

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PS-3-4 改1
提出年月日	平成29年9月6日

東海第二発電所

原子炉格納容器の限界温度・圧力

(指摘事項に関する回答)

平成29年9月
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

原子炉格納容器の限界温度・圧力に関するコメント回答資料

No.	番号	分類	審査会合コメント	審査 会合日	備考
1	497-1	個社	NUPEC 試験の適用性について、東海第二の解析モデルが同試験で評価した格納容器の破壊挙動を適切に模擬できていることを説明すること。	H29. 8. 22	回答 (497-1)
2	497-1	個社	日本機械学会「シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン（BWR 鋼製格納容器編）BSCV-3100」を適用できる根拠を説明すること。 （破壊挙動を模擬するためのモデル化（メッシュの切り方、補正係数 β の貫通部毎の差異の有無等）や構造不連続部のモデル化に関する説明を充実すること。	H29. 8. 22	回答 (497-2)
3	497-1	個社	トップヘッドフランジの定格締め付量を 3.0mm で管理している点について、手作業に起因する誤差が定格締め付け量の管理に対して有意な影響を与えないこと（トルク管理との関係含む）、また作業員が変わる際にも、管理値に対する品質の維持が保たれることについて、管理方法等の実現性を説明すること。その際、従前のシールでの実績がどの程度のものか、ヘッドフランジの凸部が現状でも均一性を保っているのか等、40 年程度経過している実績も考慮し説明すること。	H29. 8. 22	回答 (497-3)
4	497-1	個社	改良 EPDM について、東二としてどのような性質の材料を使用しようとしているのか、東二に適用できる根拠と、メーカーの開発で製品に変更が生じて、対象とする改良 EPDM	H29. 8. 22	回答 (497-4)

			が特定できるよう，考え方（定義）を説明すること。		
5	497-1	個社	圧縮ひずみ試験の供試体の試験について，結果にばらつきがある中で平均値をとることとしているが，シール材の管理値のスケール感を鑑みれば厳しい値を採用すべきであり，見直した結果について説明すること。	H29. 8. 22	回答 (497-5)
6	497-1	個社	押し込み試験について，環境条件（蒸気環境，乾燥環境），試験体（母材）の厚さ，押込量などはシール材を適用する箇所により異なるため，結果を一様に適用できるのか。根拠を整理して説明すること。	H29. 8. 22	回答 (497-6)
7	497-1	個社	電気配線貫通部のモジュール試験については，電気ペネ共研は試験実施時間が7日間に比べ十分ではなく，他方，13日間の試験を行っている「過去の環境試験」については評価条件・結果等の説明が十分ではないため，説明を充実すること。	H29. 8. 22	回答 (497-7)
8	497-1	個社	トップヘッドフランジのシール部に関し，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，内圧により内側ガスケット部の閉じ込め機能が失われる評価となっているが，当該閉じ込め機能は内外の二重のシールが機能することを設計上期待していることから，予め開口が認められる評価が得られている場合は，ガスケット設計を適切に見直すこと。（トップヘッドフランジ以外のフランジに対しても，製作公差を考慮した上で閉じ込め機能が維持できているか，説明すること）	H29. 8. 22	回答 (497-8)

回答 (497-1)

1. 指摘事項

497-1	NUPEC 試験の適用性について、東海第二の解析モデルが同試験で評価した格納容器の破壊挙動を適切に模擬できていることを説明すること。
-------	--

2. 回答

見直し中。

回答 (497-2)

1. 指摘事項

497-2	日本機械学会「シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン (BWR 鋼製格納容器編) BSCV-3100」を適用できる根拠を説明すること。(破壊挙動を模擬するためのモデル化 (メッシュの切り方, 補正係数 β の貫通部毎の差異の有無 等) や構造不連続部のモデル化に関する説明を充実すること。)
-------	--

2. 回答

見直し中。

回答 (497-3)

