

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密あるいは防護上の観点
から公開できません

| | |
|------------------|-------------|
| 東海第二発電所 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 補足-270-1 改0 |
| 提出年月日 | 平成30年5月11日 |

東海第二発電所

原子炉格納施設的设计条件に関する説明書

に係る補足説明資料

(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)

平成30年5月

日本原子力発電株式会社

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E P D M製シール材の適用性について
- 別紙 3. 改良E P D M製シール材における各試験について
- 別紙 4. 改良E P D M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E P D M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E P D M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. トップヘッド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. 試験データの代表性・信頼性について
- 別紙 16. 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 17. 原子炉格納容器のリーク発生順序及び各部位の裕度について
- 別紙 18. 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 19. 格納容器隔離弁のS A環境下における耐性確認試験の概要について
- 別紙 20. 移動式炉心内計装（T I P : Traversing In-core Probe）系統爆破弁について
- 別紙 21. 動的荷重の影響について
- 別紙 22. モデル化している各部位の耐震性について
- 別紙 23. フランジ部の永久変形の評価について
- 別紙 24. 原子炉格納容器 評価温度・圧力負荷後の耐震性
- 別紙 25. 原子炉格納容器 限界温度・圧力に対する経年劣化の影響について
- 別紙 24. 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 25. 原子炉格納容器貫通部リスト

1. 概要

本資料は、「原子炉格納施設的设计条件に関する説明書」(以下「説明書」という。)の「6. 重大事故等時における原子炉格納容器の放射性物質閉じ込め機能評価」に示す重大事故等時の評価温度, 評価圧力に対する原子炉格納容器の構造健全性及び機能維持の詳細に示すものである。

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"> ・ トップヘッドフランジ ・ 機器搬入用ハッチ ・ サプレッション・チェンバアクセスハッチ ・ 所員用エアロック（扉板シール部） ・ 配管貫通部（平板類） | 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>※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（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（扉板以外シール部） ・ 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（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，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"> ・トップヘッドフランジ ・機器搬入用ハッチ ・サプレッション・チェンバアクセスハッチ ・所員用エアロック（扉板シール部） ・配管貫通部（平板類） | 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格納容器ハッチ類の実機相当に換算した漏えい量は、格納容器設計漏えい率である 0.5 %/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：1 cc/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 (バタフライ弁) | 設計漏えい量以下 | <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 (バタフライ弁) の実機相当に換算した漏えい量は、格納容器設計漏えい率である 0.5 %/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) 1×10⁻⁷ Pa・m³/s 以下 ○実機相当換算値 1×10⁻⁷ %/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 (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) 240 cc/min 以下 / 600 A ○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 (扉板以外シール部) ・原子炉格納容器隔離弁 (T I P ボール弁) | 200℃以上 | 圧力により開口が生じる部位でなく、また、高温環境下での耐性を確認していることから格納容器内の 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ない。 |

改良 E P D M 製シール材の適用性について

東海第二発電所では、改良 E P D M 製シール材として [] を採用する計画である。

改良 E P D M 製シール材の開発経緯を以下に示す。

- ・従来、格納容器のシール材（ガスケット）として使用していたシリコンゴムは、使用温度範囲が -60°C ～ $+200^{\circ}\text{C}$ であり、従来の E P D M 製シール材の使用温度範囲 -50°C ～ $+150^{\circ}\text{C}$ 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 E P D M 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 E P D M 製シール材を開発した。

改良 E P D M 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、事故時環境を考慮した条件 [] [] 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。

東海第二発電所で採用予定の改良 E P D M 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 E P D M 製シール材は、従来の E P D M 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ている型番品 [] 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を実施し、事故時環境におけるシール機能評価を行うことで、実機フランジへの適用性について確認する。

改良 E P D M 製シール材における各試験について

改良 E P D M 製シール材の適用にあたり、「改良 E P D M 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」の試験条件がシビアアクシデント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) 改良 E P D M 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口すること」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口するのか」を評価し、その開口量に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（表 1 参照）。

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 |
|----------------------------|-------------------|------------------------|
| 圧力の上昇によりフランジ部が開口することによる漏えい | 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 |

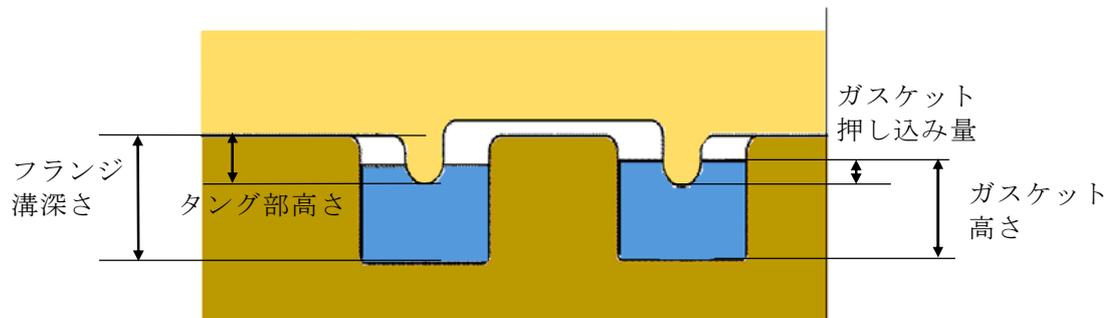
圧縮永久ひずみ試験で得られるひずみ率がフランジ構造によらず、一様に適用できる理由を整理する。

- 原子炉格納容器の限界温度・圧力である 200 °C，2 Pd 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、改良型 E P D M 製シール材を適用する「角型断面ガスケットを用いるボルト締めフランジのガスケットの圧縮率」とほぼ同等である（表 2 参照）。

よって、東海第二発電所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 角型断面ガスケットを用いるボルト締めフランジのガスケットの圧縮率

| 設備名 | フランジ溝 深さ | タング 部高さ | ガスケット 高さ | ガスケット押 し込み量 | 圧縮率 |
|-----------------------------|-------------|------------|-------------|----------------|-----|
| トップヘッド フランジ | | | | | |
| 機器搬入用 ハッチ | | | | | |
| サプレッション・ チェンバアクセス ハッチ | | | | | |
| 閉止板 (X-28) | | | | | |



- ・ガスケット押し込み量 = (ガスケット高さ + タング部高さ) - 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 %

2) 実機フランジ模擬試験

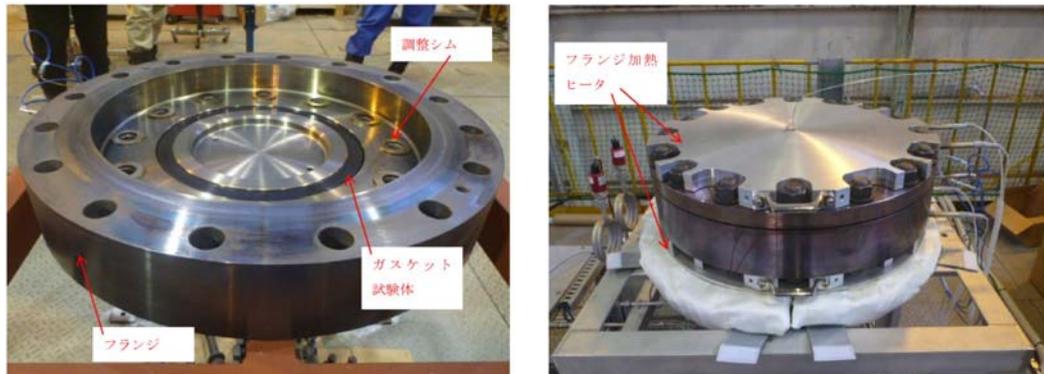
圧縮永久ひずみ試験結果を用いた開口量評価では、内圧によるフランジの構造部の変形は模擬しているが、実機フランジ溝にガスケットをセットした状態におけるシール材の変形は模擬していないため、実機にセットした状態におけるシール材の変形による気密性を確認する必要がある。また、1)項で記述したシール機能の評価では、ガスケットの復元量とフランジの開口量が等しい状態（ガスケット押し込み量が 0 mm で接している状態）までをシール機能維持のクライテリアとしており、その状態においても気密性を有することを確認する必要がある。

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 参照)

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 |
|---|---|--|
| 実機フランジガスケット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内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*により気密性を有していることを確認 |
| ガスケットに対するタングの押し込み量が 0 mm 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 0 mm 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 0 mm 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 |

※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・高さともに実機と同等、中心径のみ縮小した試験装置（図 1 参照）



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 °C，2 Pd 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。
- ・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 0 mm で接している状態）でのシール性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。

実機フランジ模擬試験によって，ガスケットに対するタングの押し込み量が 0 mm で接している状態を再現しており，圧縮永久ひずみ試験の結果を用いた開口量評価において，最も厳しい状態である。よって，東海第二発電所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、シビアアクシデント環境より保守的な条件で試験を実施している。また、温度については格納容器限界温度 200 °C が 7 日間継続する条件であり、シビアアクシデント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 °C、300 °C をそれぞれ定める期間を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、シビアアクシデント環境よりも保守的な温度条件により、シビアアクシデント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、シビアアクシデント条件を模擬するために、有効性評価（大LOCA+ECCS機能喪失+SBO）におけるフランジガスケット部における事故後7日間の累積放射線量の目安である 800 kGy を用いて試験している。

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ライン」に事故時環境評価試験の試験実施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順序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製シール材の事故時環境における劣化特性を確認するために、JIS K 6262「加硫ゴム及び熱加塑性ゴムの常温・高温及び低温における圧縮永久ひずみの求め方」に準じた圧縮永久ひずみ試験を実施した。

試験装置を第1図に示す。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、事故時条件を模擬するために、フランジガasket部の事故後7日間の累積放射線量の目安である を用いて実施している。試験は、試験片を圧縮板ではさみボルトを締付けることにより圧縮させる。試験片の圧縮量はスペーサの厚さで調整している。

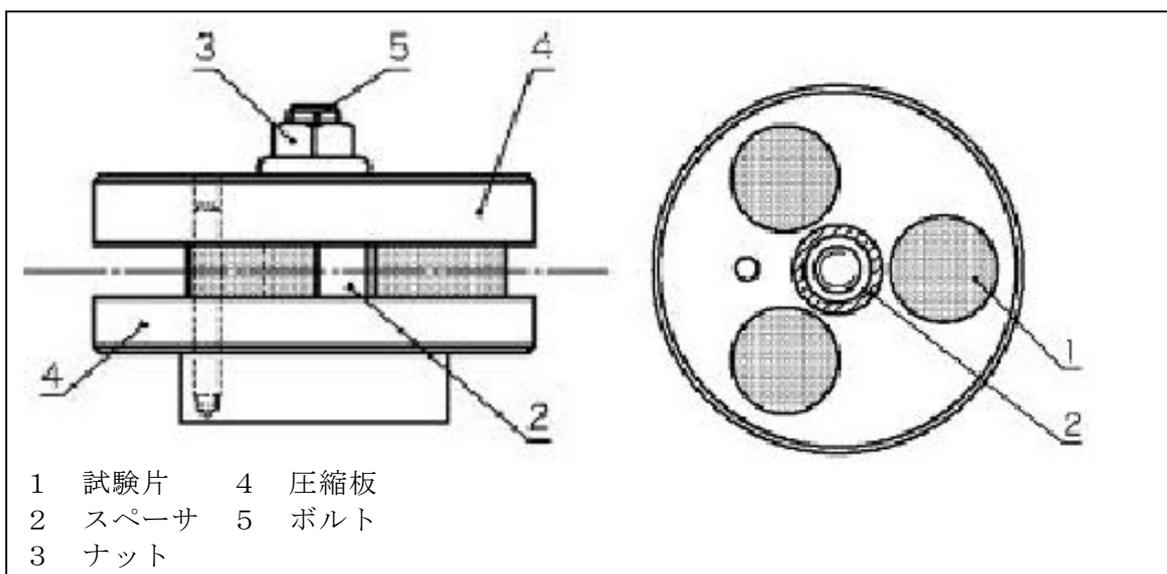


図1 圧縮永久ひずみ試験装置

試験では、加圧試験容器を用いて高温蒸気で曝露し、試験温度は、格納容器限界温度である 200 °C、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、試験片の初期厚みと試験後の試験片の厚さを測定し、次の式 (1) により算出する。各試験片の中心を 0.01 mm の単位まで厚さ測定し、3 個の試験片で得られた値の平均値を算出する。圧縮永久ひずみの算出概念図を図 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

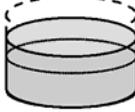
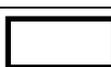
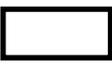
| 初期状態 | 試験状態 | 圧縮開放 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| 厚さ t ₀ | 厚さ t ₂ (25%圧縮) | 厚さ t ₁ $Cs = \frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_2)} \times 100$ |

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 (改良 E P D M 製)

| 材料 | 試験温 度 | 構造部放射線照 射量 | 試験 雰囲気 | 試験時間 | ひずみ率 (%) ^{※2} | |
|---|----------|---|-----------|--------|---|---|
| | | | | | 各試験片 | 平均 |
| 改良 E P D M  | 200 °C |  | 蒸気 | 168 時間 |    |  |

※1 J I S K 6262 に従い実施

※2 試料を圧縮し完全に回復した状態が 0 %、全く回復しない状態が 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健全性の確認を行った。

試験フローを図1に示し、試験の概要を以下に示す。

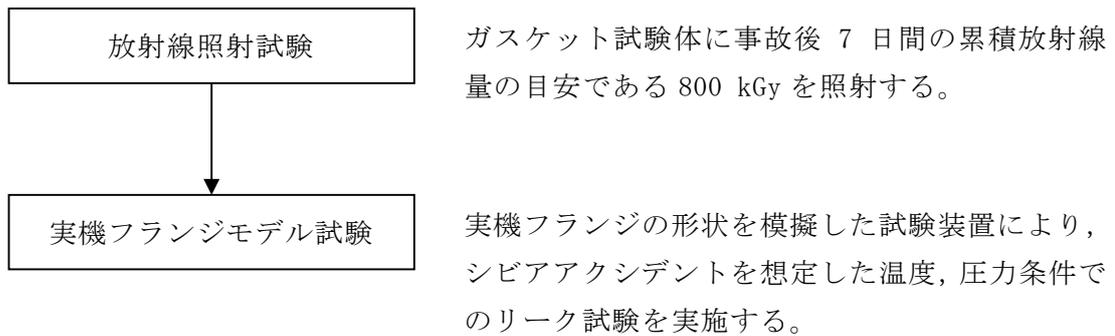


図1 実機フランジ模擬試験の試験フロー

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タング&グループ型（T&G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におけるリーク量として適用できる。

また、内圧上昇後の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、高圧空気ボンベ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。

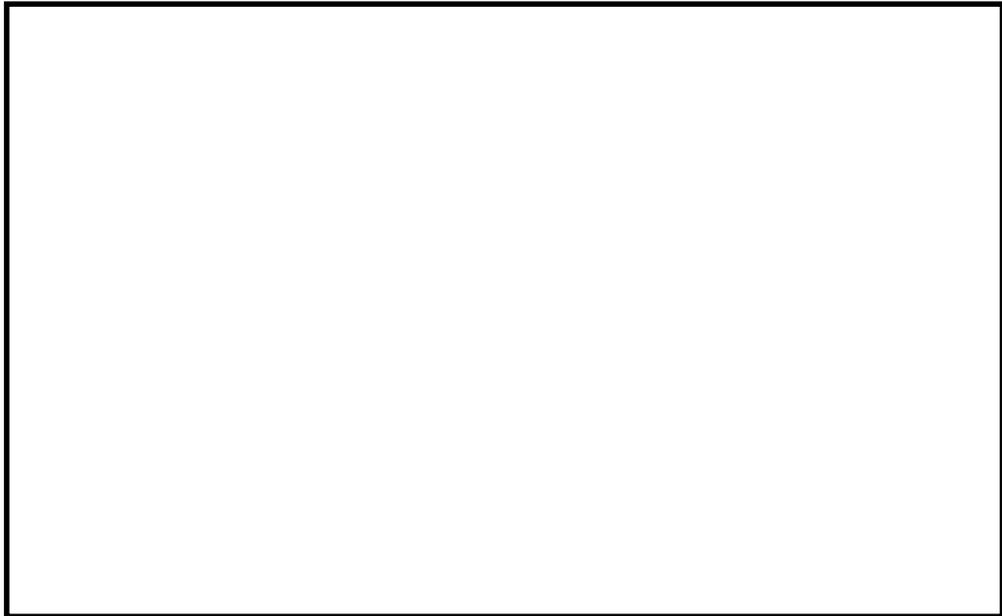
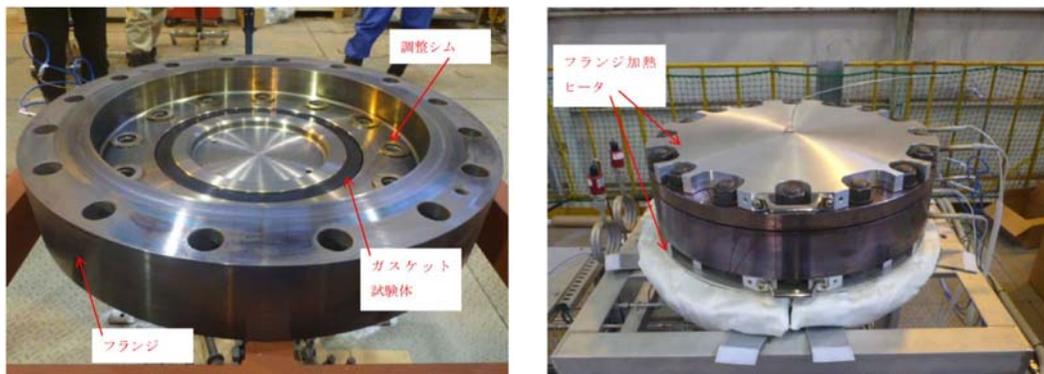


図2 試験装置概要図



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

事故時条件を模擬するために、放射線照射量は、フランジガスケット部の事故後 7 日間の累積放射線量の目安である 800 kGy 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。

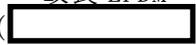
一般に有機材料の放射線劣化挙動には、酸素が影響を及ぼすことが知られているが、環境に酸素が存在しない場合においては放射線と熱の同時法と逐次法の劣化はほぼ等しいことが知られている。格納容器内は、通常時は窒素環境下、事故時は蒸気環境下であり、酸素が常に供給される環境ではないことから、放射線と熱の同時曝露による劣化への影響は十分小さく、逐次法による劣化の付与は妥当であると考ええる。なお、「原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイドライン」において、事故時環境試験の試験方法として放射線照射をした後に定められた温度条件下に曝露することが定められており、このことから逐次法による劣化の付与は妥当であると考ええる。

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、加圧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、格納容器限界温度である 200 °C、さらに余裕を見た 250 °C、300 °C とし、加圧圧力は格納容器限界圧力 2 Pd (0.62 MPa) を包絡する圧力 (0.854 MPa 以上) で気密確認を実施する。また、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限 (0 mm) で設定する。なお、押し込み量は、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を押し込み量 0 mm 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限 (0 mm) であっても、有意な漏えいは発生せず、200 °C・168 時間、250 °C・96 時間、300 °C・24 時間の耐性が確認された。図 4 に 200°C・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 シビアアクシデント条件での試験結果

| No. | 試験体 | 温度 | 継続時間 | 押し込み量 | 漏えいの有無 |
|-----|--|--------|--------|-------|--------|
| 1 | 改良 EPDM () | 200 °C | 168 時間 | 0mm | 無 |
| 2 | 改良 EPDM () | 250 °C | 96 時間 | 0mm | 無 |
| 3 | 改良 EPDM () | 300 °C | 24 時間 | 0mm | 無 |

下記条件は全ケース共通

試験圧力：2 Pd 以上 (0.854 MPa 以上)、放射線照射量：800 kGy、加圧媒体：乾熱 (空気)
漏えい判定基準：1 cc/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。



全体写真

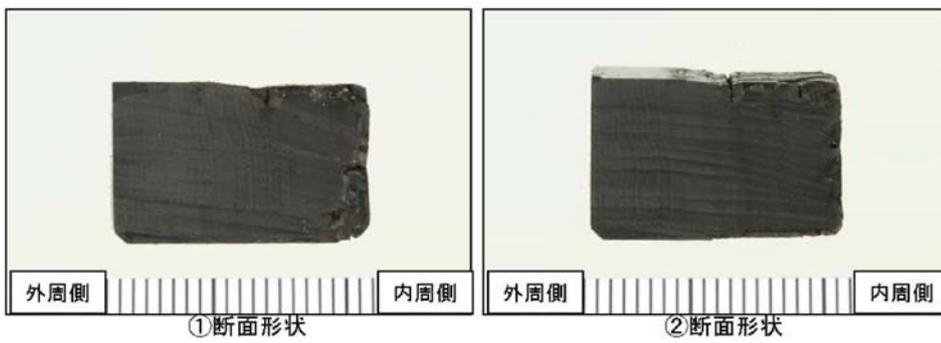
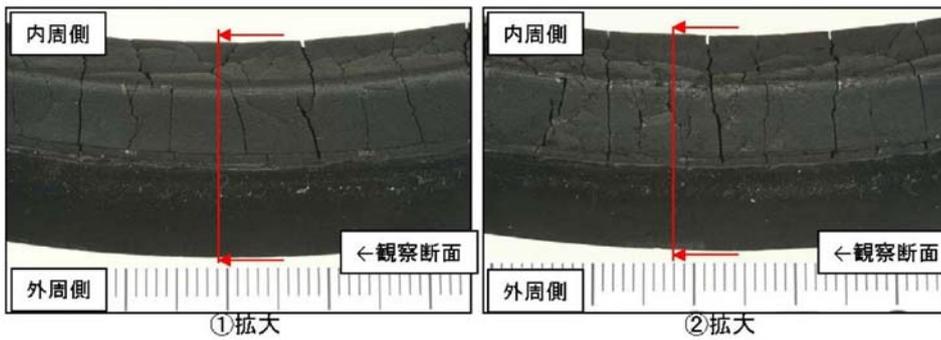


図 4 試験後の試験体外観 (200℃・168 時間)

改良E P D M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E P D M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（「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0 mm（ガスケットとタングが接している状態）に設定し、実機が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（トップヘッドフランジ）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、表1に示す。

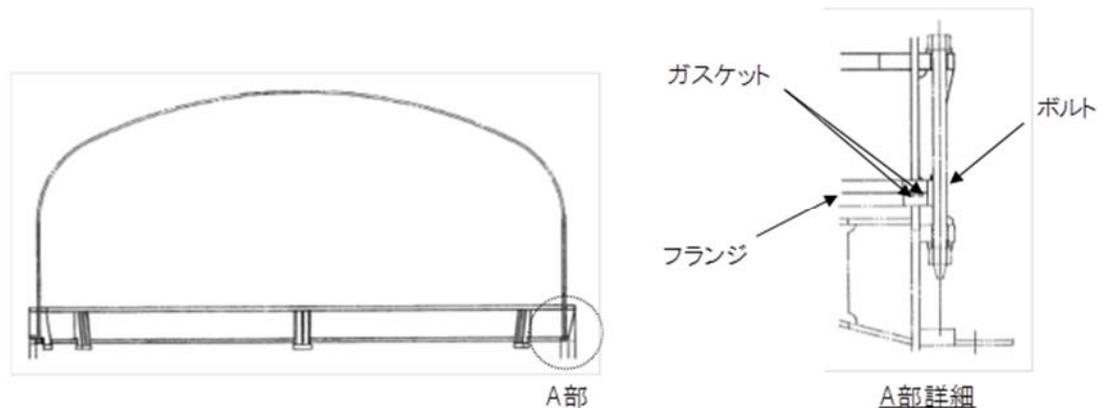


図1 トップヘッドフランジ断面形状図

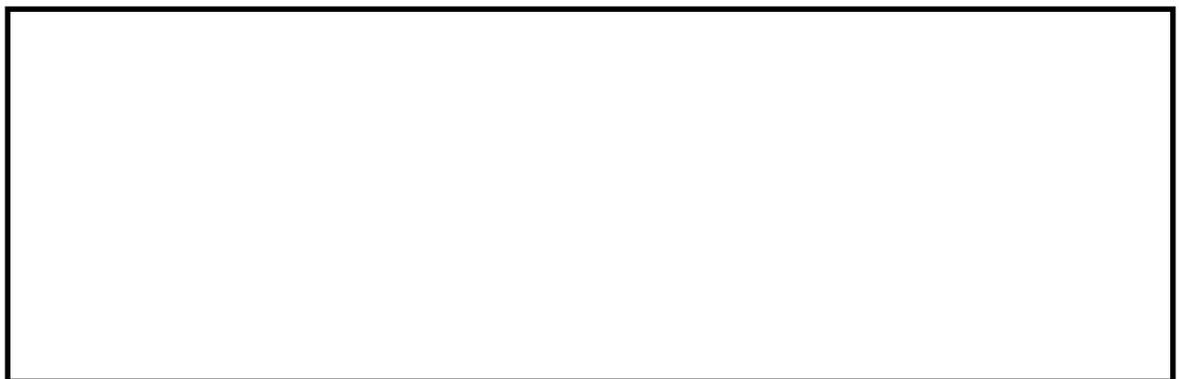


図2 実機フランジ模擬試験装置図

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 (トップヘッド フランジ) | | | | | | | | |
| 実機フランジ 模擬試験装置 | | | | | | | | |

