

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

別紙: 竜巻荷重が作用した場合の特定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竜巻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んにか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

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んにか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。

(設計方針)

(2) 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。

【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。

(設計方針)

(3) 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。

(4) 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。

(5) 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。

』

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。

- 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にか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

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。

- 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にか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、閉じ込め機能を担保する部位はおおむね弾性状態にとどまるようにし、臨界防止機能を担保する構成部材(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)は弾性範囲に留まるように設計する。また、除熱機能およ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設計する。

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^(注)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-00005「特定兼用キャスクの構造及びその安全機能を担保する構成部材に関する説明資料」に示す。

(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) 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。
- (4) 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。
- (5) 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、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。

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。

竜巻荷重に対する特定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。

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のフローを図 1 に示す。上記の竜巻荷重に対し、特定兼用キャスクの安全機能のうち、閉じ込め機能を担保する部位（密封境界部）はおおむね弾性状態に留まること、臨界防止機能を担保する部位（バスケット）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（H-ビーム、バスケット側板及びコーナーエレメント）が弾性範囲に留まること、並びに除熱機能およ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ことを確認する。なお、除熱機能を担保するフィンは胴の一部であること、遮蔽機能を担保する中性子遮蔽材は胴内部のボアホール部に配置されていることから、これらの機能維持評価対象は胴とする。

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、密封境界部（一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト、胴）及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、閉じ込め機能の維持については、一次蓋の横ずれ有無も評価する。

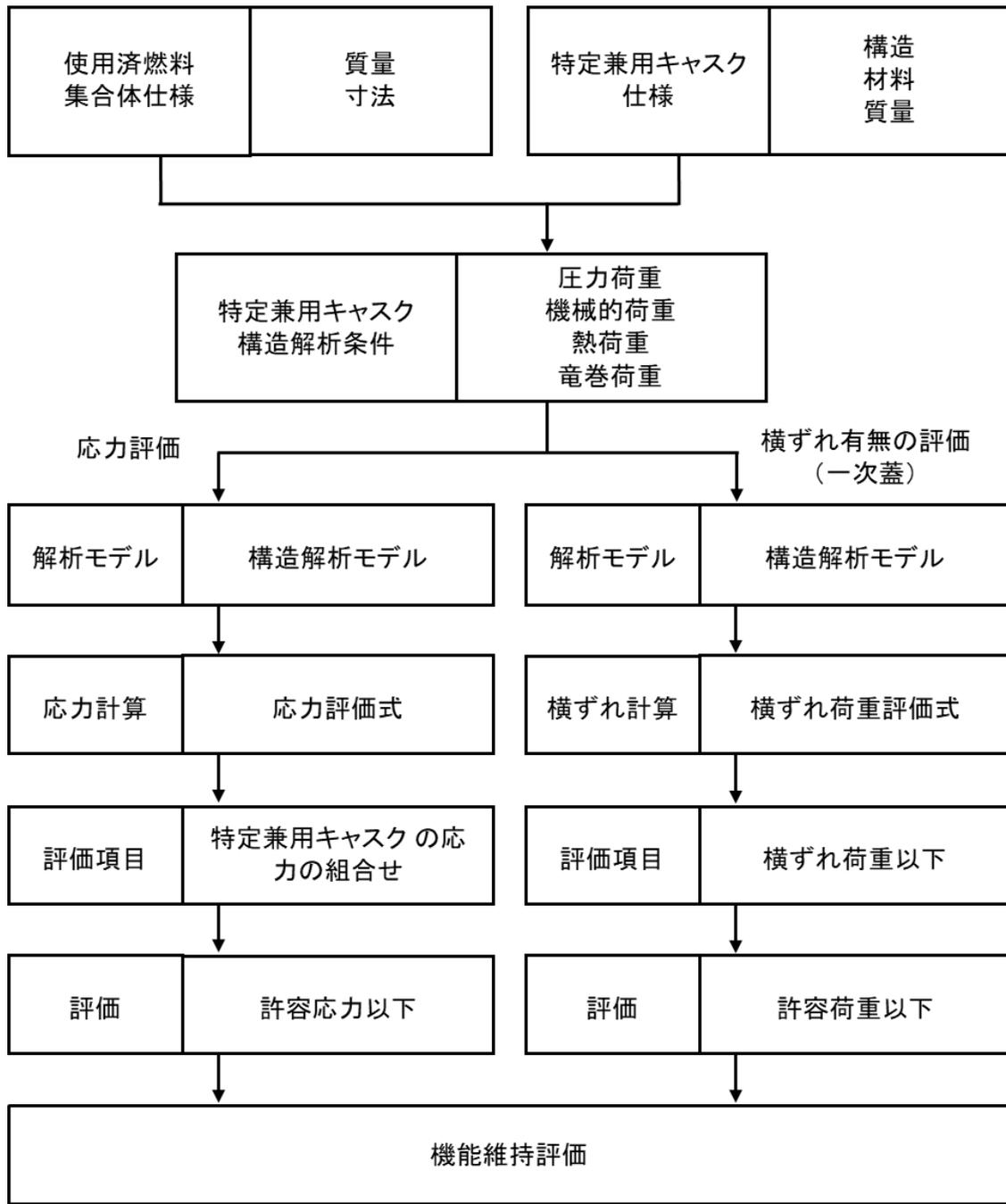


図 1: 竜巻荷重作用時の機能維持評価フロー

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: 風圧による荷重の計算条件及び計算結果

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	<input type="text"/>
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: 気圧差の設定

