

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。

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	7
3. 使用する解析コード	20
4. 参考文献	26

別紙1 0.3m 落下時の構造健全性評価

別紙2 地震時のトラニオンの構造健全性評価

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、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。

(1) 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んにか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んにか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

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、乾式キャスクの地震に対する設計は、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[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-24P型は、兼用キャスク告示に定める地震力に対して、貯蔵用緩衝体の装着により、蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法により貯蔵する設計とする。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-24P型は、貯蔵架台に固定され、貯蔵架台は基礎等に固定せずに設置される。

MSF-24P型は、兼用キャスク告示で定める地震力に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。

本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-24P型の構造健全性評価を実施し、構造健全性が維持されることから、MSF-24P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-24P型は、基礎等に固定しないため、本確認内容は、型式証明申請の範囲外である。

[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は、型式証明申請の範囲外である。本確認事項に対する確認は、後段審査（設置（変更）許可申請）への引継ぎ事項とする。

[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。
- (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。
- (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。
- (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。

MSF-24P型の地震力による構造健全性評価の概要を以下に示す。

構造健全性評価の評価部位は、安全機能を担保する兼用キャスク本体（胴、外筒、下部端板、伝熱フィン、中性子遮蔽材カバー、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋、蓋ボルト）、バスケット、及び兼用キャスクを支持するトラニオンを対象とし、構造健全性評価は、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-24P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を組み合わせ実施する。ここで、地震力は、静的震度（加速度）に基づき算定した地震力とする。

a. 兼用キャスク本体及びバスケットの構造健全性評価

MSF-24P型は、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（以下、「事業所外運搬規則」という）に規定される一般の試験条件のうち、0.3m落下において兼用キャスク本体及びバスケットが弾性範囲に留まる設計としている。地震時にMSF-24P型に生じる加速度（水平 23m/s^2 (2300Gal) 及び鉛直 16m/s^2 (1600Gal)）が、0.3m落下（0.3m水平落下及び0.3m垂直落下）時にMSF-24P型に生じる衝撃加速度に比べ小さいことを示すことにより、構造健全性が維持されることを示す。

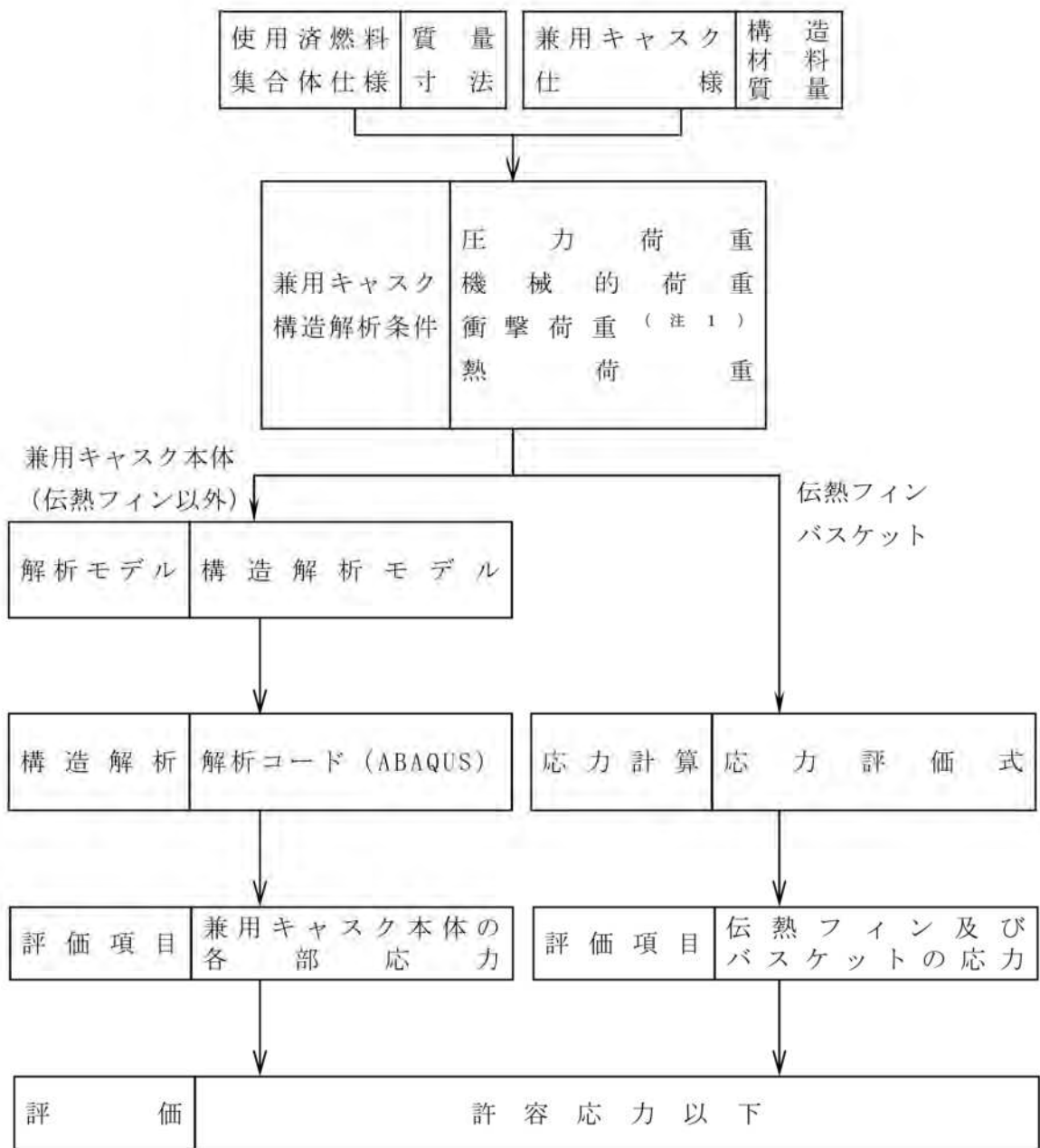
①0.3m落下時の構造健全性

MSF-24P型の0.3m落下時における構造健全性評価フローを第1図に示す。また、0.3m落下時における構造健全性評価の詳細を別紙1に、0.3m落下時にMSF-24P型の各部に生じる応力を第1表に示す。

MSF-24P型の0.3m落下時の構造健全性評価は、金属キャスク構造規格の供用状態Bの評価基準（弾性範囲の基準）を基にしている。金属キャスク構造規格では、地震時（ S_s 地震力が作用する場合）の評価基準は、供用状態D（構造部材を破損させないとする基準）であり、0.3m落下時の方が地震時に比べ保守的な基準となっている。

第1表に示すとおり、0.3m落下時の胴、外筒、下部端板、伝熱フィン、中性子遮蔽材カバー、一次蓋、二次蓋、三次蓋、蓋ボルト及びバスケットに生じる応力は、評価基準（供用状態 B）を満足している。また、密封境界部（一次蓋密封シール部）及びバスケットに生じる応力は、弾性範囲内である。

0.3m落下時に MSF-24P 型に生じる衝撃加速度は、CRUSH コードを、また、胴、外筒、下部端板、中性子遮蔽材カバー、一次蓋、二次蓋、三次蓋及び蓋ボルトに生じる応力は、ABAQUS コードを使用して求めている。これらの算出に用いる解析コードは、3. に示すとおり、技術的な特殊性及び新規性はなく、許認可で使用実績がある。



(注1) 落下時の衝撃加速度は、CRUSHコードにより算出する。

第1図 0.3m落下時の兼用キャスク本体及びバスケットの構造健全性評価フロー

第1表(1/3) MSF-24P型の0.3m落下時の応力

項目 (注1)	解析基準 (注2)	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)
1. 垂直落下			
(1) 容器本体 (頭部垂直落下)			
一次応力			
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	65
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	34
三次蓋 (P _L)	1.5S _m	205	36
胴 (P _L)	1.5S _m	186	43
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	183	6
外筒 (引張)	f _t	156	39
外筒 (圧縮)	f _c	156	24
外筒 (せん断)	f _s	90	14
外筒 (曲げ)	f _b	156	45
下部端板 (引張)	f _t	136	2
下部端板 (圧縮)	f _c	136	1
下部端板 (せん断)	f _s	78	4
下部端板 (曲げ)	f _b	136	12
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	17
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	1
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	10
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	70
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	2
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	1
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	3
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	16
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	48
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	31
(一次+二次) 応力			
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	66
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	34
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	85
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	76
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	23
外筒 (引張)	3f _t	470	82
外筒 (せん断)	3f _s	271	18
外筒 (曲げ)	3f _b	470	85
下部端板 (引張)	3f _t	410	48
下部端板 (せん断)	3f _s	236	24
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	107
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	11
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	11
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	64
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	35
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	3
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	9
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	96
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	43
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	289
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	323
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	212
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	323
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	204
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	216

(注1) P_L: 一次局部膜応力、P_b: 一次曲げ応力、Q: 二次応力、σ_m: 平均引張応力、σ_b: 曲げ応力

(注2) S_m: 設計応力強さ、S_y: 設計降伏点、f_t: 許容引張応力、f_c: 許容圧縮応力、f_s: 許容せん断応力、f_b: 許容曲げ応力

第1表(2/3) MSF-24P型の0.3m落下時の応力

項目 (注1)	解析基準 (注2)	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)
(2) 容器本体 (底部垂直落下)			
一次応力			
一次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	16
二次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	186	5
三次蓋 (P _L +P _b)	1.5S _m	205	39
胴 (P _L)	1.5S _m	184	23
胴 (底板) (P _L +P _b)	1.5S _m	183	30
外筒 (引張)	f _t	156	37
外筒 (圧縮)	f _c	156	5
外筒 (せん断)	f _s	90	8
外筒 (曲げ)	f _b	156	39
下部端板 (引張)	f _t	136	7
下部端板 (圧縮)	f _c	136	2
下部端板 (せん断)	f _s	78	11
下部端板 (曲げ)	f _b	136	43
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	157	—
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	157	3
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	90	2
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	157	9
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f _t	136	14
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f _c	136	2
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f _s	78	8
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f _b	136	57
一次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	36
二次蓋密封シール部 (P _L)	S _y	185	14
(一次+二次) 応力			
一次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	22
二次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	372	8
三次蓋 (P _L +P _b +Q)	3S _m	411	55
胴 (P _L +P _b +Q)	3S _m	369	44
胴 (底板) (P _L +P _b +Q)	3S _m	366	49
外筒 (引張)	3f _t	470	87
外筒 (せん断)	3f _s	271	15
外筒 (曲げ)	3f _b	470	49
下部端板 (引張)	3f _t	410	40
下部端板 (せん断)	3f _s	236	11
下部端板 (曲げ)	3f _b	410	58
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	472	3
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	272	4
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	472	11
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	3f _t	410	33
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	3f _s	236	9
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	3f _b	410	61
一次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	185	63
二次蓋密封シール部 (P _L +P _b +Q)	S _y	186	22
一次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	562	249
一次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	843	250
二次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	196
二次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	202
三次蓋ボルト (σ _m)	2S _m	564	234
三次蓋ボルト (σ _m +σ _b)	3S _m	846	326
(3) 伝熱フィン			
伝熱フィン取付部(S)	S _m	63	6
(4) バスケット			
バスケットプレート(σ _c)	S _m	36	7

(注1) P_L: 一次局部膜応力、P_b: 一次曲げ応力、Q: 二次応力、σ_m: 平均引張応力、σ_b: 曲げ応力、σ_c: 圧縮応力、S: 応力強さ

(注2) S_m: 設計応力強さ、S_y: 設計降伏点、f_t: 許容引張応力、f_c: 許容圧縮応力、f_s: 許容せん断応力、f_b: 許容曲げ応力

第1表(3/3) MSF-24P型の0.3m落下時の応力

項目 (注1)	解析基準 (注2)	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)
2. 水平落下			
(1) 容器本体			
一次応力			
一次蓋 ($P_L + P_b$)	$1.5S_m$	186	10
二次蓋 ($P_L + P_b$)	$1.5S_m$	186	20
三次蓋 (P_L)	$1.5S_m$	205	24
胴 (P_L)	$1.5S_m$	186	66
胴 (底板) (P_L)	$1.5S_m$	183	18
外筒 (引張)	f_t	156	77
外筒 (圧縮)	f_c	156	20
外筒 (せん断)	f_s	90	30
外筒 (曲げ)	f_b	156	87
下部端板 (引張)	f_t	136	8
下部端板 (圧縮)	f_c	136	13
下部端板 (せん断)	f_s	78	16
下部端板 (曲げ)	f_b	136	63
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	f_t	157	14
蓋部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f_c	157	5
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f_s	90	6
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f_b	157	24
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	f_t	136	12
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	f_c	136	56
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	f_s	78	17
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	f_b	136	67
一次蓋密封シール部 (P_L)	S_y	185	57
二次蓋密封シール部 (P_L)	S_y	185	67
(一次+二次) 応力			
一次蓋 ($P_L + P_b + Q$)	$3S_m$	372	15
二次蓋 ($P_L + P_b + Q$)	$3S_m$	372	54
三次蓋 ($P_L + P_b + Q$)	$3S_m$	411	64
胴 ($P_L + P_b + Q$)	$3S_m$	372	101
胴 (底板) ($P_L + P_b + Q$)	$3S_m$	366	45
外筒 (引張)	$3f_t$	470	99
外筒 (せん断)	$3f_s$	271	30
外筒 (曲げ)	$3f_b$	470	134
下部端板 (引張)	$3f_t$	410	60
下部端板 (せん断)	$3f_s$	236	33
下部端板 (曲げ)	$3f_b$	410	146
蓋部中性子遮蔽材カバー (引張)	$3f_t$	472	12
蓋部中性子遮蔽材カバー (せん断)	$3f_s$	272	6
蓋部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	$3f_b$	472	25
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	$3f_t$	410	80
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	$3f_s$	236	17
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	$3f_b$	410	59
一次蓋密封シール部 ($P_L + P_b + Q$)	S_y	185	70
二次蓋密封シール部 ($P_L + P_b + Q$)	S_y	185	62
一次蓋ボルト (σ_m)	$2S_m$	562	251
一次蓋ボルト ($\sigma_m + \sigma_b$)	$3S_m$	843	590
二次蓋ボルト (σ_m)	$2S_m$	564	241
二次蓋ボルト ($\sigma_m + \sigma_b$)	$3S_m$	846	596
三次蓋ボルト (σ_m)	$2S_m$	564	285
三次蓋ボルト ($\sigma_m + \sigma_b$)	$3S_m$	846	468
(2) 伝熱フィン (発生応力なし)			
(3) バスケット			
バスケットプレート縦板 (σ_c)	S_m	36	12
バスケットプレート横板 (σ_b)	αS_m	46	8
バスケットプレート横板 (τ)	$0.6S_m$	21	2

