

格納容器用改良 EPDM ゴム (EP-176) の高温・水蒸気環境での 限界シール性

Limited sealing property of improved EPDM rubber (EP-176)
for containment vessel in high temperature and steam environment

ニチアス株式会社 花島 完治

Kanji Hanashima

Non Member

Abstract

The sealing material of the containment vessel has been adopting improved EPDM rubber instead of silicone rubber from heat resistance, steam resistance, radiation resistance at severe accident. In order to evaluate the sealing performance of the improved EPDM rubber (EP-176), the steam seal test was conducted under a severe environment than the currently assumed severe accident. For the improved EPDM rubber (EP-176), we have found that the limit of sealing performance as O-ring is 300 °C, 336 hours or more.

Keywords: EPDM rubber, Heat, Steam, Radiation, Compression set, Seal, Leak, Severe accident, Containment vessel

1. 緒言

原子力発電所において、メルトダウンや冷却システムの破損などの“シビアアクシデント”の場合に格納容器は放射性物質の放散の防壁として重要な機能を備えている。格納容器は“シビアアクシデント”で発生する高温高圧の水蒸気や水素気体に対して高い気密性と抵抗性が要求される。従って、格納容器の密封境界部を形成するドライウェルフランジやハッチフランジなどは十分なシール性能を有することが要求される。

格納容器の密封境界部のシール材としては、従来、シリコンゴムや EPDM ゴムが使われている。しかし、シリコンゴムは水蒸気条件での耐久性に不安があり、EPDM ゴムは高温条件での耐久性に不安がある。

BWR 原子力発電所の格納容器の密封境界部の“シビアアクシデント”となる温度は 200°C といわれ[1]、各耐久評価は 200°C、168 時間で行われている。

花島、山本らは従来のシリコンゴムや一般の EPDM ゴムや「改良 EPDM ゴム」と呼ばれる EP-176 に対して、“シビアアクシデント”を想定した放射線照射と温度 250°C までの高温・水蒸気環境の圧縮永久ひずみ試験やシール試験を行った[2],[3],[4]。その結果、「改良 EPDM ゴム」EP-176 は従来のシリコンゴムや一般の EPDM ゴムよりも高い耐熱、耐水蒸気性を有することを示した。

しかし、現実には想定している“シビアアクシデント”の条件を超える可能性もあり、「改良 EPDM ゴム」EP-176 が、さらに厳しい高温・水蒸気環境でどのような特性を示し、限界の環境はどの程度になるかを評価することは有意義であると考えられる。

そこで、放射線照射した「改良 EPDM ゴム」EP-176 の 250°C、300°C の蒸気シール試験を行い、シール性を評価したので報告する。

2. ゴムガスケットのシール特性

2.1 ゴムガスケットのシール機構

小林らはゴムガスケットの気体の漏れには、明らかに挙動が異なる 2 種類の漏れがあることを確認した[5]。一つはゴムガスケットの表面と接触しているフランジ面の隙間を気体を通る接触面漏れになる(Fig.1)。もう一つはゴムガスケットの内部を気体が透過する浸透漏れになる(Fig.2)。

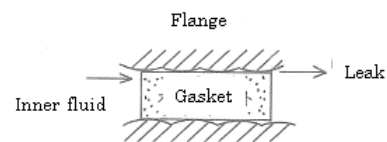


Fig.1 Contact surface leak

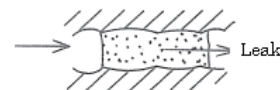


Fig.2 Penetration leak

連絡先: 花島 完治、
〒230-0053 神奈川県横浜市鶴見区大黒町 1-70
ニチアス株式会社 鶴見テクニカルセンター、
E-mail: hanashima-k@nichias.co.jp

接面漏れは石鹼水を塗布すると泡が発生するような比較的大規模な漏れで、一般的に、 $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以上の漏洩量となる[6]。ただし、通常、ゴムガスケットは10~15%程度圧縮するとこの接面漏れはほとんどなくなる[5]。それに対して、浸透漏れは石鹼水を塗布しても泡が発生しないような微量な漏れになり、気体がゴムガスケットの内部を通過するもので、液体、固体は通過できず、気体も分子量が大きくなり通過しづらくなる。従って、“シビアアクシデント”時、格納容器内の放射性物質の外部への漏れを防止するには、大規模漏洩となる接面漏れを防ぐことが重要になる。

2.2 圧縮永久ひずみとシール特性

ゴムガスケットは通常、フランジの溝に設置し、フランジを締め切って圧縮して使用する。高温や水蒸気、放射線環境で使用するとフランジを開放してもゴムガスケットが使用前の厚さまで戻らなくなる。この戻らないひずみは圧縮永久ひずみ C_s といい、下式により求められる。

$$C_s = (t_0 - t_2) / (t_0 - t_1) \times 100$$

C_s : 圧縮永久ひずみ (%)

t_0 : 試料厚さ (mm)

t_1 : 圧縮時厚さ (mm)

t_2 : 取出し後厚さ (mm)



