

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3月8日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

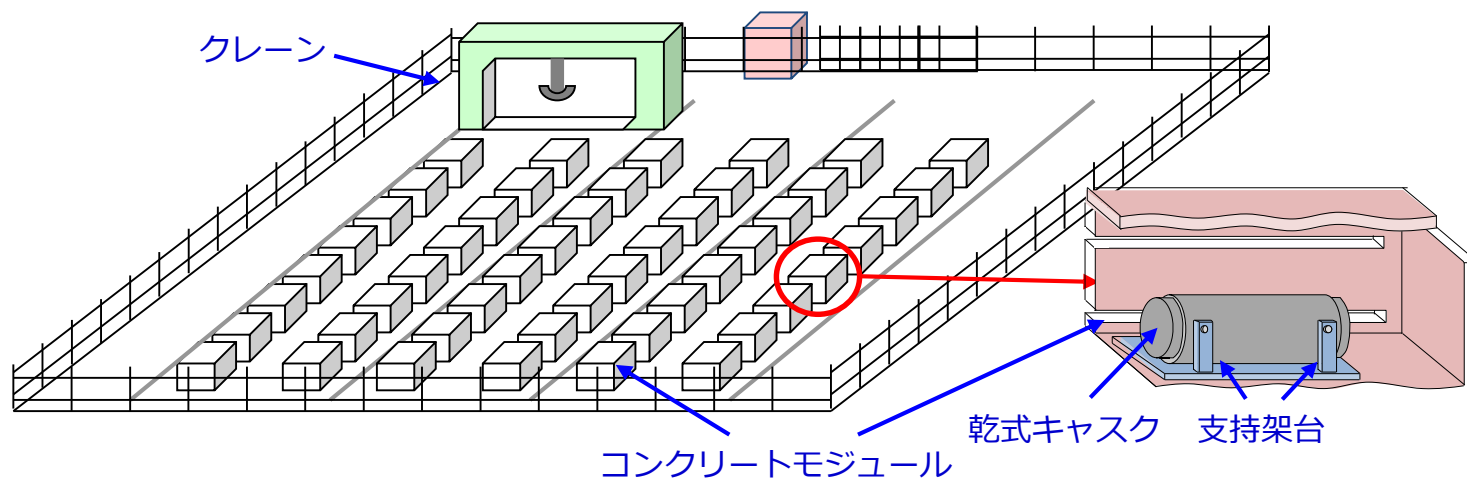
- 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備増設について、「令和3年2月13日の福島県沖の地震を踏まえた東京電力福島第一原子力発電所の耐震設計における地震動とその適用の考え方」を適用し現在設計中であり、準備が整い次第実施計画の変更申請を行う。
- 実施計画変更申請にあたり手戻りのないよう、以降の当社の対応方針について状況を説明する。
 - Ss900の地震力により想定されるシナリオに対して乾式キャスクの基本的安全機能への影響評価（以下、影響評価）を動的解析で行い、基本的安全機能が維持されることを確認
 - 乾式キャスクは耐震Sクラスに分類されるが、耐震評価の評価条件が上記影響評価で生じる加速度に包絡されることから耐震評価は実施しない

- 乾式キャスクの基本的安全機能維持及びその他主要設備の健全性確認プロセス
 - 次の主要設備に対してSs900の地震力による影響を保守的に考慮し、想定シナリオを抽出
 - 乾式キャスク
 - 支持架台
 - コンクリートモジュール
 - クレーン
 - コンクリート基礎
 - 抽出した想定シナリオに対して乾式キャスクの基本的安全機能への影響を評価。なお、今回は基本的安全機能に係る主要な部位を評価対象として動的解析を行い影響を確認
 - 各設備に内在するインベントリ、または上記の影響評価結果から耐震クラスを設定し、耐震評価を実施
 - 乾式キャスクは耐震評価が影響評価の評価条件に包絡されることを示し、耐震性が確保されていることを確認
 - その他主要設備に対しては耐震クラスに応じた耐震評価を実施

■ 乾式キャスク仮保管設備の主要設備に対する影響は次の通り。

対象設備	Ss900に対しての設備への影響	想定される損傷等
乾式キャスク	堅牢なつくりのため、基本的安全機能※は維持される見込み	-
支持架台	Ss900の地震力に耐えられない見通しのため、保守的に設備に損傷等が生じることを想定	支持機能喪失 →想定シナリオ①
コンクリートモジュール		落下・転倒 →想定シナリオ②
クレーン		転倒 →想定シナリオ③
コンクリート基礎		コンクリート基礎上面に設置された上記設備に対して、保守性を見込んだ損傷度合いを想定

