

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密また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-743 改3
提出年月日	平成30年9月14日

V-2-9-5-5-1 静的触媒式水素再結合器の耐震性についての計算書

目 次

1.	概要	1
2.	一般事項	2
2.1	構造計画	2
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	8
4.	応力解析及び構造強度評価	8
4.1	応力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
4.3	解析モデル及び諸元	13
4.4	固有周期	15
4.5	設計用地震力	15
4.6	計算方法	16
4.7	計算条件	20
4.8	応力の評価	20
5.	評価結果	21
5.1	重大事故等対処設備としての評価結果	21

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の設計方針に基づき、静的触媒式水素再結合器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。

静的触媒式水素再結合器は、重大事故等対処設備において常設重大事故緩和設備に分類される。以下、この分類に応じた構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

静的触媒式水素再結合器の構造計画を表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>静的触媒式水素再結合器は取付ボルトにて架台に固定する。</p> <p>取付ボルト4本のうち、3本は熱膨張を逃がす構造となっている。</p> <p>架台はアンカボルトにて壁面に固定する。</p>	<p>静的触媒式水素再結合器は、鋼板を角形に組み立てたハウジングの内部に触媒カートリッジを装荷した構造である。</p>	<p>(単位：mm)</p>

2.2 評価方針

静的触媒式水素再結合器の応力評価は、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」にて示す静的触媒式水素再結合器の部位を踏まえ「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「4.5 固有周期」で算出した固有周期及び荷重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. 応力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。

