

本資料のうち、枠囲みの内容は
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-746 改2
提出年月日	平成30年9月7日

V-2-4-2-3 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震性についての計算書

V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 燃料条件	5
4.3 設計事象	5
4.4 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	7
6. 応力解析の手順	10
6.1 解析手順の概要	10
6.2 荷重条件の選定	10
6.3 応力計算と評価	10
6.3.1 応力計算の方法	10
6.3.2 応力評価	11
6.3.3 数値の丸め方	12
7. 参考文献	13

図表目次

図 5-1	キャスク容器及び中間胴の応力解析箇所	14
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	15
表 4-2	キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	16
表 4-3	中間胴の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	17
表 5-1	代表事象	18
表 6-1	キャスク容器用材料の許容応力値	19
表 6-2	キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値	20
表 6-3	中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）用材料の許容応力値	20
表 6-4	中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値	21
表 6-5	数値の丸め方一覧表	23

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のキャスク容器及び中間胴に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

(1) キャスク容器

使用済燃料乾式貯蔵容器において、放射性物質を閉じ込める圧力バウンダリ境界を構成しているキャスク容器は、貯蔵時において、放射性物質を貯蔵するという観点から、使用済燃料プールや使用済樹脂貯蔵タンク等と同様に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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス3容器相当に区分される。

したがって、圧力荷重に関してはクラス3容器における規格計算式に基づく手法で構造強度を評価することができる。しかし、熱荷重や取扱い時の衝撃荷重等の各種の荷重の作用が想定されることから、これらの荷重に対する強度評価に当たっては、圧力荷重も含め、応力解析により発生応力を求めて評価することが必要であり、同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス1容器に準じて設計する。

(2) 中間胴

中間胴は、キャスク容器胴部を支持する部材であることから、キャスク容器の評価手法との整合性をとり、設計・建設規格のクラス1支持構造物に準じて設計する。

ここで、設計事象とその許容応力状態はキャスク容器と同じとする。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」として示す。

3. 記 号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
A	断面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
D	直径	mm
E	縦弾性係数	MPa
g	重力加速度(=9.80665)	m/s ²
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S _s	基準地震動S _s により定まる地震力	—
S ₁₂	主応力差 σ ₁ - σ ₂	MPa
S ₂₃	主応力差 σ ₂ - σ ₃	MPa
S ₃₁	主応力差 σ ₃ - σ ₁	MPa
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
S _ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S _ℓ '	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
K	応力集中係数	—
U	疲労累積係数	—
T	締付けトルク	N・mm
N	許容繰返し回数	回
W	質量	kg
α	熱膨張係数	mm/mm℃
f _t	許容引張応力	MPa

計算書の記号	記号の説明	単位
f_s	許容せん断応力	MPa
f_c	許容圧縮応力	MPa
f_b	許容曲げ応力	MPa
f_p	許容支圧応力	MPa
$f_t^{*1)}$	許容引張応力	MPa
$f_s^{*1)}$	許容せん断応力	MPa
$f_c^{*1)}$	許容圧縮応力	MPa
$f_b^{*1)}$	許容曲げ応力	MPa
$f_p^{*1)}$	許容支圧応力	MPa
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_b	圧縮応力	MPa
σ_{bb}	曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_{bb}$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_{bb}$	引張側曲げ応力	MPa
σ_{cc}	圧縮応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_{tt}	引張応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{n\theta}$	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

注記 1) : f_t^* , f_s^* , f_c^* , f_b^* , f_p^* : f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

4. 設計条件

キャスク容器及び中間胴は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用圧力 1.0 MPa

最高使用温度 160 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

キャスク容器及び中間胴の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 及び表 4-3 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

キャスク容器及び中間胴の応力解析を行う箇所は、次のとおりである(図 5-1 参照)。

- (1) 内胴
- (2) 中間胴
- (3) 上部フランジ
- (4) 底板
- (5) 一次蓋
- (6) 一次蓋締付けボルト
- (7) バルブカバー
- (8) バルブカバー締付けボルト
- (9) 密封シール部
- (10) 底部プラグ

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算、応力計算及び疲労解析の必要性検討に使用する材料の物性値は以下のとおりである。

- (1) 内圧及び機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は 20℃とする。
- (4) 物性値を温度補正して使用する場合には、補正方法を応力計算書に示す。

5.5 許容応力

材料の応力強さ限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

I キャスク容器

- (1) キャスク容器（穴の周辺部及びボルトを除く。）にあつては、次によること。この場合において、キャスク容器に直接溶接されるブラケット等（バスケット及び中間胴を除く）を取り付けるすみ肉溶接部にあつては、次の値の2分の1とする。
- a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 PVB-3111(2)a. 及び d. の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 PVB-3111(3)a. 及び c. の規定を満足すること。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、設計・建設規格 PVB-3112 の規定を満足すること。
 - d. 設計事象 I 及び設計事象 II において生じる応力の疲労解析は、設計・建設規格 PVB-3114 の規定を満足すること。
 - e. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによる応力の疲労解析を行い、疲労累積係数を求め、d. で求めた疲労累積係数との和が 1.0 を超えないこと。
 - f. 純せん断荷重を受ける部分にあつては、a. 及び b. の規定にかかわらず、平均せん断応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合においては、設計・建設規格 PVB-3115(1) の規定
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合においては、設計・建設規格 PVB-3115(2) の規定
 - g. 支圧荷重を受ける部分にあつては、平均支圧応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 PVB-3116(1) 又は(2) の規定。
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用して生じる場合で、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の平均支圧応力は、設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定する値の 1.5 倍の値を超えないこと。
 - (c) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用して生じる場合で、(b) 以外の場合の平均支圧応力は、設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定する値を超えないこと。

h. 密封シール部にあつては、次によること。

- (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ、並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、いずれも設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に規定する値を超えないこと。
- (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ、並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、いずれも設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に規定する値を超えないこと。

(2) ボルトにあつては、次によること。

- a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合において生じる応力は、設計・建設規格 PVB-3121 (2) の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合において生じる応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 軸方向に垂直な断面の平均引張応力は、設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。
 - (b) (a) に規定する平均引張応力と曲げ応力の和は、ボルトの断面の外周において、設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。
 - c. 設計事象 I 及び設計事象 II において生じる応力の疲労解析は、設計・建設規格 PVB-3122 の規定を満足すること。
 - d. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによる応力の疲労解析を行い、疲労累積係数を求め、c. で求めた疲労累積係数との和が 1.0 を超えないこと。
- (3) 疲労解析において使用する疲労強度減少係数及び応力集中係数は設計・建設規格 PVB-3130 の規定によること。
- (4) (1) 及び (2) において、繰返し荷重が設計・建設規格 PVB-3140 (1) から (6) の規定に適合するときは、疲労解析を行うことを要しない。
- (5) (1), (2), (3) 及び (4) の場合において、設計・建設規格の“供用状態 A, 供用状態 B” はそれぞれ“設計事象 I, 設計事象 II” と読み替える。
- (6) キャスク容器に穴を設ける場合は、設計・建設規格 PVB-3500 の規定を満足すること。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

II 中間胴

- (1) 中間胴(キャスク容器との溶接部近接部分)にあつては、5.5 項 I (1)の規定による。
- (2) 中間胴 (前号に掲げる範囲を除く) にあつては、次によること。
- a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.2 の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.3 の規定を満足すること。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力(キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。)は、次の値を超えないこと。
 - (a) 引張応力と圧縮応力(引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。)、せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差、並びに支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)、(2)、(3)及び(4)に定める値
 - (b) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値
 - d. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力(キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。)は、次の値を超えないこと。
 - (a) 引張応力と圧縮応力(引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。)、せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差は、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)、(2)及び(3)に定める値
 - (b) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。
この場合において、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのは、「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」に読み替えるものとする。
 - (c) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値
 - e. a., b., c., 及び d.において応力の組合せが考えられる場合は、組合せ応力に対する評価は、設計・建設規格 SSB-3121.1(6)の規定による。
- (3) (2)の場合において、設計・建設規格の“供用状態 A, 供用状態 B”はそれぞれ“設計事象 I, 設計事象 II”と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

キャスク容器及び中間胴の応力解析は、想定される圧力荷重、機械的荷重を基に、キャスク容器及び中間胴の実形状をモデル化し、汎用解析コードである

「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく応力解析等の汎用解析コードである。応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し、各メッシュについて計算を実施することによって行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4.項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は代表事象毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の3つである。

a. 内圧

b. 機械的荷重

自重(燃料集合体を含む貯蔵容器(二次蓋を含む)の貯蔵時の設計重量を用いる)、衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化に当たっては、キャスク容器、中間胴、ガンマ線遮へい体の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。

b. 解析モデルは、1/2対称の三次元固体(連続体)要素による解析モデルとする。また、モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

(3) 構造及び材料の不連続性を考慮して、応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、応力計算書に示す。応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

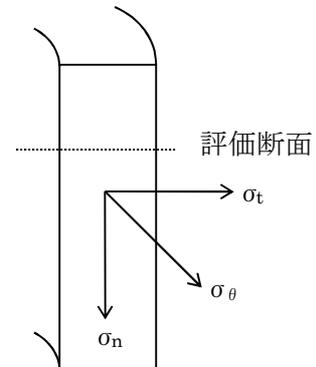
(4) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{n\theta}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

また、中間胴用材料の許容応力値を表 6-3 及び表 6-4 に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く）及び中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）の応力評価

キャスク容器及び中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）の応力評価は、設計・建設規格 PVB-3110 に従い以下の項目を実施する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価
 - (c) 圧縮応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 PVB-3120 に従い実施する。

(3) 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）の応力評価

中間胴の応力評価は、設計・建設規格 SSB-3010 に従い以下の項目を実施する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 組合せ応力

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-5 に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) 伝熱工学資料 第4版, 日本機械学会 (1986)
- (2) 機械工学便覧 新版, 日本機械学会 (1987)
- (3) 伝熱工学資料 第3版, 日本機械学会 (1975)
- (4) Mc Adams, W.H., "Heat Transmission", Third Edition, Mc Graw Hill.
- (5) 鉛ハンドブック, 日本鉛亜鉛需要研究会 (1975)
- (6) 使用済核燃料輸送容器の構造解析プログラムの開発・整備に関する調査報告書(Ⅲ), 日本機械学会 (1985)
- (7)



図 5-1 キャスク容器及び中間胴の応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵 貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 事業所内運搬 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設 計事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常 着床 取扱い機器の単 一故障, 誤動作 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常 着床 貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によつて 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の落下 	<ul style="list-style-type: none"> 該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒)
が発生しないため, 事象として選定していない。

- 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷重時	荷 重	圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付力	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	備考
								異常着床・支持構造への衝突		
I	貯蔵時	○	○	○					○	*1
	運搬時	○	*2	○	○				○	
	吊上げ時	○	*2	○			○		○	
	搬出前作業及び燃料取出し作業時	○	○	○					○	
II	衝撃荷重作用時	○	*2	○				○	○	

注記 *1: S_d *地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

*2: 本状態での自重による荷重は、運搬時荷重、吊上げ荷重又は衝撃荷重に含まれる。

表 4-3 中間胴の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 [*]	備考
					異常着床・ 支持構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1: キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

2: S_d^ 地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代 表 事 象

設計事象	代表事象 ¹⁾	包絡される事象	荷重条件 ²⁾	備 考
I + S _d *	貯 蔵 時 (S _d *地震力が 作用する場合)	—	キヤスク容器内圧 : -0.1MPa 蓋間圧力 : <input type="text"/> MPa 自 重 : 1 g (=9.81m/s ²) ボルト初期締付け力 地震力 水平方向: C _H g = 1.17 g (=11.48m/s ²) 鉛直方向: C _V g = 0.65 g (= 6.38m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯 蔵 時 (S _s 地震力が 作用する場合)	—	キヤスク容器内圧 : -0.1MPa 蓋間圧力 : <input type="text"/> MPa 自 重 : 1 g (=9.81m/s ²) ボルト初期締付け力 地震力 水平方向: C _H g = 1.17 g (=11.48m/s ²) 鉛直方向: C _V g = 0.65 g (= 6.38m/s ²) 熱荷重	—

注記 1) : 本事象について応力解析を行う。

2) : S_sと組合せ、Ⅲ_ASの評価を実施する。

表 6-1 キャスク容器用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類	許容応力値			
		オーステナイト系ステンレス鋼			
		密封シール部以外の部位 ¹⁾		密封シール部	
		SUS 304 SUS F304	許容値基準	SUS F304	許容値基準
設計事象 I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	162	1.2S _m	152	Min {S _y , 1.2S _m }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b ⁴⁾	243	1.8S _m	152	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q ³⁾	405	3S _m	152	S _y
	純せん断応力 σ _s	81	0.6S _m		
	支圧応力 σ _p ²⁾	152 (228)	S _y (1.5S _y)		
設計事象 I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	278	Min {2.4S _m , 2/3S _u }	152	S _y
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b ⁴⁾	418	Min {3.6S _m , S _u }	152	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q ³⁾	405	3S _m	152	S _y
	純せん断応力 σ _s	167	0.4S _u		
	支圧応力 σ _p ²⁾	418 (627)	S _u (1.5S _u)		

注記 1) : 底部プラグ溶接部の許容応力値は表に示される値の 1/2 とする。

2) : () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

3) : S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

4) : P_Lの許容応力は P_L+P_bの許容応力と同一とする。

表 6-2 キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許 容 応 力 値	
		合金鋼 SNB23-3	許 容 値 基 準
設計事象 I + S _d *	平均引張応力	550	2 S _m
	平均引張応力+曲げ応力	825	3 S _m
設計事象 I + S _s	平均引張応力	825	S _y
	平均引張応力+曲げ応力	825	S _y

表 6-3 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分）用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許容応力値	
		オーステナイト系ステンレス鋼	
		SUS 304	許容値基準
設計事象 I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	162	1.2 S _m
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b ³⁾	243	1.8 S _m
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q ²⁾	405	3 S _m
	純せん断応力 σ _s	81	0.6 S _m
	支圧応力 σ _p ¹⁾	152(228)	S _y (1.5S _y)
設計事象 I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	278	Min {2.4S _m , 2/3S _u }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b ³⁾	418	Min {3.6S _m , S _u }
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q ²⁾	405	3 S _m
	純せん断応力 σ _s	167	0.4 S _u
	支圧応力 σ _p ¹⁾	418(627)	S _u (1.5S _u)

注記 1) : () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

2) : S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

3) : P_Lの許容応力はP_L+P_bの許容応力と同一とする。

表 6-4(1) 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類		許容応力値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUS304	許容値基準
設計事象 I + S _d * 1)	一次応力	引張応力	204	1.5 f _t
		圧縮応力	204	1.5 f _c
		せん断応力	117	1.5 f _s
		曲げ応力	204	1.5 f _b
		支圧応力	279	1.5 f _p
	一次+二次応力	引張・圧縮応力 ²⁾	408	3 f _t
		せん断応力 ²⁾	234	3 f _s
		曲げ応力 ²⁾	408	3 f _b
		支圧応力	279	1.5 f _p
		座屈応力	117	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力とせん断応力を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_t^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_n \cdot \sigma_t - \sigma_t \cdot \sigma_\theta - \sigma_\theta \cdot \sigma_n + 3\tau_{nt}^2 + 3\tau_{t\theta}^2 + 3\tau_{n\theta}^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{cc}|}{1.5f_c} + \frac{|c\sigma_{bb}|}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_{bb}| - |\sigma_{cc}|}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{tt}| + |t\sigma_{bb}|}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_{bb}| - |\sigma_{tt}|}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の 1.5 f_c、1.5 f_b、1.5 f_t は、3 f_c、3 f_b、3 f_t とする。

- 2) : S_d* 地震力のみによる応力振幅について評価する。

表 6-4(2) 中間胴（キャスク容器との溶接部近接部分を除く）用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUS304	許 容 値 基 準
設計事象 I + S _s ¹⁾	一次 応力	引張応力	204	1.5 f _t *
		圧縮応力	204	1.5 f _c *
		せん断応力	117	1.5 f _s *
		曲げ応力	204	1.5 f _b *
		支圧応力	279	1.5 f _p *
	一 次 + 二 次 応力	引張・圧縮応力 ²⁾	408	3 f _t
		せん断応力 ²⁾	234	3 f _s
		曲げ応力 ²⁾	408	3 f _b
		支圧応力	279	1.5 f _p *
		座屈応力	117	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力とせん断応力を組み合わせた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_t^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_n \cdot \sigma_t - \sigma_t \cdot \sigma_\theta - \sigma_\theta \cdot \sigma_n + 3\tau_{nt}^2 + 3\tau_{t\theta}^2 + 3\tau_{n\theta}^2}$$

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{cc}|}{1.5f_c} + \frac{|c\sigma_{bb}|}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_{bb}| - |\sigma_{cc}|}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_{tt}| + |t\sigma_{bb}|}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_{bb}| - |\sigma_{tt}|}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の 1.5 f_c、1.5 f_b、1.5 f_t は、3 f_c、3 f_b、3 f_t とする。

- 2) : S_s 地震力のみによる応力振幅について評価する。

表 6-5 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設 計 値
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 捨 て	整 数 値 位
計算応力値 ¹⁾	MPa	小数点以下第 1 位	切 上 げ	整 数 値 位
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切 上 げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
角 度	°	—	—	設 計 値
質 量	kg	—	—	設 計 値
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁

注記 1) : 応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	9
6.1 解析手順の概要	9
6.2 荷重条件の選定	9
6.3 応力計算と評価	9
6.3.1 応力計算の方法	9
6.3.2 応力評価	10
6.3.3 数値の丸め方	10
7. 引用文献	11

図表目次

図 5-1	キャスク容器の応力解析箇所	12
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	13
表 4-2	キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	14
表 5-1	代表事象	15
表 6-1	キャスク容器用材料の許容応力値	16
表 6-2	キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値	18
表 6-3	数値の丸め方一覧表	19

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のキャスク容器に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、放射性物質を閉じ込める圧力バウンダリ境界を構成しているキャスク容器は、貯蔵時において、放射性物質を貯蔵するという観点から、使用済燃料プールや使用済樹脂貯蔵タンク等と同様に、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 - 2 0 0 5 / 2 0 0 7（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス3容器相当に区分される。

したがって、圧力荷重に関してはクラス3容器における規格計算式に基づく手法で構造強度を評価することができる。しかし、熱荷重や取扱い時の衝撃荷重等の各種の荷重の作用が想定されることから、これらの荷重に対する強度評価に当たっては、圧力荷重も含め、応力解析により発生応力を求めて評価することが必要であり、同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス1容器に準じて設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇－〇〇〇〇」
〇」として示す。

3. 記 号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
B	「設計・建設規格」付録材料図表 Part7 図2の縦軸のB値	—
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
K	応力集中係数	—
m	質量	kg
N _a	許容繰返し回数	回
N _c	繰返し回数	回
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _{d o}	最高使用圧力 (外圧)	MPa
P _L	一次局部膜応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S _s	基準地震動S _s による地震力	—
S ₁₂	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$	MPa
S ₂₃	主応力差 $\sigma_2 - \sigma_3$	MPa
S ₃₁	主応力差 $\sigma_3 - \sigma_1$	MPa
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
S _ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S _ℓ '	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
T _r	締付けトルク	N・mm
U _f	疲労累積係数	—

計算書の記号	記号の説明	単位
α	熱膨張係数	mm/(mm・°C)
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力状態	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—

4. 設計条件

キャスク容器は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用圧力 1.0 MPa

最高使用温度 170 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

キャスク容器の応力解析を行う箇所は、次の通りである（図 5-1 参照）。

- (1) 胴
- (2) 底板
- (3) 一次蓋
- (4) 一次蓋締付けボルト
- (5) バルブカバー
- (6) バルブカバー締付けボルト
- (7) 密封シール部

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算及び疲労解析の必要性検討に使用する材料の物性値は以下の通りである。

- (1) 内圧及び機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ とする。
- (2) 物性値を温度補正して使用する場合には、補正方法を応力計算書に示す。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

- (1) キャスク容器（穴の周辺部及びボルトを除く。）にあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、「設計・建設規格」 PVB-3111(2)a. 及び d. に定める値を超えないこと。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、「設計・建設規格」 PVB-3111(3)a. 及び c. に定める値を超えないこと。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値の差は、「設計・建設規格」 PVB-3112 に定める値を超えないこと。
 - d. キャスク容器の胴にあつては設計事象 I 及び設計事象 II において生じる応力解析による

- 熱応力のサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は「設計・建設規格」 PVB-3112 に定める値を超えないこと。
- e. 設計事象 I 及び設計事象 II において生じる応力の疲労解析は、「設計・建設規格」 PVB-3114 に定める値を超えないこと。
- f. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによる応力の疲労解析を行い、疲労累積係数を求め、e. で求めた疲労累積係数との和が 1.0 を超えないこと。
- g. 純せん断荷重を受ける部分にあつては、a. 及び b. の規定にかかわらず、平均せん断応力は、次の値を超えないこと。
- (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合においては、「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 1 に定める値の 0.6 倍の値
- (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合においては、「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 9 に定める値の 0.4 倍の値
- h. 支圧荷重を受ける部分にあつては、平均支圧応力は、次の値を超えないこと。
- (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合においては、「設計・建設規格」 PVB-3116(1)及び(2)に定める値
- (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用して生じる場合で、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合は、「設計・建設規格」付録材料図表 Part5 表 9 に定める値の 1.5 倍の値
- (c) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用して生じる場合で、(b)以外の場合は、「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 9 に定める値
- i. 密封シール部にあつては、次によること。
- (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さは、「設計・建設規格」 PVB-3111(2)a. に定める値を超えないこと。また、一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ、並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さは、いずれも「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値を超えないこと。
- (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ、並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さは、いずれも「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値を超えないこと。
- (2) ボルトにあつては、次によること。
- a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合において生じる応力は、「設計・建設規格」 PVB-3121(2)に定める値を超えないこと。
- b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合において生じる応力は、次に定める値を超えないこと。
- (a) 軸方向に垂直な断面の平均引張応力は、「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表 8 に定める値

- (b) (a)に規定する平均引張応力と曲げ応力の和は、ボルトの断面の外周において、「設計・建設規格」 付録材料図表 Part5 表8に定める値
- c. 設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて生じる応力の疲労解析は、「設計・建設規格」 PVB-3122によること。
- d. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによる応力の疲労解析を行い、疲労累積係数を求め、c.で求めた疲労累積係数との和が1.0を超えないこと。
- (3) 疲労解析において使用する疲労強度減少係数及び応力集中係数は「設計・建設規格」PVB-3130に定めるものによる。
- (4) (1)及び(2)において、繰返し荷重が「設計・建設規格」 PVB-3140(1)から(6)までの規定に適合するときは、疲労解析を行うことを要しない。
- (5) (1)から(4)において、「設計・建設規格」の「供用状態A」、「供用状態B」、「供用状態C」及び「供用状態D」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」、「設計事象Ⅱ」、「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象Ⅰの状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合」と読み替える。
- (6) キャスク容器に穴を設ける場合は、「設計・建設規格」 PVB-3500の規定による。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

キャスク容器の応力解析は、想定される圧力荷重、機械的荷重を基に、キャスク容器の実形状をモデル化し、解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく応力解析の汎用解析コードである。

温度分布計算は、領域を小さなメッシュに分割し、各メッシュについての熱平衡方程式を立て、微小時間でステップごとの温度分布を順次求める方式によっている。

応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部で小さなメッシュに分割することによって行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示されているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えるものは次の2つである。

a. 内圧

b. 機械的荷重

自重（燃料集合体含む貯蔵容器（二次蓋含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化に当たっては、キャスク容器及び底部中性子遮へい体カバーの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。

b. 荷重が局部的に作用する事象については、その局部的荷重による発生応力を評価するため三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

また、モデル化に当たり、対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

(3) 構造及び材料の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、計算書の形状図中に、番号〔例①〕で示す。

(4) 応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

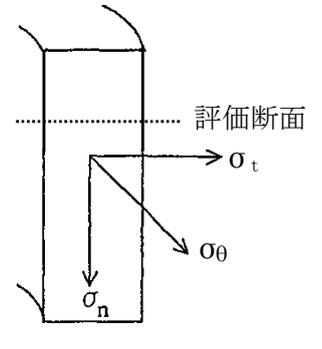
(5) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、「設計・建設規格」GNR-2130による定義に従い、応力種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は下記の通りである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{\theta n}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力を表6-1～表6-2に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く。）の応力評価

キャスク容器の応力評価は、「設計・建設規格」PVB-3110に従い、以下の項目を評価する。

- a. 一次応力強さ
 - b. 一次＋二次応力強さ
 - c. 繰返し荷重の評価
 - d. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価
 - (c) 軸圧縮応力の評価
- (2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、「設計・建設規格」PVB-3120に従い評価する。

6.4.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表6-3に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) 伝熱工学資料 改訂第4版, 日本機械学会 (1986)
- (2) 機械工学便覧 新版, 日本機械学会 (1987)
- (3) 伝熱工学資料 改訂第3版, 日本機械学会 (1975)
- (4) 平成12年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書, (財)原子力発電技術機構
- (5) Siegel, R., and Howell, J.R., "THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER", Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York, (1980)
- (6) Jakob, M., "Heat Transfer", Volume I, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1962)
- (7)
- (8) 化学工学便覧 第5版, 化学工学協会 (1988)
- (9) 応力集中 増補版, 西田正孝, 森北出版 (1973)

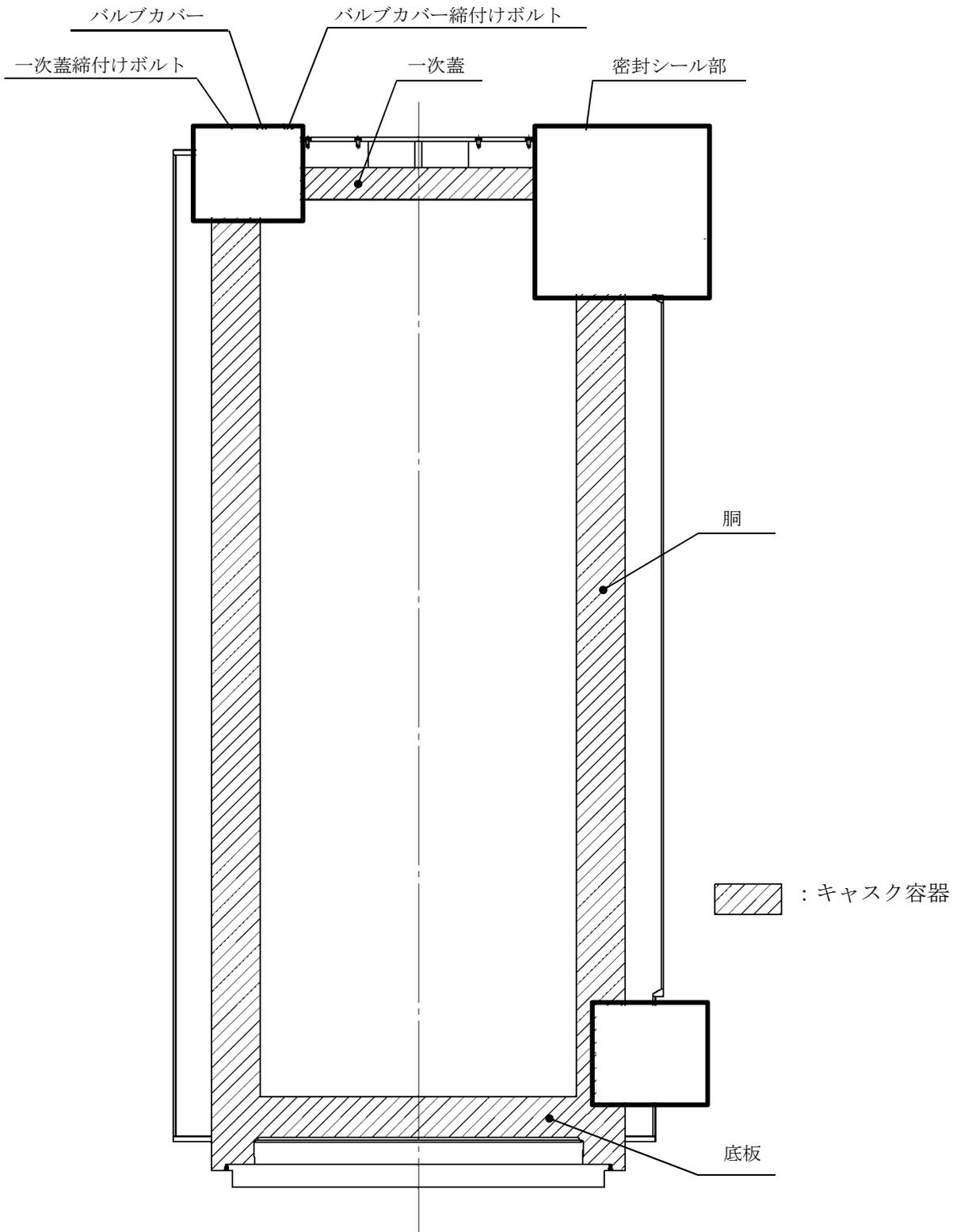


図 5-1 キャスク容器の応力解析箇所（全体断面図）

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設計 事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によって 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷重時	圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	備考
							異常着床 支持構造物への衝突		
I	貯蔵時	○	○	○	—	—	—	○	*1
	運搬時	○	*2	○	○			○	
	吊上げ時	○	*2	○		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○	○	○				○	
II	衝撃荷重作用時	○	*2	○			○	○	

注記 *1: 支持構造物であるトランニオン固定ボルトの初期締付け力, S_d *地震力及び S_s 地震力は, 設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

*2: 本状態での自重による荷重は, 運搬時荷重, 吊上げ荷重又は衝撃荷重に含まれる。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件*2	備考
I + S _d *	貯蔵時 $\left(S_d^* \text{地震力が} \right)$ 作用する場合	—	キャスク容器内圧：-0.1 MPa 蓋間圧力： <input type="text"/> MPa 自重 ボルト初期締付け力 地震力 水平方向：1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向：0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 $\left(S_s \text{地震力が} \right)$ 作用する場合	—	キャスク容器内圧：-0.1 MPa 蓋間圧力： <input type="text"/> MPa 自重 ボルト初期締付け力 地震力 水平方向：1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向：0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1：本事象について応力解析を行う。

*2：S_sと組合せ、Ⅲ_ASの評価を実施する。

表 6-1 キヤスク容器用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		炭素鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		GLF1	許容値基準	GLF1	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	181	Min {S _y , 2/3 S _u }	181	Min {S _y , 2/3 S _u }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b	271	Min {1.5 S _y , S _u }	181	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q* ²	362	3 S _m	181	S _y
	平均せん断応力 σ _s	72	0.6 S _m		
	平均支圧応力 σ _p * ¹	181 (271)	S _y (1.5 S _y)		
I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	251	2/3 S _u	181	S _y
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b	377	S _u	181	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q* ²	362	3 S _m	181	S _y
	平均せん断応力 σ _s	150	0.4 S _u		
	平均支圧応力 σ _p * ¹	377 (565)	S _u (1.5 S _u)		

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

*2：S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 キヤスク容器用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		ステンレス鋼	
		密封シール部以外	
		SUS304	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	160	1.2 S _m
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L + P _b	240	1.8 S _m
	一次+二次応力強さ P _L + P _b + Q* ²	401	3 S _m
	平均せん断応力 σ _s	80	0.6 S _m
	平均支圧応力 σ _p * ¹	150 (225)	S _y (1.5 S _y)
I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	276	Min {2.4 S _m , 2/3 S _u }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L + P _b	414	Min {3.6 S _m , S _u }
	一次+二次応力強さ P _L + P _b + Q* ²	401	3 S _m
	平均せん断応力 σ _s	165	0.4 S _u
	平均支圧応力 σ _p * ¹	414 (621)	S _u (1.5 S _u)

注記 *1 : () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

*2 : S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		低合金鋼	
		一次蓋締付けボルト バルブカバー締付けボルト	
		SNB23-3	許容値基準
I + S _d *	平均引張応力	547	2 S _m
	平均引張応力+曲げ応力	821	3 S _m
I + S _s	平均引張応力	820	S _y
	平均引張応力+曲げ応力	820	S _y

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	—	—	設計値
質量	kg	—	—	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

注記 * : 応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	9
6.1 解析手順の概要	9
6.2 荷重条件の選定	9
6.3 応力計算と応力の分類	9
6.3.1 応力計算の方法	9
6.3.2 応力評価	9
6.3.3 数値の丸め方	10
7. 引用文献	11

図表目次

図 5-1	キャスク容器の応力解析箇所	12
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	13
表 4-2	キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類と組合せ	14
表 5-1	代表事象	15
表 6-1	キャスク容器用材料の許容応力値	16
表 6-2	キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値	18
表 6-3	数値の丸め方一覧表	19

1. 概 要

本書は,使用済燃料乾式貯蔵容器のキャスク容器に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、放射性物質を閉じ込める圧力バウンダリ境界を構成しているキャスク容器は、貯蔵時において、放射性物質を貯蔵するという観点から、使用済燃料プールや使用済樹脂貯蔵タンク等と同様に、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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス3容器相当に区分される。

したがって、圧力荷重に関してはクラス3容器における規格計算式に基づく手法で構造強度を評価することができる。しかし、熱荷重や取扱い時の衝撃荷重等の各種の荷重の作用が想定されることから、これらの荷重に対する強度評価に当たっては、圧力荷重も含め、応力解析により発生応力を求めて評価することが必要であり、同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス1容器に準じて設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」
〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
B	設計・建設規格 付録材料図表 Part7 図2 の縦軸のB値	—
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
K	応力集中係数	—
m	質量	kg
N	許容繰返し回数	回
n	繰返し回数	回
P _a	許容外圧	MPa
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _{do}	最高使用圧力 (外圧)	MPa
P _L	一次局部膜応力強さ	MPa
P _m	一次一般膜応力強さ	MPa
Q	二次応力	MPa
R	キャスク容器の平均半径	mm
r	半径	mm
S	許容繰返し回数に対する繰返しピーク応力強さ	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d により定まる地震力又は静的地震力の大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—

計算書の記号	記号の説明	単 位
S_m	設計応力強さ	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
S_ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S_ℓ'	縦弾性係数を補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
T	温度	°C
T_r	締付けトルク	N・mm
t	板厚	mm
U	疲労累積係数	—
W	荷重	N
α	熱膨張係数	mm/mm°C
σ_b	圧縮応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

キャスク容器は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用圧力 1.0 MPa

最高使用温度 160 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

キャスク容器の応力解析を行う箇所は、次のとおりである（図 5-1 参照）。

- (1) 胴
- (2) 底板
- (3) 一次蓋
- (4) 一次蓋締付けボルト
- (5) バルブカバー
- (6) バルブカバー締付けボルト
- (7) 密封シール部

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算及び疲労解析の必要性検討に使用する材料の物性値は以下のとおりである。

- (1) 内圧及び機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は 20°C とする。
- (2) 物性値を温度補正して使用する場合には、補正方法を応力計算書に示す。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

- (1) キャスク容器（穴の周辺部及びボルトを除く。）にあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 PVB-3111(2)a. 及び d. の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 PVB-3111(3)a. 及び c. の規定を満足すること。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、設計・建設規格 PVB-3112 の規定を満足すること。
 - d. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 又は S_s 地震動のみによる応力の疲労解析を行い、疲労累積係数の和が 1.0 を超えないこと。
 - e. 純せん断荷重を受ける部分にあつては、平均せん断応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合においては、設計・建設規格 PVB-3115(1) の規定

- (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合においては、設計・建設規格 PVB-3115(2) の規定
- f. 支圧荷重を受ける部分にあっては、平均支圧応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合においては、設計・建設規格 PVB-3116(1) 又は(2) の規定
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用して生じる場合で、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の平均支圧応力は、設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 9 にて規定する値の 1.5 倍の値を超えないこと。
 - (c) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用して生じる場合で、(b) 以外の場合の平均支圧応力は、設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 9 にて規定する値を超えないこと。
- g. 密封シール部にあっては、次によること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さは、設計・建設規格 PVB-3111(2)a. の規定又は設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値のいずれか小さい方の値を超えないこと。また、一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ、並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、いずれも設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合において生じる応力の応力解析による一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ、並びに一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さのサイクルにおいて、その最大値と最小値との差は、いずれも設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。
- (2) ボルトにあっては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用する場合において生じる応力は、設計・建設規格 PVB-3121(2) の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用する場合において生じる応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 軸方向に垂直な断面の平均引張応力は、設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。
 - (b) (a) に規定する平均引張応力と曲げ応力の和は、ボルトの断面の外周において、設計・建設規格付録材料図表 Part5 表 8 にて規定される値を超えないこと。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 又は S_s 地震動のみによる応力の疲労解析を行い、疲労累積係数の和が 1.0 を超えないこと。
- (3) 疲労解析において使用する疲労強度減少係数及び応力集中係数は設計・建設規格 PVB-3130 の規定によること。
- (4) (1) 及び(2) において、繰返し荷重が設計・建設規格 PVB-3140(1) から(6) までの規定に

適合するときは、疲労解析を行うことを要しない。

- (5) (1), (2), (3) 及び(4)の場合において、設計・建設規格の“供用状態A, 供用状態B”はそれぞれ“設計事象Ⅰ, 設計事象Ⅱ”と読み替える。
- (6) キャスク容器に穴を設ける場合は、設計・建設規格 PVB-3500 の規定を満足すること。
- (7) キャスク容器の胴の形状は、設計・建設規格 PVB-4110(1)及び(3)の規定を満足すること。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

キャスク容器の応力解析は、想定される圧力荷重、機械的荷重を基に、キャスク容器の実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく応力解析等の汎用解析コードである。応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し、各メッシュについて計算を実施することによって行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4. 項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と応力の分類

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 2 つである。

- a. 内圧
- b. 機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器（二次蓋を含む）の貯蔵時の設計重量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては、キャスク容器及び底部中性子遮蔽体カバーの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 荷重が局部的に作用するため、その局部的荷重による発生応力を評価するため三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

また、モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、応力計算書に示す。応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

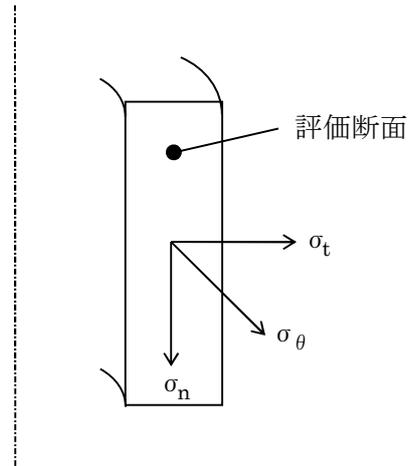
(4) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{\theta n}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



キャスク容器用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

(1) キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

キャスク容器の応力評価は設計・建設規格 PVB-3110 に従い以下の項目を実施する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次＋二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は設計・建設規格 PVB-3120 に従い評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) 伝熱工学資料 第4版, 日本機械学会(1986)
- (2) 機械工学便覧 新版 日本機械学会 (1987)
- (3) 伝熱工学資料 第3版, 日本機械学会(1975)
- (4)
- (5) 応力集中 増補版, 西田正孝, 森北出版(1973)
- (6) HEAT TRANSMISSION THIRD EDITION, KOGAKUSHA

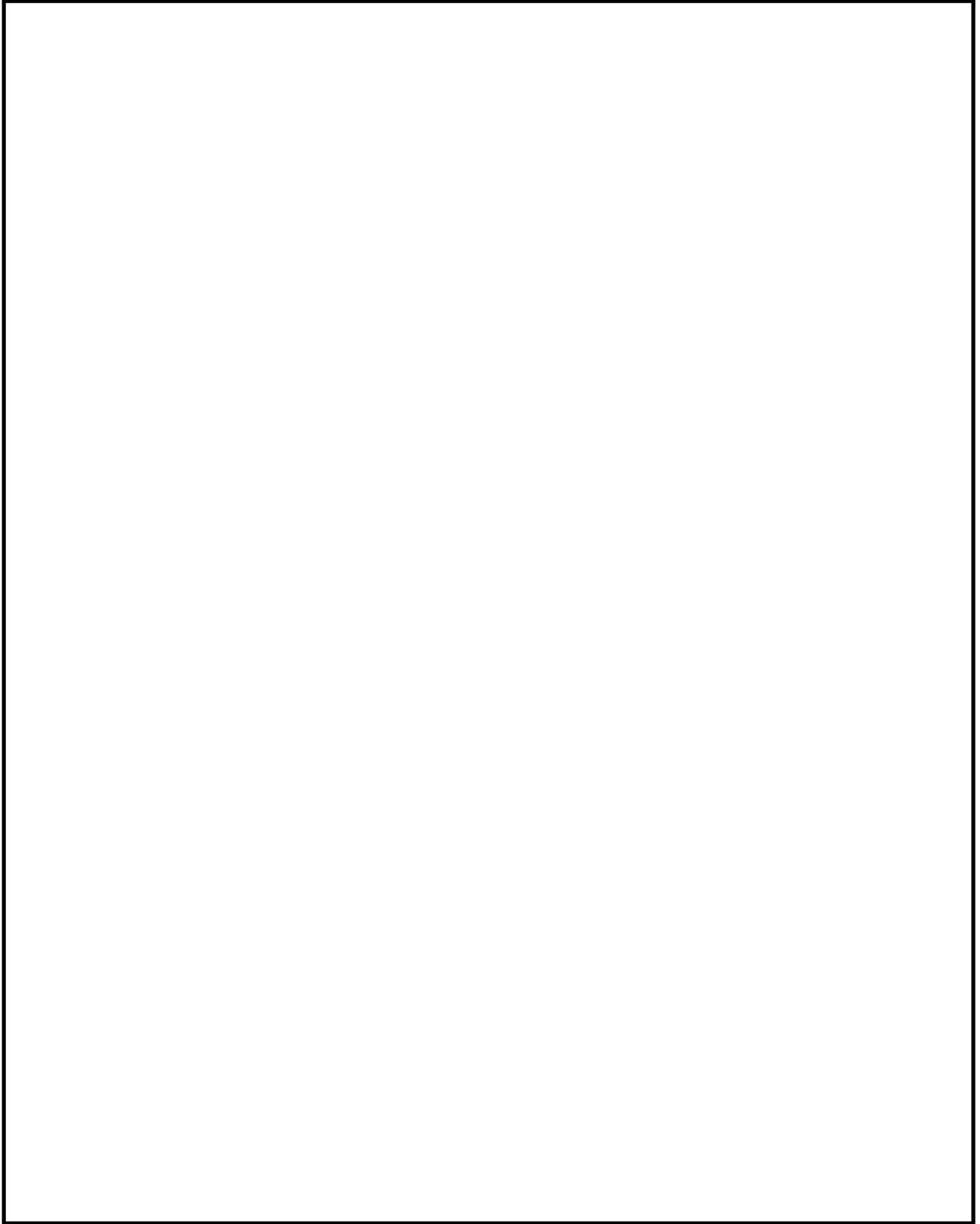


図 5-1 キャスク容器の応力解析箇所(1/2)

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設計 事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によつて 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類と組合せ

設計事象	荷重時	荷 重	圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付力	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	備考
								異常着床・支持構造物への衝突		
I	貯蔵時	○	○	○					○	*1
	運搬時	○	*2	○	○				○	
	吊上げ時	○	*2	○		○			○	
	搬出前作業及び燃料取出し作業時	○	○	○					○	
II	衝撃荷重作用時	○	*2	○			○	○		

注記 *1: S_d *地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

*2: 本状態での自重による荷重は、運搬時荷重、吊上げ荷重又は衝撃荷重に含まれる。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象 *1	包絡される事象	荷重条件	備 考
I + S _d *	貯蔵時 〔 S _d *地震力が作用する場合 〕	—	キャスク容器内圧：-0.1 MPa 蓋間圧力：□ MPa 自重：1 g (=9.81 m/s ²) ボルト初期締付け力 地震力 水平方向：0.72 g (=7.06 m/s ²) 鉛直方向：0.36 g (=3.53 m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 〔 S _s 地震力が作用する場合 〕	—	キャスク容器内圧：-0.1 MPa 蓋間圧力：□ MPa 自重：1 g (=9.81 m/s ²) ボルト初期締付け力 地震力 水平方向：1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向：0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1：本事象について応力解析を行う。

表 6-1 キヤスク容器用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		炭素鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		GLF1	許容値基準	GLF1	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	182	Min. {S _y , 2/3・S _u }	182	Min. {S _y , 2/3・S _u }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b	273	Min. {1.5・S _y , S _u }	182	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q *2	364	3・S _m	182	S _y
	純せん断応力 σ _s	72	0.6・S _m		
	支圧応力 σ _p *1	182 (273)	S _y (1.5・S _y)		
I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	251	2/3・S _u	182	S _y
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b	377	S _u	182	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q *2	364	3・S _m	182	S _y
	純せん断応力 σ _s	150	0.4・S _u		
	支圧応力 σ _p *1	377 (565)	S _u (1.5・S _u)		

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

*2：S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 キャスク容器用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		ステンレス鋼			
		密封シール部以外		密封シール部	
		SUS304, SUSF304	許容値基準	SUS304, SUSF304	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	162	1.2・S _m	152	Min. {1.2・S _m , S _y }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b	243	1.8・S _m	152	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q ^{*2}	406	3・S _m	152	S _y
	純せん断応力 σ _s	81	0.6・S _m		
	支圧応力 σ _p ^{*1}	152 (229)	S _y (1.5・S _y)		
I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	278	Min. {2.4・S _m , 2/3・S _u }	152	S _y
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _L +P _b	417	Min. {3.6・S _m , S _u }	152	S _y
	一次+二次応力強さ P _L +P _b +Q ^{*2}	406	3・S _m	152	S _y
	純せん断応力 σ _s	167	0.4・S _u		
	支圧応力 σ _p ^{*1}	418 (627)	S _u (1.5・S _u)		

注記 *1：() 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値

*2：S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 キャスク容器用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		低合金鋼	
		一次蓋締付けボルト バルブカバー締付けボルト	
		SNB23-3	許容値基準
I + S _d *	平均引張応力	550	2・S _m
	平均引張+曲げ応力	826	3・S _m
I + S _s	平均引張応力	825	S _y
	平均引張+曲げ応力	825	S _y

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設 計 値
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整 数
計算応力値 *	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整 数
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角 度	°	—	—	設 計 値
質 量	kg	—	—	設 計 値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

注記 * : 応力成分は, 小数点以下第 2 位を四捨五入し, 小数点以下第 1 位までの値を記載する。

V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	7
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	9
6.3.1 応力計算の方法	9
6.3.2 応力評価	9
6.3.3 数値の丸め方	10
7. 引用文献	11

図表目次

図 5-1	バスケットの応力解析箇所	12
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	13
表 4-2	バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	14
表 5-1	代表事象	15
表 6-1	バスケット用材料の許容応力値	16
表 6-2	数値の丸め方一覧表	17

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、バスケットは、貯蔵時において、使用済燃料貯蔵ラックと同様に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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）の機器等の区分に当てはまらなると考えられるが、使用済燃料集合体を直接支持する部材であるため、炉心支持構造物に準じて設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積または接触面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
F _X	単位長さあたりの X 方向荷重	N/mm
F _Y	単位長さあたりの Y 方向荷重	N/mm
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	Z 方向加速度	m/s ²
G ₂	X 方向加速度	m/s ²
G ₃	Y 方向加速度	m/s ²
L	バスケット全長	mm
L _s	サポートガイドの長さ	mm
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
W	質量	kg
Z	断面係数	mm ³
α _H	水平方向設計加速度	m/s ²
α _V	鉛直方向設計加速度	m/s ²
ρ	密度	kg/mm ³
σ ₁	主応力	MPa
σ ₂	主応力	MPa
σ ₃	主応力	MPa

計算書の記号	記号の説明	単位
σ_b	座屈応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力(x方向)	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力(y方向)	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力(z方向)	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

バスケット及びサポートガイドは、以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度（バスケット） : 210 °C

最高使用温度（サポートガイド） : 160 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように、設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

バスケットの応力解析を行う箇所は次のとおりである(図 5-1 参照)。

- (1) チャンネル
- (2) サポートブロック
- (3) 補強板①
- (4) 補強板②
- (5) 仕切板
- (6) 底板
- (7) サポートガイド
- (8) サポートガイド溶接部

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。
なお、常温は 20℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次に各号に掲げるとおりとする。

- (1) バスケットにあつては、次によること。
- a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 CSS-3111(3)の規定を満足すること。
 - b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 CSS-3111(4)の規定を満足すること。
 - c. 純せん断荷重を受ける部分にあつては、a.及びb.の規定にかかわらず、平均せん断応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3114(2)に定める値を超えないこと。
 - (b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3114(3)に定める値を超えないこと。
 - d. 支圧荷重を受ける部分にあつては、平均支圧応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3115(2)に定める値を超えないこと。
 - (b) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3115(3)に定める値を超えないこと。
 - e. 圧縮荷重を受ける部分にあつては、座屈応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力又は S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値を超えないこと。
 - f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用してバスケットに塑性変形が生じる場合には、臨界防止評価のため変形量の評価を行う。
 - g. 溶接部にあつては、設計・建設規格 CSS-3150 に規定される継手効率を考慮すること。
- (2) (1)において、設計・建設規格の「供用状態A」及び「供用状態B」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

バスケット及びサポートガイドの応力解析は、想定される機械的荷重を基にバスケット及びサポートガイドの実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく応力解析等の汎用解析コードである。温度分布計算及び応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し、各メッシュについて計算を実施することによって行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4. 項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は代表事象毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器の貯蔵時の設計重量を用いる。）、地震荷重をいう。

(2) 計算モデルは次の方針に従う。

a. モデル化にあたっては、バスケットの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮し、1/2形状の2次元平面固体要素及びはり要素による解析モデルとする。

b. 中性子吸収板は非構造強度部材としてモデルより除外する。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力(x方向)

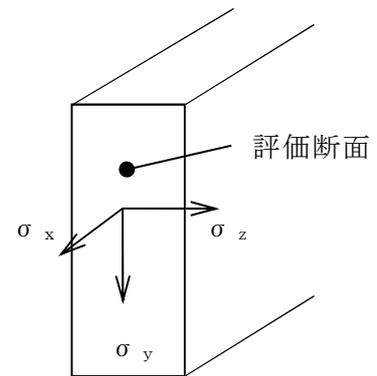
σ_y : 評価断面に平行な方向の応力(y方向)

σ_z : 評価断面に平行な方向の応力(z方向)

τ_{xy} : せん断応力

τ_{yz} : せん断応力

τ_{zx} : せん断応力



バスケット用材料の許容応力値を表 6-1 に示す。

(1) バスケット及びサポートガイドの応力評価

バスケット及びサポートガイドの応力評価は、設計・建設規格 CSS-3110 及び SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

a. 一次応力強さ

b. 特別な応力の検討

(a) 純せん断応力の評価

(b) 支圧応力の評価

(c) 座屈応力の評価

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

(1) 伝熱工学資料 第4版, 日本機械学会 (1986)

(2) 伝熱工学資料 第3版, 日本機械学会 (1975)

(3) 機械工学便覧 新版, 日本機械学会 (1987)

(4)



(5) McAdams, W.H., "Heat Transmission", Third Edition McGraw Hill.

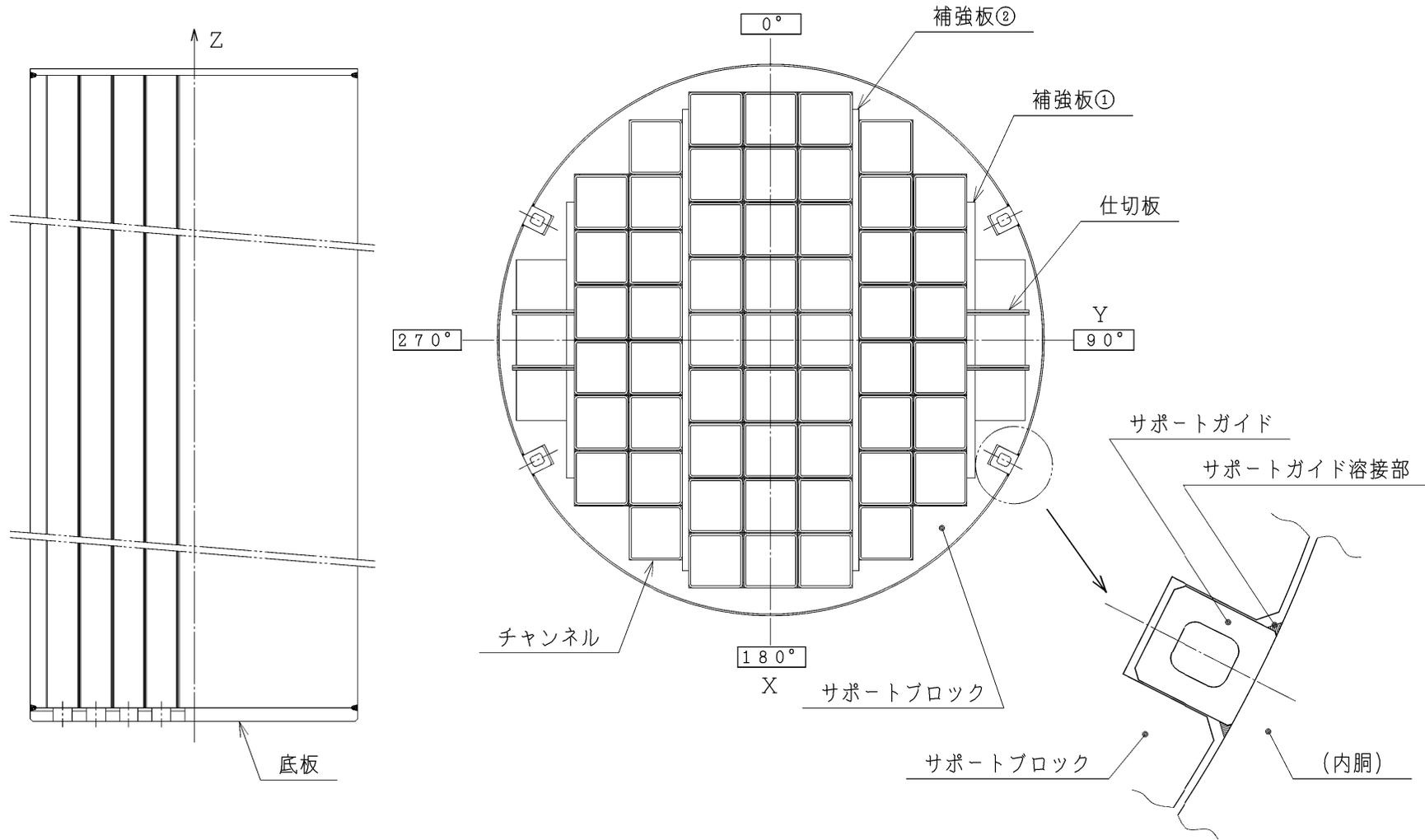


図 5-1 バスケットの応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設計 事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II という機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によって 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記*: 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷重時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 [*]	備考
					異常着床・支持構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1: キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

*2: S_d *地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表5-1 代表事象

設計事象	代表事象 ¹⁾	包絡される事象	荷重条件 ²⁾	備考
I + S _d *	貯蔵時 (S _d *地震力が作用する場合)	—	自重:1g (=9.81m/s ²) 地震力 水平方向: C _H g=1.17g (=11.48m/s ²) 鉛直方向: C _V g=0.65g (=6.38m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 (S _s 地震力が作用する場合)	—	自重:1g (=9.81m/s ²) 地震力 水平方向: C _H g=1.17g (=11.48m/s ²) 鉛直方向: C _V g=0.65g (=6.38m/s ²) 熱荷重	—

注記 1) : 本事象について応力解析を行う。

2) : S_sと組合せ, III_ASの評価を実施する。

表 6-1 バスケット用材料の許容応力値

許容応力区分	応力の種類	許容応力値 (MPa)				
		アルミニウム合金 ²⁾		オーステナイト系ステンレス鋼		
		A5052TD-H34	A5083FH-0 ²⁾ 及びA5083P-0	許容値基準	SUS304 ²⁾	許容値基準
設計事象 I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m			1.5 S _m	202	1.5 S _m
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _m +P _b			2.25 S _m	303	2.25 S _m
	純せん断応力 σ _s			0.9 S _m	121	0.9 S _m
	支圧応力 σ _p ¹⁾			1.5 S _y (2.25 S _y)	228 (342)	1.5 S _y (2.25 S _y)
	座屈応力 σ _b			1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c	117	1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c
設計事象 I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m			2/3 S _u	278	Min {2.4S _m , 2/3S _u }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P _m +P _b			S _u	418	Min {3.6S _m , S _u }
	純せん断応力 σ _s			1.2 S _m	162	1.2 S _m
	支圧応力 σ _p ¹⁾			2 S _y (3 S _y)	304 (456)	2 S _y (3 S _y)
	座屈応力 σ _b			1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c	117	1.5f _b , 1.5f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : ()内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

2) : サポートブロック内の周溶接は完全溶込み溶接とし、設計・建設規格 CSS-3150 に定められる検査の種類を A とするため、溶接効率は 1.0 である。また、サポートガイドと内胴との溶接は片側すみ肉溶接とし、設計・建設規格 CSS-3150 に定められる検査の種類を E とするため、溶接効率は 0.4 である。

表 6-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 捨 て	整 数 値 位
計算応力値 ¹⁾	MPa	小数点以下第 1 位	切 上 げ	整 数 値 位
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切 上 げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
角 度	°	—	—	設 計 値
質 量	kg	—	—	設 計 値

注記 1) : 応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 荷重条件	4
4.1 設計条件	4
4.2 設計事象	4
4.3 荷重の種類とその組合せ	4
5. 計算条件	5
5.1 解析対象とする事象	5
5.2 解析箇所	5
5.3 形状及び寸法	5
5.4 物性値	5
5.5 許容応力	5
6. 応力解析の手順	7
6.1 解析手順の概要	7
6.2 荷重条件の選定	7
6.3 応力計算と応力の分類	7
6.3.1 応力計算の方法	7
6.3.2 応力の分類	7
6.4 応力の評価	8
6.4.1 主応力	8
6.4.2 応力強さ	8
6.4.3 一次応力強さ	8
6.5 特別な応力の検討	8
6.5.1 純せん断応力の評価	8
6.5.2 支圧応力の評価	8
6.5.3 軸圧縮応力の評価	8
6.5.4 座屈応力の評価	8
7. 解析及び評価結果の添付	9
7.1 応力解析結果	9
7.2 応力評価結果	9
8. 引用文献	9

図表目次

図 5-1	バスケットの応力解析箇所	10
表 4-1	乾式貯蔵キャスクの設計事象	11
表 4-2	バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	12
表 5-1	代表事象	13
表 5-2	バスケット用材料の許容応力値	14
表 6-1	数値の丸め方一覧表	15

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、バスケットは、貯蔵時において、使用済燃料貯蔵ラックと同様に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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）の機器等の区分に当てはまらなると考えられるが、使用済燃料集合体を直接支持する部材であるため、炉心支持構造物に準じて設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積，又は接触面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
ℓ	バスケットプレート長さ	mm
M	曲げモーメント	N・mm
m	質量	kg
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _m	一次一般膜応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s による地震力	—
S ₁₂	主応力差 σ ₁ - σ ₂	MPa
S ₂₃	主応力差 σ ₂ - σ ₃	MPa
S ₃₁	主応力差 σ ₃ - σ ₁	MPa
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
Z	断面係数	mm ³
ρ	密度	kg/mm ³
σ	主応力	MPa
σ ₁	主応力	MPa
σ ₂	主応力	MPa
σ ₃	主応力	MPa
σ _b	座屈応力	MPa
σ _p	平均支圧応力	MPa
σ _s	平均せん断応力	MPa
σ _c	胴部軸方向に受ける圧縮応力	MPa
σ _x	評価断面に垂直な方向の応力 (x 方向)	MPa
σ _y	評価断面に平行な方向の応力 (y 方向)	MPa
σ _z	評価断面に平行な方向の応力 (z 方向)	MPa
τ _{xy}	せん断応力	MPa
τ _{yz}	せん断応力	MPa
τ _{zx}	せん断応力	MPa
I + S _d *	設計事象 I の貯蔵時の状態において、S _d *地震力が作用した場合の許容応力状態	—
I + S _s	設計事象 I の貯蔵時の状態において、S _s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—

4. 荷重条件

バスケットは、以下の荷重条件に耐えるように設計する。

各部の応力解析は、本章に示す荷重を考慮する。応力解析に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

4.1 設計条件

最高使用温度 : 260 °C

機械的荷重 : 自重及び地震力による荷重をいう。

4.2 設計事象

考慮する設計事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

応力解析を行う箇所の形状を図 5-1 に示す。

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。
なお、常温は、20℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次に掲げる通りとする。

- (1) バスケットにあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 CSS-3111(3)に定める値を超えないこと。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 CSS-3111(4)に定める値を超えないこと。
 - c. 純せん断荷重を受ける部分にあつては、a. 及び b. の規定にかかわらず、平均せん断応力は、次の値を超えないこと。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3114(2)に定める値
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3114(3)に定める値
 - d. 支圧荷重を受ける部分にあつては、平均支圧応力は、次の値を超えないこと。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3115(2)に定める値
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3115(3)に定める値
 - e. 軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴にあつては、圧縮応力は、次の値を超えないこと。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3116.1(2)に定める値
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3116.1(3)に定める値

- f. 圧縮荷重を受ける部分にあつては、座屈応力は、次の値を超えないこと。
- (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力、又は S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)，(3)，又は(4)に定める値の 1.5 倍の値
- g. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用してバスケットに塑性変形が生じる場合には、臨界防止評価のため変形量の評価を行う。

(2) (1)において、設計・建設規格の「供用状態C」及び「供用状態D」は、それぞれ「設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

バスケット用材料の許容応力値を表 5-2 に示す。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示されているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。

6.3 応力計算と応力の分類

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは、以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(2) 伝熱プレートは、非構造強度部材として評価対象より除外する。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、計算書の形状図中に、番号〔例①〕で示す。

応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

(4) 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については、丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は、原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表6-1に示す。

