超電導ケーブルへの適用を考慮した各種高分子 電気絶縁材料の液体窒素温度における 機械的特性

大江 敏男, 水野 幸男, 長尾 雅行, 小崎 正光

豊橋技術科学大学電気・電子工学系 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1

(1989年12月29日受理)

Mechanical Properties of Polymers for Electrical Insulating Materials of Superconducting Power Cable

Toshio OHE, Yukio MIZUNO, Masayuki NAGAO and Masamitsu KOSAKI

Toyohashi University of Technology, Department of Electrical and Electronic Engineering,
Tempaku-cho, Toyohashi 440

(Received December 29, 1989)

Synopsis:

A superconducting power cable is one of the promising ways for transmitting huge electric power efficiently in the future. We have proposed the new design of superconducting power cable with a similar electrical insulation structure to the conventional extruded cross-linked polyethylene cable (CV cable). The prominent feature of the design is to exploit excellent electrical properties of polymers in the cryogenic temperatures and to separate helium coolant from the electrical insulation. The cooling test of the cable showed that the most serious problem is a crack of polymer insulation due to a large difference in thermal contraction between the polymeric insulation and a conductor. Contractions, tensile properties and the influence of heat cycles on them were measured for some polymeric insulating materials. Furthermore, mechanical stress of the polymeric insulation of the cable at low temperature was calculated using the data of mechanical properties obtained. As a result, it is found that ethylene propylene rubber has superior mechanical properties in the cryogenic temperature region.

1. はじめに

低損失・高効率送電が可能な超電導ケーブルは、将来における大容量地中送電方式として有力な候補の一つであり、国内外で鋭意研究が行われてきた。近年の高温超電導体の発見はこの分野における新たな飛躍を示唆し、その実用化へ向けてさらに研究・開発の前進が期待される。超電導ケーブルの電気絶縁方式として従来提案されているテープ巻冷媒含浸方式¹⁾に対し、筆者らは、Fig. 1 に示すような押出し固体高分子を電気絶縁に採用した超電導ケーブルを提案し、冷却、通電、課電試験を行ってきた²⁾。この絶縁方式では、電気絶縁には押出し方式の高分子絶縁材料のみを

採用し、冷媒である液体ヘリウム(LHe)を銅パイプ内に流し電気絶縁部から完全に分離しているため、長期部分放電劣化の面で信頼性があり、また構造が簡単であり製造コストの面で経済的になりうる。さらにこの方式では現在実用化が進められている高温超電導体が実用化された場合にも、電気絶縁設計になんら変更を加えることなく超電導体の動作温度に対応した冷媒に変更するのみで対処可能である。これらの長所に対して、低温における高分子絶縁体の脆化、および導体と絶縁体の熱収縮率の差に起因する冷却時の絶縁体の割れの発生がこの方式の最大の問題点となる。

筆者らは、固体絶縁として当初極低温における誘電特性の優れた低密度ポリエチレン (LDPE) を考え、

Fig. 1 Configuration of cable.

短尺モデルケーブルによる冷却試験で検討を加えた³⁾後、ケーブルを試作し、15 m ケーブルの冷却を行ったが、冷却途中 170 K 付近で絶縁部に割れが発生した⁴⁾。引き続いて試作した架橋ポリエチレン (XLPE) 絶縁ケーブルにおいては、高温超電導体の動作温度である液体窒素 (LN₂) 温度は大きくクリアしたものの、冷却途中の 40 K 付近で割れが発生した⁵⁾。いずれのケーブルにおいてもクラック発生前の極低温における電気的特性には問題がなく、クラックの発生を防止できれば超電導ケーブルの実用化への見通しが大きく開かれる。そこで、次のステップへの足掛りとして、低温用機器の電気絶縁部に採用されているエチレンプロピレンゴム (EPR) を候補として考え、LDPE, XLPE と比較しつつ極低温における機械的特性を再検討し、超電導ケーブル絶縁体への適用の可能性を検討することとした。

室温以上の温度におけるこれらの高分子絶縁材料の機械的特性の報告は数多くあり、XLPE と EPR の機械的、電気的特性の詳細な報告も見られる⁶⁾。しかしながら高分子材料の極低温における機械的特性に関する報告はガラス強化繊維プラスチックなど構造材に関するものは見られるが^{6,7)}、絶縁体自体に関する報告は比較的少ない。わずかにポリエチレンを含む数種類の熱可塑性高分子と、エポキシに関する報告⁸⁾がされている程度であり、とくに EPR に関する報告は見られない。さらに、高分子材料はその分子構造、形態高次構造や添加剤の有無などによって性質は異なると考えられるため、実際にケーブルに採用する材料の極低温における機械的特性を把握することは実用上、きわめて重要である。

