

| | |
|-----------------------|------------------------|
| 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-変 2-工-B-13-0001 改 1 |
| 提出年月日 | 2023年 4月 28日 |

VI-2-10-2 浸水防護施設の耐震性についての計算書

2023年 4月

東北電力株式会社

申請範囲目録

VI-2-10-2 浸水防護施設の耐震性についての計算書

VI-2-10-2-10 逆止弁付ファンネルの耐震性についての計算書

VI-2-10-2-10-1 逆止弁付ファンネル（第2号機）の耐震性についての計算書

VI-2-10-2-10-2 逆止弁付ファンネル（第3号機）の耐震性についての計算書

VI-2-10-2 浸水防護施設の耐震性についての計算書

目 次

VI-2-10-2-10 逆止弁付ファンネルの耐震性についての計算書

〇 2 変二 VI-2-10-2 R 3 E

VI-2-10-2-10 逆止弁付ファンネルの耐震性についての計算書

目 次

- VI-2-10-2-10-1 逆止弁付ファンネル（第2号機）の耐震性についての計算書
- VI-2-10-2-10-2 逆止弁付ファンネル（第3号機）の耐震性についての計算書

VI-2-10-2-10-1 逆止弁付ファンネル（第2号機）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 | 配置概要 | 2 |
| 2.2 | 構造計画 | 3 |
| 2.3 | 評価方針 | 4 |
| 2.4 | 適用規格・基準等 | 6 |
| 2.5 | 記号の説明 | 7 |
| 3. | 評価対象部位 | 8 |
| 4. | 固有値解析 | 9 |
| 4.1 | 固有振動数の計算方法 | 9 |
| 4.1.1 | 解析モデル | 9 |
| 4.1.2 | 記号の説明 | 9 |
| 4.1.3 | 固有振動数の計算 | 10 |
| 4.2 | 固有振動数の計算条件 | 11 |
| 4.3 | 固有振動数の計算結果 | 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 | 12 |
| 5.2.1 | 荷重の設定 | 12 |
| 5.2.2 | 荷重の組合せ | 13 |
| 5.3 | 許容限界 | 13 |
| 5.4 | 設計用地震力 | 15 |
| 5.5 | 計算方法 | 16 |
| 5.5.1 | 弁本体 | 16 |
| 5.5.2 | 弁体 | 17 |
| 5.6 | 計算条件 | 18 |
| 6. | 機能維持評価 | 19 |
| 6.1 | 機能維持評価方法 | 19 |
| 7. | 評価結果 | 20 |
| 7.1 | 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の応力評価 | 20 |
| 7.2 | 基準地震動 S_s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価 | 20 |
| 7.3 | 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の構造健全性評価 | 21 |

1. 概要

本書類は、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に基づき、浸水防護施設のうち逆止弁付ファンネル（第2号機）（以下、逆止弁付ファンネルという。）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。耐震評価は、逆止弁付ファンネルの固有値解析、応力評価、機能維持評価及び構造健全性評価により行う。

逆止弁付ファンネルは、浸水防護施設としてSクラス施設に分類される。以下、浸水防護施設としての構造強度評価を示す。

なお、逆止弁付ファンネルの耐震評価においては、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約1mの地盤沈下が発生したことを考慮する。

2. 一般事項

2.1 配置概要

逆止弁付ファンネルは、第2号機海水ポンプ室の床面に設置する。逆止弁付ファンネルの設置位置図を図2-1に示す。

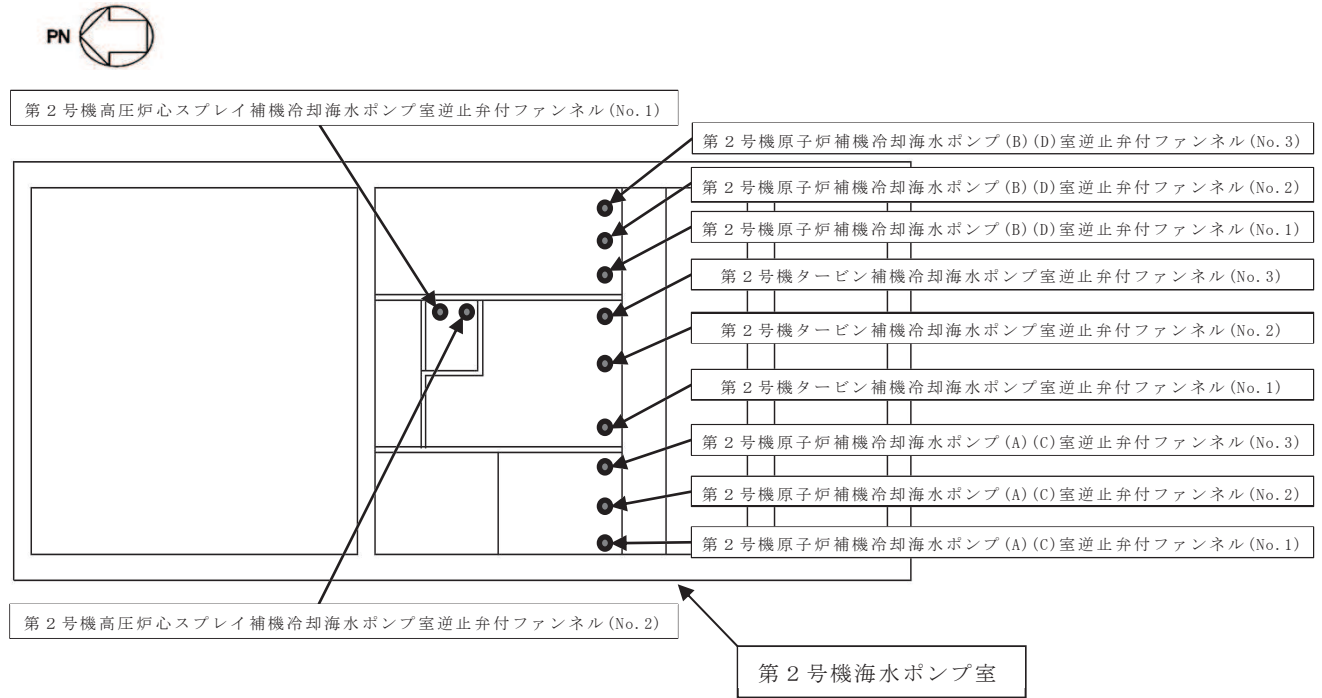
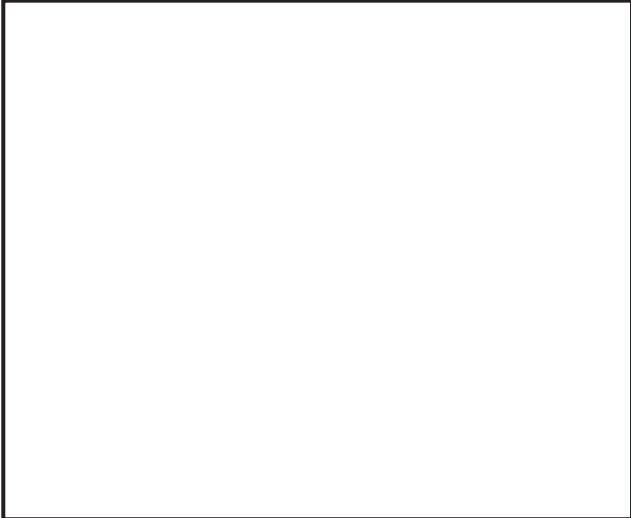


