U.D.C. 621.315.211.3

500 kV 級 OF ケーブル

500 kV Class OF-Cable

水上徳五郎* 橋本博治**
Tokugorō Mizukami Hiroji Hashimoto
比企野恭二* 依田文吉*
Kyōji Hikino Bunkichi Yoda

内 容 梗 概

わが国においても 400～500 kV 級の超高圧ケーブル開発の機運が高まってきており，これらのケーブルの実用化も近い将来であると考えられる。

本論文は，絶縁紙の物理特性がケーブル絶縁の電気特性に及ぼす影響，ケーブル導体，絶縁層，補強層およびケーブル終端箱などの諸問題に関し，超高圧ケーブル製作の立場から検討を加えたものである。400～500 kV 級のケーブルには，絶縁紙厚や油圧に特殊な配慮がなされ衝撃波強度を増加させ使用電位傾度を高くとったＯＦケーブルが主として考えられている。筆者らはこのような超高圧ケーブルの場合の絶縁設計には，誘電体損失に基く発熱，充電電流に基く無効電力および屈曲などによる機械的欠陥の発生防止が最も重要であると考え，0.04mm 厚までの低密度絶縁紙と 4 kg/cm² までの中油圧の採用を吟味し，400～500 kV 級にはこの方式のＯＦケーブルが適当であるという結論を得た。

これに基き，27.5mm の絶縁厚の 550mm² のＯＦケーブルの試作を行い各種の特性の検討を行ったが，衝撃波強度は 2,100 kV 以上，長時間交流強度は 800 kV 以上，誘電正接は使用条件で 0.24% であり機械的諸特性も満足なものであることが明らかとなり，500 kV 級ケーブルとして十分使用できることが確認された。

またこれらの超高圧ケーブル用の終端箱には，コンデンサリング形の分圧方式の採用が適当であることが明確になった。

1. 緒 言

ヨーロッパにおける最近の超高圧ケーブルの発達はめざましく，1952年にスエーデンの Harspränget 発電所および Kilforsen発電所において 380kV OF ケーブルが実用されて[1]以来，380～425 kV OF ケーブルがスエーデン[2]，フランス[3]の各地において使用されはじめており，さらに 500 kV 級以上のケーブルの研究も進められている[4]。一方，わが国においても最近，電力需要が激増しており，送電電圧の超高圧化が進められている。これに伴ってケーブル使用電圧も上昇の一途をたどり，400～500 kV 級ケーブルの実用化も身近かな問題になってきている。

これら超高圧ケーブルの実用化にあたっては，従来の OF ケーブルにみられなかった技術上の問題点が多く，これらは製造設備の能力と精度に関連して解決されなければならない。したがって超高圧ケーブル実現には，材料および構造上の問題を検討するとともに設備の整備を行い，材料および構造の選定の可否を確認しなければならない。

本論文では 400～500 kV OF ケーブル開発における諸問題についての検討経過を取りまとめ，これらのケーブルがすでに実用可能の段階になったことを報告する。

2. 超高圧ケーブルの問題点

2.1 導 体

超高圧ケーブルの導体には，改めて検討を必要とする問題が多い[5]。これらのケーブルは屈曲による機械的欠陥が発生しやすいため導体外径をできるだけ縮少させる必要がある。また使用電位傾度が高く薄手の絶縁紙を内層に用いるので，できるだけ平滑な表面が要求される。導体表面のよごれはケーブルの誘電特性に大きな影響を与え，特に超高圧ケーブルの場合には重大な問題となる。

これらの問題を解決するためには，高精度の成形導体の開発と，導体のよごれ防止の研究に重点をおく必要があると考えられる。占積率がよく表面が平滑で可撓性のある成形導体をうるためには素線の断面形状と圧縮率および圧縮法の検討が最も重要であった。また潤滑剤を用いない圧縮法を確立し，導体表面の平滑性の確保と導体のよごれ防止に成功した。誘電特性改善のために，さらに特殊溶剤を用いる導体洗滌装置を作成し，大きな効果を収めた。

第 1 表 超高圧ケーブル用成形導体の特性

項 目	特 性 値
導体公称断面	550 mm²
寸法	油通路内径 15.7 mmφ 外径 31.3 mmφ
構成	第 1 層 12セグメント 第 2 層 21セグメント 第 3 層 24セグメント
占積率	96.7%
導体抵抗	30.4μΩ/m
半径方向油流抵抗	10^3～10^4 g/cm⁴/s

第 1 表に超高圧 OF ケーブル用成形導体の特性の一例を示す。

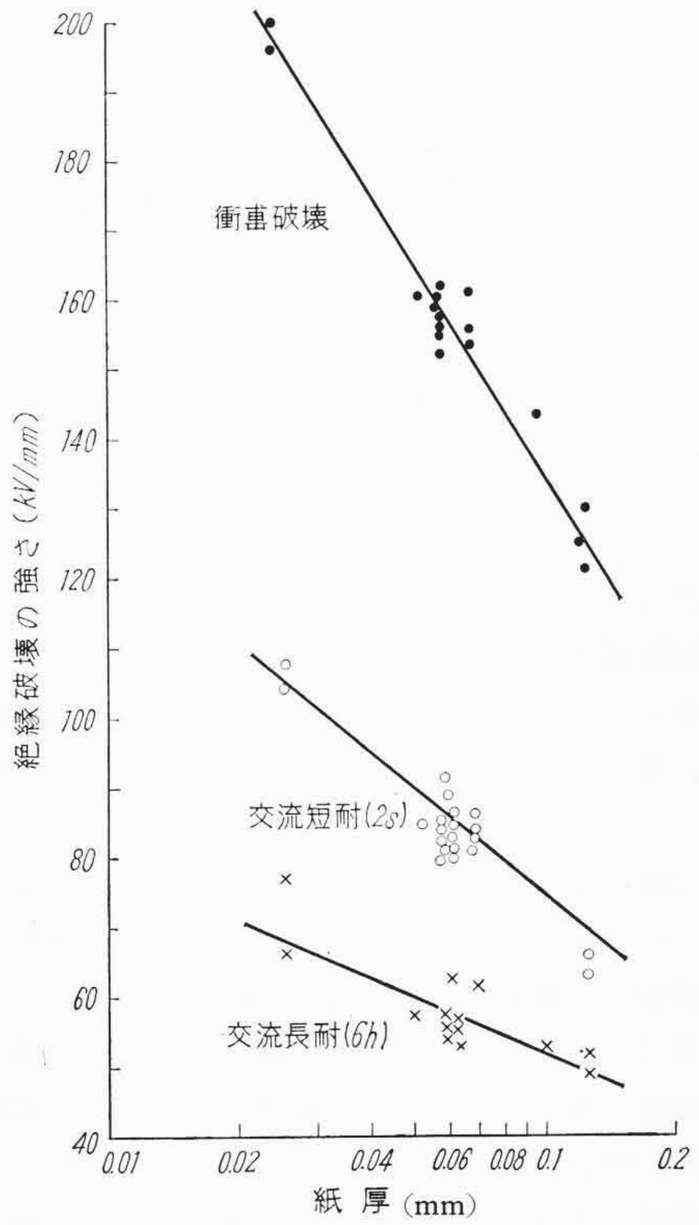
2.2 絶 縁

2.2.1 絶縁の破壊強度

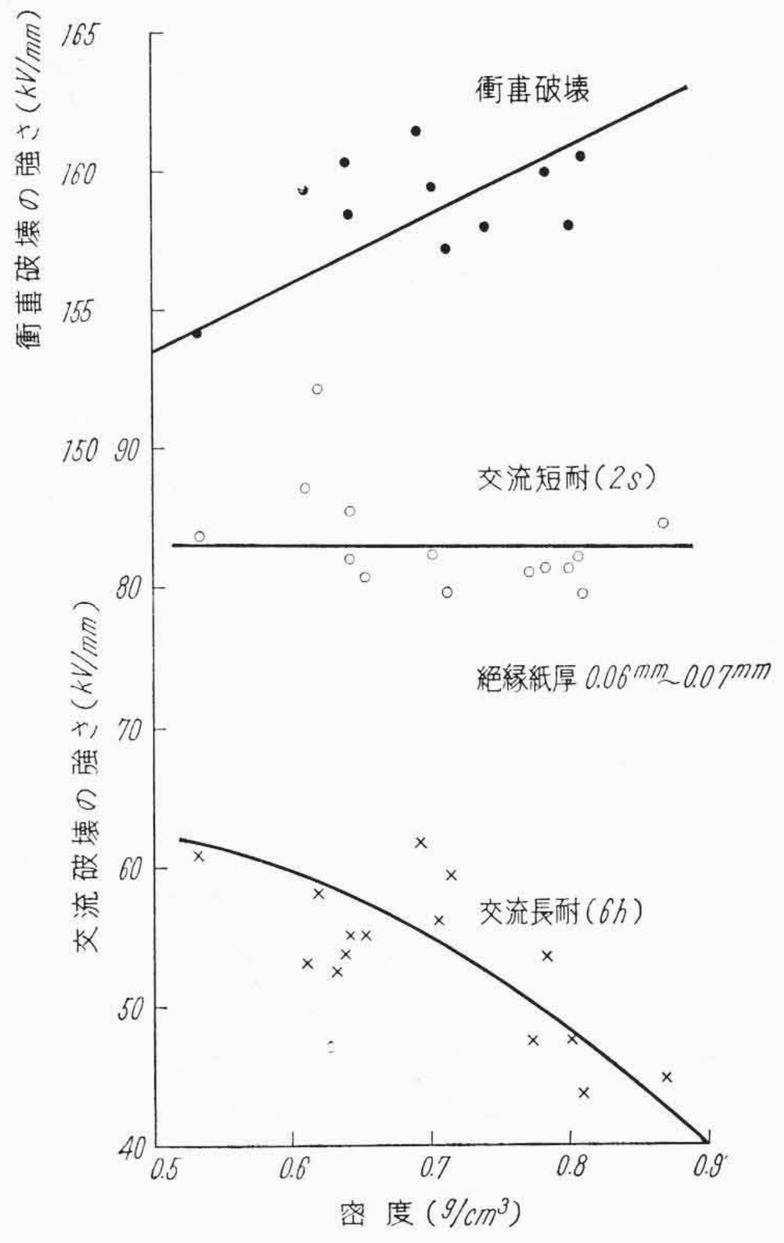
現在のケーブル製造設備の常識から考えると，30mm程度以上の厚さの紙絶縁を電気的に有害な欠陥なしに作成することは非常にむずかしく，またこの程度の絶縁になると熱放散がはなはだ重要な問題になってくる。このため超高圧ケーブルでは絶縁厚に制約を受け，絶縁層の電気強度を上昇させて使用電位傾度を高くすることが必要となる。したがって絶縁紙，絶縁油などの材料的な問題，ケーブル構造および製造設備，製造方式を再検討しなければならない。

