超高圧直流ケーブルの絶縁性能

Insulation Performance of Extrahigh-voltage DC Oil-filled Cable

安藤順夫* 遠藤 桓* 沼尻文哉** Nobuo Andô Takeshi Endô Fumiya Numajiri

As factors that affect the insulation performance of extrahigh-voltage DC oil-filled cables, dependence of DC breakdown strength and resistivity on temperature and moisture in insulation are of importance, and the problem of superposition of surges in inverse polarity should be thoroughly investigated. Tests were carried out with impregnated paper and model cable, to seek the fundamental properties of DC cables. These tests revealed that breakdown strength and resistivity of insulation are considerably dependent on temperature and moisture and that the stress which occurred at the instant of superposition of surge in inverse polarity against line voltage was most severe for cable insulation. On the other hand, an improved calculating method for stress distribution in insulation was derived. It contains heat generated by leakage current and varied resistivity of insulation grading. The results of a series of breakdown tests with 250 kV DC oil-filled cables and flexible joints were analyzed by this calculation method and the above matters were confirmed.

1. 緒 言

北海道と本州を結ぶ直流連系の建設計画が具体化され,わが国 にも本格的な±250kV 600MWの直流送電が実現されようとして いる。イギリスではこれまで主流を占めた長距離海底直流ケーブ ルとは違って,大都市内部での大容量連系用のロンドン・キング スノース系統±266kV 640MWの直流ケーブルが運転にはいった。 このように国内外とも直流ケーブルは新しい段階を迎えており, 筆者らも直流ケーブルの重要性を認識し,理論,材料による基礎 的な検討と試作ケーブルによる具体的な開発研究を進めてきた。

本報告は250kV級直流OFケーブルを対象として,直流ケーブル絶縁性能上の特異な問題とそれに対する対策ならびに試作ケーブルの直流性能とその検討結果についてまとめたものである。

2. 絶縁性能に関係する特異な問題

直流ケーブルが交流ケーブルと異なる点は数多くあるが,特に ケーブルの絶縁性能上,注意しなければならない問題は次の3点 であろう。

(1) 絶縁体内の直流電位分布

負荷電流の有無による絶縁体内の温度こう配により電位分布が 変化し、負荷電流ありの場合にはシース側に最高電界が発生する。 したがって、負荷条件と電位分布の関係を的確に把握(はあく)し シース側の高電界に考慮を払わなければならない。

(2) 油浸紙の直流絶縁耐力

絶縁紙の厚さ,密度,気密度など油浸紙本来の特性以外に,温 度や残留水分などによる直流絶縁耐力の変化が大きいため,(1) 項と合わせて適切な絶縁設計を行なう必要がある。

(3) 異常電圧に対する絶縁耐力

~10倍であるが、直流ケーブルでは3倍程度にとられており、このため直流ケーブルでは交流ケーブルであまり考慮されなかった 運転電圧とサージの重畳の問題が重要になる。

3. 直流ケーブル絶縁体内の電位, 電界分布

直流ケーブルの絶縁体内の電位や電界を計算する方法として数 種の方法が用いられており、これを分類すると次の三つに大別さ れる。

- (1) 絶縁体の抵抗成分(p)に着目し、これに空間電荷を加味して電界のひずみや過渡的な変化を求める。
- (2) 絶縁体の容量成分(ε) に着目し、これに空間電荷を加味 して計算する。
- (3) ρ, ε両者を考慮し計算する。このとき空間電荷はρ, ε の
 分布の相違分として同時に考慮される。

一般には(3)の方法が用いられており、さらに簡略化して、一定 の直流電圧に対してはρ成分から計算し、サージ重畳や極性反転 時には ε 成分で決まる電界を重畳するという方法がとられている。 筆者らもこの(3)の方法を用いており、特にρによって決まる直流 電界については詳細な解析を行ない後述のようにその妥当性を確 認した。

3.1 直流電圧に対する電界

すでに明らかにされたように、ケーブル絶縁体内で電位と温度 に関するラプラス、ポアソンの式を連立微分方程式として解けば 電位、電界および温度分布を求めることができる⁽¹⁾。

 $\operatorname{div} |\sigma(g \operatorname{rad} V)| = 0 \cdots (1)$

div $\{k \ (g \operatorname{rad} T)\} = -\sigma (g \operatorname{rad} V)^2 \cdots (2)$

