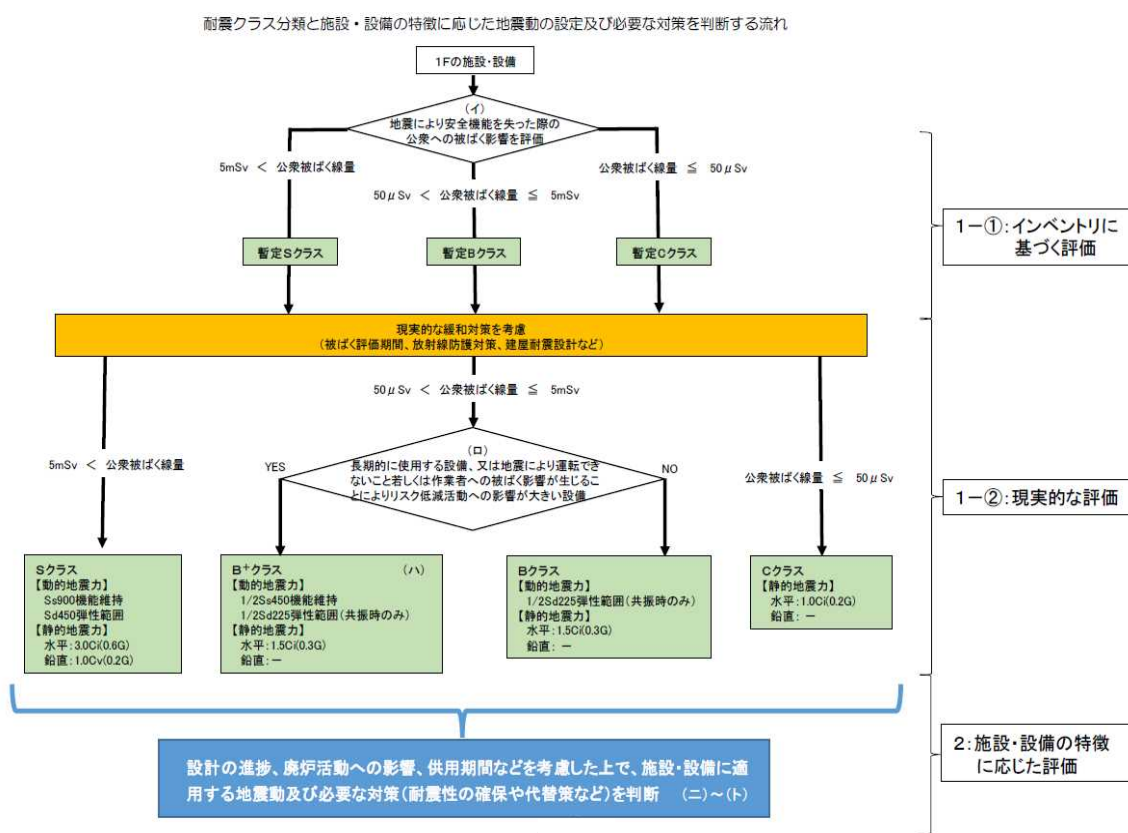


使用済燃料乾式キャスク仮保管設備（増設）の耐震設計について

1. 基本方針

2022年11月16日に示された「東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における耐震クラス分類と地震動の適用の考え方」※に基づき耐震設計を行う。

※第51回原子力規制委員会 資料3「東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における耐震クラス分類と地震動の適用の考え方」（2022年11月16日 原子力規制庁）



【(へ)：上位クラスへの波及的影響】

上位クラスへの波及的影響がある場合、原則上位クラスに応じた地震動を念頭に置くが、耐震クラス分類の考え方と同様に、下位クラスによる波及的影響を起因とする敷地周辺の公衆被ばく線量も勘案し、適切な地震動を設定する。

2. インベントリに基づく評価、現実的な評価

2.1 基本方針

地震によりキャスク仮保管設備の安全機能を失った際の公衆への被ばく影響を評価する。

乾式キャスクのインベントリにより乾式キャスク自体の耐震クラスは後述の「2.4 耐震クラス分類」より S クラスである。乾式キャスクは Ss900 に耐え得る十分な耐震性を有しており、非常に堅牢な造りである。したがって、地震による乾式キャスク以外の付帯設備が乾式キャスクの機能に影響を及ぼすこと（以下、波及的影響という。）を「1. 基本方針」の「東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所における耐震クラス分類と地震動の適用の考え方」に基づき「上位クラスへの波及的影響」に関して「現実的な評価」を行い、波及的影響が乾式キャスクへの機能喪失にどの程度影響を与えるかを確認し、付帯設備の耐震クラスを決定する。

以下の手順により評価する。

- (1) Ss900 によりキャスク仮保管設備の付帯設備が安全機能を失う損傷モードを抽出
- (2) 抽出された損傷モードに対して乾式キャスクへの波及的影響を評価
- (3) 波及的影響評価より公衆被ばく線量を評価し耐震クラスを設定
- (4) 耐震クラスに応じた耐震評価を実施し、安全機能が維持されることを確認

2.2 地震による損傷モードの抽出

(1) 支持架台

a. 支持架台の損壊

(2) コンクリートモジュール

a. コンクリートモジュールの転倒または倒壊

(3) クレーン

a. クレーンの転倒または倒壊

(4) コンクリート基礎

a. コンクリート基礎の損傷

2.3 波及的影響評価（暫定結果）

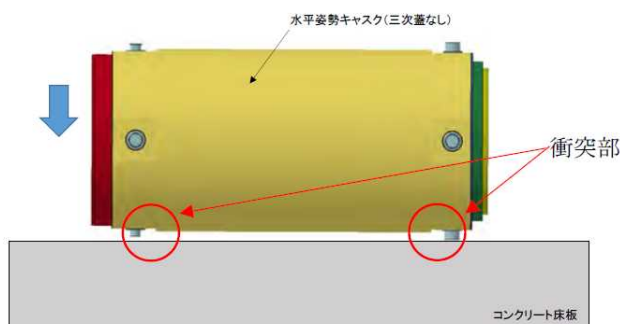
2.2 で抽出した事象に対する乾式キャスクへの影響評価を行う。

(1) 支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下評価

a. 水平落下

(a) 評価方針

900gal の地震時に支持架台が許容値を超過する見込みであるが、超過部位は支持架台の一部であり、なおかつ許容値に対して1～2割程度の超過であるため、即座かつ完全に支持機能を失うことは考えにくく、また支持架台が損傷したとしても支持架台のコンクリート塊や鉄筋は物理的に存在する。ただし、支持架台の損傷具合を定量的に評価することは困難なので本評価においては、保守的に前後左右の支持架台の支持機能が同時に喪失し、支持架台を無視して保管位置の高さからコンクリート床板まで自由落下する場合を評価する。



(b) 評価方法

落下した乾式キャスクがコンクリート床板に衝突する際に生じる衝突荷重及び加速度の計算条件は以下の通り。

- ・ 上部トラニオン及び下部トラニオンとコンクリート床板の衝突とする。
- ・ コンクリート床板は剛とする。
- ・ 衝突によりトラニオンには引張強さの応力が生じるとする。

i. 衝突荷重の算出

トラニオン径及びトラニオン材質の引張強さより発生荷重は40MNとなる。

ii. 衝撃加速度の算出

衝突荷重及びキャスクの質量より衝撃加速度は35Gとなる。

構造解析コードABAQUSを用いて0°～180°方向をモデル化したハーフモデルを使用し、密封シール部及び締付けボルトの応力評価を行う。

鉛直下側の上部トラニオン及び下部トラニオンを拘束し、キャスクモデルに上記で算出した衝撃加速度35Gを与える。

(c) 判定基準

波及的影響評価において、先行プラント^{※1}では金属キャスクの機能維持という観点で密封性能が維持できることを確認している。したがって、判定基準は密封機能評価の判定基準として下表の内容とする。