1. 指摘事項

497-3	トップヘッドフランジの定格締め付量を 3.0mm で管理するとしている点について、手作業に起因する誤差が定格締め付け量の管理に対して有意な影響を与えないこと（トルク管理との関係含む）、また作業員が変わる際にも、管理値に対する品質の維持が保たれることについて、管理方法等の実現性を説明すること。その際、従前のシールでの実績がどの程度のものか、ヘッドフランジの凸部が現状でも均一性を保っているのか等、40 年程度経過している実績も考慮し説明すること。
-------	---

2. 回答

定期検査におけるトップヘッドフランジ閉鎖時には、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ていると考えている。トップヘッドフランジ部の構造を図 1 に示す。



図 1 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ク（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、溝やタンク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クは均一性を維持していると考えている。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2、図3に示す。

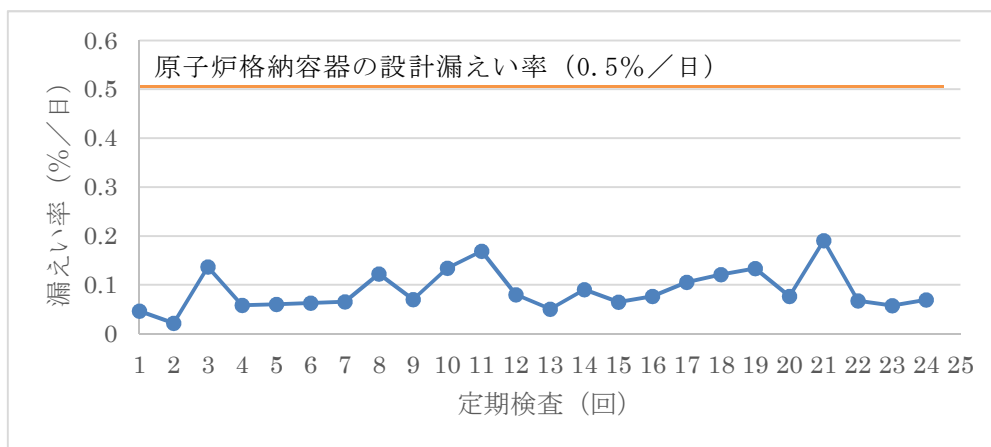


図2 原子炉格納容器全体漏えい率検査実績



図3 トップヘッドフランジ部リークテスト実績

回答 (497-4)

1. 指摘事項

497-4	改良 EPDM について、東二としてどのような性質の材料を使用しようとしているのか、東二に適用できる根拠と、メーカーの開発で製品に変更が生じても、対象とする改良 EPDM が特定できるよう、考え方（定義）を説明すること。
-------	--

2. 回答

東海第二発電所では、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、格納容器のガスケット材料として使用していたシリコンゴムの使用温度範囲は -60°C ～ $+200^{\circ}\text{C}$ であり、従来の EPDM 製シール材の一般的な使用温度範囲 -50°C ～ $+150^{\circ}\text{C}$ よりも若干高いものの、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、更なる高耐熱化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。

東海第二発電所に採用予定の改良 EPDM 製シール材

については、試験により、事故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確認している。

なお、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標準の型番品として管理されており、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で今回シール機能が確認されたものを調達することが可能である。

回答 (497-5)

1. 指摘事項

497-5	圧縮ひずみ試験の供試体の試験について、結果にばらつきがある中で平均値をとることとしているが、シール材の管理値のスケール感を鑑みれば厳しい値を採用すべきであり、見直した結果について説明すること。
-------	--

2. 回答

ゴム材料の圧縮永久ひずみ試験は、J I S K 6262「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム－常温、高温及び低温における圧縮永久ひずみの求め方」に基づき実施している。J I S K 6262では、3個の試験片を用いて同時測定した結果の平均値を圧縮永久ひずみとして評価することと定められているが、今回の評価にあたっては、保守的な評価とするために、類似の条件における試験結果から統計学的なばらつきを考慮し、圧縮永久ひずみ値を評価する。