静的触媒式水素再結合器の耐震評価フローを図2-1に示す。

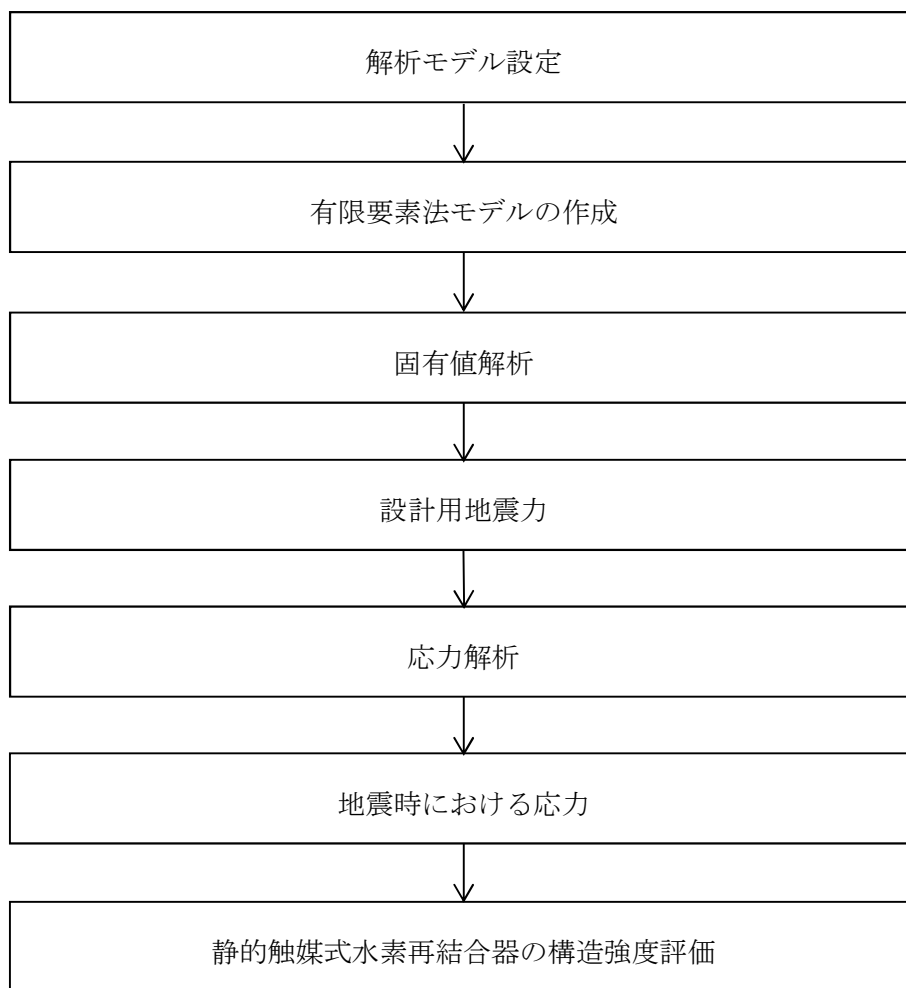


図 2-1 静的触媒式水素再結合器の耐震評価フロー

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_{b1}	取付ボルトの軸断面積	mm^2
A_{b2}	アンカボルトの軸断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
d_1	取付ボルトの呼び径	mm
d_2	アンカボルトの呼び径	mm
E	本体の縦弾性係数	MPa
E_s	架台の縦弾性係数	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	MPa
F_{ba}	アンカボルトに作用する引張力	N
F_x	架台に作用する力 (X方向)	N
F_y	架台に作用する力 (Y方向)	N
F_z	架台に作用する力 (Z方向)	N
f_t	許容引張応力 (f_t を1.5倍した値)	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるボルトの許容引張応力 (f_t を1.5倍した値)	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
f_{sb}	ボルトの許容せん断応力 (f_s を1.5倍した値)	MPa
G	本体のせん断弾性係数	MPa
G_s	架台のせん断弾性係数	MPa
m_o	本体の運転時質量	kg
m_{o1}	架台を含めた全体の質量	kg
l	アンカボルト間距離	mm
M_x	架台に作用するモーメント (X軸周り)	$\text{N} \cdot \text{m}$
M_y	架台に作用するモーメント (Y軸周り)	$\text{N} \cdot \text{m}$
M_z	架台に作用するモーメント (Z軸周り)	$\text{N} \cdot \text{m}$
n_1	せん断力を受ける取付ボルトの本数	—
n_2	せん断力を受けるアンカボルトの本数	—
n_{f1}	引張力を受ける取付ボルトの本数	—
n_{f2}	引張力を受けるアンカボルトの本数	—
n_{f3}	架台に作用するモーメント (M_y, M_z) により引張力を受けるアンカボルトの本数	—
Q_{bp}	取付ボルトに作用するせん断力	N
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°Cにおける値	MPa
