

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 補足-011-2 改0
提出年月日	2023年11月30日

原子炉格納容器の重大事故等時の閉じ込め機能健全性について

2023年11月
東京電力ホールディングス株式会社

原子炉格納容器の重大事故等時の閉じ込め機能健全性について

目 次

1. 概要

- 別紙 1. シール機能維持に対する考え方について
- 別紙 2. 改良 EPDM 製シール材の適用性について
- 別紙 3. 改良 EPDM 製シール材における各試験について
- 別紙 4. 改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験について
- 別紙 5. 実機フランジ模擬試験の概要について
- 別紙 6. 改良 EPDM 製シール材における実機フランジ模擬試験結果の適用について
- 別紙 7. 改良 EPDM 製シール材の実機を模擬した小型フランジ試験について
- 別紙 8. バックアップシール材のシール機能について
- 別紙 9. バックアップシール材塗布による設計影響について
- 別紙 10. ドライウェル主フランジ等の開口量評価について
- 別紙 11. 経年劣化を考慮したシール機能について
- 別紙 12. 化学薬品や核分裂生成物のシール機能への影響について
- 別紙 13. シール材の運転環境（放射線量，温度）の考慮について
- 別紙 14. 黒鉛製シール材について
- 別紙 15. フランジ開口量評価の妥当性について（構造解析との関連性）
- 別紙 16. 原子炉格納容器の各シール部の開口裕度について
- 別紙 17. 所員用エアロック開口量評価に係る変形支点の変位の影響について
- 別紙 18. 原子炉格納容器隔離弁の重大事故等時環境における耐性確認試験の概要について
- 別紙 19. 重大事故等時におけるシール機能の追従性について
- 別紙 20. フランジ部の塑性変形の評価について
- 別紙 21. 200℃，2Pd の適用可能時間を過ぎてから用いる限界圧力，温度について
- 別紙 22. 開口量評価条件の設置許可時からの変更点について
- 別紙 23. フランジ開口量評価結果 ボルト部の応力コンター図及び変形図
- 別紙 24. 代替循環冷却系の健全性
- 別紙 25. ドライウェル上鏡部の温度分布形成による局所的な影響について

1. 概要

本資料は、「原子炉格納施設的设计条件に係る説明書」(以下「説明書」という。)の「6. 重大事故等における原子炉格納容器の放射性物質の閉じ込め機能評価及びその他影響確認」に示す重大事故等時の原子炉格納容器の閉じ込め機能維持の詳細を示すものである。

シール機能維持に対する考え方について

原子炉格納容器のハッチ類，配管貫通部，電気配線貫通部及び原子炉格納容器隔離弁のシール部のシール機能は，ガスケット等の試験結果及び材料特性により判定基準を定め，200℃，2Pdの環境下においてシール機能が維持できることを確認している。シール機能維持の考え方を表1に示す。

表1 シール機能維持の考え方

対象箇所	判定基準	シール機能維持の考え方
<ul style="list-style-type: none"> ・ドライウェル主フランジ ・機器ハッチ類 ・所員用エアロック (扉のシール材) ・配管貫通部 (閉止フランジ) 	許容開口量以下	<p>開口量評価で得られた開口量*¹が，ガスケットの試験結果*²に基づき設定した許容開口量（シール機能が維持できる開口量）以下であることを確認することにより，シール機能が維持できることを確認</p> <p>注記*1：フランジ部の形状・寸法に基づき解析等により算出</p> <p>*2：圧縮永久ひずみ試験結果及び実機フランジ模擬試験による漏えい試験結果</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・電気配線貫通部 (モジュール) ・原子炉格納容器隔離弁 (不活性ガス系バタフライ弁) 	設計漏えい量以下	試験における漏えい量が設計漏えい量以下であることを確認することにより，シール機能が維持できることを確認
<ul style="list-style-type: none"> ・所員用エアロック (扉以外のシール材) ・原子炉格納容器隔離弁 (TIP ボール弁) 	200℃以上	圧力により開口が生じる部位ではないため，試験結果及び材料仕様によりシール材の高温環境下における耐性を確認することにより，シール機能が維持できることを確認

また，ハッチ類，電気配線貫通部（モジュール）及び原子炉格納容器隔離弁（不活性ガス系バタフライ弁）については，シール材の漏えい試験結果に基づき設定した判定基準を基にシール機能の維持を確認している。このことから，各漏えい試験において判定基準として設定した漏えい量より，判定基準を満たした場合に実機において想定される漏えい量を推定したところ，原子炉格納容器全体の設計漏えい率に比べても十分小さい値であり，シール機能は維持されると判断している。漏えい量の推定結果を表2に示す。

表2 判定基準を満たした場合に想定される漏えい量の推定結果 (1/2)

対象箇所	判定基準	判定基準を満たした場合に想定される漏えい量
<ul style="list-style-type: none"> ・ドライウェル主フランジ ・機器ハッチ類 ・所員用エアロック (扉のシール材) ・配管貫通部 (閉止フランジ) 	許容開口量 以下	<p>実機フランジ模擬試験において、開口量＝許容開口量となる状態を模擬したリーク試験を実施しており、本試験において判定基準として設定した漏えい量から原子炉格納容器ハッチ類の実機相当に換算した漏えい量は、原子炉格納容器設計漏えい率である0.4%/dayに比べ、十分に小さい値であることを確認している。</p> <p>○漏えい有無の判定基準 漏えい量：1cc/min 以下</p> <p>○実機相当換算値 0.001%/day 以下 (PCV 空間容積に対する割合)</p>

表 2 判定基準を満たした場合に想定される漏えい量の推定結果 (2/2)

対象箇所	判定基準	判定基準を満たした場合に想定される漏えい量
<ul style="list-style-type: none"> ・電気配線貫通部 (モジュール) ・原子炉格納容器隔離弁 (不活性ガス系バタフライ弁) 	<p>設計漏えい 量以下</p>	<p>試験における判定基準として設定した漏えい量から電気配線貫通部 (モジュール) 及び原子炉格納容器隔離弁 (不活性ガス系バタフライ弁) の実機相当に換算した漏えい量は、原子炉格納容器設計漏えい率である 0.4%/day に比べ、十分に小さい値であることを確認している。</p> <p><電気配線貫通部 (モジュール) ></p> <ul style="list-style-type: none"> ○漏えい有無の判定基準 (設計漏えい量) 1.0×10⁻⁷Pa・m³/s 以下 ○実機相当換算値 5.3×10⁻⁹%/day 以下 (PCV 空間容積に対する割合) <p><原子炉格納容器隔離弁 (不活性ガス系バタフライ弁) ></p> <ul style="list-style-type: none"> ○漏えい有無の判定基準 (設計漏えい量) 240cc/min 以下/600A ○実機相当換算値 0.02%/day 以下 (PCV 空間容積に対する割合)
<ul style="list-style-type: none"> ・所員用エアロック (扉以外のシール材) ・原子炉格納容器隔離弁 (TIP ボール弁) 	<p>200℃以上</p>	<p>圧力により開口が生じる部位ではなく、また、高温環境下での耐性を確認していることから原子炉格納容器内の 200℃の環境条件であってもシール機能に影響を及ぼすものではない。</p>

改良 EPDM 製シール材の適用性について

柏崎刈羽原子力発電所第 6 号機では、改良 EPDM 製シール材として [] を採用する計画である。

改良 EPDM 製シール材の開発経緯を以下に示す。

- ・従来、原子炉格納容器のシール材（ガスケット）として採用していたシリコンゴムは、使用温度範囲が -60°C ～ 200°C であり、従来の EPDM 製シール材の使用温度範囲 -50°C ～ 150°C よりも耐熱性は若干高いものの、既往の試験結果から高温蒸気環境での劣化が確認されていた。
- ・従来の EPDM 製シール材はシリコンゴムに比較して高温蒸気に強い材料であったが、更なる耐熱性向上を目的に材料の改良を進め、改良 EPDM 製シール材を開発した。

改良 EPDM 製シール材については、ガスケットメーカーにおいて、耐熱性、耐高温蒸気性及び耐放射線性の確認を目的に、重大事故等時環境を考慮した条件（放射線量 800kGy を照射した上で 200°C の蒸気環境にて 168 時間）にて圧縮永久ひずみ試験が実施されており、耐性が確認されている。

柏崎刈羽原子力発電所第 6 号機で採用予定の改良 EPDM 製シール材 [] については、ガスケットメーカーで実施された試験と同様に圧縮永久ひずみ試験を実施するとともに、重大事故等時の温度及び放射線による劣化特性がシール機能に影響を及ぼすものでないことを実機フランジ模擬試験にて確認している。

また、改良 EPDM 製シール材は、従来の EPDM 製シール材と同様、ガスケットメーカーにて材料や特長に応じ定めた型番号 [] として管理されているものであり、当該品を特定可能であることから、メーカー型番号を指定することにより今回シール機能が確認されたものを確実に調達することが可能である。

なお、今後の技術開発により、より高い信頼性があるシール材が開発された場合は、今回と同様に圧縮永久ひずみ試験等により重大事故等時環境におけるシール機能評価を行うなど、実機フランジへの適用性について検討する。

改良 EPDM 製シール材における各試験について

改良 EPDM 製シール材の適用にあたり、「改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験」及び「実機フランジ模擬試験」の 2 種類の試験を実施している。本資料では、各試験の位置付けを明確化するとともに、「実機フランジ模擬試験」の試験条件が重大事故等時環境を適切に模擬できているかを確認するため、「高温曝露の方法」及び「放射線試験の方法」について適切性を確認した。

1. 各試験の位置付けについて

1.1 改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験

フランジ部からの漏えいの発生を防止するため、フランジ面にはシール材がセットされている。フランジはフランジボルトを締め付けることによりシール材を圧縮し、シール機能を発揮する構造となっている。

このため、フランジ部からの漏えいは「内部圧力の上昇によりフランジ部が開くこと」に加え、「その開口量がシール材の復元量を超える」場合に生じる。したがって、シール材の耐漏えい性能を確認するためには、シール材がセットされるフランジが「圧力上昇によりどの程度開くのか」を評価し、その開口量に対して熱等により劣化した「シール材の復元量」を確認することが必要となる。フランジ部の開口量評価と圧縮永久ひずみ試験の位置付けを表 1 に示す。

表 1 フランジ部の開口量評価と圧縮永久ひずみ試験の位置付け

フランジ部からの漏えい要因	確認事項	試験及び評価の位置付け
圧力上昇によりフランジ部が開くことによる漏えい	フランジ部の圧力上昇による開口量	解析による開口量評価
開口量がシール材の復元特性を超えることによる漏えい	熱等により劣化したシール材の復元量	圧縮永久ひずみ試験によるシール材の復元量評価

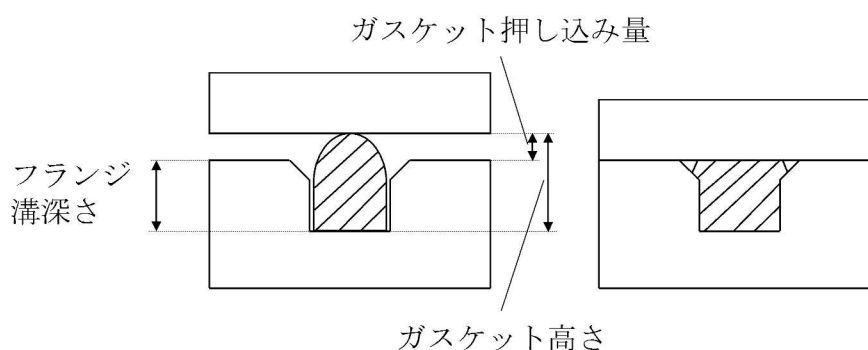
圧縮永久ひずみ試験で得られるひずみ率がフランジ構造によらず、一様に適用できる理由を整理する。

- ・原子炉格納容器の限界温度、圧力である 200°C、2Pd で評価しているため、圧力上昇による影響は、フランジ構造によらず同等である。
- ・本試験は、フランジ構造に関わらず、圧縮状態で使用される静的シール部におけるシール材単体の劣化度（ひずみ率）から復元量を確認するものであることから、フランジ構造の違いはフランジ構造の解析による開口量計算において評価している。
- ・本試験におけるシール材試験片の圧縮率は、%としており、改良 EPDM 製シール材に適用するフランジのガスケットの圧縮率とほぼ同等である（表 2）。

よって、柏崎刈羽原子力発電所第6号機原子炉格納容器の限界温度、圧力の評価では、フランジ部の開口量と圧縮永久ひずみ試験結果を用いることでシール部の健全性を評価できる。

表2 改良 EPDM 製ガスケットの圧縮率

設備名	フランジ溝 深さ (mm)	ガスケット 高さ (mm)	ガスケット 押し込み量 (mm)	圧縮率 (%)
ドライウエル 主フランジ				
ドライウエル 機器搬入用ハッチ (上部, 下部)				
サブプレッション チェンバ出入口				



- ・ガスケット押し込み量＝ガスケット高さ－フランジ溝深さ
- ・圧縮率＝(ガスケット押し込み量／ガスケット高さ)×100%

1.2 実機フランジ模擬試験

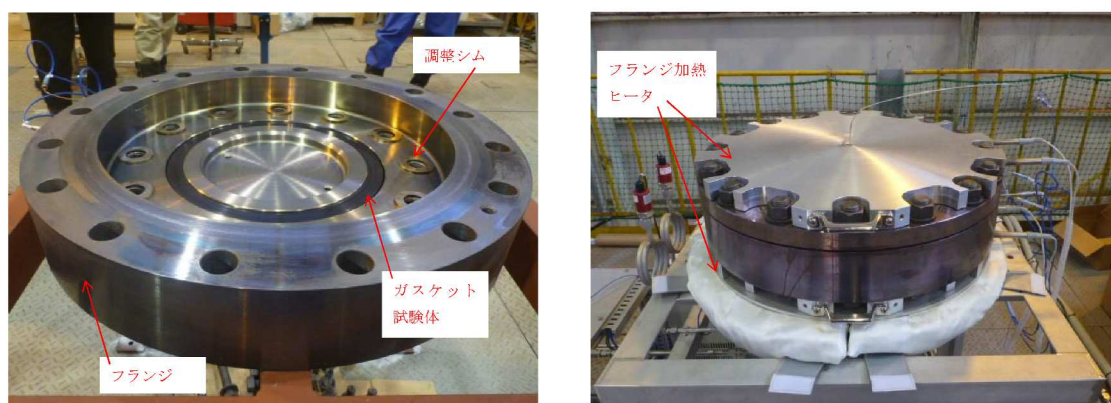
圧縮永久ひずみ試験結果を用いた開口量評価では、内圧によるフランジ構造部の変形は模擬しているが、実機フランジ溝にガスケットをセットした状態におけるシール材の変形は模擬していないため、実機にセットした状態におけるシール材の変形による気密性を確認する必要がある。また、1.1項で記述したシール機能の評価では、ガスケットの復元量とフランジの開口量が等しい状態（ガスケット押し込み量が0mmで接している状態）までをシール機能維持の判定基準としており、その状態においても気密性を有することを確認する必要がある。

