

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	TK-1-073 改 0
提出年月日	平成 30 年 2 月 1 日

東海第二発電所

原子炉格納施設の設計条件に関する説明書

に係る主要な論点整理の説明資料

平成 30 年 2 月

日本原子力発電株式会社

東海第二発電所 原子炉格納容器の限界温度・圧力 審査会合における指摘事項の回答

平成29年9月21日
日本原子力発電株式会社

1. 第497回審査会における指摘事項
2. 指摘事項の回答

1. 第497回審査会における指摘事項



番号	指摘日時	分類	指摘事項の内容
1	2017/8/22	格納容器 本体	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	2017/8/22	格納容器 本体	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。
3	2017/8/22	トップヘッド フランジ	トップヘッドフランジの定格締付量の管理について、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。
4	2017/8/22	トップヘッド フランジ	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。
5	2017/8/22	トップヘッド フランジ	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るべきであり、見直した結果について説明すること。
6	2017/8/22	トップヘッド フランジ	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、結果を一樣に適用できるのか。根拠を整理して説明すること。
7	2017/8/22	電気配線 貫通部	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日間に比べ十分でなく、他方、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。
8	2017/8/22	トップヘッド フランジ	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. 指摘事項の回答(No.1) (No.2)



(1) 指摘事項(No.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。

指摘事項(No.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

- 第497回審査会合では、最新知見に基づく有限要素法を用いた弾塑性解析により塑性ひずみの評価結果を示したところであるが、許容ひずみの考え方についてはエンドースされたものではないことから、技術基準で要求される応力制限の考え方に基づき、改めて評価を実施した。
- 原子炉格納容器の構造健全性の評価方法は、既工認の強度計算書の応力評価値に、評価圧力から算出される換算係数を乗じて、2Pd時の発生応力を評価した。その結果、表1に示すとおり、発生応力は許容応力以内であり、原子炉格納容器の健全性を確認した。
- 評価点⑤については、2Pdの内圧に加え、シビアアクシデント時のスプレイ水による水位上昇に伴う水頭圧を考慮していることもあり、裕度が小さい結果となっている。シビアアクシデント時の水位については、運転手順により確実に管理されるため、当該部の応力強さが許容応力を超えることはない。

表1 原子炉格納容器の応力評価結果

評価対象	一次応力[MPa]			
	P_m		$P_L + P_b$	
	応力強さ	許容応力	応力強さ	許容応力
原子炉格納容器本体	①円筒部と円錐部の接合部			
	②円錐部の角度変化部			
	③円錐部の板厚変化部			
	④円錐部と円筒部の接合部			
	⑤円筒部(中央部)			
	⑥原子炉格納容器基部			
⑦機器搬入用ハッチ取付部				
⑧サブレッション・チェンバースハッチ取付部				

※1: 構造不連続部であるため、 $P_L + P_b$ で評価

※2: 一般構造部であるため、 P_m で評価

(3) 記載箇所

- 別紙 1. 原子炉格納容器本体
別紙 3. 機器搬入用ハッチ
別紙 4. サブレッション・チェンバースハッチ

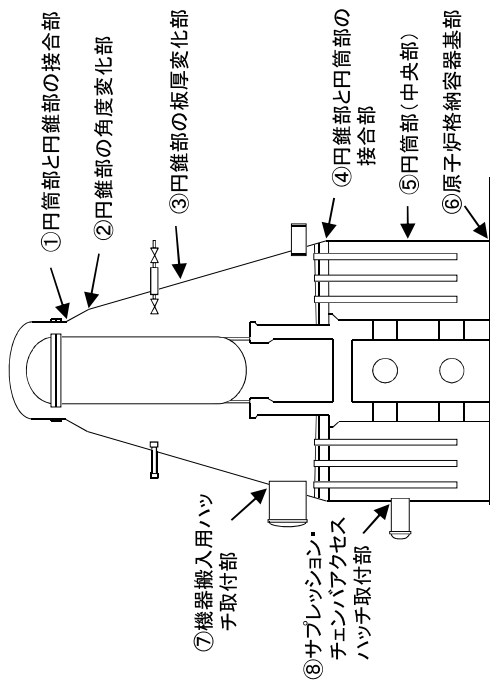


図1 原子炉格納容器の応力評価対象部位

2. 指摘事項の回答 (No.3)



(1) 指摘事項

トップヘッドフランジの定格締付け量の管理について、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なのか、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

- ・トップヘッドフランジ閉鎖時の締め付け作業においては、以下の管理を工事要領書に基づき実施しているため、定格締め付け量の管理に対して作業員の違いや手作業に起因する誤差の影響はなく、管理値に対する品質は維持されている。

トルク管理	決められたトルクでボルトを締め付け
面間管理	<div></div> の隙間ゲージが挿入できないことを確認

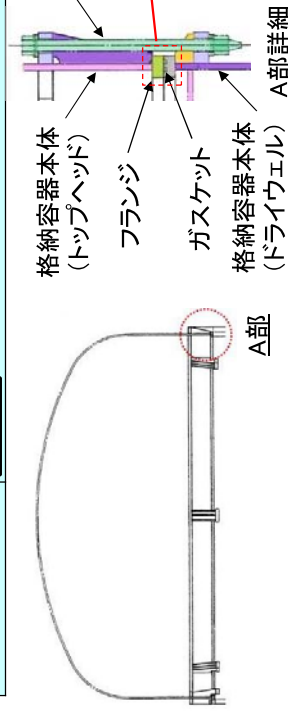
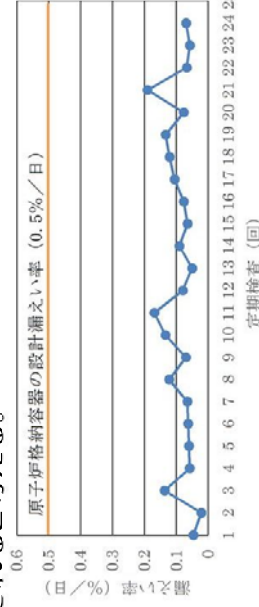


図1 トップヘッドフランジ構造図

- ・トップヘッドフランジのタンゲやガスケット溝は、以下により、シール部の健全性が維持され则认为る。

管理項目	内容
点検手入れ	傷つけないような素材で実施
外観目視点検	傷や変形がないことを確認
漏えい検査	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



(3) 記載箇所

参考資料9 トップヘッドフランジ等の開口量評価について

図3 原子炉格納容器全体漏えい率検査実績

2. 指摘事項の回答 (No.4)

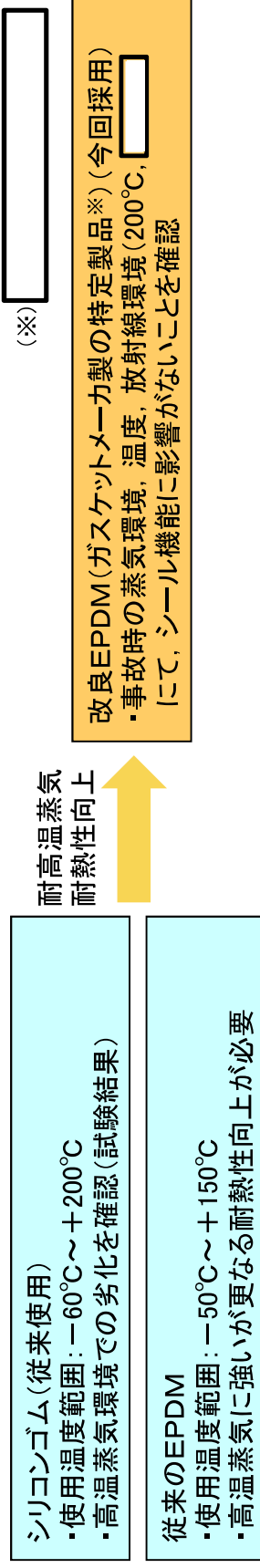


(1) 指摘事項

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製シール材としてガスケットメーカーの特定製品※を採用する計画である。
- ・ガスケットメーカーの特定製品※は、耐高温蒸気、耐熱性向上の観点で開発されたシール材である。



