

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PS-C-1 改 46
提出年月日	平成 29 年 9 月 8 日

東海第二発電所

重大事故等対策の有効性評価

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。

目 次

1. 重大事故等への対処に係る措置の有効性評価の基本的考え方
 - 1.1 概 要
 - 1.2 評価対象の整理及び評価項目の設定
 - 1.3 評価に当たって考慮する事項
 - 1.4 有効性評価に使用する計算プログラム
 - 1.5 有効性評価における解析の条件設定の方針
 - 1.6 解析の実施方針
 - 1.7 解析コード及び解析条件の不確かさの影響評価方針
 - 1.8 必要な要員及び資源の評価方針
 - 付録1 事故シーケンスグループの抽出及び重要事故シーケンスの選定について
 - 付録2 原子炉格納容器の限界温度・圧力
 - 付録3 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて
-
2. 運転中の原子炉における重大事故に至るおそれがある事故
 - 2.1 高圧・低圧注水機能喪失
 - 2.2 高圧注水・減圧機能喪失
 - 2.3 全交流動力電源喪失
 - 2.3.1 全交流動力電源喪失（長期TB）
 - 2.3.2 全交流動力電源喪失（TBD，TBU）
 - 2.3.3 全交流動力電源喪失（TBP）

原子炉格納容器の限界温度・圧力

目 次

1. 評価の概要	
(1) はじめに	1
(2) 原子炉格納容器の概要	1
(3) 限界温度・圧力の設定	1
(4) 評価内容及び評価結果の概要	2
a. 評価対象	3
b. 機能喪失要因	5
c. 評価方法	6
d. 評価結果の概要	10
(5) まとめ	46

《別紙》

1. 原子炉格納容器本体	
1.1 評価方針	1-1
1.2 評価結果	1-5
<u>2. トップヘッドフランジ</u>	
<u>2.1 評価方針</u>	<u>2-1</u>
<u>2.2 評価</u>	<u>2-5</u>
<u>2.3 評価結果</u>	<u>2-19</u>

3.	機器搬入用ハッチ	
3.1	評価方針	3-1
3.2	評価	3-5
3.3	評価結果	3-27
4.	サプレッション・チェンバアクセスハッチ	
4.1	評価方針	4-1
4.2	評価	4-5
4.3	評価結果	4-27
5.	<u>所員用エアロック</u>	
5.1	<u>評価方針</u>	<u>5-1</u>
5.2	<u>評価</u>	<u>5-6</u>
5.3	<u>評価結果</u>	<u>5-12</u>
6.	<u>配管貫通部</u>	
6.1	<u>概要</u>	<u>6-1</u>
6.2	<u>配管貫通部（接続配管）</u>	<u>6-2</u>
6.2.1	<u>評価方針</u>	<u>6-2</u>
6.2.2	<u>評価</u>	<u>6-3</u>
6.2.3	<u>評価結果</u>	<u>6-5</u>
6.3	<u>配管貫通部（スリーブ）</u>	<u>6-11</u>
6.3.1	<u>評価方針</u>	<u>6-11</u>
6.3.2	<u>評価</u>	<u>6-13</u>
6.3.3	<u>評価結果</u>	<u>6-19</u>

6.4	配管貫通部（平板類）	6-20
6.4.1	評価方針	6-20
6.4.2	評価	6-22
6.4.3	評価結果	6-28
6.5	配管貫通部（セーフエンド）	6-29
6.5.1	評価方針	6-29
6.5.2	評価	6-30
6.5.3	評価結果	6-31
6.6	配管貫通部（伸縮継手）	6-32
6.6.1	評価方針	6-32
6.6.2	評価	6-33
6.6.3	評価結果	6-34
7.	電気配線貫通部	
7.1	概要	7-1
7.2	電気配線貫通部（アダプタ）	7-3
7.2.1	評価方針	7-3
7.2.2	評価	7-3
7.2.3	評価結果	7-5
7.3	電気配線貫通部（ヘッダ）	7-6
7.3.1	評価方針	7-6
7.3.2	評価	7-6
7.3.3	評価結果	7-9

7.4	電気配線貫通部（モジュール）	7-11
7.4.1	評価方針	7-11
7.4.2	評価	7-12
7.4.3	評価結果	7-16

8. 原子炉格納容器隔離弁

8.1	概要	8-1
8.2	原子炉格納容器隔離弁（不活性ガス系バタフライ弁）	8-2
8.2.1	評価方針	8-2
8.2.2	評価	8-3
8.2.3	評価結果	8-3
8.3	原子炉格納容器隔離弁（T I P ボール弁）	8-5
8.3.1	評価方針	8-5
8.3.2	評価	8-6
8.3.3	評価結果	8-6

参考資料 1 改良 E P D M 製シール材における各試験について

参考資料 2 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

参考資料 3 実機フランジ模擬試験の概要について

参考資料 4 改良 E P D M 製シール材における縮小モデル試験結果の適用
について

参考資料 5 改良 E P D M 製シール材の試験について

参考資料 6 バックアップシール材のシール機能について

参考資料 7 バックアップシール材塗布による設計影響について

- 参考資料 8 トップヘッドフランジ開口評価における製作公差の影響について
- 参考資料 9 経年劣化を考慮したシール機能について
- 参考資料 10 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
- 参考資料 11 シール材の運転環境（放射線量，温度）の考慮について
- 参考資料 12 黒鉛製シール材について
- 参考資料 13 試験データの代表性・信頼性について
- 参考資料 14 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）
- 参考資料 15 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
- 参考資料 16 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
- 参考資料 17 電気配線貫通部のシール性能に係るアレニウス則評価の位置付けについて
- 参考資料 18 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
- 参考資料 19 移動式炉心内計装（T I P : Traversing In-core Probe）系統爆破弁について
- 参考資料 20 動的荷重の影響について
- 参考資料 21 モデル化している各部位の耐震性について
- 参考資料 22 フランジ部の永久変形の評価について
- 参考資料 23 原子炉格納容器 評価温度・圧力負荷後の耐震性
- 参考資料 24 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
- 参考資料 25 200°C，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

参考資料 26 原子炉格納容器貫通部リスト

2. トップヘッドフランジ

2.1 評価方針

トップヘッドフランジは、ドライウエル上蓋側のフランジと原子炉格納容器本体側のフランジをボルトにより固定している。また、シール部はシール溝が内外二重に配置されており、それぞれにシリコンゴムのガスケットを使用している。

トップヘッドフランジの構造強度上考慮すべき機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊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から、脆性破壊及び疲労破壊は評価対象外と考えることができる。

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、フランジが開口し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るが、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。

したがって、トップヘッドフランジの機能喪失要因は、原子炉格納容器内圧による過度な塑性変形に伴う延性破壊、また、シール部のフランジ開口量及びシール材の高温劣化によるシール機能の低下が考えられる。

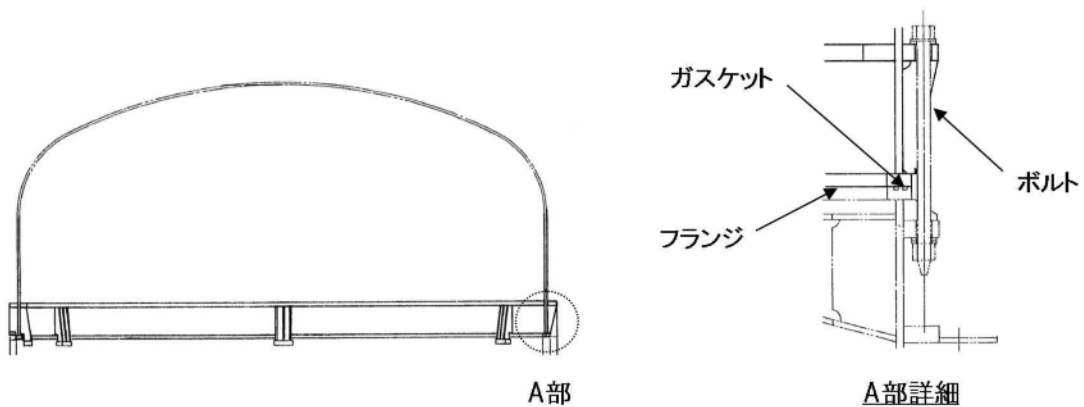
このため、200℃、2Pdでの健全性確認には以下の評価が必要である。

- ・フランジ部の耐圧
- ・フランジ固定部の強度
- ・ガスケットの健全性

トップヘッドフランジの評価対象と評価方法を第2-1表に、評価対象を第2-1図にそれぞれ示す。

第 2-1 表 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 (フランジ部)	延性破壊	既工認に準拠した評価
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



第 2-1 図 トップヘッドフランジの評価対象

(1) フランジ部の耐圧

フランジ部の耐圧評価として、原子炉格納容器温度・圧力が200℃，2Pdにおけるフランジ部の一次応力評価を行い、発生応力が許容応力以下であることを確認する。

評価に当たっては、既工認と同様の評価手法である設計建設規格の評価手法に準拠し、構造健全性を確認する。

ここで、設計・建設規格の解説表PVB-3110-1において、延性破壊評価は一次応力の評価を実施することとなっている。一方、設計・建設規格における一次応力強さの許容値は、材料の種類及び温度毎に材料試験（引張試験）を実施した結果をもとに、国内Su 値検討会で設定された設計引張強さ（Su）に割下げ率を考慮して設定されたものである（設計・建設規格 解説GNR-2200）。今回の評価は、設計基準である最高使用温度及び最高使用圧力を超過するフランジ部の限界温度及び許容圧力の妥当性を確認するものであるため、上記割下げ率を P_m （一次一般膜応力強さ）には1.5、 P_L+P_b （一次局部膜応力強さ＋一次曲げ応力強さ）には1.0とした評価を行う。すなわち、フランジ部に発生する応力が、 P_m が $2/3Su$ 、 P_L+P_b がSu 以下であれば延性破壊には至らず、構造は健全で機能要求（放射性物質の閉じ込め機能）を確保できると考える。この許容値の考え方は、設計・建設規格解説PVB-3111 に示すように、供用状態Dの P_m 、 P_L+P_b の許容値と同様である。なお、耐圧機能維持の観点から、安全評価上の仮定（原子炉冷却材喪失事故を想定）に保証を与える目的で応力評価を行う設計・建設規格の供用状態Dの許容応力は、鋼材の究極的な強さを基に、弾性計算により塑性不安定現象の評価を行うことへの理論的安全裕度を考慮して定めたものであり、 P_m は $2/3Su$ 、 P_L+P_b は $1.5 \times 2/3Su (=Su)$ と規定されている。前者は、膜応力であり断面の応力がSu に到達すると直ちに破損に至るため割下げ率1.5を考慮して規定されているが、後者は、断面表面がSuに到達しても断面内部は更なる耐荷能力があり直ちに破損には至らないため割下げ率は1.0 とする。

(2) フランジ固定部の強度

① 締付けボルトの強度評価

トップヘッドフランジの締付けボルトについて、200℃、2Pdにおける強度を評価する。

② フランジの開口評価

原子炉格納容器の重大事故時の過温、過圧時におけるフランジ開口量を評価するために、FEM 解析を用いてトップヘッドフランジ部における開口量を評価する。

(3) ガasketの健全性

シール材（ガasket）はこれまでシリコン製シール材を使用しているが、事故環境下における性能特性に優れたシール材である改良E P D M製シール材に変更する。改良E P D M製シール材による事故時の格納容器閉じ込め機能を確認するために、圧縮永久ひずみ試験結果をもとに格納容器限界開口量を評価し、重大事故時におけるフランジ開口量と比較することで格納容器閉じ込め機能の評価する。

2.2 評価

(1) フランジ部の耐圧

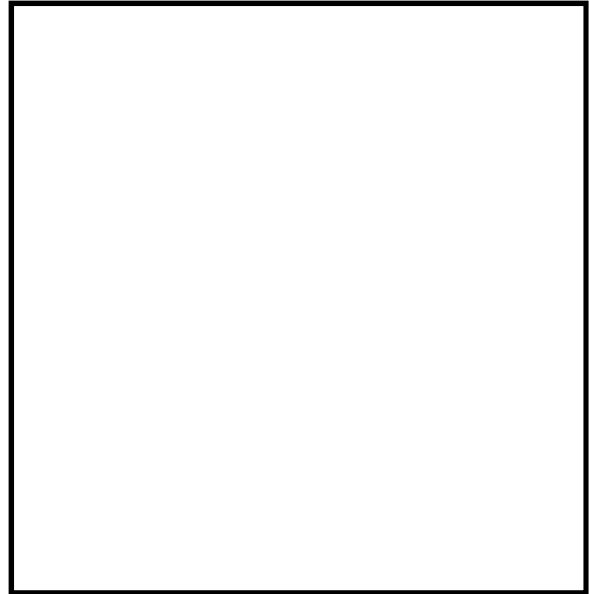
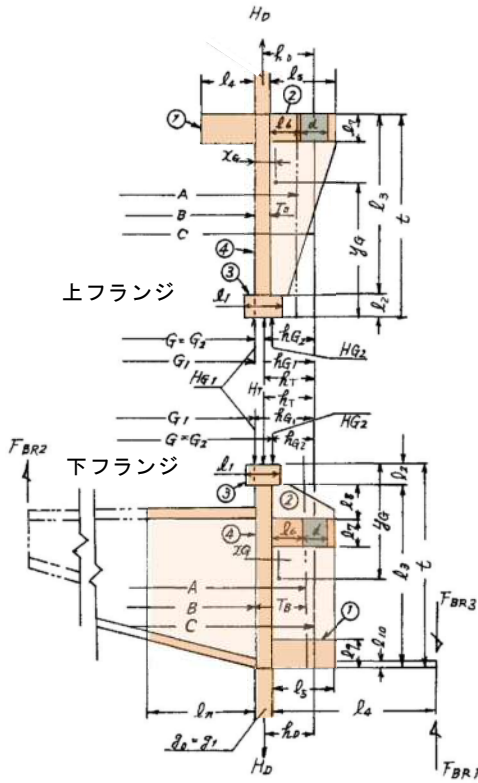
トップヘッドフランジについて、既工認と同様の評価手法である設計・建設規格 PVE-3700 を適用し、J I S B 8265「圧力容器の構造—一般事項」に基づいてフランジの発生応力について算出した結果を示す。

S_u 値を算出する際の温度は、限界温度として設定した 200°C を用いる。

応力計算に用いるトップヘッドフランジの主要寸法を第 2-2 図に示す。

また、応力算出結果を第 2-2 表に示す。

各発生応力とも許容応力を下回っており、200°C、2Pd 条件下においてトップヘッドフランジの構造健全性を確認した。



フランジ材質：ASME SA516 Gr70 (SGV480 相当)

第 2-2 図 トップヘッドフランジの形状及び主要寸法

第 2-2 表 応力算出結果

単位：MPa

荷重	応力			許容応力
2Pd	フランジの軸方向応力	σ_H	185	422
	フランジの径方向応力	σ_R	2	281
	フランジの周方向応力	σ_T	86	281
	組合せ応力	$\frac{\sigma_H + \sigma_R}{2}$	94	281
$\frac{\sigma_H + \sigma_T}{2}$		136	281	

(2) フランジ固定部の強度

①縮付けボルトの強度評価

トップヘッドフランジの縮付けボルトについて、200℃、2Pdにおける強度を、既工認の強度計算書をベースに評価する。縮付けボルト基本仕様を第2-3表、評価結果を第2-4表に示す。

発生応力は、許容応力以下であることから、縮付けボルトは200℃、2Pdにおいて健全である。

第2-3表 トップヘッドフランジ縮付けボルトの主要仕様

項目	東海第二発電所
ボルト材質	ASME SA320 Gr. L43 (SNCM439相当)
ボルト呼び	<input type="text"/>
ボルト本数	<input type="text"/>

第2-4表 縮付けボルトの評価結果 (単位: MPa)

