ポリプロピレン系新規絶縁材料の電力ケーブルへの適用(3)

正員 棕橋 清* 非会員 松田 好司*
 正員 宮下 芳次** 正員 出村 剛**
 非会員 植田朝喜与** 正員 吉野 勝美***

The Application of Novel Polypropylene to the Insulation of Electric Power Cable (3)

Kiyoshi Kurahashi*, Member, Yoshiji Matsuda*, Non-member, Yoshitsugu Miyashita**, Member
 Tsuyoshi Demura**, Member, Asakiyo Ueda**, Non-member, Katsumi Yoshino***, Member

Having higher melting temperature than polyethylene, polypropylene has been expected as insulation material for power cable. But isotactic polypropylene used generally is unsuitable as cable insulation because it shows poor flexibility, low breakdown strength due to growing spherulites, and so on. But stereoregular syndiotactic polypropylene (s-PP) newly developed with metallocene catalyst shows quite different properties from i-PP.

The authors had investigated the basic properties of s-PP and the initial properties as a cable which was manufactured using s-PP insulation, in the previous paper. As the results of this, it was revealed that s-PP had superior thermal and electrical properties to cross-linked polyethylene and the s-PP insulation cable showed satisfactory initial properties. However, in order to apply to an actual cable, the properties must be maintainable over 30 years after construction.

In this paper, we estimated the long term and remaining properties for s-PP insulation cable.

A series of experiments on long term properties gave following results.

- (1) S-PP cable shows longer life over 30 years.
- (2) The breakdown strength of s-PP cable after long term experiment equal to 30 years is slightly lower than initial breakdown strength, but it's sufficient as remaining property.

Furthermore, water-tree resistivity of s-PP was investigated and it was revealed that s-PP significantly suppressed the water tree propagation compared with XLPE.

These results suggested that s-PP cable would be available as next generation cable.

キーワード : 電力ケーブル, シンジオタクチックポリプロピレン, 雷インパルス破壊強度, AC 破壊強度

Keywords : electric power cable, syndiotactic polypropylene, lightning impulse breakdown strength, AC breakdown strength

1. まえがき

架橋ポリエチレン(XLPE)はその優れた耐熱性, 電気特性により現在送電ケーブルの絶縁材料として広く用いられている。

しかし, 近年の環境意識の高まりの中, 架橋構造を有す

るがゆえに熔融せず, 再利用が困難な XLPE にかわる新規絶縁材料が求められていた。

ポリエチレンよりはるかに高い融点を有するポリプロピレンは, ケーブル開発当初より絶縁材料として期待され研究されてきたが, 従来はケーブル材料としては不適とされてきた。

その理由としては①可撓性に乏しく加工性にも劣る②球晶が成長しやすく球晶界面での絶縁耐力が大幅に低下する。③銅との接触により劣化が著しく促進されるといった点が挙げられる。

一方, 近年, 開発されたメタロセン触媒によって分子構造を立体的に制御した高分子材料を合成することが可能になり, 既存のチーグラ系触媒では困難であった新規構造高分子材料の開発が活発化している⁽¹⁾。

* 関西電力(株)
 〒661-0974 尼崎市若王子3丁目11-20
 The Kansai Electric Power Company, Inc.
 11-20, Nakoji 3-Chome, Amagasaki 661-0974
 ** 三菱電線工業(株)
 〒664-0027 伊丹市池尻4-3
 Mitsubishi Cable Industries, Ltd.
 4-3, Ikejiri, Itami 664-0027
 *** 大阪大学
 〒565-0871 吹田市山田丘2-1
 Osaka University
 2-1, Yamada-Oka, Suita 565-0871

表 1 s-PP の基本特性

Table 1. Properties of samples.

