

資料 2-2

Doc No. L5-95LD210 R0

2023 年 2 月 20 日

三菱重工業株式会社

補足説明資料 4 - 1

4 条

地震による損傷の防止

地震に対する安全機能維持に関する説明資料

枠囲みの範囲は、商業機密のため、非公開とします。

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	7
3. 参考文献	21

別紙1 地震時のトラニオンの構造健全性評価

別紙2 地震時の特定兼用キャスクの機能維持評価

別紙3 地震時の使用済燃料集合体の構造健全性評価

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地震に対する要求事項は、以下のとおりである。

(i) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第4条第6項

兼用キャスクは、次のいずれかの地震力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 兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定めるもの
- 二 基準地震動による地震力

b. 設置許可基準規則解釈別記4第4条第2項

第4条第6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」ことを満たすために、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 第6項に規定する地震力（以下「第6項地震力」という。）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。ただし、輸送荷姿により設置する場合は第6項地震力によって安全機能が損なわれるおそれがないものとし、輸送荷姿以外の兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、緩衝体の装着等により兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法により設置する場合は、第6項地震力による兼用キャスク蓋部の金属部へ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とする。
- 二 兼用キャスクについては、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と第6項地震力を組み合わせた荷重条件に対して、当該兼用キャスクに要求される機能を保持すること。また、上記により求められ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し、当該兼用キャスクに要求される機能に影響を及ぼさないこと。ただし、兼用キャスクの閉じ込め機能を担保する部位は、上記の荷重条件に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。
- 三 兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、第6項地震力を適用すること。また、上記の「兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」を満たすために、少なくとも次に示す事項について、兼用キャスクがその安全機能を損なわないことを確認すること。
 - ・設置地盤、地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響

- ・兼用キャスク間の相互影響
- ・兼用キャスクと周辺施設との相互影響（周辺施設の損傷、転倒、落下等による兼用キャスクへの影響を含む。）

c. 設置許可基準規則解釈別記4第4条第3項第1号

第6項地震力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「兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理化な地震力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。

- ・兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示（平成31年原子力規制委員会告示第2号。以下「兼用キャスク告示」という。）第1条によるものとする。
- ・水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。

d. 兼用キャスク告示第1条

設置許可基準規則第4条第6項第1号の原子力委員会が別に定める地震力は、次の表に掲げる加速度及び速度による地震力とする。

加速度	水平2300Gal及び鉛直1600Gal
速度	水平2m/s及び鉛直1.4m/s

(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) 第6項地震力を適用していること。

(基本方針)

(2) 兼用キャスクは、(1)に示す第6項地震力に対して安全機能が維持されること。

(3) 輸送荷姿により設置する場合は第6項地震力によって安全機能が損なわれるおそれがないこととし、輸送荷姿以外の兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、緩衝体の装着等により兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法により設置する場合は第6項地震力による兼用キャスク蓋部の金属部へ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こととする。

(荷重及び荷重の組合せ)

(4) 兼用キャスクに作用する地震力と地震力以外の荷重を適切に組み合わせていること。

(許容限界)

(5) 兼用キャスクの設置方法に応じて、安全上適切と認められる規格等に基づき許容限界を設定していること。

(静的解析及び地震応答解析)

(6) 第6項地震力による兼用キャスクの安全機能の評価に際しては、兼用キャスクの設置方法に応じて、静的解析又は地震応答解析を行っていること。

(7) 兼用キャスクの静的解析及び地震応答解析においては、設置方法及び適用する地震力の種類に応じて、適切な解析モデル及び解析手法を設定していること。

(8) 地震応答解析を行う場合は、兼用キャスクの地震応答解析モデルへの入力地震動は兼用キャスクの設置位置の地震応答に基づき算定していること。

(耐震性評価)

- (9) 第6項地震力と地震力以外の荷重を組み合わせ、その結果得られる応力等が(5)の許容限界で設定する許容限界を超えていないこと。
- (10) 密封境界部以外の部位は、(9)の荷重により塑性ひずみが生ずる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に対して十分な余裕を有すること。

』

【確認内容】

『

(考慮する自然現象等の設定方針)

- (1) 設置許可基準規則の解釈別記4第4条第3項に基づき、第6項地震力を定めていること。
- (2) 第6項地震力として、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地震力

地震力を算出するために必要な加速度及び速度は以下のとおり。

- ・ 加速度 : 水平2300Gal 及び鉛直1600Gal
- ・ 速度 : 水平200cm/s 及び鉛直140cm/s

②基準地震動による地震力

(省略)

(基本方針)

- (3) 兼用キャスクは、第6項地震力の作用に対する評価が行われていること。ただし、輸送荷姿により設置する場合は第6項地震力によって安全機能が損なわれるおそれがないこととし、輸送荷姿以外の兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、緩衝体の装着等により兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法により設置する場合は第6項地震力による兼用キャスク蓋部の金属部へ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こととする。
- (4) 兼用キャスクを基礎等に固定しない場合、兼用キャスクの設置方法に応じて兼用キャスク告示第1条に定める加速度による地震力又は基準地震動による地震力に対して安全機能が維持される設計であること。特に、蓋部の金属部への衝突が生じる設置方法であるときは、当該衝突に対して安全機能が維持される設計であること。
- (5) 兼用キャスクを基礎等に固定する場合、兼用キャスク告示第1条に定める加速度による地震力又は基準地震動による地震力に対して安全機能が維持される設計であること。

- (6) 兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、第6項地震力を適用すること。また、上記の「兼用キャスクが、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」を満たすために、少なくとも次に示す事項について、兼用キャスクの安全機能への影響がないことを確認すること。
- 1) 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
 - 2) 兼用キャスク間の相互影響
 - 3) 兼用キャスクと周辺施設との相互影響（周辺施設の損傷、転倒、落下等による兼用キャスクへの影響を含む。）
- (7) 兼用キャスクの設置位置周辺の斜面が兼用キャスクの安全機能に影響を及ぼす可能性については、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」を参考に必要な離隔の有無等によって判断するとともに、必要な離隔が確保されない場合は、当該斜面の安定性を評価していること。斜面の安定性評価に当たっては、「6. 地盤及び周辺斜面の安定性評価」を参考にしていること。

(荷重及び荷重の組合せ)

- (8) 荷重及び荷重の組合せの考え方が、以下を踏まえ妥当であること。
- 1) 地震力以外の荷重
兼用キャスクに作用する地震力以外の荷重は、安全上適切と認められる規格等に基づいて、貯蔵時に想定される荷重を考慮していること。
 - 2) 荷重の組合せ
兼用キャスクについて、耐震性評価を行う際、JEAG4601等の安全上適切と認められる規格等を参考に、兼用キャスクの設置方法に応じて、兼用キャスクに作用する地震力と地震力以外の荷重を組み合わせていること。
- (9) 設計上、転倒等を想定する場合は、これらによる荷重と同時に想定されるその他の荷重とを組み合わせた評価を行っていること。

(許容限界)

- (10) 兼用キャスクの許容限界は、安全上適切と認められる規格等に基づき設定すること。加えて、兼用キャスクの閉じ込め機能及び臨界防止機能に関しては以下のとおりとすること。
- 1) 密封境界部がおおむね弾性範囲内となる許容限界としていること

- 2) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさない許容限界としていること。

(静的解析及び地震応答解析)

- (11) 静的解析及び地震応答解析に用いる解析モデル及び解析手法は、JEAG4601の規定を参考に設定していること。
- (12) 兼用キャスクの転倒等に伴う衝突解析を行う場合は、兼用キャスク告示で定める地震力又は兼用キャスクの設置位置の地震応答に基づき、エネルギー保存則等を用いることにより、衝突時の速度を適切に算定していること。
- (13) 静的解析において、兼用キャスク告示で定める地震力を用いる場合の水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。
- (14) スペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析を用いる場合は、入力地震力として、基準地震動に基づいて兼用キャスクの設置位置の設計用床応答スペクトル又は加速度時刻歴応答波を算定していること。
- (15) 基準地震動による水平2方向及び鉛直方向の地震力による応力の組合せは、各方向の入力地震動の位相特性並びに兼用キャスクの構造及び応答特性に留意し、保守的な評価となる組合せ方法を適用すること。なお、各方向の入力地震動の位相特性及び兼用キャスクの応答特性により、必要に応じ、応答の同時性を考慮していること。

(耐震性評価)

- (16) 兼用キャスクの耐震性を評価する上で必要な箇所を評価対象部位として選定し、安全上適切と認められる規格等の規定を参考に、当該評価対象部位の応力評価及び疲労評価を行っていること。
- (17) 兼用キャスクの耐震性評価において、地震力とそれ以外の荷重を組み合わせ、その結果得られる応力等が(10)で設定する許容限界を超えていないこと。
- (18) 密封境界部以外の部位は、(17)の荷重により塑性ひずみが生ずる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に対して十分な余裕を有すること。
- (19) 設計上、転倒等を想定する場合は、その影響を考慮していること。
- (20) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保しており、兼用キャスクの転倒又は衝突、貯蔵建屋の天井の落下等によりバスケットに塑性変形が生ずる場合は、バスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

』

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 型の地震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4条第6項

兼用キャスクは、次のいずれかの地震力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 兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定めるもの
- 二 基準地震動による地震力

b. 設置許可基準規則解釈別記4第4条第2項

第4条第6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」ことを満たすために、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 第6項に規定する地震力（以下「第6項地震力」という。）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。ただし、輸送荷姿により設置する場合は第6項地震力によって安全機能が損なわれるおそれがないものとし、輸送荷姿以外の兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、緩衝体の装着等により兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法により設置する場合は、第6項地震力による兼用キャスク蓋部の金属部へ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とする。
- 二 兼用キャスクについては、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と第6項地震力を組み合わせた荷重条件に対して、当該兼用キャスクに要求される機能を保持すること。また、上記により求められ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し、当該兼用キャスクに要求される機能に影響を及ぼさないこと。ただし、兼用キャスクの閉じ込め機能を担保する部位は、上記の荷重条件に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。
- 三 兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、第6項地震力を適用すること。また、上記の「兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」を満たすために、少なくとも次に示す事項について、兼用キャスクがその安全機能を損なわないことを確認すること。

- ・設置地盤、地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
- ・兼用キャスク間の相互影響
- ・兼用キャスクと周辺施設との相互影響（周辺施設の損傷、転倒、落下等による兼用キャスクへの影響を含む。）

e. 設置許可基準規則解釈別記4第4条第3項第1号

第6項地震力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「兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理化な地震力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。
 - ・兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示（平成31年原子力規制委員会告示第2号。以下「兼用キャスク告示」という。）第1条によるものとする。
 - ・水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。

d. 兼用キャスク告示第1条

設置許可基準規則第4条第6項第1号の原子力委員会が別に定める地震力は、次の表に掲げる加速度及び速度による地震力とする。

加速度	水平2300Gal及び鉛直1600Gal
速度	水平2m/s及び鉛直1.4m/s

MSF-76B型は、特定兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、貯蔵用緩衝体の装着により、兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない、蓋部が金属部へ衝突しない方法で横置きに設置する設計とする。

また、MSF-76B型は、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定める地震力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を起こさ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、耐震性評価（機能維持評価）に用いる荷重及び荷重の組合せとして、兼用キャスク告示で定める地震力（加速度）について水平地震力と鉛直地震力を同時に不利な方向の組合せで作用させることに加え、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。上記条件に基づく耐震性評価の結果、MSF-76B型を支持するトラニオン及び特定兼用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、安全機能が維持されることを確認した。

なお、設置許可基準規則解釈別記4第4条第2項第3号に示される周辺施設からの波及的影響評価については、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。

(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地震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) 設置許可基準規則の解釈別記4第4条第3項に基づき、第6項地震力を定めていること。

(2) 第6項地震力として、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地震力

地震力を算出するために必要な加速度及び速度は以下のとおり。

- ・ 加速度 : 水平2300Gal 及び鉛直1600Gal
- ・ 速度 : 水平200cm/s 及び鉛直140cm/s

②基準地震動による地震力

(省略)

地震に対する評価に用いる地震力は、兼用キャスク告示で定める地震力とし、地震力を算出するために必要な加速度及び速度は以下のとおりとする。

- ・ 加速度 : 水平2300Gal 及び鉛直1600Gal
- ・ 速度 : 水平200cm/s 及び鉛直140cm/s

〔確認内容〕

（３）兼用キャスクは、第 6 項地震力の作用に対する評価が行われていること。ただし、輸送荷姿により設置する場合は第 6 項地震力によって安全機能が損なわれるおそれがないこととし、輸送荷姿以外の兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、緩衝体の装着等により兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法により設置する場合は第 6 項地震力による兼用キャスク蓋部の金属部へ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こととする。

MSF-76B 型は、特定兼用キャスクを基礎等に固定しない蓋部が金属部へ衝突しない方法で設置し、貯蔵用緩衝体の装着により、兼用キャスク告示に定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。したがって、兼用キャスク告示で定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部へ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。

〔確認内容〕

（４）兼用キャスクを基礎等に固定しない場合、兼用キャスクの設置方法に応じて兼用キャスク告示第 1 条に定める加速度による地震力又は基準地震動による地震力に対して安全機能が維持される設計であること。特に、蓋部の金属部への衝突が生じる設置方法であるときは、当該衝突に対して安全機能が維持される設計であること。

