# 500kV CVケーブルの基礎検討

# Basic Investigation of 500kV XLPE Power Cable

大都市圏内の地中送電には、誘電損失、充電電流が小さく、防災処置が容易で油槽を必要としないCVケーブルが特に適しており、その送電容量の大幅な増加が強く期待されている。本論文は、275kV CVケーブルの技術をベースに、500kV CVケーブルの開発を検討した。

最近のケーブル製造技術の飛躍的進歩により、絶縁性能が大幅に向上したことと、架橋ポリエチレン絶縁体にSF6ガスを含浸して、長期信頼性をよりいっそう高めることにより、絶縁厚低減設計が可能で、これにより500kV CVケーブルは、十分実用が可能であると考えられる。ケーブルの構造設計と送電容量の試算をも行ない、ステンレスシースの採用、トラフの省略又は換気形化により、大幅な送電容量の増大が図れることを示した。

依田文吉\* Bunkichi Yoda 池田忠禧\*\* Chûki Ikeda

## 1 緒言

イタリアのエマニエリが、OFケーブル体系を完成して以来約70年が経過した。現在我が国及び世界の地中送電の最高電圧は500kVで、OF又はPOFパイプ形Oil-filled Cableケーブルが使用されている。

しかし、20余年前に誕生したCVケーブル(架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル)は、保守が容易、油槽が不要で、防災上も有利である点から近年広く用いられるようになり、その使用電圧も275kVにまで達した。

今後、大都市圏内あるいは大電力連系用の大容量地中送電線を考慮すると、500kV級のCVケーブルができれば、その低誘電損失、低充電電流と防災上の有利性から最適のケーブルであると考えられる。

CVケーブルの製造技術は、過去20年の間にガス架橋法の開発、三層同時押出法の確立、コンパウンドの異物除去を中心とした品質管理の推進などにより、飛躍的に向上してきている。

これらの技術進歩により、絶縁性能、特に初期のそれは十分に高く、また、ばらつきのない安定したものとなっている。更に、この絶縁体をアルミシース又はステンレスシースで周囲の化学薬品、水分などの悪影響から防護し、また更に、内部に $\mathbf{SF}_6$ がス $^{*1}$ を充塡して、架橋ポリエチレン $\mathbf{SF}_6$ がスを含浸する構造とすることにより、長期の課電劣化を抑止できる。

初期絶縁性能の向上、SF6ガス含浸による長期信頼性の向上を勘案した設計と試作試験を行ない、500kV CVケーブルが十分実現の可能性のあることを見いだした。

送電容量は,低誘電損失の利点に加えて,ステンレスシースの採用,防災トラフの換気形化又は省略を行なうことにより,大幅な増大が見込まれる。

※1) SF6ガスは、分子量146、密度6.1g/l(15℃,1 kg/cm²)で熱的、 化学的に安定であり、絶縁耐力は空気の2~3倍で約3 kg/cm² で絶縁油に匹敵する。現在ガス絶縁電気機器に広く用いられて いる。

## 2 絶縁設計

ケーブルの絶縁厚さtは、商用周波及び雷インパルスの必要耐電圧値Vとそれぞれの最低破壊電界 $E_L$ との比から決定される。耐電圧値VAC及び $V_{Imp}$ は、次の(1)式及び(2)式で与えられる $^{1}$ 。

$$V_{AC} = (E_0/\sqrt{3}) \times k_1 \times k_2 \times k_3 \cdots (1)$$

 $V_{Imp}$ =BIL(Basic Insulation Level)値× $\hat{k}_1 \times \hat{k}_2 \times \hat{k}_3$ .....(2)

従来の絶縁設計では、上式の定数及びELをCVケーブル開発当初の特性を基に決めており、最近の超高圧ケーブルのそれとは大幅に異なる。最近のCVケーブルの絶縁特性を考慮して、これらの値を変更し表1に示す値とした。

