

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-19-0226_改0
提出年月日	2021年7月16日

VI-2-6-5-4-4-2 格納容器内水素濃度(S/C)の耐震性についての計算書

2021年7月
東北電力株式会社

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	6
3.	評価部位	7
4.	固有周期	7
4.1	固有値解析方法	7
4.2	解析モデル及び諸元	7
4.3	固有値解析結果	9
5.	構造強度評価	10
5.1	構造強度評価方法	10
5.2	荷重の組合せ及び許容応力	10
5.2.1	荷重の組合せ及び許容応力状態	10
5.2.2	許容応力	10
5.2.3	使用材料の許容応力評価条件	10
5.3	設計用地震力	13
5.4	計算方法	14
5.4.1	応力の計算方法	14
5.5	計算条件	17
5.5.1	計器取付ボルトの応力計算条件	17
5.6	応力の評価	17
5.6.1	計器取付ボルトの応力評価	17
6.	機能維持評価	18
6.1	電氣的機能維持評価方法	18
7.	評価結果	19
7.1	重大事故等対処設備としての評価結果	19

1. 概要

本計算書は、添付書類「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及び機能維持の設計方針に基づき、格納容器内水素濃度(S/C)が設計用地震力に対して十分な構造強度及び電氣的機能を有していることを説明するものである。

格納容器内水素濃度(S/C)は、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、重大事故等対処設備としての構造強度評価及び電氣的機能維持評価を示す。

構造強度評価については計器取付ボルトに作用する応力の裕度が厳しい条件（許容値／発生値の小さい方）となるものを代表して評価する。また、電氣的機能維持評価に用いる機能維持評価用加速度は、設置床高さが同じで、同構造の場合は同じ加速度となることから、構造強度評価の代表として選定した検出器を代表として評価する。評価対象を表 1-1 に示す。

表 1-1 概略構造識別

評価部位	評価方法	構造計画
D23-H ₂ E102A（代表） D23-H ₂ E102B	5. 構造強度評価	表 2-1 構造計画

2. 一般事項

2.1 構造計画

格納容器内水素濃度(S/C)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>検出器は、計器取付ボルトにより計器取付金具に固定される。</p> <p>計器取付金具は、サプレッションチェンバ内に溶接で設置する。</p>	<p>水素吸蔵材料式水素検出器</p> <p>(検出器は、サプレッションチェンバに設置された計器取付金具に計器取付ボルトにより固定される構造)</p>	<p>【格納容器内水素濃度(S/C) (D23-H₂E102A)】</p> <p>溶接部</p> <p>サプレッションチェンバ</p> <p>計器取付金具</p> <p>上面</p> <p>計器取付ボルト</p> <p>溶接部</p> <p>360</p> <p>625</p> <p>正面</p> <p>検出器</p> <p>溶接部</p> <p>448</p> <p>側面</p> <p>(単位：mm)</p>

2.2 評価方針

格納容器内水素濃度(S/C)の応力評価は、添付書類「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、「2.1 構造計画」にて示す格納容器内水素濃度(S/C)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. 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、「5. 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。また、格納容器内水素濃度(S/C)の機能維持評価は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」にて設定した電氣的機能維持の方針に基づき、地震時の応答加速度が電氣的機能確認済加速度以下であることを、「6. 機能維持評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「7. 評価結果」に示す。

