

外竜巻00-01の修正方針

VI-1-1-1-2-4-1-1
竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針

目 次

	ページ
1. 概要	1
2. 強度評価の基本方針	1
2.1 評価対象施設	2
2.1.1 竜巻防護対象施設	2
2.1.2 重大事故等対処設備	3
2.2 評価方針	3
2.2.1 評価の分類	3
3. 構造強度設計	5
3.1 構造強度の評価方針	5
3.2 評価対象部位の選定	11
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	13
4.1 荷重の設定及び荷重の組合せ	13
4.2 許容限界	16
5. 強度評価方法	21
5.1 構造強度評価	21
5.1.1 建物・構築物に関する評価式	21
5.1.2 機器・配管系に関する評価式	21
5.2 衝突評価	37
5.2.1 建物・構築物	37
5.2.2 機器・配管系	37
6. 準拠規格	39

1. 概要

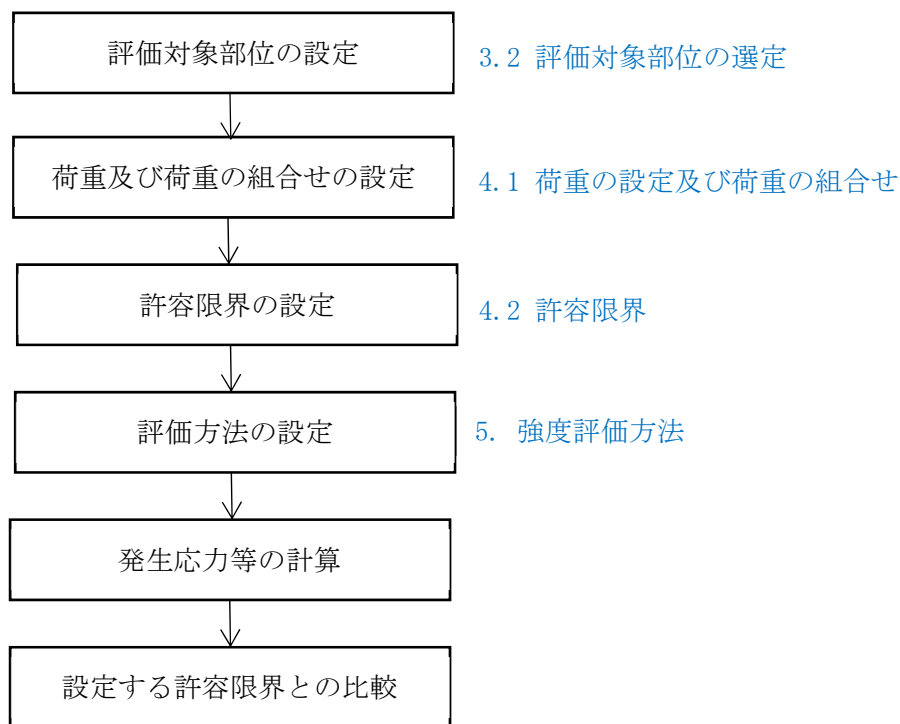
本資料は、「VI-1-1-1-2-2 竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定」及び「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」に基づき、竜巻の影響を考慮する施設が、設計荷重(竜巻)に対して要求される強度を有することを確認するための強度評価の方針について説明するものである。

強度評価は、「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」に示す準拠規格を用いて実施する。

なお、竜巻への配慮が必要な施設のうち、竜巻防護対策設備(飛来物防護ネット及び飛来物防護板)の評価方針については、設計飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することを防止するための防護措置であり、施設自体の変形によりエネルギーを吸収する設計としている。そのため、設計思想がその他の竜巻の影響を考慮する施設と異なることから、「VI-1-1-1-2-4-1-2 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 評価対象施設」に示す評価対象施設を対象として、「4.1 荷重の設定及び荷重の組合せ」で示す設計荷重(竜巻)により生じる応力等が「4.2 許容限界」で示す許容限界内にあることを「5. 強度評価方法」に示す計算方法を使用し、「6. 準拠規格」に示す規格を用いて確認する。強度評価の全体の流れを第2-1図に示す。



第2-1図 強度評価の流れ

2.1 評価対象施設

2.1.1 竜巻防護対象施設

「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」にて構造強度設計上の性能目標を設定している竜巻の影響を考慮する施設を強度評価の対象とする。強度評価を行うにあたり、評価対象施設を以下のとおり分類することとし、第2.1.1-1表に示す。

(1) 建物・構築物

a. 竜巻防護対象施設を収納する建屋

建屋内の竜巻防護対象施設を防護する外殻となる、竜巻防護対象施設を収納する建屋とする。

b. 屋外の竜巻防護対象施設（建屋）

設計荷重(竜巻)に対し構造強度を維持する必要がある建屋とする。

c. 使用済燃料収納キャスクを収納する建屋

使用済燃料収納キャスクを防護する外殻となる、使用済燃料収納キャスクを収納する建屋とする。

d. 竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある施設とする。

(2) 機器・配管系

a. 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設

気圧差による荷重に対し構造強度を維持する必要がある、外気と繋がっている建屋内の竜巻防護対象施設とする。

b. 屋外の竜巻防護対象施設（建屋以外）

設計荷重(竜巻)に対し構造強度を維持する必要がある屋外の竜巻防護対象施設とする。

c. 竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある施設とする。

第2.1.1-1 評価対象施設(竜巻防護対象施設)

評価区分	施設区分	評価対象施設
機器・配管系	屋外の竜巻防護対象施設 (建屋以外)	<ul style="list-style-type: none"> ・安全冷却水 B 冷却塔 ・安全冷却水系(安全冷却水 B 冷却塔周りの配管)

注記：第 1 回設工認申請の対象設備のみを記載。

なお、その他の竜巻の影響を考慮する施設に係る強度計算の方針については、各施設の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

2.1.2 重大事故等対処設備

重大事故等対処設備については、当該設備の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

2.2 評価方針

竜巻の影響を考慮する施設を対象に、「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」で示す構造強度設計上の性能目標を達成するため、竜巻に対する強度評価を実施する。

強度評価の評価方針は、それぞれ「2.2.1(1) 構造強度評価」の方針、「2.2.1(2) 衝突評価」の方針及び「2.2.1(3) 動的機能維持評価」の方針に分類でき、評価対象施設はこれらの評価を実施する。

2.2.1 評価の分類

(1) 構造強度評価

構造強度評価は、設計荷重(竜巻)により生じる応力等に対し、評価対象施設及びその支持構造物が、当該施設の機能を維持可能な構造強度を有することを確認する。構造強度評価は、構造強度により閉止性及び開閉機能を確保することの評価を含む。

