

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-19-0188_改0
提出年月日	2021年6月17日

VI-2-別添 2-6 逆流防止装置の耐震性についての計算書

2021年6月

東北電力株式会社

目 次

1.	概要	1
2.	一般事項	2
2.1	配置概要	2
2.2	構造計画	3
2.3	評価方針	3
2.4	適用規格	5
2.5	記号の説明	6
3.	評価部位	8
4.	固有周期	9
4.1	固有周期の計算方法	9
4.2	固有周期の計算条件	11
4.3	固有周期の計算結果	11
5.	構造強度評価	12
5.1	構造強度評価方法	12
5.2	荷重及び荷重の組合せ	13
5.3	許容限界	14
5.4	設計用地震力	16
5.5	計算方法	17
5.6	計算条件	19
6.	機能維持評価	20
6.1	機能維持評価方法	20
7.	評価結果	21

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-2-別添 2-1 溢水防護に係る施設の耐震計算の方針」に従い、逆流防止装置が設計用地震力に対して、主要な構造部材が十分な構造健全性を有することを確認するものである。評価は、逆流防止装置の固有値解析、応力評価、機能維持評価及び構造健全性評価により行う。

逆流防止装置は、浸水防護施設としてCクラス施設に分類される。

2. 一般事項

2.1 配置概要

逆流防止装置の設置位置を表 2-1 に示す。

表 2-1 逆流防止装置の設置位置

機器名称	建屋	設置階	高さ (mm)
逆流防止装置	原子炉建屋	地下 3 階	O.P. -8100
	制御建屋	地下 2 階	O.P. 1500

2.2 構造計画

逆流防止装置は、フロート式の逆止弁であり、配管内で逆流が発生するとフロートが押上げられ、弁座に密着することで止水する。逆流防止装置の構造計画を表 2-2 に示す。

表 2-2 構造計画

計画の概要			概略構造図
型式	主体構造	支持構造	
外ねじ 取付型	弁座を含む弁本体、弁体であるフロート及びフロートを弁座に導くフロートガイドで構成する。	配管のねじ切り部に直接ねじ込み固定とする。	

2.3 評価方針

逆流防止装置の耐震評価は、添付書類「VI-2-別添 2-1 浸水防護に係る施設の耐震計算の方針」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、「2.2 構造計画」に示す逆流防止装置の構造を踏まえ、「3. 評価部位」にて設定する評価部位において、「4. 固有周期」にて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、逆流防止装置の機能維持評価は、逆流防止装置の固有周期を考慮して評価用加速度を設定し、設定した評価用加速度が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。さらに、構造健全性評価により耐震評価を実施する評価部位については、逆流防止装置の機能維持評価結果に基づき構造健全性を確認することで実施する。応力評価、機能維持評価及び構造健全性評価の評価結果を「7. 評価結果」にて確認する。