格納容器内水素濃度(S/C)の耐震評価フローを図2-1に示す。

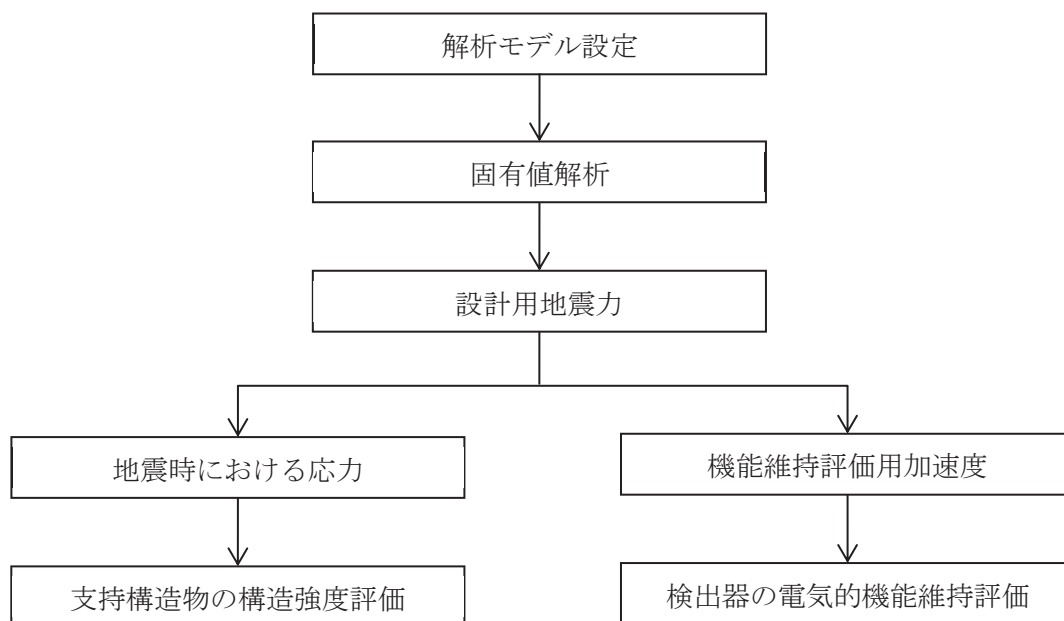


図2-1 格納容器内水素濃度(S/C)の耐震評価フロー

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。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 -1987)
- (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)
- (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)
- (4) J S M E S N C 1 -2005/2007 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (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_b	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	ボルトの呼び径	mm
F	設計・建設規格 SSB-3131 に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3133 に定める値	MPa
F_b	ボルトに作用する引張力 (1 本当たり)	N
F_{b1}	鉛直方向地震及び壁掛の取付面に対し左右方向の水平方向地震によりボルトに作用する引張力 (1 本当たり)	N
F_{b2}	鉛直方向地震及び壁掛の取付面に対し前後方向の水平方向地震によりボルトに作用する引張力 (1 本当たり)	N
f_{sb}	せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 (f_s を 1.5 倍した値又は f_s^* 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 倍した値又は 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
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
h_2	取付面から重心までの距離	mm
l_3	評価上の支点と重心までの距離	mm
l_a	側面(左右)ボルト間の距離	mm
l_b	上下ボルト間の距離	mm
m	検出器の質量	kg
n	ボルトの本数	—
n_{fV}	評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数(側面方向)	—
n_{fH}	評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数(正面方向)	—
Q_b	ボルトに作用するせん断力	N
Q_{b1}	水平方向地震によりボルトに作用するせん断力	N
Q_{b2}	鉛直方向地震によりボルトに作用するせん断力	N

記号	記号の説明	単位
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
$S_y (R T)$	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
π	円周率	—
σ_b	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

計算精度は、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 に示すとおりである。

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
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	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位*3

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

格納容器内水素濃度(S/C)の耐震評価は、「5.1 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計器取付ボルトについて実施する。格納容器内水素濃度(S/C)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. 固有周期

