

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
3	使用する解析コード	21
4	参考文献	23
別紙 1	地震時におけるキャスク本体溝部及びキャスク下部の固定装置との接触部の構造健全性の評価	24
別紙 2	地震時の CASTOR® geo26JP 型の機能維持評価	40

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 2300 Gal 及び鉛直 1600 Gal
速度	水平 2 m/s、鉛直 1.4 m/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 2300 Gal 及び鉛直 1600 Gal
 - ・速度 : 水平 200 cm/s 及び鉛直 140 cm/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

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

CASTOR[®] geo26JP 型は、地盤の十分な支持を想定して貯蔵架台に固定された CASTOR[®] geo26JP 型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 CASTOR[®] geo26JP 型の安全機能が損なわれない設計とする。基礎等への固定は CASTOR[®] geo26JP 型本体の溝部による固定方法とする。

図 1 に示すように、CASTOR[®] geo26JP 型本体の溝部と CASTOR[®] geo26JP 型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している。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。この固定方法は、CASTOR[®] geo26JP 型本体が一体ものであるため可能であり、キャスク本体に作用する強い力に耐えることができる。

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。

CASTOR[®] geo26JP 型は、固定された状態において、その本体は、弾性状態に留まるようにし、滑動及び転倒せず、CASTOR[®] geo26JP 型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、CASTOR[®] geo26JP 型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ようにし、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、除熱機能及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。

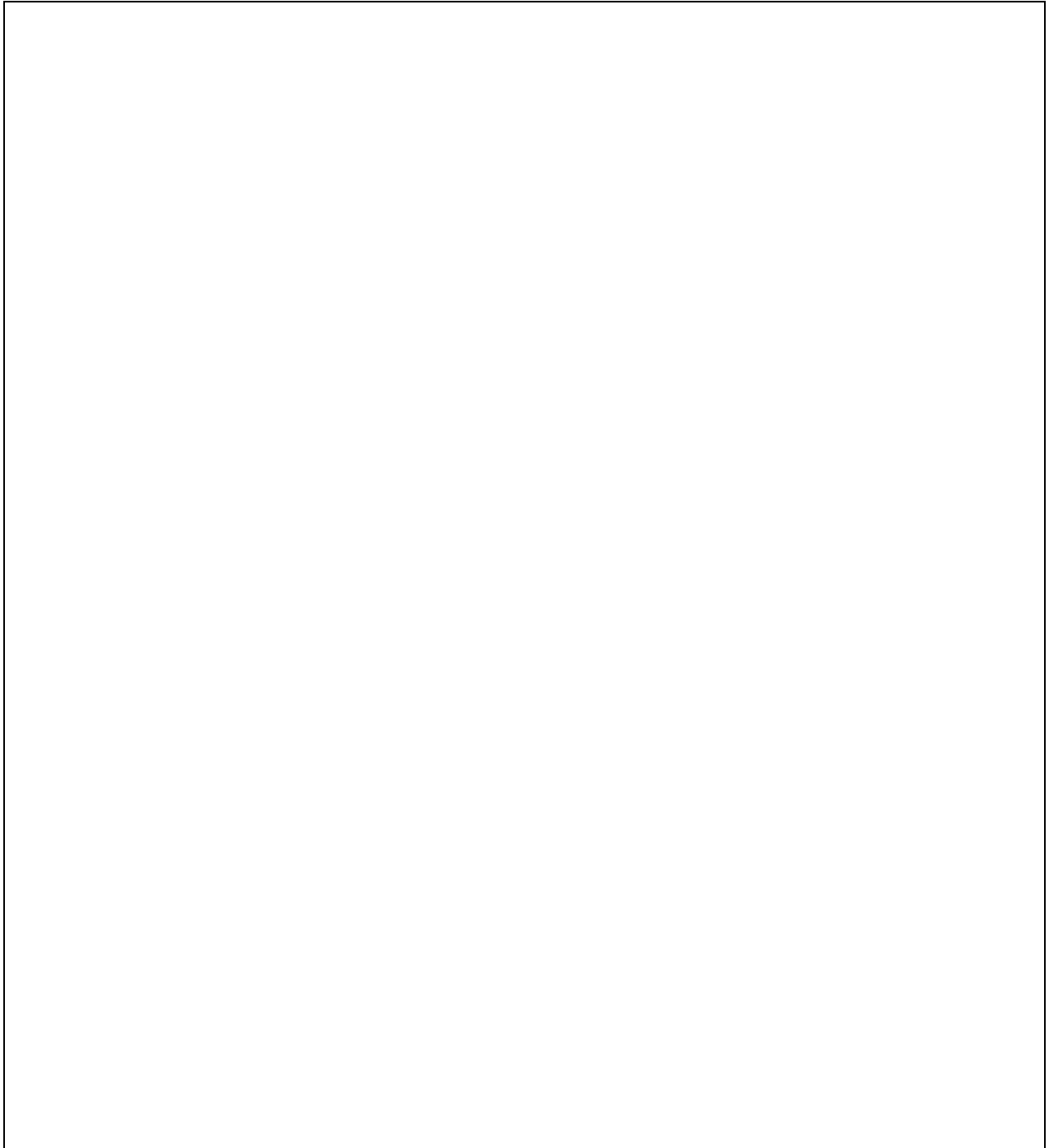


図1 キヤスク本体の溝部により貯蔵架台に固定された CASTOR® geo26JP 型

以上の設計方針に基づき、CASTOR® geo26JP 型が地震力に対して CASTOR® geo26JP 型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、型式証明申請範囲外とし、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、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 2300 Gal 及び鉛直 1600 Gal
 - ・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。

速度は地震力の算出に用いない。

- ・加速度：水平 2300 Gal 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に固定された CASTOR® geo26JP 型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。

[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。

CASTOR® 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、CASTOR® geo26JP 型の貯蔵架台等に固定するキャスク本体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、CASTOR® geo26JP 型が滑動及び転倒せず、CASTOR® geo26JP 型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 [1]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)を組み合わせで実施する。

CASTOR® geo26JP 型は、貯蔵架台の固定装置によって基礎等に固定され、キャスク本体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はない。

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キャスク本体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評価は、3次元有限要素法応力解析コード(AN-SYS コード)による静的解析により実施する。機能維持評価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 CASTOR® geo26JP 型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、キャスク本体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(キャスク本体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(胴、一次蓋密封シール部、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が胴の一部であること、遮蔽機能を担保する中性子遮蔽材が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. キャスク本体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、キャスク本体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、地震時のキャスク本体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 2.35 G(2300 Gal)及び鉛直 1.64 G(1600 Gal))により算出される地震力を基に、キャスク本体溝部及びキャスク下部固定装置接触部に生じる応力を三次元有限要素法(ANSYS[®]コード)にて算出し、それぞれの構造健全性を評価する。キャスク本体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 に示し、その応力評価結果を表 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、地震時にキャスク本体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。

従って、CASTOR[®] geo26JP は滑動・転倒しない。

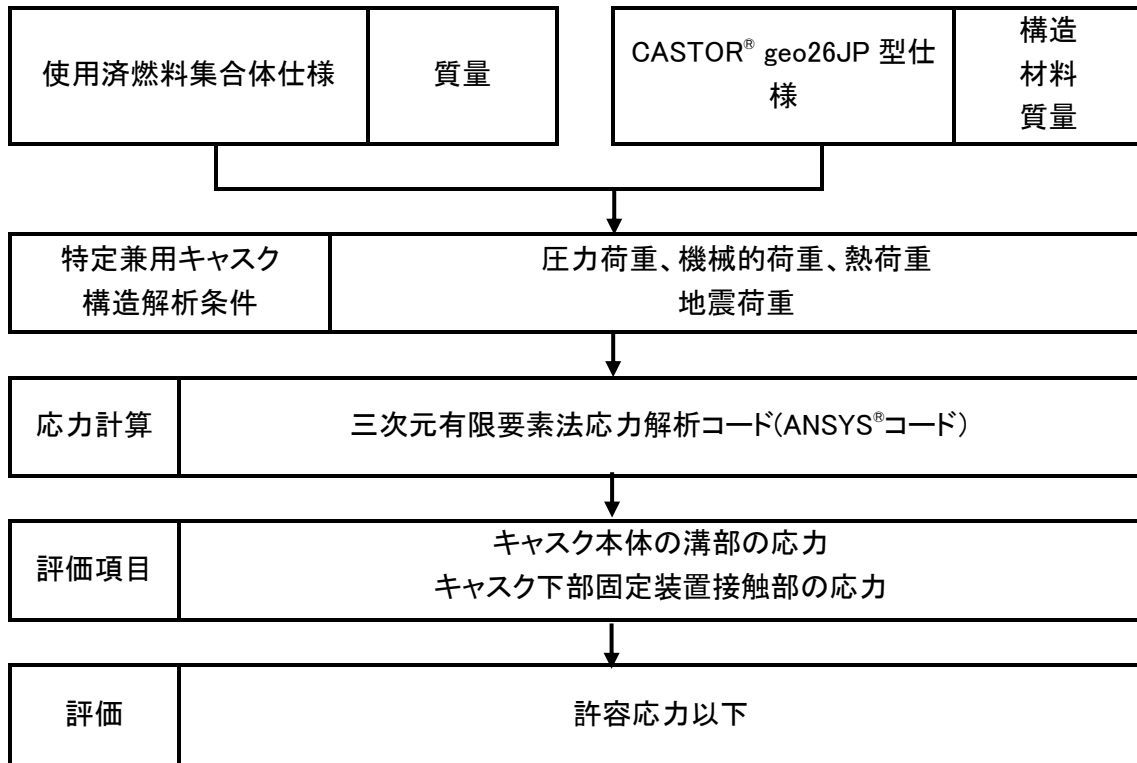


図 2 地震時の構造健全性評価フロー

表 1 地震時の構造健全性評価結果

評価項目	材料名	作用応力	計算値 [MPa]	評価温度 [°C]	評価基準値 Sy [MPa]
キャスク本体 溝部 経路 1	球状黒鉛鋳鉄 (低温用厚肉フ ェライト球状黒 鉛鋳鉄品)	一次膜応力	111.2	105	157.3
キャスク本体 溝部 経路 2		一次膜応力	63.5		
		一次膜+曲 げ応力	86.7		
キャスク本体 溝部	FCD 300LT (JIS G 5504)	せん断応力	95.3		
キャスク下部 固定装置接触 部		一次膜応力	35.4	120	155.2

