

補足説明資料

第六条

外部からの衝撃による損傷の防止

竜巻に対する安全機能維持に関する説明資料

目 次

1. 要求事項	3
2. 要求事項への適合性	6
3. 参考文献	16

別紙: 竜巻荷重が作用した場合の兼用キャスクの機能維持評価

1

要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、特定兼用キャスクの外部からの衝撃による損傷の防止に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則 第六条第4項

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
- 二 想定される森林火災

b. 設置許可基準規則解釈 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。

c. 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。

(2) 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確認事項

「4. 自然現象に対する兼用キャスクの設計 4.2 考慮する自然現象等の設定方針、4.3 考慮する自然現象等に対する設計方針」には、以下の様に記載されている。

【審査における確認事項】

『

(考慮する自然現象等の設定方針)

- (1) 設置許可基準規則第6条第4項に規定する竜巻による作用力を適用していること。
- (2) 設置許可基準規則第6条第4項及び第6項に規定する外部事象を適用していること。

(設計方針)

- (3) 兼用キャスクは、(1)に示す竜巻による作用力に対して安全機能が維持されること。
- (4) 兼用キャスクは、(2)に示す森林火災、爆発及び人為による火災に対して安全機能が維持されること。

【確認内容】

『

(考慮する自然現象等の設定方針)

- (1) 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。
・最大風速：100m/s
- (2) 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。
- (3) 設置許可基準規則の解釈別記4第6条第2項第2号及び同条第3項に基づき、森林火災、爆発及び人為による火災(隣接する工場等の火災をいう。以下同じ。)を選定していること。
- (4) その他の外部事象のうち、(1)で選定した事象以外の事象については、以下のとおりとする。

① 火山立地評価

(略)

② ①以外の外部事象(火山灰層厚、積雪、落雷等)

兼用キャスク告示で定める地震力等に対する安全機能の維持を求めることを踏まえると、①以外の外部事象は兼用キャスクの安全機能を損なわせるものではないと考えられるため、個別の確認は不要とする。

(設計方針)

- (5) 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。

- (6) 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。
- (7) 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。
- (8) 森林火災、爆発及び人為による火災に対する具体的な評価は、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づき、離隔等の適切な対応が図られていること。

』

2

要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

CASTOR® geo26JP 型の外部からの衝撃のうち、竜巻による損傷防止に関する設計は、以下の通り設置許可基準規則に適合している。

a. 設置許可基準規則 第六条第 4 項

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
- 二 想定される森林火災

b. 設置許可基準規則解釈 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。

c. 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。

CASTOR® geo26JP 型は、兼用キャスク告示で定められる竜巻による荷重及び設計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。

特定兼用キャスクの安全機能のうち、閉じ込め機能及び臨界防止機能を担保する構成部材は全て弾性範囲に留まるように設計する。

2. (2) 審査ガイドへの適合性の説明に示す通り、竜巻荷重が作用した場合の評価には、兼用キャスク告示で定める竜巻の作用力とし、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。また、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)の組合せを考慮しても、許容基準を超えないことを確認する。なお、評価に用いる材料の設計値については、1024-TR-00008“CASTOR® geo26JP 型の型式証明申請に関する補足説明資料 -材料-”参考文献[1]で説明する。

なお、設置許可基準規則第六条第 4 項第二号の規定の「想定される森林火災」については、型式証明申請の対象外とし、原子炉設置(変更)許可時に確認を受ける事項とする。

(注) CASTOR® geo26JP 型に衝突する設計飛来物は、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(第 1 表)とし、飛来物の種類、寸法、質量及びその最大速度を設定する。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能を維持するために自然現象等に対する基本方針の妥当性を確認することが定められており、特定兼用キャスクの外部からの衝撃のうち、竜巻による損傷防止に関する設計は、以下の通り審査ガイドの確認内容に適合している。

【確認内容】

- (1) 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。
 ・最大風速：100m/s
- (2) 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。

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。

a) 最大風速

最大風速は 100m/s とする。

b) 設計飛来物

表 1 に記載する、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とする。CASTOR[®] geo26JP 型に竜巻荷重が作用する場合の評価では CASTOR[®] geo26JP 型への最大の影響を与える飛来物を選定する。

表 1 設計飛来物

飛来物の種類	棒状物		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
サイズ (m)	長さ×直径 2 × 0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量 (kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度 MV_{Hmax} (m/s)	49	51	30	60	34
最大鉛直速度 MV_{Vmax} (m/s)	33	34	20	40	23