4.1 固有値解析方法

格納容器内水素濃度(S/C)の固有値解析方法を以下に示す。

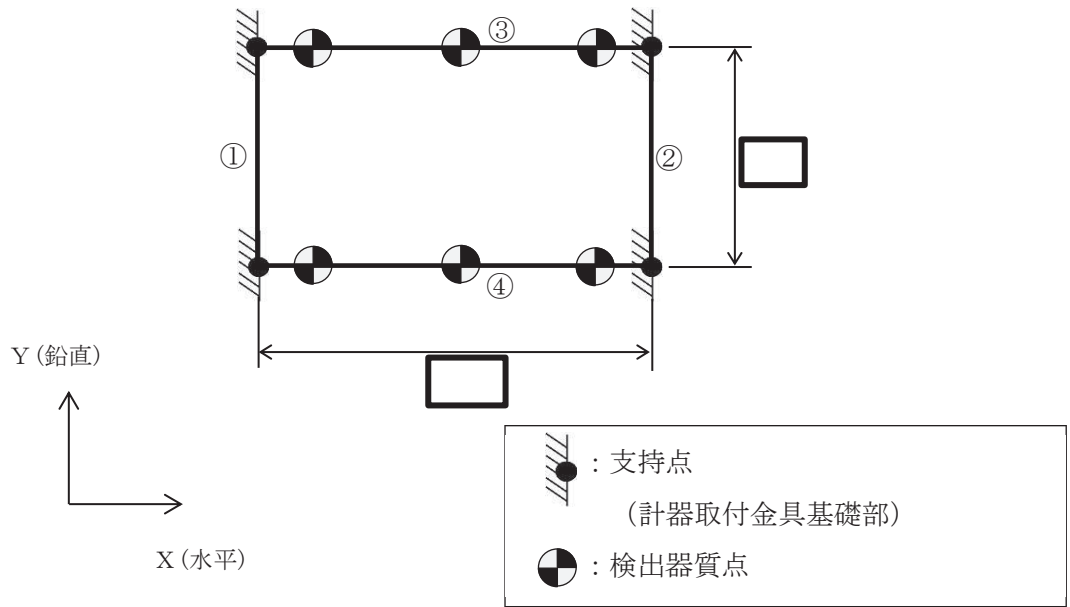
- (1) 格納容器内水素濃度(S/C)は、「4.2 解析モデル及び諸元」に示す三次元はりモデルとして考える。

4.2 解析モデル及び諸元

格納容器内水素濃度(S/C)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、機器の諸元を本計算書の【格納容器内水素濃度(S/C) (D23-H₂E102A) の耐震性についての計算結果】のその他の機器要目に示す。

- (1) 計器取付金具はサプレッションチェンバ内に固定されることから、①から④の部材で組まれた支持構造物とみなし、支持点（計器取付金具基礎部）4点で固定されるものとする。
- (2) 解析モデルにおいて、検出器の質量は計器取付金具の検出器取付位置に分散されるものとする。
- (3) 拘束条件として、支持点（計器取付金具基礎部）のX Y Z方向及び回転方向を固定する。
- (4) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (5) 解析コードは、「NX 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、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



(単位：mm)

図 4-1 格納容器内水素濃度(S/C)解析モデル

4.3 固有値解析結果

固有値解析結果を表 4-1 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 4-1 固有値解析結果

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

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.2 項(1)～(4)のほか、次の条件で計算する。

- (1) 地震力は、格納容器内水素濃度(S/C)に対して、水平方向及び鉛直方向から同時に作用するものとする。
- (2) 格納容器内水素濃度(S/C)は、計器取付ボルトにより計器取付金具に固定されるものとする。
- (3) 格納容器内水素濃度(S/C)の質量は、検出器を考慮する。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

格納容器内水素濃度(S/C)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 5-1 に示す。

5.2.2 許容応力

格納容器内水素濃度(S/C)の許容応力は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表 5-2 に示す。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

格納容器内水素濃度(S/C)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を表 5-3 に示す。

表 5-1 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*1	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
計測制御 系統施設	計測装置	格納容器内水素濃度(S/C)	常設耐震／防止 常設／緩和	—*2	$D + P_D + M_D + S_s$ *3	IV _A S
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	V _A S (V _A SとしてIV _A Sの許容限界を用いる。)

注記*1：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*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 5-2 許容応力（重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力	
	引張り	せん断
IV _{AS}	1.5・f _t *	1.5・f _s *
V _{AS} (V _{AS} としてIV _{AS} 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 5-3 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 (℃)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		計器取付ボルト		周囲環境温度	200	120

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.3 設計用地震力

耐震評価に用いる設計用地震力を表 5-4 に示す。

「基準地震動 S_s 」による地震力は、添付書類「VI-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 5-4 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)		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
原子炉建屋 O.P. -0.80 (O.P. -8.10 ^{*1})		0.05 以下 ^{*2}	—	—	$C_H=0.99$	$C_V=0.69$

