

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)

波及的影響を及ぼすおそれのある施設の
金属キャスクへの影響評価

目次

1. 目的	1
2. 検査架台	1
2. 1 基本仕様について	1
2. 2 評価事象について	1
2. 3 検査架台の金属キャスクへの転倒時について	2
2. 3. 1 概要	2
2. 3. 2 評価方針	2
2. 3. 3 評価条件	4
2. 3. 4 評価	4
2. 3. 5 入力値	6
2. 3. 6 評価結果	6
2. 4 検査架台足場の金属キャスクへの回転落下時について	6
2. 4. 1 概要	6
2. 4. 2 評価方針	7
2. 4. 3 評価条件	9
2. 4. 4 評価	9
2. 4. 5 入力値	13
2. 4. 6 評価結果	13
2. 5 金属キャスクの検査架台への衝突時について	14
2. 5. 1 概要	14
2. 5. 2 評価方針	14
2. 5. 3 評価条件	15
2. 5. 4 評価	15
2. 5. 5 入力値	16
2. 5. 6 評価結果	17
2. 6 代表事象の選定	17
3. 防火シャッター	19
3. 1 基本仕様について	19
3. 2 許容応力値について	19
3. 3 評価事象の選定について	19
3. 4 防火シャッターの水平落下時	20
3. 4. 1 概要	20
3. 4. 2 評価方針	20
3. 4. 3 評価条件	20
3. 4. 4 評価	21
3. 4. 5 入力値	24

3. 4. 6	評価結果	24
3. 5	防火シャッタの傾斜落下時	24
3. 5. 1	概要	24
3. 5. 2	評価方針	25
3. 5. 3	評価条件	26
3. 5. 4	評価	28
3. 5. 5	入力値	32
3. 5. 6	評価結果	33
3. 6	代表事象の選定	33
4.	中性子線エリアモニタ	34
4. 1	基本仕様について	34
4. 2	許容応力値について	34
4. 3	中性子線エリアモニタの落下高さについて	34
4. 4	評価事象について	34
4. 5	代表事象の選定	35

別紙1 「2. 検査架台」の補足

別紙2 「3. 防火シャッタ」の補足

別紙3 「4. 中性子線エリアモニタ」の補足

1. 目的

本資料は、波及的影響を及ぼすおそれのある施設の金属キャスクへの影響評価について評価における基本仕様、評価事象及び設工認申請書に記載の代表事象の選定について説明するものである。

波及的影響については、設計及び工事の計画の認可申請書の分割第1回申請（R3.8 認可）において波及的影響評価に係る基本方針、波及的影響を考慮する施設の選定により、波及的影響を及ぼすおそれがある施設を示している。

波及的影響を及ぼすおそれがある施設の金属キャスクへの影響結果については、設工認申請書「添付5-7-1 波及的影響を及ぼすおそれのある施設の金属キャスクへの影響評価結果」に記載している。

本資料では、金属キャスクへの影響結果のうち検査架台、防火シャッタ及び中性子線エリアモニタについて説明を行う。

2. 検査架台

2.1 基本仕様について

(1) 最高使用温度について

a. 金属キャスク

最高使用温度については、「設 2-補-006 使用済燃料貯蔵設備本体の強度及び耐食性について（BWR用大型キャスク（タイプ2A）」と同じとする。密封容器の最高使用温度は150℃、外筒の最高使用温度は120℃である。

b. 検査架台

評価温度は周囲環境温度（45℃）とする。

2.2 評価事象について

検査架台の波及的影響評価として抽出した事象を表1に示す。

表1 検査架台の波及的影響評価事象

評価事象	金属キャスク 衝突部位	抽出根拠
検査架台の金属キャスクへの転倒時	胴	地震力により、検査架台のアンカーボルトが破損し、金属キャスクに転倒する可能性があるため。
検査架台足場の金属キャスクへの回転落下時	胴（蓋フランジ部）	地震力により、最上段の検査架台足場が回転転倒し、胴（蓋フランジ部）に衝突する可能性があるため。
金属キャスクの検査架台への衝突時	外筒	貯蔵架台が床面に固定されていない状態で地震力が作用した場合、ロッキング振動によって、金属キャスクが検査架台と衝突する可能性があるため。

2. 3 検査架台の金属キャスクへの転倒時について

2. 3. 1 概要

検査架台がアンカーボルトで固定されている場合に、基準地震動 S_s による地震力が作用した際のアンカーボルト健全性を評価し、検査架台が転倒するかを確認する。検査架台が地震により転倒する場合、検査架台が転倒し、金属キャスクに衝突する場合の応力評価を行う。

2. 3. 2 評価方針

図1に、地震時に検査架台アンカーボルトに作用する引抜き力の計算モデルを示す。以下の手順にて評価を実施する。

- ・地震による転倒を想定し、水平地震力と鉛直地震力が検査架台の重心位置に作用するとして、モーメントのつり合いからアンカーボルトに生じる引抜き力を算出する。
- ・引抜き力から引張応力を、水平地震力からせん断応力を算出し、これらの組合せ応力を評価する。
- ・組合せ応力が設計降伏点以下であれば、アンカーボルトは健全であり、検査架台は地震により転倒しない。

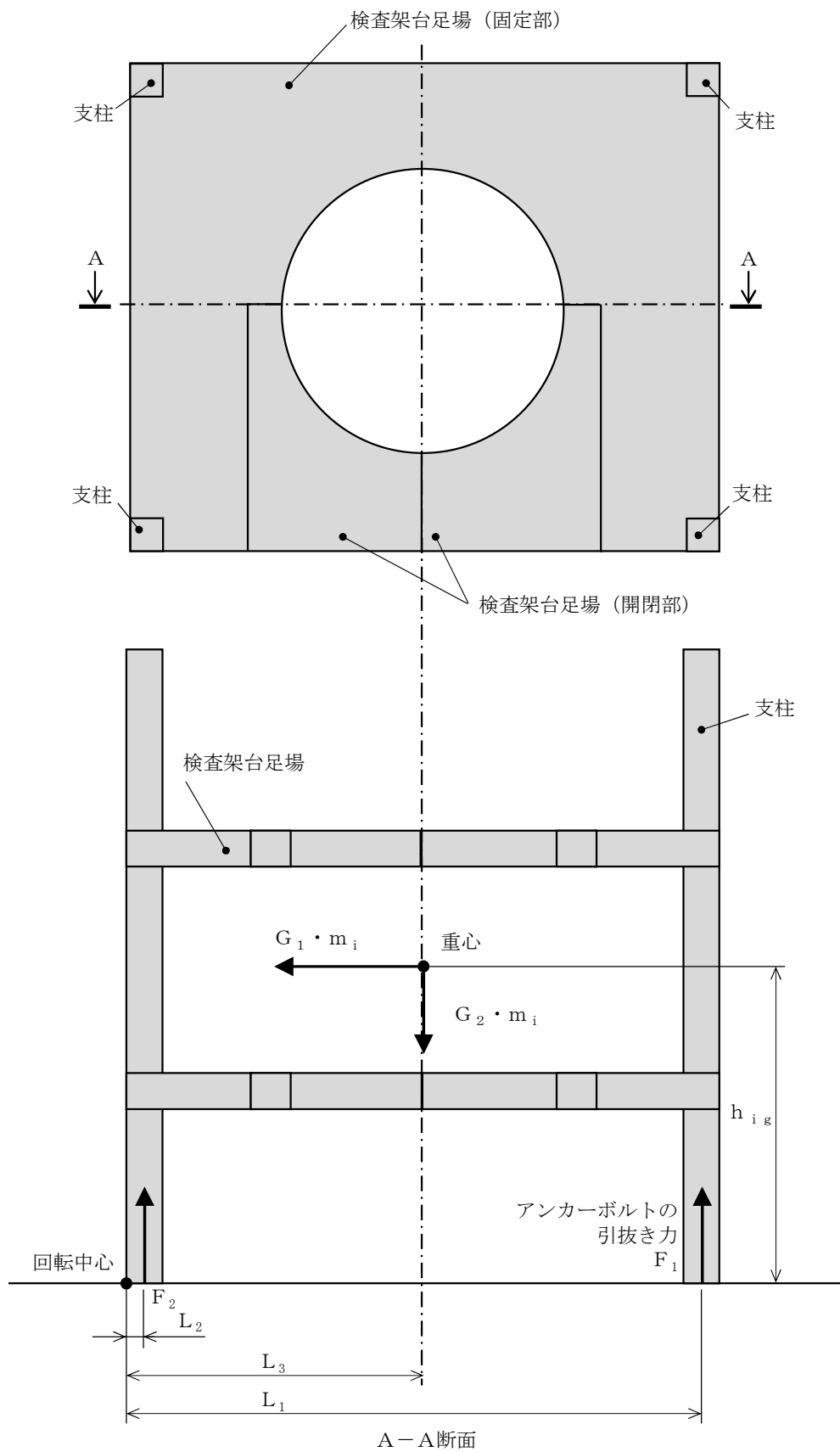


図1 地震時に検査架台アンカーボルトに作用する引抜き力の計算モデル

2. 3. 3 評価条件

- ・ 図1に示すように、検査架台底部の1辺を軸に回転転倒することを想定する。
- ・ アンカーボルトに発生する引張応力が大きくなるように、検査架台の幅は狭い方の値を使用する。
- ・ アンカーボルトは16本すべてを用いて検査架台を固定していると考え、引抜き力が回転中心からの距離に比例するものとする。
- ・ アンカーボルトの位置は、支柱の中心とする。
- ・ S_s地震力として水平1.40G、鉛直0.87Gで評価する。

2. 3. 4 評価

(1) アンカーボルトに生じる引張応力

図1を基に算出する。

回転中心と逆側にあるアンカーボルトの引抜き力 F_1 は、モーメントのつり合いから以下の式で算出する。

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot m_i \cdot h_{ig} - G_2 \cdot m_i \cdot L_3}{L_1 + \frac{L_2^2}{L_1}} \quad (1)$$

ここで、

G_1 : 水平方向加速度 (m/s^2)

水平方向震度を C_H 、重力加速度を G (m/s^2)として、以下の式で算出する。

$$G_1 = C_H \cdot G \quad (2)$$

G_2 : 鉛直方向加速度 (m/s^2)

鉛直方向震度を C_V 、重力加速度を G (m/s^2)として、以下の式で算出する。

$$G_2 = (1 - C_V) \cdot G \quad (3)$$

m_i : 検査架台の質量 (kg)

h_{ig} : 床面から検査架台重心までの高さ (mm)

L_1 : 回転中心から回転中心と逆側にあるアンカーボルトまでの距離 (mm)

L_2 : 回転中心から回転中心側にあるアンカーボルトまでの距離 (mm)

L_3 : 回転中心から検査架台重心までの距離 (mm)

