

資料 1-5

Doc No. GK04-SC-A02 Rev.3

2023年6月30日

日立造船株式会社

補足説明資料 5-1

5 条

津波による損傷の防止

津波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 ……………	3
3. 要求事項への適合性……………	7
4. 津波荷重による Hitz-B69 型の機能維持評価……………	12
5. 参考文献 ……………	25

別紙 1 津波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。

(津波による損傷の防止)

第五条 設計基準対象施設（兼用キャスク及びその周辺施設を除く。）は、その供用中に当該設計基準対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波（以下「基準津波」という。）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。

2 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

適合のための設計方針

1 について

型式証明申請の範囲外とする。

2 について

Hitz-B69型は、第一号に規定する「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設計とする。

Hitz-B69型は、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と上記の遡上波の波力及び漂流物の衝突による荷重を組み合わせた荷重条件に対して、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。

(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。

(津波による損傷の防止)

第五条 設計基準対象施設（兼用キャスク及びその周辺施設を除く。）は、その供用中に当該設計基準対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波（以下「基準津波」という。）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。

2 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

適合のための設計方針

1 について

型式証明申請の範囲外とする。

2 について

Hitz-B69 型は、第一号に定める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組み合わせた荷重条件に対して、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。

2. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、キャスクの津波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5条第2項

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

b. 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。

c. 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。

d. 兼用キャスク告示第2条

設置許可基準規則第5条第2項第1号の原子力規制委員会が別に定める津波は、浸水深が10メートルで、流速が20メートル毎秒である津波とする。

(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」に記載されている津波に対する【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 4.2.2 津波」

【審査における確認事項】

『

設置変更許可基準規則第5条第2項に規定する津波による作用力を適用していること。

』

【確認内容】

『

- (1) 設置許可基準規則の解釈別記4第5条第1項及び第2項に基づき、兼用キャスク告示で定める津波又は基準津波を定めていること。
- (2) 設置許可基準規則第5条第2項に規定する津波として、以下のいずれかを適用していること。

①兼用キャスク告示で定める津波による作用力

キャスクの設置位置への津波の遡上を前提とし、兼用キャスクに作用する津波荷重として、波力及び漂流物衝突荷重を考慮する。これらを算出するために必要な浸水深、流速及び漂流物質量は以下のとおり。

- ・浸水深 : 10m
- ・流速 : 20m/s
- ・漂流物質量 : 100t

②基準津波による作用力

設置許可基準規則の解釈別記3に基づく基準津波を用いた津波伝播解析及び遡上解析により兼用キャスクへの入力津波を評価する。

』

b. 「4.3.2 津波に対する設計方針 4.3.2.1 基本方針」

【審査における確認事項】

『
兼用キャスクは、「4.2.2 津波」に示す津波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) 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。
(2) 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「耐津波設計に係る工認審査ガイド」を参考にしていること。

』

c. 「4.3.2 津波に対する設計方針 4.3.2.2 設計・評価の方針」

【審査における確認事項】

『
兼用キャスクに対する津波の影響については、兼用キャスクの設置方法に応じて適切な評価を実施し、津波による作用力に対して兼用キャスクの安全機能が維持される設計であること。

』

【確認内容】

『
以下を踏まえたものであること。また、工事計画認可においては、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。
(1) 兼用キャスク告示で定める津波を適用する場合
1) 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。
2) 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。
3) 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。
①津波波力（津波波圧）

- ・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

②漂流物衝突荷重

- ・道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）

4) 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。

(2) 基準津波を適用する場合

遡上解析の結果、兼用キャスクの設置地盤の高さや津波防護施設等により、兼用キャスクの設置位置への津波の遡上がない場合、津波による作用力に対する評価は不要とする。

』

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 型の津波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 5 条第 2 項

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

b. 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。

c. 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。

d. 兼用キャスク告示第 2 条

設置許可基準規則第 5 条第 2 項第 1 号の原子力規制委員会が別に定める津波は、浸水深が 10 メートルで、流速が 20 メートル毎秒である津波とする。

Hitz-B69 型は、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合理的な津波として原子力規制委員会が別に定める津波による遡上波の波力及び漂流物の衝突による荷重が同時に作用する荷重条件に対して、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。

津波荷重が作用した場合の評価に用いる津波荷重として、兼用キャスク告示で定める津波による作用力とし、浸水深に基づく津波波力及び質量 100 トンの漂流物の衝突による漂流物衝突荷重を同時に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材に発生する応力が許容限界を満足することから、津波に対して安全機能が維持されることを確認した。

(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、キャスクの津波に対する設計は、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) 設置許可基準規則の解釈別記4第5条第1項及び第2項に基づき、兼用キャスク告示で定める津波又は基準津波を定めていること。
- (2) 設置許可基準規則第5条第2項に規定する津波として、以下のいずれかを適用していること。

①兼用キャスク告示で定める津波による作用力

兼用キャスクの設置位置への津波の遡上を前提とし、兼用キャスクに作用する津波荷重として、波力及び漂流物衝突荷重を考慮する。これらを算出するために必要な浸水深、流速及び漂流物質量は以下のとおり。

- ・浸水深 : 10m
- ・流速 : 20m/s
- ・漂流物質量 : 100t

②基準津波による作用力

置許可基準規則の解釈別記3に基づく基準津波を用いた津波伝播解析及び遡上解析により兼用キャスクへの入力津波を評価する。

Hitz-B69型に津波荷重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、波力及び漂流物衝突荷重を考慮する。これらを算出するための条件は以下のとおりである。

- ・浸水深 : 10m
- ・流速 : 20m/s
- ・漂流物質量 : 100t

<2. (2) b.に対する適合性>

【確認内容】

- (1) 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。
- (2) 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「耐津波設計に係る工認審査ガイド」を参考にしていること。

Hitz-B69 型に津波荷重が作用した場合の評価は、津波がキャスクの設置位置へ遡上することを前提として耐津波設計に係る工認審査ガイドを参考に実施し、キャスクの安全機能が維持されることを確認する。

<2. (2) c.に対する適合性>

【確認内容】

以下を踏まえたものであること。また、工事計画認可においては、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。

(1) 兼用キャスク告示で定める津波を適用する場合

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
 - ①津波波力（津波波圧）
 - ・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
 - ②漂流物衝突荷重
 - ・道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV下部構造編）
- 4) 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。

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、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。

津波荷重が作用した場合の評価においては、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が同時に作用することに加え、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、Hitz-B69 型の評価上最も厳しくなる位置へ作用させる。

津波荷重に対するキャスクの詳細評価は、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、津波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。

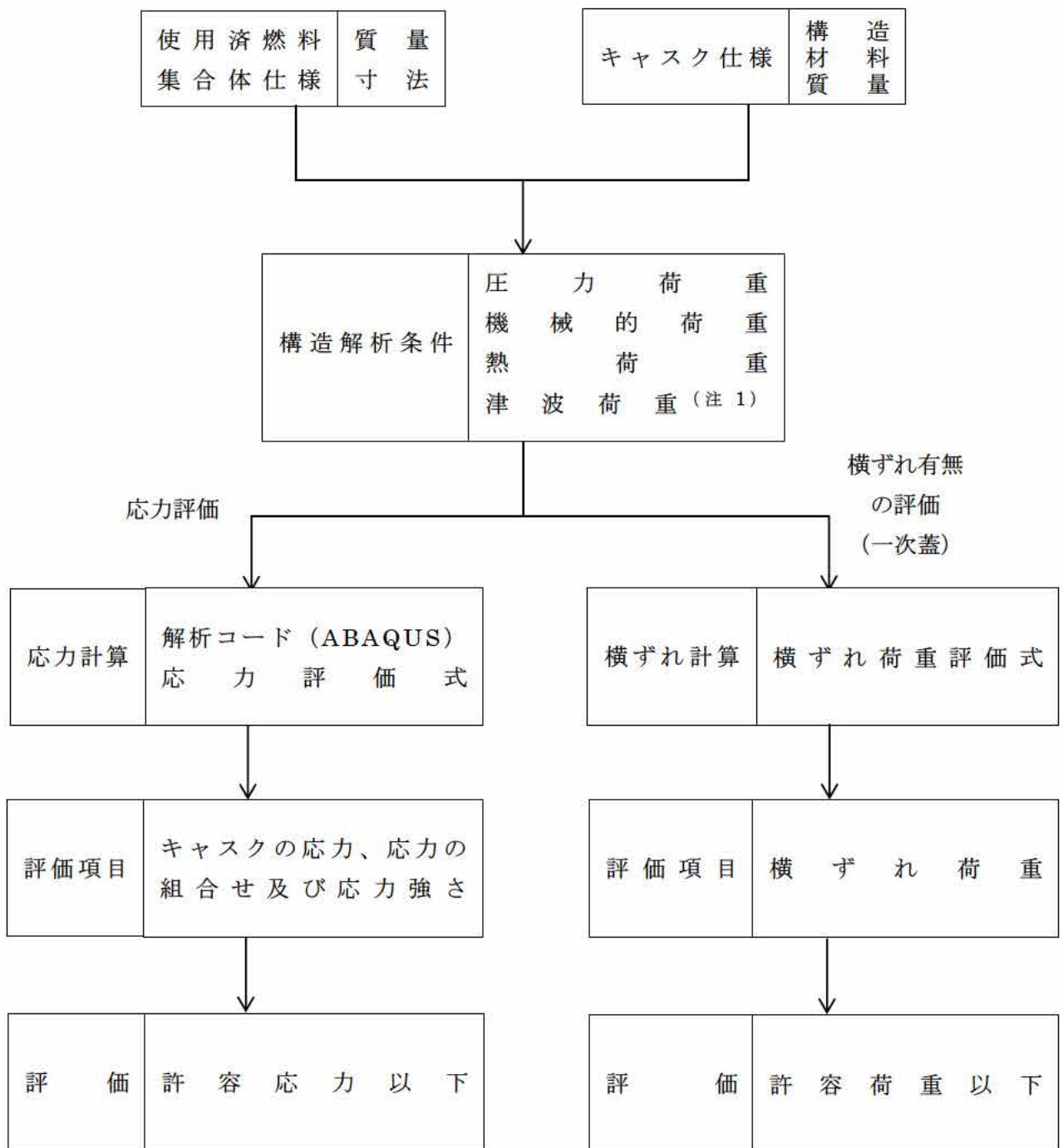
4. 津波荷重による Hitz-B69 型の機能維持評価

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。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。

