

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-011-2 改2
提出年月日	2020年4月14日

【原子炉格納施設の設計条件に関する説明書に係る補足説明資料  
(原子炉格納容器の重大事故等時の閉じ込め機能健全性について)】

2020年4月

東京電力ホールディングス株式会社

## 目 次

### 1. 概要

- 別紙 1. シール機能維持に対する考え方について
- 別紙 2. 改良 EPDM 製シール材の適用性について
- 別紙 3. 改良 EPDM 製シール材における各試験について
- 別紙 4. 改良 EPDM 製シール材の圧縮永久ひずみ試験について
- 別紙 5. 実機フランジ模擬試験の概要について
- 別紙 6. 改良 EPDM 製シール材における実機フランジ模擬試験結果の適用について
- 別紙 7. 改良 EPDM 製シール材の実機を模擬した小型フランジ試験について
- 別紙 8. バックアップシール材のシール機能について
- 別紙 9. バックアップシール材塗布による設計影響について
- 別紙 10. ドライウェル主フランジ等の開口量評価について
- 別紙 11. 経年劣化を考慮したシール機能について
- 別紙 12. 化学薬品や核分裂生成物のシール機能への影響について
- 別紙 13. シール材の運転環境（放射線量，温度）の考慮について
- 別紙 14. 黒鉛製シール材について
- 別紙 15. フランジ開口量評価の妥当性について（構造解析との関連性）
- 別紙 16. 原子炉格納容器の各シール部の開口裕度について
- 別紙 17. 所員用エアロック開口量評価に係る変形支点の変位の影響について
- 別紙 18. 原子炉格納容器隔離弁の重大事故等時環境における耐性確認試験の概要について
- 別紙 19. 重大事故等時におけるシール機能の追従性について
- 別紙 20. フランジ部の塑性変形の評価について
- 別紙 21. 200℃，2Pd の適用可能時間を過ぎてから用いる限界圧力，温度について
- 別紙 22. 開口量評価条件の設置許可時からの変更点について
- 別紙 23. フランジ開口量評価結果 ボルト部の応力コンター図及び変形図
- 別紙 24. 代替循環冷却系の健全性
- 別紙 25. ドライウェル上鏡部の温度分布形成による局所的な影響について

下線部：今回ご提出箇所

## 1. 概要

本資料は、「原子炉格納施設的设计条件に係る説明書」(以下、「説明書」という。)の「6. 重大事故等における原子炉格納容器の放射性物質の閉じ込め機能評価及びその他影響確認」に示す重大事故等時の原子炉格納容器の閉じ込め機能維持の詳細を示すものである。

## 重大事故等時におけるシール機能の追従性について

## 1. はじめに

原子炉格納容器については、重大事故等時に原子炉格納容器圧力の上昇率が大きくなる場合においてシール機能が追従できず、原子炉格納容器から漏えいが生じる可能性がある。原子炉格納容器のフランジ開口量の変化速度が最も速くなる事故シナリオは、**溶融燃料-冷却材相互作用発生時**であり、本ケースを対象に、圧力上昇時のシール機能への影響について評価した。

## 2. 原子炉圧力容器破損に伴う圧力上昇の影響について

有効性評価に関する事故シナリオにおいて、原子炉格納容器の**フランジ開口量の変化速度が最も速くなる**のは、1.に記載のとおり**溶融燃料-冷却材相互作用発生時**である。フランジ等のシール部に用いるシール材は、フランジ等の開口量に合わせて形状が変化することによりシール機能を確保しているが、原子炉格納容器の圧力上昇時のフランジの開口量の変化する速度にシール材の形状の変化が追従できない場合には、漏えいが生じる可能性がある。

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

## 2.1 シール材の形状変化速度

フランジ部においてシール材に採用する改良 EPDM 製シール材について、復元速度を評価するため、J I S K 6 2 5 4に基づく試験を行った。

当社が評価している事故シナリオにおいて、フランジ開口量の変化速度が最も早くなるのは、**溶融燃料-冷却材相互作用発生時**である。この場合における開口量の変化速度は、0.3mm/s 程度であることが分かっているため、これを参照して、0.3mm/s を上回る 300mm/min (5mm/s) 及び 500mm/min (8.33 mm/s) を試験速度とした。

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

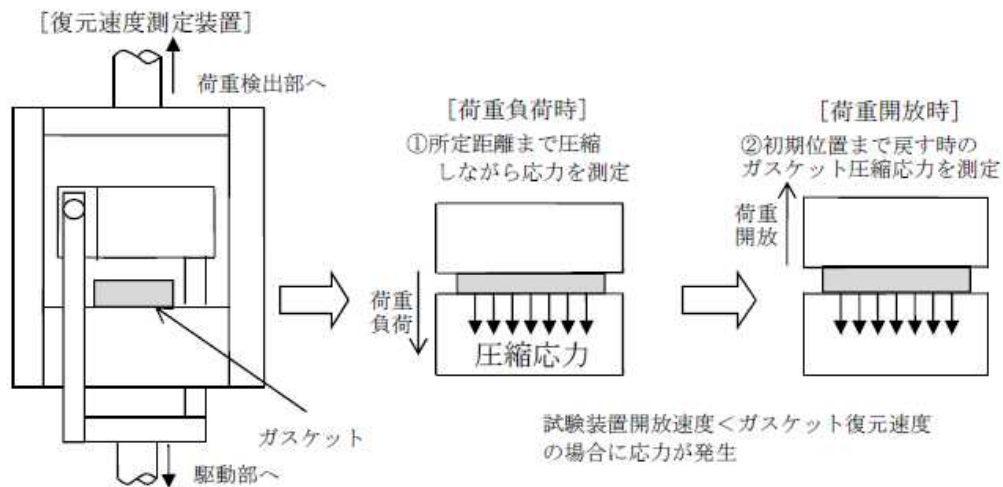


図1 復元速度測定試験の概要

## 2.2 試験結果

試験結果を図2に示す。この図に示すように、荷重開放時の各計測点において圧縮応力が測定されたことから、改良 EPDM 製シール材の復元速度は 500mm/min

(8.33mm/s) 以上であることを確認した。前述のとおり、フランジ開口量の変化速度が早くなるのは、**溶融燃料-冷却材相互作用発生時**であるが、その時のフランジ開口変化速度は 0.3mm/s 程度であり、以下のとおりシール材復元速度は十分な追従性を有しているものであり、急速な開口に対してもシール機能を維持できるものとする。

