

補足説明資料 5 - 1

5条

地震による損傷の防止

地震による損傷の防止に関する説明資料

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	6

別紙 1 ABAQUS コードによる応力解析について

別紙 2 貯蔵用三次蓋の構造健全性について

1. 要求事項

型式設計特定機器の型式指定申請において、特定兼用キャスクの地震による損傷の防止に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 技術基準規則要求事項

a. 技術基準規則第5条第5項

兼用キャスクは、設置許可基準規則第四条第六項に規定する地震力に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。

b. 技術基準規則解釈第4条第6項

第5項の規定は、設置許可基準規則第4条第6項の規定に基づき設置許可で確認した設計方針に基づき、兼用キャスクが、同項の地震力に対し、施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していることをいう。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査
ガイド確認事項

「4. 自然現象に対する兼用キャスクの設計 4.2 考慮する自然現象等の設定方針、4.3 考慮する自然現象に対する設計方針」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

(考慮する自然現象等の設定方針)

(1) 第6項地震力を適用していること。

(基本方針)

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

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

(荷重及び荷重の組合せ)

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

(許容限界)

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

(静的解析及び地震応答解析)

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

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

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

(耐震性評価)

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

』

【確認内容】

『

(考慮する自然現象等の設定方針)

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

①兼用キャスク告示で定める地震力

地震力を算出するために必要な加速度及び速度は以下のとおり。

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

②基準地震動による地震力

(省略)

(基本方針)

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

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

(荷重及び荷重の組合せ)

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

(許容限界)

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

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

(静的解析及び地震応答解析)

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

(耐震性評価)

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

』

2. 要求事項への適合性

(1) 技術基準規則への適合性

MSF-24P(S)型の地震による損傷の防止に関する設計は、以下のとおり技術基準規則に適合している。

a. 技術基準規則第5条第5項

兼用キャスクは、設置許可基準規則第四条第六項に規定する地震力に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。

b. 技術基準規則解釈第4条第6項

第5項の規定は、設置許可基準規則第4条第6項の規定に基づき設置許可で確認した設計方針に基づき、兼用キャスクが、同項の地震力に対し、施設の機能を維持していること又は構造強度を確保していることをいう。

MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、貯蔵用緩衝体の装着により、兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない、蓋部が金属部へ衝突しない方法で横置きに設置する設計とする。

また、MSF-24P(S)型は、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定める地震力を組み合わせた荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まるようにし、臨界防止機能を担保するバスケットプレートは、弾性状態に留まるように設計する。その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有し、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。

2. (2) 審査ガイドへの適合性の説明に示すとおり、MSF-24P(S)型は、設置許可基準規則第4条第6項の規定に基づいて、型式証明を受けた設計方針に基づき、兼用キャスク告示で定める地震力に対して、十分な構造強度を有し、安全機能が維持されることを確認している。

なお、周辺施設からの波及的影響評価については、型式指定申請の範囲外（設工認時に別途確認）である。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能を維持するために自然現象等に対する基本方針の妥当性を確認することが定められており、特定兼用キャスクの地震による損傷の防止に関する設計は、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[確認内容]

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

(2) 第6項地震力として、以下のいずれかを適用していること。

①兼用キャスク告示で定める地震力

地震力を算出するために必要な加速度及び速度は以下のとおり。

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

②基準地震動による地震力

(省略)

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

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

[確認内容]

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

MSF-24P(S)型は、貯蔵用緩衝体の装着により、兼用キャスク告示に定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。したがって、兼用キャスク告示で定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対してその安全機能が損なわれるおそれがない。

[確認内容]

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

MSF-24P(S)型は、兼用キャスク告示で定める地震力に対して、その安全機能が維持される設計とする。

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(S)型の耐震性評価を実施し、MSF-24P(S)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。

本型式指定申請の設置方法は基礎等に固定する設置方法ではないため、型式指定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評価は、型式指定申請の範囲外（設工認時に別途確認）である。

[確認内容]

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

兼用キャスク設置位置周辺の斜面の影響評価は、型式指定申請の範囲外（設工認時に別途確認）である。

[確認内容]

(8) 荷重及び荷重の組合せの考え方が、以下を踏まえ妥当であること。

1) 地震力以外の荷重

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

2) 荷重の組合せ

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

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

MSF-24P(S)型の耐震性評価は、(一社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 1987」、(一社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984」及び(一社)日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」(以下上記3指針を「JEAG4601」と総称する。)に基づき、設計用地震力による荷重と地震力以外の荷重として、貯蔵施設での特定兼用キャスクの貯蔵時の状態に作用する荷重を組み合わせ実施している。

なお、転倒等の想定事象に対する評価は、型式指定申請の範囲外(設工認時に別途確認)である。

[確認内容]

(11) 静的解析及び地震応答解析に用いる解析モデル及び解析手法は、JEAG4601の規定を参考に設定していること。

(13) 静的解析において、兼用キャスク告示で定める地震力を用いる場合の水平地震力及び鉛直地震力については、同時に不利な方向の組合せで作用させること。

MSF-24P(S)型の耐震性評価は、静的震度(加速度)に基づき算定した地震力を使用し、静的解析により実施している(地震応答解析は行わない)。また、地震力は、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組合せで作用させている。

[確認内容]

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

転倒等の想定事象に対する評価は、型式指定申請の範囲外（設工認時に別途確認）である。また、地震力の算定において、スペクトルモーダル解析又は時刻歴応答解析は実施しない。さらに、地震力には、基準地震動による地震力を用いない。

[確認内容]

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

耐震性評価における MSF-24P(S) 型の安全機能の維持は、設計用地震力及び地震力以外の荷重に対して、特定兼用キャスクの構造強度の確保を基本とし、特定兼用キャスクに上記の荷重が作用した場合に特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位に生じる応力等を許容限界以下とすることで構造強度を確保する。応力評価及び疲労評価は、(一社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)に基づき、許容限界は、金属キャスク構造規格の適用部材の分類に応じた供用状態Dの許容基準を適用している。金属キャスク構造規格における密封境界部(密封シール部及び密封蓋ボルト)の供用状態Dの許容応力は弾性範囲内である。

