

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7添-3-014-7 改1
提出年月日	2020年 5月14日

V-3-別添 2-2-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の
強度計算の方針

2020年 5月
東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 強度評価の基本方針	2
2.1 評価対象施設	2
3. 構造強度設計	3
3.1 構造強度の設計方針	3
3.2 機能維持の方針	3
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	6
4.1 荷重及び荷重の組合せ	6
4.2 許容限界	10
5. 強度評価方法	12
5.1 評価条件	12
5.2 評価対象部位	12
5.3 強度評価方法	13
6. 適用規格	20

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第7条及びその「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（以下「解釈」という。）に適合し、技術基準規則第54条及びその解釈に規定される「重大事故等対処設備」を踏まえた重大事故等対処設備に配慮する設計とするため、V-1-1-3「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちV-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」（以下「V-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」という。）の「4.1 構造物への荷重を考慮する施設」にて設定している非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板が、降下火砕物に対して構造健全性を維持することを確認するための強度評価方針について説明するものである。

強度評価は、V-1-1-3「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちV-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」（以下「V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」という。）に示す適用規格を用いて実施する。

降下火砕物の影響を考慮する施設のうち、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の具体的な計算の方法及び結果は、V-3-別添 2-9「非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度計算書」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 荷重及び荷重の組合せ」で示す降下火砕物による荷重と組み合わせべき他の荷重による組合せ荷重により発生する応力等が、「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」で示す評価方法及び考え方を使用し、「6. 適用規格」で示す適用規格を用いて確認する。

2.1 評価対象施設

本資料における評価対象施設は、V-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」にて設定している構造物への荷重を考慮する施設のうち、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を強度評価の対象施設とする。

3. 構造強度設計

V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」で設定している降下火砕物特性に対し、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している構造物への荷重を考慮する施設が、構造強度設計上の性能目標を達成するように、V-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「5. 機能設計」で設定している非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板が有する機能を踏まえて、構造強度の設計方針を設定する。

また、想定する荷重及び荷重の組合せを設定し、それらの荷重に対し、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造強度を保持するように構造設計と評価方針を設定する。

3.1 構造強度の設計方針

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、V-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」の「4.1(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、想定する降下火砕物、地震及び積雪を考慮した荷重に対し、降下火砕物堆積時の機能維持を考慮して、架構を軽油タンクのコンクリート基礎に基礎ボルトで固定し、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の主要な構造部材が構造健全性を維持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

3.2 機能維持の方針

V-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を達成するために、「3.1 構造強度の設計方針」に示す構造を踏まえ、V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重条件を適切に考慮して、構造設計及びそれを踏まえた評価方針を設定する。

(1) 構造設計

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管に降下火砕物が堆積することを防止する防護鋼板、防護鋼板を支持する架構及び架構をコンクリート基礎に固定する基礎ボルトから構成される。

想定する降下火砕物及び積雪（以下「降下火砕物等」という。）の堆積による鉛直荷重に対しては、降下火砕物が堆積する防護鋼板に作用し、架構に伝達する構造とする。また、地震荷重に対しては、架構を介して基礎ボルトに伝達する構造とする。

