

大型角型容器を使用した場合の充填固化体の固型化条件、
大型角型容器の蓋締めを使用する EPDM ガスケットの長期健全性
及び大型角型容器の蓋締め要領

2023 年 9 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

目 次

第 1 章 背景及び目的.....	1-1
第 2 章 大型角型容器を使用した場合の充填固化体の固型化条件.....	2-1
第 3 章 大型角型容器の蓋締め時に使用する EPDM ガasket の長期健全性.....	3-1
第 4 章 大型角型容器の蓋締め要領.....	4-1
第 5 章 参考文献.....	5-1

第1章 背景及び目的

役目を終え、運転を停止した商業用原子力発電所の廃止措置において、大量に発生する放射能レベルの低い廃棄物の効率的な処分の実現に向けて、大型角型容器を活用するための様々な検討が進められている。

本書では、放射能レベルの低い廃棄物を大型角型容器に収納し充填固化体を製作する場合の製作要件として、固型化条件、大型角型容器の蓋締め使用する EPDM ガasket の長期健全性評価及び大型角型容器の蓋締め要領に関する概要をまとめている。

第2章 大型角型容器を使用した場合の充填固化体の固型化条件

ここでは、放射能レベルの低い廃棄物を大型角型容器に収納し充填廃棄体を製作する場合の製作要件として、固型化条件の概要を示す。

2.1. 大型角型容器を使用した固型化条件の概要

商業用原子力発電所の廃止措置に伴う解体工事などから発生する比較的大型な放射性廃棄物は、廃棄体容器として大型角型容器を使用して、次のステップによって、容器への固型化を行う。

- a) 放射性廃棄物の分類
- b) 放射性廃棄物の分別
- c) 放射性廃棄物の処理
- d) 放射性廃棄物の収納
- e) 固型化／固型化材料等の注入
- f) 固型化後の養生
- g) 蓋の取り付け

なお、本書で廃棄体容器として使用する大型角型容器は、蓋をボルトで締め付ける方式を想定している。上記の各ステップについて以下詳細を示す。

(1) 放射性廃棄物の分類

主に、原子炉の解体工事にて大型機器などを切断した際に、その解体片等が放射性廃棄物として発生する。これらが、大型角型容器を使用した充填固化の対象となる放射性廃棄物である。これらの放射性廃棄物は、吸水性や形状の違いから、容器収納時の間隙への固型化材料の注入性が異なることを踏まえて、**表 1** に示すように、大きく次のように分類される。

- －非吸水性・塊状廃棄物(機器などの金属類)
- －吸水性・塊状廃棄物(コンクリート類)
- －非吸水性・管状廃棄物(配管などの金属類)

表 1—固型化の対象とする放射性廃棄物の分類 [1]

放射性廃棄物の分類	放射性廃棄物の種類	廃棄物の特徴
非吸水性・塊状廃棄物	—機器類、容器類、弁類類などの金属類	金属製の吸水性が小さい廃棄物で、切断後などの廃棄物の間隙が比較的大きく、充填する固型化材料等の注入性を阻害しない。
吸水性・塊状廃棄物	—コンクリートブロック —コンクリート片	吸水性があり、充填する固型化材料等の注入性を阻害するおそれがある。
非吸水性・管状廃棄物	—配管類 —塩化ビニルパイプ —ケーブル類	金属製、塩化ビニル製などの吸水性が小さい廃棄物であるが、形状が管状又は棒状で、廃棄物の間隙へ充填する固型化材料等の注入性を阻害するおそれがある。
<p>注記 非吸水性・管状廃棄物を圧縮処理した放射性廃棄物は、固型化材料等の充填性の観点からは、非吸水性・塊状廃棄物に分類される。</p>		

(2) 放射性廃棄物の分別

発生した放射性廃棄物は、放射能濃度の評価条件、廃棄物の間隙への固型化材料の注入性、放射性廃棄物の種類などを踏まえて、**表 1** に示す放射性廃棄物の分類ごとに分別する。

(3) 放射性廃棄物の処理

分別した放射性廃棄物は、大型角型容器に収納するために、必要に応じて切断などの処理を行う。

(4) 放射性廃棄物の収納

(1)項から(3)項のステップを経た放射性廃棄物は、放射性廃棄物の分類ごとに、**表 2** に示した容器への収納にかかる廃棄物の制限条件(収納位置、廃棄物形状・最小寸法)に従って、大型角型容器に収納する。

表 2—放射性廃棄物の大型角型容器への収納にかかる制限条件^[1]

放射性廃棄物の分類	容器への収納制限 (収納位置、廃棄物形状)	放射性廃棄物の寸法制限
非吸水性・塊状廃棄物	収納制限なし	最小寸法：40 mm 以上 ^{a)}
吸水性・塊状廃棄物	容器中央にコンクリートブロックを収納し、コンクリートブロックと容器との間に破碎したコンクリート片を収納する。	コンクリート片の最小寸法：40 mm 以上 ^{a)} コンクリートブロック：容器に収納した状態で、隙間が 20 cm 程度となる寸法 (コンクリートブロックを複数収納する場合は、その集合体の状態で、隙間が 20 cm 程度となる寸法)
非吸水性・管状廃棄物	横置き収納した管状廃棄物の長軸方向の端と容器との間に、固型化材料等の注入部(端部)の空間を設けて収納 ^{b)} する。	長さ：1 300 mm 以下 外径：21.7 mm 以上
<p>注^{a)} 最小寸法未満のコンクリート片などの粒状廃棄物を多く含まないとする目安である。</p> <p>注^{b)} 可能であれば、管状廃棄物は固型化材料の注入側を低くした傾斜を設けることが望ましい。</p>		

(5) 固型化／固型化材料等の注入

本書では、放射性廃棄物の固型化の方法は、固型化材料等の容器上部からの注入による充填固化を想定している。

放射性廃棄物を収納した容器内に、あらかじめ、均質に練り混ぜた固型化材料等を、表 3 に示した固型化材料等の注入条件の管理項目を満足するように、容器の上部から注入する。なお、固型化材料として使用するセメントは、JIS R 5210 又は JIS R 5211 に定めるセメント、若しくは、これらと同等以上の品質をもつセメントを使用する。

表 3—固型化材料等の注入条件の範囲^[1]

注入条件の管理項目	注入条件の管理内容
固型化材料等の注入速度	界面上昇速度：3 m/h～9 m/h
固型化材料等の注入位置	吸水性・塊状廃棄物：上部、対角隅 2 か所 ^{a)} 非吸水性・管状廃棄物：上部、端部中央 1 か所 ^{a)} 上記以外：上部、中央 1 か所
<p>注^{a)} “対角隅”とは、容器の対角線上にある隅の部分の意味。また、“端部”とは、管状廃棄物を横置き収納した管状廃棄物の片方の開口部の端と容器との空間の意味。</p>	

(6) 固型化後の養生

a. 養生の目的

固型化材料等の注入により放射性廃棄物が大型角型容器と一体となり、固型化材料等の強度、耐久性などが所定の水準を達成するために、適切な温度の下で、水分の逸散を防止

し、かつ有害な作用の影響を受けないようにすることが必要であり、そのために、一定の期間は養生を行う。

ここでいう養生は、固型化材料等の注入後に固型化材料等の流動性がなくなるまでの短期的な養生について示すものであり、この短期的な養生期間内に、廃棄体が傾くような搬送及び省撃又は振動が加わるような取扱いを行うことを避けなければならない。