緩衝体による津波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。

津波荷重作用時の 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。臨界防止機能を担う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。コンパートメントとして使用する材料は金属キャスク構造規格に定められていない材料であるが、その許容限界は JSME 新規材料採用ガイドライン（等）に基づいて設定した基準値（案）（別添 1-1 参照）を用いる。材料データの取得の考え方は別添 1-1 で説明する。なお、本基準値（案）の設定は後段審査で確定する。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るおそれがないことを確認する。



(注 1) 津波荷重として津波波力及び漂流物衝突荷重を考慮する。

図 1 津波荷重作用時の Hitz-B69 型の機能維持評価フロー

(1) 津波荷重の設定

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。

想定される津波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津波波圧による荷重を等分布荷重として、漂流物衝突荷重を集中荷重として設定する。

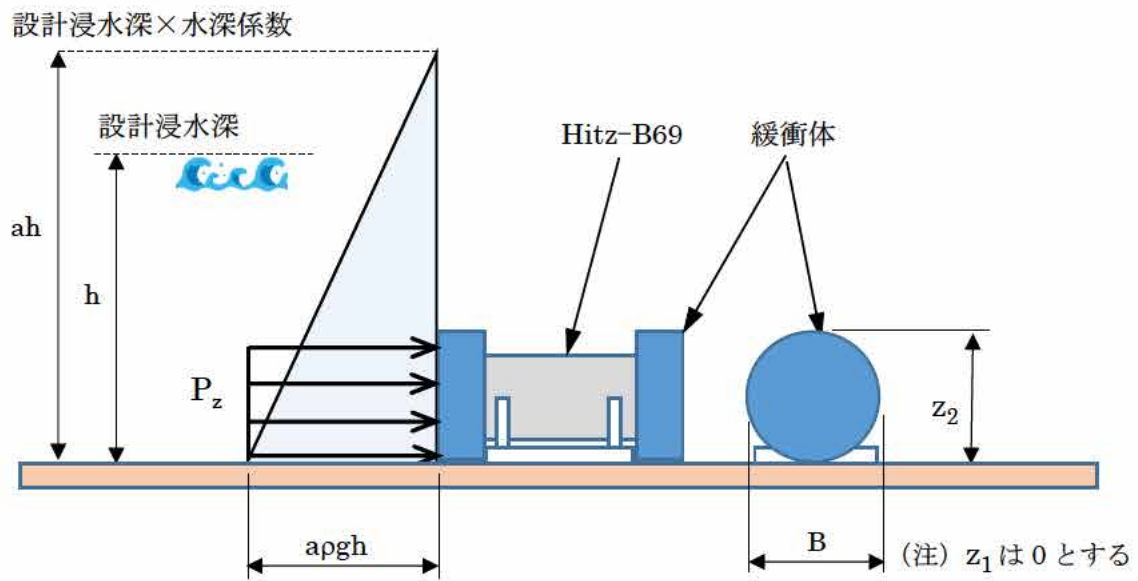
バスケットと伝熱フィンの評価では津波荷重からキャスクに作用する加速度を算出するため、バスケットと伝熱フィンには津波波圧による荷重と漂流物衝突荷重を組み合わせた津波荷重を設定する。

評価対象部位は密封境界部、外筒、バスケット及び伝熱フィンであるが、評価する部位に対してそれぞれ荷重条件を設定する。

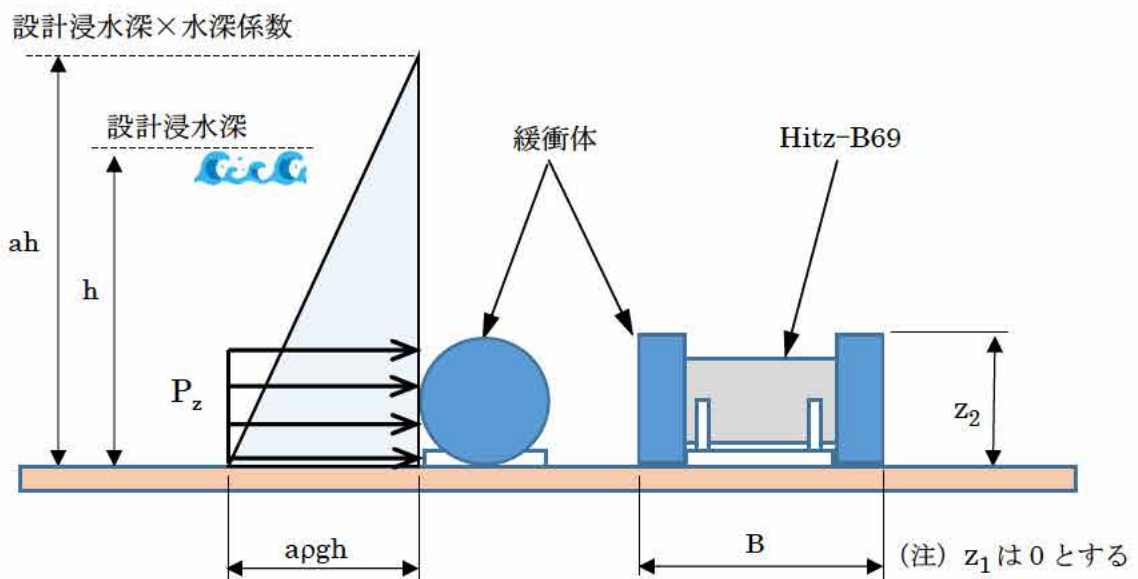
a. 密封境界部、外筒及び二次蓋ボルト

①津波波力

キャスクへ作用する津波波力の評価モデルを図 2 に示す。津波波力 z-B69 型を越流するため、波圧は三角分布となるが、キャスク本体及び外筒には、最深部の波圧による荷重がキャスクの投影面に等分布で作用するものとする。



(a) 長手方向からの津波



(b) 径方向からの津波

図2 津波波力の評価モデル (密封境界部、外筒及び二次蓋ボルト)

津波波圧の計算条件及び計算結果を表 1 に示す。

$$P_z = a \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

ここで、

ρ : 海水の密度 (=1030 kg/m³)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

a : 水深係数 (=3)

h : 設計浸水深 (m)

表 1 津波波圧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
海水の密度	ρ	kg/m ³	1030
水深係数	a	—	3
設計浸水深	h	m	10
津波波圧	P_z	N/m ²	3.04×10^5

②漂流物衝突荷重 (P_c)

漂流物衝突荷重 P_c は、「道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IV 下部構造編)」に示される次の衝突荷重の評価式により算定する。

計算条件及び計算結果を表 2 に示す。

$$P_c = 0.1 \cdot W \cdot v$$

ここで、

W : 漂流物の質量 (N)

v : 表面流速 (m/s)

表 2 漂流物衝突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
漂流物の質量	W	N	9.80665×10^5 (注 1)
表面流速	v	m/s	20
漂流物衝突荷重	P_c	N	1.97×10^6

(注 1) 漂流物質量 100 t に重力加速度を乗じた値である。

③津波荷重の組合せ

密封境界部、外筒及び二次蓋ボルトの評価においては、津波波圧 P_z を等分布荷重として、漂流物衝突荷重 P_c を集中荷重として解析モデルの蓋中央部又は外筒中央部に同時に作用させる。荷重条件を図 3 に示す。

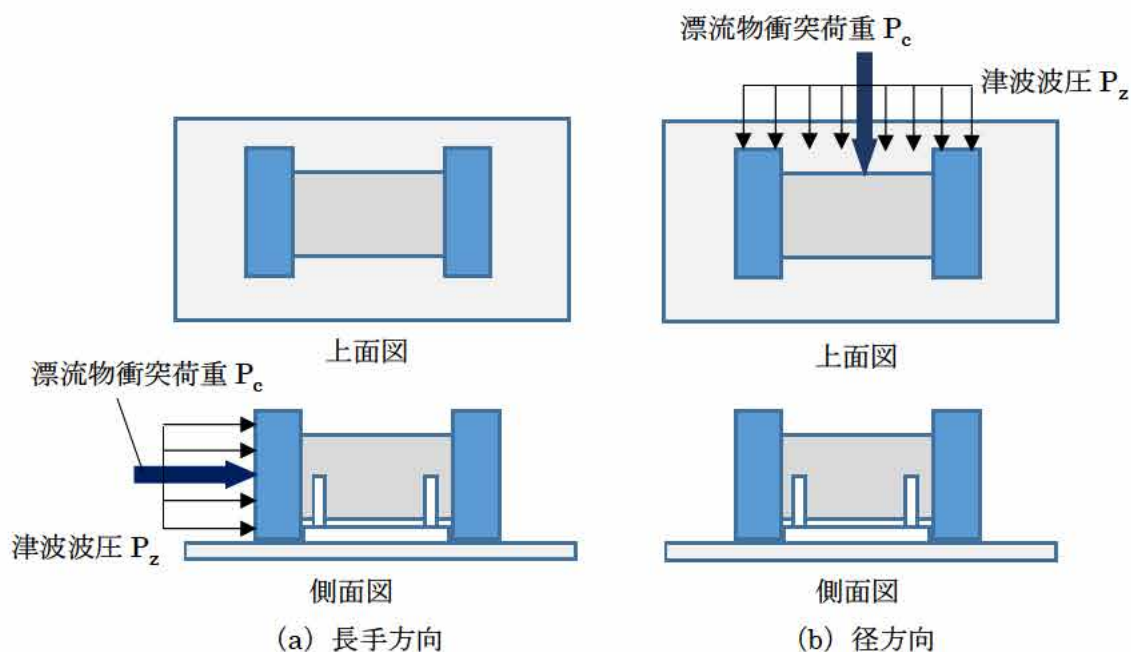


図 3 荷重条件 (密封境界部及び外筒)

b. バスケット及び伝熱フィン

①津波波力

キャスクへ作用する津波波力の評価モデルを図4に示す。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定する。津波の設計浸水深は10mであり、Hitz-B69型を越流するため波圧は三角分布となり、Hitz-B69型が存在する高さまでの台形分布がHitz-B69型に作用する。また、津波波力は長手方向からの津波によるものを P_{t1} 、径方向からの津波によるものを P_{t2} としてそれぞれ求める。

