

原子力発電所の低圧ケーブル非破壊劣化診断技術

Investigation of Non-destructive Diagnosis Technologies for Electrical Cables in Nuclear Power Stations

三宅 悟 (Satoru Miyake)*

要約 我が国の原子力発電所が運転を開始して以来、30年近く経過しており、原子力発電所の安全性、信頼性の確保ならびにプラントの高経年化の観点から、プラントの神経でありまとめて保守取替が困難なケーブルの劣化度及び残存寿命を非破壊的に診断できる技術を開発する必要がある。

発電所の構内に布設されている低圧ケーブルについては、目視点検や絶縁抵抗測定による健全性の確認は行われているが、それだけでは劣化度や残存寿命の診断は困難である。

本研究では、既存の非破壊診断技術であるところの表面硬さ試験 (indenter)、熱重量分析、誘電正接試験、酸化誘導試験及び超音波 (回折SH波) 伝播時間測定の手法を用いる技術の適用可能性について試験を行った。

試験は、原子力発電所に用いられている低圧電気ケーブルの中から3種類のものを選定し、それらのケーブルに対して、何種類もの条件下での、放射線照射だけの加速劣化、温度だけの加速劣化及び放射線照射と温度との複合環境下での加速劣化を生じさせ、劣化時間の関数として、引張試験の伸び、表面硬さ試験、熱重量分析、誘電正接試験、酸化誘導試験及び超音波 (回折SH波) 伝播時間について測定を行った。

測定されたデータの解析は、AEA TechnologyのBurnayとRuddにより提案された実験式を用いて、時間、温度及び照射線量率を重ね合わせる方法によった。この方法を、先ず、引張試験の伸びに対して適用した。引張試験の測定値、熱劣化の温度と劣化時間、照射劣化の照射線量率と照射時間及び熱と放射線同時加速劣化の条件と時間を用いて、Ruddの式におけるモデルパラメータを求めた。このモデルパラメータを用いて、同式により各試験測定点の移動係数を計算した。そして、伸びの各々の測定点をその測定点が得られた等価時間 (即ち、移動係数と劣化時間との積) に対してプロットし、等価時間に対する伸びのマスターカーブを作成した。その後、表面硬さ試験、熱重量分析、誘電正接試験、酸化誘導試験及び超音波伝播時間測定の実験データを等価時間に対してプロットし、伸びのマスターカーブとの比較を行った。その結果、表面硬さ試験データのマスターカーブが、試験に用いた3種類のケーブルに対して実施したいづれの劣化条件においても伸びのマスターカーブとの強い相関を示したので、ケーブルの劣化度及び残存寿命を非破壊的に診断する技術として、有効であることが分かった。

キーワード 低圧ケーブル、ケーブル劣化、表面硬さ (indenter)、熱重量分析、誘電正接、酸化誘導、超音波 (回折SH波) 伝播時間、寿命予測、合成劣化グラフ

Abstract Nuclear power stations in Japan have been operating about thirty years. So, it is important for safety, stable operation and aging management of nuclear power stations to investigate non-destructive diagnosis technologies relative to the amount of degradation and residual life of electrical cables.

Low voltage cables in nuclear power stations are examined visually and by insulation resistance tests to verify their intactness, but those examinations are not effective to estimate the amount of degradation and residual life of electrical cables.

Therefore, this study was carried out to investigate the applicability of existing non-destructive diagnosis technologies, including indenter measurements, thermogravimetric analysis, dielectric loss, oxidation induction time and temperature and ultrasonic wave (diffracted shear horizontally wave) transmission time, relative to the amount of degradation and residual life of electric cables.

Measurements have been made on changes in tensile elongation, indenter measurements, thermogravimetric analysis, dielectric loss, oxidation induction time and temperature and ultrasonic

* (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

wave transmission time. These are being measured as a function of aging time in several different aging conditions, including radiation aging, thermal aging and combined radiation/thermal aging.

Analysis of the test data obtained during these measurements is based on time-temperature-dose rate superposition using an empirical relationship, which was initially developed by Burnay and refined by Rudd of AEA Technology. The superposition method is initially applied to the tensile test data, since this is usually regarded as the prime indicator of aging degradation. The values of tensile test data, aging temperature and aging time, aging dose rate and aging time, and combined radiation/thermal aging condition and aging time are used to estimate model parameters in the equation given by Rudd. Then, using the model parameters, the shift factor for each test condition is calculated by the equation to obtain the equivalent time for each data point. Next, each value of elongation is plotted versus the equivalent time of the data, to form a master curve of the elongation data as a function of the equivalent time. After that, non-destructive test data, including indenter measurements, thermogravimetric analysis, dielectric loss, oxidation induction time and temperature and ultrasonic wave transmission time, are also plotted versus the equivalent time of the data and compared with the master curve for elongation.