Sample	MFR*(g/10min)	Melting point(°C)**	Mechanical properties			Breakdown strength	
			Ys(MPa)	Ts(MPa)	Elo.(%)	Impulse(kV/mm)	AC(kV/mm)
s-PP	3.7	133	18	35	655	362	93
i-PP	7	164	****	37	≒0	140	57
XLPE	1.1***	105	10	32	512	242	74

* MFR:melt flow rate(measured by ASTM D 1238)

** by differential scanning calorimeter(DSC)

*** before crosslinking

**** not observed

この動きは特に 3 級炭素を有する炭化水素ポリマーにおいて顕著であり、ポリプロピレンにおいても、従来利用されてきたアイソタクチックポリプロピレン(i-PP)とは構造の全くことなるシンジオタクチックポリプロピレン(s-PP)の合成が可能になってきた^{(2)~(5)}。

筆者らはすでに、s-PP が従来いわれてきた i-PP の弱点を克服した新しい材料であること及び電気絶縁材料として優れた特性を有することを示した⁽⁶⁾。表 1 に既報で検討した s-PP の基本特性を示す。s-PP は i-PP と異なり、弱点となる大きな球晶が発達しないため XLPE と同等の機械特性を有し、XLPE を上回る優れた絶縁特性を示す。また、融点が高いため XLPE に比較して高温使用が可能である。

さらに、実際に電力ケーブルを試作してその初期特性がすぐれたものであることについても明らかにしている⁽⁷⁾。

しかし、現実の電力ケーブルは布設後 30 年以上にわたって、使用に供され、性能を維持できなければならない。そこで本報では s-PP ケーブルの長期特性を確認するために、実布設を模擬したケーブル布設を行い、長期課通電試験を実施した。

さらに長期試験後の残存性能を確認するために、室温でのインパルスおよび AC 破壊試験を実施した。

2. 試料

実験に用いた s-PP 試作ケーブルの概要を図 1 および図 2 に、試作時の条件を以下に示す。絶縁材料としてはケーブル製造に充分な量を確保するため、融点の若干低いセミコマーシャルグレードを使用し、低温脆性改良のために VLDPE をブレンドした。また、実験に使用したケーブルの有効長は 50m とした。

ケーブルサイズ：22kV 1c×100mm²

絶縁材料：s-PP/VLDPE ブレンド体

(s-PP 融点=126°C, Mw/Mn=3.7, MFR=4.6)

半導電材料：導電性熱可塑性エラストマー(融点=153°C)

線速：3m/min

シリンダー設定温度：150~220°C

ダイ設定温度：200°C

Cable class	22kV
Conductor size	100sq
Cable diameter	37.0mm
Insulation thickness	6.0mm
Insulation material	s-PP:VLDPE=85:15
Semiconductor material	TPE(with carbon black)

図 1 22kV 級 s-PP ケーブル概要

Fig. 1. Structure of 22kV class s-PP cable.

図 2 22kV 級 s-PP ケーブルの外観

Fig. 2. Appearance of 22kV class s-PP cable.

3. 実験

〈3・1〉 長期課通電試験 長期課通電試験については JEC3408-1997 (特別高圧(11kV~275 kV)架橋ポリエチレンケーブル及び接続部の高電圧試験法) に準拠して 30 年に相当する寿命を検証すべく、表 2 に示す条件で実施した。

試験電圧の決定にあたっては、s-PP ケーブルの寿命指数 n を確認するための予備試験として短時間 V-t 試験を実施した。その結果を図 3 に示す。 n 値としては 15 程度が期待できることを確認し、十分な裕度をもって $n=9$ を採用した。 n 値と試験期間から劣化係数を算出しケーブル最高電圧(24kV)の 1.7 倍の対地電圧に電圧変動の裕度を見込み試験電圧を 25kV とした。

ヒートサイクルについては s-PP が非架橋であることから融点近傍の熱履歴を避けるため供試ケーブルの短時間導体許容温度は設けず、常時導体許容温度を 110°C として通電条件を決定した。

長期課通電試験の試験回路構成を図 4 に試験風景を図 5 に示す。供試ケーブルの導体温度の直接計測が困難なため、温度計測用にダミーケーブルを設けた。

〈3・2〉 部分放電試験 長期課通電試験における供試ケーブルの劣化を検証するため、部分放電試験を長期課通電開始前、1.5 ヶ月経過後、3 ヶ月終了後の計 3 回実施した。試験条件を表 3 に示す。

