

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

Behavior of compression set due to a change in temperature of
the containment vessel for improved EPDM rubber (EP-176)

ニチアス株式会社 花島 完治

Kanji Hanashima

Non Member

Abstract

In Japan, from the heat resistance and the steam resistance and the radiation resistance when the severe accident occurs, the sealing material of the containment vessel is instead to the silicone rubber, have come to adopt the EPDM rubber called "improved EPDM rubber". However, the compression set test to be evaluated for sealing properties, rubber gaskets changing the timing of radiation that its behavior is changed has been suggested. Therefore, for the "improved EPDM rubbers (EP-176)", we performed a compression set test with different timing of the irradiation, and to clarify the behavior. Further, the sealing material of the containment vessel, it is necessary to also maintain the sealing properties after the severe accident has ceased. For the "improvement EPDM rubber (EP-176)", we do the compression set test you change the heating conditions after a severe accident considerable amount of time, made it clear also that behavior.

Keywords: EPDM rubber, Silicone 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蒸気などのガスに対して高い気密性と抵抗性が要求され、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も十分なシール性能を有することが必要である。

この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、シリコンゴムは蒸気雰囲気下での耐久性に不安があり、EPDM ゴムは高温雰囲気下での耐久性に不安がある。

花島、山本らは「改良 EPDM ゴム」と呼ばれる EP-176 に“シビアアクシデント”を想定して放射線照射した試料の高温蒸気環境の圧縮永久ひずみ試験やシール試験を行い、従来のシリコンゴムや EPDM ゴムよりもより高い性能であることを示した[1],[2]。また、中野らは常温での圧縮永久ひずみ試験において、治具に試料をセット

した圧縮状態で放射線照射を行った場合、試験前の試料に放射線照射を行ったものよりも圧縮永久ひずみが大きくなることを示した[3]。ここで、格納容器用のゴムガスケットは圧縮状態で使用されるため、“シビアアクシデント”での特性をよりよく評価するためには、花島、山本らが行った放射線照射した試料の高温蒸気環境の圧縮永久ひずみ試験だけでなく、治具に試料をセットした圧縮状態で放射線照射したものの高温蒸気環境の圧縮永久ひずみ試験でも評価を行う必要がある。

そこで、今回、今後の格納容器で使用するゴムガスケットである「改良 EPDM ゴム」EP-176 について、治具にセットした圧縮状態で“シビアアクシデント”を想定した放射線照射を行った後、高温蒸気で加熱した圧縮永久ひずみ試験を行い、その挙動について検討した。

さらに、“シビアアクシデント”が終息し、温度が低下した後もゴムガスケットは十分なシール性能を有することが必要であるので、“シビアアクシデント”が終息した後に温度が低下した場合を想定した圧縮永久ひずみ試験を行い、その挙動についても検討した。

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ガスの漏れには、明らかに挙動が違う 2 種類の漏れがあることを確認した[4]。一つ

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

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ガスが通る接面漏れになる(Fig.1)。もう一つはゴムガスケットの内部をガスが透過する浸透漏れになる(Fig.2)。

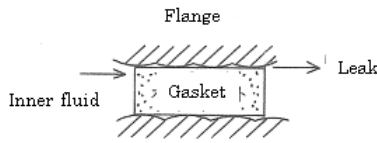


Fig.1 Contact surface leak

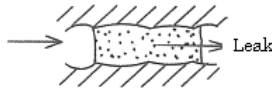


Fig.2 Penetration leak

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あり、この時の漏洩率は $1 \times 10^5 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以上になる[5]。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ことが判っている[4]。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 $1 \times 10^5 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 未満の微小な漏れになる。この浸透漏れはガスがゴムガスケットの内部を通過(拡散)するので、漏れが発生するまでに時間もかかる。“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、密封境界部のゴムガスケットを圧縮して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機構

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ゴムが劣化して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(永久ひずみ)の度合いを評価するのが、下式の圧縮永久ひずみ C_s になる。

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

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

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、接面漏れによる大規模な漏れの可能性が高くなる。

ここで、加藤らは大規模漏洩が発生する圧縮永久ひずみを推定し、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限界を評価した[5]。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た[1],[2]。

