U.D.C. 621.315.221.8 : 661.846.22

ハイミックス電線(無機絶縁電線)の諸特性

Characteristics of Mineral Insulated Copper Sheathed Cables

外山泰久* 市川寛* 大和田清*
Yasuhisa Toyama Hiroshi Ichikawa Kiyoshi Ōwada

内容梗概

ハイミックス電線は導体を高度に圧縮したマグネシアで絶縁し，銅管で被覆した単心乃至多心の電線で，一般にはMI電線（Mineral Insulated Copper Sheathed Cable）と呼ばれている。

本論文では，電気絶縁材料としてのマグネシアの特性の概要，および600V ハイミックス電線の諸特性についての検討結果，ならびにマグネシアの絶縁破壊に関する若干の考察を述べた。

すなわち，ハイミックス電線は

（1） 絶縁耐力がきわめて大きい。

（2） 許容電流が大きい。

（3） 機械的強度が大きく，かつ変形後も破壊電圧は実用上十分な値を示す。

（4） 電気的破壊を繰返しても絶縁耐力は低下しない。

（5） 耐熱，耐焔，耐老化性が著しくすぐれ，寿命は永久的である。

以上の諸特性から，船舶用，高温作業場，重要建造物などの電力配線用として好適である。

1. 緒言

最近合成化学の進歩にともなってつぎつぎに新しい材料が電線に応用されており，絶縁電線の進歩向上はめざましいものがある。これらの中にはガラス，アスベストなどの無機材料もかなり応用されているが，完全無機質の絶縁電線は例が少ない。

ハイミックス電線(通称,無機絶縁電線，Mineral Insulated Copper Sheathed Cable) は導体を高度に圧縮したマグネシアで絶縁し，外側を金属管で被覆したもので，導体および金属管の材料は目的，使用条件によって，アルミニウム,銅合金などのものもあるが，600V 級の電力配線用としては導体，金属管とも銅を使用したものが一般である。

無機絶縁電線は1934年にフランスの Societé Alsacienne de Constructions Mechaniques で工業化されて以来，欧米では船舶用電線に広く用いられているほか，重要建造物，高温装置の配線などにも使用されており，ルーブル博物館の配線に使用されていることは著名である。

ハイミックス電線の特長は次のとおりである。

（1） 耐熱性，耐焔性にすぐれている。

材料が完全無機質であるため不燃，耐焔性で，かつ熱伝導が良好であるため短時間であれば 1,000°C 付近でも使用できる。通常 250°C 付近で連続使用が可能である。

（2） 許容電流が大きい。

マグネシアの熱伝導率が大きく，シース表面の熱抵抗が小さいため通常の絶縁電線に比べ許容電流が大きい。

（3） 機械的強度が大きい。

変形，衝撃，引張りなどに対してきわめて強い上に，通常の配線には十分な可撓性がある。

（4） 耐湿，耐水，耐油性がすぐれている。

金属管で被覆してあるので，耐湿，耐水，耐油性にすぐれている。

（5） 永久的に使用できる。

耐食性，耐候性，耐老化性が著しくすぐれているため寿命はほとんど永久的である。

以下，600V ハイミックス電線について，マグネシア絶縁の特長，構造および寸法，電気的，機械的諸特性，ならびに端末加工などについての試験結果を報告する。

2. マグネシア絶縁の特性

電線の絶縁あるいは被覆用無機材料としては，アスベスト，マイカ，ガラス繊維などが用いられているが，これらは単独でその目的に用いられているものでなく適当な有機質の絶縁材料と組合わせて用いられており，絶縁材料よりもむしろ有機質絶縁材料の支持体として用いられているものである。したがってこれらの絶縁電線の許容使用温度は有機質の絶縁材料の耐熱性によって限定され，そのほかの諸特性においても完全無機質から構成されるハイミックス電線に及ぶものでない。

周知のように金属の酸化物は一般に熱的，化学的にきわめて安定なものが多く，電気材料としても，マイカ，アスベスト，ガラスのほかに，シリカ，マグネシア，アルミナ，酸化チタンなどがあり，これらの鉱物は主として磁器の形で広く用いられている。微粉状で均一な酸化物あるいは鉱物としては，マグネシア，アルミナ，シリマナイト，酸化カルシウム，あるいはマグネシアと硼酸の混合物，酸化ベリリウム，粉末ガラス，カオリン，ジルコンなどが試みられているが，実用されているものはアルミナとマグネシアである。

