

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 2-補-014-01 改 1
2021 年 12 月 20 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)

金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件
及び計算条件

令和 3 年 1 2 月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

目次

1. 目的	1
2. 金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件及び計算条件	1
2. 1 解析温度の設定	1
2. 2 衝突荷重の設定	5
2. 2. 1 天井クレーン落下	5
2. 2. 2 天井スラブ落下	9
3. 金属キャスクの一次蓋の横ずれ量	12
4. 仮想的大規模津波による搬送台車上の金属キャスクへの影響	12

※変更箇所を赤字で示す。

1. 目的

本資料は、設工認申請書添付 6-1-4「仮想的大規模津波の影響を考慮する施設の評価方針」における金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件及び計算条件について説明するものである。

2. 金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件及び計算条件

金属キャスクの閉じ込め機能評価の強度解析において必要な設計条件及び計算条件に、解析温度と衝突荷重がある。

設計条件である解析温度は、金属キャスクの温度分布計算の結果に基づき部位ごとに代表値を設定し、解析に用いる。

計算条件である衝突荷重は、衝突想定条件を踏まえて金属キャスクに作用させる落下物の衝突荷重を計算し、解析に用いる。

以下では、その導出について説明する。

なお、解析コード A B A Q U S の解析には、Explicit（陽解法）と Standard（陰解法）がある。本評価では、衝突荷重を保守的に評価し、金属キャスクにその最大荷重が作用し金属キャスクの変形量と荷重が釣り合う静的な変形状態を模擬するため、Standard を用いた。Standard はこれまで多くの検証がなされている。

2. 1 解析温度の設定

強度解析における 2 つの衝突想定条件では、金属キャスク姿勢がそれぞれ異なる。天井クレーン落下時は水平姿勢であり、天井スラブ落下時はたて姿勢である。よって、水平姿勢は輸送時の姿勢と同じであることから、核燃料輸送物設計変更承認申請書と同様の計算結果(図 1)を用いる。また、たて姿勢は貯蔵時の姿勢と同じであることから、密封容器の応力計算と同様の計算結果(図 2)を用いる。

本解析では胴と一次蓋の温度の設定が必要である。図 1 及び図 2 に示す温度分布計算結果を踏まえ、各部位の最高温度に余裕をもたせた値を解析温度として設定する。なお、温度を高く設定すると材料強度に対して厳しい条件となり、保守的な解析となる。

天井クレーン落下時の胴（側部）の最高温度は 120℃ 近傍であることから、解析温度は切り上げて 130℃ と設定した。また、一次蓋の最高温度は 100℃ 近傍であることから、解析温度は切り上げて 110℃ と設定した。

天井スラブ落下時は胴及び一次蓋を一体と考え、密封容器（底部）の最高温度は140℃近傍であることから、解析温度は切り上げて150℃と設定した。

胴	天井クレーン落下	130 °C
	天井スラブ落下	150 °C
一次蓋	天井クレーン落下	110 °C
	天井スラブ落下	150 °C

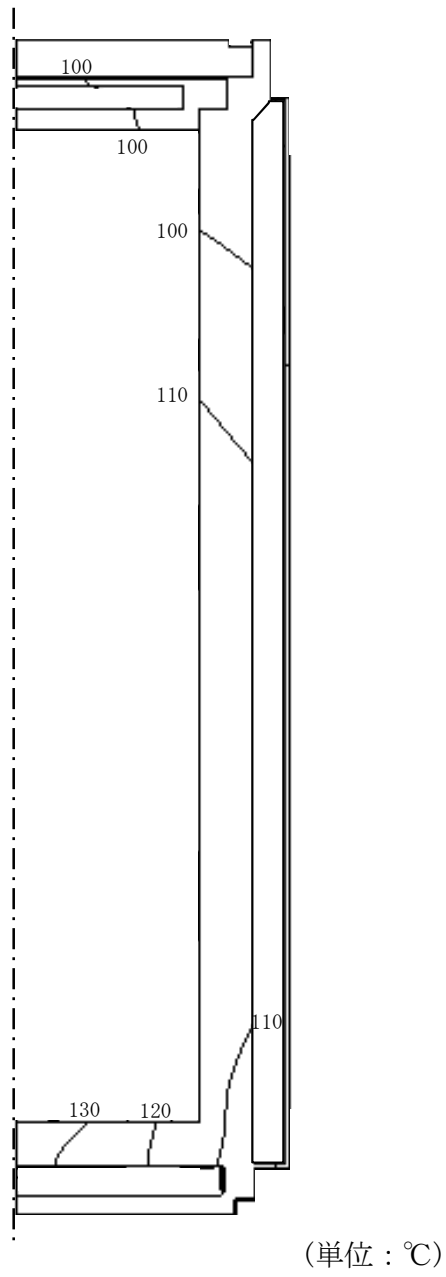


図1 温度分布図 (天井クレーン落下)

