

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-1009 改 0
提出年月日	平成 30 年 8 月 9 日

V-2-5-4-1-3 残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書

目次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用基準	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	6
3. 評価部位	7
4. 地震応答解析及び構造強度評価	10
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	10
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	10
4.3 解析モデル及び諸元	20
4.4 固有周期	21
4.5 設計用地震力	22
4.6 計算方法	23
4.7 計算条件	31
4.8 応力の評価	31
5. 評価結果	32
5.1 設計基準対象施設としての評価結果	32
5.2 重大事故等対処設備としての評価結果	35
6. 引用文献	37

1. 概要

本計算書は、技術基準規則の解釈第 17 条 4 において記載される「非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について（内規）」（平成 20・02・12 原院第 5 号（平成 20 年 2 月 27 日原子力安全・保安院制定））及び「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している設計方針に基づき、残留熱除去系ストレーナが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

残留熱除去系ストレーナは、設計基準対象施設においては既設の S クラス施設に、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

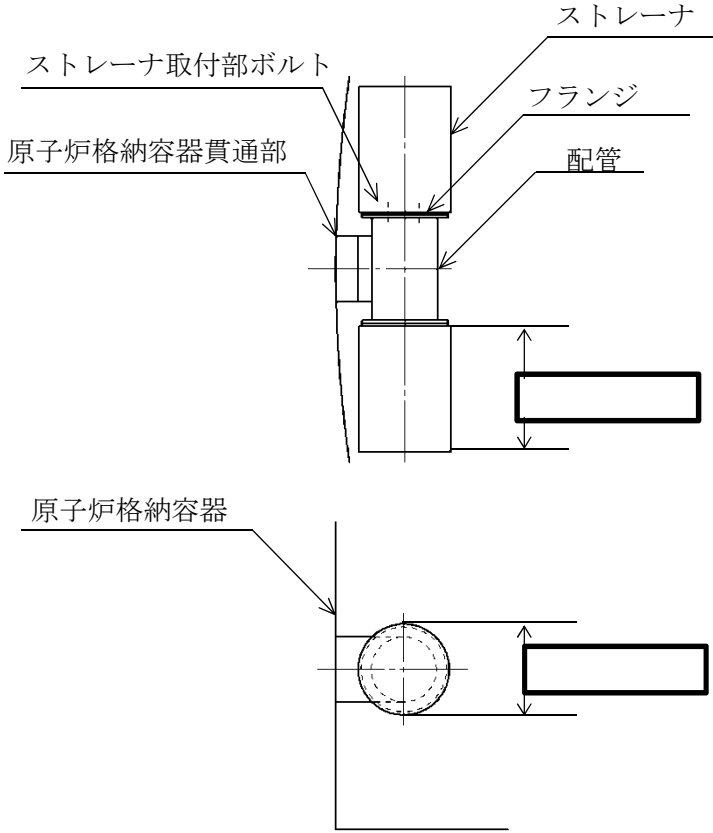
なお、残留熱除去系ストレーナ、高圧炉心スプレイ系ストレーナ及び低圧炉心スプレイ系ストレーナは同形状のストレーナを使用することから、本計算書においては代表して残留熱除去系ストレーナに残留熱除去系ストレーナ、高圧炉心スプレイ系ストレーナ及び低圧炉心スプレイ系ストレーナの荷重条件で最大となる値を用いて評価している。

2. 一般事項

2.1 構造計画

残留熱除去系ストレーナ、高圧炉心スプレイ系ストレーナ及び低圧炉心スプレイ系ストレーナの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図	摘要
支持構造	主体構造		
原子炉格納容器貫通部に取り付けられたティーに据え付ける。	円錐支持ディスク形		<ul style="list-style-type: none">・残留熱除去系ストレーナ・高圧炉心スプレイ系ストレーナ・低圧炉心スプレイ系ストレーナ

2.2 評価方針

残留熱除去系ストレーナの応力評価は、非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について（平成 20 年 2 月 27 日付け平成 20・02・12 原院第 5 号）に基づき設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示す残留熱除去系ストレーナの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.4 解析モデル及び諸元」及び「4.4 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「4. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5. 評価結果」に示す。

残留熱除去系ストレーナの耐震評価フローを図 2-1 に示す。

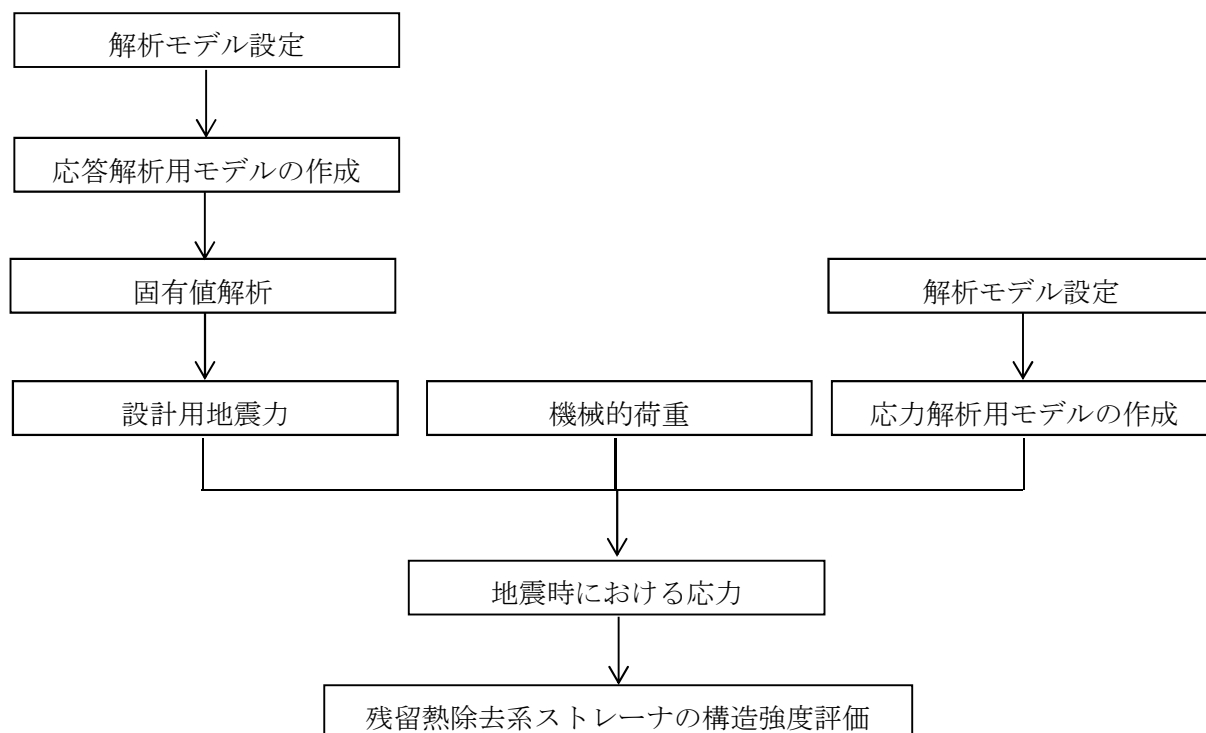


図 2-1 残留熱除去系ストレーナの耐震評価フロー

2.3 適用基準

適用基準等を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補－1984, J E A G 4 6 0 1 -1987 および J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版）（日本電気協会電気技術基準調査委員会）
- (2) 発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005 年版（2007 年追補版含む。）） J S M E S N C 1 －2005/2007）（日本機械学会 2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）
- (3) 非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について（平成 20 年 2 月 27 日付け平成 20 ・ 02 ・ 12 原院第 5 号）

2.4 記号の説明

記 号	記 号 の 説 明	単 位
A	断面積	mm ²
a	ボルト穴中心円半径	mm
b	フランジ内半径	mm
CH	チャギング時の荷重	—
CO	蒸気凝縮振動荷重	—
D	直径	mm
d	孔径, ボルトの直径	mm
F	軸力	N
f _t	ボルトの発生応力	MPa
L	長さ	mm
・	ディスク間ギャップ, ボルトのZ軸からの距離	mm
M	モーメント	N・mm
n	ボルトの本数	—
P	孔の間隔 (中心間)	mm
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d により定まる地震力又は静的地震力	—
SRV	逃がし安全弁作動時	—
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—
t	板厚	mm
W	ストレーナ重心に作用する荷重	—
X	軸直角方向	—
Y	軸方向	—
Z	軸直角方向	—
β	形状係数	—
σ _r	曲げ応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

