

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添-2-042-8-4 改1
提出年月日	2020年8月19日

V-2-10-2-4-3(4) ボンベラックの耐震性についての計算書

2020年8月

東京電力ホールディングス株式会社

(4) ボンベラック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 適用規格・基準等	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	7
3. 評価部位	8
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	9
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	9
4.2.2 許容応力	9
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	9
4.3 解析モデル及び諸元	12
4.4 固有周期	13
4.5 設計用地震力	13
4.6 計算方法	14
4.6.1 ボンベラック（はり要素）	14
4.6.2 ボンベラック（シェル要素）	14
4.6.3 溶接部	14
4.7 計算条件	17
4.8 応力の評価	17
4.8.1 ボンベラックの応力評価	17
4.8.2 溶接部の応力評価	17
5. 評価結果	18
5.1 設計基準対象施設としての評価結果	18

1. 概要

本計算書は、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の設計方針に基づき、原子炉補機冷却海水系空気ポンベラック（以下「ポンベラック」という。）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。

ポンベラックは、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

ポンベラックの構造計画を表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>ボンベラックは、壁面に設定したアンカプレートに溶接にて固定する。</p>	<p>ボンベラックは、溶接にて組み立てたフレームにポンペを固定する構造である。</p>	<p style="text-align: center;">空気ボンベラック</p> <p style="text-align: right;">(単位: mm)</p>

2.2 評価方針

ボンベラックの応力評価は、V-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、「2.1 構造計画」にて示すボンベラックの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.3 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。

ボンベラックの耐震評価フローを図2-1に示す。



図 2-1 ボンベラックの耐震評価フロー

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 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984
（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 （（社）日本電気協会）
- ・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（（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_w	溶接部の有効断面積（1箇所当たり）	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
E_1	ボンベラックの縦弾性係数	MPa
E_2	ボンベラックの縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.2に定める値	MPa
F_w	取付面に対し前後方向に作用する最大せん断力	N
F_{w1}	取付面に対し平行方向に作用するせん断力	N
F_{w2}	取付面に対し前後方向に作用するせん断力（正面方向転倒）	N
F_{w3}	取付面に対し前後方向に作用するせん断力（側面方向転倒）	N
f_s	溶接部の許容せん断応力	MPa
f_t	ボンベラックの許容引張応力	MPa
g	重力加速度（=9.80665）	m/s^2
h	取付面から重心までの距離	mm
L_w	溶接長（1箇所当たり）	mm
l_3	重心と下側溶接部間の距離	mm
l_4	上側溶接部と下側溶接部中心間の距離	mm
l_5	左側溶接部と右側溶接部中心間の距離	mm
m	ボンベ設備の質量	kg
n	溶接箇所数	—
n_{vw1}	鉛直方向地震により取付面に対し前後方向のせん断力を受けるとして期待する溶接箇所数	—
n_{HW1}	水平方向地震により取付面に対し前後方向のせん断力を受けるとして期待する溶接箇所数	—
S	溶接部の脚長	mm
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に定める値	MPa
$S_y (RT)$	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	温度条件	℃
ν	ポアソン比	—

記号	記号の説明	単位
σ	はり要素の組合せ応力	MPa
σ_a	はり要素の軸応力	MPa
σ_b	はり要素の曲げ応力	MPa
σ_x	シェル要素のX方向応力	MPa
σ_y	シェル要素のY方向応力	MPa
σ_s	シェル要素の組合せ応力	MPa
τ	はり要素のせん断応力	MPa
τ_w	溶接部に生じる最大せん断応力	MPa
τ_{w3}	取付面に対し平行方向に作用するせん断応力	MPa
τ_{w4}	取付面に対し前後方向に作用するせん断応力	MPa
τ_{xy}	シェル要素のせん断応力	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
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	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積	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 位を切捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

ボンベラックの耐震評価は、「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、耐震評価上厳しくなるボンベラック、アンカプレートへの溶接部について実施する。