The master curve for indenter measurements showed a correlation with the master curve for elongation. The indenter measurements proved to be an effective, non-destructive diagnosis technology relative to the amount of degradation and residual life on electrical cables for the three cable types tested, at every kind of aging condition in the test.

Keywords low voltage cable, degradation on electrical cable, tensile elongation, indenter measurements, thermogravimetric analysis, dielectric loss, oxidation induction time and temperature, ultrasonic wave (diffracted shear horizontally wave) transmission time, lifetime prediction, superposed degradation master curve

1. はじめに

原子力発電所用ケーブルは、電圧種別で大別すると6.6kV以上の高圧用と600V以下の低圧用になる。高圧ケーブルについては、直流漏れ電流法、部分放電法等の電気的な診断技術が確立されつつありかなり進んでいる⁽¹⁾。

一方、発電所の構内に布設されている低圧ケーブルについては、目視点検や絶縁抵抗測定による健全性の確認は行われているが、それだけでは劣化度や残存寿命の診断が困難である。このため、ケーブルを布設状態のままケーブルの性能を損なうことなく、劣化度を測定できる非破壊劣化診断技術の確立が望まれている。

一般に原子力発電所におけるケーブルの環境は通常運転時の平均温度は30～60℃、線量率は1Gy/h以下であるが、ケーブルの絶縁材料や被覆材料として用いられている高分子材料は、空気中において、低線量率の放射線環境下で熱が加わると相乗効果によって酸化劣化が促進されることが知られている⁽²⁾。

そこで本研究では、原子力発電所用ケーブルを用

いて、広範囲の温度及び放射線の複合環境下で長時間暴露による加速劣化を生じさせ、破壊試験である機械的引張試験の伸びを劣化の指標として、次の試験を行った。

すなわち、発電所のケーブル布設場所での使用可能な非破壊劣化診断技術として選んだ表面硬さ試験(indenter)^(3,4,5)、熱重量分析⁽¹⁾、誘電正接試験⁽⁶⁾、酸化誘導試験(OIT, OITP)⁽⁷⁾及び超音波(回折SH波)伝播時間測定⁽⁸⁾の各測定手法によりケーブルの絶縁材料と被覆材料の劣化による変化を測定し、それぞれの試験毎の測定値を時間依存データの重ね合わせ法^(9,10)によるデータの重ね合わせを行い、そのデータを比較し、発電所で適用できる低圧ケーブルの非破壊劣化診断技術の確立を目指し検討した。

以下、その結果について述べる。

2. 試験試料

原子力発電所で使用されている低圧ケーブルには、低圧電力用、制御用そして計装用があるが、その中で代表的な絶縁材料及び被覆材料が使われているケーブルを選定した。それを表1に示す。

表1 試験用ケーブル

種別	絶縁材料	被覆材料	ケーブル記号	サイズ
低圧電力ケーブル	難燃EPゴム(EPR)	難燃低塩酸特殊耐熱ビニル(PVC)	FR-PSHV	2芯 8mm ²
制御ケーブル	" (EPR)	難燃クロロスルホン化ポリエチレン(CSPE)	FR-CPHS	10芯 2mm ²
	" (EPR)	難燃低塩酸特殊耐熱ビニル(PVC)	FR-CPSHVS	4芯 2mm ²

3. 試験試料の作成

試験試料は、ケーブルを分解し、絶縁材料と被覆材料を別々にしたものと、ケーブル状態の2種類を作成した。

ケーブルを分解して作成した試験試料の形状は、引張試験の絶縁材料は管状、被覆材料はダンベル状で構成されている。

もう一方のケーブル状態の試験試料は、誘電正接試験と表面硬さ試験用として作成した。

3.1 引張試験他用試験試料

酸化誘導試験⁽⁷⁾及び熱重量分析⁽¹⁾用の試験試料は引張試験後の試験試料から分析用として採取した。また、超音波伝播時間測定⁽⁸⁾用は引張試験後の試験片を使用した。

試験試料形状

・絶縁材料

管状

試験試料長さ 90 mm

ゲージ長さ 30 mm

・被覆材料

ダンベル形状 (ISO-3F Type 2)