T	温度条件	°C
ν	ポアソン比	—

記 号	記 号 の 説 明	単 位
σ_{ba}	アンカボルトに作用する引張応力	MPa
σ_{bp}	取付ボルトに作用する引張応力	MPa
σ_p	本体に作用する組合せ応力	MPa
σ_s	架台に作用する組合せ応力	MPa
τ_{ba}	アンカボルトに作用するせん断応力	MPa
τ_{bp}	取付ボルトに作用するせん断応力	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
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	°C	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ*1	mm	—	—	整数位
面積	mm ²	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中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

本体の耐震評価は、「4.1 応力解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、本体、架台、取付ボルト、アンカボルトについて実施する。本体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. 応力解析及び構造強度評価

4.1 応力解析及び構造強度評価方法

- (1) 地震力は、本体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、応力評価において組合せるものとする。
- (2) 触媒カートリッジは、本体と一体として評価する。
- (3) カートリッジが補強材として作用しないよう解析モデルでは、本体に質量のみを負荷する。
- (4) 本体は、壁に設置した架台に取付ボルトで取り付ける。また、架台は、壁にアンカボルトで取り付ける。
- (5) 本体は、形状が円筒形ではないため、三次元のシェル要素を用いて本体及び架台の応力を算出する。なお、取付ボルト及びアンカボルトの強度評価については、解析結果で得られた荷重を用いて、理論式により応力を算出する。
- (6) 本体は、壁に設置した架台上に取付ボルト4本で据付けられている。このうち1本は固定、その他3本は熱膨張を逃がす構造となっていることから、評価上転倒による引張を受けるボルト本数は保守的に1本とする。また、上記構造から評価上せん断を受けるボルト本数も保守的に1本とする。