制度は6桁以上を確保する。表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりとする。

票2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
震度	—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
温度	℃	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ* ¹	mm	—	—	整数位
面積* ²	mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁* ²
モーメント	N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁* ²
力	N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁* ²
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力* ³	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記 *1：設計上定める値が小数点以下の場合は、小数点以下表示とする。

*2：絶対値が1000以上のときは、べき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の間における引張強さ及び降伏点は比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

残留熱除去系ストレーナの取付け状況，形状及び主要寸法を図 3-1，図 3-2 に示し，ディスクセッパ幅，スぺーサ内径，ロングフィンガ長さ及びショートフィンガ長さを表 3-1 に示す。

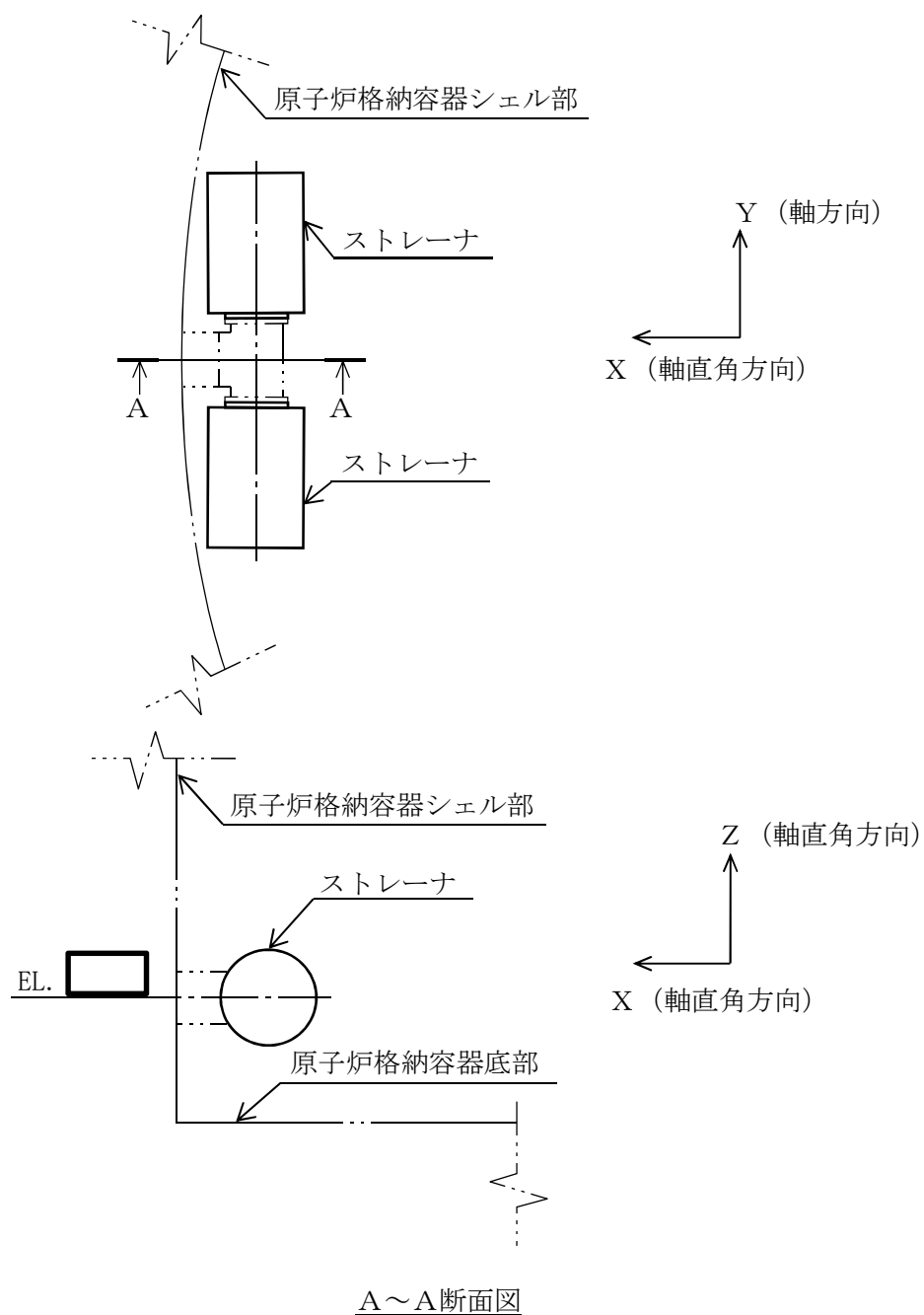
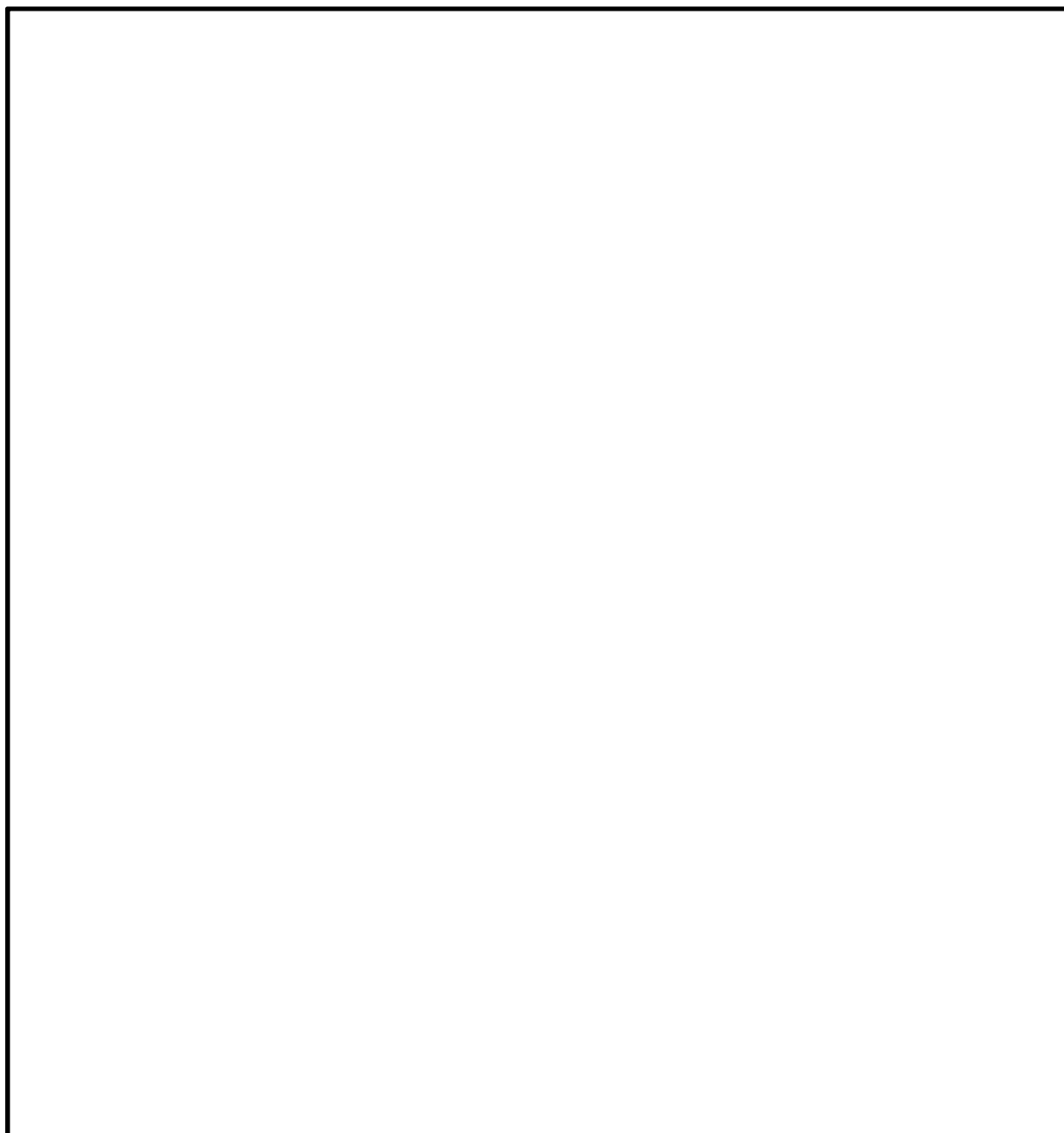
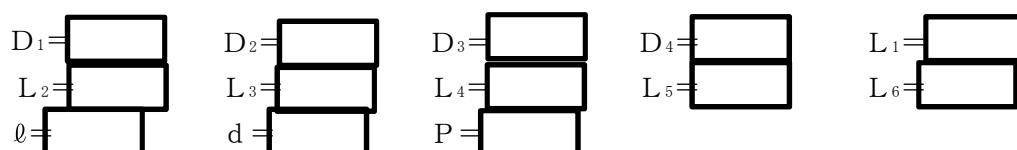