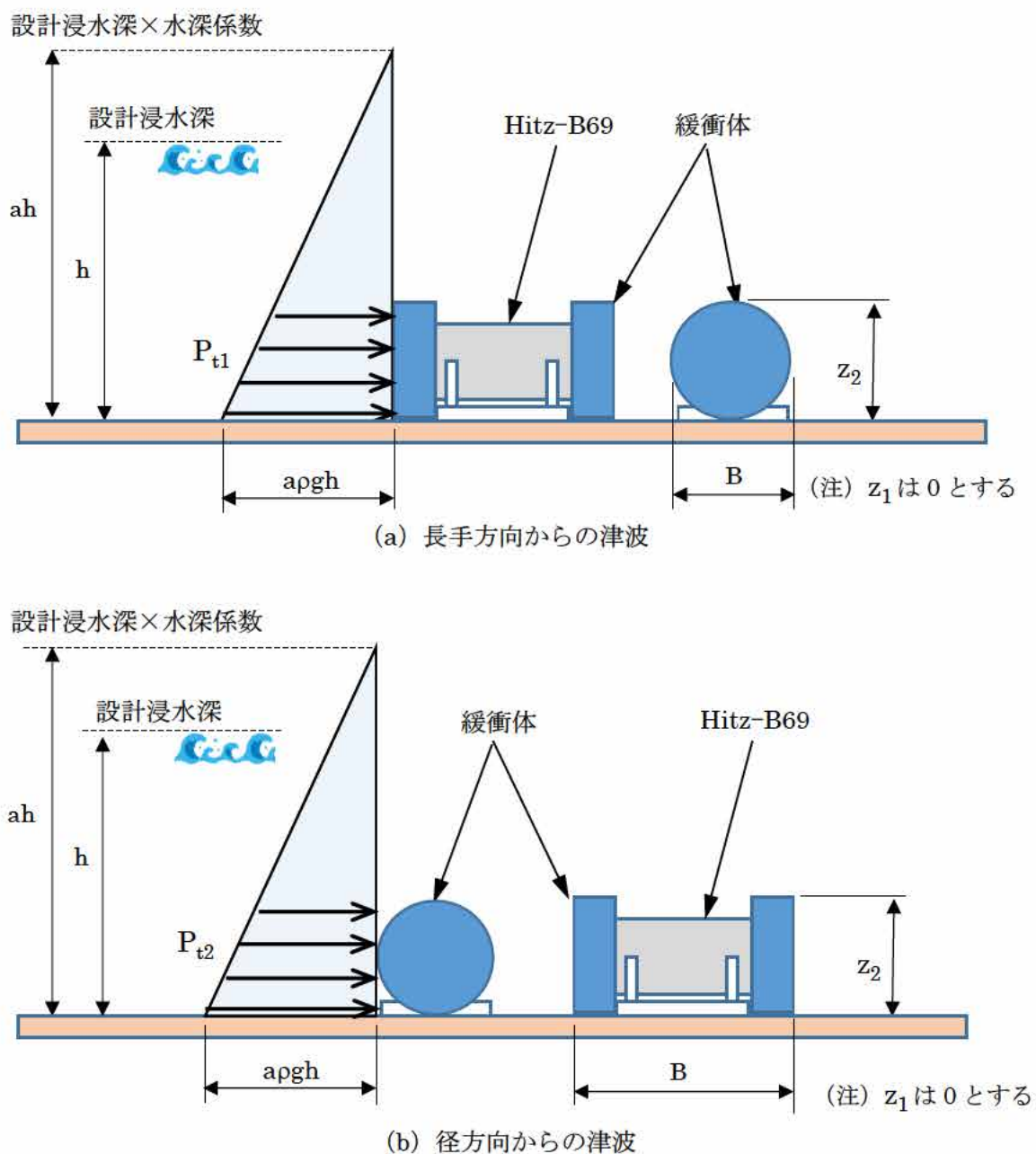


図4 津波波力の評価モデル (バスケット及び伝熱フィン)

計算条件及び計算結果を表 3 に示す。

$$P_t = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz = \rho g B \left\{ \left(ahz_2 - \frac{1}{2} z_2^2 \right) - \left(ahz_1 - \frac{1}{2} z_1^2 \right) \right\}$$

ここで、

ρ : 海水の密度 (=1030 kg/m³)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

a : 水深係数 (=3)

h : 設計浸水深 (m)

z_1 : 受圧面の最小高さ ($0 \leq z_1 \leq z_2$) (m)

z_2 : 受圧面の最大高さ ($z_1 \leq z_2 \leq h$) (m)

B : 受圧面の幅 (m)

表 3 津波波力の計算条件及び計算結果 (バスケット及び伝熱フィン)

(a) 長手方向からの津波波力

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果
海水の密度	ρ	kg/m ³	1030
水深係数	a	—	3
設計浸水深	h	m	10
受圧面の最小高さ	z_1	m	0
受圧面の最大高さ	z_2	m	3.6 (注 1)
受圧面の幅	B	m	3.6 (注 1)
津波波力 (長手方向)	P_{t1}	N	3.70×10^6

(注 1) 緩衝体外径とする。(図 4 参照)

(b) 径方向からの津波波力

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果
海水の密度	ρ	kg/m ³	1030
水深係数	a	—	3
設計浸水深	h	m	10
受圧面の最小高さ	z_1	m	0
受圧面の最大高さ	z_2	m	3.6 (注 1)
受圧面の幅	B	m	6.8 (注 2)
津波波力 (径方向)	P_{t2}	N	6.98×10^6

(注 1) 緩衝体外径とする。(図 4 参照)

(注 2) 横置き状態で津波波力が最大となるキャスク軸方向の幅とする。(図 4 参照)

②漂流物衝突荷重 (P_c)

漂流物衝突荷重 P_c は、密封境界部及び外筒と同様、「道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IV 下部構造編)」に示される次の衝突荷重の評価式により算定する。

計算条件及び計算結果を表 4 に示す。

$$P_c = 0.1 \cdot W \cdot v$$

ここで、

W : 漂流物の質量 (N)

v : 表面流速 (m/s)

表 4 漂流物衝突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
漂流物の質量	W	N	9.80665×10^5 (注 1)
表面流速	v	m/s	20
漂流物衝突荷重	P_c	N	1.97×10^6

(注 1) 漂流物質量 100 t に重力加速度を乗じた値である。

③津波荷重の組合せ

バスケット及び伝熱フィンの評価においては、長手方向からの津波荷重 P_1 は長手方向からの津波波力 P_{t1} と漂流物衝突荷重 P_c を、径方向からの津波荷重 P_2 は径方向からの津波波力 P_{t2} と流物衝突荷重 P_c を組み合わせて作用させる。

荷重条件を図 5 に示す。

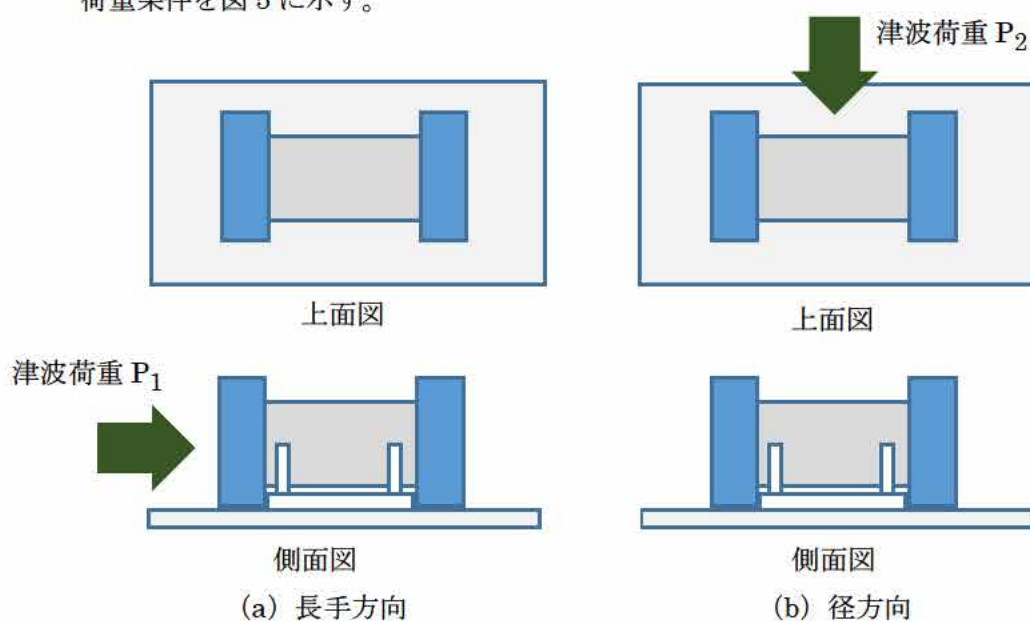


図 5 荷重条件 (バスケット及び伝熱フィン)

計算条件及び計算結果を表 5 に示す。

$$P = P_t + P_c$$

表 5 津波荷重の組合せ (バスケット及び伝熱フィン)

(a) 長手方向からの津波荷重

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果
津波波力 (長手方向津波)	P_{t1}	N	3.70×10^6
漂流物衝突荷重	P_c	N	1.97×10^6
津波荷重 (長手方向)	P_1	N	5.67×10^6