項目	記号	単位	値
最低内圧(注1)	P_1	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: 設計飛来物による衝撃荷重の計算条件及び計算結果

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: 複合荷重

項目	記号	単位	算出された荷重
風圧力による荷重	F_w	MN	0.092
気圧差による荷重(注1)	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	<u>8.54</u>
鉛直方向複合荷重	F_{T1v}	MN	-
	F_{T2v}	MN	<u>3.96</u>

(注 1) 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。

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。

表 6: 密封境界部の応力評価結果

評価項目 ¹⁾	計算値 [MPa]	評価基準 ²⁾ [MPa]
一次蓋密封シール部 $\max(\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z)$	31.3	155.2
一次蓋ボルト (σ_{m+b})	409.6	913.4
胴 (σ_b)	77	<u>155.2</u>
胴 (τ)	<u>9</u>	<u>89.6</u>

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、 τ : せん断応力

2) 評価基準の設定の詳細を表 A-1 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]
鉛直	コーナーエレメント (σ_m)	<2	114
	バスケット側板 (σ_m)	<2	114
	H-ビーム (σ_m)	<2	157
水平	H-ビーム (σ_b)	86	157
	バスケット側板 (σ_b)	<u>24</u>	<u>114</u>
	コーナーエレメント (σ_b)	<u>20</u>	<u>114</u>

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。

表 8: 一次蓋の横ずれ評価結果

評価項目	計算値 [MN]	評価基準 ¹⁾ [MN]
一次蓋の慣性力	<u>0.436</u>	<u>3.456</u>

1) 一次蓋ボルトの締め付けによる摩擦力

したがって、CASTOR[®] geo26JP 型に竜巻荷重が作用しても、特定兼用キャスクの安全機能は維持される。

別紙: 竜巻荷重が作用した場合の特定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部（一次蓋密封部、一次蓋ボルト、胴）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 1024-TR-00005 R0 特定兼用キャスクの構造及びその安全機能を担保する構成部材に関する説明資料に記している。

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、胴）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、密封境界部及びバスケットは、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）。なお、竜巻荷重が直接作用している胴には竜巻荷重 F_{T2} を作用させる。

$$a_{Th} = \frac{F_{T2h}}{M} = \frac{8.54 \text{ MN}}{120 \text{ t}} = 71.2 \text{ m/s}^2 (7.25 \cdot a_g)$$

$$a_{Tv} = \frac{F_{T2v}}{M} = \frac{3.96 \text{ MN}}{120 \text{ t}} = 33.0 \text{ m/s}^2 (3.36 \cdot a_g)$$

F_{T2} : 竜巻複合荷重（水平：8.54 MN、鉛直 3.96 MN）

M : 質量（120 t）

a_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せて評価する。

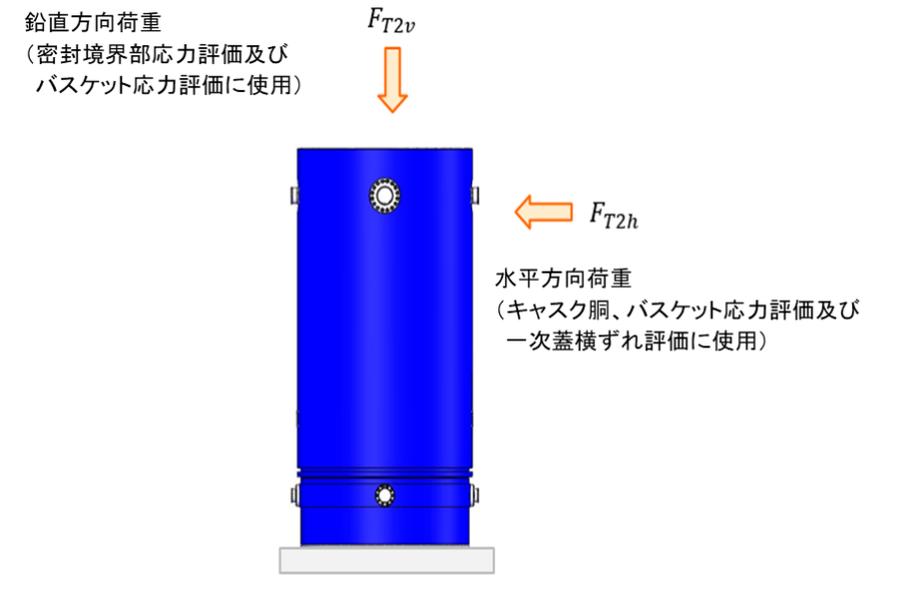


図 A-1 竜巻荷重の作用方向

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、一次蓋ボルト及び胴)及びバスケットの評価基準は、部材が弾性範囲を維持し、塑性変形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、一次蓋密封シール部の評価基準には、一次蓋よりも許容応力が小さい胴の値を用いる。

