

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-781 改3
提出年月日	平成30年9月13日

V-2-3-4-2-3 制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性について
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	3
2.4 記号の説明	4
2.5 計算精度と数値の丸め方	5
3. 評価部位	6
4. 地震応答解析及び構造強度評価	7
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	7
4.2 荷重の組合せ及び許容限界	8
4.3 解析モデル及び諸元	13
4.4 固有周期	14
4.5 設計用地震力	15
4.6 計算方法	16
4.7 計算条件	19
4.8 応力の評価	19
5. 評価結果	19
5.1 設計基準対象施設としての評価結果	19

1. 概要

本計算書は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、制御棒駆動機構ハウジング（以下「CRDハウジング」という。）支持金具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。

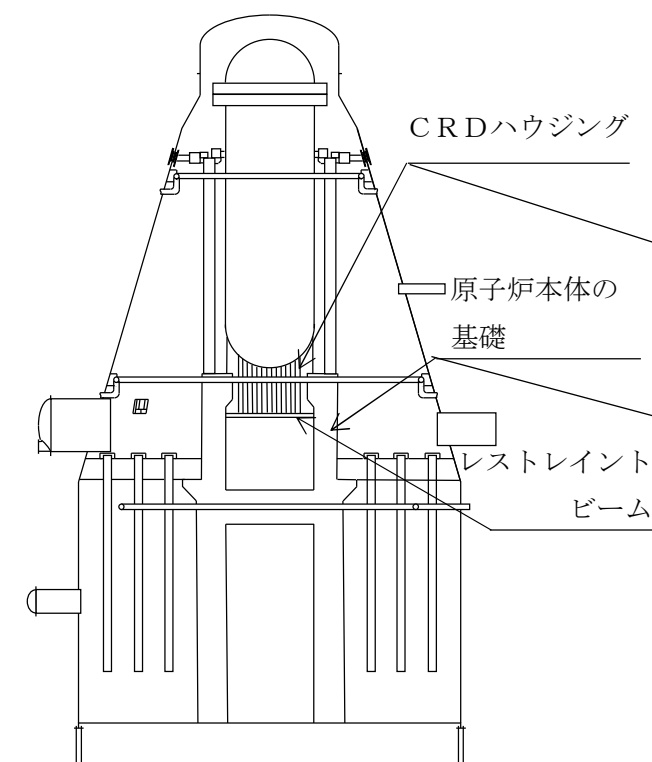
CRDハウジング支持金具は設計基準対象施設においてはSクラス施設に分類される。以下、設計基準対象施設としての**構造強度**評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

CRDハウジング支持金具の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>・CRDハウジング支持金具は原子炉本体の基礎に支持される。</p>	<p>・CRDハウジング支持金具は鋼製の支持構造物である。</p> <p>・制御棒駆動機構ハウジングが完全に破断またはフランジボルトが破断した場合に、制御棒を含めた駆動機構全体の落下を制限する。</p> <p>・制御棒駆動機構ハウジングの地震時横揺れを防止する。</p>	 <p>The diagram is a cross-sectional schematic of a reactor core assembly. At the top is the CRD (Control Rod Drive) housing, which is supported by a structure labeled 'CRDハウジング'. Below this is the reactor core, supported by a '原子炉本体の基礎' (Reactor core base). At the bottom, there are 'レストレイントビーム' (Restraint beams) that support the lower part of the assembly. The diagram is enclosed in a large rectangular frame on the right side of the table.</p>

2.2 評価方針

CRDハウジング支持金具の応力評価は、添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針 3.1 構造強度上の制限」にて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CRDハウジング支持金具の部位を踏まえた「3. 評価部位」にて設定する箇所において、地震により評価部位に作用する荷重で発生す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。評価結果を「5. 評価結果」に示す。

