

# 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

2022年4月27日

**TEPCO**

---

東京電力ホールディングス株式会社

- これまでキャスク仮保管設備は乾式キャスク以外の付帯設備も乾式キャスク本体と同じ耐震性で評価してきた。
- 一方、「原子力発電所施設内での輸送・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」（以下、審査ガイド）が新たに制定され、この審査ガイドの趣旨は乾式キャスク本体の堅牢性に着目した内容であり、合理的な立て付けになっている。



- 本質的な乾式キャスク堅牢性に着目して1F特定原子炉施設におけるキャスク仮保管設備（増設）の本質的かつ技術的な耐震評価を構築する

# 評価方針

---

## 1. 乾式キャスク本体の耐震性

## 2. 乾式キャスク本体以外の付帯設備の損傷等による乾式キャスク本体の健全性

○地震による乾式キャスクへの影響シナリオ抽出が必要十分か

○不確定性がある場合、その不確定性に対して十分な保守性があるか

### 評価プロセス

乾式キャスク本体の耐震性

除熱・密封・遮へい・臨界防止

抽出されたシナリオが必要十分か

シナリオ抽出・評価・運用分析

技術的に十分な保守性があるか

評価モデルの技術的な妥当性

現設計で上記を満たすか

乾式キャスクへの影響が無視できない場合は追加対策

# 乾式キャスク

---

## 1. 乾式キャスク本体の耐震性

## 2. 乾式キャスク本体以外の付帯設備の損傷等による乾式キャスク本体の健全性

○地震による乾式キャスクへの影響シナリオ抽出が必要十分か

○不確定性がある場合、その不確定性に対して十分な保守性があるか

### 評価プロセス

乾式キャスク本体の耐震性

応答倍率法を用いた耐震評価

抽出されたシナリオが必要十分か

技術的に十分な保守性があるか

現設計で上記を満たすか

## ■ 基準地震動Ss900galにおける乾式キャスクの耐震性を応答倍率法を用いて評価

### ➤ 評価方法

従来Ss600とSs900の設計震度の応答比を算出。従来Ss600の既存評価の余裕率と比較し、応答比以上の余裕率であることを確認する。

### ➤ 固有周期

計算モデル及び乾式キャスク、支持架台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。

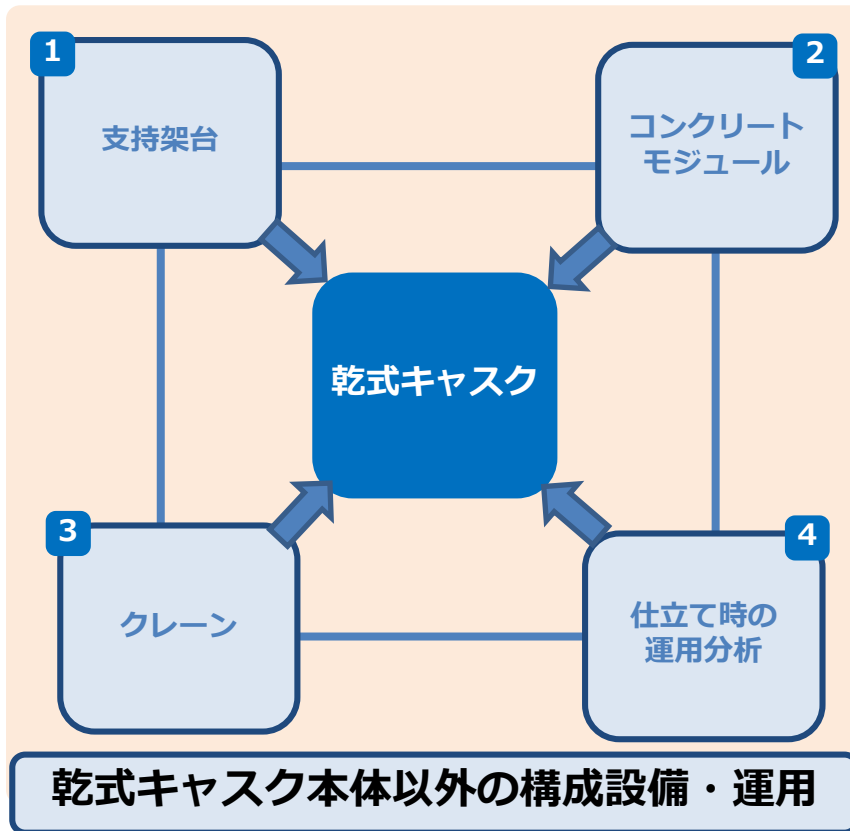
	既存評価（従来Ss600）	本評価（Ss900）
1.2ZPA（水平）	0.79G	1.13G
1.2ZPA（鉛直）	0.49G	0.84G