2. 実機への適用性

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、1 cc/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1 cc/min の漏えい量を実機フランジでの漏えい量に換算し、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、J I S 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。また、実機フランジ模擬試験ではガスケット押し込み量を0 mmに設定し、実機が2 Pd時の開口量以上を模擬した条件で試験を実施している。

本試験で判定基準として設定した漏えい量(1 cc/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を推定したところ、格納容器全ハッチ類フランジからのリーク量は0.001 %/day以下であり、格納容器の設計漏えい率(0.5 %/day)の1/500以下となる。実機フランジのガスケット径を表2に、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、事故時条件を模擬した改良EPDM製シール材の試験結果は、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 ^{※1※3} |
|------------------------|------------------------|
| トップヘッドフランジ | |
| 機器搬入用ハッチ | |
| 所員用エアロック ^{※2} | |
| サプレッション・チェンバアクセスハッチ | |
| X-28 貫通部 | |
| 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： 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 100 mm 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) | 1 cc/min |
|--|----------|
| 試験フランジガスケット径 (D_1) | |
| 格納容器フランジガスケット径合計 (D_0) | |
| ガスケット径比 ($\alpha = D_0/D_1$) | |
| 格納容器フランジでの漏えい量 ($L_0 = L_1 \times \alpha$) | |
| 格納容器空間容積 (V_0) | |
| 格納容器空間容積に対する割合 (L_0/V_0) | |

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、800 kGyの γ 線照射を行った材料を用いて、高温曝露又は蒸気曝露を行った後、気密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は図1、試験治具及びシール材外観は図2に示すとおりである。シール材の断面寸法は実機の1/2とし、内側の段差1 mmに加えて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グ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He気密確認試験の条件は、実プラントで想定されるシビアアクシデント条件と比較して保守的な条件となると想定される。試験の詳細と結果を以下に記載する。

① 高温曝露

熱処理炉を使用して乾熱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を使用して、1 MPa、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 He気密確認試験

高温曝露及び蒸気曝露後の試験体について、Heを用いて気密試験を実施した。負荷圧力は0.3 MPa、0.65 MPa、0.9 MPaとし、スヌープでのリーク確認と、0.3 MPaでは保持時間10分、0.65 MPa及び0.9 MPaでは保持時間30分で圧力降下の有無を確認した。また、0.8 mm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確認試験も実施した（実機1.6 mm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リーク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He気密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。

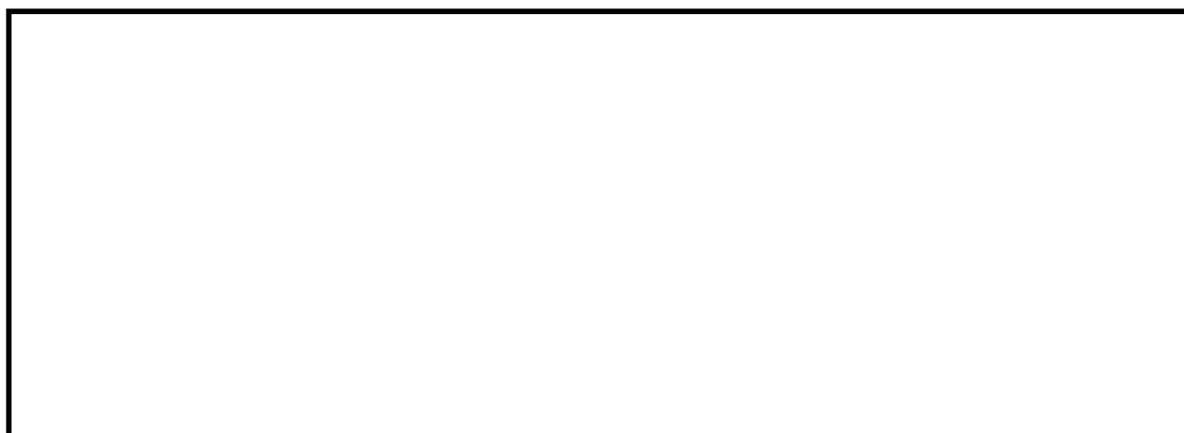


図1 試験治具寸法

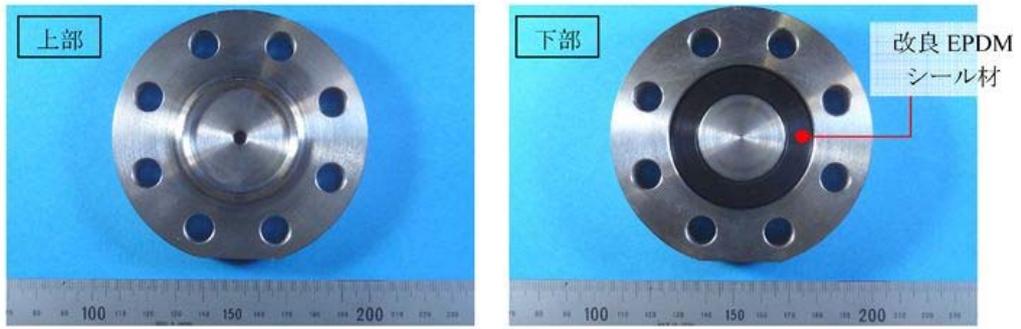


図2 試験治具及びシール材外観

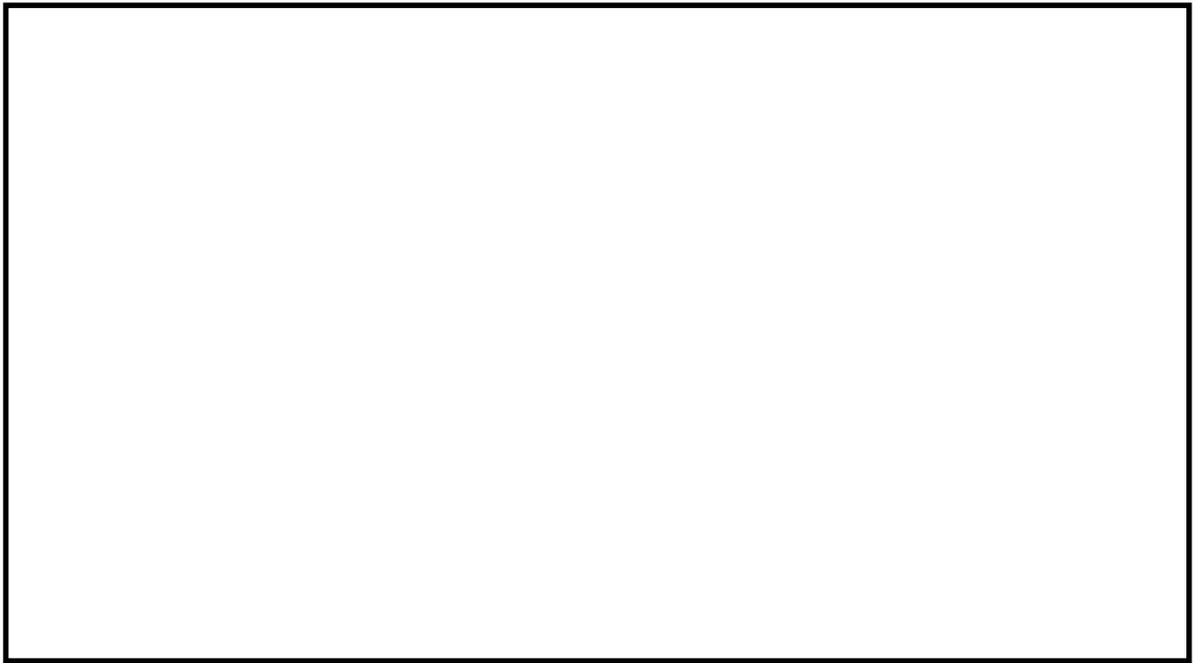


図3 蒸気用オートクレーブ系統図



図4 蒸気曝露試験体設置状況



図5 He気密確認試験状況



図6 開口模擬したHe気密試験
(隙間ゲージ使用)

表1 He気密確認試験状況

| No. | 曝露条件 | γ 線照射量 | 開口変位 模擬 | 0.3MPa | 0.65MPa | 0.9MPa |
|-----|------------------------|---------------|------------|--------|---------|--------|
| 1 | 乾熱200℃, 168時間 | 800kGy | 無し | ○ | ○ | ○ |
| | | | 0.8mm | ○ | ○ | ○ |
| 2 | 蒸気1MPa, 250℃, 168時間 | 800kGy | 無し | ○ | ○ | ○ |
| | | | 0.8mm | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 蒸気1MPa, 250℃, 168時間 | 800kGy | 無し | ○ | ○ | ○ |
| | | | 0.8mm | ○ | ○ | ○ |

○：リーク及び圧力降下なし

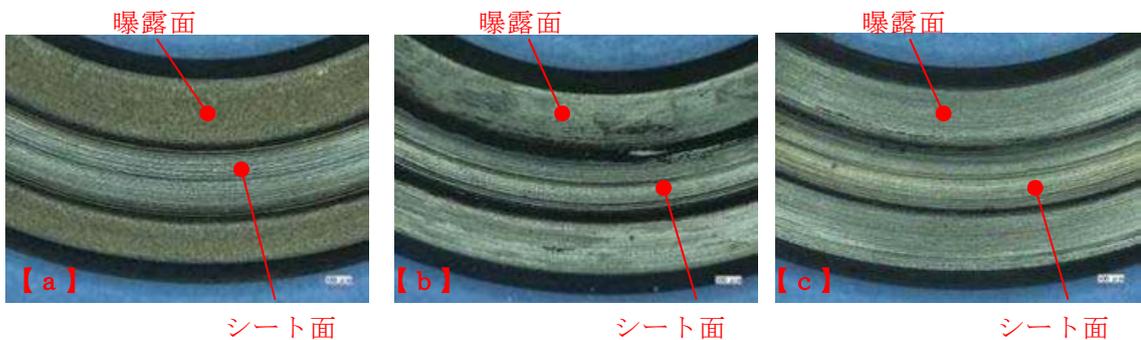


図7 試験後外観観察結果

(a: 乾熱 200℃, 168時間, b, c: 蒸気 250℃, 168時間)

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。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。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、曝露条件では顕著な劣化は認められなかった。

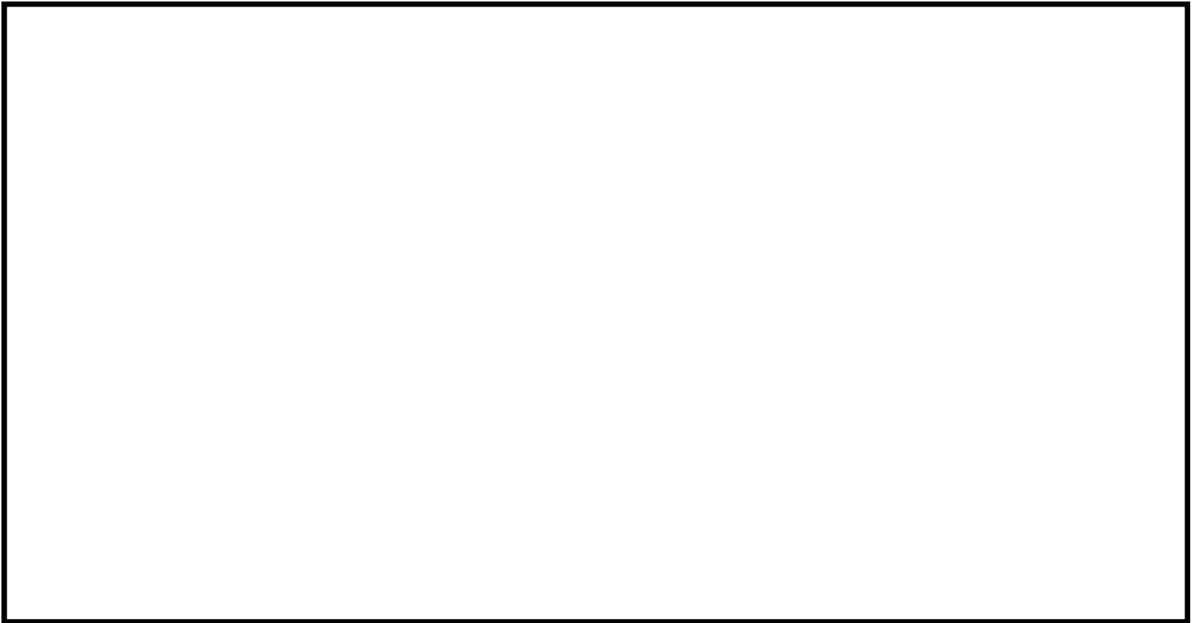


図8 FT-IR分析結果（曝露面）

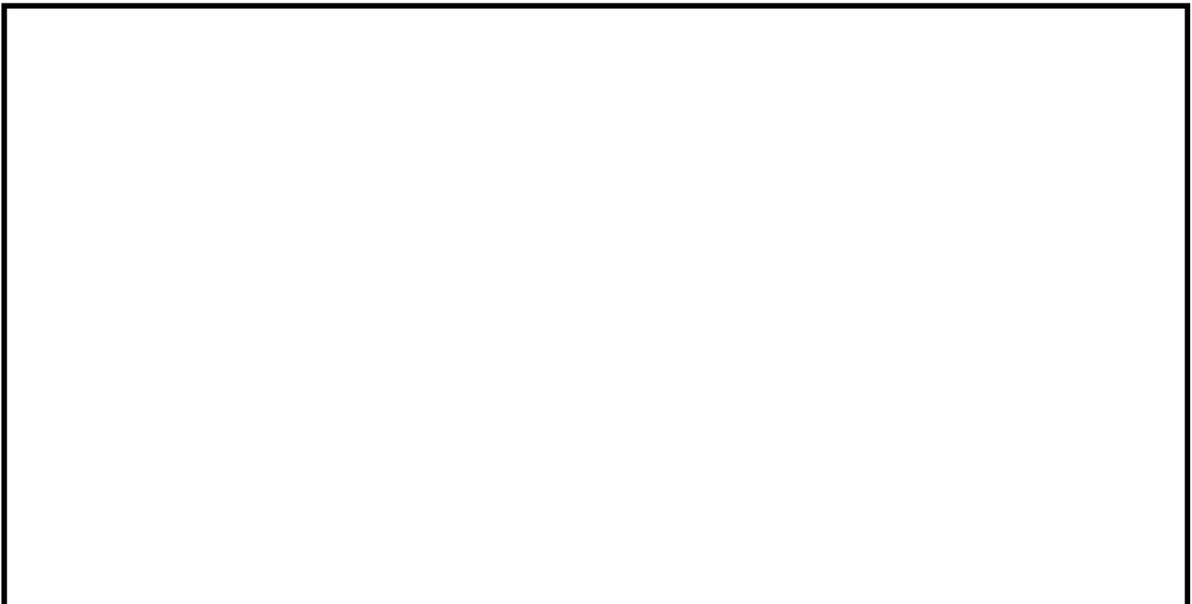


図9 FT-IR分析結果（シート面）

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。

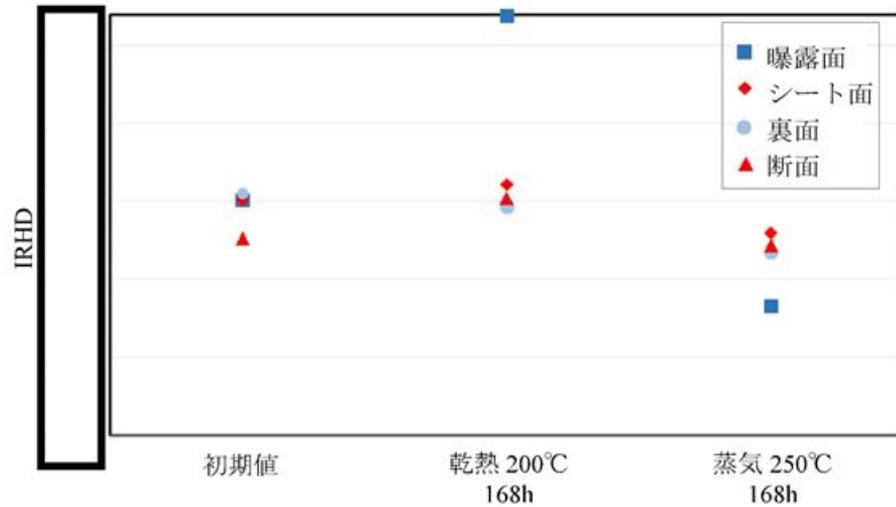


図10 硬さ測定結果

以上の試験結果から、200℃、2Pd、168時間の条件下では、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、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格納容器フランジ部の気密性は維持されることが考えられる。

バックアップシール材のシール機能について

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は、耐高温性、耐蒸気性、耐放射線性が確認され、重大事故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。

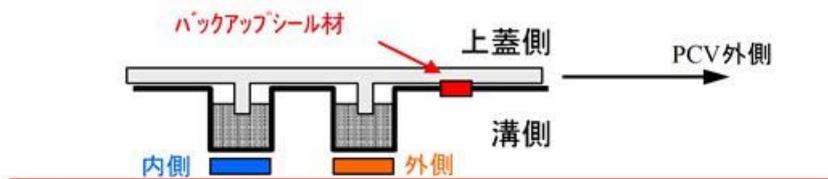


図1 バックアップシール材イメージ図

(1) バックアップシール材の適用目的

原子炉格納容器の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後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、格納容器内が長時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」の組み合わせとすることで、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、事故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あげられるため、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に塗布することから、改良EPDM製シール材への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、酸化劣化による改良EPDM製シール材のシール機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、事故発生後の改良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、格納容器閉じ込め機能の更なる安全性向上対策として、トップヘッドフランジ、機器搬入用ハッチフランジ及びサプレッション・チェンバアクセスハッチフランジのシール部に「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) 高温曝露後及び蒸気曝露後気密確認試験
- 2) 開口模擬後気密確認試験
- 3) 実機適用性試験
- 4) 長時間試験（改良EPDM製シール材との組み合わせ）

各々の試験の詳細を以下に示す。

1) 蒸気曝露試験（250℃×168時間）後気密確認試験

フランジ部に塗布するバックアップシール材に関して、小型試験治具（図2参照）を用いてγ線照射及び蒸気曝露後にHe気密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 γ 線照射

事故条件を模擬するために、放射線照射量はフランジ部の事故後7日間の累積放射線量の目安である800 kGyを目標に、線源Co-60、照射時間100時間にて γ 線照射を実施した。

照射実績は、雰囲気線量8.19 kGy/h, 8.27 kGy/h, 累積照射量819 kGy, 827 kGyであった。

② 高温曝露

熱処理炉を使用して300 °C, 73時間及び350 °C, 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1 MPa, 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系統図を図3に、試験片設置状況を図4に示す。

④ He気密確認試験

蒸気曝露後の試験体について、Heを用いて気密試験を実施した。高温曝露条件では負荷圧力0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.62 MPa, 蒸気曝露条件では負荷圧力は0.3, 0.65, 0.9 MPaとし、スヌープでのリーク確認と0.65 MPa及び0.9 MPa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。気密確認試験状況を図5に、試験結果を表1及び表2に示す。いずれの試験体もリーク及び圧力降下は認められなかった。

⑤ FT-IR分析

He気密確認試験後にFT-IR分析を実施した。FT-IR分析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。分析結果を図6に示す。本試験条件では350 °C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。

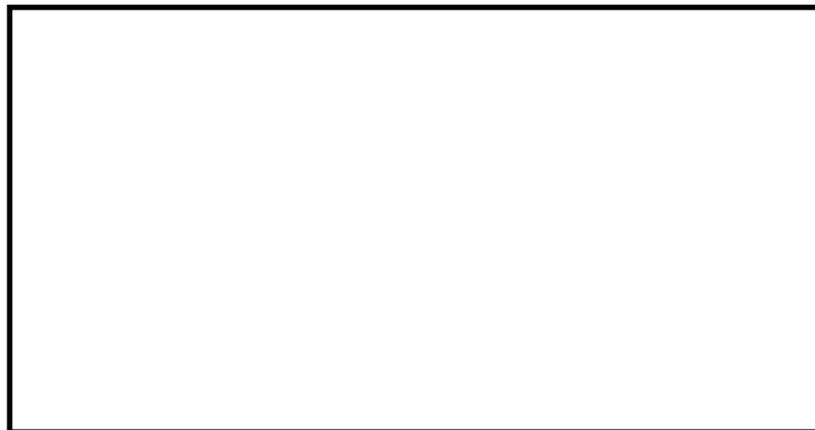


図2 小型試験治具寸法

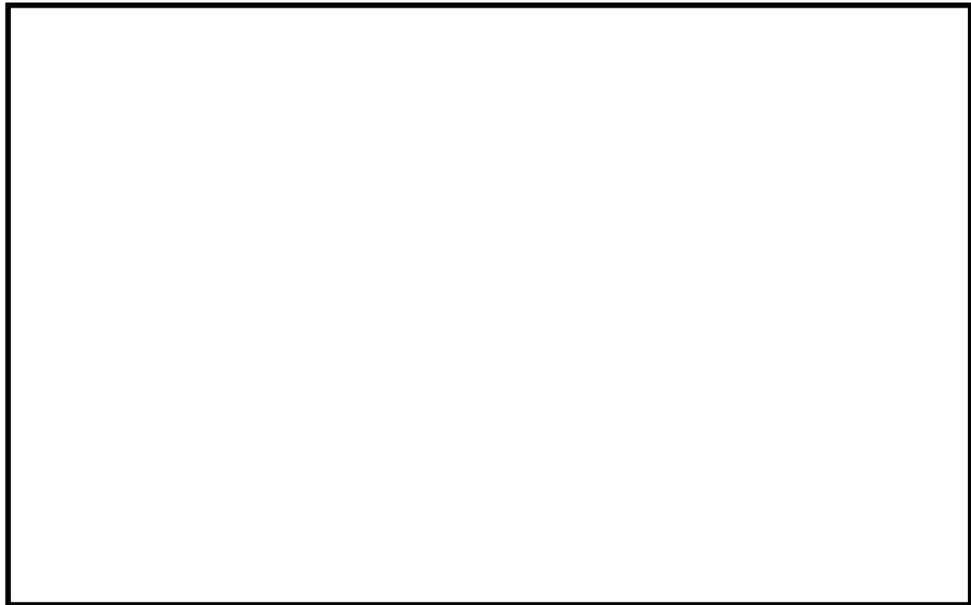


図3 蒸気用オートクレーブ系統図



図4 蒸気曝露
試験片設置状況



図5 気密確認試験状況



表1 He 気密確認試験結果（高温曝露後）

| No. | 高温曝露条件 | 0.2 MPa | 0.3 MPa | 0.4 MPa | 0.5 MPa | 0.62 MPa | γ線照射量 |
|-----|--------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 1 | 300 °C, 73時間 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 827 kGy |
| 2 | 350 °C, 73時間 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 827 kGy |

○：リーク及び圧力低下なし

表2 He 気密確認試験結果（蒸気曝露後）

| No. | 蒸気曝露条件 | 0.3 MPa | 0.65 MPa | 0.9 MPa | γ線照射量 |
|-----|----------------------|---------|----------|---------|---------|
| 1 | 1 MPa, 250 °C, 168時間 | ○ | ○ | ○ | 819 kGy |
| 2 | 1 MPa, 250 °C, 168時間 | ○ | ○ | ○ | 819 kGy |
| 3 | 1 MPa, 250 °C, 168時間 | ○ | ○ | ○ | 819 kGy |

