

海外鉄道車両軽量電線用ハロゲンフリー材料の開発

Development of Halogen-free Insulation Material for Overseas Railway Rolling Stock Lightweight Electric Wire

千葉宏樹*
Hiroki Chiba

西口雅己*
Masaki Nishiguchi

〈概要〉

海外鉄道車両用電線には、垂直難燃性や高耐熱性、高温耐油性等に加えて、鉄道運転時の振動等に耐えるために高い耐摩耗性が要求される。一方、鉄道車両の更なる軽量化のため電線被覆材の薄肉化が求められており、一般的にその材料にはエンジニアリングプラスチック（以下エンブラ）が使用されているが、柔軟性や端末加工性に問題を有している。

今回、被覆材のベース材料として汎用ポリオレフィンを用いるとともに、当社独自のポリマー材料技術を導入することで、エンブラ並みの諸特性に加えて、柔軟性や端末加工性においても優れ、従来電線よりも薄肉化されて約15～35%の軽量化を達成できるハロゲンフリー材料の開発に成功した。

1. はじめに

近年、世界中で環境問題について関心が高まる中、鉄道輸送は他の輸送手段と比べてエネルギー消費量が低く、CO₂排出量が少ない。そのため、環境に優しい輸送手段として注目されており、現在の鉄道関連の世界市場規模は14兆円程度と大きく、年率2～3%程度で成長を続けている¹⁾。特に、現在は欧州やアジアを中心とする海外市場において鉄道網の整備が進んでおり、続いて南米やアフリカ大陸においても布設が活発化していく見込みである。それに伴い、鉄道車両に使用される各種部材の需要も高まっており、鉄道車両に関するビジネスは今後大きく成長すると予想される。

また、今後の鉄道車両開発において、車両本体の軽量化が検討されている²⁾。車両が軽量化されることにより、鉄道の更なる省エネ化や高速化のみならず、騒音の防止やレール等への負担が少なくなるため保線作業の軽減効果が期待される。そのため、鉄道用電線においても軽量化を目的として被覆厚さの更なる薄肉化が検討されている。

上記背景の下、今回鉄道車両用電線の中でも、主として信号用として使用される軽量電線に着目し、その新規被覆材の開発を行った。

2. 海外鉄道車両用電線

欧州やアジアを中心とした海外の鉄道車両用電線には、被覆厚さの薄肉化に加えて、電線布設時や鉄道運転時の振動に耐えるため、EN規格（欧州統合規格）に準拠した高度な耐摩耗特性

や垂直難燃性、高耐熱性等が要求される。そのため、その被覆材料には、強度特性や耐熱性に優れたエンブラがベース材料として用いられてきた。しかしながら、このような材料は概して剛直なため柔軟性に劣り、車両やそれに搭載される各種部材の細部への配線が困難とされていた。

今回、エンブラを使用せず、汎用のポリオレフィン樹脂で全て構成した新規ポリマー材料を開発した。それを電線被覆材として用いることで、薄肉・軽量電線の規格であるEN 50264-3-1およびEN 50306-2に対応した耐摩耗性、耐熱性、高温耐油性等の力学的特性や、IEC 60332-3-24 Category C（EN 50264-1）の垂直難燃性、IEC 61034（EN 50264-1）の低発煙性等を満足させた。さらには従来使用されていたエンブラで課題となっていた柔軟性や端末皮むき加工性にも優れた鉄道車両軽量電線被覆材を開発した。

3. 海外鉄道車両用軽量電線の構造

海外鉄道車両用軽量電線の構造を表1に示す。本電線の肉厚は0.4 mmであり、従来の鉄道車両用電線の肉厚と比べておよそ1/2である。したがって、電線の重量が軽量化され、省エネルギー対応の構成となっている。一方で、被覆厚が薄くなるため、被覆材料には更なる高強度、高いレベルの耐摩耗性等の種々の厳しい諸特性が要求される。

* 研究開発本部 高分子技術研究所

表1 海外鉄道車両用軽量電線の構造
Structure of lightweight electric wire developed for overseas railway rolling stock.