※基本的安全機能：除熱・密封・遮へい・臨界防止



- 「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）を参考に乾式キャスクへの要求事項及び判定基準を設定
- 影響評価の判定基準
 - 密封境界部がおおむね弾性範囲内であること
 - 密封境界部以外の部位は、塑性ひずみが生じる場合であってもその量が小さく破断に対して十分余裕があること
 - バスケットに臨界防止上有意な変形が生じないこと
- また、乾式キャスク仮保管設備においてはSs900適用時に支持架台及びコンクリート基礎に保守的に損傷等が生じることを想定しているため、審査ガイドの「地震に対する設計方針」で規定されている「基礎等に固定しない場合」の評価に該当
- 当該設備は緩衝体を装着しない設置方法となるため、乾式キャスク蓋部の金属部への衝突に対して安全機能が維持されることを影響評価により確認
- 仮に支持架台及びコンクリート基礎の健全性が維持される場合であっても、影響評価により算出された加速度（最大加速度40G）は審査ガイドで規定される地震力※よりも大きくこれを包絡するため、安全機能は維持される

※兼用キャスク告示で定める地震力

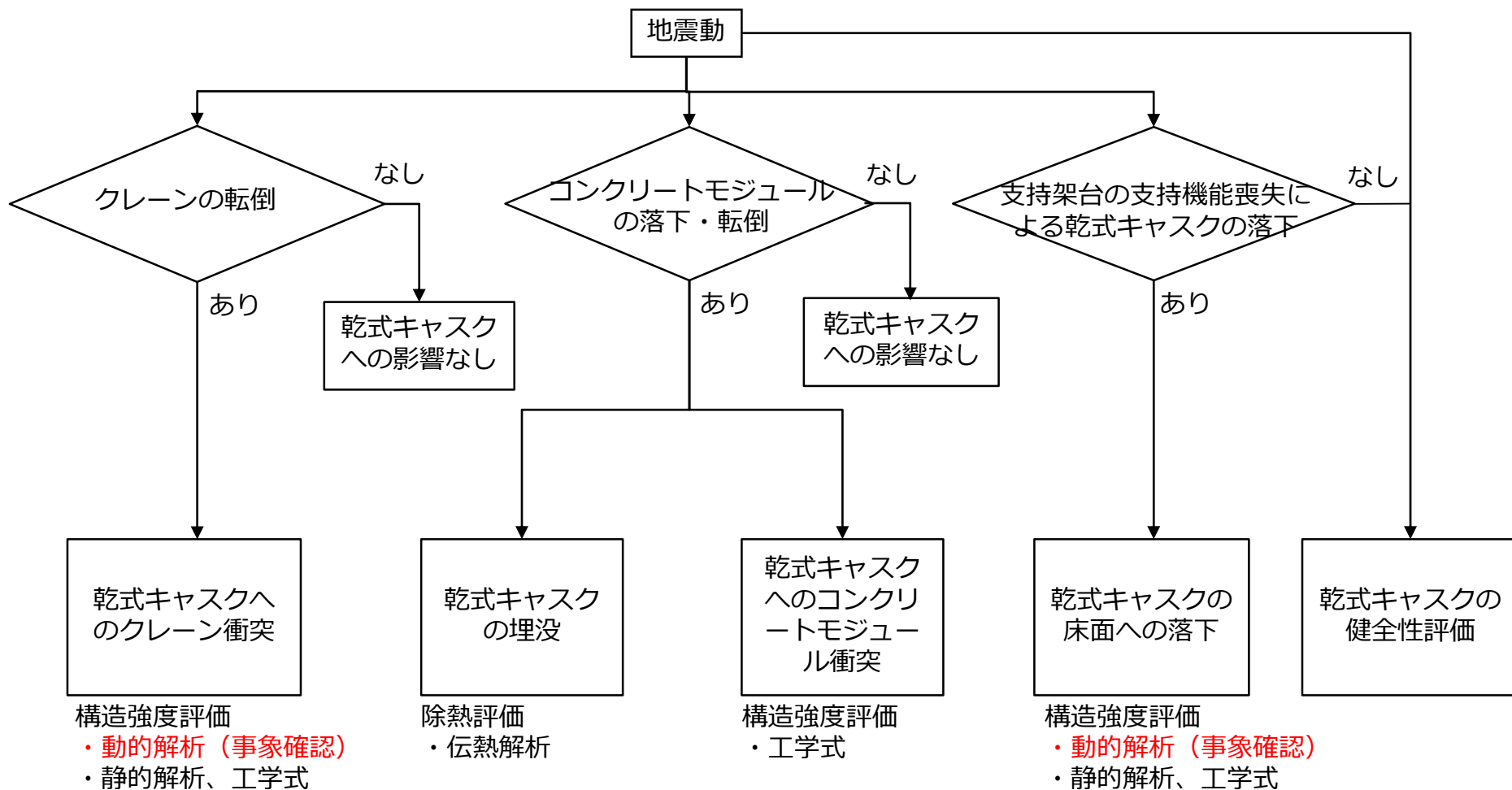
①加速度：水平2300gal及び鉛直1600gal、速度：水平200cm/s及び鉛直140cm/s

