U.D.C. 621. 315. 211. 3. 024. 027. 85

500kV直流OFケーブルの開発 Development of 500kV DC Oil-filled Cable

Preparing for the forthcoming age of EHV DC transmission we trially manufactured 500 kV, 1 x 1,000 mm² DC oil-filled cable and its accessories for submarine service. In this cable, we used insulation paper of high density, high permeability and stable resistivity in order to get higher insulation strength than before for DC and impulse as well as to increase the reliability of the cable insulation. Also, based on our long experience with EHV AC cable, we designed and manufactured accessories for DC cables placing design emphasis on the protection of insulation from mositure and contamination as well as on the good contact of outer shielding layer with insulation paper. From numerous test results, it was confirmed that the performance of these cables and accessories is highly satisfactory.

安藤順夫*	Nobuo Ando
花野芳幸*	Yoshiyuki Hanano
安倍 宏**	Hiroshi Abe
林田克哉**	Katsuya Hayashida
沼尻文哉***	Fumiya Numajiri

1 緒 言

130

24

超高圧直流送電が世界各国で実施されているが,わが国に おいても将来海底ケーブルによる大容量系統の連系を主目的 とした直流送電が実施される気運にあり,超高圧大容量の直 流海底ケーブルの開発に着手しておく必要性が強く認識され

レスを最大許容ストレス35kV/mmに近づけることができ、直流ケーブルとしての利点が発揮されることになる。

最終的なケーブル構造は、図1および表1に示すとおりで ある。

ている。このため電線メーカー4社は超高圧電力研究所の指 導下に,通商産業省工業化助成金を得て500kV大容量直流ケ ーブルの開発を行なった⁽¹⁾。本報告は,この共同研究において 日立電線株式会社が分担した500kV×1×1,000mm²直流OFケ ーブルおよびその付属品の開発経過と特性について取りまと め述べるものである。

2 500kV直流OFケーブルの絶縁設計

直流ケーブルの絶縁体に加わる電気的ストレスは、電圧の ほかに温度条件によっても大きく変化するため、熱的設計と 電気的設計は相互に依存する。以下開発にあたってわれわれ が問題にした諸点を順を追い記述する。

2.1 導体

標準的な布設状態の下で,負荷電流 1,000 A を許容できる ケーブルの導体サイズは約1,000mm²になる。直流電流である ため脈流以外に表皮効果を考える必要がないことから,導体 構造として同心円形より線を採用した。海底ケーブルとして 必要なケーブルの同径接続を容易にするためにも,同心円形 より線は望ましいものとなる。

2.2 絶縁体厚さ

これまでの直流OFケーブルに関する検討結果から、直流 運転電圧に対して $35 \, kV/mm$ 、インパルスに対して $100 \, kV/mm$ が許容できる最大のストレスであると推定される。

運転電圧に対する異常電圧の大きさは、系統構成や避雷器 その他の保護装置により決定されるものであり、既設の 250 kV級直流線路では運転電圧の3倍程度がとられている。しか し、将来の500kV級直流線路では、直流用避雷器の発達と内 部異常電圧の抑制により異常電圧レベルを 2.5倍程度に押え

2.3 絶縁材料

運転時や試験電圧印加時に絶縁体に加わるストレスを求めると表2に示すようになる。ただし、絶縁体の特性として以下の値を用いた。

比誘電率 $\varepsilon = 4.0$ 固有絶縁抵抗 $\rho = \rho_0 \exp(-\alpha T - \beta E)$ ただし、 $\rho_0: 0^{\circ}C, 0 \text{ kV/mm} における\rho(\Omega \cdot \text{cm})$ $[=2.0 \times 10^{19}]$ $\alpha: \rho の温度依存係数(1/^{\circ}C) [=0.10]$



られると期待できる。そこで今回の500kV直流ケーブルの開発にあたっては異常電圧を 2.5倍,すなわち500×2.5=1,250 kVに選んだ。これにより絶縁厚は21mmとなり、直流運転スト