図2-1 逆止弁付ファンネルの設置位置図

2.2 構造計画

逆止弁付ファンネルは、圧縮スプリングのばね圧によりサポータを介して弁体を上側に引き上げていることから、常時弁体と弁座が密着している。弁体と弁座が密着している状態で津波が逆止弁付ファンネルの下側から流入してきた場合、弁体が更に押上げられ、弁座により密着することで止水する。逆止弁付ファンネルの構造計画を表 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 | |
| 第 2 号機海水ポンプ室床面の配管にねじ込み継手で固定する。 | 弁座を含む弁本体及び弁体で構成する。弁体は弁本体に取付金具、取付金具ピンで取付けられる。また、弁体はサポータ、ガイド、圧縮スプリングで保持される。 |  |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.3 評価方針

逆止弁付ファンネルの耐震評価は、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、「2.2 構造計画」にて示す逆止弁付ファンネルの構造を踏まえ、「3. 評価対象部位」にて設定する評価対象部位において、「4. 固有値解析」にて算出した固有振動数に基づく設計用地震力により算出した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。また、逆止弁付ファンネルの機能維持評価は、逆止弁付ファンネルの固有振動数を考慮して機能維持評価用加速度を設定し、設定した機能維持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対象部位については、逆止弁付ファンネル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 2-2 に示す。

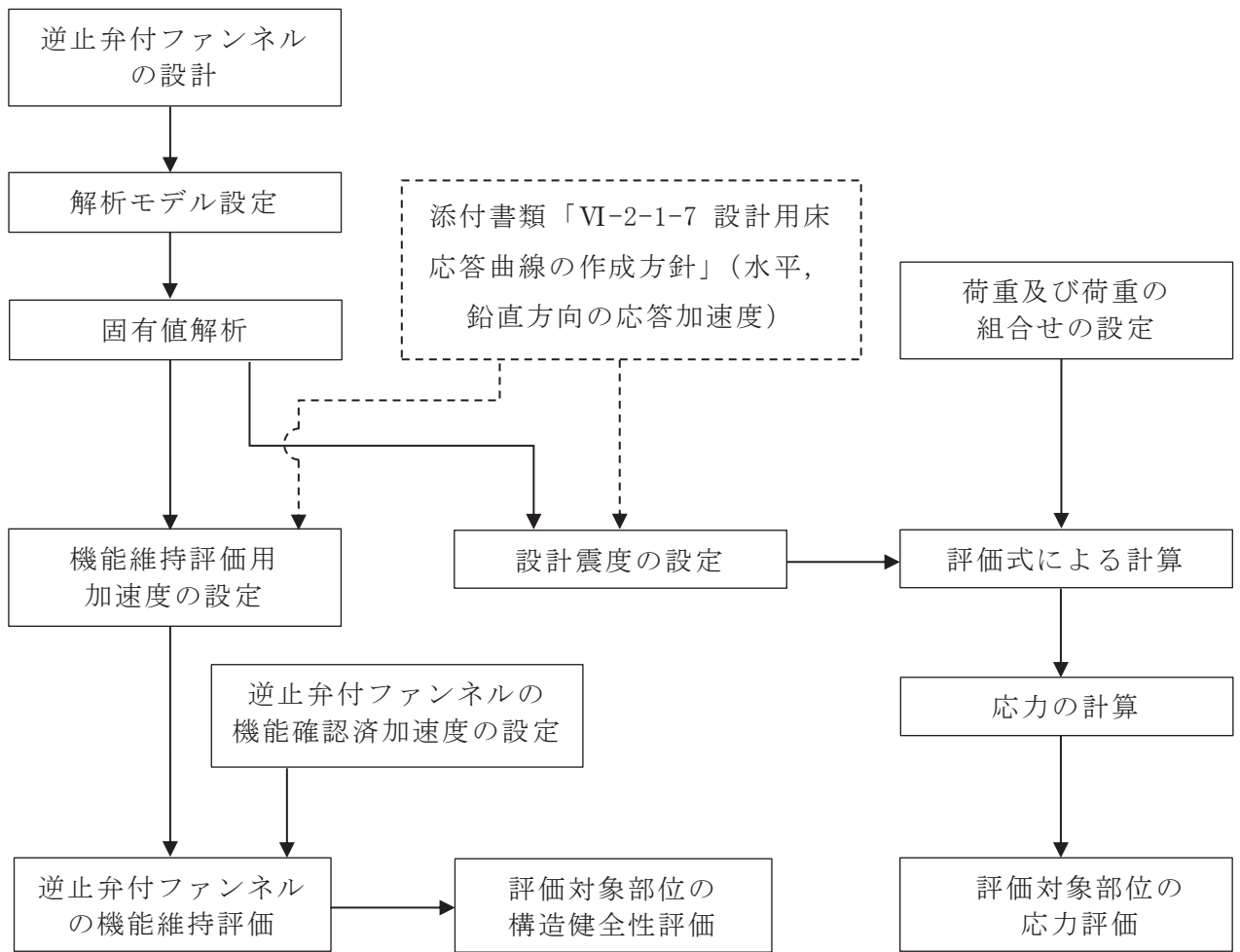


図 2-2 耐震評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格，基準等を以下に示す。

- (1) 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) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 -1987)
- (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)
- (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)
(以下「 J E A G 4 6 0 1 」と記載しているものは上記 3 指針を指す。)
- (5) 機械工学便覧 (日本機械学会)

2.5 記号の説明

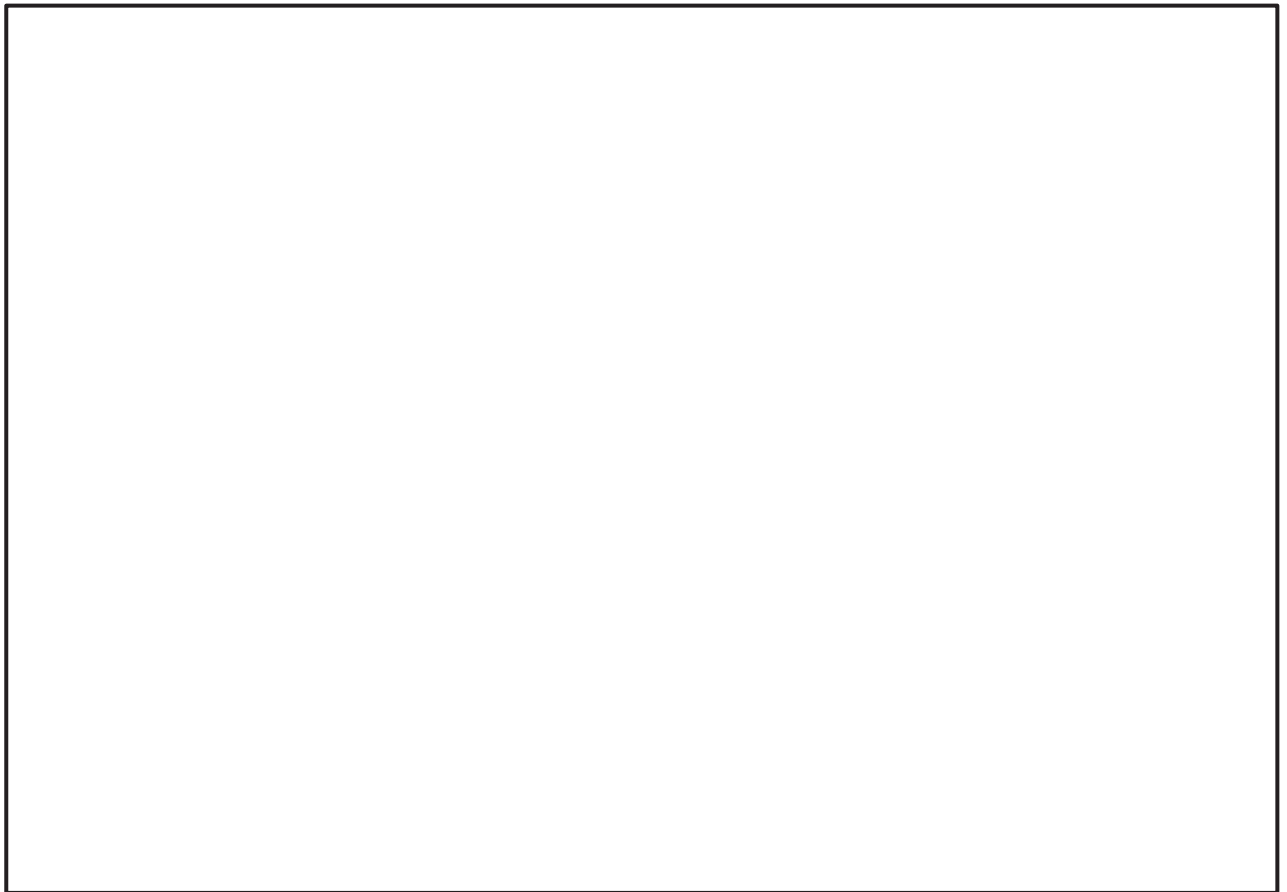
逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる記号を表 2-2 に示す。

