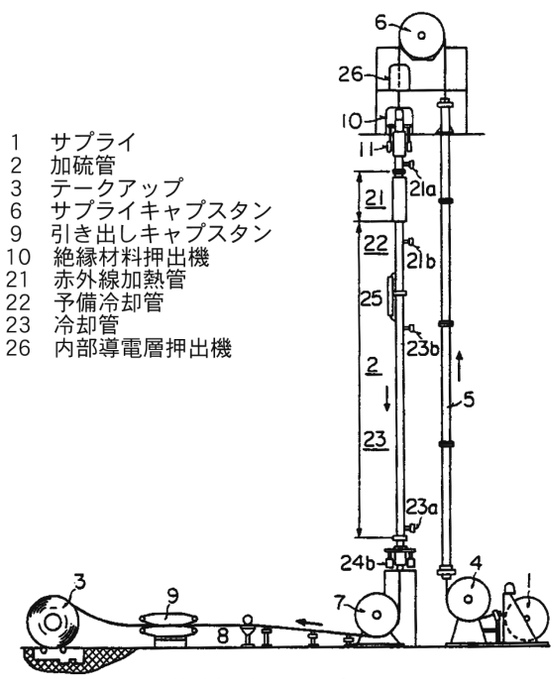


図 5.9　熱線架橋 (RCP) プロセス (26)

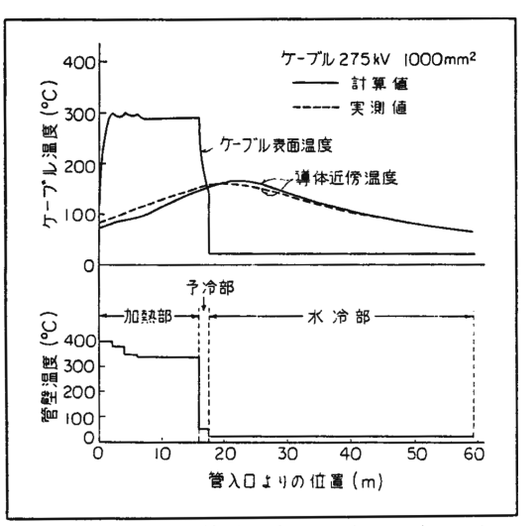
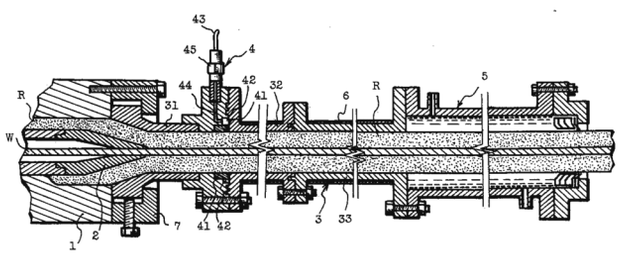


図 5.10　RCP での管壁温度およびケーブル温度 (26)

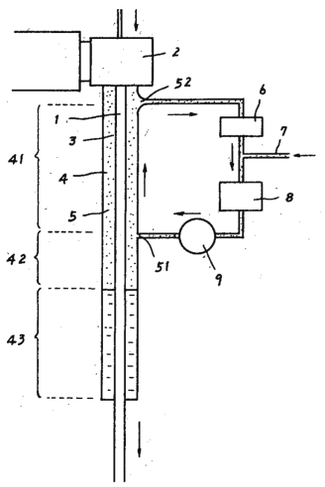
1971 年に大日日本電線 (株)(以下大日日本電線と記述 ; 現三菱電線工業 (株)) は、建屋高さの制約を受けない HCV 式の乾式架橋 MDCV プロセスの開発を三菱油化 (株) と共同で行い実用化した [28],[29]。従来の水蒸気架橋のケーブルで不可避だった数μ m ～数十μ m のボイドサイズが 1 μ m 以下と極めて小さくなった [28]。この製造方式は図 5.11 に示すように三層同時押出のヘッドとロングダイスを一体化し、押出した絶縁体を加温されたダイス内を滑らせて製造する乾式架橋法である。押出されたケーブルコア表面とダイスとが接触して焼き付くのを防止するため特殊な粘度を有する潤滑剤を使用することが特徴である。MDCV の「架橋部 + 冷却部」の長さは従来の蒸気架橋 VCV 方式のそれの 1/2 程度となる [30] と記されている。この方式で 1973 年に中国電力 (株) 白神変電所 110kV 200mm^2 CV ケーブル亘長 60m 1 回線を製造納入している [31]。この CV ケーブルが乾式架橋で製造され布設された日本で初めての CV ケーブル線路である。



W 導体　R 絶縁体　1 クロスヘッド　2 ニップル
3 長ランドダイス装置　4 成形助剤供給装置　5 水冷管
6 ヒータ

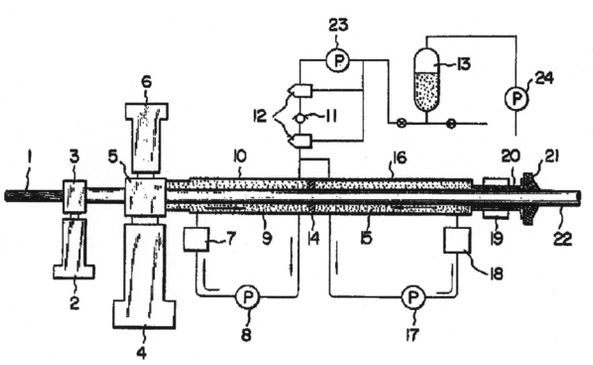
図 5.11　MDCV プロセス (HCV)[29]

1973 年に日立電線が実用化した乾式架橋装置は、図 5.12 に示すように VCV 方式で加熱加圧した不活性ガスを媒体として循環し、ケーブルコアとの境膜熱抵抗を下げて熱効率を改善した架橋方式である [32],[33],[34]。1975 年に藤倉電線が実用化した乾式架橋装置 (FZCV) [35],[36],[37] は、図 5.13 に示すようにシリコン油を媒体として用いたもので、加熱されたシリコン油と冷却されたシリコン油を別々に循環し、連続した管内でシリコン油により加圧架橋冷却する方式である。この製造方式は図 5.14 に示すように CCV 方式である。XLPE とシリコン油は比重が同じなので、浮力によって絶縁体重量がほぼ相殺され、CCV で課題である XLPE の垂れ下がり現象が生じにくいことが特徴である。古河電工は架橋媒体として熱伝達特性の良好な無機溶融塩を使った FSCV 方式による乾式架橋装置を実用化した [38]。昭和電線は高周波誘導加熱により導体を加熱しその熱で架橋反応を行わせる熱効率を改善した乾式架橋方式を実用化した [39]。各社が競って独自方式の乾式架橋装置を開発した。



1 導体　2 押出機　3 プラスチック　4 架橋筒　41 加熱部
43 冷却部　5 不活性ガス　6 フィルター　8 熱交換機
9 高圧ポンプ

図 5.12　ガス架橋プロセス (不活性ガス循環)[33]



1 心線　3 内導押出機　4 絶縁押出機　6 外導押出機　7 ヒータ
9 加熱媒体　10 架橋パイプ　14 シール部　15 冷却媒体
16 冷却パイプ　18 冷却装置　23 加圧ポンプ

図 5.13　FZCV プロセス [36]

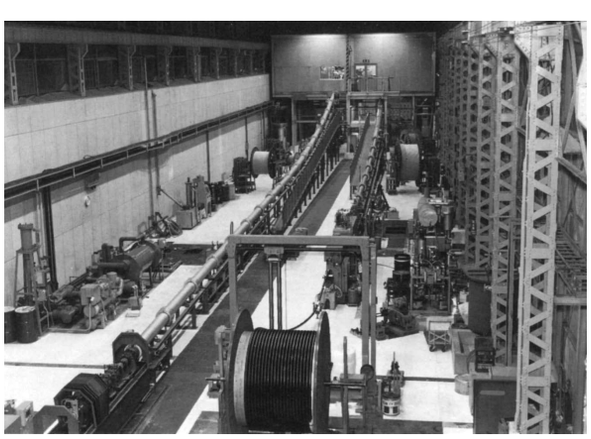


図 5.14　FZCV 設置状況（CCV）[45]

乾式架橋方式の採用により、図 5.15 に示すように水蒸気架橋で発生したミクロボイドが減少した。図 5.16 示すように XLPE 中のミクロボイドの大きさおよび個数が激減し、XLPE 中の含有水分量も極めて少なくなった[38),40)]。これらの乾式架橋製造方式によって、CV ケーブルの交流破壊特性は図 5.17 に示すように約 30% 向上し、絶縁体の厚さの低減が可能となった。これらの技術は、世界初めての試みであり、架橋ポリエチレン電力ケーブルの電気絶縁性能の安定化に貢献し、かつ超高圧化を推進した。この技術により日本が CV ケーブルの製造技術に関して、品質面も含めて世界のトップになった。表 5.4 に示すように絶縁厚さの低減が進んだ。これらの乾式架橋製造技術はヨーロッパを初めとして海外に技術輸出されている[43)]。

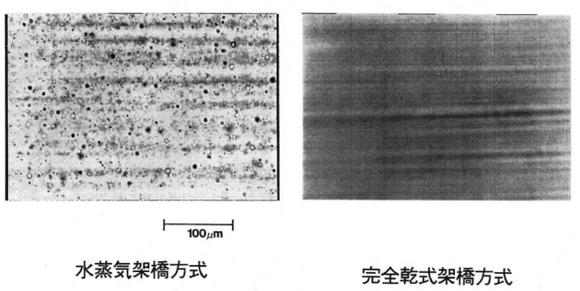


図 5.15　絶縁体中のミクロボイド[35)]

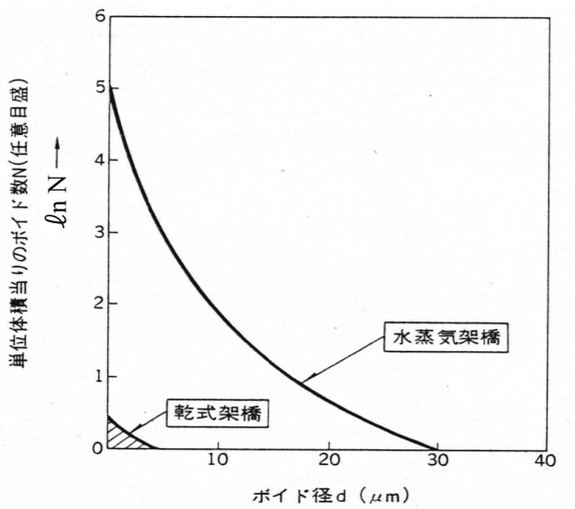
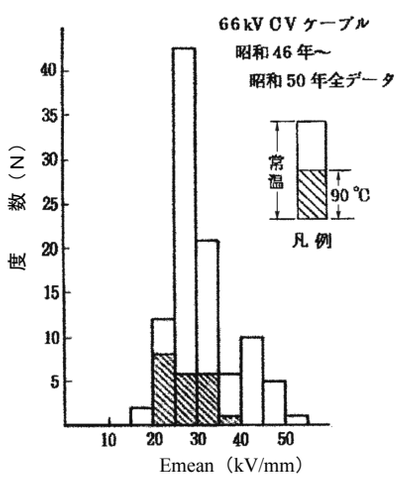
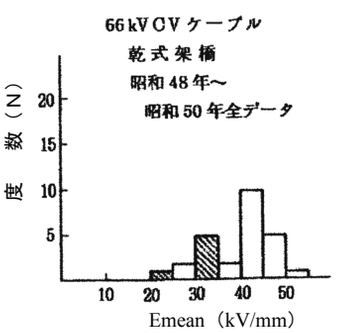


図 5.16　乾式 XLPE ケーブルのボイドレベル[38)]



(a) 蒸気架橋品含む



(b) 乾式架橋品

図 5.17　66kV CV ケーブル初期破壊値ヒストグラム[41)]

表 5.4　66kV 級 CV ケーブル絶縁厚の変遷[42)]

電圧	項目	年度（昭和） 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
66kV	絶縁厚	66kV t=15 / 77kV t=17 ／ 66kV t=13 / 77kV t=15 ／ 66kV t=11 / 77kV t=13 ／ 66kV t=9～10
77kV	架橋方式	水蒸気架橋 ／ 乾式架橋
	遮へい層	銅テープ　0.1 mm × 2 枚 ／ 単心・銅テープ 0.2mm×2 枚 ／ 単心ワイヤシールド 1.2 φ × 40本

5.3.2　長距離 66 ～ 77kV CV ケーブル線路

1971 年から東京電力が 66kV CV ケーブルの実用化を進めた。1975 年以降多くの 66 ～ 77kV CV ケーブルのジョイント入り長距離線路が建設され接続箱が実用化された[1]。中間接続箱の構造は、テープ巻モールド式、テープ巻式、プレハブ式が検討された。

CV ケーブル用接続箱の構造の変遷を表 5.5 に示す。CV ケーブルの接続部では、補強絶縁部とケーブル界面は微小のボイドの発生は避けられない。また、運転時の温度変化によるケーブル絶縁体の熱膨張収縮に起因する絶縁体の挙動も新たな課題であった。この対策として FM ジョイントなどのモールドジョイントが使用された[46],[47]が、施工時間が長い欠点があり、図 5.18 に示すようなテープ巻式中間接続箱が使用された[1]。テープ巻式接続箱の補強巻き部は大形となり、人力による巻きつけ作業のため労力の点で課題があり、更に巻き付けコントロールや異物混入防止等の品質面でも問題があり、機械巻き工法が採用された[1],[48]。

5.3.3 水トリー問題と対策

(1) 水トリー問題

水トリー (Water Tree) は、「水の存在のもとで電圧が印加された時に、絶縁層と電極の界面、あるいは絶縁層内のボイドや異物からトリー状の劣化痕が発生し成長する現象」である。水トリーは 1967 年に (株) 日立製作所宮下により水中モータの細物 PE 電線で初めて発見された[49]。細い電線で電圧も 200V と低いものであり、電線メーカーは当初特殊な現象と考え、ケーブルの耐電圧劣化現象と結びつけなかった。1967 年頃から水トリーの発生したケーブルが発見されるようになったが、発生頻度も少なく、最初は公にならなかった 。しかし 1971 年に米国の Vahlstorm が実使用した 15kV ポリエチレン絶縁ケーブルで水トリーの存在が発表され注目された[50]。国内でも 1970 年に古河電工福田らが 6.6kV の架橋ポリエチレンケーブルの浸水課電試験で水トリーを発見し[51]、1972 年に電力中央研究所福田らが 3.3 ～ 6.6kV CV ケーブルで絶縁破壊を起こしたケーブルを調査したところ水トリーが見られ報告された[52]。電気的にも重要な現象として電気学会絶縁材料耐電界性常置委員会で取り上げられ調査された。水トリーの発生メカニズムとその対策などが電気学会技術報告としてまとめられている[53],[54],[55]。水トリーは CV ケーブルの耐電圧性能を低下させ、絶縁破壊を引き起こす要因となっており、これらの水トリー発生と伸展の現象解明が CV ケーブルの高電圧化の進歩に貢献した。

水トリーはその形態から図 5.19 に示すようにボウタイトリー (Bow-tie Tree) と界面水トリー (Vented Tree とも呼ぶ) に分類されている[56]。これらのトリーは、浸水下では顕著に発生し、初期のボイド径が大きいほど伸びは大きく、時間経過に伴い大きくなるがその伸びは飽和する傾向がある。乾式架橋で製造された 66kV 以上 CV ケーブルでは、ボイド・異物から発生するボウタイトリーが支配的となる。長期信頼性確保の観点から、ボウタイトリーの発生・伸展メカニズムおよび長期絶縁性能に及ぼす影響について解明する必要があった。乾式架橋法で製造された CV ケーブルでも浸水下での課電でもボウタイトリーが発生している[57]。ボウタイトリーの長さにより交流破壊電圧は低下する[55]が、一方ボウタイトリーは交流破壊電圧に影

表 5.5　66kV 級 CV ケーブル用中間接続箱絶縁方式の変遷[1]

年度	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
66kV級	テープ巻式																																										
	テープ巻モールド式																																										
	プレハブ式																																									
	ゴムブロック式																																									

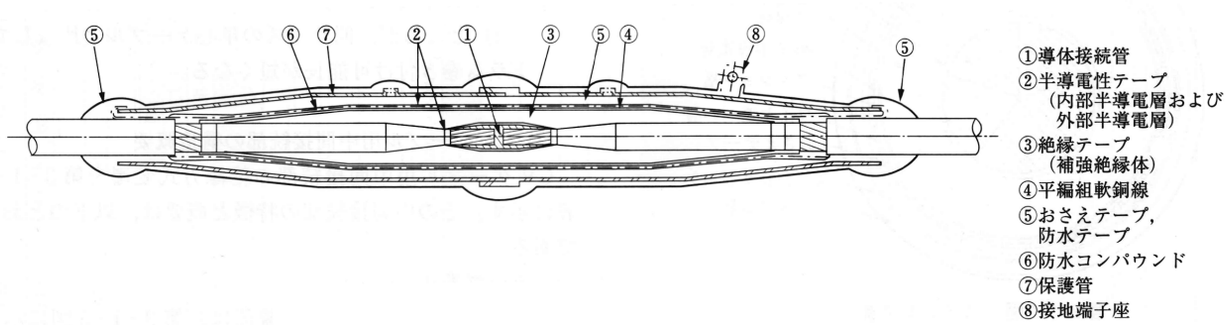


図 5.18　66kV 級用テープ巻式普通接続箱[1]

響はないという報告もあり[58]、耐電圧特性への影響は必ずしも明確ではなかった。超高圧 CV ケーブルの開発においては、ボウタイトリーを極力発生しないように、絶縁体中のボイド径の縮小とその数の削減、異物の削減および水分量の低減を図った。

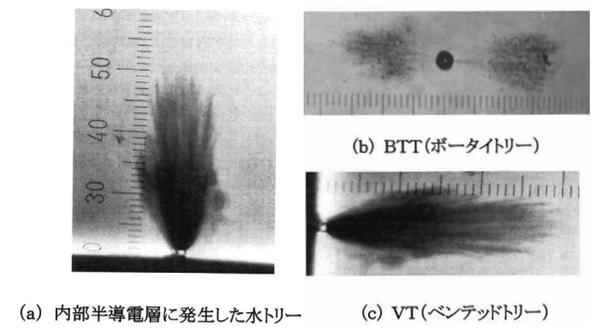


図 5.19　水トリーとボウタイトリー[59]

水トリーの発生したケーブルで、前駆遮断法[注)]を用いて、電気トリー発生源種類と交流での 電気トリー発生電界 (前駆遮断電界) を求めている。

注) 前駆遮断法

前駆遮断法は、1980 年代に日立電線遠藤が開発した方式[60] である。従来のケーブルでの絶縁破壊試験では、絶縁体の起点となった欠陥部が焼失し破壊原因が判明しなくなってしまう。絶縁体中の欠陥部から電気トリーが伸展して全路破壊する以前に部分放電パルスを検出して電源を遮断する方式である。これは日本独自で開発した技術である。これにより、ほぼ原形のまま欠陥部からのトリーが目で見られるようになり、絶縁体中に有害な欠陥の種類と大きさが明らかとなった。また、パルスの到達時間差を両端で測定することでケーブルの欠陥部を特定できるため、欠陥部の顕微鏡調査が容易となった。この技術は、CV ケーブルの絶縁破壊の原因が何であるかを明らかにし、CV ケーブルの絶縁性能向上に貢献した。

ボウタイトリーからのトリーは図 5.20 に示すように新たな電気トリーを発生する。図 5.21 に示すようにボウタイトリーの場合でも交流前駆遮断電界値は初期破壊電界の 1/3 ～ 1/4 に低下しており[61]、水トリーの有害性は明らかとなった。特に開閉サージなど過電圧が加わった場合にトリーの進展が懸念される。

CV ケーブルにおける水トリーの絶縁破壊特性は時間依存性を有しており、OF ケーブルの耐電圧時間特性とは全く異なる。このような水トリーの伸展具合を把握監視するため CV ケーブル劣化診断技術の開発がなされている[62]。

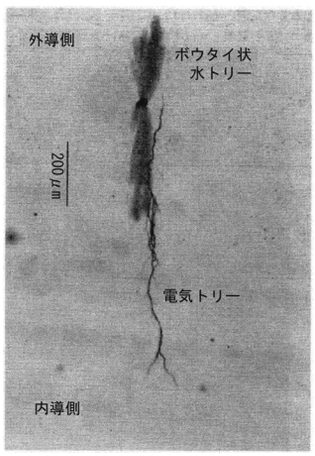


図 5.20　水トリーからの電気トリー発生例[61]

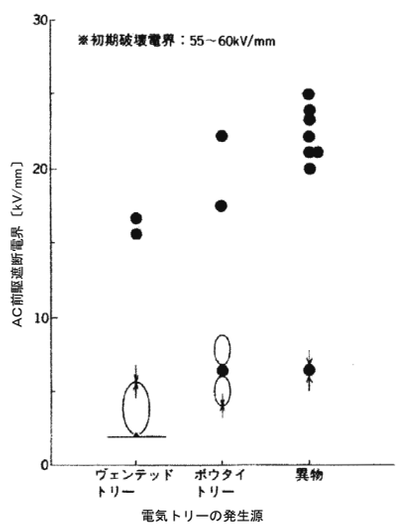


図 5.21　AC 前駆遮断電界と電気トリー発生源種類の関係[61]

水トリーの発生と進展を抑制するためには、①水分を少なくすること、②水の侵入をなくすこと、③ボイド、異物、突起による局部電界上昇を抑えることが重要であり、CV ケーブルの絶縁破壊特性および信頼性の向上に必要な課題であった。乾式架橋プロセスの導入により絶縁体中の水分を少なくし、シースに金属被または遮水層を設けて水の侵入を抑制し、更に材料のクリーン化および 3 層同時押出などの製造方法の改善で、66kV 以上 CV ケーブルにおける水トリーの問題は著しく改善された。

(2) 鉛遮水ラミネートテープ付き CV ケーブルの実用化

水トリーとボウタイトリーはいずれも局部電界と水分の共存のもとで発生する。その防止には吸水現象と

水トリー発生および成長という相互作用を断ち切ることが必要であり、CV ケーブルの遮水層の検討がなされた。遮水シース材料として透湿係数の小さいプラスチックの試みもなされたが、完全に水の侵入を阻止できないため採用されなかった。遮水性能と共に外傷防護性能、機械的特性も考慮され、金属被と金属ラミネート遮水構造の両方式が検討された。ケーブル外径の制約がない布設環境では金属被が適しているが、管路布設のようなケーブル外径の制約が厳しく、外傷防護性能が重要視されない場合では金属ラミネートテープ遮水方式が適している。基本的に 275kV 以上 CV ケーブルでは金属被が用いられている。

金属ラミネート遮水ケーブルの構造については、古河電工が 1970 年に鉛ラミネートテープをケーブルコア上に縦沿えして密封する構造を提案しており [63]、遮水ケーブルのもとになっている。鉛ラミネート遮水ケーブルの構造を図 5.22 に示す。この方式ではプラスチックシースを透過した水分はラップ部の接着層のみを経由して侵入するもので、水分透過量の比は 2.7 × 10^{-4} と極めて小さくなり [63]、ほぼ完全遮水構造とみなせる。金属ラミネート遮水テープの材質としては、機械的特性特に屈曲性を優先して鉛が採用された。

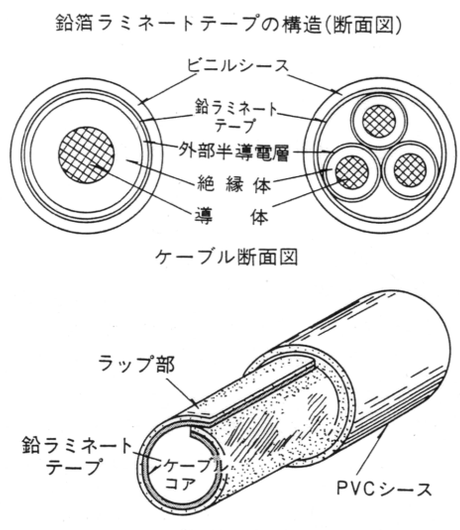


図 5.22　鉛ラミネートテープ設置方法 [38]

各社とも基本的には図 5.23 に示すような鉛ラミネート遮水テープを使用した。ケーブルにサージが侵入した時に、ケーブルの半導電層と鉛テープ (Lead foil layer) 間に異常な電位差が発生しないよう、絶縁体を用いず半導電性の層 (Semi-Conductive PVC layer) としている [67]。鉛層の外側はそのプラスチック層とケーブルシースビニル層が接着し一体化する構造としている。ビニル押出時の熱により接着剤を介し鉛ラミネートテープが充分にビニルシースに融着する構造となっている。

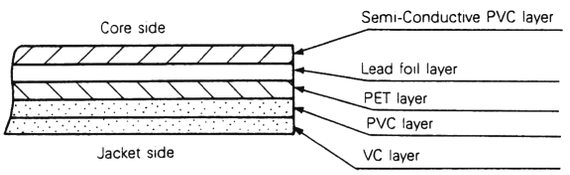


図 5.23　鉛ラミネート遮水テープの構造 [67]

この鉛ラミネート遮水テープを使用した方式は、1983 年に東京電力東扇島線 154kV 400mm^2 および 600mm^2 CV ケーブル線路亘長 2.6km 2 回線に使用された [64]。納入社は日立電線と昭和電線である。1984 年にこの遮水層付きケーブルは東京電力にて 66kV CV ケーブルの構造として標準仕様化された [65]。アルミを使用したラミネート遮水構造は、ヨーロッパでも使用実績があったが、環境面、経済性の点でも長所があることから、日本でも使用され [66]、2000 年以降に 275kV CV ケーブルまで使用されるようになった [1]。

5.3.4　短距離 154 ～ 187kV CV ケーブル線路

1973 ～ 1976 年にかけて東京電力東東京変電所構内の地中送電総合試験場において、東京電力と電線メーカー 6 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線、昭和電線、大日日本電線) とが共同で 154kV CV ケーブルおよびその付属品 (気中終端箱、テープ式モールド接続箱 TMJ、プレハブ型接続箱 PJ など 5 種) の長期課通電試験を実施した [39],[68]。50 年に相当する長期課通電試験 (導体温度 90℃サイクリック、課電累積時間約 5500 時間) を実施し十分に長期間の使用に耐えることを実証した。気中終端箱、中間接続箱 (TMJ、PJ) などが実用化の見通しを得た。

1976 年に日本で初めて 154kV 600mm^2 CV ケーブル (絶縁厚 23mm) が関西電力長曽根線 120m 2 回線に布設され竣工した。納入社は住友電工である [69]。

1977 年に東京電力新富士変電所天童東幹線引込み線に 154kV 800mm^2 CV ケーブル (絶縁厚 25mm; 内導厚 2mm 込み) 0.35km 2 回線が運開している [68]。納入社は古河電工である。絶縁体の製造は、三層同時押出および乾式架橋方式を適用している。内外半導電層を含めると押出コア層は 29mm の厚肉となる。ヒートサイクルによる絶縁体の熱膨張と収縮により従来の銅テープ巻き構造ではテープが破断に至ることもあり、これに対処するため銅線スパイラル巻き構造が初めて採用された。銅線径 1.2mm ϕ、本数 78 本、ピッチ約

850mm の条件で巻かれている。この仕様については、①インパルス電圧で外部半導電表面の銅線間で放電が生じないこと、②コアの熱膨張を銅線の熱膨張で吸収できることを考慮して設計されている。終端箱はゴムモールドストレスコーンを使用したプレハブ型気中終端箱を採用している。

1977 年に日立電線が電源開発奥清津揚水発電所 (出力 1000MW) 向け 187kV 2000mm^2 アルミ被 CV ケーブル 2 回線 (ケーブル長 435m) および 600mm^2 アルミ被 CV ケーブル 4 回線 (ケーブル長 1156m) を納入し、1978 年に運開した。ケーブル正味絶縁厚さは 20mm であった。ガス架橋方式で製造したケーブルであり、蒸気架橋製造のケーブルに比べて交流およびインパルス破壊電圧が 20 ～ 50% 向上したため、設計電界強度を 20% 上昇させ [70]、絶縁厚の低減を図った。

5.4 直流 250kV および 500kV ケーブルの開発と実用化

5.4.1 直流 250kV および 500kV ケーブルの開発

北海道・本州連系をはじめとして、大容量直流ケーブルの開発が必要とされ、1971 年から電力中央研究所、超高圧電力研究所、電線メーカー 4 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線) と共同で、関係電力会社の協力を得て、直流 500kV OF ケーブルおよび 250kV CV ケーブルの開発が進められた [71],[72]。

表 5.6 に直流 500kV 鉛被 OF ケーブルの構造を示す。絶縁紙は、直流用に開発した高密度・高気密度紙を使用し [73]、絶縁厚は 21mm である。CIGRE 推奨案 (CIGRE Electra No.32, SC21, (1974)) に基づく型式試験と更に過酷な条件による試験に耐え、直流ケーブルとしての適用性が確認された。その後の北海道・本州連系 250kV OF ケーブルの設計に活かされた。

表 5.6　直流 500kV OF ケーブル構造 [73]

導体	公称断面積	mm2	1000
	形状		中空円形撚線
	構成	数/mmØ	144/3.0
	外径	mm	47.7
絶縁体厚さ		mm	21.0
遮蔽層厚さ		mm	0.3
鉛被厚さ		mm	4.0
補強層厚さ		mm	0.5
ポリエチレン防食層厚さ		mm	5.0
ケーブル外径		mm	111.4

表 5.7 に直流 250kV CV ケーブルの構造を示す。水蒸気架橋製造品で絶縁厚 (内外半導電層込み) は 25mm であった。長期課通電試験においてケーブルも含めて多数回の絶縁破壊が発生し、XLPE の直流電圧に対する基礎的検討を行うと共に、直流 CV ケーブルに対する試験法についての検討が行われた [72]。供試したケーブルは水蒸気架橋製造装置で製造されたものであり、接続に使用したモールド用テープも照射架橋テープなどケーブルおよび接続箱の製造施工技術が未熟で絶縁破壊を発生した面もあった。種々検討した結果、直流印加時に絶縁体内の電界分布を変歪させる空間電荷発生の問題があることが明らかとなった。

表 5.7　直流 250kV CV ケーブル構造 [72]

導体	公称断面積	mm2	1000
	形状		円形撚線
	構成	数/mmØ	127/3.2
	外径	mm	41.6
絶縁体厚さ*		mm	25
遮蔽層厚		mm	0.5
ビニル防食層		mm	4.5
ケーブル外径		mm	101.6

*内導・外導厚さ含む

その後直流 CV ケーブルの空間電荷に関する研究が大学などの研究機関で進められ、直流課電下での絶縁体中の空間電荷分布の測定が可能となつた [74],[75]。この測定技術は武蔵工業大学高田が考案したパルス静電応力法 [74] であり、直流 CV ケーブル絶縁材料の開発に貢献した。交流用 XLPE のままでは空間電荷の問題が回避できず、空間電荷抑制効果を有する充填材入り CV ケーブルが開発された [76]。

5.4.2 北海道・本州連系線直流 250kV 海底 OF ケーブル

電源開発 (株) が、北海道電力 (株) 函館交直変換所と東北電力 (株) 上北交直変換所間を結ぶ直流連系線 124km のうち海峡横断部に直流 ± 250kV OF ケーブルの布設を計画し、開発を進め完成した [77],[78]。ケーブルの構造を図 5.24 および表 5.8 に示す。工場ジョイント (FJ) はケーブルとほぼ同径で仕上げられ、ケーブルと同等の電気的および機械的性能が要求された。開発された海底 OF ケーブル、陸上 OF ケーブル、渚接続箱、普通接続箱、修理接続箱、工場接続箱、気中終端接続箱について、CIGRE 推奨案に基づき機械試験を実施した。更に電力中央研究所武山研究所で 1974 年 12 月から約 5 ヶ月間にわたり CIGRE 推奨型式試験および長期課通電試験を実施し、引続き残存性能試験を実施し長期信頼性を確認した。

1978 年に青森県左井と北海道古川間に直流 250kV 600mm^2 OF ケーブル 43.2km 、最大水深 300m、1 条 (300MW) が布設され、1979 年に運開した。単極導体

帰路方式で、帰路ケーブルも布設された。本線 OF ケーブルの単長 1800m および帰路 CV ケーブルの 2000m は住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線の各社で製造され、一箇所に集められ FJ で接続された。海底ケーブルの製造および布設工事は共同企業体で行われた。ケーブルは、潮流の方向、ケーブルの陸揚げの作業性を考えて、北海道側から出発して本州側に向かって布設された。渚部から 4 ～ 4.5km 以内の浅瀬の箇所については埋設防護を実施した。埋設方式はウォータージェット式埋設機を使用した。

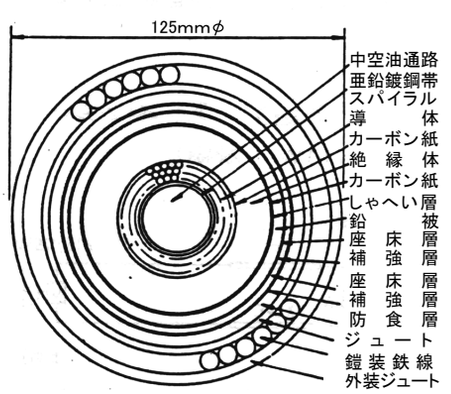


図 5.24 北本直流 250kV OF ケーブルの構造 [77]

表 5.8　北本直流 250kV OF ケーブルの構造

項目	本線ケーブル	帰路ケーブル
種類	OFケーブル	CVケーブル
導体断面積	600mm^2	500mm^2
油通路	25mm	
絶縁体厚さ	14.5mm	7mm
がい層	8mmø　鉄線	6mmø　鉄線
概略外径	125mm	75mm
概算重量	46kg/m	18kg/m
FJ	23個	21個

当時、1976 年に布設された British-Columbia Vancouver の直流 ± 300kV 400mm^2 海底 OF ケーブルの線路が最高電圧で、海底ケーブルルート長は 29km であり [77]、北海道本州連系線は世界に肩をならべる直流海底 OF ケーブルであった。