CRDハウジング支持金具の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

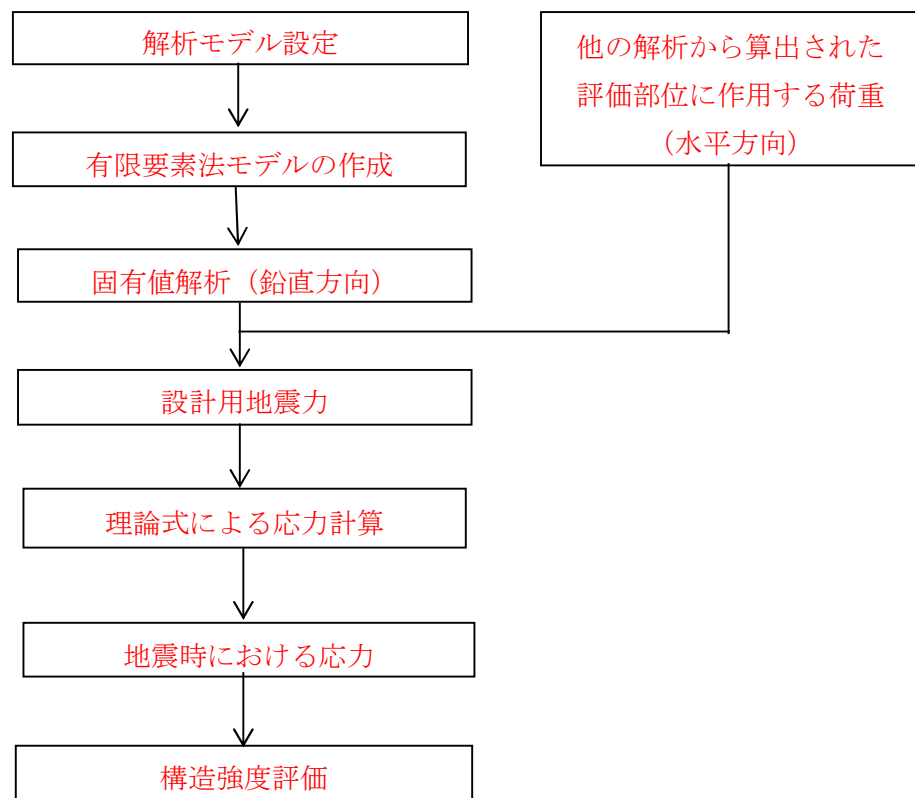


図 2-1 CRDハウジング支持金具の耐震評価フロー

2.3 適用基準

適用基準を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 (日本電気協会)
- (2) 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 (日本電気協会)
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 (日本電気協会)
- (4) 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。)

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	長さ, ボルト断面積	mm, mm ²
B	長さ	mm
C	長さ	mm
C _H	水平震度	—
C _V	鉛直震度	—
D	直径, ボルト呼び径	mm
d	ボルト呼び径	mm
F	基準応力, 荷重	MPa, N
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _t	許容引張応力	MPa
H	水平方向地震荷重	N
ℓ	長さ	mm
L	長さ	mm
M _H	水平方向地震による曲げモーメント	N・mm
M _V	鉛直方向地震による曲げモーメント	N・mm
n	ボルト本数	—
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	—
S _s	基準地震動S _s により定まる地震力	—
S _{yd}	最高使用温度における材料の設計降伏点	MPa
S _{yt}	試験温度における材料の設計降伏点	MPa
T _L	荷重試験により支持構造物が破損するおそれのある荷重	N
W _D	死荷重	N
w _D	死荷重による等分布荷重	N/mm
w _H	水平方向地震による等分布荷重	N/mm
w _V	鉛直方向地震による等分布荷重	N/mm
Z _H	断面係数	mm ³
Z _V	断面係数	mm ³
σ _b	曲げ応力	MPa
σ _t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は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。

表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
面積	mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁* ¹
断面係数	mm ³	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁* ¹
力	N	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁* ¹
算出応力	MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力* ²	MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記 *1: 絶対値が1000以上のときは、べき数表示とする。