②基準地震動による地震力

	要求事項	評価対象	判定基準
除熱	(1)想定される状態において、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができること。	伝熱フィン	<ul style="list-style-type: none"> ・塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さく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	<ul style="list-style-type: none"> ・設計基準温度以下
密封	(1)想定される状態において、乾式キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。	一次蓋及び二次蓋締付けボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・降伏応力以下
		一次蓋及び二次蓋	<ul style="list-style-type: none"> ・基準横ずれ量以下
	(2)密封境界部は、想定される衝撃力に対して、おおむね弾性範囲内にとどまること。	フランジ	<ul style="list-style-type: none"> ・密封境界部がおおむね弾性範囲内
		一次蓋及び二次蓋	<ul style="list-style-type: none"> ・密封境界部がおおむね弾性範囲内
	(3)密封機能の異常に対して、その修復性が考慮されていること。	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封監視装置により密封機能を監視できること

	要求事項	評価対象	判定基準
遮へい	(1)想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮へい機能を有すること。	外筒	<ul style="list-style-type: none"> ・塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さく破断に対して十分余裕があること
	(2)主要設備の損傷によりその遮へい機能が著しく低下した場合においても、敷地境界の実効線量が線量限度（1mSv/y）を超えないこと。	敷地境界線量	<ul style="list-style-type: none"> ・乾式キャスク単独で1mSv/y以下
臨界防止	(1)想定される状態において、使用済燃料が臨界に達するおそれがないこと。	燃料被覆管	<ul style="list-style-type: none"> ・弾性範囲内
	(2)乾式キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合は、想定される状態において、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさないこと。	バスケット	<ul style="list-style-type: none"> ・おおむね弾性範囲内

想定シナリオ		評価項目	評価内容
①	支持架台の支持機能喪失による乾式キャスクの落下	乾式キャスクの落下評価	<ul style="list-style-type: none"> 乾式キャスクが落下した際、乾式キャスクの基本的安全機能に影響がないことを評価。（乾式キャスクの健全性及び敷地境界への線量影響有無）
		コンクリートモジュールの落下・転倒	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートモジュールが落下・転倒し乾式キャスクに衝突した際、乾式キャスクの基本的安全機能に影響がないことを評価。（乾式キャスクの堅健全及び敷地境界への線量影響有無）
		乾式キャスクの除熱評価	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートモジュールにより埋没した乾式キャスクの主要部位が制限温度を超えず健全であることを評価。
②	コンクリートモジュールの落下・転倒	敷地境界線量評価	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートモジュールの落下・転倒により遮蔽機能が喪失した時の敷地境界線量を評価。
		クレーンの転倒	<ul style="list-style-type: none"> クレーンが転倒し乾式キャスクに衝突した際、乾式キャスク内に収納された燃料が露出しないことを評価。（乾式キャスクの健全性）
③	クレーンの転倒	クレーン衝突による乾式キャスクへの影響評価	<ul style="list-style-type: none"> クレーン衝突で乾式キャスクの蓋部が損傷、基準漏えい率を満足しないことを想定し、収納燃料の破損という保守的な条件を仮定。乾式キャスク内部のガス状核分裂生成物が大気中に放出した時の敷地境界における被ばく線量を評価。
		敷地境界被ばく線量評価	<ul style="list-style-type: none"> クレーン衝突で乾式キャスクの蓋部が損傷、基準漏えい率を満足しないことを想定し、収納燃料の破損という保守的な条件を仮定。乾式キャスク内部のガス状核分裂生成物が大気中に放出した時の敷地境界における被ばく線量を評価。



