

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6添-3-013-17 改0
提出年月日	2023年11月15日

VI-3-別添 1-9-3 消音器の強度計算書

K6 ① VI-3-別添 1-9-3 R0

2023年11月

東京電力ホールディングス株式会社

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	3
2.4 適用規格	4
3. 強度評価方法	5
3.1 記号の定義	5
3.2 評価対象部位	7
3.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3.4 許容限界	9
3.5 評価方法	10
4. 評価条件	12
5. 強度評価結果	13

1. 概要

本資料は、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、非常用ディーゼル発電設備排気消音器が竜巻時及び竜巻通過後においても、消音器の機能維持を考慮して、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

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、非常用ディーゼル発電設備排気消音器の「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

非常用ディーゼル発電設備排気消音器は、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、原子炉建屋屋上に設置する。非常用ディーゼル発電設備排気消音器の位置図を図 2-1 に示す位置に設置する。

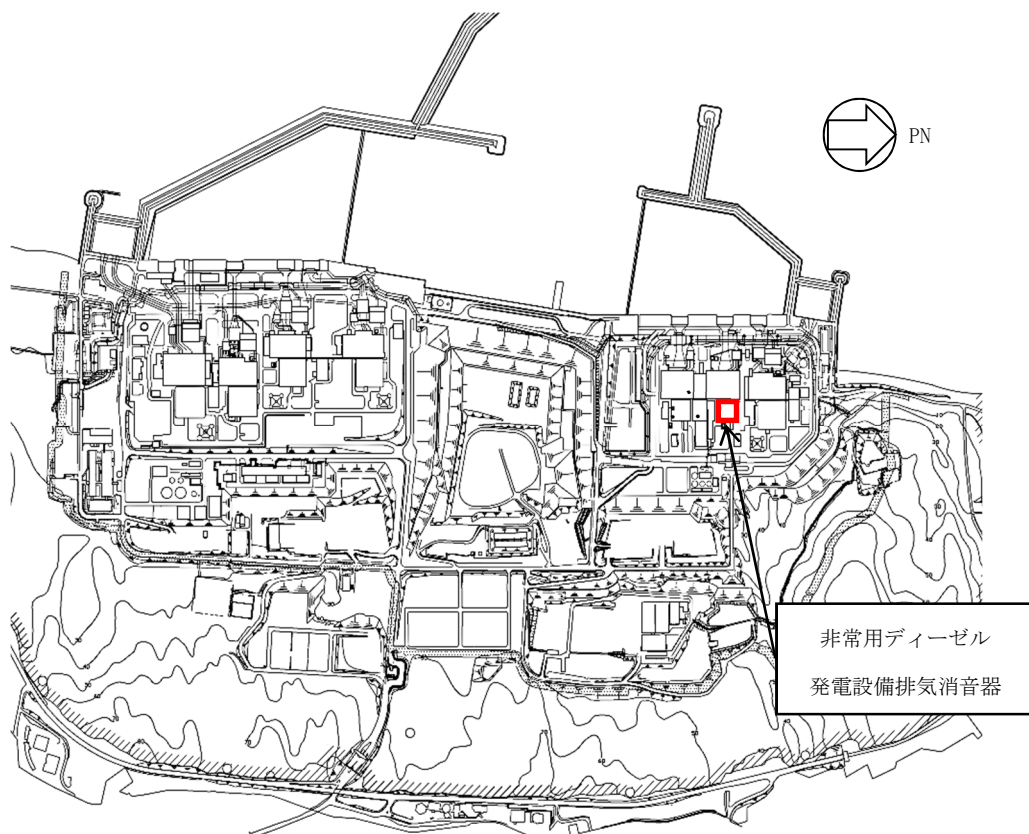


図 2-1 非常用ディーゼル発電設備排気消音器の位置図

2.2 構造概要

非常用ディーゼル発電設備排気消音器について、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。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器は原子炉建屋屋上面に設置しており、取付ボルトにより固定している。設置台数は3台とし、すべてを同一設計としている。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の概要図を図2-2に示す。