また、臨界防止機能を担保するバスケットプレートについては、金属キャスク構造規格に規定されている材料を用いていないため、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第43条の26の3第1項の規定により、使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けた金属製の乾式キャスク(MSF-21P型)のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金(MB-A3004-H112)における供用状態Dの許容基準を許容限界とするとともに、弾性範囲内に留まることを確認している。

さらに、除熱機能を担保する伝熱フィンについては、バスケットプレートと同様に金属キャスク構造規格に規定がないため、部材が欠損せず、除熱機能を維持できるための基準として破断点を許容限界としている。

上記に基づく耐震性評価の結果、MSF-24P(S)型の各部材が地震時に十分な構造強度を有しており、安全機能が維持されることを型式指定申請書 添付書類4「耐震性に関する説明書」に示すとおり確認している（第1表及び第2表参照）。

第1表(1/2) MSF-24P(S)型の地震時における構造強度評価結果

(胴、一次蓋、一次蓋ボルト、カバープレート、カバープレートボルト、二次蓋、二次蓋ボルトの金属キャスク構造規格への適合性確認結果)

分類	評価項目	番号	許容基準 ^(注1)	適合確認結果	
密封容器	ボルト以外 ^(注2)	一次一般膜応力強さ	MCD-1311.3(1)	$P_n \leq 2/3S_u$	各応力強さは許容基準(許容応力)以下である。
		一次局部膜応力強さ	MCD-1311.3(2)	$P_L \leq S_u$	
		一次膜+一次曲げ応力強さ	MCD-1311.3(3)	$P_L + P_b \leq S_u$	
		一次+二次応力強さ	MCD-1312(2)	$P_L + P_b + Q \leq 3S_u$	
		疲労評価	MCD-1314(2) MCD-1332	$U_r^* \leq 1.0$ 疲労評価要否	ボルトを除く密封容器は疲労評価不要の条件を満足するため疲労評価は不要である。
		平均支圧応力	MCD-1316.2(2)	$\sigma_p \leq S_u$	各応力は許容基準(許容応力)以下である。
		圧縮応力	MCD-1317(3)	$\sigma_c \leq \text{MIN}[1.5S_u, 1.5B]$	
	密封シール部 ^(注3)	一次一般膜応力強さ	MCD-1318.1(1)	$P_n \leq S_y$	各応力強さは許容基準(許容応力)以下である。
		一次局部膜応力強さ	MCD-1318.1(2)	$P_L \leq S_y$	
		一次膜+一次曲げ応力強さ	MCD-1318.1(3)	$P_L + P_b \leq S_y$	
		一次+二次応力強さ	MCD-1318.1(4)	$P_L + P_b + Q \leq S_y$	
	ボルト ^(注4)	平均引張応力	MCD-1321.2(1)	$\sigma_n \leq S_y$	各応力は許容基準(許容応力)以下である。
		平均引張応力+曲げ応力	MCD-1321.2(2)	$\sigma_n + \sigma_b \leq S_y$	
疲労評価		MCD-1322(2)	$U_r^* \leq 1.0$	疲労累積係数(U_r^*)は許容基準以下である。	

(注1) 記号の説明は、型式指定申請書 添付書類4-1「耐震設計の基本方針」による。

(注2) 胴、胴(底板)、胴(フランジ)、一次蓋、カバープレート、二次蓋のうち、密封シール部を除く。

(注3) 胴(シール部)、一次蓋(シール部)、二次蓋(シール部)

(注4) 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、カバープレートボルト

第1表(2/2) MSF-24P(S)型の地震時における構造強度評価結果
 (トラニオン、外筒、下部端板、中性子遮蔽材カバーの
 金属キャスク構造規格への適合性確認結果)

分類	評価項目	番号	許容基準 ^(注1)	適合確認結果
トラニオン (注2)	せん断応力 (一次)	MCD-3311.3	せん断応力 (一次) $\leq 1.5f_s^*$	各応力は許容基準 (許容応力) 以下である。
	曲げ応力 (一次)	MCD-3311.3	曲げ応力 (一次) $\leq 1.5f_b^*$	
	支圧応力 (一次)	MCD-3311.3	支圧応力 (一次) $\leq 1.5f_p^*$	
	組合せ応力 (一次)	MCD-3311.3	組合せ応力 (一次) $\leq 1.5f_t^*$	
	せん断応力 (一次+二次)	MCD-3312.3 (2)	せん断応力 (一次+二次) $\leq 3f_s$	
	曲げ応力 (一次+二次)	MCD-3312.3 (3)	曲げ応力 (一次+二次) $\leq 3f_b$	
	支圧応力 (一次+二次)	MCD-3312.3 (4)	支圧応力 (一次+二次) $\leq 1.5f_p^*$	
中間胴 (注3)	引張応力 (一次)	MCD-3721.3 (2)	引張応力 (一次) $\leq 1.5f_t^*$	
	せん断応力 (一次)	MCD-3721.3 (2)	せん断応力 (一次) $\leq 1.5f_s^*$	
	圧縮応力 (一次)	MCD-3721.3 (2)	圧縮応力 (一次) $\leq 1.5f_c^*$	
	曲げ応力 (一次)	MCD-3721.3 (2)	曲げ応力 (一次) $\leq 1.5f_b^*$	
	組合せ応力 (一次)	MCD-3721.3 (2)	組合せ応力 (一次) $\leq 1.5f_t^*$	
	引張応力及び圧縮応力 (一次+二次)	MCD-3722.3	引張応力及び圧縮応力 (一次+二次) $\leq 3f_t$	
	せん断応力 (一次+二次)	MCD-3722.3	せん断応力 (一次+二次) $\leq 3f_s$	
	曲げ応力 (一次+二次)	MCD-3722.3	曲げ応力 (一次+二次) $\leq 3f_b$	
	座屈 (一次+二次)	MCD-3722.3	座屈応力 (一次+二次) $\leq 1.5f_b, 1.5f_s$ 又は $1.5f_c$	

