

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 2-補-014-01 <u>改 3</u>
2022 年 <u>7 月 25 日</u>

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 4 年 7 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	1
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
5. 仮想的大規模津波に対する貯蔵架台の影響評価	12
6. 添付資料	14

※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

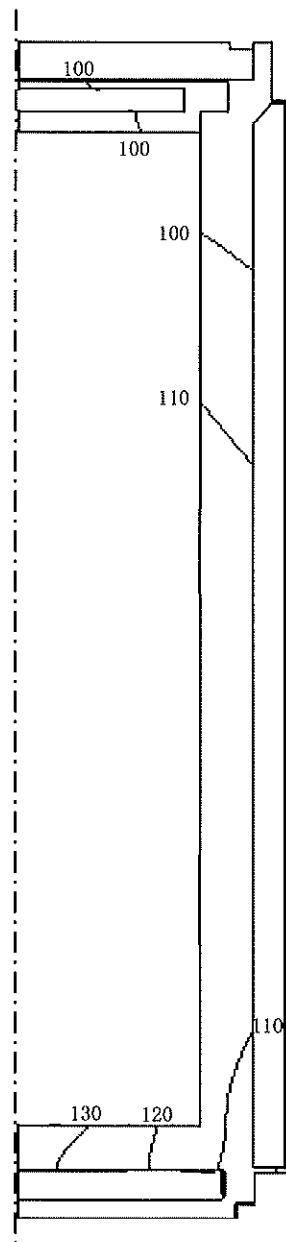
強度解析における 2 つの衝突想定条件では、金属キャスク姿勢がそれぞれ異なる。天井クレーン落下時は水平姿勢であり、天井スラブ落下時はたて姿勢である。よって、水平姿勢は輸送時の姿勢と同じであることから、核燃料輸送物設計変更承認申請書と同様の計算結果(図 1)を用いる。また、たて姿勢は貯蔵時の姿勢と同じであることから、密封容器の応力計算と同様の計算結果(図 2)を用いる。

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



(単位：℃)

図1 温度分布図 (天井クレーン落下)

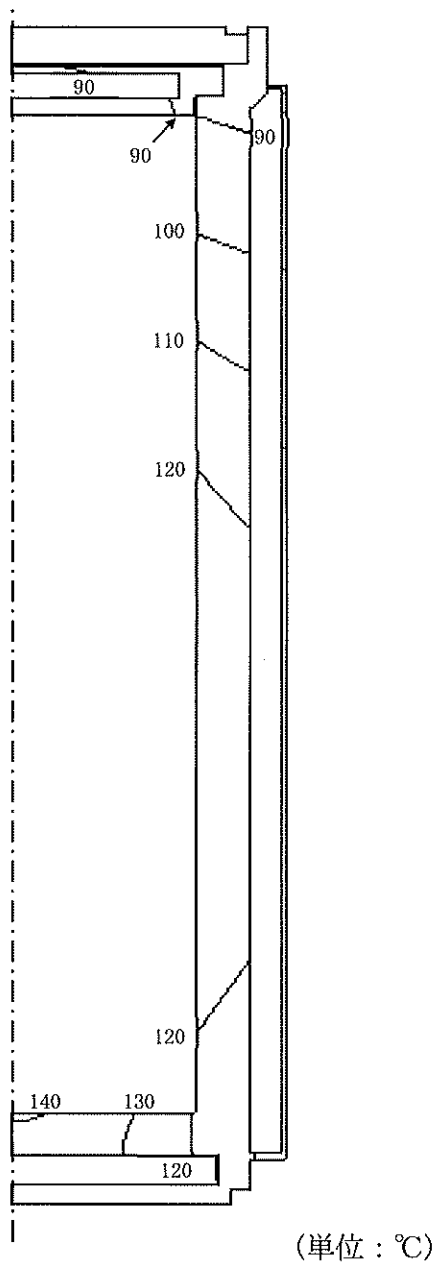


図2 温度分布図 (天井スラブ落下)