【確認内容】

- (3) 設置許可基準規則の解釈別記4第6条第2項第2号及び同条第3項に基づき、森林火災、爆発及び人為による火災(隣接する工場等の火災をいう。以下同じ。)を選定していること。
- (4) その他の外部事象のうち、(1)で選定した事象以外の事象については、以下のとおりとする。
 - ① 火山立地評価
(略)
 - ② ①以外の外部事象(火山灰層厚、積雪、落雷等)
兼用キャスク告示で定める地震力等に対する安全機能の維持を求めることを踏まえると、①以外の外部事象は兼用キャスクの安全機能を損なわせるものではないと考えられるため、個別の確認は不要とする。
- (8) 森林火災、爆発及び人為による火災に対する具体的な評価は、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づき、離隔等の適切な対応が図られていること。

火山立地調査、森林火災、爆発及び人為による火災に対する評価は、型式証明申請の範囲外としている。

【確認内容】

- (5) 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。
- (6) 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。
- (7) 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。

CASTOR[®] geo26JP 型に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、CASTOR[®] geo26JP 型の安全機能が維持されることを確認する。

設計竜巻に対する設計飛来物及び最高速度は、表 1 に示す通り、原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの表 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。

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。

型式証明における設計方針の妥当性確認として、CASTOR[®] geo26JP 型に竜巻荷重が作用した場合の機能維持評価を実施し、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計であることを確認する。機能維持評価の概要を以下に示す。

〈竜巻荷重による CASTOR[®] geo26JP 型の機能維持評価〉

CASTOR[®] geo26JP 型に竜巻荷重が作用した場合の機能維持評価では、上記の竜巻荷重に対して特定兼用キャスクの安全機能のうち閉じ込め機能及び臨界防止機能を担保する部材は全て弾性範囲に留まることを確認する。なお、フィンがキャスク本体の一部であり中性子遮蔽材はキャスク内部に配置されていて、竜巻荷重に対してキャスク本体が弾性範囲であることから、CASTOR[®] geo26JP 型の除熱機能及び遮蔽機能は損なわれることはない。伝熱および遮蔽機能は損なわれず、[2]および[3]においてより別途詳細に述べる。

また、上記で計算した竜巻荷重に加え、供用中に作用する荷重（圧力荷重、機械的荷重、熱荷重）を組み合わせた荷重に基づき、密封境界（一次蓋、一次蓋ボルト）およびバスケットに生じる応力について応力評価式を用いて算出し、これらの部材の構造健全性を評価する。また、閉じ込め機能を維持するための、一次蓋の横ずれ有無を評価する。

