

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-17-0024_改0
提出年月日	2021年2月2日

VI-3-別添 1-1-9 軽油タンクの強度計算書

02 ② VI-3-別添 1-1-9 R1

2021年2月

東北電力株式会社

## 目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	2
2.4 適用規格	4
3. 強度評価方法	4
3.1 記号の定義	4
3.2 評価対象部位	5
3.3 荷重及び荷重の組合せ	6
3.4 許容限界	8
3.5 評価方法	9
4. 評価条件	11
5. 強度評価結果	12

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、軽油タンク及び燃料移送ポンプ等が、竜巻時及び竜巻通過後においても、非常用高圧母線へ7日間の電源供給が継続できるよう燃料補給を行う機能を維持することを考慮して、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。

2. 基本方針

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等について、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の軽油タンク室及び軽油タンク室（H）に設置する。

軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の位置図を図 2-1 に示す。

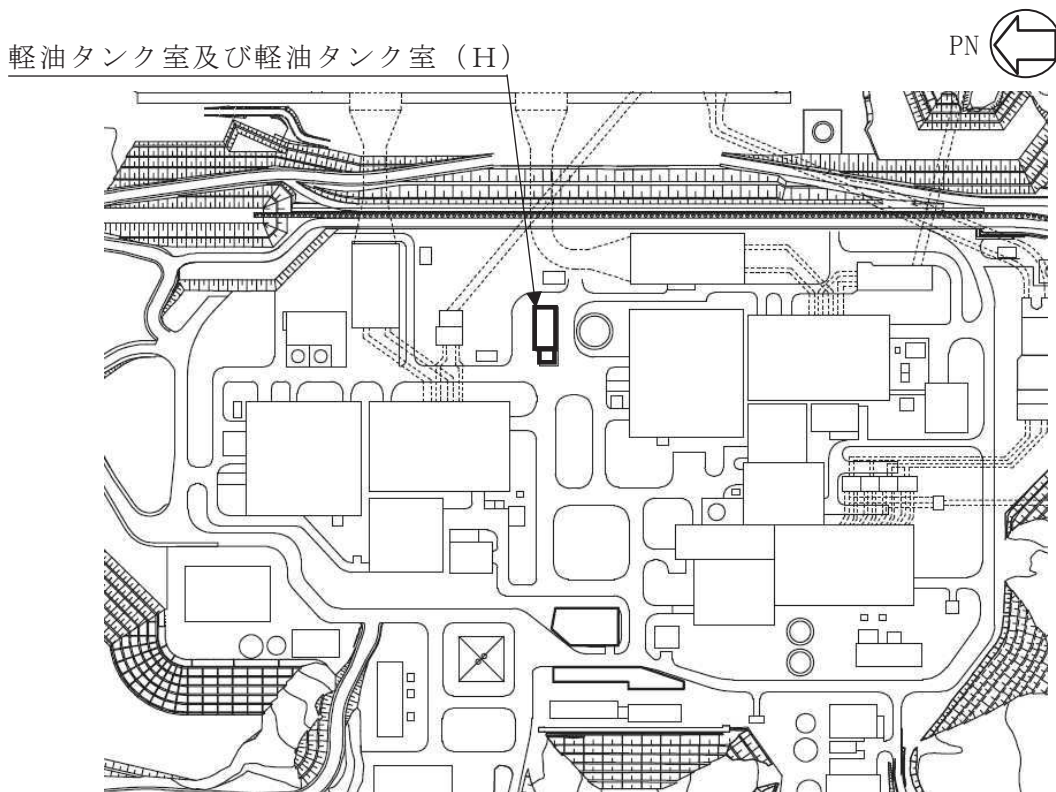


図 2-1 軽油タンク室及び軽油タンク室（H）の位置図

## 2.2 構造概要

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等について、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

軽油タンクは、大気開放型の鋼製の横置円筒形容器を主体構造とし、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）内に設置し、コンクリート基礎に基礎ボルトで固定する構造とする。