6.3.2 応力の分類

応力の計算結果は、表5-2に示すように応力の種類ごとに分類して、応力計算書に示す。このときの応力の定義と分類は、設計・建設規格 GNR-2130による。

なお、応力の記号とその方向は以下の通りである。

σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力（x方向）

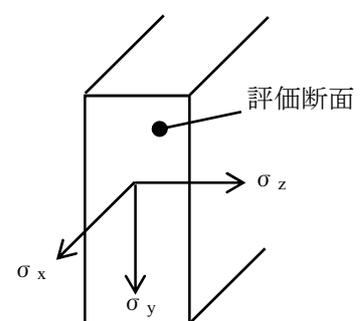
σ_y : 評価断面に平行な方向の応力（y方向）

σ_z : 評価断面に平行な方向の応力（z方向）

τ_{xy} : せん断応力

τ_{yz} : せん断応力

τ_{zx} : せん断応力



6.4 応力の評価

6.4.1 主応力

計算された各種の荷重による応力を重ね合わせ、各応力評価点（面）の組合せ応力を求める。

組合せ応力は、一般に σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} の6成分をもち、応力評価点（面）の主応力は、引用文献(1)のA4編1.4.1項により次式を満足する3根として計算する。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \cdot \sigma^2 + (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x - \tau_{xy}^2 \\ & \quad - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \cdot \sigma - \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \tau_{yz}^2 + \sigma_y \cdot \tau_{zx}^2 \\ & \quad + \sigma_z \cdot \tau_{xy}^2 - 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} = 0 \end{aligned}$$

上式により主応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 が求まる。

6.4.2 応力強さ

下記の3つの主応力差の絶対値で最大のものを応力強さとする。

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

6.4.3 一次応力強さ

機械的荷重により発生する一次一般膜応力強さ及び一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さが、5.5(1)a.及びb.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5 特別な応力の検討

6.5.1 純せん断応力の評価

純せん断荷重を受ける部分は、5.5(1)c.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5.2 支圧応力の評価

支圧荷重を受ける部分は、5.5(1)d.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5.3 軸圧縮応力の評価

軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴の部分は、5.5(1)e.に示す許容応力値を満足することを示す。

6.5.4 座屈応力の評価

圧縮荷重を受ける部分は、5.5(1)f.に示す許容応力値を満足することを示す。

7. 解析及び評価結果の添付

応力計算書では、以下に示すように解析結果を添付する。

7.1 応力解析結果

考慮した荷重ごとに評価対象とした応力評価点（面）について、応力の種類ごとに解析結果を示す。

7.2 応力評価結果

次の応力評価結果を、評価対象とした応力評価点（面）について添付する。

- (1) 一次一般膜応力強さ
- (2) 一次一般膜＋一次曲げ応力強さ
- (3) 純せん断応力
- (4) 支圧応力
- (5) 軸圧縮応力
- (6) 座屈応力

8. 引用文献

- (1) 機械工学便覧 新版，日本機械学会（1987）

10

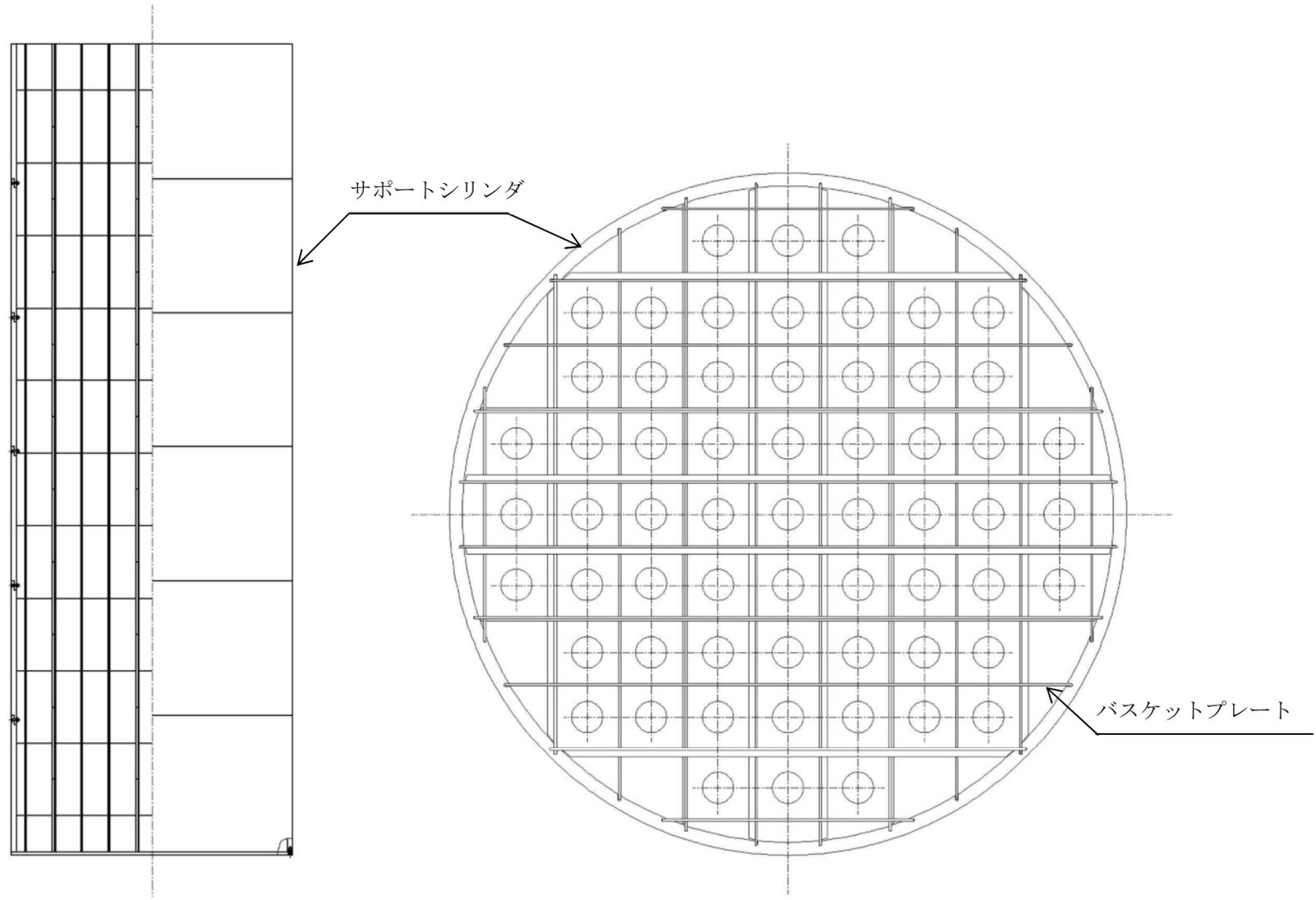


図 5-1 バスケットの応力解析箇所

表 4-1 乾式貯蔵キャスクの設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い 状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設計 事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間中 に予想される取扱い機器の単 一故障, 単一誤動作等の事象 によって, 貯蔵容器が通常貯 蔵状態あるいは通常取扱い状 態から外れるような状態をい う。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象によ って引き起こされる状態をい う。すなわち, 設計事象 II で いう機器の単一故障, 運転員 の単一誤操作等によって引き 起こされるもののうち, その 発生頻度が十分に低いと考え られるものを分類する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは考 えられない事象によって引き 起こされる状態をいうが, 万 一発生した場合の設計の妥当 性を確保するために特に設け たものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷 重 時	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 [*]	備考
					異常着床・ 支持構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1：キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

*2： S_d *地震力及び S_s 地震力は，設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件*2	備考
I + S _d *	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	自重 地震力 水平方向 : 1.17 g (=11.48m/s ²) 鉛直方向 : 0.65 g (=6.38m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	自重 地震力 水平方向 : 1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向 : 0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1 : 本事象について応力解析を行う。

*2 : S_sと組合せ, III_AS の評価を実施する。

表 5-2 バスケット用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		バスケットプレート		サポートシリンダ	
		B-SUS	許容値基準	SUS304	許容値基準
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P _m	201	1.5 S _m	180	1.5 S _m
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ P _m +P _b	301	2.25 S _m	270	2.25 S _m
	平均せん断応力 σ _s	120	0.9 S _m	108	0.9 S _m
	平均支圧応力 σ _p * ¹	311 (467)	1.5 S _y (2.25 S _y)	200 (300)	1.5 S _y (2.25 S _y)
	軸圧縮応力* ² σ _c	—	—	92	1.5×Min{S _m , B* ³ }
	座屈応力 σ _b	180	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c	—	—
I + S _s	一次一般膜応力強さ P _m	269	Min{2.4 S _m , 2/3 S _u }	263	Min{2.4 S _m , 2/3 S _u }
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ P _m +P _b	404	Min{3.6 S _m , S _u }	395	Min{3.6 S _m , S _u }
	平均せん断応力 σ _s	160	1.2 S _m	144	1.2 S _m
	平均支圧応力 σ _p * ¹	415(622)	2 S _y (3 S _y)	266(400)	2 S _y (3 S _y)
	軸圧縮応力* ² σ _c	—	—	123	2×Min{S _m , B* ³ }
	座屈応力 σ _b	180	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c	—	—

注記 *1: ()内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

*2: 円筒形の軸方向の圧縮に対して適用する。

*3: B値は、設計・建設規格 付録材料図表 Part7 図1 から図20 までにより求められた値。

表 6-1 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力評価	8
6.3.3 数値の丸め方	9
7. 引用文献	10

図表目次

図 5-1	バスケットの応力解析箇所	11
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	12
表 4-2	バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	13
表 5-1	代表事象	14
表 6-1	バスケット用材料の許容応力値	15
表 6-2	バスケット用材料（ボルト用材料）の許容応力値	16
表 6-3	数値の丸め方一覧表	17

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、バスケットは、貯蔵時において、使用済燃料貯蔵ラックと同様に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(日本機械学会)(以下、「設計・建設規格」という。)の機器等の区分に当てはまらないと考えられるが、使用済燃料集合体を直接支持する部材であるため、炉心支持構造物に準じて設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積又は接触面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
F _b	軸力	N/mm
F _f	ボルトの締付け力	N
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	加速度 (前後方向)	m/s ²
G ₂	加速度 (左右方向)	m/s ²
G ₃	加速度 (下方向)	m/s ²
ℓ	バスケットプレート長さ (バスケット全長)	mm
M	曲げモーメント	N・mm
m	質量	kg
P _b	一次曲げ応力	MPa
P _m	一次一般膜応力強さ	MPa
Q	二次応力	MPa
Q _b	二次曲げ応力	MPa
Q _m	二次膜応力	MPa
S _d *	弾性設計用地震動 S _d により定まる地震力又は静的地震力の大きい方	—
S _s	基準地震動 S _s により定まる地震力	—
S _m	設計応力強さ	MPa
S _u	設計引張強さ	MPa
S _y	設計降伏点	MPa
t	板厚	mm
Z	断面係数	mm ³

計算書の記号	記号の説明	単位
θ	角度	°
σ	主応力	MPa
σ_b	座屈応力	MPa
σ_f	ボルトの締付け応力	MPa
σ_p	支圧応力	MPa
σ_s	純せん断応力	MPa
σ_x	評価断面に垂直な方向の応力(x方向)	MPa
σ_y	評価断面に平行な方向の応力(y方向)	MPa
σ_z	評価断面に平行な方向の応力(z方向)	MPa
τ_{xy}	せん断応力	MPa
τ_{yz}	せん断応力	MPa
τ_{zx}	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

バスケットは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 230 ℃

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

バスケットの応力解析を行う箇所は次のとおりである（図 5-1 参照）。

- (1) 枠板（大）
- (2) 枠板（小）
- (3) 燃料支持板
- (4) 拘束リング
- (5) 拘束リングボルト
- (6) 枠板固定ボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。
なお、常温は 20°C とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

- (1) バスケット（ボルトを除く。）にあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 CSS-3111(3)の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による一次応力強さは、設計・建設規格 CSS-3111(4)の規定を満足すること。
 - c. 純せん断荷重を受ける部分にあつては、a. 及び b. の規定にかかわらず、平均せん断応力は次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3114(2)に定める値を超えないこと。
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3114(3)に定める値を超えないこと。
 - d. 支圧荷重を受ける部分にあつては、平均支圧応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 CSS-3115(2)に定める値を超えないこと。
 - (b) 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合においては、

設計・建設規格 CSS-3115(3)に定める値を超えないこと。

- e. 圧縮荷重を受ける部分にあっては、座屈応力は、次の規定を満足すること。
 - (a) 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力又は S_s 地震力が作用して生じる場合においては、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)，(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値を超えないこと。
 - f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用してバスケットに塑性変形が生じる場合には、臨界防止評価のため変形量の評価を行う。
 - g. 溶接部にあっては、設計・建設規格 CSS-3150 に規定される継手効率を考慮すること。
- (2) ボルトにあっては、次によるものとする。
 - a. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる応力の応力解析による応力強さは、設計・建設規格 CSS-3121.3 の規定を満足すること。
 - b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる応力の応力解析による応力強さは、設計・建設規格 CSS-3121.4 の規定を満足すること。
- (3) (1)及び(2)において、設計・建設規格の「供用状態A」及び「供用状態B」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

バスケットの応力解析フローを図 6-1 に示す。

バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重を基にバスケットの実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」及び応力評価式を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく応力解析等の汎用解析コードである。温度分布計算及び応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し、各メッシュについて計算を実施することによって行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は 4. 項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

自重（燃料集合体を含む貯蔵容器の貯蔵時の設計重量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の負荷荷重をいう。

(2) 伝熱プレートは非構造強度部材として評価対象より除外する。

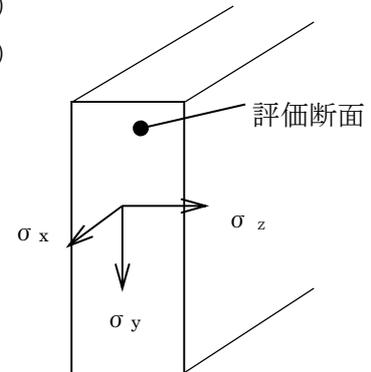
(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、応力計算書に示す。応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力 (x 方向)
- σ_y : 評価断面に平行な方向の応力 (y 方向)
- σ_z : 評価断面に平行な方向の応力 (z 方向)
- τ_{xy} : せん断応力
- τ_{yz} : せん断応力
- τ_{zx} : せん断応力



バスケット用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

(1) バスケット (ボルトは除く。) の応力評価

バスケットの応力評価は、設計・建設規格 CSS-3110 及び SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ
- c. 特別な応力の検討
 - (a) 純せん断応力の評価
 - (b) 支圧応力の評価
 - (c) 座屈応力の評価

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 CSS-3120 に従い評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

(1) 伝熱工学資料 第4版, 日本機械学会 (1986)

(2) 伝熱工学資料 第3版, 日本機械学会 (1975)

(3)



(4) HEAT TRANSMISSION THIRD EDITION, KOGAKUSHA

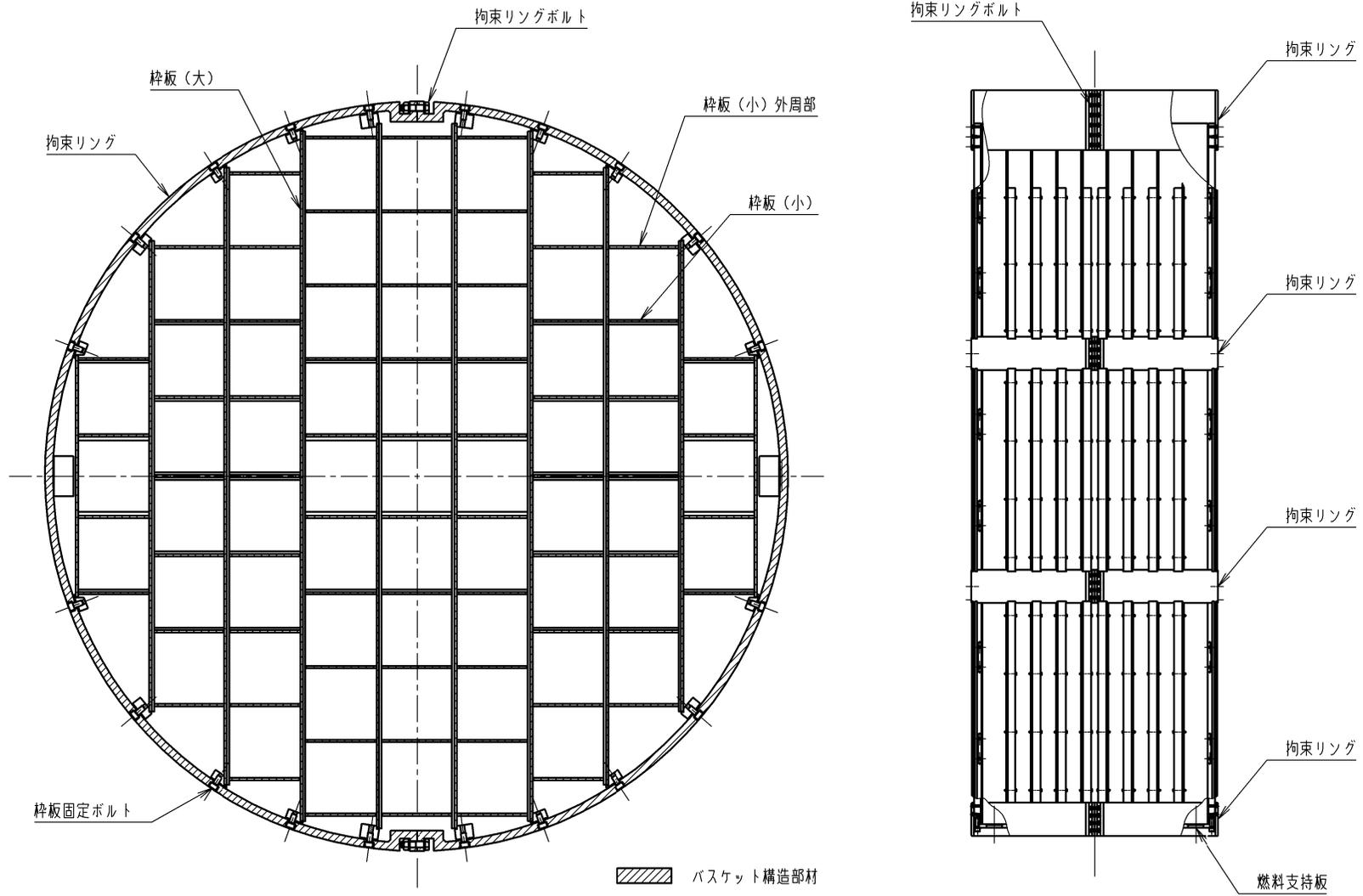


図 5-1 バスケットの応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い 状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設計 事象 III, 設計事象 IV 及び試験状態 以外の状態をい う。	貯蔵容器の寿命程度の期間中 に予想される取扱い機器の単 一故障, 単一誤動作等の事象 によって, 貯蔵容器が通常貯 蔵状態あるいは通常取扱い状 態から外れるような状態をい う。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な作 動等により, 貯蔵 又は計画された 取扱いの停止が 緊急に必要とさ れる状態をいう。	発生頻度が十分低い事象によ って引き起こされる状態をい う。すなわち, 設計事象 II で いう機器の単一故障, 運転員 の単一誤操作等によって引き 起こされるもののうち, その 発生頻度が十分に低いと考え られるものを分類する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは考 えられない事象によって引き 起こされる状態をいうが, 万 一発生した場合の設計の妥当 性を確保するために特に設け たものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷重時	自重 による 荷重	運 搬 時 荷 重	吊 上 げ 荷 重	衝撃荷重	熱 荷 重	備 考
					異常着床・支持 構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*1
	運 搬 時	○	○			○	
	吊 上 げ 時	○		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	○			○	○	

注記 *1: S_d *地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
I + S _d *	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	自重 : 1 g (=9.81 m/s ²) 地震力 水平方向 : 0.72 g (=7.06 m/s ²) 鉛直方向 : 0.36 g (=3.53 m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	自重 : 1 g (=9.81 m/s ²) 地震力 水平方向 : 1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向 : 0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1 : 本事象について応力解析を行う。

表 6-1 バスケット用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値		
		枠板	枠板 拘束リング 燃料支持板	許容値基準
		B-SUS	SUS304	
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m		187	$1.5 \cdot S_m$
	一次膜+一次曲げ応力強さ P_m+P_b		281	$2.25 \cdot S_m$
	純せん断応力 σ_s		112	$0.9 \cdot S_m$
	支圧応力 σ_p^*		207 (310)	$1.5 \cdot S_y$ ($2.25 \cdot S_y$)
	座屈応力 (一次+二次) σ_b		105	$1.5 \cdot f_b$, $1.5 \cdot f_s$ 又は $1.5 \cdot f_c$
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m		266	Min. { $2.4 \cdot S_m$, $2/3 \cdot S_u$ }
	一次膜+一次曲げ応力強さ P_m+P_b		399	Min. { $3.6 \cdot S_m$, S_u }
	純せん断応力 σ_s		150	$1.2 \cdot S_m$
	支圧応力 σ_p^*		276 (414)	$2 \cdot S_y$ ($3 \cdot S_y$)
	座屈応力 (一次+二次) σ_b		105	$1.5 \cdot f_b$, $1.5 \cdot f_s$ 又は $1.5 \cdot f_c$

注記 * : () 内は支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

表 6-2 バスケット用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類	許容応力値			
		拘束リング ボルト	枠板 固定ボルト	許容値基準	
		SUS630 H1150	SUS304		
I + S _d *	一次一般膜応力強さ P_m		187	$1.5 \cdot S_m$	
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$		281	$2.25 \cdot S_m$	
	一次膜応力+二次膜応力 $P_m + Q_m$			Min. { $0.9 \cdot S_y, 2/3 \cdot S_u$ }	
	一次応力+二次応力 $P_m + Q_m + P_b + Q_b$			$0.9 \cdot S_y$	
I + S _s	一次一般膜応力強さ P_m				$2/3 \cdot S_u$
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$		266	Min. { $2.4 \cdot S_m, 2/3 \cdot S_u$ }	
				S_u	
			399	Min. { $3.6 \cdot S_m, S_u$ }	

NT2 補③ V-2-4-2-3 R0

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整 数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整 数
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角 度	°	—	—	設 計 値
質 量	kg	—	—	設 計 値

注記 * : 応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力評価	8
6.3.3 数値の丸め方	9

図表目次

図 5-1	トラニオンの応力解析箇所	10
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	11
表 4-2	トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	12
表 5-1	代表事象	13
表 6-1	トラニオン用材料の許容応力値	14
表 6-2	数値の丸め方一覧表	15

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、トラニオンは、貯蔵容器の取扱時及び貯蔵時の支持のための部品であり、貯蔵容器全体を支持する。したがって、キャスク容器の評価方法と整合をとり、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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
a ₁	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
F _w	トラニオンに作用する荷重	N
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _t ^{* 1)}	許容引張応力	MPa
f _s ^{* 1)}	許容せん断応力	MPa
f _c ^{* 1)}	許容圧縮応力	MPa
f _b ^{* 1)}	許容曲げ応力	MPa
f _p ^{* 1)}	許容支圧応力	MPa
G ₁	貯蔵容器軸に直角方向の加速度	m/s ²
G ₃	貯蔵容器軸方向の加速度	m/s ²
h _{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
L	荷重位置と評価点との距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
S _d [*]	弾性設計用地震動 S _d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—

注記 1) : f_t^{*}, f_s^{*}, f_c^{*}, f_b^{*}, f_p^{*} : f_t, f_s, f_c, f_b, f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記号の説明	単位
S_s	基準地震動 S_s により定まる地震力	—
W	質量	kg
Z	断面係数	mm ³
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s ²
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s ²
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

トラニオンは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度：160 ℃

注：トラニオンはキャスク容器に取り付けられており一体であることから、トラニオンの最高使用温度は、キャスク容器と同じ 160℃とする。

4.2 設計事象

設計上考慮する事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

設計事象 I における事象のうち、表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

トラニオンの応力解析を行う箇所は、次のとおりである(図 5-1 参照)。

(1) トラニオン

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

温度分布計算及び応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

(1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度 (160°C) に対する値を用いる。

なお、常温は 20°C とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

(1) トラニオンにあつては、次によること。

a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.2 の規定を満足すること。

b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.3 の規定を満足すること。

c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震動のみによって生じる一次応力と二次応力(キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。)を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。

(a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差(引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。)については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。

(b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。

(c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。

(d) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。

(e) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。

- d. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の規定を満足すること。
- (a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。
 - (b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。
 - (c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。
 - (d) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。
この場合において、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのは、「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」に読み替えるものとする。
 - (e) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2), (3)又は(4)に定める値の1.5倍を超えないこと。
- e. c.及びd.において応力の組合せが考えられる場合は、組合せ応力に対する評価は設計・建設規格 SSB-3121.1(6)の規定による。
- (2) (1)において、設計・建設規格の「供用状態A」及び「供用状態B」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。
- 許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

トラニオンの応力解析は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4.項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(2) 貯蔵時においては、地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は、下部トラニオン4個で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

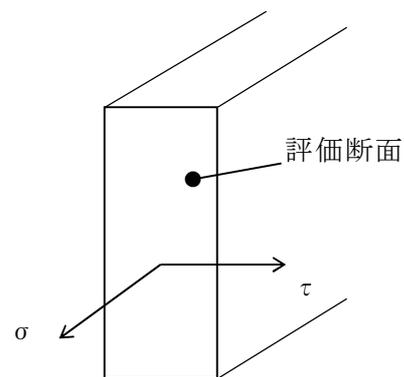
6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



トラニオン用材料の許容応力値を表6-1に示す。

(1) トラニオンの応力評価

トラニオンの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

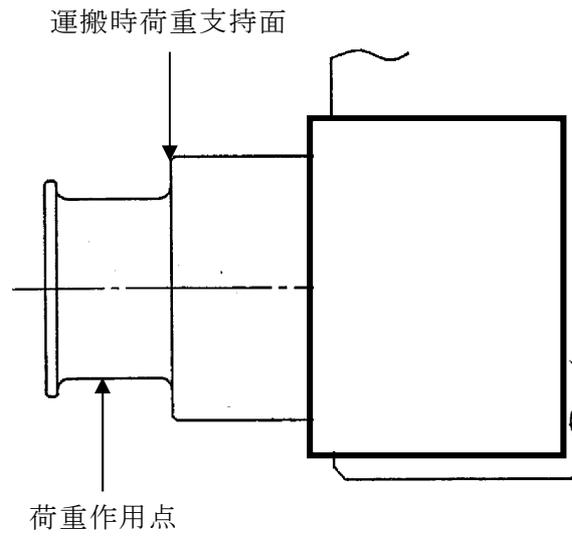
- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。



下部トラニオン

注記) 貯蔵時に地震力が作用する場合は、
下部トラニオンのみで荷重を支持する。

図 5-1 トラニオンの応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設計 事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によつて 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記*: 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・
転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 [*]	備考
	荷重時				支持構造物への衝突 異常着床 [*]		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1: キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

*2: S_d 地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代 表 事 象

設計事象	代表事象 ¹⁾	包絡される事象	荷重条件 ²⁾	備 考
I + S _d *	貯 蔵 時 (S _d *地震力が 作用する場合)	—	自 重:1 g (=9.81m/s ²) 地震力 水平方向: C _H g=1.17G(=11.48m/s ²) 鉛直方向: C _V g=0.65G(= 6.38m/s ²) 熱荷重	許容応力状態 Ⅲ _A S で評価
I + S _s	貯 蔵 時 (S _s 地震力が 作用する場合)	—	自 重:1 g (=9.81m/s ²) 地震力 水平方向: C _H g=1.17G(=11.48m/s ²) 鉛直方向: C _V g=0.65G(= 6.38m/s ²) 熱荷重	許容応力状態 Ⅳ _A S で評価

注記 1) : 本事象について応力解析を行う。

2) : S_sと組合せ、Ⅲ_AS の評価を実施する。

表 6-1 トラニオン用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許容応力値 (MPa)	
			析出硬化ステンレス鋼	
			SUS630 H1150	許 容 値 基 準
I + S _d * ¹⁾	一 次 応 力	引張応力	588	1.5 f _t
		圧縮応力	570	1.5 f _c
		せん断応力	339	1.5 f _s
		曲げ応力	588	1.5 f _b
		支圧応力	801	1.5 f _p
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 ²⁾	1176	3 f _t
		せん断応力 ²⁾	678	3 f _s
		曲げ応力 ²⁾	1176	3 f _b
		支圧応力	801	1.5 f _p
		座屈応力	339	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c
I + S _s ¹⁾	一 次 応 力	引張応力	588	1.5 f _t *
		圧縮応力	570	1.5 f _c *
		せん断応力	339	1.5 f _s *
		曲げ応力	588	1.5 f _b *
		支圧応力	801	1.5 f _p *
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 ²⁾	1176	3 f _t
		せん断応力 ²⁾	678	3 f _s
		曲げ応力 ²⁾	1176	3 f _b
		支圧応力	801	1.5 f _p *
		座屈応力	339	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、I + S_d*の一次応力については上式による。

I + S_sの一次応力の場合、分母の 1.5 f_c、1.5 f_b、1.5 f_tは、1.5 f_c*、1.5 f_b*、1.5 f_t*とする。一次+二次応力の場合、分母の 1.5 f_c、1.5 f_b、1.5 f_tは、3 f_c、3 f_b、3 f_tとする。

- 2) : S_d*地震力及びS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 捨 て	整 数 値 位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 上 げ	整 数 値 位
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切 上 げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
断 面 係 数	mm ³	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
質 量	kg	—	—	設 計 値

V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 荷重条件	5
4.1 設計条件	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と応力の分類	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力の分類	9
6.4 応力の評価（ボルトを除く）	9
6.4.1 一次応力	9
6.4.2 一次＋二次応力	9
6.4.3 組合せ応力	9
6.5 ボルトの応力評価	9
7. 解析及び評価結果の添付	10
7.1 応力解析結果	10
7.2 応力評価結果	10

図表目次

図 5-1	トラニオンの応力解析箇所	11
表 4-1	乾式貯蔵キャスクの設計事象	12
表 4-2	トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	13
表 5-1	代表事象	14
表 5-2	トラニオン用材料の許容応力値	15
表 5-3	トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値	16
表 6-1	数値の丸め方一覧表	17

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、トラニオンは、貯蔵容器の取扱時及び貯蔵時の支持のための部品であり、貯蔵容器全体を支持する。したがって、キャスク容器の評価方法と整合をとり、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。）） JSME S NC1-2005/2007（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」
〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	トラニオンの断面積	mm ²
A _b	トラニオンボルトの断面積	mm ²
a ₁	地震時の乾式貯蔵キャスク回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の乾式貯蔵キャスク回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
C _c	トラニオンボルト計算における係数	—
C _H	水平方向設計震度	—
C _t	トラニオンボルト計算における係数	—
C _v	鉛直方向設計震度	—
D _{b i}	トラニオンボルト取付部の内径	mm
D _{b o}	トラニオンボルト取付部の外径	mm
D _c	トラニオンボルトのピッチ円直径	mm
e	トラニオンボルト計算における係数	—
F _{c c}	キャスク容器に作用する圧縮力	N
F _m	トラニオンに作用する荷重	N
F _{t b}	トラニオンボルトに作用する引張力	N
F ₁	トラニオン固定ボルトの初期締付け力	N
f _T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _t *	許容引張応力 *	MPa
f _s *	許容せん断応力 *	MPa
f _b *	許容曲げ応力 *	MPa
g	重力加速度(=9.80665)	m/s ²
G ₁	乾式貯蔵キャスク軸に直角方向(上下方向)の加速度	m/s ²
G ₂	乾式貯蔵キャスク軸方向(前後方向)の加速度	m/s ²
h _{c g}	乾式貯蔵キャスク底面から重心までの高さ	mm

注記 * : f_t*, f_s*, f_b*は、各々 f_t, f_s, f_bの値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.の本文中「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記号の説明	単位
k	トラニオンボルト計算における中立軸の荷重係数	—
L	荷重位置と評価点との距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
m	質量	kg
n	トラニオンボルト本数	—
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
t_1	トラニオンボルト面積相当幅	mm
t_2	圧縮側相当幅	mm
Z	トラニオンの断面係数	mm ³
z	トラニオンボルト計算における係数	—
α	トラニオンボルト計算における中立軸を定める角度	rad
σ	トラニオンの評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	トラニオンの曲げ応力	MPa
σ_{cc}	キャスク容器の圧縮応力	MPa
σ_T	トラニオンの組合せ応力	MPa
σ_{tb}	トラニオンボルトの引張応力	MPa
τ	トラニオンのせん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力状態	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—

4. 荷重条件

トラニオンは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 設計条件

最高使用温度： 140 °C

4.2 設計事象

考慮する設計事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

応力解析を行う箇所の形状を図 5-1 に示す。

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は以下の通りである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は 20 °C とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次に掲げる通りとする。

- (1) トラニオン（ボルトを除く）にあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.2 に定める値を超えないこと。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.3 に定める値を超えないこと。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。
 - (a) せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)及び(3)に定める値
 - d. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。
 - (a) せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差は、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)及び(3)に定める値
 - e. c. 及び d. において応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は設計・建設規格 SSB-3121.1(6)による。この場合において、それぞれの式の中の各許容応力は 3 倍した値とする。

- (2) ボルトにあっては、次によること。
- a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3132 に定める値を超えないこと。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3133 に定める値を超えないこと。
- (3) (1)及び(2)において、設計・建設規格の「供用状態C」及び「供用状態D」は、それぞれ「設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

トラニオン用材料の許容応力値を表 5-2 及び表 5-3 に示す。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

トラニオンの応力解析は, 想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示されているが, 各部の計算においては, その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。

6.3 応力計算と応力の分類

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(2) 貯蔵時において, 地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は, 下部トラニオン4個で支持する。

なお, 荷重作用点位置は荷重支持面の中央部とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して, 応力評価点(面)をとる。評価点(面)は, 計算書の形状図中に, 番号〔例①〕で示す。

応力評価は, この応力評価点(面)について行う。

(4) 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また, 規格, 基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし, 規格, 基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表6-1に示す。

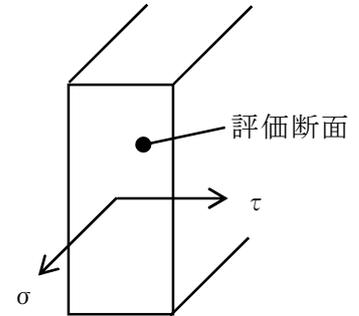
6.3.2 応力の分類

応力の計算結果は表 5-2 及び表 5-3 に示すように応力の種類ごとに分類して、応力計算書に示す。このときの応力の定義と分類は設計・建設規格 GNR-2130 による。

なお、応力の記号とその方向は、以下の通りである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



6.4 応力の評価（ボルトを除く）

6.4.1 一次応力

機械的荷重により発生する一次応力が、5.5(1)a. 及び b. に示す許容応力値を満足することを示す。

6.4.2 一次+二次応力

設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力及び S_s 地震力のみによって発生する一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力が、5.5(1) c. 及び d. に示す許容応力値を満足することを示す。

6.4.3 組合せ応力

応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は、5.5(1)a. , b. 及び e. により行う。

6.5 ボルトの応力評価

ボルトの応力評価として、5.5(2)に示す許容応力値を満足することを示す。また、応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は5.5(2)により行う。

7. 解析及び評価結果の添付

応力計算書では，以下に示すように解析結果を添付する。

7.1 応力解析結果

考慮した荷重ごとに評価対象とした応力評価点（面）について，応力の種類ごとに解析結果を示す。

7.2 応力評価結果

次の応力評価結果を，評価対象とした応力評価点（面）について添付する。

- (1) 一次応力
- (2) 一次＋二次応力
- (3) 組合せ応力

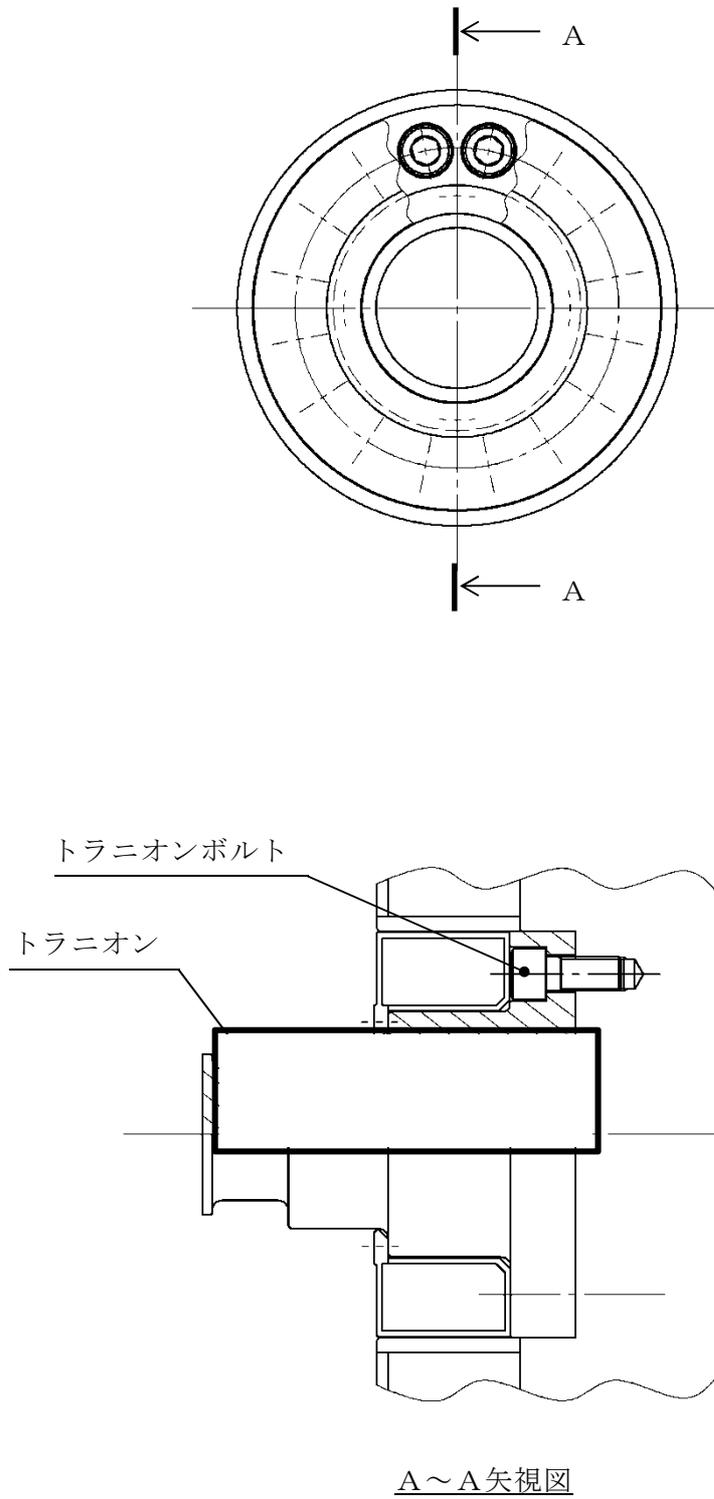


図 5-1 トランニオンの応力解析箇所

表 4-1 乾式貯蔵キャスクの設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵 貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 事業所内運搬 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設 計事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常 着床 取扱い機器の単 一故障, 誤動作 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常 着床 貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるものうち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によって 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の落下 	<ul style="list-style-type: none"> 該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷 重 時	自重 による荷重	運搬時 荷重	吊上げ 荷重	衝撃荷重	熱荷重 *	備 考
					支持構造物 への衝突 異常着床・		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1：キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

*2： S_d *地震力及び S_s 地震力は，設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象 *	包絡される事象	荷重条件* ²	備考
I + S _d *	貯蔵時 (S _d *地震力が作用する場合)	—	自重 トランニオン固定ボルトの初期締付け力 地震力 水平方向: 1.17 g (= 11.48 m/s ²) 鉛直方向: 0.65 g (= 6.38 m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 (S _s 地震力が作用する場合)	—	自重 トランニオン固定ボルトの初期締付け力 地震力 水平方向: 1.17 g (= 11.48 m/s ²) 鉛直方向: 0.65 g (= 6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1: 本事象について応力解析を行う。

*2: S_sと組合せ, III_ASの評価を実施する。

表 5-2 トラニオン用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値	
			トラニオン	許容値基準
			SUS630 H1150	
I + S _d * *1	一次 応力	せん断応力	341	1.5 f _s
		曲げ応力	591	1.5 f _b
I + S _s * *1	一次+ 二次応力	せん断応力 *2	682	3 f _s
		曲げ応力 *2	1182	3 f _b
I + S _s * *1	一次 応力	せん断応力	341	1.5 f _s *
		曲げ応力	591	1.5 f _b *
I + S _s * *1	一次+ 二次応力	せん断応力*2	682	3 f _s
		曲げ応力*2	1182	3 f _b

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力（σ）とせん断応力（τ）を組み合わせた応力（σ_T）は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

*2：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-3 トラニオン用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

設計応力 区分	応力の種類	許容応力値	
		トラニオン ボルト	許容値基準
		SNB23-3	
I + S _d * *	引張応力	475	1.5 f _t
	せん断応力	366	1.5 f _s
I + S _s * *	引張応力	475	1.5 f _t *
	せん断応力	366	1.5 f _s *

注記 *：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は、次の2つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T \leq f_t$$

ここで、 τ ：ボルトに発生するせん断応力 (MPa)

ただし、

I + S_d*の場合、 f_t は $1.5 f_t$ とする。

I + S_sの場合、 f_t は $1.5 f_t^*$ とする。

表 6-1 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力評価	8
6.3.3 数値の丸め方	9

図表目次

図 5-1	トラニオンの応力解析箇所	10
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	11
表 4-2	トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	12
表 5-1	代表事象	13
表 6-1	トラニオン用材料の許容応力値	14
表 6-2	数値の丸め方一覧表	15

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、トラニオンは、貯蔵容器の取扱時及び貯蔵時の支持のための部品であり、貯蔵容器全体を支持する。したがって、キャスク容器の評価方法と整合をとり、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。）） JSME S N C1-2005/2007（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
a ₁	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台⑤のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
F _m	トラニオンに作用する荷重	N
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _t [*]	許容引張応力	MPa
f _s [*]	許容せん断応力	MPa
f _c [*]	許容圧縮応力	MPa
f _b [*]	許容曲げ応力	MPa
f _p [*]	許容支圧応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	貯蔵容器軸に直角方向 (上下方向) の加速度	m/s ²
G ₂	貯蔵容器軸に直角方向 (左右方向) の加速度	m/s ²
G ₃	貯蔵容器軸方向の加速度	m/s ²
h _{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm

注記 * : f_t^{*}, f_s^{*}, f_c^{*}, f_b^{*}, f_p^{*} : f_t, f_s, f_c, f_b, f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記号の説明	単位
L	荷重位置と評価点との距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
m	質量	kg
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又は静的地震力の大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s により定まる地震力	—
Z	トラニオン断面係数	mm ³
σ	トラニオンの評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_B	トラニオン取付けボルトの引張応力	MPa
σ_b	トラニオンの曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_b$	トラニオンの圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_b$	トラニオンの引張側曲げ応力	MPa
σ_c	トラニオンの圧縮応力	MPa
σ_T	トラニオンの組合せ応力	MPa
σ_t	トラニオンの引張応力	MPa
τ	トラニオンのせん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

トラニオンは以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 160 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

トラニオンの応力解析を行う箇所は、次のとおりである（図 5-1 参照）。

- (1) トラニオン
- (2) トラニオン取付けボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は 20°C とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

- (1) トラニオンにあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.2 の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.3 の規定を満足すること。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時において、 S_d^* 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。
 - (a) 引張応力と圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1) の規定を満足すること。
 - (b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2) の規定を満足すること。
 - (c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3) の規定を満足すること。
 - (d) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4) の規定を満足すること。
 - (e) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2), (3) 又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。
 - d. 設計事象 I の貯蔵時において、 S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の規定

を満足すること。

- (a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。
 - (b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。
 - (c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。
 - (d) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。この場合において、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのは、「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」に読み替えるものとする。
 - (e) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。
- e. c. 及び d. において応力の組合せが考えられる場合は、組合せ応力に対する評価は設計・建設規格 SSB-3121.1(6)の規定による。
- (2) トラニオン取付けボルトにあつては、次によること。
- a. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3132 の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3133 の規定を満足すること。
- (3) (1)及び(2)において、設計・建設規格の「供用状態 A」は、「設計事象 I」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

トラニオンの応力解析は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4.項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(2) 貯蔵時においては、地震力が作用する場合の鉛直方向及び水平方向荷重は、下部トラニオン4個で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

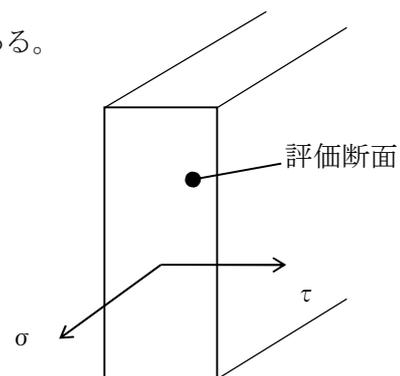
6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



トラニオン用材料の許容応力値を表6-1に示す。

(1) トラニオン（ボルトを除く。）の応力評価

トラニオンの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目を評価する。

- a. 一次応力
- b. 一次+二次応力
- c. 組合せ応力

(2) トラニオン取付けボルトの応力評価

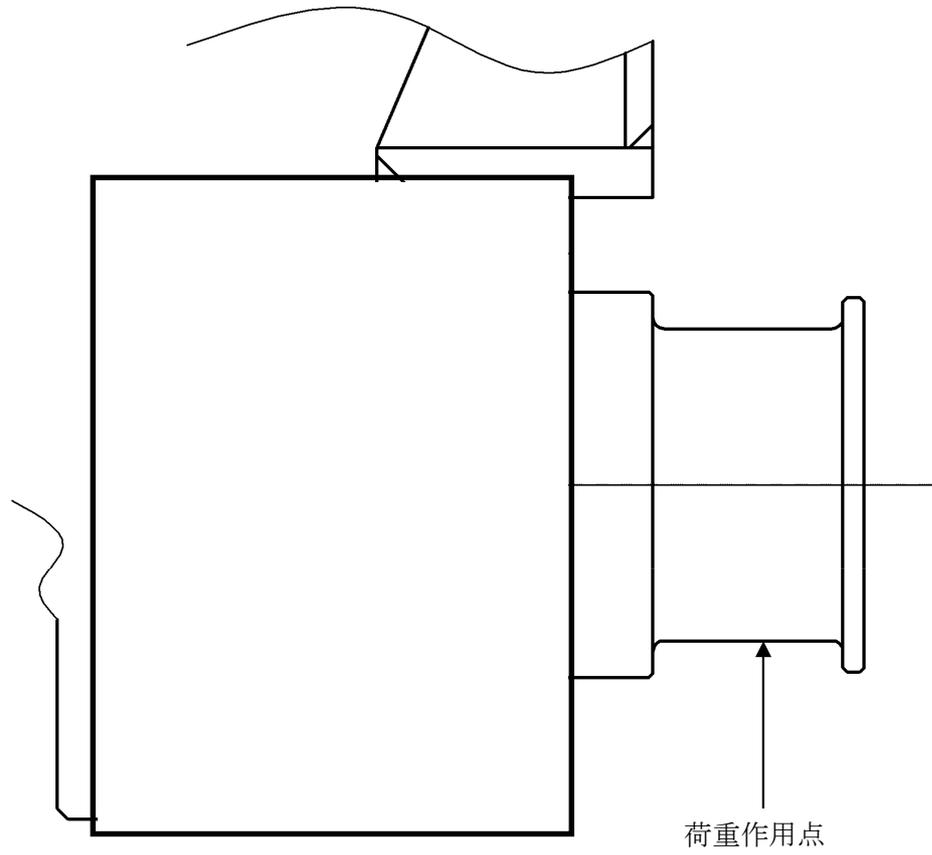
ボルトの応力評価は，設計・建設規格 SSB-3130 に従い評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は，原則として四捨五入とする。また，評価に用いる許容応力及び算出応力等については，安全側に丸めて使用する。

また，規格，基準等により決まる数値については丸めず，規格，基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-2 に示す。



下部トラニオン

図 5-1 トラニオンの応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い 状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設 計事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によつて 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷重時	自重 による 荷重	運 搬 時 荷 重	吊 上 げ 荷 重	衝撃荷重	熱 荷 重	備 考
					異常着床・支持 構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*1
	運 搬 時	○	○			○	
	吊 上 げ 時	○		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	○			○	○	

注記 *1: S_d *地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象 *1	包絡される事象	荷重条件	備考
I + S _d *	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	自重:1 g (=9.81 m/s ²) 地震力 水平方向:0.72 g (=7.06 m/s ²) 鉛直方向:0.36 g (=3.53 m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	自重:1 g (=9.81 m/s ²) 地震力 水平方向: 1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向: 0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1: 本事象について応力解析を行う。

表 6-1 トラニオン用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値	
			ステンレス鋼	許容値基準
			SUS630 H1150	
I +	一 次 応 力	引張応力	588	$1.5 \cdot f_t$
		圧縮応力	587	$1.5 \cdot f_c$
		せん断応力	339	$1.5 \cdot f_s$
		曲げ応力	801	$1.5 \cdot f_b$
		支圧応力	801	$1.5 \cdot f_p$
S _d *1	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 *2	1176	$3 \cdot f_t$
		せん断応力 *2	678	$3 \cdot f_s$
		曲げ応力 *2	1603	$3 \cdot f_b$
		支圧応力	801	$1.5 \cdot f_p$
		座屈応力	339	$1.5 \cdot f_b, 1.5 \cdot f_s$ 又は $1.5 \cdot f_c$
I +	一 次 応 力	引張応力	588	$1.5 \cdot f_t^*$
		圧縮応力	587	$1.5 \cdot f_c^*$
		せん断応力	339	$1.5 \cdot f_s^*$
		曲げ応力	801	$1.5 \cdot f_b^*$
		支圧応力	801	$1.5 \cdot f_p^*$
S _s *1	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応力 *2	1176	$3 \cdot f_t$
		せん断応力 *2	678	$3 \cdot f_s$
		曲げ応力 *2	1603	$3 \cdot f_b$
		支圧応力	801	$1.5 \cdot f_p^*$
		座屈応力	339	$1.5 \cdot f_b, 1.5 \cdot f_s$ 又は $1.5 \cdot f_c$

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5 \cdot f_c^*} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の $1.5 \cdot f_c^*$ 、 $1.5 \cdot f_b^*$ 、 $1.5 \cdot f_t^*$ は $3 \cdot f_c$ 、 $3 \cdot f_b$ 、 $3 \cdot f_t$ とする。

*2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整 数
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整 数
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
断 面 係 数	mm ³	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質 量	kg	—	—	設 計 値

V2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力評価	8
6.3.3 数値の丸め方	9

図表目次

図 5-1	支持構造物の応力解析箇所	10
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	11
表 4-2	支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	12
表 5-1	代表事象	13
表 6-1	支持構造物用材料の許容応力値	14
表 6-2	支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値	16
表 6-3	数値の丸め方一覧表	17

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、支持構造物は、貯蔵時における貯蔵容器を固縛する構造物であり、キャスク容器の評価方法との整合をとり、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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
a ₁	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F _c	圧縮力	N
F ₁	支持台①の引張力	N
F ₂	支持台②の引張力	N
f _T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _t ^{* 1)}	許容引張応力	MPa
f _s ^{* 1)}	許容せん断応力	MPa
f _c ^{* 1)}	許容圧縮応力	MPa
f _b ^{* 1)}	許容曲げ応力	MPa
f _p ^{* 1)}	許容支圧応力	MPa
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
g	重力加速度(=9.80665)	m/s ²
h _{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm

注記 1) : f_t^{*}, f_s^{*}, f_c^{*}, f_b^{*}, f_p^{*} : f_t, f_s, f_c, f_b, f_pの値を算出する際に設計・建設規格SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記号の説明	単位
L	トラニオン固定ボルト間距離	mm
N	部材の数	—
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d^* による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s により定まる地震力	—
W_c	貯蔵容器質量	kg
W_s	支持台 1 個の質量	kg
Z	断面係数	mm^3
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_p	支圧応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s^2
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s^2
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

支持構造物は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 130 ℃

4.2 設計事象

設計上考慮する事象を表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

設計事象 I における事象のうち、表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

支持構造物の応力解析を行う箇所は次のとおりである。(図 5-1 参照)

- (1) 支持台座
- (2) トラニオン固定金具
- (3) 容器押え金具
- (4) トラニオン固定ボルト
- (5) リブ
- (6) アンカーボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度 (130°C) に対する値を用いる。
なお、常温は 20°C とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

- (1) 支持構造物 (ボルトを除く) にあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I において生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.1 の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.2 の規定を満足すること。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.3 の規定を満足すること。
 - d. 設計事象 I において生じる一次応力と二次応力 (キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。) を加えて求めた応力は、設計・建設規格 SSB-3122.1 の規定を満足すること。
 - e. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力 (キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。) を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。

- (a) 引張応力と圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。
 - (b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。
 - (c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。
 - (d) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。
 - (e) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2), (3)又は(4)に定める値の1.5倍を超えないこと。
- f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の規定を満足すること。
- (a) 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。
 - (b) せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。
 - (c) 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。
 - (d) 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。
この場合において、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのは、「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」に読み替えるものとする。
 - (e) 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2), (3)又は(4)に定める値の1.5倍を超えないこと。
- g. e.及びf.において応力の組合せが考えられる場合は、組合せ応力に対する評価は設計・建設規格 SSB-3121.1(6)の規定による。
- (2) ボルトにあっては、次によること。
- a. 設計事象Ⅰにおいて呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3131の規定を満足すること。
 - b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3132の規定を満足すること。
 - c. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3133の規定を満足すること。
- (3) (1)及び(2)において、設計・建設規格の「供用状態A」及び「供用状態B」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。
許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

支持構造物の応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4.項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(2) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向、下方向、水平方向荷重は、それぞれトラニオン固定金具、支持台座、容器押え金具で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して応力評価点(面)をとる。評価点(面)は、応力計算書に示す。

応力評価は、この応力評価点(面)について行う。

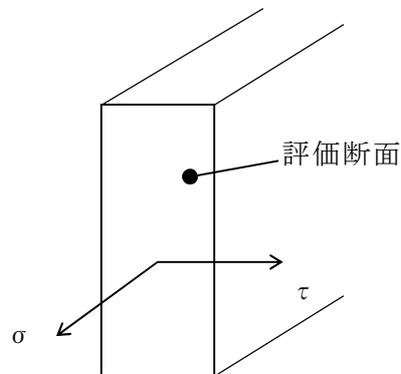
6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）の応力評価

支持構造物の応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目を実施する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3130 に従い実施する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

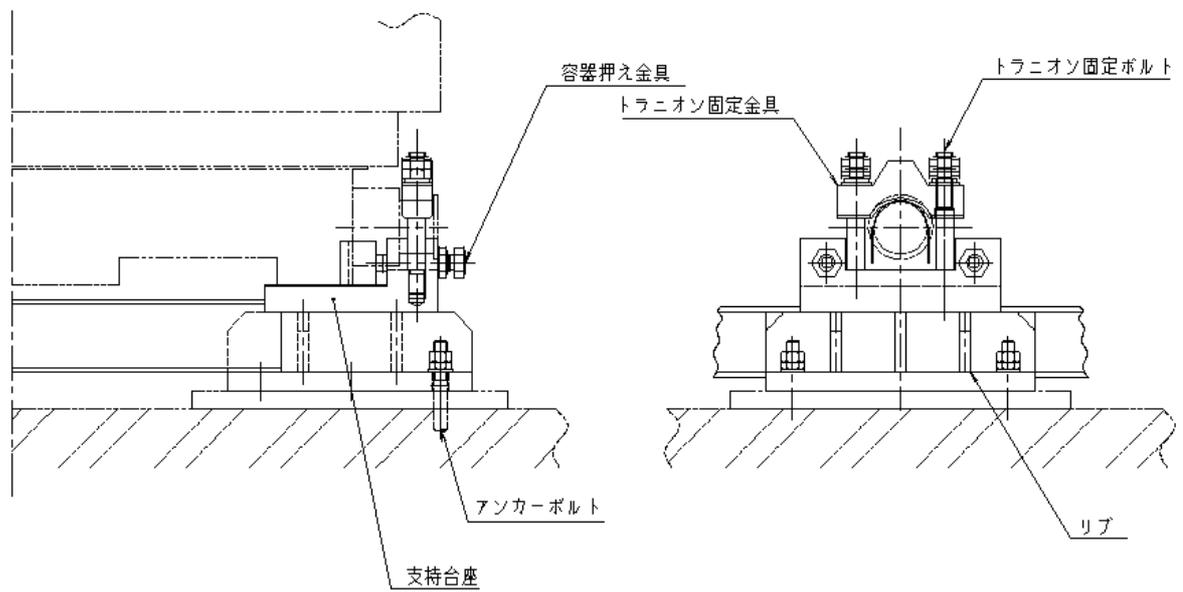


図 5-1 支持構造物の応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常の取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵 貯蔵容器の吊上げ, 吊下げ, 移動 事業所内運搬 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵
II	設計事象 I, 設計事象 III, 設計事象 IV 及び試験状態以外の状態をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間中に予想される取扱い機器の単一故障, 単一誤動作等の事象によって, 貯蔵容器が通常貯蔵状態あるいは通常取扱い状態から外れるような状態をいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常着床 取扱い機器の単一故障, 誤動作 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常着床 貯蔵容器の支持構造物への衝突
III	貯蔵容器又はその取扱い機器等の故障, 異常な作動等により, 貯蔵又は計画された取扱いの停止が緊急に必要とされる状態をいう。	発生頻度が十分低い事象によって引き起こされる状態をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち, その発生頻度が十分に低いと考えられるものを分類する。		
IV	貯蔵容器の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵容器の寿命中に起こるとは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが, 万一発生した場合の設計の妥当性を確保するために特に設けたものをいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の落下 	<ul style="list-style-type: none"> 該当なし*

注記*: 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 [*]	備考
	荷重時				異常着床・ 支持構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1：キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

*2： S_d *地震力及び S_s 地震力は，設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代 表 事 象

設計事象	代表事象 ¹⁾	包絡される事象	荷重条件 ²⁾	備 考
I	貯 蔵 時	—	自 重: 1 g ($=9.81\text{m/s}^2$) 熱荷重	設計事象 I のうち大半の期間を占める代表事象。
I + S _d *	貯 蔵 時 (S _d *地震力が作用する場合)	—	自 重: 1 g ($=9.81\text{m/s}^2$) 地震力 水平方向: C _H g = 1.17 g ($=11.48\text{m/s}^2$) 鉛直方向: C _V g = 0.65 g ($=6.38\text{m/s}^2$) 熱荷重	許容応力状態 III _A S で評価
I + S _s	貯 蔵 時 (S _s 地震力が作用する場合)	—	自 重: 1 g ($=9.81\text{m/s}^2$) 地震力 水平方向: C _H g = 1.17 g ($=11.48\text{m/s}^2$) 鉛直方向: C _V g = 0.65 g ($=6.38\text{m/s}^2$) 熱荷重	許容応力状態 IV _A S で評価

注記 1) : 本事象について応力解析を行う。

2) : S_sと組合せ, III_AS の評価を実施する。

表 6-1 (1) 支持構造物用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値 (MPa)				許容値基準
			炭素鋼		合金鋼	合金鋼	
			リブ	支持台座	トラン オン 固定金具	容器押え 金具	
			SM490B	SFVC2B	SNB23-3	SNB23-3	
設計事象 I ¹⁾	一次 応力	引張応力	181	148	425	425	f _t
		圧縮応力	181	147	421	362	f _c
		せん断応力	104	85	245	245	f _s
		曲げ応力	181	148	425	425	f _b
		支圧応力	247	201	580	580	f _p
	一次 + 二次 応 力	引張・圧縮応力	543	444	1275	1275	3 f _t
		せん断応力	312	255	735	735	3 f _s
		曲げ応力	543	444	1275	1275	3 f _b
		支圧応力	370	301	870	870	1.5 f _p
		座屈応力	156	127	367	367	1.5 f _s 又は 1.5 f _c
I + S _d * 1)	一次 応力	引張応力	271	222	637	637	1.5 f _t
		圧縮応力	271	220	631	543	1.5 f _c
		せん断応力	156	127	367	367	1.5 f _s
		曲げ応力	271	222	637	637	1.5 f _b
		支圧応力	370	301	870	870	1.5 f _p
	一次 + 二次 応 力	引張・圧縮応力 ²⁾	543	444	1275	1275	3 f _t
		せん断応力 ²⁾	312	255	735	735	3 f _s
		曲げ応力 ²⁾	543	444	1275	1275	3 f _b
		支圧応力	370	301	870	870	1.5 f _p
		座屈応力	156	127	367	367	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

- ②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|\sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1$$

- ③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、設計事象 I の一次応力については上式による。

I + S_d*の一次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は、1.5 f_c, 1.5 f_b, 1.5 f_t とする。

I + S_d*の一次+二次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は、3 f_c, 3 f_b, 3 f_t とする。

- 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 (2) 支持構造物用材料の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類		許 容 応 力 値 (MPa)				許容値基準
			炭素鋼		合金鋼	合金鋼	
			リ ブ	支持台座	トラン 固定金具	容器押え 金具	
		SM490B	SFVC2B	SNB23-3	SNB23-3		
I + S _s ¹⁾	一 次 応 力	引張応力	307	265	637	637	1.5 f _t *
		圧縮応力	307	265	631	543	1.5 f _c *
		せん断応力	177	153	367	367	1.5 f _s *
		曲げ応力	307	265	637	637	1.5 f _b *
		支圧応力	420	361	870	870	1.5 f _p *
	一 次 + 二 次 応 力	引張・圧縮応 力 ²⁾	543	444	1275	1275	3 f _t
		せん断応力 ²⁾	312	255	735	735	3 f _s
		曲げ応力 ²⁾	543	444	1275	1275	3 f _b
		支圧応力	420	361	870	870	1.5 f _p *
		座屈応力	156	127	367	367	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記 1) : 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c^*} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の 1.5 f_c*、1.5 f_b*、1.5 f_t*は、3 f_c、3 f_b、3 f_tとする。

- 2) : S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

許容応力 区 分	応 力 の 種 類	許 容 応 力 値 (MPa)		
		合金鋼	低合金鋼	許容値基準
		トロンロン固定ボルト	アンカーボルト	
		SNB23-3	SCM435	
設計事象 I ¹⁾	引張応力	319 ¹⁾	296 ¹⁾	f_t
	せん断応力	245	227	f_s
I + S _d * ¹⁾	引張応力	478 ¹⁾	261 ¹⁾	1.5 f_t
	せん断応力	367	340	1.5 f_s
I + S _s ¹⁾	引張応力	478 ¹⁾	261 ¹⁾	1.5 f_t^*
	せん断応力	367	340	1.5 f_s^*

注記 1) : 組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は、次の 2 つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 f_t - 1.6 \tau$$

$$f_T = f_t$$

ここで、 τ : ボルトに発生するせん断応力 (MPa)