○：リーク及び圧力低下なし

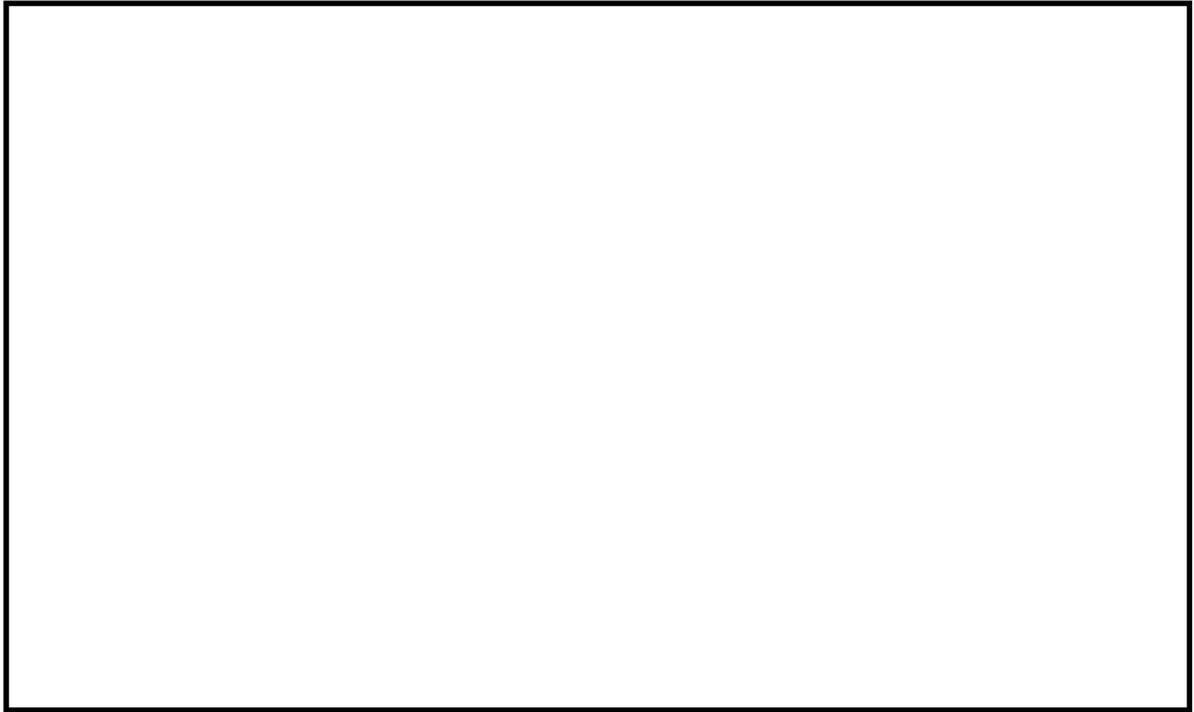


図6 FT-IR分析結果

2) 開口模擬後気密確認試験

重大事故時には、事故後ベント実施までは圧力が2 Pd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より気密性が維持されているか否かを確認するため、30 cm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気密確認試験を実施して漏えいの有無を確認した。試験実施状況を図7、図8、試験条件及び結果を表3に示す。

1.9 mmまでの変位を経験した後もHe気密確認においてリーク及び圧力降下は認められなかった。なお、He気密確認試験は、1)の蒸気曝露試験(250℃×168時間)後気密確認試験と同様に、負荷圧力は0.3 MPa、0.65 MPa、0.9 MPaとし、スヌープでのリーク確認と0.3 MPaは保持時間10分で、0.65 MPa及び0.9 MPa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、高温曝露の有無は事故時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、試験結果に大きな影響を与えないと考えている。

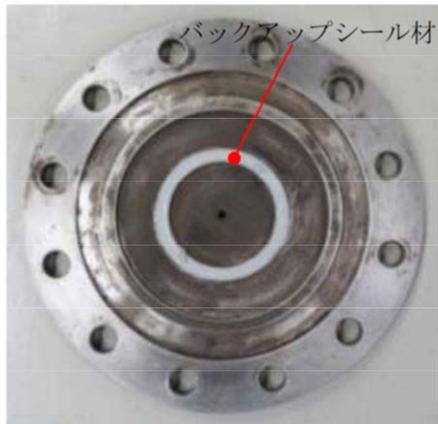


図7バックアップシール材塗布状況
(1.5mm 厚さ)



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気密確認試験結果

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

○：リーク及び圧力降下なし

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ので、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担保出来るか否か、また、既存のシール材との干渉の有無を確認するため、バックアップシール材の塗布と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、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格納容器外側にバックアップシール材塗布し、バックアップシール材単体でシール機能を持つことを確認する条件の2通り実施した。いずれの局所漏えい試験も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1～1.5 mm程度となる様に治具を用いて作業を実施した（図11参照）。

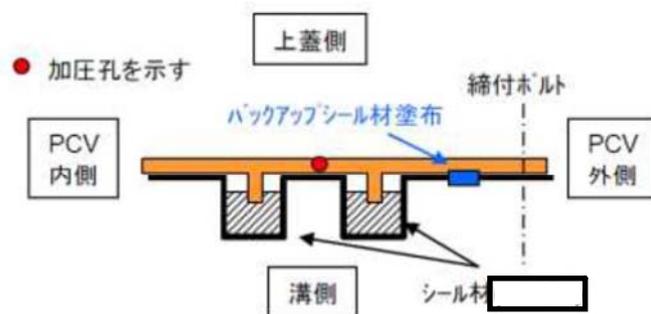


図9 内側及び外側シール材+格納容器外側バックアップシール材塗布条件

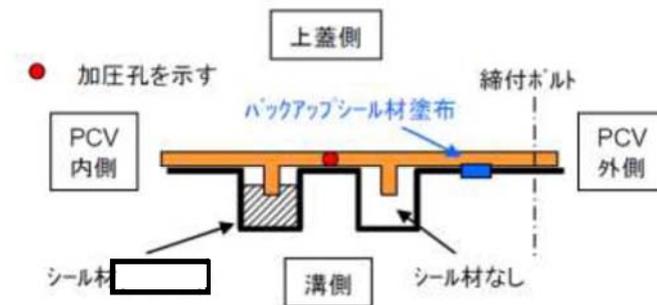


図10 内側シール材+格納容器外側バックアップシール材塗布条件



(a) バックアップシール材塗布作業



(b) ハッチ閉鎖時

図11 バックアップシール材塗布試験状況

4) 長時間試験

重大事故時においては、復旧までに相応の日数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（ γ 線照射量800 kGy）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He気密確認試験を行い漏えいの有無を確認した。試験条件を以下に示す。

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He気密確認試験を実施し、He気密確認試験後には、再度、熱処理炉に戻して乾熱200℃条件にて追加日数の高温曝露を継続実施している。

②He気密確認試験

高温曝露後の試験体について、Heを用いて気密試験を実施した。負荷圧力は0.3 MPa, 0.65 MPa, 0.9 MPaとし、スヌープでのリーク確認と0.3 MPaは保持時間10分、0.65 MPa及び0.9 MPa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。いずれの試験においてもリーク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+バックアップシール材)



図 13 He 気密確認試験状況

表4 He 気密確認試験結果

| No. | 曝露条件 | 曝露日数 | 曝露時間 | 0.3 MPa | 0.65 MPa | 0.9 MPa |
|-----|---------|------|---------|---------|----------|---------|
| 1 | 乾熱 200℃ | 30 | 720時間 | ○ | ○ | ○ |
| 2 | 乾熱 200℃ | 45 | 1,080時間 | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 乾熱 200℃ | 60 | 1,440時間 | ○ | ○ | ○ |
| 4 | 乾熱 200℃ | 75 | 1,800時間 | ○ | ○ | ○ |
| 5 | 乾熱 200℃ | 90 | 2,160時間 | ○ | ○ | ○ |
| 6 | 乾熱 200℃ | 105 | 2,520時間 | ○ | ○ | ○ |

○：リーク及び圧力降下なし

以上のことから、バックアップシール材について格納容器限界温度200℃における長期におけるシール性が確認できた。また、ベント実施までの間に格納容器の過圧によりフランジ開口を経験したとしても、ベント後のフランジ開口量が小さい領域では高温性に優れたシール機能を発揮することが確認できた。よって、バックアップシール材は、格納容器ベント操作後の長期シール機能強化に有効である。

なお、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ナリオでは、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、これよりも過酷な200℃状態が30日間継続しても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、事故後長期のシール性向上のためには「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ている。

(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の通り定めている。塗布幅は幅が広い程シール機能が向上するが、試験でシール機能が確認できた最小の塗布幅を元に設定している。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元に設定している。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元に設定している。

表5 バックアップシール材の塗布条件

| 項目 | 塗布条件 |
|-----------------|------|
| 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、幅、厚さを担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

フランジ設計として、漏えい発生を防止するためにOリング溝にシール材（改良EPDM製）がセットされているが、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込み量を確保すること
- ② 内圧及びシール材反力について、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の考慮事項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フランジ厚さの変化はほとんど無く、約 0.01 mm 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、幅 [] 以上、厚さ [] 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、幅及び厚さは均一に塗布可能とする。

実プラントでのガスケットの押込み深さは [] である。一方、バックアップシール材適用による押込み量の変化は約 0.01mm と想定され、バックアップシール材適用による押込み深さ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。

(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（1）からバックアップシール材塗布時の厚さは約 0.01mm である。

① 開口量評価

構造上バックアップシール材の厚さ分、突起によるガスケットの締め付け量は低減する。このため、最も評価結果が厳しくなるトップヘッドフランジにて 2 Pd 時の締め付け量と必要締め付け量を比較し、シール性能を維持できることを確認した（図 1, 表 1 参照）。なお、ここで用いたガスケットの必要締め付け量は実機を模擬した試験を実施し、締め付け量 0 mm でもシール性能を維持できることを確認している。

$$\begin{aligned}
 \text{評価式：締め付け量} &= \text{初期締め付け量} - \text{バックアップ材厚さ} - \text{開口量} \\
 &= (\quad) - (0.01 \text{ mm}) - \quad \\
 &= \quad > 0 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

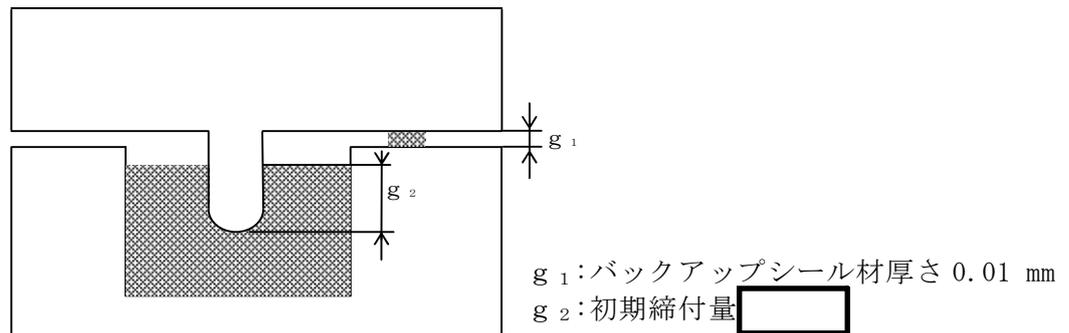


図1 バックアップシール材塗布時の初期締付状態図

表1 2 Pd時のバックアップシール材を用いたフランジシール部
開口量と締付量

| 設備名 | バックアップシール材厚さ | 開口量 | 締付量 | 必要締付量 |
|----------------|--------------|----------------------|----------------------|-------|
| トップヘッド フランジ | 0.01 | <input type="text"/> | <input type="text"/> | 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、2 Pd時にフランジに加わる荷重には、格納容器内圧による荷重、ガスケット反力による荷重及びバックアップシール材による荷重があるが、バックアップシール材反力による荷重は内圧による荷重と比較して極めて小さくなる。このため、フランジ部へ発生する応力の影響は格納容器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。

- (4) 改良E P D M製シール材に対する悪影響、フランジ締付・開放作業への影響について
フランジ締付・開放作業等の現場作業への影響について、フランジ締付時の締付ボルト管理トルク値の変更は必要ないこと、フランジ開放時(点検時)の手入れの際にバックアップシール材はスクレーパ等により、容易に除去可能であることを確認している。また、バックアップシール材の除去時にフランジ部の構造により、現場作業への影響が考えられるが、フランジ面とガスケットを装填する溝部の不連続な箇所があるものの、作業上、影響はない。

化学的影響については、長時間試験で改良E P D M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で劣化後の気密性が確認できていることから、悪影響がないと考えられる。また、フランジ締付時にバックアップシール材の余剰分は、フランジ外面に出てくるが除去可能である。

(5) まとめ

以上の検討により、バックアップシール材塗布におけるフランジ締込量への影響は約0.01 mmとわずかであり、開口量評価及びフランジ部応力評価に大きな影響はない。また、改良E P D M製シール材に対して化学反応の影響がないこと、フランジ締付作業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上の影響はない。

トップヘッドフランジ等の開口量評価について

(1) トップヘッド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E P D M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。トップヘッドフランジの開口量評価を図1、改良E P D M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 トップヘッドフランジの圧力と開口量の関係
(東海第二発電所モデル, 200℃)

表1 圧縮永久ひずみ試験^{※1}結果 (改良E P D M製)

| | |
|--------------------|------------------------------------|
| 試験温度 | 200 °C |
| 構造部放射線照射量 | <input type="text"/> |
| 試験雰囲気 | 蒸気 |
| 試験時間 | 168 h |
| ひずみ率 ^{※2} | <input type="text"/> ^{※3} |

※1 J I S K 6262 に従い実施

※2 試料を圧縮し完全に回復した状態が 0%、全く回復しない状態が 100 %

※3 の平均値

図 1 の開口量評価線図で設定している許容開口量は、格納容器内温度 200 °C の状態を 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、格納容器限界温度・圧力である 200 °C，2 Pd 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、原子炉格納容器のトップ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に、内側ガスケットと外側ガスケットの間に加圧空間を有した二重シール構造を採用している。格納容器バウンダリに要求される事故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、さら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は直接事故時環境に晒されるものでない。このため、本評価ではフランジの内側シール材の追従性が失われた時を機能喪失とみなした評価であるが、実際には外側シール材の追従性が失われるまでは閉じ込め機能を確保できる。しかしながら、外側シール材部の開口量は内側シール材部と比較して小さいこともあり、本評価では保守的に格納容器の内側シール部の閉じ込め機能を評価した。

開口量評価については、フランジ開口量とシール材復元量を比較しているが、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，材料物性のばらつきを考慮したひずみ率を踏まえ、保守的な評価を次に示す。なお，製作公差のうち，ガスケットの寸法公差は，最小側を 0 と設計変更し，製作公差を考慮しても，公称値以上の寸法となるように管理する。

以上の考え方を表 2 に整理する。

表 2 シール部の構造，寸法及び材料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。 |
| ガスケットの製作公差 | ガスケット設計の変更 | ・トップヘッドフランジ部のガスケットについて，製作公差の最小側を 0 と設計変更し，製作公差を考慮しても，公称値以上の寸法となるように管理するため，上記のシール部の公差に反映する。 |
| 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 °C 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。 |
| ガスケットのひずみ率 | 材料物性のばらつきの考慮したひずみ率を採用 | ・J I S K 6262 の結果に基づき，ひずみ率 <input type="text" value=""/> をより厳しい値とするため，圧縮永久ひずみ試験の結果に，統計学的なばらつきを考慮したひずみ率の設定 |

ひずみ率は、表 2 の考え方に記載の通り、圧縮永久ひずみ試験の結果に、統計学的なばらつきを考慮したひずみ率の設定とする。設定方法は、J I S K 6262 の結果に基づき、ひずみ率 [] と類似の条件にて実施した試験結果を抽出し、試験片数を増やして統計学的なばらつきを考慮した圧縮永久ひずみ率を算出した。抽出したデータを追加した統計学的なばらつきの評価結果を第 3 表に示す。追加抽出したデータは No. 2~4 の 3 回分 (9 個) であり、雰囲気、温度・劣化時間、照射時間を変えて実施した試験のうち、雰囲気、温度・劣化時間が同一であるものを選定した。なお、試験 No. 1 は、ひずみ率 [] を設定した試験データである。

表 3 に示すとおり、試験回数 4 回分、合計 12 個の試験データに基づく統計学的なばらつきを考慮したひずみ率を算出した結果、圧縮永久ひずみ率の最大値は [] であった。

表 3 統計学的に算出した圧縮永久ひずみ率

| 試験 No. | ひずみ率 | 平均値 | 標準偏差 σ | 平均値 + 2 σ |
|--------|------|-----|---------------|------------------|
| 1 | [] | [] | [] | [] |
| 2 | [] | [] | [] | [] |
| 3 | [] | [] | [] | [] |
| 4 | [] | [] | [] | [] |

注記：試験条件は以下の通り

雰囲気：蒸気環境 (試験 No. 1~4)

温度・劣化時間：200℃・168 時間 (試験 No. 1~4)

照射線量：[]

圧縮永久ひずみ試験：J I S K 6262 に基づき実施 (試験 No. 1~4)

本評価における圧縮永久ひずみのばらつきは、重大事故環境を考慮したひずみ率を確認するため、原子力プラント特有の条件として [] の放射線量を照射した後、圧縮状態で 200℃ の飽和蒸気環境にて 168 時間劣化させた状態での測定値であり、改良型 EPDM 製シール材の使用温度範囲外で実施した過酷な環境下での試験であることから、ひずみ率のばらつきの幅が大きく出たものと考えられる。なお、改良 EPDM 材のメーカーカタログ値として記載されている圧縮永久ひずみ [] (試験条件 []) の試験時は、測定値のばらつきが [] 程度であり、重大事故環境における試験で生じたばらつきと有意な差はない。

ここで、表 3 に示す圧縮永久ひずみ率のデータ群における外れ値の有無について棄却検定法を用いて評価する。

棄却検定法として、原子力発電所内の安全系に係る計器類を対象とし、多点データの統計的処理に係る手法を定めた指針である「安全保護系計器のドリフト評価指針」(J E A G 4621-2007 日本電気協会)を参考とし、グラブス・スミルノフ検定を採用した。

統計学的に算出した圧縮永久ひずみ率は、正規分布に従う場合、[] (平均値 $\pm 2\sigma$) の値が全ケース内に含まれる確率は約 95 % である。

したがって、全ケースから外れる確率 5 % を検定水準としてグラブス・スミルノフ

検定を行い、表 4 及び表 5 に示す試験データ群の中に外れ値は存在するか確認を実施した。

表 4 試験データ群

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | |

表 5 試験データのまとめ

| 項目 | データ数 | 最大値 | 最小値 | 平均値 μ | 不偏標準偏差 s |
|----|------|-----|-----|--------------|---------------|
| 値 | 12 | | | | |

グラブス・スミルノフ検定とは、任意の検査値に対し検定統計量 t (式(1)) を求め、この検定統計量 t がある検定水準における臨界値 τ (式(2)) よりも大きい場合、その検査値を異常値とみなす判定法である。

$$t_i = \frac{|x_i - \mu|}{s} \quad \text{(式(1))}$$

ここで、

x_i : 検査値 ($i=1, 2, \dots, 12$)

μ : 標本平均

s : 不偏標準偏差

t_i : 検定統計量 ($i=1, 2, \dots, 12$)

$$\tau = (n-1) \cdot \sqrt{\frac{t_{\alpha/n}^2}{n(n-2) + n \cdot t_{\alpha/n}^2}} \quad \text{(式(2))}$$

ここで、

n : データ数

$t_{\alpha/n}$: 自由度 $(n-2)$ の t 分布の上側 $100\alpha/n\%$ 値

($\alpha=0.05$ として t 分布表より算出)

表 5 の試験データのまとめから、データ群の平均値 μ 及び標準偏差 s (不偏標準偏差) はそれぞれ $\mu = \square$, $s = \square$ となる。また、検査値 x_i は平均値から最も離れた値とし、 $x_4 = \square$ とする。

このときの検定統計量 t_4 は以下のとおりである。

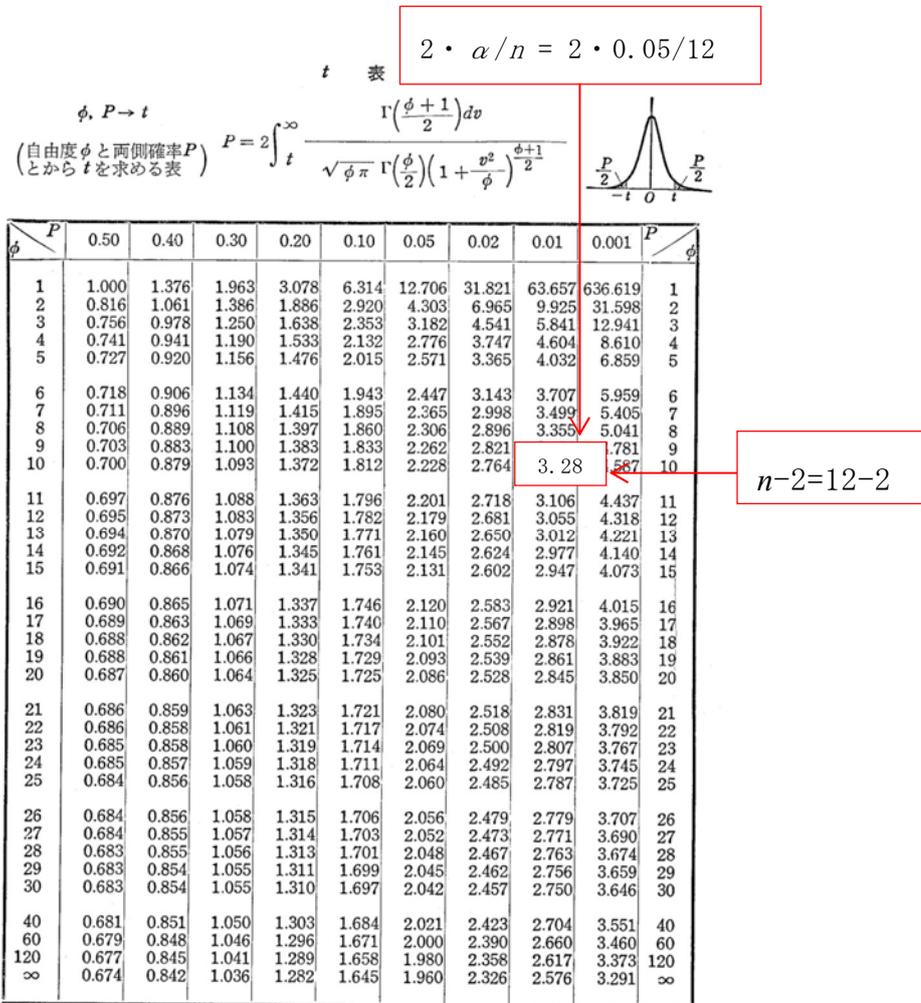
$$t_4 = \frac{|x_4 - \mu|}{s} = \square = \square$$

これに対し、臨界値 τ は、標本数 $n=12$ 、有意水準 α を 5% と設定し、 $t_{\alpha/n}$ を自由度 $n-2$ の t 分布の上側 $100\alpha/n\%$ 値としたとき、

$$\tau = (n-1) \cdot \sqrt{\frac{t_{\alpha/n}^2}{n(n-2) + n \cdot t_{\alpha/n}^2}} = (12-1) \times \sqrt{\frac{3.28^2}{12 \times (12-2) + 12 \times 3.28^2}} =$$

2.29
となる。

ここで、 $t_{\alpha/n} = 3.28$ は、下図に示す t 分布表から算定した値である。



(出典：推計学入門演習 (産業図書株式会社))

以上より、平均値から最も離れた検定値である $x_4 = \square$ に対する検定統計量 t は \square であり、臨界値 $\tau = 2.29$ よりも小さいため、異常値とは判定されない。

したがって、第3表に示す圧縮永久ひずみ値のデータ群において外れ値と判定されるものはなく、これらの値のばらつきを考慮して統計学的に算出した圧縮永久ひずみ率 \square を評価に用いることは妥当である。

なお、本評価において使用したグラブス・スミルノフ検定手法は、対象とするデータ群が正規分布に従うことを適用の前提条件としている。ここでは、改良EPDM製シール材の圧縮永久ひずみ試験のデータ(12点)に対して、正規性の検討を実施する。

正規性の検討に用いる手法として、原子力発電所内の安全系に係る計器類を対象とし、多点データの統計的処理に係る手法を定めた指針である「安全保護系計器のドリフト評価指針」(J E A G 4621-2007 日本電気協会)を参考とし、 χ^2 (カイ2乗)適合度検定を採用した。