MSF-76B 型は、特定兼用キャスクを基礎等に固定しない蓋部が金属部へ衝突しない方法で設置し、兼用キャスク告示で定める地震力に対して、その安全機能が維持される設計とする。

型式証明における設計方針への妥当性確認として、兼用キャスク告示で定める加速度による地震力に対する MSF-76B 型の耐震性評価（機能維持評価）を実施し、MSF-76B 型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（〔確認内容〕（８）以降の適合性説明を参照）。

〔確認内容〕

（５）兼用キャスクを基礎等に固定する場合、兼用キャスク告示第 1 条に定める加速度による地震力又は基準地震動による地震力に対して安全機能が維持される設計であること。

MSF-76B 型は、基礎等に固定する方法で設置しないため、本確認内容は型式証明申請書の範囲外である。

[確認内容]

(6) 兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、第6項地震力を適用すること。また、上記の「兼用キャスクが、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」を満たすために、少なくとも次に示す事項について、兼用キャスクの安全機能への影響がないことを確認すること。

- 1) 設置地盤及び地震応答政情の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
- 2) 兼用キャスク間の相互影響
- 3) 兼用キャスクと周辺施設との相互影響（周辺施設の損傷、転倒、落下等による兼用キャスクへの影響を含む。）

周辺施設からの波及的影響評価は、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。

[確認内容]

(7) 兼用キャスクの設置位置周辺の斜面が兼用キャスクの安全機能に影響を及ぼす可能性については、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」を参考に必要な離隔の有無等によって判断するとともに、必要な離隔が確保されない場合は、当該斜面の安定性を評価していること。斜面の安定性評価に当たっては、「6. 地盤及び周辺斜面の安定性評価」を参考にしていること。

兼用キャスク設置位置周辺の斜面の影響評価は、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。

[確認内容]

(8) 荷重及び荷重の組合せの考え方が、以下を踏まえ妥当であること。

1) 地震力以外の荷重

兼用キャスクに作用する地震力以外の荷重は、安全上適切と認められる規格等に基づいて、貯蔵時に想定される荷重を考慮していること。

2) 荷重の組合せ

兼用キャスクについて、耐震性評価を行う際、JEAG4601等の安全上適切と認められる規格等を参考に、兼用キャスクの設置方法に応じて、兼用キャスクに作用する地震力と地震力以外の荷重を組み合わせていること。

(9) 設計上、転倒等を想定する場合は、これらによる荷重と同時に想定されるその他の荷重とを組み合わせた評価を行っていること。

MSF-76B型の地震力による耐震性評価（機能維持評価）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。）を基に、MSF-76B型に作用する地震力に加え、地震力以外の荷重として、供用中に作用する荷重（圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重）を組み合わせて実施する。

なお、転倒等の想定事象に対する評価は、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。

[確認内容]

(10) 兼用キャスクの許容限界は、安全上適切と認められる規格等に基づき設定すること。加えて、兼用キャスクの閉じ込め機能及び臨界防止機能に関しては以下のとおりとする。

1) 密封境界部がおおむね弾性範囲内となる許容限界としていること。

2) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさない許容限界としていること。

MSF-76B型の地震力による耐震性評価（機能維持評価）は、金属キャスク構造規格を基に実施する。

型式証明における設計方針の妥当性確認として、特定兼用キャスクを支持するトラニオンに加え、特定兼用キャスク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。トラニオンは、金属キャスク構造規格のトラニオンの規定を適用する。バスケットプレートは、金属キャスク構造規格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。外筒及び伝熱フィンは金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がないが、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地震時に破断しないことを確認し、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。

〔確認内容〕

- (11) 静的解析及び地震応答解析に用いる解析モデル及び解析手法は、JEAG4601 の規定を参考に設定していること。
- (13) 静的解析において、兼用キャスク告示で定める地震力を用いる場合の水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。

MSF-76B 型の地震力による耐震性評価（機能維持評価）は、静的震度（加速度）に基づき算定した地震力を使用し、静的解析により実施する。また、地震力は、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組合せで作用させる。

〔確認内容〕

- (12) 兼用キャスクの転倒等に伴う衝突解析を行う場合は、兼用キャスク告示で定める地震力又は兼用キャスクの設置位置の地震応答に基づき、エネルギー保存則等を用いることにより、衝突時の速度を適切に算定していること。
- (14) スペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析を用いる場合は、入力地震力として、基準地震動に基づいて兼用キャスクの設置位置の設計用床応答スペクトル又は加速度時刻歴応答波を算定していること。
- (15) 基準地震動による水平 2 方向及び鉛直方向の地震力による応力の組合せは、各方向の入力地震動の位相特性並びに兼用キャスクの構造及び応答特性に留意し、保守的な評価となる組合せ方法を適用すること。なお、各方向の入力地震動の位相特性及び兼用キャスクの応答特性により、必要に応じ、応答の同時性を考慮していること。
- (19) 設計上、転倒等を想定する場合は、その影響を考慮していること。

転倒等の想定事象に対する評価は、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。また、地震力の算定において、スペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析は実施しない。さらに、地震力には、基準地震動による地震力を用いない。

〔確認内容〕

- (16) 兼用キャスクの耐震性を評価する上で必要な箇所を評価対象部位として選定し、安全上適切と認められる規格等の規定を参考に、当該評価対象部位の応力評価及び疲労評価を行っていること。
- (17) 兼用キャスクの耐震性評価において、地震力とそれ以外の荷重を組み合わせ、その結果得られる応力等が(10)で設定する許容限界を超えていないこと。
- (18) 密封境界部以外の部位は、(17)の荷重により塑性ひずみが生ずる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に対して十分な余裕を有すること。
- (20) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保しており、兼用キャスクの転倒又は衝突、貯蔵建屋の天井の落下等によりバスケットに塑性変形が生ずる場合は、バスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

MSF-76B 型の耐震性評価（機能維持評価）では、金属キャスク構造規格に基づき、MSF-76B 型に作用する地震力に加え、地震力以外の荷重として、供用中に作用する荷重（圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重）を組み合わせ実施し、許容限界を超えないことを確認する。

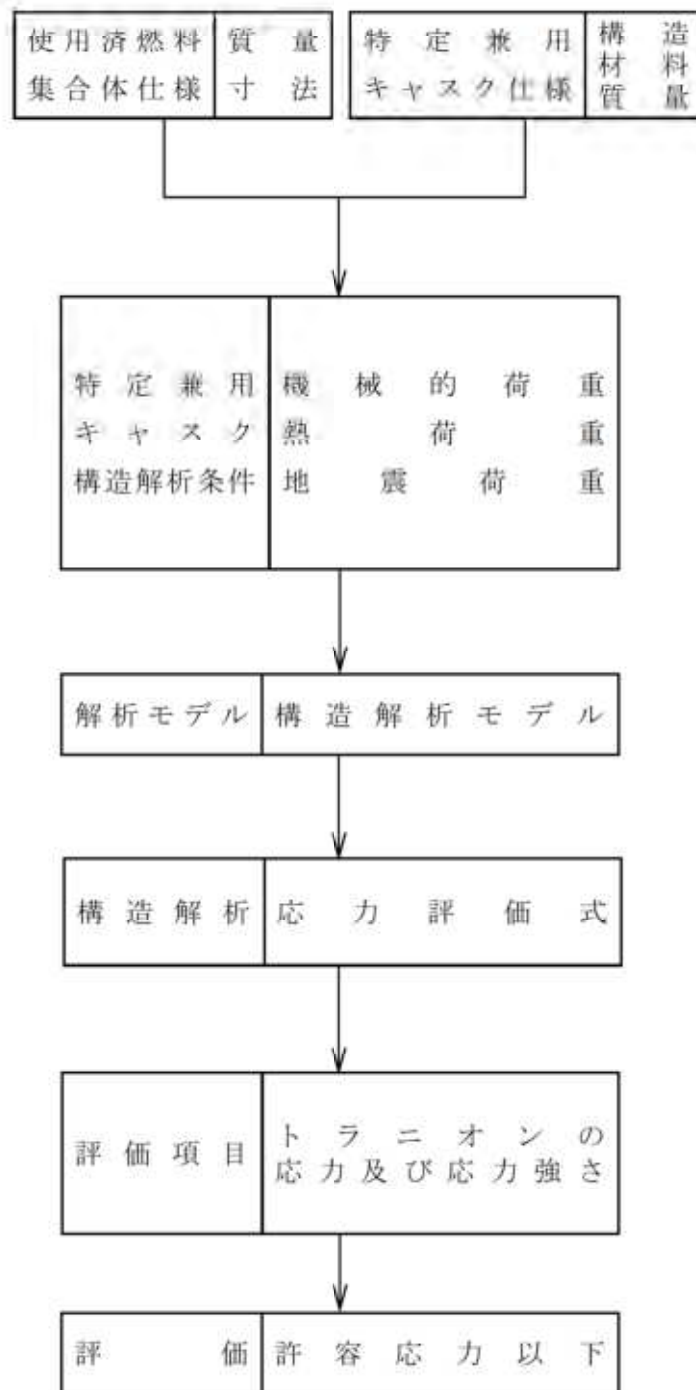
型式証明における設計方針の妥当性確認として、特定兼用キャスクを支持するトラニオンに加え、特定兼用キャスクの安全機能を担保する構成部材として、閉じ込め機能を担う密封境界部（一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト）、臨界防止機能を担うバスケット（バスケットプレート）、遮蔽機能及び除熱機能を担う外筒（ガンマ線遮蔽材で最も板厚が薄く、中性子遮蔽材を支持するとともに、除熱機能を担う伝熱フィンが取り付けられる部位）、並びに除熱機能を担う伝熱フィンを評価対象として評価を行う。トラニオンは、金属キャスク構造規格のトラニオンの規定を適用する。バスケットプレートは、金属キャスク構造規格のバスケットの規定を適用する。また、密封境界部は弾性範囲内となる許容限界とする。外筒及び伝熱フィンは金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がないが、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地震時に破断しないことを確認し、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 型の地震力による機能維持評価の概要を以下に示す。

a. トラニオンの構造健全性評価

MSF-76B 型は、上部トラニオン、胴上部及び下部トラニオンにより貯蔵架台等に固縛され、横置き姿勢で貯蔵される。

MSF-76B 型の地震時におけるトラニオンの構造健全性評価フローを第 1 図に示す。地震時に MSF-76B 型に生じる加速度（水平 23m/s^2 （2300Gal）及び鉛直 16m/s^2 （1600Gal））による地震力を基に、トラニオンに生じる応力を応力評価式にて算出し、構造健全性を評価する。

トラニオンの構造健全性評価の詳細を別紙1に、トラニオンの構造健全性評価結果を第1表に示す。第1表に示すとおり、地震時にトラニオンに生じる応力は金属キャスク構造規格の評価基準を満足しており、構造健全性は維持される。



第1図 地震時のトラニオンの構造健全性評価フロー

第1表 トラニオンの構造健全性評価結果 (注)

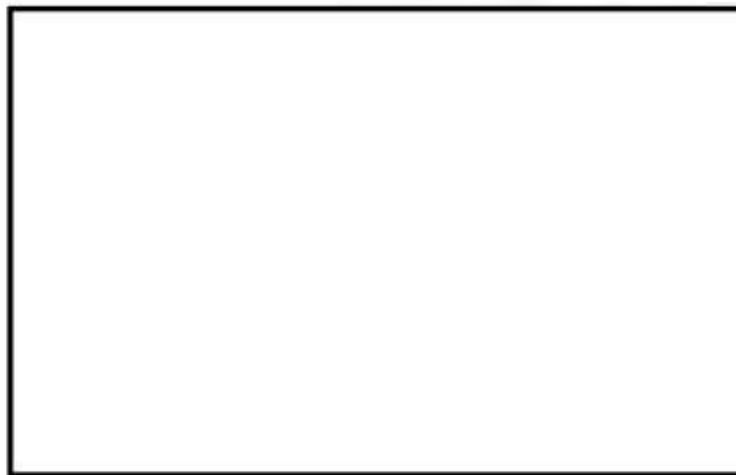
(1) 下部トラニオン本体

評価断面	曲げ応力		せん断応力		応力強さ	
	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa)	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa)	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa)
A-A	126	591 ($1.5f_b^*$)	65	341 ($1.5f_s^*$)	182	591 ($1.5f_t^*$)
B-B	202	591 ($1.5f_b^*$)	41	341 ($1.5f_s^*$)	219	591 ($1.5f_t^*$)



(2) 下部トラニオン接続部

評価領域	支圧応力 (一次応力)		支圧応力 (一次+二次応力)	
	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa)	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa)
A	150	410 ($1.5f_p^*$)	193	410 ($1.5f_p^*$)
B	63		106	

