

| | |
|-----------------------|------------------------|
| 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-13-0002 改 1 |
| 提出年月日 | 2023年 4月 28日 |

VI-3-別添3 津波又は溢水への配慮が必要な施設の強度に関する説
明書

2023年 4月

東北電力株式会社

申請範囲目録

VI-3-別添 3 津波又は溢水への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

VI-3-別添 3-2 津波への配慮が必要な施設の強度計算書

VI-3-別添 3-2-9 逆止弁付ファンネルの強度計算書

VI-3-別添 3-2-9-1 逆止弁付ファンネル（第2号機）の強度計算書

VI-3-別添 3-2-9-2 逆止弁付ファンネル（第3号機）の強度計算書

VI-3-別添 3 津波又は溢水への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

目 次

VI-3-別添 3-2 津波への配慮が必要な施設の強度計算書

VI-3-別添 3-2 津波への配慮が必要な施設の強度計算書

目 次

VI-3-別添 3-2-9 逆止弁付ファンネルの強度計算書

VI-3-別添 3-2-9 逆止弁付ファンネルの強度計算書

目 次

VI-3-別添 3-2-9-1 逆止弁付ファンネル（第2号機）の強度計算書

VI-3-別添 3-2-9-2 逆止弁付ファンネル（第3号機）の強度計算書

VI-3-別添 3-2-9-1 逆止弁付ファンネル（第 2 号機）の強度計算書

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 | 9 |
| 4. | 固有値解析 | 10 |
| 4.1 | 固有振動数の計算方法 | 10 |
| 4.1.1 | 解析モデル | 10 |
| 4.1.2 | 記号の説明 | 10 |
| 4.1.3 | 固有振動数の計算 | 11 |
| 4.2 | 固有振動数の計算条件 | 12 |
| 4.3 | 固有振動数の計算結果 | 12 |
| 5. | 構造強度評価 | 13 |
| 5.1 | 構造強度評価方法 | 13 |
| 5.2 | 荷重及び荷重の組合せ | 13 |
| 5.2.1 | 荷重の設定 | 13 |
| 5.2.2 | 荷重の組合せ | 14 |
| 5.3 | 許容限界 | 14 |
| 5.4 | 設計用地震力 | 16 |
| 5.5 | 計算方法 | 17 |
| 5.5.1 | 荷重条件 | 17 |
| 5.5.2 | 応力計算 | 18 |
| 5.6 | 計算条件 | 20 |
| 6. | 評価結果 | 21 |
| 6.1 | 応力評価 | 21 |
| 6.2 | 構造健全性評価 | 21 |

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」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。）が津波荷重及び余震を考慮した荷重に対し、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

なお、逆止弁付ファンネルの強度評価においては、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。

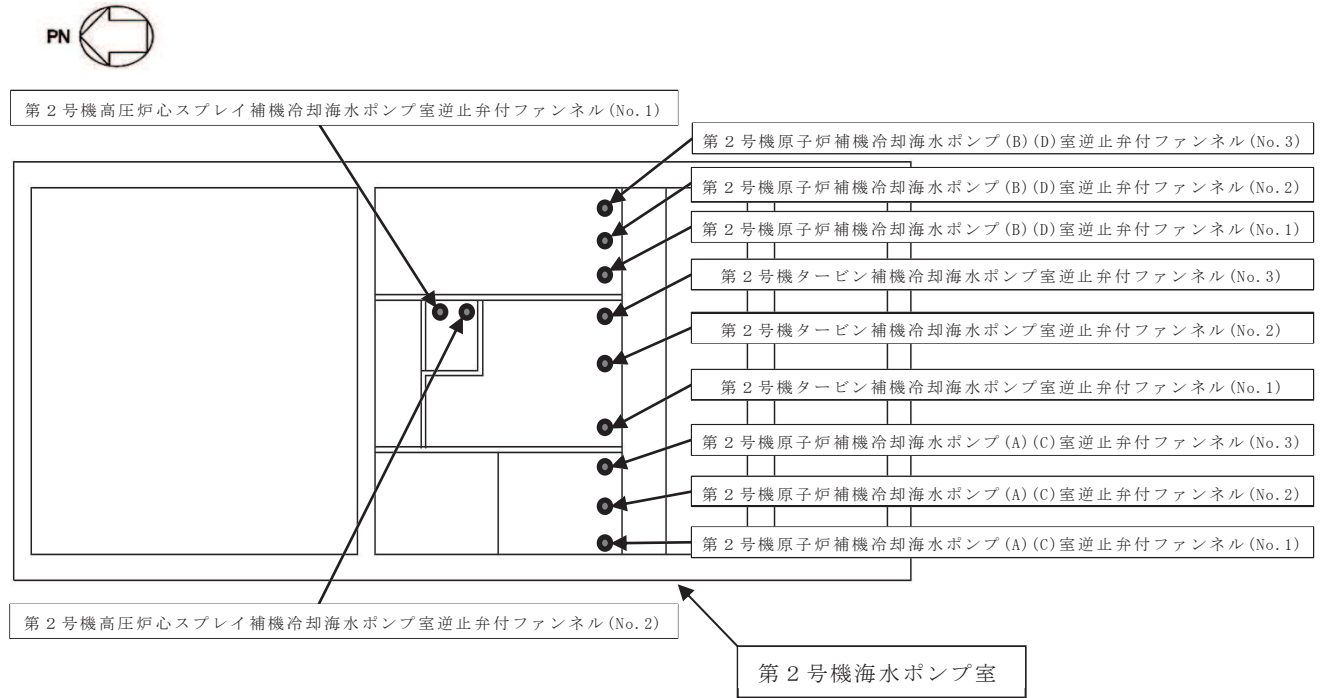


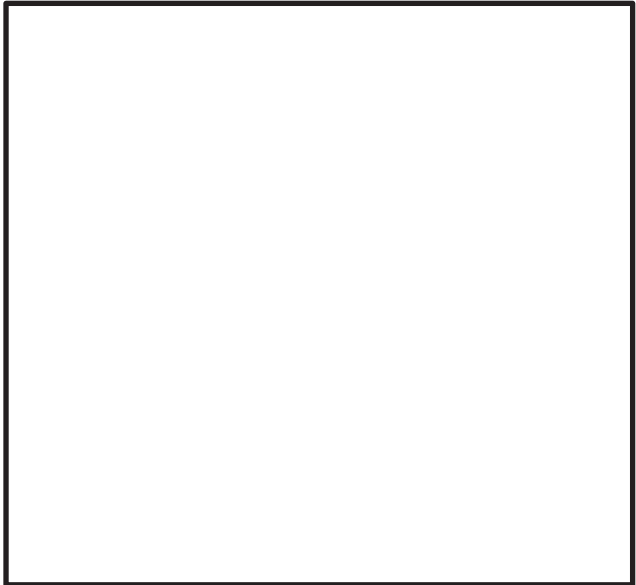
図 2-1 逆止弁付ファンネルの設置位置図

2.2 構造計画

逆止弁付ファンネルの構造計画は、VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3. 構造強度設計」に示す構造計画を踏まえて、詳細な構造を設定する。

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 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強度評価は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」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、応力評価及び構造健全性評価により実施する。応力評価では、逆止弁付ファンネルの評価対象部位に作用する応力等が許容限界以下であることを「5.1 構造強度評価方法」に示す方法により、「5.6 計算条件」に示す計算条件を用いて評価し、構造健全性評価により強度評価を実施する評価対象部位については、評価対象部位に作用する圧力が許容限界以下であることを「5.1 構造強度評価方法」に示す方法により、「5.6 計算条件」に示す計算条件を用いて評価する。応力評価及び構造健全性評価の確認結果を「6. 評価結果」にて確認する。