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造計画を表 3-1 に示す。

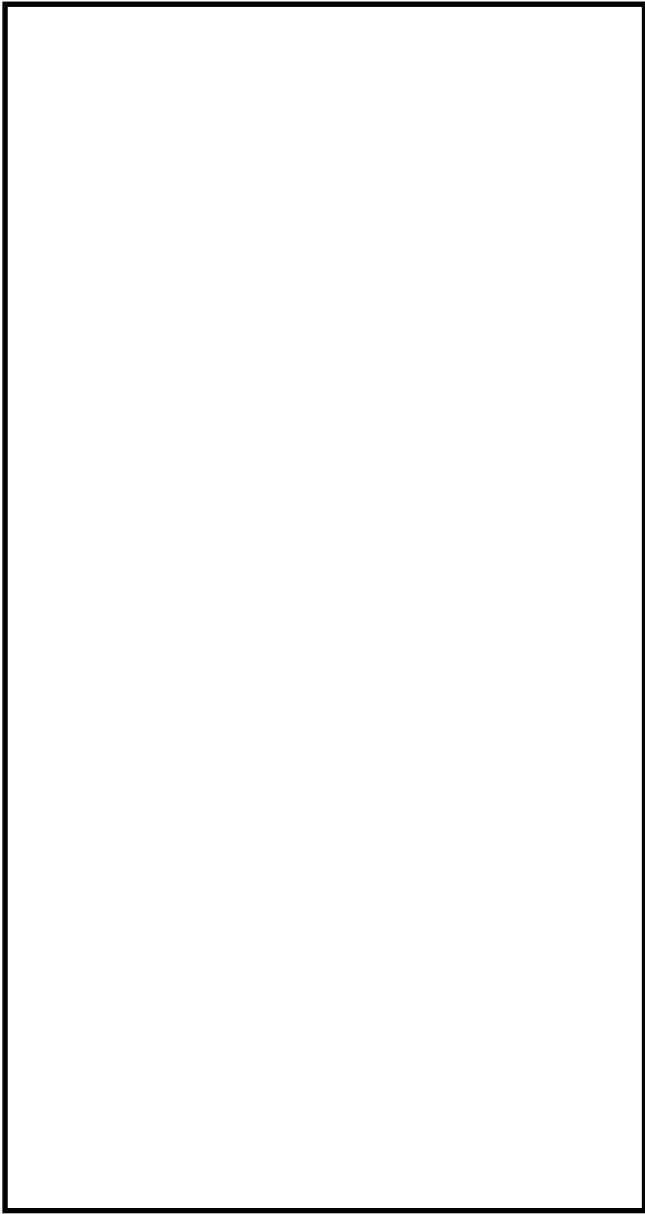
(2) 評価方針

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、「(1) 構造設計」を踏まえ、以下の評価方針とする。

想定する降下火砕物、地震及び積雪を考慮した荷重に対し、荷重の作用する部位及び荷重が伝達する部位を踏まえて、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する防護鋼板、架構及び基礎ボルトが、「4.2 許容限界」で設定している許容限界を超えないことを確認する。評価方法としては、FEMを用いた解析により算出した応力を基に評価を行う。

降下火砕物、地震及び積雪を考慮した荷重に対する強度評価を、V-3-別添 2-9「非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度計算書」に示す。

表 3-1 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の構造計画

施設 名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
【位置】非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板は、屋外の軽油タンクエリアに設置する設計とする。			
非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板	防護鋼板, 架構及び基礎ボルトにより構成する。	コンクリート基礎に基礎ボルトで固定する。	

K7 ① V-3-別添 2-2-2 R0

4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せを「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に、許容限界を「4.2 許容限界」に示す。

4.1 荷重及び荷重の組合せ

強度評価にて考慮する荷重及び荷重の組合せは、V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」を踏まえ、以下のとおり設定する。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重は、V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2)a. 荷重の種類」で設定している常時作用する荷重に従って、持続的に生じる荷重である自重及び積載荷重とする。

b. 降下火砕物による荷重 (F_a)

降下火砕物による荷重は、V-1-1-3「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちV-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」(以下「V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」という。)の「4.1 自然現象の組合せについて」で設定している自然現象の組合せに従って、主荷重として扱うこととし、V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.2 設計に用いる降下火砕物特性」に示す降下火砕物の特性及び「2.1.3(2)a. 荷重の種類」に示す降下火砕物による荷重を踏まえて、湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 35cm 堆積した場合の荷重として堆積量 1cm ごとに $147.1\text{N}/\text{m}^2$ の降下火砕物による荷重が作用することを考慮し設定する。

c. 地震荷重 (F_k)