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

静的触媒式水素再結合器の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表4-1に示す。

4.2.2 許容応力

静的触媒式水素再結合器の許容応力を表4-2 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

静的触媒式水素再結合器の使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備の評価に用いるもの表4-3に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等その他の支持構造物）

施設区分		機器名称	設備分類*1	機器等の区分	荷重の組合せ	供用状態
原子炉 格納施設	圧力低減設 備その他の 安全設備	静的触媒式 水素再結合器	常設／緩和	—*2	$D + P_D + M_D + S_S$ *3	IV_{AS}
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_S$	V_{AS} (V_{AS} として IV_{AS} の許容 限界を用いる)

注記 *1：「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力状態を適用する。

*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_S$ 」の評価に包絡されるため、評価結果の記載を省略する。

表4-2 許容応力（重大事故等その他の支持構造物）

	許容限界*1, *2 (ボルト以外)		許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力		一次応力	
	組合せ	引張り	せん断	
IV _A S	1.5・ f_t *	1.5・ f_t *	1.5・ f_s *	
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの 許容限界を用いる)				

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（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		最高使用温度	300			
本体	SUS304 相当 []	最高使用温度	300	127	391	205
架台	SS400 (厚さ ≤ 16 mm)	最高使用温度	300	170	373	—
取付ボルト	SUS304	最高使用温度	300	127	391	205
アンカボルト	SS400 (径 ≤ 16 mm)	周囲環境温度	[] (300*)	170	373	—

注記 *：周囲環境温度は [] であるが、保守的に機器の最高使用温度である 300°C を使用する。

4.3 解析モデル及び諸元

静的触媒式水素再結合器の解析モデルを図4-1に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を表4-4に示す。

- (1) 静的触媒式水素再結合器本体及び架台をシェル要素でモデル化する。
- (2) 拘束条件としては、架台は壁で固定されている。静的触媒式水素再結合器本体は、取付ボルトにより架台に固定されている。
- (3) 解析コードは、「NX NASTRAN」を使用し、固有値、静的触媒式水素再結合器本体の応力及び架台の応力を求める。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、添付書類「V-5-49 計算機プログラム（解析コード）の概要・NX NASTRAN」に示す。
- (4) 機器及び架台の質量は、密度にて与えるものとする。ただし、カートリッジの質量は、本体の前後面に分布荷重として与える。
- (5) アンカーボルトの荷重は、架台の固定端に作用する軸力、せん断力及びモーメントより算出し、プレートはモデル化していない。

