

# 発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の 型式証明申請 設置許可基準規則への適合性について (第四、五、六条関連)

GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH

2023年12月14日

# 目次

---

1. 設置許可基準規則への適合性の概要
2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)
3. 設置許可基準規則への適合性(第五条)
4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

# 1. 設置許可基準規則への適合性の概要

## 設置許可基準規則適合性説明対象

設置許可基準規則	安全機能					構造健全性	設計条件	貯蔵施設に関する要件
	臨界防止	遮蔽	除熱	閉じ込め	長期健全性			
第四条:地震による損傷の防止	-	-	-	-	-	○	-	○
第五条:津波による損傷の防止	-	-	-	-	-	○	-	○
第六条:外部からの衝撃による損傷の防止	-	-	-	-	-	○	-	○
第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	○	○	○	○	○	-	-	○

青枠部分について、本資料で説明する。

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

設置許可基準規則第四条(地震による損傷の防止)の要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則(注1) 第四条第6項	兼用キャスクは、次のいずれかの地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。 一 兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかににかかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定めるもの 二 基準地震動による地震力	地盤の十分な支持を想定して貯蔵架台等に固定された特定兼用キャスクを基礎等に固定し、たて置きで設置し、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と兼用キャスク告示(注2)第一条で定める地震力を組み合わせた荷重条件に対して特定兼用キャスクの安全機能が損なわれない設計とする。	先行例のたて置きと同様。
設置許可基準規則解釈(注3) 別記4第四条第2項	第6項に規定する地震力(以下、「第6項地震力」)に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないものであること。	同上	同上
設置許可基準規則解釈 第四条第2項	<ul style="list-style-type: none"> <li>自重その他の貯蔵時に想定される荷重と第6項地震力を組み合わせた荷重条件を考慮すること。</li> <li>塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルにとどまって破断延性限界に十分な余裕を有すること。</li> <li>兼用キャスクの閉じ込め機能を担保する部位は、上記の荷重条件に対しておおむね弾性状態にとどまる範囲で耐えること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自重及び貯蔵中に想定される荷重と第6項地震力を組み合わせた荷重条件を考慮する。</li> <li>閉じ込め機能を担保する部材はおおむね弾性範囲内に、臨界防止機能を担保する部材は弾性範囲内に留まるように設計する。</li> <li>除熱機能及び遮蔽機能を担保する部材は、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有するように設計する。</li> </ul>	先行例は、内筒、中性子遮蔽材／伝熱フィン、外筒の多層構造となっているが、本キャスクは鋳鉄一体構造である。そのため、安全機能を担保する部位が先行例と異なる。
設置許可基準規則解釈 別記4第四条第3項	水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。	水平地震力及び鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用することを考慮する。	先行例と同様。

(注1)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2)「兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかににかかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示」

(注3)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

CASTOR® geo26JP型の地震による損傷の防止に係る設計方針について具体的には以下の通り。

### [設計方針]

- 地盤の十分な支持を想定して貯蔵架台等に固定された特定兼用キャスクを基礎等に 固定し、かつ、その安全機能を損なわない、基礎等に固定する方法でたて置きに設置する設計とする。
- 自重その他の貯蔵時に想定される荷重と兼用キャスク告示の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、キャスク本体による固定方法の場合は、特定兼用キャスクの貯蔵架台等に固定するキャスク本体の溝部と下部接触部は弾性状態に留まるようにし、特定兼用キャスクが転倒・滑動せず、特定兼用キャスクの安全機能に影響を及ぼさない設計とする。
- 上記の荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まるようにし、臨界防止機能を担保するバスケットの鋼製部材は弾性状態に留まるように設計する。その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有し、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。

### [評価方針]

- 自重その他の貯蔵時に想定される荷重と兼用キャスク告示の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、静的解析による構造健全性評価を実施し、滑動・転倒しないことを確認する。
- 同荷重条件に対して、安全機能を担保する部位の評価を実施し、安全機能に影響を及ぼさないことを確認する。

### [設計の妥当性(成立性見通し)]

- 構造健全性評価により特定兼用キャスクが転倒・滑動しないことを確認した。また、機能維持評価により、特定兼用キャスクの安全機能に影響を及ぼさないことを確認した。よって、地震力作用時に特定兼用キャスクの安全機能は維持される。

### [原子炉設置(変更)許可申請時の確認事項]

- 地震時に貯蔵施設における周辺施設等からの波及的影響によりCASTOR® geo26JP型の安全機能が損なわれないこと。

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の地震による損傷防止に対する設計方針を下表に示す。

確認内容	地震による損傷防止に関する設計方針	先行例との比較
<p>(基本方針)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>兼用キャスクを基礎等に固定する場合、兼用キャスク告示で定める加速度による地震力に対して安全機能が維持される設計であること。</li> <li>周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自重及び貯蔵中に想定される荷重と兼用キャスク告示第1条に定める加速度による地震力を組み合わせた荷重条件に対し、キャスク本体の溝部及び下部接触部を固定装置により貯蔵架台に固定することで、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。</li> <li>周辺施設からの波及的影響の評価については、本型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。</li> </ul>	<p>先行例ではトラニオンにより貯蔵架台に固定するのに対して、キャスク本体の溝部及び下部接触部を固定装置により固定する。</p>
<p>(荷重及び荷重の組合せ)</p> <p>兼用キャスクに作用する地震力と地震力以外の荷重を適切に組み合わせていること。</p>	<p>金属キャスク構造規格(注2)に基づき、特定兼用キャスクに作用する地震力に加え、地震力以外の荷重として、供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重)を組み合わせ評価する。</p>	<p>先行例と同様。</p>
<p>(許容限界)</p> <p>兼用キャスクの許容限界は、安全上適切と認められる規格等に基づき設定すること。加えて、兼用キャスクの閉じ込め機能及び臨界防止機能に関して、密封境界部がおおむね弾性範囲内となる許容限界とし、兼用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、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさない許容限界としていること。</p>	<p>金属キャスク構造規格に基づき許容限界を考慮し、保守的に、キャスク本体胴の許容限界を弾性範囲内と設定する。また、機能維持評価では、閉じ込め機能を担う密封境界部(一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト、胴)の構成部材は許容限界をおおむね弾性範囲内とし、臨界防止機能を担うバスケットは弾性範囲内と設定する。</p>	<p>機能維持評価は、先行例と同様。</p>