- ・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。
 - ・当社は、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、東海第二に適用できることを確認した。
 - ・今後、当該品を特定できるよう設計管理を行うとともに、調達においてはメーカー型番を指定することでシール機能が確認された製品を確実に使用すること可能である。
- なお、技術開発により、製品に変更が生じた場合、より高い信頼性があることを、今回と同様に圧縮永久ひずみ試験等により事故時環境におけるシール機能評価を行い、実機フランジへの適用性について確認する。

(3) 記載箇所

参考資料1 改良EPDM製シール材の適用性について

2. 指摘事項の回答 (No.5)



(1) 指摘事項

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るべきであり、見直した結果について説明すること。

(2) 回答

・圧縮永久ひずみ試験は、JIS K 6262「加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー常温、高温及び低温における圧縮永久ひずみの求め方」に基づき実施しており、圧縮永久ひずみ率はJISの規定どおり、同時に試験した3個の供試体から得られた結果の平均値()を用いている。

・フランジの開口量評価に用いたひずみ率は、JISに基づく、圧縮永久ひずみ試験の結果を用いているが、シール部の構成部品に対する製作公差等の影響を考慮した開口量評価を行うにあたり、圧縮永久ひずみ率に、
おいても、より厳しい値で評価することとし、類似条件の試験結果を加え、
統計学的に圧縮永久ひずみ率を算出した。

統計学的に算出した圧縮永久ひずみ率の最大値:

上記の圧縮永久ひずみ率を用いて、トップヘッドフランジ等のシール部について製作公差等を考慮した開口量評価を行い、シール機能が維持できることを確認した。

確認結果は、指摘事項の回答 (No.8)に記載する。

(3) 記載箇所

参考資料9 トップヘッドフランジ等の開口量評価について

表1 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+2σ [%]
1				
2				
3				
4				

試験条件

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：JIS K 6262に基づき実施

2. 指摘事項の回答 (No.6)



(1) 指摘事項

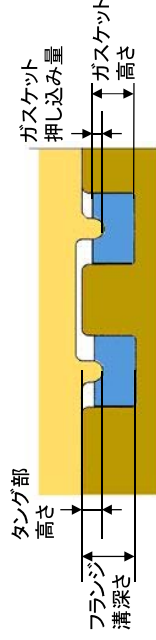
押し込み試験について、環境条件（蒸気環境，乾燥環境），試験体（母材）の厚さ，押し込み量などはシール材を適用する箇所により異なるため，結果を一樣に適用できるのか。根拠を整理して説明すること。

(2) 回答

- ・圧縮永久ひずみ試験及び実機フランジ模擬試験については，以下のように結果を一樣に適用できる。
 - 試験の環境条件：環境条件については評価上最も厳しくなる200℃，2Pdを各フランジの評価条件として設定し，実機フランジ模擬試験の試験条件としていることから，実機フランジ模擬試験の結果は適用可能である。
 - 試験体の構造（厚さ）：構造の違いによる開口量へ与える影響は，有限要素法による解析で模擬している。各フランジのシール部の設計（ガスケット溝深さ，タング部高さ，ガスケット高さ）はほぼ同様であるため，実機フランジ模擬試験の結果を適用できる。
 - 押し込み量：各フランジのガスケット圧縮率は，ほぼ一定となるよう設計されており，押し込み量の違いによる影響はない。

表1 各フランジの各部寸法及び圧縮率

設備名	フランジ溝 深さ [mm]	タング部 高さ [mm]	ガスケット 高さ [mm]	ガスケット 押し込み量 [mm]	圧縮率 [%]
トップヘッドフランジ					
機器搬入用ハッチ					
サブレーション・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%

図1 フランジガスケット部詳細図

(3) 記載箇所

参考資料2 改良EPDM製シール材における各試験について

2. 指摘事項の回答 (No.7)



(1) 指摘事項

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

①電気ペネ共研

- 実機の電気ペネトレーションのモジュール部への伝熱を模擬した試験であり、200℃・2Pdの環境条件下において、一次シール部（高圧用194℃/62時間、低圧用137℃/62時間）、二次シール部（高圧用44℃/62時間、低圧用68℃/62時間）ともにシール機能が維持されることを確認している。

種類	試験条件			シール部温度(℃)/漏えい有無	
	雰囲気	温度(℃)	圧力(MPa)	放射線照射	時間(h)
高圧	乾熱	200(220)※	(0.61～0.79)※	なし	62
低圧	乾熱	200(220)※	(0.60～0.81)※	なし	62

※：()内は記録グラフからの読み取り値

②過去の環境試験

- 冷却材喪失事故模擬試験として高温環境下で13日間のシール機能の健全性を確認している。
- 電気ペネ共研での二次シール部の温度よりも高い温度で、13日間のシール機能の健全性を確認している。

○以下により、電気配線貫通部のモジュールについて、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る。

- 格納容器内環境が200℃における二次シール部の温度は、実機を模擬した試験体を使用している電気ペネ共研で得られた温度（高圧用44℃、低圧用68℃）と評価できる。
- 過去の環境試験では、電気ペネ共研で得られた二次シール部の温度（高圧用44℃、低圧用68℃）を上回る温度条件下で、13日間のシール部の健全性が確認されている。

(3) 記載箇所

別紙 7.4 電気配線貫通部（モジュール）

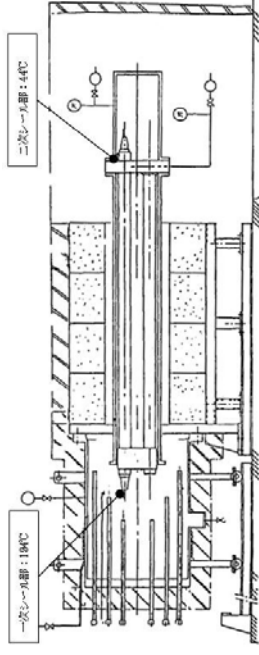


図1 電気ペネ共研 試験概要図(高圧用)

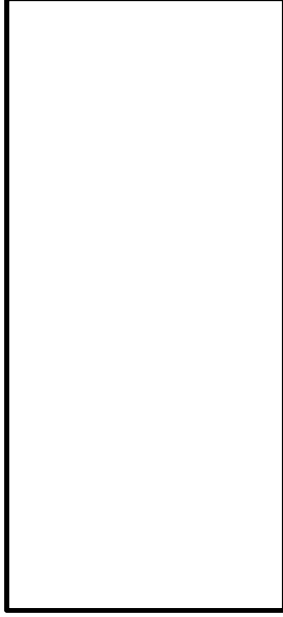


図2 冷却材喪失事故模擬試験 試験概要図(高圧用)

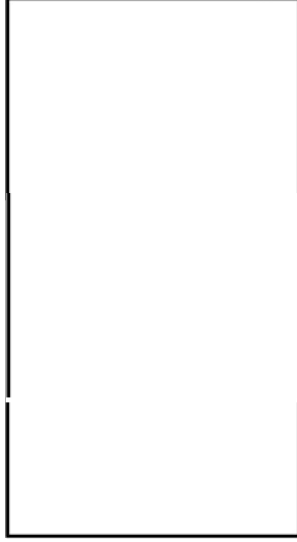


図3 冷却材喪失事故模擬試験 温度測定結果

2. 指摘事項の回答 (No.8) (1/2)

(1) 指摘事項

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

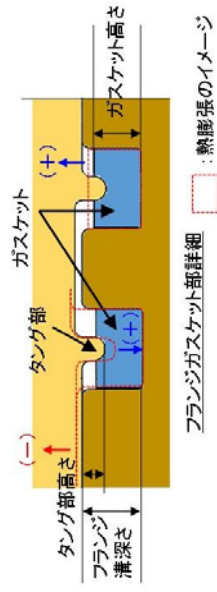
- ・トップヘッドフランジのシール部は、技術基準規則第44条に要求される単体の漏えい試験を可能とすように、内側及び外側ガスケットの間に加圧空間を有する二重シール構造の設計としている。原子炉格納容器の閉じ込め機能は、内側又は外側のどちらか一方のシール部機能が保たれればよい。
- ・トップヘッドフランジのガスケットの設計(管理値)の見直し及び製作公差の精査を行い、開口量評価を実施した結果、トップヘッドフランジの2Pdにおける開口量は内側及び外側のいずれについても許容開口量以下であることを確認した。
- ・トップヘッドフランジ以外のシール部についても、2Pdにおける開口量は許容開口量以下であることを確認した。