絶縁紙の厚さ，密度および気密度の破壊強度に及ぼす影響を研究することは上記の意味から最も重要なことである。これらの問題に関しては従来若干の研究結果が報告されているが[6][7]，結果が必ずしも一致しないのは，これらの要因をおのおの独立に変化させることが抄紙技術上ほとんど不可能であることによるものと

* 日立電線株式会社電線工場
** 日立電線株式会社電線工場工博



第1図 超高圧ケーブル用絶縁紙の油浸状態における厚さと各種破壊強度の関係



第2図 超高圧ケーブル用絶縁紙の油浸状態における密度と各種破壊強度の関係

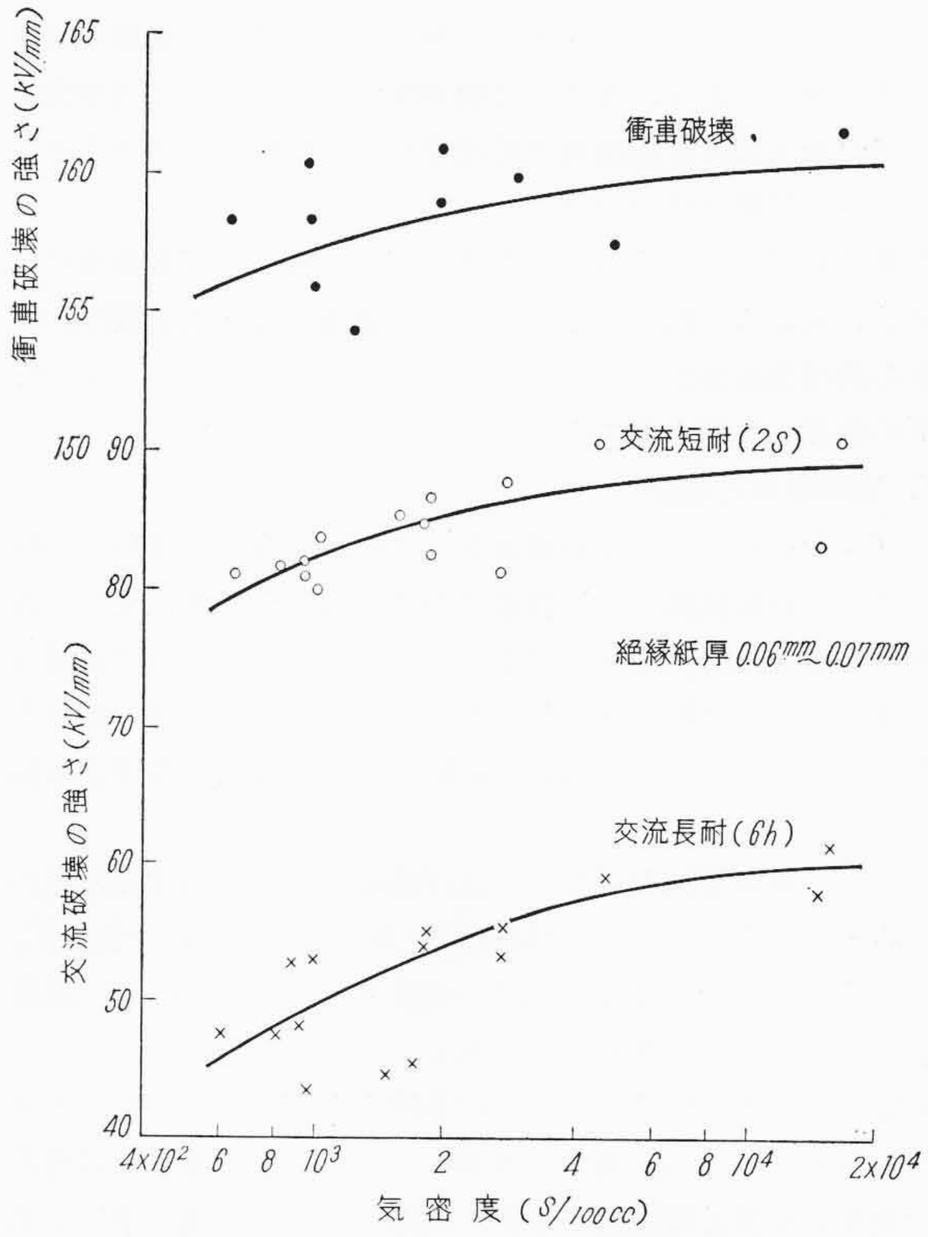
考えられる。筆者らは超高圧ケーブル用に試作したこれらの値の異なる数多くの絶縁紙を用い実用的な意味で油浸紙絶縁のモデルを作成して,絶縁紙の厚さ，密度および気密度が絶縁層の衝撃波，交流短時間および交流長時間の課電による破壊に及ぼす影響を検討した。この結果を**第1～3図**に示す。紙厚を薄くすると一般に電気強度は上昇するが衝撃波の場合は特に顕著であり，紙厚 0.1 mm と0.04mmとを比較した場合交流長時間強度の 125%に対し140%である。一方密度を増加させると衝撃波強度は向上するが交流長時間強度は低下する。これは誘電率の増加による油浸絶縁中の油層部分の電位分担の増加に起因するものと考えられる。気密度の増加はいずれの破壊強度をも向上させる。

したがって絶縁紙の選択には電気強度の立場からは低密度高気密度の薄紙の採用が有力であると考えられるが，これらの特性は独立なものでなく，また機械特性，加工性および誘電特性を考え合わせる必要があり，単純に結論を下すことはできない。

2.2.2 誘 電 特 性

超高圧ケーブルの場合には誘電体損失が銅損以外の熱源となり，これは使用電圧の上昇につれて急激に増大する。たとえば誘電正接を 0.5%と仮定すると，220 kV ケーブルの誘電体損失は銅損の30%以上になり，345 kV ケーブルでは 80%以上になる[8]。また使用電圧の上昇につれて充電電流が増加し無効電力が増す。したがって超高圧ケーブル絶縁の誘電正接および静電容量は，送電容量，ケーブル条長に制約を与える要因となり[8]，非常に重要な意味をもってくる。