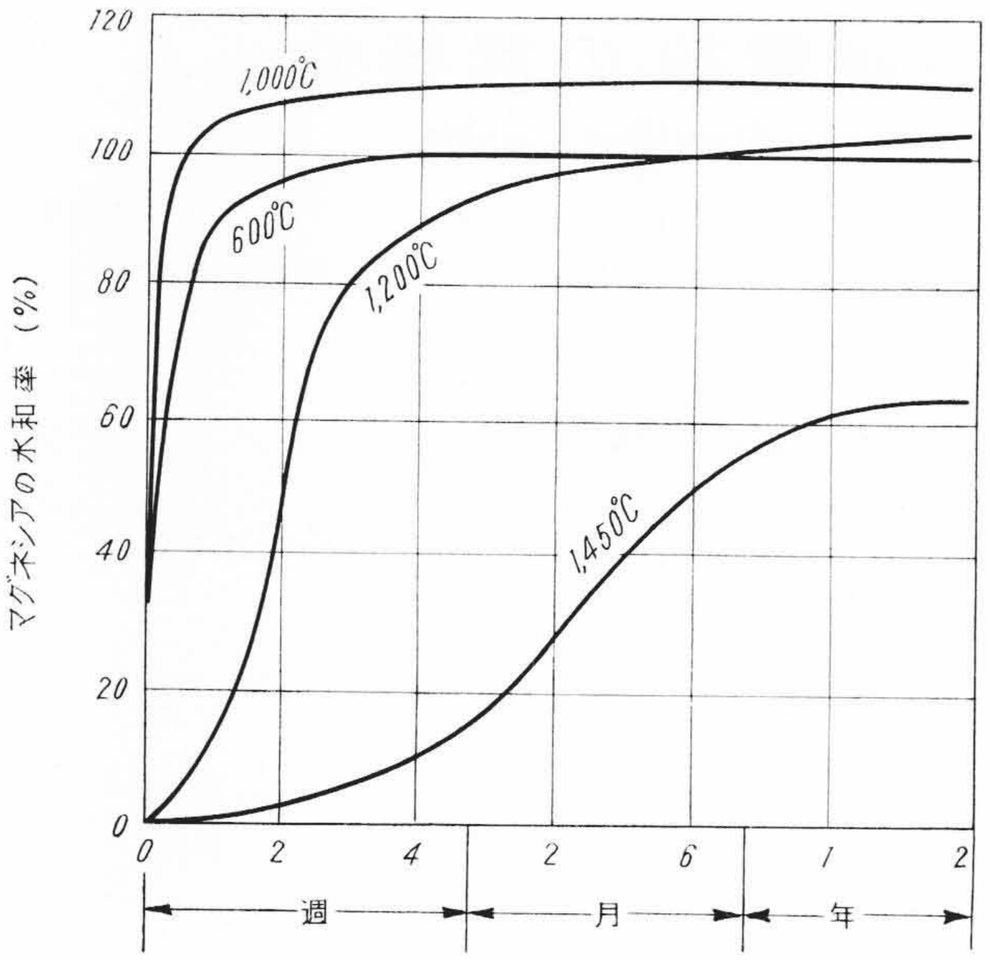
一方，ハイミックス電線のように長尺の電線絶縁の場合には高度に圧縮した場合のすぐれた絶縁特性と，良好な熱伝導性のためマグネシアが選ばれ，またマグネシアはハイミックス電線製造上からも多くの利点がある。

通常マグネシアは天然のマグネサイト，あるいは海水中の苦汁から得られる水酸化マグネシウムを焙焼して得られるが，これらマグネシアの電気的，物理的性質はその原料，焙焼の方法と温度，ならびに不純物から一定でなく，またマグネシアの微粉末を圧縮した場合には，このほかに圧縮の程度により変るものである。

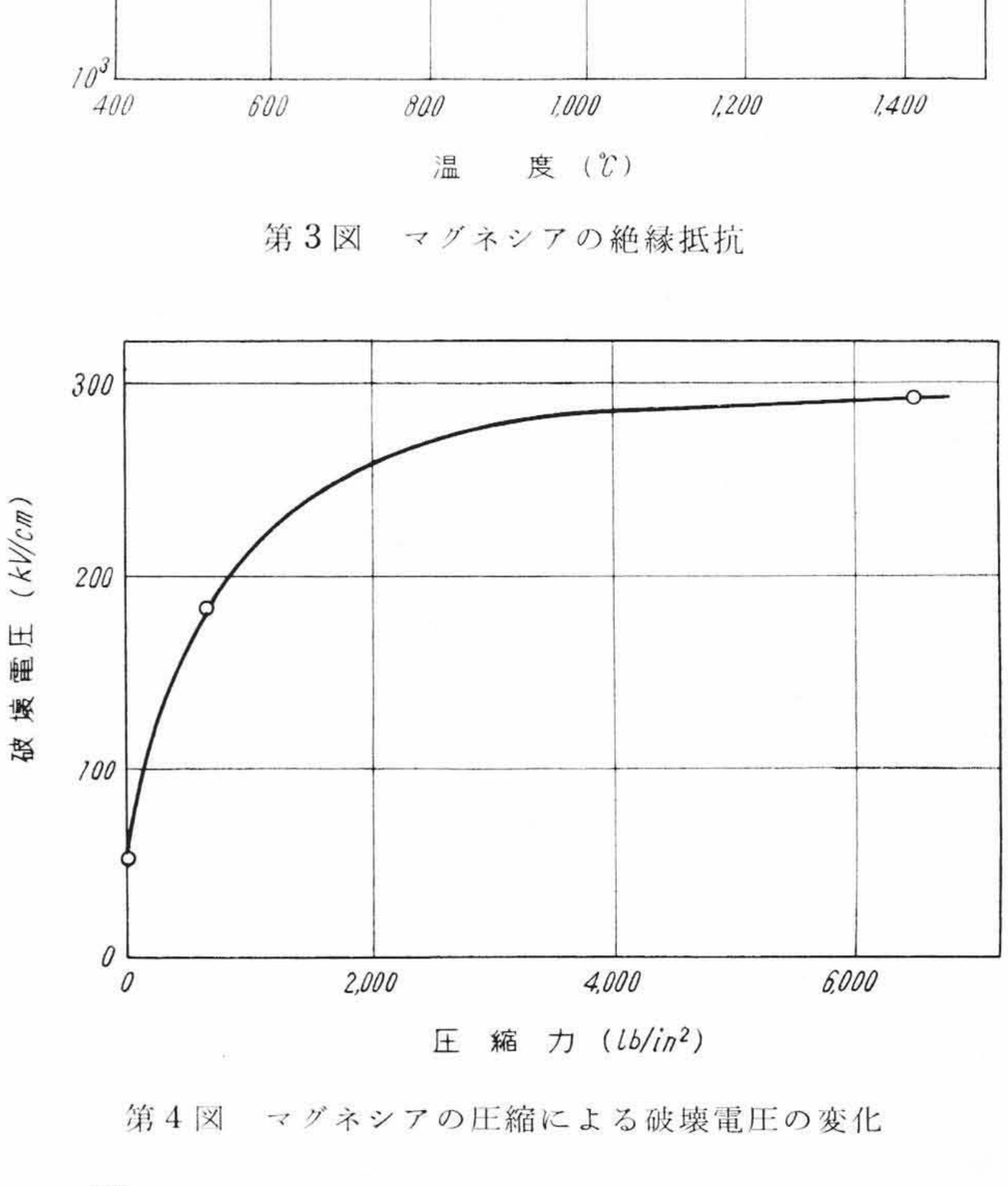
以下，ハイミックス電線用として関連のあるマグネシアの特性の若干を示す。

マグネシアは吸水して水和するが，その程度はマグネシアの焙焼温度から異なり， E. M. Campbell 氏の報告によれば第1図のように示される[1]。すなわち，マグネシアは焙焼温度の高低にかかわら