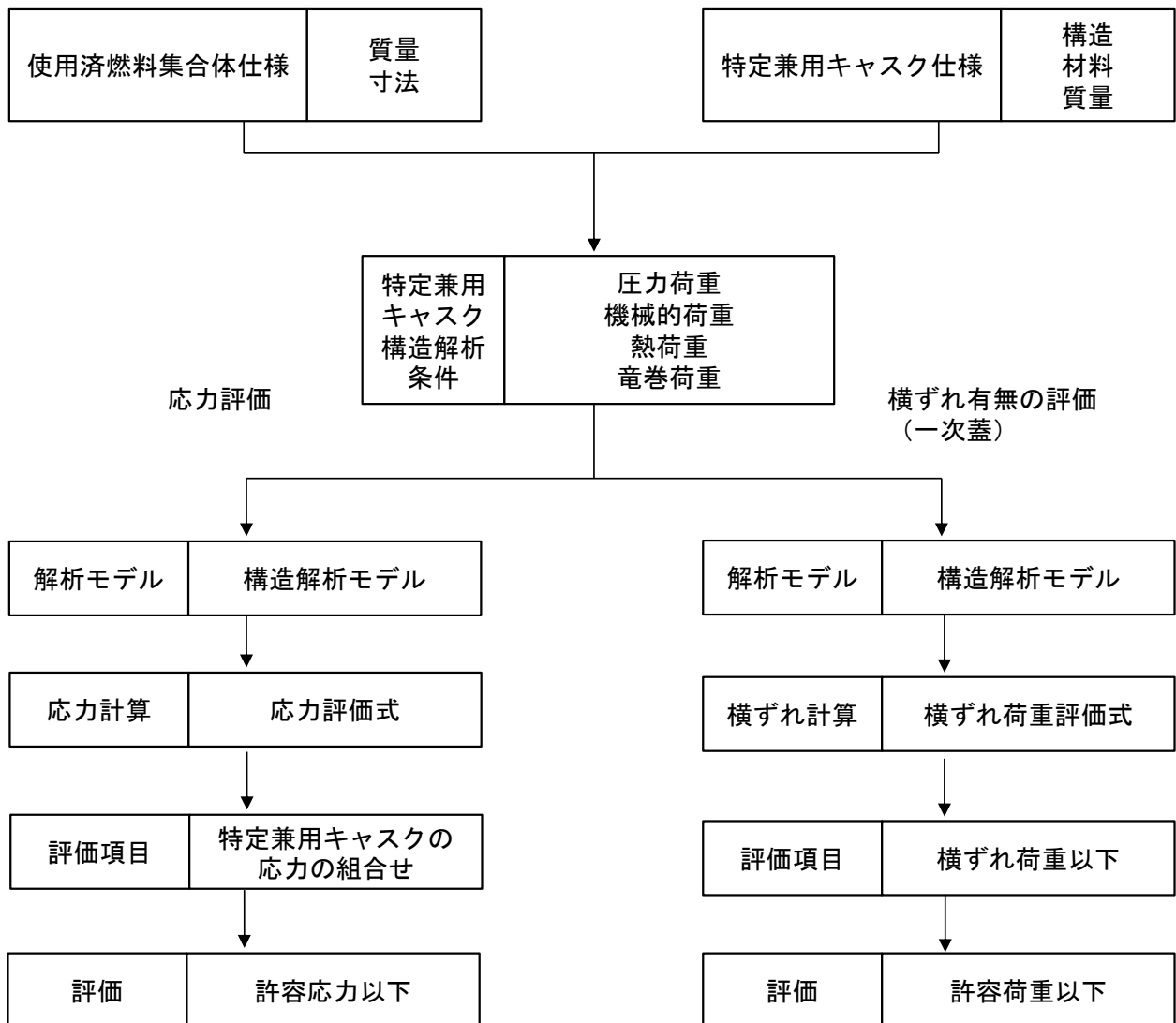


図1 竜巻荷重作用時の機能維持評価フローチャート

1) 竜巻荷重設定

機能維持評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせを以下の通り設定する。

① 風圧力による荷重 (F_w)

風圧力による荷重は次式で計算され、計算条件と計算結果を表 2 に示す。

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

以下

- G : ガスト影響係数
- C : 風力係数
- A : 受圧面積 (m²)
- ρ : 空気密度 (kg/m³)
- V_D : 設計竜巻の最大風速 (m/s)

表 2 風圧による荷重の算定条件及び算定結果

項目	記号	単位	値
ガスト影響係数(注1)	G	-	1.0
風力係数(注2)	C	-	1.2
受圧面積(注3)	A	m ²	□
空気密度(注4)	ρ	kg/m ³	1.22
設計竜巻最大風速	V_D	m/s	100
風圧力による荷重	F_w	MN	0.092

(注1) 設計竜巻最大風速 V_D は最大瞬間風速であるため、ガイドに従って $G=1.0$ とする。

(注2) 「建築物荷重指針・同解説」の円筒型形状の風力係数より $C=1.2$ とする。

(注3) 水平方向の投影面積より設定した。

(注4) 「建築物荷重指針・同解説」の速度圧算出で用いている空気密度の値を用いる。

② 気圧差による荷重 (F_p)

機能維持評価では、表 3 に示すように、CASTOR® geo26JP 型の内圧を 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。

表 3 機能維持評価での内圧設定

項目	記号	単位	値
最低内圧(注1)	P _i	MPa	0
大気圧	P _a	MPa	0.101
気圧差	ΔP	MPa	0.101

(注1) 保守的に内圧を0とする。

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_M)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 設計対象物の衝突方向長さ(最小長さ)(m)

計算条件及び結果を表4に示す。表4に示す最大荷重は、機能維持評価に用いられる。

表 4 竜巻荷重

飛来物の種類	寸法			質量 M [kg]	最小長さ L [m]	速度		衝撃荷重	
	l ₁ [m]	l ₂ (d) [m]	l ₃ [m]			v _h [m/s]	v _v [m/s]	F _h [MN]	F _v [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

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_w 、圧力差 F_p による荷重、及び設計飛来物による衝撃荷重 F_M の組み合わせた複合荷重 F_{T1} 及び F_{T2} とする(表 5 参照)。

$$F_{T1} = F_p$$

$$F_{T2} = F_w + 0.5 \cdot F_p + F_M$$

表 5 竜巻荷重

項目	記号	単位	算出された荷重
風圧力による荷重(注1)	F_w	MN	0.092
気圧差による荷重(注2)	F_p	MN	-
設計飛来物の水平方向衝撃荷重	F_{Mh}	MN	8.45
設計飛来物の鉛直方向衝撃荷重	F_{Mv}	MN	3.87
水平方向複合荷重	F_{T1h}	MN	-
	F_{T2h}	MN	8.45
鉛直方向複合荷重	F_{T1v}	MN	-
	F_{T2v}	MN	3.87

