

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. 特定機器型式証明申請に係る要求事項への適合性のための設計方針……………	1
2. 要求事項 ……………	5
3. 要求事項への適合性……………	8
4. 竜巻荷重による Hitz-B69 型の機能維持評価……………	13
5. 参考文献 ……………	26

別紙 1 竜巻荷重作用時のキャスクの機能維持評価

1. 特定機器型式証明申請に係る要求事項への適合性のための設計方針

(1) 特定機器型式証明申請に係る要求事項に対する適合性

Hitz-B69型は、使用済燃料を貯蔵する機能を有するとともに、使用済燃料の工場等外への運搬に用いる輸送容器としての機能を併せ持つ特定兼用キャスク（以下「キャスク」という。）である。

発電用原子炉施設に使用する特定機器の設計の型式証明申請に係る Hitz-B69 型の安全設計について、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への適合のための設計方針を以下に示す。

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第六条 安全施設（兼用キャスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）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。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

3 安全施設（兼用キャスクを除く。）は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であつて人為によるもの（故意によるものを除く。以下「人為による事象」という。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

4 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

5 前項の規定は、兼用キャスクについて第一項の規定の例によることを妨げない。

6 兼用キャスクは、次に掲げる人為による事象に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

一 工場等内又はその周辺において想定される兼用キャスクの安全性を損なわせる原因となるおそれがある爆発

二 工場等の周辺において想定される兼用キャスクの安全性を損なわせる原因となるおそれがある火災

7 前項の規定は、兼用キャスクについて第三項の規定の例によることを妨げない。

適合のための設計方針

1 から 3 について

型式証明申請の範囲外とする。

4 について

一 Hitz-B69 型は、第一号に規定する「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竜巻」による飛来物の衝突において、その安全機能を損なわない設計とする。

Hitz-B69 型は、上記の荷重条件に対して、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密封境界部は、おおむね弾性状態に留まる設計とし、臨界防止機能を担保するバスケットは、臨界防止上有意な変形が生じない設計とする。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、破断延性限界に対して十分な余裕を有し、キャスクの安全機能を維持する設計とする。

二 型式証明申請の範囲外とする。

5 から 7 について

型式証明申請の範囲外とする。

(2) 特定機器を使用することにより発電用原子炉施設に及ぼす影響

Hitz-B69 型は、Hitz-B69 型を発電用原子炉施設において使用した場合に発電用原子炉施設の安全性を損なうような影響を及ぼさない設計とする。以下、Hitz-B69 型を発電用原子炉施設において使用した場合に発電用原子炉施設の安全性を損なうような影響を及ぼさないことを、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に沿って確認する。

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第六条 安全施設（兼用キャスクを除く。）は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）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。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

3 安全施設（兼用キャスクを除く。）は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。以下「人為による事象」という。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

4 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

5 前項の規定は、兼用キャスクについて第一項の規定の例によることを妨げない。

6 兼用キャスクは、次に掲げる人為による事象に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

一 工場等内又はその周辺において想定される兼用キャスクの安全性を損なわせる原因となるおそれがある爆発

二 工場等の周辺において想定される兼用キャスクの安全性を損なわせる原因となるおそれがある火災

7 前項の規定は、兼用キャスクについて第三項の規定の例によることを妨げない。

適合のための設計方針

1 から 3 について

型式証明申請の範囲外とする。

4 について

一 Hitz-B69 型は、第一号に規定する「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竜巻」による飛来物の衝突において、キャスクの安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。

Hitz-B69 型は、上記の荷重条件に対して、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密封境界部は、おおむね弾性状態に留まる設計とし、臨界防止機能を担保するバスケットは、臨界防止上有意な変形が生じない設計とする。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、破断延性限界に対して十分な余裕を有し、キャスクの安全機能を維持する設計とする。

以上より、発電用原子炉施設の安全性に影響を及ぼさない。

二 型式証明申請の範囲外とする。

5 から 7 について

型式証明申請の範囲外とする。

2. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、キャスクの竜巻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

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

「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」に記載されている竜巻に対する【審査における確認事項】及び【確認内容】は以下のとおりである。

a. 「4.2 考慮する自然現象等の設定方針 4.2.3 竜巻」

【審査における確認事項】

『

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。

』

【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。

』

b. 「4.3.3 竜巻に対する設計方針」

【審査における確認事項】

『
兼用キャスクは、「4.2.3 竜巻」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】

- 『
- (1) 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。
 - (2) 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。
 - (3) 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。

』

3. 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

Hitz-B69 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

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。

Hitz-B69 型は、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設計飛来物の衝突荷重に対して、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密封境界部は、おおむね弾性状態に留まる設計とし、臨界防止機能を担保するバスケットは、臨界防止上有意な変形が生じない設計とする。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、破断延性限界に対して十分な余裕を有し、キャスクの安全機能を維持する設計とする。

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とし、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作用させるとともに、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、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た。上記条件に基づく機能維持評価の結果、キャスクの安全機能を担保する構成部に発生する応力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である。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、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、キャスクの竜巻に対する設計は、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

<2. (2) a.に対する適合性>

【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。

Hitz-B69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は、最大風速及び設計飛来物を考慮する。これらを算出するための条件は以下のとおりである。

a. 最大風速

最大風速は、100m/sとする。

b. 設計飛来物

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（表1参照）とする。設計荷重としては、キャスクへの影響が最大となるものを選定して評価する。

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
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

<2. (2) b.に対する適合性>

【確認内容】

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。

Hitz-B69 型に竜巻による飛来物が衝突した場合の評価は、竜巻影響評価ガイドを参考に実施する。

設計竜巻に対する設計飛来物及び最大速度は、表 1 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、飛来物の衝突荷重は、**Riera** の式に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視して設定する。

竜巻荷重に対するキャスクの評価は、**FEM** 解析に基づく応力評価等により実施する。

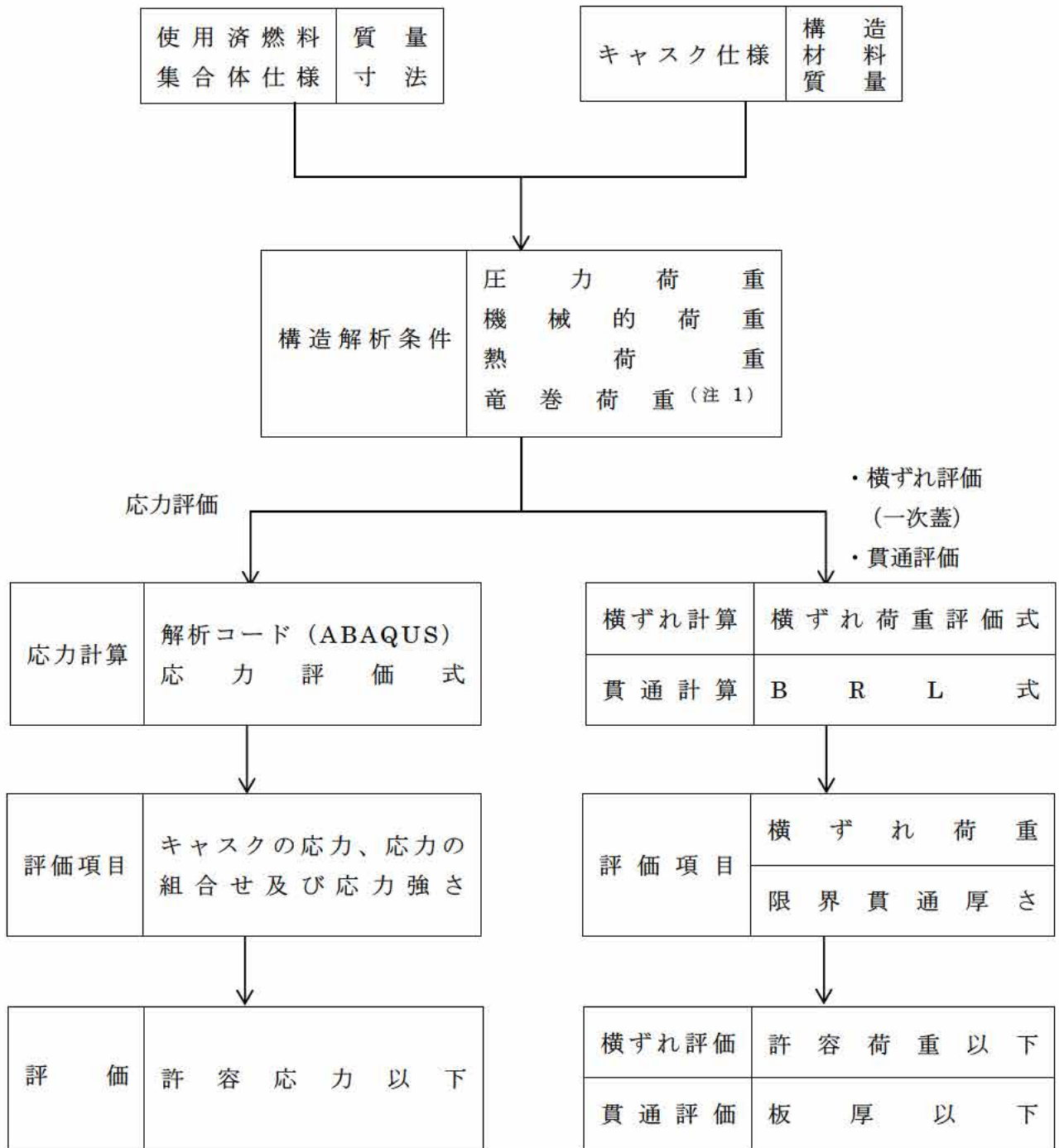
型式証明における設計方針の妥当性確認として、竜巻荷重が作用した場合の機能維持評価を実施し、**Hitz-B69** 型の安全機能が維持される設計であることを確認する。機能維持評価の概要を 4.項に示す。

4. 竜巻荷重による Hitz-B69 型の機能維持評価

機能維持評価は、Hitz-B69 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及び一次蓋ボルト）、遮蔽機能を担う外筒（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部位）、臨界防止機能を担うバスケット、除熱機能を担う伝熱フィンを評価対象とする。また、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、緩衝体の構造体としての剛性を考慮しない条件とする。さらに、密封境界部の評価として、一次蓋の横ずれ有無を評価する。また、Hitz-B69 型は蓋部の遮蔽機能を担保する部材として二次蓋を取り付けており、二次蓋を所定の位置に支持する必要があることから二次蓋ボルトの評価を行うこととする。

竜巻荷重作用時の Hitz-B69 型の機能維持評価フローを図 1 に示す。

密封境界部及び二次蓋ボルトは金属キャスク構造規格⁽¹⁾に定める供用状態 D の許容応力を許容限界とする。バスケットは供用状態 D の許容応力を許容限界とし、塑性変形が生じる場合はバスケットの変形量を考慮した臨界解析により臨界防止上有意な変形が生じていないことを確認する。また、外筒及び伝熱フィンは金属キャスク構造規格に許容応力の記載がないが、外筒については同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、破断しないことを確認することで、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。



(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突荷重を考慮する。

図 1 竜巻荷重作用時の Hitz-B69 型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み合わせは、以下のとおり設定する。

想定される竜巻はキャスクの長手方向だけでなく径方向からも到来する可能性があることから、キャスク長手方向（キャスク頭部側）又は径方向（キャスク側部側）の荷重を考慮して評価を行う。

評価対象部位のうち密封境界部と外筒には風圧力による荷重を等分布荷重として、飛来物衝突荷重を集中荷重として設定する。

バスケットと伝熱フィンの評価では竜巻荷重からキャスクに作用する加速度を算出するため、バスケットと伝熱フィンには風圧力による荷重と飛来物衝突荷重を組み合わせた竜巻荷重を設定する。

a. 密封境界部、外筒及び二次蓋ボルト

①風圧力による荷重

キャスクへ作用する風圧力による荷重のモデルを図 2 に示す。風圧力による荷重（等分布荷重） Q_w は、下記の評価式により算定する。

風圧力による荷重の計算条件及び計算結果を表 2 に示す。

$$Q_w = \frac{W_w}{A}$$

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

ここで、

W_w : 風圧力による荷重 (N)

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

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

ρ : 空気の密度 ($=1.22 \text{ kg}/\text{m}^3$)

V_D : 竜巻の最大風速 ($=100 \text{ m}/\text{s}$)

G : ガスト影響係数 ($=1$)

C : 風力係数 ($=1.2$)

A : 受圧面積 (m^2)

表 2 風圧力による荷重の計算条件及び計算結果（密封境界部、外筒及び二次蓋ボルト）

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果	
			長手方向からの 竜巻荷重	径方向からの 竜巻荷重
空気の密度	ρ	kg/m ³	1.22 (注 1)	
竜巻の最大風速	V_D	m/s	100	
ガスト影響係数	G	—	1.0 (注 2)	
風力係数	C	—	1.2 (注 3)	
受圧面積	A	m ²	4.91 (注 4)	13.5 (注 5)
風圧力による荷重	W_w	N	3.60×10^4	9.89×10^4
風圧力による荷重 (等分布荷重)	Q_w	N/m ²	7.32×10^3	7.32×10^3