### ➤ 応答比

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

### ➤ 評価結果

すべての部位において余裕率は応答比1.71を上回っているため、Ss900においても耐震性を確保できる見込み



### 1 支持架台

→支持機能喪失による乾式キャスク落下、  
乾式キャスクの衝突性

### 2 コンクリートモジュール

→落下・転倒による乾式キャスクへの  
影響、除熱、遮へい

### 3 クレーン

→転倒による乾式キャスクへの影響

### 4 運用分析

→仕立て作業中の乾式キャスクへの影響  
→監視計装系の要求事項整理

※ 床面に対しては、構成設備が乾式キャスクへの影響がないことを以て、床自体の健全性評価は必要ない

次ページ以降に各シナリオに対する具体的な評価方法を記す

# 支持架台

1. 乾式キャスク本体の耐震性

2. 乾式キャスク本体以外の付帯設備の損傷等による乾式キャスク本体の健全性

○地震による乾式キャスクへの影響シナリオ抽出が必要十分か

○不確定性がある場合、その不確定性に対して十分な保守性があるか

## 評価プロセス

乾式キャスク本体の耐震性

抽出されたシナリオが必要十分か

- ・ 支持機能喪失による乾式キャスク落下
- ・ 支持機能喪失時の乾式キャスク衝突性