シール材復元速度 500mm/min (8.33mm/s) 以上 > フランジ開口変化速度 (0.3mm/s)



図2 一定復元速度下で測定した改良 EPDM 製シール材の圧縮応力

なお、本試験は、劣化していない材料に対して実施したものであるが、表1に示すとおり、劣化後の圧縮永久ひずみ率、硬さ、質量変化率からは、有意な性状変化が見られていない。また、さらに詳細に劣化による影響を確認するために、劣化後の材料のFT-IRやシート面の硬さに関する検討を行った。その結果、シール材の性状に大きな変化は確認されなかった。

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

表1 改良 EPDM 製シール材の基礎特性データの経時変化

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

注：γ線 1.0MGy 照射済の試験体を用い、飽和蒸気環境下に曝露した後の測定値

<追従性判断に使用できる理由>

800kGy の放射線照射を行い、乾熱 200℃を 168 時間曝露した改良 EPDM 製シール材、及び 800kGy の放射線照射を行い、蒸気 250℃を 168 時間曝露した改良 EPDM 製シール材について、劣化後のシート面の FT-IR スペクトルを図 3 に、硬さ測定の測定値を図 4 に示す。その結果、FT-IR スペクトルは、分析位置に顕著な劣化が認められないこと、硬さ測定結果は、200℃、168 時間条件では酸化劣化によって暴露面の近傍

においては硬さが顕著に上昇したが、その他は、硬さの初期値近傍であることから、放射線照射+蒸気曝露後の試験片と初期試験片に顕著な差異はないことが確認できるため、復元特性が同様であると類推される。