## 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。

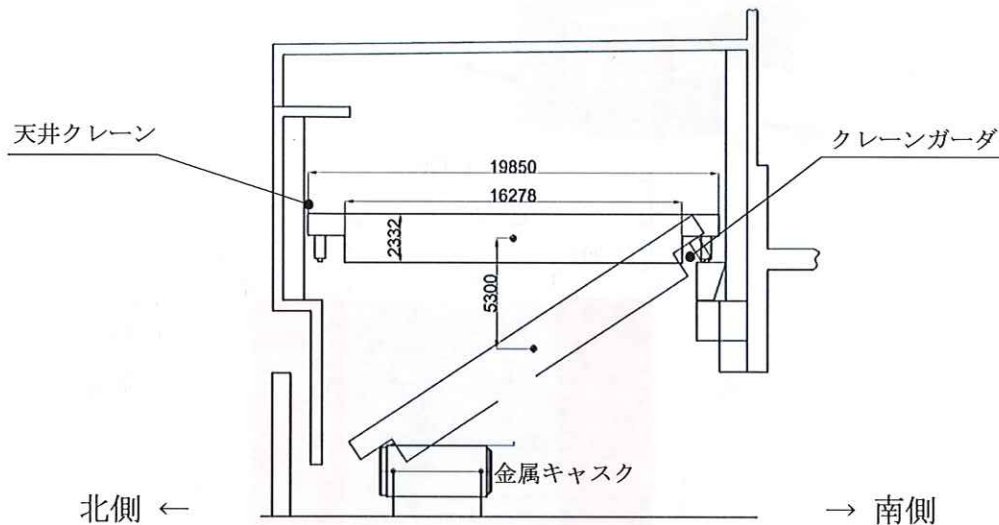
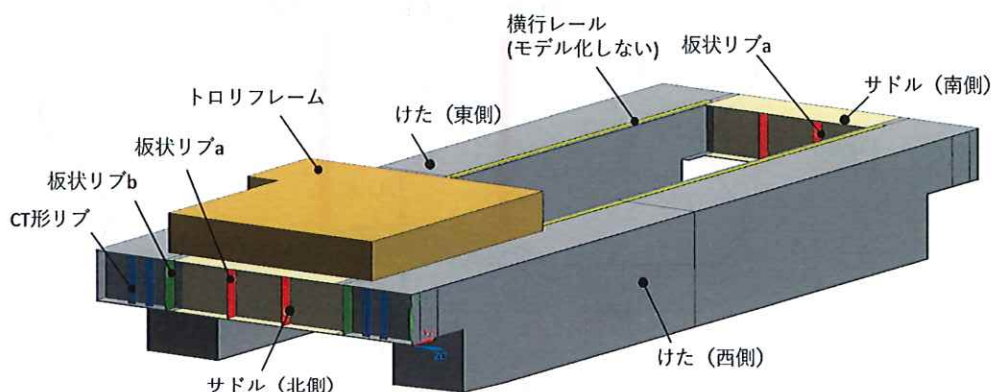