χ^2 適合度検定は、仮定された理論上の確率分布に対して、標本から求められた度数が適合するか否かを検証する手法として一般的に知られたものである。

χ^2 検定の対象データを表 6 に示す。表 6 のデータは、蒸気環境で 200℃/168 時間劣化させた試料の圧縮永久ひずみ試験データ (12 個) である。

表 6 改良 EPDM の圧縮永久ひずみデータ (単位 : %)

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | | |
| 平均値 : <input type="text"/> / 不偏標準偏差 : <input type="text"/> | | | | | | | | | | | |

χ^2 適合度検定は、表 6 に示す標本データと正規分布を仮定した期待値とを比較し、適合度を検定するものであり、データ数と関係なく一般的に使用される。表 6 に示すデータを階級ごとに分割して整理した結果を表 7 に、表 7 に基づき作成したヒストグラムを図 2 に示す。

表 7 圧縮永久ひずみデータの度数分布表

| 階級 | 度数 O_i | 期待度数 E_i | $(O_i - E_i)^2 / E_i$ |
|----|-------------|---------------|-----------------------|
| | | | |

階級数 : 12 (自由度 : 9)

χ^2 値

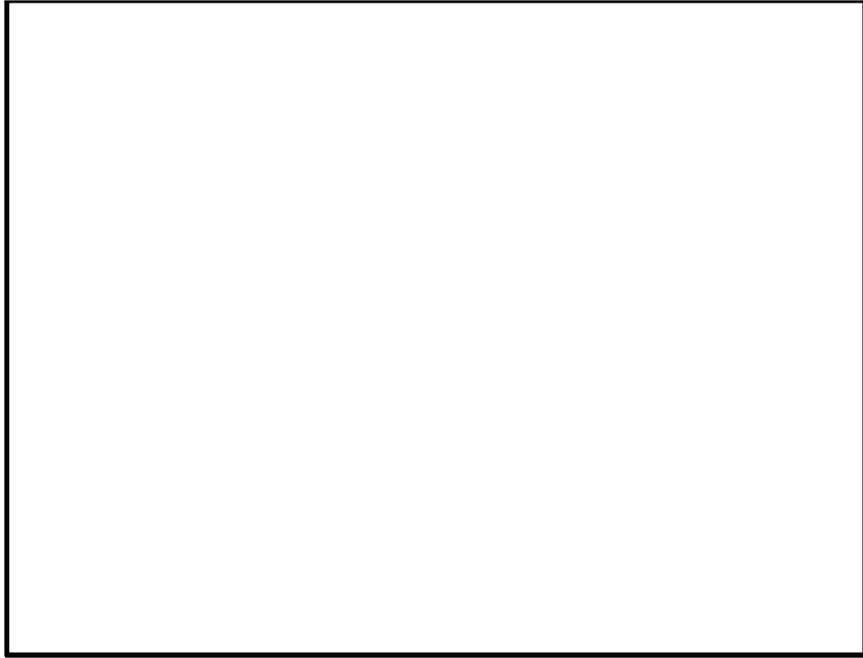


図2 圧縮永久ひずみデータのヒストグラム

χ^2 値は、標本データの度数と正規分布を仮定した場合の期待度数との差の積算として下式で求められる。

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \boxed{}$$

ここで、

O_i : ある階級に含まれるデータ数

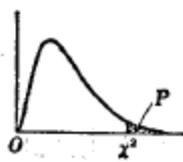
E_i : ある階級の期待度数

χ^2 適合度検定では、標本データより求めた χ^2 値が、データの自由度（階級数－制約数）に対する χ^2 分布表の値よりも小さければ、正規分布に従っている（正規性がある）と判定される。自由度 9、上側確率 5% に対する χ^2 分布表の値は 16.92 であり、12 個のデータに基づく χ^2 値 $\boxed{}$ は 16.92 よりも小さいため、表 6 に示す圧縮永久ひずみデータに対する正規性を示すとの仮定は棄却されなかった。

χ^2 表

$\phi, P \rightarrow \chi^2$

(自由度 ϕ と上側確率 P とから χ^2 を求める表)

$$P = \int_{\chi^2}^{\infty} \frac{1}{\chi^2} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{\phi}{2}\right)} e^{-\frac{\chi^2}{2}} \left(\frac{\chi^2}{2}\right)^{\frac{\phi}{2}-1} \frac{d\chi^2}{2}$$


| $\phi \backslash P$ | .995 | .99 | .975 | .95 | .90 | .75 | .50 | .25 | .10 | .05 | .025 | .01 | .005 | ϕ |
|---------------------|---------|--------|---------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| 1 | 0.00393 | 0.0157 | 0.00982 | 0.003 | 0.0158 | 0.102 | 0.455 | 1.323 | 2.71 | 3.84 | 5.02 | 6.63 | 7.88 | 1 |
| 2 | 0.0100 | 0.0201 | 0.0506 | 0.103 | 0.211 | 0.575 | 1.386 | 2.77 | 4.61 | 5.99 | 7.38 | 9.21 | 10.60 | 2 |
| 3 | 0.0717 | 0.115 | 0.216 | 0.352 | 0.584 | 1.213 | 2.37 | 4.11 | 6.25 | 7.81 | 9.35 | 11.34 | 12.84 | 3 |
| 4 | 0.207 | 0.297 | 0.484 | 0.711 | 1.064 | 1.923 | 3.36 | 5.39 | 7.78 | 9.49 | 11.14 | 13.28 | 14.86 | 4 |
| 5 | 0.412 | 0.554 | 0.831 | 1.145 | 1.610 | 2.67 | 4.35 | 6.63 | 9.24 | 11.07 | 12.83 | 15.09 | 16.75 | 5 |
| 6 | 0.676 | 0.872 | 1.237 | 1.635 | 2.20 | 3.45 | 5.35 | 7.84 | 10.64 | 12.59 | 14.45 | 16.81 | 18.55 | 6 |
| 7 | 0.989 | 1.239 | 1.690 | 2.17 | 2.83 | 4.25 | 6.35 | 9.04 | 12.02 | 14.07 | 16.01 | 18.48 | 20.3 | 7 |
| 8 | 1.344 | 1.646 | 2.18 | 2.73 | 3.49 | 5.07 | 7.34 | 10.22 | 13.36 | 15.51 | 17.53 | 20.1 | 22.0 | 8 |
| 9 | 1.735 | 2.09 | 2.70 | 3.33 | 4.17 | 5.90 | 8.34 | 11.39 | 14.68 | 16.92 | 19.02 | 21.7 | 23.6 | 9 |
| 10 | 2.16 | 2.56 | 3.25 | 3.94 | 4.87 | 6.74 | 9.34 | 12.55 | 15.99 | 18.31 | 20.5 | 23.2 | 25.2 | 10 |
| 11 | 2.60 | 3.05 | 3.82 | 4.57 | 5.58 | 7.58 | 10.34 | 13.70 | 17.28 | 19.68 | 21.9 | 24.7 | 26.8 | 11 |
| 12 | 3.07 | 3.57 | 4.40 | 5.23 | 6.30 | 8.44 | 11.34 | 14.85 | 18.55 | 21.0 | 23.3 | 26.2 | 28.3 | 12 |
| 13 | 3.57 | 4.11 | 5.01 | 5.89 | 7.04 | 9.30 | 12.34 | 15.98 | 19.81 | 22.4 | 24.7 | 27.7 | 29.8 | 13 |
| 14 | 4.07 | 4.66 | 5.63 | 6.57 | 7.79 | 10.17 | 13.34 | 17.12 | 21.1 | 23.7 | 26.1 | 29.1 | 31.3 | 14 |
| 15 | 4.60 | 5.23 | 6.26 | 7.26 | 8.55 | 11.04 | 14.34 | 18.25 | 22.3 | 25.0 | 27.5 | 30.6 | 32.8 | 15 |
| 16 | 5.14 | 5.81 | 6.91 | 7.96 | 9.31 | 11.91 | 15.34 | 19.37 | 23.5 | 26.3 | 28.8 | 32.0 | 34.3 | 16 |
| 17 | 5.70 | 6.41 | 7.56 | 8.67 | 10.09 | 12.79 | 16.34 | 20.5 | 24.8 | 27.6 | 30.2 | 33.4 | 35.7 | 17 |
| 18 | 6.26 | 7.01 | 8.23 | 9.39 | 10.86 | 13.68 | 17.34 | 21.6 | 26.0 | 28.9 | 31.5 | 34.8 | 37.2 | 18 |
| 19 | 6.84 | 7.63 | 8.91 | 10.12 | 11.65 | 14.56 | 18.34 | 22.7 | 27.2 | 30.1 | 32.9 | 36.2 | 38.6 | 19 |
| 20 | 7.43 | 8.26 | 9.59 | 10.85 | 12.44 | 15.45 | 19.34 | 23.8 | 28.4 | 31.4 | 34.2 | 37.6 | 40.0 | 20 |
| 21 | 8.03 | 8.90 | 10.28 | 11.59 | 13.24 | 16.34 | 20.3 | 24.9 | 29.6 | 32.7 | 35.5 | 38.9 | 41.4 | 21 |
| 22 | 8.64 | 9.54 | 10.98 | 12.34 | 14.04 | 17.24 | 21.3 | 26.0 | 30.8 | 33.9 | 36.8 | 40.3 | 42.8 | 22 |
| 23 | 9.26 | 10.20 | 11.69 | 13.09 | 14.85 | 18.14 | 22.3 | 27.1 | 32.0 | 35.2 | 38.1 | 41.6 | 44.2 | 23 |
| 24 | 9.89 | 10.86 | 12.40 | 13.85 | 15.66 | 19.04 | 23.3 | 28.2 | 33.2 | 36.4 | 39.4 | 43.0 | 45.6 | 24 |
| 25 | 10.52 | 11.52 | 13.12 | 14.61 | 16.47 | 19.94 | 24.3 | 29.3 | 34.4 | 37.7 | 40.6 | 44.3 | 46.9 | 25 |
| 26 | 11.16 | 12.20 | 13.84 | 15.38 | 17.29 | 20.8 | 25.3 | 30.4 | 35.6 | 38.9 | 41.9 | 45.6 | 48.3 | 26 |
| 27 | 11.81 | 12.88 | 14.57 | 16.15 | 18.11 | 21.7 | 26.3 | 31.5 | 36.7 | 40.1 | 43.2 | 47.0 | 49.6 | 27 |
| 28 | 12.46 | 13.56 | 15.31 | 16.93 | 18.94 | 22.7 | 27.3 | 32.6 | 37.9 | 41.3 | 44.5 | 48.3 | 51.0 | 28 |
| 29 | 13.12 | 14.26 | 16.06 | 17.71 | 19.77 | 23.6 | 28.3 | 33.7 | 39.1 | 42.6 | 45.7 | 49.6 | 52.3 | 29 |
| 30 | 13.79 | 14.95 | 16.79 | 18.49 | 20.6 | 24.5 | 29.3 | 34.8 | 40.3 | 43.8 | 47.0 | 50.9 | 53.7 | 30 |
| 40 | 20.7 | 22.2 | 24.4 | 26.5 | 29.1 | 33.7 | 39.3 | 45.6 | 51.8 | 55.8 | 59.3 | 63.7 | 66.8 | 40 |
| 50 | 28.0 | 29.7 | 32.4 | 34.8 | 37.7 | 42.9 | 48.3 | 56.3 | 63.2 | 67.5 | 71.4 | 76.2 | 79.5 | 50 |
| 60 | 35.5 | 37.5 | 40.5 | 43.2 | 46.5 | 52.3 | 59.3 | 67.0 | 74.4 | 79.1 | 83.3 | 88.4 | 92.0 | 60 |
| 70 | 43.3 | 45.4 | 48.8 | 51.7 | 55.3 | 61.7 | 69.3 | 77.6 | 85.5 | 90.5 | 95.0 | 100.4 | 104.2 | 70 |
| 80 | 51.2 | 53.5 | 57.2 | 60.4 | 64.3 | 71.1 | 79.3 | 88.1 | 96.6 | 101.9 | 106.6 | 112.3 | 116.3 | 80 |
| 90 | 59.2 | 61.8 | 65.6 | 69.1 | 73.3 | 80.6 | 89.3 | 98.6 | 107.6 | 113.1 | 118.1 | 124.1 | 128.3 | 90 |
| 100 | 67.3 | 70.1 | 74.2 | 77.9 | 82.4 | 90.1 | 99.3 | 109.1 | 118.5 | 124.3 | 129.6 | 135.8 | 140.2 | 100 |
| $\chi \backslash P$ | -2.58 | -2.33 | -1.96 | -1.64 | -1.28 | -0.674 | 0.000 | 0.674 | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.33 | 2.58 | $\chi \backslash P$ |

(出典：推計学入門演習 (産業図書株式会社))

次に表 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トップヘッドフランジの開口量評価を実施する。

製作公差がトップヘッド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、ガスケット溝深さ、タンク部高さ及びガスケット高さが該当する (図 3 参照)。これらの製作公差を表 8 に示す。

表 8 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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| バックアップシール厚さ | | |
| ガスケット押し込み量 | | |

表 2 より，製作公差を考慮したガスケットの押し込み量は，
 (公称値) - (公差) = と評価できる。

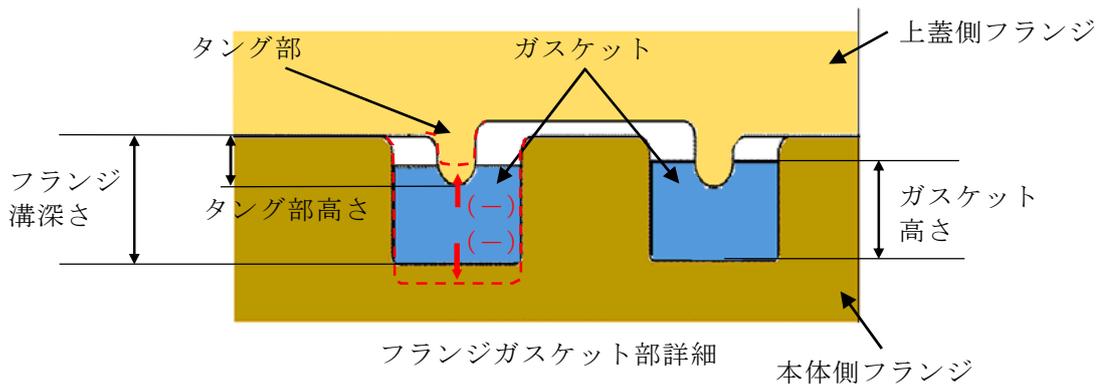


図 3 製作公差の概要（赤点線：製作公差のイメージ）

更に，各部位の熱膨張を考慮した寸法を表 9 に示す。これらの製作公差の概要を図 4 に示す。

表9 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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| 熱膨張変位合計 | | |

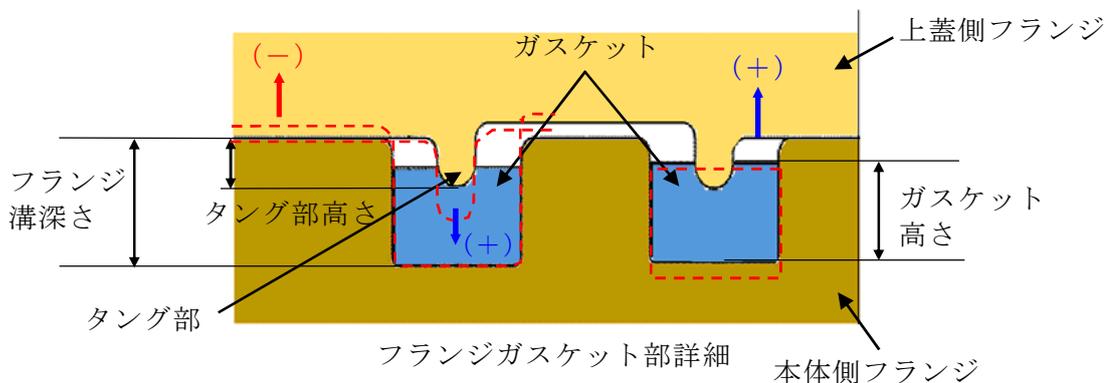


図4 熱膨張変位の概要（赤点線：熱膨張のイメージ）

熱膨張量 ΔL の評価式は以下の通り

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

ここに、

L：基準寸法 (mm)

α ：材料の熱膨張係数 (mm/mm \cdot °C)

鋼材 = 11.85×10^{-6} ，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9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、 + = と評価できる。

また、実機フランジ模擬試験においては、高温での試験を実施する前段階として、予備加圧にて徐々に調整シム量を少なくしていき、ガスケットからの漏えいが起こらない状態を押し込み量 0 mm と定義していることから、漏えいが起こらなくなった時点においては、調整シムの最小厚さである のガスケット押し込み量が発生する恐れがある。

上記より、実機フランジ模擬試験で想定されるガスケット押し込み量は、製作公差及び熱膨張を考慮したガスケットの押し込み量より、 - = と評価できる。

以上の結果から、シール部の構造、寸法及び材料のばらつきを考慮した評価は表10の通りとなり、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 10 シール部の構造，寸法及び材料のばらつきを考慮した評価結果

| 評価 | | 押し込み量 | ひずみ率 | 許容 開口量 | 開口量(2 Pd) | 評価結果 |
|-----|----|-------|------|-----------|-----------|------|
| 公称値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |
| 評価値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |

(2) トップヘッドフランジの施工管理について

実機のトップヘッドフランジにおいては、定期検査におけるトップヘッドフランジ閉鎖時に、決められた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、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 [] の隙間ゲージが挿入できないことをもって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、作業管理における品質は維持できると考える。トップヘッドフランジ部の構造を図5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、タング（突起）によるガスケット押し込み量 [] が確保出来る構造となっている。

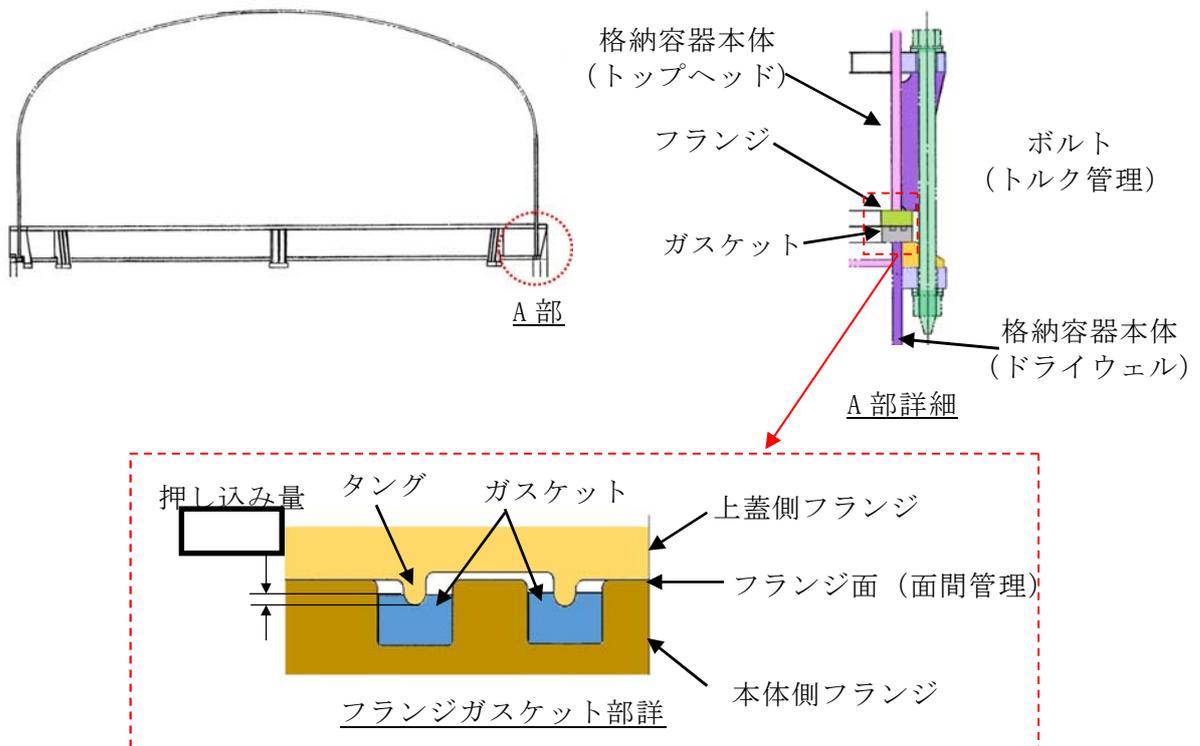


図5 トップヘッドフランジ部の構造

また、トップヘッドフランジの溝及びタング（突起）については、定期検査の開放時に手入れを実施しているが、溝やタングを傷つけないような素材で手入れを行っていること、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こと、定期検査毎に原子炉格納容器全体の漏えい率検査及びトップヘッドフランジ部のみのリークテストを実施しており、有意な変動のないことを確認していることから、トップヘッドフランジの溝及びタングは気密性を維持していると考ええる。原子炉格納容器全体漏えい率検査実績及びトップヘッドフランジ部リークテスト実績を図6、図7に示す。

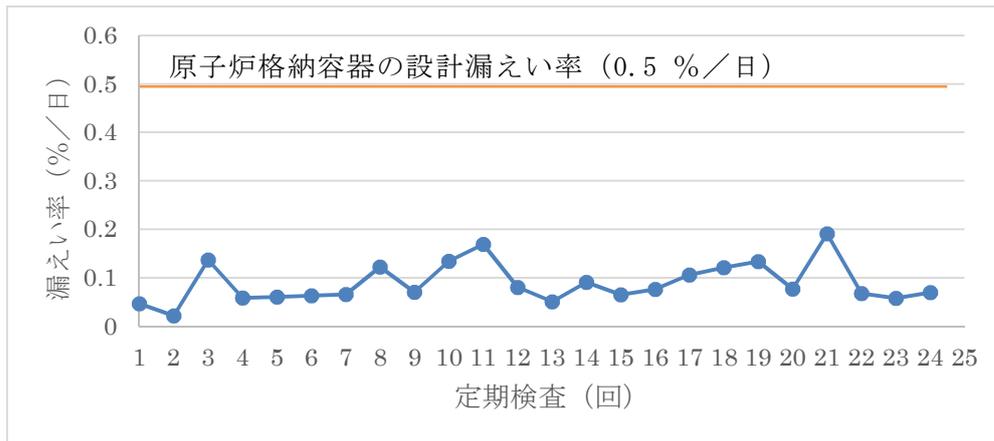


図6 原子炉格納容器全体漏えい率検査実績

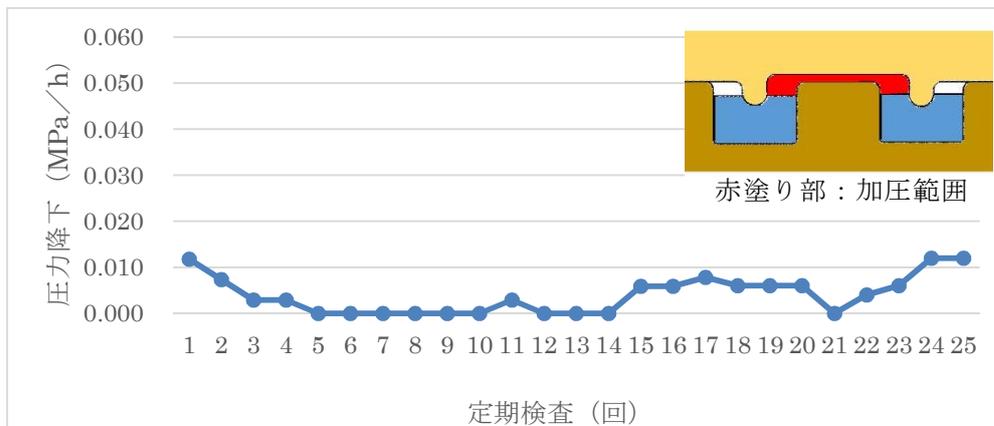


図7 トップヘッドフランジ部リークテスト実績

(3) トップヘッド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

トップヘッド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機器搬入用ハッチ，サンプレッション・チェンバアクセスハッチ，所員用エアロックについても開口量評価を実施する。評価結果は，表 11 から表 22 の通りであり，製作公差を考慮しても閉じ込め機能が維持できる。

表 11 機器搬入用ハッチ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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| バックアップシール厚さ | - | 0.01 mm |
| ガスケット押し込み量 | | |

表 12 機器搬入用ハッチ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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| 熱膨張変位合計 | | |

