

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. 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備の増設について

1～6号機の使用済燃料プールに保管されている燃料（以下、SFP燃料）を共用プールに受け入れるため、共用プールの空き容量を確保する必要がある。既存のキャスク仮保管設備は1～4号機SFP燃料受け入れのために設計した施設であり、5,6号機SFP燃料まで含めると、さらに30基の乾式キャスク容量の増設が必要となる。

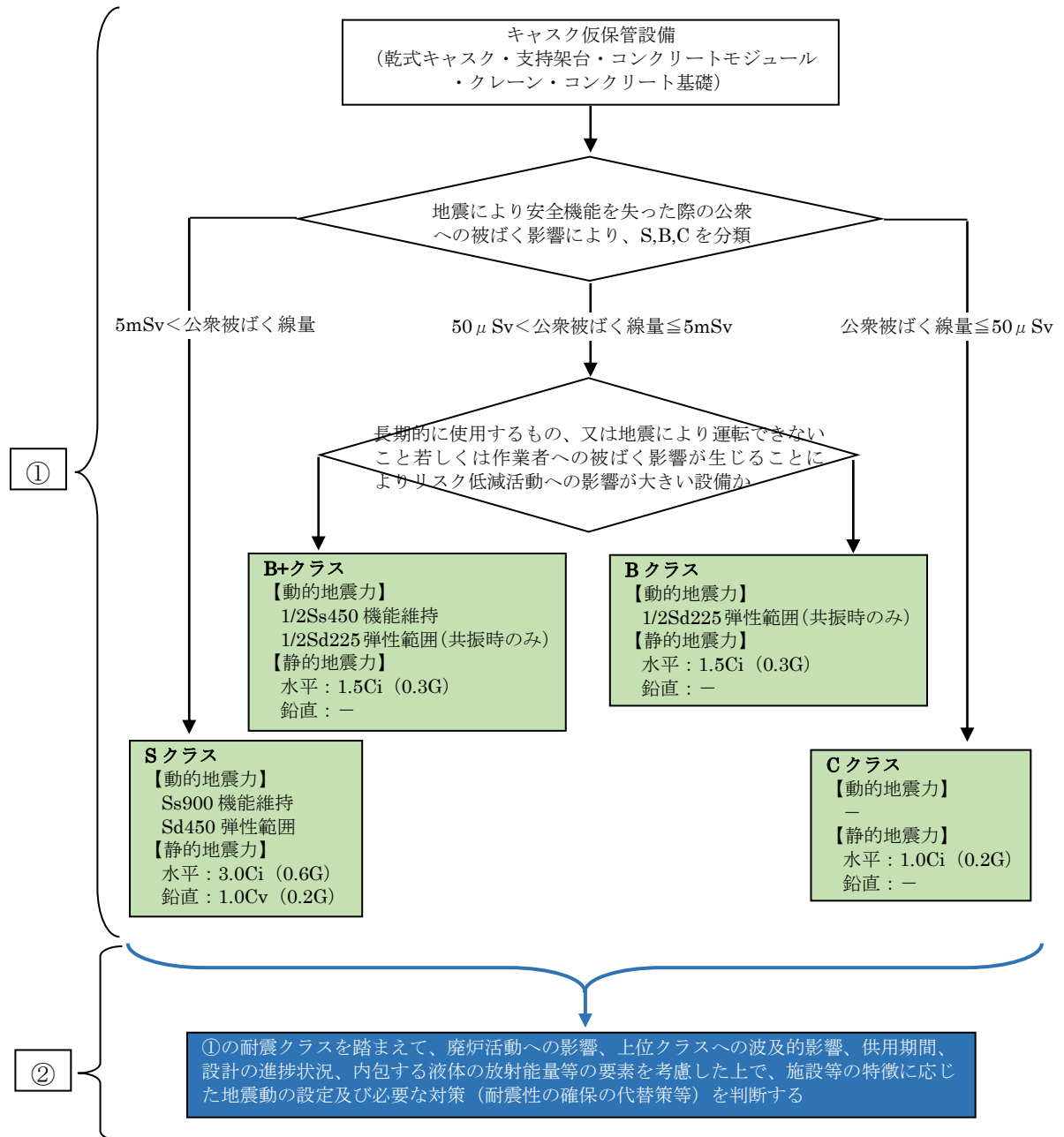
1F構内の敷地上の制約等を考慮し、乾式キャスク容量の増設を合理的に実施するため、現在のキャスク仮保管設備の基礎上に乾式キャスクを追加、および東側に新規基礎を追加することとし、設計をこれまで実施してきた。