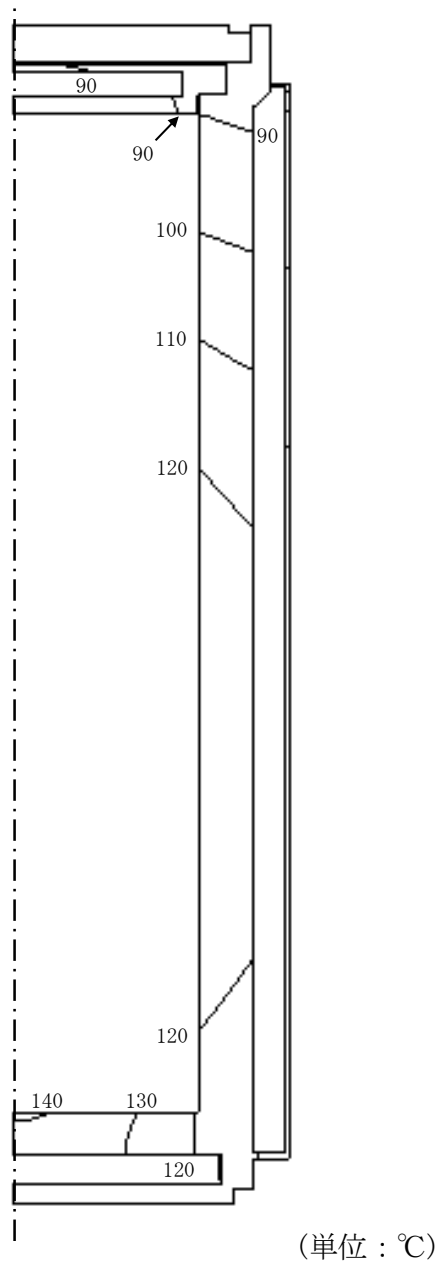


図2 温度分布図 (天井スラブ落下)

2. 2 衝撃荷重の設定

2. 2. 1 天井クレーン落下

天井クレーン落下時の衝突荷重を工学式により算出する。天井クレーンが受入れ区域の北壁の損傷により、北側クレーンガーダから脱輪して、水平姿勢の金属キャスクのフランジ部側面に衝突する事象を評価する。天井クレーンの落下姿勢を図 3 に示す。天井クレーン南側はクレーンガーダ上のまま、北側が金属キャスクに衝突し、その時の落下高さ（重心変位） H は 5.3m となる。また、天井クレーン質量 m_c は 128 トンである。