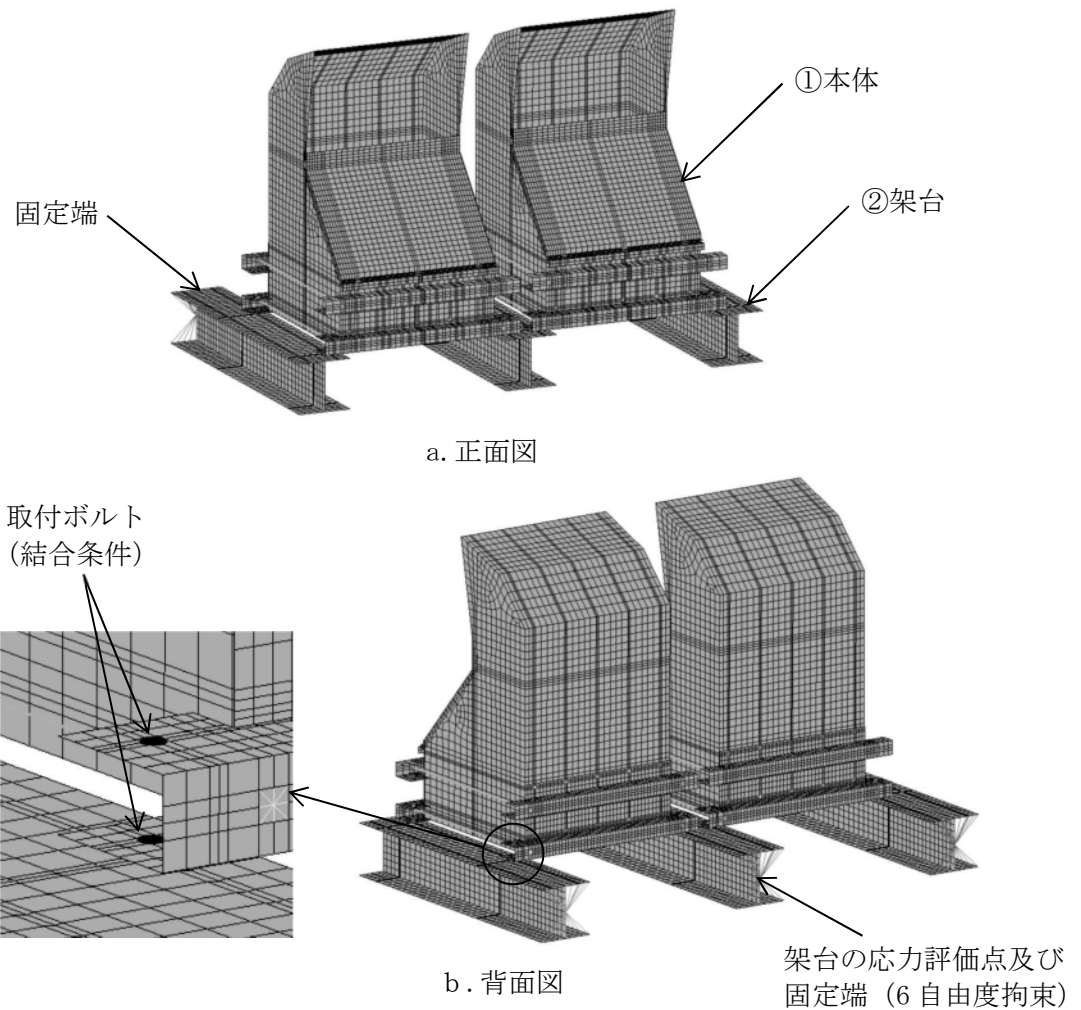


図4-1 解析モデル

表4-4 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	SUS304相当 <div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 15px; margin: 5px 0;"></div> (本体) SS400 (架台)
運転時質量	m_o	kg	<div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 20px;"></div>
全体質量	m_{o1}	kg	<div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 20px;"></div>
温度条件 (最高使用温度)	T	℃	300 (本体) 300 (架台)
縦弾性係数 (最高使用温度)	E E _s	MPa	176000 (本体) 185000 (架台)
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	個	<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 30px;"></div>
節点数	—	個	<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 30px;"></div>

4.4 固有周期

解析コード「NX NASTRAN」により求めた固有値解析の結果を表4-5に示す。

1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2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 4-5 固有値解析結果

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1次		

4.5 設計用地震力

「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」に基づき設定する。また、減衰定数は添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

評価に用いる設計用地震力を表4-6に示す。

表 4-6 設計用地震力（重大事故等対処設備）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		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
EL. 46.5 *1 (EL. 57.0 *2)			$C_H=2.09$	$C_V=1.77$

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：壁に設置した架台に取り付けられた機器のため、設置床上階の設計用地震力を使用する。

*3：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 本体

本体の応力は、自重、鉛直方向地震及び水平方向地震(X, Y)を考慮し、三次元シェル要素による解析結果を用いる。ここで、各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	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$