〈3・3〉 誘電正接温度特性試験・静電容量温度特性試験 誘電正接温度特性試験および静電容量温度特性試験についても〈3・2〉項と同様、初期、1.5 ヶ月後、3 ヶ月後の計 3 回実施した。測定条件を表 4 に示す。

〈3・4〉 残存性能試験 残存性能試験として、常温で

のインパルス破壊試験、AC 破壊試験を実施した。破壊試験のケーブル有効長は 2m とし、各 3 回実施してその平均値を求めた。

インパルス破壊試験は $1.2 \times 50 \mu \text{sec}$ の負極性インパルス波を予想破壊電圧の 70% 値を初期値として 20kV/3 回印加の

図 4 回路図

Fig. 4. Circuit figure.

図 5 試験状況

Fig. 5. Test scene.

表 2 長期課通電試験条件

Table 2. Condition of long term test.

Test period	3months(92days)
Test voltage	25kV AC60Hz
Heat cycle	1cycle/day, 8hours current ON and 16hours current OFF
	conductor approaching temperature 110°C (107±3°C)

図 3 短時間 V-t 試験結果

Table 3. Result of short time V-t test.

表 3 部分放電試験条件

Table 3. Condition of partial discharge test.

Test voltage	22kV
Sensitivity	10pC
Temperature	Room temperature

表 4 誘電正接および静電容量試験条件

Table 4. Condition of $\tan \delta$ and electrostatic capacity test.

	Initial, 1.5months later	3months later
Voltage	12.7kV	
Temperature	RT, 60°C, 90°C	RT, 60°C, 90°C, 105°C
Order	RT→(105°C)→90°C→60°C

図6 水トリー発生試験電極系

Fig. 6. Electrode assembly for water treeing.

ステップ昇圧方式で課電した。

AC 破壊試験は予想破壊電圧の 70% 値×1 時間を初期値として 20kV/10 分印加のステップ昇圧で課電した。

〈3・5〉 絶縁材料の耐水トリー試験 s-PP 試作ケーブルを用いた長期性能評価は気中課電としたが、ケーブル絶縁材料としての基本性能を確認すべく、シート試料による耐水トリー性評価を実施した。実験はケーブル試作に用いたものと同じ材料を使用して、熱プレス成形によって作製した 2mm シートの表面を #80 のサンドペーパーで研磨処理したものを試料とし、図 6 に示す電極系を用いて 1mol/l NaCl 水溶液冠水下で実施した。試験電界は水トリーの最低発生電界を上回る 5kV/mm とし、1kHz で周波数加速を行った。所定時間の課電終了後、電極直下部を 200~250 μm にスライスカットし、沸騰水中にて 2 時間煮沸後、光学顕微鏡を用いて各スライス片の界面水トリーの発生状況を調査した。なお、比較対象として現行 XLPE 絶縁体についても同様の調査を実施した。

4. 結果と考察

〈4・1〉 長期課通電試験 長期課通電試験を実施した結果、供試ケーブルは絶縁破壊することなく試験期間を満了した。

〈4・2〉 部分放電試験 結果を表 5 に示す。いずれの場合も部分放電は観測されず、異常は認められなかった。

〈4・3〉 誘電正接/静電容量温度特性試験 誘電正接および静電容量の温度特性試験の結果を表 6 および図 7、図 8 に示す。

いずれの場合も初期の温度特性に比較して課通電後は値が低くなっているが、1.5 ヶ月後と 3 ヶ月後ではほとんど変化がない。課通電履歴によってケーブル特性が安定し長期的に非常に安定した特性を有することが判った。

また誘電正接、静電容量のいずれの値も温度上昇に伴って低くなり熱暴走の恐れのない良好な特性を示した。

〈4・4〉 残存性能試験結果 インパルス破壊強度及び AC 破壊強度の測定結果を図 9 および図 10 に示す。

表 5 部分放電試験結果

Table 5. Result of partial discharge test.

	Initial	1.5M	3M
Result	Corona free		

表 6 静電容量および誘電正接の温度特性

Table 6. Temperature character of electrostatic capacity and $\tan \delta$.

