

論文の内容の要旨

論文題目 ポリプロピレンラミネート紙の絶縁特性向上と大容量電力ケーブルへの適用

氏名 畑 良 輔

20世紀初頭に発明された OF 電力ケーブルは、今日に至っても地中大容量電力送電の主流技術を担っている。その絶縁は天然繊維からなるクラフト紙と絶縁油の複合のまま 1970年代を迎えた。大容量化のために高電圧化するには、インパルス強度を上げる必要性があったが、そのためには絶縁紙の気密度を上げることと薄様化する必要がある。しかしながらそれらは限界値に達していたので、クラフト紙に替えて人工フィルムの活用が考えられた。その結果生まれたのが、写真 1 に示す、気密度無限大の PP (Polypropylene) フィルムと薄様クラフト紙をラミネートした PPLP (Polypropylene Laminated Paper) である。

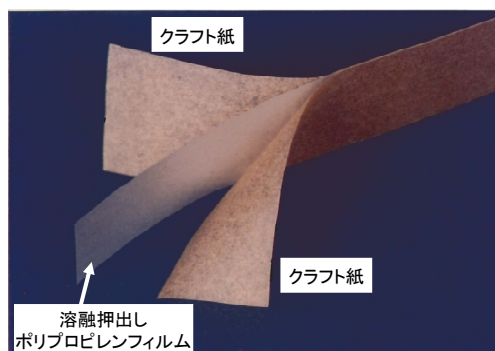


写真 1 PPLP

PPLP 単独の真性インパルス破壊は、単独では機械的強度不足のために使用出来ない薄様クラフト紙を、PP と貼り合わせることによって使用可能化したことによるクラフト紙の薄紙化効果で向上するが、通常のケーブルと同様の絶縁テープ積層によって生じるオイルギャップが存在すると、クラフト紙とは異なって PPLP はオイルより破壊強度が高いため、オイルの破壊とその時にオイルギャップと対向する PPLP の複合薄様クラフト紙の耐力で破壊強度が決まることが分かった。一方、繰り返し波の AC に対しては、クラフト紙も PPLP もオイルギャップの微小放電が対向するクラフト紙を損傷させることによって生ずるから、クラフト紙と PPLP の誘電率(ε)比に応じたオイルギャップの AC ストレス緩和分だけ PPLP の方が高い AC 破壊強度を示す。

DC では、クラフト紙の場合、インパルスと同じ破壊メカニズムによってクラフト紙そのものの破壊特性が支配的であるために、破壊ストレスも両者でほぼ同程度である。しかしながら、PPLP では、DC ストレス分布が絶縁材料の抵抗率比で決まる事になり、殆ど全てのストレスが抵抗率の圧倒的に高い PP 層に印可されることになる。一方、気密度無限大の PP 層は非常に高い DC (及びインパルス) 破壊強度を示すので、結局 PPLP の DC 破壊強度はインパルス破壊強度より圧倒的に高くなる。以上述べた破壊のメカニズム及び破壊ストレスをクラフト紙と PPLP で比較して示すと表 1 の通りとなる。

表 1 OF ケーブルの破壊メカニズムと破壊ストレス

波形		クラフトOFケーブル	PPLP OFケーブル (PPLP-A相当)
AC	破壊メカニズム	オイルギャップの微小放電 ⇨ 対向テープクラフト紙BD ⇨ ケーブルBDへ	
	BDストレス	40~50 ($\epsilon_k / \epsilon_{PPLP} \cong 3.4 / 2.8 \cong 1.2$) (油圧効果有り)	50~60
Impulse	破壊メカニズム	絶縁テープのBD ⇨ ケーブルBDへ (*1)	オイルギャップのBD ⇨ PPLPのBD ⇨ ケーブルのBDへ (極性効果有り) (*2)
	BDストレス	100	130
DC	破壊メカニズム	絶縁テープのBD ⇨ ケーブルBDへ	絶縁テープのBD (但し PPLPのPPテープからBD) ⇨ ケーブルBDへ
	BDストレス	100 (DC BD \cong Imp. BD)	180 (モデルケーブル) (DC BD \cong 1.4 × Imp. BD) 〔但し PP 比率kをupすると〕 〔倍率は比例して大きくなる〕

注 *1 クラフト紙のImp. BDストレスはオイルギャップのオイルのBDストレスよりやや低い

*2 PPLPがオイルギャップのオイルのImp. BDより破壊ストレスで高いのは、ラミネートするクラフト紙の厚さが薄く、そのImp. BDストレスが高いからである。

同表の AC では、オイルギャップの耐圧に対して「油圧効果」があるので、超々高圧(UHV)電力ケーブルでは高油圧適用のコンセプトが重要となる。一方、インパルスでは、オイルギャップ中のストリーマの対向テープへの衝撃が破壊に影響するので、そもそも「+」インパルスに弱い「インパルスの極性効果」を生ずるから、この対策として導体直上に高 ϵ のクラフト紙層を配置する複合絶縁層のコンセプトが生まれた。この考えを積極的に活用するといわゆる「 ϵ -grading」が可能であり、絶縁厚を規定する導体直上の最大交流性ストレスを緩和する事が可能になる。

