

補足説明資料 7 - 1

7 条

外部からの衝撃による損傷の防止

竜巻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	3

別紙 1 ABAQUS コードによる応力解析について

別紙 2 設計飛来物による衝撃荷重の比較

別紙 3 設計飛来物による衝撃荷重が MSF-24P(S) 型蓋部以外に作用する場合の構造健全性について

別紙 4 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竜巻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7条第4項

兼用キャスクが設置許可基準規則第六条第四項又は第五項の規定により定める自然現象によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。

b. 技術基準規則解釈第7条第6項

第4項及び第5項に規定する「適切な措置を講じなければならない」には、供用中における運転管理等の運用上の措置及び対象とする発生源から一定の距離を置くことを含む。

(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 考慮する自然現象等に対する設計方針」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) 設置許可基準規則第6条第4項に規定する竜巻による作用力を適用していること。

(設計方針)

(2) 兼用キャスクは、(1)に示す竜巻による作用力に対して安全機能が維持されること。

』

【確認内容】

『

(考慮する自然現象等の設定方針)

(1) 設置許可基準規則第6条第4項に規定する兼用キャスク告示で定める竜巻として、設置許可基準規則の解釈別記4第6条第2項第1号に基づき、設計竜巻（原子力発電所の竜巻影響評価ガイド「1.4 用語の定義」に規定する「設計竜巻」をいう。以下同じ。）の最大風速を以下のとおり定め、設計荷重を設定していること。

・最大風速 : 100 m/s

(2) 設計荷重の設定に用いる設計飛来物は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に基づき、兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定していること。

(設計方針)

(3) 竜巻による飛来物の衝突荷重及び衝突による評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考にしていること。

(4) 設計竜巻に対する飛来物及び最大速度は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に記載の値を参考に設定し、飛来物の衝突荷重を算定（例えば、建築物の耐衝撃設計の考え方（(一社)日本建築学会 2015.1）を参考に飛来物の圧潰挙動を無視してRieraの式等で算定）していること。

(5) 竜巻荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により行われていること。

』

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)型の外部からの衝撃のうち、竜巻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7条第4項

兼用キャスクが設置許可基準規則第六条第四項又は第五項の規定により定める自然現象によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。

b. 技術基準規則解釈第7条第6項

第4項及び第5項に規定する「適切な措置を講じなければならない」には、供用中における運転管理等の運用上の措置及び対象とする発生源から一定の距離を置くことを含む。

MSF-24P(S)型は、兼用キャスクが竜巻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竜巻として原子力規制委員会が別に定める竜巻による荷重及び設計飛来物の衝突による荷重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6条第4項一号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竜巻に対して、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。

(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外部からの衝撃のうち、竜巻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) 設置許可基準規則第6条第4項に規定する兼用キャスク告示で定める竜巻として、設置許可基準規則の解釈別記4第6条第2項第1号に基づき、設計竜巻（原子力発電所の竜巻影響評価ガイド「1.4 用語の定義」に規定する「設計竜巻」をいう。以下同じ。）の最大風速を以下のとおり定め、設計荷重を設定していること。

・最大風速：100 m/s

(2) 設計荷重の設定に用いる設計飛来物は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に基づき、兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定していること。

MSF-24P(S)型に竜巻が作用した場合の評価に用いる設計荷重の設定に用いる最大風速及び設計飛来物は、以下のとおり設定している。

a. 最大風速

最大風速は、100 m/s とする。

b. 設計飛来物

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの解説表 4.1 に示される飛来物（第1表参照）を設計飛来物とする。MSF-24P(S)型に竜巻荷重が作用した場合の評価では、MSF-24P(S)型への影響が最大となるものを選定している。

第1表 設計飛来物

飛来物の種類	棒状物		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
寸法(m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量(kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度(m/s)	49	57 (注1)	30	60	34
最大鉛直速度(m/s)	33	38 (注1)	20	40	23

