

シリコーンゴム絶縁低圧電気ケーブルの劣化診断手法の評価

Evaluation of Diagnostic Technique for Degradation of Low-Voltage Electric Cables with Silicone Rubber Insulator

三上 雅生 (Masao Mikami)*

要約 原子力発電所の高経年化対策の一環として、そこで使用されている低圧電気ケーブルの非破壊劣化診断技術と寿命判定基準が必要とされている。ここでは、シリコーンゴム絶縁低圧電気ケーブルの劣化に着目し、熱劣化に伴う表面硬さの変化をインデントモジュラスによって測定した。また、一般的な劣化指標とされている破断時伸びの測定およびマイクロ硬度計による測定も行った。その結果、インデントモジュラス測定は(1)シリコーンゴム絶縁体に対しても熱劣化特性をうまく把握できること、(2)これから破断時伸びに換算することによりケーブルの劣化度が診断できることおよび(3)マイクロ硬度計測定結果とも良い相関があることが明らかになった。

キーワード 低圧電気ケーブル、シリコーンゴム、絶縁劣化、インデントモジュラス、加速劣化試験、熱劣化

Abstract As a part of countermeasures against ageing problems of nuclear power plants, it is requested to establish non-destructive diagnostic technique for their degradation of low voltage electric cables and assessment standard of their life. Having aimed at investigating the degradation of low-voltage electric cable with silicone rubber insulator, change of its surface hardness at elevated temperatures were measured by indenter modulus. Moreover, we also measured the elongation at break, which is regarded as general degradation index of electric cables, and the surface hardness with a micro hardness meter. Consequently, it is seen that the indenter modulus measurement is (1) capable to obtain general feature of the thermal degradation of silicone rubber insulator, (2) applicable to diagnose the degree of degradation of the electric cable by converting the result to elongation at break, (3) well correlated with the hardness measurement of the electric cable with the micro hardness meter.

Keywords low-voltage cable, silicone rubber, deterioration of insulators, indenter modulus, accelerated ageing, thermal ageing

1. はじめに

原子力発電所用ケーブルは、使用する電圧で大別すると6.6 kV以上の高圧用と600V以下の低圧用になる。高圧ケーブルの劣化診断については、(社)日本電線工業会から「高圧CVケーブルの保守・点検指針」(1993年9月)が発行され、直流漏れ電流法、残留電圧法⁽¹⁾等の電氣的な診断技術が確立し、診断も進んでいる。一方、発電所構内に敷設されている低圧ケーブルについては指針等もなく、目視点検や絶縁抵抗測定による健全性確認は行われているが、劣化度や残存寿命の評価が困難である。このため、ケーブルを布設状態のままその性能を損なうことなく劣化度を測定する非破壊劣化診断技術の開発が進められ⁽²⁾、

また電力各社でも高経年化対策(PLM)の観点から超音波伝搬速度法等による評価等が試みられている⁽³⁾。

低圧ケーブルのシースや絶縁材料には、塩化ビニール、ポリエチレン、エチレンプロピレン(EP)ゴム、シリコーンゴムなどの高分子材料が用途や環境に応じて用いられている。それぞれの絶縁材料は熱、紫外線、放射線等の環境条件により、高分子の連鎖同士が新たに結合したり(架橋)、逆に連鎖が切れたり(分子鎖切断)する等の化学構造変化が生じる⁽⁴⁾。こうした化学構造変化によりこれら絶縁材料は硬化や脆化等により弾性率が上昇して、その後の振動や熱サイクルにより亀裂が発生し、ケーブルとしての機械的寿命が来る。ケーブルの電氣的性能としては、絶縁性の保持が第一であり、その低下が電氣的寿命

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

である。従って、絶縁低下の監視が必要である。高压ケーブルでは印加電圧が高く、材料物性の変化に基づく電気抵抗等の変化を容易に捉えることができるが、低压ケーブルでは絶縁材料の劣化に対して電気抵抗等の電気特性の変化は小さく、亀裂等が発生し、そこに湿気等の水分が付着することで急激な絶縁低下が発生するに至って始めて検出が可能となることが多い。