ただし、設計事象 I の一次応力については上式による。

I + S_d* の場合、 f_t は 1.5 f_t とする。

I + S_s の場合、 f_t は 1.5 f_t^* とする。

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 捨 て	整 数 値 位
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 上 げ	整 数 値 位
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切 上 げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
断 面 係 数	mm ³	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
質 量	kg	—	—	設 計 値

V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力評価	8
6.3.3 数値の丸め方	9

図表目次

図 5-1	支持構造物の応力解析箇所	10
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	11
表 4-2	支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	12
表 5-1	代表事象	13
表 6-1	支持構造物用材料の許容応力値	14
表 6-2	支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値	16
表 6-3	数値の丸め方一覧表	17

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、支持構造物は、貯蔵時における貯蔵容器を固縛する構造物であり、トラニオンの評価方法との整合をとり、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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇」
〇」として示す。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
a ₁	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
F _c	圧縮力	N
F ₁	支持台①の引張力	N
F ₂	支持台②の引張力	N
F ₃	トラニオン固定ボルトの初期締付け力	N
F _H	水平力	N
f _T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _t *	許容引張応力 *	MPa
f _s *	許容せん断応力 *	MPa
f _c *	許容圧縮応力 *	MPa
f _b *	許容曲げ応力 *	MPa
f _p *	許容支圧応力 *	MPa
g	重力加速度(=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
h _{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
L	トラニオン固定ボルト間距離	mm
m _c	貯蔵容器質量	kg

注記 * : f_t*, f_s*, f_c*, f_b*, f_p*: f_t, f_s, f_c, f_b, f_pの値を算出する際に「設計・建設規格」 SSB-3121.1(1)a.の本文中「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」と読み替えて算出した値

計算書の記号	記号の説明	単位
m_s	支持台 1 個の質量	kg
n	部材の数	—
n_1	支持台の数	—
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
Z	断面係数	mm^3
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
${}_c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
${}_t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_p	支圧応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力状態	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—

4. 設計条件

支持構造物は以下の荷重条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 130 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

設計事象 I における事象のうち, 表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し, 代表事象について解析を実施する。

5.2 解析箇所

支持構造物の応力解析を行う箇所は, 次のとおりである。(図 5-1 参照)

- (1) 支持台座
- (2) トラニオン固定金具
- (3) 容器押えボルト
- (4) トラニオン固定ボルト
- (5) リブ
- (6) 支持台用フレーム
- (7) アンカーボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は, 応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は以下のとおりである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は, 最高使用温度に対する値を用いる。なお, 常温は 20 °C とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は, 次に掲げるとおりとする。

- (1) 支持構造物 (ボルトを除く) にあつては, 次によること。
 - a. 設計事象 I において生じる一次応力は, 「設計・建設規格」 SSB-3121.1 に定める値を超えないこと。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において, S_d *地震力が作用して生じる一次応力は, 「設計・建設規格」 SSB-3121.2 に定める値を超えないこと。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において, S_s 地震力が作用して生じる一次応力は, 「設計・建設規格」 SSB-3121.3 に定める値を超えないこと。
 - d. 設計事象 I において生じる一次応力と二次応力 (キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。) を加えて求めた応力は, 「設計・建設規格」 SSB-3122.1 に定める値を超えないこと。
 - e. 設計事象 I の貯蔵時の状態において, S_d *地震動のみによって生じる一次応力と二次応力 (キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。) を加えて求めた応力は, 次の値を超えないこと。

- (a) 引張応力と圧縮応力（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）、せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差、並びに支圧応力については、「設計・建設規格」 SSB-3122.1(1)、(2)、(3)及び(4)に定める値。
 - (b) 座屈応力については、「設計・建設規格」 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値。
- f. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。
- (a) 引張応力と圧縮応力（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）、せん断応力及び曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値の差は、「設計・建設規格」 SSB-3122.1(1)、(2)及び(3)に定める値。
 - (b) 支圧応力については、「設計・建設規格」 SSB-3122.1(4)に定める値。この場合において、「設計・建設規格」 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点」とあるのは、「付録材料図表 Part5 表8に規定する材料の設計降伏点の1.2倍の値」に読み替える。
 - (c) 座屈応力については、「設計・建設規格」 SSB-3121.1(2)、(3)又は(4)に定める値の1.5倍の値。
- g. e.及びf.において応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は「設計・建設規格」 SSB-3121.1(6)による。
- (2) ボルトにあつては、次によること。
- a. 設計事象Ⅰにおいて呼び径断面に生じる応力は、「設計・建設規格」 SSB-3131に定める値を超えないこと。
 - b. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、「設計・建設規格」 SSB-3132に定める値を超えないこと。
 - c. 設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、「設計・建設規格」 SSB-3133に定める値を超えないこと。
- (3) (1)及び(2)において、「設計・建設規格」の「供用状態A」、「供用状態B」、「供用状態C」及び「供用状態D」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」、「設計事象Ⅱ」、「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる場合」及び「設計事象Ⅰの貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる場合」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

支持構造物の応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示されているが、各部の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

(2) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向，下方向，水平方向荷重は，それぞれトランオン固定金具，支持台座，容器押えボルト及び支持台用フレームで支持する。
なお，荷重作用点位置は荷重支持面の中央部とする。

(3) 構造の不連続性を考慮して，応力評価点（面）をとる。評価点（面）は，計算書の形状図中に，番号〔例①〕で示す。

(4) 応力評価は，この応力評価点（面）について行う。

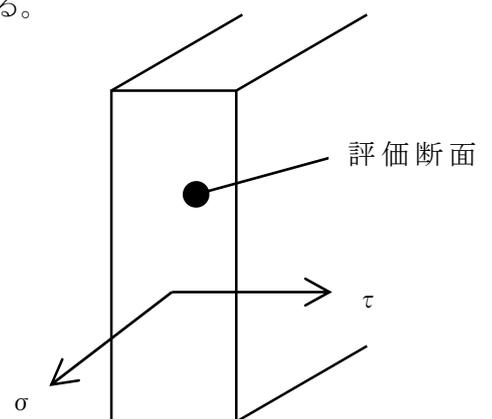
6.3.2 応力評価

応力の計算結果は，「設計・建設規格」GNR-2130 による定義に従い，応力の種類ごとに分類し，以下の評価を応力計算書に示す。

なお，応力の記号とその方向は以下のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 6-1 及び 6-2 に示す。

- (1) 支持構造物（ボルトを除く。）の応力評価
支持構造物の応力評価は、「設計・建設規格」SSB-3120 に従い以下の項目を評価する。
 - a. 一次応力
 - b. 一次＋二次応力
 - c. 組合せ応力
- (2) ボルトの応力評価
ボルトの応力評価は、「設計・建設規格」SSB-3130 に従い評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

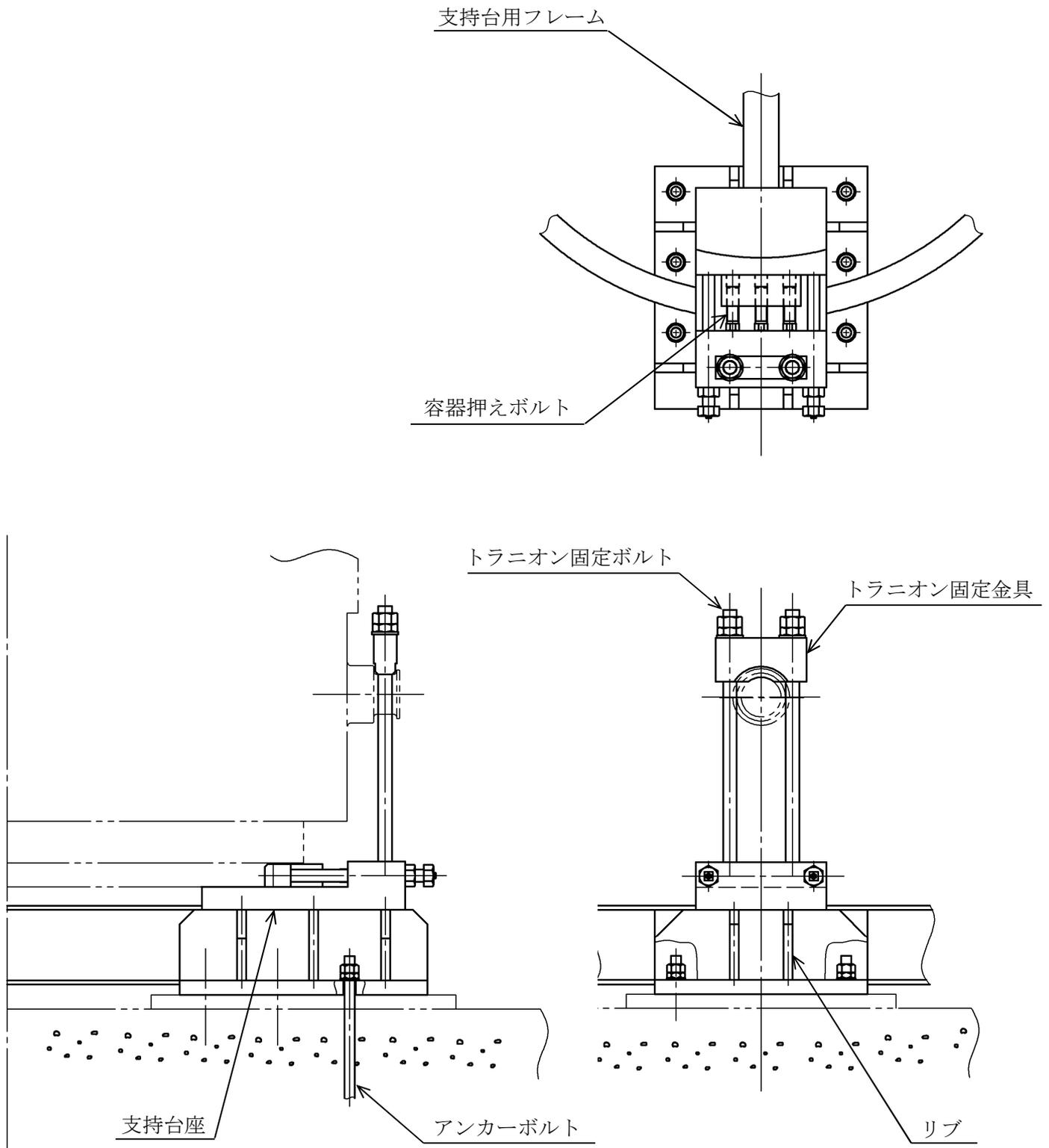


図 5-1 支持構造物の応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵 貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 事業所内運搬 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設 計事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常 着床 取扱い機器の単 一故障, 誤動作 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の異常 着床 貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によつて 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容器の落下 	<ul style="list-style-type: none"> 該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 [*]	備考
	荷重時				異常着床・ 支持構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*2
	運 搬 時	*1	○			○	
	吊 上 げ 時	*1		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	*1			○	○	

注記 *1：キャスク容器の熱膨張により生ずる応力に限る。

*2： S_d *地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象 *1	包絡される事象	荷重条件*2	備考
I	貯蔵時	—	自重 熱荷重	設計事象 I のうち 大半の期間を占め る代表事象。
I + S _d * $\left(S_d \text{ * 地震力が} \right)$ $\left(\text{作用する場合} \right)$	貯蔵時 $\left(S_d \text{ * 地震力が} \right)$ $\left(\text{作用する場合} \right)$	—	自重 トラニオン固定ボルトの初期締 付け力 地震力 水平方向 : 1.17 g (=11.48m/s ²) 鉛直方向 : 0.65 g (=6.38m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s $\left(S_s \text{ 地震力が} \right)$ $\left(\text{作用する場合} \right)$	貯蔵時 $\left(S_s \text{ 地震力が} \right)$ $\left(\text{作用する場合} \right)$	—	自重 トラニオン固定ボルトの初期締 付け力 地震力 水平方向 : 1.17 g (=11.48m/s ²) 鉛直方向 : 0.65 g (=6.38m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1 : 本事象について応力解析を行う。

*2 : S_sと組合せ, III_AS の評価を実施する。

表 6-1 支持構造物用材料の許容応力値 (1/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値					許容値基準
			炭素鋼	炭素鋼	ステンレス鋼	低合金鋼	炭素鋼	
			リブ	支持 台座	トラニオン 固定金具	容器押え ボルト	支持台用 フレーム	
		SM520C	SFVC2B	SUS630 H1150	SNB23-3	SS400		
設計事象 I	*1 一次 応力	引張応力	203	148	394	425	141	f_t
		圧縮応力	189	148	394	421	141	f_c
		せん断応力	117	85	227	245	81	f_s
		曲げ応力	203	148	394	425	141	f_b
		支圧応力	277	201	537	580	192	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力	610	444	1182	1276	424	$3 f_t$
		せん断応力	352	256	682	736	244	$3 f_s$
		曲げ応力	610	444	1182	1276	424	$3 f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	$1.5 f_p$
		座屈応力	176	128	341	631	122	$1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$
I + S _d * *1	一次 応力	引張応力	305	222	591	638	212	$1.5 f_t$
		圧縮応力	284	222	591	631	212	$1.5 f_c$
		せん断応力	176	128	341	368	122	$1.5 f_s$
		曲げ応力	305	222	591	638	212	$1.5 f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	$1.5 f_p$
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	610	444	1182	1276	424	$3 f_t$
		せん断応力 *2	352	256	682	736	244	$3 f_s$
		曲げ応力 *2	610	444	1182	1276	424	$3 f_b$
		支圧応力	415	302	805	870	289	$1.5 f_p$
		座屈応力	176	128	341	631	122	$1.5 f_b, 1.5 f_s$ 又は $1.5 f_c$

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合せた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c| + |c \sigma_b|}{f_c} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t \sigma_b - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t \sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c \sigma_b| - \sigma_t}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、設計事象 I の一次応力については上式による。

I + S_d* の一次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は $1.5 f_c, 1.5 f_b, 1.5 f_t$ とする。

I + S_d* の一次+二次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は $3 f_c, 3 f_b, 3 f_t$ とする。

*2：S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 支持構造物用材料の許容応力値 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類		許容応力値					許容値基準
			炭素鋼	炭素鋼	ステンレス鋼	低合金鋼	炭素鋼	
			リブ	支持台座	トラニオン固定金具	容器押えボルト	支持台用フレーム	
		SM520C	SFVC2B	SUS630 H1150	SNB23-3	SS400		
I + S _s *1	一次応力	引張応力	340	266	591	638	254	1.5 f _t *
		圧縮応力	314	266	591	631	254	1.5 f _c *
		せん断応力	196	153	341	368	146	1.5 f _s *
		曲げ応力	340	266	591	638	254	1.5 f _b *
		支圧応力	463	362	805	870	346	1.5 f _p *
	一次+二次応力	引張・圧縮応力 *2	610	444	1182	1276	424	3 f _t
		せん断応力 *2	352	256	682	736	244	3 f _s
		曲げ応力 *2	610	444	1182	1276	424	3 f _b
		支圧応力	463	362	805	870	346	1.5 f _p *
		座屈応力	176	128	341	631	122	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

- ① 次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合せた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

- ② 圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5f_c^*} + \frac{|c \sigma_b|}{1.5f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{t \sigma_b - |\sigma_c|}{1.5f_t^*} \leq 1$$

- ③ 引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{\sigma_t + t \sigma_b}{1.5f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c \sigma_b| - \sigma_t}{1.5f_b^*} \leq 1$$

ただし、②及び③において、一次応力については上式による。一次+二次応力の場合、分母の 1.5 f_c *, 1.5 f_b *, 1.5 f_t * は 3 f_c, 3 f_b, 3 f_t とする。

*2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

設計応力 区分	応力の種類	許容応力値		
		低合金鋼	低合金鋼	許容値基準
		トラニオン 固定ボルト	アンカー ボルト	
		SNB23-3	SCM435	
設計事象 I *	引張応力	319	296	f_t
	せん断応力	245	227	f_s
I + S _d * *	引張応力	478	444	$1.5 f_t$
	せん断応力	368	341	$1.5 f_s$
I + S _s * *	引張応力	478	444	$1.5 f_t^*$
	せん断応力	368	341	$1.5 f_s^*$

注記 *：組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力値は、次の2つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T \leq f_t$$

ここで、 τ ：ボルトに発生するせん断応力 (MPa)

ただし、設計事象 I については上式による。I + S_d*の場合、 f_t は $1.5 f_t$ とする。

I + S_sの場合、 f_t は $1.5 f_t^*$ とする。

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
断面係数	mm ³	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質量	kg	—	—	設計値

V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	5
5. 計算条件	6
5.1 解析対象とする事象	6
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	6
5.4 物性値	6
5.5 許容応力	6
6. 応力解析の手順	8
6.1 解析手順の概要	8
6.2 荷重条件の選定	8
6.3 応力計算と評価	8
6.3.1 応力計算の方法	8
6.3.2 応力評価	9
6.3.3 数値の丸め方	9

図表目次

図 5-1	支持構造物の応力解析箇所	10
表 4-1	貯蔵容器の設計事象	11
表 4-2	支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ	12
表 5-1	代表事象	13
表 6-1	支持構造物用材料の許容応力値	14
表 6-2	支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値	16
表 6-3	数値の丸め方一覧表	17

1. 概 要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力解析の方針を述べるものである。

注：図表は、一括して巻末に示す。

2. 適用基準

使用済燃料乾式貯蔵容器において、支持構造物は、貯蔵時における貯蔵容器を固縛する構造物であり、トラニオンの評価方法との整合をとり、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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス1支持構造物に従って設計する。

注：本書及び応力計算書において、設計・建設規格の条項は「設計・建設規格〇〇〇-〇〇〇〇〇」として示す。

3. 記 号

3.1 記号の説明

本書及び応力計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては、本書と異なる場合がある。

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
A	断面積	mm ²
a ₁	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離	mm
a ₂	地震時の貯蔵容器回転支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離	mm
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
F ₁	引張力	N
F ₂	支持台②での引張力	N
F _c	圧縮力	N
F _H	水平力	N
f _T	せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力	MPa
f _t	許容引張応力	MPa
f _s	許容せん断応力	MPa
f _c	許容圧縮応力	MPa
f _b	許容曲げ応力	MPa
f _p	許容支圧応力	MPa
f _t [*] *	許容引張応力	MPa
f _s [*] *	許容せん断応力	MPa
f _c [*] *	許容圧縮応力	MPa
f _b [*] *	許容曲げ応力	MPa
f _p [*] *	許容支圧応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²

注記 * : f_t^{*}, f_s^{*}, f_c^{*}, f_b^{*}, f_p^{*}: f_t, f_s, f_c, f_b, f_pの値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

計算書の記号	記号の説明	単位
h_{CG}	貯蔵容器底面から重心までの高さ	mm
L	トラニオン固定ボルト間距離	mm
m_c	貯蔵容器質量	kg
n	部材の数	—
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又は静的地震力の大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s により定まる地震力	—
Z	断面係数	mm ³
σ	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_b	曲げ応力	MPa
$c\sigma_b$	圧縮側曲げ応力	MPa
$t\sigma_b$	引張側曲げ応力	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_p	支圧応力	MPa
σ_T	組合せ応力	MPa
σ_t	引張応力	MPa
τ	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件

支持構造物は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

最高使用温度： 130 °C

4.2 設計事象

設計上考慮する事象については表 4-1 に示す。

4.3 荷重の種類とその組合せ

支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-2 に示す。応力解析に用いる荷重は応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

表 5-1 に示すように解析対象とする設計事象は $I + S_d^*$ 及び $I + S_s$ とし、解析を実施する。

5.2 解析箇所

支持構造物の応力解析を行う箇所は次のとおりである（図 5-1 参照）。

- (1) 支持台座
- (2) トラニオン固定金具
- (3) 容器押え金具
- (4) トラニオン固定ボルト
- (5) リブ
- (6) アンカーボルト

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は下記のとおりである。

- (1) 機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。
なお、常温は 20℃とする。

5.5 許容応力

材料の応力強さの限界及び許容応力は、次の各号に掲げるとおりとする。

- (1) 支持構造物（ボルトを除く。）にあつては、次によること。
 - a. 設計事象 I において生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.1 の規定を満足すること。
 - b. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.2 の規定を満足すること。
 - c. 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して生じる一次応力は、設計・建設規格 SSB-3121.3 の規定を満足すること。
 - d. 設計事象 I において生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、設計・建設規格 SSB-3122.1 の規定を満足すること。

- e. 設計事象 I の貯蔵時において、 S_d *地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の値を超えないこと。
- 引張応力と圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。
 - せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。
 - 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。
 - 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。
 - 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2), (3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。
- f. 設計事象 I の貯蔵時において、 S_s 地震動のみによって生じる一次応力と二次応力（キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。）を加えて求めた応力は、次の規定を満足すること。
- 引張応力及び圧縮応力のサイクルにおける最大値と最小値との差（引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。）については、設計・建設規格 SSB-3122.1(1)の規定を満足すること。
 - せん断応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(2)の規定を満足すること。
 - 曲げ応力のサイクルにおける最大値と最小値との差については、設計・建設規格 SSB-3122.1(3)の規定を満足すること。
 - 支圧応力については、設計・建設規格 SSB-3122.1(4)の規定を満足すること。この場合において、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのは、「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」に読み替えるものとする。
 - 座屈応力については、設計・建設規格 SSB-3121.1(2), (3)又は(4)に定める値の 1.5 倍を超えないこと。
- g. e. 及び f. において応力の組合せが考えられる場合は、組合せ応力に対する評価は設計・建設規格 SSB-3121.1(6)の規定による。
- (2) ボルトにあつては、次によること。
- 設計事象 I において呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3131 の規定を満足すること。
 - 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d *地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3132 の規定を満足すること。
 - 設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用して呼び径断面に生じる応力は、設計・建設規格 SSB-3133 の規定を満足すること。

- (3) (1)及び(2)において、設計・建設規格の「供用状態A」及び「供用状態B」は、それぞれ「設計事象Ⅰ」及び「設計事象Ⅱ」と読み替える。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

6. 応力解析の手順

応力解析を行う場合の手順について一般的な事項を述べる。

6.1 解析手順の概要

支持構造物の応力解析は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて行う。

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4.項に示されているが、各部の計算においては、その部分についての重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

- (1) 応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは以下のとおりである。

a. 機械的荷重

- (2) 貯蔵時に貯蔵容器に地震力が作用する場合の上方向、下方向、水平方向荷重は、それぞれトランオン固定金具、支持台座、容器押え金具で支持する。

なお、荷重作用点位置は荷重支持面の中央点とする。

- (3) 構造の不連続性を考慮して、応力評価点（面）をとる。評価点（面）は、応力計算書に示す。

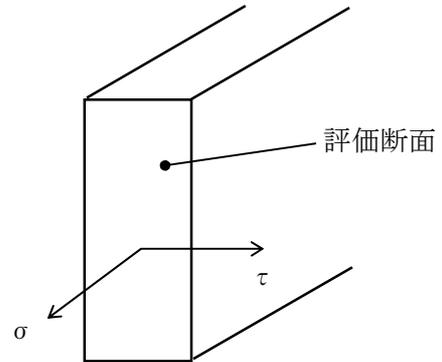
応力評価は、この応力評価点（面）について行う。

6.3.2 応力評価

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は次のとおりである。

- σ : 評価断面に垂直な方向の応力
- τ : せん断応力



支持構造物用材料の許容応力値を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

(1) 支持構造物（ボルトを除く）の応力評価

支持構造物の応力評価は、設計・建設規格 SSB-3120 に従い以下の項目を評価する。

- a. 一次応力
- b. 一次＋二次応力
- c. 組合せ応力

(2) ボルトの応力評価

ボルトの応力評価は、設計・建設規格 SSB-3130 に従い評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-3 に示す。

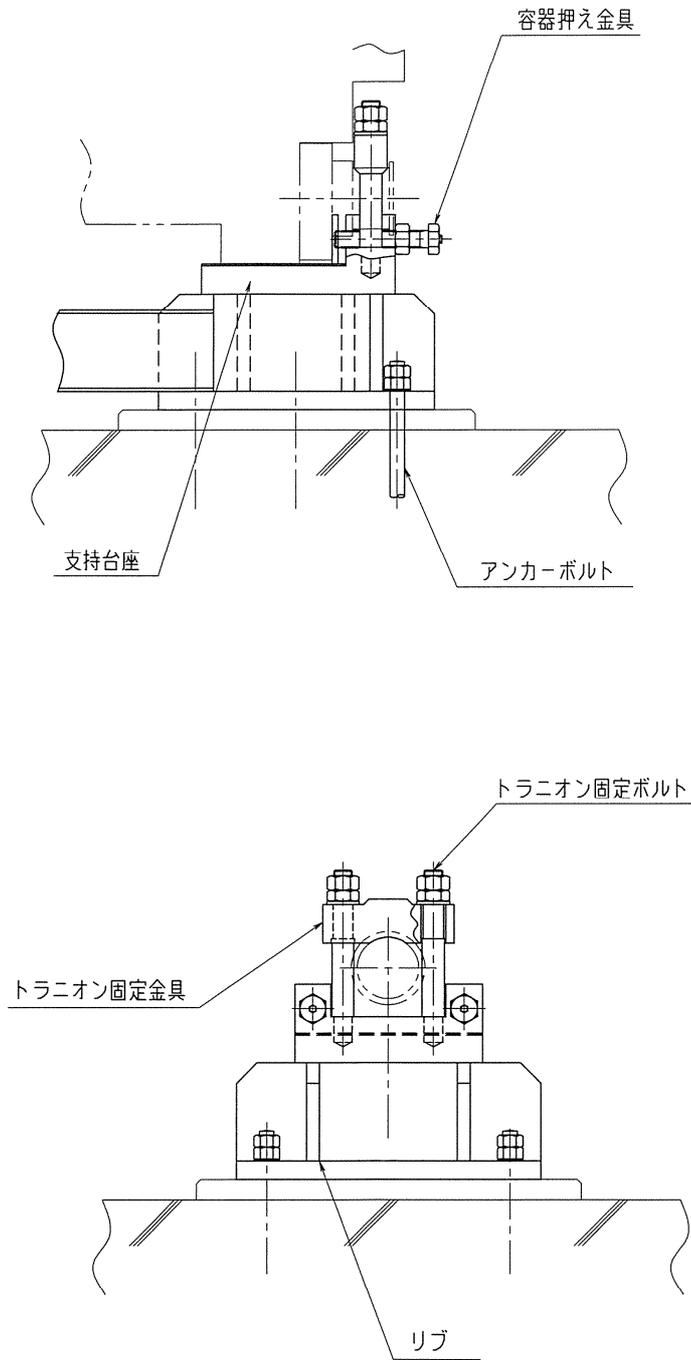


図 5-1 支持構造物の応力解析箇所

表 4-1 貯蔵容器の設計事象

設計事象	定義	解説	事象の例	東海第二発電所における選定事象
I	貯蔵容器の通常 の取扱い時及び 貯蔵時の状態を いう。	貯蔵状態及び計画的な取扱 い状態。	・貯蔵 ・貯蔵容器の吊上 げ, 吊下げ, 移動 ・事業所内運搬	・貯蔵
II	設計事象 I, 設 計事象 III, 設 計事象 IV 及び試験 状態以外の状態 をいう。	貯蔵容器の寿命程度の期間 中に予想される取扱い機器 の単一故障, 単一誤動作等の 事象によって, 貯蔵容器が通 常貯蔵状態あるいは通常取 扱い状態から外れるような 状態をいう。	・貯蔵容器の異常 着床 ・取扱い機器の単 一故障, 誤動作	・貯蔵容器の異常 着床 ・貯蔵容器の支持 構造物への衝突
III	貯蔵容器又はそ の取扱い機器等 の故障, 異常な 作動等により, 貯蔵又は計画さ れた取扱いの停 止が緊急に必要 とされる状態を いう。	発生頻度が十分低い事象に よって引き起こされる状態 をいう。すなわち, 設計事象 II でいう機器の単一故障, 運 転員の単一誤操作等によっ て引き起こされるもののう ち, その発生頻度が十分に低 いと考えられるものを分類 する。		
IV	貯蔵容器の安全 設計上想定され る異常な事態が 生じている状態 をいう。	発生頻度が極めて低く, 貯蔵 容器の寿命中に起こるとは 考えられない事象によつて 引き起こされる状態をいう が, 万一発生した場合の設計 の妥当性を確保するために 特に設けたものをいう。	・貯蔵容器の落下	・該当なし*

注記* : 東海第二発電所においては, 以下の防止措置が施されており, 設計事象 IV (落下・転倒) が発生しないため, 事象として選定していない。

- ・ 貯蔵容器吊上げ装置の多重化, インターロック等の防護設備設置による防止
- ・ 貯蔵容器運搬装置については, 貯蔵容器の固縛・固定機構の適切化による防止
- ・ 確定された貯蔵容器の取扱い手順, 作業手順による防止
- ・ 運用機材の適切な保守管理による防止

表 4-2 支持構造物の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象	荷 重 荷重時	自重 による 荷重	運 搬 時 荷 重	吊 上 げ 荷 重	衝撃荷重	熱 荷 重	備 考
					異常着床・支持 構造物への衝突		
I	貯 蔵 時	○				○	*1
	運 搬 時	○	○			○	
	吊 上 げ 時	○		○		○	
	搬出前作業及び 燃料取出し作業時	○				○	
II	衝撃荷重作用時	○			○	○	

注記 *1: S_d 地震力及び S_s 地震力は、設計事象 I の貯蔵時における荷重と組み合わせるものとする。

表 5-1 代表事象

設計事象	代表事象 *1	包絡される事象	荷重条件	備考
I	貯蔵時	—	自重:1 g (=9.81 m/s ²) 熱荷重	設計事象 I のうち大半の期間を占める代表事例
I + S _d *	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	自重:1 g (=9.81 m/s ²) 地震力 水平方向:0.72 g (=7.06 m/s ²) 鉛直方向:0.36 g (=3.53 m/s ²) 熱荷重	—
I + S _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	自重:1 g (=9.81 m/s ²) 地震力 水平方向: 1.17 g (=11.48 m/s ²) 鉛直方向: 0.65 g (=6.38 m/s ²) 熱荷重	—

注記 *1: 本事象について応力解析を行う。

表 6-1(1) 支持構造物用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値				許容値基準
			炭素鋼	炭素鋼	低合金鋼	低合金鋼	
			リブ	支持台座	トラニオン 固定金具	容器 押え金具	
			SM490B	SF490A	SNB24-1	SNB23-1	
設計 事象 I *1	一次 応力	引張応力	181	148	484	484	f_t
		圧縮応力	172	147	482	475	f_c
		せん断応力	104	85	279	279	f_S
		曲げ応力	209	170	558	558	f_b
		支圧応力	247	201	660	660	f_p
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力	544	444	1452	1452	$3 \cdot f_t$
		せん断応力	314	256	838	838	$3 \cdot f_S$
		曲げ応力	627	512	1675	1675	$3 \cdot f_b$
		支圧応力	370	302	990	990	$1.5 \cdot f_p$
		座屈応力	157	128	419	419	$1.5 \cdot f_S$ 又は $1.5 \cdot f_c$
I + S _d * *1	一次 応力	引張応力	272	222	726	726	$1.5 \cdot f_t$
		圧縮応力	259	221	723	713	$1.5 \cdot f_c$
		せん断応力	157	128	419	419	$1.5 \cdot f_S$
		曲げ応力	313	256	837	837	$1.5 \cdot f_b$
		支圧応力	370	302	990	990	$1.5 \cdot f_p$
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	544	444	1452	1452	$3 \cdot f_t$
		せん断応力*2	314	256	838	838	$3 \cdot f_S$
		曲げ応力*2	627	512	1675	1675	$3 \cdot f_b$
		支圧応力	370	302	990	990	$1.5 \cdot f_p$
		座屈応力	157	128	419	419	$1.5 \cdot f_b, 1.5 \cdot f_S$ 又は $1.5 \cdot f_c$

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|c\sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{f_b} \leq 1$$

ただし、②及び③において、設計事象 I の一次応力については上式による。

I+S_d*の一次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は、 $1.5 \cdot f_c, 1.5 \cdot f_b, 1.5 \cdot f_t$ とする。

I+S_d*の一次+二次応力の場合、分母の f_c, f_b, f_t は、 $3 \cdot f_c, 3 \cdot f_b, 3 \cdot f_t$ とする。

*2：S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1(2) 支持構造物用材料の許容応力値

(単位：MPa)

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値				
			リブ	支持台座	トランニオン 固定金具	容器 押え金具	許容値基準
			SM490B	SF490A	SNB24-1	SNB23-1	
I + S _s *1	一次 応力	引張応力	308	266	726	726	1.5・f _t *
		圧縮応力	291	265	723	713	1.5・f _c *
		せん断応力	177	153	419	419	1.5・f _S *
		曲げ応力	355	306	837	837	1.5・f _b *
		支圧応力	420	362	990	990	1.5・f _P *
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力 *2	544	444	1452	1452	3・f _t
		せん断応力 *2	314	256	838	838	3・f _S
		曲げ応力 *2	627	512	1675	1675	3・f _b
		支圧応力	420	362	990	990	1.5・f _P *
		座屈応力	157	128	419	419	1.5・f _b , 1.5・f _S 又 は 1.5・f _c

注記 *1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対する評価は以下による。

①次式で計算される評価断面に垂直な方向の応力(σ)とせん断応力(τ)を組み合わせた応力(σ_T)は，引張応力に対する許容応力値以下であること。

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

②圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5 \cdot f_c^*} + \frac{|c\sigma_b|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1$$

③引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は，次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |t\sigma_b|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1$$

ただし，②及び③において，一次応力については上式による。一次+二次応力の場合，分母の1.5・f_c*, 1.5・f_b*, 1.5・f_t*は3・f_c, 3・f_b, 3・f_tとする。

*2：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-2 支持構造物用材料（ボルト用材料）の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力区分	応力の種類	許容応力値		
		低合金鋼		許容値基準
		トラニオン固定ボルト	アンカーボルト	
		SNB23-1	SCM435	
設計事象 I	引張応力	363	296	f_t
	せん断応力	279	227	f_s
I + S _d * *	引張応力	544	444 *	$1.5 \cdot f_t$
	せん断応力	419	341	$1.5 \cdot f_s$
I + S _s *	引張応力	544	444 *	$1.5 \cdot f_t^*$
	せん断応力	419	341	$1.5 \cdot f_s^*$

注記 * : 組合せ応力が考えられる場合の許容引張値(f_t)は、次の2つの計算式により計算した値のいずれか小さい方の値とする。

$$f_T = 1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_T = f_t$$

ここで、 τ : ボルトに発生するせん断応力 (MPa)。

ただし、設計事象 I の一次応力については上式による。I + S_d* の場合、 f_t は、 $1.5 \cdot f_t$ とする。I + S_s の場合、 f_t は、 $1.5 \cdot f_t^*$ とする。

表 6-3 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整 数
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整 数
長 さ	mm	—	—	設 計 値
設 計 震 度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面 積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
断 面 係 数	mm ³	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
質 量	kg	—	—	設 計 値

V-2-4-2-3-5 キャスク容器の耐震性についての計算書①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 固有周期	2
2.1 固有周期の計算方法	2
2.2 固有周期の評価	2
3. 応力計算	3
3.1 応力評価点	3
3.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)	3
3.2.1 荷重条件	3
3.2.2 計算方法	3
3.2.3 計算結果	3
4. 応力の評価	4
4.1 キャスク容器 (ボルトを除く) の応力評価	4
4.2 ボルトの応力評価	4
4.3 中間胴の応力評価	4
4.4 特別な応力の評価	4
5. 繰返し荷重の評価	5
5.1 キャスク容器 (ボルトを除く) の評価	5
5.2 ボルトの評価	5
5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討	5
5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析	5
5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析	6
6. 穴の補強	7

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料	8
図 3-1	キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）	9
図 3-2	キャスク容器及び中間胴の解析モデル（地震時）	10
表 1-1	計算結果の概要	11
表 2-1	固有周期の計算結果	14
表 3-1	キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	15
表 3-2	キャスク容器及び中間胴の応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	20
表 4-1	キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	25
表 4-2	キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	28
表 5-1	繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）	31
表 5-2	繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）	31
表 6-1	貫通孔部の応力強さ	32

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のキャスク容器及び中間胴に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 固有周期

2.1 固有周期の計算方法

貯蔵容器をはりでモデル化すると、上端自由及び下端固定のはりの固有周期（T）は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L^2}{1.875^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{E \cdot I}} \\ m &= \frac{m_T}{L} \\ I &= \frac{\pi}{64} (d_{m o}^4 - d_{m i}^4) + \frac{\pi}{64} (d_{i o}^4 - d_{i i}^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

- L : 貯蔵容器の全長 (m)
- E : 胴の縦弾性係数 (Pa)
- I : 胴の断面二次モーメント (m⁴)
- m_T : 貯蔵容器（内部も含む）の総重量 (kg)
- d_{m o} : 中間胴の外径 (m)
- d_{m i} : 中間胴の内径 (m)
- d_{i o} : 内胴の外径 (m)
- d_{i i} : 内胴の内径 (m)

2.2 固有周期の評価

2.1 項の計算により得られた固有周期の計算結果を表 2-1 に示す。計算結果より、剛であることを確認した。

3. 応力計算

3.1 応力評価点

キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）を図 3-1 に示す。

3.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）

3.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧力（ -0.1MPa ）+ 蓋間圧力（ 0.4MPa ）+ ボルト初期締付け力
+ 地震力 + 自重

3.2.2 計算方法

(1) 一次応力及び一次+二次応力

a. 内胴，上部フランジ，底板，中間胴，一次蓋及び一次蓋締付けボルト

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 3-2 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$$G_1 = \alpha_H, \quad G_2 = 9.81 - \alpha_V$$

ここで， α_H ：水平方向設計加速度（ $= C_H g = 11.48\text{m/s}^2$ ）

α_V ：鉛直方向設計加速度（ $= C_V g = 6.38\text{m/s}^2$ ）

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部の底板に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で表わされる。

$$\sigma_p = W_G \cdot G_Z / A$$

ここで， W_G ：バスケット及び燃料の質量（ $= 25200\text{ kg}$ ）

G_Z ：鉛直方向加速度（ $= 9.81 + \alpha_V = 16.19\text{ m/s}^2$ ）

A ：接触面積（ $= 1.17 \times 10^6\text{ mm}^2$ ）

(3) 座屈応力

中間胴に生じる圧縮応力（ σ_b ）は（1）a. の計算方法と同様である。

3.2.3 計算結果

応力計算結果を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

4. 応力の評価

4.1 キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の一次一般膜応力強さ (P_m)、一次局部膜応力強さ (P_L)、一次膜+一次曲げ応力強さ (P_L+P_b) 及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ (P_L+P_b+Q) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

4.2 ボルトの応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均引張応力及び平均引張応力+曲げ応力は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

4.3 中間胴の応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際のキャスク容器との溶接部近接部分における一次一般膜応力強さ (P_m)、一次局部膜応力強さ (P_L)、一次膜+一次曲げ応力強さ (P_L+P_b) 及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ (P_L+P_b+Q) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

また、上記以外の範囲における引張応力、せん断応力、圧縮応力、曲げ応力、支圧応力及び座屈応力並びに地震時の組合せ応力は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

4.4 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

純せん断応力 (σ_s) に該当する評価箇所がないため、評価を省略する。

(2) 支圧応力

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均支圧応力 (σ_p) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

(3) 圧縮応力

各設計事象における評価を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の圧縮応力 (σ_b) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

5. 繰返し荷重の評価

5.1 キャスク容器（ボルトを除く）の評価

地震力により発生する応力の全振幅を表 4-1 及び表 4-2 に示した応力強さ（一次+二次応力：地震力のみによる全振幅を示す）の最大値（ $S_{max} = 62 \text{ MPa}$ ）とすると、この応力値は、設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において 10^{11} 乗を許容繰返し回数としたときにこれに対応する繰返しピーク応力強さの値の 114 MPa（設計・建設規格 添付 4-2-2 曲線Bに相当）以下となる（表 4-1）。したがって、地震力による応力は設計・建設規格 PVB-3140 の規定を満足しているため、疲労評価を必要としない。

5.2 ボルトの評価

5.1 項において疲労評価が不要となる条件を満足することから、一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトについて、地震動のみによる疲労累積係数が 1.0 以下となることを示す。

5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

- (1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり、設計・建設規格 PVB-3122(2)に従い、設計疲労曲線として設計・建設規格 添付 4-2 3.4 を使用する。
- (2) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが 0.375 mm、バルブカバー締付けボルトが 0.25 mm であって 0.07 mm より大である。
- (3) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は、

$$\begin{aligned} \text{一次蓋締付けボルト} & : \frac{2.2}{31} = 0.071 \\ \text{バルブカバー締付けボルト} & : \frac{1.0}{13} = 0.077 \end{aligned}$$

であって、0.06 以上である。

5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析

一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは、次式で計算する。

$$S_p = K \cdot \frac{W_\ell \cdot G_1}{A} \dots\dots\dots (5.1)$$

- ここで、 S_p : 繰返しピーク応力強さ (MPa)
- K : 一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)
- W_ℓ : 一次蓋の質量 (= 5400 kg)
- G_1 : 軸方向の加速度
 (地震時 S_d *地震力が作用する場合 = 6.38 m/s²)
 (地震時 S_s 地震力が作用する場合 = 6.38 m/s²)
- A : 全数のボルト最小断面積 (= 3.01×10⁴ mm²)

また、繰返しピーク応力強さは次式で計算する。ただし、 S_p はピーク応力強さの変動範囲である。

$$S_\ell = \frac{1}{2} \cdot S_p \dots\dots\dots (5.2)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 (4)のとおり、縦弾性係数 (2.07×10^5) と材料の使用温度における縦弾性係数 ($E = 1.83 \times 10^5$ MPa) の比を繰返しピーク応力強さに乗じて補正する。

$$S_\ell' = S_\ell \cdot \frac{2.07 \times 10^5}{E} \dots\dots\dots (5.3)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4により、補正した繰返しピーク応力強さ (S_ℓ') に対する許容繰返し回数を求める。繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 5-1 に示す通りとなり、地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため、添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。ただし、 W_θ : バルブカバーの質量 (= 8 kg)

A : 全数のボルト最小断面積 (= 1.06×10^3 mm²)

繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 5-2 に示すとおりである。

したがって、地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため、添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

6. 穴の補強

設計・建設規格 PVB-3520 により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で表わされる。

$$S_c = K \cdot S \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、 S_c : 貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (= 3.0) (引用文献 (2) 参照)

S : 貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) は表 4-1 及び表 4-2 より求められる。

したがって、貫通孔部の応力強さ (S_c) は表 6-1 に示す通りとなり、すべて許容応力を満足するため、貫通孔の補強は不要となる。

NT2 補② V-2-4-2-3 R0



図 1-1 形状・寸法・材料

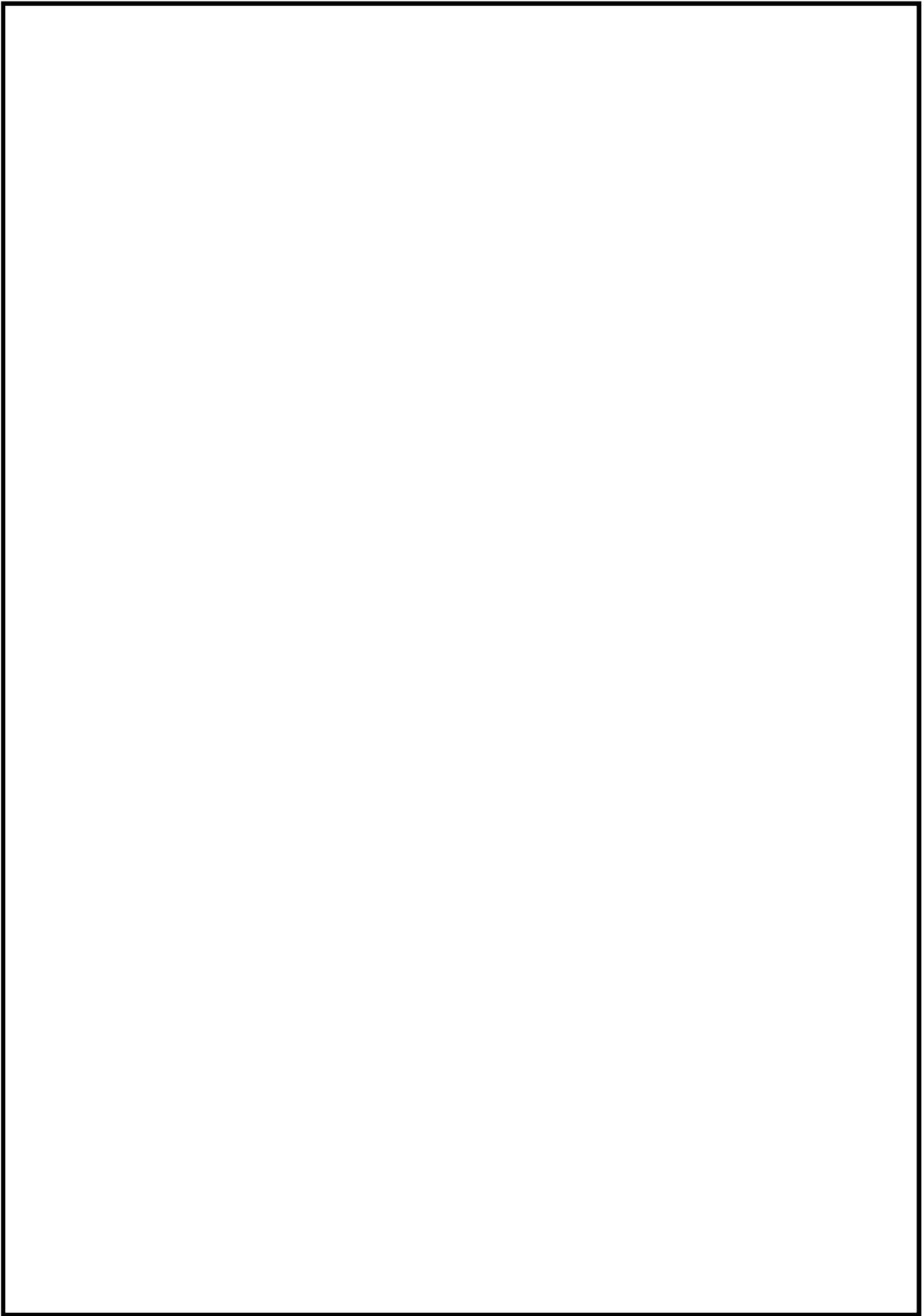


図 3-1 キャスク容器及び中間胴の応力評価点（面）

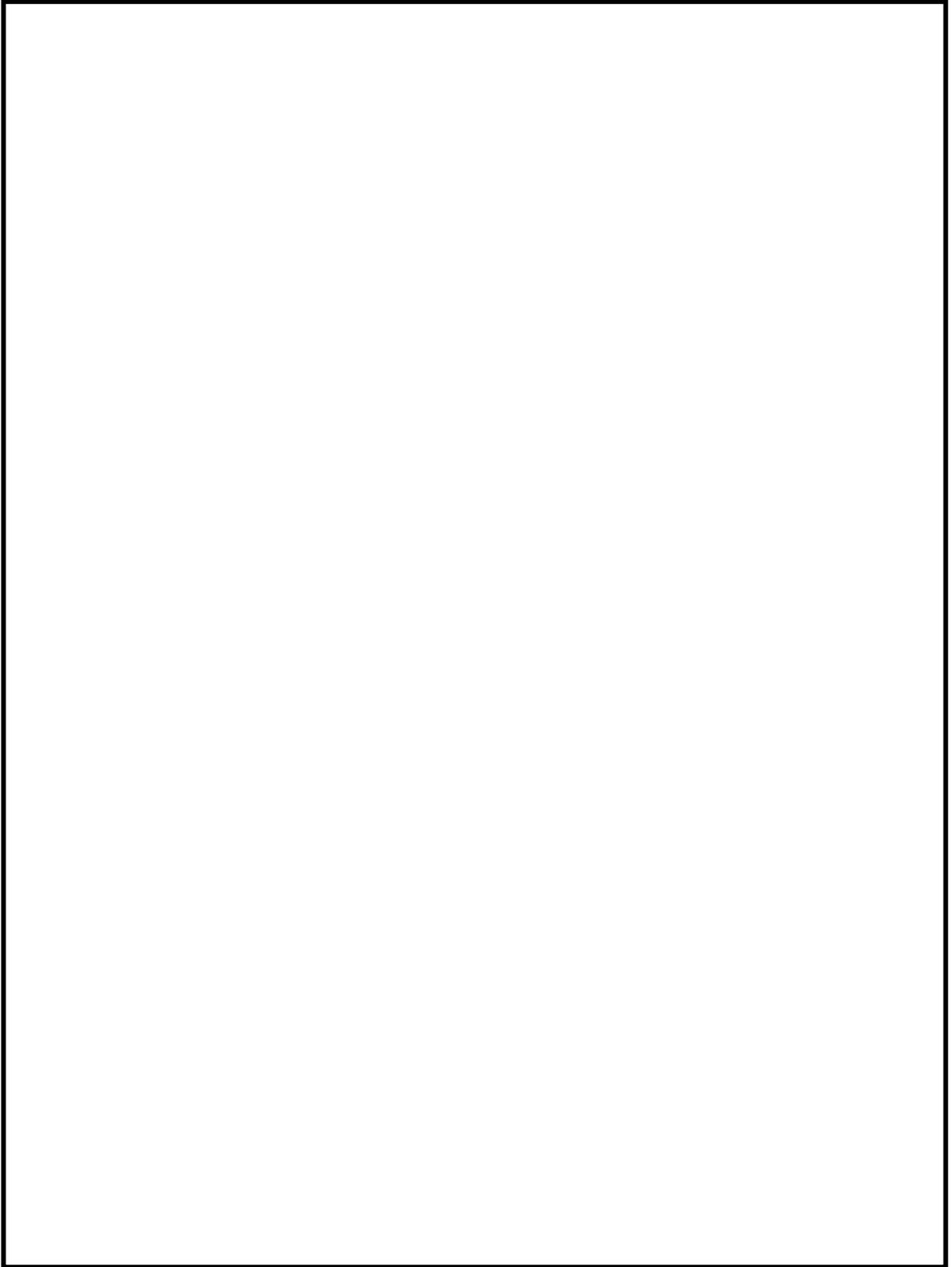


図 3-2 キャスク容器及び中間胴の解析モデル (地震時)

表 1-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
一次蓋	SUSF304	I + S _d *	17	162	①-①'	-	-	-	27	243	①'	2	405	②
		I + S _s	17	278	①-①'	-	-	-	27	418	①'	2	405	②
内 胴	SUS304	I + S _d *	62	162	⑤-⑤'	72	243	⑥-⑥'	-	-	-	62	405	⑥'
		I + S _s	62	278	⑤-⑤'	72	418	⑥-⑥'	-	-	-	62	405	⑥'
上部フランジ	SUSF304	I + S _d *	-	-	-	32	243	⑨-⑨'	-	-	-	4	405	⑩
		I + S _s	-	-	-	32	418	⑨-⑨'	-	-	-	4	405	⑩
底 板	SUSF304	I + S _d *	30	162	⑪-⑪'	-	-	-	39	243	⑪	34	405	⑫
		I + S _s	30	278	⑪-⑪'	-	-	-	39	418	⑪	34	405	⑫
密 封 シール部	SUSF304	I + S _d *	29	152	⑬	-	-	-	48	152	⑬	2	152	⑬
		I + S _s	29	152	⑬	-	-	-	48	152	⑬	2	152	⑬

表 1-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
バルブカバー	SUS304	I + S _d *	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		I + S _s	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分)	SUS304	I + S _d *	—	—	—	113	243	⑧-⑧'	—	—	—	116	405	⑧
		I + S _s	—	—	—	113	418	⑧-⑧'	—	—	—	116	405	⑧
底部プラグ溶接部	SUSF304	I + S _d *	68	81	⑱	—	—	—	—	—	—	94	202	⑱
		I + S _s	68	139	⑱	—	—	—	—	—	—	94	202	⑱

12

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	引張応力 (引張・圧縮応力 ¹⁾)			圧縮応力			せん断応力			曲げ応力			座屈応力			
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分を除く)	SUS304	I + S _d *	一次応力	125	204	⑰	—	—	—	7	117	⑱	107	204	⑱			
			一次+二次応力	71	408	⑱				14	234	⑱	71	408	⑱			
		I + S _s	一次応力	125	204	⑰				—	—	—	7	117	⑱	107	204	⑱
			一次+二次応力	71	408	⑱				14	234	⑱	71	408	⑱	—	—	—

注記 1) : 一次+二次応力に対する評価に用いる。

表 1-1(3) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設 計 事 象	垂直応力+せん断応力			圧縮又は引張応力+曲げ応力 (引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾)			
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	
中間胴 (キャスク容器との溶接 部近接部分を除く)	SUS304	I + S _d [*]	一次応力	110	204 ²⁾	⑰	107	204 ²⁾	⑱
			一次+二次応力	65	408 ²⁾	⑱	71	408 ²⁾	⑱
		I + S _s	一次応力	110	204 ²⁾	⑰	107	204 ²⁾	⑱
			一次+二次応力	65	408 ²⁾	⑱	71	408 ²⁾	⑱

注記 1) : 一次+二次応力に対する評価に用いる。

2) : $f_t=f_c=f_b$ 及び $f_t^*=f_c^*=f_b^*$ であるので、組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

(単位：MPa)

部 位	材 料	設 計 事 象	平均引張応力			平均引張応力 + 曲げ応力		
			計算値	許容応力	評価点 (面)	計算値	許容応力	評価点 (面)
一次蓋締付けボルト	SNB23-3	I + S _d [*]	211	550	③	218	825	③
		I + S _s	211	825	③	218	825	③
バルブカバー 締付けボルト	SNB23-3	I + S _d [*]	—	—	—	—	—	—
		I + S _s	—	—	—	—	—	—

表 2-1 固有周期の計算結果
(単位 : s)

固有周期
$T = 0.043$

表 3-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (1/5)
(貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
一次蓋	①	P _m							17	162
		P _L +P _b							7	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	①'	P _m							17	162
		P _L +P _b							27	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②	P _m							—	—
		P _L +P _b							20	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②'	P _m							—	—
P _L +P _b								10	243	
P _L +P _b +Q ²⁾								1	405	
σ_s								—	—	
σ_p								—	—	
ボ縮一 ル付次 トけ蓋	③	平均引張応力							211	550
		平均引張応力 +曲げ応力							218	825
内 胴	④	P _m							—	—
		P _L							45	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	④'	P _m							—	—
		P _L							45	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (2/5)
(貯蔵時: S_d*地震力が作用する場合)

(単位: MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
内 胴	⑤	P _m						62	162	
		P _L						—	—	
		P _L +P _b +Q ²⁾						15	405	
		σ_s						—	—	
		σ_p						—	—	
	⑤'	P _m						62	162	
		P _L						—	—	
		P _L +P _b +Q ²⁾						11	405	
		σ_s						—	—	
		σ_p						—	—	
	⑥	P _m						—	—	
		P _L						72	243	
		P _L +P _b +Q ²⁾						48	405	
		σ_s						—	—	
		σ_p						—	—	
	⑥'	P _m						—	—	
P _L							72	243		
P _L +P _b +Q ²⁾							62	405		
σ_s							—	—		
σ_p							—	—		
上 部 フ ラ ン ジ	⑨	P _m						—	—	
		P _L						32	243	
		P _L +P _b +Q ²⁾						2	405	
		σ_s						—	—	
		σ_p						—	—	
	⑨'	P _m						—	—	
		P _L						32	243	
		P _L +P _b +Q ²⁾						2	405	
		σ_s					—	—		
		σ_p					—	—		

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表3-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (3/5)
(貯蔵時: S_d*地震力が作用する場合)

(単位: MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
上部 フランジ	⑩	P _m							—	—
		P _L							19	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑩'	P _m							—	—
		P _L							19	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底 板	⑪	P _m							30	162
		P _L +P _b							39	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							9	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	152
	⑪'	P _m							30	162
		P _L +P _b							23	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							14	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	152
	⑫	P _m							—	—
		P _L +P _b							36	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							34	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑫'	P _m							—	—
		P _L +P _b							29	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							31	405
σ_s								—	—	
σ_p								—	—	
シール 部	⑬	P _m							29	152
		P _L +P _b							48	152
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	152

注記1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-1 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (4/5)

(貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力		
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$				
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力						105	204		
			圧縮応力						—	—		
			せん断応力						2	117		
			曲げ応力						79	204		
			支圧応力						—	—		
			垂直+せん断応力						93	204 ³⁾		
			圧縮+曲げ応力						—	—		
			引張+曲げ応力						79	204 ³⁾		
			一次+二次応力	引張・圧縮応力 ²⁾						3	408	
		せん断応力 ²⁾							3	234		
		曲げ応力 ²⁾							3	408		
		支圧応力							—	—		
		座屈応力							—	—		
		垂直+せん断応力 ²⁾							5	408 ³⁾		
		引張・圧縮+曲げ ²⁾							3	408 ³⁾		
		⑭		一次応力	引張応力						125	204
					圧縮応力						—	—
			せん断応力							3	117	
	曲げ応力								77	204		
	支圧応力								—	—		
	垂直+せん断応力								110	204 ³⁾		
	圧縮+曲げ応力								—	—		
	引張+曲げ応力								77	204 ³⁾		
	一次+二次応力		引張・圧縮応力 ²⁾							10	408	
			せん断応力 ²⁾						6	234		
			曲げ応力 ²⁾						10	408		
			支圧応力						—	—		
			座屈応力						—	—		
			垂直+せん断応力 ²⁾						12	408 ³⁾		
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						10	408 ³⁾		
			⑮	一次応力	引張応力						113	204
					圧縮応力						—	—
	せん断応力									7	117	
	曲げ応力								107	204		
	支圧応力								—	—		
	垂直+せん断応力								110	204 ³⁾		
	圧縮+曲げ応力								—	—		
	引張+曲げ応力								107	204 ³⁾		
	一次+二次応力	引張・圧縮応力 ²⁾								71	408	
		せん断応力 ²⁾							14	234		
		曲げ応力 ²⁾							71	408		
		支圧応力							—	—		
		座屈応力							—	—		
		垂直+せん断応力 ²⁾							65	408 ³⁾		
		引張・圧縮+曲げ ²⁾							71	408 ³⁾		

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力

σ_θ : 円周方向応力

σ_t : 評価断面に平行な方向の応力

$\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力

2) : S_d^* 地震力のみによる全振幅について示す。

3) : $f_t = f_c = f_b$ であるので組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 3-1 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (5/5)
(貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	τ_t	$\tau_{n\theta}$		
中間胴 (キヤスク容器との溶接部近接部分)	⑦	P _m							—	—
		P _L							65	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							5	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑦'	P _m							—	—
		P _L							65	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧	P _m							—	—
		P _L							113	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							116	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧'	P _m							—	—
		P _L							113	243
		P _L +P _b +Q ²⁾							36	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底部プラグ溶接部	⑱	P _m							68	81
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							94	202
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_t, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (1/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
一次蓋	①	P _m							17	278
		P _L +P _b							7	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	①'	P _m							17	278
		P _L +P _b							27	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②	P _m							—	—
		P _L +P _b							20	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	②'	P _m							—	—
P _L +P _b								10	418	
P _L +P _b +Q ²⁾								1	405	
σ_s								—	—	
σ_p								—	—	
ボ縮一 ル付次 トげ蓋	③	平均引張応力							211	825
		平均引張応力 +曲げ応力							218	825
内 胴	④	P _m							—	—
		P _L							45	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	④'	P _m							—	—
		P _L							45	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							6	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (2/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
内 胴	⑤	P _m							62	278
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							15	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑤'	P _m							62	278
		P _L							—	—
		P _L +P _b +Q ²⁾							11	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥	P _m							—	—
		P _L							72	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							48	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑥'	P _m							—	—
		P _L							72	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							62	405
σ_s								—	—	
σ_p								—	—	
上 部 フ ラ ン ジ	⑨	P _m							—	—
		P _L							32	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑨'	P _m							—	—
		P _L							32	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キャスク容器及び中間胴の応力計算結果 (3/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
上部 フランジ	⑩	P _m							—	—
		P _L							19	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑩'	P _m							—	—
		P _L							19	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
底 板	⑪	P _m							30	278
		P _L +P _b							39	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							9	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	418
	⑪'	P _m							30	278
		P _L +P _b							23	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							14	405
		σ_s							—	—
		σ_p							1	418
	⑫	P _m							—	—
		P _L +P _b							36	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							34	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑫'	P _m							—	—
		P _L +P _b							29	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							31	405
σ_s								—	—	
σ_p								—	—	
シール 部	⑬	P _m							29	152
		P _L +P _b							48	152
		P _L +P _b +Q ²⁾							2	152

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (4/5)

(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力	
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$			
中間胴 (キヤスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力						105	204	
			圧縮応力						—	—	
			せん断応力						2	117	
			曲げ応力						79	204	
			支圧応力						—	—	
			垂直+せん断応力						93	204 ³⁾	
			圧縮+曲げ応力						—	—	
			引張+曲げ応力						79	204 ³⁾	
			引張・圧縮応力 ²⁾						3	408	
		一次+二次応力	せん断応力 ²⁾						3	234	
			曲げ応力 ²⁾						3	408	
			支圧応力						—	—	
			座屈応力						—	—	
			垂直+せん断応力 ²⁾						5	408 ³⁾	
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						3	408 ³⁾	
			引張応力						125	204	
			圧縮応力						—	—	
			⑭	一次応力	せん断応力						3
	曲げ応力								77	204	
	支圧応力								—	—	
	垂直+せん断応力								110	204 ³⁾	
	圧縮+曲げ応力								—	—	
	引張+曲げ応力								77	204 ³⁾	
	引張・圧縮応力 ²⁾								10	408	
	一次+二次応力	せん断応力 ²⁾								6	234
		曲げ応力 ²⁾								10	408
		支圧応力							—	—	
		座屈応力							—	—	
		垂直+せん断応力 ²⁾							12	408 ³⁾	
		引張・圧縮+曲げ ²⁾							10	408 ³⁾	
		引張応力							113	204	
		圧縮応力							—	—	
		⑮		一次応力	せん断応力						7
	曲げ応力									107	204
	支圧応力									—	—
	垂直+せん断応力								110	204 ³⁾	
	圧縮+曲げ応力								—	—	
	引張+曲げ応力								107	204 ³⁾	
	引張・圧縮応力 ²⁾								71	408	
	一次+二次応力		せん断応力 ²⁾							14	234
			曲げ応力 ²⁾							71	408
			支圧応力						—	—	
			座屈応力						—	—	
			垂直+せん断応力 ²⁾						65	408 ³⁾	
			引張・圧縮+曲げ ²⁾						71	408 ³⁾	