(b) 径方向からの津波荷重

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果
津波波力 (径方向津波)	P_{t2}	N	6.98×10^6
漂流物衝突荷重	P_c	N	1.97×10^6
津波荷重 (径方向)	P_2	N	8.95×10^6

(2) 機能維持評価

津波荷重作用時に Hitz-B69 型に生じる津波荷重を基に、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、一次蓋については横ずれ有無の評価を行う。

津波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 6 (a) ～ (d) に示す。表 6 (a) ～ (d) に示すとおり、津波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。一次蓋の横ずれ評価結果を表 6 (e) に示す。表 6 (e) に示すとおり、一次蓋の横ずれは生じないことを確認した。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。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、津波荷重作用時に Hitz-B69 型の安全機能は維持される。

津波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 6 津波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

津波荷重 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	45	162 (S_y)
		胴フランジ部	P_L+P_b+Q	54	183 (S_y)
	一次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	359	846 (S_y)
	二次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	266	848 (S_y)
径方向	一次蓋 密封シール部	一次蓋部	P_L+P_b+Q	62	162 (S_y)
		胴フランジ部	P_L+P_b+Q	74	183 (S_y)
	一次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	432	846 (S_y)
	二次蓋ボルト		$\sigma_m+\sigma_b$	340	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	42	284 (f_b)
		せん断	17	163 (f_s)
	外筒端部 (評価位置②)	曲げ	0	284 (f_b) (注 1)
		せん断	19	163 (f_s) (注 1)
	外筒端部 (評価位置③)	曲げ	64	170 (f_b) (注 2)
		せん断	35	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

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)
長手方向	コンパートメント	圧縮	9	265 (f_c)
径方向	コンパートメント	せん断	6	171 ($1.2S_m$)
		曲げ	8	391 (S_u)
		応力強さ	13	266 (S_y)
	391 (S_u)			
サポートプレート	圧縮	10	157 (f_c)	

(d) 伝熱フィン

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)
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

(e) 一次蓋の横ずれ

評価項目	計算値 (N)	評価基準 (N) (注1)
一次蓋の慣性力	3.17×10^5	2.19×10^6

(注1) 一次蓋ボルトの締付力による摩擦力

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)

津波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⁾に基づき津波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. 津波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

津波荷重作用時の 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

密封境界部と外筒の機能維持評価における荷重条件は以下のとおり。

- ・等分布荷重である津波波圧 P_z 及び集中荷重である漂流物衝突荷重 P_c が同時に作用する。
- ・漂流物衝突荷重 P_c 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。
- ・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した。

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

(軸方向に垂直な断面の平均引張応力) $\leq S_y$

(軸方向に垂直な断面の平均引張応力+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津波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 津波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)

津波荷重の 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	45	120	162
	密封シール部	2	P_L+P_b+Q	54	145	183
	一次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	359	115	846
	二次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	266	110	848
径方向	一次蓋	1	P_L+P_b+Q	62	120	162
	密封シール部	2	P_L+P_b+Q	74	145	183
	一次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	432	115	846
	二次蓋ボルト	—	$\sigma_m+\sigma_b$	340	110	848

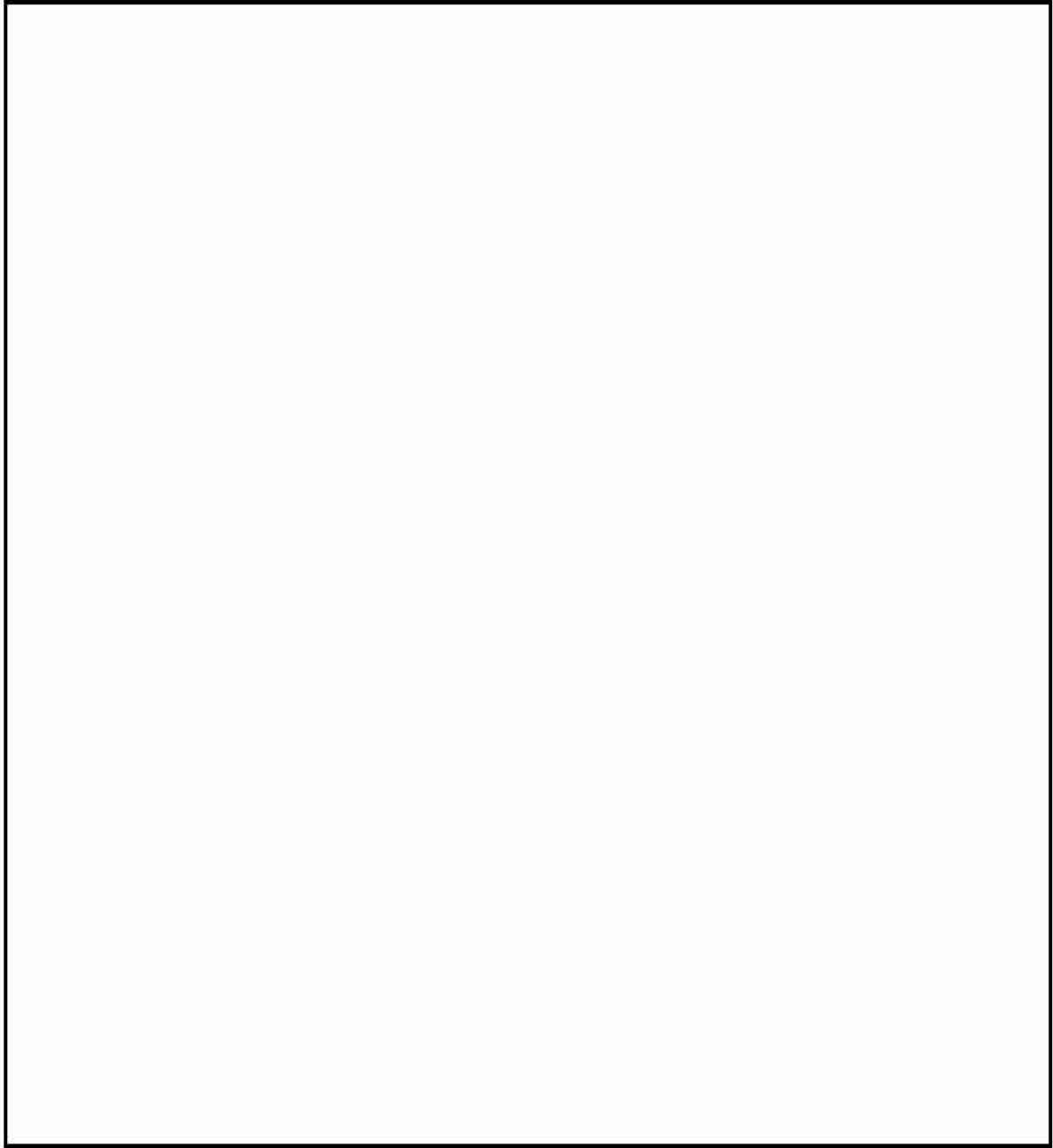
(注 1) 別紙 1-4 図参照

(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

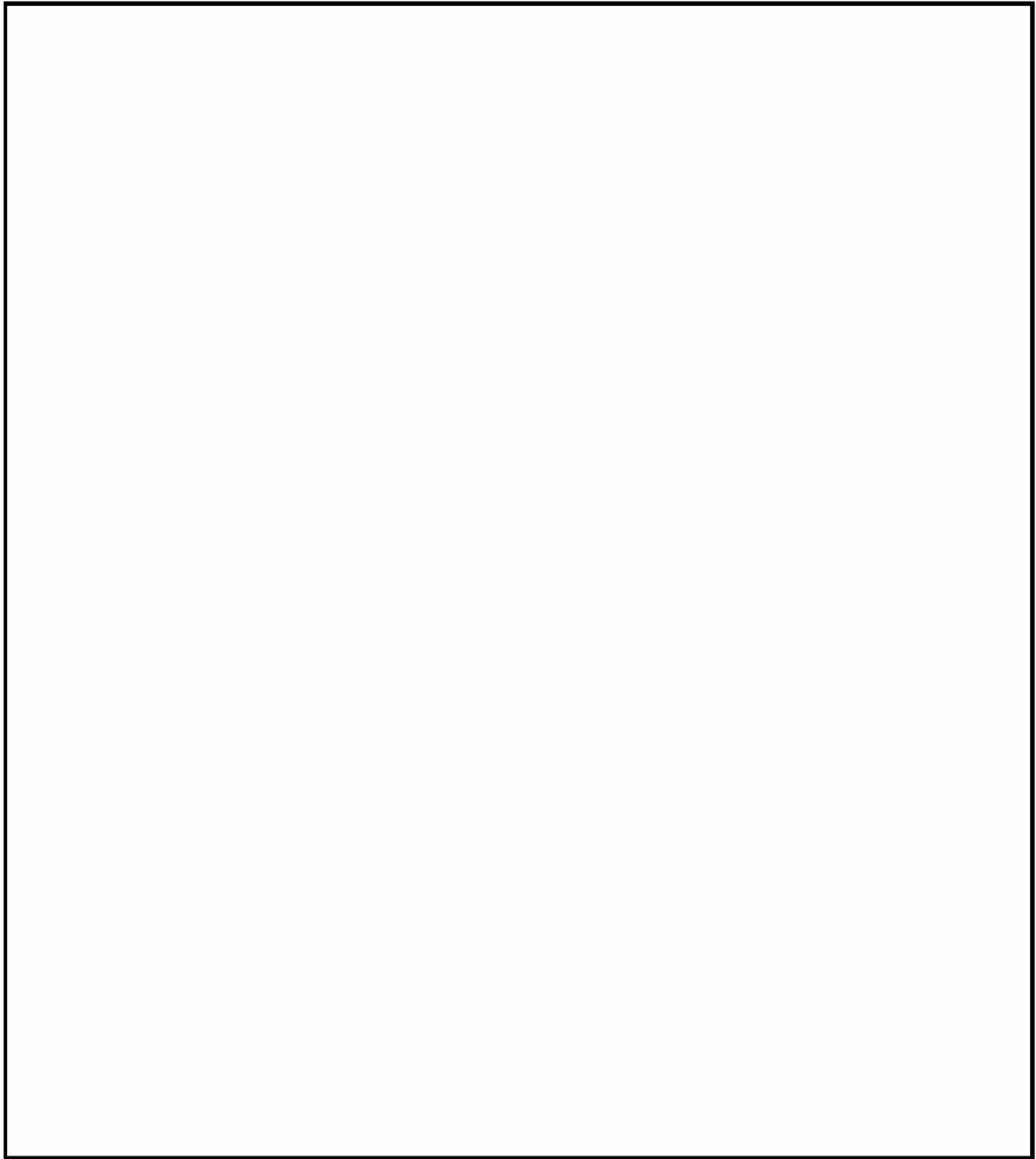
σ_m : 平均引張応力、 $\sigma_m+\sigma_b$: 平均引張応力+曲げ応力