ボンベラックの耐震評価部位については、表2-1の概略構造図に示す。

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) 地震力は、ボンベラックに対して水平方向及び鉛直方向から作用するものとし、原則として、強度評価において組み合わせるものとする。なお、溶接部においては、作用する応力の算出において組み合わせるものとする。
- (2) 拘束条件として、ボンベラックは、溶接により X, Y, Z の 3 方向を固定として設定する。
- (3) ボンベ本体は、ボンベラックにプレート及びボルトにて固定され収納されており、解析上、断面性状を考慮したはり要素としてモデル化する。
- (4) 各ボンベから配管への接続管は、接続を容易にするためフレキシビリティを有した構造としており、地震時におけるボンベと配管の相対変位は微小であることから、地震時の変位を十分吸収できるものとする。
- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

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

ボンベラック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

ボンベラックの許容応力は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表4-2に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

ボンベラック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。

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	
その他発電用原子炉の附属施設	浸水防護施設	取水槽水位計 (原子炉補機冷却海水系空気ポンベラック)	S	—*	$D + P_D + M_D + S_s$	III _A S

注記*：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表4-2 許容応力（その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト以外)	
	一次応力	
	せん断	組合せ
III _A S	$1.5 \cdot f_s$	$1.5 \cdot f_t$

注記*1：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。

*2：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。

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 _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
ボンベラック		周囲環境温度	40			—
		周囲環境温度	40			—
溶接部		周囲環境温度	40			—

4.3 解析モデル及び諸元

ボンベラックの解析モデルを図4-1に、解析モデルの諸元を表4-4に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を本計算書の【ボンベラックの耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

- (1) ボンベラックは構成する鋼材をシェル要素及びはり要素でモデル化する。
- (2) 拘束条件として、ボンベラックは、溶接によりX, Y, Zの3方向を固定として設定する。
- (3) ボンベ及びボンベラックの質量は、密度にて与えるものとする。
- (4) 解析コードは「ABAQUS」を使用し、固有値、ボンベラックの応力を求める。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、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