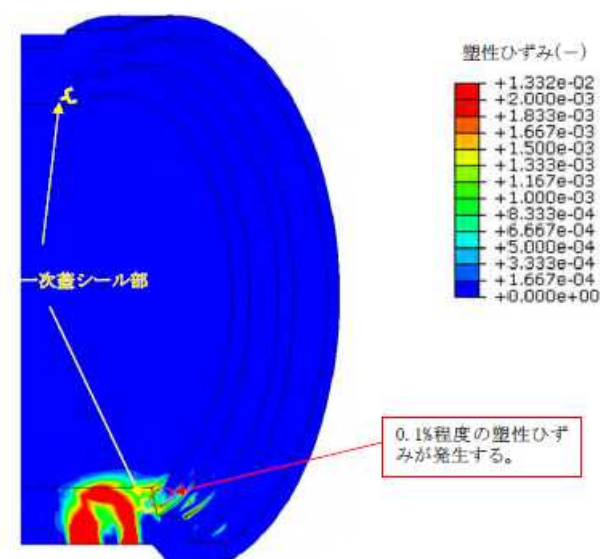
評価部位	判定基準	備考
胴体密封シール部	おおむね弾性範囲	塑性ひずみ 0.2%以下
一次蓋密封シール部	おおむね弾性範囲	塑性ひずみ 0.2%以下
一次蓋締付けボルト	848MPa ^{※2}	ボルト材料の設計降伏点

※1：第319回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合 資料2-1「リサイクル燃料備蓄センターにおける津波防護方針について（貯蔵建屋損傷時の金属キャスクの基本的安全機能維持の確認）」（令和元年12月9日 リサイクル燃料貯蔵株式会社）

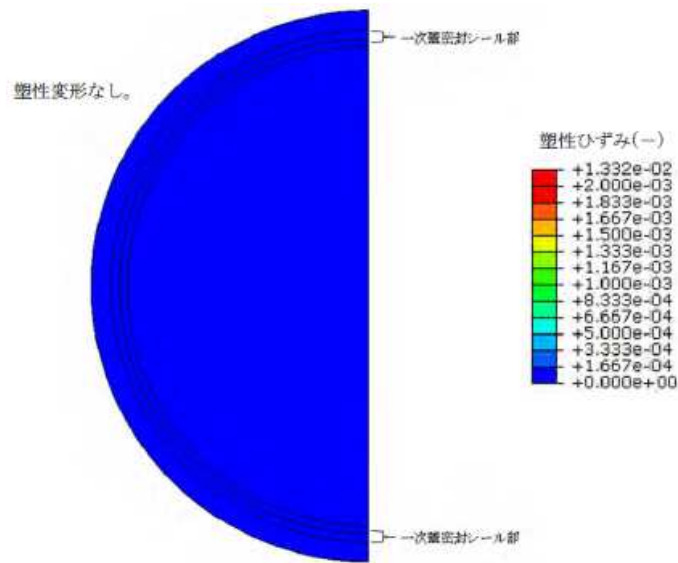
※2：貯蔵時最高使用温度に対する値

(d) 評価結果

胴体密封シール部及び一次蓋密封シール部に生じるひずみを図に示す。0.1%程度の塑性ひずみは生じるもののおおむね弾性範囲で判定基準を満足する。また、一次蓋締付けボルトに生じる応力は表の通りで判定基準を満足する。



(a) 胴体密封シール部（一次蓋シール部）



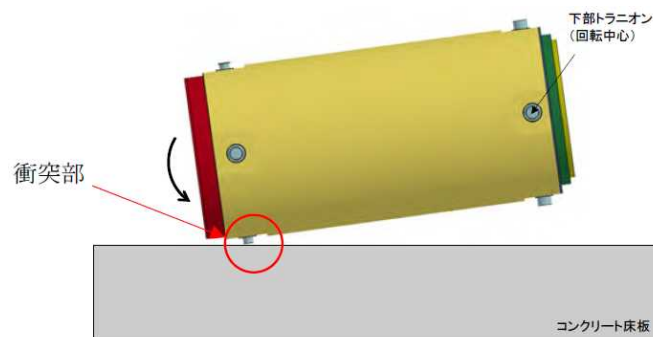
(b)一次蓋密封シール部（一次蓋裏側から見た図）

評価部位	一次応力		判定基準
	引張応力	引張+曲げ応力	
一次蓋締付けボルト	279MPa	704MPa	848MPa

b. 回転落下

(a) 評価方針

「a. 水平落下」と同様に、900gal の地震により支持架台が即座かつ完全に支持機能を失うことは考えにくいですが、本評価では保守的に前方（蓋側）左右の支持架台の支持機能が喪失し、支持架台を無視して保管位置の高さからコンクリート床板まで後方の支持架台を中心に回転落下（蓋部とコンクリート床板との衝突）する場合を評価する。



(b) 評価方法

落下した乾式キャスクがコンクリート床板に衝突する際に生じる衝突荷重及び加速度の計算条件は以下の通り。

- ・ 上部トラニオンとコンクリート床板の衝突とする。
- ・ コンクリート床板は剛とする。
- ・ 衝突によりトラニオンには引張強さの応力が生じるとする。

i. 衝突荷重の算出

トラニオン径及びトラニオン材質の引張強さより発生荷重は 13MN となる

ii. 衝撃加速度の算出

衝撃加速度は回転中心からの距離に比例し、蓋部で最大 35G となる。

構造解析コード ABAQUS を用いて 0° ~180° 方向をモデル化したハーフモデルを使用し、密封シール部及び締付けボルトの応力評価を行う。

水平方向下部トラニオンを回転軸として固定し、鉛直下側の上部トラニオンを拘束し、キャスク先端が 35G となる角速度を与える。

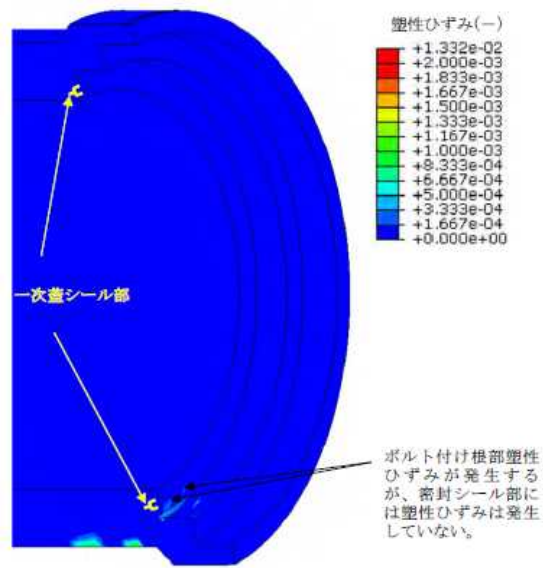
(c) 判定基準

「a. 水平落下」と同様に、判定基準は密封機能評価の判定基準として下表の内容とする。

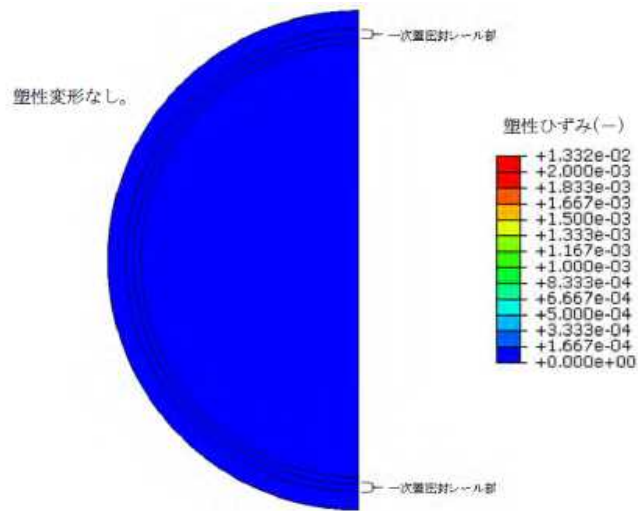
評価部位	判定基準	備考
胴体密封シール部	おおむね弾性範囲	塑性ひずみ 0.2%以下
一次蓋密封シール部	おおむね弾性範囲	塑性ひずみ 0.2%以下
一次蓋締付けボルト	848MPa	ボルト材料の設計降伏点

(d) 評価結果

胴体密封シール部及び一次蓋密封シール部に生じるひずみを図に示す通り、塑性ひずみは発生せず判定基準を満足する。また、一次蓋締付けボルトに生じる応力は表の通りで判定基準を満足する。



(a) 胴体密封シール部（一次蓋シール部）



(b) 一次蓋密封シール部一次蓋裏側から見た図

評価部位	一次応力		判定基準
	引張応力	引張+曲げ応力	
一次蓋締付けボルト	265MPa	616MPa	848MPa

乾式キャスクの基本的安全機能に係る評価

「(1) 支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下評価」では先行プラントを参考に密封機能について評価したが、その他の基本的安全機能（除熱・遮へい・臨界防止）についても評価する。