試験試料長さ 50 mm

ゲージ長さ 20 mm

ゲージ幅 4 mm

3.2 誘電正接試験他用試験試料

試験試料形状

ケーブル状態

試験試料長さ 1 m

片方の端から被覆材料を75mm剥がした。また、絶縁材料を端から20mm剥がし導体を露出させ誘電正接試験用端子とした。

4. 試験試料の加速劣化

上記3項の要領で作成した試験試料を、空气中で、放射線劣化、熱放射線複合劣化及び熱劣化の3つ条件で加速劣化を行い、加速劣化期間中に6回測定した。

劣化条件は表2ないし4の通りである。

表2 絶縁材料 (EPR) 加速劣化条件
(引張試験, 酸化誘導試験, 熱重量分析, 超音波伝播時間測定)

放射線	線 ⁶⁰ Co	
	照射線量率	650・200・85・40 Gy/h
	室温	20
	劣化時間	最大 6900時間
熱 + 放射線	線 ⁶⁰ Co	
	温度/照射線量率	40 / 240・99 Gy/h 60 / 236・103 Gy/h
	劣化時間	最大 6900時間
熱	温度	100・110・120
	劣化時間	最大 7100時間

表3 被覆材料 (CSPE) 加速劣化条件
(引張試験, 熱重量分析, 超音波伝播時間測定)

放射線	線 ⁶⁰ Co	
	照射線量率	780・200・85・40 Gy/h
	室温	20
	劣化時間	最大 6900時間
熱 + 放射線	線 ⁶⁰ Co	
	温度/照射線量率	40 / 295・109 Gy/h 60 / 289・120 Gy/h
	劣化時間	最大 6600時間
熱	温度	100・110・120
	劣化時間	最大 6000時間

表4 被覆材料 (PVC) 加速劣化条件
(引張試験, 熱重量分析, 超音波伝播時間測定)

放射線	線 ^{60}Co 照射線量率 780・200・85・40 Gy/h 室温 20 劣化時間 最大 6900 時間
熱 + 放射線	線 ^{60}Co 温度/照射線量率 40 / 295・109 Gy/h 60 / 289・120 Gy/h 劣化時間 最大 2300 時間
熱	温度 90・100・110 劣化時間 最大 4500 時間

表5 ケーブル状態試料加速劣化条件
(表面硬さ試験 (indenter), 誘電正接試験)

放射線	線 ^{60}Co 照射線量率 130・85 Gy/h 850 Gy/h(ケーブル中央部) 室温 20 劣化時間 最大 3900 時間
熱 + 放射線	線 ^{60}Co 温度/照射線量率 60 / 75 Gy/h 劣化時間 最大 3900 時間
熱	温度 100 劣化時間 最大 3900 時間

5. 試験要領

5.1 引張試験

引張試験は常温で, 引張速度を絶縁材料は 200mm/min, 被覆材料は 100mm/min で測定し, 1 バッチの試験は試験片 5 個の平均から求めた。

5.2 酸化誘導温度試験 (OITP)

酸化誘導温度試験⁽⁷⁾は, 示差走査熱量計を使用し試験試料の温度を一定速度で上昇させて, 試験試料の発熱開始時の温度を測定する。

試験試料の量は約 10mg 使用し, 10 /min の速度で昇温した。発熱開始温度は, 基線からの偏差が 0.1W/g に達する点の曲線に対する接線と基線との交点から求めた。

この試験に使用する装置は, 被覆材料の PVC 及び CSPE を加熱する際に発生する塩素ガスによって, 装置が腐食されるためこれらの材料については試験をしなかった。

5.3 酸化誘導期間試験 (OIT)

酸化誘導期間試験⁽⁷⁾は, 示差走査熱量計を使用し, 試験試料を下記に示す温度で保持し発熱開始までの時間を測定する。

試験試料の量は, 約 10mg 使用した。パージガスは最初, 窒素を使用し, 試験温度よりも 10 低い温度までは 50 /min で昇温し, その後, 試験温度まで 5 /min で昇温する。試験温度になれば, パージガスを窒素から酸素に切り替える。

発熱開始時間は, 基線と基線からの偏差が 0.02W/g に達する点の曲線に対する接線との交点から求めた。

この試験に使用する装置は, 被覆材料の PVC 及び CSPE を加熱する際に発生する塩素ガスによって, 装置が腐食されるためこれらの材料については試験をしなかった。

試験温度 (初期の発熱開始時間が 20 分から 30 分になる温度を選んだ)

ケーブル	絶縁材料 (EPR)
FR-PSHV	185
FR-CPSHVS	175
FR-CPHS	190

5.4 熱重量分析 (TGA)