構造強度評価は、評価対象施設の構造を考慮し、以下の分類ごとの評価方針を「3.1(1)構造強度評価」に示す。

a. 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

b. 機器・配管系

機器・配管系における評価分類と評価対象施設を第2.2.1-1表に示す。

第2.2.1-1表 機器・配管系における評価分類と評価対象施設

評価区分	評価分類	評価対象施設
機器・配管系	冷却塔	・安全冷却水 B 冷却塔
	配管	・安全冷却水系 (安全冷却水B冷却塔周りの配管)

(2) 衝突評価

衝突評価は、設計竜巻による設計飛来物による衝撃荷重に対する直接的な影響の評価として、評価対象施設が、貫入が生じた場合においても、当該施設の機能を維持可能な状態に留めることを確認する。

評価対象施設の構造及び当該施設の機能を考慮し、飛来物の衝突により想定される損傷モードを以下のとおり分類し、それぞれの評価方針を「3.1(2) 衝突評価」に示す。

a. 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

b. 機器・配管系

(a) 貫入

(3) 動的機能維持評価

動的機能維持評価は、設計荷重(竜巻)に対し、竜巻時及び竜巻通過後において、冷却塔のファン駆動部等の動的機器が、当該施設の動的機能を維持可能なことを確認する。

a. 機器・配管系

(a) 冷却塔

3. 構造強度設計

3.1 構造強度の評価方針

「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度上の性能目標を達成するために「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「5.1 構造設計」に示す設計方針を踏まえ、「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.1.3 荷重の設定及び荷重の組合せ」で設定している荷重、「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.1.4 竜巻の影響を考慮する施設に対する竜巻防護設計」に示す許容限界を適切に考慮して、評価を実施する。

(1) 構造強度評価

a. 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

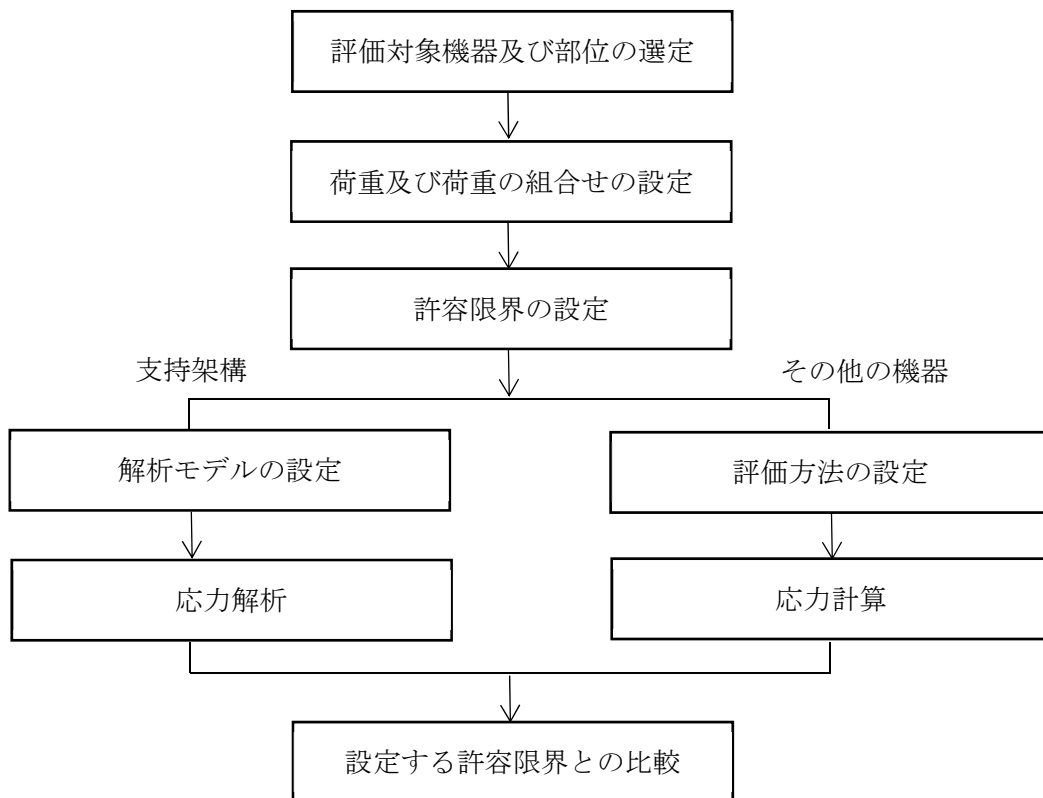
b. 機器・配管系

(a) 冷却塔

冷却塔の構造強度評価フローを第3.1-1図に示す。

構造強度評価については、設計荷重（竜巻）に対し、冷却塔の機能に影響を与える機器である支持架構（基礎ボルト含む）、管束、ファン駆動部、遮熱板及びルーバを構成する部材のうち、設計荷重（竜巻）が直接作用する部位及び直接作用する部位を介して荷重が作用する部位に生じる応力が、許容応力以下であることを計算により確認する。

評価方法としては、「5.1.2(1) 冷却塔」に示すとおり、FEM等を用いた解析法若しくは定式化された評価式を用いた解析法により評価対象部位に対する発生荷重及び発生モーメントを算定する。

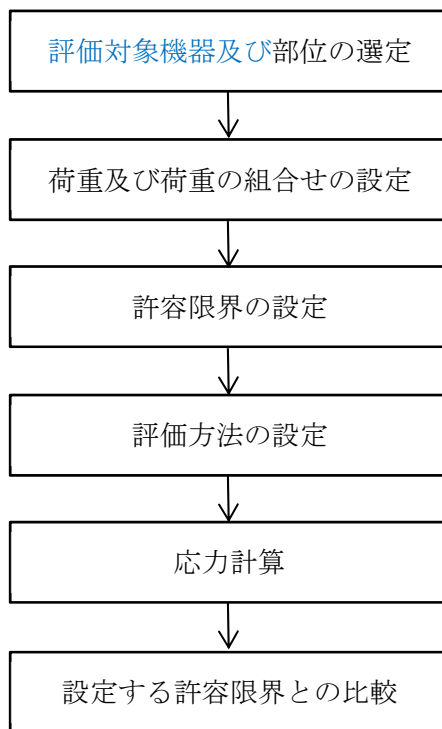


第3.1-1図 冷却塔の構造強度評価フロー

(b) 配管

配管の構造強度評価フローを第3.1-2図に示す。

構造強度評価については、設計荷重(竜巻)に対し、配管本体に生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.2(2)配管」に示すとおり、評価式により算出した応力を基に評価を行う。