廃炉中長期実行プランに記載の工程表や中期的リスクの低減目標マップを着実に遂行するために、共用プールの空き容量確保を現在実施中でありキャスク仮保管設備は、2024年度の下期には現行の65基が満杯となるため、それまでに30基の拡張工事の完了が必要となる。

増設分については従来設備の拡張で設計しているため、耐震設計は旧Ss600での機能維持を前提としている。今回、2021年9月8日に示された「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（2回目）」を踏まえ、耐震評価について考え方を整理する。

2. 基本方針

2021年9月8日に示された「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（2回目）」に基づき耐震設計を行う。（詳細は以下の図の通り）



2.1 シナリオ抽出

地震によりキャスク仮保管設備の構成設備が安全機能を失った際に想定されるシナリオを抽出する。

- (1) 乾式キャスク
 - a. 収納燃料の露出
- (2) 支持架台
 - a. 支持機能喪失による乾式キャスクの落下
 - b. 落下後の乾式キャスクとコンクリートモジュールの衝突
 - c. 落下後の乾式キャスク同士の衝突
- (3) 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
 - b. コンクリートモジュールの転倒または倒壊による乾式キャスクへの衝突
- (4) クレーン
 - a. クレーンの転倒または倒壊
 - b. クレーンの転倒または倒壊による乾式キャスクへの衝突
- (5) コンクリート基礎
 - a. コンクリート基礎損傷による支持架台、コンクリートモジュール、クレーンの安全機能喪失

2.2 乾式キャスクへの影響評価

2.1 で抽出したシナリオのうち、乾式キャスクへの影響評価を行い公衆への被ばく有無を確認する。

- (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 (2.1 (2) a.)
- (2) 乾式キャスク同士の衝突性評価 (2.1 (2) c.)
- (3) 乾式キャスクとコンクリートモジュールの衝突性評価 (2.1 (2) b.及び 2.1 (3) b.)
- (4) 乾式キャスクとクレーンの衝突性評価 (2.1 (4) b.)

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（キャスク仮保管設備の西端）における評価とする。

2.3 耐震クラス分類

- (1) 乾式キャスク
収納燃料の露出（内在するインベントリ）により耐震クラスは S クラスで分類される。
- (2) 支持架台
支持架台単体の安全機能（支持機能）喪失による公衆への被ばく影響はない。
2.1 及び 2.2 より乾式キャスクへの波及的影響について、乾式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、周辺設備への波及的影響について、支持機能喪失により乾式キャスクは固定されないため、地震動により滑動した乾式キャスクがコンクリートモジュールに衝突し倒壊させる可能性がある。コンクリートモジュールが倒壊した場合、遮へい機能が低下するため敷地境界線量は増加する。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 で分類される。

※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。

(3) コンクリートモジュール

コンクリートモジュール単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遮へい機能が喪失した場合、敷地境界線量は増加し、その増加量は(2)と同様。よって、(2)と同様に耐震クラスは B+クラス で分類される。

なお、2.1 及び 2.2 より乾式キャスクへの波及的影響について、乾式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。

(4) クレーン

クレーン単体の安全機能喪失による公衆への被ばく影響はない。

2.1 及び 2.2 より乾式キャスクへの波及的影響について、乾式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、周辺設備への波及的影響について、待機位置 (2.2(4)と同様) 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に衝突し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ため耐震クラスは Cクラス で分類される。(評価中)

(5) コンクリート基礎

コンクリート基礎単体の安全機能喪失による公衆への被ばく影響はない。

乾式キャスク及び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支持架台、コンクリートモジュール、クレーンの安全機能が損なわれる可能性がある。