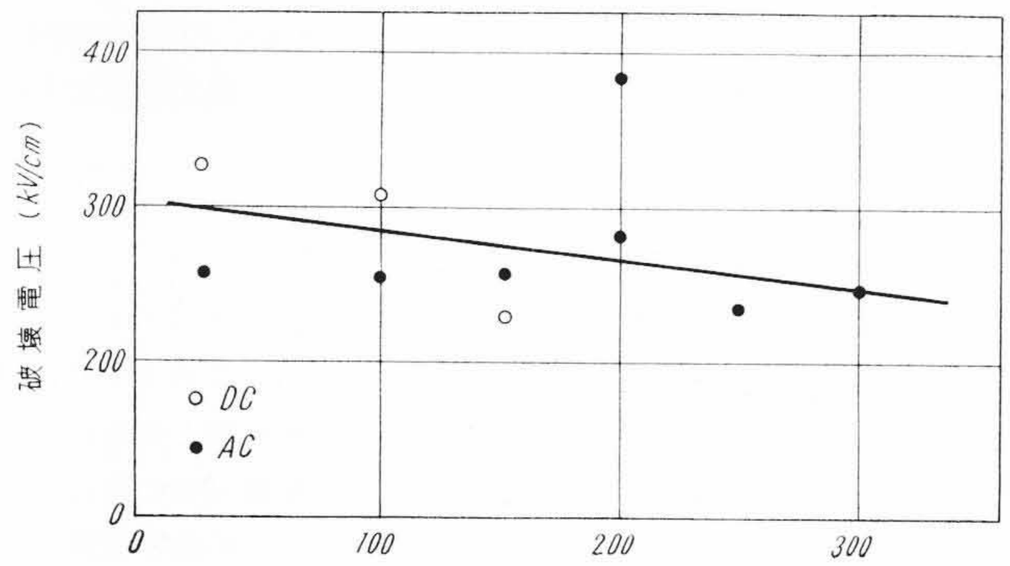
* 日立電線株式会社電線工場



第1図　マグネシアの焙焼温度と水和率の関係

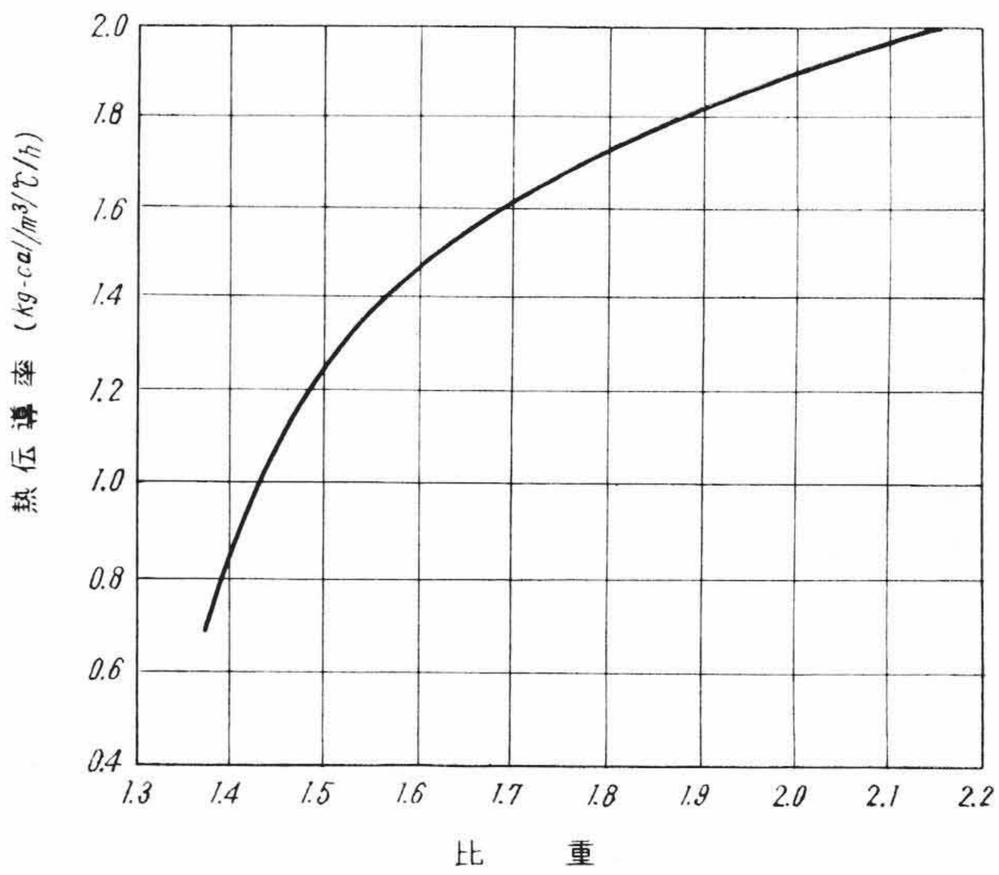


第3図　マグネシアの絶縁抵抗



第2図　マグネシアの破壊電圧と温度の関係

第4図　マグネシアの圧縮による破壊電圧の変化



第5図　マグネシアの圧縮による熱伝導率の変化

ず遅速の程度の差はあるが水和する。水和，あるいは水分の吸着が電気特性の上から好ましくないことは絶縁材料として当然である。ハイミックス電線はマグネシア絶縁の外側を銅管で被覆してあるので，吸水，吸湿の懸念がまったくないことが特長の一つであるが，端末部においてはマグネシアはふんい気によっては吸水に対してもっとも危険な状態にあり，長年月にわたって良好な絶縁状態をうるためには端末部の処理加工には特別の注意が必要である。端末部の処理加工に関しては後節で詳述する。