B. 密封境界部及びバスケットの機能維持評価

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 2300 Gal 及び鉛直 1600 Gal)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る。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。

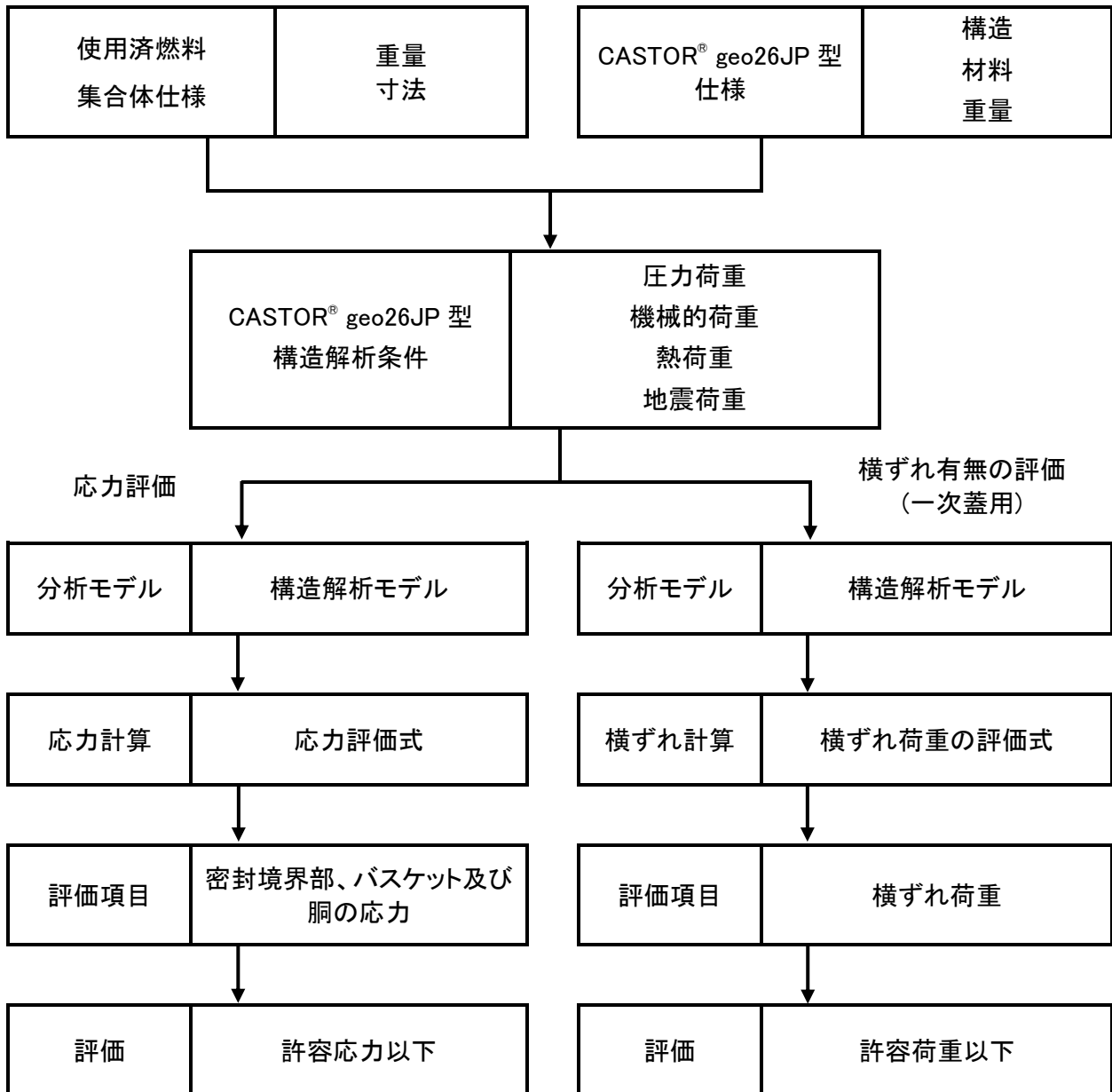


図 3 地震時の機能維持評価フロー

表 2 地震時の密封境界部の応力評価結果

評価部位 ^(注1)	計算値 [MPa]	評価基準 [MPa] ^(注2)
一次蓋密封シール部 $\max(\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z)$	33.3	155.2
一次蓋ボルト (σ_{m+b})	334.7	913.4
胴 (σ_m)	45	155.2

(注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

(注2) 評価基準の考え方については図 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 ^(注1)	計算値 [MPa]	評価基準 [MPa] ^(注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)	<2	114
	バスケット側板 (σ_p)	<2	114
	H-ビーム (σ_b)	32	157

(注1) σ_m : 一次膜応力、 σ_b : 一次曲げ応力

(注2) 評価基準の考え方については図 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 [kN]	判定基準 [MN] ^(注1)
一次蓋の慣性力	142.7	3.456

^(注1) 一次蓋締め付け時のボルト荷重による摩擦力

3 使用する解析コード

本章では、CASTOR[®] geo26JP 型の構造健全性評価に使用する解析コードについて説明する。

3.1 ANSYS[®] Mechanical[™] コード

1) 概要

ANSYS[®] Mechanical[™] コード(以降、ANSYS[®] という)は、Swanson Analysis Systems 社(現 ANSYS 社)が 1970 年に開発した 3 次元有限要素法応力解析コードを用いたコンピュータプログラムである。ANSYS[®] は、ISO9001、ASME NQA-1 の品質保証体制のもと開発され、米国原子力規制委員会の 10CFR50、10CFR21 の要求を満たし、多くの研究機関や企業で利用されている。航空宇宙、自動車、機械、建築、土木など様々な分野の構造解析に広く利用されている。ANSYS[®] は、構造、熱、流体、電磁気、及び複数領域にまたがる計算など、工学のさまざまな分野で有限要素計算を実行するために使用できる商用ソフトウェアである。GNS では、特に輸送用キャスクと貯蔵用キャスクの陰解法静的構造解析及び除熱解析に ANSYS[®] を使用している。

2) 機能

輸送用キャスク及び貯蔵用キャスクの静的構造有限要素解析は、一般的に 3 次元で行われ、3 次元体積要素及びシェル要素、ならびに特殊な目的(接点、ガスケット)のための 3 次元要素、2 次元要素、1 次元要素を使用する。荷重は、衝撃、重力、加速度、予荷重、圧力、温度分布などによる外力又は内力である。

有限要素解析の出力は、変位、応力、ひずみ、荷重である。評価は、金属キャスク構造規格の基準を考慮して保守的に設定した許容限界に照らして行われる。有限要素解析の出力量は、臨界や封じ込めなど、さらなる解析の入力としても機能する。

3) ANSYS[®] の検証

検証は、ハードウェアとオペレーティングシステムの現状に合わせて定期的に行われる。検証とは、コンピュータプログラムが、適用された数学モデルに対して、採用された各パラメータについて定義された範囲内で正しい解を生成したことを示すことである。検証のために、ANSYS[®] の文書に記載されている例として、関連するすべての荷重、変形モード、材料モデル、及び出力を網羅している例を解析した。表 1 に、解析した一部の検証例を示す。

表 5 検証に用いたモデルと解析例

例	モデル名	解析のタイプ
VM184	直線片持ち梁	静的、線形、曲げ
VM187	湾曲梁の曲げ	静的、線形、曲げ

これらの例は、関連するすべての荷重、変形モード、材料モデル、及び出力を網羅している。また、出力量を ANSYS® の文書に記載されている解と比較した。ANSYS® は、GNS が使用する用途に適していることがわかる。

検証結果は、数値的に決定された結果と、引用された検証例の関連する結果の比を用いて評価される。計算された比が 1.00 に等しい場合、それぞれの数値結果は ANSYS® の文書に記載されている解と同等とみなされる。