(注1) 記号の説明は、型式指定申請書 添付書類4-1「耐震設計の基本方針」による。

(注2) 上部トラニオン、下部トラニオン

(注3) 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

第2表 MSF-24P(S)型の地震時における機能維持評価結果
 (バスケットプレート及び伝熱フィンの応力評価結果)

分類	評価項目	許容基準 ^(注1)		評価結果
バスケット (注2)	一次一般膜応力強さ	使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けた許容基準	$P_m \leq 2/3S_u$	各応力強さ又は各応力は許容基準(許容応力)以下である。
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ		$P_m + P_b \leq S_u$	
	せん断応力		$\tau \leq 1.2S_m$	
	圧縮応力		$\sigma_c \leq 1.5f_c^*$	
伝熱フィン	せん断応力	— (破断点)	$\tau \leq 2/3S_u$	

(注1) 記号の説明は、型式指定申請書 添付書類4-1「耐震設計の基本方針」による。

(注2) バスケットプレート

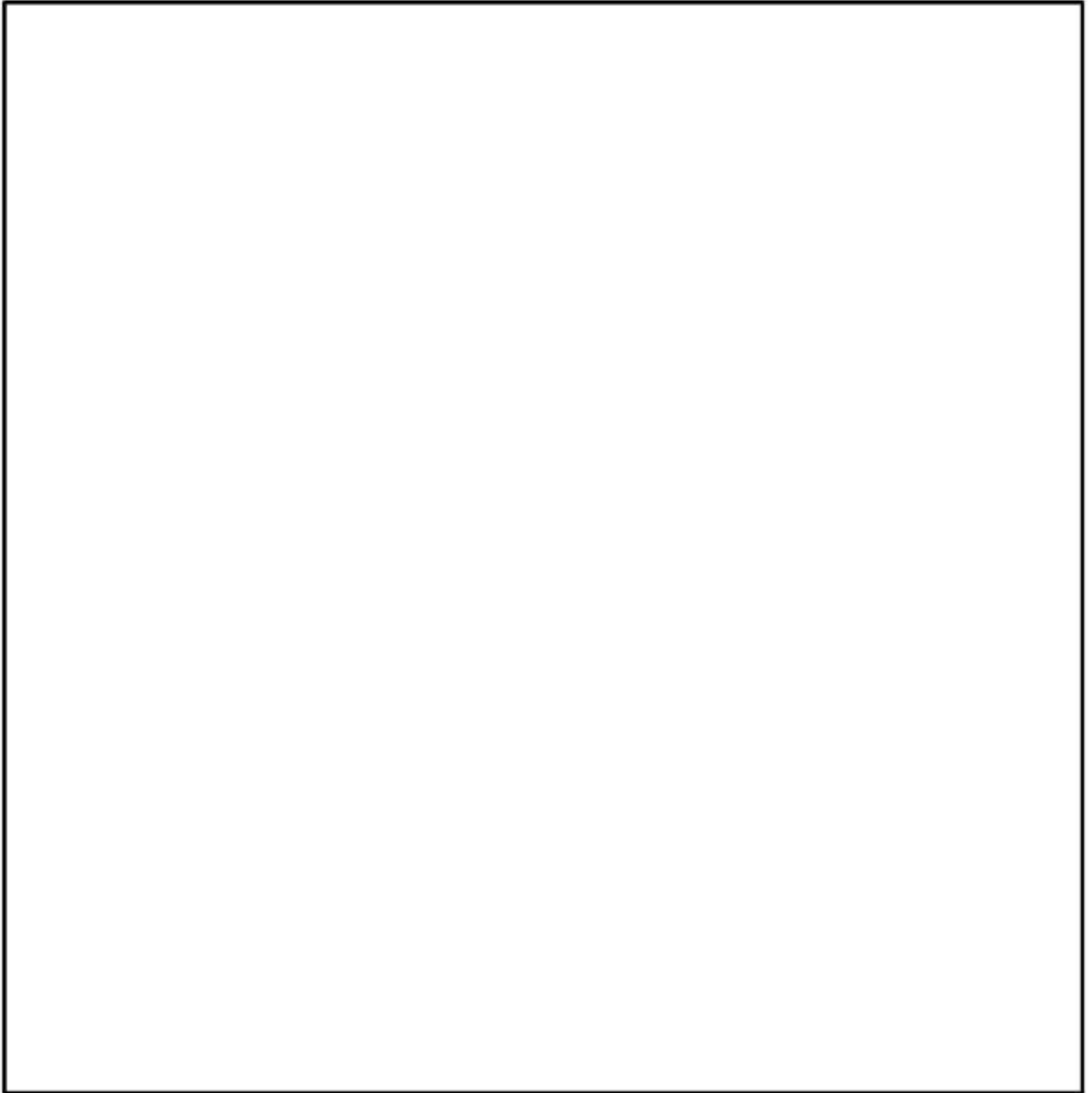
ABAQUS コードによる応力解析について

MSF-24P(S)型の胴、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、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の応力解析は、有限要素法による構造解析コード (ABAQUS) を使用する。解析モデルを別紙 1-1 図に示す。