■ 乾式キャスクの落下評価

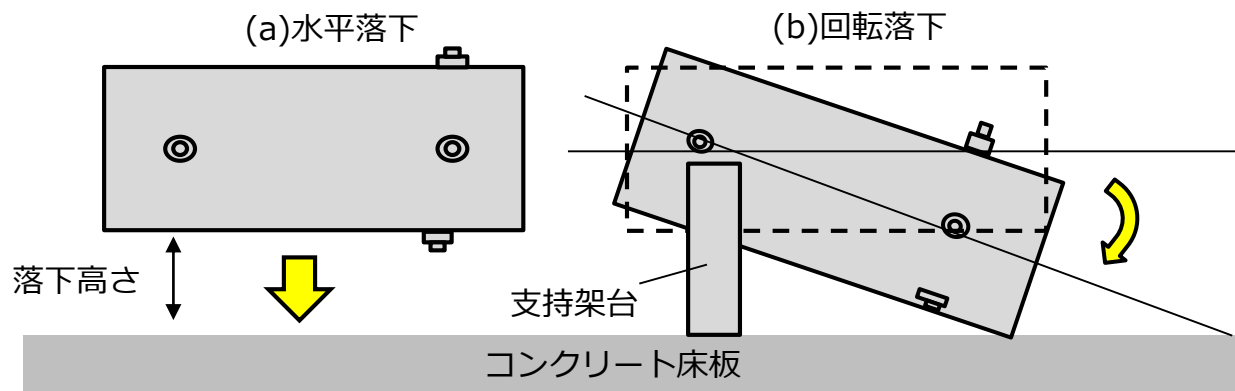
➤ 評価条件

(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、保守的に保管位置の高さから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、保守的に保管位置の高さから支持架台を中心に回転落下すると仮定。



➤ 評価結果※まとめ

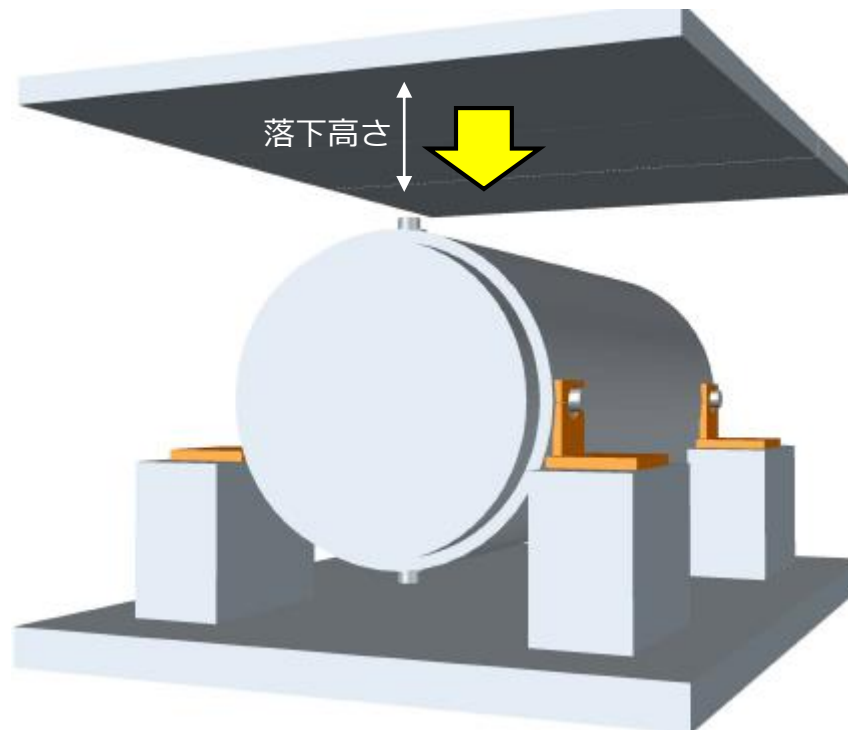
※すべて暫定結果

	評価対象	(a) 水平落下		(b) 回転落下		判定基準
除熱	伝熱フィン	○	塑性ひずみなし	○	塑性ひずみなし	・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の損傷は想定しないことから対象外	—	同左	—
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	・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	・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	・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	・おおむね弾性範囲内
遮へい	外筒	○	塑性ひずみなし	○	塑性ひずみなし	・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ため対象外	—	同左	—
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）	・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	・おおむね弾性範囲内