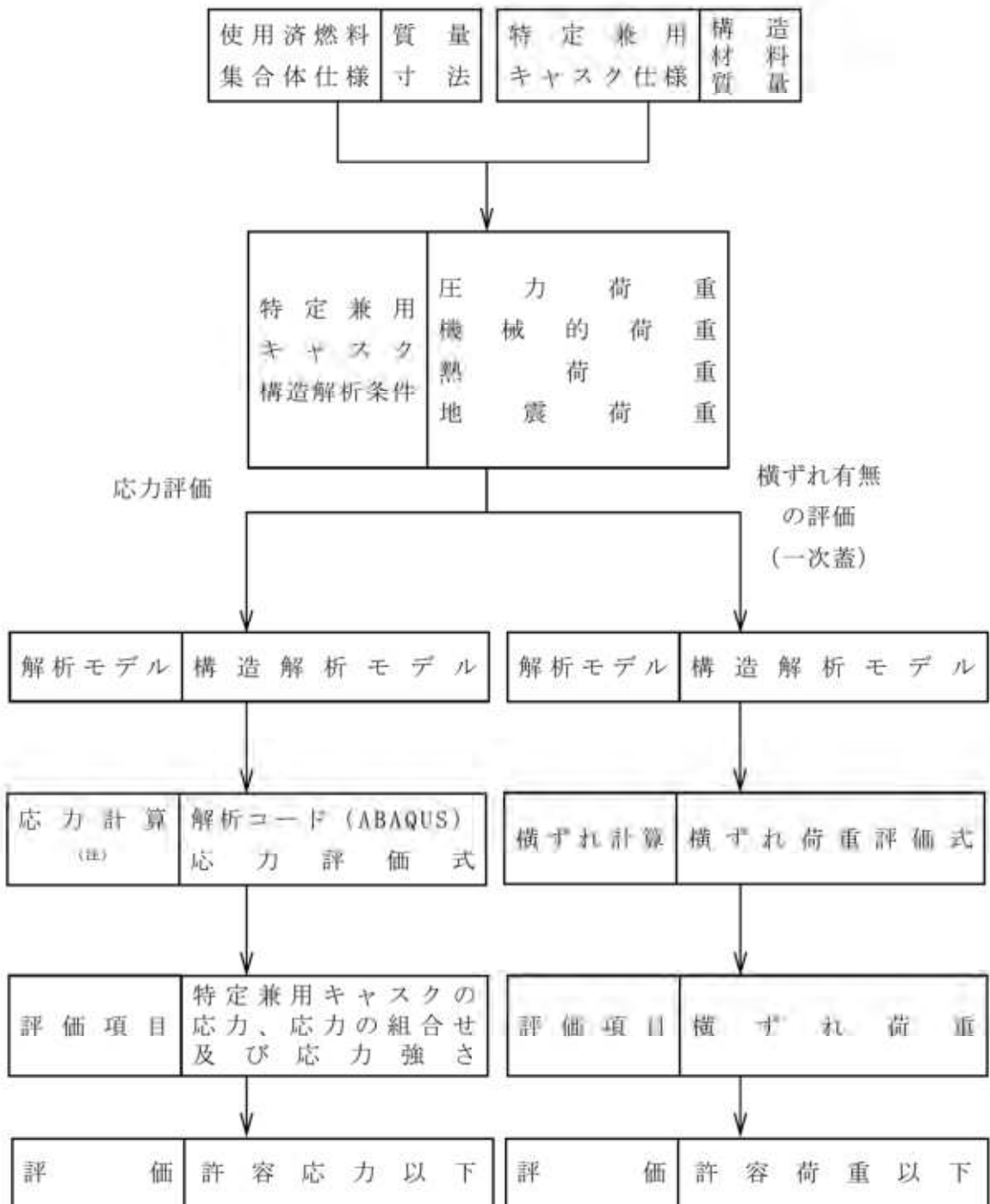


(注) 上部トラニオンに比べ厳しい結果となる下部トラニオンを評価対象としている。

b. 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

MSF-76B 型の地震時における密封境界部、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 2 図に示す。地震時に MSF-76B 型に生じる加速度（水平 23m/s^2 （2300Gal）及び鉛直 16m/s^2 （1600Gal））による地震力を基に、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、機能維持評価を行う。また、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。

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の詳細を別紙 2 に、密封境界部、バスケット、外筒及び伝熱フィンの応力評価結果を第 2 表に、密封境界部の横ずれ評価結果を第 3 表に示す。第 2 表に示すとおり、地震時に密封境界部に生じる応力は弾性範囲に留まり、閉じ込め機能は維持される。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。また、外筒及び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、遮蔽機能及び除熱機能は維持される。さらに、第 3 表に示すとおり、地震時に一次蓋に作用する慣性力は蓋締付時のボルト荷重による摩擦力より小さく、一次蓋の横ずれは生じないことを確認した。したがって地震時に MSF-76B 型の安全機能は維持される。



(注) 型式証明では、応力評価式により応力計算を行う。

第2図 地震時のMSF-76B型の機能維持評価フロー

第2表 地震時の密封境界部、バスケット、外筒及び伝熱フィンの応力評価結果

(1) 密封境界部

評価部位 (注1)	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa) (注2)
一次蓋密封シール部 ($P_L + P_b$)	27	185
一次蓋ボルト ($\sigma_n + \sigma_b$)	265	846

(注1) P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力、 σ_n : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注2) 金属キャスク構造規格の密封シール部、蓋ボルトの評価基準の考え方を基本として、審査ガイド要求を踏まえ、密封境界部が弾性範囲となるように降伏応力以下と設定。

(2) バスケット

地震力作用方向	評価部位 (注1)	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa) (注2)
水平	バスケットプレート (σ_c)	2	280
鉛直	バスケットプレート縦板 (σ_c)	7	280
	バスケットプレート横板 (σ_b)	10	421
	バスケットプレート横板 (τ)	1	171

(注1) σ_c : 圧縮応力、 σ_b : 曲げ応力、 τ : セン断応力

(注2) 金属キャスク構造規格のバスケットの規定 (供用状態 D) を適用。また、降伏応力 (S_y) は 217MPa である。

(3) 外筒

応力の種類	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa) (注1)
引張応力	31	282

(注1) 金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がない外筒は、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。

(4) 伝熱フィン

応力の種類	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa) (注1)
応力強さ	2	177

(注1) 金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がない伝熱フィンは、地震時に破断しないように引張強さ以下と設定。

第3表 地震時の密封境界部の横ずれ評価結果 (注1)

評価項目	計算値(N)	評価基準(N) (注2)
一次蓋の慣性力	1.98×10^5	1.50×10^6

(注1) 一次蓋ボルトの締付力による摩擦力

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).

地震時のトラニオンの構造健全性評価

1. 概要

本資料は、上部トラニオン及び下部トラニオンを対象として金属キャスク構造規格に基づき地震時の構造健全性について評価した結果についてまとめたものである。評価の詳細を以下に示す。

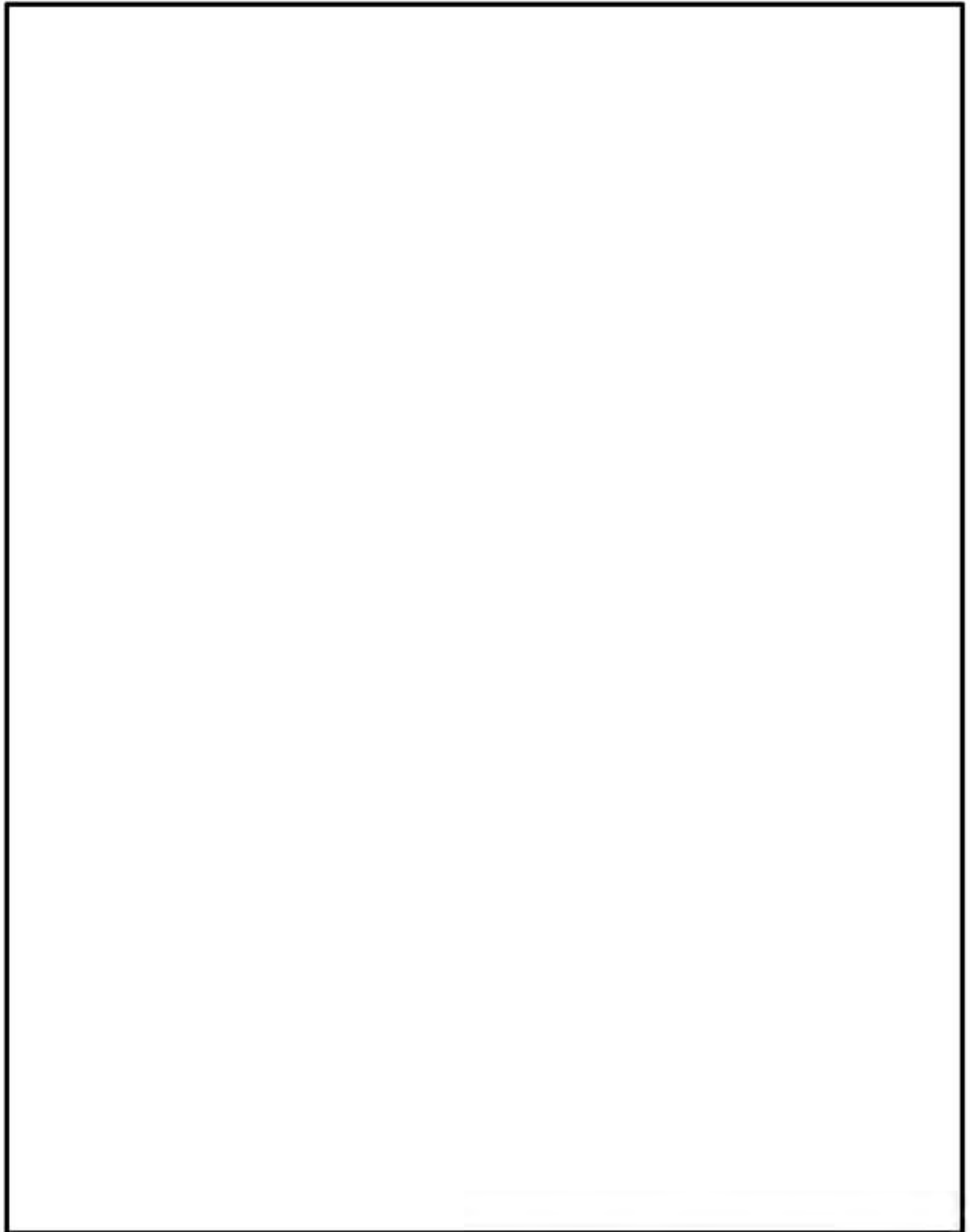
2. 地震時のトラニオンの構造健全性評価

2.1 固縛方法

MSF-76B 型の貯蔵時の固縛構造を別紙 1 - 1 図に示す。MSF-76B 型は、上部トラニオン（2箇所）、胴上部及び下部トラニオン（2箇所）により貯蔵架台等に固定される。

鉛直上方向の変位は、上部トラニオン固縛部と下部トラニオン固縛部により拘束され、鉛直下方向の変位は、胴上部と下部トラニオン固縛部により拘束される。

また、水平方向変位のうち、前後方向（MSF-76B 型長手方向）の変位は、下部トラニオン固縛部により拘束される。左右方向の変位は、上部トラニオン固縛部、胴上部及び下部トラニオン固縛部により拘束される。



別紙 1 - 1 図 貯蔵時の固縛構造（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法）

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。

2.2 荷重条件

MSF-76B 型の貯蔵中における質量は 135.4ton 以下である。また、MSF-76B 型に発生する加速度として、以下に示す値を設計条件として設定し、水平方向と鉛直方向の加速度による地震力が同時にトラニオンに作用するとして評価を行う。

- ・ 水平方向 : 2.35 G (2300Gal)
- ・ 鉛直方向 : 1.64 G (1600Gal) ※鉛直下方向には自重を考慮し 2.64 G とする。

上下トラニオン及び胴上部に作用する荷重は、別紙 1-1 図に示す荷重状態より、次式で与えられる。なお、上部側の左右方向の荷重算出においては、保守的に上部トラニオン又は胴上部のどちらかのみで支持されるものとして荷重を算出する。

次式により算出される各方向荷重を別紙 1-1 表及び別紙 1-2 表に示す。

$$F_{V1} = \frac{b}{a_1 + b} V_1$$

$$R_{V1} = \frac{a_1}{a_1 + b} V_1$$

$$F_{V2} = \frac{b}{a_2 + b} V_2$$

$$R_{V2} = \frac{a_2}{a_2 + b} V_2$$

$$R_H = H$$

$$F_{L1} = \frac{b}{a_1 + b} L$$

$$R_{L1} = \frac{a_1}{a_1 + b} L$$

$$F_{L2} = \frac{b}{a_2 + b} L$$

$$R_{L2} = \frac{a_2}{a_2 + b} L$$

ここで、 F_{V1} : 上部トラニオンに作用する上方向荷重 (N)

R_{V1} : 下部トラニオンに作用する上方向荷重 (N)

F_{V2} : 胴上部に作用する下方向荷重 (N)

R_{V2} : 下部トラニオンに作用する下方向荷重 (N)

R_{H1} : 下部トラニオンに作用する前後方向荷重 (N)

F_{L1} : 上部トラニオンに作用する左右方向荷重 (N)

R_{L1} : 下部トラニオンに作用する左右方向荷重 (N)

[上部側の左右方向荷重を上部トラニオンのみで支持した場合]

F_{L2} : 胴上部に作用する左右方向荷重 (N)

R_{L2} : 下部トラニオンに作用する左右方向荷重 (N)

[上部側の左右方向荷重を胴上部のみで支持した場合]