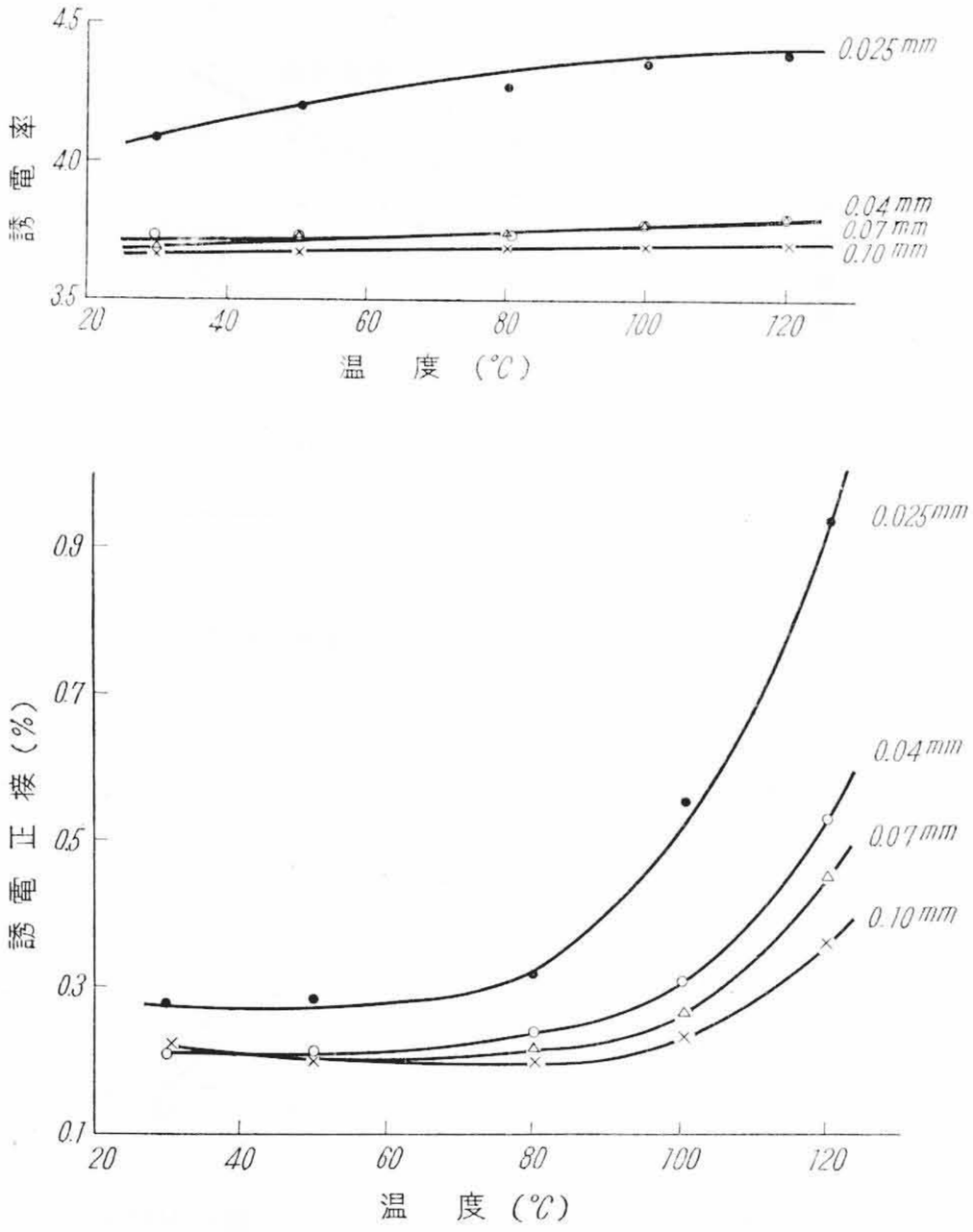
以上の観点から前項で述べた各種の厚さの超高圧ケーブル用絶縁紙について，誘電正接と誘電率の詳細な吟味を行った。この結果を**第4図**に示す。紙厚が薄くなるにしたがって誘電正接，誘電率ともに増加の傾向が認められる。これは紙厚の減少に伴う密度の増加に起因するものと考えられる。いずれにしても絶縁紙の選択には，電気強度や機械的な特性以外にこれらの誘電特性を十分考慮に入れなければならない。



第3図 超高圧ケーブル用絶縁紙の油浸状態における気密度と各種破壊強度の関係

2.2.3 絶縁紙の加工技術

超高圧ケーブルは絶縁層が厚くなり屈曲に対する条件が過酷である。また使用電位傾度を上昇させるため薄手の絶縁紙の使用を考慮しなければならない。このため紙巻技術が非常に重要であり，特に紙皺などの機械的欠陥と乾燥後の絶縁層のゆるみに対する考慮が必要である。



第4図　超高圧ケーブル用絶縁紙の誘電率と誘電正接の温度特性

紙皺などの絶縁層の機械的欠陥の発生の難易は，絶縁層の可撓性と密接な関係があり，筆者らは紙巻時の紙テープの張力や含有水分などの加工条件と絶縁層の可撓性および絶縁層のゆるみとの関係について詳細な検討を行った。

また各工程において5m以上の径の巻取を確保して屈曲条件を緩和すると同時に，紙巻機のテープ張力調整装置と紙巻機室，紙切機室の調湿調温装置の整備を行い，上記最適条件の実現により，絶縁層の機械的欠陥の発生防止を図った。

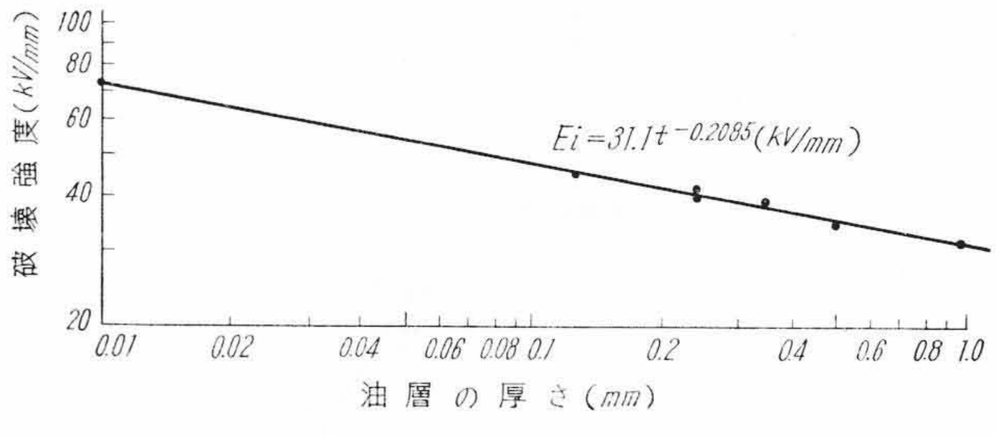
2.2.4　油膜厚さと油圧

ケーブル絶縁においては絶縁紙テープの突き合わせ部分に油膜が存在する。絶縁紙部分と油膜部分の電圧分担から考えて，交流破壊強度が油膜厚の影響を受けることが考慮される。油浸絶縁層内に種々の厚さの油膜を作成したモデル試料による実測の結果を**第5図**に示す。油膜厚の増加とともに交流破壊強度が低下する傾向が明確に認められる。

欠陥のない絶縁層においては，ほぼ絶縁紙厚に相当する油膜が存在すると考えられるので，絶縁紙厚は薄いほうが有利であるが，欠陥が発生した場合には異常に厚い油膜が形成されるので，紙厚の選定にはこの点の考慮も必要である。

使用電位傾度改善のほかの一つの手段として油圧を増加させる[9]ことが考えられる。油圧の増加によって，油膜部分の特性の影響の大きい交流破壊強度の改善が期待できる。実測結果によると，15 kg/cm² 程度までは交流破壊強度に顕著な効果が認められ，1 kg/cm² における値の150%が得られるが，高油圧範囲にはいるとその効果はしだいに飽和の傾向を示す。したがって 4 kg/cm² においてすでに 15 kg/cm² における交流破壊強度の 85% 以上の値が得られる。

一方衝撃波強度に対する油圧の効果は比較的少ない。これは衝撃波破壊が絶縁紙部分の特性に左右されることに起因すると考えられるが，いずれにしても 4 kg/cm² の中油圧範囲で飽和値に近い



第5図　油膜厚と交流破壊強度の関係

値が得られる。

2.2.5　絶縁層の構成

超高圧ケーブルの絶縁設計にあたっては，衝撃波強度，長時間交流強度，誘電特性，機械特性および加工性を同時に考慮する必要がある。

1954年以降 L. Domenach 氏らにより 0.014mm程度の極薄紙と高油圧を用いて使用電位傾度を上昇させる方式が開発された[9]。筆者らの検討では**第1図**に示すように紙厚の低減とともに衝撃波強度は上昇するが，0.04mm 以下の極薄紙になると機械的強度と均一性が顕著に減少し，好条件の紙巻加工が非常に困難になる。また製造時，布設時にうける屈曲そのほかの応力により，絶縁層に欠陥が発生して厚い油膜を形成する機会が多くなる。

また**第4図**に示すように，ケーブル用の極薄紙の場合はカレンダリングにより密度が高くなり，誘電正接および誘電率が上昇し，超高圧ケーブルに重要な誘電体損失および充電電流低減の目標が犠牲になる。機械特性改善のためにじん皮繊維を用いる場合は，この傾向はさらに強くなる[10]。

超高圧ケーブルの場合には，導体直上部は電位傾度，熱放散などが非常に悪条件にあり[2]，また熱源が近傍にあるので，長時間交流特性に対しては局部的にきわめて不利な立場にある。一方最近避雷器分野の発達が著しく，超高圧系統の BIL の低減は世界的な傾向になってきている。従来の 60kV 級の普通厚の絶縁紙を用いた場合においても衝撃波強度は6時間交流強度の 2.5 倍以上の値が得られており，衝撃波強度改善のために，長時間交流強度，誘電特性を犠牲にするのは妥当でないと考える。

油圧の選定にあたっては，絶縁紙部分の電気特性との協調と経済性とを考慮する必要があり，筆者らは 4 kg/cm² 程度の中油圧が適当と考える。15 kg/cm² 程度の高油圧範囲ではケーブル補強層および終端箱，圧力油槽などの付属品の設計がむずかしくなり，絶縁油漏洩の危惧も増してくる。特に超高圧ケーブルにおける付属品の比重を考えると経済的に非常に不利になる。4 kg/cm² 程度の中油圧範囲を採用すれば電気的にも高油圧範囲とほぼ同等の効果が期待でき，経済的に非常に有利になる。