(注1) 竜巻影響評価ガイドの速度（水平 51 m/s、鉛直 34 m/s）に対し保守側な設定とした。

〔確認内容〕

- (3) 竜巻による飛来物の衝突荷重及び衝突による評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考にしていること。
- (4) 設計竜巻に対する飛来物及び最大速度は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に記載の値を参考に設定し、飛来物の衝突荷重を算定（例えば、建築物の耐衝撃設計の考え方（(一社)日本建築学会 2015.1）を参考に飛来物の圧潰挙動を無視してRieraの式等で算定）していること。
- (5) 竜巻荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により行われていること。

MSF-24P(S)型の竜巻に対する評価は、竜巻影響評価ガイドを参照して、以下に示す設計竜巻荷重及びそれ以外の荷重の組合せを適切に考慮して、MSF-24P(S)型の構造強度評価及び機能維持評価を実施し、それらの結果がそれぞれ定める許容限界を満足することを確認した。

設計竜巻荷重としては、設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を考慮している。また、設計竜巻荷重以外の荷重として、常時作用する荷重（自重）及び運転時の状態で作用する荷重（供用中に作用する荷重（圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重））を考慮している。

設計飛来物による衝撃荷重の算定にあたり、設計竜巻に対する設計飛来物及び最大速度は、第1表に示したとおり、竜巻影響評価ガイド解説表 4.1 に記載の値を基に設定し、設計飛来物の衝突荷重は、Rieraの方法に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視して算定している。

設計竜巻荷重及びそれ以外の荷重の組み合わせに対する特定兼用キャスクの評価では、FEM解析及び応力評価式による応力評価により実施している。

竜巻による損傷を防止する設計における MSF-24P(S)型の安全機能の維持は、設計竜巻荷重及びそれ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

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。

上記に基づく評価の結果、MSF-24P(S)型の各部材が竜巻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 3-2 「竜巻による損傷防止に関する説明書」に示すとおり確認している（第2表及び第3表参照）。

第2表(1/2) MSF-24P(S)型の竜巻に対す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)	$P_L + P_b \leq S_u$	
		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)	$\sigma_a \leq S_y$	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)	$\sigma_a + \sigma_b \leq S_y$	

(注1) 記号の説明は、型式指定申請書 添付書類3-2-1「竜巻に対する強度計算の基本方針」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2表(2/2) MSF-24P(S)型の竜巻に対する構造強度評価結果

(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
中間胴 ^(注2)	引張応力(一次)	MCD-3721.3(1)	引張応力(一次) $\leq 2/3S_u$	各応力は許容基準(許容応力)以下である。
	せん断応力(一次)	MCD-3721.3(1)	せん断応力(一次) $\leq 2/3S_u/\sqrt{3}$	
	圧縮応力(一次)	MCD-3721.3(1)	圧縮応力(一次) $\leq 1.5f_c^*$	
	曲げ応力(一次)	MCD-3721.3(1)	曲げ応力(一次) $\leq 2/3S_u$	
	組合せ応力(一次)	MCD-3721.3(1)	組合せ応力(一次) $\leq 2/3S_u$	

(注1) 記号の説明は、型式指定申請書 添付書類3-2-1「竜巻に対する強度計算の基本方針」による。

(注2) 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3表 MSF-24P(S)型の竜巻に対す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-D P C 17001)を受けた許容基準	$P_n \leq 2/3S_u$	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		$P_n + P_b \leq S_u$	
	せん断応力		$\tau \leq 1.2S_n$	
	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3-2-1「竜巻に対する強度計算の基本方針」による。