精査項目	内容	考え方	精査結果			
ガスケット製作公差	管理値の見直し	・ガスケットの製作公差の最小側を設けない管理基準に変更した。				
シール部の製作公差	二乗和平方根の採用	・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ことから、シール部の製作公差は、二乗和平方根を用いる。				
シール部の構成材料の熱膨張	材料の熱膨張の考慮	・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。				
ひずみ率	材料特性のばらつきを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した。(回答No.5より)				
	①押し込み量(公称値)	②シール部の公差	③熱膨張	④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						

- ・類似の設計であるサプレッション・チェンバアクセスハッチの実機寸法を測定した結果、製作誤差は[]であった。したがって、サプレッション・チェンバアクセスハッチと同一の設計メーカーであり同一の工場で製造されたトップヘッドフランジの開口量評価において、上記の製作公差の値([])を用いることは保守的である。
- ・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。

(3) 記載箇所

参考資料9 トップヘッドフランジ等の開口量評価について



2. 指摘事項の回答 (No.8) (2/2)



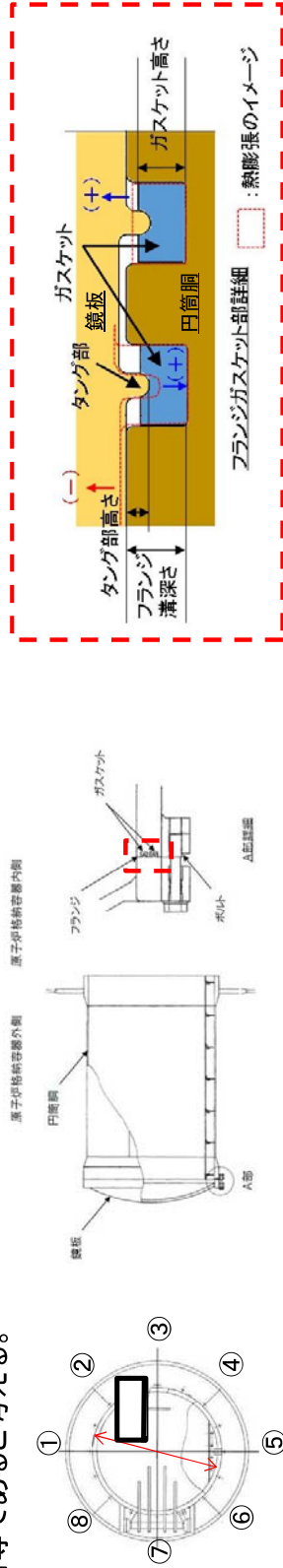
【参考】サブレッジョン・チェンバアクセスハッチ 実機フランジ計測

(1) 目的

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(サブレッジョン・チェンバアクセスハッチ)の寸法測定を実施し、製作誤差による影響を確認した。

(2) 測定結果

- ・実機寸法測定の結果、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。
- ・サブレッジョン・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)と設計メーカー、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える。



サブレッジョン・チェンバアクセスハッチ 構造図

測定箇所	測定結果 [mm]							
	設計値 [mm]		①		②		③	
溝深さ	内側	外側	内側	外側	内側	外側	内側	外側
タング高さ	内側	外側	内側	外側	内側	外側	内側	外側

(3) 実機フランジ計測結果を考慮した開口量評価(最も裕度が小さいトップヘッドフランジ部にて評価)

- ・トップヘッドフランジシール部にサブレッジョン・チェンバアクセスハッチと同程度の製作誤差があると仮定し、トップヘッドフランジの許容開口量を算出した結果、許容開口量は()と評価され、解析から評価した開口量()に対して余裕がある結果となった。

	①押し込み量 (公称値)	②シール部の公差	③熱膨張	④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/Gハッチの実測値使用
- ・バックアップシール: 有

東海第二発電所 原子炉格納容器の限界温度・圧力

平成29年8月22日
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

1. 評価の概要

○限界温度・圧力の設定

- ⇒ 原子炉格納容器の評価温度及び圧力については、重大事故等時には、原子炉格納容器の機能である放射性物質の閉じ込め機能を確保できるものとする。
- ⇒ 東海第二発電所の重大事故等対策の有効性評価において、原子炉格納容器の評価温度及び圧力をそれぞれ200℃、2Pd(0.62MPa[gage]、Pd:最高使用圧力(0.31MPa[gage]))としている。
- ⇒ これより、限界温度・圧力は、既往研究で得られた知見に加え、重大事故等対策の有効性評価における事故シナリオを考慮し実施した試験等による原子炉格納容器の破損・漏えい限界に対し、余裕を考慮した値として、200℃、2Pdを設定している。

【既往研究】

- a. (財)原子力発電技術機構「重要構造物安全評価(原子炉格納容器信頼性実証事業)に関する総括報告書(平成15年3月)」(以下「NUPEC試験」という。)
- b. 電力共同研究「格納容器電気ペネトレーションの特性確認試験(昭和62年度)」(以下「電気ペネ共研」という。)

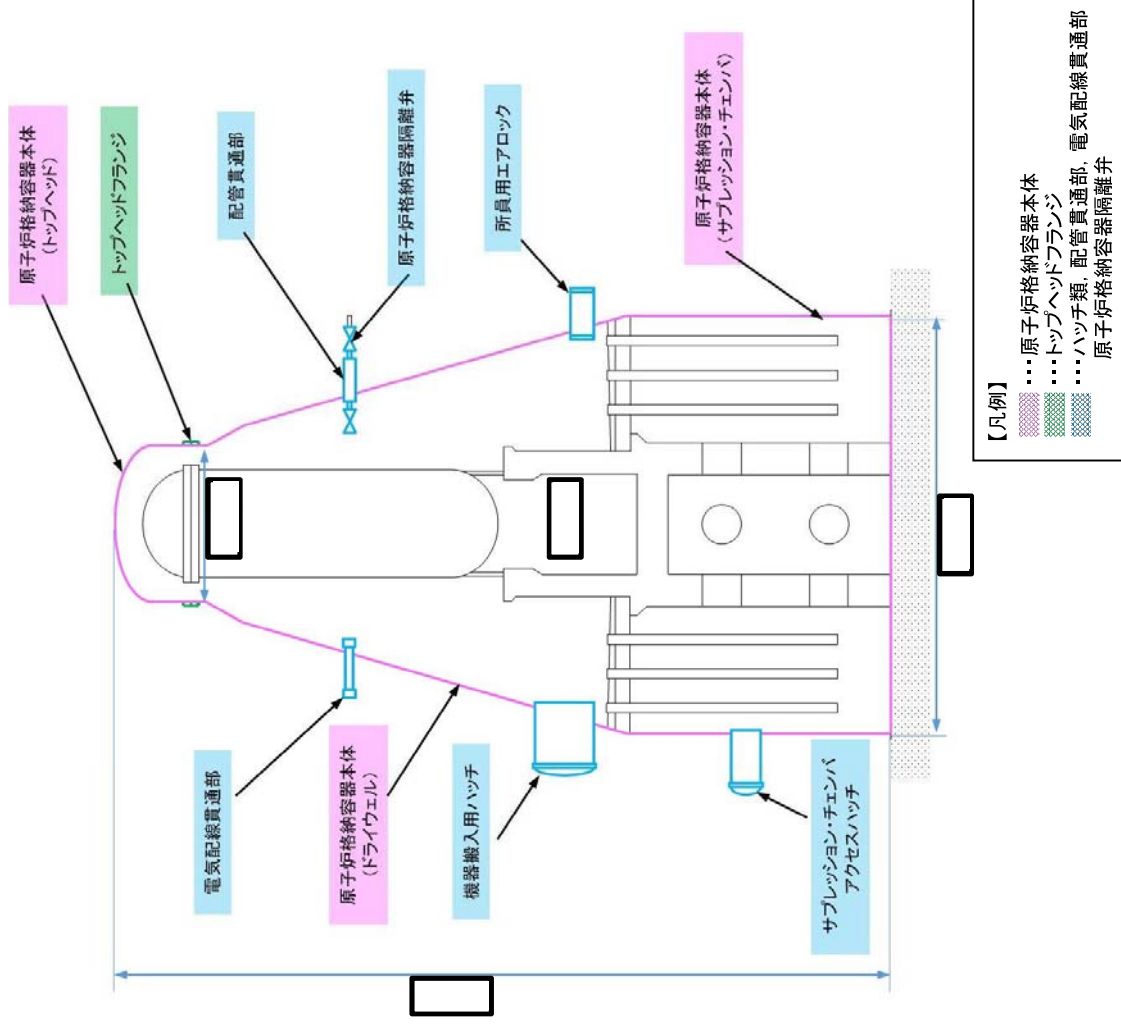
1. 評価の概要

○評価対象

⇒ 重大事故等時に放射性物質の閉じ込め機能を確保するためには、200℃、2Pdの環境下における原子炉格納容器本体等の構造健全性を確認する必要がある。

⇒ また、福島第一原子力発電所事故において、原子炉格納容器からの漏えい要因の一つとして推定されている開口部等のシール部についても、200℃、2Pdの環境下での機能維持を確認する必要がある。