(注 1) 建築物荷重指針・同解説（2015）に示される空気の密度である。

(注 2) 竜巻の最大風速は最大瞬間風速であるため、1.0 とする。

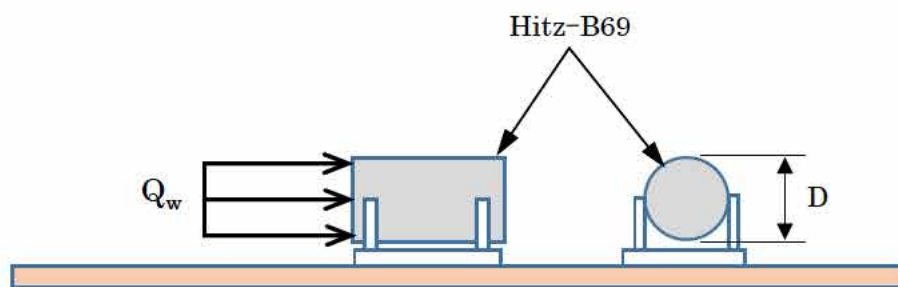
(注 3) 建築物荷重指針・同解説（2015）に示される円筒形状の風力係数である。

(注 4) 長手方向から竜巻荷重を受けるキャスク投影面積。

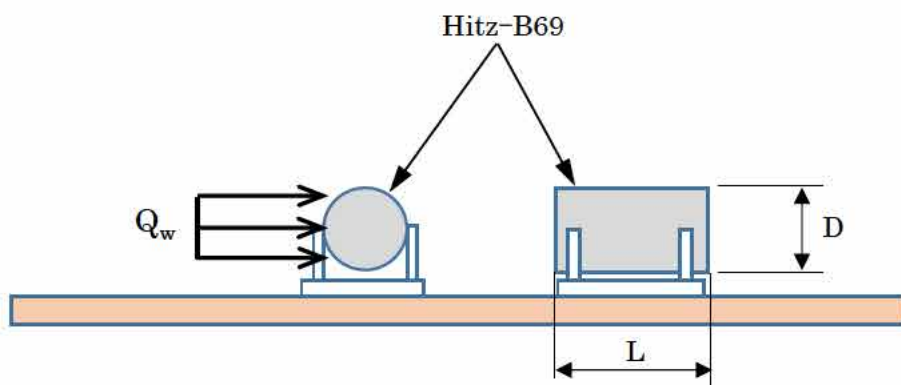
$$(A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad D: \text{キャスク外径} (=2.5\text{m}))$$

(注 5) 径方向から竜巻荷重を受けるキャスク投影面積。

$$(A = D \cdot L \quad D: \text{キャスク外径} (=2.5\text{m})、L: \text{キャスク全長} (=5.4\text{m}))$$



(a) 長手方向からの竜巻



(b) 径方向からの竜巻

図 2 風圧力による荷重（密封境界部、外筒及び二次蓋ボルト）

②気圧差による荷重

機能維持評価においては、表 3 に示すとおり、設計値に対して Hitz-B69 型の外部とキャスク本体内部の気圧差 W_p を保守的に設定（設計値の最大 0.021 MPa に対して 0.101 MPa と設定）する。したがって、竜巻により生じる外気との気圧差は、この保守性に包絡されると考えられる。

表 3 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
① キャスク本体内部	0.08MPa～0.097MPa	0MPa
② 外気	大気圧 (0.101MPa)	大気圧 (0.101MPa)
①と②の気圧差 W_p	最大 0.021MPa	0.101MPa

③飛来物衝突荷重

飛来物衝突荷重 W_M は、Riera の式に基づき、設計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、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。また、設計飛来物の最大速度については、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表 4 に示す。機能維持評価に用いる荷重は、計算条件とする飛来物のうち最も大きいトラックの荷重を用いる。

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

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 (m)

表 4 飛来物衝突荷重の計算条件及び計算結果

設計飛来物	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
質量	M	kg	8.4	135	540	2300	4750
最大速度	V	m/s	49	51	30	60	34
衝突方向 長さ	L_{\min}	m	0.05	0.2	0.15	2.4	1.3
飛来物 衝突荷重	W_M	N	8.07×10^5	3.52×10^6	6.48×10^6	6.90×10^6	8.45×10^6

④竜巻荷重の組合せ

密封境界部、外筒及び二次蓋ボルトの評価においては、風圧力による荷重 Q_w を等分布荷重として、飛来物衝突荷重 W_M を集中荷重として同時に解析モデルに作用させる。竜巻によって生じる外気の気圧差は、キャスク外部とキャスク本体内部の差圧設定で考慮するため、竜巻荷重には考慮しない。

荷重条件を図3に示す。

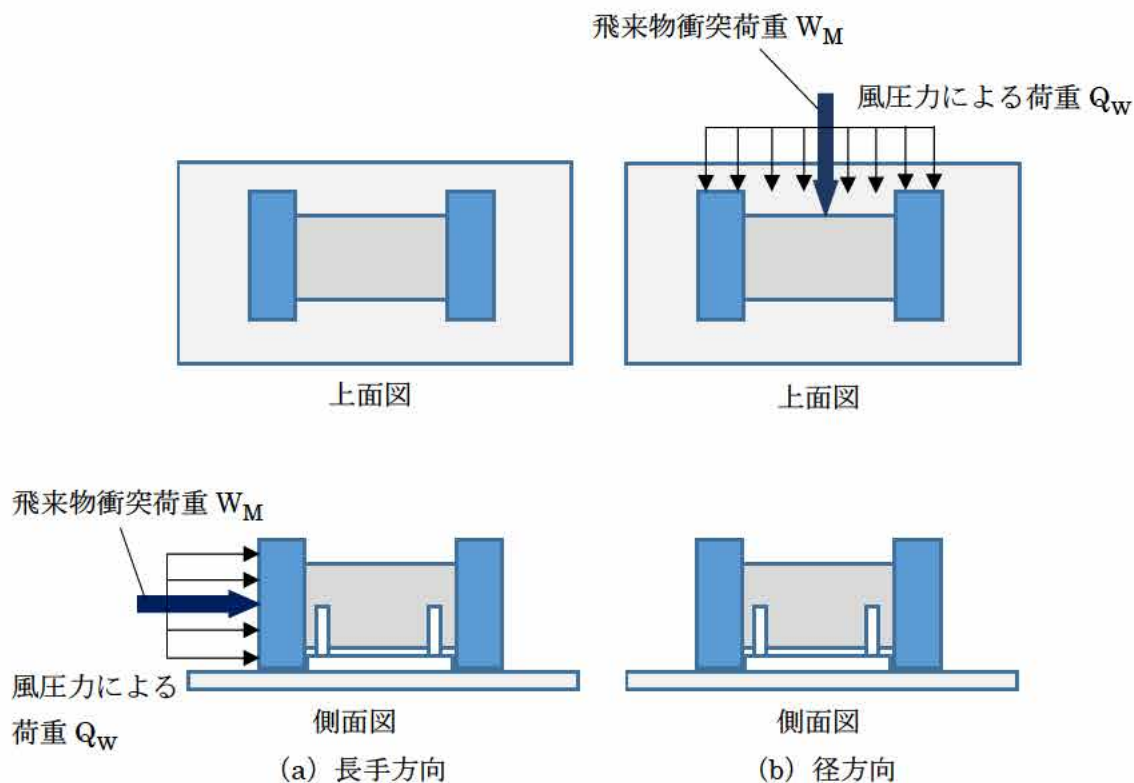


図3 荷重条件（密封境界部、外筒及び二次蓋ボルト）

b. バスケット及び伝熱フィン

①風圧力による荷重

風圧力による荷重 W_w は、下記の評価式により算定する。

風圧力による荷重の計算条件及び計算結果を表 5 に示す。

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

ここで、

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

$$q = \frac{1}{2} \rho V_D^2$$

ρ : 空気の密度 ($=1.22 \text{ kg}/\text{m}^3$)

V_D : 竜巻の最大風速 ($=100 \text{ m}/\text{s}$)

G : ガスト影響係数 ($=1$)

C : 風力係数 ($=1.2$)

A : 受圧面積 (m^2)

表 5 風圧力による荷重の計算条件及び計算結果 (バスケット及び伝熱フィン)

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果	
			長手方向からの 竜巻荷重	径方向からの 竜巻荷重
空気の密度	ρ	kg/m^3	1.22 (注 1)	
竜巻の最大風速	V_D	m/s	100	
ガスト影響係数	G	—	1.0 (注 2)	
風力係数	C	—	1.2 (注 3)	
受圧面積	A	m^2	13.0 (注 4)	24.5 (注 5)
風圧力による荷重	W_w	N	9.49×10^4	1.80×10^5

(注 1) 建築物荷重指針・同解説 (2015) に示される空気の密度である。

(注 2) 竜巻の最大風速は最大瞬間風速であるため、1.0 とする。

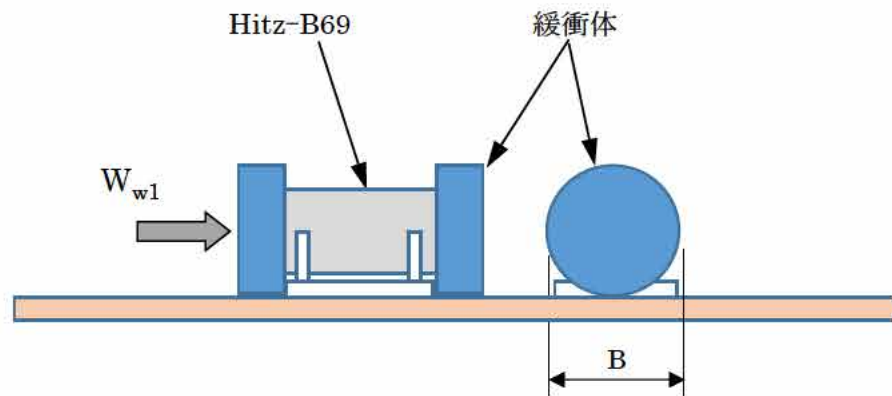
(注 3) 建築物荷重指針・同解説 (2015) に示される円筒形状面への風力係数である。

(注 4) 長手方向から竜巻荷重を受けるキャスクの投影面積。

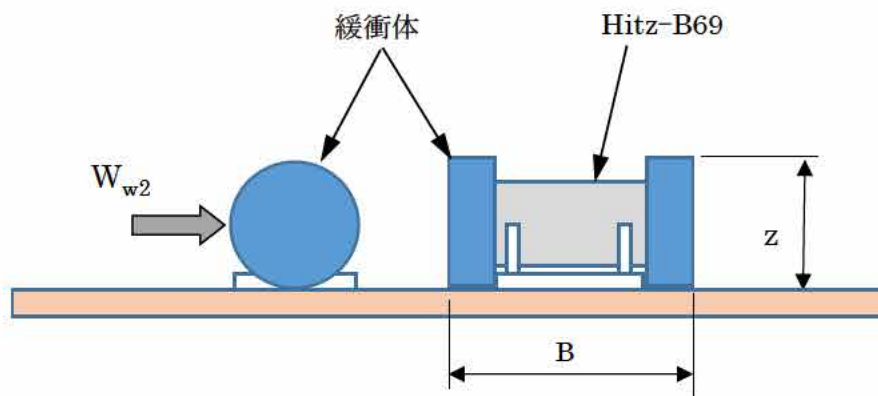
$$(A_1 = B \cdot B \quad B: \text{緩衝体外径} (=3.6\text{m}))$$

(注 5) 径方向から竜巻荷重を受けるキャスクの投影面積。

$$(A_2 = z \cdot B \quad z: \text{緩衝体外径} (=3.6\text{m})、B: \text{キャスク全長} (=6.8\text{m}))$$



(a) 長手方向からの竜巻



(b) 径方向からの竜巻

図4 風圧力による荷重の評価モデル (バスケット及び伝熱フィン)

②気圧差による荷重

密封境界部、外筒及び二次蓋ボルトと同様、Hitz-B69 型の外部とキャスク本体内部の気圧差による荷重 W_p を設定するが、キャスク外部とキャスク本体内部の差圧設定で考慮するため、竜巻荷重には考慮しない。

③飛来物衝突荷重

密封境界部及び外筒と同様、飛来物衝突荷重 W_M は、Riera の式に基づき算定する。機能維持評価に用いる荷重は、計算条件とする飛来物のうち最も大きいトラックの荷重を用いる。

