

インデントモジュラス法によるケーブルの経年劣化 診断手法の検討

Study on the Ageing Degradation Diagnosis of Electric Cables Based
on Indenter Modulus Method

松波 潮 (Ushio Matsunami)*

三上 雅生 (Masao Mikami)*

要約 原子力発電所の安全性と信頼性を確保する上で、ケーブルの経年劣化の診断が重要である。このためにいくつかの方法が提案されている中で、原子力安全システム研究所では、10年ほど以前からインデントモジュラス法に取り組み、その優秀性を実証してきた。ここではまず、原子力安全基盤機構の調査研究に参加し、難燃エチレンプロピレンゴム絶縁ケーブルの経年劣化診断に対しAEA Technology社製の装置によるインデントモジュラス法が最も優れていることを実証した。続いて、特性の改善を目指して筆者らが新しく開発して製作したインデントモジュラス測定装置の特性を求め、まず、ケーブルの経年劣化診断に十分使えることを確認した。次に、先端の形状が異なる押針を用いて実験した結果、測定値のばらつきは押針の形状に依存しないことを見出した。

キーワード 低圧電気ケーブル、シリコンゴム絶縁ケーブル、難燃EPゴム絶縁ケーブル、絶縁劣化、インデントモジュラス、押針形状

Abstract Diagnosis of aged electric cables is essential for safe, steady operation of nuclear power plants and various diagnostic techniques have been proposed. The Institute of Nuclear Safety System, Incorporated selected indenter modulus method as the best cable diagnostic method and has demonstrated the superiority of this method for nearly a decade. In this study, the authors participated in a research program sponsored by the Japan Nuclear Energy Safety Organization and verified that an indenter modulus method that used an apparatus made by AEA Technology was most effective for diagnosing the ageing degradation of flame retardant ethylene-propylene rubber insulated cables. Then they developed a new indenter modulus measurement apparatus to improve the diagnostic performance and measured the characteristics of this apparatus. As a result they confirmed that this apparatus was also useful for ageing degradation diagnosis of electric cables. Following the above study, they carried out a cable diagnosis test using indenters of various tip configurations. The results showed that variation of measured indenter modulus values was independent of indenter tip configuration.

Key words low-voltage cable, silicon rubber insulated cable, flame retardant ethylene-propylene rubber insulated cable, insulation deterioration, indenter modulus, indenter configuration

1. はじめに

原子力発電所で使用されている電気ケーブルは全長1000~2000kmに及び、電動機等の機器へ電力を供給する機能と機器の監視・制御信号を伝達する機能を有している。これら電気ケーブルは、熱や放射線環境において、酸化等により徐々に絶縁性能低下などの経年劣化が進行する。特に、原子炉格納容器内の安全系に属する電気ケーブルは、設計想定事故時の高温水蒸気と高放射線量の過酷な環境において

も機能の維持が要求される。

原子力発電所用ケーブルのうち90%以上を占める電圧600V以下の低圧ケーブルについて、現在のところ劣化評価に関する確立された診断手法がなく、定期的な絶縁抵抗測定や系統、機器と組み合わせた動作確認により健全性確認が行われているが、劣化度の評価が困難である。このため、ケーブルをその性能を損なうことなく、布設状態のまま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^{(1)~(3)}、また電力会社でも高経年化対策の観点から超音

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

波伝搬速度法等による評価等が試みられている⁽⁴⁾。低圧ケーブルのシースや絶縁材料には、塩化ビニル、ポリエチレン、エチレンプロピレンゴム（EPゴム）、シリコ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（架橋）、逆に連鎖が切断（分子鎖切断）する等の化学構造変化が生じる⁽⁵⁾。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を起こして弾性率が大きくなり、その後の振動や熱サイクルによって絶縁材料に亀裂が発生する。低圧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い。絶縁材料に発生する亀裂等に湿気からの水分が付着することによって急激な絶縁低下に至り、始めて検出が可能となることが多い。

