

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-003-14改03
提出年月日	2023年4月13日

VI-2-3-3-2-3 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

2023年4月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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 適用規格・基準等	3
2.4 記号の説明	4
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	8
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	8
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	8
4.3 解析モデル及び諸元	9
4.4 固有周期	9
4.5 設計用地震力	9
4.6 計算方法	10
4.7 計算条件	12
4.8 応力の評価	12
5. 参照図書	13

1. 概要

本計算書は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度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。

注：本計算書においては、昭和60年12月25日付け60資庁第11431号にて認可された工事計画の添付書類（参照図書(1)）を「既工認」という。

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圧力容器ペデスタルに支持される。</p>	<p>CRDハウジング支持金具は、原子炉圧力容器ペデスタルに溶接されたブラケット、ブラケットにボルトにより取り付けられたレストレントビーム及びレストレントビームをつなぐスプライスプレートとレストレントビーム結合ボルトから構成される鋼製の支持構造物であり、CRDハウジングからの水平荷重を原子炉圧力容器ペデスタルに伝達するように、CRDハウジングを取り囲んでいる。</p>	<p>原子炉圧力容器ペデスタル レストレントビーム レストレントビーム結合ボルト スプライスプレート ブラケット レストレントビーム スプライスプレート ブラケット CRDハウジング B部鳥観図 A-A矢視図 原子炉圧力容器ペデスタル CRDハウジング支持金具 CRDハウジング支持金具拡大図 EL</p> <p>(単位：mm)</p>

2.2 評価方針

CRDハウジング支持金具の応力評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」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、「3. 評価部位」にて設定する箇所に作用する設計用地震力による応力等が許容限界に収まることを、「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。