表1に、今回の評価で実施した200℃、168時間劣化後の圧縮永久ひずみ試験の結果と、統計学的なばらつきの評価結果を示す。

表1に示すとおり、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場合、圧縮永久ひずみの最大値は□と評価でき、この値を用いた場合であってもシール機能が維持可能であることを確認している。

表 1 圧縮永久ひずみ試験結果

ひずみ率	平均値	標準偏差 σ	平均値 + 2 σ

注記：試験条件は以下の通り

照射線量：

雰囲気：蒸気環境

温度・劣化時間：200℃・168hr

メーカーカタログ値として圧縮永久ひずみ の記載がある。この値は、
 程度のばらつきで得られた試験結果である。

一方、本評価における圧縮永久ひずみは、原子カ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
 168hr 劣化させた状態での測定値であり、ガスケット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。

回答 (497-6)

1. 指摘事項

497-6	押し込み試験について、環境条件（蒸気環境，乾燥環境），試験体（母材）の厚さ，押込量などはシール材を適用する箇所により異なるため，結果を一様に適用できるのか。根拠を整理して説明すること。
-------	--

2. 回答

圧縮永久ひずみ試験については，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ガスケット単体の劣化度（ひずみ率）から復元量を確認するものであり，フランジ構造の違いは構造部の開口量計算において評価しているものと考えます。

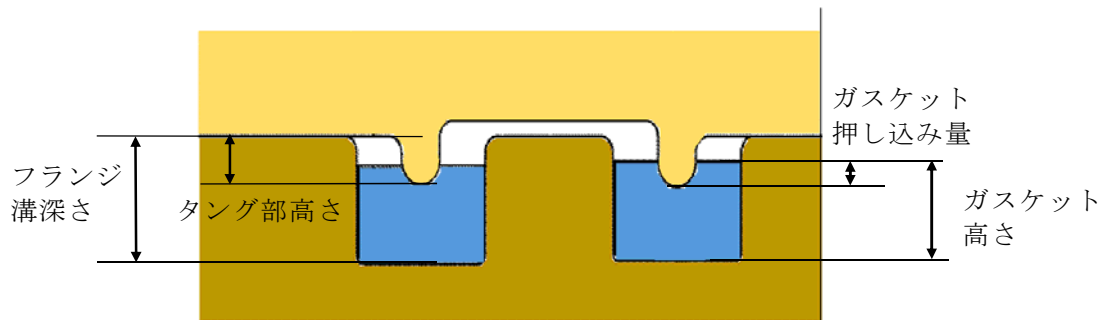
実機フランジ模擬試験については，圧力の上昇に伴い試験体を開口させているわけではなく，内圧上昇後にフランジが開口した状態を想定し，ガスケットの復元量とフランジの開口量が等しい状態（押込み量が 0mm で接している状態）でのシール性を確認しているものであり，フランジ構造による開き方向の違いは構造部の開口量計算において評価しているものと考えます。

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を表 1 に示す。フランジガスケット部はガスケットの圧縮率がほぼ一定値となるように設計されている。これに対して，本評価で実施した圧縮永久ひずみ試験においても試験片の圧縮率は としており，その他試験時の環境温度・雰囲気については実機におけるシール材の環境を模擬している。

したがって，圧縮永久ひずみ試験により得られた材料の復元特性を実機の開口量評価に用いることは妥当である。

表1 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%

回答 (497-7)

1. 指摘事項

497-7	電気配線貫通部のモジュール試験については、電気ペネ共研は試験実施時間が7日間に比べ十分ではなく、他方、13日間の試験を行っている「過去の環境試験」については評価条件・結果等の説明が十分ではないため、説明を充実すること。
-------	---

2. 回答

電気配線貫通部のモジュール部に対するシール機能評価については、「電気ペネ共研の試験結果を用いた評価」及び「過去の環境試験結果を用いた評価」を行っている。

このうち、「電気ペネ共研の試験結果を用いた評価」については、加速熱劣化した際の実環境条件における換算時間を予測式であるアレニウス式を用いて評価することにより、いずれの評価においても重大事故環境下で7日間以上の健全性を有していることを確認しており、いずれの評価も有効であると考え、安全側に評価する観点から「過去の環境試験結果を用いた評価」を代表的な知見として、耐環境性を評価している。