マグネシアの破壊電圧，絶縁抵抗の温度による変化を第2図および第3図に示す[2][3]。すなわち，温度の上昇によるマグネシアの破壊電圧の低下は常温から300℃付近まできわめて少ない。また，マグネシアの絶縁抵抗は第3図に示す一例のように高温においてもきわめてすぐれた絶縁抵抗を示している。

マグネシアの破壊電圧は微粉末を圧縮することによって著しく高い値となることがA. Gemant氏およびF. A. Glassow氏の研究から第4図のように示されている。すなわち 3 t/in² で圧縮したマグネシアは空気の約6倍の破壊電圧であることが示される[2]。

さらにマグネシアの圧縮による熱伝導率の変化は第5図のとおり報告されており圧縮により著しい熱伝導率の上昇が認められる[4]。

以上若干の特性について記したように，マグネシアはかなりの高温度においても高い破壊電圧と，すぐれた絶縁抵抗を示し，さらに圧縮によって破壊電圧，熱伝導率が著しく向上するなど，粉末状の無機絶縁材料としてもっともすぐれた特性を有し，ハイミックス電線の絶縁材料として最適のものと考える。

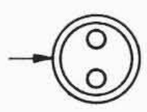
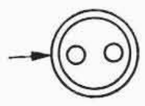
第1表　表面温度の測定

温度(℃) / 電流(A)	最高温度	温度上昇	大気温度
40	21.0	17.2	3.8
50	30.0	25.2	4.8
60	42.3	35.9	6.4
70	54.0	46.7	7.3

第2表　短時間破壊電圧

電線の種類	破壊電圧(V)	備　考
2×1.6mm	5,970	一部端末で破壊
3×1.6mm	3,930	
4×1.6mm	3,770	

第3表　押つぶし破壊電圧測定結果

押つぶし率 (%)	押つぶし荷重(t)	押つぶし方向	押つぶし後の破壊電圧(V)
58.5	9		5,970
73.0	18		5,900
58.5	9		4,400
73.0	18		4,200

3. 電気的性能

ハイミックス電線の定格電圧は通常600V までである。その電気的性能は一般の600V 級の絶縁電線と大体同等と考えてよい。しかし本電線の規格は特殊な電線であるため，船舶用電線としてロイド規格[5]，ＡＢ規格[6]に規定されている程度である。電気的性能に関しては今後多くの検討が必要であるが，以下特に本電線の特長についての実験結果の若干を述べる。

3.1　電流容量試験

線種として2×1.6mm（外径9.3mm）について試料長 3m で電流容量試験を行った。温度は銅−コンスタンタン熱電対をシース表面にそう入して測定した。通電電流は2心並列として40，50，60，70Aとした。測定結果を**第1表**に示す。

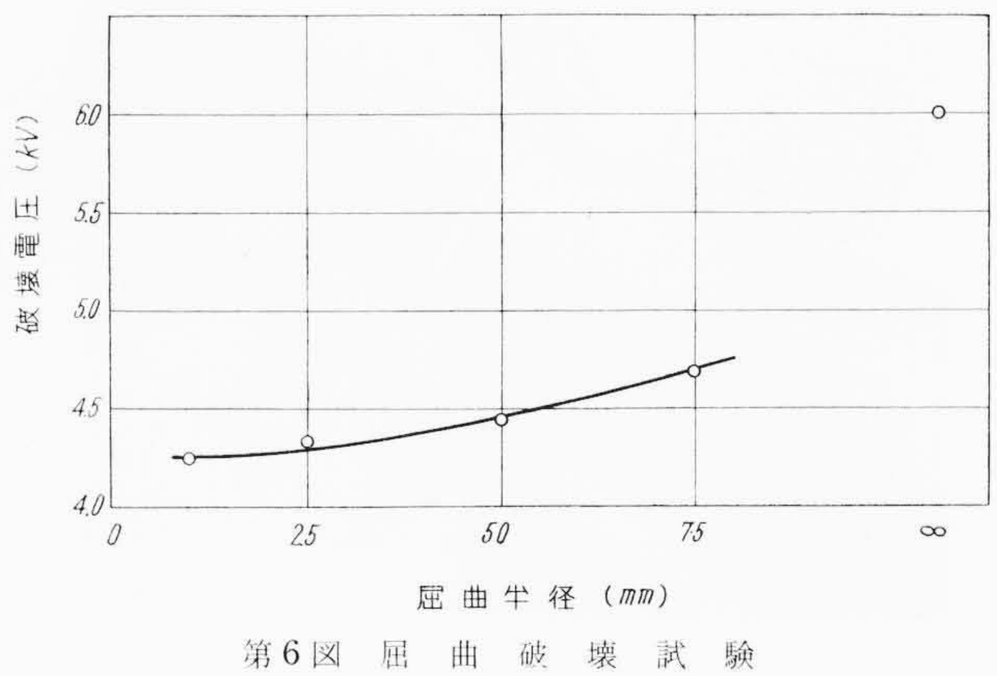
本試験結果から，周囲温度40°C，温度上昇40°C として許容電流を求めると32.5Aとなる。なお内部温度と表面温度との差は電線の外径が小さいため正確に測定することは困難であったが，約2～3%高い温度を示した。この値を導体断面積の等しい舶用線と比較すると2倍程度であり，シースの熱放散のよいことと，マグネシアの熱伝導率のよいことから非常に大きい許容電流が得られる訳である。