(注1)「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」

(注2)「日本機械学会 使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 2007年版」

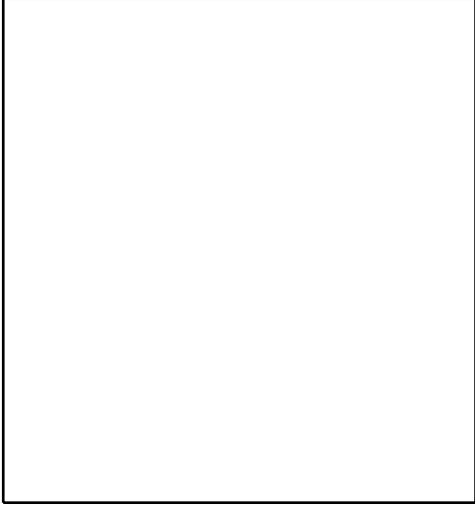
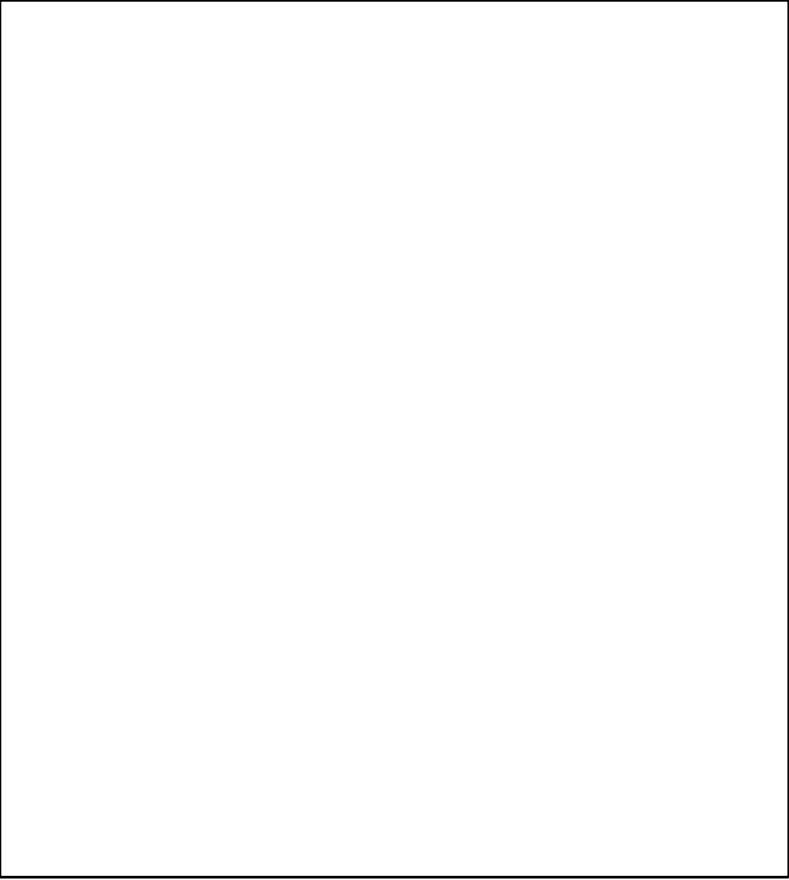
## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

### 審査ガイドへの適合性(つづき)

確認内容	地震による損傷防止に関する設計方針	先行例との比較
<p>(静的解析及び地震応答解析) 静的解析及び地震応答解析に用いる解析モデル及び解析手法は、JEAG4601の規定を参考に設定していること。静的解析において、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向に作用させること。</p>	<p>地震力に対する構造健全性評価は、キャスク本体による固定方法について、有限要素解析コードを用いて静的解析を実施する。機能維持評価については、応力評価式を用いた静的解析により実施する。ここで、静的解析における地震力は、兼用キャスク告示で定める地震力を用い、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組み合わせで作用させることを考慮する。</p>	<p>先行例では応力評価式により、トラニオンの応力評価を行っているが、本申請では有限要素解析コードを用いて静的解析を実施・評価する。</p>
<p>(耐震性評価) 兼用キャスクの耐震性を評価する上で必要な箇所を評価対象部位として選定し、安全上適切と認められる規格等の規定を参考に、応力評価及び疲労評価を行っていること。 第6項地震力と地震力以外の荷重を組合せ、その結果得られる応力等が、許容限界を超えていないこと。また、密封境界部以外の部位に塑性ひずみが生じる場合でも、その量が小さなレベルに留まって、破断延性限界に対して十分な余裕を有すること。</p>	<p>構造健全性評価については、特定兼用キャスクに作用する地震力に加えて、地震力以外の荷重として供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重)を組み合わせ評価を実施し、許容限界を超えないことを確認する。 耐震性を評価する上で必要な箇所は以下のとおりとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 転倒防止を担保する部材として、胴(キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部)</li> <li>・ 閉じ込め機能を担保する部材として密封境界部(一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト)</li> <li>・ 臨界防止機能を担保する部材としてバスケット</li> <li>・ 遮蔽及び除熱機能を担保する部材として胴(ボアホール部及び放熱フィン部)</li> </ul>	<p>構造健全性評価として、先行例におけるトラニオンによる固縛方法と異なり、キャスク本体溝部及び下部接触部が評価部位となる。</p>

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

- 特定兼用キャスクの**本体による固定方法**

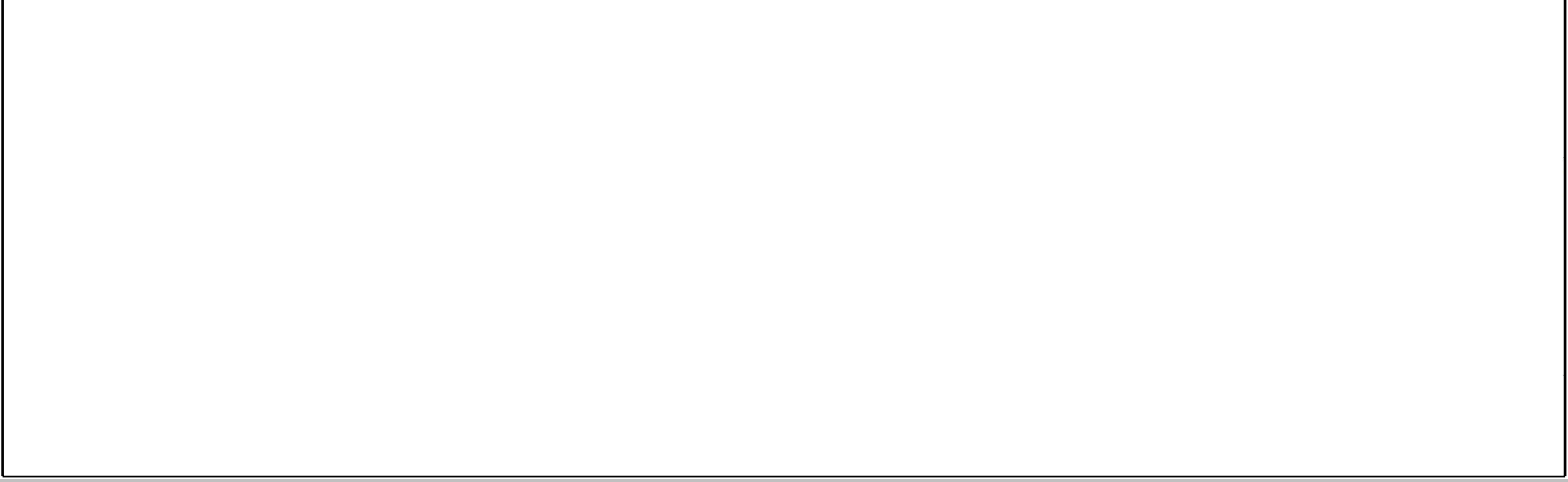


CASTOR® geo26JP型は、キャスク本体の溝部とキャスク本体の下部を固定装置により貯蔵架台に固定することで、地震力が作用してもキャスクの滑動や転倒を防ぐ設計とする。

固定装置の舌部をキャスク本体の溝部に嵌め込むことで上下動を制限し、固定装置の下部でキャスク本体を挟み込むことで水平方向の移動を制限する。

なお、キャスク底板は特定兼用キャスク本体と一体化するよう取り付けられるため横滑りすることはない、また、キャスク底板は固定装置と接触しない。

キャスク本体と固定装置間の接触部





## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

### ● 基本方針、荷重及び荷重の組合せ、許容限界

#### 評価に用いる地震力、荷重及びその組み合わせ

- 地震に対する評価に用いる地震力は、兼用キャスク告示が定める地震力とし、地震力を算出するために必要な加速度は、以下のとおりとする。  
水平:2300Gal、鉛直:1600Gal
- 水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組み合わせで作用させることを考慮する。
- 地震力以外の荷重として、供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重)を組み合わせる。

評価項目		評価対象	評価基準
構造健全性評価	転倒防止 (構造健全性)	胴(キャスク溝部及びキャスク下部接触部)	おおむね弾性範囲内
	機能維持評価		
	閉じ込め機能	密封境界部(一次蓋、一次蓋ボルト、胴)	おおむね弾性範囲内
	臨界防止機能	バスケット(H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板)	弾性範囲内
	遮蔽機能	胴(ボアホール部)	破断延性限界に十分な余裕を有する
	除熱機能	胴(放熱フィン部)	破断延性限界に十分な余裕を有する