逆止弁付ファンネルの強度評価フローを図 2-1 に示す。逆止弁付ファンネルの強度評価においては、その構造を踏まえ、津波荷重及び余震に伴う荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価部位を設定する。強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、津波に伴う荷重作用時（以下「津波時」という。）及び津波に伴う荷重と余震に伴う荷重の作用時（以下「重畳時」という。）を考慮し、評価される最大荷重を設定する。重畳時における余震荷重は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示す津波荷重との重畳を考慮する弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ による地震力とする。余震荷重の設定に当たっては、弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ を入力して得られた設置床の最大応答加速度の最大値を考慮して設定した設計震度を用いる。

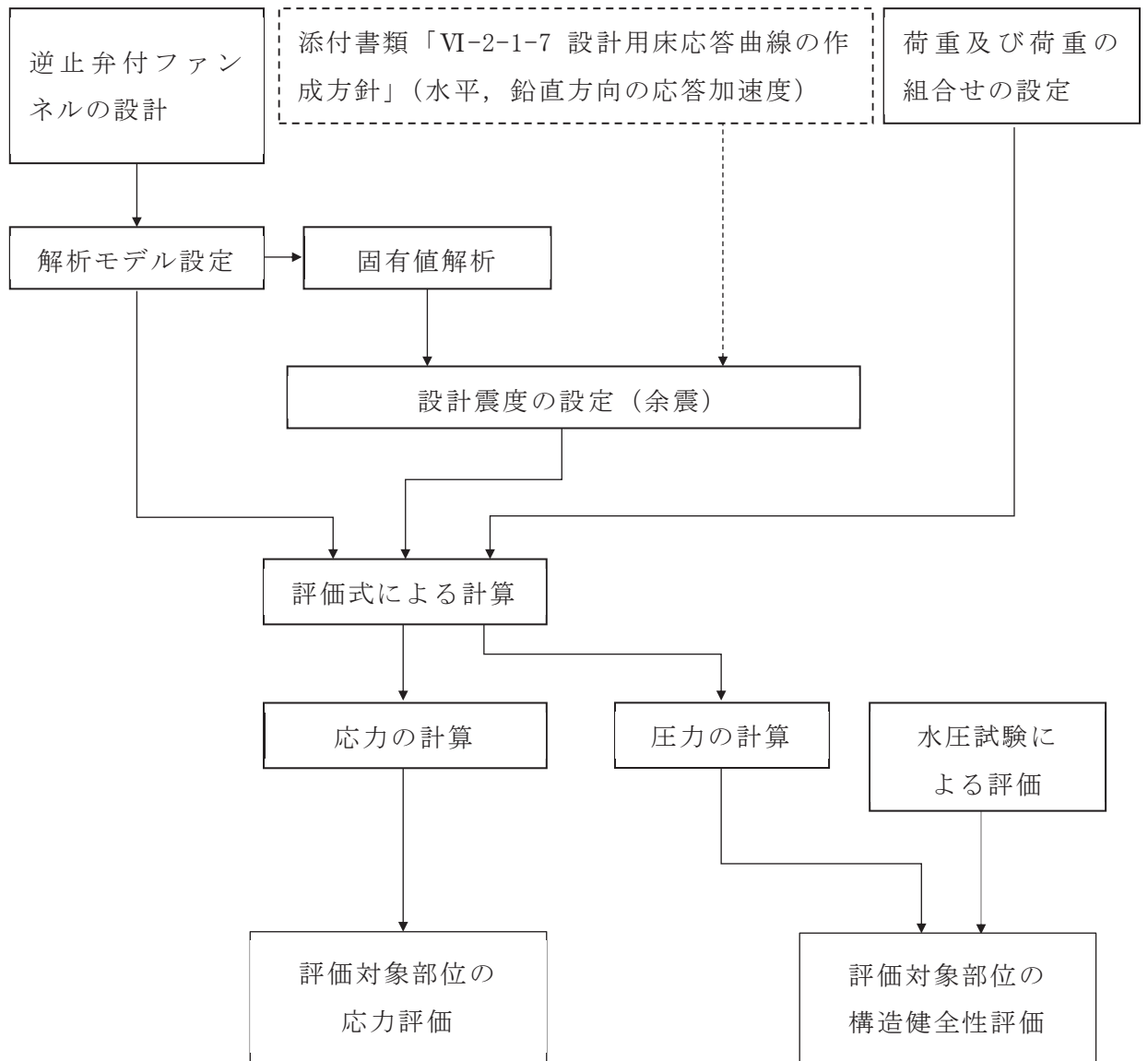


図 2-1 強度評価フロー

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) 日本港湾協会 2007 年 港湾の施設の技術上の基準・同解説
- (6) 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 逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる記号 (1/2)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|------------------------------|--|------------------|
| S _d | 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ による余震荷重 | N |
| C _{H S_d} | 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ による水平方向の設計震度 | — |
| C _{V S_d} | 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ 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 | 突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積 | mm ² |
| A ₃ | 突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる受圧面積 | mm ² |
| C _d | 抗力係数 | — |
| 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 |
| h | 津波荷重水位 | m |
| 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 | N・mm |
| D | 固定荷重 | — |
| P _t | 突き上げ津波荷重 | MPa |
| 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 |
| U | 海水ポンプ室における津波の最大流速 (鉛直方向) | m/s |
| W _{d1} | 逆止弁付ファンネルの自重 | N |
| W _{d2} | 弁体の自重 | N |

表 2-2 逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる記号 (2/2)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|---------------|-------------------|-------------------|
| ρ_o | 海水の密度 | kg/m ³ |
| σ_{H1} | 弁本体に加わる曲げ応力 | MPa |
| σ_{V1} | 弁本体に加わる圧縮応力 (重畳時) | MPa |
| σ_{V2} | 弁体に加わる曲げ応力 (重畳時) | MPa |
| P_V | 弁体に発生する圧力 | MPa |
| P_w | 逆止弁付ファンネルに発生する圧力 | MPa |