図Ⅰ 500kV I×I,000mm² 直流OFケーブル 外径約110mm ¢, そ の他詳細寸法は表1に示す。

49

Fig. 1 500kV, 1×1,000mm² DC Oil-filled Cable

*日立電線株式会社研究所 **日立電線株式会社日高工場 ***日立電線株式会社研究所 工学博士

500kV直流OFケーブルの開発 日立評論 VOL.56 No.2 152

表 | 500kV |×1,000mm² 直流OFケーブルの構造 絶縁厚は交 流275kV OFケーブルとほぼ同じである。

Table I Structure of 500kV, I×I,000mm² DC Oil-filled Cable

	項目		単位	数值
油	通 路 内	径	mm¢	16.0
導	断面	積	mm²	1,000
	形	状	int in	中空円形より線
体	外	径	mm ϕ	45.0
絶	縁体厚	さ*	mm	21.0
L	ゃへい層厚	さ	mm	0.3
鉛	被厚	さ	mm	4.5
防	食 層 厚	さ	mm	5.0
ケ	ーブル外	径	mm ϕ	110.0
最	大静電容	皇	$\mu {\sf F}/{\sf km}$	0.304
最	小絶縁抵	抗	MΩ-km	2,300
最	大 導 体 抵 抗 (20	°C)	Ω/km	0.0184

注:*絶縁体厚さは導体上カーボン紙厚さおよび絶縁体上カーボン紙厚さ(各 0.3mm)を含む。

 β : ρ の電界依存係数(mm/kV) [=0.04]

 $T: 温度 (^{\circ}C)$

E:電界(kV/mm)

表2から明らかなように、直流耐電圧試験あるいはインパ ルス耐電圧試験時のストレスは、油浸絶縁紙の破壊ストレス に近くほとんど裕度がないため、材料の選択およびケーブル 製造上かなりの困難が伴うことが予想される。

直流ケーブルの絶縁紙に対する多くの考察から,絶縁紙は 直流およびイシパルス破壊強度のきわめて高いものであると 同時に,海底ケーブルとして十分な機械的強度も必要である。 この二つの見地から高密度,高気密度のものが必要であり, また固有抵抗が高く,安定したものが望ましい。脱イオン水 洗紙はこの意味で直流ケーブル用絶縁紙として望ましいもの になる。得られた絶縁紙の特性を従来の交流ケーブル用低損 失紙と比較して**表3**に示した。

絶縁油は,超高圧交流ケーブルで多くの実績を持つ合成油 (ハード形アルキルベンゼン)を採用した。

ケーブル絶縁体は表3に示す4種の絶縁紙を組み合わせて、 直流とインパルス両者に対してストレスの緩和を図った段絶 縁構成とした。

2.4 その他

鉛被,補強層などには,これまでの交流海底ケーブルで得た経験をそのまま適用した。

表 2 各種条件下における絶縁体内の電界強度 インパルスおよび直流耐電圧時の電界強度はかなりきつく,材料の選択とケーブルの製造条件に注意を払った。

Table 2 Electrical Field Strength in Insulation Under Various Conditions

電 圧 (k	V)	電 流(A)	導体側電界強度 (kV/mm)	シース側電界強度 (kV/mm)
直流運転時	500	0	28.8	20.9
直流運転時	"	١,000	20.3	28.4
直流常温耐圧時	1,250	0	67.8	56.4
直流高温耐圧時	۱,000	1,225*	36.4	59.4
インパルス	1,250	0	84.5	43.6
インパルス	1,500	"	101.3	52.3

注:*絶縁体内の温度こう配が、1000A通電時の1.5倍となる電流である。

1 185 Dd ... 14 r

Ⅰ ケーブルの電気的性能

表4は、試作ケーブルの電気的性能の代表例を示すもので ある。予備検討としての第一次試作ケーブルには従来の超高 圧OFケーブル用絶縁紙が用いられ、絶縁紙の組合せを種々 変えて理論的な段絶縁の効果が実際のケーブルでどの程度発 揮されるかを求めた。

