

補足説明資料

第四条 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

目 次

1	要求事項	3
2	要求事項への適合性	8
別紙1	地震時におけるキャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性の評価	
別紙2	地震時の特定兼用キャスクの機能維持評価	

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。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第四条第6項第一号

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第四条第2項

2 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とど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とど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第四条第3項第一号

3 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的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一条

設置許可基準規則第四条第6項第一号の原子力規制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 および鉛直 1600Gal
速度	水平 2m/s、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、「4.2.1 地震」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「4.3.1.3 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、(1)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)

兼用キャスクの評価は、以下によること。(別表中「兼用キャスク本体評価」欄)

- (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) 許容限界の設定が、以下を踏まえ妥当であること。
 - 1) 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。
 - a. 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。
 - b. 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「4.3.1.3 許容限界」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、(2)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

CASTOR® geo26JP 型の地震による損傷防止に関する設計は、以下の通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四条第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第四条第2項

2 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とど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とど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第四条第3項第一号

3 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的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一条

設置許可基準規則第四条第6項第一号の原子力規制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

CASTOR[®] geo26JP 型は、地盤の十分な支持を想定して貯蔵架台等に固定された特定兼用キャスクを基礎等に固定する方法でたて置きで設置し、設置許可基準規則第四条第6項の地震力として兼用キャスク告示第一条で定める合理的な地震力が作用しても特定兼用キャスクの安全機能が損なわれない設計とする。

図1に示す様に、CASTOR[®] geo26JP 型はキャスク本体の溝部とキャスク本体の下部を固定装置により貯蔵架台に固定することで、地震力が作用してもキャスクの滑動や転倒を防ぐ設計とする。固定装置の舌部をキャスク本体の溝部に嵌め込むことで上下動を制限し、固定装置の下部でキャスク本体を挟み込むことで水平方向の移動を制限する。固定方法の詳細は別紙1に示す。

CASTOR[®] geo26JP 型は自重及び貯蔵中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、安全機能が維持される設計とする。これについては、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)と鉛直方向及び水平方向の地震力の同時に不利な方向の組合せを考慮する。

特定兼用キャスクの貯蔵架台等に固定するキャスク本体の溝部と下部固定装置接触部は、弾性状態に留まるようにし、特定兼用キャスクが滑動及び転倒せず、特定兼用キャスクの安全機能に影響を及ぼさない設計とする。さらに、上記荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能のうち閉じ込め機能を担保する部材はおおむね弾性範囲に留まる様にし、臨界防止機能を担保するバスケットの鋼製部材は弾性状態に留まるよう設計する。また、除熱機能および遮蔽機能を担保する部材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するよう設計する。

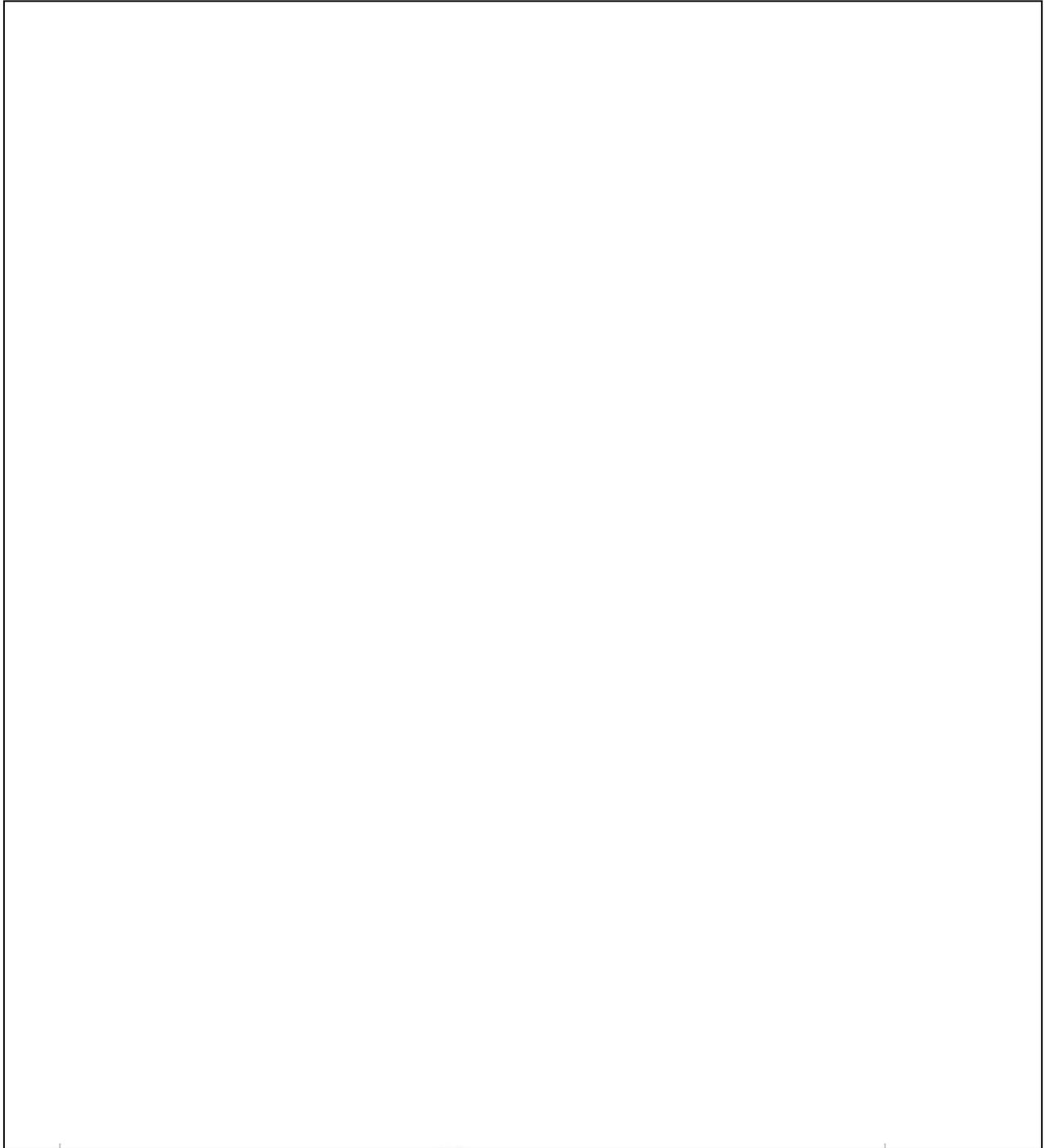


図 1 貯蔵時のキャスク

以上の設計方針に基づき、CASTOR® geo26JP 型が地震力に対して特定兼用キャスクの安全機能を維持することを確認する。

なお、設置許可基準規則解釈別紙 4 第 4 条第 2 項第 3 号に定める地震時に貯蔵施設における周辺施設からの波及的影響に対する確認事項については、型式証明申請の対象外とし、設置(変更)許可申請で確認を受ける事項とする。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能を維持するために自然現象等に対する基本方針の妥当性を確認することが定められており、特定兼用キャスクの地震による損傷防止に関する設計は、以下の通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、兼用キャスク告示が定める地震力とし、地震力を算出するために必要な加速度は以下のとおりとする。

速度は算出に用いない。

- ・加速度：水平 2300Gal 及び鉛直 1600 Gal

[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。
- (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。

CASTOR® geo26JP 型は、地盤の十分な支持を想定して貯蔵架台等に固定された特定兼用キャスクを基礎等に固定する方法でたて置きで設置する設計である。

CASTOR® geo26JP 型は、基礎等に固定する設計とするため、適用外である。

[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。

CASIOR® geo26JP 型は、兼用キャスク告示第1条に定める加速度による地震力を作用させても、図1に示すキャスク本体の溝部を固定装置により貯蔵架台に固定し、特定兼用キャスクの貯蔵架台等に固定するキャスク溝部及び下部固定装置接触部が弾性状態に留まるようにすることで、特定兼用キャスクが滑動及び転倒せず、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。

[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。)

周辺施設からの波及的影響の評価については、本型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。

[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からの影響評価については、本型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。

[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。

CASTOR® geo26JP 型の地震力に対する構造健全性及び機能維持評価は、金属キャスク構造規格に基づき、CASTOR® geo26JP 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)を組み合わせる実施する。

CASTOR® geo26JP 型は、貯蔵架台の固定装置によって地面に固定され、キャスク溝部及び下部固定装置接触部の構造健全性が維持される設計とすることから、地震力による滑動及び転倒等を想定しない。

なお、貯蔵架台及び固定装置については、本型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。

[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こと。
- a. 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。
 - b. 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。

CASTOR® geo26JP 型の地震力に対する構造健全性評価及び機能維持評価では、金属キャスク構造規格を考慮し、保守的に構造健全性評価では胴の許容限界を弾性範囲内と設定し、機能維持評価では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、胴)の構成部材の許容限界をおおむね弾性範囲内、臨界防止機能を担うバスケットの許容限界を弾性範囲内と設定する。

[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。

CASTOR® geo26JP 型の地震力に対する構造健全性及び機能維持評価は、FEM による静的解析を実施する。なお、型式証明における設計方針の妥当性確認においては応力評価式を用いた静的解析により実施する。ここで、静的解析における地震力は、兼用キャスク告示で定める地震力を用い、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組み合わせで作用させることを考慮する。

[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。

CASTOR® geo26JP 型は、地盤の十分な支持を想定して貯蔵架台等に固定された特定兼用キャスクを基礎等に固定する方法でたて置きで設置する設計であり、キャスク溝部及び下部接触部の構造健全性が維持される設計とすることから、地震力による滑動や転倒等を想定しない。このため、衝突解析は実施しない。