④竜巻荷重の組合せ

バスケット及び伝熱フィンの評価においては、長手方向からの竜巻荷重 W_{T1} は風圧力による荷重 W_{w1} と飛来物衝突荷重 W_M を、径方向からの竜巻荷重 W_{T2} は風圧力による荷重 W_{w2} と飛来物衝突荷重 W_M を組み合わせる。

$$W_T = W_w + W_p + W_M$$

荷重条件を図 5 に示す。

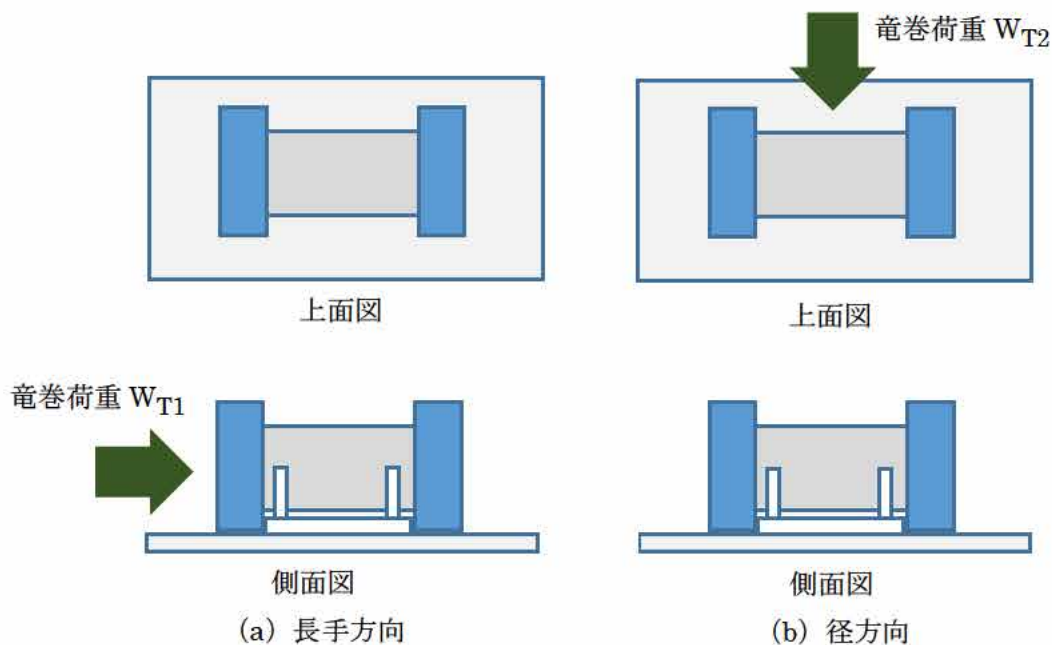


図 5 荷重条件 (バスケット及び伝熱フィン)

計算条件及び計算結果を表 6 に示す。

表 6 竜巻荷重の組合せ (バスケット及び伝熱フィン)

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果	
			長手方向からの 竜巻荷重	径方向からの 竜巻荷重
風圧力による荷重	W_w	N	9.49×10^4	1.80×10^5
気圧差による荷重	W_p	N	— (注 1)	
飛来物衝突荷重	W_M	N	8.45×10^6	
竜巻荷重	W_T	N	8.55×10^6	8.63×10^6

(注 1) キャスク外部と本体内部の差圧設定で考慮するため、竜巻荷重には考慮しない。

(2) 機能維持評価

竜巻荷重作用時に Hitz-B69 型に生じる竜巻荷重を基に、密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）及び二次蓋ボルトについては有限要素法を用いた ABAQUS コードにより評価を行う。また、外筒、バスケット及び伝熱フィンについては工学式により応力を計算し、機能維持評価を行う。さらに、一次蓋の横ずれ有無の評価と、設計飛来物が衝突した局部の貫通評価を行う。

竜巻荷重作用時の密封境界部、外筒、バスケット、伝熱フィン及び二次蓋ボルトの応力評価結果を表 7 (a) ～ (d) に示す。表 7 (a) ～ (d) に示すとおり、竜巻荷重作用時に密封境界部、外筒、バスケット及び二次蓋ボルトに生じる応力は、金属キャスク構造規格の密封容器、中間胴及びバスケットそれぞれにおける供用状態 D の基準を満足する。バスケットに生じる応力は、供用状態 D の基準を満足しており、さらに使用済燃料集合体を収納するコンパートメントに生じる応力強さは、設計降伏応力より小さいため、コンパートメントは塑性変形せず、臨界防止上有意な変形は生じない。よって、閉じ込め機能、遮蔽機能及び臨界防止機能が損なわれるおそれはない。一次蓋の横ずれ評価結果を表 7 (e) に、計飛来物の貫通評価を表 7 (f) に示す。表 7 (e) (f) に示すとおり、一次蓋の横ずれは生じないこと及び設計飛来物が衝突した場合でも貫通しないことを確認した。伝熱フィンについても許容応力以下となり、部材は欠損せず、除熱機能が損なわれることはない。したがって、竜巻荷重作用時に Hitz-B69 型の安全機能は維持される。

竜巻荷重作用時のキャスクの機能維持評価の詳細を別紙 1 に示す。

表 7 竜巻荷重作用時の機能維持評価結果

(a) 密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）及び二次蓋ボルト

竜巻荷重 作用方向	評価部位		応力の種類 (注1)	計算値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
長手方向	一次蓋 密封シール部	一次蓋部	P_L+P_b+Q	49	162 (S_y)
		胴フランジ部	P_L+P_b+Q	52	183 (S_y)
	一次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	322	846 (S_y)
	二次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	577	848 (S_y)
径方向	一次蓋 密封シール部	一次蓋部	P_L+P_b+Q	108	162 (S_y)
		胴フランジ部	P_L+P_b+Q	85	183 (S_y)
	一次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	419	846 (S_y)
	二次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	442	848 (S_y)

(注1) P_L ：一次局部膜応力強さ、 P_b ：一次曲げ応力強さ、 Q ：二次応力強さ、
 σ_m ：平均引張応力、 $\sigma_m+\sigma_b$ ：平均引張応力+曲げ応力

(b) 外筒

津波荷重 作用方向	評価部位	応力の種類	計算値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
径方向	外筒中央部 (評価位置①)	曲げ	102	284 (f_b)
		せん断	55	163 (f_s)
	外筒端部 (評価位置②)	曲げ	0	284 (f_b) (注1)
		せん断	25	163 (f_s) (注1)
	外筒端部 (評価位置③)	曲げ	122	170 (f_b) (注2)
		せん断	55	97 (f_s) (注2)

(注1) 継手効率 1.0 を考慮した値である。

(注2) 継手効率 0.6 を考慮した値である。

(c) バスケット

竜巻荷重 作用方向	評価部位	応力の種類	計算値 (MPa)	評価基準値 (MPa) (注1)
長手方向	コンパートメント	圧縮応力	13	265 (f_c)
径方向	コンパートメント	せん断	6	171 ($1.2S_m$)
		曲げ	7	391 (S_u)
		応力強さ	13	266 (S_y)
	391 (S_u)			
サポートプレート	圧縮応力	10	157 (f_c)	

(d) 伝熱フィン

竜巻荷重 作用方向	評価部位	応力の種類	計算値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
長手方向	溶接部	応力強さ	1	86 (S_u) (注1)

(注1) 継手効率 0.45 を考慮した値である。

(e) 一次蓋の横ずれ評価

評価項目	計算値 (N)	評価基準値 (N) (注1)
一次蓋の慣性力	3.04×10^5	2.19×10^6

(注1) 一次蓋ボルトの締付力による摩擦力

(f) 飛来物貫通評価

竜巻荷重 作用方向	評価部位	限界貫通厚さ (mm)	評価基準値 (mm) (注1)
径方向	外筒中央部	8.9	14

(注1) 設計飛来物が衝突する部位のうち最も板厚が薄い外筒の板厚

5. 参考文献

- (1) (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)

竜巻荷重作用時のキャスクの機能維持評価

1. 概要

本資料は、Hitz-B69 型を対象として金属キャスク構造規格⁽¹⁾に基づき竜巻荷重作用時の機能維持評価を行った結果についてまとめたものである。

本評価は、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及び一次蓋ボルト）、臨界防止機能を担うバスケット、遮蔽機能を担う外筒（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部位）、除熱機能を担う伝熱フィンを評価対象として実施した。また、蓋部の遮蔽機能を担う二次蓋を所定の位置に支持する必要があることから二次蓋ボルトの評価を実施した。評価の詳細を以下に示す。

2. 竜巻荷重作用時の機能維持評価

(1) 密封境界部及び二次蓋ボルト

閉じ込め機能を担う密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）及び二次蓋ボルトについては、有限要素法を用いた ABAQUS コードにより各部位に生じる応力を評価する。

a. 解析モデル

竜巻荷重作用時の Hitz-B69 型の解析モデルとして、別紙 1-1 図に示す三次元解析モデルを用いる。本解析モデルは、胴、底板、外筒、底部中性子遮蔽材カバー、一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、二次蓋及びトラニオンより構成される。なお、一次蓋及び二次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。

b. 荷重条件及び境界条件

密封境界部の機能維持評価における荷重条件は以下のとおり。

- ・等分布荷重である風圧力による荷重及び集中荷重である飛来物衝突荷重が同時に作用する。
- ・飛来物衝突荷重は評価するうえで最も厳しくなる箇所へ作用させる。
- ・側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材等の非強度部材は相当質量に応じた荷重を考慮して、その荷重受面に分布させる。
- ・胴内部圧力、一次二次蓋間圧力、側部中性子遮蔽材部圧力、一次蓋中性子遮蔽材部圧力及び底部中性子遮蔽材部圧力が作用する。
- ・竜巻によってキャスク外部とキャスク本体内部に気圧差が生じる。
- ・温度は貯蔵状態の熱解析結果を使用する。

境界条件として、トラニオンの固定位置における節点の軸方向変位、径方向変位、及び鉛直方向変位を拘束する。荷重条件と境界条件を別紙 1-2 図及び別紙 1-3 図に示す。

c. 評価基準

密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）及び二次蓋ボルトに発生する応力の評価基準は、金属キャスク構造規格の密封容器の供用状態 D における許容応力を適用する。

i. 一次蓋密封シール部

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

$$P_L + P_b + Q \leq S_y$$

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

P_L : 一次局部膜応力強さ

P_b : 一次曲げ応力強さ

Q : 二次応力強さ

S_y : 設計降伏点

ii. 蓋ボルト

$$(\text{軸方向に垂直な断面の平均引張応力}) \leq S_y$$

$$(\text{軸方向に垂直な断面の平均引張応力} + \text{曲げ応力}) \leq S_y$$

d. 評価結果

別紙 1-4 図に示す応力評価位置に対する竜巻荷重作用時における密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）の一次応力強さ及び二次蓋ボルトの応力の評価結果を別紙 1-1 表に示す。別紙 1-1 表に示すように、一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトに生じる応力は評価基準値を満足する。

別紙 1-1 表 竜巻荷重作用時におけるキャスク本体の応力評価結果
(密封境界部及び二次蓋ボルト)

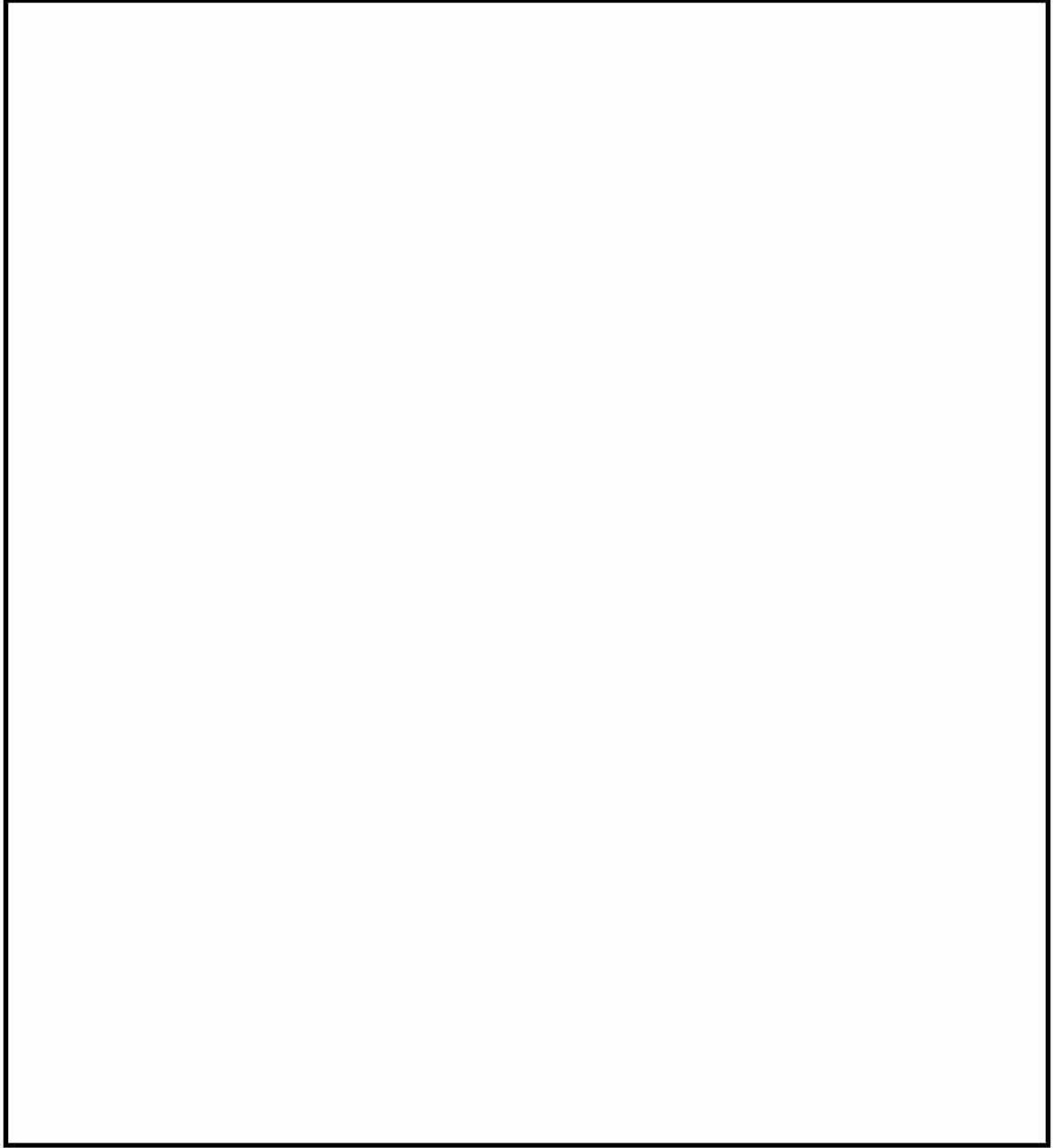
竜巻荷重 作用方向	部位	評価断面 (注 1)	応力の種類 (注 2)	計算値 (MPa)	温度 (°C) (注 3)	評価基準値 (MPa) (注 4)
長手方向	一次蓋	1	P_L+P_b+Q	49	120	162
	密封シール部	2	P_L+P_b+Q	52	145	183
	一次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	322	115	846
	二次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	577	110	848
径方向	一次蓋	1	P_L+P_b+Q	108	120	162
	密封シール部	2	P_L+P_b+Q	85	145	183
	一次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	419	115	846
	二次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	442	110	848

