

空気駆動シリンダーのシール用NBR製Oリング 寿命評価手法の検討

A Study on the Method for Estimating the Life Time of O-Rings Made of NBR
Used in Sealing Air Operating Cylinders

藤井 有蔵 (Yuzo Fujii)* 満田 安正 (Yasumasa Mitsuta)†

要約 原子力発電所の安全に関係する機器の中には密閉性を確保するためにゴム製のOリングを使用しているものが多くある。これらOリングは使用するに従い劣化し、最後には求められる機能を果たせなくなるため、正確な寿命評価に基づき適切な間隔でOリングの取替えを行うことが重要である。本研究では、換気空調システムのダンパー開閉用シリンダー（ダンパーオペレータ）に取り付けられているNBR（アクリロニトリル-ブタジエンゴム）製Oリングを取り上げ、機能が果たせなくなる時期（寿命）について定量的な評価を実施した。寿命評価は以下の手順で実施した。(1) Oリングの劣化に影響を与える主要因が熱酸化反応であることを確認し、Oリングに対し異なる3温度で促進劣化試験を実施した。(2) 促進劣化させたOリングの切断時伸び値に対しアレニウス則が成立することを確認したうえで、これをもとに寿命を推定した。(3) 推定手法の信頼性を確認するために実機で使用されたOリングに対する測定値の伸び値と推定値の伸び値との比較を行った結果、(測定値-推定値)/推定値の平均と標準偏差はそれぞれ11%と8%であった。この結果から推定値は測定値と大きな誤差はなく、この方法でOリングについてはほぼ良い推定が可能であると言える。

キーワード NBR製Oリング, 寿命評価, 促進劣化試験, アレニウス則

Abstract At nuclear power plants, a large number of O-rings made of rubber are attached to safety related machines and apparatus for sealing two metallic components. O-rings degrade during the long term exposure in environmental conditions in use, and finally lose the requested functions. Therefore it is important to exchange them in a proper period based on the precise life time estimation.

This study aimed at to investigate the method for estimating the life time of O-rings made of NBR (acrylonitrile butadiene rubber) attached to the air cylinders which drive the dampers of ventilation systems in nuclear power plants.

It has been conducted as follows : (1)After confirming that the main cause of degradation of O-rings is thermo-oxidation reaction, thermally accelerated aging tests were carried out for O-rings with three different temperatures. (2)It was certified that the elongation values of O-rings obtained by the tests could be fitted by the Arrhenius rule, and then the life time of O-rings was estimated using the Arrhenius rule. (3)In order to validate the reliability of this estimation, we measured the elongation values of the O-rings which had been actually used at nuclear power plants, and compared them to the predicted elongation values obtained by the above estimation. The average and standard deviation of the values which is calculated by the equation{(measured value-predicted value)/ predicted value}are 11% and 8%, respectively and there are small errors between the measured value and the predicted values. As a result we can judge that good estimation of life time of O-rings can be done by the above method.

Keywords O-ring made of NBR, estimation of life time, thermal acceleration aging test, Arrhenius rule

1. はじめに

原子力発電所の換気空調系統ではダンパーを開閉するために約300個の空気シリンダー方式の駆動機構（ダンパーオペレータ）が設置されており、密閉性を

維持してピストンが摺動出来るようピストンヘッドにNBR（アクリロニトリル-ブタジエンゴム）製のOリングが取り付けられている。

換気空調系統のダンパーは必要時に放射性物質を建屋内に保持する等安全上重要な役目を持っている

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株)

ことからOリングは劣化が進み、密閉性等の求められる機能が維持できなくなる前に取替えを行う必要がある。

一方、原子力発電所に使われているOリングの運転中における損傷原因の中にはOリング取り付け時の作業ミスに起因するものもあることから、必要以上のOリングの取替えは損傷原因発生を増やす可能性がある。

これらの点から、Oリングに求められる機能が維持できなくなる期間（寿命）を定量的に求めた上でOリングの使用期間を適切に設定することは原子力発電所の安全確保の点から重要である。

ゴムの寿命を定量的に求める手法としては、ゴムの劣化に影響を与える要因についてその影響の程度を実際より厳しくした促進劣化試験を実施し、試験結果から実際の使用条件での寿命を推定する手法をとる場合が多い。劣化の要因のうち一般的に影響の大きい熱の促進劣化方法についてはJIS-6257に示されており、寿命評価の方法として熱劣化に注目した場合にはアレニウス則、疲労劣化についてはマイナー則等がある。しかしこれらの手法で精度良い評価を行う場合以下の課題がある。

- (1) Oリングの劣化に影響を与える要因にはさまざまなものが考えられることから、それらの影響の程度を確実に把握するとともに促進劣化試験を行う場合は劣化に大きな影響を与える要因に注目した方法をとる必要がある。
- (2) ダンパーオペレータはさまざまな場所に取り付けられていることから、劣化要因が個々のOリングへ与える影響の程度は異なる。従ってOリングの劣化程度を統一的に評価できる適切な指標を選び、当該指標による寿命基準を定める必要がある。
- (3) 促進劣化試験及びその結果に基づき実機使用条件での寿命を推定する際にはさまざまな誤差が含まれてくることから、それらを寿命評価の中で適切に考慮する必要がある。

本研究ではこれらの課題に対応するために以下の検討を行い、正確な寿命評価をめざした。

- (1) ゴムの劣化要因としては使用環境要因、薬品等の化学品による要因及び機械的要因が考えられる。ダンパーオペレータOリングの劣化については文献調査及び実機使用条件の確認により熱酸化反応の影響が大きく、Oリングに塗布されているグリスの影響等も考慮すべきであると判断し

た。そこで促進劣化試験はグリスを塗布したOリングについて加熱により促進劣化させる手法で実施し、その結果にアレニウス則の適用性を確認したうえで、実際の使用条件での寿命を評価した。