(注1) P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力、 Q : 二次応力、 σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力、 σ_c : 圧縮応力、 τ : せん断応力

(注2) S_m : 設計応力強さ、 S_y : 設計降伏点、 f_t : 許容引張応力、 f_c : 許容圧縮応力、 f_s : 許容せん断応力、 f_b : 許容曲げ応力

②地震時の兼用キャスク本体及びバスケットの構造健全性評価

地震時にMSF-24P型に生じる加速度と0.3m落下時にMSF-24P型に生じる衝撃加速度の比較を第2表に示す。

なお、加速度以外の機械的荷重、圧力荷重及び熱荷重は、地震時と0.3m落下時で差異はない。

第2表に示すとおり、地震時の加速度は、0.3m落下時に比べ小さいことから、地震時において兼用キャスク本体及びバスケットの構造健全性は維持される（弾性範囲）。

第2表 地震時の加速度と0.3m落下時の加速度の比較

地震時の加速度	設計基準値 ^(注)
水平 23 m/s ²	0.3m 水平落下 200 m/s ²
鉛直 16 m/s ²	0.3m 垂直落下 255 m/s ²

(注) 事業所外運搬規則に規定される一般の試験条件のうち、0.3m落下において兼用キャスク本体及びバスケットの構造健全性は維持される（金属キャスク構造規格の供用状態Bを満足する）設計としている。

③使用済燃料の再取出性について

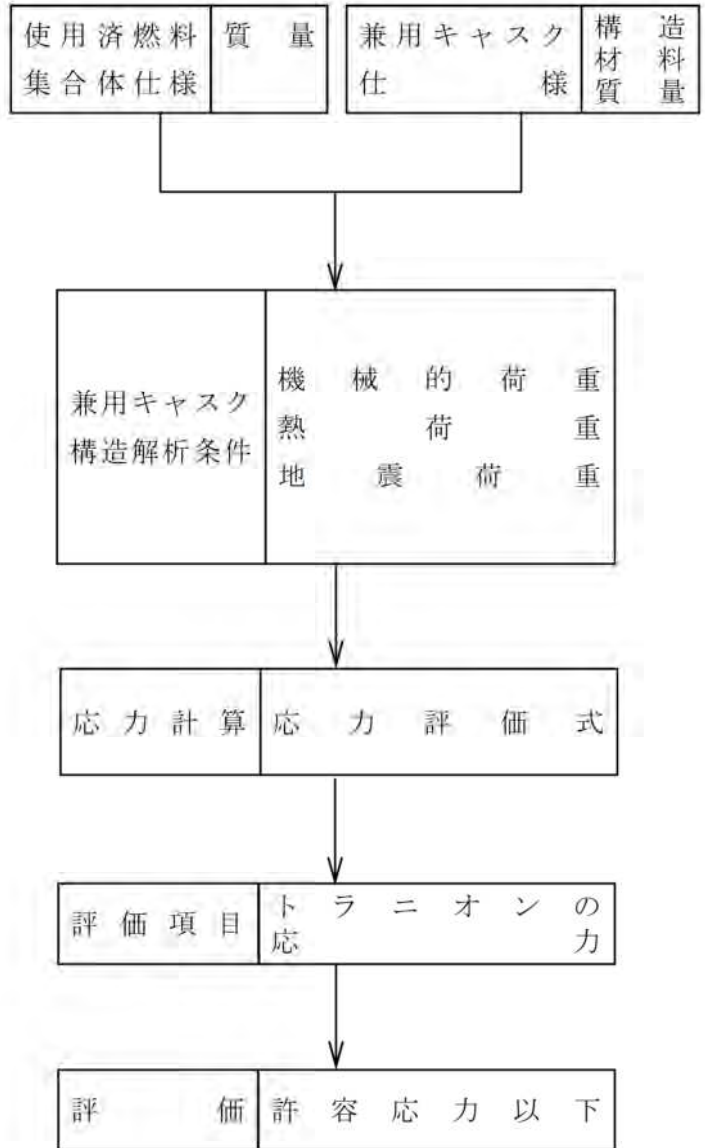
上記②に示したとおり、地震時において、兼用キャスクの蓋部は弾性範囲に留まる設計であることから、蓋の開放は可能である。また、別紙1（別添）に示すとおり、燃料集合体の燃料被覆管は、0.3m落下時においても弾性範囲に留まることから、燃料被覆管の構造健全性は維持される。したがって、安全機能への影響はなく、また、使用済燃料の再取出性に問題はない。

b. トラニオンの構造健全性評価

MSF-24P型は、上部トラニオン及び下部トラニオンにより貯蔵架台に固縛され、横置き姿勢で貯蔵される。したがって、地震時のトラニオンの構造健全性を評価する。

MSF-24P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2図に示す。地震時にMSF-24P型に生じる加速度（水平23m/s²（2300Gal）及び鉛直16 m/s²（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2に、トラニオンの構造健全性評価結果を第3表に示す。第3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（供用状態D）を満足しており、構造健全性は維持される。

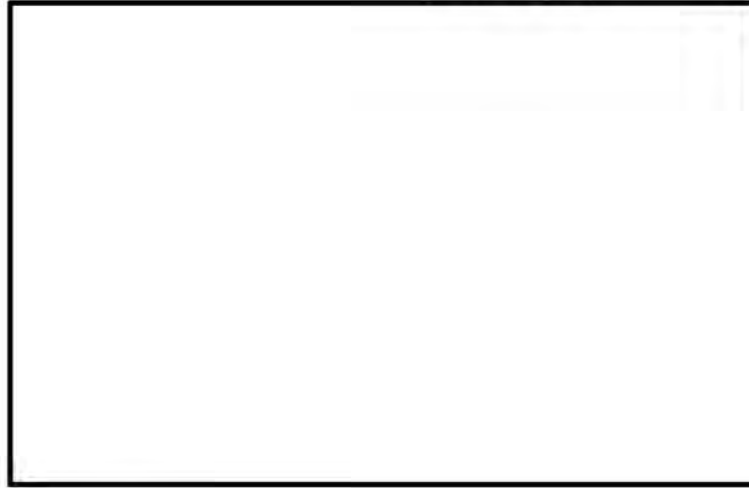


第2図 地震時のトラニオンの構造健全性評価フロー

第3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)	基準値 (MPa)	計算値 (MPa)	基準値 (MPa)	計算値 (MPa)	基準値 (MPa)
A-A	131	591 ($1.5f_b^*$)	65	341 ($1.5f_s^*$)	185	591 ($1.5f_t^*$)
B-B	238	591 ($1.5f_b^*$)	40	341 ($1.5f_s^*$)	252	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)	基準値 (MPa)	計算値 (MPa)	基準値 (MPa)
A	165	412 ($1.5f_p^*$)	209	412 ($1.5f_p^*$)
B	78		122	



(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。

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

MSF-24P 型の地震時の安全設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

①CRUSH コード

i 概要

CRUSH コード⁽²⁾ は、旧日本原子力研究所で開発された輸送容器等の落下衝突解析用計算コードである。

ii 機能

CRUSH コードは、落下衝突解析に際して以下の機能を有している。

- a) 緩衝体の緩衝材を互いに干渉しない 1 次元棒の集合体とみなし、1 次元棒の変形によって落下エネルギーを吸収すると仮定するもので、緩衝材の応力-ひずみ特性があれば、変形量、荷重及び加速度を求めることができる。
- b) 計算対象を 1 次元の体系にモデル化して解析を行うため、パラメトリック計算を容易に行うことができる。

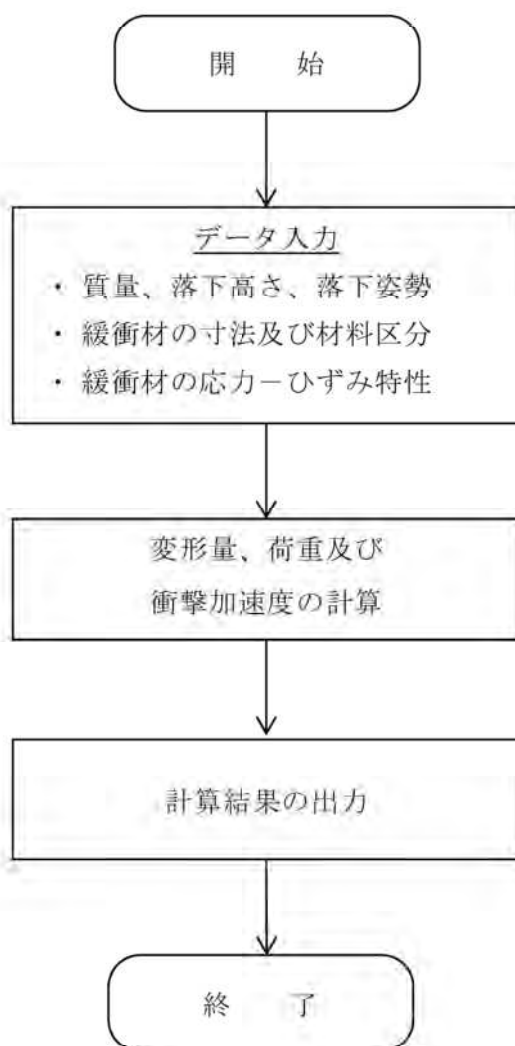
iii 計算フロー

CRUSH コードの計算フローを第 3 図に示す。

iv 使用実績及び検証

CRUSH コードは、国内の輸送容器の緩衝体設計に広く使用されており許認可の実績がある。また、CRUSH コードによる衝撃加速度の計算結果は、緩衝材に木材を用いた輸送容器の落下試験と比較し検証されている⁽²⁾⁽³⁾。

CRUSH コードの検証例を第 4 表に示す。



第3図 CRUSH コードの計算フロー

第4表 CRUSH コードの検証例⁽³⁾

(1) 衝撃加速度^(注)

試験条件	最大衝撃加速度 (m/s ²)	
	落下試験	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	598 (61G)	618 (63G)
9.3 m 傾斜落下	1451 (148G)	1510 (154G)

(2) 緩衝体変形量^(注)

試験条件	緩衝体変形量 (mm)	
	落下試験	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	259	308
9.3 m 傾斜落下	253	314

(注) MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いて 9.3 m 落下試験（頭部垂直落下及び傾斜落下）を実施し、落下試験で計測された容器本体の衝撃加速度及び緩衝体変形量を CRUSH 解析結果と比較し、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を検証した。

② ABAQUS コード

i 概要

ABAQUS コード⁽⁴⁾は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.（現在は Dassault Systèmes 社）で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり、輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

ii 機能

ABAQUS コードは、応力解析に際して以下の機能を有している。

- a) 弾性・弾塑性解析等のいずれの解も得ることができる。
- b) 材料特性として時間依存、ひずみの履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- c) モデルの形状は 1 次元～3 次元、また連続体についても取り扱うことができる。
- d) 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。

- e) 荷重条件として集中荷重、分布荷重、モーメント、加速度（慣性力）、圧力、遠心力、コリオリ力等が取り扱うことができる。また、これら条件の時間依存、線形変化に対しても対応可能である。

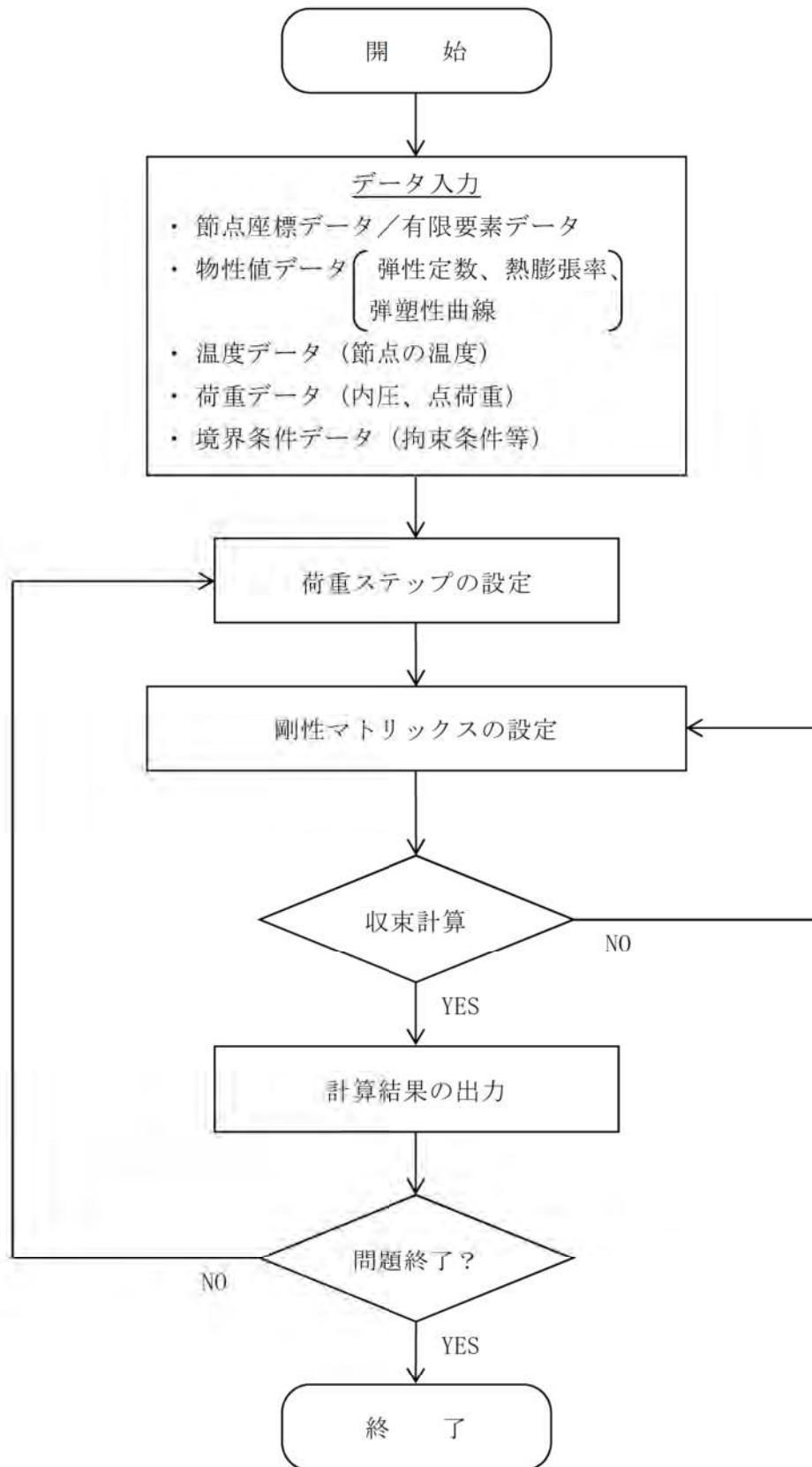
iii 計算フロー

ABAQUS コードの計算フローを第 4 図に示す。

iv 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、これまで多くの応力解析に対し許認可の実績がある。また、ABAQUS コードによる輸送容器の応力計算結果は、輸送容器の落下試験結果を基に算出される応力と比較し検証されている⁽³⁾。

ABAQUS コードの検証例を第 5 表に示す。



第4図 ABAQUS コードの計算フロー

第5表 ABAQUS コードの検証例⁽³⁾

(1) 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果^(注)

部位	変形モード	落下試験結果 より算出した 応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	47	201	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	51	53	848

(2) 9.3 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果^(注)

部位	変形モード	落下試験結果 より算出した 応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張+曲げ	92	181	848
三次蓋ボルト	引張+曲げ	273	368	848

(注) MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いて 9.3 m 落下試験（頭部垂直落下及び傾斜落下）を実施し、落下試験で計測された蓋部のひずみを基に、MSF-24P 型と落下試験モデルの寸法差等を考慮して算出した 9.3m 頭部垂直落下時及び 9.3m 水平落下時に MSF-24P 型輸送容器に発生する応力と ABAQUS 解析結果とを比較し、ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を検証した。

4. 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).
- (2) 幾島毅, 浅田和雄,「放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発, (I) 緩衝体付き輸送容器衝突計算コード CRUSH」, 日本原子力学会誌 Vol. 33 No. 4, (1991) .
- (3) 四国電力(株),「核燃料輸送物設計承認申請書の一部補正について」, 原子力発第 19317 号, (2019) .
- (4) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual(6.12)” , (2012).