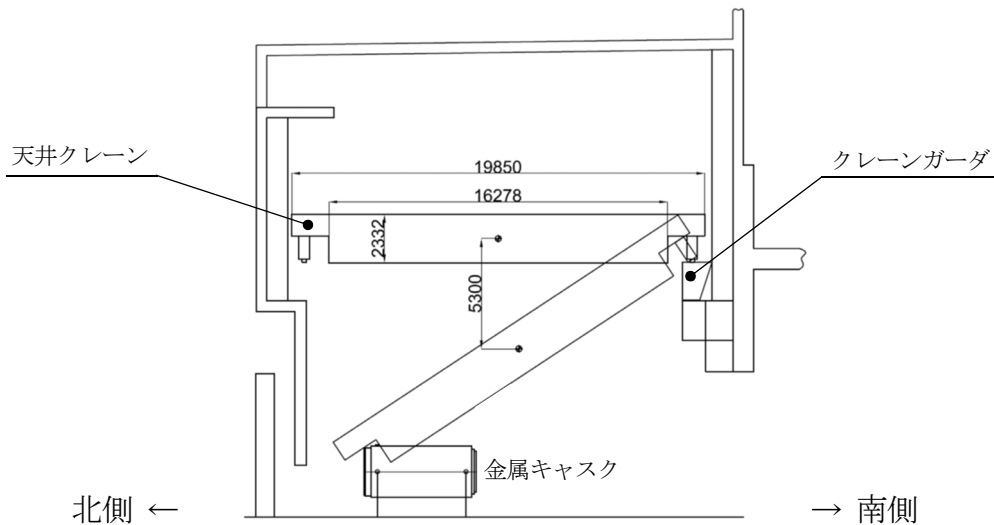
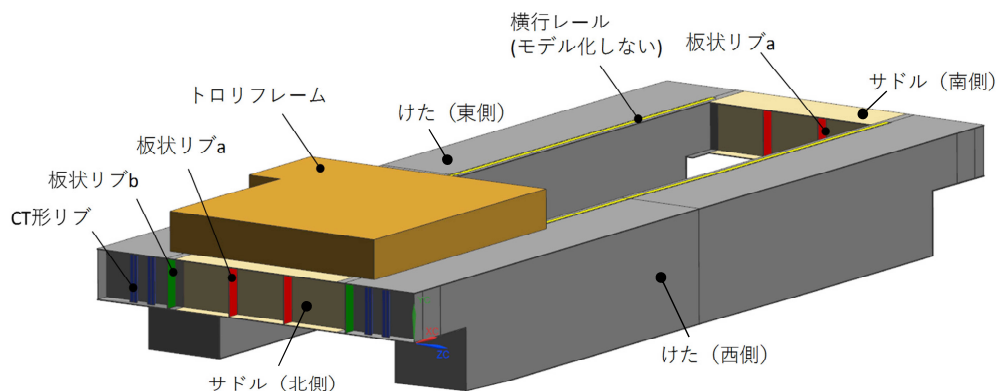


図 3 天井クレーンの落下姿勢

金属キャスクに対して、天井クレーンのサドル部が衝突する想定をする。天井クレーン形状及びサドルの機械強度を図 4 に示す。なお、材質の降伏応力と引張強さはミルシートの最大値としている。



部位	材質	降伏応力	引張強さ
サドル	SM490A	450MPa	555MPa

図 4 天井クレーン形状及びサドルの機械強度

サドルに対して金属キャスクは肉厚で剛であるので、衝突によってサドルが塑性変形する。天井クレーンは落下姿勢を維持したまま変形が進むと考え、サドルの2枚の立板（板厚 16mm）及び4枚のリブ（板厚 15mm，図 4 の板状リブ a(赤)）に圧縮変形が生じる。金属キャスクとサドルの位置関係から，図 5 に示すように立板はキャスクの胴部外径（フランジ部外半径 1156 mm）に沿った円弧状，リブは台形状及び三角形状に変形する。