以前当社では、難燃EPゴム絶縁の電力ケーブルと制御ケーブルについて、耐熱ビニール等の被覆材も含めた経年劣化の検査技術の研究を行った。そこでは酸化誘導、誘電損失、熱重量損失、インデントモジュラス（IM）および超音波伝搬時間を選定し、放射線照射と熱による劣化についてそれぞれの劣化度合いとの相関性を求め、その結果からIMが最も良い非破壊劣化診断技術であると評価した⁽⁶⁾。しかし、その場合シリコンゴム絶縁ケーブルについては検討を加えなかった。そこで本研究では、新たにシリコンゴム絶縁ケーブルの劣化に着目した。シリコンゴムの劣化は、これを構成するシロキシサン⁽⁷⁾の結合が変化することによるといわれているが、そのデータは不十分で、これを用いたケーブルの劣化についてもほとんどデータがない。ここでは、EPゴム絶縁ケーブルの劣化診断で最も良いとされたIMをシリコンゴム絶縁ケーブルの熱劣化特性測定に適用し、その熱劣化特性を求めた。次に劣化に伴う破断時伸びの値を測定し、IM測定値と比較した。さらにマイクロ硬度計による測定も実施し、これもIM測定結果と比較検討した。

2. 測定の方法

2.1 IM測定装置の概要と測定対象

IM測定には、英国AEA Technology社（現在、Raditec社）製Cable Manager（現在、Cable Conditioning and Life Management）として製品化されているものを使用した。IM測定の原理図を図1に示す。次に押し込み量と押し込み力の測定例を図2に示す。図2には押し針押し込み位置を少し変えて測定した押し込み変位と押し込み力の結果の例を示しており、再現性が良好なことを示している。測定結果は押し針（Indenter）を押し込んだ時の押し込み深さ（押し針移動量）に対する押し込み力の勾配であり、表面硬さを示す物性弾性係数と同じN/mmの単位で与えられる。

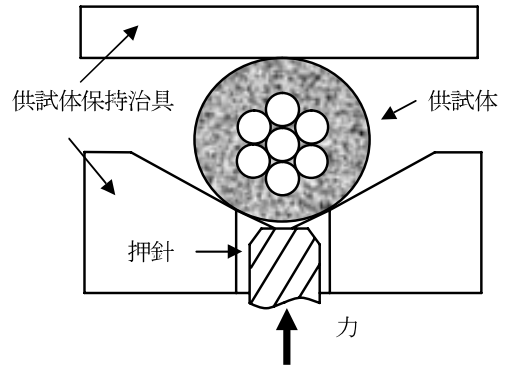


図1 IM測定装置の原理図

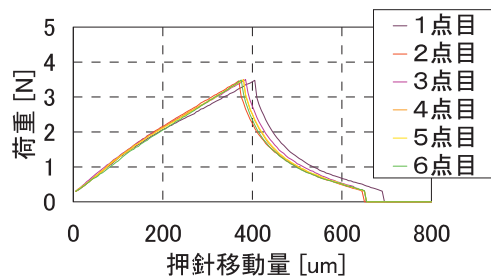


図2 IM測定による荷重・変位曲線の例

2.2 供試体

供試ケーブルは、三菱電線工業(株)製の2種類の錫メッキ軟銅撚り線導体シリコンゴム絶縁ケーブル（FR-STQ-INR/FR-CRDM-INR）で、導体の公称断面積は1.25 mm²、3.5 mm²と8 mm²の3種とした。その断面図を図3に示す。絶縁体は、それぞれ黒、白、赤、緑の4色と黒、白の2色で色別されている。これらを各色ごとに約150mm 3本と約70mm 1本を1組とする長さに切り取り、70mm以外の導体の芯線を抜き出した後、空気循環式恒温槽に入れて所定の温度で保持し熱劣化させた。このようにしたのは、

