高経年 GIS における O リングの劣化特性

正員 皆川 忠郎* 正員 永尾 栄一*
 正員 土江 瑛* 正員 米沢比呂志**
 正員 高山 大輔** 正員 山川 豊**

Degradation Characteristics of O-rings on Highly Aged GIS

Tadao Minagawa*, Member, Eiichi Nagao*, Member, Ei Tsuchie*, Member,
 Hiroshi Yonezawa**, Member, Daisuke Takayama**, Member, Yutaka Yamakawa**, Member

Owing to increasing number of highly aged GIS, the investigation of the remaining lifetimes of those systems are becoming more important. Because a lot of O-rings are used in GIS, the study of degradation mechanism and life-time estimation method of O-ring is essential. In this paper, the information about O-ring degradation mechanism is described, and the statistical method for estimating the remaining lifetime of O-ring is proposed. The degradation of O-ring is mainly subject to chemical reactions triggered by oxygen. Because there are many factors influencing those chemical reactions, the dispersion of degradation rates of O-rings in GIS is very large. Consequently the statistical analysis is one of the effective techniques for lifetime estimation of O-rings in GIS.

キーワード：高経年 GIS，O リング，劣化，ゴム

Keywords: highly aged GIS, O-ring, degradation, rubber

1. はじめに

近年，送変電機器の高経年化が進展する中，電力コスト低減への要請の高まりを背景として，機器の延命化および更新時期の適正化が求められている。加えて機器のライフサイクルコスト低減の観点から，保守・点検の合理化が求められており，従来の TBM (Time Based Maintenance) から，CBM (Condition Based Maintenance)，さらには RCM (Reliability Centered Maintenance) への移行が活発に検討されている。このような状況において，従来同様に信頼性の高い電力供給を維持するためには，高経年機器に対する詳細な劣化評価技術，寿命推定技術が不可欠となる。

GIS-GCB 等のガス絶縁機器では，ガスシール性能は機器寿命に大きく影響する要因の 1 つであるため，O リング寿命についても過去に多くの研究が行われ，20 年以上の寿命を有することが示されている⁽¹⁾。しかしながらフィールドでは，設計想定寿命 30 年に至る機器が増加しつつあるた

め，O リング劣化についても，より詳細な検討が急がれる状況にあり，近年活発な研究が行われている⁽²⁾⁽³⁾。

本報告では，高経年ガス絶縁機器における O リング劣化のメカニズムについて考察するとともに，統計的解析による寿命推定について報告する。

2. O リング劣化プロセスの考察

2.1 O リングのシール機構と劣化指標 GIS-GCB のガスシールには，クロロブレンゴム (CR)，ニトリルゴム (NBR)，エチレンプロピレンジエンゴム (EPDM) 等のゴム O リングが使用されている。O リングによるシール機構は，O リングを圧縮して装着する際に生ずる反力による接圧と，内部の流体の圧力により加わる接圧 (自封性) により説明される。ただし横山らの解析結果⁽³⁾によると，内圧 0.5 MPa での自封性の寄与率は 10% 程度であり，封入ガス圧が 0.5 MPa 程度以下である通常の GIS-GCB では，主にゴムの圧縮反力による接圧でシールが維持されていると考えることができる。従ってゴムの圧縮反力が低下するとガスリークに至ることとなる。一般にガスシール用 O リングでは，圧縮反力の低下は塑性変形に対応していることから，図 1 および図 1 中に示す式により表される圧縮永久歪率 (Compression set: Cs) が，劣化の指標として使用されている⁽³⁾。

経年劣化が進行して圧縮永久歪率が 80% に達すると，ガ

* ティーエム・ティーアンドディー (株)

〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

TMT&D. Corporation

8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

** 関西電力 (株) 電力システム技術センタ 電気グループ

〒530-6691 大阪市中之島 6-2-27 NCB ビル 26F

The Kansai Electric Power Co., Inc.

6-2-27, Nakanoshima, Kita-ku, Osaka 530-6691

スリーク発生の可能性が急激に高まることが報告されており、圧縮永久歪率 80% がガスシール限界となる⁽³⁾⁽⁵⁾。

O リングの経年劣化を予測するため、この圧縮永久歪率を指標として加速試験による劣化評価が実施されており、その結果に基づいて、上述したとおり GIS・GCB では 20 年以上の寿命を有すると考えられている⁽¹⁾。図 2 は GIS 用クロロブレン O リングについて、O リングメーカーにて実施された加速劣化試験の結果であり、試験は大気中で行われている⁽⁶⁾。時間経過とともに圧縮永久歪率が増加しており、すなわち劣化が進行していることがわかる。また 25°C の場合、上述した圧縮永久歪率 80% に至るのは、10,000 日以上、の約 30 年であることがわかる。

図 1 O リングの圧縮永久歪率

Fig. 1. Compression set of rubber O-ring.

