

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。

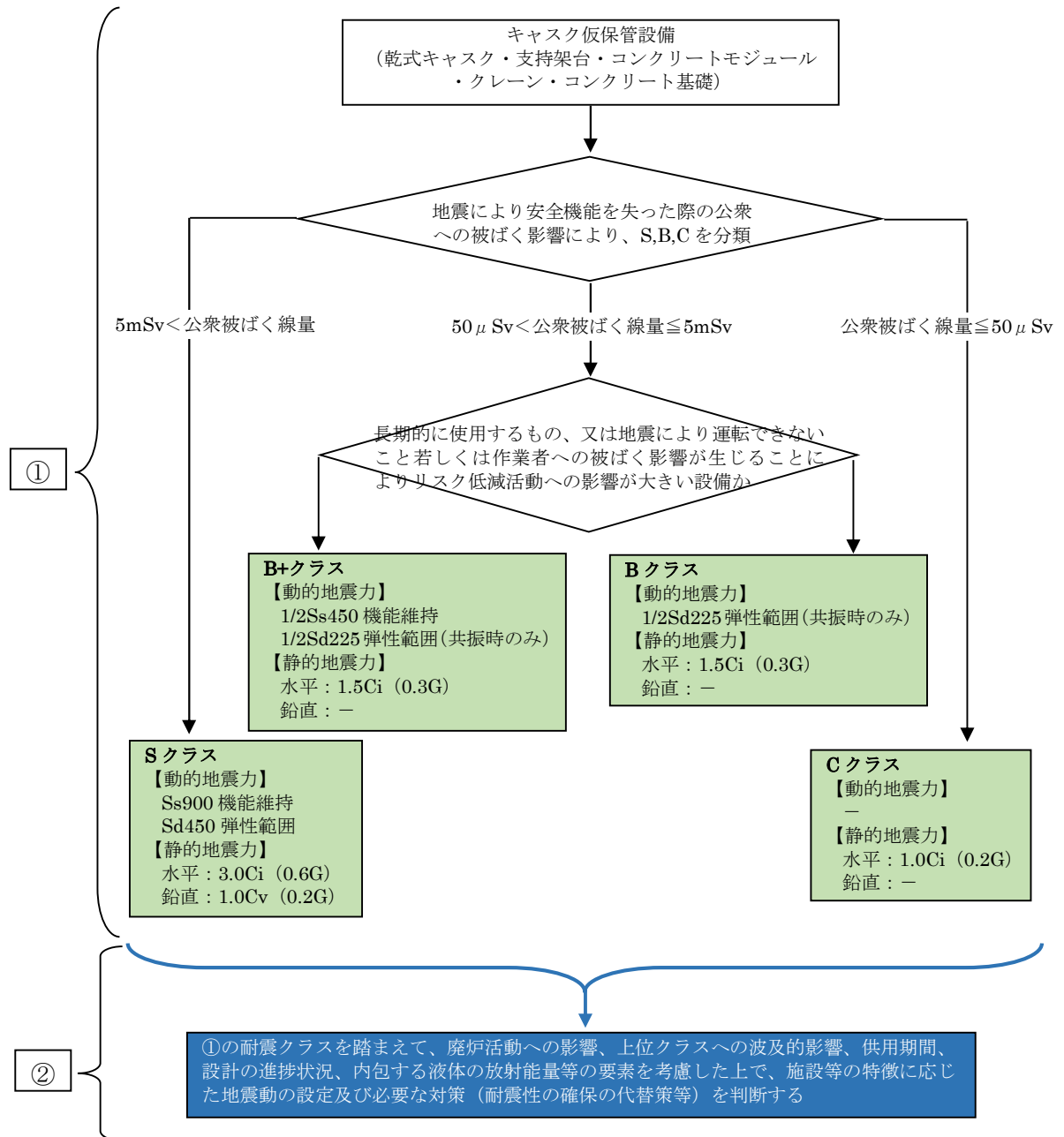
1F構内の敷地上の制約等を考慮し、乾式キャスク容量の増設を合理的に実施するため、現在のキャスク仮保管設備の基礎上に乾式キャスクを追加、および東側に新規基礎を追加することとし、設計をこれまで実施してきた。