原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）では、10年余り以前に高経年化研究センター検査技術グループの前身である潜在事象研究プロジェクトにおいて、難燃EPゴム絶縁の電力ケーブルと制御ケーブルに関し耐熱ビニル等の被覆材も含めた経年劣化の検査技術の研究を開始した。そこでは、当時提案されていたケーブルの非破壊診断技術の酸化誘導温度・期間、熱重量分析、超音波伝搬時間、誘電正接、インデントモジュラス（Indenter Modulus：IM）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た。そして、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の評価を下した⁽⁶⁾。

本検討では、IM法による各種ケーブル絶縁材料の劣化特性として、以前三上が取り組んだ原子炉格納容器内の安全系に使用されているシリコンゴム絶縁材料の熱劣化特性⁽⁷⁾を再掲し、原子力安全基盤機構（JNES）の劣化供試体を用いた難燃EPゴム絶縁材料の熱・放射線同時劣化特性測定の結果を示す。次に原子力発電所の実機ケーブルへのIM法の適用性について概要を述べる。さらに、筆者らが独自に開発したIM計測装置の特性および押針の先端がケーブルと接触する面積を大きくすることによる測定値のばらつきへの影響を検討した結果について報告する。

2. ケーブルの各種絶縁材料に対する検討

2.1 シリコンゴムの熱劣化特性⁽⁷⁾⁽⁸⁾

非破壊劣化診断技術としてIMを選定し、3.1に示すAEA Technology社製の測定装置を採用し、これ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て、その熱劣化特性を求めた。また、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。その結果を図1に示す。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。さらに、IM測定値と国際規格であるIRHD（international rubber hardness degree）⁽⁹⁾マイクロ硬度計コンパクト測定値の関係を図2に示す。IM測定値とIRHD硬度の間にはよい相関がある。これによ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

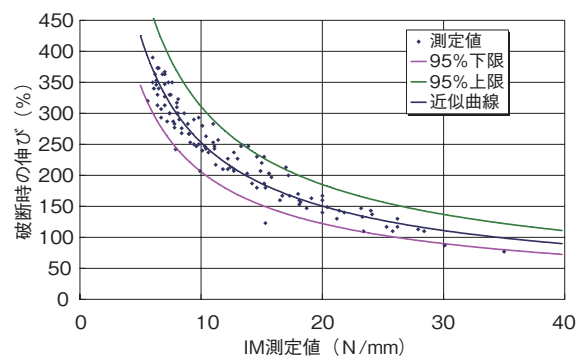


図1 IM測定値と破断時伸び
(シリコンゴム、三菱電線製FR-CRDM-INR
3.5mm², 135℃～175℃熱劣化0～373日)

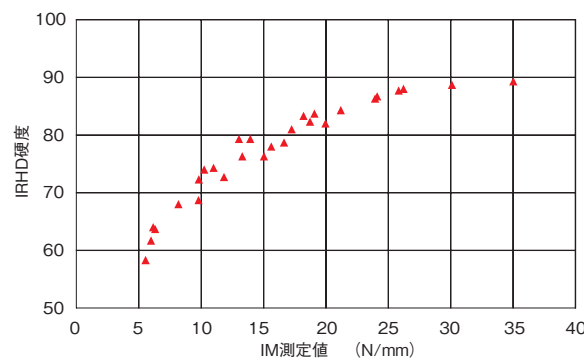


図2 IM測定値とIRHD硬度
(シリコンゴム、三菱電線製FR-CRDM-INR
3.5mm², 155℃熱劣化0～199日)

れた。

これらの結果は既に発表しているが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、以下の検討のため再掲した。

2.2 架橋ポリエチレン系，EP ゴム系の熱・放射線同時劣化特性

JNES は、2005 年度に「原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究」⁽¹⁰⁾の一貫として、「ケーブル非破壊劣化診断技術の実機適用性調査」を以下の要領で実施した。

- (1) 調査対象とする診断技術は公募により、少なくとも平成 21 年までに実機で使用できる見通しが得られているものを選定する。
- (2) 第 I 期の診断対象は、架橋ポリエチレン、難燃架橋ポリエチレン、EP ゴムおよび難燃 EP ゴムである。また、第 II 期の診断対象は、シリコンゴムおよび特殊耐熱ビニルである。
- (3) 診断に用いる供試体は、JNES において、熱と放射線により同時劣化されたもので、破断時の伸び値は事前に把握されている。
- (4) 選定された診断技術の測定データは、ラウンドロビン方式で各機関が取得する。