# 2.1 寿命換算係数k<sub>1</sub>の設定

 $k_1$ は、30年間のケーブル実使用期間にわたりケーブルが常規電圧に耐えることを1時間の試験で保証するための係数である。一定電圧課電下でのケーブル寿命 t は、V-t曲線でt $\propto$ V-rという形で示される。

従来はこのnの値として、 $Oudin^2$ )及び $Kreuger^3$ による実験値から9が採られ、 $k_1=\sqrt[9]{30\times365\times24}=4.0$ としていた。

しかし、下記の理由でn=12としても十分安全サイドにあると考えられる。n=12とすると、

 $k_1 = \sqrt[12]{30 \times 365 \times 24} = 2.83$  となる。

表 | 絶縁厚さ設計諸元 500kV CVケーブルの絶縁厚さ設計では、設計諸元数値を見直し、従来の値を若干変更している。

	記号	記 号 内 容	500kV CV ケーブル設計	275kV CV ケーブル設計
商	$k_1$	V-t 特性から算出される 1時間耐圧値と30年耐圧値の比	2.83	4
Ħ	<b>k</b> 2	不確定要素に対する裕度	_ 1.1	1.1
司皮電圧	<b>k</b> 3	温度係数	1.1	1.1
±	$E_L(AC)$	ワイブル分布での破壊強度最低値	30	30
雷インパルス電王	$\hat{k}_1$	温度係数	1.2	1.25
	$\hat{k}_2$	不確定要素に対する裕度	1.1	1.1
	$\hat{k}_3$	経年劣化に対する裕度	1.1	1.1
	$E_L(Imp)$	ワイブル分布での破壊強度最低値	65	60

注:CVケーブル(架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル)

<sup>\*</sup> 日立電線株式会社電線研究所 工学博士 \*\* 日立電線株式会社日高工場 工学博士

- (1) n = 9 の値は、Oudin<sup>2)</sup>とKreuger<sup>3)</sup>による模擬ボイドを含んだ試料の部分放電劣化に対する実験値である。
- (2) 現在の内部半導電層, 絶縁体及び外部半導電層の三層同時押出しとガス架橋法による C V ケーブルでは, 部分放電劣化は起こらない。

また,金属密閉シース付構造とすれば,化学薬品,水分などによる化学トリー劣化,水トリー劣化を防止できる。

このようなケーブル絶縁体で考えられる劣化要因は、異物及び電極不整からの電気トリー進展である。この劣化機構でのnの値はJocteur<sup>4)</sup>により約25であると言われている。

- (3) CVケーブルの気中課通電試験の結果を見ると、nは13以上と考えられる<sup>1)</sup>。
- (4) 4章で述べるとおり、絶縁体にSF6ガスを含浸することにより、課電劣化は大幅に抑えられる。

# 2.2 温度係数k1の設定

- (1) 導体温度90°C と20°C との雷インパルス破壊値の比は、昭和48年~50年の全ケーブルデータで1.21であるが、乾式架橋法によるケーブルに限ると1.17である $^{1)}$
- (2)  $SF_6$ がスを架橋ポリエチレン絶縁体に含浸する場合に、あらかじめ真空乾燥処理を行なう。この操作により絶縁体中の架橋剤分解残渣はほぼ完全に除去される。架橋剤分解残渣は、特に高温の直流、及び雷インパルス破壊電圧を低下させる働きがあり、分解残渣を取り除いたケーブルの $\hat{k}_1$ はほぼ1.1である。