また、兼用キャスク告示の地震力を用いて静的解析を行うため、地震力の算定において、スペクトルモード解析及び時刻歴応答解析は実施しない。

なお、周辺施設である貯蔵架台及び固定装置は本型式証明申請の範囲外とし、設置(変更)許可申請において確認を受ける事項とする。

[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「4.3.1.3 許容限界」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、(2)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。

CASTOR® geo26JP 型の耐震性評価では、CASTOR® geo26JP 型に作用する地震力に加えて、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。

耐震性を評価する上で必要な箇所は以下のとおりとする。

(構造健全性評価)

- 滑動及び転倒防止を担保する部材として胴(キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部)

(機能維持評価)

- 閉じ込め機能を担保する部材として密封境界部(一次蓋シール部、一次蓋ボルト)
- 臨界防止機能を担保する部材としてバスケット
- 遮蔽及び除熱機能を担保する部材として胴(ボアホール部及び放熱フィン部)

なお、除熱機能を担保するフィンは胴の一部であること、遮蔽機能を担保する中性子遮蔽材は胴内部のボアホール部に配置されていることから、これらの機能維持評価対象は胴とし、構造健全性評価における活動及び転倒防止を担保する部材としての胴の評価に含まれるものとする。

CASTOR[®] geo26JP 型の地震力に対する構造健全性及び機能維持評価の概要を以下に示す。

A. キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性評価

CASTOR[®] geo26JP 型は、キャスク溝部及びキャスク下部が固定装置によって貯蔵架台に固定され、たて置き姿勢で貯蔵される。したがって、地震時のキャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性を評価する。

CASTOR[®] geo26JP 型の地震時におけるキャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性評価フローを図2に示す。地震時に CASTOR[®] geo26JP 型に生じる加速度(水平 2.35G (2300Gal) 及び鉛直 1.64G (1600Gal))により算出される地震力を基に、キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部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。キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性評価の詳細を別紙1に、応力評価結果を表1に示す。

表1に示すとおり、許容限界(評価基準)は弾性範囲内である降伏応力であり、地震時にキャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部に生じる応力は評価基準を満足しており、構造健全性は維持される。

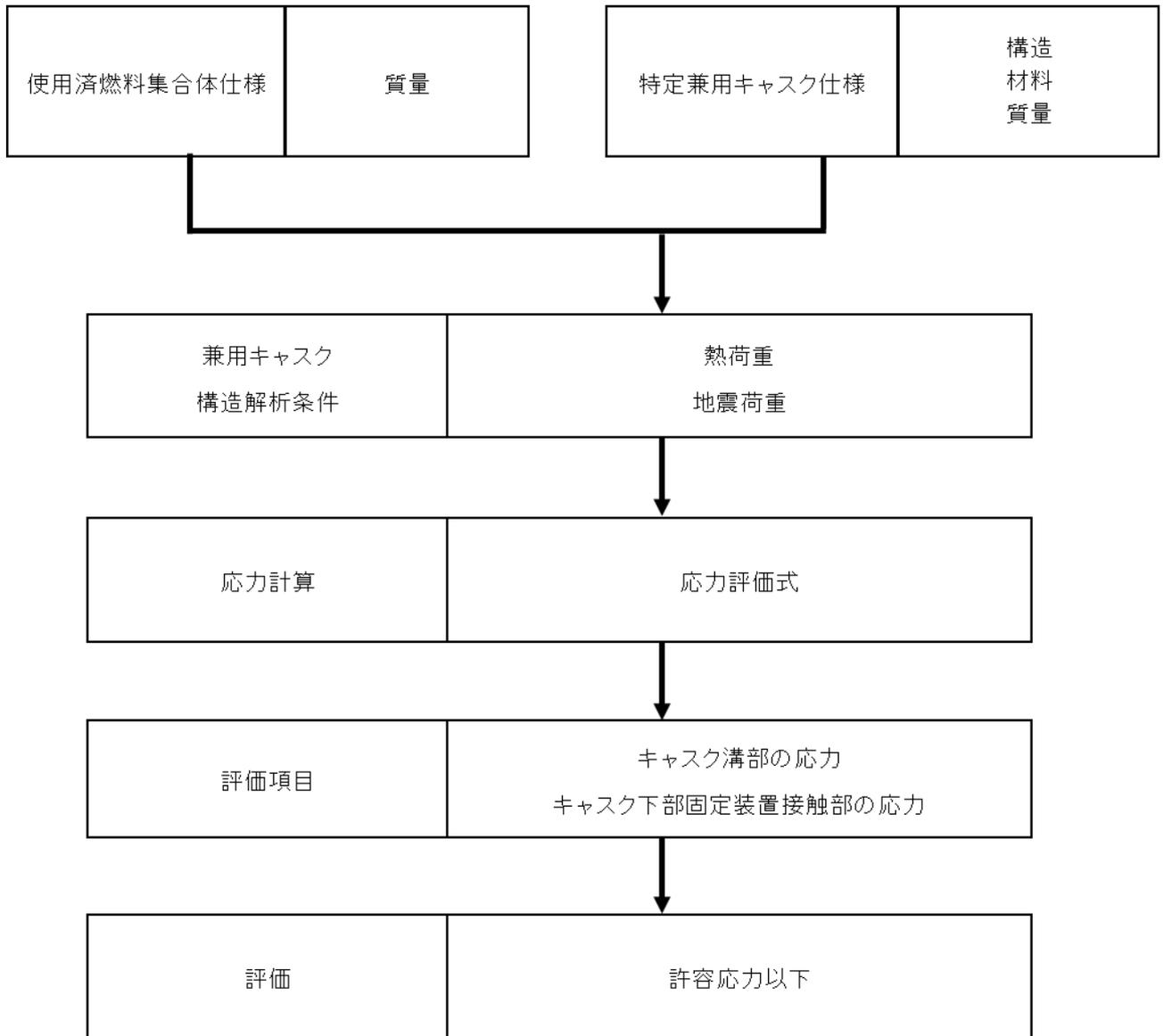


図 1 地震時の構造健全性評価フロー

表 1 地震時の構造健全性評価結果

評価項目	一次せん断応力		一次曲げ応力		一次膜応力	
	計算値 [MPa]	評価基準 ¹⁾ [MPa]	計算値 [MPa]	評価基準 ¹⁾ [MPa]	計算値 [MPa]	評価基準 ¹⁾ [MPa]
キャスク溝部	52	92.8	138	160.8	-	-
キャスク下部固定装置接触部	-	-	-	-	45	160.8

¹⁾ 評価基準の考え方については表 A1-2 参照

B. 密封境界部、バスケット及び胴の機能維持評価

CASTOR[®] geo26JP 型の地震時における密封境界部及びバスケットの機能維持評価フローを図3に示す。地震時に CASTOR[®] geo26JP 型に生じる加速度(水平 2300Gal 及び鉛直 1600Gal)により算出される地震力を基に、密封境界部(一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト、胴)、バスケット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、一時蓋の横ずれ有無を評価する。

密封境界部及びバスケットの機能維持評価の詳細を別紙2に、応力評価結果を表2及び表3に、密封境界部の横ずれ評価結果を表4に示す。表2及び表3に示すとおり、地震時に密封境界部及びバスケットに生じる応力は弾性範囲に留まり、閉じ込め機能及び臨界防止機能が損なわれることは無い。また、表4に示すとおり、地震時に一次蓋に作用する慣性力は蓋締め付け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。