図 2 O リング (CR) の圧縮永久歪率加速劣化試験結果⁽⁶⁾

Fig. 2. Results of the accelerated test on the compression set of polychloroprene O-ring.

2.2 ゴムの粘弾性と劣化プロセス ゴムの力学的特徴は粘弾性であり、その挙動は例えば、スプリングとダッシュポットで表した図 3 の 4 要素モデル⁽⁶⁾において、E1 により弾性を、E2 と η_2 により粘弾性を、 η_1 により粘性を表現することができる。すなわちこの物理的モデルに従えば、塑性変形に伴う応力緩和すなわち圧縮永久歪の発生は、 η_1 による不可逆な変形と、E2 と η_2 の時定数が長い半可逆的な変形であると考えることができる。

しかしながら一方、長期的なゴム機能の劣化としては、上記のような物理的变化に加えて、酸化および酸化を起点とする架橋反応や分子鎖の切断等の、化学的变化の進行が強く影響することが知られている。ガス絶縁機器用 O リングのこれまでの劣化評価結果においても、空気との接触状況によって劣化が大きく異なる等、長期的にはこの化学反応が支配的であることがわかっている。ゴムの酸化劣化反応は、酸素による水素の引き抜きによりラジカルが生成し、そのラジカルによって連鎖的に反応が進行する自動酸化機構である⁽¹⁰⁾。この反応により、ゴム分子の一部が切断されるとゴムは軟化するが、同時進行する分子間の架橋反応は硬化させる要素となり、このどちらが支配的であるかによって、劣化による硬度変化が異なることになる。この劣化プロセスの概要を図 4 に図示する。

これを図 3 の 4 要素モデルに適用すれば、経年による化学反応によって、E1, E2, η_1 , η_2 の各パラメータが変化していることと等価である。すなわち分子の切断はスプリ

図 3 ゴム粘弾性の 4 要素モデル

Fig. 3. 4-element model of rubber viscoelasticity.

図 4 O リングの劣化プロセス

Fig. 4. Deterioration process of O-ring.

ングE1,E2の弾性率低下およびダッシュポット η_1, η_2 の抵抗低下と表現でき、架橋の進行はダッシュポット η_1, η_2 の抵抗上昇に対応すると考えることができる。

ただしゴムの種類が異なると、反応プロセスやその速度が異なる。また合成ゴムでは通常この反応を抑制するために、酸化防止剤(老化防止剤)が添加されているので、同じ種類のゴムでも、劣化状況は同一とは限らない。

2・3 Oリング劣化の温度依存性 図2から明らかとなり、Oリングの劣化速度は、温度に強く依存している。図5はクロロプレンOリング劣化の温度依存性を示したものであり、縦軸は図2の劣化直線から、圧縮永久歪率が80%に到達するまでの時間を求めたものであり、すなわち各温度におけるOリング寿命に相当する。

図5から常温付近では、 10°C 上昇で圧縮永久歪率80%に到達するまでの期間は、概ね半分になっており、いわゆる 10°C 二倍則にしたがっていることがわかる。このことは、実機におけるOリングの寿命に対して、环境温度や負荷状況等に依存する機器の温度が極めて強く影響することを意味している。

図6はCR, NBR, EPDMの3種類のOリングについて、横軸を絶対温度の逆数、縦軸を圧縮永久歪率80%に到達するまでの時間の対数として示したアレニウスプロットであり、劣化反応の特性を表すものである。なお図6では、

図5 Oリング寿命の温度依存性

Fig. 5. Dependence of O-ring lifetime on temperature.

図6 Oリング寿命のアレニウスプロット

Fig. 6. Arrhenius plot of O-ring lifetime.

NBR, EPDMについても、文献(6)のデータを元に算出した値を用いた。これらの直線は、(1)式に示したアレニウスの式で定義することができ、直線の傾きは反応の活性化エネルギー E を表すものである。

$$\frac{1}{\tau} = K \times \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 τ は一定の圧縮永久歪率に到達する時間、 K は定数、 E は活性化エネルギー(kJ/mol)、 R は気体定数($=8.31 \text{ J/K/mol}$)、 T は絶対温度($=\text{氏温度}(^{\circ}\text{C})+273.15$)(K)である。

(1)式に従って、3種類のOリング劣化の活性化エネルギー E を求めると、CRとNBRが 57 kJ/mol 、EPDMが 58 kJ/mol となる。分子構造の異なるゴムにおいて、酸化等の化学反応が生ずる場合、活性化エネルギーは異なる値が期待されるが、ここでは3種類の材料においてほぼ同じ値を示している。このことは、Oリングにおける圧縮永久歪率上昇では、酸化等の化学反応そのものは、圧縮永久歪率上昇の速度に最も寄与する過程(律速過程)となっておらず、他の支配的過程が存在している可能性を示している。