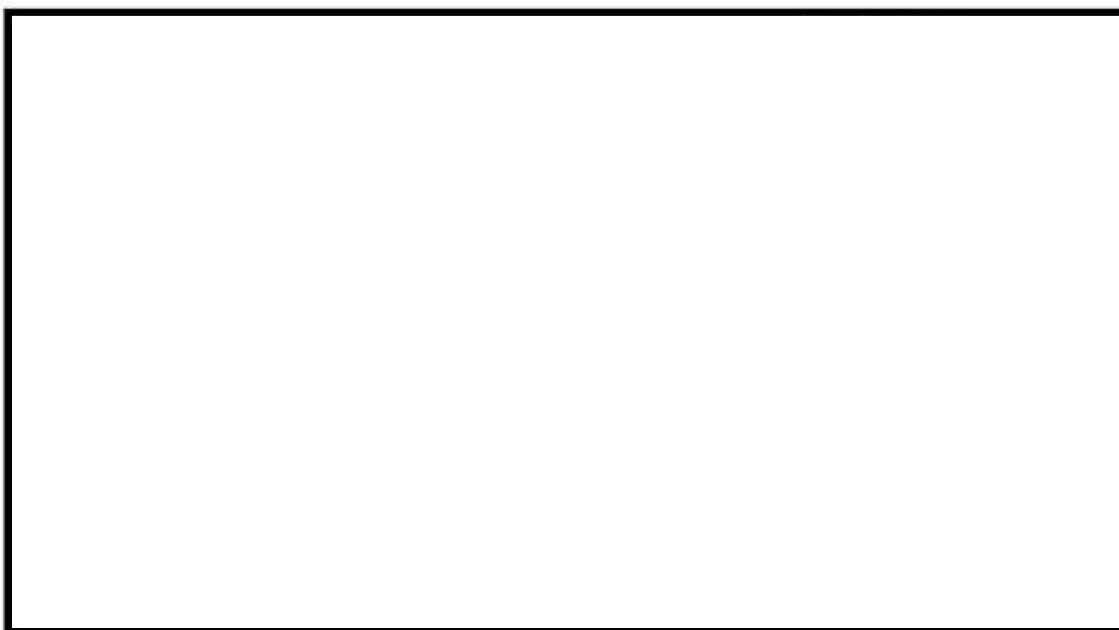


図3 FT-IR測定結果（シート面）

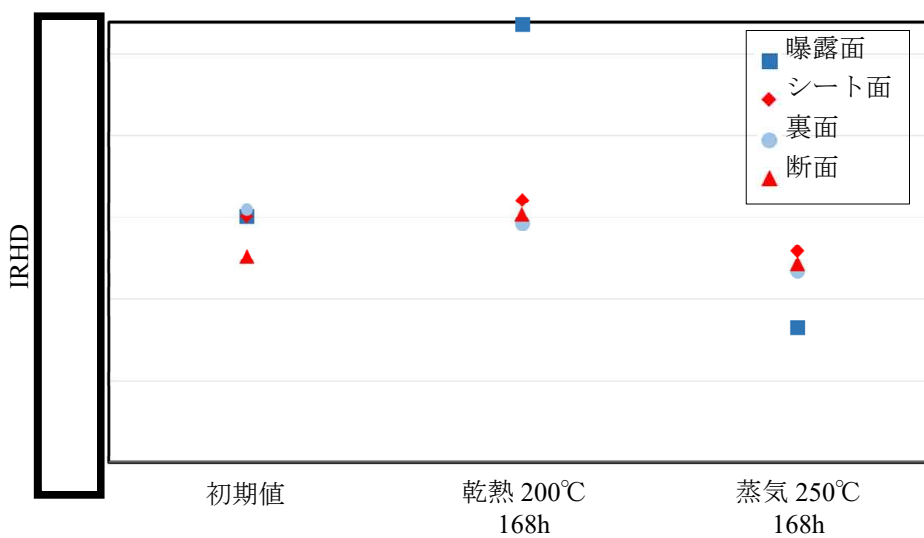


図4 硬さ測定結果

また、上記試験に加え、劣化した試験体を用いた復元速度測定も実施している。試験条件を表 2、試験結果を図 5、6 に示しているが、劣化後においても復元速度は 500mm/min 以上であり、十分な復元速度を有していることが確認できた。

表 2 劣化試験体を用いた復元速度測定試験の試験条件

ケース	シート材	放射線照射量	暴露媒体	暴露温度	試験体数
1	改良 EPDM	1MGy	蒸気	200°C (168h)	3 個
2	改良 EPDM	1MGy	蒸気	200°C (168h) + 150°C (168h)	3 個

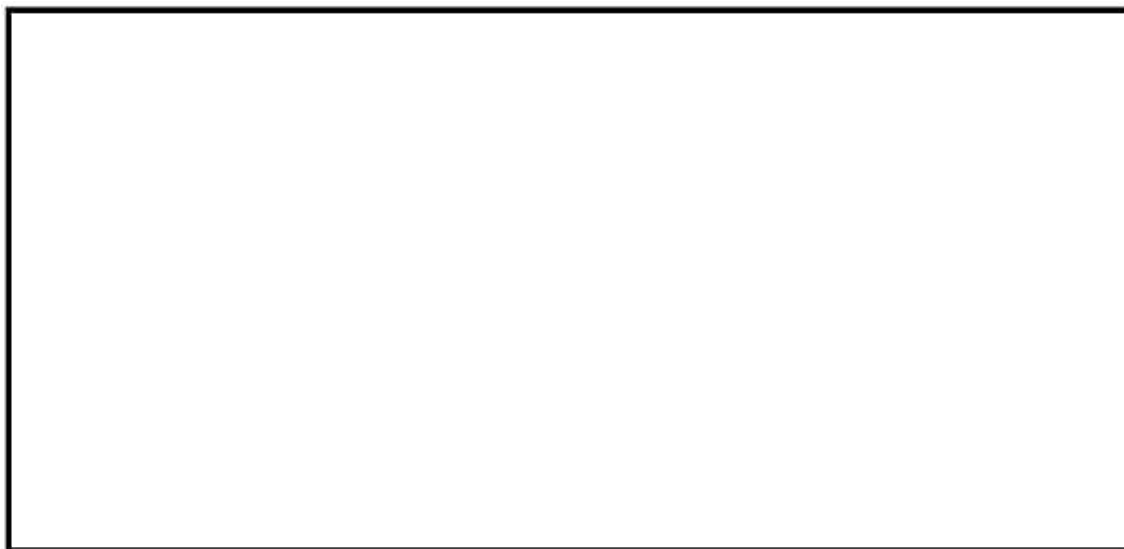


図 5 復元速度測定試験 (試験数 : 各 3)  
 (劣化条件<ケース 1> : 放射線照射量 1MGy, 暴露温度 200°C, 168h)  
 (左 : 300mm/min, 右 : 500mm/min)





図6 復元速度測定試験 (試験数: 各3)

(劣化条件<ケース2>: 放射線照射量 1MGy, 暴露温度 200℃, 168h⇒150℃, 168h)

(左: 300mm/min, 右: 500mm/min)

本試験で得られた結果から、劣化を考慮した場合の改良 EPDM 製シール材の復元速度は 500mm/min (=8.33mm/s) 以上であることが確認できる。これは、当社が評価している事故シナリオのうち最もフランジ開口の変化速度が早い事象(0.3mm/s 程度)と比較しても、十分な裕度を有しており、試験データのばらつきも小さいことから、重大事故等時に必要なシール機能を維持できるものと評価できる。

## 開口量評価条件の設置許可時からの変更点について

## 1. はじめに

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 EPDM 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。実施したフランジ開口量評価では FEM 解析を用いているが、今回実施した評価については、設置変更許可時の評価条件から、一部条件の変更を行っている。本書は設置許可時の評価条件からの変更点について説明するものである。

## 2. 設置許可時のフランジ開口量評価条件からの変更点

表 1 及び表 2 は、ドライウェル主フランジ及び上部ドライウェル機器搬入用ハッチにおける開口量評価条件の、設置許可時と今回の比較表である。今回実施した評価で設定した条件は、工事計画認可における先行認可実績を踏まえて解析コードを変更すると共に、実態を踏まえた評価条件への変更を行っている。また、ドライウェル主フランジのナット及びワッシャについては、開口量の低減を目的として、より降伏点の高い材質へ変更することとし、評価を実施した。

また、参考として、今回新規に実施した下部ドライウェル機器搬入用ハッチ及びサブレーションチェンバ出入口の評価条件について、表 3 に示す。

表1 フランジ開口量評価 条件比較表 (ドライウェル主フランジ)