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。

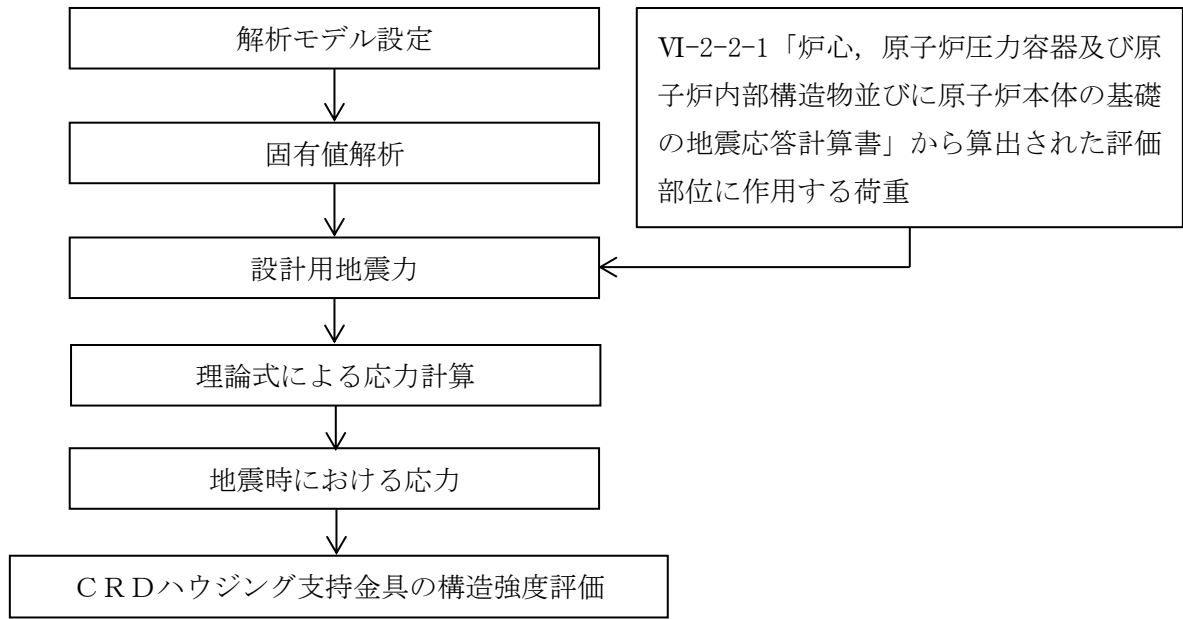


図2-1 CRDハウジング支持金具の耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007) (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_1	レストレントビーム一般部の断面積	mm^2
A_2	レストレントビーム端部の断面積	mm^2
A_3	レストレントビーム結合ボルトの断面積	mm^2
C_v	鉛直方向設計震度	—
D	死荷重	—
E	縦弾性係数	MPa
F	せん断力	N
F_t	ボルト引張荷重	N
f_{bm}	許容曲げ応力	MPa
f_{sm}	許容せん断応力	MPa
f_{tm}	許容引張応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
H	レストレントビーム最大支持スパンA-Bが受け持つ水平地震荷重	N
H_1	ばね反力として求めた水平地震荷重を上回る荷重	N
L	レストレントビームの全長	mm
l	長さ	mm
M	地震及び死荷重以外で地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態IV、Vは除く。）で設備に作用している機械的荷重	—
M_c	レストレントビーム端部の曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_E	レストレントビーム一般部の曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
m_0	質量	kg
n_1	引張を受けるボルト本数	—
n_2	せん断を受けるボルト本数	—
P	地震と組み合わせべきプラントの運転状態（地震との組合せが独立な運転状態IV、Vは除く。）における圧力荷重	—
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5 又は表6 に定める値	MPa
S_d	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力	—
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又はSクラス設備に適用される静的地震力のいずれか大きい方の地震力	—
S_s	基準地震動 S_s により定まる地震力	—
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9 に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8 に規定める値	MPa

記号	記号の説明	単位
S_y (R T)	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に定める材料の 40℃における値	MPa
T	温度	℃
W	レストレントビームの死荷重	N
w	分布荷重	N/mm
Z_c	レストレントビーム端部の断面係数	mm ³
Z_e	レストレントビーム一般部の断面係数	mm ³
ν	ポアソン比	—
σ_b	曲げ応力	MPa
σ_k	組合せ応力	MPa
τ	せん断応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 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
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
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 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第 1 位の場合は、小数点以下第 1 位表示とする。