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

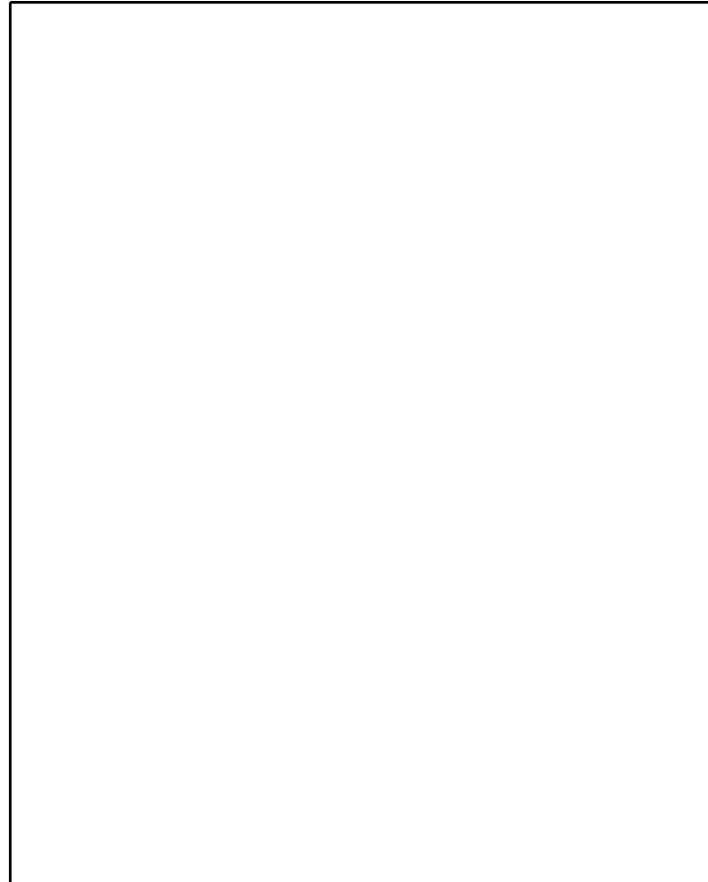
### ● 評価方法

構造健全性評価は、キャスク本体による固定方法では三次元有限要素解析コードを用いた応力計算により評価を行う。機能維持評価は安全機能に関わる構造部材の健全性を応力評価式を用いた応力計算、及び横ずれ荷重評価式により評価する。

[キャスク本体による固定方法での構造健全性評価]

(評価方法)

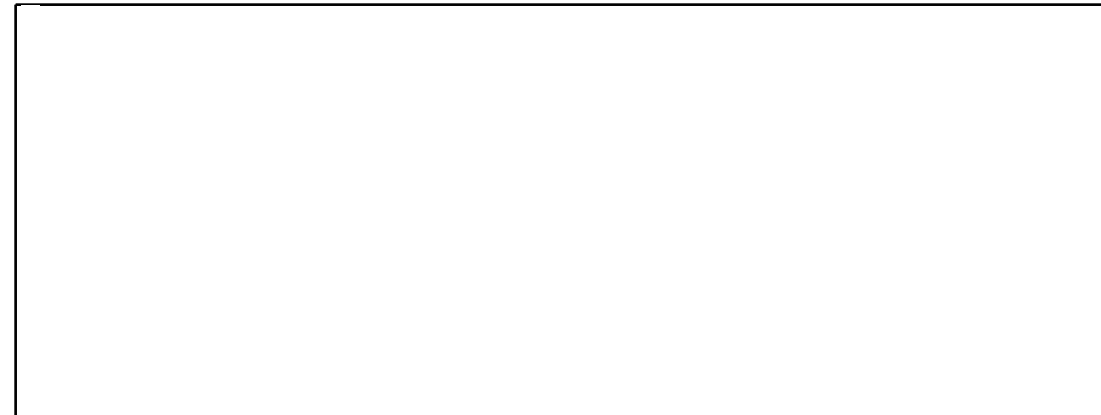
- 評価基準は、金属キャスク構造規格の設計応力強さよりも保守的な降伏応力を用いる。
- 静的解析手法として、有限要素計算プログラム ANSYS® Release 2021 R2 を用いる。
- 計算モデルは、評価対象であるキャスク本体下部(溝部及び下部接触部)、及び固定装置を詳細にモデル化し、その他の部分は簡略化してモデル化する。



(保守性)

- 評価基準の算出温度は、キャスク溝部及び下部固定装置接触部のうち高い温度である120°Cの値を用いる。
- 水平方向地震荷重が1つの固定装置で支持される場合がキャスク本体に対して最も大きな荷重が作用するため、この場合について評価する。
- 保守的にキャスクの溝部と固定装置の舌部の間に  の隙間を設定する。※

※設計貯蔵期間を通して、使用済燃料の発熱量と周囲環境温度変化をパラメータとして熱収縮を算出したところ、 となった。機械加工の誤差を含めても  は保守的な値である。



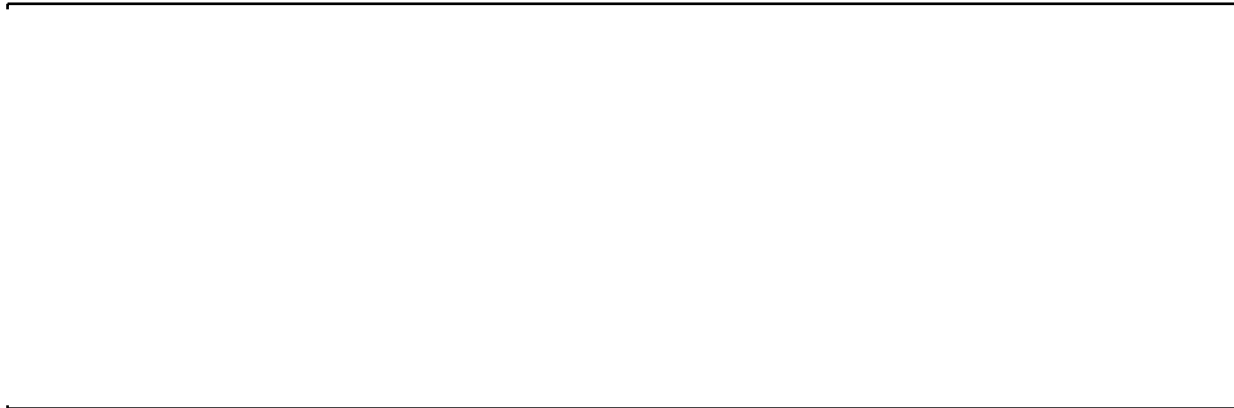
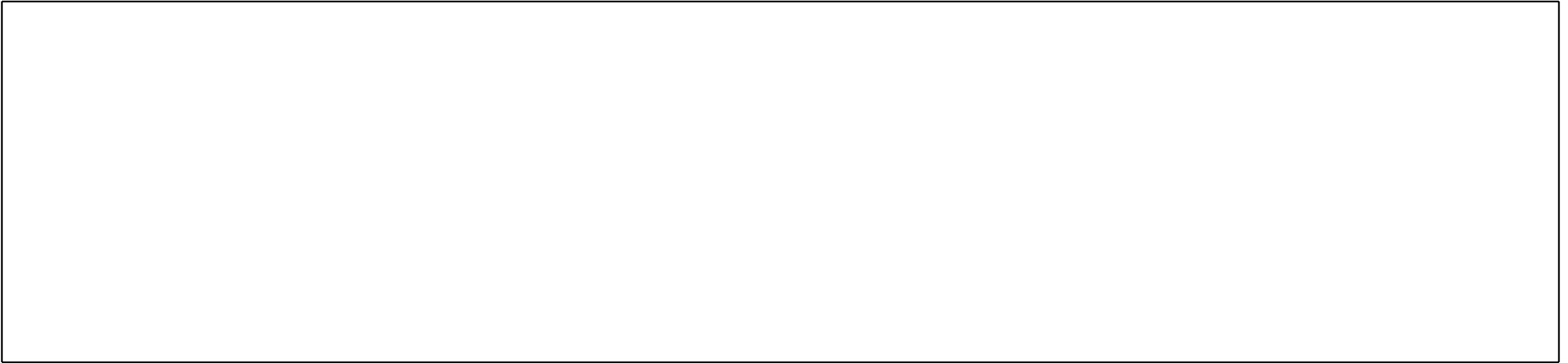
水平加速度方向