3.2　短時間破壊試験

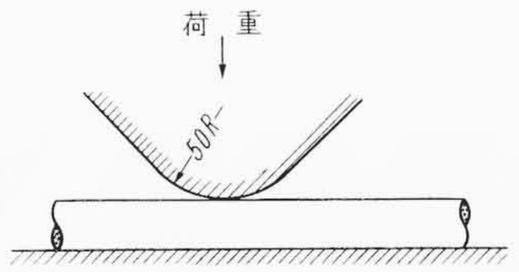
ハイミックス電線の破壊電圧の文献値は3,500～5,000V であり，またマグネシアの破壊電圧は約60 V/mil（60サイクル）と報告されている[7]。本節においては数種のハイミックス電線についての交流の破壊電圧測定結果と，各種曲げ半径で屈折した場合の測定結果を述べる。試験は試料長約2mで，端末を絶縁油中に浸漬し，初めに3,000V，5分間課電し，ついで電圧上昇速度 500 V/s で破壊まで昇圧して測定した。測定結果は**第2表**に示すとおりである。

ハイミックス電線は布設，配線作業の場合，当然種々の屈曲をうけるので，十分な可撓性と屈曲に対する強度が必要であるとともに，屈曲後実用上十分な耐電圧を保有しなければならない。機械的強度に関しては後節に詳述することにして，本節では屈曲後の破壊電圧の測定結果を記す。

2×1.6mm（外径9.3mm）の供試線を25，50，75mm の曲げ半径で屈曲し，屈曲後の破壊電圧を前述のように端末を絶縁油中に浸漬して測定した。測定結果は**第6図**に示すとおりで，25mm の曲げ半径（電線外径の2.7倍）で屈曲後も破壊電圧の低下は約30% で，定格電圧に対してはなんら影響ないことが示された。



第6図　屈曲破壊試験



第7図　押つぶし方法

3.3　誘電特性と絶縁耐力

次に，1×4.5mm，5.0mm，2×1.2mm，3×1.6mm，2.0mm，4×1.6mm の6種の供試線から3本ずつの試料をとり，これを変圧器油中に浸漬して，600，1,200，2,000V の60c/s の交流電圧を印加し，シェーリングブリッジにより誘電特性を測定した。その結果，いずれの場合も電圧による変動はほとんどなく，誘電正接は 0.7～1.7%（誘電率は4.7～5.8）の範囲にあった。この変動は吸湿によるものとも思われるが，600V 級の絶縁電線としては十分なものであり，また電圧による変動の少ないことから大きな空隙のないことが確認された。さらに電圧を上昇して，破壊近辺まで測定したが，誘電正接には変化なく，突如として破壊が起きた。もちろんこの場合に誘電正接の急増が認められたが，その後の測定から課電履歴は認められなかった。試みに50回繰返し破壊させて課電特性を求めたが，破壊電圧の低下はほとんどみられなかった。

他方，破壊電圧の時間特性を求めたが，まったく平坦であり課電時間に無関係な絶縁耐力を示している。誘電特性とあわせ考えると，おそらく固体誘電体の破壊ではなく，むしろ気体放電に近い機構と想像される。

次に破壊状態で漏えい大電流を通じ，シース銅管が変色する程度に局部過熱したところ，破壊電圧は30～50%低下した。破壊点を解体したところ，黒色の銅酸化物が検出された。

以上の実験から明らかなとおり，ハイミックス電線の絶縁耐力はきわめて高く，絶縁電線として望ましいものと考えられる。

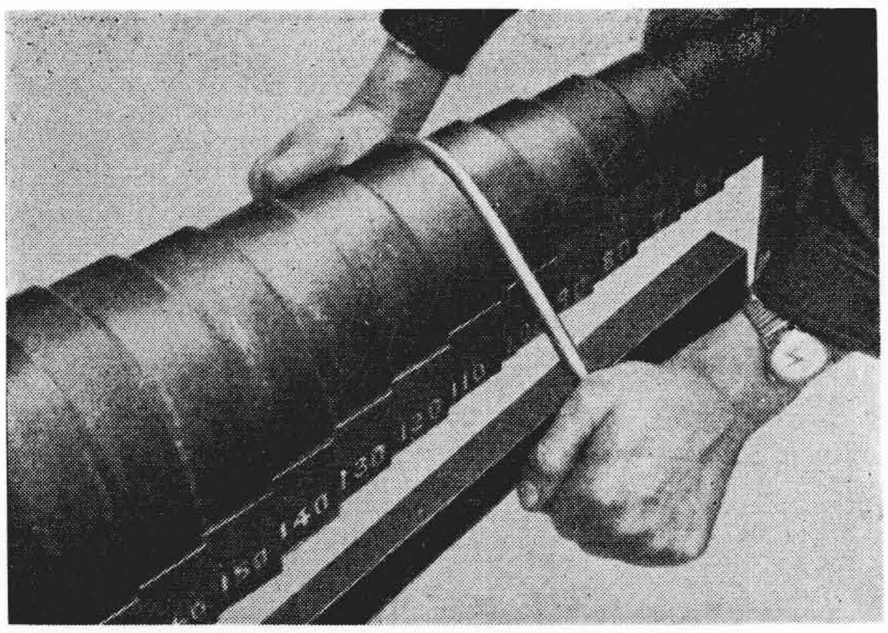
3.4　押つぶし耐電圧試験

前項と同一の試料を**第7図**の方法で押つぶしした場合の破壊電圧を測定したが，導体配列と直角方向の押つぶしではほとんど破壊電圧の低下は認められず，また導体配列と同一方向では約30%低下した。しかしながらこの程度の押つぶしでは定格電圧では使用上なんらさしつかえないものである。