図 3-1 残留熱除去系ストレーナの取付け状況



A～A矢視図



①ディスクセット 1

②中間ディスクセット (2～17)

③ディスクセット 18

④スペーサ (1～17)

⑤リブ

(厚さ mm)⑥コンプレッションプレート (厚さ mm)

⑦ロングフィンガ*

(厚さ mm)⑧ショートフィンガ (厚さ mm)

⑨ディスクサポートリング

(厚さ mm)

⑩ストラップ

(厚さ mm)

⑪ボトムスペーサ

⑫フランジ, ストレーナ取付部ボルト

(①～④及び⑪は多孔プレート形状であり, 多孔プレートの厚さは mm である。)注記 * : ディスクセット 14～18 におけるロングフィンガの厚さは mm である。

図 3-2 残留熱除去系ストレーナの形状及び主要寸法 (単位 : mm)

表 3-1 ディスクセット幅，スぺーサ内径，ロングフィンガ長さ及びショートフィンガ長さ
(単位：mm)

[illegible]

4. 地震応答解析及び構造強度評価

4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 残留熱除去系ストレーナの応力評価は、東海第二発電所 平成 20 年 4 月 7 日付け平成 20・02・29 原第 41 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。
- (2) 残留熱除去系ストレーナは、残留熱除去系ストレーナ部ティーに据付部材を介さずに、取付ボルトにて直接接続されるものとする。
- (3) 残留熱除去系ストレーナの質量には、ストレーナに付着する異物量を考慮し、荷重の算出において組み合わせるものとする。
- (4) 地震力は、残留熱除去系ストレーナに対して軸方向及び軸直角方向に作用するものとし、軸直角方向に作用する荷重については水平方向と鉛直方向地震力の二乗和平方根により算出する。
- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (6) 概略構造図を表 2-1 に示す。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

残留熱除去系ストレーナの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4-1 に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-2 に示す。

なお、「1. 概要」に記載したとおり本計算書では、同形状である残留熱除去系ストレーナ、高圧炉心スプレイ系ストレーナ及び低圧炉心スプレイ系ストレーナの代表として残留熱除去系ストレーナの評価としていることから、荷重の組合せについては高圧炉心スプレイ系ストレーナ及び低圧炉心スプレイ系ストレーナについても記載する。

4.2.2 許容応力

残留熱除去系ストレーナの許容応力を表 4-3 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要 度分類	機器等 の区分	荷重の組合せ	許容 応力 状態
原子炉 冷却系統 施設	残留熱 除去設備	残留熱除去系 ストレーナ	S	クラス 2	$D + P_D + M_D + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_L + M_L + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	Ⅳ _A S
	非常用 炉心冷却 設備その 他原子炉 注水設備	高压炉心 スプレイ系 ストレーナ	S	クラス 2	$D + P_D + M_D + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_L + M_L + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	Ⅳ _A S
		低压炉心 スプレイ系 ストレーナ	S	クラス 2	$D + P_D + M_D + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_L + M_L + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	Ⅳ _A S

表4-2 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉冷却系統施設	残留熱除去設備	残留熱除去系ストレーナ	常設耐震／防止	重大事故等クラス 2	$D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容応力を用いる)
	非常用炉心冷却設備その他原子炉注水設備	残留熱除去系ストレーナ	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス 2	$D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容応力を用いる)
		高圧炉心スプレイ系ストレーナ	常設耐震／防止	重大事故等クラス 2	$D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容応力を用いる)
		低圧炉心スプレイ系ストレーナ	常設耐震／防止	重大事故等クラス 2	$D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容応力を用いる)
原子炉格納施設	圧力低減設備その他の安全設備	残留熱除去系ストレーナ	常設耐震／防止 常設／緩和	重大事故等クラス 2	$D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容応力を用いる)
		高圧炉心スプレイ系ストレーナ	常設／緩和	重大事故等クラス 2	$D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容応力を用いる)

注記 * : 「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備, 「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備, 「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

表4-3 許容応力

(ストレーナ本体：設計基準対象施設)

許容応力 状態	一次一般 膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)	一次＋二次応力* ¹
Ⅲ _A S	Min(S_y , $0.6 \cdot S_u$) ただし、オーステナイト系ステンレス 鋼及び高ニッケル合金については $1.2 S$ としてもよい。	S_y ただし、オーステナイト系ステンレス 鋼及び高ニッケル合金については $1.2 S$ としてもよい。	S_d 又は S_s 地震動のみによる疲労解析を行い 疲労累積係数が 1.0 以下であること。ただし、 地震動のみによる一次＋二次応力の変動値 が $2 S_y$ 以下であれば、疲労解析は不要であ る。
Ⅳ _A S	$0.6 \cdot S_u$	$0.9 \cdot S_u$	

注記 *1：二次応力が発生する場合のみ考慮する。

(ストレーナ本体：重大事故等対処設備)

許容応力 状態	一次一般 膜応力	一次応力 (曲げ応力を含む)	一次＋二次応力* ¹
Ⅳ _A S	$0.6 \cdot S_u$	$0.9 \cdot S_u$	S_d 又は S_s 地震動のみによる疲労解析を行 い疲労累積係数が 1.0 以下であること。ただ し、地震動のみによる一次＋二次応力の変動 値が $2 S_y$ 以下であれば、疲労解析は不要で ある。
V _A S * ²	$0.6 \cdot S_u$	$0.9 \cdot S_u$	

注記 *1：二次応力が発生する場合のみ考慮する。

*2：許容応力状態V_A Sとして、Ⅳ_A Sの許容限界を用いる。

(ストレーナ取付部ボルト：設計基準対象施設)

許容応力 状態	許容応力 (MPa)
Ⅲ _A S	1.5・S
Ⅳ _A S	2・S

(ストレーナ取付部ボルト：重大事故等対処設備)

許容応力 状態	許容応力 (MPa)
Ⅳ _A S	2・S
V _A S ^{*1}	2・S

注記 *1：許容応力状態V_A Sとして、Ⅳ_A Sの許容限界を用いる。

4.2.3 設計荷重

残留熱除去系ストレーナの設計荷重のうち、地震荷重、水力学的動荷重及びフランジの設計荷重は、ストレーナ、ティー、貫通部及び原子炉格納容器の範囲を考慮（ストレーナから原子炉格納容器までの連成モデルを用いて解析を行い、各部の反力を算出）して設定する。なお、解析モデルについては4.3項 解析モデル及び諸元にて説明する。