- (2) 劣化要因の主体が熱酸化反応であることから劣化指標として引張試験での切断時伸びおよび硬さを選んだ。また、両者の測定値の相関に基き劣化指標の妥当性を確認した。寿命基準値については熱劣化評価で一般的に使われているものを使用するが、当該Oリングの実質的な使用限界に関する情報を得るために加熱可能なシリンダーを使用して劣化させたOリングについて摺動試験を実施し、機能維持の確認を行った。
- (3) 促進劣化試験では供試サンプル数を増やしてゴム特性のバラツキによる影響を減らすとともに寿命推定の信頼性を確認するため発電所で実際に使用されたOリングについて劣化状態（切断時伸び等）の測定を行い、推定値との比較を行った。

以上を踏まえ、検討は図1のフローで実施した。

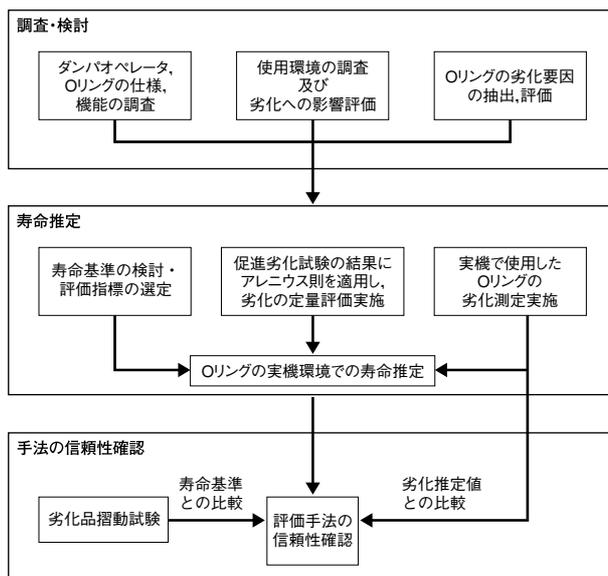


図1 Oリング寿命評価フロー

2. ゴムの劣化要因

一般にゴムは環境要因、薬品類、機械的要因等により劣化が進む。環境要因としては熱、光、酸素、オゾン、放射線、動的疲労等があり、薬品類では油や溶剤により膨潤や抽出が起こる。また機械的要因としては圧縮・引張り応力や摩耗等が考えられる。

劣化要因の中で一般的な環境において最も重要な劣化プロセスは酸素の自動酸化劣化反応による高分子の架橋、主鎖切断である。

その他の劣化要因も独自の影響を与えるのに加え、自動酸化劣化反応を促進することにより影響を与える部分が多い。

ダンパーオペレータのOリングの劣化要因は一般環境での劣化を中心に薬品類については摺動摩擦低減のために塗布されたグリスが考えられる。また、応

力、磨耗については半径方向及び円周方向圧縮力、ピストンの摺動時にシリンダー内面との摩擦が生じ、それによる発生する応力および接触面の磨耗が考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。

各要因がOリングの劣化にどのような影響を与えるかについて表1に示す。

さらに表1で抽出した劣化要因がダンパーオペレータの駆動性能に影響を与える可能性を表2により確認した。

表1 ゴム劣化要因のOリングへの影響

劣化要因	劣化への影響	ダンパーオペレータOリングへの影響	
酸素(空気)	酸化劣化反応をおこす。他の劣化要因(熱、光等)が付加されると反応が促進される。	影響を考慮する必要がある。シリンダー内は加圧されており、酸化劣化が促進される可能性を検討する必要がある。	◎
オゾン	引張り応力がかかった状態でき裂を発生させる。	ダンパーオペレータは屋内設置でありオゾンは少ない。Oリングへの引張り応力はほとんどない。	×
熱	熱自体の劣化作用とともに酸化劣化反応を促進する。	ダンパーオペレータ設置場所の温度はさまざまであり、劣化への影響も異なる。	◎
光	光自体の劣化作用とともに酸化劣化反応を促進する。	Oリングはシリンダー内に設置されており光の影響は無い。	×
放射線	放射線がゴムの分子を切断する等の影響を与えるほか酸化劣化との相乗効果もある。	ダンパーオペレータは放射線を受ける場所にも設置されており影響の評価が必要。	○
グリス	グリスがゴムの分子の中に入り込み膨らませる(膨潤)等の影響が考えられる。	グリスをOリング及びシリンダー内面に塗布しておりこの影響を考慮する必要がある。	◎
引張りまたは圧縮応力	引張り状態の場合オゾン劣化によるき裂が促進される。また劣化に伴い変形が起こる。	引張り、圧縮とも応力的には小さいことから影響は少ない。	×
繰返し応力による疲労	ゴムの分子が切れる等の影響を受ける。	グリス塗布によりOリングとシリンダー間の摩擦力は少なく影響は少ないと考えられるが摺動回数を踏まえ検討要。	○
摺動時の摩擦による磨耗	磨耗によりゴムの表面が機械的に削り取られる。	グリスの膜によりOリングはシリンダーと直接接触しないようにしているが摺動回数を踏まえ検討要。	○

- ◎：影響が大きく、十分な評価が必要
- ：影響を与える可能性があり、実機状況を踏まえ検討が必要
- ×

表2 ダンパーオペレータの機能に影響を与えるOリングの劣化要因

機能の低下	機能低下の要因	機能低下の要因となる特性変化	対応する劣化要因	発生の可能性(劣化要因評価に基き判断)
ピストンが空気注入に伴う動きをしない	駆動用空気の漏洩	Oリング表面の磨耗	磨耗	検討要
		Oリング表面の傷	オゾンによるき裂	可能性は少ない
		Oリング弾性低下・硬度上昇	・酸化劣化に関連するもの ・繰返し応力 ・化学反応を起こさせる環境要因	検討要
		Oリングの軟化	グリスによる膨潤	検討要
	Oリングシリンダー内面間の摺動摩擦大	Oリングの表面割れ	摩擦に伴う引張り応力によるき裂	可能性は少ない
			オゾンによるき裂	可能性は少ない
		Oリングの軟化変形	グリスによる膨潤	検討要