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		評価基準	基準	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
	胴	許容応力	S_y	155.2
バスケット	コーナーエレメント	許容一次膜応力	S_y	114
	バスケット側板	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) 胴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]
一次蓋密封シール部	□
一次蓋ボルト	
胴	
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、一次蓋ボルト及び胴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 120℃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。

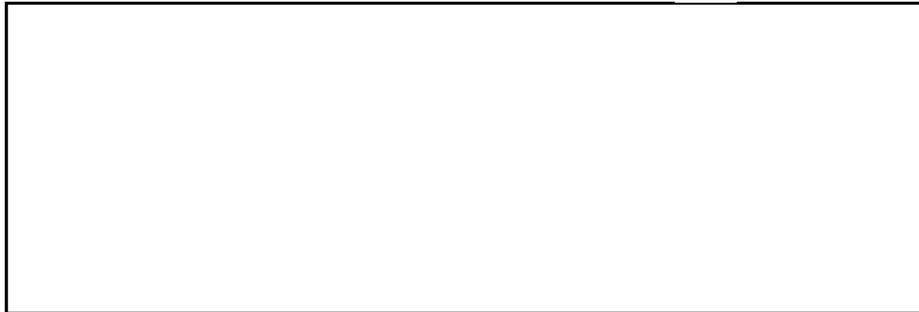


図 A-2 内圧に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

一次蓋密封シール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 に本評価における計算条件を、表 A2-4 に計算結果を示す。

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	蓋間圧力-胴内圧	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

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。

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

また、一次蓋密封シール部の接線応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{t1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3 \cdot \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

また、一次蓋密封シール部の軸方向応力は以下のとおりとした。

表 A-4 一次蓋密封シール部に発生する内圧による応力計算結果

結果	一次膜+一次曲げ応力			評価基準
	σ_{r1} [MPa]	σ_{t1} [MPa]	σ_{z1} [MPa]	S_y [MPa]
応力値	28.2	7.6	0.0	155.2

(b) 慣性力による応力

図 A-3 に示すとおり、一次蓋を周辺固定の円板とみなした場合の一次膜+一次曲げ応力を評価する。なお、竜巻荷重作用時の慣性力は表面に一様分布荷重として作用するとした。

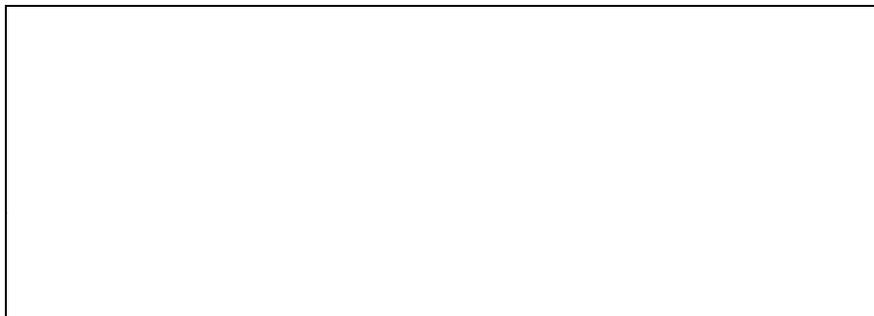


図 A-3 竜巻の慣性力に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

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、CASTOR® geo26JP型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。

一次蓋密封シール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 に本評価における計算条件を、表 A2-6 に計算結果を示す。

表 A-5 慣性力による一次蓋密封シール部に発生する応力の計算条件

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	
g	重力加速度	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$	9810
m	質量	kg	
a_{Tv}	鉛直方向加速度	a_g	3.36
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

一次蓋密封シール部に作用する分布荷重は以下の式で計算される。

$$\text{[Blank Box]}$$

ここで

$$\text{[Blank Box]}$$

$$\text{[Blank Box]}$$

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。

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

また、一次蓋密封シール部の接線応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{t1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3 \cdot \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

また、一次蓋密封シール部の軸方向応力は以下のとおりとした。

表 A-6 慣性力により一次蓋密封シール部に発生する応力の計算結果

結果	一次膜+一次曲げ応力			評価基準
	σ_{r2} [MPa]	σ_{t2} [MPa]	σ_{z2} [MPa]	S_y [MPa]
応力値	3.1	0.9	0.0	155.2

(c) 一次蓋密封シール部に発生する応力

表 A-4 及び表 A-6 に基づき、一次蓋密封シール部に発生する応力を算出する。表 A-7 に示すとおり、一次蓋密封シール部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-7 一次蓋密封シール部に発生する応力評価結果

結果	一次膜+一次曲げ応力			評価基準
	σ_r [MPa]	σ_t [MPa]	σ_z [MPa]	S_y [MPa]
応力値	31.3	8.5	0.0	155.2

b. 一次蓋ボルト

竜巻時の一次蓋ボルトには、蓋締め付け時のボルト荷重と竜巻時の慣性力による膜応力 σ_m 及び曲げ応力 σ_b が作用する。ここで、内圧(蓋の内外の圧力差)は、一次蓋の膜応力及び曲げ応力を減少させ

るため考慮しない。また、一次蓋ボルト内部の温度差は小さく、熱荷重の影響は無視できることから考慮しない。

また、一次蓋ボルトの温度には蓋ボルト周辺の胴最高温度である 110°C 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 に本評価における計算条件を、表 A-9 に計算結果を示す。