更に電力需要の急速な増大に対応するため、1993 年に光複合直流 250kV 1 × 600mm^2 OF ケーブル 43.2km 1 条が増設され、双極方式で 600MW の連系容量となった [79],[80]。海底ケーブルでは制御用通信ケーブルが必要であり、3 心海底ケーブルでは 3 心の撚合せスペースに光ファイバを複合する技術が開発されていたが、そのようなスペースのない単心ケーブルでは国内外実績がなく新たに開発された。ケーブルの構造を表 5.9 に示す。複合した光ユニットを図 5.25 に示す。絶縁設計については変更していない。住友電工、フジクラ、日立電線で PE シースまで製造されたケーブルを古河電工に運搬し、光ファイバ (各社約 10km 製造供給) の複合化を含めて鎧装巻を行い、ケーブル 43.2km 長を一連長とした [80]。

表 5.9　増設北本直流 250KV OF ケーブル [79]

項目	本線ケーブル
種類	OFケーブル
導体断面積	600mm^2
油通路	25mm
絶縁体厚さ	14.5mm
鉛被厚さ	4.0mm
補強層厚さ	0.1 × 2mm 0.5 × 2mm
防食層厚さ	4.5mm
光ファイバユニット	4mmø
がい層	8mmø　鉄線
概略外径	138mm
概算重量	49kg/m

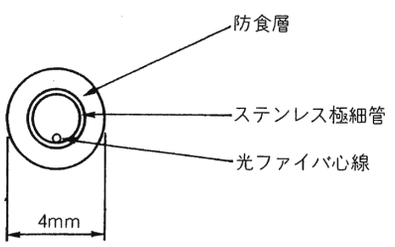


図 5.25　光ファイバユニット [79]

5.5　まとめ

日本の自主技術により 275kV OF および POF ケーブル線路の建設が進められた。大電流化のため、日本独自に OF ケーブルおよび POF ケーブルの冷却方式の検討がされ、洞道トラフ間接水冷方式など冷却システムを導入した線路が建設された。1973 年に関西電力奥多々良木変電所に短距離 500kV OF ケーブルが実用化された。しかし、クラフト紙 OF ケーブルの絶縁体損失の起因となる誘電率 ε、誘電体力率 $\tan\delta$ が大きく、500kV OF ケーブル長距離線路の建設にはこの低減が必須となっていた。このため、表 5.2 に示すように各社は競って独自の半合成紙の開発を進めた。

初期には CV ケーブルの絶縁押出方式は、BN ケーブルの製造の延長で竪型加硫機 (VCV) を用いた水蒸気架橋法で製造されていた。高温水蒸気下での架橋のため、水蒸気が絶縁体の架橋ポリエチレン中に浸透し、冷却工程で凝縮して水となり、時間経過とともに蒸発して、微小のボイドが多数形成し、耐電圧特性を著し

く低下させた。この間各社で VCV での生産性の改善と高い建物を必要としない横型の CV 製造方法の検討がされた。これらの製造技術改善とあわせて 1969 年頃から乾式架橋製造方式が各社独自に開発された。この製造方式の採用によりケーブル絶縁体中の欠陥となるボイドの数量と大きさが著しく削減し CV ケーブルの耐電圧特性が大幅に改善し、高電圧化が可能となった。また、水トリー現象をいち早く解明し、水分の絶縁体への影響を明らかにし、アルミ被の適用、簡易遮水層の適用を実施し高電圧化に貢献した。これらの技術は世界に先んじた技術であり、CV ケーブルの性能を向上させ、高電圧 CV ケーブルの実用化に貢献した。1976 年に日本で初めて 154kV CV ケーブルが関西電力長曽根線に布設された。

1979 年に北海道・本州連系線 43km の直流 250kV 海底 OF ケーブルが完成した。日本初の長距離直流海底 OF ケーブルの製造および布設工事を電線メーカー 4 社の共同企業体で実施した。日本の技術を結集したものであり、送電電圧と線路長について世界と肩をならべる海底 OF ケーブルであった。直流 CV についても開発が行われ、XLPE 中に発生する空間電荷形成の問題とその試験法を世界に提言した。

OF ケーブル、POF ケーブル、CV ケーブルともに日本の独自の自主技術により実用化された。この時代に世界に肩に並べるべく、半合成紙、素線絶縁導体など新たな製品の研究開発が始められた。

引用参考文献

(1) 「地中送電設備の劣化診断技術とアセットマネジメント」電気協同研究会　第 67 巻　第 1 号　(2011)
(2) 松尾ほか :「東京電力 (株) 275kV OF ケーブルの布設」藤倉電線技報　第 42 号　p1　(1970)
(3) 今井 :「電力ケーブル冷却総論」古河電工時報　第 71 号　p107　(1981)
(4) 長浜ほか :「管路直接水冷 154kV OF ケーブルシステムの完成」住友電気　第 116 号　p15　(1980)
(5) 山田ほか :「洞道内トラフ間接水冷の建設例」古河電工時報　第 71 号　p163　(1981)
(6) 渡辺ほか :「500kV OF ケーブルの長期課通電試験結果」昭和電線電纜レビュー　Vol.24　No.1　p50 (1974)
(7) 小島 :「OF ケーブルの技術進歩と将来展望」住友電気　第 117 号　p175　(1980)
(8) 野田ほか:「500kV 級 OF ケーブルの開発と実用化」住友電気　第 117 号　p198　(1980)
(9) 斎藤ほか :「超高圧地中送電技術の現状と将来の展望」日立電線　No.1　p1　(1981)
(10) 津田 :「Ⅲ . 超高圧低損失 OF ケーブル」電学誌 103 巻　12 号　p1182　(1983)
(11) 松尾ほか :「マイカ混抄絶縁 OF ケーブルの布設 」藤倉電線技報　第 39 号　p1　(1969)
(12) 山本ほか :「超々高圧電力ケーブル用合成紙」藤倉電線技報　第 45 号　p1　(1972)
(13) 児島ほか :「超高圧電力ケーブル用合成絶縁紙の開発」昭和電線電纜レビュー　Vol23,　No.1 p38 (1973)
(14) 加賀谷ほか :「新しい絶縁紙」藤倉電線技報　第 25 号　p67　(1963)
(15)「絶縁材料技術開発の歴史的展開」電気学会技術報告 第Ⅱ－ 464 号　絶縁材料技術開発の歴史的展開調査専門委員会　1993 年 8 月　(1993)
(16) D.R.Edward et al.:"An Assesment of the Potential of EHV Polypropylene/Paper Laminate Insulated Self-Contained Oil-Filled Cables" IEEE 1974 UG Trans. & Distr. Conf., No 74 CH0832-6-Pwr,　(1974)
(17) 久保ほか :「275kV ポリプロピレンラミネート紙絶縁 OF ケーブルの開発」住友電気　第 115 号　p22　(1979)
(18) 草野ほか :「SIOLAP 絶縁 OF ケーブルの開発 (第 1 報)」昭和電線電纜レビュー　No.29, N0.1 p27 (1979)
(19) 大野他:「275 ｋＶ半合成紙(SIOLAP)絶縁 OF ケーブルの実践路への適用と残存性能試験結果」電気学会全国大会 1421　(1987)
(20) 松尾ほか :「東京電力 (株) 新宿線 275kV 高油圧パイプケーブル (第 1 報 設計)」藤倉電線技報第 46 号　p29　(1972)
(21) 依田ほか :「東京電力 (株) 新宿線 275kV 高油圧パイプケーブル (第 2 報 施工)」藤倉電線技報第 47 号　p23　(1972)
(22) 木村ほか :「九州電力株式会社新小倉線 220kV 高油圧パイプケーブル」藤倉電線技報　第 58 号　p1 (1978)
(23) 渡辺ほか :「500kV POF ケーブルパイプ充填油循環冷却実証試験結果」藤倉電線技報　第 52 号 p1 (1975)
(24) 長崎ほか :「米国 P.P.L 納入 138kV PEX ケーブルおよび付属品について」住友電気　第 106 号　p1 (1972)
(25) 中村ほか :「ゴム・プラスチック電線の架橋装置」特願昭 42-51189　特公昭 46 － 23141

(26) 志賀ほか:「架橋ポリエチレン加硫方法の最近の進歩」住友電気　特集号　p93　(1975)
(27) Y.Kawasaki et al.:"Radiant Curing Process(RCP) for Manufacturing HV and EHV XLPE Cables", 46th Annual Convention of The Wire Association International, Chicago, Illinois,　(Oct. 1976)
(28) トピックス:「画期的な架橋ポリエチレン絶縁ケーブルの製造技術の完成」大日日本電線時報　第49号　p63 (1971)
(29) 不破ほか「同時成形加硫方法」 特願昭 46-46660
(30) 山内ほか:「MDCV プロセスの概要」大日日本電線時報　第59号　p1　(1975)
(31) トピックス:「中国電力(株)白神変電所へ 110kV 1 × 200mm^2 CV ケーブル納入」大日日本電線時報　第55号　p50　(1973)
(32) 水上ほか:「ガス架橋法による架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能」電学誌, Vol.94-A No.7, p9 (1974)
(33) 池田ほか:「ゴム・プラスチックケーブルの製造法」特願昭 47-63826
(34) T.Mizukami et al.:"Inert Gas Curing Systems" 46th Annual Convention of The Wire Association International, Chicago, Illinois,　(Oct. 1976)
(35) 鹿間ほか:「架橋ポリエチレン用新 CV 機 (FZCV) の開発」藤倉電線技報　第54号　p1　(1976)
(36) 大島ほか:「架橋ポリオレフィン絶縁ケーブルの製造装置」　特願昭 49-12364　特公昭 52 − 33314
(37) Michio Takaoka et al.:"Apparatus for Manufacturing Polyolefin-Insulated Cables" United State Patent, 3,909,177　(1975)
(38) 福田ほか:「CV 電力ケーブルの技術進歩」古河電工時報　第76号　p1　(1985)
(39) 松尾ほか:「電力ケーブルの技術開発」 昭和電線電纜レビュー　V0l.31, No.2, p87　(1981)
(40) 大島ほか:「超高圧ケーブル FZCV 機による XLPE ケーブルの特性」藤倉電線技報　第59号 p1 (1978)
(41)「特別高圧架橋ポリエチレンケーブル及び接続部の高電圧試験法」第34巻 第1号 電気協同研究会 (1978)
(42)「絶縁設計の合理化」電気協同研究会　第44巻 第3号　(1988)
(43) 宮下ほか:「超高圧 CV ケーブルの技術進歩」三菱電線工業時報　第90号　p3　(1996)
(44) 藤倉電線社史:　藤倉電線(株)昭和48年　(1973)
(45) フジクラ　100年の歩み:(株)フジクラ　(1987)
(46) 速水ほか:「66kV ～ 77kV PEX ケーブルの接続部の開発」住友電気　第103号　p29　(1971)
(47) 岩田:技術トピックス「66kV CV ケーブル用直線接続箱 (FM ジョイント)」藤倉電線技報　第52号 p58　(1975)
(48) 江野窪ほか:「CV ケーブル用部品の技術進歩」古河電工時報　第81号　p1　(1987)
(49) 宮下ほか:「浸水ポリエチレン電線 Tree 劣化機構とその加速試験」電学誌　Vol.87-10, No,949, p2009　(1967-10)
(50) V.Vahlstorm Jr:"Investigation of Insulation Deterioration in 15kV and 22kV Polyethylene Cables Removed from Service" Paper 71 C42-PWR,PES Underground Distribution Conf.,p1023 (1971-9)
(51) 福田ほか:「プラスチックケーブルの水中劣化現象と対策 − Water Tree と Sulfide Tree-」第33回絶縁劣化研究懇談会資料　(1970-11)
(52) 福田ほか:電力中央研究所　技術第一研究所報告　研究報告　71061　(1972)
(53)「有機絶縁材料における水トリーについて (2)」:絶縁材料耐電界性常置専門委員会 電気学会技術報告(Ⅱ部)　第95号　1980年6月
(54)「有機絶縁材料における水トリーについて (3)」:絶縁材料直流・インパルストリーイング調査専門委員会　電気学会技術報告(Ⅰ部)　第134号　1982年5月
(55)「高分子絶縁材料におけるトリーイング劣化の基礎過程」:トリーイング劣化基礎過程調査専門委員会　電気学会技術報告　第674号　1998年4月
(56) 津久井ほか:「水トリーの発見の背景とその後に与えた影響について」電気学会　誘電・絶縁材料 / 電気技術史合同研究会資料 DEI-91-38/HEE-91-4 (1991)
(57) 吉川ほか:「高電圧 CV ケーブルの浸水課電劣化」住友電気　第119号　p51 (1981)
(58) 馬渡ほか:「CV ケーブルの高性能化と大容量化の動向」フジクラ技報　第70号　p1　(1985)
(59) 関井:セミナーテキスト「絶縁材料の劣化機構解明とその抑止および信頼性向上対策」千葉工業大学　(2006)
(60) 遠藤:「前駆遮断検出による CV ケーブル破壊原因の解明」電学論 B 108巻　10号 p451　(1988)
(61) 武藤ほか:「水トリーからの電気トリー発生進展現象の検討」古河電工時報　第90号 p21 (1992)

(62) 成瀬ほか:「CV ケーブルの残留電荷測定法による絶縁診断技術の検討」フジクラ技報　96 号　p27 (1999)
(63) 福田ほか:「CV ケーブルの水トリー問題と遮水テープの開発」古河電工時報　第 72 号　p9　(1981)
(64) 中挾ほか:「東京電力(株)・東扇島線 154KV CV ケーブルの布設工事」昭和電線電纜レビュー　Vol.34 No.1　p53　(1984)
(65)「電力ケーブル・被覆線・電力用機器」古河電工時報　第 78 号　p6　(1986)
(66) 梅田ほか:「電力・配電・送電・産業用電線ケーブル及び付属品」古河電工時報　第 120 号　p1 (2007)
(67) 中挾ほか:「鉛ラミネート遮水層付き CV ケーブルの開発」大日日本電線時報　第 70 号　p38 (1985)
(68) 小杉ほか:「東京電力初納入 154kV CV ケーブルの技術成果について」古河電工時報　第 64 号 p1 (1978)
(69) 関西電力二十五年史　関西電力株式会社　(1978)
(70) Kohji Kojima,et al.:「187kV Cross-Linked Polyethylene Insulated Aluminum Sheathed Power Cables」Hitachi Review Vol.28 p183 (1979)
(71) Y.Sakamoto,et al.:「Development of 500kV　d.c. Self-Contained Oil-Filled Cable」IEEE Trans.,Vol. PAS-100, No.4,　p1949　(April 1981)
(72) Y.Sakamoto,et al.:「Insulation Properties of 250kV DC XLPE Cables」IEEE Trans.,Vol.PAS-100, No.7, p3175　(July 1981)
(73) 高岡ほか:「500kV 直流 OF ケーブルの開発」藤倉電線技報　第 51 号　p1　(1974)
(74) T.Futani et.al.:"Measurement of Space Charge Distribution in Thick Dielectic Using the Pulsed Electroacoustic Method" IEEE　Trans., Electrical Insulation, Vol.23, No.3, p433　(June1988)
(75) 宮田ほか:「PEA 法によるケーブル中の空間電荷分布測定」フジクラ技報　第 81 号　p55　(1991)
(76) S.Ogata et al.:"Study on the Dielectic Characteristics of DC Cables" IEEE Trans. on Power Delivery p1239 (July 1990)
(77) 峰村ほか:「特殊海底ケーブルの技術動向」電気学会　電線・ケーブル研究会　EC-85-4　p39 (1985)
(78) S.Minemura,et al:" ± 250 kV Direct Current Submarine Cable for Hokkaido Honshu Link" CIGRE 21-03 (1980 Session)
(79) 磯ほか:「電源開発株式会社　北本連系線増設光複合単心海底 OF ケーブルの実用化」フジクラ技報　第 85 号 p20　(1993)
(80) 磯ほか:「北海道・本州連系線増設光複合海底ケーブルの完成」古河電工時報　第 94 号　p59　(1994)

6 日本独自技術で世界トップレベルへ 1980年(昭和55年)頃～1990年(平成2年)頃

日本独自の275kV半合成紙OFケーブルが実用化され、更に500kV PPLP絶縁OFケーブルの開発が進められた。導体の低損失化のため、世界で初めて素線に酸化第二銅皮膜を施した素線絶縁分割導体が開発され、275kV POFケーブル線路に実用化された。

CVケーブルについては、材料から絶縁体押出製造までのクリーン化技術の適用、接続箱の施工技術の改善により超高圧化が進められた。発電所の引出し線として500kV CVケーブルが世界で初めて実用化され、接続箱が入った長距離275kV CVケーブル線路が実用化された。

6.1 半合成紙絶縁OFケーブルの開発と実用化

6.1.1 275kV半合成紙絶縁アルミ被OFケーブルの実用化

5.1.4項表5.2で示した開発された半合成紙が275kV OFケーブル線路に実用化された。1980年に東京電力は、城北線275kV 2000mm^2 アルミ被OFケーブル線路亘長約21kmのうち管路布設区間に、日本で初めての半合成紙OFケーブルを実用化した。住友電工がPPLP[1]を1回線の1区間(0.9km)、昭和電線がSIOLAP[2]を2回線の各々1区間(0.9km × 2)のケーブルに各々使用した。PPLPおよびSIOLAPの線路のケーブル構造を表6.1および表6.2に示す。$\varepsilon \times \tan\delta$ (%)は2.8 × 0.1%以下で従来クラフト紙の約40%の値に低減され、絶縁厚はクラフト紙の19.5mm厚から16.5mmと低減された。

表6.1 城北線275kV PPLP絶縁OFケーブル構造[1]

項目		単位	ケーブル導体サイズ(mm^2)		
			1,600	2,000	
			在来紙	PPLP紙	在来紙(参考)
油通路内径		mm	19.6		
導体	形状		6分割中空圧縮円形		
	外径	mm	53.3	58.8	
絶縁体厚		mm	19.5	16.5	19.5
アルミ被厚		mm	2.5	2.5	2.6
防食層(ビニル)厚		mm	4.5	6.0	
概算外径(約)		mm	122	119	126
概算油量(約)		ℓ/km	3,840	3,100	4,170
概算重量(約)		kg/km	27,800	31,200	32,800

表6.2 城北線275kV SIOLAP絶縁OFケーブル構造[2]

項目	単位	SIOLAP絶縁	クラフト紙絶縁
油通路内径	mm	19.6	
導体サイズ	mm^2	2,000(圧縮6分割)	
絶縁体厚さ	mm	16.5	19.5
アルミ被厚さ	mm	2.5	2.6
ケーブル外径	mm	121	128
概算重量	kg/m	31.5	32.6

関西電力では1982年に南大阪泉北線亘長8.5kmの全区間に275kV半合成紙絶縁OFケーブルを採用した。住友電工が275kV 1500mm^2 PPLP絶縁アルミ被OFケーブル[3]を、および日立電線が275kV 1500mm^2 FEP絶縁アルミ被OFケーブル[4]を納入した。絶縁厚さは16.5mmである。FEP絶縁OFケーブルの$\tan\delta$特性を図6.1に示す。FEPラミネート紙はテフロンを使用しているため合成絶縁油に対する膨潤がなく剥離強度が大きいという利点があるがコスト面で課題があった。古河電工は1987年に関西電力下穂積線275kV 1500mm^2 OPPL絶縁アルミ被OFケーブルを納入した。絶縁厚さは16.5mmで、OPPLはポリプロピレンの延伸フィルムを用いたものでクラフト紙とポリプロピレン層の間の剥離強度を改善している[5]。

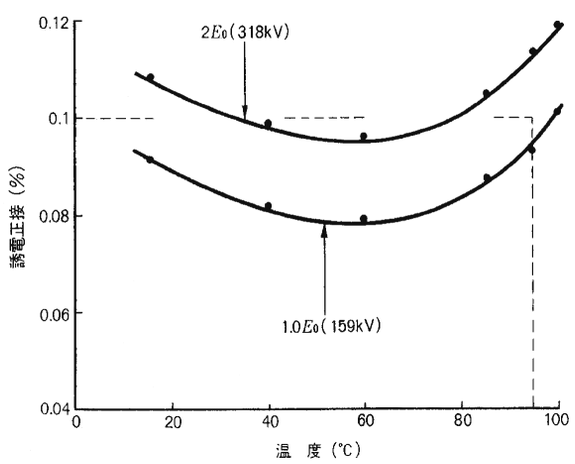


図6.1 275kV FEP絶縁OFケーブル 誘電正接温度特性[3]

6.1.2 500kV半合成紙絶縁OFケーブルの開発

(1) 開発試験 I

都心導入用の長距離500kV OFケーブル線路を対象に500kV 2000mm^2 半合成紙絶縁アルミ被OFケーブルの開発が行われた。この開発は1980年から電力中央研究所の協力のもと、東京電力と電線メーカー5

社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線、昭和電線) とで行われた [6]。500kV 長距離ケーブルとして図 6.2 に示す結果から送電容量面から見ると $\varepsilon \times \tan\delta \leqq 2.5 \times 0.05$ が望ましかったが、経済性と開発可能性から $\varepsilon \times \tan\delta \leqq 2.7 \times 0.07$ を目標として開発が進められた [6]。目標の ε と $\tan\delta$ を達成するため、半合成紙のプラスチック分率は 275kV のラミネート紙の約 40% から約 60% にアップした [7]。ケーブル構造を表 6.3 に示す。ケーブルの写真を図 6.3 に示す。導体側から 120 μ m、170 μ m、220 μ m の PPLP を巻き、その外側に 200 μ m の PML 巻いた構造である。鉛工対策として、外側絶縁遮蔽層から下 4mm 厚に耐熱性の良い PML を使用した。PPLP および PML の耐電圧特性の向上からケーブル絶縁厚はクラフト紙絶縁の 33mm 厚から 25mm 厚へ低減した。

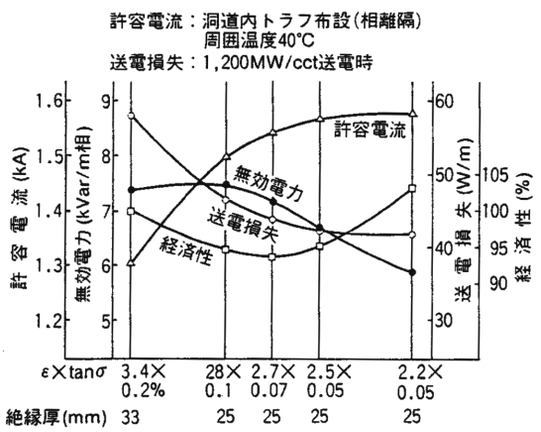


図 6.2　500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブルの評価 [7]

表 6.3　半合成紙絶縁 500kV 1 × 2,500mm ^{2}OF ケーブルの構造 [7]

項目		単位	数値
油通路	内径	mm	25.0
	厚さ	mm	1.5
導体	形状	—	中空 7 分割圧縮円形
	外径	mm	68.0
絶縁体厚さ		mm	25.0
絶縁体構成	カーボン紙	—	2 枚
	金属化紙	—	1 枚
	PPLP 120	mm	約 5.5
	PPLP 170	mm	約 8.0
	PPLP 220	mm	約 7.0
	PML 200	mm	約 4.0
	金属化紙	—	1 枚
しゃへい層厚さ		mm	約 0.25
銅線織込布テープ層厚さ		mm	約 0.5
アルミ被		mm	3.0
防食層		mm	6.0
仕上り概算外径		mm	153.0
概算重量		kg/km	46,000

図 6.3　500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブル [8]

半合成紙では中間部にプラスチック層を設けているため、乾燥含浸工程における絶縁油含浸によりプラスチック層が膨潤するため厚くなる現象がある。この結果ケーブルコアが硬くなりケーブル曲げの機械特性および電気特性に課題があった。500kV ケーブルではこの対策として、PPLP の製造については調湿量を増やした水滴調湿法を採用している [7]。これは粒径分布の広い水滴を PPLP のクラフト表面に散布して表面に凹凸を生じさせたものであり、PPLP のプラスチック層の膨潤量をクラフト紙の乾燥時の厚さの減少で吸収するものである。水滴調湿法の原理 [7] を図 6.4 に示す。更に紙巻張力による管理も重要であった。

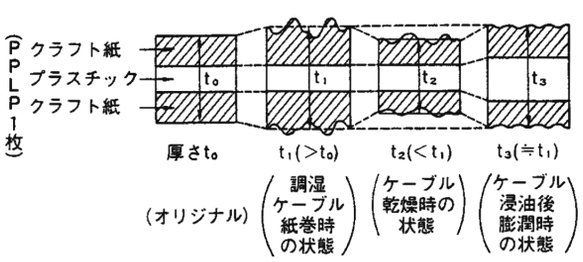


図 6.4 水滴調湿 PPLP の膨潤吸収原理 [7]

電力中央研究所・横須賀研究所にて実証試験線路 (180m ループと 120m ループの 2 線路) を建設し、1982 年 9 月より 1984 年 2 月まで表 6.4 に示す試験条件で長期安定性を確認した [6],[7],[8]。ケーブル試験状況を図 6.5 に示す。長期試験における $\tan\delta$ (%) は図 6.6 に示すように 0.07 以下となっており十分目標性能を満足した。試験終了後各社にて残存性能試験を実施し必要性能を満足していることを確認している。

表 6.4　長期課通電試験条件

項　目		長期課通電試験 Ⅰ		長期課通電試験 Ⅱ	
期間		1982/9～1984/2		1984/12～1986/5	
線路長		180m+130m		320m	
試験条件	電圧/時間	電圧 kV	時間	電圧 kV	時間
		320	3598	330	3815
		330	2641	360	3327
		370	3485	400	3571
		400	960		
等価年数 (V-t特性;n=16)		42.1年		42.4年	
試験条件	温度/時間	温度 ℃	時間	温度 ℃	時間
		85	3420	85	1224
		ヒートサイクル 40回		95	3821
		95	2480	ヒートサイクル 10回	
		105	1920	105	4210
				ヒートサイクル 15回	
等価年数 (60℃ベース)		41.1年		40.2年	

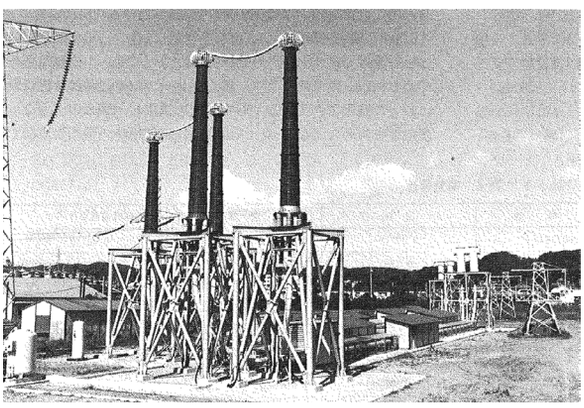


図 6.5　試験場風景 [8]

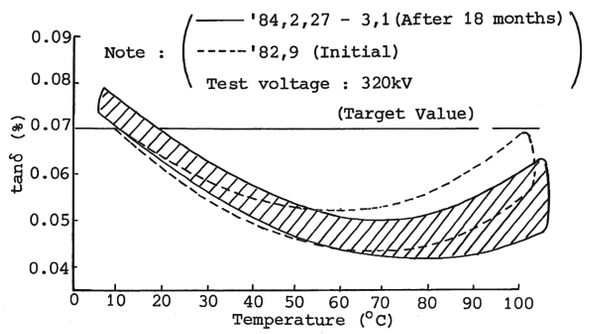


図 6.6　500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブル tan δ 特性 [6]

(2) 開発試験　Ⅱ（本四橋梁向け）

引き続き電力中央研究所の協力もとで、電源開発と前記電線メーカー 5 社との共同で本四橋梁添架用 500kV 2500mm^2 半合成紙絶縁アルミ被 OF ケーブルの開発を行った[9),(10),(11)]。ケーブルの構造を表6.5に示す。PPLP の外側に 200 μ m の PML を巻いたケーブル (A ケーブル) とクラフト紙を巻いたケーブル (B ケーブル) を試作し、初期電気性能試験および鉛工試験を実施した。両ケーブルとも初期試験を満足した。鉛工、再鉛工試験においても PPLP および PML に異常は認められず、鉛工管理を行えば普通鉛工に対して実用上問題ことがないことを確認した[9)]。

表 6.5　500kV　半合成紙絶縁 OF ケーブル

	ケーブル種類		A	B
ケーブル構造	油通路	内径	25.0mm	25.0mm
		厚さ	1.5mm	1.5mm
	導体	形状	7分割圧縮	
		外径	68.0mm	68.0mm
	導体遮蔽	半導体紙厚さ	2枚	2枚
		金属化紙厚さ	1枚	1枚
	絶縁体	PPLP	約5.5mm	約5.5mm
		PPLP	約8.0mm	約8.0mm
		PPLP	約7.0mm	約7.0mm
		PML	約4.0mm	–
		クラフト紙	–	約4.0mm
	外部遮蔽	金属化紙厚さ	1枚	1枚
		遮蔽層厚さ	約0.25mm	約0.25mm
	銅線織込み布テープ厚さ		約0.5mm	約0.5mm
	アルミ被厚さ		3.0mm	3.0mm
	防食層		6.0mm	6.0mm
	概略ケーブル外径		153mm	153mm
	概算重量		46kg/m	46kg/m

電力中央研究所・横須賀研究所に実証試験線路 320m を建設し、1984 年 11 月より 1986 年 5 月まで表 6.4 に示す条件で長期実証試験を実施した。試験線路では、橋梁添架構造部を模擬してジョイント振動部、長大オフセット部およびジョイント隣接スネーク部が設けられ、長期安定性を確認した。A ケーブル、B ケーブルともに tan δ 温度特性の経時変化も十分目標値を満足し長期安定性を検証した[9),(11)]。試験後に残存性能試験を実施し問題のないことを確認した。この結果を踏まえ、本四連系線向けに世界で初めての 500kV PPLP 絶縁アルミ被 OF ケーブル (B ケーブル構造) が採用された[9),(12),(13)]。

6.2　275KV POF ケーブルの大容量化

1982 年に中部電力が世界で初めての素線絶縁導体を使用した知多火力連系線 275kV POF ケーブル 3.4km 2 回線を建設した[14)]。1 回線あたり 700MV の送電容量は地中送電線路として当時日本で最大の大容量線路であった。納入および施工は藤倉電線が行なった。ケーブル構造を表6.6に示す。低損失化対策として、2500mm^2　素線絶縁 5 分割圧縮導体が使用され、絶縁紙は脱イオン水洗紙が使用された。含浸油および充填油とも合成油が使用された。油循環強制冷却システムが採用され、電流容量のアップが図られた。

表 6.6　知多火力連系線 275kV POF ケーブル構造 [14]

項目		単位	数量
公称電圧		kV	275
導体	公称断面積	mm^2	2,500
	形状	−	5分割圧縮（素線絶縁）
	外径（約）	mm	61.9
導体バインダ（約）		〃	0.6
絶縁厚(カーボン紙含む)		〃	19.5
防湿層（約）		〃	0.2
補強層（約）		〃	0.5
スキッドワイヤ		〃	2.5×5.0 D型
概算外径		〃	109
概算重量		kg/m	31

従来導体を使用した場合、図 6.7 に示すように POF ケーブル線路での送電損失のうち全体の損失の約 50% は導体による損失である。素線絶縁導体の適用により、図 6.8 示すように交流抵抗は約 20% 低減し。送電容量は約 7% 増加した。

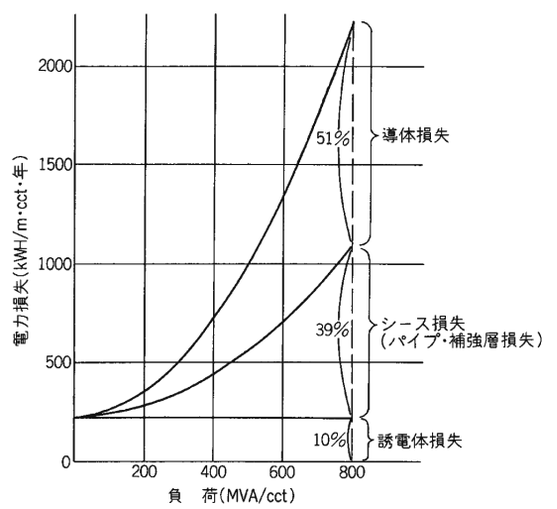


図 6.7　送電損失の内訳 (275kV 3 × 2,500mm^2POF ケーブル , 従来導体 ,LF=1.0 の場合)[14]

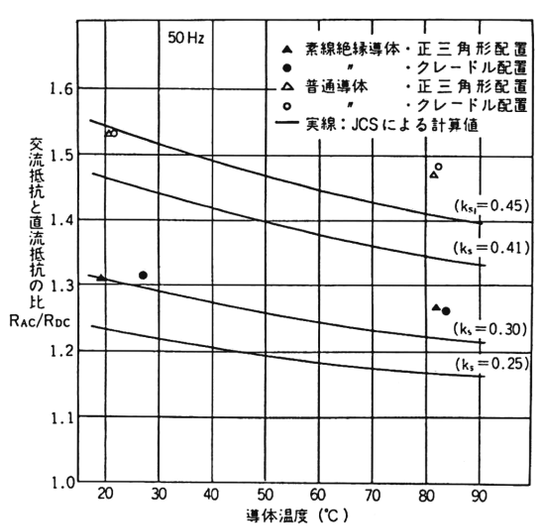


図 6.8　素線絶縁導体交流抵抗の AC/DC[15]（鋼管がない場合の三相での交流抵抗測定結果）

素線絶縁分割導体とは、裸銅素線の接触抵抗だけでは、表皮効果の低減に対して十分な効果が得られないため、素線間を強制的に絶縁しようという方式である。4 章の図 4.8 に示す分割導体におけるひとつのセグメントは、撚り線で構成されており、セグメント内の素線は分割導体の中心側と外側とに撚られながら転位する。このため各素線のもつインダクタンスはほぼ均一となり、セグメント内の電流分部は均一化され表皮効果は小さくなる。素線絶縁導体における被覆材料は、従来エナメル被覆が検討されていたが、皮膜が 30 ～ 60 μ m と厚く、ジョイント時の皮膜除去が難しく実用化されていなかった。酸化第二銅皮膜による皮膜は藤倉電線が開発したもので [15]、図 6.9 に示すように酸化皮膜は約 1 μ m と薄い。酸化第二銅の体積抵抗率は 10^5 Ω・cm であるが銅の体積抵抗率 1.7 × 10^{-6} Ω・cm にくらべ極めて大きいので絶縁として十分な機能を有している。