表1, 表2から判断すると, 劣化要因のうち熱と酸素による酸化劣化反応が重要な要因となる他グリス, ピストンの摺動磨耗・疲労及び放射線については具体的な使用条件を考慮の上影響を検討する必要があるといえる。一方, 光, オゾンの劣化への影響はほとんどない。

3. ダンパーオペレータ及びOリングの仕様

ダンパーオペレータは換気空調系統のファン出入り口に取り付けたダンパーの開閉を行うものである。

本研究で対象としたものは関西電力(株)の原子力発電所(主として格納容器内及び補助建屋内)で使用されているダンパーオペレータであり, シリンダー内に加圧された空気を注入し, 内部のピストンを駆動する仕組みとなっている。(図2)

シリンダー, ピストンヘッドともに材料は鋳鋼であり, シリンダーの内面は硬度の高いクロムメッキが施してある。Oリングはピストンヘッドに装着され, シリンダー内面との密封性を維持している。

Oリングに使われているゴム材はNBRで基本仕様は中高ニトリル, 硫黄架橋である。基本的な機械的特性として切断時伸び値が355%, 引張強さが18.14MPa, 硬さ(JIS Hs)が71(いずれもメーカー実測値)であり, また限界温度範囲は-30℃~120℃となっている。

Oリングの形状仕様は内径約84.4mm, 外形約100.6mm(平均値)で, 断面はシリンダー摺動用の形状としてだるま型になっている。Oリングはピストンヘッドの溝(直径85mm)にグリスを全面に塗布された状態ではめ込むようになっている。装着状態ではOリングの内輪部分が円周方向に微少な引張り力(伸び率:0.7%)を受ける。また, ピストンをシリンダーに挿入した場合, シリンダー内面(内径100mm)とピストンヘッド溝部の直径の差が15mmであるのに対しOリングの内外径差は約16.2mmあるため, Oリングは若干の半径方向圧縮力(圧縮率約7%程度)を受ける。ダンパーの開閉は駆動用圧縮空気(圧力0.38MPa)の注入, 排出により行われ, ピストンは最大約100mm摺動する。

Oリング及びシリンダー内面には摺動をスムーズに行わせるため鉱油系のグリス(商品名マルチノック2)が塗布されている。また, Oリングメーカーではグリスをつけた状態でのOリング使用限度のめやすは累積距離1,000kmとしている。

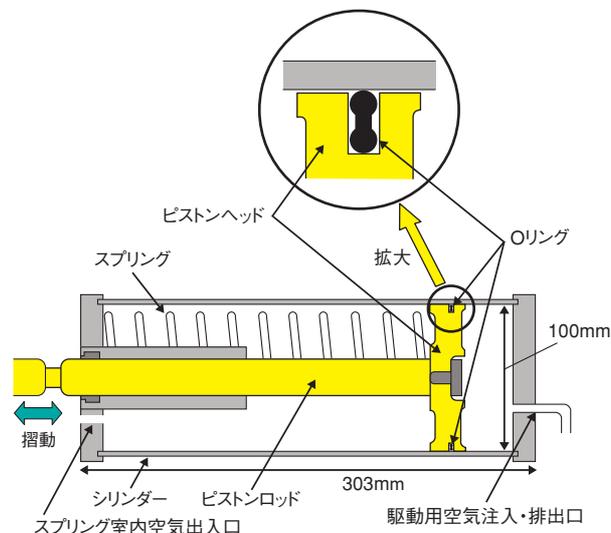


図2 ダンパーオペレータの断面図

4. 劣化要因の影響検討

Oリングの劣化に影響を与える可能性のある温度, 空気圧, グリス, 摺動及び放射線についてOリングの使用環境を調査し, 影響を検討した。

4.1 温度条件

原子力発電所でダンパーオペレータOリングが使用されている場所のうち比較的温度の高い格納容器内について年間の温度変化を図3に示す。

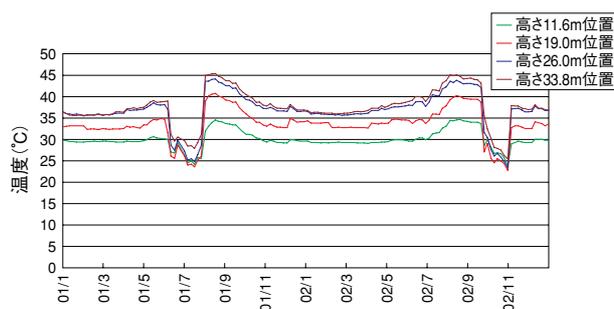


図3 高浜3号機格納容器温度

格納容器内には原子炉等の発熱物があることから一般に屋外よりも温度が高く, 昼夜, 季節および運転の有無により温度が変化している。図3では最高温度は45℃を越えている場所もあり, 年間の平均でも40℃に近くまで達しており, 現場温度によるOリングの劣化への影響は大きいと考えられる。温度の影響を定量的に見るため, Oリングの促進劣化試験を行い, その結果をアレニウス則に当てはめて実際に設置されている場所の温度での劣化進展の評価を行う

ことが適切と考えられる。

4.2 ピストンの摺動回数

ダンパーオペレータは主にファンの停止、起動に伴いダンパーの開閉を行うが、原子力発電所ではファンの切り替えは基本的に1回/月以下であり、点検・保守、試験等による開閉を含めても20年間で1,000回を上回ることはないと言える。

一方、当該Oリングの使用限度のめやすとしてメーカーでは累積距離1,000kmの範囲内であればOリングは機能を維持できるとしており、摺動距離を100mmとした場合回数は1,000万回となる。実機での摺動回数はこれに比べ極めて少ないことから摺動による磨耗等の機能への影響はないと考えられる。

なお、磨耗の影響が無いことについては使用済みOリングの外観観察及び寸法測定の中で確認する。

4.3 放射線の影響

図4にNBRを含む各種ゴムの放射線照射による劣化程度を示す。NBRでは吸収線量が 10^7 rad以上で影響が出てくるといえるが⁽³⁾、ダンパーオペレータのOリングが使用されている場所の吸収線量は20年累積でも 1×10^6 rad以下であり、放射線照射に伴うNBRの劣化への影響は無視できると考えられる。