本論文では、LDPE, XLPE, EPR の 3 種類の高分子材料について LN₂ 温度における収縮率、引張破壊強度などの基礎的な機械的特性、およびこれらに対する熱履歴の影響などをダンベル試料を用いて測定・比

較した結果について述べる。また、ケーブル形状において冷却収縮により絶縁部に発生する機械的応力の解析を行い、結果との比較を行った。

2. 実験項目および方法

筆者らが開発中の超電導ケーブルにおいては、電気絶縁部は、極低温 (液体ヘリウム (LHe) 温度付近) ・真空中にある。機械的特性を調べる実験は、この条件下で行うのが望ましいが、この条件下で実際に実験を行うことは容易でないため、LN₂ 温度における各種高分子材料の機械的特性を測定することにした。LDPE の引張破壊強度は、室温から温度の低下とともに上昇し、105 K で最大値を示した後、LHe 温度まで約 30 % 低下するという報告⁹⁾もあり、LN₂ 温度における特性から LHe 温度での特性を推定することは必ずしも容易ではない。しかしながら、LN₂ 温度における特性は、高温超電導体が実用化され LN₂ が冷媒として用いられた場合における重要な指針を与えるのみならず、LHe 温度での特性を推定する上で役立つと考えられる。

試料としては、LDPE, XLPE, EPR, およびこれらにカーボンブラックを添加した半導電材料を使用した。半導電材料は、電力ケーブルにおいて、電界緩和を目的として、絶縁体-導体間に採用されている。試料片は Fig. 2 に示す形状であり、厚さは 2 mm である。試料片の基本的な機械的特性を得るため、以下に挙げる項目についての実験を行った。

2.1 収縮率の測定

試験片に低温用歪みゲージ (東京測器研究所製: CFLA-6.350-11) を貼り付け、Fig. 3 に示す測定システムを用いて温度制御された低温窒素ガスをクライオスタットに導き、試料片の温度を徐々に低下させて収縮率の測定を行った。冷却速度は 1 [K/min] とし、最終的には試料片を LN₂ 中に浸漬した。

なお、収縮率は次式で定義した。

$$\text{収縮率} = \frac{l(T) - l_0(T_0)}{l_0(T_0)} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Fig. 2 Sample for tensile test.

Fig. 3 System for measuring thermal contraction.

ただし、 $l(T)$: 温度 T における長さ

$l_0(T_0)$: 冷却前の室温 T_0 における長さ

歪ゲージで測定される抵抗値はパーソナルコンピュータで処理され、収縮率が計算される。

2.2 引張破壊強度の測定

Fig. 4 に示す治具に試料片を固定し、引張試験器(三和機器製作所製: インストロンタイプ)を用いて測定を行った。試験器は上部ヘッドに荷重を感知するロードセル(東京測器研究所製: TCL-Z-200 kA)が装着してあり、このヘッドが任意の設定速度で上下する仕組みになっている。つかみ具で固定された試料片を治具に固定する方法は、次に述べる2通りの方法で行った。

① 固定法1 (自由収縮状態)

固定ピンとつかみ具の穴を、冷却時の試験片の収縮以上の余裕を開けて固定する。LN₂ 浸漬後、試験片の状態は自由収縮状態である。

② 固定法2 (残留応力のある状態)

固定ピンとつかみ具の穴を全く余裕のない状態で固定する。したがって LN₂ 浸漬後、試験片にはそれ自身の収縮による応力がすでに懸かっている。この応力

Fig. 4 Device for tensile breakdown test.

を残留応力と呼ぶことにする。実際のケーブル構造においては、熱収縮率の差がある絶縁部と導体部とが滑らないように密着されているため、冷却時に絶縁部の収縮が抑制されて、絶縁部にそれ自身の収縮による内部応力が発生し、これが冷却によるクラック発生の原因となっている。本固定法はこの状態を模擬したものである。

いずれの固定法の試料においても、試験片を固定したつかみ具全体を LN₂ に浸漬し、定常状態になった後、1 [mm/min] の引張速度で引張破壊強度の測定を行った。このとき、X-Yレコーダーでヘッドの変位-試験片に懸かる荷重曲線を記録した。