(注 1)風圧力による荷重は、設計竜巻荷重と比較して小さく、機能維持評価には考慮しない。

(注 2)竜巻により生じる外気の気圧差による荷重は、CASTOR[®] geo26JP 型の内圧と大気圧との圧力差である。

⑤ 竜巻荷重と組み合わせる荷重について

a) 常時作用する荷重

CASTOR[®] geo26JP 型の供用中に常時作用する荷重は、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。

b) 竜巻以外の自然現象による荷重これらの自然現象による荷重は竜巻荷重に比べ十分小さく、竜巻荷重の設定に包絡される。

2) 機能維持評価結果

竜巻荷重作用時の機能維持評価について、各部の評価結果を表 6、表 7、表 8 に示す。

評価結果から、CASTOR[®] geo26JP 型では竜巻荷重が作用しても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、一次蓋の横ずれは生じないことから、閉じ込め機能及び臨界防止機能は維持される。また、キャスクのフィン、厚肉キャスク本体の一部であり、中性子遮蔽材はキャスクの内部に配置されているため、竜巻荷重によって CASTOR[®] geo26JP 型の除熱機能及び遮蔽機能が損なわれることはない。

したがって、竜巻荷重に対しても、CASTOR[®] geo 26JP 型の安全機能は維持される。

表 6 密封境界の応力評価結果

評価項目 ¹⁾	計算値 [MPa]	評価基準 ²⁾ [MPa]
一次蓋 密封境界 $\max(\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z)$	□	155.2
一次蓋ボルト (σ_{m+b})	□	913.4

- 1) σ_r : 半径方向応力、 σ_t : 接線応力、 σ_z : 軸方向応力
 σ_{m+b} : 一次膜+一次曲げ応力
 2) 評価基準の設定の詳細を表 A-7 に示す。

表 7 バスケットの応力評価結果

竜巻荷重 作用方向	評価項目 ¹⁾	計算値[MPa]	評価基準 ²⁾ [MPa]
水平	コーナーセグメント (σ_m)	□	114
	アウターレセプタクル プレート(σ_m)	□	114
	Hビーム (σ_m)	□	157
鉛直	Hビーム (σ_b)	□	157

- 1) σ_m : 一次膜応力、 σ_b : 一次曲げ応力
 2) 評価基準の設定の詳細を表 A-1 に示す。

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 8 一次蓋の横ずれ評価結果

評価項目	計算値[N]	判定基準 ¹⁾ [N]
一次蓋の慣性力	<input type="text"/>	<input type="text"/>

1)一次蓋ボルトの締め付けによる摩擦力

内は商業機密のため、非公開とします。

3

参考文献

- [1] 1024-TR-00010 CASTOR[®] geo26JP 型 第十六条 燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設- 材料に関する説明資料-
- [2] 1024-TR-00008 CASTOR[®] geo26JP 型 第十六条 燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設-除熱機能に関する説明資料-
- [3] 1024-TR-00007 CASTOR[®] geo 26JP 型 第十六条 燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設 - 遮蔽機能に関する説明資料-
- [4] 1024-TR-00009 CASTOR[®] geo26JP 型 第十六条 燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設- 閉じ込め機能に関する説明資料-

別紙: 竜巻荷重が作用した場合の兼用キャスクの機能維持評価

A.1 概要

本資料は、竜巻荷重が作用する場合の機能維持評価結果をまとめたものである。評価対象は、閉じ込め機能を担保する密封境界（一次蓋密封部と一次蓋ボルト）及び臨界防止機能を担保するバスケットとした。評価の詳細を以下に示す。

なお、CASTOR[®] geo26JP 型の安全機能の評価に関わる材料については参考文献[1]に記している。

A.2 竜巻荷重作用時の機能維持評価

密封境界部（一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト）及びバスケットの構造健全性を評価として、型式証明申請内容の妥当性確認のため、応力評価式による評価を行った。また、密封境界部の評価については、一次蓋金属ガスケットの水平方向の横ずれに起因する漏えい有無を確認するため、水平方向荷重を考慮して一次蓋の水平方向横ずれの有無を評価した。

A.2.1 荷重条件

竜巻荷重が作用した場合の CASTOR[®] geo26JP 型の機能維持評価では、想定される最大荷重に基づき評価を実施する。なお、兼用キャスクは基礎等に固定されており荷重の作用により横滑り等の挙動は生じないとして評価を行う。

竜巻荷重が作用した場合、密封境界部、バスケットは、以下の式から算出した加速度による慣性力が CASTOR[®] geo26JP 型の長手方向と径方向に作用するものとして評価する（図 A-1 参照）。竜巻荷重が直接作用しているキャスク本体には竜巻荷重 F_{T2} を作用させる。

$$a_{Th} = \frac{F_{T2h}}{M} = \frac{8.45 \text{ MN}}{120t} = 70.42 \text{ m/s}^2 (7.18G)$$

$$a_{Tv} = \frac{F_{T2v}}{M} = \frac{3.87 \text{ MN}}{120t} = 32.25 \text{ m/s}^2 (3.29G)$$