表 2-2 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 | 弁体の断面積 | mm^2 |
| D_1 | 弁本体の外径 | mm |
| D_2 | 弁体の外径 | mm |
| d_1 | 弁本体の内径 | mm |
| F_{H1} | 弁本体の最下端に加わる水平方向地震荷重 | N |
| F_{V1} | 弁本体に加わる鉛直方向地震荷重 | N |
| F_{V2} | 弁体に加わる鉛直方向地震荷重 | N |
| g | 重力加速度 | m/s^2 |
| I_1 | 弁本体の断面二次モーメント | mm^4 |
| L_1 | 弁全体の長さ | mm |
| m_1 | 逆止弁付ファンネルの全質量 | kg |
| m_2 | 弁体の質量 | kg |
| t | 弁体の厚さ | mm |
| M_1 | 弁本体に発生する曲げモーメント | $\text{N} \cdot \text{mm}$ |
| D | 固定荷重 | — |
| S | 設計・建設規格の付録材料図表 Part5 表 5 鉄鋼材料の各温度における許容引張応力 | MPa |
| W_{d1} | 逆止弁付ファンネルの自重 | N |
| W_{d2} | 弁体の自重 | N |
| σ_{H1} | 弁本体に加わる曲げ応力 | MPa |
| σ_{V1} | 弁本体に加わる引張応力 | MPa |
| σ_{V2} | 弁体に加わる曲げ応力 | MPa |

3. 評価対象部位

逆止弁付ファンネルは、弁本体及び弁体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対象部位として、弁本体及び弁体を選定し、構造健全性評価による評価対象部位として圧縮スプリング、ガイド、サポータ、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部を選定する。また、機能維持評価による評価対象部位として、逆止弁付ファンネルを選定する。逆止弁付ファンネルの評価対象部位について、図 3-1 に示す。



図中の①～②は応力評価による評価対象部位を、③～⑧は構造健全性評価による評価対象部位をそれぞれ示す。

図 3-1 逆止弁付ファンネルの評価対象部位

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 固有値解析

4.1 固有振動数の計算方法

逆止弁付ファンネルの構造に応じて、保守的に固有振動数が小さく算出されるよう、より柔となるようにモデル化し、固有振動数を算出する。また、その場合においても固有振動数が 20Hz 以上であることを確認する。

4.1.1 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、円筒状の弁本体の断面をもつはりとして設定する。モデル化の概略を図 4-1 に示す。



図 4-1 モデル化の概略

4.1.2 記号の説明

逆止弁付ファンネルの固有振動数算出に用いる記号を表 4-1 に示す。

表 4-1 固有振動数算出に用いる記号

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------|----------------|---------------|
| d_m | モデル化に用いる弁本体の内径 | mm |
| D_m | モデル化に用いる弁本体の外径 | mm |
| E | 弁本体の縦弾性係数 | MPa |
| f | 弁本体の一次固有振動数 | Hz |
| I_m | 弁本体の断面二次モーメント | mm^4 |
| k | ばね定数 | N/m |
| ℓ_1 | 弁本体全体の長さ | mm |
| m | 逆止弁付ファンネルの全質量 | kg |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.1.3 固有振動数の計算

固有振動数の計算に用いる寸法は、公称値を使用する。水平方向の固有振動数 f を以下の式より算出する。なお、鉛直方向の固有振動数については、逆止弁付ファンネルの構造上、水平方向よりも鉛直方向の方が剛構造となるため、水平方向の固有振動数のみを確認する。

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

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I_m}{l_1^3} \times 10^3$$

弁本体の断面二次モーメント I_m の算出過程を以下に示す。モデル化に用いる弁本体の断面二次モーメント I_m は、以下の式より算出する。

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

4.2 固有振動数の計算条件

表 4-2 に固有振動数の計算条件を示す。

表 4-2 固有振動数の計算条件

| 弁本体の材質 | 逆止弁付ファンネル 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) |
|--------|-----------------------------|---|---|
| □ | 1.5 | □ | □ |

| 弁本体の長さ ℓ ₁ (mm) | 弁本体の 縦弾性係数* E (MPa) |
|-------------------------------|---------------------------|
| □ | 1.94 × 10 ⁵ |

注記* : 「5.3 許容限界」における温度条件での縦弾性係数Eを用いる。

4.3 固有振動数の計算結果

表 4-3 に固有振動数の計算結果を示す。固有振動数は、20Hz 以上であることから、剛構造である。

表 4-3 固有振動数の計算結果

| 機器名称 | 固有振動数 (Hz) |
|-----------|---------------|
| 逆止弁付ファンネル | 878 |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

逆止弁付ファンネルの耐震評価は、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. 評価対象部位」にて設定する評価対象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、逆止弁付ファンネルの自重 W_{d1} 及び弁体の自重 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_{V2} を考慮し、以下の式より算出する。

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

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

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

5.2.2 荷重の組合せ

逆止弁付ファンネルの耐震計算にて考慮する荷重の組合せを表 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 |
|--------------------|-----------|---------|
| 浸水防護施設 (浸水防止設備) | 逆止弁付ファンネル | S |

| 荷重の組合せ ^{*1*2} | 許容応力状態 |
|------------------------|------------------|
| D + S _s | Ⅲ _A S |

注記 *1: Dは固定荷重, S_sは基準地震動 S_sによる地震荷重を示す。

*2: 固定荷重 (D) 及び基準地震動 (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

逆止弁付ファンネルの弁本体及び弁体の許容限界を表 5-2 に, 許容応力評価条件を表 5-3 にそれぞれ示す。また, 弁本体及び弁体の許容応力算出結果を表 5-4 にそれぞれ示す。

表 5-2 弁本体及び弁体の許容限界

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

注記 *1: 引張及び曲げは, J E A G 4 6 0 1 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: 引張応力と曲げ応力の組合せ応力である。

*3: 地震後, 津波後の再使用性や津波の繰返し作用を想定し, 当該構造物全体の变形能力に対して浸水防護機能として十分な余裕を有するよう, 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 弁本体及び弁体の許容応力評価条件

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件 (°C) | S * (MPa) |
|--------|----|--------------|--------------|
| 弁本体 | | 40 | 111 |
| 弁体 | | | |

注記*：鉄鋼材料（ボルト材を除く）の許容引張応力を示す。

表 5-4 弁本体及び弁体の許容応力算出結果

| 許容応力状態 | 評価対象 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 | 133 | 133 | 133 |
| | 弁体 | — | 133 | — |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.4 設計用地震力

「4. 固有値解析」に示したとおり，逆止弁付ファンネルの固有振動数が 20Hz 以上であることを確認したため，逆止弁付ファンネル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」に示す逆止弁付ファンネル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。逆止弁付ファンネルの耐震計算に用いる設計震度を表 5-5 に示す。

