

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PS-3-4 改0
提出年月日	平成29年9月1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	
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

東海第二発電所においては、シビアアクシデント時の原子炉格納容器の破壊挙動を確認するため、有限要素法を用いた弾塑性解析を実施している。本解析は、格納容器全体の変形挙動を適切に模擬するとともに、格納容器胴部の形状不連続部、及びハッチ類を含む主要な貫通部をモデル化し、局所的な応力・ひずみ集中による影響についても評価することを目的としている。そのため、解析モデルの設定においては設計・建設規格の考え方に基づく要素分割をするとともに、実機条件を踏まえた境界条件を設定している。これら一連の解析手法の妥当性確認を目的として、既往の知見である NUPEC 試験において実施された 1/10 縮尺モデル試験を模擬した検証解析を実施している。

図 1 に 1/10 縮尺モデル試験体を、図 2 に検証解析モデルを示す。

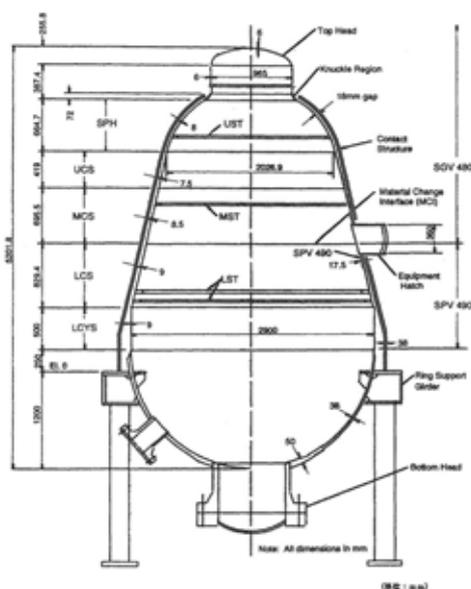


図 1 縮尺モデル試験体

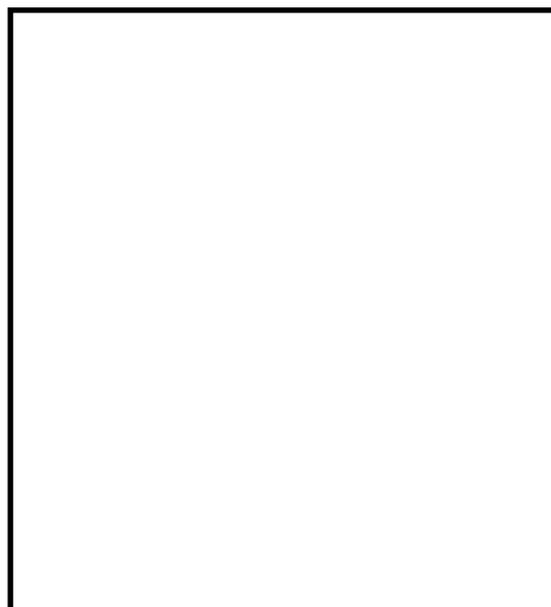


図 2 検証解析モデル

1/10 縮尺モデル試験の結果、試験体の設計圧力の約 6 倍に到達した時点で、機器ハッチ近傍に破損が確認された。また、補強リングの切り欠き部においても破損が確認された。試験体の破損状況を図 3 及び図 4 に示す。