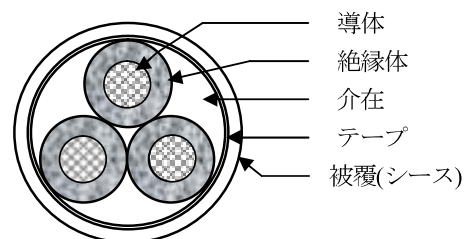


図3 代表的なケーブルの構造

ケーブル完成品のままで熱劣化させると、導体と絶縁体が密着し、劣化供試体の引張り試験ができなくなるためである。まずケーブルを解体して絶縁体が

ら導体を引き抜き、管状の供試体を用いた。供試ケーブルの仕様を表1に示す。

表1 供試ケーブルの仕様

	導 体			絶縁体	
	公称 断面積 mm ²	構成 本/mm	外径 mm	厚さ mm	色 芯 数
FR-STQ-INR	1.25	7/0.45	1.35	0.76	4
FR-CRDM-INR	3.5	7/0.8	2.4	1.1	4
	8	7/1.2	3.6	1.1	2

2.3 IM測定の内容

IM測定装置は、供試体の物性等に対して種々の設定が可能であり、本研究では以下の設定で測定した。

押針の挿入/引抜速度 0.08 mm/s

IM測定開始荷重 1 N

IM測定終了荷重 3 N

また、供試体1本につき6点測定することとし、ケーブルの長さ方向に5mm以上間隔をあけて3箇所、180度回転させて3箇所の計6点で測定し、それらの平均値を求めた。

2.4 引張り試験

引張り試験には長さ約15cmの管状供試体を用いた。



図4 引張り試験の写真

測定には島津製作所(株)製オートグラフAGS-10KNGを用い、引張り荷重200Nのロードセルにて、ミネベア(株)製掴み具を社内で加工して使用した。測定条件は常温、標線50mm、引張り速度500mm/minとし、供試体の破断強度、破断伸びを求めた。その写真を図4に示す。

2.5 マイクロ硬度計測定

標準試料厚さ1.5mmのパーレイス社製IRHD(International Rubber Hardness degree)マイクロ硬度計コンパクトを用い測定した。その写真を図5に示す。圧子は 0.395 ± 0.005 mmであり、 $8.3\text{mN} \pm 0.5\text{mN}$ の予備荷重を与えた後、 $145\text{mN} \pm 0.5\text{mN}$ の主荷重を加えた30秒後の数値を3点測定し、平均値で求めた。



図5 IRHDマイクロ硬度計

2.6 加速劣化

シリコーンゴムの耐熱使用温度は $150 \sim 250^\circ\text{C}$ 、最高許容連続使用温度は 125°C といわれている。 195°C で40日間の予備試験を実施した結果から、 125°C より 10°C 高い 135°C およびそれより 20°C と 40°C 高い、 155°C と 175°C の合計3つ温度を用いることとした。供試体を空気循環式恒温槽に入れ、所定の日数加熱した後に取り出し、IM測定、引張り試験およびマイクロ硬度計測定を実施した。

3. 測定結果

3.1 熱劣化とIMの関係

導体の公称断面積 3.5mm^2 で色の異なる4種類の絶縁体について、劣化期間とIM測定値の関係を求めた結果を図6～図9に示す。色毎に添加物が異なるため特性が少しずつ異なるが、いずれも熱劣化期間に対して単調増加の特性変化を示している。このことからシリコーンゴム絶縁体についてもIM測定によりその劣化度が容易に求められることが確認できる。