実機フランジ模擬試験は、圧縮永久ひずみ試験の結果を用いた開口量評価の中で最も厳しい状態を再現する試験をすることで、開口量評価の妥当性を確認するために実施している（表3）。

表3 実機フランジ模擬試験の位置付け

開口量評価における未確認事項	確認事項	実機フランジ模擬試験の位置付け
実機フランジ溝にガスケットをセットした状態における内圧や熱膨張によりシール材が変形した状態における気密性	内圧、熱膨張でシール材がガスケット溝で変形した状態で気密性を有すること	ガスケット溝内でのシール材の変形を考慮するため、実機フランジを模擬した試験装置*により気密性を有することを確認
ガスケットに対するタングの押し込み量が 0mm で接している状態（開口量＝許容開口量）における気密性	ガスケットに対するタングの押し込み量が 0mm で接している状態で気密性を有すること	ガスケットに対するタングの押し込み量が 0mm で接している状態で試験を実施することにより気密性を有していることを確認

注記*：試験装置の断面形状は実機と同形状であり、ガスケット及び溝寸法は幅・高さとともに実機と同等、中心径のみ縮小した試験装置（図1）



試験装置外観（フランジ開放時）

試験装置外観（フランジ密閉時）

図1 試験装置外観写真

実機フランジ模擬試験で得られた結果がフランジ構造によらず、一様に適用できる理由を整理する。

- ・原子炉格納容器の限界温度、圧力である 200℃、2Pd で評価しているため、内圧上昇による影響は、フランジ構造によらず同等である。
- ・内圧上昇後にフランジが開口した状態を想定し、ガスケットの復元量とフランジの開口量が等しい状態（押し込み量が 0mm で接している状態）でのシール機能を確認しているものであり、フランジ構造による開口の違いはフランジ部の解析による開口量計算において評価している。

実機フランジ試験によって、ガスケットの押し込み量が 0mm で接している状態を再現しており、漏えいはガスケットの復元量に対してフランジの開口量が大きくなった場合（ガスケットの押し込み量 < 0mm）に発生することを踏まえると、本試験条件は最も厳しい状態である。よって、柏崎刈羽原子力発電所第 6 号機原子炉格納容器の限界温度、圧力の評価では、フランジ部の解析による開口量評価において、開口量が許容開口量以内であることを確認することで、シール部の健全性を評価できる。

2. 実機フランジ模擬試験の高温曝露の方法について

改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験において、蒸気環境よりも高温空気（乾熱）環境の方がより大きな劣化が確認されたこと、並びに、改良 EPDM 製シール材の劣化は、一般的に酸素により引き起こされるとの知見に基づき、実機フランジ模擬試験では蒸気ではなく高温空気（乾熱）で曝露し、重大事故等時環境より保守的な条件で試験を実施している。また、温度については原子炉格納容器限界温度 200℃が 7 日間継続する条件であり、重大事故等時環境よりも厳しい条件で曝露しており、それに加え、さらに余裕をみた 250℃、300℃をそれぞれ定める期間、一定温度で高温に曝露した試験を実施している。

よって、本試験は高温曝露時に、蒸気環境よりも厳しい乾熱曝露、重大事故等時環境よりも保守的な温度条件により、重大事故等時環境を適切に模擬できていると考える。

3. 実機フランジ模擬試験の放射線照射の方法について

放射線照射量については、重大事故等時環境を模擬するために、有効性評価（大 LOCA+ECCS 機能喪失+SB0）におけるフランジガスケット部の重大事故等発生後 7 日間の累積放射線照射量の目安である 800kGy を適用している。

また、放射線照射と高温曝露の順序について「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド」に重大事故等時環境評価試験の試験実施方法として放射線照射を実施した後に定められた温度条件下に曝露することを定められていることから、この考え方を参考にし、放射線照射後に高温曝露を行う逐次法で試験を実施している。

改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験について

改良 EPDM 製シール材の重大事故等時環境における劣化特性を確認するために、J I S K 6 2 6 2 「加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの常温・高温及び低温における圧縮永久ひずみのもとめ方」に準じた圧縮永久ひずみ試験を実施した。

試験装置の概要を図 1 に示す。試験片として、予めγ線照射したシール材を用いている。放射線量は、重大事故等時環境を模擬するために、フランジガスケット部の重大事故等発生後 7 日間の累積放射線照射量の目安である 800kGy とした。試験は、試験片を圧縮板ではさみ、ボルトを締め付けることにより圧縮させる。なお、試験片の圧縮量はスペーサーの厚さで調整している。

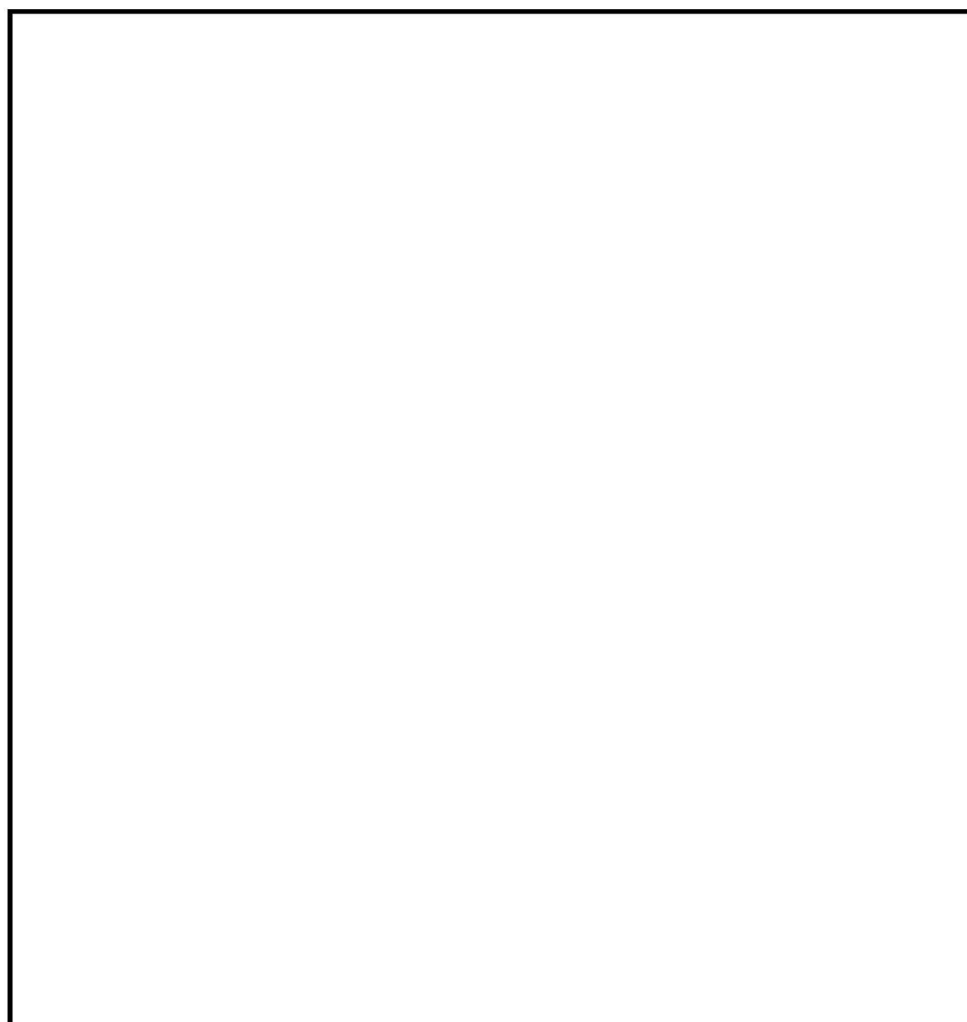


図 1 圧縮永久ひずみ試験装置

試験では、加圧試験容器を用いて高温空気及び高温蒸気で曝露し、試験温度は、原子炉格納容器限界温度である 200℃に加えて、さらに余裕をみた 250℃とする。試験期間は 7 日間（168 時間）とし、一定温度で高温曝露している。

圧縮永久ひずみ率は、試験片の初期厚さと試験後の試験片厚さを測定し、次の式（1）により算出する。各試験片の中心厚さを 0.01mm の単位まで測定し、得られた値の平均値を算出する。圧縮永久ひずみ率の算出概念図を図 2 に示す。

$$Cs = \frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_2)} \times 100 \quad \dots \dots \dots (1)$$

- Cs : 圧縮永久ひずみ率
- t₀ : 試験片の初期厚み
- t₁ : 試験後の試験片の厚み
- t₂ : スペーサ厚さ

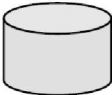
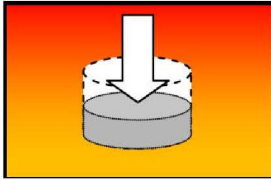
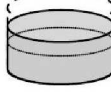
初期状態	試験状態	圧縮解放
		
厚さ t ₀	厚さ t ₂ (<input type="text"/> %圧縮)	厚さ t ₁ $Cs = \frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_2)} \times 100$

図 2 圧縮永久ひずみ率の算出概念図

圧縮永久ひずみ試験の結果を表 1 に示す。

表 1 圧縮永久ひずみ試験*1 結果

試験体	試験温度	放射線照射量	試験雰囲気	試験時間	圧縮永久ひずみ率*2 (%)
改良 EPDM 製シール材 <input type="text"/>	200℃	800kGy	空気 (乾熱)	168 時間	<input type="text"/>
	250℃		空気 (乾熱)		<input type="text"/>
	200℃		蒸気		<input type="text"/>
	250℃		蒸気		<input type="text"/>

注記*1 : J I S K 6 2 6 2 に従い実施

*2 : 試料を圧縮し完全に元の状態に戻った場合を 0%、全く復旧せずに完全に圧縮された状態のままである状態を 100%

実機フランジ模擬試験の概要について

改良 EPDM 製シール材のシール機能の性能確認として、実機フランジの形状を模擬した試験装置を用いて、実機条件に近い状態でのシール機能の健全性確認を行った。

試験フローを図 1 に示し、試験の概要を以下に示す。

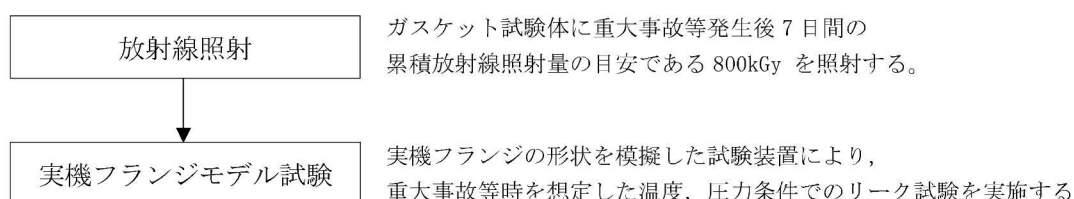


図 1 実機フランジモデル試験フロー

1. 試験装置

実機フランジ模擬試験の試験装置は図 2、図 3 に示すようにフランジユニット、ガス供給ユニット、リークガス計測ユニットから構成される。フランジユニットは、直径 250mm のガスケット試験体を組み込んで内部を加圧可能な試験フランジと、試験フランジを所定の試験条件に加熱制御するためのフランジ加熱ヒータから構成される。試験フランジにガスケット試験体を組み込む溝断面形状（フランジ型式）は実機フランジで採用されている甲丸型を模擬している。フランジ断面形状は実機と同形状であり、中心径のみを縮小した試験装置としているため、試験で得られたリーク量をガスケット径比で補正することで実機フランジのリーク量に換算できる。

また、内圧上昇後の原子炉格納容器フランジの開口を模擬するため、ガスケット試験体の押し込み量をフランジ間に設置する調整シムにより設定する。ガス供給ユニットは、高圧空気ポンプと圧力調整器から構成され、所定の圧力に調整された加圧ガスを空気加熱器により所定の温度に加熱制御する。リーク量はリークガス計測ユニットのマスフローメータにて計測される。試験装置外観写真を図 3 に示す。

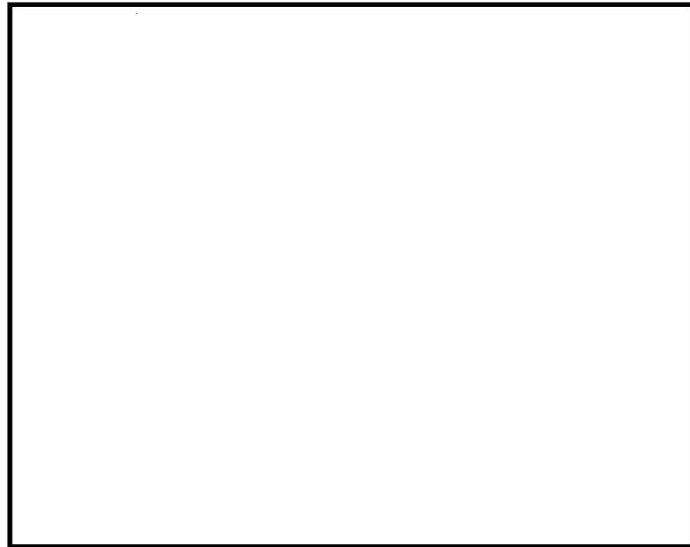
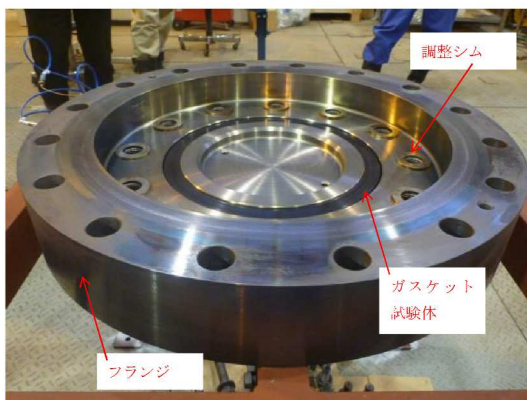
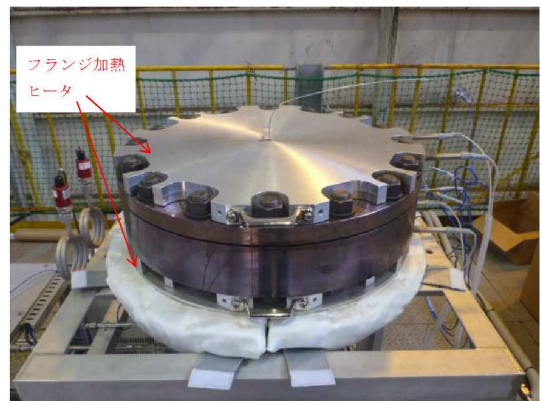