項目	設置許可時条件	今回条件	変更理由
解析コード	FINAS VERSION 20.1	Abaqus R2017x	先行工事計画認可において実績のあるコードに変更した
解析モデル	3次元ソリッド [ ] セクターモデル	3次元ソリッド [ ] セクターモデル	モデル軽量化の目的で、1/2ピッチモデルとした
モデル規模	・節点数：15042 ・要素数：10980	・節点数：19150 ・要素数：14084	モデルの詳細化を行った
材料特性	・温度依存の弾塑性材料，硬化則：多直線等方硬化則 ・材料構成則：API 579-1/ASME FFS-1 (2007) を使用	・温度依存の弾塑性材料，硬化則：多直線等方硬化則 ・材料構成則：ASME BPVC Sec. VIII Div.2 Part5 を使用	先行工事計画認可において実績のある材料構成則に変更した
材料	・鏡板，胴，フランジ： [ ] ・ボルト [ ] : ・ナット : ・ワッシャ :	・鏡板，胴，フランジ： [ ] ・ボルト [ ] : ・ナット : ・ワッシャ :	開口量抑制を目的としてナット及びワッシャの材質変更を行った
拘束条件	・周方向対称面：周方向の自由度を拘束 ・中心軸：水平2方向の自由度を拘束 ・胴端部：径方向フリー	・周方向対称面：周方向の自由度を拘束 ・中心軸：水平2方向の自由度を拘束 ・胴端部：完全拘束	胴端部の拘束条件について、コンクリート埋設であることから完全拘束の条件とした
荷重条件	・ボルト締結力 [ ] [N] (JSME 材料規格 2012 年版 許容引張応力 S 値：ボルト軸方向応力は約 [ ] MPa)	・ボルト締結力 [ ] [N] (実機締付管理値の下限：ボルト軸方向応力は約 [ ] MPa)	ボルト締結力について、実運用を踏まえた条件に変更した
摩擦条件	・摩擦係数は考慮しない ( $\mu = 0.0$ )	・摩擦係数を考慮する ( $\mu = [ ]$ )	摩擦を考慮することとした
熱膨張	・ボルト締結力の昇温による軸力変化においてのみ考慮 ・熱膨張係数は設計・建設規格 2005 年版の値を使用	・構造部材全体について考慮 ・熱膨張係数は設計・建設規格 2005 年版の値を使用	熱膨張について、構造部材全体において考慮することとした

表 2 フランジ開口量評価 条件比較表 (上部ドライウェル機器搬入用ハッチ)

項目	設置許可時条件	今回条件	変更理由
解析コード	FINAS VERSION 21.0	Abaqus R2017x	先行工事計画認可において実績のあるコードに変更した
解析モデル	3次元ソリッド [ ] セクターモデル	3次元ソリッド [ ] セクターモデル	変更なし
モデル規模	・節点数：5004 ・要素数：3483	・節点数：6492 ・要素数：4454	モデルの詳細化を行った
材料特性	・温度依存の弾塑性材料，硬化則：多直線等方硬化則 ・材料構成則：ASME BPVC Sec. VIII Div.2 Part5 を使用	・温度依存の弾塑性材料，硬化則：多直線等方硬化則 ・材料構成則：ASME BPVC Sec. VIII Div.2 Part5 を使用	変更なし
材料	・蓋，胴，ブラケット : [ ] ・スイングボルト [ ] : [ ] ・ナット，ピン : [ ] ・ワッシャ : [ ]	・蓋，胴，ブラケット : [ ] ・スイングボルト [ ] : [ ] ・ナット，ピン : [ ] ・ワッシャ : [ ]	変更なし
拘束条件	・周方向対称面：周方向の自由度を拘束 ・中心軸：軸直2方向の自由度を拘束 ・胴端部：完全拘束	・周方向対称面：周方向の自由度を拘束 ・中心軸：軸直2方向の自由度を拘束 ・胴端部：完全拘束	変更なし
荷重条件	・ボルト締結力 [ ] [N] (JSME 材料規格 2012 年版 許容引張応力 S 値：ボルト軸方向応力は約 [ ] MPa)	・ボルト締結力 [ ] [N] (必要最小締付力：ボルト軸方向応力は約 [ ] MPa)	ボルト締結力について，実運用を踏まえた条件に変更した
摩擦条件	・摩擦係数は考慮しない ( $\mu = 0.0$ )	・摩擦係数を考慮する ( $\mu = [ ]$ )	摩擦係数を考慮することとした
熱膨張	・ボルト締結力の昇温による軸力変化においてのみ考慮 ・熱膨張係数は設計・建設規格 2005 年版の値を使用	・構造部材全体について考慮 ・熱膨張係数は設計・建設規格 2005 年版の値を使用	熱膨張について，構造部材全体において考慮することとした

表3 新規実施のフランジ開口量評価条件（下部ドライウェル機器搬入用ハッチ，サブプレッションチェンバ出入口）

項目	下部ドライウェル機器搬入用ハッチ	サブプレッションチェンバ出入口	備考
解析コード	Abaqus R2017x	Abaqus R2017x	
解析モデル	3次元ソリッド [ ] セクターモデル	3次元ソリッド [ ] セクターモデル	
モデル規模	・節点数：13446 ・要素数：10564	・節点数：13453 ・要素数：10558	
材料特性	・温度依存の弾塑性材料，硬化則：多直線等方硬化則 ・材料構成則：ASME BPVC Sec. VIII Div.2 Part5 を使用	・温度依存の弾塑性材料，硬化則：多直線等方硬化則 ・材料構成則：ASME BPVC Sec. VIII Div.2 Part5 を使用	
材料	・蓋，胴，ブラケット： [ ] ・ボルト [ ]： ・平座金：	・蓋，胴，ブラケット： [ ] ・ボルト [ ]： ・平座金：	
拘束条件	・周方向対称面：周方向の自由度を拘束 ・中心軸：軸直2方向の自由度を拘束 ・胴端部：周方向，軸方向の自由度を拘束	・周方向対称面：周方向の自由度を拘束 ・中心軸：軸直2方向の自由度を拘束 ・胴端部：完全拘束	下部ドライウェル機器搬入用ハッチについては，鏡板に固定される構造のため径方向を拘束しない設定とした
荷重条件	・ボルト締結力 [ ] [N] (必要最小締付力：ボルト軸方向応力は約 [ ] MPa)	・ボルト締結力 [ ] [N] (必要最小締付力：ボルト軸方向応力は約 [ ] MPa)	
摩擦条件	・摩擦係数を考慮する ( $\mu = [ ]$ )	・摩擦係数を考慮する ( $\mu = [ ]$ )	
熱膨張	・構造部材全体について考慮 ・熱膨張係数は設計・建設規格 2005年版の値を使用	・構造部材全体について考慮 ・熱膨張係数は設計・建設規格 2005年版の値を使用	