F_{T2} : 竜巻荷重（水平：8.45 MN、鉛直 3.87 MN）

M : 質量（120 t）

g : 重力加速度（9.81m/s²）

竜巻荷重以外の荷重として、運転中に作用する圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重を組み合わせる評価する。

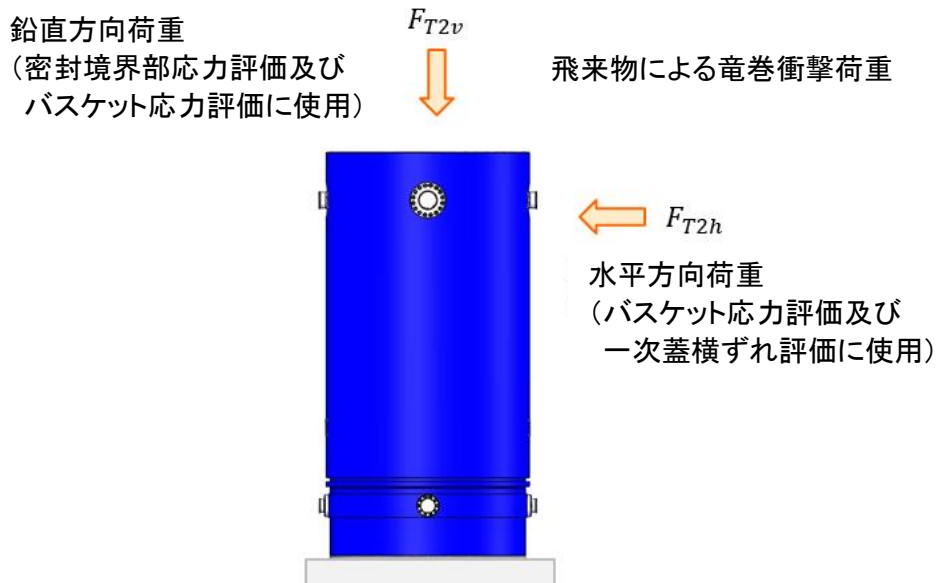


図 A-1 竜巻荷重の作用方向

A.2.2 評価基準

評価対象とする部材のうち、密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）及びバスケットの評価基準は、部材が弾性範囲を維持し、塑性ひずみが発生しない降伏点とした。これを表 A-1 に示す。これらは表 A-2 に示す各部の設計最高温度に基づく値である。

なお、一次蓋密封境界部の評価基準には、一次蓋よりも許容応力が小さいキャスク本体の値を用いる。

また、一次蓋の横ずれの有無を評価するための評価では、竜巻荷重作用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。

表 A-1 密封境界部及びバスケットの応力評価基準値

評価部位		評価項目	式	値[MPa]
密封境界部	一次蓋密封シール部	許容応力	S_y	155.2 ¹⁾
	一次蓋ボルト	許容応力	S_y	913.4
バスケット	コーナーセグメント	許容一次膜応力	S_y	114
	アウターレセプタクルプレート	許容一次膜応力	S_y	114
	Hビーム	許容一次膜応力	S_y	157
		許容一次膜+曲げ応力	S_y	157

1) キャスク本体の値と一次蓋の値の小さい方を適用

表 A-2 構成部材の温度

構成部材	温度 [°C]
密封境界部(一次蓋及びキャスク本体)	□
一次蓋ボルト	□
バスケット	□

A.2.3 応力評価

(1) 密封境界部

竜巻荷重作用時の密封境界部の応力計算は、応力評価式により行う。一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルトの応力評価の詳細は、以下に示すとおりである。

a. 一次蓋密封シール部

竜巻荷重作用時の一次蓋密封シール部には、内圧(蓋間空間と胴内空間の圧力差)及びキャスク長手方向の慣性力 F_{T2v} による一次膜+一次曲げ応力 ($\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$) が作用する。

一次膜＋一次曲げ応力は、以下の式で表され、式中の添え字 1、2 はそれぞれ内圧による応力成分、慣性力による応力成分を示す。

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2}$$

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2}$$

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2}$$

なお、一次蓋密封シール部における部材内部の温度差は小さく、熱荷重の影響は無視できるため考慮しない。

また、許容限界値は温度の上昇とともに減少することから、評価に用いる構成部材の温度は一次蓋密封シール部の最高温度である□とする。

(a) 内圧による応力

図 A-2 に示すとおり、一次蓋を周辺固定の円板とみなし、一次蓋密封シール部に作用する一次膜＋一次曲げ応力を解析的に評価した。なお、内圧は表面に一様分布荷重として与える。