この理由で、温度係数 $\hat{k}_1$ を1.2とした。

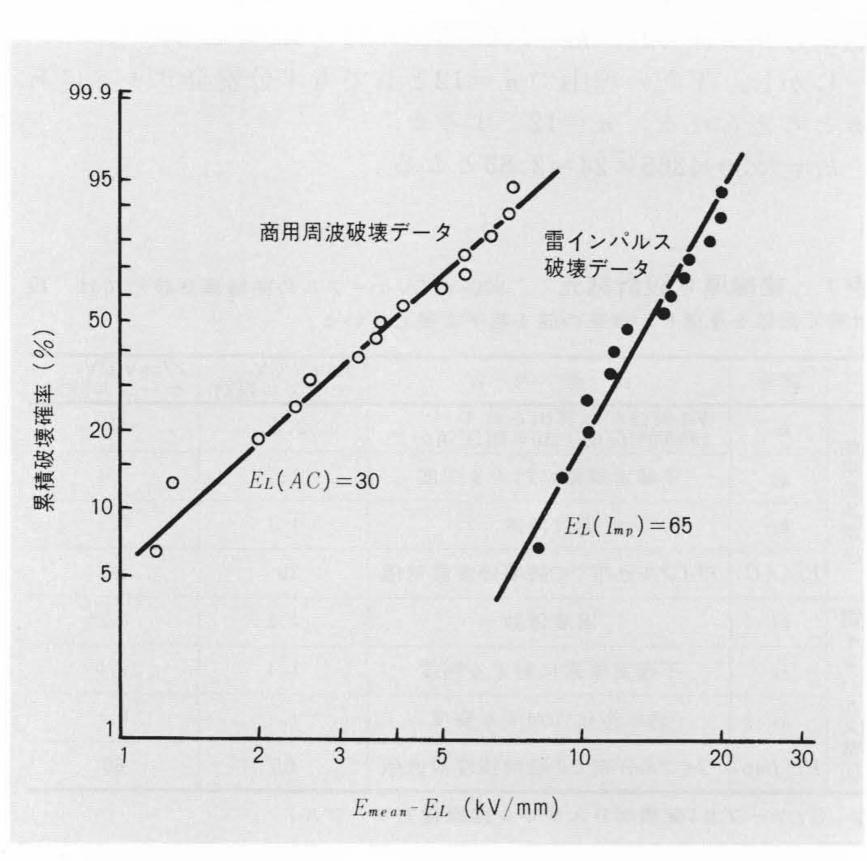
## 2.3 最低破壊電界 ELの設定

最近の154kVから275kVまでのCVケーブルの破壊試験結果 をワイブル分布に当てはめると、図1に示すとおり

$$E_L(AC) = 30 \mathrm{kV/mm}$$

 $E_L(Imp) = 65 \text{kV/mm}$ 

が得られる。 $E_L(Imp)$ は従来の60kV/mmよりも高い値であり、これは製造技術、品質管理の向上の結果と考えられる。この値を500kV CVケーブルの設計に使用するものとする。



#### 2.4 絶縁厚さの決定

上記の結果から500kV CVケーブルの絶縁厚さは、35mmと決定できる。

$$t_{AC} = \frac{525}{\sqrt{3}} \times 2.83 \times 1.1 \times 1.1/30 = 34.6 \text{mm}$$
  
 $t_{Imp} = 1,550 \times 1.2 \times 1.1 \times 1.1/65 = 34.6 \text{mm}$ 

# 日 ケーブルの構造と送電容量

#### 3.1 ケーブルの概略構造

35mm絶縁の500kV 1×2,000mm<sup>2</sup> CVケーブルの構造を**表 2** に示す。

構造上の特徴は下記のとおりである。

#### (1) 金属シース

外傷の防止, 化学薬品や水分の浸入防止及びSF6ガス含浸加圧のため, 金属シースが必要である。そのために, 波付アルミシース及び波付ステンレスシースが考えられる。波付アルミシースは多くの使用実績と十分な地絡容量をもつが, シース損失が大きいことが欠点である。

波付ステンレスシースは、シース損失が無視できる程度に小さいので、特に大容量送電に適している。しかし、シースの地絡容量確保のために、ケーブルコア上にワイヤシールドを施す必要がある。更に、厚肉大サイズケーブルのシースとしての実績が少ないので、機械特性を十分に検討する必要がある。いずれのシースを採用する場合にも、ケーブルコア上に、ケーブルコアの熱膨張を吸収し、更に良好な電気的接触を保つ導電性クッション層を施す。

#### (2) SF<sub>6</sub>ガス含浸

架橋ポリエチレン絶縁体を真空乾燥後 $SF_6$ ガスを含浸し、 更に金属シース内に $SF_6$ ガス約 $5 \text{ kg/cm}^2$ を充塡する。これは、 架橋ポリエチレン絶縁体の電気的絶縁強度と長期安定性の向