表 5-5 逆止弁付ファンネルの設計震度

| 地震動 | 床面高さ* ¹ O. P. (mm) | 場所 | 設計震度* ² | |
|--------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------|------|
| | | | | |
| 基準地震動 S s | 1250 | 海水ポンプ室 (補機ポンプエリア) | 水平方向 C _H | 1.83 |
| | | | 鉛直方向 C _V | 1.94 |

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：「4. 固有値解析」より，逆止弁付ファンネルの固有振動数が 20Hz 以上であることを確認したため，海水ポンプ室（補機ポンプエリア）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。

5.5 計算方法

5.5.1 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。

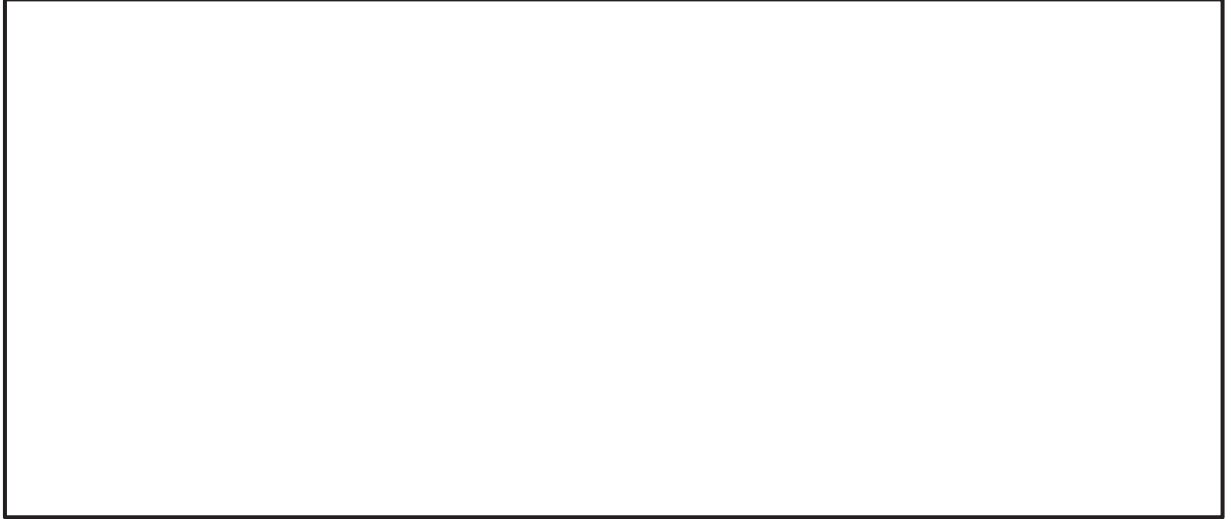


図 5-1 弁本体の構造図

(1) 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。

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

(2) 水平応答加速度負荷時

弁全体の最下端に集中荷重が負荷された片持ちはりとして、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。

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

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

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

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.5.2 弁体

(1) 鉛直応答加速度負荷時

鉛直応答加速度により弁体は弁座に押し付けられ、曲げ応力が発生する。曲げ応力 σ_{v2} を以下の式より算出する。ただし、弁体の自重による荷重 W_{d2} は曲げ応力 σ_{v2} を緩和する方向に作用するため考慮しない。なお、曲げ応力の算出については、機械工学便覧（日本機械学会）より、円板、周辺単純支持、等分布荷重の応力計算式を用いる。

$$\sigma_{v2} = 1.24 \cdot \frac{\left(\frac{W_{d2} + F_{v2}}{A_2} \right)}{t^2} \cdot \left(\frac{D_2}{2} \right)^2$$



図 5-2 弁体に加わる荷重

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.6 計算条件

逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる計算条件を表 5-6 に示す。

表 5-6 逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる計算条件

| 弁本体の材質 | 逆止弁付ファンネル の全質量 m_1 (kg) | 弁全体の長さ L_1 (mm) | 弁本体の外径 D_1 (mm) |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <input type="text"/> | 1.5 | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

| 弁本体の内径 d_1 (mm) | 弁本体の断面積 A_1 (mm ²) |
|-------------------------|--|
| <input type="text"/> | 336.9 |

| 弁体の材質 | 弁体の質量 m_2 (kg) | 弁体の外径 D_2 (mm) | 弁体の厚さ t (mm) |
|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| <input type="text"/> | 0.10 | 61 | 2 |

| 弁体の断面積 A_2 (mm ²) | 重力加速度 g (m/s ²) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 2.922×10^3 | 9.80665 |

6. 機能維持評価

「3. 評価対象部位」にて評価対象部位として設定した逆止弁付ファンネル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、逆止弁付ファンネルの加振試験後に逆止弁付ファンネルの漏えい試験を実施することにより逆止弁付ファンネルの機能維持評価を実施した。

6.1 機能維持評価方法

逆止弁付ファンネルの固有振動数を考慮して、地震時における逆止弁付ファンネルの機能維持評価用加速度を設定し、設定した機能維持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。逆止弁付ファンネルの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、逆止弁付ファンネルに対して、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、VI-1-1-2-2-5「津波防護に関する施設の設計方針」に示す地震後の繰返しの襲来を想定した経路からの津波を想定し、0.18MPa 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。また、最大漏えい量となる水圧 (0.01MPa) においても、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、逆止弁付ファンネルの地震時及び地震後の機能維持を確認した。

なお、固有値解析結果により、逆止弁付ファンネルの固有振動数 20Hz 以上であることを確認したため、機能維持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 逆止弁付ファンネルの機能確認済加速度

| 評価対象部位 | 機能確認済加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$) | |
|-----------|---------------------------------------|------|
| | 水平方向 | 鉛直方向 |
| 逆止弁付ファンネル | 6.0 | 6.0 |

7. 評価結果

7.1 基準地震動 S s に対する評価対象部位の応力評価

基準地震動 S s に対する評価対象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 に対する評価対象部位の応力評価

| 評価対象部位 | 発生応力 (MPa) | | 許容応力 (MPa) |
|--------|---------------|-----|---------------|
| | 弁本体 | 引 張 | 1 |
| 曲 げ | | 1 | 133 |
| 組合せ* | | 2 | 133 |
| 弁体 | 曲 げ | 1 | 133 |

注記 * : 引張 σ_{V1} + 曲げ σ_{H1} は, $\sigma_{V1} + \sigma_{V1} \leq 1.2S$ で評価

7.2 基準地震動 S s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価

基準地震動 S s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価結果を表 7-2 に示す。表 7-2 に示すとおり機能維持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止弁付ファンネルの機能維持を確認した。

表 7-2 逆止弁付ファンネルの機能維持評価結果

| 評価対象 部位 | 床面高さ O.P. (mm) | 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 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$) | |
| | | | 機能維持 評価用 加速度* | 機能確認 済加速度 | 機能維持 評価用 加速度* | 機能確認 済加速度 |
| 逆止弁付 ファンネル | 1250 | 海水ポン プ室 (補 機ポンプ エリア) | 1.53 | 6.0 | 1.61 | 6.0 |

注記 * : 「4. 固有値解析」より, 逆止弁付ファンネルの固有振動数が 20Hz 以上であることを確認したため, 機能維持評価用加速度には海水ポンプ室 (補機ポンプエリア) における最大応答加速度を使用した。

7.3 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の構造健全性評価

「7.2 基準地震動 S_s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価」に示したとおり、逆止弁付ファンネルの機能維持を確認したことにより、評価対象部位である圧縮スプリング、ガイド、サポータ、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部が構造健全性を有することを確認した。