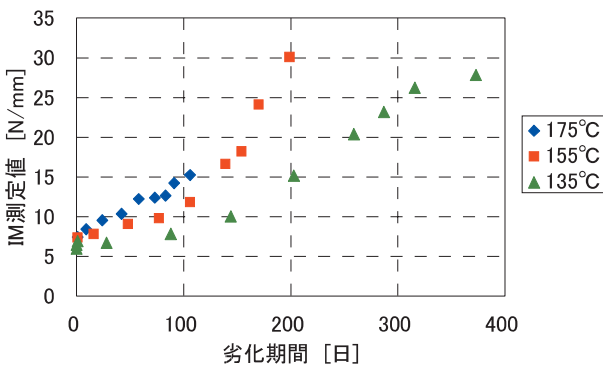


図6 3.5 mm² 黒色絶縁体の劣化期間とIM測定値

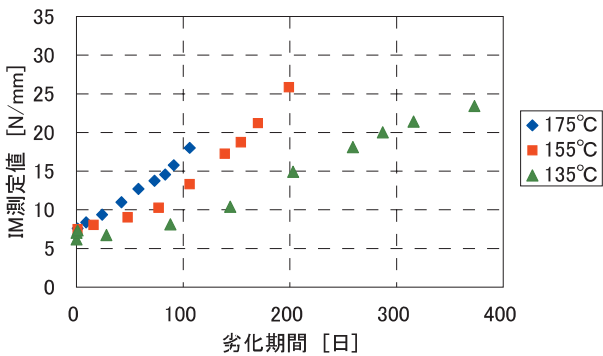


図7 3.5 mm² 白色絶縁体の劣化期間とIM測定値

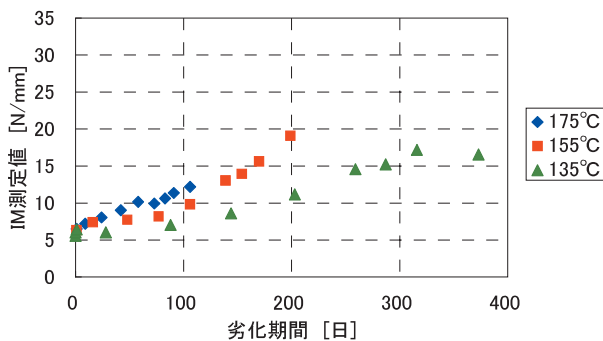


図8 3.5 mm² 赤色絶縁体の劣化期間とIM測定値

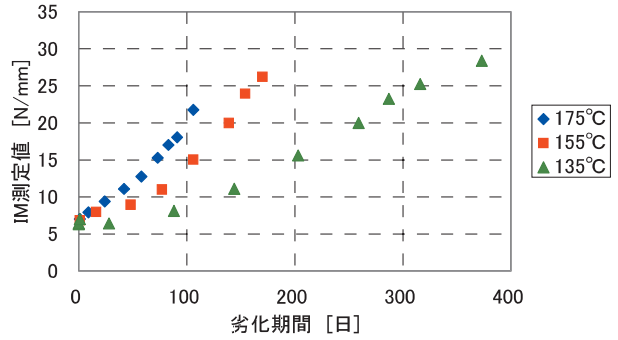


図9 3.5 mm² 緑色絶縁体の劣化期間とIM測定値

図10は絶縁体厚さの影響を検討するため、公称断面積 1.25mm^2 、 3.5mm^2 および 8mm^2 の3種の白色絶縁体についてIM測定値のデータを図示したものである。この図から見て、厚さの影響はないといえる。

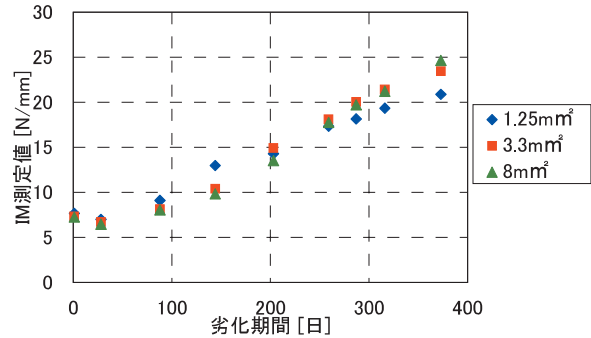


図10 断面積の異なる白色絶縁体の劣化期間とIM測定値

3.2 熱劣化と破断時伸びとの関係

IM測定結果と同じように、公称断面積 3.5mm^2 で色の異なる4種類の絶縁体について劣化期間と破断時伸びの関係を図11～図14に示す。前に示したIM測定値に比べて、バラツキが大きいですが、いずれもほぼ平坦に減少している。