この調査には、INSS を含め 3 社が参加した。INSS は 3.1 に示す AEA Technology 社製の測定装置の IM 測定により参画した。IM 測定値と破断時の伸びとの相関性を評価した結果、現在の技術ではこの方法が最も優れていることおよび IM 測定は、一部のケーブルを除き、架橋ポリエチレン系および EP ゴム系の絶縁体に適用可能であることの評価を得ている。一例として、C 社難燃 EP ゴムの相関性

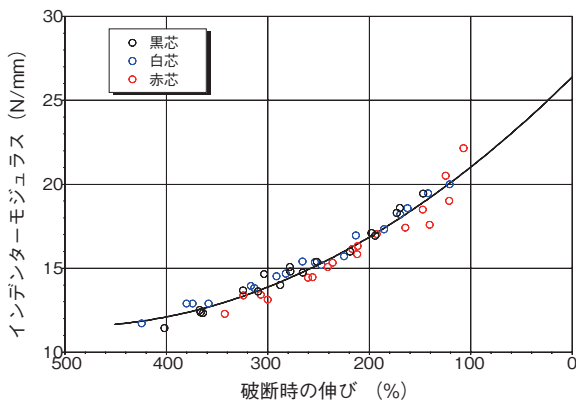


図3 IM 測定値と破断時伸び
(C 社難燃 EP ゴム絶縁体, $R^2=0.96$)
(R^2 は多項式回帰の決定係数)

評価結果を図 3 に示す。破断時の伸びとインデントモジュラス間の相関は非常によい。

2.3 実機での測定

実機に対する IM 測定の適用性を検討するため、3.1 に示す AEA Technology 社製の測定装置を用いて原子炉格納容器内において低圧ケーブルの測定を実施した。IM 測定の対象は絶縁体であることから、被覆材が取り除かれたケーブル末端部において実施した。原子炉格納容器内低圧ケーブルの測定状況の例を図 4 に示す。AEA Technology 社製の IM 測定装置は、プローブヘッドの保持治具に測定対象のケーブル絶縁体を挟み込んで測定する構造であるが、端子箱内で解線したケーブル末端部の現状の形態に十分対応したものであり、現地の測定に適応していることが検証できた。

測定の結果、当該ケーブルに顕著な劣化は見られず、現状では健全な状態であると判断された。

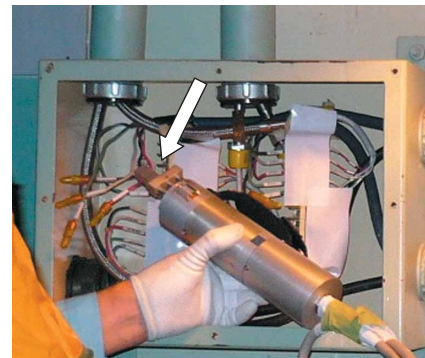


図4 原子炉格納容器内の測定状況
(矢印のところのケーブルを測定中)

3. IM 測定の精度向上の検討

3.1 IM 測定装置の概要と測定対象

これまでの IM 測定には、英国 AEA Technology 社製 Cable Manager として製品化されているもの(図 5, 以下「AEA 装置」という.)を使用してきた。IM 測定の原理を図 6 に示す。次に、押込み変位(押針移動量)と押込み力(荷重)の測定例を図 7 に示す。この図は、押込み力の上限を 3.5N に設定して測定した例を示しており、始めに押込み変位が進むにつれて押込み力が増加するが、両者はほぼ直線の関係にある。上限値に達すると押針は引抜か