3. 試験

3.1 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 とする。一般特性を Table 1 に示す

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

3.2 圧縮永久ひずみ試験

圧縮永久ひずみ試験は JIS K 6262 に準拠して行った。放射線照射はすでに常温で照射した試料(圧縮前、Before)を試験治具に挟んで加熱する場合と試験治具に試料を挟んだ圧縮した状態の常温で照射した(圧縮中、During)後に加熱する場合の二つから選択した。加熱は大気中の乾熱と水蒸気の2種類の環境を選択した。さらに、“シビアア

クシデント”が終息した後、格納容器の温度が低下することを想定し、試験中に温度を低下させた圧縮永久ひずみ試験も行った。試験条件を下記に示す。

- ・ 試料形状：大型試験片外径φ29mm、厚さ12.5mm
- ・ 加熱環境：乾熱、蒸気
- ・ 放射線照射：線量 0.8MGy、1.2MGy
γ線(線源 Co60)、線量率 10kGy/hr
- ・ 水蒸気：試験温度での飽和蒸気
- ・ 試験温度：150°C、200°C、250°C
- ・ 試験時間：24hr(1day)、72hr(3day)、168hr(7day)、
168hr→168hr(7day)、720hr(30day)、
168hr→744hr(31day)、1272hr(53day)、
168hr→720hr(30day)→552hr(23day)

Table 2 Test condition

Test No.	Radiation		Environ-ment	Heating					
	Timing	Total dose MGy		1st		2nd		3rd	
				Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr
1-1	Before	0.8	Dry	200	24	-	-	-	-
1-2	Before	0.8	Dry	200	72	-	-	-	-
1-3	Before	0.8	Dry	200	168	-	-	-	-
1-4	Before	0.8	Dry	225	24	-	-	-	-
1-5	Before	0.8	Dry	225	72	-	-	-	-
1-6	Before	0.8	Dry	225	168	-	-	-	-
1-7	Before	0.8	Dry	250	24	-	-	-	-
1-8	Before	0.8	Dry	250	72	-	-	-	-
1-9	Before	0.8	Dry	250	168	-	-	-	-
2-1	Before	0.8	Steam	200	24	-	-	-	-
2-2	Before	0.8	Steam	200	72	-	-	-	-
2-3	Before	0.8	Steam	200	168	-	-	-	-
2-4	Before	0.8	Steam	225	24	-	-	-	-
2-5	Before	0.8	Steam	225	72	-	-	-	-
2-6	Before	0.8	Steam	225	168	-	-	-	-
2-7	Before	0.8	Steam	250	24	-	-	-	-
2-8	Before	0.8	Steam	250	72	-	-	-	-
2-9	Before	0.8	Steam	250	168	-	-	-	-
3-1	Before	0.8	Steam	200	168	150	168	-	-
3-2	Before	0.8	Steam	200	168	150	720	-	-
3-3	Before	0.8	Steam	200	168	150	744	-	-
3-4	Before	1.2	Steam	200	168	-	-	-	-
3-5	Before	1.2	Steam	200	168	150	168	-	-
3-6	Before	1.2	Steam	200	168	150	720	-	-
3-7	Before	1.2	Steam	200	168	150	744	-	-
3-8	Before	1.2	Steam	200	168	150	1272	-	-
3-9	Before	1.2	Steam	200	168	100	1272	-	-
3-10	Before	1.2	Steam	200	168	150	720	100	552
3-11	Before	1.6	Steam	200	168	150	168	-	-
4-1	During	0.8	No heat	-	-	-	-	-	-
4-2	During	0.8	Steam	200	168	-	-	-	-
4-3	During	0.8	Steam	200	168	150	744	-	-
4-4	During	1.2	No heat	-	-	-	-	-	-
4-5	During	1.2	Steam	200	168	-	-	-	-
4-6	During	1.2	Steam	200	168	150	744	-	-

Before : The irradiation before compression
During : The irradiation during compression