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	□
$F_{v,max}$	最大一次蓋ボルト締め付け力	MN	
m	一次蓋の質量	kg	
g	重力加速度	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$	9810
a_{TV}	鉛直加速度	a_g	3.36
n	ボルト数	-	□

一次蓋ボルト1本の膜応力は以下の式で計算される。

ここで

表 A-9 一次蓋ボルトに発生する膜応力の計算結果

結果	一次膜応力	評価基準
	σ_m [MPa]	S_y [MPa]
応力値	297.7	913.4

(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 に本評価における計算条件を、表 A-11 に計算結果を示す。

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	a_g	7.25
a_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。

$$\sigma_b = \frac{m \cdot a_{Th} \cdot L}{n \cdot d_s}$$

ここで

$$m = \frac{W}{g}$$

$$W = \rho \cdot V$$

表 A-11 一次蓋ボルトに発生する曲げ応力の計算結果

結果	一次曲げ応力	評価基準
	σ_b [MPa]	S_y [MPa]
応力値	113.0	913.4

(c) 一次蓋ボルトの応力評価

表 A-9 及び表 A-11 に基づき、一次蓋密封シール部に発生する応力を算出した。表 A-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評価結果

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	297.7	410.7	913.4

C. 胴

胴の静的強度評価では、最高温度 120°C を考慮する。

竜巻時には、竜巻による荷重及び設計飛来物の衝突荷重が胴に作用する。応力計算モデルを図 A-4 に示す。キャスクは鉛直に設置されているため、胴は下部に固定された梁とみなされる。風荷重は胴に均一に分布して作用するものとする。さらに、設計飛来物の衝突荷重は、胴の上部に集中した横方向の荷重として保守的に考慮する。

竜巻により、胴は曲げ応力とせん断応力を受ける。表 A-13 に本評価における計算条件を、表 A-14 に計算結果を示す。

表 A-13 胴に発生する応力の計算条件

記号	[説明]	単位	[値]
H	胴の高さ	[mm]	
D	胴外径	[mm]	
d	胴内径 ¹⁾	[mm]	
F_w	風荷重	[MN]	0.092
F_{Mh}	設計飛来物による水平方向衝撃荷重	[MN]	8.45

(注 1) 詳細は図 A-5 に示す。

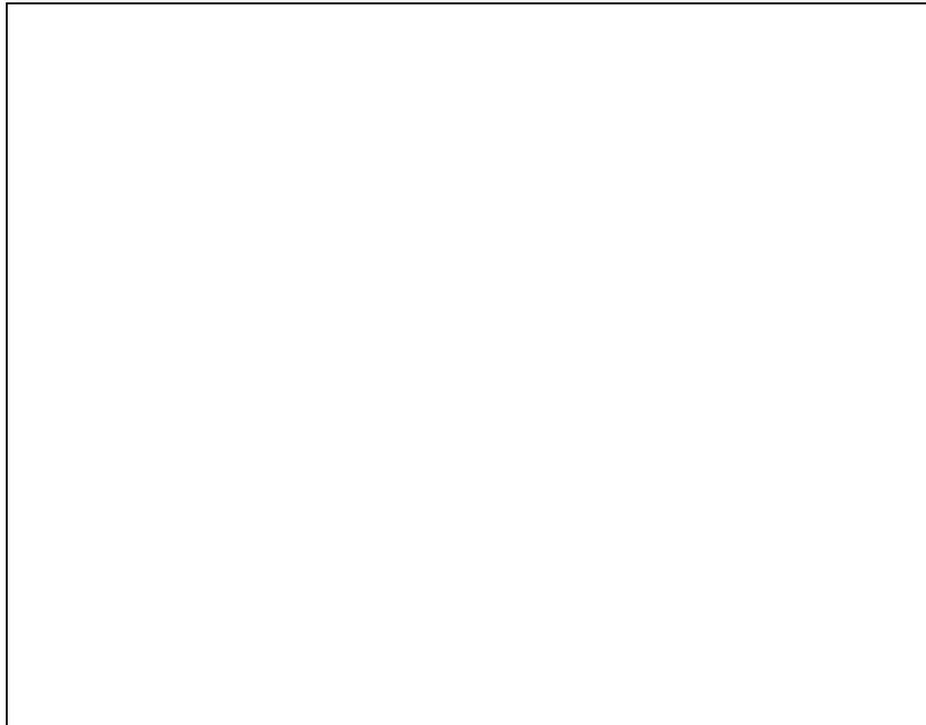


図 A-4 堅牢に固定された梁としての胴の計算の力学系

曲げモーメント

$$M_B = F_{Mh} \cdot H + F_w \cdot H/2$$



せん断力

$$T = F_{Mh} + F_w$$

$$T = 8.45 \text{ MN} + 0.092 \text{ MN} = 8.54 \text{ MN}$$

胴断面については、計算では保守的に外側領域のみを考慮する。(図 A-5 に示す円環状のボアホール領域及びボアホールのない内側領域は無視する。)