技術的に十分な保守性があるか

- ・ 瞬時に支持架台がなくなることはないが、支持架台を無視した保管高さ位置からの水平及び回転落下評価
- ・ ガレキ等による減速効果は無視した衝突性評価

現設計で上記を満たすか

## ■ 支持架台の支持機能喪失により落下した乾式キャスクの安全機能への影響を評価

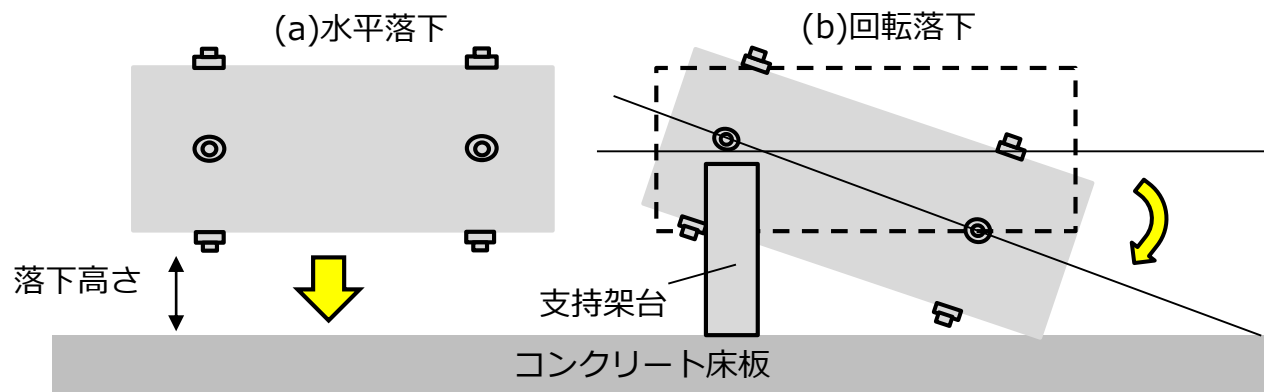
### ➤ 評価条件

#### (a) 水平落下

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と仮定。

#### (b) 回転落下

前後のどちらか両側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支持架台を中心に回転落下すると仮定。

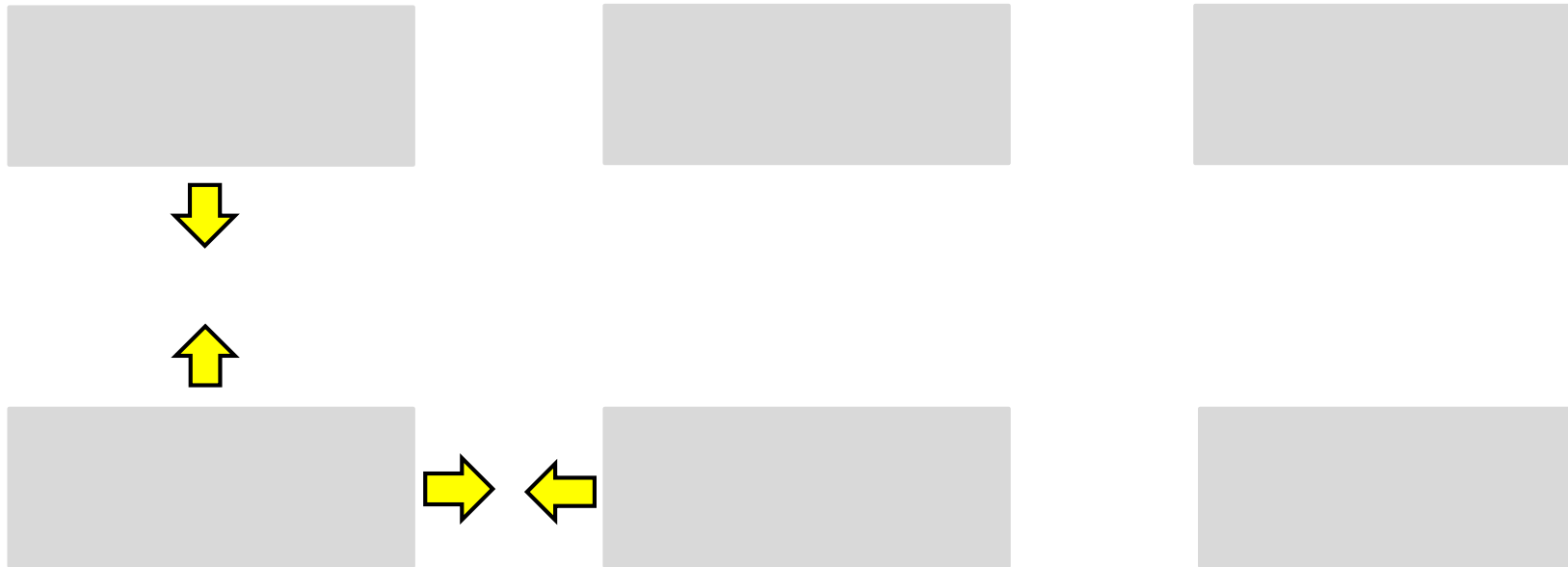
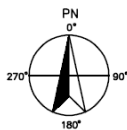




## ■ 支持機能喪失時の乾式キャスク同士の衝突性評価

### ➤ 評価条件

- ・ 支持架台、コンクリートモジュール、トラニオンなどによる減速効果を見せず、円筒形の剛体が床板上を移動すると仮定。
- ・ 衝突する2基の乾式キャスクの移動方向は同一方向だが、図のように保守的に互いが衝突する向きとする。