(注 1) 別紙 1-4 図参照

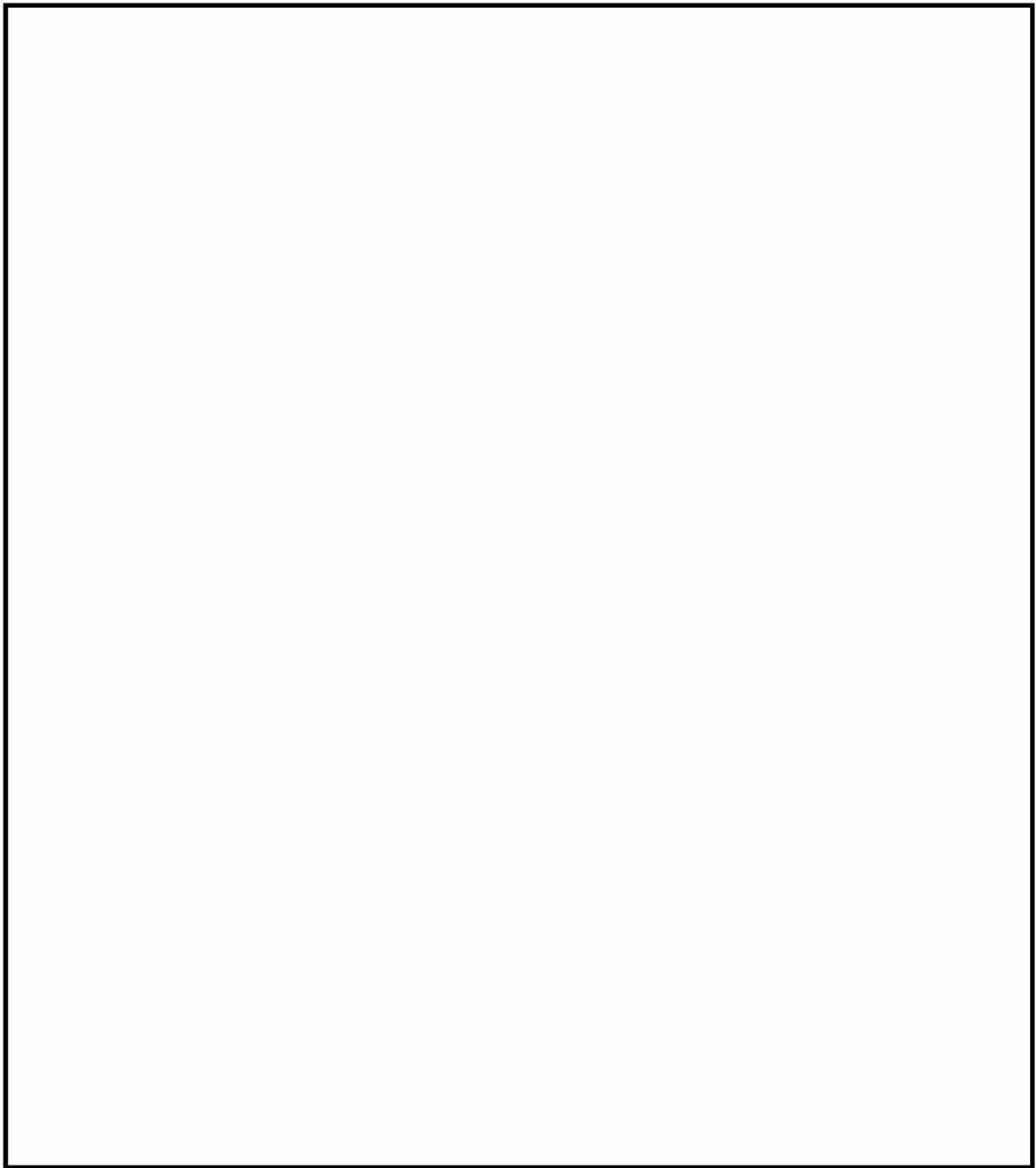
(注 2) P_L ：一次局部膜応力強さ、 P_b ：一次曲げ応力強さ、 Q ：二次応力強さ、 σ_m ：平均引張応力、 $\sigma_m+\sigma_b$ ：平均引張応力+曲げ応力

(注 3) Hitz-B69 型の除熱解析の結果（補足説明資料 16-4 「除熱機能に関する説明資料 (GK04-SC-B01)」）から設定

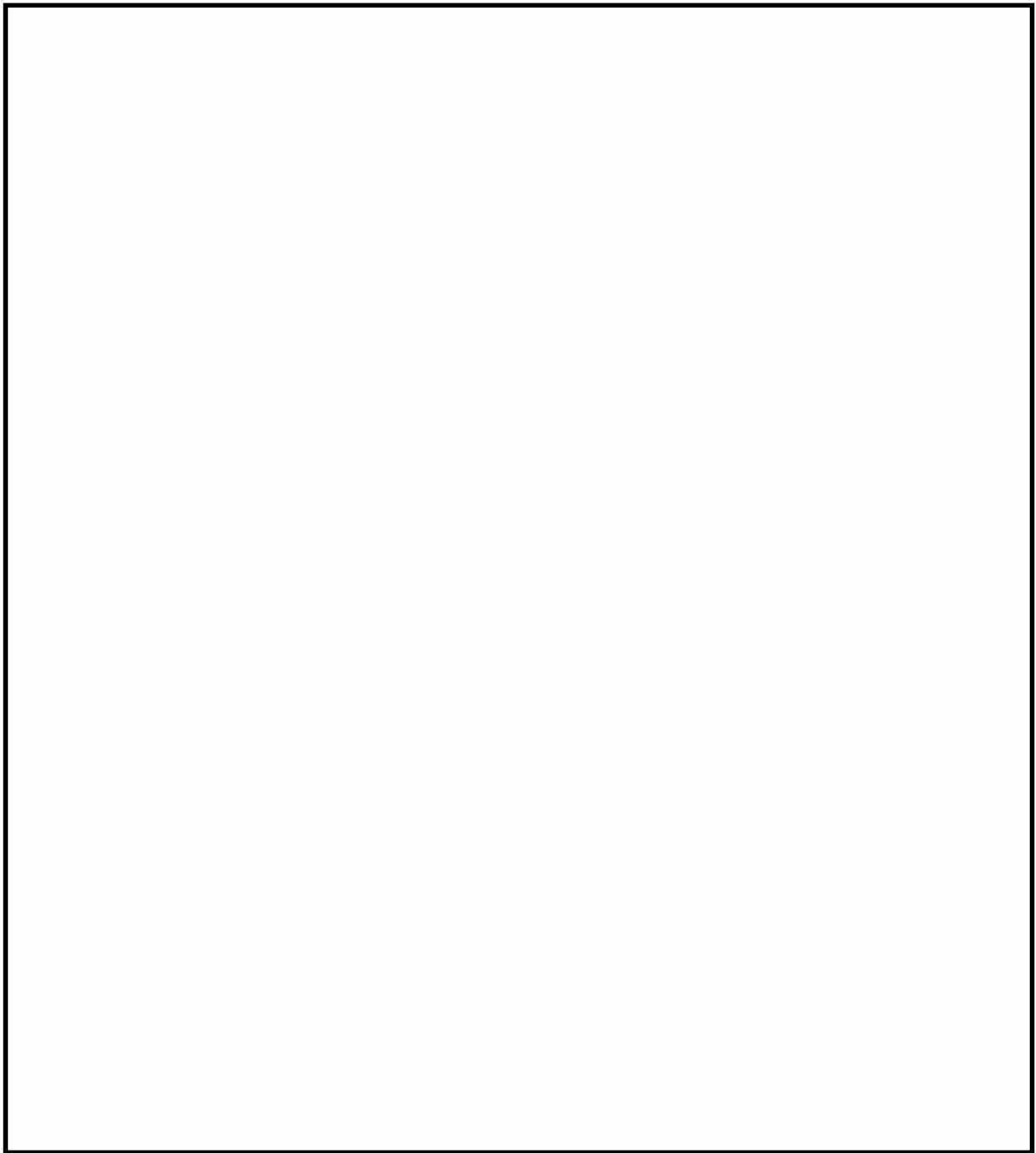
(注 4) 一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は S_y である。



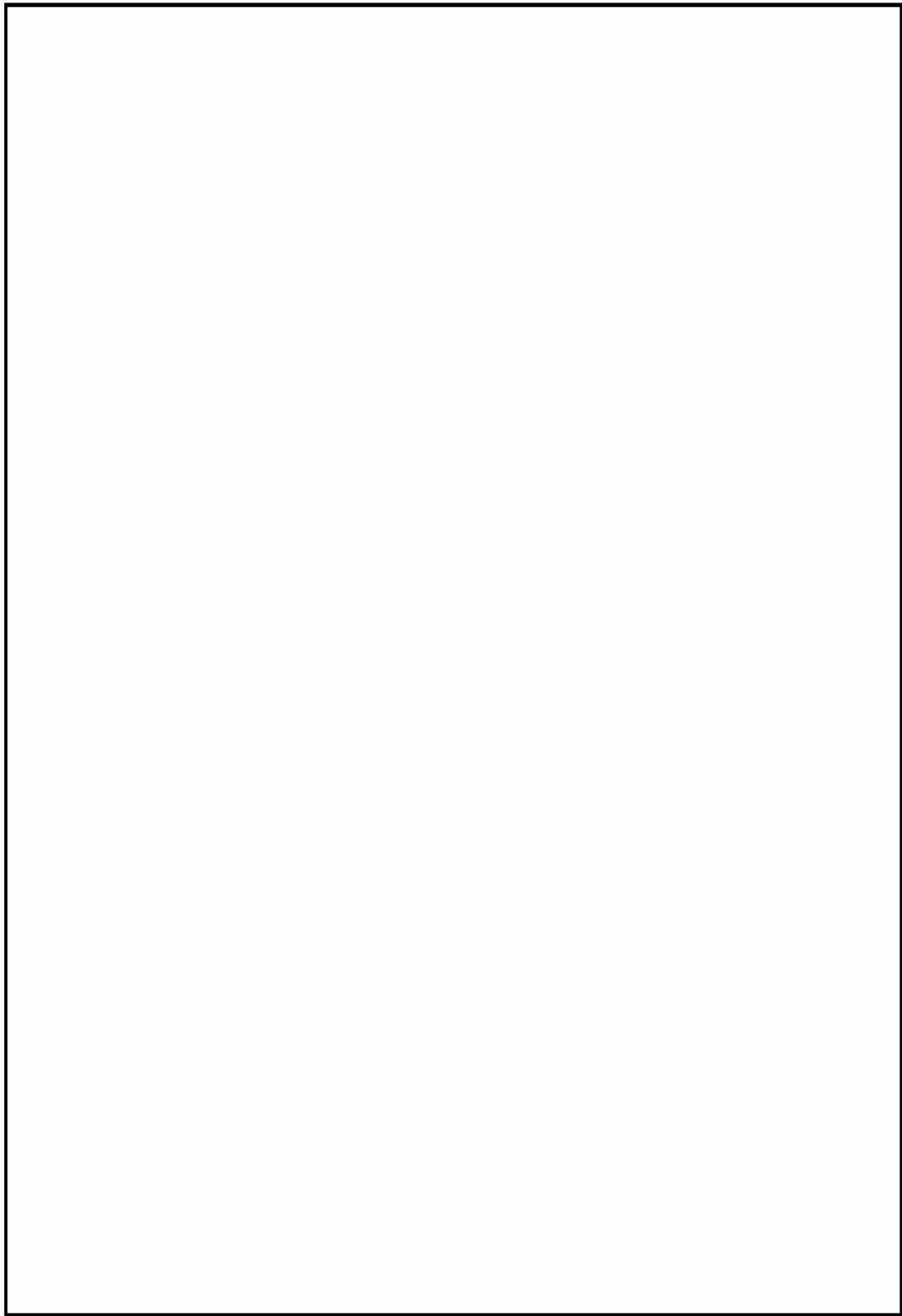
別紙 1-1 図 Hitz-B69 の三次元解析モデル



別紙 1-2 図 竜巻荷重作用時における荷重条件及び境界条件（長手方向からの竜巻）



別紙 1-3 図 竜巻荷重作用時における荷重条件及び境界条件（径方向からの竜巻）



別紙 1-4 図 キャスクの応力評価位置

(2) 外筒

遮蔽機能を担う外筒（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部位）の評価は、工学式により発生する応力を評価する。