キャスクの溝部と固定装置の舌部間の隙間

内は商業機密のため、非公開とします。

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

### 評価結果(キャスク本体による固定方法)



- キャスク本体の溝と固定装置の舌部との接触面では、キャスクの溝部に面圧による応力がかかる。評価のため、応力は溝部中央の経路1上で線形化される(左上図参照)。偏心荷重により、キャスク溝部は圧縮応力だけでなく曲げ応力も受ける。この応力は経路2を介して線形化される(右上図参照)。その結果、膜応力と曲げ応力が評価される。
- 固定装置に対するキャスク下部の接触領域で、線形化された応力強度を評価する。左下図に評価経路を示す。固定装置の下部接触部からの表面圧力による膜応力を評価する。

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

評価結果のまとめ(構造健全性評価)

固定方法	評価項目	部材	作用応力	計算値	評価基準	
				[MPa]	[MPa]	
キャスク本体による 固定方法	キャスク溝部 経路1	球場黒鉛鋳鉄品 FCD300LT	一次膜応力	111.2	$S_y$	155.2
	キャスク溝部 経路2		一次膜応力	63.5	$S_y$	155.2
			一次膜+曲げ応力	86.7	$S_y$	155.2
	キャスク下部接触面積		一次膜応力	35.4	$S_y$	155.2

これらの結果から、地震荷重に対して、特定兼用キャスクに発生する応力は評価基準未満であり、構造健全性が損なわれることはなく、特定兼用キャスクは転倒しない。

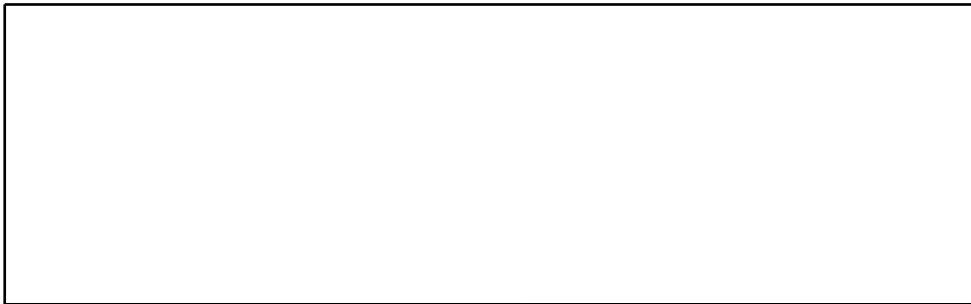
## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

### [機能維持評価]

#### (評価方法)

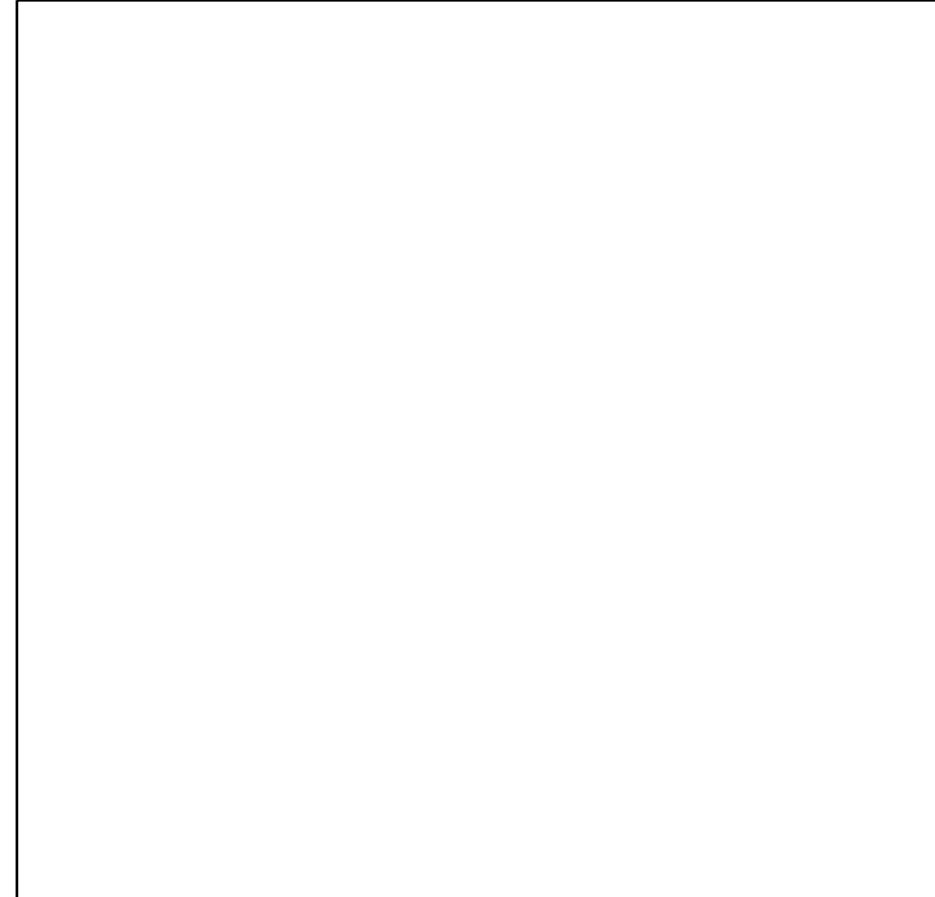
- 密封境界部(一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及び胴)、バスケットの地震時の慣性力に対する応力評価を応力評価式により実施する。
- 密封境界部の評価として、一次蓋金属ガスケットの横ずれによる隙間が生じることによる漏えい有無を確認するために、横ずれ荷重の評価式により一次蓋の横ずれ有無を評価する。
- 応力評価基準は、金属キャスク構造規格の設計応力強さよりも保守的な降伏応力を用いる。
- 一次蓋の横ずれの有無を評価するための評価基準は、地震時に一次蓋に作用する慣性力に対して、一次蓋ボルトの締め付け力により一次蓋に作用する摩擦力の方が大きいことを確認する。
- 胴(ボアホール部及び放熱フィン部)に発生する応力は、キャスク本体下部接触部に発生する応力との面積による比較によって算出する。

#### 密封境界部に発生する鉛直加速度



一次蓋密封シール部の応力計算モデル(慣性力、内圧)