図2 試験装置概要図



試験装置外観（フランジ開放時）



試験装置外観（フランジ密閉時）

図3 試験装置外観

2. 試験条件

重大事故等時環境を模擬するために、放射線照射量は、フランジガスケット部の重大事故等発生後7日間の累積放射線照射量の目安である800kGyを予め照射したシール材をガスケット試験体として用いる。放射線による劣化と熱による劣化は、放射線照射をした後に定められた温度条件下に曝露する逐次法により付与した。

一般に有機材料の放射線劣化挙動には、酸素が影響を及ぼすことが知られているが、環境に酸素が存在しない場合においては放射線と熱の同時法と逐次法の劣化はほぼ等しいことが知られている。原子炉格納容器内は、通常時は窒素環境下、重大事故等時は蒸気環境下であり、酸素が常に供給される環境では無いことから、放射線と熱の同時曝露による劣化への影響は十分小さく、逐次法による劣化の付与は妥当であると考えられる。なお、「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイドライン」において、重大事故等時環境試験の試験方法として放射線照射をした後に定められた温度条件下に曝露することが定められており、このことから逐次法による劣化の付与は妥当であると考えられる。

改良 EPDM 製シール材の劣化は、一般的に酸素により引き起こされるとの知見に基づき、試験雰囲気は蒸気ではなく高温空気（乾熱）を用い、試験温度については、原子炉格納容器限界温度である 200℃、さらに余裕を見た 250℃、300℃とし、試験圧力は原子炉格納容器限界圧力 2Pd (0.62MPa) を包絡する圧力で気密性確認を実施する。また、原子炉格納容器内圧上昇後の実機フランジの開口を模擬するため、フランジによるガスケット試験体の押し込み量を最小(0mm)に設定する。なお、最小押し込み量(0mm)は、高温での試験を実施する前段階として、常温での予備加圧を実施し、ガスケットから漏えいが起こらない状態と定義する。

3. 試験結果

試験結果を表 1 に示す。フランジによるガスケット試験体の押し込み量が最小(0mm)であっても、有意な漏えいは発生せず、200℃・168 時間、250℃・96 時間の耐性が確認された。300℃のケースにおいては試験途中にリークが発生したケースがあったものの、概ね 24 時間程度の耐性を有することが確認された。図 4 に 200℃・168 時間の試験ケースにおける試験体の外観を示す。図 4 より、フランジとガスケット試験体との接触面を境界として劣化（表面のひび割れ）は内周側で留まり、外周側に有意な劣化が見られないことから、フランジ接触面でシール機能を維持できていることが確認された。また、断面形状より、劣化（表面のひび割れ）はガスケット試験体の表面層のみで留まっているため、有意な劣化が進行していないことが確認された。

表 1 重大事故等時条件での試験結果*1

試験体	温度	継続時間	押し込み量	漏えいの有無
改良 EPDM 製シール材 	200℃	168 時間	0mm	無
改良 EPDM 製シール材 	250℃	96 時間	0mm	無
改良 EPDM 製シール材 	300℃	24 時間	0mm	有*2

注記*1：下記条件は全ケース共通

- ・試験圧力：2Pd 以上（0.62MPa 以上）
- ・放射線照射量：800kGy
- ・試験雰囲気：乾熱（空気）
- ・漏えい判定基準：1cc/min 以上の漏えい量が 30 分以上継続した場合に漏えい有とする。

*2：継続時間 22 時間で漏えいが発生

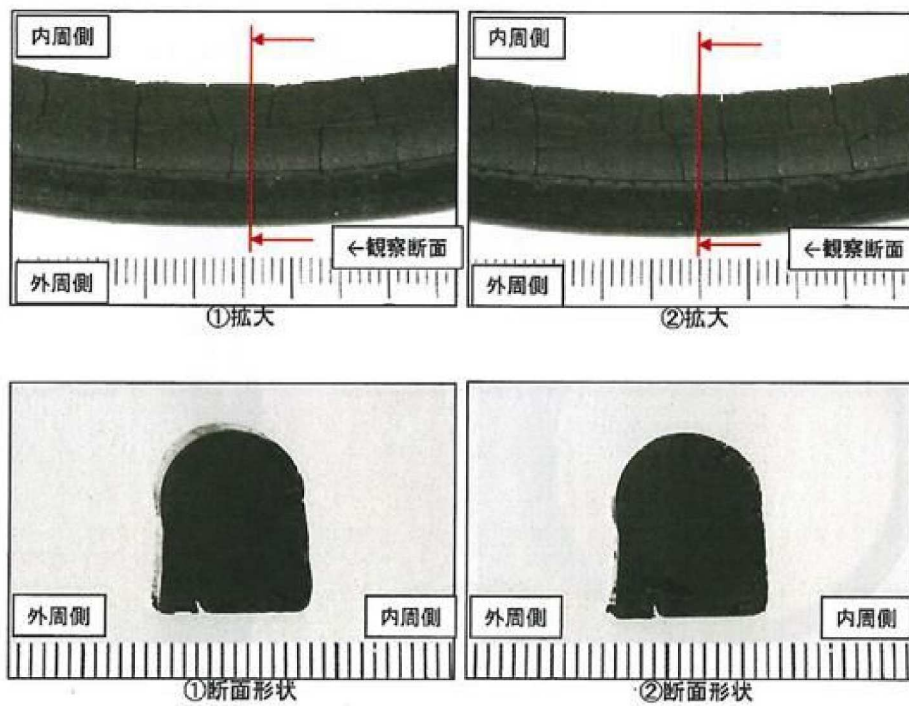


図4 試験後の試験体外観 (200℃・168時間)

改良 EPDM 製シール材における実機フランジ模擬試験結果の適用について

改良 EPDM 製シール材については、シール機能の性能確認として圧縮永久ひずみ試験に加えて、実機フランジを模擬した試験装置（以下「実機フランジ模擬試験装置」という。）を用いてシール機能を確認している。

実機フランジ模擬試験装置のフランジ断面形状は実機と同形状、ガスケット及び溝寸法は幅・高さともに実機と同等であり、中心径のみを縮小した試験装置としており、フランジ部は実機と同様な変形を模擬できる。

また、実機フランジ模擬試験ではガスケット試験体の押し込み量を 0mm に設定し、実機の 2Pd 時の開口量以上を模擬した条件で試験を実施している。

1. 実機と実機フランジ模擬試験装置の比較

実機（ドライウェル主フランジ）及び、実機フランジ模擬試験装置のフランジ部の断面形状及び寸法を図 1、図 2 及び表 1 に示す。

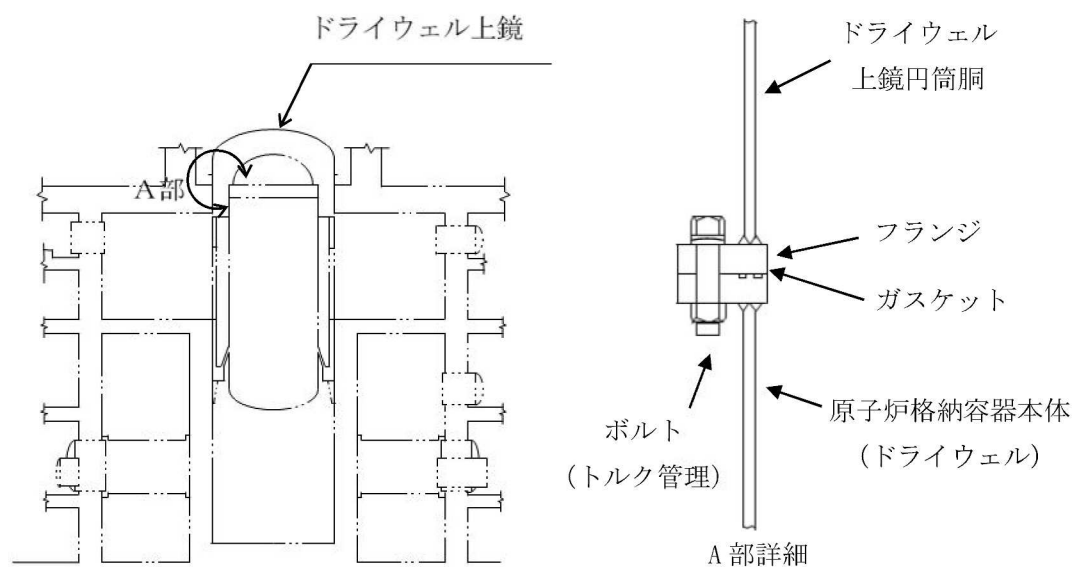


図 1 ドライウェル主フランジ断面形状

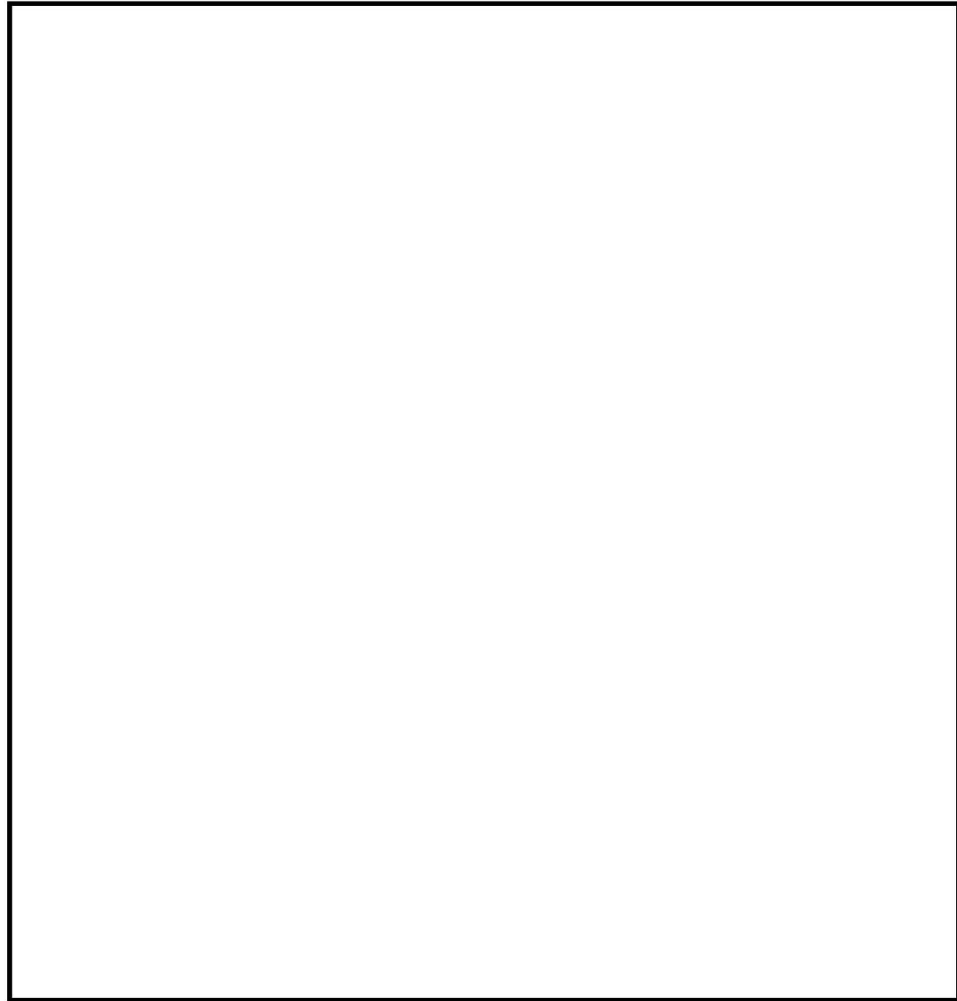


図 2 実機フランジ模擬試験装置図

表 1 実機フランジと実機フランジ模擬試験装置の寸法比較

(単位：mm)

		ガスケット寸法				溝寸法			
		内径	外径	幅	高さ	内径	外径	幅	高さ
実機フランジ (ドライウェル 主フランジ)	内側								
	外側								
実機フランジ 模擬試験装置									

2. 実機への適用

前述のとおり、実機フランジ模擬試験装置は、フランジの断面形状が実機と同形状、ガスケット及び溝寸法は幅・高さともに実機と同等であり、中心径のみを縮小した試験装置である。

実機フランジ模擬試験では、漏えい有無の判定基準として、1cc/min以上の漏えい量が30分以上継続した場合に漏えい有と判断することとしている。ここで、試験の判定基準として設定した1cc/minの漏えい量を実機フランジでの漏えい量に換算し、原子炉格納容器の設計漏えい率との比較を行った結果は以下のとおりである。

ガスケットの内径を d_i 、外径を d_o とすると、JIS B 2490よりガスケットからの漏えい量 L はガスケットの接触面の内径 d_i に比例し、ガスケット接触幅 $(d_o - d_i)/2$ に反比例する。

$$L \propto \frac{d_i}{(d_o - d_i)/2} = \frac{1}{(d_o/d_i - 1)/2}$$

表1より実機フランジ模擬試験のガスケットの断面形状は実機と一致させていることから、ガスケット試験体の接触幅は実機ガスケットと一致している。このため、フランジ部からの漏えい量はガスケット内径に比例する。

本試験で判定基準として設定した漏えい量 (1cc/min) より、ガスケット径比で補正した実機フランジでの漏えい量から求めた、原子炉格納容器全ハッチ類フランジ部からの漏えい量は0.001%/day以下であり、原子炉格納容器の設計漏えい率 (0.4%/day) の1/400以下となる。実機フランジのガスケット径を表2、実機フランジにおける漏えい量の推定結果を表3に示す。

このように、重大事故等時環境を模擬した改良 EPDM 製シール材における実機フランジ模擬試験結果は、原子炉格納容器の設計漏えい率と比較して十分に余裕がある状態であることから、改良 EPDM 製シール材の実機への適用は可能であると考えられる。

表2 実機フランジのガスケット径

対象	ガスケット径 (mm) *1, 3
ドライウェル主フランジ	
上部ドライウェル機器搬入用ハッチ	
下部ドライウェル機器搬入用ハッチ	
所員用エアロック*2	
サプレッションチェンバ出入口	
合計	

注記*1: 二重ガスケットについては保守的に外側ガスケットの中心径を用いる。

*2: 所員用エアロックはガスケット周長が等価となる等価直径とする。

*3: ガスケット径が 1000mm 以下の閉止フランジ付貫通部については、他の大開口部と比較して影響が小さいため対象外とする。

表3 実機フランジにおける漏えい量の推定結果

試験での漏えい判定基準 (L_1)	1cc/min
試験フランジガスケット径 (D_1)	<input type="text"/> mm
原子炉格納容器フランジガスケット径合計 (D_0)	<input type="text"/> mm
ガスケット径比 ($\alpha = D_0/D_1$)	<input type="text"/> mm/mm
原子炉格納容器フランジでの漏えい量 ($L_0 = L_1 \times \alpha$)	<input type="text"/> cc/min
	<input type="text"/> m ³ /day
原子炉格納容器空間容積 (V_0)	13350 m ³ *
原子炉格納容器空間容積に対する割合 (L_0/V_0)	<input type="text"/> %/day