Fig.3 Compression set

圧縮永久ひずみが発生するとフランジ開放時の復元量が小さくなるとともに圧縮中の実質的な圧縮量も小さくなっているため、フランジ接触面の隙間を埋めているゴムガスケットの応力が小さくなる。接触面の応力が小さくなると隙間が発生しやすくなり、大規模漏洩が発生する。

ここで、加藤らは漏洩が発生しない圧縮永久ひずみの限界値を80%として、温度と時間による圧縮永久ひずみの変化傾向から、ゴムガスケットの使用期間を評価している[9]。また、花島、山本らも実際に圧縮永久ひずみの温度と時間による変化からゴムガスケットの使用期間を推定している[1],[2]。

3. 試料

試料はニチアスで“シビアアクシデント”対策用に開発した「改良 EPDM ゴム」EP-176に1MGyの放射線を照射したものとする。一般特性をTable 1に示す

・放射線照射条件

γ 線 : 線源 Co60

線量 : 1 MGy

線量率 : 10 kGy/hr

Table 1 Typical properties

Rubber	Improvement EPDM
Sample name	EPDM-B
NICHIAS Product No.	NU2670-EP-01 NU2680-EP-01
NICHIAS Compound No.	EP-176
Hardness JIS K 6253	A 82
Tensile Strength [MPa] JIS K 6251	13.1
Elongation [%] JIS K 6251	140
Compression set [%] 150°C x 72hr JIS K 6262	7

4. 蒸気シール試験

高温・水蒸気環境で劣化したゴムガスケットのシール性を評価するため、以下の蒸気シール試験を行う。

ブラインド型の溝フランジにゴムガスケット(Oリング)をセットし、フランジ内部に水をOリングに接触しないように10~18g入れてボルトで締め付ける。締め付け後、常温でフランジ締結体の重量を測定し、フランジ締結体を電気炉に入れ、所定温度、所定時間加熱させる。所定温度、所定時間加熱後、フランジ締結体を電気炉から取出し、常温まで冷却後フランジ締結体の重量を測定する。この時、加熱時のフランジ締結体内部では、水が飽和水蒸気になり、Oリング内周部が飽和水蒸気に暴露される。内部の圧力が外部よりも高くなるので、水蒸気は外部に漏れようとする。加熱後のフランジ締結体の重量が加熱前よりも減少している場合、水蒸気が外部に漏れたこと

になる。従って、加熱後のフランジ締結体の重量の減少量から、Oリング(ゴムガスケット)の高温・水蒸気環境でのシール性を評価できる。

また、Oリングの線径を測定し、圧縮永久ひずみを求める。

下記に試験条件を示す。

- ・試料形状：Oリング
- ・サイズ：AS568-320 線径φ5.33×内径φ27.94
- ・フランジ：JIS 10K FF 20A (Fig.4)
- ・溝深さ：4 mm (圧縮率 25.0%)
- ・ボルト：M12、4本
- ・締付荷重：24 kN (締付トルク：15 N-m/本)
- ・加熱温度：250℃ (飽和蒸気圧 3.98MPa)
300℃ (飽和蒸気圧 8.59MPa)
- ・加熱時間：通算 336 時間 (168 時間)
- ・測定時間：0、24、72、168、336 時間

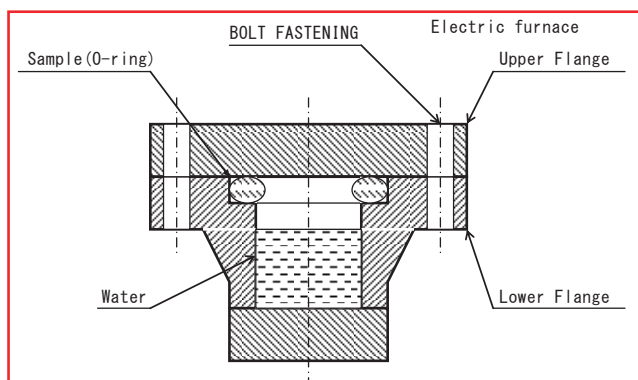


Fig.4 Test equipment

・漏洩量換算

今回実施した蒸気シール試験は飽和水蒸気で試験しているが、想定している“シビアアクシデント”の条件ではそこまで高圧にならない。また、実際の蒸気配管での圧力は 1MPa 程度の水蒸気であることが多い。そこで、流体が 1MPa の水蒸気のときの漏洩量に換算して評価した。