真上から見た乾式キャスク配置図

### ➤ 評価結果

- ・ 乾式キャスクとコンクリート床面との摩擦による減速効果により、東西方向及び南北方向のいずれも乾式キャスク同士の衝突は起きない見込み。

※すべて暫定結果

	評価対象	落下評価		衝突性評価	判定基準			
		(a) 水平落下	(b) 回転落下					
除熱	伝熱フィン	○	塑性ひずみなし	○	衝突は生じない	・破断に対して十分余裕があること		
	コンクリートモジュールの除熱評価	—	「コンクリートモジュール」で評価	—	同左	—		
密封	一次蓋及び二次蓋締付けボルト	○	降伏応力以下	○	降伏応力以下	○	衝突は生じない	・降伏応力以下
	一次蓋及び二次蓋横ずれ量	○	基準値以下	○	基準値以下	○	衝突は生じない	・基準横ずれ量以下
	フランジ	○	塑性ひずみなし	○	塑性ひずみなし	○	衝突は生じない	・おおむね弾性範囲内
	一次蓋及び二次蓋密封境界部	○	塑性ひずみなし	○	塑性ひずみなし	○	衝突は生じない	・おおむね弾性範囲内

※すべて暫定結果

	評価対象	落下評価		衝突性評価	判定基準			
		(a) 水平落下	(b) 回転落下					
遮へい	外筒	○	塑性ひずみなし	○	塑性ひずみなし	○	衝突は生じない	・破断に対して十分余裕があること
	敷地境界線量	○	落下による影響はない	○	同左	○	衝突は生じない	・1mSv/y以下
臨界防止	燃料被覆管	○	降伏応力以下（鉛直方向最大加速度：バスケット中央で約40G）	○	降伏応力以下（鉛直方向最大加速度：バスケット中央で約30G）	○	衝突は生じない	・弾性範囲内
	バスケット	○	塑性ひずみなし（燃料が収納されていない部位にわずかなひずみが生じるが、臨界防止機能に影響はない）	○	塑性ひずみなし	○	衝突は生じない	・おおむね弾性範囲内

## 【参考】燃料被覆管の応力評価

- 水平落下時、バスケット中央で約40Gの衝撃加速度が生じる（実施した影響評価中、最大の衝撃加速度）
- 設計承認申請書をもとに燃料被覆管の健全性が維持されることを確認する。

0.3m水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果（設計承認申請書から抜粋）

燃料タイプ	新型8×8燃料	新型8×8ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度8×8燃料
衝撃加速度[m/s <sup>2</sup> ]	196	196	196
応力強さ[MPa]	87	97	99
降伏応力[MPa]	611	560	560
余裕率	6.02	4.77	4.65

約20G

$$\text{余裕率} = \frac{\text{降伏応力}}{\text{応力強さ}} - 1$$

- 水平落下時のバスケット中央の最大加速度約40Gは0.3m水平落下時の衝撃加速度約20Gより2倍程度大きいですが、評価結果の余裕率に包絡されるため燃料被覆管の健全性は維持される

# コンクリートモジュール

## 1. 乾式キャスク本体の耐震性

## 2. 乾式キャスク本体以外の付帯設備の損傷等による乾式キャスク本体の健全性

○地震による乾式キャスクへの影響シナリオ抽出が必要十分か

○不確定性がある場合、その不確定性に対して十分な保守性があるか  
評価プロセス

乾式キャスク本体の耐震性

抽出されたシナリオが必要十分か

- ・落下、転倒による乾式キャスクへの衝突
- ・乾式キャスクの除熱機能低下
- ・落下、転倒による遮へい機能低下

技術的に十分な保守性があるか

- ・天板及び側板が形状を維持したまま落下、転倒
- ・鉄筋があり張り付くことはないが、乾式キャスクに張り付き、覆い隠す状態
- ・すべてのコンクリートモジュールがなくなることはないが、遮へい効果を無視