(1) 死荷重

残留熱除去系ストレーナの自重による荷重及び残留熱除去系ストレーナに付着する異物の自重による異物荷重^{*1}の2つの死荷重を考慮する。

残留熱除去系ストレーナの自重＝ N

異物荷重＝ N

注記 *1：異物荷重は運転状態Ⅳ（プールスウェル時は除く。）及び運転状態Vの荷重の組合せ時に考慮する。

(2) 差圧

差圧による荷重^{*2}は、異物付着時の残留熱除去系ストレーナを通しての最大設計差圧より設定し、以下のとおりとする。

また、差圧による荷重の作用方向を図4-1に示す。

差圧荷重＝ kPa

注記 *2：差圧による荷重は運転状態Ⅳ（プールスウェル時は除く。）及び運転状態Vの荷重の組合せ時に考慮する。

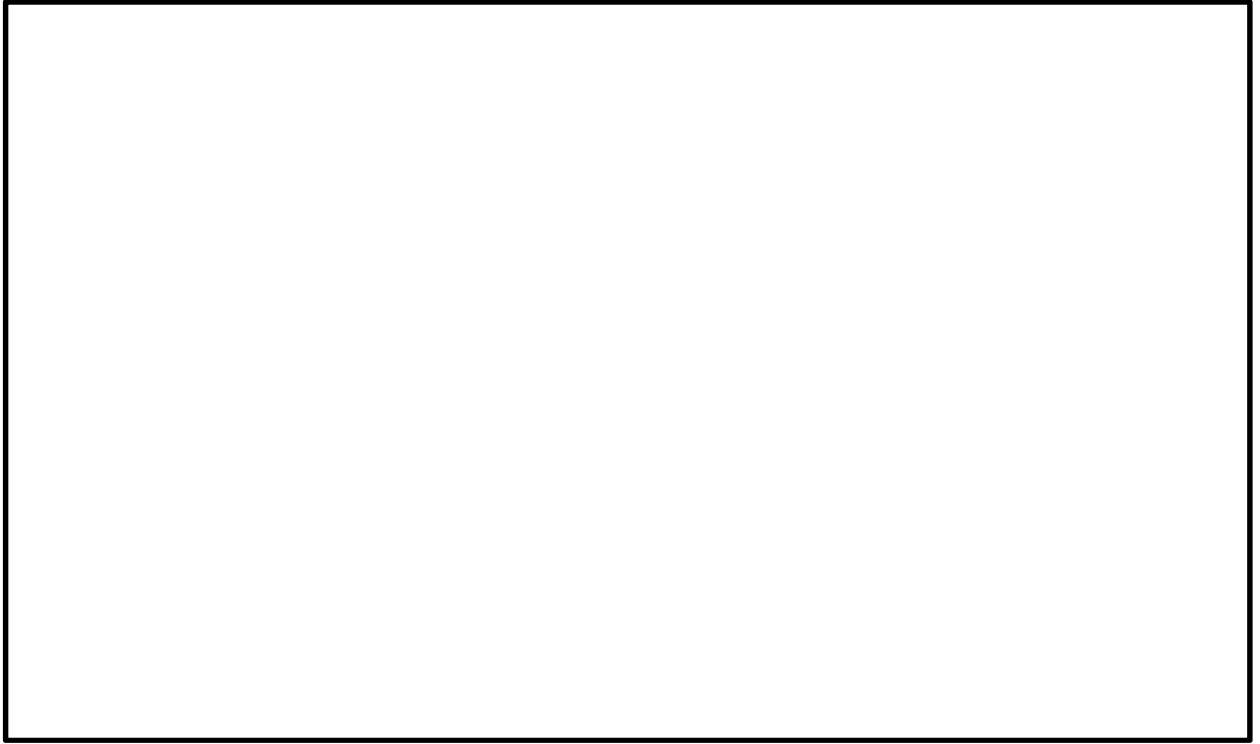


図 4-1 差圧荷重の作用方向

(3) 水力学的動荷重（逃がし安全弁作動時荷重及び原子炉冷却材喪失時荷重）

逃がし安全弁作動時及び原子炉冷却材喪失時には、サプレッションチェンバないの水中構造物に様々な荷重が水力学的動荷重として作用する。これらの荷重については、原子力安全委員会が策定した評価指針「BWR, MARK-II型格納容器圧力抑制系に加わる動荷重の評価指針」（以下「MARK II動荷重指針」という。）に準じて荷重の評価を実施する。

MARK II動荷重指針に基づき、残留熱除去系ストレーナに加わる水力学的動荷重を算出した結果を表4-4に示す。表4-4に示した荷重は、考慮すべき水力学的動荷重が最大となる位置を選定して算出した値である。なお、地震荷重と組合せる逃がし安全弁作動時荷重のみ記載する。

なお、残留熱除去系ストレーナは、逃がし安全弁作動時荷重内の水ジェット及び上記凝縮過程による荷重についても十分小さいため評価対象としない。

水力学的動荷重の作用方向を図4-2に示す。

軸方向の荷重は、引用文献(1)の考え方にに基づき、最前列のディスクと最後列のディスクで軸方向荷重の1/2ずつを受け持つとし、この荷重を最前列と最後列のディスクの投影面積で除算し、軸方向の圧力荷重として作用させる。