また酸化が支配的劣化因子である系において調べられた結果によると、ゴムの酸化劣化反応の活性化エネルギーは、 $85 \sim 125 \text{ kJ/mol}$ 程度であることが報告されているが⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾、ここで得られた $57 \sim 58 \text{ kJ/mol}$ の値はそれよりかなり低く、むしろゴム中を物質が拡散する時の活性化エネルギーに近い。拡散している物質は酸素であると推測されるが、添加されている酸化防止剤が拡散・移動していることも考えられる。いずれにしてもOリングの劣化では、Oリング内部に溶解・浸入した酸素がゴム分子と反応する過程が律速ではなく、浸入した酸素が実際に反応を生ずる点まで到達する過程が律速となっているものと考えられる。すなわちOリングは、溝に挿入して上下がフランジに密着した状態で使用されるため、空気との接触面は限られており、そこから供給される酸素が、Oリングに溶解・浸入して、内部に向けて拡散・到達する過程が律速になっていると考える。

なお西田はゴム劣化のアレニウス式による評価について、実用温度域のもとで律速過程が変わったり、劣化反応が単一成分だけに起因しないことなどから、(1)式から求めた活性化エネルギーが、実際の反応を表さない場合があることを指摘している⁽¹⁴⁾。しかしながら図6において、EPDMは直線からの乖離が若干大きいものの、3種類のゴムいずれもが概ね良好な直線性を示しており、かつ同等の活性化エネルギーを示しているため、ここでのアレニウス式による評価は妥当であると考えられる。

2・4 温度変化と寿命の関係 上述のとおり、温度変化はOリングの劣化に対して大きく影響をおよぼすが、電力機器の使用環境では、温度条件は常に変化する。このような場合の劣化速度は、変圧器の劣化にも適用されているように⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、平均温度ではなく温度依存性を考慮した等価温度を用いる必要がある。以下にその考え方を述べる。

温度が一定の場合の劣化と温度の関係は(1)式に示した

とおりであるが、ここで左辺の $1/\tau$ は、温度 T における劣化速度と考えることができる。従って時間 t における温度と劣化速度を $T(t), v(t)$ 、とすると、その関係は (2) 式で表され、

$$v(t) = K \times \exp \left\{ -\frac{E}{RT(t)} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

$t_0 \sim t_1$ までの期間に進行する総劣化量は、(3) 式のように示すことができる。

$$\int_{t_0}^{t_1} v(t) dt = K \times \int_{t_0}^{t_1} \exp \left\{ -\frac{E}{RT(t)} \right\} dt \dots \dots \dots (3)$$

ここで $t_0 \sim t_1$ までの期間につき、一定温度 T_{EQ} の時の劣化量が (3) 式の劣化量と等価であると定義すれば以下となる。

$$K \times \int_{t_0}^{t_1} \exp \left\{ -\frac{E}{RT_{EQ}} \right\} dt = K \times \int_{t_0}^{t_1} \exp \left\{ -\frac{E}{RT(t)} \right\} dt \dots \dots \dots (4)$$

整理すると T_{EQ} は (5) 式で与えられ、この T_{EQ} を O リング劣化についての等価温度と考える。上述したとおり、(5) 式から明らかなように、 T_{EQ} は平均温度とは一致しない。

$$T_{EQ} = -\frac{E}{R \ln \left[\frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \exp \left\{ -\frac{E}{RT(t)} \right\} dt \right]} \dots \dots \dots (5)$$

実機の O リングについては、その部位での温度変化 $T(t)$ が既知であれば、(5) 式より等価温度を算出することができる。温度変化の周期を考慮すると、当該部位の 1 年間の温度変化で評価するのが望ましい。通常、機器の詳細な温度変化データを入手するのは困難であるが、これも変圧器で適用されているように⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、年間の温度変化を (6) 式のように定義すれば、試算を行うことが可能である。

$$\theta_a = \theta_{ay} + A \sin \frac{2\pi t}{365 \times 24} + B \sin \frac{2\pi t}{24} + Ts \sin \frac{2\pi t}{24} + T_{LC} + T_h \dots \dots \dots (6)$$

ここで θ_a は機器温度変化 (°C)、 θ_{ay} は年間平均温度 (°C)、 A は日間平均気温の年間変動幅 (°C)、 B は気温の日間変動幅 (°C)、 t は時間、 Ts は日照による温度上昇 (°C)、 T_{LC} は想定負荷電流通電時の温度上昇 (°C)、 T_h は例えばガスヒータ運転等の外部入熱による温度上昇 (°C) である。

具体例として、兵庫県 A 変電所に設置の GCB について、代表的部位の平均温度と等価温度を試算した結果を表 1 に示す。試算に使用した各温度は、気象条件には理科年表の値を、負荷温度上昇 T_{LC} とヒータ温度上昇 T_h には、設計仕様および運転実績からの算出値を用いた。いずれの条件においても、平均温度と比較して等価温度が数 °C 高くなっており、温度依存性を考慮すると、平均気温で評価するよりも劣化が加速することがわかる。これは (2) 式から明ら

表 1 フィールド GCB の等価温度計算例

Table 1. Calculation examples of equivalent temperature of GCB in field.