(注2) バスケットプレート

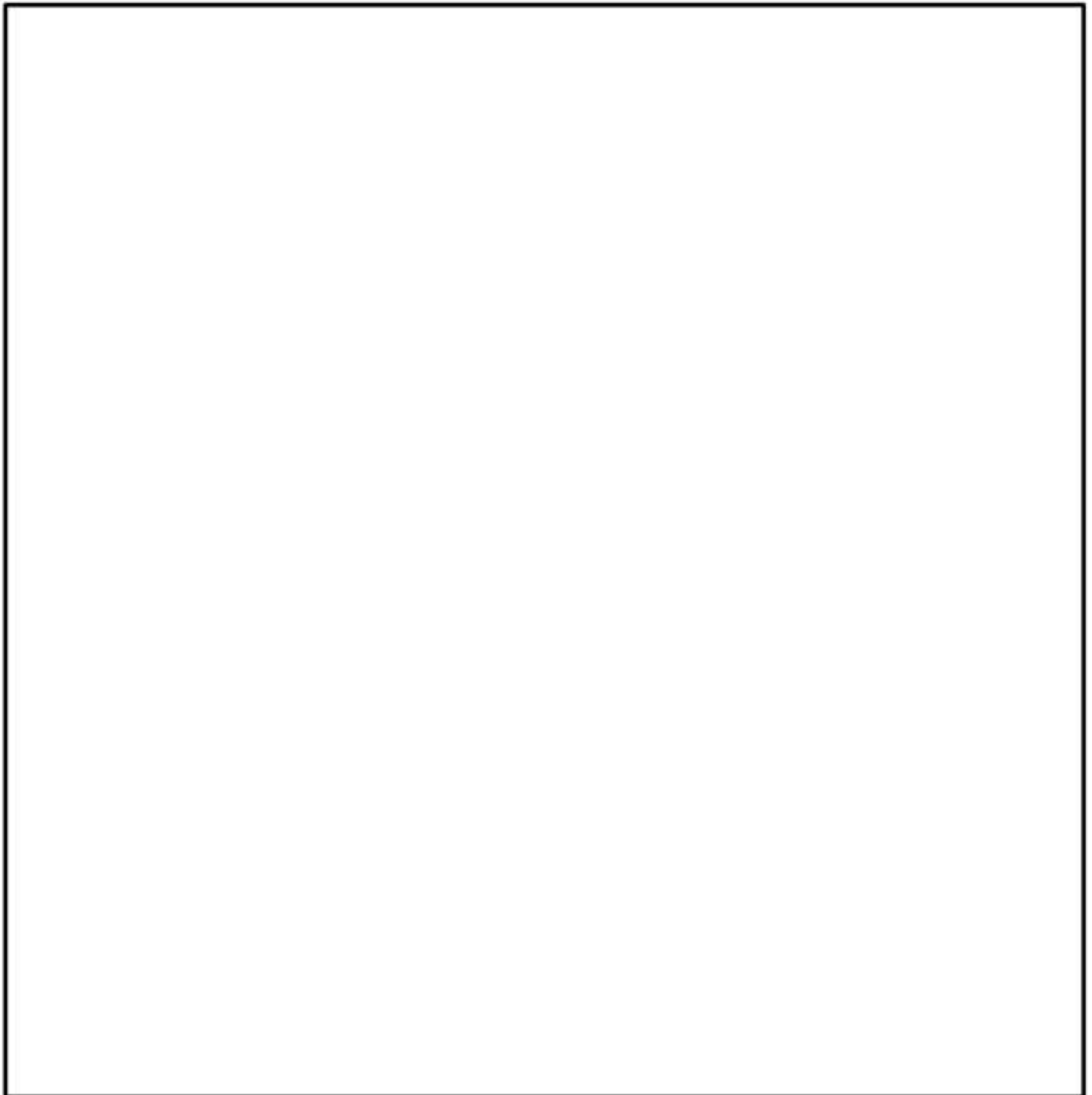
ABAQUS コードによる応力解析について

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。