熱重量分析⁽¹⁾は, 熱重量分析計を使用し試験試料の温度を一定速度で上昇させて, 試験試料の重量が 5% 低下した時の温度を測定する。

試験試料の量は約 15mg 使用し, パージガスは酸素を使用して, 10 /min の速度で昇温し測定した。

5.5 超音波伝播時間測定（回折SH波）

超音波伝播時間測定⁽⁸⁾は、東芝タンガロイ(株)製材料表面音診機USH-Aを用い、プローブ（1.6MHzのSH波）を使用して、超音波のケーブル材料内の伝播時間の計測をする。

5.6 誘電正接試験（tan δ）

誘電正接試験⁽⁶⁾は、Electro Scientific社製Video Bridge2160を用い、導体と遮へい層間で、遮へい層のないケーブルは導体間で、周波数が20Hzから150kHzの範囲で計測する。

- ・積分時間：180 msec
- ・設定時間：5 msec
- ・電圧：1.5 V

5.7 表面硬さ試験（indenter）

表面硬さ試験⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、Ogden社製Indenter Polymer Ageing Monitorを用い、プローブを一定速度でケーブルの被覆材料または絶縁材料に所定の力で押し当て、プローブの押し込み量を計測し、そのカーブの傾きで求める。その比率をIM（indenter modulus）N/mmで表す。

データは、絶縁材料は任意の箇所5点を計測しその平均から求め、被覆材料は長さ方向10点、円周方向3点の計30点を計測しその平均から求めた。

計測条件

被覆材料：力の上限 10 N

測定範囲 4.5 ~ 9.0 N(この間の傾き)

絶縁材料：力の上限 4 N

測定範囲 1.5 ~ 3.5 N(この間の傾き)

測定時のプローブ速度（mm/min）

ケーブル	被覆材料	絶縁材料
FR-PSHV	5	5
FR-CPSHVS	5	5
FR-CPHS	7	5

6. 結果

現在、ケーブルの劣化の指標として、引張試験の伸びを基準としている。5項に記載した6種類の非破壊劣化診断技術による測定結果を、伸びを劣化の指標として比較する。

相異なる加速劣化条件による測定結果を直接比較することはできないので、合成劣化グラフ法を用いる。すなわち、AEA TechnologyのRuddが提唱している時間、温度及び照射線量率の重ね合わせによる移動係数式（1）により、時間依存データの重ね合わせ法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を用いて試験データの劣化時間を移動させ、合成劣化グラフを作成する。

$$a(T, D) = \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \left\{ 1 + kD^x \exp \left[\frac{E_x}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

T ：試験温度（K）

T_{ref} ：基準温度（K）

E ：活性化エネルギー（cal/mol）

R ：気体定数（1.99 cal/mol）

D ：照射線量率（Gy/sec）

k ：モデル定数

x ：モデル定数

まず、(1)式の活性化エネルギー E とモデル定数 k 及び x の値は引張試験結果から求め、引張試験以外の試験結果についてはこの値を使用し、移動係数式（1）により各劣化条件に適用すべき移動係数を算出する。次に、(1)式から算出した移動係数と各劣化条件の劣化時間との積で定義される等価時間を求めて、各データを等価時間に対しプロットして合成劣化グラフを作成する。

具体的には、熱による加速劣化においては、表2ないし4に示したように3種類のケーブルについて、それぞれ3通りの加速劣化温度を選んだ。それらの温度のなかから選んだ特定の加速劣化温度のデータを基準とし、その他の2通りの加速劣化温度に対するデータを時間軸側へ移動し最適な重ね合わせ状態になる各温度の移動係数を求める。また、熱劣化の移動係数式（2）は（1）式から次のように導かれる。

$$k(T) = \exp \left[-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right] \quad (2)$$

次に、アレニウスの関係を使用して、これらの各温度の移動係数值を図1に示すように $1/T$ に対して

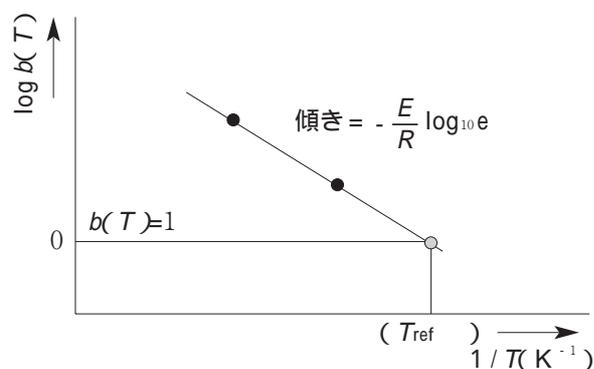


図1 活性化エネルギー (E) の特定図

プロットし、その傾き(3)式から活性化エネルギー E を求める。

$$\text{傾き} = -\frac{E}{R} \log_{10} e \quad (3)$$

また、放射線劣化と熱放射線複合劣化について、熱劣化で使用した特定の温度データを基準とし、各劣化条件のデータを時間軸側へ移動し最適な重ね合わせ状態になる各劣化条件の移動係数を求める。