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 地震による損傷モード

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う損傷モードを抽出する。

- (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

2.2 乾式キャスクへの影響評価（暫定結果）

2.1 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（2.1 (1) a.）
 - a. 水平落下
 - (a) 評価方法
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) 評価結果
乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。
 - b. 回転落下
 - (a) 評価方法
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) 評価結果
乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。
- (2) 乾式キャスク同士の衝突性評価（2.1 (1) a.）
 - (a) 評価方法
すべての支持架台の支持機能喪失により、コンクリート床板上に乾式キャスクが落下し、落下後に地震により速度を持った乾式キャスク同士が衝突するか評価する。保守的に支持架台、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は無視し、円筒形の剛体が床板上を移動すると仮定。また、移動する乾式キャスクの移動方向は同一方向だが、保守的に互いに衝突する向きに移動するとして評価する。
また、評価に用いる摩擦係数について、実施計画Ⅱ-2-11 では摩擦係数 $0.25\sim 0.4$ ^{*1} が記載されているが、文献等^{*2} で一般的に用いられているコンクリートと金属の摩擦

係数 0.6 を用いて評価する。

(b) 評価結果

Ss900 時の加速度時刻歴より保守的に初期速度を 200cm/s としても移動距離は数 10cm であり、隣接する乾式キャスク間の距離 (約 3m^{※3}) よりも十分小さいため乾式キャスク同士は衝突しない。なお、実施計画 II-2-11 に記載されている摩擦係数 0.25 を用いた場合でも移動距離は 1m 未満であるため乾式キャスク同士は衝突しない。

※1：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させ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。

※2：「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」(日本機械学会論文集 Vol.82, No.834, 2016) では摩擦係数 0.63、「搬送中の貯蔵架台付き金属キャスクの長周期地震動に対する地震時安定性評価」(土木学会論文集 A1 Vol.68, No.2, 271-286, 2012) では摩擦係数 0.5~0.7 が使用されている。

※3：互いに衝突する向きに移動する場合、移動距離が約 1.5m 未満であれば衝突しない。

(3) コンクリートモジュールの落下・転倒による評価 (2.1 (2) a.)

a. 水平姿勢でトラニオンに衝突

(a) 評価方法

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する場合を評価する。

(b) 評価結果

乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。

b. 傾斜してフランジ部側面に衝突

(a) 評価方法

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する場合を評価する。

(b) 評価結果

乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。

c. 水平姿勢で外筒に衝突

(a) 評価方法

天板パネル 1 枚が形状を維持したまま外筒に落下する場合を評価する。

(b) 評価結果

乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。

d. 傾斜して外筒に衝突

(a) 評価方法

天板パネル 1 枚が形状を維持したまま外筒に落下する場合を評価する。

(b) 評価結果

乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。

(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 (2.1 (2) a.)

(a) 評価方法

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場合を評価する。

(b) 評価結果

基準温度を満足する見込み。

(5) クレーンの転倒による評価 (2.1 (3) a.)

(a) 評価方法

保守的にクレーンが形状を維持したまま乾式キャスクに転倒する場合を評価する。
なお、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。また、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ため乾式キャスク 2 基への衝突とする。

(b) 評価結果

乾式キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認。

2.3 耐震クラス分類

(1) 乾式キャスク

密封機能喪失により内包する放射性物質が漏えいし公衆への被ばく影響が大きいため耐

震クラスは S クラスに分類される。

(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。

また、乾式キャスクへの波及的影響については、「2.2 乾式キャスクへの影響評価」より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。

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

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+ クラスに分類される。

なお、乾式キャスクへの波及的影響については、「2.2 乾式キャスクへの影響評価」より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。

（※）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

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。

また、乾式キャスクへの波及的影響については、「2.2 乾式キャスクへの影響評価」より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。

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は、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。（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は、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。

この場合、(3)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+ クラスに分類される。

2.4 耐震評価（評価中）

(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、その時の当該設備の状態（損傷度合い）を定量評価することは困難である。一方、支持架台及びコンクリート基礎が弾性限界を超えた場合、一般的に地震力は増幅しない。

以上より、乾式キャスクの耐震評価では、保守的に支持架台及びコンクリート基礎が健全である時の最大加速度を入力して評価を行う。評価の結果、耐震性を確保できる見込み。

(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。

3. JEAC の耐震重要度分類の適用

「2.基本方針」に基づき当該設備の耐震クラスを分類したが、ここでは「原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2015）」の耐震重要度分類と相違ないか確認する。