項目	東海第二発電所	許容値
トップヘッドフランジ	<input type="text"/>	576

②フランジの開口評価

トップヘッドフランジについて、2Pdにおけるフランジ面の開口量が許容開口量を下回ることを確認するため、三次元FEMモデルを用いて弾塑性解析を実施した。

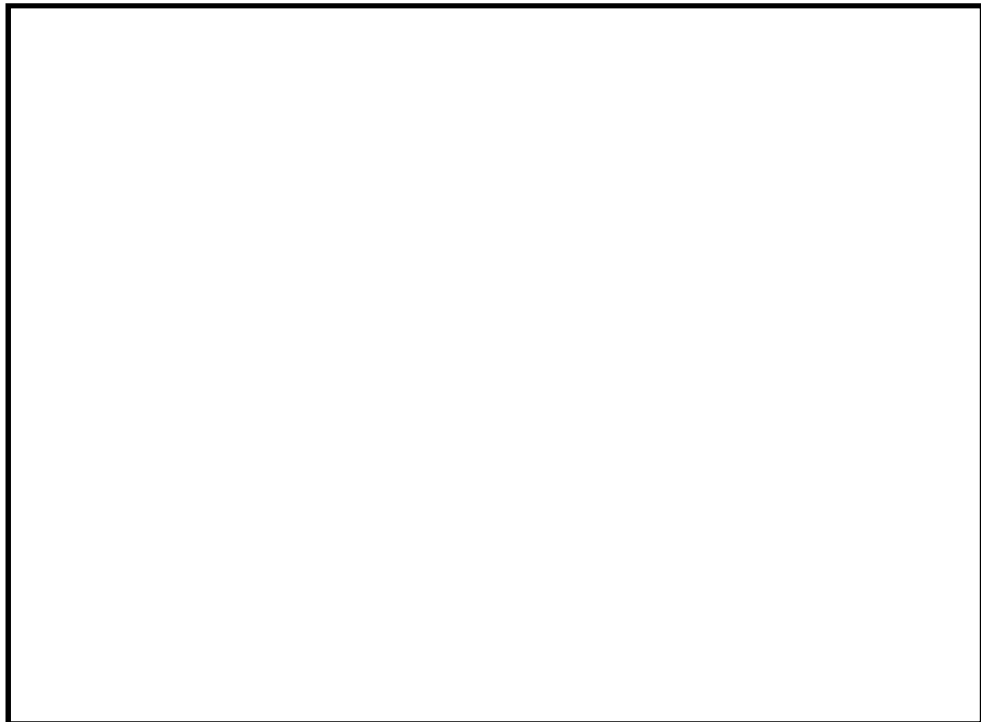
第2-3図に解析モデルを示す。本解析では、フランジの他、圧力作用面であるトップヘッド及び原子炉格納容器胴部（円筒胴及び円錐胴）をモデ

ル化する。

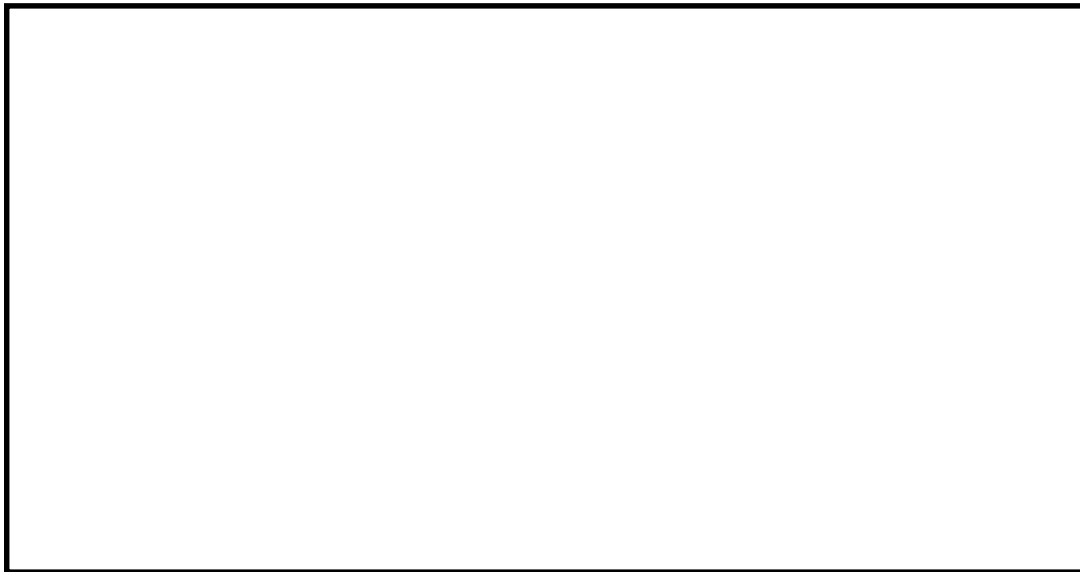
また、フランジシール部を構成する各種部材（フランジ、ボルト、ナット等）の荷重伝達経路を詳細にモデル化するため、ソリッド要素を用いて可能な限り詳細な形状をモデル化する。モデルは対称性を考慮してボルト1/2ピッチ分をモデル化している。荷重条件として、0から発散するまで内圧を加えた。

200°Cにおける圧力と開口量の関係を第2-4図に示す。

2Pdにおける内側ガスケット部の開口量は 外側ガスケット部は であった。



第2-3図 トップヘッドフランジの解析モデル



第 2-4 図 圧力と開口量の関係（東海第二発電所モデル，200℃）

(3) ガスケットの健全性

フランジシール部は，内圧が低い段階ではボルトの初期締付けにより開口は抑制されているが，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。ただし，フランジ部が開口しても，フランジ部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る。しかしながら，重大事故環境に晒されると，フランジシール部に使用されているシール材が劣化し，フランジの開口に追従できなくなり格納容器閉じ込め機能を損なう可能性がでてくる。

そこで，トップヘッドフランジのシール部に使用されているシール材（シリコンゴム）について，事故時環境下の耐性が優れた改良 E P D M 製シール材に変更して格納容器閉じ込め機能の強化を図る。従って，改良 E P D M 製シール材について，事故時の温度や放射線による劣化特性を試験により確認し，想定される事故シナリオにおけるシール機能を評

価する。なお、フランジ部のシール材は、プラントの定期検査時に開放される場合には取り替えを実施しており、通常運転中における劣化は極めて軽微であることから、事故条件下での評価を実施する。

a. シール材（改良E P D M製）の圧縮永久ひずみ試験結果について

改良E P D M製シール材の事故時環境における劣化特性を、高温蒸気曝露の期間を確認するために、J I S 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」に準じて圧縮永久ひずみ試験を実施した。その結果を第2-5表に示す。なお、圧縮永久ひずみ測定とは、所定の圧縮率をかけ変形させた後、開放時の戻り量を評価するものである。完全に元の形状に戻った場合を0%とし、全く復元せずに完全に圧縮された状態のままである状態を100%としている。例えば、圧縮永久ひずみが第2 - 5表で示す の場合は、シール材の初期縮付量が である東海第二を例にとると 戻ることを意味する。この場合 のフランジ部開口まではシール機能が確保可能と想定できる。

第2-5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

b. 改良EPDM製シール材の性能確認試験

b-1 実機を模擬した小型フランジ試験

改良EPDM製シール材の性能を確認するために、圧縮永久ひずみ試験に加え、実機フランジOリング溝を模擬した小型試験装置を用いて、事故環境に曝露した後のシール機能を確認した。試験装置を第2-5図に示しており、実機Oリング溝の断面寸法を1/2スケールとして試験治具を製作し、予めγ線照射したシール材を用いて試験体を作り、高温環境に曝露した後に気密確認試験を実施した。

試験条件としては、事故条件を模擬するために、放射線照射量はフランジガasket部の事故後7日間の累積放射線量の日安である800kGyを用いて実施している。また、高温曝露は高温空気及び高温蒸気で曝露し、温度については、格納容器限界温度である200℃と、さらに余裕を見た250℃を設定し、それぞれ7日間(168時間)一定温度で高温曝露している。また、試験治具のOリング溝は内側に□の段差があり、その段差の間からシール材が高温空気又は蒸気に曝露されるため、事故時の格納容器過圧に伴うフランジ開口を考慮した状態で、高温曝露ができる試験体となっている。高温曝露後は、事故時に発生する水素を模擬するために、Heにより気密確認試験を実施している。気密確認試験では、格納容器限界圧力2Pd(0.62MPa)以上の気密性を確認するため最大で0.9MPaまで加圧して気密性を確認している。また、格納容器過圧に伴うフランジ開口時のシール材の気密性を確認するために、高温曝露後の試験体フランジを0.8mm開口させ、その状態でもHe気密確認試験を実施し、0.9MPa加圧時に漏えいのないことを確認している。なお、開口量の0.8mmは、2Pdにおける開口量が最も大きなトップヘッドのフランジ開口量□を1/2スケールにしたものと同等である。

試験結果は第2-6表に示すとおり、本試験により200℃が168時間継続した

場合の改良E P D M製シール材のシール機能の健全性を確認した。



第2-5図 改良E P D M製シール材の性能確認試験装置

第 2-6 表 He 気密確認試験結果

No.	曝露条件	γ 線照射量	変位	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	○	○	○

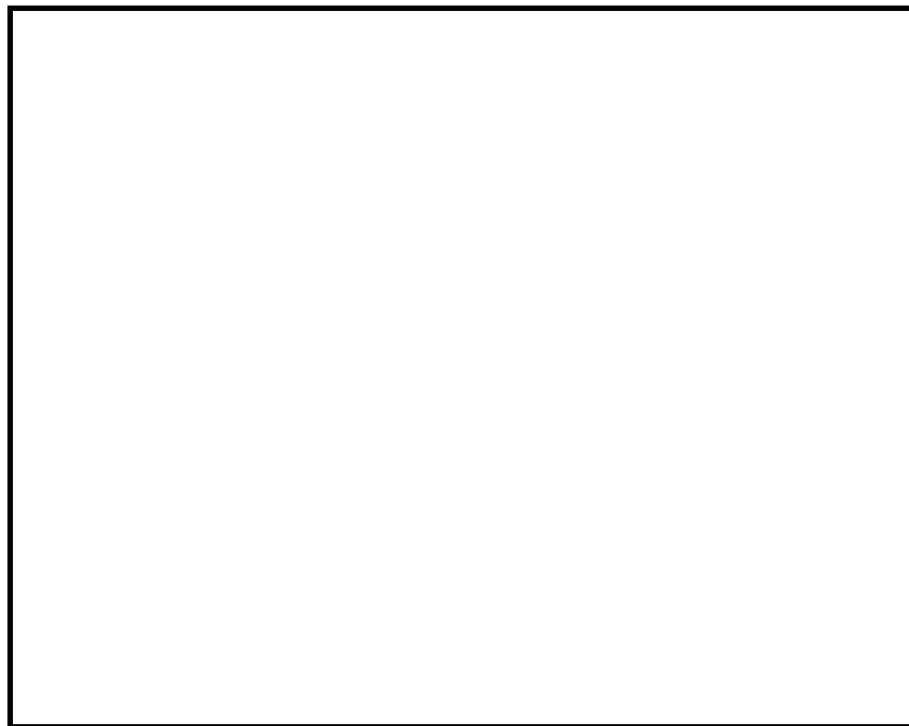
○ : リーク及び圧力降下なし

b - 2 実機フランジ模擬試験

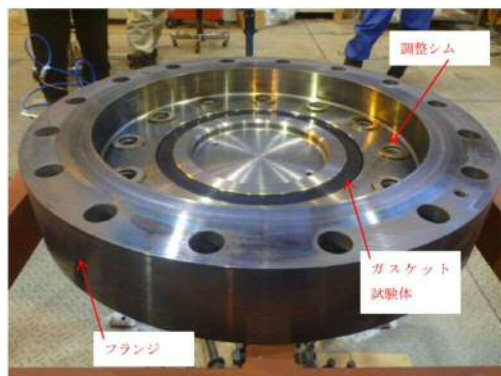
改良EPDM製シール材は前述の小型フランジ試験に加え、より大口径（ガスケット径：約250mm）の**実機フランジ模擬試験**（実機フランジモデル試験）も実施しており、実機条件に近い状態でのシール健全性の確認を行っている。試験装置は第2-6図、第2-7図に示しており、試験フランジの溝断面形状は実機と同じとし、溝径を縮小した試験フランジとする。試験試料の断面形状は実機と同じとし、径を縮小した試験試料とする。予めγ線照射したシール材を用いて試験体を作り、高温環境に曝露した後に気密確認試験を実施する。

試験条件としては、事故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800kGyを用いて実施している。また、EPDM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、高温曝露は蒸気ではなく高温空気（乾熱）で曝露し、温度については、格納容器限界温度である200℃と、さらに余裕を見た250℃、300℃とし、それぞれ定める期間を一定温度で高温曝露する。また、内圧作用時の実機フランジの開口を模擬するため、フランジ面に調整シムを挟んで押し込み量を調整できる装置にしている。

本試験装置によりシール材を高温曝露した後、気密確認試験を実施した。気密確認試験では、格納容器限界圧力 2Pd(0.62MPa)を包絡する圧力で気密性を確認した。



第 2-6 図 実機フランジ模擬試験の装置概要



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）

第 2-7 図 実機フランジ模擬試験装置の外観

試験結果を第 2-7 表に示す。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 (0mm) であっても、有意な漏えいは発生せず、200℃・168 時間、250℃・96 時間、300℃・24 時間の耐性が確認された。第 2-8 図に 200℃・168 時間の試験ケースにおける試験体の外観を示す。第 2-8 図より、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。

第 2-7 表 シビアアクシデント条件での試験結果

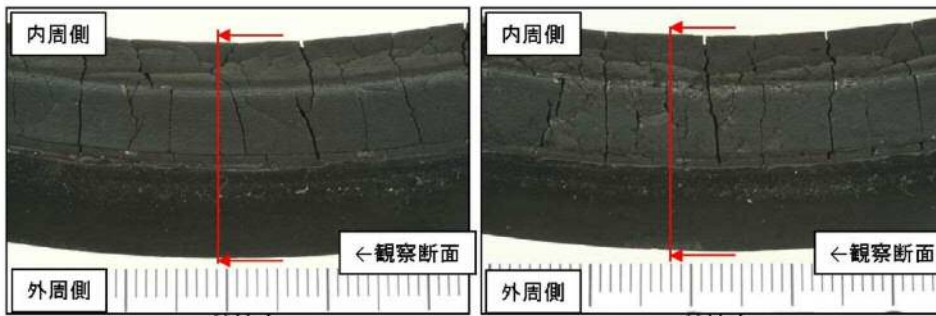
No.	試験体	温度	継続時間	押し込み量	漏えいの有無
1	改良 EPDM (<input type="text"/>)	200℃	168 時間	0mm	無
2	改良 EPDM (<input type="text"/>)	250℃	96 時間	0mm	無
3	改良 EPDM (<input type="text"/>)	300℃	24 時間	0mm	無

下記条件は全ケース共通

試験圧力：2Pd 以上 (0.854MPa 以上)、放射線照射量：800kGy、加圧媒体：乾熱 (空気)

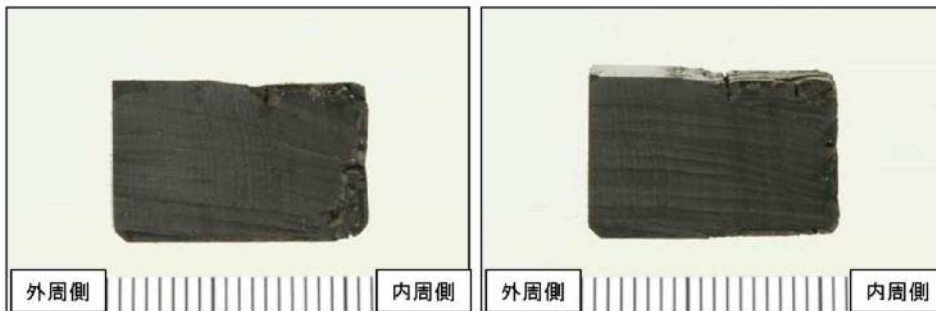


全体写真



①拡大

②拡大



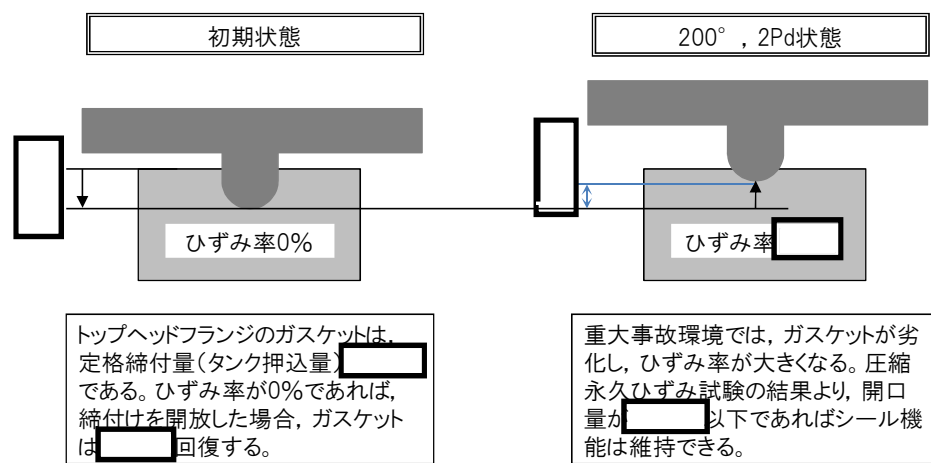
①断面形状

②断面形状

第 2-8 図 試験後の試験体外観 (200°C・168 時間)