軸直角方向の荷重は、ストレーナの片面のみで荷重を受け持つとし、ストレーナの片面の投影面積で軸直角方向荷重を除算し、軸直角方向の圧力荷重として作用させる。

表4-4 水力学的動荷重（逃がし安全弁作動時荷重）

荷重名称	軸方向 (N)	軸直角方向 (N)
S R V 荷重（運転時，中小破断時）＊		

注記 ＊：方向は図3-1参照。ただし、軸直角方向（X方向及びZ方向）については、二乗和平方根としている。

定常ドラッグ荷重と圧力荷重との二乗和平方根とする。

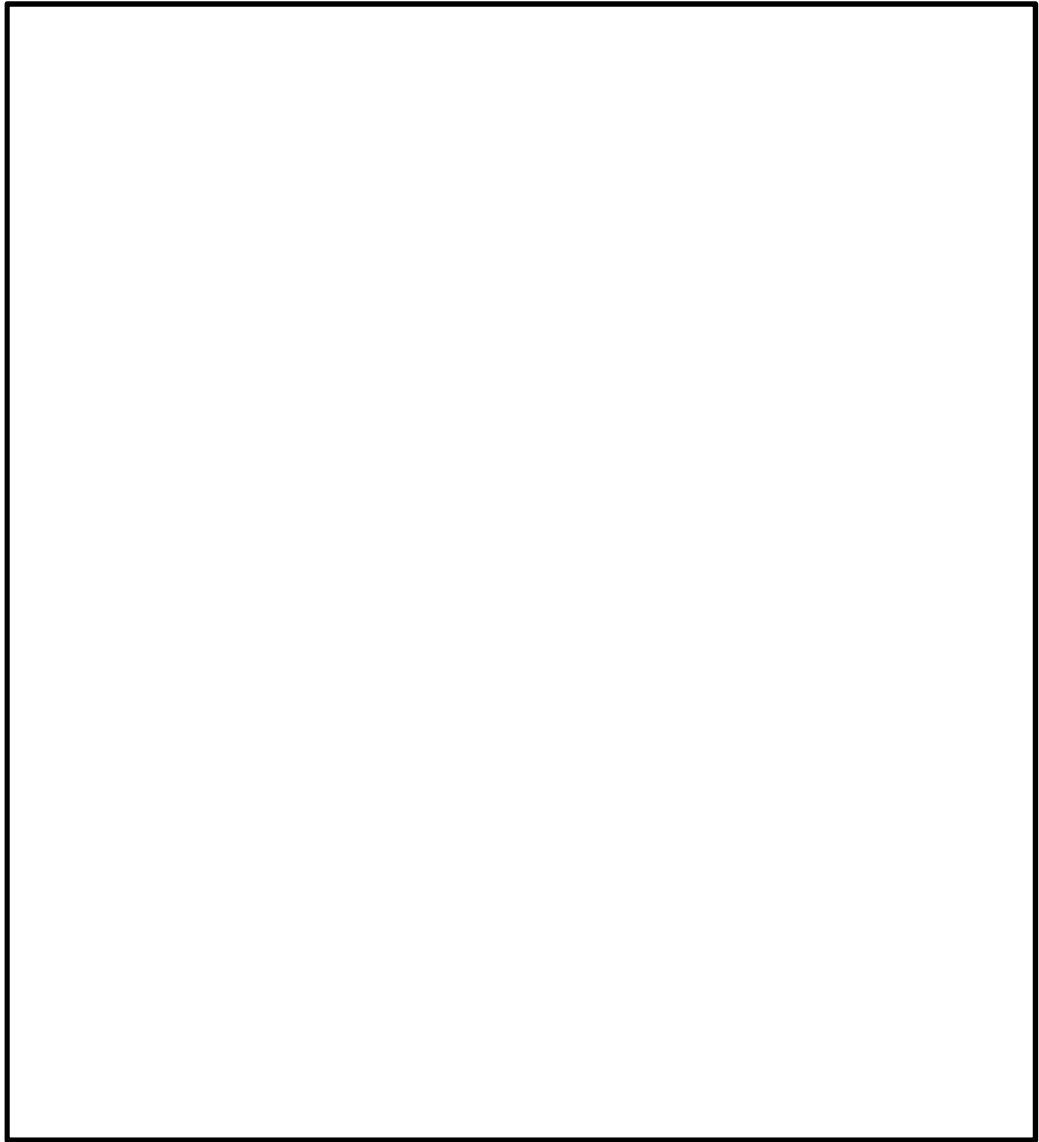


図 4-2 水力学的動荷重の作用方向

4.2.4 使用材料の許容応力評価条件

残留熱除去系ストレーナの許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4-5 及び表 4-6 に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-7 及び表 4-8 に示す。

なお、各評価部位の使用材料については以下のとおり。

多孔プレート	SUS304L
リブ	SUS304
コンプレッションプレート	SUS304
フィンガ	SUS304
ストラップ	SUS304
フランジ	SUS304
ストレーナ取付部ボルト	SUS304

表4-5 使用材料（ストレーナ本体）の許容応力評価条件（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
多孔プレート	SUS304L	周囲環境温度	104.5	107	143	—	—
リブ他	SUS304	周囲環境温度	104.5	121	169	—	—

表4-6 使用材料（ストレーナ取付部ボルト）の許容応力（設計基準対象施設）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
ストレーナ取付ボルト	SUS304	周囲環境温度	104.5	105	—	—	—

表4-7 使用材料（ストレーナ本体）の許容応力（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
多孔プレート	SUS304L	周囲環境温度	148	—	—	390	—
リブ他	SUS304	周囲環境温度	148	—	—	422	—

表4-8 使用材料（ストレーナ取付部ボルト）の許容応力（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (℃)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
ストレーナ取付ボルト	SUS304	周囲環境温度	104.5	96	—	—	—

4.3 解析モデル及び諸元

解析モデルの概要を以下に示す。

- (1) 残留熱除去系ストレーナの応力評価は，東海第二発電所 平成 20 年 4 月 7 日付け平成 20・02・29 原第 41 号（既工認）にて認可された実績のある手法を適用する。各荷重による応力は，実績のある二次元はりモデル及び三次元シェルモデルによる有限要素解析手法を適用する。なお，ストレーナ本体の応力計算に用いた三次元シェルモデル（以下「応力解析用モデル」という。）については，4.6.2 項 応力計算方法で説明することとし，ここではストレーナから原子炉格納容器までをモデル化した二次元はりモデル（以下「応答解析用モデル」という。）について説明する。
- (2) 4.2.3 項 設計荷重のとおり，応答解析用モデルではストレーナから外側配管までの連成モデルを用いて解析を行い，固有値及び各部の反力を算出する。応答解析用モデルについて図 4-3 に示す。なお，ストレーナについてはリブ等の補強材を有しており，構造上十分に剛であることができる。
- (3) 解析コードは「MSC NASTRAN」を使用し，固有値及び荷重を求める。なお，評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については，「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要 MSC NASTRAN」に示す。



図 4-3 応答解析用モデル

表 4-9 機器諸元

項目	単位	入力値
材質	—	
温度	℃	104.5
縦弾性係数	MPa	1.98×10^5
ストレーナ重量	kg	

4.4 固有周期

応答解析用モデルによる固有値解析の結果を表 4-10 に示す。

1 次モードは水平方向に卓越し、固有周期が 秒、2 次モードは水平方向に卓越し、固有周期が 0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。また、鉛直方向は 3 次モード以降で卓越し、固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

表 4-10 固有値解析結果

モード	固有周期 (s)	卓越方向	刺激係数		
			X	Y	Z
1 次	<input type="text"/>	水平	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2 次	<input type="text"/>	水平	-	-	-

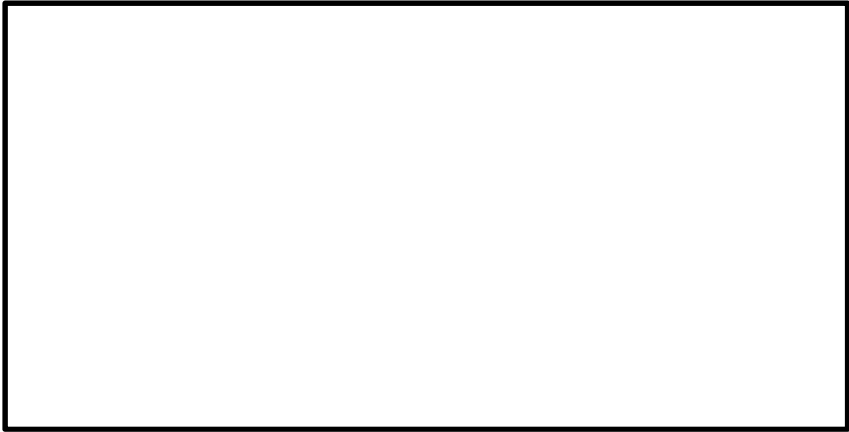


図 4-4 振動モード (1 次モード 0.086 s)

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-11 及び表 4-12 に示す。

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s 」による地震力は、「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づく。なお、残留熱除去系ストレーナについては図 3-1 に示す軸方向及び軸直角方向に地震力を作用させるため、その地震力を表 4-13 にしめす。

表 4-11 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所 及び 設置高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s		減衰定数 (%)	
	水平 方向	鉛直 方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平 方向	鉛直 方向
格納容器内 EL. <input type="text"/> m	<input type="text"/>	0.05 以下*1	$C_H=0.53$ 又は*2	$C_V=0.48$	$C_H=0.96$ 又は*3	$C_V=0.90$	1.0	—

注記 *1：固有値解析より 0.05 秒以下であることを確認した。

*2：弾性設計用地震動 S_d に基づく設計評価用床応答曲線より得られる値

*3：基準地震動 S_s に基づく設計評価用床応答曲線より得られる値

表 4-12 設計用地震力（重大事故等対処設備）

据付場所 及び 設置高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s		減衰定数 (%)	
	水平 方向	鉛直 方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平 方向	鉛直 方向
格納容器内 EL. <input type="text"/> m	<input type="text"/>	0.05 以下*1	—	—	$C_H=0.96$ 又は*2	$C_V=0.90$	1.0	—

注記 *1：固有値解析より 0.05 秒以下であることを確認した。

*2：基準地震動 S_s に基づく設計評価用床応答曲線より得られる値

表 4-13 ストレーナに作用する地震力

取付け位置 EL. <input type="text"/> m		
地震荷重	軸方向	軸直角方向
S_d^*	1.31	1.40
S_s	2.21	2.39

注：方向は図3-1参照。

ただし、軸直角方向（X方向及びZ方向）については、二乗和平方根としている。

4.6 計算方法

ストレーナの形状が同一であること及び考慮すべき荷重として最大となる値を使用して計算することから、応力評価は代表して残留熱除去系ストレーナにつき実施する。

4.6.1 応力評価点

残留熱除去系ストレーナの構造は、図 3-2 に示すように、リブ及びフィンガが主強度部材となり各ディスクを支える構造になっている。各ディスクの表面は多孔プレートとなっており、ろ過装置としての機能を果たしている。作用される荷重の大部分は、フィンガにより支えられた各ディスクの多孔プレート表面に加わり、負荷された荷重は最終的にはリブに伝達される。したがって、ここではストレーナの主要構成部材である多孔プレート、リブ、コンプレッションプレート、フィンガ、ストラップ、フランジ及びストレーナ取付部ボルトの構造、形状を考慮した応力評価点を選定し、評価を実施する。