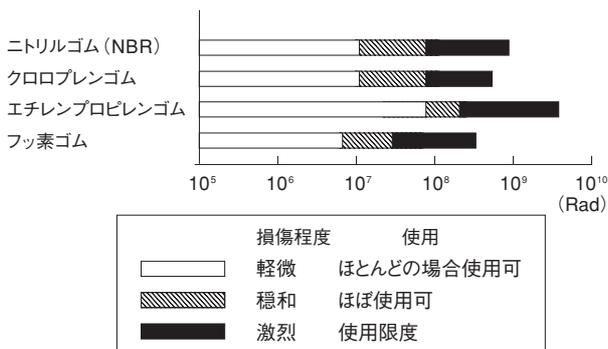


図4 放射線のゴムの劣化への影響⁽³⁾

4.4 駆動空気圧の影響

エアシリンダーのピストンは空気圧で駆動され、その圧力は0.38MPaである。その場合酸素分圧は0.076MPa ($0.38\text{MPa} \times 0.2$)となる。一般的にゴムは純粋酸素の雰囲気下で圧力が高くなると劣化が速く進む。クロロプレンを対象として純粋酸素雰囲気下

圧力を変えた試験結果⁽⁴⁾から判断すると通常の大気圧での酸素圧力に相当する0.02MPa酸素圧での劣化に対し0.076MPaの酸素圧では同一の劣化状態に達する時間が20%程度減少すると推定される。

酸素圧の劣化進展速度への影響はゴムの種類で大きな違いは無いといわれており、NBRについても同様の影響を与えるものと考えられる。しかしながらダンパーオペレータOリングについては以下の点からその影響は低減されるものと考えられる。

- (1) クロロプレンに対する試験は純粋酸素雰囲気下で実施したものである。一般に空気雰囲気下での圧力が増加した場合の劣化への影響は酸素のみの雰囲気における酸素圧力増加による劣化への影響に比べかなり小さくなる。
- (2) 圧縮空気に触れる部分はOリングの半面部分である
- (3) 安全上重要なファンは冗長設計となっており台数の内1/2あるいは1/3は順次停止しているものが多い。停止期間中はダンパーは閉止しており、その場合シリンダー内は大気圧である。

4.5 グリス塗布による影響

グリスのOリング劣化への影響としてはグリスがOリングの内部に侵入することによるOリングの膨潤が考えられる。この影響については促進劣化試験でグリスを塗布したOリングをサンプルとして使用することによりグリスの影響を含めた劣化評価をおこなう。さらに促進劣化試験の中でグリスなしのOリングについても劣化データを採取しグリス塗布のものと比較することによりグリス塗布の影響を確認する。

5. 寿命評価

前節に述べたように熱及び空気による劣化並びにグリスによる劣化を対象に図1に示したステップで寿命評価を行った。

5.1 劣化指標

劣化指標はOリングの劣化に伴う特性変化を定量的に表す尺度となるものであることから劣化を的確に示すとともに実用上比較的簡易にその値を求めることができなければならない。その選定は重要である。また、寿命基準が当該の指標で設定出来ることが必

須である。

ダンパーオペレータのOリングの場合、主な劣化要因が酸化劣化反応によるものであり、機械的な要因による影響が少ないと考えられることから劣化指標として引張特性（切断時伸び、引張強さ）及び硬さを適用するのが一般的であり、促進劣化試験では切断時伸びを基準とすべきと報告されている⁽⁵⁾。

また、寿命基準の考え方については次項に示すが、一般産業界で用いられている寿命の指標は切断時伸びがよく使われる。以上から本検討では切断時伸びを基本的な劣化指標として採用し、硬さ測定は非破壊で実施できることから、硬さを補足的な指標とした。

また、これら2つの指標による測定値の相関をとり、指標の妥当性について確認する。

上記指標のうち切断時伸びについてはJIS-B2401に基き2個の滑車にOリングを装着し、滑車間の距離を広げていく手法により測定した。

なお、切断時伸びに関する値は以下の計算式により求める。

- (1) 切断時伸び (E_B) : 対象Oリングに引張りを加え、切断したときの長さ (I_1) から引張り前の長さ (I_0) を引いたものを I_0 で割ったものを % で示したもの。

$$(E_B = 100 \times (I_1 - I_0) / I_0)$$

- (2) 劣化品切断時伸びの新品切断時伸びに対する相対値 (E_R) : 対象劣化品の伸び (E_1) を新品の伸び (E_0) で割ったものを % で示したもの。

$$(E_R = 100 \times (E_1 / E_0))$$

硬さについては当研究所が英国 A E A 社より導入し、改良したIM (Indenter Modulus) 測定装置を使用した。

IM測定装置はOリングをはさんだ後モジュラスが一定速度でOリングを押し込み、その距離と荷重の比から硬さを求める仕組みとなっている。

以下、簡単のために切断時伸びおよび劣化品の新品に対する相対値をそれぞれ「伸び」および「伸び残率」と呼び、IM測定装置による硬さを「IM値」と呼ぶ。

5.2 Oリングの寿命基準

ダンパーオペレータのOリングの寿命は当該Oリングに要求される機能、すなわちシリンダー内の空気

密閉性の維持、ピストンの円滑な駆動の維持ができなくなった時点である。

そこで寿命基準を確認する方法としてOリングを装着した状態でシリンダーを摺動しながら加熱により促進劣化させる実証試験を行い、機能を喪失した時点での伸び値を求める方法が考えられる。しかしOリングが機能を喪失する劣化程度にはバラツキがあることから少数のサンプルによる実験では信頼性を持った寿命基準値を求めることは難しい。