#### バスケットに発生する鉛直加速度方向

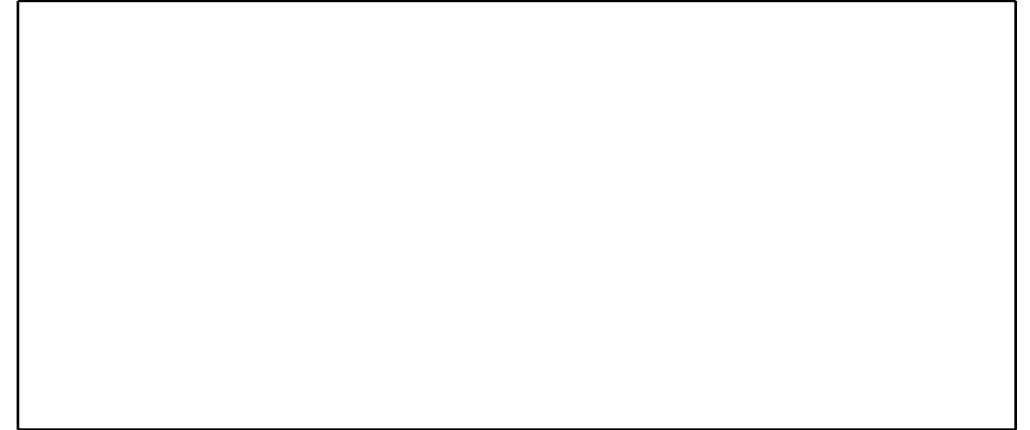


## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

バスケットに発生する水平加速度方向



中性子遮蔽材ボアホール及び放熱フィンに発生する応力



キャスク本体胴の断面積A1とキャスク下部固定装置の舌部が接触する部分の面積A2の比較によって行う。

H-ビームに作用させる荷重



## 2. 設置許可基準規則への適合性(第四条)

### 機能維持評価結果のまとめ

評価部位	部材	評価項目	評価基準		計算結果	評価結果	
			[MPa]	[MPa]	[MPa]		
密封境界部	一次蓋: ステンレス鋼 [ ] 又は [ ] キャスク本体: 球状黒鉛鋳鉄 FCD 300 LT	一次膜+ 一次曲げ応力	Sy	155.2	33.3	弾性範囲内	
	一次蓋ボルト	合金鋼棒鋼 [ ]	一次膜+曲げ応力	Sy	913.4	334.7	弾性範囲内
バスケット	H-ビーム	ステンレス鋼 [ ] 又はステンレス鋼(棒材) [ ]	一次膜応力	Sy	157	<2	弾性範囲内
	コーナーエレメント	ステンレス鋼 [ ]	一次曲げ応力	Sy	157	32	弾性範囲内
	バスケット側板	同上	一次膜応力	Sy	114	<2	弾性範囲内
胴	ボアホール部 放熱フィン部	球状黒鉛鋳鉄 FCD 300 LT	キャスク下部接触部の評価に包絡される。			弾性範囲内	

	地震により発生する慣性力 [N]	一次蓋の摩擦力[N]	評価結果
一次蓋横ずれ	142,702	3,456,000	一次蓋は横ずれしない

地震時に密封境界部及びバスケットに生じる応力は弾性範囲に留まり、閉じ込め機能及び臨界防止機能が損なわれることは無い。また、地震時に一次蓋に作用する慣性力は蓋締め付け時のボルト荷重による摩擦力より小さく、一次蓋の横ずれは生じない。さらに、地震時において中性子遮蔽材ボアホール及び放熱フィンに発生する応力は、キャスク本体下部接触部に発生する応力より小さいため、遮蔽機能および除熱機能が損なわれることはない。

したがって、地震時にCASTOR® geo26JP型の安全機能は維持される。

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第五条)

設置許可基準規則第五条(津波による損傷の防止)の要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則 第五条第2項第一号	兼用キャスク及びその周辺施設は、次のいずれかの津波に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。 一 兼用キャスクが津波により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかんにかかわらず判断するために用いる合理的な津波として原子力規制委員会が別に定めるもの 二 基準津波	兼用キャスク告示で定める合理的な津波(浸水深が十メートルで、流速が二十メートル毎秒)及び津波による遡上波の波力及び漂流物(質量100トン)の衝突による荷重が同時に作用する荷重が作用しても特定兼用キャスクの安全機能が損なわれない設計とする。	先行例と同じ考え方。
設置許可基準規則解釈 別記4第5条第1項第1号	第5条第2項の津波の設定に当たっては、以下の方針によること。 一 第1号に規定する「兼用キャスクが津波により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかんにかかわらず判断するために用いる合理的な津波として原子力規制委員会が別に定めるもの」については、兼用キャスク告示第2条によるものとする。		
設置許可基準規則解釈 別記4第5条第2項第1号	第5条第2項に規定する「安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」を満たすために、兼用キャスクの設計に当たっては、以下の方針によること。 一 兼用キャスク告示第2条に定める津波に対する兼用キャスクの設計については、次のとおりとする。 ・津波による遡上波の波力及び漂流物の衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないものであること。 ・上記の「漂流物の衝突」については、質量100トンの漂流物の衝突とすること。 ・上記の波力及び衝突による荷重については、同時に作用させること。		
兼用キャスク告示 第二条	設置許可基準規則第五条第2項第一号の原子力規制委員会が別に定める津波は、浸水深が十メートルで、流速が二十メートル毎秒である津波とする。		



### 3. 設置許可基準規則への適合性(第五条)

審査ガイドの確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の津波による損傷防止に対する設計方針を下表に示す。

確認内容	津波による損傷防止に関する設計方針	先行例との比較
<p>(基本方針)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>兼用キャスク告示で定める津波を適用する場合は、津波が兼用キャスクの設置位置へ遡上することを前提とした評価が行われていること。</li> <li>津波に対する評価に際しては、必要に応じて「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」及び「耐津波設計に係る設工認審査ガイド」を参考にしていること。</li> </ul>	<p>津波が特定兼用キャスクの設置位置へ遡上することを前提とした評価を行う。</p>	<p>先行例と同じ考え方</p>
<p>(設計・評価の方針)</p> <p>以下を踏まえたものであること。また、設計及び工事の計画の認可においては、津波荷重の設定、施設の寸法、構造及び強度が要求事項に適合するものであること。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>兼用キャスク告示で定める津波を適用する場合             <ol style="list-style-type: none"> <li>兼用キャスクの評価において保守的な荷重の作用及び組合せを設定すること</li> <li>1)において考慮する荷重としては、浸水深に基づく津波波力並びに流速及び漂流物質量に基づく衝突荷重を基本とし、それぞれの荷重については、兼用キャスクの評価上最も厳しくなる位置へ作用させること。</li> <li>津波波力及び漂流物荷重は、以下の指針等を参考に設定することができる。                 <ol style="list-style-type: none"> <li>津波波力(津波波圧)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針</li> </ul> </li> <li>漂流物衝突荷重                     <ul style="list-style-type: none"> <li>道路橋示方書・同解説(Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編)</li> </ul> </li> </ol> </li> <li>津波荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により行うこと。                 <ul style="list-style-type: none"> <li>基準津波を適用する場合</li> </ul> </li> </ol> </li> </ul> <p>(略)</p>	<p>金属キャスク構造規格に基づき、特定兼用キャスクに作用する津波荷重に加え、津波荷重以外の荷重として、供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重)を組み合わせて評価する。</p> <p>津波波力は、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」に、漂流物衝突荷重は「道路橋示方書・同解説(Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編)」に基づきそれぞれ設定する。</p> <p>津波荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により行う。</p>	<p>先行例と同じ考え方</p>

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第五条)

#### ● 基本方針、荷重及び荷重の組合せ、許容限界

##### 評価に用いる地震力、荷重及びその組み合わせ

津波が作用した場合の評価に用いる津波荷重は、兼用キャスク告示で定める津波による作用力とし、波力及び漂流物荷重を考慮する。これらを算出するための条件は以下のとおり。

- 浸水深：10 m、流速：20 m/s、漂流物質量：100 ton
- 津波による遡上波の波力及び漂流物の衝突による荷重を同時に作用させる。
- 津波以外の荷重として、供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重)の組合せを考慮する。

評価項目		評価対象	評価基準
機能維持評価	閉じ込め機能	密封境界部(一次蓋、一次蓋ボルト、胴)	おおむね弾性範囲内
	臨界防止機能 (注)	バスケット(H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板)	弾性範囲内
	遮蔽機能	胴(ボアホール部※)	破断延性限界に十分な 余裕を有する
	除熱機能	胴(放熱フィン部)	破断延性限界に十分な 余裕を有する