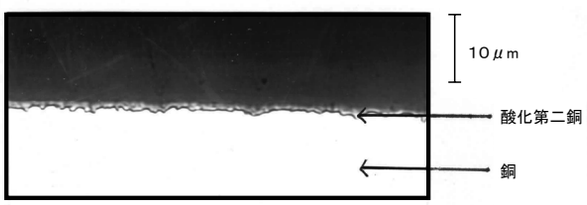


図 6.9　酸化第二銅皮膜 [15]

素線絶縁導体ケーブルの接続箱組立てには、3 章の図 3.7 に示すようなスリーブ圧縮部分において予め絶縁皮膜を除去する必要がある。皮膜除去方法については図 6.10 に示すようなサンドブラスト法を藤倉電線が開発し実用化した [15]。密閉式キャビネットを導体先端に被せ、その中で導体先端の素線間に若干の隙間を設けてブラスト処理を行う方式で、乾式で絶縁体へ悪影響を与えず、作業時間も短く、ほぼ 100% 皮膜除去が可能である。サンド(研削粒子)としては電気絶縁性、化学的安定性、研削性からアルミナ (Al_2O_3) を採用した。アルミナは 100 μ m程度と小さく圧搾空気で吹き付けるので、僅かな隙間で導体内部に達し内部の素線の皮膜を速やかに除去できる。その後エアジェットにより導体に残ったサンドを除去している。サンドの流れは完全密閉回路をなし、外部への飛散はない。

この素線絶縁導体とその皮膜除去の方法は、66kV から 275kV までの素線絶縁導体が必要な大導体 CV ケーブルにも適用された [16],[17]。サンドブラストによる素線絶縁導体の皮膜除去方式はエナメル被覆の素線絶縁導体にも使用され、世界初の素線絶縁導体 275kV ケーブルの実用化に貢献した。

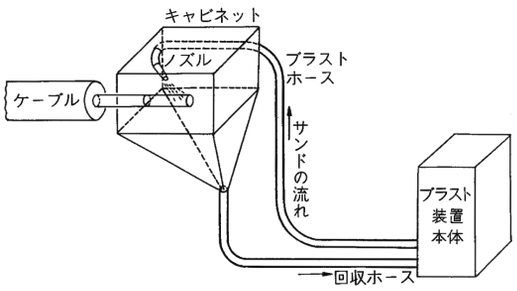


図 6.10　サンドブラスト法による被膜除去 [15]

POF ケーブルの熱伸縮は線路の曲り部および接続箱近傍に生じ易く、この原因により海外では絶縁破壊が発生じていた [18]。日本でも 1982 年に波乗りによるコア移動で絶縁破壊事故が発生していた [19]。この対策として図 6.11 に示すようなオフセット管を適当な間隔 (100 ～ 150m) に設置し、熱伸縮を分散吸収する方式を採用した。1 回線あたり 25 個のオフセット管を設置した [14]。日本独自の技術であり、POF ケーブル線路の高信頼度化に貢献した。

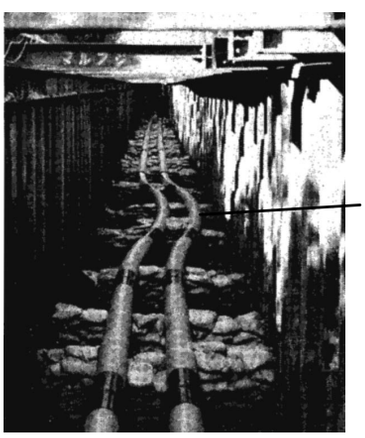


図 6.11　オフセット管布設状況 [14]

6.3　CV ケーブルの超高圧化

6.3.1　長距離 154kVCV ケーブル線路

154kV 以上 CV ケーブルの接続箱種類の変遷を表 6.7 に示す。154kV 長距離 CV ケーブル用の接続箱として、テープ巻モールド式接続箱が 1981 年から 1995 年頃にかけて主に使用され、1990 年代に入ってプレハブ式接続箱が使用された。この間一部の線路で、東京電力は 275kV 長距離線路用接続箱の前段階として押出モールド式接続箱を使用した。

(1) テープ巻きモールド式接続箱 (TMJ)

154kV CV ケーブル用 TMJ の長期信頼性が確認され、1981 年に 154kV 600mm^2 CV ケーブル (絶縁厚 23mm) が東京電力豊島変電所から池袋変電所に至る 2.1km 3 回線に実用化された。古河電工、藤倉電線、大日日本電線の 3 社が納入した [21],[22],[23]。ケーブ構造を表 6.8 に示す。絶縁厚は 23mm である。遮水層は設けられていない。

TMJ のモールド時の加圧方法として、当初外側に抗張力の強いテープを巻き補強絶縁体の熱膨張力を利用する方法が取られたが、XLPE の融点付近での比容積が非線形に大きく変化し、モールド時に加熱部分でボイドおよび内部歪が発生し易かった。このため、加熱および冷却期間を通じてモールド時の加圧圧力をコントロールする必要があり、ガス加圧方式が採用された [24]。架橋工程の原理図を図 6.12 に示し、TMJ の構造を図 6.13 に示す。

実線路適用にあたっては、テープ巻き時の浮遊塵埃の混入防止のため、マンホール内に簡易なビニールハウスを設け、その内部に防護ケースを設けて、その中にテープ巻き機を設置し作業された。モールド時のガス圧、昇温、加熱および冷却の温度と時間をすべて自動制御しかつ連続記録して設定のミスおよび作業のばらつきを極力なくし、現場の省力化を図り、品質管理

表 6.7　154kV 以上 CV ケーブル用中間接続箱絶縁方式の変遷 [20]

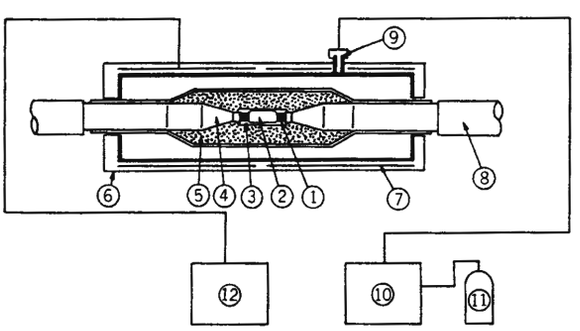
年度	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
154kV	テープ巻モールド式																																										
	押出モールド式																																										
	プレハブ式																																										
	ゴムブロック式																																										
220kV	プレハブ式																																										
275kV	押出モールド式																																										
	プレハブ式																																										
500kV	押出モールド式																																										

132kV・187kVの仕様については，個別設計

の徹底を行った[21],[24]。この接続方法では、3相あたり12日～14日要するという課題があり[21]、この改善が必要であった。その後TMJは使用されなくなった。

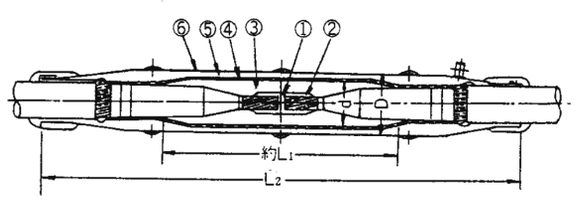
表6.8　154kV CVケーブル構造[22]

電圧（kV）		154
線心数		1
導体	公称断面積（mm²）	600
	形状	円形圧縮
	外径（mm）	29.5
内部導電層厚（約mm）		1.0
絶縁体厚（mm）		23.0
外部導電層厚（約mm）		1.5
しゃへい層	銅線径（約mm）	1.2
	銅線本数（本）	80
	銅条厚，幅（約mm×約mm）	0.4×10
押えテープ厚（約mm）		1.0
シース厚（mm）		5.0
ケーブル外径（約mm）		94.3
概算重量（kg/km）		13,100



①導体　⑦ヒーター
②導体接続管　⑧PVCシース
③内部半導電層　⑨圧縮空気入口
④ケーブル絶縁体　⑩自動圧縮空気供給装置
⑤モールド絶縁体　⑪エアーボンベ
⑥加圧容器　⑫プログラム温度コントローラ

図6.12　TMJの架橋工程[24]



①導体接続管
②内部半導電層
③モールド絶縁体
④外部しゃへい層
⑤防水コンパウンド
⑥保護銅管

導体サイズ	寸法(mm)			
	φd	φD	L_1	L_2
600mm²	101	140	730	1350

図6.13　TMJの構造[22]

(2) 押出モールド式接続箱 (EMJ)

TMJは現地でテープを巻く工程がありマンホール内の塵埃など異物を巻き込む可能性があり、異物の混入の懸念を払拭できなかった。この問題の解決のため、1980年頃から工場でのケーブル製造と同じく、小型の押出機を現地のマンホール内に据付け、クローズドシステムにして金型内に架橋剤入りポリエチレン材料を押出し、その後架橋成形するEMJの開発が進められた[25],[26],[27]。押出工程の原理図を図6.14に示す。架橋工程は図6.12に示すTMJの場合と基本的に同じである。275kV CVケーブル用EMJについて東京電力、住友電工および日立電線の間で共同研究が行われた。十分な耐電圧性能を有していることが確認され[28]、275kV線路適用の前段階として154kV長距離CVケーブル線路にEMJが適用された。

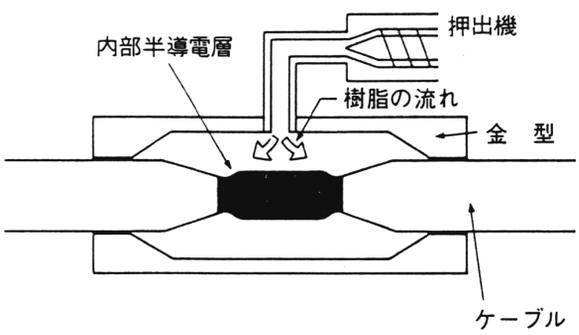


図6.14　EMJの押出工程[25]

住友電工は、東京電力三郷浄水線亘長5.8km 2回線でTMJのほかに日本で初めてEMJ 6相を1985年に実用化した[29]。EMJの構造を図6.15に示す。1985年に日立電線も同じく東京電力下総線154kV CVケーブルに実用化した[30]。住友電工は、1986年に関西電力向け鳴門淡路線187kV 2000mm² CVケーブル亘長5.3km 360MW 1回線(大鳴戸橋添架1.8km含む)にEMJ 39相を納入した[31]。その後154kV用に使用されていない。

(3) プレハブ式接続箱 (PJ)

154kV CVケーブルの長期実証試験の結果を踏まえ、1981年にクウェート向け132kV CVケーブル用に短時間施工と高度な熟練した技術を使用しないPJが使用された[32]。しかし日本ではまだ154kV用としては絶縁信頼性の点で懸念があり実用化されていなかった。TMJおよびEMJは、施工時間が長くかつ高度な熟練した施工が必要であつた。これらの問題を解決する方法として154kV CVケーブル用PJの検討が絶縁信頼性の向上を主眼において進められた。

図6.16のPJの構造において、主要部品の②エポキシユニットと④プレモールド絶縁体は品質管理された工場で製造し、検査および出荷され、施工現場で組立てられるので品質的に安定している。組立工法は

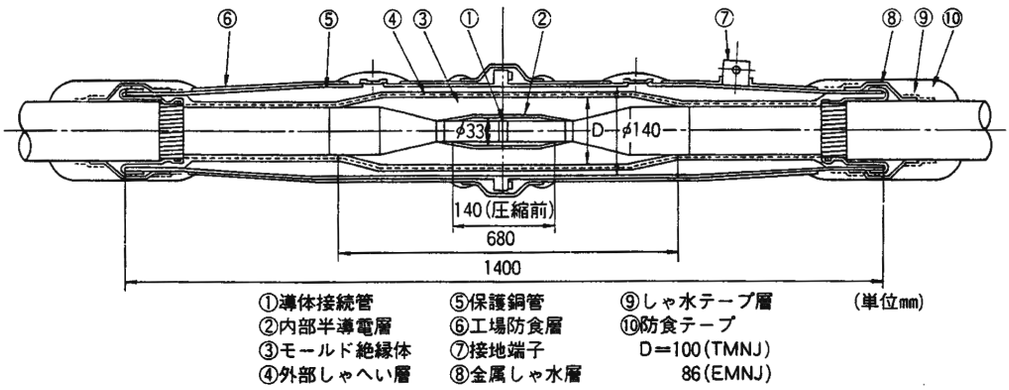
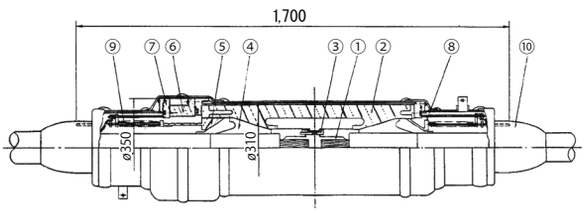


図 6.15　154kV 接続部の構造 [29]



符号	部品名称	符号	部品名称
1	導体接続管	6	絶縁筒
2	エポキシユニット	7	中間フランジ
3	ユニット固定金具	8	圧縮装置A
4	プレモールド絶縁体	9	圧縮装置B
5	プレモールド絶縁体押しパイプ	10	防食処理

図 6.16　154kV プレハブ接続箱の構造 [33]

図 6.17 に示すとおりである。エポキシユニットおよびプレモールド絶縁体の形状とその配置については、電界分布計算を実施し設計された。ゴムモールド絶縁体と接するエポキシユニットおよびケーブルとのそれぞれ界面電界をできるだけ均一かつ小さくするような形状と配置にしている。これらの界面には、シリコン油が塗布され、図 6.16 の⑧および⑨のスプリングによる圧縮装置を用いてヒートサイクルによる温度変化に対しても一定な面圧がかかるような構造としている。

エポキシユニット注型技術、プレモールド絶縁体の成形技術は各社固有の技術である。エポキシおよびゴムの製造では、ケーブル製造と同様に異物の混入を極力なくすと共に、電極との絶縁体界面では剥離によるボイドの発生と異物が混入しないよう特別な改善がなされている。

関西電力は、一連の開発試験 [33] を終え、1990 年に矢田支線 154kV 1500mm^2 5.03km 2 回線で、PJ を実用化した [34]。納入社は住友電工と古河電工である。施工管理については、異物混入防止、外傷防止、寸法管理など厳しく実施された。施工日数は 7 日 /3 相であり、TMJ の施工日数約 22 日 /3 相に比較して大幅な時間短縮となった。PJ は 275 ～ 500kV CV ケーブル用接続箱として開発が行われ、現在でも広く使用されている。

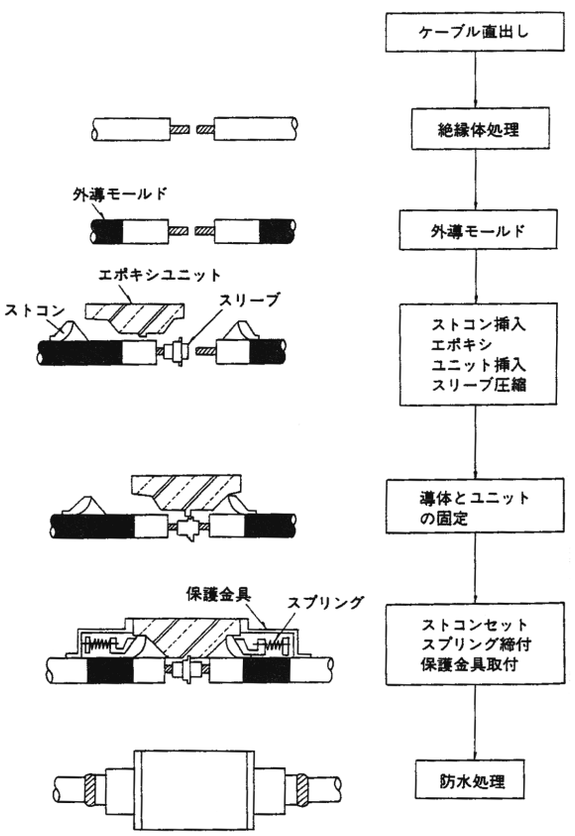


図 6.17　組立工法 [33]

6.3.2　短距離 275kV CV ケーブル線路

1979 年 6 月に住友電工は世界で初めて電源開発名古屋変電所向に 275kV 800mm^2 アルミ被 CV ケーブルを布設納入した [35]。絶縁厚は 27mm であった。地絡電流対策と遮水の目的で 2.2mm 厚の波付アルミ被を設けている。

1980 年に日立電線が中部電力奥矢作揚水発電所 (出力 315MW+780MW) 向け 275kV 600mm^2 アルミ被 CV ケーブル 亘長 660m 3 回線および亘長 48m 2 回線に布設し竣工した [36]。ケーブル絶縁厚さは 29mm である。交流最低破壊電界強度 25kV/mm、インパルス最低破壊電界強度 56kV/mm を使用して絶縁厚を決め

ている。

その後電線各社は絶縁厚 27mm とした 275kV 短距離 CV ケーブルを実用化した。

6.3.3 長距離 275kV CV ケーブル線路

(1) 275kV CV ケーブルと押出しモールド式接続箱 (EMJ) の開発

(a) ケーブルと EMJ の絶縁設計

各社で 275kV CV ケーブルを長距離線路に適用する検討が 1980 年頃から始まり EMJ の開発が進められた。CV ケーブルの絶縁厚は交流耐電圧値に対する必要厚さ t(ac) とインパルス耐電圧値に対する必要厚さ t(imp) を求めどちらか大きい必要厚さを採用している。その算出法は「特別高圧架橋ポリエチレンケーブル及び接続部の高電圧試験法」に定められている[37]。算出式を表 6.9 に示す。

絶縁厚の決定に重要なことは、t(ac) に対しての交流最低電界強度 $E_{L(ac)}$ および劣化係数 k_1 値 (V-t 特性の n=9 値から計算値 k_1=4) であり、絶縁厚 t(imp) に対してはインパルス最低電界強度 $E_{L(imp)}$ の値である。内外半導電層と絶縁層三層同時押出、乾式架橋およびケーブル製造・品質管理技術の改善によるボイド・異物・突起の低減によって、$E_{L(ac)}$ および $E_{L(imp)}$ は 1975 年以降表 6.10 および図 6.18 に示すように向上していった。275kV CV ケーブル短距離線路の実績を踏まえて、$E_{L(ac)}$ =30kV/mm および $E_{L(imp)}$=60kV/mm を[38]採用した。この値から 275kV CV ケーブル絶縁厚は 27mm とした[39]。

275kV CV ケーブルの接続箱としては、電気特性が優れ、品質向上が図れる EMJ が採用された。EMJ の補強絶縁厚 (導体スリーブ上) は、ケーブルと同様に EMJ の破壊試験結果のデータをワイブルプロットで整理して求めて、$E_{L(ac)}$ =20kV/mm および $E_{L(imp)}$=50kV/mm が採用され、表 6.9 から算出して 35mm とした[39]。

ケーブル及び EMJ の実線路条件での長期信頼性を確認するため、電力中央研究所横須賀研究所構内において 3 度にわたる長期課通電試験が実施された。これらの長期試験の概要を表 6.11 に示す。

表 6.9　設計絶縁厚算出式[39]

AC より決まる絶縁厚　t(ac)

$$t(\mathrm{ac})=\frac{V/\sqrt{3}\times\frac{1.15}{1.1}\times k_1\times k_2\times k_3}{E_L(\mathrm{ac})}\quad(\mathrm{mm})$$

V　：公称電圧　(kV)

k_1　：劣化係数 (V-t 特性の n 乗則より算出される 1 時間耐圧値と 30 年耐圧値との差)

k_2　：温度係数　(1.1)

k_3　：布設その他の安全係数　(1.1)

$E_{L(ac)}$　：ワイブルプロットより求まる AC 電圧に対する初期最低破壊電界強度　(kV/mm)

Imp より決まる絶縁厚　t(imp)

$$t(\mathrm{imp})=\frac{\mathrm{BIL}\times k_1'\times k_2'\times k_3'}{E_{L(\mathrm{imp})}}\quad(\mathrm{mm})$$

BIL　：基準衝撃電圧絶縁強度　(kV)

k_1'　：温度係数　(1.25)

k_2'　：繰返しインパルスに対する劣化係数　(1.1)

k_3'　：布設その他の安全係数　(1.1)

$E_{L(imp)}$　：ワイブルプロットより求まる Imp 電圧に対する初期最低破壊電界強度　(kV/mm)

表 6.10　66kV ～ 77kV ケーブルの E_L 値の変遷[38]
（常温破壊データ）

期　間	E_L 種類	試料数	E_L 値 (kV/mm)	備　考
昭48～50	E Lac E Limp	58 77	20 50	一部水蒸気架橋
昭50～53	E Lac E Limp	58 60	30 60	全て乾式架橋
昭53～61	E Lac E Limp	104 181	35 75	

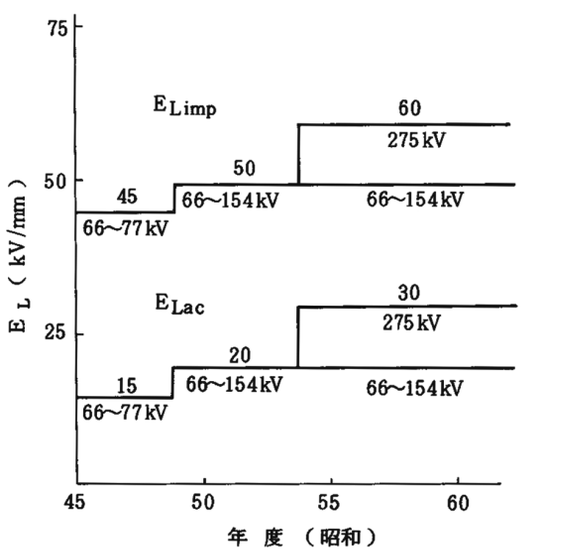


図 6.18　絶縁設計に採用された E_L 値の変遷[38]

(b) 長期課通電試験Ⅰ (ワイヤーシールド CV ケーブル用)

最初の長期課通電試験は、1985 ～ 1986 年にかけて東京電力、関西電力、中部電力、電力中央研究所および電線 6 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線、昭和電線、大日日本電線) との共同で行われた[40],[41]。供試ケーブルは 275kV 3000mm^2 CV ケーブルで、絶縁厚は基本仕様の 27mm より厳しく 24mm とし、ワイヤーシールド付きビニルシース構造とした。一部に鉛被遮水付きケーブルも供試し、布設条件は縦スネークおよび横スネークとし実際の布設条件を模擬した。

表 6.11　横須賀研究所における 275kV CV ケーブル長期課通電試験の概要

項目		長期課通電試験　I	長期課通電試験　II	長期課通電試験　III
共同研究参加社	電力会社	東電、関電、中電	中電	−
	研究所	電力研究所	電力研究所	電力研究所
	電線メーカ	住友、古河、フジクラ、日立、昭和、三菱	住友、古河、フジクラ、日立	フジクラ、昭和、三菱
試験線路		ケーブル450m　EMJ 8相	ケーブル420m　EMJ4相	ケーブル400m　EMJ3相
試験期間		1985～1986年	1988年4～10月	1990年7～12月
試験条件	電圧	280kV	285kV	285kV
	ヒートサイクル	12hr ON　12hr OFF	8hr ON　16hr OFF	12hr ON　12hr OFF
	到達導体最高温度	90℃	90℃	105℃
	期間	6ヶ月(等価年数50年相当)	6ヶ月(等価年数50年相当)	6ヶ月(等価年数50年相当)
ケーブル構造	導体	3000mm^2	2500mm^2(素線絶縁)	2500mm^2
	内部半導電導厚さ	2.5mm	2.5mm	2.5mm
	絶縁体厚さ	24mm	27mm	23mm
	外部半導電層厚さ(クッション層厚込)	4mm	4mm	4mm
	ワイヤーシールド	2.0mm×80本	−	−
	シース　材質	−	ステンレス被	アルミ被
	厚さ	−	0.8mm	3.1mm
	防食層厚	6.5mm(一部遮水層付き)	5mm	5mm
	外径	143mm	159mm	154mm
EMJ	構造	IJ型(325φ×2300mm)	IJ型(325φ×2300mm)	IJ型(325φ×2300mm)

住友:住友電気工業(株)、古河:古河電気工業(株)、藤倉:藤倉電線(株)、
日立:日立電線(株)、昭和:昭和電線電纜(株)、三菱:三菱電線工業(株)(1986年に大日日本電線㈱から社名変更)

試験のレイアウトを図 6.19 に示す。EMJ は上記 6 社が納入した。試験では、4 回の絶縁破壊が発生したが、その主な原因は製造不良・品質管理上の不徹底およびミスによるものであった[39]。絶縁破壊した箇所は改修され試験は終了した。試験終了後各社工場にて残存性能試験を実施し、ケーブルおよび EMJ の長期信頼性は確認された。この試験の結果から、ケーブル製造技術の改善ならびに製造から現地施工までのすべての段階において品質管理を一層強化・徹底することが必要とされ、更なる高品質化が進められた。

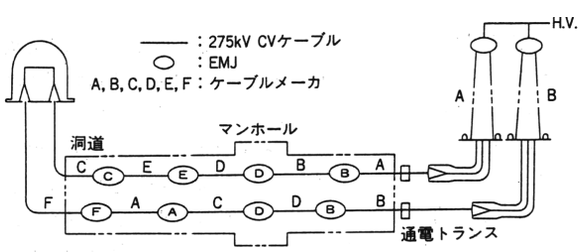


図 6.19　長期課通電試験 I の敷設レイアウト[40]

(c) 長期課通電試験Ⅱ (ステンレス被 CV ケーブル用)

中部電力は、275kV CV ケーブル線路として送電容量の関係から、図 6.20 に示す 2500mm^2 素線絶縁導体およびステンレスシースを使用した構造の CV ケーブルの適用を計画していた。ケーブルおよび EMJ の長期課通電試験を、中部電力、電力中央研究所および電線 4 社 (住友電工、古河電工、藤倉電線、日立電線) と共同で横須賀研究所において 1988 年に実施した[40),(42]。このケーブルの絶縁厚は 27mm である。試験後ケーブルおよび EMJ を撤去し、各社工場において残存性能試験を実施し長期信頼性が確認された。長期試験とその他の布設検証実験[40]を踏まえ、ケーブルおよび EMJ の長期安定性が確認でき、長距離 275kV 素線絶縁導体ステンレス被 CV ケーブル線路が実用化された。

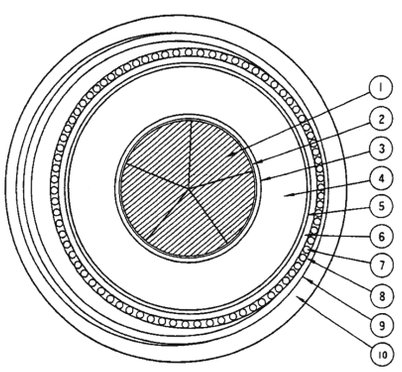


図 6.20　275kV ステンレス被 CV ケーブル[40]

(d) 長期課通電試験Ⅲ (低減絶縁ケーブル)

更なる 275kV CV ケーブルの絶縁厚の低減を目指して、電力中央研究所と藤倉電線、昭和電線、三菱電線 (株) が共同で絶縁厚 23mm の 275kV 2500mm^2 CV ケーブルおよび EMJ の長期課通電試験を横須賀研究所において 1990 年に実施し[43),(44),(45]、残存性能試験を実施した。EMJ 接続方法の概略を図 6.21 に示した。

500kV CV ケーブルおよび EMJ の開発の見通しを得た[46]。

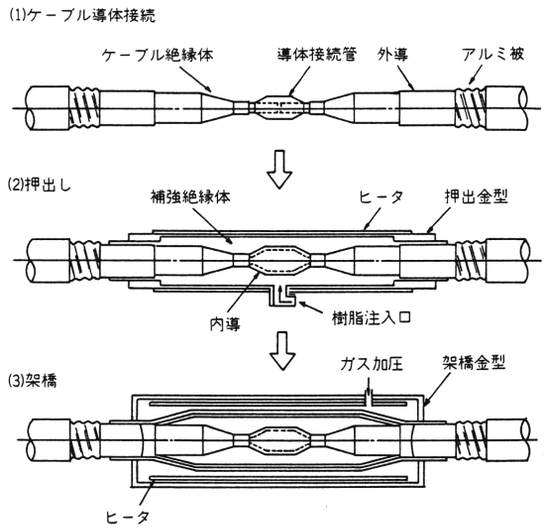


図 6.21 EMJ 組立て手順 [44]

(2) 長距離 275kVCV ケーブル線路

長期課通電試験 I の結果を踏まえ、東京電力は、1989 年に都内への電力供給のため、南川崎変電所から池上変電所間の南池上線 亘長 9.5km 1 回線 (440MVA) に、世界で初めて 275kV 1400mm^2 アルミ被 CV ケーブルを実用化した。普通接続箱および絶縁接続箱には EMJ が採用された。納入社は住友電工、古河電工、日立電線である [47],[48]。ケーブル構造を表 6.12 に示す。絶縁厚さは 27mm であった。

ケーブルの製造については、材料供給の完全密閉化、押出機防塵室のクリーン度改善、押出機への細密スクリーンメッシュの適用、および半導電層の突起レベル管理などの対策を更に進め、表 6.13 に示す異物・ボイド・半導電層突起の要求レベルを十分満足することを確認している [47]。

EMJ の構造を図 6.22 に示す。接続箱とケーブルアルミ被との接続は、OF ケーブルと異なり鉛工を使用しない方式としている。絶縁接続部の寸法は 360mm ϕ × 1800mm で、275kV OF ケーブルの絶縁接続箱と同寸法である。施工管理については、図

表 6.12 275kV CV ケーブルの構造表 [47]

品名			CAZV	CAZV-F*1
導体	公称断面積	(mm^2)	1,400	
	形状		分割圧縮円形	
	外径	(mm)	45.0	
内部半導電層厚さ		(mm)	約 2.0	
絶縁体厚さ		(mm)	27.0	
絶縁体外径		(mm)	約 103.0	
外部半導電層厚さ		(mm)	約 1.0	
クッション層厚さ (含む遮蔽層厚さ)		(mm)	約 3.0	
アルミ被厚さ		(mm)	2.9	
防食層厚さ		(mm)	5.3	
ケーブル最大外径		(mm)	150	
概算重量		(kg/km)	28,000	
電気特性	直流最大導体抵抗	(Ω/km)	0.0133	
	最大静電容量	(μF/km)	0.21	
	最小絶縁抵抗 絶縁体	(MΩ·km)	3,000	
	最小絶縁抵抗 シース	(MΩ·km)	10	1

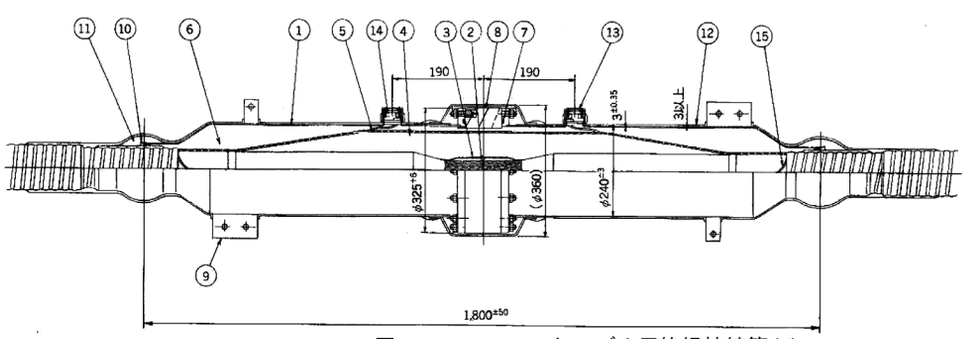
*1 防災防食層

表 6.13 異物・ボイド・導電層突起の規格 [47]

項目	規格
異物	ブラック・メタル 70 μm 以下 アンバー 250 μm 以下
ボイド	30 μm 以下
半導電層突起	70 μm 以下

6.23 に示すように中間検査として、X 線撮影を実施して施工中の異物・ボイドの侵入防止の管理を徹底した。接続箱施工体制については、工場でのトレーニングを十分積み重ねて、実証試験、受入試験の組立てを行った作業班を配した。品質管理については、QC 工程表およびチェックシートを作成し、万全な品質管理を実施している [47]。EMJ の施工日数は 1 月 /3 相と長時間を要し、線路施工に時間がかかるという課題が残った。

線路の健全性を確認する絶縁診断が要望された。東京電力と日立電線は、絶縁接続箱 (IJ) において、図 6.24 に示すように絶縁筒でシース縁切りされた左右の防食層の外側に金属箔を設けて、この箔を用いて



符号	部品名称
1	保護銅管
2	導体接続管
3	内部半導電層
4	絶縁体
5	外部しゃへい層
6	防水混和物
7	Oリング
8	絶縁筒
9	接地端子座
10	スペーサ
11	エポキシ+ガラステープ
12	防食層
13	ガス採取口
14	Oリング
15	テフロンチューブ

図 6.22 275kV CV ケーブル用絶縁接続箱 [47]

PD(Partial Discharge: 部分放電) の検出および校正パルスの注入を行い、微小な放電の判定ができる新しい部分放電測定法を実用化した[49]。上述の南池上線の日立電線の施工区間 4.09km で交流課電時に PD 測定を実施した。絶縁接続箱 (IJ) での検出感度は 1 PC で部分放電のないことが確認された。この IJ 区間両側のケーブルと隣接する EMJ でも 1 ～ 15PC の測定感度で測定され、線路の健全性が確認されている。