一方、一般的にゴム成型品の寿命としてバラツキを考慮して安全側に伸び残率が新品の70%あるいは50%をとる場合が多い。

そこで、本研究では一般的な寿命基準と上記の実験による結果を組み合わせた形で寿命基準を検討することとし、第一ステップとして伸び残率50%を寿命基準として寿命評価を行い⁽⁶⁾、第二ステップとして一般寿命基準（伸び残率50%）を超えて促進劣化させたOリングについて摺動試験を行い、ダンパーオペレータのOリングに関して一般寿命基準が余裕を持った基準であることを確認する。

5.3 実機使用品の劣化評価

- (1) 測定対象

原子力発電所で使用したダンパーオペレータのOリング50個について外観観察を実施するとともにOリング幅（(外径-内径)/2）、伸び値、IM値の測定を行った。

また、比較のために4グループの新品（購入時期が異なる）についても同様の測定を実施した。

劣化測定を行った使用済みOリングは異なる9ヶ所のダンパーから採取したものである。環境温度は同一ダンパーに設置されているダンパーオペレータでは大きな違いは無いが、ダンパーが異なると温度も異なってくる。また、使用期間は4サイクル（5.1年）、5サイクル（6.3年）及び6サイクル（7.6年）使用のものが含まれており、同一発電所で同時期に取り出したものであるが、ロットが同一かどうかは確認できなかった。

これら測定対象となった使用済みOリングと新品のOリングを表3.1、表3.2に示す。

- (2) 観察・寸法測定結果

目視観察の結果、使用済み品について表面の傷（特にシリンダー内面と接触している部分の磨耗）、

変色等は見られず、新品との比較で外観上の変化は無かった。

新品及び使用済み品のOリング幅の測定結果について平均値と標準偏差を図5.1に示す。(図5.1以降の図で平均値と標準偏差の表示の仕方は図5.1と同様)

使用済み品のOリング幅は設置場所によるバラツキがあるが、全体の平均では新品と変わらず、いずれもシリンダー内面-ピストンヘッド溝部のギャップに比べ大きな値となっていることから密閉性を保持する能力は十分維持されている。

(3) 伸び値及びIM値測定結果

図5.2, 図5.3に使用済み品、新品の伸び値及びIM値の平均値と標準偏差の使用期間に対する傾向を示す。

伸び値の傾向として使用済み品は新品に対して値が小さくなっており、全体として使用期間が長いほど、また設置場所の温度が高いほど低下傾向が大きいものが多いといえる。

一方、IM値も全体として使用期間が長いほどまた温度が高いほどその値が高くなる傾向が見られる。

標準偏差を比較すると新品のグループごとの伸び値、IM値の標準偏差の平均はそれぞれ20%, 0.18であるのに対し、使用済み品の伸び値、IM値の標準偏差はそれぞれ12%, 0.19となる。(使用済み品グループAの伸び値と新品グループ1のIM値は標準偏差が他のものに比べ非常に大きくなっており、理由は明確ではないがこれらは標準偏差の平均値算定からは外した。)

新品の伸び値が使用済み品の伸び値に比べ大きな値となっている理由としては伸び値はOリングの引張りに対して弱い部分に依存した値をとるため、新品の状態では含有物の場所による偏りが大きくそれがバラツキに影響をあたえているが、使用するにしたがって偏りが分散し平均化してくることから安定した特性になるのではないかと考えられる。

表3.1 測定対象使用済みOリング

設置建屋	Oリング設置場所	Oリング個数	使用期間(年)	設置場所温度(°C)	図5.1~5.3での記号
補助建屋	A	3	5.1	34(最高)	■
	B	4	5.1	34.5(最高)	■
	C	3	6.3	32(最高)	□
	D	5	6.3	32.5(最高)/22.1(平均)	■
	E	3	6.3	34(最高)/16.3(平均)	■
	F	2	6.3	32.5(最高)	■
	G	3	7.6	34(最高)	■
	H	3	7.6	30.5(最高)	■
	I	3	7.6	47(最高)/23.9(平均)	■
補助容器	J	3	6.3	46.6(最高)/38.6(平均)	◆
	K	6	6.3	39.9(最高)/34.0(平均)	◆
	L	4	6.3	33.7(最高)/29.3(平均)	◆
Oリング数21個	M	8	7.6	36.2(最高)/31.2(平均)	◆

(注)
 ・補助建屋最高温度:平成13年7月20日~7月27日の最高値
 ・補助建屋平均温度:平成13年7月20日~平成14年6月22日の平均値
 ・格納容器内最高温度および平均温度:1サイクル(平成13年8月7日~平成14年11月12日)の最高値および平均値
 ・補助建屋についてはダンパーに設置した温度計による。格納容器については既設の温度計記録値から温度計、ダンパーの設置高さを考慮して推定

表3.2 測定対象新品Oリング

グループ	(1)寸法測定個数	(2)伸び値、硬度測定個数	図5.1~5.3での記号	備考
1	11	6	●	グループ1,2について(1),(2)の測定対象Oリングは異なる
2	20	10	●	
3	6	6	●	
4	8	8	●	