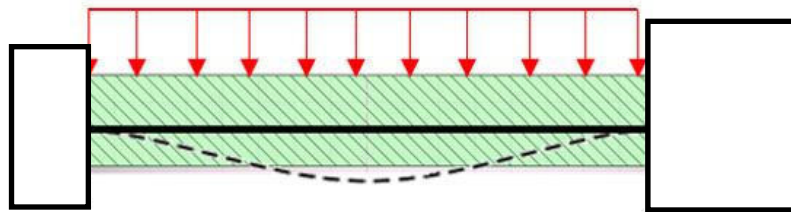


図 A-2 内圧に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

密封境界部における半径方向曲げ応力、接線応力及び軸方向応力をそれぞれ評価した。

表 A2-3 に本評価における入力値を示す。また、表 A2-4 に応力評価結果を示す。

表 A-3 内圧により発生する一次蓋密封シール部の応力計算条件

記号	説明	単位	値
R	固定支持部(蓋ボルト)の半径	mm	□
r	評価点(ガスケット)の半径	mm	□
t	厚さ ¹⁾	mm	□
p	一次蓋の最大内圧 ²⁾	MPa	□
ν	ポアソン比	-	0.31

1) 一次蓋上部から、シール部溝の上部までを厚さとして設定

2) 内圧の値は[4]において説明

竜巻が作用した場合、鉛直方向の慣性力 a_{Tv} により蓋に荷重が作用する。なお、兼用キャスクは縦置き姿勢で貯蔵されるため、水平方向の慣性力では一次蓋密封シール部に応力が発生しないことから、鉛直方向の慣性力のみ考慮する。

密封境界部における半径方向曲げ応力、接線応力及び軸方向応力をそれぞれ評価した。

表 A-5 に本評価における入力値を示す。また、表 A2-6 に応力評価結果を示す。

表 A-5 慣性力による一次蓋シール部の応力評価の入力値

記号	説明	単位	値
R	固定支持部(蓋ボルト)の半径	mm	<input type="text"/>
r	評価点(ガスケット)の半径	mm	<input type="text"/>
t	厚さ ¹⁾	mm	<input type="text"/>
g	重力加速度	$\frac{mm}{s^2}$	9810
m	質量	Mg	<input type="text"/>
a_{Tv}	垂直方向加速度	g	3.29
ν	ポアソン比	-	0.31

1) 一次蓋上部から、シール部溝の上部までを厚さとして設定

一次蓋に作用する分布荷重は以下の式で計算される。

$$p = \frac{F_{vert}}{A} = \text{$$

ここで

$$F_{vert} = m \cdot g \cdot a_{Tv} = \text{$$

$$A = \pi \cdot R^2 = \text{$$

また、一次蓋密封シール部の半径方向曲げ応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{r1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (3 + \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

$$\sigma_{r2} = \text{$$

内は商業機密のため、非公開とします。

また、一次蓋ボルトの温度には蓋ボルト周辺のキャスク本体最高温度である を考慮する。なお、評価基準値は温度上昇に伴い低下するため、最高温度での評価は低温での評価を包絡する。

(a) 膜応力

竜巻時に一次蓋ボルトに作用する膜応力 σ_m は、竜巻荷重作用時の鉛直方向加速度 σ_{m1} と一次蓋締め付け時の荷重 による膜応力 σ_{m2} の合計値で求められる。

表 A-8 に本評価における入力値を示す。また、表 A-9 に応力評価結果を示す。

表 A-8 一次蓋ボルトに発生する膜応力の計算条件

記号	説明	単位	値
d_s	ボルトの応力断面における直径	mm	<input type="text"/>
$F_{v,max}$	最大一次蓋ボルト締め付け力	N	<input type="text"/>
m	一次蓋の質量	kg	<input type="text"/>
g	重力加速度	$\frac{mm}{s^2}$	9810
$a_{\tau v}$	鉛直加速度	g	3.29
n	ボルト数	-	<input type="text"/>

一次蓋ボルト1本の膜応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_m = \frac{F_{V,max}}{A_s} = \text{$$

ここで

$$A_s = \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 = \text{$$

表 A-9 一次蓋ボルトに発生する膜応力の結果

結果	一次膜応力	評価基準値
	σ_m [MPa]	S_y [MPa]
応力値	<input type="text"/>	913.4

内は商業機密のため、非公開とします。

(b) 曲げ応力

竜巻荷重作用時に一次蓋ボルトには水平方向慣性力 a_{Tv} による曲げ応力 σ_b が作用する。

表 A-10 に本評価における入力値を示す。また、表 A-11 に応力評価結果を示す。

表 A-10 一次蓋ボルトに発生する曲げ応力の計算条件

記号	説明	単位	値
d_s	ボルト断面直径	mm	<input type="text"/>
m	一次蓋の質量	kg	<input type="text"/>
L	ボルト首部長さ	mm	<input type="text"/>
a_{Th}	水平加速度	g	7.18
g	重力加速度	$\frac{m}{s^2}$	9.81
n	ボルト数	-	<input type="text"/>

一次蓋ボルト1本の曲げ応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_b = \frac{M}{W_s} = \text{$$