したがって、地震時に CASTOR[®] geo26JP 型の安全機能は維持される。

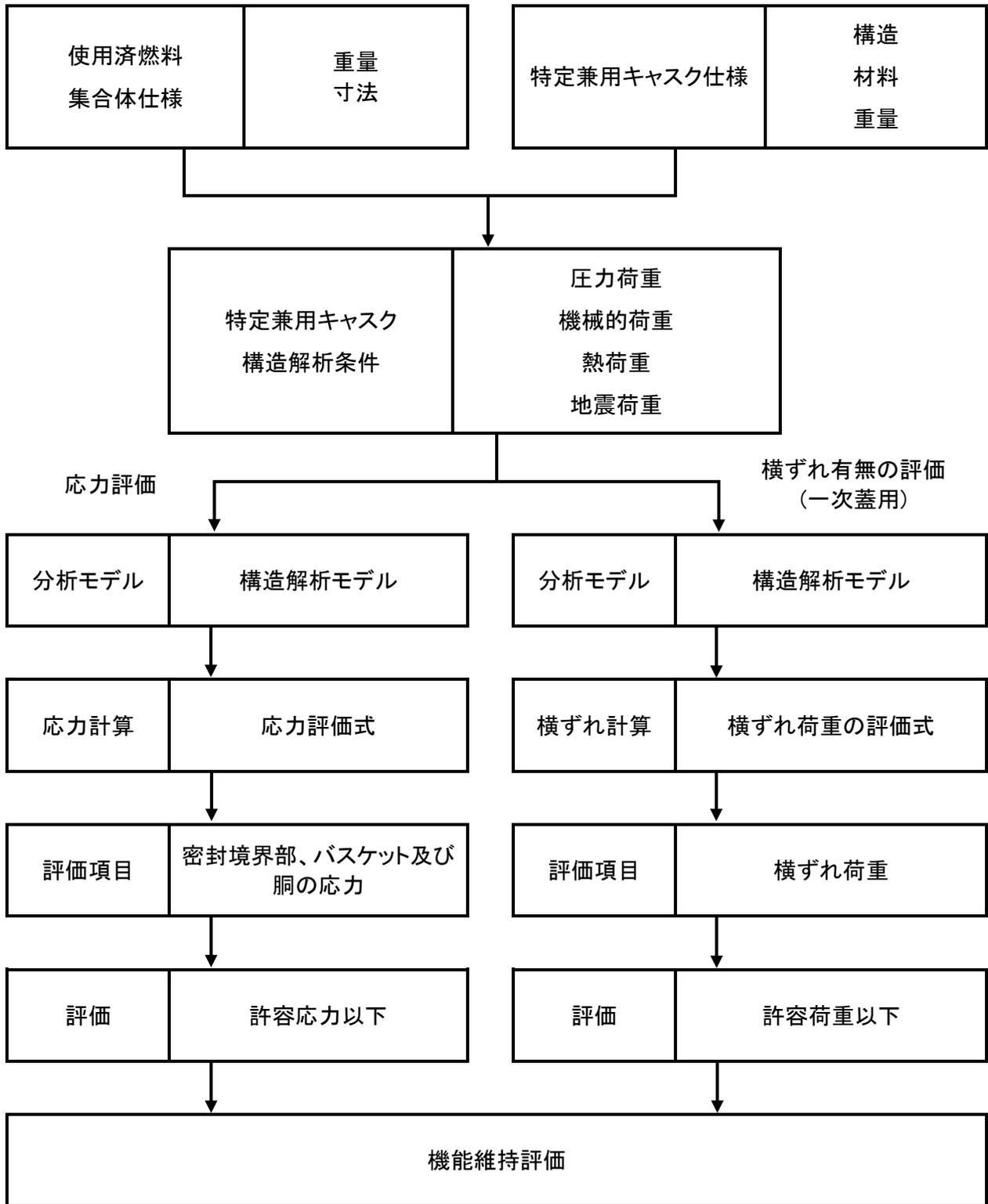


図2 地震時のCASTOR® geo26JP型の機能維持評価フロー

表 2 地震時の密封境界部の応力評価結果

評価部位 ¹⁾	計算値[MPa]	評価基準[MPa] ²⁾
一次蓋密封シール部 $\max(\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z)$	30.7	155.2
一次蓋ボルト (σ_{m+b})	334.7	913.4
胴 (σ_m)	<u>45</u>	<u>155.2</u>

¹⁾ σ_r : 半径方向応力、 σ_t : 曲げ応力、 σ_z : 接線方向応力、 σ_{m+b} : 軸方向一次膜+一次曲げ応力

²⁾ 評価基準の考え方については表 A1-2 参照

表 3 地震時のバスケットの応力評価結果

地震力の作用方向	評価部位 ¹⁾	計算値[MPa]	評価基準[MPa] ²⁾
鉛直	コーナーエレメント (σ_m)	<2	114
	バスケット側板 (σ_m)	<2	114
	H-ビーム (σ_m)	<2	157
水平	コーナーエレメント (σ_m)	<u><2</u>	<u>114</u>
	バスケット側板 (σ_p)	<u><2</u>	<u>114</u>
	H-ビーム (σ_b)	<u>32</u>	<u>157</u>

¹⁾ σ_m : 一次膜応力、 σ_b : 一次曲げ応力

²⁾ 評価基準の考え方については表 A1-2 参照

表 4 地震時の一次蓋の横ずれ評価結果

評価項目	計算値[N]	判定基準[N] ¹⁾
一次蓋の慣性力	1.427×10^5	3.456×10^6

¹⁾ 一次蓋締め付け時のボルト荷重による摩擦力

別紙 1: 地震時におけるキャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性の評価

A1.1 概要

本資料は、キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部を対象として地震時の構造健全性について評価した結果をまとめたものである。評価の詳細を以下に示す。

なお、評価に関する部品の材料の仕様は 1024-TR-00005 “補足説明資料 第4条地震による損傷の防止、第5条津波による損傷の防止、第6条外部からの衝撃による損傷の防止”に示すとおりである。

固定装置の設計については、本申請の申請範囲外のため、発電用原子炉施設の設置(変更)許可申請時に別途確認される。

A1.2 地震時におけるキャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造健全性評価

A1.2.1 固定装置

CASTOR® geo26JP 型は、キャスク本体と貯蔵架台を固定装置により固定することで地震事象に対して転倒等を防止する設計である。貯蔵時の固定状態を図 A1-2 に、キャスク底板の固定状態を図 A1-1 に示す。また、図 A1-3 に固定装置を、図 A1-4 にキャスク本体と固定装置の接触部を示す。この固定装置に類似したものとして、鉄道のレール固定装置がある。また、トラニオンを利用した固定方法と比較して、トラニオンより高い位置でキャスクの転倒モーメントに抵抗するので、トラニオンより効率的に転倒を防止できる。

固定装置は、貯蔵架台と締結するフランジ部、キャスク溝部を押さえる舌部で構成されている。この固定装置は、貯蔵架台と M64 のボルト 3 本で締結され、キャスクの周方向 90° 毎に等間隔に設置される。各固定装置は、貯蔵架台に設置された偏心ボルトを回転させることでキャスク下部を挟み込むように押し付けられる。

図 A1-4 に示す通り、キャスク溝部は固定装置の舌部を挟み込んで鉛直方向の動きを防止することができるように設計されており、これによりキャスクの転倒を防止する。なお、舌部の先は、キャスク本体に接触せず、水平方向の滑動の防止には寄与しない。

また、図 A1-4 に示す通り、キャスク本体の下部(キャスク下部固定装置接触部)が固定装置と接触し、水平方向の荷重を受ける。これによりキャスクの滑動を防止する。なお、固定装置と接触するキャスク本体の部位は胴のみであり、棒状の中性子遮蔽材を所定の位置に保持するために取り付けられるキャスク底板には接触しない。なお、図 A1-1 に示すように、キャスク底板はキャスク本体と一体化するよう取り付けられるため横滑りすることはない。