*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

CRDハウジング支持金具の耐震評価は、「4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、実施する。本計算書で評価する箇所の形状及び主要寸法を図3-1に、使用材料を表3-1に示す。CRDハウジング支持金具は、原子炉圧力容器ペDESTALに溶接されたブラケット、ブラケットにボルトにより取り付けられたレストレントビーム及びレストレントビームをつなぐスプライスプレートとレストレントビーム結合ボルトから構成される鋼製の支持構造物であり、CRDハウジングからの水平荷重を原子炉圧力容器ペDESTALに伝達するように、CRDハウジングを取り囲んでいる。

なお、CRDハウジング支持金具のうち、地震時にCRDハウジングを支持するレストレントビームを評価部材とする。レストレントビームの応力評価点は、レストレントビーム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3-2及び図3-2に示す。

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) レストレントビームは、原子炉圧力容器ペDESTAL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圧力容器ペDESTALに伝達する構造である。

レストレントビームの耐震評価は、「4.5 設計用地震力」に示す水平地震荷重及び鉛直地震力を用いて、参照図書(1)に示す既工認の手法に従い、「4.6 計算方法」に示す手法により構造強度評価を行う。また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、絶対値和法を適用する。

(2) 構造強度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応力

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 に示す。

4.2.2 許容応力

CRDハウジング支持金具の許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表 4-2 のとおりとする。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

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 に示す。

4.2.4 設計荷重

(1) 最高使用温度及び死荷重

最高使用温度及び死荷重は、既工認からの変更はなく、次のとおりである。

温度（最高使用温度）	171 °C
死荷重W	<input type="text"/> N

4.3 解析モデル及び諸元

レストレントビームの解析モデルを図 4-1 に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元について表 4-4 に示す。なお、解析においては原子炉本体の基礎との取り付け部で溶接されるため、ブラケット及びレストレントビームをモデル化している。また、スプライスプレートによる結合部は、レストレントビームと同様の剛性でモデル化している。

- (1) 3次元はり要素による有限要素解析手法を適用する。レストレントビームの質量（バンパーの質量含む）は、はり要素に等分布質量を設定する。
- (2) 拘束条件は、レストレントビームの原子炉本体の基礎との取り付け部を固定条件（並進3方向及び3軸回り回転を拘束）とする。
- (3) 解析コードは「MSC NASTRAN」を使用し、固有値を求める。

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、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