⇒ このことから、原子炉格納容器本体に加えて、開口部及び貫通部の構成品、また、ガスケットの劣化及びシート部の開口に伴いリークパスになる可能性があるシール部について評価する。



2. 原子炉格納容器本体の評価

2. 1 原子炉格納容器本体（一般構造部）

○想定される機能喪失要因

- ・延性破壊
(内圧を受けることによって生じる、過度な塑性変形)

○機能喪失要因の選定理由

原子炉格納容器本体の設計時に考慮される機能喪失要因は、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられる。今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰り返し荷重が作用しないこと、圧縮力が一般部に生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

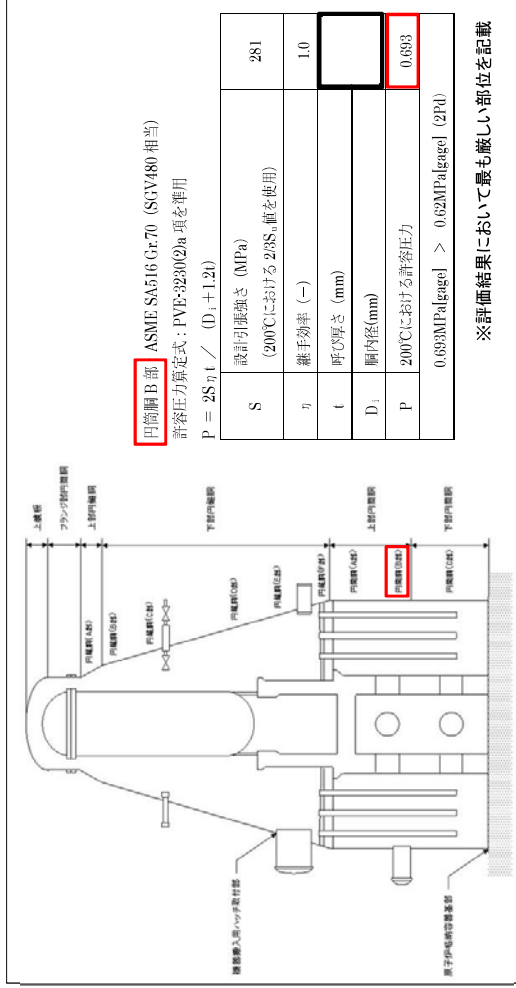
○評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
構造部	延性破壊	・設計・建設規格の評価式を準用した評価 ・有限要素法を用いた弾塑性解析結果を活用した評価

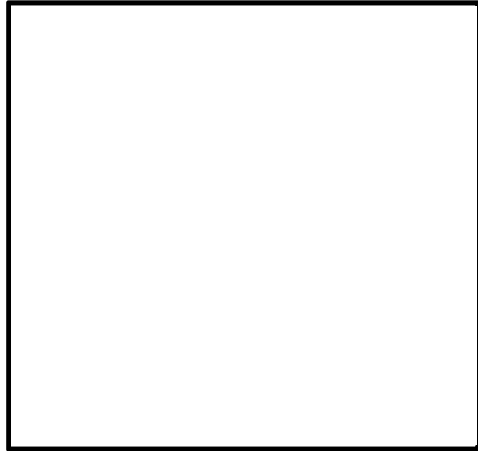
○評価結果

評価結果は以下のとおりであり、放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

- ・規格を準用し算出された許容圧力(0.693MPa[gage])は、評価圧力2Pdを上回る。
- ・有限要素法による弾塑性解析結果から、格納容器全体が破損に至るのは、約1.4MPa(4.6Pd)であり、評価圧力2Pdを上回る。



設計・建設規格の評価式を準用した評価



有限要素法を用いた弾塑性解析結果(東海第二, 200℃, 2Pd)

2. 原子炉格納容器本体の評価

2. 2 機器搬入用ハッチ取付部(構造不連続部)

○想定される機能喪失要因

- ・延性破壊
(内圧を受けることによって生じる、過度な塑性変形)

○機能喪失要因の選定理由

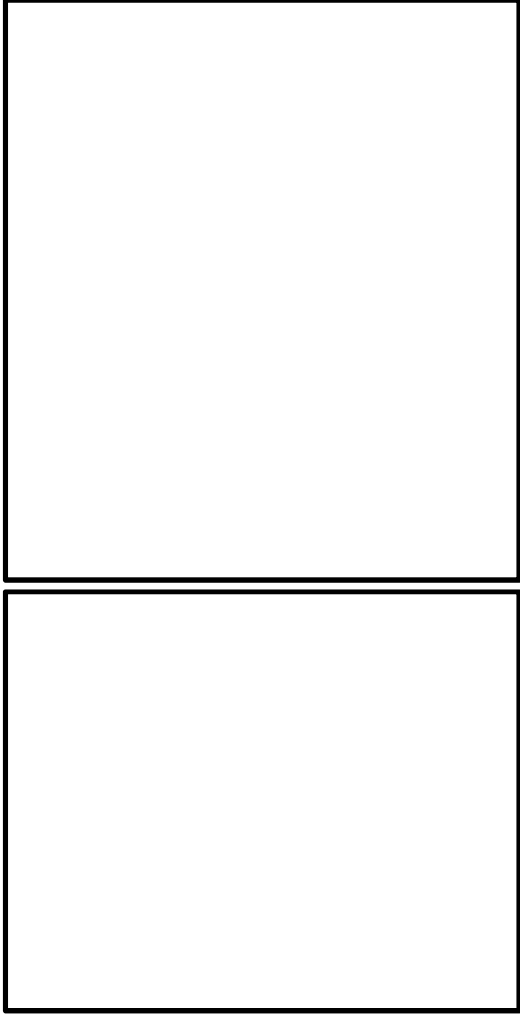
原子炉格納容器本体の設計時に考慮される機能喪失要因は、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられる。今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰り返し荷重が作用しないこと、圧縮力が一般部に生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

○評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
構造不連続部	延性破壊	・有限要素法を用いた弾塑性解析結果を活用した評価

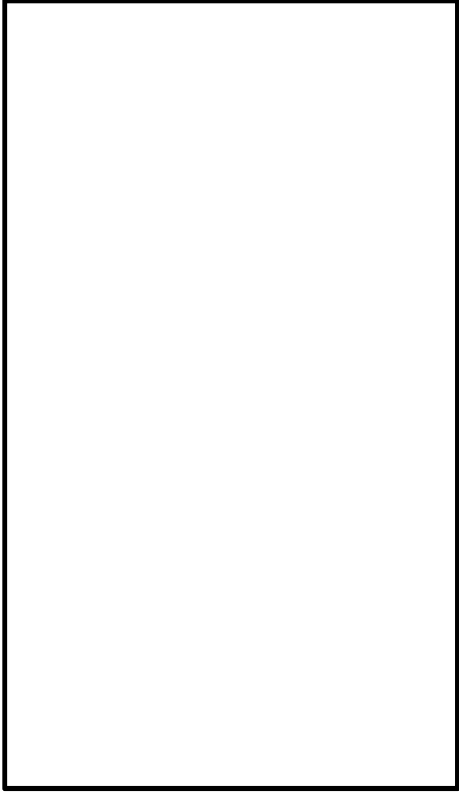
○評価結果

局部的に塑性ひずみが発生しているが、200℃、2Pdにおける増分はごくわずかであり、ひずみ集中による局部的な破損が発生することはない。



東海第二 原子炉格納容器
全体モデル図

相当塑性ひずみ分布図 (200℃、2Pd)