■ コンクリートモジュール衝突による乾式キャスクへの影響評価

➤ 評価条件

天板の自由落下または側板の転倒（回転衝突）を仮定。



■ 乾式キャスクの除熱評価

➤ 評価条件

(a) 最厳ケース

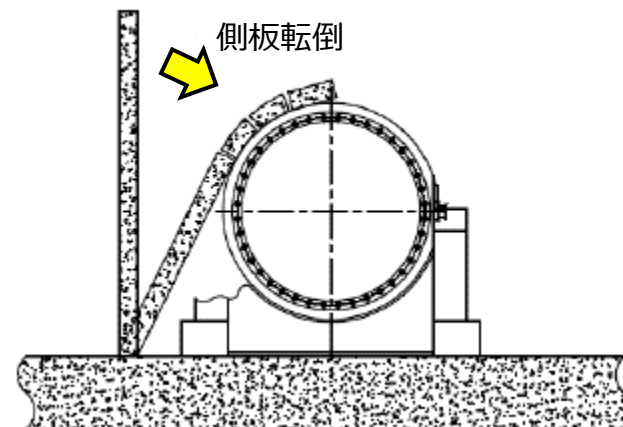
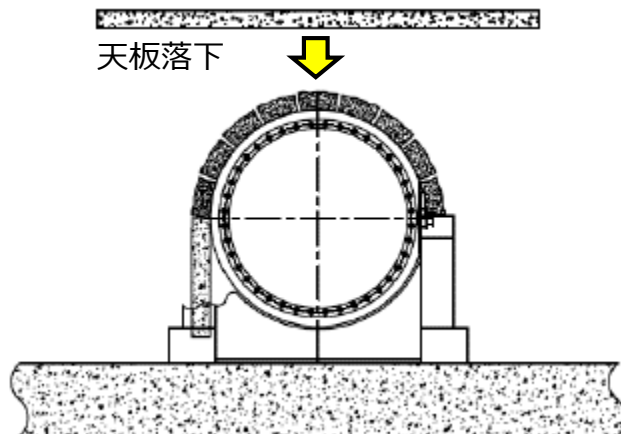
落下・転倒したコンクリートモジュールにより乾式キャスクが埋没すると仮定。