表 13 機器搬入用ハッチの開口量評価結果

| 評価 | | 押し込み量 | ひずみ率 | 許容開口量 | 開口量 | 評価結果 |
|-----|----|-------|------|-------|-----|------|
| 公称値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |
| 評価値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |

※実機フランジ模擬試験で想定されるガスケット押し込み量を含む

表 14 サプレッション・チェンバアクセスハッチ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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| バックアップシール厚さ | - | 0.01 mm |
| ガスケット押し込み量 | | |

表 15 サプレッション・チェンバアクセスハッチ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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| 熱膨張変位合計 | | |

表 16 サプレッション・チェンバアクセスハッチの開口量評価結果

| 評価 | | 押し込み量 | ひずみ率 | 許容開口量 | 開口量 | 評価結果 |
|-----|----|-------|------|-------|-----|------|
| 公称値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |
| 評価値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |

※実機フランジ模擬試験で想定されるガスケット押し込み量を含む

表 17 所員用エアロック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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| ガスケット押し込み量 | | |

表 18 所員用エアロック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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| 熱膨張変位合計 | | |

表 19 所員用エアロックの開口量評価結果

| 評価 | 押し込み量 | ひずみ率 | 許容開口量 | 開口量 | 評価結果 |
|-----|-------|------|-------|-----|------|
| 公称値 | | | | | ○ |
| 評価値 | | | | | ○ |

※実機フランジ模擬試験で想定されるガスケット押し込み量を含む

表 20 閉止板 (X-28) 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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| ガスケット押し込み量 | | |

表 21 閉止板 (X-28) 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 | | |
| タング部高さ | | |
| ガスケット高さ | | |
| 熱膨張変位合計 | | |

表 22 閉止板 (X-28) の開口量評価結果

| 評価 | | 押し込み量 | ひずみ率 | 許容開口量 | 開口量 | 評価結果 |
|-----|----|-------|------|-------|-----|------|
| 公称値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |
| 評価値 | 内側 | | | | | ○ |
| | 外側 | | | | | ○ |

※実機フランジ模擬試験で想定されるガスケット押し込み量を含む

(4) 実機フランジ計測結果を考慮したトップヘッドフランジ部の開口量評価について

トップヘッドフランジのシール部は、製作公差を考慮した場合の許容開口量と開口量の比較において、内側シール部の裕度が小さいことから、実機フランジ（サプレッション・チェンバアクセスハッチ）の寸法測定を実施し、製作寸法の誤差を確認した。サプレッション・チェンバアクセスハッチの構造図を図 8 に、フランジ部の寸法測定結果を表 23 に示す。

サプレッション・チェンバアクセスハッチの実機フランジ寸法測定の結果、製作公差 [] に対し、シール部が開口となる方向の製作寸法の誤差は [] 以内であった。

サプレッション・チェンバアクセスハッチシール部のガスケット溝及びタング（突起）は、トップヘッドフランジのガスケット溝及びタング（突起）と設計メーカ、設計、製作方法及び材質は同じであり、機械加工の精度も同等であると考えられることから、製作寸法の誤差についても同等であると考えられる。

サプレッション・チェンバアクセスハッチの製作寸法の誤差は、 [] であり、設計の製作公差を用いてシール部の公差を [] とした評価は、実機フランジのシール部に対して保守的な評価であると評価できる。

参考として、サプレッション・チェンバアクセスハッチと同程度の製作寸法の誤差があると仮定し、サプレッション・チェンバアクセスハッチの実機フランジ寸法測定結果からトップヘッドフランジについて開口量評価を行った。

評価の結果、トップヘッドフランジの内側シール部における許容開口量は表 24 に示すとおり、 [] であり、開口量に裕度があることを確認した。

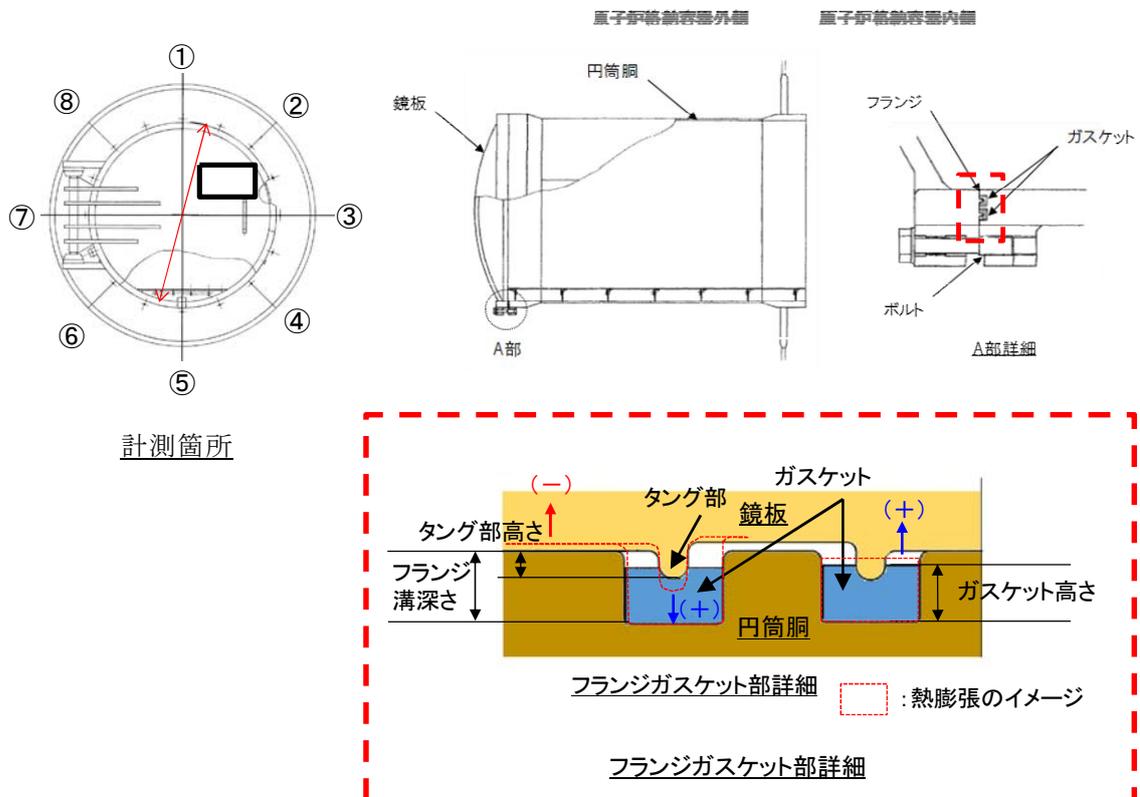


図 8 サプレッション・チェンバアクセスハッチ 構造図

表 23 サプレッション・チェンバアクセスハッチフランジ部測定結果

| 測定箇所 | 設計値 [mm] | 測定結果 [mm] | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | ① | | ② | | ③ | | ④ | | ⑤ | | ⑥ | | ⑦ | | ⑧ | |
| | | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 | 内側 | 外側 |
| 溝深さ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| タンゲ 高さ | | | | | | | | | | | | | | | | | |

表 24 トップヘッドフランジ開口量評価

| | 押し込み量 (公称値) | シール部の 公差 | 熱膨張 | 調整 シム量 | ひずみ 率 | 許容開口 量 | 開口量 (2Pd) |
|----------------|----------------|-------------|-----|-----------|----------|-----------|--------------|
| 内側 シール 部 | | | | | | | |
| 外側 シール 部 | | | | | | | |

<評価条件>

- ・ガスケット寸法：
- ・シール部の公差：S/C アクセスハッチの実測値使用
バックアップシール有

(5) 開口量評価における保守性について

表 25 に示すとおり、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や許容開口量の算出において、圧縮永久ひずみ試験は実機よりも劣化に対して保守性がある評価であるが、実機フランジ模擬試験において試験装置等の誤差があることや実機フランジ締付時の面間管理（隙間ゲージ挿入による管理）には実機フランジでのガスケット押し込み量に対し不確かさがある。

今後、ガスケットの増厚を検討し、裕度を確保することとする。

表 25 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。 | ・実機フランジ締付け時の面間管理（隙間ゲージ挿入による管理）において隙間ゲージの厚さ以下の隙間は把握できていない。 |
| | | ・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。 |
| | 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晒されるため、ひずみ試験から得られたひずみ率は材料の劣化を保守側に見積もっている。 | |
| | | ・実機ガスケット全体のうち、タング部で圧縮している部分は局所的であり、圧縮されていない部分が大部分残存しているため、タング押し込み部の復元量は、圧縮されていない部分のゴム弾性の寄与も想定される。 | |

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E P D M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、高温蒸気環境下での耐漏えい性能を確認している。また、開口部に用いられる改良E P D M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ていること、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、十分に耐漏えい性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（高圧用）及び電気配線貫通部（低圧用）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事故時のシール機能は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 | ペネトレーションを冷熱装置内に設置し，60 サイクルのサーマルサイクルを放射線照射試験の前後2 回実施。1サイクルは [] を [] 時間で変化させている。 |
| 2 | 放射線照射試験 | ペネトレーションが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 [] 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 [] を加える。 |

また，自主的取組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) He 気密確認試験 (0.3, 0.65, 0.9 MPa)
- (2) FT-IR分析

試験の結果，H e 気密確認試験において表2で示す通りリークは認められなかった。また，F T - I R 分析においても図1に示す通り，55℃を約18ヶ月保持した試験材の分析結果は初期材と同様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 気密確認試験結果

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

○：リーク及び圧力降下なし



図1 F T - I R 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

東海第二発電所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」と「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、原子炉再循環ポンプモータや再循環流量制御弁の動作に使用されているが、格納容器胴側に設置されるシール部から離れた位置に設置されている。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、又はダイア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改良EPDM製シール材については、電力共同研究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450mg/m³）よりも高濃度のよう素環境下（約1,000mg/m³）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。

重大事故等時に格納容器内で発生する水素の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、重大事故時の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から、ガスケット材料透過による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。

シール材の運転環境（放射線量，温度）の考慮について

トップヘッドフランジ等のシール材に使用する改良E P D M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，高温蒸気環境下での性能を確認している。また，開口部に用いられる改良E P D M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ないものと考えられること，プラントの定期検査においては取替を行っており，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，十分に性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（高圧用）及び電気配線貫通部（低圧用）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。

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事故時のシール機能は確保されるものとする。

黒鉛製シール材について

黒鉛製シール材は、膨張黒鉛（化学反応を用いて鱗片状黒鉛に物質を挿入した黒鉛層間化合物を急熱すると層間に入れられた物質が燃焼，ガス化し，黒鉛が層の重なり方向に膨張したもの）を圧縮加工したものであり，一般的に 400℃程度の高温環境下においても安定性の高いシール材料である。

東海第二発電所で使用する黒鉛製シール材の仕様を表 1 に示す。重大事故環境下に十分な耐性を有する製品であることを確認している。

表 1 貫通部に使用する黒鉛製シール材の仕様

| 対象部位 | 仕様 | | |
|---------------------|--------|--------|-------|
| | 耐熱温度 | 耐圧性 | 耐放射線性 |
| 所員用エアロック 電気配線貫通部 | 400℃以上 | 6.9MPa | 15MGy |

試験データの代表性・信頼性について

長期的な格納容器温度（168 時間以降で 150℃を下回る状況）と閉じ込め機能の関係を評価するために、時間経過による改良 E P D M 製シール材への長期的な影響について試験結果をもとに表 1 に示しているが、その試験データの信頼性について説明する。

表 1 には改良 E P D M 製シール材の圧縮永久ひずみ率、硬さ、質量変化率をそれぞれ試験時間に対して示しているが、これは同じ環境条件に曝露した試験体 3 個のデータの平均値を示したものである。試験体 3 個それぞれの試験結果を表 2 に示す。圧縮永久ひずみ率、硬さ、質量変化率について試験体 3 個の実測値データに大きなばらつきは無いことが確認できる。

表 1 改良 E P D M 製シール材の基礎特性データの経時変化

| 試験時間 | 0～7 日 | 7 日～14 日 | 14 日～30 日 |
|--------------|-------|----------|-----------|
| 試験温度 | | | |
| 圧縮永久ひずみ率 (%) | | | |
| 硬さ | | | |
| 質量変化率 (%) | | | |

表 2 0～7 日 (200℃), 7 日～30 日 (150℃) の圧縮永久ひずみ試験

| No | 試験時間 (日) | 試験温度 (℃) | 圧縮永久ひずみ試験 | | | | | |
|----|-------------|-------------|------------------|-----|-----|-----|--------------|-----|
| | | | 圧縮永久 ひずみ率 (%) | | 硬さ | | 質量変化率 (%) | |
| | | | 実測値 | 平均値 | 実測値 | 平均値 | 実測値 | 平均値 |
| 1 | 0～7 | 200 | | | | | | |
| 2 | 7～14 | 150 | | | | | | |
| 3 | 14～30 | 150 | | | | | | |

また、シール材の復元特性を示すために、劣化を付与した試験体を用いて、復元速度測定試験を実施した。試験ケースを表 3 に示す。

全てのケースにおいて試験体 3 個に対して試験を実施したものであり、試験結果のばらつきを確認するため、代表としてケース 1-2 の試験体 3 個全ての試験結果を図 1 に示す。いずれの試験体においても同様の傾向を示しており、復元速度 500 mm/min の試験に大きなばらつきはない。

その他の試験ケースについても、試験結果に大きなばらつきはないため、各ケース試験体 3 個のうち代表として 1 個の試験結果を図 2 及び図 3 に示す。

表3 改良EPDM製シール材の基礎特性データの経時変化

| ケース | 材料 | 照射量 | 曝露媒体 | 曝露温度 | 復元速度 | 試験体数 |
|-----|---------|-----|------|------|------|------|
| 1-1 | 改良EPDM材 | | | | | 3 |
| 1-2 | 改良EPDM材 | | | | | 3 |
| 2-1 | 改良EPDM材 | | | | | 3 |
| 2-2 | 改良EPDM材 | | | | | 3 |

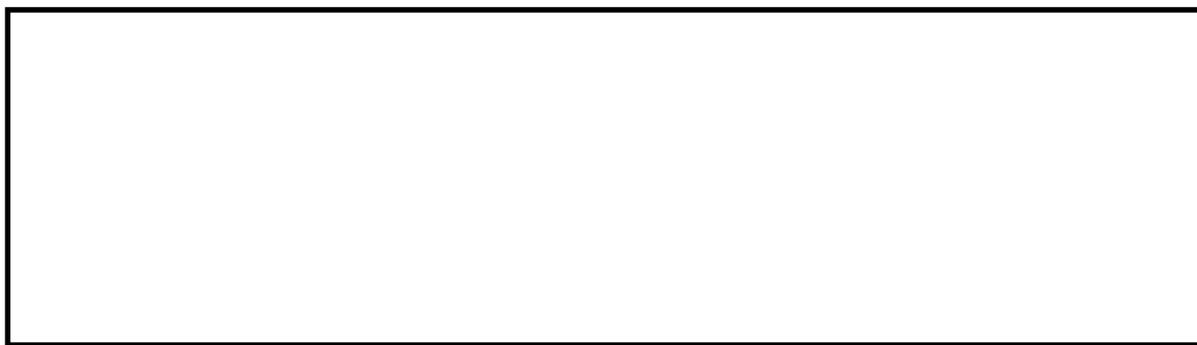


図1 復元速度測定試験（ケース1-2の試験体3個）

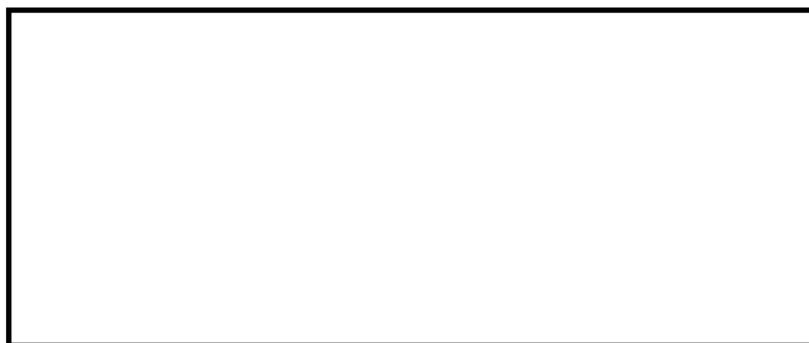


図2 復元速度測定試験（左：ケース1-1，右：ケース1-2）



図3 復元速度測定試験（左：ケース2-1，右：ケース2-2）

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）

今回、実施したトップヘッドフランジの開口量評価には、FEM解析を用いている。FEM解析では、開口量に影響を及ぼす可能性のあるボルト等の構造は、実機の寸法等を模擬して解析モデルに反映している。また、フランジ部の開口の挙動への影響が大きいと考えられる上下フランジ面同士の接触の影響も考慮し、三次元ソリッド要素を用いて弾塑性大変形解析を実施した。その評価モデルを図1に、圧力-開口量の関係を図2に示す。

以上のような解析手法を用いることにより、高い精度で開口量の評価が可能である。図3はNUPECで実施された機器搬入用ハッチフランジの圧力と開口量の関係である。この開口量は、図4に示すハッチモデル試験体のフランジ部にひずみゲージを取り付けて、漏えいが生じるまで内圧を加えて計測されたものである。なお、この試験において、漏えいが発生したのは、内圧が6.17Pd、フランジ開口量が平均で6.3mmのときであり、フランジが開口しても、漏えいが生じていない結果が得られている。この試験結果に対して、当社解析と同様に精度を向上させた解析手法を適用し、同等のメッシュ分割を用いて評価を行っている(図5及び表1参照)。図3の示すように、試験結果と解析結果の比較から解析結果は、圧力の上昇に伴って増加するフランジ部の開口量を精度よく評価できていることがわかる。

フランジ部の開口量評価では、フランジ部だけではなく、圧力作用面である上鏡板や胴部もモデル化しているため、内圧の増加により、ボルト部にモーメントが生じてフランジ部の開口が発生する。フランジ部に生じるモーメントが増加すると、同時に上鏡板や胴部の幾何学形状も変化するため、ボルトへの荷重のかかり方が逐次的に変化し、結果として、内圧の増加に対する開口挙動が曲線的に変化する。

以上より、FEM解析を用いて実施したトップヘッドフランジの開口量評価により、実機の挙動を適切に評価することが可能である。



図1 トップヘッドフランジ部の解析モデル

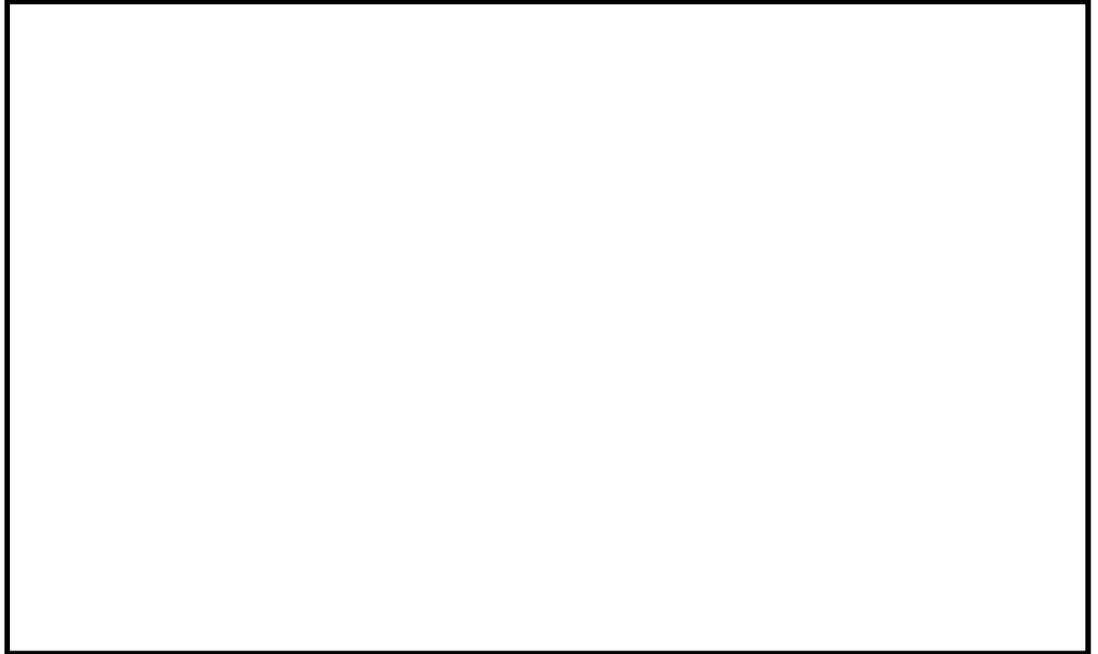


図2 トップヘッドフランジ部における圧力-開口量の関係

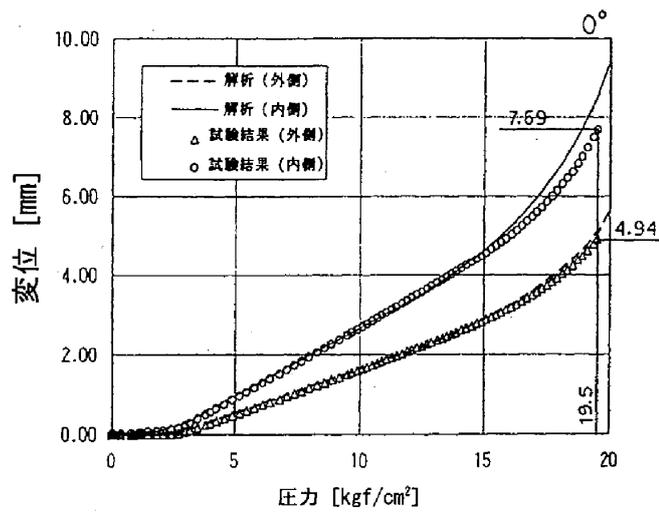


図3 NUPEC機器搬入用ハッチフランジの圧力-開口量の関係

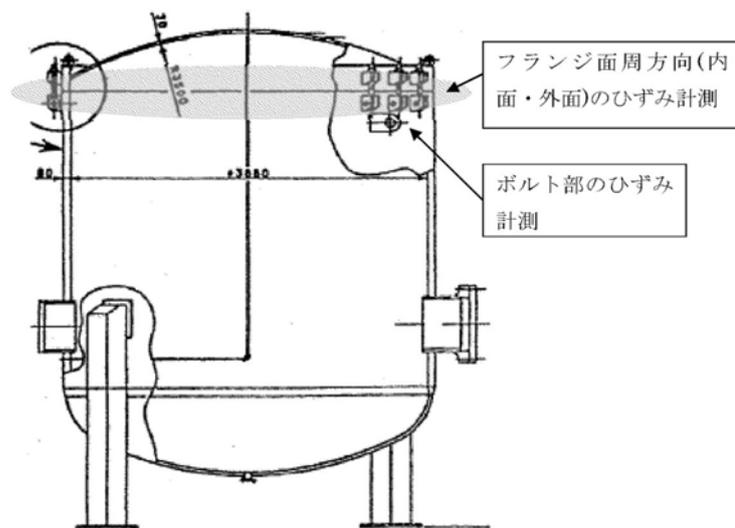


図4 NUPECハッチモデル試験体

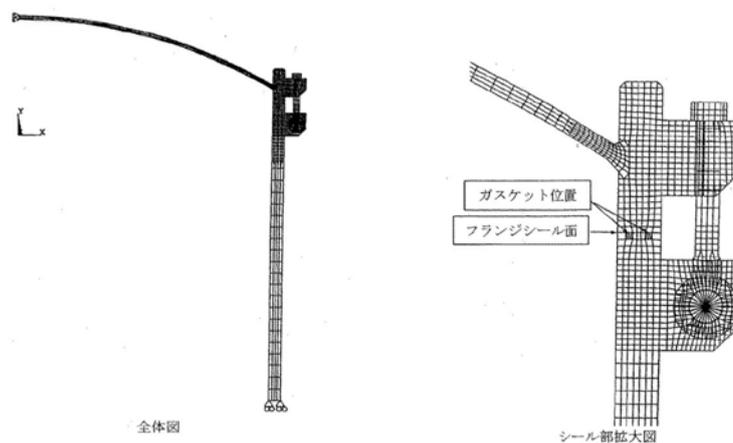


図5 NUPECハッチモデル試験解析モデル

表1 NUPEC解析モデルと当社解析モデルの比較

| 解析項目 | NUPEC解析モデル | 当社解析モデル |
|-------------|---|--|
| 解析コード | ANSYS | ABAQUS |
| モデル化範囲 | 胴部，上鏡部：軸対称ソリッド要素 ボルト，ブラケット：平面応力要素 フランジシール面：接触要素 | 格納容器胴部（円筒胴，円錐胴）， 上鏡部，フランジシール部構成部材 （フランジ，ボルト，ナット等）： ボルト 1/2 ピッチ分をセクタとした 周期対称ソリッド要素 フランジシール面：接触要素 |
| 材料定数 | 試験体の材料の引張試験から得られた物性値を用いた。 応力ひずみ関係は，真応力－真ひずみ関係を多直線で近似して用いた。 | 材料規格に基づく物性値を用いた。 応力ひずみ関係は，ASME B&PV Code Sec. VIII (2012Addenda) Div.2 ANNEX 3-D による真応力－真ひずみ関係を多直線で近似して用いた。 |
| 境界条件 | 上鏡中央は，軸対称性から X 方向に拘束，Y 方向を自由。胴板下端は X 方向に自由，Y 方向を拘束。 | 格納容器胴側と底部との取り合いを固定。端部は対称条件を設定。 |
| ボルト初期締め付け荷重 | 実機で設定している値を用いた。 | 実機で設定している値を用いた。 |
| 荷重条件 | 内圧を段階的に負荷し，1.96 MPa となるまで解析を実施した。 | 内圧を段階的に負荷し，発散するまで解析を実施した。 |