以上の観点から筆者らは超高圧ケーブルの絶縁構成には 0.04 mm までの密度の高くない絶縁紙と，4 kg/cm² 程度の中油圧範囲を採用することに決定し，前述の加工条件の検討，紙巻加工の精度の向上，乾燥方式の改善などの製作上の考慮を実施して，機械的にも誘電的にも不安の残らない，十分な衝撃波強度と長時間交流強度をもつ絶縁層をうることができた。

2.3　しゃへい

使用電位傾度を増加させるために導体しゃへい，絶縁しゃへいは重要なものである。従来導体しゃへいに用いられてきたカーボン紙は導体の凹凸を電気的に軽減する[11]目的のほかに，ストリーマの伸びを抑制するなどの二次的な効果も期待され，また導体絶縁間の油膜厚さを減少させる効果もある。超高圧ケーブルにおいては導体

第2表 海外における 380 kV 以上の著名ケーブルの構造と特性

製造メーカー	Liljeholmens Kabelfabrik	Liljeholmens Kabelfabrik	Les Cables de Lyon	Les Cables de Lyon	Les Cables de Lyon	Les Cables de Lyon	Pirelli S.A.
製作年次	1950	1955	1950	1955	1957	1959	1956
使用場所	Harspränget[1] Kilforsen.	Stenkullen (変圧器直結)[2] Såderäsen	Harspränget[2]	Lasel[4]	Stornorrfors Grundfors	Roselend[3] (変圧器直結)	試作品[13]
送電容量 (MVA)	360	850		880(強制空冷)	880(強制水冷)	88	600～800
電圧 (kV)	380	425	380	425	500	380	425
導体面積 (mm²)	500	900	540	1,100	407	234	800
設計基準	インパルス耐圧 1,775 kV 交流耐圧 450kV 1分 直流耐圧 850kV 1分 (布設) 耐内圧 30 kg/cm²	インパルス耐圧 1,500 kV	インパルス耐圧 1,775 kV 交流耐圧 450 kV 1分	インパルス耐圧 1,500kV 耐内圧 35 kg/cm²			インパルス耐圧 1,500 kV 交流耐圧 2.5E, 24 hr
使用最大ストレス (kV/mm)	13.6		15.5	15.7	14.6	17.0	13.0
導体形式	メッキ銅セグメンタル	メッキ銅，セグメンタル	普通中空導体，表面のみセグメント	普通中空導体	普通中空導体	普通中空導体	セグメンタル
油通路内径 (mm)	15.7	15.7					
導体外径 (mm)	30.8	39.0					
絶縁厚 (mm)	28	27.5	24	22	28	24	26.5
絶縁構成	40μ, 50μ, 70μ, 100μ, 110μ	40μ, 50μ, 70μ 100μ, 110μ	20μ～120μ	20μ～120μ	20μ～120μ		普通絶縁紙 (特に高密度でない)
導体しゃへい	なし	カーボン紙 40μ,100μ		特殊半導体 20μ 厚	特殊半導体 20μ 厚		カーボン紙
絶縁しゃへい	金属化成紙と銅テープ	カーボン紙と金属化成紙および銅テープ					金属化成紙
鉛被方式	油通路溝つき二重鉛被 5.5mm厚，3.5mm厚	油通路溝つき一重鉛被 7.5mm厚	油通路溝つき二重鉛被	油通路溝つき二重鉛被	油通路溝つき二重鉛被	油通路溝つき二重鉛被	3.2 mm
外装方式	軟銅短ピッチ，硬銅長ピッチ P.V.C. テープ防食	ステンレス,短ピッチ，長ピッチ P.V.C.テープ防食		ステンレス短ピッチ，長ピッチ P.V.C.防食	ステンレス,短ピッチ，長ピッチ		銅テープ 加硫ゴム防食
仕上外径 (mm)	118	117	99	110	115	104.8	110
総重量 (kg/m)	52	47.8	32				
油圧 (kg/cm²)	10～4	10～4	14～23	15	15		1
電気特性	衝撃波 1,950kV B.D. 1分間交流 782 kV B.D. 直流耐圧 850 kV O.K. 誘電正接 0.36% (30.5kV常温) 静電容量 0.225 μF/km		直流耐圧 850 kV OK		衝撃波 2,000kV.B.D. (C.H.) 1分間交流 850 kV CH せん絡 誘電正接 0.3% (350kV,20℃)		衝撃波 1,750kV B.D. 交流 600 kV 24h OK 誘電正接 0.28% (300 kV 20℃) 0.275% (300kV 90℃)
機械特性	内圧強度 79 kg/cm² BD				内圧強度 120 kg/cm² B.D.		

近傍に薄手の絶縁紙を用いるので油膜厚の見地から同程度の厚さのカーボン紙が必要となるが，この場合カーボン紙の機械的強度の改善が重要な問題である。

また筆者らの研究[12]によると通常のアセチレンブラック紙の使用によって交流強度は20～25%向上するが，衝撃波に対してはその効果は非常に少ない。このため衝撃波に対しても十分な効果が期待できる材料の開発が必要である。

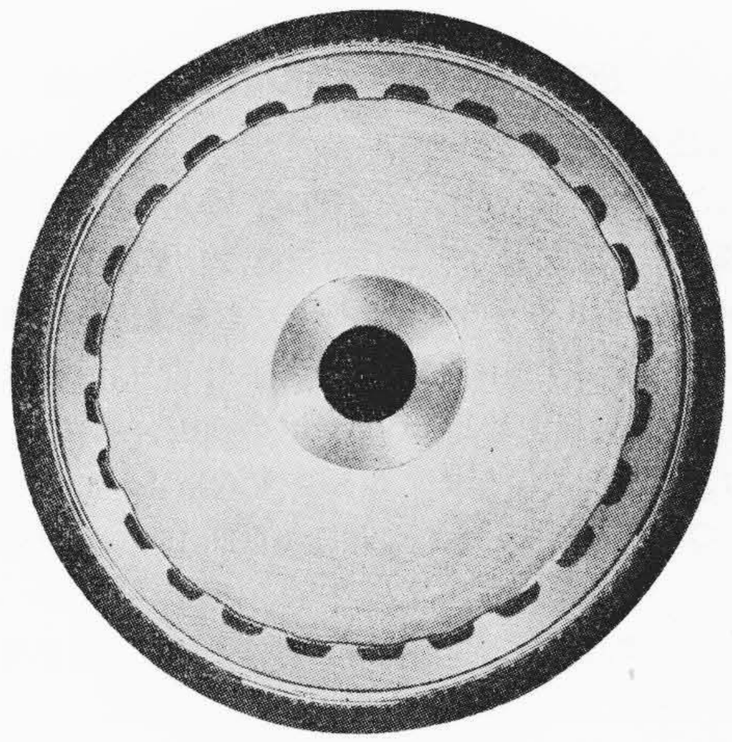
絶縁しゃへいに関しては，超高圧ケーブルには油通路用の溝を内面に設けた鉛被が用いられるので，鉛被内面と絶縁層間の油膜を電気的にしゃへいすることが主目的となる。このためには上記の衝撃波に対する考慮が特に必要であると考えられる。

以上の見地から，超高圧ケーブルしゃへい構造に関しては従来の方式を再検討する必要があり，筆者らもこの検討を進めている。

2.4 鉛被，補強層

OFケーブルなどの内圧形ケーブルに対しては特に鉛被の欠陥防止が重要であるが[13]最近開発された Hansson-Robertson 連続被鉛機によって大口径の純鉛および各種合金鉛の連続押出しが可能となり，鉛被に対する信頼性が非常に高まった。

したがって現在製造上問題となる点は十分解決されている。500 kV 級ケーブルの場合には**第2表**および**第6図**に示すように鉛被内面に溝が設けられているが，これは温度急変時の絶縁層外層部の油圧変化を許容限界内に制限することのほかに，製造時，乾燥注油条件を良好にするためである。



第6図 500 kV 級 OF ケーブルの断面構造

ケーブル内圧に対する補強としては，通常の布設条件で使用される場合には従来の低油圧OFケーブルの補強に比べ特に変更の必要は認められない。ただ 500 kV 級 OF ケーブルの場合は標準内圧 4 kg/cm² 以上となるので，従来の半径方向内圧に対する短ピッチ巻補強層のほかに，軸方向内圧に対する長ピッチ巻補強層が必要である。これら両者に対する補強層は鉛被の内圧によるひずみが許容範囲内におさまるように設計されなければならない。