0.3m 落下時の構造健全性評価

1. 概要

MSF-24P 型は、使用済燃料集合体を貯蔵する機能を有するとともに、使用済燃料の原子力発電所敷地外への運搬に使用する輸送容器としての機能を併せもつ兼用キャスクである。そのため、事業所外運搬規則に定める BM 型輸送物に係る一般の試験条件（0.3m 落下試験）に適合する設計としている。

0.3m 落下時における MSF-24P 型の構造健全性評価の詳細を以下に示す。

2. 落下時の衝撃加速度

輸送物が 0.3 m 落下した場合、その落下エネルギーは容器本体の上下部に取り付けられた緩衝体の変形によって吸収される。本項では、0.3m 落下時の緩衝体の変形量及び衝撃加速度について評価し、輸送容器の健全性を評価する。緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析条件を以下に述べる。

2.1 落下姿勢

輸送物の落下姿勢として次の 2 種類を考える（別紙 1 - 1 図参照）。

- ①垂直落下
- ②水平落下

2.2 解析方法

緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析方法を以下に示す。

①輸送物の落下エネルギーは緩衝体の弾塑性変形によって全て吸収されるものとする。この仮定では、緩衝体を除いた輸送物及び落下試験台を剛体とし、落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視することになるので、落下による緩衝体の変形を大きく評価することにより保守側の解析となる。

②解析に用いる輸送物の質量に関する数値は、輸送物最大総質量 134.4 トンを用いる。

落下エネルギーは次式で与えられる。

$$E_k = mgH$$

ただし、

E_k : 輸送物の落下エネルギー (N・mm)

m : 輸送物最大総質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

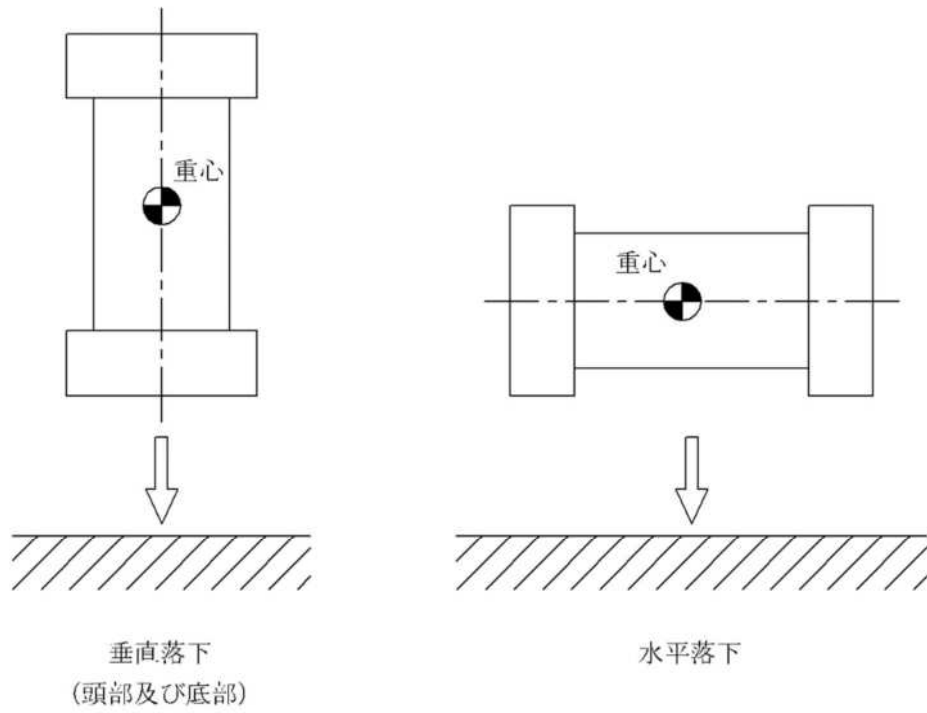
H : 落下高さ (mm)

計算条件と計算結果を別紙 1-1 表に示す。

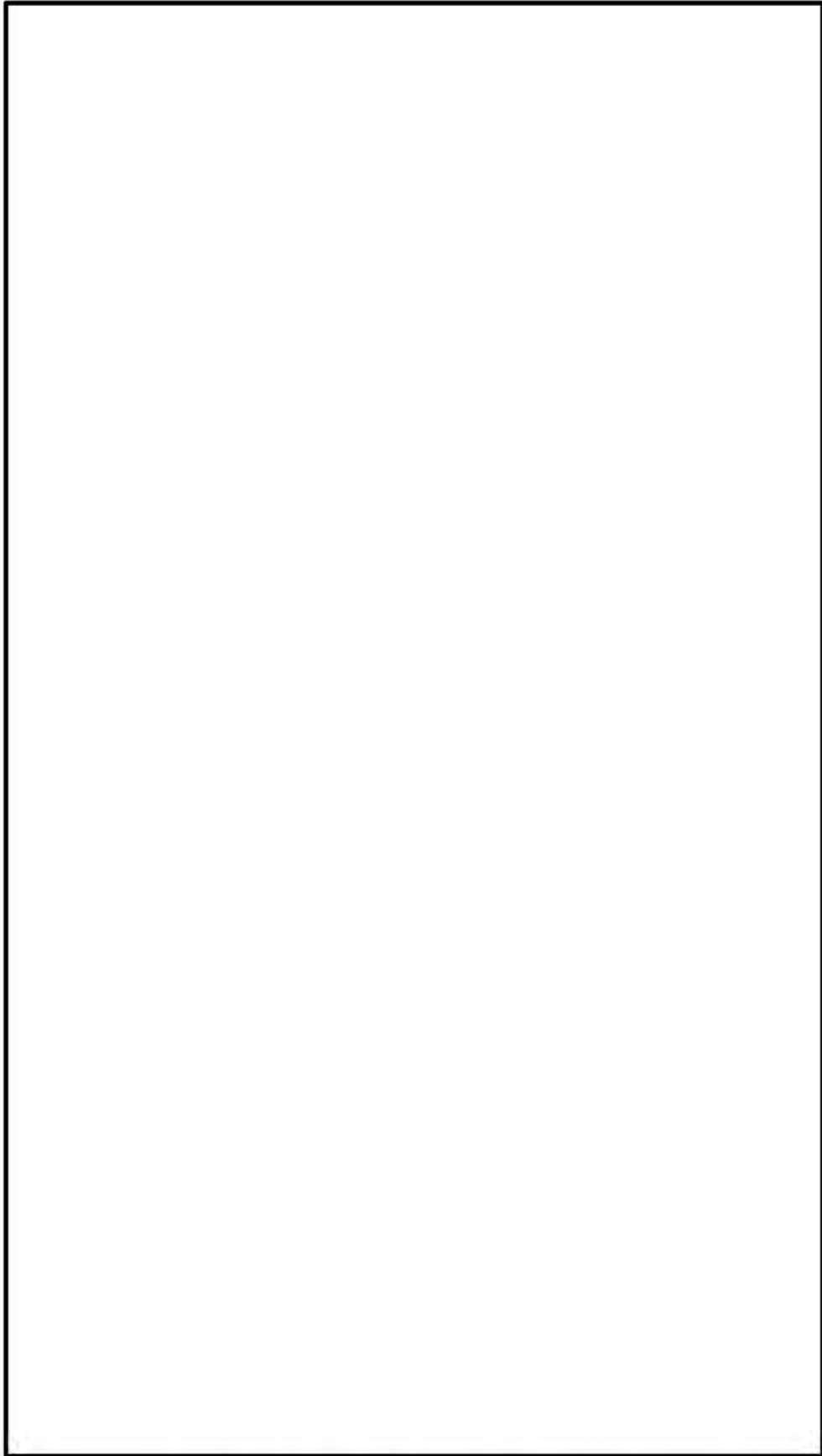
別紙 1-1 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大 総質量 : m (kg)	重力加速度 : g (m/s^2)	落下高さ : H (mm)	輸送物の 落下エネルギー : E_k (N・mm)
数値	1.344×10^5	9.80665	300	3.955×10^8

- ③緩衝体の変形量と衝撃力の計算は CRUSH コードを用いて行う。このコードにおいては、エネルギー吸収に寄与する部材は安全側に内部の木材のみとして、緩衝体の変形量を単軸変形法 (UDM) により求めている。
- ④衝撃力については解析と実験との比較検証により得られた誤差 $\pm 20\%$ を考慮した負荷係数 1.2 を③で求められる衝撃力に乗じる。
- ⑤木材は、木目 (又は積層) 方向と、木目 (又は積層) と直角方向で圧潰特性が異なる。各々の方向における特性を別紙 1-2 図に示す。木目 (又は積層) 方向とある角度を持つ落下方向に対しては、異方性の影響を考慮する。
- ⑥水平落下においては、上部緩衝体と下部緩衝体の吸収エネルギー比を 50% ずつとして解析している。また、緩衝体の変形量は、上部緩衝体と下部緩衝体の変形が大きい方の値としている。



別紙 1 - 1 図 落下姿勢



別紙 1 - 2 図 緩衝材（木材）の圧潰特性

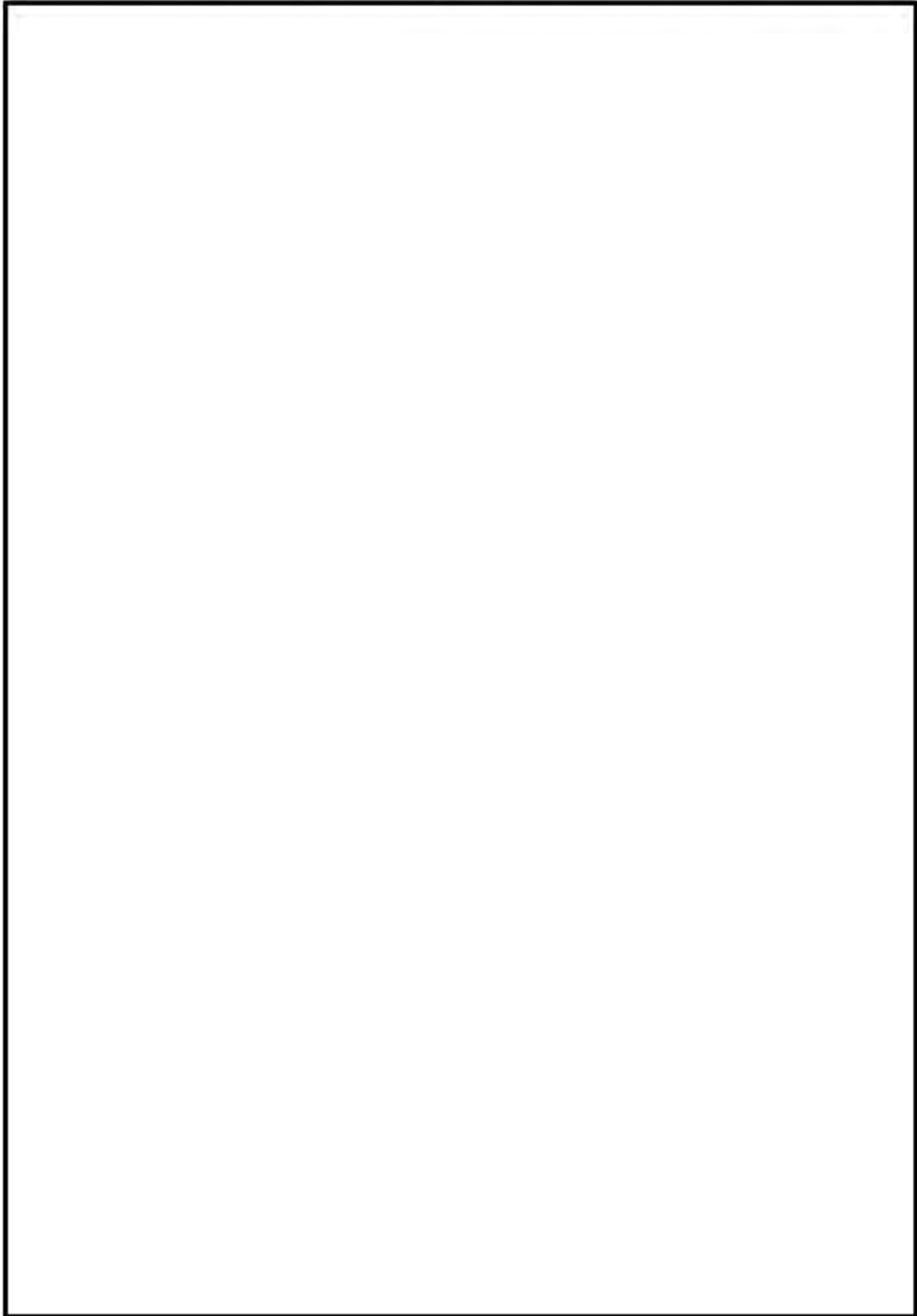
無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 1-4