VI-2-10-2-10-2 逆止弁付ファンネル（第3号機）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 | 配置概要 | 2 |
| 2.2 | 構造計画 | 3 |
| 2.3 | 評価方針 | 4 |
| 2.4 | 適用規格・基準等 | 6 |
| 2.5 | 記号の説明 | 7 |
| 3. | 評価対象部位 | 8 |
| 4. | 固有値解析 | 9 |
| 4.1 | 固有振動数の計算方法 | 9 |
| 4.1.1 | 解析モデル | 9 |
| 4.1.2 | 記号の説明 | 9 |
| 4.1.3 | 固有振動数の計算 | 10 |
| 4.2 | 固有振動数の計算条件 | 11 |
| 4.3 | 固有振動数の計算結果 | 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 | 12 |
| 5.2.1 | 荷重の設定 | 12 |
| 5.2.2 | 荷重の組合せ | 13 |
| 5.3 | 許容限界 | 13 |
| 5.4 | 設計用地震力 | 15 |
| 5.5 | 計算方法 | 16 |
| 5.5.1 | 弁本体 | 16 |
| 5.5.2 | 弁体 | 17 |
| 5.6 | 計算条件 | 18 |
| 6. | 機能維持評価 | 19 |
| 6.1 | 機能維持評価方法 | 19 |
| 7. | 評価結果 | 20 |
| 7.1 | 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の応力評価 | 20 |
| 7.2 | 基準地震動 S_s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価 | 20 |
| 7.3 | 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の構造健全性評価 | 21 |

1. 概要

本書類は、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に基づき、浸水防護施設のうち逆止弁付ファンネル（第3号機）（以下、逆止弁付ファンネルという。）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。耐震評価は、逆止弁付ファンネルの固有値解析、応力評価、機能維持評価及び構造健全性評価により行う。

逆止弁付ファンネルは、浸水防護施設としてSクラス施設に分類される。以下、浸水防護施設としての構造強度評価を示す。

なお、逆止弁付ファンネルの耐震評価においては、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約1mの地盤沈下が発生したことを考慮する。

2. 一般事項

2.1 配置概要

逆止弁付ファンネルは、第3号機海水熱交換器建屋の床面に設置する。逆止弁付ファンネルの設置位置図を図2-1に示す。

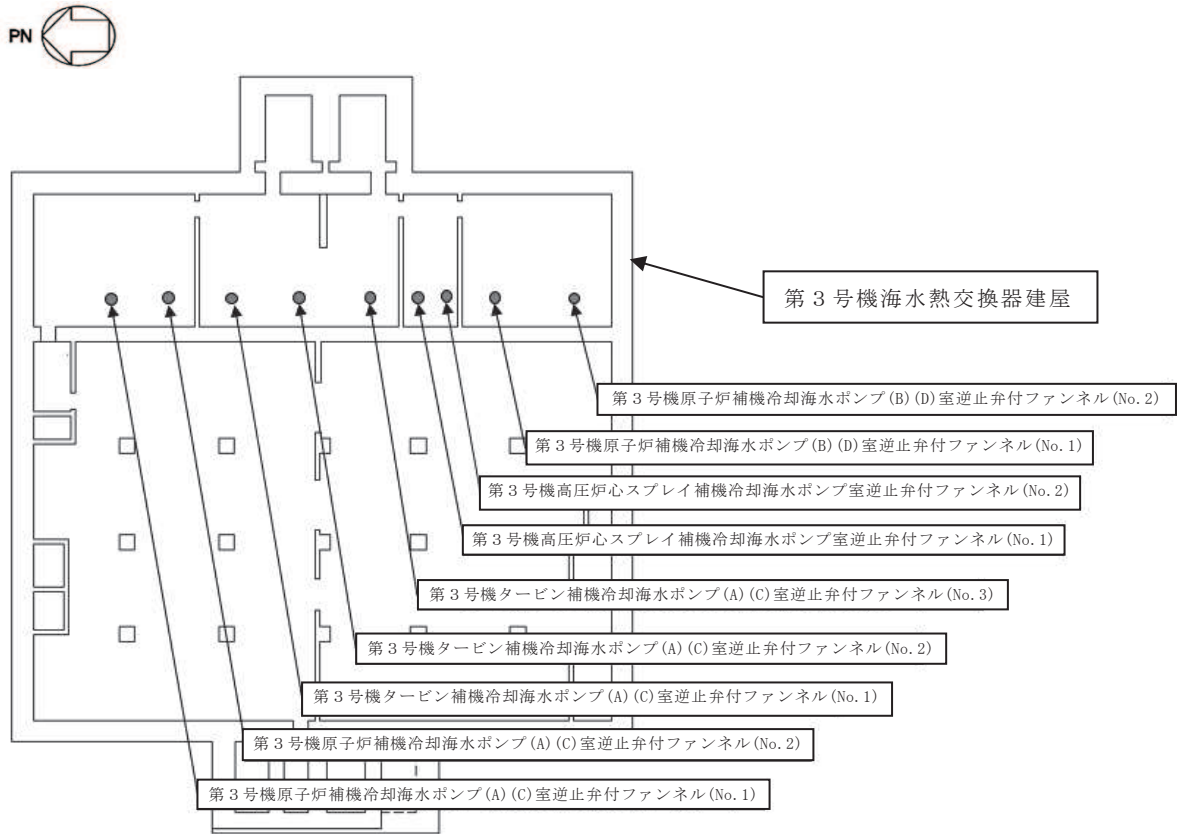
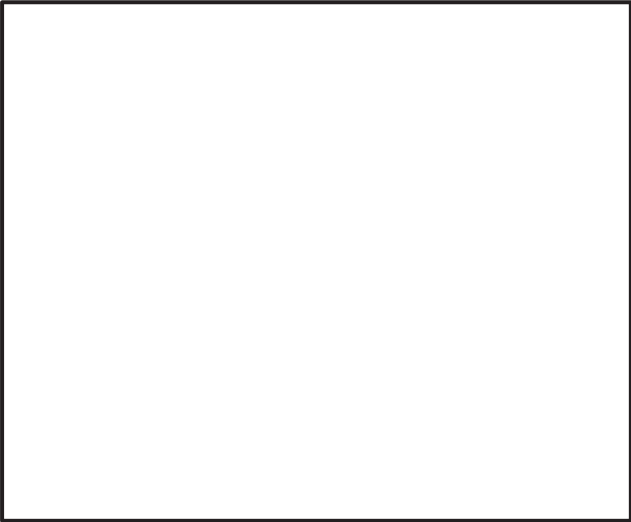


図2-1 逆止弁付ファンネルの設置位置図

2.2 構造計画

逆止弁付ファンネルは、圧縮スプリングのばね圧によりサポータを介して弁体を上側に引き上げていることから、常時弁体と弁座が密着している。弁体と弁座が密着している状態で津波が逆止弁付ファンネルの下側から流入してきた場合、弁体が更に押し上げられ、弁座により密着することで止水する。逆止弁付ファンネルの構造計画を表 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 | |
| 第 3 号機海水熱交換器建屋床面の配管にねじ込み継手で固定する。 | 弁座を含む弁本体及び弁体で構成する。弁体は弁本体に取付金具、取付金具ピンで取付けられる。また、弁体はサポータ、ガイド、圧縮スプリングで保持される。 |  |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.3 評価方針

逆止弁付ファンネルの耐震評価は、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、「2.2 構造計画」にて示す逆止弁付ファンネルの構造を踏まえ、「3. 評価対象部位」にて設定する評価対象部位において、「4. 固有値解析」にて算出した固有振動数に基づく設計用地震力により算出した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。また、逆止弁付ファンネルの機能維持評価は、逆止弁付ファンネルの固有振動数を考慮して機能維持評価用加速度を設定し、設定した機能維持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対象部位については、逆止弁付ファンネル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 2-2 に示す。