三次元シェル要素による解析結果を5.項に示す。

4.6.2 架台

架台の応力は、本体と同様に、自重、鉛直方向地震及び水平方向地震(X, Y)を考慮し三次元シェル要素による解析結果を用いる。各応力の算出式は本体と同様である。

三次元シェル要素による解析結果を5.項に示す。

4.6.3 取付ボルト

取付ボルトの応力は、地震による震度によって生じる引張力とせん断力について計算する。

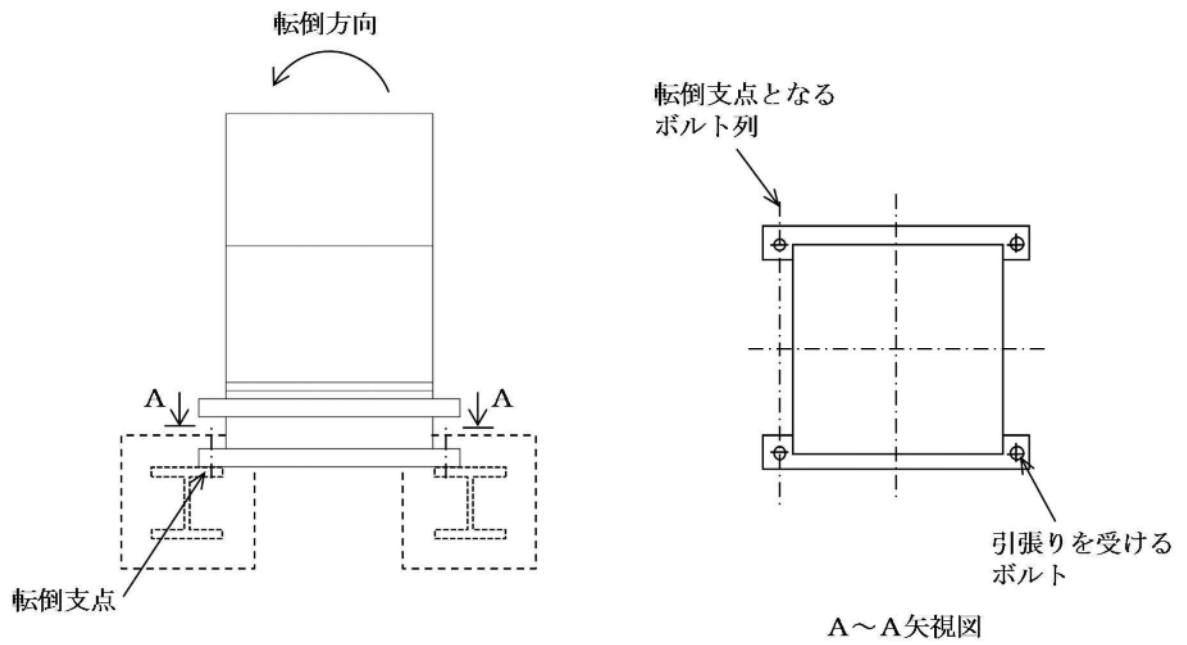


図4-2 計算モデル（長辺方向転倒）

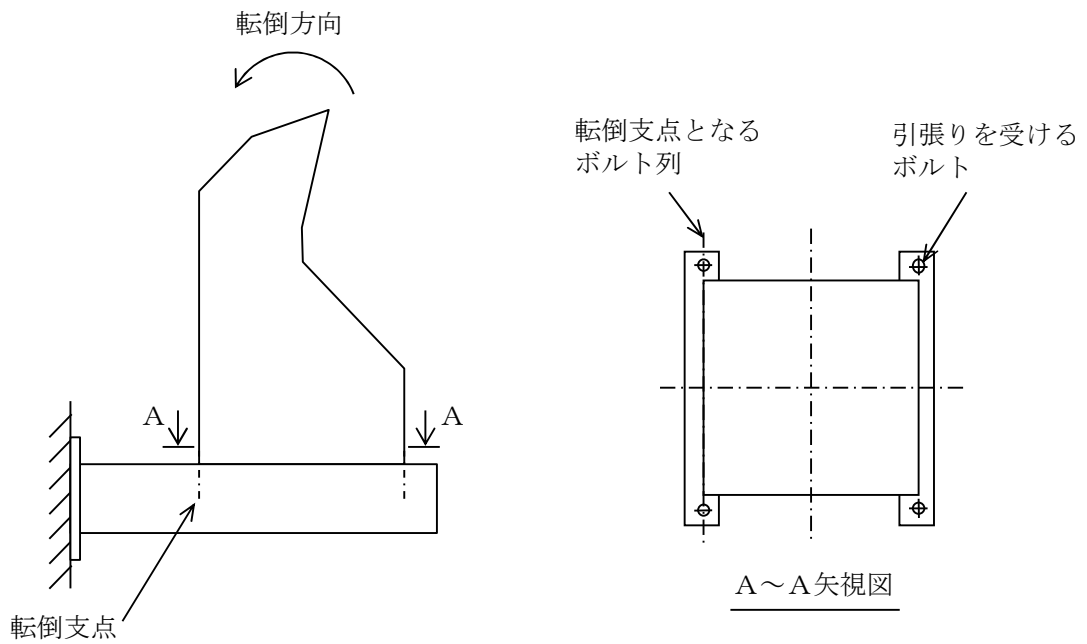


図4-3 計算モデル（短辺方向転倒）

(1) 引張応力

取付ボルトに対する引張力は図4-2及び図4-3で取付ボルトを支点とする転倒を考え、この片側の取付ボルト1本で受けるものとして計算する。

引張応力(σ_{bp})

$$\sigma_{bp} = \frac{F_{bp}}{n_{f1} \cdot A_{b1}} \dots\dots\dots (4.6.1)$$

ここで、

引張力 F_{bp} は、解析結果より得られた値を用いる。

取付ボルトの軸断面積 A_{b1} は、

$$A_{b1} = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \dots\dots\dots (4.6.2)$$

(2) せん断応力

取付ボルトに対するせん断力は、取付ボルト1本で受けるものとして計算する。

せん断応力(τ_{bp})

