

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 2-補-013-04 改 1
2022 年 6 月 24 日

リサイクル燃料備蓄センター
設計及び工事の計画の変更認可申請書
(補足説明資料)

金属キャスク及び貯蔵架台の耐震性

令和 4 年 6 月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

目次

1. 概要	1
2. 金属キャスク及び貯蔵架台の耐震性に関する評価	1
2.1 金属キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フロー	1
2.2 固有周期の算出方法	6
2.3 設計用地震力について	12
2.4 計算結果	13
3. 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価	18
3.1 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した 評価部位の抽出方法について	18
3.2 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した 評価部位の抽出結果（構造上の特徴による抽出）	19
3.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した 評価部位の抽出結果（発生値の増分による抽出）	21
3.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の影響の詳細評価	23
3.5 水平2方向及び鉛直方向地震力の影響の詳細評価結果	24
3.6 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価結果	24
4. 下部トラニオン及び固縛装置に加わる荷重の分散について	27
4.1 荷重の分散を考慮した下部トラニオンの応力評価	27
4.2 荷重の分散を考慮したトラニオン固定金具及び トラニオン固定ボルトの応力評価	28
添付1 トラニオンに作用する荷重の角度依存性について	33
添付2 水平2方向の詳細評価に用いる設計震度の設定	35

1. 概要

本資料は、金属キャスク及び貯蔵架台の耐震性について補足する資料として、固有周期の評価方法及び設計用震度の設定の考え方並びに水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価等の考え方を示す。

【既設工認からの主な変更点】

金属キャスク及び貯蔵架台の耐震性における評価について、既設工認で用いている評価手法（解析コードや公式計算）からの変更点はない。

なお新規制基準に基づく基準地震動の変更等により、以下の事項について見直し、追加を行っている。

- ・ 基準地震動変更に伴う、評価結果の見直し
- ・ 水平2方向及び鉛直方向地震力の組み合わせによる影響評価の追加
- ・ 下部トラニオンに係る評価方法の変更
- ・ 貯蔵架台埋込金物評価の追加

2. 金属キャスク及び貯蔵架台の耐震性に関する評価

2.1 金属キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フロー

2.1.1 固有周期の評価フロー

固有周期の評価フローを第2-1図に示す。

2.1.2 設計用震度の設定フロー

基準地震動 S_s による地震力による設計用震度の設定フローを第2-2図、弾性設計用地震動 S_d による地震力及び静的地震力による設計用震度の設定フローを第2-3図に示す。

2.1.3 応力評価のフロー

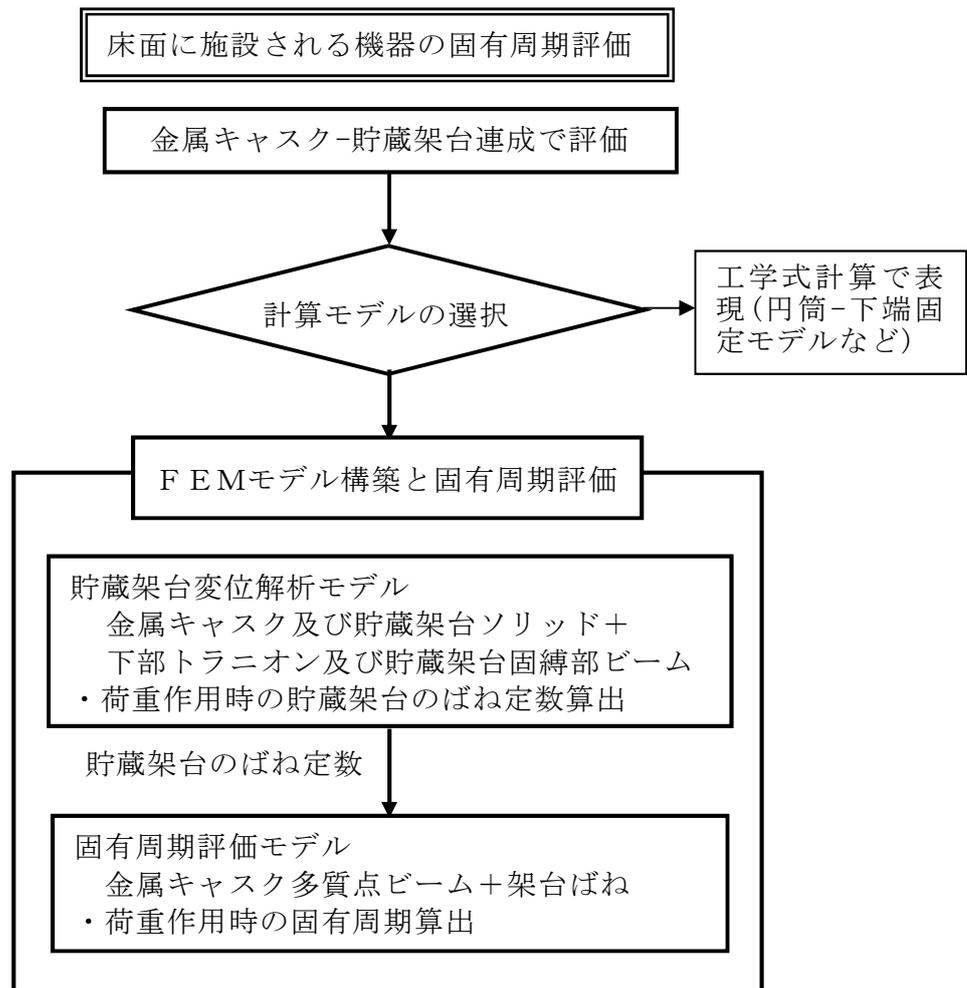
応力評価のフローを第2-4図に示す。

2.1.4 評価における荷重の作用方向

評価においては地震力をトラニオンに発生する荷重が最大となる方向（第2-5図の 90° 方向）に作用させて評価している。 90° 方向に作用させた場合のトラニオンに発生する荷重及び 45° 方向に作用させた場合のトラニオンに発生する荷重は、添付1の式を用いて計算する。計算結果を第2-1表に示す。また 90° 方向の荷重が最大となることの説明