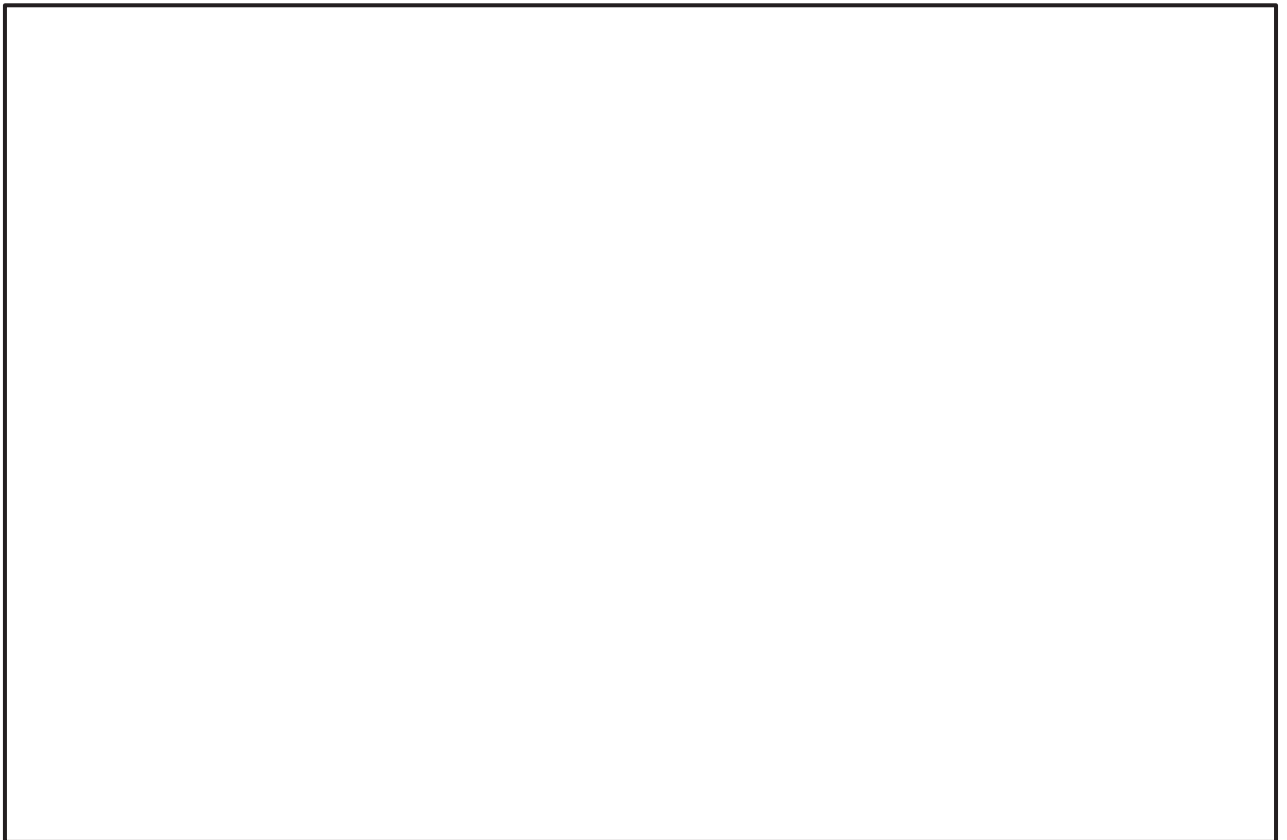
3. 評価対象部位

逆止弁付ファンネルの評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、津波荷重及び余震に伴う荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

津波時は逆止弁付ファンネル上流からの津波荷重により、弁本体に圧縮力が作用する。また、逆止弁付ファンネル上流からの津波荷重により弁体が弁座に密着し閉弁状態となる際に弁体に曲げ力が作用する。

重畳時に逆止弁付ファンネル上流からの津波荷重及び鉛直方向の余震荷重が負荷される場合は、津波時と同様の力が作用する。一方、水平方向の余震荷重が負荷される場合は、弁本体には曲げモーメントが作用する。

このことから、強度評価においては、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。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。

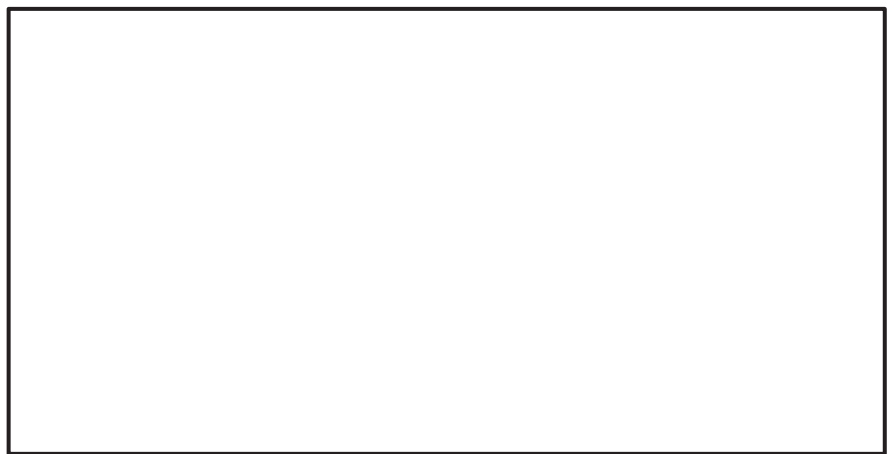


図 4-1 モデル化の概略

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.1.2 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 | mm |
| 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 |

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強度評価は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している方法を用いて、強度評価を実施する。

逆止弁付ファンネルの強度評価は、「3. 評価対象部位」に示す評価対象部位に対し、「5.2 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.3 許容限界」に示す荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、「5.5 計算方法」に示す方法を用いて評価を行う。

5.2 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

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) 突き上げ津波荷重 (P_t)

突き上げ津波荷重は、基準津波による津波荷重水位を考慮し、以下の式より算出する。

$$P_t = (\rho_o \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_o \cdot U^2) / 10^6$$

(3) 余震荷重 (S_d)

余震荷重は、添付書類「V-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、弾性設計用地震動 S_d-D2 に伴う地震力及び慣性力を考慮するものとし、水平方向については、弾性設計用地震動 S_d-D2 に伴う地震力とする。

余震による地震荷重 F_{H1}, F_{V1}, F_{V2} を以下の式より算出する。

$$F_{H1} = m_1 \cdot C_{HSd} \cdot g$$

$$F_{V1} = m_1 \cdot C_{VSd} \cdot g + \rho_o \cdot C_{VSd} \cdot g \cdot H \cdot A_2 / 10^6$$

$$F_{V2} = m_2 \cdot C_{VSd} \cdot g + \rho_o \cdot C_{VSd} \cdot g \cdot H \cdot A_3 / 10^6$$

5.2.2 荷重の組合せ

逆止弁付ファンネルの強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 5-1 に示す。

表 5-1 逆止弁付ファンネルの強度評価にて考慮する荷重の組合せ

| 施設区分 | 機器名称 | 荷重の組合せ |
|--------------------|-----------|------------------------|
| 浸水防護施設 (浸水防止設備) | 逆止弁付ファンネル | $D + P_t + S_d^{*1*2}$ |

注記 *1: D は固定荷重, P_t は突き上げ津波荷重, S_d は弾性設計用地震動 $S_d - D2$ による余震荷重を示す。

*2: 固定荷重 (D) 及び弾性設計用地震動 $S_d - D2$ による余震荷重 (S_d) の組合せが, 強度評価上, 突き上げ津波荷重 (P_t) を緩和する方向に作用する場合, 保守的にこれら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許容限界は, VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ, 「3. 評価対象部位」にて設定している評価対象部位毎に, 機能損傷モードを考慮し, 弁本体及び弁体については, 設計・建設規格に準じた供用状態 C の許容応力を用いる。

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については, 水圧試験により確認した圧力を許容値として用いる。水圧試験では, 逆止弁付ファンネルの閉状態に対して, 突き上げ津波荷重を模擬した静水圧 1.2MPa を圧縮スプリング, 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に負荷し, 有意な変形及び著しい漏えいがないことを確認した。

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, 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。また, 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の許容限界を表 5-5 に示す。

表 5-2 弁本体及び弁体の許容限界

| 供用状態 (許容応力状態) | 許容限界* ¹ | | |
|---------------------------------------|--------------------|-------|-------------------|
| | 一次応力 | | |
| C (Ⅲ _A S)* ³ | 圧縮 | 曲げ | 組合せ* ² |
| | 1.2・S | 1.2・S | 1.2・S |