ただし、 $\sigma = \sigma_0 \exp[\alpha T + \beta E]$ であり、また V:電位(kV)、

直流ケーブルに加わる異常電圧としては、 雷サージ、 開閉サー ジのほかに直流系統の固有の現象である潮流逆転に伴う極性反転 があげられる。

* 目立電線株式会社研究所** 日立電線株式会社研究所 工学博士

E:電界 (kV/mm), σ :電導度 (U/cm), k:熱伝導度 (w/°C·cm), σ_0 , α , β :絶縁体の種類により決まる定数, である。この計算法 の特徴は, (2)式で絶縁体の発熱を考慮していることおよび $d\sigma_0/dr$, $d\alpha/dr$, $d\beta/dr \neq 0$ とすることにより異なった絶縁抵抗特性の絶 縁体を組み合わせた場合の電界も計算できる点にある。

51

3.2 異常電圧重畳ならびに極性反転時の電界

異常電圧重畳ならびに極性反転時には,重畳あるいは反転直後 の発生電界が最高となり,その値はεによって決まるサージ性電 界がそれまで加わっていた直流電界に重畳されたものとして求め られる⁽²⁾。

すなわち,

 $V = V_{DC} + V_{I_{mp}} \qquad (3)$ $E = E_{DC} + E_{I_{mp}} \qquad (4)$

ただし、V、E:重畳直後の電位、電界、V_{DC}、E_{DC}:直流電位、 電界、V_{Imp}、 E_{Imp} :サージ電圧による電位、電界である。極性反 転時には運転電圧の2倍の逆極性サージが重畳されたものとみな せばよい。

3.3 接続部の電界

接続部の電位や電界を求める場合にも(1)~(4)式を用いればよい が、長さ方向に一様でないため同軸円筒の長さ方向の成分も考慮 する必要があり、半径方向の成分のみを考えればよいケーブルの 場合ほどには簡単に解けない。このため、二次元のポテンシャル 場の解析方法であるメッシュ法による繰返し収束計算が用いられ る。計算は非常に複雑となるが(2)式の絶縁体の発熱σ(grad V)² を無視することにより比較的簡単に実用的な解を得ることができ る。

4. 油浸紙材料の直流特性



油浸紙材料の直流電圧に対する諸特性についてもすでに報告した⁽¹⁾ので重複を避け、ここでは2章と関連する特殊な項目について述べる。

4.1 直流破壊強度の温度および残留水分量依存性

OF油浸紙の直流破壊強度は常温で110kV/mm程度であり,紙厚, 密度,気密度などによって100~130kV/mmとなりうることはすで に明らかにされている。このような絶縁紙本来の特性以外に外部 条件によって油浸紙の破壊強度は変化する。特に温度および油浸 紙中の残留水分による破壊強度の低下はケーブルの性能を検討す るうえで無視することのできない現象である。

図1に温度上昇に伴う直流およびインパルス破壊強度の低下の 様子が示されている。これより,直流破壊強度はインパルス破壊強 度以上に強く温度に依存しており,OFケーブルの許容温度80℃ 付近では直流破壊強度を80kV/mm程度と考えねばならないと言わ れている。図2には,残留水分量への依存性が正常に乾燥含浸さ れた油浸紙の破壊強度に対する比率として示されており,残留水 分量が0.3%付近まではほぼ一定であるが,これを越えると破壊 強度は急激に低下している。正常なケーブルの残留水分量は0.1 %程度であり問題とはならないが,接続部などでは施工条件によ って0.5~1%となることもあるので,接続部の設計,施工上注 意しなければならない。





4.2 絶縁抵抗の残留水分量依存性

一般にOFケーブルの絶縁体の固有絶縁抵抗は温度と電界に依 存するとされ、次の実験式で表わされている。

 ρ_0 , α , β は油浸紙の種類によって多少変化するが, 先の絶縁 破壊強度と同様残留水分量によって大きく変化する。特に ρ_0 の変 化が大きく, その実測例は図3に示されている。すなわち, 残留 水分量が1%増加することにより ρ_0 は約1けた低下している。

後述のように接続部の施工中に部分的な吸湿が生ずるとその部 分の抵抗が低下し電圧分担は軽減される。しかしその分だけ他の 部分の電圧分担が大きくなり局部的な高電界を生じ,絶縁破壊の 発端となる。したがって破壊強度の低下,絶縁抵抗の低下はいず れもケーブルの性能を低下させることになり,ケーブルの設計, 製造,接続部の施工上吸湿と残留水分には厳重な注意を払う必要 がある。