V_1 : 上方向慣性力 (N)

$$= 135.4 \times 10^3 \times 1.64 \times 9.80665 = 2.178 \times 10^6 \text{ N}$$

V_2 : 下方向慣性力 (N)

$$= 135.4 \times 10^3 \times 2.64 \times 9.80665 = 3.506 \times 10^6 \text{ N}$$

H : 前後方向慣性力 (N)

$$= 135.4 \times 10^3 \times 2.35 \times 9.80665 = 3.121 \times 10^6 \text{ N}$$

L : 左右方向慣性力 (N)

$$= 135.4 \times 10^3 \times 2.35 \times 9.80665 = 3.121 \times 10^6 \text{ N}$$

a_1 : 重心から上部トラニオン固縛位置までの距離 = mm

a_2 : 重心から胴上部固縛位置までの距離 = mm

b : 重心より下部トラニオン中心までの距離 = mm

別紙 1-1 表及び別紙 1-2 表に示す荷重のうち、左右方向荷重は、トラニオンに応力を生じさせないため、鉛直方向（上又は下）及び前後方向を合成した荷重が最も大きくなる組合せについて評価を実施する。この場合、別紙 1-1 表に示す下部トラニオンに作用する荷重が最も大きくなることから、下部トラニオンを代表して評価する。

下部トラニオンには、下方向荷重 R_{V2} と前後方向荷重 R_H の合成荷重 $F(N)$ が発生するため、当該荷重に対する強度評価を実施する。

$$F = \sqrt{R_{V2}^2 + R_H^2} / n$$

$$= 1.768 \times 10^6 \text{ (N)}$$

ここで、 n : 荷重を受けもつ下部トラニオンの数 = 2

別紙1-1表 トラニオン及び胴上部に作用する荷重

(水平方向加速度が前後方向に作用する場合)

(単位: $\times 10^6$ N)

荷重		上部トラニオン			胴上部			下部トラニオン		
		F_{V1}	F_{H1}	F_{L1}	F_{V2}	F_{H2}	F_{L2}	R_{V1}, R_{V2}	R_H	R_{L1}, R_{L2}
鉛直 方向	上 (1.64 G)	1.227	/	/	/	/	/	0.952	/	/
	下 (2.64 G)	/	/	/	1.847	/	/	1.660	/	/
水平 方向	前後 (2.35 G)	/	0	/	/	0	/	/	3.121	/
	左右 (0 G)	/	/	0	/	/	0	/	/	0

別紙1-2表 トラニオン及び胴上部に作用する荷重

(水平方向加速度が左右方向に作用する場合)

(単位: $\times 10^6$ N)

荷重		上部トラニオン			胴上部			下部トラニオン		
		F_{V1}	F_{H1}	F_{L1}	F_{V2}	F_{H2}	F_{L2}	R_{V1}, R_{V2}	R_H	R_{L1}, R_{L2}
鉛直 方向	上 (1.64 G)	1.227	/	/	/	/	/	0.952	/	/
	下 (2.64 G)	/	/	/	1.847	/	/	1.660	/	/
水平 方向	前後 (0 G)	/	0	/	/	0	/	/	0	/
	左右 (2.35 G)	/	/	1.758	/	/	1.644	/	/	1.478

2.3 評価基準

トラニオンの評価基準は、金属キャスト構造規格 供用状態 D の評価基準に基づき別紙 1-3 表のとおりとする。なお、トラニオンの設計温度は、145℃である。

別紙 1-3 表 トラニオンの評価基準

種類	一次応力	一次+二次応力
曲げ応力	$1.5\sigma_b^*$	—
せん断応力	$1.5\sigma_s^*$	—
応力強さ	$1.5f_t^*$	—
支圧応力	$1.5f_p^*$	

(注) $1.5\sigma_b^*$: 許容曲げ応力 (MPa)

$1.5\sigma_s^*$: 許容せん断応力 (MPa)

$1.5f_t^*$: 許容引張応力 (MPa)

$1.5f_p^*$: 許容支圧応力 (MPa)

— : トラニオンには作用しないため未記載としている。

2.4 構造強度評価

(1) トラニオン本体

応力計算モデル図を別紙 1-2 図に示す。



別紙 1-2 図 下部トラニオン本体の応力計算モデル図

a. 曲げ応力

別紙 1-2 図に示すトラニオンの断面に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{MC}{I}$$

$$M = FX$$

ここで、M : 曲げモーメント (N・mm)

F : 最大荷重 (N)

X : モーメントアーム (mm)

C : 中立軸からの距離 (mm)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$$

d_o : トラニオン外径 (mm)

d_i : トラニオン内径 (mm)

b. せん断応力

別紙 1-2 図に示すトラニオンの断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{F}{A}$$

ここで、A : 断面積 (mm²)

$$A = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)$$

c. 応力強さ

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ による応力強さ S (MPa) は次式で与えられる。

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

各断面の計算条件と計算結果を別紙 1-4 表に示す。別紙 1-4 表に示すとおり、下部トラニオン本体の応力は評価基準を満足する。

別紙1-4表 下部トラニオン本体の計算条件及び計算結果

評価断面	最大荷重 : F (N)	モーメント アーム : X (mm)	中立軸から の距離 : C (mm)	トラニオン 外径 : d_o (mm)	トラニオン 内径 : d_i (mm)
A-A	1.768×10^6	[Redacted]			
B-B	1.768×10^6				

評価断面	曲げ応力		せん断応力		応力強さ	
	σ_b (MPa)	評価基準 (MPa)	τ (MPa)	評価基準 (MPa)	S (MPa)	評価基準 (MPa)
A-A	126	591 ($1.5f_b^*$)	65	341 ($1.5f_s^*$)	182	591 ($1.5f_t^*$)
B-B	202	591 ($1.5f_b^*$)	41	341 ($1.5f_s^*$)	219	591 ($1.5f_t^*$)

(2) トラニオン接続部

a. 地震荷重による支圧応力（一次応力）

別紙 1 - 3 図に下部トラニオンに作用する荷重関係を示す。各荷重は以下の関係がある。

① Y 軸方向の力のつり合い

$$R_1 = F + R_2$$

ここで、

F : 下部トラニオン 1 個に作用する荷重 (N)

R₁ : 下部トラニオンに作用する反力 (N)

R₂ : 下部トラニオンに作用する反力 (N)

② 0 点回りのモーメントのつり合い

$$F \cdot L_1 - R_2 \cdot L_2 - (f_1 + f_2) \cdot \frac{d}{2} = 0$$

ここで、

f₁ : 下部トラニオンに作用する摩擦力 (N)

f₂ : 下部トラニオンに作用する摩擦力 (N)

L₁ : 0 点から荷重作用点までの距離 (mm)

L₂ : 0 点から反力 R₂ の作用点までの距離 (mm)

d : 下部トラニオン接続部の外径 (mm)

③ 摩擦力と垂直抗力の関係

$$f_1 = \mu R_1, f_2 = \mu R_2$$

ここで、

μ : 摩擦係数 (-)

①、②及び③の関係より荷重 F 作用時の反力 R₁ 及び R₂ は次式で与えられる。

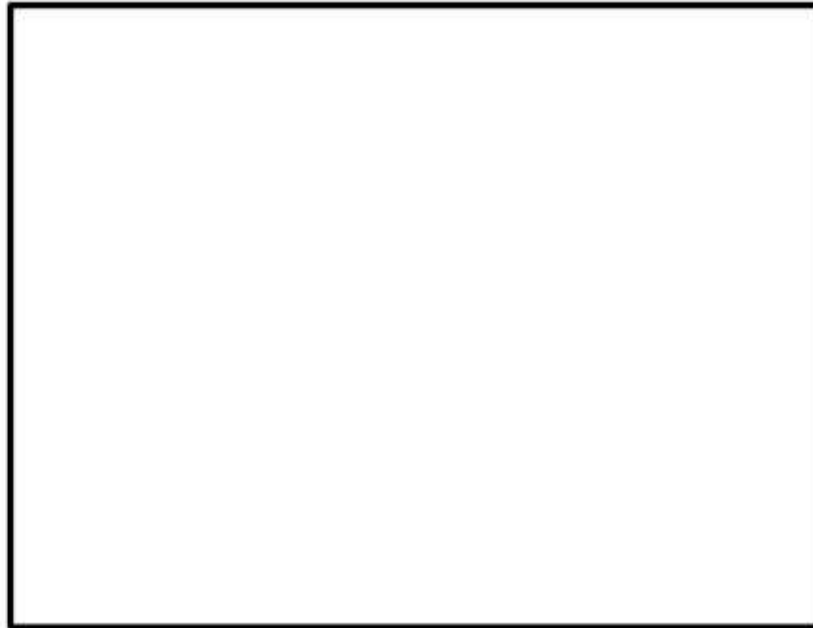
$$R_1 = \frac{FL_1 + \mu F(d/2) + FL_2}{\mu d + L_2}$$

$$R_2 = \frac{FL_1 - \mu F(d/2)}{\mu d + L_2}$$

地震荷重による支圧応力 σ_{P11} (MPa)、σ_{P12} (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_{P11} = R_1 / (d \cdot L_2 / 2)$$

$$\sigma_{P12} = R_2 / (d \cdot L_2 / 2)$$



別紙1-3図 トラニオン接続部の応力計算モデル

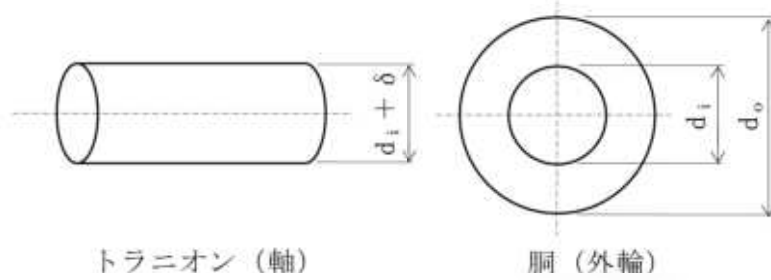
b. しまりばめ荷重による支圧応力（二次応力）

別紙1-4図にしまり嵌め荷重による支圧応力の算出モデルを示す。しまり嵌め荷重による支圧応力は次式により与えられる。

$$\sigma_{p2} = \frac{\alpha}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \cdot \frac{d_1^2}{d_o^2 - d_1^2}}$$

ここで、

- ν : ポアソン比 (-)
- α : しまり嵌め比 (δ/d_1)
- δ : 胴と下部トラニオンの締め代 (直径差)
- d_1 : 下部トラニオン接続部の外径 (mm)
- d_o : 下部トラニオン接続部の外輪外径 (mm)
- E : 下部トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
- E' : 胴の縦弾性係数 (MPa)



別紙1-4図 しまり嵌め荷重による支圧応力の計算モデル

c. 支圧応力 (一次+二次) 応力

支圧応力 σ_p (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_p = \text{MAX}[\sigma_{P11}, \sigma_{P12}] + \sigma_{P2}$$

支圧応力の計算条件と計算結果を別紙1-5表に示す。別紙1-5表より、下部トラニオン接続部に発生する応力は評価基準を満足する。

別紙1-5表 下部トラニオン接続部の計算条件及び計算結果

評価領域	下部トラニオンに作用する荷重 : F (N)	0点から荷重作用点までの距離 : L ₁ (mm)	0点から反力 R ₂ の作用点までの距離 : L ₂ (mm)	下部トラニオン接続部の外径 : d (mm)	摩擦係数 : μ (-)
A	1.768 × 10 ⁶				0.35
B	1.768 × 10 ⁶				0.35

評価領域	下部トラニオンに作用する反力 : R ₁ 又は R ₂ (N)	地震荷重による支圧応力 (一次応力) : σ _{P11} 又は σ _{P12} (MPa)	評価基準 ^(注1) : 1.5f _p * (MPa)
A	3.044 × 10 ⁶	150	410
B	1.276 × 10 ⁶	63	

(注1) 胴の方が基準値が小さいため、胴の基準値を示す。

評価領域	ポアソン比 : ν (-)	胴と下部トラニオンの縮め代 : δ _δ (mm)	下部トラニオン接続部の外径 : d ₁ (mm)	下部トラニオン接続部の外輪外径 : d ₂ (mm)
A 及び B	0.3			

(注2) d₂の大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きい d₁の とした。

評価領域	下部トラニオンの縦弾性係数 : E (MPa)	胴の縦弾性係数 : E' (MPa)	しまり嵌め荷重による支圧応力 (二次応力) : σ _{P2} (MPa)
A 及び B	1.88 × 10 ⁵	1.95 × 10 ⁵	43

評価領域	支圧応力 (一次+二次応力)	
	σ _P (MPa)	評価基準 ^(注3) : 1.5f _p * (MPa)
A	193	410
B	106	

(注3) 胴の方が許容応力は小さいため、胴の評価基準値を示す。

地震時の特定兼用キャスクの機能維持評価

1. 概要

本資料は、特定兼用キャスク本体を対象として金属キャスク構造規格⁽¹⁾に基づき地震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。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（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して実施した。評価の詳細を以下に示す。

2. 地震時の機能維持評価

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として、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の地震時の慣性力に対する応力評価を応力評価式により実施した。また、密封境界部の評価として、一次蓋金属ガスケットの横ずれによりリークパスが生じることによる漏えい有無を確認するために、横ずれ荷重の評価式により一次蓋の横ずれ有無を評価した。

2.1 固縛方法

MSF-76B 型の貯蔵時の固縛構造は別紙 1 - 1 図に示すとおりである。

2.2 荷重条件

MSF-76B 型に発生する加速度として、以下に示す値を設計条件として設定し、水平方向と鉛直方向の加速度による地震力（別紙 2 - 1 図参照）が同時に特定兼用キャスクに作用するとして評価を行う。