導体		絶縁厚さ (mm)	仕上り外径 (mm)
サイズ (mm ²)	導体外径 (mm)		
0.30	0.7	0.4	1.5 ± 0.2
0.50	0.9	0.4	1.7 ± 0.2
0.75	1.1	0.4	1.9 ± 0.2
1.00	1.3	0.4	2.1 ± 0.2
1.25	1.5	0.4	2.3 ± 0.2
1.50	1.6	0.4	2.4 ± 0.2
2.00	1.8	0.4	2.6 ± 0.2
2.50	2.2	0.4	3.0 ± 0.2

4. 海外鉄道車両軽量電線用被覆材料の要求特性および試験方法

4.1 ホットセット特性

EN規格 (EN 50264-3-1 および EN 50306-2) では、電線被覆材が高温で熔融せずに強度を維持しているかどうかを確認する評価方法として、ホットセット特性に適合することが要求される。ホットセット試験の方法を図1に示す。試験はEN 50305に基づき、200℃の高温雰囲気下で管状の試験サンプルを20 N/cm²の負荷荷重を吊り下げ15 min 放置する。15 min後の標点距離の伸び率が100%以下、かつ荷重除去後の標点間の永久伸び率が25%以下であることが要求される。

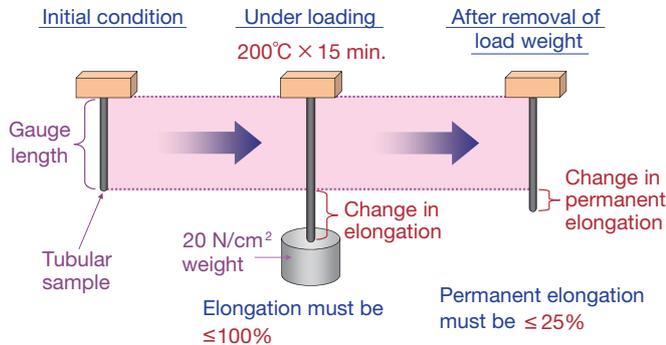


図1 ホットセット試験
Hot-set test.

4.2 耐摩耗性試験

本被覆材は、EN 50305に準拠して実施した耐摩耗性試験に適合することが要求される。この試験方法を図2に示す。今回の試験は、水平に設置した電線サンプルの上に、9 Nの負荷荷重を加えながら、0.45 mm φの鋼ブレードを用いて被覆材料を摩耗させた。そのブレードがサンプルの導体に達するまで連続で往復させる。摩耗させる部分は、1サンプルにつき、90, 180, 270, 360度円周方向の合計4回実施する。EN 50306-2より、各箇所が100往復以上、4回の平均値が150往復以上であることが要求されている。

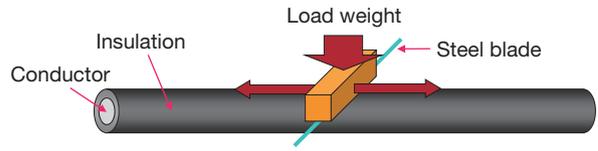


図2 耐摩耗性試験
Abrasion resistance test.

4.3 垂直難燃性

本被覆材には難燃性IEC60332-3-24 Category C (EN 50264-1)の垂直難燃試験に適合することが要求される。本試験方法を図3に示す。3,500 mmの長さに揃えた電線サンプルを図3のように隙間無く垂直に布設する。その後、バーナーで20分間サンプル下部を着火し、炎を離れた後自己消火するまで放置する。完全に消化した後、バーナー着火点からの炭化長さが2,500 mm以下であれば合格である。

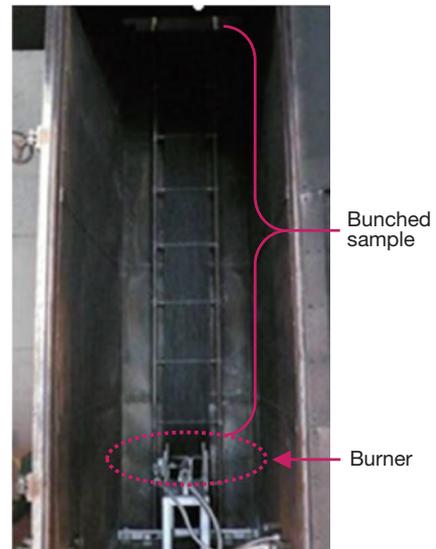


図3 IEC 60332-3-24 Category Cの垂直燃焼試験
Vertical flame resistance test in accordance with IEC 60332-3-24 Category C.