4.3 異常電圧重畳時の破壊強度

筆者らはさきに直流電圧に逆極性のサージが重畳したときの破 壊強度は、あらかじめ加える直流電圧の増加に伴い若干上昇する

インパルスよりも直流のほうが破壊強度の温度依存性がかなり大きい。OFケーブル許容温度80℃では約80kV/mmとなる。 図1 油浸紙の直流破壊強度の温度依存性

52

な法反は、のちか この加える 世紀 电圧 の 追加に ド・ 名 千 上 弁 する が、その値としては重畳の瞬間に加わった最大電位差が110kV/mm 程度で破壊するとみなさなければならないことを明らかにした⁽¹⁾。 その他の報告⁽³⁾⁽⁴⁾も総合してみると、図4(a)に示されたように同 極性サージ重畳時には重畳後のピークで決まるストレスがある値 以上となれば破壊し、また逆極性サージ重畳時には重畳後のピー ク値ではなく電圧変化分で決まるストレスがある値以上となれば

超高圧直流ケーブルの絶縁性能 日立評論 VOL.54 No.10 901



(b) ギャップなどで保護されたケーブルに生ずるサージ重畳現象

- (a) 同極性サージに対してはピーク値が, 逆極性サージに対しては変化分が破壊を決定する。
- (b) 対地電圧±3Voのサージが加わったとき同極性ならピーク値3Voが, 逆極性なら 変化分4Voが破壊と結びつく。(a), (b)から逆極性サージ重畳時のほうが過酷であ ることがわかる。

図4 直流ケーブルにおけるサージ重畳

破壊すると考えられる。破壊を生ずるストレスは報告によって試験条件が異なるため多少の違いがあり、またあらかじめ加えた直流電圧によって若干増加するが概略110kV/mmである。

一方, 実系統で保護ギャップなどが"一定の対地電圧"で放電 することによりケーブルを保護しているものとすれば次のような 現象が生ずる。今, 仮に運転電圧 Voの系統において保護ギャップ による保護レベルを3倍の3Toとすると, 図4(b) に示したよう に同極性サージの場合にはケーブルはピーク値3Voに耐えればよ いのに対し, 逆極性サージの場合にはケーブルは電圧の変化分4 Voに耐えなければならないことになり, 明らかに逆極性サージが 加わった場合のほうが過酷になる。

表1 試作250kV 直流OF ケーブルの構造

	項		日		単位	数 値
油	通	路	内	径	mm ∳	14
導	断		面	積	mm ²	400
体	外			径	mm ∳	30.6
絶	導	体しゃ・	へい層	厚さ	mm	0.3
縁	絶	縁	体	厚	mm	12.4
体	絶	縁体しゃ	へい声	層厚さ	mm	0.3
鉛		被	厚	さ	mm	2.9
防 1	食 層	, 補 強	頁 層	厚さ	mm	5.0
外		and a second		径	mm Ø	約 73

とおりである。既設の250kV級直流ケーブルのインパルスレベル は運転電圧の3倍程度に採られており、今回もこれを踏襲して 750kVとした。この値が交流154kVOFケーブルのBILと一致 するため絶縁厚さも交流154kVOFケーブルと同様になっている。 なお絶縁紙としては従来の交流ケーブル用絶縁紙の中から80~150 µのものを選んで使用し、また絶縁油は長距離海底OFケーブル に適した粘度の低いソフトアルキルベンゼン油とした。

5.2 試験結果

試験内容は,常温と高温(導体通電による温度こう配ありの状態と外部加熱による均一高温状態)での直流破壊試験,ヒートサイクル下での極性反転耐圧試験および常温でのインパルス,交流破壊試験である。試験条件と試験結果は**表2**に一括して表示されている。

長距離海底ケーブルでは架空線側からの侵入サージはケーブルの インピーダンスが小さいため減衰してケーブル部に侵入すること, 長距離のため往復反射によるビルドアップが生じないことなどの理由 で雷サージは大きい問題にはならないと考えられる。しかし短距離の ケーブルの場合にはビルドアップによる異常電圧の発生が予想され るので上に述べた逆極性サージ重畳時の特異な現象が重要となる。

サージ重畳時の破壊強度については実際のケーブルで十分検討 する必要があるが、上記の現象が成り立つとすれば、直流系統で のサージ保護装置の特性あるいは系統保護レベルとケーブル耐圧 レベルとの関連などを再検討しなければならない。