燃料移送ポンプ等は、鋼製の燃料移送ポンプ及び配管を主体構造とし、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）内に設置し、コンクリート基礎にサポート又は基礎ボルト等で固定する構造とする。

軽油タンク、燃料移送ポンプ等の概要図を図 2-2、図 2-3 に示す。

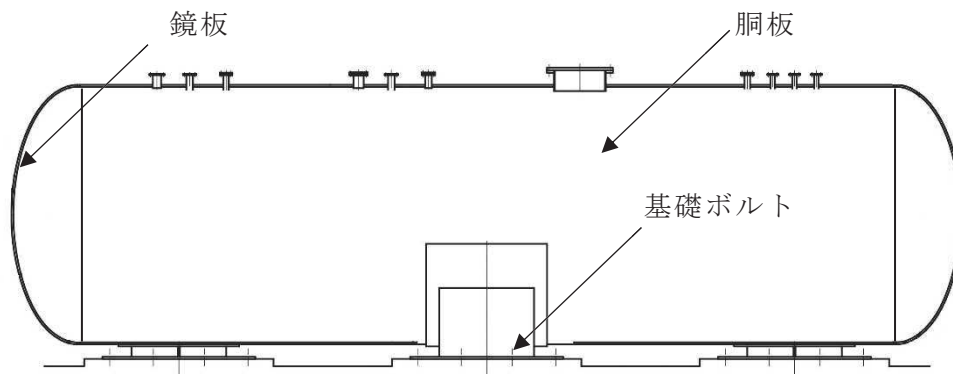


図 2-2 軽油タンクの概要図

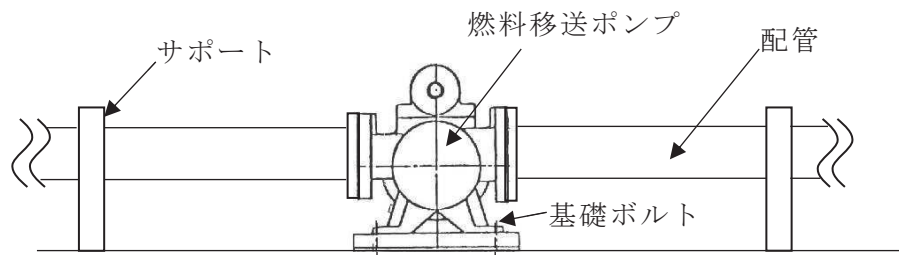


図 2-3 燃料移送ポンプ等の概要図

## 2.3 評価方針

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の強度評価は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」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、軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の評価対象部位に作用する応力が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の強度評価においては、その構造を踏まえて、評価対象部位を選定する。

(1) 構造強度評価の評価方針

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の構造強度評価フローを図 2-4 に示す。構造強度評価においては、軽油タンクは大気開放型であり、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）に設置されていることを踏まえて、設計竜巻の気圧差荷重による応力が設計上の許容外力以下であることを確認する。燃料移送ポンプ等に対しては、設計竜巻の気圧差荷重に内圧及び自重を加えた応力が、許容応力以下であることを確認する。

構造強度評価では、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻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」に示す評価式を用いる。軽油タンクの許容限界は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻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」に示す許容限界である、「J I S B 8 2 6 5-2017 圧力容器の構造—一般事項」（以下「J I S B 8 2 6 5」という。）より算出される値とする。燃料移送ポンプ等の許容限界は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻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」に示す許容限界である、「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）」、「原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）」及び「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」という。）の許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sとする。