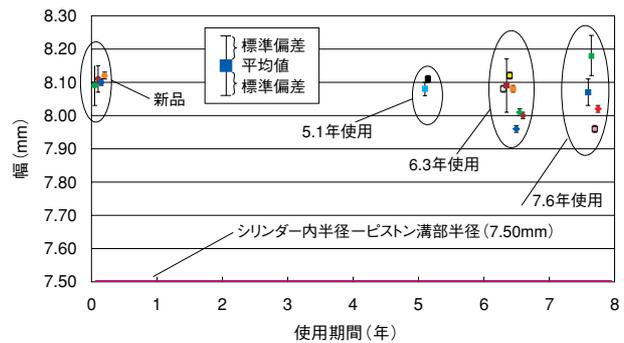


図5.1 実機使用品及び新品幅の変化

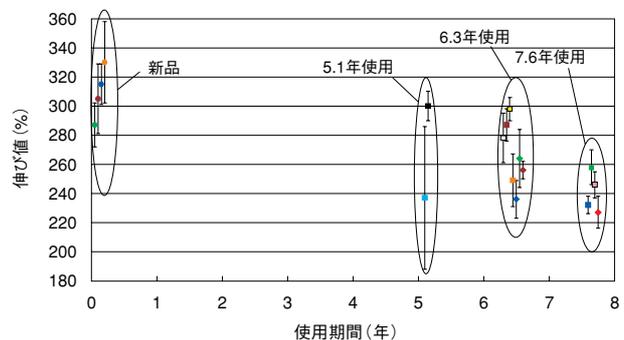


図5.2 実機使用品及び新品伸び値

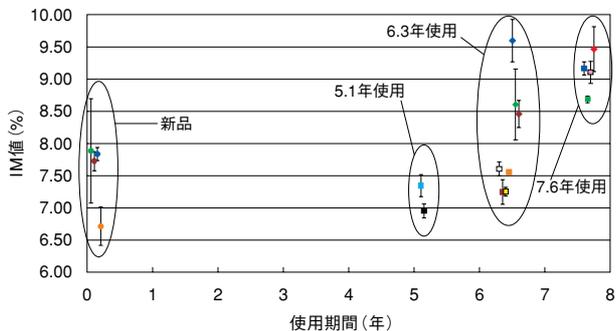


図5.3 実機使用品及び新品IM値

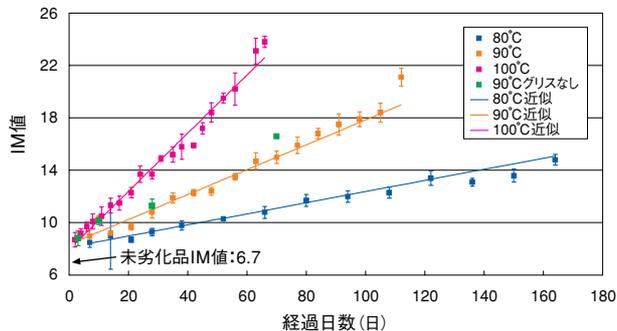


図6.2 促進劣化試験におけるIM値変化

5.4 加熱によるOリングの促進劣化試験

(1) 試験の概要

Oリングの促進劣化試験はグリスを塗布したOリングを恒温槽に収納し、試験温度80℃、90℃、100℃の3温度で加熱し、伸び残率が50%以下になるまで、順次時間経過に従いOリングを取りだして伸び値とIM値を測定した。

精度良く劣化傾向を把握するため1回あたりの取り出しOリングを4サンプルとし、各温度での取り出し回数も15回~20回とした。

また、グリスの劣化への影響を確認するため、グリスを塗布していないOリングについて90℃で促進劣化させ4時点(各4サンプル)の劣化データを採取し、グリス塗布のものと比較を行った

(2) 測定データの傾向

各温度での取り出しごとの伸び残率、IM値の平均値及び標準偏差並びに劣化傾向の近似線を図6.1及び6.2に示す。

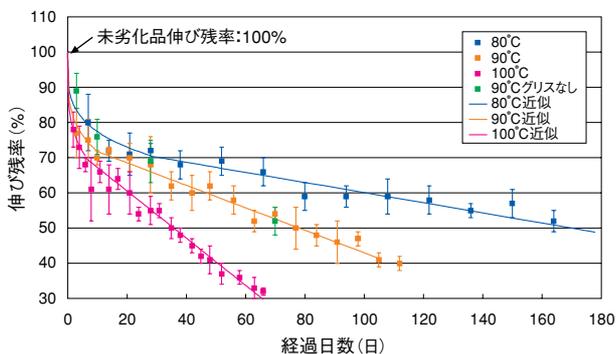


図6.1 促進劣化試験における伸び残率変化

劣化に伴う伸びの変化については各温度とも初期に比較的速く伸び残率が減少し、その後は時間経過に伴いゆっくりと直線的に伸び残率が減少している。

各プロットは近似線からのバラツキが小さく、各温度での劣化傾向も類似していることからデータは信頼できるものと考えられる。

またIM値についても初期に比較的速く上昇し、その後ゆっくりと直線的に上昇しており、近似線からのバラツキ、各温度での劣化傾向も伸び残率と同様である。

熱劣化させたOリングの伸び残率のバラツキをみるとデータ取り出し時期ごとの標準偏差の平均は約4% (伸び値で約12%) であり、劣化にともなう標準偏差の増加は見られなかった。

これは5.3で示した実機使用済みOリングの設置場所毎の伸び値平均(12%)と同じ値である。

以上より複数のOリングを同条件で劣化させた場合の標準偏差は伸び値で12%と考えてよく、劣化の程度が大きなOリングでも伸び値が平均値に比べ36%(3σ)以上小さい値をとることはほとんど無いと言える。

(3) グリス塗布の有無による劣化程度の違い

図6.1及び図6.2にはグリス塗布なしのOリングの伸び残率及びIM値の変化も示している。

図6.1から伸び残率について劣化が進んだ状態ではグリス塗布の有無にかかわらずほとんど変わらないことが分かる。一方、図6.2から判断するとIM値については劣化が進んだ状態でグリス塗布のものの方が小さい値となっていると言える。

一般にグリス等の油類はゴム中に入り込みゴムを膨潤させる性質があり、その場合ゴムの硬度は低くなる。Oリングについてもグリス塗布のものは膨潤が発生し、IM値が低くなったものと考えられる。

(4) 伸び値とIM値の相関

図7に新品, 実機使用済みのOリング及び促進熱劣化させたOリングの伸び値とIM値の相関プロット及び回帰曲線を示す. 回帰曲線からのバラツキを示すR-2乗値を求めると0.953となり各プロットの回帰曲線からのバラツキは非常に小さいといえる.

この回帰曲線に基き伸び残率50% (新品の伸び値を310%として伸び値では155%となる) のIM値を求めると16.0となる.

IM測定は非破壊測定法で, 同一サンプルでの劣化傾向を継続して確認することが出来る利点があり, 伸び値との相関も良いことからOリングに対し有効な劣化指標となり得ることがわかった.