2.3 解析モデル

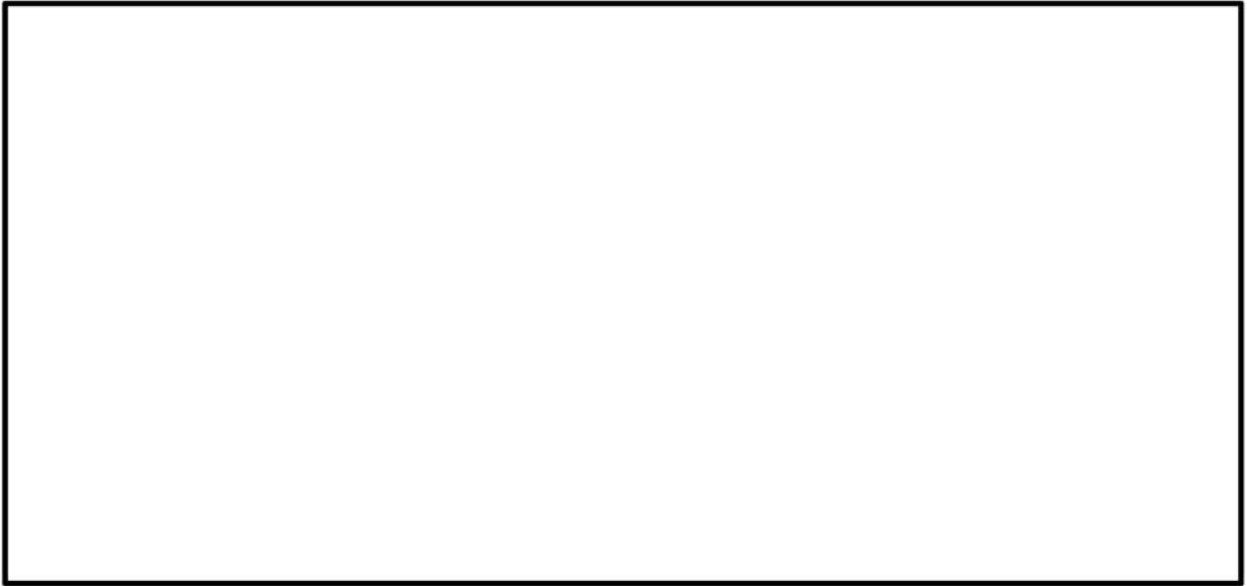
各落下方向の解析モデルを別紙 1 - 3 図及び別紙 1 - 4 図に示す。斜線を施した部分、すなわち緩衝体内の木材が変形量 δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。



別紙 1 - 3 図 垂直落下解析モデル

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。



別紙 1 - 4 図 水平落下解析モデル

2.4 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

2.1~2.3 に示した方法により求めた落下エネルギー E_k に対応する変形量 δ と衝撃加速度 G を別紙 1 - 2 表に示す。

ここで、衝撃加速度 G は次式で求めている。

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

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

m : 輸送物質質量 (kg)

別紙 1 - 2 表 0.3m 落下時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 : F (N)	衝撃 加速度 G : (m/s ²)	設計 加速度 ^(注1) (m/s ²)	緩衝体の 変形量 : δ (mm)	設計基準 変形量 ^(注2) : δ_{max} (mm)
垂直 落下	頭部	3.555×10^7	265	270	26	684
	底部	3.417×10^7	255	260	27	608
水平落下		2.686×10^7	200	210	42	374.5

(注 1) 設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注 2) 設計基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

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. 落下時の兼用キャスク本体（伝熱フィンを除く）の応力評価

3.1 解析モデル

MSF-24P 型の兼用キャスク本体の解析は、有限要素法による構造解析コード（ABAQUS コード）を使用し、三次元有限要素を用いた別紙 1 - 5 図に示す三次元 180 ° 対称モデルを用いる。

MSF-24P 型の構成部材の物性値として入力する縦弾性係数及び熱膨張係数には、金属キャスク構造規格別表 6 - 1 及び別表 6 - 2 に示される値を使用した。

3.2 荷重条件及び境界条件

0.3m 垂直落下（頭部・底部）及び 0.3m 水平落下における荷重条件及び境界条件を別紙 1 - 6 図から別紙 1 - 8 図に示す。解析条件を以下に示す。

(1) 荷重条件

a. 機械的荷重・慣性力

0.3m 頭部垂直落下時に作用する荷重は以下のとおりである。

- ・ 衝撃加速度（ 270 m/s^2 ）による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 下部緩衝体の自重による慣性力が胴（底板）外面に働く。
- ・ 内部の収納物等（バスケット、燃料集合体）の慣性力が一次蓋内面に働く。
- ・ 落下時の上部緩衝体反力が三次蓋外面に働く。

0.3m 底部垂直落下時に作用する荷重は以下のとおりである。

- ・ 衝撃加速度（ 260 m/s^2 ）による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋上面に働く。
- ・ 内部の収納物等（バスケット、燃料集合体）の慣性力が胴（底板）内面に働く。

0.3m 水平落下時に作用する荷重は以下のとおりである。

- ・ 衝撃加速度（ 210 m/s^2 ）による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 内部の収納物等（バスケット、燃料集合体）の慣性力が胴内面へ働く。
- ・ 落下時の上・下部緩衝体反力が胴フランジ面及び底板に働く。

また、蓋ボルトの初期締付力、一次蓋及び二次蓋の金属ガスケットの締付反力等を機械的荷重として考慮する。

b. 圧力荷重

圧力荷重として、胴内圧、一次蓋－二次蓋間の圧力、二次蓋－三次蓋間の圧力、中性子遮蔽材部（蓋部、側部、底部）の圧力を考慮する。

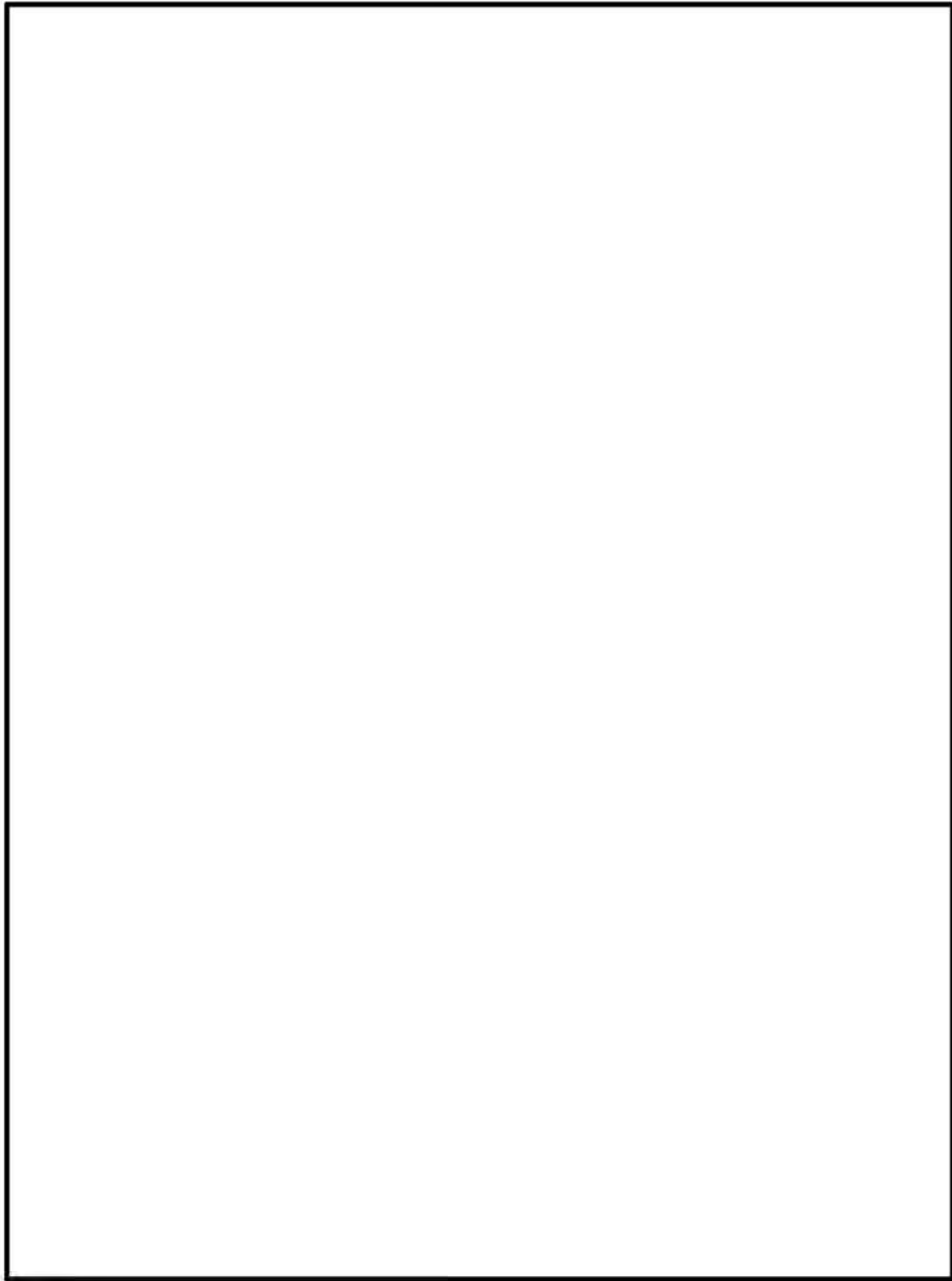
c. 熱荷重

除熱解析結果から得られる MSF-24P 型の温度分布を入力することで、モデル化した構成部材の熱荷重を考慮する。

(2) 境界条件

0.3m 頭部垂直落下及び底部垂直落下時には、衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とした。

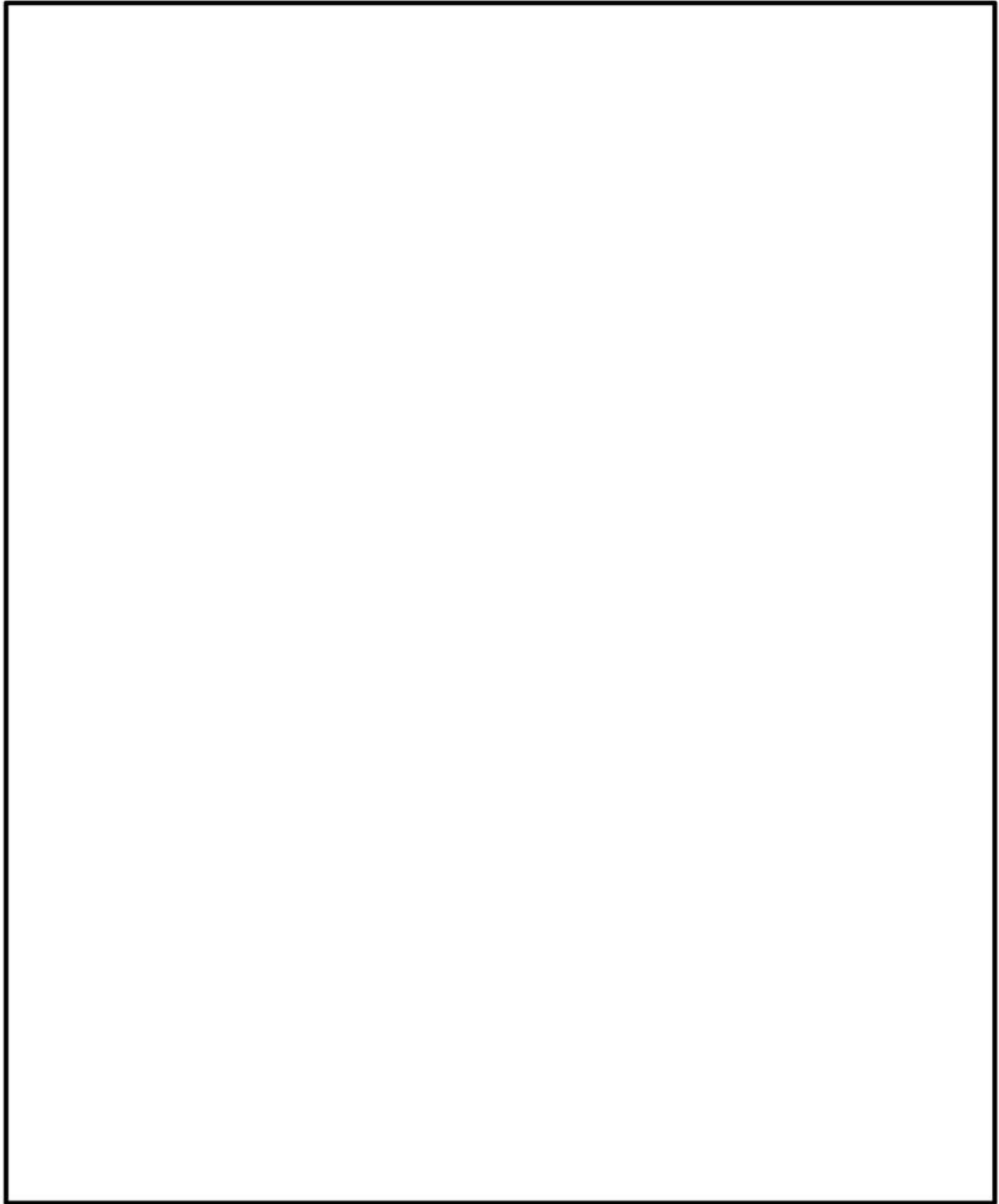
0.3m 水平落下時には、上・下部緩衝体を取り付く面（反力を受ける面）の上・下 1 箇所の Y 方向変位を拘束した。また、 0° - 180° 面の対称面において X 方向の変位を拘束した。