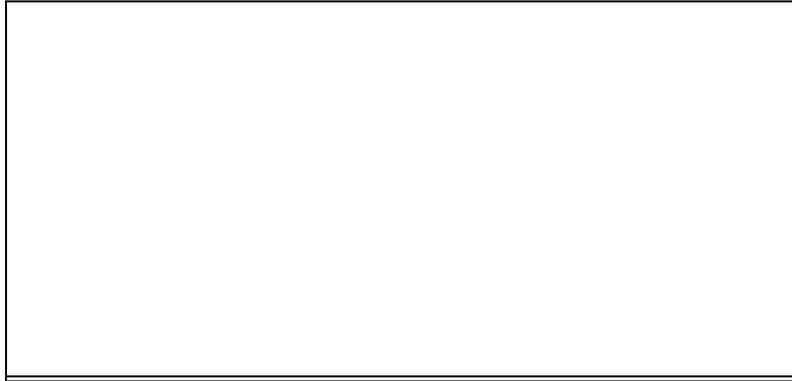


図 A1-1 カassetの固定状態

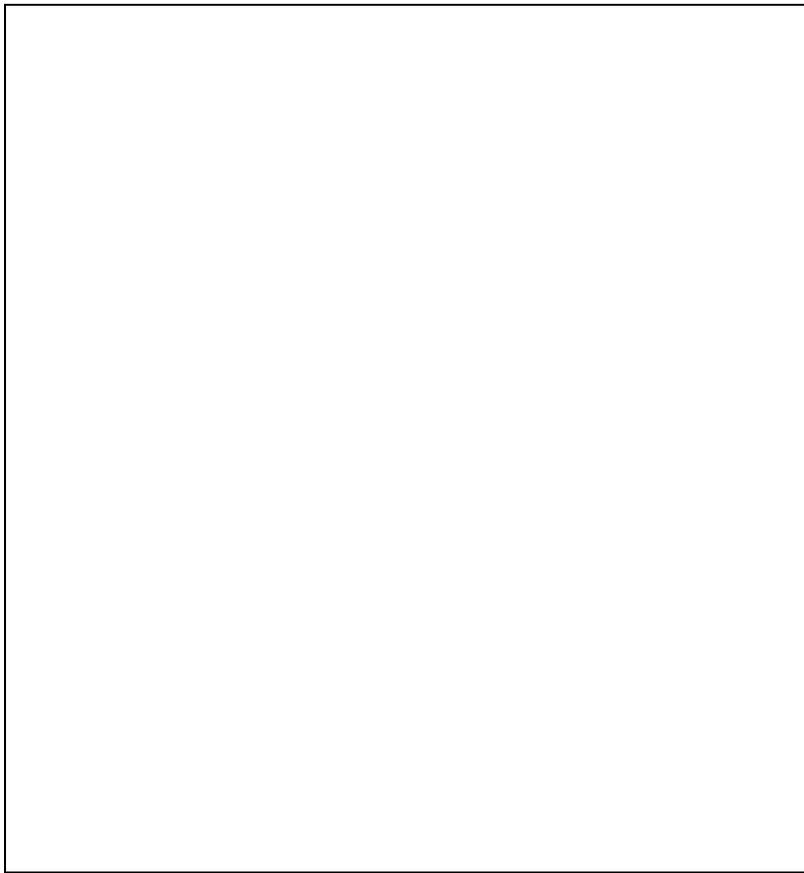


図 A1-2 カassetの固定状態

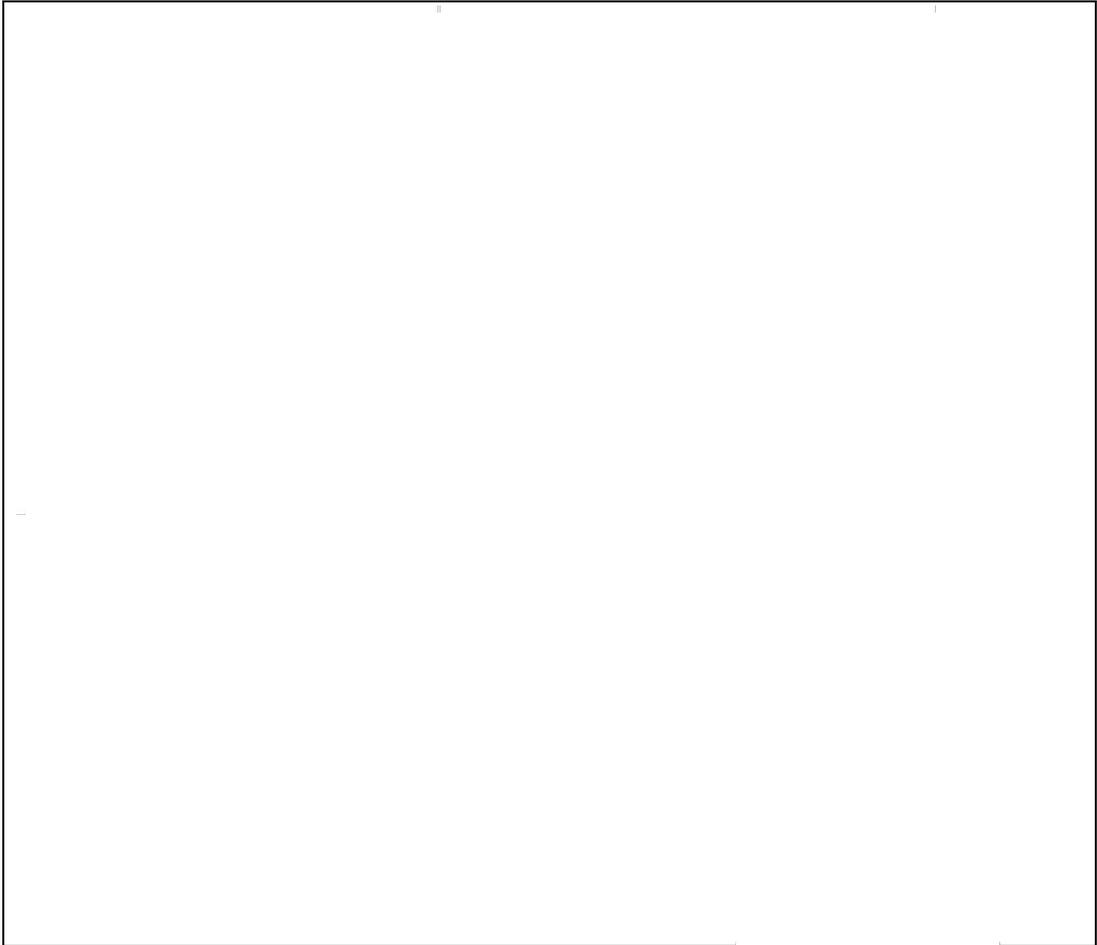


図 A1-3 固定装置

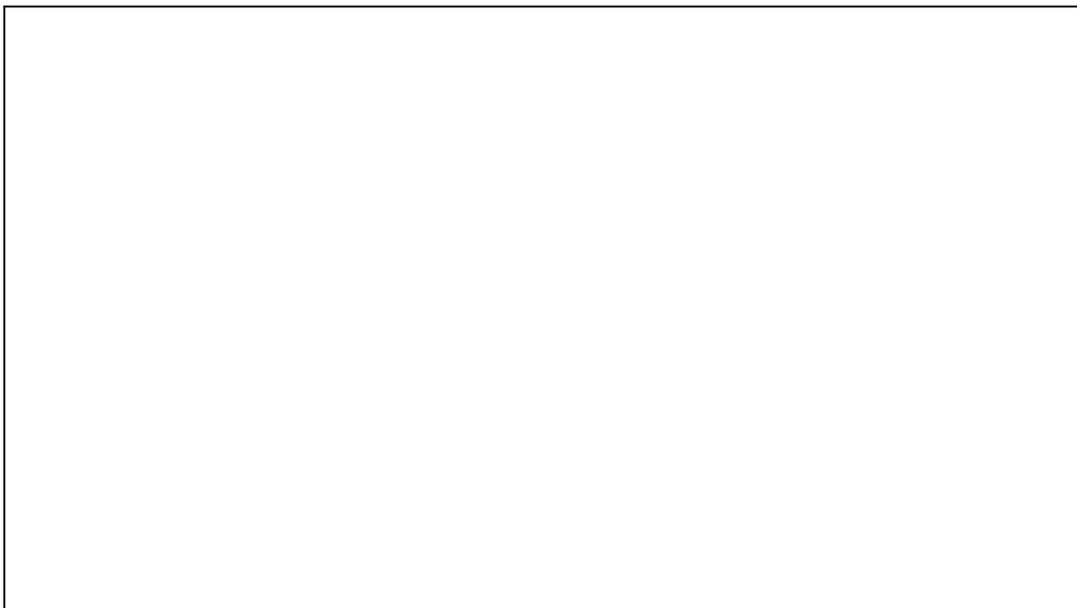


図 A1-4 キャスク本体と固定装置の接触部

A1.2.2 荷重条件

CASTOR® geo26JP 型の貯蔵中における質量は最大 118t であるが、評価には保守的に 120t を用いる。

また、CASTOR® geo26JP 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する。

- 水平方向: 2.35G (2300Gal)
- 鉛直方向: 1.64G (1600Gal)

なお、水平方向と鉛直方向の加速度による地震力が同時に作用することを考慮して評価を行う。また、鉛直上方向の加速度については、重力加速度として 1G を差し引いて評価する。

ここで、図 A1-5 に水平方向の加速度を示す。水平方向地震荷重が 1 つの固定装置で支持される場合がキャスク本体に対して最も大きな荷重が作用するため、この場合について評価する。

また、評価上、以下を前提条件として与える。

- 鉛直方向地震荷重 F_{vert} は、固定装置の舌部を介してキャスクの溝部に作用する。
- 溝部に作用する鉛直方向荷重は、固定装置の配置に合わせて線形に分布するものとする。
- 水平方向地震荷重 F_{hor} は、固定装置の下部接触部を介してキャスクの下部固定装置接触部に作用する。
- キャスク下部固定装置接触部に作用する水平方向荷重は、1 つの固定装置で支持された場合を想定する。