1. 電気ペネ共研の試験結果を用いた評価

電気ペネ共研において、LOCA時の圧力、温度条件を超える条件下での電気配線貫通部の知見を得るため、東海第二発電所を含む国内BWR電力実機の電気配線貫通部の構造を反映した試験体を用い、電気配線貫通部モジュールの気密性能について検証を行っている。図1に電気ペネ共研の試験概要図を、表1及び図2、図3に試験結果を示す。

試験結果より、高圧用モジュールのEPゴムシール部は194℃/62時間、低圧用モジュールの樹脂シール部は137℃/62時間の熱劣化に対して、漏

えいがないことが確認できている。

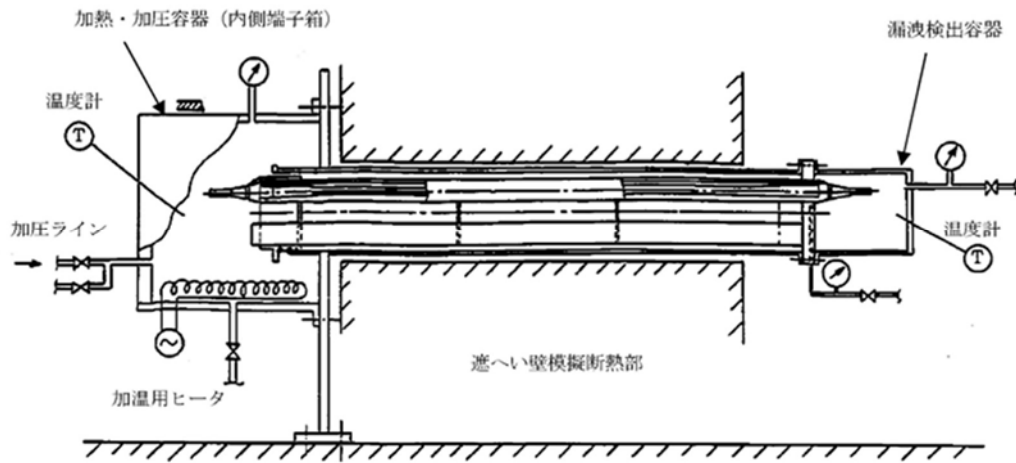


図1 電気ペネ共研の試験概要

表1 電気ペネ共研の試験結果

種類	試験条件					シール部温度(°C)／漏えい有無	
	雰囲気	温度(°C)	圧力(MPa)	放射線照射	時間(h)	一次シール	二次シール
高圧	乾熱	200(220)*	(0.61~0.79)*	なし	62	194/漏えいなし	44/漏えいなし
低圧	乾熱	200(220)*	(0.60~0.81)*	なし	62	137/漏えいなし	68/漏えいなし