なお、機能確認済加速度には、正弦波加振試験において、止水性の機能の健全性を確認した加振波の最大加速度を適用する。

耐震評価フローを図 2-1 に示す。

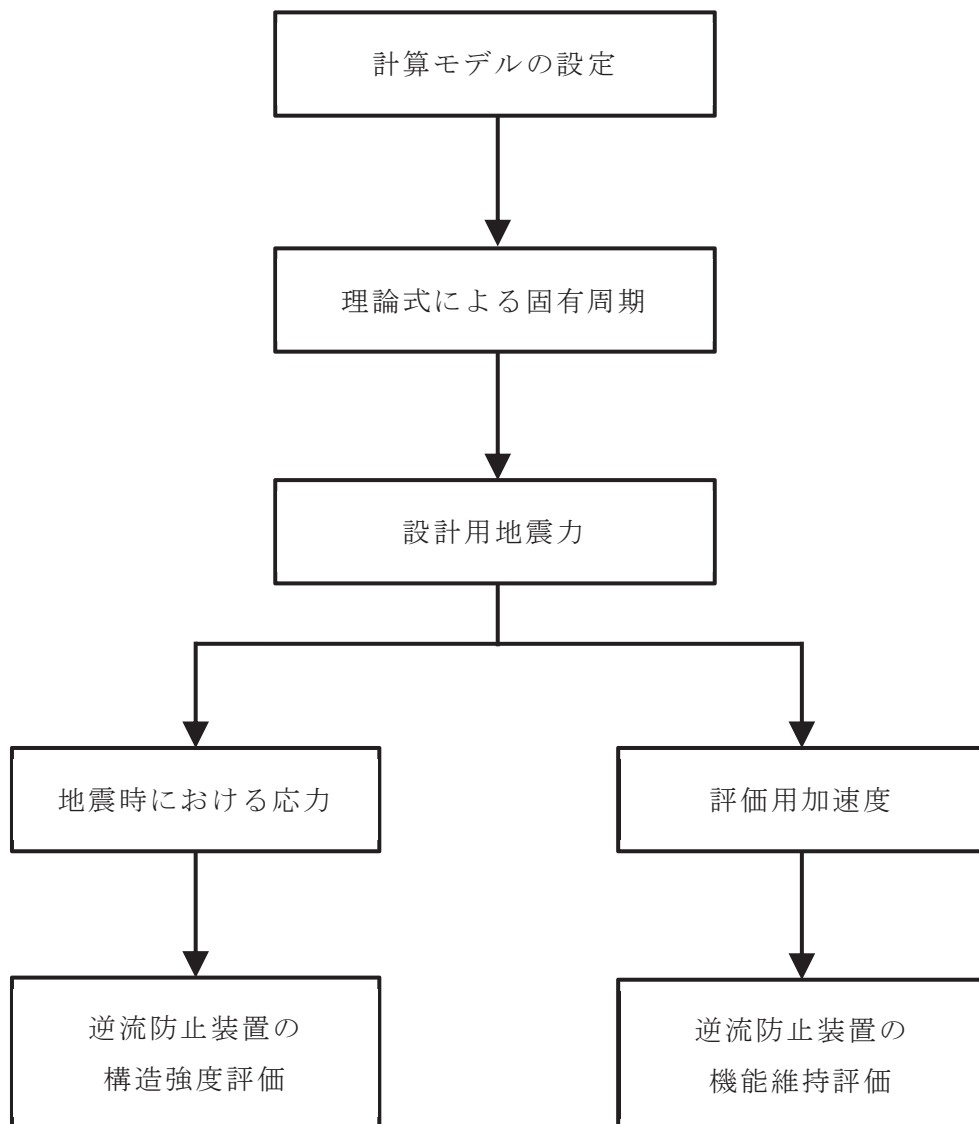


図 2-1 耐震評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- (1) 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1 -2005/2007」((社) 日本機械学会 (以下「設計・建設規格」という。))
- (2) 「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)
- (3) 「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)
- (4) 「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)
- (5) 機械工学便覧 ((社) 日本機械学会)
- (6) 日本産業規格 (J I S)