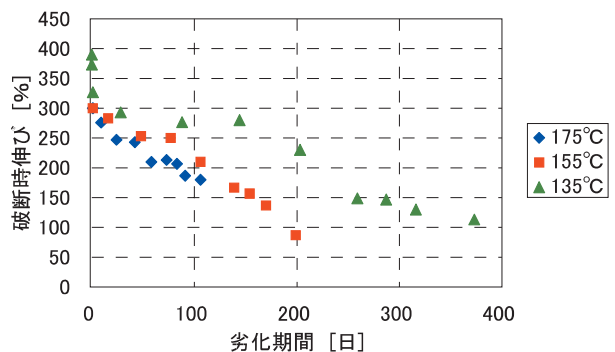


図11 3.5 mm² 黒色絶縁体の劣化期間と破断時伸び

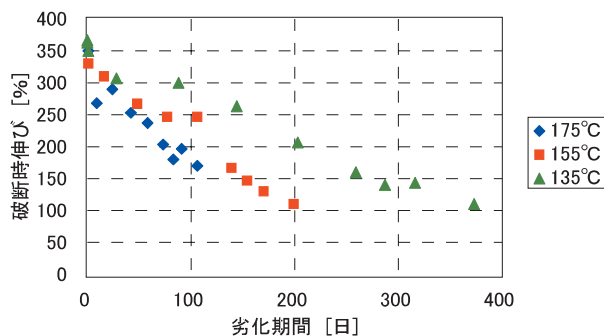


図12 3.5 mm² 白色絶縁体の劣化期間と破断時伸び

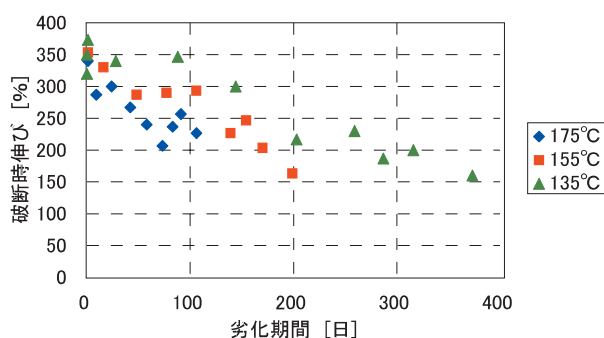


図13 3.5 mm² 赤色絶縁体の劣化期間と破断時伸び

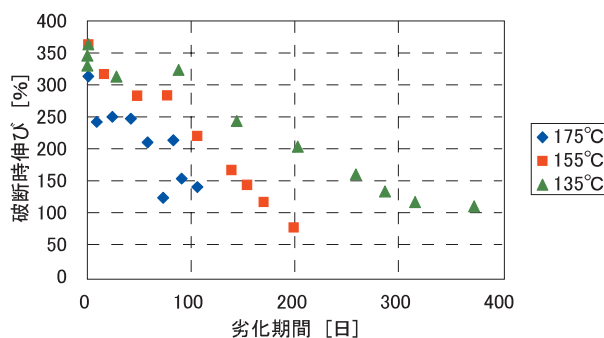


図14 3.5 mm² 緑色絶縁体の劣化期間と破断時伸び

絶縁材に用いられるゴムの劣化指標として、一般にこうした引張り試験時の破断時伸びが使われるが、これは破壊試験であり、この場合1つの破壊試験は1回きりの完全な非可逆現象であるため、どうしてもバラツキが大きくなる。さらに、通常シート状の材料からダンベル形状の試料を作成して引張り試験を実施しているが、ここでは外形1.35~3.6mm厚さ0.76~1.1mm円筒状のケーブルの絶縁体から試料を作成したため、撚り線を引き剥いた管状の供試体による破断時伸びを取り扱っており、余計にバラツキが大きくなったものと考えられる。

3.3 IM測定値と破断時伸びの関係

次に3.1で示したIM測定値と3.2で示した破断時伸びとの関係をプロットした。各色に対する両者の関係を図15~図18に示す。前述のとおり破断時伸びがケーブルの劣化指標として一般に使用されるため、今測定したIM測定値から破断時伸びを推定しようとする破断時伸びについてはばらつきがあるので95%信頼ラインからの推定となる。例えば、3.5 mm² 黒色絶縁体のIM測定結果が10.0N/mmだとすると破断時伸び260%±70%となる。