応力評価点を表 4-14 及び図 4-5 に示す。

表 4-14 応力評価点

名称		応力評価点番号	応力評価点
多孔 プレート	ディスク	P 1	全ディスクセットの多孔プレート
	スペーサ*	P 2	ディスクセット間の円筒形多孔プレート
リブ		P 3	リブ
コンプレッションプレート		P 4	コンプレッションプレート
フィンガ		P 5	フィンガ
ストラップ		P 6	ストラップ
フランジ		P 7	フランジ
ストレーナ取付部ボルト		P 8	ボルト

注記 * : ボトムスペーサを含む。

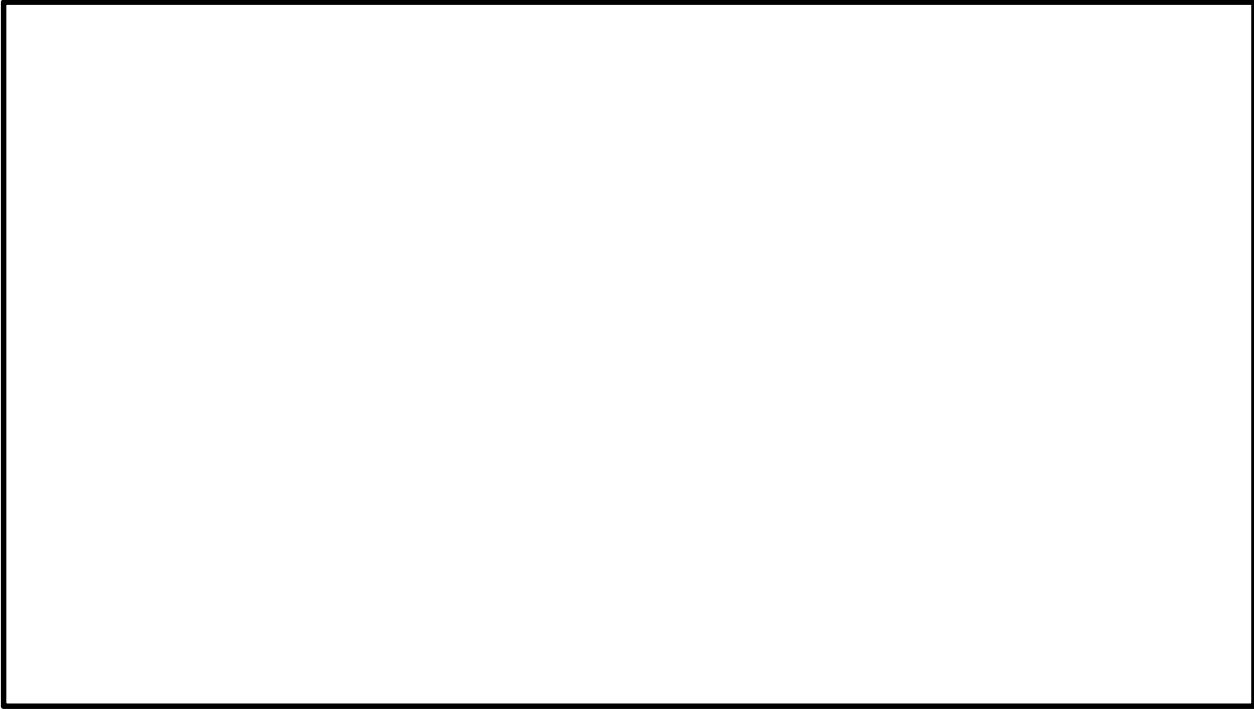


図 4-5 応力評価点

4.6.2 応力計算方法

応力計算方法について、以下に示す。なお、フランジ及びストレーナ取付部ボルトについては作用する荷重についても本項目で記載する。

(1) ストレーナ（応力評価点 P 1 ～ P 6）

各荷重により残留熱除去系ストレーナに生じる応力は、解析コード MSC NASTRAN を使用して計算する。

残留熱除去系ストレーナの計算モデルを図 4-6 に示す。また、計算モデルの各部材は溶接により接合されており、溶接部は健全性が確保されるよう設計する。

なお、多孔プレート等の等価縦弾性係数、等価ポアソン比及び応力増倍率は、引用文献 (2) の考え方に基づき設定した。

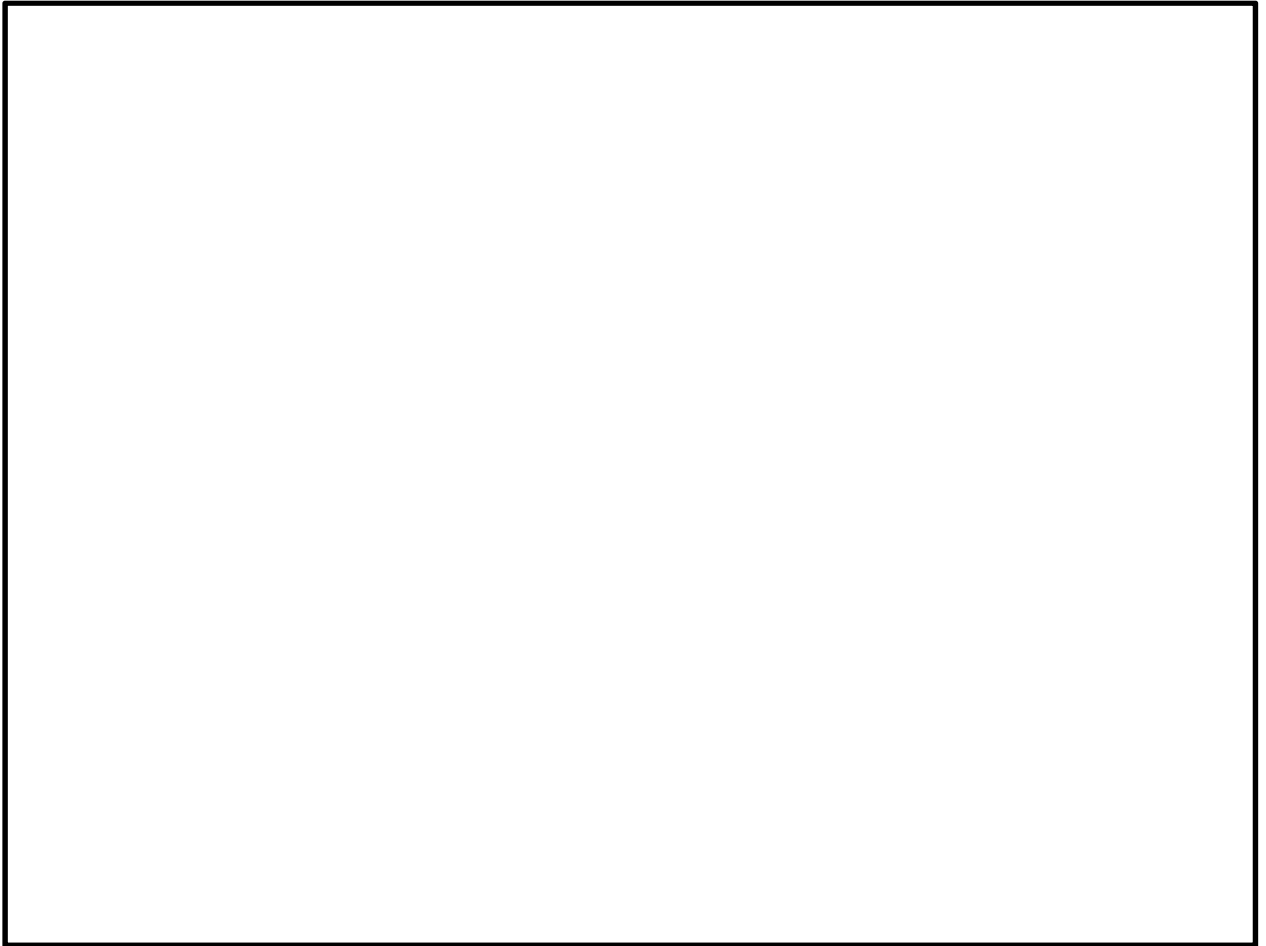


図 4-6 残留熱除去系ストレーナの計算モデル

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SUS304L, SUS304
質量	m ₀	kg	433.4
温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	104.5
等価縦弾性係数	E	MPa	1.13×10 ⁵
等価ポアソン比	ν	—	0.37
応力増倍率			2.295
要素数	—	個	31984
節点数	—	個	43328