4.4 発煙試験

発煙性としてIEC 61034 (EN 50264-1)の3 mキューブ発煙試験に適合することが要求される。本試験はサンプルを1,000 mmの長さに揃え、3 m立方の試験室内にてバーナーを用いて40分間燃焼させ、被覆材料から発生した煙で封入された試験室内における光透過率を測定する。この光透過率が70%以上であれば合格である。

4.5 高温耐油性

本被覆材はEN 50305で規定された高温耐油試験に適合することが要求される。試験は、100℃に熱したASTM IRM 902の油中に、管状の被覆材を24および72 Hr浸漬させ、その後引張試験を実施する。EN 50264-3-1の標準耐油性においては24 Hr浸漬後、同規格の特別耐油性においては72 Hr浸漬後の引張強度の残率および破断伸びの残率がそれぞれ、70～130%、60～140%の範囲内であれば合格である。

4.6 長期耐熱性

本被覆材は105℃以上の長期耐熱性が要求される。

通常3点以上の温度で加熱老化試験を行い、各温度の終点からアーレニウスプロットにより長期耐熱温度を求める。今回は180, 158, 133℃の3点で加熱老化試験を実施し、各温度における破断伸びの残率が50%に達した時の時間(終点)を調査した。各温度の終点からアーレニウスプロットによって20,000 Hrにおける長期耐熱温度を算出した。

4.7 柔軟性試験

柔軟性評価の方法を図4に示す。電線を280 mmに切断し、切断した電線の両端を繋げて輪にした後、4.0 mm φのマンドレルに引っ掛け、輪にしたサンプルに3.4 Nの荷重を吊り下げる。

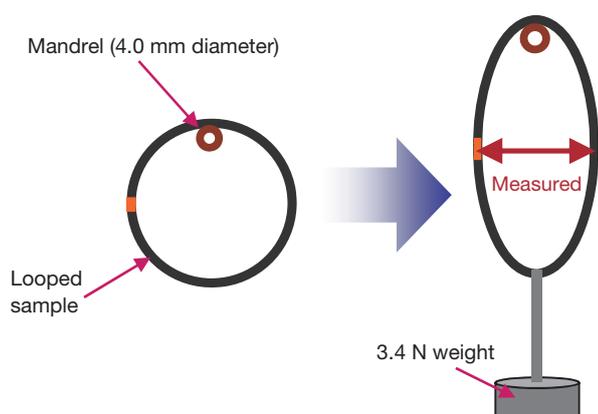


図4 柔軟性評価
Evaluation of wire flexibility.

荷重をかけた状態における電線輪の短径長さの測定を行うことにより、電線の柔軟性を測定した。荷重をかけたときの電線輪の短径長さが短いほど柔軟である。

5. EN規格準拠の要求特性に対応したポリマー材料開発

第4項のEN規格に準拠した要求特性に対し、海外鉄道車両軽量電線用被覆材料を汎用ポリオレフィン樹脂をベースに開発した。以下、本材料開発について説明する。

まず、汎用ポリオレフィン樹脂を200℃でのホットセット試験に供した場合、ポリオレフィン樹脂の中で最も高温の融点を有するポリプロピレンでも160℃程度であるため、すぐに樹脂が溶融してしまいEN規格を満足しない。そこで今回、汎用ポリオレフィン樹脂に対し電子線架橋を施すこととした。

次いで耐摩耗特性について説明する。耐摩耗性の向上には、高密度のポリオレフィン樹脂の使用や電子線架橋などの架橋処理が有効であるが、高密度ポリオレフィンは一般的に硬く柔軟性が懸念される。また、本被覆材料には難燃性も要求されるのに対し、このような高密度樹脂は難燃剤などのフィラーの受容性が低く、十分な難燃性を付与することが困難である。そのため柔軟性およびフィラー受容性を確保するためには、ある程度密度の低い樹脂やエチレン系共重合体(例えば、エチレン酢酸