4.4 固有周期

固有値解析の結果を表 4-5 に、振動モード図を図 4-2 に示す。固有周期は 0.05 秒以下であり、剛構造であることを確認した。

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-6 及び表 4-7 に示す。

水平方向について、レストレントビームにはCRDハウジングから荷重が作用するため、VI-2-2-1「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本体の基礎の地震応答計算書」に示す水平方向のモデルにおいて、レストレントビームはばね要素としてモデル化されている。このため、レストレントビームに加わる地震荷重 S_d^* 及び地震荷重 S_s での水平地震荷重は、ばね反力として求めた水平地震荷重を上回る荷重 H_1 を基に、図 3-2 に示す応力評価点のレストレントビーム最大支持スパン A-B が受け持つ荷重を考慮して H として設定する。なお、レストレントビームの水平方向の地震慣性力については、ばね反力として求めた水平地震荷重に比べて軽微であるため、考慮しない。レストレントビーム最大支持スパン A-B が受け持つ荷重は、全 137 本の制御棒駆動機構ハウジングのうち、レストレントビーム最大支持スパン A-B が受け持つ範囲に位置する 65 本分を考慮して、次式で算出する。

$$H = H_1 \times \frac{65}{137}$$

なお、鉛直方向についてはCRDハウジングから荷重が作用しないため、「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 」による鉛直地震力は、「4.4 固有周期」に示すとおり鉛直方向で剛構造であることから、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」により求めた地震力を上回る地震力を設定する。

4.6 計算方法

4.6.1 応力評価方法

応力評価は、既工認と同様に、図 3-2 に示すレストレントビーム最大支持スパン A-B に対して実施する。

応力評価点 P 1～P 3 の応力計算方法は、「4.6.2 レストレントビーム一般部（応力評価点 P 1）」、「4.6.3 レストレントビーム端部（応力評価点 P 2）」、及び「4.6.4 レストレントビーム結合ボルト（応力評価点 P 3）」に示すとおりである。「4.7 計算条件」に示す荷重を用いて、図 4-3 に示す両端支持ばりとして、応力評価断面の断面性状により各荷重による応力を算出する。

4.6.2 レストレントビーム一般部（応力評価点 P 1）

(1) 応力計算

a. 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M_E}{Z_E}$$

ここで

M_E : 曲げモーメント

$$\text{両端支持ばりへの等分布荷重のため } M_E = \frac{w \cdot \ell_{22}^2}{8}$$

$$w : \text{分布荷重} = \frac{H}{\ell_{22}} \quad (\text{水平地震})$$

$$= \frac{W}{L} \cdot (1 + C_v) \quad (\text{鉛直地震})$$

L : レストレントビーム全長 = mm

Z_E : 断面係数 = $8.480 \times 10^5 \text{ mm}^3$ (水平地震)

= $2.920 \times 10^5 \text{ mm}^3$ (鉛直地震)

b. せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A_1}$$

ここで

F : せん断力

両端支持ばりへの等分布荷重のため $F = H / 2$

A_1 : 評価部位の断面積 = $8.998 \times 10^3 \text{ mm}^2$

c. 組合せ応力

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

4.6.3 レストレントビーム端部（応力評価点 P 2）

(1) 応力計算

a. 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M_C}{Z_C}$$

ここで

M_c : 曲げモーメント

$$\text{両端支持はりへの等分布荷重のため } M_c = \frac{W \cdot l_{23}}{2} \cdot (l_{22} - l_{23})$$

$$w : \text{分布荷重} = \frac{H}{l_{22}} \quad (\text{水平地震})$$

$$= \frac{W}{L} \cdot (1 + C_v) \quad (\text{鉛直地震})$$

$$Z_c : \text{断面係数} = 1.730 \times 10^5 \text{ mm}^3 \quad (\text{水平地震})$$

$$= 4.990 \times 10^4 \text{ mm}^3 \quad (\text{鉛直地震})$$

b. せん断応力

$$\tau = \frac{F}{A_2}$$

ここで

F : せん断力

$$\text{両端支持はりへの等分布荷重のため } F = H / 2$$

$$A_2 : \text{評価部位の断面積} = 5.760 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

c. 組合せ応力

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

4.6.4 レストレストビーム結合ボルト (応力評価点 P 3)