表 2 500kV CVケーブルの構造 アルミシース及びステンレスシース を付けた構造例を示す。

		項		目			構	造	
導		体	サ	イ		ズ	2,000mm <sup>2</sup>		
金	属	シ		ス	仕	様	アルミ	ステンレス	
			公	称 断	面	積	2,0	000 mm <sup>2</sup>	
導		体	形	-44 1		状	4 分割	圧縮円形	
			外			径	53	.8mm	
内	部	半	導 電	層	厚	\$	約	2.0mm	
絶		縁	体	厚		5	35	. 0 mm	
押	出	外部	半導	電層	厚	5	約	1.5mm	
熱	膨	張	吸収	層	厚	<b>*</b>	約2.5mm	約2.0mm	
L	to	^	い用	軟	銅	線*	_	直径約1.2mm/90本	
押	え	テ	-	プ	厚	5		約0.5mm	
		-	厚			<b>5</b>	3.3mm		
アル	ミン	ース	波	高		5	約6.0mm	_	
<b>-</b>			厚			<b>3</b>		0.8 mm	
スティ	<i>/ / / / / / / / / / / / / / / / / / / </i>	シース	波	高		5	_	約6.0mm	
防		食	層	厚		5	6	.Omm	
概		算		外	1.0	径	169 mm	166 mm	
概		算	- 1	重		量	39.4kg/m	39.0kg/m	
導	体	抵	抗	(DC, a	t 20	℃)	0.009	33 Ω /km	
静		電		容		量	0.161	μF/km	
絶 縁				抵	*******	抗	3,500	MΩ·km	

注: \* ステンレスシース形ケーブルは、しゃへい層として、地絡容量(20kA・0.2秒)対策から銅線横巻(直径1.2mm×90本)仕様を設けた。

表 3 気中布設500kV CVケーブルの送電容量 誘電体損失,シース損失及びトラフの熱抵抗が,大きく許容電流を左右する。ステルレスシースCVケーブルの送電容流が大きい。

	項	目		単位		仕		様	
ケ	ー ブ	ル種	類		架橋ポリエチレン絶縁				OFAZV
布	設 法 ()	5 災 ト ラ	フ)		ありなし			あり	
シ	- ;	4 仕	様		アルミ	ステンレス	アルミ	ステンレス	アルミ
導	体 t	+ 1	ズ	mm <sup>2</sup>		**			
直	流 導 体	抵 抗 (at 2	20℃)	Ω/km	585	0,00915			
交	流導	体 抵	抗	"	0.13	0.0131(at 85°C)			
**	絶	縁 体		°C ⋅cm/W	66.3		1 -	63.2	
熱	コア	表面放	散	"	16.9	16.6	16.9	16.6	-
	防	食	層	"	7.1	7.2	7.1	7.2	7.8
抵	表面	放	散	"	17.0	17.3	17.0	17.3	18.5
	1	ラ	フ	"	dal -	5.3		_	5.3
抗	トラス	トラフ表面放散			2	3.6		4 d x26 li	23.6
	_ // // //	誘電体	損失	W/cm	0.0558				0.211
誘電体損失		温度上	- 昇	deg	5.75	5.76	4.14	4.14	18.3
	10. 4	回 路 排	<b>美</b>						
シ	ース損失	渦 電 流	損 失	_	0.821	0	0.821	0	0.674
全	熱	抵	抗	°C ⋅cm/W	182.4	139.0	128.3	108.6	158.4
許	容	電	流	А	1,180	1,350	1,440	1,560	1,135
充	電電	流 (at 50	0kV)	A/km		30.2			
有	効 送 電 容 量(	リアクトル補作	 賞時)	MVA/10km	1,020	1,165	1,245	1,350	975

注:略語説明 OFAZV(アルミ被ビニル防食OFケーブル)