## フランジ開口量評価結果 ボルト部の応力コンター図及び変形図

## 1. はじめに

FEM 解析により実施した 200℃, 2Pd 条件下でのフランジ開口量評価の結果として, 開口現象に係わる主要部位であるボルト部の応力コンター図および変形図を本資料に示す。

## 2. ボルト部軸方向の応力コンター図及び変形図

図 1~4 に各ボルト部の応力コンター図及び変形図 (変形率は 10 倍) を示す。いずれの部位についても, ボルトの 200℃における降伏応力に対して最大発生応力が小さく, 弾性域に収まっている。



図 1 応力コンター図及び変形図 (ドライウェル主フランジ)



図2 応力コンター図及び変形図（上部ドライウェル機器搬入用ハッチ）

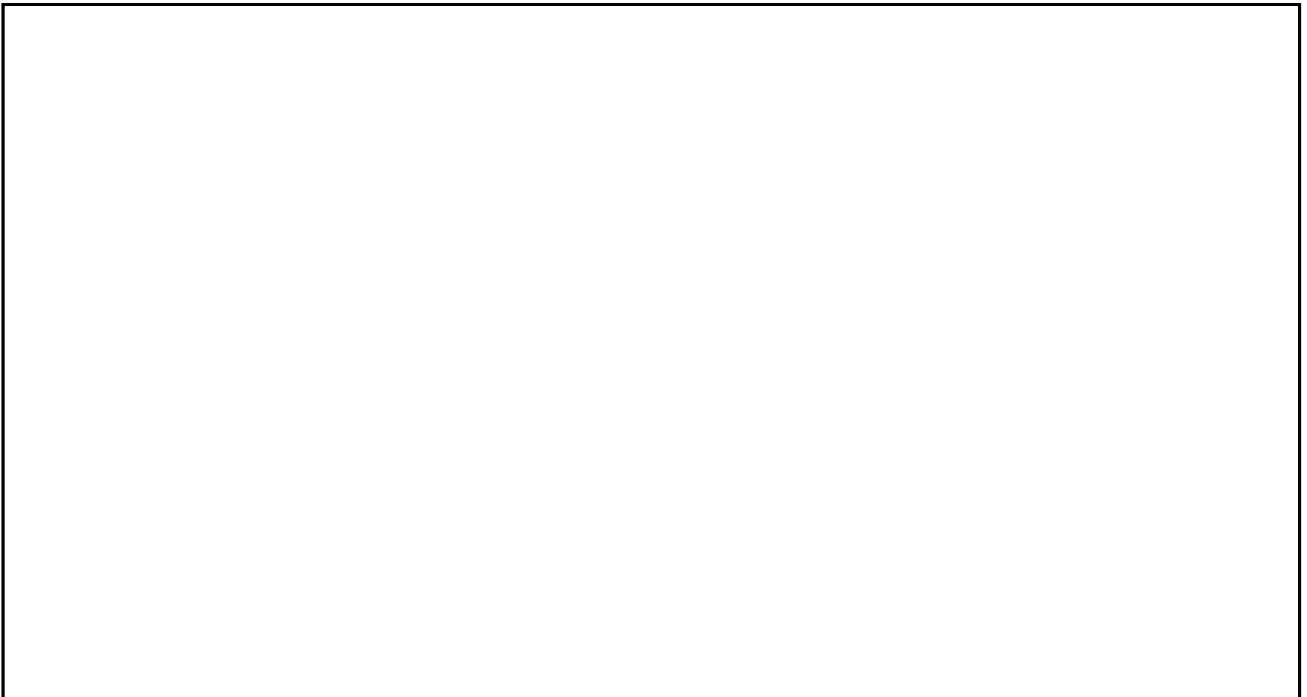


図3 応力コンター図及び変形図（下部ドライウェル機器搬入用ハッチ）

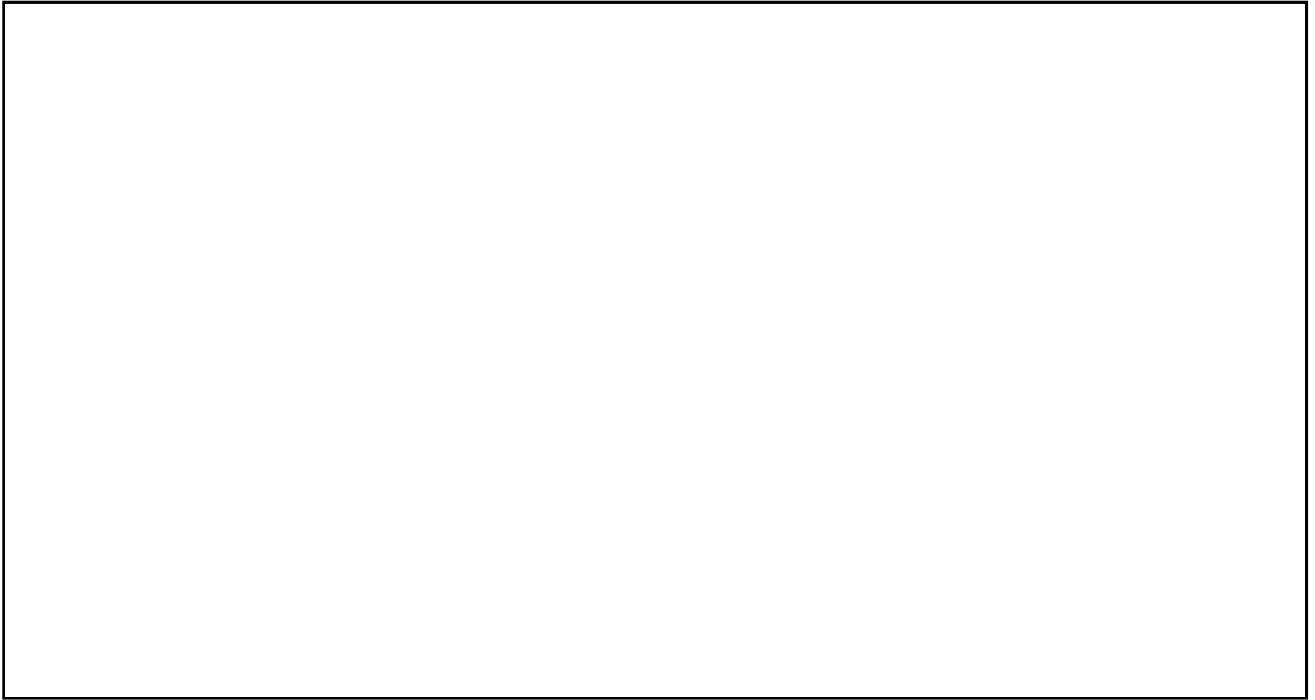


図4 応力コンター図及び変形図（サプレッションチェンバ出入口）



## ドライウェル上鏡部の温度分布形成による局所的な影響について

1. はじめに

ドライウェル主フランジの重大事故等時における開口量評価については、全体を一様に 200℃、2Pd 条件として評価を行っている。

ここでは、重大事故等時にドライウェル上鏡部に局所的な温度分布が形成される可能性について検討し、また、仮に局所的な温度分布が形成された場合のドライウェル主フランジのシール機能に及ぼす影響について確認した結果を示す。

2. 重大事故等時の温度分布状況について

ドライウェル上鏡部の重大事故等時の温度分布状況については以下が考えられる。

- ・ 原子炉格納容器は金属製であり熱伝導が生じるため、ドライウェル上鏡部も含めた原子炉格納容器内で重大事故等時に極端な温度分布が形成されることはないと考えられる。