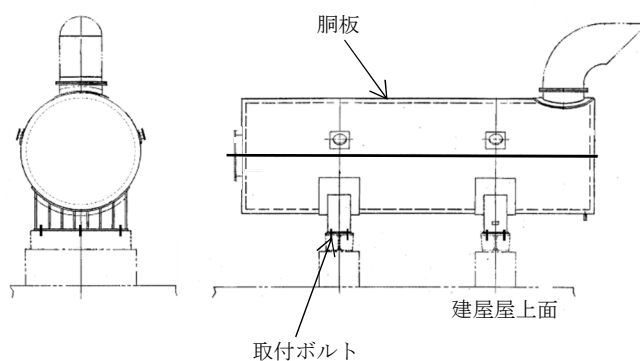


図2-2 非常用ディーゼル発電設備排気消音器の概要図

2.3 評価方針

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価は、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、非常用ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位に作用する応力等が、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。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の構造強度評価フローを図 2-3 に示す。構造強度評価においては、非常用ディーゼル発電設備排気消音器に対して、設計竜巻による荷重に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。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同様なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（日本電気協会）、「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」（日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における 1 質点系モデルによる評価方法を準用し、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。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価における許容限界は、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 E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

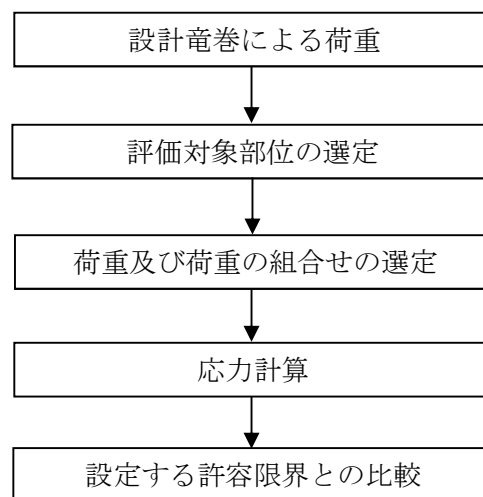


図 2-3 構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004 改定）
- ・「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」（日本電気協会）
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987」（日本電気協会）
- ・「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」（日本電気協会）
- ・「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」（日本機械学会）（以下「J S M E」という。）
- ・U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の構造強度評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
A _A	m ²	軸方向応力評価における受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
A _H	m ²	軸直角方向応力評価における受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
A _b	mm ²	取付ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C _A	—	軸方向応力評価における建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C _H	—	軸直角方向応力評価における建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
d	mm	取付ボルト呼び径
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
F _{bA}	N	軸方向における引張力
F _{bH}	N	軸直角方向における引張力
f _t	MPa	J SME SSB-3121.1 に規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力
f _s	MPa	J SME SSB-3121.1 に規定される供用状態 A 及び B での許容せん断応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
h	mm	消音器重心高さ
ℓ _{1A}	mm	軸方向における取付ボルトから重心までの距離
ℓ _{2A}	mm	軸方向における取付ボルトから重心までの距離
ℓ _{1H}	mm	軸直角方向における取付ボルトから重心までの距離
ℓ _{2H}	mm	軸直角方向における取付ボルトから重心までの距離
m	kg	消音器の質量

表 3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
N	—	取付ボルト本数
n_{fA}	—	軸方向における引張力を受ける取付ボルト本数
n_{fH}	—	軸直角方向における引張力を受ける取付ボルト本数
Q_b	N	取付ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
S_u	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
S_y	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
V_D	m/s	設計竜巻の最大風速
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_w	N	風圧力による荷重
π	—	円周率
ρ	kg/m ³	空気密度
σ_{bA}	MPa	軸方向における取付ボルトに生じる引張応力
σ_{bH}	MPa	軸直角方向における取付ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	取付ボルトに生じるせん断応力

3.2 評価対象部位

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位は、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」にて示している評価対象部位に従って、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器は、鋼製の胴板を主体構造とし、原子炉建屋屋上に設けたコンクリート基礎に本体を取付ボルトで固定する構造とする。設計竜巻による荷重は、非常用ディーゼル発電設備排気消音器本体に作用し、取付ボルトに作用する。

排気消音器の転倒による閉塞により、ディーゼル発電設備の排気機能に影響を与える波及的影響を考慮し、転倒を防止するための主要な支持部材のうち、荷重作用点から離れていることから転倒モーメントが大きく作用し、更に支持断面積が小さいことから発生する応力が厳しくなる取付ボルトを評価対象部位として設定する。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の強度評価における評価対象部位を、図 3-1 に示す。