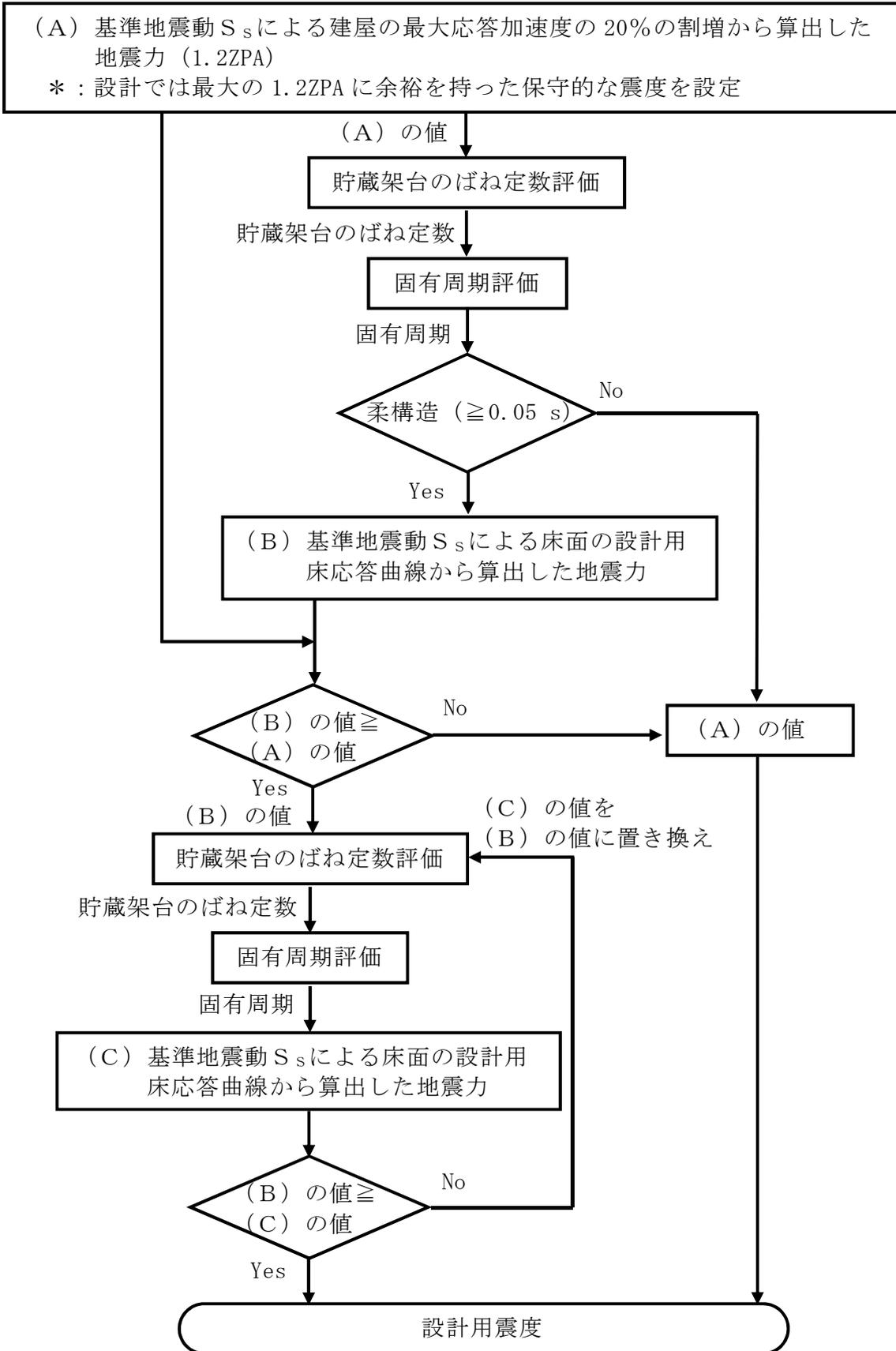
として、 1° ずつ支点を変更した評価結果を添付1に示す。

以上から、 90° 方向に作用させた場合のトラニオンに発生する荷重の値がもっとも大きく保守的な評価となる。



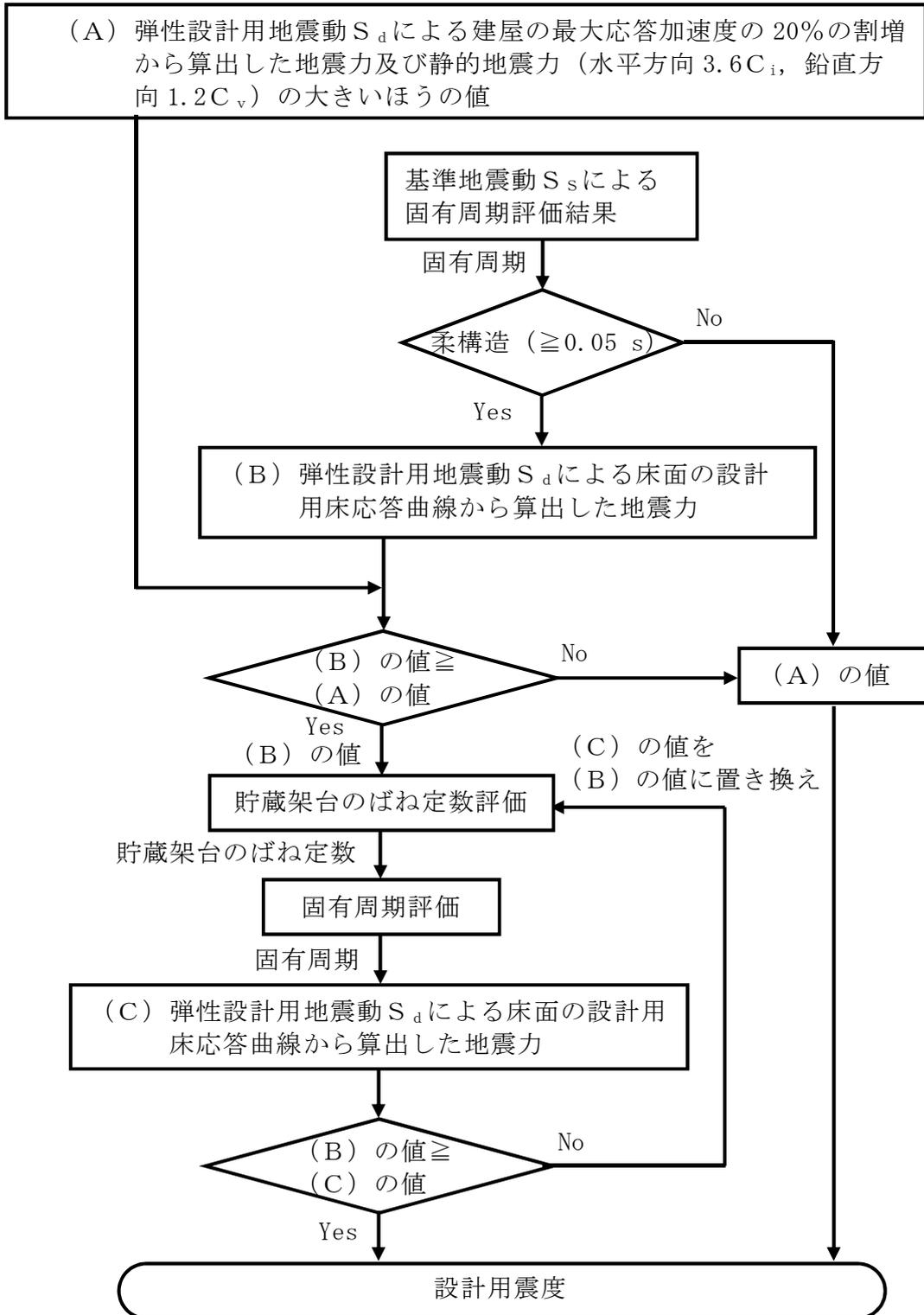
第2-1図 固有周期の評価フロー

固有値に応じた設計用震度の策定



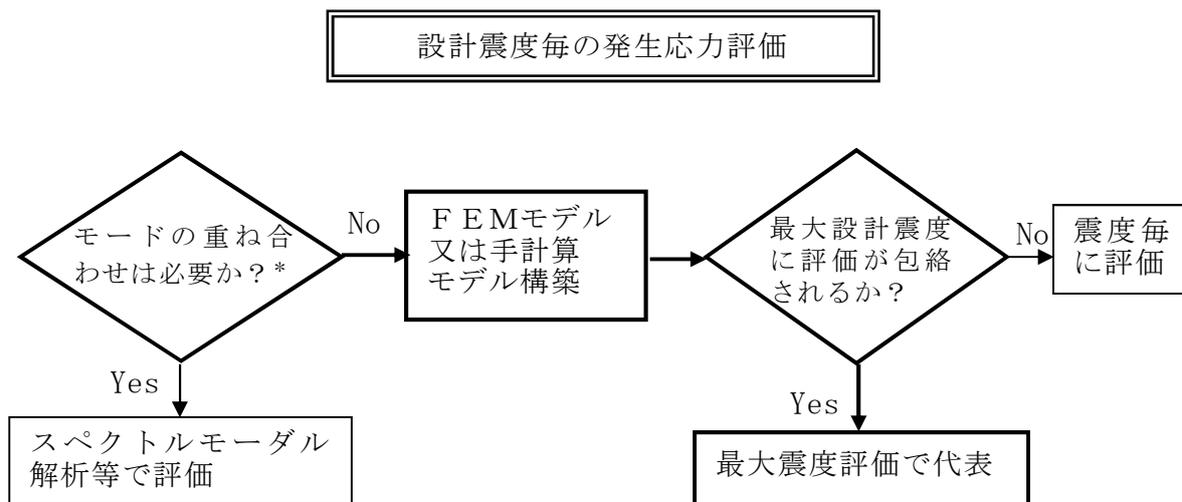
第 2-2 図 設計用震度の設定フロー (基準地震動 S_s による地震力)

固有値に応じた設計用震度の策定



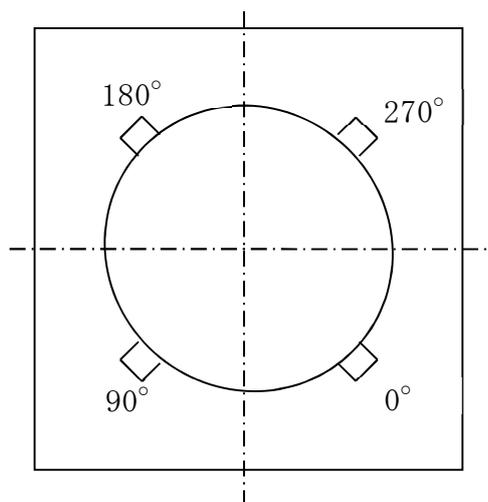
第 2-3 図 設計用震度の設定フロー

(弾性設計用地震動 S_d による地震力及び静的地震力)



* : 複数の固有振動モードが柔領域で生じた場合は重ね合わせを行う。

第2-4図 応力評価のフロー(金属キャスク及び貯蔵架台)



第2-5図 評価モデルの角

第2-1表 トラニオンに発生する荷重

荷重作用方向	トラニオンに作用する荷重(N)
貯蔵架台対角方向(90° 方向)	1.33×10 ⁶
貯蔵架台対辺方向(45° 方向)	1.10×10 ⁶

2.2 固有周期の算出方法

2.2.1 固有値解析モデル

金属キャスクは、下部トラニオンを介して貯蔵架台上に固縛され、貯蔵架台は架台固定ボルトを介して床面に固定される。貯蔵架台は搬送台車での移送を考慮し開口部を有していることから、十分に剛な構造とはならない。剛な貯蔵架台であれば、床面からの応答の増幅は無視できるものとして金属キャスク単体で評価できるが、貯蔵架台は金属キャスクよりも剛性が低いと考えられることから、金属キャスクと貯蔵架台の連成で固有周期を評価する。

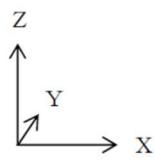
貯蔵架台は、円筒形状などのように工学式計算で表現できる簡易な形状ではなく、厚板が面外変形する場合の剛性を求める必要があることから、固有周期を算出する際、FEMモデルを構築する。ここで、金属キャスクを多質点のビームで、貯蔵架台をばねでモデル化し、有限要素法に基づく汎用解析コードであるABAQUSを用いる。

固有値解析モデルを第2-6図に示す。

なお、金属キャスク及び貯蔵架台の連成モデルによる固有周期評価では、材料自体が弾性範囲内であっても、地震力と変形量の関係が非線形になるため、地震力が大きいほど貯蔵架台のばね定数が小さくなり、固有周期が大きくなる傾向にある。このため設計震度は、設計用床応答曲線の特性も考慮した上で設計用床応答曲線より算出された地震力を上回るよう設定する。