*2: 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

CRDハウジング支持金具各部の形状及び主要寸法を図 3-1 に示す。また、使用材料及び使用部位を表 3-1 に示す。

なお、耐震評価上厳しくなるレストレントビーム一般部、端部及びレストレントビーム結合ボルトを評価する。

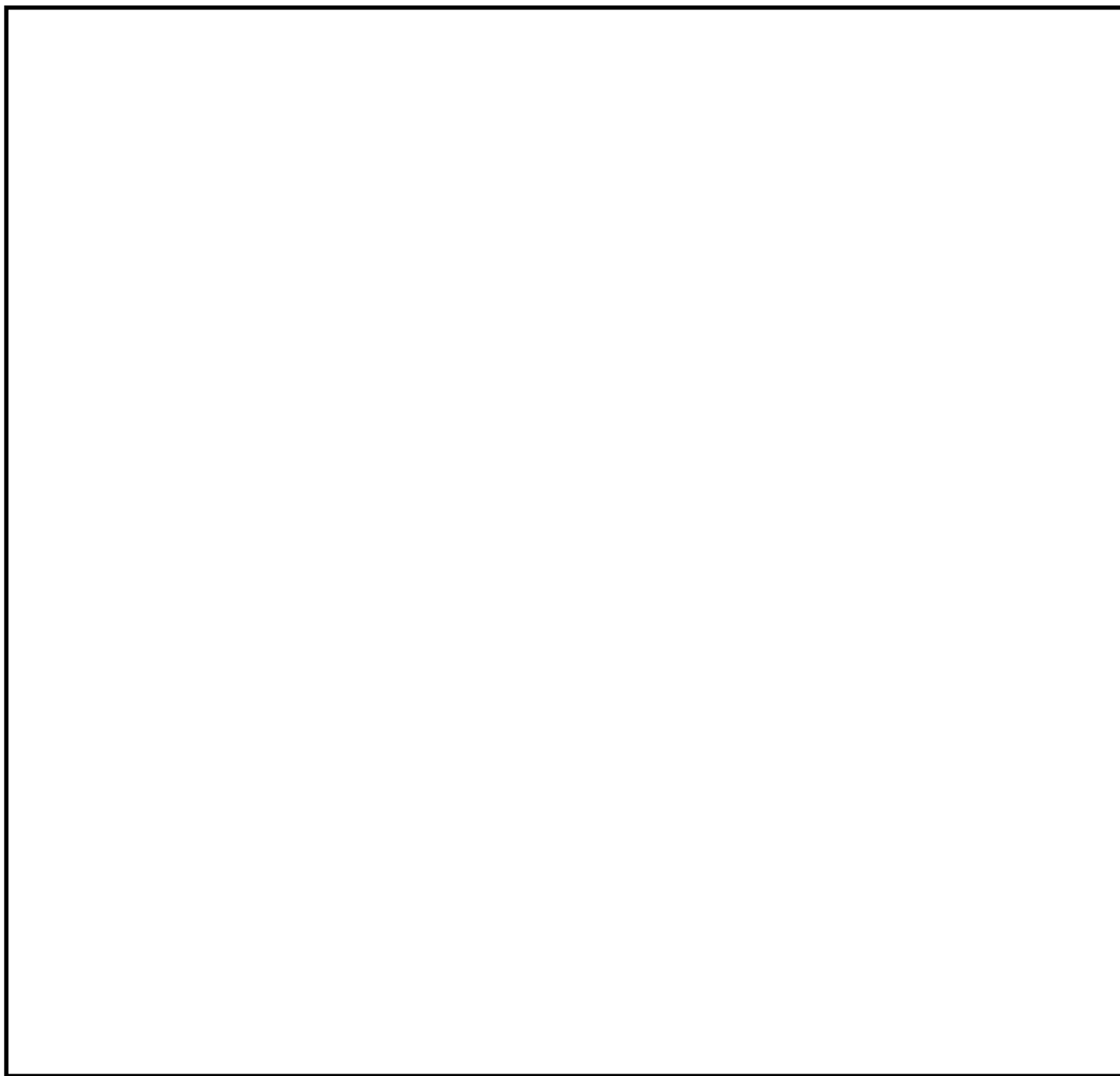


図 3-1 CRDハウジング支持金具の形状及び主要寸法

表 3-1 使用材料表

使用部位	使用材料	備考
レストレントビーム	SM41B	SM400B*
レストレントビーム結合ボルト	F10T	

注記 * : 新 JIS を示す。

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) CRDハウジング支持金具は、原子炉本体の基礎の内周側に固定され、CRDハウジングの水平地震荷重を原子炉本体の基礎に伝達する構造物である。CRDハウジング支持金具に作用する地震力は、CRDハウジングから伝達される水平地震荷重に加え、鉛直の固有周期に応じた応答加速度に基づき算出する。CRDハウジング支持金具の耐震評価として、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」において計算された水平地震荷重と、上記の応答解析に基づき算出した鉛直地震力を用いて、構造強度評価を行う。
- (2) 構造評価に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (3) 概略構造図を表 2-1 に示す。

4.2 荷重の組合せ及び許容限界

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

CRDハウジング支持金具の荷重の組合せ及び許容応力状態を表 4-1 に示す。表で使用される記号は添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」に従うものとする。

4.2.2 許容限界

CRDハウジング支持金具の許容限界を表 4-2 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件及び許容応力

CRDハウジング支持金具の使用材料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 4-3 及び表 4-4 に示す。また、許容応力状態に対する許容応力のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 4-5 に示す。

表4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震設計上の重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
原子炉 本体	原子炉 圧力容器 付属構造物	CRD ハウジング 支持金具	S	—*	$D + P_D + M_D + S_d^*$	III _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	IV _A S

[記号の説明]

D : 死荷重

P_D : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲ及び地震従属事象として運転状態Ⅳに包絡する状態がある場合にはこれを含む。）又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重