JEAC では以下の通り、耐震重要度分類の適用が規定されている。（以下、JEAC 抜粋）

2.2 耐震クラス別施設

(1) Sクラスの施設

- a. 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系
- b. 使用済燃料を貯蔵するための施設
- c. 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設
- d. 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- e. 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- f. 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設
- g. 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設であり、上記の「放射性物質の放散を直接防ぐための施設」以外の施設
- h. 津波防護機能を有する施設及び浸水防止機能を有する施設
- i. 敷地における津波監視機能を有する施設

(2) Bクラスの施設

- a. 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設
- b. 放射性廃棄物を内蔵している施設。ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式により、その破損による公衆に与える放射線の影響が周辺監視区域外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く。

- c. 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設
- d. 使用済燃料を冷却するための施設
- e. 放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、Sクラスに属さない施設

(3) Cクラスの施設

上記Sクラス、Bクラスに属さない施設

2.3 耐震重要度分類の適用

(1) 設備区分

a. 主要設備

施設に課せられる機能に直接的に関連する設備

b. 補助設備

施設に課せられる機能に間接的に関連し、その補助的役割を持つ設備

c. 直接支持構造物

主要設備、補助設備に直接取り付けられる支持構造物、又はこれら設備の荷重を直接的に受ける支持構造物

d. 間接支持構造物

直接支持構造物から伝達される荷重を受ける鉄筋コンクリート及び鉄骨等の支持構造物

e. 波及的影響を考慮すべき施設

耐震クラス下位の分類に属するもののうち、その破損によってSクラスの施設に波及的影響を及ぼすおそれのある施設

(2) 設備区分に適用する耐震重要度分類

a. 主要設備が安全上要求される機能に関連する補助設備及び直接支持構造物については、主要設備と同一の耐震クラスとする。

b. 間接支持構造物については、耐震クラスは定めないが、支持する設備の耐震クラスに応じて適用される地震動を、確認用地震動として定義して定める。

c. 波及的影響を考慮する施設については、影響を受けるおそれのあるSクラスの施設の安全機能を維持するために考慮すべき地震動を、確認用地震動として定義して定める。なお、波及的影響を考慮する施設の耐震クラスは、その設備本来の機能上の分類によることとする。

【解説】

(1) 設備区分と耐震重要度分類との関連について

施設の安全機能は、主要設備だけでなく、補助設備及び直接支持構造物が健全かつそ

それぞれの機能を発揮することにより確実に果たされるものである。したがって、補助設備並びに直接支持構造物は主要設備の持つ安全機能に要求される耐震設計上の重要度と同一の重要度に分類する必要がある。

(2) 耐震重要度分類の適用に当たっての留意事項

- a. 主要設備が補助的役割を持つ機能を必要とせずに、それ自体で安全上の当該機能を満たす場合、主要設備の付属設備は補助設備とみなさない。

3.1 耐震クラス分類

(1) 乾式キャスク

耐震クラスは、「2.2 (1) b. 使用済燃料を貯蔵する施設」に該当するため Sクラス に分類される。

また、設備区分は「主要設備」に該当。

(2) 支持架台

耐震クラスは、「2.2 (3) Sクラス、Bクラスに属さない施設」に該当するため Cクラス に分類される。

また、設備区分は「直接支持構造物」に該当。

なお、「2.3 (2) a. 主要設備が安全上要求される機能に関連する補助施設及び直接支持構造物については、主要設備と同一の耐震クラスとする。」と規定されているが、本文「2.2 乾式キャスクへの影響評価」より、直接支持構造物（支持架台）は主要設備（乾式キャスク）の安全上要求される機能に関連しない。

また、【解説】においても、「(2)a. 主要設備が補助的役割を持つ機能を必要とせずに、それ自体で安全上の当該機能を満たす場合、主要設備の付属設備は補助設備とみなさない。」とあり、この考え方は技術的に主要設備（乾式キャスク）の安全機能が担保できるのであれば、直接支持構造物（支持架台）に適用しても矛盾ない。

以上より、支持架台の耐震クラスは必ずしも乾式キャスクと同一にする必要はない。

(3) コンクリートモジュール

耐震クラスは、「2.2 (1) b. 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設」に該当するため Bクラス に分類される。