- ・ 試験数：各条件3個(n=3)
試験結果は3個の平均値とする
- ・ 圧縮率[(t0-t1)/t0]：25%

・ 試験後厚さ測定

乾熱 試験治具を恒温槽から取り出し、速やかに試験治具から試料を開放する。開放した試料は室温に30分間放置後に厚さを測定する。

蒸気 試験時間経過後に恒温槽の温度を下げ、80°C以下になってから試験治具を取り出し、30分間、室温で放置する。その後、試験治具から試料を開放し、厚さを測定する。

3.3 硬さ測定

蒸気暴露した圧縮永久ひずみ試験前後の試料について、平面部の硬さ測定を行う。試験前後の硬さの値から硬さ変化率Hr(Hardness rate)を求める。試験条件を下記に示す。

- ・ JIS K6253 準拠 タイプAデュロメーター

- ・ 試験数：各条件3個(n=3)

試験結果は3個の平均値とする

- ・ $Hr = (\text{試験後硬さ} - \text{試験前硬さ}) / \text{試験前硬さ}$

硬さ変化率が+：試験前よりも試料が硬くなる

硬さ変化率が-：試験前よりも試料が柔らかくなる

4. 結果

4.1 圧縮永久ひずみ

放射線を事前照射した乾熱および水蒸気の加熱における圧縮永久ひずみ試験の結果を Table3,4、Fig4 に示す。

Table 3 Compression set (1)

Test No.	Radiation		Environ-ment	Heating						Cs %	
	Timing	Total dose MGy		1st		2nd		3rd		Actual Value	Ave. Value
				Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr		
1-1	Before	0.8	Dry	200	24	-	-	-	-	9	9
										9	
										9	
1-2	Before	0.8	Dry	200	72	-	-	-	-	12	12
										12	
										12	
1-3	Before	0.8	Dry	200	168	-	-	-	-	20	19
										18	
										18	
1-4	Before	0.8	Dry	225	24	-	-	-	-	14	14
										14	
										14	
1-5	Before	0.8	Dry	225	72	-	-	-	-	16	15
										15	
										14	
1-6	Before	0.8	Dry	225	168	-	-	-	-	17	17
										17	
										17	
1-7	Before	0.8	Dry	250	24	-	-	-	-	15	14
										13	
										14	
1-8	Before	0.8	Dry	250	72	-	-	-	-	20	19
										19	
										19	
1-9	Before	0.8	Dry	250	168	-	-	-	-	24	24
										23	
										23	

Table 4 Compression set (2)

Test No.	Radiation Timing	Total dose MGy	Heating Environment	1st			2nd			3rd			Cs %	
				Temp. °C	Time hr		Temp. °C	Time hr		Temp. °C	Time hr		Actual Value	Ave. Value
2-1	Before	0.8	Steam	200	24		-	-	-	-	-	-	14 14 15	14
2-2	Before	0.8	Steam	200	72		-	-	-	-	-	-	17 18 17	17
2-3	Before	0.8	Steam	200	168		-	-	-	-	-	-	21 21 21	21
2-4	Before	0.8	Steam	225	24		-	-	-	-	-	-	16 16 17	16
2-5	Before	0.8	Steam	225	72		-	-	-	-	-	-	22 22 22	22
2-6	Before	0.8	Steam	225	168		-	-	-	-	-	-	26 25 23	25
2-7	Before	0.8	Steam	250	24		-	-	-	-	-	-	24 24 24	24
2-8	Before	0.8	Steam	250	72		-	-	-	-	-	-	28 26 26	27
2-9	Before	0.8	Steam	250	168		-	-	-	-	-	-	31 30 31	31

