

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 3-014-20
提出年月日	2022年 10月 24日

VI-3-別添 2-2-2 ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度計算の方針

2022年 10月

中国電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 強度評価の基本方針	1
2.1 評価対象施設	1
3. 構造強度設計	2
3.1 構造強度の設計方針	2
3.2 機能維持の方針	2
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	4
4.1 荷重及び荷重の組合せ	4
4.2 許容限界	7
5. 強度評価方法	9
5.1 評価条件	9
5.2 評価対象部位	9
5.3 強度評価方法	10
6. 適用規格・基準等	13

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に配慮する設計とするため、VI-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VI-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「4.1 構造物への荷重を考慮する施設」にて設定しているディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備が、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、VI-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VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」に示す適用規格・基準等を用いて実施する。

降下火砕物の影響を考慮する施設のうち、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の具体的な計算の方法及び結果は、VI-3-別添 2-12「ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度計算書」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・基準等」で示す適用規格・基準等を用いて確認する。

2.1 評価対象施設

本資料における評価対象施設は、VI-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」に設定している構造物への荷重を考慮する施設のうち、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備を強度評価の対象施設とする。

3. 構造強度設計

VI-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、VI-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」で設定しているディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備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、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備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

ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備は、VI-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「4.1(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、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の主要な構造部材が構造健全性を維持する設計とする。

3.2 機能維持の方針

VI-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、VI-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

ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備は、非常用ディーゼル発電設備 A-ディーゼル燃料移送ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備ディーゼル燃料移送ポンプ（以下「燃料移送ポンプ」という。）を覆う形で設置し、燃料移送ポンプに降下火砕物が堆積することを防止する鋼製のカバー本体及び点検用開口蓋（以下「カバー」という。）、カバーを支持するサポート及びそれらを固定する取付ボルトで構成される。

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は、カバーに作用し、カバー取付ボルト、サポート、サポート取付ボルト、基礎ボルトで固定されたポンプベースを介して基礎部に伝達する構造とする。

ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の構造計画を表 3-1 に示す。

(2) 評価方針

ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備は、「(1) 構造設計」を踏まえ、以下の強度評価方針とする。

想定する降下火砕物等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、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備を構成するカバー、サポート及び取付ボルトが弾性域に留まらず、塑性域に入る状態とならないことを「5. 強度評価方法」に示すFEM解析及び計算により確認する。

降下火砕物による荷重及びその他の荷重に対する強度評価を、VI-3-別添2-12「ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度計算書」に示す。

表 3-1 ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の構造計画

施設名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】 ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備は、燃料移送ポンプエリアに設置する設計とする。</p>			
ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備	カバー、サポート及び取付ボルトで構成する。	基礎ボルトで固定されたポンプベースに、取付ボルトで固定する。	<p>(a) 上面図</p> <p>(b) 側面図 (A-A 断面)</p> <p>(c) 側面図 (B-B 断面)</p>

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、VI-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。なお、風（台風）による荷重はディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の周囲に設置されたディーゼル燃料移送ポンプエリア防護対策設備により防護されることから考慮しない。

(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、VI-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、VI-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 56cm 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. 積雪荷重 (F_s)

積雪深は、VI-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. 組合せ」に示す組み合わせる積雪深を踏まえて、松江地方气象台での観測記録（1941年～2018年）により設定した設計基準積雪量 100cm に平均的な積雪荷重*を与えるための係数 0.35 を考慮し 35cm とする。積雪荷重については、建築基準法施行令第86条第2項により、積雪量 1cm ごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し算出する。

注記 *：建築物の構造関係技術基準解説書

(2) 荷重の組合せ

a. 降下火砕物による荷重及び積雪荷重の組合せ

降下火砕物による荷重及び積雪荷重については、VI-1-1-3-4-1「火山への配慮

に関する基本方針」の「2.1.3(2)b. 荷重の組合せ」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。

上記を踏まえ、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価における荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造等を考慮し設定する。対象施設の荷重の組合せを考慮した結果を表 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)	降下火砕物等の堆積 による荷重(F_v)
ケース 1	○	○

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
F_a	N/m^2	湿潤状態の降下火砕物による荷重
F_d	N	常時作用する荷重
F_s	N/m^2	積雪荷重
F_v	N/m^2	降下火砕物等の堆積による荷重
g	m/s^2	重力加速度 (=9.80665)
H_a	m	降下火砕物の層厚
H_s	cm	積雪深
ρ_1	kg/m^3	降下火砕物の湿潤密度
ρ_2	$N/(m^2 \cdot cm)$	建築基準法施行令に基づき設定する積雪の単位荷重

b. 鉛直荷重

鉛直荷重については、湿潤状態の降下火砕物及び積雪を考慮する。

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。

$$F_a = \rho_1 \cdot g \cdot H_a$$

積雪荷重は、次式のとおり算出する。

$$F_s = \rho_2 \cdot H_s$$

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。

$$F_v = F_a + F_s$$

表 4-3 に入力条件を示す。

表 4-3 入力条件

ρ_1 (kg/m ³)	g (m/s ²)	H_a (m)	ρ_2 (N/(m ² ・cm))	H_s (cm)
1500	9.80665	0.56	20	35