引張破壊強度、伸び、弾性率は以下の式に基づいて計算し、同じ材料の試料について数本の測定を行い、その平均値を求めた。

$$\text{引張破壊強度} = \frac{\text{破壊時に試験片に懸かる荷重}}{\text{試験片の標線内の断面積 [77 K]}} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} & \text{試験片の標線内の断面積 [77 K]} \\ &= (\text{断面積 [300 K]}) \times \{1 - 2 \\ & \quad \times (\text{試験片の収縮率 [77 K]})\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{引張破壊伸び} = \frac{\text{ヘッドの変位}}{\text{試験片の標線間距離}} \quad (4)$$

$$\text{引張弾性率} = \text{応力対歪曲線の勾配} \quad (5)$$

2.3 熱履歴が材料の機械的強度に与える影響を調べる実験

Fig. 5 に試料片に熱履歴を与えるための治具を示す。固定板としては、ケーブルに用いられている銅パイプと絶縁部分との拘束状態を模擬するため、銅板を使用した。治具で固定した試料片と、固定しない試料片の2種類を LN₂ 中に急激に浸漬し10分間放置する。ついで50℃の恒温槽中に移し10分間放置する。

Fig. 5 Device for fixation of sample.

このサイクルを10回繰り返して試験片に熱履歴を与える。その後、前述の固定法1(自由収縮状態)で、試料の引張破壊強度、伸び、および引張弾性率を求めた。ここで、引張弾性率は、応力-歪曲線の直線部分における値である。実際の超電導ケーブルでは、点検時や、故障時などにケーブル温度を室温まで上げ、再び冷却することが想定されるが、絶縁体はこの熱履歴に耐えなければならない。通常これらの温度変化は時間的にゆっくり行すが、本実験では、時間的に急激に温度を変化させており実際に課せられる熱履歴よりも厳しい条件下での特性を求めていることになる。

3. 実験結果および考察

3.1 収縮率

Table 1 に LN₂ 温度における収縮率(絶対値)の平均値を示す。各試料とも温度の低下とともに収縮率が徐々に低下している。77 K における各試料の収縮率を比較してみる。LDPE と XLPE は 1.6 % であり、ポリエチレンを架橋しても収縮率が変わらないことがわかる。半導電 LDPE、半導電 XLPE は 1.5 % であり、カーボンブラック添加による大きな変化は認められない。EPR の収縮率は約 1.1 % で、LDPE、XLPE の約 70 % の値である。

3.2 引張破壊強度、伸び、弾性率

自由収縮状態における実験結果を Table 2 に示す。

Table 1 Thermal contractions of polymers at liquid nitrogen temperature.

Materials	Thermal contraction (%)
LDPE	1.6
Semiconducting LDPE	1.5
XLPE	1.6
Semiconducting XLPE	1.5
EPR	1.1
Semiconducting EPR	1.4

Table 2 Tensile properties of polymers in liquid nitrogen (Free contraction).

Materials	Tensile strength (kg/mm ²)	Tensile elongation (%)	Tensile modulus (kg/mm ²)
LDPE	12.1	5.6	233
Semiconducting LDPE	8.6	4.5	222
XLPE	14.2	7.1	227
Semiconducting XLPE	11.3	6.0	226
EPR	14.0	6.7	243
Semiconducting EPR	11.6	5.5	240

Fig. 6 Appearance of samples after break.

XLPE は LDPE より高い引張破壊強度を示す。また Fig. 6 に示すように破壊試験後の LDPE には破壊時の衝撃が原因であると思われる多数のクラックが発生しているのに対し、XLPE には発生していない。これらは架橋の効果であると考えられる。また半導電 LDPE、半導電 XLPE はそれぞれ LDPE、XLPE に比べて強度が低下している。これは半導電試料に混入されたカーボンの影響であると考えられる。また EPR は XLPE と同程度の強度であり、半導電 EPR は半導電 XLPE と同程度の強度である。ケーブル構造では高分子絶縁体の収縮率と金属のそれらとの差が小さ

Table 3 Tensile properties of polymers in liquid nitrogen (Constrained contraction).

Materials	Resulted stress at 77 K (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Tensile elongation (%)	Tensile modulus (kg/mm ²)
LDPE	8.1	10.5	1.1	223
XLPE	7.4	13.4	3.4	214
EPR	2.3	12.6	5.7	206

Table 4 Tensile properties of polymers in liquid nitrogen after cooling cycles (Free contraction).