なお、外筒はキャスク上部のフランジ部と下部端板によって固定されており、長手方向からの竜巻荷重に対してはフランジ部と下部端板によって支持されるため、有意な応力は発生しないことから、径方向からの竜巻荷重により発生する応力のみ評価する。

a. 評価モデル

外筒に竜巻荷重が作用したときの外筒の評価モデルを別紙 1-5 図に示す。

外筒と胴フランジとの接続部を固定端、下部中性子遮蔽材カバーとの接続部をピン支持とする梁モデルで評価する。風圧力による荷重は緩衝体を考慮せず、外筒のみに等分布荷重として作用させる。また、飛来物衝突荷重は、外筒の長さ方向（キャスク軸方向）の中央位置に集中荷重として保守的に作用させる。



(注記) 外筒は上部、中央部及び下部で外筒外径 D が異なるが、評価上は安全側に断面係数 Z 及び断面積 A が最も小さくなる外筒中央部の寸法で代表する。

別紙 1-5 図 外筒の評価モデル

b. 評価基準

外筒に発生する応力の評価基準は、金属キャスク構造規格の中間胴の供用状態 D における許容応力を適用する。なお、各評価式の F は S_u (設計引張強さ) とした値を用いる。

i. 引張応力

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ii. 圧縮応力

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$\nu : \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

iii. せん断応力

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

iv. 曲げ応力

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

c. 評価結果

別紙 1-5 図に示す外筒中央部（評価位置①）には曲げ応力 σ_{b1} 及びせん断応力 τ_1 が生じる。外筒端部（評価位置②）には曲げ応力は生じず（ $\sigma_{b2}=0$ ）、せん断応力 τ_2 のみが生じる。外筒端部（評価位置③）には曲げ応力 σ_{b3} 及びせん断応力 τ_3 が生じる。

それぞれの曲げ応力とせん断応力は次式で与えられる。

外筒中央部（評価位置①）

$$\sigma_{b1} = \frac{M_1}{Z}$$

$$\tau_1 = \frac{Q_1}{A}$$

ここで、

M_1 : 外筒中央部（評価位置①）に生じる曲げモーメント（N・mm）

$$M_1 = \frac{1}{16} \omega L^2 + \frac{5}{32} W_M L$$

W_M : 飛来物衝突荷重（N）

ω : 風圧力による等分布荷重（N/m）

$$\omega = Q_w \cdot D$$

Q_w : 風圧力（N/m²）

D : 外筒外径（mm）

L : 外筒長さ（mm）

Z : 断面係数（mm³）

$$Z = \frac{\pi}{32D} (D^4 - d^4)$$

Q_1 : 外筒中央部（評価位置①）に生じるせん断力（N）

$$Q_1 = \frac{1}{8} \omega L + \frac{11}{16} W_M$$

A : 外筒断面積（mm²）

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

d : 外筒内径（mm）

外筒端部 (評価位置②)

$$\sigma_{b2} = 0$$

$$\tau_2 = \frac{Q_2}{A}$$

ここで、

Q_2 : 外筒端部 (評価位置②) に生じるせん断力 (N)

$$Q_2 = \frac{3}{8} \omega L + \frac{5}{16} W_M$$

W_M : 飛来物衝突荷重 (N)

ω : 風圧力による等分布荷重 (N/m)

$$\omega = Q_w \cdot D$$

Q_w : 風圧力 (N/m²)

D : 外筒外径 (mm)

L : 外筒長さ (mm)

A : 外筒断面積 (mm²)

外筒端部 (評価位置③)

$$\sigma_{b3} = \frac{M_3}{Z}$$

$$\tau_3 = \frac{Q_3}{A}$$

ここで、

M_3 : 外筒端部 (評価位置③) に生じる曲げモーメント (N・mm)

$$M_3 = \frac{1}{8} \omega L^2 + \frac{3}{16} W_M L$$

W_M : 飛来物衝突荷重 (N)

ω : 風圧力による等分布荷重 (N/m)

$$\omega = Q_w \cdot D$$

Q_w : 風圧力 (N/m²)

D : 外筒外径 (mm)

L : 外筒長さ (mm)

Z : 断面係数 (mm³)

Q_3 : 外筒端部 (評価位置③) に生じるせん断力 (N)

$$Q_3 = \frac{5}{8} \omega L + \frac{11}{16} W_M$$

A : 外筒断面積 (mm²)

外筒の計算条件と計算結果を別紙 1-2 表に示す。別紙 1-2 表に示すように、外筒に生じる応力は評価基準を満足する。

別紙 1-2 表 外筒の応力計算条件及び計算結果

風圧力による荷重 Q_w (N/m ²)	風圧力による等分布荷重 ω (N/m)	飛来物衝突荷重 W_M (N)
7.32×10^3	1.80×10^4	8.45×10^6

外筒長さ L (mm)	外筒外径 D (mm)	外筒内径 d (mm)	断面係数 Z (mm ³)	断面積 A (mm ²)

外筒中央部 (評価位置①)					
曲げモーメント M_1 (N・mm)	曲げ応力 σ_{b1} (MPa)	評価基準値 f_b (MPa)	せん断力 Q_1 (N)	せん断応力 τ_1 (MPa)	評価基準値 f_s (MPa)
6.60×10^9	102	284	5.83×10^6	55	163

外筒端部 (評価位置②)					
曲げモーメント M_2 (N・mm)	曲げ応力 σ_{b2} (MPa)	評価基準値 f_b (MPa)	せん断力 Q_2 (N)	せん断応力 τ_2 (MPa)	評価基準値 f_s (MPa)
0	0	284 ^(※1)	2.68×10^6	25	163 ^(注1)

(注1) 継手効率 1.0 を考慮した値

外筒端部 (評価位置③)					
曲げモーメント M_3 (N・mm)	曲げ応力 σ_{b3} (MPa)	評価基準値 f_b (MPa)	せん断力 Q_3 (N)	せん断応力 τ_3 (MPa)	評価基準値 f_s (MPa)
7.94×10^9	122	170 ^(※2)	5.87×10^6	55	97 ^(注2)

(注2) 継手効率 0.6 を考慮した値

(3) バスケット

臨界防止機能を担うバスケットについては、工学式により発生する応力を評価する。

バスケットには風圧力による荷重と飛来物衝突荷重を組み合わせた竜巻荷重による慣性力が作用するものとし、長手方向からの竜巻荷重が作用した場合と、径方向からの竜巻荷重が作用した場合をそれぞれ評価する。