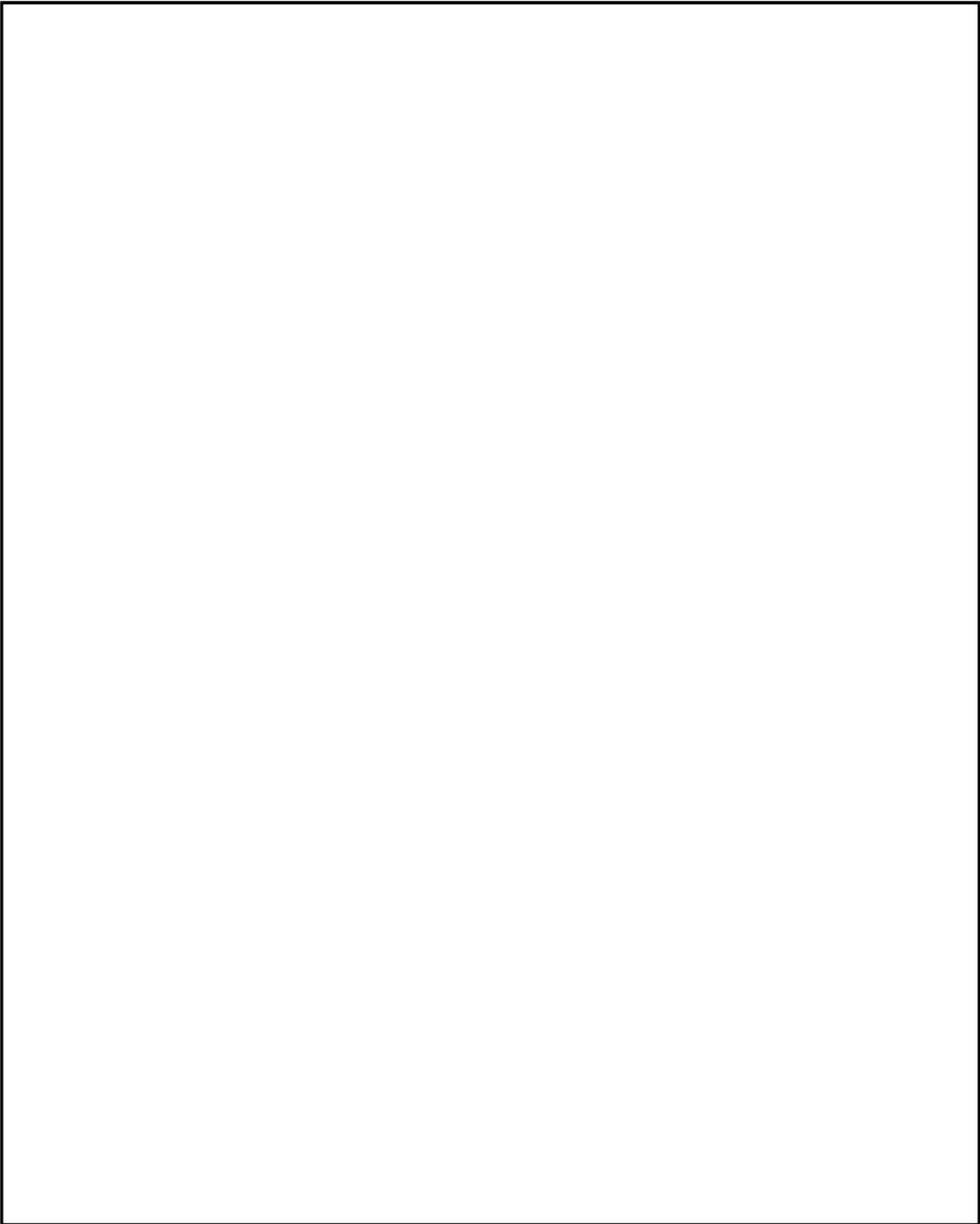
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

断面の種類	節点間
断面 1	
断面 2	
断面 3	



第 2-6 図 固有値解析モデル

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第 2-7 図 固有値解析モデル説明図 (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

金属キャスクの貯蔵状態を解析モデルに反映する。(金属キャスクの貯蔵状態における質量は、密封容器、バスケット、トラニオン、二次蓋、外筒、中性子遮蔽材、中性子遮蔽材カバー、燃料集合体を考慮している。)

第 2-6 図に示すように、固有値解析モデルは、金属キャスクの軸方向の質量分布及び断面を模擬して金属キャスクを 1 軸多質点でモデル化し、最下端に貯蔵架台と等価な剛性となるばねを設けている。質量はエリア毎に設定し、エリア内で複数点ある場合には均等に分布させる。また、断面は基本的に最弱部になるように胴体部を 3 段円筒（第 2-7 図に示す斜線部）に模擬し、機械的性質（縦弾性係数及びポアソン比）は胴の材質（GLF1）の値を使用する。以下に質量点を説明する。

1: 貯蔵架台との接触面

貯蔵架台及び底部中性子遮蔽材エリアのうち断面 1 の半分の質量を与える。

2: 底部中性子遮蔽材エリアのうち断面 1 と断面 2 との境界面

底部中性子遮蔽材エリアのうち断面 1 の半分の質量と断面 2 の半分の質量を与える。

3: 底部中性子遮蔽材エリア断面 2 と底板エリア断面 3 との境界面

底部中性子遮蔽材エリアのうち断面 2 の半分の質量と底板エリア断面 3 の半分の質量を与える。

4: 底板エリア断面 3 と収納物エリア断面 3 との境界面

底板エリア断面 3 の半分の質量と収納物エリアの mm の半分の質量を与える。

5~12: 収納物エリア断面 3 均等に設定

それぞれの質量点の上下半分ずつの質量を与える。

13: 一次蓋中央

一次蓋エリアの質量を与える。

14: 二次蓋中央

二次蓋エリアの質量を与える。

貯蔵架台のばね定数は、固縛力を考慮した貯蔵架台ばね定数評価用の F E Mモデル（以降、貯蔵架台変位解析モデルという。）で評価する。貯蔵架台変位解析モデルを第 2-8 図に示す。貯蔵架台変位解析モデルは、金属キャスク及び貯蔵架台をソリッド要素でモデル化し、質量分布状態を 3 次元的に模擬する。金属キャスクと貯蔵架台が連結される下部トラニオンと貯蔵架台固縛部をビーム要素で模擬する。貯蔵容器は固縛部との取合、慣性モーメントを考慮してモデル化する。トラニオンは実機を模擬した断面性能のビーム要素とする。貯蔵架台は架台固定ボルトで床面に固定されているので、架台固定ボルト領域のブロックを床面に対して固定条件とする。トラニオンと架台固縛部のビームに初期締付け力を作用させる。

上記の状態を模擬した後、水平方向及び鉛直方向加速度を作用させ、貯蔵架台に外力を加える。

作用した荷重と変位から、固縛部を含めた貯蔵架台のばね定数を定めることができる。このばね定数は、固縛力と底面の接触条件など、固縛部と貯蔵架台に引張/圧縮荷重が作用した状態が模擬されたものであり、実際に地震時の水平、鉛直方向の加速度が作用し続けた場合の貯蔵架台の剛性に等しい。固有値解析に使用するばね定数は水平方向並進ばね定数 K_x 、鉛直方向並進ばね定数 K_z 及び回転ばね定数 $K_{\theta Y}$ であり、それぞれ以下のように算出する。

- ①水平方向並進ばね定数 K_x : 水平方向の荷重と変位の比から算出
- ②鉛直方向並進ばね定数 K_z : 鉛直方向の荷重と変位の比から算出
- ③回転ばね定数 K_{θ} : モーメントと貯蔵容器軸の鉛直とのなす角の比から算出

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第2-8図 貯蔵架台変位解析モデル

2.3 設計用地震力について

金属キャスク及び貯蔵架台は、耐震設計上の重要度分類 S クラスである。

2.3.1 水平方向

求められた固有周期 ($T=0.080\text{ s}$) より、柔構造であると判断される。

(1) 基準地震動 S_s による地震力

水平方向基準地震動 S_s による床面の水平方向設計用床応答曲線 (第 2-9 図) または、水平方向基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しより算出したものいずれか大きい方に余裕を持った保守的な設計用地震力とする。

(2) 弾性設計用地震動 S_d による地震力

水平方向弾性設計用地震動 S_d による床面の水平方向設計用床応答曲線 (第 2-10 図) または、水平方向弾性設計用地震動 S_d による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しより算出したものいずれか大きい方を設計用地震力とする。

(3) 静的地震力

S クラスの静的地震力 ($3.6C_i$) とする。

2.3.2 鉛直方向

求められた固有周期 ($T=0.023\text{ s}$) より、剛構造であると判断される。

(1) 基準地震動 S_s による地震力

鉛直方向基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しより算出したものに余裕を持った保守的な設計用地震力とする。

(2) 弾性設計用地震動 S_d による地震力

鉛直方向弾性設計用地震動 S_d による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しより算出したものを設計用地震力とする。

(3) 静的地震力

S クラスの静的地震力 ($1.2C_v$) とする。

2.4 計算結果

2.4.1 固有周期

固有周期の評価結果は、2.3 項に示した通り、水平方向 0.080 s，鉛直方向 0.023 s である。

2.4.2 設計用震度

設計用震度の評価結果を 14～15 頁に示す。

水平方向設計震度について

(1) 水平方向基準地震動 S_s による地震力

動的地震力			
設計用床応答曲線より算出		建屋の最大加速度より算出	
NS (第2-8図)	EW (第2-8図)	NS	EW
1.13	1.27	1.40* (1.27)	1.40* (1.29)