第3表の 500 kV 級ケーブルの補強層は高落差布設の場合を想定

第3表　超高圧ケーブル試作品の構造と特性

電圧 (kV)	154 単心	154 単心	154 単心	154 3心	154 3心	154 3心	275 単心	275 単心	500 単心
導体面積 (mm²)	380	600	600	200	200	200	550	600	550
使用電位傾度 (kV/mm)	9.4	8.6	9.4	11.9	10.8	9.9	11.9	11.5	18.2
導体形式	セグメンタル	普通中空導体	普通中空導体	圧縮導体	圧縮導体	圧縮導体	セグメンタル	普通中空導体	セグメンタル
油通路内径 (mm)	7.0	14.0	14.0	18.0	18.0	18.0	15.7	12.0	15.7
導体外径 (mm)	21.8	35.6	35.6	17.0	17.0	17.0	31.3	34.6	31.3
絶縁厚 (mm)	15.0	14.0	12.5	12.0	14.0	16.0	21.0	21.0	27.5
絶縁構成 (mm)	0.06,0.100,0.125	0.07,0.100,0.125	0.07,0.100,0.125	0.07,0.100,0.125	0.07,0.100,0.125	0.07, 0.10, 0.125	0.04, 0.07 0.10, 0.125	0.04, 0.07 0.10, 0.125	0.04, 0.07 0.10, 0.125
導体しゃへい (mm)	なし	0.10カーボン紙 2枚	0.10カーボン紙 2枚	0.10カーボン紙 2枚	0.10カーボン紙 2枚	0.10カーボン紙 2枚	0.06カーボン紙 2枚	0.06カーボン紙 2枚	0.06カーボン紙 2枚
絶縁しゃへい (mm)	0.125絶縁紙 1枚 0.1銅テープ 1枚	0.15カーボン紙 2枚	0.15カーボン紙 2枚	0.15カーボン紙 1枚 0.15カーボン紙＋0.10銅テープ	0.15カーボン紙 1枚 0.15カーボン紙＋0.10銅テープ	0.15カーボン紙 1枚 0.15カーボン紙＋0.10銅テープ	0.15カーボン紙 2枚	0.15カーボン紙 2枚	0.15カーボン紙 2枚 0.15金属化成紙 } 共巻 0.10銅テープ } 共巻
鉛被方式 (mm)	純鉛 5.2厚	純鉛 3.4厚	純鉛 3.4厚	純鉛 4.0厚	純鉛 4.0厚	純鉛 4.0厚	E合金 3.4厚	E合金 3.4厚	純鉛 6.8厚(溝つき)
外装方式 (mm)	なし	0.20×25 黄銅テープ2枚 ネオプレン 4.0厚	0.20×25 黄銅テープ 2枚 ネオプレン 4.0厚	0.2×25 黄銅テープ 2枚 ネオプレン 4.0厚	0.2×25 黄銅テープ 2枚 ネオプレン 4.0厚	0.2×25 黄銅テープ 2枚 ネオプレン 4.0厚	0.2×25 黄銅テープ 2枚 ネオプレン 4.0厚	0.2×25 黄銅テープ 2枚 ネオプレン 3.5厚	0.4×40 ステンレステープ2枚 0.5×10 ステンレステープ30枚 0.5×10 ステンレステープ1枚 ネオプレン 4.0厚
仕上外径 (mm)	64.0	86	86	110.2	119.4	128.4	94	100	116
総重量 (kg/m)		22.0	19.3	31.1	35.5	39.9	25.0	24.7	
油圧 (kg/cm²)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	4.0
衝撃破壊電圧	850 kV/1回 C.H. で B.D.	1,150 kV C.H. で B.D.	1,170 kV OK	960 kV/2回 C.H. で B.D.	1,060kV/1回 C.H. で B.D.	1,000kV/2回 C.H. で B.D.	1,400kV/1回 C.H. でせん絡	試験中	2,100kV/1回 C.H. で B.D.
衝撃破壊電位傾度	88.2 kV/mm	111.6 kV/mm	122.3 kV/mm	130.0 kV/mm	130.5 kV/mm	111.7 kV/mm	100.6kV/mm		132.2 kV/mm
長時間交流破壊電圧	410 kV/10min	430 kV C.H. で B.D.	440kV CH せん絡				560 kV C.H. でせん絡		800 kV B.D. せず
長時間交流破壊電位傾度	42.6 kV/mm B.D.	41.7 kV/mm	46.6 kV/mm				42.3kV/mm		50.4 kV/mm
誘電正接	% 0.21 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$	% 0.26 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$	% 0.24 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$	% 0.24 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$	% 0.24 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$	% 0.24 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$	% 0.24 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$		% 0.24 $\left(\frac{E}{\sqrt{3}}\text{ 常温}\right)$
静電容量	0.30 μF/km	0.355 μF/km	0.392 μF/km	0.224μF/km	0.212 μF/km	0.184 μF/km	0.237 μF/km		0.270 μF/km

して最高静油圧 15 kg/cm² として設計されたものである。破壊試験の結果では 60 kg/cm² においても破壊しなかった。これは使用内圧に対して十分余裕のある値である。

3. 超高圧ケーブルの構造および性能

3.1 超高圧ケーブルの構造

現在実用されまたは試作された 380 kV 以上の超高圧ケーブルの代表的な例を**第2表**に示す。これらの例における特長は Liljeholmens Kabelfabrik が最小 0.04mm厚までの絶縁紙と標準 4 kg/cm² の油圧を用いたいわゆる中油圧方式を採用し[1]，Les Cables de Lyon が密度の高い極薄紙と 15 kg/cm² の油圧を標準としたいわゆる高油圧方式であること[4][14]，および Pirelli S. A. が低密度紙と 1 kg/cm² の油圧を標準としたいわゆる低油圧方式をとっていること[5]である。

一方，筆者らは前述のような検討を行った結果，低密度絶縁紙および中油圧の採用が最も合理的と考える。この方式に基いて現在までに試作したケーブルの構造例を**第3表**に示す。

導体は比較検討のため普通中空導体とセグメンタル導体の両方を採用し，導体しゃへいには 154 kV ケーブルには 0.1 mm 厚カーボン紙，275 kV および 500 kV 級ケーブルには 0.06 mm 厚カーボン紙を用いた。絶縁は 154 kV ケーブルでは 0.07mm までの絶縁紙を用いて 12～16mm 厚さとし，275 kV および 500 kV 級ケーブルでは 0.04 mm までの絶縁紙を用いてそれぞれ 21 mm，27.5mm の厚さとした。使用電位傾度はそれぞれ 8.6～11.9 kV/mm，11.5～11.9 kV/mm，18.2 kV/mm となる。鉛被はいずれも一重鉛被であり，500 kV 級ケーブルには内側に油通路用の溝を設けた。使用油圧は 154 kV，275 kV ケーブルの場合には 1 kg/cm² で，真中テープとネオプレンによる普通補強防蝕方式を用い，500 kV 級ケーブルの場合は 4 kg/cm² を採用し，補強には高落差布設を検討するための 15 kg/cm² 使用内圧を想定した長ピッチ，短ピッチ両方式のステンレススチール補強層を用いた。

500 kV 級ケーブルの断面写真を**第6図**に示す。

3.2 電気特性

154 kV，275 kV および 500 kV 級 OF ケーブルの各種試作品についての電気的諸特性を**第3表**に示す。

0.04mm までの厚さの絶縁紙を用いた 275 kV 以上のケーブルと 0.07 mm までの厚さの絶縁紙を用いた 154 kV ケーブルの破壊電位傾度を比較すると，紙厚の効果が十分認められ，500 kV 級ケーブルの場合にも特別な欠陥なく絶縁層が作成されていることがうかがわれる。

275 kV 以上のケーブルの静電容量，誘電正接の値は 154 kV ケーブルの値と比較しても，ほぼ同等な値であり，紙厚による誘電体損失および充電電流増加の不安のないことを示しており，絶縁紙の選択が妥当であったことを示している。

400～500 kV 級ケーブルの場合，要求される絶縁性能は系統の絶縁協調に基礎をおいたものでなければならないと考えられる。わが国の 400 kV 級送電専門委員会の報告によれば，系統電圧 380 kV の系統に対しては 1,425 kV が BIL として要望されており，500 kV の系統に対しては 1,800 kV 程度が推定される。ケーブルの衝撃波強度，交流強度をこれらの値に対してどのように決定するかは今後の問題であろうが，いずれにしても今回の試作ケーブルの特性は，380 kV 系統はもちろん 500 kV 系統にも実用の期待が十分もてるも

第4表 275 kV OFケーブルの絶縁層半径方向の油流抵抗

絶縁体構成＼項目	275 kV 550 mm² セグメンタル導体 OF ケーブル 油圧 (kg/cm²)	油温 (℃)	単位長20℃における油流抵抗 (g/cm⁴/s)	275 kV 600 mm² 普通導体 OF ケーブル 油圧 (kg/cm²)	油温 (℃)	単位長20℃における油流抵抗 (g/cm⁴/s)
絶縁層全体	1.08	15.0	2.43×10^{7}	1.25	26.9	2.56×10^{7}
	2.16	15.3	2.44×10^{7}	2.00	29.6	2.53×10^{7}
0.04mm, 0.07mm, 0.10mmまでの絶縁紙を残した場合	1.07	12.0	2.32×10^{7}	1.50	29.4	2.28×10^{7}
	2.02	11.7	2.25×10^{7}	—	—	—
0.04mm, 0.07mmまでの絶縁紙を残した場合	1.00	10.0	2.11×10^{7}	1.50	29.3	2.09×10^{7}
	2.02	14.2	2.08×10^{7}	—	—	—
0.04mm絶縁紙だけを残した場合	1.10	8.7	1.78×10^{7}	1.48	24.9	1.92×10^{7}
	2.00	10.0	1.80×10^{7}	—	—	—
導体だけの場合	1.00	11.6	10^{5} 以下	0.50	25.0	10^{5} 以下