上を目的とするものである。

#### 3.2 送電容量

表 3 に、500kV2、000mm<sup>2</sup>のCVケーブルとOFケーブルの送電容量を比較して示す。

アルミシースを付け、トラフに収納した場合、両者の許容電流はほぼ等しい。しかし、SF6ガスを充塡した金属シース入りCVケーブルは、地絡アークによる延焼はないと考えられるので、防災トラフを除くことあるいは換気形とすることが可能であろう。この場合は、27%許容電流が増加する。ステンレスシースを用いると、トラフ内に入れた場合でも19%、トラフを除いた場合には37%の許容電流増加が見込める。

# 4 SF<sub>6</sub>ガス含浸架橋ポリエチレンの絶縁特性

# 4.1 基礎検討結果

水分や化学薬品などの影響を受けない架橋ポリエチレン絶縁体の課電劣化は,異物又はボイドから発生した電気的トリーの伸展によるものと考えられる。

日立電線株式会社は、架橋ポリエチレン絶縁体にSF6ガスを含浸する効果について検討し、その結果、特に交流課電劣化防止に大きな効果があることを見いだしている<sup>5),6)</sup>。これらの検討結果を要約すると下記のとおりである。

- (1)  $SF_6$ がスを約0.6w%含浸した架橋ポリエチレンの電気トリー開始電圧は80%上昇する。更に、トリー開始電圧以上の電圧を印加した場合のトリーの伸びも $SF_6$ がス含浸で著しく小さくなる( $\mathbf{表}4$ 参照)。
- (2) 11kV及び33kVのCVケーブルにSF6ガスを含浸すると、 **表 5** に示すとおり交流破壊電圧が50%、インパルスの破壊電 圧が10%程度上昇する。
- (3) 上記の $SF_6$ 含浸11kV CV ケーブルを、金属パイプ内で $SF_6$  ガス5  $kg/cm^2$ 加圧し、これに100kV を9,335時間課電したが異常はなく、その後の破壊電圧は、長期課電前と有意差がなかった。

表 4 種々のガス中モールド試料の50%トリー開始電圧 塩素やフッ素原子を含む $SF_6$ ,  $C_4F_8$ ,  $CCl_2F_2$ などの電気的負性ガスがポリエチレンに含まれると、電気トリー開始電圧が上昇する。

ニールドガス及び160	℃でのガス圧力(gauge)	50%トリー開始電圧 (kV)
空気	0 kg/cm <sup>2</sup>	18
CCI <sub>3</sub> F	5	20
真空	$10^{-2} \sim 10^{-3} \text{Torr}$	21
N <sub>2</sub>	5 kg/cm <sup>2</sup>	21.5
CCI <sub>2</sub> F-CCI <sub>2</sub> F	5 kg/cm <sup>2</sup>	24
H <sub>2</sub> O(水蒸気)	5 kg/cm <sup>2</sup>	25
CCI <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	5 kg/cm <sup>2</sup>	29
CCI <sub>2</sub> F-CCIF <sub>2</sub>	5 kg/cm <sup>2</sup>	30
SF <sub>6</sub>	5 kg/cm <sup>2</sup>	32
C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	5 kg/cm <sup>2</sup>	40

(4) 架橋ポリエチレンに収着する $SF_6$ ガスの量は、ガス圧力Pにほぼ比例するが、電気絶縁強度の指標であるトリー開始電圧VtはPの増加に対して飽和する傾向を示す。

実用上 $3 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 程度の $SF_6$ ガス加圧により、効果的な含浸を行なうことができる。

## 4.2 超高圧SF6ガス含浸CVケーブルの試作及び試験

基礎実験結果に基づき、正味絶縁厚さ $29\,\mathrm{mm}$ の $\mathrm{SF}_2$ がス含浸ケーブルを試作した。導体サイズは $600\,\mathrm{mm}^2$ で、押出外部半導電層上に金属線入り半導電テープを巻き、アルミシースを被覆して絶縁体を高温真空処理後 $\mathrm{SF}_6$ がスを加圧含浸し、アルミシース内に $\mathrm{SF}_6$ がス $3\,\mathrm{kg}/\mathrm{cm}^2$ を封入した。