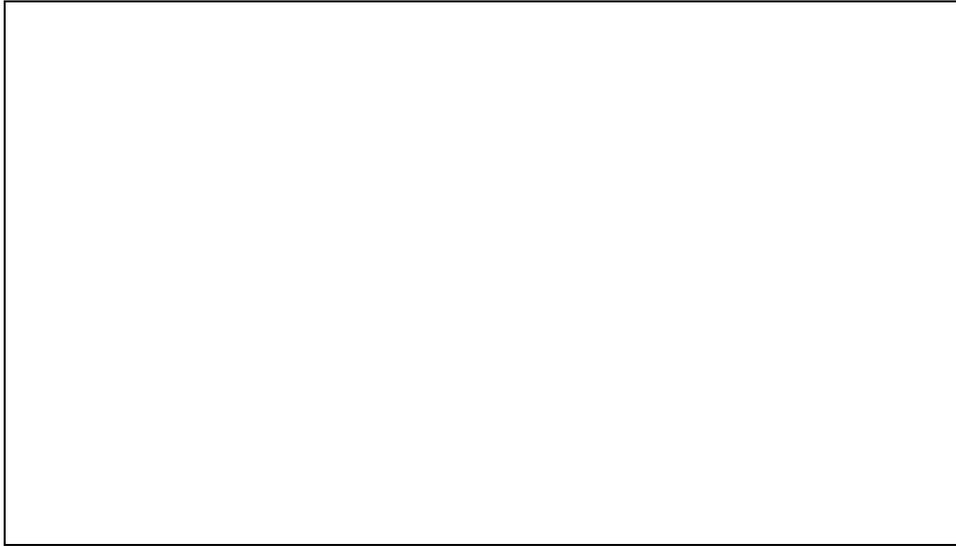


図 A-5 洞断面

外径



内径



面積

$$A_{CS} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$$



慣性モーメント

$$W_{CS} = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} \cdot \frac{2}{D}$$



応力計算

曲げ応力

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_{CS}}$$



せん断応力

$$\tau = \frac{T}{A_{CS}}$$



表 A-14 胴に発生する曲げ応力とせん断応力の計算結果

結果	一次曲げ応力	評価基準	せん断応力	評価基準
	σ_b [MPa]	S_y [MPa]	S_y [MPa]	$S_y/\sqrt{3}$ [MPa]
胴	77	155.2	9	89.6

表 A-14 に示すとおり、胴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。

上述の通り、竜巻荷重が胴に作用した場合に、胴は破断延性限界に十分な余裕を有する。ただし、CASTOR® geo26JP 型の胴表面にあるフィン部は局部的に塑性変形する可能性がある。そのような変形は設計飛来物であるトラックのエンジン部分が衝突したときに最大となると仮定する。そのトラックのエンジンの一般的な寸法は、大きく見積もって、概略 1m x 1m x 1m である。一方、CASTOR® geo26JP 型の表面フィンの面積は約 24m² であり、衝突するエンジンの投影面積は約 1m² となり、変形する面積は全体の約 4% 程度である

(2) バスケット

CASTOR® geo26JP 型のバスケットの部材は、①使用済燃料を直接支持し、かつ燃料間距離を保つための塑性変形を許容しない部材(H-ビーム、バスケット側板、コーナーエレメント)と②その他のバスケットを構成する部材とに区別される。①の部材は②の部材が存在する前提で応力評価を実施する。①の部材に対する評価結果が評価基準である降伏範囲内であれば、②の部材はおおむね降伏範囲内であることが示され、バスケットとして使用済燃料を支持し、かつ燃料間距離を保ち、臨界防止機能が維持されることを示すことができる。よって、本項では①の部材に対する評価を行う。