次に、上記で求めた各劣化条件の移動係数を(1)式に代入し、各劣化条件の移動係数が当てはまるモデル定数 k と x を決める。

表6に各試験データの重ね合わせから求めた移動係数と、この移動係数から求めた活性化エネルギー E とモデル定数 k 及び x の値を示す。

表6 試験結果から求めた移動係数とモデルパラメータ

(a) 絶縁材料(EPR)

劣化条件		移動係数		
温度	照射線量率	ケーブル種別		
	Gy/h	FR-CPHS	FR-PHSV	FR-CPSHVS
20	650	17.3	11.2	10.9
20	200	6.8	3.6	2.8
20	85	3.0	1.28	1.4
20	40	2.0	0.77	0.61
40	240	10.3	4.0	3.3
40	99	9.6	3.9	2.9
60	236	4.5	1.3	1.4
60	103	4.8	1.35	1.5
100	0	1.0	0.35	0.5
110	0	3.2	1.0	0.6
120	0	7.5	1.7	1.0
モデルパラメータ				
E (kcal/mol)		29	15	15
k (s/Gy)		180	56	52
x		0.95	1	1
T_{ref} (K)		373	383	393

(b) 被覆材料(CSPE, PVC)

劣化条件		移動係数		
温度	照射線量率	ケーブル種別		
	Gy/h	FR-CPHS (CSPE)	FR-PHSV (PVC)	FR-CPSHVS (PVC)
20	780	0.26	8.8	7.6
20	200	0.081	3.6	2.6
20	85	0.043	1.5	1.3
20	40	0.019	1.1	0.83
40	295	0.16	5.8	4.3
40	109	0.23	7.7	6.1
60	289	0.093	3.1	2.4
60	120	0.065	3.1	2.8
90	0	-	1.0	1.0
100	0	0.15	1.5	1.8
110	0	0.45	2.6	2.2
120	0	1.0	-	-
モデルパラメータ				
E (kcal/mol)		27	13	16
k (s/Gy)		4.2	75	75
x		0.88	0.8	0.8
T_{ref} (K)		393	363	363

6.1 引張試験

図2にFR-CPHSケーブルの絶縁材料EPRの伸びの合成劣化グラフを示す。これは、熱劣化条件の温度100℃，線量率0 Gy/hの条件を基準にし、他の劣化条件のデータを移動係数だけ時間軸側へ平行移動させ、重ね合わせたグラフである。

図2に示すとおり、伸びは時間の経過とともに低下し、各劣化条件のデータもよく重なり、バラツキも小さい。

他のケーブルの材料についても、同様の結果であった。

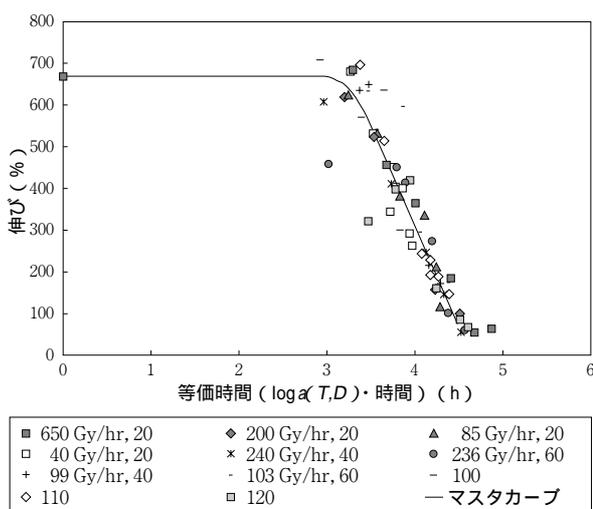


図2 伸び 合成劣化グラフ FR - CPHS EPR 絶縁

6.2 酸化誘導温度試験 (OITP)

図3にFR-CPHSケーブルの絶縁材料EPRの酸化誘導温度の合成劣化グラフを示す。これは、熱劣化条件の温度100℃，線量率0 Gy/hの条件を基準にし、他の劣化条件のデータを移動係数だけ時間軸側へ平行移動させ、重ね合わせたグラフである。

図3に示すとおり、伸びのマスタカーブと比較すると、伸びの低下とは概ね同様の傾向を示してはいるが、熱劣化させた試験試料では、酸化誘導温度は時間が経過するも低下しなかった。また、それ以外の劣化条件の試験試料の結果についても劣化により低下はするが、データのバラツキが大きい。