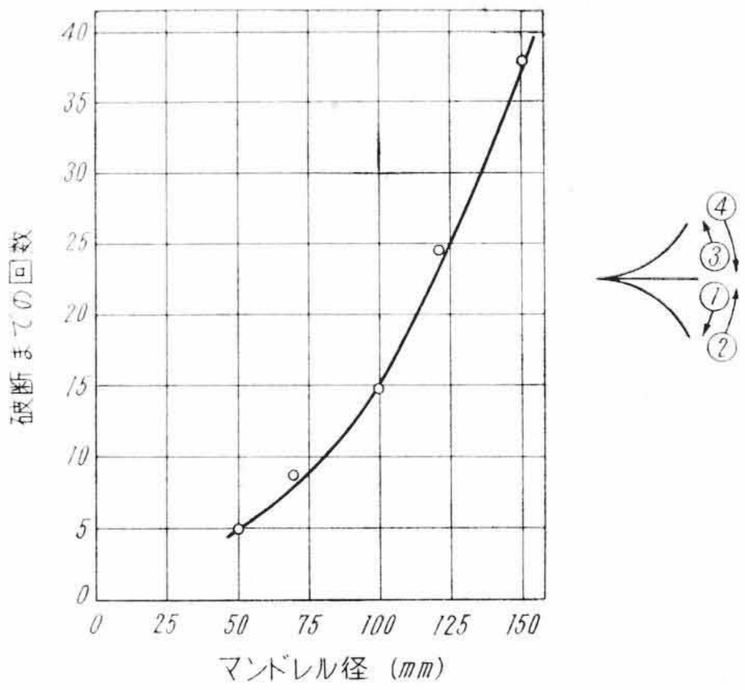
実験結果は**第3表**に示すとおりである。なお押つぶし率は押つぶし前の外径と，押つぶし後の押つぶし方向の厚みの比で表わした。