第3.1-2図 配管の強度評価フロー

(2) 衝突評価

a. 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

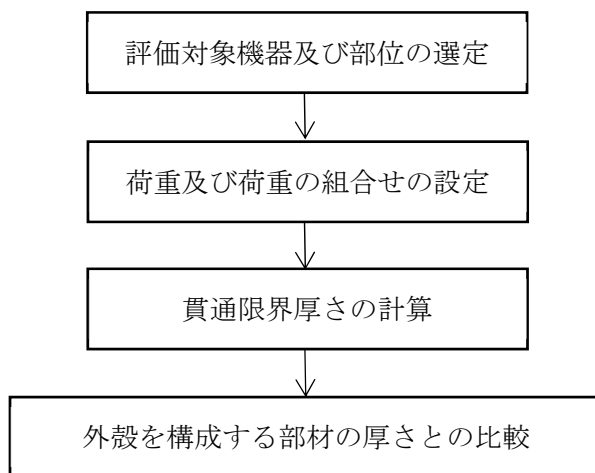
b. 機器・配管系

(a) 冷却塔

冷却塔の衝突評価フローを第3.1-3図に示す。衝突評価については、防護ネットを通過する飛来物である砂利による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材の厚さ未満であることを計算により確認することを基本とする。ただし、耐圧部については、外殻を構成する部材の厚さから耐圧強度上必要な厚さ※を差し引いた残りの厚さが貫通限界厚さ以上となることを確認する。

評価方法としては、「5.2.2 機器・配管系」に示すとおり、評価式により算出した貫通限界厚さを基に評価を行う。

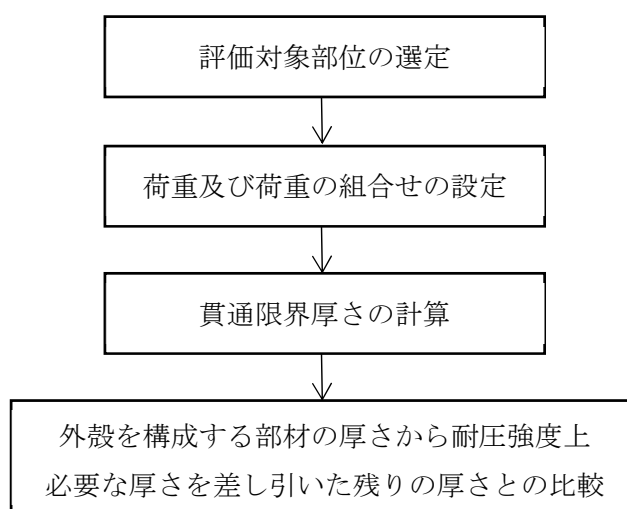
※ 耐圧強度上必要な厚さとは、最高使用圧力等使用環境から要求される厚さであり、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」(社)日本機械学会(以下、「JSME」という。)に基づき算出される。



第3.1-3図 冷却塔の衝突評価フロー

(b) 配管

配管の衝突評価フローを第3.1-4図に示す。衝突評価については、防護ネットを通過する飛来物である砂利による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材の厚さから耐圧強度上必要な厚さを差し引いた残りの厚さが貫通限界厚さ以上となることをもって、その施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認する。評価方法としては、「5.2.2 機器・配管系」に示すとおり、評価式により算出した貫通限界厚さを基に評価を行う。



第3.1-4図 配管の衝突評価フロー

(3) 動的機能維持評価

a. 機器・配管系

(a) 冷却塔

動的機能維持評価は、設計荷重(竜巻)に対し、竜巻時及び竜巻通過後において、動的機器であるファン駆動部が、動的機能を維持可能なことを確認する評価であり、以下の2点について評価を行う。

- ・ファンリングとファンの接触評価
- ・原動機等の軸受け部の破損評価

安全冷却水B冷却塔においては、動的機能を維持するため、以下の設計としている。

- ・ [REDACTED]
[REDACTED]十分な曲げ剛性を有する設計とすること
- ・ [REDACTED]
[REDACTED]変位は生じない設計とすること

上記の設計を踏まえ、各機器の取付ボルトの構造健全性を確認することで、動的機能は維持されていると判断できることから、動的機能維持評価は、取付ボルトの構造健全性評価に包絡される。

3.2 評価対象部位の選定

(1) 構造強度評価対象部位の選定

a. 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

b. 機器・配管系

「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「5.1 構造設計」に示す構造設計と作用する荷重の伝達を基に評価対象部位を選定する。

評価対象機器は、安全機能を損なわないよう要求される機能を維持するために必要な機器とし、評価対象機器のうち、設計荷重(竜巻)が直接作用する部位及び直接作用する部位を介して荷重が作用する部位を評価対象部位とする。

(a) 冷却塔

評価対象機器は、冷却機能を維持するために必要な機器及び冷却機能を維持するために必要な機器に対し影響を及ぼすおそれのある機器とし、評価対象機器のうち、設計荷重(竜巻)が直接作用する部位及び直接作用する部位を介して荷重が作用する定着部を評価対象部位とする。第3.2-1表に評価対象機器と評価対象部位を示す。

第 3.2-1 表 構造強度評価の評価対象部位

評価分類	施設名称	評価対象機器	評価対象部位
冷却塔	安全冷却水 B冷却塔	管束	管束フレーム
			ヘッダー
			管束取付ボルト
		ファン駆動部	ファンリング
			ファンリングサポート
			ファンリングサポート取付ボルト
		遮熱板	遮熱板
			遮熱板取付ボルト
		ルーバ	ルーバ取付ボルト
		支持架構 (基礎ボルト含む)	支持架構を構成する部材 (主柱, 床はり, 2F機械台はり, 立面ブレース及び水平ブレース)
基礎ボルト			

(b) 配管

評価対象機器は、冷却機能を維持するために必要な機器とし、評価対象部位は設計荷重(竜巻)が直接作用する部位とする。

第3.2-2表 構造強度評価の評価対象部位

評価分類	施設名称	評価対象機器	評価対象部位
配管	安全冷却水系(安全冷却水B冷却塔周りの配管)	配管	配管本体

(2) 衝突評価対象部位の選定

a. 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

b. 機器・配管系

「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「5.1 構造設計」に示す構造設計と作用する荷重の伝達を基に評価対象部位を選定する。

評価対象機器は、飛来物による衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、安全機能を損なわないよう要求される機能を維持するために必要な機器とし、評価対象機器に対し、外殻を構成する部材のうち最も薄い板厚を有する部材を評価対象部位とする。

(a) 冷却塔

評価対象機器は、飛来物による衝撃荷重が作用し、貫入する可能性があるため、冷却能力を維持するために必要な機器を評価対象機器とし、評価対象機器に対し、外殻を構成する部材の中から最も薄い板厚を有する部材を評価対象部位とする。第3.2-3表に評価対象機器と評価対象部位を示す。