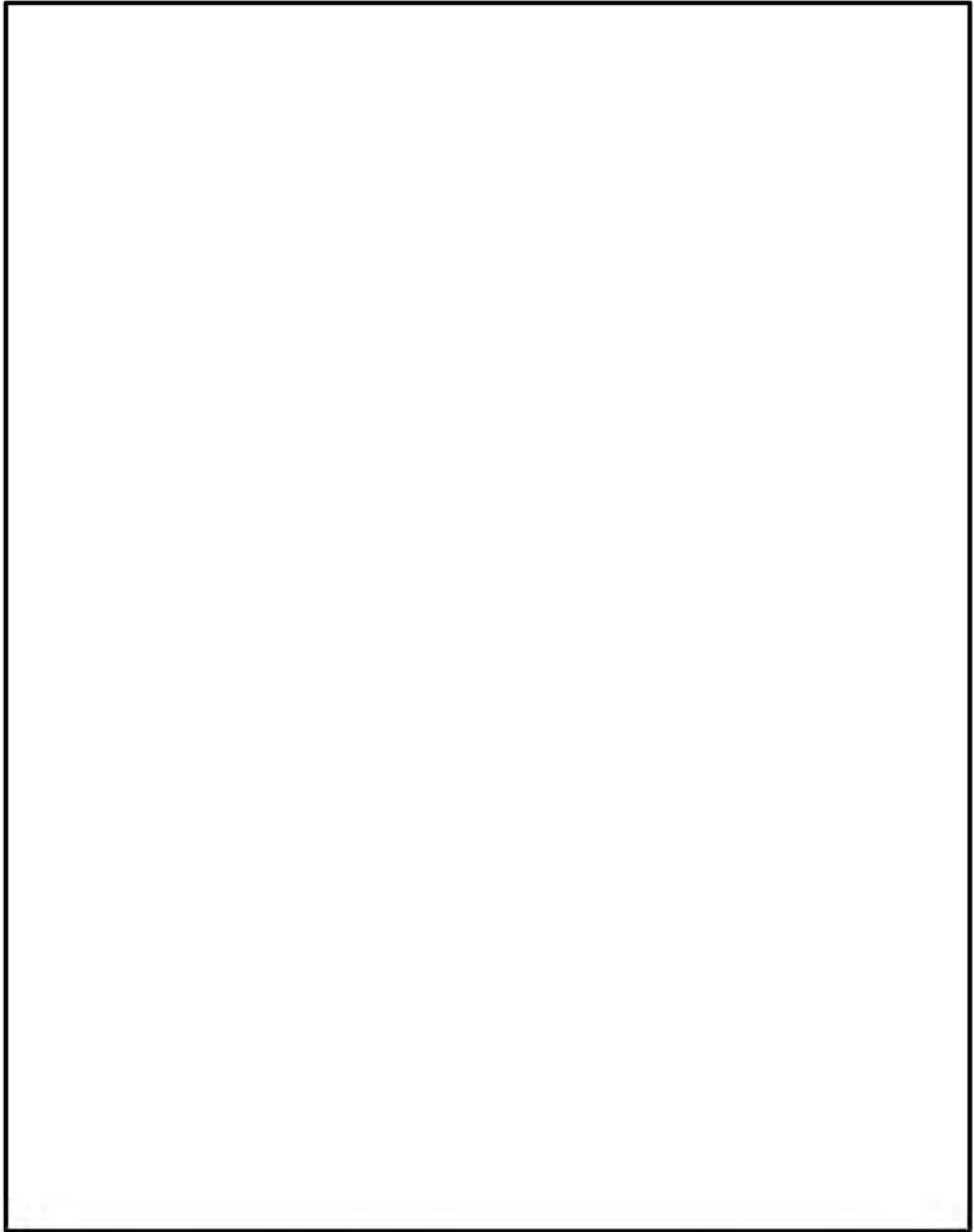
別紙 1 - 5 図 解析モデル

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。



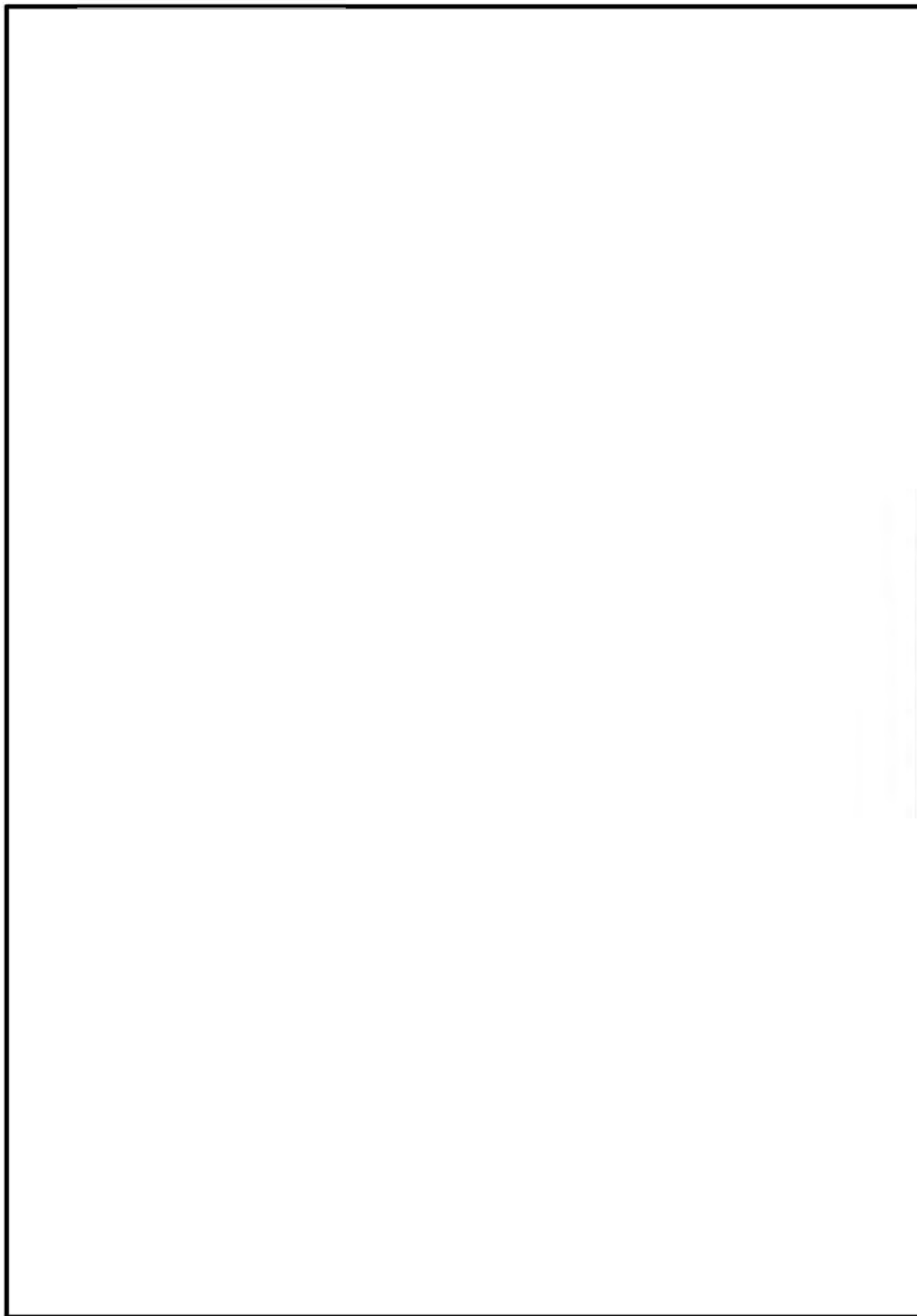
別紙 1 - 6 図 頭部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



別紙 1 - 7 図 底部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

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。



別紙 1-8 図 0.3 m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

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。

3.3 設計基準

胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋、蓋ボルト及び蓋密封シール部に発生する応力の設計基準値は、金属キャスク構造規格を適用した。また、金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がない、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーは、中性子遮蔽材を保持する構造物であることを考慮し、設計・建設規格〈第I編 軽水炉規格〉のクラス1支持構造物の規定を適用した。

(1) 蓋ボルト以外の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$$

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_m : 金属キャスク構造規格 別表第 5-1 に示される設計応力強さ

(2) 蓋ボルト

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

$$(\text{平均引張応力} + \text{曲げ応力}) \leq 3S_m$$

ここで、

S_m : 金属キャスク構造規格 別表第 5-2 に示される設計応力強さ

(3) 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格 別表第 5-8 に示される設計降伏点

(4) 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー

- a. 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t を超えないこと。一次+二次応力については、b. の圧縮応力との差が f_t の3倍を超えないこと。

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

ここで、

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

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

S_u : 金属キャスク構造規格¹⁾ 別表 5-9 に示される設計引張強さ

$S_y(\text{RT})$: 金属キャスク構造規格¹⁾ 別表 5-8 に示される 40 °C における
設計降伏点

- b. 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c を超えないこと。

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

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

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

- c. 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s を超えないこと。一次+二次応力については f_s の3倍を超えないこと。

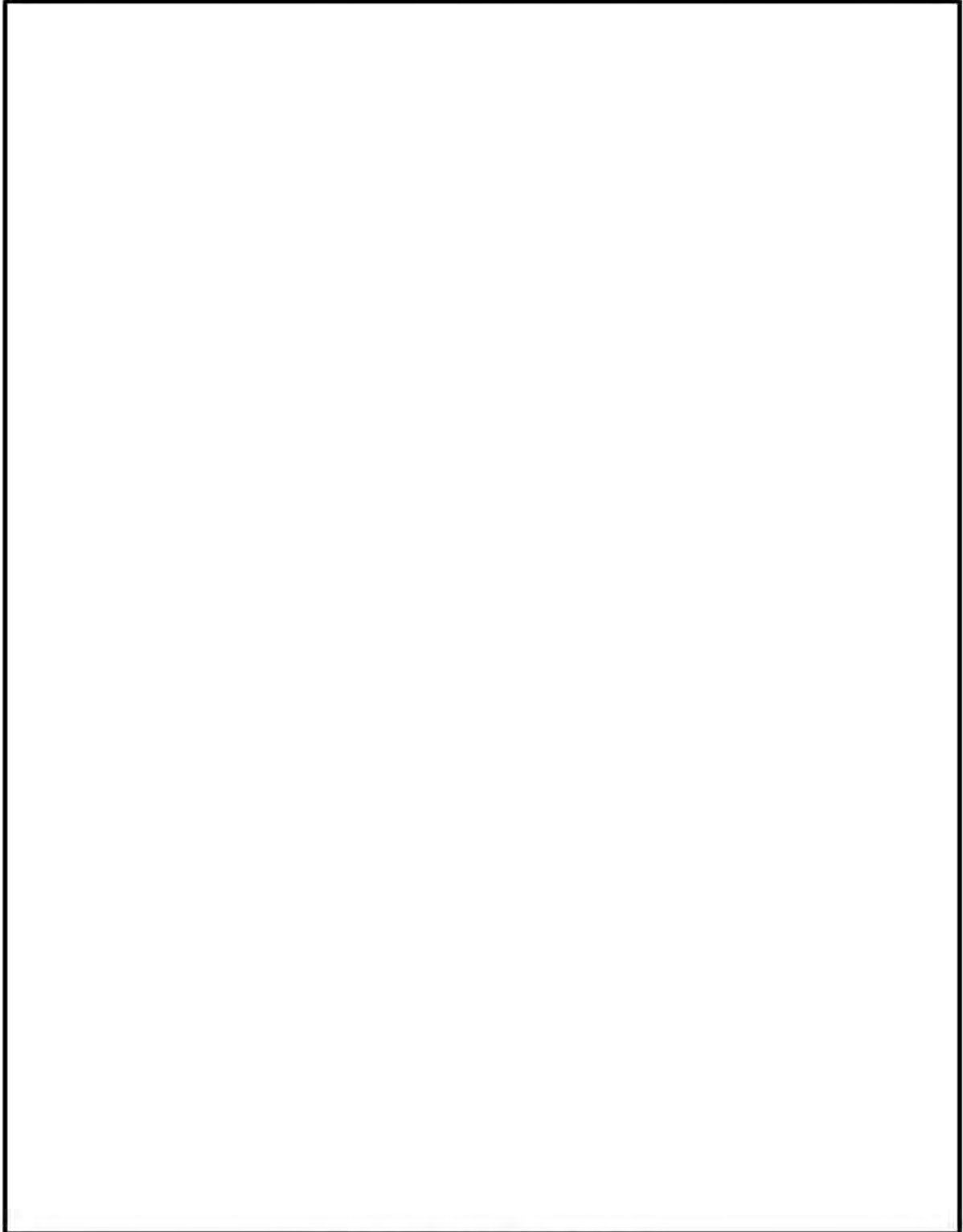
$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

- d. 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b を超えないこと。一次+二次応力については f_b の3倍を超えないこと。

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

3.4 解析結果

主要な位置（別紙 1 - 9 図参照）に対する応力解析結果を別紙 1 - 3 表から別紙 1 - 8 表に示す。0.3m 落下時において、すべての評価位置において、設計基準を満足した。



別紙第 1 - 9 図 応力評価位置

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。

別紙1-3表 頭部 0.3m 垂直落下時の一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	7	[]	124	16.7
		P_L+P_b	内	64		186	1.90
	外		65	1.86			
	②	P_L	—	33		186	4.63
二次蓋	③	P_m	—	5		124	23.8
		P_L+P_b	内	30		186	5.20
	外		34	4.47			
	④	P_L	—	6		186	30.0
三次蓋	⑤	P_m	—	7		137	18.5
		P_L+P_b	内	26		205	6.88
	外		16	11.8			
	⑥	P_L	—	36		205	4.69
胴	⑦	P_L	—	43		186	3.32
	⑧	P_m	—	9		123	12.6
		P_L+P_b	内	9	184	19.4	
	外		9	19.4			
	⑨-1	P_L	—	5	184	35.8	
	⑨-2	P_L	—	6		29.6	
胴(底板)	⑩	P_m	—	1	122	121	
		P_L+P_b	内	6	183	29.5	
	外		6	29.5			
⑪	P_L	—	5	183	35.6		
外筒	⑫	引張	—	7	156	21.2	
		圧縮	—	24	156	5.50	
		せん断	—	14	90	5.42	
		曲げ	—	45	156	2.46	
	⑬	引張	—	39	156	3.00	
		圧縮	—	4	156	38.0	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	156	155	
	⑭	引張	—	7	156	21.2	
		圧縮	—	2	156	77.0	
		せん断	—	9	90	9.00	
		曲げ	—	37	156	3.21	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) 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

(注3) 断面①~⑪の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫~⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

別紙1-3表 頭部0.3m垂直落下時の一次応力の評価(2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類(注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	2	[Redacted]	136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	4		78	18.5
		曲げ	—	12		136	10.3
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	7		157	21.4
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	8		90	10.2
		曲げ	—	18		157	7.72
	⑰	引張	—	17		157	8.23
		圧縮	—	—		157	—
		せん断	—	10		90	8.00
		曲げ	—	70		157	1.24
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	1		136	135
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	2		78	38.0
		曲げ	—	4		136	33.0
	⑲	引張	—	2	136	67.0	
		圧縮	—	1	136	135	
		せん断	—	3	78	25.0	
		曲げ	—	16	136	7.50	
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	16	186	10.6	
	㉑	P_L	—	31	185	4.96	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	48	185	2.85	
	㉓	P_L	—	14	185	12.2	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) 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

(注3) 断面⑮~⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳~㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