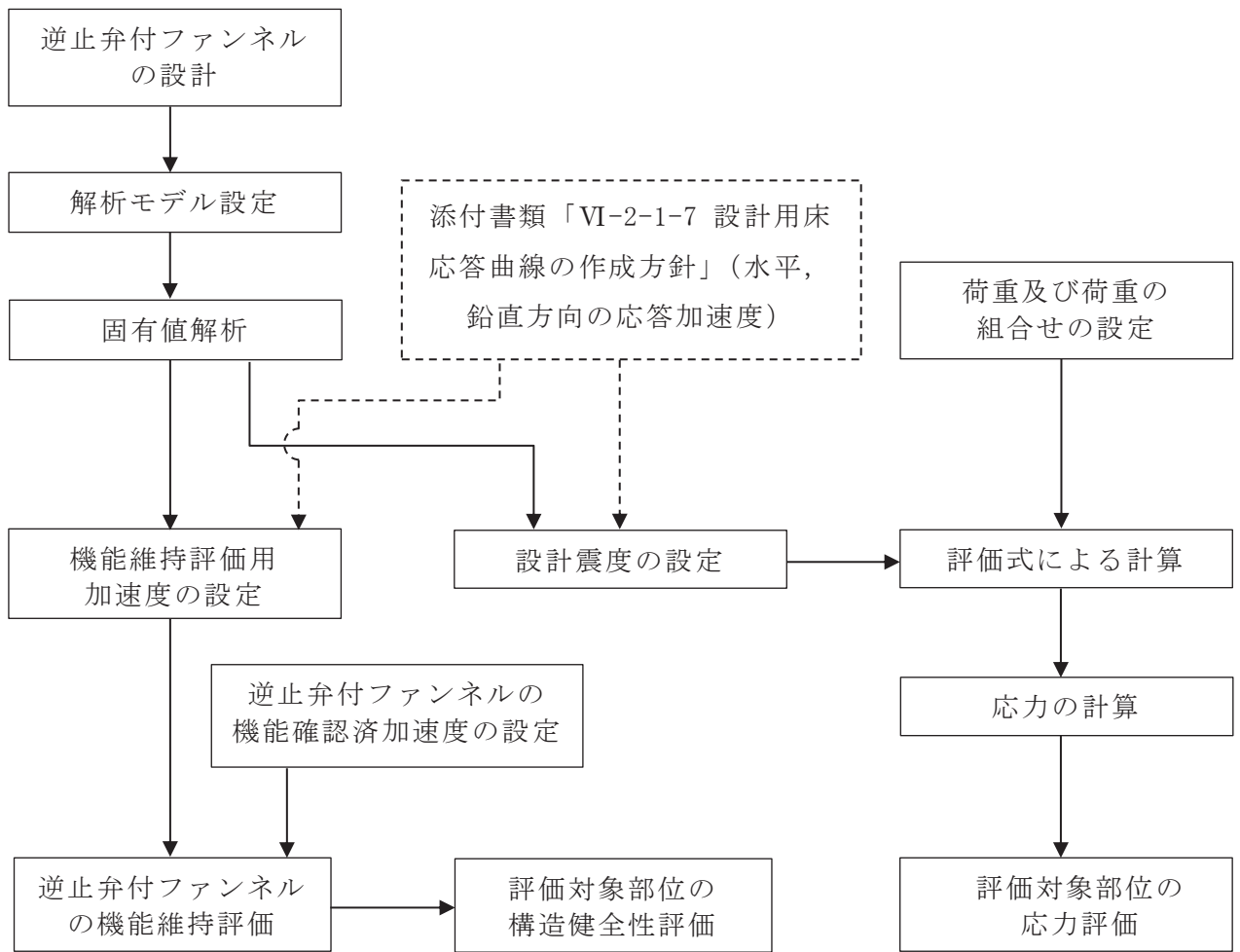


図 2-2 耐震評価フロー

2.4 適用規格・基準等

適用する規格，基準等を以下に示す。

- (1) 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) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 -1987)
- (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)
- (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)
(以下「 J E A G 4 6 0 1 」と記載しているものは上記 3 指針を指す。)
- (5) 機械工学便覧 (日本機械学会)

2.5 記号の説明

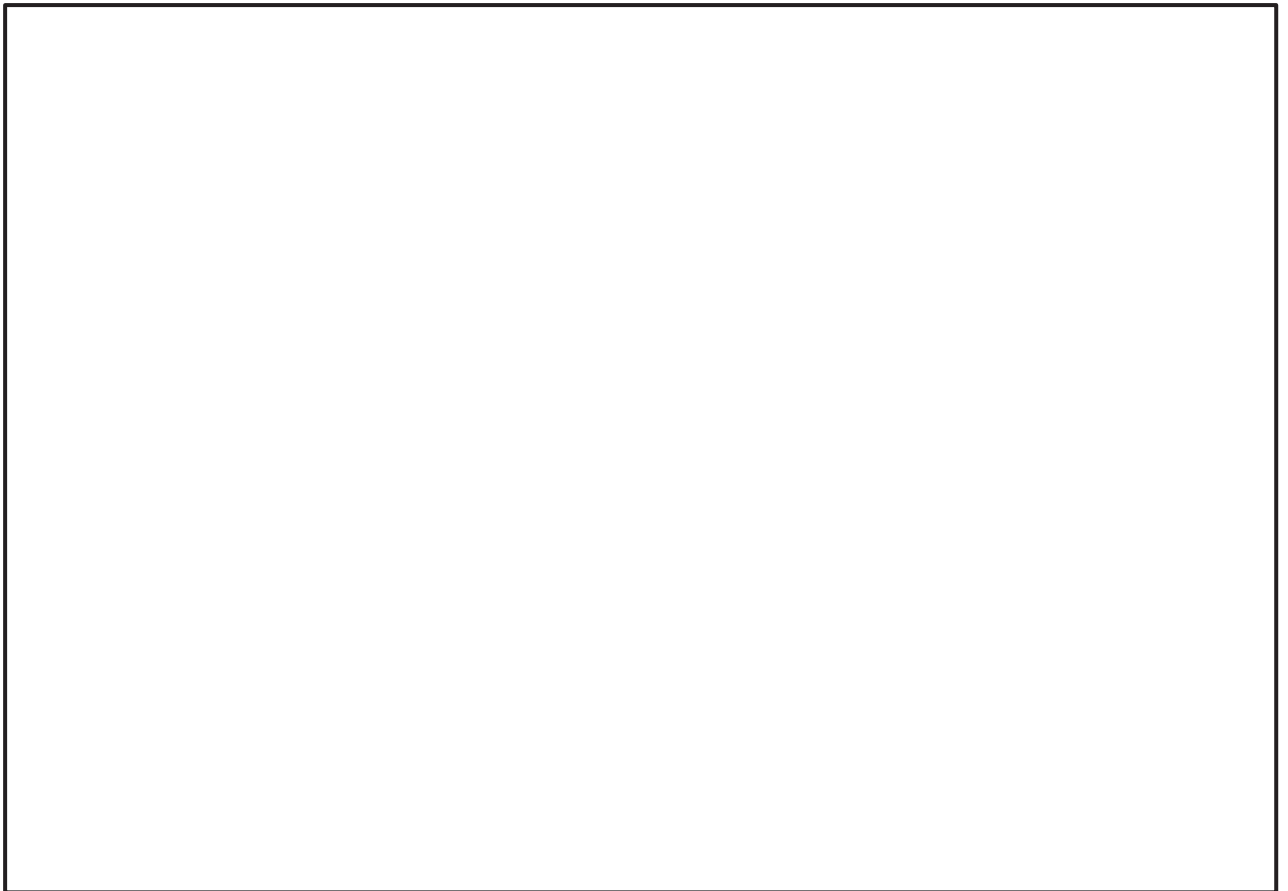
逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる記号を表 2-2 に示す。