ビニル共重合体(EVA))等を選ぶ必要があるが、このような材料は機械的強度に劣る。また、このような材料に電子線架橋を施しても、EN規格の耐摩耗性を付与するのは困難であった。そこで、ポリマーと難燃剤である水酸化マグネシウムをイオニックに結合させる当社独自の新型架橋技術を導入した(図5)。この技術により、無機フィラーが有する硬さをポリマーへ付与することが可能となり、耐摩耗性を大幅に向上させることができる。また、この技術は水酸化マグネシウムの導入量がある程度多いほど耐摩耗性を向上できるため、高レベルの難燃性も併せて付与できる。当社では、主に高強度の電子機器用ワイヤや自動車用電線等に使用されている技術であるが、今回はそれらの製品以上に強固な架橋を施した。

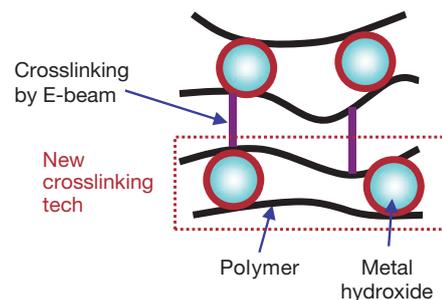


図5 新型架橋技術
New crosslinking technique.

100℃の高温耐油性に対しては、図6のように高温でもポリマーの構造(結晶性)が崩れないことが必要と考えられる。そこで、高温時におけるポリマー構造に着目し、100℃でもポリマーの結晶性が失われずオイルの進入が生じないベース材料の選定を行った。

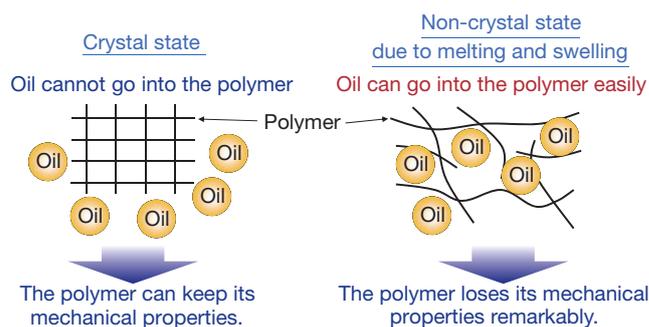


図6 高温時におけるポリオレフィン構造の概念図
Schematic illustration of structure of polyolefin at high temperature.

また、長期耐熱性に関しては、当社がこれまで電子機器用電線や産業用電線で培った耐熱技術を導入した。

上記ポリマー技術をまとめたものを図7に示す。本被覆材料は、電子線架橋と独自の新型架橋の複合架橋技術に加えて、当社のポリマー材料技術を多分に取り入れたものである。

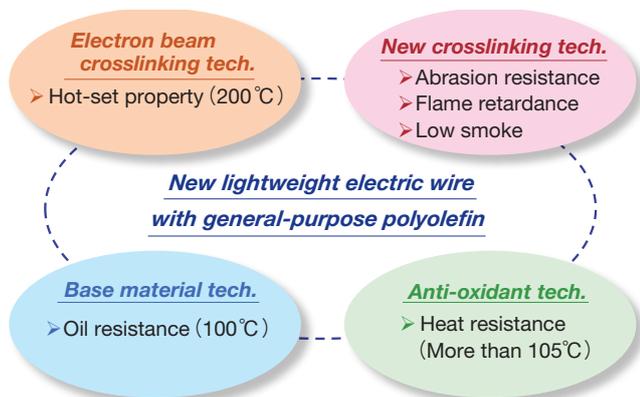


図7 海外鉄道車両軽量電線用被覆材に用いた各種ポリマー材料技術
A wide variety of material techniques on the insulation material for overseas railway rolling stock lightweight electric wire.

6. 結果および考察

6.1 ホットセット試験

ホットセット試験の結果を、非架橋のポリオレフィン材料と併せて表2に示す。

表2 ホットセット試験結果
Results of hot-set tests.