M_D : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲ及び地震従属事象として運転状態Ⅳに包絡する状態がある場合にはこれを含む。）又は当該設備に設計上定められた機械的荷重

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

S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力

注記 * : 耐震Sクラス設備の直接支持構造物として、その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容限界を適用する。

表4-2 許容限界（その他の支持構造物）

（設計基準対象施設）

許容応力 状 態	許容限界*1, *2, *3 (ボルト等以外)										許容限界*2, *4 (ボルト等)		形式試験に よる場合
	一次応力					一次+二次応力					一次応力		許容荷重
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧	引張 圧縮	せん断	曲げ	支圧	座屈*5	引張	せん断	
Ⅲ _A S	1.5・f _t	1.5・f _s	1.5・f _c	1.5・f _b	1.5・f _p	3・f _t	3・f _s *6	3・f _b *7	1.5・f _p *8	1.5・f _b , 1.5・f _s *7, *8	1.5・f _t	1.5・f _s	$T_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{S_{y d}}{S_{y t}}$
Ⅳ _A S	1.5・f _t *	1.5・f _s *	1.5・f _c *	1.5・f _b *	1.5・f _p *	S _d 又はS _s 地震動のみに よる応力振幅について評価 する。			1.5・f _p *8	又は 1.5・f _c	1.5・f _t *	1.5・f _s *	$T_L \cdot 0.6 \cdot \frac{S_{y d}}{S_{y t}}$

注記*1：「鋼構造設計規準 SI 単位版」（2002年日本建築学会）等の幅厚比の制限を満足させる。

*2：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*3：耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であって耐圧部と一体の応力解析を行うものについては，耐圧部と同じ許容応力とする。

*4：コンクリートに埋め込まれるアンカボルトで地震応力の占める割合が支配的なものであって，トルク管理，材料の照合等を行わないものについては，材料の品質，据付状態等のゆらぎ等を考慮して，Ⅲ_ASの許容応力を一次引張応力に対しては f_t，一次せん断応力に対しては f_sとして，またⅣ_AS→Ⅲ_ASとして応力評価を行う。

*5：薄肉円筒形状のもの座屈の評価にあつては，クラスMC容器の座屈に対する評価式による。

*6：すみ肉溶接部にあつては最大応力に対して 1.5・f_sとする。

*7：設計・建設規格 SSB-3121.1(4)により求めた f_bとする。

*8：自重，熱膨張等により常時作用する荷重に，地震動による荷重を重ね合わせて得られる応力の圧縮最大値について評価する。

表4-3 使用材料（レストレントビーム）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 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境 温度	171				
レストレントビーム	SM400B	周囲環境 温度	171	—	201	373	—