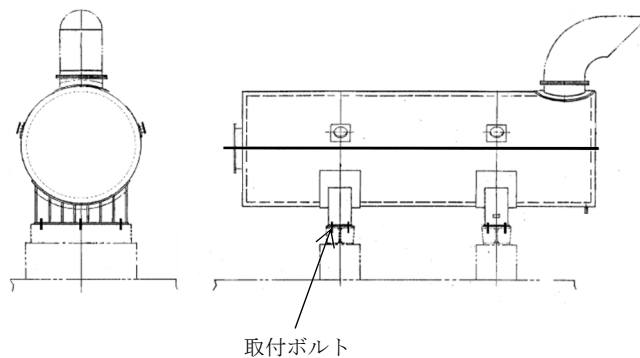


図 3-1 非常用ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位

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、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」にて示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

構造強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 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。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$\text{自重による荷重} = m \cdot g$$

b. 設計竜巻による荷重

屋外の施設であるため風圧力による荷重を考慮する。非常用ディーゼル発電設備排気消音器は屋外施設であり閉じた施設ではないため、気圧差は発生しないことから、気圧差による荷重は考慮しない。また、非常用ディーゼル発電設備排気消音器は排気機能が健全であれば良く、仮に飛来物による衝撃荷重によって貫通しても、その貫通箇所又は本来の排気箇所から排気されることから、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は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(3)c. (a)風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

$$\text{ここで } q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$$

(2) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、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、非常用ディーゼル発電設備排気消音器の評価対象部位に対して設定する。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の取付ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。強度評価の荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	非常用ディーゼル発電設備排気消音器	取付ボルト	①自重 ②風圧力による荷重

3.4 許容限界

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の取付ボルトの許容限界は、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」にて設定している評価対象部位に対して、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、その他支持構造物の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、J S M E付録材料図表 Part5 の表にて許容応力を計算する際は、評価対象部位の周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度がJ S M E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、J S M E付録材料図表 Part5 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ものとする。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の取付ボルトの許容限界を表 3-3 に、それぞれの許容応力を表 3-4 に示す。

表 3-3 許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
取付ボルト	Ⅲ _A S	一次応力	引張	$1.5f_t$
			せん断	$1.5f_s$
			組合せ	$\text{Min} \{1.5f_t, (2.1f_t - 1.6\tau)\}$

表 3-4 許容応力

評価対象部位	材料	温度条件* (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5f _t (MPa)	1.5f _s (MPa)
取付ボルト	SNB7	40	725	860	602	451	347