固型化材料等の原材料にセメントを用いる場合、養生方法に関して示方書に記載されている、次に示した養生の目的を参考とすることが可能である。

- －湿潤に保つ。
- －温度を制御する。
- －有害な作用に対して保護する。

b. 養生の方法

養生の方法は、示方書に記載されている養生の目的を考慮して、次のように行うことが望ましい。

(a) 湿潤に保つ 廃棄体製作上では“水分の逸散を防ぐ”ことが重要であり、そのための方法は、次のとおりである。

- －硬化開始までの凝結の期間は、日光の直射、風などによる水分の逸散を防ぐよう、建屋内(室内)で養生する。
- －固型化材料等の露出面は、硬化中の乾燥による収縮を小さくするため、養生の期間は極度に乾燥しないように留意する。

(b) 温度を制御する 廃棄体製作上では“適切な温度条件に保つ”ことが重要であり、そのための方法は、次のとおりである。

- －固型化材料等が硬化する反応は、温度によって著しく影響を受けるため、廃棄体は、十分な硬化が進むまで、硬化に必要な温度条件に保ち、急激な温度変化のないようにするため、建屋内(室内)で養生する。

(c) 有害な作用に対して保護する 廃棄体製作上では“有害な作用から保護する”ことが重要であり、そのための方法は、次のとおりである。

- －十分に硬化していない固型化材料等は、衝撃、過大な荷重、振動などによって、ひび割れなどの損傷を受けやすいため、養生期間中は予想される振動、衝撃、荷重などの有害な作用から保護する。

c. 養生の期間

一般的なコンクリートの凝結過程では、養生温度は、凝結性状に著しく影響を及ぼすため、温度管理の程度によって、養生すべき時間に対する影響を考慮する必要がある。養生の期間は、周囲温度などに応じて、あらかじめ定めて管理する。

(7) 蓋の取り付け

a. 蓋の取り付け全般

養生を終えた廃棄体容器に、蓋を取付け、蓋が固定されるようボルト締めを行う。

また、蓋、ガスケット、ボルトの保管状態及び保管期間にも留意が必要である。

b. 蓋の取り付けの目的

廃棄体の密閉性に関しては、内容物が固型化物であるため、固型化物そのものによって一定程度の放射性物質の閉じ込め性が確保され、放射性廃棄物の飛散又は漏えいが生じにくいと考えられるが、埋設施設での“最大の高さからの落下による衝撃によって飛散又は漏えいする放射性物質の量が極めて少ないこと”が必要であるため、蓋の取付けによって、落下時に生じた粉砕物の廃棄体外への飛散を防ぐ必要がある。

c. 接合面及びガスケット

蓋と容器本体との接合面は、平面度などに異常がなく、清浄とする。また、ガスケットを使用する場合は、内容物を容易に散逸させない形状、密閉性の良い材料を用いる。

d. 蓋の取付け

ボルトを用いた蓋の取り付けは、所定の締付け手順、締付けトルクの管理などによって行い、かつ、締付けトルクが均等になるよう管理する。

2.2. 固型化条件の参考基礎データ

大型角型容器への放射性廃棄物の収納条件、固型化材料等の注入条件を設定するために実施された実規模模擬試験の試験条件及び試験結果を示した基礎データを以下に示す。

(1) 大型角型容器を用いた固型化の試験条件

a. 試験対象廃棄物

大型角型容器への固型化材料等の充填性試験において使用した 3 種類の模擬廃棄物の条件を、表 4 に示す。

表 4—固型化試験に使用した模擬廃棄物 ^[1]

放射性廃棄物の分類	模擬廃棄物の種類	模擬廃棄物の寸法	吸水率
非吸水性・塊状廃棄物	玉石	最大径：50 mm 最小径：40 mm	0.0 %
吸水性・塊状廃棄物	再生クラッシュラン	最大径：60 mm 最小径：40 mm	4.7 %
非吸水性・管状廃棄物	鋼管	外径：21.7 mm 内径：17.4 mm 管長：1 300 mm	0.0 %
用語説明 再生クラッシュラン： 工事現場から搬出される建設副産物であるコンクリート塊などを再利用し、製造した再生骨材。			

b. 固型化材料等の配合条件例

大型角型容器への固型化材料等の充填性試験において適用した固型化材料等の配合条件例を、表 5 に示す。

表 5—固型化試験に適用した固型化材料等の配合条件例 [1]

W/B (%)	S/P 比	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	P		S	SP	AD
				SFPC	FA			
48	0.8	2.5	350	729	217	760	5.68	28.4
記号説明								
W : 水、SFPC : シリカフェームセメント、FA : フライアッシュ、S : 細骨材、P : 混和剤、SP : 高性能 AE 減水剤、AD : 硬化促進剤、W/B : W/SFPC×100 %								

c. 固型化材料等の練り混ぜ後の性状

大型角型容器への固型化材料等の充填性試験において、模擬廃棄物を収納した大型角型容器内に注入した固型化材料等の性状(流動性、ブリーディング率及び圧縮強度)を、表 6 に示す。

表 6—固型化試験に使用した固型化材料等の性状 [1]

放射性廃棄物の分類	試験 No	P ロート流下時間(秒) ^{a)}	ブリーディング率(%)	28 日圧縮強度 (N/mm ²) ^{b)}
非吸水性・塊状廃棄物	1	44.7	0.0	64.0
	2	54.3	0.0	63.6
吸水性・塊状廃棄物	1	28.7	0.0	64.3
	2	27.0	0.0	64.5
非吸水性・管状廃棄物	1	42.0	0.0	60.2
	2	30.5	0.0	61.7
注 ^{a)} 充填前の練り混ぜた固型化材料等の状態での測定値。				
注 ^{b)} 採取した固型化材料等 3 点の平均値。				

d. 模擬廃棄物の収納条件及び注入条件

大型角型容器への固型化材料等の充填性試験において、大型角型容器への模擬廃棄物の収納条件及び固型化材料等の注入条件を、表 7 に示す。

表 7—模擬廃棄物の収納条件及び固型化材料等の注入条件 ^[1]

放射性廃棄物の分類	模擬廃棄物の収納状態	模擬廃棄物の収納の実積率	固型化材料等の注入位置	固型化材料等の注入速度 ^{b)}
非吸水性・塊状廃棄物	容器内に玉石(詳細は、表 4 参照)を収納した。	玉石収納部：67.7%	容器上部、中央 1 か所	3 m/h から 9 m/h
吸水性・塊状廃棄物	容器中央部にコンクリートブロック(1.2 m×1.2 m×1 m)を定置し、その周囲に再生クラッシュラン(詳細は、表 4 参照)を容器内に収納した。	再生クラッシュラン収納部：62.0%	容器上部の隅、対角 2 か所	3 m/h から 9 m/h
非吸水性・管状廃棄物	容器内に鋼管(詳細は、表 4 参照)2,906 本を水平に俵積みして収納した。鋼管の開口部と容器との間は 150 mm の隙間を設けた。	鋼管収納部：29.9% ^{a)}	鋼管の開口部と容器との隙間の 1 か所	3 m/h から 9 m/h
<p>注^{a)} 鋼管の内部及び鋼管を積み重ねた間隙の空隙を除いた鋼管自体の体積割合。 注^{b)} 固型化材料等の注入界面上昇速度。</p>				

(2) 大型角型容器を使用した固型化試験結果

a. 大型角型容器を使用した固型化試験の目標条件

(a) 固型化試験の目標条件の項目

大型角型容器を使用した固型化試験結果の評価に当たって、考慮すべき目標条件には、次の条件を含める。

- 固型化材料等の充填性 1(充填後の廃棄体内の残空隙量の低減)
(安全審査の前提条件及びオーバーフロー防止)
- 固型化材料等の充填性 2(固型化材料等の注入時の流動勾配¹ が小さい。)
(運転管理上の容器からの固型化材料等のオーバーフロー防止)
- 固型化後の強度(一体的に固型化できている強度)
(固型化した固型化部分の圧縮強度又は固型化材料等の圧縮強度)