これらについては、(2)～(4)と同様であり、上位クラスへの波及的影響を考慮すると耐震クラスは B+クラス で分類される。

2.4 耐震評価

(1) 乾式キャスク

支持架台及びコンクリート基礎は Ss900 で耐震性を確保できない見込み (評価中) であり、乾式キャスクに伝わる地震力を算出することができないため Ss900 における評価は困難。

しかしながら、2.2 の影響評価において乾式キャスクに生じる加速度は数十 G であり、耐震評価における加速度よりも大きく、影響評価の結果乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認しているため、耐震性は維持される。

(2) 支持架台

1/2Ss450 で耐震性を確保できる見込み。(評価中)

(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。(評価中)

(4) クレーン

耐震性を確保できる見込み。(評価中)

(5) コンクリート基礎

1/2Ss450 で耐震性を確保できる見込み。(評価中)

3. 従来の要求機能に対する評価

実施計画「2.13 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備」の「2.13.1.2 要求される機能」に記載された「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」を参照して耐震クラスを設定し、「2.基本方針」に基づき評価を行う。

- ・原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について（抜粋）

耐震重要度分類の考え方：乾式キャスク貯蔵施設の耐震重要度分類は、以下のとおりとする。

- 1) 乾式貯蔵キャスク：乾式貯蔵キャスクは、使用済燃料を貯蔵していること及び想定されるいかなる場合にも収納する使用済燃料の臨界を防止する必要があることから、使用済燃料プールと同じく Sクラスとする。
- 2) 支持構造物：支持構造物は、乾式貯蔵キャスクを直接支持することから、乾式貯蔵キャスクと同じ Sクラスとする。
- 3) 貯蔵建屋：貯蔵建屋は、Sクラスの乾式貯蔵キャスクを収納し、その間接支持構造物となることから、基準地震動 Ss に対して安全上支障のないことを確認する。なお、貯蔵建屋内においては、乾式貯蔵キャスクの密封境界である一次蓋の開放を行わないことを前提としているので、貯蔵建屋は、遮へい機能を必要としないため Cクラスとする。

3.1 耐震クラス分類

(1) 乾式キャスク

「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」の乾式貯蔵キャスクより耐震クラスは Sクラスで分類される。

(2) 支持架台

「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」の支持構造物より耐震ク

ラスは S クラスで分類される。

(3) コンクリートモジュール

「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」の貯蔵建屋と見なすと耐震クラスは C クラスで分類される。

(4) クレーン

「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」の貯蔵建屋の一部と見なすと耐震クラスは C クラスで分類される。

(5) コンクリート基礎

「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」の支持構造物より耐震クラスは S クラスで分類される。

3.2 耐震評価

(1) 乾式キャスク

応答倍率法 (※) による評価の結果、Ss900 で耐震性を確保できる見込み。(評価中)
ただし、支持架台及びコンクリート基礎が Ss900 において健全であることを前提とする。

(2) 支持架台

応答倍率法 (※) による評価の結果、Ss900 で耐震性を確保できない見込み。(評価中)
ただし、コンクリート基礎が Ss900 において健全であることを前提とする。

(3) コンクリートモジュール

2.4 で 1/2Ss450 で耐震性を確保できる見込み (評価中) のため、C クラスの耐震性も確保できる。

(4) クレーン

2.4 で 1/2Ss450 で耐震性を確保できる見込み (評価中) のため、C クラスの耐震性も確保できる。

(5) コンクリート基礎

応答倍率法 (※) による評価の結果、Ss900 で耐震性を確保できない見込み。(評価中)

3.3 耐震性の確保の代替策及び廃炉活動への影響 (②の検討)

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。支持構造物である支持架台及びコンクリート基礎の耐震性を確保するには、以下の対策が考えられる。

(1) 既設保管エリアの基礎及び地盤の改良かつ増設エリアの設計見直し

(2) 別エリアに 95 基分のキャスク仮保管設備を新規設置

いずれも 1F 構内の場所の確保はタンクエリアの撤去がない限り困難であり、耐震設計にも数年はかかる見込みのため、使用済燃料取り出しスケジュールに影響が出る。

4. 準拠基準等

2.2 の乾式キャスクの堅牢性に着目した影響評価により乾式キャスクの基本的安全機能の確保を評価できることから、「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」を適用せず、「2.基本方針」に基づき耐震設計を行うこととする。