検証計算で求めた比は、すべて等価基準を満たしているため、特筆すべき異常はなく、ANSYS® 2021 R2 の各プラットフォームへの適合性が示された。

計算の結果、計算ソフトウェア ANSYS® 2021 R2 は、GNS 社が使用するプラットフォーム上の用途に適していることが示された。

4) 使用実績例

- ANSYS®コードは、ドイツおよびチェコにおいて、次の輸送キャスクの許認可における安全解析において、使用されている。

CASTOR® V/19 (D/4372/B(U)F-96, Rev. 3, 2015 (ANSYS® 14.5)

CASTOR® 1000/19 (CZ/070/B(U)F-96, Rev. 0, 2010 (ANSYS® Release 10.0A1)

- ANSYS®コードは、多くの研究機関や企業で利用されている。航空宇宙、自動車、機械、建築、土木など様々な分野の構造解析に広く利用されている。
- ANSYS®コードは、原子炉設置(変更)許可申請書の応力解析など、原子力分野の構造解析に多く利用されている例がある[2]。

4 参考文献

- [1] JSME FAS FA1-2007-使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版),(社)日本機械学会
- [2] 東北電力(株) VI-5 計算機プログラム(解析コード)の概要、2021年9月

別紙1 地震時におけるキャスク本体溝部及びキャスク下部の固定装置との接触部の構造健全性の評価

A1.1 概要

本資料は、CASTOR[®] geo26JP 型の胴の溝部及び胴の下部と固定装置との接触部が弾性状態を維持し、塑性ひずみが生じないことを確認するため、地震力による構造健全性を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。

評価に関連する構成部品の材料は、**補足説明資料「特定兼用キャスクの構造と材」**「構造・材料に関する補足説明資料(1024-TR-00005)」に示すとおりである。CASTOR[®] geo26JP 型の胴の材料は、球状黒鉛鋳鉄(低温用厚肉フェライト球状黒鉛鋳鉄品)FCD 300LT (JIS G 5504)である。

A1.2 CASTOR[®] geo26JP 型の固定方法、荷重条件、評価基準

A1.2.1 固定方法

CASTOR[®] geo26JP 型は、貯蔵架台の上にたて置きで設置し、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、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地震力が作用しても、滑動及び転倒せず、CASTOR[®] geo26JP 型の安全機能が損なわれない設計とする。

キャスクの貯蔵状態を図 A1-1 に示す。図 A1-2 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滑動することはない。さらに図 A1-3、図 A1-4 及び図 A1-8 は、固定装置及びキャスク本体と固定装置との間の接触領域を示している。

固定装置は、貯蔵架台にそれぞれ ボルトで連結された、角ばった形状の 4 つの装置で構成されている。固定装置は、貯蔵架台に固定される部分(フランジ)とキャスク本体に挿入する部分(舌部)で構成される。4 つの装置は、キャスクの円周に沿って 90° ごとに等間隔に配置されている。各固定装置の背後には、貯蔵枠の一部として偏心ボルトが挿入されている。偏心ボルトにより、固定装置はキャスク底部の下部円周に押し付けられる。図 A1-3 b)の舌部がキャスク本体底部の溝にはまり、キャスクの浮き上がりを防止する。キャスクの滑りを防止するため、各装置の後ろに直径 程度の偏心ボルトを追加挿入する。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。

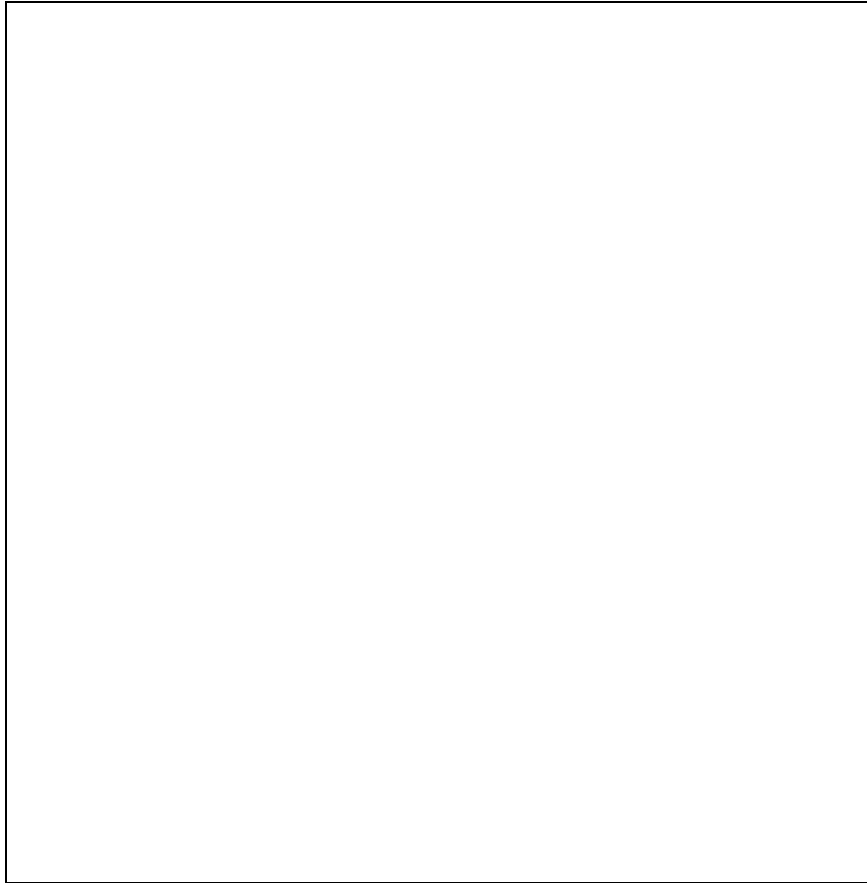


図 A1-1 貯蔵時のキャスク固定状態



図 A1-2 キャスク底板の取り付け状態

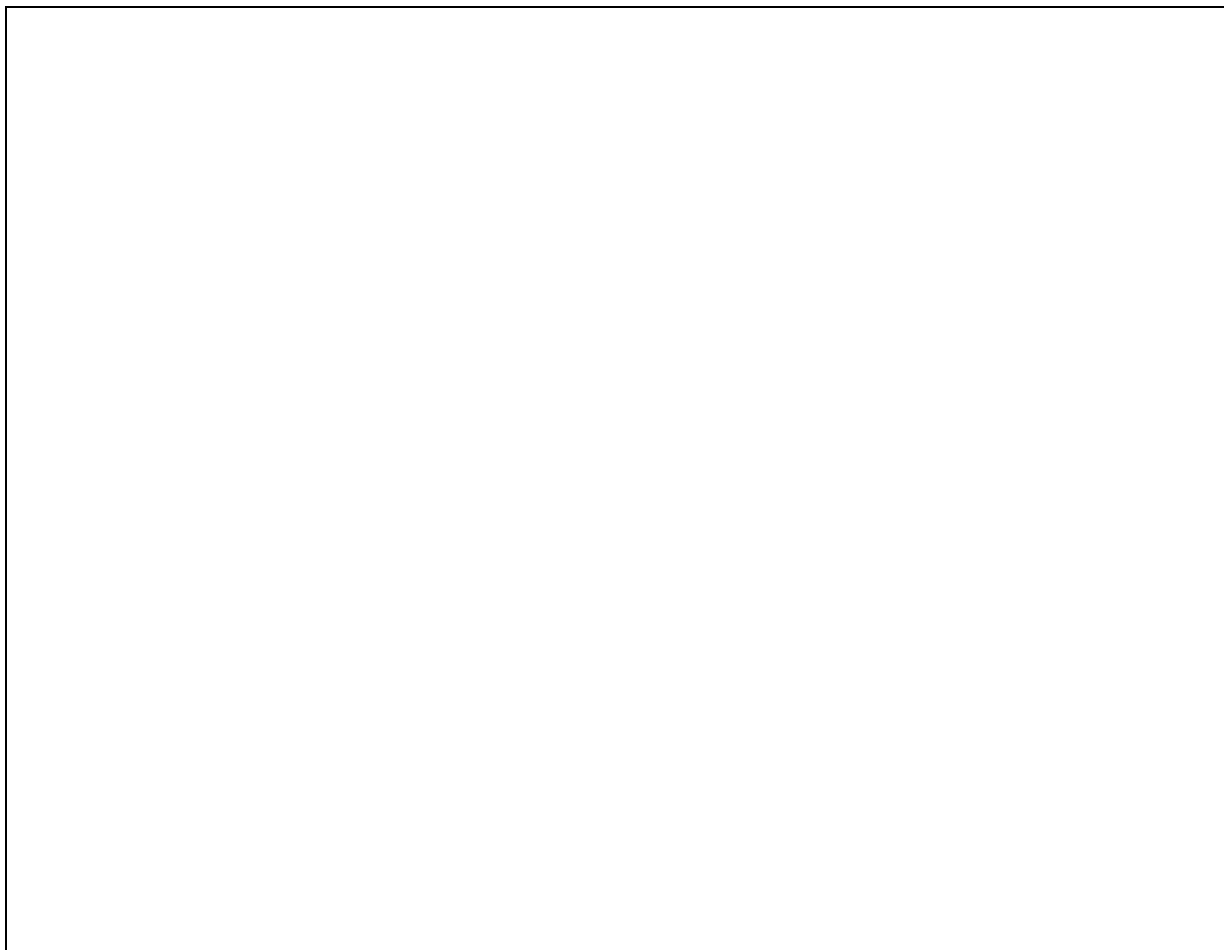


図 A1-3 キヤスク固定装置



図 A1-4 キヤスク本体と固定装置間の接触部



図 A1-5 固定装置のキャスク本体との接触部

A1.2.2 荷重条件

貯蔵中の CASTOR® geo26JP 型の質量は 118 t であるが、この評価では保守的に 120 t を用いる。評価に用いる加速度の設計条件は以下の値とする：