試験結果をみるとインパルスおよび常温での直流性能は良好であるが、高温での直流性能が予想外に低く、その原因の 一つとして熱破壊が考えられた。また詳細な結果は表4には示さなかったが、試みた各種の段絶縁設計による差は明らかとなり、高ストレスを発生する導体側とシース側の絶縁紙の 配分が重要であることが見いだされた。

第二次試作ケーブルは2.で述べた直流用絶縁紙で構成され ており,第一次試作ケーブルの経験を生かした段絶縁設計を 施したものである。電気的性能は表4に示したとおり高温で の直流性能も向上し,長時間耐圧試験で1,350kV以上という 安定した性能のものを得ることができた。

布設用の第三次ケーブルは, 第二次試作ケーブルとほぼ同

表 3 直流用絶縁紙の諸特性 交流用絶縁紙と比較すると、密度、気密度が大きく破壊強度も高くなっている。

Table 3 Properties of Insulation Paper for DC Cable

分 類	厚さ密度		気密度	抗張力	破 壞 強 度 (kV / mm)			誘電正接	絶縁 抵 抗			
	(µm)	(g/cm³)	(s/1,000cc)	(kg/15mm)	直 流(常温)	インパルス、 (常温)	交 流(常温)	比誘電率	100℃(%)	$\rho_{o}(\vartheta \cdot cm)$	α(1/℃)	β (mm/kV)
交流用 低損失紙	125	0.72	١,300	14.0	138	127	45	3.4	0.21	19.5×10 ¹⁸	0.10	0.043
今回開発した	80	1.04	9,000	14.5	160	150	55	4.2	0.32	6.6×10 ¹⁸	"	0.044
	100	1.00	4,500	16.5	145	135	50	4.1	0.33	6.3×10 ¹⁸	"	0.043
直流用絶縁紙	125	1.02	4,000	"	"	130	45	4.0	"	6.0×10 ¹⁸	"	0.045
	150	1.06	3,000	17.5	140	"	40	"	0.32	5.0×10 ¹⁸	n	11

注:破壊強度より右は合成油含浸紙の特性を示す。

50

500kV直流OFケーブルの開発 日立評論 VOL.56 No. 2 153

表 4 第一次および第二次試作ケーブルの電気試験結果 直流用絶縁紙を使用した第二次試作ケーブルは、十分な性能を有している。

able 4 Test Result	s of	the	First	and	Second	Trially	Manufactured	Cables	
--------------------	------	-----	-------	-----	--------	---------	--------------	--------	--

ケーブル	No.	試験電圧	加熱法および 導体電流(A)	導体温度 (℃)	破 壊(耐圧) 電 圧(kV)	破壊(耐圧)時 最高ストレス (kV/mm)	破壊点
	1	インパルス*	加熱なし	26	⊖ 1,700 良	導体側 115.0	-
笋 — 次	2	"	外部加熱	86	⊖ I,520 ″	<i>"</i> 102.8	_
み へ 試作ケーブル	3	** 直 流	加熱なし	24	⊖ 1,650	″ 88.I	ケーブルヘッド
	4	"	1,800	94	⊖ 1,000	シース側 78.4	ケーブル
	5	"	١,300	86	⊖ 1,200	// 71.2	"
	I	インパルス	加熱なし	19	⊖ 1,700 良	導体側 115.0	—
第二次	2	"	1,300	85	⊖ 1,520 ″	" 102.8	-
試作ケーブル	3	直 流	1,400	**** 85以上	⊖ 1,350 ″	**** シース側82.1以上	
	4	"	*** ヒート サイクル	**** 89以上	⊖ 1,350 Ⅰサイクル良	**** ″ 82.1以上	-