図3 天井クレーンの落下姿勢

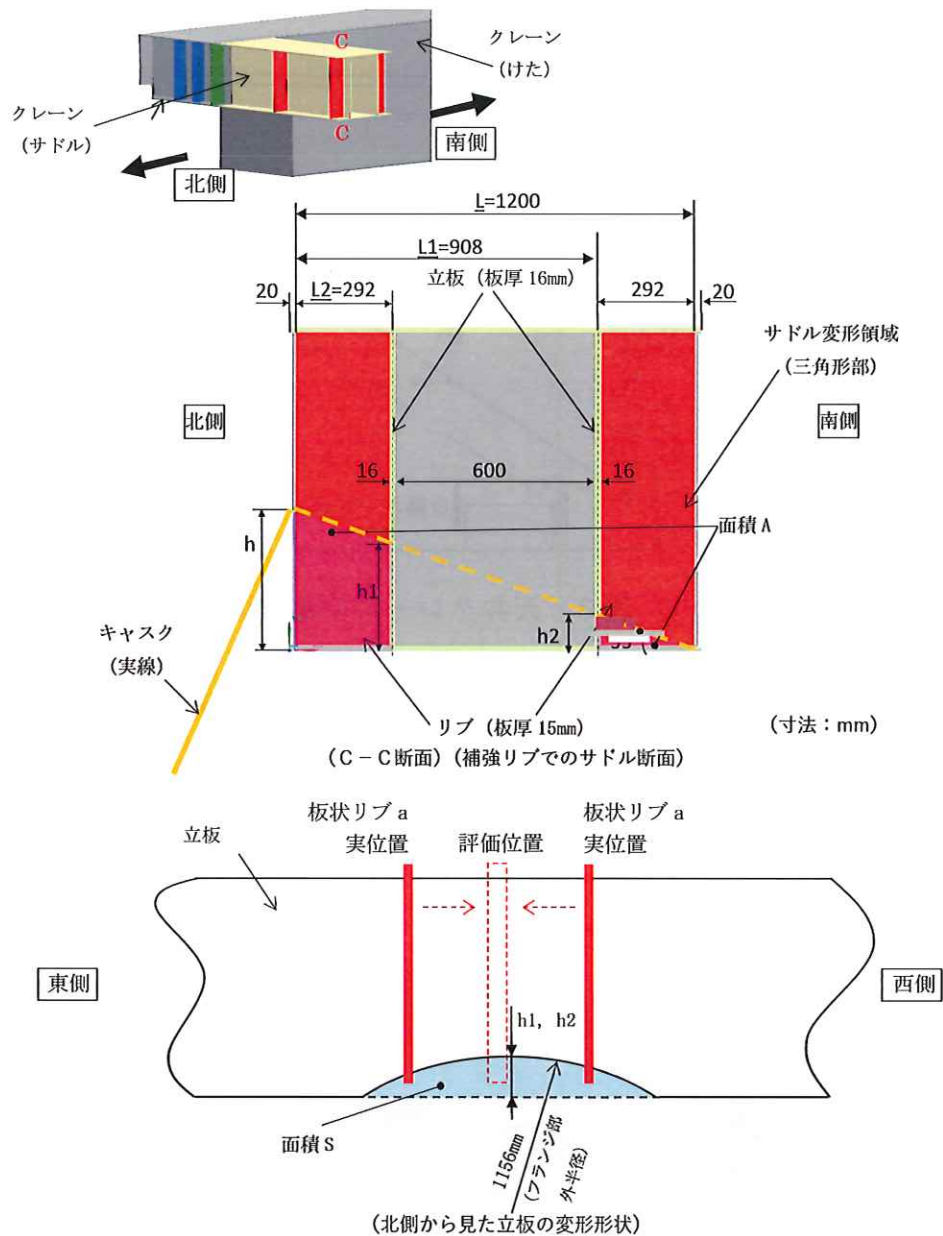
金属キャスクに対して、天井クレーンのサドル部が衝突する想定をする。天井クレーン形状及びサドルの機械強度を図4に示す。なお、材質の降伏応力と引張強さはミルシートの最大値としている。



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。





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。

$$S = 2 \int_{1156-h1}^{1156} \sqrt{1156^2 - x^2} dx + 2 \int_{1156-h2}^{1156} \sqrt{1156^2 - x^2} dx$$

$$A = \frac{W(h+h1)}{2} \times 2 + \frac{W \times h2}{2} \times 2$$

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) ( $=h \cdot L1/1200$ )

$h2$  : 南側の立板の鉛直方向変位 (mm) ( $=h \cdot L2/1200$ )

$W$  : 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。

$$V = S \times t3 + A \times t4$$

ここで、 $t3$  : 立板の板厚 (mm) ( $=16\text{mm}$ )

$t4$  : リブの板厚 (mm) ( $=15\text{mm}$ )

クレーンの単位体積当たりの塑性エネルギーを  $\sigma$  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 ( $=9.80665 \text{ m/s}^2$ )

$H$  : 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 $\sigma$ ( $J/m^3$ )*	$5.03 \times 10^8$
変形量を考慮した落下エネルギー $E$ (J)	$7.35 \times 10^6$
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 $m_c \cdot V_0$ ( $N \cdot s$ )	$1.31 \times 10^6$
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

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

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

## 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×高さ  $\square$  mm 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。