相当塑性ひずみと限界ひずみとの比較 (200℃)

3. シール部の機能評価

3. 1 トップヘッドフランジ(シール部)

3. 1. 1 フランジ部開口量評価(弾塑性解析)

○想定される機能喪失要因
・開口, シール機能低下

○機能喪失要因の選定理由

トップヘッドフランジのシール部については、内圧が低い段階ではボルトの締め付けにより開口は抑制されるが、内圧の上昇に伴って開口量が増加することにより、外部への漏えい経路を形成する。

また、フランジが開いてもフランジの密閉性を担保しているシール材が健全であれば、シール材が開口に追従するため外部への漏えいを防止することができ、重大事故環境に晒されると、シール材が高温劣化し、フランジの開口に追従できなくなりシール機能の低下が想定される。

○評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
シール部 (フランジ、ガスケット)	開口 シール機能低下	実機モデルのFEM解析による開口量評価 既往研究の試験結果を用いた評価

○評価結果

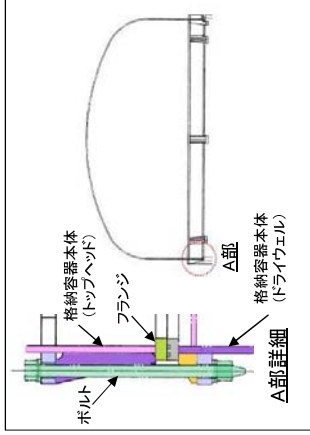
圧縮永久ひずみ試験結果より、許容される開口量は であるのに対し、FEM解析による2Pdにおけるフランジ部の開口量は、 であり、許容開口量 を下回ることからシール機能は維持できる。



圧縮永久ひずみ試験

○開口量評価

200℃における圧力と開口量の関係より、2Pdにおける内側ガスケット部の開口量は 、外側ガスケット部の開口量は であった。



トップヘッドフランジ部構造図

トップヘッドフランジ解析モデル

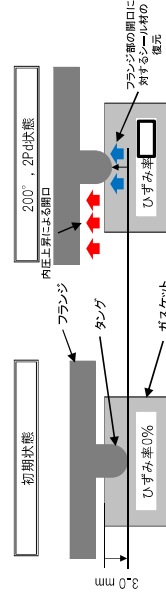
圧力と開口量の関係(東海第二, 200℃)

○許容開口量

トップヘッドフランジは、タング(突起)がガスケットを押し込む構造であり、フランジの定格締付量(タング押込量)は である。圧力の増加に伴いフランジ部は開口するが、ひずみ率が であればガスケットは $(= \text{} \times (100\% - \text{}))$ まで回復するため、開口量が 以下であればシール機能は維持できる。

圧縮永久ひずみ試験結果(改良EPDM材)

試験温度	200℃
構造部放射線照射量	<input type="text"/>
試験雰囲気	蒸気
試験時間	168h
ひずみ率	<input type="text"/>



トップヘッドフランジのガスケットは、定格締付量(タング押込量) である。ひずみ率が0%であれば締付けを開放した場合、ガスケットは 回復する。

重大事故環境では、ガスケットが劣化し、ひずみ率が大きくなる。圧縮永久ひずみ試験の結果より、開口量が 以下であればシール機能は維持できる。

4. 評価結果のまとめ

評価対象	評価点	評価方法	評価条件	評価値	判定基準	評価結果
原子炉格納容器本体	一般構造部	設計・建設規格を準用 有限要素法 (FEM)	200℃	許容圧力: 0.69MPa[gage] (円筒胴部) 塑性破壊 (全体): 約1.4MPa[gage] (疲労累積係数:)	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上 0.62MPa[gage] (2Pd) 以上 (疲労累積係数1以下)	破断せず 破断せず (1以下)
	構造不連続部	有限要素法 (FEM)	200℃	局部破壊なし	破損がないこと	破断せず
トップヘッドフランジ	ボルト・工認手法	ボルト・工認手法	2Pd	発生応力 (ボルト): 247MPa	576MPa 以下	破断せず
	フランジ・ガスケット	設計・建設規格を準用 有限要素法 (FEM) ガスケット試験	200℃	発生応力 (フランジ): 185MPa 開口量: (内側): (外側):	424MPa 以下 許容開口量: 以下	破断せず シール機能維持
機器搬入用ハッチ	構造部	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (円筒胴): 2.445MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	シール部 (フランジ・ガスケット)	有限要素法 (FEM) 設計・建設規格を準用	200℃	許容圧力 (フランジ): 10.19MPa[gage] 開口量: (内側): (外側):	許容開口量: 以下	シール機能維持
サブプレッシャーチェンバ アクセスハッチ	構造部	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (円筒胴): 4.493MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	シール部 (フランジ・ガスケット)	有限要素法 (FEM) ガスケット試験	200℃	許容圧力 (フランジ): 10.63MPa[gage] 開口量: (内側): (外側):	許容開口量: 以下	シール機能維持
所員用エアロック	構造部 (円筒胴)	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力: 3.716MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	構造部 (隔壁)	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力: 1.322MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
所員用エアロック	シール部 (隔壁・シール部)	既承認の評価値を用いた評価 機工工字便覧 ガスケット試験	200℃	開口量: 以下	許容開口量: 以下	シール機能維持
	シール部 (その他シール部)	ガスケット試験	200℃	200℃ 以上	200℃ 以上	シール機能維持
接続配管	同左	代表配管: PPC-3530	200℃	発生応力 (X-31): 169MPa	許容応力 (257MPa) 以下	破断せず
	スリーブ本体	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (X-18): 26.817MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
配管 構造部	スリーブ取付部	工認手法	2Pd	発生応力 (X-31): 198MPa	許容応力 (393MPa) 以下	破断せず
	構造部 (ボルト締め平板)	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (X-28): 1.90MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
配管 構造部	構造部 (フランジ・ボルト)	JIS B 8265	2Pd	発生応力 (X-28): 124MPa	許容応力 (281MPa) 以下	破断せず
	シール部 (フランジ・ガスケット)	文献の理論式	200℃	開口量: 以下	許容開口量: 以下	シール機能維持
セーフエンド	同左	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (X-18): 4.529MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	同左	設計・建設規格を準用	2Pd	疲労累積係数 (X-14):	疲労累積係数1以下	1以下
伸縮継手 アダプタ	同左	設計・建設規格を準用	200℃	許容圧力 (高圧): 10.645MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	同左	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (低圧): 10.613MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
電気配線 貫通部	同左	設計・建設規格を準用	2Pd	許容圧力 (高圧): 27.948MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	シール部 (モジュール)	電気ハネ共研 NUPEC試験	200℃	許容圧力 (低圧): 10.69MPa[gage] 漏えいなし	漏えいなし	シール機能維持
原子炉 格納容器 隔離弁	弁箱	レーディング設計	200℃	許容圧力: 1.40MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	弁シート部	漏えい確認試験	200℃	漏えいなし	設計漏えい量以下	シール機能維持
原子炉 格納容器 隔離弁	弁箱	レーディング設計	200℃	許容圧力: 1.32MPa[gage]	0.62MPa[gage] (2Pd) 以上	破断せず
	シール部	材料仕様	200℃	200℃ 以上	200℃ 以上	シール機能維持

東海第二発電所 原子炉格納容器の限界温度・圧力 審査会合における指摘事項の回答

平成29年10月12日
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の観点から公開できません

1. 第511回審査会における指摘事項
2. 指摘事項の回答

1. 第511回審査会における指摘事項



番号	指摘日時	分類	指摘事項の内容
1	2017/9/21	シール部	評価結果のまとめ表において、原子炉格納容器の各評価部位におけるシール機能維持の記載方法について、漏えい量の関係から整理し、資料を見直すこと。
2	2017/9/21	トップヘッド フランジ	圧縮ひずみ試験の各試験ケースのひずみ率の値の差が大きいため、棄却検定を踏まえても統計学的に算出した圧縮永久ひずみ率の算出が妥当であることを説明すること。

2. 指摘事項の回答(No.1)