注記 *1: 圧縮及び曲げは、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: 圧縮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

| 供用状態 (許容応力状態) | 評価 対象部位 | 許容限界 | | |
|-------------------------|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | 一次応力 | | |
| | | 圧縮 1.2・S (MPa) | 曲げ 1.2・S (MPa) | 組合せ 1.2・S (MPa) |
| C (Ⅲ _A S) | 弁本体 | 133 | 133 | 133 |
| | 弁体 | — | 133 | — |

表 5-5 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の許容限界

| 評価対象部位 | 水圧試験の圧力 (MPa) |
|---|------------------|
| 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 | 1.2 |

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強度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 5-6 に示す。

表 5-6 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 | 余震による設計震度* ² | |
|--|------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|------|
| | | | | |
| 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ | 1250 | 海水ポンプ室 (補機ポンプエリア) | 水平方向 C _{H S_d} | 1.05 |
| | | | 鉛直方向 C _{V S_d} | 1.03 |

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

逆止弁付ファンネルの強度評価は、構造部材に作用する応力が、「5.3 許容限界」で設定した許容限界以下であることを確認する。

5.5.1 荷重条件

以下の荷重条件にて応力計算を実施する。

(1) 固定荷重 (D)

逆止弁付ファンネルの自重は突き上げ津波荷重を緩和する方向に作用することから、考慮しない。ただし、余震による水平地震力を求めるに当たって、固定荷重として逆止弁付ファンネルの自重を考慮する。

(2) 突き上げ津波荷重 (P_t)

突き上げ津波荷重 P_t は、逆止弁付ファンネル上流から作用するものとする。

(3) 余震荷重 (S_d)

余震荷重 S_d は、逆止弁付ファンネルの設置位置における水平方向及び鉛直方向の地震荷重を考慮する。

5.5.2 応力計算

(1) 弁本体

a. 圧縮

鉛直応答加速度による余震荷重及び突き上げ津波荷重により、弁本体に加わる圧縮応力 σ_{v1} を以下の式より算出する。また、突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積 A_2 は、弁本体のうち突き上げ津波荷重を受ける面積が最も広い箇所を適用する。突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積は弁本体の外径 D_1 の円の面積を適用する。弁本体の断面積 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。ただし、逆止弁付ファンネルの自重 W_{d1} は圧縮応力 σ_{v1} を緩和する方向に作用するため考慮しない。

$$\sigma_{v1} = \frac{W_{d1} + F_{v1} + P_t \cdot A_2}{A_1}$$

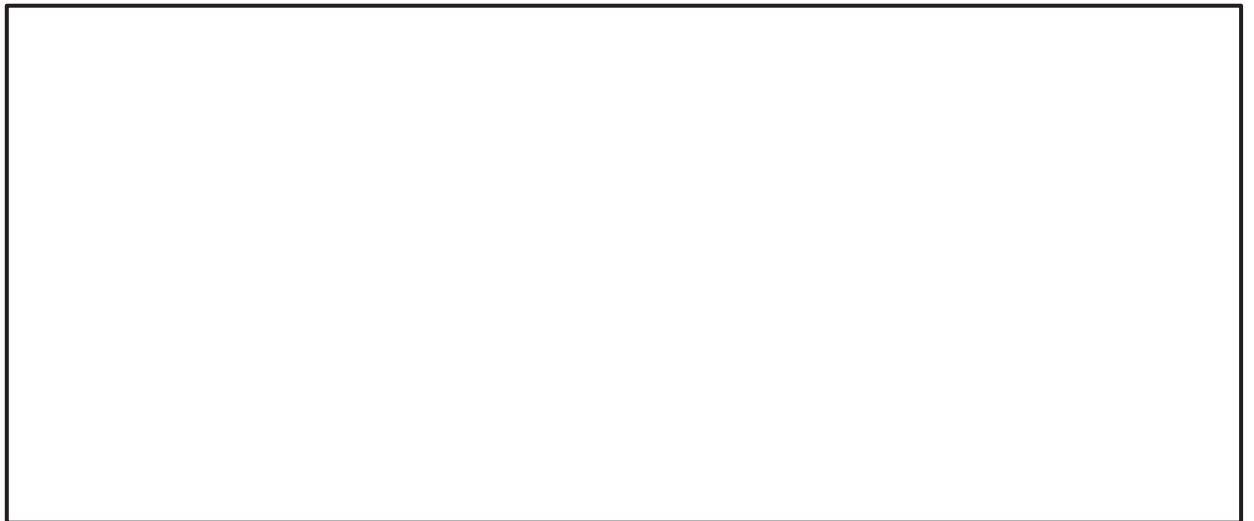


図 5-1 弁本体の構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

b. 曲げ

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。弁全体の長さ L_1 、弁本体の外径 D_1 及び内径 d_1 について図 5-1 に示す。

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

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

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

(2) 弁体

a. 曲げ

鉛直応答加速度による余震荷重及び突き上げ津波荷重により、弁体に加わる曲げ応力 σ_{V2} を以下の式より算出する。また、突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる受圧面積 A_3 は、図 5-2 に示すとおり、突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる弁体の外径 D_2 の円の面積を適用する。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。

$$P_{V2} = \frac{W_{d2} + F_{V2}}{A_3} + P_t$$

$$\sigma_{V2} = 1.24 \cdot \frac{P_{V2}}{t^2} \cdot \left(\frac{D_2}{2}\right)^2$$

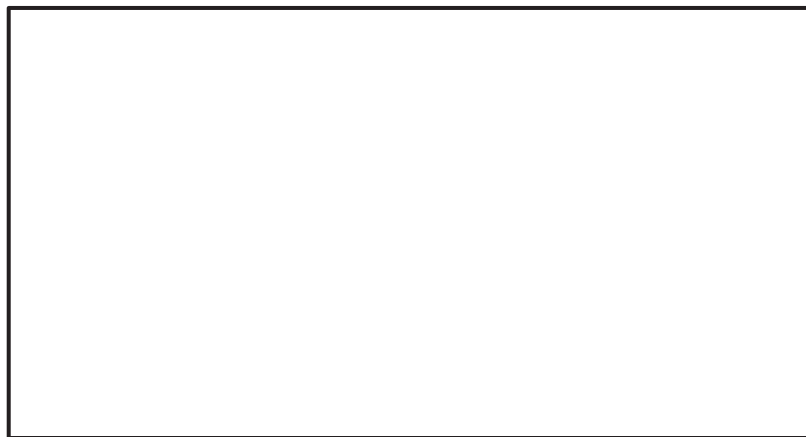


図 5-2 弁体の寸法図

(3) 弁体、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部

突き上げ津波荷重により弁体、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部に発生する圧力 P_w は以下の式より算出する。

$$P_w = P_t$$

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 5-7 に示す。

表 5-7 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) | 突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積 A_2 (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 |
| 突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる受圧面積 A_3 (mm ²) | 重力加速度 g (m/s ²) | 海水の密度 ρ_o (kg/m ³) | 抗力係数 C_d |
| 2.922×10^3 | 9.80665 | 1030 | 1.2 |
| 津波荷重水位 h (m) | 海水ポンプ室における津波の最大流速(鉛直方向) * U (m/s) | 慣性力(鉛直方向)評価高さ H (m) | |
| 18.6 | 1.0 | 16.6 | |