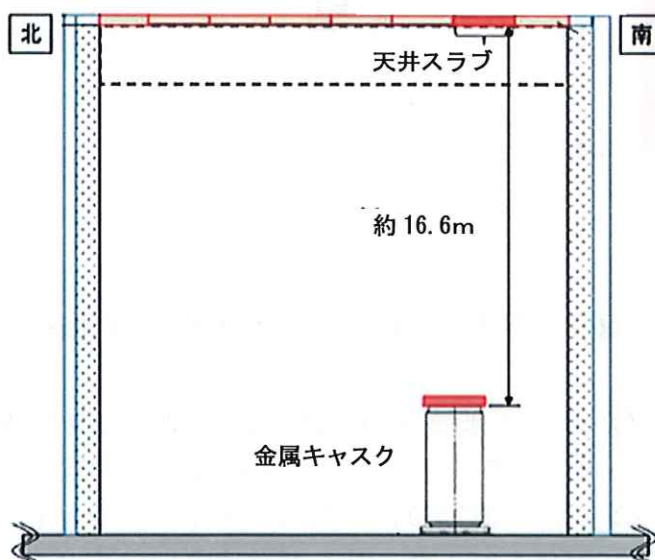
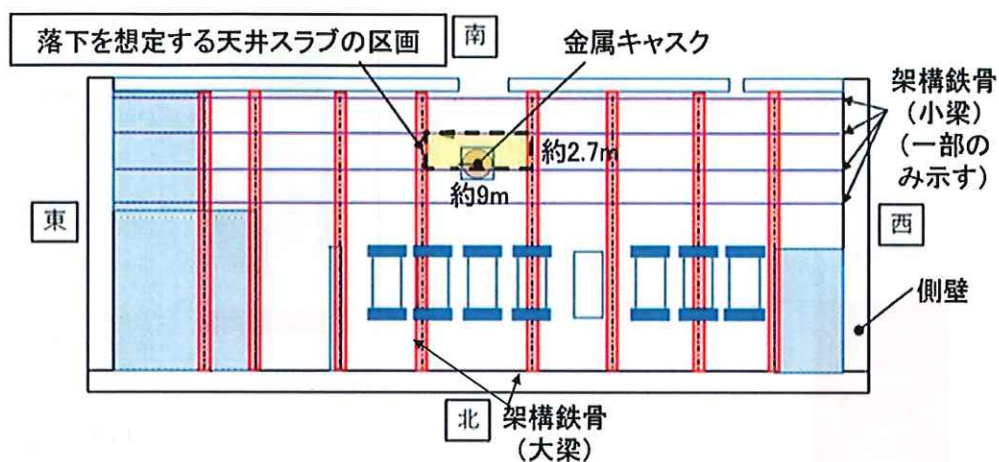


図6 天井スラブの落下姿勢

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

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 $\sigma$ として設定する。評価モデルを図7に示す。