注記*: ドライウェル空間容積 (約 7350m³) + サプレッションチェンバ空間容積 (約 6000m³, サプレッションプール水量が約 3600m³ の場合において)

改良 EPDM 製シール材の実機を模擬した小型フランジ試験について

改良 EPDM 製シール材について、耐高温性、耐蒸気性を確認するために、800kGy の γ 線照射を行ったシール材を用いて、高温曝露又は蒸気曝露を行った後、気密性確認試験を実施して漏えいの有無を確認した。また、試験後の外観観察、FT-IR 分析及び硬さ測定を行い、曝露後のシール材の状況を確認した。本試験に使用した試験治具寸法を図 1 に、試験治具及びシール材外観を図 2 に示す。シール材の断面寸法は実機の 1/2 とし、内側の段差 1mm により外側からも高温空気又は蒸気に曝露されることとなる。

なお、治具に使用されている鉄鋼材料と改良 EPDM 製シール材とでは、改良 EPDM 製シール材の方が線膨張係数は大きく、温度を低下させた場合には改良 EPDM 製シール材の方が治具と比較して収縮量が大きくなるため、試験治具溝内でのタンク等との密着性は低下する方向となり、気密試験は高温状態より室温での試験の方が厳しくなると考えられる。このことから、本試験のオートクレーブでの蒸気曝露及び室温での H e 気密性確認試験の条件は、実プラントで想定される重大事故等時環境と比較して保守的な条件となる。試験の詳細と結果を以下に記載する。

① 高温曝露

熱処理炉内に小型フランジ試験装置を設置し、乾熱 200°C、168 時間の高温曝露を実施した。

② 蒸気曝露

蒸気用オートクレーブ内に小型フランジ試験装置を設置し、1MPa、250°C の蒸気環境下で 168 時間曝露を実施した。蒸気用オートクレーブの系統図を図 3 に、蒸気曝露試験体設置状況を図 4 に示す。

③ H e 気密性確認試験

高温曝露及び蒸気曝露後の試験体について、H e を用いて気密試験を実施した。負荷圧力は 0.3MPa、0.65MPa、0.9MPa とし、スヌープでの漏えい確認と、0.3MPa では保持時間 10 分、0.65MPa 及び 0.9MPa では保持時間 30 分で圧力降下の有無を確認した。また、0.8mm の隙間ゲージを用いてフランジ開口変位を模擬した気密性確認試験も実施した（実機 1.6mm 相当の変位）。試験状況を図 5、図 6 に、試験結果を表 1 に示す。いずれの条件下でも漏えい及び圧力降下は認められなかった。

④ 試験後外観観察

デジタルマイクロスコープを用いて H e 気密性確認試験後のシール材表面を観察した。観察結果を図 7 に示す。シール材表面に割れ等の顕著な劣化は認められなかった。



図1 試験治具寸法

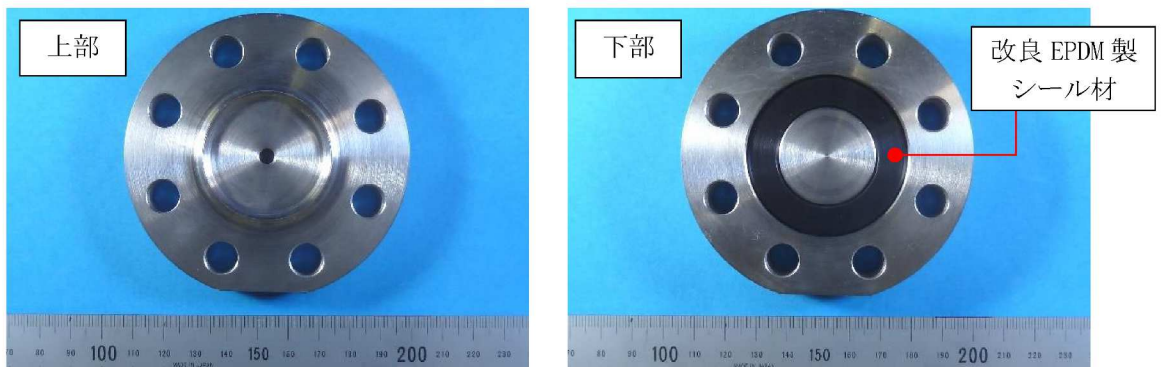


図2 試験治具及びシール材外観

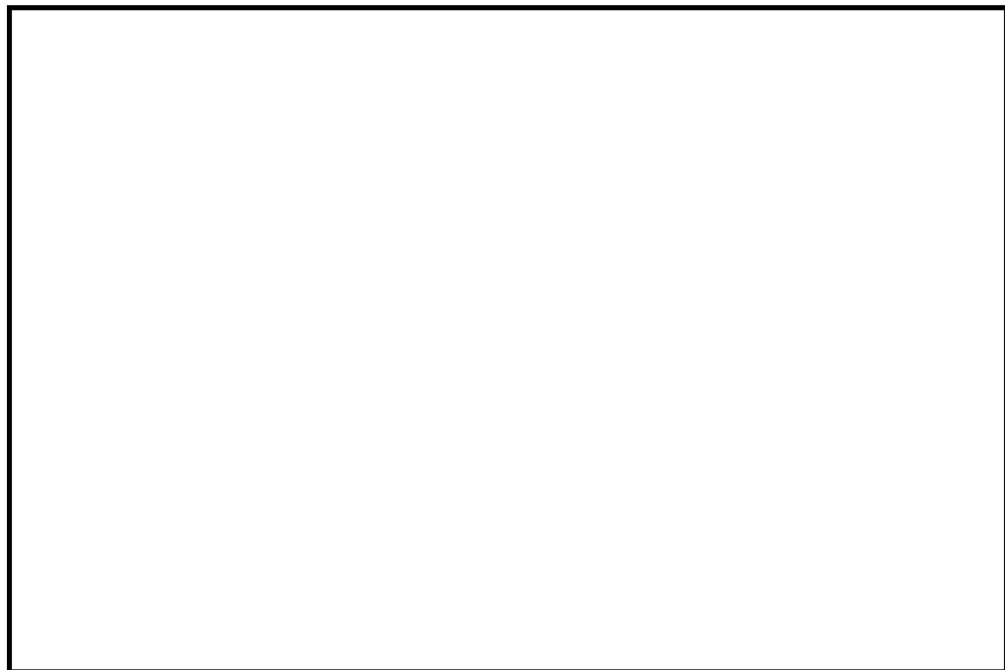


図3 蒸気用オートクレーブ系統図

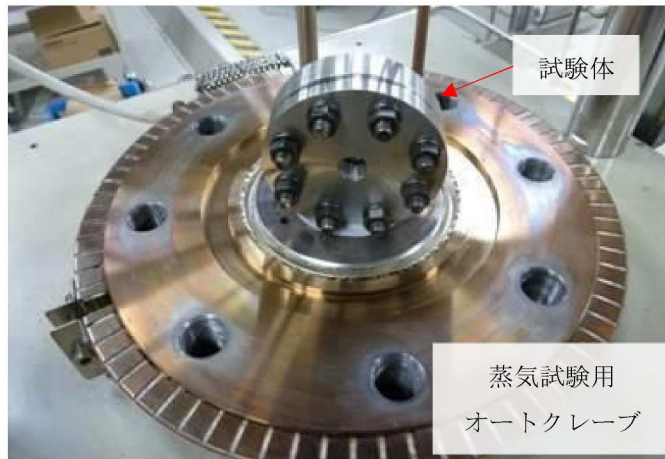


図4 蒸気曝露試験体設置状況



図5 He気密性確認試験状況

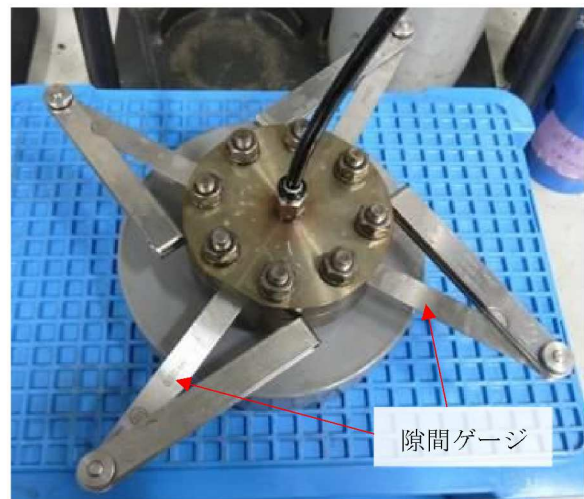


図6 He気密試験時開口模擬
(隙間ゲージ使用)

表1 He気密性確認試験状況

No.	曝露条件	放射線 照射量	変位	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa
1	乾熱 200°C, 168h	800kGy	なし	○	○	○
			0.8mm	○	○	○
2	蒸気 1MPa, 250°C, 168h	800kGy	なし	○	○	○
			0.8mm	○	○	○
3	蒸気 1MPa, 250°C, 168h	800kGy	なし	○	○	○
			0.8mm	○	○	○

○：漏えい及び圧力降下なし

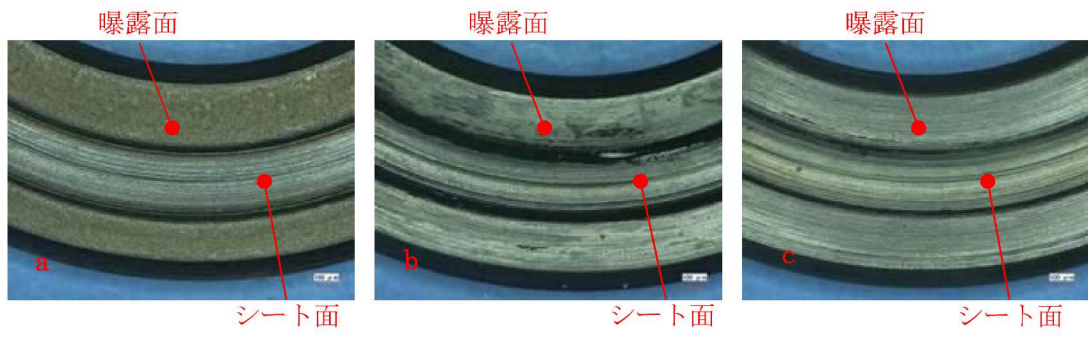


図7 試験後外観観察結果
(a: 乾熱 200°C, 168h, b及びc: 蒸気 250°C, 168h)

⑤ FT-IR 分析

試験後のシール材の FT-IR 分析*結果を図 8, 図 9 に示す。高温曝露中に空気が直接接触する位置 (曝露面) では, ベースポリマーの骨格に対応するピークが消失していたが, その他の分析位置 (シート面), 曝露条件では顕著な劣化は認められなかった。

注記* : FT-IR 分析では赤外線が分子結合の振動や回転運動のエネルギーとして吸収されることを利用して, 試料に赤外線を照射して透過又は反射した光量を測定することにより分子構造や官能基の情報を取得可能である。

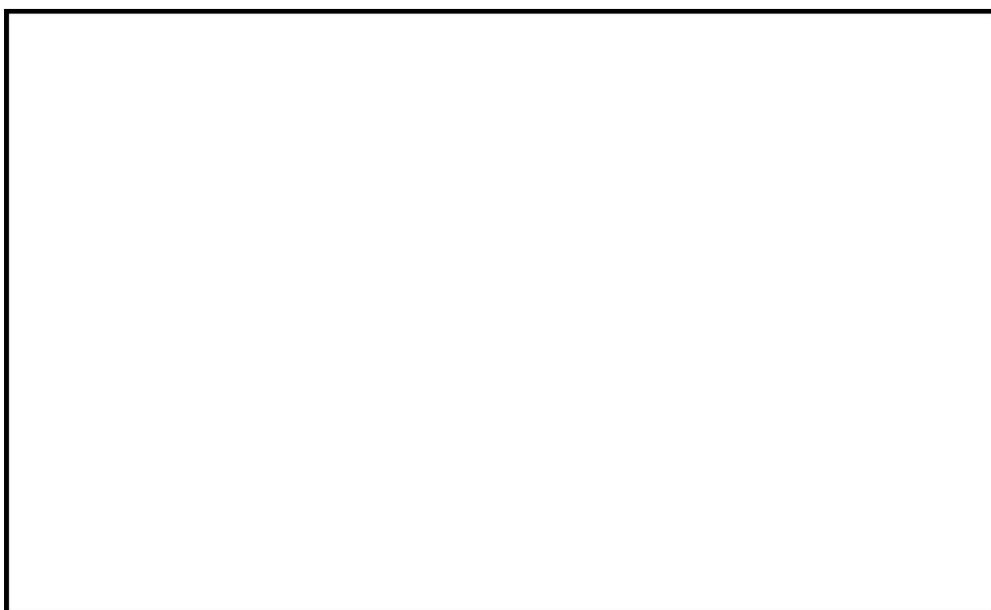


図 8 FT-IR 分析結果 (曝露面)



図 9 FT-IR 分析結果 (シート面)

⑥ 硬さ測定

試験後のシール材の硬さ測定結果を図 10 に示す。曝露面，シート面，裏面，断面の硬さを測定した。曝露面において，乾熱 200℃，168 時間条件において，曝露面では酸化劣化によって硬さが顕著に上昇していた。その他の部位，条件では，蒸気 250℃，168 時間条件の曝露面で若干の軟化が確認された以外，硬さは初期値近傍であり，顕著な劣化は確認されなかった。

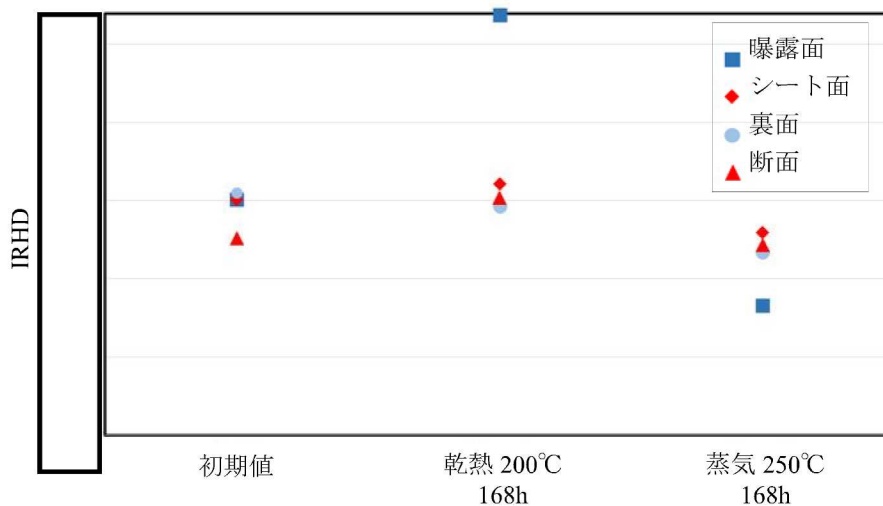


図 10 硬さ測定結果

以上の試験結果より，200℃，2Pd，168 時間の条件下においては，改良 EPDM 製シール材に顕著な劣化が認められないことから，フランジガスケット材として改良 EPDM 製シール材を使用した場合は，原子炉格納容器内部圧力上昇時のフランジ部の開口を勘案しても原子炉格納容器フランジ部の気密性は保たれると考えられる。