ここで、漏洩量の換算方法を下記に詳述する。

まず、1時間あたりに漏洩した水蒸気の重量(重量漏洩量)から気体の体積としての漏洩量を算出する。この時、気体の体積は圧力によって変わるが、理想気体と考えると圧力Pと体積Vの積PVは一定になるので、漏洩で取り扱う気体量はPVで取り扱い、気体の漏洩量は、「気体量/時間」で表す[7]。そこで、重量漏洩量に蒸気比体積を掛け、重量を気体体積に換算し、その体積に圧力(蒸気圧)を掛けて気体の漏

洩量として蒸気漏洩量 Q_s を求める。

$$Q_s = P_s \times v \times Q_w / 10^6 / (60 \times 60)$$

Q_w : 重量漏洩量 (mg/hr)

Q_s : 蒸気換算漏洩量 (Pa-m³/s)

P_s : 蒸気圧 (Pa)

v : 蒸気比体積(m³/kg)

次に、流体圧力が 1MPa になった場合の換算漏洩量を算出する。

漏洩は内部の圧力と外部の圧力の差から発生し、漏洩量 Q は下式のように表せる[7]。

$$Q = C(P_i - P_o)$$

Q : 漏洩量 (Pa-m³/s)

P_i : 内圧 (Pa)、 P_o : 外圧(Pa)

C : コンダクタンス

コンダクタンス C は漏洩時の流体の流れの抵抗で、水蒸気は圧縮性流体の粘性流にあたり、漏洩の流路を簡単に円導管の流れとすると下式のようなになる[7],[8]。

$$C = \pi a^4 (P_i + P_o) / (16 \eta L)$$

a : 漏洩流路(円導管)半径(m)

L : 漏洩流路(円導管)長さ(m)

η : 粘性係数

ここで、粘性係数 η 、漏洩流路半径 a 、長さ L は圧力が変わっても一定と考えられるので、それらをまとめ、比例定数 A とすると漏洩量 Q と内圧 P_i 、外圧 P_o との関係は下式となる。

$$Q = C(P_i - P_o)$$

$$= A(P_i^2 - P_o^2)$$

上式の関係から、内圧を 1MPa としたときの換算漏洩量(1MPa 蒸気換算漏洩量と呼ぶ) Q_1 は下式から求められる。

$$Q_1 = Q_s (P_i^2 - P_o^2) / (P_{is}^2 - P_o^2)$$

Q_1 : 1MPa 蒸気換算漏洩量(Pa-m³/s)

Q_s : 蒸気漏洩量 (Pa-m³/s)

P_o : 外圧(大気圧=1.013x10⁵ Pa)

P_{is} : 内圧(加熱温度での飽和蒸気圧 Pa)

P_{i1} : 内圧(1MPa=1x10⁶ Pa)

5. 結果と考察

蒸気シール試験の漏洩量の結果を Table 2,3, Fig.5、圧縮永久ひずみの結果を Table 4、試験前後の試料の外観を Table 5,6 に示す。なお、加熱温度 300℃の試験No.4 は加

熱を 168 時間で終了した。

Table 2 Results of Leak rate at 250°C

試料	TOMBO No.NU2670-EP-01 (EP-176)				
線量	1MGy				
環境	飽和水蒸気				
加熱温度	250°C				
飽和蒸気圧	3.98MPa				
試験No.	n1		n2		
加熱時間	重量	1MPa	重量	1MPa	
hr	漏洩量	蒸気換算	漏洩量	蒸気換算	
	mg/hr	漏洩量	mg/hr	漏洩量	
		Pa-m ³ /s		Pa-m ³ /s	
24	12.6	4.4E-05	13.1	4.5E-05	
72	12.3	4.3E-05	12.2	4.2E-05	
168	12.2	4.2E-05	12.2	4.2E-05	
336	11.9	4.1E-05	11.6	4.0E-05	

Table 3 Results of Leak rate at 300°C

試料	TOMBO No.NU2670-EP-01 (EP-176)				
線量	1MGy				
環境	飽和水蒸気				
加熱温度	300°C				
飽和蒸気圧	8.59MPa				
試験No.	n3		n4		
加熱時間	重量	1MPa	重量	1MPa	
hr	漏洩量	蒸気換算	漏洩量	蒸気換算	
	mg/hr	漏洩量	mg/hr	漏洩量	
		Pa-m ³ /s		Pa-m ³ /s	
24	4.2	2.9E-06	26.3	1.8E-05	
72	2.6	1.8E-06	20.2	1.4E-05	
168	2.6	1.8E-06	16.9	1.2E-05	
336	1.6	1.1E-06	—	—	