- ・ 原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）ヘッド部には図 1 に示すとおり保温材が設置されていることから、ドライウェル上鏡部に極端な温度分布が形成されることはないと考えられる。
- ・ 原子炉格納容器内では気相部が成層化する可能性も考えられるが、一方で、中心部に設置されている RPV が熱源、原子炉格納容器壁面が除熱源となって対流が生じることが想定されるため、極端な温度分布は形成されにくいと考えられる。

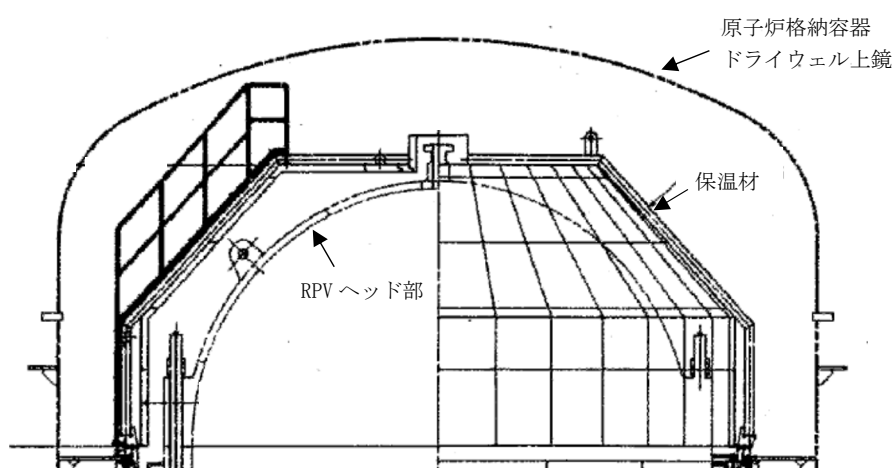


図 1 RPV ヘッド部の保温材概要図

### 3. 開口量評価への影響確認

上記2. に示したとおり，ドライウエル上鏡部に極端な温度分布が形成されることはないと考えられるが，仮想的な温度分布を考慮した条件でのドライウエル主フランジの開口量評価を実施し，開口量及びシール機能への影響有無について確認を行った。

#### (1) 評価条件

別添1で示したドライウエル主フランジの開口量評価の評価条件のうち，本評価で変更する条件を表1及び図2に示す。

重大事故等時は，原子炉建屋の水素爆発防止を目的として格納容器頂部注水系を運用する方針のため，原子炉格納容器外側の原子炉ウエルに，ドライウエル主フランジのフランジ面まで水張りする状況を想定する。このとき，注水した水の温度は，原子炉格納容器内温度が200℃の場合，熱伝導及び熱伝達により短時間で100℃まで上昇することが想定されるため，温度条件は，フランジ面より下側を100℃，フランジ面より上側を200℃の条件とした。

表1 開口量評価条件（変更点のみ抜粋）

項目	別添1の評価条件	本評価条件
ドライウエル上鏡部 温度	200℃	ドライウエル上鏡：200℃， ドライウエル主フランジ フランジ面：100℃
胴部温度	200℃	100℃
締結部材温度 (ボルト，ナット，ワッシャ)	200℃	フランジ面を境界として 上鏡側：200℃ 胴部側：100℃