表4-4 使用材料（レストレントビーム結合ボルト）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 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境 温度	171				
レストレントビーム結合ボルト	F10T	周囲環境 温度	171	—	900	1000	—

表4-5 許容応力状態に対する許容応力

(単位：MPa)

材料	温度 (°C)	許容応力 状態	基準応力 F	許容応力		
				引張応力	曲げ応力	せん断応力
SM400B	171	Ⅲ _A S	201	—	201	—
		Ⅳ _A S	241	—	241	—
F10T	171	Ⅲ _A S	700	525*	—	404
		Ⅳ _A S	700	394*	—	404

注記* : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$ より算出

4.2.4 設計荷重

(1) 死荷重

レストレントビームの死荷重 W_D

(2) 地震荷重

CRDハウジング支持金具に加わる水平方向地震荷重について、添付書類「V-2-3-2 炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」において計算された計算結果を用いる。

レストレントビームの弾性設計用地震動 S_d 又は静的地震力及び基準地震動 S_s による水平方向地震荷重を表4-6に示す。CRDハウジング支持金具に加わる鉛直地震力は「4.4 固有周期」に基づき「4.5 設計用地震力」に示す。

表 4-6 弾性設計用地震動 S_d 又は静的地震力及び基準地震動 S_s による水平方向地震荷重

地震荷重	S_d^*	S_s
水平方向地震荷重 H (N)	<input type="text"/>	

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) CRDハウジング支持金具の固有値の評価は、はりモデルによる有限要素解析手法を適用する。
- (2) 固有値解析用モデルでは固有値を算出する。固有値解析用モデルについて図 4-1 に、機器諸元について表 4-7 に示す。
- (3) 解析コードはMSC NASTRANを使用する。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、添付書類「V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要・MSC NASTRAN」に示す。