(1) 応力計算

a. 引張応力

$$\sigma_t = \frac{F_t}{n_1 \cdot A_3}$$

ここで

$$F_t : \text{ボルト引張荷重} = \frac{W}{L} \cdot (1 + C_v) \cdot l_{22}$$

$$A_3 : \text{ボルト断面積} = 3.140 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$n_1 : \text{引張を受けるボルト本数} = 8 \text{ 本}$$

b. せん断応力

$$\tau = \frac{F}{n_2 \cdot A_3}$$

ここで

F : せん断力

$$\text{両端支持はりへの等分布荷重のため } F = H / 2$$

$$A_3 : \text{ボルト断面積} = 3.140 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$n_2 : \text{せん断を受けるボルト本数} = 4 \text{ 本}$$

4.7 計算条件

応力計算に用いる荷重を「4.2 荷重の組合せ及び許容応力」及び「4.5 設計地震力」に示す。

4.8 応力の評価

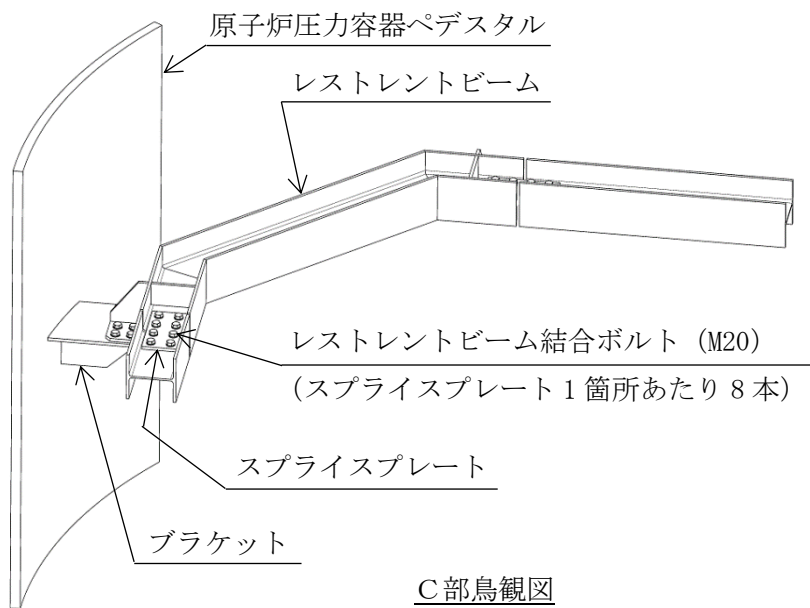
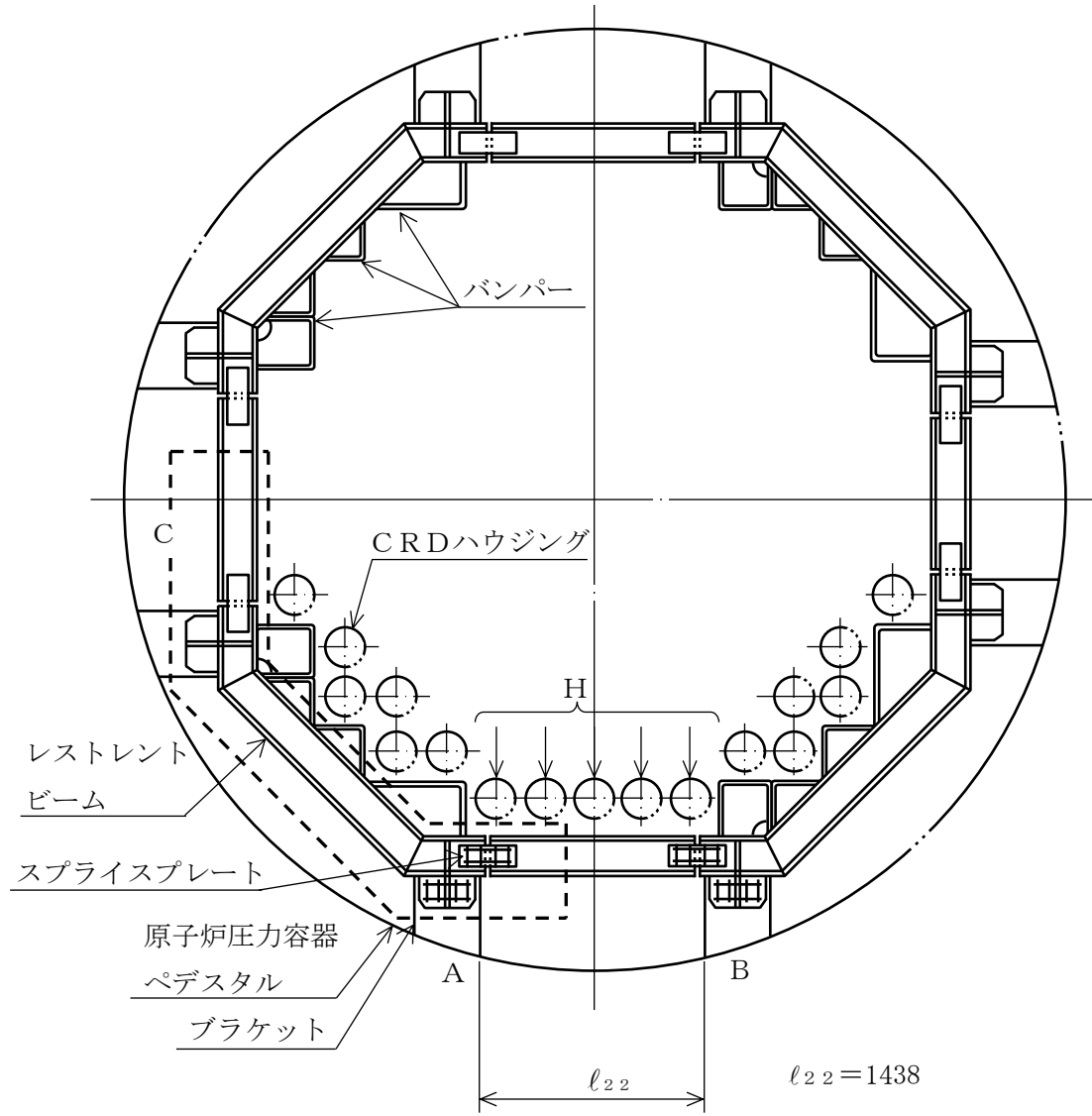
各許容応力状態における評価を表 4-8 に示す。