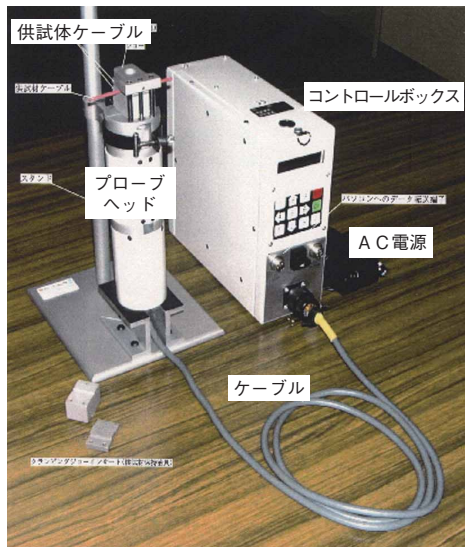


図5 AEA Technology 社製 IM 測定装置

れるが、変位は連続してプラスの値で示している。また、押針押し込み位置を少し変えて6点測定した結果、再現性が良好なことを示している。IM 測定の結果（値）は押針を押し込んだ時の押し込み変位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。

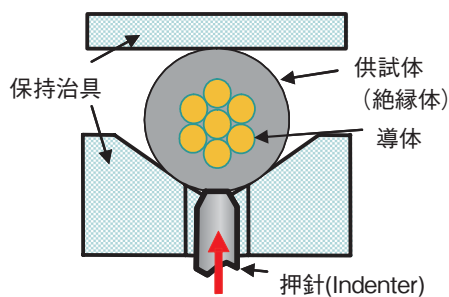


図6 IM 測定装置の原理

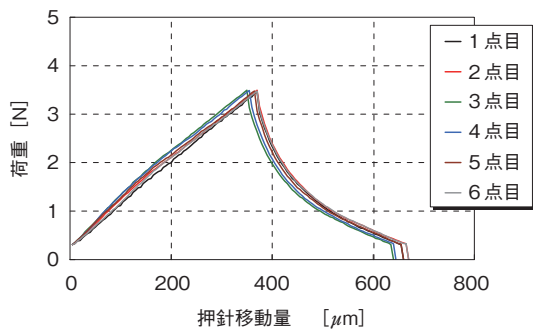


図7 IM 測定による押し込み力（荷重）・押し込み変位（押し針移動量）曲線の例

3.2 IM 測定精度上の問題

IM 測定は、1本の供試体に対して押針押し込み位置を少し変えて6点の測定値の平均を求めているので6点の測定値のばらつきをできるだけ少なくすることが必要である。しかし、このばらつきは、図8に示すように、ケーブルの劣化が進行するほど大きくなる傾向がある。その原因として、劣化が進行するほど、ケーブルの測定部位によって表面の硬度が異なってくるのが推測された。そこで押針の先端がケーブル表面を押している面積を大きくして、IM 測定値のばらつきを低減する可能性を調べるため、押針の先端形状を変化させてみることにした。現在まで用いてきた AEA 装置の押針は、JIS K 6253 の「ダイロメータ硬さ試験」の押針を参考にしたもので、先端が円錐台状でケーブル表面との接触部が平面状になっている。

なお、AEA 装置は購入から10年程度を経過していること、また、自作品の方が試験に依じて装置の改良も容易になることから、筆者らは新たにIM 測定装置（以下「INSS 装置」という。）を開発し、製作することとした。

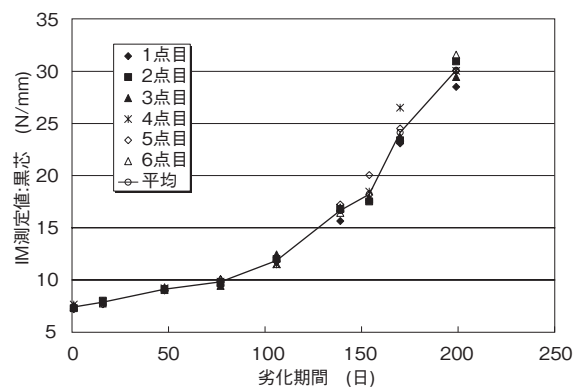


図8 IM 測定の6点測定値の推移（シリコーンゴム、三菱電線製 FR-CRDM-INR 3.5mm²、155℃熱劣化0～199日）

3.3 INSS 装置の開発

3.3.1 INSS 装置の構成

INSS 装置は、測定部、制御ボックスおよびパソコンで構成し、パソコンは汎用品で、制御ボックスとはUSB一本で接続する。

測定部は、小型の圧縮型ロードセルを固定した台

とロードセルに垂直に載せた押針を駆動モータにより上下移動させる構造であり、押針は取替えが簡単にできるようにしてある。押針の押込み速度の設定値は現在のところは固定としているが、設定値を変更可能にするよう改良を計画している。