$$\tau_{bp} = \frac{Q_{bp}}{n_1 \cdot A_{b1}} \dots\dots\dots (4.6.3)$$

ここで、

せん断力 Q_{bp} は、解析結果より得られた値を用いる。

4.6.4 アンカボルト

アンカボルトについては、自重、鉛直方向地震力及び水平方向地震力によって生じる、引張力及びせん断力について計算する。

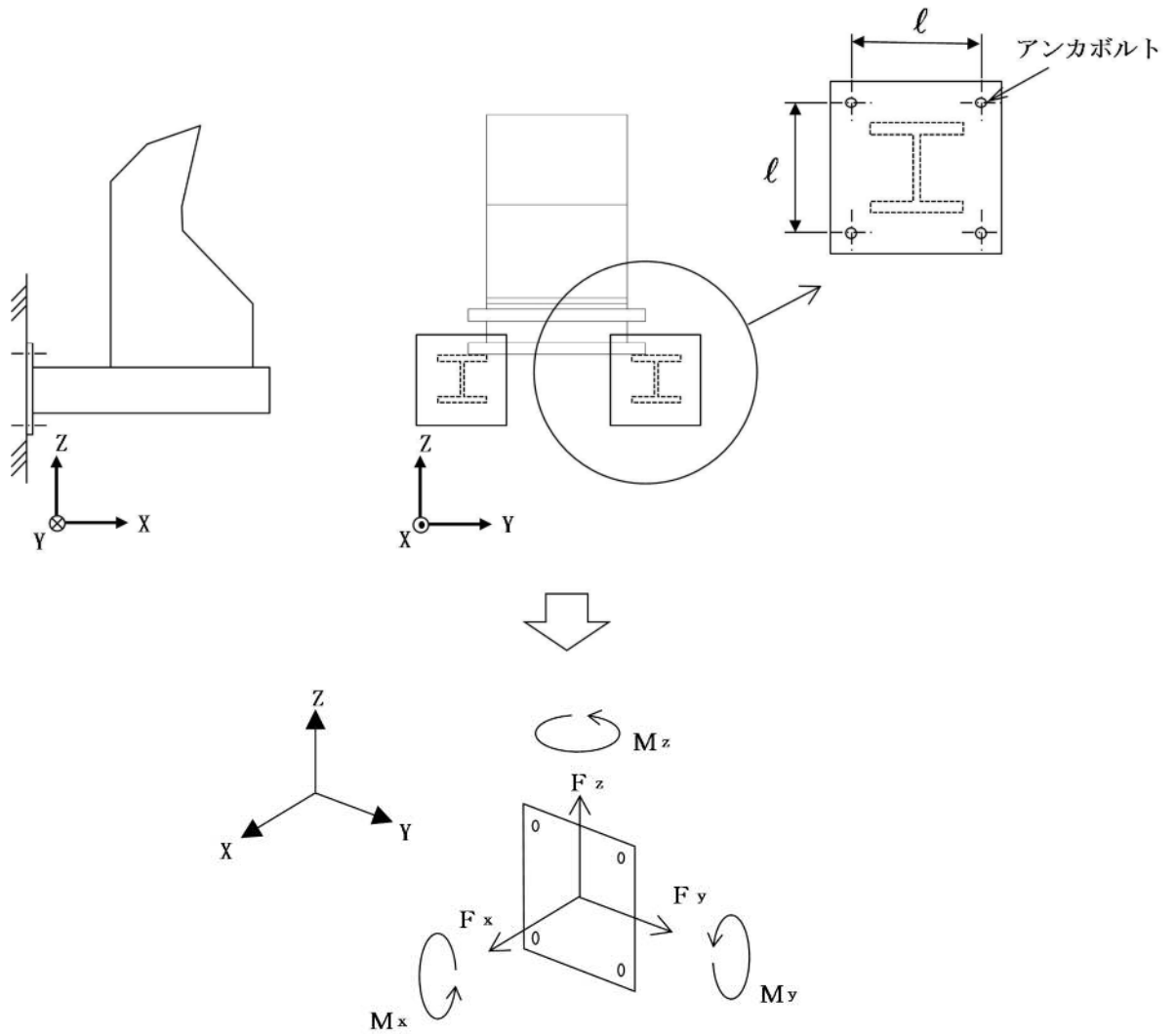


図4-4 計算モデル (架台アンカボルト部)

(1) 引張応力

アンカボルトに対する引張応力は、下式により計算する。

引張応力(σ_{ba})

$$\sigma_{ba} = \frac{F_x}{n_{f2} \cdot A_{b2}} + \frac{M_y}{n_{f3} \cdot \ell \cdot A_{b2}} + \frac{M_z}{n_{f3} \cdot \ell \cdot A_{b2}} \cdots \cdots (4.6.4)$$

ここで、

引張力 F_x 及びモーメント M_y , M_z は、解析結果より得られた値を用いる。

アンカボルトの軸断面積 A_{b2} は、

$$A_{b2} = \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2 \cdots \cdots (4.6.5)$$

(2) せん断応力

アンカボルトに対するせん断応力は、下式により計算する。

せん断応力(τ_{ba})

$$\tau_{ba} = \frac{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}{n_2 \cdot A_{b2}} + \frac{M_x}{n_2 \cdot \frac{\sqrt{2} \ell}{2} \cdot A_{b2}} \cdots \cdots (4.6.6)$$