1. 水平落下

1.1 除熱機能

「(1) 支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下評価」では保守的に衝突荷重を大きく見積もるためコンクリート床板を剛としたが、現実的にはコンクリート床板が損傷しキャスク本体への影響はないと評価されている^{※1}。したがって、伝熱部材の損傷がないことから除熱機能は維持される。

※1：金属キャスク落下時瞬時漏えい評価 ー実物大金属キャスク落下試験ー（平成 18 年 12 月 財団法人電力中央研究所 N06004）

1.2 遮へい機能

「1.1 除熱機能」と同様に、外筒部の損傷がないことから遮へい機能は維持される。

1.3 臨界防止機能

内部収納物に作用する加速度 35G は、輸送時の 9m 水平落下時の加速度 65G^{※2}を下回るため、バスケット及び燃料被覆管の損傷は生じず、臨界防止機能は維持される。

※2：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）

2. 回転落下

「1. 水平落下」に同じ。

(2) 乾式キャスク同士の衝突性評価

(a) 評価方針

支持架台について、900galの地震時に許容値を超過する見込みであるが、超過部位は支持架台の一部であり、なおかつ許容値に対して1～2割程度の超過であるため、即座かつ完全に支持機能を失うことは考えにくく、また支持架台が損傷したとしても支持架台のコンクリート塊や鉄筋は物理的に存在する。

コンクリートモジュールについても900galの地震時に一部の部位が許容値を1割程度超過するが、即座かつ完全に倒壊することは考えにくく、仮に倒壊したとしても天板や側板は物理的に存在する。

コンクリート基礎については応答倍率法（現実的には様々な方向で揺れが分散するが、各方向での最大加速度を採用）で許容値に対して5割程度超過となった。保守的な結果であるがコンクリート基礎部にひびや段差等が生じる可能性がある。

一方、コンクリート基礎部を形成する材料は地震発生時に破損する可能性があるもののコンクリートや鉄筋は存在する。現実的にこれら残存物は地震による乾式キャスクの並進運動を阻害する方向に作用する。

支持架台やコンクリートモジュール、コンクリート基礎の損傷具合、運動阻害の程度を定量的に評価することは困難なので本評価においては、保守的に支持架台、コンクリートモジュール、コンクリート基礎などによる減速効果を完全に無視し、水平面に置かれた円筒形の剛体がコンクリート床板上を並進運動する場合を評価する。

さらに、地震が発生した場合、敷地全体がある同一方向に動き、乾式キャスク全体も同一方向に動く。しかしながら、現実的にはありえない乾式キャスク同士が同時かつ互いに近接する方向に運動するとし、コンクリート床板との摩擦を考慮した移動距離により乾式キャスク同士の衝突性を評価する。

(b) 評価方法

乾式キャスクがコンクリート床板上を一定の摩擦力を受けて移動した際の移動距離の計算条件は以下の通り。

- ・床面からの摩擦力以外に移動を妨げるものはないとする。
- ・乾式キャスクは剛体で回転せずにコンクリート床板上を水平移動する。

i. 移動距離の算出

乾式キャスクの運動エネルギーEは

$$E = m \times V_0^2 / 2$$

ここで、 V_0 ：初速(m/s)

m ：質量(kg)

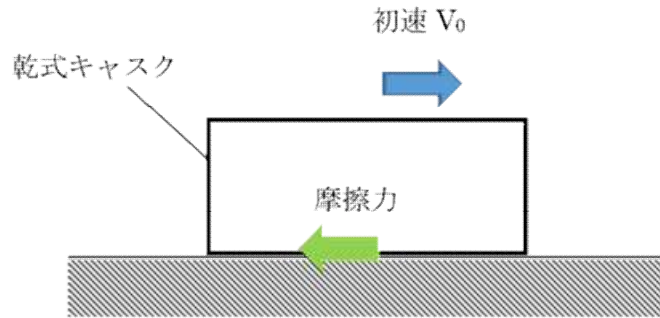
摩擦力により消費されるエネルギーEfは

$$E_f = \mu \times N \times L = \mu \times mg \times L$$

ここで、 μ : 摩擦係数
 N : 垂直抗力(N)
 L : 移動距離(m)

運動エネルギーが摩擦力により消費されるとき、 $E=Ef$ となるため、移動距離 L は

$$L=V_0^2/(2 \times \mu \times g)$$



ii. 初速

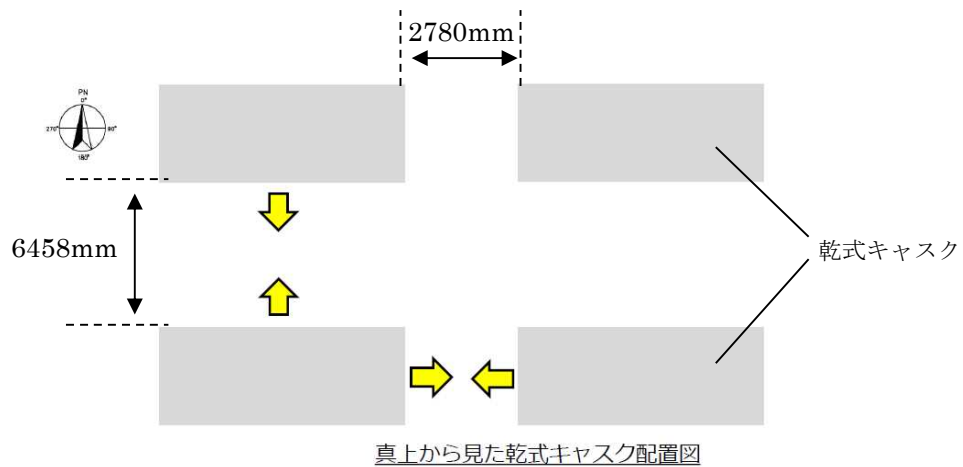
初速の最大値は「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」（以降、審査ガイドという。）で示される保守的な水平方向速度（200cm/s）より 2.0m/s とする。また、参考に 0.5m/s, 1.0 m/s , 1.5 m/s のケースについても評価する。

iii. 摩擦係数

実施計画に記載されている鋼材とコンクリートの摩擦係数を適用する。また、参考に 0.1 から 1.0 の 0.1 刻みについても評価する。

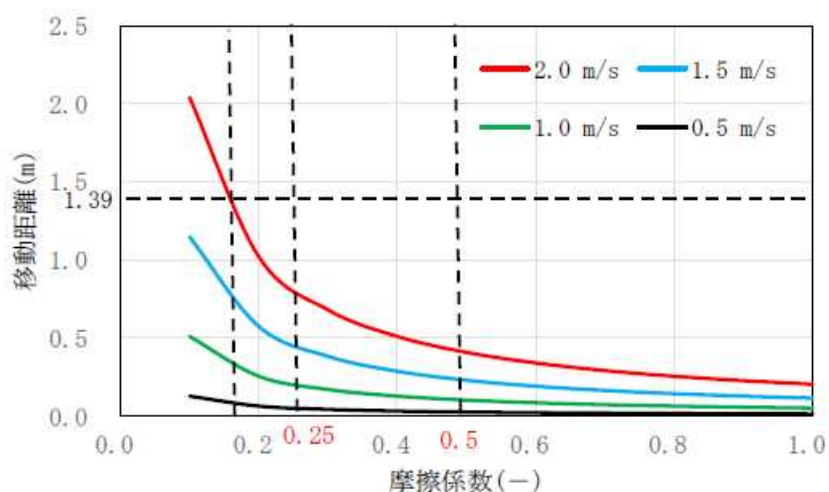
(c) 判定基準

相互のキャスク間距離で距離の短い東西方向を判定基準 1.39m(=2.78/2) とする。



(d) 評価結果

文献^{※1}による鋼材とコンクリート摩擦係数は一般的に 0.5~0.7 が用いられている。一方、実施計画 II-2-11 では滑動評価に鋼材とコンクリートの摩擦係数として 0.25~0.4^{※2}が記載されており、最小値の摩擦係数を 0.25 としても基準値を満足する。さらに、Ss900gal は審査ガイドで示される水平方向加速度 2300gal よりも小さく初速は 2.0m/s よりも低減されるため移動距離はさらに短くなる。以上のことから現実的には乾式キャスク同士の衝突は生じない。