2.5 記号の説明

逆流防止装置の固有周期の計算に用いる記号を表2-3に, 応力評価に用いる記号を表2-4にそれぞれ示す。

表 2-3 逆流防止装置の固有周期の計算に用いる記号

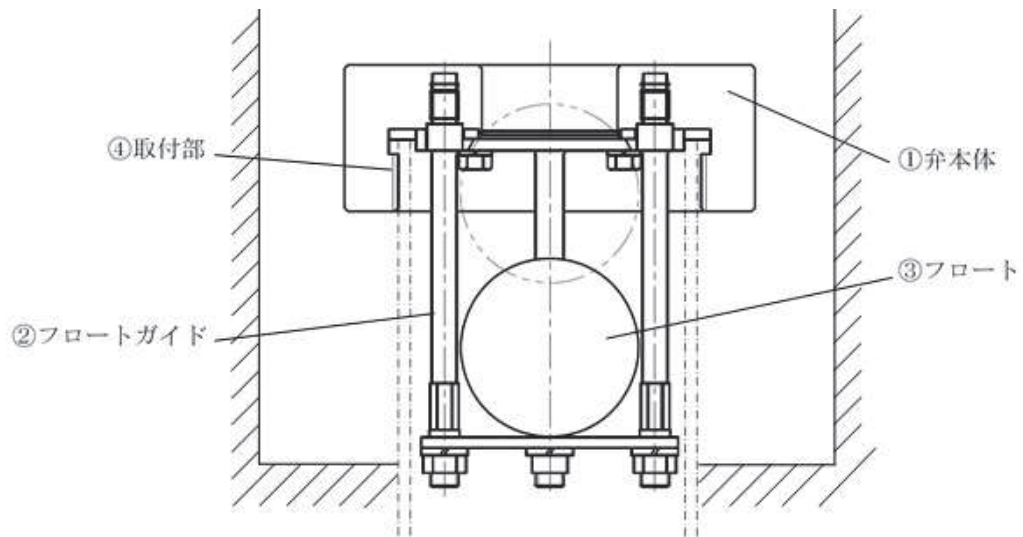
記号	記号の説明	単位
A	モデル化に用いるフロートガイドの有効断面積	mm ²
d _m	モデル化に用いる弁本体の内径	mm
D _{f m}	モデル化に用いるフロートガイドの直径	mm
D _m	モデル化に用いる弁本体の外径	mm
E	モデル化に用いるフロートガイドの縦弾性係数	MPa
f	逆流防止装置の一次固有振動数	Hz
T	逆流防止装置の固有周期	s
I _a	モデル化に用いるフロートガイド1本の断面二次モーメント	mm ⁴
I _m	モデルの等価断面二次モーメント	mm ⁴
I _{m1}	モデル化に用いる弁本体の断面二次モーメント	mm ⁴
I _{m2}	モデル化に用いるフロートガイド4本の等価断面二次モーメント	mm ⁴
k	モデルのばね定数	N/m
ℓ ₁	モデル化に用いる弁本体の長さ	mm
ℓ ₂	モデル化に用いるフロートガイドの長さ	mm
m	モデル化に用いる弁の全質量	kg
yg	フロートガイドの図心GとX軸の距離	mm

表 2-4 逆流防止装置の応力評価に用いる記号

記号	記号の説明	単位
C_H	基準地震動 S_s による水平方向の設計震度	—
C_V	基準地震動 S_s による鉛直方向の設計震度	—
A_1	弁本体の断面積	mm^2
A_2	フロートガイドの最小断面積	mm^2
d_1	弁本体の内径	mm
D_1	弁本体の外径	mm
D_2	フロートガイドの最小直径	mm
F_{H1}	弁本体の最下端に加わる水平方向地震荷重	N
F_{H2}	フロートガイドの最下端に加わる水平方向地震荷重	N
F_{V1}	弁本体に加わる鉛直方向地震荷重	N
F_{V2}	フロートガイドに加わる鉛直方向地震荷重	N
g	重力加速度	m/s^2
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 鉄鋼材料(ボルト材を除く)の各温度における許容引張応力	MPa
I_1	弁本体の断面二次モーメント	mm^4
I_2	フロートガイドの断面二次モーメント	mm^4
L_1	弁全体の長さ	mm
L_2	フロートガイドの長さ	mm
m_1	弁の全質量	kg
m_2	フロートガイド 1 本当たりの質量	kg
M_1	弁本体に発生する曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_2	フロートガイドに発生する曲げモーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
W_{d1}	弁全体の常時荷重	N
W_{d2}	フロートガイド 1 本当たりに作用する常時荷重	N
σ_{H1}	弁本体に加わる曲げ応力	MPa
σ_{H2}	フロートガイドの最小断面積に加わる曲げ応力	MPa
σ_{V1}	弁本体に加わる引張応力	MPa
σ_{V2}	フロートガイドの最小断面積に加わる引張応力	MPa

3. 評価部位

逆流防止装置は、弁本体、フロート、フロートガイド等で構成されている。耐震評価においては、応力評価による評価部位として、弁本体及びフロートガイドを選定し、構造健全性評価による評価部位としてフロート及び取付部を選定する。また、機能維持評価による評価部位として、逆流防止装置を選定する。逆流防止装置の評価部位について図 3-1 に示す。