また、2.4 より乾式キャスクにおける耐震評価が困難であることから乾式キャスクについては「原子力発電所耐震設計技術規程」を適用しない。

(※) 応答倍率法による耐震評価

➤ 評価方法

旧 Ss600 と Ss900 の設計震度の応答比を算出。旧 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。本評価では、乾式キャスク、支持架台、コンクリート基礎を対象とする。

➤ 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。

➤ 応答比

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

➤ 評価結果

・ 乾式キャスク

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	345	831	2.4

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	2			377			188.5		

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

上記より、すべての部位において余裕率が応答比 1.71 を上回っているため、Ss900 において耐震性を確保できる見込み。

・支持架台

ケース 1 : 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力

ケース 2 : 自重+鉛直方向地震力+軸直角方向水平地震力

部位	応力の種類	ケース 1		ケース 2		許容応力		
		計算値	余裕率	計算値	余裕率			
鋼製支持架台	評価断面 ①	一次応力	圧縮	15	21.5	15	21.5	322
			曲げ	37	8.8	151	2.2	326
			せん断	15	12.5	16	11.8	188
			組合せ	58	5.6	168	1.9	326
		一次+二次応力	引張・圧縮	10	56.4	10	56.4	564
			曲げ	74	7.6	151	3.7	564
			せん断	30	10.8	16	20.3	324
			座屈	15	18.6	15	18.6	279
	評価断面 ②	一次応力	圧縮	7	46.4	7	46.4	325
			曲げ	27	12.1	28	11.6	326
			せん断	7	26.9	7	26.9	188
			組合せ	35	9.3	36	9.1	326
		一次+二次応力	引張・圧縮	5	112.8	5	112.8	564
			曲げ	37	15.2	24	23.5	564
			せん断	13	24.9	7	46.3	324
			座屈	7	40.0	7	40.0	280
	評価断面 ③	一次応力	曲げ	201	1.6	111	2.9	326
			せん断	23	8.2	13	14.5	188
			組合せ	205	1.6	114	2.9	326
		一次+二次応力	曲げ	347	1.6	201	2.8	564
せん断			38	8.5	22	14.7	324	

部位	応力の種類		ケース 1		ケース 2		許容応力
			計算値	余裕率	計算値	余裕率	
埋め込み金物	一次応力	曲げ	66	4.1	85	3.2	270
		せん断	14	11.1	19	8.2	155
		組合せ	70	3.9	91	3.0	270
	一次+二次 応力	曲げ	131	3.4	85	5.3	450
		せん断	28	9.2	19	13.6	258
		引張	109	1.5	79	4.2	ケース 1 : 165
基礎ボルト (注)	一次応力	引張	129	1.3	—	—	ケース 2 : 332
			せん断	193	1.4	89	2.9
		せん断	193	1.4	89	2.9	261

(注) 上段：鉛直方向地震力が上向き（+Z方向）のとき

下段：鉛直方向地震力が下向き（-Z方向）のとき

部位	応力の種類	ケース 1			ケース 2		
		曲げモーメント	曲げ耐力	余裕率	曲げモーメント	曲げ耐力	余裕率
コンクリート支持架台	曲げ	813	2808	3.5	769	1048	1.4
		せん断力	せん断耐力	余裕率	せん断力	せん断耐力	余裕率
	508	890	1.8	529	777	1.5	

上記より、一部の部位において余裕率が応答比 1.71 を下回っているため、Ss900 において耐震性を確保できない見込み。

・コンクリート基礎（抜粋）

スラブ B (NS方向)	設計断面力	ケース 1 6		
		せん断力最大	せん断耐力	余裕率
		2450	2853	1.2
スラブ C (EW方向)	設計断面力	ケース 1		
		せん断力最大	せん断耐力	余裕率
		1291	1554	1.2

上記より、一部の部位において余裕率が応答比 1.71 を下回っているため、Ss900 において耐震性を確保できない見込み。