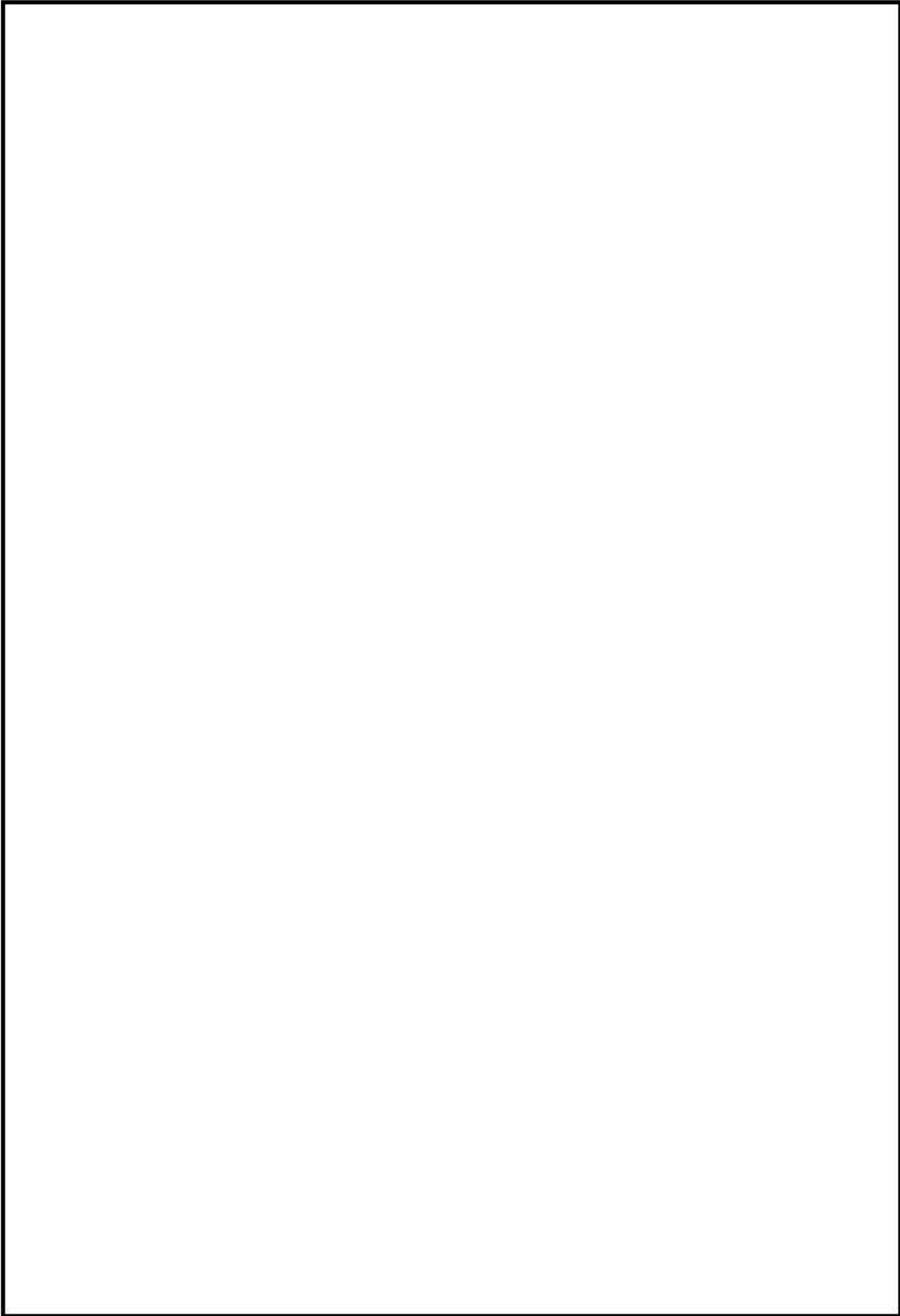
(3-1) コンパートメント

a. 評価モデル

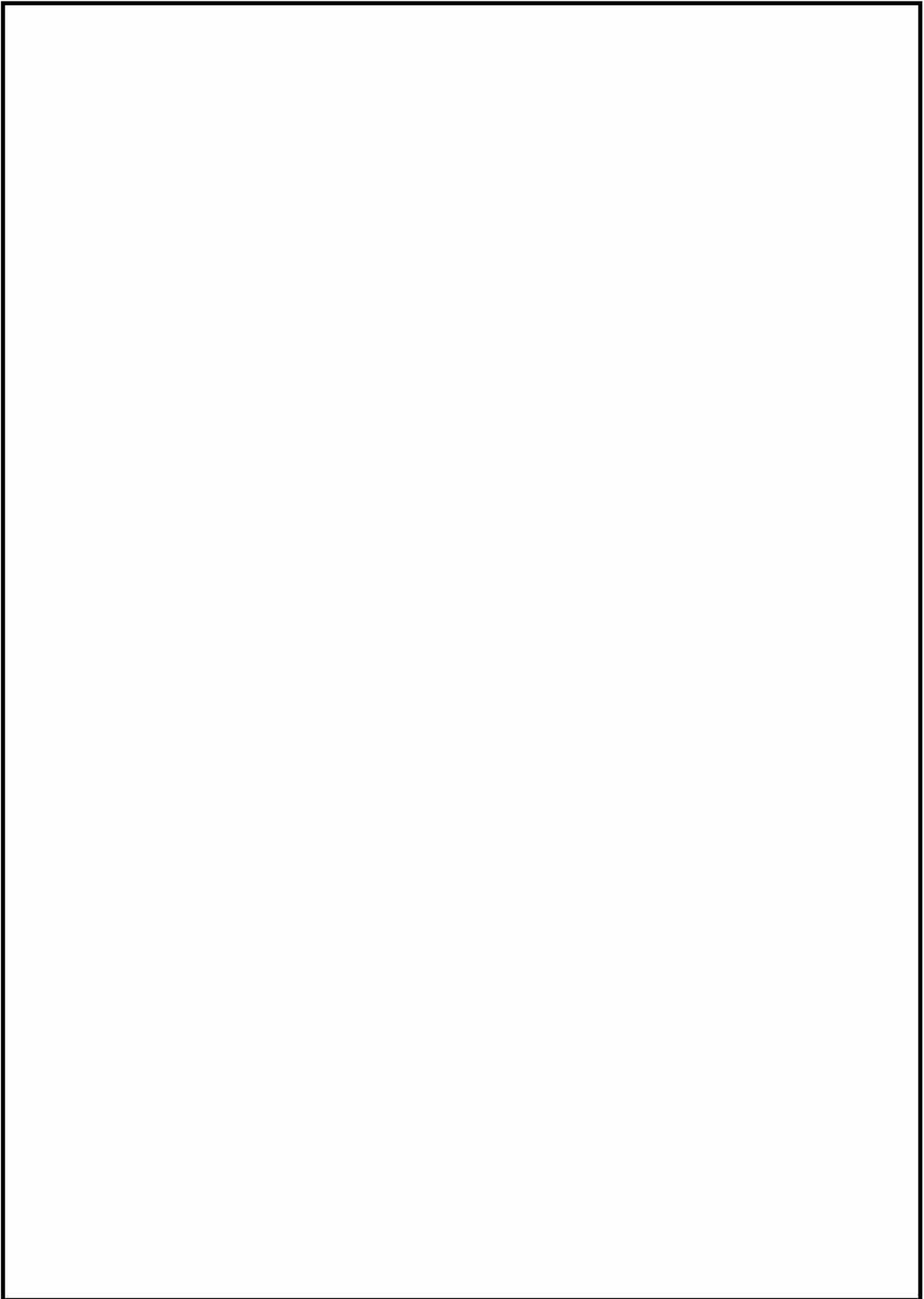
長手方向からの竜巻荷重が作用した場合のコンパートメントのモデルを別紙 1-6 図 (a) に示す。別紙 1-6 図 (b) に示すとおり、上部側はサポートプレート支持部を模擬した固定端、下部側は下部プレートに固定された固定端とする評価モデルとして評価を行う。評価においては加速度が作用するコンパートメント 69 体を積載質量とし、サポートプレート及びアルミブロックの荷重を受ける外周部のコンパートメント 24 体を評価対象とする。外周部のコンパートメントのうち最大応力が生じるコンパートメント下部側の支持スパン 1 つ分の範囲を評価モデルとして、外周部のコンパートメント 24 体に働く応力の評価を行う。

径方向からの竜巻荷重が作用した場合のコンパートメントのモデルを別紙 1-7 図 (a) に示す。評価においては加速度が作用するコンパートメントのうち最大荷重がかかる 90°側の 1 列分のコンパートメント 5 体を評価対象とする。コンパートメントは軸方向に等間隔のサポートプレートで支持されている。サポートプレート中間の支持部は支持部上下で対称条件であるのに対し、上端部及び下端部は上部プレート及び底部プレートによる支持構造となり、対称条件ではないことから、別紙 1-7 図 (b) に示すとおり、評価モデルとして、片側はサポートプレート支持部を模擬した固定端、もう一方は上端部又は下端部を模擬した単純支持端とする梁モデルで評価を行う。コンパートメント中間の支持部をモデル化した場合は両端固定の梁モデルとなり、これと比較して本評価モデルは発生する最大の曲げ応力が大きくことから、保守的な評価といえる。

荷重条件としては、評価対象とするコンパートメント及びその投影面積上にある部材の支持スパン 1 つ分の範囲の荷重が均一に作用することとする。



別紙 1-6 図 コンパートメントの評価モデル (長手方向からの竜巻荷重)



別紙 1-7 図 コンパートメントの評価モデル（径方向からの竜巻荷重）

b. 荷重条件

バスケットの機能維持評価においては、風圧力による荷重と飛来物衝突荷重を組み合わせた竜巻荷重が作用した場合の評価を行う。竜巻荷重が作用した場合の Hitz-B69 型に生じる衝撃加速度 G は次式により求められる。

竜巻荷重が作用した場合の衝撃加速度を別紙 1-3 表に示す。

$$G = \frac{W_T}{m}$$

ただし、 W_T : 竜巻荷重 (N)

m : キャスク質量 (=131000kg)

別紙 1-3 表 竜巻荷重が作用した場合の衝撃加速度

竜巻荷重の 作用方向	竜巻荷重 (N)		キャスク質量 m (kg)	衝撃加速度 (m/s^2)	
	W_{T1}	8.55×10^6		G_1	66
長手方向	W_{T1}	8.55×10^6	131000	G_1	66
径方向	W_{T2}	8.63×10^6		G_2	66

c. 評価基準

コンパートメントに発生する応力の評価基準は、金属キャスク構造規格のバスケットの供用状態 D における許容応力を適用する。

コンパートメントが塑性変形せず、臨界防止上有意な変形が生じないことを確認するため、コンパートメントに生じる応力強さの評価基準として設計降伏応力 S_y を適用する。

i. せん断応力

$$\tau \leq 1.2S_m$$

ここで、

S_m : 設計応力強さ

ii. 曲げ応力

$$\sigma_b \leq S_u$$

ここで、

S_u : 設計引張強さ

iii. 応力強さ

$$s \leq S_u$$

$$s \leq S_y$$

ここで、 S_y : 設計降伏応力

iv. 圧縮応力

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$v : v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

d. 評価

①長手方向からの竜巻荷重により発生する応力

長手方向からの竜巻荷重による慣性力がコンパートメントに作用し、圧縮応力 σ_c が生じる。加速度が働くコンパートメント 69 体を積載質量とし、サポートプレート及びアルミブロックの荷重を受ける外周部のコンパートメント 24 体を評価対象とする。外周部のコンパートメントのうち最大応力が生じるコンパートメント下部側の支持スパン 1 つ分の範囲を評価モデルとして、コンパートメント 24 体に働く応力の評価を行う。

$$Q_c = W_s G_1$$

$$\sigma_c = \frac{Q_c}{A_c^*}$$

ただし、

Q_c : 圧縮荷重 (N)

W_s : 評価対象とするコンパートメントに作用する合計質量 (kg)

具体的な部材は別紙 1-6 図に示す。

G_1 : 長手方向からの竜巻荷重による加速度 (m/s^2)

A_c^* : 評価対象とするコンパートメントの断面積 (mm^2)

断面積の計算を d.①-1 項に示す。

①-1 コンパートメント断面積の計算

コンパートメント断面の概略図を別紙 1-8 図に示す。

コンパートメント 1 体の断面を 12 分割した各断面積 $A_1 \sim A_{12}$ からコンパートメント 1 体あたりの断面積 A_s を計算し、それを元に評価対象とする n 体のコンパートメントの断面積 A_s^* を計算する。

評価対象とするコンパートメントの断面積 A_s^* の計算条件および計算結果を別紙 1-4 表に示す。

$$A_s = \sum_1^{12} A_x$$

$$A_1 \sim A_4 = bh$$

$$A_5 \sim A_8 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{4} r_1^2$$

$$A_9 \sim A_{12} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{4} r_2^2$$

$$A_s^* = n \cdot A_s$$

ただし、

$A_1 \sim A_{12}$: コンパートメント各部の断面積 (mm^2)

b, h, r_1, r_2 : 別紙 1-8 図に記載するコンパートメント各部の寸法 (mm)

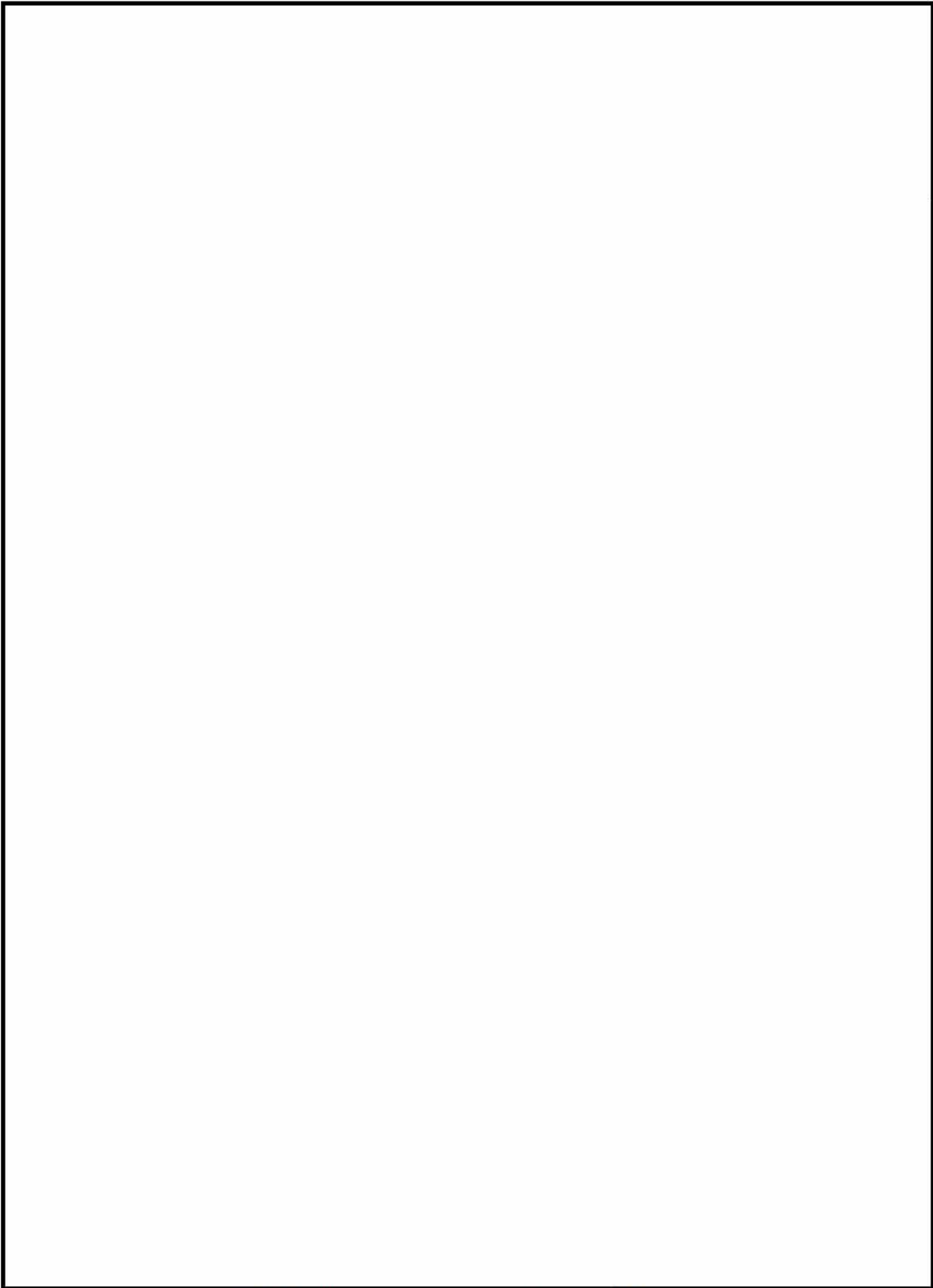
A_s : コンパートメント 1 体あたりの断面積 (mm^2)

A_s^* : 評価対象とするコンパートメントの断面積 (mm^2)

n : 評価対象とするコンパートメントの数 (-)

別紙 1-4 表 コンパートメントの断面積

--



別紙 1-8 図 コンパートメント断面の概略図

②径方向からの竜巻荷重により発生する応力

径方向からの竜巻荷重による慣性力がコンパートメントに作用し、せん断応力 τ と曲げ応力 σ_b が生じる。加速度が働くコンパートメントのなかで最大荷重がかかる 90°側 5 列分のコンパートメント 5 体を評価対象とし、サポートプレートの支持スパン 1 つ分の範囲を評価モデルとする。竜巻荷重による加速度が評価モデルに働く場合の評価を行う。

$$W = W_s G_2$$

$$Q_B = \frac{5}{8} W$$

$$\tau = \frac{Q_B}{A_s^*}$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z^*}$$

$$s = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

ただし、

W : 設計評価荷重 (N)

W_s : 評価対象とするコンパートメントに作用する合計質量 (kg)

評価対象とするコンパートメント及びその投影面積上にある部材のうち、支持スパン 1 つ分の合計質量とする。具体的な部材は別紙 1-7 図に示す。

G_2 : 径方向からの竜巻荷重による加速度 (m/s^2)

Q_B : せん断力 (N)

A_s^* : 評価対象とするコンパートメントの断面積 (mm^2)

鉛直方向の加速度と同様、断面積の計算は d.①-1 項のとおり。

M : 曲げモーメント ($N \cdot mm$)

$$M = \frac{1}{8} W L_s$$

L_s : サポートプレートの支持スパン (mm)

Z^* : 評価対象とするコンパートメントの断面係数 (mm^3)

s : 応力強さ (MPa)