(b) 残空隙量の目標値

廃棄体中の内部空隙としては、安全審査条件などを考慮した空隙量以下で製作できることを目標とする必要がある。しかしながら、大型角型容器を使用した廃棄体に関する埋設事業に関する安全審査は、これまでに行われていないことから、過去に適用された空隙量を判断材料とする。

なお、廃棄体上部の空隙(空間)は、固型化時の注入した固型化材料等のオーバーフローを防ぐためにも必要であることから、次の条件を判断条件とすることが望ましい。

- 安全審査の廃棄体の空隙量の前提条件:30%以下
- 固型化時の注入した固型化材料等のオーバーフロー防止:上部空隙率 10%を管理目標

¹ 角型容器の上部(1 か所又は 2 か所)から固型化材料等を注入すると、注入箇所直下で固型化材料等の表面の高さが高く、それより離れているところでは固型化材料等の表面の高さが低い状態すなわち固型化材料等表面に傾斜ができた状態で、固型化材料等が徐々に容器の中に満たされ、注入停止以降も、固型化材料等の表面に傾斜が残る。流動勾配とはこの傾斜のことである。

(c) 流動勾配の目標値

注入する固型化材料等の注入中の流動勾配は、廃棄体製作時の固型化材料等の注入時の固型化材料等の廃棄物の間隙への注入性の良否の把握、及び固型化材料等の注入中の廃棄体の容器からのオーバーフロー防止の観点から求められる条件である。

一方、残空隙量の観点からは、上部空隙量を大きくすることは避けたいことから、流動勾配に関して、“10 %以下”を判断条件とすることが望ましい。

なお、固型化材料等の注入中の廃棄体の容器からのオーバーフローは、注入の最終段階で生じる事象であるため、この段階での流動勾配で判断することが望ましい。

(d) 圧縮強度の目標値

廃棄体の強度要件は、水圧などの作用を自重によって支えるダムの“内部コンクリート”の強度要件に類似していると考えられるため、“ダムの内部コンクリートの配合強度”を参考にして圧縮強度の目標値を設定することが望ましい。

b. 大型角型容器を使用した固型化試験結果

(a) 非吸水性・塊状廃棄物の充填性試験結果

非吸水性・塊状廃棄物(40 mm～50 mm の玉石で模擬)に関する充填性試験結果を、表 8 に示す。この表より、表 4 に示される最小寸法の非吸水性塊状の放射性廃棄物であれば、次の条件で固型化を行うことによって、目標条件を満たす良好な充填性が得られることが分かった。

－注入位置：容器上部中央、1 か所

－注入速度：3 m/h～9 m/h(固型化材料等の注入界面上昇速度)

表 8—実規模充填性試験の結果(非吸水性・塊状廃棄物)^[1]

項目	評価方法	注入速度 (固型化材料等の注入界面上昇速度)	
		3 m/h	9 m/h
充填性 1 (残空隙率)	固化体内の残空隙率 ^{a)}	内部空隙：0.22 %	内部空隙：0.31 %
充填性 2 (流動勾配)	充填中の流動勾配	最大：7.5 % 平均：1.7 %	最大：7.5 % 平均：1.7 %
	充填後における固型化材料等の上面の勾配	最大：0.42 %	最大：0.75 %
圧縮強度	3 か所から採取したコアサンプルで評価	平均値：37.8 N/mm ²	平均値：37.5 N/mm ²

注記 “充填中の流動勾配”は、模擬廃棄物収納部分の注入位置から流動先端分までの固型化材料等の流動勾配で、最大は容器幅 1 600 mm を四等分した区間ごとの最大勾配を意味する。
“充填後における上面の勾配”は、固型化材料等の注入完了時の上面の勾配を意味する。

注^{a)} 残空隙率の“内部空隙”とは、玉石収納部における固型化材料等の注入後に残る内部空隙量。

(b) 吸水性・塊状廃棄物の充填性試験結果

吸水性・塊状廃棄物(40 mm～60 mm の再生クラッシュランで模擬)に関する充填性試験結果を、表 9 に示す。この結果、流動性の固型化材料等を用い、表 4 を満たす最小寸法の非吸水性塊状の放射性廃棄物(ただし、容器中央にコンクリートブロックを定置)であれば、次の条件で固型化を行うことによって、目標条件を満たす良好な充填性が得られることが分かった。

- －注入位置：容器上部の対角隅、2 か所
- －注入速度：3 m/h～9 m/h(固型化材料等の注入界面上昇速度)

表 9—実規模充填性試験の結果(吸水性・塊状廃棄物)^[1]

項目	評価方法	注入速度 (固型化材料等の注入界面上昇速度)	
		3 m/h	9 m/h
充填性 1 (残空隙率)	固化体内の残空隙率 ^{a)}	推定内部空隙率：10 %～14 %	
充填性 2 (流動勾配)	充填中の流動勾配	最大：35.0 % 平均：10.3 % ^{b)}	最大：37.5 % 平均：8.4 %
	充填後における固型化材料等の上面の勾配	最大：3.38 %	最大：1.13 %
圧縮強度 ^{c)}	5 か所から採取したコアサンプルで評価	平均：14.0 N/mm ²	平均：15.4 N/mm ²
<p>注記 “充填中の流動勾配”は、模擬廃棄物収納部分の注入位置から流動先端分までの固型化材料等の流動勾配で、最大は容器幅 1 600 mm を四等分した区間ごとの最大勾配を意味する。 “充填後における上面の勾配”は、固型化材料等の注入完了時の上面の勾配を意味する。</p> <p>注^{a)} 残空隙率における“推定内部空隙率”とは、収納した再生クラッシュラン(吸水性あり)が固型化材料等中の水分を吸水したと仮定した場合の吸水された水分の体積を含めた空隙率。</p> <p>注^{b)} 固型化材料等の注入の最終の段階における固型化材料等の平均流動勾配は、4 %程度まで低下している。</p> <p>注^{c)} 設計基準強度を 1/4 以上の確率で下回らないことの補足がある(充填性試験では、5 点の内 1 点が 14.1 N/mm² を下回っただけであり、この条件を満足している。)</p>			

(c) 非吸水性・管状廃棄物の充填性試験結果

非吸水性・管状廃棄物(寸法 1 300 mm、外径 21.7 mm の鋼管で模擬)に関する充填性試験結果を、表 10 に示す。この結果、流動性の固型化材料等を用い、表 4 を満たす最小寸法の非吸水性管状の放射性廃棄物であれば、次の条件で固型化を行うことによって、目標条件を満たす良好な充填性が得られることが分かった。

- －注入位置：容器側面(管開口部と容器との間)の中央、1 か所
- －注入速度：3 m/h～9 m/h(固型化材料等の注入界面上昇速度)

表 10—実規模充填性試験の結果(非吸水性・管状廃棄物)^[1]

項目	評価方法	注入速度 (固型化材料等の注入界面上昇速度)	
		3 m/h	9 m/h
充填性 1 (残空隙率)	固化体内の残空隙率 ^{a)}	内部空隙率：6.4 %	内部空隙率：4.9 %
充填性 2 (流動勾配)	充填中の流動勾配	最大：20.0% 平均：7.0 %	最大：13.8% 平均：6.2 %
	充填後における固型化材料等の上面の勾配	最大：0.58 %	最大：0.31 %
圧縮強度	注入した固型化材料等 3 サンプルの一軸圧縮強度で評価	平均：60.2 N/mm ²	平均：61.7 N/mm ²
<p>注記 1 “充填中の流動勾配”は、模擬廃棄物収納部分の注入位置から流動先端分までの固型化材料等の流動勾配で、最大は容器幅 1 600 mm を四等分した区間ごとの最大勾配を意味する。 “充填後における上面の勾配”は、固型化材料等の注入完了時の上面の勾配を意味する。</p> <p>注記 2 管状廃棄物の場合、廃棄物と固型化した状態での圧縮強度は測れないため、注入する固型化材料等で評価した。</p> <p>注^{a)} 残空隙率における“内部空隙率”とは、管を収納している部分における内部空隙率を意味する。</p>			