(注)臨界防止機能を担保する構成部材は、「使用済燃料を直接支持し、かつ燃料間距離を保つために変形を許容しない部材」とする。

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第五条)

- 静的解析(機能維持評価)

機能維持評価は安全機能に関わる構造部材の健全性を応力評価式を用いた結果で確認する。

津波波力は、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」に示される評価式により算出する。

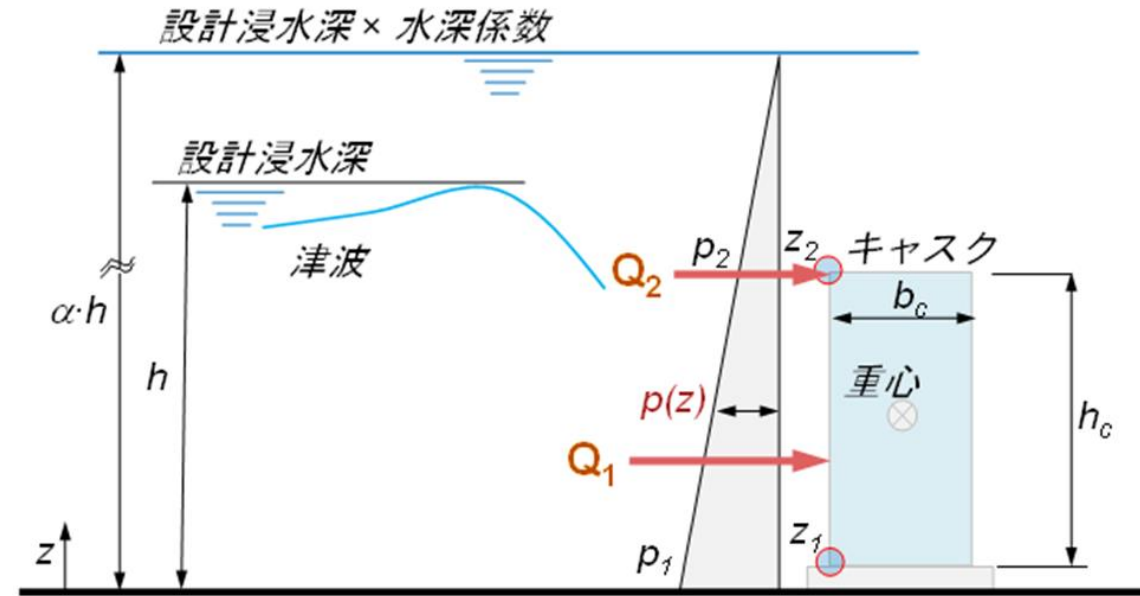
条件及び計算結果を表1に示す。

$$p(z) = \rho \cdot g \cdot (a \cdot h - z)$$

$$Q_1 = \int_{z_1}^{z_2} p(z) \cdot dz = b_c \cdot \rho \cdot g [a \cdot h(z_2 - z_1) - 1/2 \cdot (z_2^2 - z_1^2)]$$

$$Q_1 = b_c \cdot \rho \cdot g [a \cdot h(z_2 - z_1) - 1/2 \cdot (z_2^2 - z_1^2)]$$

- p(z) : 波圧
- $\rho$  : 海水の密度(1030kg/m<sup>3</sup>)
- g : 重力加速度(9.81m/s<sup>2</sup>)
- a : 水深係数(3)
- h : 設計浸水深(m)
- b<sub>c</sub> : 受圧面の幅(m)
- h<sub>c</sub> : 受圧面の高さ(m)
- z<sub>1</sub> : 受圧面の最小高さ(m)
- z<sub>2</sub> : 受圧面の最大高さ(m)



項目	記号	単位	値
浸水深	h	m	10
受圧面の最小高さ	z <sub>1</sub>	m	0
受圧面の最大高さ	z <sub>2</sub>	m	
受圧面の幅	b <sub>c</sub>	m	
<b>津波波力</b>	<b>Q<sub>1</sub></b>	<b>MN</b>	<b>3.55</b>

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第五条)

漂流物衝突荷重 $Q_2$ は、「道路橋示方書・同解説(Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編)」に示す次の衝突荷重の評価式により算出する。

$$Q_2 = 0.1 \cdot W \cdot v$$

$$W = m_d \cdot g$$

- W : 漂流物の重量 (MN)  
 v : 表面流速(m/s)  
 $m_d$  : 漂流物重質量(Mg)  
 g : 重力加速度 (9.81m/s<sup>2</sup>)

説明	記号	単位	計算条件又は計算結果
漂流物質量	$m_d$	Mg	100
漂流物の重さ	W	MN	0.981
表面流速	v	m/s	20
漂流物衝突荷重	$Q_2$	MN	1.96

説明	記号	単位	値
津波波力	$Q_1$	MN	3.55
漂流物衝突荷重	$Q_2$	MN	1.96
津波荷重	Q	MN	5.51

よって、津波荷重は**5.51MN**となる。

津波荷重約 $Q=5.51$  MNは、後述する竜巻荷重 $F_{T2h}=8.54$  MN より小さいため、津波に対する機能維持評価は竜巻荷重に対する機能維持評価に包絡される。(具体的な数値の比較は第六条竜巻による損傷の防止にて示す。)

竜巻荷重に対する機能維持評価では、CASTOR<sup>®</sup> geo26JP型では津波荷重が作用しても密封境界部に生じる応力は弾性範囲に留まり、一次蓋の横ずれは発生しないことから、閉じ込め機能は維持される。バスケットに生じる応力は、使用済燃料を直接支持し、かつ燃料間距離を保つために変形を許容しない部材について弾性範囲に留まることから、臨界防止機能は維持される。胴(フィン部及びボアホール部)に生じる応力は弾性範囲に留まることから、除熱機能及び遮蔽機能は維持される。

したがって、CASTOR<sup>®</sup> geo 26JP型に津波荷重が作用しても、特定兼用キャスクの安全機能は維持される。

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

設置許可基準規則第六条第4項のうち、竜巻による損傷の防止の要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則 第六条第4項第一号	兼用キャスクは、次に掲げる自然現象が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。 一 兼用キャスクが竜巻により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な竜巻として原子力規制委員会が別に定めるもの	兼用キャスク告示で定められる竜巻(最大風速100m/s)による荷重及び設計飛来物(竜巻影響評価ガイド解析表4.1で示される飛来物)の衝突による荷重を組み合わせた荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能を損なわない設計とする。	先行例と同じ考え方。
設置許可基準規則 別記4第6条第2項 第1号	第6条第4項に規定する「自然現象」については、以下のとおりとする。 一 第1号に規定する「兼用キャスクが竜巻により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な竜巻として原子力規制委員会が別に定めるもの」については、次のとおりとする。 ・兼用キャスク告示第3条によるものとする。 ・竜巻による飛来物の衝突に対して、その安全機能を損なわないものであること。		
兼用キャスク告示第 三条	設置許可基準規則第六条第4項第一号の原子力規制委員会が別に定める竜巻は、風速が百メートル毎秒である竜巻とする。		

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

審査ガイドの確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の竜巻による損傷防止に対する設計方針を下表に示す。