注記 * : 海水ポンプ室における最大鉛直流速に対し、保守的に設定した値。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 評価結果

6.1 応力評価

逆止弁付ファンネルの強度評価結果を表 6-1 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 6-1 逆止弁付ファンネルの応力評価結果

| 評価対象部位 | 発生応力 (MPa) | | 許容応力 (MPa) |
|--------|---------------|-----|---------------|
| | 弁本体 | 圧縮 | |
| 曲げ | | 1 | 133 |
| 組合せ* | | 6 | 133 |
| 弁体 | 曲げ | 105 | 133 |

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

6.2 構造健全性評価

逆止弁付ファンネルの構造健全性評価結果を表 6-2 に示す。発生圧力が、有意な変形及び著しい漏えいがないことを確認した水圧試験圧力以下であることから、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。

表 6-2 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の構造健全性評価結果

| 評価対象部位 | 発生圧力 (MPa) | | 水圧試験の圧力 (MPa) |
|--------|---|----|------------------|
| | 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 | 圧縮 | |

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。

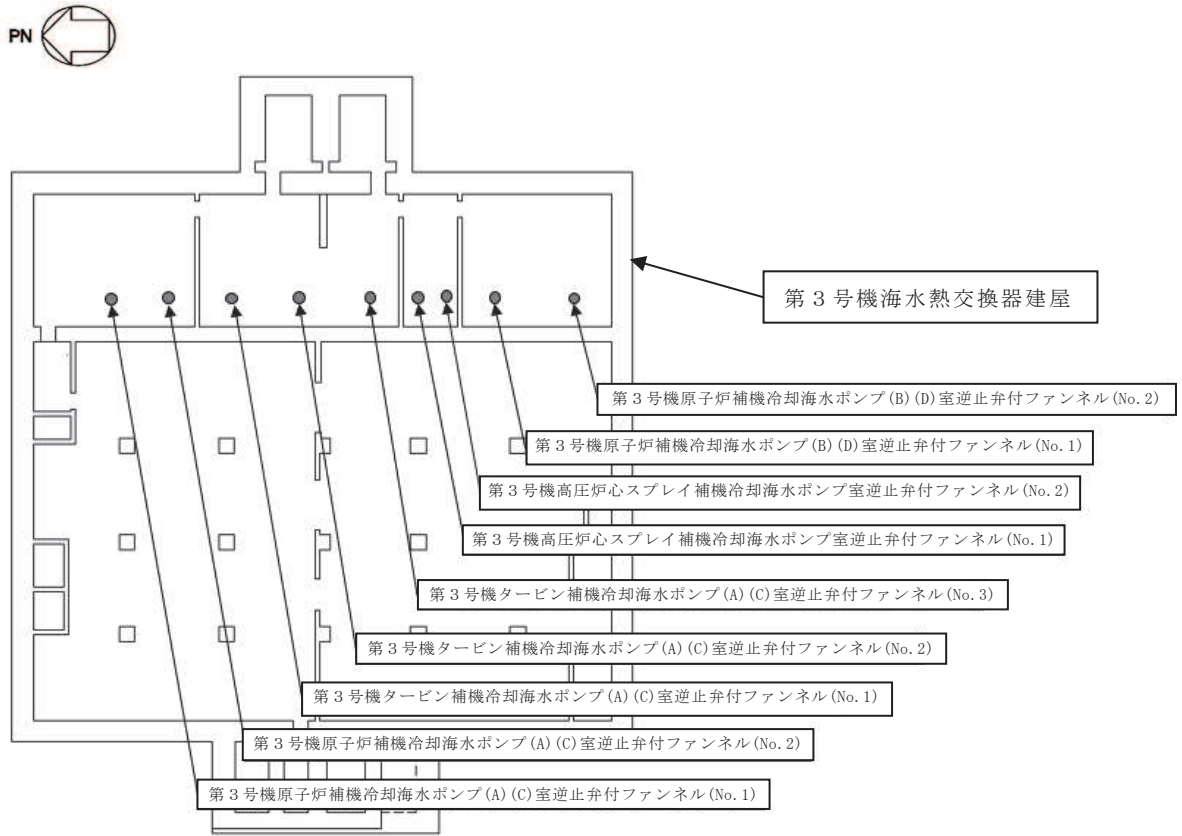


図2-1 逆止弁付ファンネルの設置位置図

VI-3-別添 3-2-9-2 逆止弁付ファンネル（第3号機）の強度計算書

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 | 9 |
| 4. | 固有値解析 | 10 |
| 4.1 | 固有振動数の計算方法 | 10 |
| 4.1.1 | 解析モデル | 10 |
| 4.1.2 | 記号の説明 | 10 |
| 4.1.3 | 固有振動数の計算 | 11 |
| 4.2 | 固有振動数の計算条件 | 12 |
| 4.3 | 固有振動数の計算結果 | 12 |
| 5. | 構造強度評価 | 13 |
| 5.1 | 構造強度評価方法 | 13 |
| 5.2 | 荷重及び荷重の組合せ | 13 |
| 5.2.1 | 荷重の設定 | 13 |
| 5.2.2 | 荷重の組合せ | 14 |
| 5.3 | 許容限界 | 14 |
| 5.4 | 設計用地震力 | 16 |
| 5.5 | 計算方法 | 17 |
| 5.5.1 | 荷重条件 | 17 |
| 5.5.2 | 応力計算 | 18 |
| 5.6 | 計算条件 | 20 |
| 6. | 評価結果 | 21 |
| 6.1 | 応力評価 | 21 |
| 6.2 | 構造健全性評価 | 21 |

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」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。）が津波荷重及び余震を考慮した荷重に対し、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

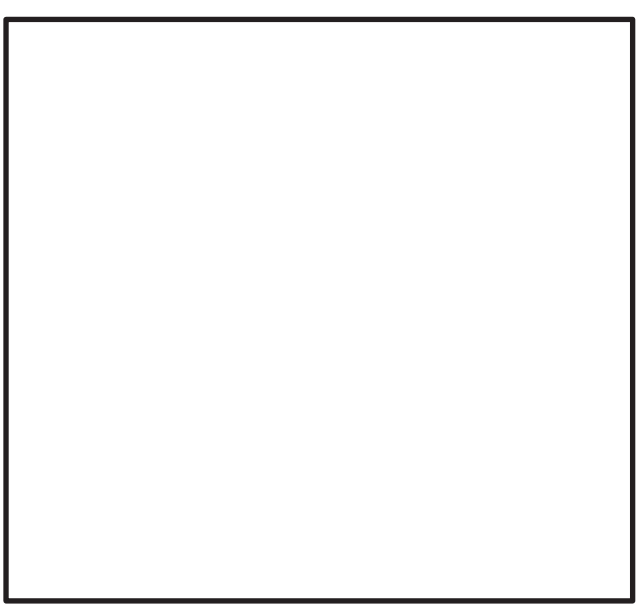
なお、逆止弁付ファンネルの強度評価においては、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約1mの地盤沈下が発生したことを考慮する。

2.2 構造計画

逆止弁付ファンネルの構造計画は、VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3. 構造強度設計」に示す構造計画を踏まえて、詳細な構造を設定する。

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強度評価は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」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、応力評価及び構造健全性評価により実施する。応力評価では、逆止弁付ファンネルの評価対象部位に作用する応力等が許容限界以下であることを「5.1 構造強度評価方法」に示す方法により、「5.6 計算条件」に示す計算条件を用いて評価し、構造健全性評価により強度評価を実施する評価対象部位については、評価対象部位に作用する圧力が許容限界以下であることを「5.1 構造強度評価方法」に示す方法により、「5.6 計算条件」に示す計算条件を用いて評価する。応力評価及び構造健全性評価の確認結果を「6. 評価結果」にて確認する。