この試作ケーブルの試験の主眼は、長尺ケーブルの長期課電特性の確認であるので、有効長さ40m の長尺サンプルに、780kV(26.9kV/mm)を155時間課電したが異常なく耐えた。この高電界長時間課電の実績をV-t特性で考える。図2に示すとおり、仮にKreugerの9乗則 $^{3}$ に従うと、26.9kV/mm $<math>\times$ 155時間

表 5 SF6含浸IIkV及び33kV CVケーブルの破壊強度 SF6ガス含浸により、特に交流の破壊強度が著しく上昇する。

項目		商用周波县	長時間破壊値	雷インパルス破壊値				
	-X -L	常温		常温		高温(90℃)		
ケーブル		電 圧 (kV)	平均電界強度 (kV/mm)	電 圧 (kV)	平均電界強度 (kV/mm)	電 圧 (kV)	平均電界強度 (kV/mm)	
IIkV I50mm <sup>2</sup>	未乾燥	170 170	34.0 34.0	390 395 378 392	78.0 79.0 75.6 78.4	255 235	51.0 47.0	
TIKV 150mm	SF <sub>6</sub> ガス含浸	290 280 270 270以上	58.0 56.0 54.0 54.0以上	470 420	94.0 84.0	370 398 426	74.0 79.6 85.2	
33kV 200mm²	未乾燥	270 290 240	30.0 32.2 26.7					
	SF <sub>6</sub> ガス含浸	340以上 370以上 390	37.8以上 41.1以上 43.3	660	73.3			

