

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6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 添-3-014-2 改0
提出年月日	2024年1月10日

VI-3-別添 2-1-2 原子炉建屋の強度計算の方針

K6 ① VI-3-別添 2-1-2 R0

2024年1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	11
5. 強度評価条件及び強度評価方法	14
5.1 強度評価条件	14
5.2 強度評価方法	14
6. 適用規格	15
7. 引用文献	16

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、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」（以下「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」という。）の「4.1 構造物への荷重を考慮する施設」で設定している原子炉建屋が、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」（以下「VI-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、原子炉建屋の具体的な計算の方法及び結果は、VI-3-別添 2-4「原子炉建屋の強度計算書」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」で示す許容限界を超えないことを、「5. 強度評価条件及び強度評価方法」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、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物への荷重を考慮する施設のうち、原子炉建屋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」で設定している原子炉建屋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、原子炉建屋の構造強度を保持するよう機能維持の方針を設定する。

3.1 構造強度の設計方針

原子炉建屋は、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」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、鉄筋コンクリート造の屋根スラブを、鉄骨フレーム（以下「屋根トラス」という。）及び鉄筋コンクリート造の耐震壁等で支持し、支持性能を有する基礎スラブにより支持する構造とする。降下火砕物及び積雪（以下「降下火砕物等」という。）による荷重を短期荷重とするために、降下火砕物の降灰から 30 日を目途に降下火砕物を適切に除去すること、また降灰時には除雪も併せて実施することを保安規定に定める。

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

原子炉建屋は、屋根スラブを屋根トラス、耐震壁等で支持し、支持性能を有する基礎スラブにより支持する構造とする。屋根スラブ、屋根トラス、耐震壁等は適切な強度を有する構造とする。

降下火砕物等の堆積による鉛直荷重に対しては、降下火砕物等が堆積する屋根スラブに作用する構造とする。

原子炉建屋の設置位置を図 3-1 に、構造計画を表 3-1 に示す。

(2) 評価方針

原子炉建屋は、「(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、原子炉建屋の屋根スラブ、屋根トラス、耐震壁等が、「4.2 許容限界」で示す許容限界を超えないことを確認する。

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、VI-3-別添 2-4「原子炉建屋の強度計算書」に示す。