現設計で上記を満たすか

## ■ 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への影響を評価

### ➤ 評価条件

(a) 水平姿勢でトラニオンに衝突

天板パネル3枚が連結し形状を維持したままトラニオンに落下。

(b) 傾斜してフランジ部側面に衝突

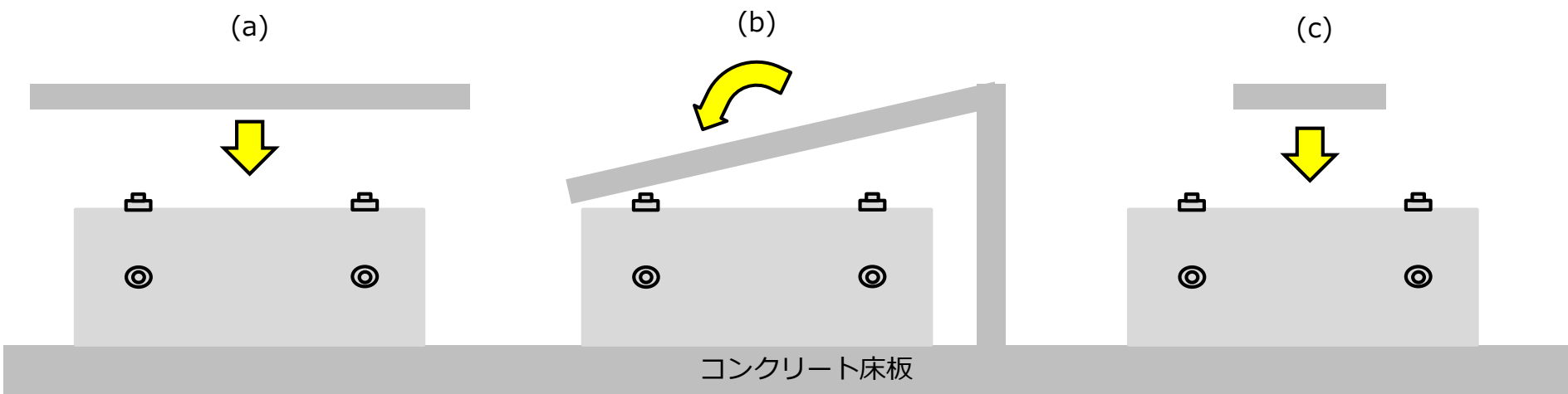
天板パネル3枚が連結し形状を維持したままフランジ部側面に落下。

(c) 水平姿勢で外筒に衝突

天板パネル1枚が形状を維持したまま外筒に落下。

(d) 傾斜して外筒に衝突

天板パネル1枚が形状を維持したまま外筒に落下。



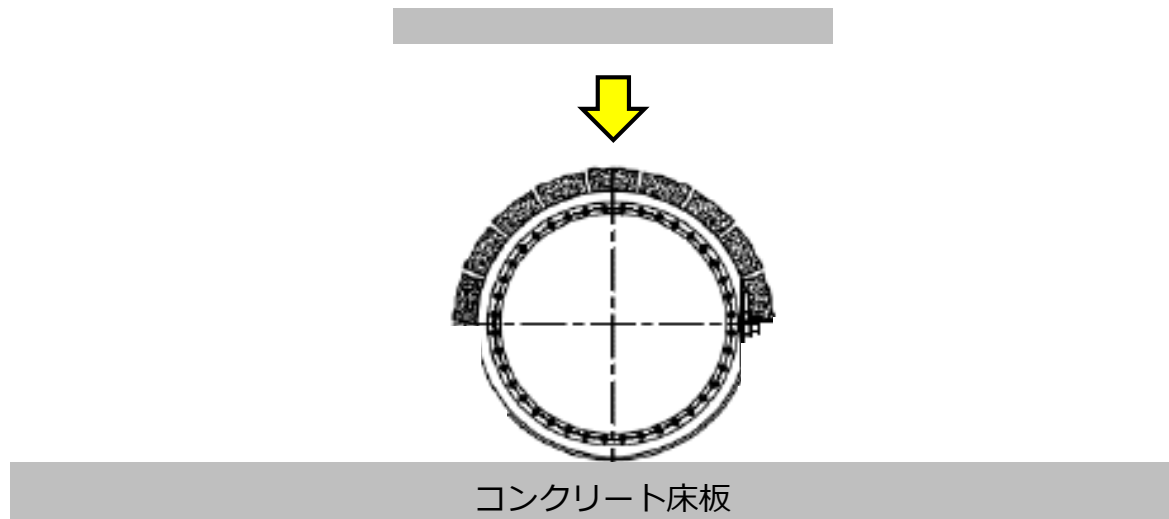
## ■ コンクリートモジュールの落下・転倒による乾式キャスクの除熱評価

### ➤ 評価条件

落下した天板には鉄筋が入っているため張り付くことはないが、保守的に乾式キャスクの上半分を張り付いて覆う状態を仮定。

### ➤ 評価項目

- ・ 容器（中性子遮へい材、本体耐圧部、金属ガスケット）
- ・ バスケット
- ・ 燃料被覆管



## ■ コンクリートモジュールの落下・転倒による敷地境界線量への影響を評価

### ➤ 評価条件

すべてのコンクリートモジュールが落下・転倒することで遮へい機能を喪失したと仮定し、コンクリートモジュールの遮へい効果を見捨てる。

### ➤ 評価位置

敷地境界の最寄りの評価点



### ➤ 評価結果

最寄りの評価点で、コンクリートモジュールがある場合（約 $61\mu\text{Sv}/\text{y}$ ）と比較し約9倍の約 $540\mu\text{Sv}/\text{y}$ （見込み）



※すべて暫定結果

	評価対象	コンクリートモジュールの落下・転倒		判定基準
除熱	伝熱フィン	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・破断に対して十分余裕があること
	コンクリートモジュールの除熱評価	(評価中)		・設計基準温度以下