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

水平方向と鉛直方向の加速度が同時に作用すると仮定して評価する。地震時の鉛直上方向の加速度については、重力 1g を差し引いて評価する。

ここで、図 A1-6 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。

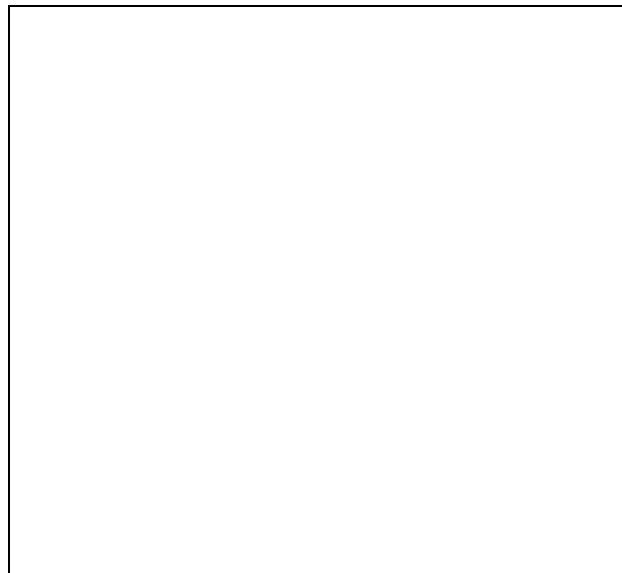


図 A1-6 水平加速度方向

固定装置の舌部とキャスクの溝との間に隙間があると仮定すると、キャスクは図 A1-7 に示すように一方向に傾くことができる。この傾斜運動により、キャスクは片側(図 A1-7 の左下側)では地面から浮き上がり、反対側(図 A1-7 の右下側)では地面に接したままとなる。ある傾斜角度に達すると、キャスクの溝はまず左側に設置された固定装置の舌部に接触する。残りの 3 つの固定装置とキャスク本体溝部は、幾何学的な理由により接触しない。この時、応力が固定装置の一箇所に集中し、大きな応力が発生する。そこで、キャスク本体溝部の下側の支持部の肉厚を厚くすることで、生じる応力を許容範囲まで低減する(図 A1-8 参照)。



図 A1-7 キャスクの溝部と固定装置の舌部の間に 隙間がある場合のキャスクと固定装置の接触状況

キャスクに作用する荷重は、キャスク本体と固定装置の接触部(図 A1-4 に示すキャスク本体溝部、キャスク底板上部の側面部)間の反力となる。



図 A1-8 キャスク本体溝部の下側の支持部の形状

A1.2.3 評価基準

キャスク本体溝部及びキャスク下部固定装置接触部の評価基準を表 A1-1 に示す。評価基準は、弾性範囲内とした。この応力評価基準は、除熱解析の結果を踏まえて、表 A1-2 に示す各部の設計温度に基づき設定している。

表 A1-1 キャスク本体溝部及びキャスク下部固定装置接触部の応力評価基準

評価項目	制限値応力	基準	値 [MPa]
キャスク本体溝部	許容一次膜応力	S_y	157.3
	許容一次膜+曲げ応力	S_y	157.3
	せん断応力	S_y	157.3
キャスク下部 固定装置接触部	許容一次膜応力	S_y	155.2

表 A1-2 評価対象部材の温度

構成部材	温度[°C]
キャスク本体溝部	105
キャスク下部 固定装置接触部	120

A1.3 キャスク本体溝部及びキャスク下部固定装置接触部の構造強度評価

A1.3.1 有限要素モデル

キャスク本体の静的強度評価は、有限要素計算プログラム ANSYS® Release 2021 R2 を用いて実施した。キャスクの溝部とキャスク下部固定装置接触部の応力を評価するために有限要素モデルを構築した。キャスク本体、一次蓋、二次蓋、キャスク底板、4 つの固定装置、貯蔵架台のみをモデル化した。キャスクの溝部とキャスクの固定装置に対する下部接触部の評価上、キャスクの溝部と下部接触部は詳細にモデル化され、その他の領域は簡略化されている。したがって、キャスク本体上部、一次蓋、二次蓋、貯蔵架台及びキャスク底板は簡略化されている。有限要素モデルとその構成要素を図 A1-9 に示す。



図 A1-9 有限要素モデルの構成要素

モデル化された構成部品は、2次元要素次数を持つ SOLID186 及び SOLID187 要素でメッシュ化されている。特に評価対象領域(カスクの溝部とカスク固定装置の下部接触部)については、発生する応力を適切に評価するために、より細かいメッシュ(図 A1-10、図 A1-11)が設定されている。