(2) フランジ（応力評価点 P 7）

フランジの設計荷重は、ストレーナに作用する荷重から算出したフランジ部のモーメントを用いる。ここでのモーメントとは、図 4-7 に示すように、ストレーナ重心に作用する荷重とその作用点からフランジまでのモーメントアームから計算したモーメントであり、フランジに対して面外方向の曲げモーメント（2 方向ある面外方向曲げモーメントの二乗和平方根の合成値）とする。ストレーナ重心がフランジ中心軸上に位置することから、フランジ面内方向のモーメント（ねじりモーメント）は発生しないため、ここでは評価対象としない。

フランジの設計荷重を表 4-15 に示す。

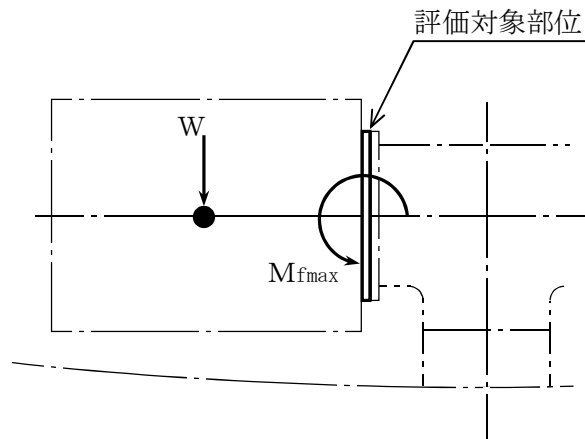


図 4-7 フランジに作用するモーメント

表 4-15 フランジの設計荷重

荷重		モーメント (N・mm)
1	死荷重	
2	異物荷重 ^{*1}	
3	差圧 (DB)	
4	SRV 荷重	
5	ストレーナ S_d *地震荷重	
6	ストレーナ S_s 地震荷重	
7	異物 S_d *地震荷重 ^{*2}	
8	差圧 (SA)	
9	異物 S_s 地震荷重 ^{*2}	

注記 *1：異物による荷重は死荷重に含めて計算している。

*2：異物による地震荷重はストレーナの地震荷重に含めて計算している。

表 4-15 に記載した荷重から，以下に示す計算方法により応力評価を行う。

ストレナ取付部のフランジは，一般的なフランジとは異なりガスケットを使用しない。そこで，フランジを以下のようにモデル化する。

フランジを外周（ボルト穴中心円直径）が固定された平板と考え，表 4-15 に示すモーメントが中心部に作用すると考える。この場合の発生応力は，引用文献(3)より，図 4-8 に示す計算モデルで下記の計算式より求める。

$$\sigma_r = \frac{\beta \cdot M_{fmax}}{a \cdot t^2}$$

ここに， σ_r : 曲げ応力 (MPa)

M_{fmax} : 表 4-15 に示すモーメント (N・mm)

a : ボルト穴中心円半径 = (mm)

b : フランジ内半径 = (mm)

t : フランジ板厚 = (mm)

β : b/a (=) から決まる計算上の係数 =

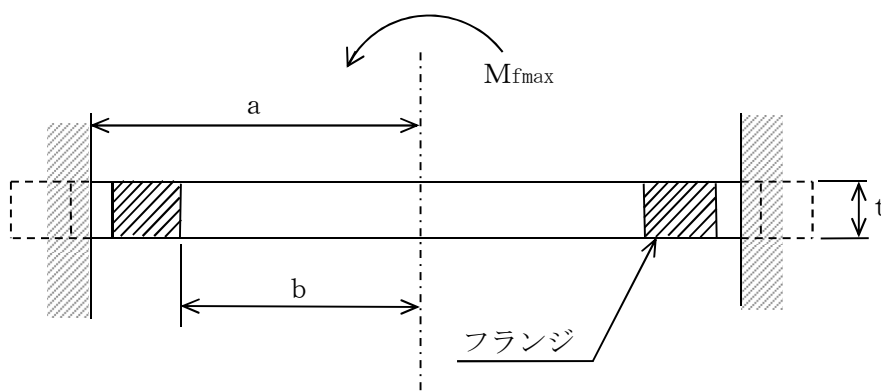


図 4-8 フランジ断面の計算モデル

(3) ストレーナ取付部ボルト（応力評価点 P 8）

ストレーナ取付部ボルトの設計荷重は，4.6.2 項(2)に示すフランジに作用する最大モーメントに加え，ストレーナの軸方向に発生する反力であるボルトの軸方向荷重を考慮する。

ボルトの設計荷重を表 4-16 に示す。

表 4-16 ボルトの設計荷重

荷重		軸方向荷重 (N)
1	死荷重	
2	異物荷重 ^{*1}	
3	差圧（DB）	
4	SRV 荷重	
5	ストレーナ S _d *地震荷重	
6	ストレーナ S _s 地震荷重	
7	異物 S _d *地震荷重 ^{*2}	
8	差圧（SA）	
9	異物 S _s 地震荷重 ^{*2}	

注記 *1：異物による荷重は死荷重に含めて計算している。

*2：異物による地震荷重はストレーナの地震荷重に含めて計算している。

表 4-16 に記載した荷重から，以下に示す計算方法により応力評価を行う。

図 4-9 に示すフランジの中心を通る中立軸（Z 軸）まわりのモーメントを考える。このとき，Z 軸まわりのモーメントは，各ボルトに発生する軸力とボルトの Z 軸からの距離の積から得られるモーメントとつりあっていると考えることができる。ここで，軸方向荷重によって中立軸が移動するが，軸方向荷重のボルトへの影響が小さいため，軸方向荷重による中立軸の移動は無視する。

したがって，Z 軸まわりのモーメントと各ボルトの軸力の関係は下記となる。

$$MZ = \sum_{k=1}^n F_{tk} \cdot \ell_k$$

ここに，MZ : Z 軸まわりのモーメント (N・mm)

F_{tk} : 各ボルトに発生する軸力 (N)

ℓ_k : 任意のボルト k における Z 軸からの距離 (mm)