ガスケットの健全性を評価するにあたり、トップヘッドフランジに許容される開口量について以下のように設定する。

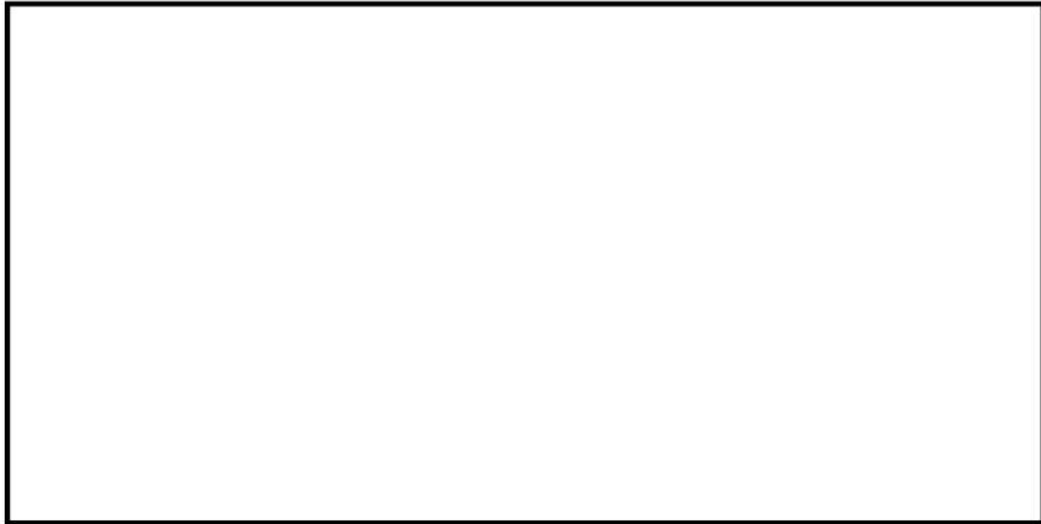
第 2-9 図に開口量とシール材のシール性関係図を示す。東海第二発電所のトップヘッドフランジは、タング（突起）がガスケットを押し込む構造であり、フランジの定格締付量（タング押込量）は [] である。圧力の増加に伴いフランジ部は開口するが、「シール材（改良 E P D M 製）の圧縮永久ひずみ試験」より得られたガスケットの圧縮永久ひずみ率 [] をもとに、ガスケットの事故時環境における最大復元量を評価すると、 [] (= [] × (100% - [])) となる。また、「実機フランジ模擬試験」から 200℃、2Pd におけるタング押込量 0mm においてシール機能が維持されていることを確認したことから、許容開口量は、最大復元量と同じ [] に設定する。



第 2-9 図 ひずみ率と許容開口量関係図

本評価に用いる許容開口量は、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」シーケンスのベント実施タイミング（事故後約 19 時間）における環境条件を包絡する 168 時間後における圧縮永久ひずみ試験結果（ひずみ率）から [] としている。

したがって、(2)b. 項にて求めた 200°C 、 2Pd ($0.62\text{MPa}[\text{gage}]$) における開口量は、内側ガスケット部で 外側ガスケット部で であり、許容開口量 を下回り、シール機能が維持できることを確認した (第 2-10 図)。



第 2-10 図 圧力と開口量の関係 (東海第二発電所モデル, 200°C)

2.3 評価結果

トップヘッドフランジの健全性評価結果を表2-11に示す。

第2-11表 トップヘッドフランジの健全性評価結果

No.	大項目	評価方法	評価	結果
(1)	フランジ部の耐圧	応力評価	200℃, 2Pdにおけるフランジ部の一次応力は, 許容値: 2/3Suを満足することを確認	○
(2)	フランジ固定部の強度	①締付けボルトの強度評価	200℃, 2Pdにおける締付ボルトの一次応力は, 許容値: 2/3Suを満足することを確認	○
		②フランジの開口評価	200℃, 2Pdにおけるフランジ開口を評価 (3)ガスケットの健全性と併せて健全性評価を行う)	—
(3)	ガスケットの健全性	シール材劣化, 開口量評価	・ガスケット(改良EPDM製シール材)の事故時環境における劣化特性を考慮しても200℃, 2Pdにおけるフランジ開口量は, 許容開口量以下となり, シール機能が維持されることを確認	○

以上により, トップヘッドフランジについては, 200℃, 2Pd 環境下でも, 放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

なお, 更なる安全性向上対策として, 重大事故後の長期におけるシール機能健全性を補強するために, 高温蒸気に耐性があるバックアップシール材を追加塗布する。その有効性については, バックアップシール材の試験を元に評価し, 格納容器閉じ込め機能の信頼性を確認した。

5. 所員用エアロック

5.1 評価方針

所員用エアロックは、原子炉格納容器外側に突き出した円筒胴、隔壁及び隔壁に支持された扉板によって原子炉格納容器バウンダリを構成している。また、扉板はロック機構により固定されており、隔壁と扉板とのシール部には、シリコンゴムのガスケットを使用している。

隔壁には扉開閉ハンドル軸、開閉表示盤の電線管が貫通しており、貫通部にはフッ素系シール材を使用している。また、隔壁に接続する均圧配管にはフランジ部及び均圧弁にシール材を使用しており、フランジ部には非石綿系シートガスケット、均圧弁シート部にはフッ素系シール材を使用している。

所員用エアロック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、有意な圧縮力が所員用エアロック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。

従って、所員用エアロックの機能喪失要因は、高温状態で内圧を受け、過度な塑性変形に伴う延性破壊が想定される。

また、シール部のうち扉板部については、原子炉格納容器内の圧力が上昇した際に、扉板は所員用エアロック本体側に押し付けられる構造であるため、圧力により扉が開くことはないが、高温状態で内圧を受けることによる扉板のわずかな変形及びシール材の高温劣化によるシール機能の低下が想定される。なお、その他のシール部についても高温劣化によるシール機能の低下が想定される。

そのため、所員用エアロック本体の塑性変形に伴う延性破壊、また、扉の変形及びシール材の高温劣化によるシール機能の低下が考えられる。

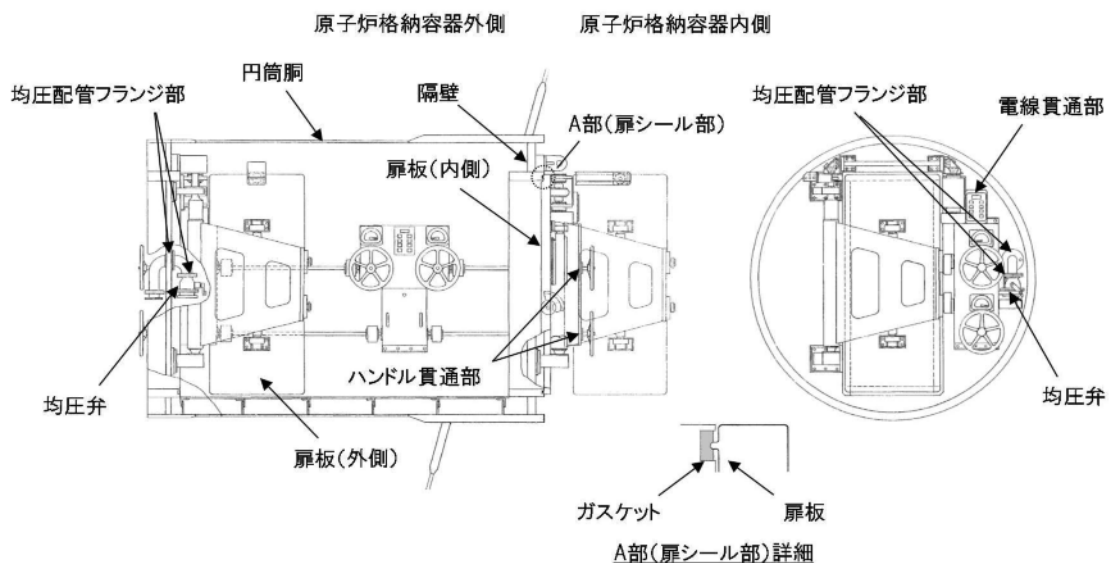
このため、200℃、2Pd での健全性確認には以下の評価が必要である。

- ・ 本体の耐圧
- ・ ガスケットの健全性

所員用エアロックの評価対象と評価方法を第5-1表に、評価対象を第5-1図にそれぞれ示す。

第5-1表 評価対象と評価方法

評価対象（シール材）		機能喪失要因	評価方法
構造部	円筒胴	延性破壊	設計・建設規格の評価式を準用した評価
	隔壁	延性破壊	既工認の評価結果を用いた評価
シール部	扉板 (ガスケット)	開口, シール材劣化	機械工学便覧の計算式を用いた評価 試験結果等を用いた評価
	扉開閉ハンドル貫通部 (Oリング)	シール材劣化	試験結果等を用いた評価
	電線管貫通部 (シール材)	シール材劣化	試験結果等を用いた評価
	均圧配管フランジ部 (ガスケット)	シール材劣化	試験結果等を用いた評価
	均圧弁 (シート部)	シール材劣化	試験結果等を用いた評価



第 5-1 図 所員用エアロックの評価対象

(1) 本体の耐圧

a. 許容圧力評価

所員用エアロックの構造健全性評価として、所員用エアロックのうち内圧による荷重を受け止める部位のうち、円筒胴については、既工認と同様の評価手法である設計・建設規格に示される必要最小板厚の式を用い許容圧力評価を行い、隔壁については、既工認において最も厳しい応力点を代表評価点として、既工認で算出した応力に基づき許容圧力評価を行い、許容圧力が $2Pd$ を上回ることを確認する。(隔壁部の代表評価点以外の応力評価点については別添 5-1 参照)

ここで、設計建設規格の解説表 PVB - 3110 - 1 において、延性破壊評価は一次応力の評価を実施することとなっている。一方、設計・建設規格における一次応力強さの許容値は、材料の種類及び温度毎に材料試験（引張試験）を実施した結果をもとに国内 Su 値検討会で設定され

た設計引張強さ (S_u) に割下げ率を考慮して設定されたものである (設計・建設規格 解説 GNR - 2200)。

今回の評価は、設計基準である最高使用温度及び最高使用圧力を超過する所員用エアロックの限界温度及び許容圧力の妥当性を確認するものであるため、上記割下げ率を P_m (一次一般膜応力強さ) には 1.5 とした評価を行う。すなわち、所員用エアロックに発生する応力が、 P_m が $2/3S_u$ 、 P_L+P_b が S_u 以下であれば、延性破壊には至らず、構造は健全で機能要求 (放射性物質の閉じ込め機能) を確保できると考えている。

この許容値の考え方は、設計・建設規格 解説 PVB - 3111 に示すように、供用状態 D の P_m の許容値と同等である。なお、耐圧機能維持の観点から、安全評価上の仮定 (原子炉冷却材喪失事故を想定) に保証を与える目的で応力評価を行う設計・建設規格の供用状態 D の許容応力は、鋼材の究極的な強さを基に、弾性計算により塑性不安定現象の評価を行うことへの理論的安全裕度を考慮して定めたものであり、 P_m は $2/3S_u$ と規定されている。 P_m は、膜応力であり断面の応力が S_u に到達すると直ちに破損に至るため割下げ率 1.5 を考慮して規定されている。

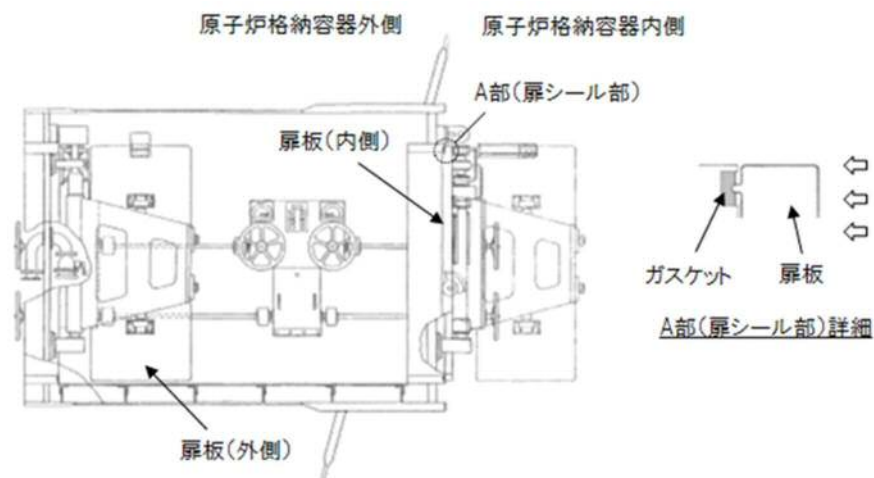
(2) ガスケットの健全性

a. 扉のシール材

所員用エアロックの扉のシール材には、これまでシリコンガスケットを使用しているが、事故時の耐環境性に優れた改良 EPDM 製シール材に変更する。所員用エアロック扉閉止時は、扉は原子炉格納容器内圧により扉板が支持部に押付けられる構造であり、圧力により扉板

が開くことはない。しかし、高温状態で内圧を受けることによる扉板のわずかな変形によりガスケット部の微小な開口が予想されるため、圧力による開口量を機械工学便覧のほりのたわみ計算式に基づき評価する。改良E P D M製シール材による事故時の格納容器閉じ込め機能を確認するために、圧縮永久ひずみ試験結果をもとに許容開口量を評価し、重大事故時における扉板部の開口量と比較することで格納容器閉じ込め機能を評価する。

なお、シール材の高温劣化については、エアロックの扉に使用されるシール材がトップヘッドフランジ及びハッチ類と同一であり、事故時の耐環境性に優れた改良E P D M製シール材であること、事故時には格納容器の内圧により扉が押し付けられシール部を抑え込む方向であること及び扉が二重に設けられることから、原子炉格納容器閉じ込め機能への影響度は小さいと考え、トップヘッドフランジ・ハッチ類の評価にて代表するものとする。所員用エアロックの構造概略図を第5-2 図に示す。なお、エアロックのシール材は、プラントの定期検査時に開放される場合には取り替えを実施しており、通常運転中における劣化は極めて軽微であることから、事故条件下での評価を実施する。



第 5-1 図 所員用エアロックの構造概略図

b. 扉以外のシール材

所員用エアロックには、扉のシリコンガスケット以外に格納容器閉じ込め機能を確保するための隔壁貫通部にシール材が使用されているが、今後、事故時の耐環境性に優れた第 5-2 表に示すシール材に変更する。

これらのシール材について試験結果及び一般的な材料特性により重大事故環境下における耐性を確認する。

第 5-2 表 所内用エアロック（扉以外）のシール材

対象部位	シール材
扉開閉ハンドル貫通部 (Oリング)	改良 E P D M材
電線管貫通部 (シール材)	膨張黒鉛材
均圧配管フランジ部 (ガスケット)	改良 E P D M材 又は 膨張黒鉛材
均圧弁 (シート部)	P E E K材