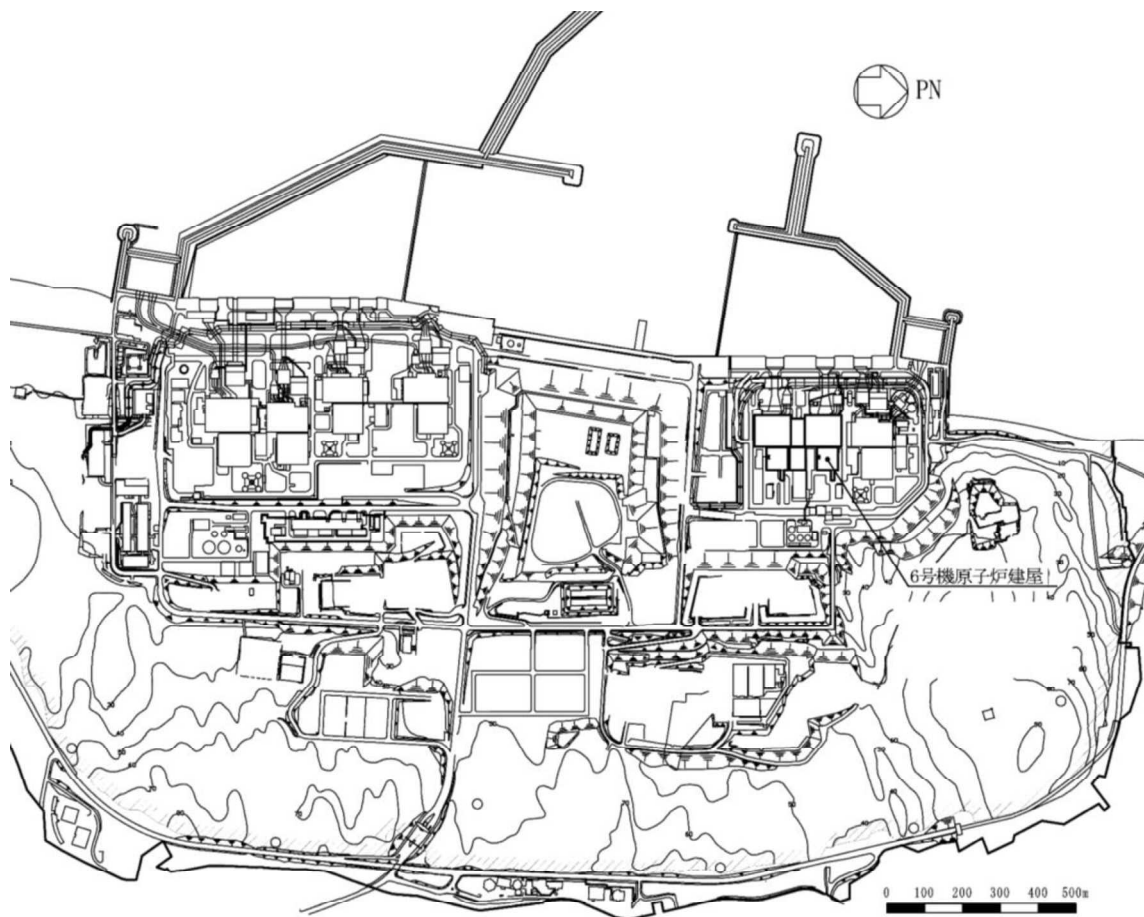


図 3-1 原子炉建屋の設置位置

表 3-1 構造計画

計画の概要		説明図
主体構造	支持構造	
<p>鉄筋コンクリート造の主体構造及び鉄骨造の屋根トラスで構成する。</p>	<p>荷重は建屋の外殻を構成する屋根，耐震壁等に作用し，耐震壁等を介し，基礎スラブへ伝達する構造とする。</p>	<p>(NS 方向断面) (単位：m)</p> <p>(EW 方向断面) (単位：m)</p>

K6 ① VI-3-別添 2-1-2 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の種類、荷重の組合せ及び荷重の算定方法を「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。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重 (F_d)

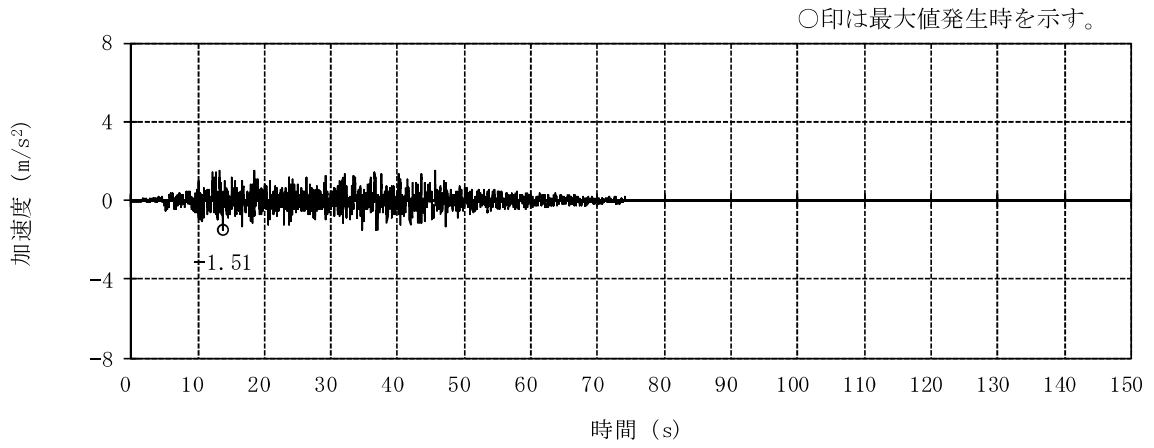
常時作用する荷重は、VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2)a. 荷重の種類」で設定している常時作用する荷重に従って、持続的に生じる荷重である固定荷重及び積載荷重とする。

b. 降下火砕物による荷重 (F_a)