(b) 条件緩和ケース

過去のガレキ埋没試験等から埋没割合を設定。

➤ 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



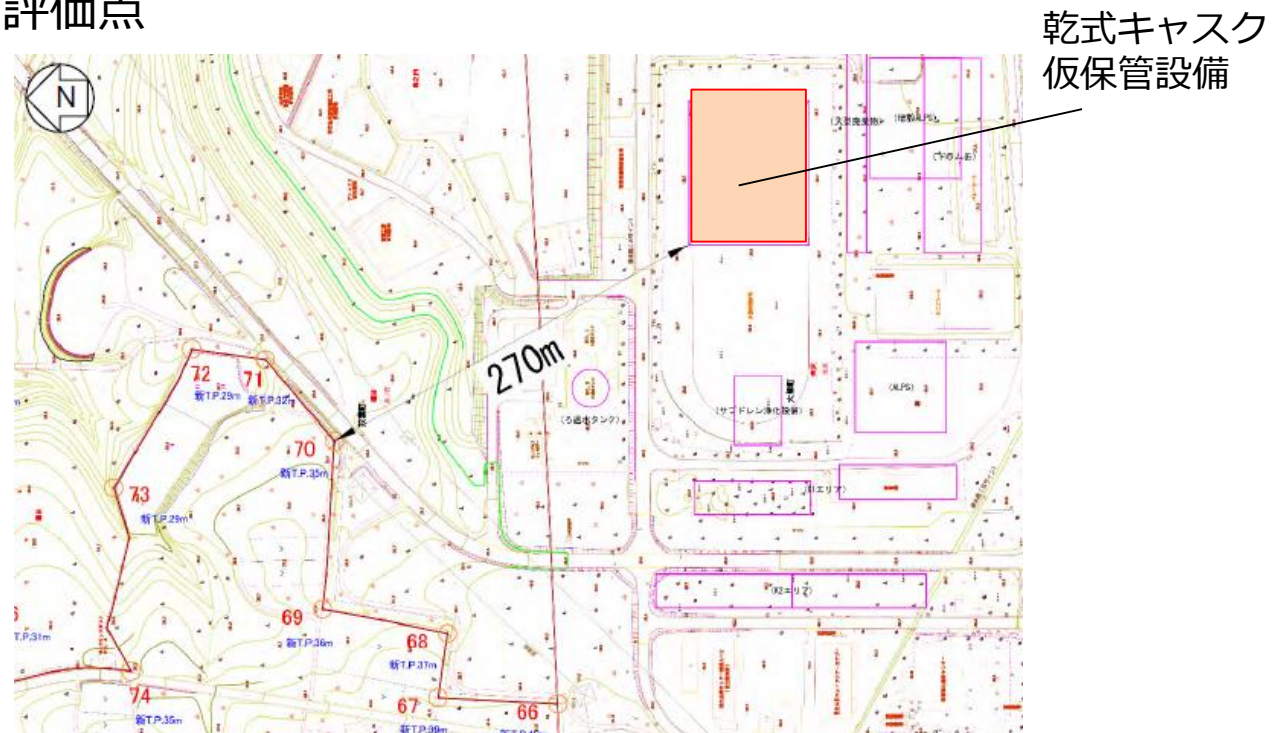
■ 敷地境界線量評価

➤ 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）

➤ 評価結果※まとめ

※すべて暫定結果

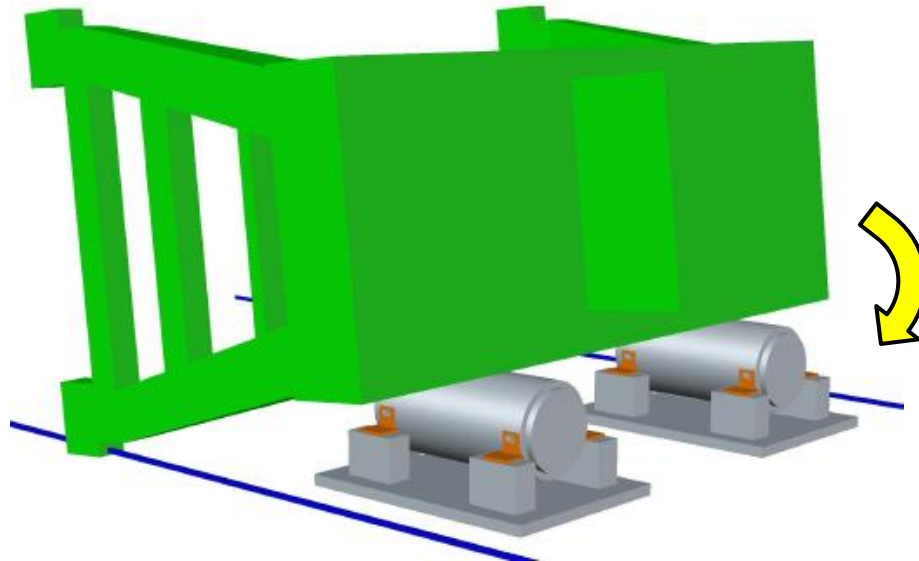
	評価対象	コンクリートモジュールの落下・転倒		判定基準
除熱	伝熱フィン	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・破断に対して十分余裕があること
	コンクリートモジュールの除熱評価	評価中		・設計基準温度以下
密封	一次蓋及び二次蓋締付けボルト	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・降伏応力以下
	一次蓋及び二次蓋横ずれ量	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・基準横ずれ量以下
	フランジ	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・おおむね弾性範囲内
	一次蓋及び二次蓋密封境界部	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・おおむね弾性範囲内
遮へい	外筒	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・破断に対して十分余裕があること
	敷地境界線量	○	約540 μ Sv/y	・1mSv/y以下
臨界防止	燃料被覆管	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・弾性範囲内
	バスケット	○	想定シナリオ①または③に包絡する	・おおむね弾性範囲内

■ クレーン衝突による乾式キャスクへの影響評価

➤ 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する。

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。



■ 燃料破損時の敷地境界被ばく線量評価

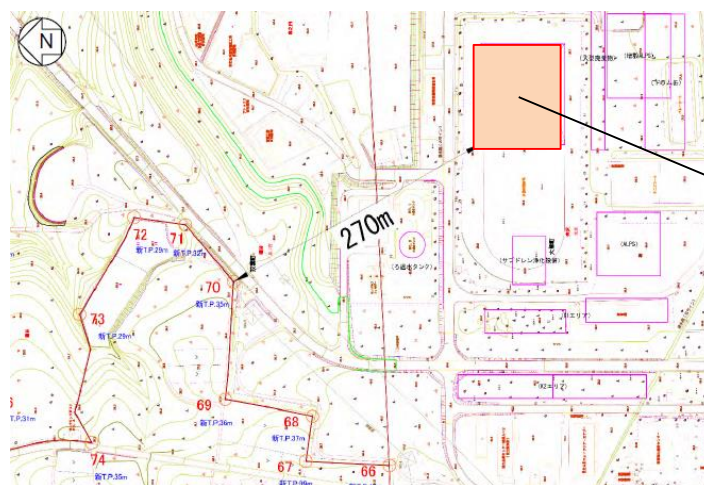
➤ 評価条件

クレーン衝突評価と同様に待機位置からの回転転倒により乾式キャスクに衝突し、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