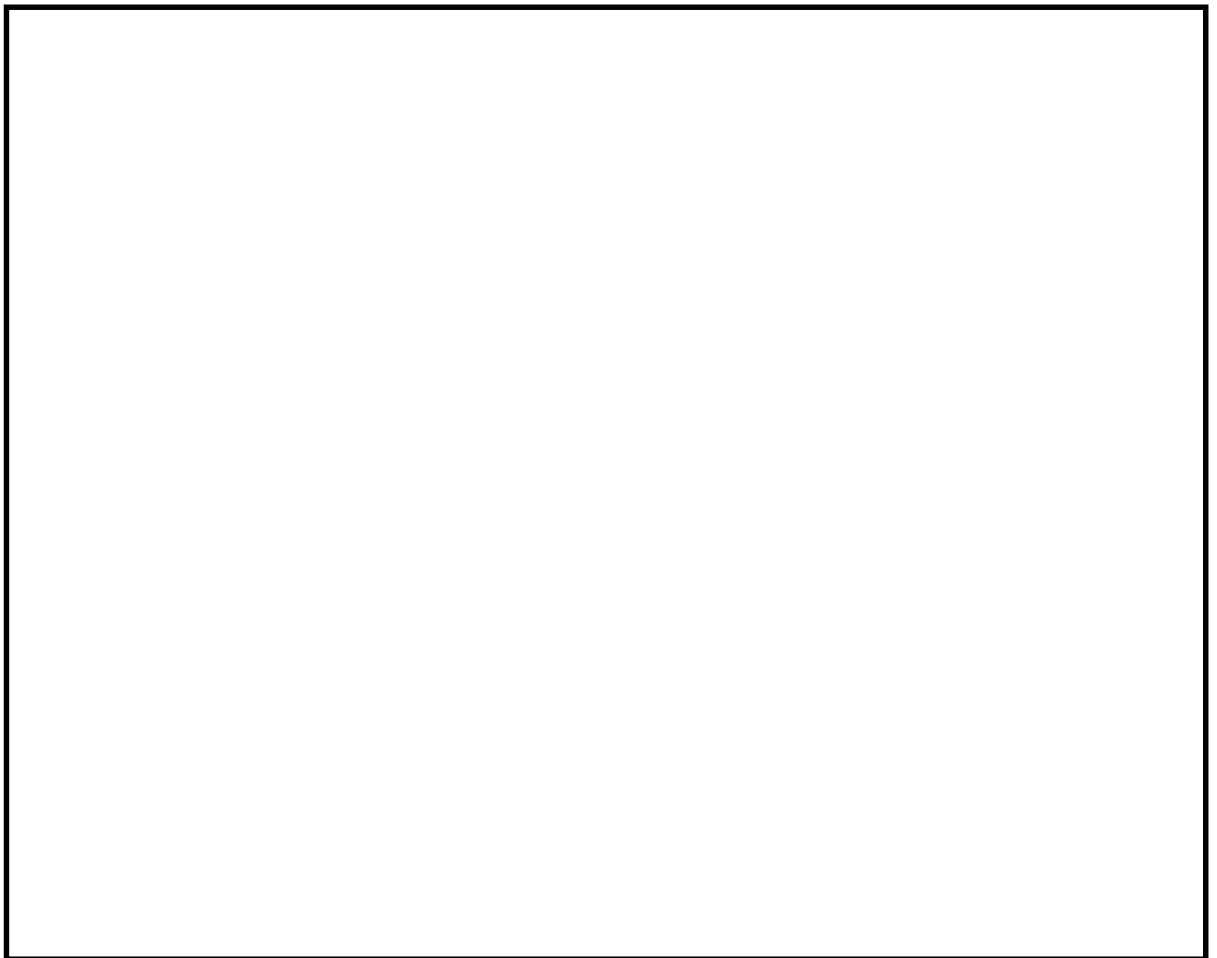


図 4-1 固有値解析用モデル

表 4-7 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SM400B
質量	m_0		<input type="text"/> *
温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	171
縦弾性係数	E	MPa	193000
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	個	図4-1に記載の とおり
節点数	—	個	

注記 * : 1/2 モデルのため、全体の半分の値。

4.4 固有周期

固有値解析用モデルによる固有値解析の結果を表 4-8 に示す。

一次モードは鉛直方向に卓越し、固有周期が 秒であることを確認した。固有周期は 0.05 秒以下であり剛であることを確認した。

また、水平方向は二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 4-8 固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1 次	<input type="text"/>	鉛直方向

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-9 に示す。

水平方向については、「4.2.4 設計荷重」に示す添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」で算出された地震荷重と，表 4-9 に示す震度により算出した荷重のうち大きい方を用いる。

鉛直方向については，「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，添付書類「V-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づく。

表 4-9 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所 及び 設置高さ ^{*1, *2}	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
	— *3		$C_H=0.86$ *3	$C_V=0.63$	$C_H=1.43$ *3	$C_V=1.19$	—	—

注記 *1：水平方向設計震度に用いる設置高さを示す。

*2：鉛直方向設計震度に用いる設置高さを示す。

*3：添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」で算出された地震荷重と，本表に示す震度により算出した荷重のうち大きい方を用いる。

*4：固有値解析より 0.05 秒以下であり，剛であることを確認した。

4.6 計算方法

4.6.1 応力評価点

CRDハウジング支持金具の応力評価点は、CRDハウジング支持金具を構成する部材の形状及び荷重伝達経路を考慮し、発生応力が大きくなる部位を選定する。選定した応力評価点を表 4-10 及び図 4-2 に示す。

表 4-10 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
A	レストレントビーム一般部*
B	レストレントビーム端部*
C	レストレントビーム結合ボルト