4. 機械的性能

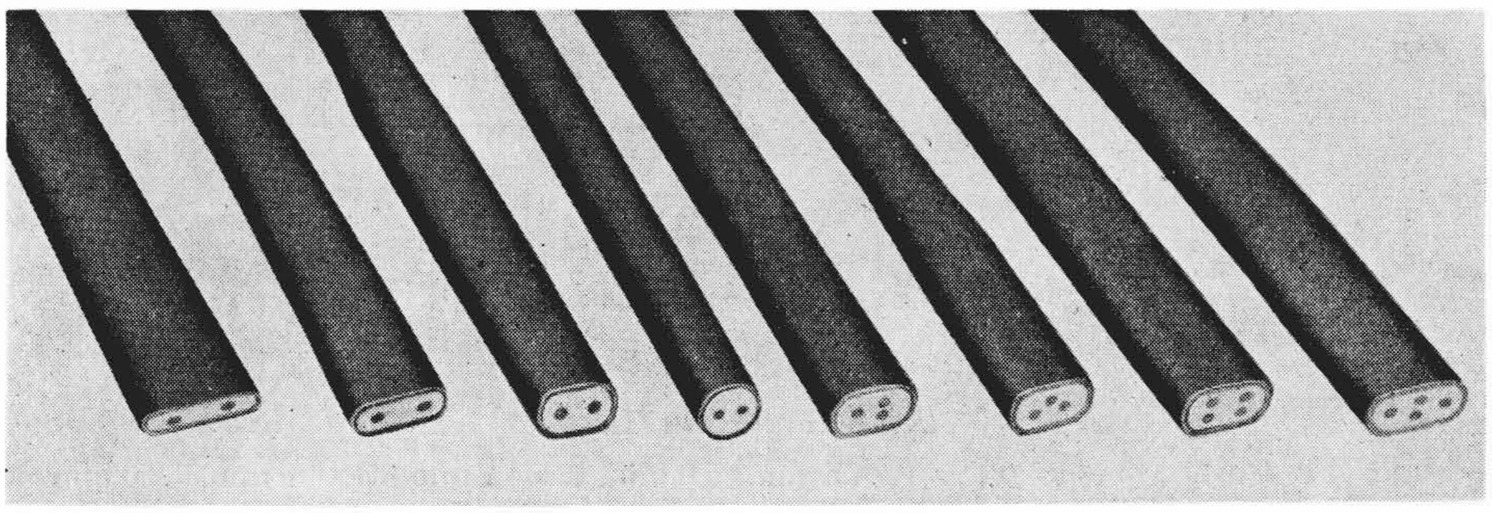
ハイミックス電線は導体として単線を使用し，シースが銅である



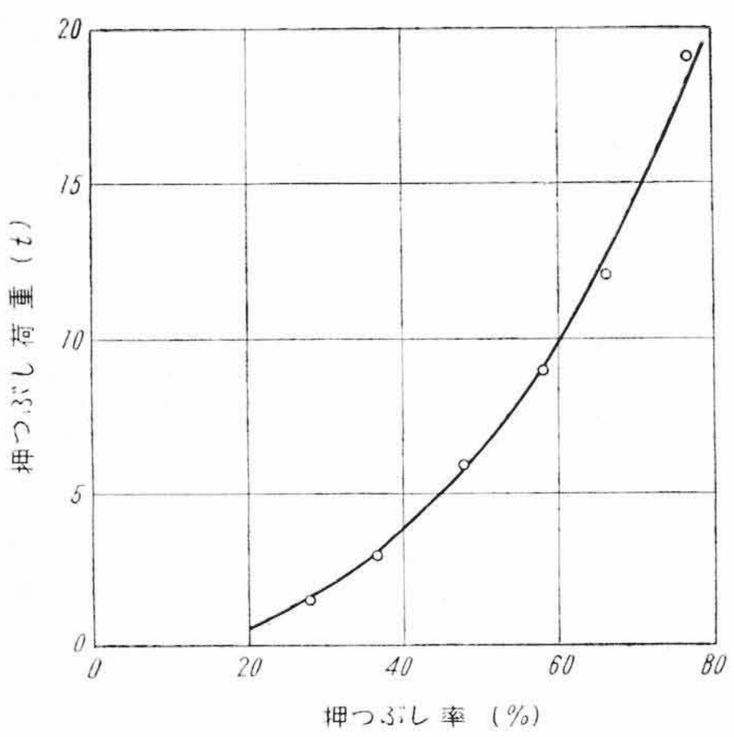
第8図　曲げ試験の情況



第9図　曲げ直径と破壊までの回数との関係



第10図　押つぶし後の電線の変形情況



第11図　押つぶし率と押つぶし荷重との関係

第4表　引張り試験結果

電線の種類	外径 (mm)	最大荷重 (kg)	電線断面積に対する引張強さ (kg/mm²)	金属構成部の引張強さ (kg/mm²)
2心×1.2mm	8.5	460	8.1	23.4
3心×2.0mm	10.8	840	9.2	22.0
4心×1.6mm	10.7	770	8.6	22.2

ことと，絶縁体は均質なマグネシアの粉末を高度に圧縮したものであるから，変形，衝撃に対して大きな強度をもっており，圧縮に対する強度はがい装ケーブルの約6倍，コンジット管と比較して3.5倍程度，また衝撃に対してもがい装ケーブルより大きいといわれている。

以下，ハイミックス電線の機械的強度に関し，二，三の試験結果を報告する。

4.1　曲げ試験

第8図に示すようなマンドレルを用いて曲げ試験を行った。試料として2×1.6 mm（外径9.3 mm）のハイミックス電線を用い，各種の曲げ半径で屈曲し，シースが破壊するまでの回数を測定した。曲げは90度として，その回数は第9図に示すように1回の動作を1回の曲げ回数とした。

4.2　押つぶし試験

前節で押つぶしした場合の耐電圧試験の結果を説明したが，本節では1～4心までの押つぶしの状況を示す。第10図に示されるとおり，シースを変形させると絶縁体，導体ともほぼ比例して変形している。このことはマグネシアがほとんど銅と同程度の変形抵抗を有するまで密に充てんされていることがわかり，この点普通の絶縁電線のように絶縁体が先に破壊することはない。このことは各線心のものについて同様である。

次に，2×1.6 mm（外径9.3 mm）を前章の押つぶし耐電圧試験と同じ条件で押つぶした場合の押つぶし率と荷重の関係を求めると第11図のとおりである。

4.3　引張試験

ハイミックス電線について引張試験を行い，電線としての見掛けの引張強さ，および金属構成部の引張り強さを求めた。第4表にその結果を示す。

この結果より導体およびシースの引張強さは普通の焼鈍した銅線の引張強さとほとんど差がないことがわかる。このことは本電線は金属シースを使用している割合にはやわらく，また伸びがあり，配線作業が容易に行われることを示しているものである。

5.　端末処理

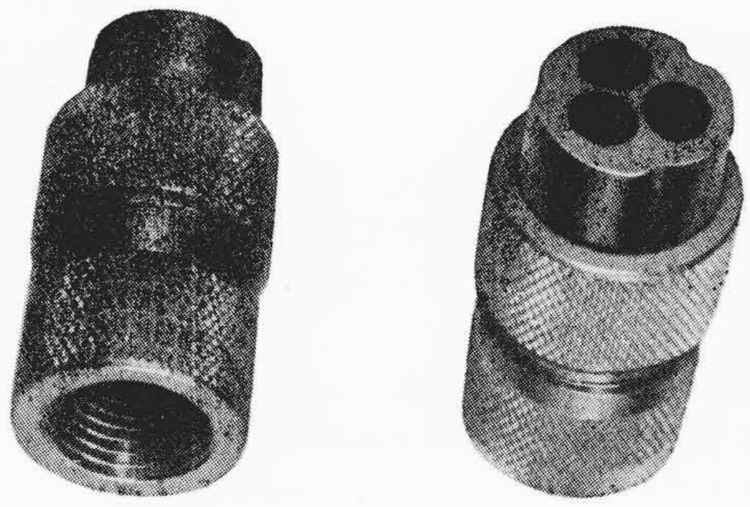
前述のようにマグネシアは吸湿性があるので，ハイミックス電線を端末無処理のまま空気中に放置すると，絶縁体のマグネシアは吸湿する。この吸湿はマグネシアが水和するほどでなくても，絶縁抵抗は著しく低下し，ことに湿度中に電解質が含まれるとトラッキングやアークの原因ともなる。

ハイミックス電線の端末は配線前に通常ワックスや樹脂を用いて密封して防湿するが，配線工事中の一時的な防湿にはボイル油を使用するのが好適である。

ハイミックス電線の端末をボイル油を用いて防湿処理した場合と，無処理のまま空気中に放置した場合の絶縁抵抗の変化を比較すると，ボイル油を用いた場合は24時間経過後も絶縁抵抗は低下しな

第5表　水中浸漬における端末からの水の浸透

浸漬日数	1(日)	2	5	10	15
試料 A	12 (cm)	17	20	20	20
試料 B	20	26	30	33	33



第12図　端末付属金具

いが，無処理の場合はその初期値に対して1/100以下に低下することが認められボイル油が一時的な防湿剤として良好なものであることが判明した。

しかし，ハイミックス電線の絶縁体のように高度に圧縮されたマグネシア中での湿気の浸透は比較的少なく，大体数10cmで飽和してそれ以上進行しないようである。一例を示すと，ハイミックス電線を切断し，端末無処理のまま水中に浸漬して，メガーで絶縁抵抗を測定しながら両端部を切断していき，絶縁抵抗が無限大となるときの切断長を求めると，第5表のようになり水の浸透は約5日間で短い距離にとどまりそれ以上進行していないようである。