また、設備区分は「波及的影響を考慮すべき施設」に該当。

(4) クレーン

耐震クラスは、「2.2 (3) Sクラス、Bクラスに属さない施設」に該当するため Cクラス に分類される。

また、設備区分は「波及的影響を考慮すべき施設」に該当。

(5) コンクリート基礎

耐震クラスは、「2.2 (1) b. 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破

損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設」に該当するため **B** クラスに分類される。

また、設備区分は「間接支持構造物」に該当。

以上より、本文「2.3 耐震クラス分類」における耐震クラス分類は **JEAC** における分類と相違ない。

4. 従来方針による評価

既存評価では、キャスク仮保管設備の構成設備が安全機能を失った際の乾式キャスクへの影響評価は実施しておらず、構成設備に対して旧 **Ss600** 機能維持を要求事項として耐震評価を行ってきた。本評価においても既存評価と同様に **Ss** 機能維持を要求事項として耐震設計を行った場合の評価を以下に示す。

表 既設と増設の耐震クラスまとめ

	既設		増設
乾式キャスク	S クラス (旧 Ss600 機能維持)	安全機能を維持するために必要な構造強度を有すること	S クラス
支持架台		乾式キャスクを落下・転倒させないこと	C クラス
コンクリートモジュール		乾式キャスクの安全機能に影響を与えるような倒壊等をしていないこと	B+クラス
クレーン		乾式キャスクの安全機能に影響を与えるような倒壊、転倒、逸走等が生じないこと	C クラス
コンクリート基礎		支持架台に作用する力を支持するとともに、これを固定する固定ボルトの引き抜きに抵抗すること、及び基礎の傾斜によりクレーンの転倒、倒壊などが生じないこと	B+クラス

4.1 耐震評価（評価中）

(1) 乾式キャスク

応答倍率法^{※4}による評価の結果、**Ss900** で耐震性を確保できる見込み。

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。
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

Ss900 で耐震性を確保できない見込み。

(4) クレーン

Ss900 で耐震性を確保できない見込み。

(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。

4.2 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：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

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	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

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	
基礎ボルト (注)	一次応力	引張	109	1.5	79	4.2	ケース 1 : 165	
			129	1.3	—	—	ケース 2 : 332	
		せん断	193	1.4	89	2.9	261	
			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	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。