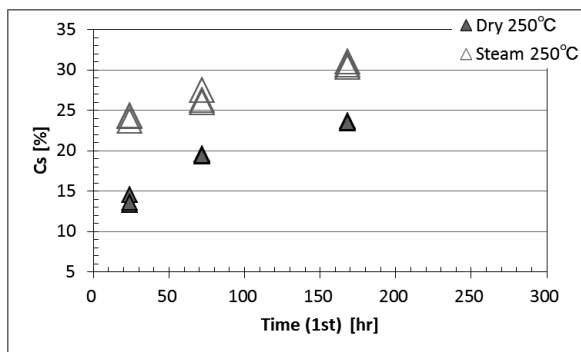
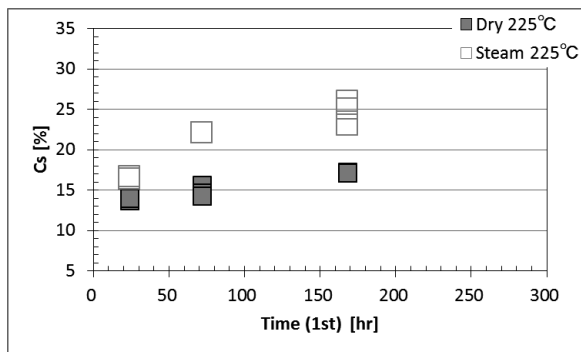
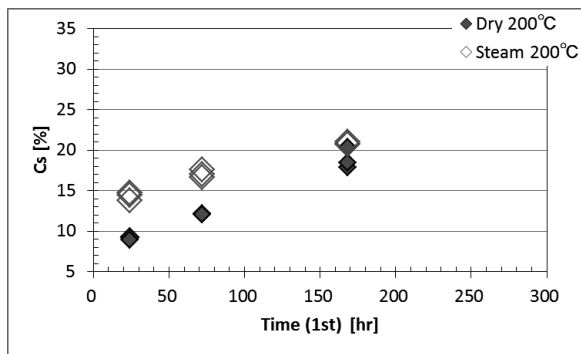


Fig.4 Compression set

Table 3,4 及び Fig.4 から、放射線を圧縮永久ひずみ試験前に照射(0.8MGy)した場合、加熱方法(乾熱および水蒸気)によらず、時間の経過(24hr,72hr,168hr)とともに圧縮永久ひずみは大きくなった。また、温度が高い方が圧縮永久ひずみは大きくなった。さらに、同じ時間、温度で、加熱環境が乾熱よりも水蒸気の方が圧縮永久ひずみは大きくなった。これらは、以前の報告と同様の結果となっている[1],[2]。

水蒸気での加熱の場合の加熱時間の対数と圧縮永久ひずみの関係を Fig.5 に示す。

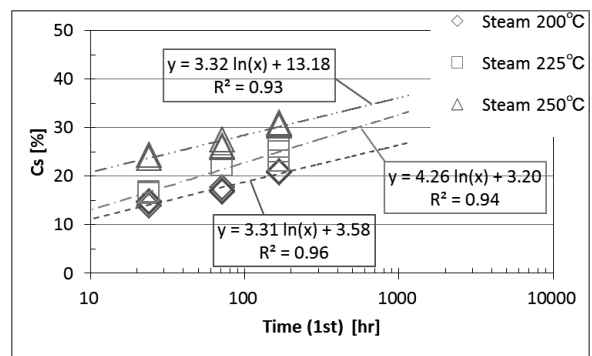


Fig.5 Time and Compression set (steam)

Fig.5 から、加熱時間の対数と圧縮永久ひずみの関係は良い直線性($R^2 : 0.93 \sim 0.96$)を示しており、各温度での加熱時間の対数と圧縮永久ひずみの直線の傾きはほぼ同じ傾き(3.31~4.26)を示している。このことは、水蒸気加熱での時間による圧縮永久ひずみの増加は今回の温度範囲で同一の機構により発生していると示唆される。

次に、加熱温度を途中で下げて水蒸気加熱を継続したときの圧縮永久ひずみ試験(1st : 1段階目加熱、2nd : 2段階目加熱、3rd : 3段階目加熱)の結果 Table5、Fig.6,7 に示す。

Table 5 Compression set (3)