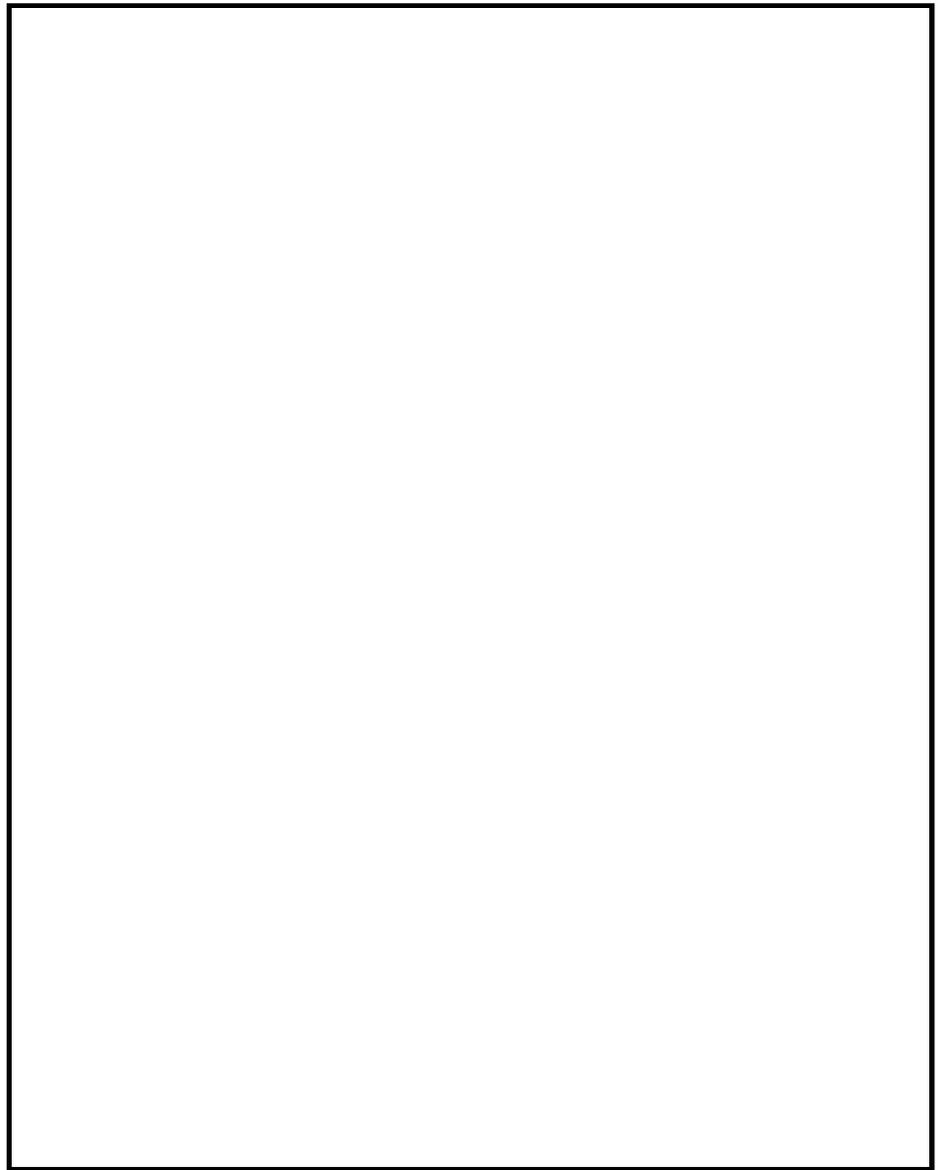


図4-1 解析モデル

表4-4 解析モデルの諸元

項目	記号	単位	入力値
材質 (ボンベ)	—	—	マンガン鋼
材質 (ボンベラック)	—	—	
材質 (プレート)	—	—	
温度条件 (周囲環境温度)	T	°C	40
縦弾性係数 (ボンベ)	E	MPa	200667
縦弾性係数 (ボンベラック)	E	MPa	
縦弾性係数 (プレート)	E	MPa	
ポアソン比	ν	—	0.3
質量 (ボンベ)	m	kg	
質量 (ボンベラック, プレート)	m	kg	
ボンベ数	—	本	2
要素数	—	個	19708
節点数	—	個	21334

4.4 固有周期

固有値解析の結果を表4-5に示す。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4-5 固有周期

形状	モード	卓越方向	固有周期 (s)	刺激係数		
				水平方向		鉛直方向
				NS方向	EW方向	
ボンベ	1次	鉛直	0.044	—	—	—
ラック	3次	水平	0.025	—	—	—

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表4-6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」に基づき設定する。

表4-6 設計用地震力 (設計基準対象施設)

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震力 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
	0.025	0.044	—	—	C _H =1.23	C _V =0.95

注記* : 基準床レベルを示す。

4.6 計算方法

4.6.1 ボンベラック（はり要素）

ボンベラックの応力は、自重、鉛直方向地震及び水平方向地震（X, Y）を考慮し、シェル要素及びはり要素による解析結果を用いる。ここで、はり要素の組合せ応力の算出式は下記による。

応力の種類	単位	応力算出式
組合せ応力	MPa	$\sqrt{(\sigma_a + \sigma_b)^2 + 3 \cdot \tau^2}$

4.6.2 ボンベラック（シェル要素）

ボンベラックの応力は、自重、鉛直方向地震及び水平方向地震（X, Y）を考慮し、シェル要素及びはり要素による解析結果を用いる。ここで、シェル要素の組合せ応力の算出式は下記による。

応力の種類	単位	応力算出式
組合せ応力	MPa	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$

4.6.3 溶接部

(1) ボンベラック取付面に対し平行方向に作用するせん断力

ボンベラック取付面に対し平行方向に作用するせん断力は全溶接部で受けるものとして計算する。

$$F_{w1} = \sqrt{(m \cdot C_H \cdot g)^2 + (m \cdot (1 + C_V) \cdot g)^2} \dots\dots\dots (4.6.3.1)$$

ボンベラック取付面に対し平行方向に作用するせん断応力（ τ_{w3} ）

$$\tau_{w3} = \frac{F_{w1}}{n \cdot A_w} \dots\dots\dots (4.6.3.2)$$

ここで、せん断を受ける溶接部の有効断面積 A_w は、

$$A_w = (S / \sqrt{2}) \times L_w \dots\dots\dots (4.6.3.3)$$

(2) ボンベラック取付面に対し前後方向に作用するせん断応力

溶接部に対する力は最も厳しい条件として、図 4-2 及び図 4-3 で最外列の溶接部を支点とする転倒を考え、これを片側の最外列の溶接部で受けるものとして計算する。