表 2-2 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 | 弁体の断面積 | mm^2 |
| D_1 | 弁本体の外径 | mm |
| D_2 | 弁体の外径 | mm |
| d_1 | 弁本体の内径 | mm |
| F_{H1} | 弁本体の最下端に加わる水平方向地震荷重 | N |
| F_{V1} | 弁本体に加わる鉛直方向地震荷重 | N |
| F_{V2} | 弁体に加わる鉛直方向地震荷重 | N |
| g | 重力加速度 | m/s^2 |
| I_1 | 弁本体の断面二次モーメント | mm^4 |
| L_1 | 弁全体の長さ | mm |
| m_1 | 逆止弁付ファンネルの全質量 | kg |
| m_2 | 弁体の質量 | kg |
| t | 弁体の厚さ | mm |
| M_1 | 弁本体に発生する曲げモーメント | $\text{N} \cdot \text{mm}$ |
| D | 固定荷重 | — |
| S | 設計・建設規格の付録材料図表 Part5 表 5 鉄鋼材料の各温度における許容引張応力 | MPa |
| W_{d1} | 逆止弁付ファンネルの自重 | N |
| W_{d2} | 弁体の自重 | N |
| σ_{H1} | 弁本体に加わる曲げ応力 | MPa |
| σ_{V1} | 弁本体に加わる引張応力 | MPa |
| σ_{V2} | 弁体に加わる曲げ応力 | MPa |

3. 評価対象部位

逆止弁付ファンネルは、弁本体及び弁体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対象部位として、弁本体及び弁体を選定し、構造健全性評価による評価対象部位として圧縮スプリング、ガイド、サポータ、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部を選定する。また、機能維持評価による評価対象部位として、逆止弁付ファンネルを選定する。逆止弁付ファンネルの評価対象部位について、図3-1に示す。



図中の①～②は応力評価による評価対象部位を、③～⑧は構造健全性評価による評価対象部位をそれぞれ示す。

図 3-1 逆止弁付ファンネルの評価対象部位

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 固有値解析

4.1 固有振動数の計算方法

逆止弁付ファンネルの構造に応じて、保守的に固有振動数が小さく算出されるよう、より柔となるようにモデル化し、固有振動数を算出する。また、その場合においても固有振動数が 20Hz 以上であることを確認する。

4.1.1 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、円筒状の弁本体の断面をもつはりとして設定する。モデル化の概略を図 4-1 に示す。

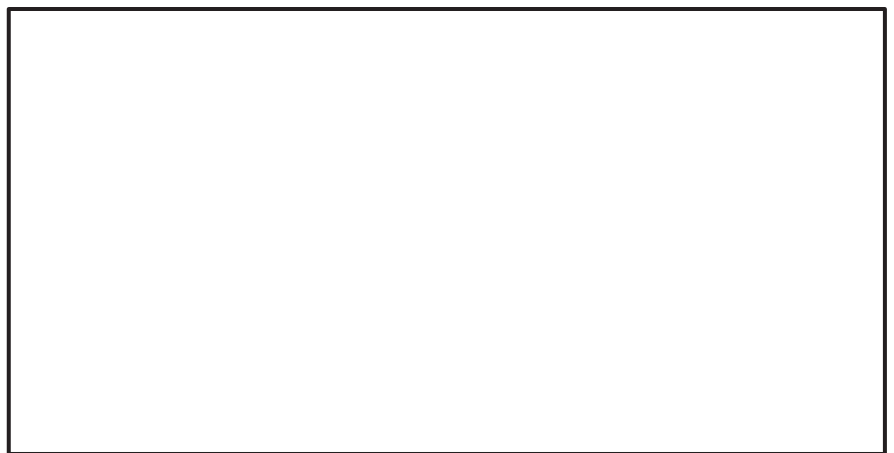


図 4-1 モデル化の概略

4.1.2 記号の説明

逆止弁付ファンネルの固有振動数算出に用いる記号を表 4-1 に示す。

表 4-1 固有振動数算出に用いる記号

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|----------|----------------|---------------|
| d_m | モデル化に用いる弁本体の内径 | mm |
| D_m | モデル化に用いる弁本体の外径 | mm |
| E | 弁本体の縦弾性係数 | MPa |
| f | 弁本体の一次固有振動数 | Hz |
| I_m | 弁本体の断面二次モーメント | mm^4 |
| k | ばね定数 | N/m |
| ℓ_1 | 弁本体全体の長さ | mm |
| m | 逆止弁付ファンネルの全質量 | kg |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.1.3 固有振動数の計算

固有振動数の計算に用いる寸法は、公称値を使用する。水平方向の固有振動数 f を以下の式より算出する。なお、鉛直方向の固有振動数については、逆止弁付ファンネルの構造上、水平方向よりも鉛直方向の方が剛構造となるため、水平方向の固有振動数のみを確認する。

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

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I_m}{l_1^3} \times 10^3$$

弁本体の断面二次モーメント I_m の算出過程を以下に示す。モデル化に用いる弁本体の断面二次モーメント I_m は、以下の式より算出する。

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

4.2 固有振動数の計算条件

表 4-2 に固有振動数の計算条件を示す。

表 4-2 固有振動数の計算条件

| 弁本体の材質 | 逆止弁付ファンネル 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) |
|--------|-----------------------------|---|---|
| □ | 1.5 | □ | □ |

| 弁本体全体の長さ ℓ ₁ (mm) | 弁本体の 縦弾性係数* E (MPa) |
|---------------------------------|---------------------------|
| □ | 1.94 × 10 ⁵ |

注記* : 「5.3 許容限界」における温度条件での縦弾性係数Eを用いる。

4.3 固有振動数の計算結果

表 4-3 に固有振動数の計算結果を示す。固有振動数は、20Hz 以上であることから、剛構造である。

表 4-3 固有振動数の計算結果

| 機器名称 | 固有振動数 (Hz) |
|-----------|---------------|
| 逆止弁付ファンネル | 878 |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

逆止弁付ファンネルの耐震評価は、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. 評価対象部位」にて設定する評価対象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、逆止弁付ファンネルの自重 W_{d1} 及び弁体の自重 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_{V2} を考慮し、以下の式より算出する。

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

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

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

5.2.2 荷重の組合せ

逆止弁付ファンネルの耐震計算にて考慮する荷重の組合せを表 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 |
|--------------------|-----------|---------|
| 浸水防護施設 (浸水防止設備) | 逆止弁付ファンネル | S |

| 荷重の組合せ ^{*1*2} | 許容応力状態 |
|------------------------|------------------|
| D + S _s | Ⅲ _A S |

注記 *1: Dは固定荷重, S_sは基準地震動 S_sによる地震荷重を示す。

*2: 固定荷重 (D) 及び基準地震動 (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

逆止弁付ファンネルの弁本体及び弁体の許容限界を表 5-2 に, 許容応力評価条件を表 5-3 にそれぞれ示す。また, 弁本体及び弁体の許容応力算出結果を表 5-4 にそれぞれ示す。

表 5-2 弁本体及び弁体の許容限界

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

注記 *1: 引張及び曲げは, J E A G 4 6 0 1 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: 引張応力と曲げ応力の組合せ応力である。

*3: 地震後, 津波後の再使用性や津波の繰返し作用を想定し, 当該構造物全体の変形能力に対して浸水防護機能として十分な余裕を有するよう, 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 弁本体及び弁体の許容応力評価条件

| 評価対象部位 | 材料 | 温度条件 (°C) | S * (MPa) |
|--------|----|--------------|--------------|
| 弁本体 | | 40 | 111 |
| 弁体 | | | |