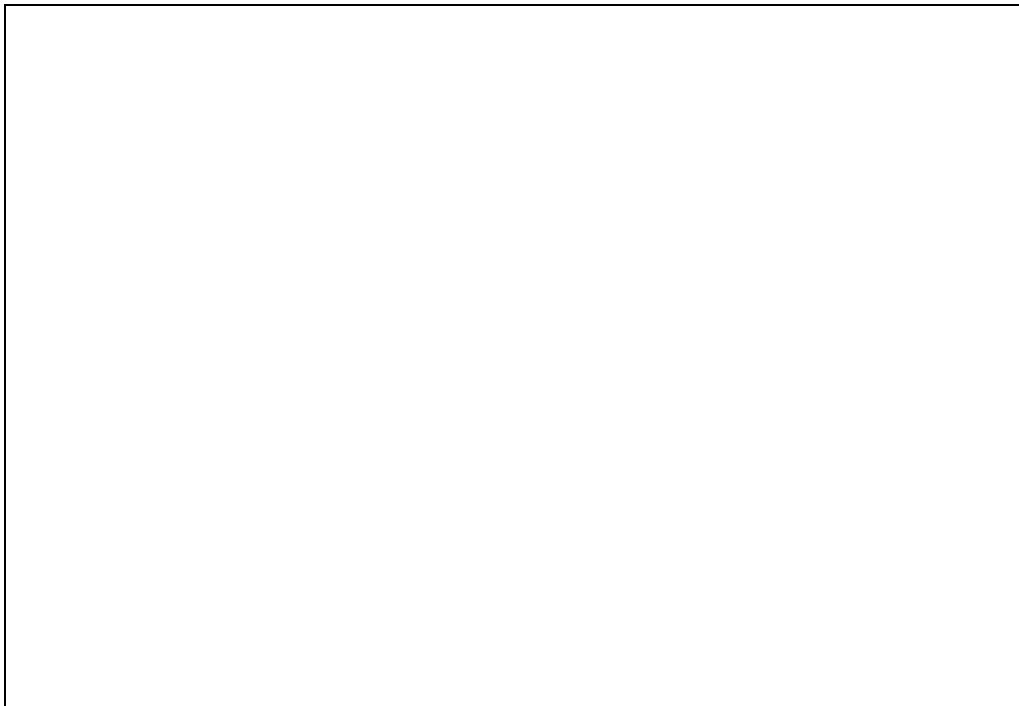


図 A1-10 有限要素モデルのメッシュ

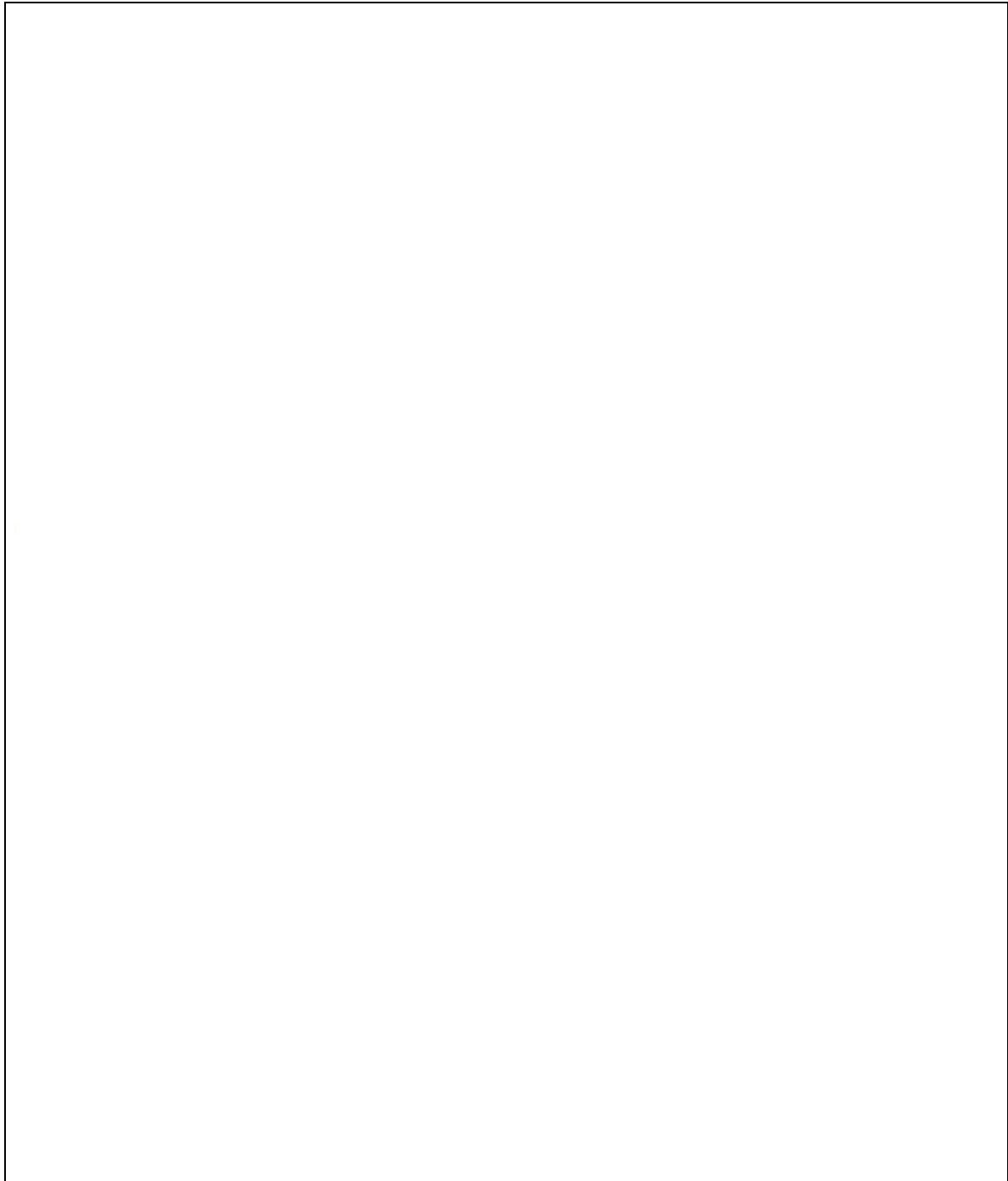


図 A1-11 有限要素モデルのメッシュ - 評価箇所の詳細

A1.3.2 境界条件

各固定装置と貯蔵架台の底面の節点は固定されている(緑色でハイライトされた図 A1-12 参照)。固定とは、これらの節点の変位が全方向に固定されていることを意味する。ここで、固定装置は評価対象外である。



図 A1-12 各固定装置と貯蔵架台の底面の節点

CASTOR[®] geo26JP 型本体は、固定装置と貯蔵架台との接触条件によつてのみ動きが制限される。すなわち、CASTOR[®] geo26JP 型は隙間が閉じるまで、加えられた加速度によつて動くことができる。隙間が閉じると、反力が CASTOR[®] geo26JP 型本体に伝わる。このようにして、CASTOR[®] geo26JP 型本体へ荷重が加わる。

本モデルでは、CASTOR[®] geo26JP 型の質量 120 t、重心高 とする。

CASTOR[®] geo26JP 型本体、CASTOR[®] geo26JP 型底板、固定装置の弾性材料挙動をモデル化した。考慮した材料入力データは表 A1-3 に、その他のモデル化された部品については、剛性材料挙動が考慮されている。

表 A1-3 弾性モデル部品の材料データ

構成部品	弾性係数 [MPa]	ポアソン比
CASTOR [®] geo26JP 型キャスク本体	156,800	0.29
CASTOR [®] geo26JP 型キャスク底板	194,800	0.31
固定装置	207,625	0.3

A1.2.2 で設定した荷重(加速度)をこのモデルに適用する。

保守的な計算として、キャスクの溝部と固定装置の舌部(キャスク軸方向、図 A1-13 参照)の間に の隙間を空けて行う(注 1)。キャスクが加速荷重を受けて傾き始めると、一方の固定装置の舌部と、反対側の固定装置のキャスクに対する下側の接触部だけが接触することになる(図 A1-13 参照)。この状態が、想定しうる最も保守的な荷重条件になる。

(注 1): CASTOR[®] geo26JP 型は貯蔵初期から貯蔵末期までの間に、収納する使用済燃料の発熱量が低下すると、鋳鉄製キャスク本体の熱収縮が起こる。保守的に 105°C から -22.4°C の温度変化による熱収縮は、鋳鉄の熱膨張率を $12 \times 10^{-6} 1/K$ とすると、キャスクの溝部の位置で約 となる。これに、溝部や舌部の機械加工の許容誤差等を考慮すると、隙間は保守的に と仮定できる。ここで、固定装置の熱的収縮は、保守的に無視する。

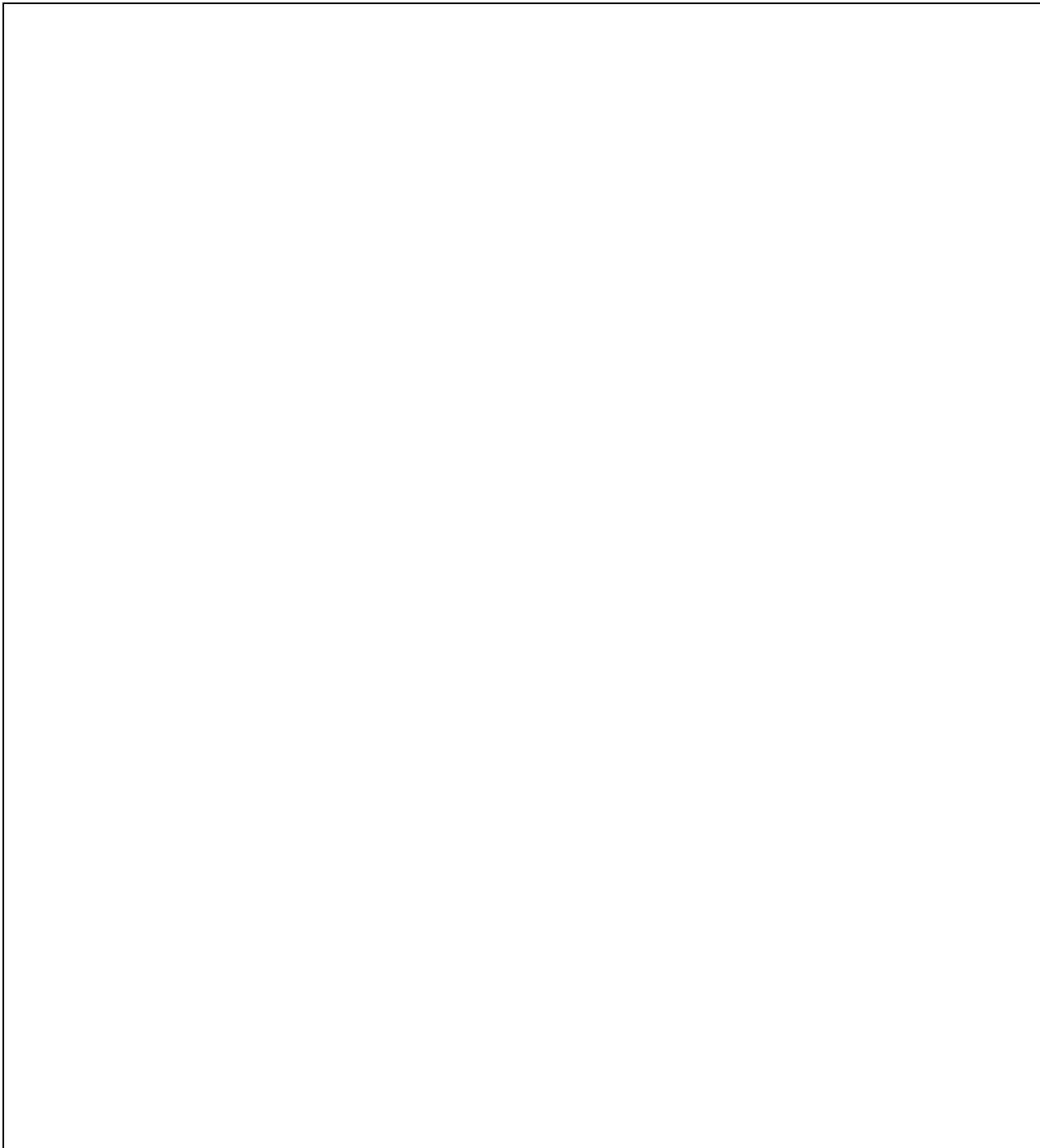


図 A1-13 CASTOR® geo26JP 型の胴溝部と固定装置舌部の接触状態の変化

A1.3.3 計算結果・評価

A1.3.3.1 溝部

キャスク本体の溝部と固定装置の舌部との接触面では、キャスクの溝部に面圧による荷重がかかる。この接触により、固定装置からの荷重がキャスクの溝に伝えられる。機械学会金属キャスク構造規格 MCD-1316(支圧荷重の評価)によると、面圧の許容値(保守的に S_y)に対する膜応力の評価が必要である。評価のため、応力は溝部中央の経路 1 上で評価される(図 A1-14 参照)。キャスク本体溝部は圧縮応力だけでなく曲げ応力も受ける。この応力は経路 2 を介して評価される(図 A1-15 参照)。その結果、膜応力と曲げ応力が評価される。発生した応力と応力負荷率(計算値/評価基準値)を表 A1-4 に示す。最大負荷率は 70.7 %であり、評価基準値を超えていない。