No	Weather Conditions (°C)	Rise in Equipment Temperature (°C)		Estimated Temp. of Equipment (°C)	
		T_{LC}	T_h	Average	Equiv.
1	$\theta_{ay} = 15.6$ $A = 11.7$ $B = 4.3$ (summer) 3.7 (winter) $Ts = 10$ (summer) 4.5 (winter)	1.6	0.0	19.5	23.7
2		3.2	0.0	21.1	25.3
3		4.8	0.0	22.7	26.9
4		8.0	0.0	25.9	30.0
5		4.8	2.0	23.4	27.1
6		8.0	4.5	27.4	30.5
7		6.9	7.5	27.3	30.1

かなように、温度上昇に伴って劣化速度が指数関数で増加することに起因する。従って O リング使用部位の温度変化の振幅、すなわち (6) 式の A, B, Ts が大きいほど、平均温度と等価温度の差は増大することとなる。

以上、等価温度による O リング劣化速度の評価について述べた。現時点では等価温度と平均温度との差を確認する実証的データは取得していないが、O リング劣化は化学的变化に基づく現象であることが明らかなので、原理的に等価温度による評価が妥当であるものとする。

3. 実機における O リング劣化

3・1 フィールドデータ測定結果 表 2 および図 7 に、8 箇所の変電所に設置された経年 GCB の計 327 本のクロロブレン O リングについて、圧縮永久歪率を実測した結果を示す。図 7 には図 2 の加速劣化試験結果におけるデータも示した。フィールドデータは、傾向として加速劣化試験結果と概ね一致しているが、ばらつきが非常に大きく、かつ全体的には、25 °C における加速劣化試験結果より劣化が軽微である。図 7 によると、今回評価した大部分の O リングは、30 年経過時点で、シール機能限界の圧縮永久歪率 80% 未満となっているものと推察される。加速劣化試験とフィールドにおける劣化の違いを含めて、以下実機における O リング劣化メカニズムについての考察を行う。

3・2 実機における劣化抑制機構 O リングの劣化では、空気中の酸素が O リング内部の反応点まで到達する過程が律速となっていることを述べた。図 7 中の劣化直線は、大気中での加速劣化試験によるものであるが、一方で GIS-GCB では内部に SF_6 ガスが封入されているため、酸素供給はフランジ外側のみに限定される。図 8 は高経年 GCB から取り出したクロロブレン O リングについて、内側 (ガス側)、上面 (フランジ接触面)、外側 (大気側) の硬度測定を行った結果であるが、内側は外側と比較して硬度が低く、劣化の進行が小さいことがわかる。なおガス変圧器を模擬した加速劣化試験でも、内部に SF_6 および PFC を充填することによって、O リング劣化が抑制されることが示

表2 フィールド GCB の O リング圧縮永久歪率

Table 2. Compression set of GCB O-rings in the field.

S/S	Age (year / day)	Number of Sample	Compression set(%) Ave.	Max
A	3 / 1080	38	17.6	23.0
B	27.4 / 10020	16	60.0	76.3
C	23.9 / 8730	8	43.9	53.5
D	23 / 8400	9	51.4	56.5
E	21.7 / 7920	34	45.5	64.3
F	23.7 / 8640	33	41.7	64.3
G	28 / 10227	138	44.8	74.7
H	33 / 12053	51	59.8	80.1

図7 フィールド GCB における O リング劣化

Fig. 7. O-ring degradation data on GCB in the field.

図8 経年 O リングの硬度測定結果

Fig. 8. Hardness of aged O-rings.

されている⁽¹⁸⁾。

さらに GIS-GCB では図9に示すとおり、ガスシールのバックアップやフランジ部の防錆を目的として、O リング外周に液体パッキンやシリコンシーラント等の補助シール剤が塗布されているので、フランジ外周からの酸素の供給も抑制される。ただし図10の、新品 O リング、実機経年 O リング、強制劣化 O リング(150℃で5時間)の赤外分光分析結果では、実機経年品は強制劣化品同様に、酸化防止剤であるベンゼン核のピークが小さくなるとともに酸化劣化を示す C=O のピークが現れており、やはり酸化劣化が進行していることが確認できる。補助シール剤によ

図9 フランジ部のシール構造

Fig. 9. Cross sectional view of flange.

図10 O リングの赤外分光分析結果

Fig. 10. Results of IR spectroscopic analysis.

図11 O リング劣化の部位比較

Fig. 11. Comparison of degradaton rates of O-rings.