もし，端末を無処理のまま短時間空気中に放置した場合には，端末付近をバーナーなどで加熱すれば容易に除湿できるが，長期間にわたり放置した場合には，端末付近のマグネシアは水和して水酸化マグネシウムに変っているので，水分の除去にはかなり加熱しなければならないので，端末部数10cmを切断したほうが良い。

このようにハイミックス電線の吸湿は布設配線前の段階ではさほど問題とならないが，布設配線後においては水分の浸入を防止するため，永久的な完全端末処理をしなければならない。この場合，第12図のような端末付属品を使用し，この中に絶縁コンパウンドを充てんして，ゴムパッキングで締めつけて完全な耐湿性とする。

このような端末処理をして使用中のハイミックス電線は，布設配線後約100日において，500 MΩ/km以上の絶縁抵抗を示している。

6. 結　　言

以上，電気絶縁材料としてのマグネシアの特性の概要を紹介するとともに，600Vハイミックス電線の諸特性の測定結果，ならびに絶縁破壊の機構に関する若干の考察を述べた。

以上の結果を総合すると，ハイミックス電線は，

（1）　同一導体断面積の絶縁電線に比べて許容電流が大きい。

（2）　破壊電圧は3,000V以上を示し，一度絶縁破壊しても繰返しほぼ同じ電圧を課電することができる。

（3）　マグネシア絶縁の絶縁破壊は，固体絶縁物のそれと異なり，むしろ気体放電に近い機構と推定される。

（4）　600V級の絶縁電線として良好な誘電特性を示す。

（5）　機械的強度が大で，かつ屈曲，引張，押つぶしなどの変形後も実用上十分な絶縁耐力を示す。

（6）　耐熱，耐焔，耐老化性が著しくすぐれているとともに，絶対に不燃性であるため寿命は永久的である。

以上のような特性をもつハイミックス電線は，船舶用，高温作業場，重要建造物の電力，照明配線用として好適と考えられる。

本論文を終るに当り，種々ご指導をたまわった日立電線株式会社久本部長，吉川，高嶋，杉山課長，ならびに本実験に種々ご協力いただいた山岸，野口，依田，石上，高木の諸氏に厚くお礼申しあげる次第である。

参　考　文　献

（1）　E. de M. Campbell: J. Ind. Eng. Chem., 1, 665 (1909)
（2）　A. Gemant & F. A. Glassow: J. of Franklin Institute, 230, 471 (Oct. 1940)
（3）　Ceramic Data Book, 551 (1958–1959)
（4）　Electrical Times, 93, 799 (1938)
（5）　Lloyd's Register of Shipping (1958)
（6）　American Burean of Shipping (1958)
（7）　C. A. Jordan, G. S. Eager: AIEE (Power Apparatus & Systems) 74 (17) 198 (1955)

新　案　の　紹　介

実用新案登録 第495155号

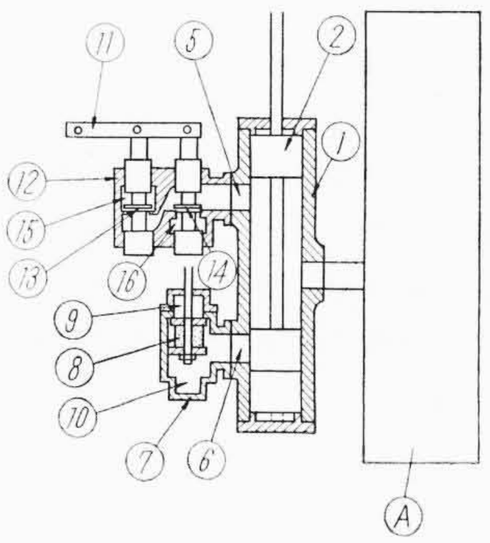
若森俊郎・鈴木輝彦・大谷　大

ブレーキエンジンにおける手動および自動運転切換装置

この考案は，制御弁とブレーキシリンダとの間に電磁弁を有する切換弁を設け，手動運転と自動運転との切換えを随時に行うことができるようにしたものである。

図は手動運転における中立状態を示したもので，切換弁1の弁体2は電磁弁7との連絡路6を閉鎖し，制御弁12との連絡路5を開口しているが，制御弁の弁体13，14は弁座に密着しているからブレーキシリンダAと圧油側15および排油側16との連絡は遮断されている。したがって，巻胴は一定の制動力で制動された状態にある。

ブレーキハンドルの操作によりリンク11を上下し，圧油側15または排油側16とブレーキシリンダAとを連通して制動力を増減させることにより手動運転を行う。

手動から自動運転に切換える場合には，適宜機構により切換弁の弁体2を下降させて連絡路5を閉鎖すると同時に連絡路6を開口させ，ブレーキシリンダAと電磁弁7を連通させる。この場合，電磁弁7は排油側10を開放した状態で切換えが行われるように切換弁1とインターロックされているので，電磁弁の弁8を電気的操作により下降させてシリンダAと圧油側9とを連通すれば制動力は減じ，逆に弁8を上昇させると制動力は増加して円滑な自動運転を行う。

この考案によれば制御弁または電磁弁の排油側は開口した状態で切換が行われ，また切換弁は切換えの途中でも常に制御弁と電磁弁のいずれか一方または両方に通じているから，ブレーキシリンダは常に排油側に通じていることになり切換えの途中でブレーキのゆるむおそれは全然なく，確実かつ安全に切換動作が行える。（野村）