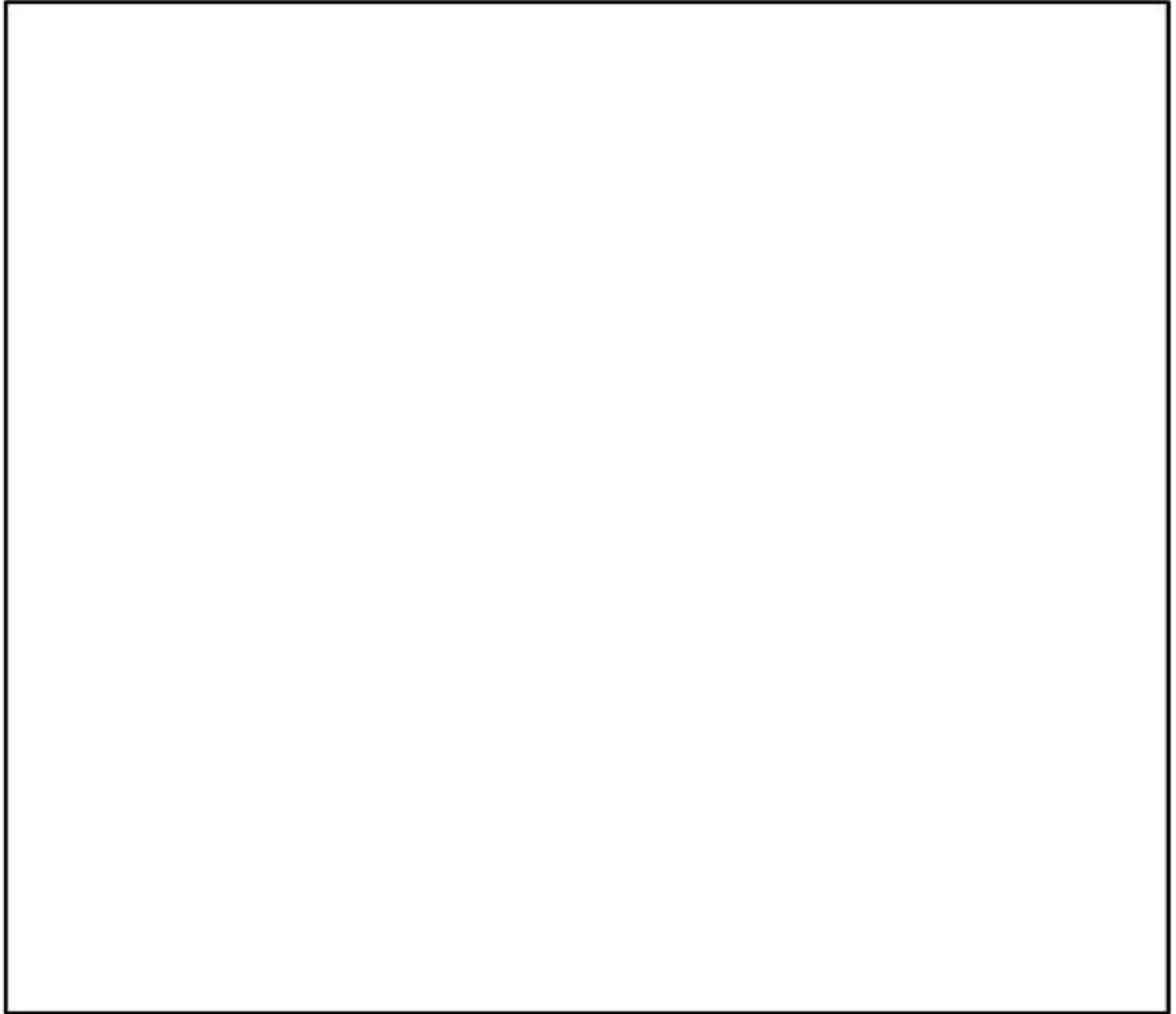
解析モデルは、MSF-24P(S)型の胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋、外筒等によりモデル化される。

また、解析モデルは、三次元の 360° モデルとし、三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルとする。モデル化には公称寸法を用いた。一次蓋、二次蓋及び貯蔵用三次蓋は各蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。なお、中性子遮蔽材は慣性力による荷重が模擬できるように質量体として考慮した。使用済燃料集合体、バスケット及び伝熱フィンモデル化せず、使用済燃料集合体及びバスケットは、胴内部に作用する荷重として考慮し、伝熱フィンは胴及び外筒の質量に考慮した。

なお、応力解析に用いる ABAQUS コードは、別添 1 に示すとおり検証され、適用性が確認されている。



別紙 1 - 1 図 解析モデル 部材定義図 (1/2)



別紙1-1図 解析モデル 部材定義図 (2/2)

(別紙1-1図 (1/2) と異なり、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及び貯蔵用三次蓋ボルトを同時に示した断面表示としている)

応力解析に使用する ABAQUS コードについて

MSF-24P(S)型の応力解析に用いる解析コード (ABAQUS) 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。

i 概要

ABAQUS コード⁽¹⁾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、輸送キャスクの構造解析など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 解析フロー