第3.2-3表 衝突評価の評価対象機器

評価分類	施設名称	評価対象機器	評価対象部位
冷却塔	安全冷却水B冷却塔	管束	管束フレーム
		ファン駆動部	ファンリング
		支持架構 (基礎ボルト含む)	床はり
		遮熱板	遮熱板本体

(b) 配管

評価対象機器は、冷却機能を維持するために必要な機器とし、評価対象部位は、設計荷重(竜巻)が直接作用する部位とする。評価において考慮する飛来物の衝突により、配管に飛来物による衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある、外殻を構成する部材のうち最も薄い板厚を有する部材を評価対象部位とする。第3.2-4表に評価対象機器と評価対象部位を示す。

第3.2-4表 構造強度評価の評価対象部位

評価分類	施設名称	評価対象機器	評価対象部位
配管	安全冷却水系(安全冷却水B冷却塔周りの配管)	配管	配管本体

4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界

評価対象施設の強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せを、「4.1 荷重の設定及び荷重の組合せ」に、許容限界を「4.2 許容限界」に示す。

4.1 荷重の設定及び荷重の組合せ

(1) 荷重の組合せ

評価対象施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、竜巻ガイドを参考に設計竜巻の風圧力による荷重(W_w)、気圧差による荷重(W_p)及び設計飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重とし、下式より算出する。

$$W_{T1} = W_p \quad \dots (4.1-1)$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M \quad \dots (4.1-2)$$

評価対象施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。各施設の設計竜巻による荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造を踏まえ適切な組合せを設定する。

各評価対象施設における評価項目ごとの荷重の組合せ一覧表を第4.1-1表に示す。

第4.1-1表 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重							
			常時作用する荷重			風圧力による荷重	気圧差による荷重	飛来物による衝撃荷重	運転時荷重	積雪荷重
			自重	水頭圧	積載荷重					
機器・配管系	冷却塔	構造強度	[Redacted]							
		衝突								
	配管	構造強度	○	—	—	○	○	—	○*4	—
		衝突	—	—	—	—	—	○	—	—

(○：考慮する荷重を示す。)

注記) [Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

*4：配管に作用する内圧

(2) 荷重の算定方法

「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(1) 荷重の種類」で設定している荷重の算出式を以下に示す。

a. 記号の定義

荷重の算出に用いる記号を第4.1-2表に示す。

第4.1-2表 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	施設の受圧面積
C	—	風力係数(施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根, 壁等)に応じて設定する。)
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	N	自重による荷重
m	kg	質量
q	N/m ²	設計用速度圧
R _m	m	最大接線風速半径
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
V _{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _P	N	気圧差による荷重
W _W	N	風圧力による荷重
ρ	Kg/m ³	空気密度
ΔP _{max}	N/m ²	設計竜巻の最大気圧低下量

b. 自重による荷重の算出

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g \quad \dots (4.1-3)$$

c. 竜巻による荷重の算出

(a) 風圧力による荷重

風圧力による荷重は、竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻ガイドを参考に次式のとおり算出する。

$$W_W = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots (4.1-4)$$

ここで、

$$q = 1/2 \cdot \rho \cdot V_D^2 \quad \dots (4.1-5)$$

(b) 気圧差による荷重

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

$$W_p = \Delta P_{\max} \cdot A \quad \cdot \cdot \quad (4.1-6)$$

ここで、

$$\Delta P_{\max} = \rho \times V_{Rm}^2 \quad \cdot \cdot \quad (4.1-7)$$

(c) 設計飛来物による衝撃荷重

設計飛来物による衝撃荷重を考慮する各施設の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

評価条件を第4.1-3表に示す。

第4.1-3表 評価条件

最大風速 V_D (m/s)	空気密度 ρ (kg/m ³)	ガスト影響 係数 G (-)	設計用 速度圧 q (N/m ²)	最大接線 風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧 低下量 ΔP_{\max} (N/m ²)
100	1.22	1.0	6100	85	8900

4.2 許容限界

許容限界は、「VI-1-1-1-2-3 竜巻の影響を考慮する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」で示す構造強度設計上の性能目標及び「3.1 構造強度の評価方針」に示す評価方針を踏まえて、評価項目ごとに設定する。

「4.1 荷重の設定及び荷重の組合せ」で示す荷重及び荷重の組合せを含めた、評価項目ごとの許容限界を第4.2-1表に示す。

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）日本電気協会）、
「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編JEAG 4601-補 1984」
（（社）日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991追補版」
（（社）日本電気協会）（以下、「JEAG4601」という。）を準用できる施設については、
JEAG4601に基づきJSMEの付録材料図表及びJISの材料物性値により許容限界を算出している。
その他施設や衝撃荷重のみを考慮する施設については、JSMEや既往の実験式に基づき許容限界を設定する。

ただし、JSMEの適用を受ける機器であって、許容値の規定がJSMEにないものは機能維持の評価方針を考慮し、JEAG4601に基づいた許容限界を設定する。

第 4.2-1 表 施設ごとの許容限界(1/2)

施設名称	荷重の 組合せ	評価対象 部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
				応力等の状態	限界状態	
安全冷却水 B 冷却塔	F _d +W _T (W _W , W _P)	管束フレーム ヘッダー 管束取付ボルト ファンリング ファンリングサポート ファンリングサポート取付ボルト 遮熱板 遮熱板取付ボルト ルーバ取付ボルト 支持架構を構成する部材 基礎ボルト	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	JEAG4601 等に準じて許容応力状態Ⅲ _A S の許容応力以下とする。
		外殻を構成する部材				施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。

第 4. 2-1 表 施設ごとの許容限界 (2/2)

施設名称	荷重の 組合せ	評価対象 部位	評価 項目	機能損傷モード		許容限界
				応力等の状態	限界状態	
安全冷却水系 (安全冷却水 B 冷却塔周りの 配管)	$F_d + W_T (W_W, W_P, W_M) + F_P$	配管本体	構造 強度	一次 (膜+曲げ)	部材の降伏	JEAG4601 等に準じて許容応 力状態Ⅲ _A S の許容応力以下 とする。
		外殻を構成する部材	衝突	変形	流路を確保 する機能の 喪失	評価式により算定した貫通 限界厚さが、外殻を構成する 部材の厚さから耐圧強度上 必要な厚さを差し引いた残 りの厚さ未満とする。

(1) 許容限界の設定

a. 構造強度評価

(a) 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

(b) 機器・配管系

イ. 冷却塔

構造強度評価においては、設計荷重(竜巻)に対し、冷却塔の機能に影響を与える機器を構成する部位のうち、設計荷重(竜巻)が直接作用する部位及び直接作用する部位を介して荷重が作用する部位が、概ね弾性域に収まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、JEAG4601等に準じて許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