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。
 3) : $f_t=f_c=f_b$ 及び $f_t^*=f_c^*=f_b^*$ であるので組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 3-2 キヤスク容器及び中間胴の応力計算結果 (5/5)
(貯蔵時：S_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾					計算値	許容 応力	
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	τ_t			$\tau_{n\theta}$
中間胴(キヤスク容器との溶接部近接部分)	⑦	P _m							—	—
		P _L							65	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							5	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑦'	P _m							—	—
		P _L							65	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							4	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧	P _m							—	—
		P _L							113	418
		P _L +P _b +Q ²⁾							116	405
		σ_s							—	—
		σ_p							—	—
	⑧'	P _m							—	—
P _L		113	418							
P _L +P _b +Q ²⁾		36	405							
σ_s		—	—							
σ_p		—	—							
底部プラグ溶接部	⑱	P _m	68	139						
		P _L	—	—						
		P _L +P _b +Q ²⁾	94	405						
		σ_s	—	—						
		σ_p	—	—						

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_t, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 4-1 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
一 次 蓋	①-①'	P_m	17	162
	①	P_L+P_b	7	243
	①'		27	243
	①	P_L+P_b+Q	1	405
	①'		1	405
	②	P_L+P_b	20	243
	②'		10	243
	②	P_L+P_b+Q	2	405
	②'		1	405
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	211	550
		平均引張応力+ 曲げ応力	218	825
内 胴	④-④'	P_L	45	243
	④	P_L+P_b+Q	6	405
	④'		6	405
	⑤-⑤'	P_m	62	162
	⑤	P_L+P_b+Q	15	405
	⑤'		11	405
	⑥-⑥'	P_L	72	243
	⑥	P_L+P_b+Q	48	405
	⑥'		62	405

注記 1) : P_L+P_b+Q は S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
上部フランジ	⑨-⑨'	P_L	32	243
	⑨	P_L+P_b+Q	2	405
	⑨'		2	405
	⑩-⑩'	P_L	19	243
	⑩	P_L+P_b+Q	4	405
	⑩'		2	405
底 板	⑪-⑪'	P_m	30	162
		σ_P	1	152
	⑪	P_L+P_b	39	243
	⑪'		23	243
	⑪	P_L+P_b+Q	9	405
	⑪'		14	405
	⑫	P_L+P_b	36	243
	⑫'		29	243
	⑫	P_L+P_b+Q	34	405
	⑫'		31	405
密封シール部	⑬	P_m	29	152
		P_L+P_b	48	152
		P_L+P_b+Q	2	152
中間胴 （キヤスク容器との 溶接部近接部分）	⑦-⑦'	P_L	65	243
	⑦	P_L+P_b+Q	5	405
	⑦'		4	405
	⑧-⑧'	P_L	113	243
	⑧	P_L+P_b+Q	116	405
	⑧'		36	405
底部プラグ溶接部	⑭	P_m	68	81
		P_L+P_b+Q	94	202

注記 1) : P_L+P_b+Q は S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。（密封シール部を除く）

表 4-1 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）(3/3)

(単位：MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	計 算 値	許容応力	
中間胴 (キヤスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力	105	204
			圧縮応力	-	-
			せん断応力	2	117
			曲げ応力	79	204
			垂直応力+せん断応力	93	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	-	-
			引張応力+曲げ応力	79	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	3	408
			せん断応力 ¹⁾	3	234
			曲げ応力 ¹⁾	3	408
			座屈応力	-	-
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	5	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	3	408 ²⁾
			⑭	一次応力	引張応力
	圧縮応力	-			-
	せん断応力	3			117
	曲げ応力	77			204
	垂直応力+せん断応力	110			204 ²⁾
	圧縮応力+曲げ応力	-			-
	引張応力+曲げ応力	77			204 ²⁾
	一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾		10	408
		せん断応力 ¹⁾		6	234
		曲げ応力 ¹⁾		10	408
		座屈応力		-	-
		垂直応力+せん断応力 ¹⁾		12	408 ²⁾
		引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾		10	408 ²⁾
		⑮		一次応力	引張応力
圧縮応力	-		-		
せん断応力	7		117		
曲げ応力	107		204		
垂直応力+せん断応力	110		204 ²⁾		
圧縮応力+曲げ応力	-		-		
引張応力+曲げ応力	107		204 ²⁾		
一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾		71	408	
	せん断応力 ¹⁾		14	234	
	曲げ応力 ¹⁾		71	408	
	座屈応力		-	-	
	垂直応力+せん断応力 ¹⁾		65	408 ²⁾	
	引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾		71	408 ²⁾	

注記 1) : S_d^* 地震力のみによる全振幅について示す。

2) : $f_t=f_c=f_b$ であるので、組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 4-2 キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
一 次 蓋	①-①'	P _m	17	278
	①	P _L +P _b	7	418
	①'		27	418
	①	P _L +P _b +Q	1	405
	①'		1	405
	②	P _L +P _b	20	418
	②'		10	418
	②	P _L +P _b +Q	2	405
	②'		1	405
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	211	825
		平均引張応力+ 曲げ応力	218	825
内 胴	④-④'	P _L	45	418
	④	P _L +P _b +Q	6	405
	④'		6	405
	⑤-⑤'	P _m	62	278
	⑤	P _L +P _b +Q	15	405
	⑤'		11	405
	⑥-⑥'	P _L	72	418
	⑥	P _L +P _b +Q	48	405
	⑥'		62	405

注記 1) : P_L+P_b+Q は S_s 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 キヤスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	評価点（面）	応力分類	計算値 ¹⁾	許容応力
上部フランジ	⑨-⑨'	P _L	32	418
	⑨	P _L +P _b +Q	2	405
	⑨'		2	405
	⑩-⑩'	P _L	19	418
	⑩	P _L +P _b +Q	4	405
	⑩'		2	405
底 板	⑪-⑪'	P _m	30	278
		σ _P	1	418
	⑪	P _L +P _b	39	418
	⑪'		23	418
	⑪	P _L +P _b +Q	9	405
	⑪'		14	405
	⑫	P _L +P _b	36	418
	⑫'		29	418
	⑫	P _L +P _b +Q	34	405
	⑫'		31	405
密封シール部	⑬	P _m	29	152
		P _L +P _b	48	152
		P _L +P _b +Q	2	152
中間胴 (キヤスク容器との 溶接部近接部分)	⑦-⑦'	P _L	65	418
	⑦	P _L +P _b +Q	5	405
	⑦'		4	405
	⑧-⑧'	P _L	113	418
	⑧	P _L +P _b +Q	116	405
	⑧'		36	405
底部プラグ溶接部	⑰	P _m	68	139
		P _L +P _b +Q	94	202

注記 1) : P_L+P_b+Q は S_s地震力のみによる全振幅について評価する。（密封シール部を除く）

表 4-2 キャスク容器及び中間胴の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3/3）

（単位：MPa）

部位	評価点 (面)	応力分類	計 算 値	許容応力	
中間胴 (キャスク容器との溶接部近接部分を除く)	⑬	一次応力	引張応力	105	204
			圧縮応力	-	-
			せん断応力	2	117
			曲げ応力	79	204
			垂直応力+せん断応力	93	204 ²⁾
			圧縮応力+曲げ応力	-	-
			引張応力+曲げ応力	79	204 ²⁾
		一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾	3	408
			せん断応力 ¹⁾	3	234
			曲げ応力 ¹⁾	3	408
			座屈応力	-	-
			垂直応力+せん断応力 ¹⁾	5	408 ²⁾
			引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾	3	408 ²⁾
			⑭	一次応力	引張応力
	圧縮応力	-			-
	せん断応力	3			117
	曲げ応力	77			204
	垂直応力+せん断応力	110			204 ²⁾
	圧縮応力+曲げ応力	-			-
	引張応力+曲げ応力	77			204 ²⁾
	一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾		10	408
		せん断応力 ¹⁾		6	234
		曲げ応力 ¹⁾		10	408
		座屈応力		-	-
		垂直応力+せん断応力 ¹⁾		12	408 ²⁾
		引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾		10	408 ²⁾
		⑮		一次応力	引張応力
	圧縮応力		-		-
	せん断応力		7		117
	曲げ応力		107		204
垂直応力+せん断応力	110		204 ²⁾		
圧縮応力+曲げ応力	-		-		
引張応力+曲げ応力	107		204 ²⁾		
一次±二次応力	引張・圧縮応力 ¹⁾		71	408	
	せん断応力 ¹⁾		14	234	
	曲げ応力 ¹⁾		71	408	
	座屈応力		-	-	
	垂直応力+せん断応力 ¹⁾		65	408 ²⁾	
	引張・圧縮応力+曲げ応力 ¹⁾		71	408 ²⁾	

注記 1) : S_s地震力のみによる全振幅について示す。

2) : $f_t=f_c=f_b$ 及び $f_t^*=f_c^*=f_b^*$ であるので、組合せ応力が引張応力に対する許容値以下であれば規定を満足する。

表 5-1 繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）

事 象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ s_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ s_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (-)
地震時	S_d^*	10000	5	6	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000	5	6	1.00×10^6	0.01
U (地震時)						0.02

表 5-2 繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）

事 象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ s_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ s_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (-)
地震時	S_d^*	10000	1	2	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000	1	2	1.00×10^6	0.01
U (地震時)						0.02

表 6-1 貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

設計事象	応力分類	貫通孔を無視した 場合の応力強さ (S)	貫通孔部の応力 (S _c)	許容応力
I + S _d *	P _L +P _b	27	81	243
	P _L +P _b +Q	2	6	405
I + S _s	P _L +P _b	27	81	418
	P _L +P _b +Q	2	6	405

V-2-4-2-3-5 キャスク容器の耐震性についての計算書②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 固有周期	2
2.1 固有周期の計算方法	2
2.2 固有周期の評価	2
3. 応力計算	3
3.1 応力評価点	3
3.2 貯蔵時 (S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合)	3
3.2.1 荷重条件	3
3.2.2 計算方法	3
3.2.3 計算結果	3
4. 応力の評価	4
4.1 キャスク容器 (ボルトを除く。) の応力評価	4
4.2 ボルトの応力評価	4
4.3 特別な応力の評価	4
5. 繰返し荷重の評価	5
5.1 キャスク容器 (ボルトを除く。) の評価	5
5.2 ボルトの評価	8
5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討	8
5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析	8
5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析	9
6. 穴の補強	10

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料	11
図 3-1	キャスク容器の応力評価点 (面)	12
図 3-2	キャスク容器の解析モデル (圧力+ボルト初期締付け力作用時)	13
図 3-3	キャスク容器の解析モデル (地震時)	14
表 1-1	計算結果の概要	15
表 2-1	固有周期の計算結果	16
表 3-1	キャスク容器の応力計算結果 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合)	17
表 3-2	キャスク容器の応力計算結果 (貯蔵時: S_s 地震力が作用する場合)	20
表 4-1	キャスク容器の応力評価 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合)	23
表 4-2	キャスク容器の応力評価 (貯蔵時: S_s 地震力が作用する場合)	25
表 5-1	キャスク容器 (ボルトを除く。) の疲労解析不要の評価結果	27
表 5-2	疲労累積係数 (一次蓋締付けボルト)	28
表 5-3	疲労累積係数 (バルブカバー締付けボルト)	28
表 6-1	貫通孔部の応力強さ	29

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のキャスク容器に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 固有周期

2.1 固有周期の計算方法

貯蔵容器をはりでモデル化すると、上端自由及び下端固定のはりの固有周期（T）は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L^2}{1.875^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{E \cdot I}} \\ m &= \frac{m_T}{L} \\ I &= \frac{\pi}{64} \cdot (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

- L : 貯蔵容器の全長 (m)
- E : 胴の縦弾性係数 (Pa)
- I : 胴の断面二次モーメント (m⁴)
- m_T : 貯蔵容器 (内部も含む) の総重量 (kg)
- d_o : 胴の外径 (m)
- d_i : 胴の内径 (m)

2.2 固有周期の評価

2.1項の計算により得られた固有周期の計算結果を表 2-1 に示す。計算結果より、剛であることを確認した。

3. 応力計算

3.1 応力評価点

キャスク容器の応力評価点（面）を図 3-1 に示す。

3.2 貯蔵時（ S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

3.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。なお、地震力には S_s 地震力を適用する。

キャスク容器内圧力（-0.1 MPa）＋蓋間圧力（0.4 MPa）＋ボルト初期締付け力
＋地震力＋自重

3.2.2 計算方法

(1) 一次応力及び一次＋二次応力

a. 胴，底板，一次蓋及び一次蓋締付けボルト

(a) 圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 3-2 に示す。

(b) 地震力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 3-3 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$$G_1 = C_H \cdot g, G_2 = (1 - C_V) \cdot g \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 C_H ：水平方向設計震度（=1.17）

C_V ：鉛直方向設計震度（=0.65）

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

m_G ：バスケット及び燃料の質量（= kg）

A ：接触面積（= mm²）

C_V ：(1)a. (b) と同じ

3.2.3 計算結果

応力計算結果を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

4. 応力の評価

4.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の一次一般膜応力強さ (P_m)、一次局部膜応力強さ (P_L)、一次膜+一次曲げ応力強さ ($P_L + P_b$) 及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ ($P_L + P_b + Q$) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針②」5.5 項の各規定を満足する。

4.2 ボルトの応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均引張応力及び平均引張応力+曲げ応力は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針②」5.5 項の各規定を満足する。

4.3 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

平均せん断応力 (σ_s) を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

(2) 支圧応力

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均支圧応力 (σ_p) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針②」5.5 項の規定を満足する。

(3) 軸圧縮応力

軸圧縮応力 (σ_b) を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

5. 繰返し荷重の評価

5.1 キャスク容器（ボルトを除く。）の評価

設計・建設規格 PVB-3140 により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(6)に示し、表 5-1 にその評価結果のまとめを示す。なお、燃料装荷・取出しサイクルは通常 1 回であるが、本評価においては 100 回に想定しても条件を満足することを示す。

(1) 設計・建設規格 PVB-3140(1) (大気圧－使用圧力－大気圧の変動)

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数 (N_1) は、燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として評価する。

$$N_1 = 100 \text{ (回)}$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、設計温度における設計応力強さ $3 \cdot S_m$ (362 MPa) を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数 (N_a) は、

$$N_a = 3756 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 < N_a$$

であり、条件を満足する。

(2) 設計・建設規格 PVB-3140(2) (燃料装荷・取出し及び耐圧試験等を除く設計事象 I 及び設計事象 II における圧力変動)

燃料装荷・取出しを除く設計事象 I 及び設計事象 II における圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.23 \text{ MPa} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 P : 最高使用圧力 (=1.0 MPa)

S_m : 設計応力強さ (=120 MPa)

S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、 10^6 回を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (=86 MPa)

また、(5.1) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (A_m) は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、 S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(5.1) 式による値を超える実際の圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

(5.1) 式より、圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は、0.23 MPa となる。地震力が作用する場合における実際の圧力は密封容器のため 0.23 MPa を超える変動は生じないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として (5.2) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$A_m = 3.88 \text{ MPa}$$

となる。

したがって、燃料装荷・取出しを除く設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合における圧力変動の全振幅を最高使用圧力（ $P=1.0$ MPa）と仮定しても、

$$P < A_m$$

であり、条件を満足する。

- (3) 設計・建設規格 PVB-3140(3)（燃料装荷・取出し時の温度差）

キャスク容器の任意の2点間の距離（ p ）は、次式で計算する。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 942 \text{ mm} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、 R : キャスク容器の平均半径（ $=907.5$ mm）

t : キャスク容器の板厚（ $=244$ mm）

キャスク容器の燃料装荷・取出し時において、相互の距離が p を超えない任意の2点間の温度差の許容値（ T ）は、次式で計算する。なお、2点間の平均温度はキャスク容器の最高使用温度（ $T_{max}=170$ °C）とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 277 \text{ °C} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、 E : 2点間の平均温度における縦弾性係数（ $=1.93 \times 10^5$ MPa）

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数（ $=13.07 \times 10^{-6}$ mm/(mm・°C)）

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、燃料装荷・取出しの回数（100回）を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ（ $=1413$ MPa）

したがって、任意の2点間において生じる温度差を最高使用温度（ T_{max} ）と常温との差（ $\Delta T=150$ °C）と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

- (4) 設計・建設規格 PVB-3140(4)（燃料装荷・取出し時を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱの温度差変動）

燃料装荷・取出し時を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて、相互の距離が p を超えない任意の2点間の温度差の変動の全振幅の許容値（ T ）は、次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、 E, α : (3) と同じ

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(5.6)式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値（MPa）

$$T' = \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 17.0 \text{ °C} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここで、 S : (2) と同じ

設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器であり

かつ温度変動する加熱源を収納していないので、任意の 2 点間の温度差の変動が(5.6)式により計算した値の 17.0 °Cを超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として (5.5) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$T = 277 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、キャスク容器の任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(5) 設計・建設規格 PVB-3140(5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

一次蓋締付けボルトとバルブカバー締付けボルトは同種の合金鋼を使用しており、一次蓋は炭素鋼、バルブカバーはステンレス鋼を使用している。

ここでは、縦弾性係数及び熱膨張係数の差が大きく、評価が厳しくなる組合せであるバルブカバーとバルブカバー締付けボルトを代表として評価する。

バルブカバーとバルブカバー締付けボルトの部分の温度変動の許容値 (T) は、(5.7) 式で計算する。なお、縦弾性係数及び熱膨張係数はキャスク容器の最高使用温度 ($T_{max} = 170^\circ\text{C}$) に対する値とする。

$$T = \frac{S}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} = 61.9 \text{ }^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

ここで、 S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において、許容繰返し回数 1×10^{11} 回に対する繰返しピーク応力強さ (=94 MPa)

E_1 : バルブカバーの縦弾性係数 (= 1.84×10^5 MPa)

E_2 : バルブカバー締付けボルトの縦弾性係数 (= 1.82×10^5 MPa)

α_1 : バルブカバーの瞬時熱膨張係数 (= 17.27×10^{-6} mm/(mm \cdot °C))

α_2 : バルブカバー締付けボルトの瞬時熱膨張係数 (= 13.29×10^{-6} mm/(mm \cdot °C))

また、(5.7) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (T) は、(5.8) 式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

ここで、 S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.2 において、(5.7) 式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ (MPa)

設計事象 I、設計事象 II 及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので、温度変動は、気温変動によるものと考え、

(5.7) 式により計算した値の 61.9°Cを超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし、計 100 回として評価すると、

$$S_a = 1.8 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$T = 1185.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、設計事象Ⅰ，設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合において生じる温度の変動を最高使用温度（ T_{max} ）と常温との差（ $\Delta T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(6) 設計・建設規格 PVB-3140(6)（機械的荷重の変動）

地震力により発生する応力について、表 5-1 に示すとおり応力の全振幅は、 S_d^* 及び S_s 地震による繰返し回数 10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ（262 MPa）を下回っている。また、地震力による疲労累積係数は 1.0 を下回っていることから、

$$\Delta \sigma \leq S$$

である。

(7) 検討結果

以上の(1)から(6)より、設計・建設規格 PVB-3140 の規定を全て満足しているのので、疲労解析を必要としない。

5.2 ボルトの評価

5.1 項において疲労評価が不要となる条件を満足することから、一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトについて、地震動のみによる疲労累積係数が 1.0 以下となることを示す。

5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

- (1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり、設計・建設規格 PVB-3122(2)に従い、設計疲労曲線として設計・建設規格 添付 4-2 3.4 を使用する。
- (2) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの平均引張応力+曲げ応力の許容値を $3 \cdot S_m$ としたので、設計疲労曲線として、設計・建設規格 添付 4-2 3.4 の“曲線 2”を使用する。
- (3) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが mm, バルブカバー締付けボルトが mm であって 0.07 mm より大である。
- (4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は、

一次蓋締付けボルト : = 0.062

バルブカバー締付けボルト : = 0.072

であって、0.06 以上である。

5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析

一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは、次式で計算する。

$$S = K \cdot \left(\pm \frac{m_e \cdot G_1}{A} \right) \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで、 S : ボルトのピーク応力強さ (MPa)
 K : 一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)
 A : 全数のボルト最小断面積 (= mm²)
 m_0 : 一次蓋の質量 (=4900 kg)
 G_1 : 軸方向の加速度

地震	S_d^*	6.38 m/s ²
	S_s	6.38 m/s ²

また、繰返しピーク応力強さは次式で計算する。

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot S_P \dots\dots\dots (5.10)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 (4) のとおり、縦弾性係数 ($E_0=2.07 \times 10^5$ MPa) と解析に用いる縦弾性係数 ($E=1.82 \times 10^5$ MPa) との比を考慮し補正する。

$$S_0' = S_0 \cdot \frac{E_0}{E} \dots\dots\dots (5.11)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 により、補正した繰返しピーク応力強さ (S_0') に対する許容繰返し回数 (N) を求める。繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は表 5-2 に示す通りとなり、地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため、添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針②」5.5 項の規定を満足する。

5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。

ただし、

m_r : バルブカバーの質量 (=6 kg)
 A : 全数のボルト最小断面積 (= mm²)

繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 5-3 に示すとおりである。

したがって、地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針②」5.5 項の規定を満足する。

6. 穴の補強

設計・建設規格 PVB-3520 により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で計算する。

$$S_c = K \cdot S \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、 S_c : 貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0 (引用文献(9)参照))

S : 貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) と貫通孔部の応力強さ (S_c) は表 6-1 に示す通りとなり、すべて許容応力を満足するため、貫通孔の補強は不要となる。

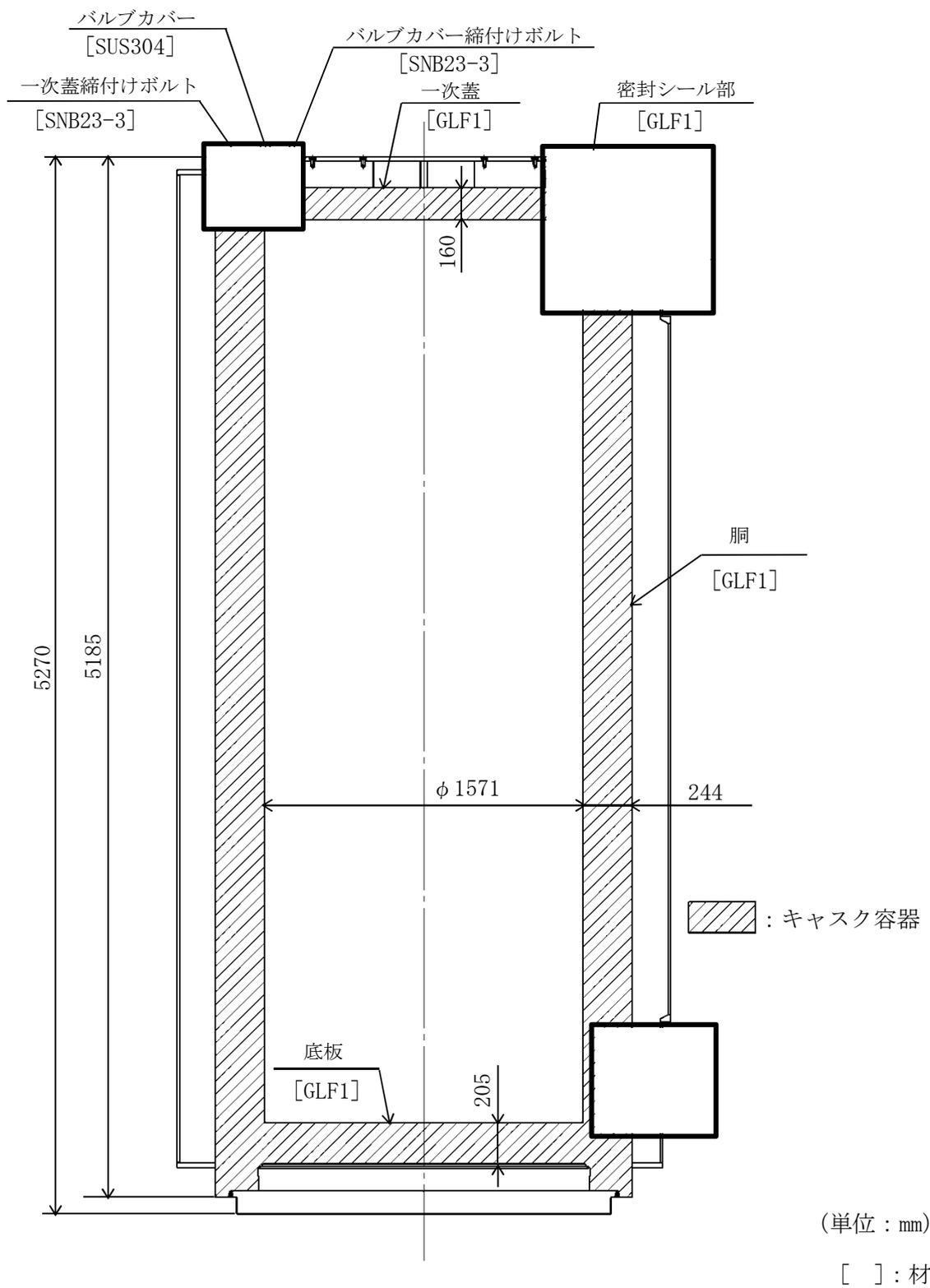


図 1-1 形状・寸法・材料

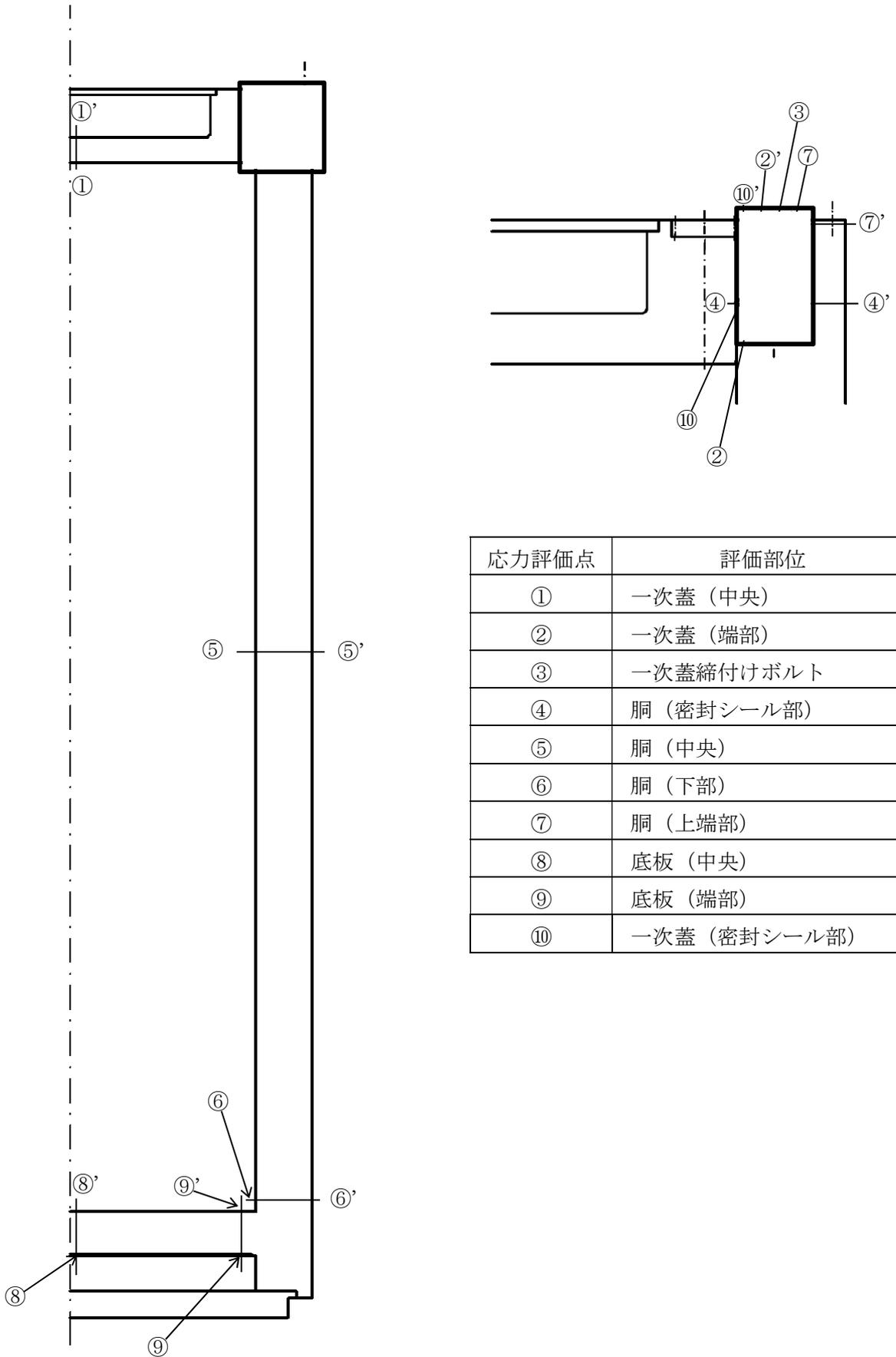


図 3-1 キャスク容器の応力評価点（面）

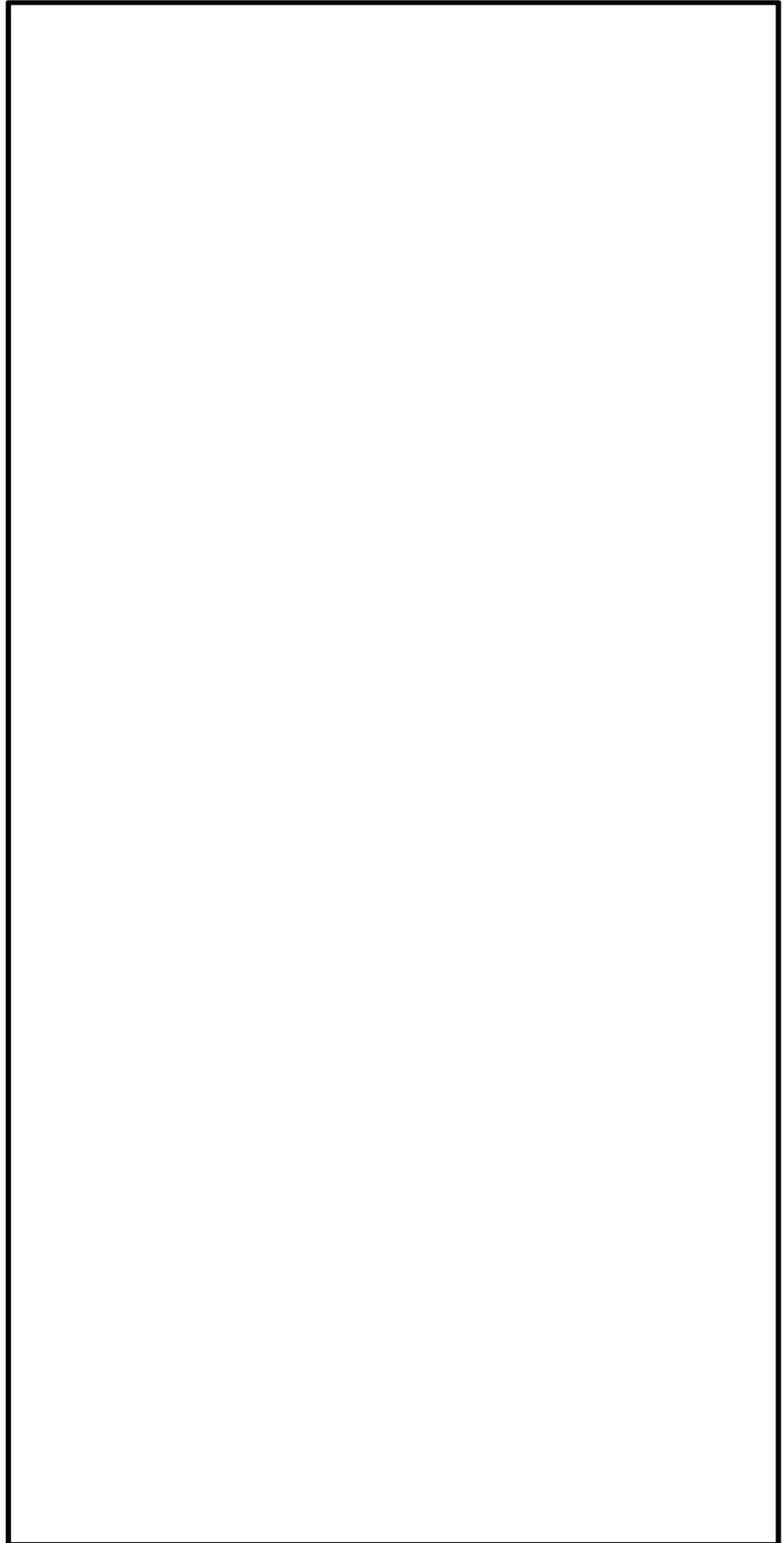


図 3-2 キヤスク容器の解析モデル
(圧力+ボルト初期締付け力作用時)

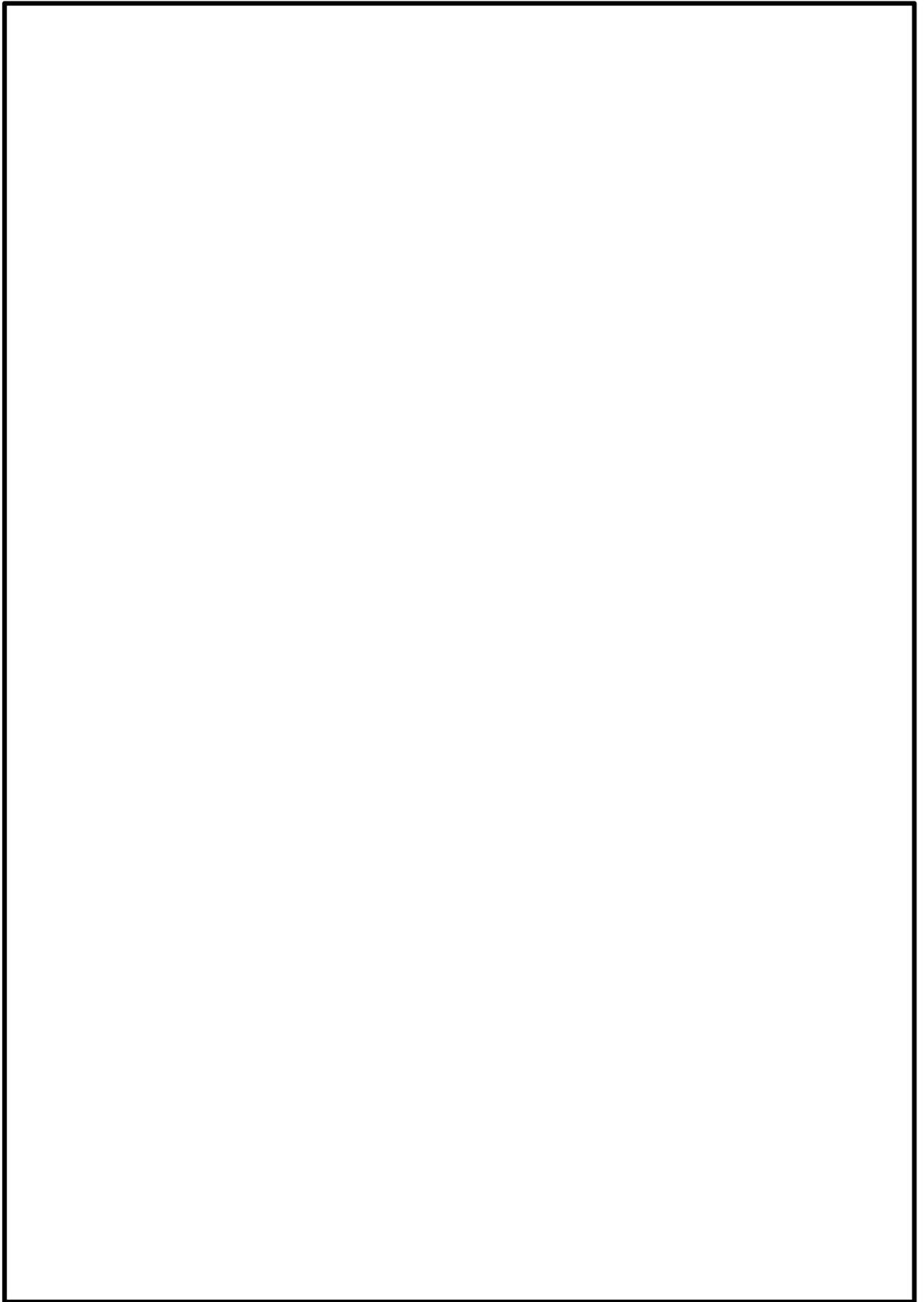
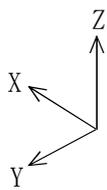


図 3-3 キャスク容器の解析モデル（地震時）

表 1-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
一次 蓋	炭素鋼 (GLF1)	I + S _d *	3	181	①-①'				42	271	②	28	362	②
		I + S _s	3	251	①-①'				42	377	②	28	362	②
胴	炭素鋼 (GLF1)	I + S _d *	4	181	⑤-⑤'				27	271	⑥	123	362	⑥'
		I + S _s	4	251	⑤-⑤'				27	377	⑥	123	362	⑥'
底板	炭素鋼 (GLF1)	I + S _d *	3	181	⑧-⑧'				11	271	⑨	45	362	⑨'
		I + S _s	3	251	⑧-⑧'				11	377	⑨	45	362	⑨'
密 封 シール部	炭素鋼 (GLF1)	I + S _d *	10	181	⑩-⑩'				26	181	⑩	23	181	⑩
		I + S _s	10	181	⑩-⑩'				26	181	⑩	23	181	⑩

表 1-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	支圧応力		
			計算値	許容応力	評価点
底板	炭素鋼 (GLF1)	I + S _d *	1	181	⑧'
		I + S _s	1	377	⑧'

表 1-1(3) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	平均引張応力			平均引張応力 + 曲げ応力		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
一次蓋締付けボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	$I + S_d^*$	272	547	③	335	821	③
		$I + S_s$	272	820	③	335	820	③

表 2-1 固有周期の計算結果
(単位：s)

固有周期
$T = 0.023$

表 3-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合）（1/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分*1					計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	
一次蓋 (中央)	①	P _m						3
		P _L +P _b						10
		P _L +P _b +Q*2						2
		σ_s						—
		σ_p						—
	①'	P _m						3
		P _L +P _b						8
		P _L +P _b +Q*2						2
		σ_s						—
		σ_p						—
一次蓋 (端部)	②	P _L						—
		P _L +P _b						42
		P _L +P _b +Q*2						28
		σ_s						—
		σ_p						—
	②'	P _L						—
		P _L +P _b						33
		P _L +P _b +Q*2						17
		σ_s						—
		σ_p						—
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張 応力						272
		平均引張応力 +曲げ応力						335
胴 (密封シール部)	④	P _m						6
		P _L +P _b						17
		P _L +P _b +Q						12
		σ_s						—
		σ_p						—
	④'	P _m						6
		P _L +P _b						6
		P _L +P _b +Q						10
		σ_s						—
		σ_p						—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：周方向応力

σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} ， $\tau_{t\theta}$ ， $\tau_{\theta n}$ ：せん断応力

*2：S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-1 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴 (中央)	⑤	P _m							4
		P _L +P _b							—
		P _L +P _b +Q*2							7
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑤'	P _m							4
		P _L +P _b							—
		P _L +P _b +Q*2							5
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (下部)	⑥	P _L							—
		P _L +P _b							27
		P _L +P _b +Q*2							93
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑥'	P _L							—
		P _L +P _b							27
		P _L +P _b +Q*2							123
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (上端部)	⑦	P _L							—
		P _L +P _b							2
		P _L +P _b +Q*2							1
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑦'	P _L							—
		P _L +P _b							2
		P _L +P _b +Q*2							2
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} ， $\tau_{t\theta}$ ， $\tau_{\theta n}$ ：せん断応力

*2：S_d*地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キャスク容器の応力計算結果 (貯蔵時：S_s地震力が作用する場合) (1/3)

(単位：MPa)

部位	応力評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋 (中央)	①	P _m							3
		P _L +P _b							10
		P _L +P _b +Q*2							2
		σ_s							—
		σ_p							—
	①'	P _m							3
		P _L +P _b							8
		P _L +P _b +Q*2							2
		σ_s							—
		σ_p							—
一次蓋 (端部)	②	P _L	—						
		P _L +P _b	42						
		P _L +P _b +Q*2	28						
		σ_s	—						
		σ_p	—						
	②'	P _L	—						
		P _L +P _b	33						
		P _L +P _b +Q*2	17						
		σ_s	—						
		σ_p	—						
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張 応力	272						
		平均引張応力 +曲げ応力	335						
胴 (密封シール部)	④	P _m	6						
		P _L +P _b	17						
		P _L +P _b +Q	12						
		σ_s	—						
		σ_p	—						
	④'	P _m	6						
		P _L +P _b	6						
		P _L +P _b +Q	10						
		σ_s	—						
		σ_p	—						

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: せん断応力
 *2: S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴 (中央)	⑤	P _m							4
		P _L +P _b							—
		P _L +P _b +Q*2							7
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑤'	P _m							4
		P _L +P _b							—
		P _L +P _b +Q*2							5
		σ_s							—
		σ_p							—
胴 (下部)	⑥	P _L	—						
		P _L +P _b	27						
		P _L +P _b +Q*2	93						
		σ_s	—						
		σ_p	—						
	⑥'	P _L	—						
		P _L +P _b	27						
		P _L +P _b +Q*2	123						
		σ_s	—						
		σ_p	—						
胴 (上端部)	⑦	P _L	—						
		P _L +P _b	2						
		P _L +P _b +Q*2	1						
		σ_s	—						
		σ_p	—						
	⑦'	P _L	—						
		P _L +P _b	2						
		P _L +P _b +Q*2	2						
		σ_s	—						
		σ_p	—						

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} 、 $\tau_{t\theta}$ 、 $\tau_{\theta n}$ ：せん断応力
 *2：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 3-2 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3/3）

（単位：MPa）

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分*1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
底板 (中央)	⑧	P _m							3
		P _L +P _b							4
		P _L +P _b +Q*2							8
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑧'	P _m							3
		P _L +P _b							3
		P _L +P _b +Q*2							5
		σ_s							—
		σ_p							1
底板 (端部)	⑨	P _L							—
		P _L +P _b							11
		P _L +P _b +Q*2							38
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑨'	P _L							—
		P _L +P _b							11
		P _L +P _b +Q*2							45
		σ_s							—
		σ_p							1
一次蓋 (密封ノール部)	⑩	P _m							10
		P _L +P _b							26
		P _L +P _b +Q							23
		σ_s							—
		σ_p							—
	⑩'	P _m							10
		P _L +P _b							9
		P _L +P _b +Q							12
		σ_s							—
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 τ_{nt} ， $\tau_{t\theta}$ ， $\tau_{\theta n}$ ：せん断応力

*2：S_s地震力のみによる全振幅について示す。

表 4-1 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（1/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	3	251
	①	$P_L + P_b$	10	271
	①'	$P_L + P_b$	8	271
	①	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
	①'	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	42	271
	②'	$P_L + P_b$	33	271
	②	$P_L + P_b + Q^*$	28	362
	②'	$P_L + P_b + Q^*$	17	362
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	272	547
		平均引張応力+ 曲げ応力	335	821
胴 (密封シール部)	④-④'	P_m	6	181
	④	$P_L + P_b$	17	181
	④'	$P_L + P_b$	6	181
	④	$P_L + P_b + Q$	12	181
	④'	$P_L + P_b + Q$	10	181
胴 (中央)	⑤-⑤'	P_m	4	181
	⑤	$P_L + P_b + Q^*$	7	362
	⑤'	$P_L + P_b + Q^*$	5	362

注記 *： S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-1 キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）（2/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
胴 (下部)	⑥	$P_L + P_b$	27	271
	⑥'	$P_L + P_b$	27	271
	⑥	$P_L + P_b + Q^*$	93	362
	⑥'	$P_L + P_b + Q^*$	123	362
胴 (上端部)	⑦	$P_L + P_b$	2	271
	⑦'	$P_L + P_b$	2	271
	⑦	$P_L + P_b + Q^*$	1	362
	⑦'	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
底板 (中央)	⑧-⑧'	P_m	3	181
	⑧'	σ_p	1	181
	⑧	$P_L + P_b$	4	271
	⑧'	$P_L + P_b$	3	271
	⑧	$P_L + P_b + Q^*$	8	362
	⑧'	$P_L + P_b + Q^*$	5	362
底板 (端部)	⑨'	σ_p	1	181
	⑨	$P_L + P_b$	11	271
	⑨'	$P_L + P_b$	11	271
	⑨	$P_L + P_b + Q^*$	38	362
	⑨'	$P_L + P_b + Q^*$	45	362
一次蓋 (密封シール部)	⑩-⑩'	P_m	10	181
	⑩	$P_L + P_b$	26	181
	⑩'	$P_L + P_b$	9	181
	⑩	$P_L + P_b + Q$	23	181
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	12	181

注記 * : S_d^* 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	3	251
	①	$P_L + P_b$	10	377
	①'	$P_L + P_b$	8	377
	①	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
	①'	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	42	377
	②'	$P_L + P_b$	33	377
	②	$P_L + P_b + Q^*$	28	362
	②'	$P_L + P_b + Q^*$	17	362
一次蓋締付け ボルト	③	平均引張応力	272	820
		平均引張応力+ 曲げ応力	335	820
胴 (密封シール部)	④-④'	P_m	6	181
	④	$P_L + P_b$	17	181
	④'	$P_L + P_b$	6	181
	④	$P_L + P_b + Q$	12	181
	④'	$P_L + P_b + Q$	10	181
胴 (中央)	⑤-⑤'	P_m	4	251
	⑤	$P_L + P_b + Q^*$	7	362
	⑤'	$P_L + P_b + Q^*$	5	362

注記 *：S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 4-2 キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/2）

（単位：MPa）

部 位	応力評価点	応力分類	計算値	許容応力
胴 (下部)	⑥	$P_L + P_b$	27	377
	⑥'	$P_L + P_b$	27	377
	⑥	$P_L + P_b + Q^*$	93	362
	⑥'	$P_L + P_b + Q^*$	123	362
胴 (上端部)	⑦	$P_L + P_b$	2	377
	⑦'	$P_L + P_b$	2	377
	⑦	$P_L + P_b + Q^*$	1	362
	⑦'	$P_L + P_b + Q^*$	2	362
底板 (中央)	⑧-⑧'	P_m	3	251
	⑧'	σ_p	1	377
	⑧	$P_L + P_b$	4	377
	⑧'	$P_L + P_b$	3	377
	⑧	$P_L + P_b + Q^*$	8	362
	⑧'	$P_L + P_b + Q^*$	5	362
底板 (端部)	⑨'	σ_p	1	377
	⑨	$P_L + P_b$	11	377
	⑨'	$P_L + P_b$	11	377
	⑨	$P_L + P_b + Q^*$	38	362
	⑨'	$P_L + P_b + Q^*$	45	362
一次蓋 (密封シール部)	⑩-⑩'	P_m	10	181
	⑩	$P_L + P_b$	26	181
	⑩'	$P_L + P_b$	9	181
	⑩	$P_L + P_b + Q$	23	181
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	12	181

注記 * : S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-1 キャスク容器（ボルトを除く。）の疲労解析不要の評価結果

設計・建設規格 PVB-3140	繰返し荷重		設定繰返し回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧→使用圧力→大気圧		100	繰返し数 $N_1=100$	$3S_m$ に対する許容繰返し数 $N_a=3756$	$N_1 < N_a$ であるので本条件を満足
(2)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象 I, II における圧力変動		100	圧力変動振幅 $P=1.0 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m=3.88 \text{ MPa}$	$P < A_m$ であるので本条件を満足
(3)	燃料装荷及び燃料取出しでの 2 点間の温度差		100	温度差 $\Delta T=150 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差許容値 $T=277 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(4)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象 I, II における 2 点間の温度差変動		100	温度差変動振幅 $\Delta T=150 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差変動許容値 $T=277 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(5)	異種材結合部の温度変動		100	温度変動振幅 $\Delta T=150 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T=1185.9 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(6)	機械的荷重の変動	地震力	1×10^4	応力の全振幅 $\Delta \sigma = 123 \text{ MPa}$	1×10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S = 262 \text{ MPa}$	$\Delta \sigma < S$ であるので本条件を満足
				繰返し数 $N_c=10000$	ピーク応力強さに対する許容繰返し回数 $N_a=151811$	繰返し回数と許容繰返し回数の比 $(N_c/N_a) = 0.0659$ $U = 0.132 \leq 1.0$ であるので本条件を満足

表 5-2 疲労累積係数（一次蓋締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (-)
地震時	S_d^*	10000	2	3	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000	2	3	1.00×10^6	0.01
U (地震時)						0.02

表 5-3 疲労累積係数（バルブカバー締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (-)
地震時	S_d^*	10000	1	2	1.00×10^6	0.01
	S_s	10000	1	2	1.00×10^6	0.01
U (地震時)						0.02

表 6-1 貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

設計事象	応力評価点	応力分類	貫通孔を無視した場合の応力強さ (S)	貫通孔部の応力 (S _c)	許容応力
I + S _d *	⑬	P _L + P _b	7	29	271
	⑬	P _L + P _b + Q	7	27	362
I + S _s	⑬	P _L + P _b	7	29	377
	⑬	P _L + P _b + Q	7	27	362

V-2-4-2-3-5 キャスク容器の耐震性についての計算書③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 固有周期	2
2.1 固有周期の計算方法	2
2.2 固有周期の評価	2
3. 応力計算	3
3.1 応力評価点	3
3.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
3.2.1 荷重条件	3
3.2.2 計算方法	3
3.2.3 計算結果	4
3.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	4
3.3.1 荷重条件	4
3.3.2 計算方法	4
3.3.3 計算結果	4
4. 応力の評価	5
4.1 キャスク容器 (ボルトを除く) の応力評価	5
4.2 ボルトの応力評価	5
4.3 特別な応力の評価	5
5. 繰返し荷重の評価	6
5.1 キャスク容器 (ボルトを除く) の評価	6
5.2 ボルトの評価	10
5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討	10
5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析	10
5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析	11
6. 穴の補強	12

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料	13
図 3-1	キャスク容器の応力評価点（面）	14
図 3-2	キャスク容器の解析モデル（圧力+ボルト初期締付け力作用時）	15
図 3-3	キャスク容器の解析モデル（地震時）	16
図 3-4	キャスク容器の解析モデル（自重作用時）	17
表 1-1	計算結果の概要	18
表 2-1	固有周期の計算結果	19
表 3-1	キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	20
表 3-2	キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	24
表 4-1	キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	28
表 4-2	キャスク容器の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	30
表 5-1	キャスク容器（ボルトを除く）の疲労解析不要の評価結果	32
表 5-2	繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）	33
表 5-3	繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）	33
表 6-1	貫通孔部の応力強さ	34

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のキャスク容器に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 固有周期

2.1 固有周期の計算方法

貯蔵容器をはりでモデル化すると、上端自由及び下端固定のはりの固有周期（ T ）は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} T &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L^2}{1.875^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{E \cdot I}} \\ m &= \frac{m_T}{L} \\ I &= \frac{\pi}{64} \cdot (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} T &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L^2}{1.875^2} \cdot \sqrt{\frac{m}{E \cdot I}} \\ m &= \frac{m_T}{L} \\ I &= \frac{\pi}{64} \cdot (d_o^4 - d_i^4) \end{aligned}} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

- L : 貯蔵容器の全長 (m)
- E : 胴の縦弾性係数 (Pa)
- I : 胴の断面二次モーメント (m^4)
- m_T : 貯蔵容器 (内部も含む) の総重量 (kg)
- d_o : 胴の外径 (m)
- d_i : 胴の内径 (m)

2.2 固有周期の評価

2.1 項の計算により得られた固有周期の計算結果を表 2-1 に示す。計算結果より、剛であることを確認した。

3. 応力計算

3.1 応力評価点

キャスク容器の応力評価点（面）を図 3-1 に示す。

3.2 貯蔵時（ S_d *地震力が作用する場合）

3.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧（-0.1 MPa）+ 蓋間圧力（0.4 MPa）+ ボルト初期締付け力 + 地震力 + 自重

3.2.2 計算方法

(1) 一次応力及び一次+二次応力

a. 胴，底板，一次蓋及び一次蓋締付けボルト

(a) 圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 3-2 に示す。

(b) 地震力が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 3-3 に示す。

加速度として次の値を用いる。

$$G_1 = 0.72 \text{ g } (= 7.06 \text{ m/s}^2)$$

$$G_2 = 0.36 \text{ g } (= 3.53 \text{ m/s}^2) \dots\dots\dots (3.1)$$

(c) 自重が作用する場合

解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 3-4 に示す。なお，解析モデル形状は(a)と同一である。

(2) 支圧応力

バスケット底面との接触部の底板に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_g \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで，

- m_g : バスケット及び燃料の質量（= kg）
- G_2 : 鉛直方向加速度（= 1 g + 0.36 g（= 13.34 m/s²））
- A : 接触面積（= mm²）

3.2.3 計算結果

応力計算結果を表 3-1 に示す。

3.3 貯蔵時（S_s地震力が作用する場合）

3.3.1 荷重条件

貯蔵時において S_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

キャスク容器内圧（-0.1 MPa）+ 蓋間圧力（0.4 MPa）+ ボルト初期締付け力 + 地震力 + 自重

3.3.2 計算方法

計算方法は 3.2.2 と同様である。

ただし、

$$G_1 = 1.17 \text{ g} (= 11.48 \text{ m/s}^2)$$

$$G_2 = 0.65 \text{ g} (= 6.38 \text{ m/s}^2) \dots\dots\dots (3.3)$$

また、平均支圧応力算出時の加速度は $G_2 = 1 \text{ g} + 0.65 \text{ g} (= 16.19 \text{ m/s}^2)$ である。

3.3.3 計算結果

応力計算結果を表 3-2 に示す。

4. 応力の評価

4.1 キャスク容器（ボルトを除く）の応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の一次一般膜応力強さ (P_m)、一次局部膜応力強さ (P_L)、一次膜+一次曲げ応力強さ ($P_L + P_b$) 及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力解析による応力強さ ($P_L + P_b + Q$) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針③」5.5 項の各規定を満足する。

4.2 ボルトの応力評価

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均引張応力及び平均引張応力+曲げ応力は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針③」5.5 項の各規定を満足する。

4.3 特別な応力の評価

(1) 純せん断応力

平均せん断応力 (σ_s) を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

(2) 支圧応力

評価結果を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力および S_s 地震力が作用する際の平均支圧応力 (σ_p) は添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

(3) 軸圧縮応力

軸圧縮応力 (σ_b) を評価すべき箇所がないため、評価を省略する。

5. 繰返し荷重の評価

5.1 キヤスク容器（ボルトを除く）の評価

設計・建設規格 PVB-3140 により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(7)に示し、表 5-1 にその評価結果のまとめを示す。なお、燃料装荷・取出しサイクルは通常 1 回であるが、本評価においては 100 回と想定しても条件を満足することを示す。

(1) 設計・建設規格 PVB-3140(1)（大気圧－使用圧力－大気圧の変動）

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数（ N_1 ）は、燃料装荷・取出し想定回数である 100 回として評価する。

$$N_1 = 100 \text{ (回)}$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、設計温度における設計応力強さ $3 \cdot S_m$ (364 MPa) を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数（ N_a ）は、

$$N_a = 3691 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 < N_a$$

であり、条件を満足する。

(2) 設計・建設規格 PVB-3140(2)（燃料装荷・取出し及び耐圧試験等を除く設計事象 I 及び設計事象 II における圧力変動）

燃料装荷、燃料取出しを除く設計事象 I 及び II における圧力変動の全振幅の許容値（ A_{m1} ）は次式で計算する。

$$A_{m1} = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.23 \text{ MPa} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

P : 最高使用圧力 (=1.0 MPa)

S_m : 設計応力強さ (=121 MPa)

S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において 10^6 を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (=86 MPa)

また、(5.1) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値（ A_{m2} ）は次式で計算する。

$$A_{m2} = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(5.1) 式による値を超える実際の圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

(5.1) 式より、圧力変動の全振幅の許容値 (A_{m1}) は、0.23 MPa となる。設計事象 I，設計事象 II 及び地震力が作用する場合における実際の圧力は密封容器のため (5.1) 式による値の 0.23 MPa を超える変動は生じないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし、計 100 回として

(5.2) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$A_{m2} = 3.8 \text{ MPa}$$

となる。

したがって、燃料装荷、燃料取出しを除く設計事象 I，設計事象 II 及び地震力が作用する場合における圧力変動の全振幅を最高使用圧力 ($P (=1.0 \text{ MPa})$) と仮定しても、

$$P < A_{m2}$$

であり、条件を満足する。

(3) 設計・建設規格 PVB-3140(3) (燃料装荷・取出し時の温度差)

キャスク容器の任意の 2 点間の距離 (p) は次式で計算する。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 956 \text{ mm} \dots \dots \dots (5.3)$$

ここで、

R : キャスク容器の平均半径 (=882.5 mm)

t : キャスク容器の板厚 (=259 mm)

キャスク容器の燃料装荷時及び燃料取出し時において、相互の距離が p を超えない任意の 2 点間の温度差の許容値 T は次式で計算する。なお、2 点間の平均温度はキャスク容器の最高使用温度 ($T_{max}=160^\circ\text{C}$) とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 282^\circ\text{C} \dots \dots \dots (5.4)$$

ここで、

E : 2 点間の平均温度における縦弾性係数 (= $1.94 \times 10^5 \text{ MPa}$)

α : 2 点間の平均温度における瞬時熱膨張係数
(= $12.88 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm}^\circ\text{C})$)

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、燃料装荷・取出しの回数 (100 回) を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (=1413 MPa)

したがって、任意の 2 点間において生じる温度差を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T=140^\circ\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(4) 設計・建設規格 PVB-3140(4) (燃料装荷・取出し時を除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱの温度差変動)

燃料装荷, 燃料取出しを除く設計事象Ⅰ及び設計事象Ⅱにおいて, 相互の距離が p を超えない任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅の許容値 (T) は, 次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで,

E, α : 5.1 (3) と同じ

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において, (5.6) 式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合に, これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

$$T' = \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 17.2^\circ\text{C} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここで,

T' : 温度差変動の全振幅 (°C)

S : 5.1 (2) と同じ

設計事象Ⅰ, 設計事象Ⅱ及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので, 任意の 2 点間の温度差の変動が (5.6) 式により計算した値の 17.2 °C を超えることはないと考えられるが, 変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし, 計 100 回として (5.5) 式を用いて評価すると,

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$T = 282 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって, キャスク容器の任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 (ΔT = 140°C) と仮定しても,

$$\Delta T < T$$

であり, 条件を満足する。

(5) 設計・建設規格 PVB-3140(5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

縦弾性係数又は熱膨張係数の値が異なる材料で作られた部分は, 一次蓋と一次蓋排水バルブ部 (一次蓋ボス) の部分である。

一次蓋と一次蓋ボスの温度変動の許容値 T は次式で計算する。なお, 縦弾性係数及び熱膨張係数はキャスク容器の最高使用温度 (T_{max} = 160°C) に対する値とする。

$$T = \frac{S}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} = 63 \text{ }^\circ\text{C} \dots\dots\dots (5.7)$$

ここで、

S : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、 10^6 を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (=86 MPa)

E_1 : 一次蓋の縦弾性係数 (= 1.94×10^5 MPa)

E_2 : 一次蓋ボスの縦弾性係数 (= 1.85×10^5 MPa)

α_1 : 一次蓋の瞬時熱膨張係数 (= 12.88×10^{-6} mm/ (mm°C))

α_2 : 一次蓋ボスの瞬時熱膨張係数 (= 17.16×10^{-6} mm/ (mm°C))

また、(5.7) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (T) は次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \dots \dots \dots (5.8)$$

ここで、

S_a : 設計・建設規格 添付 4-2 3.1 において、(5.7) 式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合に、これに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

設計事象 I , 設計事象 II 及び地震力が作用する場合においてキャスク容器は密封容器でありかつ温度変動する加熱源を収納していないので、温度変動は、気温変動によるものと考え、(5.7) 式により計算した値の 63°C を超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷・取出しサイクルにおいて 1 回とし、計 100 回として評価すると、

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$T = 1045 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、設計事象 I , 設計事象 II 及び地震力が作用する場合において生じる温度の変動を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T < T$$

であり、条件を満足する。

(6) 設計・建設規格 PVB-3140(6) (機械荷重変動)

地震力により発生する応力について、表 5-1 に示すとおり応力の全振幅は、 S_d^* 及び S_s 地震による繰返し回数 10000 回に対する許容繰返しピーク応力強さ (1754 MPa) を下回っている。また、地震力による疲労累積係数は 1.0 を下回っていることから、

$$\Delta \sigma \leq S$$

である。

(7) 検討結果

以上の(1)から(6)より、設計・建設規格 PVB-3140 の規定を全て満足しているので、疲労解析を必要としない。

5.2 ボルトの評価

5.1 項において疲労評価が不要となる条件を満足することから，一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトについて，地震動のみによる疲れ累積係数が 1.0 以下となることを示す。

5.2.1 設計・建設規格 PVB-3122 及び添付 4-2 3.4 に対する検討

- (1) 一次蓋締付けボルト及びバルブカバー締付けボルトの最小引張強さは 1000 MPa であり，設計・建設規格 PVB-3122(2)に従い，設計疲労線図として設計・建設規格 添付 4-2 3.4 に示されるものを使用する。
- (2) ねじは三角ねじであり，ねじ底部の半径は一次蓋締付けボルトが 0.4 mm，バルブカバー締付けボルトが 0.2mm であって 0.07mm より大である。
- (3) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は，

一次蓋締付けボルト：
$$\frac{2.0}{25.5} = 0.078$$

バルブカバー締付けボルト：
$$\frac{1.0}{9.5} = 0.105$$

であって，0.06 以上である。

5.2.2 一次蓋締付けボルトの疲労解析

一次蓋締付けボルトに生じる繰返しピーク応力強さは次式で計算する。

$$S_p = K \cdot \frac{m_\ell \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで，

S_p : ピーク応力強さ (MPa)

K : 一次蓋締付けボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)

m_ℓ : 一次蓋の質量 (= kg)

G_2 : 鉛直方向加速度

S_d^* 3.53 m/s²

S_s 6.38 m/s²

A : 全数のボルト最小断面積 (= mm²)

また，繰返しピーク応力強さは次式で計算する。

$$S_{\ell} = \frac{1}{2} \cdot S_p \dots\dots\dots (5.10)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 (4) のとおり，(2.07×10⁵) と材料の使用温度における縦弾性係数 (E = 1.83×10⁵ MPa) の比を繰返しピーク応力強さに乗じて補正する。

$$S_{\ell}' = S_{\ell} \cdot \frac{2.07 \times 10^5}{E} \dots\dots\dots (5.11)$$

設計・建設規格 添付 4-2 3.4 により，補正した繰返しピーク応力強さ (S_{ℓ}') に対する許容繰返し回数を求める。繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 5-2 に示すとおりとなり，地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため，添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