地震荷重は、V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」で設定している自然現象の組合せに従って、従荷重として扱うこととし、V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」に示す組み合わせる地震を踏まえて、年超過確率 10^{-2} 相当の地震動を主荷重に組み合わせる地震荷重として考慮することとするが、その大きさは、年超過確率 10^{-2} 相当地震動を上回る地震動として、V-2「耐震性に関する説明書」のうちV-2-1-2「基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の策定概要」に示す弾性設計用地震動 S_d による地震力を地震荷重として設定する。

d. 積雪荷重 (F_s, F_{sb})

積雪荷重は、V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」で設定している自然現象の組合せ

に従って、従荷重として扱うこととし、V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」に示す組み合わせる積雪深を踏まえて、柏崎市における1日当たりの積雪量の年超過確率 10^{-2} 規模の値84.3cmが堆積した場合の荷重を主荷重に組み合わせる積雪荷重(F_s)とする。更に、従荷重として扱う積雪荷重とは別に、ベース負荷として日最深積雪量の平均値に当たる積雪量31.1cmによる荷重を常時考慮する積雪荷重(F_{sb})として考慮する。積雪荷重については、新潟県建築基準法施行細則により、積雪量1cmごとに 29.4N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

(2) 荷重の組合せ

a. 降下火砕物による荷重、地震荷重及び積雪荷重の組合せ

降下火砕物による荷重、地震荷重及び積雪荷重については、V-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1 自然現象の組合せについて」を踏まえて、それらの組合せを考慮し、自然現象の荷重として扱う。自然現象の荷重は短期荷重として扱う。

b. 荷重の組合せ

荷重の組合せについては、自然現象の荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

なお、常時作用する荷重、地震荷重及び積雪荷重については、組み合わせることで降下火砕物による荷重の抗力となる場合には、評価結果が保守的となるよう荷重の算出において考慮しないこととする。

上記を踏まえ、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価における荷重の組合せの設定については、施設の設置状況及び構造等を考慮し設定する。非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板における荷重の組合せの考え方を表4-1に示す。

表 4-1 荷重の組合せ

考慮する荷重 の組合せ	荷重					
	常時作用 する荷重 (F_d)		主荷重	従荷重		ベース負荷
	自重	積載 荷重	降下火砕物 による荷重 (F_a)	地震荷重 (F_k)	積雪荷重 (F_s)	常時考慮す る積雪荷重 (F_{sb})
ケース 1	○	○	○	○	—	○
ケース 2	○	○	○	—	○	○

注：○は考慮する荷重を示す。

(3) 荷重の算定方法

「4.1(1) 荷重の種類」で設定している荷重のうち、「4.1(2)a. 降下火砕物による荷重, 地震荷重及び積雪荷重の組合せ」で設定している自然現象の荷重の鉛直荷重及び水平荷重の算出式及び算出方法を以下に示す。

a. 記号の定義

荷重の算出に用いる記号を表 4-2 に示す。

表 4-2 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
C_H	—	水平方向設計震度
C_V	—	鉛直方向設計震度
F_a	N/m^2	湿潤状態の降下火砕物による荷重
F_s	N/m^2	従荷重として組み合わせる積雪荷重
F_{sb}	N/m^2	ベース負荷として組み合わせる常時考慮する積雪荷重
F_{vk}	N/m^2	従荷重として地震荷重を組み合わせたときの降下火砕物等の堆積による鉛直荷重
F_{vs}	N/m^2	従荷重として積雪荷重を組み合わせたときの降下火砕物等の堆積による鉛直荷重
f'_s	$N/(m^2 \cdot cm)$	建築基準法施行令に基づき設定する積雪の単位荷重
g	m/s^2	重力加速度
H_a	cm	降下火砕物の層厚
H_s	cm	組合せ荷重として考慮する積雪深
H_{sb}	cm	ベース負荷として考慮する積雪深
ρ	kg/m^3	降下火砕物の湿潤密度

b. 鉛直荷重

鉛直荷重については、降下火砕物、地震及び積雪を考慮する。

(a) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重

湿潤状態の降下火砕物による荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_a = \rho \cdot g \cdot H_a \cdot 10^{-2}$$