ロ. 配管

構造強度評価においては、設計荷重(竜巻)に対し、配管本体が、概ね弾性域に収まることにより、その施設の安全機能に影響を及ぼすことのないことを踏まえ、JEAG4601等に準じて許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を許容限界として設定する。

b. 衝突評価

(a) 建物・構築物

建物・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

(b) 機器・配管系

衝突評価においては、飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、部材厚さを許容限界として設定する。ただし、耐圧部については部材厚さから耐圧強度上必要な厚さを差し引いた残りの厚さを許容限界として設定する。

配管における耐圧強度上必要な厚さについて平成7年7月22日付け7安(核規)第710号にて認可を受けた設工認申請書の「V-1 主要な容器及び管の耐圧強度及び耐食性に関する設計の基本方針」の別添-6 図-37の値を用いる。

5. 強度評価方法

評価手法は、以下に示す解析法により、適用性に留意の上、規格及び基準類並びに既往の文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とする。

- ・ FEM等を用いた解析法
- ・ 定式化された評価式を用いた解析法

竜巻ガイドを参照して、設計竜巻荷重は、地震荷重と同様に施設に作用する場合は、地震荷重と同様に外力として評価をするため、JEAG4601を適用可能とする。

ただし、閉じた施設となる屋外配管等については、その施設の大きさ及び形状を考慮した上で、気圧差を見かけ上の配管の内圧の増加として評価する。

風圧力による荷重の影響を考慮する施設については、建築基準法施行令等に基づき風圧力による荷重を考慮し、設備の受圧面に対して等分布荷重として扱って良いことから、評価上高さの1/2又は荷重作用点より高い重心位置に集中荷重として作用するものとする。

設計竜巻による荷重が作用する場合に強度評価を行う施設のうち、強度評価方法として、[FEM等を用いた解析法](#)、容器及び建屋等の定式化された評価式を用いた解析法を以下に示す。

5.1 構造強度評価

5.1.1 建物・構築物に関する評価式

建屋・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

5.1.2 機器・配管系に関する評価式

(1) 冷却塔

a. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を[第5.1.2-1表](#)に示す。

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

イ. 支持架構を構成する部材の記号の定義

支持架構を構成する部材の構造強度評価に用いる記号を第5.1.2-2表に示す。

第5.1.2-2表 支持架構の応力評価に用いる記号

記号	単 位	定 義
F_a	N	はり要素に作用する引張, 圧縮荷重
F_y, F_z	N	はり要素に作用するせん断荷重
M_y, M_z	N・mm	はり要素に作用する曲げモーメント
M_a	N・mm	はり要素に作用するねじりモーメント
A_f	mm ²	部材の断面積
A_{f_y}, A_{f_z}	mm ²	部材の有効せん断断面積
Z, Z_y, Z_z	mm ³	部材の断面係数
Z_p	mm ³	部材のねじり断面係数
$1.5f_t$	MPa	許容引張応力
$1.5f_s$	MPa	許容せん断応力
$1.5f_c$	MPa	許容圧縮応力
$1.5f_b$	MPa	許容曲げ応力
σ_t	MPa	引張応力
σ_c	MPa	圧縮応力
σ_b	MPa	曲げ応力
τ	MPa	せん断応力
i, i_y, i_z	mm	部材の断面二次半径
E	MPa	縦弾性係数
F	MPa	「JSME S NC1」SSB-3121.1(1)に定める値

ロ. 基礎ボルト

基礎ボルトの応力評価に用いる記号を第5.1.2-3表に示す。

第5.1.2-3表 基礎ボルトの応力評価に用いる記号

記号	単位	定義
F_{bt}	N	ボルトの引張力
F_{bs}	N	ボルトのせん断力
A_b	mm ²	ボルトの断面積
σ_{ao}	MPa	ボルトに生じる引張応力
τ_b	MPa	ボルトに生じるせん断応力
n_a	本	柱脚部1ヶ所当たりのボルト本数
F	MPa	「JSME」SSB-3121.1(1)に定める値
$1.5f_t$	MPa	許容引張応力
$1.5f_s$	MPa	許容せん断応力

ハ. 機器本体（管束フレーム、ヘッダー、ファンリング、ファンリングサポート、遮熱板）

機器本体の応力評価に用いる記号を第5.1.2-4表に示す。

第5.1.2-4表 機器本体の応力評価に用いる記号

記号	単位	定義
β_1	—	4辺支持平板として評価する機器の最大応力の係数
a	mm	4辺支持平板として評価する機器の短手側の辺の長さ
b	mm	4辺支持平板として評価する機器の長手側の辺の長さ
t	mm	4辺支持平板として評価する機器の板厚
σ_1	MPa	ヘッダーの風圧力による応力
σ_2	MPa	ヘッダーの内圧及び気圧差による応力
σ_i	MPa	ヘッダーの内圧による応力
B	mm	ヘッダーの高さ
L	mm	ヘッダーの支持間距離
P_i	MPa	ヘッダーの内圧
P_b	MPa	気圧差による圧力
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	重心高さ
m	kg	自重
Z	mm ³	断面係数
n	本	ファンリングサポートの本数
ℓ	mm	機器中心と取付ボルトの距離
σ	MPa	発生応力
F	MPa	「JSME」SSB-3121.1(1)に定める値
1.5f _b	MPa	許容曲げ応力