別紙 1 - 4 表 頭部 0.3m 垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	-	内	66	[Redacted]	372	4.63
			外	63			4.90
	②	-	内	48		372	6.75
			外	49			6.59
二次蓋	③	-	内	30		372	11.4
			外	34			9.94
	④	-	内	18		372	19.6
			外	21			16.7
三次蓋	⑤	-	内	26		411	14.8
			外	22			17.6
	⑥	-	内	85		411	3.83
			外	36	10.4		
胴	⑦	-	内	76	372	3.89	
			外	37		9.05	
	⑧	-	内	22	369	15.7	
			外	9		40.0	
	⑨-1	-	内	9	369	40.0	
			外	17		20.7	
	⑨-2	-	内	24		14.3	
			外	23		15.0	
胴(底板)	⑩	-	内	21	366	16.4	
			外	4		90.5	
	⑪	-	内	21	366	16.4	
			外	23		14.9	

(注1) 別紙 1 - 9 図 参照

(注2) 断面①~⑪における基準値は $3S_m$ である。

別紙1-4表 頭部0.3m垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	28	[Redacted]	470	15.7
		せん断	—	14		271	18.3
		曲げ	—	14		470	32.5
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	82		470	4.73
		せん断	—	18		271	14.0
		曲げ	—	85		470	4.52
下部端板	⑮	引張	—	48		410	7.54
		せん断	—	24		236	8.83
		曲げ	—	107		410	2.83
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	8		472	58.0
		せん断	—	11		272	23.7
		曲げ	—	23		472	19.5
	⑰	引張	—	11	472	41.9	
		せん断	—	8	272	33.0	
		曲げ	—	64	472	6.37	
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	35	410	10.7	
		せん断	—	2	236	117	
		曲げ	—	6	410	67.3	
	⑲	引張	—	29	410	13.1	
		せん断	—	3	236	77.6	
		曲げ	—	9	410	44.5	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	24	186	6.75	
			外	21		7.85	
	㉑	—	内	43		185	3.30
			外	38		3.86	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	25	185	6.40	
			外	96		0.92	
	㉓	—	内	14		185	12.2
			外	14		12.2	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	289	562	0.94	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	323	843	1.60	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	212	564	1.66	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	323	846	1.61	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	204	564	1.76	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	216	846	2.91	

(注1) 別紙1-9図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
 応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面㉑～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
 値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
 より小さい。

別紙1-5表 底部0.3m垂直落下時の一次応力の評価(1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P_m	—	2	[]	124	61.0
		P_L+P_b	内	16		186	10.6
			外	15			11.4
	②	P_L	—	12		186	14.5
二次蓋	③	P_m	—	1		124	123
		P_L+P_b	内	5		186	36.2
			外	4			45.5
	④	P_L	—	5		186	36.2
三次蓋	⑤	P_m	—	8		137	16.1
		P_L+P_b	内	39		205	4.25
			外	35			4.85
	⑥	P_L	—	28		205	6.32
胴	⑦	P_L	—	6		186	30.0
	⑧	P_m	—	11		123	10.1
		P_L+P_b	内	11	184	15.7	
			外	11		15.7	
	⑨-1	P_L	—	16	184	10.5	
	⑨-2	P_L	—	23		7.00	
胴(底板)	⑩	P_m	—	5	122	23.4	
		P_L+P_b	内	24	183	6.62	
			外	30		5.10	
⑪	P_L	—	11	183	15.6		
外筒	⑫	引張	—	12	156	12.0	
		圧縮	—	—	156	—	
		せん断	—	8	90	10.2	
		曲げ	—	39	156	3.00	
	⑬	引張	—	37	156	3.21	
		圧縮	—	1	156	155	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	156	155	
	⑭	引張	—	12	156	12.0	
		圧縮	—	5	156	30.2	
		せん断	—	7	90	11.8	
		曲げ	—	27	156	4.77	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) 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

(注3) 断面①~⑪の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫~⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値 f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

別紙1-5表 底部0.3m垂直落下時の一次応力の評価(2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	7		136	18.4
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	11		78	6.09
		曲げ	—	43		136	2.16
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	2		157	77.5
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	4		157	38.2
	⑰	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	3		157	51.3
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	9		157	16.4
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	13		136	9.46
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	6		78	12.0
		曲げ	—	20		136	5.80
	⑲	引張	—	14		136	8.71
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	8		78	8.75
		曲げ	—	57		136	1.38
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	12		186	14.5
	㉑	P_L	—	14		185	12.2
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	36		185	4.13
	㉓	P_L	—	25	185	6.40	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) 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

(注3) 断面⑮~⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳~㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

別紙 1 - 6 表 底部 0.3m 垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	-	内	15	[Redacted]	372	23.8
			外	17			20.8
	②	-	内	22		372	15.9
			外	14			25.5
二次蓋	③	-	内	5		372	73.4
			外	4			92.0
	④	-	内	6		372	61.0
			外	8			45.5
三次蓋	⑤	-	内	37		411	10.1
			外	37			10.1
	⑥	-	内	37		411	10.1
			外	55	6.47		
胴	⑦	-	内	26	372	13.3	
			外	15		23.8	
	⑧	-	内	24	369	14.3	
			外	11		32.5	
	⑨-1	-	内	13	369	27.3	
			外	29		11.7	
	⑨-2	-	内	21		16.5	
			外	44		7.38	
胴(底板)	⑩	-	内	49	366	6.46	
			外	34		9.76	
	⑪	-	内	20	366	17.3	
			外	34		9.76	

(注1) 別紙 1 - 9 図 参照

(注2) 断面①~⑪における基準値は $3S_m$ である。

別紙1-6表 底部0.3m垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(℃)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	51	[Redacted]	470	8.21
		せん断	—	7		271	37.7
		曲げ	—	19		470	23.7
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	87		470	4.40
		せん断	—	15		271	17.0
		曲げ	—	49		470	8.59
下部端板	⑮	引張	—	40		410	9.25
		せん断	—	11		236	20.4
		曲げ	—	58		410	6.06
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		472	—
		せん断	—	4		272	67.0
		曲げ	—	9		472	51.4
	⑰	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	11		472	41.9
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	33		410	11.4
		せん断	—	8		236	28.5
		曲げ	—	26		410	14.7
	⑲	引張	—	15		410	26.3
		せん断	—	9		236	25.2
		曲げ	—	61		410	5.72
二次蓋 シール部	⑳	—	内	22		186	7.45
			外	9			19.6
	㉑	—	内	21			185
			外	18	9.27		
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	63		1.93	
	㉓	—	内	25		185	6.40
			外	24		6.70	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	249	562	1.25	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	250	843	2.37	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	196	564	1.87	
		$\sigma_m + \sigma_t$	—	202	846	3.18	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	234	564	1.41	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	326	846	1.59	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面㉑～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

別紙 1 - 7 表 0.3m 水平落下時の一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	P _m P _L +P _b	—	3	[]	124	40.3
			内	8			22.2
	②	P _L	外	10		186	17.6
			—	10			17.6
二次蓋	③	P _m P _L +P _b	—	6		124	19.6
			内	15			11.4
	④	P _L	外	20		186	8.30
			—	19			8.78
三次蓋	⑤	P _m P _L +P _b	—	13		137	9.53
			内	23			7.91
	⑥	P _L	外	22		205	8.31
			—	24			7.54
胴	⑦	P _L	—	66		186	1.81
	⑧	P _m P _L +P _b	—	21		123	4.85
			内	20			8.20
	⑨-1	P _L	外	29		184	5.34
			—	20	8.20		
⑨-2	P _L	—	31	184	4.93		
胴(底板)	⑩	P _m P _L +P _b	—	11	122	10.0	
			内	12		14.2	
	⑪	P _L	外	13	183	13.0	
外筒	⑫	引張 圧縮 せん断 曲げ	—	77	156	1.02	
			—	20		6.80	
			—	30		2.00	
			—	87		0.79	
	⑬	引張 圧縮 せん断 曲げ	—	41	156	2.80	
			—	13		11.0	
			—	3		29.0	
			—	7		21.2	
	⑭	引張 圧縮 せん断 曲げ	—	14	156	10.1	
			—	18		7.66	
			—	20		3.50	
			—	86		0.81	

(注1) 別紙 1 - 9 図 参照

(注2) 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

(注3) 断面①~⑪の P_m に対する基準値は S_m、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は 1.5S_m である。断面⑫~⑭における引張応力に対する基準値は f_t、圧縮応力に対する基準値は f_c、せん断応力に対する基準値は f_s、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

別紙1-7表 0.3m 水平落下時の一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
下部端板	⑮	引張	—	8		136	16.0
		圧縮	—	13		136	9.46
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	63		136	1.15
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	2		157	77.5
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	13		157	11.0
	⑰	引張	—	14		157	10.2
		圧縮	—	5		157	30.4
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	24		157	5.54
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	5		136	26.2
		圧縮	—	30		136	3.53
		せん断	—	17		78	3.58
		曲げ	—	11		136	11.3
	⑲	引張	—	12		136	10.3
		圧縮	—	56		136	1.42
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	67		136	1.02
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	15	186	11.4	
	㉑	P_L	—	67	185	1.76	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	40	185	3.62	
	㉓	P_L	—	57	185	2.24	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) 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

(注3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

別紙1-8表 0.3m水平落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価(1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	解析 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS)
一次蓋	①	—	内	7	[Redacted]	372	52.1
			外	12			30.0
	②	—	内	15		372	23.8
			外	13			27.6
二次蓋	③	—	内	14		372	25.5
			外	18			19.6
	④	—	内	54		372	5.88
			外	32			10.6
三次蓋	⑤	—	内	25		411	15.4
			外	25			15.4
	⑥	—	内	43		411	8.55
			外	64	5.42		
胴	⑦	—	内	101	372	2.68	
			外	78		3.76	
	⑧	—	内	23	369	15.0	
			外	36		9.25	
	⑨-1	—	内	25	369	13.7	
			外	24		14.3	
	⑨-2	—	内	43		7.58	
			外	32		10.5	
胴(底板)	⑩	—	内	33	366	10.0	
			外	11		32.2	
	⑪	—	内	39	366	8.38	
			外	45		7.13	

(注1) 別紙1-9図 参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は3S_mである。

別紙1-8表 0.3m水平落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価(2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS)
外筒	⑫	引張	—	99	[Redacted]	470	3.74
		せん断	—	26		271	9.42
		曲げ	—	72		470	5.52
	⑬	引張	—	64		470	6.34
		せん断	—	3		271	89.3
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	86		470	4.46
		せん断	—	30		271	8.03
		曲げ	—	134		470	2.50
下部端板	⑮	引張	—	60		410	5.83
		せん断	—	33		236	6.15
		曲げ	—	146		410	1.80
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑰	引張	—	12		472	38.3
		せん断	—	6		272	44.3
		曲げ	—	25		472	17.8
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	64	410	5.40	
		せん断	—	17	236	12.8	
		曲げ	—	8	410	50.2	
	⑲	引張	—	80	410	4.12	
		せん断	—	16	236	13.7	
		曲げ	—	59	410	5.94	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	36	186	4.16	
			外	25		6.44	
	㉑	—	内	61		185	2.03
			外	62		1.98	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	70		1.64	
	㉓	—	内	57		185	2.24
			外	56		2.30	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	251	562	1.23	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	590	843	0.42	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	241	564	1.34	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	596	846	0.41	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	285	564	0.97	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	468	846	0.80	

(注1) 別紙1-9図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

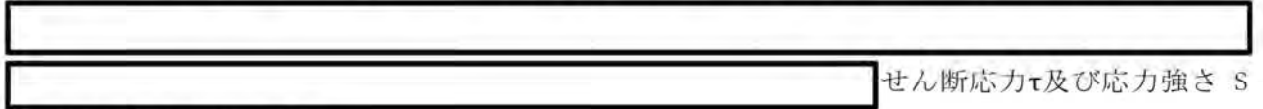
(注3) 断面⑫~⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳~㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

4. 落下時の伝熱フィンの応力評価

4.1 0.3m 垂直落下

(1) 応力計算方法

垂直落下時には、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により以下の式に示すせん断応力 τ (MPa) が生じる。なお、別紙 1-10 図のとおり、



の算出式を以下に示す。

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

$$S = 2 \tau$$

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_v : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積 (mm^2/mm)



別紙 1-10 図 伝熱フィン取付部の応力計算モデル

(2) 設計基準

伝熱フィン、中性子遮蔽材領域の除熱機能の向上を目的として胴と外筒の間に取付けられる伝熱部材であり、密封容器の構造強度を担保するものではないものの、本評価では、必要な除熱機能が維持されることを確認するため、伝熱フィンについては落下時に伝熱フィン取付部の健全性が維持されることを確認する。

(3) 計算条件及び計算結果

計算条件及び計算結果を別紙 1 - 9 表に示す。表に示すように、解析基準値を満足する。

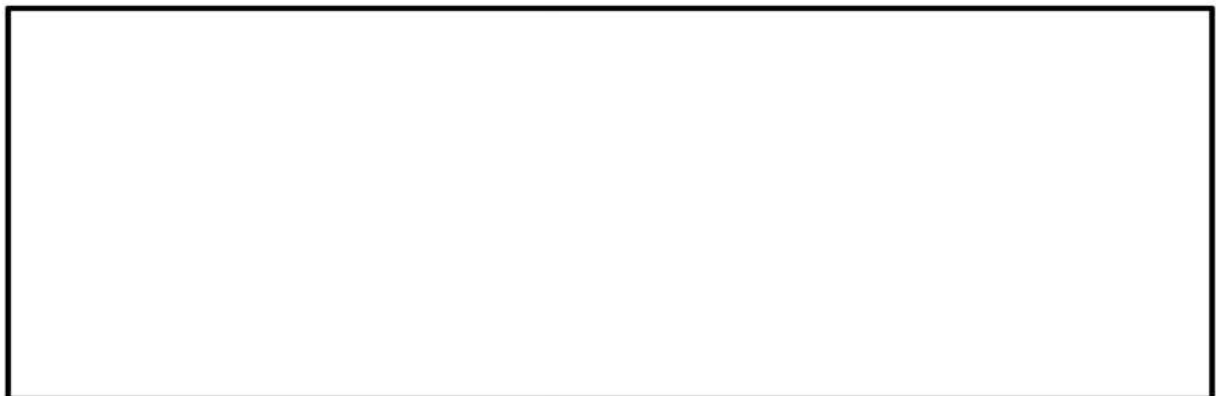
別紙 1 - 9 表 伝熱フィン取付部計算条件及び計算結果

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)	垂直落下時の衝撃加速度 : G_v (m/s ²)	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)
0.014	0.059	270	8

伝熱フィンの温度 (°C)	せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
120	3	6	63	9.50

4.2 0.3m 水平落下

水平落下時には、伝熱フィンの鉛直上側に位置する中性子遮蔽材の重量による荷重が伝熱フィンに作用するが、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 1 - 11 図参照）。