確認内容	竜巻による損傷防止に関する設計方針	先行例との比較
<p>(考慮する自然現象等の設定方針)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>設置許可基準規則第6条第4項に規定する兼用キャスク告示で定める竜巻として、設置許可基準規則の解釈別記4第6条第2項第1号に基づき、設計竜巻(原子力発電所の竜巻影響評価ガイド「1.4 用語の定義」に規定する「設計竜巻」をいう。以下同じ。)の最大風速を以下のとおり定め、設計荷重を設定していること。</li> <li>最大風速：100m/s</li> <li>設計荷重の設定に用いる設計飛来物は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に基づき、兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定していること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>竜巻が作用した場合の評価に用いる設計荷重の設定に用いる最大風速及び設計飛来物は以下の通り設定する。               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 最大風速 最大風速は100m/sとする。</li> </ul> </li> <li>設計荷重の設定に用いる設計飛来物は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの解説表4.1に示される飛来物とする。竜巻荷重が作用する場合の評価ではCASTOR® geo26JP型へ最大の影響を与える飛来物を選定する。</li> </ul>	<p>先行例と同じ考え方</p>
<p>(設計方針)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>竜巻による飛来物の衝突荷重及び衝突による評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考にしていること。</li> <li>設計竜巻に対する飛来物及び最大速度は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に記載の値を参考に設定し、飛来物の衝突荷重を算定(例えば、建築物の耐衝撃設計の考え方((一社)日本建築学会 2015.1)を参考に飛来物の圧潰挙動を無視して Riera の式等で算定)していること。</li> <li>竜巻荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM 解析に基づく応力評価等により行われていること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>竜巻荷重が作用する場合の評価については、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドを参考に実施し、特定兼用キャスクの安全機能が維持されることを確認する。</li> <li>設計竜巻に対する設計飛来物及び最高速度は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの解説表4.1に記載されている値を用い、設計飛来物の衝撃荷重はRieraの手法に基づき、飛来物の圧壊挙動を無視して算定する。</li> <li>竜巻荷重に対する特定兼用キャスクの詳細評価は、型式指定において、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM 解析に基づく応力評価等により行う。</li> </ul>	<p>先行例と同じ考え方</p>

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

### ● 基本方針、荷重及び荷重の組合せ、許容限界

#### 評価に用いる地震力、荷重及びその組み合わせ

- CASTOR® geo26JP型に竜巻が作用した場合の評価に用いる設計荷重の設定に用いる最大風速及び設計飛来物は以下の通り設定する。  
 最大風速: 100m/s  
 設計飛来物: 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの解説表4.1に示される飛来物を設計飛来物。CASTOR® geo26JP型への最大の影響を与える飛来物を選定。衝撃荷重はRieraの手法に基づき、飛来物の圧壊挙動を無視して算定。
- 竜巻の作用力、風圧による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせる。
- 竜巻による荷重及び飛来物の衝突による荷重以外の荷重として、供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重)の組合せを考慮する。

評価項目	評価対象	評価基準	
機能維持評価	閉じ込め機能	密封境界部(一次蓋、一次蓋ボルト、胴)	おおむね弾性範囲内
	臨界防止機能 (注)	バスケット(H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板)	弾性範囲内
	遮蔽機能	胴(ボアホール部※)	破断延性限界に十分な余裕を有する
	除熱機能	胴(放熱フィン部)	破断延性限界に十分な余裕を有する

(注)臨界防止機能を担保する構成部材は、「使用済燃料を直接支持し、かつ燃料間距離を保つために変形を許容しない部材」とする。

# 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

## ● 竜巻荷重の設定

### ① 風圧力による荷重

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot v_D^2$$

- G : ガスト影響係数
- C : 風力係数
- A : 受圧面積(m<sup>2</sup>)
- ρ : 空気密度(kg/m<sup>3</sup>)
- V<sub>D</sub> : 設計竜巻の最大風速(m/s)

項目	記号	単位	値
ガスト影響係数	G	-	1.0
風力係数	C	-	1.2
受圧面積	A	m <sup>2</sup>	<input type="text"/>
空気密度	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1.22
設計竜巻最大風速	V <sub>D</sub>	m/s	100
風圧力による荷重	F <sub>W</sub>	MN	0.092

### ② 気圧差による荷重

内圧を0として内外気圧差を保守的に0.101MPaと設定した。竜巻によって生じる気圧低下は、本保守性に包絡される。

項目	記号	単位	値
最低内圧(注1)	P <sub>1</sub>	MPa	0
大気圧	P <sub>a</sub>	MPa	0.101
気圧差	ΔP	MPa	0.101

### ③ 設計飛来物による衝撃荷重

設計飛来物による衝撃荷重(F<sub>M</sub>)は、衝突前の飛来物の運動量と衝撃荷重による力積(衝撃荷重時刻歴:矩形波または三角波、衝撃時間=衝撃長さ/速度)が等しいと仮定して、飛来物の衝突による減速を考慮せずに、飛来物の圧壊挙動を無視し、Rieraの方法に基づいて算出する。

時刻歴に矩形波を想定する場合(鋼製パイプ、鋼製材、コンクリート板):

$$F_M = \frac{M \cdot v^2}{L_{min}}$$

時刻歴に三角波を想定する場合(コンテナ、トラック):

$$F_M = \frac{2 \cdot M \cdot v^2}{L_{min}}$$

- M : 質量(kg)
- v : 飛来物の最高設計速度(m/s)
- L<sub>min</sub> : 設計対象物の衝突方向長さ(最小長さ)(m)



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

### ③ 設計飛来物による衝撃荷重(続き)

飛来物の種類	寸法			質量 M [kg]	最小長さ L <sub>min</sub> [m]	速度		衝撃荷重	
	l <sub>1</sub> [m]	l <sub>2</sub> (d) [m]	l <sub>3</sub> [m]			v <sub>h</sub> [m/s]	v <sub>v</sub> [m/s]	F <sub>h</sub> [MN]	F <sub>v</sub> [MN]
鋼製パイプ	2	0.05	-	8.4	0.05	49	33	0.01	0
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	0.2	51	34	1.76	0.78
コンクリート板	1.5	1	0.15	540	0.15	30	20	3.24	1.44
コンテナ	2.4	2.6	6	2300	2.4	60	40	6.9	3.07
トラック	5	1.9	1.3	4750	1.3	34	23	8.45	3.87

### ⑤ 竜巻荷重と組み合わせる荷重について

常時作用する荷重

CASTOR® geo26JP型の供用中に常時作用する荷重として、圧力荷重(内圧、蓋間圧力等)、機械的荷重(蓋ボルト締付力、金属ガスケット締付力等)、及び熱荷重を考慮する。

### ④ 複合荷重

機能維持評価に用いられる竜巻荷重は、風圧力による荷重F<sub>W</sub>、圧力差F<sub>P</sub>による荷重、及び設計飛来物による衝撃荷重F<sub>M</sub>の組み合わせた複合荷重F<sub>T1</sub>及びF<sub>T2</sub>とする。

$$F_{T1} = F_P$$

$$F_{T2} = F_W + 0.5 \cdot F_P + F_M$$

項目	記号	単位	算出された荷重
風圧力による荷重	F <sub>W</sub>	MN	0.092
気圧差による荷重	F <sub>P</sub>	MN	-
設計飛来物の水平方向衝撃荷重	F <sub>Mh</sub>	MN	8.45
設計飛来物の鉛直方向衝撃荷重	F <sub>Mv</sub>	MN	3.87
水平方向複合荷重	F <sub>T1h</sub>	MN	-
	F <sub>T2h</sub>	MN	8.54
鉛直方向複合荷重	F <sub>T1v</sub>	MN	-
	F <sub>T2v</sub>	MN	3.96