(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

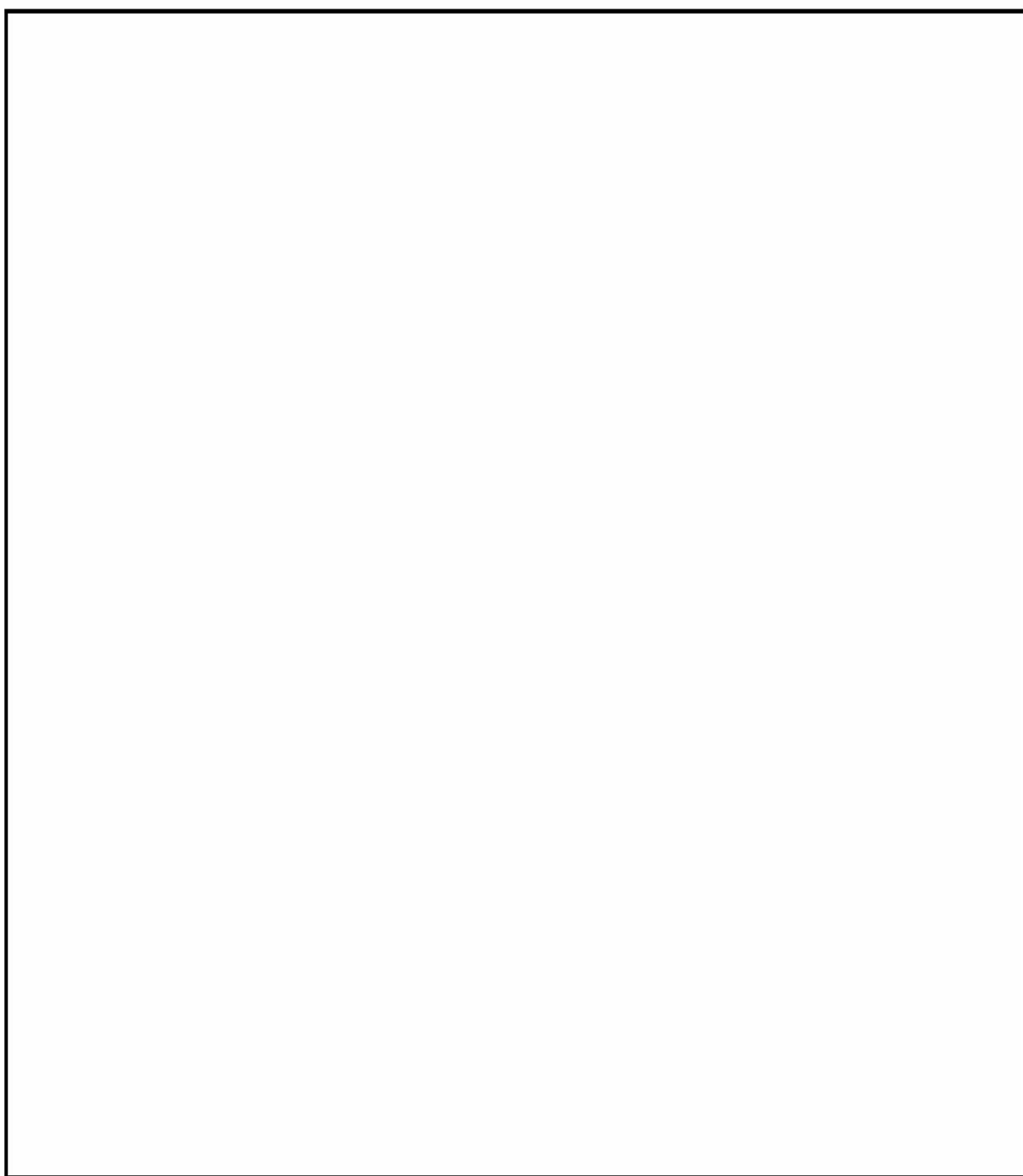
(注 4) 一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は S_y である。



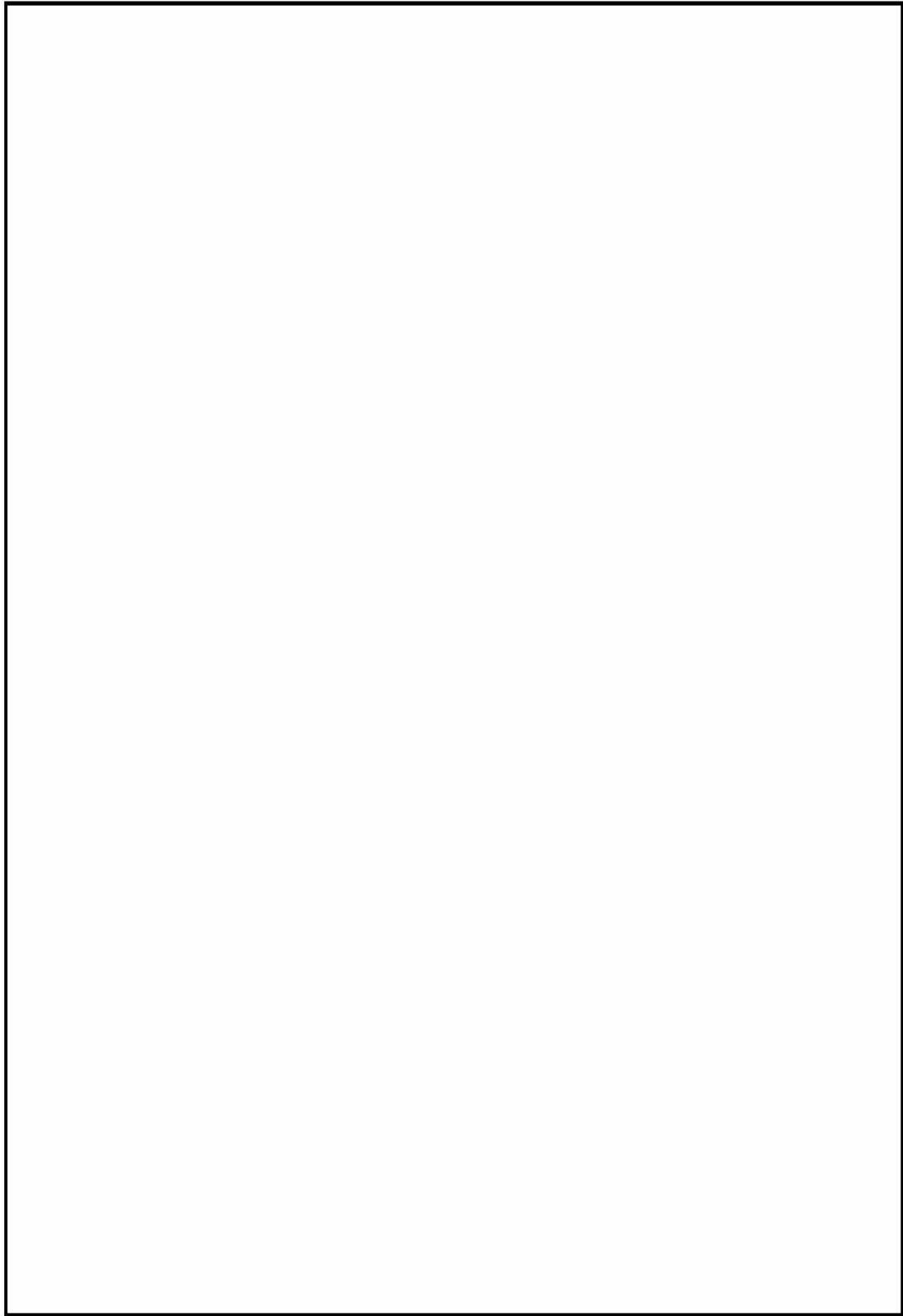
別紙 1-1 図 Hitz-B69 の三次元解析モデル



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



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



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。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、長手方向からの津波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評価を省略することとし、径方向からの津波荷重により発生する応力のみ評価する。

a. 評価モデル

外筒に津波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。津波波圧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。また同時に、漂流物衝突荷重は、外筒の長さ方向（キャスク軸方向）の中央位置に保守的に集中荷重として作用させる。



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）

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

P_c : 漂流物衝突荷重（N）

ω : 津波波圧による等分布荷重（N/m）

$$\omega = P_z \cdot D$$

P_z : 津波波圧（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）

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

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)

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

P_c : 漂流物衝突荷重 (N)

ω : 津波波圧による等分布荷重 (N/m)

$$\omega = P_z \cdot D$$

P_z : 津波波圧 (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)

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

P_c : 漂流物衝突荷重 (N)

ω : 津波波圧による等分布荷重 (N/m)

$$\omega = P_z \cdot D$$

P_z : 津波波圧 (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)

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

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

津波波圧 P_z (N/m ²)	津波波圧による等分布荷重 ω (N/m)	漂流物衝突荷重 P_c (N)
3.04×10^5	7.47×10^5	1.97×10^6

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)
2.69×10^9	42	284	1.82×10^6	17	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)	2.01×10^6	19	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)
4.15×10^9	64	170 ^(※2)	3.68×10^6	35	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。

