

補足説明資料 6 - 1

6 条

外部からの衝撃による損傷の防止

竜巻及びその他外部事象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 | 1 |
| 2. 要求事項への適合性 | 4 |
| 3. 参考文献 | 13 |

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及びその他外部事象に対する要求事項は、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6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
- 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3条

設置許可基準規則第6条第4項第1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、以下のように記載されている。

【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：100 m/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4.11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、(3)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)

②①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

MSF-76B 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、以下のとお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6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
- 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3条

設置許可基準規則第6条第4項第1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。

MSF-76B 型は、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プレートは、臨界防止上有意な変形が生じないように設計する。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。

2. (2) 審査ガイドへの適合性の説明に示すとおり、竜巻荷重が作用した場合の評価に用いる竜巻荷重は、兼用キャスク告示で定める竜巻による作用力を基に、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物^(B)による衝撃荷重を組み合わせた複合荷重とし、供用中に作用する荷重（圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重）

を組み合わせることとしている。また、安全上適切と認められる規格等で妥当性が確認されている値等を許容限界とすることに加え、上記による荷重により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留まって破断延性限界に十分な余裕を有すること、及び特定兼用キャスクの密封境界部についてはおおむね弾性状態に留まる値を許容限界とし、バスケットプレートについては、臨界防止上有意な変形を起こさないことを確認する。さらに、貯蔵用緩衝体による竜巻荷重のエネルギー吸収を無視するとともに、貯蔵用緩衝体の構造体としての剛性を考慮しない条件として機能維持評価を実施した。上記条件に基づく機能維持評価の結果、特定兼用キャスクの安全機能を担保する構成部材が許容限界を満足することから、竜巻に対して安全機能が維持されることを確認した。

なお、設置許可基準規則第6条第4項第2号に示される想定される森林火災に対する安全機能が損なわれないことについては、型式証明申請の範囲外（設置（変更）許可時に別途確認）である。

（注）MSF-76B型に衝突し得る設計飛来物は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下「竜巻影響評価ガイド」という。）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、以下のとお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：100 m/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。

MSF-76B型に竜巻荷重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、以下のとおり設定する。

a. 最大風速

最大風速は、100 m/sとする。

b. 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（第1表参照）を設計飛来物とする。MSF-76B型に竜巻荷重が作用した場合の評価では、MSF-76B型への影響が最大となるものを選定して評価する。

第1表 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 |
| 寸法(m) | 長さ×直径 2×0.05 | 長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2 | 長さ×幅×厚さ 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(m/s) | 49 | 51 | 30 | 60 | 34 |
| 最大鉛直速度(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、(3)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)
- ②①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。

火山立地評価、森林火災、爆発及び人為による火災は、型式証明申請の範囲外（設置（変更）許可での別途確認）である。

[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。

MSF-76B型に竜巻荷重が作用した場合の評価は、竜巻影響評価ガイドを参考に実施し、MSF-76B型の安全機能が維持されること確認する。

設計竜巻に対する設計飛来物及び最大速度は、第1表に示したとおり、竜巻影響評価ガイド解説表4.1に記載の値を基に設定し、設計飛来物の衝突荷重は、Rieraの方法に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視して算定する。