回転中心と逆側にあるアンカーボルトに生じる引張応力 σ_{c1} は、以下の式で算出する。

$$\sigma_{c1} = \frac{F_1}{n_{B1} \cdot A_B} \quad (4)$$

ここで、

n_{B1} : 回転中心と逆側にあるアンカーボルトの本数 (本)

A_B : アンカーボルト 1 本あたりの最小断面積 (mm^2)

$$A_B = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (5)$$

ここで、

d : アンカーボルトの最小径 (mm)

(2) アンカーボルトに生じるせん断応力

アンカーボルトのせん断応力 τ_1 は、以下の式で算出する。

$$\tau_1 = \frac{G_1 \cdot m_i}{(n_{B1} + n_{B2}) \cdot A_B} \quad (6)$$

ここで、

n_{B2} : 回転中心側にあるアンカーボルトの本数 (本)

(3) 組合せ応力

組合せ応力が考えられる場合の許容引張応力 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。

$$f_T = 1.4 \cdot S_y - 1.6 \cdot \tau_1 \quad (7)$$

$$f_T = S_y \quad (8)$$

ここで、

τ_1 : ボルトに発生するせん断応力 (MPa)

S_y : アンカーボルトの設計降伏点 (MPa)

2. 3. 5 入力値

記号	項目	単位	値
n_{B1}	回転中心と逆側にあるアンカーボルトの本数	本	8
n_{B2}	回転中心側にあるアンカーボルトの本数	本	8
d	アンカーボルトの最小径	mm	26.211
A_B	アンカーボルト1本あたりの最小断面積	mm ²	5.39×10^2
C_H	水平方向震度	-	1.40
C_V	鉛直方向震度	-	0.87
G	重力加速度	m/s ²	9.80665
G_1	水平方向加速度	m/s ²	13.73
G_2	鉛直方向加速度	m/s ²	1.275
h_{ig}	床面から検査架台重心までの高さ	mm	3572
m_i	検査架台の質量	kg	13500
L_1	回転中心から回転中心と逆側にあるアンカーボルトまでの距離	mm	4800
L_2	回転中心から回転中心側にあるアンカーボルトまでの距離	mm	100
L_3	回転中心から検査架台重心までの距離	mm	2450
F_1	回転中心と逆側にあるアンカーボルトの引抜き力	N	1.29×10^5

2. 3. 6 評価結果

結果を以下の表に示す。アンカーボルトに生じる組合せ応力は設計降伏点以下である。したがって、アンカーボルトは健全であり、検査架台は地震により転倒しない。

(単位：MPa)

部材	応力	算出値	許容値	結果
アンカーボルト	引張り	30	485	良
	せん断	22	485	良

2. 4 検査架台足場の金属キャスクへの回転落下時について

2. 4. 1 概要

金属キャスクが検査架台内に進入する途中で検査架台足場が回転し、金属キャスクに衝突する事象の金属キャスクへの影響を評価する。

2. 4. 2 評価方針

図 2 に, 検査架台足場の回転衝突時の計算モデルを示す。以下の手順にて評価を実施する。

- ・ 検査架台と金属キャスクの位置関係から, 検査架台足場が金属キャスクに衝突する際の検査架台足場の傾斜角度を算出する。
- ・ 検査架台足場を重心位置と回転中心位置での両端単純支持の梁と仮定し, 検査架台足場が垂直姿勢から金属キャスクへの衝突時の傾いた姿勢になるまでの位置エネルギーが, 検査架台足場の曲げ変形による弾性エネルギー及び蓋フランジ部の衝突部の変形による吸収エネルギーに全て変換されるとして, 衝突荷重を算出する。
- ・ 金属キャスクの衝突部位は角部であり, 荷重作用面積が微小のため金属キャスクは塑性変形する事が考えられるが, 変形することで荷重作用面積が大きくなり, 応力が小さくなる。そこで, 金属キャスクの降伏応力と荷重を用いて, どの程度の面積であれば弾性変形の範囲内であるかを算出し, 塑性変形する程度を評価する。

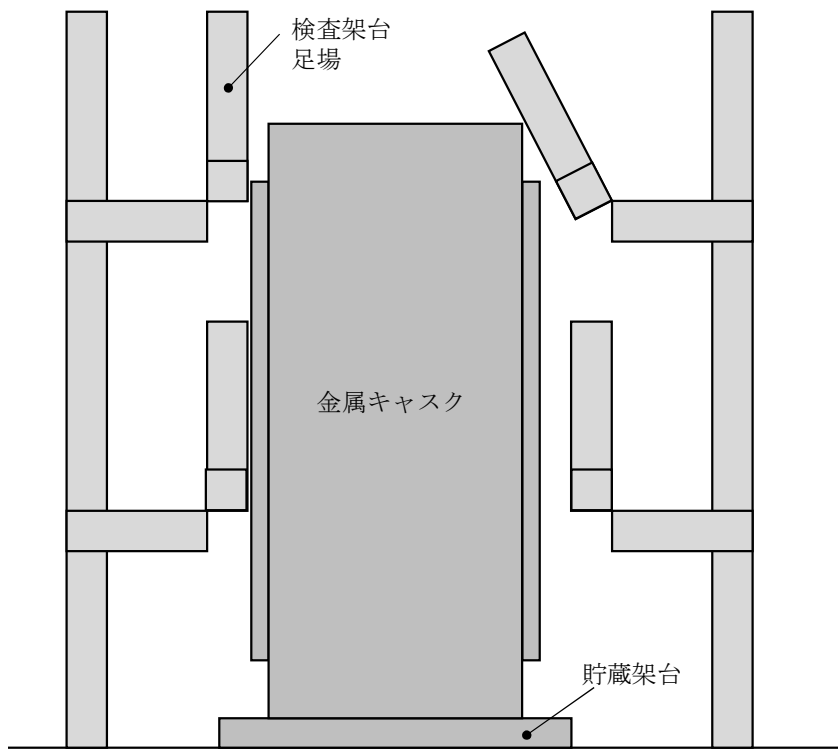
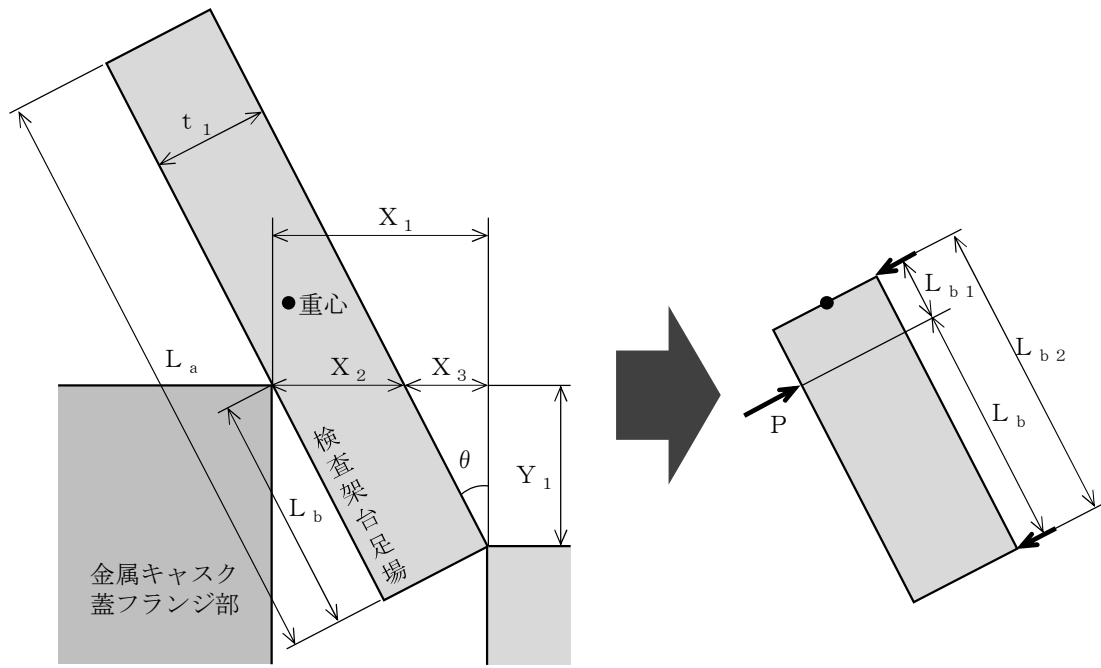


図2 検査架台足場の回転衝突時の計算モデル

2. 4. 3 評価条件

- ・ 衝突部位は、胴(蓋フランジ部)と外筒が考えられるが、傾斜角度が大きくなる衝突時の荷重が大きくなる胴(蓋フランジ部)で評価する。
- ・ 金属キャスクの位置は、金属キャスクが検査架台内に進入する途中の事象とし、検査架台入口位置とする。
- ・ 金属キャスク高さは、傾斜角度が大きくなるようにエアパレットが着床した場合を想定し、貯蔵架台及び金属キャスク全長とする。

2. 4. 4 評価

(1) 金属キャスクへの衝突時の検査架台足場の傾斜角度

図2を基に算出する。

図中の長さ X_2 は、以下の式で表せる。

$$X_2 = \frac{t_1}{\cos \theta} \quad (9)$$

また、長さ X_3 は、以下の式で表せる。

$$X_3 = Y_1 \cdot \tan \theta \quad (10)$$

さらに、金属キャスクと検査架台の最大距離 X_1 は、以下の式で表せる。

$$X_1 = X_2 + X_3 \quad (11)$$

(9)(10)(11)式より、下式の関係が成り立つ。

$$X_1 = \frac{t_1}{\cos \theta} + Y_1 \cdot \tan \theta \quad (12)$$

(12)式が成り立つように、傾斜角度 θ を繰り返し計算により求める。

(2) 蓋フランジ部の変形量

図2を基に算出する。

検査架台足場を重心位置と回転中心位置での両端単純支持の梁と仮定し、荷重と検査架台足場の曲げ変形の関係及び曲げ変形によるばね力を用いて、検査架台足場のばね定数を算出する。

検査架台足場の衝突部における曲げ変形量 δ は、以下の式で表せる。

$$\delta = \frac{P \cdot L_{b1}^2 \cdot L_b^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot L_{b2}} \quad (13)$$

ここで、

E : 検査架台足場の縦弾性係数 (MPa)

I : 検査架台足場の断面二次モーメント (mm⁴)
*別紙1で算出する。

L_b : 検査架台足場の曲げ長さ (mm)

ここで,

$$L_b = \frac{Y_1}{\cos \theta} + t_1 \cdot \tan \theta \quad (14)$$

P : 衝突部に作用する荷重 (N)

*検査架台足場の重心位置は検査架台足場の長さL_aの中心位置と考える。

L_{b1} : 検査架台足場の重心と蓋フランジ部の衝突部との距離 (mm)

ここで,

$$L_{b1} = L_{b2} - L_b \quad (15)$$

L_{b2} : 検査架台足場の重心と回転中心の距離 (mm)