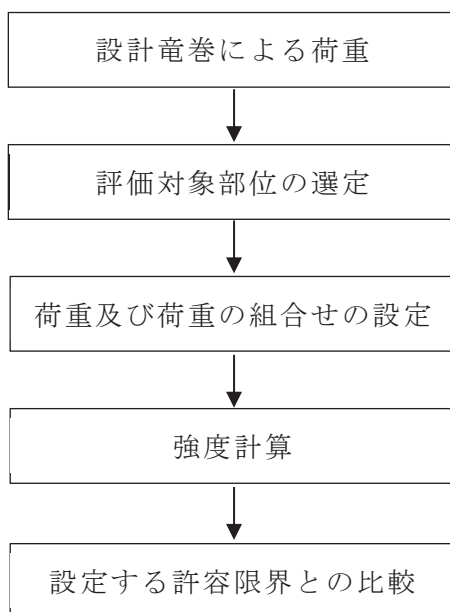


図2-4 軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の構造強度評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・日本建築学会 2004年 建築物荷重指針・同解説
- ・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)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1-1987)
- ・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)
- ・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。)
- ・日本機械学会 1987年 新版機械工学便覧
- ・J I S B 8 2 6 5-2017 圧力容器の構造—一般事項

## 3. 強度評価方法

### 3.1 記号の定義

#### (1) 構造強度評価の記号の定義

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の構造強度評価に用いる記号を表 3-1，表 3-2 にそれぞれ示す。

表 3-1 軽油タンクの構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	—	J I S B 8 2 6 5 図 E.9 に規定される値
B	MPa	J I S B 8 2 6 5 図 E.10 に規定される値
D <sub>o</sub>	mm	円筒胴の外径
h	mm	鏡板の深さ
L	mm	圧を保持する胴の設計長さ
P <sub>a</sub>	MPa	許容外圧
Δ P	MPa	設計竜巻による気圧低下量
t	mm	円筒胴の計算厚さ

表3-2 燃料移送ポンプ等の構造強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
D	mm	管外径
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
L	m	配管の支持間隔
m	kg/m	単位長さ当たりの配管の質量
P	MPa	内圧
S <sub>y</sub>	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 の表にて規定される設計降伏点
t	mm	板厚
w	N/m	単位長さ当たりの配管の自重による荷重
Z	mm <sup>3</sup>	断面係数
π	—	円周率
ΔP	MPa	設計竜巻の気圧低下量
W <sub>P</sub>	N	気圧差による荷重
σ	MPa	配管に生じる応力
σ <sub>WP</sub>	MPa	気圧差により生じる応力
σ <sub>自重</sub>	MPa	自重により生じる応力
σ <sub>内圧</sub>	MPa	内圧により生じる応力

### 3.2 評価対象部位

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻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」にて示す評価対象部位を踏まえて、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき選定する。

#### (1) 構造強度評価の評価対象部位

##### a. 軽油タンク

設計竜巻による気圧差荷重は、軽油タンクベント配管を介して軽油タンク本体に作用する。タンクの許容外圧については、鏡板と比較して胴板が小さいことから、タンクを構成する胴板を評価対象部位として選定する。

##### b. 燃料移送ポンプ等

設計竜巻による気圧差荷重は、燃料移送ポンプのケーシング及び接続する配管に作用する。設計竜巻の気圧差荷重により発生する応力については、ポンプケーシングと比較して断面積が小さく発生応力が大きくなる配管を評価対象部位として選定する。