図2 開口量評価条件（ドライウエル主フランジの解析モデル）

なお、格納容器頂部注水系の注水口については、系統概要図を図3に、注水口の設置位置を図4に示すとおり、ドライウエル上鏡の頂部には直接水がかからない位置に設置している。

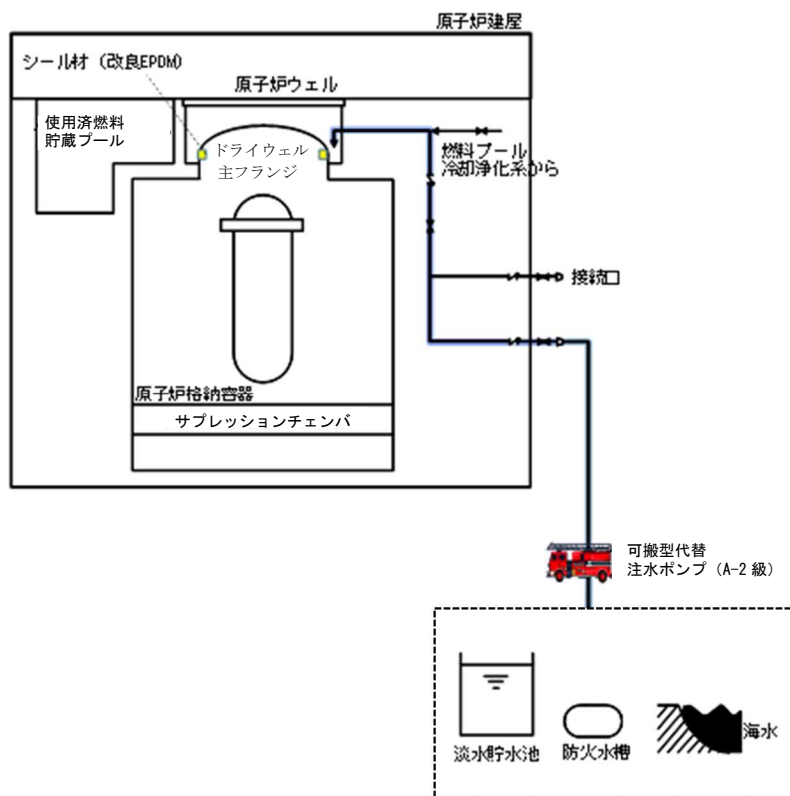


図3 格納容器頂部注水系の系統概要図

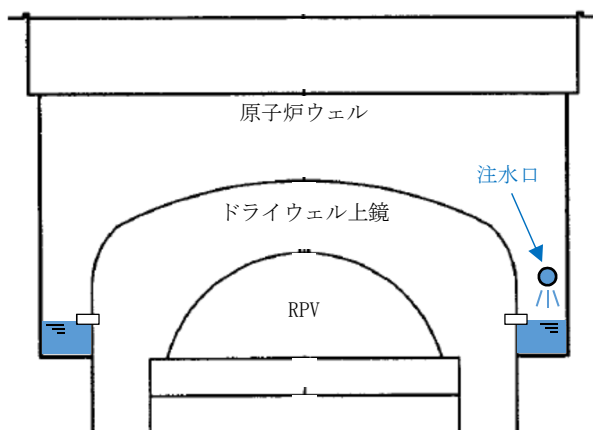


図4 格納容器頂部注水系注水口の設置位置

(2) 評価結果

別添 1 の評価結果，本評価結果の比較を表 2 に示す。また，別添 1 の評価結果を図 5 に，本評価結果を図 6 に示す。

表 2 開口量評価結果の比較

項目	別添 1 の評価結果	本評価結果
内側ガスケット 開口量 (2Pd 時)	1.11 mm	1.06 mm
外側ガスケット 開口量 (2Pd 時)	0.87 mm	0.82 mm