バックアップシール材のシール機能について

原子炉格納容器閉じ込め機能の更なる安全性向上対策を目的に、自主的な取り組みとして、バックアップシール材（一液硬化型耐火シーラント）を塗布する。バックアップシール材は図1で示すように、現行シール材のシール溝よりも外側のフランジ面全周に塗布できるシール材である。バックアップシール材には、耐高温性、耐蒸気性、耐放射線性が確認され、重大事故等環境下においてもシール機能を発揮できるものを用いる。

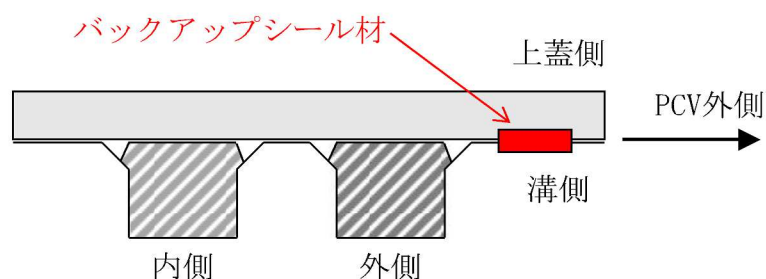


図1 バックアップシール材イメージ図

1. バックアップシール材の適用目的

原子炉格納容器フランジ部のシール機能は、200℃、2Pdの環境下において、改良 EPDM 製シール材により重大事故等発生後の7日間のシール機能が維持できることを確認しているが、原子炉格納容器内が長期間にわたり高温状態が続くことでシール材の性能が低下することを考慮して、改良 EPDM 製シール材の外側にバックアップシール材を塗布し、「改良 EPDM 製シール材+バックアップシール材」の組合せとすることで、長期におけるシール機能健全性を補強する。

また、改良 EPDM 製シール材は、重大事故等時の耐環境性に優れていることを確認しているが、一般的な劣化モードとして酸化劣化が挙げられるため、長期におけるシール材の信頼性を向上させるためには、劣化要因である酸素の高温状態曝露を回避することが必要になる。バックアップシール材は、フランジ外側ガスケット部よりも外周のフランジ面を塗布することから、改良 EPDM 製シール材への原子炉格納容器外側からの酸素供給を遮断する役割も果たすことができるため、酸化劣化における改良 EPDM 製シール材のシール性能低下を抑えることが可能である。

以上より、バックアップシール材は、重大事故等発生後の改良 EPDM 製シール材の長期におけるシール機能健全性を補強することができるため、原子炉格納容器閉じ込め機能の更なる安全性向上対策として、ドライウェル主フランジ、機器ハッチ類のシール部に「改良 EPDM 製シール材+バックアップシール材」を採用する。

2. バックアップシール材の性能確認試験

バックアップシール材に関して、耐高温性、施工性等を確認するために、以下の試験を実施した。

- (1) 高温曝露及び蒸気曝露後気密性確認試験
- (2) 開口模擬後気密性確認試験
- (3) 実機適用性試験
- (4) 長時間試験（改良 EPDM 製シール材との組合せ）

各々の試験の詳細を以下に示す。

(1) 高温曝露及び蒸気曝露（250℃，168 時間）後気密性確認試験

フランジ部に塗布するバックアップシール材に関して、小型試験体（図 2 参照）を用いて放射線照射及び蒸気曝露後に H e 気密性確認試験を実施し漏えいの有無を確認するとともに、試験後に FT-IR 分析を実施してバックアップシール材の化学構造の変化状況を確認した。試験条件の詳細を以下に記載する。

① 放射線照射

重大事故等時環境を模擬するために、放射線照射量はフランジ部の重大事故等後 7 日間の累積放射線照射量の目安である 800kGy を目標に、線源 ^{60}Co 、照射時間 100 時間にて、放射線照射を実施した。照射実績は、雰囲気線量 8.19kGy/h, 8.27kGy/h, 累積照射量 819kGy, 827kGy であった。

② 高温曝露

熱処理炉を使用して 300℃，73 時間及び 350℃，73 時間の高温曝露を実施した。

③ 蒸気曝露

蒸気用オートクレーブを使用して、試験体（3 個）を 1MPa，250℃の蒸気環境下で 168 時間曝露を実施した。蒸気用オートクレーブの系統図を図 3 に、試験体設置状況を図 4 に示す。

④ H e 気密性確認試験

蒸気曝露後の試験体について、H e を用いて気密性確認試験を実施した。高温曝露条件では負荷圧力 0.2，0.3，0.4，0.5，0.62MPa，蒸気曝露条件では負荷圧力は 0.3，0.65，0.9MPa とし、スヌープでの漏えい確認と 0.65MPa 及び 0.9MPa は保持時間 30 分，その他の圧力では保持時間 10 分で圧力降下の有無を確認した。気密性確認試験状況を図 5 に、試験結果を表 1，2 に示す。いずれの試験体も漏えい及び圧力降下は認められなかった。

⑤ FT-IR 分析

H e 気密性確認試験後に FT-IR 分析*を実施した。分析結果を図 6 に示す。本試験条件では 350℃高温曝露条件を除いてシロキサン構造の変化量は小さく、顕著な劣化は認められなかった。

注記*：FT-IR は赤外線が分子結合の振動や回転運動のエネルギーとして吸収されることを利用して、試料に赤外線を照射して透過又は反射した光量を測定することにより分子構造や官能基の情報を取得可能である。

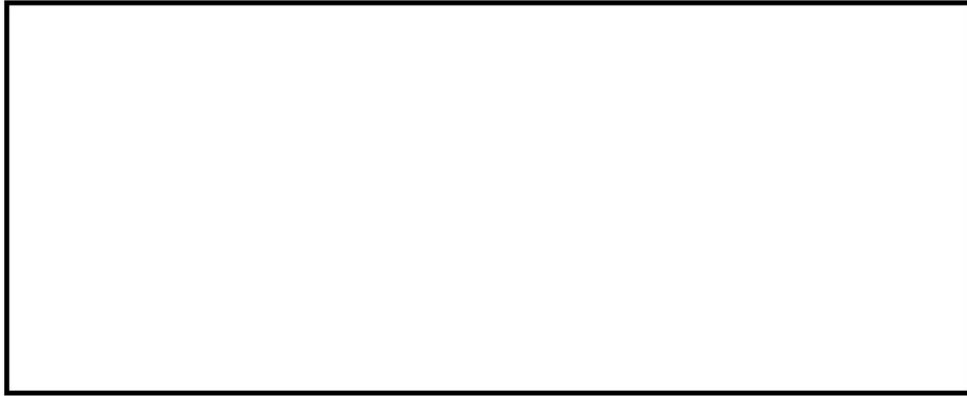


図2 小型試験治具寸法

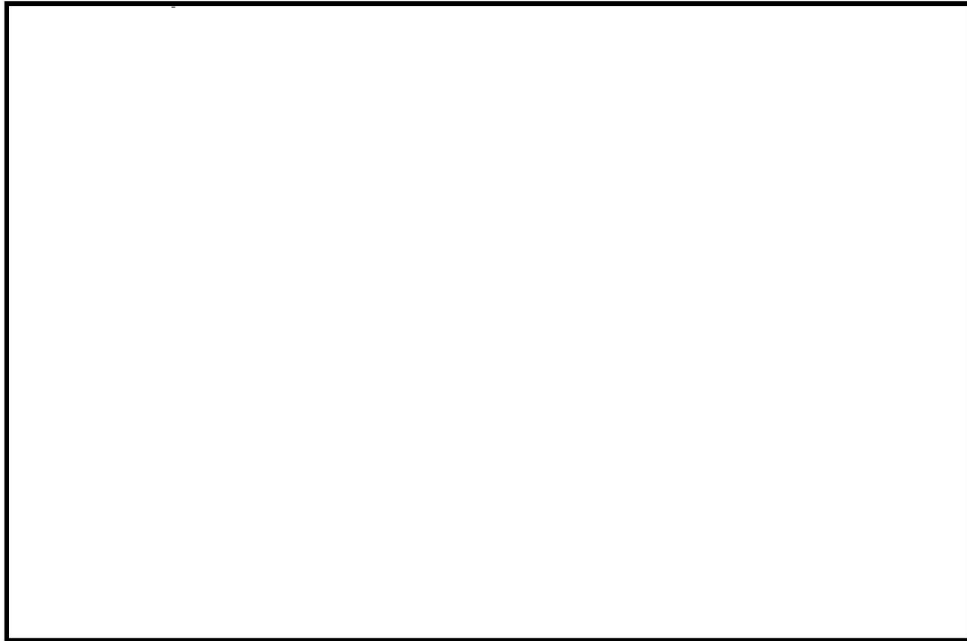


図3 蒸気用オートクレーブ系統図



図4 蒸気曝露
試験片設置状況



図5 気密性確認試験状況

表1 He気密性確認試験結果（高温曝露後）

No.	高温曝露条件	0.2MPa	0.3MPa	0.4MPa	0.5MPa	0.62MPa	放射線照射量
1	300℃, 73h	○	○	○	○	○	827kGy
2	350℃, 73h	○	○	○	○	○	827kGy

○：漏えい及び圧力降下なし

表2 He気密性確認試験結果（蒸気曝露後）

No.	蒸気曝露条件	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa	放射線照射量
1	1MPa, 250℃, 168h	○	○	○	819kGy
2	1MPa, 250℃, 168h	○	○	○	819kGy
3	1MPa, 250℃, 168h	○	○	○	819kGy

○：漏えい及び圧力降下なし

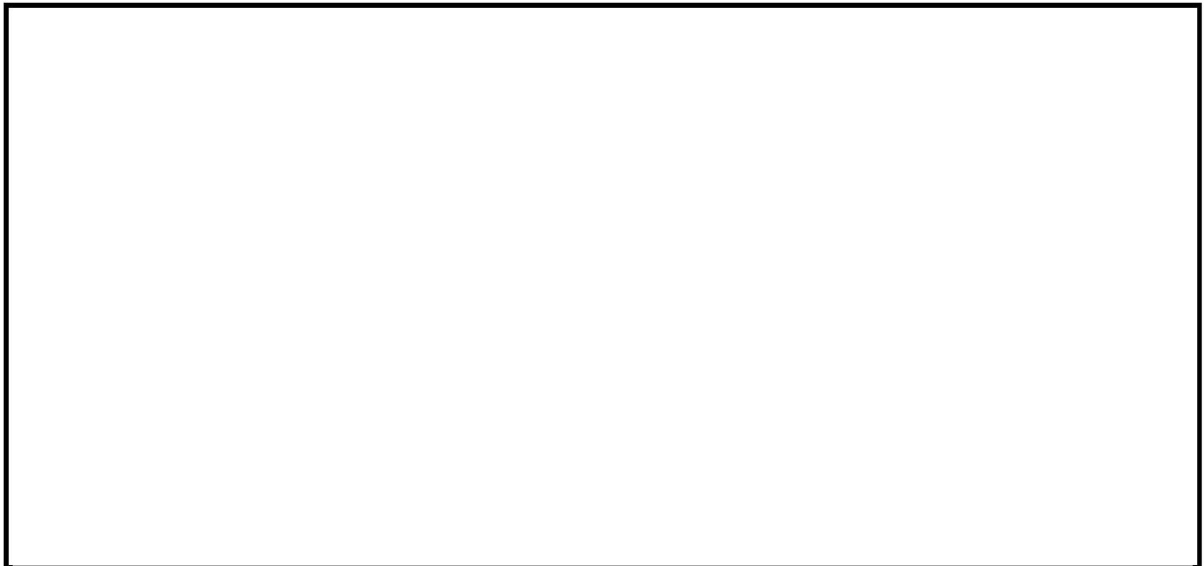


図6 FT-IR分析結果

(2) 開口模擬後気密性確認試験

重大事故等時には、事故後ベント実施までは圧力が $2Pd$ 近傍と高くなりフランジ部が開口することから、フランジ開口を経験した後にバックアップシール材に気密性があるか否かを確認するため、30cm 中型試験体を用いて隙間ゲージで一度変位を経験させた後に He 気密性確認試験を実施した。試験の流れとしては、バックアップシール材を塗布したフランジを乾燥させた後に、隙間ゲージで変位を加え、その後隙間ゲージを引き抜いて試験フランジの変位を当初位置に戻す。その状態で He 気密性確認試験を実施して漏えいの有無を確認した。試験状況を図 7、図 8、試験条件及び結果を表 3 に示す。

1.9mm までの変位を経験した後も He 気密性確認試験において漏えい及び圧力降下は認められなかった。なお、 He 気密性確認試験は (1) の高温曝露及び蒸気曝露試験 (250℃, 168 時間) 後気密性確認試験と同様に、負荷圧力は 0.3MPa, 0.65MPa, 0.9MPa とし、スヌープでの漏えい確認と 0.3MPa は保持時間 10 分、0.65MPa 及び 0.9MPa は保持時間 30 分で圧力降下の有無を確認した。

なお、開口模擬後気密性確認試験は試験装置上の理由から、バックアップシール材に高温曝露は経験させていない。しかしながら、FT-IR 分析結果では 250℃ 蒸気曝露でバックアップシール材の化学構造の変化量は小さく、顕著な劣化が認められなかったことから、重大事故等時のフランジ開口を模擬したバックアップシール材の性能を確認する試験においては、(1)⑤ FT-IR 分析の結果も踏まえると、高温曝露の有無は試験結果に大きな影響を与えないと考える。



図 7 バックアップシール材塗布状況
(1.5mm 厚さ)



図 8 変位付与状況
隙間ゲージを用いて所定の変位を加えた後、隙間ゲージを抜いて再締め付け

表3 開口模擬後He気密性確認試験結果

No.	塗布厚さ	変位	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa
1	1.5mm	変位付与前	○	○	○
		1.0mm	○	○	○
2	5.0mm	変位付与前	○	○	○
		1.0mm	○	○	○
3	1.5mm	変位付与前	○	○	○
		1.9mm	○	○	○