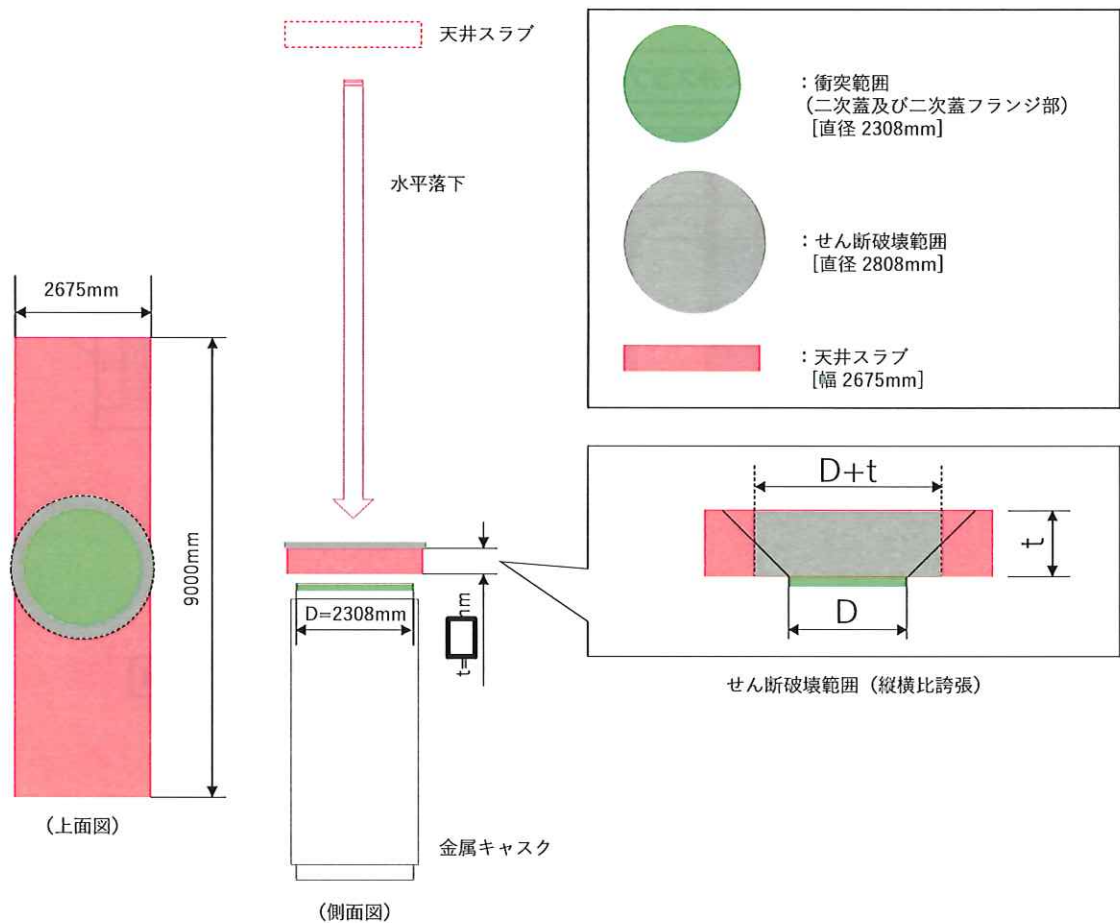


図7 評価モデル（天井スラブがせん断破壊する）

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。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

せん断荷重  $F_t$  (衝突荷重) は下式により算出する。

$$F_t = \pi \times (D + t) \times t \times \sigma$$

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)

$\sigma$  : 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  $F_t$  は 11MN となる。衝突荷重  $F_t$  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)	
天井スラブ強度 $F_c$ (MPa)	46.2
許容せん断応力度 $\sigma$ (MPa)	2.4
衝突荷重(せん断荷重) $F_t$ (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。

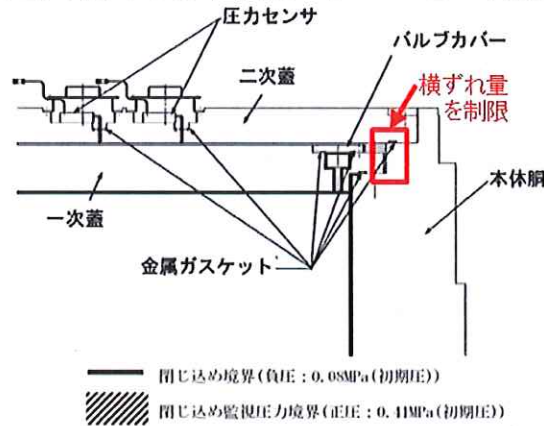


図8 金属キャスクの密封シール部詳細

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。

### 5. 仮想的な大規模津波に対する貯蔵架台の影響評価

仮想的な大規模津波の水流による抗力は、金属キャスク及び貯蔵架台の高さ方向に一様に作用する。このため、抗力は高さ方向の中心位置の集中荷重で表すことができる。また、水平方向地震力による荷重は、質量と加速度の積であり、重心位置の集中荷重で表すことができる。

下図に水流による抗力と水平方向地震力による集中荷重の作用位置を示す。金属キャスク、貯蔵架台ともに水平方向地震力による荷重の作用位置が高い。すなわち、水流による抗力と水平方向地震力による荷重が同じ値の場合、抗力によるモーメントは水平方向地震力によるモーメントを下回る。