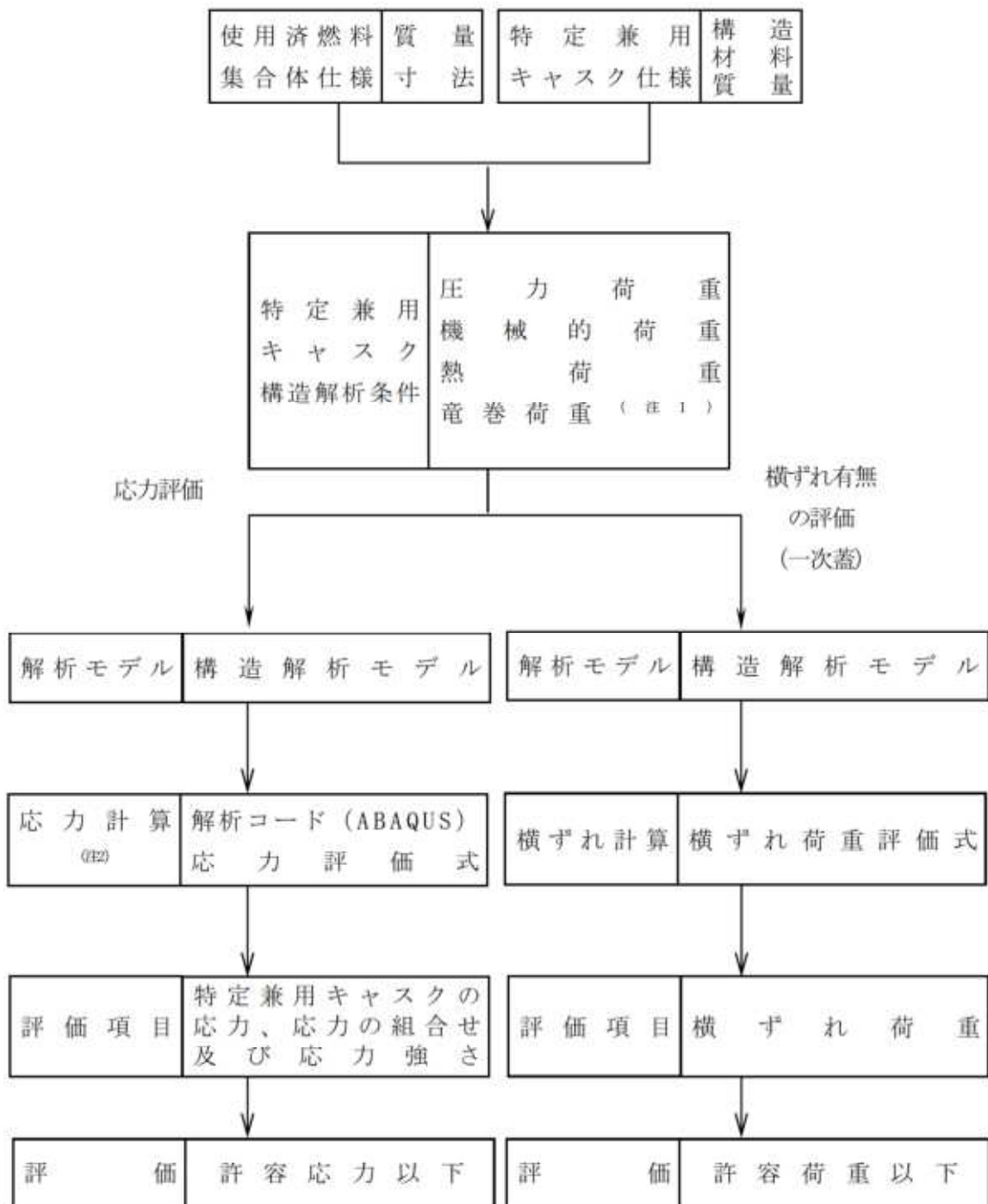
竜巻荷重に対する特定兼用キャスクの詳細評価は、型式指定において、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により実施する。

型式証明における設計方針の妥当性確認として、竜巻荷重がMSF-76B型に作用した場合のMSF-76B型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している。機能維持評価の概要を以下に示す。

<竜巻荷重による MSF-76B 型の機能維持評価>

竜巻荷重が MSF-76B 型に作用した場合の機能維持評価は、MSF-76B 型の安全機能を担保する構成部材として、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）、臨界防止機能を担うバスケット（バスケットプレート）、遮蔽機能及び除熱機能を担う外筒（ガンマ線遮蔽材で最も板厚が薄く、中性子遮蔽材を支持するとともに、除熱機能を担う伝熱フィンが取り付けられる部位）、並びに除熱機能を担う伝熱フィンを評価対象とする。バスケットプレートは、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 (JSME S FA1-2007)⁽¹⁾（以下、「金属キャスク構造規格」という）のバスケットの規定を適用する。また、密封境界部は弾性範囲内となる許容限界とする。金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がない外筒については、金属キャスク構造規格の中間胴の規定（供用状態 D）を適用し、伝熱フィンについては、竜巻荷重作用時に破断しないことを確認することで、それぞれの部材が欠損せず、安全機能が損なわれないことを確認する。

MSF-76B 型の竜巻荷重作用時の密封境界部、バスケット、外筒、及び伝熱フィンの機能維持評価フローを第 1 図に示す。竜巻荷重は、貯蔵用緩衝体によるエネルギー吸収を無視して算定し、竜巻荷重に加え、供用中に作用する荷重（圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重）を組み合わせる。上記により算定した竜巻荷重を基に、密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）、バスケット（バスケットプレート）、外筒、及び伝熱フィンに生じる応力を応力評価式にて算出し、機能維持を評価する。機能維持評価では、貯蔵用緩衝体の構造体としての剛性を考慮しない条件とする。また、閉じ込め機能維持の評価として、一次蓋の横ずれ有無を評価する。



(注1) 竜巻荷重として、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を考慮する。

(注2) 型式証明では、応力評価式により応力計算を行う。

第1図 竜巻荷重作用時の機能維持評価フロー

1) 竜巻荷重の設定

機能維持評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、以下のとおり設定する。

①風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、下式により算定する。計算条件及び計算結果を第2表に示す。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで、

q : 設計用速度圧 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$)

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2$$

G : ガスト影響係数

C : 風力係数

A : 受圧面積 (m^2)

ρ : 空気の密度 (kg/m^3)

V_0 : 設計竜巻の最大風速 (m/s)

第2表 風圧力による荷重の計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 計算条件又は計算結果 |
|-----------|--------|------------------------|-----------------------|
| | | | 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法 |
| ガスト影響係数 | G | — | 1 ^(注1) |
| 風力係数 | C | — | 1.2 ^(注2) |
| 受圧面積 | A | m^2 | 24.48 ^(注3) |
| 空気の密度 | ρ | kg/m^3 | 1.226 ^(注4) |
| 設計竜巻の最大風速 | V_0 | m/s | 100 |
| 風圧力による荷重 | W_w | N | 1.81×10^5 |