ここで

$$M = \frac{m \cdot a_{Th} \cdot g \cdot L}{n} = \text{$$

$$W_s = \frac{\pi \cdot d_s^3}{32} = \text{$$

表 A-11 一次蓋ボルトに発生する曲げ応力の結果

結果	一次曲げ応力	設計基準値
	σ_b [MPa]	S_y [MPa]
応力値	<input type="text"/>	913.4

内は商業機密のため、非公開とします。

(c) 一次蓋ボルトの応力評価

表 A-9 及び表 A-11 に基づき、一次蓋ボルトに発生する応力を算出した。一次蓋密封シール部に発生する応力を算出する。表 A2-12 に示すとおり、一次蓋ボルトに発生する応力は評価基準以下であり、弾性範囲に留まる。

表 A-12 一次蓋ボルトに発生する応力の結果

結果	一次膜応力	一次膜 + 曲げ応力	評価基準
	σ_m [MPa]	σ_{m+b} [MPa]	S_y [MPa]
応力値	□	□	913.4

(2) バスケット

a. 鉛直方向竜巻荷重に対する応力評価

CASTOR® geo26JP 型のバスケットの構成部材を図 A-4 に示す。これらの部材は、鉛直方向竜巻荷重に伴い慣性力が作用し、応力が発生する。ここで、評価に用いる慣性力には、竜巻荷重作用時の鉛直方向加速度に加えて重力加速度1Gを考慮した。

応力評価は、発生した膜応力と設計基準値に比較によって行われる。

各部材に発生する膜応力は、表 A-13 に示す部材重量及び評価断面の断面積によって求められる。なお、部材重量は切り上げた値を用い、評価断面の断面積は切り捨てた値を用いた。

バスケットの膜応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_m = \frac{m \cdot (a_{T_v} + 1) \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}}{A}$$

表 A-14 に示すとおり、鉛直方向加速度に対して各バスケットの部品に発生する膜応力は評価基準以下であり、弾性範囲に留まる。

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

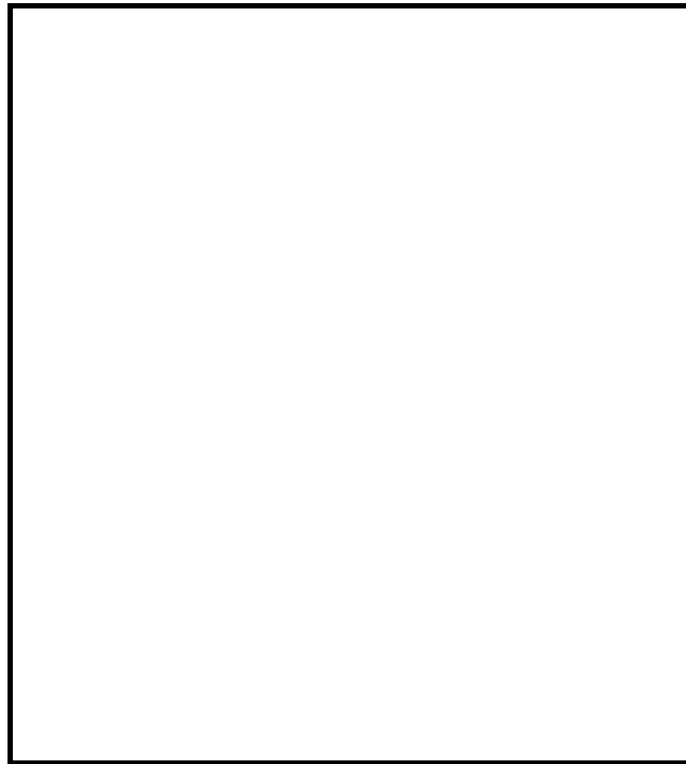


図 A-4 バスケットを構成する各部材

表 A-13 鉛直方向竜巻荷重に対してバスケットに発生する膜応力の計算条件及び計算結果

評価部材	鉛直加速度 +自重	質量 m	面積 A	一次膜応力 σ_m
	[g]	[kg]	[mm ²]	[MPa]
コーナーセグメント	4.29	□	□	□
アウターレセプタクルプレート小	4.29	□	□	□
アウターレセプタクルプレート大	4.29	□	□	□
Hビーム	4.29	□	□	□

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 A-14 鉛直方向竜巻荷重に対してバスケットに発生する膜応力と設計基準の比較

評価部材	一次膜応力	設計基準
	σ_m [MPa]	S_y [MPa]
コーナーセグメント	□	114
アウターレセプタクルプレート	□	114
Hビーム	□	157

b. 水平方向竜巻荷重に対する応力評価

バスケットに水平方向地震力が作用した場合、Hビームのみは燃料集合体からの直接的な荷重を受ける。このため、Hビームに対して燃料集合体質量及びHビームを挟み込む熱伝導・中性子吸収部材の質量を考慮し、水平方向地震力が作用した場合の応力評価を行った。