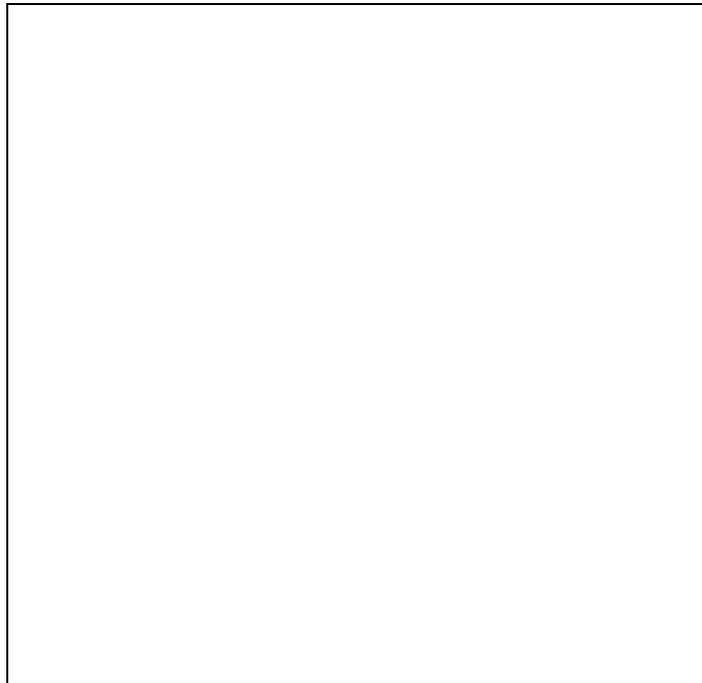


図 A1-5 水平方向加速度の作用方向

キャスク本体に作用する荷重は、図 A1-6 に示す荷重状態のつり合いから転倒モーメントを算出し、評価部位に発生する荷重を算出する。

図 A1-7 に地震時にキャスク溝部に作用する荷重の概要を、表 A1-1 に荷重計算用の入力値を示す。

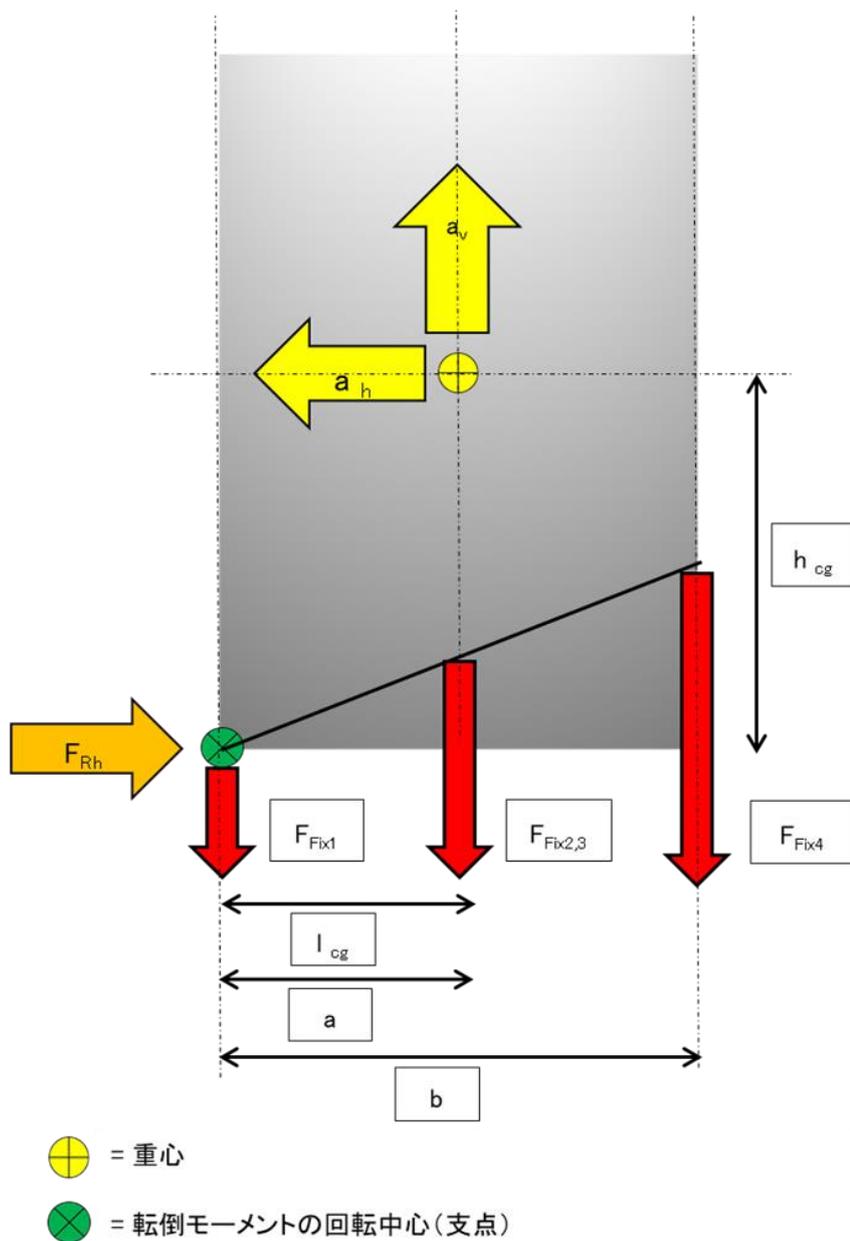


図 A1-6 地震時にキャスク溝部に作用する荷重

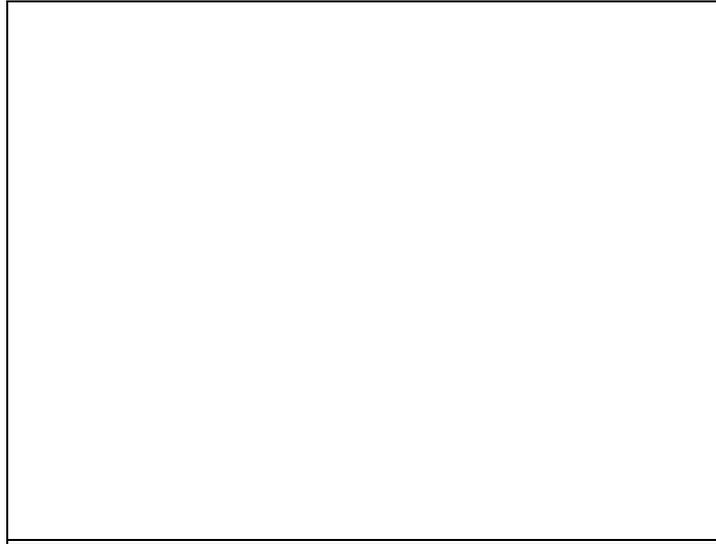


図 A1-7 固定装置に作用する荷重(左図)及びキャスク本体に作用する荷重(右図)

表 A1-1 荷重計算用の入力値

項目	記号	単位	値
重力加速度	g	$\frac{mm}{s^2}$	9,810
キャスク質量	m	t	120
水平加速度	a_h	g	2.35
鉛直加速度	a_v	g	0.64
キャスクの重心高さ	h_{CG}	mm	<input type="text"/>
キャスク底面の直径	b	mm	<input type="text"/>
キャスク底面端部から重心位置までの水平距離	$l_{CG} = a$	mm	<input type="text"/>

地震時にキャスク本体へ作用する荷重(F_{vert} :鉛直方向、 F_{hor} :水平方向)は以下のとおり求められる。

$$F_{vert} = m \cdot g \cdot a_v = 120 \text{ t} \cdot 9,810 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} \cdot 0.64 = 753,408 \text{ N}$$

$$F_{hor} = m \cdot g \cdot a_h = 120 \text{ t} \cdot 9,810 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} \cdot 2.35 = 2,766,420 \text{ N}$$

この荷重から、キャスク本体に発生する転倒モーメントは以下の式によって求められる。

$$F_{Fix,A} = \frac{F_{hor} \cdot h_{CG} + F_{vert} \cdot l_{CG}}{b + 2 \cdot \frac{a^2}{b}}$$

なお、荷重は固定装置の配置に合わせて接触部面積に荷重が等分布で作用するものと仮定する。

この結果、キャスク溝部に作用する最大の鉛直方向荷重($F_{Fix,4}$)は以下のとおりとなる。

また、キャスク下部の接触部に作用する水平荷重 F_{hor} は2,766,420 Nである。

A1.2.3 評価基準

キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の評価基準は、キャスク溝部及び下部固定装置接触部のうち高い温度である (除熱解析の結果) の値として表 A1-2 に示す値を設定した。評価基準は、弾性範囲内とした。

表 A1-2 キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の応力評価基準

評価部位	評価	基準	値[MPa]
キャスク溝部	せん断応力	$\frac{S_y}{\sqrt{3}}$	92.8
	一次曲げ応力	S_y	160.8
キャスク下部固定装置接触部	一次曲げ応力	S_y	160.8

A1.2.4 キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造強度評価

キャスク本体の静的強度評価は、最高温度 を想定して実施した。許容応力は温度の増加と共に小さくなるため、最高温度評価は最低温度評価を包絡する。

A1.2.2 項で求めた荷重を用いて、キャスク溝部に対するせん断応力及び一次曲げ応力、並びにキャスク下部固定装置接触部に対する一次膜応力を評価した。

図 A1-8 に評価位置を示す。また、表 A1-3 に応力評価計算条件を示す。



図 A1-8 キャスク本体の応力評価位置

表 A1-3 応力評価計算条件

項目	記号	単位	値
鉛直方向荷重	$F_{vert}=F_{Fix,4}$	N	<input type="text"/>
曲げモーメント長さ	l	mm	<input type="text"/>
せん断面の厚さ/高さ	h	mm	<input type="text"/>
せん断面の幅	b	mm	<input type="text"/>
水平方向荷重	F_{hor}	N	<input type="text"/>
キャスク下部固定装置接触部の面積	A_h	mm ²	<input type="text"/>

表 A1-3 に示す計算条件を基に、以下の評価式によりキャスク溝部に発生する応力を求めた。
また、評価結果のまとめを表 A1-4 に示す。

ここで、

[]

ここで、 []

[]

ここで求めた応力と A1.2.3 項に定めた評価基準に記載されている許容応力値から、応力負荷率(発生応力/許容応力)を算出すると以下のとおりとなる。また、この応力負荷率のまとめを表 A1-4 に示す。

$$\max\left(U_{bend} = \frac{\sigma_{bend}}{S_y} = \frac{138 \text{ MPa}}{160.8 \text{ MPa}} = 86\%; U_{shear} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_{shear}}{S_y} = \frac{\sqrt{3} \cdot 52 \text{ MPa}}{160.8 \text{ MPa}} = 56\%\right) \\ = U_{bend} = 86\%$$

以上から、地震力によりキャスク溝部に発生する応力は基準値を満足する。

なお、応力負荷率が 90%となるのに必要な最小せん断断面積 A_{shear} は、以下の通りである。(表 A1-2 を参照) (この値は固定装置の舌部設計に必要)

[]

表 A1-3 に示す計算条件を基に、以下の評価式によりキャスク下部固定装置接触部に発生する応力を求めた。評価結果のまとめを表 A1-4 に示す。

[]

また、キャスク下部固定装置接触部に作用する水平荷重から発生する膜応力を評価した。ここで求めた応力と A1.1.3 項に定めた評価基準に記載されている許容応力値から応力負荷率を算出すると 28%となる。また、この応力負荷率のまとめを表 A1-4 に示す。

以上から、地震力によりキャスク下部固定装置接触部に発生する応力は基準値を満足する。

これらの結果から、評価条件を基に設定した水平方向に 2.35G (2300Gal)、鉛直方向に 1.64G (1600Gal)の加速度に対してキャスク溝部に発生する応力及びキャスク下部固定装置接触部に発生する応力は評価基準値以下であり、弾性範囲に留まり、構造健全性が損なわれず滑動及び転倒しないことを確認した。

なお、キャスク本体胴の断面積はキャスク下部固定装置接触部の断面積より大きいいため、キャスク本体胴に発生する応力は溝部に発生する応力よりも小さく、機能維持評価における胴の評価基準値を満足する。よって、中性子遮蔽材ボアホール及び放熱フィンの形状は維持されることから、遮蔽機能及び除熱機能は維持される。

表 A1-4 キャスク溝部及びキャスク下部固定装置接触部の応力評価まとめ

評価部位	評価項目	評価式	単位	値
発生応力				
キャスク溝部	一次せん断応力	$\sigma_{shear} = \frac{F_{vert.}}{A_{\tau}}$	MPa	52
	一次曲げ応力	$\sigma_{bend} = \frac{M}{W}$	MPa	138
キャスク下部固定装置接触部	一次膜応力	$\sigma_{mem} = \frac{F_H}{A_h}$	MPa	45
応力負荷率				
キャスク溝部	一次せん断応力に対する安全率	$U_{shear} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_{shear}}{S_y}$	%	56
	一次曲げ応力に対する安全率	$U_{bend} = \frac{\sigma_{bend}}{S_y}$	%	86
キャスク下部固定装置接触部	一次膜応力に対する安全率	$U_{mem} = \frac{\sigma_{mem}}{S_y}$	%	28

別紙 2: 地震時の特定兼用キャスクの機能維持評価

A2.1 概要

本資料は、特定兼用キャスク本体を対象として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、一次蓋ボルト及び胴）、臨界防止機能を担うバスケット、遮蔽機能及び除熱機能を担う胴について評価を実施した。なお、胴の評価については、別紙 1 に示す通り、構造健全性評価における胴の評価に包絡されるため、ここでは計算は示さない。評価の詳細を以下に示す。