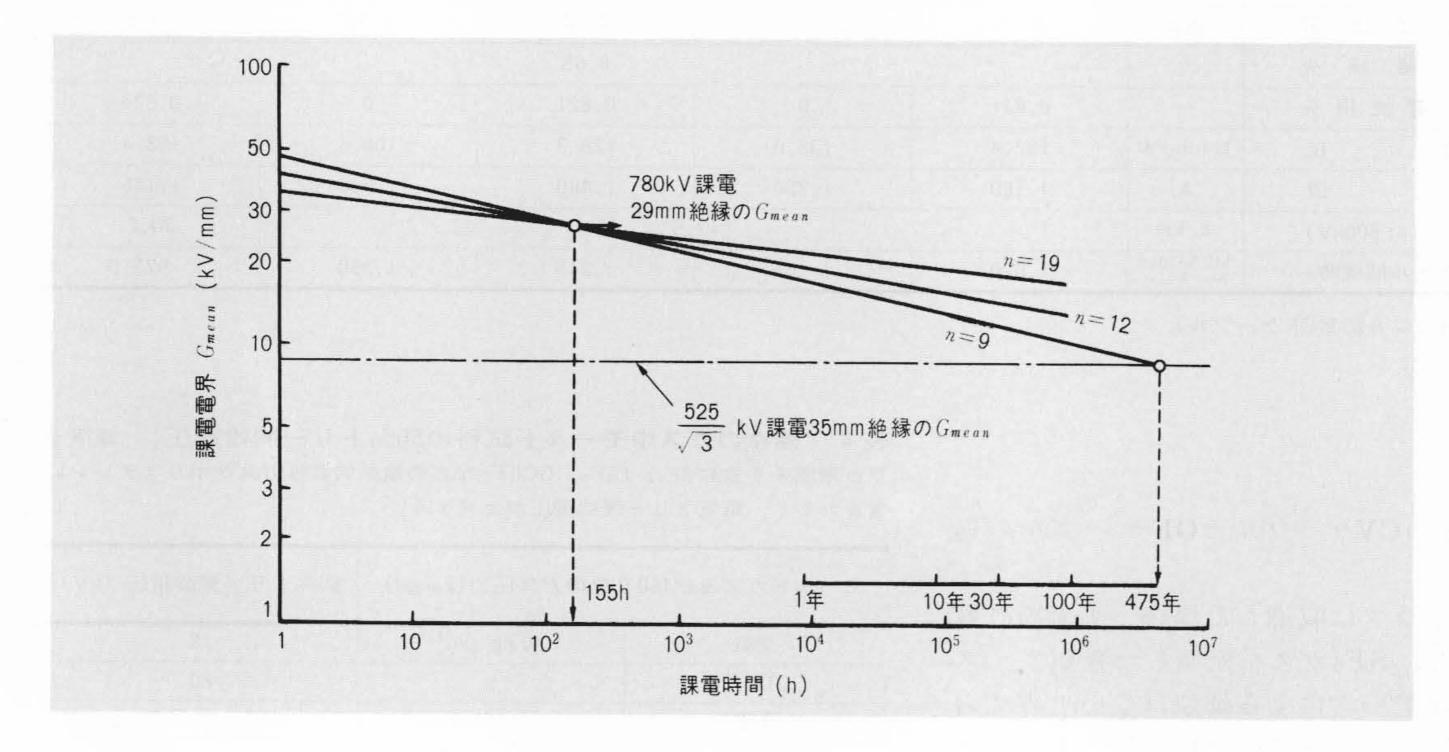


図 2 SF6ガス含浸試作500 kV CV ケーブルの長期課電 試験 SF6含浸CVケーブルは, 長時間にわたる高電界課電に対 しても十分安定した絶縁性能を もつ。

課電は3章で述べた設計35mm絶縁の500kV CV $\tau$ -ブルでは、対地電圧 $\frac{525}{\sqrt{3}}$ kV(8.66kV/mm)課電475年に相当することが分かる。V-t特性のnは12以上と考えられるので、更に長期の寿命をもつこととなる。更に、引き続き、端末及び接続部を含む長期課通電試験を約1年間行なう予定であり、現在準備を進めている。

# 5 今後の問題点

(1) 各種終端部,接続部の開発

基本的には、275kV CVケーブルの終端部、接続部の絶縁構造と同じであるが、ケーブル本体とともに長期信頼性の確認を十分に行なうことが必要である。

(2) ステンレスシースの検討

送電容量増大の強力な手段であるので、機械特性の把握を 行ない、実用に当たっての取扱い性を確認する。

# 6 結 言

以上を要約すると以下に述べるとおりである。

- (1) 最近のCVケーブルの性能向上と $SF_6$ ガス含浸効果を考慮した低減絶縁厚さ設計により、500kV CVケーブルの絶縁厚さを34mmと設定したこと。
- (2) 上記の低減絶縁厚さ設計によっても、十分な長期信頼性があることを、SF6ガス含浸29mm絶縁厚さの試作ケーブルの

長時間高電圧課電試験により実証したこと。

(3) ステンレスシースの採用,防災トラフの省略,又は換気形化により送電容量の大幅な増加が見込めること。

500kV CVケーブルの実現にはなお多くの問題点が残されているが、その解決はケーブルメーカーの使命であり、これの早期実用化のため、鋭意努力を続けていく考えである。

# 参考文献

- 1) 特高架橋ポリエチレン, 高電圧試験法専門委員会:特別高圧 架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の高電圧試験法, 電 気協同研究, 34. 1(昭和53年7月)
- J. M. Oudin, et al.: The Use of Thermoplastic Insulating Material in the Manufacture of Extra High Voltage Cables for D.C and A.C, CIGRE 19, 209(1962)
- 3) F.H.Kreuger: Endurance Tests with Polyethylene Insulated Cables, Methods and Criteria, CIGRE 22. 21-02(1968)
- 4) R. Jocteur, et al.: Research and Development in France in the Field of Extruded Polyethylene Insulated High Voltage Cables. CIGRE 24. 21-07(1972)
- 5) 池田, 外:電気的負性ガス含浸ポリエチレンの絶縁特性, 電気学会誌A, 47, 3, 120~129(昭47-3)
- 6) 池田,外:SF<sub>6</sub>ガス含浸架橋ポリエチレンケーブルの絶縁特性, 日立評論,**54**,4,370~373(昭47-4)