※：() 内は記録グラフからの読み取り値

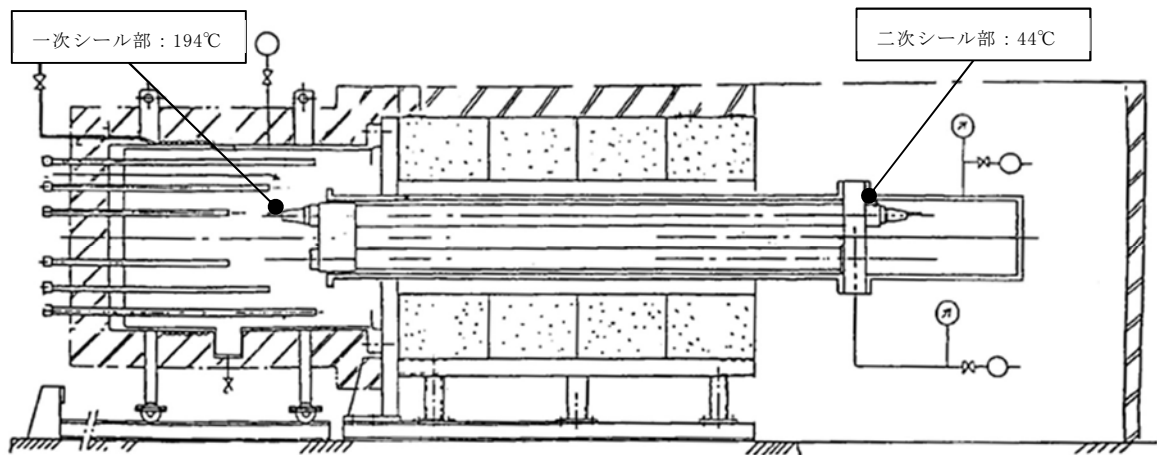


図2 高圧用モジュール試験体 温度分布図

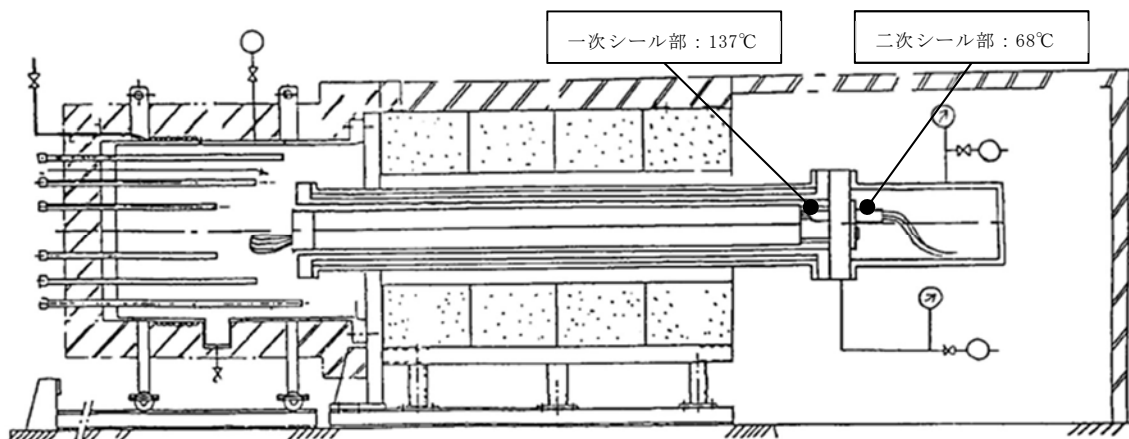


図3 低圧用モジュール試験体 温度分布図

また、試験結果の二次シール部の温度（高圧用 44℃、低圧用 68℃）に対して、余裕を考慮し保守的に 100℃と想定した場合においても、一次シール部の熱劣化条件（高圧用 194℃/62 時間、低圧用 137℃/62 時間）に対してアレニウス式により活性化エネルギー（15kcal/mol）を用いて換算評価を行うと、高圧用 3,640 時間、低圧用 384 時間となり 168 時間を上回った。

なお、有機物であるシール材の活性化エネルギーについては「原子力発電所のケーブル経年劣化ガイド（JNES-RE-2013-2049）」にて劣化処理条件として設定されている値（15kcal/mol）を使用している。この値は、過去の試験結果等におけるシール材の活性化エネルギーに比べて保守的な値であることを確認している。

2. 過去の環境試験における評価

過去の電気配線貫通部の環境試験では、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、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。電気配線貫通部（低電圧用）及び電気配線貫通部（高電圧用）の二次シール部の温度、環境試験温度を

図 4 に示す。

この試験において、原子炉格納容器内を模擬した電気ペネ共研の試験(二次シール部において高電圧用 44℃, 低電圧用 68℃) よりも厳しい温度条件下で、13 日間の健全性が確認された結果からも、格納容器が 200℃の状況において格納容器閉じ込め機能が確保できると考えている。