a. 竜巻の鉛直方向荷重に対する応力評価

CASTOR® geo26JP 型のバスケットの構造と竜巻の鉛直方向加速度の作用図を図 A-6 に示す。

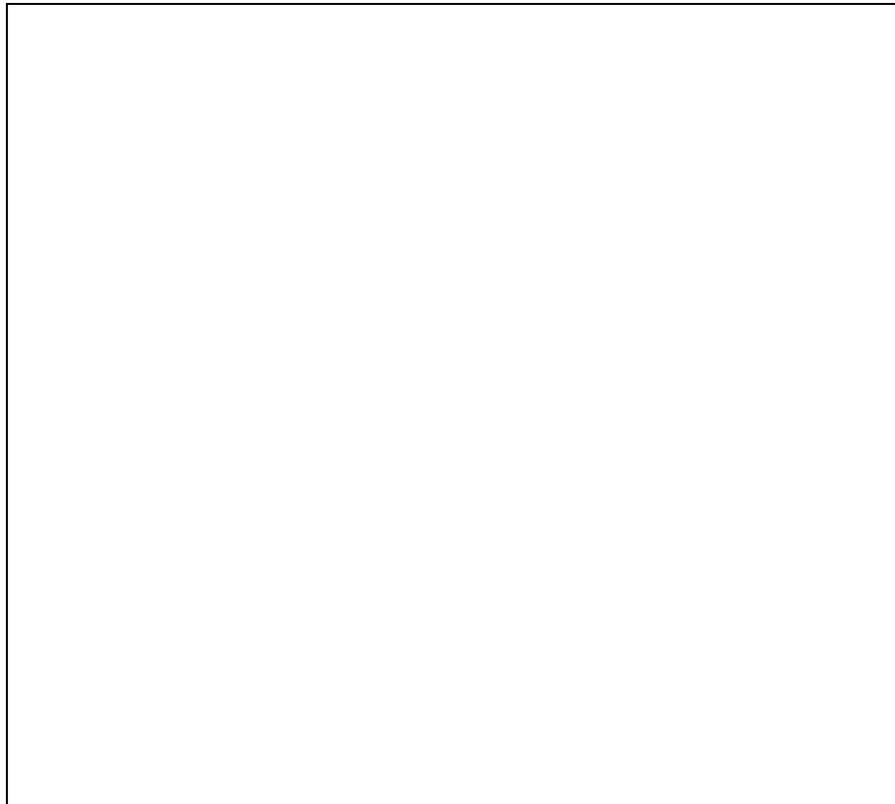


図 A-6 バスケットの構造と竜巻の鉛直方向加速度

CASTOR® geo26JP 型のバスケットの構成部材を図 A-7 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、発生した膜応力と評価基準との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。

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

表 A-16 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。



図 A-7 バスケットの構成部材

表 A-15 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
	$\cdot a_g$	[kg]	[mm ²]	[MPa]
コーナーエレメント	4.29	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
バスケット側板 小	4.29			
バスケット側板 大	4.29			
H-ビーム	4.29			

表 A-16 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評価基準の比較

評価部材	一次膜応力	評価基準
	σ_m [MPa]	S_y [MPa]
コーナーエレメント	<2	114
バスケット側板	<2	114
H-ビーム	<2	157

b. 竜巻の水平方向の荷重に対する応力評価

竜巻の水平方向の荷重条件は、 0° 以外の作用方向では荷重が分散されるため、図 A-8 に示す水平加速度 -0° の作用方向での荷重に包絡される。

竜巻の水平方向の荷重は、H-ビームのみに直接荷重が加えられ、燃料集合体と伝熱板の自重を考慮して、水平荷重に対する応力評価が行われる。ウェブに対する荷重の導出結果は、図 A-10 に示すとおりである。この時、最小寸法のウェブのみが支持構造として保守的に考慮される。両側に固定されたビームが力学系として考慮される。