注記*：鉄鋼材料（ボルト材を除く）の許容引張応力を示す。

表 5-4 弁本体及び弁体の許容応力算出結果

| 許容応力状態 | 評価対象 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 | 133 | 133 | 133 |
| | 弁体 | — | 133 | — |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.4 設計用地震力

「4. 固有値解析」に示したとおり逆止弁付ファンネルの固有振動数が 20Hz 以上であることを確認したため、逆止弁付ファンネル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」に示す逆止弁付ファンネル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。逆止弁付ファンネルの耐震計算に用いる設計震度を表 5-5 に示す。

表 5-5 逆止弁付ファンネルの設計震度

| 地震動 | 床面高さ* ¹ O. P. (mm) | 場所 | 設計震度* ² | |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|------|
| | | | 水平方向 C _H | |
| 基準地震動 S s | 7000 | 3号機海水熱交換器 建屋 | 水平方向 C _H | 2.24 |
| | | | 鉛直方向 C _V | 1.59 |

注記 *1: 基準床レベルを示す。

*2: 「4. 固有値解析」より、逆止弁付ファンネルの固有振動数が 20Hz 以上であることを確認したため、3号機海水熱交換器建屋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。

5.5 計算方法

5.5.1 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。

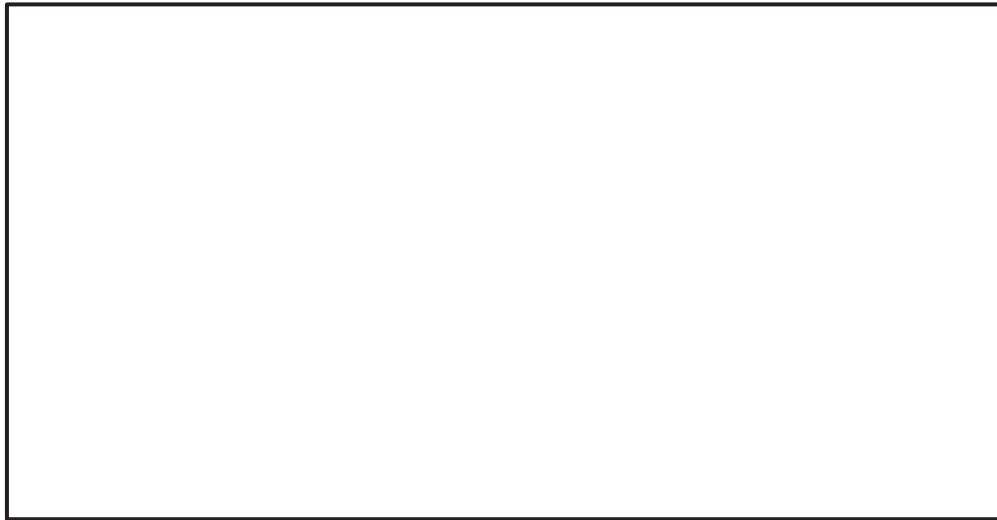


図 5-1 弁本体の構造図

(1) 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。

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

(2) 水平応答加速度負荷時

弁全体の最下端に集中荷重が負荷された片持ちはりとして、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。

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

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

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

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.5.2 弁体

(1) 鉛直応答加速度負荷時

鉛直応答加速度により弁体は弁座に押し付けられ、曲げ応力が発生する。曲げ応力 σ_{v2} を以下の式より算出する。ただし、弁体の自重による荷重 W_{d2} は曲げ応力 σ_{v2} を緩和する方向に作用するため考慮しない。なお、曲げ応力の算出については、機械工学便覧（日本機械学会）より、円板、周辺単純支持、等分布荷重の応力計算式を用いる。

$$\sigma_{v2} = 1.24 \cdot \frac{\left(\frac{W_{d2} + F_{v2}}{A_2} \right)}{t^2} \cdot \left(\frac{D_2}{2} \right)^2$$



図 5-2 弁体に加わる荷重

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5.6 計算条件

逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる計算条件を表 5-6 に示す。

表 5-6 逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる計算条件

| 弁本体の材質 | 逆止弁付ファンネル の全質量 m_1 (kg) | 弁全体の長さ L_1 (mm) | 弁本体の外径 D_1 (mm) |
|--------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| □ | 1.5 | □ | □ |

| 弁本体の内径 d_1 (mm) | 弁本体の断面積 A_1 (mm ²) |
|-------------------------|--|
| □ | 336.9 |

| 弁体の材質 | 弁体の質量 m_2 (kg) | 弁体の外径 D_2 (mm) | 弁体の厚さ t (mm) |
|-------|------------------------|------------------------|----------------------|
| □ | 0.10 | 61 | 2 |

| 弁体の断面積 A_2 (mm ²) | 重力加速度 g (m/s ²) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 2.922×10^3 | 9.80665 |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 機能維持評価

「3. 評価対象部位」にて評価対象部位として設定した逆止弁付ファンネル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、逆止弁付ファンネルの加振試験後に逆止弁付ファンネルの漏えい試験を実施することにより逆止弁付ファンネルの機能維持評価を実施した。

6.1 機能維持評価方法

逆止弁付ファンネルの固有振動数を考慮して、地震時における逆止弁付ファンネルの機能維持評価用加速度を設定し、設定した機能維持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。逆止弁付ファンネルの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、逆止弁付ファンネルに対して、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、VI-1-1-2-2-5「津波防護に関する施設の設計方針」に示す地震後の繰返しの襲来を想定した経路からの津波を想定し、0.18MPa 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。また、最大漏えい量となる水圧 (0.01MPa) においても、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、逆止弁付ファンネルの地震時及び地震後の機能維持を確認した。

なお、固有値解析結果により、逆止弁付ファンネルの固有振動数 20Hz 以上であることを確認したため、機能維持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 逆止弁付ファンネルの機能確認済加速度

| 評価対象部位 | 機能確認済加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$) | |
|-----------|---------------------------------------|------|
| | 水平方向 | 鉛直方向 |
| 逆止弁付ファンネル | 6.0 | 6.0 |

7. 評価結果

7.1 基準地震動 S s に対する評価対象部位の応力評価

基準地震動 S s に対する評価対象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 に対する評価対象部位の応力評価

| 評価対象部位 | 発生応力 (MPa) | | 許容応力 (MPa) |
|--------|---------------|-----|---------------|
| | 弁本体 | 引 張 | 1 |
| 曲 げ | | 1 | 133 |
| 組合せ* | | 2 | 133 |
| 弁体 | 曲 げ | 1 | 133 |

注記 * : 引張 σ_{V1} + 曲げ σ_{H1} は, $\sigma_{V1} + \sigma_{V1} \leq 1.2S$ で評価

7.2 基準地震動 S s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価

基準地震動 S s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価結果を表 7-2 に示す。表 7-2 に示すとおり機能維持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止弁付ファンネルの機能維持を確認した。

表 7-2 逆止弁付ファンネルの機能維持評価結果

| 評価対象 部位 | 床面高さ O. P. (mm) | 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 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$) | |
| | | | 機能維持 評価用 加速度* | 機能確認 済加速度 | 機能維持 評価用 加速度* | 機能確認 済加速度 |
| 逆止弁付 ファンネル | 7000 | 3号機海 水熱交換 器建屋 | 1.87 | 6.0 | 1.33 | 6.0 |

注記 * : 「4. 固有値解析」より、逆止弁付ファンネルの固有振動数が 20Hz 以上であることを確認したため、機能維持評価用加速度には 3号機海水熱交換器建屋における最大応答加速度を使用した。

7.3 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の構造健全性評価

「7.2 基準地震動 S_s に対する逆止弁付ファンネルの機能維持評価」に示したとおり、逆止弁付ファンネルの機能維持を確認したことにより、評価対象部位である圧縮スプリング、ガイド、サポータ、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部が構造健全性を有することを確認した。