(1) 指摘事項

評価結果のまとめ表において、原子炉格納容器の各評価部位におけるシール機能維持の記載方法について、漏えい量の関係から整理し、資料を見直すこと。

(2) 回答

- ・各評価部位におけるシール機能は、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「シール機能維持」を判断している。
- ・各判定基準を満たした場合に想定される漏えい量は、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。

対象箇所	判定基準	シール機能維持の考え方	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 ・サブプレッジョン・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	開口量※1<許容開口量※2 ※1 フランジ部の形状・寸法に基づき解析等により算出 ※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に基づき設定	実機フランジ模擬試験の漏えい判定基準から実機相当に換算した漏えい量は、格納容器の設計漏えい率である0.5%/dayに比べ、十分に小さい漏えい量である。 ○漏えい有無の判定基準：漏えい量：1cc/min以下 ○実機相当換算値：0.001%/day以下(PCV空間容積に対する割合)
<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	漏えい量※1<設計漏えい量 ※1 試験により漏えい量を測定し、設計漏えい量以下であることを確認	試験の判定基準である設計漏えい量から実機相当に換算した漏えい量は、格納容器の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。 <電気配線貫通部(モジュール)> ○漏えい有無の判定基準(設計漏えい量)： $1 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下 ○実機相当換算値： $1 \times 10^{-7} \text{%/day}$ 以下(PCV空間容積に対する割合) <原子炉格納容器隔離弁(バタフライ弁)> ○漏えい有無の判定基準(設計漏えい量)：240cc/min以下/600A ○実機相当換算値：0.02%/day以下(PCV空間容積に対する割合)
<ul style="list-style-type: none"> ・所員用エアロック(扉板以外シール部) ・原子炉格納容器隔離弁(TIPボール弁) 	200℃以上	試験結果・材料仕様>200℃	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。

(3) 記載箇所

- ・本文 1.(5)まとめ「第3表 評価結果まとめ」
- ・参考資料1 シール機能維持に対する考え方について

2. 指摘事項の回答(No.2)

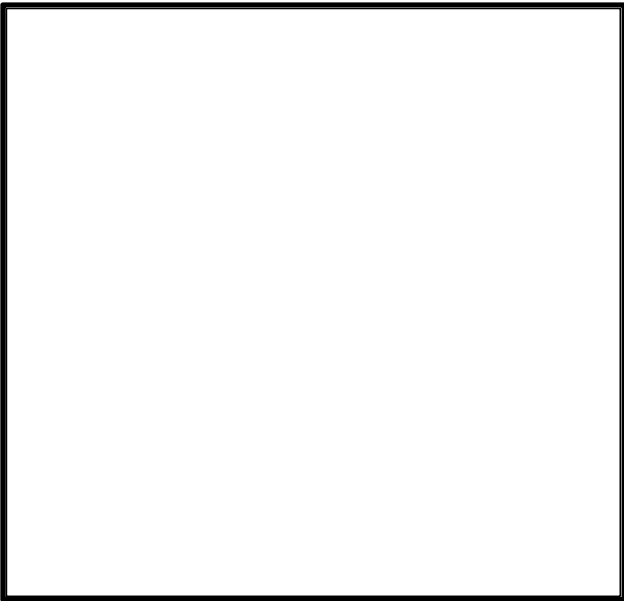


(1) 指摘事項

圧縮ひずみ試験の各試験ケースのひずみ率の値の差が大きいため、棄却検定を踏まえても統計学的に算出した圧縮永久ひずみ率の算出が妥当であることを説明すること。

(2) 回答

- ・圧縮永久ひずみ試験のデータ群について、 χ^2 (カイ2乗)適合度検定を実施し、正規性を示すとの仮定が棄却されないことを確認した。
 - ・圧縮永久ひずみ試験のデータ群について、グラブス・スミルノフ棄却検定を実施し、棄却される外れ値が存在しないことを確認した。
- このため、統計学的に算出した圧縮ひずみ率(平均値 $+2\sigma$ =)を用いて開口量評価を実施することは妥当である。
- ・今後、現状の圧縮ひずみ率のデータに加え、ひずみ試験データを拡充する。



圧縮永久ひずみ試験データ											
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 μ : <input type="text"/>				標準偏差 σ : <input type="text"/>				不偏標準偏差 s : <input type="text"/>			

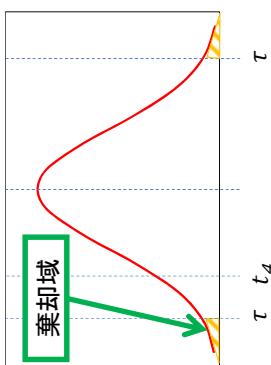
【グラブス・スミルノフ棄却検定】

平均値から最も離れた値である x_4 を検査値として検定を実施。

○検定統計量: t_4 ○臨界値: τ

$$t_4 = \frac{|x_4 - \mu|}{s} \quad \tau = (n-1) \cdot \sqrt{\frac{t_{\alpha/n}^2}{n(n-2) + n \cdot t_{\alpha/n}^2}}$$

	検定統計量 t_4	臨界値 τ
x_4	<input type="text"/>	2.29



棄却検定のイメージ図

∴ 棄却検定の結果、 $t_4 < \tau$ であるため、外れ値は存在しない。

圧縮永久ひずみデータのヒストグラム

○棄却検定の選定

圧縮永久ひずみ試験結果に対する棄却検定の方法は、以下の理由により、グラブス・スミルノフ検定を採用した。

- ① JEAG及びJIS規格においても用いられている手法であり、一般的に広く用いられているものである。
- ② 改良EPDM材の圧縮永久ひずみ率は、 χ^2 (カイ2乗)適合度検定結果から正規性を示すとの仮定が棄却されなかった。

(3) 記載箇所

参考資料10 トップヘッドフランジ等の開口量評価について

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第 1 図，改良 E P D M 製シール材の圧縮永久ひずみ試験結果を第 1 表に示す。



第 1 図 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℃)

第 1 表 圧縮永久ひずみ試験^{※1}結果 (改良 E P D M 製)

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

※1 JIS 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

第1図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℃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℃、2Pdに対して、シール材機能は余裕があることを示している。

なお、原子炉格納容器の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。

以上の考え方を第2表に整理する。

第 2 表 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る使用する場合，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℃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"/> 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，第 2 表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。

第 3 表に示すとおり，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。

第 3 表 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	<input type="text"/>			
2	<input type="text"/>			
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>			

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E P D M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E P D M材のメーカ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，第3表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，第4表及び第5表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。

第4表 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}
<input type="text"/>											

第 5 表 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)

第 5 表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。

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

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、

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

$$= 2.29$$

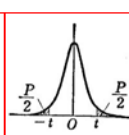
となる。

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。

$2 \cdot \alpha / n = 2 \cdot 0.05 / 12$

t 表

$\phi, P \rightarrow t$
(自由度 ϕ と両側確率 P とから t を求める表)

$$P = 2 \int_t^\infty \frac{\Gamma(\frac{\phi+1}{2}) dv}{\sqrt{\phi \pi} \Gamma(\frac{\phi}{2}) (1 + \frac{v^2}{\phi})^{\frac{\phi+1}{2}}}$$


$\phi \backslash P$	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001	$P \backslash \phi$
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619	1
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598	2
3	0.756	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941	3
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610	4
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859	5
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959	6
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405	7
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041	8
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.251	4.751	9
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.183	4.571	10
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437	11
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318	12
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221	13
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140	14
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073	15
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015	16
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965	17
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922	18
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883	19
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850	20
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819	21
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792	22
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767	23
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745	24
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725	25
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707	26
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690	27
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674	28
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659	29
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646	30
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551	40
60	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460	60
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373	120
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291	∞

(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 $t = 2.29$ 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ではなく、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第 6 表に示す。第 6 表のデータは、蒸気環境で $200^\circ\text{C}/168$ 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。