Temp. (°C)	Initial		1.5months		3months	
	$\tan \delta$ (%)	CX(pF)	$\tan \delta$ (%)	CX(pF)	$\tan \delta$ (%)	CX(pF)
17	—	—	—	—	0.024	8344
26	—	—	0.016	8320	—	—
35	0.029	8414	—	—	—	—
60	0.010	8240	0.008	8140	0.007	8150
90	0.010	8110	0.007	8030	0.007	8026
105	—	—	—	—	0.006	8004

図7 静電容量

Fig. 7. AC Electrostatic capacity.

図8 誘電正接

Fig. 8. $\tan \delta$ of s-PP cable.

図9 インパルス破壊強度
Fig. 9. Impulse breakdown strength.

図10 AC破壊強度
Fig. 10. AC breakdown strength.

インパルス破壊強度で初期値の約80%, AC破壊強度で約90%の値に低下したが、それでもJEC3408に示される22kV架橋ポリエチレンケーブルの長期課通電試験後の残存性能試験電圧値(インパルス破壊電圧値210kV(絶縁厚6mmとして35kV/mm), AC破壊電圧値25kV(同4kV/mm))に比較するとはるかに高い試験電圧まで破壊しない性能を示しており、30年に相当する長期課通電試験後も十分な残存性能を有していることが確認できた。

なお、XLPEケーブルの長期課通電試験後の残存性能については一般に初期に比較してほとんど変化しないか同等以上との報告がある⁽⁸⁾。それに対して今回評価したs-PPではAC破壊強度はあまり変化がないが、インパルス破壊強度に低下が見られた。この原因については、現時点では不明だ

図11 s-PP絶縁体の水トリ発生状況
Fig. 11. Water Treeing in s-PP insulation.

が、今回使用した材料がXLPEほど高度に異物管理したものではなかったことが破壊値の誤差に影響した可能性もあり、今後の検討課題と考えている。

〈4・5〉 絶縁材料の耐水トリ性能評価結果 今回試作ケーブルに用いたs-PP絶縁材料の水トリ発生状況を図11に示す。この結果より、s-PPはXLPEに比して水トリの伸展速度が遅く、材料的に耐水トリ性に優れることが判る。現在、日本国内の高電圧XLPEケーブルには、簡易遮水層や金属シースが設けられており、運転中の浸水による水トリ劣化の発生は極めて少なくなっているが、万一、浸水したとしても、s-PPケーブルは従来のXLPEケーブルと同等以上の性能を有していると言える。

5. まとめ

s-PPの電力ケーブル絶縁体への適用の可能性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) s-PP絶縁ケーブルは30年を越える寿命を有する。
- (2) s-PP絶縁ケーブルの残存破壊強度は、初期値に比較すると若干の低下は見られるものの、30年相当の長期課通電試験後も十分な残存値を示す。
- (3) s-PP絶縁ケーブルの耐水トリ性は、XLPEケーブルと同等以上である。

以上のように、s-PP絶縁ケーブルは初期性能のみならず、長期性能についても優れた特性を示した。ケーブル機械特性試験をはじめ、未だいくつかの評価課題(ケーブル浸水課通電試験等)は残っているものの、次世代ケーブルとして非常に有望であることを確認することができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、試料提供をはじめ多大な技術的協力をいただいた三井化学株式会社の関係各位に深く感謝いたします。

(平成15年6月12日受付, 平成15年12月1日再受付)