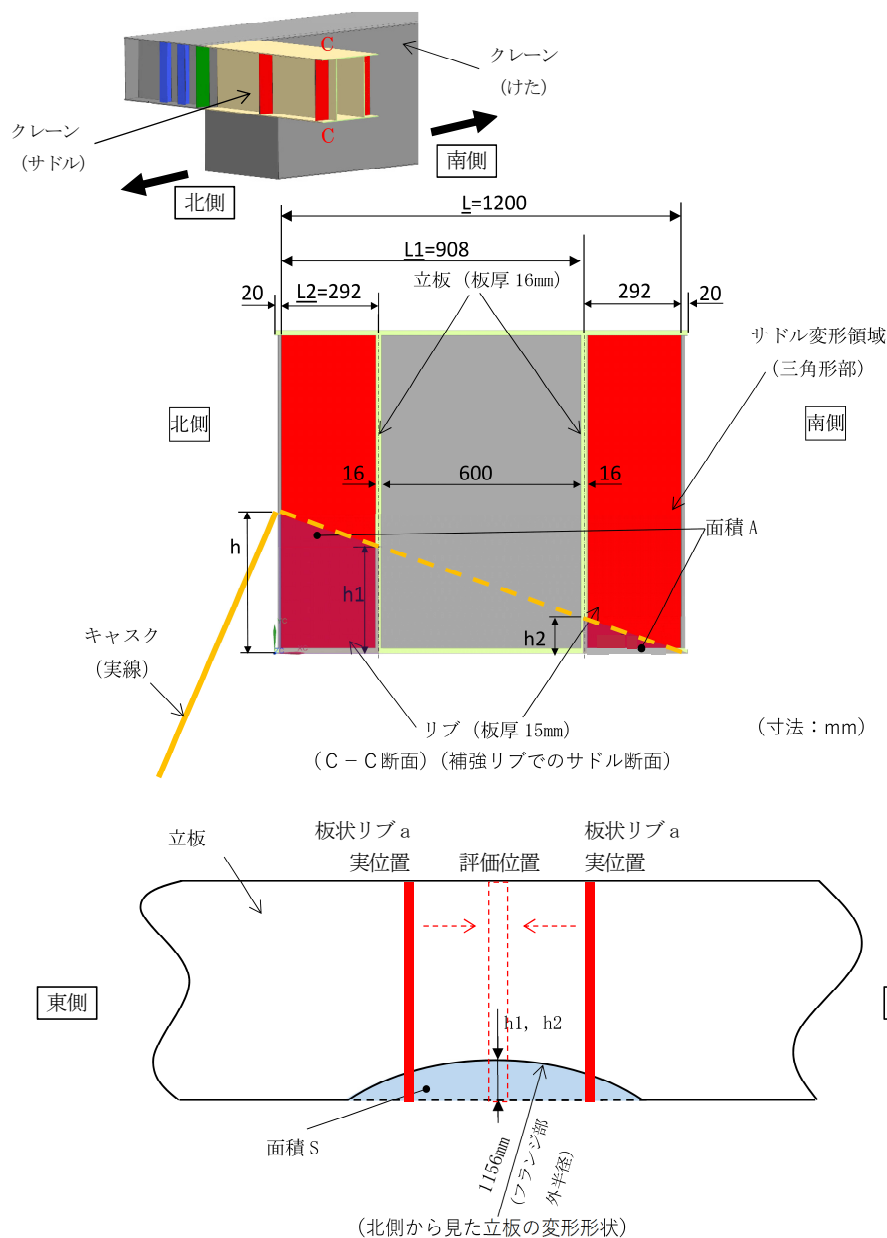


図 5 サドルの変形領域

鉛直方向変位を h とすると，立板の塑性変形面積 S ，リブの塑性変形面積

Aは、それぞれ下式により算出する。

$$S = 2 \int_{1156-h_1}^{1156} \sqrt{1156^2 - x^2} dx + 2 \int_{1156-h_2}^{1156} \sqrt{1156^2 - x^2} dx$$

$$A = \frac{W(h+h_1)}{2} \times 2 + \frac{W \times h_2}{2} \times 2$$

ここで、h：鉛直方向変位(mm)

h1：北側の立板の鉛直方向変位(mm) (=h・L1/1200)

h2：南側の立板の鉛直方向変位(mm) (=h・L2/1200)

W：リブの幅(mm) (=292-(16/2))

なお、リブの塑性変形面積Aは保守的に評価するため、サドル中央部を評価位置とし、リブ2枚分の計算を行う。

以上より、変形領域の体積Vは下式により算出する。

$$V = S \times t_3 + A \times t_4$$

ここで、t3：立板の板厚(mm) (=16mm)

t4：リブの板厚(mm) (=15mm)

クレーンの単位体積当たりの塑性エネルギーを σ とすると、落下エネルギーをすべてクレーンの塑性変形で吸収する場合、変形により吸収されるエネルギー E_p では下式が成り立つ。このときの変形量を考慮した落下エネルギーEは、変形量(鉛直方向変位)h分を含める。

$$E_p = V \times \sigma$$

$$= E$$

ここで、E：変形量を考慮した落下エネルギー(J)

$$E = m_c \times g \times (H+h)$$

m_c ：クレーン質量(kg)

g ：重力加速度(=9.80665 m/s²)

H：落下高さ(m)

h：変形量(m)

以上の関係式を満たす変形量hは0.554(m)であり、この値から荷重作用時間 t_e を算出する。

荷重作用時間 t_e は、変形量 h を初期速度 $V_0 (= (2g \cdot H)^{1/2})$ で除して算出する。実事象では減速が生じると考えられるが、考慮せずに評価する。この荷重作用時間 t_e と落下時の運動量から、衝突荷重 F_0 (最大荷重) は下式により算出する。

$$m \cdot V_0 = \int_0^{t_e} F(t) dt = \int_0^{t_e} F_0 \{1 - (t/t_e)\} dt = F_0 \cdot t_e / 2$$

表 1 に衝突荷重計算の設定条件及び算出結果を示す。単位体積当たりの塑性エネルギーにはサドルの流動応力を使用した。金属キャスクと天井クレーン (サドル) との衝突において、衝突荷重 F_0 は 48MN となる。衝突荷重 F_0 は金属キャスクのフランジ部側面 (板状リブ a 間に相当する範囲) に、荷重総和が 48MN となるよう一様圧力で付与する。