注記 * : 曲げ荷重が支配的となるため、曲げ応力のみの評価とする。

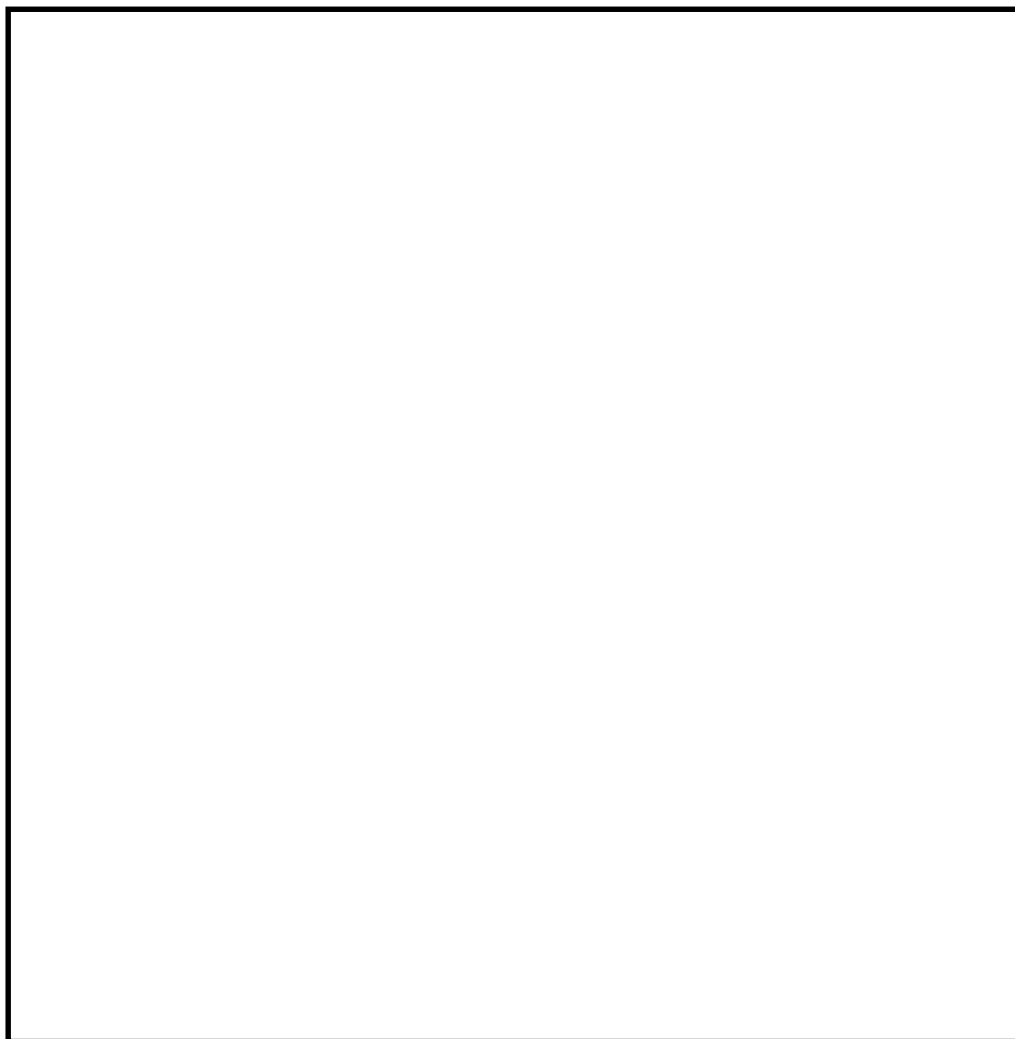


図 4-2 応力評価点

4.6.2 応力計算方法

レストレントビームに生じる応力は、次式により計算する。

(1) 荷重

図 4-3 に示す両端支持ばりとして計算する。自重による鉛直荷重も考慮する。

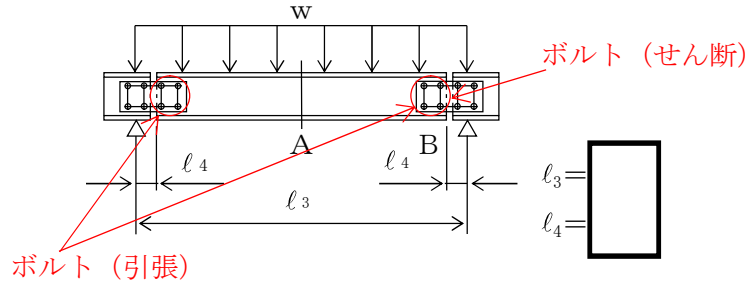


図 4-3 計算モデル (単位 : mm)