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：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。

5.4 計算方法

5.4.1 応力の計算方法

5.4.1.1 計器取付ボルトの計算方法

計器取付ボルトの応力は、地震による震度により作用するモーメントによって生じる引張力とせん断力について計算する。

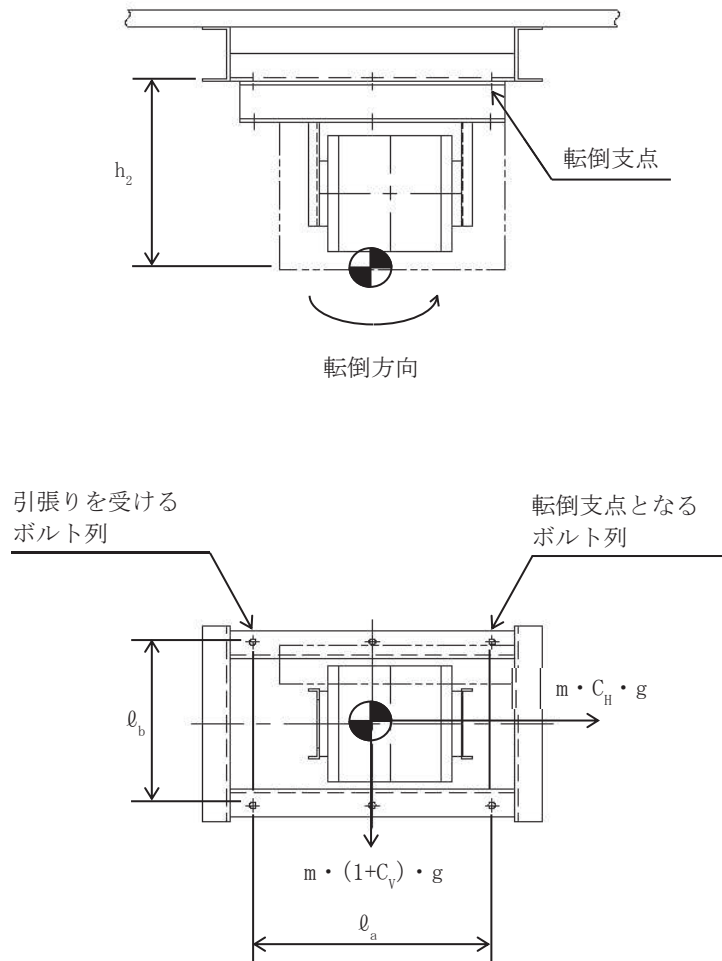


図5-1 計算モデル（水平方向転倒の場合）

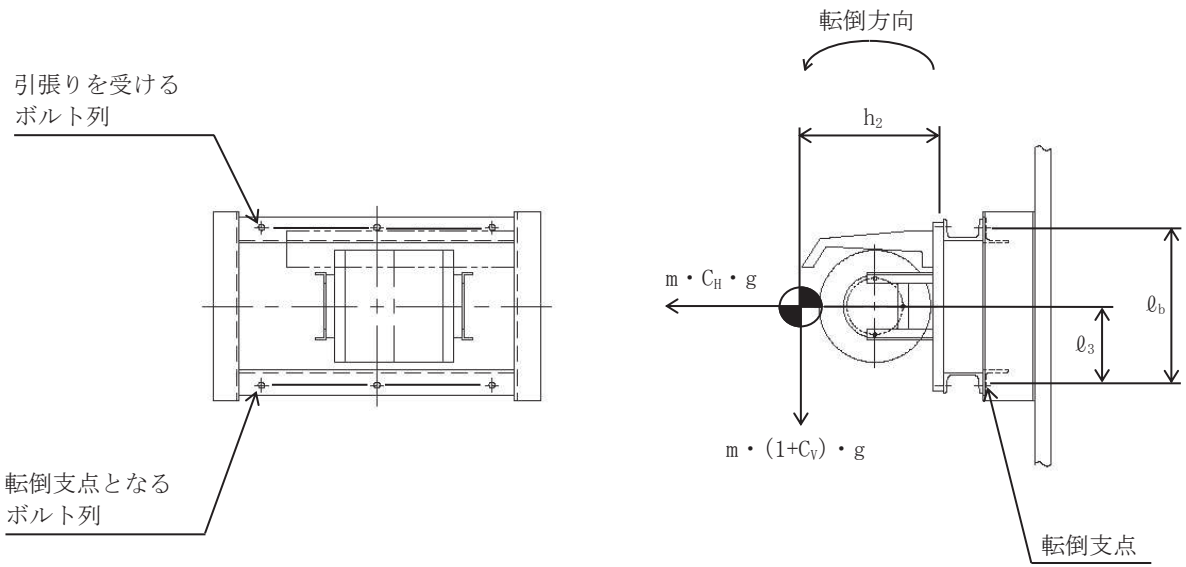


図5-2 計算モデル（鉛直方向転倒の場合）

(1) 引張応力

計器取付ボルトに対する引張力は、最も厳しい条件として、図5-1及び図5-2でそれぞれのボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の最外列の計器取付ボルトで受けるものとして計算する。

引張力

$$F_{b1} = m \cdot g \cdot \left(\frac{C_H \cdot h_2}{n_{fH} \cdot \ell_a} + \frac{(1 + C_V) \cdot h_2}{n_{fV} \cdot \ell_b} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.1)$$

$$F_{b2} = m \cdot g \cdot \left(\frac{C_H \cdot \ell_3 + (1 + C_V) \cdot h_2}{n_{fV} \cdot \ell_b} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.2)$$

$$F_b = \text{Max} (F_{b1}, F_{b2}) \dots\dots\dots (5.4.1.1.3)$$

引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} \dots\dots\dots (5.4.1.1.4)$$

ここで、取付ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots\dots\dots (5.4.1.1.5)$$

ただし、 F_b が負のときボルトには引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

計器取付ボルトに対するせん断力は、計器取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力

$$Q_{b1} = m \cdot g \cdot C_H \dots\dots\dots (5.4.1.1.6)$$

$$Q_{b2} = m \cdot g \cdot (1 + C_V) \dots\dots\dots (5.4.1.1.7)$$

$$Q_b = \sqrt{(Q_{b1})^2 + (Q_{b2})^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.8)$$

せん断応力