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の評価対象部位を図3-1、図3-2に示す。

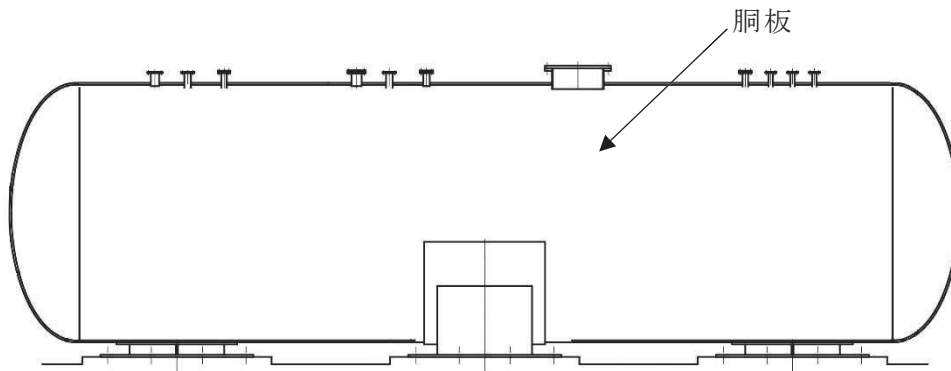


図 3-1 軽油タンクの評価対象部位

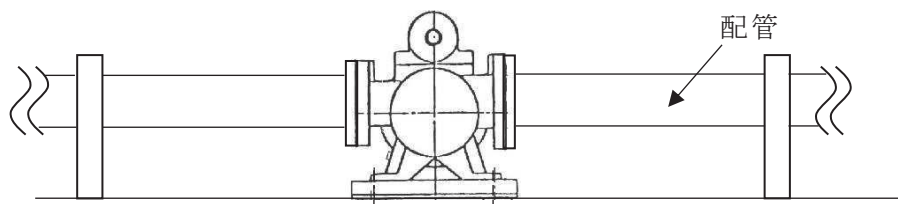


図 3-2 燃料移送ポンプ等の評価対象部位

### 3.3 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 1-1 竜巻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」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

#### (1) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

##### a. 軽油タンク

##### (a) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

##### イ. 設計竜巻による荷重

設計竜巻による荷重として、気圧差による荷重を考慮する。

なお、設計竜巻による風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重については、軽油タンク室及び軽油タンク室（H）により防護されることから考慮しない。



(イ) 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重 $W_p$ は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻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」に示す評価方法に従って評価する。

具体的な計算方法は、「3.5(1) 構造強度評価の評価方法」に示す。

(b) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻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」にて設定している荷重の組合せを踏まえて、設定する。

軽油タンクの胴板には、気圧差による荷重が作用する。

構造強度評価に用いる荷重を表3-3に示す。

表 3-3 構造強度評価に用いる荷重 (軽油タンク)

施設分類	評価対象部位	荷重
外気とつながっている屋内の外部事象防護対象施設	胴板	気圧差による荷重

b. 燃料移送ポンプ等

(a) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

イ. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。  
単位長さ当たりの自重による荷重は、以下のとおり計算する。

$$w = m \cdot g$$

ロ. 設計竜巻による荷重

設計竜巻による荷重として、気圧差による荷重を考慮する。

なお、設計竜巻による風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重については、軽油タンク室及び軽油タンク室 (H) により防護されることから考慮しない。

(イ) 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重 $W_p$ は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻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」に示す評価方法に従って評価する。

なお、配管については、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として考慮する。具体的な計算方法は、「3.5(1) 構造強度評価の評価方法」に示す。

ハ. 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、配管に作用する内圧を考慮する。

(b) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻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」にて設定している荷重の組合せを踏まえて、設定する。

配管本体には、自重，気圧差による荷重及び内圧が作用する。

構造強度評価に用いる荷重の組合せを表3-4に示す。

表 3-4 構造強度評価に用いる荷重の組合せ（燃料移送ポンプ等）

施設分類	評価対象部位	荷重
外気とつながっている屋内の外部事象防護対象施設	配管	①自重 ②気圧差による荷重 ③内圧

3.4 許容限界

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等の許容限界は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻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に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J I S B 8 2 6 5の許容外圧及びJ E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 構造強度評価の許容限界

軽油タンクの胴板の許容限界は、J I S B 8 2 6 5を適用し、「压力容器の胴及び鏡板」の規定うち、「円筒胴の計算厚さ」より許容外圧を算出する。

燃料移送ポンプ等の配管の許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2,3配管」の許容限界を適用する。設計荷重に対して、当該施設に要求される安全機能を維持できるように弾性設計とするため、許容応力状態Ⅲ<sub>A</sub>Sから算出した以下の許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、設計・建設規格 付録材料図表Part5,6の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の最高使用温度に応じた値をとるものとするが、温度が設計・建設規格 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、設計・建設規格 付録材料図表Part5,6で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いる。