5.2 評価

(1) 本体の耐圧

a. 許容圧力評価

所員用エアロックの構造健全性評価として、所員用エアロックのうち内圧による荷重を受け止める部位のうち、円筒胴については、既工認と同様の評価手法である設計・建設規格に示される必要最小板厚の式を用い許容圧力評価を行い、隔壁については、既工認において最も厳しい応力点を代表評価点として、既工認で算出した応力に基づき許容圧力評価を実施した。

評価に用いた主要仕様を第5-3表に示す。

第5-4表に、所員用エアロックの許容圧力評価結果を示す。結果を示す。

第5-3表 所員用エアロックの主要仕様

項目	東海第二発電所
最高使用圧力 (MPa)	0.31
最高使用温度 (°C)	171
材料	ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)
内径 (mm)	
胴板厚さ (mm)	

第5-4表 所員用エアロックの許容圧力評価結果

①円筒胴：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

許容圧力算定式：PVE-3230(2)a項を準用

$$P = 2S \eta t / (D_i + 1.2t)$$

S	許容引張応力 (MPa) (200°Cにおける 2/3S _u 値を使用)	281
η	継手効率 (-)	1.0
t	呼び厚さ (mm)	
D _i	胴内径 (mm)	
P	200°Cにおける許容圧力	3.716
3.716MPa > 0.62MPa (2Pd)		

②隔壁：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

$$P = S \times P_D / \sigma$$

S	許容引張応力 (MPa) (200°Cにおける 2/3S _u 値を使用)	422
P _D	設計圧力 (MPa)	0.279
σ	既工認での発生応力 (MPa)	89
P	200°Cにおける許容圧力	1.322
1.322MPa > 0.62MPa (2Pd)		

(2) ガスケットの健全性

a. 扉のシール材

a - 1 扉板部の開口量評価

所員用エアロック扉閉止時は、扉は原子炉格納容器内圧により扉板が支持部に押付けられる構造であり、圧力により扉板が開くことはない。しかし、高温状態で内圧を受けることによる扉板のわずかな変形によりガスケット部の微小な開口が予想されるため、圧力による開口量を機械工学便覧のはりのたわみ計算式に基づき評価した。改良E P D M製シール材による事故時の格納容器閉じ込め機能を確認するために、圧縮永久ひずみ試験結果をもとに許容開口量を評価し、重大事故時における扉板部の開口量と比較することで格納容器閉じ込め機能の評価した。

許容開口量の設定に使用する改良E P D M製シール材の圧縮永久ひずみ試験結果を第5-5表に示す。

第5-5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

許容開口量の設定に使用する試験結果は、トップフランジの設定の考え方と同様、168hのひずみ率とする。また、扉板シール部の定

格押込量が であることを踏まえ、許容開口量は (=定
格締付量 × (100% -) / 100%) とする。

機械工学便覧のはりのたわみ計算式を用いて求めた、所員用エア
ロック扉板の開口量は第 5-6 表に示すとおり 0.73mm であり、許容開
口量 を下回る。

所員用エアロック扉の変形概念図を第 5-3 図に示す。

第 5-6 表 所員用エアロック（扉板）の開口量評価結果

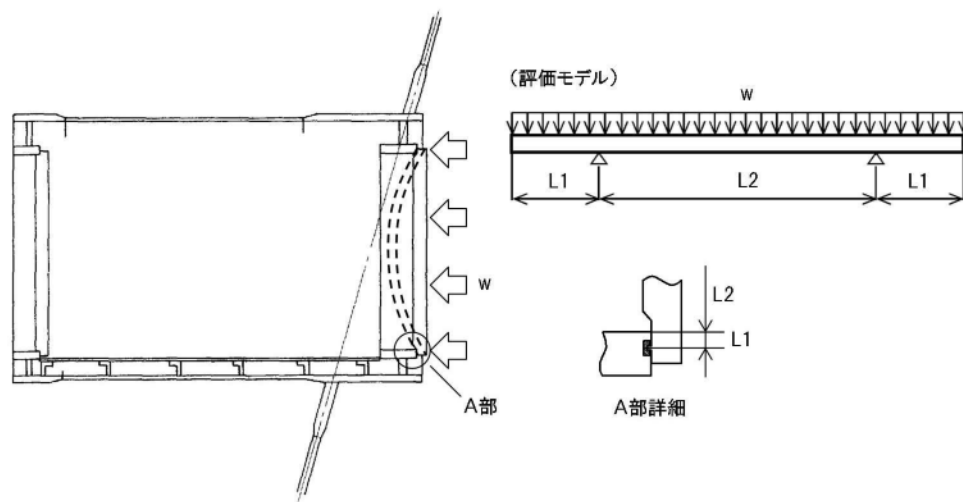
評価式：機械工学便覧

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

$$w = P \times b \quad (w: \text{単位荷重})$$

$$I = b \times h^3 / 12 \quad (I: \text{断面二次モーメント})$$

P	圧力 (MPa[gage])	0.62
b	扉板の幅 (mm)	<input type="text"/>
L ₁	支点からシール部までの長さ (mm)	<input type="text"/>
E	縦弾性係数 (MPa)	191,000
h	扉板の厚さ (mm)	<input type="text"/>
L ₂	支点間の長さ (mm)	<input type="text"/>
δ	変位量 (mm)	<input type="text"/>



第 5-3 図 所員用エアロック扉の変形概念図

b. 扉以外のシール材

所員用エアロックには、扉のシリコンガスケット以外に格納容器閉じ込め機能を確保するための隔壁貫通部にシール材が使用されているが、今後、事故時の耐環境性に優れた第 5-2 表に示すシール材に変更する。

これらのシール材について試験結果及び一般的な材料特性により重大事故環境下における耐性を確認した。

扉開閉ハンドル貫通部及び均圧配管フランジ部に使用する改良 EPDM 材については、第 5-5 表の圧縮永久ひずみ試験結果に示すとおり、重大事故環境下においても十分な耐性を有することを確認している。

電線管貫通部及び均圧配管フランジ部に使用する膨張黒鉛材は、一般的に 400℃程度の高温環境下においても高い安定性を得ることができるシール材料であり、第 5-7 表に示す材料特性から、重大事故環境下においても十分な耐性を有することを確認した。

第 5-7 表 膨張黒鉛材の材料特性

シール材	仕様		
	耐熱温度	耐圧性	耐放射線性
膨張黒鉛材	400℃以上	6.9MPa	約 15MGy

均圧弁シート部に使用する PEEK 材は、一般的に 200℃程度の高温環境下においても高い安定性を得ることができるシール材料であり、第 5-8 表に示す材料特性から、重大事故環境下においても十分な耐性を有することを確認した。

第 5-8 表 PEEK 材の材料特性

シール材	仕様		
	耐熱温度	融点	耐放射線性
PEEK材	250℃	334℃	約 10MGy

また、実機均圧弁と同型の弁を使用した、重大事故時の格納容器環境を模擬した耐環境試験を実施しており、熱及び放射線曝露後の漏えい試験にて弁シート部の気密性が確保できることを確認している。第 5-9 表に耐環境試験条件を示す。

第 5-9 表 均圧弁の耐環境試験条件 (PEEK 材)

熱劣化	200℃, 168 時間
放射線照射量	<input type="text"/>
漏えい試験圧力	0.9MPa [gage]

5.3 評価結果

所員用エアロックの健全性評価結果を第5 - 10表に示す。

第5 - 10表 所員用エアロックの健全性評価結果

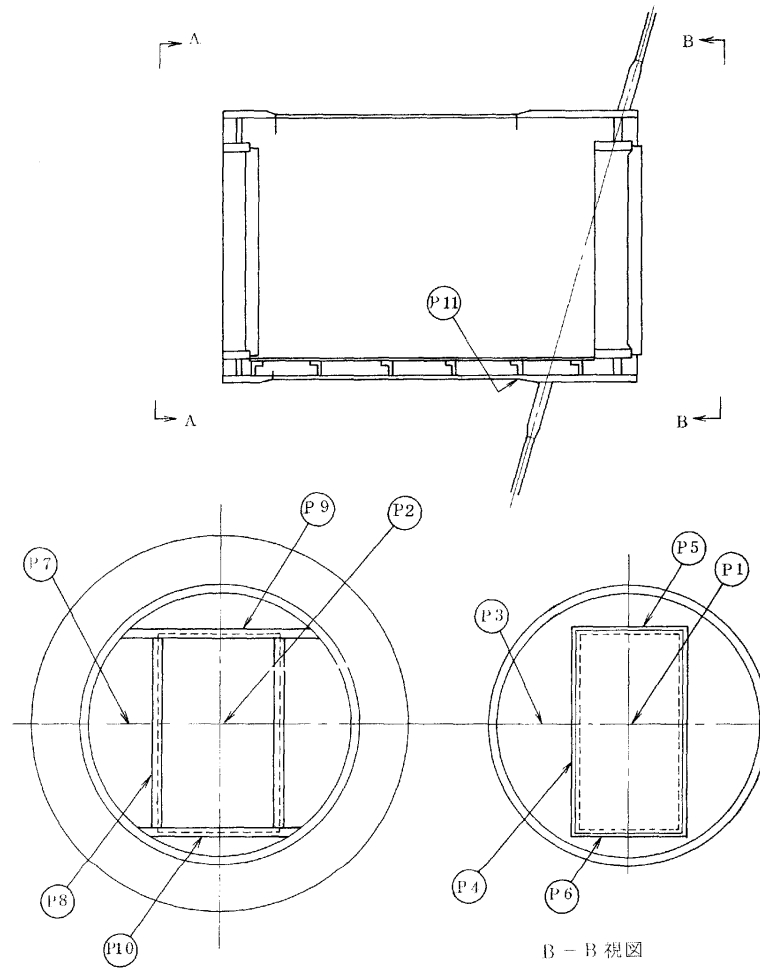
No.	大項目	評価方法	評価	結果
(1)	本体の耐圧	①応力評価	200℃, 2Pdにおけるフランジ部の一次応力は, 許容値: 2 / 3 Suを満足することを確認	○
		②許容圧力評価		
(2)	ガスケットの健全性	シール材劣化, 開口量評価	ガスケット(改良EPDM材, 膨張黒鉛材, PEEK材)の事故時環境における劣化特性を考慮しても200℃, 2Pdにおけるフランジ開口量は, 許容開口量以下となり, シール機能が維持されることを確認	○

以上により, 所員用エアロックについては, 200℃, 2Pd 環境下でも, 放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

所員用エアロックの隔壁部の評価について

所員用エアロックの隔壁について，既工認で算出した応力に基づき，許容圧力を求め， $2Pd$ を上回ることを確認する。

所員用エアロックの応力評価点を第 5-1(1)図に，所員用エアロックの各応力評価点における評価結果を第 5-1(1)表に示す。



第 5-1(1)図 所員用エアロックの応力評価点

第 5-1(1)表 所員用エアロック隔壁部の評価結果

単位：MPa

評価点	既工認における 応力強さ	許容応力	設計圧力	200℃における 許容圧力
P1	19	422	0.279	6.196
P2	19	422	0.279	6.196
P3	55	422	0.279	2.140
P4	72	422	0.279	1.635
P5	11	422	0.279	10.703
P6	10	422	0.279	11.773
P7	55	422	0.279	2.140
P8	89	422	0.279	1.322
P9	14	422	0.279	8.409
P10	12	422	0.279	9.811

6. 配管貫通部

6.1 概要

配管貫通部の 200℃, 2Pd 環境下の健全性を確認する。

代表的な配管貫通部の概要図を第 6-1 図に示す。配管貫通部は、スリーブと平板類（平板、穴あき平板、フランジ、ボルト締め平板及びフルードヘッド）、セーフエンド、伸縮継手とスリーブ等に接続する配管（接続配管）によって原子炉格納容器バウンダリを構成している。また、フランジ部はボルトにより固定されており、シール部にはシリコンゴムを使用している。

上記を踏まえ、本章では以下の構成で健全性を確認する。

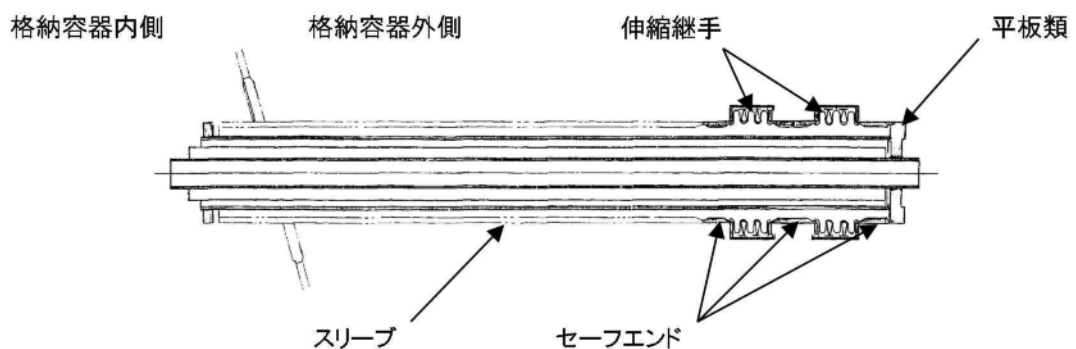
6.2 項では、配管貫通部（接続配管）の構造健全性を確認する。

6.3 項では、配管貫通部（スリーブ）の構造健全性を確認する。

6.4 項では、配管貫通部（平板類）の構造健全性、シール部の機能維持を確認する。

6.5 項では、配管貫通部（セーフエンド）の構造健全性を確認する。

6.6 項では、配管貫通部（伸縮継手）の構造健全性を確認する。



第 6-1 図 配管貫通部概要図

6.2 配管貫通部（接続配管）

6.2.1 評価方針

接続配管は、スリーブ等を介して原子炉格納容器と接続している。

接続配管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、圧縮力が接続配管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。

従って、接続配管の機能喪失要因は、原子炉格納容器の変形により生じる過度な曲げ荷重に伴う延性破壊が想定される。

このため、200℃、2Pd での接続配管の健全性確認について、第 6-1 表に示す評価方法により評価を実施する。

接続配管は原子炉格納容器貫通部の変位が支持構造物により拘束されることにより、反力及びモーメントが発生し、応力が発生することから、変位による反力及びモーメントが最大となる貫通部 X-31 の接続配管を代表として評価する。（別添 6.2-1 参照）

第 6-1 表 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 (接続配管)	延性破壊	設計・建設規格の評価式に準拠した評価 (X-31 で代表評価)

6.2.2 評価

貫通部 X-31 に接続する接続配管について、3次元梁モデルを用いた配管解析にて発生応力を算出し、設計・建設規格 PPC-3530 に規定される一次＋二次応力の制限値を満足することを確認する。

評価に用いる縦弾性係数及び熱膨張係数は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、200℃における値を用いる。

(1) 解析条件

解析条件を第 6-2 表に示す。また、原子炉格納容器貫通部の変位を第 6-3 表に示す。

第 6-2 表 解析条件

名称	単位	スリーブ	接続配管
材 料	—	SA333 Gr. 6 (GSTPL 相当)	SM400B
外 径	mm	609.6	609.6
厚 さ	mm	31.0	9.5
縦弾性係数	$\times 10^5$ MPa	1.92 ^{※1}	1.91 ^{※1}
熱膨張係数	$\times 10^{-6}$ mm/mm℃	12.70 ^{※1}	12.09 ^{※1}
温 度	℃	200	200
圧 力	MPa [gage]	0.62	0.62

※1：200℃における値

第 6-3 表 原子炉格納容器貫通部の変位

貫通部番号	温度	変位 (mm)	
		水平 (外向き)	鉛直 (上向き)
X-31	200℃	□	□

(2) 強度計算に使用する記号の定義

管の応力計算に用いる記号について以下に説明する。

記号	単位	説明
D_o	mm	管の外形
M_a	N・mm	管の機械的荷重（自重その他の長期的荷重に限る）により生じるモーメント
M_c	N・mm	管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生じるモーメント
P	MPa	計算圧力
S_a	MPa	許容応力
S_c	MPa	室温における設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 に規定する材料の許容引張応力
S_h	MPa	使用温度における設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 に規定する材料の許容引張応力
S_n	MPa	一次応力と二次応力を加えて求めた応力
Z	mm ³	管の断面係数
f	—	設計・建設規格 PPC-3530 に規定する許容応力低減係数
i_1, i_2	—	設計・建設規格 PPC-3530 に規定する応力係数
t	mm	管の厚さ