Test No.	Radiation Timing	Total dose MGy	Heating Environment	1st		2nd		3rd		Cs %	
				Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Actual Value	Ave. Value
3-1	Before	0.8	Steam	200	168	150	168	-	-	18 18 17	17
3-2	Before	0.8	Steam	200	168	150	720	-	-	22 23	23
3-3	Before	0.8	Steam	200	168	150	744	-	-	22 22 22	22
3-4	Before	1.2	Steam	200	168	-	-	-	-	21 21 19	21
3-5	Before	1.2	Steam	200	168	150	168	-	-	16 18 19	18
3-6	Before	1.2	Steam	200	168	150	720	-	-	26 21 19	22
3-7	Before	1.2	Steam	200	168	150	744	-	-	24 22 22	23
3-8	Before	1.2	Steam	200	168	150	1272	-	-	26 22 22	23
3-9	Before	1.2	Steam	200	168	100	1272	-	-	25 24 23	24
3-10	Before	1.2	Steam	200	168	150	720	100	552	26 24 25	25
3-11	Before	1.6	Steam	200	168	150	168	-	-	19 19 20	20

Table 5、Fig.6 の 2 段階目(2nd)の加熱時間が 744hr までの場合、圧縮永久ひずみ試験前に照射する放射線の線量 0.8MGy と 1.2MGy であまり変わりなく、1.6MGy になるとわずかに大きくなった。また、2 段階目の加熱時間が長くなると圧縮永久ひずみ率はわずかに大きくなる傾向が見られるが、2 段階目の加熱を行っていないものの圧縮永久ひずみとほとんど変わらなかった。

Table 5、Fig.7 の 2 段階目の加熱がより長期の 1,272hr までの場合(2 段階目 100°Cまたは 150°C)と 2 段階目の加熱を 150°C、720hr として 3 段階目の加熱を 100°C、552hr(720hr+552hr=1,272hr)とした場合で、圧縮永久ひずみはほとんど変わらなかった。

以上から、水蒸気加熱において、200°C、168hr 加熱後に温度を下げて加熱を継続しても圧縮永久ひずみは 200°C、168hr 加熱のものとはほとんど変わらないことが判った。

次に、放射線を圧縮中に照射した試料の圧縮永久ひずみ試験の結果を Table6、Fig.8 に示す。

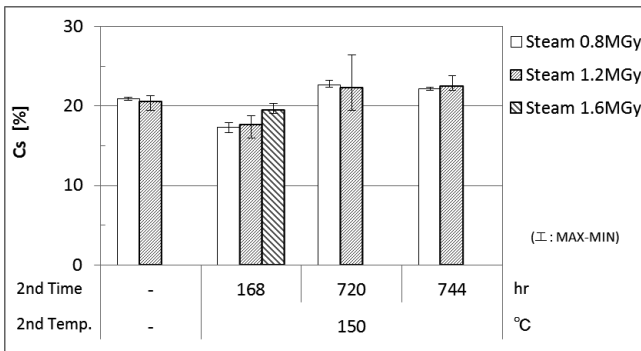


Fig.6 Compression set (2steps-heat)

Table 6 Compression set (4)

Test No.	Radiation Timing	Total dose MGy	Heating Environment	1st		2nd		3rd		Cs %	
				Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Actual Value	Ave. Value
4-1	During	0.8	No heat	-	-	-	-	-	-	47 37 47	43
4-2	During	0.8	Steam	200	168	-	-	-	-	51 49 51	51
4-3	During	0.8	Steam	200	168	150	744	-	-	53 54 52	53
4-4	During	1.2	No heat	-	-	-	-	-	-	58 58 59	58
4-5	During	1.2	Steam	200	168	-	-	-	-	63 61 61	62
4-6	During	1.2	Steam	200	168	150	744	-	-	61 60 61	61

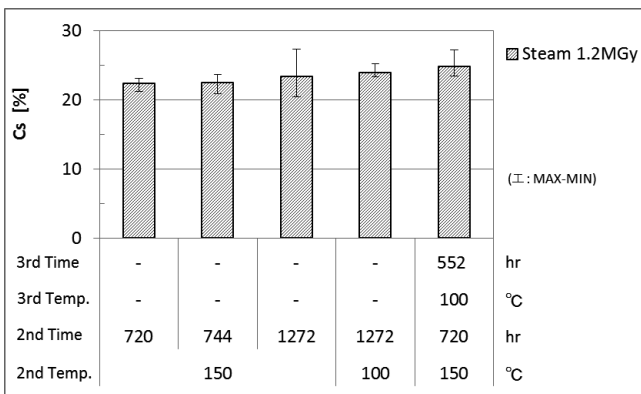


Fig.7 Compression set (2steps, 3steps-heat)