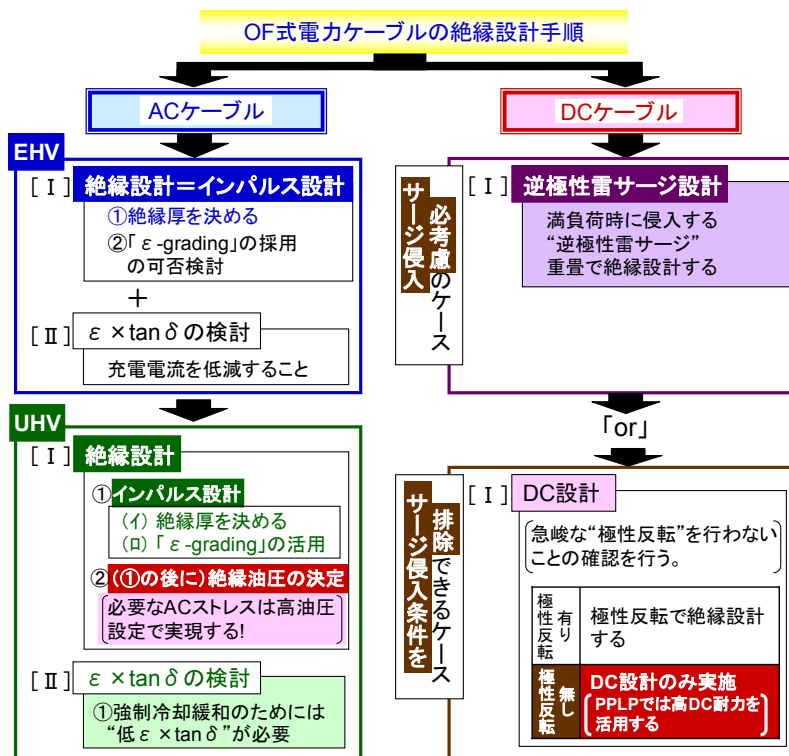
DC OF ケーブルでは、PPLP の優れたインパルス及び DC 耐電圧特性に加えて、PPLP 主絶縁の両サイドにクラフト紙薄層絶縁を組み合わせることによって、前記「 ϵ -grading」と「 ρ -grading」効果を同時に引き出す事が可能になり、導体直上及び金属シース直下に生ずるインパルス及び DC 両方の最大ストレスを緩和した理想的な DC OF ケーブルが可能となる。

一方、非給油型の超長尺 Solid DC 海底ケーブルでは、ケーブルに交流性の波形が入らない様に線路構成することによって、PPLP の DC 特性を極限まで向上させる事が、DC 耐圧向上の観点からのみならず、在来のクラフト紙 Solid DC ケーブルでは最大の欠点になる絶縁油の移動や負荷遮断時の枯渇に対しても放電劣化しない「新しい Solid DC ケーブル」を実現する観点からもキーになる技術であることが分かった。そこで、Solid DC ケーブル専用の PP 比率が 70%超の PPLP-S を試作してこれらの特長を一つ一つ実証すると共に、従来のクラフト紙 Solid DC ケーブルでは最大 500kV 未満及び最高許容温度略 50°C の設計限界が存在するのに対して、PPLP Solid DC ケーブルではこれらを Breakthrough して 600~1,000kV 級でかつ略 80°C が可能な革新的大容量ケーブルが実現出来ることを実験し提唱した。この「新しい絶縁材料を適用した革新的なケーブルコンセプト」を最大限に生かすには、現在適用されている、在来のクラフト紙絶縁ケーブルのみをベースにして定められた DC ケーブルの標準の効力を有する「CIGRE 推奨案」を改訂することが、喫緊の重要性を持つことも主張している。

以上、新たにクラフト紙絶縁材料に加えて新種の PPLP を用いることが可能になった事によって、OF 及び OF と類似の Solid DC ケーブルの絶縁機能と破壊メカニズムの全容が解明できるとともに、逆にそれらの利点を組み合わせた先進的電力ケーブルの設計手法が、

AC/DC 両ケーブルに亘って俯瞰可能となった。この考え方に基づき将来の UHV 級までの電力ケーブルの設計を系統的に纏めたのが表 2 である。

表 2 OF 式電力ケーブルの絶縁設計手順



本論文では、PPLP を用いて新しいコンセプトの下に実ケーブルを試作・試験してその性能を検証すると共に、これら最新鋭電力ケーブルを世界初の商用線路へ適用して運用した実例についてもとりまとめている。又、これら新鋭電力ケーブルを採用することによる在来ケーブルからの経済性の評価方法についても確立した。

21世紀は「エネルギー・資源・環境」の世紀と云われているが、このキーワードに適合する技術として超伝導技術がとり上げられる。本論文では、高温超伝導 (HTS) ケーブルに対しては OF ケーブルと同様に、冷媒と絶縁を兼ねた液体窒素と複合される積層絶縁体としては PPLP が最適であること、又基礎データによれば、PPLP は OF ケーブルと同様に取り扱得る電気特性を示すことが分かった。但し、HTS が文字通りその威力を発揮する PPLP 絶縁 HTS DC ケーブルでは、更に革新的な絶縁設計が可能であることと、究極の無損失低電圧大容量送電コンパクトケーブルシステムが実現する可能性のあることをとりまとめた。