なお、評価に関連する部品の材料については、1024-TR-00005 “補足説明資料 第4条地震による損傷の防止、第5条津波による損傷の防止、第6条外部からの衝撃による損傷の防止”に記載するとおりである。

A2.2 地震時の機能維持評価

密封境界部（一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及び胴）、バスケット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る隙間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。

A2.2.1 固定方法

CASTOR[®] geo26JP 型の貯蔵時の固定状態は、別紙 1 の A1.2.1 項に示すとおりである。

A2.2.2 荷重条件

CASTOR[®] geo26JP 型の貯蔵中における質量は最大 118t であるが評価には保守的に 120t を用いた。

また、CASTOR[®] geo26JP 型に発生する加速度として、以下の値を設定する。

- 水平方向: 2.35G (2300Gal)
- 鉛直方向: 1.64G (1600Gal)

なお、水平方向と鉛直方向の加速度による地震力が同時に作用することを考慮して評価を行う。

また、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）を組み合わせて評価を実施する。

A2.2.3 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、一次蓋ボルト及び胴）及びバスケットの評価基準を表 A2-1に示す。一次蓋密封シール部の温度は、と仮定した。

なお、表 A2-1に示す応力評価基準は、除熱解析の結果を踏まえて表 A2-2 に示す各部の設計温度に基づき設定している。なお、一次蓋密封シール部の応力評価基準は、キャスク本体の応力評価基準から保守的に設定した。

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、一次蓋ボルトの締め付け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。

表 A2-1 密封境界部及びバスケットの応力評価基準値

評価部位		評価項目	基準	値[MPa]
密封境界部	一次蓋密封シール部	一次曲げ応力＋一次膜応力	$S_y^{1)}$	155.2 ²⁾
	一次蓋ボルト	一次曲げ応力＋一次膜応力	$S_y^{1)}$	913.4
	胴	一次曲げ応力＋一次膜応力	$S_y^{1)}$	155.2
		せん断力	$S_y/\sqrt{3}$ [MPa]	89.6
バスケット	コーナーエレメント	一次曲げ応力＋一次膜応力	$S_y^{1)}$	114
	バスケット側板	圧縮応力	$S_y^{1)}$	114
	H-ビーム	一次曲げ応力	$S_y^{1)}$	157

- 1) 保守的に弾性体の状態を設計基準として考慮する。
- 2) 胴の値と一次蓋の値の小さい方を適用

表 A2-2 評価対象部材の温度

構成部材	温度 [°C]
一次蓋密封シール部	<input type="text"/>
一次蓋ボルト	<input type="text"/>
胴	<input type="text"/>
バスケット	<input type="text"/>

A2.2.4 応力評価

A2.2.4.1 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。密封境界部である一次蓋密封シール部、一次蓋ボルト及び胴の応力計算の詳細は以下に示すとおりである。

A2.2.4.1.1 一次蓋密封シール部

地震時、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）及び慣性力による一次膜＋一次曲げ応力（ σ_r , σ_t , 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、慣性力により応力成分を示す。

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2}$$

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2}$$

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{z2}$$

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。

内圧による応力

図 A2-1 に示すとおり、一次蓋を周辺固定の円板とみなし、一次蓋密封シール部に作用する一次膜＋一次曲げ応力を評価した。なお、内圧は表面に等分布荷重として与える。



図 A2-1 内圧に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

密封境界部における半径方向曲げ応力及び膜応力をそれぞれ評価した。

表 A2-3 に本評価における計算条件を、また、表 A2-4 に評価結果を示す。

表 A2-3 内圧に対する一次蓋密封シール部の応力計算条件

記号	項目	単位	値
R	固定支持部(蓋ボルト)の半径	mm	<input type="text"/>
r	評価点(ガスケット)の半径	mm	<input type="text"/>
t	厚さ ¹⁾	mm	<input type="text"/>
p	蓋間圧力-胴内圧	MPa	<input type="text"/>
v	ポアソン比	-	0.31

¹⁾ 一次蓋上部から、シール部溝の上部までを厚さとして設定

一次蓋密封シール部の半径方向曲げ応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{r1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (3 + \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

また、一次蓋密封シール部の膜応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{t1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3 \cdot \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

また、一次蓋密封シール部の軸方向膜応力は以下のとおりとした。

$$\sigma_{z1} = 0 \text{ MPa}$$

表 A2-4 内圧により一次蓋密封シール部に発生する応力評価結果

結果	一次曲げ応力及び一次膜応力			評価基準値
	σ_{r1} [MPa]	σ_{t1} [MPa]	σ_{z1} [MPa]	S_y [MPa]
応力値	<u>30.8</u>	<u>8.3</u>	0.0	155.2

慣性力による応力

図 A2-2に示すとおり、一次蓋を周辺固定の円板とみなした場合の一次膜＋一次曲げ応力を評価する。なお、地震時の慣性力は表面に等分布荷重として作用するとした。

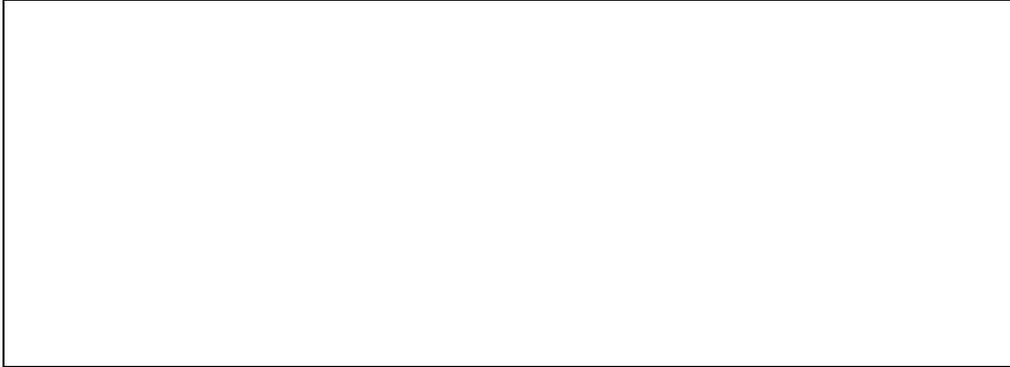


図 A2-2 地震時の慣性力に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

地震時、鉛直方向加速度 a_v による慣性力により蓋に荷重が作用する。この際、鉛直方向の慣性力に重力加速度として1Gを加えて評価する。なお、兼用キャスクはたて置き姿勢で貯蔵され、一次蓋はボルトで固定されるとともに一次蓋側面と胴内面には隙間があるため水平方向の慣性力では一次蓋密封シール部に応力が発生しないことから、鉛直方向の慣性力のみ考慮する(図 A-2-3 参照)。

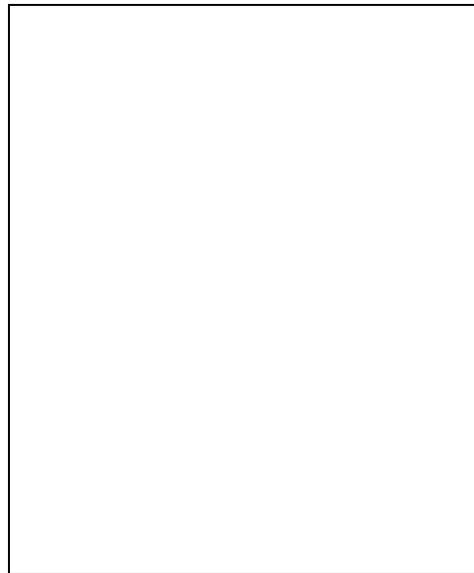


図 A-2-3 一次蓋側面と胴内面の詳細

一次蓋密封シール部における半径方向曲げ応力及び膜応力をそれぞれ評価した。
表 A2-5 に本評価における計算条件を、また、表 A2-6 に評価結果を示す。

表 A2-5 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

記号	項目	単位	値
R	固定支持部(蓋ボルト)の半径	mm	<input type="text"/>
r	評価点(ガスケット)の半径	mm	<input type="text"/>
t	厚さ ¹⁾	mm	<input type="text"/>
g	重力加速度	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$	9,810
m	一次蓋の質量	t	<input type="text"/>
a_v	鉛直加速度	g	2.64
ν	ポアソン比	-	0.31

1)一次蓋上部から、シール部溝の上部までを厚さとして設定

一次蓋に作用する等分布荷重は以下の式で計算される。

$$p = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot (R^2 - r^2)}$$

ここで

$$p_v = p \cdot (1 + a_v)$$

$$p_r = p \cdot a_v \cdot \frac{r}{R}$$

また、一次蓋密封シール部の半径方向曲げ応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{r2} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (3 + \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

$$\sigma_{r1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (3 + \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

また、一次蓋密封シール部の膜応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_{t2} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3 \cdot \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

$$\sigma_{t1} = \frac{3 \cdot p \cdot R^2}{8 \cdot t^2} \left[(1 + \nu) - (1 + 3 \cdot \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2} \right]$$

また、一次蓋密封シール部の軸方向膜応力は以下のとおりとした。

$$\sigma_{z2} = 0 \text{ MPa}$$

表 A2-6 慣性力により一次蓋密封シール部に発生する応力評価結果

結果	一次曲げ応力及び一次膜応力			設計基準
	σ_{r2} [MPa]	σ_{t2} [MPa]	σ_{z2} [MPa]	S_y [MPa]
応力値	2.5	0.7	0.0	155.2

一次蓋密封シール部に発生する応力

表 A2-4 及び表 A2-6 に基づき、A2.2.4.1.1 項の式を用いて、一次蓋密封シール部に発生する応力を算出する。表 A2-7 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り、地震時に一次蓋密封シール部は弾性範囲内となる。