別紙 1 - 11 図 水平落下時に伝熱フィンに作用する荷重

5. 落下時のバスケットの応力評価

5.1 0.3m 垂直落下

(1) 応力計算方法

バスケットは、頭部側と底部側で同様な構造である。設計加速度は、頭部垂直落下の方が大きいいため、頭部垂直落下の値を用いて評価する。

垂直落下時に最下段のバスケットプレートには、それより上部にあるバスケットプレートを含む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。

$$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_V}{A_1}$$

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_V : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

$$A_1 = (b_{A1} - b_{A2})L_1 \cdot n_A + (b_{B1} - b_{B2})L_1 \cdot n_B$$

b_{A1} : バスケットプレート A 幅 1 (mm)

b_{A2} : バスケットプレート A 幅 2 (mm)

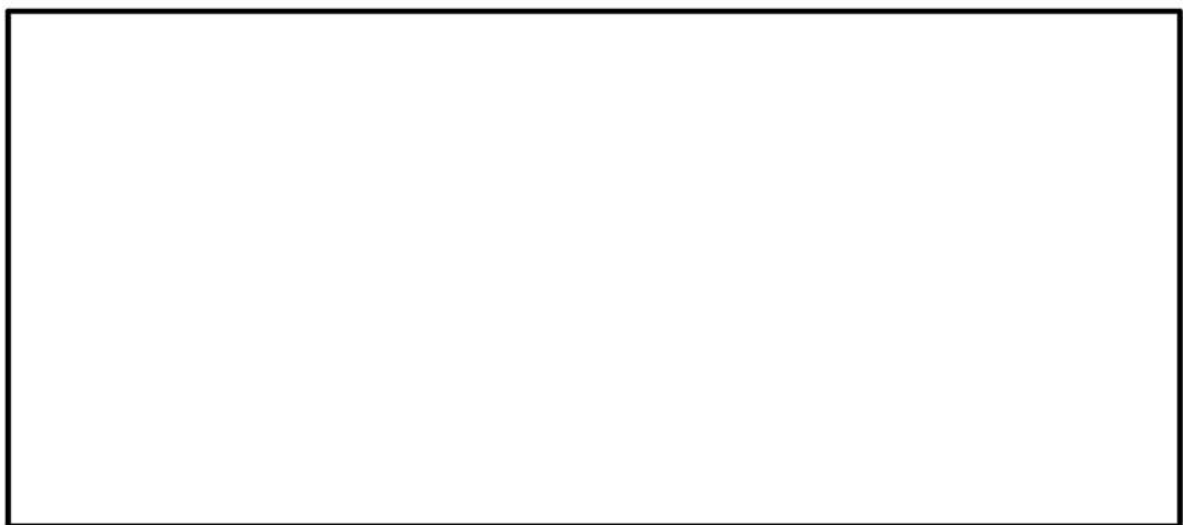
b_{B1} : バスケットプレート B 幅 1 (mm)

b_{B2} : バスケットプレート B 幅 2 (mm)

L_1 : 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_1 部の個数 (-)

n_B : 胴に接触するバスケットプレート B L_1 部の個数 (-)



別紙 1-12 図 バスケットプレートの応力計算モデル

(2) 設計基準

アルミニウム合金製のバスケットプレートについては、金属キャスク構造規格のバスケットの考え方を基本として、以下のとおり設計基準値を設定した。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_m + P_b \leq \alpha S_m$$

$$\tau \leq 0.6 S_m$$

ここで、

S_m : 設計応力強さ

P_m : 一次一般膜応力

P_b : 一次曲げ応力

α : 純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比、
又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

τ : 平均せん断応力

(3) 計算条件及び計算結果

計算条件と計算結果を別紙 1-10 表に示す。表に示すように、評価位置において解析基準値を満足する。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 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 1-10 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)	垂直落下時の 衝撃加速度 : G_v (m/s ²)
数値	5600	270

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_1 (mm)	バスケット プレート 内幅 : b_2 (mm)	バスケット プレート長 さ : L_1 (mm)	胴に接触す るバスケット プレート L_1 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						

項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	7	36	4.14
	B	7		4.14

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

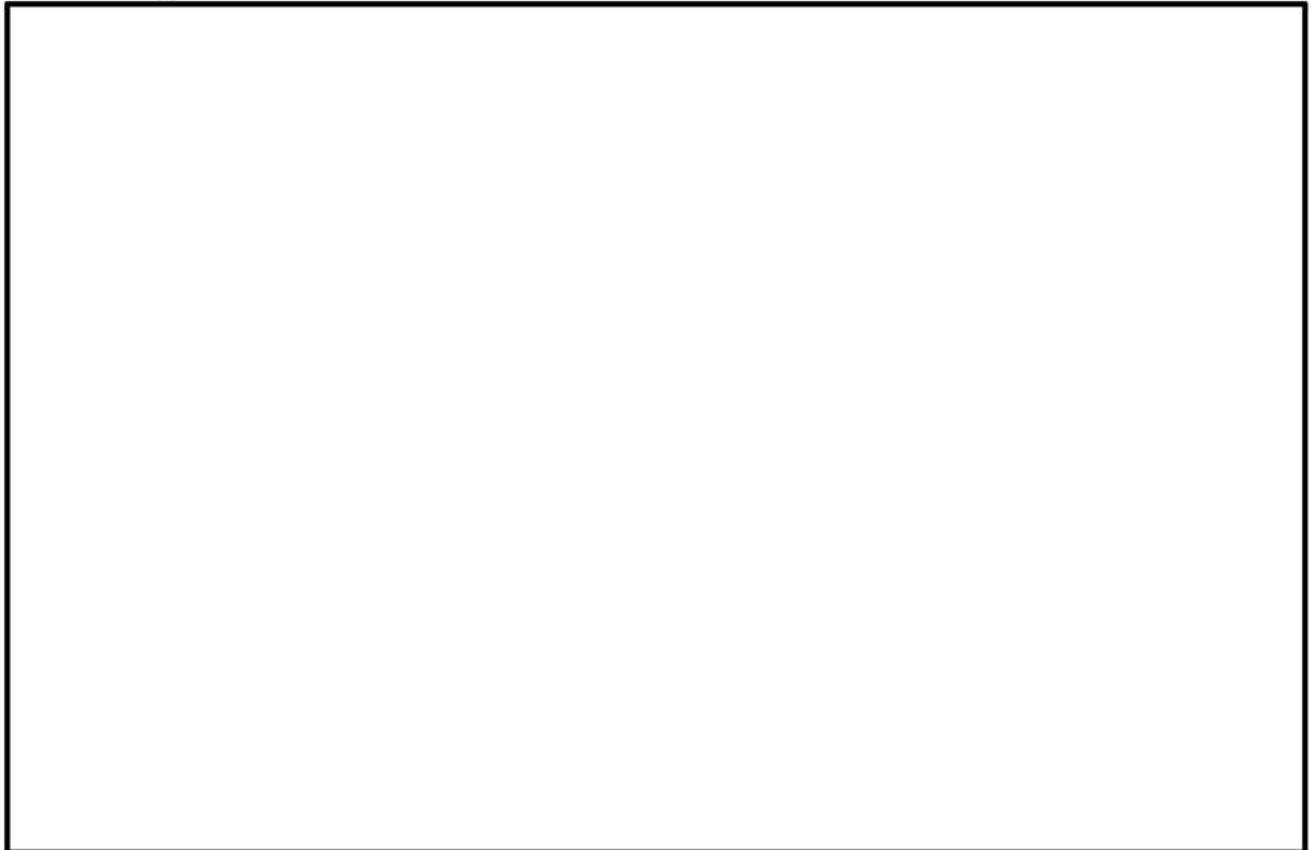
内は商業機密のため、非公開とします。

5.2 0.3m 水平落下

(1) バスケットプレート縦板

a. 応力計算方法

水平落下時にバスケットプレート縦板切欠部には、別紙 1 - 13 図に示すように、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 1 - 13 図 バスケットプレート縦板の応力計算モデル

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \cdot N} G_{II}$$

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_{II} : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s^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。

N : バスケットプレートの数 (枚)

A : 断面積 (mm²)

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2$$

b₁ : バスケットプレート幅 1 (mm)

b₂ : バスケットプレート幅 2 (mm)

h₁ : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b₃ : バスケットプレート幅 3 (mm)

b₄ : バスケットプレート幅 4 (mm)

h₂ : バスケットプレート高さ 2 (mm)



別紙 1-14 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)

b. 設計基準

0.3m 水平落下の設計基準は、5.1 に示す 0.3m 垂直落下と同じである。

c. 計算条件及び計算結果

計算条件と計算結果を別紙 1-11 表に示す。表に示すように、解析基準値を満足する。なお、180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 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 1-11 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_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数 (BP 無, BP 有) : N_r (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)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値					210

項目	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート幅 4 : b_4 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm ²)
数値							

項目	バスケットプレートの数 : N (枚)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値		12	36	2.00

(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。

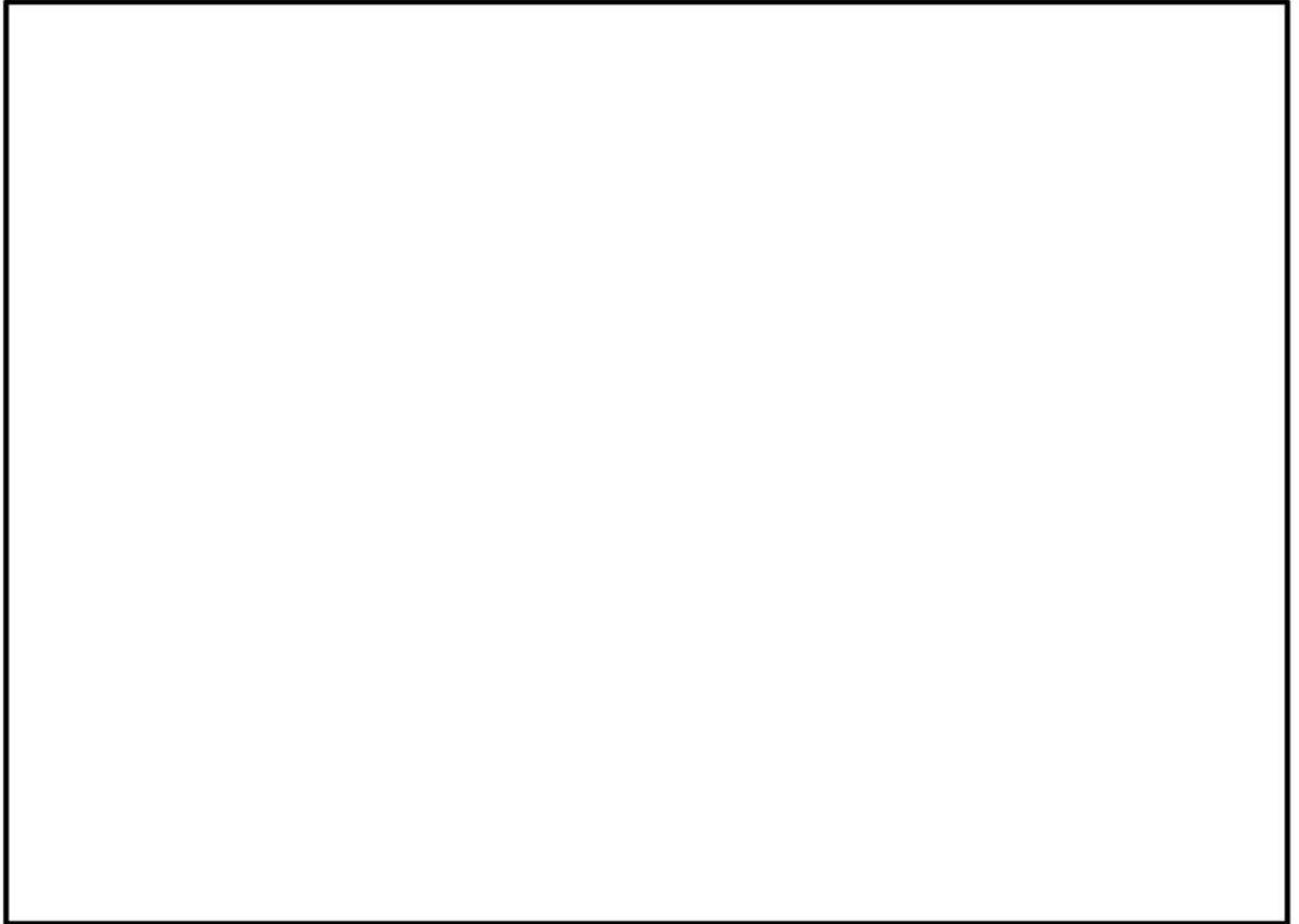
バスケットプレートの質量
 中性子吸収材の質量

--

(2) バスケットプレート横板

a. 応力計算方法

水平落下時にバスケットプレート横板切欠部には、別紙 1-15 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 1-15 図 バスケットプレート横板の応力計算モデル

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

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

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)

$$M = \frac{w \cdot \ell^2}{12} G_H$$

Z : 断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1}$$

A : 断面積 (mm²)

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2)$$

F : せん断力 (N)

$$F = w \times \ell / 2 \times G_H$$

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_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s²)

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)

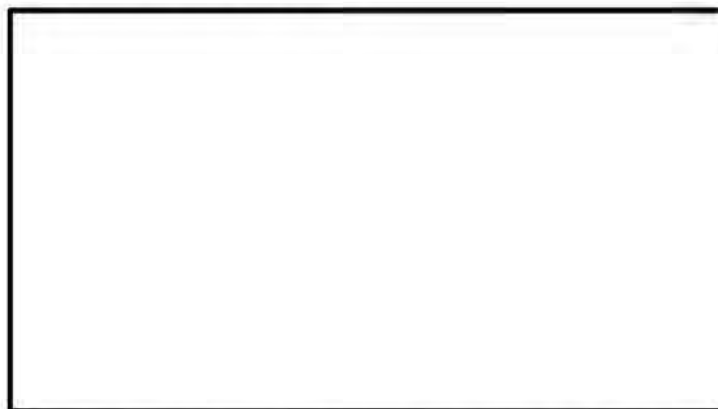
h₁ : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b₁ : バスケットプレート幅 1 (mm)

b₂ : バスケットプレート幅 2 (mm)

h₂ : バスケットプレート高さ 2 (mm)

b₃ : バスケットプレート幅 3 (mm)



別紙 1-16 図 バスケットプレートの断面形状 (曲げ応力評価)

b. 設計基準

0.3m 水平落下の設計基準は、5.1 に示す 0.3m 垂直落下と同じである。

c. 計算条件及び計算結果

計算条件と計算結果を別紙 1-12 表に示す。表に示すように、解析基準値を満足する。なお、180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 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 1-12 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 (BP 有) : 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 (枚)	バスケットセルの内幅 : l (mm)	分布荷重 : w (kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s^2)
数値						210