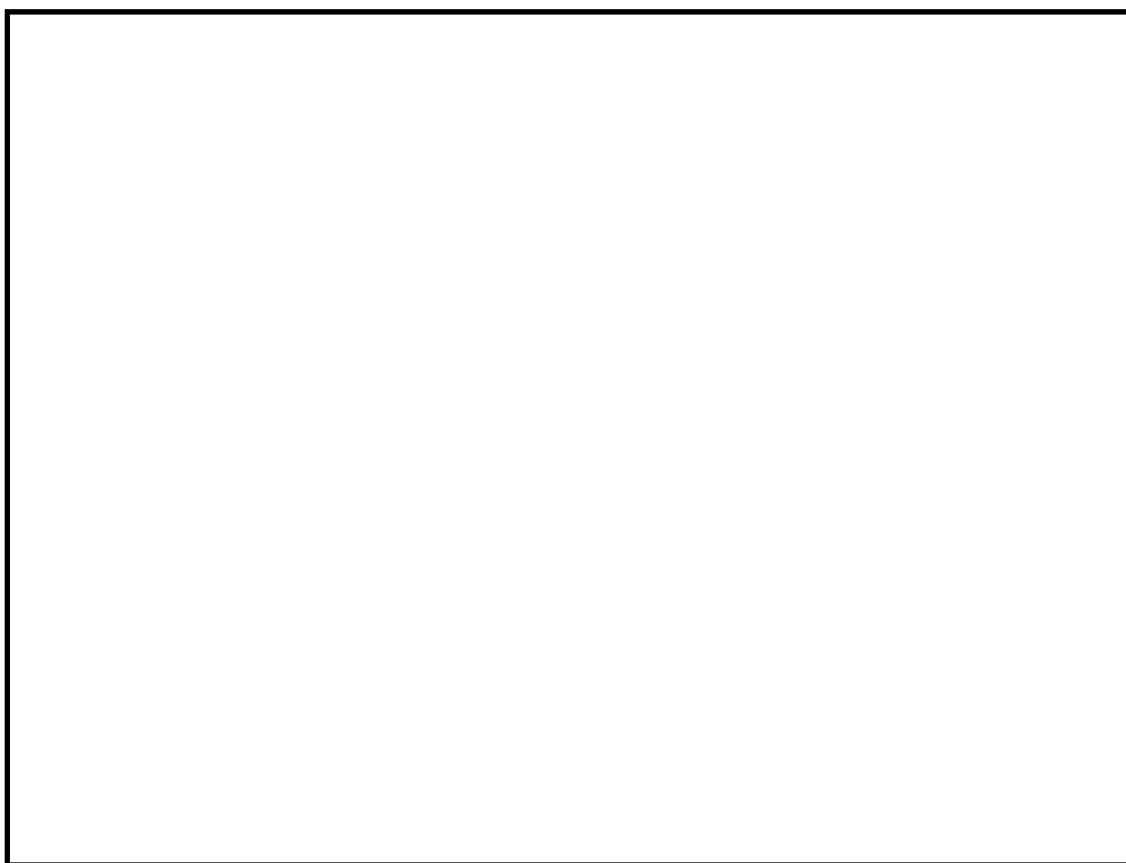


図 5 ドライウェル主フランジの開口量評価結果 (別添 1 の評価結果)

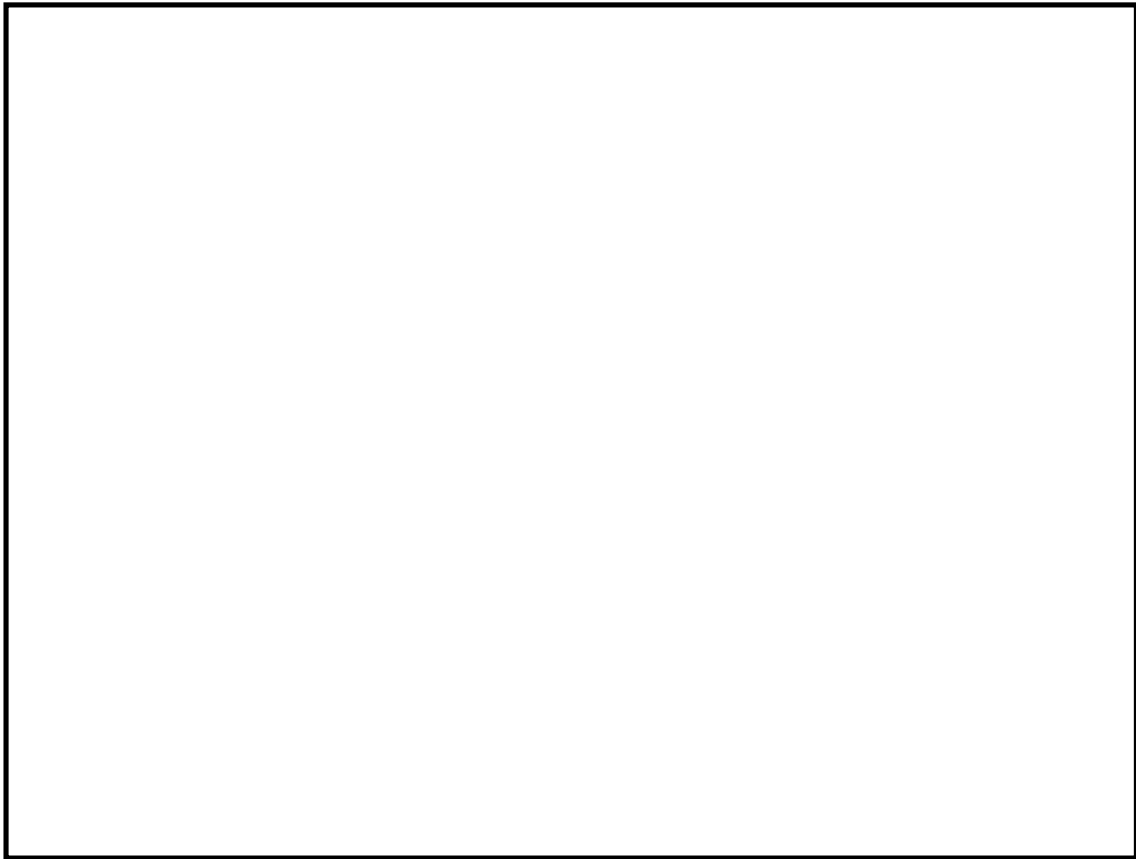


図 6 ドライウェル主フランジの開口量評価結果（温度分布を考慮する場合）

表 2 のとおり，別添 1 の評価結果（一様 200℃条件での評価結果）に比べて，温度分布を考慮した本評価結果の方が，開口量が小さい値となった。

これは，ドライウェル主フランジの下側が低温で熱膨張量が小さく，上側が高温で熱膨張量が大きくなり，ボルト締結部を支点としてフランジが閉じる方向に作用するため，開口量が小さい値になったものと推定される。

以上より，温度分布を考慮した場合においても開口量及びシール機能への影響はないことを確認した。

### 3. まとめ

重大事故等時にドライウェル上鏡部に局所的な温度分布が形成されることはないと考えられるが，仮に局所的な温度分布が形成されることを想定した条件においてドライウェル主フランジの開口量評価を実施した結果，別添 1 で説明している一様 200℃条件での開口量に比べて小さい開口量となった。

以上より，温度分布を考慮した場合においても開口量及びシール機能への影響はないことを確認した。