- 二. 機器取付ボルト（管束取付ボルト，ファンリングサポート取付ボルト，遮熱板取付ボルト，ルーバ取付ボルト）

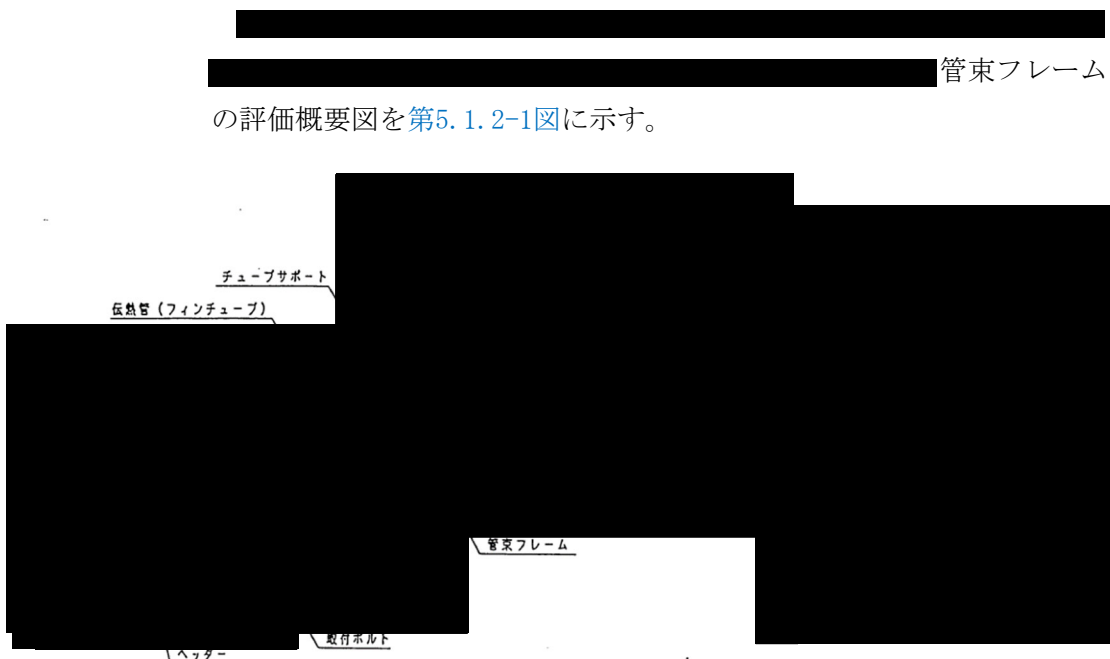
機器取付ボルトの応力評価に用いる記号を第5.1.2-5表に示す。

第5.1.2-5表 機器取付ボルトの応力評価に用いる記号

記号	単位	定義
m	kg	各評価機器の自重
g	m/s ²	重力加速度 (g=9.80665)
h	mm	各評価機器の重心高さ
A _b	mm ²	各評価機器の取付ボルトの軸断面積
n _t	本	引張力の作用する取付ボルトの評価本数
n	本	せん断力の作用する取付ボルトの評価本数
ℓ	mm	取付ボルト間の中心から，各取付ボルトまでの距離
L	mm	取付ボルト間の距離
σ _o	MPa	引張応力
F	MPa	「JSME」SSB-3121.1(1)に定める値
τ _b	MPa	せん断応力
1.5f _t	MPa	許容引張応力
1.5f _s	MPa	許容せん断応力

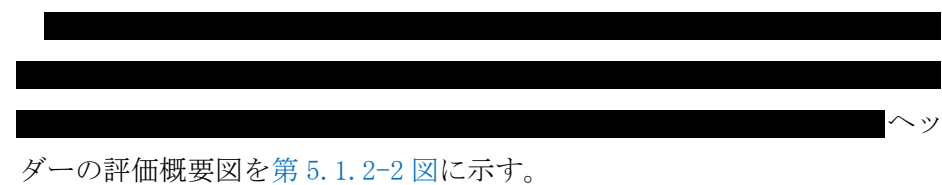
(b) 評価モデル

イ. 管束フレーム

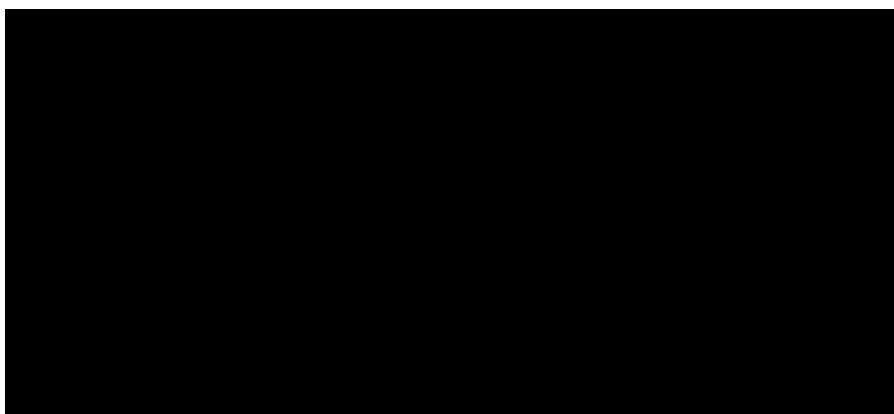


第 5. 1. 2-1 図 評価モデル (管束フレーム)

ロ. ヘッダー



風圧力

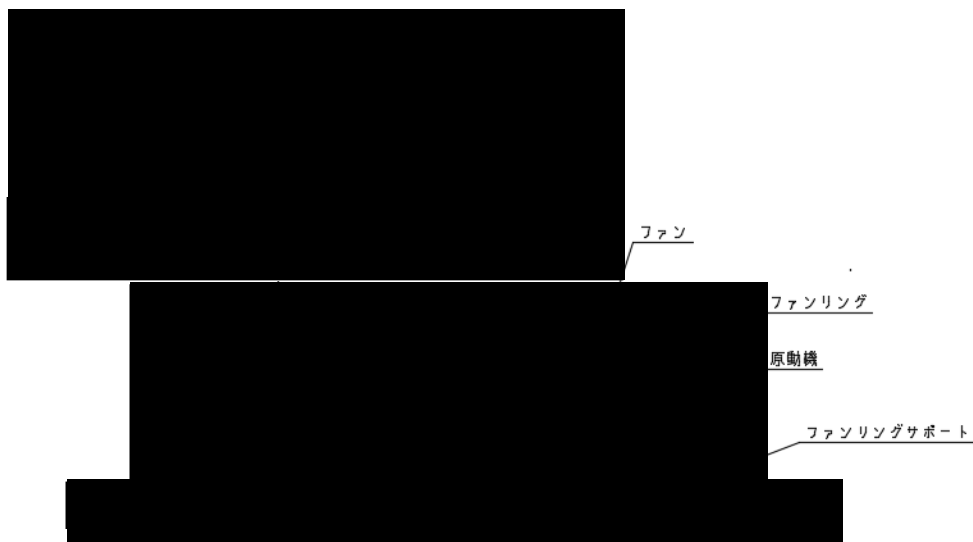


第 5. 1. 2-2 図 評価モデル (ヘッダー)

ハ. ファンリング

[Redacted]

[Redacted] ファンリングの評価概要図を第 5.1.2-3 図に示す。



第 5.1.2-3 図 評価モデル (ファンリング)

ニ. ファンリングサポート

[Redacted]

[Redacted] ファンリングサポートの評価概要図を第 5.1.2-4 図に示す。



第 5.1.2-4 図 評価モデル (ファンリングサポート)