図中の①及び②は応力評価による評価部位を、③及び④は構造健全性評価による評価部位を、それぞれ示す。

図 3-1 逆流防止装置の評価部位

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

逆流防止装置の構造に応じて、保守的に固有周期が大きく算出されるよう、より柔くなるようにモデル化し、固有周期を算出する。また、その場合においても固有周期が 0.05s 以下であることを確認する。

(1) 解析モデル

質量の不均一性を考慮し、一方の端を固定端、他方の端を自由端の 1 質点系モデルとして、自由端に弁の全質量 m が集中したモデルを組む。モデル化は、円筒状の弁本体及び円柱状の 4 本のフロートガイドの異なる 2 つの断面をもつ梁の組合せとして設定する。モデル化の概略を図 4-1 に示す。

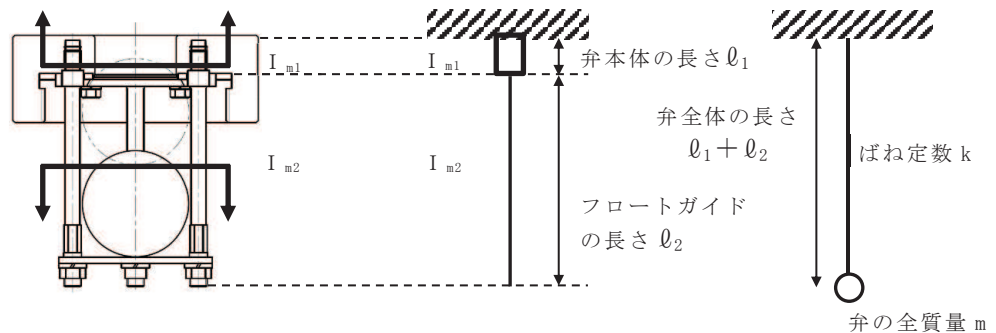


図 4-1 モデル化の概略

(2) 固有周期の計算

固有周期の計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

固有周期 T を以下の式より算出する。

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I_m}{(\ell_1 + \ell_2)^3} \cdot 10^3$$

モデルの等価断面二次モーメント I_m の算出過程を以下に示す。

a. モデル化に用いる弁本体の断面二次モーメント

モデル化に用いる弁本体の断面二次モーメント I_{m1} は、以下の式より算出する。

$$I_{m1} = (D_m^4 - d_m^4) \cdot \frac{\pi}{64}$$

b. モデル化に用いるフロートガイド 4 本の等価断面二次モーメント

平行軸の定理から、フロートガイドの図心 G と X 軸の距離 y_g を用いて、モデル化に用いるフロートガイド 4 本の等価断面二次モーメント I_{m2} は、以下の式より算出する。フロートガイド 4 本の断面を図 4-2 に示す。