積雪荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_s = f'_s \cdot H_s, \quad F_{sb} = f'_s \cdot H_{sb}$$

湿潤状態の降下火砕物に積雪を踏まえた鉛直荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_{vk} = F_a + F_{sb}, \quad F_{vs} = F_a + F_s + F_{sb}$$

表 4-3 に入力条件を示す。

表 4-3 入力条件

ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	H_a (cm)	f'_s (N/(m ² ・cm))	H_s (cm)	H_{sb} (cm)
1500	9.80665	35	29.4	84.3	31.1

以上を踏まえ、降下火砕物等の堆積による鉛直荷重は、
 $F_{vk} = 6063\text{N/m}^2$ 、 $F_{vs} = 8542\text{N/m}^2$ とする。

(b) 地震による鉛直荷重

鉛直方向設計震度 C_v によって発生する鉛直荷重を算出する。

c. 水平荷重

水平荷重については、地震を考慮する。

(a) 地震による水平荷重

水平方向設計震度 C_H によって発生する水平荷重を算出する。

4.2 許容限界

許容限界は、V-1-1-3-4-3「降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標及び「3.2 機能維持の方針」に示す評価方針を踏まえて、評価対象部位ごとに設定する。

「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で設定している荷重及び荷重の組合せを含めた、評価対象部位ごとの許容限界を表 4-4 に示す。

(1) 防護鋼板、架構及び基礎ボルト

構造強度評価においては、降下火砕物等の堆積による鉛直荷重、地震荷重及びその他の荷重に対し、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板を構成する防護鋼板、架構及び基礎ボルトが、許容限界を超えないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ、防護鋼板及び架構に対しては、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) (以下「J E A G 4 6 0 1」という。) に準じて許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力を許容限界として設定する。基礎ボルトに対しては、「各種合成構造設計指針・同解説 (日本建築学会 2010年改定)」に基づき算出した許容荷重を許容限界として設定する。

表 4-4 許容限界

施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	機能損傷モード		許容限界
			応力等の状態	限界状態	
非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板	$F_d + F_{V_k} + F_k$	防護鋼板	組合せ	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	J E A G 4 6 0 1 に準じて許容応力状態IV _A Sの許容応力以下とする*
		架構	引張, 圧縮 せん断, 曲げ 組合せ		
		基礎ボルト	引張, せん断 組合せ		各種合成構造設計指針・同解説に準じて短期許容荷重以下とする
	$F_d + F_{V_s}$	防護鋼板	組合せ		J E A G 4 6 0 1 に準じて許容応力状態IV _A Sの許容応力以下とする*
		架構	引張, 圧縮 せん断, 曲げ 組合せ		
		基礎ボルト	引張, せん断 組合せ		各種合成構造設計指針・同解説に準じて短期許容荷重以下とする

F_d : 常時作用する荷重

F_{V_k} : 従荷重として地震荷重を組み合わせるときの降下火砕物等の堆積による鉛直荷重

F_k : 従荷重として組み合わせる地震荷重

F_{V_s} : 従荷重として積雪荷重を組み合わせるときの降下火砕物等の堆積による鉛直荷重

注記* : J E A G 4 6 0 1 を基に, 表 4-5 その他支持構造物の許容限界を準用する。

表 4-5 その他支持構造物の許容限界

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト以外)				許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力				一次応力	
	引張	せん断	圧縮	曲げ	引張	せん断
IV _A S	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$

注記*1 : 応力の組合せが考えられる場合には, 組合せ応力に対しても評価を行う。

*2 : 当該の応力が生じない場合, 規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

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、規格及び基準類や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。

- ・ F E Mを用いた解析法

具体的な評価においては、 J E A G 4 6 0 1 及び各種合成構造設計指針・同解説を準用する。

降下火砕物等の堆積による鉛直荷重，地震による荷重が作用する場合に強度評価を行う施設の強度評価方法として，非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価方法を以下に示す。