なお、逆極性サージが加わった場合のケーブルの性能を予測するには、絶縁体に加わるみかけのストレスとして、先の(4)式から電界の変化分を求めればよい。

 $E = (E_{DC} + E_{Imp}) - E_{DC} = E_{Imp}$(6) ただし、 E_{Imp} : 逆極性サージ重畳時の電界であり、これは絶対 値が「直流運転電圧+逆極性サージの対地電圧」に等しいサージ が加わったときの電界に相当する。なおこの点に関しては、本論 文執筆中に同様の考え方がCIGRE論文に報告された⁽⁵⁾のでここ に付記しておく。

5. 250 kV 級直流 OF ケーブルの絶縁耐力

表2 250kV 直流OF ケーブルの試験結果

No.	電 圧 種 類	加 熱 方 法	鉛 被 温 度 (℃)	破壊(耐) 電 圧 (kV)	昇 圧 法	導 体 電 流 (AC, A)
1	Θ	常温	16	⊖1150	600 kV (30分) ~50 kV (30分)	
2	直.	外 部 加 熱	105	⊖ 850	"	_
3	流	導 体 加 熱	68	⊖ 850	600 kV (30分) ~50 kV (30分)	1050 〕重 統
4	直 流 極 性 反 転	ヒート サイクル 5回	19 5 65	(±375)	土375 kV 各60分	1000 6時間 ON 4時間 OFF
5	インパルス	常温	14	⊖1080	$\begin{array}{c} \bigcirc 900 kV(3\square) \\ \sim \bigcirc 20 kV(3\square) \end{array}$	
6	交 流	當調	16	420	360kV(3時間) ~30kV(3時間)	

5.3 試験結果の解析

今回の試験により、ケーブル本体の直流破壊電圧は過酷な温度 条件の下でも運転電圧の3倍以上となり、また極性反転耐圧、イ ンパルス、交流破壊性能いずれも250kV級直流OFケーブルとし ての所期性能を満たしていることが明らかになった。

この結果をもとに先の(1),(2)式による電界計算法の妥当性 を検討するため、次の3種の方法で絶縁体に加わるストレスを求 めてみた。

 (i) 従来の直流電界計算法。絶縁体は同じ特性の材料により均一に構成されており(ρ₀, α, β, k=一定), 絶縁体の発熱を 無視する(σ(gradV)²=0)。

53

実際のケーブルの性能を確認し、前記の電界計算法の妥当性を 検討するため試作250kV級直流OFケーブルを用いてケーブル本 体ならびに海底ケーブル用同径ジョイントの破壊試験を実施した。 なお、試験結果の一部はすでに報告されている⁽⁶⁾。 5.1 試作ケーブルの構造 試作250kV1×400mm² 直流OFケーブルの構造は表1に示した 表3 250kV 直流OF ケーブル絶縁体の固有抵抗と熱伝導率

表4 250kV直流OFケーブルの破壊試験結果の解析

(計算法(i)~(iii)に用いられた定数) 意法 絶縁 厚 ρ_0 α

計算法	絶縁厚 (mm)	$\begin{array}{ } \rho_{0} \\ (\times 10^{19} \Omega \cdot cm) \end{array}$	lpha (1/°C)	$\beta \pmod{(mm/kV)}$	k $(10^{-2} \mathrm{w/C} \cdot \mathrm{cm})$
(i) (i i)	12.4	2.0	0.100	0.04	0.182
	0.7	1.97	0.104	0.042	0.200
	0.8	1.72	0.103	0.040	0.200
(iii)	1.0	1.78	0.099	0.039	0.182
	2.7	1.85	0.098	0.041	0.182
	7.2	1.89	0.098	0.041	0.182

(iii)の計算法による結果が材料の破壊強度に最も近くなっている。

	道 体	シース 温 度 (℃)	破壊 電圧 (kV)	計算法	破壊	材料の			
No.	電 流 (A)				導 体 側		シース 側		破壞強度
					電界 (kV/mm)	温度 (℃)	電界 (kV/mm)	温度 (℃)	【低V/m)と 】温度(℃)
1		16	1,150	(i)	98.3	16	86.8	16	$\underbrace{\frac{115}{16^{\circ}C}}$
	0			(i i)	98.3	16	86.8	16	
				(iii)	105	16	78.5	16	
2	0	105	105 850	(i)	78.2	105	63.8	105	<u>80</u>
				(i i)	73.6	109	68.5	105	
				(iii)	<u>81.1</u>	108	58.9	105	$\begin{bmatrix} 108 \text{ C} \end{bmatrix}$
3	1,050	50 68 850	850	(i)	47.6	96	87.1	68	<u>83</u> (68℃)
				(i i)	38.2	101	95.4	68	
				(iii)	48.9	99	86.2	68	