(注1) 竜巻の最大風速は最大瞬間風速であり、1.0とする。

(注2) 建築物荷重指針・同解説に示される円筒形状面への風力係数である。

(注3) 風圧が最も大きくなるMSF-76B型の投影面積である。

(注4) 建築物荷重指針・同解説に示される空気の密度である。

②気圧差による荷重 (W_p)

機能維持評価においては、第3表に示すとおり、設計値に対して、MSF-76B型の外部と特定兼用キャスク本体内部の差圧を保守的に設定(設計値の最大0.021MPaに対して0.101MPaと設定)する。竜巻により生じる外気の気圧低下は、この保守性に包絡される。

第3表 機能維持評価での内圧設定

| 部位 | 設計値 | 機能維持評価で考慮する 圧力設定 |
|-----------------|------------------|---------------------|
| 特定兼用キャスク本体内部(①) | 0.08MPa~0.097MPa | 0MPa |
| 外気(②) | 大気圧(0.101MPa) | 大気圧(0.101MPa) |
| ①と②の差圧 | 最大0.021MPa | 0.101MPa |

③設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) は、Rieraの方法に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視するとともに、設計飛来物の衝突による減速を考慮せず、設計飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重(衝撃荷重時刻歴：三角波、衝突時間=衝突長さ/速度)による力積が等しいとして、次式にて算出する。

なお、設計飛来物の最大速度については、評価の代表性を考慮し、水平方向及び鉛直方向の飛来速度のうち大きい水平方向速度を設定する。

計算条件及び計算結果を第4表に示す。機能維持評価に用いる荷重は、第4表に示す最も大きい荷重を用いる。

$$W_M = \frac{2MV^2}{L_{min}}$$

ここで、

M : 設計飛来物の質量 (kg)

V : 設計飛来物の最大速度 (m/s)

L_{min} : 設計飛来物の衝突方向長さ(最小長さ) (m)

第4表 設計飛来物による衝撃荷重の計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 計算条件又は計算結果 | | | | |
|--------------------|-----------|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | | 鋼製パイプ | 鋼製材 | コンクリート板 | コンテナ | トラック |
| 設計飛来物の質量 | M | kg | 8.4 | 135 | 540 | 2300 | 4750 |
| 設計飛来物の最大速度 | V | m/s | 49 | 51 | 30 | 60 | 34 |
| 設計飛来物の衝突方向長さ(最小長さ) | L_{min} | m | 0.05 | 0.2 | 0.15 | 2.4 | 1.3 |
| 設計飛来物による衝撃荷重 | W_M | N | 8.07×10^5 | 3.52×10^6 | 6.48×10^6 | 6.90×10^6 | 8.45×10^6 |

④複合荷重

機能維持評価に用いる竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重 (W_W)、気圧差による荷重 (W_P) 及び設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) を組み合わせた複合荷重 W_{T1} 、 W_{T2} を作用させる (第5表参照)。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$$

第5表 竜巻荷重

| 項目 | 記号 | 単位 | 計算条件又は計算結果 |
|--------------|----------|----|--------------------|
| | | | 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法 |
| 風圧力による荷重 | W_W | N | 1.81×10^5 |
| 気圧差による荷重 | W_P | N | — (注) |
| 設計飛来物による衝撃荷重 | W_M | N | 8.45×10^6 |
| 複合荷重 | W_{T1} | N | — |
| | W_{T2} | N | 8.64×10^6 |

(注) 竜巻により生じる外気の気圧差による荷重は、MSF-76B型の外部と特定兼用キャスク本体内部の差圧設定において考慮する。

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

MSF-76B 型には供用中に常時作用する荷重として、圧力荷重（胴内圧や蓋間圧等）、機械的荷重（蓋ボルトの締付力や蓋部に金属ガスケットの締付反力等）及び熱荷重が作用するため考慮する。

b) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、雹及び雨である。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

1)に示したとおり、竜巻荷重 ($8.64 \times 10^6 \text{ N}$) は、補足説明資料5-1「津波に対する安全機能維持に関する説明資料 (L5-95LD211)」で示した、津波荷重 ($9.04 \times 10^6 \text{ N}$) に比べ小さい。また、機能維持評価条件のうち、津波荷重以外の荷重条件及びその他の条件は同じである。したがって、竜巻荷重による機能維持評価は、津波荷重による機能維持評価に包絡される。補足説明資料5-1に示すとおり、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ること、バスケットに生じる応力は許容応力以下かつ弾性範囲に留まり、臨界防止機能は維持されること、及び外筒及び伝熱フィンに生じる応力は許容応力以下であり、それぞれの部材は欠損しないこと、並びに津波荷重作用時に一次蓋の横ずれは生じないことを確認しており、竜巻荷重が作用しても同様に安全機能が維持される。

3. 参考文献

- (1) (一社)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)(JSME S FA1-2007)」, (2007).