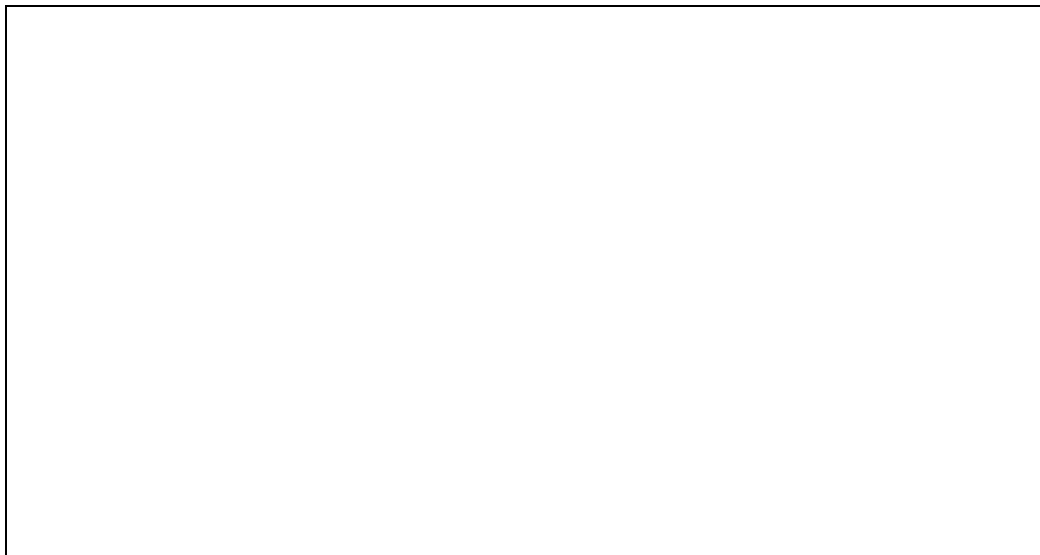


図 A1-14 キャスク本体溝部の応力評価経路 1 における応力分布(断面図)

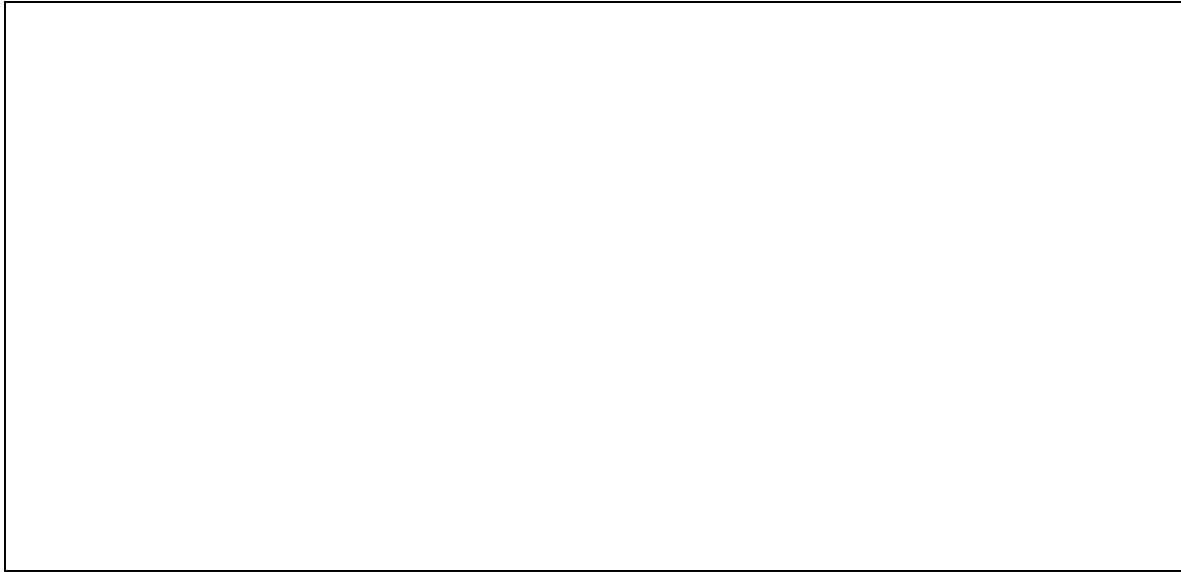


図 A1-15 キャスク本体溝部の応力評価経路 2 における応力分布(断面図)

一方、追加的に、キャスク本体の溝部に作用するせん断応力について、評価する。キャスク本体の溝部(キャスク胴体溝と固定装置舌部間の接触面積)に作用する力は三次元有限要素法応力解析コード(ANSYS コード)計算から得られる。この力は $F_{vert} = \text{[]}$ N になる。以下では、幅 [] (解析評価と同様)、高さ [] のせん断断面を考慮してせん断応力を計算する:

$$\sigma_{shear} = \frac{F_{vert}}{A_{\tau}} = \text{[]} = 55 \text{ MPa}$$

$$\text{ここで } A_{\tau} = h \cdot b = \text{[]} \text{ mm}^2$$

許容せん断力に対する応力負荷率は、次のとおりである。

$$U_{shear} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_{shear}}{S_y} = \frac{\sqrt{3} \cdot 55 \text{ MPa}}{157.3 \text{ MPa}} = 60.56 \%$$

従って、キャスク本体溝部は塑性変形することはない。

A1.3.3.2 キャスクの下部

固定装置に対するキャスク下部の接触領域で、応力強度を評価する。図 A1-16 は、キャスクの底部の切断面(キャスクキャビティ、ボアホール、固定装置、底板、中性子遮蔽盤)及び評価経路を示す。固定装置の下部接触部からの表面圧力による膜応力のみを評価する。発生した応力とその結果は表 A1-4 の通りである。その負荷率は 22.8 %であり、評価基準値を超えていない。



図 A1-16 キャスク下部と固定装置との接触部における応力評価経路と応力分布(断面図)

以上の計算結果を表 A1-4 にまとめる。

表 A1-4 キャスク本体溝部と固定装置へのキャスク下部接触部の応力評価結果

評価項 F 目	作用応力	計算値 [MPa]	評価基準値 S_y [MPa]	応力負荷率 ^(注1)
キャスク本体溝部 経路 1	一次膜応力	111.2	157.3	70.7
キャスク本体溝部 経路 2	一次膜応力	63.5	157.3	40.4
	一次膜+曲げ応力	86.7	157.3	55.1
キャスク下部 固定装置接触部	一次膜応力	35.4	155.2	22.8

(注1) 応力負荷率=計算値/評価基準値

なお、キャスク本体胴の断面積はキャスク下部固定装置の舌部が接触する部分の面積より大きいため、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。

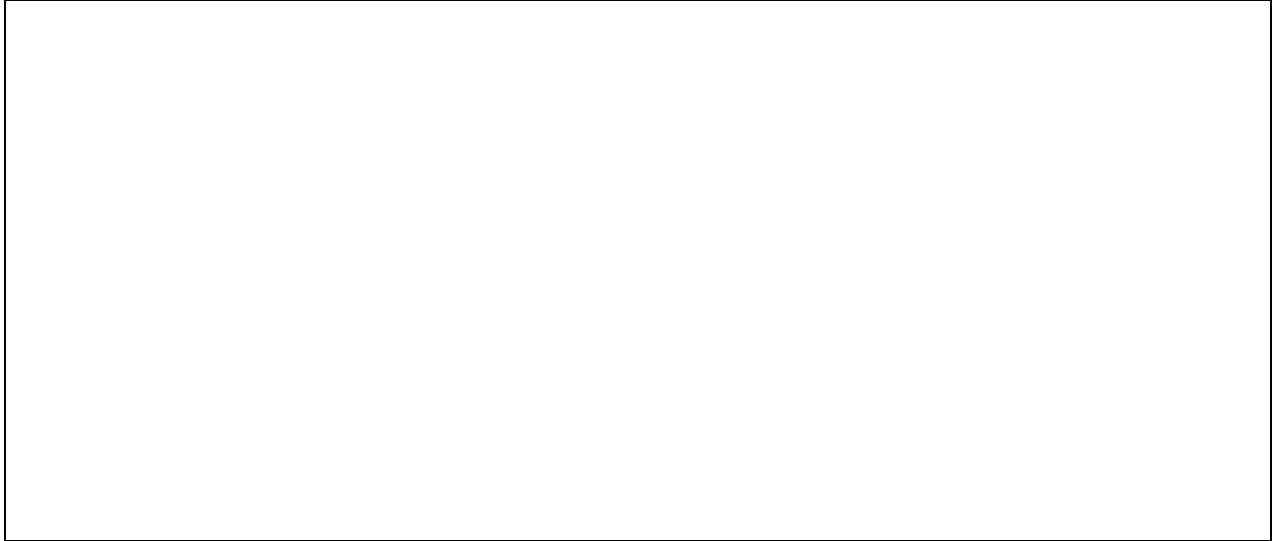


図 A1-17 キャスク本体胴の断面積とキャスク下部固定装置の舌部が接触する部分の面積の比較

別紙2 地震時の CASTOR® geo26JP 型の機能維持評価

A2.1 概要

本資料は、CASTOR® geo26JP 型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、評価に関連する構成部品の材料は、[補足説明資料「特定兼用キャスクの構造と材料に関する補足説明資料\(1024-TR-00005\)」](#)に示すとおりである。