軽油タンクの胴板の構造強度評価における許容限界を表3-5に、配管の構造強度評価における許容限界を表3-6に、許容応力を表3-7にそれぞれ示す。

表 3-5 軽油タンクの胴板の構造強度評価における許容限界

考慮する荷重	許容限界
	許容外圧
気圧差による荷重	$P_a$

表3-6 配管の構造強度評価における許容限界

許容応力状態	許容限界
	一次応力（膜＋曲げ）
$III_A S$	$S_y$

表 3-7 配管の構造強度評価における許容応力

評価対象部位	温度条件 (°C)	$S_y$ (MPa)
配管	66*1	199

注記\*1：最高使用温度

### 3.5 評価方法

#### (1) 構造強度評価の評価方法

軽油タンク及び配管の構造強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻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」にて設定している評価式を用いる。

##### a. 計算モデル

軽油タンクは、軽油タンクベント配管を通じて、設計竜巻の気圧差荷重がタンク内部に生じるものとする。この時、軽油タンクが軽油タンク室及び軽油タンク室（H）内に設置されていることを踏まえて、軽油タンクの外面は、設計竜巻の気圧差による外圧が作用するものとして評価を行う。

配管は、一定距離ごとにサポートによって支持されており、配管の自重、気圧差による荷重及び内圧を受ける単純支持梁として評価を行う。評価に用いる支持間隔は管外径、材質ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定する。