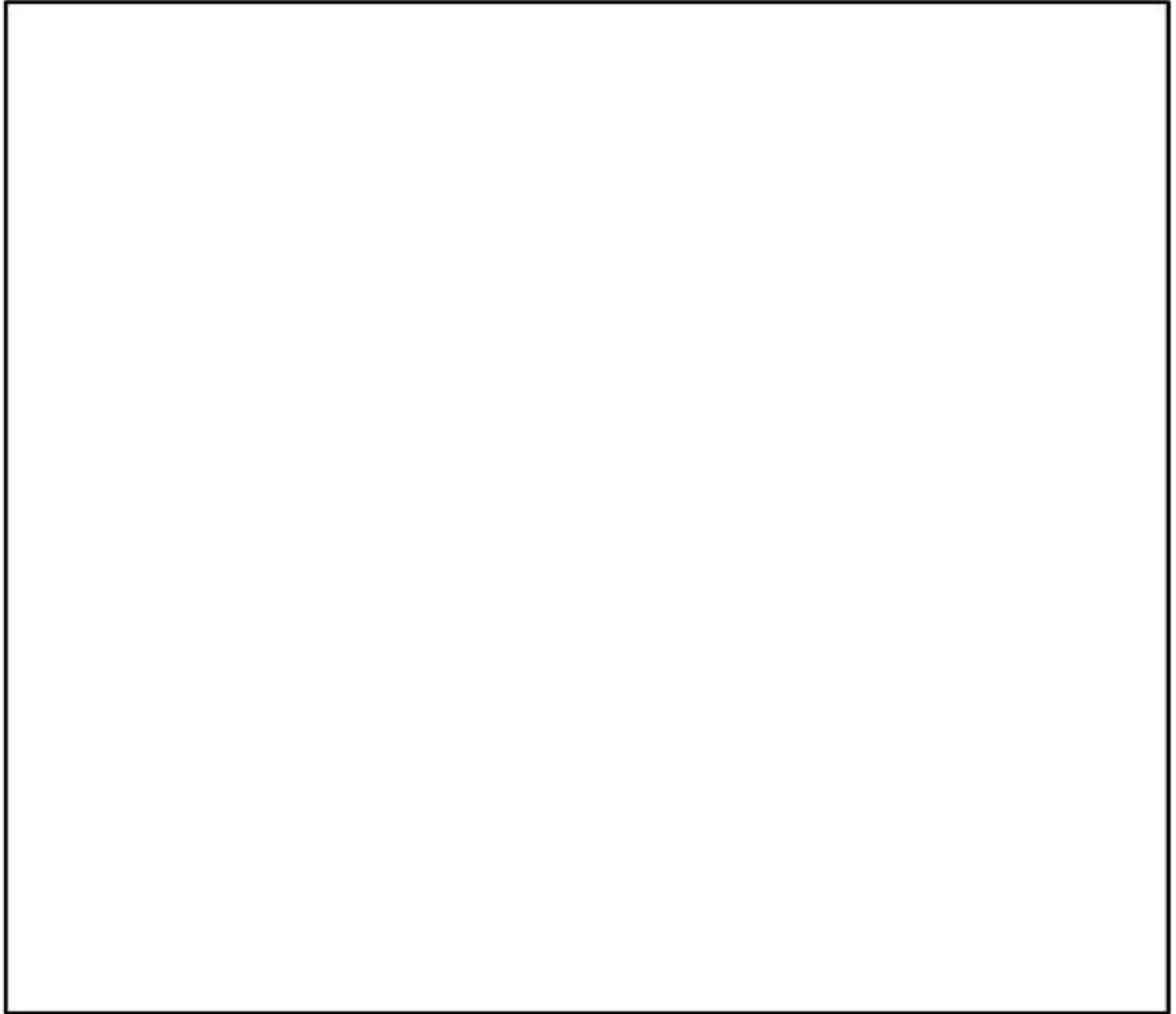
解析モデルは、MSF-24P(S)型の胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋、外筒等によりモデル化される。