* : 括弧内は 1.2ZPA の値。設計では最大の 1.2ZPA に余裕を持った保守的な震度を設定

(2) 水平方向弾性設計用地震動 S_d による地震力及び静的地震力

動的地震力				静的地震力	
設計用床応答曲線より算出		建屋の最大加速度より算出		$3.6C_i$	
NS (第2-9図)	EW (第2-9図)	NS	EW	NS	EW
0.60	0.66	0.67	0.67	0.72	0.72

太字は設計震度として採用した値

鉛直方向設計震度について

(1) 鉛直方向基準地震動 S_s による地震力

動的地震力
建屋の最大加速度より算出
UD
0.87* (0.69)

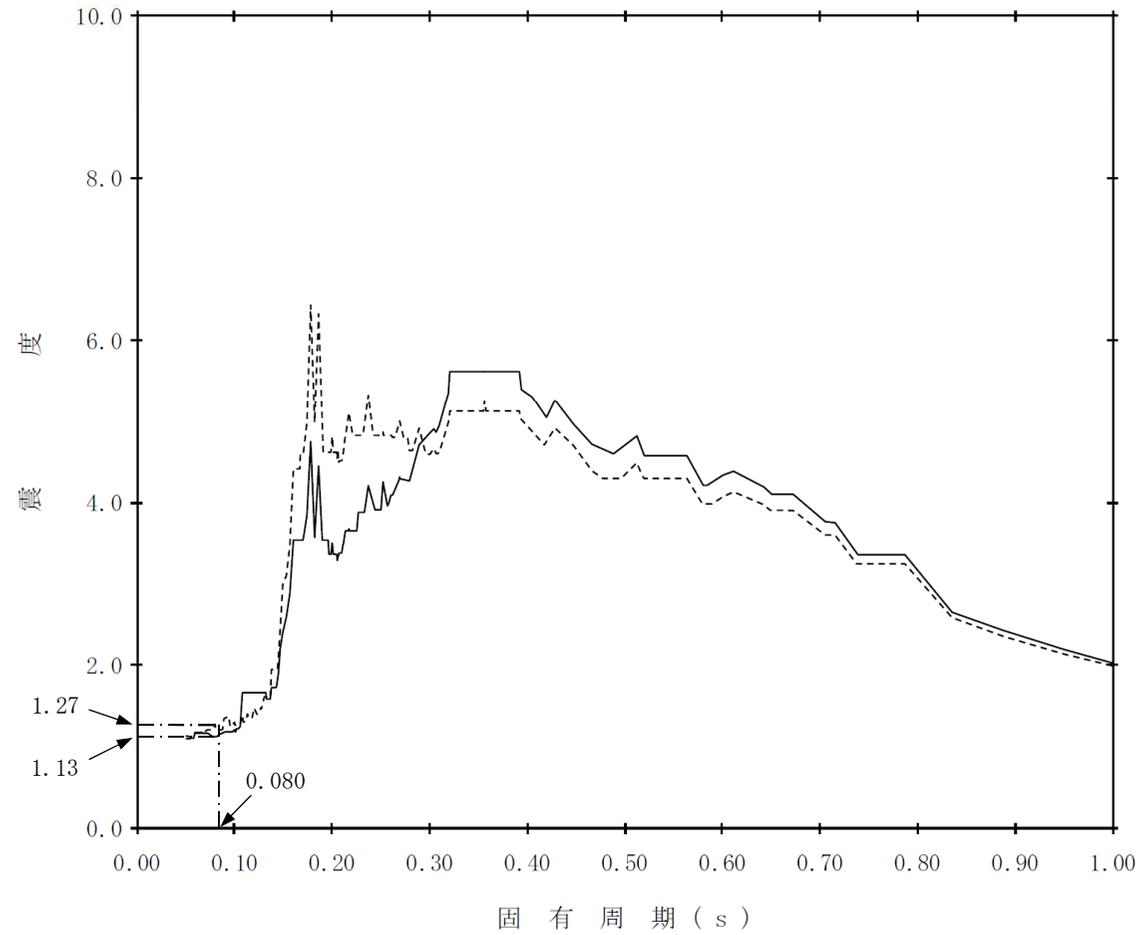
* : 括弧内は 1.2ZPA の値。設計では最大の 1.2ZPA に余裕を持った保守的な震度を設定

(2) 鉛直方向弾性設計用地震動 S_d による地震力及び静的地震力

動的地震力	静的地震力
建屋の最大加速度より算出	$1.2C_v$
UD	UD
0.37	0.29

太字は設計震度として採用した値

【SB-SsH-SB2】
構造物名：使用済燃料貯蔵建屋 標高：T.P. 16.300m ——— NS方向
減衰定数：1.0% 波形名：基準地震動 S s - - - - - EW方向

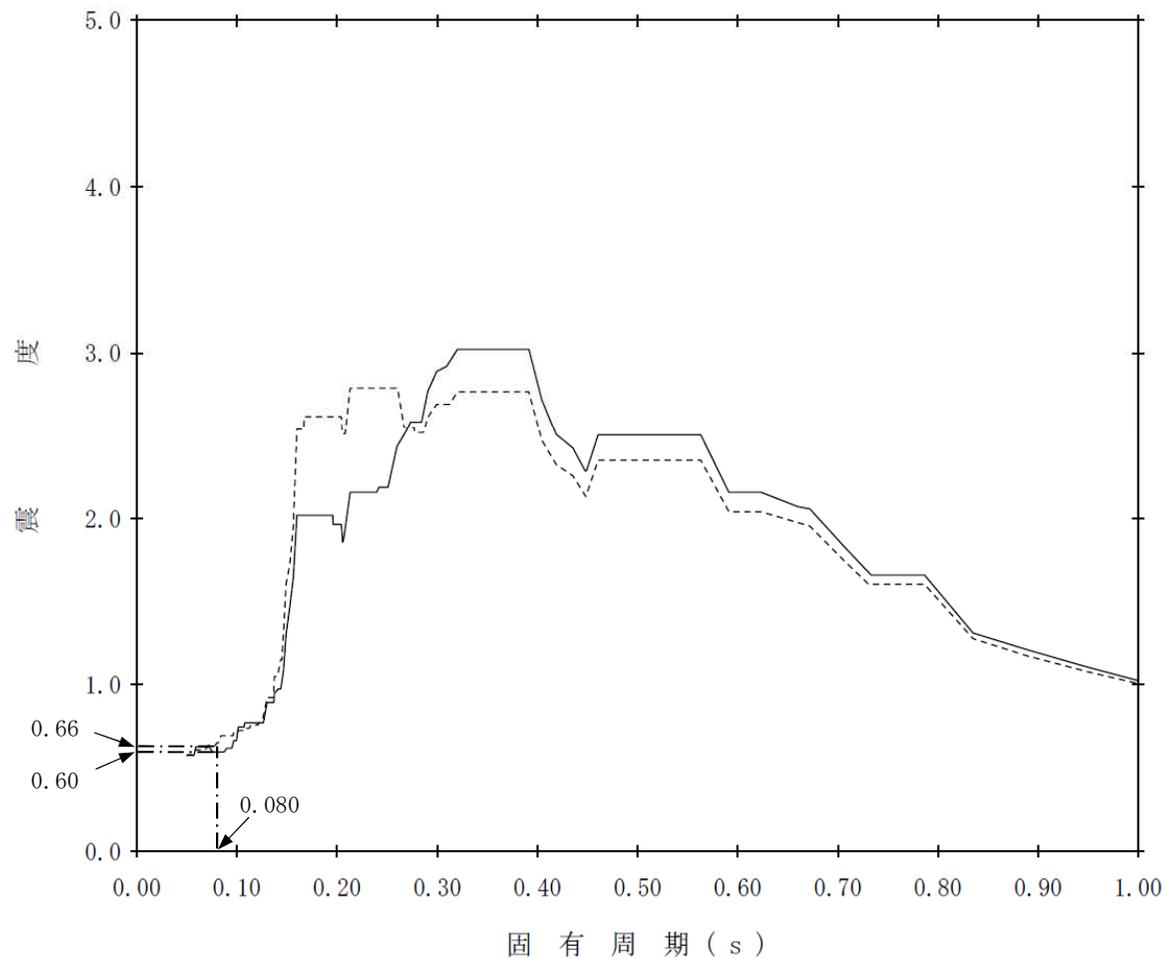


第2-9図 設計用床応答曲線①

構造物名：使用済燃料貯蔵建屋
減衰定数：1.0%

標高：T.P. 16.300m
波形名：弾性設計用地震動 S d

【SB-SdH-SB2】
—— NS方向
- - - - EW方向



第2-10図 設計用床応答曲線②

3. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価は「添付 5-3-1 金属キャスクの耐震性に関する計算書 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))」第 5-5 図 水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した影響評価フローに従い実施する。

3.1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した評価部位の抽出方法について

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響を受ける可能性があり、水平 1 方向及び鉛直方向の従来評価に加え、更なる設計上の配慮が必要な設備 (部位) については、構造及び発生値の増分の観点から抽出する方法がある。

3.1.1 構造上の特徴による抽出

機種毎に構造上の特徴から水平 2 方向の地震力が重複する観点、もしくは応答軸方向以外の振動モード (ねじれ振動等) が生じる観点にて検討を行い、水平 2 方向の地震力による影響の可能性のある設備を抽出する。分類した結果を第 3-1 表に示す。