検査架台足場の長さL_aを用いて、以下の式で算出する。

$$L_{b2} = \frac{L_a}{2} \quad (16)$$

また、検査架台足場の曲げによる弾性力で衝突部に荷重が作用すると考えると、衝突部に作用する荷重P、検査架台足場の曲げによるばね定数k、検査架台足場の変形量δは以下の関係で表せる。

$$P = k \cdot \delta \quad (17)$$

(13) (17)式を用いて、検査架台足場のばね定数kを以下の式で算出する。

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot L_{b2}}{L_{b1}^2 \cdot L_b^2} \quad (18)$$

検査架台足場の落下エネルギーUが、検査架台足場の曲げによる弾性エネルギーW_sと蓋フランジ部の衝突部の塑性変形による吸収エネルギーW_Tに全て変換されると考えると、以下の関係が成り立つ。

$$U = W_s + W_T \quad (19)$$

検査架台足場の落下エネルギー U は、以下の式で算出する。

$$U = m_a \cdot G \cdot h_U \quad (20)$$

ここで、

m_a : 検査架台足場の質量 (kg)

*別紙1で算出する。

G : 重力加速度 (m/s^2)

h_U : 検査架台足場の落下高さ (mm)

$$h_U = \frac{L_a}{2} (1 - \cos \theta) \quad (21)$$

また、検査架台足場の曲げ変形による弾性エネルギー W_s は、以下の式で算出する。

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta^2 \quad (22)$$

ここで、

k : 検査架台足場のばね定数 (N/mm)

* (18)式で算出する。

δ : 検査架台足場の曲げ変形量 (mm)

検査架台足場が衝突時の傾斜角度を維持したまま蓋フランジ部は衝突により塑性変形し、荷重作用面積 A_e は蓋フランジ部に生じる応力が設計降伏点 S_y になるときの値とする。以下の関係を考える。

$$P = S_y \cdot A_e \quad (23)$$

(17) (23)式より、検査架台足場の曲げ変形量 δ を以下の式で算出する。

$$\delta = \frac{S_y \cdot A_e}{k} \quad (24)$$

さらに、蓋フランジ部の衝突部の変形による吸収エネルギー W_T は、以下の式で算出する (別紙1参照)。

$$W_T = \sigma \cdot V \quad (25)$$

ここで、

σ : 蓋フランジ部の流動応力 (MPa)

V : 蓋フランジ部の衝突部の変形領域の体積 (mm^3)

ここで、

$$V = \frac{1}{3} \cdot A_e \cdot L_{da} \quad (26)$$

ここで、

L_{da} : 荷重の作用方向における蓋フランジ部の変形量 (mm)

*別紙1別1-図1参照

ここで、 A_e と L_{da} には以下の関係がある (別紙1参照)。

$$A_e = L_{da} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \theta \right) \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{L_{da}}{\cos \theta} \right)^2} \quad (27)$$

(19)式に代入した下式が成り立つように繰り返し計算を行うことで、 L_{da} を求める。

$$m_a \cdot G \cdot h_U$$

$$= \frac{S_y^2}{2k} \left(L_{da} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \theta \right) \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{L_{da}}{\cos \theta} \right)^2} \right)^2 \quad (28)$$

$$+ \frac{1}{3} \sigma \cdot L_{da} \left(L_{da} \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \theta \right) \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{L_{da}}{\cos \theta} \right)^2} \right)$$

また、蓋フランジ部上面の塑性変形量 L_x は、以下の式で算出する。

$$L_x = \frac{L_{da}}{\cos \theta} \quad (29)$$

2. 4. 5 入力値

記号	項目	単位	値
X_1	金属キャスクと検査架台の最大距離	mm	346
t_1	検査架台足場の板厚	mm	200
Y_1	蓋フランジ部と検査架台足場の高低差	mm	627
θ	検査架台足場の傾斜角度	°	13
L_a	検査架台足場の長さ	mm	1705
L_b	検査架台足場の曲げ長さ	mm	688
L_{b1}	検査架台足場の 重心と蓋フランジ部の衝突部との距離	mm	165
L_{b2}	検査架台足場の重心と回転中心の距離	mm	853
k	検査架台足場のばね定数	N/mm	3.498×10^6
h_U	検査架台足場重心の落下高さ	mm	21
m_a	検査架台足場の質量	kg	689
G	重力加速度	m/s ²	9.80665
I	検査架台足場の断面二次モーメント	mm ⁴	8.745×10^7
E	検査架台足場の縦弾性係数	MPa	201000
R	蓋フランジ部の半径	mm	1154
S_y	蓋フランジ部の弾性限界	MPa	183
σ	蓋フランジ部の流動応力	MPa	280
A_e	蓋フランジ部の荷重作用面積	mm ²	6.99×10^2
V	蓋フランジ部の衝突部の変形領域の体積	mm ³	4.93×10^2

2. 4. 6 評価結果

評価結果を以下の表に示す。蓋フランジ部は荷重の作用方向で約 2mm の塑性変形が発生する。また、蓋フランジ部上面の塑性変形量も約 2mm であり、蓋フランジ部上面の端部から一次蓋密封シール部までの距離 (269mm) 及び二次蓋の密封シール部までの距離 (161mm) より小さいため、当該事象による波及的影響はない。

(単位：mm)

評価対象	算出値	許容値		結果
		一次蓋密封 シール部	二次蓋密封 シール部	
荷重作用方向における蓋フランジ部の変形量	2.12	269	161	良
蓋フランジ部の上面の塑性変形量	2.17	269	161	良

2. 5 金属キャスクの検査架台への衝突時について

2. 5. 1 概要

搬送台車による浮上状態では、搬送台車での搬送中に地震が起きても、圧縮空気の層により搬送台車へ地震荷重が伝達されないため金属キャスクが地震により転倒する可能性はない。一方、貯蔵架台が着床し、貯蔵架台が床面に固定されていない状態で地震が発生した場合、金属キャスクに対し地震力の方向が正負に繰返し作用（交番）することにより金属キャスク及び貯蔵架台は一体で傾き、脚部が交互に浮き上がる事象（ロッキング振動）が発生する。このとき、金属キャスクが転倒することはないが、転倒しない場合であっても検査架台に衝突する可能性がある。

そこで、金属キャスクが検査架台内中央に位置するときにロッキング振動による最大の傾斜となった際に、検査架台に衝突するかどうかを確認する。次に、検査架台への衝突時に金属キャスクに生じる応力を評価する。

2. 5. 2 評価方針

図3に、ロッキング振動による衝突確認図を示す。

以下の手順にて評価を実施する。

- ・ 図3の各記号を用いて幾何学的に算出した金属キャスク傾斜角度が、ロッキング振動による最大の金属キャスク傾斜角度より小さければ金属キャスクはロッキング振動により検査架台に衝突する。
- ・ 衝突後、ロッキング振動による最大傾斜角度まで傾いた際の位置エネルギーが検査架台の弾性変形エネルギーに全て吸収されるとして衝突荷重を算出する。

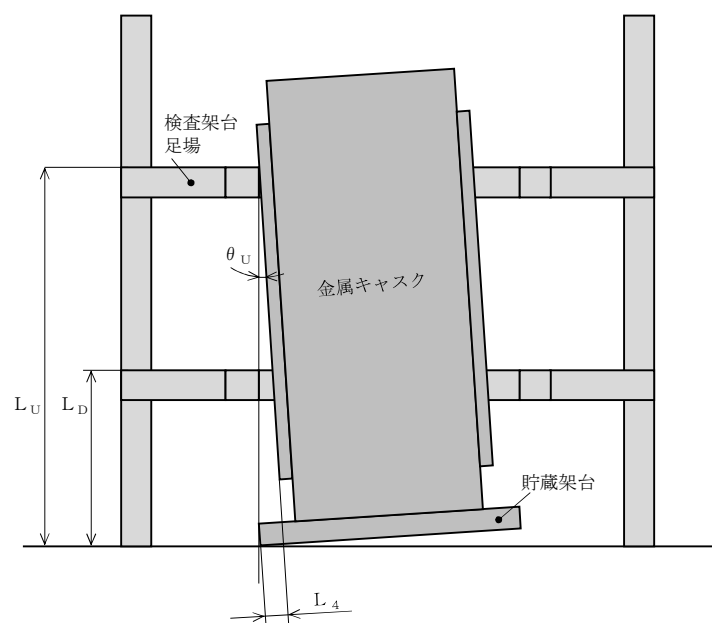


図3 ロッキング振動による衝突確認図

2. 5. 3 評価条件

- ・ 評価では、金属キャスクの位置は検査架台内中央とし、ロックンク振動により検査架台に衝突するときの傾斜角度を算出する。
- ・ 評価では、算出した傾斜角度からロックンク振動による最大の金属キャスク傾斜角度 θ_R まで傾いた場合の位置エネルギーが検査架台の弾性変形エネルギーで吸収されるとして、衝突荷重を算出する。
- ・ 金属キャスクと検査架台の衝突部の高さは、位置エネルギーが大きくなる条件として、上段の足場のみ下がっている、又は上段も下段も足場が下がっている状態で外筒が上段の足場に衝突する場合とする。
- ・ 金属キャスクが荷重を受ける面積は、足場の板厚寸法で構成する矩形の面積とする。

2. 5. 4 評価

(1) ロックンク振動による検査架台への衝突の有無

図 3 より、検査架台の足場が全て下ろされた状態であり、金属キャスクは検査架台中央位置から貯蔵架台端部を中心に回転し上段の検査架台足場に接触している。 θ_U を算出し、ロックンク振動による最大の傾斜角度 θ_R より大きければ、金属キャスクは検査架台に衝突しない。上段の検査架台足場に衝突する場合の傾斜角度 θ_U は、図中の記号を用いて以下の式で算出する。なお、この時検査架台足場の衝突部と貯蔵架台端部の回転中心の水平位置は一致する。

$$\theta_U = \sin^{-1} \left(\frac{L_4}{L_U} \right) \quad (30)$$

また、上段の検査架台足場が上げられた状態では、金属キャスクは下段の検査架台足場に衝突する。下段の検査架台足場に衝突する場合の傾斜角度 θ_D は、図中の記号を用いて以下の式で算出する。

$$\theta_D = \sin^{-1} \left(\frac{L_4}{L_D} \right) \quad (31)$$

(2) 検査架台への衝突時に金属キャスクに生じる応力

金属キャスクが検査架台に接触する角度からロックンク振動による最大傾斜角度まで傾いた際の位置エネルギー E が検査架台の弾性変形エネルギーで吸収される場合、衝突荷重 F は以下の式で算出される。

$$F = \sqrt{2 \cdot k \cdot E} \quad (32)$$

ここで、

k : 検査架台のばね定数 (N/mm)

*別紙1 参照

E : 金属キャスクの位置エネルギー (N・mm)