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

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、120℃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	$S_y^{(注1)}$	155.2 ^(注2)
	一次蓋ボルト	一次曲げ応力＋一次膜応力	$S_y^{(注1)}$	913.4
	胴	一次曲げ応力＋一次膜応力	$S_y^{(注1)}$	155.2
		せん断力	$S_y/\sqrt{3}$	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	$S_y^{(注1)}$	114
	バスケット側板	圧縮応力	$S_y^{(注1)}$	114
	H-ビーム	一次曲げ応力	$S_y^{(注1)}$	157

(注1) 保守的に弾性体の状態を設計基準として考慮する。

(注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	120
一次蓋ボルト	110
胴	120
バスケット	250

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。

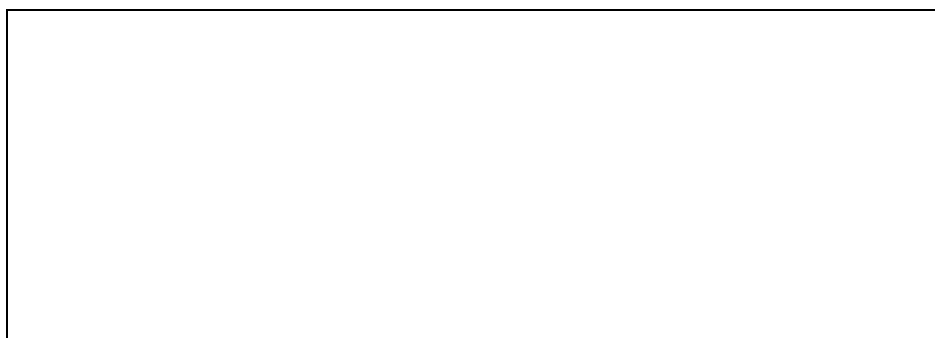


図 A2-1 内圧に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

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	[]
r	評価点(ガスケット)の半径	mm	
t	厚さ ^(注1)	mm	
p	蓋間圧力-胴内圧	MPa	
ν	ポアソン比	-	0.31

(注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。

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

$$\sigma_{r1} = [] = -30.8 \text{ MPa}$$

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。

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

$$\sigma_{t1} = [] = -8.3 \text{ MPa}$$

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	30.8	8.3	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。

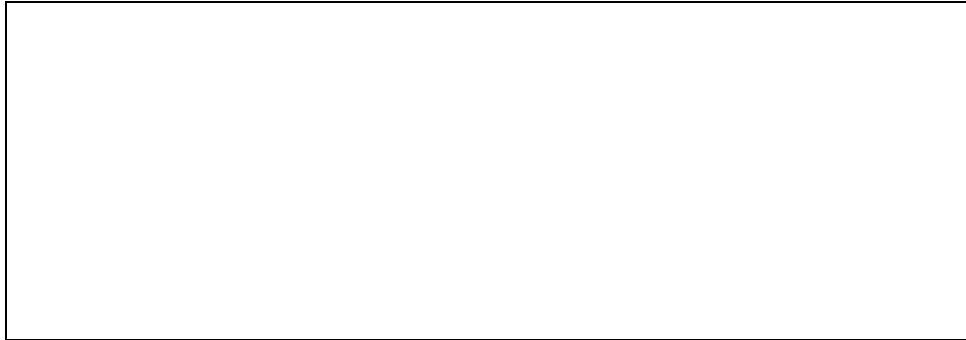


図 A2-2 地震時の慣性力に対する一次蓋密封シール部の応力計算モデル

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 A2-3 参照)。

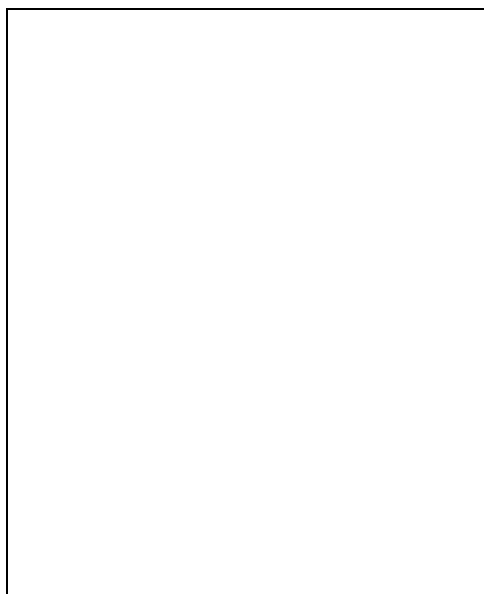


図 A2-3 一次蓋側面と胴内面の詳細

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 ^(注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

(注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。

$$p = \frac{F_{vert}}{A} = \text{$$

ここで

$$F_{vert} = m \cdot g \cdot a_v = \text{$$

$$A = \pi \cdot R^2 = \text{$$

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。

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

$$\sigma_{r2} = \text{} = -2.5 \text{ MPa}$$

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。

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

$$\sigma_{t2} = \text{} = -0.7 \text{ MPa}$$

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、A2.2.4.1.1.1 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	33.3	9.0	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	kN	<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。

$$\sigma_m = \sigma_{m1} + \sigma_{m2} = \text{$$

ここで

$$\sigma_{m1} = \frac{F_{vert}}{A_s \cdot n} = \text{$$

$$F_{vert} = m \cdot g \cdot a_v = \text{$$

$$A_s = \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 = \text{$$

$$\sigma_{m2} = \frac{F_{v,max}}{A_s} = \text{$$

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 S_y [MPa]
	σ_{m1} [MPa]	σ_{m2} [MPa]	σ_m [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、表 A2-11 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。

$$\sigma_b = \frac{M}{W_s} = \boxed{}$$

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]

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

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

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 σ_b [MPa]	評価基準値 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 σ_m [MPa]	一次膜+曲げ応力 σ_{m+b} [MPa]	評価基準値 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 参照)。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。