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

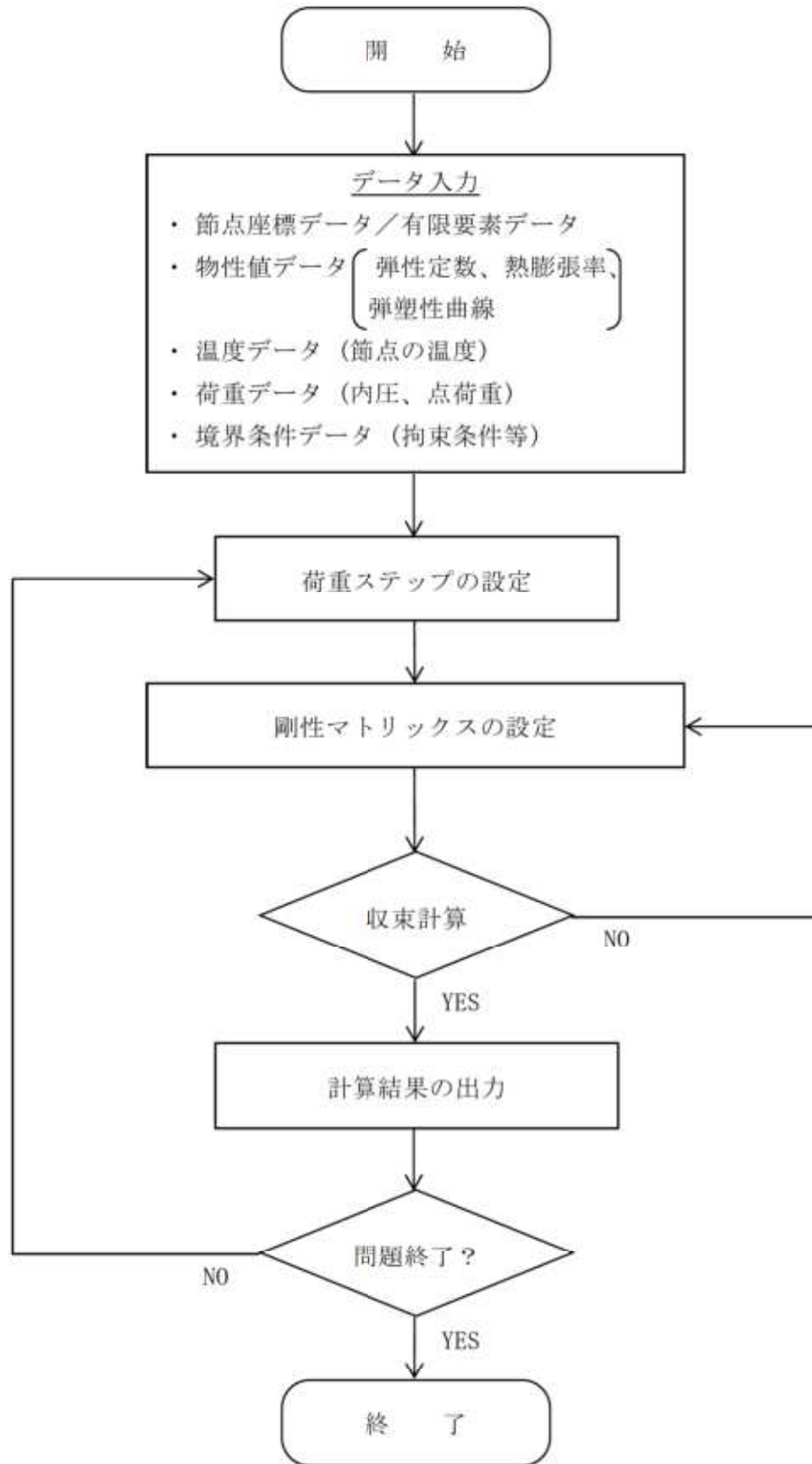
代表的な解析フローを別紙 1 - 2 図に示す。

iv 使用実績及び検証

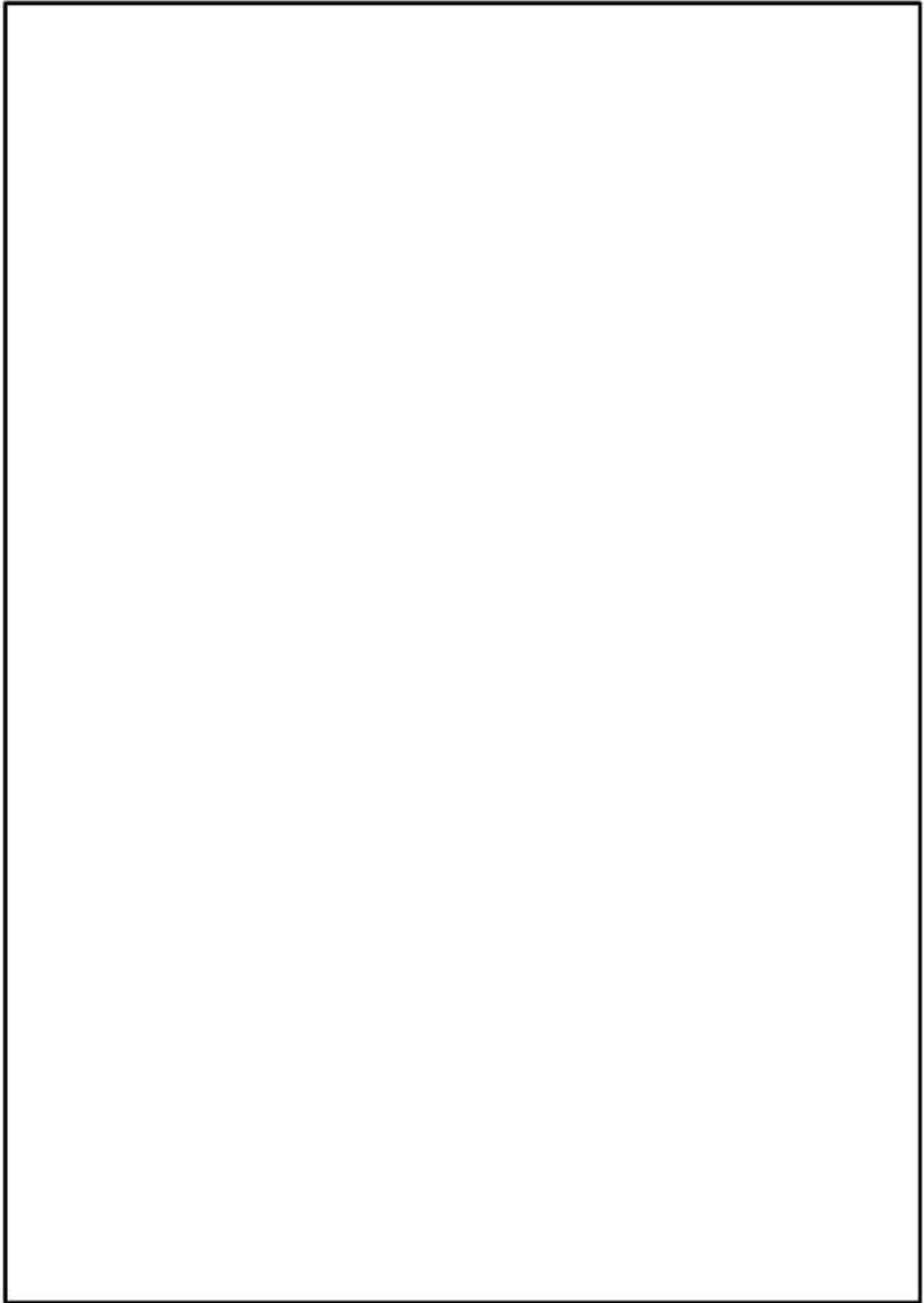
ABAQUS コードは、多くの応力解析に使用された実績がある。

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。

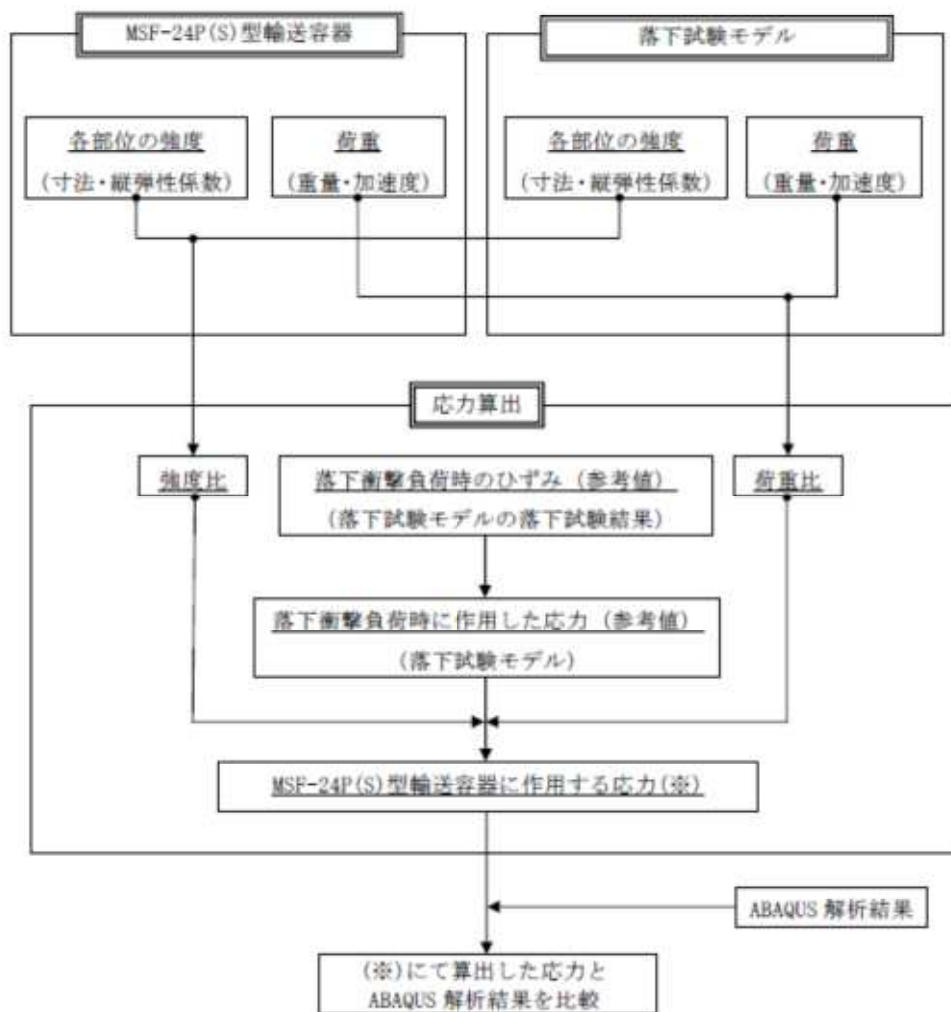
また、MSF-24P(S)型のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いた落下試験結果を基に、MSF-24P(S)型輸送容器の ABAQUS コードを用いた応力解析手法の妥当性を検証している (別紙 1 - 4 図)。