軽油タンク及び配管の計算モデル図を図3-3、図3-4に示す。

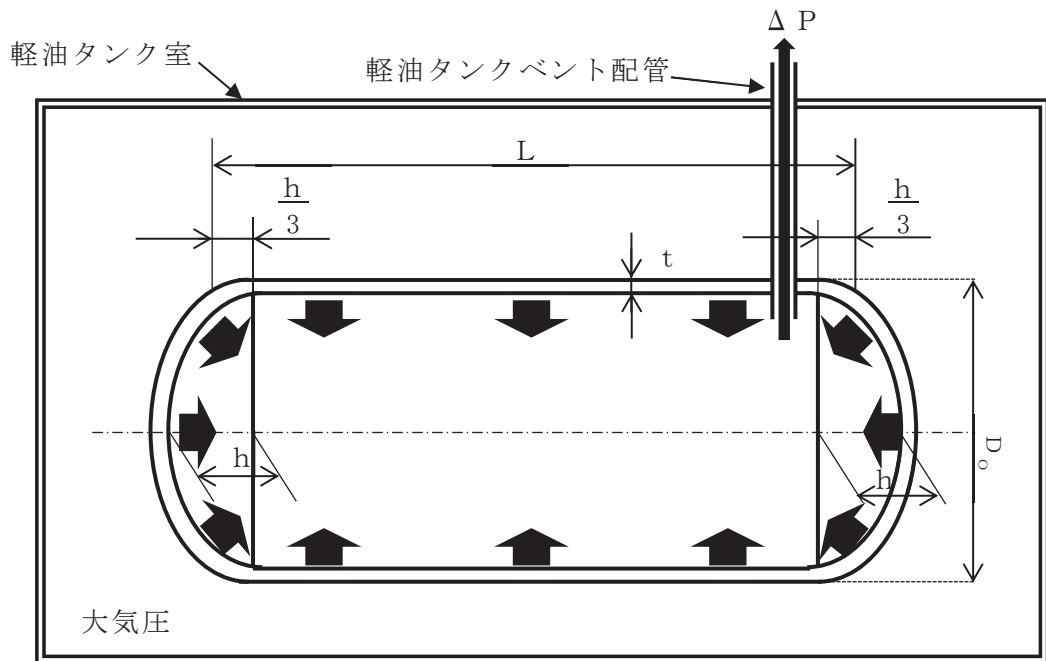


図 3-3 軽油タンクの計算モデル図

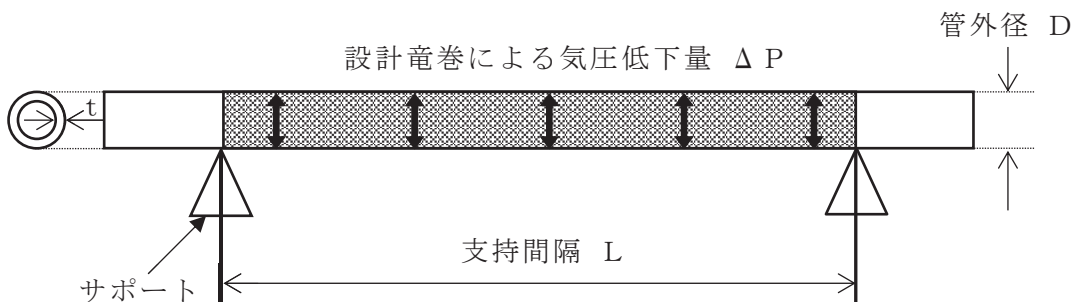


図 3-4 配管の計算モデル図

b. 計算方法

(a) 軽油タンク

気圧差による荷重は、軽油タンクの内圧が低下した分を外圧が上昇したものと考え、軽油タンクの強度が担保される許容外圧を、以下の式により算定する。

$$P_a = \frac{4 \cdot B \cdot t}{3 \cdot D_o}$$

(b) 配管

イ. 設計竜巻の気圧差により生じる応力

気圧差による荷重は、気圧が低下した分、内圧により生じる一次一般膜応力が増加すると考えて、その応力増加分を以下の式により算定する。

$$\sigma_{WP} = \frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot t}$$

ロ. 組合せ応力

竜巻荷重と組み合わせる荷重として、配管に常時作用する自重及び運転時に作用する内圧を考慮する。自重により生じる曲げ応力及び内圧により生じる一次一般膜応力は、以下の式により算定する。

$$\sigma_{自重} = \frac{w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

$$\sigma_{内圧} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t}$$

ここで、

$$Z = \frac{\pi}{32 \cdot D} \cdot \left\{ D^4 - (D - 2 \cdot t)^4 \right\}$$

したがって、自重により生じる曲げ応力、気圧差による荷重及び内圧により生じる一次一般膜応力とを足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により  $\sigma$  を算出する。

$$\sigma = \sigma_{自重} + \sigma_{WP} + \sigma_{内圧}$$

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 共通評価条件

$\Delta P$ (MPa)	$g$ ( $m/s^2$ )
$7.6 \times 10^{-3}$	9.80665

表 4-2 評価条件 (軽油タンク)

A (-)	B (MPa)	$D_o$ (mm)	L (mm)	t (mm)
$2.1 \times 10^{-4}$	22	4056	13867	28

表 4-3 評価条件（配管）

D (mm)	材料	L (m)	t (mm)	m (kg/m)	P (MPa)
60.5	STPT370	3.2	5.5	9.115	0.98
76.3	STPT370	0.492	5.2	12.05	0.98

5. 強度評価結果

(1) 構造強度評価結果

a. 軽油タンク

構造強度評価結果を表5-1に示す。

軽油タンクにおいて考慮する設計竜巻の気圧低下量は、許容外圧以下である。

表 5-1 構造強度評価結果（軽油タンク）

施設	評価部材	$\Delta P$ (MPa)	許容外圧 (MPa)
軽油タンク	胴板	$7.6 \times 10^{-3}$	0.20

b. 配管

構造強度評価結果を表5-2に示す。

配管に発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 構造強度評価結果（配管）

D (mm)	材料	$\sigma$ (MPa)	許容応力 (MPa)
60.5	STPT370	13	199
76.3	STPT370	4	199