バスケットには津波波力と漂流物衝突荷重を組み合わせた津波荷重による慣性力が作用するものとし、長手方向からの津波荷重が作用した場合と、径方向からの津波荷重が作用した場合をそれぞれ評価する。

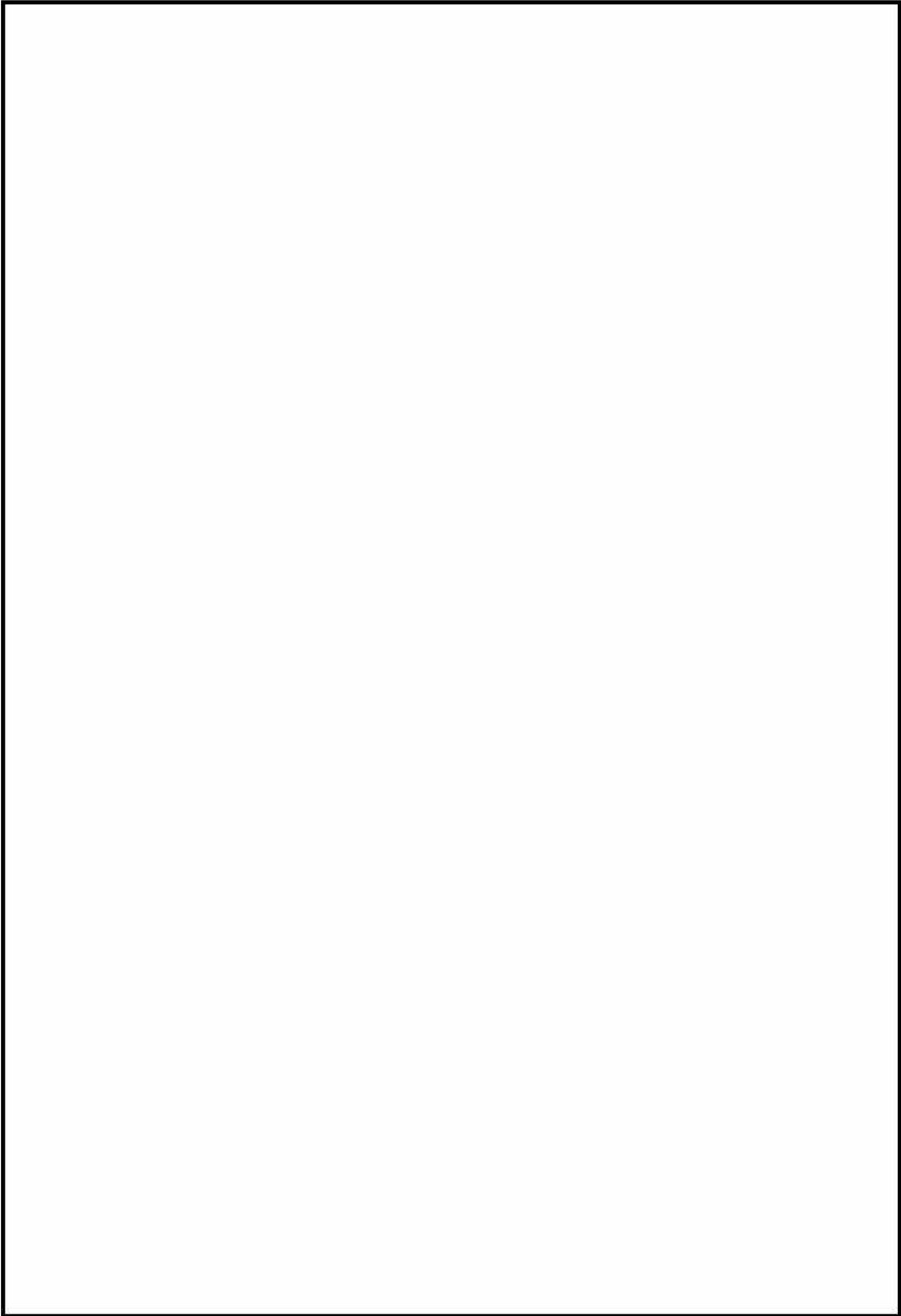
(3-1) コンパートメント

a. 評価モデル

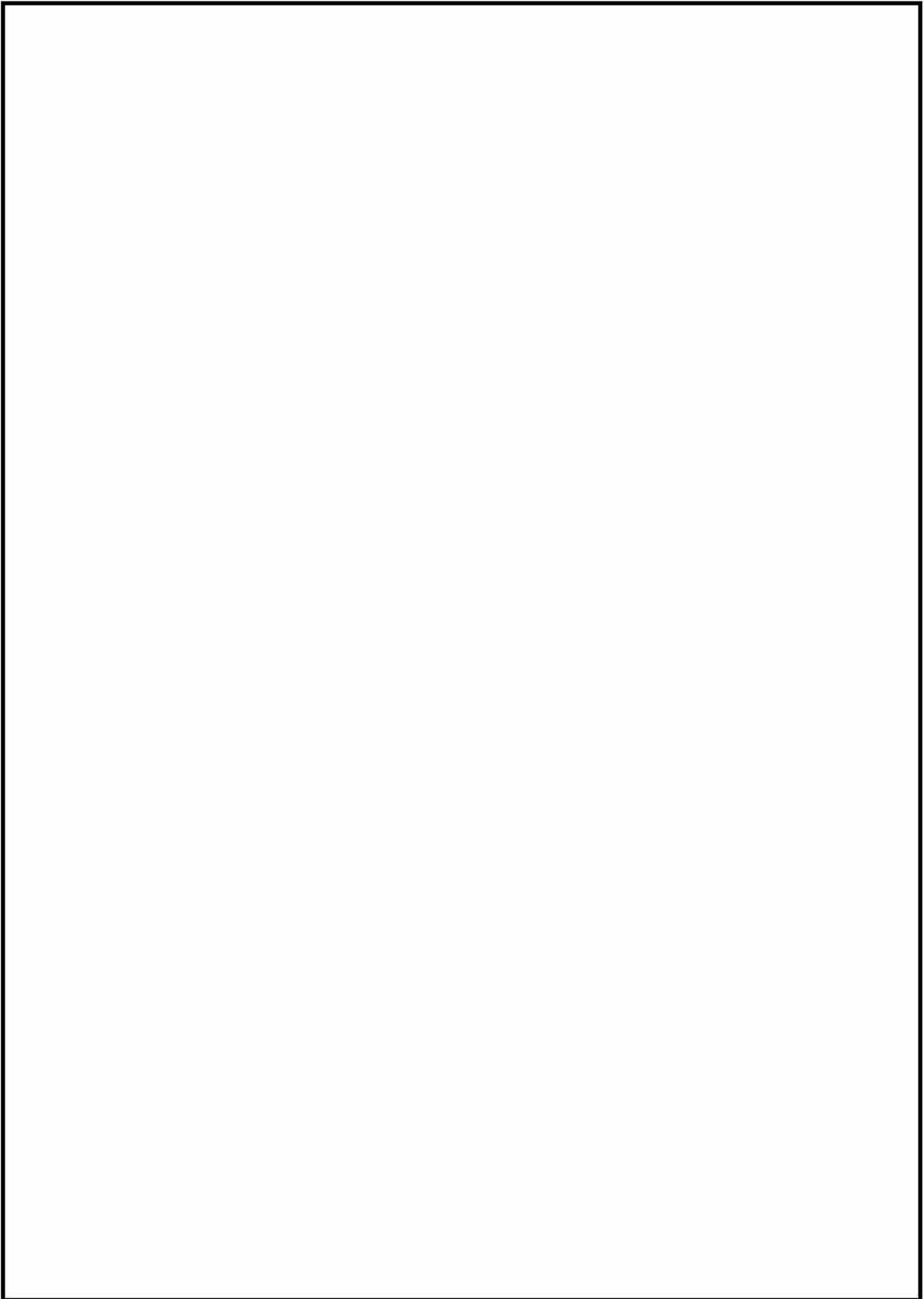
長手方向からの津波荷重が作用した場合のコンパートメントのモデルを別紙 1-6 図 (a) に示す。別紙 1-6 図 (b) に示すとおり、上部側はサポートプレート支持部を模擬した固定端、下部側は下部プレートに固定された固定端とする評価モデルとして評価を行う。評価においては加速度が作用するコンパートメント 69 体を積載質量とし、サポートプレート及びアルミブロックの荷重を受ける外周部のコンパートメント 24 体を評価対象とする。外周部のコンパートメントのうち最大応力が生じるコンパートメント下部側の支持スパン 1 つ分の範囲を評価モデルとして、外周部のコンパートメント 24 体に働く応力の評価を行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

径方向からの津波荷重が作用した場合のコンパートメントの評価モデルを別紙 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 (長手方向からの津波荷重)



別紙 1-7 図 コンパートメントの評価モデル（径方向からの津波荷重）

b. 荷重条件

バスケットの機能維持評価においては、津波波力と漂流物衝突荷重を組み合わせた津波荷重が作用した場合の評価を行う。津波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。

津波荷重が作用した場合の衝撃加速度を別紙 1-3 表に示す。

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

ただし、 P : 津波荷重 (N)

m : キャスク質量 (=131000kg)

別紙 1-3 表 津波荷重が作用した場合の衝撃加速度

津波荷重の 作用方向	津波荷重 (N)		キャスク質量 m (kg)	衝撃加速度 (m/s^2)	
	P_1	5.67×10^6		G_1	44
長手方向	P_1	5.67×10^6	131000	G_1	44
径方向	P_2	8.95×10^6		G_2	69

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 : 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長手方向からの津波荷重により発生する応力

長手方向からの津波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 : 評価対象の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 : 長手方向からの津波荷重による加速度 (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)