(1) 水平 2 方向の地震力が重複する観点

水平 1 方向の地震力に加えて、さらに水平直行方向に地震力が重複した場合、水平 2 方向の地震力による影響を検討し、影響が軽微な設備以外の影響検討が必要となる可能性があるものを抽出する。

(2) 水平方向とその直交方向が相関する振動モード (ねじれ振動等) が生じる観点

水平方向とその直交方向が相関する振動モードが生じることで有意な影響が生じ、さらに新たな応力成分が作用する可能性のある設備を抽出する。なお、今回申請設備の各部位について、該当するものは無い。

3.1.2 発生値の増分による抽出

水平 2 方向の地震力による影響の可能性のある設備に対して、水平 2 方向の地震力が各方向 1:1 で入力された場合に各部にかかる荷重や応力を求め、従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対

して、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した発生値の増分を用いて影響を検討し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した発生応力は、設備（部位）の構造により、

- ・水平 2 方向の地震力を受けた場合でも、水平 1 方向の地震動しか負担しない
- ・水平 2 方向の地震力を受けた場合、最大応力の発生箇所が異なる
- ・水平 2 方向の地震力を組み合わせても 1 方向の地震による応力と同等と言える

などにより増分が軽微となるが、それぞれの設備（部位）の増分の詳細評価ではなく、水平 2 方向の地震力が各方向 1:1 で入力された場合の最大値は、地震力の二乗和より最大 $\sqrt{2}$ 倍となるため、この値を丸めた 1.5 以上の裕度がある設備（部位）は、影響が軽微であるものと分類する。

3.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した評価部位の抽出結果(構造上の特徴による抽出)

構造上、水平 2 方向の地震力が重複した際に影響を受ける可能性がある設備（部位）について、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響の可能性のある設備（部位）として分類した結果を第 3-1 表に示す。

搬送台車は、搬送中床面から浮上しているため、水平方向の地震力は作用しない。着床時には貯蔵架台脚部が床面に接しており、金属キャスク及び貯蔵架台からの荷重を受けない設計であるため、搬送台車の水平 2 方向地震力の評価は不要である。

搬送台車搬送中着床時の金属キャスク及び貯蔵架台は、貯蔵架台の平面形状が正方形であるため、モーメント長さを考えると正方形の 1 辺よりも対角線の方が長くなり、従来の水平 1 方向の評価が保守的となる。また、**着床時における基準地震動 S_s-H の地震動での転倒評価をエネルギー時間累積評価法により実施しており、水平 2 方向の地震力を想定した場合についても、設備が有する耐震性に影響のないことを確認している。**(設 2-補-013-07

搬送台車の耐震性 参照)

受入れ区域天井クレーンは走行レール上に乗っているだけで、建屋とは固定されていないので、レールと平行の水平力が加わってもクレーンはレール上を滑るだけであり、クレーンの車輪とレール間の最大静止摩擦力以上の水平力は加わらない。トロリも横行レール上に乗っているだけで、ガーダとは固定されていないので、トロリ車輪とレール間の最大静止摩擦力以上の水平力は加わらないため、水平2方向地震力の影響はない。

第3-1表 水平2方向入力の影響検討対象設備（部位）

設備	部位
金属キャスク	一次蓋（中央，端部，密封シール部） 二次蓋（中央，端部，密封シール部） 一次蓋締付けボルト 二次蓋締付けボルト 胴（一次蓋密封シール部，二次蓋密封シール部，中央，下部） 底板（中央，端部） 底部中性子遮蔽材カバー（中央，端部） バスケットプレート 下部トラニオン 外筒
貯蔵架台	貯蔵架台本体 トラニオン固定金具 トラニオン固定ボルト 架台固定ボルト 貯蔵架台脚部
受入れ区域天井クレーン	—
搬送台車	—

3.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した評価部位の抽出結果（発生値の増分による抽出）

第3-1表において抽出された設備（部位）について，各評価部位の応力分類もしくは応力種類における許容値に対する計算値の裕度が1.5以下の設備（部位）を判定する。判定結果を第3-2表に示す。3.1.2の通り許容値に対する計算値の裕度が1.5倍より大きい設備（部位）については，水平2方向の地震力による影響の詳細評価は不要とする。

第3-2表 各評価点の許容応力に対する計算値の裕度

設備	部位	裕度	判定
金属キャスク	一次蓋(中央, 端部, 密封シール部)	3.00	○
	二次蓋(中央, 端部, 密封シール部)	7.18	○
	一次蓋締付けボルト	2.46	○
	二次蓋締付けボルト	3.09	○
	胴(一次蓋密封シール部, 二次蓋密封シール部, 中央, 下部)	4.40	○
	底板(中央, 端部)	11.43	○
	底部中性子遮蔽材カバー(中央, 端部)	2.14	○
	バスケットプレート	72.83	○
	下部トラニオン	2.28	○
	外筒	4.04	○
貯蔵架台	貯蔵架台本体	2.14	○
	トラニオン固定金具	1.42	詳細評価
	トラニオン固定ボルト	1.52	○
	架台固定ボルト	1.79	○
	貯蔵架台脚部	5.40	○
	コンクリート部	1.36	詳細評価

3.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の影響の詳細評価(水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し耐震性を有していることの確認)

各評価部位の応力分類もしくは応力種類における許容値に対する計算値の裕度が1.5以下の設備(部位)は詳細評価を実施する。

詳細評価においては従来の評価手法と同様に最大応答加速度の20%増(1.2ZPA)により算出された設計用地震力と設計用床応答曲線の比較を行って設計震度を設定する。

計算値の算出における水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せは、水平2方向及び鉛直方向地震力の組せる方法として、米国Regulatory Guide 1.92の「2. Combining Effects Caused By Three Spatial Components of an Earthquake」*を参考に、組合せ係数法(1.0:0.4:0.4)に基づいた評価を行う。

注記*: Regulatory Guide 1.92 (2006). Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis, Rev. 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.

(a) 固有周期

固有周期の計算方法は、設工認図書「添付5-3-1 金属キャスクの耐震性に関する計算書(BWR用大型キャスク(タイプ2A))」と同様であり、設計用床応答曲線の特性も考慮した上で、保守的な値を採用する。

(b) 設計震度

評価用震度は基準地震動 S_s より決定する。キャスク及び貯蔵架台は、2.4.1より水平方向に柔、鉛直方向に剛であるので、水平2方向及びを考慮した詳細評価用の設計震度は、水平方向震度は基準地震動 S_s による床面の水平方向設計用床応答曲線、鉛直方向震度は基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の20%の割り増しより設定する。詳細な設計震度の設定方法を添付2に示す。

添付2より水平方向設計震度は1.39とする。鉛直方向設計震度は基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の20%の割り増しより0.69とする。

3.5 水平2方向及び鉛直方向地震力の影響の詳細評価結果

トラニオン固定金具及びコンクリート部については、裕度が1.5以下であるため、水平2方向及び鉛直方向の影響の詳細評価を行う。水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した水平方向の評価用震度は3.4(b)の通り1.39となる。この震度は従来評価における評価用震度(水平方向1.40)より小さいため、従来の評価結果に包絡される。

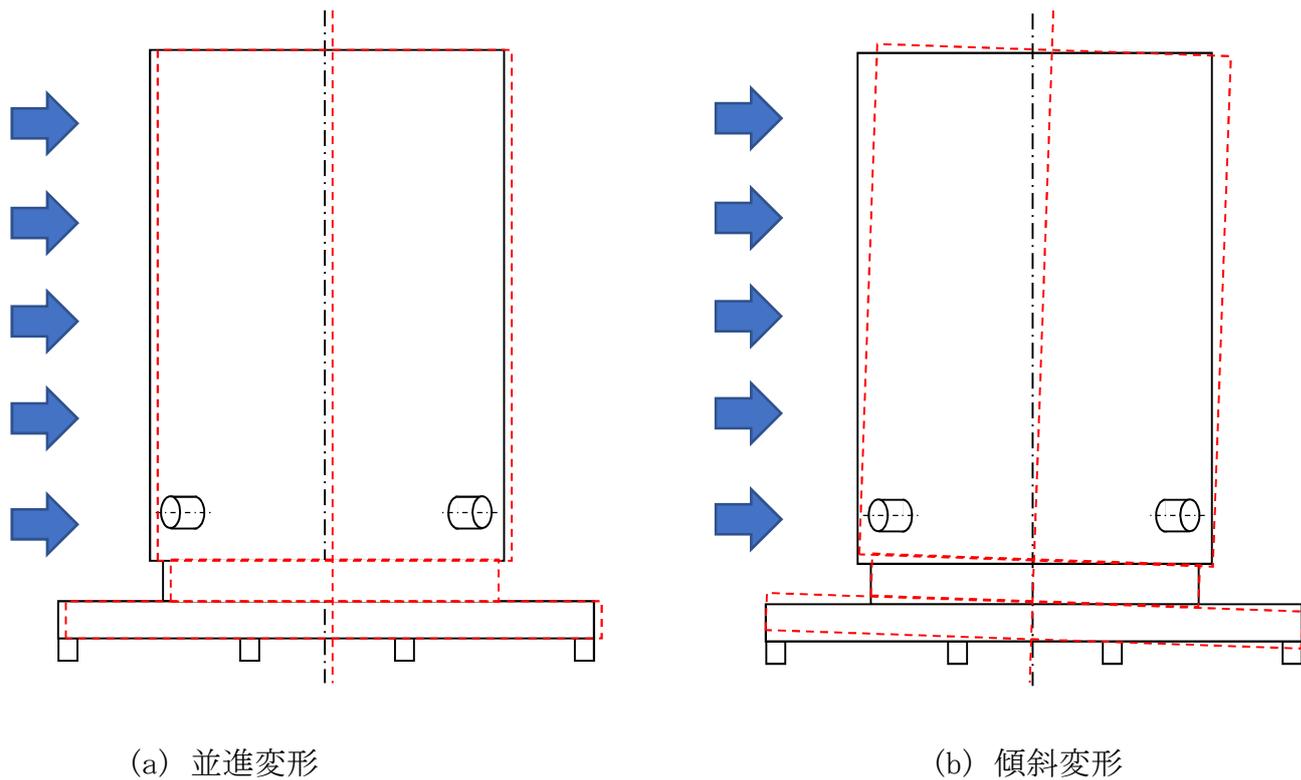
3.6 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価結果