5.2.3 バルブカバー締付けボルトの疲労解析

バルブカバー締付けボルトの疲労解析は一次蓋締付けボルトの場合と同様である。

ただし，

m_{ℓ} : バルブカバーの質量 (= kg)

A : 全数のボルト最小断面積 (= mm²)

である。

繰返し回数と許容繰返し回数との比は表 5-3 に示すとおりである。

したがって，地震時における疲労累積係数の和は 1.0 以下となるため添付書類「V-2-4-2-3-1 キャスク容器の応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

6. 穴の補強

設計・建設規格 PVB-3520 により貫通孔の補強が不要となることを示す。

貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で計算する。

$$S_c = K \cdot S \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、

S_c : 貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0 (引用文献(5)参照)) (-)

S : 貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) は表 4-1 及び表 4-2 より求められる。

したがって、貫通孔部の応力強さ (S_c) は表 6-1 に示すとおりとなり、すべて許容応力を満足するため、貫通孔の補強は不要となる。

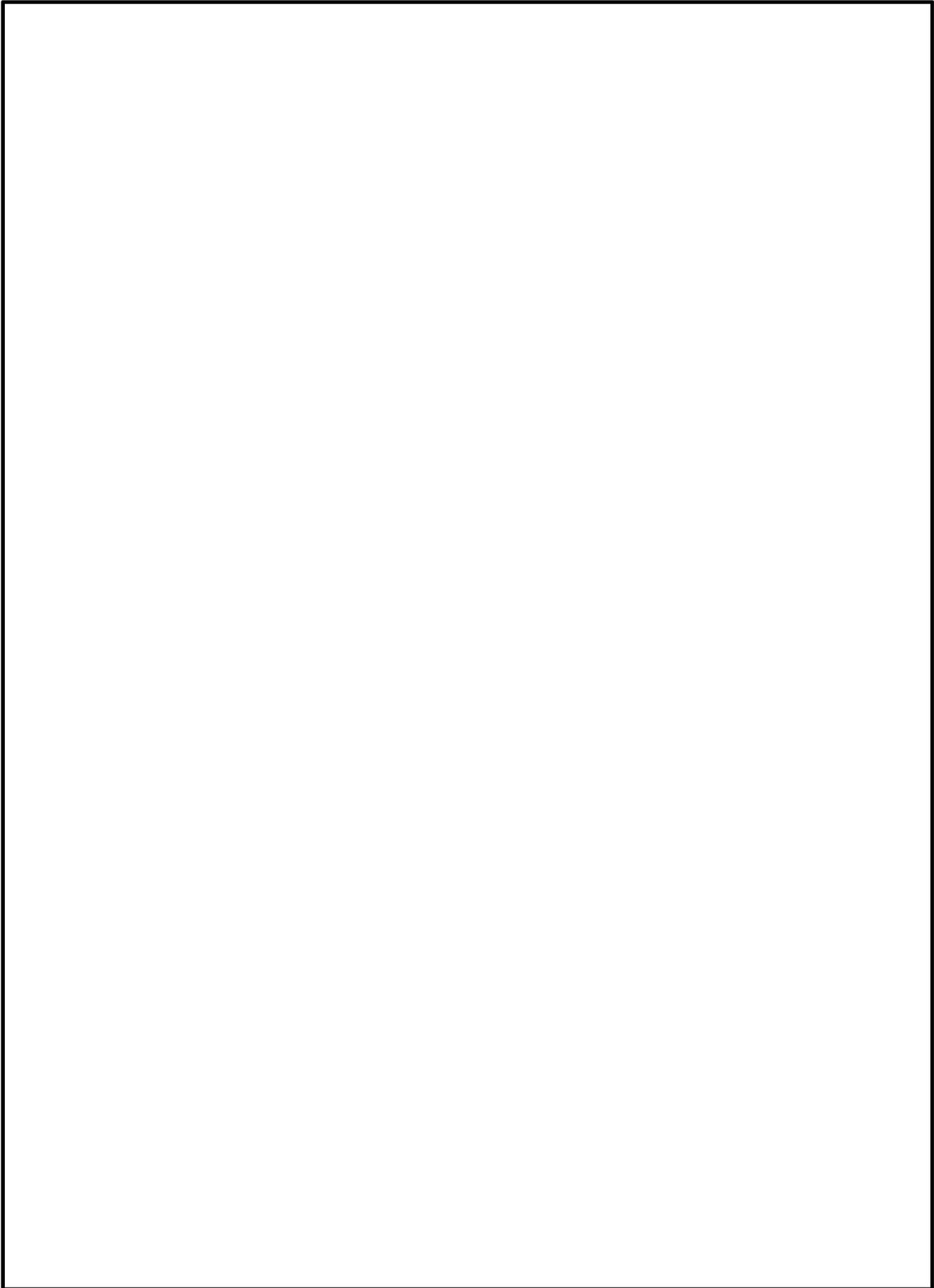


図 1-1 形状・寸法・材料

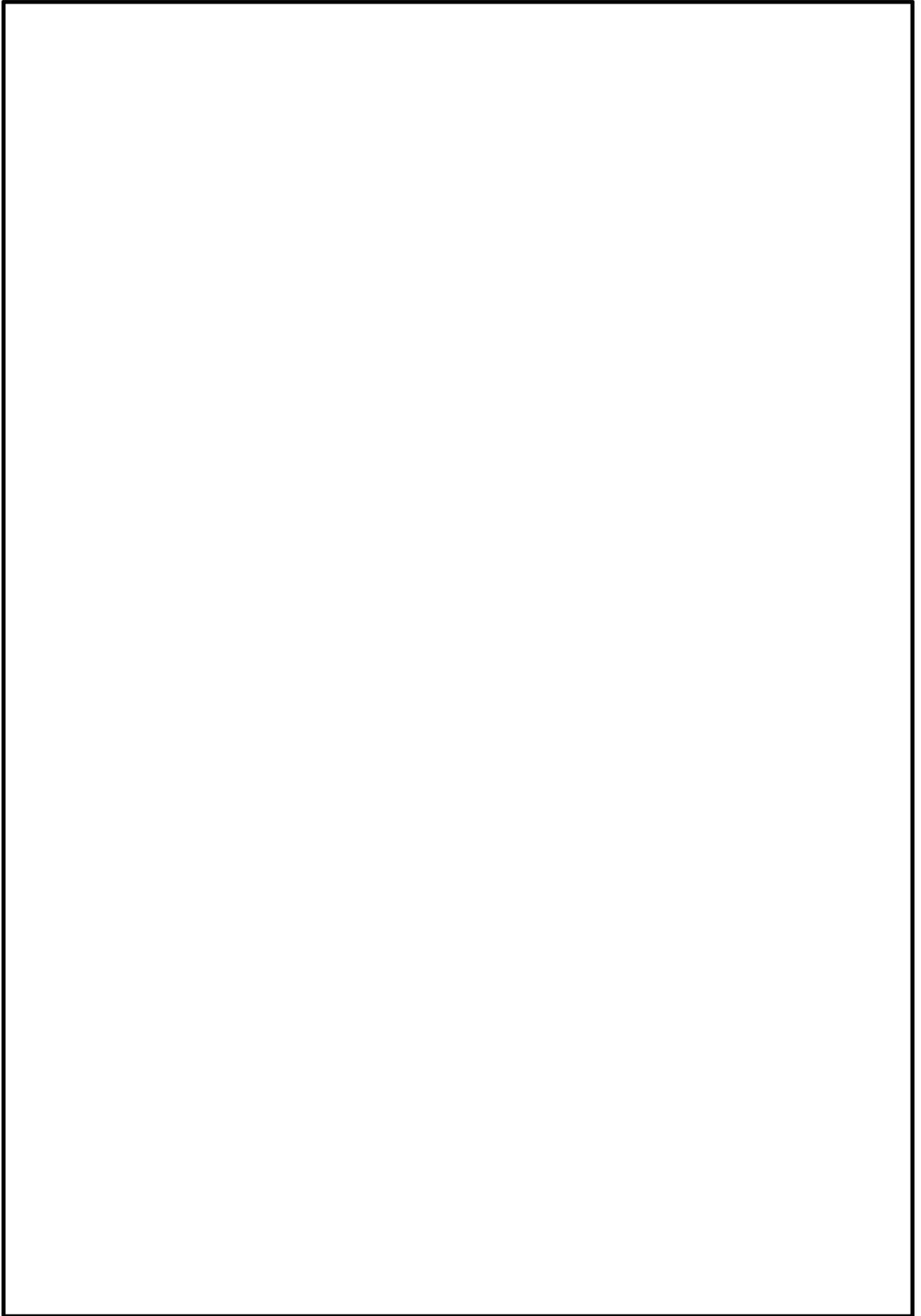


図 3-1 キャスク容器の応力評価点 (面)

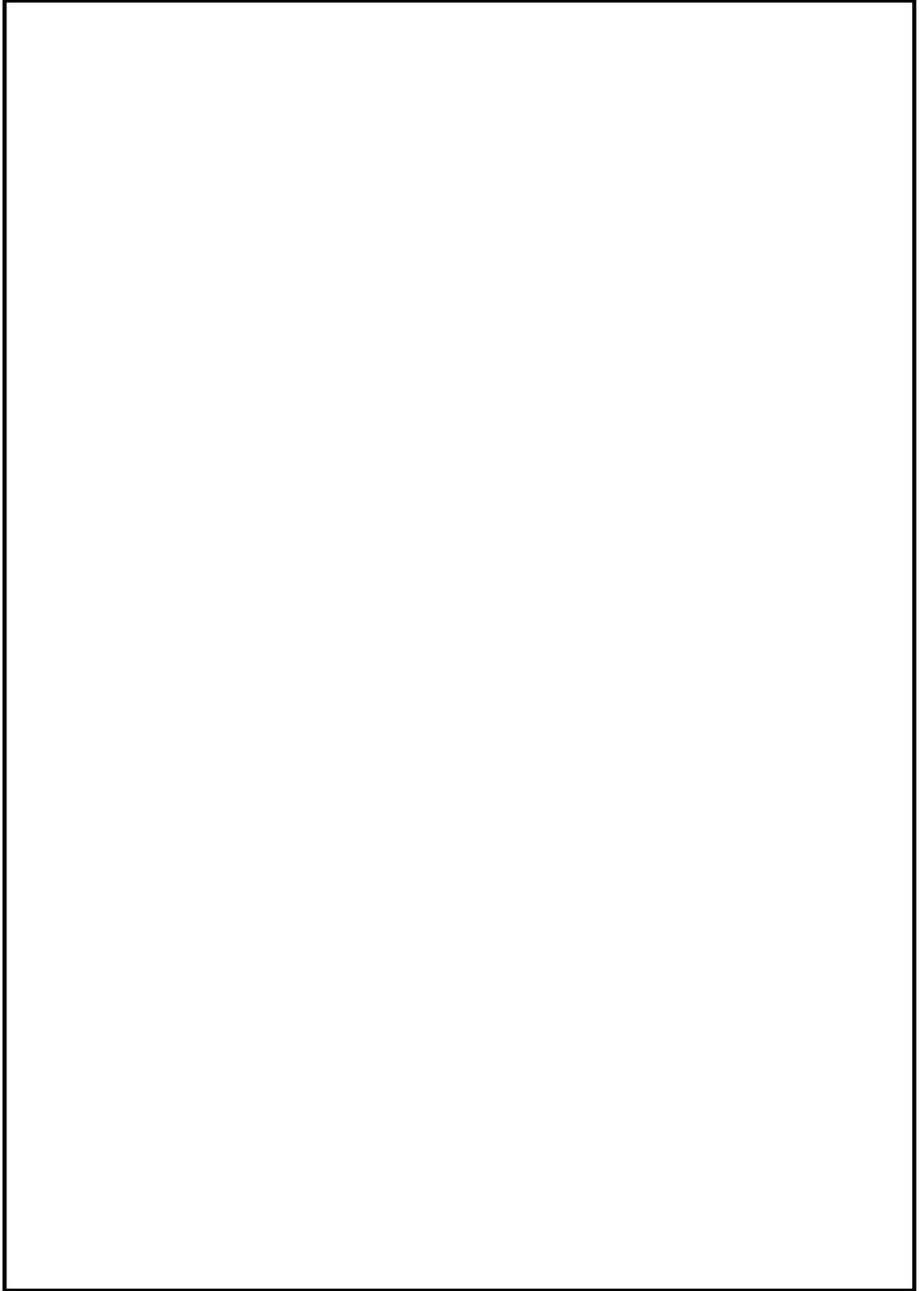


図 3-2 キャスク容器の解析モデル（圧力+ボルト初期締付け力作用時）

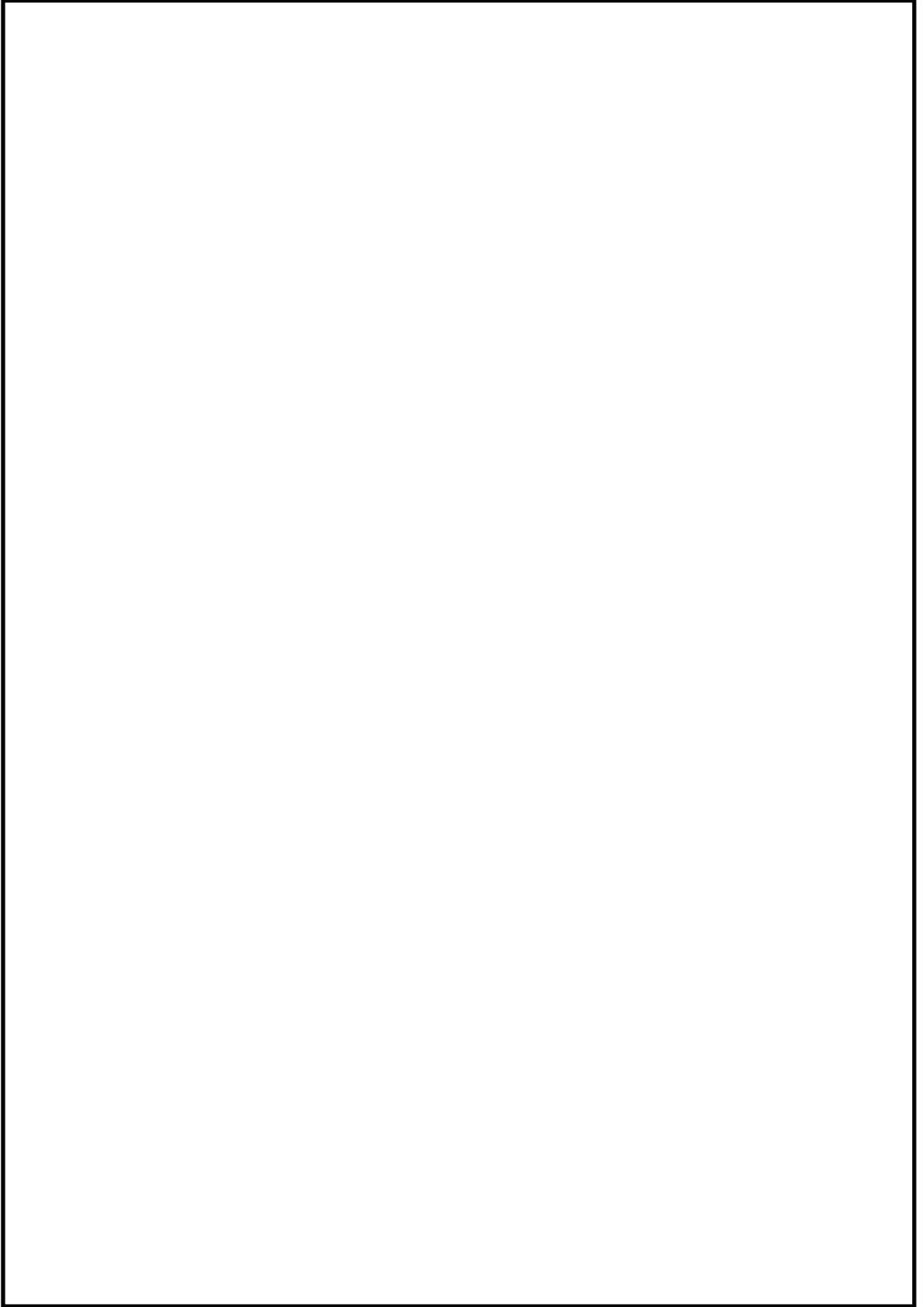


図 3-3 キャスク容器の解析モデル（地震時）

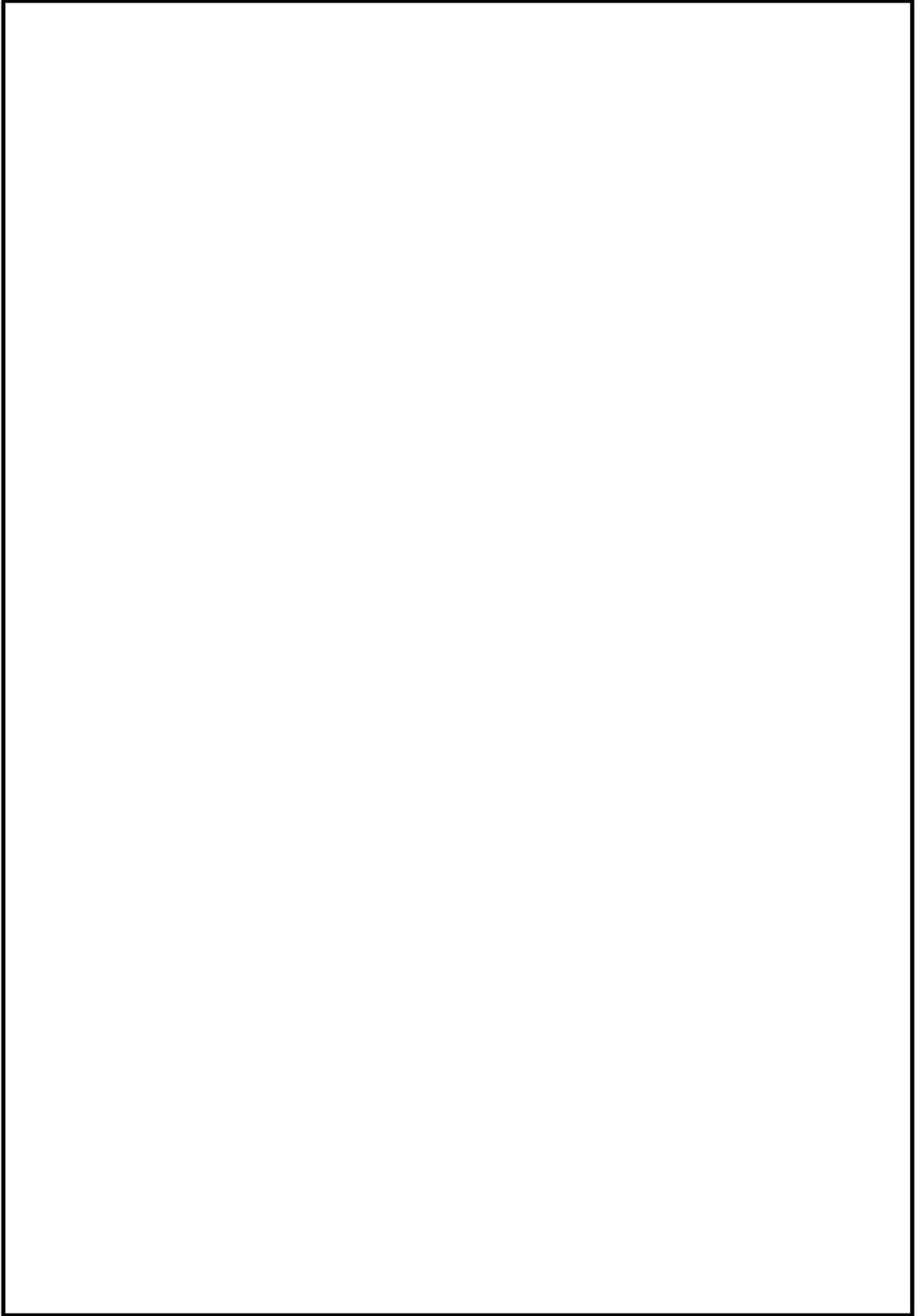


図 3-4 キャスク容器の解析モデル（自重作用時）

表 1-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次局部膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ		
			計算値	許容 応力	評価点 (面)	計算値	許容 応力	評価点 (面)	計算値	許容 応力	評価点 (面)	計算値	許容 応力	評価点 (面)
一次蓋	GLF1	I + S _d *	2	182	①-①'		7	273	①	1*	364	①		
		I + S _s	2	251	①-①'		7	377	①	1*	364	②'		
胴	GLF1	I + S _d *	3	182	④'		13	273	⑤'	29*	364	⑤'		
		I + S _s	3	251	④'		22	377	⑤'	48*	364	⑤'		
底 板	GLF1	I + S _d *	2	182	⑥-⑥'		33	273	⑦'	62*	364	⑦'		
		I + S _s	3	251	⑥-⑥'		53	377	⑦'	102*	364	⑦'		
密 封 シール部	GLF1	I + S _d *	4	182	⑧		9	182	⑧	1*	182	⑧		
		I + S _s	4	182	⑧		9	182	⑧	1*	182	⑧		

注記 *：地震力のみによる全振幅を示す。

表 1-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	平均引張応力			平均引張応力+曲げ応力		
			計算値	許容応力	評価点 (面)	計算値	許容応力	評価点 (面)
一次蓋締付け ボルト	SNB23-3	I + S _d *	267	550	③	276	826	③
		I + S _s	267	825	③	279	825	③

表 1-1(3) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	支 圧 応 力		
			計算値	許容応力	評価点 (面)
一次蓋	GLF1	$I + S_d^*$			
		$I + S_s$			
胴	GLF1	$I + S_d^*$			
		$I + S_s$			
底板	GLF1	$I + S_d^*$	7	182	⑥
		$I + S_s$	9	377	⑥

表 2-1 固有周期の計算結果

(単位：s)

固有周期
$T = 0.024$

表 3-1 キヤスク容器の応力計算結果 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合) (1/4)
(単位: MPa)

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
一次蓋	①	P_m							2
		P_L+P_b							7
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	①'	P_m							2
		P_L+P_b							6
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	②	P_m							—
		P_L+P_b							6
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
	②'	P_m							—
		P_L+P_b							7
		P_L+P_b+Q *2							1
		σ_p							—
一次蓋 縮付けボルト	③	平均引張応力							267
		平均引張応力 + 曲げ応力							276
胴	④	P_m							2
		P_L+P_b							—
		P_L+P_b+Q *2							2
		σ_p							—
	④'	P_m							3
		P_L+P_b							—
		P_L+P_b+Q *2							3
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 3-1 キヤスク容器の応力計算結果 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合) (2/4)
(単位: MPa)

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1					計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	
胴	⑤	P_m						—
		P_L+P_b						6
		P_L+P_b+Q *2						15
		σ_p						—
	⑤'	P_m						—
		P_L+P_b						13
		P_L+P_b+Q *2						29
		σ_p						—
底板	⑥	P_m						2
		P_L+P_b						2
		P_L+P_b+Q *2						5
		σ_p						7
	⑥'	P_m						2
		P_L+P_b						3
		P_L+P_b+Q *2						6
		σ_p						—
	⑦	P_m						—
		P_L+P_b						20
		P_L+P_b+Q *2						38
		σ_p						—
	⑦'	P_m						—
		P_L+P_b						33
		P_L+P_b+Q *2						62
		σ_p						—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 3-1 キヤスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合）（3/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
密封 シール部	⑧	P _m							4
		P _L +P _b							9
		P _L +P _b +Q *2							1
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	⑪'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	⑫'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P _m							—
		P _L +P _b							25
		P _L +P _b +Q *2							44
		σ_p							—
	⑬'	P _m							—
		P _L +P _b							62
		P _L +P _b +Q *2							126
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力
*2：S_d*地震力のみによる全振幅について示す

表 3-1 キャスク容器の応力計算結果 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合) (4/4)
(単位: MPa)

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P_m						—	
		P_L+P_b						10	
		P_L+P_b+Q *2						17	
		σ_p						—	
	⑭'	P_m						—	
		P_L+P_b						50	
		P_L+P_b+Q *2						100	
		σ_p						—	
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P_m						—	
		P_L+P_b						1	
		P_L+P_b+Q *2						1	
		σ_p						—	
	⑮'	P_m						—	
		P_L+P_b						1	
		P_L+P_b+Q *2						1	
		σ_p						—	
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P_m						—	
		P_L+P_b						52	
		P_L+P_b+Q *2						98	
		σ_p						—	
	⑯'	P_m						—	
		P_L+P_b						51	
		P_L+P_b+Q *2						114	
		σ_p						—	

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_d *地震力のみによる全振幅について示す

表 3-2 キャスク容器の応力計算結果 (貯蔵時: S_s 地震力が作用する場合) (1/4)
(単位: MPa)

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1					計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	
一次蓋	①	P_m						2
		P_L+P_b						7
		P_L+P_b+Q *2						1
		σ_p						—
	①'	P_m						2
		P_L+P_b						6
		P_L+P_b+Q *2						1
		σ_p						—
	②	P_m						—
		P_L+P_b						6
		P_L+P_b+Q *2						1
		σ_p						—
	②'	P_m						—
		P_L+P_b						7
		P_L+P_b+Q *2						1
		σ_p						—
一次蓋 縮付けボルト	③	平均引張応力						267
		平均引張応力 + 曲げ応力						279
胴	④	P_m						3
		P_L+P_b						—
		P_L+P_b+Q *2						3
		σ_p						—
	④'	P_m						3
		P_L+P_b						—
		P_L+P_b+Q *2						5
		σ_p						—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_s 地震力のみによる全振幅について示す

表 3-2 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
胴	⑤	P _m							—
		P _L +P _b							11
		P _L +P _b +Q *2							24
		σ_p							—
	⑤'	P _m							—
		P _L +P _b							22
		P _L +P _b +Q *2							48
		σ_p							—
底板	⑥	P _m							3
		P _L +P _b							4
		P _L +P _b +Q *2							7
		σ_p							9
	⑥'	P _m							3
		P _L +P _b							5
		P _L +P _b +Q *2							10
		σ_p							—
	⑦	P _m							—
		P _L +P _b							32
		P _L +P _b +Q *2							63
		σ_p							—
	⑦'	P _m							—
		P _L +P _b							53
		P _L +P _b +Q *2							102
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力
 *2：S_s地震力のみによる全振幅について示す

表3-2 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（3/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
密封 シール部	⑧	P _m							4
		P _L +P _b							9
		P _L +P _b +Q *2							1
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	⑪'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							2
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							2
		σ_p							—
	⑫'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							2
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P _m							—
		P _L +P _b							39
		P _L +P _b +Q *2							72
		σ_p							—
	⑬'	P _m							—
		P _L +P _b							103
		P _L +P _b +Q *2							207
		σ_p							—

注記 *1: σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
*2: S_s地震力のみによる全振幅について示す

表3-2 キャスク容器の応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（4/4）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 *1						計算値
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$	
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P _m							—
		P _L +P _b							13
		P _L +P _b +Q *2							27
		σ_p							—
	⑭'	P _m							—
		P _L +P _b							80
		P _L +P _b +Q *2							160
		σ_p							—
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
	⑮'	P _m							—
		P _L +P _b							1
		P _L +P _b +Q *2							1
		σ_p							—
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P _m							—
		P _L +P _b							84
		P _L +P _b +Q *2							162
		σ_p							—
	⑯'	P _m							—
		P _L +P _b							88
		P _L +P _b +Q *2							188
		σ_p							—

注記 *1： σ_n ：評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ ：円周方向応力
 σ_t ：評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$ ：評価断面上のせん断応力
*2： S_s地震力のみによる全振幅について示す

表 4-1 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（1/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋	①-①'	P_m	2	182
	①	P_L+P_b	7	273
	①'		6	273
	①	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	①'		1	364
	②	P_L+P_b	6	273
	②'		7	273
	②	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
②'	1		364	
一次蓋 締めボルト	③	平均引張応力	267	550
		平均引張応力 + 曲げ応力	276	826
胴	④	P_m	2	182
	④'		3	182
	④	$P_L+P_b+Q^*$	2	364
	④'		3	364
	⑤	P_L+P_b	6	273
	⑤'		13	273
	⑤	$P_L+P_b+Q^*$	15	364
	⑤'		29	364
底板	⑥-⑥'	P_m	2	182
	⑥	σ_p	7	182
	⑥	P_L+P_b	2	273
	⑥'		3	273
	⑥	$P_L+P_b+Q^*$	5	364
	⑥'		6	364
	⑦	P_L+P_b	20	273
	⑦'		33	273
	⑦	$P_L+P_b+Q^*$	38	364
	⑦'		62	364

注記 * : S_d *地震力のみによる全振幅について評価する

表 4-1 キヤスク容器の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）（2/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
密封 シール部	⑧	P_m	4	182
		P_L+P_b	9	182
		$P_L+P_b+Q^*$	1	182
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P_L+P_b	1	273
	⑪'		1	273
	⑪	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑪'		1	364
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P_L+P_b	1	273
	⑫'		1	273
	⑫	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑫'		1	364
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P_L+P_b	25	273
	⑬'		62	273
	⑬	$P_L+P_b+Q^*$	44	364
	⑬'		126	364
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P_L+P_b	10	273
	⑭'		50	273
	⑭	$P_L+P_b+Q^*$	17	364
	⑭'		100	364
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P_L+P_b	1	273
	⑮'		1	273
	⑮	$P_L+P_b+Q^*$	1	364
	⑮'		1	364
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P_L+P_b	52	273
	⑯'		51	273
	⑯	$P_L+P_b+Q^*$	98	364
	⑯'		114	364

注記 * : S_d *地震力のみによる全振幅について評価する

表 4-2 キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（1/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋	①-①'	P _m	2	251
	①	P _L +P _b	7	377
	①'		6	377
	①	P _L +P _b +Q *	1	364
	①'		1	364
	②	P _L +P _b	6	377
	②'		7	377
	②	P _L +P _b +Q *	1	364
②'	1		364	
一次蓋 締めボルト	③	平均引張応力	267	825
		平均引張応力 + 曲げ応力	279	825
胴	④	P _m	3	251
	④'		3	251
	④	P _L +P _b +Q *	3	364
	④'		5	364
	⑤	P _L +P _b	11	377
	⑤'		22	377
	⑤	P _L +P _b +Q *	24	364
	⑤'		48	364
底板	⑥-⑥'	P _m	3	251
	⑥	σ _p	9	377
	⑥	P _L +P _b	4	377
	⑥'		5	377
	⑥	P _L +P _b +Q *	7	364
	⑥'		10	364
	⑦	P _L +P _b	32	377
	⑦'		53	377
	⑦	P _L +P _b +Q *	63	364
	⑦'		102	364

注記 * : S_s地震力のみによる全振幅について評価する

表 4-2 キャスク容器の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）（2/2）
（単位：MPa）

部 位	評価点 (面)	応力分類	計算値	許容応力
密封 シール部	⑧	P _m	4	182
		P _L +P _b	9	182
		P _L +P _b +Q *	1	182
上部 トラニオン 取付部 (下側)	⑪	P _L +P _b	1	377
	⑪'		1	377
	⑪	P _L +P _b +Q *	1	364
	⑪'		2	364
上部 トラニオン 取付部 (上側)	⑫	P _L +P _b	1	377
	⑫'		1	377
	⑫	P _L +P _b +Q *	2	364
	⑫'		2	364
下部 トラニオン 取付部 (上側)	⑬	P _L +P _b	39	377
	⑬'		103	377
	⑬	P _L +P _b +Q *	72	364
	⑬'		207	364
下部 トラニオン 取付部 (下側)	⑭	P _L +P _b	13	377
	⑭'		80	377
	⑭	P _L +P _b +Q *	27	364
	⑭'		160	364
上部 トラニオン 取付部 (側面)	⑮	P _L +P _b	1	377
	⑮'		1	377
	⑮	P _L +P _b +Q *	1	364
	⑮'		1	364
下部 トラニオン 取付部 (側面)	⑯	P _L +P _b	84	377
	⑯'		88	377
	⑯	P _L +P _b +Q *	162	364
	⑯'		188	364

注記 * : S_s地震力のみによる全振幅について評価する

表 5-1 キャスク容器（ボルトを除く）の疲労解析不要の評価結果

設計・建設規格 PVB-3140	繰返し荷重		設定 繰返し回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧→使用圧力→大気圧		100	繰返し数 $N_1=100$	$3S_m$ に対する許容繰返し数 $N_a=3691$	$N_1 < N_a$ であるので本条件を満足
(2)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象 I, II における圧力変動		100	圧力変動振幅 $P=1.0$ MPa	圧力変動許容値 $A_{m2}=3.8$ MPa	$P < A_{m2}$ であるので本条件を満足
(3)	燃料装荷及び燃料取出しでの 2 点間の温度差		100	温度差 $\Delta T=140$ °C	温度差許容値 $T=282$ °C	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(4)	燃料装荷及び燃料取出しを除く設計事象 I, II における 2 点間の温度差変動		100	温度差変動振幅 $\Delta T=140$ °C	温度差変動許容値 $T=282$ °C	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(5)	異種材結合部の温度変動		100	温度変動振幅 $\Delta T=140$ °C	温度変動許容値 $T=1045$ °C	$\Delta T < T$ であるので本条件を満足
(6)	機械的荷重の変動	地震力	1×10^4	応力の全振幅 $S_{d^*} : \Delta \sigma = 126$ MPa $S_s : \Delta \sigma = 207$ MPa	1×10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S = 262$ MPa	$\Delta \sigma \leq S$ であるので本条件を満足
				繰返し数 $N_c=10000$	ピーク応力強さに対する許容繰返し回数 $S_{d^*} : N_a=139103$ $S_s : N_a=22160$	繰返し回数と許容繰返し回数の比 (N_c/N_a) $S_{d^*} : 0.0719$ $S_s : 0.452$ $U=0.524 \leq 1.0$ であるので本条件を満足

表 5-2 繰返し回数と許容繰返し回数（一次蓋締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (-)
地震時	S_d^*	60	4	5	1.00×10^6	6.00×10^{-5}
	S_s	60	7	8	1.00×10^6	6.00×10^{-5}
U (地震時)						1.20×10^{-4}

表 5-3 繰返し回数と許容繰返し回数（バルブカバー締付けボルト）

事象		繰返し数 N_c (回)	繰返しピーク 応力強さ S_ℓ (MPa)	縦弾性係数を補正 した繰返しピーク 応力強さ S_ℓ' (MPa)	許容繰返 し回数 N_a (回)	繰返し回数と許容 繰返し回数の比 N_c/N_a (-)
地震時	S_d^*	60	1	2	1.00×10^6	6.00×10^{-5}
	S_s	60	2	3	1.00×10^6	6.00×10^{-5}
U (地震時)						1.20×10^{-4}

表 6-1 貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

設計事象	応力分類	貫通孔を無視した 場合の応力強さ (S)	貫通孔部の応力 (S_c)	許容応力
I + S _d *	P _L +P _b	7	28	273
	P _L +P _b +Q*	1	4	364
I + S _s	P _L +P _b	7	28	377
	P _L +P _b +Q*	1	4	364

注記 *：地震力のみによる全振幅を示す。

V-2-4-2-3-6 バスケットの耐震性についての計算書①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	4
3. 応力の評価	5
3.1 応力強さの評価	5
3.2 特別な応力の評価	5
3.2.1 純せん断応力	5
3.2.2 支圧応力	5
3.2.3 座屈応力	5

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料	6
図 2-1	バスケットの応力評価点(面)	7
図 2-2	バスケットの解析モデル	8
図 2-3	サポートガイドの解析モデル	10
表 1-1	計算結果の概要	11
表 2-1	S_d^* 地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果	12
表 2-2	S_s 地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果	14
表 3-1	バスケットの応力評価 (貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合)	16
表 3-2	バスケットの応力評価 (貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合)	17

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点(面)を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

バスケットの応力評価点(面)を図 2-1 に示す。

2.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)

2.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重

2.2.2 計算方法

(1) チャンネル, サポートブロック, 補強板及び仕切板

a. 一次応力強さ

(a) 鉛直方向 (Z 方向) の加速度による応力

鉛直方向加速度により発生するバスケット軸方向の応力 (σ_y) は次式で表される。

$$\sigma_y = -\rho \cdot G_1 \cdot L$$

ここで, ρ : 材料の密度 ($=2.70 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)

G_1 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

L : バスケット全長 ($=4495 \text{ mm}$)

他の応力成分は零である。

ただし, $G_1 = 9.81 + \alpha_v$

α_v : 鉛直方向設計加速度 ($=C_v g = 6.38 \text{ m/s}^2$)

(b) 水平方向 (X 方向または Y 方向) の加速度による応力

解析コード「ABAQUS」の二次元平面固体(連続体)要素及びはり要素による解析モデルを図 2-2(1)及び図 2-2(2)に示す。

各部材間は相互の接触を考慮し, サポートブロックは内胴に設置されているサポートガイド接触面と接触境界を設けている。加速度は X 方向または Y 方向に作用されるものとし, その大きさは以下の通りとする。

X 方向加速度 : $G_2 (= \alpha_H)$

Y 方向加速度 : $G_3 (= \alpha_H)$

ただし, α_H : 水平方向設計加速度 ($=C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2$)

b. 支圧応力

水平方向加速度によりサポートブロックにおいてサポートガイドとの接触部に発生する平均支圧応力 (σ_p) は次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{W \cdot \alpha_H}{4 \cdot A}$$

ここで、W : バスケット+使用済燃料(61体)の質量 (=25200 kg)

A : サポートガイドとの接触面積 (=1.76×10⁵ mm²)

α_H : a. と同じ

c. 座屈応力

チャンネル及び仕切板に発生する圧縮応力は a. と同様にして求められる。

(2) サポートガイド

a. 一次応力強さ

解析コード「ABAQUS」の二次元平面固体(連続体)要素による解析モデルを図3-3に示す。

水平方向(X方向またはY方向)に加速度がバスケットに作用する場合、サポートガイド1個に作用する貯蔵容器軸方向単位長さ当たりの荷重は次式で与えられる。

$$F_X = \frac{W \cdot G_2}{4 \cdot L_S}$$

$$F_Y = \frac{W \cdot G_3}{4 \cdot L_S}$$

ここで、 F_X : X方向荷重 (N/mm)

F_Y : Y方向荷重 (N/mm)

W : バスケット+使用済燃料(61体)の質量 (=25200 kg)

G_2 : X方向加速度 (= $\alpha_H = 11.48 \text{ m/s}^2$)

G_3 : Y方向加速度 (= $\alpha_H = 11.48 \text{ m/s}^2$)

L_S : サポートガイドの長さ (=4350 mm)

したがって、

$$F_X = 16.6 \text{ N/mm}, \quad F_Y = 16.6 \text{ N/mm}$$

内胴との溶接部(コーナー)を拘束する。

(3) サポートガイド溶接部

a. 平均せん断応力

サポートガイド溶接部において発生する平均せん断応力(σ_s)は次式で表される。

$$\sigma_s = \frac{W \cdot G_2}{4 \cdot A} \quad \text{または}$$

$$\sigma_s = \frac{W \cdot G_3}{4 \cdot A}$$

ここで, W, G_2, G_3 : (2)と同じ

A : サポートガイド溶接部の断面積 ($=4.31 \times 10^4 \text{mm}^2$)

(4) 底板

a. 支圧応力

底板底面に発生する平均支圧応力(σ_p)は次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{W \cdot G_1}{A}$$

ここで, W : (2)と同じ

G_1 : (1)と同じ

A : 底板底面のキャスク容器との接触面積 ($=1.17 \times 10^6 \text{mm}^2$)

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

3. 応力の評価

3.1 応力強さの評価

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の一次一般膜応力強さ(P_m)及び一次膜+一次曲げ応力強さ($P_m + P_b$)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.2 特別な応力の評価

3.2.1 純せん断応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の平均せん断応力(σ_s)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.2.2 支圧応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の平均支圧応力(σ_p)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.2.3 座屈応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の座屈応力(σ_b)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

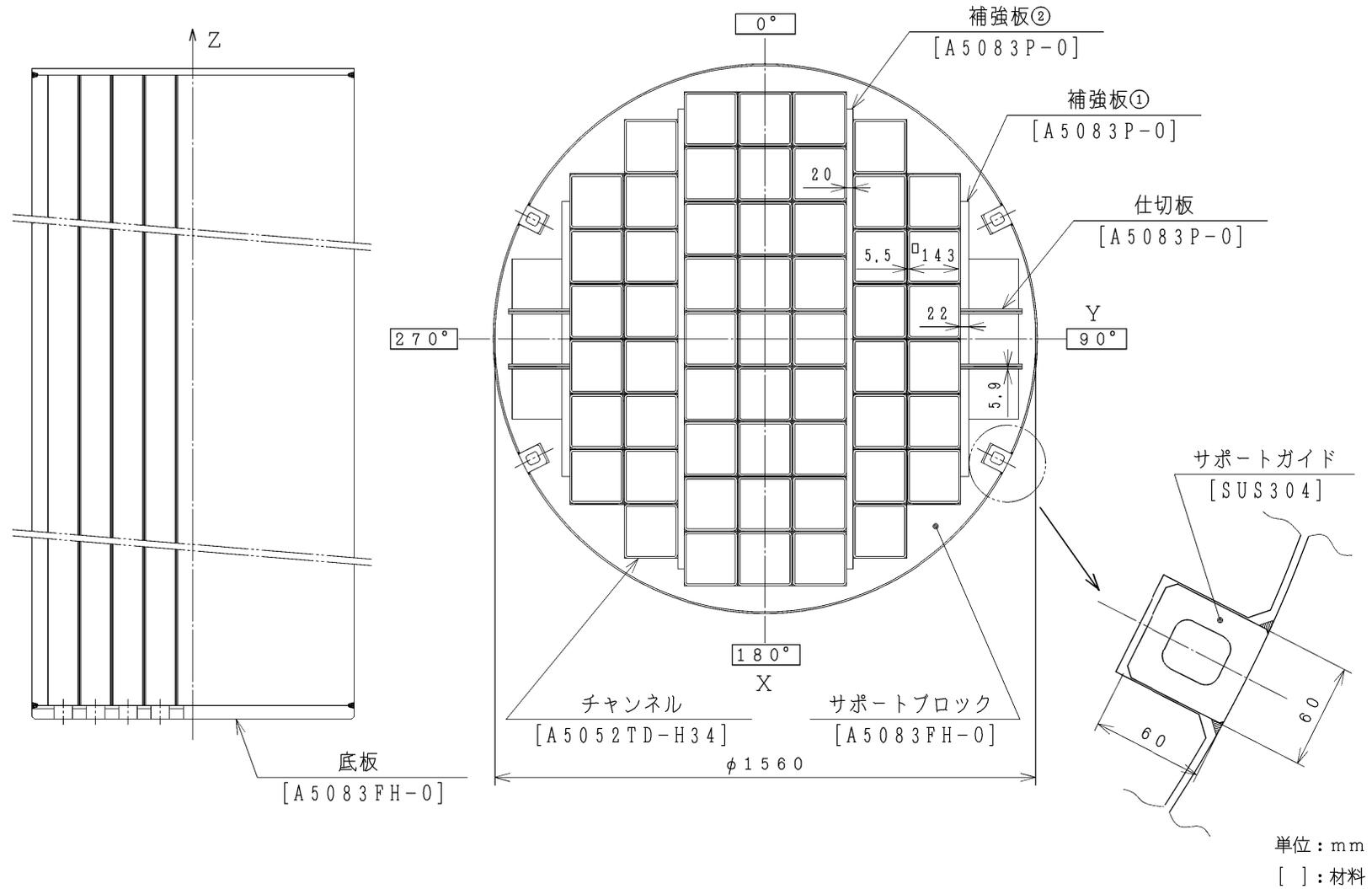


図 1-1 形状・寸法・材料

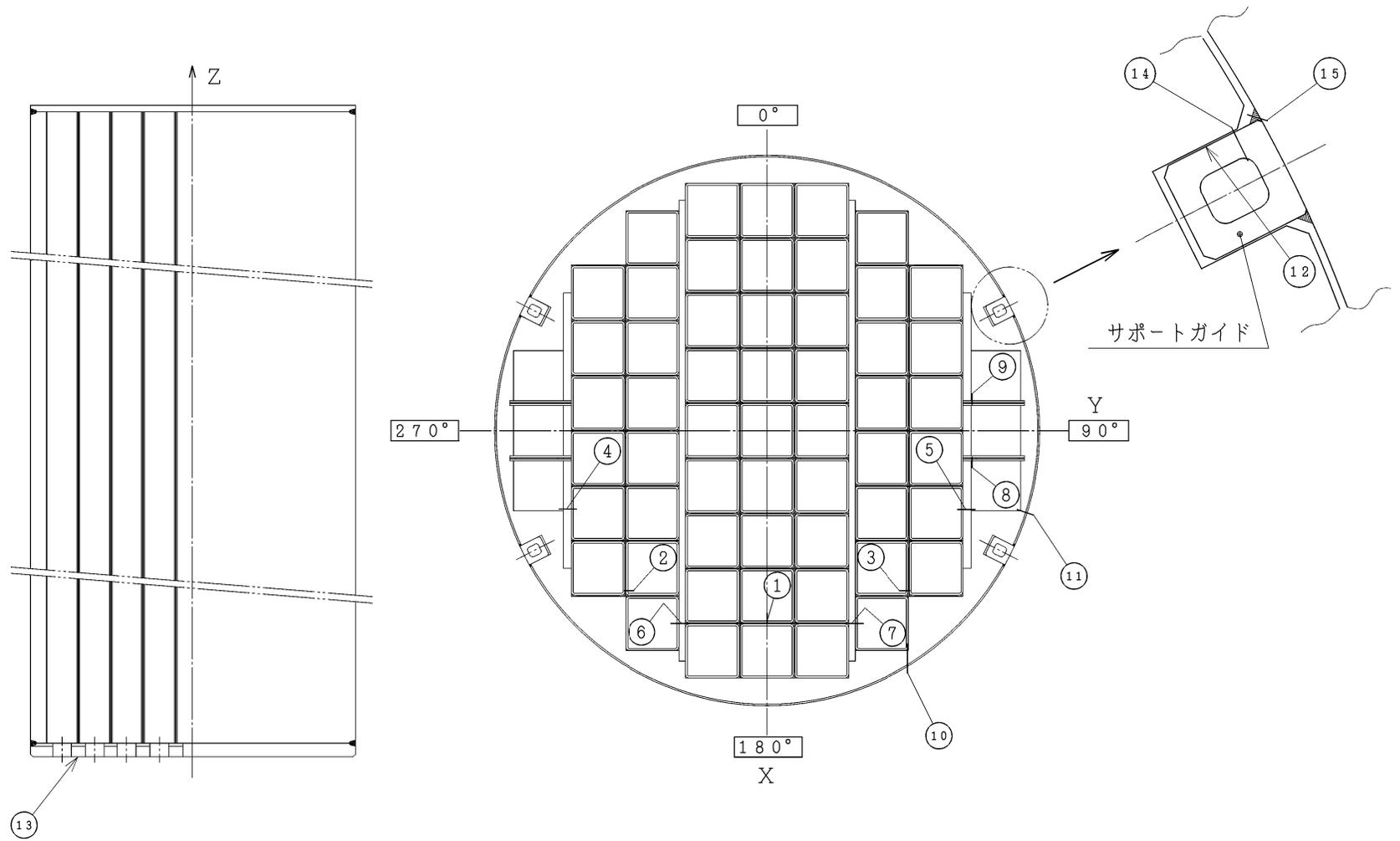
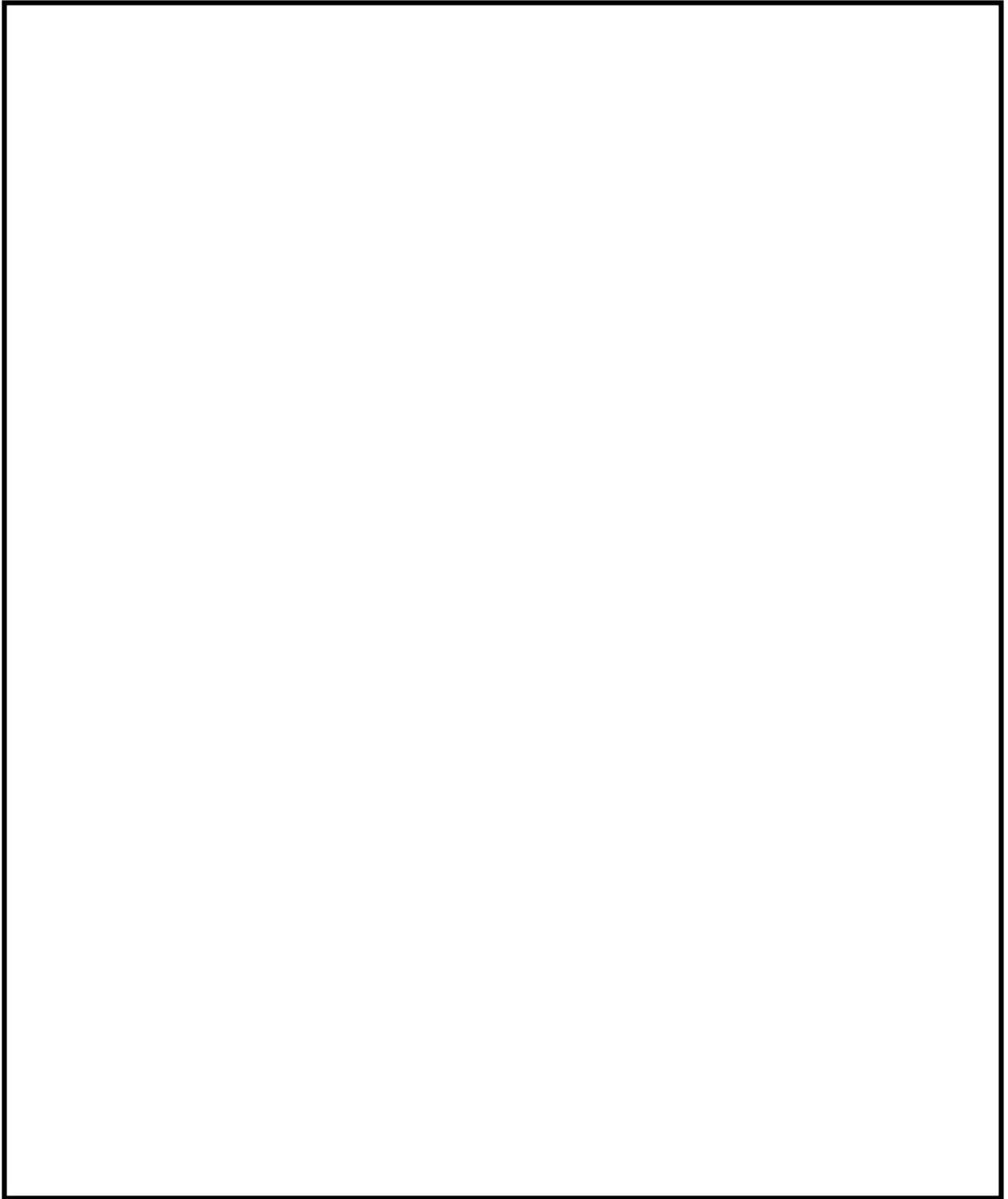
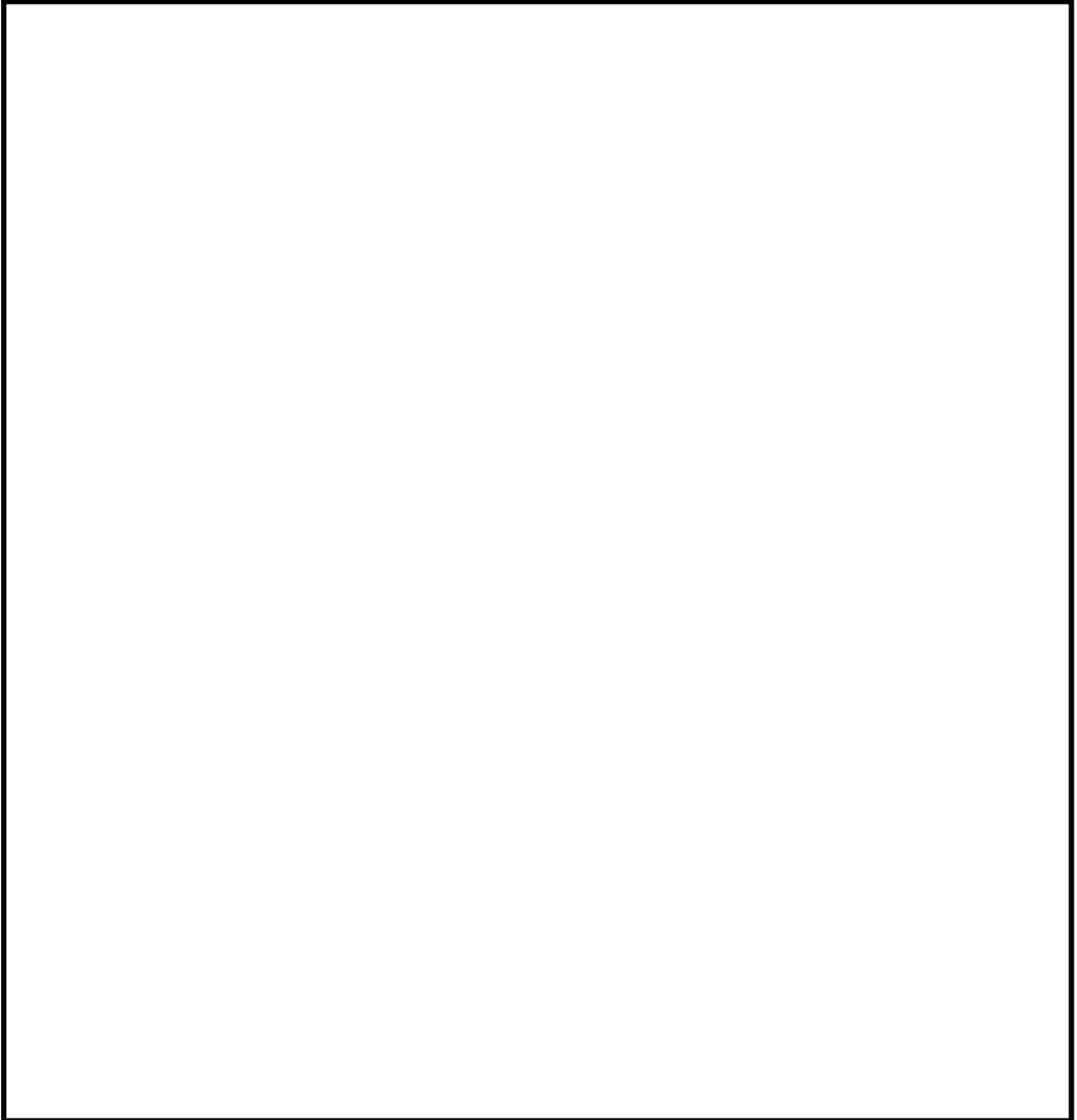


図 2-1 バスケットの応力評価点 (面)



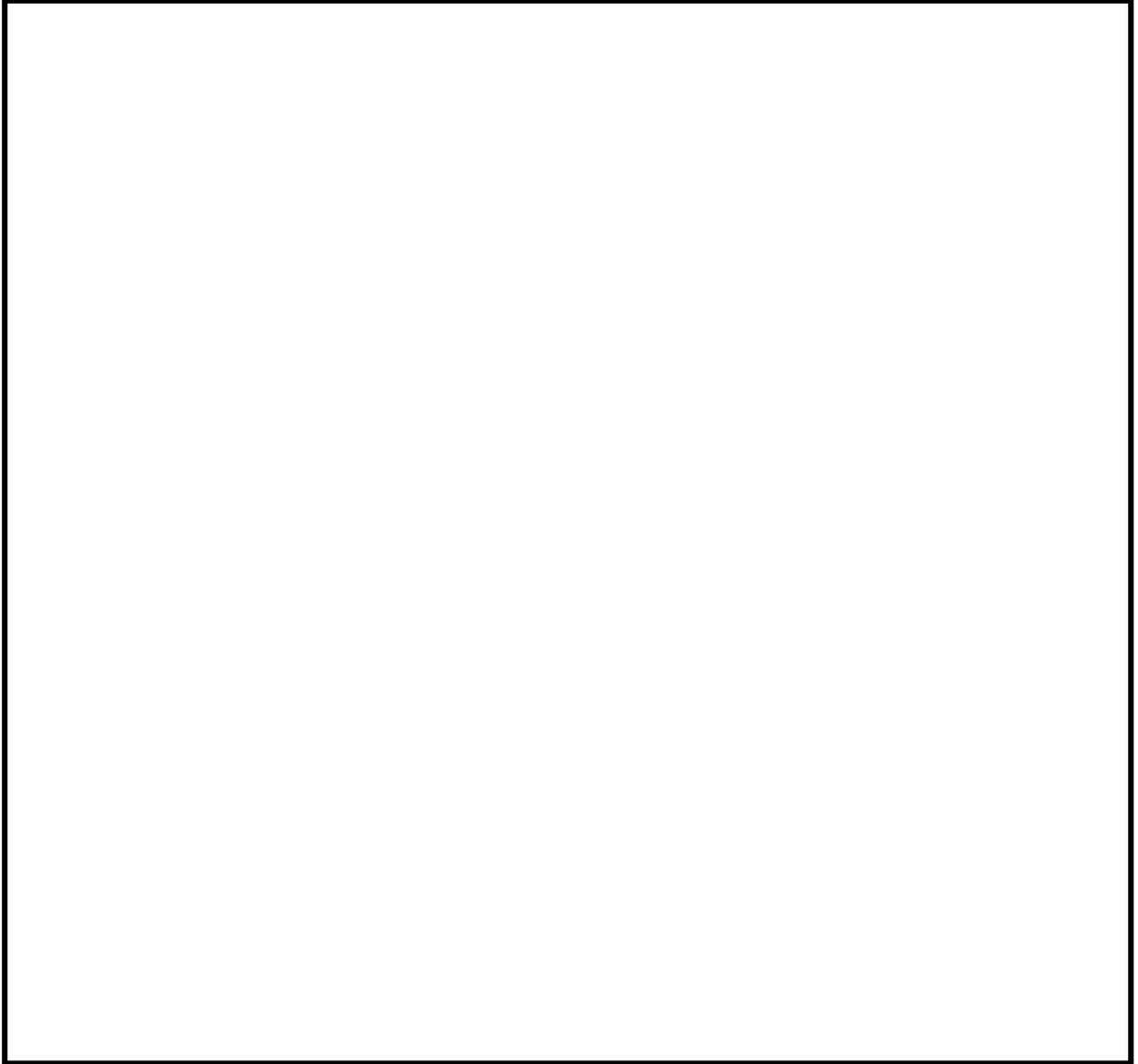
(単位 : mm)

図 2-2(1) バスケットの解析モデル
(X方向の加速度が作用する場合)



(単位 : mm)

図 2-2(2) バスケットの解析モデル
(Y方向の加速度が作用する場合)



(単位 : mm)

図 2-3 サポートガイドの解析モデル

表 1-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ																
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点														
チャンネル	A5052TD-H34 相当	$I + S_d^*$	1	202	①	3	303	①																	
		$I + S_s$	1		①	3		①																	
補強板	A5083P-0	$I + S_d^*$	1		⑤	4		⑥																	
		$I + S_s$	1		⑤	4		⑥																	
仕切板	A5083P-0	$I + S_d^*$	1		⑨	3		⑨																	
		$I + S_s$	1		⑨	3		⑨																	
サポートブロック	A5083FH-0	$I + S_d^*$	3		⑪	6		⑪																	
		$I + S_s$	3		⑪	6		⑪																	
サポートガイド	SUS304	$I + S_d^*$	4		202	⑭		6													303	⑭			
		$I + S_s$	4		278	⑭		6													418	⑭			

表 2-1 S_d*地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (1/2)

(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
チ ャ ン ネ ル	P _m	①							1	
		②							1	
		③							1	
	P _m +P _b	①							3	
		②							2	
		③							3	
	σ_s	—							—	
σ_p	—	—								
σ_b	①	1								
補 強 板 ①	P _m	④							1	
		⑤							1	
	P _m +P _b	④							2	
		⑤							3	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—							—	
σ_b	—	—								
補 強 板 ②	P _m	⑥							1	
		⑦							1	
	P _m +P _b	⑥							4	
		⑦							4	
	σ_s	—							—	
	σ_p	—	—							
σ_b	—	—								
仕 切 板	P _m	⑧	1							
		⑨	1							
	P _m +P _b	⑧	2							
		⑨	3							
	σ_s	—	—							
	σ_p	—	—							
	σ_b	⑨	1							

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 評価断面上のせん断応力

表 2-1 S_d*地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (2/2)

(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
サ ポ ー ト ブ ロ ッ ク	P _m	⑩							2	
		⑪							3	
	P _m +P _b	⑩							3	
		⑪							6	
	σ_s	—							—	
	σ_p	⑫							1	
σ_b	—	—								
サ ポ ー ト ガ イ ド	P _m	⑭							4	202
	P _m +P _b	⑭							6	303
	σ_s	—							—	—
	σ_p	—							—	—
	σ_b	—							—	—
サ ポ ー ト ガ イ ド 溶 接 部	P _m	—	—	—						
	P _m +P _b	—	—	—						
	σ_s	⑮	2	48						
	σ_p	—	—	—						
	σ_b	—	—	—						
底 板	P _m	—	—	—						
	P _m +P _b	—	—	—						
	σ_s	—	—	—						
	σ_p	⑬	1	150						
	σ_b	—	—	—						

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 評価断面上のせん断応力

表 2-2 S_s地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (1/2)

(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}		
チ ャ ン ネ ル	P _m	①								1
		②								1
		③								1
	P _m +P _b	①								3
		②								2
		③								3
	σ_s	—								—
σ_p	—	—								
σ_b	①	1								
補 強 板 ①	P _m	④								1
		⑤								1
	P _m +P _b	④								2
		⑤								3
	σ_s	—								—
	σ_p	—								—
σ_b	—	—								
補 強 板 ②	P _m	⑥								1
		⑦								1
	P _m +P _b	⑥								4
		⑦								4
	σ_s	—								—
	σ_p	—	—							
σ_b	—	—								
仕 切 板	P _m	⑧	1							
		⑨	1							
	P _m +P _b	⑧	2							
		⑨	3							
	σ_s	—	—							
	σ_p	—	—							
	σ_b	⑨	1							

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 評価断面上のせん断応力

表 2-2 S_s地震力が作用する場合のバスケットの応力計算結果 (2/2)