制御ボックスは、モータドライバ、ロードセル変換器、DC電源、マイコン等を収納している。

装置の全体構成を図9に示す。



制御ボックス 測定部 パソコン

図9 新しく製作したIM測定装置全体構成

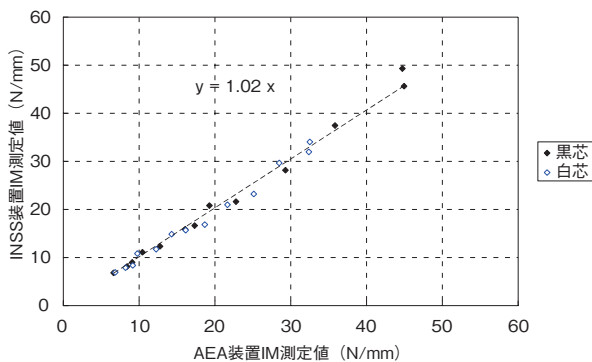


図10 INSS装置とAEA装置によるIM測定値の比較 (シリコンゴム, 三菱電線製FR-STP-INR, 155℃熱劣化0~427日)

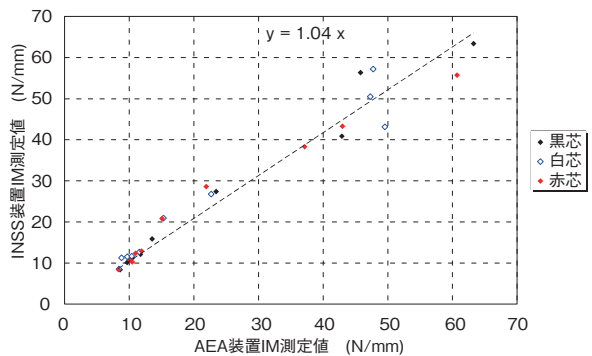


図11 INSS装置とAEA装置によるIM測定値の比較 (難燃EPゴム, 三菱電線製FR-CPHS, 120℃熱劣化0~427日)

3.3.2 AEA装置との比較

今回製作したINSS装置およびAEA装置で求めたIM測定値の比較を行った。なお、絶縁体の試料として加熱劣化させたシリコンゴム絶縁体および難燃EPゴム絶縁体を使用した。

得られたIM測定値の比較を図10と図11に示す。シリコンゴムでは、INSS装置のIM測定値とAEA装置のIM測定値は非常によい一致を示している。一方、難燃EPゴムの測定値は、IM測定値が大きなところで差が少し大きくなっているものの、それ以下ではINSS装置のIM測定値とAEA装置のIM測定値は比較的良好一致している。

IM測定値と破断時の伸びとの相関について、INSS装置とAEA装置の結果を比較すると図12と図13のようになる。シリコンゴムでは破断時の伸びが小さな(劣化が進行した)範囲で相関がよくないが、 R^2 乗値はAEA装置が0.93に対してINSS装置が0.92となり、ほぼ一致している。一方、難燃

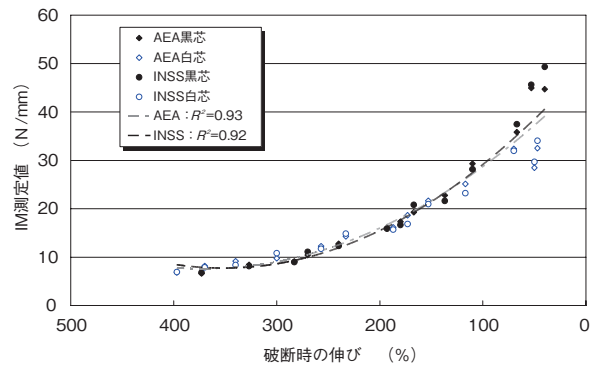


図12 INSS装置とAEA装置によるIM測定値と破断時の伸びとの相関の比較 (シリコンゴム, 三菱電線製FR-STP-INR, 155℃熱劣化0~427日)