5.1 評価条件

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価を行う場合，以下の条件に従うものとする。

- (1) 防護鋼板，架構及び基礎ボルトは， F E M解析を用いて構成部材に対する発生荷重及び発生モーメントを算定し評価を行う。
- (2) 計算に用いる寸法は，公称値を使用する。
- (3) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重については，防護鋼板の水平投影面積に対し降下火砕物等の層厚より上載質量を算出し，入力荷重として設定する。
- (4) 地震荷重は，年超過確率 10^{-2} 相当の地震動を主荷重に組み合わせる地震荷重として考慮することとするが，その大きさは，年超過確率 10^{-2} 相当地震動を上回る地震動として，弾性設計用地震動 S_d による地震力を地震荷重として設定する。
- (5) 地震荷重は，水平方向及び鉛直方向から個別に作用するものとし，作用する荷重の算出において組み合わせるものとする。

5.2 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表 5-1 に示す。

表 5-1 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
防護鋼板	組合せ
架構	引張，圧縮，せん断，曲げ，組合せ
基礎ボルト	引張，せん断，組合せ

5.3 強度評価方法

(1) 記号の定義

非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価に用いる記号を表 5-2 に示す。

表 5-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価に用いる記号 (1/3)

記号	単位	定義
A	mm ²	架構の断面積
A _{qc}	mm ²	せん断力に対するコーン状破壊面の有効投影面積
A _s	mm ²	鋼板の単位長さ当たりの断面積
A _{sy}	mm ²	架構のせん断断面積 (y 軸)
A _{sz}	mm ²	架構のせん断断面積 (x 軸)
sca	mm ²	基礎ボルトの断面積
C _H	—	弾性設計用地震動 S _d による水平方向設計震度
C _V	—	弾性設計用地震動 S _d による鉛直方向設計震度
d	mm	基礎ボルトの径
E	MPa	縦弾性係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)に定める値
F*	MPa	J S M E SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値
F _{sx}	N	防護鋼板の膜力 (x 軸)
F _{sy}	N	防護鋼板の膜力 (y 軸)
F _{sxy}	N	防護鋼板のせん断力
f _b *	MPa	架構の許容曲げ応力
f _c *	MPa	架構の許容圧縮応力
f _s *	MPa	架構の許容せん断応力
f _t *	MPa	架構又は防護鋼板の許容引張応力
i	mm	断面二次半径
L _{ce}	mm	基礎ボルトの強度算定用埋込み長さ
L _e	mm	基礎ボルトの有効埋込み長さ
ℓ _k	mm	座屈長さ

表 5-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価に用いる記号 (2/3)

記号	単位	定義
M_y	N・mm	架構の曲げモーメント (y 軸)
M_z	N・mm	架構の曲げモーメント (z 軸)
M_{s_x}	N・mm	防護鋼板の曲げモーメント (x 軸)
M_{s_y}	N・mm	防護鋼板の曲げモーメント (y 軸)
$M_{s_{xy}}$	N・mm	防護鋼板のねじりモーメント
m	kg	解析モデル各節点の付加質量の合計
N_c	N	架構の軸力 (圧縮)
N_t	N	架構の軸力 (引張)
n	—	架構と壁及び床の取付部1箇所当たりの基礎ボルトの本数
n_f	—	評価上引張力を受けるとして期待する基礎ボルトの本数
p	N	ベースプレート1枚当たりの基礎ボルトの引張力
p_a	N	ベースプレート1枚当たりの基礎ボルトの許容引張力
p_{a1}	N	基礎ボルトの降伏により決まる場合の基礎ボルト1本当たりの許容引張応力
p_{a3}	N	基礎ボルトの付着力により決まる場合の基礎ボルト1本当たりの許容引張応力
Q_y	N	架構のせん断力 (y 軸)
Q_z	N	架構のせん断力 (z 軸)
q	N	ベースプレート1枚当たりの基礎ボルトのせん断力
q_a	N	ベースプレート1枚当たりの基礎ボルトの許容せん断力
q_{a1}	N	基礎ボルトのせん断強度により決まる場合の基礎ボルト1本当たりの許容せん断力
q_{a2}	N	定着した躯体の支圧強度により決まる場合の基礎ボルト1本当たりの許容せん断力
q_{a3}	N	定着した躯体のコーン状破壊により決まる場合の基礎ボルト1本当たりの許容せん断力
R_x	N	ベースプレート部の反力 (x 軸)
R_y	N	ベースプレート部の反力 (y 軸)
R_z	N	ベースプレート部の反力 (z 軸)
S	MPa	J SME 付録材料図表 Part5 表 5 に定める許容引張応力
S_u	MPa	J SME 付録材料図表 Part5 表 9 に定める設計引張強さ
S_y	MPa	J SME 付録材料図表 Part5 表 8 に定める設計降伏点