密封	一次蓋及び二次蓋締め付けボルト	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・降伏応力以下
	一次蓋及び二次蓋横ずれ量	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・基準横ずれ量以下
	フランジ	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・おおむね弾性範囲内
	一次蓋及び二次蓋密封境界部	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・おおむね弾性範囲内
遮へい	外筒	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・破断に対して十分余裕があること
	敷地境界線量	○	約540 $\mu$ Sv/y	・1mSv/y以下
臨界防止	燃料被覆管	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・弾性範囲内
	バスケット	○	「支持架台」または「クレーン」の評価に包絡する	・おおむね弾性範囲内

# クレーン

---

1. 乾式キャスク本体の耐震性

2. 乾式キャスク本体以外の付帯設備の損傷等による乾式キャスク本体の健全性

○地震による乾式キャスクへの影響シナリオ抽出が必要十分か

○不確定性がある場合、その不確定性に対して十分な保守性があるか

## 評価プロセス

乾式キャスク本体の耐震性

抽出されたシナリオが必要十分か

- ・ 転倒による乾式キャスクへの衝突

技術的に十分な保守性があるか

- ・ 衝突エネルギーが大きくなるように形状を維持したまま乾式キャスク2基に衝突

現設計で上記を満たすか

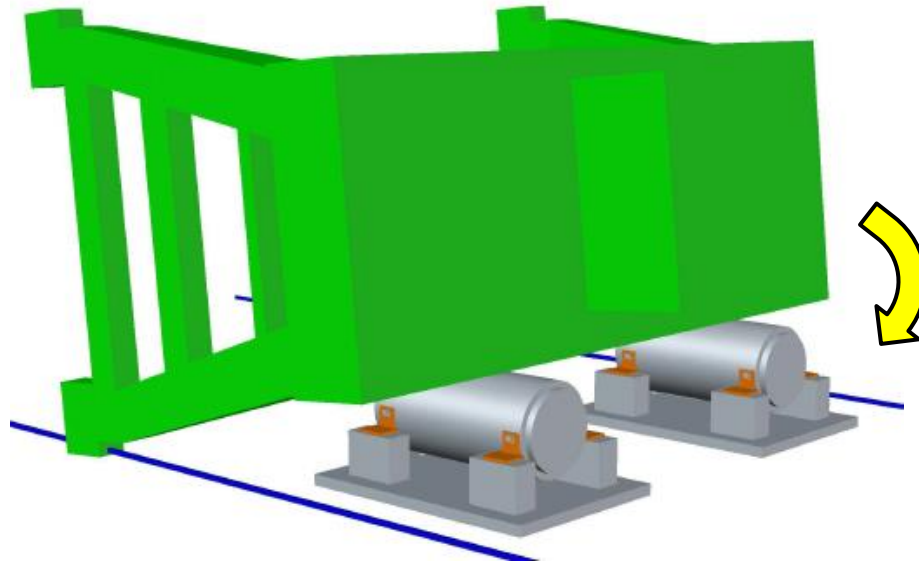
## ■ クレーンの転倒による乾式キャスクへの影響を評価

### ➤ 評価条件

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、待機位置における転倒を仮定。（【参考】時間確率を参照）