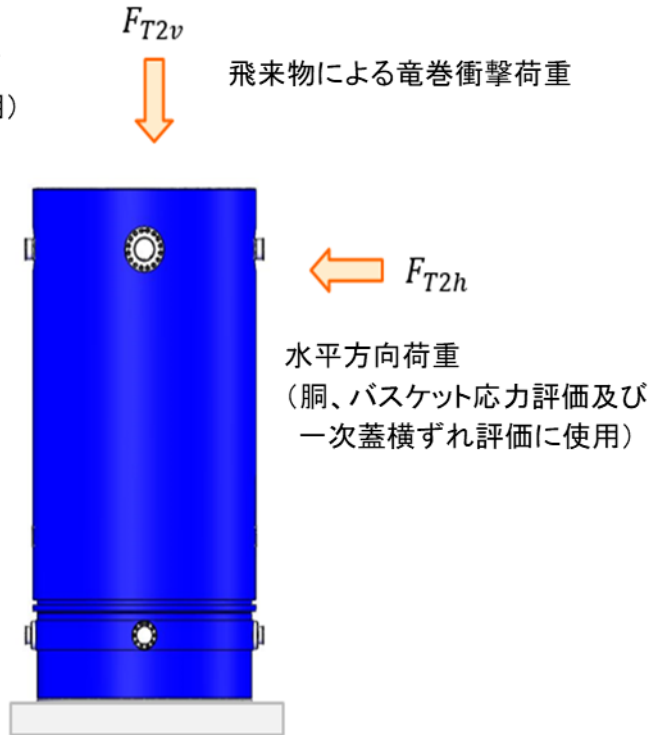
## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

### ■ 静的解析(機能維持評価)

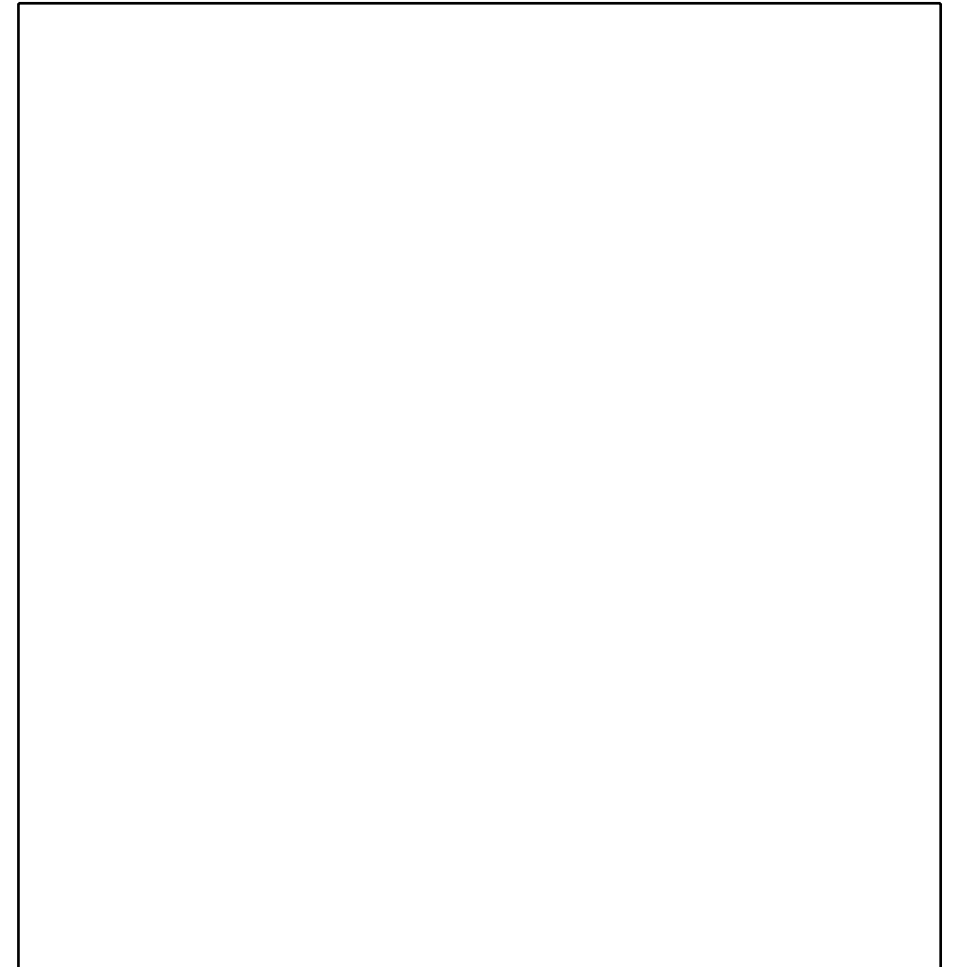
竜巻荷重作用方向

鉛直方向荷重

(密封境界部応力評価及び  
バスケット応力評価に使用)

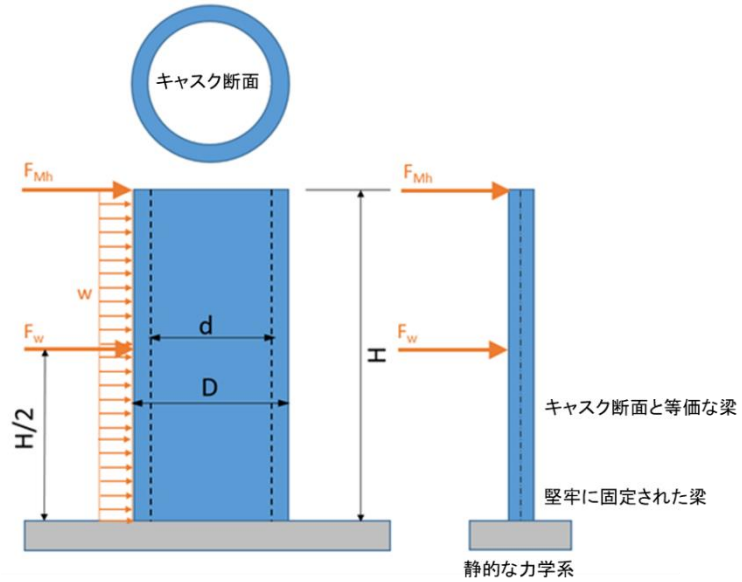


鉛直方向竜巻荷重(バスケット)



# 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

水平方向竜巻荷重(胴)作用方向



水平方向竜巻荷重(バスケット)作用方向



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

水平方向竜巻荷重(バスケット側板)

水平方向竜巻荷重(コーナーエレメント)



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第六条)

### 機能維持評価結果のまとめ

評価部位	部材	評価項目	評価基準		計算結果	評価結果	
			[MPa]	[MPa]	[MPa]		
密封境界部	一次蓋密封シール部 一次蓋ボルト	一次蓋:ステンレス鋼 [ ]	一次膜+	Sy	155.2	33.9	弾性範囲内
		キャスク本体:球状黒鉛鋳鉄 FCD 300 LT	一次曲げ応力				
	胴	合金鋼棒鋼 [ ]	一次膜+曲げ応力	Sy	913.4	410.7	弾性範囲内
			球状黒鉛鋳鉄 FCD 300 LT 同上	一次曲げ応力	Sy	155.2	77
バスケット	H-ビーム	ステンレス鋼 [ ] 又はステンレス鋼(棒材) [ ]	せん断応力	$Sy/\sqrt{3}$	89.6	9	弾性範囲内
			一次膜応力	Sy	157	<2	弾性範囲内
	コーナーエレメント	ステンレス鋼 [ ]	一次曲げ応力	Sy	157	86	弾性範囲内
			一次膜応力	Sy	114	<2	弾性範囲内
	バスケット側板	同上	一次曲げ応力	Sy	114	20	弾性範囲内
			一次膜応力	Sy	114	<2	弾性範囲内
			一次曲げ応力	Sy	114	38.8	弾性範囲内

	竜巻により発生する慣性力 [MN]	一次蓋の摩擦力[N]	評価結果
一次蓋横ずれ	0.436	3.456	一次蓋は横ずれしない

計算結果と評価基準との比較から、竜巻荷重が作用しても密封境界部に生じる応力は弾性範囲に留まり、また、一次蓋の横ずれは生じないことから、閉じ込め機能は維持される。バスケットに生じる応力は、使用済燃料を直接支持し、かつ燃料間距離を保つために変形を許容しない部材について弾性範囲に留まることから、臨界防止機能は維持される。胴(フィン部及びボアホール部)に生じる応力は弾性範囲に留まることから、除熱機能及び遮蔽機能は維持される。