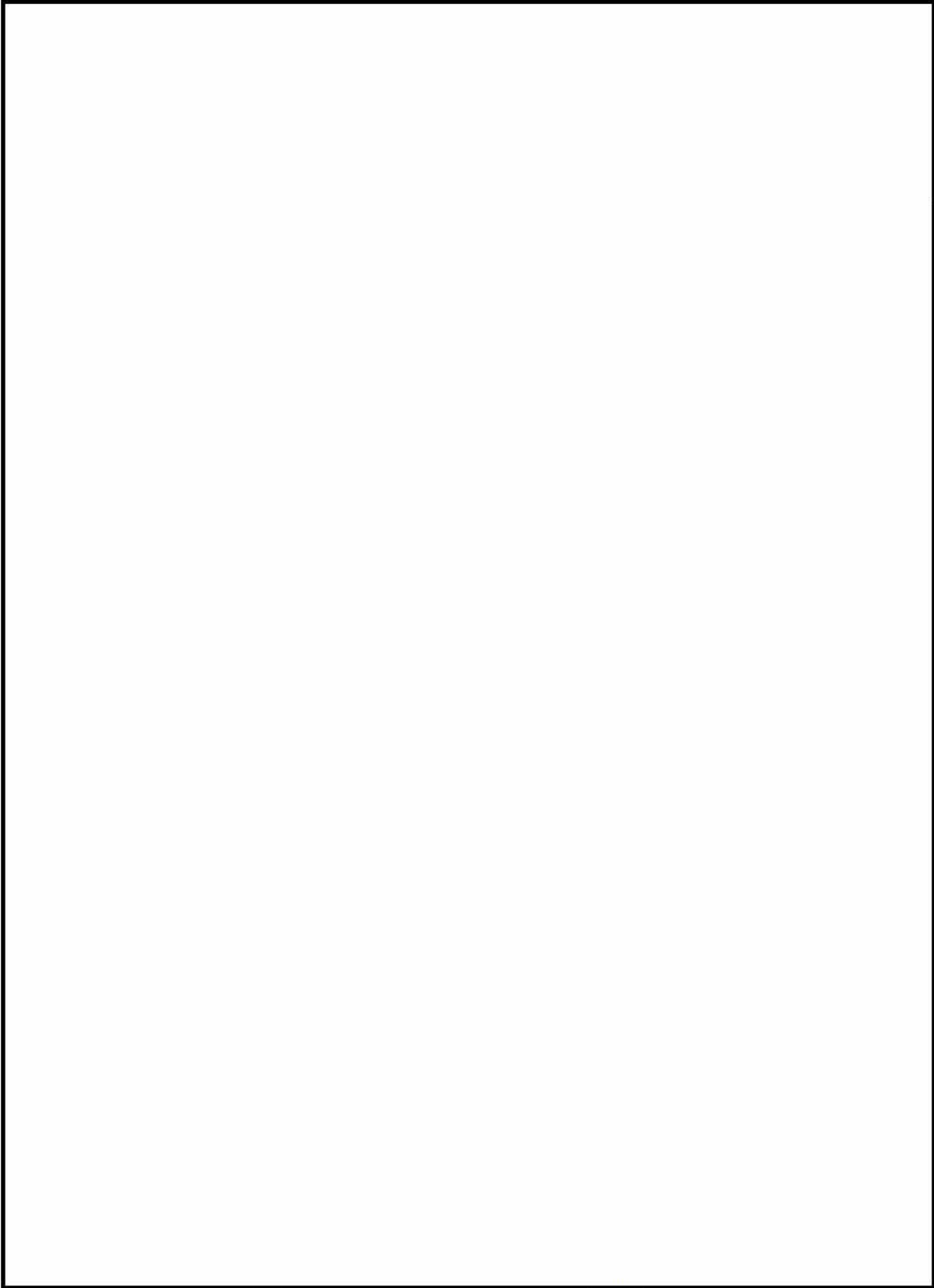
A_s : コンパートメント 1 体あたりの断面積 (mm)

A_s^* : 評価対象とするコンパートメントの断面積 (mm)

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径方向からの津波荷重により発生する応力

径方向からの津波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。地震加速度による荷重が評価モデルのコンパートメント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 : 径方向からの津波荷重による加速度 (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、断面積の計算を d.①-1 項に示す。

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)

断面係数の計算を d.②-1 項に示す。

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長手方向からの津波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。

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

合計質量 W_s (kg)	長手方向からの津波荷重 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	44	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)
5.54×10^5	8.6	265

②径方向からの津波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（径方向からの津波荷重）

(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)	

径方向からの津波荷重 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)
69	1.13×10^5	7.02×10^4	5.3	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)
4.67×10^6	7.1	391

(c) 応力強さ

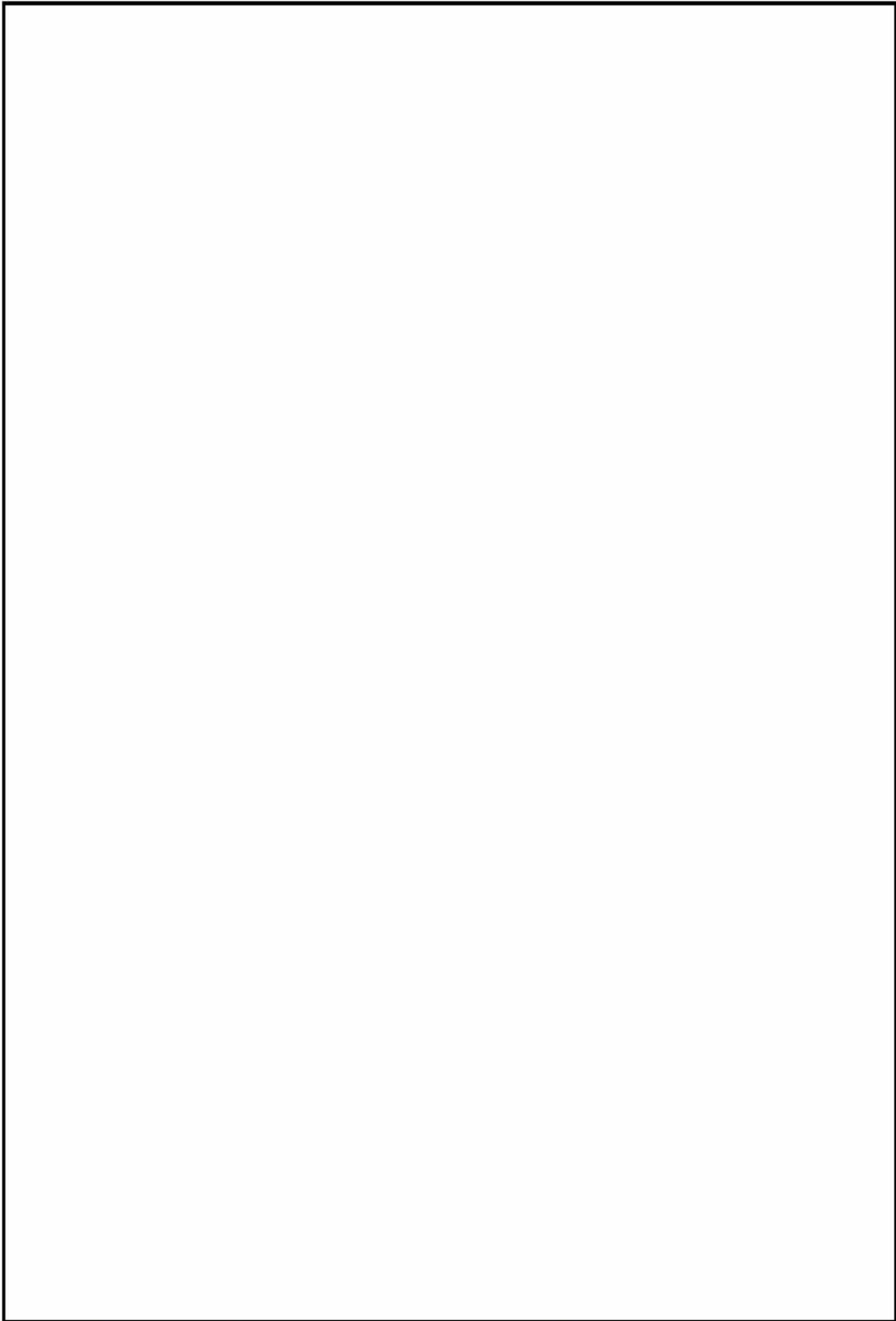
応力強さ s (MPa)	評価基準値 S_y (MPa)	評価基準値 S_u (MPa)
12.8	266	391

(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津波荷重が作用した場合の評価を行う。径方向からの津波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 (径方向からの津波荷重)

b. 荷重条件

径方向からの津波荷重が作用した場合の評価は、コンパートメントと同様、別紙 1-3 表に示す衝撃加速度を用いる。

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

$$\sigma_b \leq S_u$$

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

径方向からの津波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。津波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。

$$W = W_s G_h$$

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

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_h : 径方向からの津波荷重による加速度 (m/s^2)