表 5-2 非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価に用いる記号 (3/3)

記号	単位	定義
$S_y(RT)$	MPa	J SME 付録材料図表 Part5 表8 に定める材料の 40°Cにおける設計降伏点
X, Y, Z	—	絶対 (節点) 座標軸
x, y, z	—	局所 (要素) 座標軸
Z_b	mm ³	鋼板の断面係数
Z_y	mm ³	架構の断面係数 (y 軸)
Z_z	mm ³	架構の断面係数 (z 軸)
Z_t	mm ³	鋼板のねじり断面係数
Λ	—	架構の限界細長比
λ	—	架構の有効細長比
ν'	—	座屈に対する安全率
π	—	円周率
σ	MPa	防護鋼板の組合せ応力
σ_x, σ_y	MPa	互いに直交する垂直応力
${}_c\sigma_{qa}$	MPa	コンクリートの支圧強度
${}_c\sigma_t$	MPa	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
${}_s\sigma_{pa}$	MPa	基礎ボルトの引張強度
${}_s\sigma_{qa}$	MPa	基礎ボルトのせん断強度
σ_{by}	MPa	架構に生じる曲げ応力 (y 軸)
σ_{bz}	MPa	架構に生じる曲げ応力 (z 軸)
σ_c	MPa	架構に生じる圧縮応力
σ_t	MPa	架構に生じる引張応力
τ	MPa	防護鋼板に生じるせん断応力
τ_a	MPa	へりあき及び基礎ボルトのピッチを考慮した基礎ボルトの引張力に対する付着力
τ_y	MPa	架構に生じるせん断応力 (y 軸)
τ_z	MPa	架構に生じるせん断応力 (z 軸)
ϕ_1	—	低減係数 長期 : 2/3 短期 : 1.0
ϕ_2	—	低減係数 長期 : 1/3 短期 : 2/3
ϕ_3	—	低減係数 長期 : 1/3 短期 : 2/3

(2) 応力の計算方法

a. 防護鋼板の応力

防護鋼板の応力は、解析による計算で得られる各要素での膜力 F_{s_x} , F_{s_y} , せん断力 $F_{s_{xy}}$, 曲げモーメント M_{s_x} , M_{s_y} 及びねじりモーメント $M_{s_{xy}}$ により組合せ応力を次のように求める。

(a) 組合せ応力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2}$$

ここで,

$$\sigma_x = \frac{F_{s_x}}{A_S} \pm \frac{M_{s_x}}{Z_b}, \quad \sigma_y = \frac{F_{s_y}}{A_S} \pm \frac{M_{s_y}}{Z_b}$$

$$\tau = \frac{F_{s_{xy}}}{A_S} \pm \frac{M_{s_{xy}}}{Z_t}$$

b. 架構の応力

架構の応力は、解析による計算で得られる各要素端での軸力 N_t , N_c , せん断力 Q_y , Q_z 及び曲げモーメント M_y , M_z により各応力を次のように求める。

(a) 引張応力又は圧縮応力

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}, \quad \sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