ここで、

せん断力 F_y , F_z 及びモーメント M_x は、解析結果より得られた値を用いる。

4.7 計算条件

応力解析に用いる計算条件は、本計算書の【静的触媒式水素再結合器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 本体及び架台の応力評価

4.6.1及び4.6.2項で求めた本体及び架台の応力は許容応力 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	$\frac{F^*}{1.5} \times 1.5$

4.8.2 取付ボルト及びアンカボルトの応力評価

4.6.3項で求めた取付ボルトの引張応力 σ_{b_p} 及び4.6.4項で求めたアンカボルトの引張応力 σ_{b_a} は次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \dots\dots\dots (4.8.1)$$

せん断応力 τ_{b_p} 及び τ_{b_a} はせん断力のみを受ける取付ボルト及びアンカボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} 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_{to}	$\frac{F^*}{2} \times 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \times 1.5$

5. 評価結果

5.1 重大事故等対処設備としての評価結果

静的触媒式水素再結合器の重大事故等時の状態を考慮した場合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。

【静的触媒式水素再結合器の耐震性についての計算結果】

1. 重大事故等対処設備

1.1 設計条件

機器名称	設備分類	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		
静的触媒式水素 再結合器	常設/緩和	<input type="text"/> EL. 46.5 *1 (EL. 57.0 *2)	<input type="text"/>		—	—	C _H =2.09*4	C _V =1.77*4	300	<input type="text"/> (300*5)

注記 *1: 基準床レベルを示す。

*2: 壁に設置した架台に取り付けられた機器のため、設置床上階の設計用地震力を使用する。

*3: 固有値解析より 0.05 秒以下であることを確認した。

*4: 基準地震動 S_s の震度に地盤部物性のばらつきを考慮した設計震度

*5: 周囲環境温度は であるが、保守的に機器の最高使用温度である 300°C を使用する。

1.2 機器要目

m _o (kg)	ℓ (mm)	E (MPa)	E _s (MPa)	G (MPa)	G _s (MPa)	A _{b1} (mm ²)	A _{b2} (mm ²)	n ₁	n _{f1} * 1 1	n ₂	n _{f2}	n _{f3}
<input type="text"/>	<input type="text"/>	176000	185000	67700	71200	113.1 (M12)	201.1 (M16)	1	1 1	4	4	2

注記 *: 上段は短辺方向転倒に対する評価時の要目を示し、下段は長辺方向転倒に対する評価時の要目を示す。

部 材	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F* (MPa)
本 体	127	391	171
架 台	170	373	204
取付ボルト	127	391	171
アンカボルト	170	373	204

1.3 計算数値

1.3.1 取付ボルトに作用する力 (単位：N)

部 材	$F_{b p}$	$Q_{b p}$
取付ボルト	6.578×10^2	1.368×10^3

1.3.2 アンカボルトに作用する力

部 材	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_x (N・mm)	M_y (N・mm)	M_z (N・mm)
アンカボルト	1.560×10^3	1.284×10^3	2.078×10^3	3.301×10^4	1.214×10^6	6.108×10^5

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		

1.4.2 応力及び許容荷重 (単位：MPa)

部 材	材 料	応 力	基準地震動 S _s	
			算 出 応 力	許 容 応 力
本 体	SUS304 相当 	組 合 せ	$\sigma_p = 121$	$f_t = 171$
架 台	SS400	組 合 せ	$\sigma_s = 16$	$f_t = 204$
取付ボルト	SUS304	引 張 り	$\sigma_{bp} = 6$	$f_{ts} = 128^*$
		せ ん 断	$\tau_{bp} = 12$	$f_{sb} = 98$
アンカボルト	SS400	引 張 り	$\sigma_{ba} = 22$	$f_{ts} = 122^*$
		せ ん 断	$\tau_{ba} = 4$	$f_{sb} = 94$

すべて許容応力以下である。

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