$$\tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (5.4.1.1.9)$$

5.5 計算条件

5.5.1 計器取付ボルトの応力計算条件

計器取付ボルトの応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【格納容器内水素濃度(S/C) (D23-H₂E102A) 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。

5.6 応力の評価

5.6.1 計器取付ボルトの応力評価

5.4.1.1項で求めたボルトの引張応力 σ_b 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。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \dots\dots\dots (5.6.1.1)$$

せん断応力 τ_b は、せん断力のみを受ける計器取付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}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 機能維持評価

6.1 電氣的機能維持評価方法

格納容器内水素濃度(S/C)の電氣的機能維持評価について以下に示す。

なお、機能維持評価用加速度は、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき、基準地震動 S_s により定まる応答加速度を設定する。

格納容器内水素濃度(S/C)の機能確認済加速度は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき、同形式の検出器単体の正弦波加振試験において、電氣的機能の健全性を確認した器具の最大加速度を適用する。

機能確認済加速度を表 6-1 に示す。

表 6-1 機能確認済加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)

評価部位	方向	機能確認済加速度
格納容器内水素濃度(S/C) (D23-H ₂ E102A)	水平方向	
	鉛直方向	

7. 評価結果

7.1 重大事故等対処設備としての評価結果

格納容器内水素濃度(S/C)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及び電氣的機能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。

(2) 機能維持評価結果

電氣的機能維持評価の結果を次頁以降の表に示す。

【格納容器内水素濃度(S/C) (D23-H₂E102A) 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		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	
格納容器内水素濃度 (S/C) (D23-H ₂ E102A)	常設耐震/防止 常設/緩和	原子炉建屋 O.P. -0.80 (O.P. -8.10*1)		0.05 以下*2	—	—	C _H =0.99	C _V =0.69	200