	規格値	比較材料 (非架橋)	開発材料 (電子線架橋)
荷重時 (%)	≤100	溶融のためNG	22.6
荷重除去後 (%)	≤25	溶融のためNG	8.6

非架橋材料は200℃環境下ですぐに溶融してしまっているのに対し、ポリオレフィンに独自の電子線架橋を施すことでホットセット特性を満足させることに成功した。

6.2 耐摩耗性試験

EN 50305で規定された方法で実施した耐摩耗試験の結果を図8に示す。被覆材料としてエンブラを用いた従来の海外鉄道車両用軽量電線と、新型架橋を用いていないポリオレフィン材料を用いた電線の結果も比較として併せて記した。

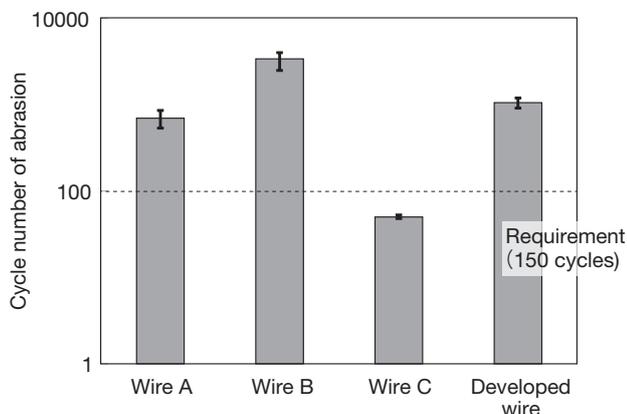


図8 荷重9 N、0.45 mm φのスチールブレードを用いたEN 50305準拠の耐摩耗性試験結果
Results of abrasion resistance tests in accordance with EN 50305 with 0.45 mm diameter steel blade and a load of 9 N.

被覆材料としてエンブラを使用した従来の海外鉄道車両用軽量電線はWire AおよびWire B、新型架橋技術を用いていないポリオレフィン材料を用いた電線はWire Cである。新型架橋技術を導入していないWire Cの平均往復回数は50往復程度と著しく耐摩耗性に劣る。これは、ポリマーと無機フィラーが結合していないため、無機フィラー自身もポリマーの摩耗に寄与してしまっているためと考えられる。一方、新型架橋技術を導入した材料を使用すると、電線の平均往復回数はおおよそ1,000往復にまで向上し、目標値の150往復を十分満足していることがわかる。このように新型架橋技術を導入した開発材料は、EN50306-2の耐摩耗性を有するとともに、エンブラを用いた海外鉄道車両用軽量電線(Wire AおよびWire B)と比較しても遜色ないことがわかる。

6.3 垂直難燃性

IEC60332-3-24 Category Cの垂直多条難燃試験の結果を図9に示す。

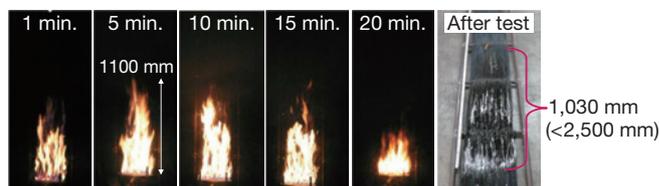


図9 IEC60332-3-24 Category Cの垂直燃焼試験結果
Result of vertical flame resistance test in accordance with IEC 60332-3-24 Category C.

着火後5分で炎高さが1,100 mmに達するものの、以降はそれ以上延焼することはなかった。また、炎を離れた後の残炎時間はわずか90秒程度であり自己消火した。また試験後の燃焼炭化長は1,030 mmであった。このような垂直多条燃焼試験に対しては、高レベルの難燃性が要求されるため難燃剤として赤燐を併用することが一般的である。あるいは、水酸化マグネシウムなどの難燃剤を多量に添加する必要があったが、このような処方一般的に耐摩耗性などの機械的特性を大きく損なう。しかしながら、今回ポリマーと水酸化マグネシウムを強固に結合させた新型架橋を用いることによって、優れた耐摩耗性ととも高レベルの難燃性も同時に付与できることを確認した。

6.4 発煙試験

IEC 61034の発煙試験の結果を表3に示す。また、ベース樹脂100質量部に対して赤燐を5質量部導入した材料を被覆した電線の試験結果を比較として同表に示す。発煙試験の結果、赤燐を使用した材料を用いた電線の光透過率は35.4%であり、規格を満足していないことがわかる。垂直多条燃焼性を満足させるため一般的には赤燐が使用されるが、本電線の場合これを用いるとEN規格は満足しないことがわかった。一方、本開発材料を用いた電線の燃焼試験後の光透過率は86.4%であり、規格の光透過率70%を十分に上回った。すなわち、仮に被覆材が燃焼したとしても、煙の発生が非常に少ないことを確認した。低発煙性であることは、例えば地下鉄等の密閉された環境下で車両の火災が生じて煙が発生しないため、周辺の見通しが遮られることなく避難や消火作業が容易となる。

表3 発煙試験結果
Results of smoke generation tests.