第 6 表 改良 E P D M 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"/>											

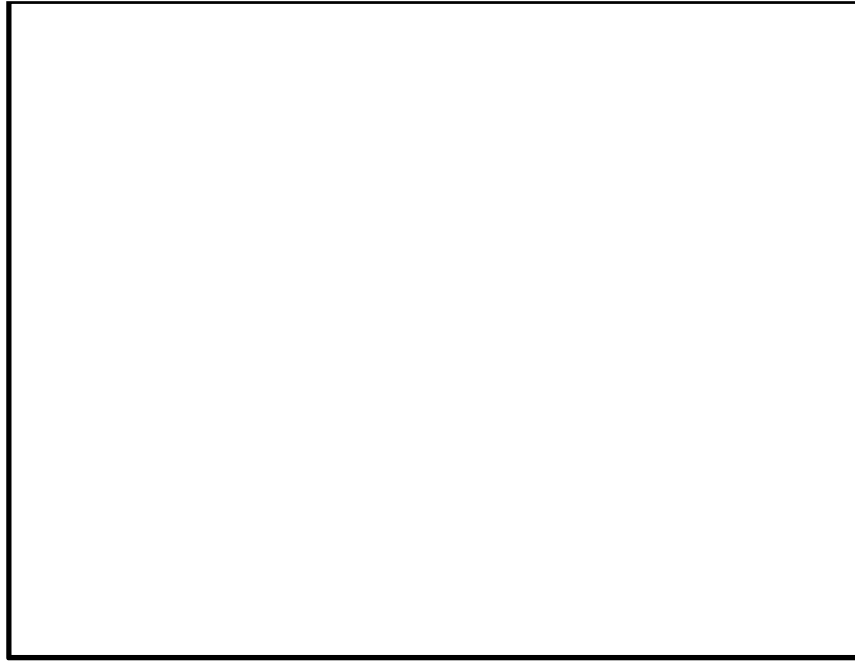
χ^2 適合度検定は、第 6 表に示す標本データと正規分布を仮定した期待値とを比較し、適合度を検定するものであり、データ数と関係なく一般的に使用される。第 6 表に示すデータを階級ごとに分割して整理した結果を第 7 表に、第 7 表に基づき作成したヒストグラムを第 2 図に示す。

第 7 表 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



第 2 図 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分の積算として下式で求められる。

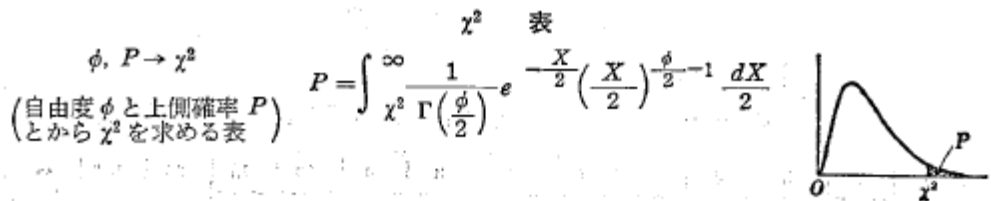
$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \boxed{}$$

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, 第 6 表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。



$\phi \backslash P$.995	.99	.975	.95	.90	.75	.50	.25	.10	.05	.025	.01	.005	$P \backslash \phi$
1	0.00393	0.00157	0.00082	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	0.109	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	49.3	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
χ^2	-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	χ^2

(出典：推計学入門演習（産業図書株式会社）)

次に第2表に基づき、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。

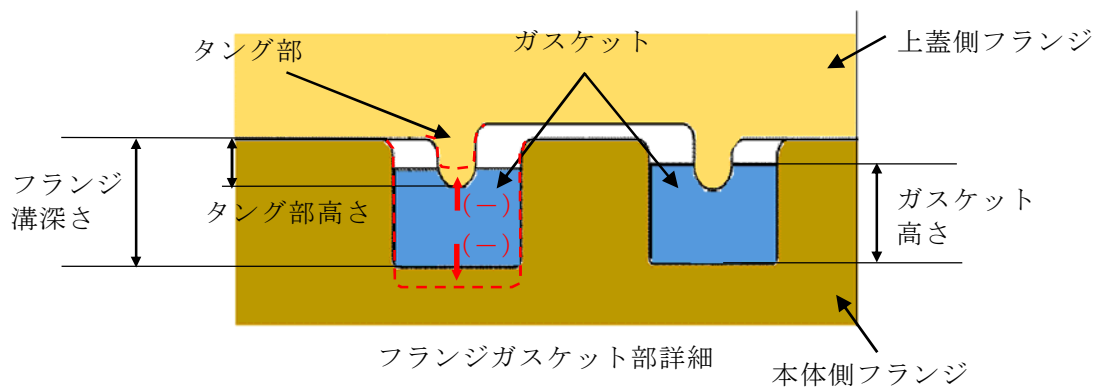
製作公差がトップヘッドフランジの開口量評価に影響する箇所は、シール材を締め付ける部位の開口方向の製作公差であるため、ガスケット溝深さ、タング部高さ及びガスケット高さが該当する（第3図参照）。これらの製作公差を第8表に示す。

第 8 表 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。

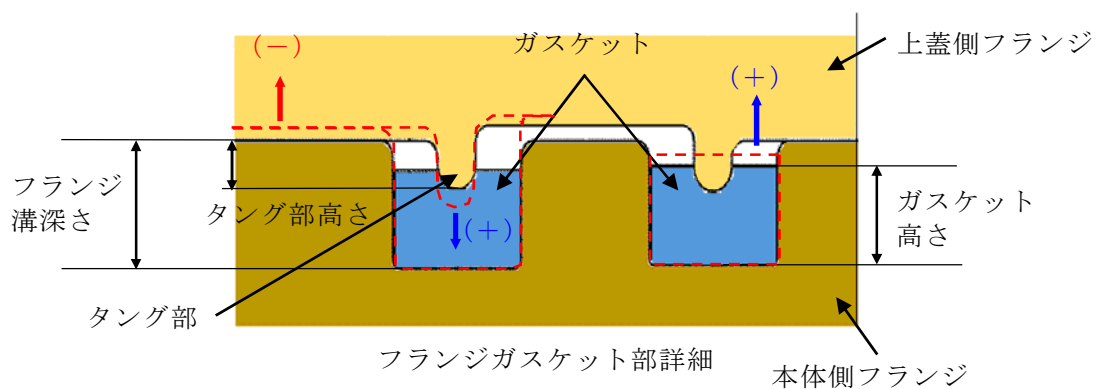


第 3 図 製作公差の概要（赤点線：製作公差のイメージ）

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

第 9 表 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		



第 4 図 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) (= $200 - \boxed{} = \boxed{}$)

第 9 表より、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 0mm 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。

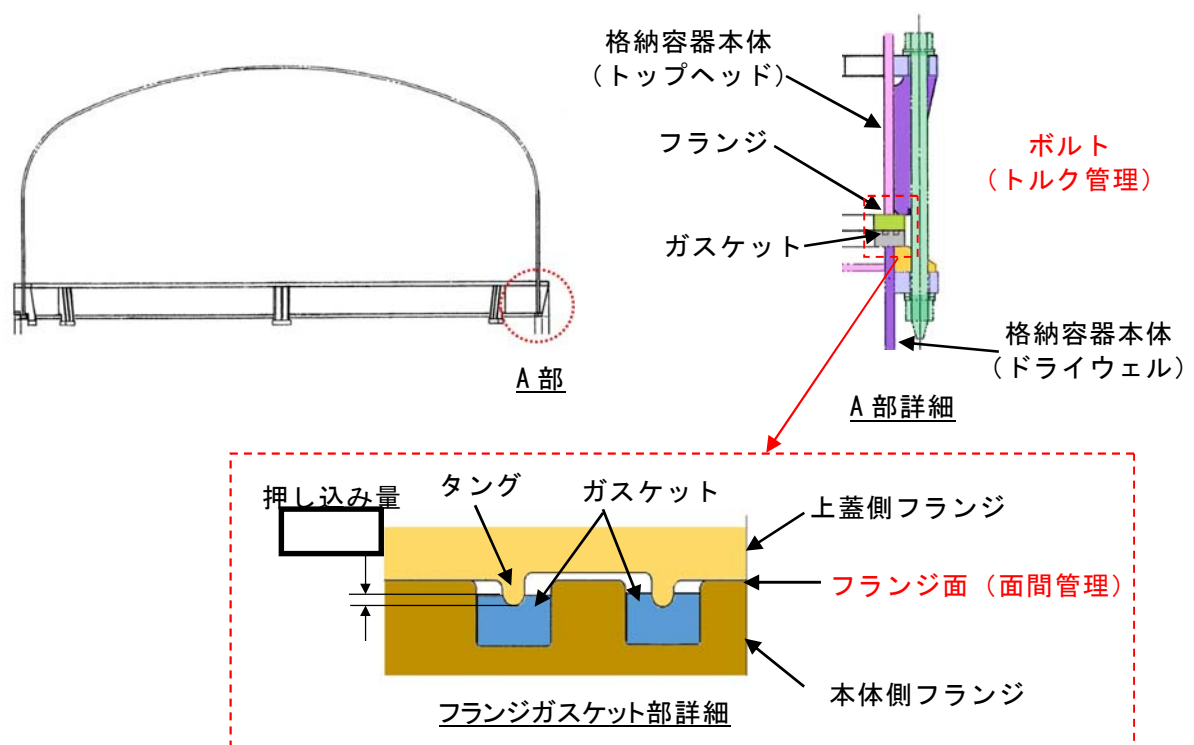
以上の結果から、シール部の構造、寸法及び材料のばらつきを考慮した評価は第 10 表の通りとなり、ばらつきを保守側に積み上げて評価した場合においても、内側・外側ともシール機能は維持されることを確認した。