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：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。

1.2 機器要目

部 材	m (kg)	h ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ _a (mm)	ℓ _b (mm)	d (mm)	A _b (mm ²)	n	n _{fV}	n _{fH}	
計器取付ボルト		348							6	3	2

部 材	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)	転倒方向	
						弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
計器取付ボルト	120	407	175	—	162	—	水平方向

1.3 計算数値

1.3.1 ボルトに作用する力 (単位：N)

部 材	F _b		Q _b	
	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
計器取付ボルト	—		—	

1.4 結論

1.4.1 ボルトの応力 (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
計器取付ボルト		引張り	—	—	σ _b =6	f _{ts} =121*
		せん断	—	—	τ _b =2	f _{sb} =93

注記*：f_{ts}=Min[1.4・f_{to}-1.6・τ_b, f_{to}]より算出。

すべて許容応力以下である。

21

1.4.2 電氣的機能維持の評価結果 (×9.8m/s²)

		機能維持評価用加速度*	機能確認済加速度
格納容器内水素濃度 (S/C) (D23-H ₂ E102A)	水平方向	0.82	
	鉛直方向	0.57	

注記*：基準地震動 S_s により定まる応答加速度とする。

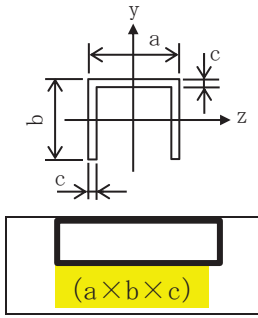
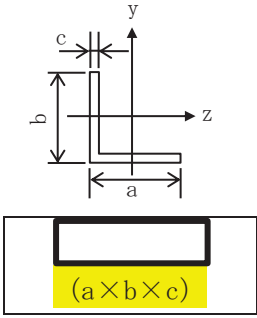
機能維持評価用加速度 (1.0ZPA) は、すべて機能確認済加速度以下である。

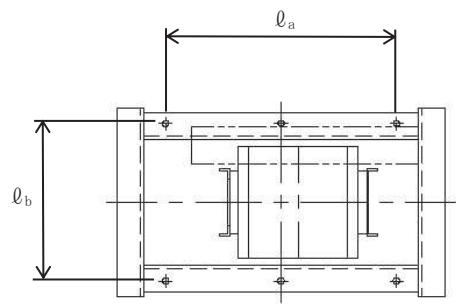
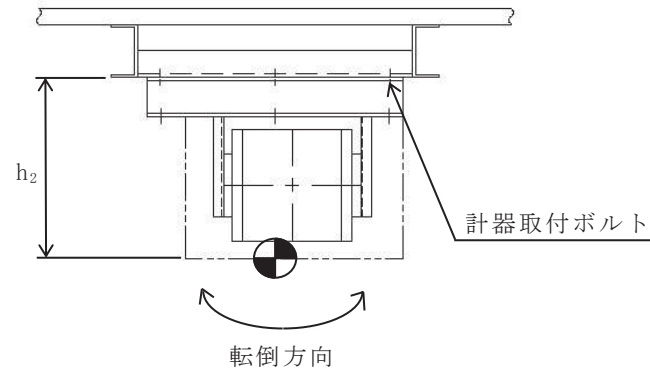
1.5 その他の機器要目

(1) 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材質	—	—	
質量	m_a	kg	
温度条件 (雰囲気温度)	T	°C	200
縦弾性係数	E	MPa	
ポアソン比	ν	—	
要素数	—	個	
節点数	—	個	

(2) 部材の機器要目

材料		
対象要素	①-②	③-④
A (mm ²)		
I _y (mm ⁴)		
I _z (mm ⁴)		
I _p (mm ⁴)		
断面形状 (mm)	 <p>(a×b×c)</p>	 <p>(a×b×c)</p>



正面（水平方向）