②-1 コンパートメント断面係数の計算

コンパートメント断面の概略図を別紙 1-8 図に示す。

断面積の計算と同様、コンパートメント 1 体の断面を 12 分割した各断面二次モーメント $I_1 \sim I_{12}$ とそれぞれの重心から端までの距離 $e_1 \sim e_{12}$ からコンパートメント 1 体あたりの断面係数 Z を計算し、それを元に評価対象とする n 体のコンパートメントの断面係数 Z^* を計算する。

評価対象とするコンパートメントの断面係数 Z^* の計算条件および計算結果を別紙 1-5 表に示す。

$$Z = \sum_1^{12} Z_x = \sum_1^{12} \frac{I_x}{e_x}$$

$$I_1 \sim I_2 = \frac{1}{12} bh^3$$

$$I_3 \sim I_4 = \frac{1}{12} hb^3$$

$$I_5 \sim I_8 = \frac{r_1^2}{4} \left(\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right)$$

$$I_9 \sim I_{12} = -\frac{r_2^2}{4} \left(\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right)$$

$$Z^* = n \cdot Z$$

ただし、

$Z_1 \sim Z_{12}$: コンパートメント各部の断面係数 (mm^3)

$I_1 \sim I_{12}$: コンパートメント各部の断面二次モーメント (mm^4)

$e_1 \sim e_{12}$: コンパートメント各部の重心から端までの距離 (mm)

b, h, r_1, r_2 : 別紙 1-8 図に記載するコンパートメント各部の寸法 (mm)

Z : コンパートメント 1 体あたりの断面係数 (mm^3)

Z^* : 評価対象とするコンパートメントの断面係数 (mm^3)

n : 評価対象とするコンパートメントの数 (—)

別紙 1-5 表 コンパートメントの断面係数



e. 評価結果

①長手方向からの竜巻荷重によりコンパートメントに発生する応力

コンパートメントの計算条件及び計算結果を別紙 1-6 表に示す。別紙 1-6 表に示すように、コンパートメントに生じる応力は評価基準値を満足する。

S 別紙 1-6 表 コンパートメントの計算条件及び計算結果（長手方向からの竜巻荷重）

合計質量 W_s (kg)	長手方向からの竜巻荷重 による衝撃加速度 G_1 (m/s ²)	評価対象とする コンパートメントの断面積 A_c^* (mm ²)
12600	66	6.45×10^4

圧縮荷重 Q_c (N)	圧縮応力 σ_c (MPa)	評価基準値 f_c (MPa)
8.37×10^5	13.0	265

②径方向からの竜巻荷重によりコンパートメントに発生する応力

コンパートメントの計算条件及び計算結果を別紙 1-7 表に示す。別紙 1-7 表に示すように、コンパートメントに生じる応力は評価基準値を満足する。

別紙 1-7 表 コンパートメントの計算条件及び計算結果（径方向からの竜巻荷重）

(a) せん断応力

評価対象とするコンパートメント			サポートプレートの 支持スパン L_s (mm)
断面積 A_s^* (mm ²)	断面係数 Z^* (mm ³)	合計質量 W_s (kg)	

径方向からの竜巻荷重 による加速度 G_2 (m/s ²)	設計評価荷重 W (N)	せん断力 Q_B (N)	せん断応力 τ (MPa)	評価基準値 $1.2S_m$ (MPa)
66	1.08×10^5	6.73×10^4	5.1	171

(b) 曲げ応力

曲げモーメント M (N・mm)	曲げ応力 σ_b (MPa)	評価基準値 S_u (MPa)
4.47×10^6	6.8	391

(c) 応力強さ

応力強さ s (MPa)	評価基準値 S_y (MPa)	評価基準値 S_u (MPa)
12.3	266	391

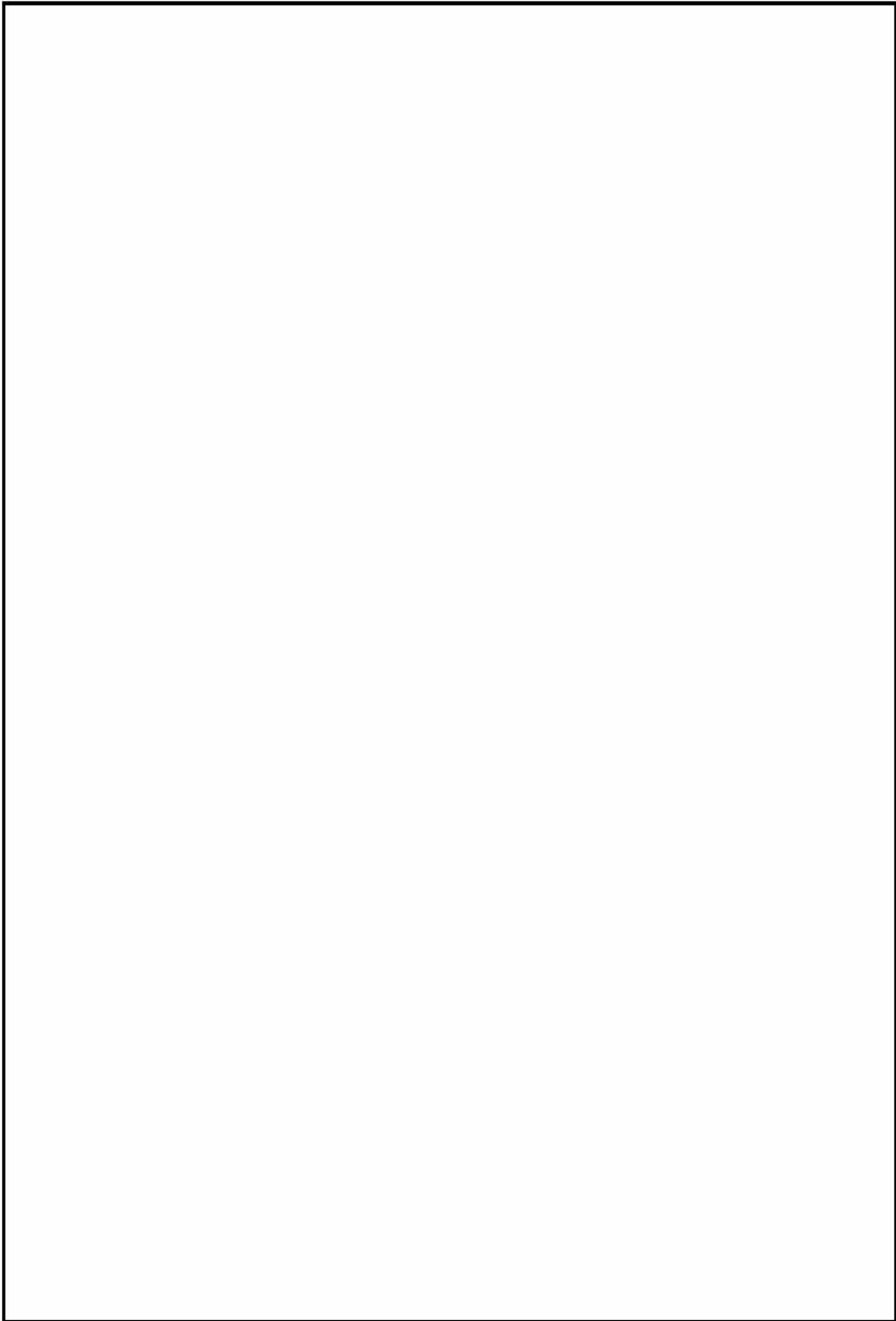
(3-2) サポートプレート

a. 評価モデル

サポートプレートでは径方向からの竜巻荷重が作用した場合の評価を行う。

径方向からの竜巻荷重が作用した場合のサポートプレートの評価モデルを別紙 1-9 図 (a) に示す。評価においては加速度が作用するコンパートメントのうち最大荷重がかかる 90°側の 5 列分のコンパートメント 45 体を支持するサポートプレート 11 枚を評価対象とする。評価対象のコンパートメントを均等に支持する 11 枚のサポートプレートを、コンパートメントと接続する箇所を固定端とし、本体胴と接触する部分を自由端とする圧縮部材としてモデル化して評価を行う。評価モデルを別紙 1-9 図 (b) に示す。

荷重条件としては、評価対象とするコンパートメント及びその投影面積上にある部材の荷重を、11 枚のサポートプレートで均等に支持するものとする。



別紙 1-9 図 サポートプレートの評価モデル (径方向からの竜巻荷重)

b. 荷重条件

コンパートメントの評価と同様、別紙 1-3 表に示す竜巻荷重が作用した場合に生じる衝撃加速度 G を用いる。

c. 評価基準

サポートプレートに発生する応力の評価基準は、金属キャスク構造規格のバスケットの供用状態 D における許容応力を適用する。

i. せん断応力

$$\tau \leq 1.2S_m$$

ここで、

S_m : 設計応力強さ

ii. 曲げ応力

$$P_m + P_b \leq S_u$$

ここで、

S_u : 設計引張強さ

iii 圧縮応力

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$\nu : \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

d. 評価

径方向からの竜巻荷重による慣性力がサポートプレートに作用し、圧縮応力 σ_c が生じる。竜巻荷重による慣性力がコンパートメントに働き、その荷重がサポートプレートに均等に作用するものとして評価を行う。

$$W = W_s G_2$$

$$\sigma_c = \frac{W}{A_c}$$

ただし

W : 圧縮荷重 (N)

W_s : 評価対象とするサポートプレートに作用する合計質量 (kg)

評価対象とするサポートプレートが取り付けられているコンパートメント及びその投影面積上にある部材の合計質量とする。具体的な部材は別紙 1-9 図に示す。

G_2 : 径方向からの竜巻荷重による加速度 (m/s^2)

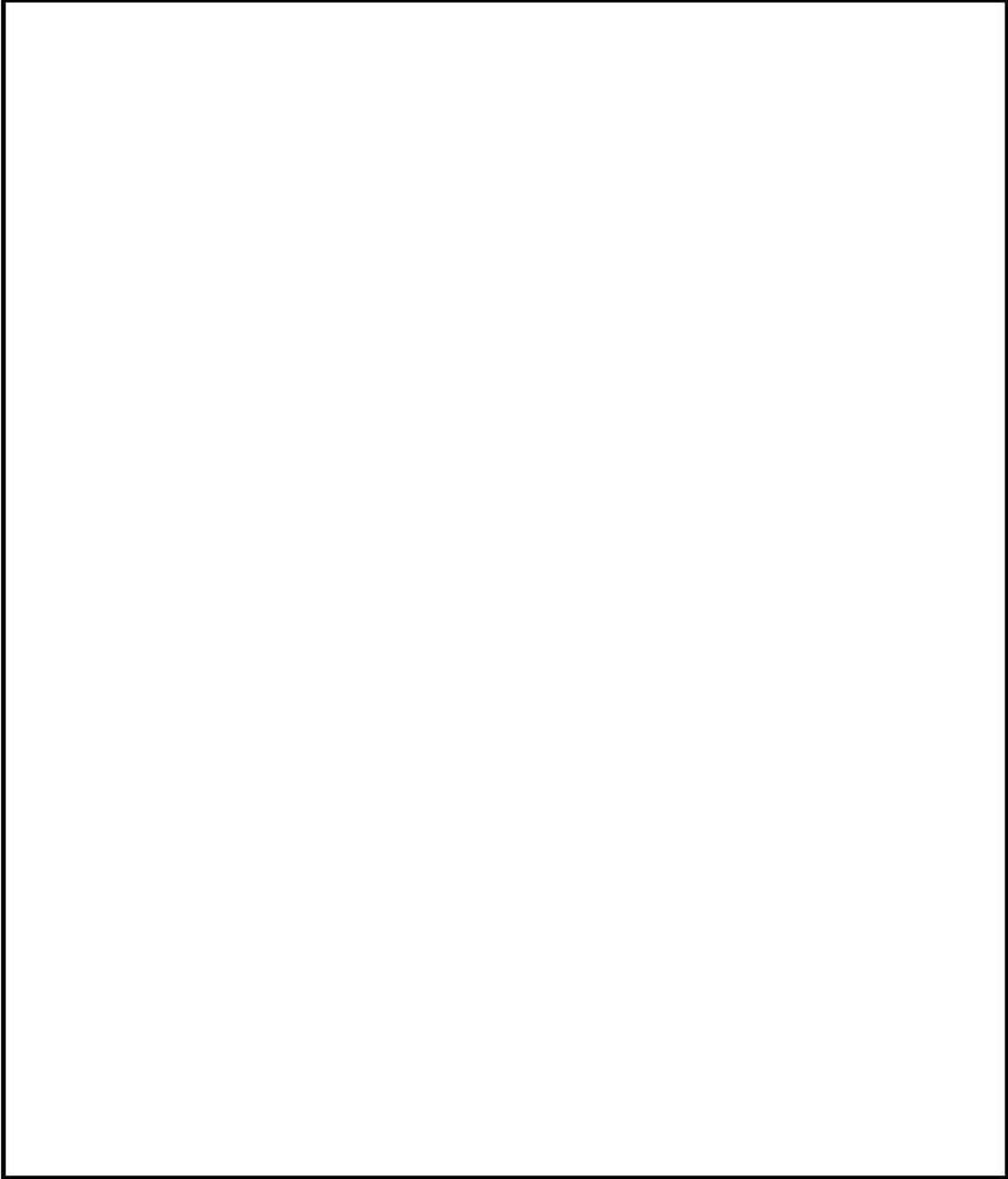
A_c : サポートプレートの断面積 (mm^2)

$$A_c = n \cdot b \cdot t$$

n : サポートプレートの枚数 (—)

b : 別紙 1-10 図に示すサポートプレートの幅 (mm)

t : サポートプレートの板厚 (mm)