(b) せん断応力

$$\tau_y = \frac{Q_y}{A_{s_y}}, \quad \tau_z = \frac{Q_z}{A_{s_z}}$$

(c) 曲げ応力

$$\sigma_{b_y} = \frac{M_y}{Z_y}, \quad \sigma_{b_z} = \frac{M_z}{Z_z}$$

(d) 組合せ応力

イ. 圧縮+曲げ

$$\max \left(\frac{\sigma_c}{1.5f_c^*} + \frac{\sigma_{b_z} + \sigma_{b_y}}{1.5f_b^*}, \frac{\sigma_{b_z} + \sigma_{b_y} - \sigma_c}{1.5f_t^*} \right)$$

ロ. 引張+曲げ

$$\max\left(\frac{\sigma_t + \sigma_{bz} + \sigma_{by}}{1.5f_t^*}, \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by} - \sigma_t}{1.5f_b^*}\right)$$

ハ. 曲げ+せん断

$$\max\left(\frac{\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{bz} + \sigma_{by})^2 + 3\tau_z^2}}{1.5f_t^*}, \frac{\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{bz} + \sigma_{by})^2 + 3\tau_y^2}}{1.5f_t^*}\right)$$

引張軸力の場合は σ_c を σ_t とする。

c. 基礎ボルトの荷重

基礎ボルトの荷重は、解析による計算で得られるベースプレート部の各要素端の反力 R_x 、 R_y 及び R_z により各荷重を次のように求める。

(a) 引張荷重

$$p = R_x$$

(b) せん断荷重

$$q = \sqrt{R_y^2 + R_z^2}$$

(3) 強度評価方法

a. 防護鋼板の応力評価

「(2)a. 防護鋼板の応力」で定めた組合せ応力が許容引張応力 $1.5f_t^*$ 以下であること。

	許容応力状態IV _A S
許容引張応力 $1.5f_t^*$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

b. 架構の応力評価

「(2)b. 架構の応力」で求めた各応力が下表で定めた許容応力以下であること。ただし、組合せ応力は1以下であること。

	許容応力状態IV _A S
許容引張応力 $1.5f_t^*$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容圧縮応力 $1.5f_c^*$	$\left\{1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\} \cdot \frac{F^*}{v'} \cdot 1.5$
許容せん断応力 $1.5f_s^*$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$
許容曲げ応力 $1.5f_b^*$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

ただし、

$$\lambda = \frac{l_k}{i}$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F^*}}$$

$$v' = 1.5 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$$

c. 基礎ボルトの評価

「(2)c. 基礎ボルトの荷重」で求めた基礎ボルトの引張荷重 p 及びせん断荷重 q が許容値以下であること。また、引張応力比とせん断応力比の二乗和が 1 以下であること。

	短期荷重
許容引張力 p_a	$\min[p_{a1}, p_{a3}] \cdot n_f$
許容せん断力 q_a	$\min[q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}] \cdot n$
組合せ	$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$

ただし、

$$p_{a1} = \phi_1 \cdot \sigma_{pa} \cdot s_c \cdot a$$

$$p_{a3} = \phi_3 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot d \cdot L_{ce}$$

$$q_{a1} = \phi_1 \cdot \sigma_{qa} \cdot s_c \cdot a$$

$$q_{a2} = \phi_2 \cdot \sigma_{qa} \cdot s_c \cdot a$$

$$q_{a3} = \phi_2 \cdot \sigma_t \cdot A_{qc}$$

短期許容せん断力を確保するための基礎ボルトの有効埋め込み長さ L_e は以下の式を満たすように算定するものとする。

$$L_e \geq \frac{\sigma_{pa} \cdot d}{4 \cdot \tau_a}$$

6. 適用規格

V-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」においては、降下火砕物の影響を考慮する施設の設計に係る適用規格を示している。

これらのうち、非常用ディーゼル発電設備燃料移送配管防護板の強度評価に用いる規格、規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 新潟県建築基準法施行細則（昭和 35 年 12 月 30 日新潟県規則第 82 号）
- ・ 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）
- ・ 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）
- ・ 各種合成構造設計指針・同解説（日本建築学会，2010 年改定）
- ・ 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（日本建築学会，2005 改定）