表 4-8 より、各許容応力状態の各応力は、「4.2.2 許容応力」に示す許容応力を満足する。

5. 参照図書

(1) 島根原子力発電所第2号機 第5回工事計画認可申請書

IV-2-2-11 「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」



C部鳥観図

(単位：mm)

図 3-1 レストレントビームの形状及び主要寸法

表 3-1 使用材料表

部材	使用材料	備考
レストレントビーム	SS41	SS400 相当
レストレントビーム 結合ボルト	SCM435	—

表 3-2 応力評価点

応力評価点番号	応力評価点
P 1	レストレントビーム一般部
P 2	レストレントビーム端部
P 3	レストレントビーム結合ボルト

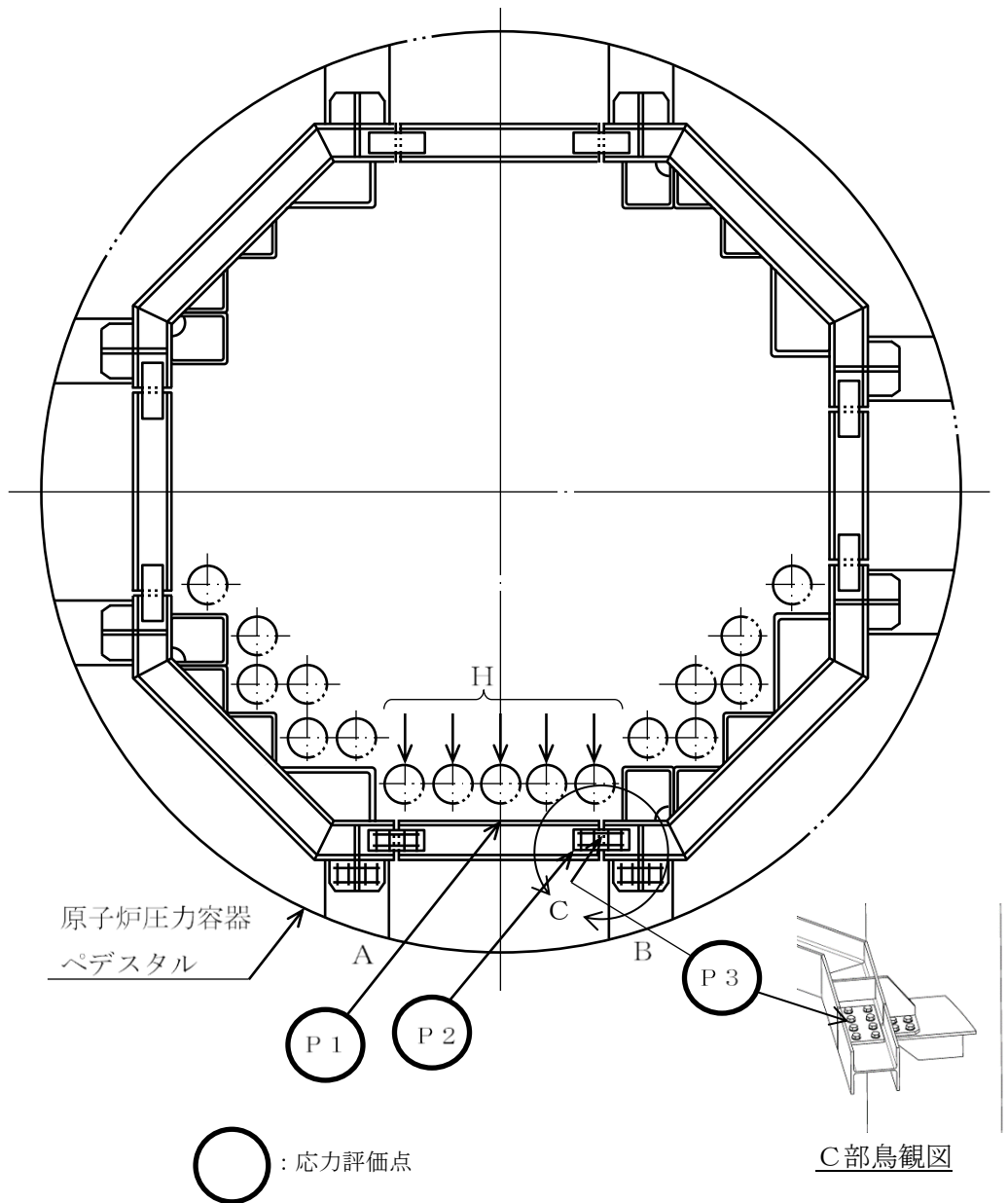


図 3-2 レストレントビームの応力評価点

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	—*1	$D + P + M + S d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_L + M_L + S d^{**2}$	Ⅳ _A S
					$D + P + M + S_s$	

注記*1：クラス1支持構造物の荷重の組合せ及び許容限界を準用する。

2：CRDハウジング支持金具に対しては、地震と組み合わせるべき運転状態Ⅳの事故後の圧力荷重および機械的荷重は、地震と組み合わせるべき通常運転時の圧力荷重及び機械的荷重と同じであり、荷重の組合せ $D + P + M + S d^$ に包絡されるため、評価しない。

表4-2 許容応力 (クラス1 支持構造物)

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等以外)		許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力		一次応力	
	曲げ	せん断	引張	せん断
ⅢAS	$1.5 \cdot f_b$	$1.5 \cdot f_s$	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$
ⅣAS	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$

注記*1：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

*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。

表 4-3 使用材料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					
レストレントビーム	鋼板	SS41*	周囲環境 温度	171	—	201	373	—
レストレントビーム 結合ボルト	棒鋼	SCM435	周囲環境 温度	171	—	642	847	—