および最高ストレスとなる部分の材料の温度を考慮した破壊 強度が示されている。

表4から以下の諸点が明らかになる。

- (1) 3種の計算方法から求めたケーブル破壊ストレスの差は10 kV/mm以内であり,破壊のばらつきを考えるとこの差を厳密 にうんぬんすることはできない。しかし,材料の破壊強度と 最もよく一致するのは(iii)の計算結果である。
- (2) 試験 No. 2 で、ケーブル破壊後課電の影響がなくなったところ、ケーブルシース温度は2時間後に105℃から100℃に低

加わったのと同じストレス変化が生じ、これに対しては裕度 が小さくなる。インパルス耐圧値750kVを単独印加の耐圧値 とみなすか、実線路での逆極性サージ重畳電圧とみなすかは 系統全体の絶縁設計上の問題と結びついており単純に結論は 得られない。系統全体のサージ重畳に対する絶縁特性と保護 装置の動作特性と両者を勘案して決定していく必要があろう。 (6) 極性反転時の破壊強度を求めることができなかったが、± 375kV 50回の反転に耐えており、モデルケーブルによる検討 結果⁽¹⁾と合わせて考えると実用上±250kVの反転には十分耐 えると予想される。

下しており、その差5℃は課電による絶縁体の発熱によって いたと考えられる。すなわち、高温での試験時には絶縁体の 発熱を無視することができず、また場合によっては熱暴走に よる熱破壊を生ずることも予想され、ケーブルの耐圧あるい は破壊試験を行なうとき注意を要する点である。

(3) 試験No.3ではシース側の温度68℃,ストレス86.2kV/mm で破壊している。実線路でもシース側に高電界の発生する負 荷電流の流れた状態ではシース側は導体側よりも10~20℃低 い温度で運転されており,破壊強度の温度依存性を考慮する と直流ケーブルの特異現象であるシース側の高電界は従来考 えられていたほどには大きい問題にはならないといえよう。 さらにサージ重畳や極性反転による導体側の高ストレスを考 え合わせると直流ケーブルにおいても導体側のストレスに対 する絶縁設計が主要となろう。

なおその他の検討結果を以下に付記する。

- (4) 直流電圧によるケーブル破壊孔はインパルスによる破壊孔 と類似して、導体側からシース側へまっすぐに貫通している。 ただし形状は、インパルスの場合ストレスの高い導体側の孔 径が小さくシース側へ円すい形に広がっていたのに対し、直 流の場合は理論上ストレスの高くなる側の径が大きく(今回 の例では10~15mm)しだいに小さくなり他端では3~5mmと なり逆の円すい状をしているのが特徴である。
- (5) インパルス破壊電圧は 1,080kVとなっており、ケーブルの 耐圧試験値:750×1.2=900kVに対しては十分な裕度を持っ ている。しかし 4.3 節に述べたように実線路で逆極性の対地 電圧750kVのサージが加わったときを想定すると1,000kVが

5.4 同径接続部の性能

上記のケーブルを用いて海底ケーブル用同径ジョイントを試作 し試験した。試験目的を絶縁性能の確認におき、導体、鉛被、補 強層、防食層などについてはこれまでの交流海底ケーブルの経験 をそのまま活用した。

絶縁体は図5に示されたように長いテーパでペンシリング部を 形成し、そこにケーブルと全く同一の油浸紙を同じ絶縁厚さまで 巻いたものである。

作業条件,試験結果,破壊路などが表5にまとめられている。 詳細は割愛するが,これらの一連の試験結果から,接続部の直 流性能は絶縁体の吸湿状態により大きく左右されることがわかっ た。他の試料による追加検討の結果,低湿度ふん囲気中で短時間 に組み立てることにより残留水分量を0.1%程度に減じれば性能 はケーブルと同程度に上昇することが判明した。

また表5の試料 No.1,2 が予想外の低い電圧で破壊した原因の 追求を兼ねて,吸湿した接続部の電界を解析した。

ー例として巻戻し部の油浸紙の水分量が0.5%程度で、その絶縁抵抗特性が $\rho_0=1.0\times10^{19}$ 、 $\alpha=0.11$ 、 $\beta=0.044$ であるとした場合の等電位分布は図6に示すとおりである。ただし、接続部の絶縁厚さはケーブル部より3mm厚くなっているものとした。