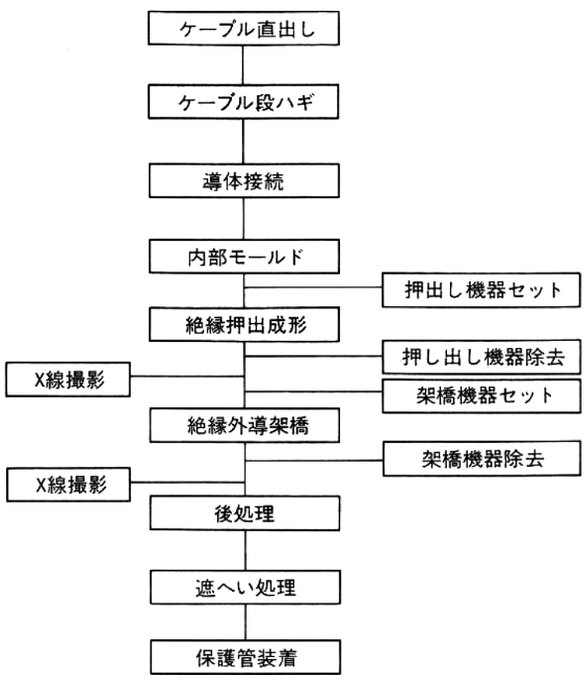


図 6.23　　EMJ 作業工程[47]

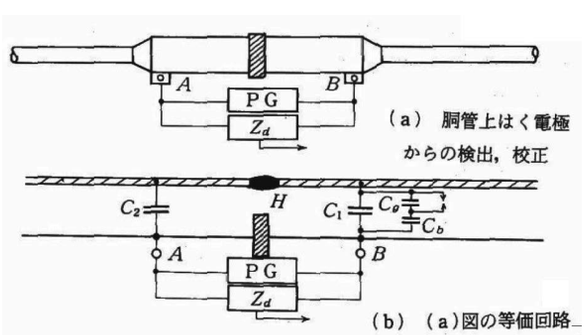


図 6.24　絶縁接続部における検出、校生法[49]

引き続き、東京電力では、1995 年に EMJ を使用した葛南世田谷線 275kV 1400mm^2 アルミ被 CV ケーブル亘長 32.5km 3 回線 (460MW × 3)[50] 、1996 年に横浜港北線 275kV 2500mm^2 アルミ被 CV ケーブル亘長 20km 3 回線[51] などを建設した。竣工試験時に PD 測定が実施された。実線路での交流運転時の活線下で放電電荷量が 1PC という微小な部分放電を可能にしたのは、世界に先駆けての技術である。

従来長距離 CV ケーブル線路の竣工試験は、商用周波の交流課電の場合は電流容量の点で設備的に不可能であり、直流耐圧試験が一般的に行われていた。直流耐電圧試験については、①部分放電に対する感度が低い、②欠陥の種類によっては直流破壊電圧 / 交流破壊電圧の比率が異なる、などの理由で実施に懸念があった。CV ケーブルでの異物・ボイド・突起に対する直流耐圧試験の有効性と危険性について 1990 年代に入って、国際的にも CIGRE WG21-09 にて竣工試験方法について議論された[52]。日本では、275kV 以上 CV ケーブルの竣工試験時には、交流課電下での PD 試験を実施するようになった。海外でも、測定方式は異なるが竣工試験時に PD を測定するようになった。

6.3.4　短距離 500kV CV ケーブル線路

(1)　ケーブルの特性向上

1982 年頃より 500kV CV ケーブルの開発が行われた[40), (53), (54]。材料から製造方法までクリーン化などの改善がなされ、275kV CV ケーブルでの破壊試験データも蓄積された。図 6.25 に示す 275kV CV ケーブルでのデータ[39] から $E_{L(ac)}$ =35kV/mm および $E_{L(imp)}$=75kV/mm が採用され、図 6.26 から V-t 特性

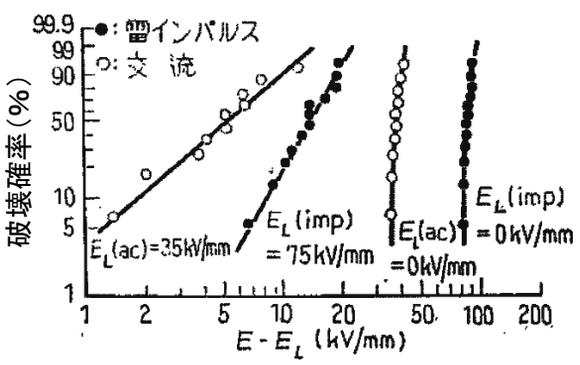


図 6.25　275kV 級 CV ケーブルの最低破壊平均 電位傾度[55]

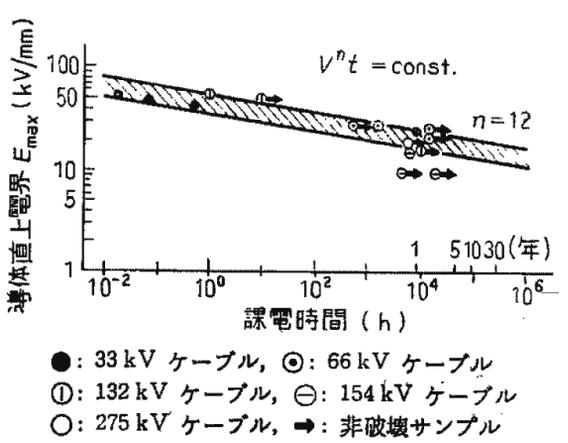


図 6.26　CV ケーブルの V-t 特性[55]

傾き n=12 を採用して 500kV CV ケーブルの絶縁厚は 32mm と設計された[55]。この絶縁厚のケーブルで初期試験、長期課通電試験が進められた[53),(54]。

5.3.3 項で述べた前駆遮断法[56]により、絶縁体中の欠陥部で図 6.27 に示すようにトリーが目で見られるようになり、ここに加わる電界と異物の関係を試験により確認できるようになった。図 6.28 は、前駆遮断法と従来からの焼損抑制法[57]から得られた異物と周囲電界との関係を示す。データのばらつきはあるものの 35kV/mm 以上で絶縁破壊を発生しないようにするには、異物の大きさは 100 μm以下にする必要があることが明らかとなった。この技術が、CV ケーブルの破壊原因の多くは異物であることであることを明確にし、500kV CV ケーブルの実用化に貢献した。

図 6.27　異物部からのトリー[56]

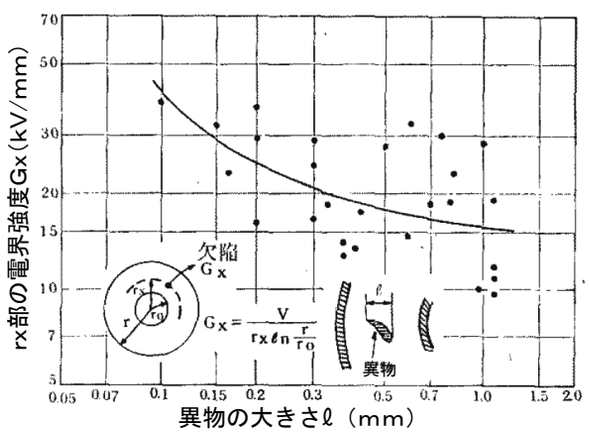


図 6.28　異物の大きさと破壊電界の関係[56]

(2) 短距離 500kV CV ケーブル線路実用化

日立電線が 1987 年 1 月に世界で初めての 500kV CV ケーブルを竣工した[54),(58]。電源開発下郷揚水発電所 (出力 1000MW) 向け 500kV 800mm^2 アルミ被 CV ケーブル亘長 190m (傾斜部 126m、立坑 20m) 1 回線である。1988 年に運開した。絶縁厚は 35mm としている[54]。ケーブル構造と写真を図 6.29 に示す。

同じく日立電線が 1987 年 7 月に東京電力今市揚水発電所 (出力 1050MW) 向け 500kV 1400mm^2 アルミ被 CV ケーブル亘長 610m (斜坑部 210m) 1 回線も竣工し[54),(58]、1988 年に運開した。ケーブル絶縁厚は 32mm である。下郷発電所向け 500kV CV ケーブルの絶縁厚 35mm は、導体外径が小さく絶縁体中での最大電界が大きくなり、これをも考慮して決められている[58]。運転電圧での両線路におけるケーブル絶縁体での最大電界は同じとなっている。

ケーブル外径は、従来クラフト紙 OF ケーブルに比べて、外径で約 5mm 大きく、絶縁厚の更なる削減が必要であった。引き続き 500kV 短距離 CV ケーブルが実用化された[59]。

項目		下郷発電所向け
導体	公称断面積	800mm²
	外径	34.0mm
内部半導電層厚さ		約3.5mm
絶縁体厚さ		35.0mm
外部半導電層厚さ		約1.0mm
熱膨脹吸収層厚さ		約3.0mm
遮へい層厚さ		約0.5mm
アルミ被	厚さ	3.0mm
	外径	約139mm
シース厚さ		6.0mm
仕上がり外径		約151mm
概算重量		25kg/m
直流最大導体抵抗		0.0231Ω/km (20℃)
絶縁抵抗		4,000MΩ·km
静電容量		0.15μF/km

(a) 構造　　(b) 写真

図 6.29 500kV CV ケーブルの構造 (下郷発電所向け)[54]

6.4　まとめ

絶縁体の低損失化のため 1985 年に東京電力城北線の一部に 275kV 半合成絶縁 OF ケーブル (PPLP,SIOLAP) が実用化された。その後各社で開発された半合成紙は 275kV OF ケーブルおよび POF ケーブルに使用された。500kV 用の半合成紙は PPLP に集約された。PPLP の PP 分率の上昇、油含浸に対する膨潤対策など新たな技術を導入し、ケーブルの試作を行い長期課通電試験に合格した。世界初の長距離 500kV OF ケーブル線路へ適用されることになった。

2500mm^2 以上の大導体化が進められ、導体損失の低減のため世界で初めて酸化第二銅皮膜による素線絶縁分割導体が開発された。併せて不可能であった導体接続法を開発したことがケーブル線路への実用化を果たしたものである。1982 年に中部電力知多火力発電所向け 275kV 素線絶縁 2500mm^2 POF ケーブルが実用化された。この技術は、大導体 CV ケーブルへも適用された。

CV ケーブルについては、日本独自の技術である前駆遮断法の開発により、CV ケーブルの破壊原因の多くは異物であることであることを明らかにした。この技術は 500kV CV ケーブルの実用化に貢献した。

XLPE の原材料から絶縁体押出製造までのクリーン化技術の適用、接続箱の施工技術の改善により超高圧化が実現された。1988 年に電源開発下郷変電所に世界で初めての 500kV CV ケーブルを実用化した。

1989 年に東京電力南池上線 9.5km の 275kV CV ケーブル線路が実用化された。長距離線路ではケーブルと同等の信頼性を有する中間接続箱の開発が必須である。接続箱の施工については、ケーブル製造と同様にボイド、異物および突起の品質管理が徹底された。更に信頼性の確認のため、竣工試験では、絶縁接続箱 (IJ) の左右の防食層の外側に金属箔を設けて、微小な放電の判定ができる部分放電 (PD) 測定法である箔電極高周波同調増幅法を開発し、線路の健全性を確認した。実線路での交流運転時の活線下で放電電荷量が 1PC という微小な部分放電測定を可能にしたのは、世界に先駆けてである。これは CV ケーブル線路の高品質化と高信頼度化には欠くことのできない技術である。

電力会社の強いニーズのもとに、電線メーカーは、超高圧化、大容量化に向けて、各社競って、ケーブル、付属品およびその周辺製品の研究開発に傾注した。各品種の電力ケーブルにおいて、日本の独自技術の開発が進められ、実用化されなかった製品も多々あるが、製造から施工まで含めた技術力を高めて世界トップレベルの技術を確立した。

引用参考文献

(1) 今井ほか :「東京電力 (株)275kV 城北線・OF ケーブル線路の完成」住友電気　第 119 号　p77　(1981)

(2) 大野ほか :「275kV 半合成紙 (SIPLAP) 絶縁 OF ケーブルの実線路への適用と残存性能試験」昭和電線電纜レビュー　Vol.38, No.1　p59　(1988)

(3) 河津ほか :「関西電力 (株) 南大阪泉北線 275kV 新種絶縁 OF ケーブル線路の完成」住友電気　第 122 号　p77　(1983)

(4) 河津ほか :「FEP ラミネート紙による 275kV 低損失ケーブルの開発」日立電線　No.2　p1　(1982-12)

(5) 福田ほか :「超高圧用 OPPL 絶縁 OF ケーブルの開発」古河電工時報　第 80 号　p119　(1987)

(6) Y.Watanabe et al.:“Development of New 500kV Laminated Paper Insulated Self-Contained Oil-Filled Cable and Its Accessories” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.3, No. 1,　p47 (January1988)

(7) 内田ほか :「500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブルならびに同径接続部の開発」住友電気　第 130 号　p161　(1987)

(8) 内田ほか :「500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブルの開発」昭和電線電纜レビュー　Vol.36, No.1 p65　(1986)

(9) 緒方ほか :「500kV PPLP 絶縁 OF ケーブルの本四連系線瀬戸大橋添架工事の完成」住友電気　第 134 号　p147　(1989)

(10) 田中ほか :「本四橋梁添架 500kV 低損失 OF ケーブル長期性能実証試験中間報告」電気学会　電線・ケーブル研究会　EC86-8　(1986)

(11) 緒方ほか :「本四連系線用 500kV 半合成紙絶縁 OF ケーブルの開発」昭和電線電纜レビュー　Vol.37,　No.1,　p62　(1987)

(12) 田中ほか :「本四連系線 500kV OF ケーブル橋梁区間工事の完成」古河電工時報　第 82 巻 p21　(1988)

(13) 松下ほか :「本四連系線 500kV OF ケーブル工事」昭和電線電纜レビュー　Vol.44, No.2, p118 (1994)

(14) 上野ほか :「中部電力株式会社知多火力連系線 275kV POF ケーブル」藤倉電線技報　第 66 号　p63　(1983)

(15) 高岡ほか :「素線絶縁分割導体の開発」藤倉電線技報　第 67 号　p17　(1984)

(16) 勝田ほか :「大容量素線絶縁 CV ケーブルの開発」フジクラ技報　第 70 号　p19　(1985)

(17) 島村ほか :「大導体素線絶縁 CV ケーブルの実用化」フジクラ技報　第 72 号　p28　(1987)

(18) T. Aabo et al.:”Thermo-Mechnical Bending Effects In EHV Pipe-Type Cables” IEEE PAS-103 No.10　p2807　(1984)

(19) 「21 世紀の地中送電技術」 電気協同研究会　第 58 巻　第 1 号　p40　(2002)

(20) 「地中送電設備の劣化診断技術とアセットマネジメント」電気協同研究会　第 67 巻　第 1 号　(2011)

(21) 大畠ほか :「モールド型直線接続部を含む 154kV CV ケーブル長距離線路の実用化」大日日本電線　第 68 号　p37　(1982)

(22) 竹鼻 : 技術トピックス「長距離 154kV CV ケーブルの布設」藤倉電線技報　第 65 号　p20　(1983)

(23) 「電力ケーブル・被覆線・電力用機器」古河電工時報　第 78 号　p6　(1986)

(24) 小野ほか :「154kV CV ケーブル用モールド型直線接続部の開発」藤倉電線技報　第 63 号　p63　(1981)

(25) 土田ほか :「154kV CV ケーブル用押出モールド接続部の開発」住友電気　第 125 号　p49 (1984)

(26) 中挟ほか :「275kV CV ケーブル用押出しモールドジョイントの開発」 日立電線 No.4　p5　(1984)

(27) Y.Sekii:“Recent Technical Progress in Extrahigh-Voltage XLPE Cables”HITACHI

CABLE REVIEW No.12 (August 1993)
(28) Toshiaki Nakabasami et al.: “Investigation for Commercial Use of 275kV XLPE Cables and Development of Extrusion type Molded Joint” IEEE 85 WM 007-0 (1985)
(29) 中挾ほか:「東京電力三郷浄水線 154kV CV ケーブル線路の完成」住友電気 第 127 号 p1 (1985)
(30) 日立電線 50 年史 技術編 (2006)
(31) 水口ほか:「大鳴門橋添架 187kV CV ケーブル線路の完成」住友電気 第 129 号 p145 (1986)
(32) 小野ほか:「132 ～ 154kV 級 CV ケーブル用プレハブ式絶縁接続部の開発と実用化」昭和 58 年電気学会全国大会 1270 (1983)
(33) 藤井ほか:「154kV CV ケーブル用プレハブ接続箱の開発」古河電工時報 第 84 号 p19 (1988)
(34) 井上ほか:「154kV CV ケーブル用エポキシ型プレハブ接続箱の実線路適用」平成 2 年電気学会電力・エネルギー部門全国大会 213 (1990)
(35)「275kV PEX ケーブル」住友電気 第 116 号 p205 (1980)
(36) S.Shinoda,et al.:”275kV XLPE Insulated Aluminum Power Cable for OKUYAHAGI No.2 Power Station”IEEE Trans on P.A.S. PAS-101,1298, (March 1980)
(37)「CV ケーブルおよび接続部の高電圧試験法」電気協同研究会 第 51 巻 第 1 号 (1995)
(38)「絶縁設計の合理化」電気協同研究会 第 44 巻 第 3 号 (1988)
(39) 神永:ミニ解説「275kV 長距離地中送電用 CV ケーブルの開発と建設技術の確立」電学誌 110 巻 6 号 p485 (1990)
(40) 福田ほか:「CV 電力ケーブルの技術進歩 (その 2) ～ 500kV CV への展開～」古河電工時報 第 84 号 p1 (1988)
(41) Kiich Yagisawa, et al.:「Development of Extruded Type Molded Joint for 275kV and 500kV XLPE Cables」HITACHI CABLE REVIEW No.9, p9 (1990)
(42) 市原ほか:「中部電力南ルート 275kV CSZV ケーブルシステムの開発」住友電気 第 138 号 p45 (1991)
(43) 鈴木他 :「低減絶縁 275kV 2500mm^2 CAZV ケーブル及び中間接続箱の長期課通電試験」平成 4 年電気学会全国大会 1458, (2002)
(44) 今城ほか:「低減絶縁 275kV CV ケーブルおよび押出しモールド式接続部の開発」フジクラ技報 第 82 号 p28 (1992)
(45) 今城ほか:「275kV CV ケーブルおよび EMJ の長期課通電試験」昭和電線電纜レビュー Vol.41 No.1 p71 (1991)
(46) 吉田ほか :275kV ～ 500kV CV ケーブルシステムの展望」フジクラ技報 第 80 号 p23 (1991)
(47) 八木澤ほか:「南池上線 275kV CV ケーブル長距離線路の完成」古河電工時報 第 84 号 p11 (1988)
(48) 八木澤ほか:「東京電力南池上線 275kV CAZV ケーブル線路の完成」住友電気 第 135 号 p142 (1989)
(49) 勝田ほか:「超高圧長尺 CV ケーブル線路の活線部分放電検出法の開発」電学論 B 111 巻 11 号 p1223 (1991)
(50) 駒場ほか:「都内導入 275kV 長距離 CV ケーブル線路の完成―東京電力 (株) 葛南世田谷線―」フジクラ技報 第 89 号 p10 (1995)
(51)「電力事業部概況」フジクラ技報 第 100 号 p43 (2001)
(52) CIGRE WG 21-09;“After-laying tests on HV extruded cable systems”Electra 173, (August 1997)
(53) 小野ほか:「大容量 500kV CV ケーブルの開発」フジクラ技報 第 70 号 p11 (1985)
(54) 川和田ほか:「500kV CV ケーブルの開発と実用化」日立電線 No.7 p59 (1988-1)
(55) 神永:ミニ解説「50 万ボルト CV ケーブルの開発」電学誌 106 巻 6 号 p59 (1986)
(56) 遠藤:「前駆遮断検出による CV ケーブル破壊原因の解明」電学論 B 108 巻 10 号 p451 (1988)
(57) 遠藤:「新しい焼損抑制法による CV ケーブルの破壊原因の解明」電学誌 A 103 巻 4 号 p29 (1983)
(58) Katsunori Ogawa et al.:“The World`s First Use of 500kV XLPE Insulated Aluminum Sheased Power Cables at the Shimogo and Imaichi Power Stations” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.1, 26, (1990)
(59) 古谷ほか:「500kV CV ケーブル布設工事」フジクラ技報 第 85 号 p25 (1993)

7 世界トップレベルの製品化 1990年(平成2年)頃～2005年(平成17年)

1980年代の日本独自の技術により世界トップレベルの500kV ケーブル技術を確立し、これをベースに500kV 半合成紙絶縁OF ケーブル、直流500kV 海底OF ケーブル、500kV CV ケーブルが完成し既に10年以上の運転がされている。これらの大容量長距離ケーブル線路建設には、日本独自の新規技術が多数導入された。

7.1 500KV 半合成紙絶縁 OF ケーブル

本州と四国の電力連系は、架空送電線により中四幹線(220kV 300MW)で結ばれていたが、電力需要の増大に伴い連系線としての送電機能が不足することが予想されたため、電力系統の強化を目的として、新たな500kV 送電線の計画がされた。本州 - 四国間の瀬戸内海海上部分を横断する方法として、本州四国連絡橋児島～坂出ルート(以降瀬戸大橋と言う)への添架および海底ケーブルなどの案が検討され、環境面や技術面で最も適している橋梁添架方式が採用された[1]。本四連絡線は、架空線105kmと電力ケーブル22km(内、橋梁区間8km)からなる500kV 送電線である。布設ルートは図7.1に示す通りである。ケーブルとしては、実績と信頼性のある500kV OF ケーブルが採用された。瀬戸大橋は、吊橋、斜張橋、トラス橋など11の橋からなり、合計約10kmにわたる[2]。吊橋のケーブル添架位置断面の代表的な一例として図7.2に示す。橋梁は鉄道と道路の併用橋となっている。

橋梁区間の建設工事は1987年4月から1988年3月の瀬戸大橋開通に合わせて行われ、その後1993年2月から1994年6月に残りの陸上区間を建設し、同年7月に運開した[3]。橋梁区間は、住友電工、古河電工、日立電線が納入し[2],[3],[4]、陸上区間は(株)フジクラ(1992年に藤倉電線(株)が社名変更、以下フジクラと記述)および昭和電線も加わり5社が納入した[5],[6]。

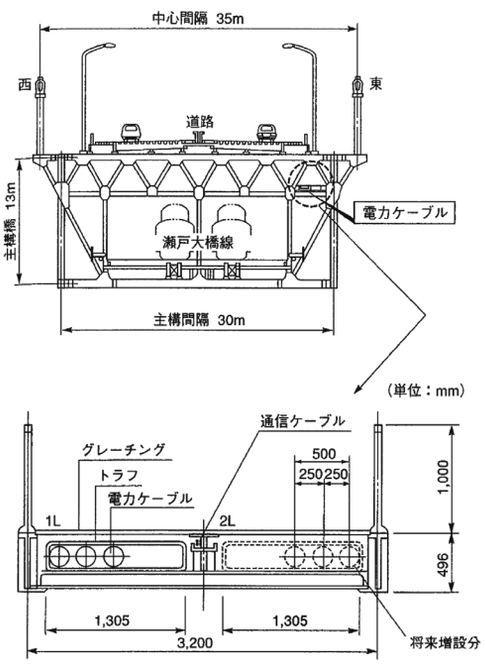


図7.2 橋梁部ケーブルの標準的な添架位置[3]

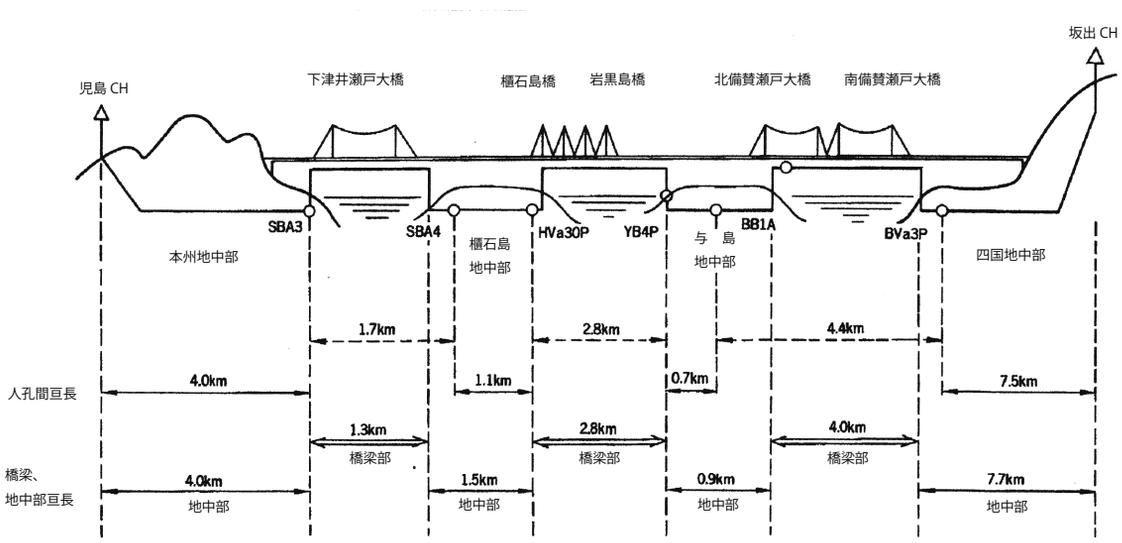


図7.1 本四連系線500kV OF ケーブル区間図[7]

(1) ケーブルおよび接続箱

各社 6.1.2 項の長期課通電試験で検証されたケーブルおよび接続箱の構造のものが使用された。表 7.1 に示す 500kV 2500mm^2 半合成紙絶縁アルミ被 OF ケーブルが使用された。絶縁体については半合成紙として PP 分率が約 60% の PPLP が使用され、その外側には接続組立時の鉛工による PPLP への熱対策として 4mm 厚のクラフト紙を巻く構造となっている。アルミ被の厚さは、ケーブルルートでの高低差が 90m あり、高油圧の区間には 4mm 厚とした[3]。ケーブル絶縁厚はすべてクラフト紙で構成した場合の 33mm から 25mm に低減され、ケーブル外径で約 10%、重量で 13%、送電ロスは約 24% 低減した[1]。

表 7.1　500KV OF ケーブル構造 [2]

項目		単位	ケーブル種類	
			中油圧用OFケーブル	高油圧用OFケーブル
公称電圧		kV	500	
線心数		—	単心	
油通路	内径	mm	25	
	金属帯厚さ	mm	1.5	
導体	公称断面積	mm^2	2500	
	導体形状	—	中空7分割圧縮円形	
	※1 外径	mm	68	
絶縁体	内部半導電層	mm	約 0.4	
	PPLP 120μ厚	mm	約 5.4	
	PPLP 170μ厚	mm	約 8.2	
	PPLP 220μ厚	mm	約 6.8	
	クラフト紙200μ厚	mm	約 4.0	
	金属化紙	mm	1枚(約0.15mm)	
	絶縁体厚	mm	25.0	
しゃへい層厚		mm	約 0.3	
銅線織込布テープ厚さ		mm	約 0.5	
アルミ被厚さ		mm	3.0	4.0
防食層厚さ		mm	6.0	6.0
概算外径		mm	153	159
最大導体抵抗		Ω/km	0.00732（20℃）	
最大静電容量		μF/km	0.3	
最小絶縁抵抗		MΩ·km	33,000（20℃）	
概算重量		kg/km	46,000	48,000
概算油量		ℓ/km	5,300	5,700

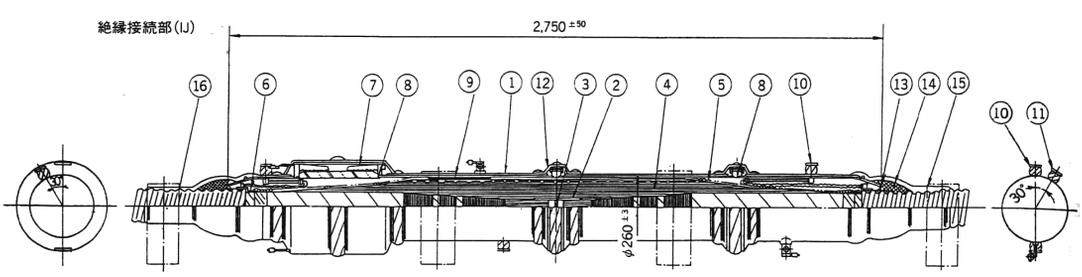
※1 導体外径はバインダー厚（約0.3mm）を含まず。

ガス中終端箱、普通接続箱、絶縁接続箱、油止め接続箱が使用された。絶縁接続箱の構造を図 7.3 に示す。橋の振動対策として、接続部内部補強絶縁層の遮蔽銅線の乱れや、外部銅管のフランジ部ボルト・ナットのゆるみ等に対する防止を図っている[2]。接続部の鉛工部の油漏れ対策として、高油圧の使用をも考慮して二重鉛工方式を採用した。鉛工作業時については、鉛工近傍のアルミ被に熱電対を取付けて温度管理を実施した。セミストップはアルミ被とケーブルコアとの相対的ずれに対応可能な構造となっている。

(2) 橋梁添架設備

瀬戸大橋のような長大橋では、温度変化、風、列車・車の走行などにより、橋は橋端部では図 7.4 に示すように伸縮と角折れが発生し、かつ全長にわたり伸縮と振動が発生する。この対策として、伸縮吸収装置、角折れ吸収装置、および振動防止対策などの特殊な装置を設置した。各場所の橋梁によりその変化量は異なるが、最大では、伸縮量が約 1500mm、角折れ量が水平方向 10% と垂直方向 19% にも及ぶ[1]。これらの挙動に対してケーブルが損傷を受けないように装置の設計がなされた。

伸縮吸収装置としては、長大オフセットを設け、30 年間に亘ってケーブルが繰り返し伸縮を受けてもアルミ被が疲労し破断して油漏れが生じることのないように設計された。ケーブルが均一に変位するように均等動作機構装置が設置されている。北備讃瀬戸大橋端部に設けた長大オフセットの概略図を図 7.5 に示す。角折れ吸収装置としては、角折れの動きを吸収するため、図 7.6 に示すようにケーブル添架枠に水平および垂直のいずれの方向にも回転できるユニバーサルヒンジが 2 ヶ所設けられている。振動防止に対しては、振動予



記号	部品名	記号	部品名
1	外部管	11	セミストップ用コネクタ
2	導体接続管	12	防食カバー
3	補強鋼管	13	スペーサー
4	補強絶縁紙	14	鉛工
5	しゃへい層	15	現地防食
6	セミストップ	16	ケーブル
7	絶縁筒		
8	Oリング		
9	内部スペーサー		
10	コネクタ		

図 7.3　絶縁接続箱 (橋梁部) の構造 [2]

測シミュレーションと各種実験により、ケーブル支持間隔を2m以下とし、更に長大オフセット、角折れ部には電力ケーブル支持ローラに防振ゴムを取り付けるなどの対策を実施した[2]。

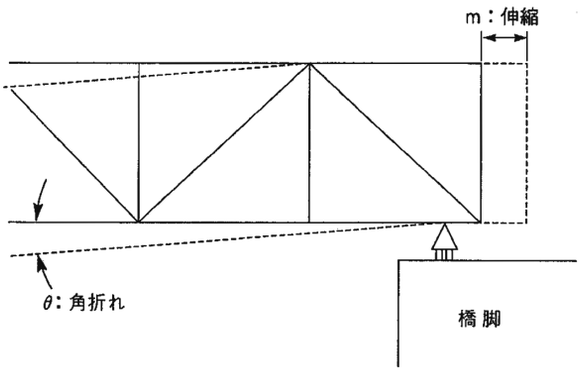


図 7.4　橋梁端部の動き[3]

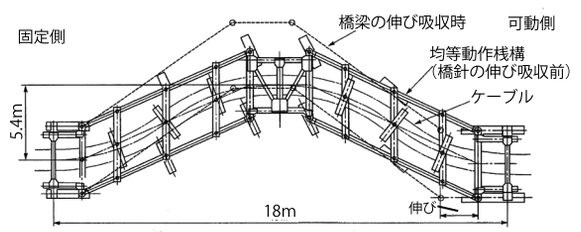


図 7.5　長大オフセットの平面図[3]

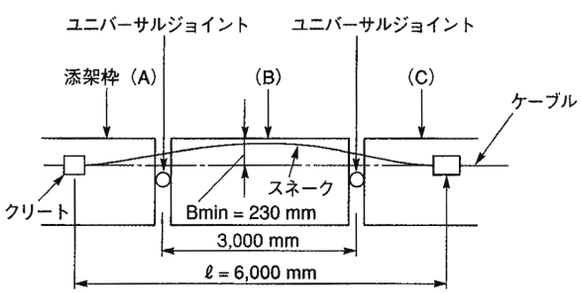


図 7.6　角折れ吸収装置[3]

これらの装置は日本独自に開発されたもので、世界でも例がない規模の新技術が適用されている。

ケーブルシースは、全長にわたりクロスボンドし、地中洞道部は普通接続箱で直接接地、橋梁添架部分の普通接続箱は他の添架設備へのシース電流の影響や橋梁への落雷があった場合の影響を考慮して非接地としている。橋梁添架部は、通信線への誘導障害などを防止するため、ケーブルを各接続部で撚架した[3]。

これらの技術は、1986年に建設された関西電力の大鳴戸橋添架187kV CVケーブル[8],[9]線路を参考としている[1]。

(3) ケーブル工事

橋梁部のケーブル布設は、ケーブルドラムを特殊吊式ポールトレーラーに積載して橋上を運搬して、橋上の所定の定置に設置し、ケーブル添架位置に引入れした[3]。立て坑部の延線にはフォーリングマシンを約7m毎に取付け、延線を停止した場合でもケーブルが滑落ちすることのないように、電磁ブレーキの他に逆回転防止機構をフォーリングマシンに取り付けた。