注記* : SS400相当

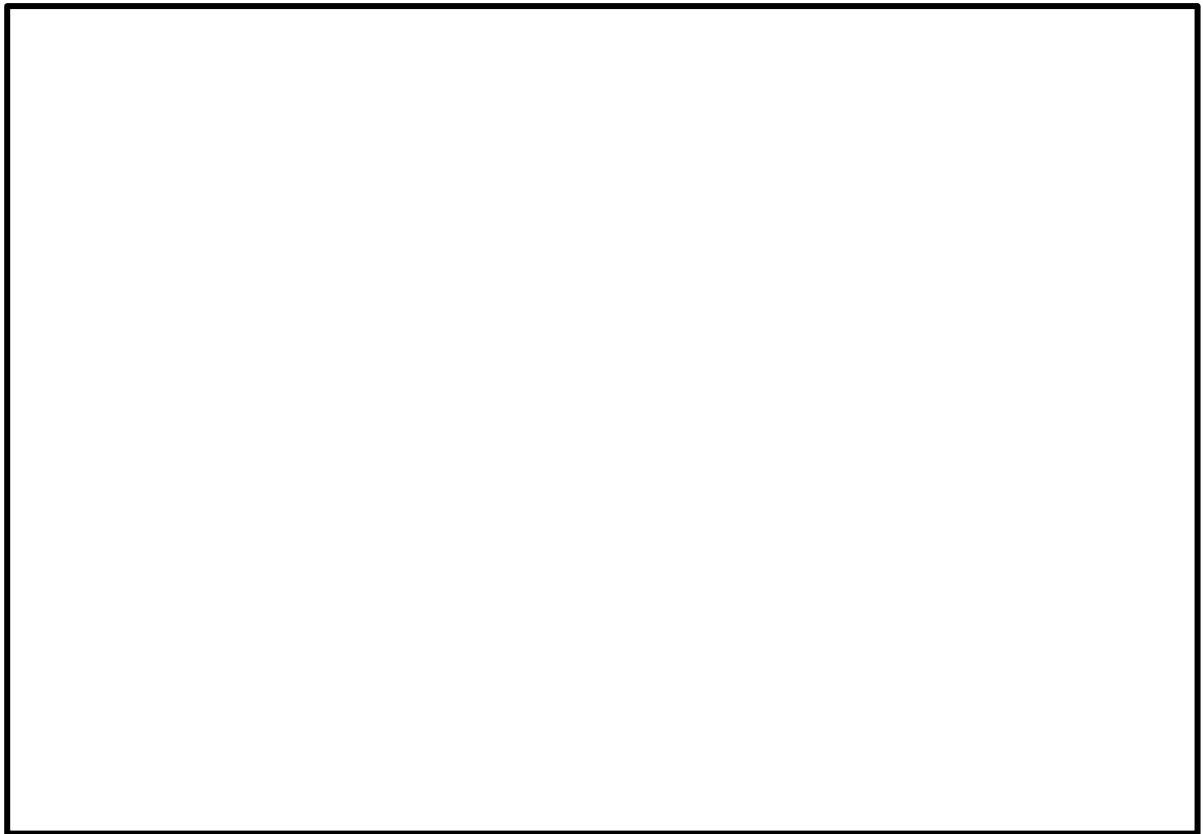


図 4-1 解析モデル

表 4-4 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SS41 (SS400相当) SM41A (SM400A相当)
質量	m _o	kg	<input type="text"/>
温度条件	T	°C	57
縦弾性係数	E	MPa	201000
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	—	<input type="text"/>
節点数	—	—	<input type="text"/>