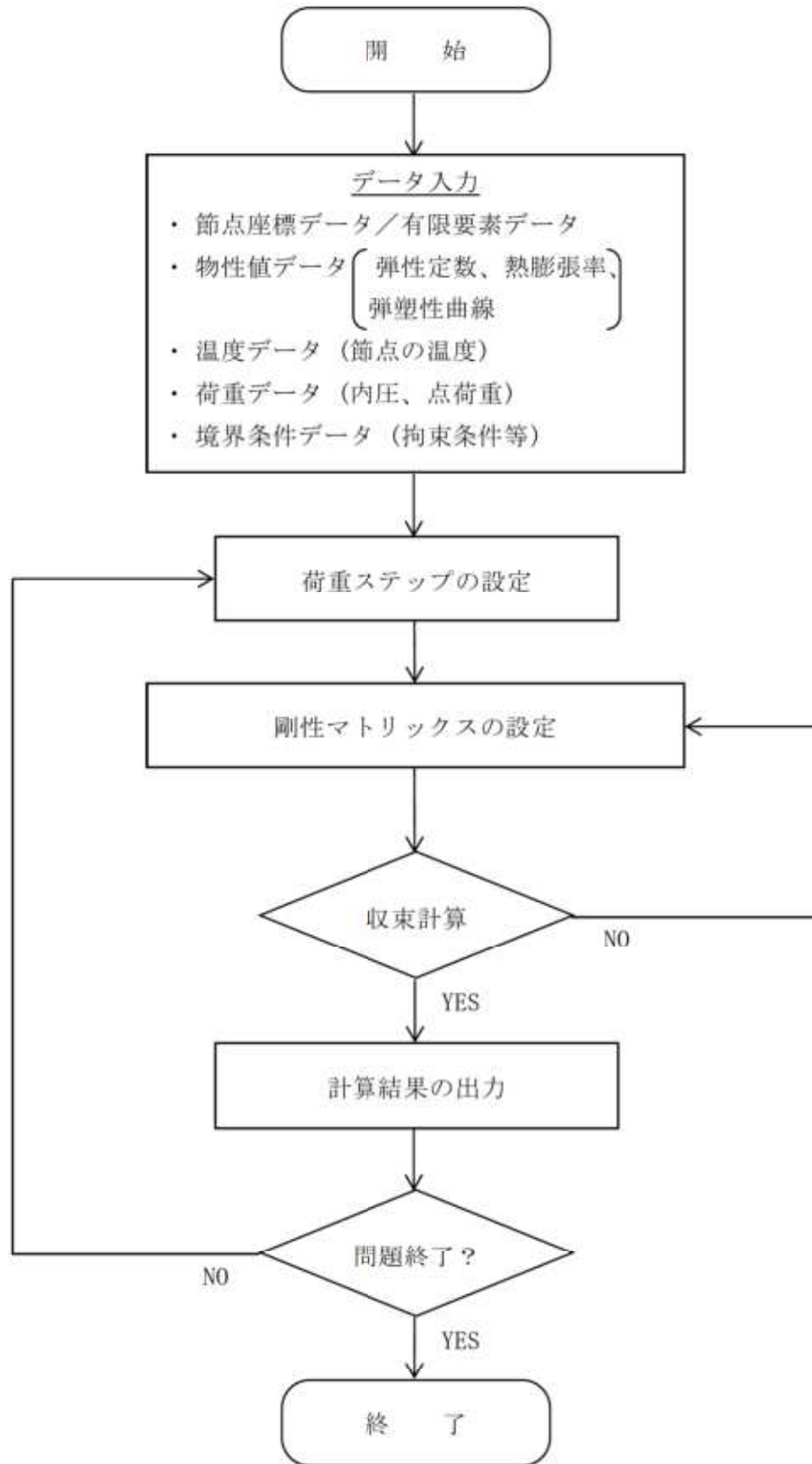
代表的な解析フローを別紙 1 - 2 図に示す。

iv 使用実績及び検証

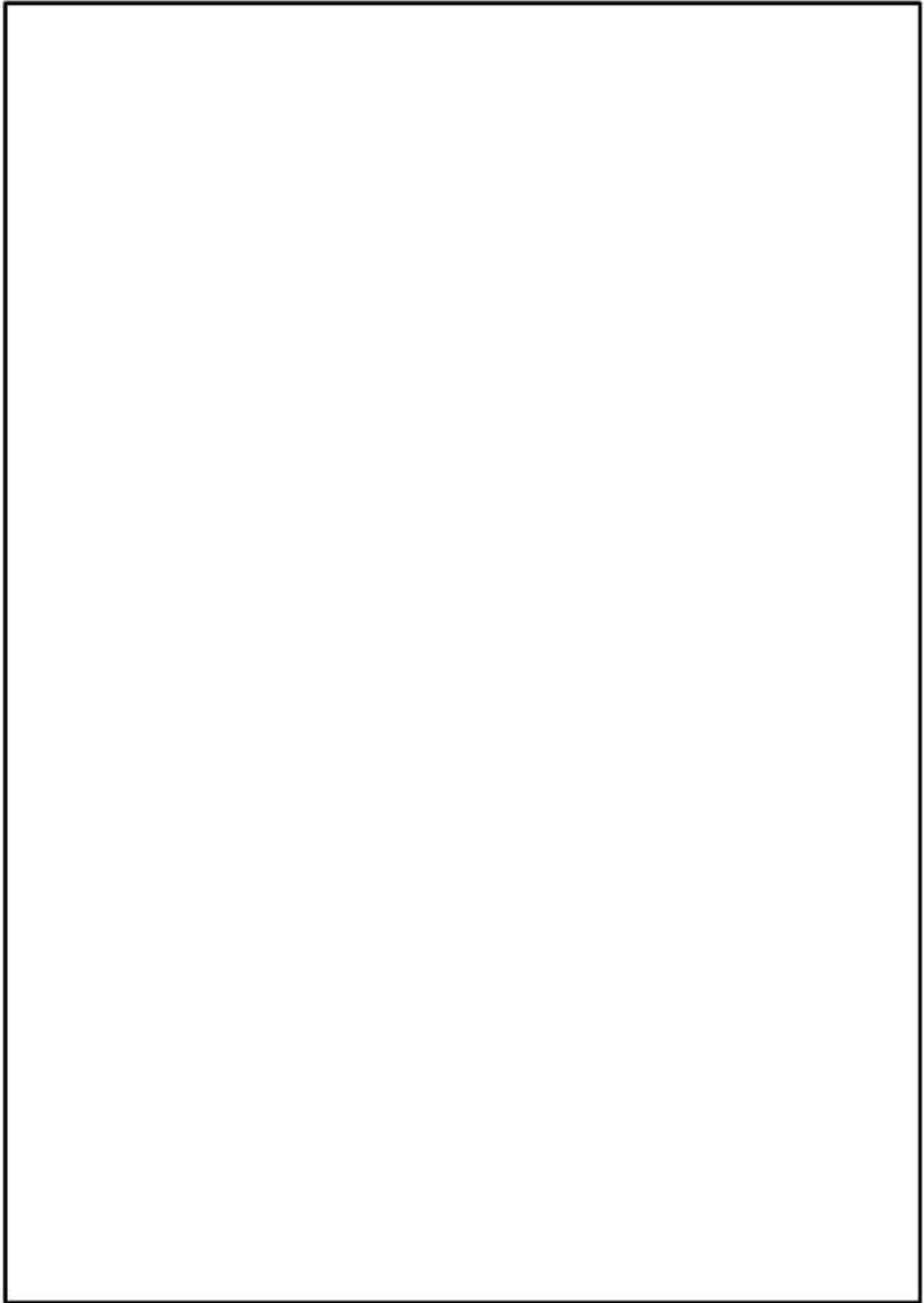
ABAQUS コードは、多くの応力解析に使用された実績がある。

検証例として、内圧力を受ける厚肉円筒についての弾性解析における ABAQUS 解析結果と理論解との比較を別紙 1 - 3 図に示す。

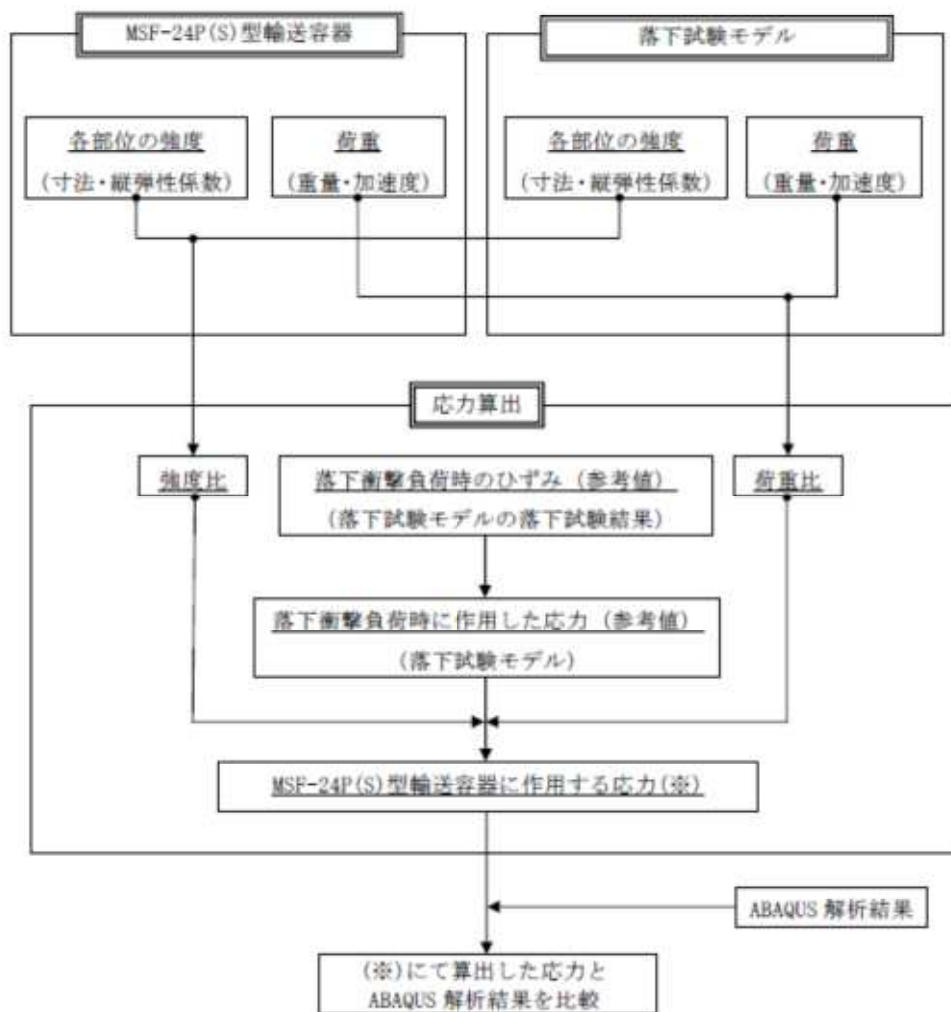
また、MSF-24P(S)型のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いた落下試験結果を基に、MSF-24P(S)型輸送容器の ABAQUS コードを用いた応力解析手法の妥当性を検証している (別紙 1 - 4 図)。



別紙 1 - 2 図 ABAQUS コードの解析フロー図



別紙 1 - 3 図 ABAQUS コードの検証例



(1) 検証手順

別紙 1 - 4 図(1/2) MSF-24P(S)型輸送容器の ABAQUS コードを用いた応力解析手法の検証
 (型式指定申請書 添付書類 13「外運搬規則第六条若しくは第七条及び第十一条に定める技術上の基準(容器に係るものに限る。)への適合性に関する説明書」(p)章 A.10.2 より抜粋)

(a)-第 A. 83 表 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 ^(注1) (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

(注1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置(軸方向)であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置(軸方向)の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを0として測定しているが、ABAQUS解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。

(a)-第 A. 84 表 9.3 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

部位	変形モード	試験結果より 算出した応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 ^(注1) (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1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置(軸方向)であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置(軸方向)の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを0として測定しているが、ABAQUS解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。

(2) 検証結果

別紙1-4図(2/2) MSF-24P(S)型輸送容器の ABAQUS コードを用いた応力解析手法の検証
(型式指定申請書 添付書類 13「外運搬規則第六条若しくは第七条及び第十一条に定める技術上の基準(容器に係るものに限る。)への適合性に関する説明書」(a)章 A. 10.2 より抜粋)

(参考文献)