2回線目のⅡ期工事が1996年から行われ2001年に完工した[1],[10]。ケーブル設計および施工方式は基本的に同じであるが、特にケーブルコアの移動抑制策について改善を行った。橋梁添架部の支持方法の改良などが行われたが、最大の対策は長尺ケーブルの採用であり、コア移動が生じた時に問題となる接続部を極力少なくした。Ⅰ期工事の条長の2倍の約1kmのケーブルを一部の区間に適用して7箇所21個の接続部を削減した[1]。

7.2　275kV 半合成紙絶縁 POF ケーブル

半合成紙の275kV OFケーブルへの適用の実績を踏まえ、ケーブル発生損失の低減と大電流化のため275kV POFケーブルへも半合成紙が適用された。

東京電力は、新宿新都心地区の需要増加に対応するため、北多摩変電所と東新宿変電所結ぶ東新宿線を計画した。POFケーブルの低損失化を狙って1990年から表7.2に示す275kV 半合成紙絶縁POFケーブルの開発を行った。半合成紙としては、PPLP、OPPLの2種類の材料が各社個別に採用された[11]。ケーブルおよび接続箱について1991年8月から1992年5月まで電力中央研究所横須賀研究所にて40年相当の長期課通電試験を実施し[11],[12]、長期安定性を確認した。1994年に実線路布設が完了し、1995年5月に運開した[13]。納入社は住友電工、古河電工、フジクラである。

表 7.2　東新宿線 275kV POF ケーブルの構造[13]

公称断面積(mm²)		2,000	1,600
導体	形状	4分割圧縮	
	外径(mm)	55.4	49.0
絶縁体	材料	半合成紙(PPLP)	
	厚さ(mm)	16.5	18.5*
防湿層	材料	金属化ポリエステルテープ	
	外径(mm)	90.0	86.6
補強層	材料	ステンレステープ　ポリエステルテープ	
	外径(mm)	91.4	88.0
滑り線	材料	D型ステンレス線	
	寸法(mm)	2.5×5.0	

＊鋼管内占有指数(ジャムレシオ)対策による

中部電力は、知多火力連絡線3号線275kV 3 × 2500mm^2 半合成紙絶縁POFケーブル亘長3.03km 1回線(既設を含めて3回線)を1998年に運開した。納入社はフジクラである。1983年に運開した1号線、2号線[14]の増設工事にあたる[15]。知多火力連絡線3号線では、ケーブル立上り箇所が1号線および2号線と変更となり、線路長が短くなった。その結果線路のインピーダンスが小さくなり、表7.3に示すように送電容量を大きくする必要があった。このため、1号線,2号線で適用した素線絶縁導体に加えて、絶縁体に半合成紙を採用してケーブルの電流容量のアップを図った。ケーブル構造を表7.4に示す。使用した半合成紙の特性を表7.5に示す。

表7.3 知多火力連絡線275kV POFケーブルの送電容量[15]

線　路	常　時	2Lブス停止作業時
1号線(1L)	528MW	771MW
2号線(2L)	528MW	−
3号線(3L)	644MW	901MW

表7.4　知多火力連絡線3号線275kV POFケーブルの構造[15]

項　目		単位	数量
公称電圧		kV	275
導体	公称断面積	mm^2	2,500
	形状	−	5分割圧縮円形より線(素線絶縁)
	外径	約mm	61.9
導体バインダ		約mm	0.6
絶縁厚(カーボン紙含む)		約mm	19.5 ┌半合成紙 16.5mm └クラフト紙 3mm
防湿層		約mm	0.2
補強層		約mm	0.7
スキッドワイヤ		mm	2.5×5.0 D型
概算外径		mm	109
概算重量		kg/m	31

表7.5　半合成紙FPPLの特性[16]

紙種	厚さ(μm)	125	155	125	備考
	PP分率(%)	40〜45		60	
剥離強度 (g/15mm)	乾紙	200↑	200↑	200↑	
	油浸	200↑	200↑	200↑	100℃ポリブテン
膨潤 (%)	DDB	3.4	3.5	4.5	100℃ 1kg/cm^2
	ポリブテン	0.9	1.0	−	
油浸比誘電率		2.82	2.83	2.65	
tanδ (%)	25℃	0.090	0.094	0.058	DDB 20kV/mm
	80℃	0.086	0.088	0.054	
	100℃	0.095	0.093	0.062	
絶縁破壊強度 (kV/mm)	AC	70	58	67	DDB含浸 t=0.6mmモデルケーブル
	インパルス	145	120	145	

このPPラミネート紙(FPPL)は、剥離強度と耐電圧特性を改善したものである[16]。通常絶縁紙の破壊電圧特性は、高気密度紙ほど高い値となる[17]が、PPラミネート紙で高密度紙を使用しようとすると紙表面が緻密となりPPとの接着性を低下させる。この改善のため、高密度紙(透気度:10,000ガーレ以上)をベースとして片面側を特殊処理した絶縁紙を用い、その特殊処理面をPP接着面側として剥離強度、絶縁破壊特性共に改善したものである。

中部電力知多火力連絡線3号線は、酸化第二銅皮膜による素線絶縁導体、新半合成紙(FPPL)、熱伸縮に対するオフセットパイプ、および冷凍機を用いた冷却循環システムなど新しい技術を採用した世界最大の大容量POFケーブル線路である。

7.3 長距離275kVおよび500kV CVケーブル

7.3.1 長距離275kVステンレス被CVケーブル線路

6.3.3.(1)(c)項の長期課通電試験の結果を踏まえ、中部電力は、1993年に名古屋市中心部における電力需要の増加および供給信頼度向上のため、知多第二火力発電所と市内の南武平町変電所(南ルートとも呼ぶ)を結ぶ275kV長距離地中送電線路に275kV 2500mm^2 素線絶縁導体ステンレス被CVケーブル(絶縁厚27mm)亘長26.9km 2回線(420MW × 2)を建設した[18],[19]。図7.7に示すように従来の275kVアルミ被CVケーブルの電力損失の約1/3となった。納入社は、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線である。ケーブル構造を表7.6に示す。その写真を図7.8に示す。

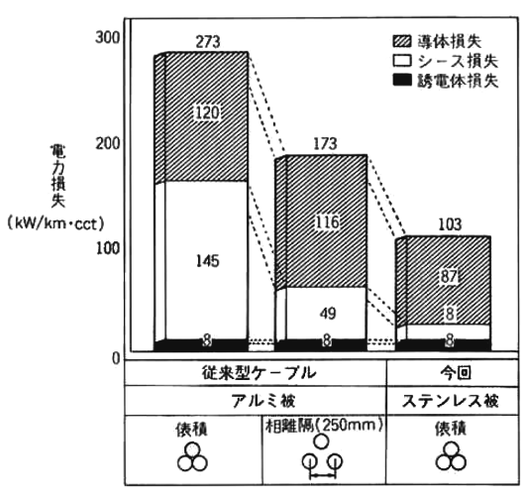


図7.7　南ルートケーブルと従来型ケーブルの電力損失比較(750MW/cct送電時)[18]

低損失化のため、素線絶縁5分割導体とステンレス被が採用された。CVケーブルの低損失化技術の集大成である。素線絶縁導体は、酸化第二銅皮膜[18],[20]とエナメル皮膜の二通りの方式[19]が使用された。金属シースの低損失化としてステンレス被を使用した。アルミ被使用の場合に比べステンレス被の渦電流損は約

1/20 に低減する。但し、ステンレス被を使用した場合、地絡電流対策として別に外部導体が必要である。このルートでの地絡電流 50kA × 0.2 秒の条件からケーブルコア上に 2.0mm φの銅線 80 本を巻くワイヤーシールド構造を適用している。ケーブル製造については、原材料製造からケーブル製造まで全ラインでのクリーンレベルのアップを図った。

表 7.6　275kV 2500mm² 素線絶縁導体ステンレス被 CV ケーブル [18]

項　目		単　位	数　値
公称電圧		kV	275
導体	公称断面積	mm²	2,500
	外径	mm	61.2
	構造	—	分割圧縮円形
	種類	—	素線絶縁
内部半導電層厚		約mm	2.5
絶縁体厚		mm	27
外部半導電層厚		約mm	1.0
半導電クッション層厚		約mm	3.0
ワイヤ遮へい	ワイヤ外径	約mm	2.0
	ワイヤ本数	本	80
半導電おさえテープ厚		約mm	1.0
ステンレス被	ギャップ	約mm	1.0
	厚さ	mm	0.8
防蝕層厚		mm	5.0
ケーブル外径		約mm	159
概算重量		約kg/m	42.5

図 7.8　275kV 2500mm² 素線絶縁導体ステンレス被 CV ケーブル [18]

EMJ の構造は 6.3.3 項の長期課通電試験Ⅱで供試された構造である。EMJ の組立てについては、①素線絶縁被膜除去時の粉末防止、②クリーン度クラス 200,000 の現場防塵環境、③ケーブル加工表面の CCD カメラによる検査 (図 7.9)、④ X 線に代わってイメージングプレートの使用、⑤ QC 工程図による現場施工管理、⑥ジョインター訓練および技能認定制度の導入、などの改善を行い、更に徹底した施工管理を行った [18]。

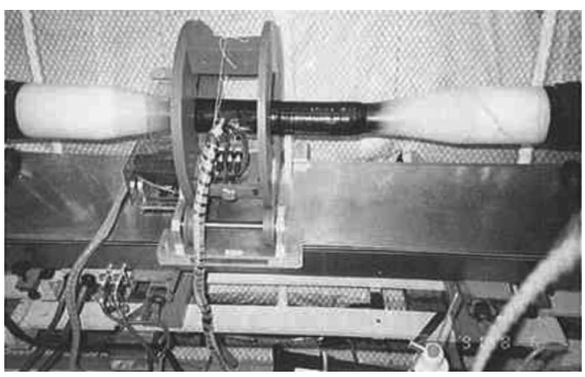


図 7.9　CCD カメラによる表面微細検査装置 [18]

竣工試験として、世界で初めて交流による長距離 CV ケーブル線路の耐電圧試験を実施した [21]。中部電力は、交流課電装置を小容量化するため、ケーブル静電容量分を補償する可変微調整型リアクトルを設置して、交流耐電圧試験 (207kV: 275kV/1.732 × 1.3) を実施した。あわせて耐電圧試験時にケーブル全長の部分放電測定を実施した。各 IJ の防食層上に金属箔電極センサを取れつける箔電極高周波同調増幅法 [22] を適用した。測定システムの一例を図 7.10 に示す。測定データは、洞道内に布設した光ファイバケーブルを使用し

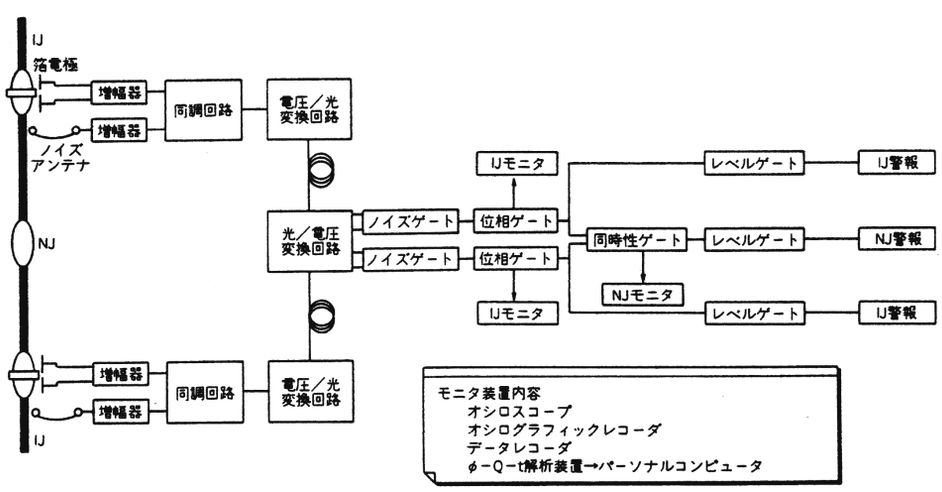


図 7.10　　部分放電測定システムの概要 [18]

て伝送され、集中監視された。試験条件は、印加電圧は 207kV 24 時間であり、同時に部分放電測定を行った。この竣工試験において、ケーブル部での部分放電を検出した[21]。欠陥部の位置が標定され、その部分に欠陥が発見された。この部分のケーブルは引き換えられた。最終的にはケーブル部を含め 1 ～ 10PC の感度で測定ができ、線路の健全性が確認できている[18],[21]。

引き続き、中部電力は、1997 年に東海松ヶ枝線 275kV 2500mm^2 素線絶縁導体ステンレス被 CV ケーブル亘長 18.9km 1 回線 (530MW)[23]、および 1999 年に海部松ヶ枝線 275kV 2500mm^2 素線絶縁導体ステンレス被 CV ケーブル亘長 23.1km 2 回線 (660MW × 2)[24],[25] を建設した。東海松ヶ枝線では、製造技術の改善によりケーブルの 1 区間長を従来の最大約 3 倍となる約 1300m ～ 1800m の長尺化を図り、EMJ 数を従来の 1/4 に削減し、線路の信頼性向上と工期短縮を図った。このため、図 7.11 に示す特殊なドラムにケーブルを巻取り後、名古屋港まで運搬し陸揚げしてトレーラーにて現地引き入れ場所まで陸上輸送した。海部松ヶ枝線においてもケーブル単長約 1400 ～ 1800m のケーブルを製造し、名古屋港以降の陸上輸送が困難なため、特殊な出荷コンテナにケーブルを巻取り、図 7.12 に示すようにコンテナを台船に載せて河川輸送を採用した。上記両線路についても竣工時の交流耐電圧試験に同様な方式で部分放電測定を実施し線路の健全性を確認している。

図 7.11　胴長大型ドラムによるケーブル布設[23]

2002 年川越西名古屋線 275kV 2500mm^2 素線絶縁導体ステンレス被 CV ケーブル亘長 14.4km 810MW 2 回線では、更に XLPE の長時間押出技術の確立とステンレステープの長尺化を図り、国内最高のケーブル一連長約 2500m の連続製造を行い、布設した[26]。接続箱の数は従来の約 2/3 に削減した。ケーブルの輸送にはコンテナ (総重量 140 トン) を用いて海上輸送し、桟橋からケーブル布設基地まで特殊なトランスポーターで運搬した。

図 7.12　コンテナを使用した台船河川輸送[24]

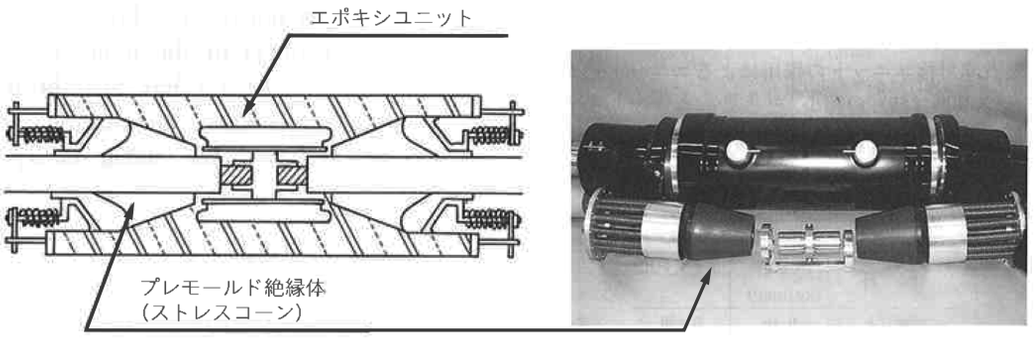
7.3.2　プレハブ式接続箱 (PJ) を使用した長距離 275kV CV ケーブル線路

(1) 275kV プレハブジョイント (PJ) の開発

EMJ は絶縁性能が優れている反面、施工日数が長く、複雑な施工管理が必要で、かつ作業者のスキルも必要であった。更に接続箱の施工についても、道路事情などで施工時間が制約され、事故時の早期復旧も必要であり、作業時間の短縮が必要であった。これらの問題を解決するため、154kV CV ケーブルで実用化されていた PJ を 275kV CV ケーブル線路にも適用するため検討された。

PJ の基本構造は、図 7.13 に示す通り、エポキシユニットとプレモールド絶縁体とからなる。エポキシユニットとプレモールド絶縁体は品質管理された工場で製造され、これらを現場で組み立てるもので、きちんと施工管理をすることにより安定した品質が確保できる[27]。

1992 年～ 1993 年に関西電力山崎実験センターにて、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線、三菱電線工業 (株) (1986 年に大日日本電線（株）が社名変更、以下三菱電線と記述）が共同で 275kV 1500mm^2 ステンレス被 CV ケーブル (絶縁厚 23mm) および PJ を供試し、図 7.14 に示すような 280m の線路を建設し長期課通電試験を実施した。ケーブル構造を表 7.7 に示す。PJ の構造を図 7.15 に示す。第 1 ステップの試験は設計寿命 30 年相当、第 2 ステップの試験は残存性能の把握を目的として行われた。275kV 課電圧下でヒートサイクル試験を行い、更に実使用を想定し強制的に機械力による伸び出し (最大 90mm) を加えながら課電した。第 1 ステップでは課電電圧条件は 275kV 122 日、最高導体温度 90℃および 105℃のヒートサイクルを加え 31.5 年相当の長期寿命特性を確認した。更に第 2 ステップでは課電電圧条件は 275kV 206 日、導



(a) PJ の概略構図　　(b) 主要部品の構造

図 7.13　275kV PJ の概略構造 [27]

体温度の変化幅が 60 ～ 75℃のヒートサイクル 133 サイクルを実施し、53.1 年相当の残存性能の確認を行い、275kV として長期的に十分な性能を有していることを検証した [28],[29],[30],[31]。

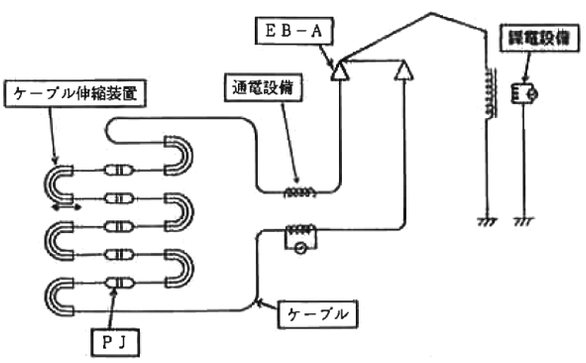


図 7.14　試験線路構成 [30]

更に大サイズ導体への PJ の適用を目指して、1995 ～ 1996 年に、東京電力、中部電力、電力中央研究所、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線、三菱電線が共同で、275kV 2500mm^2 ステンレス被 CV ケーブル用 PJ の長期課通電試験 (30 年相当 ; 課電電圧 245kV 4.8 ヶ月、90℃および 105℃のヒートサイクルを付加) を電力中央研究所横須賀研究所で実施し、長期的に十分な性能を有していることを確認した [32]。PJ の長さは図 7.15 より 100mm 長くなったが外径は変わらない。

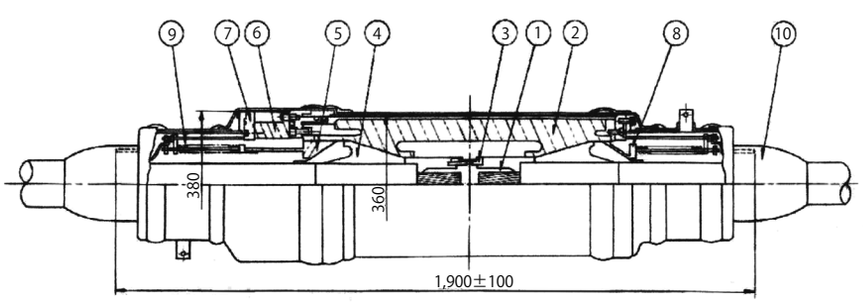
長期課通電試験の結果から、PJ は 275kV 線路用として十分な信頼性を有していることが確認され、更に 500kV 線路に対応した PJ の開発が進められた。

表 7.7　275kV ステンレス被 CV ケーブル構造表 [34]

公称電圧		kV	275
線心数		－	1
導体	公称断面積	mm²	1 500
	形状	－	分割圧縮円形
	外径	mm	46.6
内部半導電層厚さ		約 mm	2.0
絶縁体厚さ		mm	23.0
絶縁体外径		mm	96.6
外部半導電層厚さ		約 mm	1.0
クッション層厚さ		約 mm	1.0
ワイヤー径×本数		約 mm×本	2.0×8.0
押えテープ厚さ		約 mm	3.0
ステンレス被	ガタ	約 mm	0.5
	厚さ	約 mm	0.8
防食層		mm	5.0
ケーブル外径		約 mm	132
概算重量		約 kg/m	30
直流最大導体抵抗 (20℃)		Ω/km	0.0124
静電容量		μF/km	0.23
絶縁抵抗 (絶縁体) (20℃)		MΩ·km	3 000

(2)　PJ を使った長距離 275kV CV ケーブル線路の実用化

1995 年に関西電力は、大阪市内への電力供給を担う長距離地中送電線として、大阪府内の架空地点から豊中市内の小曽根変電所に至る小曽根支線 亘長



符号	部品名称	符号	部品名称
1	導体接続管	6	絶縁筒
2	エポキシユニット	7	中間フランジ
3	ユニット固定金具	8	圧縮装置A
4	プレモールド絶縁体	9	圧縮装置B
5	プレモールド絶縁体押しパイプ	10	防食処理

図 7.15　275kV PJ の構造寸法 [34]

13.8km 2回線のうち1回線(285MW)に、日本で初めてPJを使用した275kV 1500mm^2 ステンレス被CVケーブル(絶縁厚23mm)線路を実用化した。納入社は住友電工、古河電工および三菱電線である[33],[34],[35]。使用されたケーブルおよびPJは、前項の表7.7および図7.15と同じ構造である。275kV OFケーブルの絶縁接続箱1800mm ± 20 × 360mm ϕ[36]、および275kV EMJに比べて100mm程長いが実使用には問題ない。

実際のPJの組立作業に際しては、エポキシユニット、ゴムモールド絶縁体およびケーブル絶縁体表面への異物の混入を防ぐため、クリーンルームを3段階(クラス5万、クラス10万、クラス50万)に分け、必要に応じたクリーン度管理を行った。作業効率の向上とヒューマンエラーの防止を目的に、154kVでは手作業であった外導削りを機械化し、切削後の検査もCCDカメラと画像処理により自動化し、モールド絶縁体の挿入も機械化した。PJの施工日数は24日/3相でEMJの35日/3相と比較して施工日数が短縮された[33],[34]。なお、EMJ作業はモールド加熱冷却のため必ず昼夜間連続があり作業者の負担が大きいが、PJ作業は昼間のみであり作業者の負担軽減となった。

その後、関西電力は、1995年に山特線275kV 600mm^2 アルミ被CVケーブル亘長1.1km 2回線(280MW × 2)を[37]、1999年に三宮線275kV 1500mm^2 および2000mm^2 ステンレス被CVケーブルを併せて亘長7.9km 2回線(380MW × 2)[38]を実用化した。三宮線においては、外導削り機をコンパクトかつ軽量化し、図7.16に示すように専用架台を必要としない自走式外導削り機を実用化し作業時間の短縮を行った。絶縁体表面の検査方法の改善、絶縁体表面の鏡面処理の合理化を行い、施工日数は17日/3相に短縮した。EMJ施工日数で比べると約半減した。

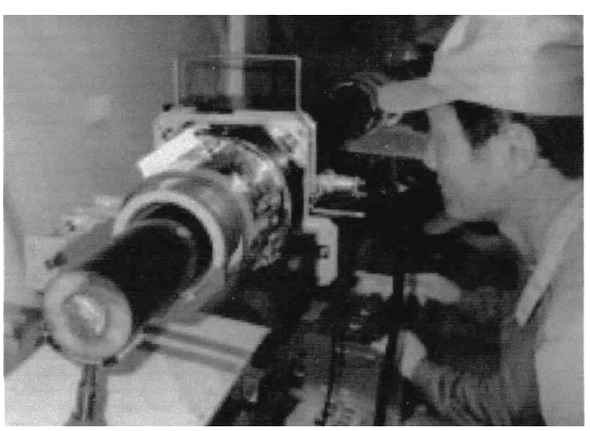


図7.16 ケーブル外導削り機[38]

7.3.3 500kV CVケーブルおよび押出しモールド型接続箱(EMJ)の開発

従来設計の延長では、500kV用にとしてケーブル絶縁厚が厚くなり過ぎ、長距離線路として実用に適さなかった。絶縁設計の原点に戻つて、原材料から製造工程までのすべてについて絶縁性能を向上させる改善が進められた。ケーブルの性能支配要因の多くは異物であることが明らかとなり、混入する有害な異物をすべて除去することにより500kV CVケーブルが完成された。EMJについても275kV用より使用電界強度も高くなり、許容される欠陥レベルも小さくする必要があり、接続作業環境のクリーン度を275kVの場合より上げ、更に光学的な検査装置など高精度に異物を検査する技術が追加して適用された。

以下にケーブルとEMJについて設計の考え方から長期性能検証までの開発の経緯を述べる。

(1) ケーブルおよびEMJの設計

500kV CVケーブルは1980年代の後半に発電所引き出し線(接続部なし)に実用化している。500kV 長距離線路建設にあたっては接続部も含めてケーブルの絶縁設計が見直された[39],[40],[41],[42],[43]。ケーブル絶縁厚はケーブルだけでなくEMJの耐電圧性能を考慮して決められた。

500kV CVケーブルの絶縁厚は、「特別高圧架橋ポリエチレンケーブル及び接続部の高電圧試験法」に定められている6.3.3(1)(a)項に記載した表6.9[44]の算出式により行われた。t(ac)に対しては最低電界強度$E_{L(ac)}$および劣化係数k_1を、t(imp)に対しては$E_{L(imp)}$を決め算出された。$E_{L(ac)}$および$E_{L(imp)}$は、表7.8に示すように製造技術の改善とケーブル欠陥レベルの低減により向上した。樹脂製造メーカーを含めた材料(絶縁材料、半導電材料)の異物管理および製造における押出しスクリーンメッシュの細密化によるボイド、異物および半導電層突起の低減による改善効果が大きい[45]。

この時期、製造された絶縁厚2～3mmのケーブルでの絶縁破壊の起点については、絶縁体中の異物が約74%、突起が26%であり、ボイドは皆無であった[40]。異物サイズの低減が$E_{L(ac)}$の向上をもたらした。

500kV級の予想される絶縁厚25～32mmの$E_{L(ac)}$は、図7.17に示す$E_{L(ac)}$の交流破壊ストレスの絶縁厚の特性から41.8～43.7kV/mmと算出され、$E_{L(ac)}$=40kV/mmとした[39],[46],[47]。$E_{L(imp)}$は、275kV CVケーブルの破壊データや$E_{L(ac)}/E_{L(imp)}$の比など既存データのレビューを行い、$E_{L(imp)}$=80kV/mmが採用された[39]。V-t特性のnの値は、6mm厚ケーブルでの試験の結

表 7.8 CV ケーブル製造技術の進歩と特性の向上例 [45]

		第 1 世 代	第 2 世 代		第 3 世 代	
					第 1 ステップ	第 2 ステップ
年 度		1975	1980	1985		1990
製造技術の改善	ボイド対策	蒸気架橋	乾 式 架 橋			
	突起対策	三層タンデム押出	三 層 同 時 押 出			
	異物対策	クリーンレベルⅠ PE	クリーンレベルⅡ PE		クリーンレベルⅢ PE	クリーンレベルⅣ PE
		スクリーンレベルA	スクリーンレベルB		スクリーンレベルC	
ケーブルの欠陥レベル	ボイド	数十μm程度	10 μm以下			
	突 起	100 μm程度	10 μm以下			
	異 物	250 μm以下	100 μm以下		70 μm以下	50 μm以下
適用ケーブル		66 kV～77 kV	154 kV	275 kV短尺	275 kV長尺 500 kV短尺	500 kV長尺
性能	$E_{L(ac)}$	20 kV／mm	30 kV／mm		35 kV／mm	40 kV／mm (注1)
	$E_{L(imp)}$	50 kV／mm	60 kV／mm		75 kV／mm	80 kV／mm (注1)

(注1) 第3世代製造設備で製造したCVケーブルの破壊データより求めた値である.

果から n=15 が得られ k_1=2.3 とした[39]。n が大きくなったのは、設備のクリーン化と精製されたコンタミフリーな材料を用いたことにより絶縁性能が改善されたためと考えられる。

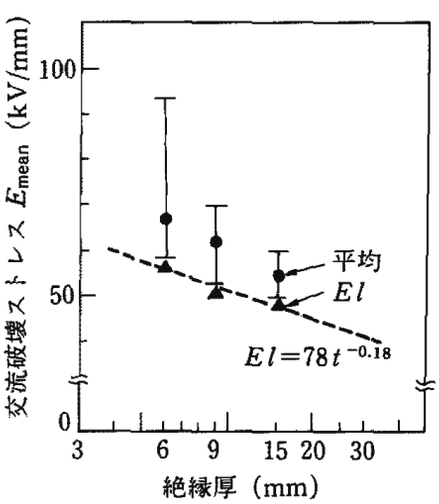


図 7.17 破壊ストレスの絶縁厚さ依存性 [39]

これらの数値から 500kV CV ケーブルの必要絶縁厚は 25mm と算出された。最終的にはケーブル絶縁厚は EMJ の絶縁性能も考慮して決められた。

500kV CV ケーブルの接続箱としては、275kV CV ケーブルの実績から EMJ が採用された。275kV CV ケーブル EMJ の電気試験における破壊点の位置は図 7.18 に示す外導処理部が 79%、インパルス破壊データの 100% が外導処理部に集中していた[39]。従って外導処理部の E_{Lmin} が設計上のネックとなるためこの部分の性能向上が図られた。破壊要因となる EMJ 外導処理部の突起レベルの低減については、架橋冷却時の温度分布改善、外導表面処理方法の改善など[45]が実施された。

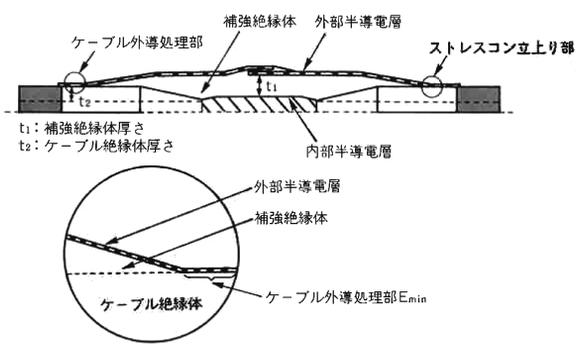


図 7.18 EMJ の基本構造 [48]

275kV EMJ での交流破壊電圧およびインパルス破壊電圧の実績値から外導処理部の E_{Lmin} が求められ、この向上率に 10% の裕度を見て $E_{Lmin\ (ac)}$=27.6kV/mm、$E_{Lmin\ (imp)}$=57.5kV/mm が採用された[41]。これらの数値から前章の表 6.9 の算出式でケーブル絶縁厚さを算出し、$E_{Lmin(ac)}$ の値から図 7.18 における t_2 = 27mm となった。EMJ の必要性能の値からケーブルの絶縁厚は 27mm となった。

EMJ 補強絶縁厚 (導体スリーブ上) は、ケーブルと同様に想定絶縁厚さ 35 ～ 45mm の E_L を求め 10% の裕度を見て、$E_{L(ac)}$ =27kV/mm および $E_{L(imp)}$=60kV/mm を採用して t_1 = 36mm とした。

ケーブルの構造を表 7.9 に示す。EMJ の構造を図 7.19 に示す。275kV CV ケーブルの絶縁厚さが 27mm であったが、ケーブル製造と EMJ の施工との技術改善

により、ほぼ同じ絶縁厚さで500kV CVケーブルが可能となった。

表7.9　500kV CVケーブル(CAZV/CSZV)の構造表[40]

公称電圧		kV	500
線心数		−	1
導体	公称断面積	mm²	2500
	形状	−	分割圧縮円形 CSZWの場合は 素線絶縁導体
	外径	mm	61.2
内部半導電層厚さ		約mm	2.5
絶縁体厚さ		mm	27.0
絶縁体外径		mm	120.2
外部半導電層厚さ		約mm	1.0
クッション層厚さ		約mm	3.0
ﾜｲﾔｰｼｰﾙﾄﾞ本数/CSZVの場合		mm	φ2.4mm×80
アルミ/ステンレス被厚		mm	3.2/0.8
防食層厚さ		mm	6.0
仕上がり外径		約mm	165
概算重量		約kg/m	45
直流最大導体抵抗(20℃		Ω/km	0.00746
最小絶縁抵抗(20℃)		MΩ•km	2500
最大静電容量		μF/km	0.27

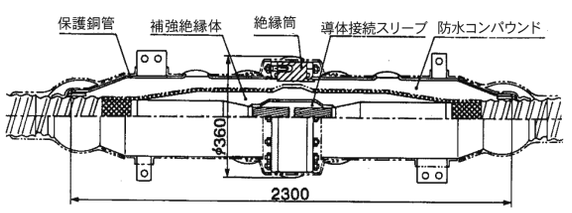


図7.19　500kV 1 × 2500mm² CVケーブル用EMJの構造寸法[41]

(2) ケーブルとEMJの品質管理

異物サイズと交流破壊電界との関係は図7.20に示すとおりであり、異物が大きくなると交流破壊電界は低下するため異物サイズの管理が最も重要である。ケーブルおよびEMJの要求品質管理値は表7.10としている。ケーブルでボイド20 μm、異物50 μm、EMJでボイド25 μm、異物70 μmとしている。これらの品質管理手法として表7.11に示す対策を施している。欠陥(ボイド、異物、突起)に対して、「入れない」「造らない」ように管理し、「入っていない」「できていない」ことを確認すると共に、万が一異物が混入した場合でも押出機のスクリーンメッシュの細密化により大きさを制限している[45]。更にバックアップする目的からケーブル押出機とEMJの押出工程については、スクリーンメッシュ通過後の溶融樹脂を光学的に検査する全量異物検査装置を取付けた。