- ・ 水平方向 : 2.35 G (2300Gal)
- ・ 鉛直方向 : 1.64 G (1600Gal) ※鉛直下方向には自重を考慮し 2.64 G とする。

また、地震力以外の荷重として、供用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て評価する。



別紙2-1図 地震時の評価用加速度

2.3 評価基準

評価対象とする部材のうち、密封境界部（一次蓋密封シール部及び一次蓋ボルト）の評価基準は金属キャスク構造規格の密封シール部、蓋ボルトの評価基準の考え方を基本として、密封境界部が弾性範囲となるように発生応力が降伏応力以下とする。バスケット（バスケットプレート）は、金属キャスク構造規格のバスケットの規定（供用状態 D）を適用する。外筒及び伝熱フィンは金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がないが、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、地震時に破断しないことを確認する。

また、一次蓋の横ずれの有無を評価するための評価基準は、地震時に一次蓋に作用する慣性力に対して、一次蓋ボルトの締付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。

(1) 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

P_L : 一次局部膜応力

P_b : 一次曲げ応力

Q : 二次応力

S_y : 降伏応力

(2) 一次蓋ボルト

$$(\text{平均引張応力}) \leq S_y$$

$$(\text{平均引張応力} + \text{曲げ応力}) \leq S_y$$

(3) バスケット

$$P_m \leq \frac{2}{3} S_u$$

$$P_m + P_b \leq S_u$$

$$\varepsilon \leq 1.2 S_u$$

ここで、

τ : 平均せん断応力

S_0 : 設計引張強さ

S_a : 設計応力強さ

(4) 外筒

- a. 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t^* の 1.5 倍を超えないこと。

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

ここで、

$F^* = \text{MIN}[0.7S_0, 1.2S_y]$ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)

$F^* = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_0, 1.2S_y(\text{RT})]$ (オーステナイト系ステンレス鋼)

- b. 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c^* の 1.5 倍を超えないこと。

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

- c. 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s^* の 1.5 倍を超えないこと。

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

- d. 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b^* の 1.5 倍を超えないこと。

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

(5) 伝熱フィン

応力強さ $\leq S_0$

(6) 一次蓋の横ずれ

一次蓋に作用する慣性力 \leq 一次蓋ボルトの締付力により一次蓋に作用する摩擦力

2.4 応力評価

(1) 密封境界部

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

a. 一次蓋密封シール部

応力計算モデル図を別紙2-2図に示す。地震時の一次蓋密封シール部には、内圧（蓋間圧力と胴内空間の圧力差）、及び地震時の慣性力による一次膜＋一次曲げ応力（ σ_r 、 σ_θ 、 σ_z ）が作用する。一次膜＋一次曲げ応力は以下の式で表され、式中の添え字の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。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ことから、考慮しない。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \\ \sigma_\theta &= \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta2} \\ \sigma_z &= \sigma_{z1} + \sigma_{z2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$



別紙2-2図 地震時の一次蓋密封シール部の応力計算モデル図

(a) 内圧による応力

別紙2-2図に示すとおり、一次蓋を周辺固定の円板とみなし、特定兼用キャスクの内圧Pが分布荷重として作用するとした場合、一次膜+一次曲げ応力(σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 、 σ_{z1})は、次式⁽²⁾で計算される。内圧により発生する一次蓋密封シール部($r=a$)の応力計算条件及び結果を別紙2-1表に示す。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= \frac{3Pa^2}{8t_0^2} \left\{ (1+\nu) - (3+\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \\ \sigma_{\theta1} &= \frac{3Pa^2}{8t_0^2} \left\{ (1+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \\ \sigma_{z1} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- P : 一次蓋-二次蓋間空間の圧力(MPa)
※胴内空間は負圧のため、保守的に胴内圧力は0 MPaとする。
- a : 半径(mm)
- r : 蓋中心からの距離(mm)
- t₀ : 一次蓋密封シール部の板厚(mm)
- ν : ポアソン比(-)

別紙2-1表 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及び結果

項目	一次蓋-二次蓋間空間の圧力 : P (MPa)	半径 : a (mm)	一次蓋密封シール部の板厚 : t ₀ (mm)	ポアソン比 : ν (-)
数値				0.3

項目	一次膜+一次曲げ応力		
	σ_{r1} (MPa)	$\sigma_{\theta1}$ (MPa)	σ_{z1} (MPa)
数値	24	7	0

(注1)最高使用圧力とした。

(注2)保守的にボルトピッチ円半径とした。

(注3)一次蓋端部の板厚とした。

(b) 慣性力による応力

別紙 2-2 図に示すとおり、一次蓋を周辺固定の円板とみなし、地震時の慣性力 w が分布荷重として作用するとした場合、一次膜+一次曲げ応力 (σ_{r2} 、 $\sigma_{\theta 2}$ 、 σ_{z2}) は、次式⁽²⁾で計算される。地震時の慣性力により発生する一次蓋密封シール部 ($r=a$) の応力計算条件及び結果を別紙 2-2 表に示す。なお、地震時の慣性力のうち、鉛直方向（一次蓋半径方向）の慣性力については、一次蓋密封シール部に応力は発生しないため、評価は、水平方向（一次蓋板厚方向）の慣性力のみ考慮する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r2} &= \frac{3wa^2}{8t_o^2} \left\{ (1+\nu) - (3+\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \\ \sigma_{\theta 2} &= \frac{3wa^2}{8t_o^2} \left\{ (1+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\} \\ \sigma_{z2} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.3)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- w : 一次蓋に作用する慣性力 (N/mm²)
 $w = \rho \times t_i \times G_H \times g$
- ρ : 一次蓋の密度 (kg/mm³)
- t_i : 一次蓋中央部の板厚 (mm)
- G_H : 水平方向加速度 (G)
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- a : 半径 (mm)
- r : 蓋中心からの距離 (mm)
- t_o : 一次蓋密封シール部の板厚 (mm)
- ν : ポアソン比 (-)

別紙2-2表 慣性力により発生する一次蓋密封シール部の応力計算条件及び結果

項目	一次蓋の 密度 : ρ (kg/mm ³)	一次蓋中央 部の板厚 : t_1 (mm)	水平方向 加速度 : G_H (G)	半径 : a (mm)	一次蓋密封 シール部の板厚 : t_0 (mm)
数値	7.85×10^{-6}		2.35		

項目	一次蓋に作用 する慣性力 : w (N/mm ²)	ポアソン比 : ν (-)	一次膜+一次曲げ応力		
			σ_{r2} (MPa)	$\sigma_{\theta 2}$ (MPa)	σ_{z2} (MPa)
数値	0.039	0.3	3	1	0

(注1) 保守的にボルトピッチ円半径とした。

(注2) 一次蓋端部の板厚とした。

(c) 一次蓋密封シール部に発生する応力

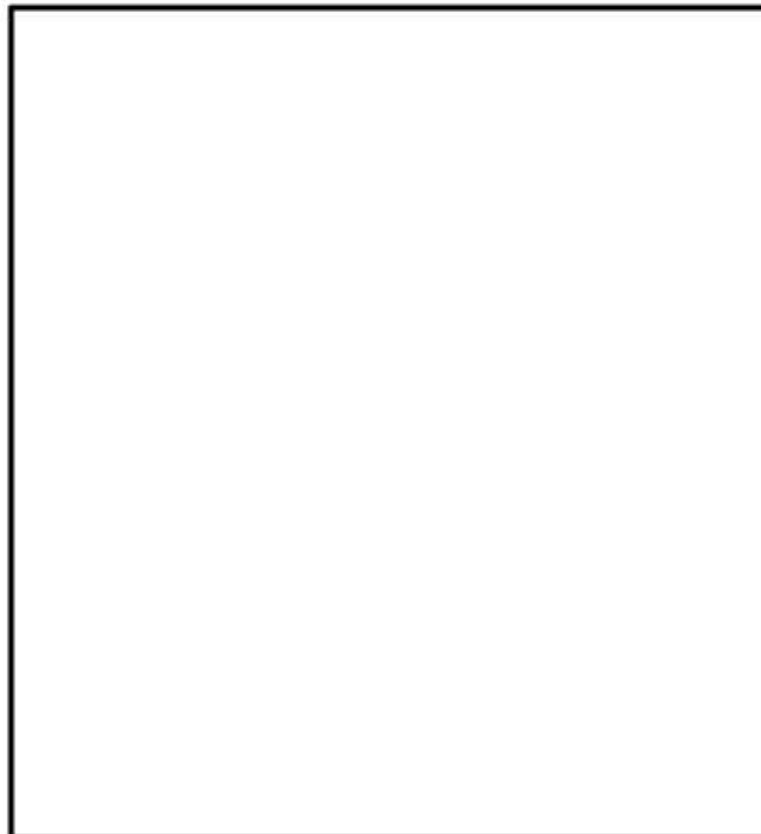
別紙2-1表、及び別紙2-2表に基づき、(2.1)式を用いて一次蓋密封シール部に発生する応力を算出する。一次蓋密封シール部の応力計算条件及び結果を別紙2-3表に示す。別紙2-3表に示すとおり、一次蓋密封シール部に発生する応力は評価基準以下である。

別紙2-3表 一次蓋密封シール部に発生する応力の計算条件及び結果

項目	一次膜+一次曲げ応力			評価基準 : S_y (MPa)
	σ_r (MPa)	σ_{θ} (MPa)	σ_z (MPa)	
数値	27	8	0	185

b. 一次蓋ボルト

応力計算モデル図を別紙2-3図に示す。地震時の一次蓋ボルトには、蓋締付時のボルト荷重と地震時の慣性力による平均引張応力 σ_n 及び曲げ応力 σ_b が作用する。ここで、内圧（蓋間空間と胴内空間の圧力差）は、一次蓋ボルトの平均引張応力及び曲げ応力を減少させることになるため考慮しない。なお、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。



別紙2-3図 地震時の一次蓋ボルトの応力計算モデル

(a) 平均引張応力

地震時に一次蓋ボルトに作用する平均引張応力 σ_n は、以下式に示すとおり、一次蓋締付時のボルト荷重による平均引張応力 σ_{n1} と水平方向（ボルト軸方向）慣性力による平均引張応力 σ_{n2} の合計値で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_{n1} + \sigma_{n2} \\ \sigma_{n1} &= p_1 \\ \sigma_{n2} &= \frac{m_1 \cdot G_H \cdot g}{A \cdot n} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.4)$$

ここで、

- p_1 : ボルト初期締付力 (MPa)
- m_1 : 一次蓋質量 (kg)
- G_H : 水平方向加速度 (G)
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- A : ボルト断面積 (mm²)

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

- d : ボルトねじ部谷径 (mm)
- n : ボルト本数 (-)

別紙 2 - 4 表に一次蓋ボルトに作用する平均引張応力の計算条件及び結果を示す。

別紙 2 - 4 表 一次蓋ボルトに作用する平均引張応力の計算条件及び結果

項目	ボルト 初期締付力 : p_1 (MPa)	一次蓋 質量 : m_1 (kg)	水平方向 加速度 : G_H (G)	ボルト ねじ部谷径 : d (mm)	ボルト 断面積 : A (mm ²)
数値			2.35		

項目	ボルト 本数 : n (-)	平均引張応力 (MPa)		
		σ_{n1}	σ_{n2}	σ_n
数値		200	3	203

(b) 曲げ応力

地震時に一次蓋ボルトには鉛直方向（ボルト径方向）慣性力による曲げ応力 σ_b が作用する。曲げ応力は次式で求められる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = m_1 \cdot G_v \cdot g \cdot L / n$$

m_1 : 一次蓋質量 (kg)

G_v : 鉛直方向加速度 (G) ※自重を考慮

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

L : ボルト首部長さ (mm)

n : ボルト本数 (-)

Z : ボルト断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{\pi d^3}{32}$$

d : ボルトねじ部谷径 (mm)

別紙 2 - 5 表に一次蓋ボルトに作用する曲げ応力の計算条件及び結果を示す。

別紙2-5表 一次蓋ボルトに作用する曲げ応力の計算条件及び結果

項目	一次蓋質量 : m_1 (kg)	鉛直方向 加速度 : G_v (G)	ボルト 首部長さ : L (mm)	曲げ モーメント : M (N·mm)
数値		2.64		

項目	ボルト 本数 : n (-)	ボルト ねじ部谷径 : d (mm)	ボルト 断面係数 : Z (mm ³)	曲げ応力 : σ_b (MPa)
数値				62

(c) 一次蓋ボルトの応力評価

地震時の一次蓋ボルトの応力評価結果を別紙2-6表に示す。別紙2-6表より、一次蓋ボルトに作用する応力は評価基準を満足する。

別紙2-6表 一次蓋ボルトの応力評価結果

項目	発生応力 (MPa)		評価基準 : S_y (MPa)
	σ_n	$\sigma_n + \sigma_b$	
数値	203	265	846

(2) バスケット

a. 水平方向地震力に対する応力評価

バスケットは、頭部側と底部側で同様な構造であり、一次蓋下面又は胴底面に接触した状態で水平方向慣性力が作用する。接触面のバスケットプレートには、バスケットプレートによる慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_H \cdot g}{A_1} \dots \dots \dots (2.6)$$

ここで、

W_b : バスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材の合計質量 (kg)