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

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。

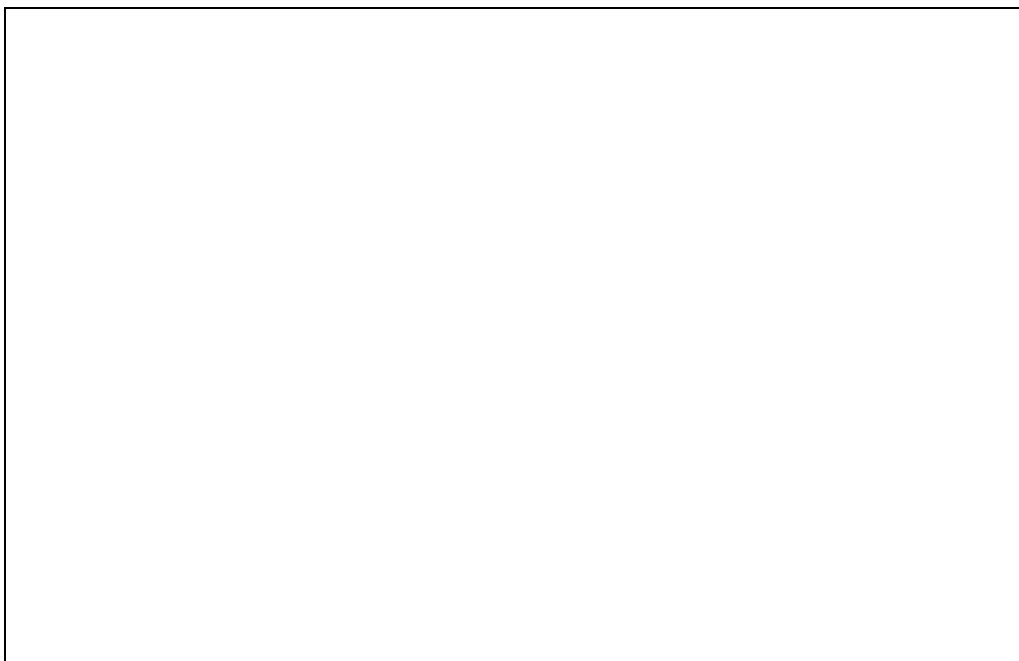


図 A2-4 バスケットの構造部材

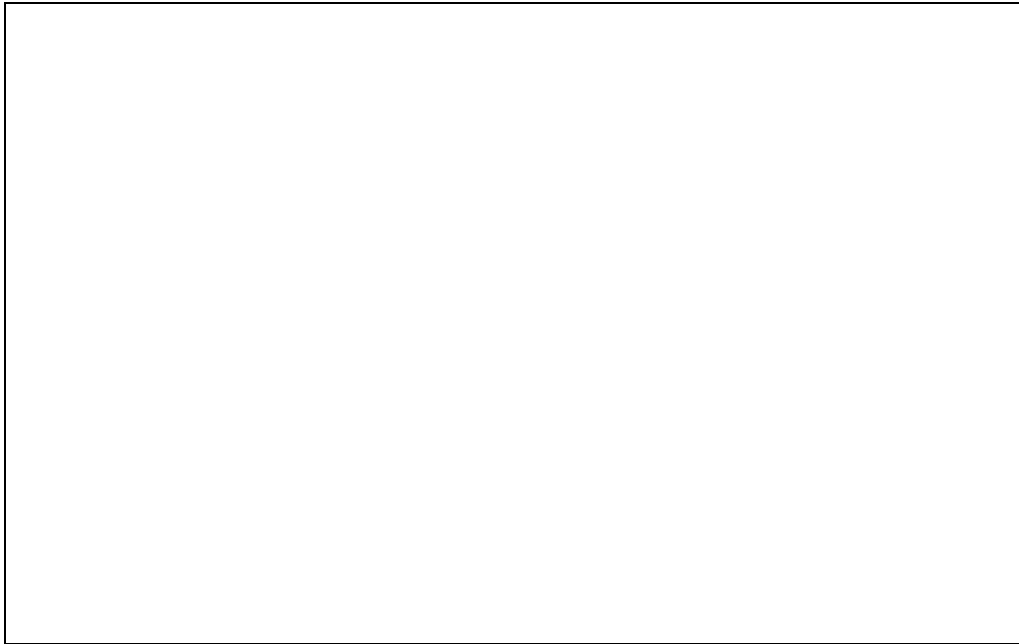


図 A2-5 バスケット鉛直方向加速度

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 [g]	重量 m [kg]	面積 A [mm ²]	一次膜応力 $\sigma_{\sigma m}$ [MPa]
コーナーエレメント	2.64	[Redacted]	[Redacted]	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 σ_m [MPa]	設計基準 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、図 A2-7、図 A2-8)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、図 A2-8)よりも分布荷重が大きいいため、他の方向の評価を包絡する。

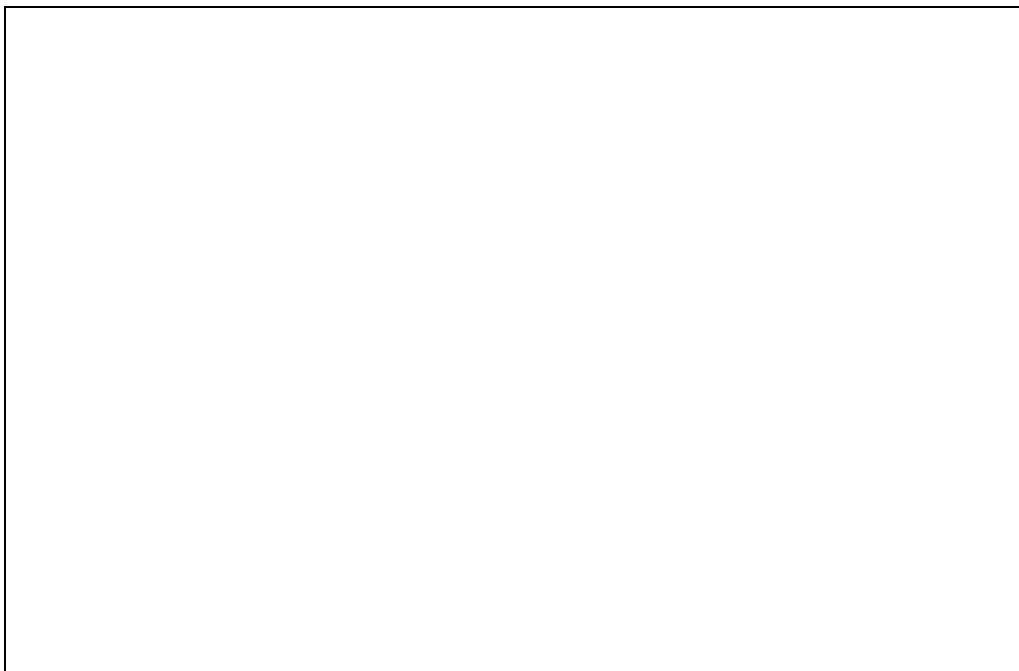


図 A2-6 バスケット水平方向加速度 (90° 方向)

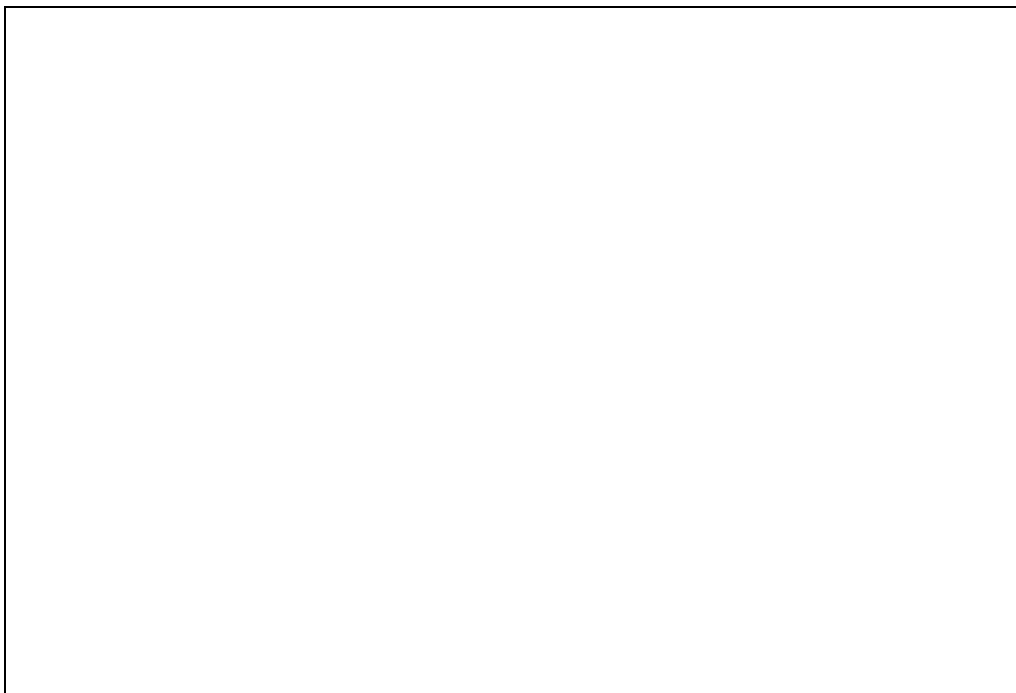


図 A2-7 バスケット水平方向加速度(45° 方向)



図 A2-8 バスケット水平方向加速度(0° 方向)

H-ビームはウェブ及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)。

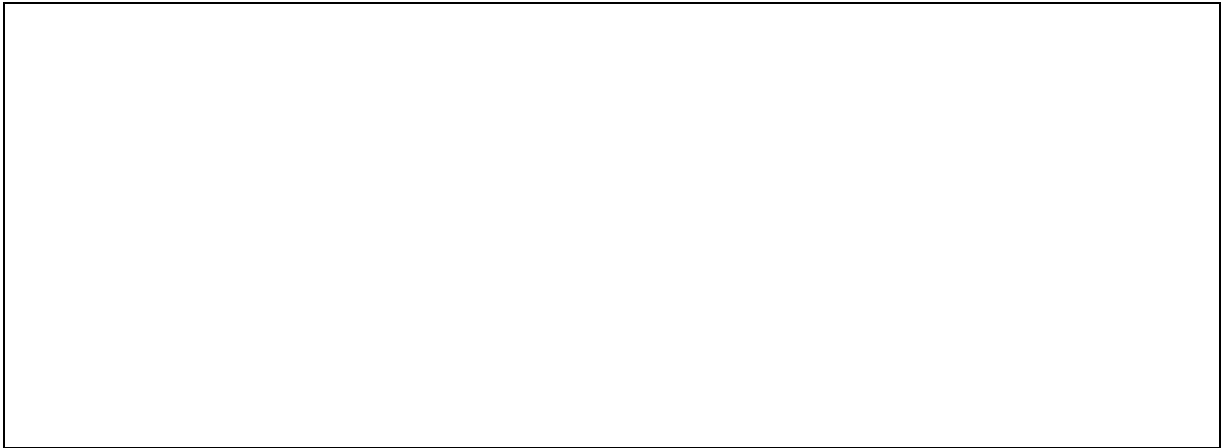


図 A2-9 水平方向地震力に対する H-ビームの応力計算モデル及び分布荷重の導出

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 σ_b [MPa]	設計基準 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	一次蓋質量 $m_{PrimLid}$: [t]	水平加速度 a_h : [g]	重力加速度 g : [$\frac{mm}{s^2}$]	一次蓋に作用する慣性力 $F_{hor,PrimLid}$: [kN]
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