のであろう。**第2表**に示した海外における各ケーブルの特性と比較しても不足のないものである。

3.3 物理特性

超高圧ケーブルでは絶縁層が厚く，薄手の紙を用いるので，絶縁層半径方向の油流抵抗を検討する必要がある。このため 275 kV 550 mm² 成形導体 OF ケーブルと，275 kV 600 mm² 普通導体 OF ケーブルを用いて，絶縁層全体，0.04mm，0.07mm，0.10mmまでの絶縁紙を用いた部分，0.04mm，0.07mm までの絶縁紙を用いた部分，0.04mm の絶縁紙の部分のそれぞれの半径方向の油流抵抗を測定した。この結果を**第4表**に示す。これより絶縁層半径方向の油圧降下は十分考慮に入れる必要があり，0.04mm 絶縁紙部分の降下が全体の50%以上であることがわかる。また導体部分の油流抵抗は絶縁層部分と比較して無視できる程度のものであり，成形導体の使用による特別の支障はないことが明らかとなった。

なお，油流抵抗は次式により算定した。

$$R=\frac{k_t\cdot P\cdot l}{Q}\ [\mathrm{g/cm^4/s}]$$

ただし，
- R： 20℃単位長当り油流抵抗(g/cm⁴/s)
- k_t： 20℃絶縁油粘度温度換算係数
- P： 油圧(g/cm²)
- l： ケーブル実効長(cm)
- Q： 単位時間の油量(cm³/s)

3.4 機械特性

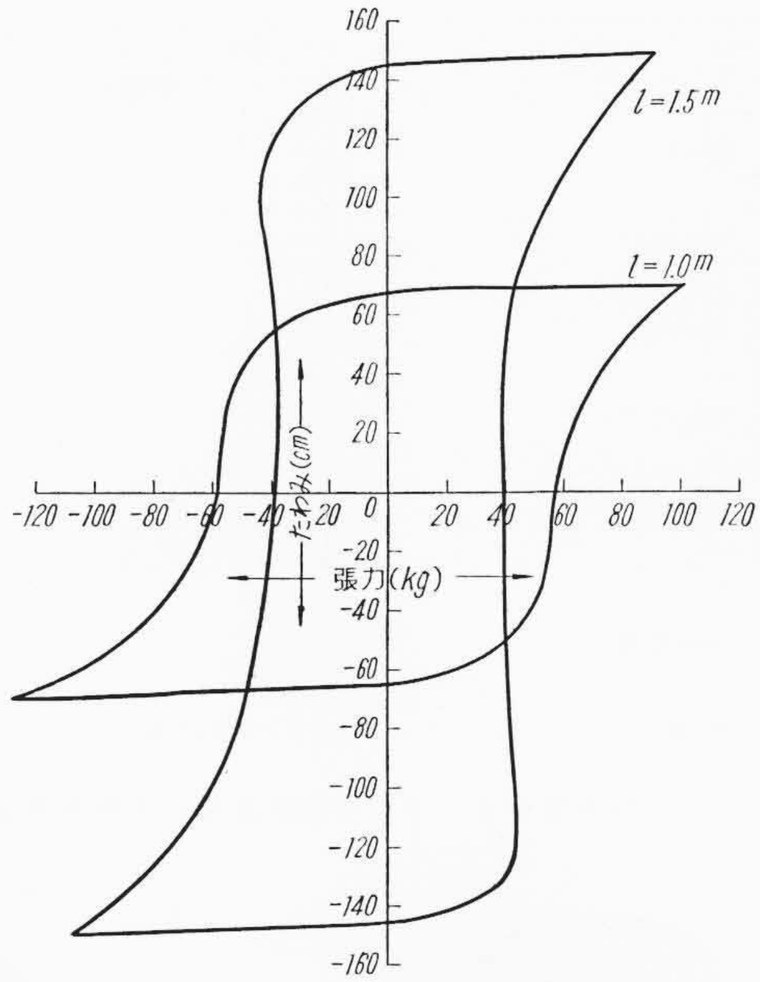
3.4.1 屈曲特性

超高圧ケーブルでは布設時における屈曲に対する安全性を検討することが重要である。このため 275 kV 級 550 mm², 500 kV 級 550 mm² OF ケーブルを 4 ℃の水中に 2 時間浸漬したのち，鉛被外径の20倍の直径の巻枠に往復 2 回巻付け中央部の解体点検を行った。この結果，導体，鉛被はもちろん絶縁層にも紙切れ，顕著な紙皺などの異常は全く認められないことが明らかとなった。

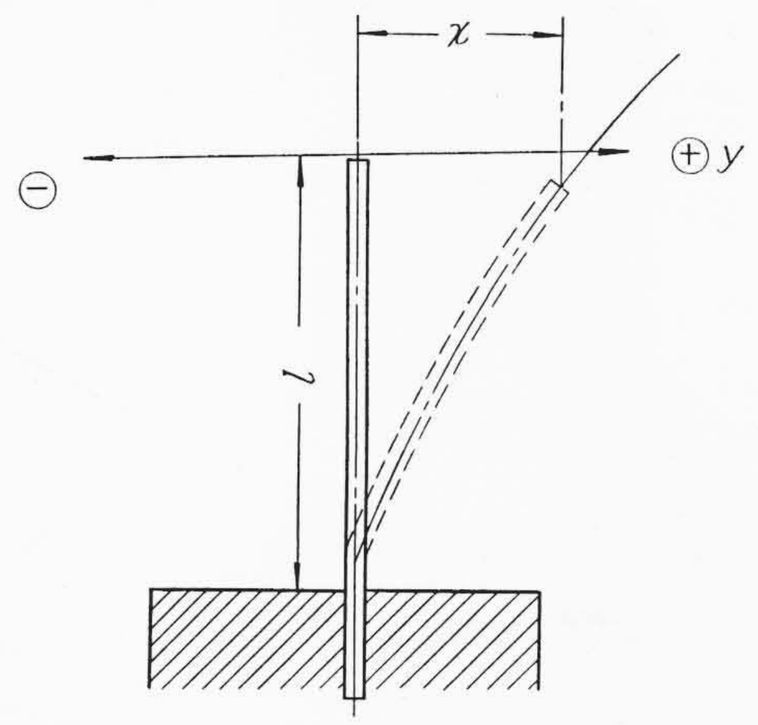
3.4.2 たわみ特性

この種のケーブルは絶縁層がケーブルの曲げ特性に及ぼす影響が大きいので，たわみ特性の詳細を検討することは意義深いと考えられる。**第7図**(b)のように 500 kV ケーブルの一端を固定し，他端を引張ってこの張力とたわみを測定すると**第7図**(a)のようになった。

このヒステレシスは，ケーブルがこのひずみ範囲では一応弾性体であることを示しているが，弾性定数が応力およびケーブルの幾何学的形状で異なるため一種の非線形弾性体と考えられる。同様な実験をほかのケーブルにも適用した結果ケーブルに一定のたわみを与えるための張力は導体サイズの大きいほど大きいが，特に大容量ケーブルにおいては分割導体などの考慮か払われるのでこの張力は飽和の傾向を示す。一方絶縁層の厚さが増すとこの張力は急激に増大しケーブルの可撓性は絶縁構成によって大きく左右され，前述のように紙厚，紙巻条件の適当な選択が重要な意義をもつことが明らかになった。



第7図(a) 500 kV 級 OF ケーブルの張力とたわみの関係



x……たわみ(cm)　y……張力(kg)　l……試料長(cm)