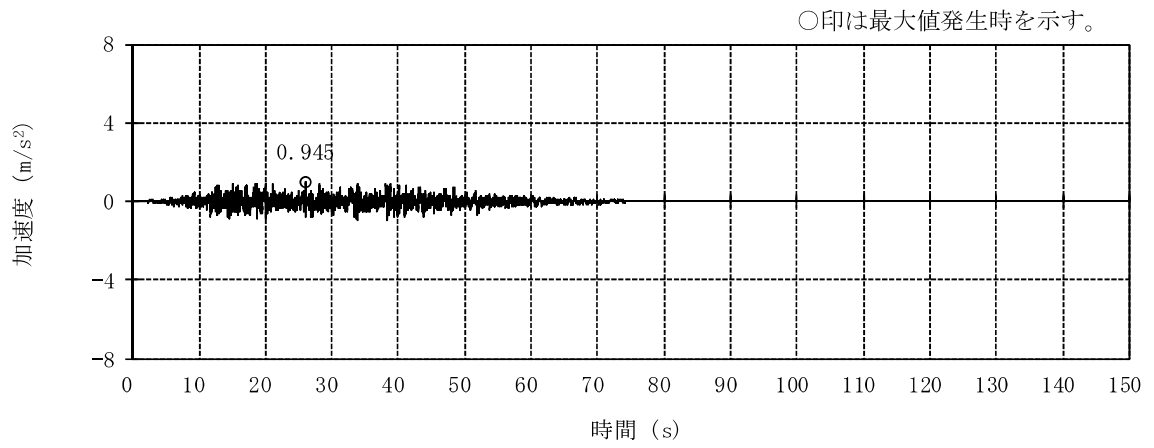
降下火砕物による荷重は、VI-1-1-3「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうちVI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」(以下「VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」という。)の「4.1 自然現象の組合せについて」で設定している自然現象の組合せに従って、主荷重として扱うこととし、VI-1-1-3-4-1「火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.2 設計に用いる降下火砕物特性」に示す降下火砕物の特性及び「2.1.3(2)a. 荷重の種類」に示す降下火砕物による荷重を踏まえて、湿潤密度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 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、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「4.1 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、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「4.1 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する。年超過確率 10^{-2} 相当地震動は、VI-2「耐震性に関する説明書」のうちVI-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」の「7.4 基準地震動 S_s の超過確率参照」に示す地震ハザード評価に基づき模擬地震波を設定する。設定した模擬地震波の加速度時刻歴波形を図 4-1 に示す。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 4-1 加速度時刻歴波形 (年超過確率 10^{-2} 相当地震動)

d. 積雪荷重 (F_s , F_{sb})

積雪荷重は、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「4.1 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、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「4.1 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、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「4.1 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。

上記を踏まえ、強度評価における荷重の組合せの設定については、建屋の設置状況及び構造を考慮し設定する。原子炉建屋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
	固定荷重	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

降下火砕物による荷重，地震荷重及び積雪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_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	従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. 降下火砕物による荷重及び積雪荷重

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。

c. 地震荷重

「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」の荷重条件を踏まえた原子炉建屋の質点系モデル及び3次元FEMモデルに対して、年超過確率 10^{-2} 相当地震動を入力して地震荷重を算出する。

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踏まえた、評価対象部位ごとの許容限界を表 4-4 に示す。

構造強度評価においては、降下火砕物、地震及び積雪を考慮した荷重に対し、評価対象部位ごとに求められる機能が担保できる許容限界を設定する。

(1) 屋根スラブ

屋根スラブは、構造健全性、遮蔽性能及び気密性能を維持することを性能目標としており、構造健全性においては終局強度を許容限界としているが、気密性能及び遮蔽性能においては短期許容応力度を許容限界としており、「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N 規準」という。）に基づく短期許容応力度を許容限界として設定する。

(2) 屋根トラス

屋根トラスは、構造健全性を維持することを性能目標としており、「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005 改定）」（以下「S 規準」という。）に基づく弾性限強度を許容限界として設定する。また、弾性範囲を超える部材については当該部材の座屈及び降伏の繰返し回数が、中込ほか（引用文献(1)参照）による破断寿命と比較し、十分な裕度を有していることを確認する。