注: * インパルス課電方法は、常温・高温とも○1,250kV/3回~○30kV/3回昇圧

** 直流課電方法は, 常温では○1,500kV/30分~50kV/30分昇圧, 高温では○1,000kV/30分~50kV/30分昇圧

*** ヒートサイクルは 1,300A 8時間通電, 4時間しゃ断

**** 理論計算上は,熱破壊領域となる。

表5 布設ケーブルの試験結果

34

吉果 第二次試作ケーブルの設計, 製造条

表 6 500kV 直流 0 F ケーブル 普通接続部および 同径接続部の 試験結果 2種の接続部ともケーブルと同等の性能である。

件を生かし,所期の性能を得た。

Table 5 Test Results of Installed Cable

試験方法	項目	特性結果
わく試験	絶縁 抵 抗	43,000 MΩ-km(20℃)
	静 電 容 量	0.303µF/km
	誘 電 正 接 (tam∂)	0.311%(200kV,16℃)
	直 流 導 体 抵 抗	0.0184Ω/km(20℃)
電気試験 (試料耐圧)	インパルス(高温)	I,500kV/3回(導体温度85℃) 耐圧良
	直流(高温)	Ⅰ,200kV/12時間 (導体温度85℃) 耐圧良

注: *ヒートサイクルは 1,300A, 8時間通電, 4時間しゃ断 インパルス, 直流の課電方法は表 4 と同じ。

条件で製造され性能も良好であった。表5は,耐圧試験以外

のデータを含めて布設ケーブルの諸特性を示すものである。

4 付属品の構造と電気的性能

4.1 普通接壳部

直流ケーブル用接続部は, 交流ケーブル用接続部とは違っ た設計を行なう必要があるが, 設計データの蓄積が少なかっ たため接続部のモデルや小サイズケーブルの接続部を試作し て予備検討を行なった。その結果, 油浸紙の貫通方向の直流 破壊強度はほぼインパルス破壊強度と同等となるが, 油浸紙 の沿層方向に電極間距離が長いと交流破壊強度に近い特性を Table 6 Test Results of Normal Joint and Flexible Joint for 500kV DC Oil-filled Cable

ジョイント	No.	試験電圧	加熱法および 導体電流(A)	ジョイント 表面温度(℃)	破 壊(耐圧) 電 圧 (kV)	破壞点
	1	インパルス	加熱なし	8	1,730	ジョイント
普通接続部	2	"	1,300	50	1,500 良	_
	3	直流	"	53	1,250 良	
	1	インパルス	加熱なし	12	1,700 良	
回復抽練前	2	"	1,300	52	1,500 良	
同径接続部	3	直 流	"	49	1,350 良	
	4	"	** ヒートサイクル	"	"	

注: * インパルス直流課電方法は,表4と同じである。

** ヒートサイクルは表5と同じである。

計した。普通接続部の構造は図2(a)に,電気的性能は表6に 示すとおりである。性能はケーブル本体とほぼ同等である。 なお接続部においても負荷時には外部しゃへい層側に最高ス トレスが発生するため、しゃへい層側のわずかな乱れにより 絶縁破壊を生ずることがないよう組立てには十分注意する必 要がある。

4.2 同径接続部

数回にわたる試作により最終的には図2(b)の構造と表6の 性能を持つ同径接続部を開発することができた。直流ケーブ ル用同径接続部の性能は、吸湿と汚れにより大幅に支配され ることが再確認された。250kV級では作業中かけ油をするこ

51

持つことが判明した。また250kV級直流OFケーブル接続部	とによりある程度吸湿の防止が可能であったが、絶縁厚、長
の開発で明らかになったように ⁽²⁾ 直流ケーブルの接続部の性能	さとも約2倍の500kV級接続部では、低湿度ふんい気中で組
は残留水分と汚(よご)れに大きく影響される。これらの点を考	み立てる必要がある。図3は、その一例として接続部絶縁体
慮して, 接統部組立中の吸湿および汚れの混入を極力防止で	内の水分量が組立時の周囲温度により大きい影響を受けるこ
きる作業法をとるとともに、接続部の径方向寸法は交流 275	とを示すものである。水分量の多いNo.1 試料では、900kV課
kV級接続部と同程度でまた長さが約40% 増しの接続部を設	電中に漏えい電流が急増したため,課電不可能となり絶縁破