※2：実施計画 II-2-11 添付資料 4-2

表 3.1-2 摩擦係数と鉛直震度の組合せ

CASE	摩擦面	摩擦係数	備考
1	鋼材とコンクリート	0.40	鋼構造設計規準 (日本建築学会)
2	鋼材とコンクリート	0.25	電中研報告書「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立-地震時のキャスク転倒評価-」(研究報告:U92037) コンクリート及び鋼材表面の塗装条件を様々に変化した試験結果のうち最も不利な摩擦係数。
3	鋼材とコンクリート	0.25	CASE2 に鉛直震度 (0.45G) による鉛直力 N を低減させた場合。
4	鋼材と鋼材	0.35~0.40	機械工業ハンドブック改訂版 「鋼材とコンクリート」の評価により包絡されるため、省略。

※1：地震動を受ける貯蔵架台付きキャスクのロッキングモデル化手法の提案 (日本機械学会論文誌 Vol.82, No.834, 2016)

EXPERIMENTAL STUDIES OF FREE-STANDING SPENT FUEL STORAGE CASK SUBJECTED TO STRONG EARTHQUAKE (PATRAM 2007 October 21-26, 2007, Miami, Florida, USA)

乾式キャスクの回転を考慮する場合の移動距離

乾式キャスクが水平移動ではなく、回転移動する場合を評価する。
乾式キャスクを初速 V_0 で回転する中空円筒に模擬する。回転の初期角速度 ω_0 は、以下となる。

$$\omega_0 = V_0 / r$$

ここで、 r : 中空円筒の外半径(m)

V_0 : 初速(m/s)

回転の運動エネルギー E は、以下となる。

$$E = I \times \omega_0^2 / 2$$

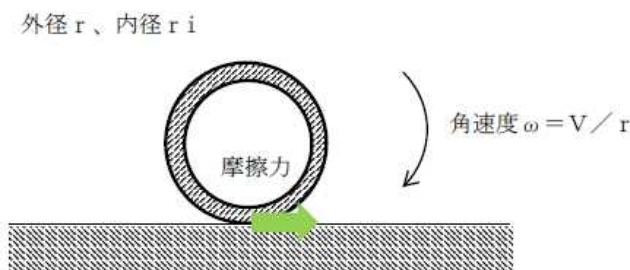
ここで、 I : 慣性モーメント($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

$$I = m \times (r^2 + r_i^2) / 2$$

m : 質量(kg)

r : 中空円筒の外半径(m)

r_i : 中空円筒の内半径(m)



中空円筒に摩擦力が作用するとき、摩擦力により消費されるエネルギー E_f は、摩擦力と回転距離 L_1 の積となる。

$$E_f = \mu \times N \times L_1$$

ここで、 μ : 摩擦係数

N : 垂直抗力(N)

$$N = m \times g$$

m : 質量(kg)

g : 重力加速度(m/s^2)

L_1 : 回転距離(m)

中空円筒が静止するのは、運動エネルギーをすべて摩擦力によるエネルギーで消費される
ときである。その際の回転距離 L_1 は、 $E = E_f$ より、以下となる。

$$L_1 = I \times \omega_0^2 / (2 \times \mu \times N)$$

$$= m \times (r^2 + r_i^2) / 2 \times (V_0 / r)^2 / (2 \times \mu \times m \times g)$$

$$= (r^2 + r_i^2) \times V_0^2 / (4 \times \mu \times g \times r^2)$$

本文の移動距離 $L = V_0^2 / (2 \times \mu \times g)$ との比をとると、1を下回るので本文の移動距離の評価が保守的である。

$$L_1 / L = (r^2 + r_i^2) / (2 \times r^2) < 1$$

(3) コンクリートモジュールの落下・転倒による評価

地震によりコンクリートモジュールが損傷し、貯蔵中の乾式キャスクにコンクリートモジュールが落下・転倒した場合の影響を評価する。

コンクリートモジュール損傷により想定される安全機能への影響を下表に整理する。

評価 ケース	衝突位置	影響
a	鉛直上側 トラニオン	鉛直上側トラニオンへの衝突により、トラニオン取付位置の 胴が損傷し、閉じ込め機能を喪失
b	胴フランジ部	密封シール部が変形し、閉じ込め機能を喪失
c	外筒 伝熱フィン	外筒部が破損し、線量が増加 伝熱フィンが破断し、除熱機能が低下

想定される衝突事象におけるコンクリートモジュールの形状、落下エネルギーを下表の通りまとめる。「(1) 支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下評価」と同様に、900gal の地震により支持架台が即座かつ完全に支持機能を失うことは考えにくいですが、本評価では保守的に落下エネルギーを大きくするため支持架台を無視し乾式キャスクが床面に置かれた場合の衝突評価を行う。

想定される衝突事象の内、落下エネルギーが大きくなる以下の3条件について評価を行う。下表においては黒枠で囲んだ部分が該当する。

- a. 天板（全体）が水平姿勢でトラニオンに衝突する場合
- b. 天板（全体）が傾斜してフランジ部側面に衝突する場合
- c. 天板（パネル1枚）が水平姿勢および傾斜姿勢で外筒に衝突する場合

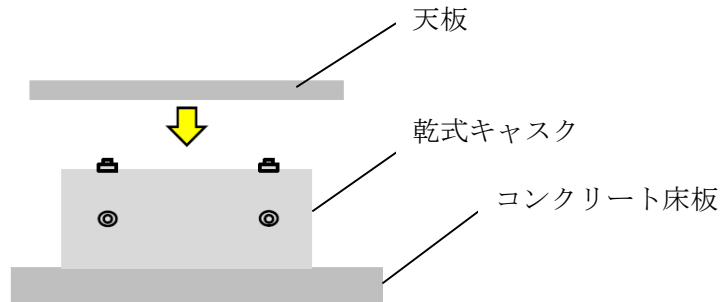
想定される衝突事象と落下エネルギー

衝突物	質量 (kg)	寸法 (mm)	姿勢	キャスク衝突位置	重心変位 (mm)	落下エネルギー (N・mm)
天板	16,300 (全体)	4680×7100 ×200	水平	トラニオン	1261	2.0×10 ⁸
			傾斜	胴フランジ部	807	1.3×10 ⁸
	5,500 (パネル1枚)	4680×2370 ×200	水平	トラニオン 外筒	1261 1348	6.7×10 ⁷ 7.1×10 ⁷
			傾斜	トラニオン 外筒	631 674	3.3×10 ⁷ 3.6×10 ⁷
側壁 (蓋側)	8,000 (全体)	3800×4280 ×200	傾斜	胴フランジ部	113	8.9×10 ⁶
	4,000 (パネル1枚)	3800×2140 ×200				4.5×10 ⁶
側壁 (底部側)	8,000 (全体)	3800×4280 ×200	傾斜	キャスク 底部	49	3.9×10 ⁶
	4,000 (パネル1枚)	3800×2140 ×200				2.0×10 ⁶
側壁 (側部側)	13,200 (全体)	3800×7100 ×200	傾斜	外筒	251	3.3×10 ⁷
	4,400 (パネル1枚)	3800×2370 ×200		外筒	251	1.1×10 ⁷

a. 天板（全体）が水平姿勢でトラニオンに衝突する場合

(a) 評価方針

天板パネル 3 枚が連結し形状を維持したまま水平姿勢でトラニオンに衝突する場合を評価し、荷重作用位置が同じ乾式キャスク水平落下事象での衝突荷重に包絡されることを示す。



(b) 評価方法

コンクリートモジュール天板の許容曲げモーメントに相当する限界荷重を算出する。トラニオンとの衝突時に限界荷重以上の荷重が作用する場合、コンクリートモジュール天板は曲げ荷重により破損するため、それ以上の荷重を支えない。

コンクリートモジュール天板には上下部トラニオンから荷重が作用し、最大曲げモーメントは上部トラニオンからの荷重が作用する位置となる。

最大曲げモーメントの値は以下の式となる。

$$M = w \times a^2 / 2$$

ここで、 w : 分布荷重(N/mm)

$$w = F / L$$

ここで、 F : 上下部トラニオンからコンクリートモジュールに作用する荷重(N)