以上を踏まえ、降下火砕物等の堆積による鉛直荷重は、8938N/m²とする。

4.2 許容限界

許容限界は、VI-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) カバー、サポート及び取付ボルト

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及びその他の荷重に対し、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備を構成するカバー、サポート及び取付ボルトが弾性域に留まらず、塑性域に入る状態とならないことをFEM解析及び計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、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_ASの許容応力を許容限界として設定する。許容応力状態IV_ASにおけるディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の許容限界を表 4-5 に示す。

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
			応力の 状態	限界状態	
ディーゼル 燃料移送ポンプ防護対策設備	$F_d + F_v$	カバー	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。
	$F_d + F_v$	サポート	曲げ, せん断, 組合せ		
	$F_d + F_v$	取付ボルト	引張, せん断, 組合せ		

表 4-5 許容限界

許容応力 状態	許容限界* (ボルト以外)			許容限界* (ボルト)	
	一次応力			一次応力	
	曲げ	せん断	引張	せん断	引張
IV A S	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$

注記*：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。

引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容組合せ応力 f_{ts}^* は以下のとおり。

$$f_{ts}^* = \text{Min} \{ 1.4 \cdot (1.5 \cdot f_t^*) - 1.6 \cdot \tau, 1.5 \cdot f_t^* \}$$

5. 強度評価方法

評価手法は、以下に示すとおり、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。

- ・ FEM 等による解析法
- ・ 定式化された評価式を用いて算出

降下火砕物等の堆積による鉛直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、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価方法を以下に示す。

5.1 評価条件

ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価は、以下の条件に従うものとする。

- (1) カバーは FEM 解析を用いて部材に発生する応力を算出し評価を行う。モデル図を図 5-1 に示す。
- (2) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重については、カバー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。
- (3) 鉛直荷重によって応力が発生するサポート及び取付ボルトは、機械工学便覧の計算方法を用いて評価を行う。計算モデル図を図 5-2 に示す。
- (4) 計算に用いる寸法は、公称値又は実測値を使用する。

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	応力の状態
カバー	組合せ
サポート	曲げ，せん断，組合せ
カバー取付ボルト	せん断
サポート取付ボルト	引張，せん断，組合せ

5.3 強度評価方法

(1) 記号の説明

ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価に用いる記号を表 5-2 に示す。

表 5-2 ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	降下火砕物等の堆積面積
A _{b1}	mm ²	カバー取付ボルトの軸断面積
A _{b2}	mm ²	サポート取付ボルトの軸断面積
A _{sa}	cm ²	サポートの断面積
F*	MPa	J S M E SSB-3121.3 又は SSB-3133 により規定される値
F _d	N	自重による鉛直荷重
F _v	N	降下火砕物等の堆積による鉛直荷重
F _{v'}	N/m ²	単位面積当たりの降下火砕物等の堆積による鉛直荷重
f _{b*}	MPa	F*により算出されるサポートの許容曲げ応力
f _{s*}	MPa	F*により算出されるサポート又はボルトの許容せん断応力
f _{t*}	MPa	F*により算出されるカバー, サポート又はボルトの許容引張応力
f _{ts*}	MPa	引張力とせん断力を同時に受けるボルトの許容組合せ応力
g	m/s ²	重力加速度 (=9.80665)
L ₁	mm	カバーの短辺側の長さ
L ₂	mm	カバーの長辺側の長さ
l ₁	mm	サポート取付面から荷重作用点までの距離
l ₂	mm	サポート取付ボルト間の距離
M	N・mm	サポートに作用する曲げモーメント
m	kg	カバー, サポート他の全質量
n ₁	—	カバー取付ボルトの本数
n ₂	—	サポート取付ボルトの本数
n _{f2}	—	評価上引張力を受けるとして期待するサポート取付ボルトの本数
N	—	サポートの本数
r	mm	カバーの端部の丸みの半径
S _u	MPa	J S M E 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 S M E 付録材料図表 Part5 の表にて規定される設計降伏点
Z	cm ³	サポートの断面係数
π	—	円周率

表 5-2 ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
σ	MPa	サポートに生じる組合せ応力
σ_b	MPa	サポートに生じる曲げ応力
σ_t	MPa	サポート取付ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	サポートに生じるせん断応力
τ_1	MPa	カバー取付ボルトに生じるせん断応力
τ_2	MPa	サポート取付ボルトに生じるせん断応力

(2) 計算モデル

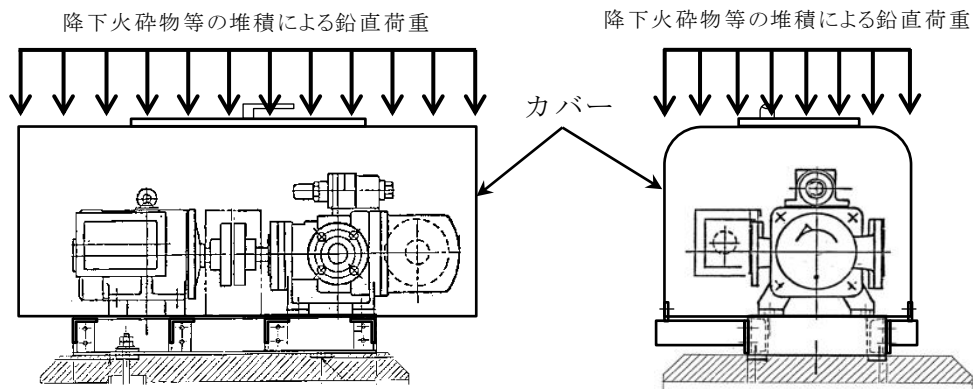


図 5-1 モデル図 (カバー)