他のケーブルのEPRについても、同様の結果であった。

この測定手法では、測定対象材料が制限され、劣化特性が劣化条件に依存すること及び合成劣化グラフでの重ね合わせデータのバラツキが大きいことにより、劣化診断技術としては、適用範囲に制限をされる。

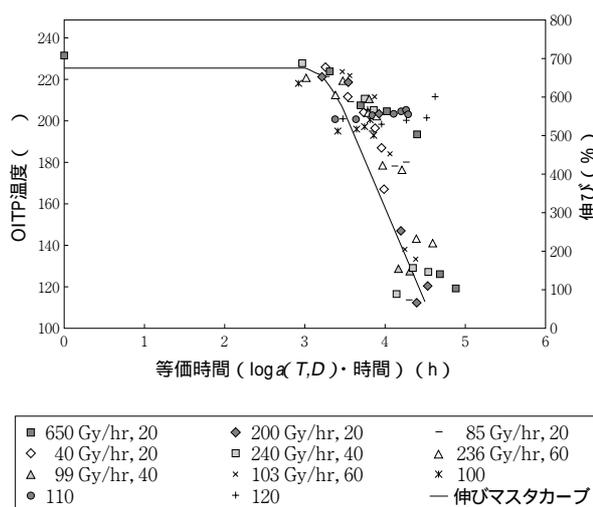


図3 酸化誘導温度 合成劣化グラフ
FR - CPHS EPR 絶縁

6.3 酸化誘導期間試験 (OIT)

絶縁材料EPRの発熱開始時間の初期値を約20分から約30分となるような試験温度で測定したが、劣化時間が長くなると発熱開始時間は求められなかった。これは、劣化の初期の変化は求められるが、劣化末期の変化を求めるのは困難であることを示している。

このため、合成劣化グラフのデータが十分得られなかった。

他のケーブルのEPRについても、同様の結果であった。

この測定手法では、測定対象材料が制限されること及び劣化末期の特性を求めるのは困難であることより、劣化診断技術としては適用が困難である。

6.4 熱重量分析 (TGA)

図4にFR・CPHSケーブルの絶縁材料EPRの熱重量分析⁽¹⁾の合成劣化グラフを示す。これは、熱劣化条件の温度100℃、線量率0 Gy/hの条件を基準にし、他の劣化条件のデータを移動係数だけ時間軸側へ平行移動させ、重ね合わせたグラフである。

図4に示すとおり、伸びのマスタカーブと比較すると、伸びの低下とは概ね同様の傾向を示しているが、放射線劣化(20 ~ 60 Gy/h)させた試験試料は、時間の経過とともにTGA温度は低下しているが、熱劣化させた試験試料は時間が経過してもあまり低下しなかった。また、熱劣化と放射線劣化のデータは相異なる劣化特性を示した。

他のケーブルの材料についても、同様の結果であった。

この測定手法では、劣化特性が劣化条件に依存し、劣化診断技術としては、適用範囲が制限をされる。

6.5 超音波伝播時間測定 (回折SH波)

被覆材料のPVC以外は、今回使用した測定装置の周波数の横波は材料内を伝播しなかった。

図5にFR・CPSHVSケーブルの被覆材料PVCの超音波伝播時間の合成劣化グラフを示す。これは、熱劣化条件の温度90℃、線量率0 Gy/hの条件を基準にし、他の劣化条件のデータを移動係数だけ時間軸側へ平行移動させ、重ね合わせたグラフである。

図5に示すとおり、伸びのマスタカーブと比較すると、伸びの低下とは概ね同様の傾向を示しているが、データのバラツキが大きい。

他のケーブルのPVCについても、同様の結果であった。

このため、測定対象材料の制限と合成劣化グラフでの重ね合わせデータのバラツキが大きいことより、劣化診断技術としては適用が困難である。

6.6 誘電正接試験 (tan δ)