a. 分布荷重

(a) 死荷重 \$W_D\$ による等分布荷重

$$w_D = \frac{W_D}{L}$$

ここで、

\$L\$: レストレントビーム全長 =

(b) 水平方向地震による等分布荷重

$$w_H = w_1$$

ここで、

\$w_1\$: 水平方向地震荷重 \$H\$ による等分布荷重

$$w_1 = \frac{H}{l_3}$$

(c) 鉛直方向地震による等分布荷重

$$w_V = w_D \cdot (1 + C_V)$$

b. A点での曲げモーメント

(a) 水平方向地震によるモーメント

$$M_{HA} = \frac{w_H \cdot l_3^2}{8}$$

(b) 鉛直方向地震によるモーメント

$$M_{VA} = \frac{w_V \cdot l_3^2}{8}$$

- c. B点での曲げモーメント
 (a) 水平方向地震によるモーメント

$$M_{HB} = \frac{w_H \cdot l_4}{2} \cdot (l_3 - l_4)$$

- (b) 鉛直地震によるモーメント

$$M_{VB} = \frac{w_v \cdot l_4}{2} \cdot (l_3 - l_4)$$

(2) 応力

- a. A点での曲げ応力

$$\sigma_{bA} = \frac{M_{HA}}{Z_{HA}} + \frac{M_{VA}}{Z_{VA}}$$

ここで,

$$Z_{HA} = \boxed{}$$

$$Z_{VA} = \boxed{}$$

- b. B点での曲げ応力

$$\sigma_{bB} = \frac{M_{HB}}{Z_{HB}} + \frac{M_{VB}}{Z_{VB}}$$

ここで,

$$Z_{HB} = \boxed{}$$

$$Z_{VB} = \boxed{}$$

- c. ボルトの引張応力

$$\sigma_t = \frac{F_1}{n_1 \cdot A}$$

ここで,

F_1 : ボルトの引張力

$$F_1 = w_v \cdot l_3$$

d : ボルトの呼び径 = $\boxed{}$

A : ボルト断面積 = $\pi/4 \cdot d^2 = \boxed{}$

n_1 : 引張を受けるボルト本数 = $\boxed{}$

- d. ボルトのせん断応力

$$\tau = \frac{F_2}{n_2 \cdot A}$$

ここで,

F_2 : ボルトのせん断力

$$F_2 = w_H \cdot l_3 / 2$$

n_2 : せん断を受けるボルト本数 = $\boxed{}$

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 荷重の組合せ及び許容限界」及び「4.5 設計用地震力」に示す。

4.8 応力の評価

「4.6 計算方法」で求めた応力は表 4-5 に記載される値以下であること。

5. 評価結果

5.1 設計基準対象施設としての評価結果

CRDハウジング支持金具の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容値を満足しており、**十分な構造強度**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 5-1 に示す。

表 4-1 に示す荷重の組合せのうち、 $D + P_D + M_D + S_d^*$ の評価について記載している。

(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 5-2 に示す。

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

表 5-1 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*)

評価対象設備	評価部位		応力分類	Ⅲ _A S		判定	備考
				発生値	許容値		
				(MPa)	(MPa)		
CRDハウジング 支持金具	A	レストレントビーム一般部	曲げ応力強さ	91	201	○	
	B	レストレントビーム端部	曲げ応力強さ	54	201	○	
	C	レストレントビーム結合ボルト	引張応力強さ	2	525	○	
			せん断応力強さ	128	404	○	

表 5-2 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	許容値		
				(MPa)	(MPa)		
CRDハウジング 支持金具	A	レストレントビーム一般部	曲げ応力強さ	149	241	○	
	B	レストレントビーム端部	曲げ応力強さ	89	241	○	
	C	レストレントビーム結合ボルト	引張応力強さ	3	394	○	
			せん断応力強さ	213	404	○	