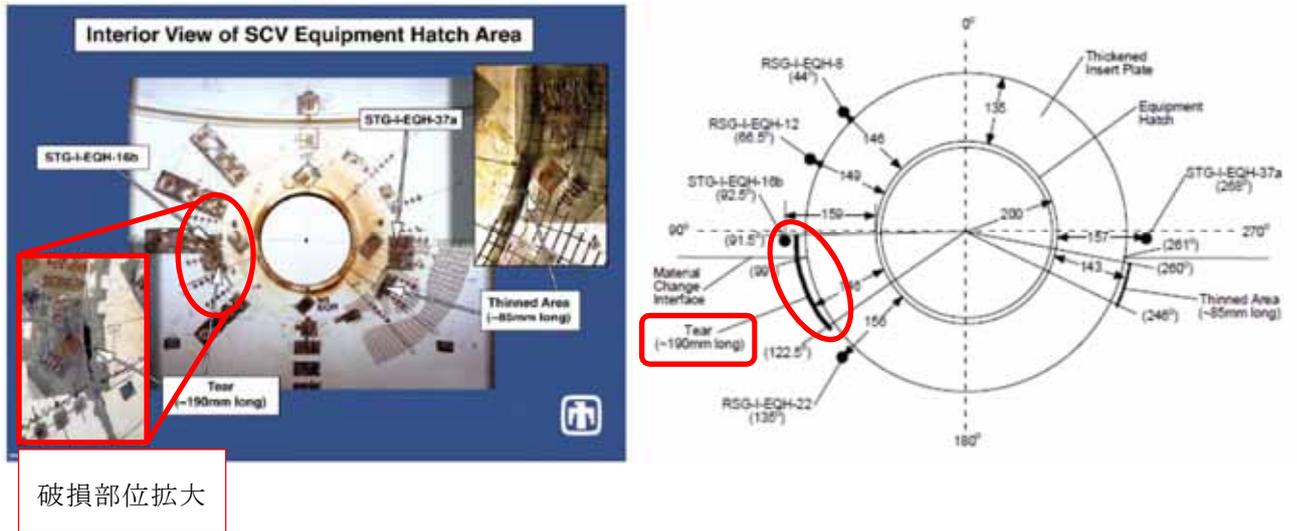


図 3 機器ハッチ近傍の破損状況（左：写真 右：模式図）

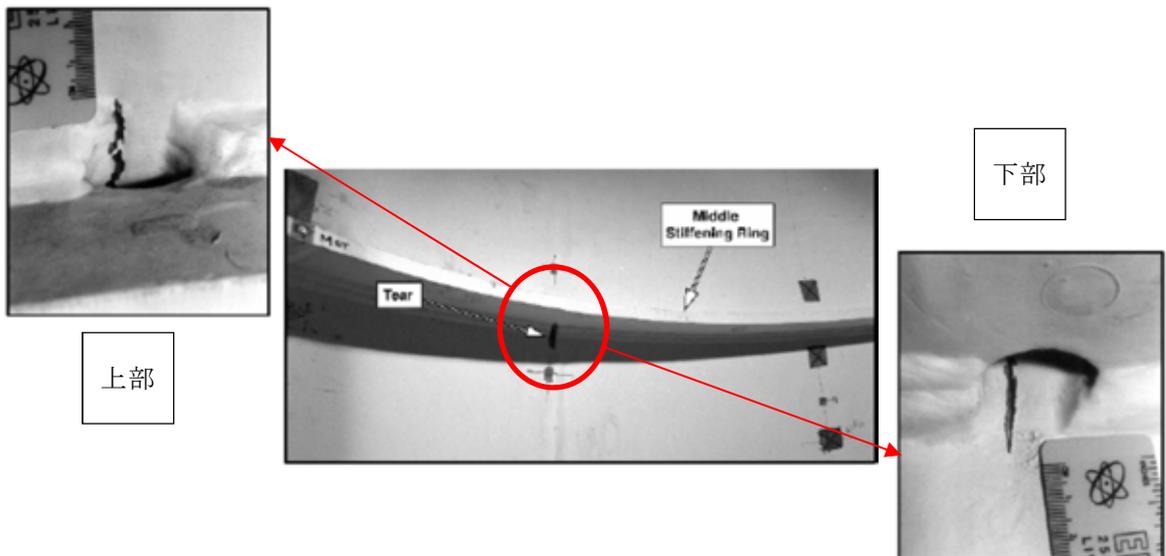


図 4 補強リング切り欠き部の破損状況

一方で図 2 の検証解析モデルを用いた解析においても、縮尺モデル試験にて破損が確認されたのと同様に、設計圧力の約 6 倍が負荷された時点で、機器ハッチ近傍及び補強リング切り欠き部周辺で局所的な応力の発生を確認した。応力分布図を図 5 及び図 6 に示す。