図6にFR・CPHSケーブルの絶縁材料EPRの周波数200Hzにおける誘電正接の合成劣化グラフを示す。これは、熱劣化条件の温度100℃、線量率0

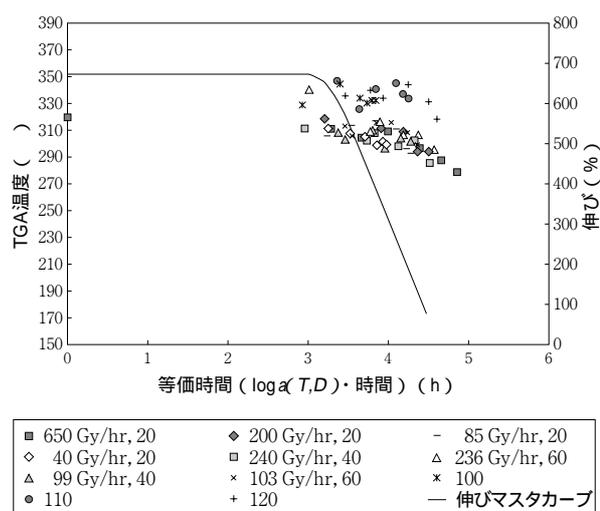


図4 熱重量分析 合成劣化グラフ
FR・CPHS EPR 絶縁

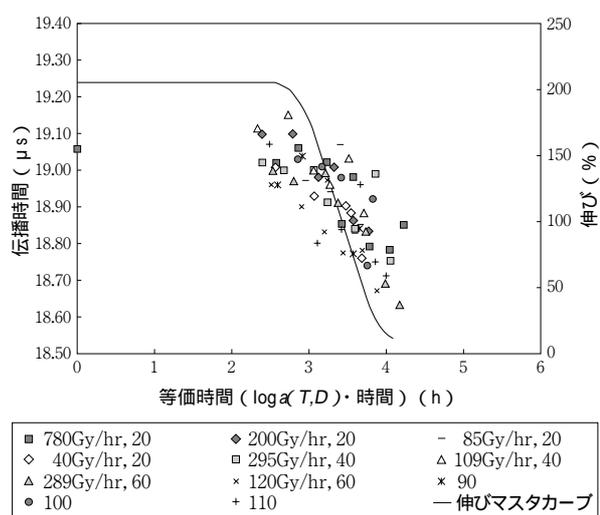


図5 超音波伝播時間 合成劣化グラフ
FR・CPSHVS PVC 被覆

Gy/hの条件を基準にし、他の劣化条件のデータを移動係数だけ時間軸側へ平行移動させ、重ね合わせたグラフである。

図6に示すとおり、伸びのマスタカーブと比較すると、伸びの低下と概ね逆の傾向を示し、時間の経過とともに大きくなる。また、劣化条件の温度が60℃以上では時間が経過すると極端に低下した。

図7にFR・CPHSケーブルの絶縁材料EPRの誘電スペクトルを示すが、誘電スペクトルのピーク値は劣化とともに低い周波数側へ移動している。特に熱

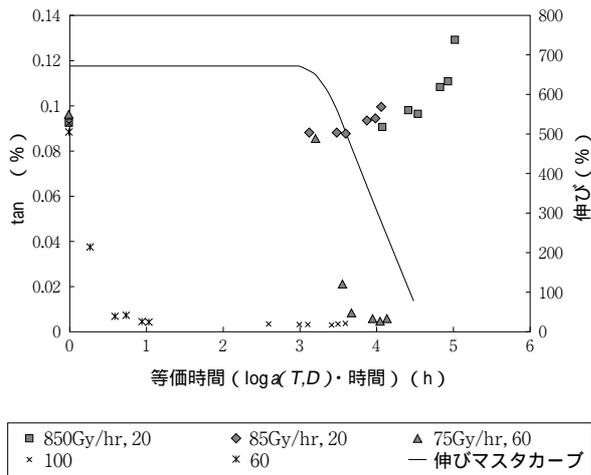


図6 誘電正接 合成劣化グラフ FR-CPHS EPR 絶縁 (core 10 to screen at 200Hz)