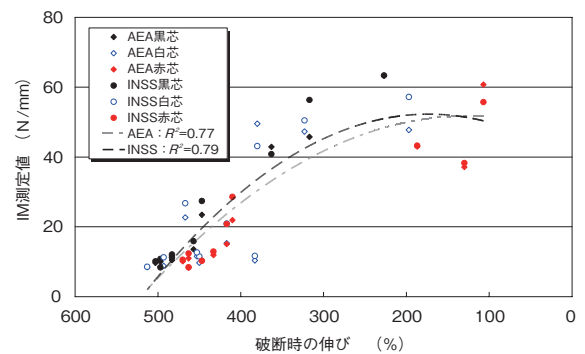


図13 INSS装置とAEA装置によるIM測定値と破断時の伸びとの相関の比較 (難燃EPゴム, 三菱電線製FR-CPHS, 120℃熱劣化0~427日)

EP ゴムでは、全ての範囲で相関はあまりよくないが、 R^2 乗値は AEA 装置が 0.77 に対して INSS 装置が 0.79 であり、シリコンゴムと難燃 EP ゴムは、ともに IM 測定値と破断時の伸びとの相関におけるばらつきが同程度である。

3.4 押針先端形状の影響

押針の先端がケーブル表面を押している面積を大きくして、IM 測定値のばらつき低減の可能性を調べた。このために 3 種類の先端形状の押針を製作した。各押針の先端形状を図 14 に示す。AEA 装置で用いてきた現状の押針 - 0 は、先端が円錐台状で、ケーブル表面との接触部を平面状にしている。これに対し、押針 - 1 は、先端が円錐状でケーブル表面との接触部を球状にしたものである。最後に、押針 - 2 は、先端がくさび型でケーブルの径方向に押針の平面長手部分を接触させることを考えた。

押針 - 0, 1, 2 によるシリコンゴムに対する IM 測定値と破断時の伸びとの相関の比較を図 15 に示す。一方、難燃 EP ゴムについては、図 13 に示したように、全体として相関がよくないため、そのうち黒芯に対する結果のみを図 16 に示す。いずれの結果でも、押針 - 1 は、劣化に伴う破断時の伸びの低下に対し IM 測定値の増加の割合が押針 - 0 に比較して小さいため、劣化の指標として不利である。一方、押針 - 2 は、劣化に伴う破断時の伸びの低下に対し IM 測定値の増加の割合が押針 - 0 とほぼ同等であり、劣化の指標としても同等である。また、シリコンゴムの R^2 乗値は、押針 - 0 が 0.92、押針 - 1 が 0.92、押針 - 2 が 0.93 であり、また、難燃 EP ゴムの R^2 乗値は、押針 - 0 が 0.98、押針 - 1 が 0.98、押針 - 2 が 0.97 となっており、シリコー