500kV直流OFケーブルの開発 日立評論 VOL.56 No. 2 154



図 2 500kV 直流 O F ケーブル 用 普通および 同径接続部 同図(a)は 普通接続部を示し, 275kV AC ケーブル 用接続部と比較して外径は同等, 長さは約1.4倍である。また(b)は 同径接続部を示すもので, 可とう性を 持たせるため外径はケーブルとほぼ等しい。ただし, 長さを増して所定の絶縁耐力を持たせてある。

Fig. 2 Structure of Normal and Flexible Joint for 500kV DC Oil-filled Cable

表7 ケーブルの熱特性測定結果 密度の高い直流用絶縁紙を使用したため,絶縁体固有熱抵抗が500℃-cm/W となっている。このため,負荷電流 通電時のシース側ストレスは緩和される。

lable / les	t Results	of	Thermal	Characteristics	of Cable
-------------	-----------	----	---------	-----------------	----------

項目	単 位	数值
導体直流抵抗(20℃)	Ω•cm	0.182×10 ⁻⁶
導体交流抵抗(20℃)	Ω•cm	0.206×10 ⁻⁶
絶縁体熱抵抗	°C -cm/W	52.5
(絶縁体固有熱抵抗)	°C-cm/W	500
防食層熱抵抗	°C-cm/W	15.0



壊と判定したものであり、6.で述べるように熱破壊を生じた ものと考えられる。

4.3 気中終端接続部

試験用終端接続部として、コンデンサコーン形ケーブルヘ ッドを開発した。直流に対する耐力はしゃへい形ケーブルヘ ッドでも十分であるが、インパルスや極性反転に対してはし ゃへい形では十分な耐力を得ることがむずかしく、インパル スや極性反転に対してはコンデンサ分圧、直流に対しては抵 抗分圧となるようなコンデンサ形端末を開発した。ケーブル ヘッドの直流性能としては第一次試作ケーブルの常温破壊試 験のデータ1,650kVが唯一のものであるが、他のすべての試 験で端末での破壊は生じておらず、十分な性能を有している ものと考えてよい。なおケーブルヘッド自体は、インパルス 2,000kV以上に耐えた実績を持っている。

5 ケーブルの熱的性能

直流ケーブルは熱的性能と電気的特性との間に強い関連が あるので、温度上昇試験を実施しケーブルの熱的特性を調べ た結果は表7に示すとおりである。その結果絶縁体の固有熱 抵抗を逆算すると500°C-cm/Wが得られる。これは多分高密度 紙の使用によるものと考えられる。直流ケーブルは負荷時に は、絶縁体内に生ずる温度こう配によりシース側に高ストレ スを発生するが⁽³⁾、絶縁体の固有熱抵抗が低くなるとこのスト レスは緩和される。一般の超高圧ケーブル用絶縁紙の固有熱 抵抗は、550°C-cm/W であるので 500°C-cm/W になれば負荷時 の最大ストレスは約15%低減されることになる。これはまた ケーブルの熱破壊にも有利な条件となる。

6 ケーブルの熱破壊

絶縁体厚さ (mm)

図3 同径接続部の油浸紙の残留水分量 施工条件により残留水分は大幅に異なり,性能にも直接影響する。

Fig. 3 Residual Moisture in Oil-impregnated Paper of Flexible Joint

52

3.に述べたように高温におけるケーブルの性能が予想外に 悪く、その改善が重要な問題であるが、高温において直流性 能が低下する原因の一つとして、ケーブルの熱破壊が考えら れる。図4は導体に1,300Aを通電した状態で高電圧を印加 したときのケーブル防食層表面温度と導体温度の関係を計算 500kV直流OFケーブルの開発 日立評論 VOL. 56 No. 2 155