表 A2-7 一次蓋密封シール部に発生する応力の評価結果

結果	一次曲げ応力及び一次膜応力			設計基準
	σ_r [MPa]	σ_t [MPa]	σ_z [MPa]	S_y [MPa]
応力値	30.7	8.3	0.0	155.2

A2.2.4.1.2 一次蓋ボルト

地震時の一次蓋ボルトには、蓋締め付け時のボルト荷重と地震時の慣性力による膜応力 σ_m 及び曲げ応力 σ_b が作用する。ここで、内圧(蓋の内外の圧力差)は、一次蓋の膜応力及び曲げ応力を減少させるため考慮しない。また、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。

膜応力

地震時に一次蓋ボルトに作用する膜応力 σ_m は、地震時の鉛直方向加速度 σ_{m1} と一次蓋締め付け時の荷重による膜応力 σ_{m2} の合計値で求められる。なお、鉛直方向の加速度については、重力加速度として1Gを差し引いて評価した。

表 A2-8 に本評価における計算条件を、また、表 A2-9 に評価結果を示す。

表 A2-8 一次蓋ボルトに発生する膜応力の計算条件

記号	項目	単位	値
d_s	ボルトの断面直径	mm	<input type="text"/>
$F_{v,max}$	最大一次蓋ボルト締め付け力	N	<input type="text"/>
m	一次蓋の質量	t	<input type="text"/>
g	重力加速度	$\frac{mm}{s^2}$	9,810
a_v	鉛直加速度	g	0.64
n	ボルト数	-	<input type="text"/>

一次蓋ボルト1本の膜応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_m = \frac{F_{v,max}}{n \cdot d_s} + m \cdot g + a_v \cdot m \cdot g$$

ここで

$$F_{v,max} = \frac{m \cdot g}{n}$$

$$m = \frac{W}{g}$$

$$W = m \cdot g$$

$$W = \frac{m \cdot g}{n}$$

表 A2-9 一次蓋ボルトに発生する膜応力の評価結果

結果	一次膜応力			評価基準値
	σ_{m1} [MPa]	σ_{m2} [MPa]	σ_m [MPa]	S_y [MPa]
応力値	0.4	297.7	298.1	913.4

曲げ応力

地震時に一次蓋ボルトには水平加速度 a_h により発生する慣性力による曲げ応力 σ_b が作用する。

表 A2-10 に本評価における計算条件を、また、A2-11 表に応力評価結果を示す。

表 A2-10 一次蓋ボルトに発生する曲げ応力の計算条件

記号	項目	単位	値
d_s	ボルトの断面直径	mm	<input type="text"/>
m	一次蓋の質量	t	<input type="text"/>
L	ボルト首部長さ	mm	<input type="text"/>
a_h	水平加速度	g	2.35
g	重力加速度	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$	9,810
n	ボルト数	-	<input type="text"/>

一次蓋ボルト1本に発生する曲げ応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_b = \frac{M}{W_s} \times 10^3$$

ここで、

M : ボルト曲げモーメント[N・mm]

W_s : ボルト断面係数[mm³]

$$M = \frac{m \cdot L \cdot a_h}{n}$$

$$W_s = \frac{\pi \cdot d_s^3}{32}$$

表 A2-11 一次蓋ボルトに発生する曲げ応力の評価結果

結果	一次曲げ応力	評価基準値
	σ_b [MPa]	S_y [MPa]
応力値	36.6	913.4

一次蓋ボルトの応力評価

表 A2-9 及び表 A2-11 に基づき、一次蓋ボルトに発生する膜及び曲げ応力を算出した。これにより、一次蓋ボルトに発生する応力を算出する。表 A2-12 に示すとおり、一次蓋ボルトに発生する応力は評価基準以下であり、地震時に一次蓋ボルトは弾性範囲内となる。

表 A2-12 一次蓋ボルトに発生する応力

結果	一次膜応力	一次膜+曲げ応力	評価基準値
	σ_m [MPa]	σ_{m+b} [MPa]	S_y [MPa]
応力値	298.1	334.7	913.4

A2.2.4.2 バスケット

バスケットは構造部材と非構造部材で構成されている。本項では、バスケットの構造健全性を確認するため構造部材(コーナーエレメント、バスケット側板、H-ビーム)に発生する応力評価を行い、非構造部材(エッジセグメント)については本評価の対象外とする。なお、地震荷重に関しては、非構造部材のバスケット内での位置が変わらない限り、その有用性が担保される。これは、構造部材の構造健全性を示すことによって証明される。

A2.2.4.2.1 鉛直方向地震力に対する応力評価

CASTOR® geo26JP 型のバスケットの構造部材を図 A2-4 に示す。これらの部材は、鉛直方向地震力に伴い慣性力が作用し、応力が発生する(図 A2-5)。ここで、評価に用いる慣性力には、地震時の鉛直方向加速度に加えて自重を考慮した。

各部材に発生する膜応力は、表 A2-13 に示す部材重量及び評価断面の断面積によって求められる。なお、部材重量は切り上げた値を用い、評価断面の断面積は四捨五入した値を用いた。

表 A2-13 に本評価における計算条件を、また、表 A2-14 に評価結果を示す。

バスケットの膜応力は以下の式で計算される。

$$\sigma_m = \frac{m \cdot (a_v + 1) \cdot 9,810 \frac{mm}{s^2}}{A}$$

表 A2-14 に示すとおり、鉛直方向加速度に対して各バスケットの部品に発生する膜応力は評価基準以下であり、弾性範囲に留まる。

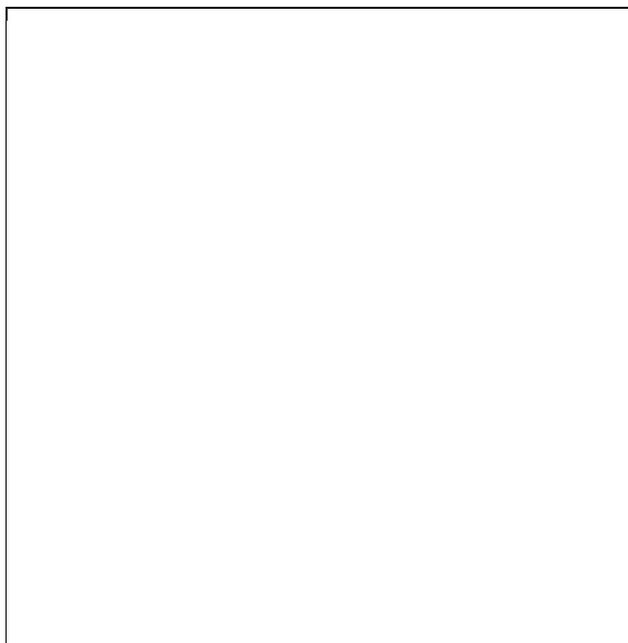


図 A2-4 バスケットの構造部材

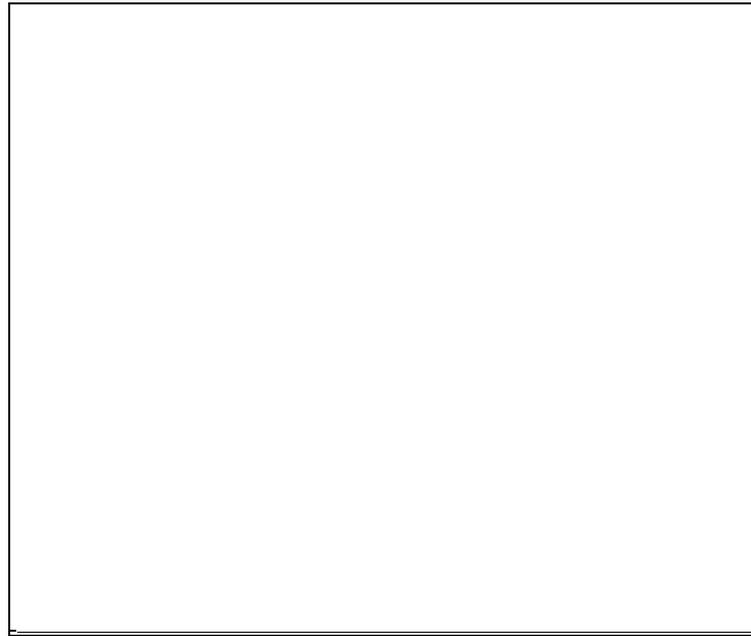


図 A2-5 バスケット鉛直方向加速度

表 A2-13 鉛直方向地震力に対してバスケットに発生する膜応力の計算条件及び計算結果

評価部材	鉛直 加速度	重量 m	面積 A	一次膜応力 $\sigma_{\sigma m}$
	[g]	[kg]	[mm ²]	[MPa]
コーナーエレメント	2.64	□	□	1.1
バスケット側板(大)	2.64	□	□	1.2
バスケット側板(小)	2.64	□	□	1.1
H-ビーム	2.64	□	□	1.2

表 A2-14 鉛直方向地震力に対してバスケットに発生する膜応力評価結果

評価部材	一次膜応力	設計基準
	σ_m [MPa]	S_y [MPa]
コーナーエレメント	<2	114
バスケット側板	<2	114
H-ビーム	<2	157

A2.2.4.2.2 水平方向地震力に対する応力評価

バスケットに水平方向地震力(図 A2-6 及び A2-7)が作用した場合、H-ビームのみは燃料集合体からの直接的な荷重を受ける。このため、H-ビームに対して燃料集合体質量及び H-ビームを挟み込む熱伝導及び中性子吸収材の質量を考慮し、水平方向地震力が作用した場合の応力評価を行った。