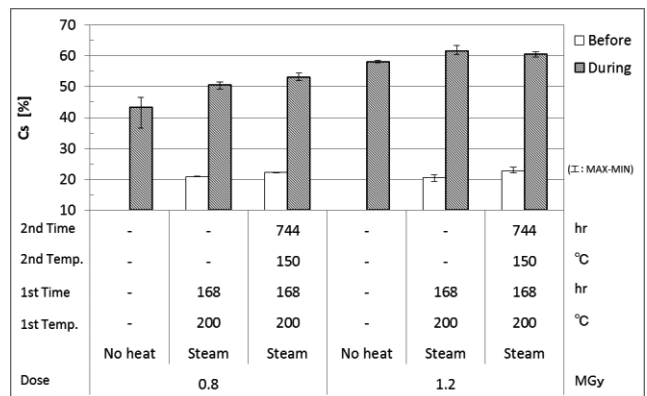


Fig.8 Compression set (Radiation Timing)

Table 6、Fig.8 から、圧縮永久ひずみ試験中(During)に放射線照射すると試験前(Before)に放射線照射したものより圧縮永久ひずみは非常に大きくなった。特に試験中に放射線照射すると加熱しない常温の状態でも圧縮永久ひずみは非常に大きくなった。さらに、試験中に放射線照射したものは線量が高い1.2MGyの方が0.8MGyのものよりも圧縮永久ひずみが大きくなった。

4.2 硬さ

水蒸気加熱の場合の圧縮永久ひずみ試験前後の硬さの変化率 Hr を Table7 に示す。

Table7 Hardness rate

Test No.	Radiation		Environ-ment	Heating						Hr %
	Timing	Total dose MGy		1st		2nd		3rd		
				Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	Temp. °C	Time hr	
2-1	Before	0.8	Steam	200	24	-	-	-	-	2.1
2-2	Before	0.8	Steam	200	72	-	-	-	-	3.1
2-3	Before	0.8	Steam	200	168	-	-	-	-	2.3
2-4	Before	0.8	Steam	225	24	-	-	-	-	1.8
2-5	Before	0.8	Steam	225	72	-	-	-	-	0.5
2-6	Before	0.8	Steam	225	168	-	-	-	-	0.8
2-7	Before	0.8	Steam	250	24	-	-	-	-	0.2
2-8	Before	0.8	Steam	250	72	-	-	-	-	-0.7
2-9	Before	0.8	Steam	250	168	-	-	-	-	-0.6
3-1	Before	0.8	Steam	200	168	150	168	-	-	2.7
3-2	Before	0.8	Steam	200	168	150	720	-	-	3.0
3-3	Before	0.8	Steam	200	168	150	744	-	-	2.8
3-4	Before	1.2	Steam	200	168	-	-	-	-	3.8
3-5	Before	1.2	Steam	200	168	150	168	-	-	4.3
3-6	Before	1.2	Steam	200	168	150	720	-	-	4.3
3-7	Before	1.2	Steam	200	168	150	744	-	-	4.9
3-8	Before	1.2	Steam	200	168	150	1272	-	-	4.7
3-9	Before	1.2	Steam	200	168	100	1272	-	-	4.6
3-10	Before	1.2	Steam	200	168	150	720	100	552	4.3
3-11	Before	1.6	Steam	200	168	150	168	-	-	5.4
4-1	During	0.8	No heat	-	-	-	-	-	-	0.7
4-2	During	0.8	Steam	200	168	-	-	-	-	3.0
4-3	During	0.8	Steam	200	168	150	744	-	-	3.1
4-4	During	1.2	No heat	-	-	-	-	-	-	1.6
4-5	During	1.2	Steam	200	168	-	-	-	-	2.7
4-6	During	1.2	Steam	200	168	150	744	-	-	4.1