(単位：MPa)

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 ¹⁾						計算値	許容 応力	
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}			
サ ポ ー ト ブ ロ ッ ク	P _m	⑩								2	
		⑪								3	
	P _m +P _b	⑩								3	
		⑪								6	
	σ_s	—								—	
	σ_p	⑫								1	
σ_b	—	—									
サ ポ ー ト ガ イ ド	P _m	⑭								4	278
	P _m +P _b	⑭								6	418
	σ_s	—								—	—
	σ_p	—								—	—
	σ_b	—								—	—
サ ポ ー ト ガ イ ド 溶 接 部	P _m	—	—	—							
	P _m +P _b	—	—	—							
	σ_s	⑮	2	64							
	σ_p	—	—	—							
	σ_b	—	—	—							
底 板	P _m	—	—	—							
	P _m +P _b	—	—	—							
	σ_s	—	—	—							
	σ_p	⑬	1	200							
	σ_b	—	—	—							

注記 1) σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力
 σ_y : 評価断面に平行な方向の応力
 σ_z : 評価断面に平行な方向の応力
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 評価断面上のせん断応力

表 3-1 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
チャンネル	P_m	①	1	
	P_m+P_b	①	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	①	1	
補強板①	P_m	⑤	1	
	P_m+P_b	⑤	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
補強板②	P_m	⑥	1	
	P_m+P_b	⑥	4	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
仕切板	P_m	⑨	1	
	P_m+P_b	⑨	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	⑨	1	
サポートブロック	P_m	⑪	3	
	P_m+P_b	⑪	6	
	σ_s	—	—	
	σ_p	⑫	1	
	σ_b	—	—	
サポートガイド	P_m	⑭	4	202
	P_m+P_b	⑭	6	303
	σ_s	—	—	—
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
サポートガイド 溶接部	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	⑮	2	48
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
底 板	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	—	—	—
	σ_p	⑬	1	150
	σ_b	—	—	—

表 3-2 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
チャンネル	P_m	①	1	
	P_m+P_b	①	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	①	1	
補強板①	P_m	⑤	1	
	P_m+P_b	⑤	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
補強板②	P_m	⑥	1	
	P_m+P_b	⑥	4	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	—	—	
仕切板	P_m	⑨	1	
	P_m+P_b	⑨	3	
	σ_s	—	—	
	σ_p	—	—	
	σ_b	⑨	1	
サポートブロック	P_m	⑪	3	
	P_m+P_b	⑪	6	
	σ_s	—	—	
	σ_p	⑫	1	
	σ_b	—	—	
サポートガイド	P_m	⑭	4	278
	P_m+P_b	⑭	6	418
	σ_s	—	—	—
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
サポートガイド 溶接部	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	⑮	2	64
	σ_p	—	—	—
	σ_b	—	—	—
底 板	P_m	—	—	—
	P_m+P_b	—	—	—
	σ_s	—	—	—
	σ_p	⑬	1	200
	σ_b	—	—	—

V-2-4-2-3-6 バスケットの耐震性についての計算書②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時 (S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合)	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	4
3. 応力の評価	5
3.1 応力強さの評価	5
3.2 特別な応力の評価	5
3.2.1 純せん断応力	5
3.2.2 支圧応力	5
3.2.3 軸圧縮応力	5
3.2.4 座屈応力	5

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料	6
図 2-1	バスケットの応力評価点（面）	7
図 2-2	地震時におけるバスケットの姿勢と荷重方向	8
表 1-1	計算結果の概要	9
表 2-1	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力が作用する場合）	10
表 2-2	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	11

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

バスケットの応力評価点（面）を図 2-1 に示す。

2.2 貯蔵時（ S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

2.2.1 荷重条件

貯蔵時において、 S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。荷重の方向を図 2-2 に示す。なお、地震力には、 S_s 地震力を適用する。

地震力+自重

2.2.2 計算方法

(1) バスケットプレート

a. 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは、バスケットプレート端部（図 2-1①部）である。水平方向加速度により発生する応力（ σ_x ）は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_1}{A_1} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$

m_A : 図 2-1 に示す斜線部 A に含まれる使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量（= kg）

A_1 : バスケットプレートの断面積（= mm²）

C_H : 水平方向設計震度（=1.17）

g : 重力加速度（=9.80665 m/s²）

下方向加速度により発生する応力（ σ_y ）は、次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_b \cdot G_2}{A_b} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

m_b : バスケットプレートの全質量（= kg）

C_V : 鉛直方向設計震度（=0.65）

A_b : バスケットプレート底部の全面積（= mm²）

他の応力成分は、零である。

b. 一次一般膜+一次曲げ応力

最大応力が発生するのは、バスケットプレート格子端部（図 2-1②部）である。水平方向加速度により発生する応力（ σ_x, τ_{zx} ）は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{M}{Z} \\ M &= \frac{m_B \cdot G_1 \cdot \ell_p}{12 \cdot \frac{\ell_w}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\tau_{zx} = \frac{m_B \cdot G_1}{2 \cdot \frac{A_1}{2}} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、M : バスケットプレート格子中央部の単位幅当たりの曲げモーメント (N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (= mm³/mm)

m_B : 図 2-1 に示す斜線部 B に含まれる使用済燃料、伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (= kg)

ℓ_p : バスケットプレートの内り (= mm)

ℓ_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (燃料集合体の荷重面の軸方向長さ) (= mm)

ただし、バスケットプレート同士の嵌合のための切欠きがあるため実際の荷重荷重面の長さを ℓ_w/2 とする。

G₁ : a. と同じ

下方向加速度により発生する応力 (σ_y) は、一次一般膜応力と同様である。

ここで、G₂ : a. と同じ

他の応力成分は、零である。

c. 純せん断応力

バスケットプレート格子端部 (図 2-1②部) に発生する平均せん断応力 (σ_s) は、(2.4) 式で計算する。

d. 支圧応力

バスケットプレート端部 (図 2-1①部) に発生する平均支圧応力 (σ_p) は、(2.1) 式で計算する。

e. 座屈応力

バスケットプレート下端部 (図 2-1③部) に発生する座屈応力 (σ_b) は、(2.2) 式で計算する。

(2) サポートシリンダ

a. 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは、サポートシリンダ下端部 (図 2-1④部) であり、下方向加速度により発生する応力 (σ_x) は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_s \cdot G_2}{A_s} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、G₂ : (1)a. と同じ

A_s : サポートシリンダの断面積 (= mm²)

m_s : サポートシリンダの質量 (= kg)

b. 一次一般膜+一次曲げ応力

サポートシリンダには、曲げ応力は発生しないので、一次一般膜応力と同様である。

c. 支圧応力

サポートシリンダのバスケットプレート支持部（図 2-1⑤部）に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は，（2.1）式で計算する。

d. 軸圧縮応力

サポートシリンダ下端部（図 2-1④部）に発生する軸圧縮応力（ σ_c ）は，（2.5）式で計算する。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-2 及び表 2-3 に示す。

3. 応力の評価

3.1 応力強さの評価

地震時における応力強さの計算結果と許容応力を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1 及び表 2-2 より、地震時の一次一般膜応力強さ (P_m) 及び一次一般膜+一次曲げ応力強さ ($P_m + P_b$) は、添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。

3.2 特別な応力の評価

3.2.1 純せん断応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1 及び表 2-2 より、地震時の平均せん断応力 (σ_s) は、添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針②」5.5 節の規定を満足する。

3.2.2 支圧応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1 及び表 2-2 より、地震時の平均支圧応力 (σ_p) は、添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針②」5.5 節の規定を満足する。

3.2.3 軸圧縮応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1 及び表 2-2 より、地震時の軸圧縮応力 (σ_c) は、添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針②」5.5 節の規定を満足する。

3.2.4 座屈応力

地震時における応力計算結果と許容応力を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1 及び表 2-2 より、地震時の座屈応力 (σ_b) は、添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針②」5.5 節の規定を満足する。

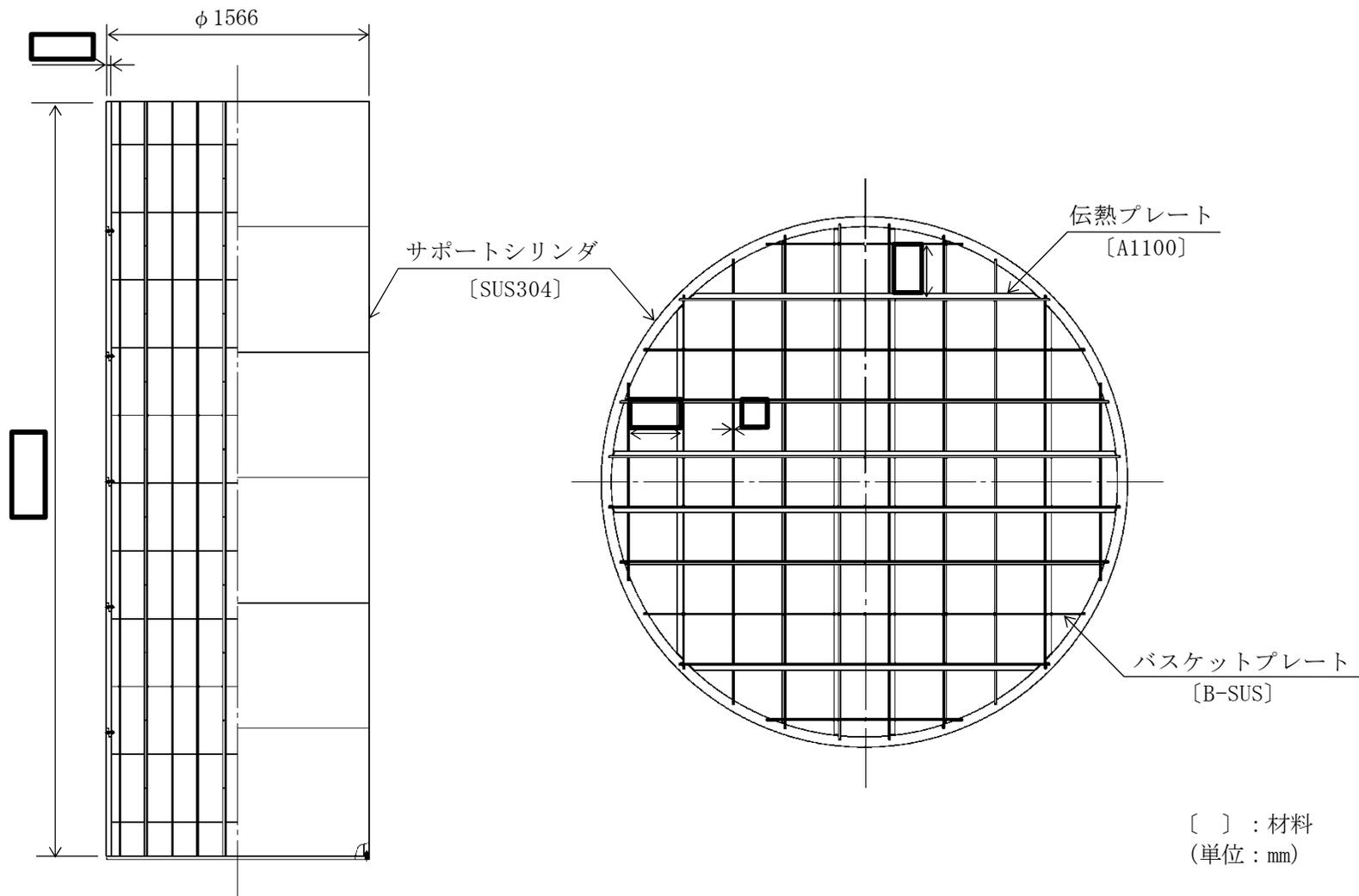


図 1-1 形状・寸法・材料

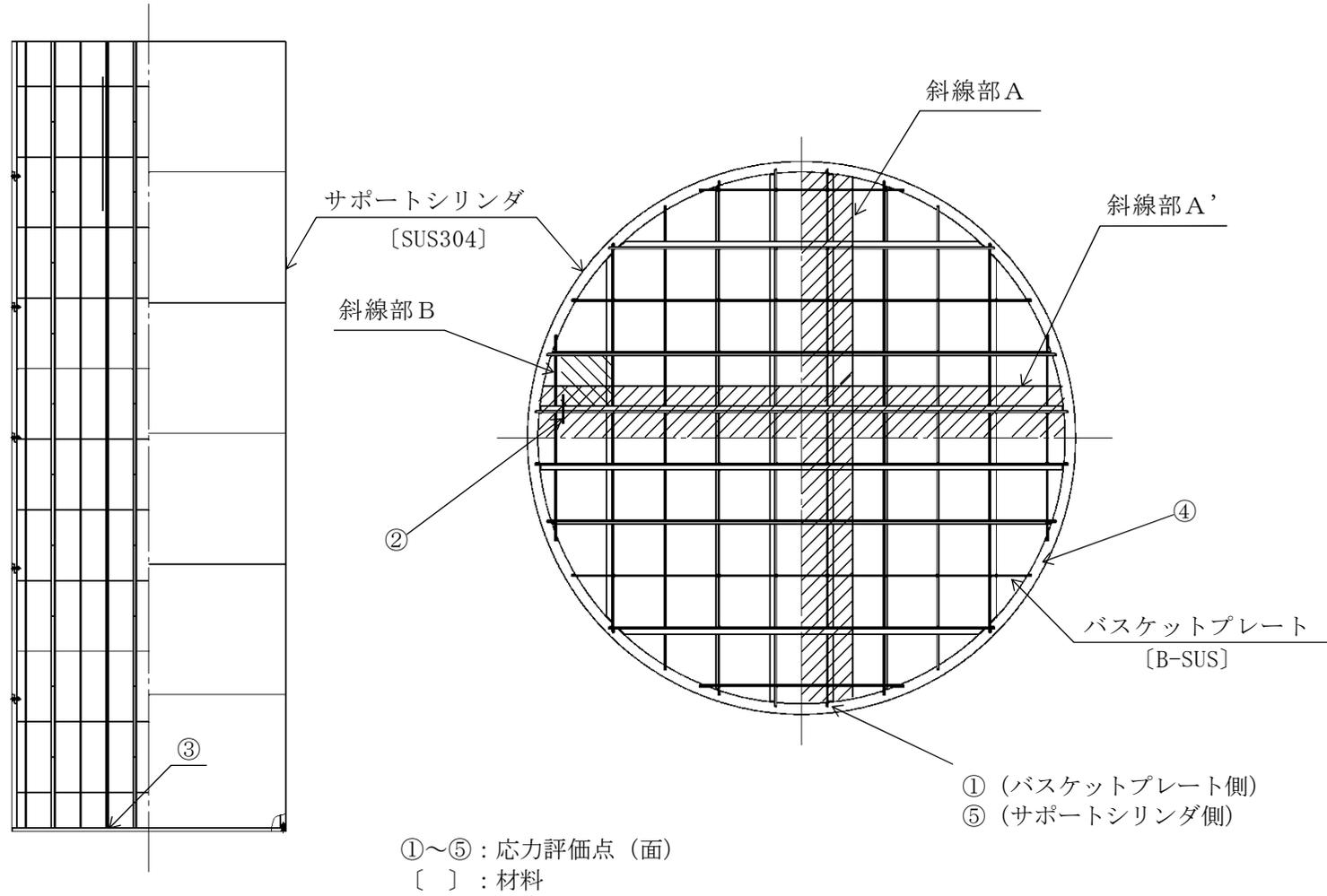


図 2-1 バスケットの応力評価点 (面)

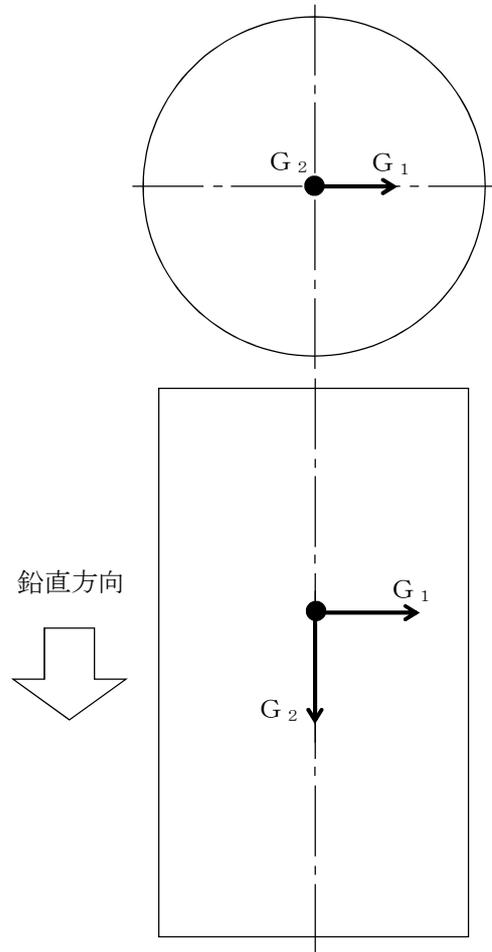


図 2-2 地震時におけるバスケットの姿勢と荷重方向

表 1-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次一般膜+一次曲げ応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点 (面)	計算値	許容応力	評価点 (面)
バスケット プレート	ボロン添 加ステン レス鋼板 (B-SUS)	I + S _d *	2	201	①	7	301	②
		I + S _s	2	269	①	7	404	②
サポート シリンダ	ステンレ ス鋼 (SUS304)	I + S _d *	1	180	④	1	270	④
		I + S _s	1	263	④	1	395	④

表 1-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	平均せん断応力			平均支圧応力			軸圧縮応力			座屈応力		
			計算値	許容 応力	評価面	計算値	許容 応力	評価面	計算値	許容 応力	評価面	計算値	許容 応力	評価面
バスケット プレート	ボロン添 加ステン レス鋼板 (B-SUS)	I + S _d *	1	120	②	2	311	①				1	180	③
		I + S _s	1	160	②	2	415	①				1	180	③
サポート シリンダ	ステンレ ス鋼 (SUS304)	I + S _d *				2	200	⑤	1	92	④			
		I + S _s				2	266	⑤	1	123	④			

表 2-1 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

(単位：MPa)

部位	応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力
バスケット プレート	P_m	①	2	201
	$P_m + P_b$	②	7	301
	σ_s	②	1	120
	σ_p	①	2	311
	σ_b	③	1	180
サポート シリンダ	P_m	④	1	180
	$P_m + P_b$	④	1	270
	σ_s	—	—	108
	σ_p	⑤	2	200
	σ_c	④	1	92

表 2-2 バスケットの応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点 (面)	計算値	許容応力
バスケット プレート	P_m	①	2	269
	$P_m + P_b$	②	7	404
	σ_s	②	1	160
	σ_p	①	2	415
	σ_b	③	1	180
サポート シリンダ	P_m	④	1	263
	$P_m + P_b$	④	1	395
	σ_s	—	—	144
	σ_p	⑤	2	266
	σ_c	④	1	123

V-2-4-2-6 バスケットの耐震性についての計算書③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	8
2.3 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	9
2.3.1 荷重条件	9
2.3.2 計算方法	9
2.3.3 計算結果	9
3. 応力の評価	10
3.1 応力強さの評価	10
3.2 特別な応力の評価	10
3.2.1 純せん断応力	10
3.2.2 支圧応力	10
3.2.3 座屈応力	10

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料	11
図 2-1	バスケットの応力評価点（面）	12
図 2-2(1)	枠板の応力評価で考慮する質量	13
図 2-2(2)	拘束リングの応力評価で考慮する質量	14
表 1-1(1)	計算結果の概要（枠板，燃料支持板，拘束リング）	15
表 1-1(2)	計算結果の概要（拘束リングボルト，枠板固定ボルト）	16
表 2-1	バスケットの応力計算結果（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	17
表 2-2	バスケットの応力計算結果（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	18
表 3-1	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	19
表 3-2	バスケットの応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	20

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のバスケットに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

バスケットの応力評価点（面）を図 2-1 に示す。

2.2 貯蔵時（ S_d *地震力が作用する場合）

2.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。
ボルト初期締付け力+地震力+自重

2.2.2 計算方法

(1) 枠板（大）

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、枠板（大）の①部（図 2-1 の①部）である。
下方向加速度により発生する圧縮応力（ σ_z ）は次式で表される。ただし、
 $G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$ ， C_V ：鉛直方向加速度（ $=3.53 \text{ m/s}^2$ ）である。

$$\sigma_z = \frac{m_A \cdot G_1}{A_A} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

m_A ：全バスケット質量（ $=$ kg）

A_A ：枠板（大）及び枠板（小）の総断面積（ $=$ mm^2 ）

他の応力成分は零である。

水平方向加速度により発生する圧縮応力（ σ_x ）は次式で表される。ただし、
 $G_3 = C_H$ ， C_H ：水平方向加速度（ $=7.06 \text{ m/s}^2$ ）である。

$$\sigma_x = \frac{m_1 \cdot G_3}{A_1} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

m_1 ：図 2-2(1)に示す斜線部①に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材
の合計質量（ $=$ kg）の $1/3$ の質量

A_1 ：拘束リング幅に相当する長さにおける枠板（大）の断面積（ $=1000 \text{ mm}^2$ ）

他の応力成分は零である。

b. 一次膜+一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、枠板（大）の③部（図 2-1 の③部）である。

下方向加速度により発生する圧縮応力（ σ_z ）は、(2.1) 式で表される。

水平方向加速度により発生する曲げ応力（ σ_x ）は次式で表される。ただし、

$G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$ ， $G_2 = C_H$ であり、 C_H ， C_V は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\text{Max.} (|M_2|, |M_3|)}{Z} \\ M_2 &= - \frac{m_3' \cdot G_2 \cdot l_1 \cdot l_2}{2 \cdot (l_1 + l_2)^2} \cdot (2 \cdot l_1 + l_2) \\ M_3 &= \frac{m_3' \cdot G_2 \cdot l_1 \cdot l_2^2}{2 \cdot (l_1 + l_2)^3} \cdot (3 \cdot l_1 + 2 \cdot l_2) \\ Z &= \frac{l_3 \cdot t^2}{6} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

- m_3' : 図 2-2(1)に示す斜線部③' に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg) の 1/3 の質量
- l_1 : 枳板により構成される格子の内寸 (= mm)
- l_2 : 枳板により構成される格子の内寸の 1/2 の寸法 (= mm)
- l_3 : 拘束リング間長さから枳板 (大) と枳板 (小) の組合せ部を除いた長さ (= mm)
- t : 枳板板厚 (= mm)

他の応力成分は零である。

水平方向加速度により発生する圧縮応力(σ_x)は次式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_x = \frac{m_3 \cdot G_3}{A_3} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

- m_3 : 図 2-2(1)に示す斜線部③に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg) の 1/3 の質量
- A_3 : 拘束リング間長さにおける枳板 (大) の断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

c. せん断応力

せん断応力(σ_s)の最大値は枳板 (大) の②部 (図 2-1 の②部) に発生し、次式で表される。ただし、 $G_2 = C_H$ であり、 C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_s = \frac{m_2' \cdot G_2}{A_2'} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、

- m_2' : 枳板 (大) と枳板 (小) の組合せ部の間にある使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg)

A_2' : 枠板 (大) と枠板 (小) の組合せ部間の断面積 (= mm²)

d. 支圧応力

支圧応力 (σ_p) の最大値は枠板 (大) の①部 (図 2-1 の①部) に発生し, (2.2) 式で表される。ただし, $G_3 = C_H$ であり, C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

e. 座屈応力

座屈応力 (σ_b) の最大値は枠板 (大) の②部 (図 2-1 の②部) に発生し, 一次応力は次式で表される。ただし, $G_3 = C_H$ であり, C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_{b(\text{一次})} = \frac{m_2 \cdot G_3}{A_2} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで,

m_2 : 図 2-2(1) に示す斜線部②に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg) の 1/3 の質量

A_2 : 拘束リング間長さにおける枠板 (大) の断面積 (= mm²)

(2) 枠板 (小)

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは, 枠板 (小) の⑥部 (図 2-1 の⑥部) である。

下方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_z) は, (2.1) 式で, 水平方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_x) は, 次式で表される。ただし, $G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$, $G_2 = C_H$ であり, C_H , C_V は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_x = \frac{m_6' \cdot G_2}{A_6} \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで,

m_6' : 図 2-2(1) に示す斜線部⑥' に含まれる使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg) の 1/3 の質量

A_6 : 拘束リング幅に相当する長さにおける枠板 (小) の断面積 (= mm²)
他の応力成分は零である。

b. 一次膜+一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは, 枠板 (小) の⑥部 (図 2-1 の⑥部) である。

下方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_z) は, (2.1) 式で, 水平方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_x) 及び曲げ応力 (σ_x), (σ_z) は, (2.7) 式及び次式で表される。

ただし, $G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$, $G_2 = C_H$, $G_3 = C_H$ であり, C_H , C_V は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{M_{\max}}{Z} \\ M_{\max} &= \frac{m_6 \cdot G_3 \cdot \ell_5^2}{12} \\ Z &= \frac{\ell_1 \cdot t^2}{6} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、

m_6 : 枠板 (大) と枠板 (小) の組合せ部の間にある使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg)

ℓ_1 : 枠板により構成される格子の内寸 (= mm)

ℓ_5 : 枠板 (大) と枠板 (小) の組合せ部の間の長さ (= mm)

t : 枠板板厚 (= mm)

他の応力成分は零である。

c. せん断応力

せん断応力(σ_s)の最大値は枠板 (小) の⑤部 (図 2-1 の⑤部) に発生し、次式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

$$\sigma_s = \frac{m_5' \cdot G_3}{A_5'} \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、

m_5' : 枠板 (大) と枠板 (小) の組合せ部の間にある使用済燃料とバスケット構造部材の合計質量 (= kg)

A_5' : 枠板 (大) と枠板 (小) の組合せ部の 2 倍の断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

d. 支圧応力

支圧応力(σ_p)の最大値は枠板 (小) の⑥部 (図 2-1 の⑥部) に発生し、(2.7) 式で表される。ただし、 $G_2 = C_H$ であり、 C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

e. 座屈応力

座屈応力(σ_b)の最大値は枠板 (小) の⑤部 (図 2-1 の⑤部) に発生し、一次応力は (2.1) 式で求められる。ただし、 $G_2 = C_H$ であり、 C_H は 2.2.2(1)a. と同等である。

(3) 燃料支持板

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、燃料支持板の脚部 (図 2-1 の⑦部) である。

下方向加速度により発生する圧縮応力(σ_x)は、次式で表される。ただし、

$G_1 = C_V + 9.81 \text{ m/s}^2$ であり、 C_V は2.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_x = \frac{m_T \cdot G_1}{A_L} \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで、

m_T : バスケット総質量+全使用済燃料質量 (= kg)

A_L : 燃料支持板脚部断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜+一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、燃料支持板の脚部(図2-1の⑦部)であり、一次膜+一次曲げ応力強さ(σ_x)は、a.項の一次一般膜応力強さと同等である。

(4) 拘束リング

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、拘束リングの⑧部(図2-1の⑧部)である。

水平方向加速度により発生する応力(σ_x)は、次式で表される。ただし、 $G_3 = C_H$ であり、 C_H は2.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_x = \sum_{i=1}^5 m_{S_i} \cdot G_3 \cdot \sin \theta_{S_i} / A_S \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、

m_{S1} : 図2-2(2)の斜線部①の使用済燃料と枠板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S1} : ボルト1の取付け角度 (=69.5°)

m_{S2} : 図2-2(2)の斜線部②の使用済燃料と枠板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S2} : ボルト2の取付け角度 (=50.0°)

m_{S3} : 図2-2(2)の斜線部③の使用済燃料と枠板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S3} : ボルト3の取付け角度 (=33.5°)

m_{S4} : 図2-2(2)の斜線部④の使用済燃料と枠板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S4} : ボルト4の取付け角度 (=20.0°)

m_{S5} : 図2-2(2)の斜線部⑤の使用済燃料と枠板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S5} : ボルト5の取付け角度 (=7.5°)

A_S : 拘束リングの断面積 (= mm²)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

最大応力が発生するのは、拘束リングの⑧部（図 2-1 の⑧部）であり、一次膜＋一次曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力と同等である。

(5) 拘束リングボルト

a. 一次一般膜応力強さ

拘束リングボルト（図 2-1 の⑨部）の一次一般膜応力強さは、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_f \\ \sigma_f &= \frac{F_f}{A_{R1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで、

σ_f : 拘束リングボルトの締付け応力

F_f : 拘束リングボルトの初期締付け力（=4800 N）

A_{R1} : 拘束リングボルト（M12）の断面積（= mm²）で表される。

他の応力成分は零である。

b. 一次膜＋一次曲げ応力強さ

拘束リングボルト（図 2-1 の⑨部）の一次膜＋一次曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

c. 一次膜＋二次膜応力強さ

拘束リングボルト（図 2-1 の⑨部）の一次膜＋二次膜応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

d. （一次＋二次）膜応力＋曲げ応力強さ

拘束リングボルト（図 2-1 の⑨部）の（一次＋二次）膜応力＋曲げ応力強さは、a. 項の一次一般膜応力強さと同等である。

(6) 枠板固定ボルト

a. 一次一般膜応力強さ

最大応力が発生するのは、33.5 ° 位置の枠板固定ボルト（図 2-1 の⑩部）である。初期締付け力による引張応力（ σ_x ）は、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_f \\ \sigma_f &= \frac{F_f}{A_{R2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、

σ_f : 枠板固定ボルトの締付け応力

F_f : 枠板固定ボルトの初期締付け力（=4800 N）

A_{R2} : 桢板固定ボルト (M10) の断面積 (= mm²) 水平方向加速度により発生するせん断応力(σ_s)は、次式で表わせる。ただし、 $G_3=C_H$ であり、 C_H は2.2.2(1)a.と同等である。

$$\sigma_s = \frac{m_{S3} \cdot G_3 \cdot \sin \theta_{S3}}{n_2 \cdot A_{R2}} \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで、

m_{S3} : 図2-2(2)の斜線部③の使用済燃料と桢板の質量 (= kg) の1/3の質量

θ_{S3} : 桢板固定ボルト⑩部の位置の角度 (=33.5°)

A_{R2} : 桢板固定ボルト (M10) の断面積 (= mm²)

n_2 : 桢板固定ボルト本数 (=4本)

他の応力成分は零である。

b. 一次膜+一次曲げ応力強さ

一次膜+一次曲げ応力強さは、a.項の一次一般膜応力強さと同等である。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表2-1に示す。

2.3 貯蔵時（S_s地震力が作用する場合）

2.3.1 荷重条件

貯蔵時においてS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。
ボルト初期締付け力+地震力+自重

2.3.2 計算方法

桝板（大），桝板（小），燃料支持板，拘束リング及び桝板固定ボルトの応力計算は2.2.2項と同様である。

拘束リングボルトの応力計算は2.2.2項(5)a.及びb.と同様である。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表2-2に示す。

3. 応力の評価

3.1 応力強さの評価

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の一次一般膜応力強さ(P_m)、一次膜+一次曲げ応力強さ($P_m + P_b$)及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ($P_m + P_b + Q$)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

3.2 特別な応力の評価

3.2.1 純せん断応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 4-1 及び表 4-2 より、各設計事象の平均せん断応力(σ_s)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

3.2.2 支圧応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の平均支圧応力(σ_p)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

3.2.3 座屈応力

各設計事象における応力計算結果と許容応力を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 及び表 3-2 より、各設計事象の座屈応力(σ_b)は添付書類「V-2-4-2-3-2 バスケットの応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

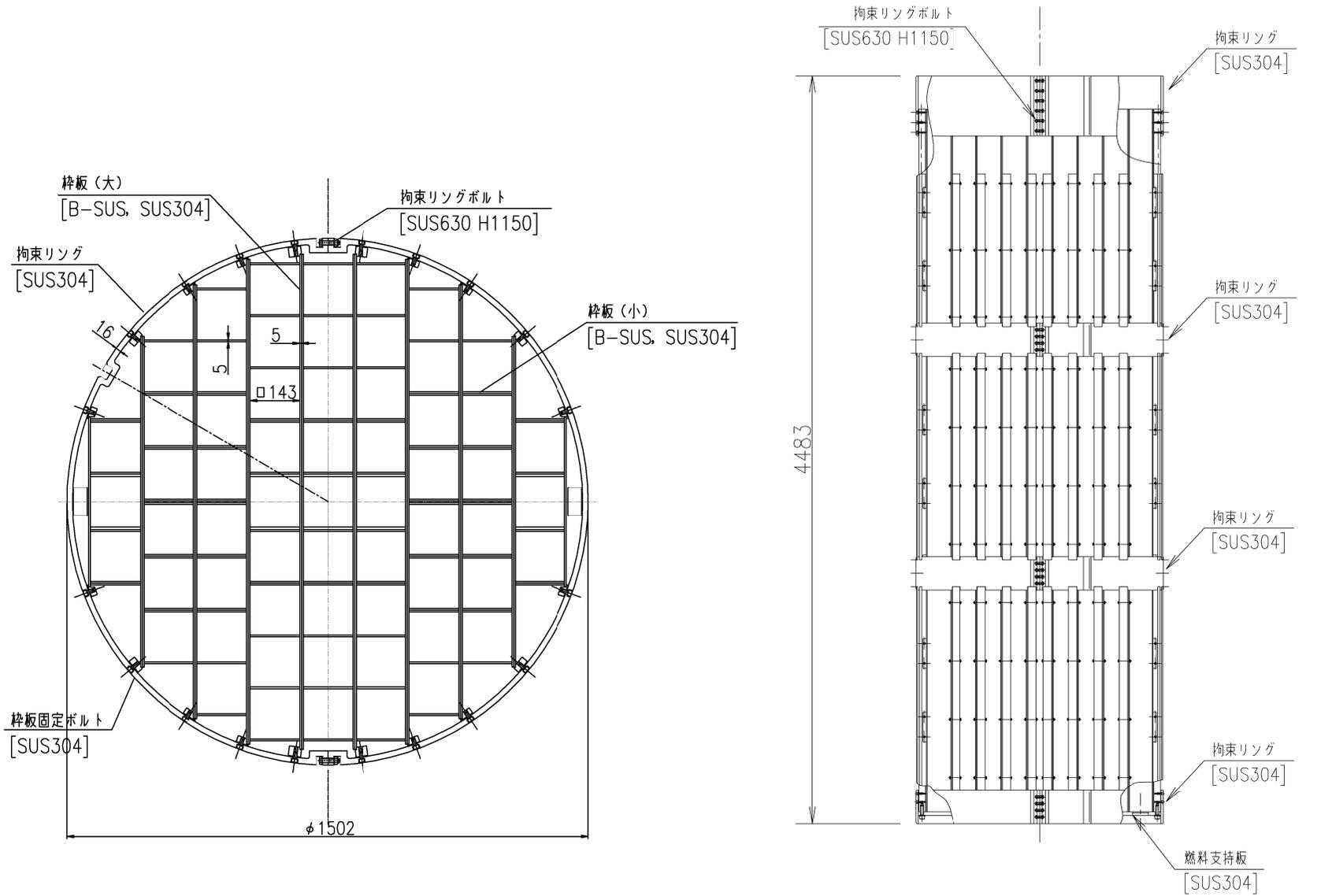


図 1-1 形状・寸法・材料

(単位：mm)

[] 材料

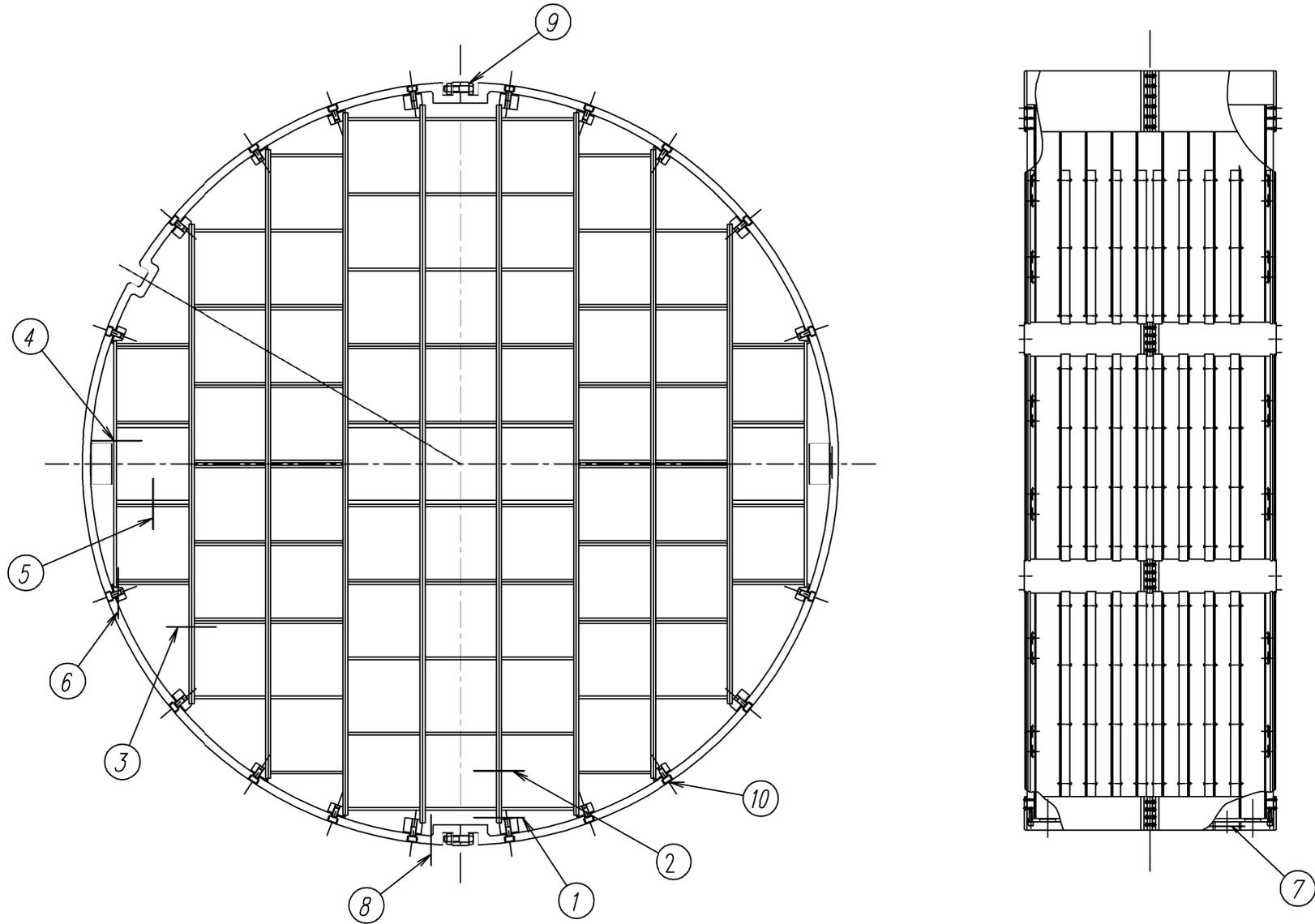


図 2-1 バスケットの応力評価点 (面)

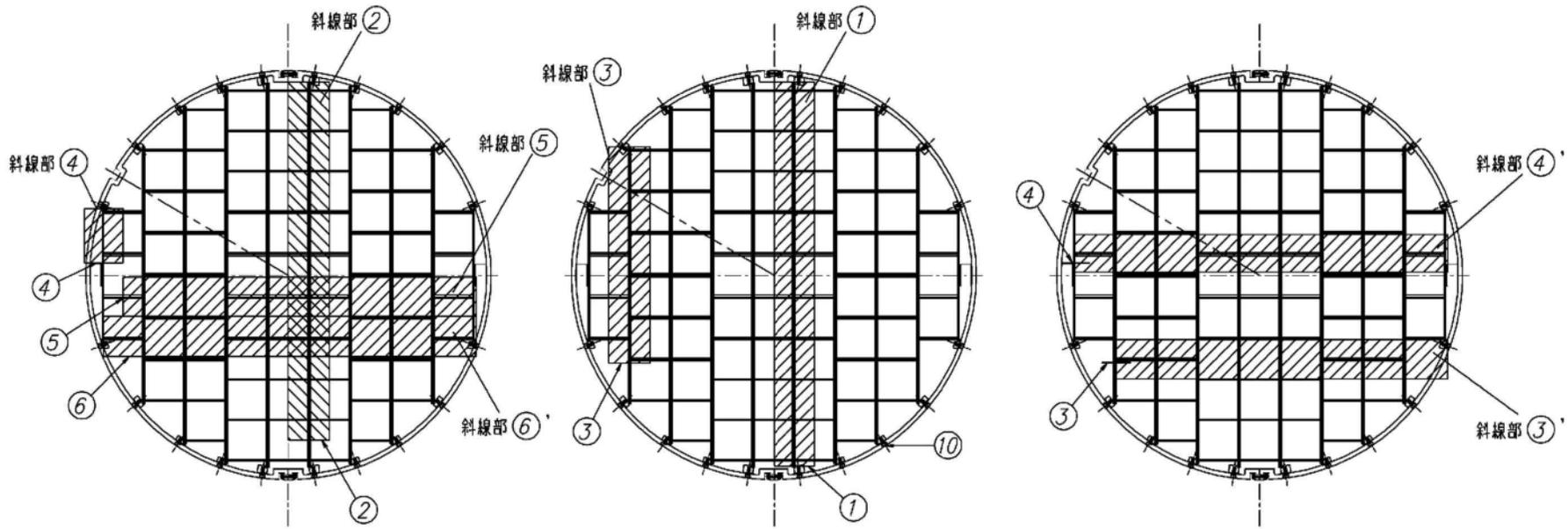


図 2-2(1) 枠板の応力評価で考慮する質量

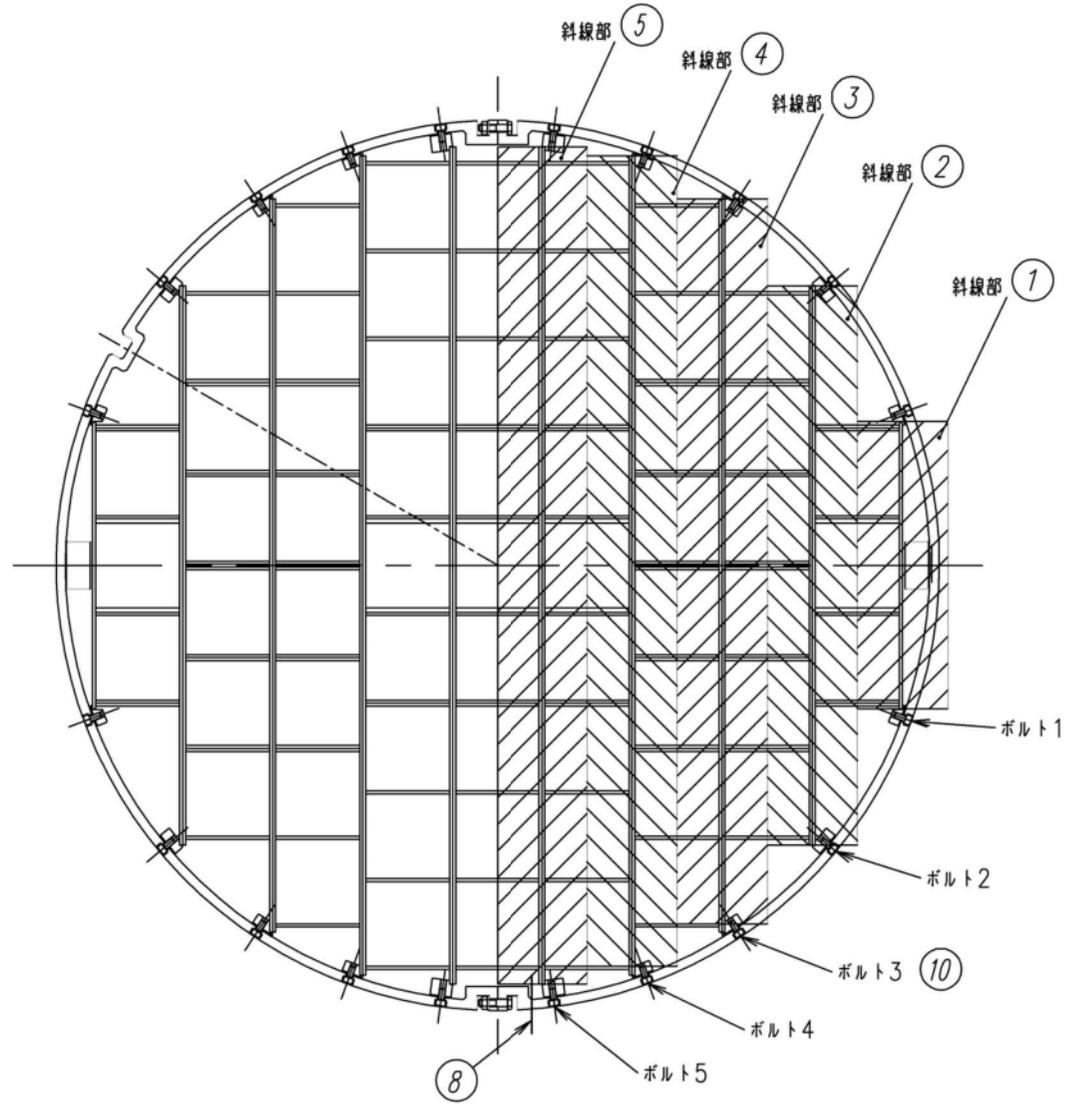


図 2-2(2) 拘束リングの応力評価で考慮する質量

表 1-1(1) 計算結果の概要 (枠板, 燃料支持板, 拘束リング)

(単位 : MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次+二次応力強さ		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
枠板 (大)	B-SUS, SUS304	I + S _d * [*]	8	187	①	61	281	③			
		I + S _s	12	266	①	98	399	③			
枠板 (小)	B-SUS, SUS304	I + S _d * [*]	7	187	⑥	29	281	⑥			
		I + S _s	11	266	⑥	47	399	⑥			
燃料支持板	SUS304	I + S _d * [*]	8	187	⑦	8	281	⑦			
		I + S _s	9	266	⑦	9	399	⑦			
拘束リング	SUS304	I + S _d * [*]	4	121*	⑧	4	182*	⑧			
		I + S _s	6	172*	⑧	6	259*	⑧			

注記 * : 溶接継手効率を考慮

表 1-1(2) 計算結果の概要 (拘束リングボルト, 桢板固定ボルト)

(単位 : MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ			一次膜+一次曲げ応力強さ			一次膜応力+二次膜応力			一次応力+二次応力		
			計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点	計算値	許容応力	評価点
拘束 リング ボルト	SUS630	I + S _d *	43	447	⑨	43	671	⑨	43	543	⑨	43	549	⑨
	H1150	I + S _s	43	543	⑨	43	815	⑨						
桢板 固定 ボルト	SUS304	I + S _d *	65	187	⑩	65	281	⑩						
		I + S _s	70	266	⑩	70	399	⑩						

表 2-1 バスケットの応力計算結果（貯蔵時：S_d*地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 *1						応力 強さ	許容 応力								
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}										
杵板 (大)	P _m	①								8	187							
	P _m +P _b	③								61	281							
	σ_s	②								1	112							
	σ_p	①								8	207							
	σ_b	②								45	105							
杵板 (小)	P _m	⑥															7	187
	P _m +P _b	⑥															29	281
	σ_s	⑤															1	112
	σ_p	⑥															7	207
	σ_b	⑤															2	105
燃料 支持板	P _m	⑦															8	187
	P _m +P _b	⑦															8	281
	σ_s	—															—	112
	σ_p	—															—	207
	σ_b	—															—	105
拘束 リング	P _m	⑧															4	121*2
	P _m +P _b	⑧															4	182*2
	σ_s	—															—	72*2
	σ_p	—															—	134*2
	σ_b	—															—	68*2
拘束 リング ボルト	P _m	⑨															43	447
	P _m +P _b	⑨															43	671
	P _m +Q _m	⑨															43	543
	P _m +Q _m +P _b +Q _b	⑨															43	549
杵板 固定 ボルト	P _m	⑩																
	P _m +P _b	⑩								65	281							

注記 *1: σ_x : 評価断面に垂直な方向の応力

σ_z : 評価断面に平行な方向の応力

σ_y : 評価断面に平行な方向の応力

τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} : 評価断面上のせん断応力

*2: 溶接継手効率を考慮

表 2-2 バスケットの応力計算結果（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力分類	評価点 (面)	応力成分 *1						応力 強さ	許容 応力
			σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}		
杵板 (大)	P _m	①							12	266
	P _m +P _b	③							98	399
	σ_s	②							1	150
	σ_p	①							12	276
	σ_b	②							45	105
杵板 (小)	P _m	⑥							11	266
	P _m +P _b	⑥							47	399
	σ_s	⑤							1	150
	σ_p	⑥							11	276
	σ_b	⑤							2	105
燃料 支持板	P _m	⑦							9	266
	P _m +P _b	⑦							9	399
	σ_s	—							—	150
	σ_p	—							—	276
	σ_b	—							—	105
拘束 リング	P _m	⑧							6	172*2
	P _m +P _b	⑧							6	259*2
	σ_s	—							—	97*2
	σ_p	—							—	179*2
	σ_b	—							—	68*2
拘束 リング ボルト	P _m	⑨							43	543
	P _m +P _b	⑨							43	815
杵板 固定 ボルト	P _m	⑩							70	266
	P _m +P _b	⑩							70	399

注記 *1： σ_x ：評価断面に垂直な方向の応力

σ_z ：評価断面に平行な方向の応力

σ_y ：評価断面に平行な方向の応力

τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} ：評価断面上のせん断応力

*2：溶接継手効率を考慮

表 3-1 バスケットの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
枠板（大）	P_m	①	8	187
	P_m+P_b	③	61	281
	σ_s	②	1	112
	σ_p	①	8	207
	σ_b	②	45	105
枠板（小）	P_m	⑥	7	187
	P_m+P_b	⑥	29	281
	σ_s	⑤	1	112
	σ_p	⑥	7	207
	σ_b	⑤	2	105
燃料支持板	P_m	⑦	8	187
	P_m+P_b	⑦	8	281
	σ_s	—	—	112
	σ_p	—	—	207
	σ_b	—	—	105
拘束リング	P_m	⑧	4	121*
	P_m+P_b	⑧	4	182*
	σ_s	—	—	72*
	σ_p	—	—	134*
	σ_b	—	—	68*
拘束リングボルト	P_m	⑨	43	447
	P_m+P_b	⑨	43	671
	P_m+Q_m	⑨	43	543
	$P_m+Q_m+P_b+Q_b$	⑨	43	549
枠板固定ボルト	P_m	⑩	65	187
	P_m+P_b	⑩	65	281

注記 *：溶接継手効率を考慮

表 3-2 バスケットの応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	評価点（面）	計算値	許容応力
枠板（大）	P _m	①	12	266
	P _m +P _b	③	98	399
	σ _s	②	1	150
	σ _p	①	12	276
	σ _b	②	45	105
枠板（小）	P _m	⑥	11	266
	P _m +P _b	⑥	47	399
	σ _s	⑤	1	150
	σ _p	⑥	11	276
	σ _b	⑤	2	105
燃料支持板	P _m	⑦	9	266
	P _m +P _b	⑦	9	399
	σ _s	—	—	150
	σ _p	—	—	276
	σ _b	—	—	105
拘束リング	P _m	⑧	6	172*
	P _m +P _b	⑧	6	259*
	σ _s	—	—	97*
	σ _p	—	—	179*
	σ _b	—	—	68*
拘束リングボルト	P _m	⑨	43	543
	P _m +P _b	⑨	43	815
枠板固定ボルト	P _m	⑩	70	266
	P _m +P _b	⑩	70	399

注記 *：溶接継手効率を考慮

V-2-4-2-3-7 トラニオンの耐震性についての計算書①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	3
3. 応力の評価	4
3.1 一次応力の評価	4
3.2 一次＋二次応力の評価	4
3.3 組合せ応力の評価	4

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	5
図 2-1	地震時に作用する荷重の計算モデル	6
表 1-1	計算結果の概要	7
表 2-1	トラニオンの応力評価 （貯蔵時： S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	8

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点(面)を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点(面)を図 1-1 に示す。

2.2 貯蔵時 (S_d*及びS_s地震力が作用する場合)

2.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d*及びS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重

2.2.2 計算方法

(1) 一次応力

a. せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は、次式で表わされる(図 2-1 参照)。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_W}{A} \\ F_W &= \frac{W \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_3 \cdot a_2)}{\frac{2a_2^2}{a_1} + a_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 1)$$

ここで、G₁=α_H、G₃=9.81-α_V

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (=2870 mm)

a₁ : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
(=2077.5 mm)

a₂ : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの
距離 (=949.5mm)

F_W : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (=1.19×10⁶ N)

W : 貯蔵容器の質量(=118000 kg)

A : 図 1-1 の評価点①の断面積(=1.75×10⁴ mm²)

α_H : 水平方向設計加速度(=C_Hg=11.48 m/s²)

α_V : 鉛直方向設計加速度(=C_Vg=6.38 m/s²)

b. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点④である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で表わされる。

$$\sigma_b = \frac{F_w \cdot L}{Z} \dots\dots\dots (2. 2)$$

ここで、 F_w : (2. 1) 式と同じ

Z : 図 1-1 の評価点④の断面係数(=1.04×10⁶ mm³)

L : 図 1-1 の評価点④と荷重作用位置との距離(=184.5 mm)

c. 支圧応力

応力が発生する箇所は、図 1-1 の下部トラニオンの評価点⑤である。トラニオン固定金具によって生じる支圧応力は(σ_p)は、次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{F_w}{A_5} \dots\dots\dots (2. 3)$$

ここで、

F_w : (2. 1) 式と同じ

A_5 : 評価点⑤に接触するトラニオン固定金具の投影面積(=1.94×10³ mm²)

d. 組合せ応力

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、次式で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (2. 4)$$

ここで、

σ_b : (2. 2) 式と同じ

τ : (2. 1) 式と同じ

(2) 一次+二次応力

a. せん断応力

せん断応力の全振幅(τ)は、(2. 1) 式と同様に与えられる。

b. 曲げ応力

曲げ応力の全振幅(σ_b)は、(2. 2) 式と同様に与えられる。

c. 支圧応力

支圧応力の全振幅(σ_p)は、(2. 3) 式と同様に与えられる。

d. 組合せ応力

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、(2. 4) 式と同様に与えられる。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、各設計事象の一次+二次応力は添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、地震時における組合せ応力は添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

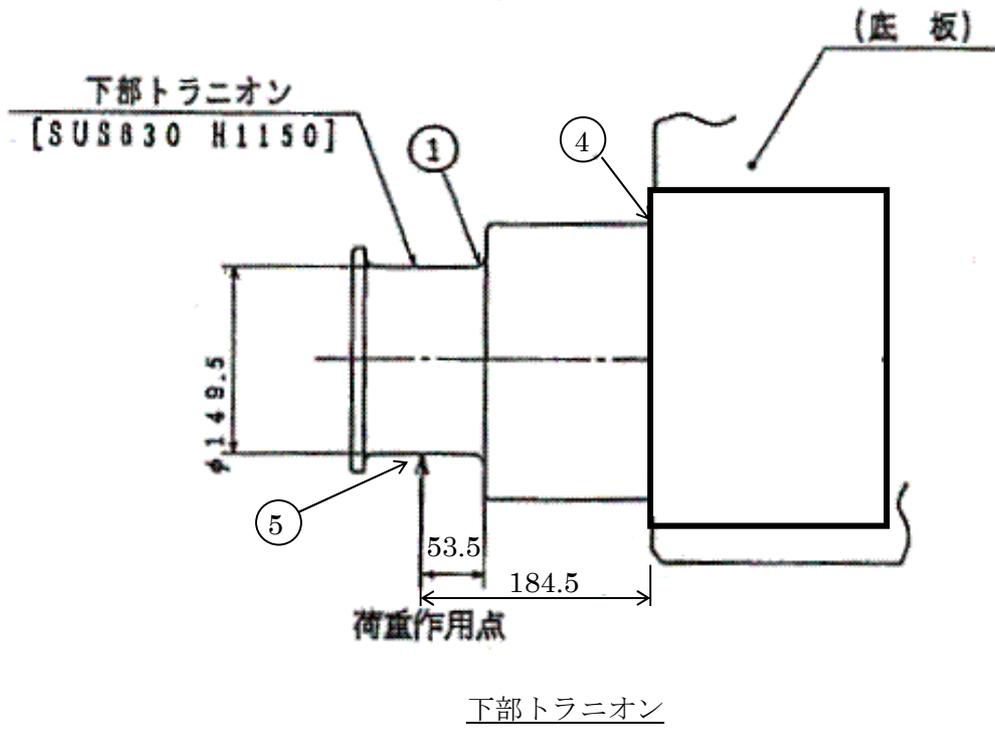
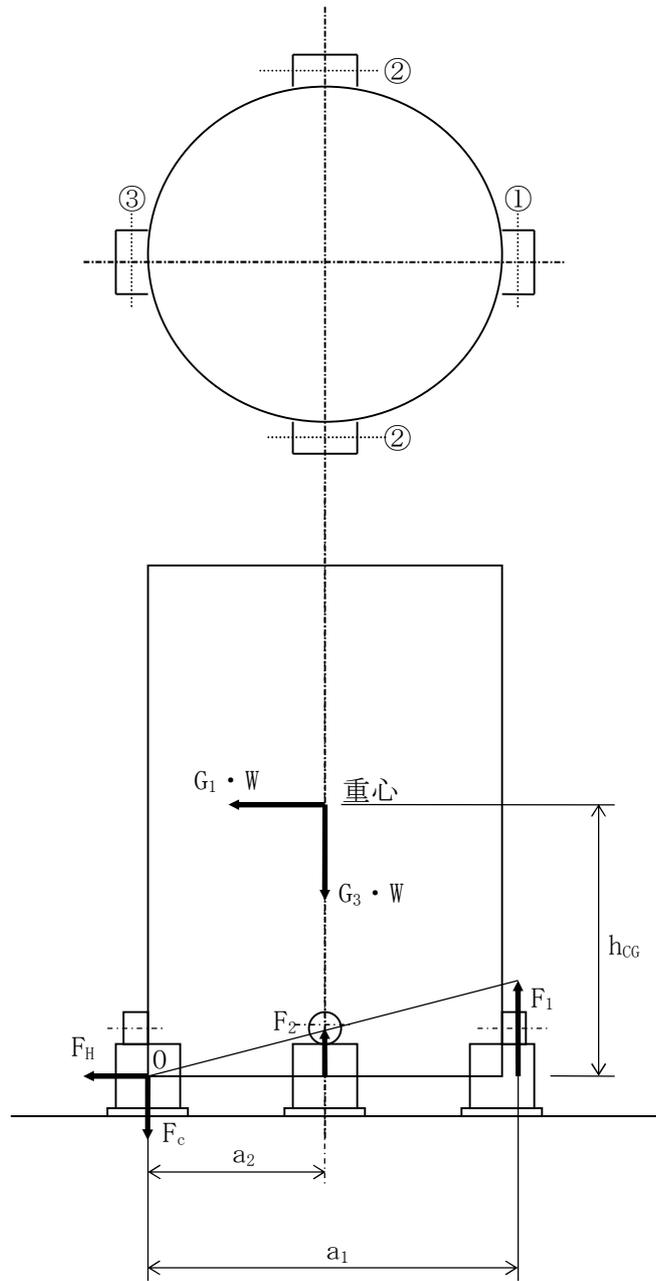


図1-1 形状・寸法・材料・応力評価点(面)



① ~③ : 支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設 計 事 象	一 次 応 力									
			せん断応力		曲げ応力		支圧応力		圧縮応力		組合せ応力	
			計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力
トラニ オン	SUS630 H1150	I + S _d *	68	339	212	588	614	801	—	—	243	588
		I + S _s	68	339	212	588	614	801	—	—	243	588

注 1：各設計事象において、既存設備により荷重作用点がずれた場合でも評価結果は許容応力を満足する。また、一次+二次応力の計算値は一次応力と等しく、許容応力は大きくなるため問題ない。

(単位：MPa)

部 位	材 料	設 計 事 象	一 次 応 力 + 二 次 応 力									
			せん断応力		曲げ応力		支圧応力		座屈応力		組合せ応力	
			計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力
トラニ オン	SUS630 H1150	I + S _d *	68	678	212	1176	614	801	—	—	243	1176
		I + S _s	68	678	212	1176	614	801	—	—	243	1176

表 2-1 トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部位	応力の種類	S_d *地震力		S_s 地震力		許容応力	
		計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)		
下部 トラニオン	一次 応力	せん断応力	68	①	68	①	339
		曲げ応力	212	④	212	④	588
		支圧応力	614	⑤	614	⑤	801
		組合せ応力	243	④	243	④	588
	1) 一次+ 二次 応力	せん断応力	68	①	68	①	678
		曲げ応力	212	④	212	④	1176
		支圧応力	614	⑤	614	⑤	801
		組合せ応力	243	④	243	④	1176

注記 1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-7 トラニオンの耐震性についての計算書②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時 (S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合)	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	5
3. 応力の評価	6
3.1 一次応力の評価	6
3.2 一次＋二次応力の評価	6
3.3 組合せ応力の評価	6

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	7
図 2-1	トラニオンボルトの荷重説明図	8
図 2-2	地震時に作用する荷重の計算モデル	9
表 1-1	計算結果の概要	10
表 2-1	トラニオンの応力評価 (貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合)	12

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点（面）を図1-1に示す。

2.2 貯蔵時（ S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）

2.2.1 荷重条件

貯蔵時において、 S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。なお、地震力には、 S_s 地震力を適用する。

地震力+自重+トラニオン固定ボルトの初期締付け力

2.2.2 計算方法

(1) トラニオン

a. 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図1-1に示す下部トラニオンの評価点①である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算する(図2-2参照)。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{(F_m + F_1)}{A} \\ F_m &= \frac{m \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2)}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$ 、 $G_2 = (1 - C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (=2720 mm)

a_1 : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
(=2238 mm)

a_2 : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心評価位置までの距離
(=924.5 mm)

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

m : 貯蔵容器の質量 (= kg)

A : 図1-1の評価点①の断面積 (= mm^2)

C_H : 水平方向設計震度 (=1.17)

C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.65)

F_1 : トラニオン固定ボルトの初期締付け力 (= N)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点②である。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= (F_m + F_1) \cdot L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 F_m : (2.1)式と同じ

F_1 : (a)と同じ

Z : 図 1-1 の評価点②の断面係数(= mm³)

L : 図 1-1 の評価点②と荷重作用位置との距離(=274 mm)

(c) 組合せ応力

イ. せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点②である。

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、 σ_b : (2.2)式と同じ

τ : (2.1)式と同じ

A : 図 1-1 の評価点②の断面積(= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) せん断応力