※—: 未測定

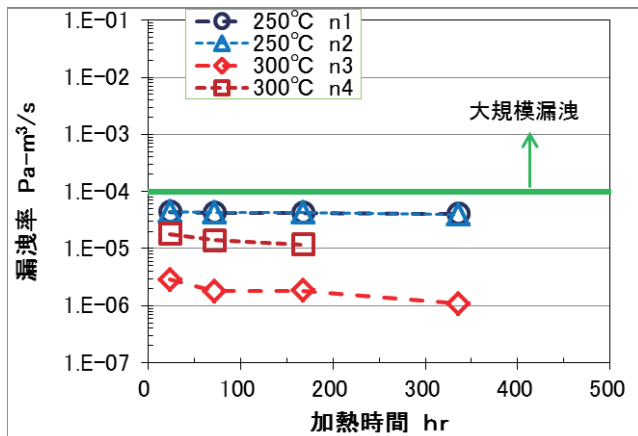


Fig.5 Leak rate for heating time

Table 4 Results of Compression set

試料	TOMBO No.NU2670-EP-01 (EP-176)			
線量	1MGy			
環境	飽和水蒸気			
加熱温度	250°C		300°C	
飽和蒸気圧	3.98MPa		8.59MPa	
試験No.	n1	n2	n3	n4
加熱時間	336hr	336hr	336hr	168hr
圧縮永久ひずみ	32%	29%	100%	81%

Table 5 Sample before test and after test at 250°C

試料	TOMBO No.NU2670-EP-01 (EP-176)	
線量	1MGy	
環境	飽和水蒸気	
加熱温度	250°C	
飽和蒸気圧	3.98MPa	
試験No.	n1	n2
試験前		
加熱時間	336hr	336hr
試験後		

Table 6 Sample before test and after test at 300°C

試料	TOMBO No.NU2670-EP-01 (EP-176)	
線量	1MGy	
環境	飽和水蒸気	
加熱温度	300°C	
飽和蒸気圧	8.59MPa	
試験No.	n3	n4
試験前		
加熱時間	336hr	168hr
試験後		

加熱温度 250℃、300℃ いずれの試験も 1MPa 蒸気換算漏洩量が大规模漏洩の判断基準である $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、大规模漏洩は発生していない。

また、試験後の試料の線径から求めた圧縮永久ひずみは 250℃では 30%程度であり、使用限界の指標[9]とする 80%よりも十分低い値であった。しかし、300℃では圧縮永久ひずみは 80%を超えていた。

300℃で試験した試料の外観をみると、Oリング外周部のフランジ面にOリングの配合物と思われる付着物があり、劣化が進んでいるように見える。また、フランジ面へ強固に固着しており、フランジからOリングをはずすのも困難な状況であった。

なお、250℃では試験前後で試料に大きな違いはみられていない。

以上のことから、「改良 EPDM ゴム」EP-176 は 250℃、336 時間での状況下でも圧縮永久ひずみが十分小さく、シール機能を発揮した。

また、さらに厳しい 300℃、336 時間では劣化は見られ、圧縮永久ひずみも 80%を超えていたが、シール性能は維持されていた。

6. 結言

1.0MGy の放射線照射を行った「改良 EPDM ゴム」EP-176 は、シビアアクシデントの想定である 200℃、168 時間よりも厳しい 250℃、336 時間でも大规模漏洩は発生していない。

また、さらに厳しい 300℃、336 時間では、Oリングの劣化は見られるものの大规模漏洩は発生していないことから、「改良 EPDM ゴム」EP-176 のOリングとしてのシール性能の限界は 300℃、336 時間以上であることがわか

った。

参考文献

- [1] “第 202 回 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 議事録 (平成 27 年 3 月 3 日)”, 原子力規制委員会 (2015)
- [2] R. Yamamoto, K. Watanabe, K. Hanashima: “Endurance test report of rubber sealing materials for the containment vessel”, ICONE23-1610, JSME (2015)
- [3] 花島, “格納容器用改良 EPDM ゴム(EP-176)の高温・水蒸気シール性”, 日本保全学会第 12 回学術講演会要旨集, pp.121-128 (2015)
- [4] 花島, “格納容器用改良 EPDM ゴム(EP-176)の温度変化による圧縮永久ひずみの挙動”, 日本保全学会第 13 回学術講演会要旨集, pp.447-453 (2016)
- [5] 小林重雄, 谷田和雄: “ゴムガスケットのリーク試験”, 真空技術, Vol.7, No.2, pp.101-112, ISSN1883-7182 (1956)
- [6] “管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法”, JIS B 2490-2008, 解説 7 (2008)
- [7] 中川洋, “漏洩防止の理論と実際”, オーム社, 3 章 漏洩とは何か (1978)
- [8] “機器フランジ漏れ防止対策資料”, JPI-7B-88-2000, 9. 漏洩理論と測定方法 (2000)
- [9] 加藤治, 三枝利有: “輸送キャスク密封装置の耐熱限界の評価”, 電力中央研究所報告 U97101, 電力中央研究所 (1998).