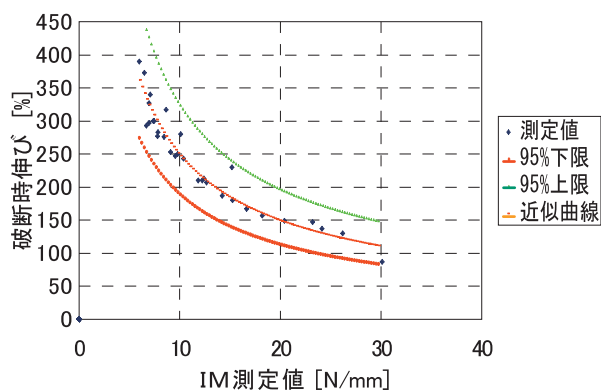


図15 3.5 mm² 黒色絶縁体のIM測定値と破断時伸び

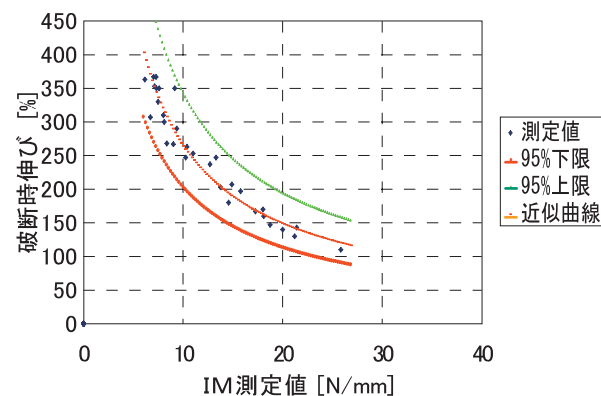


図16 3.5 mm² 白色絶縁体のIM測定値と破断時伸び

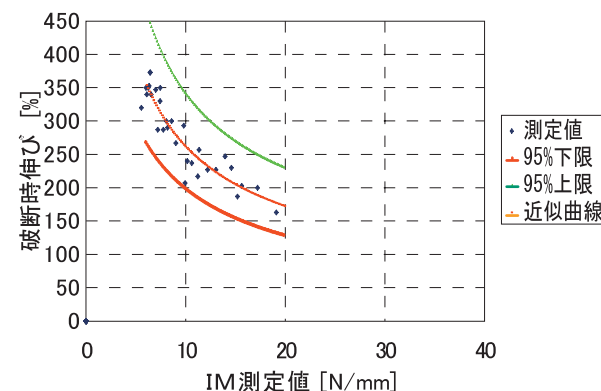


図17 3.5 mm² 赤色絶縁体のIM測定値と破断時伸び

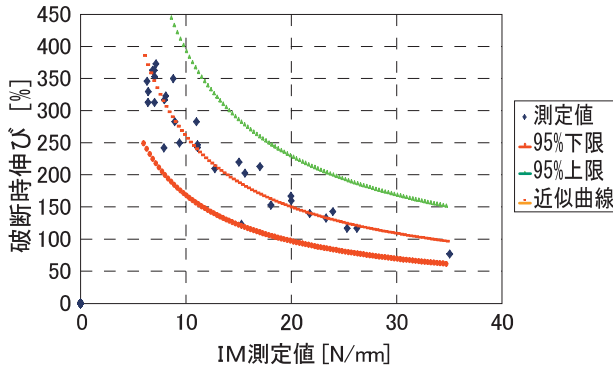


図18 3.5 mm² 緑色絶縁体のIM測定値と破断時伸び

4色全てのデータをプロットすると図19のとおり一つの近似線で表示できる。絶縁体の色が異なると熱劣化の履歴は異なっているが、物性値としてのIM測定値と破断時伸びは同じ関係をしており、IM測定値から破断時伸びが推定可能であることを示している。