	規格値	比較材料 (赤燐5部)	開発材料 (赤燐無し)
光透過率 (%)	≥70	35.4	86.4

6.5 高温耐油性

高温耐油試験の結果を表4に示す。併せて被覆材料にポリオレフィン樹脂ベースで構成した通常の垂直難燃性を有するハロゲンフリー電線 (Wire D, Wire E) についても測定を行った。通常のポリオレフィンベースの被覆材料は100℃の温度で油に浸漬させると結晶性が失われ、膨潤し機械的特性が著しく低下してしまう。一方、本電線の被覆材料は高温においてもポリマーの結晶性が崩れず安定しているため、油がポリマー中にほとんど入り込むことなく耐油性に非常に優れていることが確認された。また、本開発材料はEN 50264-3-1の標準耐油性のみならず、より厳しい特別耐油性においても適合していることがわかった。

表4 高温耐油試験結果
Results of high temperature oil resistance.

	規格値	Wire D	Wire E	開発品
EN 50264-3-1 標準耐油性 ASTM IRM902, 100℃ × 24 Hr				
引張強度残率 (%)	70 - 130	40	57	82
破断伸び残率 (%)	60 - 140	111	167	86
EN 50264-3-1 特別耐油性 ASTM IRM902, 100℃ × 72 Hr				
引張強度残率 (%)	70 - 130	-	-	90
破断伸び残率 (%)	60 - 140	-	-	111

6.6 長期耐熱性

アーレニウスプロットを用いて、20,000 Hrにおける長期耐熱温度を算出した結果を図10に示す。当社の耐熱技術を導入した被覆材料を用いた電線の連続使用温度は113℃であり、規格の105℃を十分に満足していることを確認した。

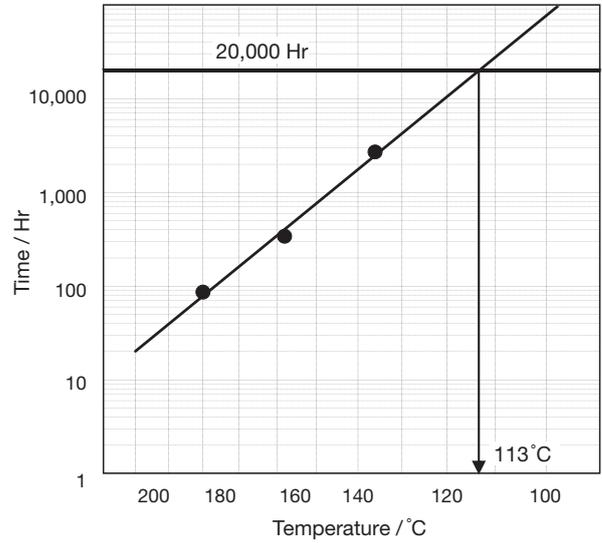


図10 アーレニウスプロットによる耐熱温度評価
Evaluation of heat resistance temperature by using Arrhenius plot.

6.7 柔軟性試験

柔軟性評価の結果を表5に示す。比較として、被覆材料としてエンプラを用いた従来の海外鉄道車両用軽量電線 (Wire A, Wire B) の結果を記した。

表5 柔軟性評価
Evaluation of wire flexibility.

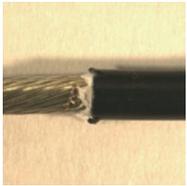
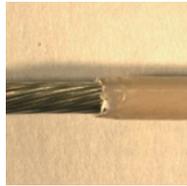
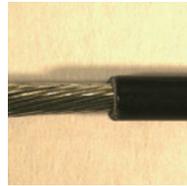
	Wire A	Wire B	開発品
3.4 N 荷重時における柔軟性評価写真			
試験前 (mm)	84	84	84
試験後 (mm)	62	57	37

このように開発電線は被覆材料としてエンプラを用いた電線と比較して、非常に柔軟性に優れていることが確認された。すなわち、車両内部あるいはそれに使用される各種部材の細部への配線性が従来よりも容易となると示唆された。

6.8 ハンドストリッパー加工による端末加工性試験

各電線のハンドストリッパー加工による端末加工性試験の結果を表6に示す。

表6 ハンドストリッパー加工による端末加工性試験結果
Evaluation of wire stripability by general insulation stripper.