○：漏えい及び圧力降下なし

(3) 実機適用性試験

実機フランジは直径が大きく塗布長さが長いため、実際にバックアップシール材を適用した場合に問題なく気密性が確保可能か、また、既存のシール材との干渉の有無を確認するため、柏崎刈羽原子力発電所第4号機SRVハッチにバックアップシール材を塗布した局所漏えい試験を実施した。

バックアップシール材塗布条件は、図9に示す内側及び外側シール材に加えて、原子炉格納容器外側にバックアップシール材を塗布して既存シール材とバックアップシール材との干渉の有無を確認する条件、図10に示す内側シール材に原子炉格納容器外側にバックアップシール材を塗布し、バックアップシール材単体でシール機能を有することを確認する条件の2通り実施した。いずれも局所漏えい試験結果は良好であった。

なお、バックアップシール材の塗布時には、塗布厚さが1～1.5mm程度となるように治具を用いて作業を実施した(図11参照)。

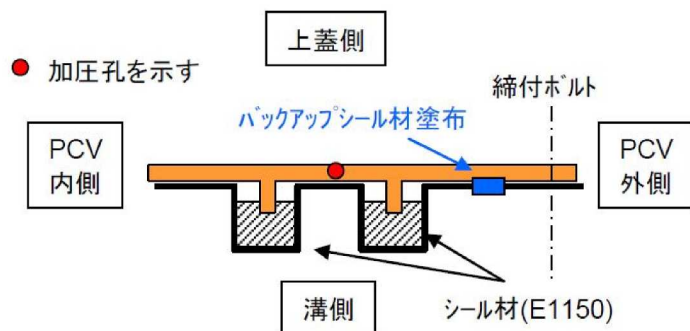


図9 内外シール材+PCV 外側バックアップシール材塗布条件

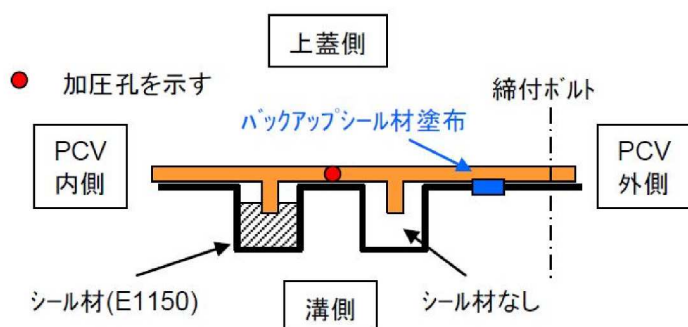


図10 内シール材+PCV 外側バックアップシール材塗布条件

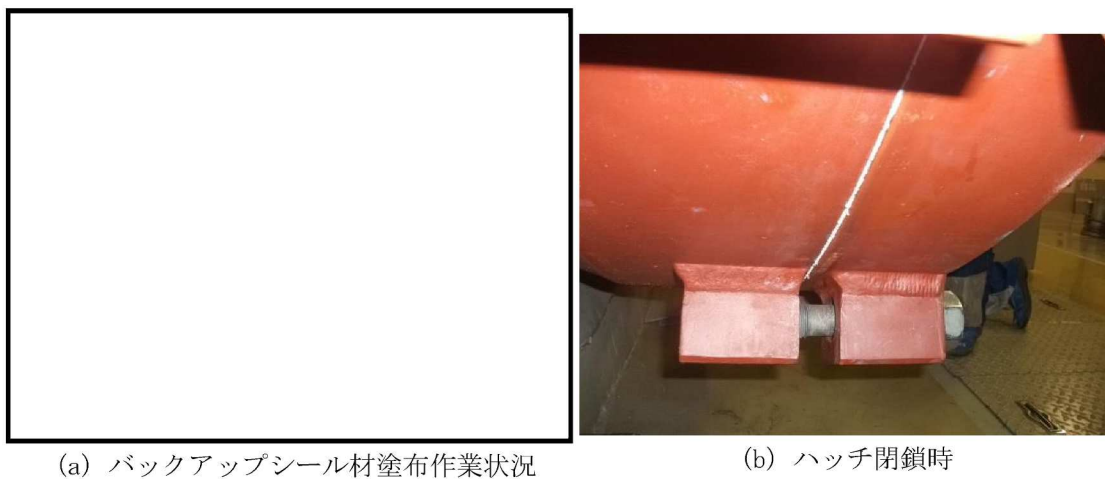


図11 柏崎刈羽原子力発電所4号機SRVハッチ試験状況

(4) 長時間試験

重大事故等時においては、復旧までに相応の期間が必要と考えられることから、30日、又はそれ以上の期間曝露したシール材の気密性を確認することを目的に、改良 EPDM 製シール材（放射線照射量 800kGy）とその外側にバックアップシール材を適用した条件で、長期間高温曝露を実施した後に H e 気密性確認試験を行い漏えいの有無を確認した。各々の詳細条件を以下に示す。

また、試験体の状況（改良 EPDM 製シール材＋バックアップシール材塗布）を図 12 に示す。

① 高温曝露

熱処理炉を用いて、乾熱 200℃条件下にて高温曝露を実施した。なお、試験体は、所定の日数曝露した後に取り出して下記の H e 気密性確認試験を実施し、再度、熱処理炉に戻して乾熱 200℃条件下にて追加日数の高温曝露を継続実施している。

② H e 気密性確認試験

高温曝露後の試験体について、H e を用いて気密試験を実施した。負荷圧力は 0.3MPa、0.65MPa、0.9MPa とし、スヌープでの漏えい確認と 0.3MPa は保持時間 10 分、0.65MPa 及び 0.9MPa は保持時間 30 分で圧力降下の有無を確認した。試験状況を図 13 に、試験結果を表 4 に示す。いずれの試験体、試験条件においても漏えい及び圧力降下は認められなかった。



図 12 試験体の状況
(改良 EPDM 製シール材＋バックアップシール材)

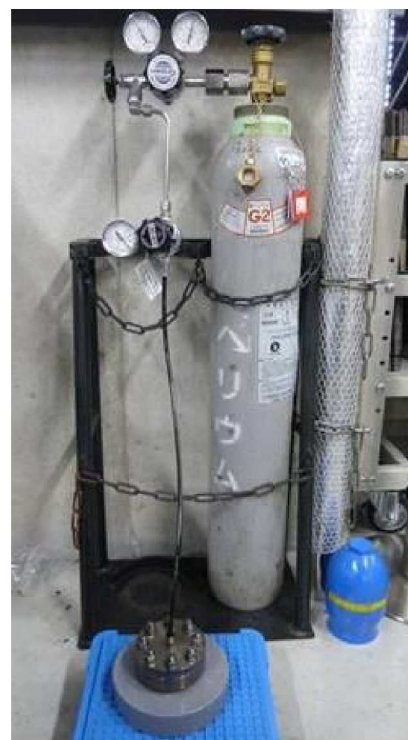


図 13 H e 気密性確認試験状況

表4 He気密性確認試験結果

曝露条件	曝露日数	曝露時間(h)	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa
乾熱 200℃	30	720	○	○	○
	45	1,080	○	○	○
	60	1,440	○	○	○
	75	1,800	○	○	○
	90	2,160	○	○	○
	105	2,520	○	○	○

○：漏えい及び圧力降下なし

以上のことから、バックアップシール材について原子炉格納容器限界温度 200℃における長期におけるシール性能を確認できた。また、ベント実施までの間に原子炉格納容器の過圧によるフランジ開口を経験した後においても、優れた高温耐性とシール性能を確認することができた。よって、バックアップシール材は、ベント実施後の長期シール機能強化に有効である。

なお、原子炉格納容器閉じ込め機能として最も厳しいシナリオである「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において代替循環冷却系を使用しないシーケンスでは、原子炉格納容器雰囲気温度は7日間（168時間）時点で150℃未満であり、その後の原子炉格納容器雰囲気温度は崩壊熱の減衰によって低下傾向となるため、7日間（168時間）以降は150℃を下回る。したがって、これよりも苛酷な200℃状態が30日間継続しても原子炉格納容器閉じ込め機能は健全であることが試験により確認できているため、重大事故等発生後長期のシール性能向上のためには「改良 EPDM 製シール材+バックアップシール材」は有効であると考えられる。

3. バックアップシール材の塗布条件

バックアップシール材のシール機能が確保されるための塗布幅、塗布厚さ、塗布作業に関する条件は、各種試験の結果から表5のとおり定めている。塗布幅は幅が広い程シール性能が向上するが、試験でシール機能が確認できた最小の塗布幅を基に設定している。塗布厚さについては、シール機能が確認できた塗布厚さを基に設定している。また、バックアップシール材は塗布後、除々に乾燥して固まるため、塗布後にフランジ閉鎖するまでの時間を制約として設けることにしている。この時間についても、試験によりバックアップシール材の乾燥時間を考慮して、シール機能が確認できた時間を基に設定している。

表5 バックアップシール材の塗布条件

項目	塗布条件 (ドライウェル主フランジ)	塗布条件 (機器ハッチ類)
バックアップシール材の塗布幅		
バックアップシール材の塗布厚さ		
塗布後、フランジ閉鎖までの時間		

4. バックアップシール材の品質確認

バックアップシール材は表5の条件で塗布することで、シール機能が確保可能である。従って、バックアップシール材塗布作業時に「塗布幅」、「塗布厚さ」、「塗布後、フランジ閉鎖までの時間」を確認することで品質を確認する。「塗布幅」、「塗布厚さ」については、それら幅、厚さを確保可能な専用治具を用いてバックアップシール材を塗布作業する等で、品質確認を行う。「塗布後、フランジ閉鎖までの時間」については、塗布作業時間を管理することで品質確認を行う。

バックアップシール材塗布による設計影響について

1. バックアップシール材塗布によるフランジ設計への影響確認について

フランジ設計として、漏えい発生を防止するためにリング溝にシール材（改良 EPDM 製）がセツトされているが、シール機能を確保するために以下が設計上考慮されている。

- ① シール材について、開口を考慮した適切な押し込み量を確保すること
- ② 内圧及びシール材反力に対して、適切なフランジ強度を有すること
- ③ シール材が、化学的影響を受ける等により、反応や劣化等の影響を受けないこと
- ④ フランジ締め付け作業の施工性が確保できること

バックアップシール材をフランジ面に塗布することで、上記①～④について悪影響を与えないことを確認するため、バックアップシール材が塗布されることにより「フランジ開口量評価でシール材（改良 EPDM 製）追従性に悪影響を与えないこと」、「フランジ応力評価に悪影響を与えないこと」、「シール材（改良 EPDM 製）に化学反応等の悪影響を与えないこと」、「フランジ締め付け作業・開放作業に悪影響を与えないこと」を確認した。

2. バックアップシール材厚さの影響について

バックアップシール材の有無による、組み上げ後のフランジ部の厚み変化はほとんどなく、約 0.01mm であることが確認されている。また、バックアップシール材の塗布条件として、ドライウェル主フランジについては幅 mm 以上、厚さ mm 以上、機器ハッチ類については幅 mm 以上、厚さ mm 以上としている。この条件を施工管理できるように、専用治具を用いて塗布作業を実施する。具体的には、塗布条件を満足できるように切り欠きを有したヘラのようなものを使用することで考えている。これをフランジ面に当てて、延ばすことでバックアップシール材を特別な技量なく、幅及び厚さを均一に塗布可能なものとする。

図 1 の中型試験体（直径 30cm）を使用して、バックアップシール材を塗布せず試験体を組み上げた後（バックアップシール材なし）とバックアップシール材を塗布して試験体を組み上げた後（バックアップシール材あり）の試験体の厚さを測定した。その結果を表 1 に示す。

実プラントでのシール材の押し込み量は約 mm である。一方、今回測定結果から、バックアップシール材適用による押し込み量の変化は 0.01mm 程度と想定され、バックアップシール材適用による押し込み量の変化量やフランジ開口量への影響は無視できる程度で悪影響はないと考えられる。

表 1 試験体の厚さ測定結果

測定位置	バックアップ シール材なし(mm)	バックアップ シール材あり(mm)
1	40.01	40.02
2	40.02	40.02
3	40.00	40.03
4	40.00	40.02
5	40.00	40.01
6	40.01	40.01
7	40.01	40.01
8	40.01	40.02
9	40.01	40.03
10	40.01	40.03
11	40.01	40.03
12	40.00	40.03
平均	40.01	40.02

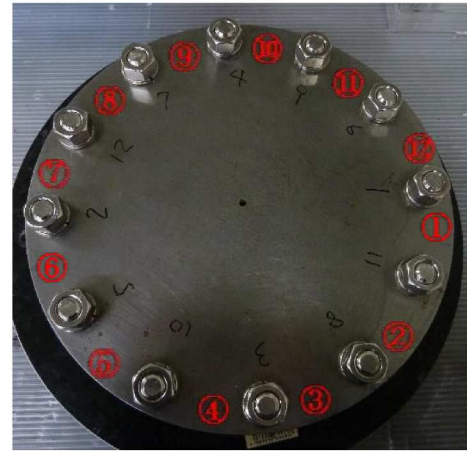


図 1 試験体厚さ測定位置

3. バックアップシール材塗布に伴うフランジへの影響について

バックアップシール材を塗布した場合の影響評価として、①開口量評価及び②フランジ応力評価を実施した。前述 2. からバックアップシール材塗布時の組み上げ後のフランジ部厚み変化は 0.01mm 程度であるが、保守的な仮定としてバックアップシール材によるフランジ部厚み変化を 0.5mm とし、開口量評価及びフランジ応力評価に悪影響がないことを確認した。

① 開口量評価

構造上バックアップシール材の厚さ分、改良 EPDM 製シール材の押し込み量は低減する。このため、最も評価結果が厳しくなるドライウェル主フランジにて 2Pd 時の押し込み量と必要押し込み量を比較し、シール機能を維持できることを確認した (図 2, 表 2 参照)。なお、ここで用いた改良 EPDM 製シール材の必要押し込み量は、実機を模擬した試験を実施し、押し込み量 0mm でもシール機能を維持できることを確認していることから、0mm とした。

$$\begin{aligned}
 \text{評価式：押し込み量} &= \text{初期押し込み量} - \text{バックアップシール材厚さ} - \text{開口量} \\
 &= (\square \text{ mm}) - (0.5\text{mm}) - (1.35\text{mm}) \\
 &= \square \text{ mm} > 0\text{mm}
 \end{aligned}$$