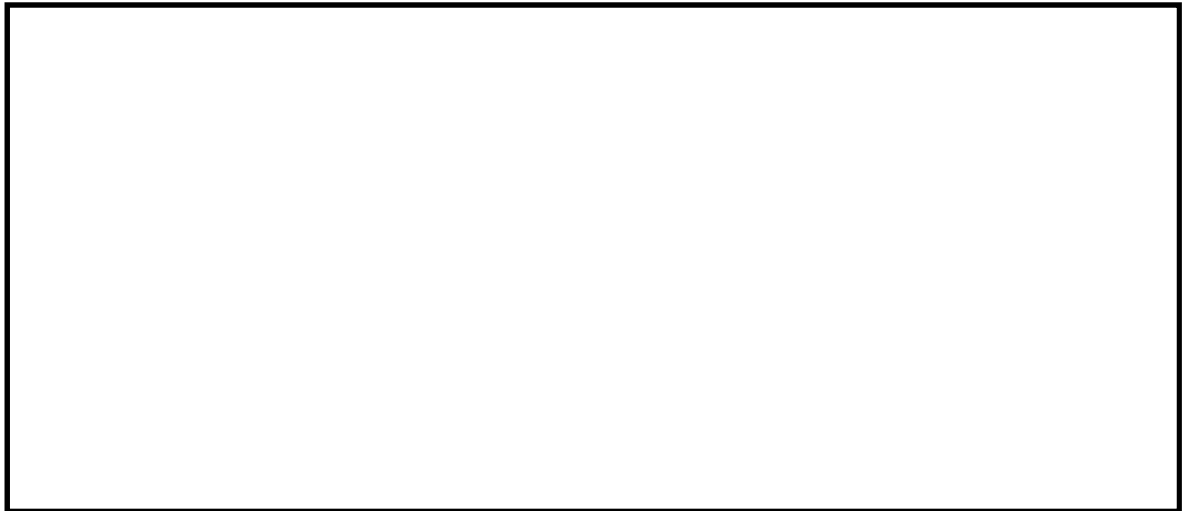


図4 モジュール型電気配線貫通部の既往環境試験と簡易的な温度評価結果

なお、図 4 で示した試験については、経年劣化を踏まえた冷却材喪失事故模擬試験であり、劣化を考慮して表 2 に示す試験を実施している。

表2 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。

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に耐漏えい性能を確保されるものと考えられる。

回答 (497-8)

1. 指摘事項

497-8	トップヘッドフランジのシール部に関し、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、内圧により内側ガスケット部の閉じ込め機能が失われる評価となっているが、当該閉じ込め機能は内外の二重のシールが機能することを設計上期待していることから、予め開口が認められる評価が得られている場合は、ガスケット設計を適切に見直すこと。(トップヘッドフランジ以外のフランジに対しても、製作公差を考慮した上で閉じ込め機能が維持できているか、説明すること)
-------	---

2. 回答

トップヘッドフランジシール部について、製作公差を考慮しても閉じ込め機能が維持できることを以下のとおり評価した。評価にあたっては、フランジ部及びガスケットの製作公差、シール部の構成材料の熱膨張、材料物性のばらつきを精査するとともに、過度に保守的にならないよう公差の重ね合わせの考え方をうい、開口量評価を実施した。

表1に評価の考え方を示す。

表1 シール部の構造，寸法及び材料のばらつきを精査した評価の考え方

精査項目	内容	考え方
改良型EPDM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と設計変更する。
シール部の公差	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で使用する場合，各々の寸法公差の二乗和平方根を用いて，算出する。また，機器の寸法公差は，寸法の中央値となるように管理されており，寸法公差の全てが，最も評価に不利な値となることは考え難い。よって，シール部の寸法公差は，二乗和平方根を用いることに変更した。
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。 ・熱膨張によってガスケットとフランジの相対距離が近づく状態を考慮する。
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	・ひずみ率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を設定