G_H : 水平方向加速度 (G)

g : 重力加速度 (m/s^2)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

$$A_1 = b_A \cdot L \cdot n_A + b_B \cdot L \cdot n_B$$

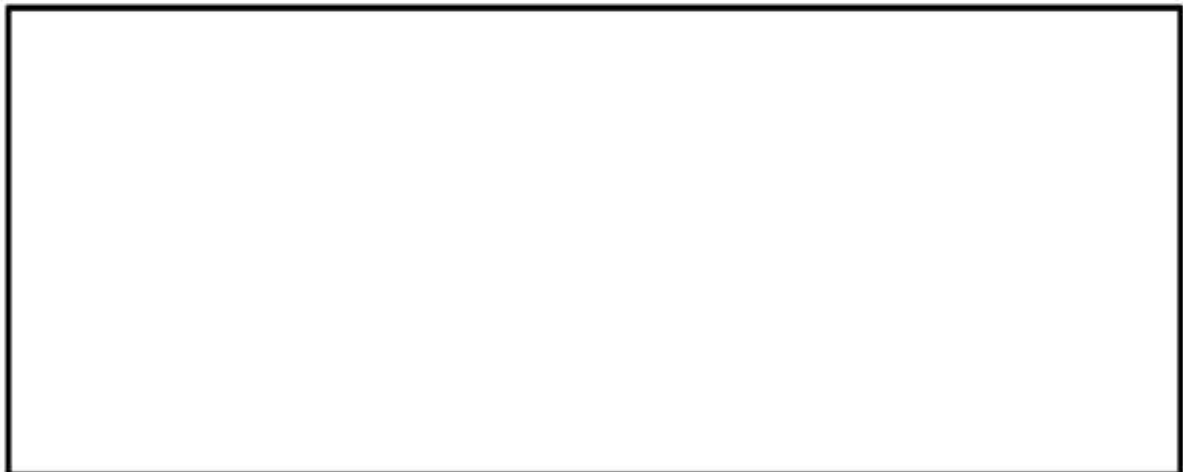
b_A : バスケットプレート A 幅 (mm)

b_B : バスケットプレート B 幅 (mm)

L : バスケットプレート長さ (mm)

n_A : 胴に接触するバスケットプレート A L 部 (別紙 2-4 図参照) の個数 (-)

n_B : 胴に接触するバスケットプレート B L 部 (別紙 2-4 図参照) の個数 (-)



別紙 2-4 図 バスケットプレートの応力計算モデル

計算条件と計算結果を別紙2-7表に示す。別紙2-7表に示すように、バスケットに作用する応力は、評価基準を満足する。また、バスケットに作用する応力は降伏応力(217 MPa)より低いので、バスケットプレートは塑性変形しない。

別紙2-7表 バスケットプレートの応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット 合計質量 : W_b (kg)	水平方向 加速度 : G_H (G)
数値	9100	2.35

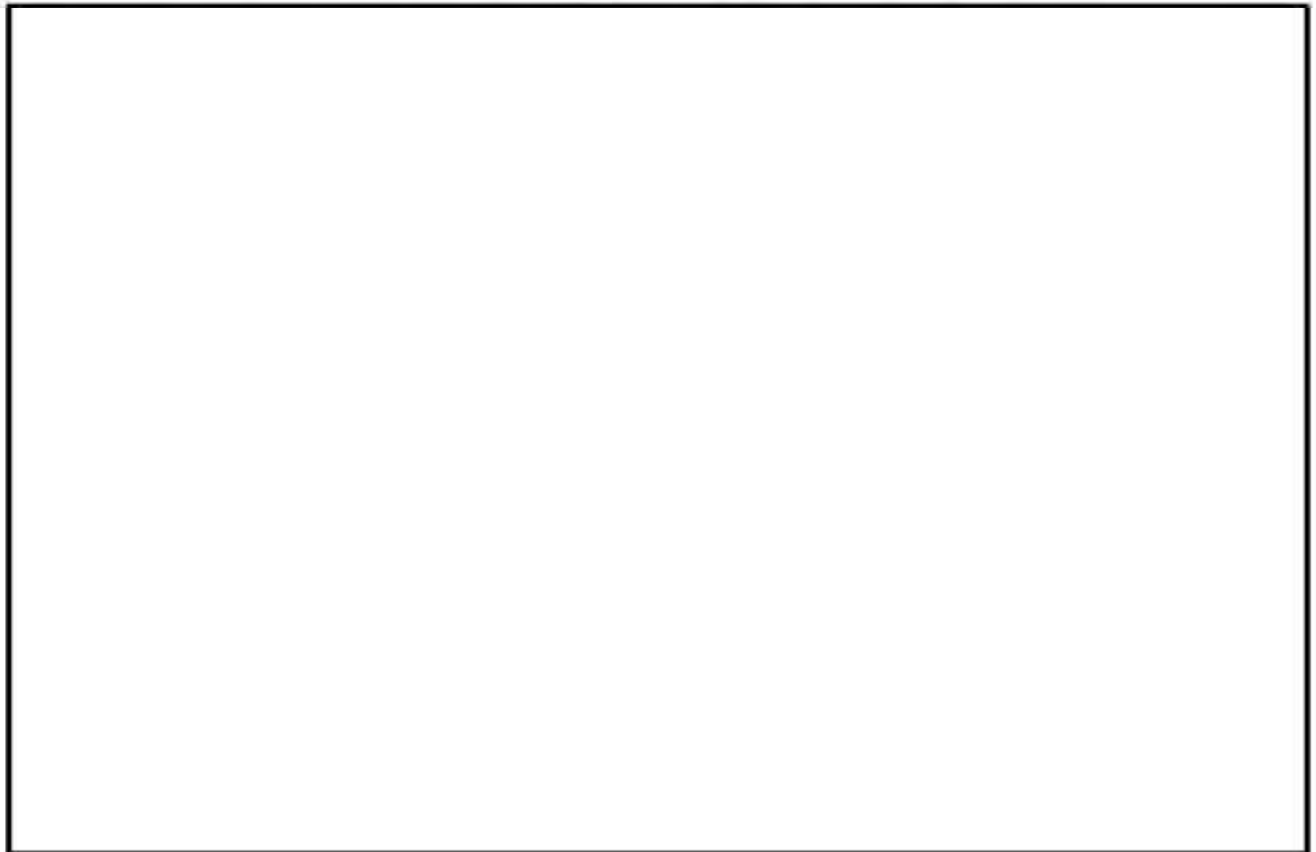
項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート 全厚さ : b (mm)	バスケット プレート 長さ : L (mm)	胴に接触す るバスケット プレート L部の個数 : n (-)	バスケット プレートと胴 の接触面積 : A_1 (mm ²)
数値	A				
	B				

項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	評価基準 : $2/3S_o$ (MPa)
数値	A	2	280
	B	2	

b. 鉛直方向地震力に対する応力評価

(a) バスケットプレート縦板

バスケットに鉛直方向地震力が作用した場合、別紙2-5図に示すように、バスケットプレート縦板切欠部に、領域Ⅰの範囲にあるバスケットプレート、バスケットサポート及び燃料集合体の自重による慣性力、並びに領域Ⅱのバスケットプレートの自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa)が生じる。



別紙2-5図 バスケットプレート縦板の応力計算モデル

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \cdot N} G_V \cdot g \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

ここで、

W_I : 領域Ⅰのバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 (kg)

W_{II} : 領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

N_f : 領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数 (体)

G_V : 鉛直方向加速度 (G) ※自重を考慮

- g : 重力加速度 (m/s^2)
N : バスケットプレートの数 (段)
A : 断面積 (mm^2)
A = bh
b : バスケットプレート幅 (mm)
h : バスケットプレート高さ (mm)



別紙 2-6 図 バスケットプレートの断面形状 (圧縮による膜応力評価)

計算条件と計算結果を別紙 2-8 表に示す。別紙 2-8 表に示すように、バスケットに作用する応力は、評価基準を満足する。また、バスケットに作用する応力は降伏応力 (217 MPa) より低いので、バスケットプレートは塑性変形しない。

別紙2-8表 バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 : W_1 (kg)	領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数 : N_1 (体)	領域Ⅰのバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 ^(注1) : W_I (kg)	領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 ^(注2) : W_{II} (kg)	鉛直方向加速度 : G_v (G)
数値					2.64

項目	バスケットプレート幅 : b (mm)	バスケットプレート高さ : h (mm)	断面積 : A (mm ²)
数値			

項目	バスケットプレートの数 : N (段)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	評価基準 : $2/3S_u$ (MPa)
数値		7	280

(注1) 領域Ⅰのバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は、以下のとおりである。

バスケットプレートの質量
 中性子吸収材の質量
 バスケットサポートの質量
 燃料集合体の合計質量

--

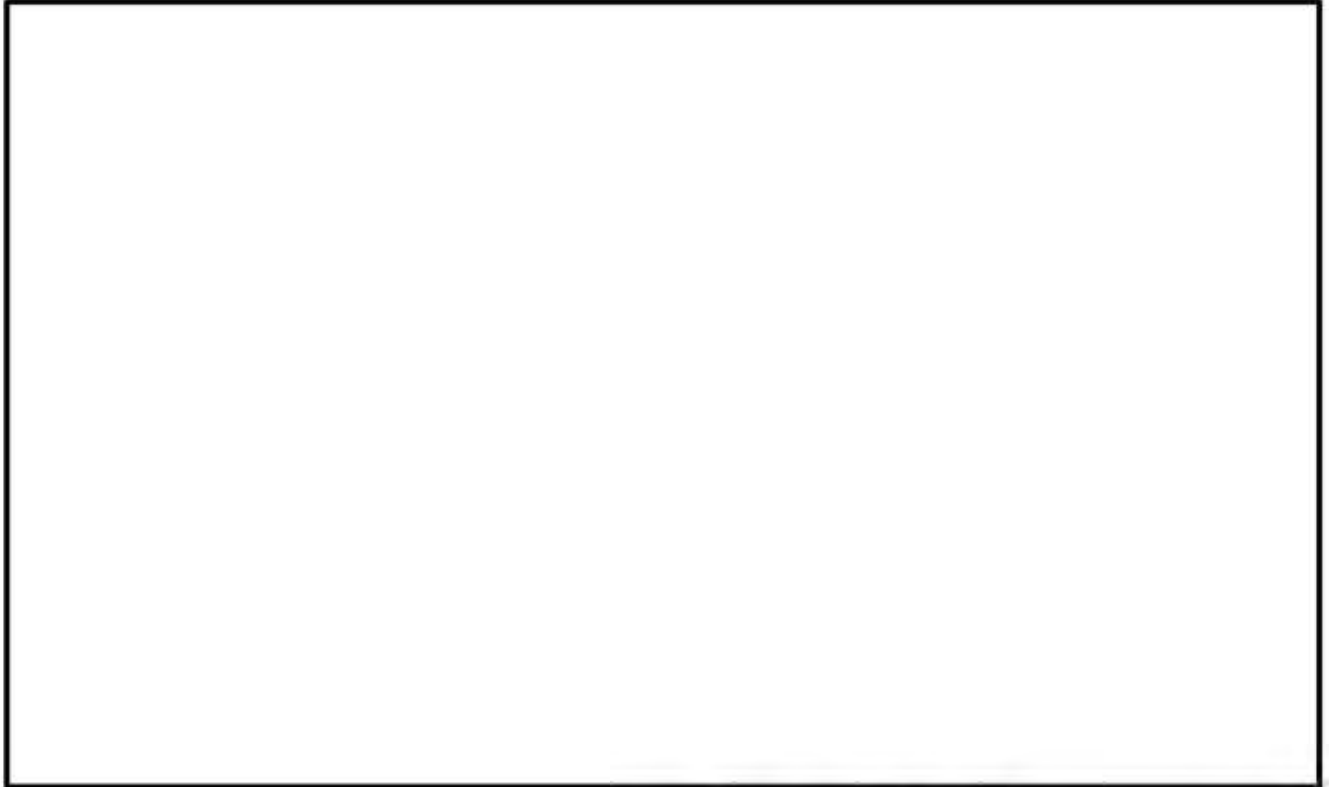
(注2) 領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量
 中性子吸収材の質量

--

(b) バスケットプレート横板

バスケットに鉛直方向地震力が作用した場合、バスケットプレート横板切欠部には、別紙 2-7 図に示すように、バスケットプレート、中性子吸収材及び燃料集合体の自重による慣性力により曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。



別紙 2-7 図 バスケットプレート横板の応力計算モデル

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \dots \dots \dots (2.9)$$

ここで、

- σ_b : 曲げ応力 (MPa)
- τ : せん断応力 (MPa)
- M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = \frac{w \cdot l^2}{12} G_v \cdot g$$

Z : 断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{1}{6} hb^2$$

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

A : 断面積 (mm²)

$$A = bh$$

F : せん断力 (N)

$$F = w \times \ell / 2 \times G_v \cdot g$$

w : 分布荷重 (kg/mm)

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N}$$

ℓ : バスケットセルの内幅 (mm)

G_v : 鉛直方向加速度 (G) ※自重を考慮

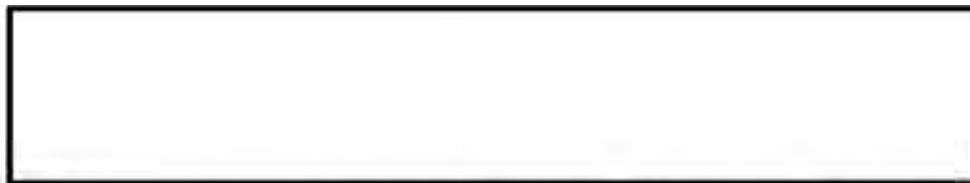
W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