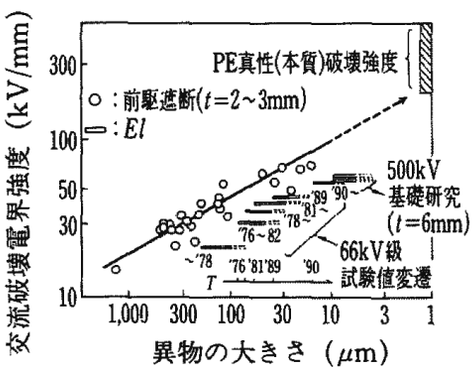


図7.20　E_L値の変遷、欠陥の大きさと交流破壊強度[39]

表7.10　500kV CVケーブルおよびEMJの要求品質管理値[48]

性能支配因子	要求品質管理値	
	ケーブル	EMJ
異物・突起	50μm	70μm
ボイド	20μm	25μm

表7.11　500KV CVケーブルおよびEMJの欠陥管理項目と品質保証方法[48]

管理項目		保証方法	
		ケーブル	EMJ
異物	入れない	スクリーンメッシュによるフィルタリングの強化	
	入っていない	全量樹脂検査 サンプルスライス検査	全量樹脂検査＋表面検査 (CCD／平行光線検査)＋X線検査
ボイド	造らない	架橋時のプロセス管理	
	できていない	サンプルスライス検査	──
突起	造らない	スクリーンメッシュによるフィルタリング，3層同時押出し	内・外導処理方法
	できていない	サンプルスライス検査	表面検査(CCD／平行光線検査)

EMJのケーブルおよびジョイント表面の付着異物についてはCCD検査ならびに平行線検査を実施し、架橋後にはX線検査を実施し、最終的に管理値以上の異物が入らないことを確認している。異物混入に対する対策を最大限実施している。

ケーブルおよびEMJの異物サイズの実測値の例を図7.21および図7.22に示す。これらの結果から統計的手法で正規分布に従うという仮定に基づき算出すると、ケーブルの最大想定異物サイズは24 μm[40]、EMJの最大想定異物サイズは30 μm[41]と推定され、500kV CVケーブルでの許容異物レベル50 μm、EMJの許容異物レベル70 μmに比べ十分小さいものである。これらのケーブル製造およびEMJ施工における品質管理が500kV CVケーブルの実現にはなくてはならない技術であった。

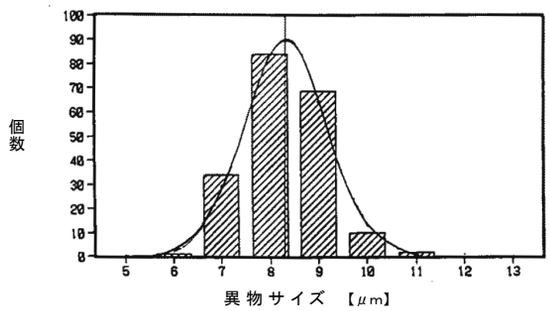


図 7.21　ケーブルスライス片の最大異物分布 [40]

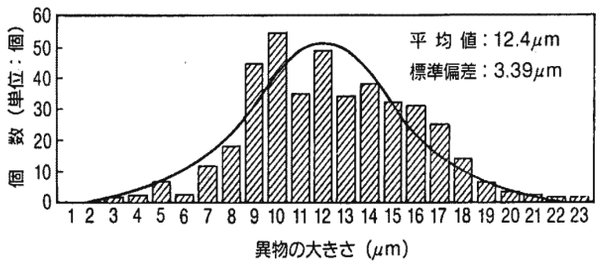


図 7.22　EMJ の最大異物の大きさの分布 [41]

(3) 初期性能試験結果と長期課通電試験結果

設計されたケーブルおよび EMJ について、各社にて試作を行い、各種の性能評価試験、長期課通電試験が実施された [48),(49),(50),(51),(52)]。

500kV CV ケーブルの要求性能耐電圧試験条件はすべて満足し、表 7.12 示すようにケーブルおよび EMJ の初期性能および残存性能電気試験結果からも、ケーブルの最低破壊電界強度 $E_{L(ac)}$ と $E_{L(imp)}$、EMJ 外導処理部の $E_{Lmin(ac)}$ と $E_{Lmin(imp)}$、および EMJ 補強絶縁部の $E_{L(ac)}$ と $E_{L(imp)}$ を充分満足している。

表 7.12 500kV CV ケーブル開発試験の電気試験結果 [41]

		A社	B社	C社	D社
要求性能耐電圧特性試験［ｹｰﾌﾞﾙ+EMJ］		良好	良好	良好	良好
最低絶縁破壊強度特性試験［ｹｰﾌﾞﾙ］	AC	1195kV 良	1195kV 良	1200kV 良	1380kV 良
	Imp	2660kV 良	2460kV 良	2860kV 良	2660kV 良
長期課通電試験［ｹｰﾌﾞﾙ+EMJ］		異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
同上残存性能試験［ｹｰﾌﾞﾙ+EMJ］	AC	1195kV 良	1195kV 良	1200kV 良	1380kV 良
	Imp	2660kV 良	2560kV 良	2760kV 良	2660kV 良

開発の最終段階として、東京電力、関西電力、中部電力、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線との共同で、電力中央研究所横須賀研究所構内に実線路を模擬した試験線路を構築し、長期課通電試験を実施した。試験線路を図 7.23 に示す。500 k V 2500mm^2 アルミ被 CV ケーブル (CAZV) およびステンレス被 CV ケーブル (CSZV) の 2 ループ (各ループ 500m) で構成され、各ループは 4 区間で構成され、各区間の中央に EMJ が設けている。

長期課通電試験は 1994 年 3 月に開始して、同年 12 月に終了した。長期課通電試験の実績は、課電時間 246 日 (5918 時間)、等価劣化年数 30.2 年 (V-t 特性の n=15 換算) である [48]。ヒートサイクル条件は常時許容最高温度 90℃ をベースとして更に 105℃ のヒートサイクルを実施した。試験期間中定期的に部分放電試験、tan δ 測定を実施し、各線路とも経時的にも大きな変化がなく安定した特性を有していることを確認した。

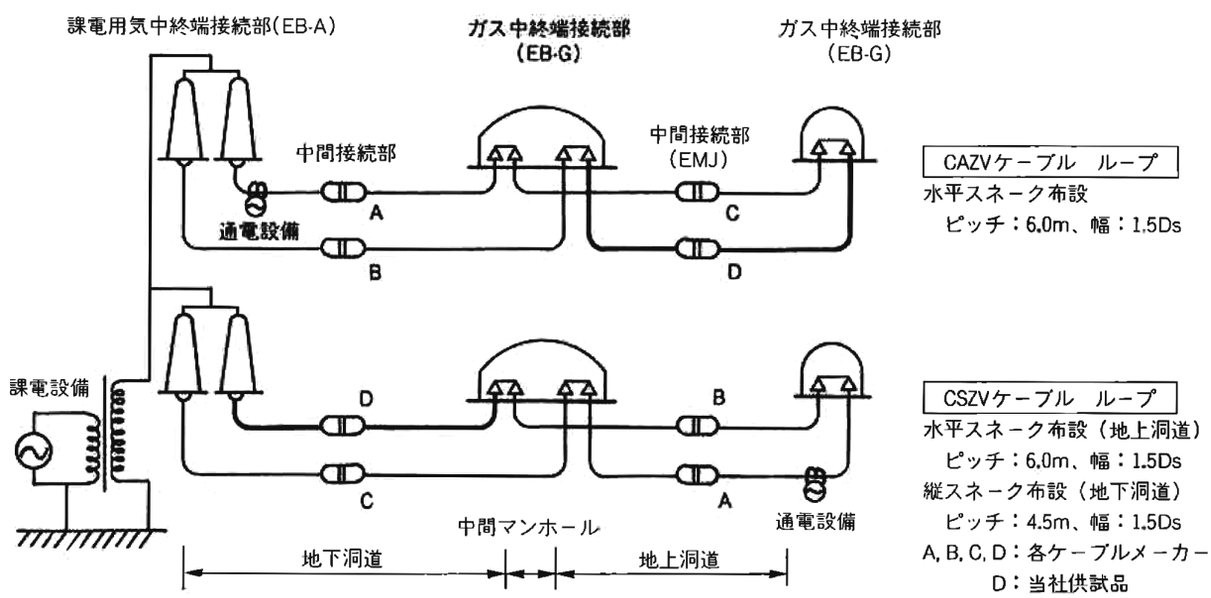


図 7.23　長期課通電試験線路構成 [48]

系統に発生する過電圧に耐えることを検証するため、長期試験を終了したEMJを含むケーブルに電気試験(AC,Imp, 開閉サージ)を実施し問題ないことを確認した[48]。500kV 系統電圧条件に十分な信頼性を有することを確認した。

(4) 500kV 半合成紙 OF ケーブルとのサイズ比較

500kV 半合成紙アルミ被 OF ケーブルのケーブル外径153mm、重量46kg/m[53]と比較して、500kV CV ケーブル(表7.9参照)は、重量ではほぼ同じであるが外径は165mmと12mm大きい。これは絶縁厚さ増とアルミ被とケーブルコアとの間のクッション層の厚さ増による。ケーブルの機械的取扱いという面ではOFケーブルとほぼ同等であり、給油タンクを使用しない分取り扱い性は優れている。

EMJの長さ(図7.19参照)は、500kV 半合成紙アルミ被 OF ケーブルの絶縁接続箱　2700mm × 360mm ϕ[53]に比べ約400mm短くなっている。これは、OFケーブルの接続部と異なり補強絶縁体とケーブル絶縁体の界面が完全融着しているため、OF ケーブルのようにこの界面の沿層の電界強度の低下がないためである。

7.3.4　500kV CV ケーブル用プレハブ型接続箱 (PJ) の開発

500kV EMJ の施工時間の短縮を狙って、500kV PJ の開発が関西電力、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線の5社共同で進められた[54]。関西電力山崎実験センターにおいて、約350mの長期課通電試験線路が建設された。500kV 3000mm^2 ステンレス被 CV ケーブル(絶縁厚27mm、ケーブル外径174mm)および各社のPJ 4相が供試され、表7.13に示す条件で長期課通電試験が行われ、2001年8月に開始し2002年に3月に完了した[55],[56]。500kV PJ は30年相当以上の寿命を有していることを確認した。表7.14に示すように外径は僅かに大きくなるが、作業性が容易で、EMJのように作業者の技能も必要なく、PJの施工日数は24日/3相とEMJの場合に比べ約55%に短縮した。500kV 半合成紙アルミ被 OF ケーブルの絶縁接続箱　2700mm × 360mm ϕ、油止め接続箱3500mm × 530mm ϕ[53]と比較してもコンパクト化が図られている。

表 7.13　長期性能試験条件および結果[55]

項目		条件	結果
最高導体温度90℃	電圧	420kV	良好
	ヒートサイクル	150回 (8時間ON、16時間OFF)	
最高導体温度105℃	電圧	420kV	良好
	ヒートサイクル	30回 (8時間ON 16時間OFF)	

表 7.14　500kV EMJ と PJ との比較[55]

	EMJ	PJ (初期性能確認済)
全長×外径 [mm]	2,300× ϕ360	2,300× ϕ390
重量	約　300kg	約　500kg
接続作業日数例	43日/3相 昼夜連続作業有り	24日/3相 昼または夜作業のみ
作業性	高度なスキル要	EMJに比べ容易

500kV 用PJを使用した線路はまだ日本では実用化されていないが、世界初のPJを使用した500kV CV ケーブル線路として、(株)ビスキャスが2010年に中国上海市電力向け万博送電線プロジェクトに500kV 2500mm^2 アルミ被CV ケーブル52km、PJ 78相を納入した[57]。500kV PJ の構造を図7.24に示す。海外を中心として今後更に500kV CV ケーブル用PJの適用が拡大されると考えられる。

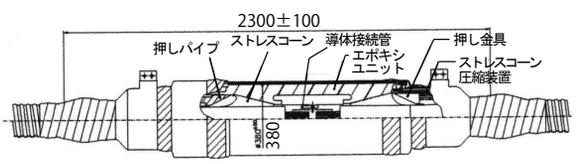


図 7.24　500kV PJ の構造[57]

7.3.5　新豊洲線 500kV　CV ケーブル線路

東京電力は7.3.3項の研究開発の成果を踏まえ、東京都心部の電力の長期安定供給を図るため500kV 外輪線拠点の新京葉変電所から都心部の新豊洲変電所に直接導入する線路として、大容量の500kV 新豊洲線亘長39.8km 2回線(900MMW × 2、最終1200MW × 2)を建設した。1996年に工事を開始し2000年に運開した。納入社は住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線である[58],[59],[60],[61],[62]。ケーブルは表7.15に示す構造の500kV 2500mm^2 アルミ被CV ケーブル(最小絶縁厚27mm)である。ルート概要は図7.25に示す通りで、新京葉変電所から県道などを経由して湾岸部に至り、国道沿いに都内に入り、新豊洲変電所至る線路である。東京湾岸に隣接しており、長尺ケーブルの海上輸送が可能な箇所があり、従来のケーブル運搬長より長尺化した1200 ～ 1800mのケーブルを製造し輸送した。

ケーブル製造については、絶縁性能の支配因子である欠陥(ボイド、異物、突起)をコントロールするため表7.16に示す品質管理を実施している[59]。特に異物については、原材料および製造ラインの異物管理強化、押出機のスクリーンメッシュの細密化と全量異物検査装置を設置し、管理値以上の異物が混入しないようにしている。長尺ケーブルの製造に対しては、架橋

工程における押出条件の精密制御を行い、長時間連続押出しを実現した。一部区間に素絶絶縁導体が使用されている[60]。

表 7.15　500kV CV ケーブル構造[59]

公称電圧		kV	500
導体	公称断面積	mm^2	2,500
	形状	−	分割圧縮円形
	外径	mm	61.2
内部半導電層厚さ		約mm	2.5
絶縁体厚さ		mm	最小27.0
絶縁体外径		mm	120.2
外部半導電層厚さ		約mm	1.0
クッション層厚さ		約mm	3.0
波付きアルミ被厚さ		約mm	3.2
防食層厚さ		mm	6.0
仕上がり外径		約mm	162
概算重量		約kg/m	41

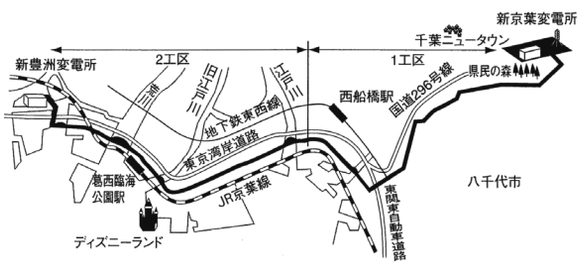


図 7.25　　新豊洲線ルート概要[60]

表 7.16　500kV CV ケーブルの欠陥管理項目と品質保証方法[59]

管理項目		保証方法
異物	管理手法	スクリーンメッシュによるフィルタリングの強化
	検査手法	全量樹脂検査，サンプルスライス検査
ボイド	管理手法	架橋時のプロセス管理 (温度，圧力などの製造条件)
	検査手法	サンプルスライス検査
突起	管理手法	スクリーンメッシュによるフィルタリング強化
	検査手法	サンプルスライス検査

EMJ については、開発段階より更に新技術を導入している。施工面では、自動ペンシリング機の導入により、信頼性の向上と施工時間の短縮、また検査精度の向上の面ではマイクロフォーカス X 線検査装置とイメージングプレートを組合せた高精度の X 線検査装置を適用した[59]。X 線検査で金属異物は検出可能であるが、繊維異物の検出は不可能であり、注入樹脂全量異物検査装置を導入した。

ケーブル製造および EMJ 施工時に取付けられた全量異物検査装置は、押出機と金型とを結ぶ樹脂流路に設けられたウィンドウセクションを流れる樹脂に高輝度の光あるいはレーザー光を照射して異物を検出して判定を行うものである[59],[60]。この装置により有害な繊維異物の検出も可能となった。

以上のミクロンオーダーの異物を入れない、および監視する技術が、ケーブルおよび EMJ に適用され、世界に例を見ない 500kV CV ケーブル線路の完成に貢献したものと言える。

布設ルートは、洞道、共同溝、橋梁添架管路、専用橋と多岐にわたり、長尺ケーブル布設のため新たな施工技術が導入された。

船橋内陸部ルートは洞道であり、東京湾に接していることを利用して、つば径 4.25m、外幅 8.55m、総重量 92.5 トンの横型ドラムを海上輸送とし長尺化を果たした。ケーブル引き入れは、図 7.26 に示すように船橋市の日の出埠頭から行われた。陸揚げした地点から洞道内に直接引き入れるケーブル搬送工法が適用された。この工法は駆動装置(ツインプーリ、磁気ベルト)により、ケーブルを載せた搬送台車を前方へ送り出し、洞道内のレール上を走行させるもので、引入れ速度は従来の 4 倍を越え、引入れ日数の短縮に貢献した。管路部については、低摩擦管工法としてシリコン油を含浸させた摩擦係数の低い管路を利用することで引入れ速度の向上を図った[59]。

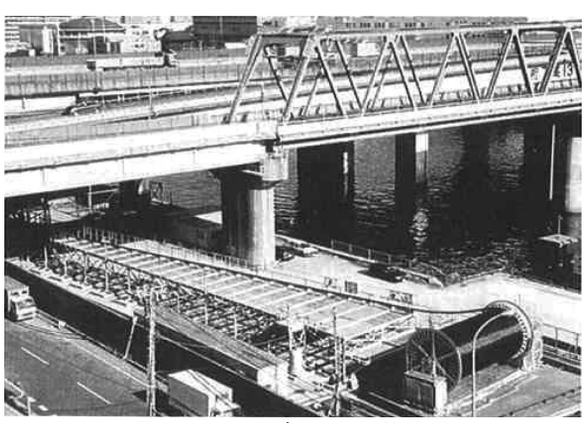


図 7.26　ケーブル引入れ状況[59]

湾岸ルートについては、橋梁添架管路と洞道が混在しているため搬送工法は適用できない。同様に海上輸送を実施し、陸揚げ地点からドラム幅を長くした横型ドラムを特殊トレーラーで布設場所まで輸送した。道路占有面積を最小限にするため、横型ドラムを道路長手方向に配置して、図 7.27 に示すように引入れ方向の向きを変えて、使用面積が最小となるトラバース台車工法を採用した[60]。

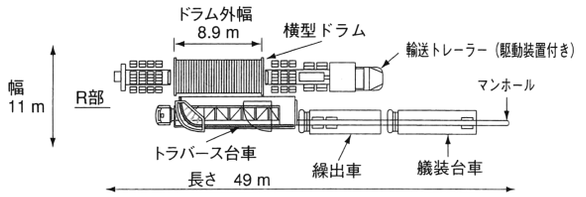


図 7.27 トラバース台車工法 占有スペース [60]

新豊洲線の竣工試験は 2000 年 11 月に完了し、運開した。竣工試験では、「交流過電圧に対する保証」と「初期故障の原因となる欠陥のスクリーニング」を目的として部分放電試験を実施している。表 7.17 に部分放電試験条件を示す。$1.1E_0$(352kV) × 1 時間、$1.0E_0$(318kV) × 168 時間と各相 7 日間に及ぶ部分放電の連続測定を 2 回線の 6 条について実施した。部分放電測定精度を向上させるため、全接続箱を絶縁接続箱化している。測定方式は、絶縁接続箱 (IJ) の絶縁筒の両側ビニルシース上に一対の金属箔電極を密着させ検出する方式で、275kV 長距離 CV ケーブル線路で実績を積み重ねた方式である。1 工区で 2.4PC 以上 [61]、2 工区で 1pC 以上 [62] の部分放電が発生していないことを確認し、線路の健全性を確認した。

表 7.17 部分放電試験条件 [59]

対象欠陥	外傷性欠陥	1.0E×82h
	スジ状ボイド	1.0E×3h
	扁平・外導界面ボイド	1.1E×1h
	水ボイドトンネル	1.0E×168h
部分放電試験条件		1.1E（352kV）×1h ＋1.0E（318kV）×168h

7.4 直流 500kV 半合成紙絶縁海底 OF ケーブル

関西方面での電力需要増加に対応する新しい電源として徳島県阿南市に新設する電源開発の橘湾火力 (出力 1050MW × 2 台) で発電した電力のうち、1400MW を関西系統へ送電するにあたって、紀伊水道を横断する直流送電設備が導入されることになった。当初、1400MW、将来 2800MW に拡張されることを考慮して建設された [63]。図 7.28 に示す直流送電線は、四国側の阿南変換所から紀伊半島側の由良開閉所までが海底ケーブルで由良開閉所から関西側の紀北変換所までが架空線で構成されている。

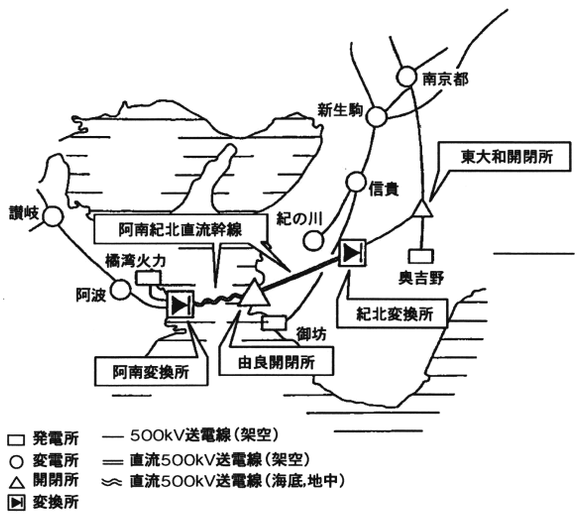


図 7.28 紀伊水道直流連系線ルート [73]

7.4.1 直流 500kV 半合成紙絶縁海底 OF ケーブルの開発

5.4 項に述べたように 1970 年代に直流 ± 500kV 1000mm^2 海底 OF ケーブル (1000MW) が、高密度・高気密度クラフト紙を使用して開発されていた [64]。しかし紀伊水道横断海底ケーブルは直流 1 回線双極方式で 2800MW の送電を目標としており、1 条あたり 2800A という大電流ケーブルが必要であり、その開発が必要となった。このため、1992 年から、直流 500KV 3000mm^2 PPLP 絶縁 OF ケーブルおよび同付属品の開発を関西電力 (株)、電源開発 (株)、四国電力 (株)、電力中央研究所、ならびに電線メーカー 4 社 (住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線) の共同研究で行った [65]。図 7.29 に示すように　直流使用電圧、送電容量、導体サイズとも世界的に実績を超えたケーブルである。

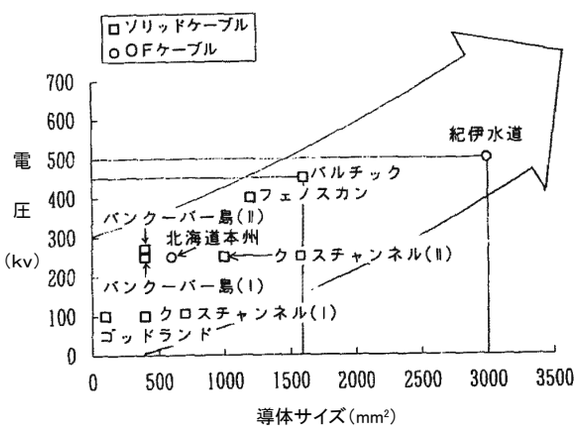


図 7.29 直流ケーブルの電圧と導体サイズの変遷 [65]

従来のクラフト紙よりも高い交流、直流およびインパルス破壊強度を持ち[66),67)]、かつ海底ケーブルの絶縁紙として要求される機械強度の強いPPLPを採用して、絶縁厚の低減と大容量化を図った。シート試験、モデルケーブル、ミニチュアケーブル、プロトタイプケーブルを段階的に試作評価し、その試験結果から、設計ストレスが求められ、要求耐電圧から必要絶縁厚が求められた。

PPLPはクラフト紙に比べインパルス破壊特性は高いが正負の極性差が大きく、正極性の耐電圧特性を改善する必要があった。図7.30に示すようにクラフト紙をPPLP絶縁層の内側に5枚入れた試験を実施し、正極性インパルスの改善が図られた[68]。クラフト紙はPPLPの内外の遮蔽層との間に0.5mm巻かれている。

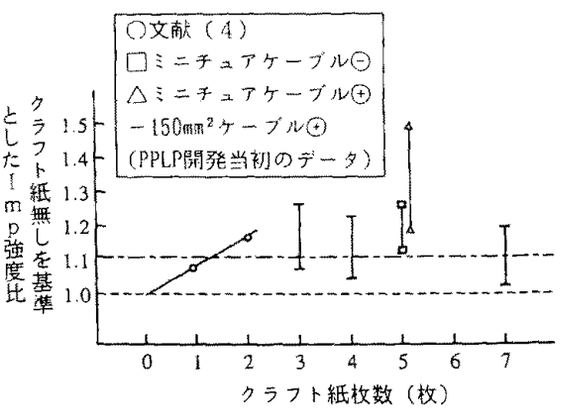


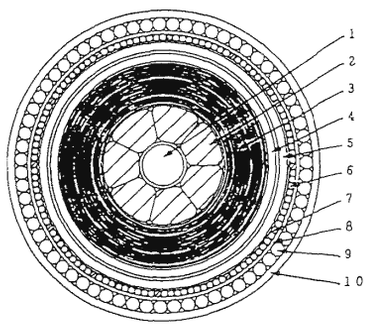
図7.30　クラフト紙の挿入効果[65]

線路の異常時耐電圧値については、交直変換器の制御異常時に発生する「インバータゲートブロック(電流断、本線地絡)」が絶縁設計上最も過酷な条件となり、これを検討して1375kVとした[65]。表7.18に示すようにこの要求耐電圧値から20.5mmの絶縁厚が決められた。海底ケーブルの絶縁厚は、機械的保護としてクラフト紙2.0mmを追加し、22.5mmとした。外側遮蔽側のクラフト紙厚は2.5mmである。海底ケーブルの構造を図7.31に示す。すべてクラフト紙の場合の絶縁厚は27ｍｍであり[68]コンパクト化が図られている。ケーブル外径が190mm、重量が100kg/mと世界で例を見ない大サイズケーブルである。

表7.18　各設計因子に対する設計ストレスと必要絶縁厚[65]

設計因子	要求耐電圧	設計ストレス	必要絶縁厚
直流電圧	500kV	45kV/mm (160kV/mm)*2	13.5mm*3
極性反転電圧	±750kV*1	85kV/mm (103kV/mm)*2	12.5mm*3
直流インパルス重畳	1375kV	85kV/mm (102kV/mm)*2	20.5mm*3

*1 CIGRE推奨試験[9]に準じた極性反転電圧
*2 平均破壊ストレス
*3 クラフト紙層を含む必要絶縁厚



1．油通路（Φ25mm）
2．導体（7分割3000mm²）
3．絶縁体（t＝22.5mm）
　クラフト氏：0.5mm
　ＰＰＰＬＰ：19.5mm
　クラフト紙：2.5mm
4．鉛被
5．ポリエチレン防食層
6．光ファイバユニット用スペーサ
7．光ファイバユニット
8．座しょう層
9．鉄線がい装
10．サービング層

外径：約１９０mm
重量：約100ｋｇ/m

図7.31　海底ケーブル構造図[65]

ケーブルおよび工場接続箱、陸上ケーブル、各種接続部を含む線路を組立て、CIGRE推奨案[69]に準じた機械・電気試験を実施した。実際の布設時に受ける機械履歴を加え、引き続き負荷サイクル試験を実施し、試験終了後インパルス破壊試験を実施し、設計値に対して充分な裕度のあることを確認した。更に関西電力総合研究所山崎実験センターにて約500mの実規模試験線路を構築して、表7.19に示すように40年相当の電圧および熱的加速劣化条件を満たす長期課通電試験を1年6ヶ月かけて実施した[70]。1994年10月から開始し1996年3月に無事終了し、ケーブルおよび接続箱などは直流500kV用として十分な実用性能をもつことが確認された。

表7.19　長期性能確認試験条件[68]

試験項目	目　的	試　験　条　件
長期課通電試験	40年に相当する寿命の検証	[電圧] 550kV,600kV,650kV×計10カ月 (1.1E)(1.2E)(1.3E) [温度] 85℃,95℃,105℃×計11カ月
ヒートサイクル試験	電流オン・オフ時の電気・機械特性の検証	[電流]直流2,800A相当 [回数] 24Hオン・24Hオフ×40回
極性反転試験	極性反転時の電気特性の検証	[電圧] +500kV　−500kV [回数] 120回
過負荷試験	過負荷送電時の電気・機械特性の検証	[電流]直流3,500A相当 [時間] 30分×10回

7.4.2　紀伊水道横断直流± 500kV 海底 OF ケーブル

住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線の 4 社は、題記ケーブルの製造と据付に関する共同企業体を設立し、本プロジェクトを遂行した[71),(72),(73),(74)]。布設ルートを図 7.32 に示す。直流 500kV 3000mm^2 PPLP 絶縁海底 OF ケーブルの構造を図 7.33 に示す。防食層と鉄線の間に、12 心 (通信線 6 心、外傷センサ 2 心、温度センサ 2 心、ポンピングプラント制御および保守情報の連絡用 2 心) の光ファイバを複合した。

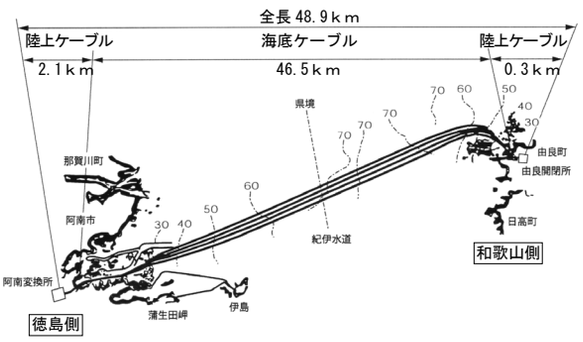


図 7.32　海底ケーブルのルート概要 [73]

図 7.33　　海底ケーブル写真 [73]

ケーブルの送電容量が大きく、46.5km に及ぶ長距離ケーブルであるため、負荷変動に伴う油量変化が 1 条あたり約 14.7kL と大きいためポンピングプラントが由良側、阿南側に設置された。漏油の早期発見を目的として油量監視システムを導入している。この特徴は、ケーブルに複合化された温度センサ光ファイバによるケーブル温度と直流用光 CT の負荷電流情報を基に油量および流量の実測値との比較を行うもので、従来の方式に比べて漏油量の感知精度は 1/10 となっている[73]。ポンピングプラントおよび漏油監視システムはフジクラが納入した。

布設された海底ケーブル 4 条は、上記 4 社が分担し、約 1.5 ～ 2 年をかけて製造された。住友電工、古河電工、日立電線は 46.5km の中に FJ を入れて製造されたが[71),(72),(74)]、フジクラは 46.5 ｋｍ一連長で製造している[73]。一連長で長尺の OF ケーブルを作るため、鉛被を約 1 ヶ月に渡って連続で押出を続ける必要があり、技術的な検証、設備の強化を実施し、製造を行った。また、設備面では紙巻後の約 2500 トンに耐える直径 20m 級の乾燥含浸缶と各工程でケーブルコアを巻き取る載荷荷重数千トンのターンテーブルが複数設置され、最終鎧装工程ではケーブル重量約 5000 トンに耐えるターンテーブルが設置された。ケーブルのターンテーブルへの巻取り状況を図 7.34 に示す。鎧装後の約 48km のケーブルの出荷試験は直流耐圧試験直流 − 1000kV × 15 分を含む試験が行われた。

図 7.34　ケーブル巻取り状況 (48km)[75]

陸上ケーブルは住友電工が納入した。

ケーブル布設工事は 4 社の共同企業体により施工された。海底ケーブル布設工事に際しては、1993 ～ 1997 年の間に調査船から音波センサなどを使用して海底調査を実施し、ケーブルルートを決定した[71]。埋設工事中の残存機雷に対する安全対策として、大型磁気センサ、水中ロボットを用いた磁気探査工法を適用し調査した。

1998 年 4 月から実施された布設工事は、ケーブルにより海底に露出している時間をなくし、工事中の外傷事故を少なくするため、図 7.35 に示すように布設船により埋設機を牽引しながらケーブルを繰り出し布設し、同時にケーブルを埋設する同時布設埋設工法を開発し実施した。布設船は、ケーブル布設位置の精度を高めるため 5 組のスクリューを自在に制御して航位位置を高精度に保ち、自動航行装置 DPS(Dynamic Positioning System) を有する布設専用船ジュリオベルネ号 (イタリア船籍　10,000 トン) を使用し、± 5m の精度で布設した。埋設機は、工事中の海上交通や漁業への影響を極力低減するため、ウォータージェット付加型鋤式埋設機を開発し、従来工法と比較して約

1/3 の工期短縮となり、紀伊水道の横断を 2 昼夜で布設することができた[73]。

海底ケーブルの布設は徳島側沖合での浅海の約 5km の布設には布設専用船が使用できないため、ターンテーブルを掲載した布設台船を使用した。新たにウォータージェット埋設機を適用し複雑な海底地形へも連続敷設埋設でき、掘削不可能な岩盤部では新たな岩盤掘削機を適用し従来法に比べて工事期間を低減した[73]。1998 年 12 月に 4 条の布設工事は完了した。1999 年 8 月に直流 − 700kV15 分の耐圧試験が終了し[74]、2000 年 6 月に ± 250kV 1400MW で運開している[63]。

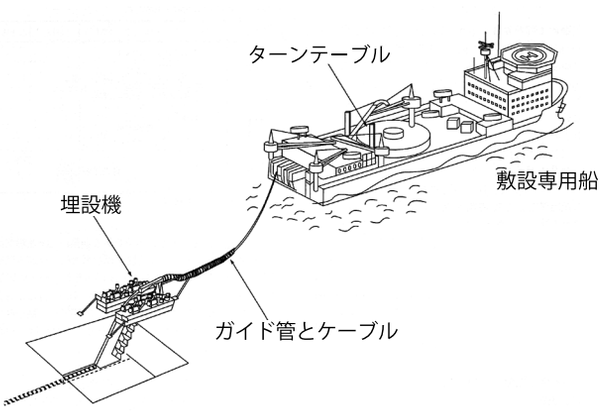


図 7.35　海底ケーブル敷設概要図[71]