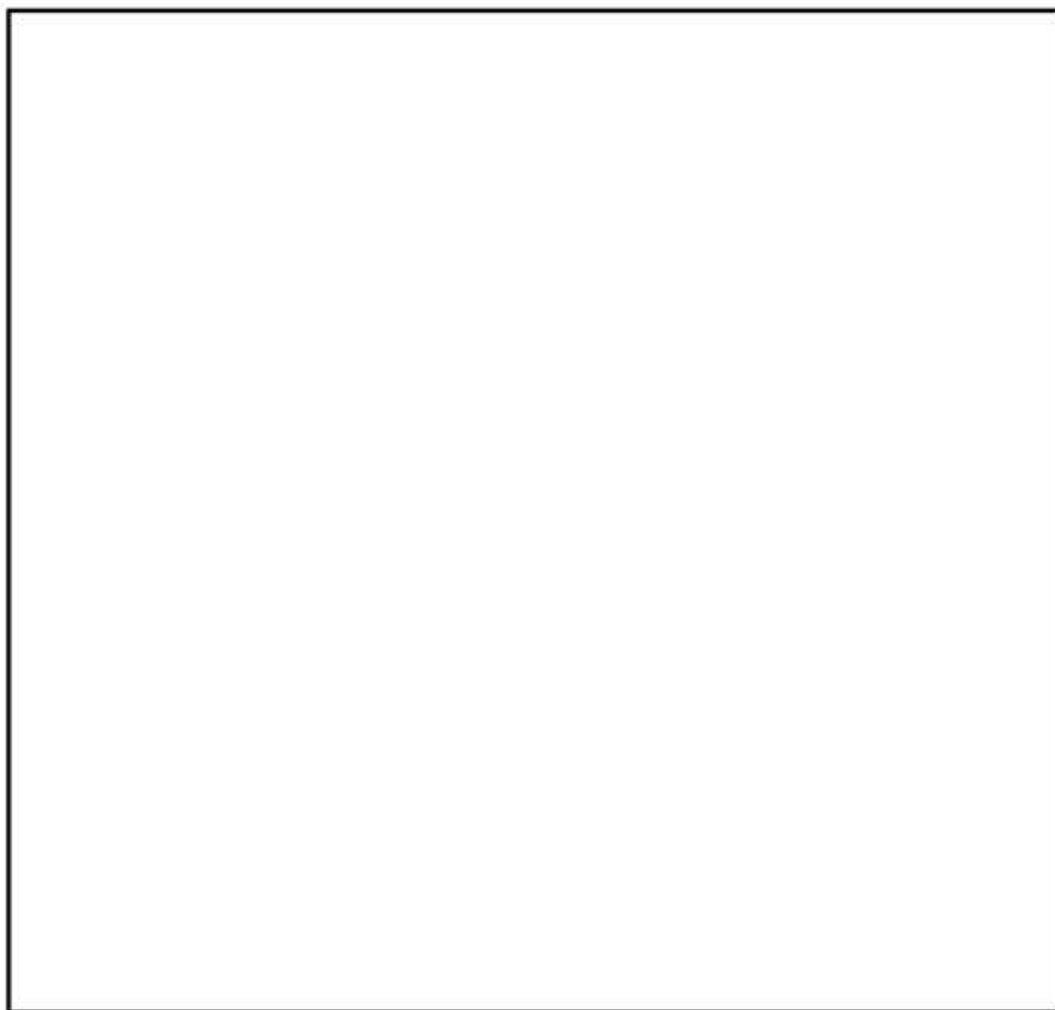
- (1) Dassault Systèmes, “SIMULIA User Assistance 2018” .

貯蔵用三次蓋の構造健全性について

1. 概要

貯蔵用三次蓋は、貯蔵用緩衝体の装着のために必要な部材（別紙 2-1 図参照）であるが、MSF-24P(S)型の安全機能を確保するために必要な強度部材ではないため、型式指定申請書 添付書類 4「耐震性に関する説明書」において、強度評価を記載していない。

本別紙では、貯蔵用三次蓋の地震時における構造健全性を示す。MSF-24P(S)型の安全機能を確保するために必要な強度部材の強度評価については、金属キャスク構造規格等に基づき実施しているが、貯蔵用三次蓋は、金属キャスク構造規格に分類のない部材であり、適用基準の規定がないため、金属キャスク構造規格の密封容器の応力評価を参考に実施した。