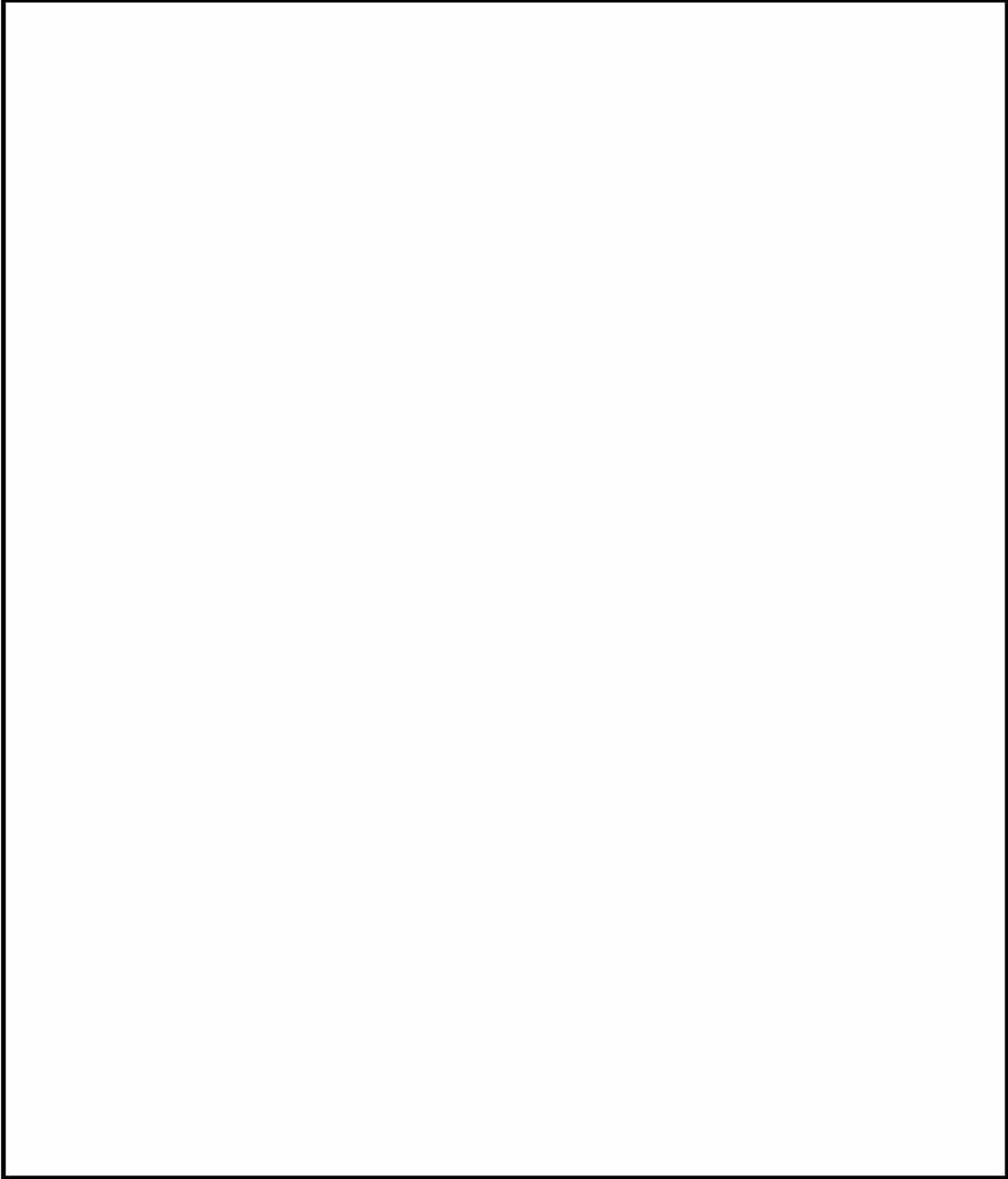
A_c : 評価対象とするサポートプレートの断面積 (mm^2)

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

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（径方向からの津波荷重）

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（径方向からの津波荷重）

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)

径方向からの津波荷重 による加速度 G (m/s ²)	圧縮荷重 W (N)	圧縮応力 σ_c (MPa)	評価基準値 f_c (MPa)
69	1.41×10^6	9.8	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	津波加速度 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	9	265 (f_c)
	水平径方向	せん断	6	171 ($1.2S_m$)
		曲げ	8	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。

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 表に示す津波波力と漂流物衝突荷重を組み合わせた津波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 Section II Part D ⁽²⁾ から、C1020P 材に相当する C10200 材の Tensile Strength の値を使用する。

d. 評価

①長手方向からの津波荷重により発生する応力

長手方向からの津波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 : 長手方向からの津波荷重による加速度 (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 1-10 表に示す。別紙 1-10 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 1-10 表 伝熱フィンの応力計算条件及び計算結果（長手方向からの津波荷重）

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)

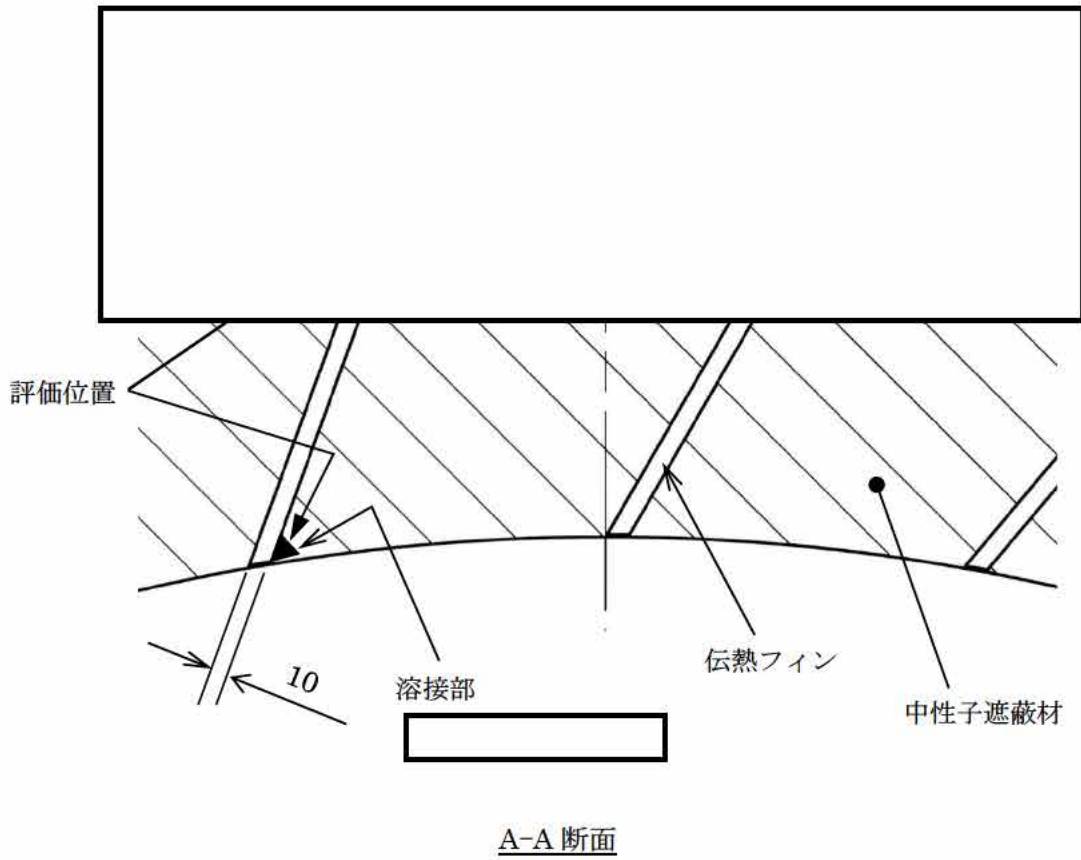
伝熱フィンの軸方向 単位長さあたりの質量 W ₁ (kg/mm)	中性子遮蔽材の軸方向 単位長さあたりの質量 W ₂ (kg/mm ²)	長手方向からの津波 荷重による加速度 G (m/s ²)
0.631	1.96	44

せん断応力 τ (MPa)	応力強さ s (MPa)	評価基準値 S _u (MPa)
0.159	1	86 (注 1)

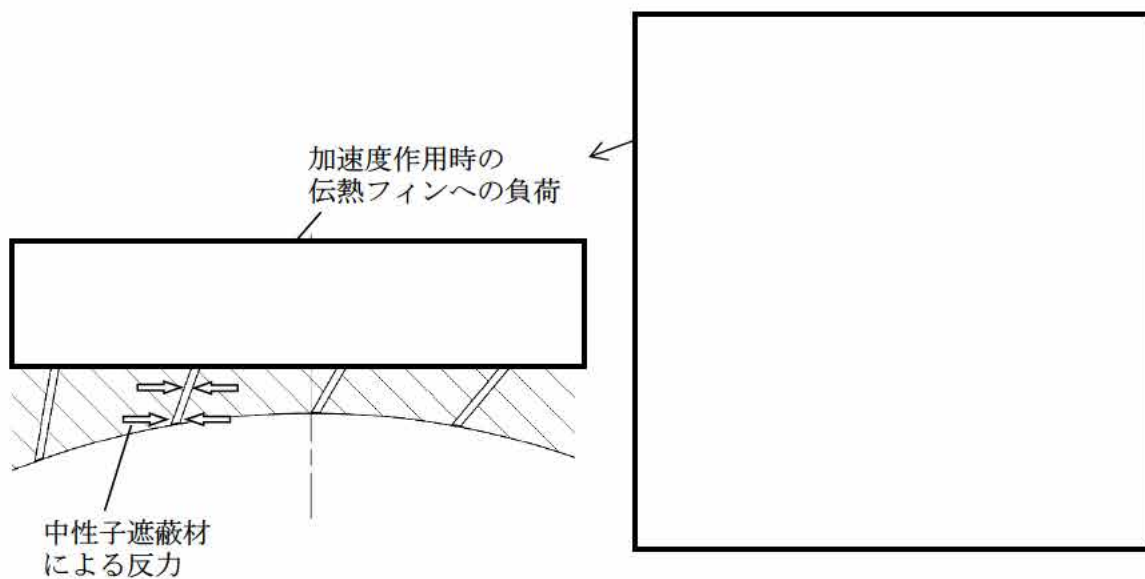
(注 1) 溶接部の継手効率 0.45 を考慮した値。継手効率は設計・建設規格のクラス 1 支持構造物の規定を準用する。

②径方向からの津波荷重により発生する応力

伝熱フィンには径方向からの津波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。



別紙 1-11 図 伝熱フィンの評価モデル



別紙 1-12 図 径方向からの津波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

津波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 1-11 表に示す。

$$F = M \cdot G$$

ここで、 M : 一次蓋の質量 (kg)

G : 径方向からの津波荷重による加速度 (m/s^2)

別紙 1-11 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 (m/s^2)	一次蓋慣性力 F (N)
4600	69	3.17×10^5

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 1-12 表に示す。一次蓋に作用する慣性力は別紙 1-11 表に示すとおり 3.17×10^5 (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 1-12 表 一次蓋の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

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 Section II Part D (ASME BPVC. II. D.M-2021)、The American Society of Mechanical Engineers (2021)