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撃が大きいいため、図のように形状を維持した状態での乾式キャスク下部への回転転倒とする。

動解析の結果より、1基への衝突よりも2基への衝突のほうが衝撃が大きいいため乾式キャスク2基への衝突とする。



※すべて暫定結果

	評価対象	クレーンの転倒評価		判定基準
除熱	伝熱フィン	○	塑性ひずみは生じるが破断には至らず、ひずみも小さい	・破断に対して十分余裕があること
	コンクリートモジュールの除熱評価	—	コンクリートモジュールを無視した評価のため対象外	—
密封	一次蓋及び二次蓋締め付けボルト	○	降伏応力以下	・降伏応力以下
	一次蓋及び二次蓋横ずれ量	○	基準値以下	・基準横ずれ量以下
	フランジ	○	塑性ひずみなし	・おおむね弾性範囲内
	一次蓋及び二次蓋密封境界部	○	塑性ひずみなし	・おおむね弾性範囲内
遮へい	外筒	○	塑性ひずみは生じるが破断には至らず、側部レジンを保持	・破断に対して十分余裕があること
	敷地境界線量	○	クレーン転倒による影響はない	・1mSv/y以下
臨界防止	燃料被覆管	○	降伏応力以下 (鉛直方向最大加速度：バスケット中央で約8G)	・弾性範囲内
	バスケット	○	塑性ひずみなし	・おおむね弾性範囲内

## 【参考】燃料破損時の敷地境界被ばく評価

### ■ クレーン転倒による燃料破損時の敷地境界被ばく線量を評価

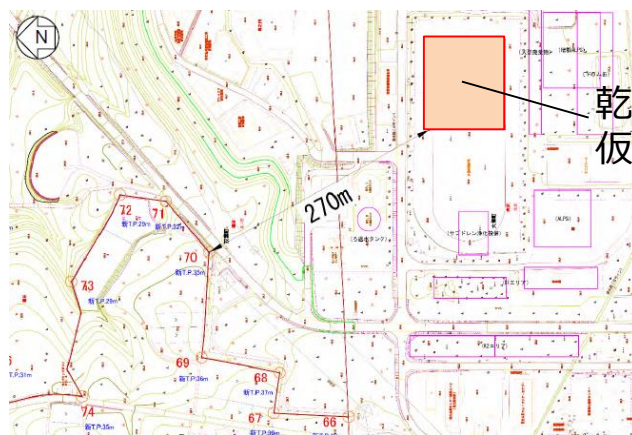
#### ➤ 評価条件

影響評価結果より、バスケット中央の最大加速度は約8Gであり、設計承認申請書の0.3m水平落下時の衝撃加速度約20Gを下回るため、燃料被覆管の健全性は維持されるが、保守的に収納燃料が全数破損したと仮定。なお、全数破損する乾式キャスクは、クレーンの幾何学的な衝突範囲より各レーンの西端に位置する乾式キャスクとする。

- (a) 第1レーンの西端の1基が全数破損
- (b) 第2レーンの西端の2基が全数破損
- (c) 第3レーンの西端の2基が全数破損
- (d) 第4レーンの西端の2基が全数破損