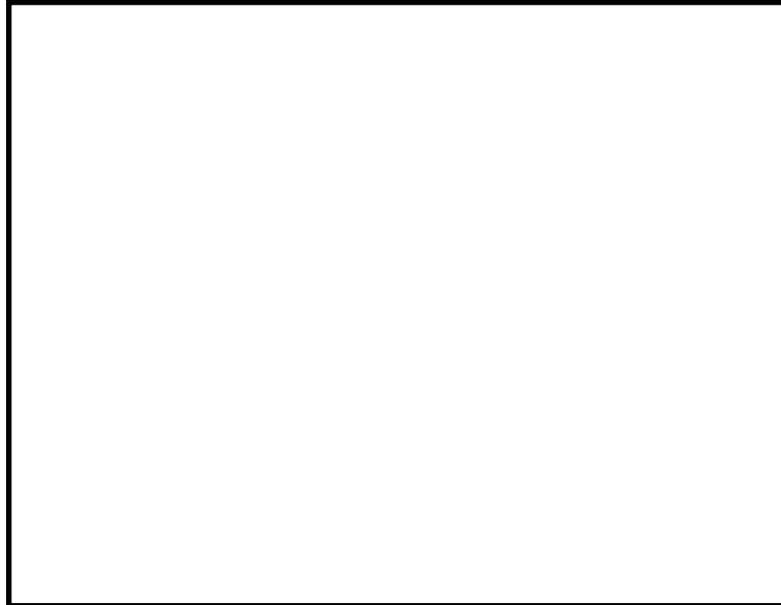


図 5 機器ハッチ近傍の相当応力分布図

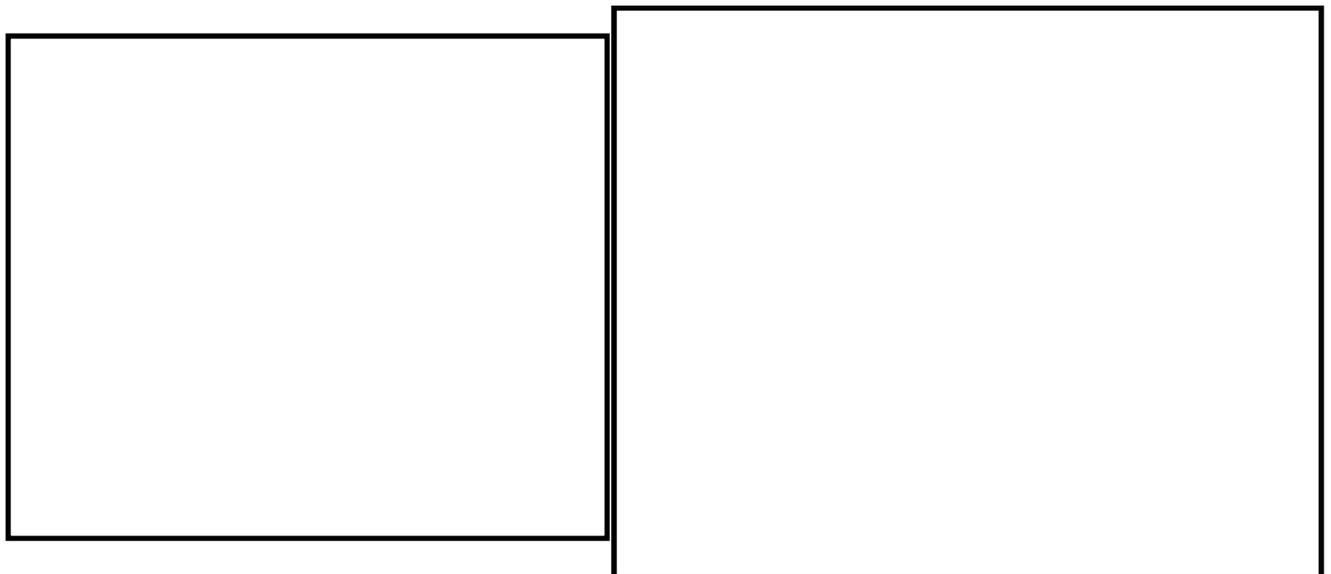


図 6 補強リング切り欠き部の相当応力分布図

(左：解析モデル図 右：応力分布図)