$$I_a = D_{fm}^4 \cdot \frac{\pi}{64}$$

$$I_{m2} = 2 \cdot I_a + 2 \cdot \left(I_a + (y_g)^2 \cdot A \right)$$

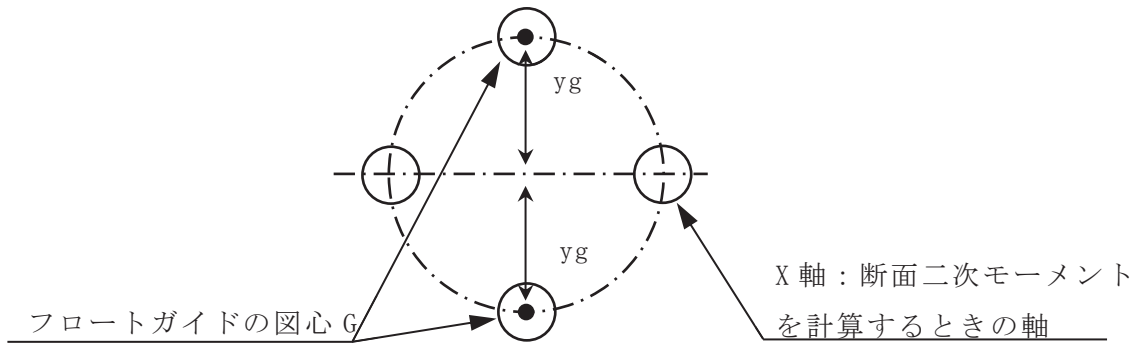


図 4-2 フロートガイド 4 本の断面

c. モデルの等価断面二次モーメント

モデルの等価断面二次モーメント I_m は、以下の式より算出する。

$$I_m = \frac{(\ell_1 + \ell_2)^3 \cdot I_{m1} \cdot I_{m2}}{I_{m1} \cdot \ell_2^3 + I_{m2} \cdot (\ell_1^3 + 3 \cdot \ell_1 \cdot \ell_2^2 + 3 \cdot \ell_1^2 \cdot \ell_2)}$$

4.2 固有周期の計算条件

表 4-1 に固有周期の計算条件を示す。

表 4-1 固有周期の計算条件

フロートガイドの材質	モデル化に用いる弁の全質量 m (kg)	モデル化に用いる弁本体の外径 D _m (mm)	モデル化に用いる弁本体の内径 d _m (mm)	モデル化に用いるフロートガイドの直径 D _{f m} (mm)
SUS304	2.90	75	38	6.6

フロートガイドの図心GとX軸の距離 y _g (mm)	モデル化に用いる弁本体の長さ l ₁ (mm)	モデル化に用いるフロートガイドの長さ l ₂ (mm)	モデル化に用いるフロートガイドの縦弾性係数* E (MPa)
30	41	102	1.922×10 ⁵

注記 * : 「5.3 許容限界」における温度条件での縦断性係数Eを用いる。

4.3 固有周期の計算結果

表 4-2 に固有周期の計算結果を示す。固有周期は、0.05s 以下であることから、剛構造である。

表 4-2 固有周期の計算結果

固有周期 (s)
0.002

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

逆流防止装置の耐震評価は、添付書類「VI-2-別添 2-1 浸水防護に係る施設の耐震計算の方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、「3. 評価部位」にて設定する評価部位に作用する応力等が「5.3 許容限界」にて示す許容限界以下であることを確認する。

5.2 荷重及び荷重の組合せ

5.2.1 荷重の設定

(1) 固定荷重 (D)

常時作用する荷重として、弁全体の自重 W_{d1} 及びフロートガイドの自重 W_{d2} を考慮し、以下の式より算出する。

$$W_{d1} = m_1 \cdot g$$

$$W_{d2} = m_2 \cdot g$$

(2) 基準地震動 S_s による地震荷重 (S_s)

基準地震動 S_s による地震荷重 F_{H1} , F_{V1} , F_{H2} , F_{V2} を考慮し、以下の式より算出する。

$$F_{H1} = m_1 \cdot C_H \cdot g$$

$$F_{H2} = m_2 \cdot C_H \cdot g$$

$$F_{V1} = m_1 \cdot C_V \cdot g$$

$$F_{V2} = m_2 \cdot C_V \cdot g$$

5.2.2 荷重の組合せ

逆流防止装置の耐震計算にて考慮する荷重の組合せ及び許容応力状態を表 5-1 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分	機器名称	耐震重要度分類	荷重の組合せ ^{*1*2}	許容応力状態
浸水防護施設	逆流防止装置	C	$D + P_D +$ $M_D + S_s$	Ⅲ _A S

注記

*1: Dは固定荷重, P_D は最高使用圧力による荷重, M_D は機械的荷重及び S_s は基準地震動 S_s による地震荷重を示す。

*2: P_D 及び M_D は荷重がかからないため考慮しない。D及び S_s の組合せが荷重を緩和する方向に作用する場合, 保守的にこれを組合せない評価を実施する。

5.3 許容限界

逆流防止装置の弁本体，フロートガイドの許容限界を表 5-2 に，弁本体，フロートガイドの許容応力評価条件を表 5-3 にそれぞれに示す。また，弁本体，フロートガイドの許容応力算出結果を表 5-4 にそれぞれ示す。