位置エネルギーEは以下の式で算出する。

$$E = m \cdot G \cdot h \quad (33)$$

ここで、

m : 金属キャスクと貯蔵架台の合計質量 (kg)

G : 重力加速度 (m/s²)

h : 金属キャスク及び貯蔵架台の重心変位 (mm)

*別紙1 参照

外筒に生じるせん断応力 τ は、以下の式で算出する。

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (34)$$

ここで、

A : せん断面積 (mm²)

2. 5. 5 入力値

(1) ロッキング振動による衝突確認

記号	項目	単位	値
L ₄	検査架台と金属キャスク外筒外面の距離	mm	259
L _U	上段の検査架台足場の床面からの高さ	mm	5000
L _D	下段の検査架台足場の床面からの高さ	mm	2200

(2) 金属キャスク転倒時の応力評価条件

記号	項目	単位	値
k	検査架台のばね定数	N/mm	1.464×10 ⁴
m	金属キャスクと貯蔵架台の合計質量	kg	133300
G	重力加速度	m/s ²	9.80665
h	金属キャスク及び貯蔵架台の重心変位	mm	127
F	外筒への衝突荷重	N	2.204×10 ⁶
A	せん断面積	mm ²	1.872×10 ⁴
S _u	外筒の設計引張強さ	MPa	373

2. 5. 6 評価結果

(1) ロッキング振動による衝突確認結果

ロッキング振動による衝突確認結果を以下の表に示す。

表では、金属キャスク傾斜角度は上段、下段いずれの足場に衝突する場合においても、ロッキング振動による最大の傾斜角度より小さい。したがって、金属キャスクが検査架台内中央に位置する場合、金属キャスクはロッキング振動により検査架台に衝突する。

(単位：°)

検査架台足場	衝突する場合の金属キャスク傾斜角度	ロッキング振動による最大の金属キャスク傾斜角度	判定
上段	3	9	衝突
下段	7		衝突

(2) 金属キャスク転倒時の応力評価結果

金属キャスクに生じる応力の評価結果を以下の表に示す。

表では、発生応力は金属キャスク衝突部位（外筒）の許容応力より十分小さい。したがって、金属キャスクが検査架台に転倒する場合、金属キャスク衝突部への影響は弾性変形の範囲内である。

(単位：MPa)

評価部位	応力	算出値	許容値	結果
外筒	せん断	118	143	良

2. 6 代表事象の選定

表1の各事象の評価結果を表2に示す。

検査架台の金属キャスクへの転倒事象は、評価結果により代表事象から除外する。

検査架台足場は天板と支持用鋼材によって構成される中空の構造物であり、金属キャスク胴（蓋フランジ部）の方が剛である。検査架台足場の金属キャスクへの回転落下事象では、検査架台足場を剛体と見なして保守的な評価を行った結果、金属キャスクへの波及的影響はないことから代表事象から除外する。

したがって、金属キャスクの検査架台への衝突時を代表事象として選定し、設工認申請書に記載する。

表2 評価結果

評価事象	金属キャスク 衝突部位	評価結果
検査架台の金属キャスクへの転倒時	胴	アンカーボルトは健全であるため、地震時において検査架台は転倒しない。
検査架台足場の金属キャスクへの回転落下時	胴（蓋フランジ部）	衝突部位の塑性変形量が蓋部密封シール部まで及ばないため、波及的影響はない。
金属キャスクの検査架台への衝突時	外筒	衝突部位に大きなせん断応力が発生するが、許容応力を下回る。

3. 防火シャッター

3. 1 基本仕様について

防火シャッターの波及的影響評価における金属キャスクの最高使用温度の算出方法を以下に示す。

(1) 最高使用温度

最高使用温度については、貯蔵時の熱解析結果から 10 °C 単位で丸めた値とする。設計値を表 3 に示す。

表 3 密封容器の最高使用温度

金属キャスクタイプ	評価部位	最高温度 評価結果 (除熱解析結果)	最高使用温度
タイプ 2 A	底板	142 °C ^{注 1)}	150 °C

注 1) 別紙 2 参照。

3. 2 許容応力値について

金属キャスクが閉じ込め機能を維持するために発生応力で塑性変形しない範囲となるよう、設計降伏点を許容応力値とする。

3. 3 評価事象の選定について

防火シャッターの波及的影響評価として抽出した事象を表 4 に示す。防火シャッターの落下形態としては、水平姿勢で落下する場合と傾いた姿勢で落下する場合が考えられる。防火シャッターの落下高さは前者が厳しく、金属キャスクの荷重作用面積は後者が厳しいため、防火シャッター落下による金属キャスクの発生応力はそれぞれの落下姿勢で評価を行い、評価事象を選定する。

表 4 防火シャッターの波及的影響評価事象

評価事象	金属キャスク 衝突部位	抽出根拠
防火シャッターの 水平落下時	胴 (蓋フランジ部)	防火シャッターが水平姿勢で落下し、胴（蓋フランジ部）に衝突する可能性があるため。
防火シャッターの 傾斜落下時	胴 (蓋フランジ部)	防火シャッターが傾いた姿勢で落下し、胴（蓋フランジ部）に衝突する可能性があるため。

3. 4 防火シャッタの水平落下時

3. 4. 1 概要

金属キャスクの搬送中に防火シャッタの下を通過中に防火シャッタが水平落下し、金属キャスクに衝突する事象の金属キャスクへの影響を評価する。

3. 4. 2 評価方針

- ・ 防火シャッタに対して金属キャスクは板厚が十分に大きく、金属キャスクを剛と考え、衝突によって防火シャッタが弾性変形すると考える。ここで、防火シャッタの板厚が薄いことから衝突時に塑性変形が発生してより大きくエネルギーを吸収するものと考えられるが、ここでは保守的に弾性変形のみを仮定する。
- ・ 防火シャッタの落下エネルギーが、防火シャッタ枠部の圧縮変形による弾性エネルギーにすべて変換されるとして、衝突荷重を算出する。金属キャスクの弾性変形を考慮すれば衝突荷重が小さくなるが、金属キャスクは剛体として大きめの荷重を算出する。

3. 4. 3 評価条件

- ・ 金属キャスクの衝突部高さは、防火シャッタの落下高さが大きくなるように、搬送台車が着床した場合を想定し、貯蔵架台+金属キャスク全長とする。
- ・ 防火シャッタは2種あるが、防火シャッタの質量が大きい、貯蔵エリア仕切り用（開口幅7m）とする。
- ・ 防火シャッタの弾性エネルギー算出時の圧縮変形は、防火シャッタの枠部と蓋フランジ部が重なる箇所のみ考慮してばね定数を算出する。
- ・ 防火シャッタ（落下物）の形状を仮想的に角パイプにモデル化し、角パイプの外幅を図面上の寸法に合わせ、角パイプの質量が図面上の質量に一致するように内幅を調整する。
- ・ 荷重作用面積は、防火シャッタと蓋フランジ部が重なる箇所とする（防火シャッタが水平姿勢で落下する場合、防火シャッタは蓋フランジ部及び二次蓋に衝突するが、衝突荷重を支えるのは主に蓋フランジ部であること、二次蓋を考慮しない方が金属キャスクの荷重作用面積が小さくなり厳しい条件で評価できることから、蓋フランジ部のみに衝突することを想定する。）。

3. 4. 4 評価

(a) 防火シャッタの衝突荷重

図5に防火シャッタ水平落下時の荷重算出図を示す。

防火シャッタの落下エネルギーが防火シャッタの圧縮変形による弾性エネルギーに全て変換されるとして、衝突荷重を算出する。

防火シャッタの衝突部位のうち、圧縮変形により落下エネルギーを吸収する部分は、防火シャッタの枠部と蓋フランジ部及び二次蓋が重なる箇所のみとし、断面積 A_S を以下の式で算出する。

$$A_S = (b_o - b_i) \cdot D_o \quad (35)$$

圧縮変形する長さを防火シャッタのケース外幅高さ a_o 、防火シャッタの縦弾性係数を E として、防火シャッタのばね定数 k_H を以下の式で算出する。

$$k_H = \frac{E \cdot A_S}{a_o} \quad (36)$$

防火シャッタの落下エネルギー U_H が、防火シャッタの曲げによる弾性エネルギー W_H に全て変換されると考える ($U_H = W_H$)。

防火シャッタの落下エネルギー U_H は、以下の式で算出する。

$$U_H = m_S \cdot G \cdot h_{UH} \quad (37)$$

上式の各変数は、以下のとおりである。

m_S : 防火シャッタ (落下物) の質量 (kg)

G : 重力加速度 (m/s^2)

h_{UH} : 防火シャッタの落下高さ (mm)

以下の式で算出する。

$$h_{UH} = h_4 - (h_1 + h_2) \quad (38)$$

また、防火シャッタの圧縮変形による弾性エネルギー W_H は、以下の関係で表せる。

$$W_H = \frac{1}{2} \cdot k_H \cdot \delta_H^2 \quad (39)$$

上式の各変数は、以下のとおりである。

δ_H : 防火シャッタ (落下物) の圧縮変形量 (mm)