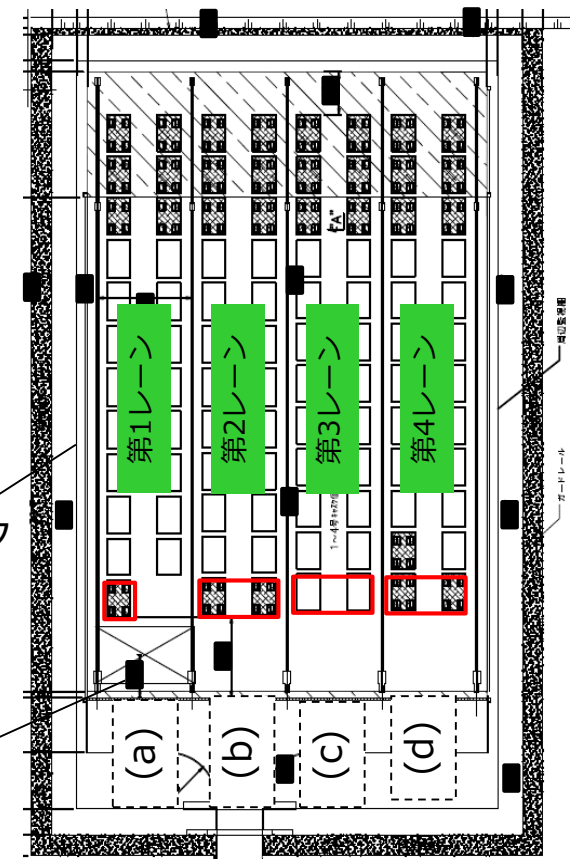
➤ 評価位置

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

クレーン



➤ 評価結果

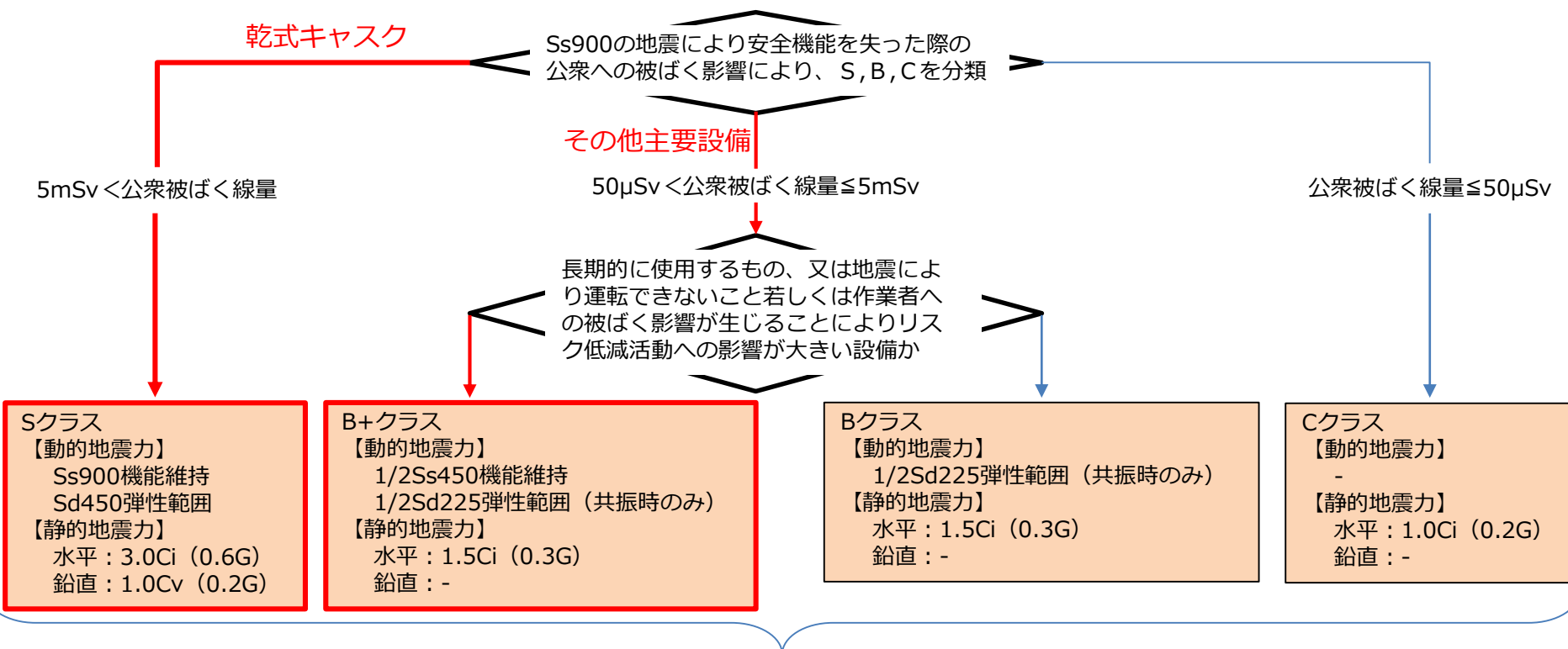
最近接点で約 $180\mu\text{Sv}$ (見込み)