2.2(1) 乾式キャスクの落下評価

■ 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

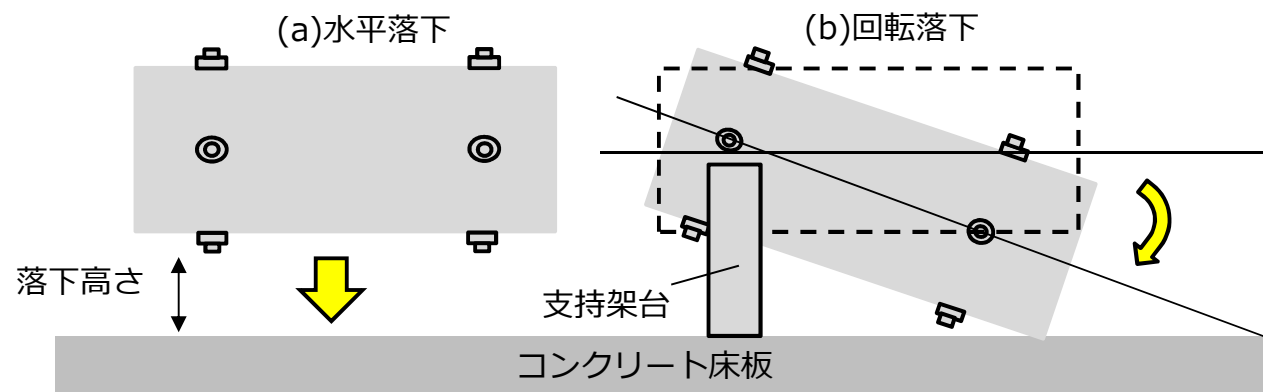
➤ 評価条件

(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。

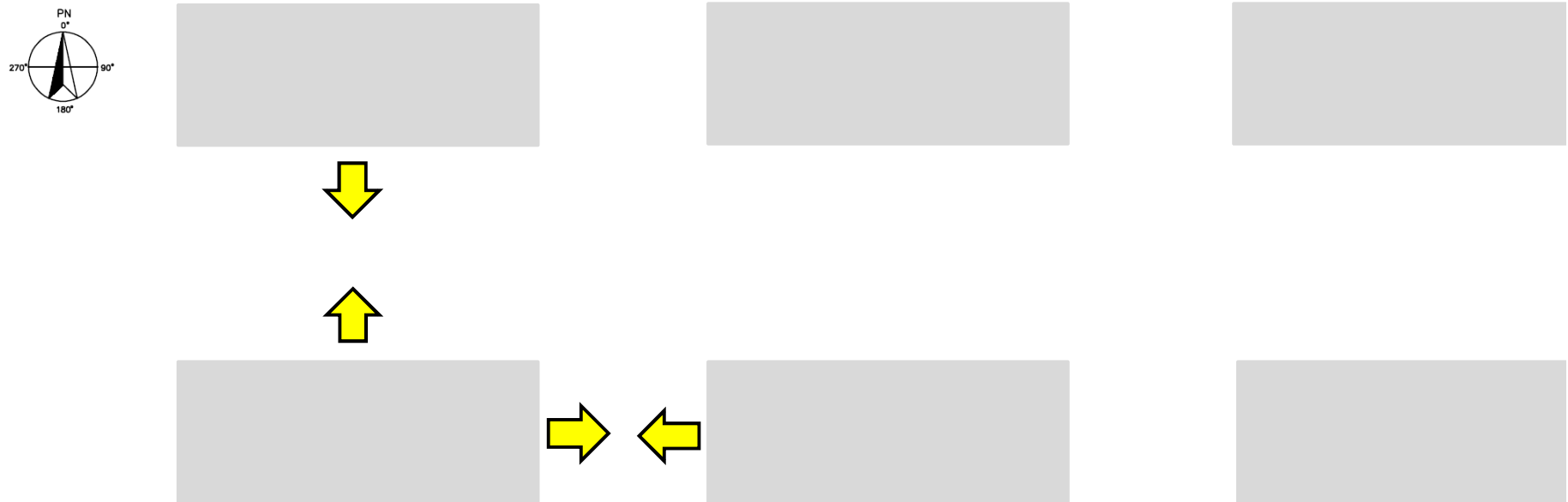


2.2(2) 乾式キャスク移動による衝突性評価

■ 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。

2.2(1),(2) 評価結果

※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

2.2(1),(2) 評価結果

※すべて暫定結果

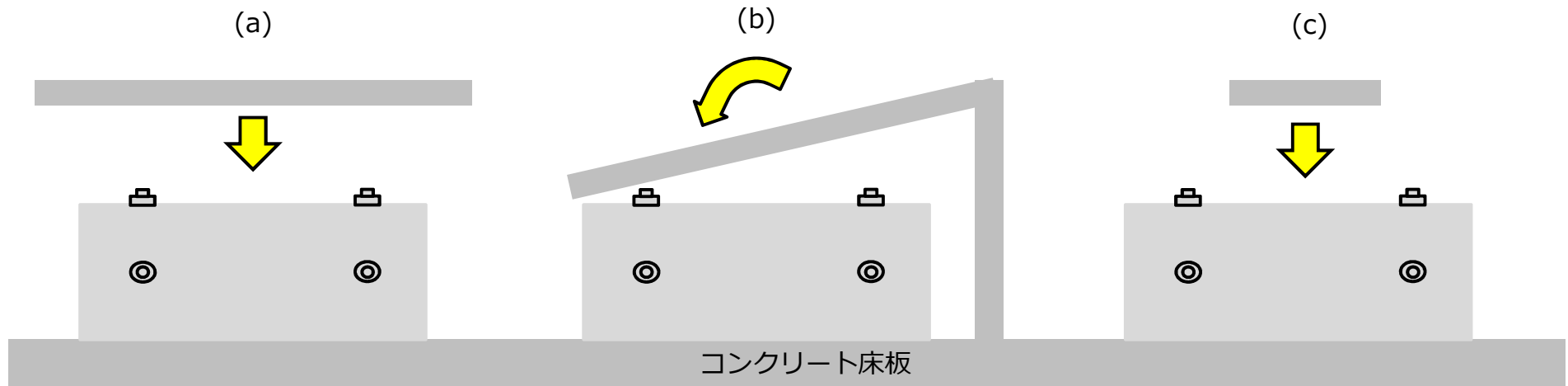
	評価対象	落下評価		衝突性評価	判定基準			
		(a) 水平落下	(b) 回転落下					
遮へい	外筒	○	塑性ひずみなし	○	塑性ひずみなし	○	衝突は生じない	・破断に対して十分余裕があること
	敷地境界線量	○	落下による影響はない	○	同左	○	衝突は生じない	・1mSv/y以下
臨界防止	燃料被覆管	○	降伏応力以下（鉛直方向最大加速度：バスケット中央で約40G）	○	降伏応力以下（鉛直方向最大加速度：バスケット中央で約30G）	○	衝突は生じない	・弾性範囲内
	バスケット	○	塑性ひずみなし（燃料が収納されていない部位にわずかなひずみが生じるが、臨界防止機能に影響はない）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