ても外部からの酸素浸入を完全に防ぐことはできないものの、O リングの劣化の進行を遅らせる効果は有しているものと考えられる。

以上の要因によって、実機の O リングは加速劣化試験と比較して、劣化が軽微となっているものとする。

3・3 劣化データのばらつき要因 フィールドの実機における O リング劣化では、大きなばらつきが生ずることを示したが、ばらつき発生の要因、すなわち劣化を促進する因子と抑制する因子を抽出するため、O リング使用部位の違いに着目した劣化度の比較評価を行った。図11は表2

に示した 8 変電所のデータのうち、G 変電所のデータを、使用部位毎に圧縮永久歪率の小さい方から整列したものである。部位毎にそれぞれ 2～6 個のデータであり、その平均値を点で、 $\pm\sigma$ をエラーバーで示した。図より、同一部位内データにもばらつきはあるものの、部位間の差異が大きいことがわかる。従ってそれぞれ使用部位に固有の、劣化促進因子もしくは抑制因子が存在していると考えられる。この劣化促進・抑制因子を明らかにするため、それぞれの部位の特徴・特異性に着目して分類を行ったところ、表 3 に示す傾向が認められた。各項目のうち (1) は上述した温度による加速因子であり、(2)～(6) は、O リングへの酸素供給に影響を与える因子である。具体的に観察された事象を次に示す。

(1) の温度については、導体近傍等で負荷温度上昇の大きい場合に、相対的に劣化の進行が観察された。ただしフィールドにおける O リングでは、使用期間を通じての温度履歴

を正確に把握することが困難であり、さらに以下に示した温度以外の因子が複合的に作用しているため、2・4 節で述べた温度と劣化速度の関係について、定量的な一致を得るには至らなかった。(2) の使用雰囲気としては、二重圧力式 GCB の高低ガス圧間のシール部位で、内側・外側ともに SF_6 ガスに接している O リングでは、空気に接する場合よりも劣化が少ない傾向が確認された。(3) に示した O リングと空気を隔てるフランジについては、幅の短い部位では酸素を遮断し難く、劣化の進行が認められた。(4) の補助シール剤では、経年で液体パッキンの油分が枯渇した部位で、劣化が進行している傾向にあった。これは液体パッキンのガスシール性能が低下すると、酸素透過が増加して O リング劣化を促進することを示していると推測できる。なお同様に補助シール剤として使用しているシリコンシーラントは、液体パッキンより長期安定性に優れるため、高経年時の O リング劣化は小さい傾向にある。ただしいずれの補助シール剤であっても、(5) フランジ面への雨水の浸入や、その結果による (6) 錆の発生のある部位では、O リングの劣化も進行していた。このような部位では、雨水同様に酸素の浸入も増加する結果によると考えるが、水によって O リング劣化が促進されている可能性も考えられる。

なお今回の評価では明確な傾向を確認できなかったが、O リング線径や、圧縮率（潰し代）も O リング劣化に影響することが報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この現象は、線径や圧縮率の違いで O リングが空気と接触する表面積が変わると、O リング内部への酸素の供給に影響し、表 3 の (2)～(6) と類似のメカニズムが作用すると理解することができる。

表 3 各種因子の劣化促進性

Table 3. Factors accelerating O-ring degradation.

Factors	Degree of degradation		
	Low	$\Leftrightarrow$	High
(1) Temperature	Low	$\Leftrightarrow$	High
(2) Oxygen	Poor	$\Leftrightarrow$	Rich
(3) Rim length of flange	Long	$\Leftrightarrow$	Short
(4) Back-up sealant	Good	$\Leftrightarrow$	Bad
(5) Water immersion	No	$\Leftrightarrow$	Yes
(6) Flange corrosion	No	$\Leftrightarrow$	Yes

(a) 硬度との相関

(b) 伸びとの相関

(c) 引張強度との相関

(d) 100%モジュラスとの相関

図 12 圧縮永久歪率と機械的特性の相関性

Fig. 12. Correlation analysis of compression set and mechanical properties.

3・4 実機劣化 O リングの物性変化 今回の評価で抽出した表 3 の各因子は、いずれも酸素に起因する化学変化を想定した劣化メカニズムであるので、O リングのゴムとしての物性にも変化を生じている可能性が高い。そこで図 11 に圧縮永久歪率の測定データを示した G 変電所の O リングについて、硬度、引張伸び、引張強度、100%モジュラス(100%伸びの時の引張応力)の測定を行った。硬度測定はタイプ A デュロメータを用い、残りの引張特性試験はオートグラフにより行った。

図 12 は各 O リングサンプルについて、圧縮永久歪率と硬度、引張伸び、引張強度、100%モジュラスの関係をプロットしたものである。ばらつきが大きい、これらの図では、経年による圧縮永久歪率の増加と機械的特性の変化との間には、一定の相関性が認められる。すなわち全体としては、経年劣化によって圧縮永久歪率が上昇しているのに対応して、硬度とモジュラスが上昇し、伸びおよび引張強度は低下している傾向が認められる。従ってこれらの物性変化は、それぞれ同一もしくは相関するメカニズムによって生じていると考えられる。