Table 7 から、放射線の線量が最も高い1.6MGyの場合に硬さ変化率がわずかに5%を越えたが、線量が1.2MGy以下では、すべて硬さ変化率は5%以下となり、圧縮永久ひずみ試験での試料の硬化は見られなかった。従って、今回の圧縮永久ひずみ試験で、放射線の線量が1.2MGy以下の場合、試料の弾性にあまり変化はないと考える。

5. 考察

線量0.8MGyまたは1.2MGyで、200°C、168hr後に温度が150°Cに下がって加熱が継続された場合に圧縮永久ひずみはほとんど変わらない理由、機構を考える。温度、時間が異なっても圧縮永久ひずみが同じ値の場合、発生

している永久ひずみは同じなので、ゴムの弾性を示す硬さも大きな変化がなければ劣化状況は同じと考える。例えば、150°Cと200°Cで圧縮永久ひずみが同じ値ならば劣化状態は同じと考えると、200°Cから150°Cに温度が変わった場合、150°Cに変わったときの200°Cでの圧縮永久ひずみの値となる150°Cでの圧縮永久ひずみの時間を求め、150°Cに温度が変わってからの圧縮永久ひずみは求めた150°Cでの時間からの変化になると考えられる。

ここで、Fig.5 から、水蒸気、150°C(0.8MGy)での対数時間による圧縮永久ひずみの変化($Cs = a \ln(t) + b$ 、 Cs : 圧縮永久ひずみ、 t : 時間、 a : 直線の傾き、 b : y 切片)を考える。Fig.5 では、200°C、225°C、250°Cで直線の傾き a はほぼ同じなので、150°Cでも直線の傾き a が200°C、225°C、250°Cと同じになると考え、その平均値を150°Cでの直線の傾き a : 3.630 とする。次に、200°C、225°C、250°Cの直線の傾き a を150°Cと同じく3.630 とし、時間とそのときの各温度での圧縮永久ひずみから直線の式の対数時間に対する各温度での y 切片の値を求め、温度とその y 切片の関係を求める。これを Fig.9 に示す。

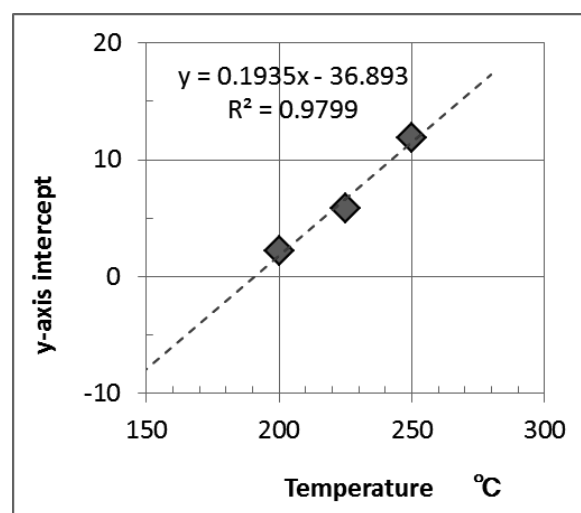


Fig.9 Temperature and y-axis intercept

Fig.9 から、温度と y 切片は良い直線性を示しているのので、これから150°Cでの y 切片の値は、 $y = -7.868$ となる。従って、150°Cでの時間と圧縮永久ひずみの関係は下記の推定式、

$$Cs = 3.630 \ln(t) - 7.868$$

となる。

今回の水蒸気、200°C(0.8MGy)での圧縮永久ひずみの結果と上記の水蒸気、150°C(0.8MGy)での時間による圧縮永久ひずみの変化の推定式を Fig.10 に示す。