別紙 2 - 1 図 貯蔵用三次蓋の設置状態

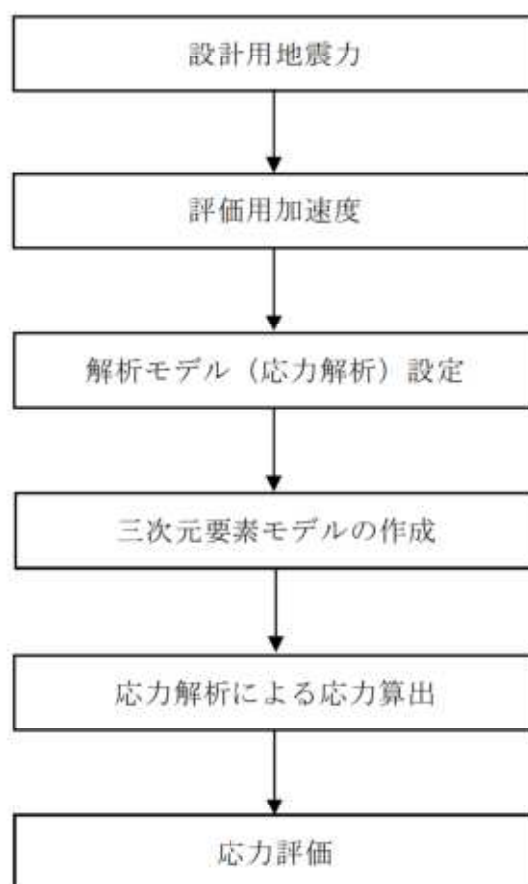
2. 貯蔵用三次蓋の強度評価

2.1 適用基準

貯蔵用三次蓋は、金属キャスク構造規格に分類のない部材であり、適用基準の規定がない。そのため、金属キャスク構造規格の密封容器の応力評価を参考に実施した。

2.2 応力評価フロー

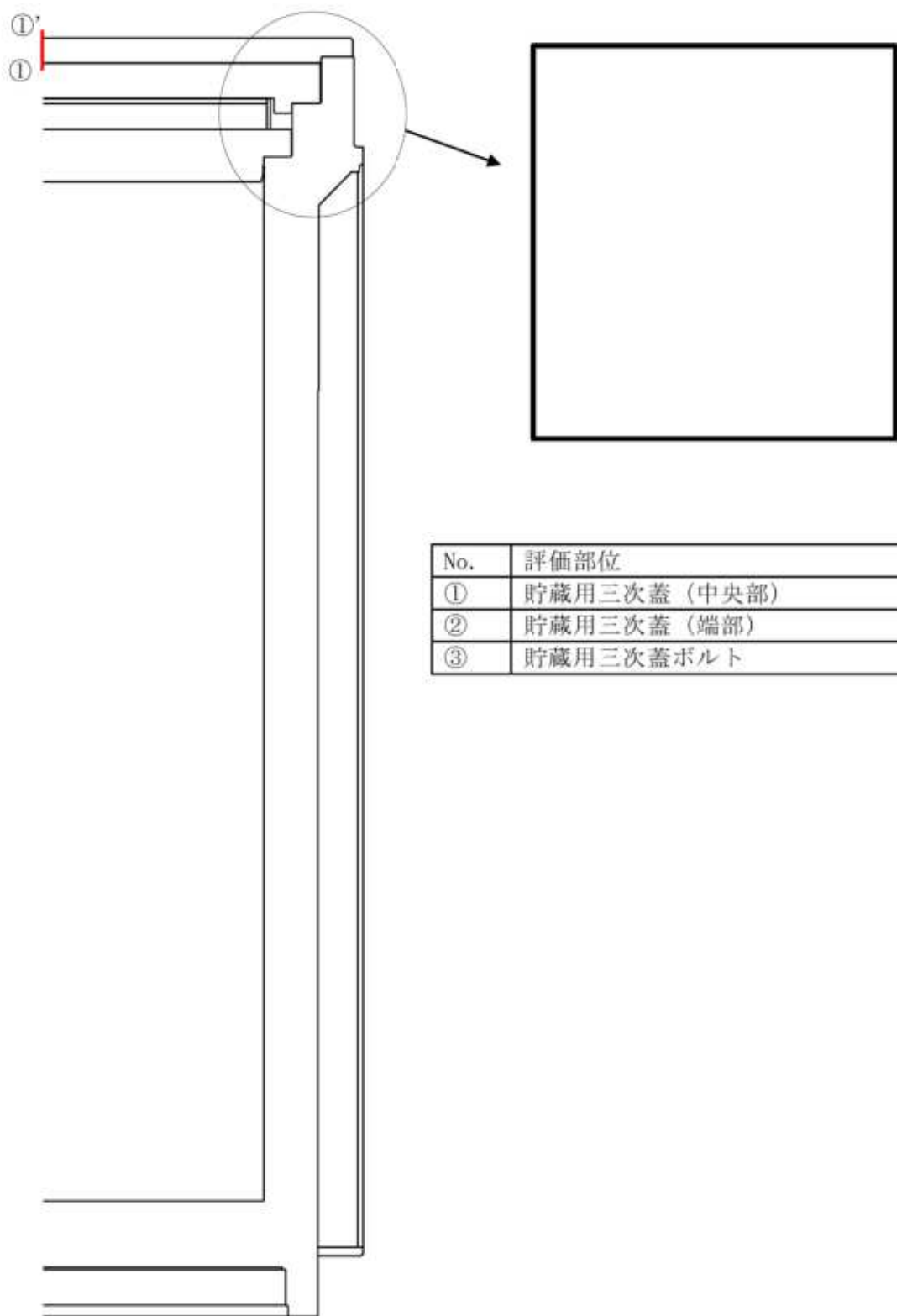
貯蔵用三次蓋の応力評価フローを別紙 2 - 2 図に示す。



別紙 2 - 2 図 貯蔵用三次蓋の応力評価フロー

2.3 応力評価箇所

応力評価箇所を別紙2-3図に示す。応力評価は、応力評価上厳しくなる構造上の不連続部等を選定して行う。



別紙2-3図 貯蔵用三次蓋の応力評価位置

2.4 応力評価方法

応力評価方法は、型式指定申請書 添付書類 4-2 「耐震計算書」の 4.4.1 「胴、胴（底板）、一次蓋、一次蓋ボルト、一次蓋シール部、二次蓋、二次蓋ボルト、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」に記載の方法と同じであり、解析コード ABAQUS により行う。

貯蔵用三次蓋及び貯蔵用三次蓋ボルトの許容限界及び使用材料の許容応力を別紙 2-1 表及び別紙 2-2 表に示す。

別紙 2-1 表 許容限界

許容応力区分	評価部位	許容限界			
		一次一般膜応力	一次膜応力＋一次曲げ応力	一次局部膜応力	一次＋二次応力
供用状態 D	貯蔵用三次蓋 (中央部・端部)	$2/3S_u$	S_u	S_u	$3S_u$ 設計用地震力のみによる応力振幅について評価する。
		平均引張応力		平均引張応力＋曲げ応力	
	貯蔵用三次蓋ボルト	S_y		S_y	

別紙 2-2 表 使用材料の許容応力^(注)

材料	温度条件 (°C)	S_u (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	評価部位
[]		111	—	373	貯蔵用三次蓋 (中央部・端部)
		—	846	—	貯蔵用三次蓋ボルト

(注) (一社) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格 JSME S NJ1-2012」による。

2.5 応力評価結果

応力評価結果を別紙2-3表に示す。応力は評価基準値を満足しており、地震に対し十分な強度を有することを確認した。

別紙2-3表 貯蔵用三次蓋及び貯蔵用三次蓋ボルトの応力評価結果

評価部位	応力分類	発生値	評価基準値
		MPa	MPa
貯蔵用 三次蓋	一次一般膜応力	1	248
	一次局部膜応力	2	373
	一次膜応力+一次曲げ応力	3	373
	一次+二次応力 ^(注1)	9	333
貯蔵用 三次蓋ボルト	平均引張応力	190	846
	平均引張応力+曲げ応力	272	846

(注1)設計用地震力のみによる全振幅について評価する。