計算モデル図 4-2 に示す **正面** 方向転倒の場合のせん断力 (F_{w2})

$$F_{w2} = \frac{m \cdot (1 + C_V) \cdot h \cdot g}{n_{vw1} \cdot l_4} + \frac{m \cdot C_H \cdot h \cdot g}{n_{HW1} \cdot l_5} \dots\dots\dots (4.6.3.4)$$

計算モデル図 4-3 に示す **側面** 方向転倒の場合のせん断力 (F_{w3})

$$F_{w3} = \frac{m \cdot (1 + C_V) \cdot h \cdot g + m \cdot C_H \cdot l_3 \cdot g}{n_{vw1} \cdot l_4} \dots\dots\dots (4.6.3.5)$$

ボンベラック取付面に対し前後方向に作用するせん断力

$$F_w = \text{M a x} (F_{w2}, F_{w3}) \dots\dots\dots (4.6.3.6)$$

ボンベラック取付面に対し前後方向に作用するせん断応力 (τ_{w4})

$$\tau_{w4} = \frac{F_w}{A_w} \dots\dots\dots (4.6.3.7)$$

(3) 溶接部の応力

$$\tau_w = \text{M a x} (\tau_{w3}, \tau_{w4}) \dots\dots\dots (4.6.3.8)$$

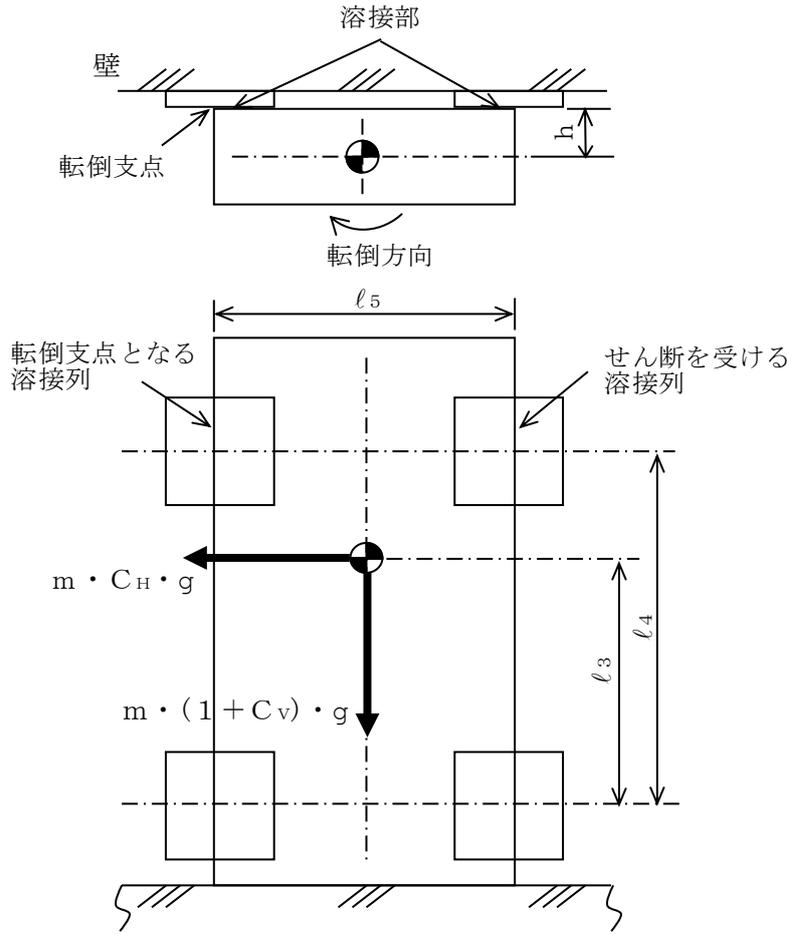


図4-2 計算モデル (正面方向転倒)