Wire A	Wire B	開発品
		

比較として、被覆材料としてエンブラを用いた従来の海外鉄道車両用軽量電線 (Wire A, Wire B) の結果を記した。

開発材料を用いた電線は加工切断部にヒゲ等の切れ残しがなく、皮はぎ性に非常に優れていることがわかる。

6.9 その他の特性

その他EN規格に準拠して開発した材料を用いた電線の評価結果を表7に示す。

開発品は力学的特性、耐熱性、耐摩耗性、耐油特性、耐薬品性、低温性、難燃性、発煙特性、柔軟性等の諸特性に優れており、鉄道車両用電線として要求されるEN規格を満足していることがわかる。また、従来電線よりも被覆厚さが1/2程度に薄肉化され、約15～35%の電線重量の削減に成功した。

表7 開発した海外鉄道車両用軽量電線の一般物性評価結果
Properties of lightweight electric wire developed for overseas railway rolling stock.

試験項目	準拠規格	規格値	開発品
引張強度 (MPa)	EN 50264-3-1	≥10	25
破断伸び (%)		≥150	167
熱老化試験 135℃ × 168 Hr	EN 50264-3-1		
引張強度残率 (%)		70 - 130	112
破断伸び残率 (%)		70 - 130	93
耐燃料性 ASTM IRM903, 70℃ × 168 Hr	EN 50264-3-1		
引張強度 (%)		70 - 130	92
破断伸び (%)		60 - 140	99
耐酸性 0.5 mol シュウ酸 水溶液, 23℃ × 168 Hr	EN 50264-3-1		
引張強度残率 (%)		≥70	91
破断伸び (%)		≥100	183
耐アルカリ性 1.0 mol 水酸化 ナトリウム水溶液, 23℃ × 168 Hr	EN 50264-3-1		
引張強度残率 (%)		≥70	91
破断伸び (%)		≥100	183
低温曲げ - 40℃	EN 50264-3-1	クラック無し	合格
低温衝撃 - 25℃	EN 50264-3-1	クラック無し	合格
ダイナミックカット スルー (N)	EN 50264-3-1	≥100	123
耐オゾン	EN 50264-3-1	クラック無し	合格
切れ目伝播 - 15℃ × 3 Hr → 1.0 kV × 1 min.	EN 50306-2	クラック無し	合格
20℃ × 3 Hr → 1.0 kV × 1 min.		クラック無し	合格
85℃ × 3 Hr → 1.0 kV × 1 min.		クラック無し	合格
柔軟性 (°) 20℃ × 72 Hr, 15 N	EN 50306-2	< 45	34.7
収縮 (mm) 300 mm, 150℃ × 1 min. → 20℃	EN 50306-2	< 1.5	0.33
ストレスクラッキング 160℃ × 168 Hr, コーン型マンドレル → 1.5 kV × 1 min.	EN 50306-2	絶縁破壊無し	合格
コアのブロッキング 150℃ × 168 Hr, PTFEと接着	EN 50306-2	外層損傷無し	合格

7. おわりに

今回、汎用ポリオレフィン樹脂をベースに、種々の当社独自のポリマー材料技術を導入した海外鉄道車両軽量電線用ハロゲンフリー材料を開発した。この材料を被覆材料として用いることで、EN規格準拠の諸特性に適合するのみならず、従来電線よりも被覆厚さの薄肉化も可能となるため、今後の鉄道車両開発の軽量化ニーズにマッチした省エネルギー対応の電線が得られる。また本開発材料は汎用ポリオレフィン樹脂で構成されているため、エンブラを使用した従来の海外鉄道車両用軽量電線と比較して柔軟性に優れているとともに、皮むき加工性にも優れており、量産性や実際に車両やそれに用いる各種部材に組み込む際の配線施工性にも優れていると考えられる。

本開発材料を用いた電線は、今後の海外鉄道車両用軽量電線として大きな需要が期待できる。

参考文献

- 1) UNIFE World Railway Market Study 2012, Roland Berger , (2012)
- 2) 鈴木康文: アルミニウム合金による鉄道車両の軽量化と今後の課題, 軽金属第60巻, 第11号, (2010), 565-570