第3章 大型角型容器の蓋締め時に使用する EPDM ガasketの長期健全性

ここでは、放射能レベルの低い廃棄物を大型角型容器に収納し充填固化体を製作する場合の製作要件として、大型角型容器の蓋締め使用する EPDM ガasketの長期健全性評価の概要を示す。

3.1. 概要^{[2], [3]}

EPDM(ethylene propylene diene monomer)は、耐熱性・耐候性・耐老化性に優れた素材である。また、反発弾性・電氣的性能にも優れていることから、自動車用ゴム製品・工業用ゴム製品・建築用ゴム製品などの幅広く使用されている。なお、非極性であることから一部の油・グリスに対する耐性が無いことに留意しておく必要があり、高分子材料で一般的に言われていることだが放射線耐性が弱いとされている。

ただし、EPDM は構造因子から加工性/物性との関係が明らかにされており、様々な高機能化 EPDM が開発され、原子力発電所向けの用途として耐放射線性を高めた高機能 EPDM などが実用化されている。

EPDM の代表的な用途としては、自動車用水系ホース、自動車のウェザーストリップ、窓枠ゴム、エアー系ホース、スチームホース、電線被覆材、防振ゴム、絶縁材、コンベアベルト等が挙げられる。

3.2. EPDM の劣化に関する調査

(1) EPDM における代表的な劣化要因

一般論として、高分子材料の劣化要因は多岐に渡る。ここで、高分子材料の代表的な劣化要因として挙がる事項^{[3], [4], [5]}として以下を挙げる。

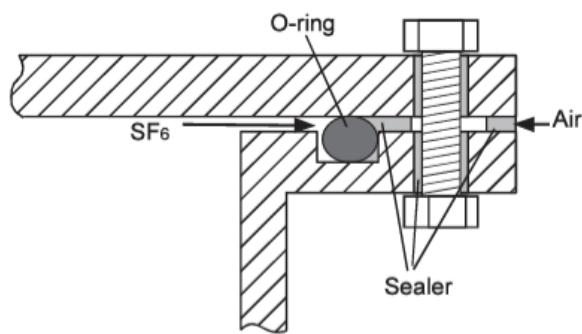
- ①熱 ②酸素及びオゾンなどによる酸化 ③光、紫外線
- ④水との接触(添加剤の溶出、加水分解等) ⑤油、有機溶剤との接触(膨潤等)
- ⑥塩素等や薬品類との接触 ⑦放射線 ⑧その他(銅との接触)

(2) 大型角型容器の EPDM ガasketとして評価が必要な劣化要因

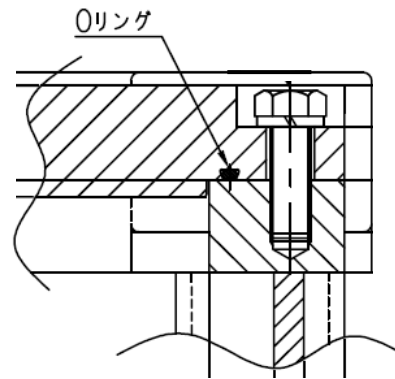
(1)項に示すように EPDM の劣化要因は多岐に渡ることから、大型角型容器の保管環境を踏まえて、この EPDM ガasketに対して評価が必要な要因を整理する。

ここで、他分野において10年以上の健全性を設計として求めるガasketの例として、送電分野におけるガス絶縁開閉装置(GIS)に用いられるガasketの劣化特性評価に関する文献^[5]を参考とした。

GIS のガasketは設計上で耐用年数20年超を求めるとあり、**図1**に示すように使用されている箇所の構造や内圧が大きくない点など類似は多く、使用環境も放射線以外は大型角型容器ガasketに近いものと推察される。



1) ガス絶縁開閉装置のシール構造^[5]



2) 大型角型容器のシール構造

図1ーガス絶縁装置と大型角型容器のシール構造の比較

ここで、大型角型容器の仕様や保管環境を踏まえ、(1)項で挙げた劣化要因に対しての評価の可否を表 11 に整理した。

この結果、大半の劣化要因は閉鎖環境であること及びグリスを塗布することにより排除されることから、EPDM ガasketの劣化に寄与する評価すべき要因は「熱」及び「放射線」の2点と結論づけられる。この結論は、参照した文献においてGIS ガasketの劣化評価が「熱」を主因としていることと整合する。

表 11—各劣化要因に対する評価の要否

劣化要因	大型角型容器の仕様や保管環境を踏まえた評価の要否	
	要否	判断理由
①熱	要	ゴム O リングの劣化速度は、温度に強く依存していることが明確であるため。
②酸素及びオゾンなどによる酸化	否	ガスケットへのグリス塗布 ^{注1)} により、酸素及びオゾンとの接触を防止される。なお、長期的にはグリスの酸化劣化が進行することから、空気(酸素)の追加共有防止のためにシーラント処理を検討することが望ましい。 ^{注2)}
③光、紫外線	否	フランジに溝を設けてガスケットを設置することから、閉じた状態ではフランジが密着し、光が当たることはない。
④水との接触(添加剤の溶出、加水分解等)	否	ガスケットへのグリス塗布 ^{注1)} により、水との接触を防止される。なお、結露水等の浸入防止のためにシーラント処理を検討することが望ましい。 ^{注2)}
⑤油、有機溶剤との接触(膨潤等)	否	EPDM は石油由来の鉱物油に耐性が無いため、グリスは EPDM 用の合成油ベースのものを用いる。このグリス塗布により、油や有機溶剤との接触は防止される。
⑥塩素等や薬品類との接触	否	ガスケットへのグリス塗布により、塩素等や薬品類との接触は防止される。(注記：水道水に含まれる次亜塩素酸では劣化が報告されているが、海塩粒子への耐性は強い)
⑦放射線	要	高分子は放射線に比較的弱い性質であることが知られているため。
⑧その他(銅との接触)	否	銅材との接触はない。

注 1)EPDM ガスケットへのグリス塗布は HZ キャスクの蓋 O リングなどで実績がある。この目的は蓋の溝へのガスケットはめ込み性の向上(ガスケットの発傷防止)が主である。
大型角型容器のガスケットにグリスを塗布するかどうかは未定であったが、長期の仮保管を実施する場合は、上述のように劣化要因との接触防止のため、グリスを塗布する仕様とする。

注 2)大型角型容器が長期の仮保管に供されるために必要な事項は十分に検討されていないが、屋内保管であってもフランジ部は GIS のようにシーラント処理により結露水や空気(酸素等)の浸入を防止することが望ましい。
EPDM は水に対する耐性は強いが、塩素が含有する水に対しては劣化も報告されている。また、酸素等との接触防止にグリスを塗布していても、グリスも長期的には酸化する可能性があり、シーラントにより酸素の共有を遮断することが対策として有効である。なお、シーラント処理はフランジ及びボルト部の腐食防止にも有用である。

3.3. 大型角型容器の EPDM ガasketの使用環境における代表的な劣化要因に対する影響評価

(1) 熱要因

熱要因に対しては、平成 21 年度に(財)電力中央研究所により、温度に対する EPDM ガasketの長期健全性の評価結果が報告⁶⁾されている。本報告を参考に、大型角型容器の仮保管中の影響を評価する。