トップヘッドフランジ及びガスケットの製作公差を考慮したガスケットの押し込み量を表2に示す。

表 2 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，

$$\square \text{ (公称値)} - \square \text{ (公差)} = \square \text{ と評価できる。}$$

また，各部位の熱膨張を考慮した寸法を表 3 に示す。

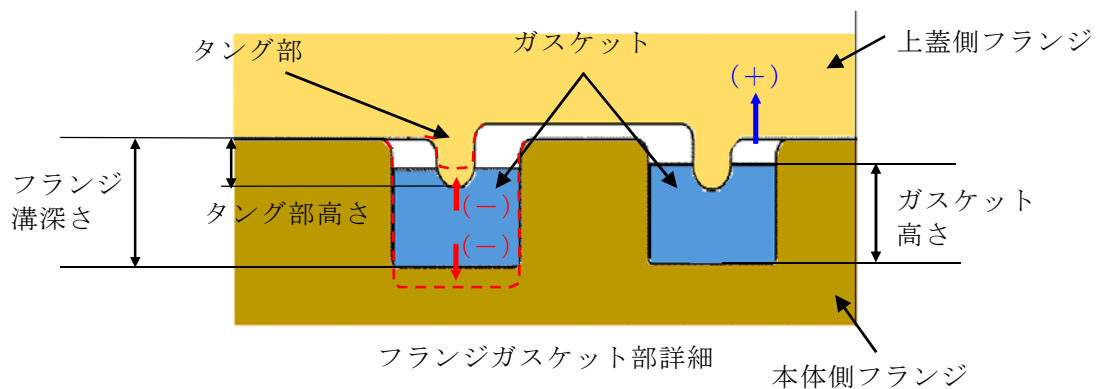


図 1 製作公差の概要（赤点線：製作公差のイメージ）

表3 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		

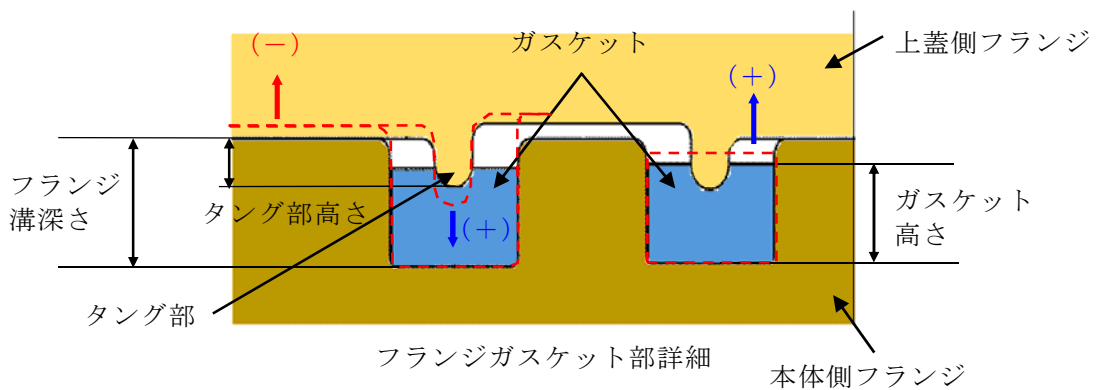


図2 熱膨張変位の概要 (赤点線：熱膨張のイメージ)

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・°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) (= $200 - \text{} = \text{$)

表3より、熱膨張を考慮したガスケットの押し込み量は、 +
 = と評価できる。

これらの結果から、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4の通りとなり、これらの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4 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 (2Pd)	評価結果
公称値	内側					○
	外側					○
評価値	内側					○
	外側					○

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ため、本評価において示した外側シール部の閉じ込め機能維持の評価は、実際よりも十分に保守的な評価であると言える。

トップヘッドフランジ以外のフランジについて、製作公差を考慮した開口量評価を実施した。評価結果は、表5から表16のとおり、製作公差を考慮しても閉じ込め機能が維持できる。

表 5 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	-	0.01mm
ガスケット押し込み量		

表 6 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 7 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					○

表 8 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	-	0.01mm
ガスケット押し込み量		

表 9 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 10 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					○

表 11 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 12 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 13 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					○

表 14 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 15 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 16 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					○