原子炉格納容器のリーク発生順序及び各部位の裕度について

原子炉格納容器バウンダリを構成する各設備に関して、重大事故等時に放射性物質の閉じ込め機能が喪失する要因として、原子炉格納容器内の温度・圧力条件の変化や原子炉格納容器本体の変形に伴い、構造健全性が失われる場合と、シール部のシール機能が失われる場合が想定される。

構造部材の評価については、規格等に定められている許容値を基準として用いて評価しており、200℃、2Pd の環境条件が継続しても構造強度を維持できるため、閉じ込め機能に対して十分な裕度を有しているものとする。

一方、シール部については、シール材が事故条件下において時間的に劣化していくことが確認されており、現在の評価において健全性が確認されている 7 日間の期間を超えて 200℃、2Pd の環境条件が長時間継続した場合には、シール材が機能を喪失し漏えいが生じる可能性がある。また、シール部のうち、トップヘッドフランジや機器搬入用ハッチ等、フランジ構造になっている箇所については、圧力の上昇に伴い開口量が増加するため、その影響により、他のシール部に比べて漏えいが生じるリスクが高いものと考えられる。

以上の検討結果から、原子炉格納容器で漏えいが発生する可能性が高い部位はフランジ構造のシール部であると評価できる。このため、フランジ構造のシール部について、200℃、2Pd の状態での健全性を確認した際の判定基準に対する裕度を確認した。

フランジ部の限界温度・圧力に対する裕度を表 1 に示す。

表1 フランジ部の限界温度・圧力に対する裕度

| 評価対象部位 | | 開口量 (mm) | 許容値 (mm) | 裕度※ |
|-------------------------|----|-------------|-------------|------|
| トップヘッドフランジ | 内側 | | | 1.1 |
| | 外側 | | | 1.4 |
| 機器搬入用ハッチ | 内側 | | | 1.4 |
| | 外側 | | | 1.8 |
| サプレッション・チェンバ アクセスハッチ | 内側 | | | 4.6 |
| | 外側 | | | 6.3 |
| 所員用エアロック | | | | 6.5 |
| 閉止フランジ | | | | 15.1 |

※：許容値／開口量

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

所員用エアロックにおけるシール部の評価については、原子炉格納容器内圧による扉板の変形に伴うシール部の開口量評価を実施しているが、この評価では、変形による支点のずれを考慮しない評価としているため、支点のずれに伴う影響について評価を行う。図1に所員用エアロックシール部の構造を示す。

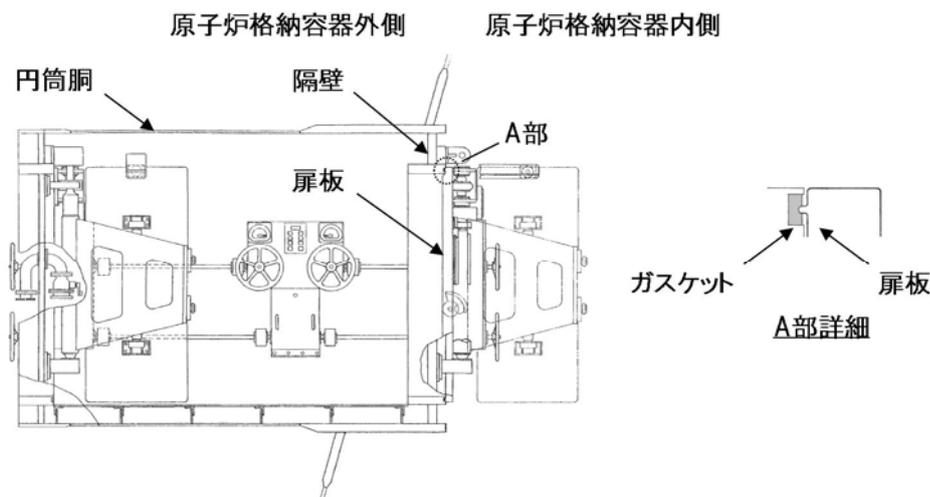


図1 所員用エアロックのシール部構造

1. 扉板の変形（たわみ等）について

所員用エアロック扉板を図2、図3のように2点支持のはりとしてモデル化する。東海第二発電所の所員用エアロック扉板は平板形状であり、扉板の板厚を考慮してモデル化していることから、はりとしてモデル化することは妥当であると考えられる。また、はりモデルは変位量が保守的となる扉板長辺側をモデル化しており、実際に荷重がかかった際は、上下に加え左右にも支持があるところを、上下2点支持としていることから、保守的な評価であると言える。

このはりモデルにより、扉板の変形（たわみ等）によって生じる縦軸方向（扉幅）の変位量 δx を評価した結果、0.2 mm程度であり、ガスケット幅 と比較しても十分小さく無視できる。

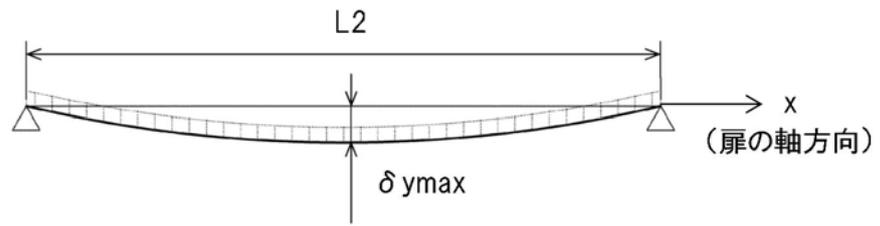
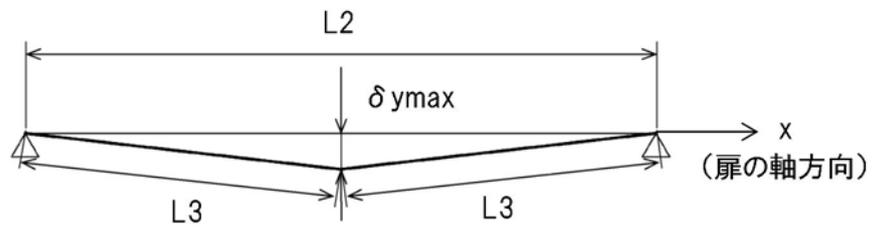


図2 2点支持はりモデル



縦軸方向（扉端）の変位量 δx は $\delta x = 2 \times L3 - L2$

図3 三角形モデル

2. 変形支点の変位について

上記で示した扉の軸方向への滑り $\delta_x = 0.2 \text{ mm}$ の場合について、所員用エアロック扉を図4のように2点支持はりモデル化し、シール部の開き量を算出した。その結果、扉シール部の変位は、変形支点を考慮しない場合の変位量と同じ であった。

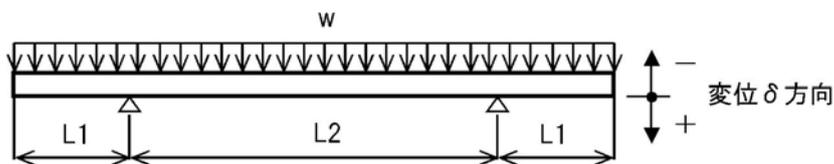


図4 2点支持はりモデル

$$\delta = \frac{w \times L_1}{(24 \times E \times I)} \times (3L_1^3 + 6L_1^2 \times L_2 - L_2^3)$$

$$= \text{ mm}$$

格納容器隔離弁の S A 環境下における耐性確認試験の概要について

原子炉格納容器隔離弁のうち、バタフライ弁の弁座ゴムシートに対し、重大事故時環境における耐性向上のため、より耐熱性・耐放射線性に優れたシール材である改良 E P D M 製シール材を選定し、耐性確認試験を実施した。試験の概要を以下に示す。

1. 試験内容

試験フロー及び試験内容を表 1 に示す。また、図 1 に蒸気通気試験装置の概要図、図 2 に常温弁座漏えい試験の概要図を示す。600A バタフライ弁を供試体とし、弁座シール材に改良 E P D M 製シール材を適用して、初期性能確認、劣化処理を行った後、200℃における飽和蒸気環境下（BWR の原子炉格納容器の設計圧力の 2 倍（2Pd）以上）で 168 時間、蒸気通気試験を実施する。さらに常温復帰後、窒素を媒体とした常温弁座漏えい試験を実施する。重大事故時環境における格納容器の閉じ込め機能を確認する観点から、弁は閉弁状態で実施する。重大事故時環境における放射線による劣化と熱による劣化は、シール材に放射線照射をした後、定められた温度条件下に曝露する逐次法により付与する。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。バタフライ弁のシール材は格納容器内の雰囲気をシールするものであり、事故時の蒸気環境をシールし、酸素が常に供給される環境をシールするものではないことから、逐次法と比較して放射線と熱の同時曝露のシール機能への影響は十分小さいものとする。

表 1 試験フロー及び試験内容

| 試験フロー | 試験内容 |
|-------------|--|
| 熱・放射線同時劣化処理 | 通常運転中に負荷される温度，線量を供試体に加える |
| 初期機能試験 | 初期状態における閉じ込め機能等を確認する |
| 機械的劣化処理 | 負荷試験機を用いて弁の開閉操作を実施する |
| 放射線照射劣化 | 重大事故環境で想定される放射線量（0.3 MGy）を供試体に照射する |
| 蒸気通気試験 | 図 1 に示す試験装置で 200 ℃，0.62 MPa 以上の蒸気環境下における閉じ込め機能を確認する。蒸気は 168 時間通期し，24 時間おきに二次側の漏えい検出弁より漏えいの有無を確認する。 |
| 常温弁座漏えい試験 | 図 2 に示す試験装置で供試体一次側を 0.62 MPa 以上の窒素加圧環境下とし，二次側からの漏えいがないことを確認する。 |

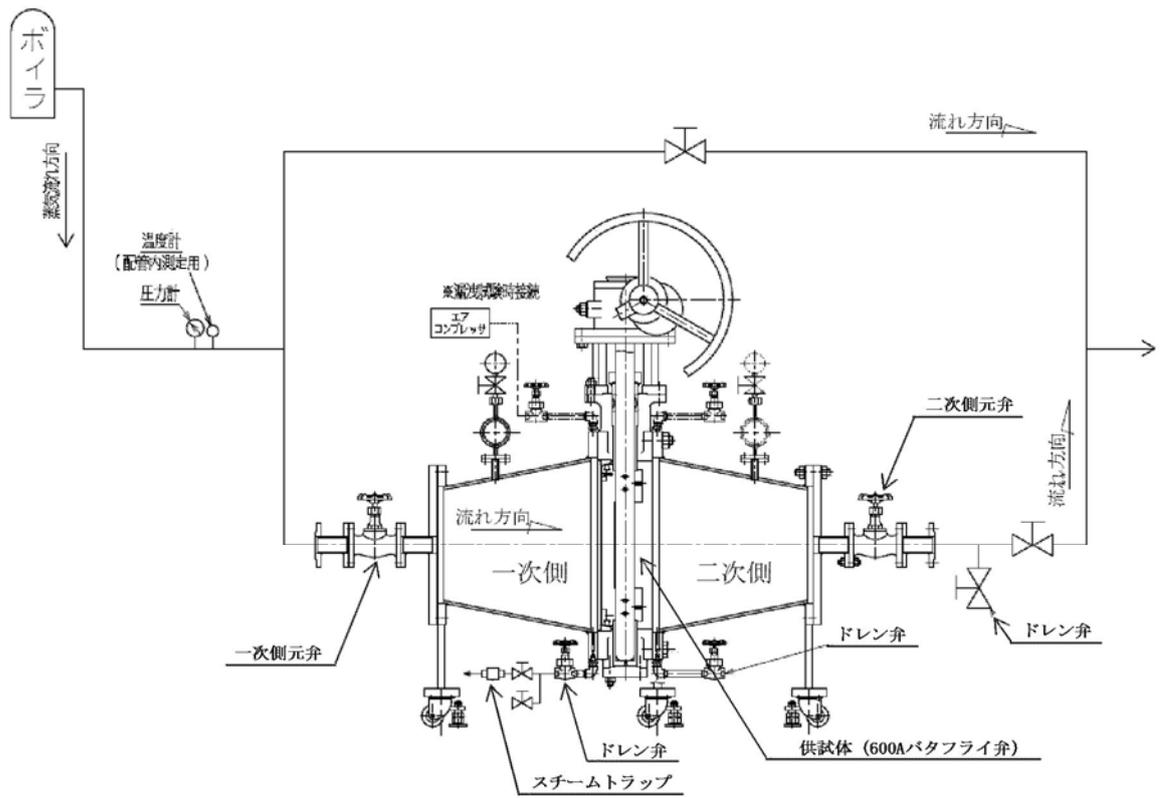


図1 蒸気通気試験装置概要図

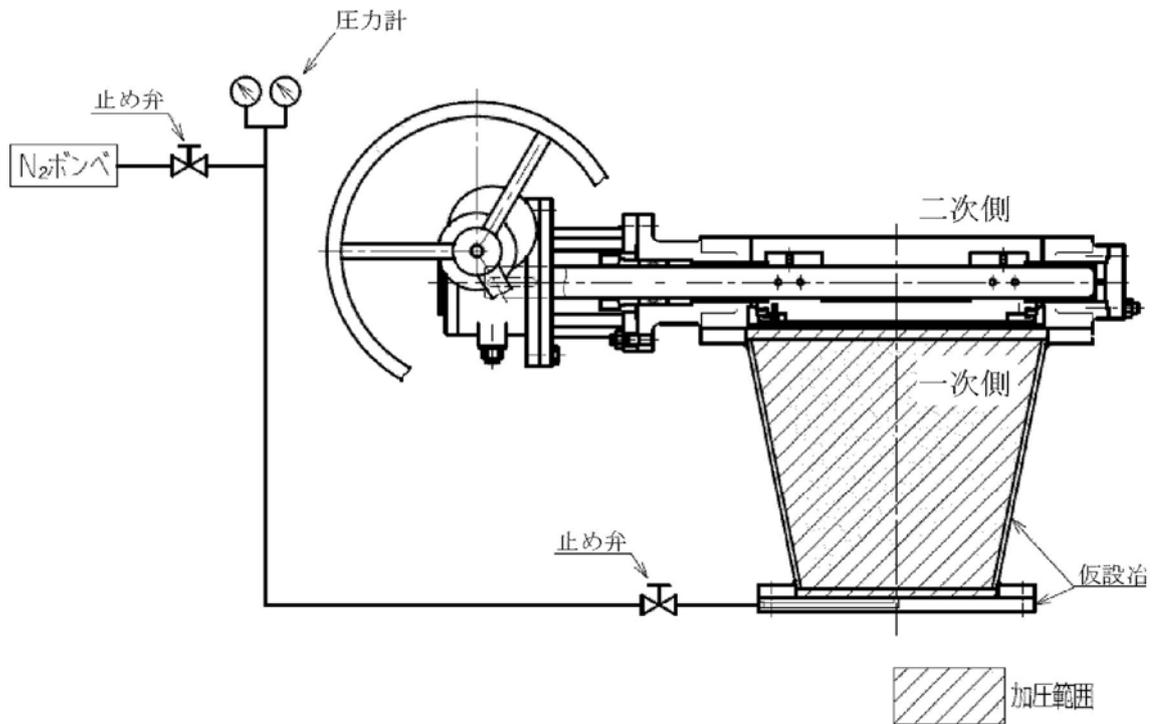


図2 常温弁座漏えい試験概要図

2. 試験結果

蒸気通気試験の試験結果を表 2 に、常温弁座漏えい試験の試験結果を表 3 に示す。蒸気通気試験中に漏えいは確認されず、また、常温復帰後の常温弁座漏えい試験においても漏えいは確認されず、閉じ込め機能を維持できることを確認した。

表 2 蒸気通気試験結果

| シート材 | 圧力 | 温度 | 加圧媒体 | 継続時間 | 照射量 | 漏えいの有無 |
|-------------|-------------|--------|------|--------|-----|--------|
| 改良 E P D M材 | 0.62 MPa 以上 | 200 °C | 蒸気 | 168 時間 | | 無 |

表 3 常温弁座漏えい試験結果

| シート材 | 圧力 | 温度 | 加圧媒体 | 漏えいの有無 |
|-------------|-------------|----|------|--------|
| 改良 E P D M材 | 0.62 MPa 以上 | 常温 | 窒素 | 無 |

移動式炉心内計装（T I P : Traversing In-core Probe）系統爆破弁について

1. 系統概要

移動式炉心内計装（T I P : Traversing In-core Probe）系統は、炉心内の軸方向及び水平方向の中性子束分布の測定をすると共に、局部出力モニタ（L P R M）の較正を行うために設けられた移動式の中性子測定装置である。

T I P系統は、5系統の中性子検出機構、駆動機構、インデクサ、バルブアセンブリなどで構成されており、炉心内 43 箇所において中性子束分布を測定できるようになっている。

T I P系統のバルブアセンブリは、T I Pボール弁と火薬切断弁（爆破弁）により構成されており、原子炉格納容器バウンダリとしては、通常運転時は全閉状態であるT I Pボール弁により、隔離機能を維持している。

T I Pボール弁が開状態となるのは、通常運転時の局部出力モニタの較正のためT I P検出器を炉心内に挿入・引抜する期間である。T I P検出器を炉心内に挿入している間に格納容器隔離信号が入った場合には、T I P検出器が自動引抜され、T I Pボール弁が自動閉止する。また、T I P検出器が炉心に挿入している間に格納容器隔離信号が入り、且つ検出器が炉心内から引抜けない場合又はT I Pボール弁が正常に閉止しない場合、T I P火薬切断弁により閉止を行う運用としている。

T I Pのシステム概略図を図1に、T I Pシステム機器構成図を図2に示す。

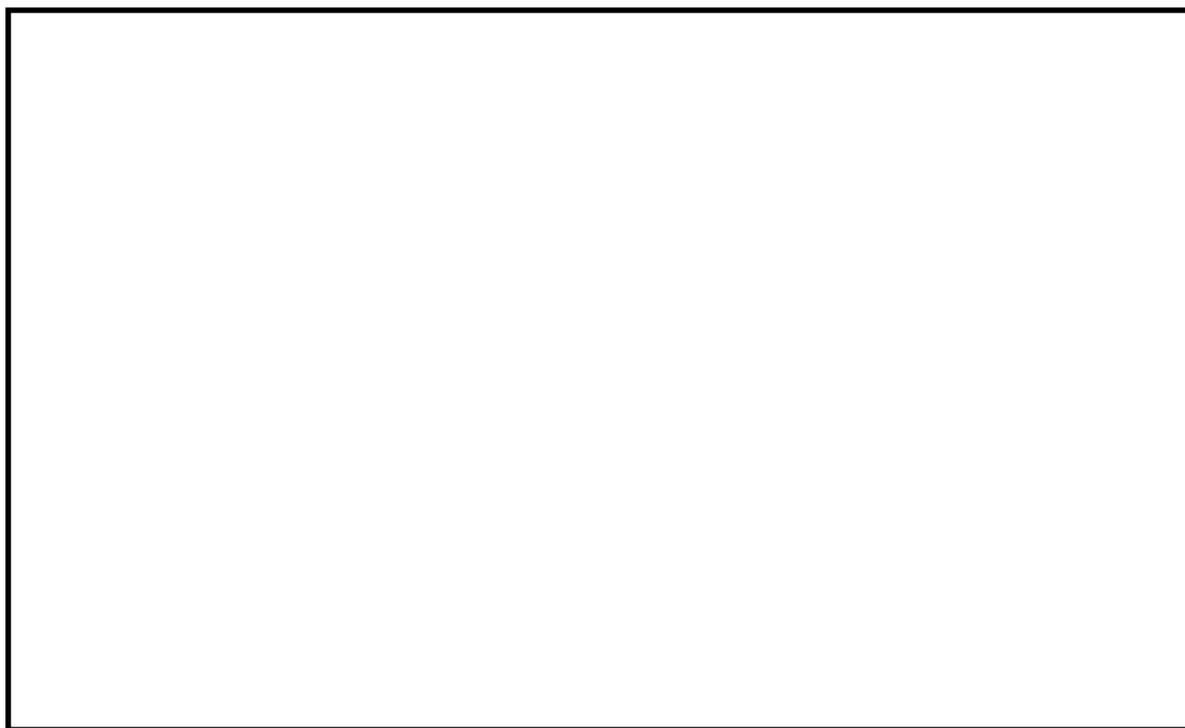


図1 T I Pシステム概略図

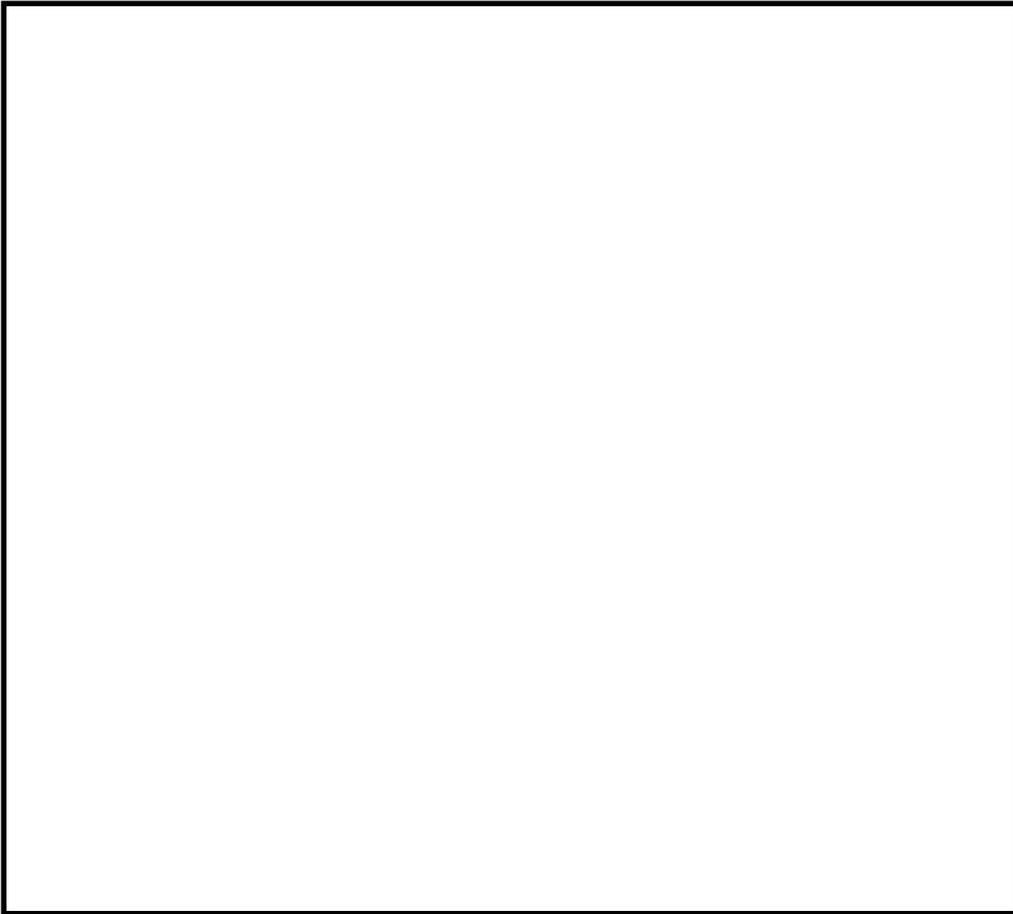


図 2 T I Pシステム機器構成図

2. T I P装置の機能，動作について

(1) 駆動機構

駆動機構は，モータにより駆動ケーブルを駆動することにより，検出器を炉内へ送り込むものである。

(2) バルブアセンブリ

バルブアセンブリは，ボール弁と火薬切断弁の2つのバルブから構成され，格納容器の隔離のためにインデクサ機構と駆動機構の間の案内管に設けられたものである。

ボール弁は電極弁であり，通常は安全方向となるようにスプリングにより閉弁されている。検出器が駆動されている場合にはソレノイドが励磁されてボール弁は開弁し，検出器がチェンバーシールド内に収められた場合にはソレノイドが無励磁となり閉弁するように，シールドリミットスイッチにてインターロック制御されている。