本報告では、MOX 新燃料輸送容器の密封境界部を想定して長期的な加熱試験を行い、アレニウスの式を用いて得られた温度・時間の係数(ラーソンミラーパラメータ：LMP)と EPDM ガasketの永久変形率の関係を導いている。本報告に記載されている LMP 算出の関係式と、EPDM に対する LMP と永久変形率の関係図について、**図 2**に示す。

$$LMP = T (C + \log t) \quad (1)$$

ここで、T は温度 (K)、C は材料定数 (=11)、
t は 時間 (hr) である。

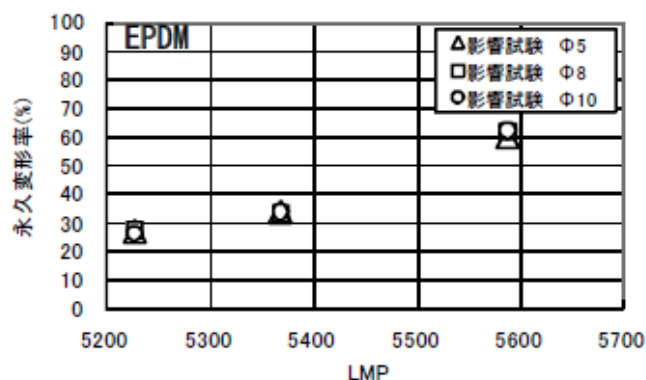


図 2—LMP 算出の関係式と、EPDM に対する LMP と永久変形率の関係図^[6]

なお、ガasketの永久変形率は、慣例的に、繰り返し使用を想定しても 80%程度までであれば密封機能が維持されるとされているのに対し、本報告中での試験データの範囲では最も高い永久変形率でも 60%程度である。近似式を外挿すれば密封機能が維持されると判断されている永久変形率 80%を評価基準とすることも可能だが、ここでは仮保管後の輸送及び埋設施設における覆土までの期間も密封性能を維持する必要があることを踏まえ、熱影響に対する永久変形率の基準は 60%程度を採用することとした。

ここで、大型角型容器を想定した場合に諸々の温度条件においてこの値に達するまでの期間を計算する。

① 温度条件：80℃、70℃、60℃

温度条件は、大型角型容器の仮保管条件が未定であるため、屋外での太陽光下での保管を想定しても保守的な値としてこれらを設定

② 評価方法：文献中で基準を満足する永久変形率 60%程度における LMP(=5588)に対して、各温度条件(80℃、70℃、60℃)の場合に要する期間を算出

以上を条件として、LMP 算出の関係式(図 2 の(1)式)に基づき、各温度条件(80℃、70℃、60℃)に対して EPDM O リングが永久変形率 60%程度となる LMP:5588 に達する期間を計算すると、以下の結果となる。

80℃: 7.7 年、70℃: 22.3 年、60℃: 68.9 年

(参考: 期間 20 年を固定して温度を逆算した場合は 71℃)

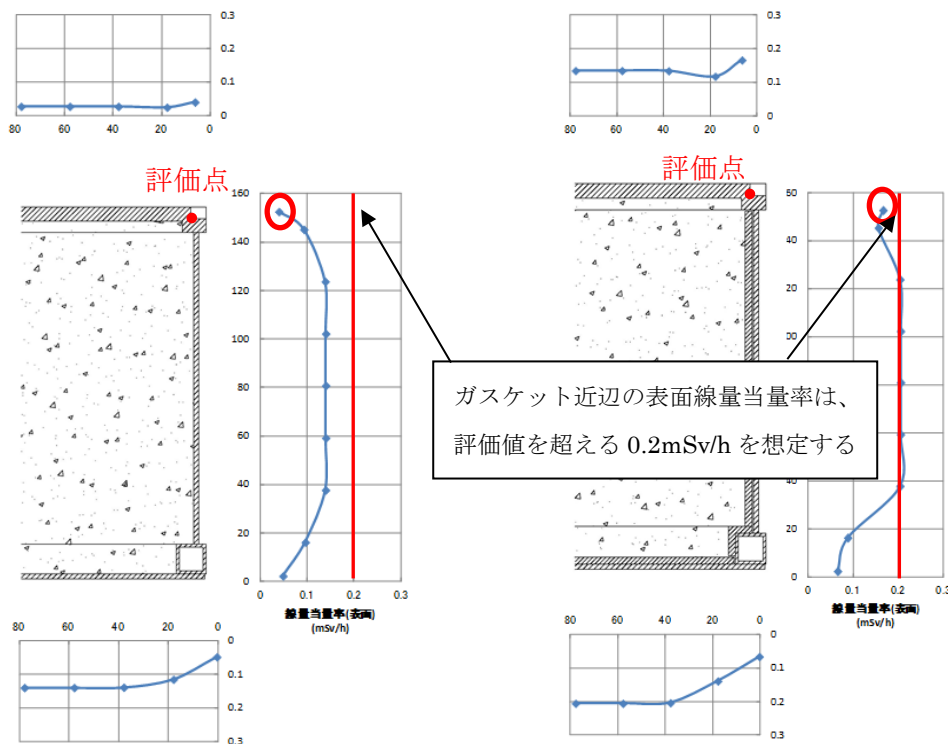
以上のことから、温度条件のみを想定した場合、環境温度が 70℃に達しない条件下であれば、20 年程度の仮保管を経ても EPDM O リングは圧縮永久ひずみ率の判定基準 80%に対して 60%程度であり、その後の輸送及び埋施設での保管期間においても密封性能が維持されることが期待できる。

(2) 放射線要因

放射線要因に対しては、「発電所での仮保管期間に想定されるガスケット部の累積線量」に対して、文献((2)b 項を参照)に記載される「EPDM の性能の変化が生じる線量」と比較し、仮保管期間の線量が EPDM の物性値に与える影響を確認する。

a. 仮保管期間に想定されるガスケット部の累積線量

大型角型容器の表面線量は、**図 3** に示すように旧設計容器(落とし蓋構造、蓋ボルト本数増とする以前)に対して、平成 25 年電力共通研究“合理的な放射性廃棄物の処分/輸送容器の開発及び安全評価に関する研究(フェーズ 3)”^[7]において評価されている。評価結果を**図 3**に示す。



1) フレーム構造製容器(1.6m 高さ)の線量分布

2) フレーム構造製容器(1.6m 高さ) + 5cm 追加遮蔽体の線量分布

図 3—旧設計時の大型角型容器の表面線量 [7]

表面線量当量率の値から EPDM ガスケット部の線量を推定するにあたって、簡単のため、以下の 2 点の想定を考慮した。

- ・ガスケット近辺の表面線量当量率は評価値を上回る 0.2mSv/h を想定する。
- ・ガスケット設置箇所は表面線量当量率の評価点より 20mm 内側を想定する。

(**図 4** 参照。旧設計時には蓋取扱い用の切り欠き部内側を評価点としていた。ガスケット設置箇所の詳細位置は設定されていないが、評価点とガスケット設置箇所の寸法関係は目測で 20mm より大きいため、安全側の評価となり、かつ簡便のため 20mm 内側を想定した。)

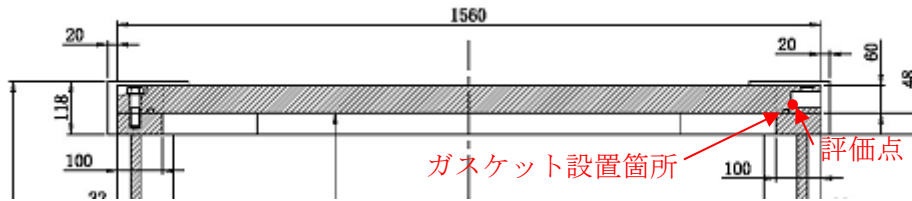


図4—旧設計時の蓋部表面線量の評価点とガスケットの位置関係 [7]

なお、ガンマ線に対する鉄の半価層が 20mm であることから、表面より 20mm 内側のガスケット部における線量当量率は 0.2mSv/h の 2 倍である 0.4mSv/h と推定される。