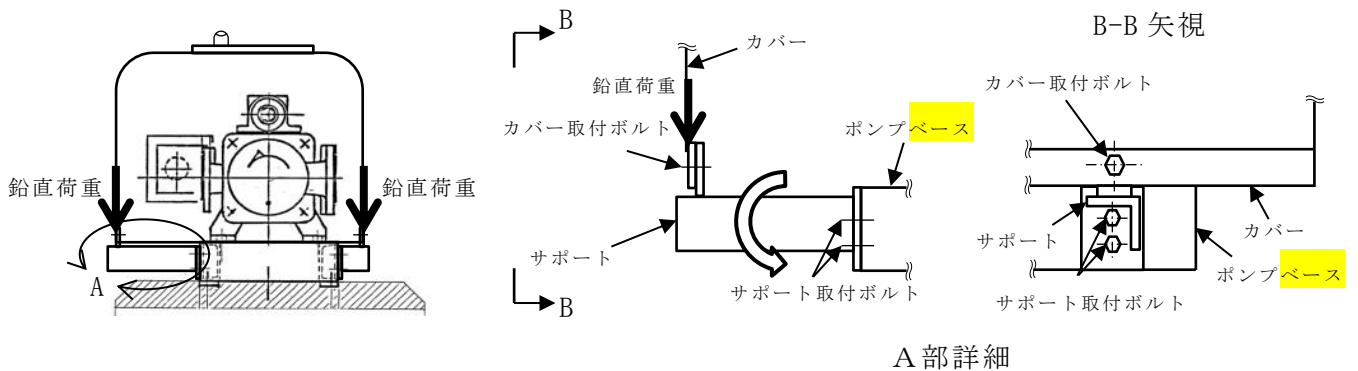


図 5-2 モデル図 (サポート, カバー取付ボルト及びサポート取付ボルト)

(3) 強度評価方法

a. 鉛直荷重

(a) 常時作用する荷重

常時作用する荷重は自重を考慮する。

$$F_d = m \cdot g$$

(b) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重

降下火砕物等の堆積によりカバーに作用する鉛直荷重はカバーの水平投影面積に降下火砕物等が堆積することを考慮する。なお、カバーの端部の丸みを持たせている部分についても降下火砕物等が堆積するものとする。

$$F_v = F_v' \cdot A$$

$$\text{ここで、} A = (L_1 - 2 \cdot r + \pi \cdot r) \cdot L_2 \cdot 10^{-6}$$

b. 応力評価

(a) サポートに生じる応力

イ. 曲げ応力

サポートに生じる曲げ応力 σ_b は次式により算出される。

(イ) 降下火砕物等の鉛直荷重によりサポートに作用する曲げモーメント M

$$M = \frac{F_v + F_d}{N} \cdot l_1$$

(ロ) 曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M}{Z \cdot 10^3}$$

ロ. せん断応力

サポートに生じるせん断応力 τ は次式より算出される。

$$\tau = \frac{F_v + F_d}{N \cdot A_{sa} \cdot 10^2}$$

ハ. 組合せ応力

サポートの曲げ及びせん断による組合せ応力 σ は次式により算出される。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

(b) カバー取付ボルトに生じる応力

イ. せん断応力

カバー取付ボルトに生じるせん断応力 τ_1 は次式より算出される。

$$\tau_1 = \frac{F_v + F_d}{n_1 \cdot A_{b1}}$$

(c) サポート取付ボルトに生じる応力

イ. 引張応力

サポート取付ボルトに生じる引張応力 σ_t は次式により算出される。

$$\sigma_t = \frac{(F_v + F_d) \cdot l_1}{n_{f2} \cdot l_2 \cdot A_{b2}}$$

ロ. せん断応力

サポート取付ボルトに生じるせん断応力 τ_2 は次式により算出される。

$$\tau_2 = \frac{F_v + F_d}{n_2 \cdot A_{b2}}$$

6. 適用規格・基準等

VI-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・基準等を示している。

これらのうち、ディーゼル燃料移送ポンプ防護対策設備の強度評価に用いる規格、基準等を以下に示す。

- (1) 建築基準法及び同施行令
- (2) 日本産業規格 (JIS G 3192 (2021))
- (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 ((社) 日本電気協会)
- (4) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987 ((社) 日本電気協会)
- (5) 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 ((社) 日本電気協会)
- (6) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版 (2007年追補版含む。)) (J S M E S N C 1-2005/2007) ((社) 日本機械学会)
- (7) 新版機械工学便覧 ((社) 日本機械学会, 1984年)