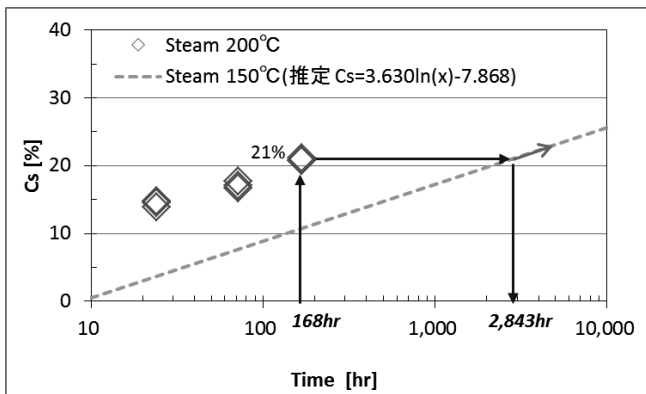


Fig.10 Time and Compression set

Table 4, Table No2-3 から水蒸気、200°C(0.8MGy)、168hr の圧縮永久ひずみは 21%、水蒸気、150°C(0.8MGy)、744hr の圧縮永久ひずみは推定式から 16%と求まる。このとき、200°C、168hr 後に 150°C、744hr となる場合の圧縮永久ひずみは Tab15、Test No3-7 から 23%となるが、200°C、168hr の圧縮永久ひずみ 21%と 150°C、744hr の圧縮永久ひずみ 16%との和と考えると 21+16=37%となり、実際の 23%よりも非常に大きな値となる。これは 200°C、168hr の経過で、試料にはすでに永久ひずみが発生しているのに永久ひずみが発生していない試料の 150°C、744hr 後の圧縮永久ひずみ 16%を加えたため圧縮永久ひずみを大きく見積もってしまったことによると考える。

そこで、圧縮永久ひずみが同じ値では、150°Cと 200°Cでの試料の永久ひずみは同じになるので、圧縮永久ひずみが同じ値ならば、温度が異なっても同じ状態と考えると 200°C、168hr 後、150°C、744hr 経過した場合の圧縮永久ひずみは、200°Cと 150°Cの圧縮永久ひずみを単純に加算するのでなく、200°C、168hr の圧縮永久ひずみ 21%になる 150°Cでの時間から 744hr 経過したときの圧縮永久ひずみの値とすればよいことになる。

具体的に Fig.10 で説明する。水蒸気、150°C(0.8MGy)での圧縮永久ひずみの対数時間による変化の直線性から、150°Cで圧縮永久ひずみが 21%になる時間を求めると 2,843hr となる。そこで、150°Cにおいて、2,843hr から、さらに 744hr 経過したときの圧縮永久ひずみを求めると、下式のように 22%となる。

$$Cs = 3.630Ln(2,843+744) - 7.868$$

$$\doteq 22\%$$

これは、実際の値 23%(Tab15、Test No3-7)とほぼ同じとなり、200°C、168hr 後に 150°C、744hr 経過しても 200°C、

168hr 後の圧縮永久ひずみは 21%とほとんど変わらないことをよく説明している。

6. 結言

以上から、改良 EPDM と呼ばれる EP-176 について、シール性に関わる圧縮永久ひずみの挙動について、以下のことが判った。

- 乾熱、水蒸気ともに温度が高く、加熱時間が長い方が圧縮永久ひずみは大きい。
- 乾熱よりも水蒸気の方が圧縮永久ひずみは大きい。
- 試験前に放射線照射した試料での圧縮永久ひずみ試験よりも試料を治具にセットした圧縮状態で放射線を照射した圧縮永久ひずみ試験の方が圧縮永久ひずみは非常に大きくなる。
- 試験前に放射線を照射した試料での圧縮永久ひずみ試験では、放射線の線量が異なっても圧縮永久ひずみはほとんど変わらない。
- 試料を治具にセットした圧縮状態で放射線を照射した圧縮永久ひずみ試験では、線量が大きい方が圧縮永久ひずみは大きくなる。
- 水蒸気、200°C、168hr 加熱した後、150°Cまで温度を下げた加熱を継続した場合、圧縮永久ひずみは 200°C、168hr での値とほとんど変わらない。

参考文献

- [1] R. Yamamoto, K. Watanabe, K. Hanashima: "Endurance test report of rubber sealing materials for the containment vessel", ICONE23-1610, JSME (2015)
- [2] 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)
- [3] M. Nakano, H. Sasaki: "Radiation resistance of rubber compounds for gaskets (second report)", ICONE20POWER2012-54985, ASME (2012)
- [4] 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)
- [5] 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).