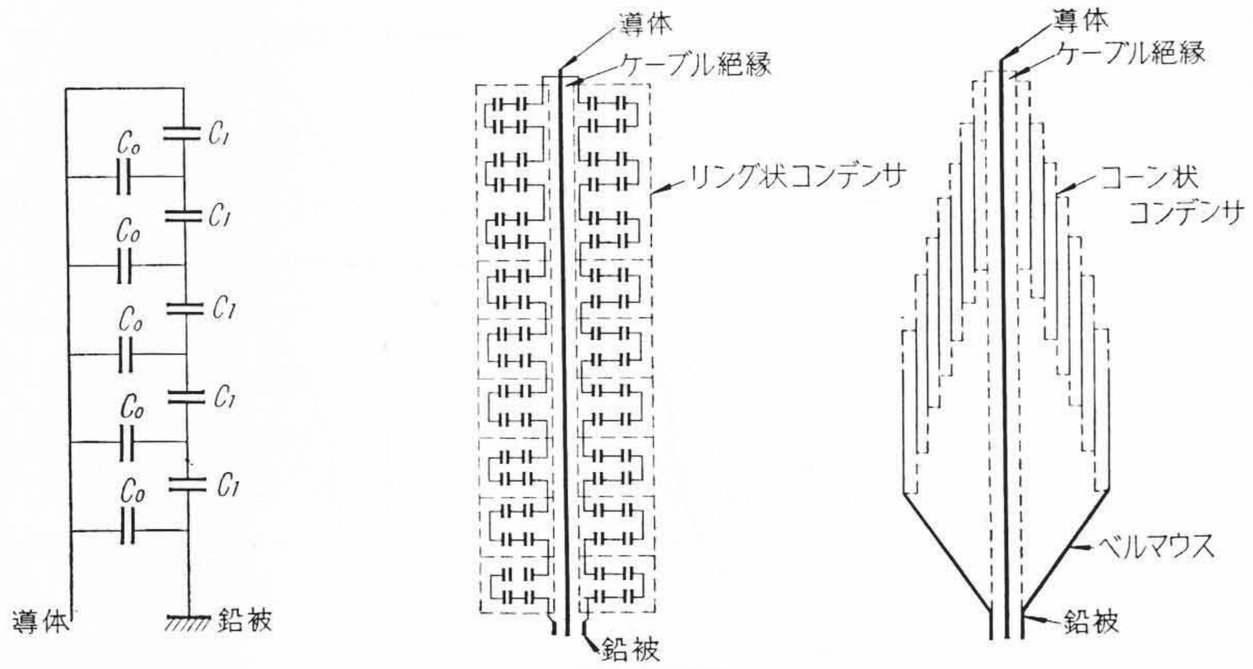
第7図(b) ケーブルのたわみ特性測定方法

4. ケーブル終端箱

4.1 内部絶縁設計

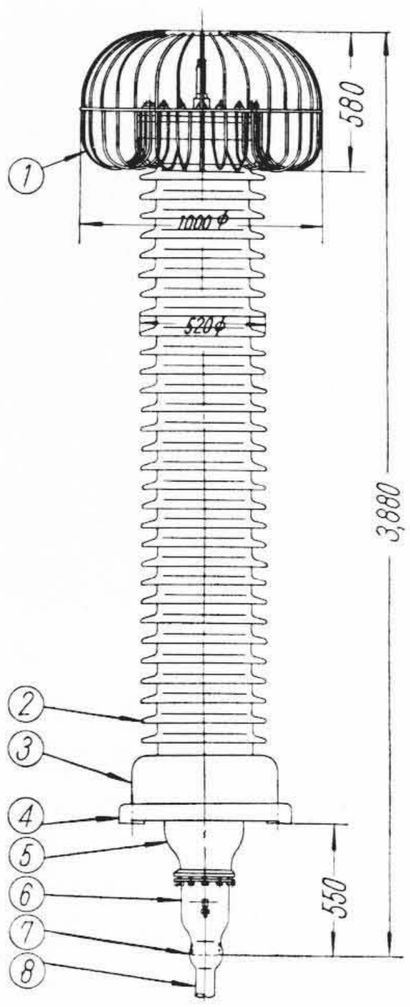
超高圧ケーブルにおいては，ケーブル端末処理の問題は技術的にも経済的にも比重が大きくなる。ケーブルの端末は変圧器などの場合と異なり大地電位の鉛被端が高電位の導体に対してきわめて近接しているので鉛被端に電界が集中する。従来この部分の電界を緩和するためにストレスコントロールコーンを用いるしゃへい形終端箱の方式がとられてきたが[16][17]，超高圧ケーブルの場合には，電圧が高く，またケーブル絶縁外径が太いのでストレスコントロールコーンの寸法が著しく大きくなり，施工性，均一性はもちろんのこと経済的にも不利となる。

鉛被端の電界集中を緩和させる合理的な方法としては抵抗またはコンデンサによる分圧が考えられるが，抵抗分圧は熱的条件が過酷



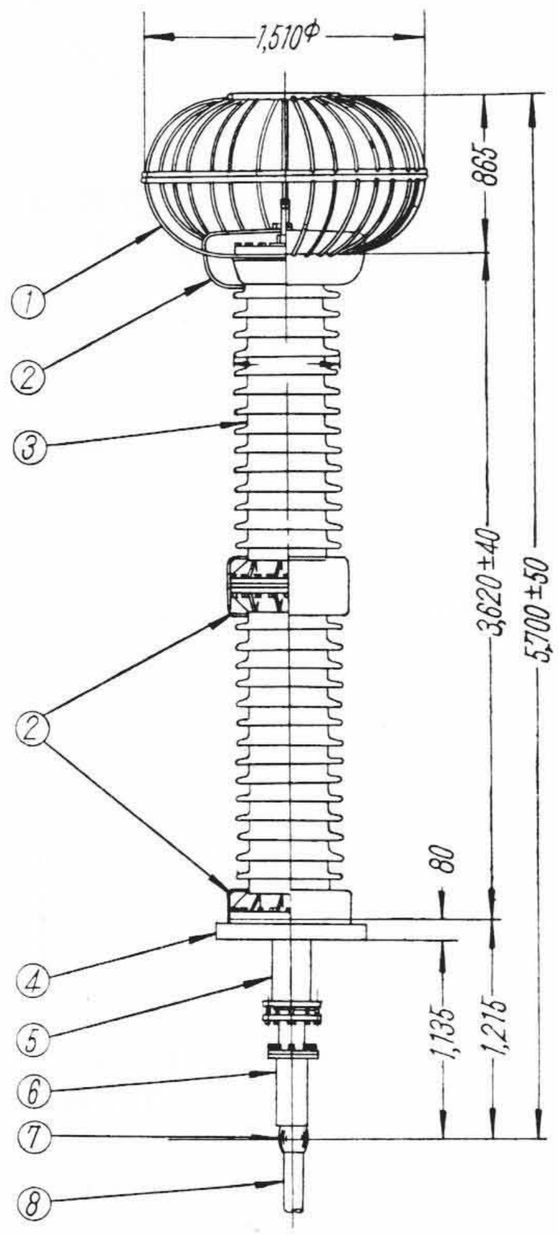
等価回路　　リング状コンデンサ分圧方式　　コーン状コンデンサ分圧方式

第8図　コンデンサ形終端箱の電極配置と等価回路



① コロナゲージ
② 金具付碍管
③ シールド筒
④ 支持金具
⑤ 下部金具（1）
⑥ 下部金具（2）
⑦ 鉛工
⑧ ケーブル

第9図　275 kV 級ケーブル用終端箱



① シールドリング
② シールド筒
③ 金具付碍管
④ 支持金具
⑤ 下部金具（1）
⑥ 下部金具（2）
⑦ 鉛工
⑧ ケーブル

第10図　500 kV ケーブル用終端箱

となり超高圧ケーブルではもっぱらコンデンサ分圧方式が開発されている[18][19]。これは鉛被端と導体間に多数段の分圧用コンデンサをそう入し，その値を適当に選ぶことにより鉛被端における電界集中を防止し直線的な電位分布にする方法である。この方法によれば端末寸法を縮少させることができ，施工上の欠陥がなければ電気的にも合理性のあるものとなる。

コンデンサ形終端箱には，あらかじめ金属箔を巻き込んだ絶縁紙コーンを作成しこれをケーブル絶縁層の上にそう入するものと，リング状のコンデンサエレメントをあらかじめ適当数作成しておき，これをケーブル絶縁層の上にそう入して重ね，それぞれのエレメントを直列に接続して分圧コンデンサを形成するもの[1]とがある。筆者らは軸方向の電位を均一にするための合理性，コンデンサ自体の絶縁の均一性，施工性，寸法の縮少などの利点から，超高圧ケーブルにはリング状コンデンサ形終端箱を採用することにした。**第8図**は各種コンデンサ分圧方式の電極配置と等価回路を示したものである。

この終端箱の内部設計の原理は，電位分布と充電電流を考慮して**第8図**の C_1/C_0 を選択し，コンデンサ課電電圧と電極端ストレスの設定に基いて分圧段数とエレメントの構造を決定することである。この終端箱の組立ては適当な太さの補強紙を巻いた上に個々のコンデンサリングを一段ずつ積み重ねていく方式であるため施工は容易であり局部的な欠陥も発生しない。組立後の排気注油は従来のシールド形終端箱と全く同様である。

これらの性能は**第3表**のケーブルの性能とともに示されているが，500 kV 級ケーブルでは 2,100 kV で終端箱の内部破壊を発生した。この電圧自体は十分満足できる値であるが，破壊通路を検討の結果，現在と同一寸法でさらに性能を向上させる見透しを得た。

4.2　外部絶縁設計

終端箱の寸法は碍管表面のせん絡電圧特性からの制約と内部の端末補強およびストレス緩和のための内部絶縁設計によって決定されなければならない。まず碍管表面のせん絡に対しては予想耐電圧を想定した上でこれに耐える寸法にしなければならない。すなわち系統電圧 275 kV に対する BIL は 1,050 kV が推奨されており，500 kV に対しては 1,800 kV と推定して**第9～10図**に示す寸法に決定した。碍子有効せん絡距離は従来の実績を参考にし，太さはリング状コンデンサによる内部絶縁設計から決定された。前述の試験結果の示すように碍管の表面せん絡に対してはなお相当の裕度のあることが確認されたが，特に本例に示すようなリング状コンデンサ形終端箱では碍管表面の電位分担も均一化されるので従来のしゃへい形終端箱よりもせん絡電圧は上昇するものと考えられる。このことは碍管の寸法をさらに縮少させる余地があることを示している。