(3) 材料の許容応力 [設計・建設規格 PPC-3530]

設計・建設規格 PPC-3530 に規定される要求事項への適合性を確認する。

なお、応力計算に使用する管の外径及び厚さは、公称値を用いる。

- ・一次＋二次応力 (S_n) [設計・建設規格 PPC-3530(1)a.]

$$S_n = \frac{PD_o}{4t} + \frac{0.75 i_1 M_a + i_2 M_c}{Z}$$

一次＋二次応力の許容応力は、設計・建設規格 PPC-3530(1)c. に基づき、次式により算出する。

$$S_a = 1.25 f S_c + (1 + 0.25 f) S_h$$

6.2.3 評価結果

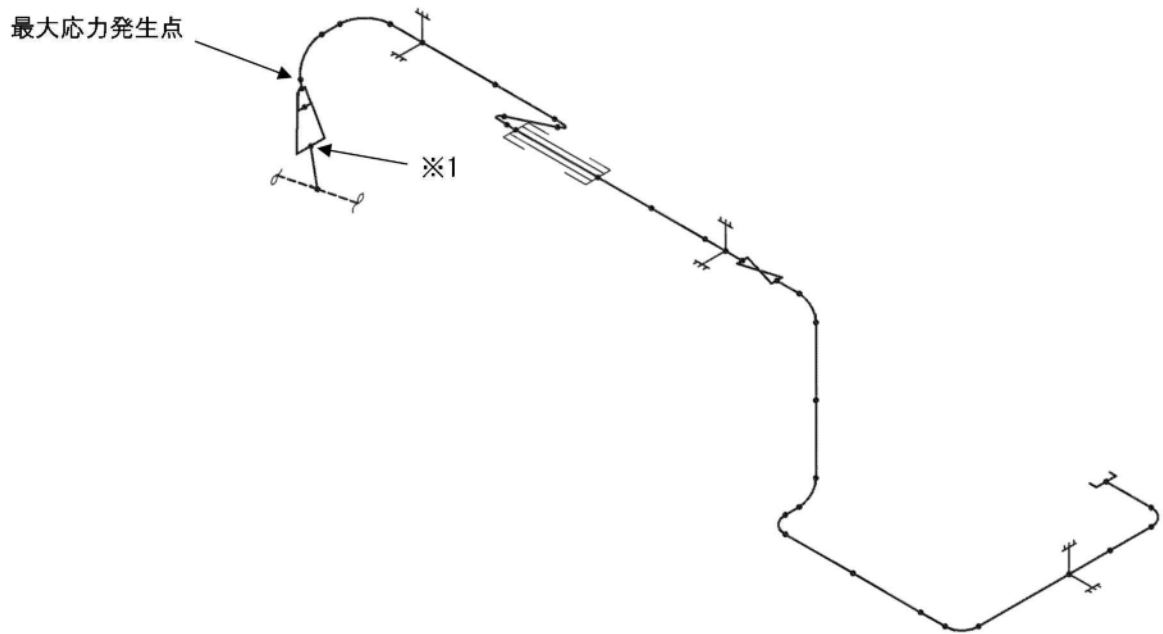
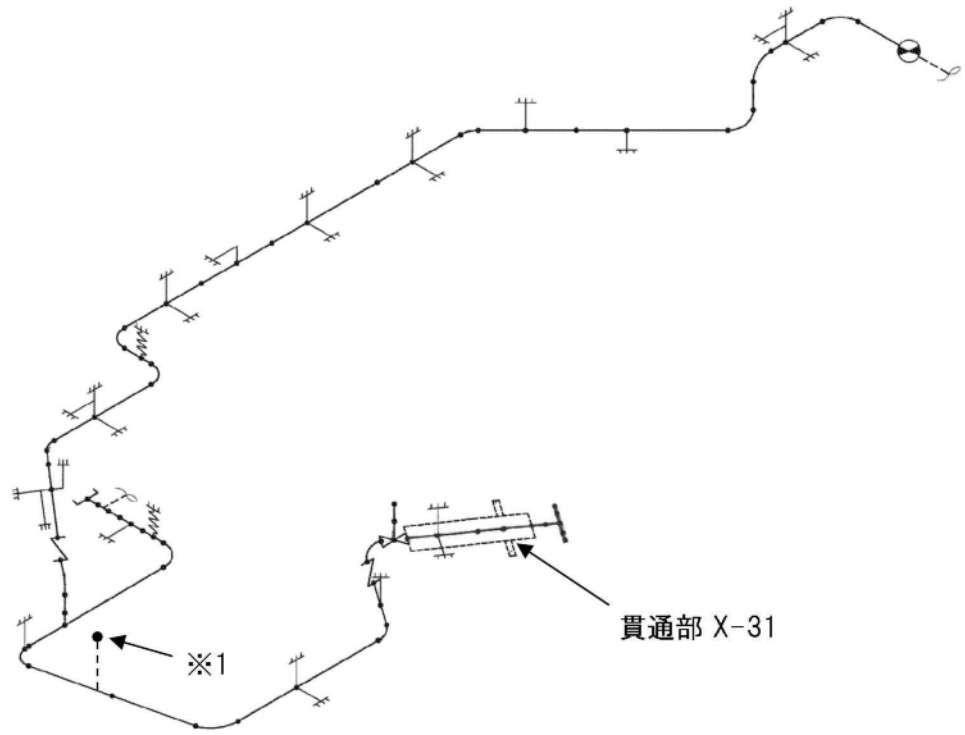
解析モデルを第 6-2 図，解析結果を第 6-4 表に示す。

貫通部 X-31 の接続配管について、設計・建設規格 PPC-3530 の規定を満足することから、配管の変形による延性破壊の可能性がないことが確認できた。以上の結果より、200℃、2Pd の環境下においても配管が損傷に至らず、放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

第 6-4 表 貫通部 X-31 に接続配管の解析結果（最大応力発生点）

単位：MPa

貫通部	一次応力評価		一次＋二次応力評価	
	計算応力	許容応力	計算応力	許容応力
X-31	39	150	169	257



第 6-2 図 解析モデル図

接続配管の評価対象について

本評価では、接続配管に発生する反力及びモーメントが最大となる貫通部 X-31 を代表として選定している。原子炉格納容器には熱膨張に伴う変位が発生するが、貫通部に接続される配管は支持構造物により拘束されているため、貫通部には反力及びモーメントが発生する。以下に反力及びモーメントの考え方を示す。

1. 配管貫通部の形式

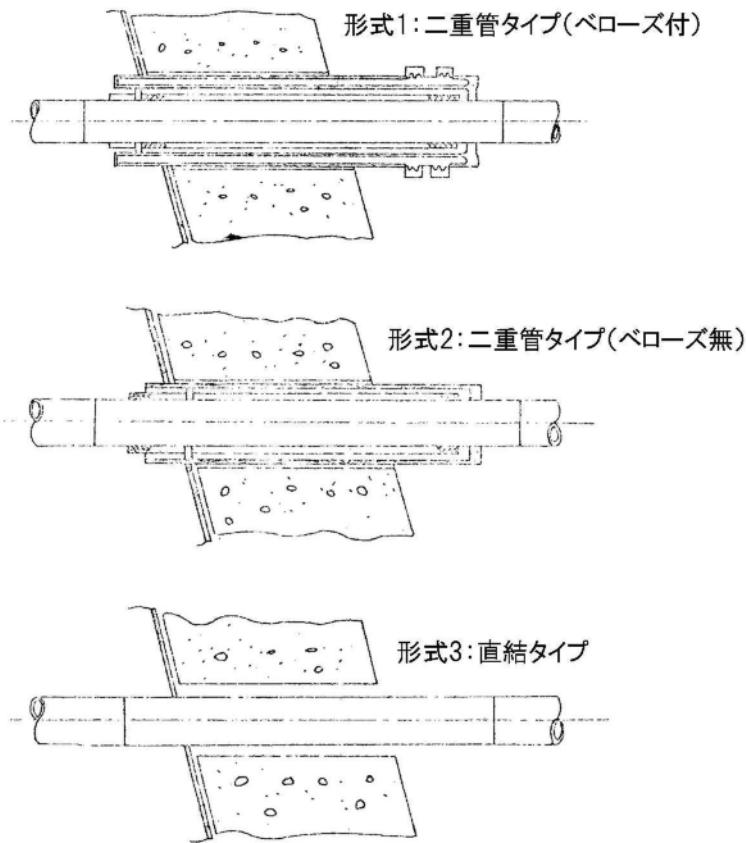
配管貫通部の構造は第 6.2-1(1)図に示すとおり、以下の 3 つに区分される。

形式 1：二重管タイプ（ベローズ付）

形式 2：二重管タイプ（ベローズ無）

形式 3：直結タイプ

形式 1 のベローズ付タイプの貫通部は配管の相対変位をベローズで吸収する構造であるため、反力及びモーメントは貫通部に伝わらない構造である。一方、形式 2 及び形式 3 の貫通部は、変位による配管反力及びモーメントが貫通部に作用し、これにより接続配管と貫通部に応力が発生する。このことから、形式 2（二重管タイプ（ベローズ無））及び形式 3（直結タイプ）の貫通部より評価部位を選定する。

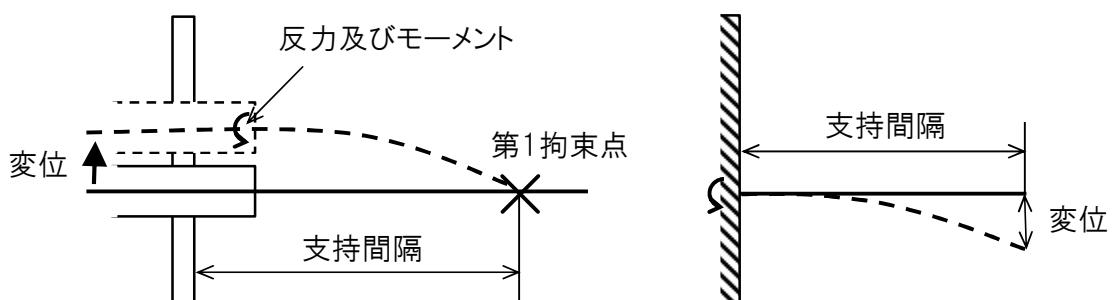


第 6. 2-1 (1) 図 配管貫通部の構造図

2. 反力及びモーメントの算出

配管貫通部の変位により発生する反力及びモーメントを以下のようにモデル化して算出する。

配管貫通部に変位が発生すると、接続する配管の第 1 拘束点で変位が拘束されることにより、貫通部に反力及びモーメントが作用することとなる。これを、第 6. 2-1 (2) 図のような梁モデルとして評価する。



第 6. 2-1 (2) 図 配管貫通部の梁モデル

第 6.2-1(2) 図において梁の自由端側に変位を与えた際に発生する反力及びモーメントは次式のとおりとなる。

$$\text{反力 } F = 3 \cdot E \cdot I \cdot \delta / L^3$$

$$\text{モーメント } M = F \cdot L$$

$$= 3 \cdot E \cdot I \cdot \delta / L^2$$

E : 縦弾性係数 I : 断面二次モーメント

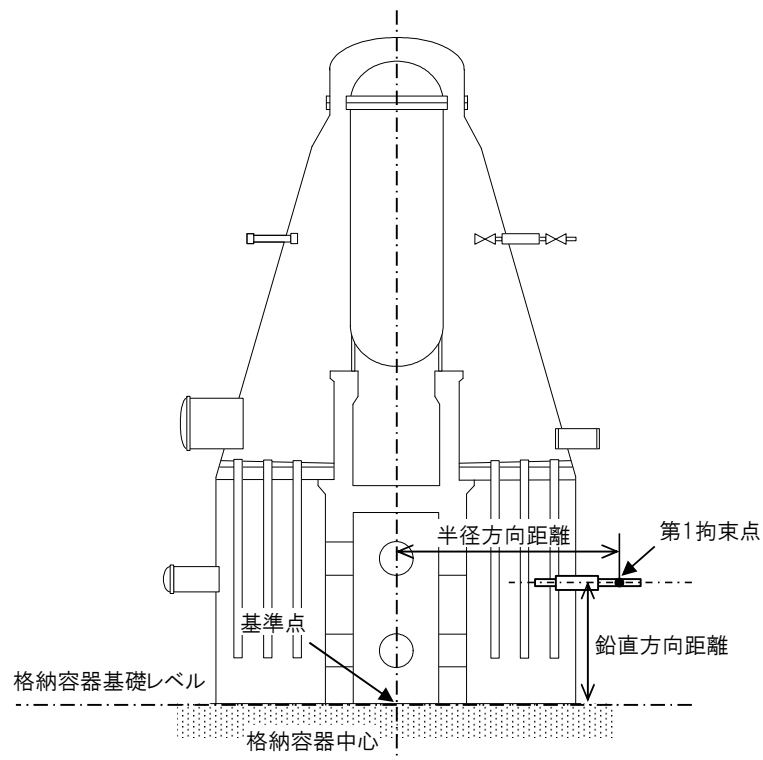
δ : 貫通部変位 L : 支持間隔

貫通部変位 δ は次式のとおりとなる。

$$\delta = \alpha \cdot \ell \cdot \Delta T$$

α : 熱膨張係数 ℓ : 基準点からの距離 ΔT : 基準温度との差

基準点からの距離は第 6.2-1(3) 図に示すとおり、鉛直方向と半径方向の距離の二乗平方根によって求める。



第 6.2-1(3) 図 基準点からの距離

3. 選定結果

配管貫通部に作用する反力及びモーメントが最大となる、貫通部 X-31 を代表箇所として選定している。各配管貫通部の反力及びモーメントを算出した結果を第 6.2-1(1)表に示す。

第 6.2-1(1)表 主要な配管貫通部の反力及びモーメント

貫通部 番号	系統	基準点 からの 距離 (mm)	接続配管仕様			支持間隔 (mm)	計算値	
			外径 (mm)	厚さ (mm)	縦弾性 係数 (MPa)		反力 (N)	モーメント ($\times 10^6 \text{N}\cdot\text{mm}$)
X-3	AC 系 D/W 排気	38,486.4	609.6	9.5	191,000	4,926.1		
X-11A	RHR D/W スプレイ	36,419.1	406.4	12.7	191,000	9,063.7		
X-13	SLC	29,343.8	48.6	5.1	183,000	4,747.0		
X-203	FCS 入口	25,100.6	114.3	6.0	191,000	2,991.3		
X-5	RCW 入口	24,763.9	216.3	8.2	191,000	5,154.6		
X-46	RCW 戻り	24,763.9	216.3	8.2	191,000	3,357.8		
X-11B	RHR D/W スプレイ	23,823.3	406.4	12.7	191,000	11,973.3		
X-53	AC 系 D/W 供給	23,481.3	508.0	9.5	191,000	7,714.7		
X-76	FCS 入口	23,481.3	114.3	6.0	191,000	7,382.8		
X-25A	RHR S/C スプレイ	20,144.4	114.3	6.0	191,000	4,483.0		
X-25B	RHR S/C スプレイ	20,144.4	114.3	6.0	191,000	3,574.8		
X-79	AC 系 S/C 排気	20,144.4	609.6	9.5	191,000	8,961.6		
X-80	AC 系 S/C 供給	20,144.4	609.6	9.5	191,000	10,042.1		
X-52A	FCS 戻り	19,073.7	165.2	7.1	191,000	7,408.8		
X-52B	FCS 戻り	19,073.7	165.2	7.1	191,000	7,960.3		
X-47	RHR テストライン	16,536.1	406.4	9.5	191,000	9,200.0		
X-48	RHR テストライン	16,536.1	406.4	9.5	191,000	5,674.5		
X-49	HPCS テストライ ン	16,536.1	318.5	10.3	191,000	10,305.7		
X-63	LPCS テストライ ン	16,536.1	318.5	10.3	191,000	16,506.5		
X-31	HPCS ポンプ入口	13,043.0	609.6	9.5	191,000	2,820.9		
X-32	RHR ポンプ入口	13,040.6	609.6	9.5	191,000	9,312.6		
X-34	LPCS ポンプ入口	13,040.6	609.6	9.5	191,000	5,560.0		
X-35	RHR ポンプ入口	13,040.6	609.6	9.5	191,000	9,727.6		
X-36	RHR ポンプ入口	13,040.6	609.6	9.5	191,000	8,780.0		