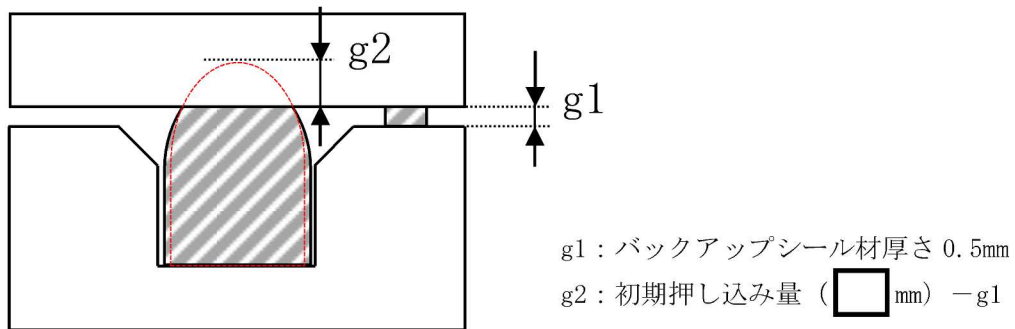


図2 バックアップシール材を保守的に0.5mm厚さとした初期押し込み状態図

表2 2Pd時のバックアップシール材を用いたフランジシール部開口量と押し込み量

設備名	バックアップシール材厚さ	開口量	押し込み量	必要押し込み量
上部ドライウェル 機器搬入用ハッチ	0.50	1.35	□	0以上

(単位: mm)

② フランジ部応力評価

バックアップシール材を用いた際、2Pd時にフランジに加わる荷重を表3に示す。表3よりバックアップシール材の荷重は内圧による荷重と比較して2桁以上小さくなる。このため、フランジ部へ発生する応力の影響は内圧が支配的であり、バックアップシール材の有無によりフランジ部へ加わる発生応力はほとんど変化しないと考えられる。

表3 2Pd時のバックアップシール材を用いたフランジに加わる荷重

内圧による荷重	シール材 (改良 EPDM 製) 反力による荷重	バックアップシール材反力 による荷重
5.166×10^4	— (セルフシールガスケット)	2.044×10^2

(単位: kN)

参考として、バックアップシール材の有無によるフランジ部発生応力を比較したものを表4に示す。このように実際に上記の結果を反映したものとなっており、バックアップシール材を考慮しても、フランジ部に発生する応力は、弾性域であることを示す供用状態Csにおける評価基準値に対して十分に余裕があるといえる。

表 4 2Pd 時のバックアップシール材を用いたフランジ部発生応力

応力分類		算出応力 (MPa)		供用状態 Cs における 許容応力 (MPa)	
		バックアップ シール材 無し	バックアップ シール材 有り		
フランジ	ハブの軸方向応力	34	34	339	
	ボルト穴の中心円における フランジの半径方向応力	190	191	226	
	フランジの半径方向応力	3	3	226	
	フランジの周方向応力	1	1	226	
	組合せ応力		19	19	226
			18	18	226
ボルト		341	342	432	

4. 改良 EPDM 製シール材に対する悪影響，フランジ締め付け・開放作業への影響について

改良 EPDM 製シール材との化学的反応等の影響については，改良 EPDM 製シール材とバックアップシール材を組み合わせたフランジによる長期熱劣化影響確認試験において，劣化後の気密性が確認できていることから，影響はないと考える。

また，フランジ締め付け・開放作業時の影響については，柏崎刈羽原子力発電所第 4 号機の SRV ハッチで実施したモックアップ試験時に，実際にバックアップシール材を塗布することにより確認している。バックアップシール材は，フランジ開放時（点検時）の手入れの際に容易に除去可能であり，フランジ締め付け時にバックアップシール材の余剰分が生じた場合は，フランジ外面に出てくるが，容易に除去可能であることから，現場作業等へ有意な影響を与えることはない。

なお，フランジ締付ボルトのトルク管理については，バックアップシール材がない場合にフランジの初期押し込み量 mm を確保できるよう，締め付け作業時に実施しているが，同トルクによる締め付けにおいて，バックアップシール材の厚みを考慮しても，重大事故等時環境において閉じ込め機能を十分確保できることを確認したことから，締付ボルトのトルク管理値に変更は必要ない。

5. まとめ

以上より，バックアップシール材塗布におけるフランジ押し込み量への影響は 0.01mm 程度とわずかであり，かつ，仮に押し込み量に 0.5mm の影響があると保守的な想定をした場合でも，開口量評価及びフランジ部応力評価に大きな影響を与えないことを確認した。また，改良 EPDM 製シール材に対して化学的反応等の影響がないこと，フランジ締め付け・開放作業の成立性も確保できることから，バックアップシール材塗布によるフランジ設計への影響はない。

ドライウェル主フランジ等の開口量評価について

1. ドライウェル主フランジの開口量評価における製作公差等の影響について

原子炉格納容器フランジ部の閉じ込め機能評価については、フランジ開口量評価と改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ特性を組み合わせることで評価している。ドライウェル主フランジの開口量評価を図 1、改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験結果を表 1 に示す。



図 1 ドライウェル主フランジの圧力と開口量の関係 (200°C)

表 1 改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験結果

No	放射線照射量	雰囲気	温度	圧縮永久ひずみ率 [%]		
				24h	72h	168h
1	800kGy	乾熱	200°C			
2	800kGy	乾熱	250°C			
3	800kGy	蒸気	200°C			
4	800kGy	蒸気	250°C			

図 1 の開口量評価線図で設定している許容開口量は、原子炉格納容器内温度 200°C の状態で 7 日間経過した際のシール材復元量が、フランジ開口量に追従できなくなる限界であり、原子炉格納容器限界温度、圧力である 200°C、2Pd に対して、シール材機能は余裕があることを示している。

なお、原子炉格納容器のドライウェル主フランジについては、技術基準規則第 44 条に要求される単体の漏えい試験を可能とするよう内側シール部と外側シール部の間に加圧空間を有する二重シール構造を採用している。原子炉格納容器バウンダリに要求される重大事故等時の閉じ込め機能維持の観点からは、内外どちらかのシール部の機能が保たれていればよく、更に一方のシール機能が喪失するまではもう一方のシール部が直接、重大事故等時環境に曝されるものではない。そこで、本評価では、保守的に最初に原子炉格納容器内雰囲気にも曝され、同圧力のときの開口量が大きくなる内側シール部の閉じ込め機能を評価した。

開口量評価は、フランジ開口量とシール材復元量を比較するものであり、評価に当たっては、シール部を構成する部位の製作公差（フランジの製作公差，シール材の製作公差等），シール部の構成材料の熱膨張，ガス性状に蒸気だけでなく乾熱も含めた複数条件での試験結果を踏まえ、保守的な評価となるようにしている。シール部の構造，寸法のばらつきを考慮した評価の考え方を表 2 に示す。

表 2 シール部の構造，寸法のばらつきを考慮した評価の考え方

評価項目	評価内容	考え方
シール部を構成する部位の製作公差	二乗和平方根の採用	機器の寸法公差は、一般的に独立した値を組み合わせて使用する場合、各々の寸法公差の二乗和平方根を用いて、算出する。
シール部の構成材料の熱膨張	材料の熱膨張を考慮	開口量評価は、200℃におけるシール部の評価であることから、構成材料の熱膨張を考慮した。

表 2 に基づき、シール部を構成する部位の製作公差等を考慮したドライウェル主フランジの開口量評価を実施する。

製作公差がドライウェル主フランジの開口量評価に影響する箇所は、シール材を締め付ける部位の開口方向の製作公差であるため、フランジ溝深さ及びガスケット高さが該当する（図 2 参照）。これらの製作公差を表 3 に示す。

表 3 製作公差を考慮したガスケットの押し込み量

部位	公称値	公差（絶対値）
フランジ溝深さ（mm）		
ガスケット高さ（mm）		
バックアップシール厚さ（mm）	—	0.01
ガスケット押し込み量（mm）		

表3より、製作公差を考慮したガスケットの押し込み量は、
 mm (公称値) - mm (公差) = mm と評価できる。

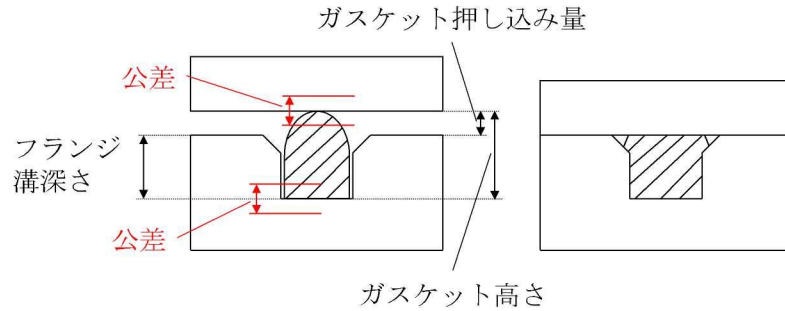


図2 製作公差の概要

各部位の熱膨張を考慮した寸法を表4に示す。熱膨張変位の概要を図3に示す。

表4 各部位の熱膨張を考慮した寸法

部位	基準寸法	熱膨張変位
フランジ溝深さ (mm)		
ガスケット高さ (mm)		
熱膨張変位合計 (mm)		

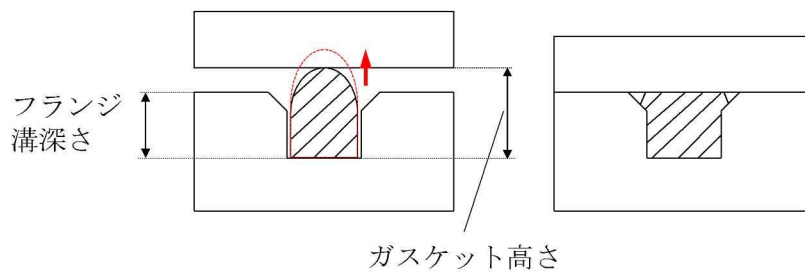


図3 熱膨張変位の概要 (赤点線：熱膨張のイメージ)

熱膨張量 ΔL の評価式は以下のとおり。

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta t$$

ここで、

L：基準寸法(mm)

α ：材料の熱膨張係数(mm/mm・°C)

ガスケット =

Δt ：据付状態から評価温度までの温度差(°C) (=200 - =)

表4より、熱膨張を考慮したガスケットの押し込み量は、製作公差を考慮したガスケットの押し込み量より、mm+mm=mmと評価できる。

以上の結果から、シール部の構造、寸法のばらつきを考慮した評価は表5のとおりとなり、ばらつきを保守側に積み上げて評価した場合においても、内側・外側ともシール機能は維持されることを確認した。

表5 シール部の構造、寸法のばらつきを考慮した評価結果

評価		押し込み量 (mm)	圧縮永久 ひずみ率 (%)	許容開口量 (mm)	開口量 (2Pd) (mm)	評価 結果
公称値	内側				1.35	○
	外側				1.06	○
評価値	内側				1.35	○
	外側				1.06	○

2. ドライウェル主フランジ以外の開口量評価における製作公差等の影響について

ドライウェル主フランジの開口量評価 (1.にて記載) と同様に、原子炉格納容器バウンダリ構成部として、評価対象としているドライウェル機器搬入用ハッチ (上部, 下部), サプレッションチェンバ出入口についても開口量評価を実施する。評価結果は、表6から表10のとおりであり、製作公差を考慮しても閉じ込め機能が維持できる。

表6 ドライウェル機器搬入用ハッチ (上部, 下部) 及び
サプレッションチェンバ出入口のガスケット押し込み量

部位	公称値	公差 (絶対値)
フランジ溝深さ (mm)		
ガスケット高さ (mm)		
バックアップシール厚さ (mm)	—	0.01
ガスケット押し込み量 (mm)		

表7 ドライウェル機器搬入用ハッチ (上部, 下部) 及び
サプレッションチェンバ出入口の各部位の熱膨張を考慮した寸法

部位	基準寸法	熱膨張変位
フランジ溝深さ (mm)		
ガスケット高さ (mm)		
熱膨張変位合計 (mm)		

表 8 上部ドライウェル機器搬入用ハッチの開口量評価結果

評価		押し込み量 (mm)	圧縮永久 ひずみ率 (%)	許容開口量 (mm)	開口量 (2Pd) (mm)	評価 結果
公称値	内側				0.74	○
	外側				0.58	○
評価値	内側				0.74	○
	外側				0.58	○

注記* : 押し込み量 = [(ガスケット押し込み量) - (シール部公差) + (熱膨張変位)]

表 9 下部ドライウェル機器搬入用ハッチの開口量評価結果

評価		押し込み量 (mm)	圧縮永久 ひずみ率 (%)	許容開口量 (mm)	開口量 (2Pd) (mm)	評価 結果
公称値	内側				0.75	○
	外側				0.62	○
評価値	内側				0.75	○
	外側				0.62	○

注記* : 押し込み量 = [(ガスケット押し込み量) - (シール部公差) + (熱膨張変位)]

表 10 サプレッションチェンバ出入口の開口量評価結果

評価		押し込み量 (mm)	圧縮永久 ひずみ率 (%)	許容開口量 (mm)	開口量 (2Pd) (mm)	評価 結果
公称値	内側				0.87	○
	外側				0.68	○
評価値	内側				0.87	○
	外側				0.68	○

注記* : 押し込み量 = [(ガスケット押し込み量) - (シール部公差) + (熱膨張変位)]

3. 開口量評価における保守性について

FEM 解析による開口量評価においては、構造物の剛性や強度が実機に比べ低めとした評価として
 いることに加え、圧縮永久ひずみ率は劣化に対して実機よりも保守的な想定に基づき選定してい
 ること等から、保守性がある評価となっている。表 11 に開口量評価における保守性の考え方を
 示す。

表 11 開口量評価における保守性

項目		保守性	備考
開口量	FEM 解析	構造物に設けられているリブを無視するなど、実際の構造物よりも剛性を低く見積もっている。	
		材料物性値を規格値ベースとすることで、強度を低めに見積もっている。	
		フランジが閉じる方向に作用する自重を考慮していない。	
許容開口量	漏えい限界	既往知見で得られたガスケット自身の変形によるセルフシール性については評価に反映されない。	実機フランジ模擬試験において、試験装置等の製作誤差は把握できていない。
	圧縮永久ひずみ率	実機のガスケットは底面・側面が溝と接しているのに対し、圧縮永久ひずみ試験は、試験体の側面全体が直接蒸気環境下に曝されるため、圧縮永久ひずみ試験から得られた圧縮永久ひずみ率は材料の劣化を保守側に見積もっている。	

4. ドライウェル主フランジの施工管理について

ドライウェル主フランジ部の構造を図4に示す。上蓋側フランジと本体側フランジのフランジ面を隙間が無いように据え付けることで、ガスケット押し込み量 \square mm が確保できる構造となっている。実機のドライウェル主フランジにおいては、定期検査におけるドライウェル主フランジ閉鎖時に、所定のトルクでボルトを締め付けることが要領書で定められていること、締め付け後に隙間ゲージによる異物の噛み込みや予期せぬフランジの変形等による隙間が生じていないことを確認していることから、作業者の技量によってガスケットの押し込み量の変動することは考え難く、施工管理による品質維持は可能であると考えられる。