弾性変形による荷重 P_H は、以下の関係で表せる。

$$P_H = k_H \cdot \delta_H \quad (40)$$

(3) (5) (6)式を用いて、荷重 P_H を以下の式で算出する。

$$P_H = \sqrt{2 \cdot m_S \cdot G \cdot h_{UH} \cdot k_H} \quad (41)$$

(b) 発生応力

第1図を基に算出する。

防火シャッタの衝突荷重が作用する面積は防火シャッタと蓋フランジ部が重なる箇所とし、荷重作用面積 A_P を以下の式で算出する。

$$A_P = b_o \cdot (D_o - D_i) \quad (42)$$

金属キャスクの発生応力 σ_{CH} は以下の式で算出する。

$$\sigma_{CH} = \frac{P_H}{A_P} \quad (43)$$

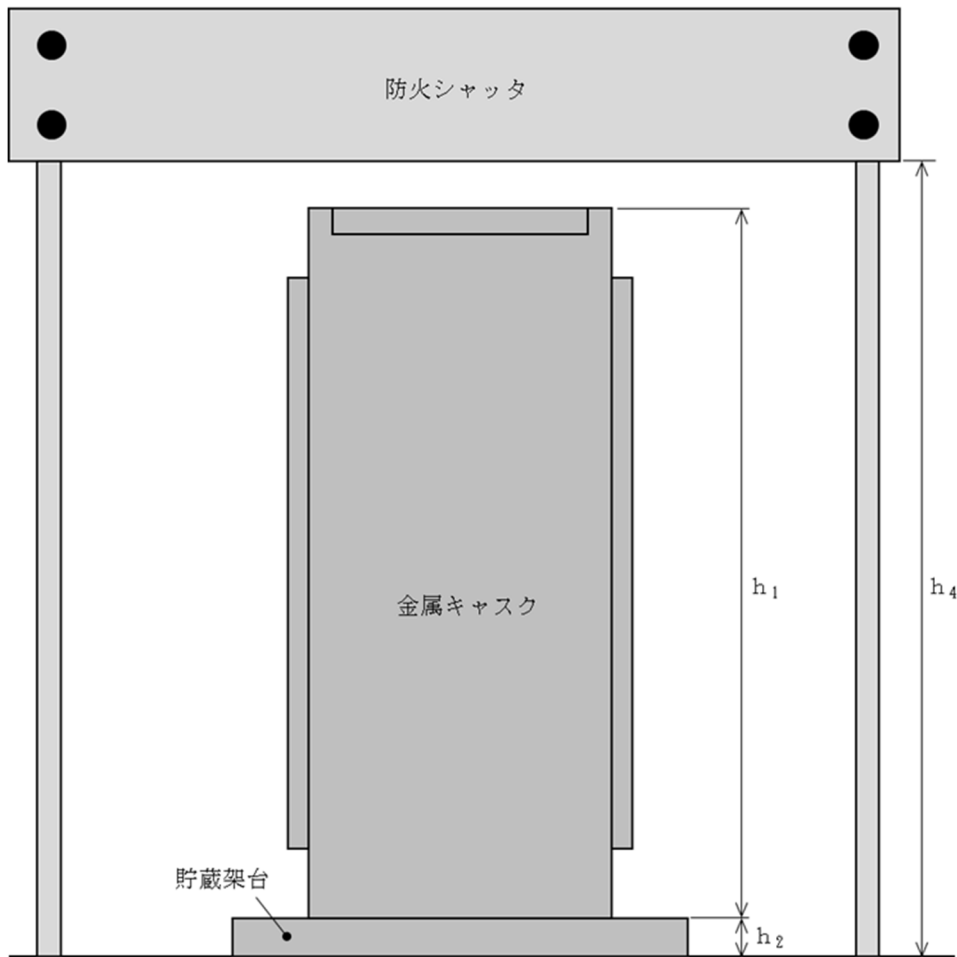
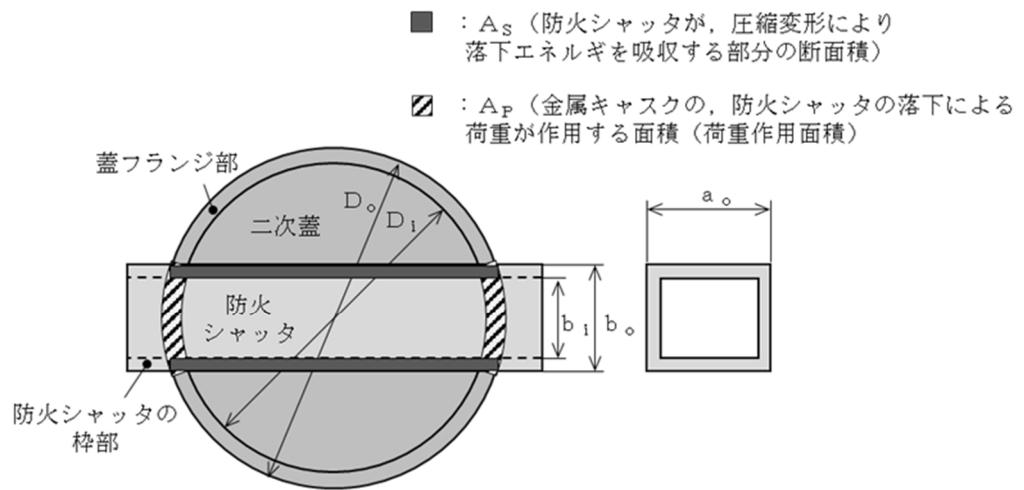


図5 防火シャッター水平落下時の荷重算出図

3. 4. 5 入力値

記号	項目	単位	値
h_1	金属キャスク高さ	mm	5320
h_2	貯蔵架台高さ	mm	307
h_4	防火シャッタの開口高さ	mm	7000
h_{UH}	防火シャッタ（落下物）の落下高さ	mm	1373
m_s	防火シャッタ（落下物）の質量	kg	1480
G	重力加速度	m/s^2	9.80665
E	防火シャッタの（落下物）縦弾性係数	MPa	203000
D_o	金属キャスク外径（蓋フランジ部）	mm	2308
D_i	金属キャスク内径（蓋フランジ部）	mm	2138
b_o	防火シャッタ（落下物）の断面幅（外寸法）	mm	630
b_i	防火シャッタ（落下物）の断面幅（内寸法）	mm	613
A_s	圧縮変形により落下エネルギーを吸収する部分の断面積	mm^2	3.89×10^4
a_o	防火シャッタ（落下物）の断面高さ（外寸法）	mm	870
k_H	防火シャッタ（落下物）のばね定数	N/mm	9.067×10^6
P_H	荷重	N	1.90×10^7
A_P	荷重作用面積	mm^2	1.07×10^5

3. 4. 6 評価結果

防火シャッタ水平落下時の応力評価結果を以下の表に示す。

(単位：MPa)

部位	機能維持のための考え方	算出値	許容値	結果
胴 (蓋フランジ部)	閉じ込め機能を維持するため塑性変形しないこと	178	183	良

3. 5 防火シャッタの傾斜落下時

3. 5. 1 概要

金属キャスクの搬送中に防火シャッタの下を通過中に防火シャッタが傾斜落下し、金属キャスクに衝突する事象の金属キャスクへの影響を評価する。

3. 5. 2 評価方針

- ・ 防火シャッターに対して金属キャスクは板厚が十分に大きく、金属キャスクを剛と考え、衝突によって防火シャッターが弾性変形すると考える。ここで、防火シャッターの板厚が薄いことから衝突時に塑性変形が発生してより大きくエネルギーを吸収するものと考えられるが、ここでは保守的に弾性変形のみを仮定する。
- ・ 防火シャッターを回転中心と重心位置での両端単純支持の梁と仮定し、防火シャッターの落下エネルギーが防火シャッターの曲げ変形による弾性エネルギーに全て変換されるとして、衝突荷重を算出する（図6参照）。衝突荷重を大きく見積もるため金属キャスクは剛として、金属キャスクの弾性変形は考慮しない。
- ・ 金属キャスクの衝突部位は、蓋フランジ部とする。

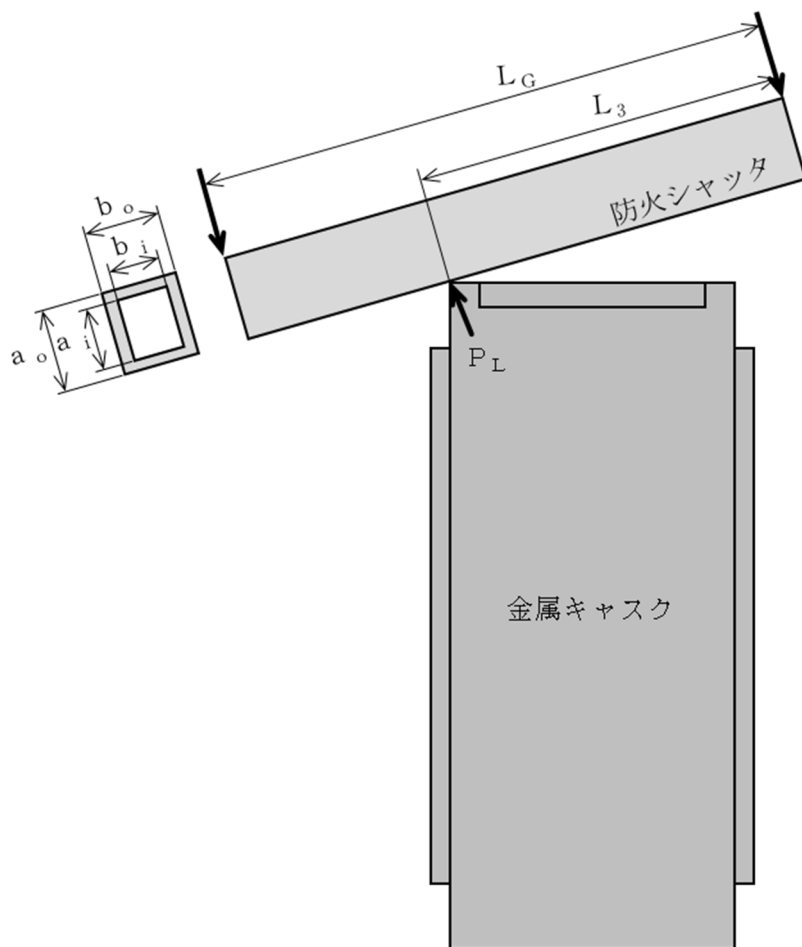


図6 防火シャッター傾斜落下時の荷重算出図

3. 5. 3 評価条件

防火シャッター衝突時の荷重を保守的に大きく見積もる条件として、以下を仮定する。

- ・ 金属キャスク位置は、防火シャッターの落下高さが大きくなるように、回転中心側の防火シャッター開口部側面に貯蔵架台が接触する位置とする（図7参照）。
- ・ 金属キャスクの衝突部高さは、防火シャッターの落下高さが大きくなるように、エアパレットが着床した場合を想定し、貯蔵架台+金属キャスク全長とする。
- ・ 傾斜角度が大きく防火シャッターの落下高さが大きくなるように、防火シャッターの回転中心は下側のアンカーボルトとする。
- ・ 防火シャッターは2種あるが、防火シャッターの質量が大きい、貯蔵エリア仕切り用（開口幅7m）とする。
- ・ 防火シャッター（落下物）の形状を仮想的に角パイプにモデル化し、角パイプの外幅を図面上の寸法に合わせ、角パイプの質量が図面上の質量に一致するように内幅を調整する。
- ・ 防火シャッターは板厚が薄く、防火シャッターが金属キャスクに衝突すると大きく変形し、金属キャスクの蓋フランジ部が防火シャッターに食い込むと考えられるため、荷重作用面積は、防火シャッターの内幅寸法全域まで蓋フランジ部が食い込んだ状態での防火シャッターと蓋フランジ部の接触部の面積とする。（ただし、荷重算出のためには保守的に弾性変形のみを仮定する。）