表 1 衝突荷重計算の設定条件及び算出結果 (天井クレーン落下)

天井クレーン質量 m_c (kg)	128000
落下高さ H (m)	5.3
初期速度 V_0 (m/s)	10.2
単位体積当たりの塑性エネルギー σ (J/m ³)*	5.03×10^8
変形量を考慮した落下エネルギー E (J)	7.35×10^6
変形量 (鉛直方向変位) h (m)	0.554
荷重作用時間 t_e (sec)	0.0543
落下時の運動量 $m_c \cdot V_0$ (N·s)	1.31×10^6
衝突荷重 F_0 (MN)	48

* : サドルの流動応力 (降伏応力と引張強さの平均値=503MPa) を使用

$$1 [\text{MPa}] = 10^6 [\text{N/m}^2] = 10^6 [\text{N} \cdot \text{m/m}^3] = 10^6 [\text{J/m}^3]$$

2. 2. 2 天井スラブ落下

天井スラブ落下時の衝突荷重を工学式により算出する。図 6 に示すように、大梁～小梁の 1 スパン分の天井スラブが水平姿勢で落下し、受入れ区域にて搬送中の垂直姿勢の金属キャスク上面に衝突する事象を評価する。

天井スラブは鉄筋コンクリート製で、形状は縦 2675mm×横 9000mm×厚さ 500mm の直方体とする。また、天井スラブに対し、金属キャスクは剛であるので、衝突によって天井スラブが金属キャスクフランジ部の外径でせん断破壊し、打ち抜かれる事象を想定する。