表 5-2 弁本体，フロートガイドの許容限界

許容応力状態	許容限界 ^{*1}		
	一次応力		
	引張	曲げ	組合せ ^{*2}
Ⅲ _A S ^{*3}	1.2・S	1.2・S	1.2・S

注記 *1：引張及び曲げ応力は，「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）を準用し，「管」の許容限界のうちクラス 2，3 配管に対する許容限界に準じて設定する。

*2：引張と曲げ応力の組合せである。

*3：地震後，当該構造物全体の変形に対して止水性を有するよう，設備を構成する材料が弾性域内に収まることを基本とする。

表 5-3 弁本体，フロートガイドの許容応力評価条件

評価部位	材 料	温度条件 (°C)	S ^{*1} (MPa)
弁本体	SUS303	60	127
フロートガイド	SUS304		127

注記 *1：鉄鋼材料（ボルト材を除く）の許容引張応力を示す。

表 5-4 弁本体，フロートガイドの許容応力算出結果

許容応力状態	評価部位	許容限界		
		一次応力		
		引 張 1.2・S (MPa)	曲 げ 1.2・S (MPa)	組合せ 1.2・S (MPa)
Ⅲ _A S	弁本体	152	152	152
	フロートガイド	152	152	152

5.4 設計用地震力

「4. 固有周期」に示したとおり逆流防止装置の固有周期が 0.05s 以下であることを確認したため、逆流防止装置の耐震計算に用いる設計震度は、添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に示す逆流防止装置における設置床の最大応答加速度の 1.2 倍を考慮して設定する。逆流防止装置の耐震計算に用いる設計震度を表 5-5 に示す。

表 5-5 設計用地震力

地震動	据付場所及び床面高さ* ¹ (mm)	地震による設計震度* ² * ³	
		基準地震動 S _s	制御建屋地下 2 階 O.P. 1500
鉛直方向 C _V	0.79		

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：「4. 固有周期」より、逆流防止装置の固有周期が 0.05s 以下であることを確認したため、設置床の最大応答加速度の 1.2 倍を考慮した設計震度を設定した。