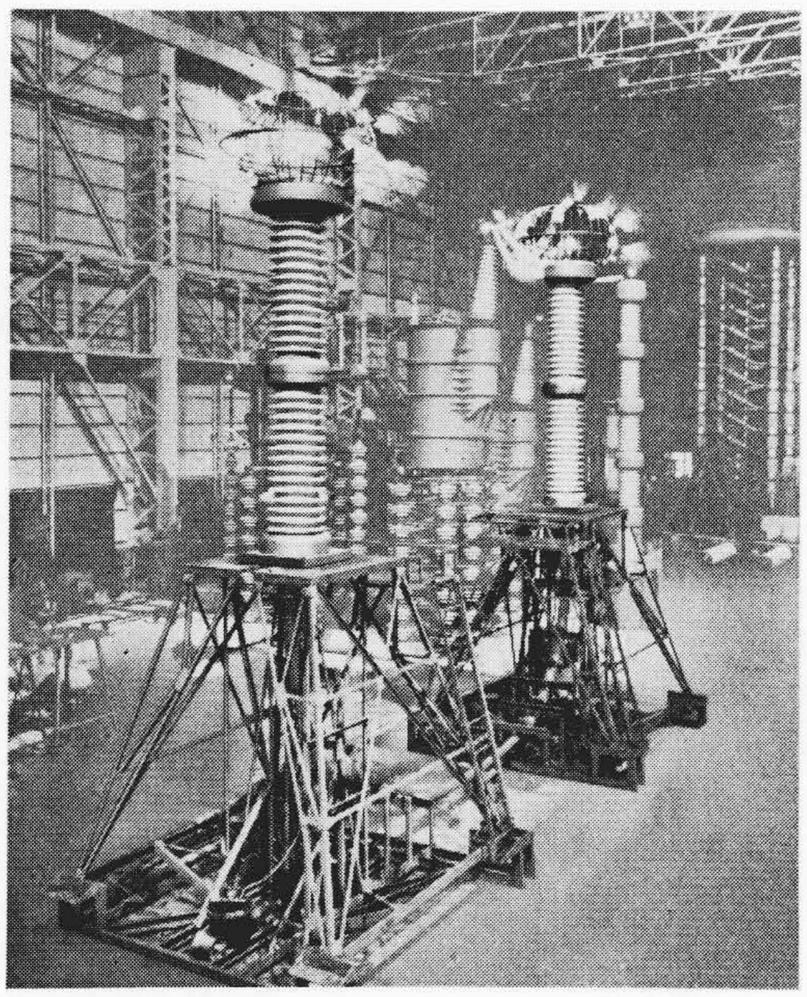
4.3　コロナシールドケージ

終端箱頂部のコロナシールドケージは従来実験的に形状を求めており，154 kV 以下では表面円滑なシールドが採用されていた。275 kV 以上ではその大きさが極端に増加して重量的にも無視できなくなるのでケージ形シールドを採用した。またこのような場合におけるコロナ開始電圧の計算方式の検討例は少ないので筆者らは次に述べる近似理論式を導入してこの点を解決した。

すなわち大地電位とケージとを同心球面と考え，ケージの最大電位傾度とケージと同一半径の球面の最大電位傾度の比が近似的に2次元の同心配置のケージと円筒における最大電位傾度の比と等しいと考えたとき，ケージ表面の最大電位傾度は次式で示される[20]。

$$E_m=\frac{\left\{1+\dfrac{(n-1)r}{R}\right\}}{nr\log e\,\dfrac{D}{\sqrt[n]{nrd^{n-1}}}}\cdot\frac{D\log D/d}{D-d}\cdot V$$

ただし，E_m：ケージ表面の最大電位傾度
D：大地電位面直径
d：ケージ直径
n：ケージ素線の本数



第 11 図　500 kV 級 OF ケーブル課電状況

r：　ケージ素線の半径

V：　印加電圧

一方この式で求められる電位傾度が Peek 氏の交流コロナ開始電位傾度に達したときコロナが開始すると考えると，ケージのコロナ開始電圧は容易に計算できる。275 kV および 500 kV 級終端箱の計算値はそれぞれ 295 kV および 314 kV であるのに対し，実測値は 270 kV および 310 kV でありかなりよく一致している。**第 11 図**はコロナ発生状況を示したものであるが，発光部分は縁端付近が主体であることからもこのような考え方が妥当であると推定される。ケージのコロナ開始電圧は実際上使用電圧以上であれば十分と考えられるので前記の設計値は妥当なものであると考えられる。

5. 結　　言

超高圧ケーブルの開発は，現在ケーブル業界における最も大きな題目の一つになっている。このため超高圧ケーブルの材料，設計および製作上の諸問題を検討し，0.04mm までの厚さの低密度ケーブル絶縁紙および中油圧を用いて，500 kV の系統電圧に使用できる超高圧ＯＦケーブルを作成することができた。

検討事項の内容を次に述べる。

（1）　超高圧ケーブルには成形導体が適当であることを確認し，導体洗浄法および圧縮法を確立した。550mm² の試作成形導体では占積率 96.7%，半径方向の油流抵抗 10^5g/cm⁴/s 以下であり，きわめて平滑な表面が得られた。

（2）　超高圧ケーブル用絶縁紙の紙厚，密度および気密度が油浸絶縁状態の衝撃波強度，長時間交流強度，短時間交流強度，誘電率および誘電正接に及ぼす影響を吟味した。絶縁紙厚を薄くすることは衝撃波強度の向上に効果が認められるが，反面加工性および機械的強度が低下し，また密度増加の原因となり，誘電率および誘電正接を増加させる。超高圧ケーブルの長時間交流強度および誘電体損失の重要性から絶縁紙は 0.04mm 以上の厚さの低密度ケーブル紙，油圧は 4 kg/cm² 程度の中油圧が適当であることが明らかになった。

（3）　製造工程中に絶縁層に機械的欠陥を与えないためには屈曲径に考慮を払う以外に，絶縁層の可撓性と乾燥後のゆるみの検討が必要であり，この詳細を吟味した。

紙巻工程における湿度調節と紙テープ張力調節を高精度のものとし，上記の最適条件を採用することにより，0.04mm 厚までの絶縁紙で満足な絶縁層をうることができた。

（4）　リング状コンデンサ形終端箱の有利な点を確認し，その設計，製作，組立方式を確立し，154 kV，275 kV および 500 kV 級のもので満足な電気特性をうることができた。

以上の検討結果を活用して 154 kV 380～600 mm²，275 kV 550～600 mm² および 500 kV 級 550 mm² の各種 OF ケーブルの試作を行ったがその特性は次のとおりであり満足できるものであった。

（1）　154 kV ケーブルでは衝撃波強度 1,170 kV 以上，長時間交流強度 440 kV 以上であり，誘電正接は常温，使用電圧において 0.21% である。絶縁紙は 0.07mm 厚までを用い，油圧は 1 kg/cm² である。

（2）　275 kV ケーブルでは衝撃波強度 1,400 kV 以上，長時間交流強度 560 kV 以上であり，誘電正接は常温使用電圧において 0.24% である。絶縁紙厚は 0.04 mm まで，油圧は 1 kg/cm² を用い，絶縁厚は21mmとした。

（3）　500 kV 級ケーブルでは衝撃波強度 2,100 kV 以上，長時間交流強度 800 kV 以上であり，最大電位傾度に換算すると，それぞれ 132.3 kV/mm，50.4 kV/mm となる。誘電正接は常温使用電圧において 0.24% であり絶縁紙厚は 0.04mm まで，油圧は 4kg/cm² を採用し，絶縁厚は 27.5 mm とした。

380 kV 級および 500 kV 級ケーブルの設計基準をどの程度にするかは今後の問題であるが，いま仮に 380 kV 系統の BIL を 1,425 kV，500 kV系統の BIL を 1,800 kV とし，使用電圧の 2.5倍の長時間交流強度が要求されるとしても，本ケーブルは十分 500 kV 系統に実用できると考える。

最後に本研究に終始ご指導いただいた日立電線株式会社斎藤工場長，内藤副工場長，久本部長，大和部長ならびに直接ご協力いただいた佐藤，遠藤両氏に感謝の意を表する。

参　考　文　献

（1）　B. Hansson, B. Bjurström, R. Johansson, G. Axelsson: CIGRÈ No. 205 (1952)
（2）　B. Hansson: CIGRÈ No. 213 (1958)
（3）　J. N. Oudin: CIGRÈ No. 231 (1960)
（4）　L. Domenach: RGE **68** (3) 202 (1959)
（5）　H. Halperin: EE **78** 604 (1959)
（6）　P. G. Priaroggia, G. Palandri: AIEE pt III (Power Apparatus and Systems) **75** 1343 (1956)
（7）　H. C. Hall, E. Kelk: PIEE **103** No. 12 564 (1956)
（8）　C. M. БРАГИН: Эиектрилество No. 7 65 (1959)
（9）　L. Domenach: CIGRÈ No. 217 (1954)
(10)　H. Halperin: AIEE pt III (Power Apparatus and Systems) **75** 348 (1956)
(11)　清水：住友電気彙報 11号 31（昭11）（Levi Civita 氏の原文引用あり）
(12)　比企野，渡辺，庄司：日立評論 第39巻 第9号 1053（昭 32）
(13)　P. G. Priaroggia, Pirelli カタログ (The Development of the Oil-filled Cable in Italy (1957))
(14)　Les Cables de Lyon カタログ (Informations Techniques No. 1 June (1954))
(15)　P. G. Priaroggia, A. Morello, G. Palandri: GIGRÈ No. 202 (1958)
(16)　H. D. Short: CIGRÈ No. 209 (1956)
(17)　L. G. Brazier: J. I. E. E. **93** (1946)
(18)　J. A. Giaro: CIGRÈ No. 209 (1952)
(19)　L. Domenach: CIGRÈ No. 211 (1952)
(20)　井出，橋本：電気学会東京支部大会 No. 289（昭 35-11）