また、線量当量率から吸収線量の換算を 1Sv=1Gy とすると、ガスケットの吸収線量率は 0.4mGy/h となる。

ここで、輸送直前のガスケット部の吸収線量率を 0.4mGy/h とした場合に、それ以前の 20 年間で仮保管した場合の L2 ガスケットが受ける累積吸収線量を導出する。

容器内の線源は ^{60}Co (半減期 5.27 年)のみと仮定し、原子核の個数と半減期の関係式①について原子核の個数とその線量率が比例するとした場合、式②が導出される。

$$N = N_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \dots\dots\dots ①$$

$$N_0 = N \times 2^{\frac{t}{T}} \dots\dots\dots ②$$

ただし、

N = t 年保管後の線量率(mGy/h)

N_0 = 保管直後の線量率(mGy/h)

t = 保管期間(年)

T = 半減期(年)

20 年保管後の大型角型容器における蓋部評価地点の表面線量率を 0.4mGy/h とすると、それまでの 20 年間で EPDM が受ける累積線量 N' は、次式③で表される。

$$\begin{aligned} N' &= N \times \int_0^t 2^{\frac{t}{T}} dt \\ &= \frac{N \times T}{\ln 2} \times \left(2^{\frac{t}{T}} - 1\right) \dots\dots\dots ③ \\ &= 343.17(\text{Gy}) \end{aligned}$$

なお、大型角型容器を仮保管する際の条件は未定であるが、ここでは、EPDM ガスケット部の累積線量に対して、他の容器から放出される放射線の影響も考慮するために、図 5 のように他の容器と接触する形で保管される状態を仮定した。

よって、EPDM が受ける累積線量は周囲の容器からの線量を加算して 4 倍となる。

(注記：ガスケット設置箇所が表面より 20mm 内側の影響を考慮すれば、もっと小さい値となるが、簡単のために 4 倍とした。)

これより、EPDM が 20 年間で受ける累積線量は、以下の値となる。

$$\begin{aligned} & 343.17\text{Gy} \times 4 \times 10^{-3} \\ & = 1.3727\text{kGy} \\ & \approx 1.4(\text{kGy}) \end{aligned}$$

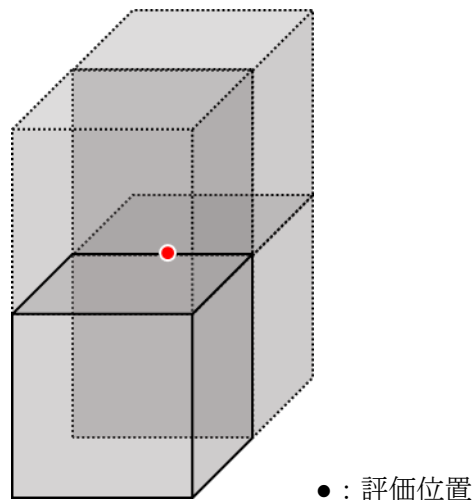


図 5—他容器の放射線影響を考慮する上で想定した仮保管状況の仮定(概略図)

b. 文献に記載される EPDM の線量影響評価

EPDM の線量影響を評価した文献としては、「(a)一般的な EPDM に対して、放射線を照射した際の物性値(破断伸び)の変化を評価した文献」と「(b)ガスケットメーカーが自社製品に対して、放射線を照射した際の永久ひずみ率の変化を評価した資料」がある。

(a)の文献で破断伸びを評価パラメータとしている理由は、ゴム製品全般に対する放射線劣化を評価した海外の文献なども同様であるが、主にケーブル被覆材を想定している点にある。これに対し、ガスケットはメンテナンスでの交換が前提とされており、限界性能を評価する需要が低いことから、永久ひずみ率を評価パラメータとして放射線影響を評価した文献が少ないと推察される。

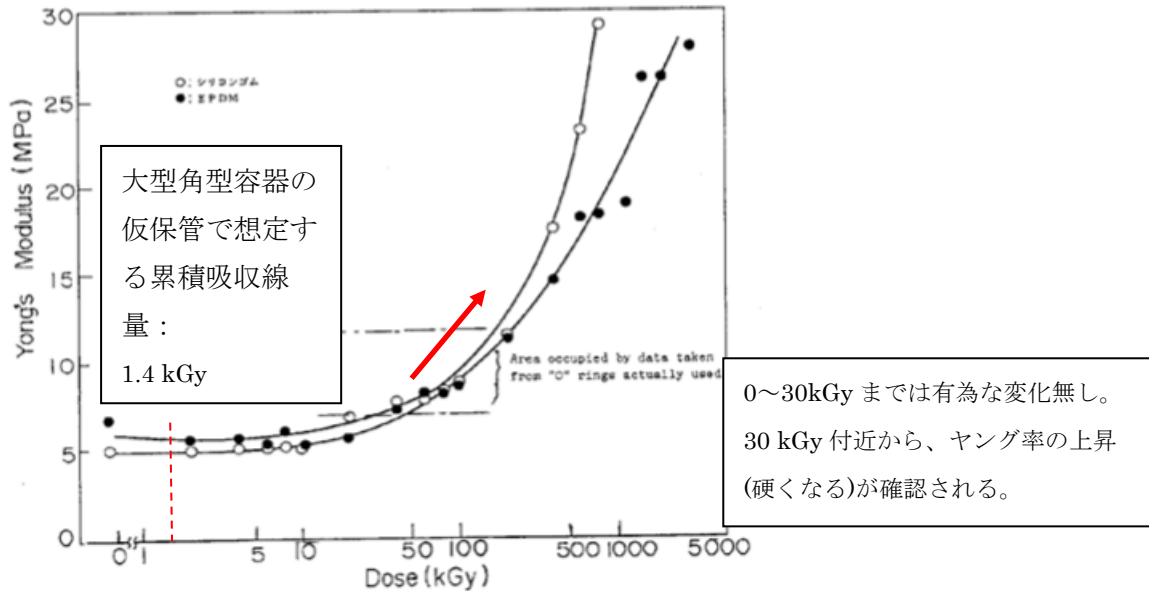
また、(b)の文献ではガスケットが密封機能を維持する指標である永久ひずみ率を評価パラメータとしているが、ガスケットメーカーが国内の原子力事業者の要望を受けてシビアアクシデント相当の多大な放射線量及び熱負荷に対しての影響を確認している。このため、累積した吸収線量当量率でもこれを大きく下回る大型角型容器のガスケットと比較するには適切ではないが、EPDM に放射線が負荷された場合に永久ひずみ量がどのような傾向を示すかの参考に確認することとした。

(a) 一般的な EPDM に対して、放射線を照射した際の物性値を評価した文献

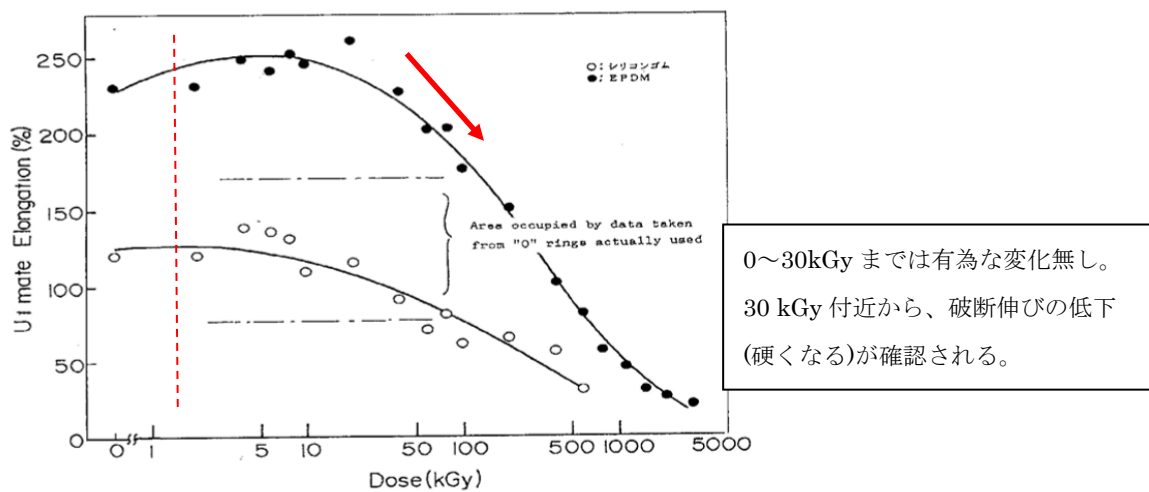
一般的な EPDM に対する放射線照射時の評価としては、特殊法人日本原子力研究所の文献^[8]を参照した。