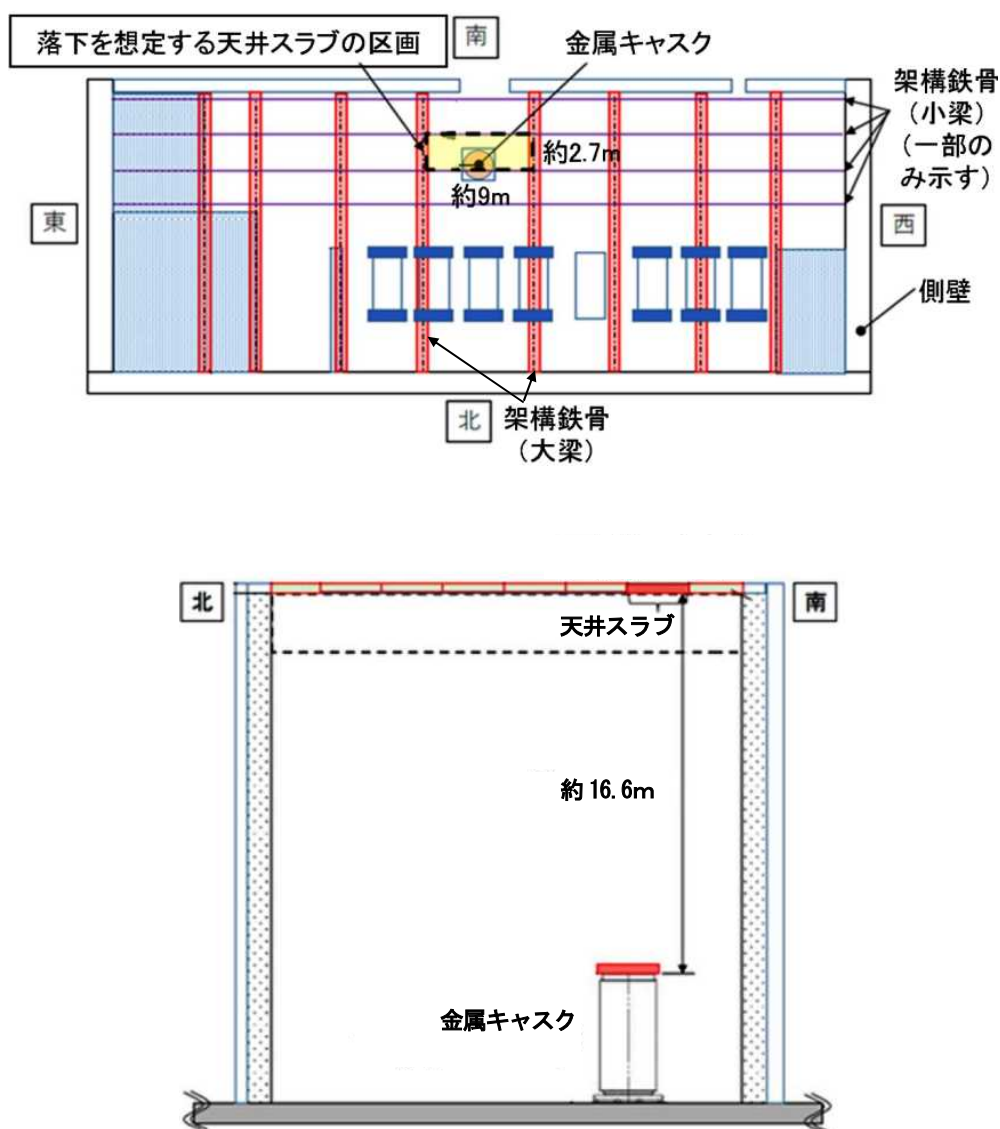


図 6 天井スラブの落下姿勢

天井スラブ強度 F_c には「原子力発電所耐震設計技術規定 (JEAC4601-2008)」の許容せん断応力度を考慮して設定した実強度 (設計基準強度の 1.4 倍) である 46.2 (MPa) を用い、打ち抜き断面に作用するせん断荷重 (衝突荷重) F_c を評価する。規定では、「 $1.5F_c/30$ 」又は「 $1.5 \times (0.49 + F_c/100)$ 」の小さい値を許容せん断応力度としているが、今回は荷重が大きくなる「 $1.5F_c/30$ 」を許容せん断応力度 σ として設定する。評価モデルを図 7 に示す。