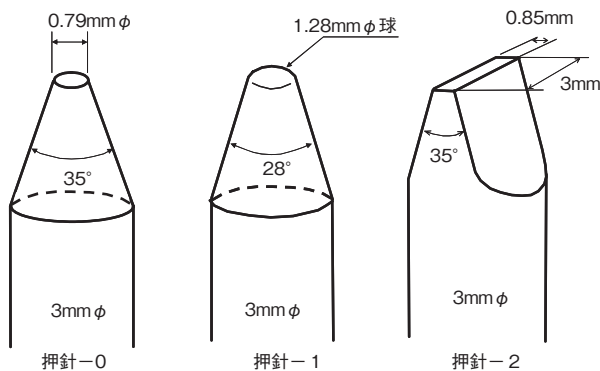


図 14 押針の先端形状

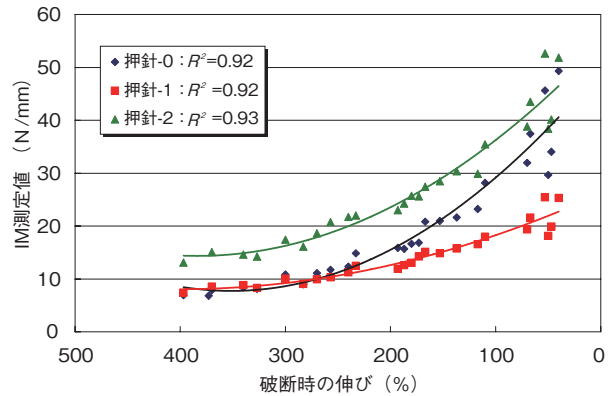


図 15 3 種類の押針による IM 測定値と破断時の伸びとの相関の比較 (シリコンゴム黒芯・白芯, 三菱電線製 FR-STP-INR, 155°C 熱劣化 0~427 日)

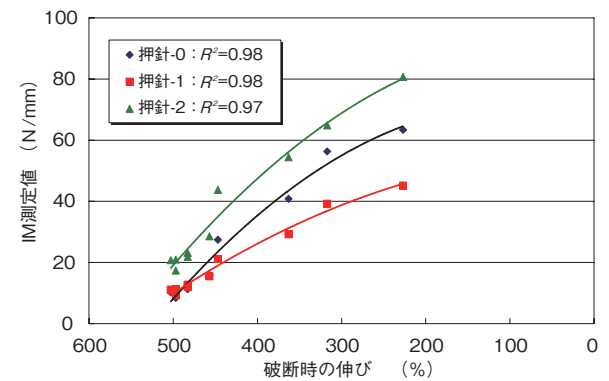


図 16 3 種類の押針による IM 測定値と破断時の伸びとの相関の比較 (難燃 EP ゴム黒芯, 三菱電線製 FR-CPHS, 120°C 熱劣化 0~427 日)

ンゴムと難燃 EP ゴムはともに、 R^2 乗値からみて 3 種類の押針先端形状のばらつきの差は見られなかった。この結果から、押針の先端がケーブル表面と接触する面積を大きくしても、測定値のばらつきに関連しないことがわかった。

4. まとめ

- (1) インデントモジュラス法は、以前に実施した結果および JNES の劣化供試体を用いた試験の結果から、原子炉格納容器内の安全系に使用されているシリコン絶縁ケーブルと難燃 EP ゴム絶縁ケーブル等の非破壊劣化診断に適用可能である。
- (2) 原子力発電所の実機ケーブル測定に対し、これまで使用してきた AEA Technology 社製の IM

測定装置の適用性を実証した。

- (3) 劣化に伴う測定値のばらつき低減のため、新たに開発して製作した INSS 装置の測定値は、これまで使用してきた AEA 装置の測定値と比較的よい一致を示した。
- (4) ばらつき低減の一環として、この INSS 装置により、ケーブルとの接触面積を増大させた押針と測定値のばらつきとの関連について調べた。その結果、ケーブル接触面積を増大させた押針形状でも、測定値のばらつきはほとんど変化しないことが分かった。

- (10) 独立行政法人 原子力安全基盤機構 規格基準部, “原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究に関する中間報告書,” JNES-SS レポート, JNES-SS-0619 (2006).

文献

- (1) 庄司弘志, 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).
- (2) 森本敬三 他, “原子力発電所での低圧ケーブルの劣化診断,” (社) 電気学会 電線・ケーブル研究会資料 EC-02-7 (2002).
- (3) 神村誠二他, “応力-歪応答による電線・ケーブル劣化診断法の開発 (第 2 報),” (社) 電気学会 絶誘導・縁材料研究会資料 DEI-91-131 (1991).
- (4) 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).
- (5) 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).
- (6) 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).
- (7) 三上雅生, “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,” INSS JOURNAL, Vol.12, p.139 (2005).
- (8) 松波 潮, 三上雅生, “インデンターモジュラス法による低圧ケーブル劣化診断,” 火力原子力発電技術協会誌, H18 大会論文集, pp.68-73 (2007).
- (9) JIS K 6253-1997, “加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法” (1997).