Materials	Sample condition	Tensile strength (kg/mm ²)	Tensile elongation (%)	Tensile modulus (kg/mm ²)
LDPE	Fixed	10.8	7.1	194
	Free	10.3	7.3	193
Semiconducting LDPE	Fixed	—	—	—
	Free	5.7	4.9	155
XLPE	Fixed	13.2	8.2	192
	Free	13.8	9.1	200
Semiconducting XLPE	Fixed	10.2	7.4	215
	Free	11.0	5.9	209
EPR	Fixed	13.6	8.4	201
	Free	13.9	8.8	184
Semiconducting EPR	Fixed	9.1	5.0	209
	Free	10.4	5.3	222

いほど冷却により絶縁体に発生する応力は小さいと考えられる。よって、EPR、XLPE の収縮率と引張破壊強度の結果から、ケーブルの材料には EPR のほうが有利であることが予想される。

Table 3 は残留応力のある状態における試験結果である。LDPE、XLPE には冷却により大きな残留応力が発生しているのに対し、EPR は LDPE、XLPE のほぼ 3 分の 1 の残留応力しか発生していない。これは収縮率の違いが大きな原因であると考えられる。各試料をケーブルの絶縁体として採用した場合、冷却時に絶縁体に発生する応力の大きさの順序はほぼこのようになると思われる。引張破壊特性を見ると自由収縮状態の結果と比較して、強度に大きな低下は認められない。伸びに関しては、LDPE が破壊までに余裕がほとんどないのに対し、EPR は余裕が残っていることを示している。

3.3 熱履歴が材料の機械的強度に与える影響

Table 4 に結果を示す。XLPE、EPR には熱履歴による大きな機械的強度の低下はなく、熱履歴の影響がほとんどないことがわかる。LDPE、半導電 LDPE の固定状態の試料は、熱履歴を与えている途中で破壊した。これはそれら自身の冷却収縮により発生した応力に耐えきれなかったためだと考えられる。また、半導電 LDPE の非固定状態の試料は標線間外で破壊しており、引張破壊強度は低下している。これは熱履歴により機械的弱点が発生したためと考えられる。

Fig. 7 Cable model for mechanical stresses calculation.

この結果より、LDPE は筆者らが提案している超電導ケーブルの押出し電気絶縁材料に適していないことが明らかになった。

4. ケーブルモデルの応力計算

Fig. 7 に示すケーブルモデルについて、絶縁体に発生する半径方向および円周方向応力は材料力学の「焼きばめの理論」⁹⁾ の計算方法を用い、軸方向応力は熱応力の計算方法を用いて計算を行った。計算式中の線膨張係数、弾性率は実験より得たデータ (Table 5) を用いて行った。

Table 5 Data for calculation (at 77 K).

Materials	Thermal contraction (%)	Elastic modulus (kg/mm ²)	Poisson's ratio
Cu	0.3	13245	0.34
EPR	1.1	243	0.48
XLPE	1.6	227	0.46

半径方向

$$\sigma_r = \left| \frac{b^2 P_{m0}}{c^2 - b^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \right| \quad (6)$$

円周方向

$$\sigma_\theta = \left| \frac{b^2 P_{m0}}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \right| \quad (7)$$

$$P_{m0} = \frac{\frac{\delta}{2b}}{\frac{a^2 + b^2}{E_1(b^2 - a^2)} + \frac{b^2 + c^2}{E_2(c^2 - b^2)} + \frac{\nu_2}{E_2} - \frac{\nu_1}{E_1}} \quad (8)$$

軸方向

$$\sigma_z = \left| \frac{\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{c^2 - b^2}}{\frac{E_1(b^2 - a^2)}{E_1(b^2 - a^2)} + \frac{1}{E_2}} \right| \quad (9)$$

 δ : 熱収縮率差による直径差 α_1, α_2 : 内筒, 外筒の収縮率 E_1, E_2 : 内筒, 外筒の弾性率 ν_1, ν_2 : 内筒, 外筒のポアソン比

Table 6 に結果を示す。各方向とも銅パイプと絶縁体の境界部で応力は最大になった。半径方向応力は無視できるほど小さく、円周方向、軸方向応力はほぼ同程度の値になっていることがわかる。各方向応力とも EPR では XLPE の約 70 % になっている。この値は両者の収縮率の比と同じ値である。これは両者の引張弾性率、ポアソン比¹⁰⁾が同程度の値であるからである。計算値を引張破壊強度の実測値と比較すると大きく下回っており、いずれの材料をケーブルに適用しても問題はないと考えられる。しかしながら、実際の XLPE ケーブルの冷却試験においては、40 K 付近で XLPE に割れが生じている。この原因として、ケーブル構造では絶縁部に機械的弱点の存在確率が高いこと、冷却時に絶縁部に温度勾配が生じることなどが考えられる。これらのことを考慮すれば、ケーブルの絶縁体として使用する場合には、機械的特性に裕度のある EPR のほうが望ましい。

5. ま と め

超電導ケーブルの電気絶縁材料の候補と考えられる

Table 6 Calculated values of mechanical stresses for cable model at 77 K.