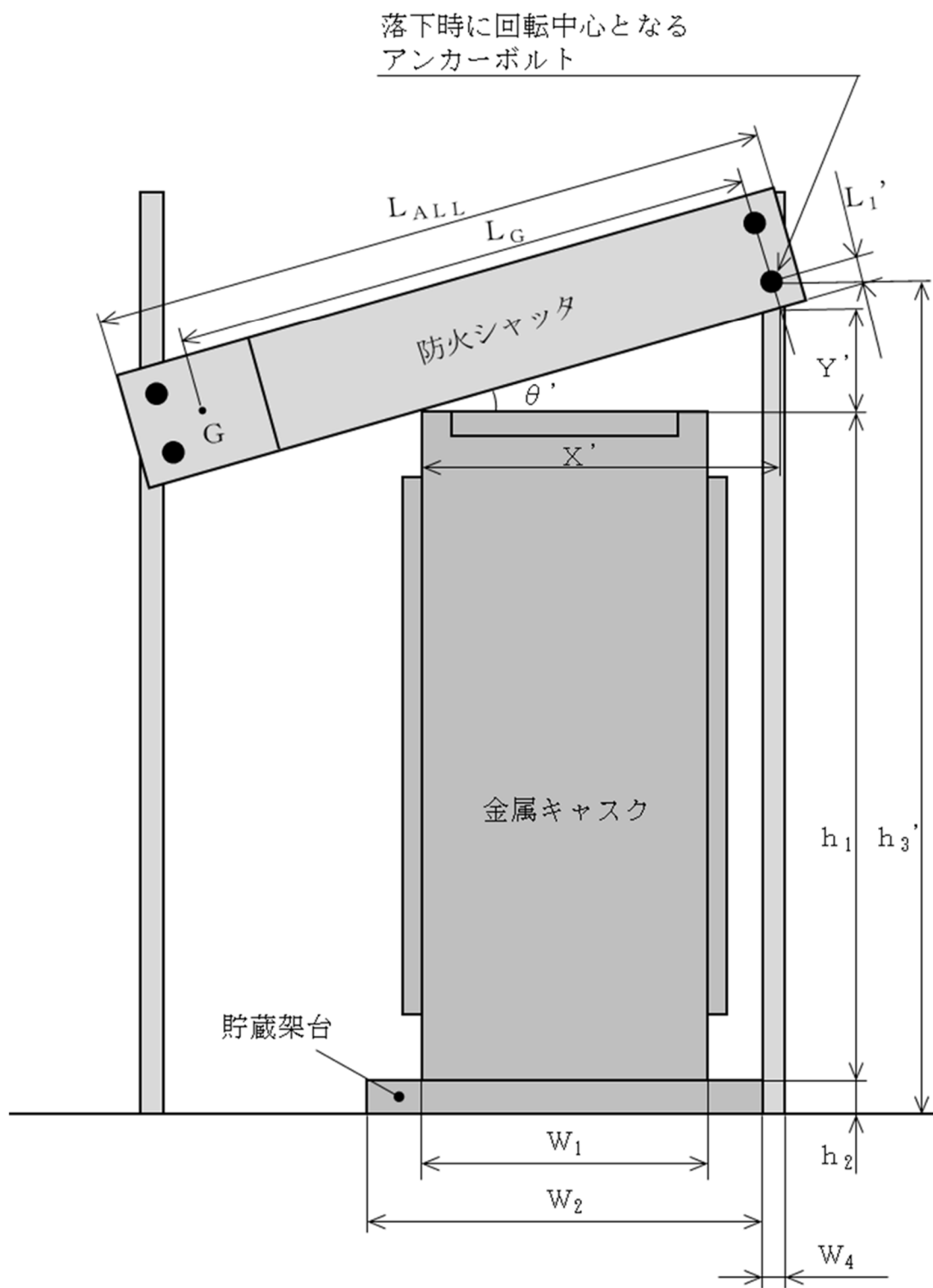


図7 防火シャッタ傾斜落下時の衝突角度の算出図

3. 5. 4 評価

(1) 金属キャスクへの衝突時の防火シャッタの傾斜角度

第2図に防火シャッタ傾斜落下時の衝突角度の算出図を示す。

第2図を基に以下のように算出する。

辺X' は、以下の式で表せる。

$$X' = w_2 - \frac{w_2 - w_1}{2} + \frac{w_4}{2} + L_1' \sin \theta' \quad (44)$$

辺Y' は、以下の式で表せる。

$$Y' = h_3' - (h_1 + h_2) - L_1' \cos \theta' \quad (45)$$

衝突角度 θ' は、以下の式で表せる。

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{Y'}{X'} \right) \quad (46)$$

(10) (11) (12)式を用いて衝突角度 θ' を算出する。

(2) 防火シャッタの衝突荷重

図6に防火シャッタ傾斜落下時の荷重算出図を示す。

防火シャッタを回転中心と重心位置での両端単純支持の梁と仮定し、防火シャッタの落下エネルギーが防火シャッタの曲げ変形による弾性エネルギーに全て変換されるとして、衝突荷重を算出する。

防火シャッタの衝突部における変形量 δ は、以下の式で表せる。

$$\delta = \frac{P \cdot L_3^2 \cdot (L_G - L_3)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot L_G} \quad (47)$$

上式の各変数は、以下のとおりである。

P : 荷重 (N)

L_G : 防火シャッタ (落下物) の重心位置長さ (mm)
*モーター部の中心位置と考える。

L_3 : 防火シャッタ (落下物) の衝突部長さ (mm)
以下の式で算出する。

$$L_3 = \frac{X'}{\cos \theta'} \quad (48)$$

E : 防火シャッタ (落下物) の縦弾性係数 (MPa)

I : 防火シャッタ（落下物）の断面二次モーメント（mm⁴）
 長方形角パイプの値は、以下の式で算出する。

$$I = \frac{b_o \cdot a_o^3 - b_i \cdot a_i^3}{12} \quad (49)$$

a_i及びb_iは、防火シャッタ（落下物）の外寸法（断面高さa_o、断面幅b_o、全長L_{ALL}）及び密度ρを用いて下式で算出される質量m_{SC}が、防火シャッタ（落下物）の質量m_Sと一致する板厚t_Sを用いて求めた値とする。

$$a_i = a_o - 2 \cdot t_S \quad (50)$$

$$b_i = b_o - 2 \cdot t_S \quad (51)$$

$$m_{SC} = (a_o \cdot b_o - a_i \cdot b_i) \cdot L_{ALL} \cdot \rho \quad (52)$$

また、防火シャッタの曲げによる弾性力で衝突部に荷重が作用すると考えると、衝突部の荷重P_L、防火シャッタの曲げによるばね定数k_L、防火シャッタの衝突部における変形量δ_Lは以下の関係で表せる。

$$P_L = k_L \cdot \delta_L \quad (53)$$

(13) (19)式を用いて、ばね定数k_Lを以下の式で算出する。

$$k_L = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot L_G}{L_3^2 \cdot (L_G - L_3)^2} \quad (54)$$

防火シャッタの落下エネルギーU_Lが、防火シャッタの曲げによる弾性エネルギーW_Lに全て変換されると考える（U_L=W_L）。

防火シャッタの落下エネルギーU_Lは、以下の式で算出する。

$$U_L = m_S \cdot G \cdot h_{UL} \quad (55)$$

上式の各変数は、以下のとおりである。

m_S : 防火シャッタ（落下物）の質量（kg）

G : 重力加速度（m/s²）

h_{UL} : 防火シャッタ（落下物）の落下高さ（mm）

以下の式で算出する。

$$h_{UL} = L_G \cdot \sin \theta' \quad (56)$$

また、防火シャッタの曲げ変形による弾性エネルギー W_L は、以下の式で算出する。

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot k_L \cdot \delta_L^2 \quad (57)$$

(19) (21) (23)式を用いて、荷重 P_L を以下の式で算出する。

$$P_L = \sqrt{2 \cdot m_S \cdot G \cdot h_{UL} \cdot k_L} \quad (58)$$

(3) 発生応力

図8に防火シャッタ傾斜落下時の荷重作用面積図を示す。

図中の三日月上のハッチング部はキャスクフランジ部が防火シャッタに食い込んだ領域を示す。

図8を基に以下のように算出する。

一般に、弦の長さ L_{dY} 、角度 θ_d 、半径 R （蓋フランジ部）は、以下の関係で表せる。

$$\theta_d = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{L_{dY}}{2 \cdot R} \right) \quad (59)$$

また、防火シャッタはケース内幅寸法 b_i の全域まで金属キャスクがのめりこんだと考え、以下の関係とする。

$$L_{dY} = b_i \quad (60)$$

(25) (26)式を用いて求めた角度 θ_d を用いて、荷重作用面積 A_d を以下の式で算出する。

$$A_d = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\theta_d}{2\pi} - R \cdot \sin\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \cdot R \cdot \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \quad (61)$$

(24) (27)式で算出した値を用いて、金属キャスクの発生応力 σ_{CL} を以下の式で算出する。

$$\sigma_{CL} = \frac{P_L}{A_d} \quad (62)$$

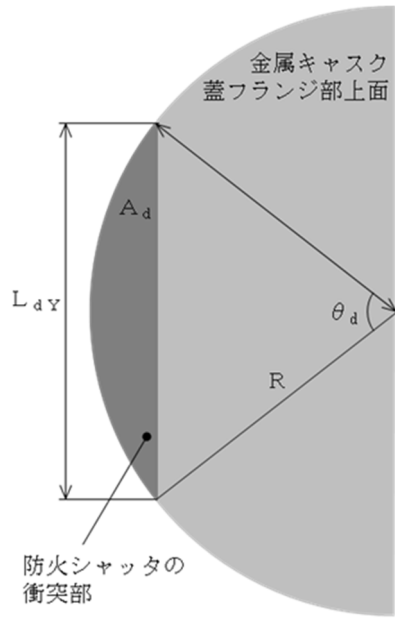


図8 防火シャッター傾斜落下時の荷重作用面積図

3. 5. 5 入力値

第4表 防火シャッタ傾斜落下時の落下角度

記号	項目	単位	値
h_1	金属キャスク高さ	mm	5320
w_1	金属キャスク蓋フランジ部外径	mm	2308
h_1	貯蔵架台高さ	mm	307
w_1	貯蔵架台全幅	mm	3000
h_3'	防火シャッタ（落下物）の回転中心高さ	mm	7290
L_1'	ケース底部からアンカーボルトまでの距離	mm	280
w_4	防火シャッタ柱幅（奥行と同じとした）	mm	70
X'	三角形の底面長さ	mm	2815
Y'	三角形の高さ	mm	1413
θ'	防火シャッタの衝突時傾斜角度	°	27
L_G	防火シャッタ（落下物）の重心位置長さ	mm	6770
L_3	防火シャッタ（落下物）の衝突部長さ	mm	3149
E	防火シャッタ（落下物）の縦弾性係数	MPa	203000
L_{ALL}	防火シャッタ（落下物）の全長	mm	7550
ρ	防火シャッタ（落下物）の密度 （機械構造用炭素鋼（S35C）とした）	kg/mm ³	7.85×10^{-6}
t_s	防火シャッタ（落下物）の板厚	mm	8
a_o	防火シャッタ（落下物）の断面高さ（外寸法）	mm	870
a_i	防火シャッタ（落下物）の断面高さ（内寸法）	mm	853
b_o	防火シャッタ（落下物）の断面幅（外寸法）	mm	630
b_i	防火シャッタ（落下物）の断面幅（内寸法）	mm	613
I	断面二次モーメント	mm ⁴	2.840×10^9
k_L	防火シャッタ（落下物）のばね定数	N/mm	9.005×10^4
m_s	防火シャッタ（落下物）の質量	kg	1480
G	重力加速度	m/s ²	9.80665
h_{UL}	防火シャッタ（落下物）の落下高さ	mm	3037
P_L	荷重	N	2.82×10^6
R	金属キャスク半径（蓋フランジ部）	mm	1154
L_{dY}	蓋フランジ部上面の衝突部の長さ	mm	613
θ_d	荷重作用面積の角度	rad	0.538
A_d	荷重作用面積	mm ²	1.7×10^4