3.6.1 金属キャスクのねじり等の影響について

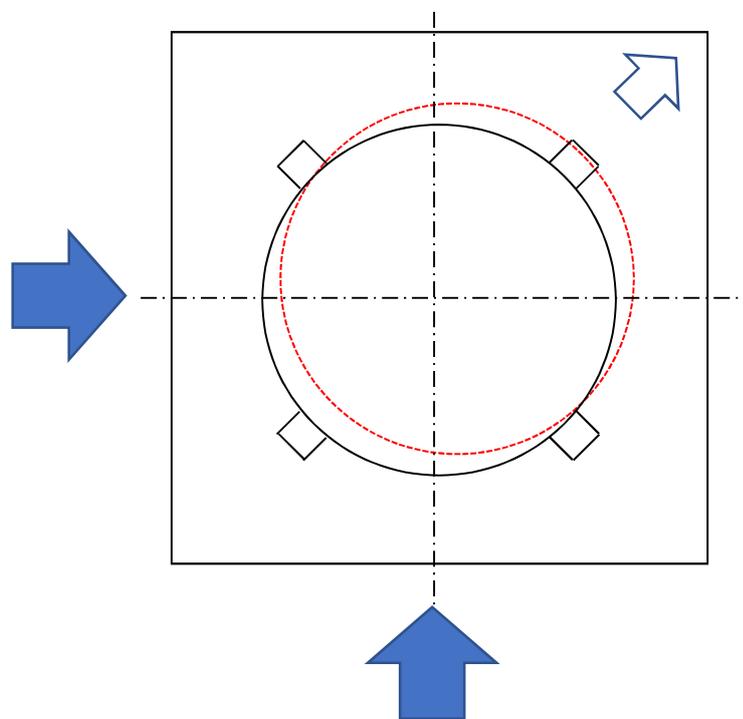
トラニオン支持の金属キャスクにおけるねじれ等現行の応答軸以外の応答について、水平方向荷重が作用する場合の金属キャスクの変形挙動を第3-1図に示す。水平荷重が作用する方向へ並進変形し、また、下部トラニオンを介して固定されていることから傾斜変形する。貯蔵架台固縛部は水平方向荷重に対して固縛を維持できる強度を持つため、水平2方向の荷重が作用する場合も、第3-2図のように荷重作用方向への傾斜が生じるが、第3-3図に示すような金属キャスク軸まわりに回転するようなねじれ変形を生じさせる荷重は作用しない。

3.6.2 まとめ

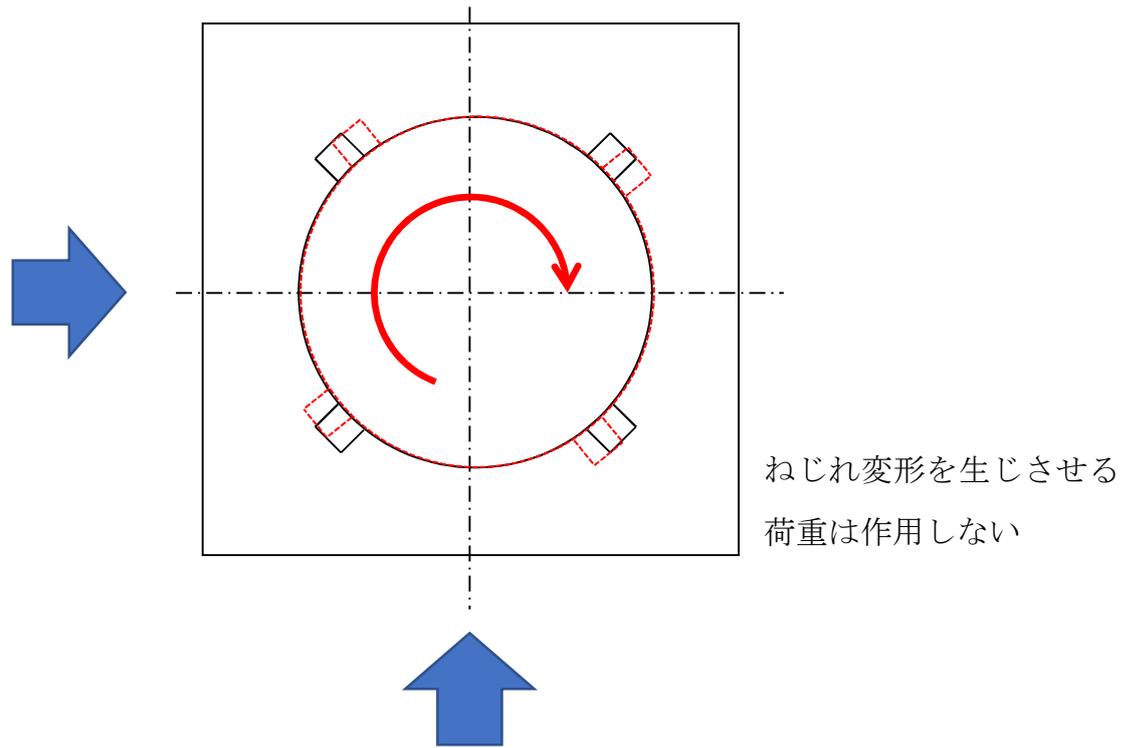
機器系において、構造上水平2方向の地震力の影響を受ける可能性がある設備(部位)について、従来の水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対して影響を評価した。その結果、耐震性への影響が懸念される設備について、設備(部位)が有する耐震性に影響がないことを確認した。



第3-1図 水平方向荷重作用時の変形挙動



第3-2図 水平2方向荷重作用時の変形挙動



第3-3図 ねじれ変形

4. 下部トラニオン及び固縛装置に加わる荷重の分散について

下部トラニオン及び固縛装置(トラニオン固定ボルト・トラニオン固定金具)の応力評価においては「添付 5-3-1 金属キャスクの耐震性に関する計算書(BWR用大型キャスク(タイプ2A))」5.4.5及び「添付 5-4-1 貯蔵架台に関する計算書」5.4.1に記載の通り、保守的に荷重の分散を考慮しない評価としている。実際の挙動としては荷重の分散を考慮して次の通りとなる。

金属キャスクは地震力による荷重によって金属キャスク底面の支点回りに変位する。変位量は支点からの距離に比例するので、それぞれの下部トラニオンに作用する荷重も支点からの距離に比例するとして荷重の分散を考慮し、支点回りのモーメントのつり合い式を用いて下部トラニオンに生じる最大荷重が算出される。下部トラニオンに作用する荷重の計算モデルを第4-1図に示す。支点より金属キャスク中心側に位置するトラニオン(第4-1図の④、⑤)は鉛直上側、支点より外側に位置する下部トラニオン(第4-1図の③)は鉛直下側に変位する。下部トラニオンの固縛装置はトラニオン上側にトラニオン固定金具を配置しているので、下部トラニオンが鉛直下側に変位する場合には荷重を支えないため、下部トラニオン3個(④:1個, ⑤:2個)に荷重が作用する。

なお、水平2方向の地震力を考慮して支点が第4-1図の位置からずれた場合の評価は添付1の通り。荷重の分散を考慮した場合の評価を4.1及び4.2に示す。

4.1 荷重の分散を考慮した下部トラニオンの応力評価

荷重条件及び応力計算は「添付 5-3-1 金属キャスクの耐震性に関する計算書(BWR用大型キャスク(タイプ2A))」の通り。ただし、 F_m (地震力によりトラニオンに作用する荷重(N))の算出については以下の式を用いる。計算結果を第4-1図に示す。

$$F_m = \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_3)}{a_1 + 2 \cdot \frac{a_2}{a_1}}$$

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/s²)
- G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s²)
- C_H : 水平方向設計震度
- C_V : 鉛直方向設計震度
- G : 重力加速度 (m/s²)
- h_{CG} : 金属キャスク底面から重心までの高さ (mm)
- a_1 : 支点Oから固縛装置④のトラニオン固定金具中心までの距離 (mm)
- a_2 : 支点Oから固縛装置⑤のトラニオン固定金具中心までの距離 (mm)
- a_3 : 支点Oから金属キャスク中心までの距離 (mm)
- F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)
- m_2 : 貯蔵時における金属キャスクの質量 (kg)

4.2 荷重の分散を考慮したトラニオン固定金具及びトラニオン固定ボルトの応力評価

荷重条件及び応力計算は「添付 5-4-1 貯蔵架台の耐震性に関する計算書」の通り。ただし、 F_1 (固縛装置に生じる引張力 (N)) の算出については以下の式を用いる。計算結果を第 4-2 表に示す。

$$F_1 = \frac{m_c \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_5)}{a_3 + 2 \cdot \frac{a_4^2}{a_3}}$$