(3) 耐震壁

耐震壁は、構造健全性、気密性能及び遮蔽性能を維持することを性能目標としており、「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）」に基づき最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} を耐震壁の許容限界として設定する。

表 4-4 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位		機能維持のための考え方	許容限界(評価基準値)	
—	構造強度を有すること	屋根	屋根スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N 規準」に基づく終局強度	
			屋根トラス		主トラス 〔上弦材〕 〔下弦材〕 斜材 束材 つなぎばり 〔上弦材〕 〔下弦材〕 上弦面水平ブレース	「S 規準」に基づく弾性限強度*2
					つなぎばり 〔斜材〕 束材 下弦面水平ブレース	応答による繰返し回数が許容限界に対して十分な裕度を有することを確認
		耐震壁*1		最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}	
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽性能を損なわないこと	屋根スラブ		部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N 規準」に基づく短期許容応力度*3	
		耐震壁*1 (二次遮蔽壁及び補助遮蔽)		最大せん断ひずみが遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3}	
気密性	換気性能とあいまって気密性能を維持すること	屋根スラブ		部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N 規準」に基づく短期許容応力度*4	
		耐震壁*1 (原子炉建屋原子炉区域(二次格納施設))		最大せん断ひずみが気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	せん断ひずみ 2.0×10^{-3} *5	

注記*1 : 建屋全体としては、地震力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、はり、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従すること、また、全体に剛性の高い構造となっており複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの変形が抑えられるため、各層の耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。また、VI-3-別添 2-4「原子炉建屋の強度計算書」の「別紙 年超過確率 10^{-2} 相当地

震動に対する原子炉建屋の地震応答計算書」で補助壁を耐震要素とした地震応答解析を行っているため、評価対象部位には補助壁を含む。

- *2 : 弾性限強度として「S 規準」のF 値に「2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所)」に基づき 1.1 倍の割増しを考慮する。
- *3 : 許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。
- *4 : 地震時に生じる応力に対して許容応力度設計とし、地震時及び地震後においても気密性を維持できる設計とする。
- *5 : 事故時に換気性能とあいまって気密性を有する設計とし、地震時においてもその機能を維持できる設計とする。耐震壁の気密性に対する許容限界の適用性は、VI-2-9-3-1「原子炉建屋原子炉区域(二次格納施設)の耐震性についての計算書 別紙-2 原子炉建屋原子炉区域の気密性に関する計算書」に示す。

5. 強度評価条件及び強度評価方法

5.1 強度評価条件

原子炉建屋の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (1) 降下火砕物等の堆積による鉛直荷重を短期荷重として評価する。
- (2) 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。
- (3) 地震荷重は、「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」の荷重条件を踏まえた原子炉建屋の質点系モデル及び3次元FEMモデルに対して、年超過確率 10^{-2} 相当地震動を入力して算出する。

5.2 強度評価方法

(1) 屋根スラブの応力計算

応力解析モデルを用いて、屋根スラブに作用する固定荷重、積載荷重及び自然現象の荷重により屋根スラブに発生する応力を求める。

(2) 耐震壁の応答計算

「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」の荷重条件を踏まえた原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析により耐震壁に発生するせん断ひずみを求める。

(3) 屋根トラスの応答計算

3次元FEMモデルによる地震応答解析により、屋根トラスに発生する応力を求める。

6. 適用規格

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を示している。

これらのうち、原子炉建屋の強度評価に用いる規格・基準等を以下に示す。

- ・建築基準法・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）
- ・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
- ・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
- ・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応力度設計法一（（社）日本建築学会，1999 改定）
- ・原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）
- ・鋼構造設計規準 一許容応力度設計法一（（社）日本建築学会，2005 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（（社）日本電気協会）
- ・2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）

7. 引用文献

- (1) 中込ほか「繰返し力を受ける SM490 鋼の疲労性に関する研究」(日本建築学会構造系論文集, 第 469 号, 127-136, 1995 年 3 月)