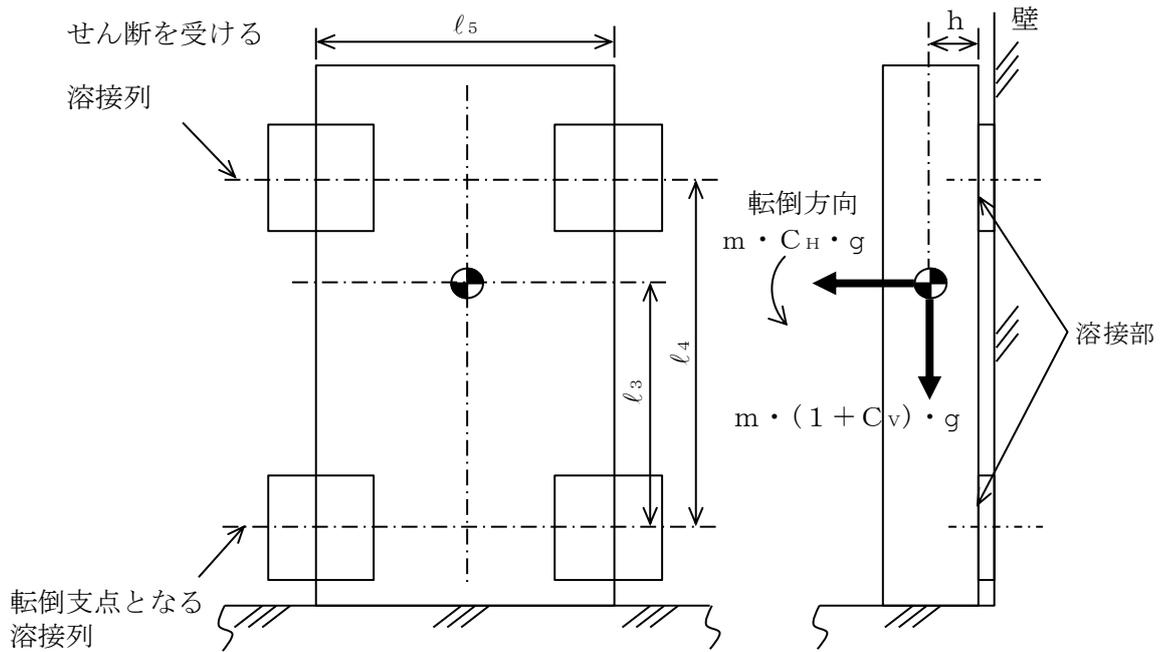


図4-3 計算モデル (側面方向転倒)

4.7 計算条件

応力解析に用いる自重（ボンベラック）及び荷重（地震荷重）は、本計算書の【ボンベラックの耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

4.8 応力の評価

4.8.1 ボンベラックの応力評価

4.6.1項及び4.6.2項で求めたボンベラックの組合せ応力が許容応力 f_t 以下であること。ただし、 f_t は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_t	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$

4.8.2 溶接部の応力評価

4.6.3項で求めた溶接部のせん断応力が許容応力 f_s 以下であること。ただし、 f_s は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容せん断応力 f_s	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5. 評価結果

5.1 設計基準対象施設としての評価結果

ボンベラック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。発生値は許容限界を満足しており，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確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

【ボンベラックの耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び 床面高さ (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		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			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		
ボンベラック	S		0.025	0.044	—	—	C _H =1.23	C _V =0.95	—	40

注記*：基準床レベルを示す。

1.2 機器要目

m (kg)	h (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ ₅ (mm)	A _w (mm ²)	E ₁ (mm)	E ₂ (mm)	ν	n	n _{v w 1}		n _{H w 1}	
										弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
			1500		763.7			0.3	4	—	2	—	2

部材	材料	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)
ボンベラック				245
				245
溶接部				245

1.3 計算数値

1.3.1 取付面に対し平行方向に作用するせん断力 (単位：N)

部材	F _{w1}	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
溶接部	—	9.270×10 ³

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位：s)

モード	固有周期	卓越方向
1次	0.044	鉛直

1.4.2 応力及び許容荷重 (単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
ボンベラック		組合せ	—	—	$\sigma_s = 79$	$f_t = 245$
溶接部		せん断	—	—	$\tau_w = 3$	$f_s = 141$

すべて許容応力以下である。