3. 5. 6 評価結果

防火シャッター傾斜落下時の応力評価結果を以下の表に示す。

(単位：MPa)

部位	機能維持のための考え方	算出値	許容値	結果
胴 (蓋フランジ部)	閉じ込め機能を維持するため塑性変形しないこと	166	183	良

3. 6 代表事象の選定

水平落下時と傾斜落下時での金属キャスクの発生応力と許容限界を表 5 に示す。水平落下時と傾斜落下時での評価結果の比較より、水平落下時を評価事象として選定し、設工認申請書に記載する。

表 5 落下姿勢ごとの応力と許容限界

(単位：MPa)

落下姿勢	評価部位	計算値	許容限界	許容基準
水平	胴 (蓋フランジ部)	178	183	S_y
傾斜	胴 (蓋フランジ部)	166	183	S_y

4. 中性子線エリアモニタ

4. 1 基本仕様について

(1) 最高使用温度について

最高使用温度については、貯蔵時の熱解析結果から 10°C~20°C単位で丸めた値とする。設計値を表 6 に示す。

表 6 二次蓋の最高使用温度

金属キャスクタイプ	評価部位	最高温度 評価結果 (除熱解析結果)	最高使用温度
タイプ 2 A	二次蓋	97°C ^{注1}	110°C

注 1) 別紙 3 参照。

4. 2 許容応力値について

金属キャスクが閉じ込め機能を維持するために発生応力で塑性変形及び破断しない範囲となるよう、設計降伏点及び破断点を許容応力値とする。

4. 3 中性子線エリアモニタの落下高さについて

中性子線エリアモニタの落下高さは、中性子線エリアモニタ設置部高さ(10923.5mm)と金属キャスク貯蔵時高さ(5627mm)の差から算出した。

4. 4 評価事象について

中性子線エリアモニタの波及的影響評価として抽出した事象を表 7 に示す。

表 7 中性子線エリアモニタの波及的影響評価事象

評価事象	金属キャスク 衝突部位	抽出根拠
中性子線エリアモニタの金属キャスクへの衝突時	二次蓋中央部	中性子線エリアモニタの落下により、金属キャスクの二次蓋に衝突し、二次蓋中央部が破断、もしくは二次蓋端部(密封シール部)及び二次蓋締付けボルトが塑性変形する可能性があるため。
	二次蓋端部	中性子線エリアモニタの落下により、金属キャスクの二次蓋に衝突し、二次蓋端部(密封シール部)及び二次蓋締付けボルトが塑性変形する可能性があるため。

4. 5 代表事象の選定

表7の各事象の評価結果を表8に示す。

評価結果より、中性子線エリアモニタの金属キャスクの衝突時を代表事象として選定する。

表8 評価結果

評価事象	金属キャスク 衝突部位		評価結果
中性子線エリアモニタの金属キャスクへの衝突時	二次蓋中央部	二次蓋中央	衝突部位にせん断力が発生するが、許容値基準を下回り、破断しないことを確認
		二次蓋端部 (密封シール部)	閉じ込め機能を維持できるように塑性変形しないことを確認
	二次蓋締付けボルト		
	二次蓋端部	二次蓋端部	
		二次蓋端部 (密封シール部)	

「2. 検査架台」の補足

1. 外筒の応力評価項目について

外筒の応力評価は使用済燃料貯蔵施設規格(金属キャスク構造規格 J S M E S F A 1 -2007) の中間胴の規定を準用する。

2. 検査架台足場の質量及び断面二次モーメントの算出

2. 1 検査架台足場の重量の算出

検査架台足場の重量は、支持用鋼材と天板の合計値とする。

各支持用鋼材の質量は、図面から長さを読み取り、J I S G 3192:2014 に記載の単位質量を用いて算出する。各支持用鋼材の長さは、以下のように算出する。

$$L_H = 1.705 \quad (\text{別1-1})$$

$$L_L = 3 \cdot 0.635 \quad (\text{別1-2})$$

$$L_C = 0.635 + 2.25 + 1.615 + \frac{2 \cdot 1.5 \cdot \pi}{4} \quad (\text{別1-3})$$

ここで、 L_H : H鋼の長さ (m)

L_L : L鋼の長さ (m)

L_C : C鋼の長さ (m)

各支持用鋼材の質量を別1-表1に示す。

別1-表1 検査用架台足場(支持用鋼材)の質量

項目	詳細*	単位質量	図面長さ	質量
		kg/m	m	kg
H鋼	H200 (B=200)	49.9	1.705	85
L鋼	L75 (t=9)	9.96	1.905	19
C鋼	C200 (B=80)	24.6	6.856	169

*JIS G 3192:2014 に記載の、単位質量の最も大きいものとした。

天板の質量は、図面から面積を読み取り、敷鉄板の板厚は 22 mm とし、密度を用いて算出する。天板の面積は、以下のように算出する。

$$A_T = 1.705 \cdot 2.45 - \frac{1.5^2 \cdot \pi}{4} \quad (\text{別1-4})$$

天板の質量を別1-表2に示す。各支持用鋼材の質量との合計は 734 kg である。

別 1-表 2 検査用架台足場（天板）の質量

項目	詳細	密度	板厚	面積	質量
		kg/m ³	m	m ²	kg
天板	敷鉄板(t=22)	7850	0.022	2.410	416

2. 2 検査架台足場の断面二次モーメントの算出

検査架台足場の断面二次モーメント I は、支持用鋼材 (I_K) と天板 (I_T) の合計値とする。

$$I = I_K + I_T \quad (\text{別1-5})$$

支持用鋼材の断面二次モーメントは JIS G 3192:2014 に記載の値を用い、特に金属キャスクへの衝突時の曲げに効く箇所を選定し、鋼材の合計値として、以下のように算出する。このとき、円形に湾曲した C 鋼は直線形状に近似する。

$$I_K = I_H + 2 \cdot I_C \quad (\text{別1-6})$$

ここで、

I_K : 支持用鋼材の断面二次モーメント (mm⁴)

I_H : H 鋼の断面二次モーメント (mm⁴)

I_C : C 鋼の断面二次モーメント (mm⁴)

天板の断面二次モーメントは、断面を長方形と考え以下のように算出する。

$$I_T = \frac{w_T \cdot t_T^3}{12} \quad (\text{別1-7})$$

ここで、

I_T : 天板の断面二次モーメント (mm⁴)

w_T : 天板の等価幅 (mm)

天板の面積 A_T と長さ 1705 mm から、以下の式で算出する。

$$w_T = \frac{A_T}{1705} \quad (\text{別1-8})$$

t_T : 天板の厚さ (敷鉄板の板厚を 22 mm とする)

各断面二次モーメントを別 1-表 3 に示す。

別 1-表 3 検査用架台足場の断面二次モーメント

項目	詳細	断面二次モーメント
		mm ⁴
H鋼 (1本あたり)	H200 (B=200)	$I_H = 4.720 \times 10^7$
C鋼 (1本あたり)	C200 (B=80)	$I_C = 1.950 \times 10^7$
支持用鋼材合計	—	$I_K = 8.620 \times 10^7$
天板	—	$I_T = 1.255 \times 10^6$
検査架台足場		$I = 8.745 \times 10^7$

3. 荷重作用面積 A_e と変形量 L_{da} の関係式の導出

別1-図1中の記号は、それぞれ以下の関係にある。

$$L_x = \frac{L_{da}}{\cos \theta} \quad (\text{別1-9})$$

$$L_y = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - L_x)^2} \quad (\text{別1-10})$$

$$L_\theta = \frac{L_{da}}{\tan \theta} + L_{da} \cdot \tan \theta \quad (\text{別1-11})$$

また、荷重作用面積 A_e は、三角形に近似して以下の式で算出する。

$$A_e = \frac{1}{2} \cdot L_y \cdot L_\theta \quad (\text{別1-12})$$

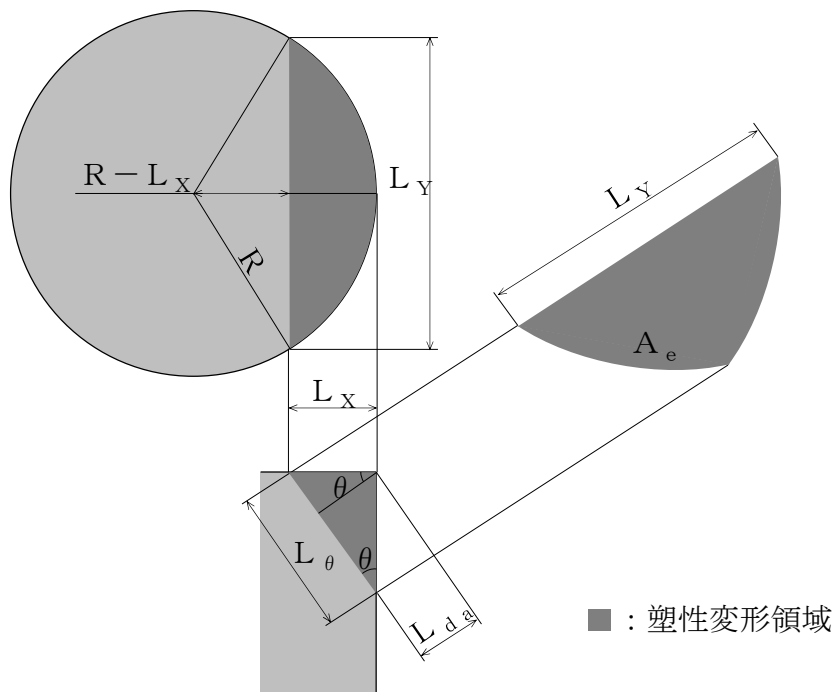
(別1-10)式、(別1-11)式を(別1-12)式に代入すると、以下となる。

$$A_e = \sqrt{R^2 - (R - L_x)^2} \cdot \left(\frac{L_{da}}{\tan \theta} + L_{da} \cdot \tan \theta \right) \quad (\text{別1-13})$$

さらに、(別1-9)式、を(別1-13)式に代入し整理すると、以下となる。

$$A_e = L_{da} \cdot \left(\frac{1}{\tan \theta} + \tan \theta \right) \cdot \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{L_{da}}{\cos \theta} \right)^2} \quad (\text{別1-14})$$