表 4-5 固有周期

モード	卓越方向	固有周期 (s)	刺激係数		
			X	Y	Z
1次	水平		—	—	—

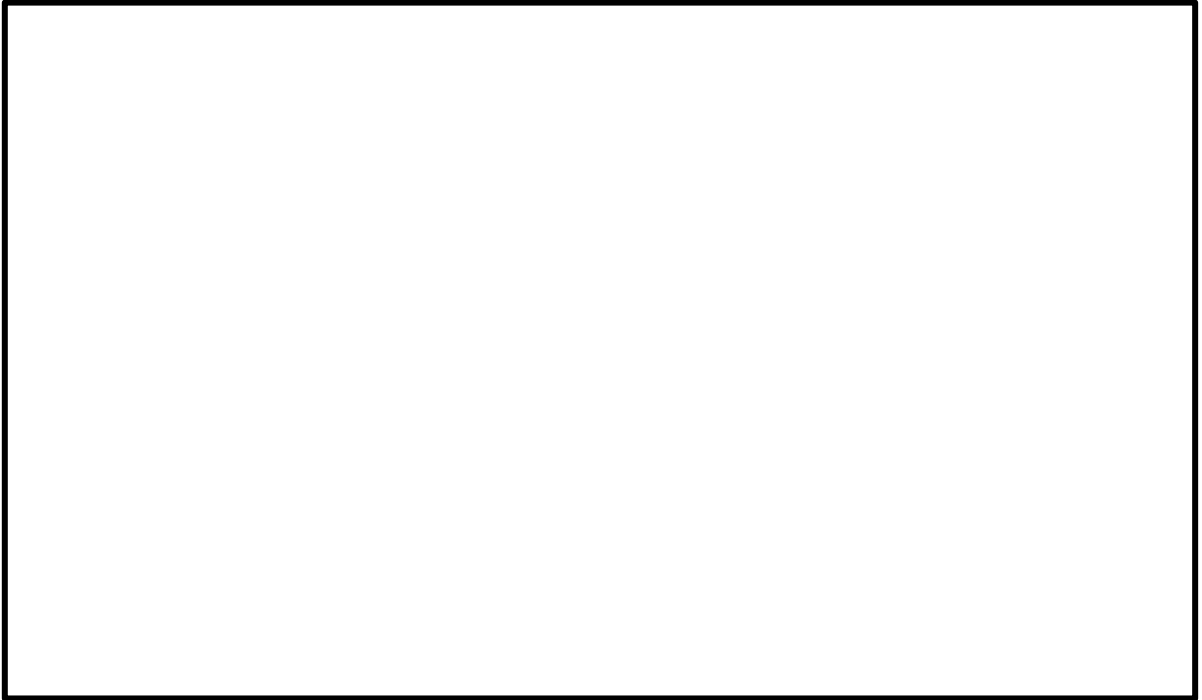


図 4-2 振動モード図

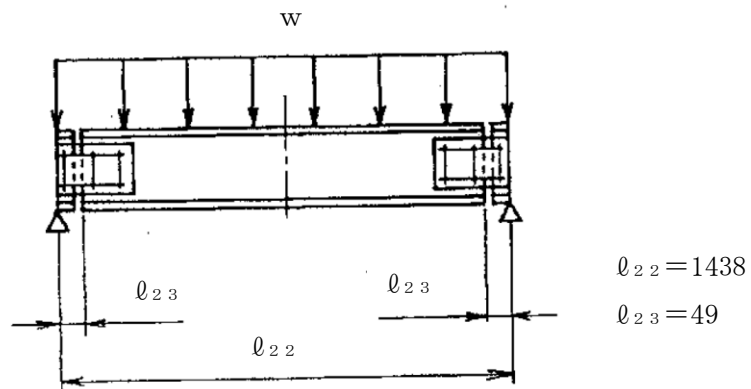


図 4-3 計算モデル (単位: mm)

表 4-6 設計用地震力（水平方向）

	地震荷重 S_d^*	地震荷重 S_s
ばね反力として求めた水平地震荷重を上回る荷重 H_1 (N) *1	□	□
レストレントビーム最大支持スパン A-B が受け持つ水平地震荷重 H (N) *2	□ *3	□

注記 *1 : VI-2-2-1 「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本体の基礎の地震応答計算書」により求めた地震荷重を上回る荷重

*2 : VI-2-2-1 「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本体の基礎の地震応答計算書」により求めた地震荷重を上回る荷重を基に，図 3-2 に示す応力評価点のレストレントビーム最大支持スパン A-B が受け持つ荷重を考慮して設定する。

3 : 地震荷重 S_d^ については，保守的に，VI-2-2-1 「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本体の基礎の地震応答計算書」により求めた地震荷重を上回る荷重を，レストレントビーム最大支持スパン A-B が受け持つ荷重として設定する。

表 4-7 設計用地震力（鉛直方向）

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	
	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
原子炉本体基礎 EL □	0.05 以下	0.05 以下	—	$C_v=0.56^{*1}$	—	$C_v=1.14^{*2}$

注記 *1 : 設計用震度 I（弾性設計用地震動 S_d ）及び静的震度を上回る設計震度

*2 : 設計用震度 I（基準地震動 S_s ）を上回る設計震度

表 4-8 評価結果まとめ

評価対象 設備	評価部位		応力分類	Ⅲ _A S		Ⅳ _A S	
				算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
				MPa	MPa	MPa	MPa
CRDハウジング 支持金具	P 1	レストレントビーム一般部	曲げ応力	123	201	153	241
			せん断応力	32	116	39	139
			組合せ応力	135	201	168	241
	P 2	レストレントビーム端部	曲げ応力	80	201	99	241
			せん断応力	49	116	61	139
			組合せ応力	117	201	145	241
	P 3	レストレントビーム結合ボルト	引張応力	2	264*	3	179*
			せん断応力	224	342	277	342

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