*3：耐震計算に用いる設計震度は、逆流防止装置が設置されている各基準床レベルのうち、鉛直方向及び水平方向の最大設計震度を設定した。

5.5 計算方法

(1) 弁本体

弁本体の発生応力を算出する。弁本体の応力評価に用いる断面積 A_1 は、図 5-1 に示すとおり、弁本体のうち最も肉厚が薄い断面を適用する。

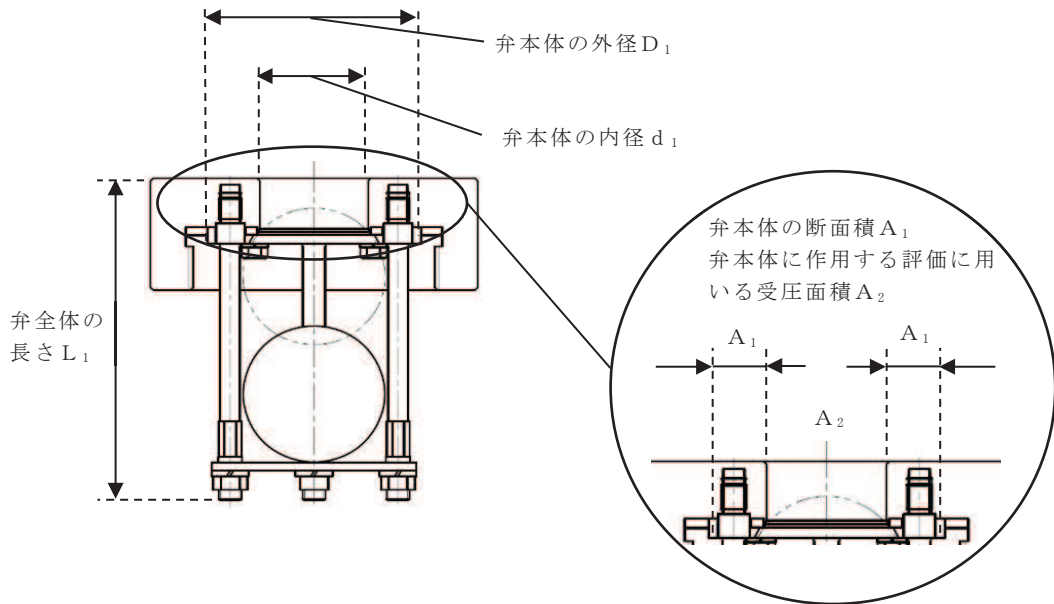


図 5-1 逆流防止装置本体の構造図

a. 鉛直応答加速度負荷時

鉛直応答加速度により、弁本体に加わる引張応力 σ_{V1} を以下の式より算出する。

$$\sigma_{V1} = \frac{W_{d1} + F_{V1}}{A_1}$$

b. 水平応答加速度負荷時

弁体の最下端に集中荷重が負荷された片持ち梁として、水平応答加速度により、弁本体に加わる曲げ応力 σ_{H1} を以下の式より算出する。

$$M_1 = F_{H1} \cdot L_1$$

$$I_1 = (D_1^4 - d_1^4) \cdot \frac{\pi}{64}$$

$$\sigma_{H1} = \frac{M_1 \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)}{I_1}$$

(2) フロートガイド

フロートガイドの応力評価に用いるフロートガイドの最小断面積 A_2 は、以下の図 5-2 に示すフロートガイドの最小直径 D_2 から求める。フロートガイドの最小断面積 A_2 はフロートガイドのうち最も小さい径の断面を適用する。

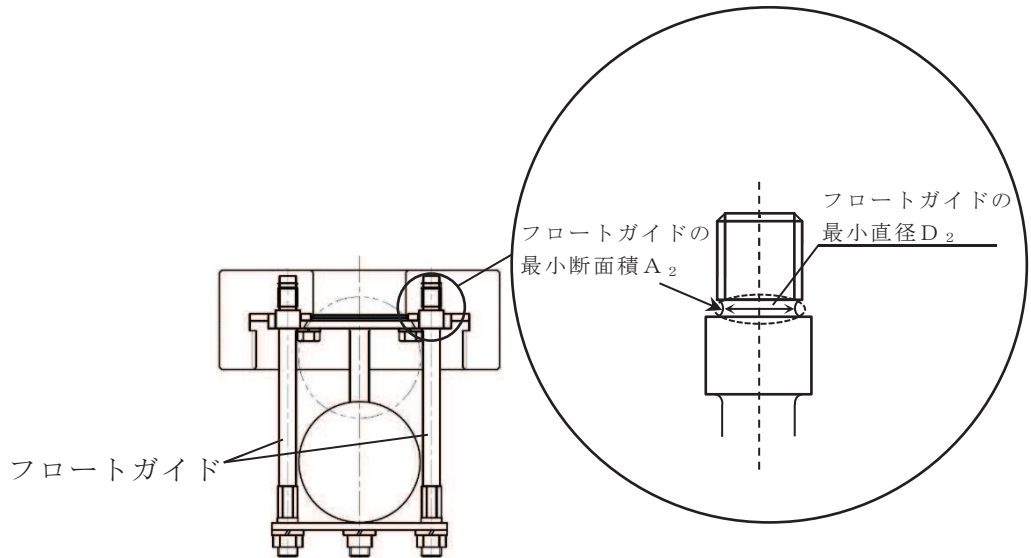


図 5-2 フロートガイドの応力評価に用いる断面積

a. 鉛直応答加速度負荷時

鉛直応答加速度により、フロートガイドの最小断面積に加わる引張応力 σ_{V2} を以下の式より算出する。

$$\sigma_{V2} = \frac{W_{d2} + F_{V2}}{A_2}$$

b. 水平応答加速度負荷時

フロートガイドの最下端に集中荷重が負荷された片持ち梁として、水平応答加速度により、フロートガイドの最小断面積に加わる曲げ応力 σ_{H2} を以下の式より算出する。

$$M_2 = F_{H2} \cdot L_2$$

$$I_2 = D_2^4 \cdot \frac{\pi}{64}$$

$$\sigma_{H2} = \frac{M_2 \cdot \left(\frac{D_2}{2}\right)}{I_2}$$

5.6 計算条件

逆流防止装置の応力評価に用いる計算条件を表 5-6 に示す。

表 5-6 逆流防止装置の応力評価に用いる計算条件

弁本体の材質	弁本体の断面積 A ₁ (mm ²)	弁の全質量 m ₁ (kg)	弁全体の長さ L ₁ (mm)
SUS303	3284	2.90	120

弁本体の外径 D ₁ (mm)	弁本体の内径 d ₁ (mm)	フロートガイドの 材質	フロートガイドの 最小断面積 A ₂ (mm ²)
75	38	SUS304	34.21