逆止弁付ファンネルの強度評価フローを図 2-1 に示す。逆止弁付ファンネルの強度評価においては、その構造を踏まえ、津波荷重及び余震に伴う荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価部位を設定する。強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、津波に伴う荷重作用時（以下「津波時」という。）及び津波に伴う荷重と余震に伴う荷重の作用時（以下「重畳時」という。）を考慮し、評価される最大荷重を設定する。重畳時における余震荷重は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示す津波荷重との重畳を考慮する弾性設計用地震動 S d - D 2 による地震力とする。余震荷重の設定に当たっては、弾性設計用地震動 S d - D 2 を入力して得られた設置床の最大応答加速度の最大値を考慮して設定した設計震度を用いる。

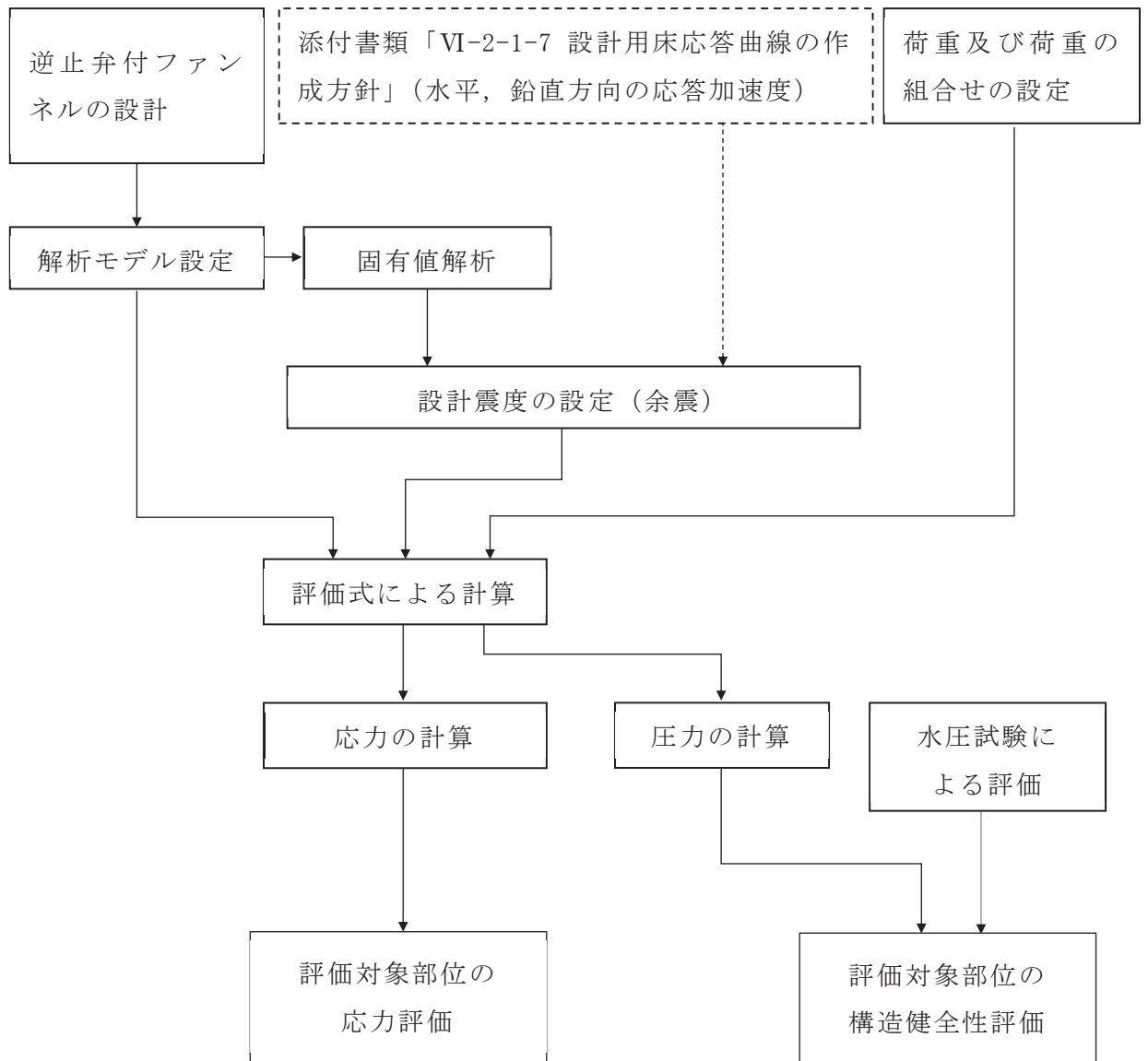


図 2-1 強度評価フロー

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) 日本港湾協会 2007 年 港湾の施設の技術上の基準・同解説
- (6) 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 逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる記号 (1/2)

| 記号 | 記号の説明 | 単位 |
|-----------------------------|--|------------------|
| S _d | 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ による余震荷重 | N |
| C _{HS_d} | 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ による水平方向の設計震度 | — |
| C _{VS_d} | 弾性設計用地震動 S _d -D ₂ 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 | 突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積 | mm ² |
| A ₃ | 突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる受圧面積 | mm ² |
| C _d | 抗力係数 | — |
| 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 |
| h | 津波荷重水位 | m |
| 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 | N・mm |
| D | 固定荷重 | — |
| P _t | 突き上げ津波荷重 | MPa |
| 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 |
| U | 海水ポンプ室における津波の最大流速 (鉛直方向) | m/s |
| W _{d1} | 逆止弁付ファンネルの自重 | N |
| W _{d2} | 弁体の自重 | N |

表 2-2 逆止弁付ファンネルの応力評価に用いる記号 (2/2)

| 記 号 | 記号の説明 | 単 位 |
|---------------|-------------------|-------------------|
| ρ_o | 海水の密度 | kg/m ³ |
| σ_{H1} | 弁本体に加わる曲げ応力 | MPa |
| σ_{V1} | 弁本体に加わる圧縮応力 (重畳時) | MPa |
| σ_{V2} | 弁体に加わる曲げ応力 (重畳時) | MPa |
| P_V | 弁体に発生する圧力 | MPa |
| P_w | 逆止弁付ファンネルに発生する圧力 | MPa |