火薬切断弁はボール弁とチェンバーシールドの間にあり，非常時にのみ使用される。検出器が炉心にある場合，原子炉内に何らかの原因による漏えいが発生し，その上検出器を引抜けない場合やボール弁が全閉しない場合に限って，T I P制御盤のキーロックスイッチによりケーブルを切断し，格納容器の隔離を行うものである。

(3) 共通案内管

共通案内管は炉心中央の案内管へ導くための案内管であり，各インデクサ機構から集まった案内管は，5ウェイコネクタにより1本の案内管へ集められ炉内に入って行く。

(4) パージシステム

パージシステムは、駆動機構内ケーブル及びインデクサ機構の絶縁劣化、錆防止のため、湿分の少ない制御用空気及び窒素ガスにて常にパージしている。

(5) インデクサ機構

インデクサ機構は、炉内案内管とチャンバーシールドの間にあり、駆動機構からの案内管と、炉内案内管を正確に結合させる機構である。

3. T I P 火薬切断弁の構造について

前述のとおり、火薬切断弁は、原子炉内に何らかの原因による漏えいが発生し、その上検出器を引抜けない場合やボール弁が全閉しない場合に限って使用される弁である。火薬切断弁の構造図を図 2 に示す。

T I P 制御盤のキーロックスイッチにより作動信号を入力することで、パワーカートリッジ内の火薬に着火し、爆発力によりカッターが飛び出し、T I P 検出器ケーブルを内蔵している案内管を切断した後、所定の位置に停止する。



第 2 図 T I P 火薬切断弁構造

4. T I P火薬切断弁の信頼性確認について

T I P火薬切断弁の信頼性確認のため、T I P火薬切断弁の起爆回路の健全性を確認することを目的として、定検毎で表 1 に示す検査を実施している。経年劣化の影響が懸念される弁駆動源である火薬については、設計寿命を考慮して交換頻度を 65 ヶ月としており、火薬切断弁ごと交換することとしている。

また、火薬切断弁の交換の際には、同一ロットの試供品にて爆破試験等を実施することで、動作信頼性を確保している。

表 1 T I P火薬切断弁の検査項目

| 検査項目 | 内容 |
|----------|-----------------------------------|
| 外観検査 | 目視による外観点検 |
| 絶縁抵抗測定試験 | T I P火薬切断弁～中央制御室操作ユニット間のケーブル健全性確認 |
| 導通確認試験 | T I P火薬切断弁の点火回路の健全性確認試験 |

動的荷重の影響について

1. はじめに

原子炉格納容器については、事故時に動的な荷重が発生する可能性がある。ここでは、評価温度・圧力 (200 °C, 2 Pd) において考慮すべき動的荷重を抽出し、その影響を評価した。

2. 考慮すべき動的荷重の抽出

原子炉格納容器内における動的な荷重は、以下によって生じうる。

- (1) 高温の炉心 (熔融デブリを含む) と水との接触に伴う蒸気発生
 - ① 損傷炉心等のヒートアップした炉心への注水時の蒸気発生
 - ② 下部プレナムへの熔融炉心の移行 (リロケーション) 時の蒸気発生
 - ③ 原子炉圧力容器破損に伴う F C I 発生時の蒸気発生
- (2) 原子炉冷却材バウンダリ内に内包された高エネルギー流体の格納容器への放出
 - ① L O C A ブローダウン時の高温水・蒸気の放出
 - ② 逃がし安全弁の作動に伴うサプレッション・プールへの蒸気放出

これらのうち、原子炉格納容器圧力の上昇率が最も大きく、フランジ等の開口量の変化速度が速い事象は、(1)③の F C I 発生時の蒸気発生である。この影響について、3. に示す。

また、(2)②については、原子炉格納容器圧力の上昇率は大きくないものの、サプレッション・チェンバ内で動的な荷重が発生する。加えて、(2)①についても、ベント管からの高温水・蒸気の吹き出しによってサプレッション・チェンバ内に動的な荷重が発生する。これらの影響について、4. に示す。

3. 原子炉圧力容器破損に伴う F C I 発生時の蒸気発生の影響について

有効性評価に関する事故シナリオにおいて、熔融炉心がペDESTALに落下した際に格納容器内圧力がスパイク上に上昇する。フランジ等のシール部に用いるシール材は、フランジ等の開口量に合わせて形状が変化することによりシール性能を確保しているが、上記の圧力上昇時のフランジの開口量の変化する速度にシール材の形状の変化が追従できない場合には、漏えいが生じる可能性がある。

このため、シール材の形状が変化するために必要な時間 (復元速度) を確認し、フランジ部の開口量の変化速度との比較を行った。

3.1 シール材の形状変化速度

フランジ部においてシール材に採用する改良 E P D M 製シール材について、復元速度を評価するため、J I S K 6254 に基づく試験を行った。

当社が評価している有効性評価に関する事故シナリオにおいて、フランジ開口量の変化速度が最も早くなるのは、熔融炉心がペDESTALに落下した際の圧力上昇時 (F C I 発生時) である。この場合における開口量の変化速度は 1.49×10^{-2} mm/s 程度であることが分かっているため、これを参照して、 1.49×10^{-2} mm/s を上回る 300 mm/min (5mm /s) 及び 500 mm/min (8.33 mm/s) を試験速度とした。

試験では、常温下で所定距離 (3.75 mm) まで一定速度 (300 mm/min 又は 500 mm/min) で圧縮後、初期位置まで一定速度 (300 mm/min 又は 500 mm/min) で荷重を開放し、この際に改良 E P D M 製シール材に加わる圧縮応力を測定する試験を実施した (図 1 参照)。本試験装置では、シール材の荷重を開放するとき、シール材の復元速度が試験装置の開放速度より大きい場合には圧縮応力が計測されることから、これにより、復元速度を測定することができる。

【復元速度測定装置】

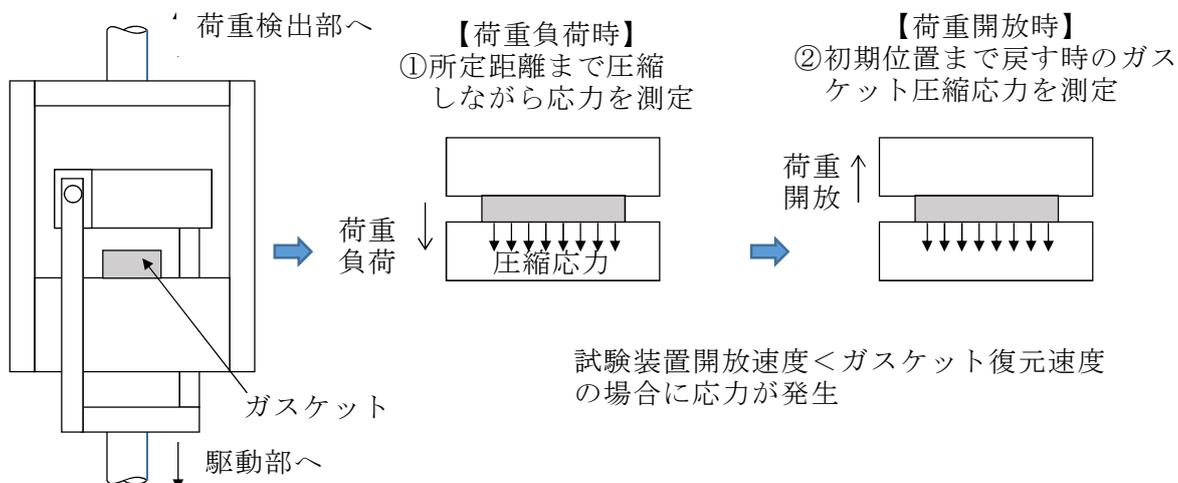


図1 復元速度測定試験の概要

3.2 試験結果

試験結果を図2に示す。この図に示すように、荷重開放時の各計測点において圧縮応力が測定されたことから、改良EPDM製シール材の復元速度は500 mm/min (8.33 mm/s) 以上であることを確認した。前述のとおり、フランジ開口量の変化速度が最も早くなるのは、熔融炉心がペDESTALに落下した際の圧力上昇時（FCI評価）であるが、その時のフランジ開口変化速度は 1.49×10^{-2} mm/s程度であり、以下のとおりシール材復元速度は十分な追従性を有しているものであり、急速な開口に対してもシール機能を維持できるものとする。

シール材復元速度 500 mm/min (8.33 mm/s) 以上 > フランジ開口変化速度 (1.49×10^{-2} mm/s)



図2 一定復元速度下で測定した改良EPDM製シール材の圧縮応力

なお、本試験は、劣化していない材料に対して実施したものであるが、参考資料15で示す通り、劣化後の圧縮永久ひずみ、硬さ、質量変化率は、大きなばらつきがなく、有意な性状変化が見られていない。また、さらに詳細に劣化による影響を確認するために、劣化後の材料のFT-IRやシート面の硬さに関する検討を行った。その結果、シール材の性状に大きな変化は確認されなかった。

これらに示す試験結果から、劣化を考慮した場合でもシール材の復元特性に大きな変化はなく、また、復元速度はフランジ開口速度に対して十分な余裕があることから、開口に対する追従性に問題はないものとする。

< 追従性判断に使用できる理由 >

800 kGy の放射線照射を行い，乾熱 200 °C を 168 時間暴露した改良 E P D M 製シール材，及び 800 kGy の放射線照射を行い，蒸気 250 °C を 168 時間暴露した改良 E P D M 製シール材について，劣化後のシート面の F T - I R スペクトルを図 3 に，硬さ測定の測定値を図 4 に示す。その結果，F T - I R スペクトルは，分析位置に顕著な劣化が認められないこと，硬さ測定結果は，200°C，168 時間条件では酸化劣化によって硬さが顕著に上昇したが，その他は，硬さの初期値近傍であることから，乾熱放射線照射+蒸気暴露後の試験片と初期試験片に顕著な差異はないことが確認できるため，復元特性が同様であると類推される。



図 3 F T - I R 分析結果 (シート面)

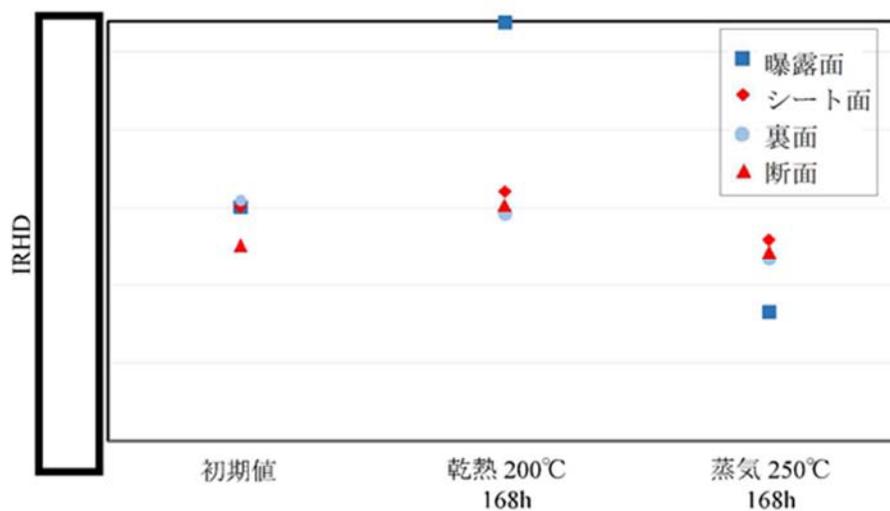


図 4 硬さ測定結果

4. 逃がし安全弁の作動に伴うサプレッション・プールへの蒸気放出の影響について
サプレッション・チェンバに作用する水力学的動荷重は大別して次の2種類がある。
- (1) ドライウェルとサプレッション・チェンバを繋ぐベント管からの吹き出しによる荷重
 - (2) 主蒸気逃がし安全弁の作動時に、サプレッション・プール水中の排気管端部に設置されたクエンチャからの蒸気吹き出しによる荷重

このうち(1)については、格納容器圧力が低いL O C A発生直後で支配的となる現象であるため、その後、格納容器が限界温度・圧力に近づいた状態においては評価不要と考える。したがって、(2)のクエンチャからの蒸気吹き出しによる荷重の影響について検討を行った。クエンチャからの蒸気吹き出しに伴う荷重には、次の2種類がある。

- (a) 気泡振動荷重
主蒸気逃がし安全弁作動時に排気管内の空気が圧縮され、クエンチャから水中に放出される際に、気泡の膨張・収縮の繰り返しにより生じる荷重。
- (b) 蒸気凝縮振動荷重
原子炉圧力容器からの蒸気が、クエンチャから水中に放出される際に生じる凝縮振動。

このうち、(a)の気泡振動荷重については、荷重の大きさがガス量とそのエネルギーに支配され、プラント設計においては主蒸気逃がし安全弁排気管の吹き出し圧力を考慮した荷重を設定している。重大事故時における排気管内のガス量や吹き出し圧力は、設計基準事故時と同等か、温度上昇に伴う排気管内のガス密度の低下によって低下する傾向にあると考えられるため、気泡振動荷重がプラント設計条件よりも厳しくなることはない。

(b)の蒸気凝縮振動荷重については、排気管に設置されているクエンチャの効果により安定した蒸気凝縮が行われることから、気泡振動荷重と比較しても十分小さく、また、サプレッション・プール水のサブクール度の変化によっても不安定凝縮が発生しない事が、過去の試験において確認されている。(図5参照)

これらの検討結果から、重大事故等時におけるサプレッション・チェンバ動荷重の影響は、プラント設計時に考慮している動荷重の影響と同等レベルであると考えられる。



図5 蒸気凝縮時の圧力変動と水温の関係

モデル化している各部位の耐震性について

原子炉格納容器バウンダリを構成する各機器について、基準地震動 S_s に対する耐震性を示すため、地震時の発生応力と供用状態 D_s の評価基準値を比較した。その結果、全ての評価部位において発生応力は、評価基準値を下回っており、評価対象部位は地震に対して健全性を有していると考えられる。(表 1 参照)

なお、フランジ部については、フランジ面がボルトで固定されており、地震時にはフランジ接合された部位同士が一体として加振されるため、地震によってフランジ部応力は発生しないと評価している。

表 1 地震時の原子炉格納容器各機器における発生応力

単位：MPa

| 評価機器 | 一次応力 | | |
|-----------------------------|------------------|------|----------------------|
| | 応力分類 | 発生応力 | 供用状態 D_s における評価基準値 |
| ドライウエル上鏡板 | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 380 |
| ドライウエル円錐胴 | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 380 |
| サプレッション・ チェンバ円筒胴 | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 387 |
| 機器搬入用ハッチ | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 380 |
| サプレッション・ チェンバアクセス ハッチ | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 387 |
| 所員用エアロック | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 380 |
| 配管貫通部 | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 344 |
| 電気配線貫通部 | 一次局部膜＋ 一次曲げ応力 | | 356 |

フランジ部の永久変形の評価について

原子炉格納容器バウンダリの健全性評価のうち、開口評価を行っているものに対して、事故時の原子炉格納容器過圧状態における開口により、永久変形が生じないことを示す。

開口影響がある部位の評価として、200℃、2Pdにおけるフランジ部の変形によるフランジ部の発生応力を算出し、供用状態Cにおける評価基準値と比較した。その結果、全てのフランジ部の発生応力が供用状態Cにおける評価基準値を下回っており、永久変形が生じないことを確認した。

<評価対象>

- ① トップヘッドフランジ
- ② 機器搬入用ハッチ
- ③ サプレッション・チェンバアクセスハッチ
- ④ 所員用エアロック

① トップヘッドフランジ

トップヘッドフランジについて、既工認と同様の評価手法を用いて算出したフランジ及びボルトの発生応力が、供用状態Cにおける評価基準値を下回ることを確認する。

トップヘッドフランジの評価結果を第1表に示す。発生応力は供用状態Cにおける評価基準値を下回っており、永久変形は生じない。

第1表 トップヘッドフランジの評価結果

単位：MPa

| 荷重 | 発生応力 | | | 供用状態Cにおける 評価基準値 |
|--------------|---------------|---------------------------------|-----|--------------------|
| | | | | |
| 2Pd | フランジの軸方向応力 | σ_H | 185 | 339 |
| | フランジの径方向応力 | σ_R | 2 | 226 |
| | フランジの周方向応力 | σ_T | 86 | 226 |
| | 組合せ応力 | $\frac{\sigma_H + \sigma_R}{2}$ | 94 | 226 |
| | | $\frac{\sigma_H + \sigma_T}{2}$ | 136 | 226 |
| 使用状態でのボルトの応力 | σ_{b0} | 247 | 423 | |

② 機器搬入用ハッチ

機器搬入用ハッチのフランジ部について、既工認と同様の評価手法を用いて算出したフランジの発生応力が、供用状態Cにおける評価基準値を下回ることを確認する。

機器搬入用ハッチフランジの評価結果を第2表に示す。発生応力は供用状態Cにおける評価基準値を下回っており、永久変形は生じない。

第2表 機器搬入用ハッチフランジの評価結果

材質：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

| | | |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------|
| S | 供用状態Cにおける評価基準値 (MPa) | 226 |
| M _P | 内圧によるモーメント (N・mm/mm) | 2.112×10 ⁴ |
| R _m | フランジ平均半径 (mm) | <input type="text"/> |
| b | フランジ幅 (mm) | <input type="text"/> |
| h | フランジ高さ (mm) | <input type="text"/> |
| I | フランジの断面二次モーメント (mm ⁴) | 4.22×10 ⁷ |
| σ | 発生応力 (MPa) | 87 |

③ サプレッション・チェンバアクセスハッチ

サプレッション・チェンバアクセスハッチフランジ部について、既工認と同様の評価手法を用いて算出したフランジの発生応力が、供用状態Cにおける評価基準値を下回ることを確認する。

サプレッション・チェンバアクセスハッチの評価結果を第3表に示す。発生応力は供用状態Cにおける評価基準を下回っており、永久変形は生じない。

第3表 サプレッション・チェンバアクセスハッチフランジ部の評価結果

材質：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

| | | |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------|
| S | 供用状態Cにおける評価基準値 (MPa) | 226 |
| M _P | 内圧によるモーメント (N・mm/mm) | 5.038×10 ³ |
| R _m | フランジ平均半径 (mm) | <input type="text"/> |
| b | フランジ幅 (mm) | <input type="text"/> |
| h | フランジ高さ (mm) | <input type="text"/> |
| I | フランジの断面二次モーメント (mm ⁴) | 1.14×10 ⁷ |
| σ | 発生応力 (MPa) | 29 |

④ 所員用エアロック

所員用エアロックの隔壁部は、既工認において、最も厳しい応力点を代表評価点として、発生応力を算出している。それに基づき供用状態Cの評価基準値との比を算出し、設計圧力に対する裕度を求め、その比を設計圧力に乗ずることで所員用エアロック部の許容圧力が求まる。この許容圧力が2Pdを上回ることを確認する。

応力評価結果を第4表に示す。許容圧力は2Pdを上回り、永久変形は生じない。

第4表 所員用エアロックの評価結果

材質：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

許容圧力算定式：

$$\alpha = S / \sigma$$

$$P = P_D \times \alpha$$

| | | |
|--------------------------|----------------------|-------|
| σ | 既工認での発生応力 (MPa) | 89 |
| S | 供用状態Cにおける評価基準値 (MPa) | 339 |
| α | 発生応力と評価基準値との比 | 3.808 |
| P_D | 設計圧力 (MPa) | 0.279 |
| P | 許容圧力 | 1.062 |
| 1.062MPa > 0.62MPa (2Pd) | | |

200 °C, 2 Pd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

1. 概要

有効性評価における格納容器温度・圧力の判断基準（評価項目）は200 °C, 2 Pdと設定しており、200 °C, 2 Pdの状態が継続することを考慮した評価が必要な部位はシール部である。このため、シール部については、200 °C, 2 Pdの状態が7日間（168時間）継続した場合でもシール機能に影響がないことを確認することで、限界温度・圧力における格納容器閉じ込め機能の健全性を示している。

ここでは、200 °C, 2 Pdを適用可能な7日間（168時間）以降においても、有効性評価で得られている厳しい条件を考慮し、格納容器の閉じ込め機能を示す。

また、上記に加えて、7日間（168時間）以降の累積放射線照射量についても、格納容器の閉じ込め機能に影響がないことを確認する。

2. 7日間（168時間）以降の圧力、温度の条件

7日間（168時間）以降において、格納容器圧力が最も高くなるのは、「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する場合のシーケンス及び「高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」で想定されるシーケンスである。これらのシーケンスは、格納容器内酸素濃度が4.0 vol%（ドライ条件）に到達した時点で、格納容器内酸素濃度上昇による格納容器ベントを遅延するため、310 kPa[gage]までサブプレッション・チェンバへの窒素注入を行う手順としており、表1で示すとおり、7日間（168時間）以降の格納容器圧力は最大で310 kPa[gage]となる。代表的に、「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する場合のシーケンスにおける格納容器圧力の推移を図1に示す。

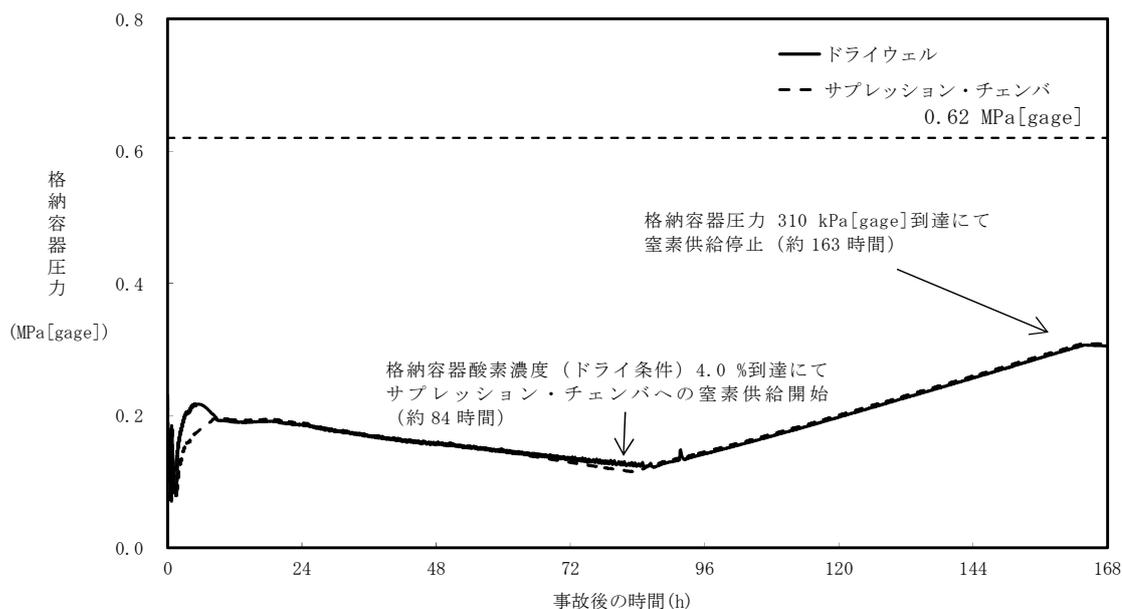


図1 格納容器圧力（「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において代替循環冷却系を使用する場合）

7日間（168時間）以降の格納容器雰囲気温度が最も高くなるのは、「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できない場合のシナリオである。このシナリオの格納容器雰囲気温度の推移を図2に示すが、7日間（168時間）時点で150℃未満であり、その後の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、第1表で示すとおり7日間（168時間）以降は150℃を下回る。また、格納容器バウンダリにかかる温度（壁面温度※）についても、事象発生後3.9時間後に生じる最高値は157℃であるが、7日間以降は150℃を下回る。