図 A-5 に水平方向地震力に対するHビームの応力計算モデル及び分布荷重の導出について示す。

なお、水平方向地震力に対しては、Hビームのウェブ部のみ構造強度部材として考慮し、両端固定梁として評価をおこなった。



Hビームに作用する単位長さ当たりの荷重の計算

手順1:

以下の条件から、1体のPWR燃料集合体からHビームに与える荷重を求める:

- PWR燃料集合体長さ
- 燃料集合体の質量
- Hビームの高さ

1体のPWR燃料集合体がHビームに作用する荷重は以下のとおり

手順2:

以下の条件から、PWR燃料集合体がHビームに与える単位長さ当たりの荷重を求める:

- 最長のHビームへ負荷を与える燃料集合体の体数
- 最長のHビームの長さ

PWR燃料集合体がHビームに与える単位長さ当たりの荷重は以下のとおり

手順3:

以下の条件から、Hビーム及びボロン添加アルミニウム板の自重によりHビームに作用する単位長さ当たりの荷重を求める:

- 総重量

自重によりHビームに与える単位長さ当たりの荷重は以下のとおり

手順4:

Hビームに作用する単位長さ当たりの荷重の重ね合わせ

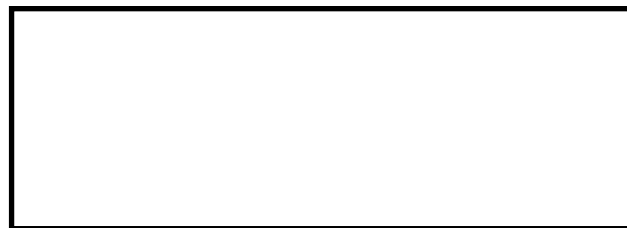


図 A-5 Hビームに作用する単位長さ当たりの荷重

ここで算出したHビームに作用する単位長さ当たりの荷重から、曲げ応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \boxed{}$$

ここで、

固定端モーメント $M = \frac{q \cdot l^2}{12} = \boxed{}$

断面係数 $W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \boxed{}$

等分布荷重 $q = \boxed{}$

評価長さ $l = \boxed{}$

ウェブ幅 $b = \boxed{}$

ウェブ高さ $h = \boxed{}$

分布荷重にはHビーム、燃料集合体及び熱伝導・中性子吸収部材の慣性力を考慮した。

表 A-15 に示すとおり、鉛直方向加速度に対して各バスケットの部品に発生する曲げ応力は評価基準以下であり、弾性範囲に留まる。

表 A-15 水平方向竜巻荷重に対するバスケットに発生する膜応力と設計基準の比較

評価部材	一次曲げ応力	設計基準
	$\sigma_b [MPa]$	$S_y [MPa]$
Hビーム	$\boxed{}$	157

A.2.4 一次蓋の横ずれ評価

竜巻荷重作用時に一次蓋に作用する水平慣性力は以下の式で計算される。

$$F_{hor,PrimLid} = m_{PrimLid} \cdot a_{Th} \cdot g$$

ここで

$m_{PrimLid}$: 一次蓋の質量[kg]

a_{Th} : 水平加速度[g]

g : 重力加速度 $[\frac{m}{s^2}]$

$\boxed{}$ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 A-16 に本評価における入力値及び計算結果を示す。

表 A-16 一次蓋慣性力計算条件と計算結果

項目	$m_{PrimLid}$: 一次蓋質量[kg]	a_h : 水平加速度 [g]	g : 重力加速度 [$\frac{m}{s^2}$]	$F_{hor,PrimLid}$: 一次蓋に作用する 慣性力[N]
値	□	7.18	9.81	□

摩擦力 F_R (一次蓋が横ずれを始める限界値)は以下の式で計算される。

$$F_R = n \cdot F_{V,min} \cdot \mu_{Lid}$$

ここで

n : 一次蓋ボルト本数 [-]

$F_{V,min}$: 一次蓋ボルトの初期締め付け力 [N]

μ_{Lid} : 蓋とキャスク間の最小摩擦係数 [-]

計算条件及び計算結果を表 A-17 に示す。表 A-17 に示すとおり、表 A-16 に示す一次蓋に作用する慣性力 □ に対して、摩擦力 □ の方が大きく、一次蓋は兼用キャスク本体から横ずれすることはない。

表 A-17 摩擦力計算条件及び計算結果

項目	n : 一次蓋ボルト本数 [-]	$F_{V,min}$: 一次蓋の初期締め付け 力 [N]	μ_{Lid} : 蓋とキャスク間の最 小摩擦係数[-]	F_R : 一次蓋の摩擦力[N]
値	□	□	0.2	□