フロートガイドの 1本当たりの質量 m ₂ (kg)	フロートガイドの 長さ L ₂ (mm)	フロートガイドの 最小直径 D ₂ (mm)	重力加速度 g (m/s ²)
0.05	102	6.6	9.80665

6. 機能維持評価

「3. 評価部位」にて評価部位として設定した逆流防止装置の地震時及び地震後の機能維持を確認するため、「6.1 機能維持評価方法」に示すとおり、逆流防止装置の加振試験後に漏えい試験を実施することにより機能維持評価を実施した。

6.1 機能維持評価方法

逆流防止装置の固有周期を考慮して、地震時における逆流防止装置の評価用加速度を設定し、設定した評価用加速度が機能確認済加速度以下であることを確認する。機能確認済加速度には、正弦波加振試験において、止水性の機能の健全性を確認した加振波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。

具体的な機能維持確認として、逆流防止装置に対して、正弦波により水平方向及び鉛直方向の加振試験を実施後、内部溢水水位を上回る圧力として 0.3MPa の水圧にて漏えい試験を実施し、漏えい量が許容漏えい量以下であることを確認した。本漏えい試験の結果により、逆流防止装置の地震時及び地震後の機能維持を確認した。

なお、固有値解析結果より、逆流防止装置の固有周期が 0.05s 以下であることを確認したため、評価用加速度には設置床の最大応答加速度を使用する。

表 6-1 逆流防止装置の機能確認済加速度

評価部位	機能確認済加速度 (×9.8m/s ²)	
	水平方向	鉛直方向
逆流防止装置	6.0	6.0

7. 評価結果

逆流防止装置の耐震評価結果を以下に示す。(1), (2) 及び (3) に示す評価結果から、逆流防止装置が耐震性を有することを確認した。

(1) 基準地震動 S_s に対する評価部位の応力評価

基準地震動 S_s に対する評価部位の応力評価結果を表 7-1 に示す。発生応力が許容応力以下であることから構造部材が構造健全性を有することを確認した。

表 7-1 基準地震動 S_s に対する評価部位の応力評価結果

評価部位	評価応力	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
弁本体	引張	1	152
	曲げ	1	152
	組合せ*	2	152
フロートガイド	引張	1	152
	曲げ	3	152
	組合せ*	4	152

注記 * : 引張 (σ_v) + 曲げ (σ_H) は, $\sigma_v + \sigma_H \leq 1.2 S$ で評価

(2) 基準地震動 S_s に対する逆流防止装置の機能維持評価

逆流防止装置の機能維持評価結果を表 7-2 に示す。表 7-2 に示すとおり評価用加速度が機能確認済加速度以下であることから逆流防止装置の機能維持を確認した。

表 7-2 逆流防止装置の機能維持評価結果

評価部位	設置階 O. P. (mm)	据付場所	機能確認済加速度との比較			
			水平加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)		鉛直加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	
			評価用加速度*	機能確認済加速度	評価用加速度*	機能確認済加速度
逆流防止装置	1500	制御建屋 (地下 2 階)	1.13	6.0	0.66	6.0

注記 * : 「4. 固有周期」より、逆流防止装置の固有周期が 0.05s 以下であることを確認したため、評価用加速度には逆流防止装置が設置されている各基準床レベルのうち最大応答加速度を使用した。

(3) 基準地震動 S_s に対するフロート及び取付部の構造健全性評価

「(2) 基準地震動 S_s に対する逆流防止装置の機能維持評価」に示したとおり逆流防止装置の機能維持を確認したことにより，評価部位であるフロート及び取付部が構造健全性を有することを確認した。