本報告では、**図 6** に示すように 30kGy 未満の領域では大きな物性値の変化がなく、30kGy 付近から物性値の変化(硬くなること)が確認され始めている。

ヤング率や破断ひずみは、ガスケットが密封性能を担保するための指標とは異なるが、EPDM が 30kGy 未満の領域であれば物性値の変化がないことは参考となる。



1) ヤング率の変化



2) 破断伸びの変化

図 6—吸収線量に対する物性値の変化(EPDM)(JAERI)[8]

(b) ガasketメーカーが自社製品に対して、放射線を照射した際の永久ひずみ率の変化を評価した資料

日本のガasketメーカーは、電力事業者の要望を受けて自社製品に対して、熱や放射線を受けた際の永久ひずみ率の変化を確認している。ここでは、国内において原子力用途にガasketを提供している代表的な2社であるニチアス(株)と(株)バルカーの製品について報告する。

① ガンマ線照射時の圧縮永久ひずみ率の変化(EPDM)(ニチアス(株))

ニチアス(株)が提供する原子炉格納容器のシール材に適用可能な耐熱性・耐蒸気性・耐放射線性に優れた EPDM ガasket EP-176 と一般的な EPDM に対して、複合条件(熱・蒸気・放射線)を付加させた場合の圧縮永久ひずみ率の変化が報告^[9]されている。圧縮永久ひずみ率の測定結果を図7に示す。

この結果、EPDM では γ 線を照射すると圧縮永久ひずみ率が減少する結果となっている。これは、800kGy と多量の γ 線により EPDM の架橋密度が高くなったためと推察されている。

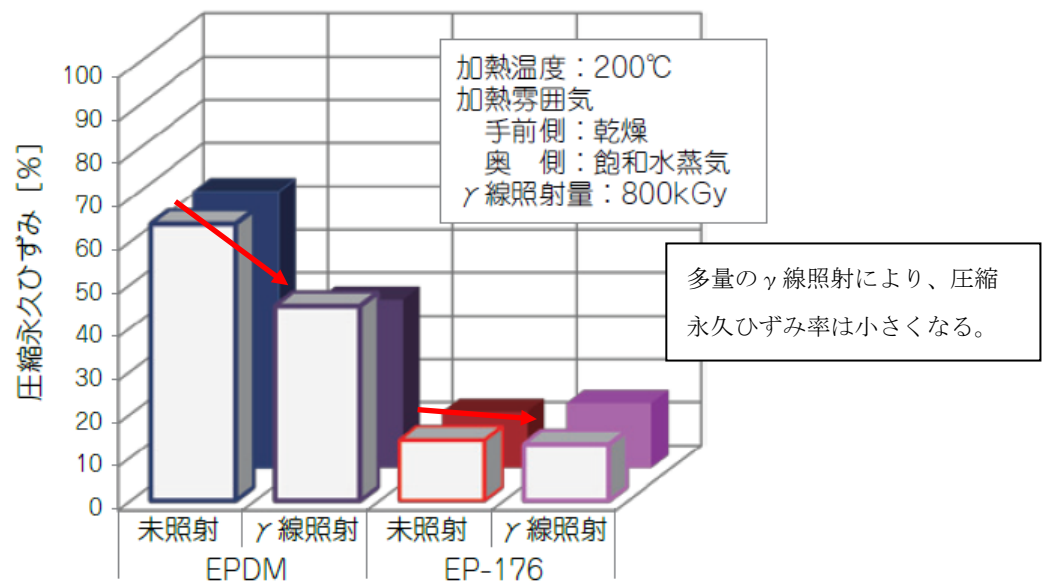


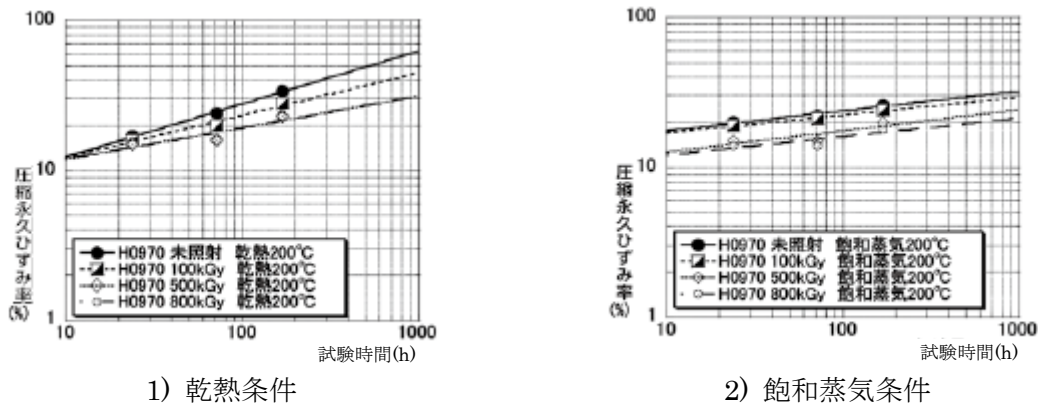
図7ーガンマ線照射時の圧縮永久ひずみ率の変化(EPDM)(ニチアス)^[9]

② ガンマ線照射時の圧縮永久ひずみ率の変化(EPDM)(株)バルカー)

(株)バルカーが提供する原子力関連製品としても使用実績がある汎用 EPDM H0970(ほか EPDM の使用環境を大きく超えた場合でも容易に崩壊を起こさない特性を有する H3070,H0880)に対して、複合条件(熱・蒸気・放射線)に対して圧縮永久ひずみ率の変化が報告^[10]されている。圧縮永久ひずみ率の測定結果を図8に示す。

高機能 EPDM の結果は省略しているが、高機能 EPDM では放射線照射量に差があっても圧縮永久ひずみ率への影響に差が殆ど無いのに対し、汎用 EPDM では放射線照射量の増加に対応して圧縮永久ひずみ率が小さくなっている。

これは、 γ 線による主鎖の切断/再結合が生じることにより架橋密度が上昇したためと推察されている。



注)上記のグラフの横軸は“試験時間(h)”に修正

図 8—ガンマ線照射時の圧縮永久ひずみ率の変化 (EPDM) (バルカー) [10]

c. EPDM への放射線照射影響まとめ

文献から確認された EPDM への放射線照射影響をまとめると、以下のとおりとなる。

- EPDM のヤング率や破断伸びは吸収線量 30kGy 未満の領域では変化しないことから、これ未満の線量では物性値の変化は十分に小さいことが推察される。
- ガasketメーカーの試験では、吸収線量 100kGy～800kGy の範囲で放射線照射の影響が確認され、圧縮永久ひずみ率は低下する傾向にあることが確認されている。

一方で、大型角型容器が輸送前の 20 年間に於いて積み重ねられた状態で仮保管されたとしても、このときの EPDM ガasketの累積吸収線量は 1.4kGy 以下であることが推定される。