次に、破損方向が適切に模擬できているかを確認するため、図 5 及び図 6 で示した応力集中部位の主応力の方向を確認したものを図 7 及び図 8 に示す。図 7 及び図 8 に示すとおり、応力集中部位の主応力ベクトルは縮尺モデル試験において破損が確認された部位の亀裂方向と直交しており、図 5 及び図 6 に示す破損部位だけでなくこれら破損の形態についても、縮尺モデル試験と弾塑性解析の傾向は一致している。これらの結果より、弾塑性解析の手法は、設計圧力を超える圧力が負荷された鋼製容器の変形挙動を適切に模擬できる手法であることが確認された。

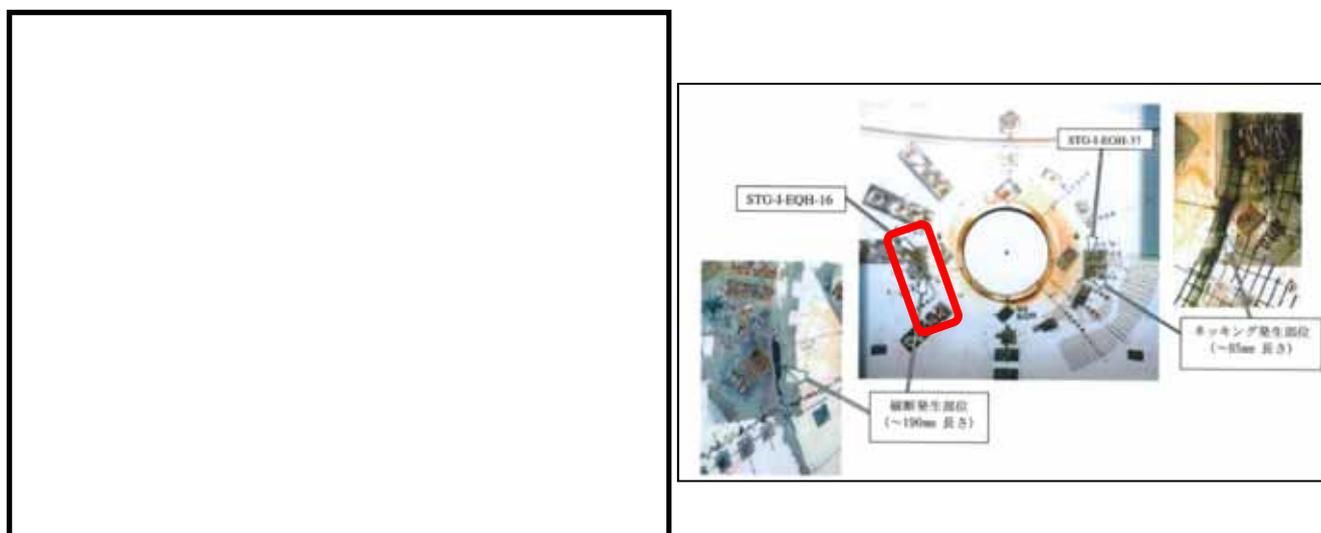


図 7 機器ハッチ近傍の主応力ベクトル図

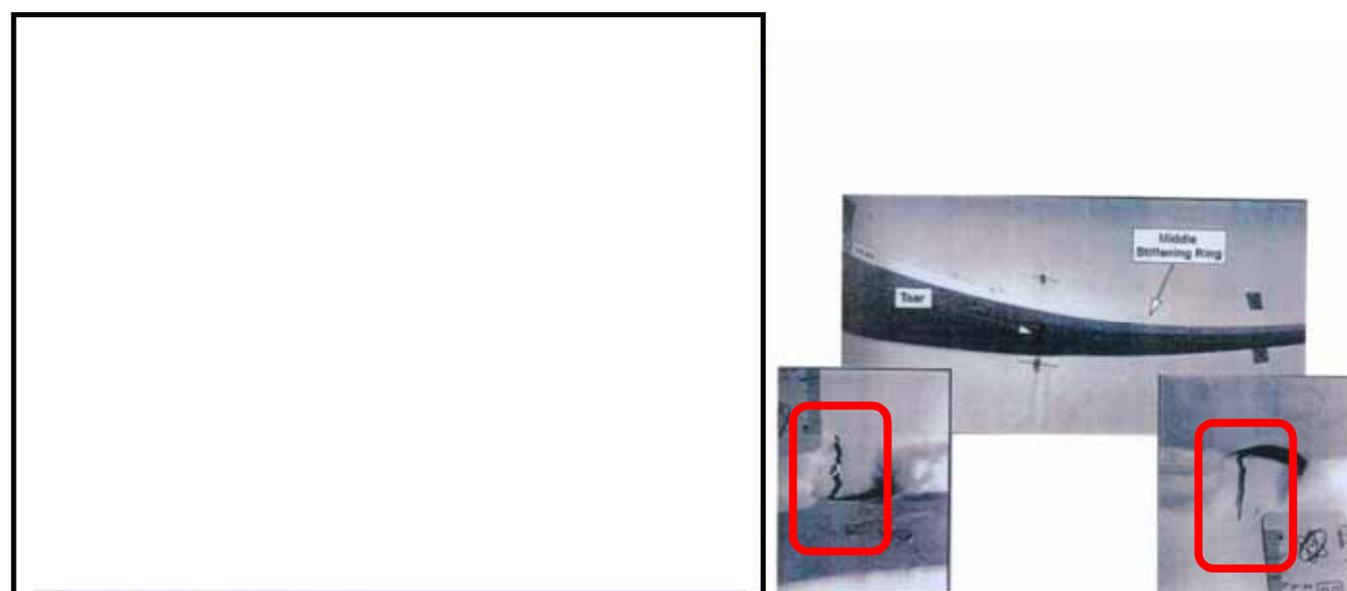


図 8 補強リング切り欠き部近傍の主応力ベクトル図

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

①解析手法について

東海第二発電所の格納容器モデルを用いた弾塑性解析においては、NUPEC縮尺モデル試験の破壊を検証した解析（以下、「検証解析」という。）の手法を用いて評価を行っている。検証解析手法は、設計・建設規格の考え方に基づく適切な要素分割と境界条件の設定により実機で想定される挙動を模擬できることが確認されえている。

今回の解析のモデル及び検証解析で使用されたモデルの設定している項目を表1に示す。

表1に示すとおり、今回の解析のモデルは、検証解析のモデルと同等と考えられるため、解析手法としては妥当と考えている。