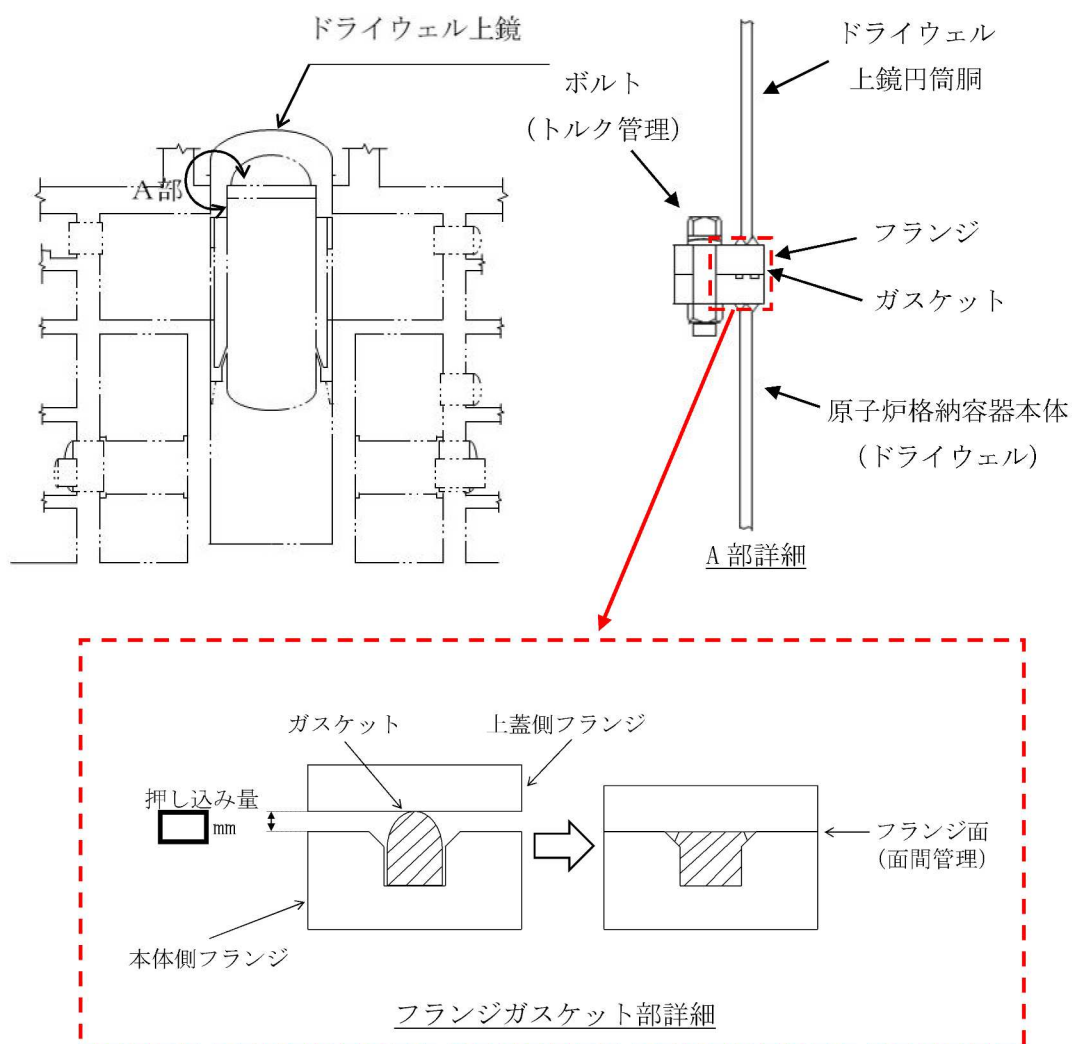


図4 ドライウェル主フランジ部の構造

また、ドライウエル主フランジのガスケット取付溝及びフランジシール面については、定期検査の開放時に手入れ及び外観目視点検を開放の都度行い、傷や変形がないことを確認している。さらに、ドライウエル主フランジ閉鎖後に原子炉格納容器全体の漏えい率検査及びドライウエル主フランジ部のみのリークテストにより所定の漏えい率以下であることを確認している。原子炉格納容器全体漏えい率検査実績及びドライウエル主フランジ部リークテスト実績を図5、図6に示す。上記よりドライウエル主フランジのガスケット取付溝及びフランジシール面は気密性を維持していると考ええる。

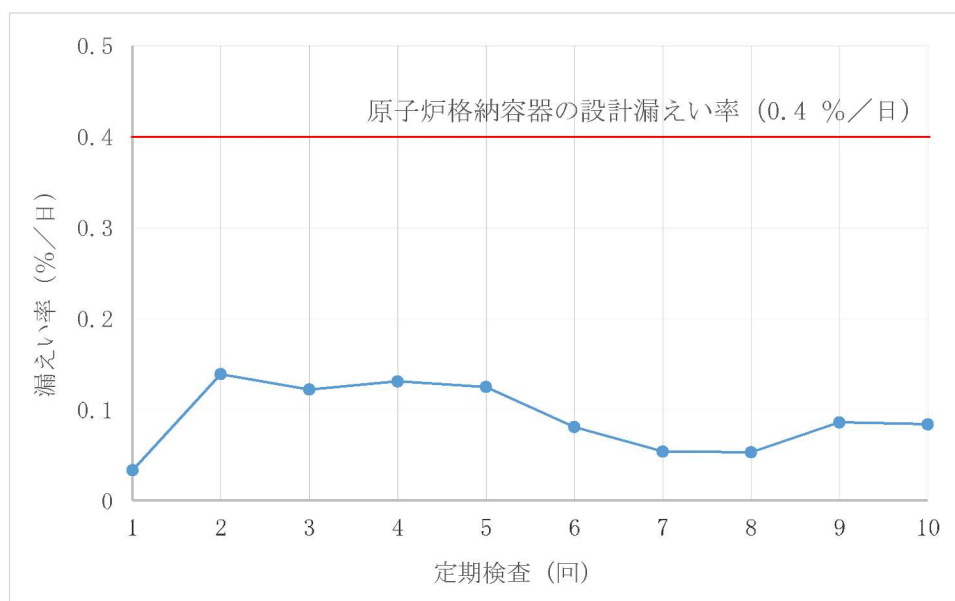


図5 原子炉格納容器全体漏えい率検査実績

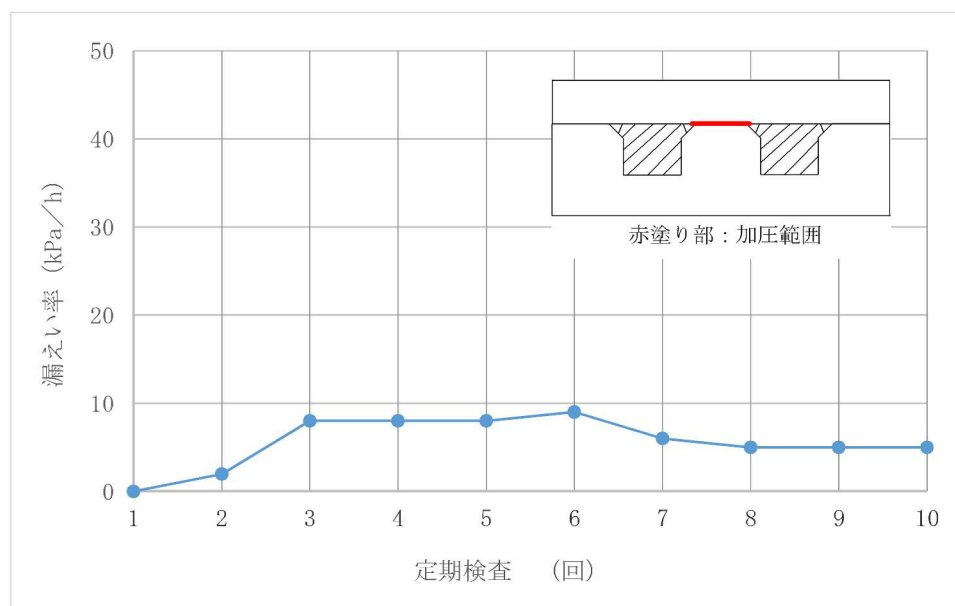


図6 ドライウエル主フランジ部リークテスト実績

経年劣化を考慮したシール機能について

本資料では、シール材の経年劣化を考慮したシール機能の健全性について示す。

原子炉格納容器のシール材に使用する改良 EPDM 製シール材については、性能確認のための試験を実施している。試験においては、通常運転時に加えて、重大事故等時に想定される照射線量を上回る放射線環境を経験したシール材に対し、高温蒸気環境下及び高温乾熱環境下でのシール機能を確認している。また、開口部に用いられる改良 EPDM 製シール材は、通常運転中に想定される温度環境を踏まえても劣化はほとんどしないものと考えられること、かつ、原子炉格納容器の開口部に用いられているシール材については、全て、プラントの定期検査において取り替えを行っており、複数の運転サイクルにわたって使用しないものであることから、現在の性能確認の結果により、十分にシール機能が確保されるものと考えられる。

また、長期間シール材を継続使用する電気配線貫通部については、過去の電気配線貫通部の環境試験において、電気配線貫通部（低電圧用）及び電気配線貫通部（高電圧用）を対象として、通常運転中の劣化を考慮した上で冷却材喪失事故模擬試験が実施されており、健全性が確認されている（表 1 参照）。

これらのことから、原子炉格納容器に使用されているシール材は、運転中の環境を考慮しても重大事故等時にシール機能を確保されるものと考えられる。

表 1 劣化を考慮した試験方法

No	試験項目	試験方法
1	サーマルサイクル試験	電気配線貫通部を冷熱装置内に設置し、 <input type="text"/> サイクルのサーマルサイクルを放射線照射試験の前に実施。1 サイクルは <input type="text"/> ℃→ <input type="text"/> ℃→ <input type="text"/> ℃を高電圧用モジュールは <input type="text"/> 時間で、低電圧用モジュールは <input type="text"/> 時間で変化させている。
2	放射線照射試験	電気配線貫通部が 40 年間の運転期間及び冷却材喪失事故時に受ける放射線を考慮し照射線量 <input type="text"/> kGy として試験を実施。
3	熱劣化試験	加熱促進により、40 年間に相当する加速熱劣化として <input type="text"/> を加える。

また、自主的な取り組みとして適用することを考えているバックアップシール材について、経年劣化によるシール機能の影響を確認した。ここでは、バックアップシール材をフランジに長時間塗布したときの変形特性を確認するために、バックアップシール材を塗布した試験用フランジを恒温槽で約 560 日間（18 ヶ月程度）55℃に保持し、バックアップシール材に関して、以下を実施した。

- (1) H e 気密性確認試験（0.3, 0.65, 0.9MPa）
- (2) FT-IR 分析

試験の結果、H e 気密性確認試験において表 2 で示すとおり漏えいは認められなかった。また、FT-IR 分析においても図 1 に示すとおり、55℃、約 18 ヶ月保持材のスペクトルは初期材と同様のスペクトルで劣化は認められず、プラント通常運転状態で 1 サイクル（13 ヶ月程度）経過しても性状が変わらないと考えられる。

表 2 H e 気密性確認試験結果

保持条件	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa
55℃ 約 18 ヶ月	○	○	○

○：漏えい及び圧力降下なし



図 1 FT-IR 分析結果

化学薬品や核分裂生成物のシール機能への影響について

1. 化学薬品等のシール機能への影響

柏崎刈羽原子力発電所第 6 号機のシール材として適用する改良 EPDM 製シール材は、エチレンとプロピレン等の共重合によって得られる合成ゴムの一種であり、同材質のゴムである EP ゴムは、これまでも原子炉格納容器隔離弁の弁体等に使用されてきた実績のある材料である。

EPDM 製シール材の基本的な特性を考慮した場合、シール機能に影響を及ぼす可能性のある物質としては、「溶剤」及び「潤滑油」が挙げられる。表 1 に EPDM 材の基本特性を示す。

洗い油やベンゼン等の溶剤については、管理区域内への持ち込み管理を行っており、プラント運転中においては原子炉格納容器内に存在しないため、シール材に悪影響を及ぼすことはない。

潤滑油については、主蒸気隔離弁等の機器の動作に使用されているが、各シール部から離れた位置に設置されており、仮に漏えいが発生した場合でも機器の下部に設置される堰、又はダイヤフラムフロア床面の傾斜によって、ドレンサンプ設備に導かれることで周辺への流出は防止され、シール材に悪影響を及ぼすことはない。

表 1 EPDM 製シール材の基本特性

耐蒸気性	A
耐水性	A
耐性（植物油）	A ～ B
耐性（潤滑油）	D
耐性（溶剤）	D

凡例 A：優 B：良 D：不可（但し配合による）

出典：日本バルカー工業（株）発行「バルカーハンドブック」より抜粋

2. 重大事故等時に発生する核分裂生成物や水素のシール機能への影響

炉心損傷時に発生する核分裂生成物の中で化学的な影響を及ぼす可能性がある物質として、アルカリ金属であるセシウム及びハロゲン元素であるよう素が存在する。このうち、アルカリ金属のセシウムについては、水中でセシウムイオンとして存在し、アルカリ環境の形成に寄与するが、膨張黒鉛ガスケットや金属ガスケットはアルカリ環境において劣化の影響はなく、また、EPDM 製シール材についても耐アルカリ性を有する材料であることから、セシウムによるシール機能への化学的影響はないものとする。

一方、ハロゲン元素のよう素については、無機材料である膨張黒鉛ガスケットや金属ガスケットでは影響がないが、有機材料である EPDM 製シール材では影響を生じる可能性がある。今後、使用することとしている EPDM 製シール材については、当社での社内試験による影響の確認を行っており、炉心損傷時に想定されるよう素濃度（約 8200mg/m³）よりも高濃度のよう素環境下（10,000mg/m³以上）においても、圧縮永久ひずみ等のシール材としての性状に大きな変化がないことを確認している。このように、よう素環境下での性能が確認された材料を用いることにより、シール機能への影響が生じることはないものとする。なお、以上の EPDM に関する特性は、改良 EPDM 製シール材においても同様であり、改良 EPDM 製シール材も問題はない。

重大事故等時に原子炉格納容器内で発生する水素の原子炉格納容器外への主要な放出モードとして気体分子のガスケット材料透過が考えられる。これは水素等の分子量が小さい気体の場合に起こりうる事象であるが、重大事故等時の原子炉格納容器内環境条件下（温度・放射線）においてシール機能の顕著な劣化は生じないこと、及び気体分子の透過に対して十分な材料の厚みが確保されていること、実機を模擬した小型フランジによる H e 気密性確認試験にて漏えいがないことを確認していること（別紙 7 参照）から、ガスケット材料透過による原子炉格納容器外への水素の放出可能性は極めて低いものと考えられる。