この仮保管時の EPDM ガasketにおける推定累積吸収線量 1.4kGy は、EPDM の物性値に影響が無いことが推定されている 30kGy を十分に下回っている。

また、EPDM の物性値にわずかな影響があったとしても、密封性能の健全性を判断する指標である圧縮永久ひずみ率を減じる方向に寄与することが示されている。

以上のことから、大型角型容器の EPDM ガasketが仮保管中に受ける累積吸収線量は密封性能に影響しないと判断できる。

3.4. まとめ

大型角型容器の仕様や保管環境を踏まえて EPDM ガasketの劣化に寄与する要因を整理すると、大半の要因は閉鎖環境であること及びグリスを塗布することにより排除され、評価すべき要因は「熱」及び「放射線」の 2 点と結論づけられた。

評価すべき要因は「熱」及び「放射線」の 2 点のうち、「放射線」については、仮保管 20 年間で推定される累積吸収線量は、他の容器からの放射線を考慮しても EPDM の物性値に有意な影

響を与えるほどではない。

よって、「熱」の影響として、環境温度が 70°C に達しない条件下であれば、20 年程度の仮保管を経ても EPDM O リングは圧縮永久ひずみ率の判定基準 80% に対して 60% 程度であり、その後の輸送及び埋施設での保管期間においても密封性能が維持されると期待できる。

第4章 大型角型容器の蓋締め要領

ここでは、放射能レベルの低い廃棄物を大型角型容器に収納し充填固化体を製作する場合の製作要件として、大型角型容器の蓋締め要領を示す。

4.1. 適用範囲

大型角型容器の蓋締めに係るボルトの締付

4.2. 準備

(1) Oリングの確認

- ・ Oリングは仕様どおりであることを確認する。
- ・ Oリングをアルコールで完全に洗浄し、有害な欠陥の有無を確認する。
- ・ Oリング溝は、アセトン等の溶剤で洗浄し、表面が乾燥していることを、Oリングの挿入前に確認する。
- ・ Oリングに塗布するグリスは選定したものであることを確認する。
- ・ Oリングにグリス塗布していることを、Oリング溝へのOリングの挿入前に確認する。

(2) ボルト及びボルト穴の確認

- ・ ボルト及びボルト穴は、仕様通りであることや、クリーンであることを確認する。

(3) Oリング当り面(本体側)の確認

- ・ 本体側のOリング当り面は、クリーンであることを確認する。

(4) 工具の確認

- ・ トルクレンチが、定められた検定期間に検定されていることを確認する。

4.3. 締付要領

(1) 蓋の取付け

- ・ 蓋の取付前には、OリングがOリング溝から脱落していないことを確認する。
- ・ 蓋のキリ穴と本体のねじ穴とが一致するよう、位置決めピンに合わせて蓋を本体に取り付ける。
- ・ 収納する廃棄物の線量が高い場合、蓋を本体に積載する作業は、ガイド用引綱等を用いて本体から離れた位置で実施する。

(2) ボルトの取付け

- ・ 全てのボルトに所定の潤滑剤を塗布し、ばね座金を取付ける。その後、蓋ボルト穴を通し、本体のねじ穴へ挿入し、手締めにより全てのボルトを取付ける。手締めの際、蓋と本体の隙間が均一(目視レベル)になるように手締めする。必要な場合はソケットレンチ等を

用いて軽く締付ける。

(3) ボルトの締付(*1)

a. ボルトの締付順序

- ・ 図 9 に示す番号順に 2 本の 180° 方向に反対のボルトを同時に又は順に締付ける。

b. 締付方法

締付は以下手順で行う。尚、以下手順は実証試験結果により修正が必要な場合がある。

手順 1

- ・ トルクレンチを用いて、図 9 に示す順に最終締付トルクの 20%以下で締付ける。

手順 2

- ・ トルクレンチを用いて、図 9 に示す順に最終締付トルクで締付ける(1回以上)。

手順 3

- ・ トルクレンチを用いて、時計回りに、最終締付トルクにて各ボルトが回らないことを確認する。

c. トルクの管理方法

- ・ 校正されたトルクレンチを用い、最終締付トルクにて各ボルトが回らないことを確認する。併せて、蓋の取付状態(片締め有無)を確認する。
- ・ 確認結果は所定の記録用紙に記録する。

*1:ボルトの締付は、「JIS B 2251 フランジ継手締付け方法」、「ASME PCC-1-2013; Guidelines for pressure boundary bolted flange joint assembly」を参照する。[11], [12]

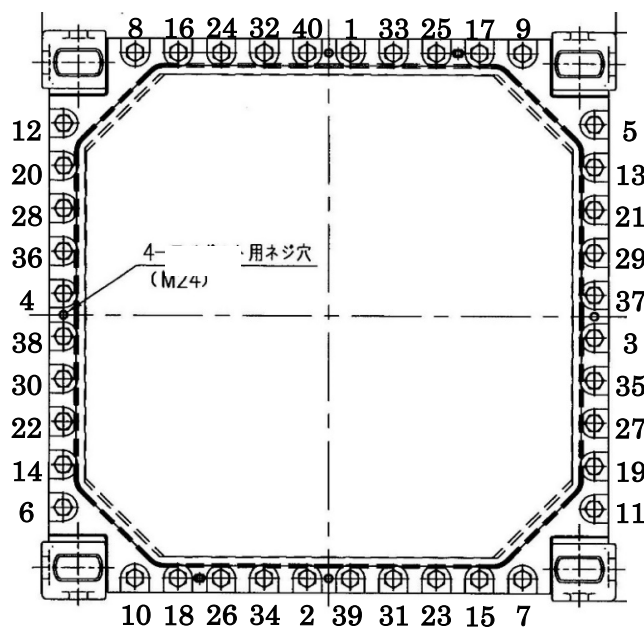


図 9 ボルトの締付け順序(例)

第5章 参考文献

- [1] 平成 27～28 年度電力共通研究 “大型／角型廃棄体の固型化パラメータに関する研究(フェーズⅡ)” のうち平成 28 年度報告書(最終年度)、日本原子力発電(株)、北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力ホールディングス(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)、(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター、日揮(株)、鹿島建設(株)
- [2] 日本ゴム協会編、ゴム技術の基礎、平成 17 年 11 月改訂題 2 刷
- [3] 西澤仁、高分子材料・製品の長寿命化・安定化技術、(株)シーエムシー出版、 2015
- [4] 大武義人、高分子材料の劣化と寿命予測、サイエンス&テクノロジー(株)、2009
- [5] 皆川史郎、高経年 GIS における O リングの劣化特性、電気学会論文 B(電力・エネルギー部門誌)125 巻(2005)
- [6] 伊藤 他、MOX 新燃料輸送容器の密封部長期健全性、研究報告：N09002、(財)電力中央研究所、平成 21 年
- [7] 平成 25 年度電力共通研究 “合理的な放射性廃棄物の処分／輸送容器の開発及び安全評価に関する研究(フェーズ 3)” 、東北電力(株)、北海道電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、原燃輸送(株)
- [8] 池島 他、原子炉におけるシリコンゴム製 O リングの放射線劣化の評価、JAERI-M- 90-216、特殊法人日本原子力研究所、1990
- [9] 原子力関連設備向けゴムガスケット評価法の検討 -高耐久性 EPDM『EP-176』の圧縮永久ひずみ特性-ニチアス技術時報 2015 年 2 号 No.369
- [10] 耐放射線性エラストマー製品の展開 高機能 EPDM H3070 H0880 バルカー技術誌 Winter 2016 No.30
- [11] JIS B 2251 フランジ継手締付け方法
- [12] ASME PCC-1-2013 ; Guidelines for pressure boundary bolted flange joint assembly