ホ. 遮熱板

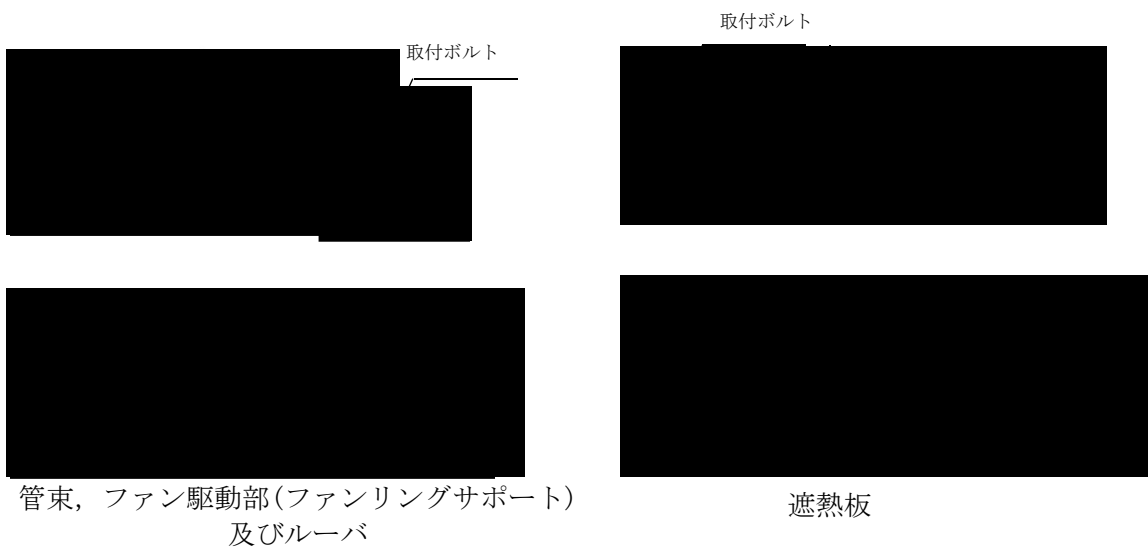
遮熱板に風圧力による荷重が作用し，遮熱板下端に全体の曲げ荷重が作用するものとして評価する。遮熱板の評価概要図を第 5.1.2-5 図に示す。



第 5.1.2-5 図 評価モデル (遮熱板)

へ. 機器取付ボルト (管束取付ボルト, ファンリングサポート取付ボルト, 遮熱板取付ボルト, ルーバ取付ボルト)

管束, ファン駆動部(ファンリングサポート), 遮熱板及びルーバに生じるせん断応力及び引張応力は, 取付ボルトの配置形状に応じて以下の計算式により求めるものとする。取付ボルト配置を第 5.1.2-6 図に示す。



第 5.1.2-6 図 取付ボルトの配置

(二) 遮熱板

以下の計算式により求めるものとする。

$$\sigma = \frac{W_w h - m g \ell}{Z} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-14)$$

ロ. 機器取付ボルト (管束取付ボルト, ファンリングサポート取付ボルト, 遮熱板取付ボルト, ルーバ取付ボルト)

(イ) ファンリングサポート, 管束及びルーバ

① 引張応力

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987((社)日本電気協会)」に記載されている式を準用し, 次式より算出する。

$$\sigma_0 = -\frac{m g \ell}{n_t LA_b} + \frac{W_w h}{n_t LA_b} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-15)$$

② せん断応力

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987((社)日本電気協会)」に記載されている式を準用し, 次式より算出する。

$$\tau_b = \frac{W_w}{A_b n} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-16)$$

(ロ) 遮熱板

① 引張応力

(5.1.2-16)式において, 遮熱板はボルトの設置方向が異なることから, 次式により算出する。

$$\sigma_0 = \frac{W_w}{A_b n} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-17)$$

② せん断応力

(5.1.2-15)式において, 遮熱板はボルトの設置方向が異なることから, 次式により算出する。

$$\tau_b = -\frac{m g \ell}{n LA_b} + \frac{W_w h}{n LA_b} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-18)$$

ハ. 支持架構を構成する部材

以下の式により応力を算出する。

(イ) 引張応力及び圧縮応力

$$\sigma_t = \frac{F_a}{A} \quad \dots (5.1.2-1)$$

$$\sigma_c = \frac{F_a}{A} \quad \dots (5.1.2-2)$$

(ロ) 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M_y}{Z_y} + \frac{M_z}{Z_z} \quad \dots (5.1.2-3)$$

(ハ) せん断応力

$$\tau = \frac{F_y}{A_{fy}} + \frac{F_z}{A_{fz}} + \frac{M_a}{Z_p} \quad \dots (5.1.2-4)$$

(ニ) 組合せ

発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007((社)日本機械学会)に基づき, 引張力と曲げモーメントを受ける部材の組合せ応力を下式より算出する。

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{1.5 f_t} \leq 1.0 \quad \dots (5.1.2-5)$$

同様に, 圧縮力と曲げモーメントを受ける部材の組合せ応力を下式より算出する。

$$\frac{\sigma_c}{1.5 f_c} + \frac{\sigma_b}{1.5 f_b} \leq 1.0 \quad \dots (5.1.2-6)$$

二. 基礎ボルト

以下

の式により応力を算出する。

(イ) 引張応力

$$\sigma_{ao} = \frac{F_{bt}}{A_b \cdot n_a} \quad \dots (5.1.2-7)$$

(ロ) せん断応力

$$\tau_b = \frac{F_{bs}}{A_b \cdot n_a} \quad \dots (5.1.2-8)$$

(2) 配管

a. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を第5.1.2-6表に示す。

第5.1.2-6表 評価対象部位及び評価内容

評価分類	施設名称	評価対象部位	応力等の状態
冷却塔	安全冷却水系(安全冷却水B 冷却塔周りの配管)	配管本体	・一次応力(膜+曲げ)

b. 評価条件

配管の強度評価は、以下の条件に従うものとする。

- (a) 配管は一定距離ごと支持構造物によって支えられているため、風圧力による一様な荷重を受ける単純支持はりとし、機械工学便覧の計算方法を参考に評価を行う。評価に用いる支持間隔は標準支持間隔を用いる。
- (b) 弁を設置している箇所においては、弁の断面係数は配管に比べ大きく、配管の評価に包絡されるため配管の評価のみを実施する。
- (c) 支持構造物については、建屋内外にかかわらず地震に対して耐荷重設計がなされており、配管本体に竜巻による荷重が作用した場合でも、作用荷重は耐荷重以下であるため、竜巻による荷重に対する支持構造物の設計は耐震設計に包絡される。
- (d) 計算に用いる寸法は公称値を使用する。