せん断応力(τ)の全振幅は、(2.1)式で計算する。

(b) 曲げ応力

曲げ応力(σ_b)の全振幅は、(2.2)式で計算する。

(c) 組合せ応力

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、(2.3)式で計算する。

ここで、 σ_b : (2.2)式と同じ

τ : (2.1)式と同じ

A : a. (c). と同じ

(2) トラニオンボルト

トラニオンボルトに発生する引張応力(σ_{tb})は、次のように求める。

曲げモーメントが作用した場合に生じるトラニオンボルトの引張荷重とキャスク容器の圧縮荷重については、図 2-1 に示すように荷重の釣合い条件を考慮することにより求める。

以下にその手順を示す。

- a. σ_{tb} 及び σ_{cc} を仮定してトラニオンボルトの応力計算における中立軸の荷重係数 k を求める。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{tb}}{\sigma_{cc}}} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、 k : トラニオンボルト計算における中立軸の荷重係数(-)
 σ_{tb} : トラニオンボルトの引張応力(MPa)
 σ_{cc} : キヤスク容器の圧縮応力(MPa)

b. トラニオンボルトの応力計算における中立軸を定める角度 α を求める。

$$\alpha = \cos^{-1} (1 - 2 \cdot k) \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、 α : トラニオンボルト計算における中立軸を定める角度(rad)

c. 各定数 e , z , C_t 及び C_c を求める。

$$e = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{(\pi - \alpha) \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\pi - \alpha) + \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha} \right\} \dots\dots (2.6)$$

$$z = \frac{1}{2} \cdot \left(\cos \alpha + \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha} \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$C_t = \frac{2 \cdot \{(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha\}}{1 + \cos \alpha} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$C_c = \frac{2 \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha)}{1 - \cos \alpha} \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、 e , z , C_t , C_c : トラニオンボルト計算における係数(-)

d. 各定数を用いて F_{tb} 及び F_{cc} を求める。

$$F_{tb} = \frac{M}{e \cdot D_c} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$F_{cc} = F_{tb} \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、 F_{tb} : トラニオンボルトに作用する引張力(N)
 M : (2.2) 式と同じ
 L : 図 1-1 のトラニオンボルトと荷重作用点との距離(=342 mm)
 D_c : トラニオンボルトのピッチ円直径(=340 mm)
 F_{cc} : キヤスク容器に作用する圧縮力(N)

e. σ_{tb} 及び σ_{cc} を求める。

$$\sigma_{tb} = \frac{2 \cdot F_{tb}}{t_1 \cdot D_c \cdot C_t} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\sigma_{cc} = \frac{2 \cdot F_{cc}}{(t_2 + t_1) \cdot D_c \cdot C_c} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$t_1 = \frac{n \cdot A_b}{\pi \cdot D_c} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot (D_{bo} - D_{bi}) - t_1 \dots\dots\dots (2.15)$$

- ここで、 t_1 : トラニオンボルト面積相当板幅 (mm)
 t_2 : 圧縮側相当幅 (mm)
 n : トラニオンボルト本数 (=16)
 A_b : トラニオンボルト (M36) の断面積 (=1.018 × 10³ mm²)
 D_{bo} : トラニオンボルト取付部の外径 (=419.2 mm)
 D_{bi} : トラニオンボルト取付部の内径 (=200.5 mm)

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

地震時における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、地震時の一次応力は、添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

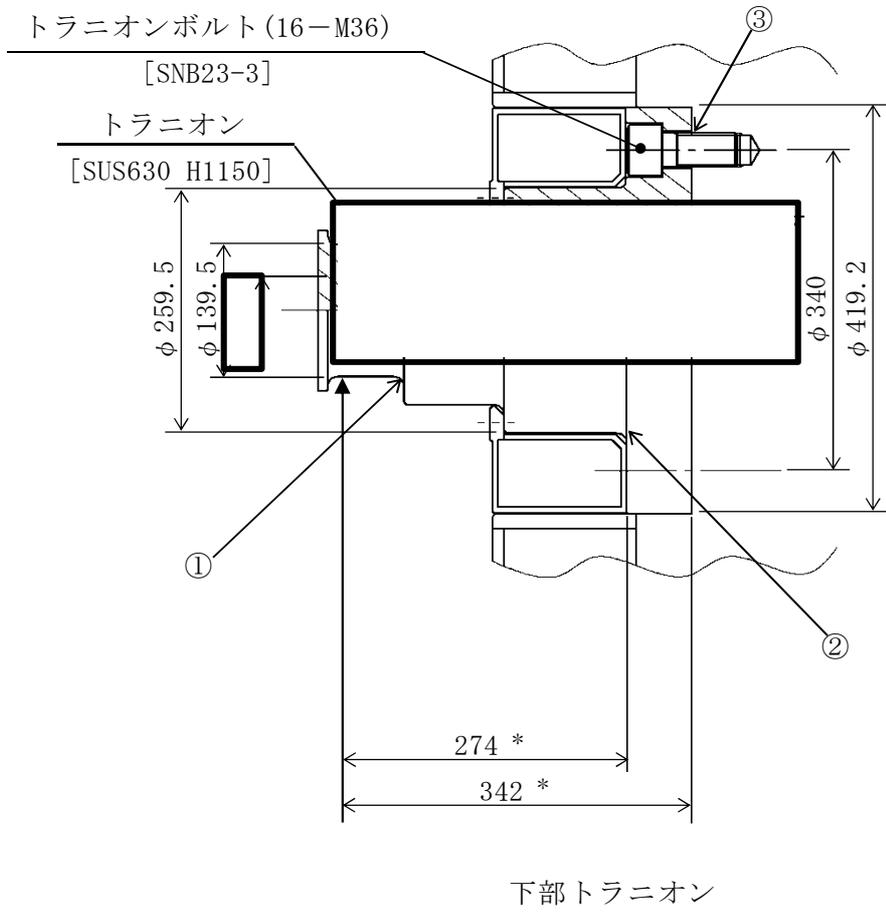
地震時における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、地震時の一次+二次応力は、添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

地震時における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、地震時における組合せ応力は、添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。



注記 * : 貯蔵時の荷重作用点
までの距離

(単位 : mm)

[] : 材料

①~③ : 応力評価点 (面)

図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)

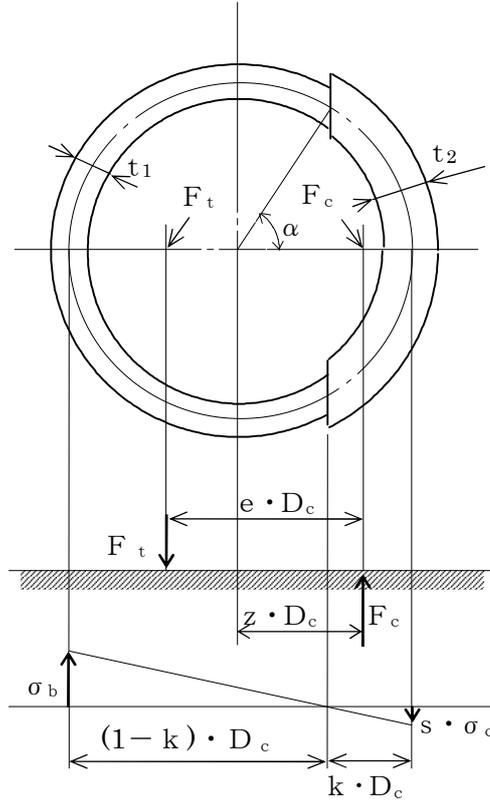
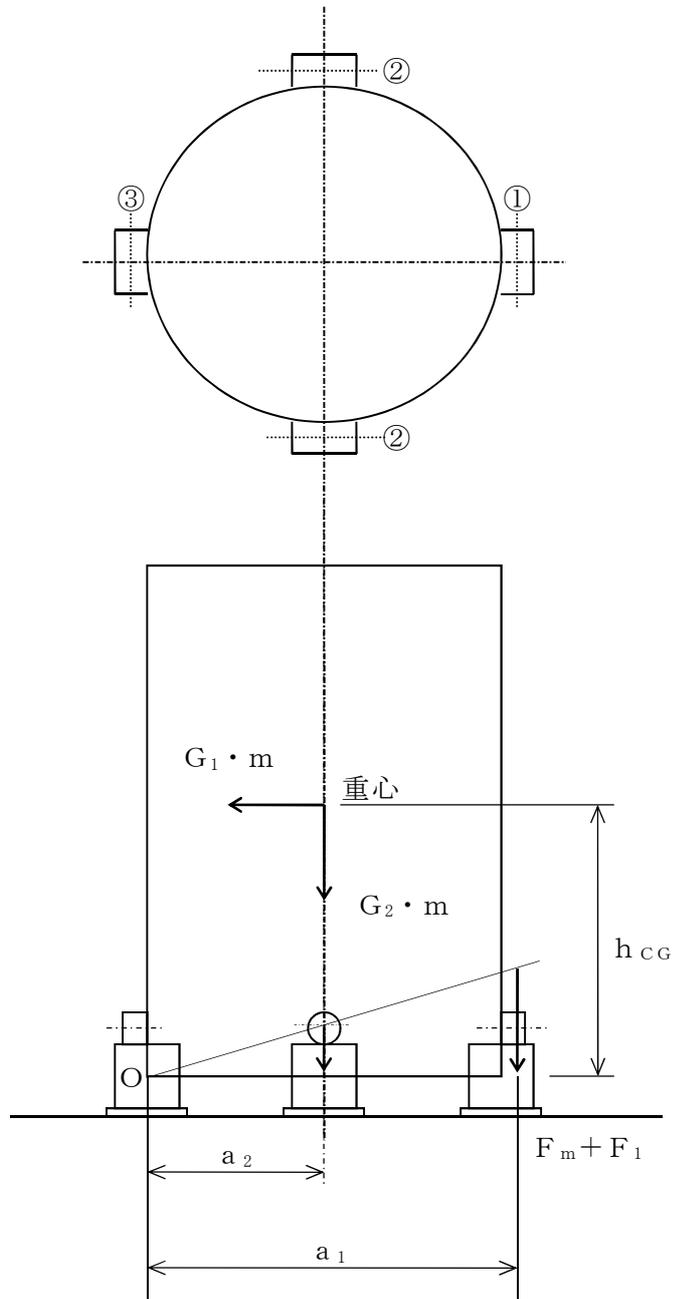


図2-1 トラニオンボルトの荷重説明図



①～③：支持台番号

図 2-2 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1(1) 計算結果の概要

部 位	材 料	設計事象	一次応力					
			せん断応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)		垂直応力とせん断 応力の組合せ (MPa)	
			計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	$I + S_d^*$	148	341	419	591	441	591
		$I + S_s$	148	341	419	591	441	591

部 位	材 料	設計事象	一次+二次応力					
			せん断応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)		垂直応力とせん断 応力の組合せ (MPa)	
			計算値	許容 応力	計算値	許容 応力	計算値	許容 応力
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	$I + S_d^*$	148	682	419	1182	441	1182
		$I + S_s$	148	682	419	1182	441	1182

表 1-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	引張応力	
			計算値	許容応力
トラニオンボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	$I + S_d^*$	323	475
		$I + S_s$	323	475

表 2-1 トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合）
（単位：MPa）

部位	応力の種類	S_d^* 地震力		S_s 地震力		許容応力	
		計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)		
下部 トラニオン	一次 応力	せん断応力	148	①	148	①	341
		曲げ応力	419	②	419	②	591
		垂直応力と せん断応力 の組合せ	441	②	441	②	591
	一* 次十二次 応力	せん断応力	148	①	148	①	682
		曲げ応力	419	②	419	②	1182
		垂直応力と せん断応力 の組合せ	441	②	441	②	1182
トラニオン ボルト	—	引張応力	323	③	323	③	475

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-7 トラニオンの耐震性についての計算書③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時 (S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合)	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	3
3. 応力の評価	4
3.1 一次応力の評価	4
3.2 一次+二次応力の評価	4
3.3 組合せ応力の評価	4

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	5
図 2-1	地震時に作用する荷重の計算モデル	6
表 1-1	計算結果の概要	7
表 2-1	トラニオンの応力評価（貯蔵時： S_d *地震力及び S_s 地震力が作用する場合）	8

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器のトラニオンに関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

トラニオンの応力評価点（面）を図 1-1 に示す。

2.2 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）

2.2.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重

2.2.2 計算方法

(1) 一次応力

a. せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-1 に示す下部トラニオンの評価点③である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力（ τ ）は、次式で表される（図 2-1 参照）。

$$\tau = \frac{F_m}{A_3}$$

$$F_m = \frac{m \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_3 \cdot a_2)}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、

$G_1 = C_H$

$G_3 = 9.81 - C_V$

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ（=2820 mm）

a_1 : 支点Oから支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離
（=2074.5 mm）

a_2 : 支点Oから支持台⑤のトラニオン固定金具中心までの距離
（=949.5 mm）

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重（= N）

m : 貯蔵容器の質量（= kg）

A_3 : 図 1-1 の評価点③の断面積（= mm²）

C_H : 水平方向設計震度（=11.48 m/s²）

C_V : 鉛直方向設計震度（=6.38 m/s²）

b. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-1 の下部トラニオンの評価点④である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力（ σ_{b4} ）は、次式で表される。

$$\sigma_{b4} = \frac{F_m \cdot L_4}{Z_4} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重（= N）

L_4 : 地震力が作用する場合の図 1-1 の評価点④と荷重作用位置との距離（= 94.5 mm）

Z_4 : 図 1-1 の評価点④の断面係数 (= mm³)

c. 支圧応力

応力が発生する箇所は、図 1-1 の下部トラニオンの評価点⑤である。トラニオン固定金具によって生じる支圧応力 (σ_p) は、次式で表される。

$$\sigma_p = \frac{F_m}{A_5} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (= N)

A_5 : 評価点⑤に接触するトラニオン固定金具の投影面積 (= mm²)

d. 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_{b4}) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{b4}^2 + 3 \cdot \tau^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

σ_{b4} : (2.2) 式と同じ

τ : (2.1) 式と同じ

(2) 一次+二次応力

a. せん断応力

せん断応力の全振幅 (τ) は、(2.1) 式と同様に与えられる。

b. 曲げ応力

曲げ応力の全振幅 (σ_b) は、(2.2) 式と同様に与えられる。

c. 支圧応力

支圧応力の全振幅 (σ_p) は、(2.3) 式と同様に与えられる。

d. 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は、(2.4) 式と同様に与えられる。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針③」5.5 項の各規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、各設計事象の一次+二次応力は添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針③」5.5 項の各規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、地震時における組合せ応力は添付書類「V-2-4-2-3-3 トラニオンの応力解析の方針③」5.5 項の各規定を満足する。

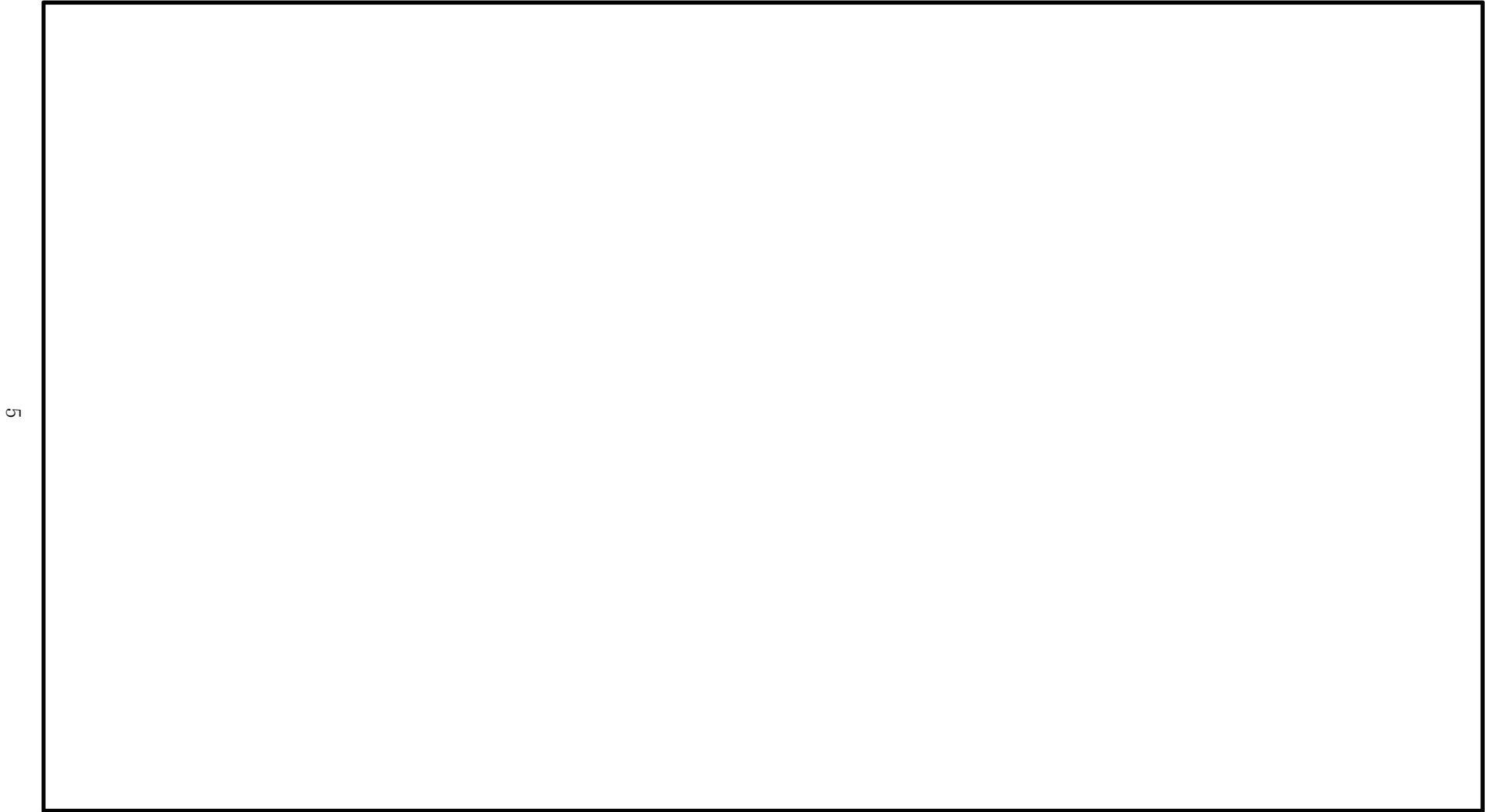
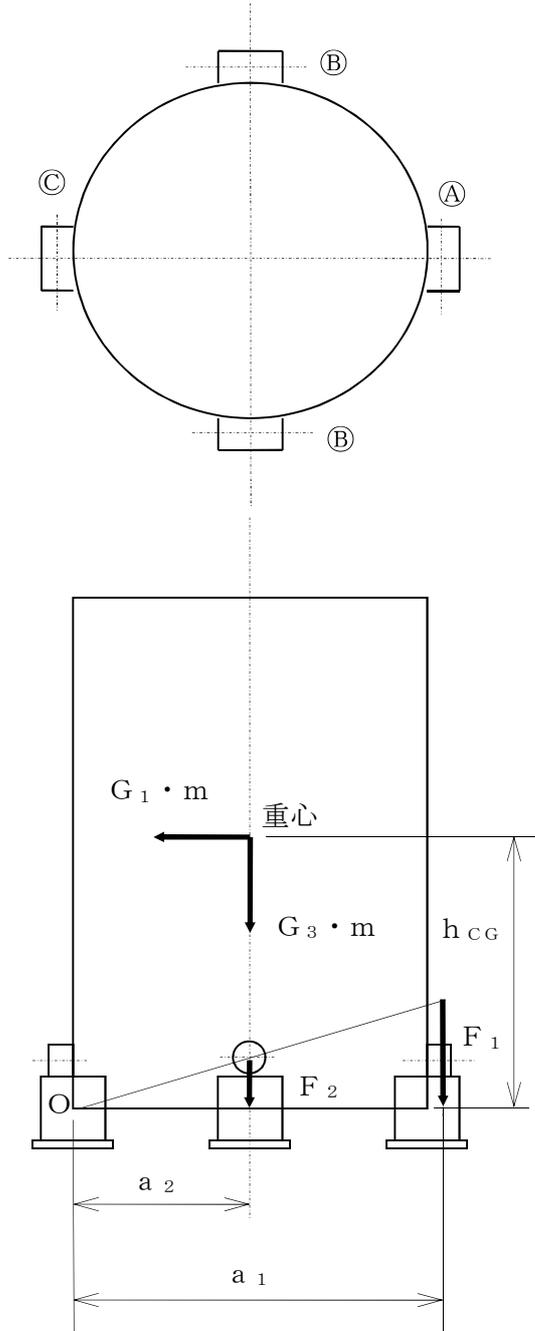


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点（面）



(A), (B), (C) : 支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部位	材料	設計 事象	一次応力									
			せん断応力		曲げ応力		支圧応力		圧縮応力		組合せ応力	
			計算 値	許容 応力								
トラ ニ オン	SUS630	$I + S_d^*$	31	339	91	801	112	801	—	—	104	588
	H1150	$I + S_s$	65	339	190	801	232	801	—	—	217	588

注：設計事象 I，II において，既存設備により荷重作用点がずれた場合でも評価結果は許容応力を満足する。また，一次+二次応力の計算値は一次応力と等しく，許容応力は大きくなるため問題ない。

なお，地震時 ($I + S_d^*$ ， $I + S_s$) においては，許容応力に対し計算値が小さいことから問題ない。

(単位：MPa)

部位	材料	設計 事象	一次+二次応力									
			せん断応力		曲げ応力		支圧応力		座屈応力		組合せ応力	
			計算 値	許容 応力								
トラ ニ オン	SUS630	$I + S_d^*$	31	678	91	1603	112	801	—	—	104	1176
	H1150	$I + S_s$	65	678	190	1603	232	801	—	—	217	1176

表 2-1 トラニオンの応力評価 (貯蔵時：S_d*地震力及びS_s地震力が作用する場合)

(単位：MPa)

部位	応力の種類	S _d *地震力		S _s 地震力		許容応力	
		計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)		
下部トラニオン	一次応力	せん断応力	31	③	65	③	339
		曲げ応力	91	④	190	④	801
		支圧応力	112	⑤	232	⑤	801
		組合せ応力	104	④	217	④	588
	一次+二次応力*	せん断応力	31	③	65	③	678
		曲げ応力	91	④	190	④	1603
		支圧応力	112	⑤	232	⑤	801
		組合せ応力	104	④	217	④	1176

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-8 支持構造物の耐震性についての計算書①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	3
2.3 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）	4
2.3.1 荷重条件	4
2.3.2 計算方法	4
2.3.3 計算結果	7
3. 応力の評価	8
3.1 一次応力の評価	8
3.2 一次+二次応力の評価	8
3.3 組合せ応力の評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点(面)	9
図 2-1	地震時に作用する荷重の計算モデル	10
表 1-1	計算結果の概要	11
表 2-1	支持構造物の応力評価 (設計事象 I)	12
表 2-2	支持構造物の応力評価 (貯蔵時: S_d *地震力が作用する場合)	13
表 2-3	支持構造物の応力評価 (貯蔵時: S_s 地震力が作用する場合)	14

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる評価点(面)を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点（面）を図 1-1 に示す。

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

自重＋熱荷重

2.2.2 計算方法

リブ及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。なお、トラニオン固定ボルト、容器押え金具、アンカーボルト及びトラニオン固定金具については、(自重＋熱荷重)により発生する応力は無視できるため評価を省略する。

(1) リブ

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

自重によりリブに生じる圧縮応力(σ_c)は次式により与えられる。

$$\sigma_c = (W_c + n \cdot W_s) \cdot g / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 W_c : 貯蔵容器質量 (=118000 kg)

n : 支持台の数 (=4)

W_s : 支持台 1 個の質量 (=700 kg)

g : 重力加速度 (=9.81 m/s²)

A : 断面積 (=5.29×10⁴ mm²)

b. 一次＋二次応力

(a) 引張・圧縮応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので、リブに発生する応力は(2.1)式と同様に与えられる。

(2) 支持台座

b. 一次応力

(a) 支圧応力

自重により支持台座に生じる支圧応力(σ_p)は次式により与えられる。

$$\sigma_p = W_c \cdot g / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 W_c , g , n : 2.2.2 項(1)a. (a)と同じ

A : 支持台座のキャスク容器底面接触面積 (=1.18×10⁵ mm²)

b. 一次＋二次応力

(a) 支圧応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので，支持台座に発生する支圧応力は，(2.2)式と同様に与えられる。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

2.3 貯蔵時（ S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合）

2.3.1 荷重条件

貯蔵時において S_d^* 及び S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力＋自重＋熱荷重

2.3.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押え金具及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力(F_1)は，図 2-1 に示す支持台①に生じ，次式により与えられる。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2a_2^2}{a_1} + a_1} W_c \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで， $G_1 = \alpha_H$ ， $G_2 = 9.81 - \alpha_V$

α_H : 水平方向設計加速度 ($=C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2$)

α_V : 鉛直方向設計加速度 ($=C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ ($=2870 \text{ mm}$)

a_1 : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離
($=2077.5 \text{ mm}$)

a_2 : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離
($=949.5 \text{ mm}$)

W_c : 2.2.2 項(1)a.(a)と同じ

この引張力(F_1)によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力(σ_t)は次式で表わされる。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで， F_1 : 引張力 ($=1.19 \times 10^6 \text{ N}$)

n : トラニオン固定金具 1 組当たりのボルトの本数 ($=2$)

A : トラニオン固定ボルト(M45)の断面積 ($=1.59 \times 10^3 \text{ mm}^2$)

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)により曲げ応力(σ_b)が発生し，次式により与えられる。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} F_1 \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、 F_1 : 引張力 (= 1.19×10^6 N)
 L : トラニオン固定ボルト間距離 (= 245 mm)
 Z : トラニオン固定金具の断面係数 (= 1.53×10^5 mm³)

b. 一次+二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力 (F_1) による曲げ応力の全振幅 (σ_b) は、(2.5) 式と同様に与えられる。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力 (F_1) によりリブに発生する引張応力 (σ_t) は、次式により与えられる。

$$\sigma_t = F_1 / A \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 F_1 : 引張力 (= 1.19×10^6 N)
 A : 2.2.2 項 (1) a. (a) と同じ

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力 (F_c) は支持台③に生じ、次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \times (W_c + W_s) + 2F_2 + F_1 \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、 $G_1 = \alpha_H$, $G_2 = 9.81 + \alpha_V$
 α_H, α_V : 2.3.2 項 (1) a. と同じ
 W_c, W_s : 2.2.2 項 (1) a. (a) と同じ
 F_1 : (2.3) 式と同じ (= 1.19×10^6 N)
 F_2 : 支持台②での引張力 (= $\frac{a_2}{a_1} F_1 = 5.44 \times 10^5$ N)
 a_1, a_2 : 2.3.2 項 (1) a. と同じ

この圧縮力 (F_c) によりリブに発生する圧縮応力 (σ_c) は次式で表わされる。

$$\sigma_c = F_c / A \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、 F_c : 圧縮力 (= 4.20×10^6 N)
 A : 2.2.2 項 (1) a. (a) と同じ

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅 (σ) は、次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、 σ_t : 2.3.2 項 (3) a. (a) と同じ

σ_c : 2.3.2項(3)a.(b)と同じ

(4) アンカーボルト

a. 引張応力

(2.3)式により与えられる引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式により与えられる。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで、 F_1 : 引張力 ($=1.19 \times 10^6$ N)
 n : 支持台1個当たりのアンカーボルトの本数 (=6)
 A : アンカーボルト(M36)の断面積 ($=1.01 \times 10^3$ mm²)

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は支持台③に生じ、次式により与えられる。

$$F_H = \alpha_H \cdot (W_c + W_s) \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、 α_H : 2.3.2項(1)a.と同じ
 W_c, W_s : 2.2.2項(1)a.(a)と同じ

この水平力(F_H)によりアンカーボルトに発生するせん断応力(τ)は、次式で表わされる。

$$\tau = F_H / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで、 F_H : 水平力 ($=1.36 \times 10^6$ N)
 n, A : 2.3.2項(4)a.と同じ

(5) 容器押え金具

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押え金具に作用する最大水平力(F_H)は支持台③に生じ、次式により与えられる。

$$F_H = \alpha_H \cdot W_c \dots\dots\dots (2.13)$$

ここで、 α_H : 2.3.2項(1)a.と同じ
 W_c : 2.2.2項(1)a.(a)と同じ

水平力(F_H)より容器押え金具に発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = F_H / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.14)$$

ここで、 F_H : 水平力 ($=1.35 \times 10^6$ N)
 n : 支持台1個当たりの容器押え金具の本数 (=2)
 A : 容器押え金具の断面積 ($=1.78 \times 10^3$ mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は、(2.14)式と同様に与えられる。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は支持台③に生じ、次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \times W_c + 2F_2 + F_1 \dots \dots \dots (2.15)$$

ここで、 $G_1 = \alpha_H$, $G_2 = 9.81 + \alpha_v$

α_H, α_v : 2.3.2 項(1)a. と同じ

W_c : 2.2.2 項(1)a. (a) と同じ

F_1, F_2 : 2.3.2 項(3)a. (b) と同じ

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で表わされる。

$$\sigma_p = F_c / A \dots \dots \dots (2.16)$$

ここで、 F_c : 圧縮力 ($=4.19 \times 10^6$ N)

A : 2.2.2 項(2)a. (a) と同じ

b. 一次+二次応力

(a) 支圧応力

地震力のみによる支圧応力の全振幅(σ_p)は(2.16)式と同様に与えられる。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表 2-2 及び表 2-3 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

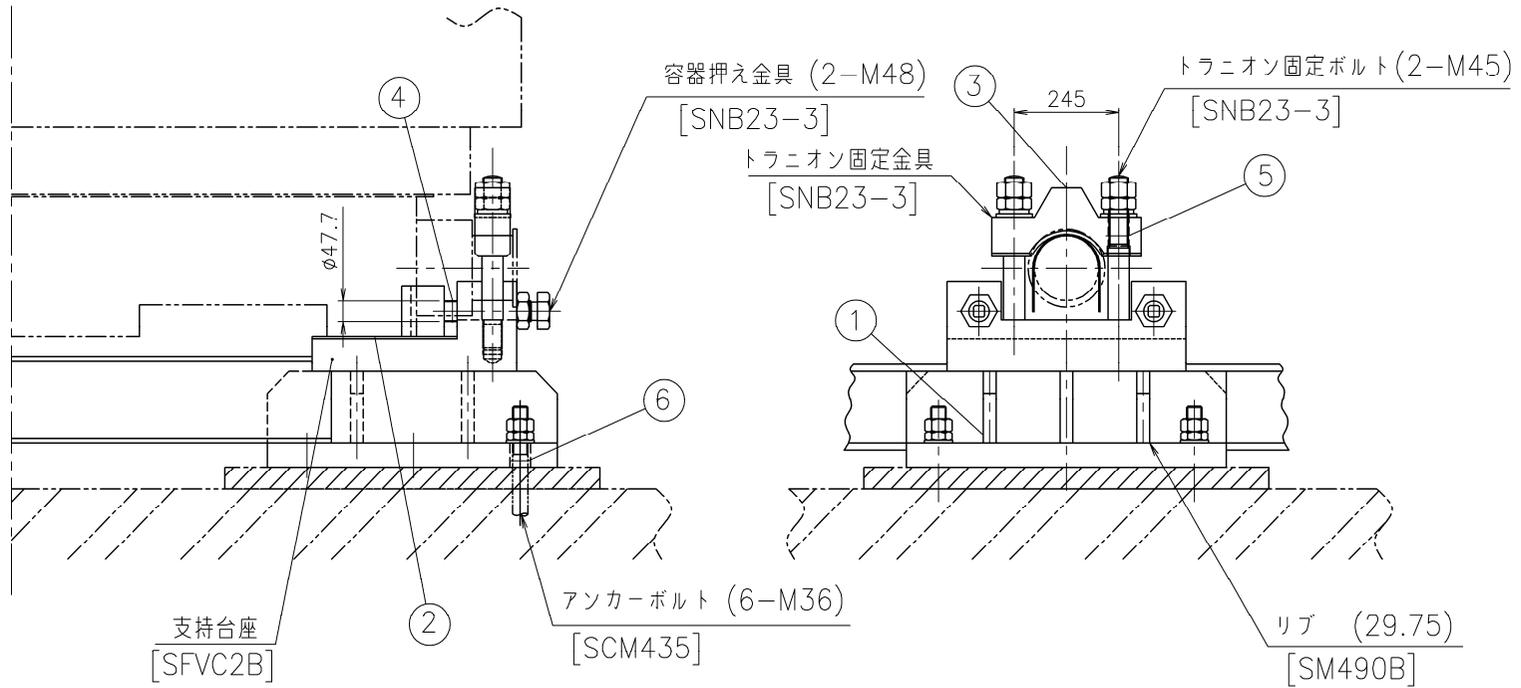
各設計事象における評価を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象の一次+二次応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針①」5.5 項の規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

各設計事象において, 組合せ応力の評価はない。

6

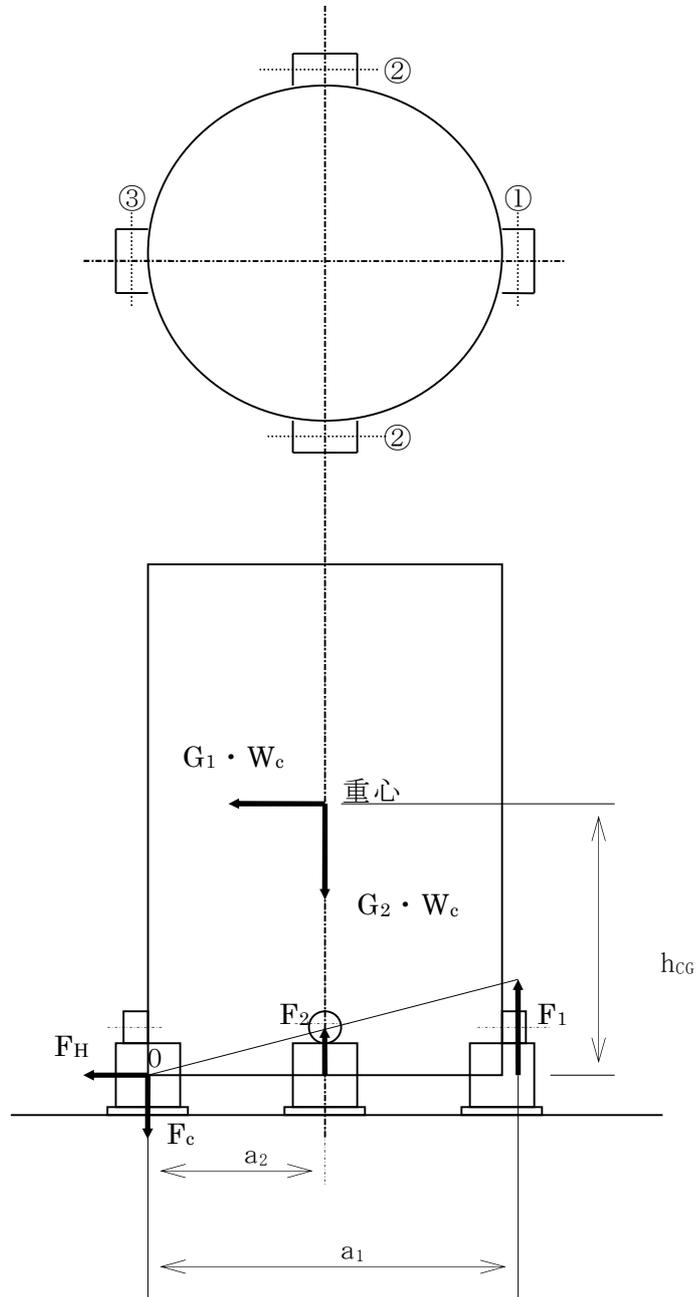


(単位 : mm)

[] : 材料

① ~ ⑥ : 応力評価点

図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点(面)



○ : 支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次応力		一次+二次応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
リブ	SM490B	I	6	181	6	543
		I + S _d *	80	271	103	543
		I + S _s	80	307	103	543
支持台座	SFVC2B	I	3	201	3	301
		I + S _d *	36	301	36	301
		I + S _s	36	361	36	361
トラニオン 固定金具	SNB23-3	I + S _d *	477	637	477	1275
		I + S _s	477	637	477	1275
容器押え 金具	SNB23-3	I + S _d *	380	543	380	1275
		I + S _s	380	543	380	1275

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	引張応力		せん断応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 固定ボルト	SNB23-3	I + S _d *	375	478		
		I + S _s	375	478		
アンカー ボルト	SCM435	I + S _d *	197	261	225	340
		I + S _s	197	261	225	340

表 2-1 支持構造物の応力評価（設計事象 I）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			計算値	評価点 (面)	
リ ブ	一次応力	圧縮応力	6	①	181
	一次+二次応力	圧縮応力	6	①	543
支持台座	一次応力	支圧応力	3	②	201
	一次+二次応力	支圧応力	3	②	301

表 2-2 支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力 ²⁾
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	477	③	637
	一次+二次応力 ¹⁾	曲げ応力	477	③	1275
リ ブ	一次応力	引張応力	23	①	271
		圧縮応力	80	①	271
	一次+二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	103	①	543
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	380	④	543
	一次+二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	380	④	1275
支持台座	一次応力	支圧応力	36	②	301
	一次+二次応力 ¹⁾	支圧応力	36	②	301
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	375	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	197	⑥	261
		せん断応力	225	⑥	340

注記 1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

2)：許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力にて評価を行う。

表 2-3 支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力 ²⁾
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	477	③	637
	一次+二次応力 ¹⁾	曲げ応力	477	③	1275
リ ブ	一次応力	引張応力	23	①	307
		圧縮応力	80	①	307
	一次+二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	103	①	543
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	380	④	543
	一次+二次応力 ¹⁾	引張・圧縮 応力	380	④	1275
支持台座	一次応力	支圧応力	36	②	361
	一次+二次応力 ¹⁾	支圧応力	36	②	361
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	375	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	197	⑥	261
		せん断応力	225	⑥	340

注記 1)：地震力のみによる全振幅について評価する。

2)：許容応力状態IV_ASの許容応力にて評価を行う。

V-2-4-2-3-8 支持構造物の耐震性についての計算書②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	3
2.3 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	3
2.3.1 荷重条件	3
2.3.2 計算方法	3
2.3.3 計算結果	7
2.4 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	7
2.4.1 荷重条件	7
2.4.2 計算方法	7
2.4.3 計算結果	7
3. 応力の評価	8
3.1 一次応力の評価	8
3.2 一次+二次応力の評価	8
3.3 組合せ応力の評価	8

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	9
図 1-2	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	10
図 2-1	地震時に作用する荷重の計算モデル	11
表 1-1	計算結果の概要	12
表 2-1	支持構造物の応力評価（設計事象 I）	13
表 2-2	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	14
表 2-3	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	15

1. 概 要

本計算書は、使用済乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1(1), (2)に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点（面）を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

自重+熱荷重

2.2.2 計算方法

リブ及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。なお、トラニオン固定ボルト、容器押えボルト、アンカーボルト、トラニオン固定金具及び支持台用フレームについては、(自重+熱荷重)により発生する応力は無視できるため評価を省略する。

(1) リブ

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

自重によりリブに生じる圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = (m_c + n \cdot m_s) \cdot g / (n \cdot A) \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

n : 支持台の数 (=)

m_s : 支持台 1 個の質量 (= kg)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

A : 断面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので、リブに発生する応力は(2.1)式と同様に計算する。

(2) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

自重により支持台座に生じる支圧応力(σ_p)は次式で計算する。

$$\sigma_p = m_c \cdot g / (n \cdot A) \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、 m_c , g , n : (1)a. (a)と同じ

A : 支持台座の貯蔵容器底面接触面積
(= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 支圧応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので、支持台座に発生する支圧応力は、(2.2)式と同様に計算する。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

2.3 貯蔵時 (S_d*地震力が作用する場合)

2.3.1 荷重条件

貯蔵時において S_d*地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。なお、地震力には S_s地震力を適用する。

地震力+自重+熱荷重+トラニオン固定ボルトの初期締付け力

2.3.2 計算方法

トラニオン固定ボルト、トラニオン固定金具、リブ、アンカーボルト、容器押えボルト、支持台座及び支持台用フレームの応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力(F₁)は、図 2-1 に示す支持台①に生じ、次式で計算する。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \cdot m_c \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、G₁ = C_H · g, G₂ = (1 - C_V) · g

G₁ : 水平方向加速度 (m/s²)

G₂ : 鉛直方向加速度 (m/s²)

C_H : 水平方向設計震度 (=1.17)

C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.65)

G : 2.2.2(1)a.(a)と同じ

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (= mm)

a₁ : 支点Oから支持台①のトラニオン固定金具中心までの距離 (= mm)

a₂ : 支点Oから支持台②のトラニオン固定金具中心までの距離 (= mm)

m_c : 2.2.2(1)a.(a)と同じ

この引張力(F₁)によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力(σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、 F_1 : (2.3)式と同じ

n : トラニオン固定金具1組当たりのボルトの本数 (=)

A : トラニオン固定ボルト の断面積 (= mm^2)

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力(F_1)及びトラニオン固定ボルトの初期締付け力(F_3)により曲げ応力(σ_b)が発生し、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} \cdot (F_1 + F_3) \dots \dots \dots (2.5)$$

ここで、 F_1 : (2.3)式と同じ

F_3 : トラニオン固定ボルトの初期締付け力 (= N)

L : トラニオン固定ボルト間距離 (= mm)

Z : トラニオン固定金具の断面係数 (= mm^3)

b. 一次+二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は、(2.5)式と同様に計算する。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F_1)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は、次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / A \dots \dots \dots (2.6)$$

ここで、 F_1 : (2.3)式と同じ

A : 2.2.2(1)a.(a)と同じ

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(F_c)は図2-1に示す支持台③に生じ、次式で計算する。

$$F_c = G_2 \cdot (m_c + m_s) + 2 \cdot F_2 + F_1 \dots \dots \dots (2.7)$$

ここで、 $G_1 = C_H \cdot g$, $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

C_H, C_V : (1)a.と同じ

m_c, m_s, g : 2.2.2(1)a.(a)と同じ

F_1 : (2.3)式と同じ

F_2 : 支持台②での引張力 (= $\frac{a_2}{a_1} \cdot F_1$) (N)

a_1, a_2 : (1)a.と同じ

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = F_c / A \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで, F_c : (2.7)式と同じ

A : 2.2.2(1)a. (a)と同じ

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は, 次式で計算する。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで, σ_t : (2.6)式と同じ

σ_c : (2.8)式と同じ

(4) アンカーボルト

支持台は図1-2に示すように形鋼で互いに接合されている。荷重がA部に加わると支持台用フレームを介してB部の支持台でも荷重を受ける。

a. 引張応力

(2.3)式により計算する引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_1 / (n \cdot A) \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで, F_1 : (2.3)式と同じ

n : 支持台1個当たりのアンカーボルトの本数 (=)

A : アンカーボルト の断面積 (= mm²)

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は図2-1に示す支持台③に生じ, 次式で計算する。

$$F_H = C_H \cdot g \cdot (m_c + n_1 \cdot m_s) \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで, C_H : (1)a.と同じ

m_c, m_s, g : 2.2.2(1)a. (a)と同じ

n_1 : 支持台の数 (=)

この水平力(F_H)は支持台2箇所を受けることから, アンカーボルトに発生するせん断応力(τ)は, 次式で計算する。

$$\tau = F_H / (2 \cdot n \cdot A) \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで, F_H : (2.11)式と同じ

n, A : a.と同じ

(5) 容器押えボルト

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押えボルトに作用する最大水平力(F_H)は図2-1に示す支持台③に生じ, 次式で計算する。

$$F_H = C_H \cdot g \cdot m_c \dots\dots\dots (2.13)$$

ここで, C_H : (1)a. と同じ
 m_c, g : 2.2.2(1)a. (a) と同じ

水平力(F_H)により容器押えボルトに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = F_H / (n \cdot A) \dots \dots \dots (2.14)$$

ここで, F_H : (2.13)式と同じ

n : 支持台 1 個当たりの容器押えボルトの本数 (=)

A : 容器押えボルトの断面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 座屈応力

容器押えボルトには地震時以外に外荷重が作用しないので, 地震力による座屈応力の最大値(σ)は, (2.14)式と同様に計算する。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は図 2-1 に示す支持台③に生じ, 次式で計算する。

$$F_c = G_2 \cdot m_c + 2 \cdot F_2 + F_1 + F_3 \dots \dots \dots (2.15)$$

ここで, $G_1 = C_H \cdot g$, $G_2 = (1 + C_V) \cdot g$

G_1 : 水平方向加速度 (m/s²)

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s²)

C_H, C_V : (1)a. と同じ

m_c, g : 2.2.2(1)a. (a) と同じ

F_1 : (2.3)式と同じ

F_2 : (3)a. (b)と同じ

F_3 : (2)a. (a)と同じ

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で計算する。

$$\sigma_p = F_c / A \dots \dots \dots (2.16)$$

ここで, F_c : (2.15)式と同じ

A : 2.2.2(2)a. (a)と同じ

b. 一次+二次応力

(a) 支圧応力

支圧応力(σ_p)は(2.16)式と同様に計算する。

(7) 支持台用フレーム

a. 一次応力

(a) 引張応力

支持台用フレームには, (2.11)式により計算する最大水平力(F_H)の 1/2 の荷重が加わり, このときの引張応力 (σ_t)は次式で計算する。

$$\sigma_t = F_H / (2 \cdot A) \dots \dots \dots (2.17)$$

ここで、 F_H ：(2.11)式と同じ

A ：支持台用フレームの断面積（= mm^2 ）

b. 一次+二次応力

(a) 引張応力

最大水平荷重による引張応力の全振幅(σ_t)は、(2.17)式と同様に計算する。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表 2-2 に示す。

2.4 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)

2.4.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重+熱荷重+トラニオン固定ボルトの初期締付け力

2.4.2 計算方法

トラニオン固定ボルト、トラニオン固定金具、リブ、アンカーボルト、容器押えボルト、支持台座及び支持台用フレームの応力計算は 2.3.2 項と同様である。

ただし、 C_H ：水平方向設計震度（=1.17）

C_V ：鉛直方向設計震度（=0.65）

2.4.3 計算結果

応力計算結果を表 2-3 に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象の一次+二次応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

各設計事象における評価を表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象における組合せ応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針②」5.5 節の各規定を満足する。

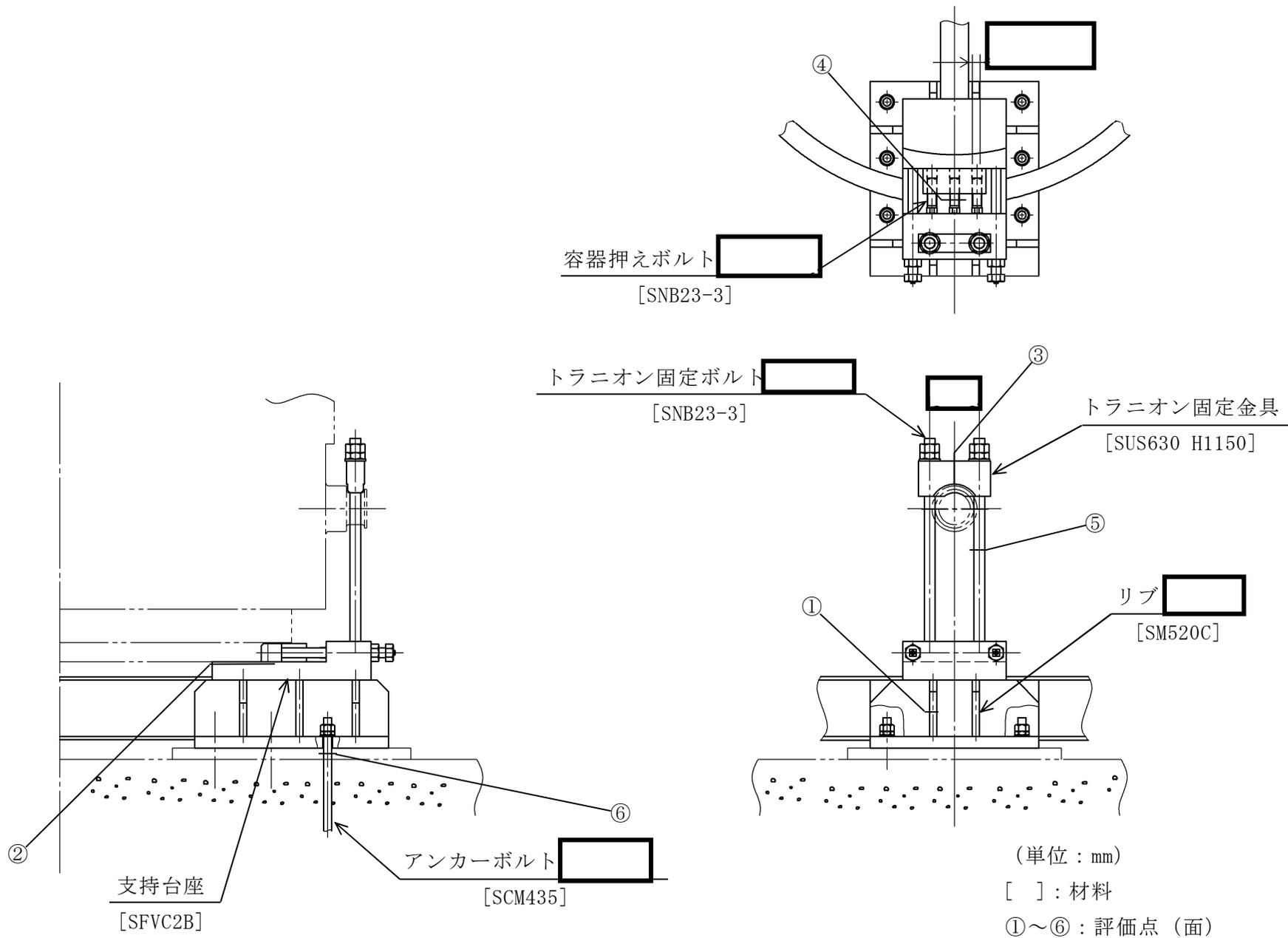
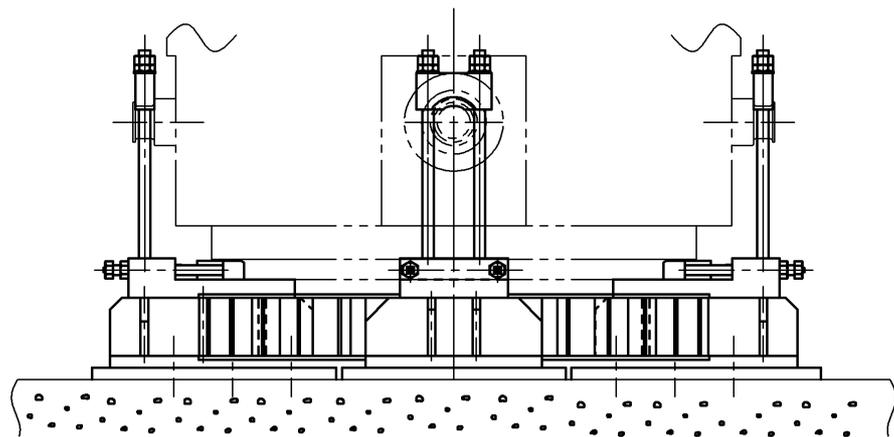
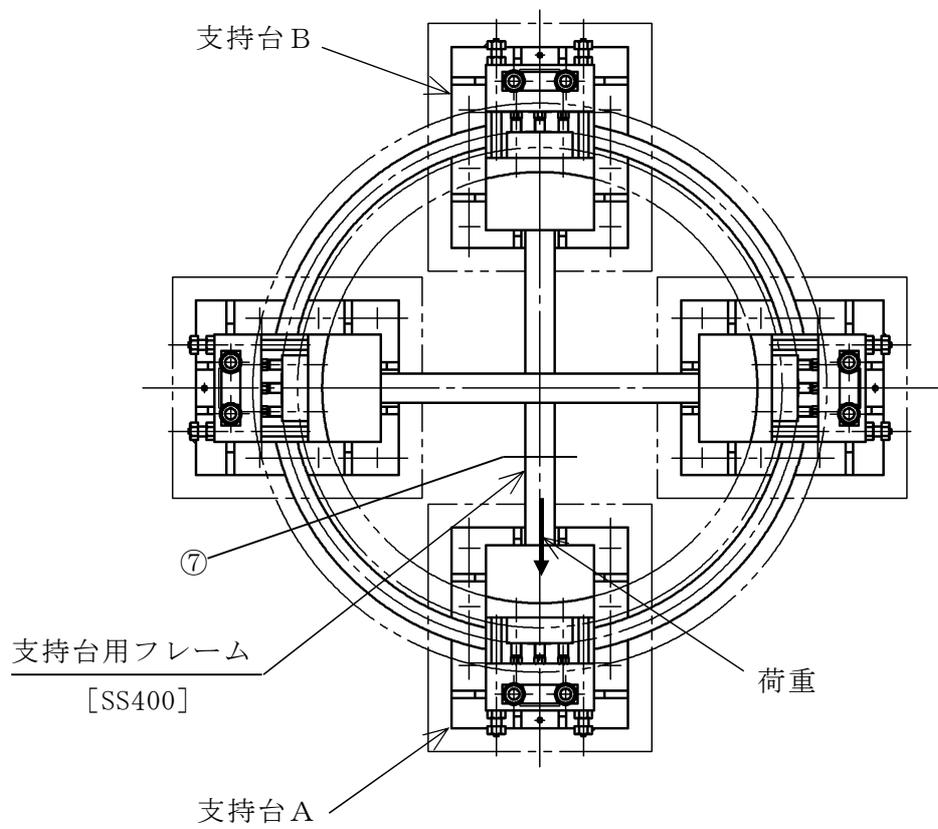
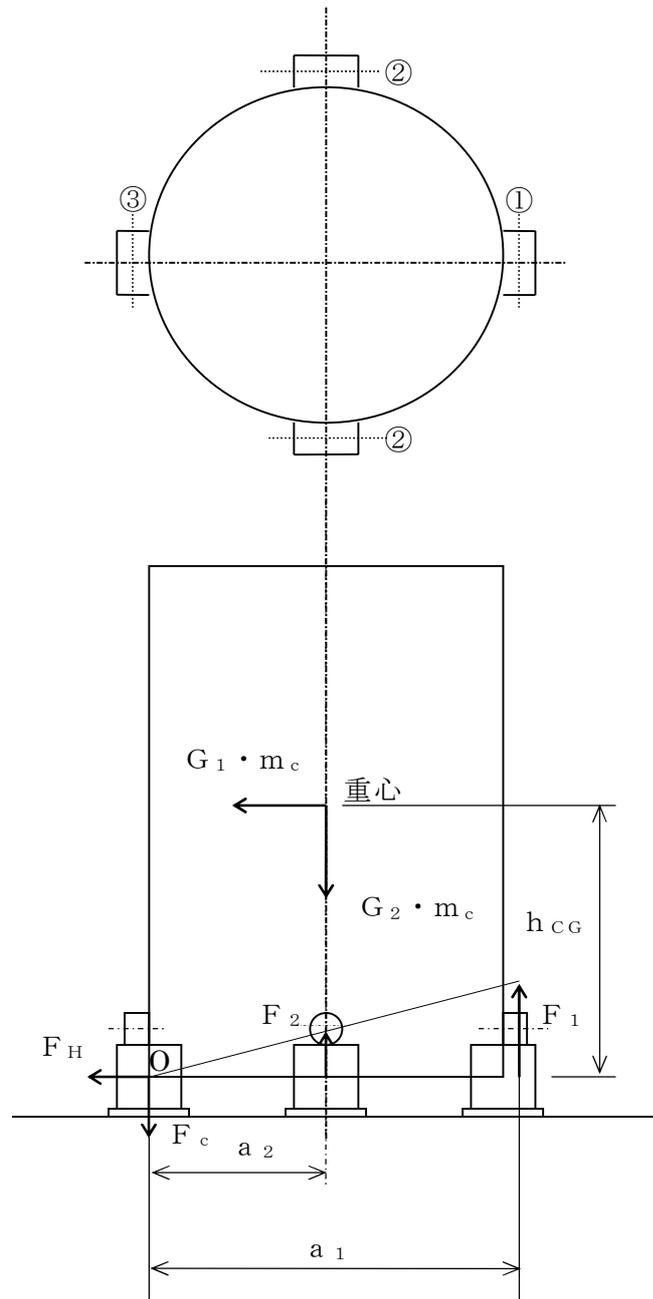


図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)



[] : 材料
 ⑦ : 応力評価点 (面)

図 1-2 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)



①～③：支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1(1) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	一次応力		一次+二次応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
リブ	炭素鋼 (SM520C)	I	5	189	5	610
		I + S _d *	64	284	81	610
		I + S _s	64	314	81	610
支持台座	炭素鋼 (SFVC2B)	I	3	201	3	302
		I + S _d *	41	302	41	302
		I + S _s	41	362	41	362
トラニオン 固定金具	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	I + S _d *	401	591	401	1182
		I + S _s	401	591	401	1182
容器押え ボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	I + S _d *	417	631	417	631
		I + S _s	417	631	417	631
支持台用 フレーム	炭素鋼 (SS400)	I + S _d *	99	212	99	424
		I + S _s	99	254	99	424

表 1-1(2) 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材 料	設計事象	引張応力		せん断応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 固定ボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	I + S _d *	305	478	—	—	—	—
		I + S _s	305	478	—	—	—	—
アンカー ボルト	低合金鋼 (SCM435)	I + S _d *	181	444	113	341	181	440
		I + S _s	181	444	113	341	181	440

表 2-1 支持構造物の応力評価（設計事象 I）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			計算値	評価点 (面)	
リ ブ	一次応力	圧縮応力	5	①	189
	一次+二次応力	引張・圧縮応力	5	①	610
支持台座	一次応力	支圧応力	3	②	201
	一次+二次応力	支圧応力	3	②	302

表 2-2 支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	401	③	591
	一次+二次応力*	曲げ応力	401	③	1182
リ ブ	一次応力	引張応力	18	①	305
		圧縮応力	64	①	284
	一次+二次応力*	引張・圧縮 応力	81	①	610
容器押えボルト	一次応力	圧縮応力	417	④	631
	一次+二次応力	座屈応力	417	④	631
支持台座	一次応力	支圧応力	41	②	302
	一次+二次応力	支圧応力	41	②	302
支持台用 フレーム	一次応力	引張応力	99	⑦	212
	一次+二次応力*	引張応力	99	⑦	424
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	305	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	181	⑥	444
		せん断応力	113	⑥	341
		組合せ応力	181	⑥	440

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 2-3 支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		計算値	評価点 (面)	許容応力
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	401	③	591
	一次+二次応力*	曲げ応力	401	③	1182
リ ブ	一次応力	引張応力	18	①	340
		圧縮応力	64	①	314
	一次+二次応力*	引張・圧縮 応力	81	①	610
容器押えボルト	一次応力	圧縮応力	417	④	631
	一次+二次応力	座屈応力	417	④	631
支持台座	一次応力	支圧応力	41	②	362
	一次+二次応力	支圧応力	41	②	362
支持台用 フレーム	一次応力	引張応力	99	⑦	254
	一次+二次応力*	引張応力	99	⑦	424
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	305	⑤	478
アンカーボルト	—	引張応力	181	⑥	444
		せん断応力	113	⑥	341
		組合せ応力	181	⑥	440

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-8 支持構造物の耐震性についての計算書③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果の概要	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価点	2
2.2 貯蔵時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 計算方法	2
2.2.3 計算結果	3
2.3 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	4
2.3.1 荷重条件	4
2.3.2 計算方法	4
2.3.3 計算結果	8
2.4 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)	9
2.4.1 荷重条件	9
2.4.2 計算方法	9
2.4.3 計算結果	9
3. 応力の評価	10
3.1 一次応力の評価	10
3.2 一次+二次応力の評価	10
3.3 組合せ応力の評価	10

図表目次

図 1-1	形状・寸法・材料・応力評価点（面）	11
図 2-1	地震時に作用する荷重の計算モデル	12
表 1-1	計算結果の概要	13
表 2-1	支持構造物の応力評価（設計事象 I）	14
表 2-2	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）	15
表 2-3	支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_s 地震力が作用する場合）	16

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の支持構造物に関する応力計算書である。

1.1 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 1-1 に示す。

1.2 計算結果の概要

計算結果の概要を表 1-1 に示す。

なお、応力評価点の選定に当たっては、応力評価上厳しくなる代表的な評価点（面）を本計算書に記載している。

2. 応力計算

2.1 応力評価点

支持構造物の応力評価点(面)を図 1-1 に示す。

2.2 貯蔵時

2.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

自重+熱荷重

2.2.2 計算方法

リブ及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。なお、トラニオン固定ボルト、容器押え金具、アンカーボルト及びトラニオン固定金具については、(自重+熱荷重)により発生する応力は無視できるため評価を省略する。

(1) リブ

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

自重によりリブに生じる圧縮応力 (σ_c) は次式により与えられる。

$$\sigma_c = \frac{(m_c + n_2 \cdot m_s) \cdot G_2}{n_2 \cdot A_1} \dots\dots\dots (2. 1)$$

ここで、

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

n_2 : 支持台の数 (=)

m_s : 支持台 1 個の質量 (= kg)

G_2 : 下方向加速度 (=9.81 m/s²)

A_1 : リブの支持台座接触断面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので、リブに発生する応力は(2. 1)式と同様に与えられる。

(2) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

自重により支持台座に生じる支圧応力 (σ_p) は次式により与えられる。

$$\sigma_p = \frac{m_c \cdot G_2}{n_2 \cdot A_2} \dots\dots\dots (2. 2)$$

ここで、

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

G_2 : 下方向加速度 (=9.81 m/s²)

n_2 : 支持台の数 (=)

A_2 : 支持台座のキャスク容器底面接触面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 支圧応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので、支持台座に発生する支圧応力は、(2. 2) 式と同様に与えられる。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表 2-1 に示す。

2.3 貯蔵時 (S_d*地震力が作用する場合)

2.3.1 荷重条件

貯蔵時において S_d*地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。
 地震力+自重

2.3.2 計算方法

トラニオン固定ボルト, トラニオン固定金具, リブ, アンカーボルト, 容器押え金具及び支持台座の応力計算は以下に示すとおりである。

(1) トラニオン固定ボルト

a. 引張応力

トラニオン固定ボルトに作用する最大引張力 (F₁) は図 2-1 に示す支持台④に生じ、次式により与えられる。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \cdot m_c \dots \dots \dots (2.3)$$

ここで,

G₁=C_H, G₂=9.81-C_V

C_H : 水平方向加速度 (=7.06 m/s²)