6.3 配管貫通部（スリーブ）

6.3.1 評価方針

スリーブは、原子炉格納容器本体胴を貫通する円筒形の部材で、原子炉格納容器本体胴に溶接固定されている。

スリーブ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、内圧を受けるスリーブには圧縮力が生じないことから、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。

従って、スリーブの機能喪失要因は、高温状態で内圧を受け、過度な塑性変形に伴う延性破壊が想定される。

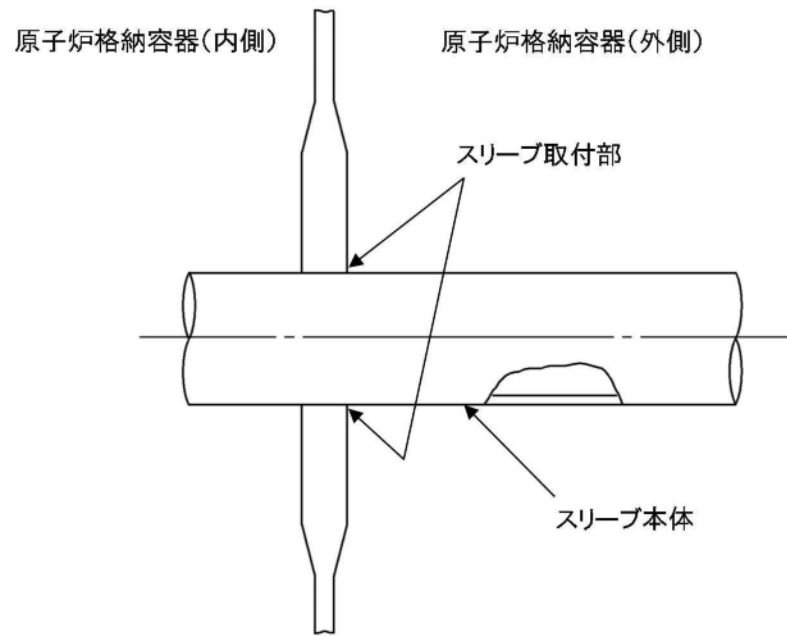
このため、200℃、2Pd でのスリーブの健全性確認について、第 6-5 表に示す評価方法により評価を実施する。

スリーブ本体の評価は、内圧による発生応力が大きくなる最大径の貫通部 X-18A～D を代表評価し、スリーブ取付部については、接続配管の反力及びモーメントが作用することから、6.2 配管貫通部（接続配管）と同様に貫通部 X-31 を代表として評価する。

スリーブの評価対象を第 6-3 図に示す。

第 6-5 表 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	スリーブ本体	延性破壊	設計・建設規格の評価式を準用した評価 (X-18A～D で代表評価)
	スリーブ取付部 (スリーブ側、胴側)	延性破壊	設計・建設規格の評価式を準用した評価 (X-31 で代表評価)



第 6-3 図 スリーブの評価対象

6.3.2 評価

(1) スリーブ本体

貫通部 X-18A～D のスリーブ本体については、既工認と同様の評価手法である設計・建設規格に示される必要最小板厚の式を用い許容圧力を求め、 $2Pd$ を上回ることを確認する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ (S_u 値) に対する割下げ率を P_m (一次一般膜応力強さ) には 1.5 として評価を行う。

すなわち、部材に発生する応力 P_m が $2/3S_u$ 値以下であれば、延性破壊に至らず、構造は健全で機能要求 (放射性物質の閉じ込め機能) を確保できると考える。この許容値の考え方は、設計・建設規格において示される原子炉格納容器 (クラスMC容器) の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である (設計・建設規格 解説 PVB-3111 参照)。

S_u 値を算出する際の温度は、限界温度として設定した 200°C を用いる。

a. 計算に使用する記号の定義

スリーブ本体の許容圧力の計算に使用する記号の定義について、以下に示す。

記号	単位	説明
P	MPa	圧力
S	MPa	許容引張応力 (200°C における $2/3S_u$ 値を使用)
η	—	継手効率
t	mm	板厚
D_o	mm	スリーブの外径

b. 許容圧力の計算方法

スリーブ本体の許容圧力は、設計・建設規格の評価式を用いて計算する。

$$t = \frac{PD_o}{2S\eta + 0.8P} \quad [\text{設計・建設規格 PVE-3611}]$$

設計・建設規格の評価式を圧力について解くと

$$P = \frac{2S\eta t}{D_o - 0.8t}$$

上式を用いて、スリーブ本体の許容圧力を計算する。

c. 許容圧力の計算結果

スリーブ本体の許容圧力の計算結果を以下に示す。

スリーブ：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

許容圧力算定式：PVE-3611 を準用

$$P = 2S\eta t / (D_o - 0.8t)$$

S	許容引張応力 (MPa) (200°Cにおける $2/3S_u$ 値を使用)	281
η	継手効率 (-)	1.0
t	呼び厚さ (mm)	
D_o	管台の外形 (mm)	
P	200°Cにおける許容圧力	26.617
26.617MPa > 0.62MPa (2Pd)		

(2) スリーブ取付部

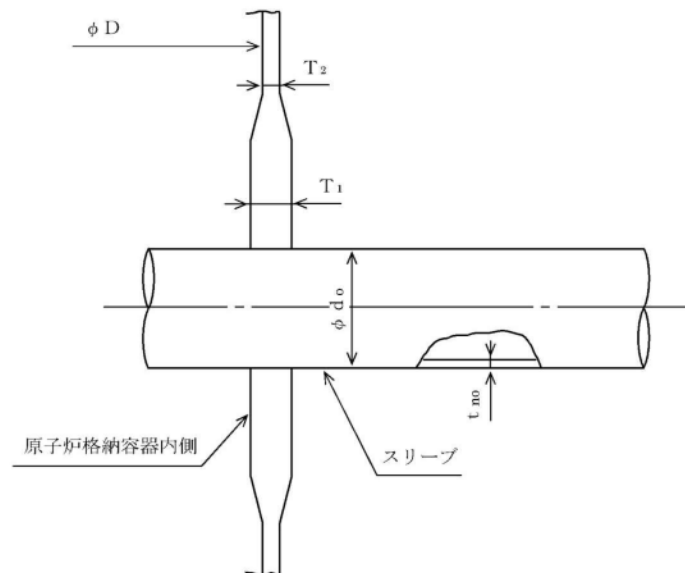
貫通部 X-31 の貫通配管解析の結果で得られた配管反力に基づき、スリーブ取付部について、既工認と同様の評価手法で発生応力を算出し、許容値を満足することを確認する。

発生応力は、熱膨張に伴う配管反力により発生する二次応力として分類されることから、設計・建設規格に示される一次＋二次応力の評価方法及び評価基準値に従う。

許容値は、設計・建設規格において示される原子炉格納容器（クラス MC 容器）の供用状態 A，B に対する許容値と同じ 3S（S 値：200°C における値）とする。

a. 貫通部の形状及び主要寸法

貫通部の形状及び主要寸法を第 6-4 図及び第 6-6 表に示す。



第 6-4 図 貫通部の形状 (X-31)

第 6-6 表 貫通部の主要寸法 (X-31)

単位 : mm

貫通部番号	T_1	T_2	d_o	t_{no}	D
X-31	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

b. 記号の説明

貫通部の応力計算に用いる記号について以下に説明する。

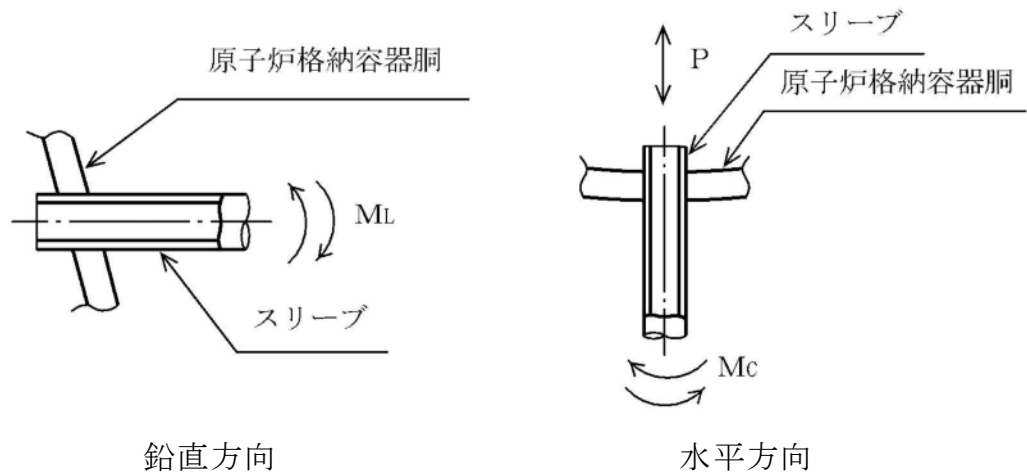
記号	単位	説明
A	mm ²	断面積
d_o	mm	直径
M_C	N・mm	水平方向モーメント
M_L	N・mm	鉛直方向モーメント
P	MPa	内圧, 軸方向荷重
P_b	MPa	一次曲げ応力
P_L	MPa	一次局部応力
Q	MPa	二次応力
D	mm	原子炉格納容器の内径
S	MPa	許容引張応力
T	mm	原子炉格納容器胴の厚さ
t_{no}	mm	スリーブの厚さ
Z	mm ³	断面係数
ν	—	ポアソン比
σ_ℓ	MPa	軸方向応力
σ_t	MPa	円周方向応力
τ	MPa	せん断応力

c. 評価条件

配管解析から得られた取合い部の反力に基づき設定した評価荷重を第6-7表に、作用方向を第6-5図に示す。また、材料及び許容応力を第6-8表に示す。

第6-7表 評価荷重

貫通部番号	荷重の種類	軸力 (N)	モーメント (N・mm)	
		P	M _C	M _L
X-31	死荷重	6.570×10^1	7.207×10^6	3.484×10^7
	熱荷重	3.205×10^4	2.591×10^7	5.271×10^7



第6-5図 貫通部の形状 (X-31)

第6-8表 材料の許容応力

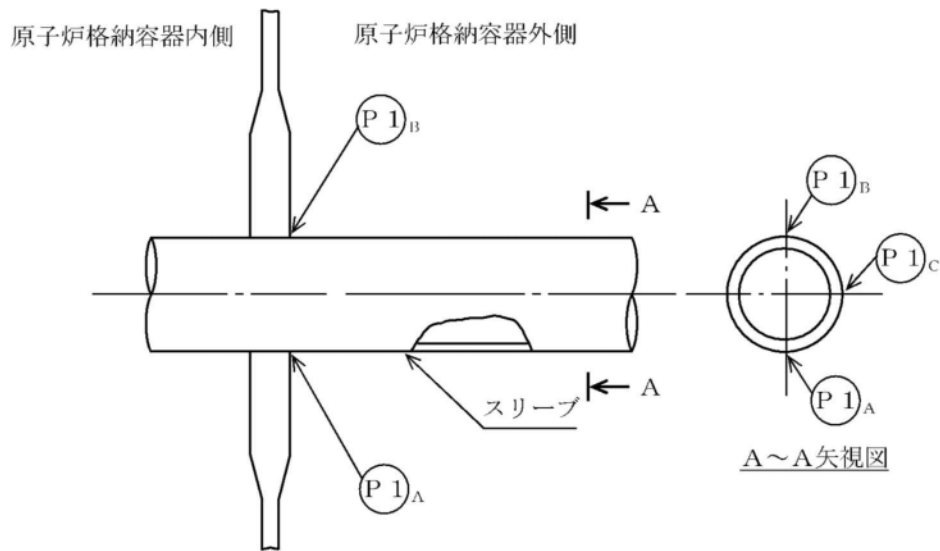
部位	材料	一次+二次応力
		$P_L + P_b + Q$
原子炉格納容器胴	SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)	393MPa (=3S)

d. 応力評価点

応力評価点を第 6-9 表及び第 6-6 図に示す。

第 6-9 表 応力評価点

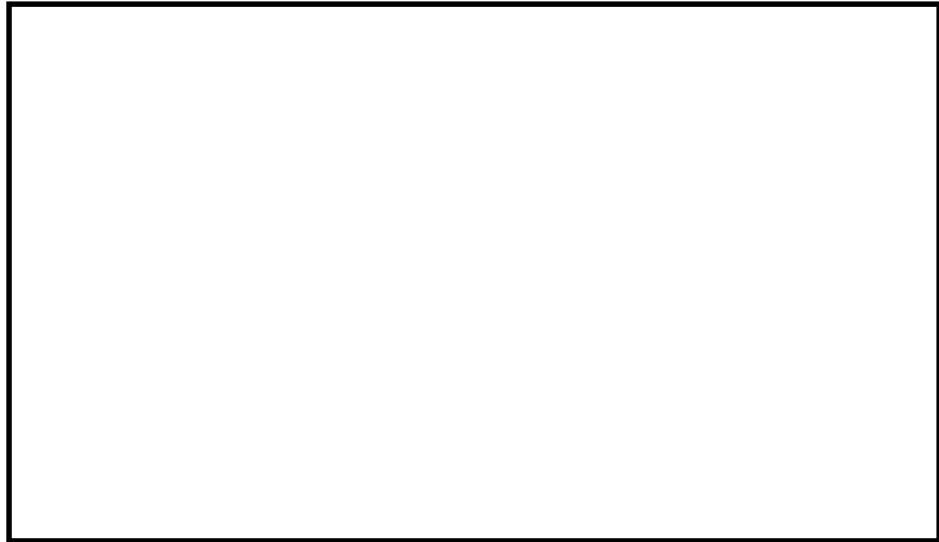
応力評価点番号	貫通部番号	応力評価点
P1-A, P1-B, P1-C	X-31	原子炉格納容器胴とスリーブの取付部（胴側）



第 6-6 図 貫通部の応力評価点

e. 応力評価点 P1 の計算

原子炉格納容器胴に作用する限界圧力（内圧）及び死荷重による応力は、既工認で計算した応力を用い、評価荷重比の割り増しを考慮して算出する。また、貫通部に作用する荷重（配管反力）により貫通部近傍に発生する応力は、第 6-7 図に示す FEMモデルを用いて計算する。



第 6-7 図 貫通部の計算モデル

f. 応力評価

貫通部 X-31 の 200℃，2Pd における各応力評価点の発生応力は，一次＋二次応力の許容値を下回る。

組み合わせ荷重による応力評価結果を第 6-10 表に示す。

第 6-10 表 材料の許容応力

貫通部 番号	荷重の 組合せ	応力分布	応力評価点	発生応力	許容応力
X-31	死荷重＋ 内圧＋熱	一次＋二次 応力	P1-A	124MPa	393MPa
			P1-B	188MPa	
			P1-C	135MPa	

6.3.3 評価結果

スリーブについては，200℃，2Pd 環境下でも，放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

6.4 配管貫通部（平板類）

6.4.1 評価方針

平板類のうち，平板，穴あき平板，フランジ，ボルト締め平板及びフルードヘッドは，スリーブ又はセーフエンドに溶接固定されている。また，フランジ部はボルトにより固定されており，シール部にはシリコンゴムのガスケットを使用している。

平板類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から，脆性破壊及び疲労破壊は評価対象外と考えることができる。

従って，平板類の機能喪失要因は，高温状態で内圧を受け，過度な塑性変形に伴う延性破壊が想定される。

また，シール部については，高温状態で内圧を受け，フランジ部が変形することによる開口及びシール材の高温劣化によるシール機能の低下が想定される。さらに，シール部の開口が進むとボルトに引張応力が作用し，ボルト破損に至ることが想定される。