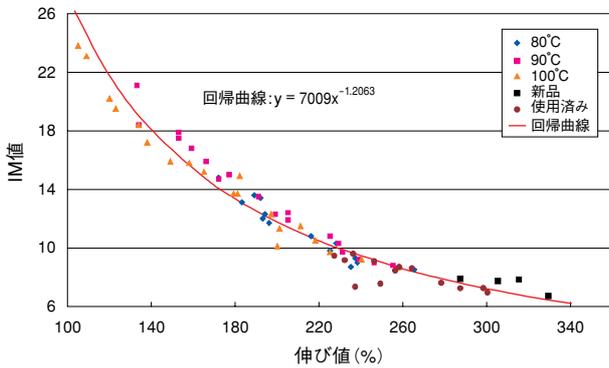


図7 伸び値対IM値

5.5 アレニウス則に基づく実機条件での寿命評価

図6.1に基づき80℃, 90℃及び100℃の3温度で寿命基準 (伸び残率50%) および伸び残率70%に達する時間を求め, アレニウスプロットをおこなった. 図8にアレニウスプロットと近似直線を示すが, プロットは50%, 70%とも良い直線性を示しており, アレニウス則を適用することは妥当と判断できる.

なお, 図8においてT, dはそれぞれ絶対温度及び経過日数である.

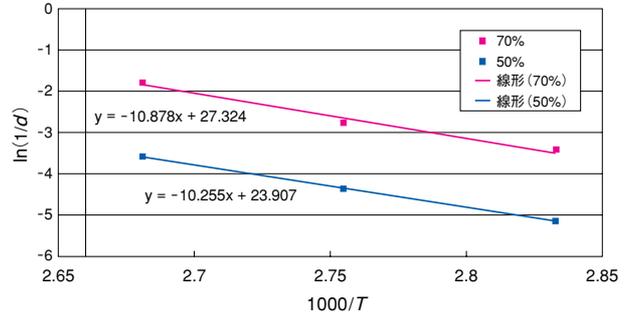


図8 伸び残率のアレニウスプロット

アレニウスプロットから活性化エネルギーを求め, 活性化エネルギーに基き実機温度で伸び残率70%および50%に達するまでの時間を求めた結果を表4に示す.

表4のうち伸び残率50%に至る予想到達時間が実機温度で使用した場合の推定寿命値となる.

表4 活性化エネルギー及び実機温度での到達時間

評価点	活性化エネルギー (cal/mol) (促進劣化試験の結果をアレニウス則に適用し求めたもの)	実機温度での 予想到達時間(年)			
		20℃	30℃	40℃	50℃
伸び残率 70%	21,615	49.5	14.5	4.6	1.6
伸び残率 50%	20,377	180.0	56.7	19.2	7.0

5.6 実機使用済みOリングの測定伸び値と推定伸び値比較

表3.1の実機で使用されたOリングのうち長期の温度測定値が採取されているものについて測定の伸び値と5.5の方法を用いて設置場所の実効温度に基づき推定した伸び値との比較を図9に示す. 測定の伸び値は設置場所毎の平均値である.

また, 推定の伸び値は実機温度での劣化傾向が促進劣化試験のものと同じ傾向になると仮定して伸び残率70%での寿命値から内挿により求めた.

図9において (測定値-推定値)/推定値の平均および標準偏差はそれぞれ11%, 8%となり推定の伸び値は測定の伸び値と大きな誤差はなく, 5.5の方法でほぼ良い推定が可能であるといえる.

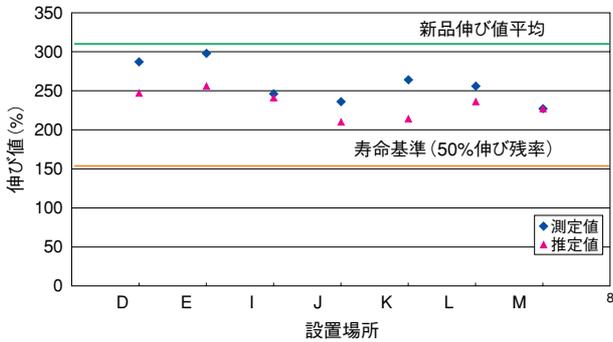


図9 測定伸び値と推定伸び値の比較

6. 劣化の進んだOリングの摺動試験

寿命基準（伸び残率50%）を超えて劣化が進んだ状態でOリングをピストン内で摺動させ、50%伸び残率を超えて劣化した状態でもOリングが十分機能することを摺動状況および劣化特性に基づき確認する。

(1) 試験装置

試験は現地設置のものと同様のシリンダーを使用し、表面に取り付けた電熱線により、内部のOリングを加熱して促進劣化させる。さらに駆動用空気についてもヒータで加熱し、空気の注入による温度低下を防いでいる。

(2) 試験方法

- ①試験装置3台にそれぞれグリス塗布のOリングを装着し、加熱しながら空気圧によりピストンを駆動させその劣化に伴う挙動変化の有無を確認する。
- ②摺動試験終了後Oリングの寸法変化（幅）、IM値を測定するとともに摺動面の拡大観察を行う。
（摺動試験後Oリングの各種測定のためピストン溝から取りはずす際、Oリングに局所的な引っ張りがかかる場合がある。劣化が進み弾性が低下したOリングではこの影響により伸び値測定の信頼性が十分でない可能性があるためIM値による測定とした。）