L : コンクリートモジュール長さ(mm)

a : 寸法(mm)

一方、コンクリートモジュール天板の許容曲げモーメントは $2.454 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{mm/mm}$ (実施計画書Ⅱ-2-13-添 3-246、鉄筋の引張許容応力より算出した値) であり、コンクリートモジュール天板の幅は 4680 mm のため、最大曲げモーメント M は

$$M = 2.454 \times 10^4 \times 4680 = 1.15 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{mm}$$

以上より、コンクリートモジュール天板に作用する荷重 F は

$$F = 2 \times M \times L / a^2 = 2 \times 1.15 \times 10^8 \times 7100 / 1653^2 = 6 \text{MN}$$

乾式キャスクに作用する荷重は力のつり合いより 6MN となる。

(c) 判定基準

「(1) 支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下評価」にて、乾式キャスクが水平落下した場合のトラニオンへの衝突荷重は 40MN であり、この値を基に静解析により機能維持評価を行っている。

したがって、乾式キャスクに作用する荷重が 40MN 以下であることを確認する。

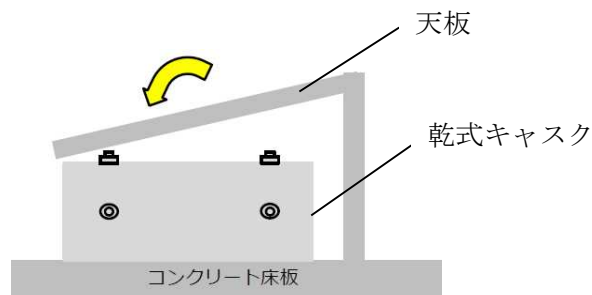
(d) 評価結果

コンクリートモジュール天板が水平落下した場合に乾式キャスクに作用する荷重は 6MN であり、乾式キャスクの水平落下時の衝突荷重 40MN 以下であるため、本事象は乾式キャスクの落下事象に包絡される。

b. 天板（全体）が傾斜してフランジ部側面に衝突する場合

(a) 評価方針

天板パネル 3 枚が連結し形状を維持したまま傾斜してフランジ部側面に落下する場合を評価し、荷重作用位置が同じ後述するクレーン衝突事象での衝突荷重に包絡されることを示す。



(b) 評価方法

「a. 天板（全体）が水平姿勢でトラニオンに衝突する場合」と同様、コンクリートモジュール天板の許容曲げモーメントに相当する限界荷重を算出する。

最大曲げモーメントの式及びコンクリートモジュールの寸法より乾式キャスクに作用する荷重は 5MN となる。

(c) 判定基準

乾式キャスクの荷重作用位置（フランジ部側面）は、「(5) クレーンの転倒による評価 参考資料 3」におけるクレーン転倒時の衝突位置と同じで、その時の衝突荷重は 41MN であり、この値を基に静解析により機能維持評価を行っている。

したがって、乾式キャスクに作用する荷重が 41MN 以下であることを確認する。

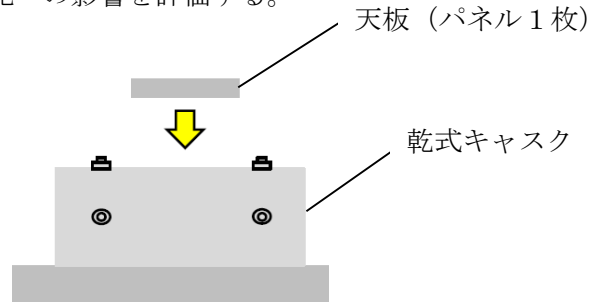
(d) 評価結果

コンクリートモジュール天板が傾斜して落下した場合に乾式キャスクに作用する荷重は 5MN であり、クレーン転倒時の衝突荷重 41MN 以下であるため、本事象はクレーン転倒事象に包絡される。

c. 天板（パネル1枚）が水平姿勢および傾斜姿勢で外筒に衝突する場合

(a) 評価方針

天板パネル1枚が形状を維持したまま水平姿勢および傾斜姿勢で落下し外筒に衝突する場合を評価する。外筒への衝突により、外筒及び伝熱フィンの損傷範囲を評価し、遮へい機能及び除熱機能への影響を評価する。



(b) 評価方法

外筒に荷重が作用した場合、外筒のせん断による破断が生じる前に伝熱フィンが圧縮されて塑性変形する。そのため、コンクリートモジュール天板落下の落下エネルギー E に対して外筒のせん断に要するエネルギー E_s および伝熱フィンの圧縮変形エネルギー E_c が大きければ、外筒が破断してレジンが欠落することはない。

コンクリートモジュール天板の落下エネルギー E は以下の式となる。

$$E = m \times g \times H$$

ここで、 m ：落下物の質量(kg)

g ：重力加速度(m/s²)

H ：落下高さ(mm)

外筒のせん断に要するエネルギー E_s は以下の式となる。

$$E_s = D \times t^2 \times S / 2$$

ここで、 D ：破断領域の周長(mm)

t ：外筒の板厚(mm)

S ：外筒のせん断強さ(MPa)

伝熱フィンが圧縮されて塑性変形するエネルギー E_c は次式で与えられる。

$$E_c = A \times S_u \times L$$

ここで、 A ：荷重を受け持つ伝熱フィンの総面積(mm²)

S_u ：伝熱フィンの設計引張強さ(MPa)

L ：伝熱フィンの圧縮変形長さ（伝熱フィン高さ）(mm)

(c) 判定基準

コンクリートモジュール天板の落下エネルギー E が外筒のせん断に要するエネルギー E_s と伝熱フィンの圧縮変形エネルギー E_c の合計を超えなければ外筒が破断に至ることはないため $E < E_s + E_c$ であることを確認する。

(d) 評価結果

下表に示す通り、いずれの場合でも、落下エネルギーが外筒のせん断エネルギーと伝熱フィンの圧縮変形エネルギーの合計を超えないため、外筒が破断することはない。

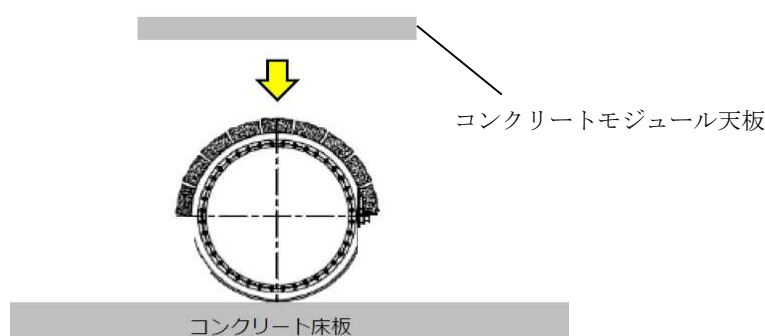
落下物	質量 (kg)	落下高さ (mm)	落下物の 落下姿勢	落下エネ ルギー (N・mm)	外筒のせん断+伝 熱フィン圧縮エネ ルギー (N・mm)		外筒の せん断 の有無
					外筒	フィン	
天板 (パネル 1 枚)	5,500	1348	水平	7.3×10^7	外筒	2.1×10^8	無
					フィン	2.5×10^9	
					合計	2.7×10^9	
		674	傾斜	3.6×10^7	外筒	3.4×10^7	無
フィン	3.2×10^8						
合計	3.5×10^8						

(4) コンクリートモジュールの落下・転倒による乾式キャスクの除熱評価

(a) 評価方針

900gal の地震時にコンクリートモジュールの一部の部位が許容値を 1 割程度超過するものの、コンクリートモジュールには鉄筋があり、完全に崩落することは考えにくい。コンクリートモジュール側板の倒壊及び天板の落下により乾式キャスクが覆われた場合の除熱評価を行う。

天板にも鉄筋が入っており、落下試験結果*からも乾式キャスクと天板にはある程度の空隙が生じると考えられるが、保守的に乾式キャスクの上半分に対して乾式キャスクと天板に空隙が全くなく天板が張り付いて覆う場合を評価する。



*平成 2 年度旧通産省委託研究「原子力発電所使用済燃料貯蔵技術確証試験」で電力中央研究所が実施



(b) 評価方法

乾式キャスクの上半分には厚さ 200mm のコンクリートモジュール天板が密着状態で覆い、さらに保守的に断熱と設定して評価する。下半分については物理的にコンクリートが密着しないため、自然対流熱伝達、放射伝熱を考慮する。