2.2(3) 乾式キャスクへの影響評価

■ 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。



2.2(4) 乾式キャスクの除熱評価

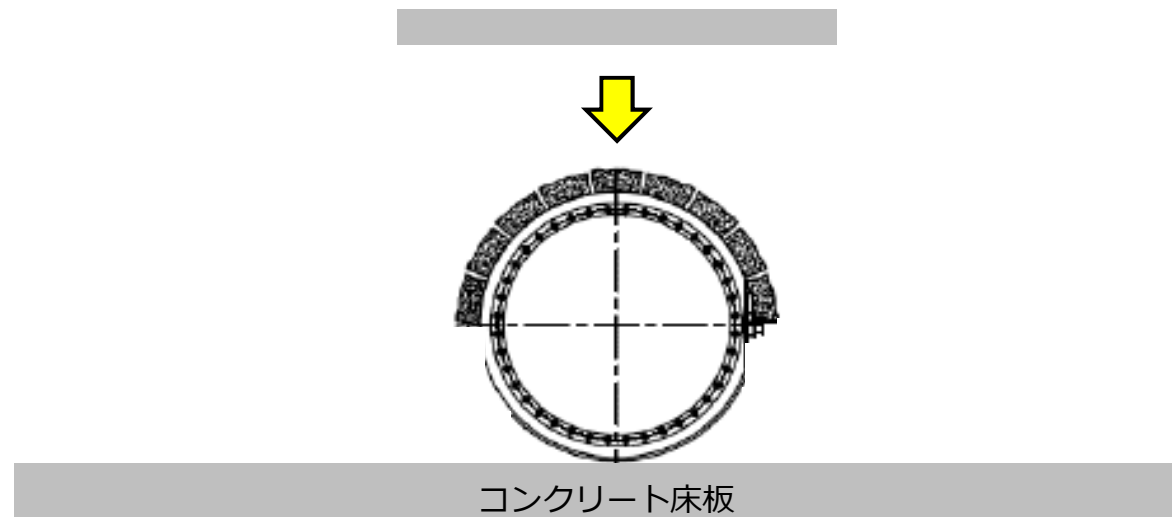
■ コンクリートモジュールの落下・転倒による乾式キャスクの除熱評価

➤ 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無視する。

➤ 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 μ Sv/y）と比較し約9倍の約540 μ Sv/y（見込み）

2.2(3),(4) 評価結果

※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)	・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 μ 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

2.2(5) 乾式キャスクへの影響評価

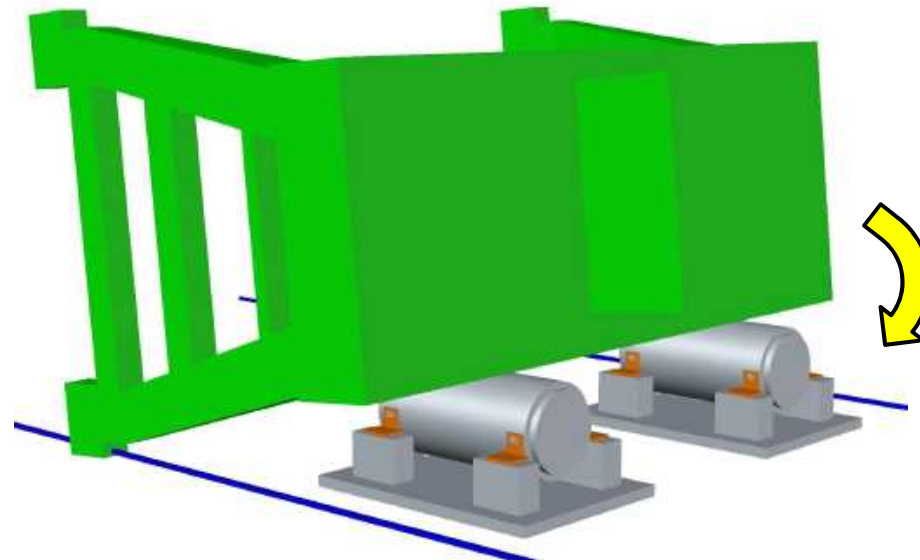
■ クレーンの転倒による乾式キャスクへの影響を評価

➤ 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。



2.2(5) 評価結果

※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】時間確率

■ クレーン使用中におけるSs発生時の時間確率

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

	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	$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ /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