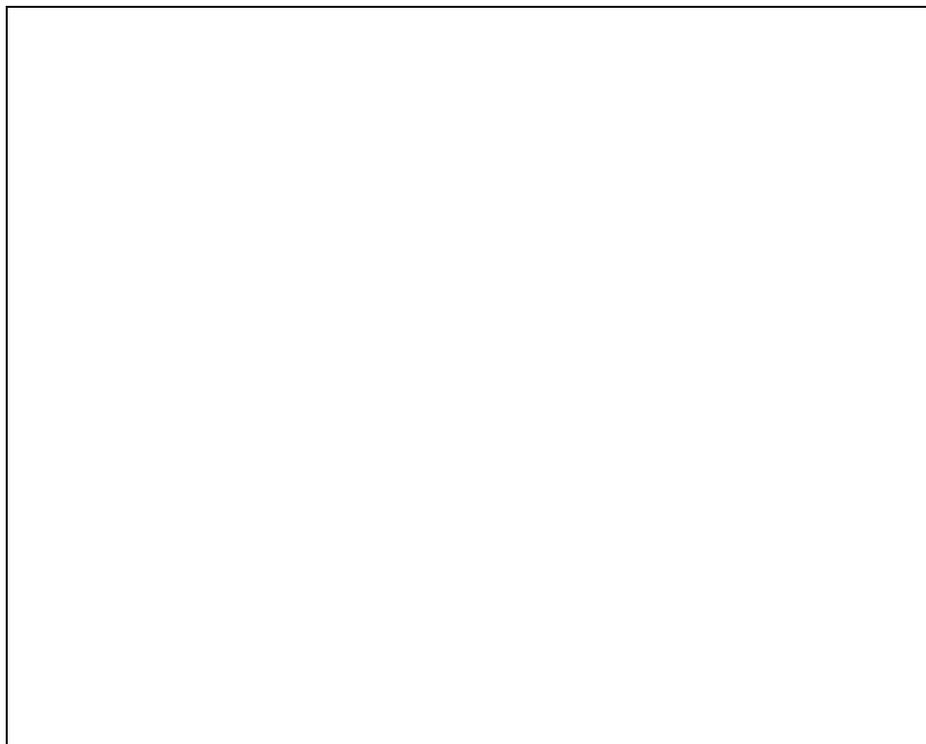


図 A-8 水平加速度 -0° の作用方向

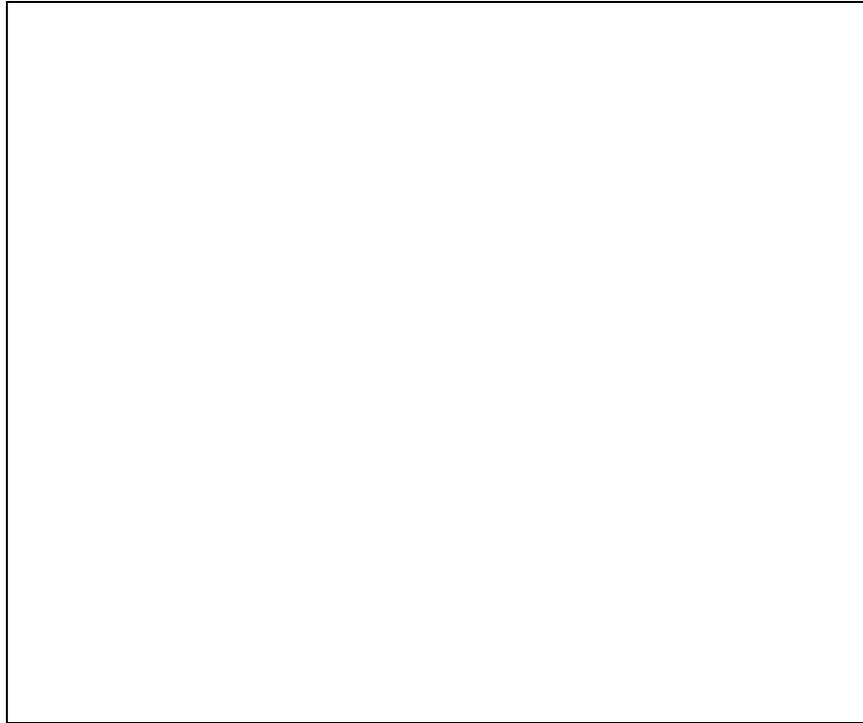


図 A-9 水平加速度 -45° の作用方向

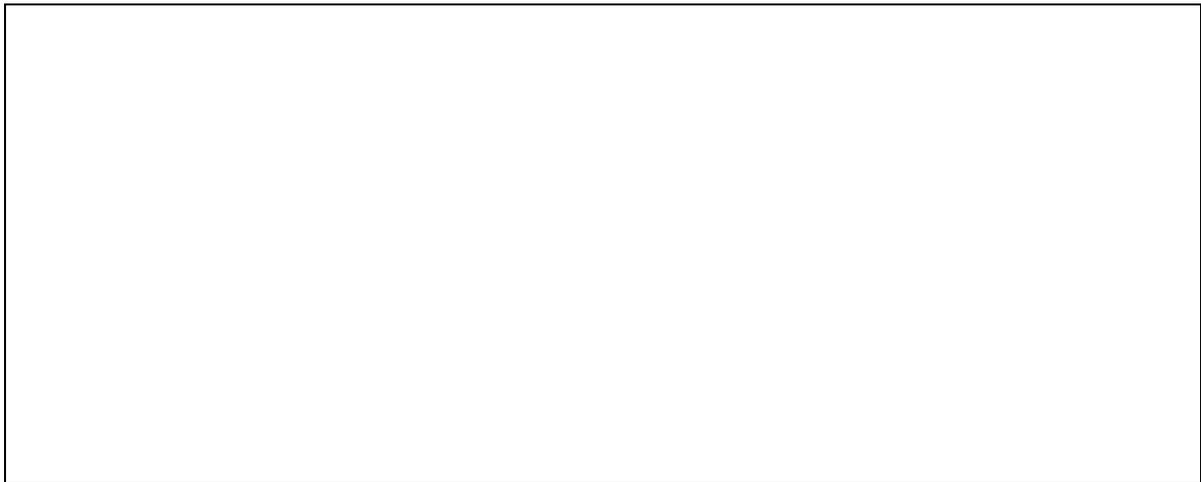


図 A-10 H-ビームに作用する単位長さ当たりの荷重

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

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。

ここで、

固定端モーメント

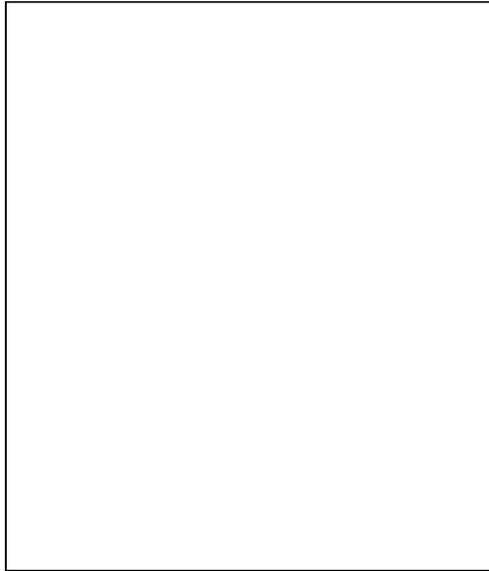
断面係数

一様分布荷重

評価長さ

ウェブ幅

ウェブ高さ



一様分布荷重にはH-ビーム、燃料集合体及び熱伝導及び中性子吸収材の慣性力を考慮した。

バスケット側板に発生する応力は以下の通り計算される。



計算条件は以下の通り。

Fは梁当たりの燃料集合体による荷重から求められる。

燃料集合体の数

燃料集合体1体の重量

バスケットの部分重量

燃料集合体長さ

2つの梁間距離

梁が荷重を受ける面積

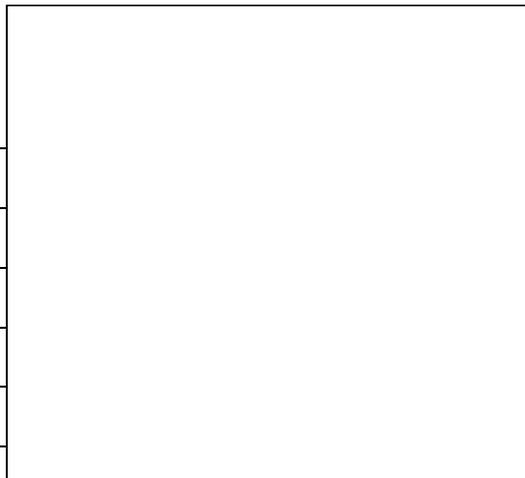


図 A-11 に燃料集合体及びバスケットの一部の荷重分布を示す。オレンジ色の線はバスケットがバスケット側板へ作用する荷重がどこかを示している。黒塗りの長方形部分は、一つの梁に発生する5体の燃料集合体(両側から半分ずつ)からの荷重分布を示す。

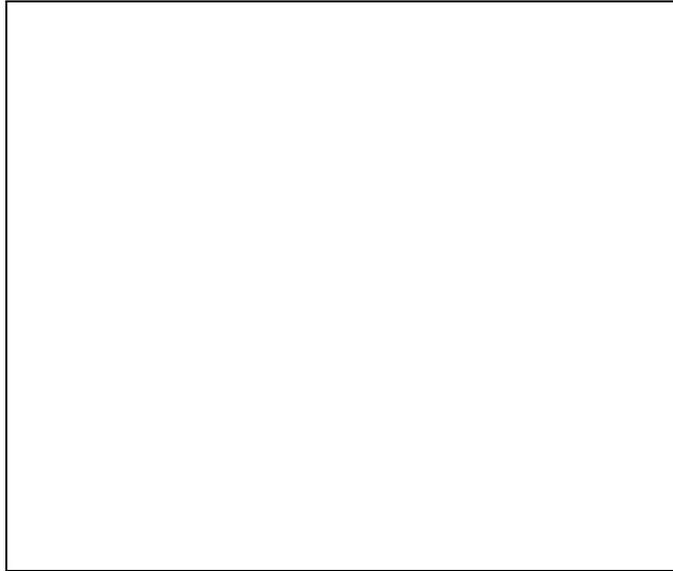


図 A-11 一つの梁に配分される重量

上記の評価は、燃料集合体がおかれる格子中央部との面積を比較した場合に、接触面積が小さいため(発生する応力が大きくなる)、バスケット側板の他の位置の評価を包絡する。

コーナーエレメントに発生する応力(図 A-12)は以下の通り計算される。



計算条件は以下の通り。

F は燃料集合体の荷重から以下の通り算出される。

面積

固定端モーメント

断面係数

一様分布荷重

コーナーエレメント幅

燃料集合体長さ

コーナーエレメント厚さ