➤ 評価結果※まとめ

※すべて暫定結果

	評価対象	待機位置からの回転転倒	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	○ 約180 μ Sv	・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

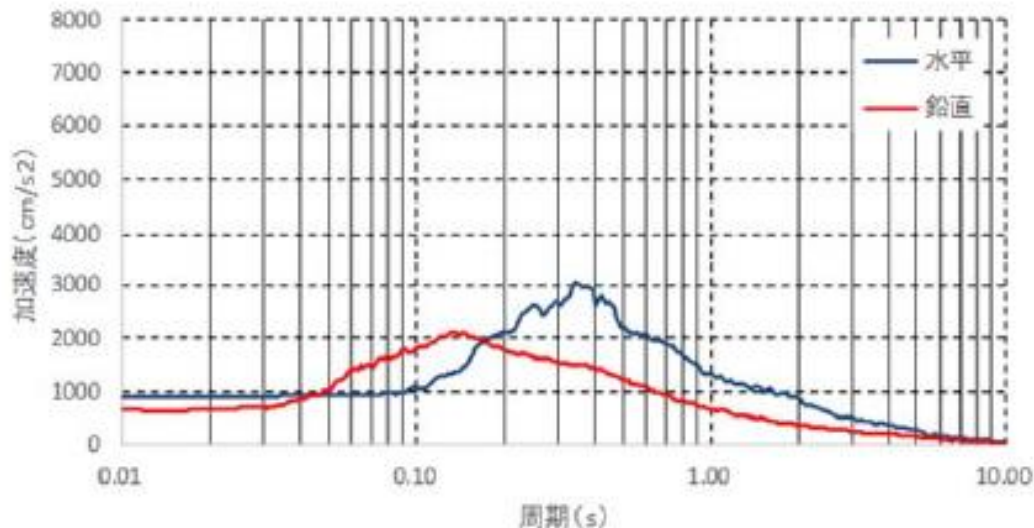
- 乾式キャスクは、インベントリより耐震Sクラスとして分類。
- その他主要設備は、想定シナリオ①～③における敷地境界線量評価の結果より耐震クラスを設定し、耐震評価を実施（下記フローチャート）



上記の耐震クラスを踏まえて、廃炉活動への影響、上位クラスへの波及的影響、供用期間、設計の進捗状況、内包する液体の放射線量等の要素を考慮した上で、敷地等の特徴に応じた地震動の設定および必要な対策（耐震性の確保の代替等）を判断する

- 乾式キャスクは耐震Sクラス、その他主要設備はB+クラスの設備として耐震評価を実施

- 乾式キャスクの影響評価結果より耐震性が確保されていることを確認
 - Ss900（水平1方向、鉛直1方向）の評価より最大加速度は4G程度
 - 保守的に「水平2方向、鉛直1方向」の最大加速度が上記の2倍であっても8G程度で収まるものと推測される



図：Ss900（水平1方向、鉛直1方向）評価時の加速度スペクトル

- 一方、想定シナリオ①(a)水平落下の評価では、最大加速度はバスケット中央で約40G
- 水平落下評価は、Ss900の加速度に比べ保守的に見積もっても5倍程度裕度を有しているためSs900の耐震評価は水平落下評価に包絡される