項目	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)
数値					

項目	曲げモーメント : M ($N \cdot mm$)	断面係数 : Z (mm^3)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : αS_m (MPa)	余裕率 (-)
数値			8	46	4.75

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm^2)	せん断応力 : τ (MPa)	基準値 : $0.6S_m$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			2	21	9.50

別添 0.3m 落下時の燃料被覆管の応力評価

1. 概要

0.3m 落下時における燃料被覆管の構造健全性として、燃料被覆管の応力評価の詳細を示す。

2. 燃料被覆管の応力評価

2.1 0.3m 垂直落下

垂直落下時に燃料被覆管に生じる応力は、落下衝撃による圧縮応力 σ_c (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。垂直落下時において最大応力強さ S (MPa) は、燃料被覆管内面に生じるので燃料被覆管内面のみ評価する。

① 落下衝撃により生じる圧縮応力

落下衝撃により生じる圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = -\frac{WG_v}{A}$$

ここで、

W : 燃料被覆管最下端における質量 (kg)

G_v : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : 燃料被覆管の断面積 (mm^2)

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

d_o : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管の内径 (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、以下の式で与えられる。

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

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

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

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)

$$R = \frac{r}{a} \quad (\text{内面においては } R=1)$$

r : 評価位置 ($a \leq r \leq b$)

③ 応力強さ

垂直落下時に生じる圧縮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、以下の式で与えられる。

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

ここで、

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

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

$$\sigma_{zL} = \sigma_v + \sigma_k$$

燃料被覆管材料 (ジルカロイ-4) の 215 °C における照射後の降伏応力 σ_y は、589 MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の諸式を用いて燃料に対して計算した結果を別紙 1-13 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは降伏応力以下である。

別紙 1-13 表 0.3m 垂直落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料		15×15燃料	
	A型	B型	A型	B型
燃料被覆管最下端における質量：W (kg)				
衝撃加速度：G _v (m/s ²)	270	270	270	270
燃料被覆管外径：d _o (mm)				
燃料被覆管内径：d _i (mm)				
内圧：P ₀ (MPa)				
応力強さ：S (MPa)	105	102	126	120
降伏応力：σ _y (MPa)	589	589	589	589
余裕率：MS (-)	4.60	4.77	3.67	3.90

2.2 0.3m 水平落下

水平落下時に生じる応力は、落下衝撃による曲げ応力 σ_b (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z、σ_r、σ_θ (MPa) である。水平落下時において最大応力強さ S (MPa) は、外面に生じるので外面のみ評価する。

① 落下衝撃により生じる圧縮応力

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、落下衝撃により生じる最大曲げ応力は、次式で与えられる。

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

$$M = \frac{1}{12}(W_f + W_c)\ell^2 \times G_H$$

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

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (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、2.1②と同じである。

③応力強さ

水平落下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、以下の式で与えられる。

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

ここで、

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

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

$$\sigma_{zL} = -\sigma_b + \sigma_z$$

以上の諸式を用いて燃料に対して計算した結果を別紙 1 - 14 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは降伏応力以下である。

別紙 1 - 14 表 0.3m 水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料		15×15燃料	
	A型	B型	A型	B型
ペレット単位長さ当たり質量： W_f (kg/mm)				
燃料被覆管単位長さ当たり質量： W_c (kg/mm)				
衝撃加速度： G_{II} (m/s^2)	210	210	210	210
支持スパン： l (mm)				
燃料被覆管外径： d_o (mm)				
燃料被覆管内径： d_i (mm)				
内圧： P_o (MPa)				
応力強さ： S (MPa)	141	140	207	195
降伏応力： σ_y (MPa)	589	589	589	589
余裕率： MS (-)	3.17	3.20	1.84	2.02

地震時のトラニオンの構造健全性評価

1. 概要

MSF-24P 型は、横置き状態で貯蔵され、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に固縛される。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。

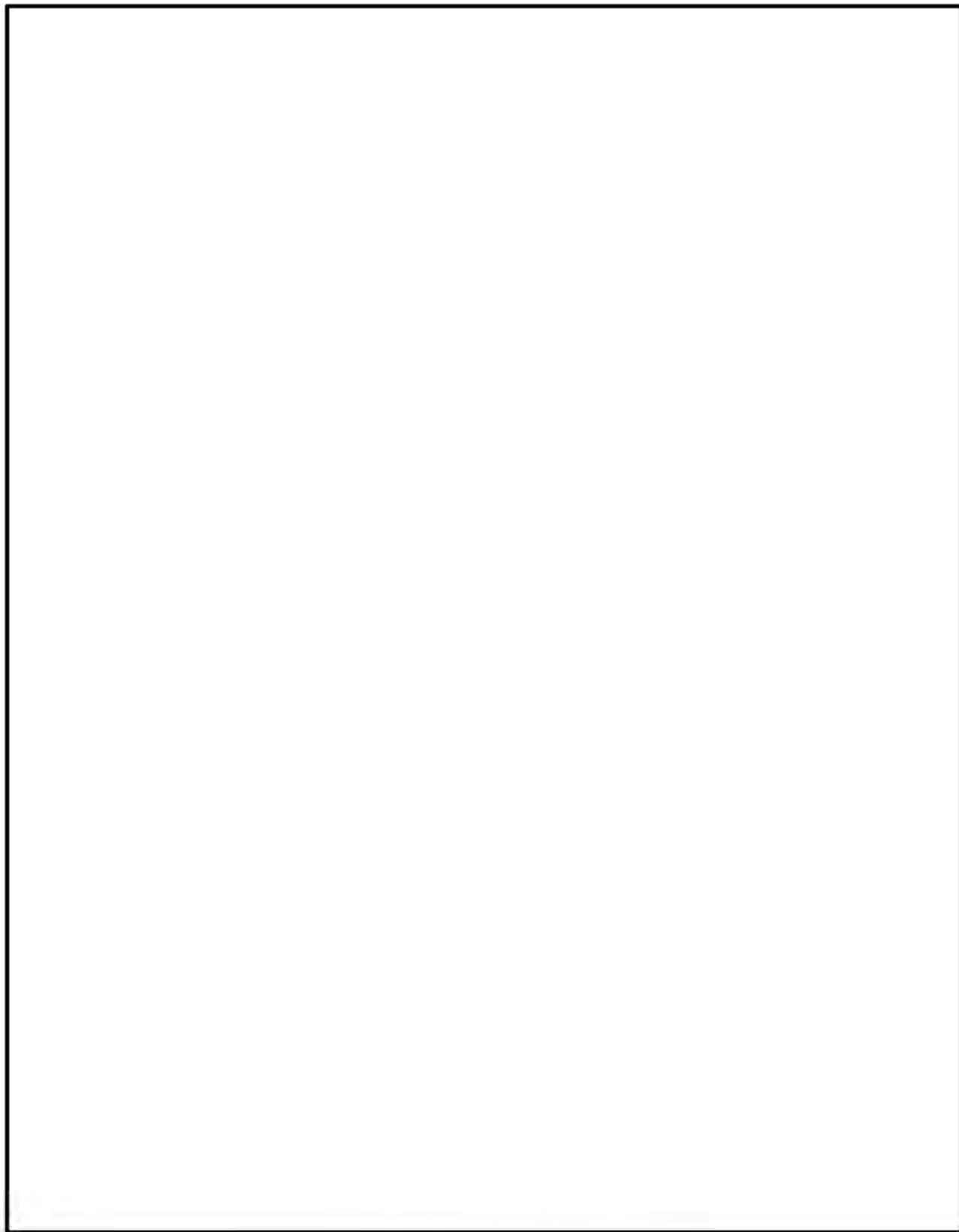
2. 地震時のトラニオンの構造健全性評価

2.1 固縛方法

MSF-24P 型の貯蔵時の固縛構造を別紙 2-1 図に示す。MSF-24P 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-24P 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2-1図 貯蔵時の固縛構造

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。

別紙2-2

2.2 荷重条件

MSF-24P 型の貯蔵中における質量は 134.4ton である。また、MSF-24P 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 2-1 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 2-1 表及び別紙 2-2 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_H : 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)

$$= 134.4 \times 10^3 \times 1.64 \times 9.80665 = 2.162 \times 10^6 \text{ N}$$

V_2 : 下方向慣性力 (N)

$$= 134.4 \times 10^3 \times 2.64 \times 9.80665 = 3.480 \times 10^6 \text{ N}$$

H : 前後方向慣性力 (N)

$$= 134.4 \times 10^3 \times 2.35 \times 9.80665 = 3.098 \times 10^6 \text{ N}$$

L : 左右方向慣性力 (N)

$$= 134.4 \times 10^3 \times 2.35 \times 9.80665 = 3.098 \times 10^6 \text{ N}$$

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 2-1 表及び別紙 2-2 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 2-1 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。

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

$$= 1.755 \times 10^6 \text{ (N)}$$

ここで、 n : 荷重を受けもつ下部トラニオンの数 = 2

別紙 2-1 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)	1.229	/	/	/	/	/	0.934	/	/
	下 (2.64 G)	/	/	/	1.835	/	/	1.646	/	/
水平 方向	前後 (2.35 G)	/	0	/	/	0	/	3.098	/	/
	左右 (0 G)	/	/	0	/	/	0	/	/	0

別紙 2-2 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)	1.229	/	/	/	/	/	0.934	/	/
	下 (2.64 G)	/	/	/	1.835	/	/	1.646	/	/
水平 方向	前後 (2.35 G)	/	0	/	/	0	/	0	/	/
	左右 (0 G)	/	/	1.761	/	/	1.634	/	/	1.465

2.3 設計基準

トラニオンの設計基準は、金属キャスト構造規格 供用状態 D の設計基準に基づき別紙 2-3 表のとおりとする。なお、トラニオンの設計温度は、125℃である。

別紙 2-3 表 トラニオンの設計基準

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

(注) $1.5f_b^*$: 許容曲げ応力 (MPa)

$1.5f_s^*$: 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 2-2 図に示す。



別紙 2-2 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 2-2 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 2-2 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 2-4 表に示す。別紙 2-4 表に示すとおり、下部トラニオン本体の応力は基準値を満足する。

別紙 2-4 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	1.755 × 10 ⁶				
B-B	1.755 × 10 ⁶				

評価断面	曲げ応力		せん断応力		応力強さ		余裕率 ^(注1) (-)
	σ _b (MPa)	基準値 (MPa)	τ (MPa)	基準値 (MPa)	S (MPa)	基準値 (MPa)	
A-A	131	591 (1.5f _b *)	65	341 (1.5f _s *)	185	591 (1.5f _t *)	2.19
B-B	238	591 (1.5f _b *)	40	341 (1.5f _s *)	252	591 (1.5f _t *)	1.34

(注1) 余裕率は応力強さに対して算出したものである。

(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 2-3 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 R_1 及び R_2 は次式で与えられる。

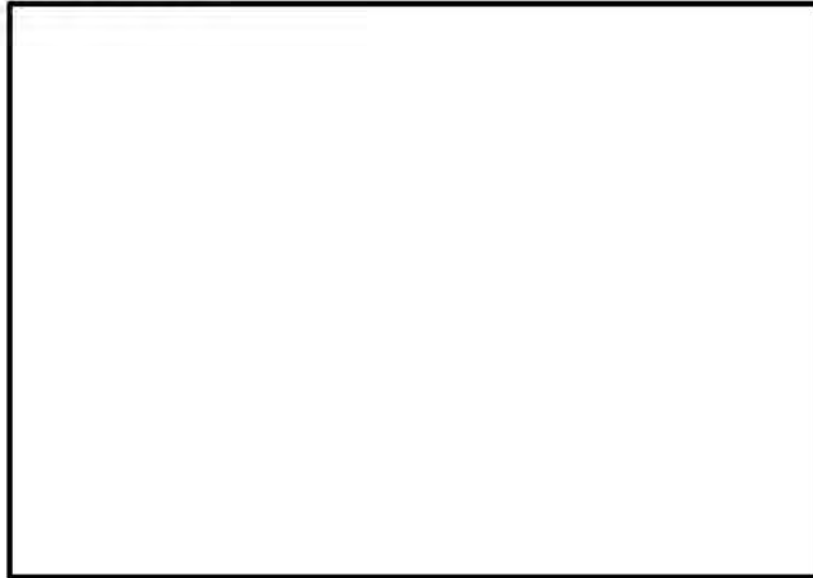
$$R_1 = \frac{FL_1 + \mu F(d/2) + FL_2}{\mu d + L_2}$$

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

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2-3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)

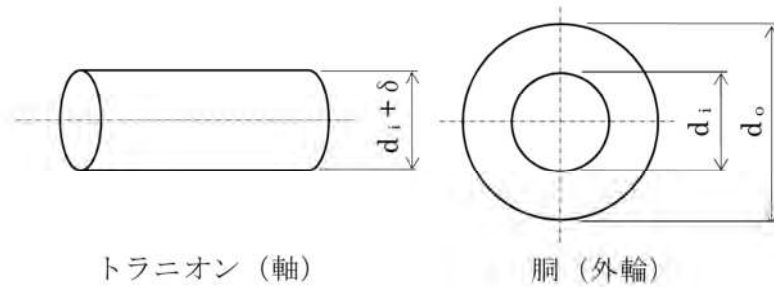
別紙2-4図にしまり嵌め荷重による支圧応力の算出モデルを示す。しまり嵌め荷重による支圧応力は次式により与えられる。

$$\sigma_{P2} = \frac{\alpha}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \cdot \frac{d_i^2}{d_o^2 - d_i^2}}$$

ここで、

ν : ポアソン比 (-)

- α : しまり嵌め比 (δ / d_i)
- δ : 胴と下部トラニオンの締め代 (直径差)
- d_i : 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 2-4 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 2-5 表に示す。別紙 2-5 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値を満足する。

別紙2-5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	1.755 × 10 ⁶				0.35
B	1.755 × 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)	基準値 ^(注1) : 1.5f _p * (MPa)	余裕率
A	3.331 × 10 ⁶	165	412	1.49
B	1.576 × 10 ⁶	78		4.28

(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締め代 : δ_0 (mm)	下部トラニオン接続部の外径 : d _i (mm)	下部トラニオン接続部の外輪外径 : d _o (mm)
A及びB	0.3			

(注2) d_o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d_i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	1.90 × 10 ⁵	1.96 × 10 ⁵	44

評価領域	支圧応力 (一次+二次応力)		余裕率 (-)
	σ_P (MPa)	基準値 ^(注3) : 1.5f _p * (MPa)	
A	209	412	0.97
B	122		2.37

(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。