別紙 1-10 図 評価対象とするサポートプレートの断面（径方向からの竜巻荷重）

e. 評価結果

計算条件と計算結果を別紙 1-8 表に示す。別紙 1-8 表に示すように、サポートプレートに生じる応力は評価基準値を満足する。

別紙 1-8 表 サポートプレートの計算条件及び計算結果（径方向からの竜巻荷重）

評価対象とするサポートプレート				
枚数 n (-)	幅 b (mm)	板厚 t (mm)	断面積 A_c (mm ²)	作用する合計質量 W_s (kg)
径方向からの竜巻荷重 による加速度 G_2 (m/s ²)		圧縮荷重 W (N)	圧縮応力 σ_c (MPa)	評価基準値 f_c (MPa)
66		1.35×10^6	9.4	157

(3-3) バスケットの応力評価まとめ

バスケットの応力評価まとめを別紙 1-9 表に示す。別紙 1-9 表に示すように、コンパートメント及びサポートプレートに生じる応力は評価基準値を満足する。

別紙 1-9 表 バスケットの応力評価まとめ

評価部位	竜巻加速度 作用方向	応力の種類	計算値 (注1) (MPa)	評価基準値 (MPa)
コンパートメント	長手方向	圧縮	13	265 (f_c)
	水平径方向	せん断	6	171 ($1.2S_m$)
		曲げ	7	391 (S_u)
		応力強さ	13	266 (S_y) 391 (S_u)
サポートプレート	水平径方向	圧縮	10	157 (f_c)

(注 1) 各評価で求めた計算値の小数点 1 桁目を切り上げて整数値にした値。

(4) 伝熱フィン

除熱機能を担う伝熱フィンについては、工学式により発生する応力を評価する。

伝熱フィンには風圧力による荷重と飛来物衝突荷重を組み合わせた竜巻荷重による慣性力が作用するものとして評価する。

a. 評価モデル

伝熱フィンの評価モデルを別紙 1-11 図に示す。伝熱フィン溶接部は伝熱フィンに対して両側（胴側及び外筒側）に同条件のすみ肉溶接を施している。

b. 荷重条件

伝熱フィンの機能維持評価においてはバスケットと同様、別紙 1-3 表に示す風圧力による荷重と飛来物衝突荷重を組み合わせた竜巻荷重が作用した場合に生じる衝撃加速度 G を用いる。

c. 評価基準

伝熱フィンの評価基準値は S_u とする。 S_u を定める物性値は、ASME Boiler & Pressure Vessel Code 2021⁽²⁾ から、C1020P 材に相当する SB-152:UNS No. C10200 の S_u 値を使用する。

d. 評価

①長手方向からの竜巻荷重により発生する応力

長手方向からの竜巻荷重による慣性力により伝熱フィンに生じるせん断応力 τ (MPa) 及び応力強さ s (MPa) は、次式で与えられる。

$$\tau = \frac{(W_1 + W_2)G}{A}$$

$$s = 2\tau$$

ここで、 W_1 : 伝熱フィンの軸方向単位長さあたり質量 (kg/mm)

W_2 : 側部中性子遮蔽材の軸方向単位長さあたり質量 (kg/mm)

G : 長手方向からの竜巻荷重による加速度 (m/s^2)

A : 伝熱フィンの軸方向単位長さあたりの溶接部面積 (mm^2/mm)

伝熱フィンに対して両側（胴側及び外筒側）の溶接部を対象とする。

$$A = \frac{2 \cdot n \cdot a \cdot L}{L}$$

n : 伝熱フィンの枚数 (-)

a : 伝熱フィン溶接部ののど厚 (mm)

L : 伝熱フィンと胴の溶接長さ (mm)

e. 評価結果

計算条件と計算結果を別紙 1-9 表に示す。別紙 1-9 表に示すように、伝熱フィンに生じる応力は評価基準を満足する。

別紙 1-9 表 伝熱フィンの応力計算条件及び計算結果（長手方向からの竜巻荷重）

伝熱フィン			
枚数 n (—)	溶接部ののど厚 a (mm)	溶接長さ L (mm)	軸方向単位長さあたりの 溶接部面積 A (mm ² /mm)

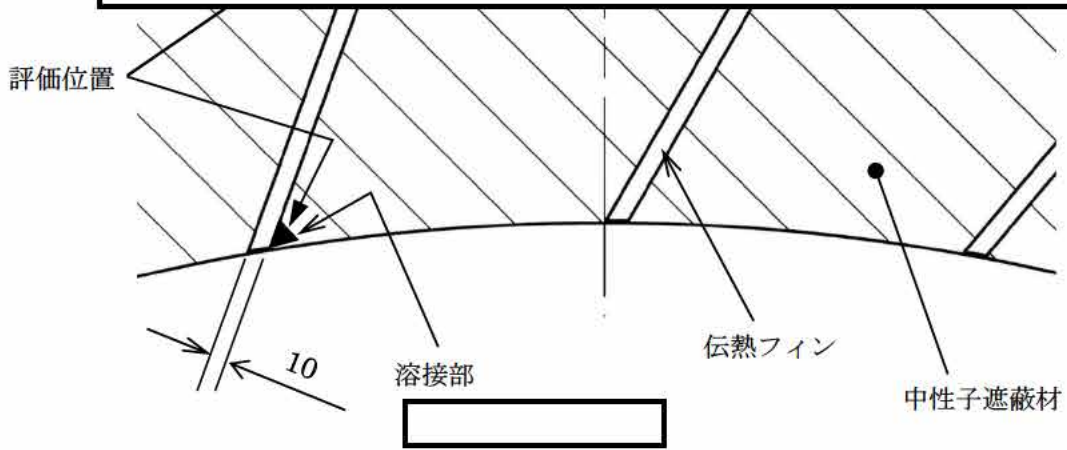
伝熱フィンの軸方向 単位長さあたりの質量 W ₁ (kg/mm)	中性子遮蔽材の軸方向 単位長さあたりの質量 W ₂ (kg/mm)	長手方向からの竜巻 荷重による加速度 G (m/s ²)
0.631	1.96	66

せん断応力 τ (MPa)	応力強さ s (MPa)	評価基準値 S _u (MPa)
0.237	1	86 (注 1)

(注 1) 溶接部の継手効率 0.45 を考慮した値継手効率は設計・建設規格のクラス 1 支持構造物の規定を準用する。

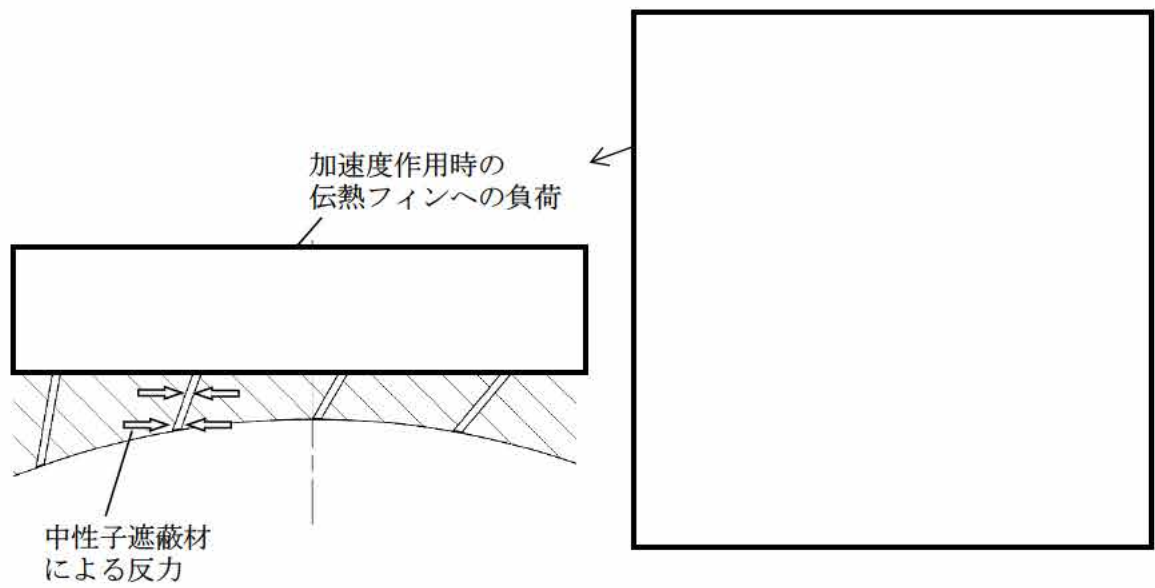
②径方向からの竜巻荷重により発生する応力

伝熱フィンには径方向からの竜巻荷重による慣性力が作用するが、別紙 1-12 図に示すとおり、伝熱フィンの両側に位置する中性子遮蔽材により支えられるため、伝熱フィンへ慣性力の影響はない。



A-A 断面

別紙 1-11 図 伝熱フィンの評価モデル



別紙 1-12 図 径方向からの竜巻荷重により伝熱フィンに作用する荷重

(5) 一次蓋の横ずれ

竜巻荷重により一次蓋に慣性力が作用した場合に、閉じ込め機能の維持の観点から、一次蓋に横ずれが生じないことを確認する。一次蓋に作用する慣性力 F (N) は次式で与えられる。一次蓋慣性力の計算条件及び計算結果を別紙 1-10 表に示す。

$$F = M \cdot G$$

ここで、 M : 一次蓋の質量 (kg)

G_2 : 径方向からの竜巻荷重による加速度 (m/s^2)

別紙 1-10 表 一次蓋慣性力の計算条件及び計算結果

一次蓋質量 M (kg)	径方向加速度 G_2 (m/s^2)	一次蓋慣性力 F (N)
4600	66	3.04×10^5

一次蓋とフランジの間に作用する摩擦力 R (N) は次式で与えられる。

$$R = \mu \cdot N$$

$$N = (1 - \phi_s) F_B \cdot n$$

ここで、 μ : 摩擦係数 (-)

N : 一次蓋の締付力 (N)

ϕ_s : 一次蓋ボルトの内力係数 (-)

F_B : 一次蓋ボルトの初期締付力 (N)

n : ボルト本数 (-)

摩擦力の計算条件及び計算結果を別紙 1-11 表に示す。一次蓋に作用する慣性力は別紙 1-10 表に示すとおり 3.04×10^5 (N) であり、摩擦力より小さい。よって、一次蓋の横ずれは発生しない。

別紙 1-11 表 摩擦力の計算条件及び計算結果

摩擦係数 μ (-)	一次蓋ボルトの 初期締付力 F_B (N)	ボルト本数 n (-)	一次蓋ボルトの 内力係数 n (-)	一次蓋の摩擦力 R (N)
				2.19×10^6

(6) 設計飛来物が衝突した局部の貫通評価

設計飛来物による限界貫通厚さは、鋼板の限界貫通厚さの評価式である BRL (Ballistic Research Laboratory) 式を用いて評価する。

$$t^{3/2} = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 d^{3/2}}$$

ここで、

t : 鋼板の限界貫通厚さ (m)

m : 飛来物の質量 (kg)

v : 飛来物の速度 (m/s)

d : 飛来物による衝突面の等価直径 (m)

$$\text{(設計飛来物の投影面積を } S \text{ とした場合、} S = \frac{\pi}{4} d^2 \text{)}$$

K : 鋼板の等級に関わる材料定数 (=1)

限界貫通厚さの計算条件及び計算結果を別紙 1-12 表に示す。評価基準値はキャスク頭部側、側部側及び底部側で最も外側にある二次蓋、外筒及び底部中性子遮蔽材カバーの板厚とする。設計飛来物による限界貫通厚さは最大 8.9mm であり、評価基準値としている鋼板の板厚より小さい。よって、設計飛来物は鋼板を貫通しない。

別紙 1-12 表 限界貫通厚さの計算条件及び計算結果

飛来物	計算条件及び計算結果					評価基準値		
	質量 m (kg)	速度 v (m/s)	投影面積 (注1) S (m ²)	等価 直径 d (m)	限界 貫通厚さ t (mm)	鋼板の板厚 (mm)		
						二次蓋	外筒	底板 中性子 遮蔽材 カバー
鋼製パイプ	8.4	49	0.002	0.050	7.3	155	14	55
鋼製材	135	51	0.06	0.276	8.9			
コンク リート板	540	30	0.15	0.437	7.0			
コンテナ	2300	60	6.24	2.819	7.2			
トラック	4750	34	2.47	1.773	8.7			

(注1) 表1に記載の設計飛来物の寸法から投影面積が最小となる値を記載

3. 参考文献

- (1) (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)
- (2) ASME Boiler & Pressure Vessel Code 2021、The American Society of Mechanical Engineers (2021)