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

配管の強度評価に用いる記号を第5.1.2-7表に示す。

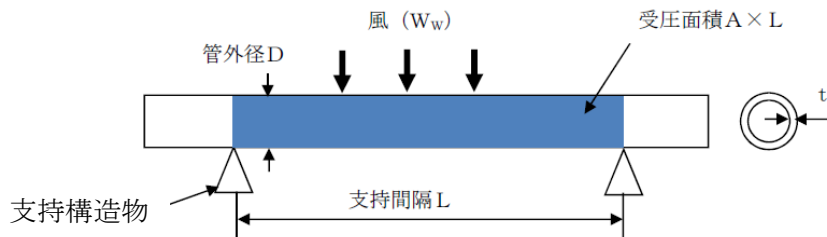
第5.1.2-7表 配管の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ² /mm	単位長さ当たりの施設の受圧面積(風向に垂直な面に投影した面積)
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	管外径
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
L	mm	支持間隔
M	N・mm	風により作用する曲げモーメント
m	kg/mm	単位長さ当たりの質量
P	MPa	内圧
q	N/m ²	設計用速度圧
Sy	MPa	JSME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
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
V _T	m/s	設計竜巻の移動速度
V _{Rm}	m/s	設計竜巻の最大接線風速
W _w	N/mm	単位長さ当たりの風圧力による荷重
w	N/mm	単位長さ当たりの自重による荷重
Z	mm ³	断面係数
ΔP _{max}	MPa	設計竜巻の最大気圧低下量
ρ	kg/m ³	空気密度
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
σ ₁ , σ ₂	MPa	配管に生じる応力
σ _{WP}	MPa	気圧差により生じる応力
σ _{WT1} , σ _{WT2}	MPa	複合荷重により生じる応力
σ _{WW}	MPa	風圧力により生じる応力
σ _{自重}	MPa	自重により生じる応力
σ _{内圧}	MPa	内圧により生じる応力

(b) 計算モデル

配管は一定距離ごとに支持構造物によって支えられているため、風圧力による一様な荷重を受ける単純支持はりとして評価を行う。評価に用いる支持間隔は標準支持間隔とする。弁を設置している場合は支持構造物の支持間隔が短くなるため、弁を設置している場合の受圧面積は最大支持間隔での受圧面積に包絡される。

配管モデル図を第5.1.2-7図に示す。



第5.1.2-7図 配管モデル図

(c) 評価方法

イ. 竜巻による応力計算

(イ) 風圧力により生じる応力

風圧力による荷重が配管の支持スパンに等分布荷重として加わり、曲げ応力を発生させるものとして、以下の式により算定する。

$$\sigma_{ww} = \frac{M}{Z} = \frac{W_w \cdot L^2}{8Z} \quad \dots (5.1.2-19)$$

ここで、断面係数Zは以下の式により算定する。

$$Z = \frac{\pi}{32D} \{D^4 - (D - 2t)^4\} \quad \dots (5.1.2-20)$$

(ロ) 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。

$$\sigma_{WP} = \frac{\Delta P_{max} \cdot D}{4 \cdot t} \quad \dots (5.1.2-21)$$

したがって、イ.及びロ.項の複合荷重により生じる応力 σ_{WT1} 及び σ_{WT2} は以下の式により算出する。

$$\sigma_{WT1} = \sigma_{WP} \quad \dots (5.1.2-22)$$

$$\sigma_{WT2} = \sigma_{ww} + 0.5 \sigma_{WP} \quad \dots (5.1.2-23)$$

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荷重である自重及び運転時荷重である内圧を考慮する。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。

$$\sigma_{\text{自重}} = \frac{w \cdot L^2}{8Z} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-24)$$

$$w = m \cdot g \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-25)$$

$$\sigma_{\text{内圧}} = \frac{P \cdot D}{4t} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-26)$$

したがって、自重及び風圧力による荷重により生じる曲げ応力と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を足し合わせ、配管に生じる応力として以下の式により σ_1 及び σ_2 を算出する。

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{自重}} + \sigma_{\text{内圧}} + \sigma_{\text{WT1}} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-27)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{\text{自重}} + \sigma_{\text{内圧}} + \sigma_{\text{WT2}} \quad \cdot \cdot \quad (5.1.2-28)$$

5.2 衝突評価

5.2.1 建物・構築物

建屋・構築物の申請に合わせて次回以降に詳細を説明する。

5.2.2 機器・配管系

(1) 貫入

a. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を第5.2.2-1表に示す。

第5.2.2-1表 評価対象部位及び評価内容

評価分類	施設名称	評価対象機器	評価対象部位	応力等の状態
冷却塔	安全冷却水B冷却塔	管束	管束フレーム	衝突による貫通力
		ファン駆動部	ファンリング	
		支持架構 (基礎ボルト含む)	床はり	
		遮熱板	遮熱板本体	
配管	安全冷却水系(安全冷却水B冷却塔周りの配管)	配管	配管本体	

b. 評価条件

衝突評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

衝突評価においては、評価対象機器に飛来物が衝突した際に跳ね返らず、貫入するものとして評価する。

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

衝突評価に用いる記号を第5.2.2-2表に示す。

第5.2.2-2 表 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	評価において考慮する飛来物の質量
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
Tc	mm	BRL 式の算出結果を実験で非貫通の結果が確認された比率で除した鋼板の貫通限界厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度

(b) 評価方法

イ. BRL式による貫通限界厚さの算出

飛来物が竜巻防護対象施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)」で用いられているBRL式を用いて算出する。

$$T^3 = \frac{0.5 \cdot M \cdot v^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^2} \quad \dots (5.2.2-1)$$

等価直径は、「電力中央研究所報告O19003」(以下「O19003」という。)から「衝突部の周長と等価な周長の円の直径」として算出する。O19003における、設計飛来物である鋼製材のような四角形衝突に対する貫通限界厚さ付近の実験データが不十分であることを考慮し、BRL式の算出結果を実験で非貫通の結果が確認された比率(0.97)で除した値を貫通限界厚さとする。

したがって、BRL式の算出結果を実験で非貫通の結果が確認された比率で除した鋼板の貫通限界厚さは、以下の式により算出する。

$$T_c = T / 0.97 \quad \dots (5.2.2-2)$$

6. 準拠規格

「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.4 準拠規格」においては、竜巻の影響を考慮する施設の設計に係る規格を示している。

これらのうち、竜巻防護対策設備及び屋外重大事故等対処設備の固縛装置を除く施設の強度設計に用いる規格、基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令・同告示
- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007((社)日本機械学会)
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編JEAG4601-補1984」(社)日本電気協会
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987((社)日本電気協会)
- ・ 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」(社)日本電気協会
- ・ 「タービンミサイル評価について」(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)
- ・ 建築物荷重指針・同解説(社)日本建築学会(2004)
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」((社)日本建築学会, 2015 改定)
- ・ 機械工学便覧((社)日本機械学会)
- ・ 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(原規技発第1909069号)

なお、次回以降に申請する施設に係る準拠規格については、当該施設の申請に合わせて次回以降に示す。