W_b : バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

N : バスケットプレートの数 (段)

h : バスケットプレート高さ (mm)

b : バスケットプレート幅 (mm)



別紙 2-8 図 バスケットプレートの断面形状 (曲げ及びせん断応力評価)

計算条件と計算結果を別紙2-9表に示す。別紙2-9表に示すように、バスケットに作用する応力は、評価基準を満足する。また、バスケットに作用する応力は降伏応力(217 MPa)より低いので、バスケットプレートは塑性変形しない。

別紙2-9表 バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 : W_f (kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b (kg)	バスケットプレートの数 : N (段)	バスケットセルの内幅 : l (mm)	分布荷重 : w (kg/mm)	鉛直方向加速度 : G_v (G)
数値						2.64

項目	バスケットプレート高さ : h (mm)	バスケットプレート幅 : b (mm)
数値		

項目	曲げモーメント : M (N·mm)	断面係数 : Z (mm ³)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	評価基準 : S_o (MPa)
数値			10	421

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm ²)	せん断応力 : τ (MPa)	評価基準 : $1.2S_u$ (MPa)
数値			1	171

(3)外筒

地震時の外筒の応力計算は、応力評価式により行う。外筒の応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

地震時の慣性力が作用した場合、外筒には側部中性子遮蔽材の慣性力が鉛直方向及び水平方向（キャスク径方向）に作用するため、外筒には側部中性子遮蔽材充填部圧力（径方向）及び側部中性子遮蔽材の慣性力が作用する。外筒の応力計算モデルを別紙2-9図に示す。なお、水平方向（キャスク軸方向）の慣性力については、外筒が特定兼用キャスク上部端板部と下部端板部により固定されているため、有意な応力は発生しないことから、評価を省略する。

最大応力は外筒中央部で発生し、外筒中央部に発生する周方向応力 σ_{θ} は、薄肉円筒が内圧を受けるときの応力評価式を用いて、以下のとおり表せる⁽²⁾。

$$\sigma_{\theta} = \frac{q \cdot r_m}{t} \dots \dots \dots (2.10)$$

ここで、

q : 等分布荷重(MPa)

$$q = p_R + p_V$$

p_R : 側部中性子遮蔽材充填部圧力（径方向）(MPa)

p_V : 地震時の慣性力により作用する側部中性子遮蔽材の面圧(MPa)

$$p_V = \rho_{\#} \cdot G \cdot g \cdot t_R$$

ρ_# : 側部中性子遮蔽材の密度(kg/mm³)

G : 負荷加速度(G)

$$G = \sqrt{G_H^2 + G_V^2}$$

G_H : 水平方向地震加速度 (G)

G_V : 鉛直方向地震加速度 (G) ※自重を考慮

g : 重力加速度(m/s²)

t_R : 側部中性子遮蔽材の厚さ(mm)

r_m : 外筒平均半径(mm)

t : 外筒板厚(mm)



別紙 2-9 図 外筒の応力計算モデル

計算条件と計算結果を別紙 2-10 表に示す。別紙 2-10 表に示すとおり、外筒に発生する応力は評価基準を満足する。

別紙 2-10 表 地震時の外筒の応力計算条件及び計算結果

項目	側部中性子遮蔽材 充填部圧力 : p_R (MPa)	側部中性子遮蔽材の 密度 : ρ_R (kg/mm ³)	水平方向 地震加速度 : G_H (G)	鉛直方向 地震加速度 : G_V (G)	側部中性子遮蔽材の 厚さ : t_R (mm)
数値	0.48	1.67×10^{-6}	2.35	2.64	<input type="text"/>

項目	外筒 平均半径 : r_m (mm)	外筒板厚 : t (mm)	周方向応力 : σ_θ (MPa)	評価基準 : $1.5f_t^*$ (MPa)
数値	<input type="text"/>	<input type="text"/>	31	282

(4) 伝熱フィン

地震時の伝熱フィンの応力計算は、応力評価式により行う。伝熱フィンの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. 水平方向地震力に対する応力評価

水平方向地震力（軸方向）により、伝熱フィンの胴側取付部において伝熱フィン及び中性子遮蔽材の自重による慣性力が作用し、以下の式に示すせん断応力 τ (MPa) が生じる。

なお、別紙 2-10 図のとおり、

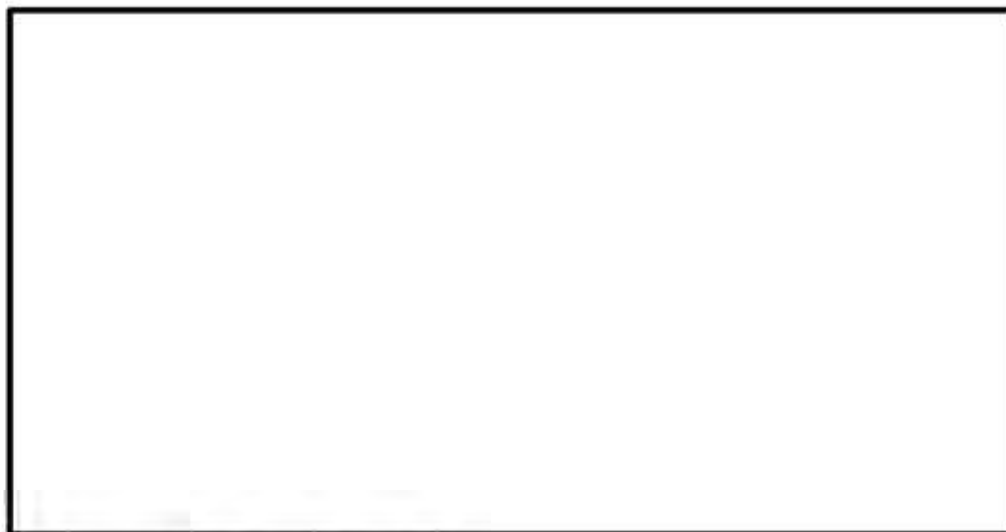
せん断応力 τ の算出式を以下に示す。

$$\tau = \frac{(W_1 + W_2)G_H \cdot g}{A} \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

$$S = 2\tau \quad \dots \dots \dots (2.12)$$

ここで、

- τ : せん断応力 (MPa)
- S : 応力強さ (MPa)
- W_1 : 伝熱フィンの軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)
- W_2 : 中性子遮蔽材の軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)
- G_H : 水平方向地震加速度 (G)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- A : 伝熱フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積 (mm²/mm)



別紙 2-10 図 伝熱フィン取付部の応力計算モデル

計算条件と計算結果を別紙2-11表に示す。別紙2-11表に示すとおり、伝熱フィンに発生する応力は評価基準を満足する。

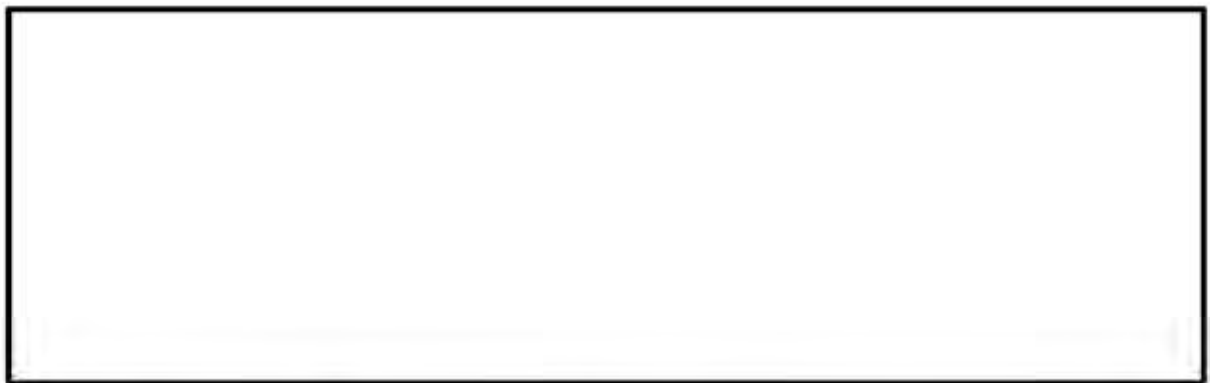
別紙2-11表 伝熱フィン取付部計算条件及び計算結果

伝熱フィンの 軸方向単位長さ 当たり重量 : W_1 (kg/mm)	中性子遮蔽材の 軸方向単位長さ 当たり重量 : W_2 (kg/mm)	水平方向 地震加速度 : G_H (G)	伝熱フィン溶接部 のど部の軸方向単位長さ 当たりの面積 : A (mm ² /mm)
		2.35	

せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	評価基準 : S_0 (MPa)
1	2	177

b. 鉛直方向地震力に対する応力評価

鉛直方向地震力に対して、伝熱フィンには鉛直上側に位置する中性子遮蔽材と伝熱フィンの自重による慣性力が作用するが、伝熱フィンは鉛直下側の中性子遮蔽材により支えられるため、伝熱フィンへの影響はない（別紙2-11図参照）。



別紙2-11図 鉛直方向地震力により伝熱フィンに作用する荷重

2.5 一次蓋の横ずれ評価

地震時に一次蓋に作用する慣性力 F は次式で与えられる。

$$F = MgG \quad \dots \dots \dots (2.13)$$

ここで、

M : 一次蓋質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

G : 負荷加速度 (G)

$$G = \sqrt{G_H^2 + G_V^2}$$

G_H : 水平方向加速度 (G)

G_V : 鉛直方向加速度 (G) ※自重を考慮

計算条件と計算結果を別紙 2-12 表に示す。

別紙 2-12 表 一次蓋慣性力計算条件及び計算結果

項目	一次蓋質量 : M (kg)	重力加速度 : g (m/s^2)	水平方向 加速度 : G_H (G)	鉛直方向 加速度 : G_V (G)	一次蓋慣性力 : F (N)
数値	<input type="text"/>	9.80665	2.35	2.64	1.98×10^5

摩擦力 R は次式で与えられる。

$$R = N\mu$$

ここで、

N : 一次蓋の締付力 (N)

$$N = N_0 A n$$

N_0 : 一次蓋ボルトの初期締付力 (MPa)

A : ボルトの断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

d : ボルト首部直径 (mm)

n : ボルト本数 (-)

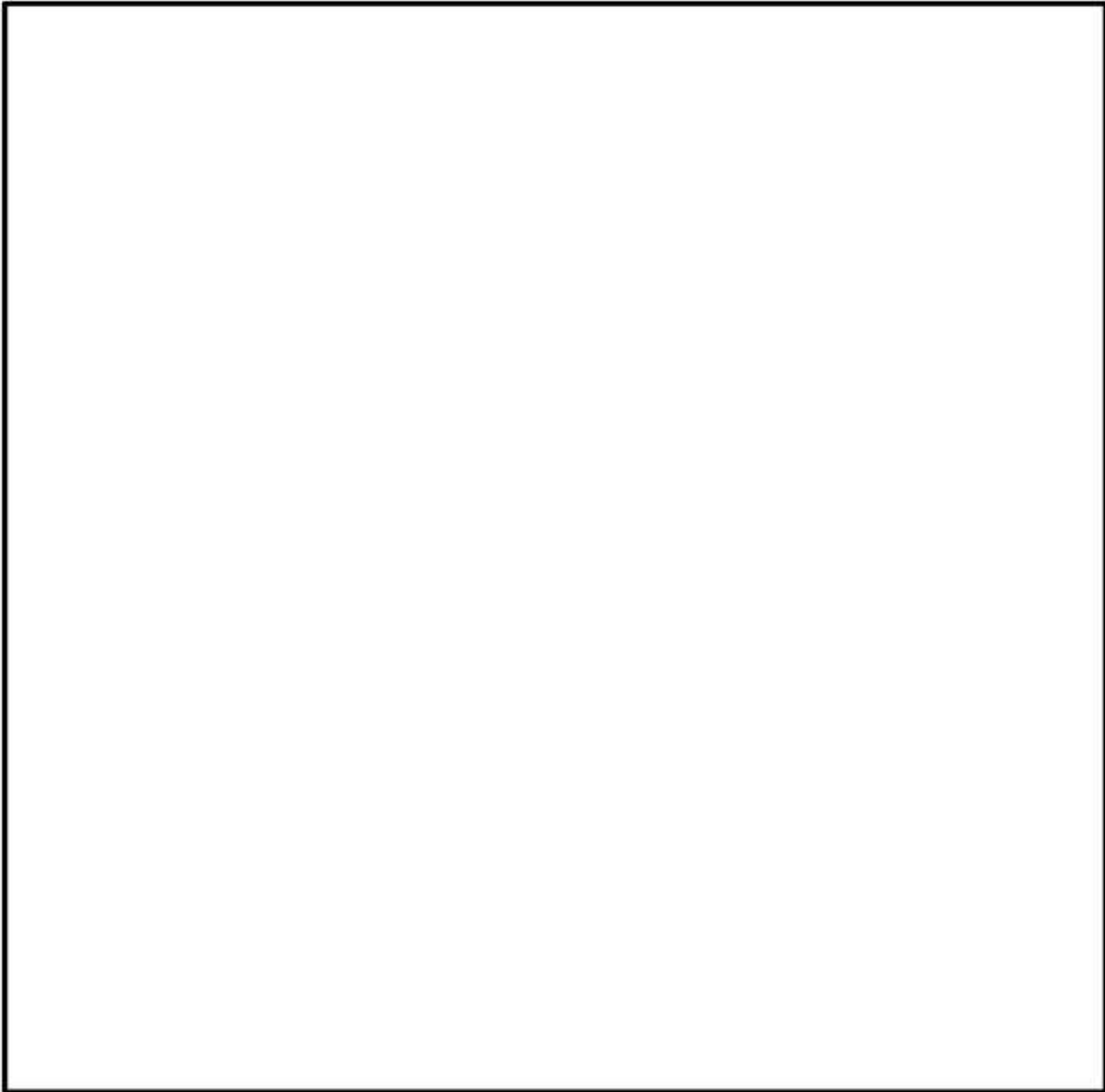
μ : 摩擦係数 (-)