定常状態の温度分布を時刻 0 とし、1000h (約 42 日) までの温度変動を評価する。

(c) 判定基準

現時点での実施計画に記載されている制限温度は、通常の発電炉での設計貯蔵期間で保管を継続する場合の値である。地震発生後は乾式キャスクの健全性を確認することから、地震発生後、保守的に数年の期間における安全機能が確保できるかを評価する。表 1 に安全機能が確保できる制限温度*を示す。

*東海第二発電所における重大事故の拡大防止に係る影響評価で評価実績がある。

「実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準」への適合状況について (平成 29 年 4 月 日本原子力発電株式会社東海第二発電所)

表1 各部材における制限温度

マスキング箇所

部位	材質	制限温度		根拠
		実施計画記載値	本評価	
新型8×8燃料	ジルカロイ-2	200		学会標準 ^{※1} 安全機能を確保する期間において、累積クリープひずみが1%以下となる温度
新型8×8ジルコニウムライナ燃料		300		
密封容器、外筒等 密封蓋締付けボルト	炭素鋼、合金鋼	350	350	構造規格
金属ガスケット	アルミニウム合金 ニッケル基合金	130		電中研 ^{※2} 安全機能を確保する期間において、累積LMPが 11.09×10^3 以下となる温度
バスケット	ボロン添加ステンレス鋼	300	300	臨界防止の観点でバスケットの変形を抑制するうえで構造強度が確保される温度
中性子遮蔽材	レジン	150		一般に熱分解が生じるとされる温度以下 ^{※3}

- ※1：日本原子力学会標準、使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2021、附属書N
 ※2：加藤治、伊藤千浩、「電力中央研究所報告 使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」、(一財)電力中央研究所、U92009（平成4年7月）
 ※3：例えば、熱重量・示差熱（TG・DTA）分析で、熱分解が観察されない温度

(d) 評価結果

部位ごとの最高温度変化を下図に示す。温度上昇は400h（約2週間）程度でほぼ定常となった。各部材の1000h経過時の温度と判定基準は下表の通りで、すべての部位で安全機能が確保できる制限温度を満足できる結果となった。

マスキング箇所



表2 各部材における評価結果

マスキング箇所

部位		評価結果	制限温度	
			実施計画記載値	本評価
新型 8×8 燃料			200	
新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料			300	
密封容器、外筒等 密封蓋締付けボルト	胴		350	350
	一次蓋			
	二次蓋			
金属ガスケット	一次蓋金属ガスケット		130	
	二次蓋金属ガスケット			
バスケット			300	300
中性子遮蔽材	側部		150	
	蓋部			
	底部			

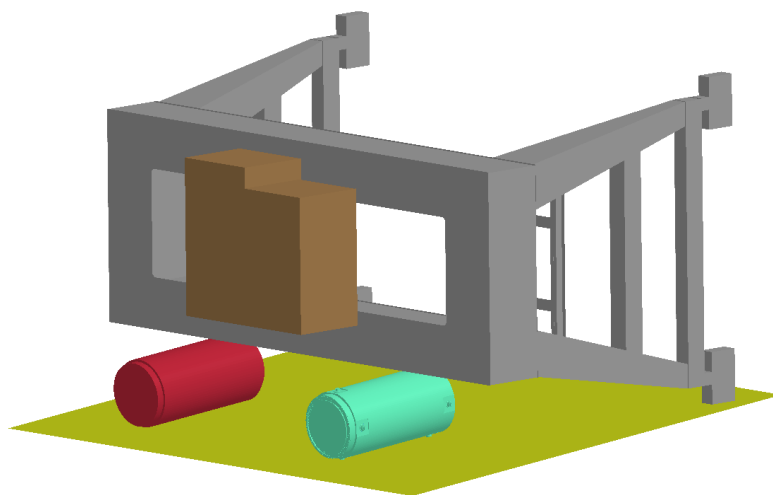
(5) クレーンの転倒による評価

(a) 評価方針

クレーンは乾式キャスクの搬出入やコンクリートモジュールの組み立てに使用し、使用期間は全体の供用期間に対して十分小さいため、待機位置におけるクレーン転倒時の乾式キャスクへの影響を評価する。(参考資料1)

また、クレーンが壊れて倒れるよりも、形状を維持したまま倒れるケースのほうが衝突荷重が大きいため、図のように形状を維持した状態のクレーンがコンクリート床板に置かれた乾式キャスクの胴下部外筒表面へ回転転倒する場合を評価する。

動解析の結果より、乾式キャスク 1 基への衝突よりも 2 基への衝突のほうが衝突荷重が大きいため乾式キャスク 2 基への衝突とする。(参考資料2)



(b) 評価方法

転倒したクレーンが乾式キャスクに衝突する際に生じる衝突荷重及び計算条件は以下の通り。

- ・ 乾式キャスクの外筒は剛とする。
- ・ 衝突によりクレーンの桁に塑性変形が生じるとする。

i. 衝突荷重の算出

桁の変形量及び荷重作用時間より衝突荷重は 48MN となる。

構造解析コード ABAQUS を用いて 0° ～ 180° 方向をモデル化したハーフモデルを使用し、密封シール部及び締付けボルトの応力評価を行う。

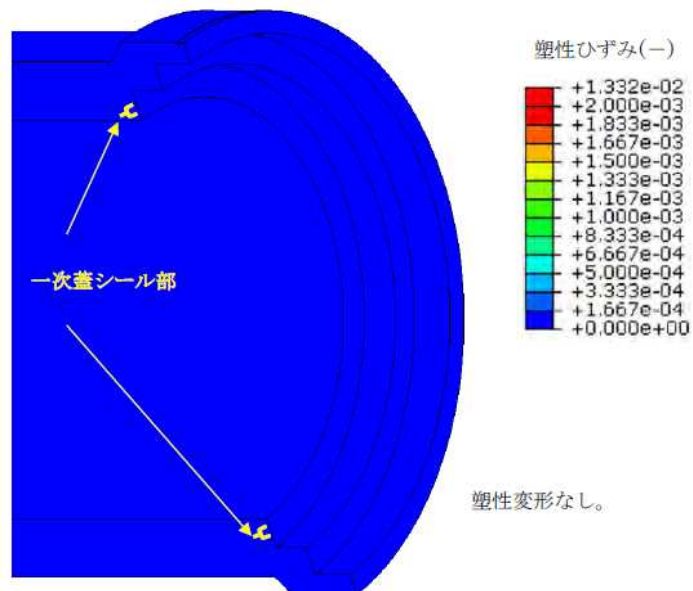
(c) 判定基準

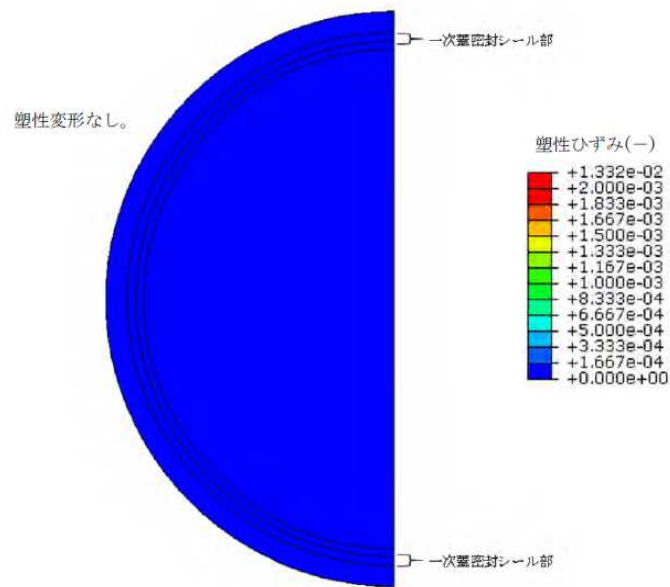
「(1) 支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下評価」と同様に、判定基準は密封機能評価の判定基準として下表の内容とする。

評価部位	判定基準	備考
胴体密封シール部	おおむね弾性範囲	塑性ひずみ 0.2%以下
一次蓋密封シール部	おおむね弾性範囲	塑性ひずみ 0.2%以下
一次蓋締付けボルト	848MPa	ボルト材料の設計降伏点