#### ➤ 評価位置

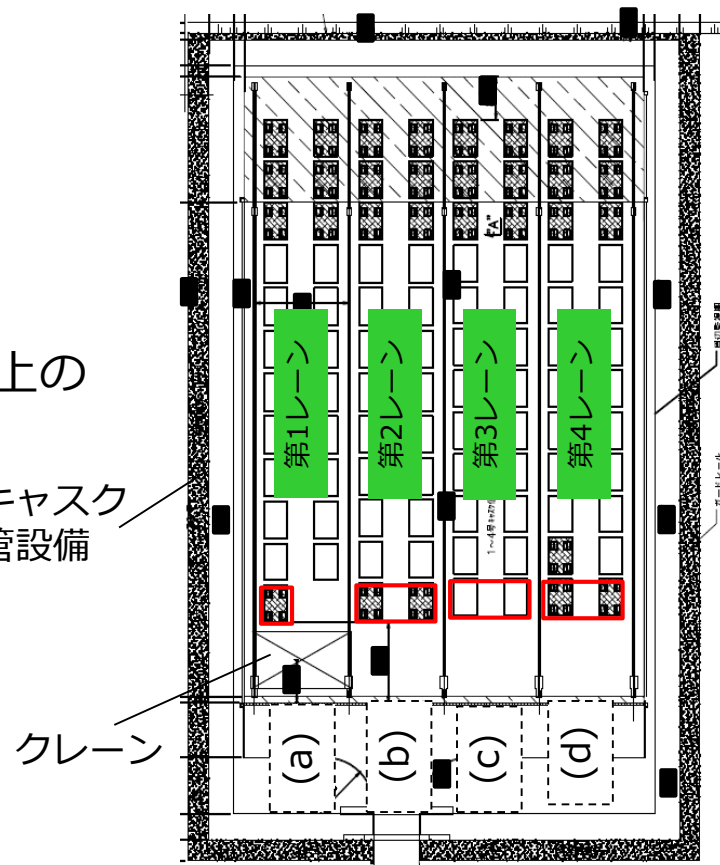
乾式キャスク仮保管設備を中心とした敷地境界上の最近接点



乾式キャスク  
仮保管設備

#### ➤ 評価結果

最近接点で約180 $\mu$ Sv (見込み)



クレーン

# 運用分析

## 1. 乾式キャスク本体の耐震性

## 2. 乾式キャスク本体以外の付帯設備の損傷等による乾式キャスク本体の健全性

○地震による乾式キャスクへの影響シナリオ抽出が必要十分か

○不確定性がある場合、その不確定性に対して十分な保守性があるか

### 評価プロセス

#### 乾式キャスク本体の耐震性

抽出されたシナリオが必要十分か

- ・ クレーンによる乾式キャスク取扱時及びコンクリートモジュール組立時の衝突
- ・ 監視装置の機能喪失

技術的に十分な保守性があるか

- ・ クレーン使用期間は設備全体の供用期間に対して十分小さいため、待機位置における衝突とする。  
(前述のクレーン転倒時の影響評価)

現設計で上記を満たすか

- ・ 乾式キャスク本体が健全であれば要求事項とはならない。なお、予備品を準備していることや直接作業員により測定可能

### ■ クレーン使用中におけるSs発生 の時間確率

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

	乾式キャスク取扱	コンクリートモジュール組立	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	同左	増設後95基 – 現在37基 保管
燃料取り出し期間	50年	同左	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	$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}/\text{年}$	同左	JEAC4601-2008
時間確率	$2.2 \times 10^{-8} \sim 4.4 \times 10^{-10}$	$6.6 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-8}$	

- 乾式キャスク取扱：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
- コンクリートモジュール組立：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



- 増設する乾式キャスク30基は、一部を既設の保管エリア西側に設置し、残りを東側に保管エリアを拡張して設置予定。
- 現設計では基礎及び支持架台はSs900に耐えられない見通し。
- Ss900における機能維持を行う場合、①既設の改造かつ増設エリアの設計見直し、または②別エリアに95基分の仮保管設備を新規設置。
- ①は、既設基礎や地盤の改良のために保管済みの乾式キャスクを一時的に移動させる必要があるが場所の選定が困難。
- ②は、1F構内での設置場所選定が困難であり、設置工事も設計から始めるため数年はかかる見込み。