表 1 解析モデルの設定項目と設定の考え方

解析項目	検証解析モデル (NUPEC 検証解析)	今回の解析モデル (東海第二)
要素サイズ	格納容器の変形挙動を適切に考慮するため、設計・建設規格の考え方に基づき、局所的な変形が減衰する距離($2.5 \times \sqrt{RT}$)よりも小さい要素サイズとする。	同左
モデル化範囲	Mark-II 改良型格納容器のドライウェル円錐部のみを 360° 分モデル化している。	格納容器底部からトップヘッド部まで全高を 180° セクタでモデル化している。 180° セクタの選定にあたっては、開口影響が最も大きい機器ハッチをはじめ、比較的大きい開口が密集している主蒸気系・給水系貫通部の群開口部を貫通部の代表部位として含んでいる。また、NUPECモデルで破損部位の1つであった補強リングについてもモデル化している。
貫通部の模擬	最も開口欠損が大きい機器ハッチのみをモデル化している。	開口影響が最も大きい機器ハッチをはじめ、比較的大きい開口が密集している主蒸気系・給水系貫通部の群開口部を貫通部の代表部位として選定している。
材料	Mark-II 改良型格納容器を想定し、SPV490 及び SGV480 を用いている。	東海第二発電所の格納容器材料である SGV480 相当(SA516Gr. 70)を用いている。
境界条件	円錐部の端部の径方向をフリーとし、それ以外は固定としている。	180° モデルの端部は対称境界としており、格納容器底部との取り合いは完全固定としている。また、格納容器本体基部の周辺に熱応力緩和の目的で設置しているサンドクッションについては、保守的に無視している。