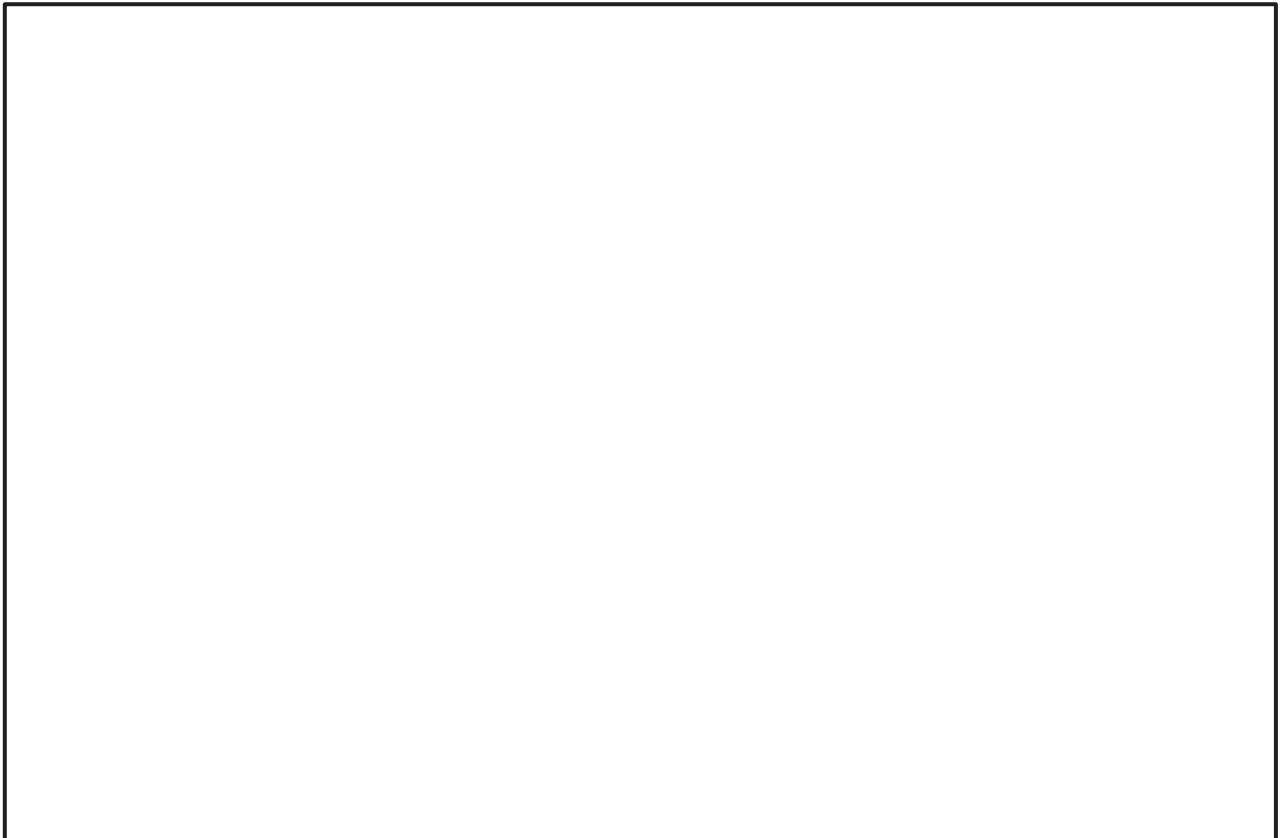
3. 評価対象部位

逆止弁付ファンネルの評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、津波荷重及び余震に伴う荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

津波時は逆止弁付ファンネル上流からの津波荷重により、弁本体に圧縮力が作用する。また、逆止弁付ファンネル上流からの津波荷重により弁体が弁座に密着し閉弁状態となる際に弁体に曲げ力が作用する。

重畳時に逆止弁付ファンネル上流からの津波荷重及び鉛直方向の余震荷重が負荷される場合は、津波時と同様の力が作用する。一方、水平方向の余震荷重が負荷される場合は、弁本体には曲げモーメントが作用する。

このことから、強度評価においては、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。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 | mm |
| 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強度評価は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している方法を用いて、強度評価を実施する。

逆止弁付ファンネルの強度評価は、「3. 評価対象部位」に示す評価対象部位に対し、「5.2 荷重及び荷重の組合せ」及び「5.3 許容限界」に示す荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、「5.5 計算方法」に示す方法を用いて評価を行う。

5.2 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

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) 突き上げ津波荷重 (P_t)

突き上げ津波荷重は、基準津波による津波荷重水位を考慮し、以下の式より算出する。

$$P_t = (\rho_o \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_o \cdot U^2) / 10^6$$

(3) 余震荷重 (S_d)

余震荷重は、添付書類「V-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、弾性設計用地震動 S_d-D2 に伴う地震力及び慣性力を考慮するものとし、水平方向については、弾性設計用地震動 S_d-D2 に伴う地震力とする。

余震による地震荷重 F_{H1}, F_{V1}, F_{V2} を以下の式より算出する。

$$F_{H1} = m_1 \cdot C_{HSd} \cdot g$$

$$F_{V1} = m_1 \cdot C_{VSd} \cdot g + \rho_o \cdot C_{VSd} \cdot g \cdot H \cdot A_2 / 10^6$$

$$F_{V2} = m_2 \cdot C_{VSd} \cdot g + \rho_o \cdot C_{VSd} \cdot g \cdot H \cdot A_3 / 10^6$$

5.2.2 荷重の組合せ

逆止弁付ファンネルの強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 5-1 に示す。

表 5-1 逆止弁付ファンネルの強度評価にて考慮する荷重の組合せ

| 施設区分 | 機器名称 | 荷重の組合せ |
|--------------------|-----------|------------------------|
| 浸水防護施設 (浸水防止設備) | 逆止弁付ファンネル | $D + P_t + S_d^{*1*2}$ |

注記 *1: Dは固定荷重, P_t は突き上げ津波荷重, S_d は弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ による余震荷重を示す。

*2: 固定荷重 (D) 及び弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ による余震荷重 (S_d) の組合せが, 強度評価上, 突き上げ津波荷重 (P_t) を緩和する方向に作用する場合, 保守的にこれら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許容限界は, VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえ, 「3. 評価対象部位」にて設定している評価対象部位毎に, 機能損傷モードを考慮し, 弁本体及び弁体については, 設計・建設規格に準じた供用状態 C の許容応力を用いる。

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については, 水圧試験により確認した圧力を許容値として用いる。水圧試験では, 逆止弁付ファンネルの閉状態に対して, 突き上げ津波荷重を模擬した静水圧 1.2MPa を圧縮スプリング, 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に負荷し, 有意な変形及び著しい漏えいがないことを確認した。

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, 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。また, 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の許容限界を表 5-5 に示す。

表 5-2 弁本体及び弁体の許容限界

| 供用状態 (許容応力状態) | 許容限界* ¹ | | |
|---------------------------------------|--------------------|-------|-------------------|
| | 一次応力 | | |
| C (Ⅲ _A S)* ³ | 圧縮 | 曲げ | 組合せ* ² |
| | 1.2・S | 1.2・S | 1.2・S |

注記 *1: 圧縮及び曲げは、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: 圧縮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

| 供用状態 (許容応力状態) | 評価 対象部位 | 許容限界 | | |
|-------------------------|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | 一次応力 | | |
| | | 圧縮 1.2・S (MPa) | 曲げ 1.2・S (MPa) | 組合せ 1.2・S (MPa) |
| C (Ⅲ _A S) | 弁本体 | 133 | 133 | 133 |
| | 弁体 | — | 133 | — |

表 5-5 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の許容限界

| 評価対象部位 | 水圧試験の圧力 (MPa) |
|---|------------------|
| 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 | 1.2 |

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強度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 5-6 に示す。

表 5-6 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 | 余震による設計震度* ¹ | |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------|------|
| | | | | |
| 弾性設計用地震動 S d - D 2 | 7000 | 3号機海水 熱交換器建屋 | 水平方向 C _{H S d} | 1.40 |
| | | | 鉛直方向 C _{V S d} | 0.77 |

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，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。

5.5 計算方法

逆止弁付ファンネルの強度評価は、構造部材に作用する応力が、「5.3 許容限界」で設定した許容限界以下であることを確認する。

5.5.1 荷重条件

以下の荷重条件にて応力計算を実施する。

(1) 固定荷重 (D)