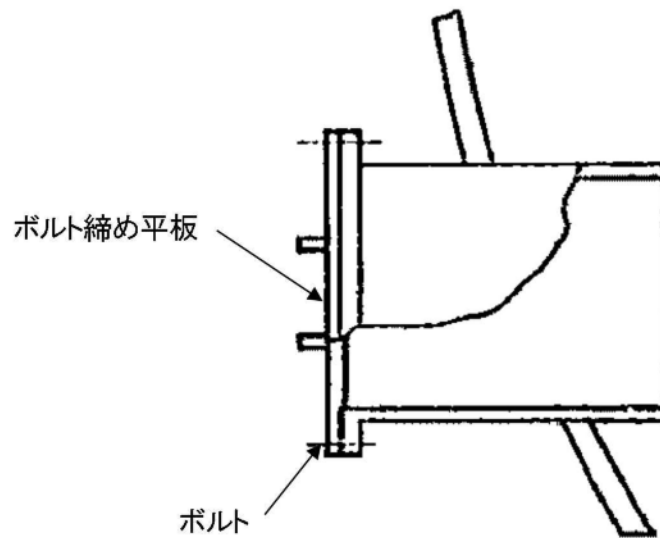
このため，200℃，2Pd での平板類の健全性確認について，第 6-11 表に示す評価方法により評価を実施する。シール部については，改良 EPDM 製シール材による評価を実施する。

平板類は，内圧による発生応力が大きくなる最大径の貫通部 X-28 を代表評価する。

平板類（X-28）の評価対象を第 6-8 図に示す。

第 6-11 表 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	ボルト締め平板	延性破壊	設計・建設規格の評価式を準用した評価 (X-28 で代表評価)
	フランジ	延性破壊	JIS B 8265 を用いた評価 (X-28 で代表評価)
	ボルト	延性破壊	JIS B 8265 を用いた評価 (X-28 で代表評価)
シール部	フランジ, ガスケット	開口, シール材劣化	一般式を用いた評価 試験結果等を用いた評価 (X-28 で代表評価)



第 6-8 図 平板類 (X-28) の評価対象

6.4.2 評価

(1) 構造部（ボルト締め平板）

貫通部 X-28 のボルト締め平板について、既工認と同様の評価手法である設計・建設規格に示される必要最小板厚の式を用い許容圧力を求め、 $2Pd$ を上回ることを確認する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ (S_u 値) に対する割下げ率を P_m （一次一般膜応力強さ）には 1.5 として評価を行う。すなわち、部材に発生する応力 P_m が $2/3S_u$ 値以下であれば、延性破壊に至らず、構造は健全で機能要求（放射性物質の閉じ込め機能）を確保できると考える。この許容値の考え方は、設計・建設規格において示される原子炉格納容器（クラスMC容器）の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である（設計・建設規格 解説 PVB-3111 参照）。

S_u 値を算出する際の温度は、限界温度として設定した 200°C を用いる。

a. 計算に使用する記号の定義

ボルト締め平板の許容圧力の計算に使用する記号の定義について、以下に示す。

記号	単位	説明
P	MPa	圧力
S	MPa	許容引張応力 (200°C における $2/3S_u$ 値を使用)
K	—	平板の取付方法による係数
t	mm	板厚
d	mm	平板の径または最少内のり

b. 許容圧力の計算方法

ボルト締め平板の許容圧力は、設計・建設規格の評価式を用いて計算する。

$$t = d \sqrt{\frac{KP}{S}} \quad [\text{設計・建設規格 PVE-3410}]$$

設計・建設規格の評価式を圧力について解くと

$$P = \frac{S}{K} \left(\frac{t}{d} \right)^2$$

上式を用いて、アダプタの許容圧力を計算する。

c. 計算結果

以下の示すとおり、ボルト締め平板の許容圧力は 2Pd 以上である。

ボルト締め平板：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

許容圧力算定式：PVE-3410 を準用

$$P = S/K \times (t/d)^2$$

S	許容引張応力 (MPa) (200°Cにおける 2/3S _u 値を使用)	281
K	係数	0.47
t	呼び厚さ (mm)	
d	平板の径 (mm)	
P	200°Cにおける許容圧力	1.90
1.90MPa[gage] > 0.62MPa[gage] (2Pd)		

(2) 構造部（フランジ，ボルト）

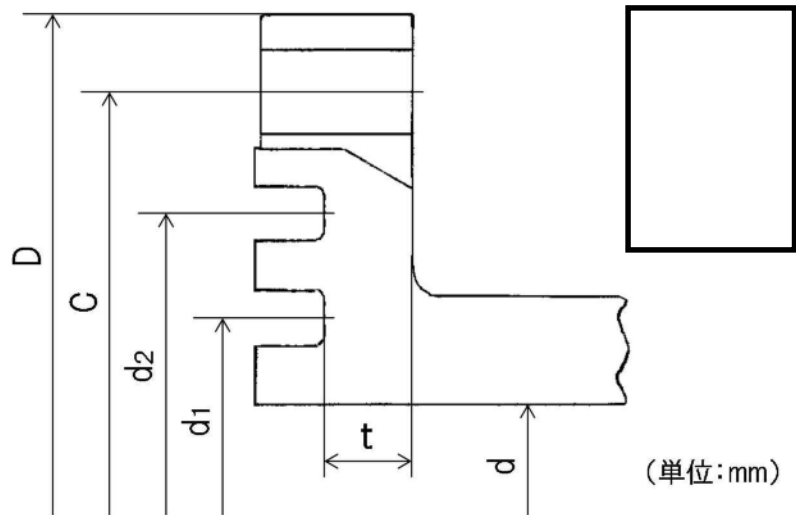
貫通部 X-28 のフランジ部について，J I S B 8 2 6 5「圧力容器の構造—一般事項」を用いて， $2Pd$ におけるフランジの発生応力が許容応力を下回ること及びボルトの必要総有効断面積が，ボルトの総有効断面積を下回ることを確認する。

その際，部材に発生する応力強さの許容値は，今回の評価が設計基準を超えた限界温度，圧力の評価であることを踏まえ，設計引張強さ (S_u 値) に対する割下げ率を P_m （一次一般膜応力強さ）には 1.5 として評価を行う。すなわち，部材に発生する応力 P_m が $2/3S_u$ 値以下であれば，延性破壊に至らず，構造は健全で機能要求（放射性物質の閉じ込め機能）を確保できると考える。この許容値の考え方は，設計・建設規格において示される原子炉格納容器（クラスMC容器）の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である（設計・建設規格 解説 PVB-3111 参照）。

S_u 値を算出する際の温度は，限界温度として設定した 200°C を用いる。

a. フランジ部の仕様及び評価条件

貫通部 X-28 のフランジ概要図を第 6-9 図, フランジ部の仕様及び評価条件第 6-12 表に示す。



第 6-9 図 フランジ概要図 (貫通部 X-28)

第 6-12 表 評価条件 (貫通部 X-28)

項目	仕様及び値
評価圧力	0.62MPa [gage]
評価温度	200°C
フランジ材質	SGV480 相当
フランジ内径	<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 100px;"></div>
フランジ板厚 (最小厚さ)	
ボルト呼び径	
ボルト本数	

ボルトの評価結果を第 6-13 表，フランジの評価結果を第 6-14 表に示す。

第 6-13 表 ボルト評価結果（貫通部 X-28）

単位：mm²

荷重	必要総有効断面積 Am	総有効断面積 Ab
2Pd	1.212×10^3	6.765×10^3

第 6-14 表 フランジ応力評価結果（貫通部 X-28）

単位：MPa

応力	記号	X-28	
		発生値	許容値
ハブの軸方向応力	σ_H	90	422
フランジの半径方向応力	σ_R	158	281
フランジの周方向応力	σ_T	31	281
組合せ応力	$\frac{\sigma_H + \sigma_R}{2}$	124	281
組合せ応力	$\frac{\sigma_H + \sigma_T}{2}$	61	281

(3) シール部

a. 規格等を用いた評価（ボルト締め平板）

貫通部 X-28 のフランジ部について、文献の理論式を用いて 2Pd における開口量を求め、許容開口量を下回ることを確認する。

シール材については、改良 E P D M 製シール材を使用することとする。

許容開口量の設定に使用する改良 E P D M 製シール材の圧縮永久ひずみ試験結果を第 6-15 表に示す。

第 6-15 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	□
試験雰囲気	蒸気
試験時間	168h
ひずみ率 ^{※2}	□ ^{※3}

※1 JIS K 6262 に従い実施

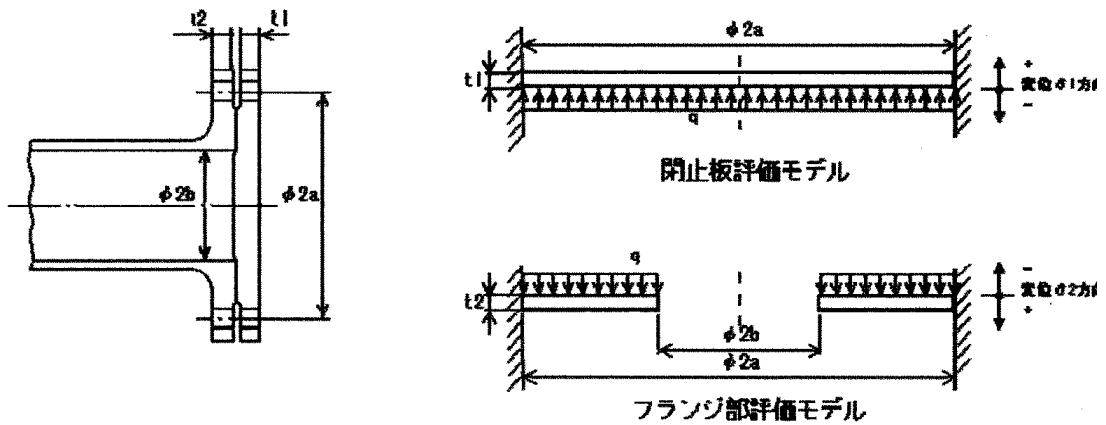
※2 試料を圧縮し完全に回復した状態が 0%，全く回復しない状態が 100%

※3 □ の平均値

許容開口量はトップヘッドフランジの考え方と同様、168 時間のひずみ率と貫通部 X-28 のフランジ部の定格締付量□を踏まえ□ = 定格締付量□ × (100% - □) / 100% とする。

第 6-10 図に示すモデルを用いた開口量の評価結果を第 6-16 表に示す。

2Pd における開口量は□であり、許容開口量□を下回る。



第 6-10 図 評価モデル

第 6-16 表 フランジ部開口量評価結果（貫通部 X-28）

記号	内 容	X-28
a	ボルト ピッチ円半径	<input type="text"/> mm
b	内半径	<input type="text"/> mm
D_1	$= \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)}$ *1	<input type="text"/>
D_2	$= \frac{Et_2^3}{12(1-\nu^2)}$ *1	<input type="text"/>
E	縦弾性係数	191000 MPa
K_{yb}	b/a から 定まる係数 *1	-6.330×10^{-4}
q	評価圧力	0.620 MPa
t_1	閉止板板厚	<input type="text"/> mm
t_2	フランジ部板厚	<input type="text"/> mm
ν	ポアソン比	0.3
δ_1	$= \frac{qa^4}{64D_1}$ *1 *2	<input type="text"/> mm
δ_2	$= \frac{-K_{yb} \cdot qa^4}{D_2}$ *1 *2	<input type="text"/> mm
$\delta_1 + \delta_2$	変位量合計	<input type="text"/> mm

6.4.3 評価結果

平板類については、200℃、2Pd 環境下でも、放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

6.5 配管貫通部（セーフエンド）

6.5.1 評価方針

セーフエンドは、伸縮継手付貫通部に用いられる短管で、スリーブ及び伸縮継手等に溶接固定されている。

セーフエンド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、圧縮力がセーフエンド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。

従って、セーフエンドの機能喪失要因は、高温状態で内圧を受け、過度な塑性変形に伴う延性破壊が想定される。

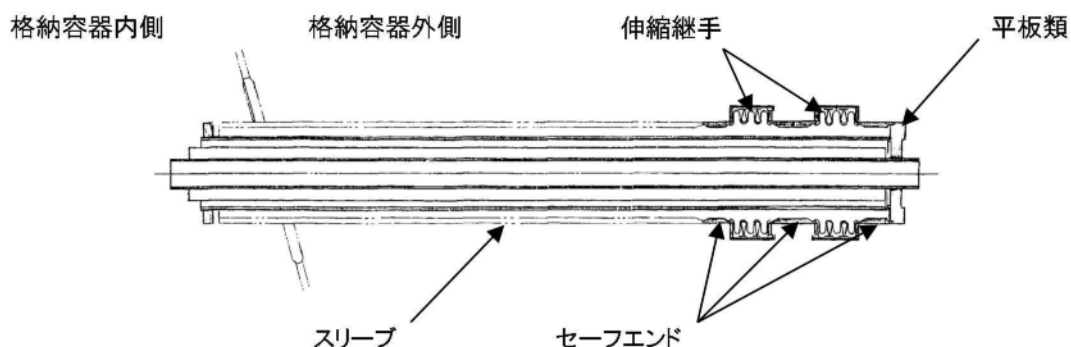
このため、200℃、2Pd でのセーフエンドの健全性確認について、第 6-17 表に示す評価方法により評価を実施する。

セーフエンドは、内圧による発生応力が大きくなる最大径の貫通部 X-18A～D を代表評価する。

セーフエンドの評価対象を第 6-11 図に示す。

第 6-17 表 評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	規格評価
構造部 (セーフエンド)	延性破壊	規格を用いた評価 (X-18A～D で代表評価)



第 6-11 図 セーフエンドの評価対象

6.5.2 評価

(1) 構造部

a. 規格を用いた評価

貫通部 X-18A～D のセーフエンドについて、既工認と同様の評価手法である設計・建設規格に示される必要最小板厚の式を用い許容圧力を求め、 $2Pd$ を上回ることを確認する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界圧力・限界温度の評価であることを踏まえ、設計引張強さ (S_u 値) に対する割下げ率を P_m (一次一般膜応力強さ) には 1.5 として評価を行う。すなわち、部材に発生する応力 P_m が $2/3S_u$ 値以下であれば、延性破壊に至らず、構造は健全で機能要求(放射性物質の閉じ込め機能)を確保できると考える。この許容値の考え方は、設計・建設規格において示される原子炉格納容器 (クラス MC 容器) の供用状態 D に対する許容値と同じ考え方である (設計・建設規格 解説 PVB-3111 参照)。

S_u 値を算出する際の温度は、限界温度として設定した 200°C を用いる。

評価結果を以下に示す。

貫通部 X-18A～D のセーフエンドは、 $2Pd$ を上回る。

セーフエンド：ASME SA516 Gr. 70 (SGV480 相当)

許容圧力算定式：PVE-3230(2)a 項を準用

$$P = 2S \eta t / (D_i + 1.2t)$$

S	許容引張応力 (MPa) (200°Cにおける $2/3S_u$ 値を使用)	281
η	継手効率 (—)	1.0
t	呼び厚さ (mm)	
D_i	胴内径 (mm)	
P	200°Cにおける許容圧力	4.529
4.529[gage]MPa > 0.62MPa[gage] (2Pd)		

6.5.3 評価結果

セーフエンドについては、200°C、2Pd 環境下でも、放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

6.6 配管貫通部（伸縮継手）

6.6.1 評価方針

伸縮継手は、配管貫通部に用いられる伸縮継手で、セーフエンドに溶接固定されている。

伸縮継手の設計時に考慮される機能喪失要因は、脆性破壊及び疲労破壊が考えられる。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から、脆性破壊は評価対象外と考えることができる。

従って、伸縮継手の機能喪失要因は、通常運転時に累積される低サイクル疲労に加えて重大事故時に累積される低サイクル疲労による疲労破壊が想定される。

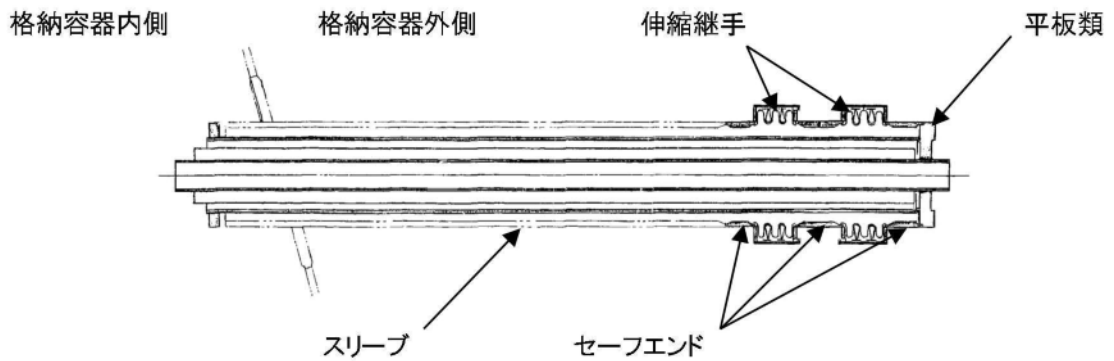
このため、200℃、2Pd での伸縮継手の健全性確認について、第 6-18 表に示す評価方法により評価を実施する。