第 10 表 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					○

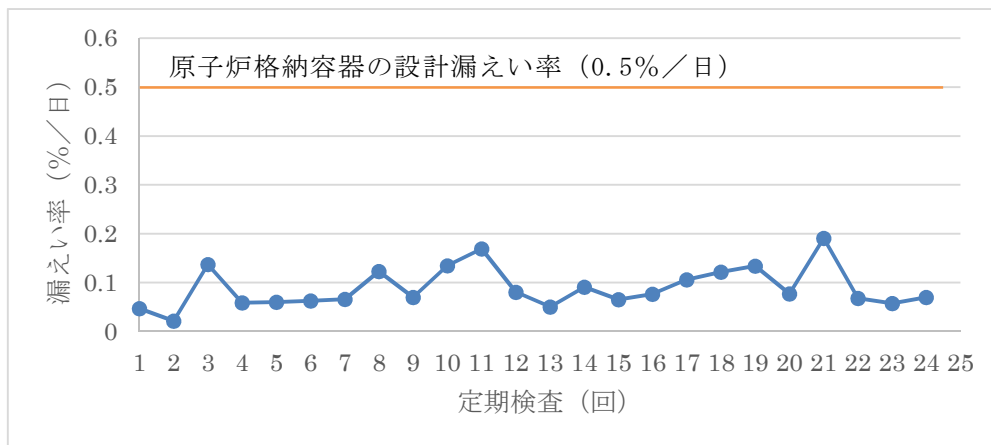
(2) トップヘッドフランジの施工管理について

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第5図に示す。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。

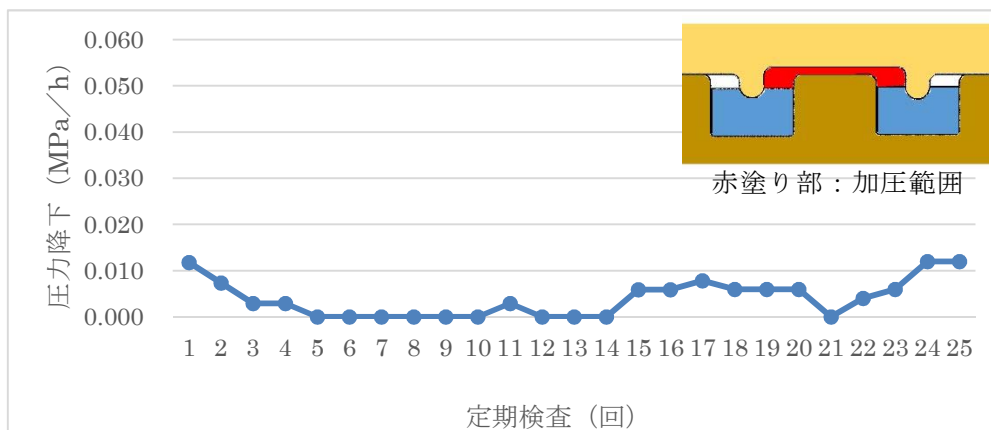


第5図 トップヘッドフランジ部の構造

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第6図、第7図に示す。



第6図 原子炉格納容器全体漏えい率検査実績



第7図 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,第11表から第22表の通りであり,製作公差を考慮しても閉じ込め機能が維持できる。

第11表 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		

第12表 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		

第 13 表 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

第 14 表 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		

第 15 表 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		

第 16 表 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

第 17 表 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		

第 18 表 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		

第 19 表 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

第 20 表 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		

第 21 表 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		

第 22 表 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第 8 図に、フランジ部の寸法測定結果を第 23 表に示す。

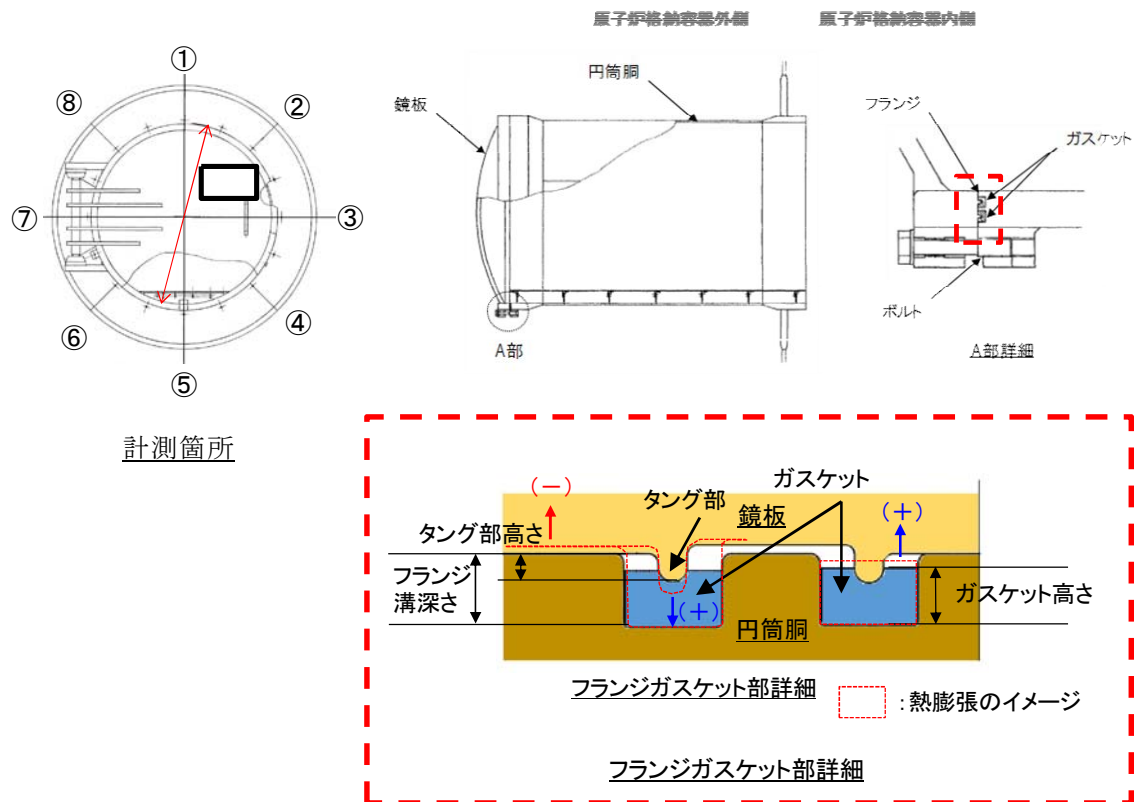
サプレッション・チェンバアクセスハッチの実機フランジ寸法測定の結果、製作公差) に対し、シール部が開口となる方向の製作寸法の誤差は 以内であった。

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）と設計メーカー、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する。

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第 24 表に示すとおり、 であり、開口量に裕度があることを確認した。



第 8 図 サプレッション・チェンバアクセスハッチ 構造図

第 23 表 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																	
タング高さ																	

第 24 表 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

第 25 表に示すとおり，F E M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実さがある。

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。

第 25 表 開口量評価における保守性

項目		保守性	備考
開口量	F E M 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。	