注記*：周囲環境温度

3.5 評価方法

非常用ディーゼル発電設備排気消音器の構造強度評価は、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。

(1) 計算モデル

受圧面の重心位置に風圧力による荷重が作用する1質点系モデルとして計算を行う。
非常用ディーゼル発電設備排気消音器の評価モデル図を図3-2に示す。

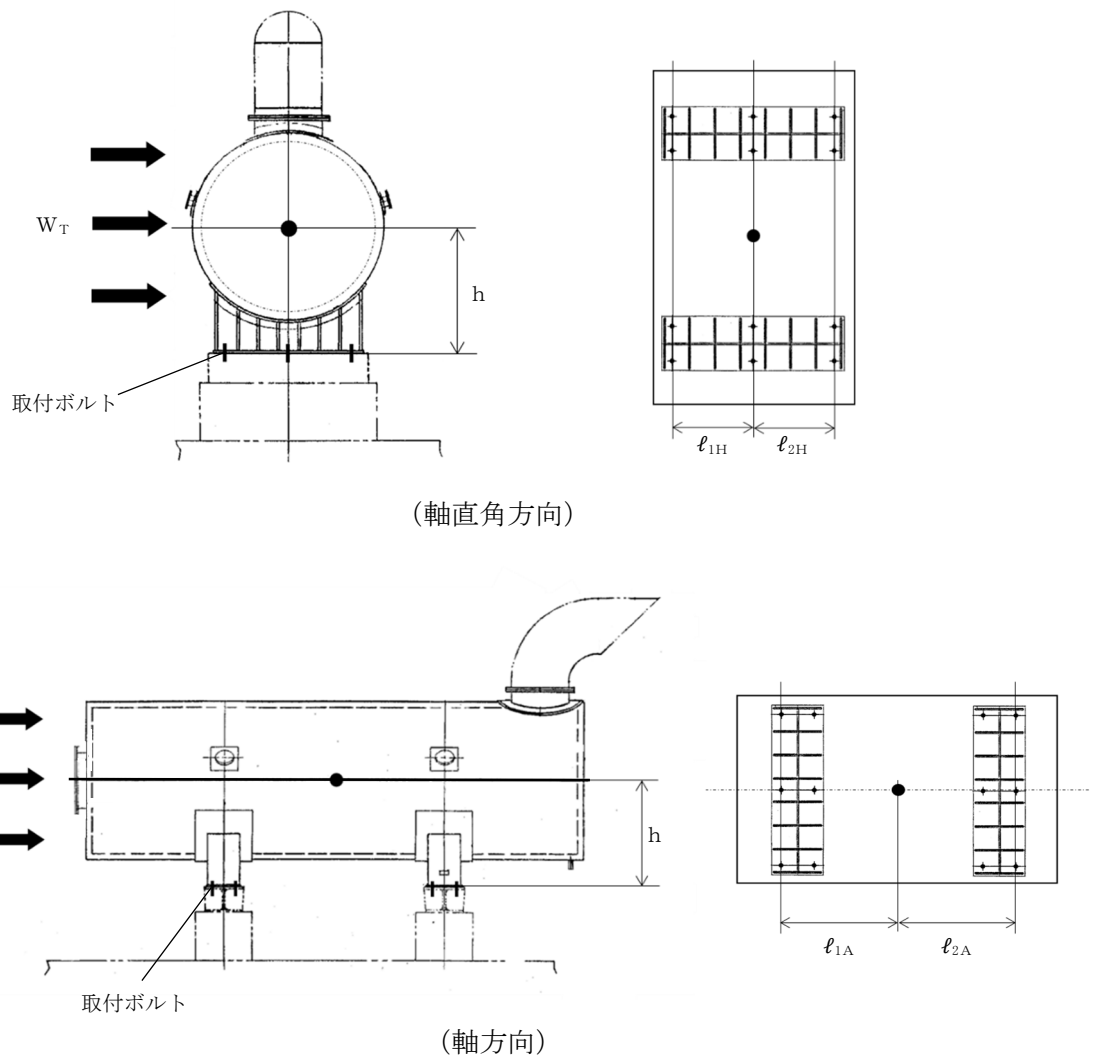


図3-2 非常用ディーゼル発電設備排気消音器の評価モデル図

(2) 計算方法

a. 引張応力

取付ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-2 で取付ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の取付ボルトで受けるものとして計算する。なお、自重によるモーメントは風荷重に対し抗力となるため除外し、保守的な評価とする ($W_T = W_w$)。

(a) 軸直角方向

イ. 引張力

$$F_{bH} = \frac{W_T \cdot h}{\ell_{1H} + \ell_{2H}}$$

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bH} = \frac{F_{bH}}{n_{fH} \cdot A_b}$$

ここで、取付ボルトの軸断面積 A_b は

$$A_b = \frac{\pi}{4} d^2$$

(b) 軸方向

イ. 引張力

$$F_{bA} = \frac{W_T \cdot h}{\ell_{1A} + \ell_{2A}}$$

ロ. 引張応力

$$\sigma_{bA} = \frac{F_{bA}}{n_{fA} \cdot A_b}$$

b. せん断応力

取付ボルトに対するせん断応力は、取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

(a) せん断力

$$Q_b = W_T$$

(b) せん断応力

$$\tau = \frac{Q_b}{N \cdot A_b}$$

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-1に示す。

表4-1 評価条件

V_D (m/s)	ρ (kg/m ³)	q (N/m ²)	g (m/s ²)	G (-)
92	1.226	5.18843×10^3	9.80665	1.0

l_{1H} (mm)	l_{2H} (mm)	l_{1A} (mm)	l_{2A} (mm)	A_H (m ²)	A_A (m ²)
900	900	2275	2275	23.91	6.493

C_H (-)	C_A (-)	h (mm)	m (kg)
1.2	2.4	1750	13500

d (mm)	N (-)	n_{fH} (-)	n_{fA} (-)	A_b (mm ²)
30	12	4	3	706.9

5. 強度評価結果

構造強度評価結果を表 5-1, 表 5-2 に示す。

非常用ディーゼル発電設備排気消音器取付ボルトに発生する応力は許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (軸直角方向)

評価対象部位	損傷モード	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
取付ボルト	引張	52	451
	せん断	18	347
	組合せ	52	451

表 5-2 評価結果 (軸方向)

評価対象部位	損傷モード	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
取付ボルト	引張	14	451
	せん断	9	347
	組合せ	14	451