 \geq

図4、高電圧課電時のケーブル温度上昇 各電圧においてケーブル 防食層表面温度が上昇すると,絶縁体発熱のため導体温度は急激に上昇する。 Fig. 4 Cable Temperature Rise Under High Voltage

したものである。計算に必要な諸定数は表3および表7によ り選んだ。シース温度の上昇につれて導体温度は急激に上昇 し,熱不平衡状態に達する。図5は,通電電流を変えて熱破 壊を生ずる温度と電圧の関係を求めたものである。表4に示 したケーブル試験結果では明らかに熱破壊を生じたと判定で きるデータは得られていないが、図3に示したように残留水 分の多い同径接続部の試験中には漏えい電流急増のため,課 電不可能となった例があり、また理論計算では図5に示すよ うに熱破壊領域に入るものもあることから、500kV直流OFケー ブルの高温の性能低下は熱不安定ということが一原因であると 推定できる。直流ケーブルに限らず超々高圧ケーブルの破壊 試験時には、温度を規定した試験条件を設定しないと熱破壊 を生ずる可能性があり,試験法上今後注意すべき点である。

7 形式試験および長期試験

4 社それぞれで開発されたケーブルと接続部は超高圧電力 研究所武山研究所に布設され、CIGRE(Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) 推奨案に基 づく形式試験が実施された。試験条件は以下のとおりである。

電電圧:①	1,000kV	10日	
Θ	1,000kV	10日	
\oplus	750kV	10日	

通電電流:1,200~1,300A,8時間通電,16時間しゃ断



図5 高温,高電圧下における熱破壊発生の可能性 各電流におい て斜線部より右上では,熱破壊の可能性がある。

Fig. 5 Possibilty of Thermal Breakdown Under High Temperature and High Voltage



温度:導体最高温度 85°C

図6は形式試験中の試料ケーブルの一つを示すものである。 このほかに4社ケーブルを接続した長尺の線路があり、長期 試験が行なわれているが、これらについては別途に報告した 1,0

言 8 結

課

500kV直流OFケーブルとその付属品試作により、所定の 性能のものを開発することができた。検討したおもな項目は 次のとおりで、それぞれについて有効なデータと経験を得る ことができた。

(1) 直流ケーブル絶縁紙の組合せによる段絶縁設計

(2) 直流ケーブル熱破壊条件の解析

直流OFケーブル製造条件の把(は)握 $(\mathbf{3})$

(4) 付属品の施工条件の確立

などである。

500kV直流海底OFケーブルの実用化はまだ将来のことで あろうが,ここに得られた結果はそのまま北海道本州連系 250kV級直流海底OFケーブルに活用できるものであると信 じている。

終わりに臨み,共同研究の指導者である超高圧電力研究所 吉田確太氏ならびに電力中央研究所坂本雄吉氏ほか共同研究 メーカーの関係各位に厚くお礼申し上げる。なお共同研究を 進めるにあたり一部の電力会社のご援助を賜わったことを付 記して謝意を表する。また日立電線株式会社日高工場、同研 究所関係各位のご指導,ご協力に対しても謝意を表わす次第 である。

500kV直流OFケーブル試験状況 図 6 背景は±1,000kV 直流発生 装置で,ループ状式料中間に接続部がある。

Fig. 6 500kV DC Oil-filled Cable Being Tested in Conformity with CIGRE Recommendation

参考文献

(1) 安藤,花野ほか「500kV直流OFケーブルの絶縁性能」,昭和 48年電気学会全国大会 No.1176 (昭48-4) (2) 安藤, 遠藤, 沼尻「超高圧直流ケーブルの絶縁性能」, 日立評 論, 54 51 (昭47-10) (3) 天野,比企野ほか「直流ケーブルの絶縁設計に関する一考察」 昭和46年電気学会全国大会 No.1134 (昭46-4)

53