Stress (kg/mm ²)	EPR	XLPE
σ_r	0.42	0.65
σ_θ	1.71	2.61
σ_z	1.89	2.87

低密度ポリエチレン (LDPE)、架橋ポリエチレン (XLPE)、エチレンプロピレンゴム (EPR) の機械的特性を液体窒素温度において評価した。ケーブルの半導電層に使用される上記材料の半導電材料についても同様の評価を行った。得られた結果を以下に示す。

1) ポリエチレンは、架橋することにより機械的特性が改善される。

2) 両端を固定して冷却した場合の EPR の残留応力は、他の材料の 3 分の 1 程度であり、引張破壊強度までかなりの余裕がある。

3) 半導電材料の機械的特性は基材のそれより低下するため、ケーブル構造においては、半導電材料の機械的特性にも注意を払う必要がある。

4) EPR, XLPE は、熱履歴に対して十分な耐久性をもつ。

5) 冷却時にケーブル構造の電気絶縁部に発生する収縮応力の計算値は、材料の引張破壊強度と比較してかなり小さい。しかしながら、ケーブル構造においては、絶縁部の機械的弱点を極力排除する必要がある。

筆者らが提案している押出し固体高分子電気絶縁構造の超電導ケーブルの電気絶縁部に要求される機械的特性としては、動作温度までの冷却時に発生する収縮応力に耐えること、熱履歴に対して耐久性があることが挙げられる。金属系超電導体を使用した超電導ケーブルにおいては、液体ヘリウム温度における機械的特性が必要ではあるが、実験に困難が伴う。また、収縮率に関しては、XLPE ケーブルの液体ヘリウム温度までの冷却時のデータと今回得られた XLPE ダンベル片の液体窒素温度までのデータを比較すると、液体ヘリウム温度における収縮率は、液体窒素温度までの収縮率曲線から外挿可能である。引張破壊強度など他の特性の液体ヘリウム温度における値は、必ずしも液体窒素温度における値から外挿されるわけではないが、液体窒素温度における値は、液体ヘリウム温度における特性を推定する上で有益な指針を与えられと考えられる。さらに、将来酸化水系超電導体が実用化された場合には、本実験の結果が重要な情報を提供する。

今回実験に供した材料の超電導ケーブルの電気絶縁材料への適用を検討してみると、引張破壊強度や引張弾性率などの特性には大差ないが、EPR は残留応力が他の材料の 3 分の 1 と小さいことから、機械的特性の面からは EPR が有力な候補となる。一方、電気的特性の面からは、絶縁破壊の強さが大きいこと、誘電損失が小さいことが要求される。EPR の極低温にお

けるこれらの電気的特性に関しては報告がないため現在検討を進めているが、今回得られた機械的特性に関する情報も含めて、EPRの超電導ケーブルの電気絶縁材料への適用可能性について検討を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) E.B. Forsyth and R.A. Thomas: Cryogenics 26 (1986) 599
- 2) 小崎正光, 長尾雅行, 水野幸男, 清水教之, 堀井憲爾: 電気学会論文誌 D 108 (1988) 977
- 3) N. Shimizu, T. Nagata, K. Horii, K. Fukushima, M. Nagao and M. Kosaki: Cryogenics 26 (1986) 459
- 4) 小崎正光, 長尾雅行, 水野幸男, 堀井憲爾, 清水教之: 電気学会絶縁材料研究会資料 (1986) EIM-86-117
- 5) R.M. Eichhorn: IEEE Trans. Electrical Insulation EI-16 (1981) 469
- 6) K. Kadotani: Composites April 11 (1980) 87
- 7) 竹野正志, 西嶋茂宏, 岡田東一, 藤岡耕治, 倉岡泰郎: 低温工学 21 (1986) 182
- 8) J. Thoris and J.C. Bobo: Proceedings of the Sixth International Cryogenic Engineering Conference (1976) J 8
- 9) 鵜戸口英善, 川田雄一, 倉西正嗣: 材料力学, 下巻, 裳華房, 東京 (1977)
- 10) 東京天文台編: 理科年表机上版 物 24, 丸善, 東京 (1988) 444