(3) 試験結果

Oリング3組9サンプルに対する試験結果を表5に、また摺動面の状態の例として表5の2-2のOリングの拡大写真を図10に示す。

表5 劣化の進んだOリングの摺動状況及び特性変化

Oリング NO.	摺動回数	IM値	寸法 (mm)	表面状況	摺動状況
1-1	45,000	15.4	7.79	・シリンダー内面との接触面が摩擦・圧縮力により変形し、平坦化している。 ・シリンダー内面との異常なこすれ跡は見られない。	・摺動の時間経過が進むに従い摺動速度が上昇する傾向であり、機能劣化は見られない。 ・摺動速度の変化は摺動によるOリング接触面の摩擦、シリンダーとのなじみ等により摺動抵抗が低下したものと考えられる。
1-2		50.5	7.60		
1-3		19.9	7.76		
2-1	240,000	27.5	7.72	・シリンダー内面との異常なこすれ跡は見られない。	・摺動の時間経過が進むに従い摺動速度が上昇する傾向であり、機能劣化は見られない。 ・摺動速度の変化は摺動によるOリング接触面の摩擦、シリンダーとのなじみ等により摺動抵抗が低下したものと考えられる。
2-2		33.5	7.69		
2-3		25.7	7.74		
3-1	18,000	46.1	7.67	・シリンダー内面との異常なこすれ跡は見られない。	・摺動の時間経過が進むに従い摺動速度が上昇する傾向であり、機能劣化は見られない。 ・摺動速度の変化は摺動によるOリング接触面の摩擦、シリンダーとのなじみ等により摺動抵抗が低下したものと考えられる。
3-2		20.6	7.68		
3-3		24.9	7.65		

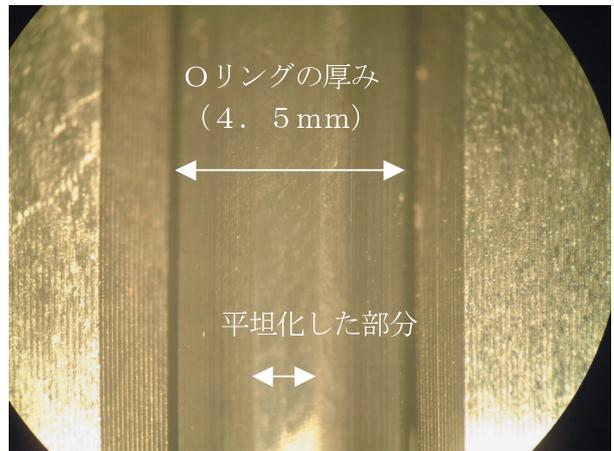


図10 劣化Oリング（2-2）の外表面の拡大写真

表5の各Oリングの摺動回数は実機で20年間に想定される摺動回数に比べ10倍以上の回数となっており、IM値は15～50で寿命基準レベル以上に劣化が進んだものとなっている。

摺動状況については時間経過にともなう摺動速度の減少等の機能低下は見られなかった。（摺動速度についてはOリングの微少な摩耗・変形、シリンダーとのなじみ等摺動抵抗の低下によると考えられる開閉速度の上昇が見られた。）

Oリング幅は新品（8.1mm）に比べ減少しているが、ピストンヘッド溝部とシリンダー内面とのギャップ幅（半径で7.5mm）より大きく密閉性を確保できる幅となっている。

拡大写真において劣化品ではシリンダー内面との接触面が摩擦、圧縮により多少変形しているが表面は平坦化しており、摺動方向の異常なこすれ跡は見られない。

これらの状況から見てOリングは設定した寿命基準（50%伸び残率）を超えて劣化し、摺動回数も実機で経験する回数を超えて使用した場合でも機能を十分維持できているといえる。

本試験結果からOリングの実質的な寿命を正確に推定することはデータ数が少ないことから難しい。しかしながら50%伸び残率（伸び値で155%）の基準は実質的な寿命に対し十分な余裕があるといえ、50%伸び残率の基準に基づき実機温度でのOリングの（時間）寿命の推定を行っておけば、劣化速度の速いOリングでも実質的な寿命を超えて劣化する可能性はほとんど無いと言える。

(5.4で示したように同一条件でのOリングの劣化のパラツキは伸び値で36%を超えることはない。従って劣化速度の速いOリングでも50%伸び残率寿命基準（伸び値155%）に対し伸び値で36%低下した119%以下になることはない。119%伸び値に対するIM値は22.0であるが摺動試験結果からみてこの程度のIM値であればOリングの健全性は維持できるといえる。)

7. まとめ

- (1) ダンパーオペレータOリングの主要な劣化要因は熱酸化反応である。
- (2) 80℃, 90℃, 100℃での促進劣化試験から求めた伸び残率のアレニウス・プロットは直線性を維持している。アレニウス則に基づき実機温度での寿命を求めた結果40℃で19.2年, 50℃で7.0年となった。
- (3) 劣化に伴うIM値の変化は伸び値の変化と良い相関があり, IM値は劣化指標として有効であることが確認できた。
- (4) 実機で使用したOリングについて測定した伸び値（同一環境条件での平均値）とアレニウス則により推定した伸び値と比較すると（測定値－推定値）/ 推定値の平均, 標準偏差はそれぞれ11%, 8%となり, 推定値と測定値に大きな誤差はない。
- (5) 同一環境条件で劣化させたOリング伸び値のパラツキはせいぜい36%であり, このパラツキは摺動試験によって求めた実質的な寿命の余裕で十分吸収されると考えられる。
- (6) 以上より本研究で促進熱劣化試験にアレニウス則を適用して求めた活性化エネルギーに基づきOリング設置場所の実効温度を使うことによりOリングの寿命についてほぼよい推定が可能であると言える。

謝辞

本研究を実施するに際しさまざまな点からアドバイスを頂いたARアキバリサーチ秋葉光雄所長に対し感謝の意を表します。

文献

- (1) 秋葉光雄, 林茂吉, ゴム・エラストマーの劣化と寿命予測, ラバーダイジェスト社, (2000).
- (2) 早川 淨, 高分子材料の寿命評価・予測法, アイピーシー, (1994).
- (3) 森田, 昭和電線電纜レビュー, 19, (1), 69, (1969).
- (4) 八木敏明, 瀬口忠夫, 吉田健三, 電線絶縁材料の加速熱劣化と放射線酸化の複合劣化, JAERI-M 86-043, p24 (1996).
- (5) 小谷悌三, 寺本俊夫, ニトリルゴムの耐熱性と配合設計, ゴム協会, Vol.53, (1980)
- (6) J.Dlab, F.Koutny, Thermo-oxidative ageing of rubber and durability of the products, *plasty a kaucuk*, 21, No.11, p336 (1984).