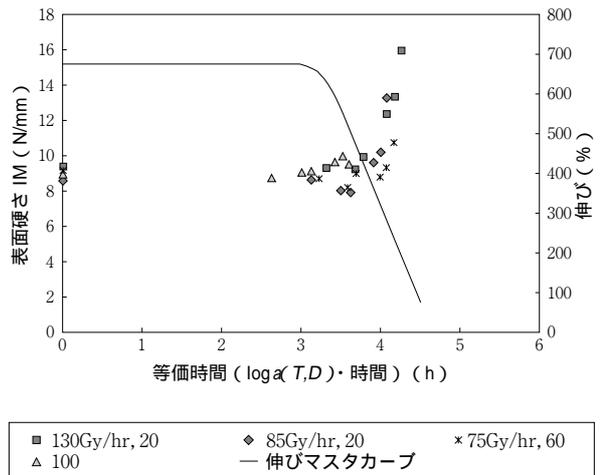


図8 表面硬さ (indenter) 合成劣化グラフ FR-CPHS EPR 絶縁

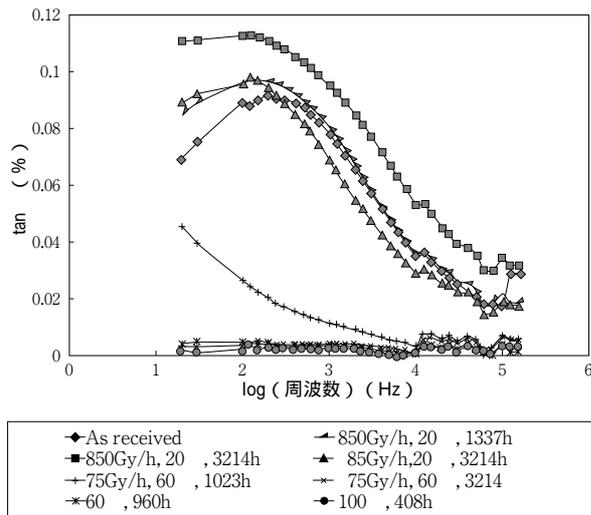


図7 誘電スペクトル FR-CPHS EPR 絶縁

による劣化の移動が大きい為である。

他のケーブルについても、同様の結果であった。

この測定手法では、劣化条件が制限され、劣化診断技術としては適用が困難である。

6.7 表面硬さ試験 (indenter)

図8にFR-CPHSケーブルの絶縁材料EPRの表面硬さの合成劣化グラフを示す。これは、熱劣化条件

の温度100℃、線量率0 Gy/hの条件を基準にし、他の劣化条件のデータを移動係数だけ時間軸側へ平行移動させ、重ね合わせたグラフである。

図8に示すとおり、伸びのマスタカーブと比較すると、伸びの低下と概ね逆の傾向を示し、時間の経過とともに大きくなる。また、データのバラツキは小さい。

他のケーブルの材料についても、同様の結果であった。

このため、劣化診断技術として十分使用可能である。

7. 結論

発電所の現場で使用する低圧ケーブルの非破壊劣化診断技術としては、伸びとの相関性があり、ケーブルの測定対象材料に制限のないこと、また、劣化条件の制限がないこと、及び合成劣化グラフのデータのバラツキが小さいことの諸条件から表面硬さ (indenter)³⁾⁴⁾⁵⁾による診断法が最も有効である。

8. 謝辞

本研究の試験には、AEA TechnologyのBurnayの多大な御協力に対し感謝致します。

文献

- (1) 神村誠二 柳生秀樹 大西隆雄 日馬康雄
川上和市朗, 熱重量分析によるポリ塩化ビニ
ルの劣化診断法, 電気学会, 絶縁材料研究会
資料 ELM - 90 - 125
- (2) Literature Review of Environmental Qualification
of Safety-Related Electric Cables, NUREG/CR-
6384, BNL - NUREG - 52480, Vol.1, p.4 - 23,
1996. 4
- (3) S P Carfagno, T A Shook, J B Gardner & G Sliter,
Development of a cable indenter to monitor cable
ageing in-site, Int. Conf. on Operability of
nuclear systems in normal and adverse
environments, Lyon, p.195 - 202, Sep 1989
- (4) J B Gardner & T A Shook, Status and
prospective application of methodologies from
an EPRI sponsored indenter test project,
Proceedings EPRI workshop on Power plant cable
condition monitoring, San Francisco, EPRI
EL/NP/CS - 5914 - SR, Paper 20, Feb 1988
- (5) G J Toman, S Hunsader & D Peters, In-plant
indenter use Commonwealth Edison plants,
Proceedings EPRI workshop on Power plant
cable condition monitoring, San Francisco, Feb
1993
- (6) Determination of long term radiation ageing in
air. Part 3, Procedures for in-service monitoring
of insulating materials, IEC Technical Report,
IEC 1244 - 3, 1996
- (7) K Anandakumaran, J M Braun, R Morra & D J
Stonkus, Characterisation of aged station cable
insulations-comparison of electrical and physical
tests, Proceedings EPRI workshop on Power
plant cable condition monitoring, San Francisco,
Feb 1993
- (8) 福原幹夫 桑野芳行, SH超音波利用による金
属, セラミックス, ポリマーの材料表面診断,
日本材料試験技術協会, 材料試験技術, Vol.42
No 1, 1997年1月
- (9) S . G. Burnay, A Practical Model for Prediction
of the Lifetime of Elastomeric Seals in Nuclear
Environments, ACS Symposium Serises
No.475, Radiation Effects on Polymers, R L
Clough & S W Shalaby, p524-533, 1991
- (10) Determination of long term radiation ageing in
air. Part 2, Procedures for predicting ageing at
low dose rates, IEC Technical Report,
IEC 1244-2, 1996