よって、抗力と水平方向地震力を比較して貯蔵架台の固定状態の維持評価を行うことは妥当である。

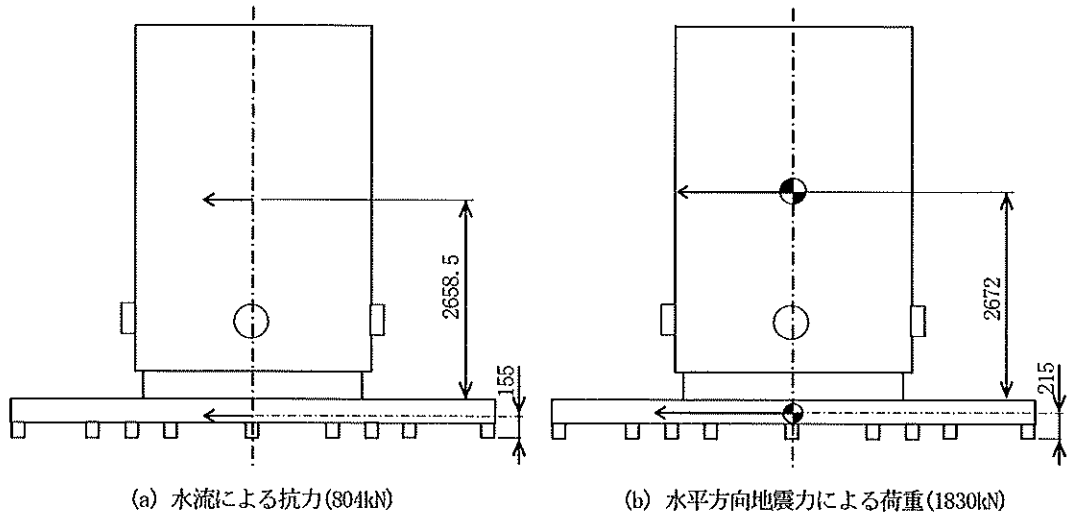


図 仮想的な大規模津波の水流による抗力と水平方向地震力による荷重の作用位置

## 6. 添付資料

次の資料を次ページ以降に添付する。

○コメント回答資料

NO. 0209-77

以 上



リサイクル燃料貯蔵株式会社		
提出日	2022年4月1日	
管理表No.	0209-77	改訂01

項目	コメント内容
津波 (第8条)	<p>落下物の衝撃荷重に対する金属キャスクの閉じ込め機能について、密封シール部の判定基準を、耐震、構造で参照する金属キャスク構造規格と異なり、塑性ひずみ量(0.2%)としているが、当該事象における判定基準の考え方を説明すること。</p> <p>&lt;3/3 追加コメント&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 発電炉での評価で同等の基準が用いられているとあるが、これが何であるか、追加で説明すること。</li> <li>・ なぜ金属キャスク構造規格の基準を使っていないのか、密封境界でどういう応力が出ていて許容限界値と比べてどうか、説明すること。</li> </ul>

(回答)

評価部位に対して「おおむね弾性範囲内」という判定基準は、耐震や構造の評価と同じ考え方であるが、本評価においては落下物と衝突するといった過酷な事象を想定しており、耐震や構造の評価に比べて付与される荷重が大きい。従って、明確な判定基準が必要であると判断し、設定した。

評価としては、胴体の一次蓋密封シール部及び一次蓋の密封シール部に塑性変形がみられないこと並びに一次蓋用締付ボルトのボルト応力が降伏応力を超えないことを合わせて満たすことで「おおむね弾性範囲内」ととどまることを確認している。

なお0.2%の塑性ひずみ量は、明瞭な降伏応力を示さない材料の耐力としても設定される量であり、判定基準を設定する際に参照した。また、認可実績のある発電炉の評価でも同等の基準が用いられていることを確認している。

(追加回答)

0.2%ひずみについては、四国電力殿(伊方発電所3号炉)の使用済燃料乾式貯蔵施設の設置に関する新規制基準適合性審査における参考資料(設置許可基準規則第16条(燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設)への適合性)でも、同様の基準を用いた評価が行われていることを確認している。

評価部位(密封シール部)は、内包する放射性物質を適切に閉じ込めるために「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済み燃料の貯蔵に関する審査ガイド(2.4 閉じ込め機能【確認内容】)」における、「衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。」を参考に、密封境界部がおおむね弾性範囲内であることが要求事項であり、おおむね弾性範囲として0.2%ひずみを判定基準とした。

天井クレーン及び天井スラブ衝突時の応力については、評価部位の各々の設計降伏応力(183~186MPa<sup>\*1</sup>)に対して、天井クレーン衝突時の発生応力は胴(一次蓋密封シール部)で220MPa程度<sup>\*2</sup>となる。この発生応力に伴い0.05%程度のひずみが発生するが、判定基準である0.2%ひずみを下回る。また天井スラブ衝突時の発生応力は胴(一次蓋密封シール部)で30MPa程度<sup>\*2</sup>となり、これは設計降伏応力以下であり、同様に判定基準を下回る。

\*1 胴及び一次蓋の材料は同一であるが、評価部位によって解析温度が異なるため、各々設計降伏応力が異なる。

\*2 速報値