評価を行った O リング材質であるクロロプレンゴム(CR)は、経年劣化により硬化し易いゴムであることが知られているが⁽¹⁹⁾、観察された硬度とモジュラスの上昇はこれに一致している。2・2 節で述べたとおり、硬化はゴム分子の架橋の進行に基づくものであるが、一方でゴム分子が切断していることを示す伸びおよび引張強度の低下も現れている。従って架橋と分子切断は並行して進行しているが、全体としては架橋が支配的になっていると考えられる。既に述べたとおり、この現象は、図 3 の粘弾性の 4 要素モデルにおけるスプリングおよびダッシュポットの特性パラメータ、 E_1 , E_2 , η_1 , η_2 の変化として表現することができる。

なおニトリルゴム(NBR)やエチレンプロピレンゴム(EPDM)も硬化型劣化を示すゴムであるので⁽¹⁹⁾、これらの材質の O リング劣化についても、同等のメカニズムであることが推測される。

以上の考察からも、経年機器の O リング劣化では、架橋や分子切断等の化学反応が進行するため、表 3 に示した各種因子は、GIS-GCB における一般的な劣化促進因子として、作用すると予想される。

4. 寿命推定についての考察

4・1 劣化推定直線による推定寿命の算出 図 7 に示したとおり、過去に調査を行った GIS-GCB の O リングでは、設計時想定寿命の 30 年でも、その大部分がシール限界値である圧縮永久歪率 80%未満の値となっている。しかしながら上述したとおり、種々の劣化促進因子の存在により、同一の機器においても劣化状況にばらつきが生ずるため、経年 30 年もしくはそれ以下であっても、一部には圧縮永久歪率が 80%に到達する O リングも見られる。そのため高経年機器では、稀ではあるが O リング劣化によるガス漏れも発生している。従って、様々な機器における O リン

図 13 O リング劣化の統計解析結果

Fig. 13. Statistical analysis of O-ring degradation.

グについて、ガス漏れに至るまでの期間、すなわち寿命を推定することが、機器の管理上非常に重要となる。

具体的な寿命の推定は、実測されたフィールドデータに対して、図 2 の加速試験における劣化の勾配を劣化推定直線として適用し、その直線が圧縮永久歪率 80%を超過する点を求める方法により行った。例えば図 13 は、表 2 の B 変電所のデータについて寿命推定を行った例である。調査を行った経年 27.4 年の O リング圧縮永久歪率の、平均値 60.0%および最大値 76.3%に対して劣化推定直線を適用すると、それぞれ推定寿命として 62 年と 31 年を算出することができる。

フィールド実機における O リングの劣化過程は、上述したとおり多くの因子が複合的に作用しているため、精度の高い寿命推定を行うためには、各種劣化因子の影響を織り込んだ劣化推定線を適用することが望ましいが、ここに示した方法は、任意の測定データから簡便に寿命を算出可能である点で、有効かつ実用的であると考えられる。

図 13 には、O リング劣化のばらつきを考慮した寿命推定として、例えばばらつきを正規分布として求めた $+3\sigma$ 上限値(全体の 0.135%に相当)に対する劣化推定直線も示した。図より、 $+3\sigma$ 上限値に対する推定寿命は 21 年となる。

8 変電所の O リング劣化データ全てについて同様の解析を行い、算出した各種推定寿命を表 4 に示した。平均寿命としては、いずれも設計時想定寿命である 30 年をはるかに上回る値となっている。測定最大値および $+3\sigma$ 上限値から求めた寿命については、概ね設計時想定寿命である 30 年近傍からそれ以上の値となっているが、ここでも大きくばらついている。これには寿命推定の精度の問題に加えて、表 3 に示した種々の因子、例えば所在地の違い(環境温度の違い)、機器の負荷温度上昇の違い、機器設置環境(屋内・屋外)の違い、補助シール剤の違い等が影響しているものと考えられる。

4・2 統計的寿命解析 表 4 のとおり A~H のいずれの変電所の GCB においても、実測最大値による寿命および $+3\sigma$ 上限値による寿命は、平均寿命と比較して著しく短い。また GIS-GCB 等のガス絶縁機器では、ガス漏れが

表 4 O リングの寿命推定

Table 4. Estimation of lifetimes of O-rings.

S/S	Estimated lifetime (years)		
	Average	Maximum point	+3 sigma limit value
A	225	104	51
B	62	31	21
C	133	76	35
D	81	62	42
E	109	41	25
F	152	44	32
G	147	34	36
H	76	33	31

図 14 O リングの漏れ発生確率推移

Fig. 14. Probability transition of leakage from O-rings.