C_V : 鉛直方向加速度 (=3.53 m/s²)

h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (=2820 mm)

a₁ : 支点Oから支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離 (=2074.5 mm)

a₂ : 支点Oから支持台⑤のトラニオン固定金具中心までの距離 (=949.5 mm)

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

この引張力 (F₁) によりトラニオン固定ボルトに発生する引張応力 (σ_t) は次式で表わされる。

$$\sigma_t = \frac{F_1}{n_5 \cdot A_5} \dots \dots \dots (2.4)$$

ここで,

F₁ : 引張力 (= N)

n₅ : トラニオン固定金具 1 組当たりのボルトの本数 (=)

A₅ : トラニオン固定ボルト (M45) の断面積 (= mm²)

(2) トラニオン固定金具

a. 一次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定金具にはトラニオン固定ボルトの引張力 (F₁) により曲げ応力 (σ_b) が発生し、次式により与えられる。

$$\sigma_b = \frac{L}{4 \cdot Z} \cdot F_1 \dots\dots\dots (2. 5)$$

ここで、

- F₁ : 引張力 (= N)
- L : トラニオン固定ボルト間距離 (=220 mm)
- Z : トラニオン固定金具の断面係数 (= mm³)

b. 一次+二次応力

(a) 曲げ応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F₁)による曲げ応力の全振幅(σ_b)は、(2. 5)式と同様に与えられる。

(3) リブ

a. 一次応力

(a) 引張応力

トラニオン固定ボルトの引張力(F₁)によりリブに発生する引張応力(σ_t)は、次式により与えられる。

$$\sigma_t = \frac{F_1}{A_1} \dots\dots\dots (2. 6)$$

ここで、

- F₁ : 引張力 (= N)
- A₁ : リブの支持台座接触断面積 (= mm²)

(b) 圧縮応力

リブに作用する最大圧縮力(F_c)は支持台◎に生じ、次式により与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= G_2 \cdot (m_c + m_s) + 2 \cdot F_2 + F_1 \\ F_1 &= \frac{G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_2 \cdot m_c}{\frac{2 \cdot a_2^2}{a_1} + a_1} \\ F_2 &= \frac{a_2}{a_1} \cdot F_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 7)$$

ここで、

- G₁ = C_H, G₂ = 9.81 + C_V
- C_H : 水平方向加速度 (=7.06 m/s²)
- C_V : 鉛直方向加速度 (=3.53 m/s²)
- h_{CG} : 貯蔵容器底面から重心までの高さ (=2820 mm)
- m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)
- m_s : 支持台1個の質量 (= kg)

F_1 : 支持台④での引張力 (= N)

F_2 : 支持台⑤での引張力 (= N)

a_1 : 支点Oから支持台④のトラニオン固定金具中心までの距離
(=2074.5 mm)

a_2 : 支点Oから支持台⑤のトラニオン固定金具中心までの距離 (=949.5 mm)

この圧縮力(F_c)によりリブに発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表わされる。

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_1} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで,

F_c : 圧縮力 (= N)

A_1 : リブの支持台座接触断面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震のみによる応力の全振幅(σ)は、次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_c \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで,

σ_t : a. (a)にて求めた引張応力

σ_c : a. (b)にて求めた圧縮応力

(4) アンカーボルト

a. 引張応力

(2.3)式により与えられる引張力(F_1)によりアンカーボルトに生じる引張応力(σ_t)は次式により与えられる。

$$\sigma_t = \frac{F_1}{n_6 \cdot A_6} \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで,

F_1 : (1)a.にて求めた引張力 (= N)

n_6 : 支持台1個当たりのアンカーボルト本数 (=)

A_6 : アンカーボルト(M36)の断面積 (= mm²)

b. せん断応力

アンカーボルトに作用する最大水平力(F_H)は支持台④, ⑤に生じ、次式により与えられる。

$$F_H = C_H \cdot (m_c + 4 \cdot m_s) \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで,

C_H : 水平方向加速度 (=7.06 m/s²)

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

m_s : 支持台 1 個の質量 (= kg)

この水平力(F_H)によりアンカーボルトに生じるせん断応力(τ)は、次式で表される。

$$\tau = \frac{F_H}{2 \cdot n_6 \cdot A_6} \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで、

F_H : 水平力 (= N)

n_6 : 支持台 1 個当たりのアンカーボルト本数 (=)

A_6 : アンカーボルト(M36)の断面積 (= mm²)

(5) 容器押え金具

a. 一次応力

(a) 圧縮応力

容器押え金具に作用する最大水平力(F_H)は支持台◎に生じ、次式により与えられる。

$$F_H = C_H \cdot m_c \dots\dots\dots (2.13)$$

ここで、

C_H : 水平方向加速度 (=7.06 m/s²)

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

水平力(F_H)より容器押え金具に発生する圧縮応力(σ_c)は次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{F_H}{n_4 \cdot A_4} \dots\dots\dots (2.14)$$

ここで、

F_H : 水平力 (= N)

n_4 : 支持台 1 個当たりの容器押え金具の本数 (=)

A_4 : 容器押え金具(M42)の断面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 引張・圧縮応力

地震力のみによる応力の全振幅(σ)は、(2.14)式と同様に与えられる。

(6) 支持台座

a. 一次応力

(a) 支圧応力

支持台座に作用する最大圧縮力(F_c)は支持台◎に生じ、次式により与えられる。

$$F_c = G_2 \cdot m_c + 2 \cdot F_2 + F_1 \dots\dots\dots (2.15)$$

ここで、

$$G_2 = 9.81 + C_V$$

C_V : 鉛直方向加速度 (=3.53 m/s²)

m_c : 貯蔵容器質量 (= kg)

F_1 : 支持台①での引張力 (= N)

F_2 : 支持台②での引張力 (= N)

圧縮力(F_c)により発生する支圧応力(σ_p)は次式で表わされる。

$$\sigma_p = \frac{F_c}{A_2} \dots\dots\dots (2.16)$$

ここで,

F_c : 圧縮力 (= N)

A_2 : 支持台座のキャスク容器底面接触面積 (= mm²)

b. 一次+二次応力

(a) 支圧応力

支圧応力(σ_p)は(2.16)式と同様に与えられる。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表2-2に示す。

2.4 貯蔵時（S_s地震力が作用する場合）

2.4.1 荷重条件

貯蔵時においてS_s地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

地震力+自重

2.4.2 計算方法

トラニオン固定ボルト，トラニオン固定金具，リブ，アンカーボルト，容器押え金具及び支持台座の応力計算は2.3.2項と同様である。

2.4.3 計算結果

応力計算結果を表2-3に示す。

3. 応力の評価

3.1 一次応力の評価

各設計事象における評価を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象の一次応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

3.2 一次+二次応力の評価

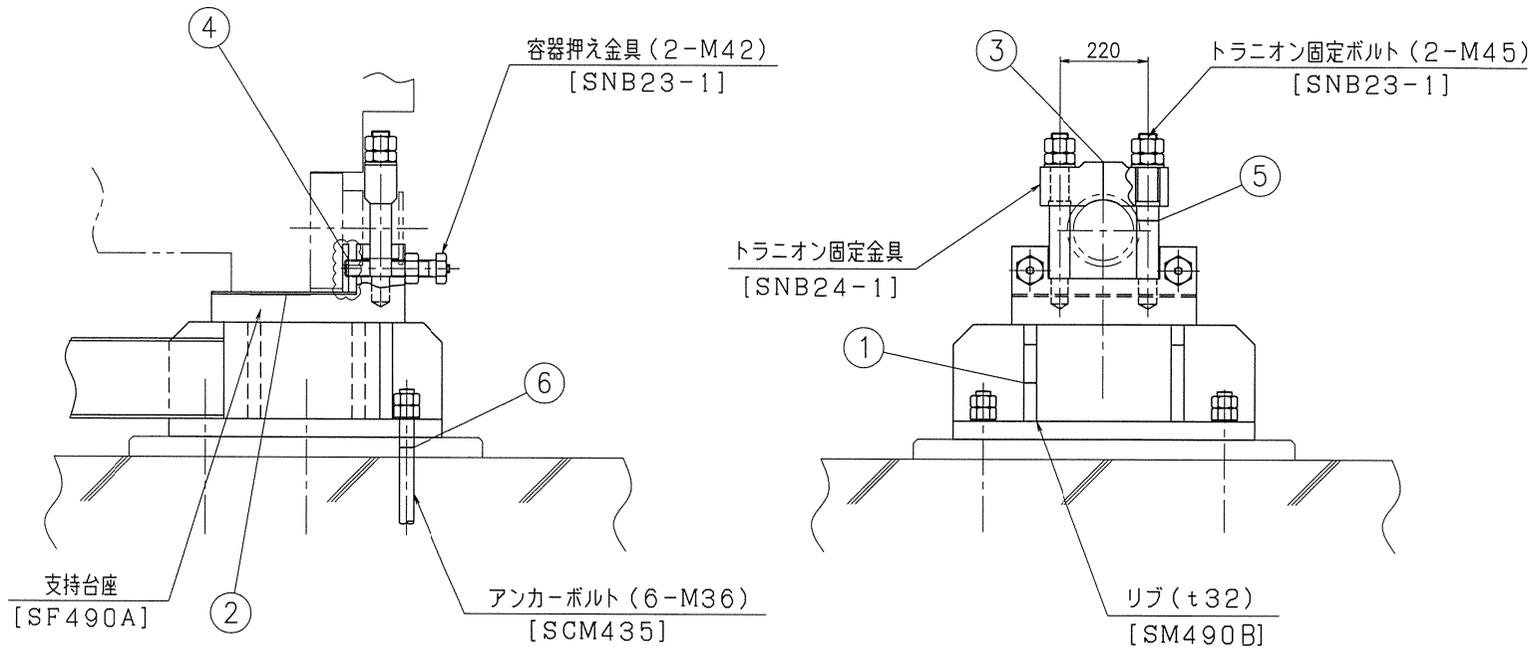
各設計事象における評価を表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-1, 表 2-2 及び表 2-3 より, 各設計事象の一次+二次応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

3.3 組合せ応力の評価

地震時における評価を表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-2 及び表 2-3 より, 地震時における組合せ応力は添付書類「V-2-4-2-3-4 支持構造物の応力解析の方針③」5.5 項の規定を満足する。

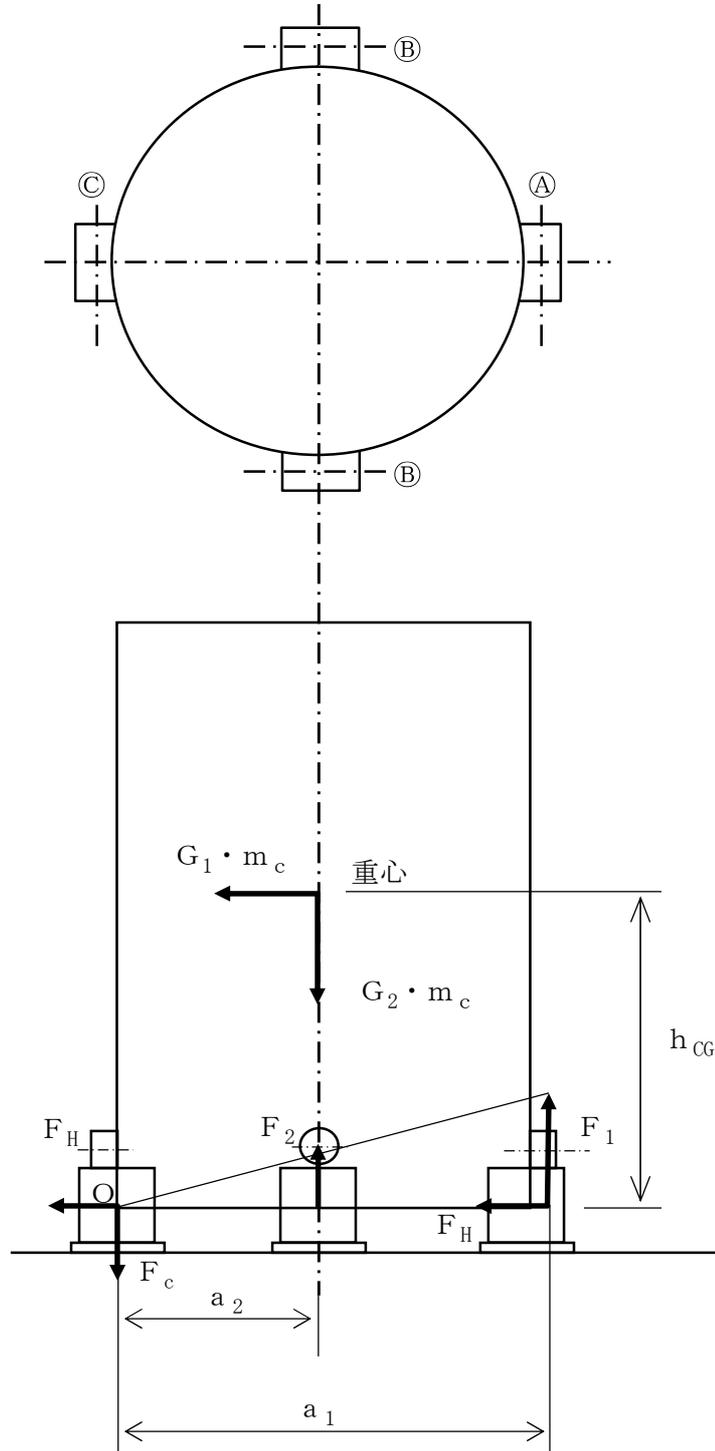


(単位 : mm)

[] : 材料

① ~ ⑥ : 応力評価点

図 1-1 形状・寸法・材料・応力評価点 (面)



Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ : 支持台番号

図 2-1 地震時に作用する荷重の計算モデル

表 1-1 計算結果の概要

(単位：MPa)

部 位	材料	設計事象	一次応力		一次+二次応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
リブ	炭素鋼 (SM490B)	I	5	172	5	544
		I + S _d *	37	259	47	544
		I + S _s	56	291	77	544
支持台座	炭素鋼 (SF490A)	I	4	201	4	302
		I + S _d *	30	302	30	302
		I + S _s	44	362	44	362
トラニオン固定金具	低合金鋼 (SNB24-1)	I + S _d *	280	837	280	1675
		I + S _s	583	837	583	1675
容器押え金具	低合金鋼 (SNB23-1)	I + S _d *	291	713	291	1452
		I + S _s	473	713	473	1452

(単位：MPa)

部位	材料	設計事象	引張応力		せん断応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 固定ボルト	低合金鋼 (SNB23-1)	I + S _d *	170	544				
		I + S _s	355	544				
アンカー ボルト	低合金鋼 (SCM435)	I + S _d *	89	444	68	341	89	444
		I + S _s	185	444	110	341	185	444

表 2-1 支持構造物の応力評価（設計事象 I）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			評価点 (面)	計算値	
リブ	一次応力	圧縮応力	①	5	172
	一次＋二次応力	引張・圧縮応力	①	5	544
支持台座	一次応力	支圧応力	②	4	201
	一次＋二次応力	支圧応力	②	4	302

表 2-2 支持構造物の応力評価（貯蔵時： S_d *地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			評価点 (面)	計算値	
リブ	一次応力	引張応力	①	10	272
		圧縮応力	①	37	259
	一次+二次応力*	引張・圧縮応力	①	47	544
支持台座	一次応力	支圧応力	②	30	302
	一次+二次応力*	支圧応力	②	30	302
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	③	280	837
	一次+二次応力*	曲げ応力	③	280	1675
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	④	291	713
	一次+二次応力*	引張・圧縮応力	④	291	1452
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	⑤	170	544
アンカー ボルト	—	引張応力	⑥	89	444
		せん断応力	⑥	68	341
		組合せ応力	⑥	89	444

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 2-3 支持構造物の応力評価（貯蔵時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：MPa）

部 位	応力の種類		貯蔵時		許容応力
			評価点 (面)	計算値	
リブ	一次応力	引張応力	①	21	308
		圧縮応力	①	56	291
	一次+二次応力*	引張・圧縮応力	①	77	544
支持台座	一次応力	支圧応力	②	44	362
	一次+二次応力*	支圧応力	②	44	362
トラニオン 固定金具	一次応力	曲げ応力	③	583	837
	一次+二次応力*	曲げ応力	③	583	1675
容器押え金具	一次応力	圧縮応力	④	473	713
	一次+二次応力*	引張・圧縮応力	④	473	1452
トラニオン 固定ボルト	—	引張応力	⑤	355	544
アンカー ボルト	—	引張応力	⑥	185	444
		せん断応力	⑥	110	341
		組合せ応力	⑥	185	444

注記 *：地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-9 二次蓋の耐震性についての計算書①
(タイプ I)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件及び構造	4
4.1 設計条件	4
4.2 数値の丸め方	4
4.3 二次蓋の構造	4
5. 応力計算 (S_d^* 及び S_s 地震時)	5
5.1 荷重条件	5
5.2 計算方法	5
5.3 評価方法	6
5.4 計算結果	6
6. 応力評価 (S_d^* 及び S_s 地震時)	7

図表目次

図 4-1	二次蓋の構造	8
図 5-1	応力評価点 (面)	9
図 5-2	計算モデル	10
表 4-1	設計条件	11
表 4-2	数値の丸め方一覧表	11
表 5-1	応力計算に使用する材料の物性値	12
表 5-2	二次蓋の許容応力値	12
表 5-3	二次蓋締付けボルトの許容応力値	12
表 5-4	二次蓋の応力計算結果	13
表 6-1	二次蓋の応力評価	15

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の二次蓋に関する応力計算書である。

2. 適用基準

二次蓋は、貯蔵時の密封監視のために圧力空間を保持するための部材であり、二次蓋及び一次蓋の蓋間内が正圧となることから、構造強度評価手法としては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（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス3容器に従って設計する。

なお、地震時における荷重の組合せ及び許容応力については設計・建設規格 GNR-2200 に従い、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）に準ずる。

3. 記 号

3.1 記号の説明

本計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

計算書の記号	記 号 の 説 明	単 位
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D	死荷重	—
g	重力加速度(=9.80665)	m/s ²
M_d	当該設備に設計上定められた機械的荷重	—
P_d	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重	MPa
P_b	一次曲げ応力	MPa
P_m	一次一般膜応力	MPa
P_L	一次局部膜応力	MPa
Q	二次応力	MPa
S	最高使用温度における設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 に規定する材料の許容引張応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s により定まる地震力	—
S_{12}	主応力差 $ \sigma_1 - \sigma_2 $	MPa
S_{23}	主応力差 $ \sigma_2 - \sigma_3 $	MPa
S_{31}	主応力差 $ \sigma_3 - \sigma_1 $	MPa
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
σ_1	主応力	MPa
σ_2	主応力	MPa
σ_3	主応力	MPa
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{n\theta}$	せん断応力	MPa
α_H	水平方向設計加速度	m/s ²
α_V	鉛直方向設計加速度	m/s ²
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力区分	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力区分	—

4. 設計条件及び構造

4.1 設計条件

最高使用圧力及び最高使用温度を表 4-1 に示す。

4.2 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 4-2 に示す。

4.3 二次蓋の構造

二次蓋の構造を図 4-1 に示す。

5. 応力計算（ S_d^* 及び S_s 地震時）

5.1 荷重条件

応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の3つである。

- a. 最高使用圧力（0.4 MPa）
- b. ボルト初期締付け力（ 4.6×10^6 N）
- c. 地震力

5.2 計算方法

(1) 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所形状・寸法・材料を図4-1に示す。

(2) 物性値

応力計算に使用する材料の物性値を表5-1に示す。

(3) 計算モデル

二次蓋の応力計算は、二次蓋の実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく、伝熱解析、応力解析等の汎用解析コードである。応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し、各メッシュについて計算を実施することによって行う。

計算モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては、二次蓋の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

加速度として次の値を用いる。

$$S_d^* \text{地震力が作用する場合： } \alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2, \quad \alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$$

$$S_s \text{地震力が作用する場合： } \alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2, \quad \alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$$

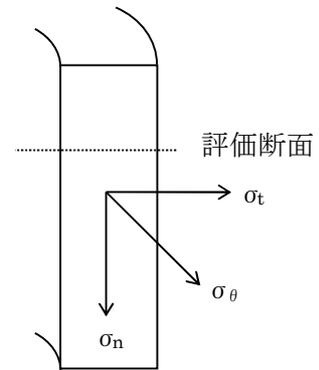
二次蓋の応力評価点（面）を図5-1に示す。解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図5-2に示す。

5.3 評価方法

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{n\theta}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



二次蓋用材料の許容応力値を表 5-2 に示す。

二次蓋締付けボルトの許容応力値を表 5-3 に示す。

(1) 二次蓋の応力評価

二次蓋の応力評価は、以下の項目を実施する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ（地震力のみによる応力振幅）

(2) 二次蓋締付けボルトの応力評価

二次蓋締付けボルトの応力評価は一次応力強さについて実施する。

5.4 計算結果

評価対象として応力評価点（面）についての応力評価を表 5-4 に示す。

6. 応力評価 (S_d^* 及び S_s 地震時)

各設計事象における二次蓋及び二次蓋締付けボルトの評価を表 6-1 に示す。

表 6-1 より各部の一次応力は許容値を満足する。また、二次蓋の一次+二次応力は $2 S_y$ 以下となり、疲労評価不要の条件を満足する。

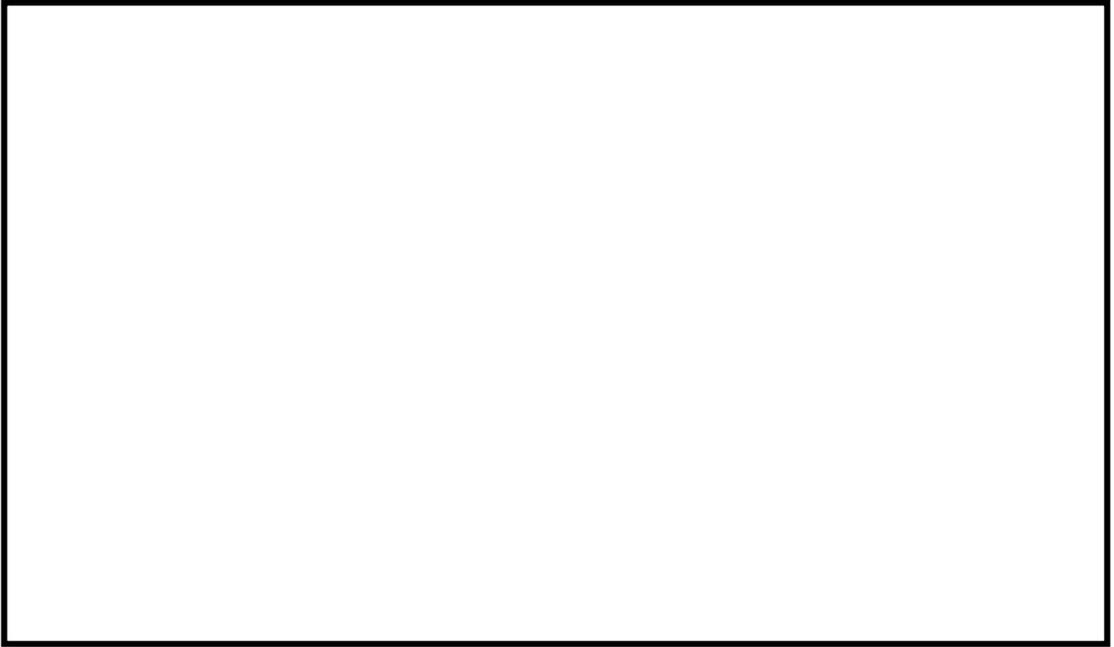


図 4-1 二次蓋の構造



図 5-1 応力評価点 (面)

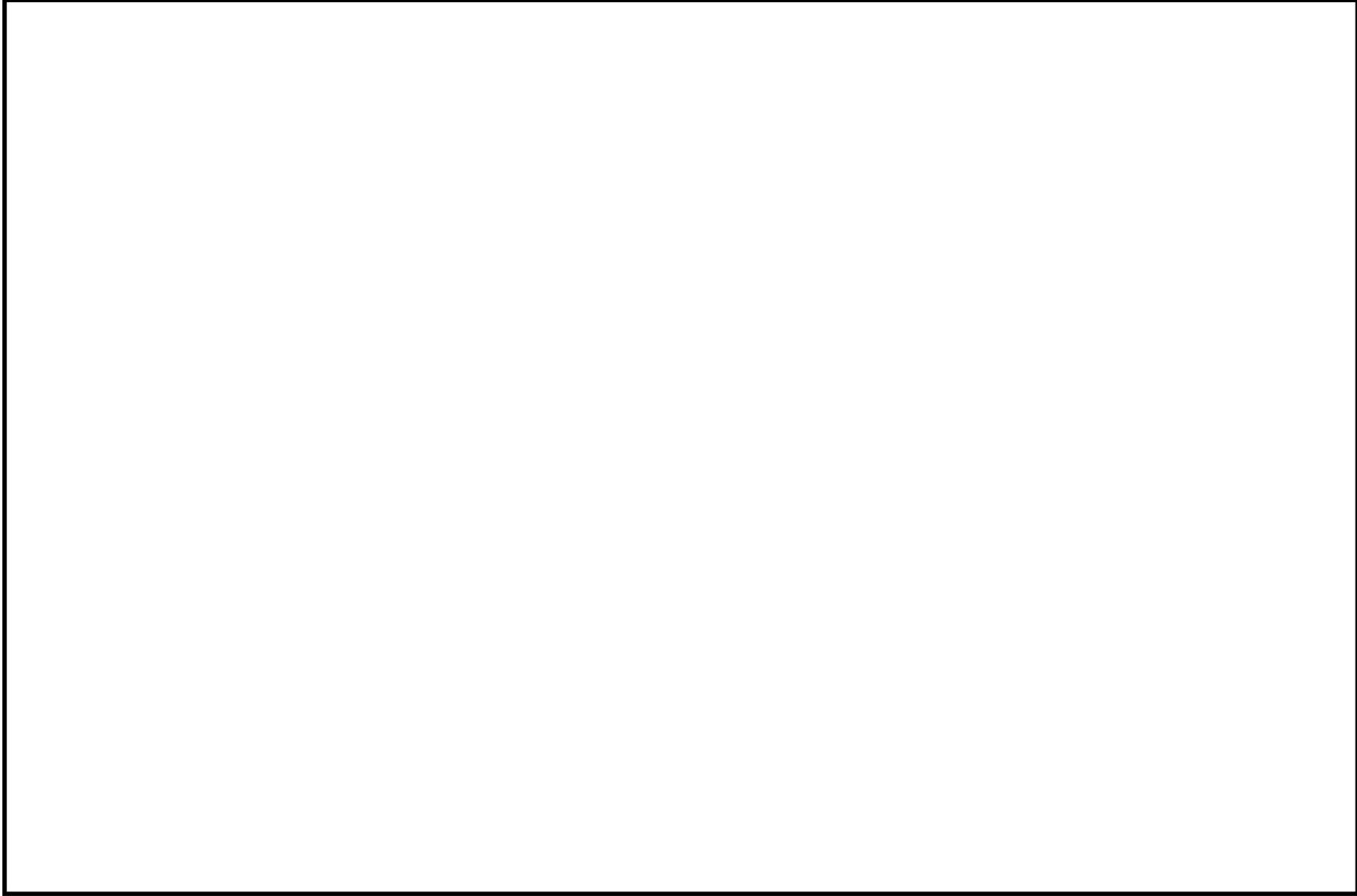


図 5-2 計算モデル

表 4-1 設 計 条 件

項 目		設 計 値
最高使用圧力	MPa	□
最高使用温度	℃	160

表 4-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設 計 値
最高使用温度	℃	—	—	設 計 値
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切 捨 て	整 数 値 位
計算応力値 ¹⁾	MPa	小数点以下第 1 位	切 上 げ	整 数 値 位
必 要 厚 さ	mm	小数点以下第 2 位	切 上 げ	小数点以下第 1 位
最 小 厚 さ	mm	小数点以下第 2 位	切 捨 て	小数点以下第 1 位
長 さ	mm	—	—	設 計 値
面 積	mm ²	有効数字 4 桁目	安全側に処理する	有効数字 3 桁
力	N	有効数字 4 桁目	切 上 げ	有効数字 3 桁

注記 1) : 応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

表 5-1 応力計算に使用する材料の物性値

部位	材料	温度 (°C)	縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (-)
二次蓋	ステンレス鋼 (SUSF304)	160	185000	0.3
二次蓋締め付けボルト	合金鋼 (SNB23-3)	160	183000	-

表 5-2 二次蓋の許容応力値

(単位: MPa)

許容応力区分	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			オーステナイト系ステンレス鋼	
			SUSF304	許容値基準
I + S _d *	D+P _d +M _d +S _d *	一次一般膜応力 (P _m)	152	Min{S _y , 0.6S _u } と 1.2S の大きい方
		一次膜+一次曲げ応力 (P _L +P _b)	228	上記の 1.5 倍
		一次+二次応力 ¹⁾ (P _L +P _b +Q)	304	2S _y
I + S _s	D+P _d +M _d +S _s	一次一般膜応力 (P _m)	250	0.6S _u
		一次膜+一次曲げ応力 (P _L +P _b)	376	0.9S _u
		一次+二次応力 ¹⁾ (P _L +P _b +Q)	304	2S _y

注記 1) : S_d* 又は S_s 地震動のみによる応力振幅について評価する。

表 5-3 二次蓋締め付けボルトの許容応力値

(単位: MPa)

許容応力区分	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			合金鋼 SNB23-3	許容値基準
I + S _d *	D+P _d +M _d +S _d *	平均引張応力	300	1.5S
I + S _s	D+P _d +M _d +S _s	平均引張応力	400	2S

表 5-4(1) 二次蓋の応力計算結果 (荷重組合せ : D+P_d+M_d+S_d*の場合)

(単位 : MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$		
二次蓋	①-①'	P _L +P _b							23	228
	①	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	①'								1	304
	②-②'	P _L +P _b							22	228
	②	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	②'								1	304
	③-③'	P _L +P _b							18	228
	③	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	③'								1	304
	④-④'	P _m							5	152
	④	P _L +P _b							34	228
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
	④'	P _L +P _b							25	228
		P _L +P _b +Q ²⁾							1	304
ボルト	⑤	平均引張 応力							146	300

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_d*地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-4(2) 二次蓋の応力計算結果 (荷重組合せ : D+P_d+M_d+S_s の場合)

(単位 : MPa)

部位	評価点 (面)	応力分類	応力成分 ¹⁾						計算値	許容応力	
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{n\theta}$			
二次蓋	①-①'	P _L +P _b							23	376	
	①	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304	
	①'								1	304	
	②-②'	P _L +P _b							22	376	
	②	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304	
	②'								1	304	
	③-③'	P _L +P _b							18	376	
	③	P _L +P _b +Q ²⁾							1	304	
	③'								1	304	
	④-④'	P _m							5	250	
	④	P _L +P _b								34	376
		P _L +P _b +Q ²⁾								1	304
	④'	P _L +P _b								25	376
		P _L +P _b +Q ²⁾								1	304
ボルト	⑤	平均引張 応力							146	400	

注記 1) : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{n\theta}$: 評価断面上のせん断応力
 2) : S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 二次蓋の応力評価

(単位：MPa)

許容応力区分	荷重の組合せ	部 位	応力分類	評価点	計算値	許容 応力値
I + S _d *	D+P _d +M _d +S _d *	二次蓋	P _m	④-④'	5	152
			P _L +P _b	④	34	228
			P _L +P _b +Q ¹⁾	②	1	304
		二次蓋 締付けボルト	平均引張応力	⑤	146	300
I + S _s	D+P _d +M _d +S _s	二次蓋	P _m	④-④'	5	250
			P _L +P _b	④	34	376
			P _L +P _b +Q ¹⁾	②	1	304
		二次蓋 締付けボルト	平均引張応力	⑤	146	400

注記 1) : S_d*及びS_s地震動のみによる応力振幅について評価する。

V-2-4-2-3-9 二次蓋の耐震性についての計算書②
(タイプⅡ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件及び構造	4
4.1 設計条件	4
4.2 数値の丸め方	4
4.3 二次蓋の構造	4
5. 応力計算 (S_d^* 及び S_s 地震時)	5
5.1 荷重条件	5
5.2 計算方法	5
5.3 評価方法	6
5.4 計算結果	6
6. 応力評価 (S_d^* 及び S_s 地震時)	7

図表目次

図 4-1	二次蓋の構造	8
図 5-1	応力評価点 (面)	8
図 5-2	計算モデル	9
表 4-1	設計条件	10
表 4-2	数値の丸め方一覧表	10
表 5-1	応力計算に使用する材料の物性値	11
表 5-2	二次蓋の許容応力値	12
表 5-3	二次蓋締付けボルトの許容応力値	12
表 5-4	二次蓋の応力計算結果	13
表 6-1	二次蓋の応力評価	15

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の二次蓋に関する応力計算書である。

2. 適用基準

二次蓋は、貯蔵時の密封監視のために圧力空間を保持するための部材であり、二次蓋及び一次蓋の蓋間内が正圧となることから、構造強度評価手法としては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。）） JSME S NC1-2005/2007（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス3容器に従って設計する。

なお、地震時における荷重の組合せ及び許容応力については設計・建設規格 GNR-2200 に従い、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（日本電気協会）に準ずる。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

記号	記号の説明	単位
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D	死荷重	—
d_o	胴の外径	mm
d_i	胴の内径	mm
E	胴の縦弾性係数	MPa
I	胴の断面二次モーメント	mm ⁴
L	貯蔵容器の全長	mm
M	貯蔵容器（内部も含む）の総質量	kg
M_d	当該設備に設計上定められた機械的荷重	—
m	単位長さ当たりの質量	kg/mm
P_d	当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重	—
P_b	一次曲げ応力強さ	MPa
P_m	一次一般膜応力強さ	MPa
P_L	一次局部膜応力強さ	MPa
Q	二次応力	MPa
S	許容引張応力	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
T	貯蔵容器の固有周期	s
σ_n	評価断面に垂直な方向の応力	MPa
σ_t	評価断面に平行な方向の応力	MPa
σ_θ	円周方向応力	MPa
τ_{nt}	せん断応力	MPa
$\tau_{t\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta n}$	せん断応力	MPa
$I + S_d^*$	設計事象 I の貯蔵時の状態において S_d^* 地震力が作用した場合の許容応力状態	—
$I + S_s$	設計事象 I の貯蔵時の状態において S_s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—

4. 設計条件及び構造

4.1 設計条件

最高使用圧力及び最高使用温度を表 4-1 に示す。

4.2 数値の丸め方

数値は、原則として四捨五入とする。また、評価に用いる許容応力及び算出応力等については、安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めないことを原則とし、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 4-2 に示す。

4.3 二次蓋の構造

二次蓋の構造を図 4-1 に示す。

5. 応力計算 (S_d^* 及び S_s 地震時)

5.1 荷重条件

応力計算は荷重毎に行う。荷重条件として与えられるものは次の3つである。

- a. 最高使用圧力 (0.4 MPa)
- b. ボルト初期締付け力 (N)
- c. 地震力

5.2 計算方法

(1) 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図4-1に示す。

(2) 物性値

応力計算に使用する材料の物性値を表5-1に示す。

(3) 計算モデル

二次蓋の応力計算は、二次蓋の実形状をモデル化し、汎用解析コードである「ABAQUS」を用いて行う。

「ABAQUS」とは、有限要素法に基づく、伝熱解析、応力解析等の汎用解析コードである。応力計算は、解析しようとする箇所を形状、材料等の不連続部を小さなメッシュに分割し、各メッシュについて計算を実施することによって行う。

計算モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては、二次蓋の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。

加速度として次の値を用いる。

$$S_d^* \text{地震力が作用する場合： } \alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2, \quad \alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$$

$$S_s \text{地震力が作用する場合： } \alpha_H = C_H g = 11.48 \text{ m/s}^2, \quad \alpha_V = C_V g = 6.38 \text{ m/s}^2$$

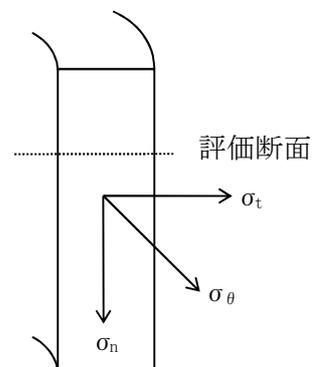
二次蓋の応力評価点（面）を図5-1に示す。解析コード「ABAQUS」の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図5-2に示す。

5.3 評価方法

応力の計算結果は、設計・建設規格 GNR-2130 による定義に従い、応力の種類毎に分類し、以下の評価を応力計算書に示す。

なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

- σ_{θ} : 円周方向応力
- σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力
- σ_t : 評価断面に平行な方向の応力
- $\tau_{n\theta}$: せん断応力
- τ_{nt} : せん断応力
- $\tau_{t\theta}$: せん断応力



二次蓋用材料の許容応力値を表 5-2 に示す。

二次蓋締付けボルトの許容応力値を表 5-3 に示す。

(1) 二次蓋の応力評価

二次蓋の応力評価は、以下の項目を実施する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ（地震力のみによる応力振幅）

(2) 二次蓋締付けボルトの応力評価

二次蓋締付けボルトの応力評価は一次応力強さについて実施する。

5.4 計算結果

評価対象として応力評価点（面）についての応力評価を表 5-4 に示す。

6. 応力評価 (S_d^* 及び S_s 地震時)

各設計事象における二次蓋及び二次蓋締付けボルトの評価を表 6-1 に示す。

表 6-1 より各部の一次応力は許容値を満足する。また、二次蓋の一次+二次応力は $2 S_y$ 以下となり、疲労評価不要の条件を満足する。

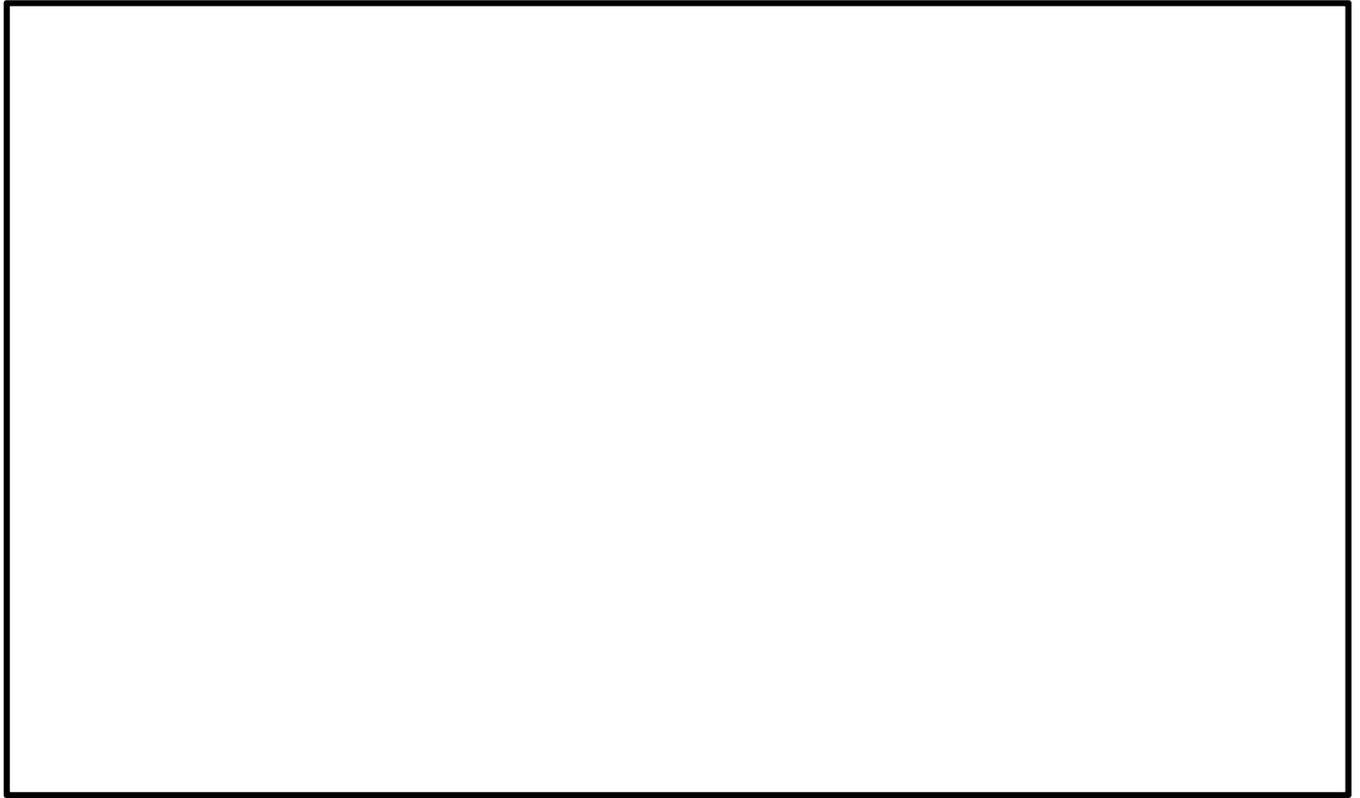


図 4-1 二次蓋の構造

- ① : 二次蓋中央部
- ② : 二次蓋端部
- ③ : 二次蓋締付けボルト

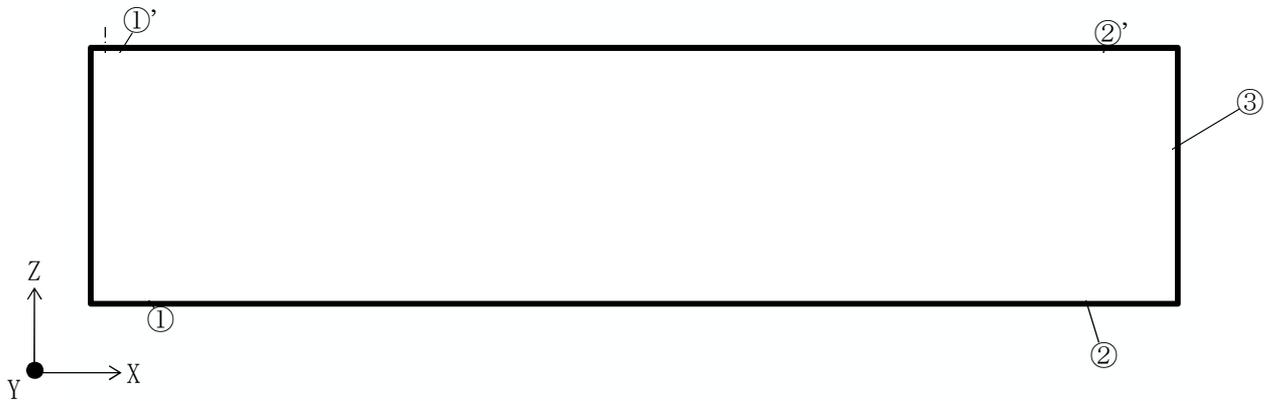


図 5-1 応力評価点 (面)

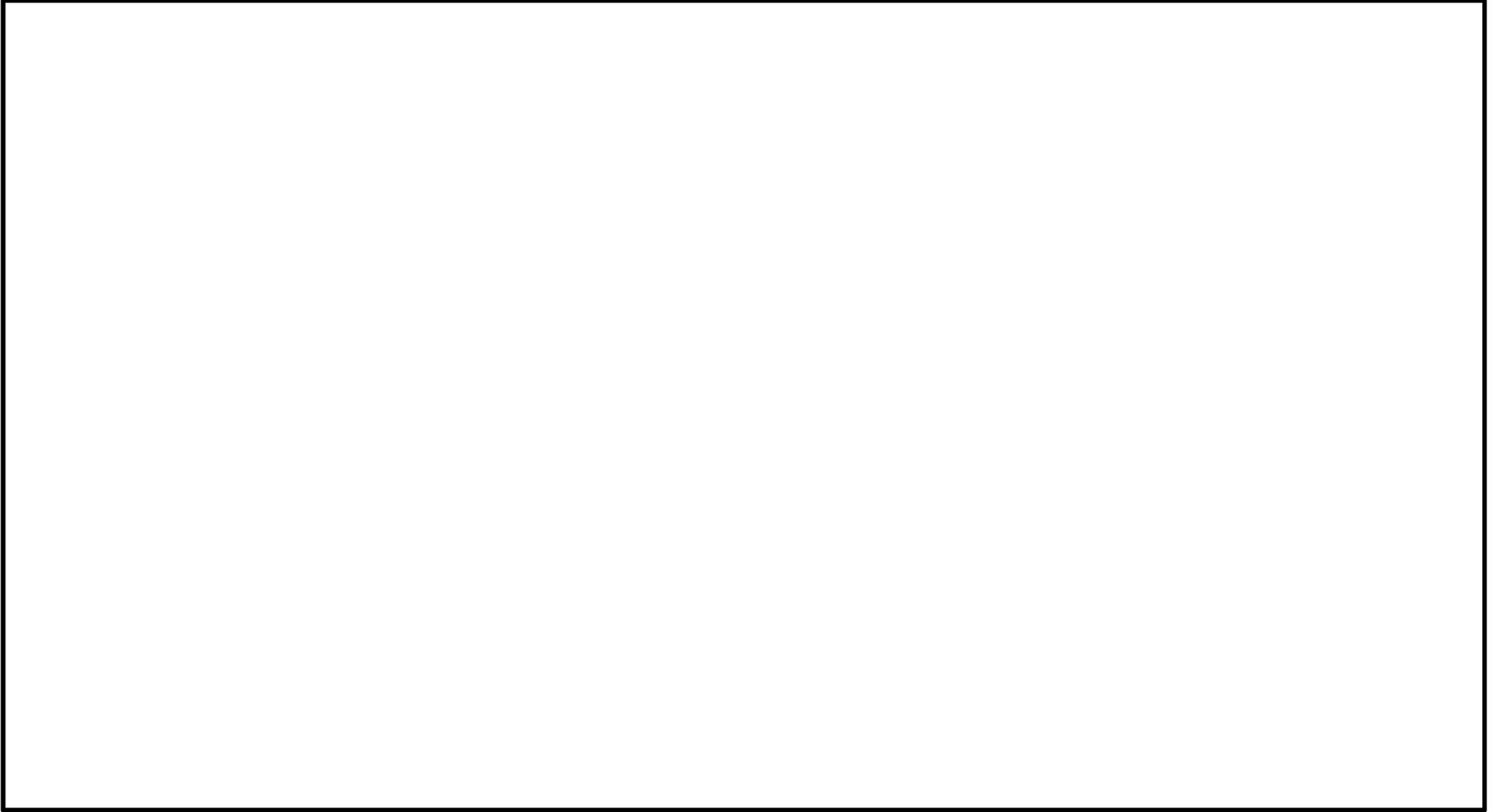


図 5-2 計算モデル

表 4-1 設 計 条 件

項 目		設 計 値
最高使用圧力	MPa	□
最高使用温度	℃	100

表 4-2 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単 位	処 理 桁	処 理 法	表示最小桁
最高使用温度	℃	—	—	設計値
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値*	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
長さ	mm	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
質量	kg	—	—	設計値

注記 *：応力成分は、小数点以下第 2 位を四捨五入し、小数点以下第 1 位までの値を記載する。

表 5-1 応力計算に使用する材料の物性値

部 位	材 料	温度 (°C)	縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (-)
二次蓋	GLF1	100	198000	0.3
二次蓋締付けボルト	SNB23-3	100	186000	0.3

表 5-2 二次蓋の許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 状態	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			炭素鋼	
			二次蓋	
			GLF1	許容値基準
I + S _d *	D + P _d + M _d + S _d *	一次一般膜応力 (P _m)	187	Min (S _y , 0.6 S _u)
		一次膜+一次曲げ応力 (P _L + P _b)	280	上記の 1.5 倍
		一次+二次応力* (P _L + P _b + Q)	374	2 S _y
I + S _s	D + P _d + M _d + S _s	一次一般膜応力 (P _m)	226	0.6 S _u
		一次膜+一次曲げ応力 (P _L + P _b)	339	0.9 S _u
		一次+二次応力* (P _L + P _b + Q)	374	2 S _y

注記 * : S_d*又はS_s地震動のみによる全振幅について評価する。

表 5-3 二次蓋締付けボルトの許容応力値

(単位：MPa)

許容応力 状態	荷重の組合せ	応力の種類	許容応力値	
			低合金鋼	
			二次蓋締付けボルト	
			SNB23-3	許容値基準
I + S _d *	D + P _d + M _d + S _d *	平均引張応力	300	1.5 S
I + S _s	D + P _d + M _d + S _s	平均引張応力	400	2 S

表 5-4(1) 二次蓋の応力計算結果 (荷重組合せ : $D + P_d + M_d + S_d^*$ の場合)

(単位 : MPa)

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分 ^{*1}						計算 値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$		
二次 蓋	①-①'	P_m							1	187
	①	$P_L + P_b$							14	280
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							1	374
	①'	$P_L + P_b$							15	280
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							1	374
	②	$P_L + P_b$							47	280
		$P_L + P_b + Q^{*2}$							1	374
	②'	$P_L + P_b$							10	280
$P_L + P_b + Q^{*2}$		1	374							
二次蓋 締付け ボルト	③	平均引張応力							108	300

注記 *1 : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
 2 : S_d^ 地震力のみによる全振幅について評価する。

表 5-4(2) 二次蓋の応力計算結果 (荷重組合せ : D + P_d + M_d + S_s の場合)

(単位 : MPa)

部位	応力 評価点	応力分類	応力成分*1						計算 値	許容 応力
			σ_n	σ_t	σ_θ	τ_{nt}	$\tau_{t\theta}$	$\tau_{\theta n}$		
二次 蓋	①-①'	P _m							1	226
	①	P _L + P _b							14	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
	①'	P _L + P _b							15	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
	②	P _L + P _b							47	339
		P _L + P _b + Q*2							1	374
	②'	P _L + P _b							10	339
P _L + P _b + Q*2		1	374							
二次蓋 締付け ボルト	③	平均引張応力							108	400

注記 *1 : σ_n : 評価断面に垂直な方向の応力 σ_θ : 円周方向応力
 σ_t : 評価断面に平行な方向の応力 $\tau_{nt}, \tau_{t\theta}, \tau_{\theta n}$: 評価断面上のせん断応力
 *2 : S_s地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-1 二次蓋の応力評価

(単位：MPa)

許容応力 区 分	荷重の組合せ	部 位	応力分類	応力 評価点	計算値	許容 応力値
I + S _d *	D + P _d + M _d + S _d *	二次蓋	P _m	①-①'	1	187
			P _L + P _b	②	47	280
			P _L + P _b + Q*	①	1	374
		二次蓋締 付けボルト	平均引張応力	③	108	300
I + S _s	D + P _d + M _d + S _s	二次蓋	P _m	①-①'	1	226
			P _L + P _b	②	47	339
			P _L + P _b + Q*	①	1	374
		二次蓋締 付けボルト	平均引張応力	③	108	400

注記 * : S_d*又はS_s地震力のみによる全振幅について評価する。

V-2-4-2-3-9 二次蓋の耐震性についての計算書③
(タイプⅢ)

目次

1. 概 要	1
2. 適用基準	2
3. 記 号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件及び構造	4
4.1 設計条件	4
4.2 数値の丸め方	4
4.3 二次蓋の構造	4
5. 応力計算	5
5.1 地震時 (S_d^*) の応力計算	5
5.1.1 荷重条件	5
5.1.2 計算方法	5
5.1.3 計算結果	6
5.2 地震時 (S_s) の応力計算	6
5.2.1 荷重条件	6
5.2.2 計算方法	7
5.2.3 計算結果	7
5.3 二次蓋締付けボルトの応力計算	7
5.3.1 荷重条件	7
5.3.2 計算方法	8
5.3.3 計算結果	9
6. 応力評価	10
6.1 地震時の二次蓋応力評価	10
6.2 地震時の二次蓋締付けボルト応力評価	10

図表目次

図 4-1	形状・寸法・材料	11
表 4-1	設計条件	12
表 4-2	数値の丸め方	12
表 5-1	二次蓋の応力計算結果	13
表 5-2	二次蓋締付けボルトの応力計算結果	13
表 6-1	地震時 (S_d^*) の応力評価	13
表 6-2	地震時 (S_s) の応力評価	13
表 6-3	二次蓋締付けボルトの応力評価	13

1. 概 要

本計算書は、使用済燃料乾式貯蔵容器の二次蓋に関する応力計算書である。

2. 適用基準

二次蓋は、貯蔵時の密封監視のために圧力空間を保持するための部材であり、二次蓋及び一次蓋の蓋間内が正圧となることから、構造強度評価手法としては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 - 2 0 0 5 / 2 0 0 7（日本機械学会）（以下、「設計・建設規格」という。）のクラス3容器に従って設計する。

なお、地震時における荷重の組合せ及び許容応力については設計・建設規格 GNR-2200 に従い、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 - 1 9 8 4（日本電気協会）に準ずる。

3. 記号

3.1 記号の説明

本計算書において、応力評価に関する以下の記号を使用する。ただし、本文中に特記ある場合は、この限りでない。

計算書の記号	記号の説明	単位
A	面積	mm ²
A _B	ボルト全数の最小断面積	mm ²
d	直径	mm
D	死荷重	—
d _G	ガスケットの平均径	mm
f	ガスケット1本当りでの線荷重	N/mm
F _G	ガスケット反力	N
g	重力加速度	m/s ²
G	地震力による加速度	m/s ²
K	平板の取付方法による係数	—
m	質量	kg
M _D	機械的荷重	—
P	最高使用圧力又は等分布荷重	MPa
P _D	最高使用圧力による機械的荷重	—
r	ボルトピッチ円の半径	mm
S _d *	弾性設計用地震動S _d により定まる地震力又は静的地震力	—
S _s	基準地震動S _s により定まる地震力又は静的地震力	—
t	板厚	mm
σ _D	死荷重による応力	MPa
σ _P	最高使用圧力による応力	MPa
σ _M	機械的荷重による応力	MPa
σ _S	地震力による応力	MPa

4. 設計条件及び構造

4.1 設計条件

最高使用圧力及び最高使用温度を表 4-1 に示す。

4.2 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 4-2 に示す。

4.3 二次蓋の構造

二次蓋の形状・寸法・材料を図 4-1 に示す。

5. 応力計算

5.1 地震時 (S_d*) の応力計算

5.1.1 荷重条件

地震時 (S_d*) 時における荷重は次に示す組合せとする。

$$D + P_D + M_D + S_{d^*}$$

ここで、

D : 死荷重

P_D : 地震と組み合わせべき設計事象 I 及び II, 又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重

M_D : 地震と組み合わせべき設計事象 I 及び II, 又は当該設備に設計上定められた機械的荷重 (設計事象 II : 貯蔵容器の支持構造物への衝突 (6g))

S_d* : 弾性設計用地震動 S_dにより定まる地震力又は静的地震力である。

本計算書においては、Dは二次蓋の自重による荷重、P_Dは最高使用圧力による荷重、M_Dは設計事象 I 及び II において作用する加速度による荷重のうち最大のもの (支持構造物への衝突 : 底部脚部の衝突) とする。

5.1.2 計算方法

(1) 二次蓋の自重による荷重 (D)

二次蓋の自重による応力は次式で計算する。

$$\sigma_D = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、

P : 等分布荷重 (=8.595×10⁻³ MPa)

$$P = m \cdot g / A$$

m : 二次蓋の質量 (= kg)

g : 重力加速度 (=9.81 m/s²)

A : 荷重負荷面積 (= π · r² = mm²)

r : 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t : 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

(2) 最高使用圧力による荷重 (P_D)

二次蓋の最高使用圧力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_P = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

P : 最高使用圧力 (=0.4 MPa)

r : 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t : 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

(3) 機械的荷重 (M_D)

二次蓋の機械的荷重による応力は次式で計算する。

$$\sigma_M = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、

P : 等分布荷重 (= 5.155×10^{-2} MPa)

$$P = m \cdot G / A$$

m : 二次蓋の質量 (= kg)

G : 加速度 (= 58.84 m/s^2)

A : 荷重負荷面積 (= $\pi \cdot r^2 =$ mm^2)

r : 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t : 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

(4) 地震力による荷重 (S_d^*)

二次蓋の地震力による応力については、二次蓋はインロー構造によりキャスク本体に設置されるため水平方向の荷重は無視できる。

よって、二次蓋の地震力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_S = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、

P : 等分布荷重 (= 3.093×10^{-3} MPa)

$$P = m \cdot G / A$$

m : 二次蓋の質量 (= kg)

G : S_d^* 地震力による鉛直方向加速度 (= 3.53 m/s^2)

A : 荷重負荷面積 (= $\pi \cdot r^2 =$ mm^2)

r : 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)

t : 二次蓋製作上の最小厚さ (= mm)

5.1.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

5.2 地震時 (S_s) の応力計算

5.2.1 荷重条件

地震時 (S_s) 時における荷重は次に示す組合せとする。

$$D + P_D + M_D + S_s$$

ここで、D、 P_D 及び M_D は 5.2.1 項と同様である。

ただし、

S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力

である。

5.2.2 計算方法

(1) 二次蓋の自重による荷重

二次蓋の自重による応力は 5.2.2(1)項に示す計算方法により計算する。

(2) 最高使用圧力による荷重

二次蓋の最高使用圧力による応力は 5.2.2(2)項に示す計算方法により計算する。

(3) 機械的荷重

二次蓋の機械的荷重による応力は 5.2.2(3)項に示す計算方法により計算する。

(4) 地震力による荷重

二次蓋の地震力による応力については、5.2.2(4)項に示す計算方法により計算する。

ただし、

P : 等分布荷重 (= MPa)

$$P = m \cdot G / A$$

G : S_s 地震力による鉛直方向加速度 (=6.38 m/s²)

5.2.3 計算結果

応力計算結果を表 5-1 に示す。

5.3 二次蓋締付けボルトの応力計算

5.3.1 荷重条件

地震時における荷重は次に示す組合せとする。

$$D + P_D + M_D + S_d^* \text{ 又は } D + P_D + M_D + S_s$$

ここで、

D : 死荷重

P_D : 地震と組み合わせべき設計事象 I 及び II, 又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による機械的荷重

M_D : 地震と組み合わせべき設計事象 I 及び II, 又は当該設備に設計上定められた機械的荷重

S_d^* : 弾性設計用地震動 S_d により定まる地震力又は静的地震力

S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力

である。

本計算書において、 D は二次蓋のガスケット反力、 P_D は最高使用圧力による荷重とし、 M_D は設計事象 I 及び II において作用する加速度による荷重のうち最大のもの（支持構造物への衝突：底部脚部の衝突）とする。

5.3.2 計算方法

(1) 二次蓋のガスケット反力による荷重 (D)

二次蓋締付けボルトのガスケット反力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_D = \frac{F_G}{A_B} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、

- F_G : ガスケット反力 (= N)
- $F_G = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d_G$
- f : ガスケット 1 本当たりの線荷重 (= N/mm)
- d_G : ガスケットの平均径 (= mm)
- A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm²)
- (二次蓋締付けボルトの最小径: mm)
- (二次蓋締付けボルトの本数: 本)

(2) 最高使用圧力による荷重 (P_D)

二次蓋締付けボルトの最高使用圧力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_P = \frac{P \cdot \pi \cdot r^2}{A_B} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここで、

- P : 最高使用圧力 (= 0.4 MPa)
- r : 二次蓋締付けボルトピッチ円の半径 (= mm)
- A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm²)

(3) 機械的荷重 (M_D)

二次蓋締付けボルトの機械的荷重による応力は次式で計算する。

$$\sigma_M = \frac{m \cdot G}{A_B} \dots\dots\dots (5.7)$$

ここで、

- m : 二次蓋の質量 (= kg)
- G : 加速度 (= 58.84 m/s²)
- A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm²)

(4) 地震力による荷重 (S_d* 及び S_s)

二次蓋締付けボルトの地震力による応力は二次蓋に作用する慣性力により発生する。二次蓋はインロー構造によりキャスク本体に取り付けられるため水平方向の荷重は無視でき、鉛直方向の荷重のみを考慮すればよい。

二次蓋締付けボルトの地震力による応力は次式で計算する。

$$\sigma_s = \frac{m \cdot G}{A_B} \dots\dots\dots (5.8)$$

ここで、

m : 二次蓋の質量 (= kg)

G : S_d*地震力による鉛直方向加速度 (=3.53 m/s²)

G : S_s地震力による鉛直方向加速度 (=6.38 m/s²)

A_B : ボルト全数の最小断面積 (= mm²)

5.3.3 計算結果

応力計算結果を表 5-2 に示す。

6. 応力評価

6.1 地震時の二次蓋応力評価

各事象における評価を表 6-1 及び表 6-2 に示す。

表 6-1 及び表 6-2 より，一次膜応力+一次曲げ応力は許容値を満足する。

また，一次+二次応力は疲労評価不要の条件を満足する。

6.2 地震時の二次蓋締付けボルト応力評価

各事象における評価を表 6-3 に示す。

表 6-3 より，平均引張応力は許容値を満足する。



(単位 : mm)

図 4-1 形状・寸法・材料

表 4-1 設計条件

項目		設計値
最高使用圧力	MPa	
最高使用温度	℃	100

表 4-2 数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示最小桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	℃	—	—	設計値
許容応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数
計算応力値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数
必要厚さ	mm	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
最小厚さ	mm	小数点以下第 3 位	切捨て	小数点以下第 2 位
長さ	mm	—	—	設計値
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

表 5-1 二次蓋の応力計算結果

(単位：MPa)

応力分類	σ_D	σ_P	σ_M	σ_S	σ
S_d^*					
S_s					

表 5-2 二次蓋締付けボルトの応力計算結果

(単位：MPa)

応力分類	σ_D	σ_P	σ_M	σ_S	σ
S_d^*					
S_s					

表 6-1 地震時 (S_d^*) の応力評価

(単位：MPa)

応力分類	計算値	許容値	備考
一次一般膜応力	—	194	Min. [S_y , $0.6 \cdot S_u$]
一次膜応力+一次曲げ応力	73	291	上記の 1.5 倍
一次+二次応力 *	2	388	$2 \cdot S_y$: 疲労解析不要の条件

注記 * : 地震力のみによる応力振幅

表 6-2 地震時 (S_s) の応力評価

(単位：MPa)

応力分類	計算値	許容値	備考
一次一般膜応力	—	223	$0.6 \cdot S_u$
一次膜応力+一次曲げ応力	73	334	上記の 1.5 倍
一次+二次応力 *	2	388	$2 \cdot S_y$: 疲労解析不要の条件

注記 * : 地震力のみによる応力振幅

表 6-3 二次蓋締付けボルトの応力評価

(単位：MPa)

地震力	平均引張応力	許容値	備考
S_d^*	194	300	$1.5 \cdot S$
S_s	194	400	$2 \cdot S$