7.5 まとめ

1980 年代で築いた日本独自の技術をベースに、更に新技術を開発し世界トップレベルのケーブル線路を完成した。概要を以下に述べる。

(1) 500kV PPLP 絶縁アルミ被 OF ケーブル

1994 年に本州四国連系線として 500kV PPLP 絶縁アルミ被 OF ケーブル を使用した 1 回線あたり 1200MW の線路が実用化された。橋梁添架するため長大オフセットによる伸縮吸収装置などの特殊な装置を開発し、世界で初めて長大橋梁添架 500kV OF ケーブル線路を完成した。PPLP の PP 分率を約 60% と高めて、275kV 半合成紙ケーブルに比べ $\varepsilon \times \tan\delta$ の値が約 2/3 となる世界トップの低損失の半合成紙を実用化した。

(2) 直流 500kV PPLP 絶縁海底 OF ケーブル

1999 年に紀伊水道横断海底ケーブルとして直流 ± 500kV 3000mm^2 PPLP 絶縁海底 OF ケーブルが実用化された。日本で築かれた直流ケーブル技術と半合成紙技術の集大成により完成されたものであり、世界で初めての長距離大容量 500kV 海底 OF ケーブル線路である。ケーブル製造面では、世界に類のない 48km の一連長製造など長尺海底 OF ケーブル製造技術を完成した。海底布設工事では、ケーブルを布設しながら同時に埋設する同時布設埋設工法など新規の工法を実用化した。

(3) 275kV POF ケーブル

1998 年に素線絶縁分割導体と半合成紙を使用した 1 回線あたり 900MW の大容量 275kV POF ケーブルが実用化された。世界でトップの大電流 POF ケーブル線路である。この素線絶縁分割導体技術は 275kV CV ケーブルにも使用された。これは世界で初めての技術であり、275kV 以上ケーブルの大容量化に貢献した。

(4) 275kV CV ケーブル

更なる CV ケーブルの大容量化のため 1993 年に素線絶縁分割導体およびステンレス被を採用し、EMJ を使用した長距離の武平町線 (南ルート)275kV CV ケーブル線路が完成した。これらは CV ケーブルとして世界で例のない低損失化技術である。

竣工試験として、ケーブルの静電容量分を補償するため可変微調整型リアクトルを設置して、世界で初めて 275kV CV ケーブル長距離線路の交流耐電圧試験を実施した。同時に全線路の絶縁接続箱で部分放電の同時測定を実施し、線路の健全性を確認した。これらは長距離 CV ケーブル線路での世界で初の試みであり、日本における超高圧 CV ケーブルの高信頼度化の要求から生み出された技術である。

2002 年に川越西名古屋線 275kV CV ケーブル線路では、特殊なコンテナを使用して海上運搬を行い、世界で最長の 2500m 一連長ケーブルの布設を実施し、接続箱の数を削減し工期の短縮とコストダウンを図った。長時間連続絶縁押出の改善により長尺ケーブルの製造が可能となったことによる。

EMJ の欠点を改善するものとしてプレハブ型接続箱 (PJ) が開発された。1995 年に PJ を使用した小曽根線支線 275kV ステンレス被 CV ケーブル線路が実用化した。その後 PJ が 275kV 長距離線路に使用された。これらの実用化は、PJ の絶縁部品として使用されるエポキシ注型品とゴムモールド品についての欠陥を造らないためのクリーン化製造技術と検査技術の向上がベースなっている。

(5) 500kV CV ケーブル

2000 年に EMJ を使用した新豊洲線 500kV アルミ被 CV ケーブル線路が建設された。ケーブル製造については、架橋ポリエチレン絶縁体中における数十μmレベルの異物混入の絶縁性能への悪影響を明らかにし、原材料および製造ラインの異物管理強化などクリーン化により有害な異物をすべて除去することを進めた。更にケーブル長手方向にわたって一切欠陥を造らないという品質管理が必要であり、ケーブル製造の押出機にスクリーンメッシュの細密化と全量異物検査装置を設置した。これらにより絶縁性能の改善がなされ、世界で例のない 500kV での高電界での使用が可能となった。

EMJ の施工に際しては、全量異物検査装置を取り付けると共に作業環境のクリーン度を上げ、光学的な検査装置、X 線装置など高精度に異物を検査する技術を導入した。

竣工試験として交流耐電圧試験 ($1.1E_0$) を実施し、併せて部分放電試験を実施し、線路の健全性を確認した。新豊洲線は世界初めての長距離 500kV CV ケーブル線路であり、日本のケーブル製造技術と接続箱施工技術の集大成のものであり世界トップの技術である。

日本では PJ を使用した 500kV CV ケーブル線路はまだ建設されていないが、2010 年に中国上海市電力向け万博送電線に日本独自の PJ を使用した 500kV CV ケーブル線路が実用化された。海外を中心に今後 PJ の適用が拡大すると考えられる。

上記 (1) から (5) について、高信頼度の長距離線路建設のため、製造設備の増強、施工体制の強化に重点をおいて実用化を推進した。いずれの品種についても、ケーブル、付属品およびその周辺の製品に関して、製造から工事まで線路システムとして日本独自の世界に先んじた技術が確立された。

引用参考文献

(1) 前川 : 電力技術のイノベーション (23)「大規模橋梁添架の 500kV ケーブルの実現」電学論 B, 129 巻 10 号 , p1170 (2009)

(2) 田中ほか :「本四連系線 500kV OF ケーブル橋梁区間工事の完成」古河電工時報 第 82 号 p21 (1988)

(3) 渡部ほか :「本州―四国連系瀬戸大橋添架長距離 500kV OF ケーブル線路」日立電線 No.15 p89 (1996)

(4) 緒方ほか :「500kV PPLP 絶縁 OF ケーブルの本四連系線瀬戸大橋添架工事の完成」住友電気 第 134 号 p147 (1989)

(5) 藤井ほか :「電源開発株式会社本四連系線 500kV OF ケーブル」フジクラ技報 第 87 号 p107 (1994)

(6) 松下ほか :「本四連系線 500kV OF ケーブル工事」昭和電線電纜レビュー p118 (1994)

(7) 緒方ほか :「本四連系線用半合成紙絶縁 OF ケーブルの開発」昭和電線電纜レビュー Vol.37,No.1 p61 (1987)

(8) 水口ほか :「大鳴戸橋添架 187kV CV ケーブル線路の完成」住友電気 第 129 号 p145 (1986)

(9) 藤井 :「大鳴戸橋添架の 187kV CV ケーブル布設・接続技術」電学誌 107 巻 第 4 号 p293 (1987)

(10) 技術トピックス「本四連系線 500kV OF ケーブル増設工事」フジクラ技報 第 96 号 p61 (1999 年)

(11) 土屋ほか :「275kV 半合成紙絶縁 POF ケーブルの開発 (長期実証試験結果)」平成 5 年電気学会全国大会 12-14, (1993)

(12) 土屋ほか :「275kVPOF/CV 異種接続部の開発 (その 2, 長期実証試験結果)」平成 6 年電気学会全国大会 12-32 , (1994)

(13) 技術トピックス「275kV 半合成紙絶縁パイプ型 OF ケーブル布設」フジクラ技報 第 88 号 p65 (1995)

(14) 上野ほか :「中部電力株式会社知多火力連系線 275kV POF ケーブル」フジクラ技報 第 66 号 p63 (1983)

(15) 石原ほか :「中部電力株式会社知多火力連系線 3 号線 275kV POF ケーブル増設工事」フジクラ技報 第 94 号 p37 (1998)

(16) 飯沼ほか :「改良型半合成紙の開発」平成 10 年電気学会全国大会 1743 7-273 , (1998)

(17) 斎藤、武 : 電気絶縁紙 コロナ社 p210 (1969)

(18) 市原ほか :「中部電力株式会社南ルート大容量 275kV CV ケーブルの線路の完成」フジクラ技報 第 86 号 p59 (1994)

(19) 市原ほか :「中部電力南ルート 275kV CSZV ケーブルシステムの開発」住友電気 第 138 号 p45 (1991)

(20) 高岡ほか :「素線絶縁分割導体の開発」藤倉電線技報 第 67 号 p17 (1984)

(21) H. Ohta et al.: “Application of Advanced After-Laying Test to Long-Distance 275kV XLPE

Cable Lines" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.2, p567 (April 1995)
(22) 勝田ほか:「超高圧長尺 CV ケーブル線路の活線部分放電検出法の開発」電学論 B 111 巻 11 号 p1223 (1991)
(23) 五味ほか:「275kV CV ケーブルの長尺線路の完成―中部電力 (株) 東海松ヶ枝線―」フジクラ技報 第 95 号 p37 (1998)
(24) 中野ほか:「275kV CV ケーブルの長尺線路の完成―中部電力 (株) 海部松ヶ枝線―」フジクラ技報第 97 号 p33 (1999)
(25) 中野ほか:「中部電力 (株) 海部松ヶ枝線 275kV CSZV ケーブル工事」日立電線 No.19 p19 (2000)
(26) 川井:「大規模地中送電線路建設の最新技術 275kV 川越西名古屋線新設工事」エネルギー 34(11) p59 (2001.11)
(27) 吉田ほか:「275kV CV ケーブル用プレハブジョイントの開発」フジクラ技報 第 79 号 p40 (1990)
(28) 中西ほか:「275kV CV ケーブル用プレハブ型接続箱の開発」住友電気 第 142 号 p51 (1993)
(29) 小橋ほか:「275kV CV ケーブル用接続箱の開発」古河電工時報 第 93 号 p57 (1993)
(30) 熊井ほか:「275kV CV ケーブル用プレハブ式中間接続箱の開発 (長期性能試験その 2)」平成 5 年電気学会全国大会 p1604 (1993)
(31) 小橋ほか:「275kV CV ケーブル用プレハブジョイント (第 2 報)」フジクラ技報 第 86 号 p66 (1994)
(32) 光山:技術トピックス「275kV 級大導体 CV ケーブル用 PMJ」フジクラ技報 92 号 p90 (1997)
(33) 中西ほか:「関西電力小曽根支線 275kV CV 線路の完成」住友電気 第 147 号 p10 (1995)
(34) 福原ほか:「275kV プレハブジョイントの実線路納入」古河電工時報 第 97 号 p109 (1995)
(35) 中西ほか:「275kV CV ケーブル用エポキシ型プレハブ型接続部の実線路への適用」電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 8 月 p478 (1995)
(36) 松尾ほか:「東京電力 (株)275kV OF ケーブルの布設」藤倉電線技報 第 42 号 p1 (1970)
(37) 土田ほか:「275kV CV ケーブル用プレハブ接続部の実用化ー関西電力 (株) 山特線―」フジクラ技報 第 89 号 p16 (1995)
(38) 安倍ほか:「合理化した施工方法による 275-kV PJ の納入」古河電工時報 p14 (2000)
(39) 神永:解説「500kV CV ケーブルの開発動向」電学誌 Vol,114-B,N0,10, p964 (1994)
(40) 神永ほか:「500kV CV ケーブルの開発」電学論 B116 巻 3 号 p299 (1996)
(41) 神永ほか:「500kV CV ケーブル用 EMJ の開発 電学論 B 116 巻 3 号 p307 (1996)
(42) T.Kaminaga et. al: "Development of 500kV-XLPE Cables and Accessories for Long Distace Underground Transmission Line –Part Ⅰ :Insulation Design of Cables–" IEEE Trans., Vol.9, No.4, p1741 (1994)
(43) T.Kaminaga et. al: "Development of 500kV-XLPE Cables and Accessories for Long Distace Underground Transmission Line–" Part Ⅱ :Jointing Techniques- IEEE Trans., Vol.9, No4, p1750 (1994)
(44) CV ケーブルおよび接続部の高電圧試験法」気協同研究会 第 51 巻 第 1 号 (1995)
(45) 久保田ほか:「500kV CV ケーブルの基礎特性」フジクラ技報 第 84 号 p139 (1993)
(46) 小沢ほか:「CV ケーブルの AC 耐電圧特性の評価」平成 4 年電気学会エネルギー部門全国大会 No.334 (1992)
(47) 久保田ほか:「CV ケーブルの AC 破壊ストレスの厚さ依存性に関する検討」平成 4 年 電気学会全国大会 No.1460 , (1992)
(48) 府川ほか:「500kV CV ケーブルおよび接続部の開発 (その 2)」フジクラ技報 第 92 号 p33 (1997)
(49) 渡辺ほか:「500kV CV ケーブルと接続部の開発」住友電気 第 147 号 p1 (1995)
(50) 田中ほか:「CV ケーブルの技術進歩 (その 3) ～長距離用 500kV CV 及び接続箱の開発～」古河電工時報 第 97 号 p86 (1995)
(51) 府川ほか:「長距離線路用 500kV CV ケーブルおよび接続部」日立電線 No.15 p73 (1996)
(52) T.Kaminaga et. al: "Development of 500kV-XLPE Cables and Accessories for Long Distace Underground Transmission Line –Part Ⅴ :Long-Term Performance for 500-KV XLPE Cables and Joint- " IEEE Trans., Vol.11, No.3, p1185 (1996)
(53) Y.Watanabe et al.: "Development of New 500kV Laminated Paper Insulated Self-Contained Oil-Filled Cable and Its Accessories" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.3, No. 1, p47 (January1988)

(54) M.Okada et al.: “Development of Prefabricated Joint for 500kV XLPE Cable”Jicable A.5.2 (1999)
(55) 家村ほか:「500kV CV ケーブル用プレハブ接続箱の長期性能試験」平成 16 年電気学会全国大会 7-140 (2004)
(56) K.Kobayashi et. al. :“Completion of Prefabricated Joint for 500kV XLPE Cable”Jicable A.5.4 (2003)
(57) 黄ほか:「世界初の 500kV プレハブジョイントの適用」平成 22 年電気学会全国大会 7-142 (2000)
(58) H. Ohno et al.: “Construction of the World’s First Long-Distance 500kV XLPE Cable Line” 2000 CIGRE 21-106 (2000)
(59) 米本ほか:「500kV 長距離 CV ケーブル線路―東京電力新豊洲線―」フジクラ技報 第 101 号 p22 (2001)
(60) 米本ほか:「長距離 500kV CV ケーブル線路の完成」SEI テクニカルレビュー 158 号 p11 (2001)
(61) トピックス「新京葉豊洲線 500kV 竣工試験の完了と線路運転開始」古河電工時報 第 108 号 p83 (2001)
(62) 米本ほか:「新豊洲線 500kV 長距離 CV ケーブル線路部分放電試験」日立電線 No.20 p75 (2001)
(63) 田中ほか:「紀伊水道直流 500kV 連系プロジェクトに見る最先端技術―変換所機器編―」電学論 A120 巻 11 号 p959 (2000)
(64) Y.Sakamoto,et al.: “Development of 500kV d.c. Self-Contained Oil-Filled Cable ” IEEE Trans.,Vol. PAS-100, No.4, p1949 (April 1981)
(65) 藤森ほか:「直流 500kV 半合成紙 (PPLP) 絶縁 OF 海底ケーブルの開発」電学論 B 116 巻 3 号 p1129 (1996)
(66) 畑ほか:「PPLP の直流基礎特性 (シート) 試験」電気学会全国大会 論文 1233 (1984)
(67) 村田ほか:「油浸 PPLP のインパルス絶縁破壊に関する基礎的研究」電学論 A 114 巻 2 号 p959 (1988)
(68) 畑ほか:「紀伊水道直流 500kV 連系プロジェクトに見る最先端技術―ケーブル編―」電学論 A 120 巻 11 号 p965 (2000)
(69) CIGRE Electra No.72 “Recommendations for Test of Power Transmission DC Cable for a Rated Voltage up to 600kV” (1980)
(70) 原ほか:「直流 500kV OF ケーブルならびに付属品」フジクラ技報 第 91 号 p19 (1996)
(71) 中西ほか:「紀伊水道における世界最大級の 500kV 直流海底ケーブル線路の建設」日立電線 No.19 p11 (2000)
(72) 井上ほか:「直流 500kV PPLP 絶縁 OF 海底ケーブル線路の建設」SEI テクニカルレビュー p69 (1999)
(73) 小山ほか:「紀伊水道横断 DC ± 500kV 海底 OF ケーブル」フジクラ技報 第 98 号 p28 (2000)
(74) 中西ほか:「直流 500kV 光複合海底 OF ケーブルプロジェクトの完成」古河電工時報 第 105 号 p89 (2000)
(75) 吉田 ;「独自技術で超高圧ケーブルを製品化」 フジクラ社内講演会 2011 年 10 月 (2011)

8 系統化調査のまとめ

8.1 送電電圧と送電容量の変遷

電力ケーブルの送電電圧と送電容量の上昇は電力会社の系統計画に基づき行われた。

OF ケーブルおよび CV ケーブルの送電電圧上昇の推移を図 8.1 および図 8.2 に示す。電力ケーブルは先ず変圧器の高電圧化に伴い発電所の引出しの短距離線路に最初に使われ、その後中間接続箱の開発がされ都市内の長距離線路に使われた。

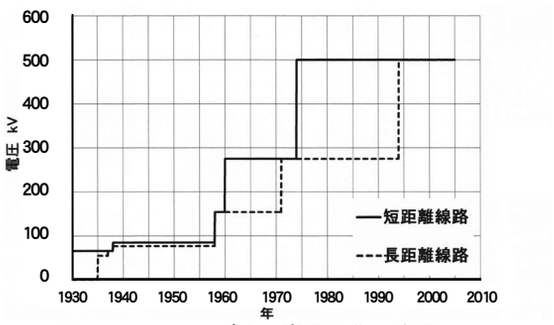


図 8.1　OF ケーブルの高電圧化の変遷

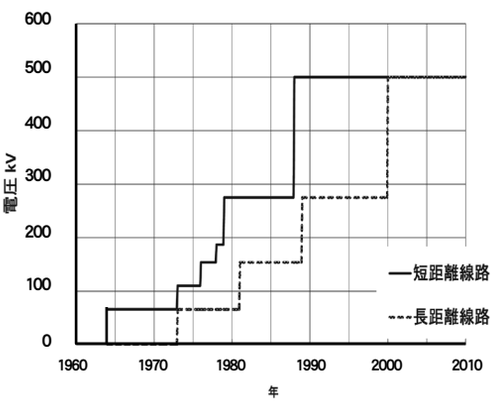


図 8.2　CV ケーブルの高電圧化の変遷

275kV 以上ケーブルでは、接続箱の開発、長期課通電試験および製品の製造と施工に長期間を必要とするので、短距離線路建設から長距離線路建設まで 10 年以上の期間を要した。特に長距離 500kV OF ケーブルについては、275kV 用で使用されたクラフト紙の誘電率 ε と誘電体力率 tan δ の値ではそのまま使用できず、半合成紙の開発が必要であり、短距離線路完成から接続箱の実用化を含めて更に長期間を要した。電力ケーブルは、ライフラインを支えるための基盤製品であり、長期にわたり高品質、高信頼度が要求されるため、新しく開発された長距離 275kV 以上のケーブルは、長期信頼性を確認するため実線路納入前に公の試験場で長期課通電試験が行われた。

長距離 OF ケーブルおよび CV ケーブルの高電圧化の変遷を図 8.3 に示す。オイルレスで保守管理が容易な CV ケーブルは OF ケーブルに比べ約 30 年遅れて実用が始められ、OF ケーブルに代わって使用されるようになっている。この間の CV ケーブルの技術発展は、乾式架橋製造装置などによる製造改善、接続箱の開発など世界をリードして進められた。

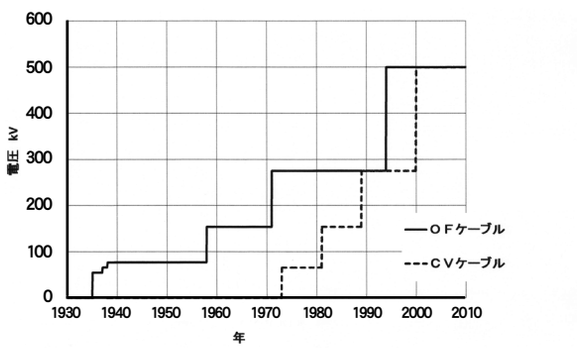


図 8.3　長距離電力ケーブル高電圧化の変遷

電力ケーブルの建設コストは、架空送電線のそれに比べ約 10 倍もかかる [(1)] ため、洞道や管路の大きさ縮小と接続箱数削減のため mm 単位の可能な限りのケーブルのコンパクト化が進められた。

交流ケーブル線路での送電容量の上昇の変遷を図 8.4 に示す。大容量化は、高電圧化と大電流化によりなされた。日本の特殊事情として都市部での消費電力の集中が大きく、電源として遠隔の発電所から大容量送電が必要であり、変圧器の高電圧化、大電流化に併せて進められた。大電流化のため徹底した導体、絶縁体および金属シースの低損失化が進められた。1975 年以降、電力ケーブルの大電流化技術として、大導体化、素線絶縁導体、半合成紙およびステンレス被の適用、更にケーブル冷却方式の採用など新たな技術開発がなされている。これらの低損失化技術および冷却技術は、日本独自の電力会社のニーズのもとに発展したものであり、必ずしも海外で広く使われているものではない。

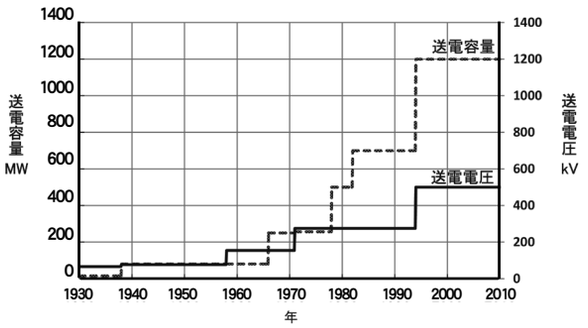


図 8.4　長距離電力ケーブルの送電電圧と送電容量の変遷

大容量冷却ケーブルについては、1980 年代に 1 回線あたり 1500MVA の長距離 275kV 内部強制冷却ケーブルが東京電力と各電線メーカーと共同開発されたが[(2),(3),(4)]、このような大容量長距離線路のニーズがなくなり、実用化されずに終わっている。

8.2　電力ケーブルの技術発展

電力ケーブルの高電圧化と大容量化の技術発展の変遷、主要件名の概要とその技術の特徴について表 8.1 に示す。以下にまとめとして OF ケーブル、POF ケーブルおよび CV ケーブルの技術発展の変遷を述べる。

8.2.1　OF および POF ケーブル

1928 年にイタリアピレリー社から OF ケーブル特許の実施権を受け、1930 年 (昭和 5 年) に日本で初めての 66kV OF ケーブルが日本電力 (株) 尾久変電所に (株) 住友電線製作所により布設された。1938 年 (昭和 13 年) 布設の大同電力 (株) 向け 77kV OF ケーブルには巴川製紙所製造の絶縁紙が使用され、日本石油 (株) 製造の絶縁油も使用されている。1930 年代の OF ケーブルの特性は先行していたヨーロッパメーカーと遜色ないものであった。

1952 年 (昭和 27 年) に布設された日本国有鉄道 66kV OF ケーブルの線路長は 14.5km と当時 66kV 級として世界最大のものであった。管路条数の削減と既設管路の有効活用のため、1952 年 (昭和 27 年) に東京電力日比谷線 66kV 3 心 OF ケーブルが布設された。この頃には、日本の技術は独り立ちできたと考える。

1956 年 (昭和 31 年) にフランスのカーベル・ド・リヨン社から薄紙絶縁電力ケーブルに関する技術導入を受け、電源開発奥只見発電所向け 287.5kV OF ケーブルが布設され、超高圧ケーブル技術に挑んだ。

その後 1965 年 (昭和 40 年) に低損失絶縁紙として脱イオン水洗紙が巴川製紙所により実用化され、154kV 以上の OF および POF ケーブルに使用された。1966 年 (昭和 41 年) にアルキルベンゼン系合成油が実用化され、脱イオン水洗紙と併用して低損失化が進められた。

日本の自主技術により、1971 年 (昭和 46 年) に長距離線路として東京電力江東城南線 275kV OF ケーブルおよび新宿線 275kV POF ケーブルが、1973 年 (昭和 48 年) に関西電力奥多々良木変電所に短距離 500kV OF ケーブルが実用化された。しかし、クラフト紙 OF ケーブルの絶縁体損失の起因となる誘電率 ε、誘電体力率 tan δ が大きく、500kV OF ケーブル長距離線路の建設にはこの低減が必須となっていた。このため、各社は競って半合成紙の開発を進めた。1980 年 (昭和 55 年) に東京電力城北線の一部に 275kV 半合成絶縁 OF ケーブル (PPLP,SIOLAP) が実用化されたのを初めとして、その後各社で開発された半合成紙は 275kV OF ケーブルおよび POF ケーブルに使用された。

大電流化のため、2500mm^2 以上の大導体化が進められ、導体損失の低減のため藤倉電線により世界で初めて酸化第二銅皮膜による素線絶縁分割導体が開発された。1982 年 (昭和 57 年) に中部電力知多火力発電所向けに 275kV 素線絶縁 2500mm^2 POF ケーブル (強制油循環冷却) が布設された。1998 年 (平成 10 年) に同箇所に更なる低損失化のため半合成紙を使用した 1 回線あたり 900MW の大容量 275kV POF ケーブル線路が実用化された。この素線絶縁導体技術は 275kV CV ケーブルにも使用された。これは世界で初めての技術であり、275kV 以上ケーブルの大容量化に貢献した。

500kV 用の半合成紙は PPLP に集約された。PPLP は住友電工と巴川製紙所との共同で開発されたものである。1994 年 (平成 6 年) に、PP 分率を高めて ε と tan δ を改善した PPLP を開発し、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線、昭和電線により本州四国連系線に 500kV PPLP 絶縁 OF ケーブル 1200MW/1 回線が実用化された。

1999 年 (平成 11 年) に、住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線が各々長尺製造技術を築き、紀伊水道横断海底ケーブルに直流 500kV PPLP 絶縁 OF ケーブル線路が運開した。これらは、日本の海底 OF ケーブル技術の集大成であり、世界で例のない長距離大容量直流 500kV OF ケーブル線路である。

表 8.2 に OF ケーブルと POF ケーブルの主要な技術ごとにその変遷をまとめた。

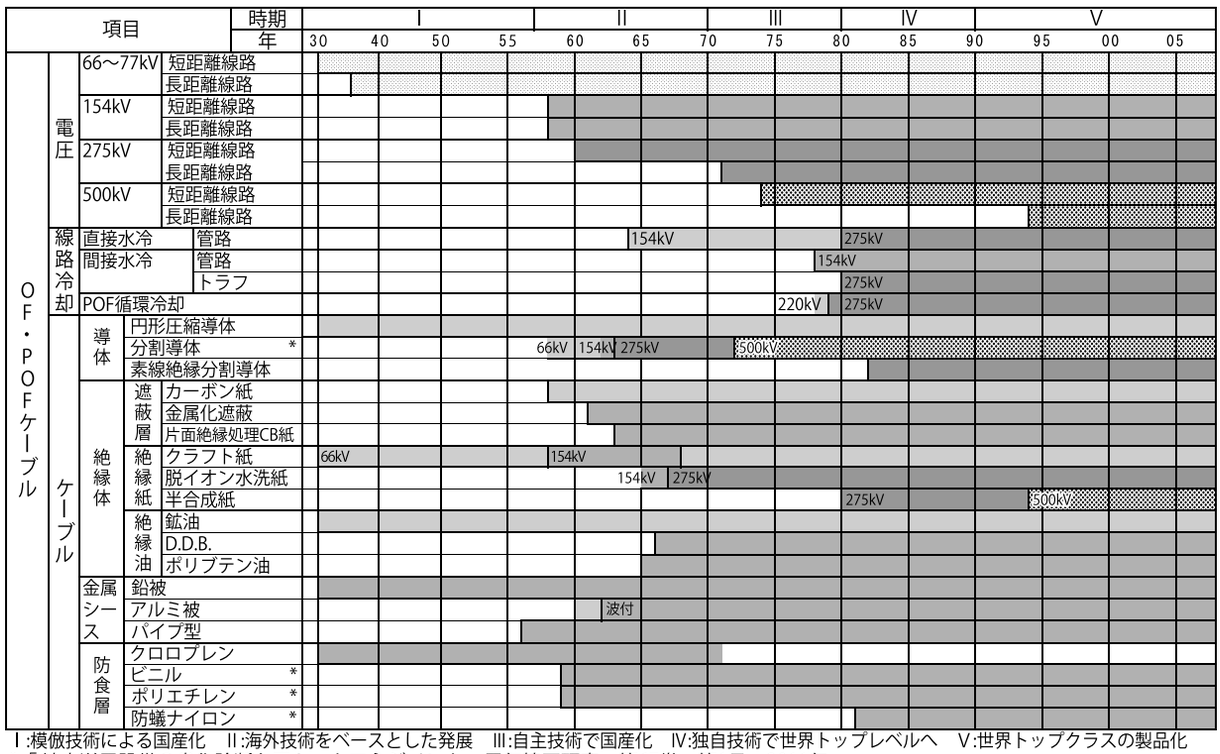
表 8.1　電力ケーブル技術発展の変遷

		OF/POFケーブル	CVケーブル
Ⅰ	1930	66kV 675mm²OFケーブル（住友電線）　*日本初OF* 日本電力　尾久変電所　275m	
	1935	55kV 400mm²OFケーブル納入（住友電線、古河、藤倉） 宇治川電気 三国変電所　3.73km 1回線　*接続箱入り初*	
	1952	66kV 150mm² 3心OFケーブル　（住友、古河、藤倉）　*66kV 3心日本初* 東京電力　日比谷一淀橋線　9.6km 2条/1cct	
	1952	66kV 200mm² OFケーブル 国鉄　新鶴見大井町間14.5km　1回線　*当時世界最大長*	
Ⅱ	1958	154kV 600mm² 鉛被クロロプレン防食OFケーブル　*日本初154kV* 東電蔵前線 9.5km 2cct（住友、古河、藤倉）	
	1960	287.5kV 200mm² 鉛被OFケーブル（住友、古河、藤倉） 電源開発;奥只見発電所　300m 3回線　*日本初287.5kVOF*	
	1962	110kV 600mm²アルミ被OFケーブル（大日）　*日本初アルミ被OF* 中国電力南広島１号線 131m	66kV 100mm²移動用　CVケーブル(住友)　*日本初移動用66kVCV* (東京電力)
	1964	66kV 100mm² POFケーブル　（藤倉）　*日本初POF* 藤倉　佐倉　440m 1回線	70kV 100mm²　CVケーブルビニールシース(古河)　*日本初70kV CV* 中部電力　尾鷲火力発電所
	1965	66kV 150mm² POFケーブル　（藤倉） 横曽根線　1.7km 2cct　*日本初脱イオン水洗紙*	66kV CV 150mm² CVケーブル(住友)　*日本初3層同時押出し66kVCV* 九州電力 新港火力 線路長90m
	1966	154kV 600mm² 低損失紙合成油 OFケーブル(住友,,古河) 東京電力 南大田線 350mの1部区間　日本初*脱イオン水洗紙+DDB*	
	1968	154kV 400/500mm2 POFケーブル（住友、古河、藤倉） 東京電力花畑江戸川線 5.5km 2回線　*日本初154kV POF*	
Ⅲ	1970		77kV 80mm² CVケーブル(藤倉)　*日本初ジョイント入り初CV線路* 中部電力　鈴鹿線　510m 1回線
	1971	275kV 1000/1200mm² OFケーブル竣工（古河、藤倉、日立、昭和） 東京電力城南線 15.5km 1回線　*日本初長距離線路275kVOF*	
		275kV1000/1400mm² POFーブル長尺線路（住友、古河、藤倉） 東京電力　新宿線　19.7km 1回線　最終3cct　*日本初275kV POF*	
	1973		110kV 200mm² CV ケーブル（大日日本)　*日本初屹式架橋CV* 中国電力白神変電所　60m 1回線
	1974	550kV 1000mm² 単心鉛被OFケーブル（住友）1973年竣工　*日本初550kV* 関西電力;奥多々良木発電所　850m 649MVA 接続箱入り	
		500kV 1200mm²アルミ被OFケーブル布設　（日立）　*日本初500kVアルミ被OF* 東京電力袖ヶ浦火力1号機	
	1976		154kV 600mm²　CVケーブル（住友）　*日本初154kV* 関西電力 長曽根線　120m 2回線
	1977		154kV 800mm² 単心CVケーブル　（古河）　*日本初ワイヤーシールド* 東京電力　天童東幹線　350m
	1978		187kV 2000mm²/600mm²　CVケーブル　（日立）　*日本初187kVCV* 電発　奥清津PS　1150m/1050m/1350m 3回線
	1979	直流250kV600mm²海底OFケーブル（住友、古河、藤倉、日立） 電源開発　北海道本州連系線 43km 1条　*日本初直流250kV海底OF*	275kV 800mm²アルミ被CVケーブル竣工（住友）　*世界初275kVCV* 電源開発　名古屋変電所 120m 1回線
Ⅳ	1980	275kV 2000mm²半合成紙絶縁OF ケーブル（住友、昭和） 東京電力城北線　昭和2回線(SIOLAP) 住友1回線(PPLP)の一部0.9km　*日本初半合成紙OF*	275kV 600mm²アルミ被CVケーブル(日立)　竣工 中部電力奥矢作変電所　645m 3回線
		トラフ間接水冷実用化275kV 1600mm² OFケーブル（古河） 東京電力北武蔵野豊島線　7km 3回線　*日本初トラフ間接水冷*	
	1981		154kV 600mm² CVケーブル長距離線路（古河、フジクラ、大日日本） 東電　豊島SS-池袋SS　2.1km　3回線　*日本初154kV 長距離CV*
	1982	275kV 2500mm² 素線絶縁導体POFケーブル（藤倉） 中部電力　知多火力線　3.4km 2回線　*世界初酸化皮膜素線絶縁導体*	
		275kV 1500mm²PPLP絶縁アルミ被OFケーブル(住友) 関西電力泉北線　8.5km 2回線	
		275kV 1500mm²FRP絶縁アルミ被OFケーブル(日立) 関西電力泉北線　8.5km 2回線	
	1985		154kV 400mm² CVケーブル(住友)　*日本初EMI* 東京電力　三郷浄水線　5.8km 2回線
	1986		187kV 2000mm²アルミ被CVケーブル　橋梁添架（住友） 関電　大鳴門橋　1.8km（600m×3）　*日本初長距離橋梁添設187kVCV EMI*
	1988		500kV 800mm²アルミ被CVケーブル（日立）　*世界初500kV CV* 電源開発　下郷発電所　1987年1月竣工
			500kV 1400mm²アルミ被CVケーブル（日立） 東京電力　今市発電所　1987年7月竣工
	1989		275kV 1400mm²アルミ被CVケーブル長距離線路（住友、古河、日立） 東京電力　南池上線 9.5km 1回線　EMJ　*世界初275kV CV 長距離線路*
Ⅴ	1993		275kV 2500mm²ステンレス被CVケーブル(住友、古河、フジクラ、日立) 中部電力　南ルート 26.9km 2回線　*世界初素線絶縁導体+ステンレス被 CV*
	1994	500kV 2500mm² PPLP絶縁アルミ被OFケーブル　22km 1回線 （電源開発;橋梁添架/住友、古河、日立 陸上/フジクラ,昭和）　*世界初500kV 半合成紙OF*	
	1995		275kV 1500mm²ステンレス被CVケーブル　PJ入り　（住友、古河、三菱） 関西電力　小曽根支線　13.8km 2回線　*日本初275kV PJ*
	1998	275kV 2500mm² 素線絶縁導体半合成紙POF（フジクラ） 中部電力　知多火力線　3.0km 1回線	
	2000	直流±500kV 3000mm² PPLP絶縁OFケーブル(住友、古河、フジクラ、日立) 関西電力・電源開発 紀伊水道連系線 48km　4条　*世界初大容量直流500kV海底OF*	500kV 2500mm²　アルミ被CVケーブル長距離線路（住友、古河、フジクラ、日立) 東電　新京葉線　39.8km 2回線　*世界初長距離500kV CV線路*