発生すると、機器を停止せずに当該部位のみを改修することが困難であるケースも多く、多数の O リングのうち、1 本からのガス漏れが、機器全体の運転に影響をおよぼすことにもなる。従って機器の運用管理としては、劣化が進行した、比較的少数の O リングによるガス漏れリスクの把握が重要であり、その把握に有効な手段の一つとして、統計解析が挙げられる。図 13 および表 4 では、統計的推定寿命として $+3\sigma$ 上限値を示したが、系統における重要性や、補修の容易性などを考慮して、 $+2\sigma$ 上限値（全体の 2.2%に相当）に対応する推定寿命で評価を行うことも考えられる。

また図 13 に示した実測データのばらつき分布から、圧縮永久歪率 80%を超過する確率を経時的に算出すれば、O リング劣化によるガス漏れ発生確率の経年変化を求めることができる。図 14 は B 変電所の O リングについて、ガス漏れ発生確率の推移を示したものである。これは機器故障のバスタブ曲線における摩耗期間での立ち上がりに対応している。この図によると、経年の少ない間は圧縮永久歪率増加による漏れ発生はほとんど皆無に等しいが、漏れ発生確率の上昇が始まると、急速に進行することがわかる。この曲線を用いれば、 $+3\sigma$ 上限値や $+2\sigma$ 上限値のみでなく、任意のガス漏れ発生確率について評価を行うことが可能である。例えば 100 本の O リングが使用されている GCB を

想定すると、圧縮永久歪率 80%を超過する確率が 1%の場合、1 本の O リングからリークを生ずる計算となる。

今回示した統計解析による評価方法は、実機からの多数サンプリングにより解析を行うものであるため、未知の個別機器の寿命予測に直接適用するのは困難である。しかしながら、環境温度、負荷温度上昇等の環境条件を考慮すれば、概略のリスク推定は可能となると考えられ、この結果を RCM の入力情報として用いれば、設備更新計画や保守計画の効率的な立案ができる。また故障率の上昇が予測される時期に、ガス圧力モニター等のより確度の高い診断装置を導入し、本格的な CBM による運用を行うことも効果的であると考えられる。

5. ま と め

高経年 GIS-GCB の O リング劣化特性を理解するため、ゴムおよび O リングの劣化メカニズムについての考察を行うとともに、8 箇所の変電所の GCB からサンプリングした O リングの分析・評価を実施した。実フィールドにおける劣化促進因子および劣化抑制因子を抽出したところ、O リングへの酸素供給の容易性と温度による影響が大きいことがわかった。

また 8 箇所の変電所の O リング劣化データについて統計解析による寿命推定を行った。変電所毎の環境条件の違いによると推定される大きなばらつきが存在したが、 $+3\sigma$ 上限での推定寿命は概ね 30 年程度となった。

今後、得られた知見の RCM, CBM への適用を進めることにより、より効率的な設備管理が期待される。

(平成 16 年 4 月 27 日受付, 平成 16 年 10 月 12 日再受付)

文 献

- (1) 電気協同研究会:「ガス絶縁機器の信頼性向上策」, 電気協同研究, Vol.44, No.3, p.64 (1988)
- (2) T. Taniguchi, T. Takimoto, M. Yamashita, H. Nakae, K. Tamoto, H. Fuzii, H. Wada, T. Minagawa, E. Tsuchie, and H. Kobayashi: "Investigation of O-ring Deterioration on Highly Aged GCB", Proc. 12th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.B, No.431, pp.386-387 (2001) (in Japanese)
谷口達也・太木本敏司・山下正徳・中江広幸・田本浩二・藤井 寛・和田英之・皆川忠郎・土江 瑛・小林晴彦:「高経年 GCB における O リングの劣化評価」, 平成 13 年電気学会電力・エネルギー部門大会, Vol.B, No.431, pp.386-387 (2001)
- (3) T. Taniguchi, J. Yokoyama, T. Minagawa, E. Tsuchie, and H. Kobayashi: "Investigation of O-ring Deterioration on Highly Aged GCB (Part 2)", Proc. 12th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.B, No.342, pp.200-201 (2002) (in Japanese)
谷口達也・横山順一・皆川忠郎・土江 瑛・小林晴彦:「高経年 GCB における O リングの劣化評価(その 2)」, 平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会, Vol.B, No.342, pp.200-201 (2002)
- (4) T. Taniguchi, J. Yokoyama, T. Minagawa, E. Tsuchie, and H. Kobayashi: "Investigation of O-ring Deterioration on Highly Aged GCB (Part 3)", 2003 National Convention Record IEE Japan, No.6-211, pp.360-361 (2003) (in Japanese)
谷口達也・横山順一・皆川忠郎・土江 瑛・小林晴彦:「高経年 GCB における O リングの劣化評価(その 3)」, 平成 15 年電気学会全国大会, No.6-211, pp.360-361 (2003)
- (5) H. Ohta, T. Kumai, T. Hatano, A. Nohara, M. Shimokawa, and Y. Kuwabara: "Investigation of O-ring Deterioration on Highly Aged GIS", 2002 National Convention Record IEE Japan, No.6-181, pp.297-298 (2002) (in Japanese)
太田秀希・熊井俊哉・波多野豊己・野原 晃・下川昌弘・桑原幸弥:

「高経年 GIS の O リング劣化に関する調査」, 平成 14 年電気学会全国大会, No.6-181, pp.297-298 (2002)

- (6) 佐藤 護・慶上伸雄・上羽勝邦:「各種合成ゴムの長期間圧縮ひずみ」, 三菱電線工業時報, No.58 号 (1974)
- (7) K. Yokoyama, M. Okazaki, and T. Komito: "Analysis of the seal mechanism using the measurement of contact pressure change and the influence of heat degradation on the sealing of fixed O-ring", *HONDA R&D Technical Rev.*, Vol.8, pp.145-151 (1996) (in Japanese)
横山和孝・岡崎雅之・小見戸拓:「固定用 O リングの面圧挙動測定によるシール理論解析および熱劣化のシール性への影響」, *HONDA R&D Technical Review*, Vol.8, pp.145-151 (1996)
- (8) 日本規格協会編:「加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの永久ひずみ試験方法」, 日本工業規格, JIS K-6262 (1997)
- (9) T. Satou, T. Takai, I. Itakura, and T. Idemaru: "Evaluation of Endurance of Oring for Gas Insulated Transformer (Report 2)", *Proc. 11th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, Vol.B, No.404, pp.176-177 (2000) (in Japanese)
佐藤 正・高井 隆・板倉 勲・丸山俊樹:「ガス絶縁変圧器用 O リングの耐久性評価 (第二報)」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, Vol.B, No.404, pp.176-177 (2000)
- (10) 深堀美英: 高分子の力学, p.56 (2000)
- (11) A.N. Gent: "Relaxation Processes in Vulcanized Rubber. II", *J. Appl. Polymer Sci.*, Vol.6, No.22, pp.442-448 (1962)
- (12) L.A. Wood: "Representation of Long-Time Creep in a Pure-Gum Rubber Vulcanizate", *Rubber Chem. Tech.*, Vol.54, pp.331-346 (1980)
- (13) 一式節也:「耐熱老化性」, 日本ゴム協会誌, Vol.38, No.10, pp.884-897 (1965)
- (14) 西田隆仁:「原子力用非金属シールの環境劣化と寿命の予測」, バルカーレビュー, Vol.44, No.6, pp.6-14 (2000)
- (15) 電気協同研究会:「電力用 SF₆ ガス取扱基準」, 電気協同研究, Vol.54, No.3, p.42 (1998)
- (16) 電気学会:「油入変圧器運転指針」, 電気学会技術報告 (1 部) No.99 (1971)
- (17) 「変圧器」, JEC-2200 (1995)
- (18) H. Yonezawa, T. Takai, I. Itakura, and H. Nakazawa: "Evaluation of Endurance of Oring for Gas Insulated Transformer", *Proc. 9th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, Vol.2, No.535, pp.576-577 (1998) (in Japanese)
米沢比呂志・高井 隆・板倉 勲・中澤宏司:「ガス絶縁変圧器用 O リングの耐久性評価 (第一報)」, 平成 10 年電気学会電力・エネルギー部門大会, Vol.2, No.535, pp.576-577 (1998)
- (19) 秋葉光雄・林 茂吉: ゴム・エラストマーの劣化と寿命予測, p.19 (2000)

皆 川 忠 郎 (正員) 1963 年 7 月 3 日生。1986 年 3 月神戸大学工学部工業化学科卒業。同年 4 月三菱電機(株)入社。2002 年 10 月よりティーエム・ティーアンドディー(株)変電 R&D センター材料技術グループ在籍。主として, 変電機器用材料の研究・開発業務に従事。

永 尾 栄 一 (正員) 1959 年 8 月 2 日生。1985 年 3 月大阪大学大学院理学研究科修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。2002 年 10 月よりティーエム・ティーアンドディー(株)変電 R&D センター材料技術グループ長。主として, 変電機器の材料技術, 診断技術, センサー技術の開発に従事。理学博士。

土 江 瑛 (正員) 1945 年 9 月 28 日生。1964 年 3 月島根県立出雲工業高等学校技術科卒業。同年 4 月三菱電機(株) 2002 年 10 月よりティーエム・ティーアンドディー(株)開閉機器事業部技術主幹。主として, 電力用開閉装置の設計に従事。

米 沢 比呂志 (正員) 1961 年 8 月 23 日生。1986 年 3 月京都大学大学院工学研究科(電気工学専攻)卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。現在電力システム技術センター電気グループ課長。主として, 変電関係業務に従事。

高 山 大 輔 (正員) 1970 年 7 月 17 日生。1996 年 3 月東北大学大学院工学研究科(電子工学専攻)卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。現在, 電力システム技術センター電気グループ副長。主として, 変電関係業務に従事。

山 川 豊 (正員) 1975 年 7 月 31 日生。2000 年 3 月京都大学大学院工学研究科(電気工学専攻)卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。現在, 電力システム技術センター電気グループに勤務。主として, 変電関係業務に従事。