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)

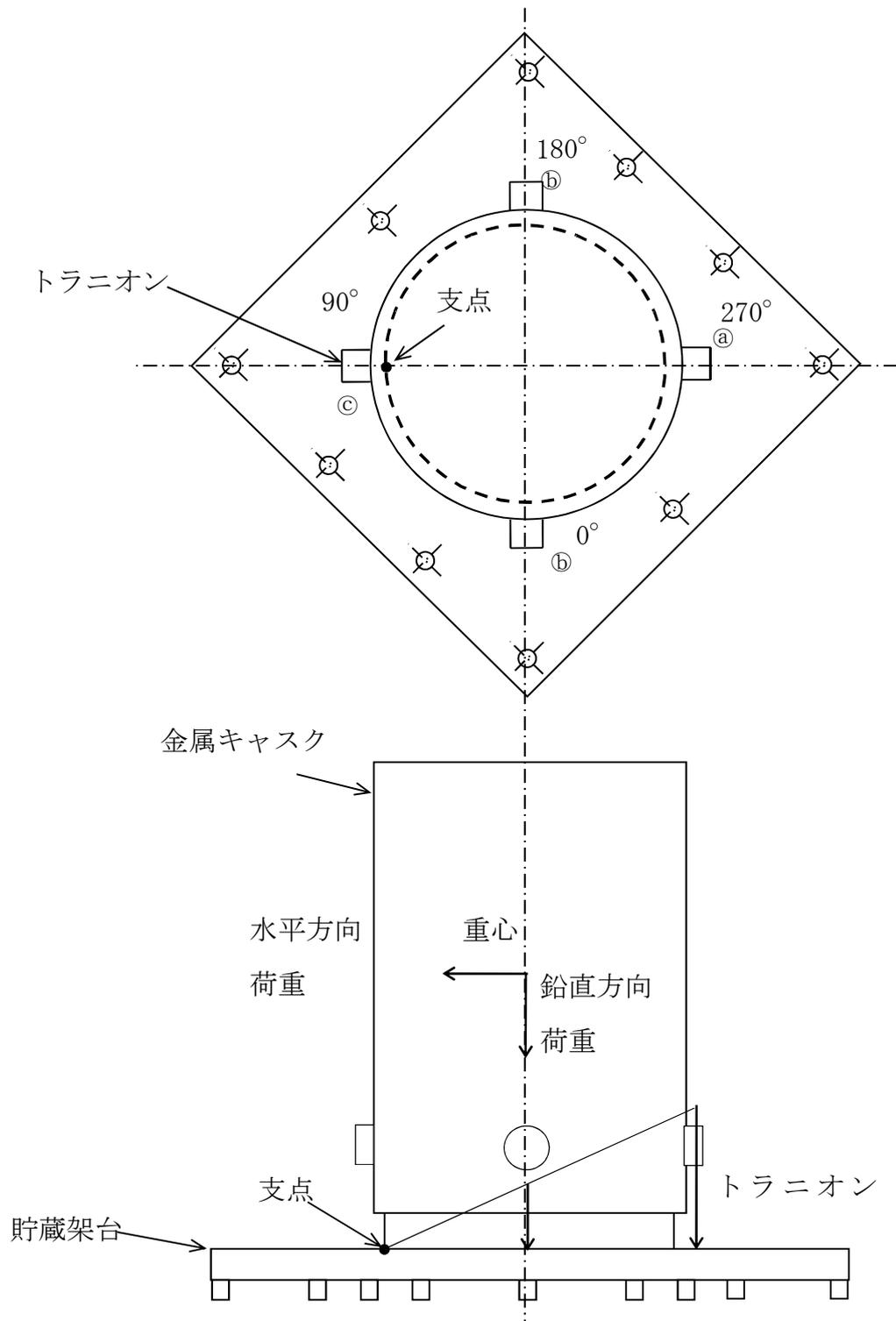
C_H : 4.1 と同じ

C_V : 4.1 と同じ

G : 4.1 と同じ

h_{CG} : 4.1 と同じ

- a_3 : 支点Oから固縛装置③のトラニオン固定金具中心までの距離 (mm)
- a_4 : 支点Oから固縛装置④のトラニオン固定金具中心までの距離 (mm)
- a_5 : 支点Oから金属キャスク中心までの距離 (mm)
- F_1 : 固縛装置に生じる引張力 (N)
- m_c : 4.1 と同じ



①, ②, ③ : 固縛装置番号

第4-1図 トラニオンに作用する荷重の計算モデル

第4-1表 荷重の分散を考慮した下部トラニオンの応力評価

(単位 : MPa)

部位	応力の種類	計算値	評価点 (面)	許容応力	裕度*2	
下部トラニオン (供用状態Cs)	一次応力	せん断応力	32	①	341	10.65
		曲げ応力	76	①	591	7.77
		垂直応力とせん断応力の組合せ	93	①	591	6.35
	*1 一次十二次応力	せん断応力	64	①	682	10.65
		曲げ応力	151	①	1182	7.82
		せん断応力	88	①	341	3.87
下部トラニオン (供用状態Ds)	一次応力	曲げ応力	209	①	591	2.82
		垂直応力とせん断応力の組合せ	259	①	591	2.28
		せん断応力	177	①	682	3.85
	*1 一次十二次応力	曲げ応力	418	①	1182	2.82

注記*1 : 地震力のみによる全振幅について評価する。

*2 : 許容応力に対する計算値の裕度

第 4-2 表 荷重の分散を考慮したトラニオン固定金具及びトラニオン固定ボルト
の応力評価 (単位 : MPa)

部 位	応力の種類		計算値	評価点(面)	許容応力	裕度*2
トラニオン 固定金具 (供用状態Cs)	一次応力	せん断応力	18	②	341	18.94
		曲げ応力	147	②	591	4.02
		組合せ応力	150	②	591	3.94
	一次+二 次応力 *1	せん断応力	36	②	682	18.94
		曲げ応力	293	②	1182	4.03
トラニオン 固定ボルト (供用状態Cs)	一次応力	せん断応力	113	②	478	4.23
トラニオン 固定金具 (供用状態Ds)	一次応力	せん断応力	50	②	341	6.82
		曲げ応力	407	②	591	1.45
		組合せ応力	416	②	591	1.42
	一次+二 次応力 *1	せん断応力	101	②	682	6.75
		曲げ応力	814	②	1182	1.45
トラニオン 固定ボルト (供用状態Ds)	一次応力	せん断応力	314	②	478	1.52

注記*1 : 地震力のみによる全振幅について評価する。

*2 : 許容応力に対する計算値の裕度

トラニオンに作用する荷重の角度依存性について

45 度方向から 90 度方向までのトラニオンに作用する最大荷重の変動を評価する。評価モデルを添付 1 図 1 に示す。トラニオンに作用する最大荷重は以下の式となる。

$$F_m = \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_5)}{a_1 + \frac{a_2^2}{a_1} + \frac{a_3^2}{a_1} + \frac{a_4^2}{a_1}}$$

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)

C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)

C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.87)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s^2)

h_{CG} : 金属キャスク底面から重心までの高さ (=2672 mm)

a_1 : 支点 O から 270 度方向トラニオン固定金具中心までの距離 (mm)

$$a_1 = 990 + 1298 \times \sin \theta$$

a_2 : 支点 O から 180 度方向トラニオン固定金具中心までの距離 (mm)

$$a_2 = 990 + 1298 \times \cos \theta$$

a_3 : 支点 O から 90 度方向トラニオン固定金具中心までの距離 (mm)

$$a_3 = 990 - 1298 \times \sin \theta$$

ただし、トラニオン固定金具中心が支点 O より外側の場合は $a_3 = 0$ とする。

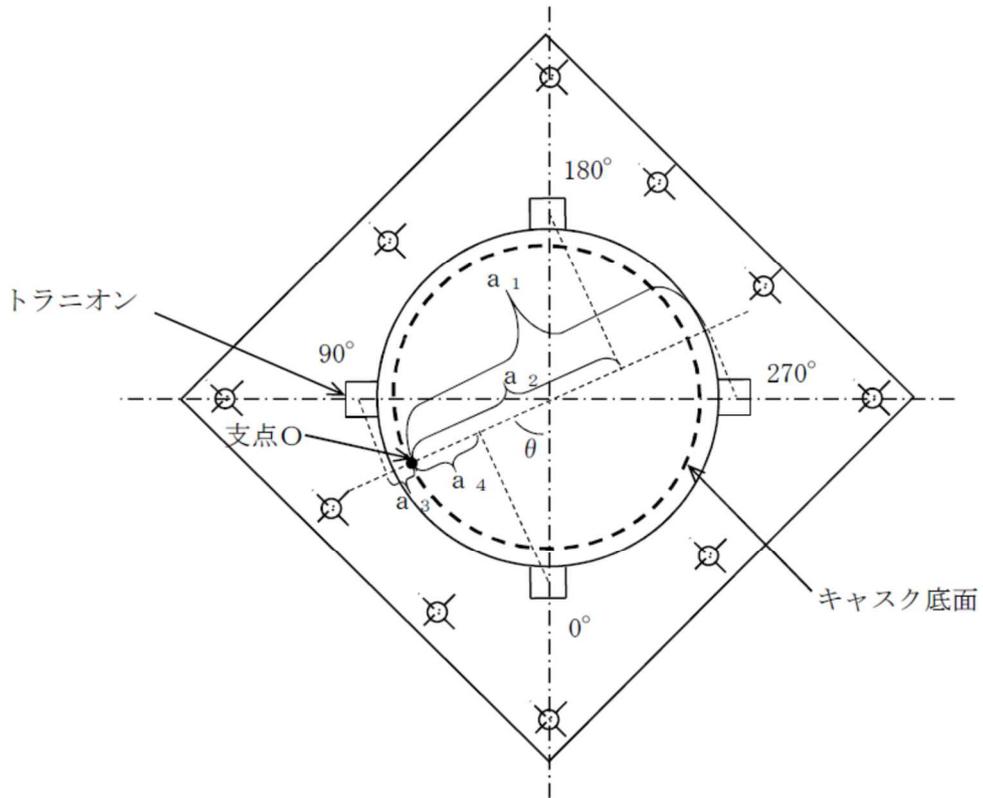
a_4 : 支点 O から 0 度方向トラニオン固定金具中心までの距離 (mm)