逆止弁付ファンネルの自重は突き上げ津波荷重を緩和する方向に作用することから、考慮しない。ただし、余震による水平地震力を求めるに当たって、固定荷重として逆止弁付ファンネルの自重を考慮する。

(2) 突き上げ津波荷重 (P_t)

突き上げ津波荷重 P_t は、逆止弁付ファンネル上流から作用するものとする。

(3) 余震荷重 (S_d)

余震荷重 S_d は、逆止弁付ファンネルの設置位置における水平方向及び鉛直方向の地震荷重を考慮する。

5.5.2 応力計算

(1) 弁本体

a. 圧縮

鉛直応答加速度による余震荷重及び突き上げ津波荷重により，弁本体に加わる圧縮応力 σ_{v1} を以下の式より算出する。また，突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積 A_2 は，弁本体のうち突き上げ津波荷重を受ける面積が最も広い箇所を適用する。突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積は弁本体の外径 D_1 の円の面積を適用する。弁本体の断面積 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。ただし，逆止弁付ファンネルの自重 W_{d1} は圧縮応力 σ_{v1} を緩和する方向に作用するため考慮しない。

$$\sigma_{v1} = \frac{W_{d1} + F_{v1} + P_t \cdot A_2}{A_1}$$

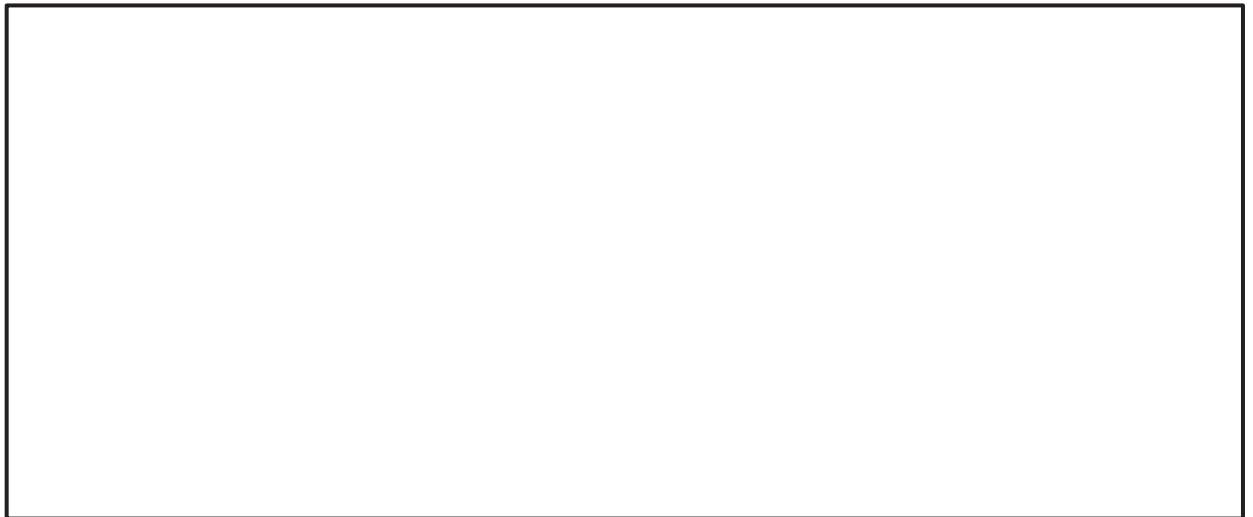


図 5-1 弁本体の構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

b. 曲げ

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。弁全体の長さ L_1 ，弁本体の外径 D_1 及び内径 d_1 について図 5-1 に示す。

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

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

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

(2) 弁体

a. 曲げ

鉛直応答加速度による余震荷重及び突き上げ津波荷重により、弁体に加わる曲げ応力 σ_{V2} を以下の式より算出する。また、突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる受圧面積 A_3 は、図 5-2 に示すとおり、突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる弁体の外径 D_2 の円の面積を適用する。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。

$$P_{V2} = \frac{W_{d2} + F_{V2}}{A_3} + P_t$$

$$\sigma_{V2} = 1.24 \cdot \frac{P_{V2}}{t^2} \cdot \left(\frac{D_2}{2}\right)^2$$

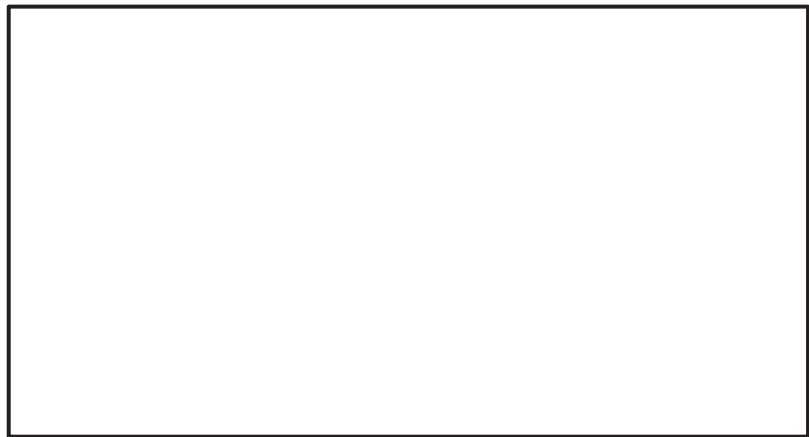


図 5-2 弁体の寸法図

(3) 弁体、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部

突き上げ津波荷重により弁体、取付金具（取付ねじ含む）、取付金具ピン及びねじ切り部に発生する圧力 P_w は以下の式より算出する。

$$P_w = P_t$$

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 5-7 に示す。

表 5-7 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) | 突き上げ津波荷重が弁本体に作用する評価に用いる受圧面積 A_2 (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 |
| 突き上げ津波荷重が弁体に作用する評価に用いる受圧面積 A_3 (mm ²) | 重力加速度 g (m/s ²) | 海水の密度 ρ_o (kg/m ³) | 抗力係数 C_d |
| 2.922×10^3 | 9.80665 | 1030 | 1.2 |
| 津波荷重水位 h (m) | 海水ポンプ室における津波の最大流速(鉛直方向) * U (m/s) | 慣性力(鉛直方向)評価高さ H (m) | |
| 19.5 | 1.0 | 17.5 | |

注記 * : 海水ポンプ室における最大鉛直流速に対し、保守的に設定した値。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 評価結果

6.1 応力評価

逆止弁付ファンネルの強度評価結果を表 6-1 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 6-1 逆止弁付ファンネルの応力評価結果

| 評価対象部位 | 発生応力 (MPa) | | 許容応力 (MPa) |
|--------|---------------|----|---------------|
| | 弁本体 | 圧縮 | |
| 曲げ | | 1 | 133 |
| 組合せ* | | 6 | 133 |
| 弁体 | 曲げ | 97 | 133 |

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

6.2 構造健全性評価

逆止弁付ファンネルの構造健全性評価結果を表 6-2 に示す。発生圧力が、有意な変形及び著しい漏えいがないことを確認した水圧試験圧力以下であることから、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。

表 6-2 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の構造健全性評価結果

| 評価対象部位 | 発生圧力 (MPa) | | 水圧試験の圧力 (MPa) |
|--------|---|----|------------------|
| | 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 | 圧縮 | |