(d) 評価結果

胴体密封シール部及び一次蓋密封シール部に生じるひずみを図に示す通り、塑性ひずみは発生せず判定基準を満足する。また、一次蓋締付けボルトに生じる応力は表の通りで判定基準を満足する。





評価部位	一次応力		判定基準
	引張応力	引張+曲げ応力	
一次蓋締付けボルト	255MPa	286MPa	848MPa

クレーン使用中における Ss 発生 の 時間確率

クレーン使用中における Ss 発生 の 時間確率は次式により計算される。

$$\text{時間確率} = \frac{\text{クレーン使用時間} \times \text{仕立て基数}}{\text{燃料取り出し期間}} \times \text{Ssの発生確率}$$

	乾式キャスク取扱 ^{※1}	コンクリートモジュール組立 ^{※2}	備考
クレーン使用時間	20 分/基	10 時間/基	乾式キャスク 1 基あたりの実績
仕立て基数	58 基		増設後 95 基—2022/4/27 現在 37 基
燃料取り出し期間	50 年		輸送貯蔵兼用キャスクの設計貯蔵期間（実施計画 2.13 に記載）
Ss 発生確率	$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}/\text{年}$		JEAC4601-2008
時間確率	$2.2 \times 10^{-8} \sim 4.4 \times 10^{-10}$	$6.6 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-8}$	

※1：乾式キャスク取扱とは、輸送架台上の乾式キャスクをクレーンで吊って、支持架台上に移動するまでの状態

※2：コンクリートモジュール組立とは、コンクリートモジュールをクレーンで吊ってコの字に組み立てるまでの状態及び乾式キャスク設置後、残りの天板・側板を組み立てるまでの状態