文 献

- (1) H. Sinn, W. Kaminsky, H.-J. Vollmer, and R. Woldt : "Living polymers on polymerization with extremely productive Ziegler catalysts", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, Vol.19, pp.390-392 (1980)
- (2) J. A. Ewen, R. L. Jones, A. Razavi, and J. D. Ferrara : "Syndiospecific Propylene Polymerizations with group 4 metallocenes", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.110, pp.6255-6256 (1988)
- (3) 杉本隆一 : 「シンジオタクチックポリプロピレンの開発」, 化学と工業, Vol.46, No.7, pp.71-73 (1993)
- (4) 杉本隆一・内川進隆・吉野勝美 : 「高性能シンジオタクチックポリプロピレンとその絶縁材料としての応用」, 電気材料技術誌, Vol.3, No.1, pp.3-18 (1994)
- (5) 吉野勝美・加藤 寛 : 「新しい高分子絶縁材料ポリプロピレンとその応用」, 電学誌, Vol.116, No.11, pp.745-748 (1994-7)
- (6) K. Yoshino, T. Demura, M. Kawahigashi, Y. Miyashita, K. Kurahashi, and Y. Matsuda : "The Application of Novel polypropylene to the Insulation of Electric Power Cable", *T.IEE Japan*, Vol.122-A, No.9, pp.872-879 (2002-9) (in Japanese)
吉野勝美・出村 剛・川東正記・宮下芳次・棕橋 清・松田好司 : 「ポリプロピレン系新規絶縁材料の電力ケーブルへの適用(1)」, 電学論 A, **122**, 9, pp.872-879 (2002-9)
- (7) M. Miyashita, T. Demura, A. Ueda, A. Someya, M. Kawahigashi, T. Murakami, Y. Matsuda, K. Kurahashi, and K. Yoshino : "The Application of Novel polypropylene to the Insulation of Electric Power Cable(2)", *IEEJ Trans. FM*, Vol.123, No.8, pp.797-803 (2003-8) (in Japanese)
宮下芳次・出村 剛・植田朝喜与・染矢 啓・川東正記・村上 剛・吉野勝美・松田好司・棕橋 清 : 「ポリプロピレン系新規絶縁材料の電力ケーブルへの適用(2)」, 電学論 A, **123**, 8, pp.797-803 (2003-8)
- (8) M. Ishida, T. Okamoto, H. Suzuki, and T. Imajo : "Micro-Analytical Method of Submicron Insulation Morphology near the Semiconducting Interface in an XLPE Cable to Evaluate its Dielectric Properties", *T.IEE Japan*, Vol.112-B, No.10, pp.863-871 (1992-10) (in Japanese)
石田政義・岡本達希・鈴木 寛・今城尚久 : 「CV ケーブルの半導電層界面近傍での微視的な絶縁体微小高次構造と絶縁性能」, 電学論 B, **112**, 10, pp.863-871 (1992-10)

棕 橋 清

(正員) 1948 年 12 月 25 日生まれ。1972 年 3 月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。主として地中送電線の研究開発・建設に従事。1998 年同社総合技術研究所主席研究員。現在大阪南支店 グループ総合営業グループ マネジャー。

松 田 好 司

(非会員) 1973 年 10 月 23 日生まれ。1996 年 3 月京都大学工学部電子工学科卒業。同年関西電力(株)入社。現在, 同社総合技術研究所に勤務。主として電力ケーブル用絶縁材料に関する研究に従事。

宮 下 芳 次

(正員) 1958 年 10 月 10 日生まれ。1982 年京都工芸繊維大学工学部工業化学科卒業。同年, 大日本電線(株)(現・三菱電線工業(株))入社。主として電力ケーブル用絶縁材料および導電材料の研究開発に従事。日本化学会会員。

出 村 剛

(正員) 1969 年 7 月 22 日生まれ。1993 年京都大学工学部工業化学科卒業。同年, 三菱電線工業(株)入社。主として電力ケーブル用絶縁材料の開発に従事。

植 田 朝喜与

(非会員) 1949 年 12 月 6 日生まれ。1975 年 3 月神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。同年大日本電線(株)(現・三菱電線工業(株))入社。主として電力ケーブルおよび付属品の技術開発に従事。

吉 野 勝 美

(正員) 1941 年 12 月 10 日生まれ。1964 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。1969 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程終了。大阪大学助手, 講師, 助教授を経て, 1988 年大阪大学工学部電子工学科教授, 現在に至る。工学博士。主に導電性高分子, 光機能性高分子, 強誘電性液晶等の有機電子材料に関する研究に従事。1984 年応用物理学賞, 1990 年大阪科学賞, 1997 年電気学会著作賞, 1998 年電気学会業績賞等受賞。日本物理学会, 応用物理学会, 日本液晶学会, 高分子学会会員。元電気学会副会長, 元日本液晶学会会長。