n : ボルトの本数=

なお，ストレーナ重心がフランジ中心軸上に位置することから，フランジ面内方向のモーメント（ねじりモーメント）は発生しないため，ここでは評価対象としない。

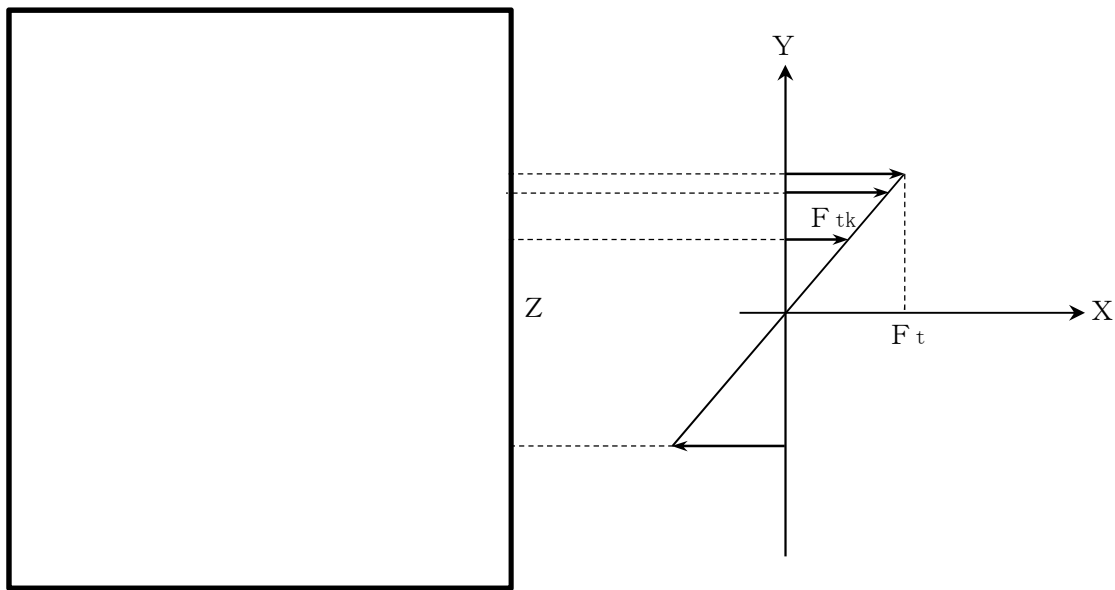


図 4-9 各ボルトに発生する軸力とモーメントアームの関係

また，ボルト軸力の Z 軸まわりのモーメント寄与分は中立軸上ではゼロであり，図 5-7 に示すように，曲げモーメントを伝えるボルトの軸力は回転中心からの距離に比例して変化すると算定する。この場合，ボルトに発生する最大の軸力を F_t とすると，各ボルトに発生する軸力 F_{tk} は下記となる。

$$F_{tk} = F_t \cdot \frac{\ell_k}{D/2}$$

ここに， F_t : 最大の軸力が発生するボルトの軸力 (N)

F_{tk} : 各ボルトに発生する軸力 (N)

D : ボルト孔中心円直径 = (mm)

以上より， n が偶数の場合，Z 軸まわりのモーメントは下記となる。

$$M_z = \frac{2 \cdot F_t}{D} \cdot \sum_{k=1}^n \ell_k^2 = \frac{F_t \cdot D \cdot n}{4}$$

$$\text{ただし, } \ell_k = \frac{D}{2} \cdot \sin\left\{\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot (k-1)\right\}$$

よって，表 4-15 に示すモーメントから，ボルトの軸力は以下のように算出できる。

$$F_t = \frac{4 \cdot M_{fmax}}{D \cdot n}$$

したがって，ボルトに発生する応力は下記となる。

$$f_t = \frac{F_t}{A_s} + \frac{F_{axl}}{A_s \cdot n}$$

ここに， f_t : ボルトの発生応力 (MPa)

A_s : ボルトの有効断面積 = $\frac{\pi \cdot d_b^2}{4}$ (mm²)

d_b : ボルトのねじ部谷径 = (mm)

F_{axl} : 表 5-4 に示す軸方向荷重 (N)

4.7 計算条件

応力解析に用いる自重及び荷重は、本計算書の 4.2 項 荷重の組合せ及び許容応力及び 4.5 項 設計用地震力に示す。

4.8 応力の評価

4.6 項 計算方法で求めた応力は表 4-17～表 4-20 に記載される値以下であること。

表4-17 ストレーナ本体の許容応力（設計基準対象施設）

材料	許容応力 状態	許容応力 (MPa)		
		一次応力		一次+二次応力*
		P_m	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$
SUS304L	Ⅲ _A S	—	143	—
	Ⅳ _A S	—	365	
SUS304	Ⅲ _A S	—	169	—
	Ⅳ _A S	—	395	

注記 *：二次応力が発生する場合のみ考慮する。（今回の計算においては、二次応力（通常運転時温度による応力を含む。）は発生しない。）

表4-18 ストレーナ取付部ボルトの許容応力（設計基準対象施設）

材料	許容応力 状態	許容応力 (MPa)
SUS304	Ⅲ _A S	157
	Ⅳ _A S	210

表4-19 ストレーナ本体の許容応力（重大事故等対処設備）

材料	許容応力 状態	許容応力 (MPa)		
		一次応力		一次+二次応力*
		P_m	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$
SUS304L	V _A S	—	351	—
SUS304	V _A S	—	380	—

注記 *：二次応力が発生する場合のみ考慮する。（今回の計算においては、二次応力（通常運転時温度による応力を含む。）は発生しない。）

表4-20 ストレーナ取付部ボルトの許容応力（重大事故等対処設備）

材料	許容応力 状態	許容応力 (MPa)
SUS304	V _A S	192

5. 評価結果

5.1 設計基準対象施設としての評価結果

残留熱除去系ストレーナの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており、耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態Ⅲ_ASに対する評価

許容応力状態Ⅲ_ASに対する応力評価結果を表 5-2 に示す。

表 4-1 に示す荷重の組合せのうち、 $D + P_D + M_D + S_d^*$ 及び $D + P_L + M_L + S_d^*$ の評価について、それぞれ発生値が高い方の評価を記載している。

(2) 許容応力状態Ⅳ_ASに対する評価

許容応力状態Ⅳ_ASに対する応力評価結果を表 5-1 に示す。

表 4-1 に示す荷重の組合せのうち、 $D + P_D + M_D + S_s$ について評価を記載している。

表 5-2 許容応力状態Ⅲ_AS に対する応力評価結果 (D + P_D + M_D + S_d* 及び D + P_L + M_L + S_d*)

評価対象設備	評価部位		応力分類	Ⅲ _A S		判定	備考
				発生値	許容応力		
				MPa	MPa		
残留熱除去系 ストレーナ	P 1	全ディスクセットの 多孔プレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		143	○	②*
	P 2	ディスクセット間の 円筒形多孔プレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		143	○	②*
	P 3	リブ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		169	○	①*
	P 4	コンプレッションプレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		169	○	①, ②*
	P 5	フィンガ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		169	○	①*
	P 6	ストラップ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		169	○	①*
	P 7	フランジ	曲げ応力		169	○	①*
	P 8	ボルト	引張応力		157	○	①*

注記 * : ①D + P_D + M_D + S_d* / ②D + P_L + M_L + S_d* における結果を示す。

表 5-1 許容応力状態Ⅳ_AS に対する応力評価結果 (D + P_D + M_D + S_s)

評価対象設備	評価部位		応力分類	Ⅳ _A S		判定	備考
				発生値	許容応力		
				MPa	MPa		
残留熱除去系 ストレーナ	P 1	全ディスクセットの 多孔プレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		365	○	
	P 2	ディスクセット間の 円筒形多孔プレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		365	○	
	P 3	リブ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		395	○	
	P 4	コンプレッションプレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		395	○	
	P 5	フィンガ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		395	○	
	P 6	ストラップ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		395	○	
	P 7	フランジ	曲げ応力		395	○	
	P 8	ボルト	引張応力		210	○	

5.2 重大事故等対処設備としての評価結果

残留熱除去系ストレーナの重大事故等対処設備としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており、耐震性を有することを確認した。

(1) 許容応力状態 $V_A S$ に対する評価

許容応力状態 $V_A S$ に対する応力評価結果を表 5-3 に示す。

表 4-2 に示す荷重の組合せのうち、 $D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$ について評価を記載している。

表 5-3 許容応力状態 V_{AS} に対する応力評価結果 ($D + P_{SA} + M_{SA} + S_s$)

評価対象設備	評価部位		応力分類	V_{AS}		判定	備考
				発生値	許容応力		
				MPa	MPa		
残留熱除去系 ストレーナ	P 1	全ディスクセットの 多孔プレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		351	○	
	P 2	ディスクセット間の 円筒形多孔プレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		351	○	
	P 3	リブ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		380	○	
	P 4	コンプレッションプレート	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		380	○	
	P 5	フィンガ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		380	○	
	P 6	ストラップ	一次膜応力＋ 一次曲げ応力		380	○	
	P 7	フランジ	曲げ応力		380	○	
	P 8	ボルト	引張応力		192	○	

6. 引用文献

- (1) NED0-32721, “Application Methodology for the General Electric Stacked Disk ECCS Suction Strainer” Licensing Topical Report, General Electric, March 2003.
- (2) ASME B&PV CODE, Section III, Division 1, Appendices, Article A-8000, “Stresses in Perforated Flat Plates,” 1989 Edition, No Addenda.
- (3) WARREN C. YOUNG
“ROARK’ S FORMULAS for Stress and Strain” 7th Edition