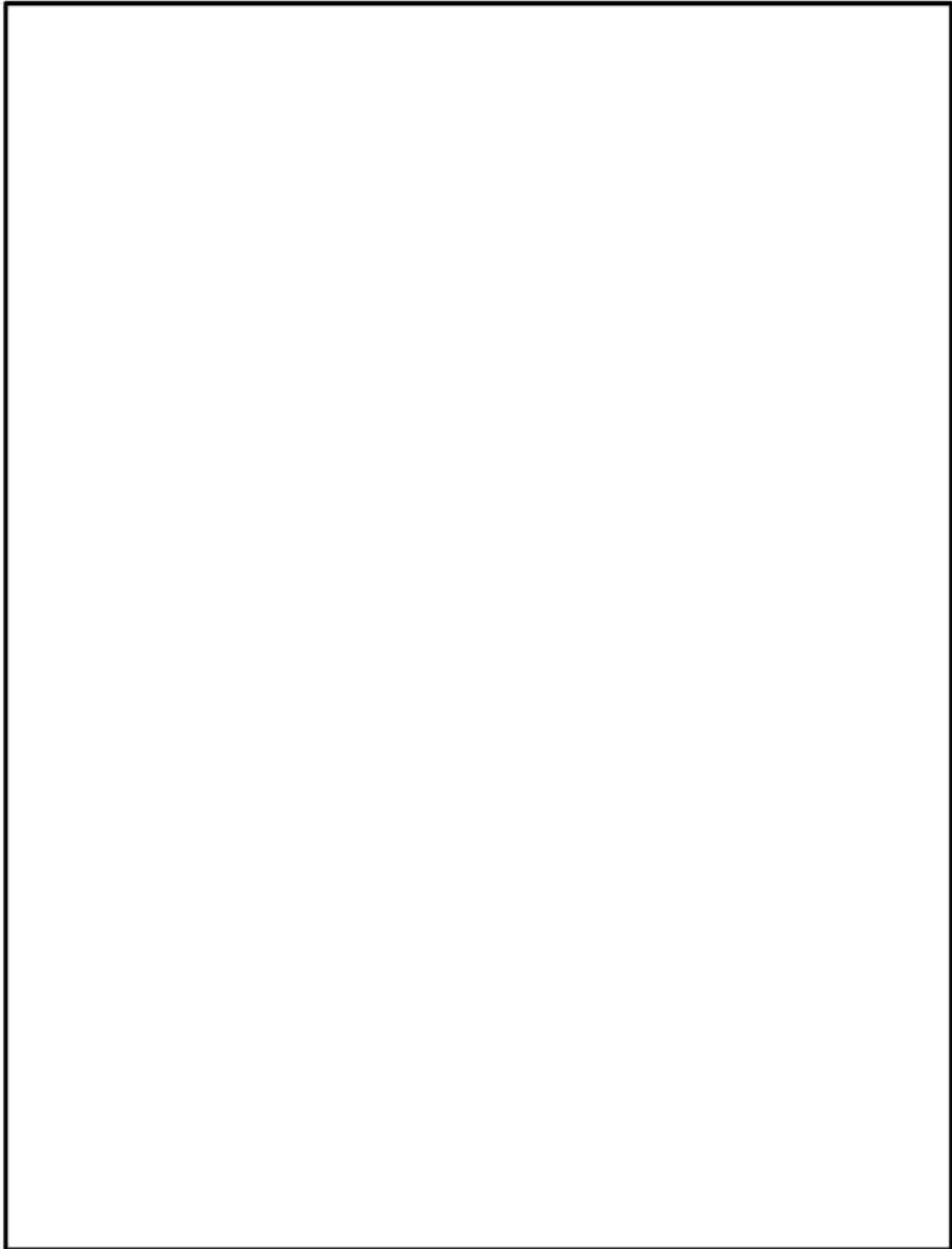
計算条件と計算結果を別紙 2-13 表に示す。別紙 2-13 表に示すとおり、別紙 2-12 表に示す一次蓋に作用する慣性力 (1.98×10^5 N) に対して、摩擦力 (1.50×10^6 N) の方が大きく、一次蓋は特定兼用キャスク本体からずれることはない。

別紙 2-13 表 摩擦力計算条件及び計算結果

項目	一次蓋ボルトの 初期締付力 : N_0 (MPa)	ボルト 首部直径 : d (mm)	ボルト 本数 : n (-)	摩擦係数 : μ (-)	ボルトの 断面積 : A (mm^2)	摩擦力 : R (N)
数値						1.50×10^6

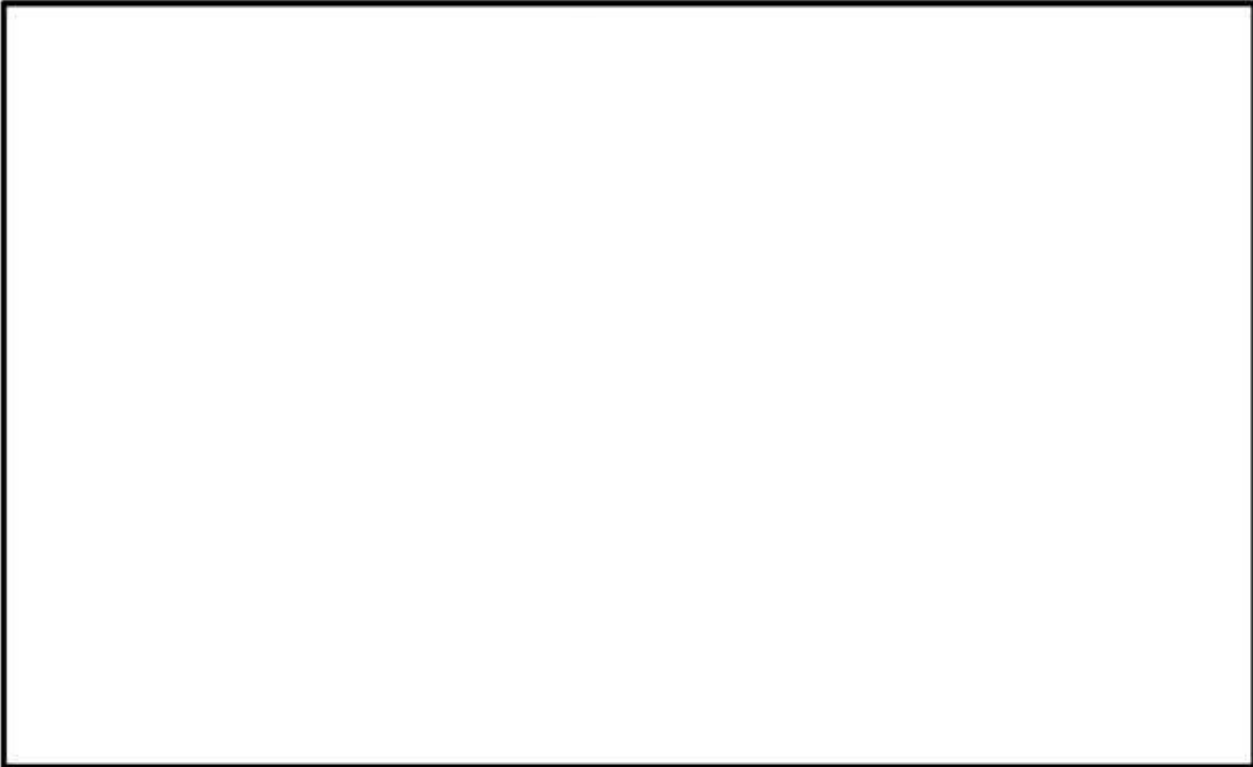






無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。



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 (JSME S FA1-2007)」, (2007).
- (2) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 新版」, (1984).

地震時の使用済燃料集合体の構造健全性評価

1. 概要

MSF-76B 型の安全設計に関する評価（臨界解析、遮蔽解析、除熱解析、閉じ込め評価）は、使用済燃料集合体が構造健全性を維持する条件で行っている。地震時に使用済燃料集合体が構造健全性を維持できることを確認するため、使用済燃料集合体を対象として地震時の構造健全性について評価を行った。評価の詳細を以下に示す。

2. 地震時の使用済燃料集合体の構造健全性評価

2.1 固縛方法

MSF-76B 型の貯蔵時の固縛構造は別紙 1 - 1 図に示すとおりである。

2.2 荷重条件

MSF-76B 型に発生する加速度として、以下に示す値を設計条件として設定し、水平方向と鉛直方向の加速度による地震力（別紙 3 - 1 図参照）が同時に特定兼用キャスクに作用するとして評価を行う。

- ・ 水平方向 : 2.35 G (2300Gal)
- ・ 鉛直方向 : 1.64 G (1600Gal) ※鉛直下方向には自重を考慮し 2.64 G とする。

また、地震力以外の荷重として、供用中に作用する圧力荷重を組み合わせて評価する。



別紙3-1図 地震時の評価用加速度

2.3 評価基準

使用済燃料集合体の地震時の評価基準は、使用済燃料集合体に変形しないことを確認するため、燃料被覆管の発生応力が降伏応力以下とする。

2.4 構造強度評価

地震時の燃料被覆管の応力計算は、応力評価式により行う。燃料被覆管の応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

地震時に生じる応力は、地震力による曲げ応力 σ_b (MPa) と内圧による各方向応力 σ_x 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。地震時において最大応力強さ S (MPa) は、内面に生じるので内面のみ評価する。また、応力が大きい新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を対象として評価する。

(1) 地震力により生じる曲げ応力

燃料被覆管は支持格子により支持される連続梁とみなすことができ、1 つの支持スパン内の部分を考えると両端固定梁となる。したがって、地震力により生じる最大曲げ応力は、次式⁽¹⁾で計算される。

$$\sigma_b = \frac{Md_o}{2I}$$

$$M = \frac{1}{12} (W_f + W_c) l^2 Gg$$

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

G : 地震時の衝撃加速度 (G)

$$G = \sqrt{G_H^2 + G_V^2}$$

G_H : 水平方向加速度 (G)

G_V : 鉛直方向加速度 (G) ※自重を考慮

g : 重力加速度 (m/s²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

W_f : ペレット単位長さ当たり質量 (kg/mm)

W_c : 燃料被覆管単位長さ当たり質量 (kg/mm)

l : 支持スパン (mm)

d_o : 燃料被覆管外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管内径 (mm)

(2) 内圧による各方向応力

内圧 P_o により生じる各方向応力は、次式⁽¹⁾で計算される。

$$\sigma_z = \frac{1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_r = -\frac{\frac{K^2}{R^2} - 1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{K^2}{R^2} + 1}{K^2 - 1} P_o$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (MPa)

σ_r : 半径方向応力 (MPa)

σ_θ : 周方向応力 (MPa)

$$K = \frac{b}{a}$$

b : 燃料被覆管外半径 (mm)

$$b = \frac{d_o}{2}$$

a : 燃料被覆管内半径 (mm)

$$a = \frac{d_i}{2}$$

P_o : 内圧 (MPa)

$R = \frac{r}{a}$ (内面においては $R=1$)

r : 評価位置 ($a \leq r \leq b$)

(3) 応力強さ

地震時に生じる曲げ応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、次式で計算される。

$$S = \text{Max} (| \sigma_{rL} - \sigma_{\theta L} | , | \sigma_{\theta L} - \sigma_{zL} | , | \sigma_{zL} - \sigma_{rL} |)$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_{\theta}$$

$$\sigma_{zL} = \sigma_b + \sigma_x$$

計算条件と計算結果を別紙 3-1 表に示す。別紙 3-1 表に示すように、燃料被覆管に生じる応力は評価基準（降伏応力）以下であり、燃料被覆管は変形しない。

別紙 3-1 表 地震時の燃料被覆管計算条件及び計算結果

燃料タイプ	新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料
ペレット単位長さ当たり質量： W_r (kg/mm)	
燃料被覆管単位長さ当たり質量： W_c (kg/mm)	
水平方向加速度： G_H (G)	2.35
鉛直方向加速度： G_V (G)	2.64
重力加速度： g (m/s ²)	9.80665
支持スパン： l (mm)	
燃料被覆管外径： d_o (mm)	12.3
燃料被覆管内径： d_i (mm)	10.8
内圧： P_o (MPa)	11.57
応力強さ： S (MPa)	102
評価基準： S_y (MPa)	563

3. 参考文献

- (1) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 新版」, (1984).