クレーンの使用期間はキャスク仮保管設備全体の供用期間に十分に小さいため、設計で想定する Ss900gal の地震動と重畳して起きる確率は十分小さい。

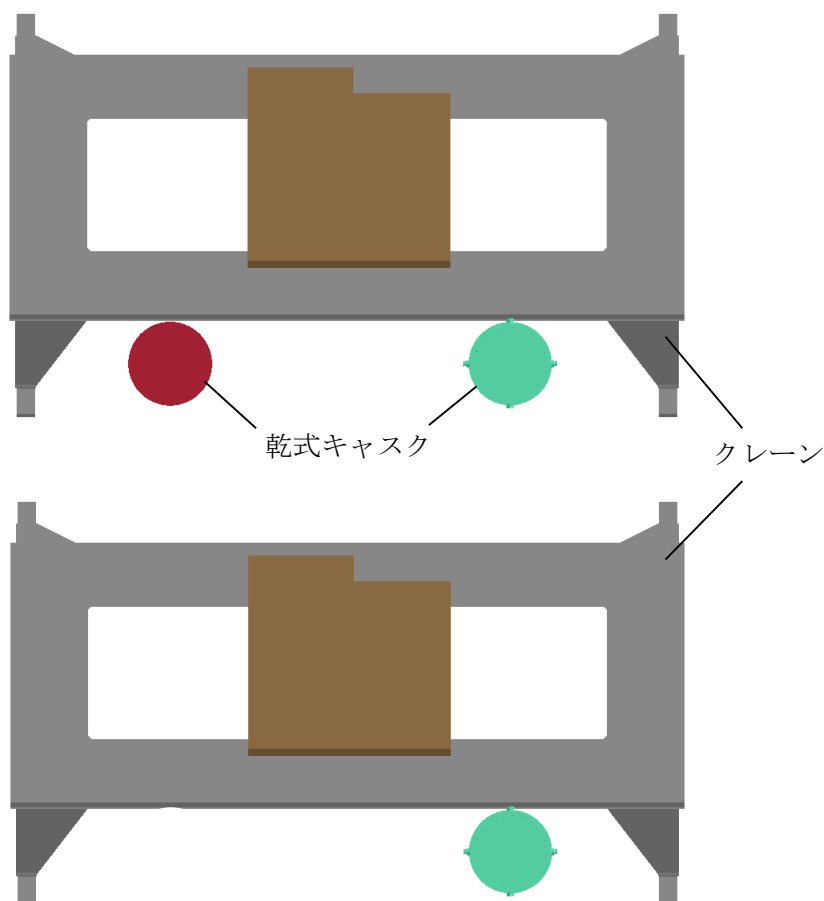
クレーン転倒時のキャスク衝突基数による衝突荷重の比較

(a) 評価方針

本評価においては、クレーンの転倒による乾式キャスクへの衝突荷重評価に関して、乾式キャスクの基数が 1 基の場合と 2 基の場合を比較する。

本文の評価方針と同様に、以下の条件で評価する。

- ・クレーン待機位置から転倒する。
- ・クレーンは形状を維持したまま転倒する
- ・乾式キャスクの胴下部外筒表面へ回転転倒する。



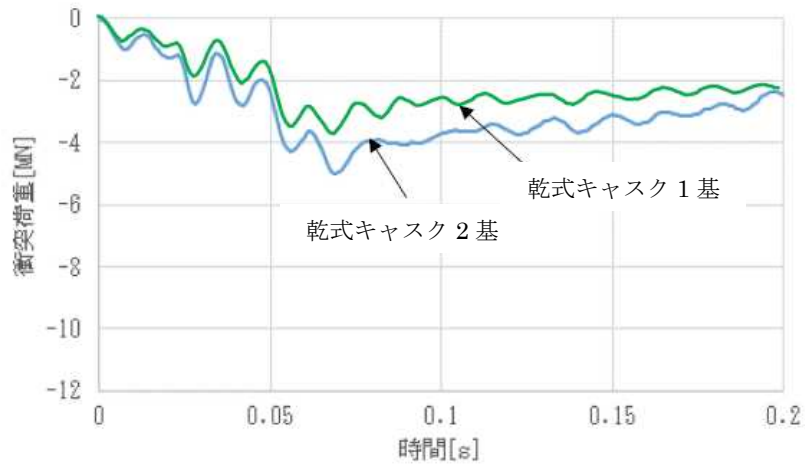
クレーン転倒時に真横から見た図

(b) 評価方法

動的解析（解析コード LS-DYNA）により評価を行う。

(c) 評価結果

動的解析による鉛直方向荷重時刻歴挙動を下図に示す。衝突荷重の最大値を下表に示す。1基への衝突よりも2基への衝突のほうが衝突荷重が大きい結果が得られた。



	乾式キャスク 1 基	乾式キャスク 2 基
衝突荷重	4MN	5MN

クレーン転倒による乾式キャスクフランジ部側面への衝突について

(a) 評価方針

本評価においては、乾式キャスクの密封機能に影響するフランジ部側面にクレーンが転倒した場合を評価する。

本文の評価方針と同様に、以下の条件で評価する。

- ・クレーン待機位置から転倒する。
- ・クレーンは形状を維持したまま転倒する
- ・乾式キャスク 2 基にクレーンが回転転倒する。

(b) 評価方法

本文の評価方法に同じ。

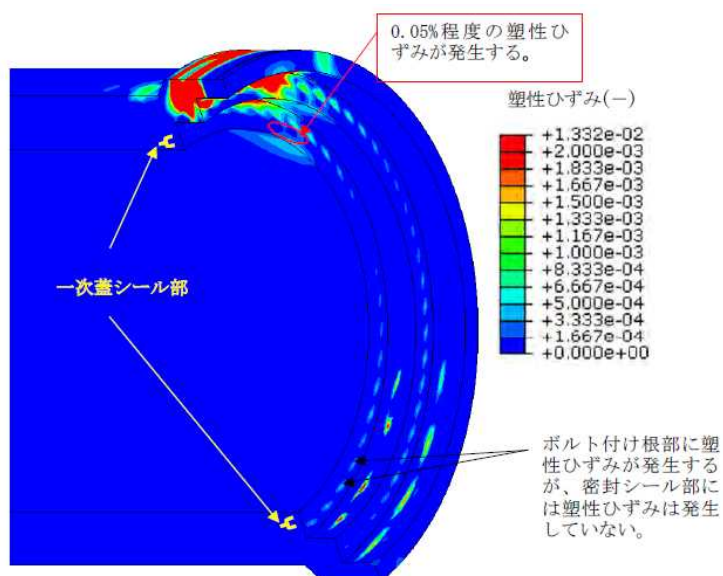
乾式キャスクに作用する衝突荷重は 41MN となる。

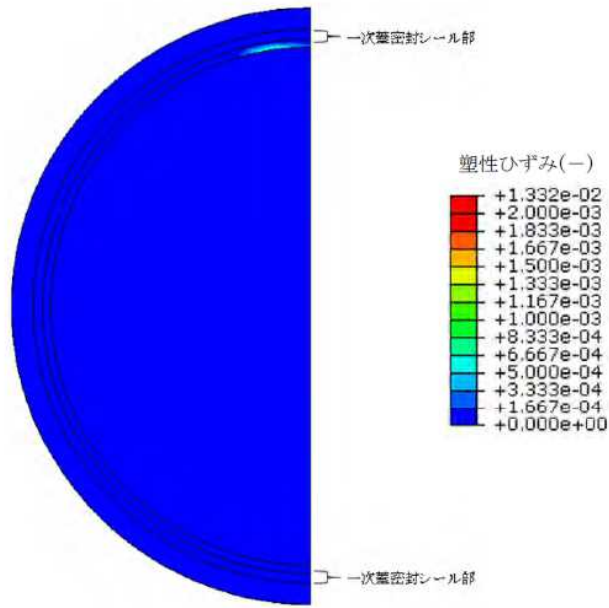
(c) 判定基準

本文の評価方法に同じ。

(d) 評価結果

胴体密封シール部及び一次蓋密封シール部に生じるひずみを図に示す。0.05%程度の塑性ひずみは生じるもののおおむね弾性範囲で判定基準を満足する。また、一次蓋締付けボルトに生じる応力は表の通りで判定基準を満足する





評価部位	一次応力		判定基準
	引張応力	引張+曲げ応力	
一次蓋締付けボルト	335MPa	701MPa	848MPa

2.4 耐震クラス分類

「2.3 波及的影響評価」より公衆被ばく線量を評価し耐震クラスを設定する。

(1) 乾式キャスク

増設される 30 基分すべての燃料が気中に露出（遮へい効果は考慮せず）し、その状態が 7 日間継続した場合、公衆被ばく線量は約 32Sv*となり、Sクラスに分類される。

※燃料 1 体分の UO_2 を点線源とした時の直接線及びスカイシャイン線の敷地境界線量は約 $91 \mu\text{Sv/h}$ より、69 体収納の増設キャスク 30 基分の燃料が 7 日間気中に露出した場合の公衆への被ばく線量は次のように計算される。

$$69 \text{ 体} \times 30 \text{ 基} \times 91 \mu\text{Sv/h} \times 24\text{h} \times 7 \text{ 日} \approx 32\text{Sv}$$

(2) 支持架台

乾式キャスクへの波及的影響はなく、キャスクの安全機能は維持されるため公衆への被ばく影響はない。

また、支持架台自体の安全機能（支持機能）喪失による公衆への被ばく影響もない。

以上より、耐震クラスは Cクラスに分類される。

(3) コンクリートモジュール

乾式キャスクへの波及的影響はなく、キャスクの安全機能は維持されるため公衆への被ばく影響はない。

一方、コンクリートモジュールはそれ自体で遮へい機能を有しているため、転倒または倒壊により公衆への被ばく影響が生じる。仮に全 95 基*のコンクリートモジュールが倒壊した場合、敷地境界線量は約 $61 \mu\text{Sv/y}$ から約 $540 \mu\text{Sv/y}$ に増加する見込み。さらに、当該設備は長期間使用する（実施計画では設計貯蔵期間は 50 年と記載）ことから耐震クラスは B+クラスに分類される。

※今回の対象は増設する 30 基であるが、その場合でも $50 \mu\text{Sv}$ を超える公衆への被ばく影響があるため耐震クラスは変わらない。

(4) クレーン

乾式キャスクへの波及的影響はなく、キャスクの安全機能は維持されるため公衆への被ばく影響はない。

また、クレーン自体の安全機能喪失による公衆への被ばく影響もない。

以上より、耐震クラスは Cクラスに分類される

なお、周辺設備への波及的影響について、待機位置からの転倒により最大 2 基分のコンクリートモジュールを倒壊させる恐れがあるが、その際の公衆への被ばく影響は小さい。

（評価中）

(5) コンクリート基礎

乾式キャスクへの波及的影響はなく、キャスクの安全機能は維持されるため公衆への被ばく影響はない。

また、コンクリート基礎自体の安全機能喪失による公衆への被ばく影響もない。

ただし、周辺設備への波及的影響について、コンクリート基礎の安全機能喪失によりコンクリートモジュールの安全機能が損なわれる可能性があるため、耐震クラスはコンクリートモジュールと同等の B+クラスに分類される。

2.5 耐震評価

「2.4 耐震クラス分類」に応じた耐震評価を実施し、各設備の安全機能が維持されることを確認する。

(1) 乾式キャスク

➤ 評価方針※

Ss900 の地震動に対して、Ss600 の既存評価結果を用いて余裕率の範囲にあることを確認する。また、既存評価は水平方向加速度が1方向のみ作用しているのに対して、本評価では作用する水平方向加速度が2方向のため、前述の余裕率にさらに1.5倍（加速度の二乗和平方根 $\sqrt{2}$ を丸めた数値）の余裕を見込んで評価する。

※全評価対象部位に対して ABAQUS による解析を実施中

➤ 評価方法

既存 Ss600 と Ss900 の設計震度の応答比を算出し、これに1.5を乗じた基準値を算出。既存評価の余裕率と比較し「基準値<余裕率」であることを確認する。

➤ 適用規格・基準

使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)

➤ 固有周期

計算モデル及び設備の仕様が既存評価と同じことから固有周期は既存評価と同様。

➤ 設計震度

固有周期は0.05秒以下であることから剛体とみなすことができ、設計用地震力は1.2ZPAとする。

➤ 基準値

$$\text{応答比} = \max(1.13/0.79, 0.84/0.49) = 1.71$$

$$\text{基準値} = \text{応答比} \times 1.5 = 2.57$$

➤ 評価結果

下表は既存の Ss600 の評価結果であり、余裕率は基準値 2.57 を上回ることを確認。よって、すべての部位で Ss900 において耐震性を確保できる見込み。

部位	一次一般膜応力			一次膜+一次曲げ応力			一次+二次応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
一次蓋	4	251	62.8	18	377	20.9	49	366	7.5
胴	2	251	125.5	11	377	34.3	19	366	19.3
底板	3	251	83.7	10	377	37.7	11	366	33.3
底部中性子遮へい材カバー	5	282	56.4	45	424	9.4	15	465	31.0
一次蓋密封シール部	—	—	—	13	183	14.1	59	183	3.1

部位	平均支圧応力		
	計算値	許容応力	余裕率
胴	2	377	188.5

部位	平均引張応力			平均引張応力+曲げ応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
一次蓋締付けボルト	243	831	3.4	351 [※]	831	2.4 [※]

※ABAQUSによる解析評価結果（暫定値）

部位	一次一般膜応力			一次膜+一次曲げ応力			一次+二次応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
二次蓋	1	286	286.0	30	429	14.3	63	474	7.5
二次蓋密封シール部	—	—	—	17	183	10.8	37	183	4.9

部位	平均引張応力			平均引張応力+曲げ応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
二次蓋締付けボルト	245	848	3.5	273	848	3.1

部位	一次一般膜応力			一次一般膜+一次曲げ応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
バスケットプレート	2	291	145.5	7	437	62.4

部位	平均せん断応力			平均支圧応力			圧縮応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
バスケットプレート	1	175	175.0	2	404	202.0	2	176	88.0

部位	一次応力								
	圧縮応力			せん断応力			曲げ応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
トラニオン	13	590	45.4	42	341	8.1	81	591	7.3

部位	一次応力		
	垂直応力とせん断応力の組合せ		
	計算値	許容応力	余裕率
トラニオン	96	591	6.2

部位	一次+二次応力								
	圧縮応力			せん断応力			曲げ応力		
	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率	計算値	許容応力	余裕率
トラニオン	13	590	45.4	84	682	8.1	163	1182	7.3

(2) 支持架台

耐震性を確保できる見込み。

(3) コンクリートモジュール

1/2Ss450 で耐震性を確保できる見込み。

(4) クレーン

耐震性を確保できる見込み。

(5) コンクリート基礎

1/2Ss450 で耐震性を確保できる見込み。