②限界ひずみについて

今回の評価では、弾塑性解析で得られたひずみの許容値（限界ひずみ）として、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」（以下、「ガイドライン」という。）の終局状態におけるひずみ限界値を適用している。以下にその適用性について考察する。

ASME Sec. IIIでは、弾塑性解析を実施する場合に多軸応力場を考慮するため、材種により定まる一軸の限界ひずみの値に対し多軸応力係数(Triaxialty Factor)を用いて補正する方法が提唱されている。さらに、ガイドラインでは、形状や寸法等に依存しない不確定要因を考慮して、溶接部近傍の形状・材料の不連続性の影響を含んだ補正係数 β によって、限界ひずみを割り下げるものとされている。

今回の解析においては、上記の考え方にに基づき、多軸応力場の影響や不確定要因を保守的に評価するため、ASME Sec. IIIで提唱されている多軸応力係数や、ガイドラインで提唱されている補正係数 β により限界ひずみを割り下げる評価を実施している。ここで、補正係数 β はNUPECモデルの機器ハッチ周辺の破損部（SGV480とSPV490の材料の境界部）に関する検証解析とNUPEC試験体との終局応力の差から評価されたものであるが、寸法や材料等の差異で表現できない不確定要因を保守的に考慮するためのものである。したがって、特定のプラント毎の構造・寸法によって適用性が変わるものではないため、東海第二発電所の原子炉格納容器に適用することは問題ない。また、補正係数 β は、溶接部の不連続性が非常に高い部位から得られた値（SGV480とSPV490の材料の境界部）であるため、均一材料（SGV480相当）で構成されている東海第二の格納容器の解析結果に適用することは補正幅を大きく見積もることになるため、保守的であると考えられる。

これらのことから、補正係数 β を考慮したガイドラインのひずみ限界値を、東海第二発電所の解析に適用することは、多軸応力場の影響や不確定要素を考慮した保守的な評価を与えるため、妥当と考える。

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け量を 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。
-------	---

2. 回答

定期検査におけるトップ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。

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、また、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から、トップヘッドフランジのタングやガスケット溝は均一性を維持していると考えている。

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、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 性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。

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

角型断面ガスケットを用いるボルト締めフランジについて，ガスケットの圧縮率を表1に示す。表1に示すとおり，フランジガスケット部はそれぞれ寸法が異なるものの，ガスケットの圧縮率は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・雰囲気を含め，実機におけるシール材の環境を適切に模擬している。

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)					

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考慮し，現実的な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考慮した評価の考え方

評価項目	評価の考え方
フランジ部及びガスケットの製作公差の考慮	<ul style="list-style-type: none">各部位の設定公差のうち，最も評価が不利となる値を二乗和平方根で足し合わせる。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 に変更する。
シール部の構成材料の熱膨張の考慮	<ul style="list-style-type: none">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。
材料物性のばらつきの考慮	<ul style="list-style-type: none">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てひずみ率を設定

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，

（公称値）－（公差）＝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。

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		

注記：熱膨張量 ΔL の評価式は以下の通り

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

ここに、

L : 基準寸法 (mm)

α : 材料の熱膨張係数 (mm/mm \cdot °C)

鋼材 = 11.85×10^{-6} , ガスケット =

Δt : 据付状態から評価温度までの温度差 (°C) (= $200 -$ $=$)

表 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 4 4 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 12 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					○