なお、評価結果については、伸縮継手の通常状態、設計状態の疲労累積係数と重大事故等時の疲労累積係数の和が最も大きかった、配管貫通部 X-14 を代表とする。

伸縮継手の評価対象を第 6-12 図に示す。

第 6-18 表 評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	規格評価
構造部 (伸縮継手)	疲労破壊	設計・建設規格に準拠した評価 (X-14 で代表評価)



第 6-12 図 伸縮継手の評価対象

6.6.2 評価

(1) 構造部

a. 規格を用いた評価

貫通部 X-14 の伸縮継手について、設計・建設規格に示される伸縮継手の疲労評価の式を用いて算出し、疲労累積係数が 1 以下であることを確認する。重大事故時の繰り返し回数は 1 回とする。また、重大事故時の伸縮継手の全伸縮量は、簡易的に設計状態 (171°C, 1 Pd) の 2 倍とする。縦弾性係数 (E) を算出する際の温度は、限界温度として設定した 200°C を用いる。

評価結果を以下に示す。

疲労累積係数は 1 以下である。

伸縮継手：SUS304

疲労評価算定式：PVE-3810 に準拠

$$N_{s_i} = (11031 / \sigma)^{3.5}$$

$$\sigma = 1.5E t \delta / (n\sqrt{bh^3}) + Ph / tc$$

E	200℃における縦弾性係数 (MPa)	183,000
t	ベローズの板厚 (mm)	
δ	全伸縮量 (mm)	
n	ベローズの波数の2倍の値	
b	ベローズの波のピッチの1/2 (mm)	
h	ベローズの波の高さ (mm)	
P	限界圧力 (MPa)	0.62
c	ベローズの層数	
σ	ベローズに生じる応力 (MPa)	
N _{S3}	許容繰返し回数 (回)	
N ₃	設計繰返し回数 (回)	1
ΣN _i / N _{S_i} (i=1~3)	疲労累積係数	

6.6.3 評価結果

伸縮継手については、200℃、2Pd 環境下でも、放射性物質の閉じ込め機能を維持できる。

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強化の更なる信頼性向上を目途としたバックアップシール材（一液硬化型耐火シーラント）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。

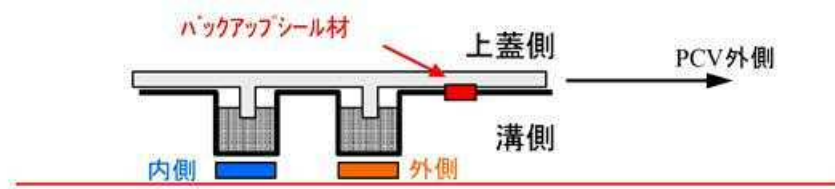


図1 バックアップシール材イメージ図

(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に対するシール機能は、200℃、2Pd の環境下において、改良E P D M製シール材により重大事故後7日間のシール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を考慮して、改良E P D M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E P D M製シール材+バックアップシール材」を組み合わせることで、長期シール機能健全性を補強する。

また、改良E P D M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、長期シール性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、酸化劣化によるシール機能低下を抑えることが可能である。

このことから、バックアップシール材は、事故発生後の改良EPDM製シール材の長期健全性を補強することができるため、更なる格納容器閉じ込め機能強化対策として、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ブプレッション・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、小型試験体（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分析を実施して化学構造の変化状況を確認した。各々の詳細条件を以下に記載する。

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800kGyを目標に、線源60_{Co}、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8.19kGy/h、8.27kGy/h、累積照射量819kGy、827kGyであった。

② 高温曝露

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

③ 蒸気曝露

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

④ 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、0.9MPaとし、スヌープでのリーク確認と0.65MPa及び0.9MPaは保持時間30分、その他の圧力では保持時間10分で圧力降下の有無を確認した。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℃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

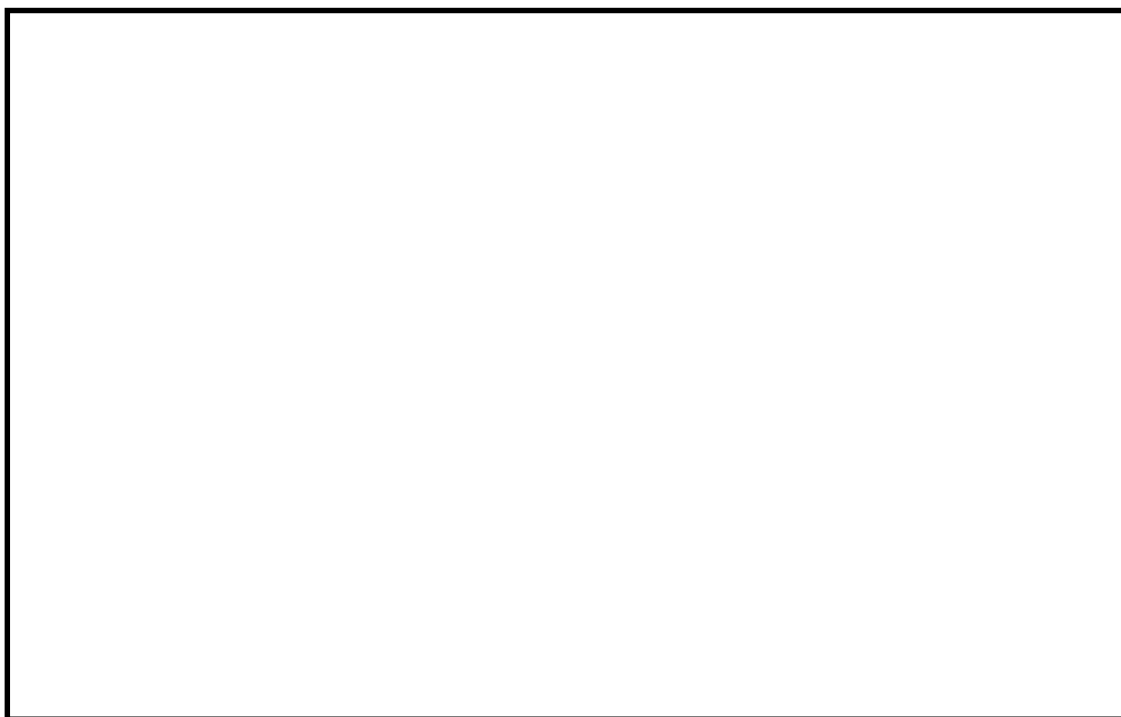


図3 蒸気用オートクレーブ系統図



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	0.2MPa	0.3MPa	0.4MPa	0.5MPa	0.62MPa	γ線 照射量
1	300℃, 73時間	○	○	○	○	○	827kGy
2	350℃, 73時間	○	○	○	○	○	827kGy

○：リーク及び圧力降下なし

表2 He気密確認試験結果（蒸気曝露後）

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

○：リーク及び圧力降下なし

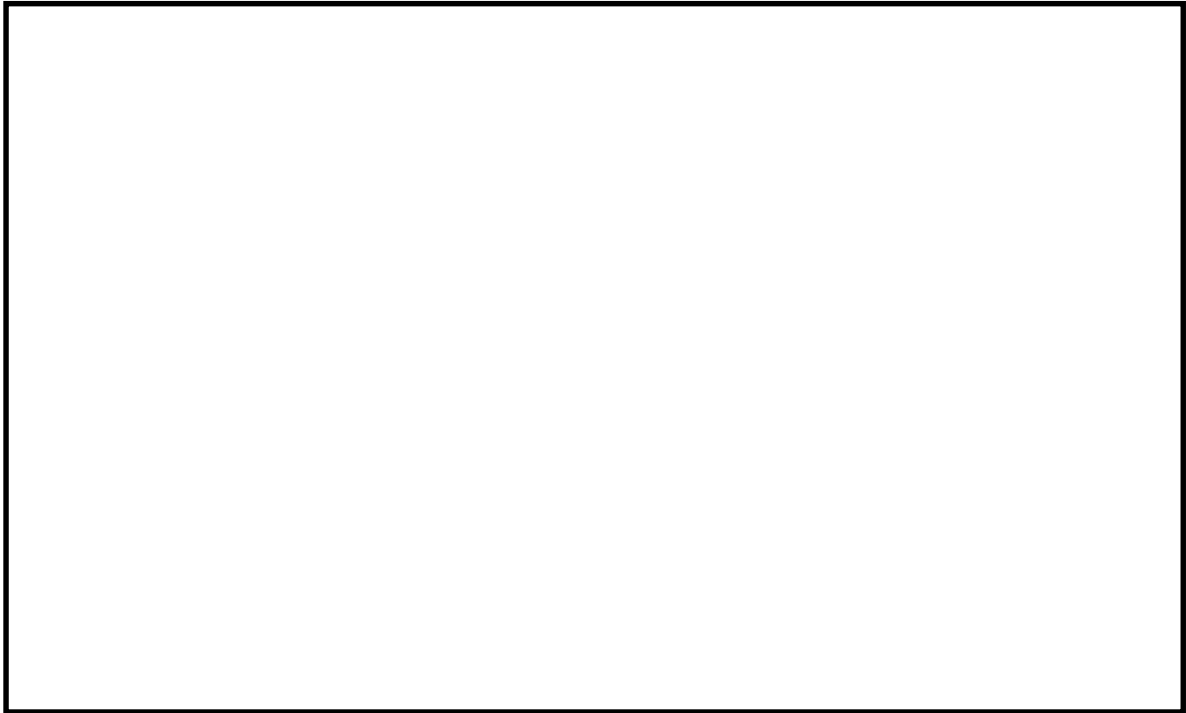


図 6 FT-IR 分析結果

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2Pd近傍と高くなりフランジ部が開口することから、フランジ開口を経験した後にバックアップシール材に気密性があるか否かを確認するため、30cm中型試験体を用いて隙間ゲージで一度変位を経験させた後にHe気密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。試験状況を図7, 8, 試験条件及び結果を表3 に示す。

1.9mmまでの変位を経験した後もHe気密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0.3MPa, 0.65MPa, 0.9MPaとし、スヌープでのリーク確認と0.3MPaは保持時間10

分、0.65MPa及び0.9MPaは保持時間30分で圧力降下の有無を確認した。

なお、開口模擬後気密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分析により250℃蒸気曝露で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では、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	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa	備考
1	1.5mm	変位付与前	○	○	○	
		1.0mm	○	○	○	
2	5.0mm	変位付与前	○	○	○	
		1.0mm	○	○	○	
3	1.5mm	変位付与前	○	○	○	
		1.9mm	○	○	○	

○：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ため、実際にバックアップシール材を適用した場合に問題なく気密性が担保出来るか否か、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を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に示す内外シール材にPCV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に示す内シール材とPCV外側にバックアップシール材塗布の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。いずれも局所漏えい試験結果は良好であった。

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

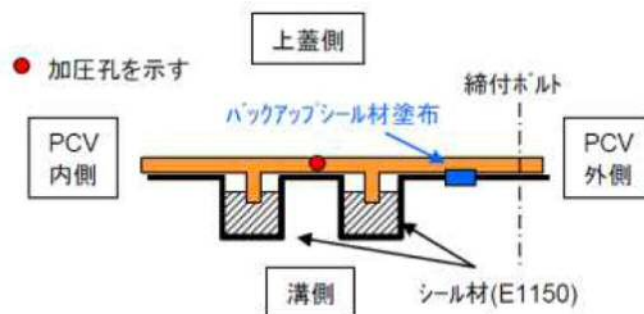


図9 内外シール材+PCV 外側バックアップシール材塗布条件

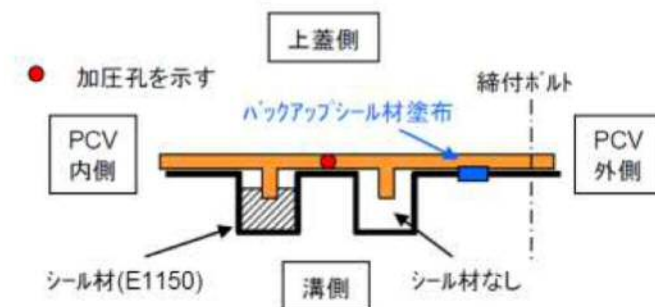
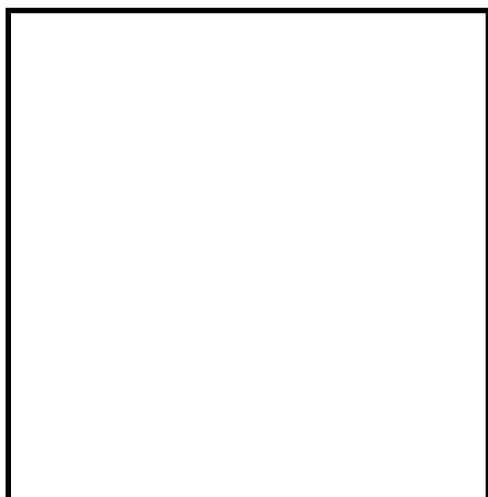


図10 内シール材+PCV 外側バックアップシール材塗布条件



(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E P D M製シール材（ γ 線照射量800kGy）とその外側にバックアップシール材を適用した条件で、長期間高温曝露を実施した後にHe気密確認試験を行い漏えいの有無を確認した。各々の詳細条件を以下に示す。

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

①高温曝露

熱処理炉を用いて、乾熱200℃条件下にて高温曝露を実施した。なお、試験体は、所定の日数曝露した後に取り出して下記の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℃条件下にて追加日数の高温曝露を行う条件で試験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0.3MPa、0.65MPa、0.9MPaとし、スヌープでのリーク確認と0.3MPaは保持時間10分、0.65MPa及び0.9MPaは保持時間30分で圧力降下の有無を確認した。試験状況を図13に、試験結果を表4に示す。いずれの試験体、試験条件においてもリーク及び圧力降下は認められなかった。

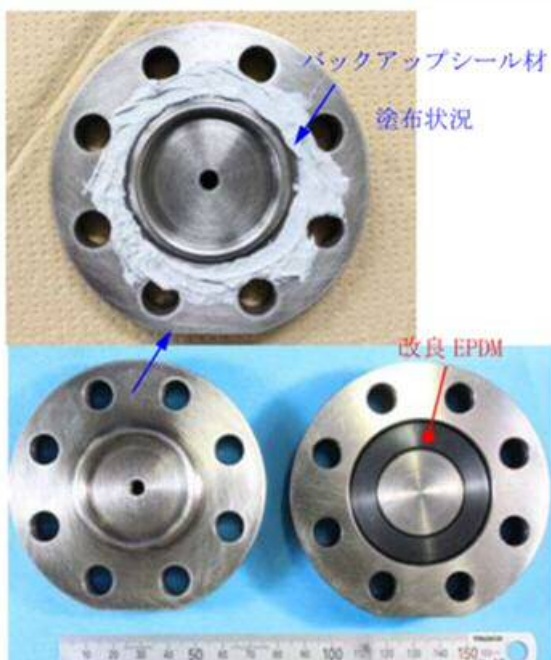


図12 試験体の状況
(改良EPDM+バックアップシール材)



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	0.3MPa	0.65MPa	0.9MPa
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過圧による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、原子炉格納容器閉じ込め機能として最も厳しいシナリオである「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において代替循環冷却系を使用しないシーケンスにおいて、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。従って、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2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2 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2の条件で塗布することで、シール機能が確保可能である。従って、バックアップシール材塗布作業時に「塗布幅」、
「塗布厚さ」、
「塗布後、フランジ閉鎖までの時間」を確認することで品質を確認する。「塗布幅」、
「塗布厚さ」については、それら幅、厚さを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。