$$a_4 = 990 - 1298 \times \cos \theta$$

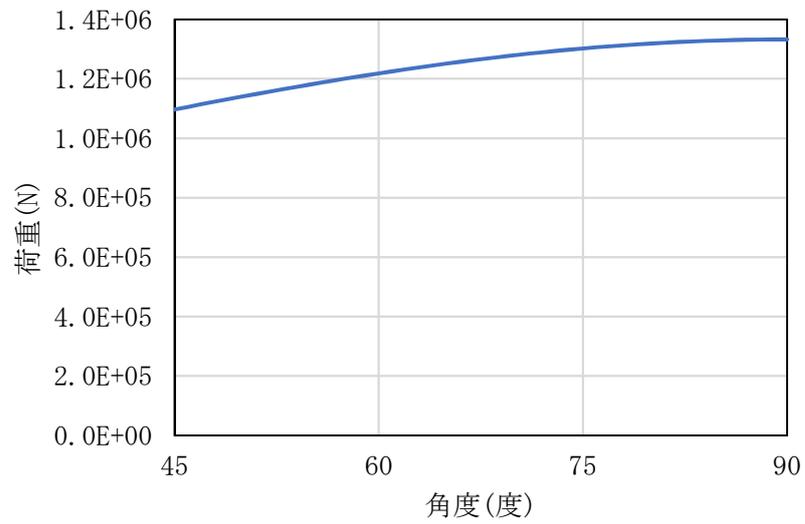
a_5 : 支点 O から金属キャスク中心までの距離 (=990 mm)

m_2 : 貯蔵時における金属キャスクの質量 (=118,300 kg)

評価結果を添付 1 図 2 に示す。トラニオンに発生する荷重は 90 度方向で最大となる。



添付1第1図 トランニオンに作用する荷重の計算モデル



添付1第2図 トランニオンに発生する最大荷重

水平 2 方向の詳細評価に用いる設計震度の設定

1. 背景

金属キャスク及び貯蔵架台の連成モデルによる固有周期評価では、材料自体が弾性範囲内であっても、地震力と変形量の関係が非線形になるため、地震力が大きいほど貯蔵架台のばね定数が小さくなり、固有周期が大きくなる傾向にある。(設 2-補-013-04 金属キャスク及び貯蔵架台の耐震性 2.2 固有周期の算出方法 2.2.1 固有値解析モデル 参照) この傾向を適切に評価するため、添付 2 第 1 図の通りに設計用震度を設計する。

2. 設定方法

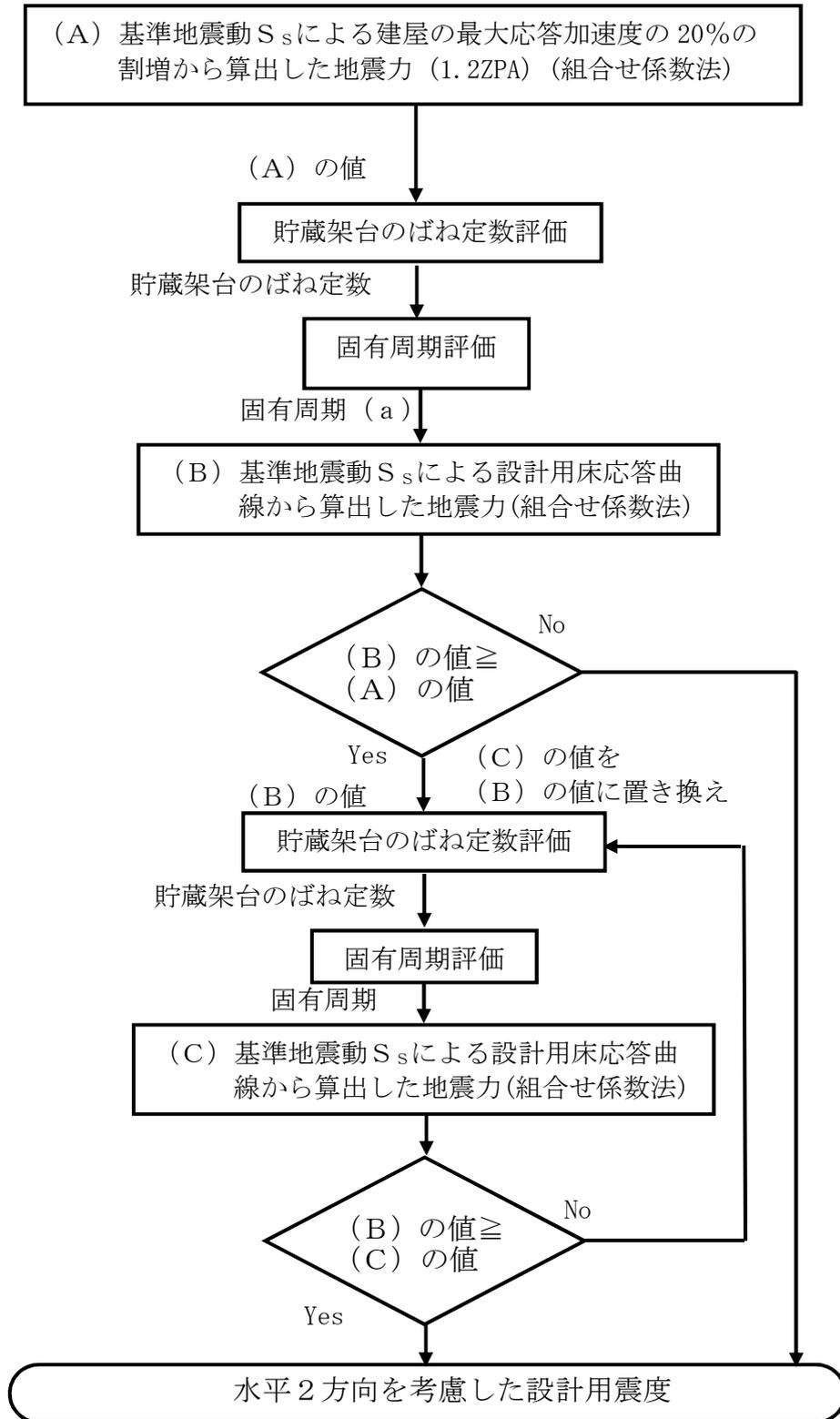
水平 2 方向を考慮した設計震度の設定方法を以下に示す。

- ① 基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の 20% の割増から算出した地震力 (1.2ZPA) に対し組合せ係数法を適用する。
- ② ① で算出した震度に対して、貯蔵架台変位解析モデルにより金属キャスク及び貯蔵架台の連成モデルに入力するばね定数を評価する。
- ③ ② で算出したばね定数に対して、金属キャスク及び貯蔵架台の連成モデルにより固有周期を評価する。
- ④ ② 及び ③ で評価した固有周期における基準地震動 S_s による設計用床応答曲線から算出した地震力に対し組合せ係数法を適用する。
- ⑤ ① 及び ④ を比較しいずれか大きい方を設計震度とする。なお、④ が大きい場合、金属キャスク及び貯蔵架台の固有周期の特性も考慮し、設計用床応答曲線より算出された地震力を上回るよう設定する。

3. 水平 2 方向を考慮した設計用震度

金属キャスク及び貯蔵架台は水平 1 方向を考慮した固有周期 ($T=0.080$ s) の評価結果より、柔構造である。このため「資料 5-1-5 設計用床応答曲線の作成方針」における床面の水平方向設計用床応答曲線又は、水平方向基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しより算出したものいずれか大きい方を設計用震度とする。

水平方向基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しは、NS 方向 1.27, EW 方向 1.29 であるので、組合せ係数法 (1.0 : 0.4 : 0.4) を適用すると $\sqrt{((1.27 \times 0.4)^2 + (1.29 \times 1.0)^2)} = 1.39$ となる。(添付 2 第 1 図 (A)) 水平方向震度 1.39 に相当する固有周期を保守的に水平方向 0.080 s として、設計用床応答曲線を確認すると、NS 方向 1.13, EW 方向 1.27 となり、組合せ係数法 (1.0 : 0.4 : 0.4) を適用すると $\sqrt{((1.13 \times 0.4)^2 + (1.27 \times 1.0)^2)} = 1.35$ となる。(添付 2 第 1 図 (B)) これらを比較すると水平方向基準地震動 S_s による建屋の最大応答加速度の 20% の割り増しより算出したものが大きいため、水平 2 方向を考慮した設計用震度は 1.39 とする。



添付2第1図 水平2方向を考慮した設計用震度の設定フロー