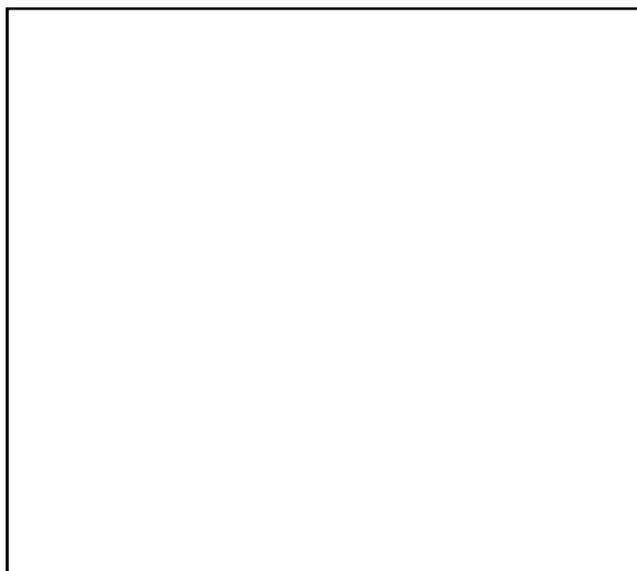


図 A-12 コーナーエレメントに発生する荷重の作用方向

表 A-17 に示すとおり、水平方向竜巻荷重によりバスケット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-17 水平方向竜巻荷重によりバスケットに発生する応力と評価基準との比較

評価部材	一次曲げ応力	圧縮応力	相当応力	評価基準
	σ_b [MPa]	σ_p [MPa]	σ_v [MPa]	S_y [MPa]
H-ビーム	86	二	二	157
バスケット側板	二	24	二	114
コーナーエレメント	二	二	20	114

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。

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

ここで

$m_{PrimLid}$: 一次蓋の質量[kg]

a_{Th} : 水平加速度[g]

a_g : 重力加速度 $[\frac{m}{s^2}]$

表 A-18 に本評価における入力値及び計算結果を示す。

表 A-18 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 [a_g]	a_g 重力加速度 [$\frac{m}{s^2}$]	$F_{hor,PrimLid}$ 一次蓋に作用する慣性力 [MN]
値	<input type="text"/>	7.18	9.81	<input type="text"/>

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-19 に示す。表 A-19 に示すとおり、表 A-18 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、一次蓋は横ずれすることはない。

表 A-19 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 [MN]	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 [MN]
値	<input type="text"/>			