※：評価に用いているMAAPコードは、FP沈着に伴う発熱を考慮したものとなっている。格納容器内のFP挙動については、原子力安全基盤機構（JNES）の「シビアアクシデント時格納容器内多次元熱流動及びFP挙動解析」において、FPのほとんどが原子炉キャビティ内の床や壁表面にとどまり、格納容器全体に飛散することがないことが確認されており、健全性が維持されたシール部等の貫通部への局所的なFP沈着は発生しにくく、MAAPコードによる壁面温度の結果は妥当と考える。

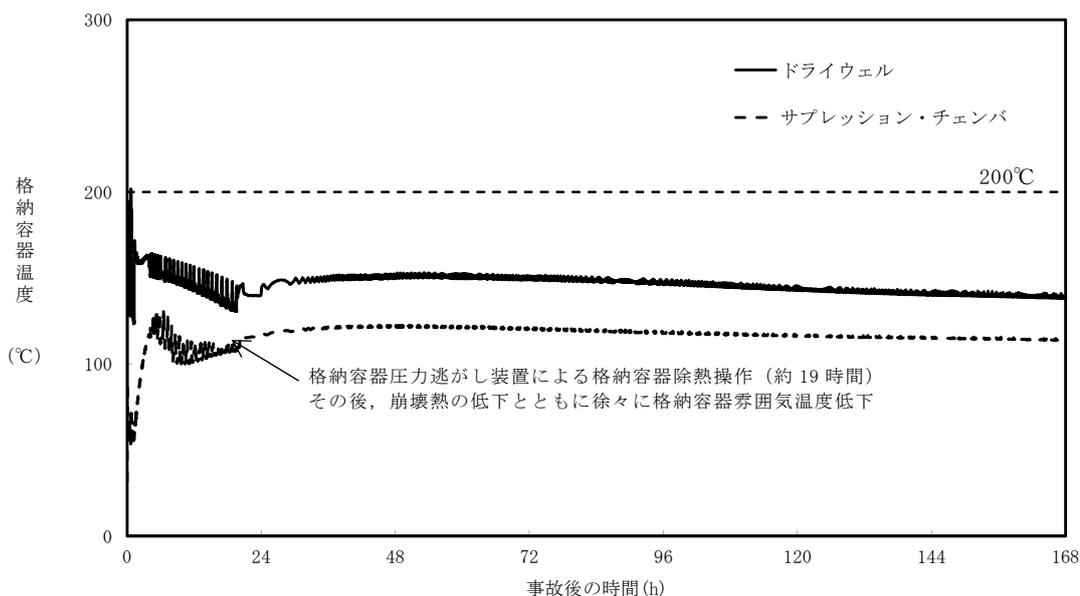


図2 格納容器雰囲気温度（「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において代替循環冷却系を使用できない場合）

表1 事故発生後の経過時間と格納容器圧力・温度，累積放射線照射量の関係

| 事故発生後の経過時間 | 0～168 時間 | 168 時間以降 |
|------------|---------------------------------|---|
| 格納容器圧力 | 評価項目として 2Pd(620kPa[gage])を設定 | 有効性評価シナリオで 最大310kPa[gage]となる (MAAP解析結果) |
| 格納容器温度 | 評価項目として 200℃を設定 | 有効性評価シナリオで 150℃を下回る (MAAP解析結果) |

3. 7日間（168時間）以降の格納容器圧力・温度と閉じ込め機能の関係について

3.1 7日間（168時間）以降の格納容器圧力と閉じ込め機能の関係について

時間経過により、格納容器の健全性に影響を及ぼす部位はシール部のシール材である。シール部の機能維持は、図3の模式図に示すとおり、格納容器内圧力の上昇に伴うフランジ部の過渡的な開口挙動に対し、シール材料の復元量が十分に確保されていることをもって確認している。つまり、格納容器温度によるシール材の熱劣化を考慮しても、圧縮永久ひずみ試験結果によりシール材の復元量が十分であれば、シール部の機能は健全である。長期のケースとして、有効性評価シナリオにおいて168時間時の格納容器圧力が高い代替循環冷却系運転ケースを評価しても、格納容器圧力は約0.31 MPaであり開口量は小さい（表2参照）。なお、復元量の具体的な評価は、格納容器温度に関係することから3.2で示す。

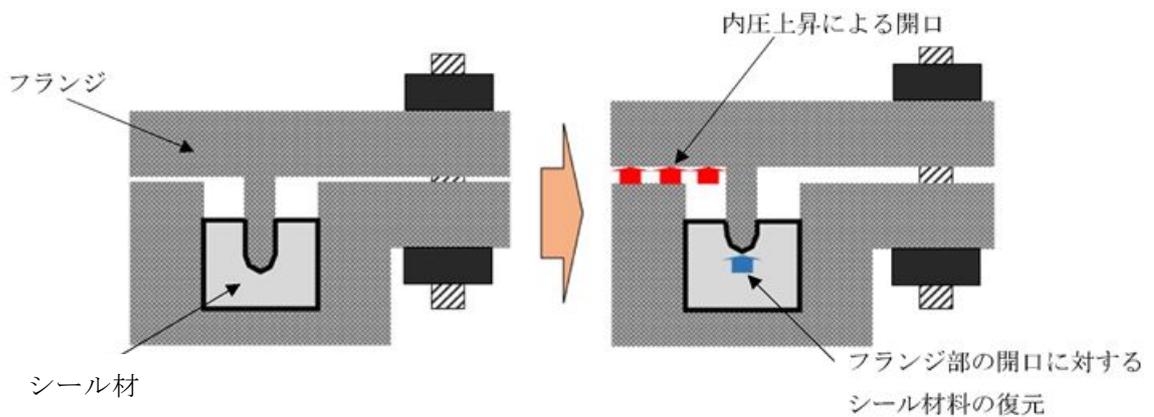


図3 シール部の機能維持確認の模式図

表 2 格納容器圧力と開口量の関係

| フランジ部位 | 溝 | 168時間時 1Pd (0.31MPa) | 2Pd (0.62MPa) |
|--------------------------|----|-------------------------|---------------|
| トップヘッド フランジ | 内側 | | |
| | 外側 | | |
| 機器搬入用ハッチ | 内側 | | |
| | 外側 | | |
| サブプレッション・チェ ンバアクセスハッチ | 内側 | | |
| | 外側 | | |

3.2 7日間（168時間）以降な格納容器温度と閉じ込め機能の関係について

格納容器温度の上昇に伴う、時間経過によるシール材の長期的（格納容器温度が 150 °Cを下回る状況）な影響を調査する。ここでは、トップヘッドフランジや機器搬入用ハッチ等に使用されている改良EPDM製シール材を用いて、168時間以降の温度・時間とシール材料の劣化挙動を確認するため、シール材の基礎特性試験を実施した。試験結果を表3に示す。

表3 改良EPDM製シール材の基礎特性データの経時変化

| 試験時間 | 0～7 日 | 7 日～14 日 | 14 日～30 日 |
|--------------|-------|----------|-----------|
| 試験温度 | 200℃ | 150℃ | 150℃ |
| 圧縮永久ひずみ率 [%] | | | |
| 硬さ | | | |
| 質量変化率 [%] | | | |

注記：γ線 1.0 MGy 照射済の試験体を用い，飽和蒸気環境下に暴露した後の測定値

表3に示すように，168時間以降，150℃の環境下においては，改良EPDM製シール材の基礎特性データにはほとんど変化はなく，経時劣化の兆候は見られない。したがって，重大事故後168時間以降における格納容器の温度を150℃と設定した場合でも，シール部の機能は十分維持される。なお，EPDM材は一般特性としての耐温度性は150℃であり，表3の結果は改良EPDM製シール材が200℃条件を7日間経験しても，一般特性としての耐熱温度まで低下すれば，それ以降は有意な劣化傾向は見られないことを示していると考えられる。また，表3の結果から圧縮永久ひずみ [] 時の改良EPDM製シール材復元量とフランジ開口量のイメージを図4に示しており，表2で示す168時間以降の格納容器圧力に対しても十分追従可能な復元量を維持していることも確認できる。

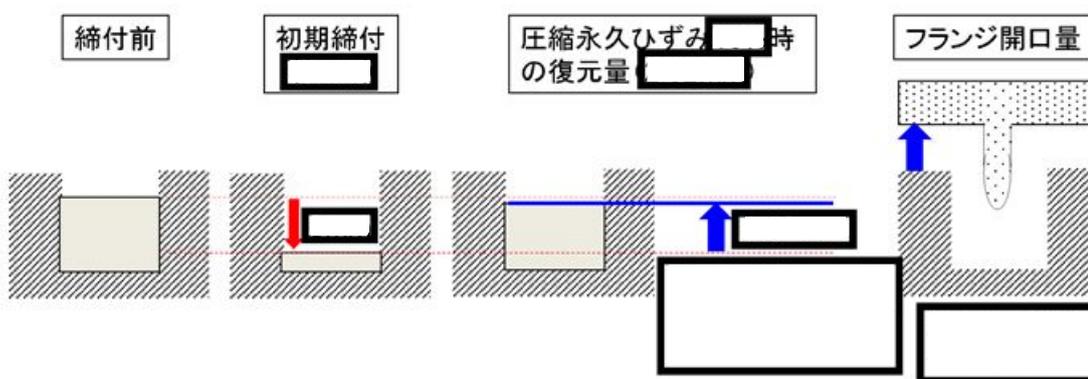


図4 圧縮永久ひずみ [] 時のシール材復元量とフランジ開口量

4. 7日間（168時間）以降の格納容器の閉じ込め機能について

2. で示したように有効性評価結果からも、7日間（168時間）以降は格納容器温度が改良EPDM製シール材の一般特性としての耐熱温度である150℃を下回ることが判っている。また、格納容器圧力についてもベント操作の有無に関わらず圧力は低下しており、開口量は2Pd時と比較しても小さいことが確認できている。なお、代替循環冷却系を使用するシーケンスの場合、中長期的には、水の放射線分解によって生じる水素と酸素が格納容器圧力の上昇に寄与するが、酸素濃度がドライ条件で4.3 vol%に到達した場合にはベントを実施することとしていることから、格納容器圧力は1 Pdから数十kPaまでの上昇にとどまる。

よって、格納容器温度・圧力が評価項目（200℃・2 Pd）にて7日間経験してもシール材が問題ないことを確認することで、長期の格納容器閉じ込め機能を確保できる。

7日間（168時間）以降の格納容器の閉じ込め機能については、格納容器圧力・温度は低下していること、及び代替循環冷却系を使用するシーケンスにおける中長期的な水の放射線分解に伴う水素と酸素の発生に寄与も大きくないことから、最初の7日間（168時間）に対して200℃・2Pdを超えないよう管理することで、長期的な格納容器閉じ込め機能は維持される。ただし、事故環境が継続することにより、熱劣化等の閉じ込め機能低下要因が存在することも踏まえ、長期的なプラントマネジメントの目安として、7日間（168時間）以降の領域においては、格納容器温度が150℃を超えない範囲で、また、格納容器圧力は1 Pd程度（1 Pd+数十kPa^{*}）以下でプラント状態を運用する。

※：酸素濃度をドライ換算で4.3 vol%以下とする運用の範囲

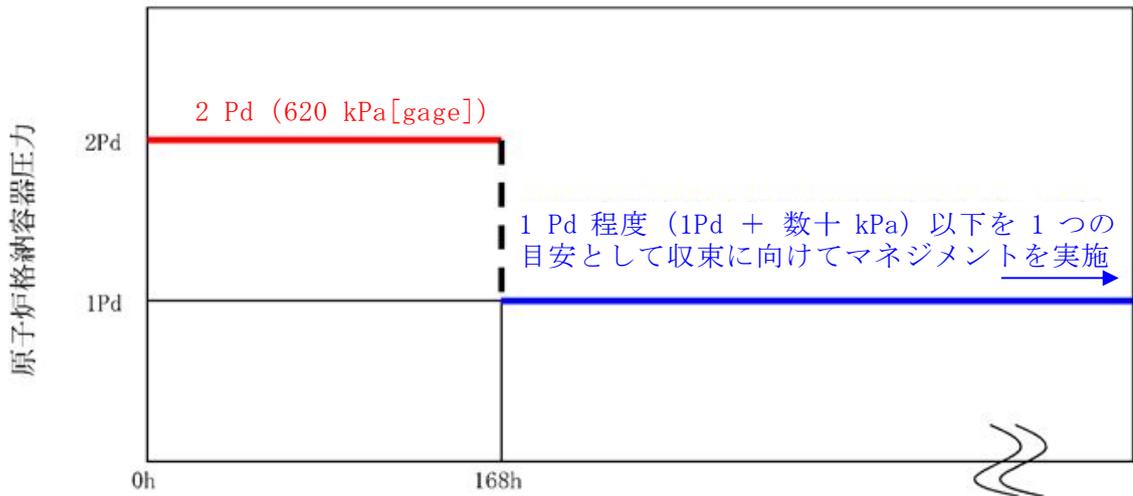


図5 格納容器圧力の168時間以降の考え方



図6 格納容器温度の168時間以降の考え方

6. 7日間（168時間）以降な放射線照射量と閉じ込め機能の関係について

時間経過によるシール材の長期的な影響を調査する。ここでは、トップヘッドフランジや機器搬入用ハッチ等に使用されている改良EPDM製シール材を用いて、168時間以降の累積放射線照射量・時間とシール材料の劣化挙動を確認するため、シール材の基礎特性試験を実施した。試験結果を表4に示す。累積放射線照射量による影響は、試験結果より、有意な変化がないことから、7日間以降のシール機能は、維持できる。

表4 改良EPDM製シール材の累積放射線照射量とひずみ率の関係

| 累積放射線照射量 | ひずみ率 |
|----------|------|
| | |

試験条件

雰囲気：蒸気環境

温度・劣化時間：200℃・168時間＋150℃・168時間

原子炉格納容器貫通部リスト (1/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|-----|---------|--------------|---------|-----------|-------|---------|----|
| | | | 口径 [mm] | 厚さ t [mm] | t/D | 高さ [EL] | 角度 |
| ハッチ | X-15 | クイップメントハッチ | 3658 | —* | —* | | |
| | X-16 | パーソネル・エア・ロック | 2400 | —* | —* | | |
| | X-28 | CRD ハッチ | 609.6 | 31.0 | 0.051 | | |
| | X-51 | アクセスハッチ | 1982 | —* | —* | | |

※当該貫通部は、配管貫通部以外の評価対象であり、代表性として不要な情報であるため、「—」とする。

| 分類 | 貫通部 No. | 用途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|----------------------------------|--------------|--|------|-----------|-------|---------|----|
| | | | 口径 | 厚さ t [mm] | t/D | 高さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部 【プロセス配管貫通部 (ドライウエル)】 | X-2 | RPV ヘッドスプレイ | 22B | 29.0 | 0.052 | | |
| | X-3 | ドライウエル排気系 2-26B-12, 2-26V-9, 150, 153 | 20B | 26.2 | 0.052 | | |
| | X-5 | RCW 送り (2-9V33) | 8B | 12.7 | 0.059 | | |
| | X-6 | HPCS | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-7 | 予備 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-8 | LPCS | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-11A | RHR (A) | 16B | 21.4 | 0.053 | | |
| | X-11B | RHR (B) | 16B | 21.4 | 0.053 | | |
| | X-12A | LPCI (A) | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-12B | LPCI (B) | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-12C | LPCI (C) | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-13 | SLC | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-14 | CUW ホンフ吸込 | 22B | 29.0 | 0.052 | | |
| | X-17A | FDW (to RPV) | 36B | 51.0 | 0.056 | | |
| X-17B | FDW (to RPV) | 36B | 51.0 | 0.056 | | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (2/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|----------------------------------|---------|----------------------------------|------|---------|-------|---------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部 【プロセス配管貫通部 (ドライウエル)】 | X-18A | MS (to Turbin) | 44B | 51.0 | 0.046 | | |
| | X-18B | MS (to Turbin) | 44B | 51.0 | 0.046 | | |
| | X-18C | MS (to Turbin) | 44B | 51.0 | 0.046 | | |
| | X-18D | MS (to Turbin) | 44B | 51.0 | 0.046 | | |
| | X-19A | RHR SDC 戻り | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-19B | RHR SDC 戻り | 28B | 39.0 | 0.055 | | |
| | X-20 | RHR SDC | 36B | 51.0 | 0.072 | | |
| | X-21 | 蒸気 (to RCIC Turbin) | 26B | 39.0 | 0.059 | | |
| | X-22 | 復水ドレン | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-26 | 予備 | 16B | 21.4 | 0.053 | | |
| | X-43 | 予備 | 6B | 11.0 | 0.067 | | |
| | X-46 | RCW 戻り (2-9V30) | 8B | 12.7 | 0.059 | | |
| | X-52A | FCS (A) & 予備 | 20B | 26.2 | 0.052 | | |
| | X-52B | FCS (B) & 予備 | 20B | 26.2 | 0.052 | | |
| | X-53 | ドライウエル給気系 2-26B-2, 9/2-26V-16 | 20B | 26.2 | 0.052 | | |
| | X-55 | N ₂ ガス供給系&FPC | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-56 | 予備&N ₂ ガス供給系, DHC | 26B | 39.0 | 0.059 | | |
| | X-57 | FP系&N ₂ ガス供給系 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-58 | 補給水系 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-76 | to FCS (A) | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| X-81 | 予備 | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | | |
| X-107B | DHC 入口 | 12B | 17.4 | 0.055 | | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (3/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用 途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|--------------------------------|--|------------------------|------|------------|-------|-------------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高 さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部【プロセス配管貫通部(サブレーション・チェンバ)】 | X-4 | RCIC | 14B | 19.0 | 0.053 | | |
| | X-23 | FLOOR DRAIN SUMP | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| | X-24 | EQUIPMENT DRAIN SUMP | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| | X-25A | RHR(A) | 4B | 8.6 | 0.075 | | |
| | X-25B | RHR(B) | 4B | 8.6 | 0.075 | | |
| | X-31 | HPCS SUCTION | 24B | 31.0 | 0.051 | | |
| | X-32 | RHR(B) SUCTION | 24B | 31.0 | 0.051 | | |
| | X-33 | RCIC SUCTION | 8B | 12.7 | 0.059 | | |
| | X-34 | LPCS SUCTION | 24B | 31.0 | 0.051 | | |
| | X-35 | RHR(A) SUCTION | 24B | 31.0 | 0.051 | | |
| | X-36 | RHR(C) SUCTION | 24B | 31.0 | 0.051 | | |
| | X-47 | RHR(A), RCIC | 16B | 21.4 | 0.053 | | |
| | X-48 | RHR(B), ML | 16B | 21.4 | 0.053 | | |
| | X-49 | HPCS TEST | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-59 | 予備 | 16B | 21.4 | 0.053 | | |
| | X-60 | RHR(A) Hx 安全弁排 気の閉止 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-62 | RHR(B) Hx 安全弁排 気の閉止 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-63 | LPCS TEST, RHR(A) | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-77 | RCIC | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-78 | OIL DRAIN SUMP | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| X-79 | サブレーション・チェンバ 排 気系(AC系) 2-26B-10, 11, 2- 26V152, 155 | 20B | 26.2 | 0.052 | | | |
| X-80 | サブレーション・チェンバ 給 気系(AC系) 2-26B-3, 4, 5, 6, 7 2-26V-18, 19, 69, 70 | 20B | 26.2 | 0.052 | | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (4/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用 途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------|------------|-------|-------------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高 さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部 【計装配管貫通部 (ドライウエル)】 | X-9A | CRD 引抜 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-9B | CRD 引抜 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-9C | CRD 引抜 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-9D | CRD 引抜 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-10A | CRD 挿入 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-10B | CRD 挿入 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-10C | CRD 挿入 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-10D | CRD 挿入 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-27A | 移動式炉心内校正 装置ドライブ | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | |
| | X-27B | 移動式炉心内校正 装置ドライブ | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | |
| | X-27C | 移動式炉心内校正 装置ドライブ | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | |
| | X-27D | 移動式炉心内校正 装置ドライブ | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | |
| | X-27E | 移動式炉心内校正 装置ドライブ | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | |
| | X-27F | 移動式炉心内校正 装置ドライブ | 1 1/2B | 5.1 | 0.105 | | |
| | X-29A | γラジエーションセンサ CH-A | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-29B | γラジエーションセンサ CH-B | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-29C | AC, PASS, CAMS, RPV フランジリークオフ | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-29D | CAMS, PLR, MS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-30 | MS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-37A | AC (2-26V213, 214) | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| X-37B | シールドロー L/T (2- 26V215, 216) | 2B | 5.5 | 0.091 | | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (5/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|------|---------|-------|---------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部 【計装配管貫通部 (ドライウエル)】 | X-38 | ドライウエル圧力測定用, PLR, MS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-39 | NB/CRD-dp, HPCS-dp | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-40 | ドライウエル圧力測定用, CAMS, MSPCV-L/T 盤 | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-41A | RCIC | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-41B | RCIC | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-42 | ドライウエル圧力測定用, MSIV-LCS, MS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-44A | J/P | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-44B | J/P, PASS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-44C | J/P | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-44D | J/P | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-54A | ドライウエル圧力測定用, PLR | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-54B | PLR | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-54C | ドライウエル圧力測定用, MSIV-LCS, PLR | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-54D | PLR | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-66A | RHR, LPCS, ホトムライナー L/T 盤 | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-66B | RHR | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-69A | PLR HPU ライン | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-69B | PLR HPU ライン | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-73 | O ₂ 測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-74 | O ₂ 測定用, FP モニタ | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| X-75 | O ₂ 測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (6/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用 途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|--------------------------------|------------|---------------------------|------|------------|-------|-------------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高 さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部 【計装配管貫通部 (ドライウエル)】 | X-84A | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-84B | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-84C | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-84D | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-85A | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-85B | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-86A | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-86B | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-86C | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-86D | 水位計 | 1B | 4.5 | 0.132 | | |
| | X-87 | MS, 炉心 dpt-N005 | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-88 | MS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-89 | MS, CUW, NB | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-90 | ドライウエル圧力測定 用, CAMS, MS | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-203 | FCS | 2B | 5.5 | 0.091 | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (7/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用 途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|--|------------|--|------|------------|-------|-------------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高 さ [EL] | 角度 |
| 配管貫通部 【計装配管貫通部(サブ レクション・チェンバ)】 | X-64A | サブレクション・チェンバ 水位測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-64B | サブレクション・チェンバ 水位測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-64C | サブレクション・チェンバ 水位測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-64D | サブレクション・チェンバ 水位測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-65 | 予備 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-67 | 予備 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-68 | 予備 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-70 | サブレクション・チェンバ 圧力測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-71A | 真空破壊弁 N ₂ ガス供給系 | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-71B | 真空破壊弁 N ₂ ガス供給系 | 10B | 15.1 | 0.056 | | |
| | X-82 | O ₂ 測定用 | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-83 | O ₂ 測定用, FP モニタ, PASS, CAMS | 2B | 5.5 | 0.091 | | |
| | X-200A | MSIV LCS | 4B | 8.6 | 0.075 | | |
| | X-200B | MSIV LCS | 4B | 8.6 | 0.075 | | |
| | X-201A | 予備 | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| | X-201B | 予備 | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| | X-202A | 予備 | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| | X-202B | 予備 | 3B | 7.6 | 0.085 | | |
| | X-230 | 計測 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |

原子炉格納容器貫通部リスト (8/8)

| 分類 | 貫通部 No. | 用 途 | スリーブ | | | 取り付け位置 | |
|---------------------|------------|----------|------|------------|-------|-------------|----|
| | | | 口径 | 厚さ [mm] | t/D | 高 さ [EL] | 角度 |
| 電気配線貫通部 (ドライウエル) | X-100A | 中性子検出等 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-100B | 中性子検出等 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-100C | 中性子検出等 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-100D | 中性子検出等 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-101A | PLRポンプ電源 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-101B | PLRポンプ電源 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-101C | PLRポンプ電源 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-101D | PLRポンプ電源 | 18B | 23.8 | 0.052 | | |
| | X-102A | 指示&制御 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-102B | 指示&制御 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-103 | 計測 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-104A | CRD位置指示用 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-104B | CRD位置指示用 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-104C | CRD位置指示用 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-104D | CRD位置指示用 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-105A | 電源&出力 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-105B | 電源&出力 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-105C | 電源&出力 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-105D | 電源&出力 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| | X-106A | 予備 | 12B | 17.4 | 0.055 | | |
| X-106B | 指示&制御 | 12B | 17.4 | 0.055 | | | |
| X-107A | 指示&出力 | 12B | 17.4 | 0.055 | | | |