図6から、予想されたように絶縁抵抗の低い油浸紙を巻いた場合には、それ自体に加わるストレスは軽減されるが、他の部分のストレスは高くなることがわかる。特にペンシリング部先端では運転中(250kV,600A)の電界が38kV/mmに達し、ケーブル部の最大電界24kV/mmよりはるかに高く、仮に同一ストレスで破壊する



 $\mathbf{54}$

超高圧直流ケーブルの絶縁性能 日立評論 VOL. 54 No.10 903

試作250kV 直流OF ケーブル同径ジョイントの試験結果 表5

(作業条件の改良により残留水分量が減少し,性能が上昇している。)

No.	作業条件	課 電 方 法 破 壊 電 圧	破壞路	油浸紙の水分量(%)
1	屋内開放状態で組立て 気温 12~18℃ 湿度 50~70% 数層ごとに80~90℃のかけ油 作業時間 8(h)×2.5(d)	600kV(30分)後 50kV(30分)で昇圧 <u>850kV 7 分 B.D.</u> 試験温度 15℃		ケーブル本体部:0.12 ペンシリング部:1.10 巻 戻 し 部:1.25
2	屋内開放状態で組立て 気温 16~26℃ 湿度 80~92% 各層ごとに80~90℃のかけ油 作業時間 8(h)×3(d)	500kV 較正後600kV へ の昇圧中B.D. 試験温度 22℃		ケーブル本体部:0.14 ペンシリング部:1.85 巻 戻 し 部:0.89
3	屋内開放状態で組立て 気温 22~29℃ 湿度 90~95% 各層ごとに110~120℃のかけ油	750kV (60分) O. K 試験温度 28℃ 750kV (30分)後 50kV (30分)で昇圧		ケーブル本体部:0.14 ペンシリング部:0.55 巻 戻 し 部:0.60



注:8時間作業終了後仮注油して翌日まで放置



図6 同径ジョイント部の等電位分布

としても接続部の破壊電圧はケーブル部の3%以下に落ち、吸湿に よる破壊ストレスの低下を加味するとさらに低い電圧で破壊する ことが推測される。表5の結果もこれを裏づけており、ストレス の高いペンシリング部先端から破壊がスタートし、その後破壊強 度の低いテーパ部に沿ってシース側へ抜けている。

これらのことから, 接続部施工時には絶縁厚さを若干増すより も吸湿を防止することが性能上非常に重要であるといえる。

ただし、上記のような現象を逆に利用して絶縁抵抗の異なった 油浸紙を組み合わせ、接続部の電圧分担を人為的にコントロール し、性能の上昇を図ることも可能であるので今後検討したい。

言

考えられる。

今後はより具体的に長距離海底ケーブルを対象として製造、布 設などケーブル独自の問題を見直すとともに、がいし汚損や異常 電圧保護装置などを含めた系統の絶縁協調の問題に対処すべきで あろう。

終わりに、本研究を行なうにあたり終始ご指導いただいた日立 電線株式会社研究所木村所長,同日高工場電力ケーブル部比企野 部長,渡辺主任技師ならびに研究所と電力ケーブル部の関係各位 に厚くお礼申し上げる。

献 文 参 考

55

6. 結

古法レーブルの理論やまれのやまれ用たオレビーこれまで定日 (1) 安藤 遺藤 沼尻:日立評論 53, 95 (昭46-4)

圓瓶ケーノルの理論や材料の使討結果をもとに、これまで女易	(1)	
に見過されていた直流ケーブルの特異な問題を取り上げた。必要	(2)	J.M.Oudin, M.Fallou: IEE Confference Publication
た実験を追加するとともに 試作250kV 直流OFケーブル本体と		No. 22 318 (1966)
国家接续部の研究研究と結果の解析な行かい問題」と対すて対策	(3)	P.Gazzana Priaroggia, et al. : IEE Conference Publication
凹1王按抗前の11王拒維認こ而木の胜利を11ない问題点に対する対象		No.22, 325(1966)
を明らかにした。まだサージ重量や極性反転などに関しては残さ	(4)	松浦,山田:電気四学会昭44年連合大会 No.945
れた点もあり、引き続き検討中である。今回の一連の研究により、	(5)	G.Bahder, et al.: CIGRE 1972 Session No.21-03(1972)
直流ケーブルの絶縁性能についてはほぼ全様が明らかになったと	(6)	安藤, 遠藤, 沼尻:電気学会昭47年全国大会 No.781