(別1-14)式が(27)式に対応する。



別1-図1 荷重作用面積 A_e と変形量 L_{da} の関係

4. 検査架台のばね定数の算出

金属キャスクと衝突する検査架台については衝突方向にあるL鋼5本及びH鋼の変形により、金属キャスクの位置エネルギーが吸収されると想定する。

4. 1 L鋼のばね定数の算出

L鋼は衝突荷重により圧縮変形する。L鋼1本あたりのばね定数 k_1 は以下の式で算出する。

$$k_1 = E_1 \cdot A_1 / L_1 \quad (\text{別 1-15})$$

ここで、

E_1 : L鋼の縦弾性係数 (MPa)

A_1 : L鋼の断面積 (mm^2)

L_1 : L鋼の長さ (mm)

また、L鋼は5本が並列に並んでいるので、L鋼のばね定数は $5 \times k_1$ となる。

4. 2 H鋼のばね定数の算出

H鋼は衝突荷重により曲げ変形する。H鋼のばね定数 k_2 は以下の式で算出する。

$$k_2 = 192 \cdot E_2 \cdot I / L_2^3 \quad (\text{別 1-16})$$

ここで、

E_2 : H鋼の縦弾性係数 (MPa)

I : H鋼の断面二次モーメント (mm^2)

L_2 : H鋼の長さ (mm)

4. 3 検査架台足場のばね定数

L鋼5本が並列、L鋼とH鋼は直列に並んでいるため、検査架台のばね定数 k は以下の式で算出する。

$$k = 5 \cdot k_1 \cdot k_2 / (5 \cdot k_1 + k_2) \quad (\text{別 1-17})$$

計算結果を別1-表4にまとめる。

別 1-表 4 計算結果

項目	記号	単位	値
L 鋼の縦弾性係数	E_1	MPa	201000
L 鋼の断面積	A_1	mm ²	1269
L 鋼の長さ	L_1	mm	525
L 鋼 1 本あたりのばね定数	k_1	N/mm	4.859×10^5
H 鋼の縦弾性係数	E_2	MPa	201000
H 鋼の断面二次モーメント	I	mm ⁴	1.600×10^7
H 鋼の長さ	L_2	mm	525
H 鋼のばね定数	k_2	N/mm	1.473×10^4
検査架台足場のばね定数	k	N/mm	1.464×10^4

5. 金属キャスク及び貯蔵架台の重心変位の算出

金属キャスクが上段の検査架台足場に接触する傾斜角度 θ_U のときの金属キャスク及び貯蔵架台の重心位置 h_1 は以下の式で算出する。

$$h_1 = \frac{L_k}{2} \cdot \sin \theta_U + h_g \cdot \cos \theta_U \quad (\text{別 1-18})$$

ここで、

L_k : 貯蔵架台の対辺方向長さ (mm)

θ_U : 上段の検査架台足場に接触する傾斜角度 (°)

h_g : 金属キャスク及び貯蔵架台の初期重心位置 (mm)

ロッキング振動による最大傾斜時の傾斜角度 θ_R のときの金属キャスク及び貯蔵架台の重心位置 h_2 は以下の式で算出する。

$$h_2 = \frac{L_k}{2} \cdot \sin \theta_R + h_g \cdot \cos \theta_R \quad (\text{別 1-19})$$

ここで、

L_k : (添付 4-1) 式と同じ

θ_R : ロッキング振動による最大傾斜角度 (°)

h_g : (添付 4-1) 式と同じ

以上より、金属キャスク及び貯蔵架台の重心変位 h は、 $h_2 - h_1$ で算出できる。計算結果を別 1-表 5 にまとめる。

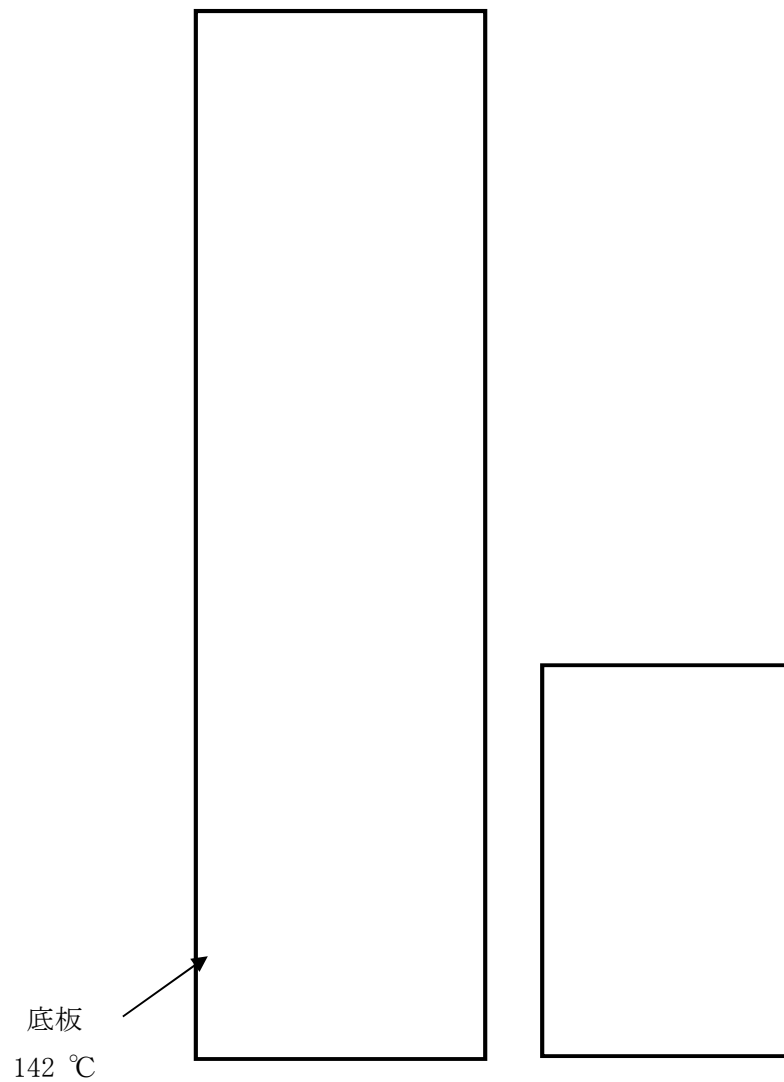
別 1－表 5 計算結果

項目	記号	単位	値
貯蔵架台の対辺方向長さ	L_k	mm	3000
金属キャスク及び貯蔵架台の初期重心位置	h_g	mm	2671
上段の検査架台足場に接触する傾斜角度	θ_U	°	3
検査架台足場に接触する傾斜角度 θ_U のときの金属キャスク及び貯蔵架台の重心位置	h_1	mm	2746
ロッキング振動による最大傾斜角度	θ_R	°	9
ロッキング振動による最大傾斜時の傾斜角度 θ_R のときの金属キャスク及び貯蔵架台の重心位置	h_2	mm	2873
金属キャスク及び貯蔵架台の重心変位	h	mm	127

「3. 防火シャッタ」の補足

1. 密封容器の最高使用温度について

貯蔵時の軸方向除熱解析モデル（三次蓋なし）の解析結果から、温度コンタを別 2-図 1 に、解析結果のまとめを別 2-表 1 に示す。解析結果より、密封容器（底板）の最高温度は 142 °C である。



別 2-図 1 軸方向の除熱解析モデルの解析結果（三次蓋なし）

別 2-表 1 評価結果

(単位：°C)

部材	評価結果
密封容器	142

「3. 防火シャッタ」の補足

1. 二次蓋の最高使用温度について

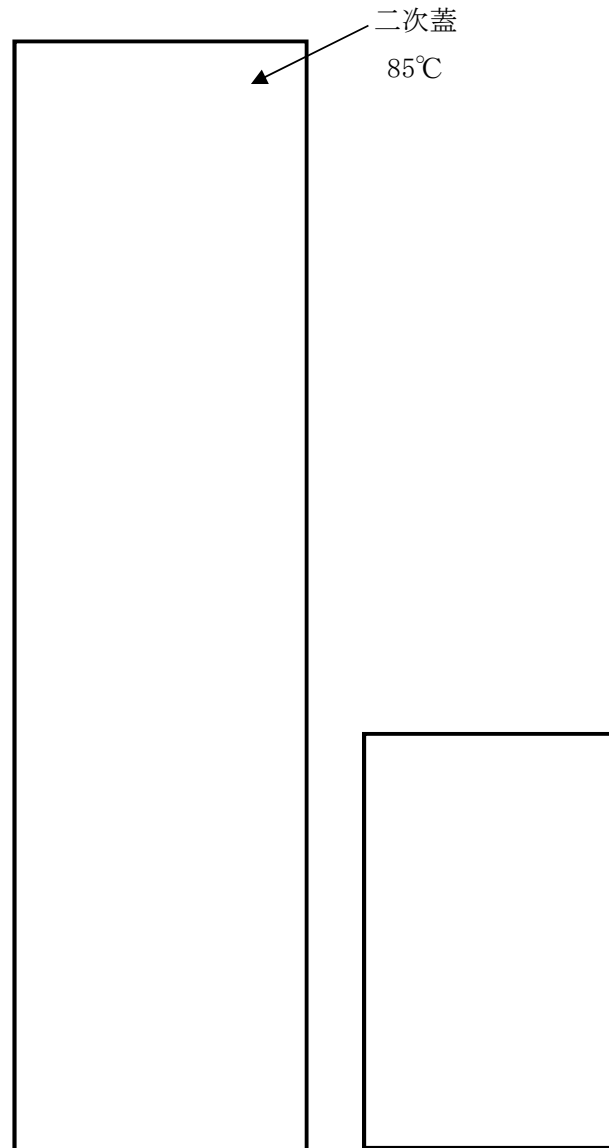
貯蔵時の軸方向除熱解析モデル（三次蓋なし）の解析結果から、温度コンタを別 3-図 1 に、解析結果のまとめを別 3-表 1 に示す。解析結果より、二次蓋の最高温度は 85℃である。

貯蔵時の熱解析結果では二次蓋の最高温度は 85℃であるが、吊上げ時など、評価事象によっては三次蓋の装着を想定するため、さらに高い温度となる。したがって、二次蓋の温度は、貯蔵時よりも高い温度となるため、強度評価において保守的な評価となるように、輸送一般時（緩衝体及び三次蓋が装着されている状態）の熱解析より得られた結果を元にした最高使用温度 97℃¹⁾を設定している。

参考文献

- 1) 核燃料輸送物設計変更承認申請書(HDP-69B型)，（平成30年7月20日申請
東京電力ホールディングス株式会社）

枠囲みの内容は商業機密に属するため公開できません。



別 3-図 1 軸方向の除熱解析モデルの解析結果（三次蓋なし）

別 3-表 1 評価結果

（単位：°C）

部材	評価結果
二次蓋	85*

※輸送一般時の熱解析結果は 97°C