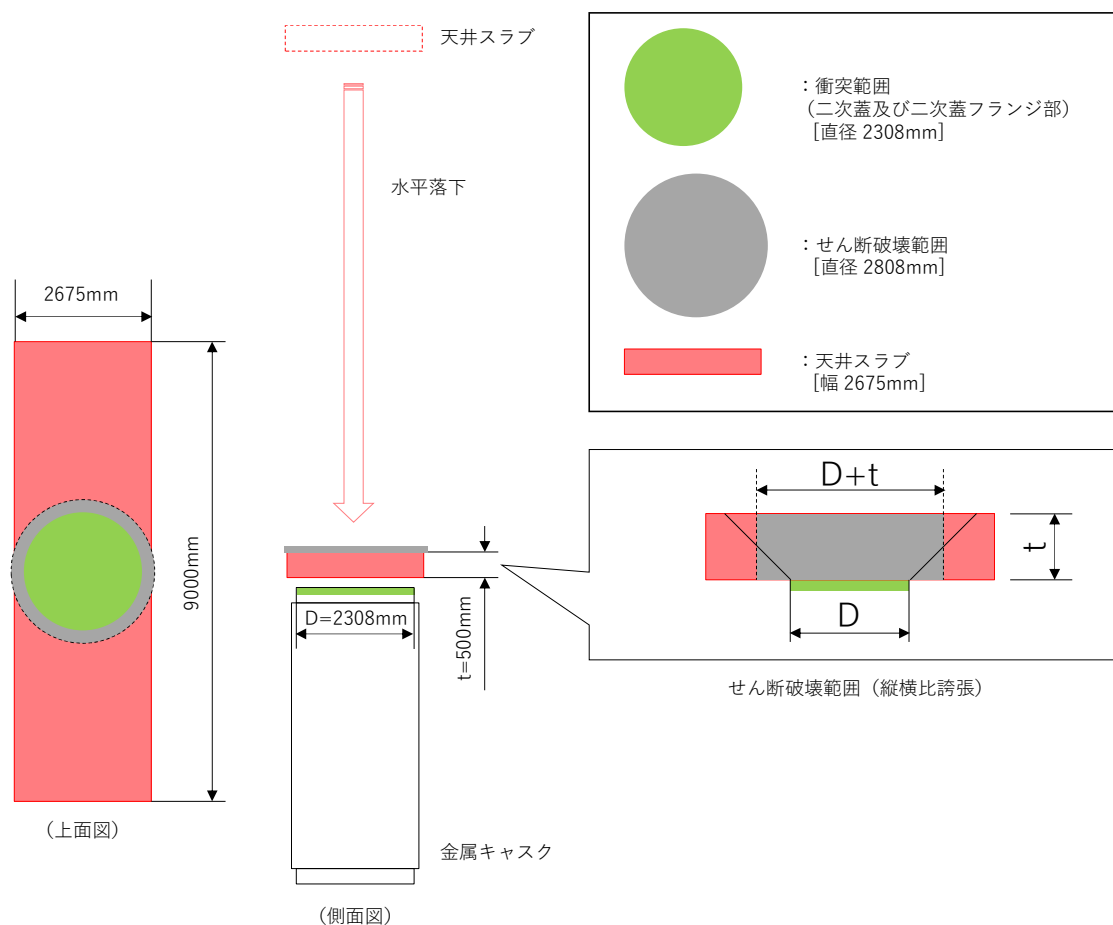


図 7 評価モデル (天井スラブがせん断破壊する)

天井スラブがせん断破壊する範囲は、「原子力発電所耐震設計技術規定 (JEAC4601-2008)」の「せん断力算定断面」を考慮し、範囲を金属キャスク二次蓋フランジ部の直径 D に天井スラブ厚さ t を足し合わせた直径を持つ円の面積として評価を行った。せん断破壊範囲は天井スラブ幅よりも大きくなるが、荷重を保守的に大きく評価することになる。

せん断荷重 F_{τ} (衝突荷重) は下式により算出する。

$$F_{\tau} = \pi \times (D + t) \times t \times \sigma$$

ここで, $\sigma = 1.5F_c / 30$

D : 二次蓋フランジ部の直径 (m)

t : 天井スラブ厚さ (m)

F_c : 天井スラブ強度 (MPa)

σ : 許容せん断応力度 (MPa)

表 2 に衝突荷重の設定条件及び算出結果を示す。金属キャスクと天井スラブとの衝突において、衝突荷重 F_{τ} は 11MN となる。衝突荷重 F_{τ} は金属キャスクの二次蓋及び二次蓋フランジ部の上面に、荷重総和が 11MN となるよう一様圧力で付与する。

なお、せん断破壊範囲の天井スラブの荷重を考慮してもその値は 74kN 程度であり、衝突荷重計算の保守性の中に包絡される。

表 2 衝突荷重計算の設定条件及び算出結果 (天井スラブ落下)

二次蓋フランジ部の直径 D (m)	2.308
天井スラブ厚さ t (m)	0.5
天井スラブ強度 F_c (MPa)	46.2
許容せん断応力度 σ (MPa)	2.4
衝突荷重(せん断荷重) F_{τ} (MN)	11

3. 金属キャスクの一次蓋の横ずれ量

金属キャスクの一次蓋や二次蓋の蓋部は、図 8 で示すように蓋の横ずれが容器本体で制限されるいわゆるインロー構造となっており、蓋部に荷重を受けても蓋の横ずれ量は最大でも本体胴フランジとの間隙に限定される。

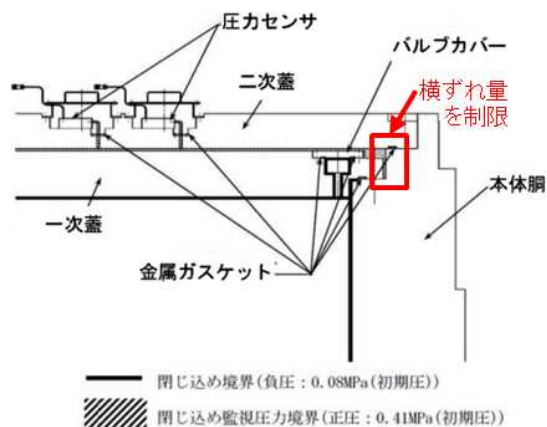


図8 金属キャスクの密封シール部詳細

一次蓋と本体胴フランジの間隙は～2mm 程度であることから、ここでは発生する横ずれ量を 2mm と仮定する。

なお、ボルトとボルト穴との間隙は一次蓋と本体胴フランジとの間隙よりも大きいため、一次蓋の横ずれがボルトに干渉することはない。

4. 仮想的な大規模津波による搬送台車上の金属キャスクへの影響

搬送台車で金属キャスクを移送する際は、金属キャスクの取扱手順に従い屋外に通じる受入れ区域の遮蔽扉は「閉」とする運用とする。したがって、搬送台車上の金属キャスクに直接津波波力が作用することや津波漂流物が衝突することはない。

以上