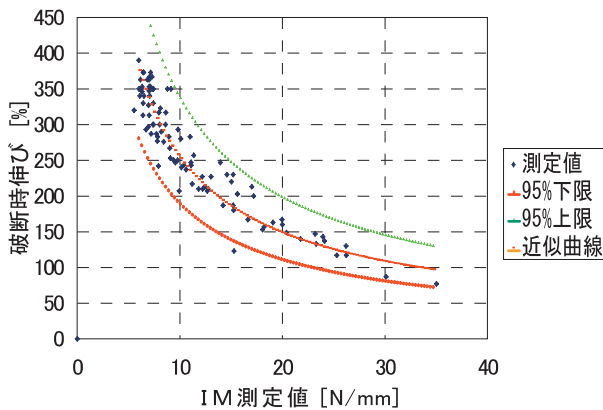


図19 3.5 mm² 全色絶縁体のIM測定値と破断時伸び

3.4 IM測定値とマイクロ硬度の関係

最後にIM測定値とマイクロ硬度の関係をプロットした結果を図19に示す。これは155℃で熱劣化させたもので公称断面積3.5 mm² 供試体の全色の結果一緒にプロットしてある。この結果から見てIM測定値とマイクロ硬度の関係は単調で、バラツキもあまり大きくない。ただこのIRHDマイクロ硬度計については測定時の水平度、サンプルの固定等が要求されており、現場測定には不向きであるが、IM測定は測定方向について制限なく、この方が現場測定向きといえる。

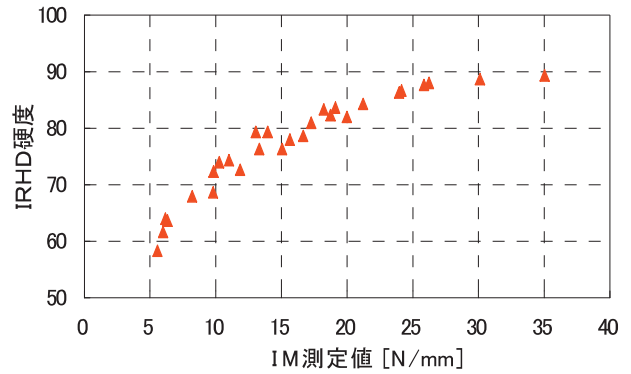


図20 IRHD硬度とIM測定値の関係

4. まとめ

絶縁体に押針を押し込んだ時の押し込み深さと押し込み力の勾配を測定するIM測定により、シリコンゴムのケーブル絶縁体の熱劣化特性について調べた。その結果、IM測定値は熱劣化特性をうまく把握でき、さらに一般的な劣化指標である破断時伸びに換算することでケーブルの劣化度が診断できることを確認した。IM測定値は国際規格であるIRHDマイクロ硬度測定結果とも相関があり、現場測定向きであるIM測定によるケーブルの劣化診断の見通しが得られた。

今後は、シリコンゴム以外の絶縁体の低圧ケーブルについてもデータを蓄積するとともに、放射線劣化の予測される実プラントでの測定を通じ、ケーブルの高経年化技術評価に寄与していきたい。

文献

- (1) 山中三四郎, 福田正, 伊藤一巳, 富田淳子, 瀬口忠男, "原子力発電所電力ケーブルの残留電圧による劣化診断の検討," 電気学会論文誌B, 116巻, 5号, pp.619-625(1996).
- (2) 庄田弘志, 竹澤由高, 片桐純一, "低圧ケーブル材料の経年劣化に対する光診断手法の開発," 火力原子力発電技術協会誌, H16大会論文集, pp.263-267(2005)
- (3) Yasunobu Nishida, "Non-destructive diagnosis technique for aging of cables used at nuclear power plants," Nuclear Engineering and Design Vol.207, No.3, pp.317-325(2001).
- (4) 秋葉光雄, 林茂吉, "ゴム・エラストマーの劣化と寿命予測," 新ポリマー選書1, ラバーダイジェ

スト社(2000).

- (5) 三宅 悟, "原子力発電所の低圧ケーブル非破壊劣化診断技術," INSS Journal, Vol.5, p.98(1998).