図 A2-9 に水平方向地震力に対する H-ビームの応力計算モデル及び分布荷重の導出について示す。なお、水平方向地震力に対しては、H-ビームのウェブ部のみ構造強度部材として考慮し、両端固定梁として評価をおこなった。90° 方向(図 A2-6)の評価は、他の方向(図 A2-7)よりも分布荷重が大きいため、他の方向の評価を包絡する。

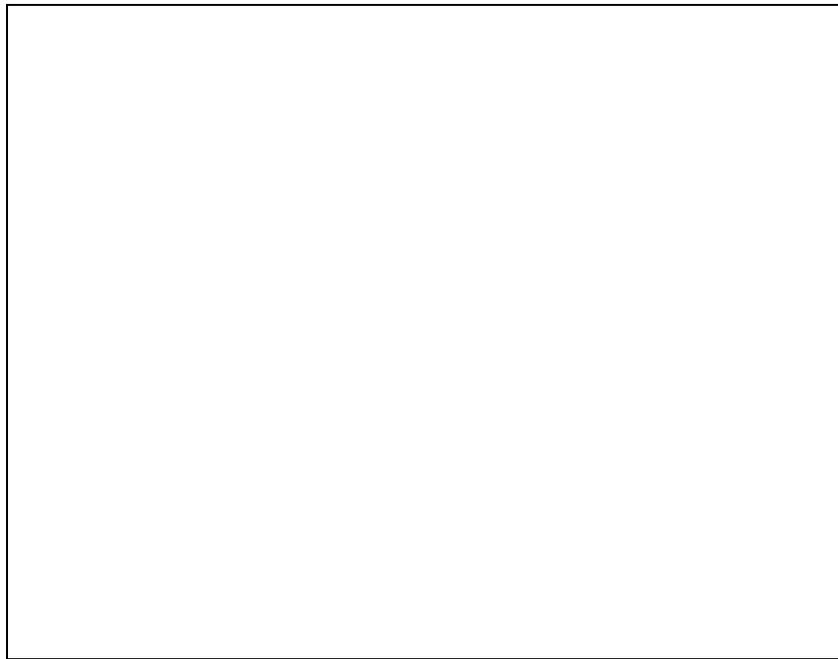


図 A2-6 バスケット水平方向加速度 (90° 方向)

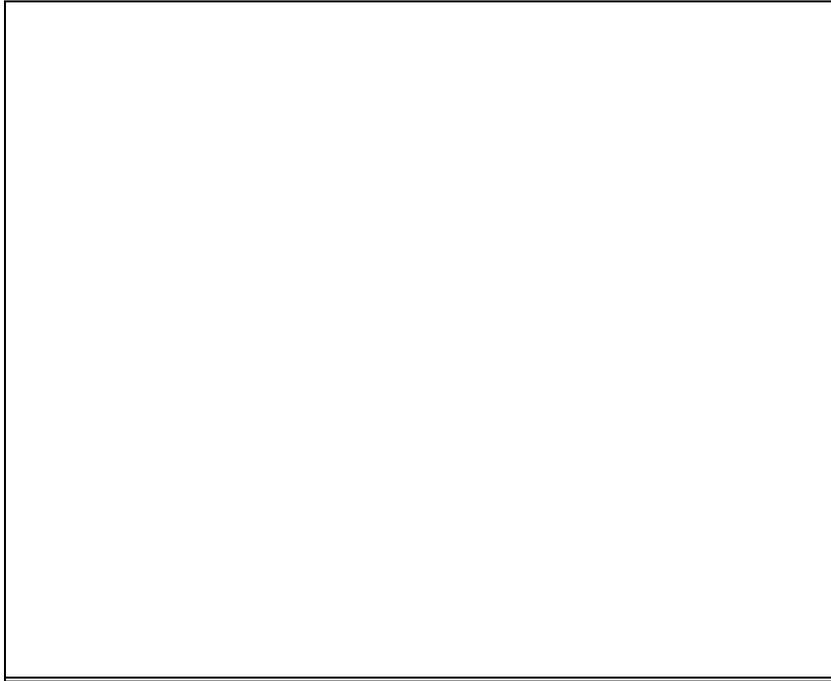


図 A2-7 バスケット水平方向加速度(45° 方向)

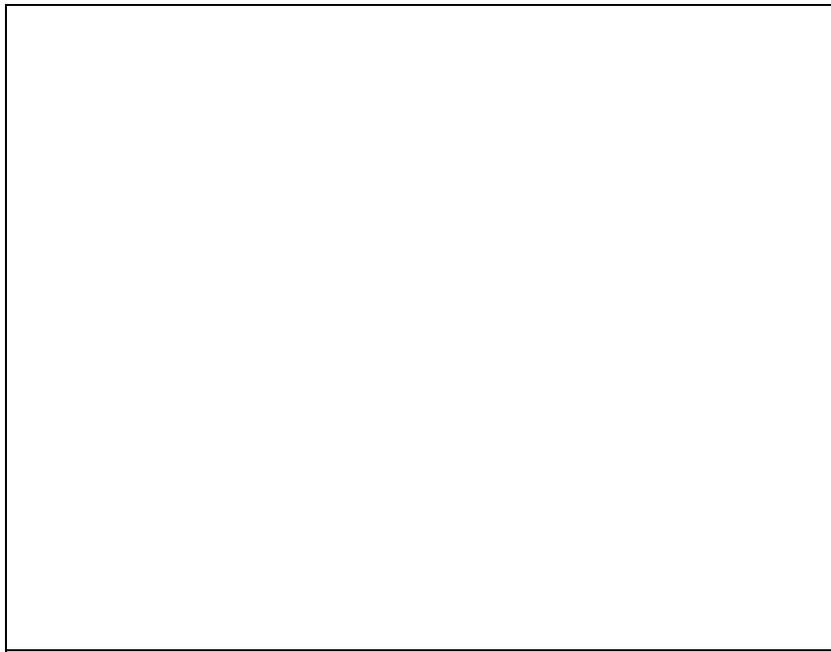


図 A2-8 バスケット水平方向加速度(0° 方向)

H-ビームはウェブおよびフランジにより構成される。2 つのウェブに支持されたフランジに荷重が発生した場合の評価を以下に示す。(図 A2-9 参照)



図 A2-9 水平方向地震力に対する H-ビームの応力計算モデル及び分布荷重の導出

以下の条件から、1 体の PWR 燃料集合体から H-ビームに与える荷重を求める:

- PWR 燃料集合体長さ
- 燃料集合体の質量
- H-ビームの高さ

1 体の PWR 燃料集合体が H-ビームに作用する荷重は以下のとおり

次に、以下の条件から、PWR 燃料集合体が H-ビームに与える単位長さ当たりの荷重を求める:

- 最長の H-ビームへ負荷を与える燃料集合体の体数
- 最長の H-ビームの長さ

PWR 燃料集合体が H-ビームに与える単位長さ当たりの荷重は以下のとおり

さらに、以下の条件から、H-ビーム及びボロン添加アルミニウム板の自重により H-ビームに作用する単位長さ当たりの荷重を求める:

- 総重量

自重により H-ビームに与える単位長さ当たりの荷重は以下のとおり

そして、H-ビームに作用する単位長さ当たりの荷重の重ね合わせは以下の通り。

ここで算出した H-ビームに作用する単位長さ当たりの荷重から、曲げ応力は以下の式で計算される。

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

固定端モーメント $M = \frac{q \cdot l^2}{12}$

断面係数 $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$

等分布荷重

曲げ評価長さ

ウェブ幅

ウェブ高さ

等分布荷重には H-ビーム、燃料集合体及び熱伝導・中性子吸収材の慣性力を考慮した。

表 A2-15 に示すとおり、水平方向加速度に対して各バスケットの部品に発生する曲げ応力は評価基準以下であり、弾性範囲に留まる。

表 A2-15 水平方向地震力に対してバスケットに発生する膜応力と設計基準の比較

評価部材	一次曲げ応力	設計基準
	σ_b [MPa]	S_y [MPa]
H-ビーム	32	157

A2.2.5 一次蓋の横ずれ評価

地震時に一次蓋に作用する水平慣性力は以下の式で計算される。

$$F_{hor,PrimLid} = m_{PrimLid} \cdot a_h \cdot g$$

- $m_{PrimLid}$: 一次蓋の質量 [t]
 a_h : 水平加速度 [g]
 g : 重力加速度 [$\frac{mm}{s^2}$]

表 A2-16 に本評価における計算条件及び計算結果を示す。

表 A2-16 一次蓋慣性力計算条件及び計算結果

項目	$m_{PrimLid}$: 一次蓋質量[t]	a_h : 水平加速度[g]	g : 重力加速度[$\frac{mm}{s^2}$]	$F_{hor,PrimLid}$: 一次蓋に作用する慣性力[N]
数値	<input type="text"/>	2.35	9,810	142,702

摩擦力 F_R (一次蓋が横ずれを始める限界値)は以下の式で計算される。

$$F_R = n \cdot F_{V,min} \cdot \mu_{Lid}$$

ここで

- n : 一次蓋ボルト本数[-]
 $F_{V,min}$: 一次蓋ボルトの初期締め付け力[N]
 μ_{Lid} : 蓋とキャスク間の最小摩擦係数[-]

計算条件及び計算結果を表 A2-17 に示す。表 A2-17 に示すとおり、表 A2-16 に示す一次蓋に作用する慣性力に対して、摩擦力の方が大きく、一次蓋は兼用キャスク本体からずれることはない。

表 A2-17 摩擦力計算条件及び計算結果

項目	n : 一次蓋ボルト本数[-]	$F_{V,min}$: 一次蓋の初期締め付け力[MN]	μ_{Lid} : 蓋とキャスク間の最小摩擦係数[-]	F_R : 一次蓋の摩擦力[MN]
数値	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.2	3.46