Ⅰ：模倣技術による国産化
Ⅱ：海外技術をベースとした発展
Ⅲ：自主技術で国産化
Ⅳ：独自技術で世界レベルへ
Ⅴ：世界トップクラスの製品化

住友：住友電気工業(株)、古河：古河電気工業(株)、フジクラ：(株)フジクラ
日立：日立電線(株)、昭和：昭和電線電機(株)、三菱：三菱電線工業(株)
住友電線：(株)住友電線製造所、藤倉：藤倉電線(株)、大日：大日電線(株)
大日日本：大日日本電線(株)
1920年：(株)住友電線製造所→1939年住友電気工業(株)
1931年：大日電線(株)→1964年大日日本電線(株)→1986年三菱電線工業(株)
1907年：藤倉電線(株)→1992年(株)フジクラ

表 8.2　OF ケーブルの主要技術の変遷



Ⅰ:模倣技術による国産化　Ⅱ:海外技術をベースとした発展　Ⅲ:自主技術で国産化　Ⅳ:独自技術で世界トップレベルへ　Ⅴ:世界トップクラスの製品化
*「:地中送電設備の劣化診断とアセットマネジメント」電気協同研究　第67巻　第1号　2011年

8.2.2　CV ケーブル

1955 年 (昭和 30 年) に有機過酸化物を混合し温度を上げて架橋する化学架橋ポリエチレン材料 (CV ケーブル絶縁体の原材料) がアメリカ GE 社で発明された。1959 年 (昭和 34 年) から電線メーカー各社が GE 社とライセンス契約を結び、この材料を用いて CV ケーブルの製造を開始した。古河電工が 1964 年 (昭和 39 年) に中部電力尾鷲火力発電所の線路に日本で初めて 70kV CV ケーブルを実用化した。日本では CV ケーブルの耐熱性と耐電圧特性に着目し、世界に先駆けて実用化を進めた。

内外半導電層と絶縁体との界面の不整をなくすため、内外半導電層と絶縁体の三層を同時に押出する製造方式が開発された。これは日本独自の技術であり、CV ケーブルの高電圧化に貢献した。当初絶縁押出方式は水蒸気架橋法で製造されていた。この製造方式では、高温水蒸気下での架橋のため水蒸気が架橋ポリエチレン中に浸透し、冷却工程で凝縮し水となり、時間経過とともに蒸発して、微小のボイドが多数形成し、耐電圧特性を著しく低下させた。1969 年 (昭和 44 年) 頃から乾式架橋製造方式が各社独自に開発され実用化された。乾式架橋製造方式の採用によりケーブル絶縁体中のボイドの数量と大きさを著しく削減し、CV ケーブルの耐電圧特性が大幅に改善した。

1976 年 (昭和 51 年) に住友電工が関西電力長曽根線 154kV CV ケーブルを布設納入したのを始めとして 154kV CV ケーブルの実用化が進められた。その後、絶縁体中への異物混入を防止するための材料のクリーン化、製造のクリーン化を進め、1979 年 (昭和 54 年) に住友電工が電源開発名古屋変電所に世界で初めて 275kV CV ケーブルを、1988 年 (昭和 63 年) に日立電線が電源開発下郷変電所に世界で初めての 500kV CV ケーブルを実用化した。

長距離 CV ケーブル線路については、ケーブルと同等の信頼性を有する中間接続箱の開発が必須であった。接続箱については、ケーブル製造と同様にボイド、異物および突起の品質管理が行われ、施工作業の機械化、異物混入の防止と CCD カメラ、X 線撮影など施工途中での異物混入チェツクを実施し絶縁信頼性の向上を果たした。

1981 年 (昭和 56 年) にテープ巻モールド接続箱 (TMJ) を使用した東京電力豊島池袋線 154kV CV ケーブル線路が、1989 年 (平成元年) に押出モールド接続箱 (EMJ) を使用した東京電力南池上線 275kV アルミ被 CV ケーブル線路が実用化された。

中部電力では更なる大容量化と低損失化のため、1993 年 (平成 5 年) に素線絶縁分割導体およびステンレス被を採用し、EMJ を使用した武平町線 (南ルート)275kV CV ケーブルを実用化した。EMJ は施工時間の長日数と作業者の高度な技能が必要であった。こ

の線路では竣工試験として、世界で初めて長距離 CV ケーブル線路での交流による耐電圧試験を実施し、併せて部分放電試験を実施し、ケーブルの健全性を確認した。これは世界で初めての試みであった。

EMJ の欠点を改善するものとしてプレハブ型接続箱 (PJ) が開発された。1995 年 (平成 7 年) に関西電力が PJ を使用した小曽根支線 275kV ステンレス被 CV ケーブル線路が建設された。その後の 275hV CV ケーブル線路には PJ が使用された。

住友電工、古河電工、フジクラ、日立電線により、2000 年 (平成 12 年) に EMJ を使用した新豊洲線 500kV アルミ被 CV ケーブル線路が建設された。ケーブルについては、絶縁設計の原点に戻つて、XLPE 材料から製造まで絶縁性能の改善が行われた。前駆遮断法の開発により絶縁破壊特性の支配要因の大半が異物であることが明らかとなり、混入する有害な異物をすべて除去する考えで製造の改善を行った。EMJ の施工に際しても同様な考えで、クリーン度を上げ、光学的な検査装置、X 線装置など高精度に異物を検査する技術を適用し高信頼度化を進めた。新豊洲線は世界初めての長距離 500kV CV ケーブル線路であり、日本の CV ケーブル製造技術と接続箱施工技術の総結集の成果で現在でも世界トップの技術である。

表 8.3 に CV ケーブルの主要な技術ごとにその変遷をまとめた。

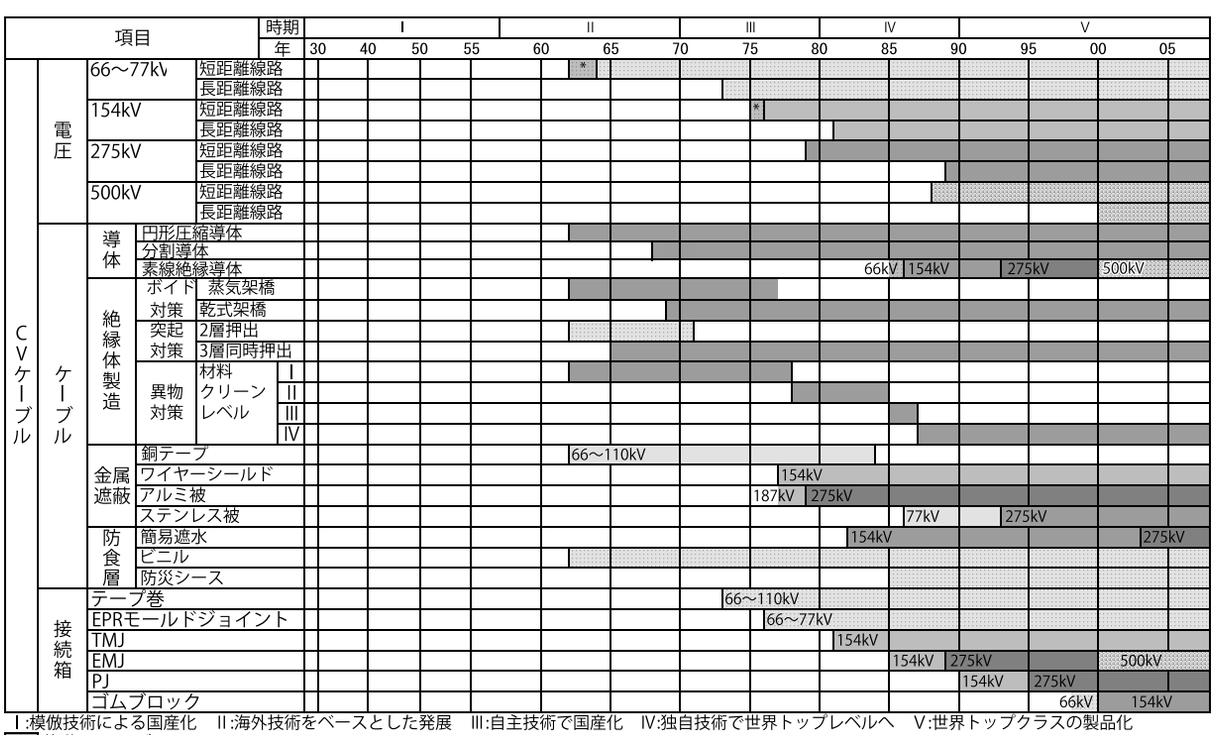
8.2.3 絶縁厚の変遷

運転電圧ごとの OF ケーブルと CV ケーブルの絶縁厚 [5],[6] の比較を図 8.5 に示す。CV ケーブルの 66kV ～ 500kV の主要電圧階級における絶縁厚低減の変遷を図 8.6 に示す。ケーブルの絶縁厚さはケーブル外径に影響を与える主要部分であり、この低減がケーブルのコンパクト化に最も重要である。

275kV までの OF ケーブルの絶縁厚は、インパルス破壊電圧強度により決まる。OF ケーブルにおける絶縁体のインパルス破壊電界と交流破壊電界との比は 3 倍以下であり、インパルス耐電圧値を基準にして絶縁厚を設計すれば交流運転電圧に対して裕度がある。500kV OF ケーブルでは、運転電圧で発生する絶縁体最大電界を考慮する必要があり [5]、CV ケーブルに比べ絶縁厚が厚く 33mm となる。半合成紙 PPLP を実用化したことにより、インパルスおよび交流破壊電圧特性が改善され CV ケーブルに比べ絶縁厚は低減した。

CV ケーブル製造における内外 3 層同時押出の採用、原材料および絶縁押出工程のクリーン化などが CV ケーブルの耐電圧の信頼性を向上させケーブル絶縁厚の低減を果たした。1960 年 (昭和 35 年) における 66kV CV ケーブルでは、絶縁体平均使用電界は約 2.5kv/mm であったが、CV ケーブルの材料と製造技術の改善が進み、新豊洲線 500kV CV ケーブルでは

表 8.3　CV ケーブルの主要技術の変遷



10.7kV/mm と約 4 倍となった。これは世界トップの技術であり、材料自体の精製とその取り扱い、ケーブル製造と接続箱施工における欠陥 (異物、ボイド、突起) の徹底した排除、および万が一混入してもそれを阻止する監視と検査技術を完成させたことによるものである。

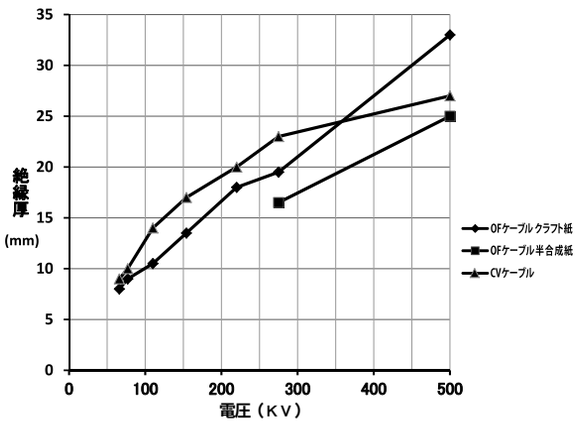


図 8.5　OF ケーブルと CV ケーブルの絶縁厚比較

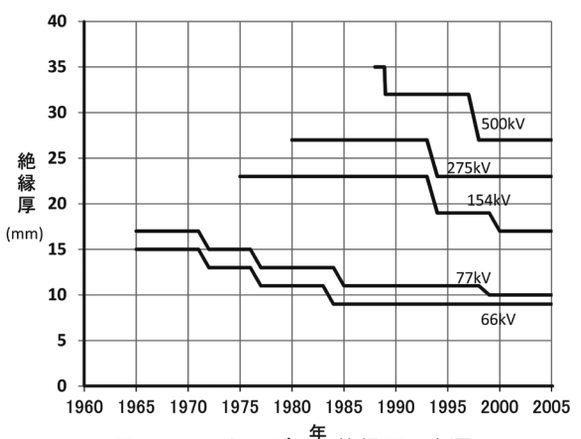


図 8.6　CV ケーブルの絶縁厚の変遷

8.2.4　日本の電力ケーブルのニーズと技術の特徴

(1) ケーブルのコンパクト化と低損失化のニーズ

日本は、島国であり、平野部も少なく電力需要も都市部に集中し、電力ケーブルのニーズは海外に比べ高い。電力ケーブルの建設コストは、架空送電線と比較して非常に高価であり、架空送電線が布設できない都市部に使用されている。海外では建設費の安価な直接埋設方式が多用されているが、日本では地中送電線のルート確保が厳しく、橋梁添架、共同溝利用、シールド工法による洞道及び管路の利用など多種多様な布設形態が使用されている。これらの収容設備の大きさや深層化も建設コストを増大させている。ルート確保と建設費の抑制の観点からケーブルの高電圧化、大電流化に併せてケーブルのコンパクト化、低損失化が進められた。

(2) 高信頼度化と高品質化のニーズ

電力ケーブルの高電圧化と大容量化は、電力会社の系統計画に基づき実用化された [7],[8]。275 ～ 500kV ケーブルについては、高信頼度、高品質のニーズのもと、電力会社との緊密な研究開発のもとでケーブルおよび付属品の実用化が進められた。特に CV ケーブルと接続箱に関する製造と施工において日本独自の検査技術が開発され、高信頼度化と高品質化の製品が実用化されている。ケーブルは数十 km 線路の長手方向に一箇所でも欠陥を造らない高品質化技術が必須であることが他の電力機器と大きく異なる点である。品質面では優れているが、コスト面での国際競争力の課題がある。

(3) OF ケーブルと POF ケーブルの低損失化技術

日本の自主技術で脱イオン水洗紙と合成油を開発し 275kV 長距離 OF ケーブル線路を建設した。世界トップの低損失な半合成紙 PPLP を開発し長距離 500kV 半合成紙 OF ケーブル線路を完成した。導体についても、日本独自の素線絶縁分割導体を開発し大容量 275kV POF ケーブルを実用化した。

(4) 海底 OF ケーブルの長尺製造技術

乾燥含浸缶などの設備の能力アップと長時間連続運転に関する製造の技術改善が行われ、紀伊水道 500kV 海底 OF ケーブルを完成した。48km 一連長製造など世界トップの海底 OF ケーブルの長尺製造技術を有している。

(5) CV ケーブル製造技術

乾式架橋製造装置など日本独自の製造技術が開発され、常に世界に先駆けて CV ケーブルの高電圧化を進めた。この乾式製造方式は海外に技術輸出されている。

前駆遮断法の開発により絶縁破壊特性の支配要因の大半が異物であることを明らかにし、原材料から押出製造までのクリーン化技術を実用化した。併わせて異物混入を阻止する監視技術と検査技術を完成させたことが 500kV CV ケーブル実現の大きな要因である。500kV CV ケーブル線路が建設され、日本の CV ケーブル製造技術は高く評価されている。

CV ケーブルの長尺化については、従来の 2 ～ 3 倍となる長時間押出技術の開発など独自の技術開発がなされ、275kV CV ケーブルでも 2500m 長の一連続製造が可能となった。コンテナを使用した運搬、ケーブルの長尺ケーブルの引き入れなど日本独自の工法を開発した。

8.3 技術の系統化

電力ケーブル技術発展の主要技術の系統化図を表8.4に示す。

電力ケーブルの高電圧化と大電流化は、電力用変圧器と架空送電線とリンクして進められた[9),10)]。電力ケーブルの送電容量は架空送電線に比べ小さく、一般的に、架空送電線1回線に対して複数回線の電力ケーブルが必要となるため、ケーブルの大容量化が必要である。

導体、絶縁体、金属シース構造について、材料面、構造面で低損失化とコンパクト化が進められた。CVケーブルについては、加えて乾式架橋製造方式、クリーン化など製造方法の改善がなされた。

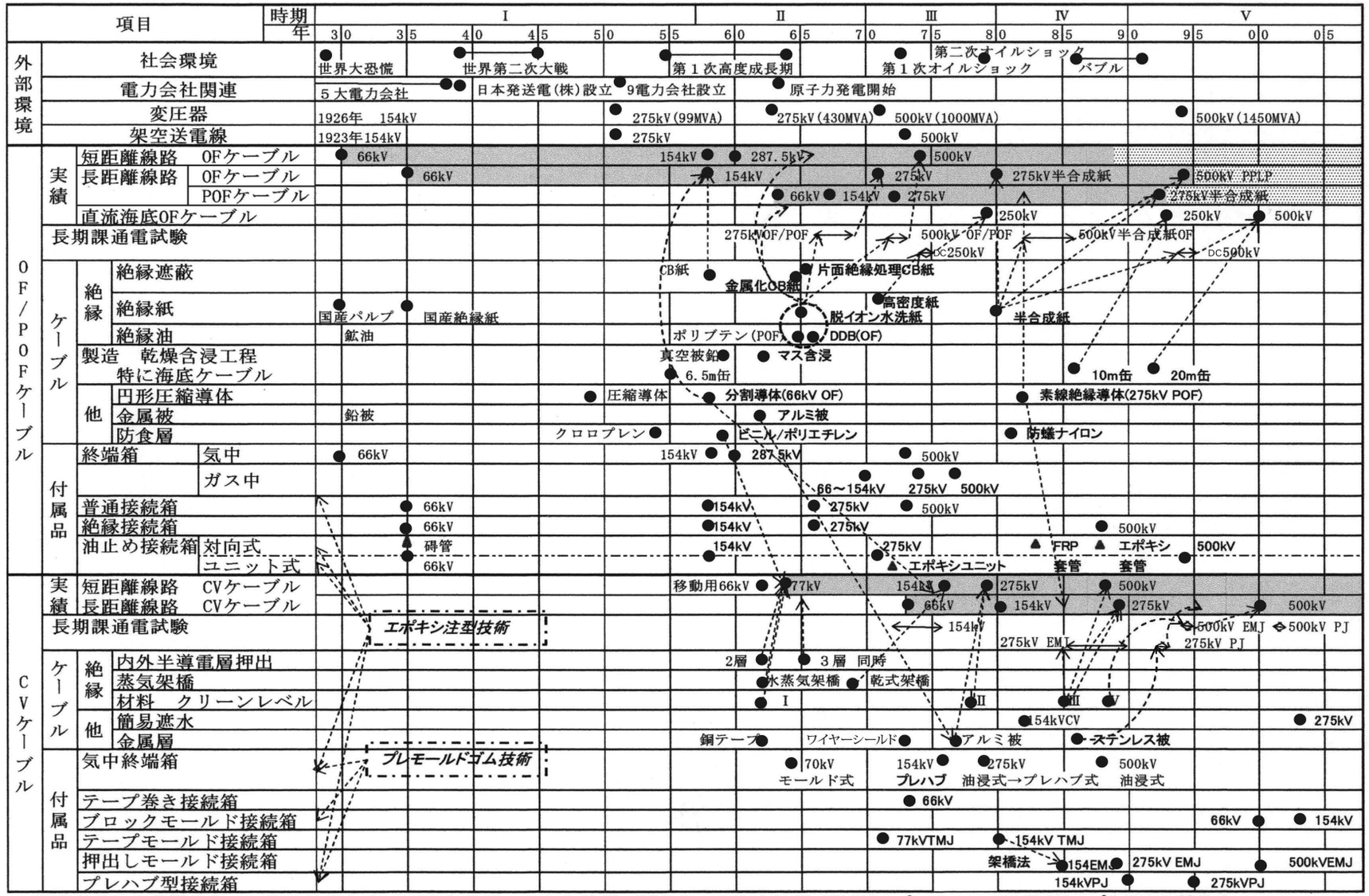
電力ケーブルの製造設備は、OF・POFケーブルとCVケーブルとは導体工程、金属シース工程、防食工程および検査工程など共通しており、OFケーブルの技術がCVケーブル技術発展に多いに貢献している。OFケーブルの長尺化については、乾燥含浸缶の大型化が図られ、大型巻取り設備が設けられた。CVケーブルの長尺化に対しては、XLPE押出機の押出量の増加とその長時間運転技術の向上によりなされた。

接続箱については、OFケーブルで開発したエポキシ注型品がCVケーブルのプレハブ型終端箱およびプレハブ型接続箱の実用化に貢献した。プレハブ型終端箱と中間接続箱、ブロックモールド接続箱については、EPゴム(Ethylene Propylene Rubber)を用いたプレモールドゴム絶縁体が使用されている[11)]。

エポキシおよびプレモールドゴムの製造には、CVケーブル製造と同様に、クリーンルーム内での製造を行い、更にエポキシ注型およびゴム押出し成形の製造時にメッシュを通して異物を入れないように管理している。異物が入っていないことをX線などで監視し、更に製造後部分放電試験を実施し、品質の向上を図った。これらの製造技術は世界トップクラスの技術である[11)]。

電力ケーブルの実線路適用に際しては、長期性能を事前に検証するため電力中央研究所および電力会社の試験場で実線路を模擬した試験線路を建設し、電圧と温度加速劣化に基づいた長期課通電試験を実施している。このような長期課通電試験の実施は他の電力用機器と異なる点である。

表 8.4　主要技術発展の系統化図



I:模倣技術による国産化　II:海外技術をベースとした発展　III:自主技術で国産化　IV:独自技術で世界トップレベルへ　V:世界トップクラスの製品化

8.4 今後の展望

電力ケーブルの技術発展の動向は、電力需要の動向に大きく影響を受ける。日本の使用最大電力量は2001年（平成13年）にピークになった以降ほぼ横這いで推移し、現時点大容量500kV超高圧電力ケーブル線路の計画はない。今後は設備の拡充・増強よりも設備の機能維持に重点をおいた運用が必要となる。経年40年以上のケーブルも増え、未然予防の観点から精度の高い絶縁診断技術の開発が必要である。一方、海外のニーズにも目を向け、蓄積された大容量超高圧ケーブル技術を生かし、グローバル化に対応せねばならない。このため、海外でも競争力のあるケーブルおよび接続箱の実用化を進め、日本技術の海外規格(IEC規格)への採用を積極的に進める必要がある。

2011年(平成23年)に発生した原子力発電所のトラブルにより、今後国民生活と経済成長に必要な電力をどのように安定的に確保し供給するかが重要な課題である。従来からの大規模電源と送配電網の運用に加えて、風力発電など再生可能エネルギーなどの電力を安定的に確保し、安定供給する送電線の整備をする必要があり、新たなスマートグリッドの構築が重要になると考えられる。高速通信ネットワーク技術などを駆使して、需要者側や風力発電などの分散電源の情報を活用して、事業者側との双方の電力利用の高効率、高信頼および高品質の電力システムを目指す必要がある。

日本固有のスマートグリッドとして、光複合電力ケーブルの採用や系統間の効率的送電線路としての直流ケーブルの導入が重要視されるであろう。更に将来的には、究極的な送電損失低減のため超電導ケーブルの活用が期待される。

海外では、ヨーロッパの国間の連系線として100kmを超える直流海底ケーブル線路が多数運転されている。給油が不要な高粘度油含浸(MIND: Mass Impregnated, Non-draining paper insulated)ケーブルが主に使用されているが、日本メーカーは納入実績がない。このケーブルは使用温度が低く制限され、海水温度の低い北欧に適して実用化されている。日本独自に油を使用しない使用温度を高くできる長距離直流海底CVケーブルの開発が進められ、北海道・本州間連系線に日本で最初の直流250kV 海底CVケーブルの使用を開始したばかりである。これまで築いたCVケーブル技術をもとに、材料および絶縁押出し技術の改良により世界に先んじてCVケーブルの長尺製造技術を確立し、長距離直流CVケーブル線路の実用化を期待したい。

引用参考文献

(1) 岩崎:小特集「最近の地中送電線技術」Ⅰ.総論 電学誌 103巻 12号 p3 (1988)

(2) K. Ogawa et al.: "Field test of 275-kV Internally water cooled XLPE cable system" IEEE Trans. on Power Delivery , Vol. 4, No.1, p8 (1989)

(3) K. Ogawa et al: "The field test of a cable internally cooled with fire resistance oil" IEEE Trans. on Power Delivery , Vol. 4, No.1, p34 (1989)

(4) E. Nakamura et al.: "Development of radial-flow type internally oil-cooled oil filled cable" IEEE Trans. on Power Delivery , Vol. 3, No.1, p39 (1988)

(5) 「OFケーブルの保守技術」電気協同研究会 第55巻 第2号 (1999)

(6) 「地中送電設備の劣化診断技術とアセットマネジメント」電気協同研究会 第67巻 第1号 (2011)

(7) 「東京電力三十年史」 東京電力 (1983)

(8) 「関西電力二十五年史」関西電力 昭和53年 (1978)

(9) 矢成:「電力用変圧器技術発展の系統化調査」:国立科学博物館 技術の調査報告書 第4集 (2004)

(10) 電線関係の技術の歴史:日本電線工業会 新技術検討委員会歴史的技術資料保存会 (1999)

(11) 「送電用CVケーブル接続部の技術動向と経年劣化現象」送電用CVケーブル接続部の技術動向調査委員会編 電気学会技術報告 電気学会 第1105号 (2007)

9 あとがきと謝辞

本系統化調査報告書は電気学会、電気協同研究会、日本電線工業会の資料と各電線メーカーの技報をもとにまとめた。OF ケーブルの初期の研究は主に電線メーカーで行われ、電気学会雑誌に掲載され、1930 年 (昭和 5 年) 代には各社彙報が発刊されており、OF ケーブルの初期のケーブル構造、設計について伺えた。先人諸氏の進取の姿勢と技術レベルの高さが、現在の世界トップクラスのレベルにした礎になっている。

電力ケーブル線路建設のため必要な技術は広範囲であり、その中で今回 66kV 以上電力ケーブルと接続箱の技術発展の変遷を主眼にまとめた。施工技術、保全技術、絶縁診断技術については触れていない。また日本独自の製造技術については、ノーハウ開示の問題があり十分でないことを実感している。

電力ケーブルは、40 年を超えて使用されており、1960 年 (昭和 35 年) 代のものも現在使用中である。使用中のケーブルでも重要科学技術史資料候補となるケーブルがある。本報告で記述した表 8.1 に示した運転中のケーブル線路については、是非撤去時にサンプルを残して頂きたい。

今回の電力ケーブルに関する系統化調査と重要科学技術史資料保存状況調査に関しては、電力会社、電力中央研究所、日本電線工業会、電線メーカー各社などの多くの方々に多大なご協力を頂いたことに深く感謝の意を表する。

東京電力株式会社、電源開発株式会社には、重要科学技術史資料候補サンプルの調査にご協力頂き深く感謝する。住友電気工業株式会社，古河電気工業株式会社、株式会社フジクラ、日立電線株式会社、昭和ホールディングス株式会社、三菱電線工業株式会社には、サンプル保存調査および資料のご提供を頂き深く感謝する。

元 (株) フジクラ加賀谷誠一氏には OF ケーブルに関する初期の貴重な資料をご提供頂き深く感謝する。

特に以下の方々には、報告書作成に当たり調査への多大なご協力を頂き深く感謝の意を表したい。

元千葉工業大学	関井康雄氏
元電力中央研究所	深川裕正氏、鈴木寛氏
元昭和電線電纜株式会社	藤原靖隆氏
元三菱電線工業株式会社	川崎勝利氏
元株式会社フジクラ	加治功氏、高橋享氏
日本電線工業会	原田真昭氏、大木啓一氏
株式会社巴川製紙所	片山勝彦氏
株式会社ビスキャス	佐久間進氏、舘野文則氏、中島武憲氏、横山繁嘉寿氏、関雄次郎氏
株式会社ジェイ・パワーシステムズ	渡辺傑氏
株式会社エクシム	大西久晴氏
株式会社フジクラ	斎藤政夫氏、杉山松次郎氏、松田光功氏、渡辺和夫氏、重年生雄氏、福田淳治氏、國村智氏、小林寿夫氏、濱島由紀子氏、竹田葉子氏

電力ケーブル登録候補一覧

番号	資料名	資料形態	所在地	製作者	布設年	選定理由
1	日本電力　尾久変電所 66kV 単心　675mm^2 二重鉛被OFケーブル	筒サンプル 筒サンプル	東京電力　電気の史料館 住友電工	住友電工 住友電工	1930年	イタリア・ピレリー社から技術導入して製造した日本最初の OFケーブル。日本電力の尾久送電線の一部区間 270mに布設。
2	電源開発　下郷発電所 500kV 800mm^2 CVケーブル	筒サンプル	電源開発　下郷発電所	日立電線	1988年	日本独自の技術で、乾式架橋、三層同時押出し、材料から製造まで クリーン化を図った世界最初の500kV CVケーブル。
3	東京電力　新豊洲線 500kV 2500mm^2 CVケーブル用 押出しモールド式接続箱	実体見本 サンプル	東京電力　電気の史料館	古河電工	1996年	世界最初の長距離500kV CVケーブル線路の中間接続箱。 この技術により、世界初の39.8kmの長距離500kV CV線路が完成できた。
4	中部電力　知多火力線 275kV 2500mm^2 POFケーブル	文鎮サンプル	ビスキャス	藤倉電線	1982年	世界で初の酸化第二銅を用いた素線絶縁分割導体275kV POFケーブル。 当時の世界最高の送電容量(700MW)の線路 この素線絶縁導体技術は大導体CVケーブルに使用された。
5	電源開発　本四連系線 500kV 2500mm^2 PPLP 絶縁OFケーブル(橋梁部)	文鎮サンプル 文鎮サンプル	ビスキャス ジェイ・パワーシステムズ	古河電工 住友電工	1988年	世界初の大容量、長距離、橋梁添架の500kV 半合成紙OF　ケーブル。 半合成紙として最も低損失のPP分率60%のPPLPを採用。 送電容量1200MW　線路長　22km　1回線(現在2回線)
6	関西電力、電源開発 紀伊水道連系線 直流±500kV 3000mm^2 PPLP絶縁OFケーブル	筒サンプル 筒サンプル 筒サンプル 筒サンプル	ビスキャス ビスキャス ジェイ・パワーシステムズ フジクラ	古河電工 フジクラ 住友電工 フジクラ	1998年	世界初の長距離大容量直流±500kV 海底OF　ケーブル 電圧500kV、導体サイズ3000mm^{2}の世界最大の大容量ケーブル。 絶縁紙としてPPLPを採用しケーブルのコンパクト化を達成。 電流容量2800A、線路長　48km 4条は世界最大規模。
7	東京電力　南池上線 275KV 1400mm^2 CVケーブル	文鎮サンプル 筒サンプル	東京電力　電気の史料館 ジェイ・パワーシステムズ	古河電工 住友電工	1989年	日本初の長距離275kVアルミ被CVケーブル。 押し出しモールド接続箱(EMJ) を使用
8	東京電力　新豊洲線 500KV 2500mm^2 CVケーブル	筒サンプル 筒サンプル 文鎮サンプル	ジェイ・パワーシステムズ ビスキャス ビスキャス	住友電工 古河電工 フジクラ	2000年	世界初の長距離500kVアルミ被CVケーブル。 押し出しモールド接続箱(EMJ)を使用

正誤表（第19集2編　電力ケーブル技術発展の系統化調査）

年月日	箇所	誤	正
2013年8月1日	p.110　左欄　上から1行目訂正	1979年	1879年
	p.110　左欄　上から17行目訂正	布設された	布設した
	p.112　左欄　上から　7行目1字削除	いずれもも	いずれも
	p.112　左欄　下から　1行目訂正	藤倉電気㈱	藤倉電線㈱
	p.114　右欄　上から　1行目1字削除	図3.6　終端箱箱構造図	図3.6　終端箱構造図
	p.120　タイトル横　年代追記	（昭　　年前半）	（昭和30年前半）
	p.152　左欄　上から　6行目訂正	中狭	中挟
	p.152　左欄　上から14行目訂正	中挟	中挟
	p.164　左欄　1行目　追記	500 CVケーブル	500kV CVケーブル
	p.165　右欄　下から　4行目訂正	中鋏	中挟
	p.166　左欄　上から　6行目訂正	中鋏	中挟
	p.185　左欄　下から17行目訂正	山:	光山:
	p.192　左欄　図8.5のX軸の数字の下に挿入		電圧（KV）