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」 (e) 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” .

設計飛来物による衝撃荷重の比較

本別紙では、第1表に示す5つの設計飛来物の衝撃荷重の算定結果の比較を示す。MSF-24P(S)型の竜巻による応力評価においては、設計飛来物による衝撃荷重として、本荷重が最も大きくなるトラックが衝突する場合としている。

<設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) >

設計飛来物による衝撃荷重 (W_M) は、Riera の方法に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視するとともに、設計飛来物の衝突による減速を考慮せず、設計飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重（衝撃荷重時刻歴：三角波、衝突時間＝衝突長さ／速度）による力積が等しいとして、次式にて算出する。

なお、設計飛来物の最大速度については、評価の代表性を考慮し、水平方向及び鉛直方向の飛来速度のうち大きい水平方向速度を設定する。

計算条件及び計算結果を別紙2-1表に示す。

$$W_M = \frac{2MV^2}{L_{min}}$$

ここで、

M : 設計飛来物の質量 (kg)

V : 設計飛来物の最大速度 (m/s)

L_{min} : 設計飛来物の衝突方向長さ (最小長さ) (m)

別紙2-1表 設計飛来物による衝撃荷重の計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	計算条件又は計算結果				
			鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
設計飛来物の質量	M	kg	8.4	135	540	2300	4750
設計飛来物の最大速度	V	m/s	49	57	30	60	34
設計飛来物の衝突方向長さ (最小長さ)	L _{min}	m	0.05	0.2	0.15	2.4	1.3
設計飛来物による衝撃荷重	W _M	N	8.07×10 ⁵	4.39×10 ⁶	6.48×10 ⁶	6.90×10 ⁶	8.45×10 ⁶

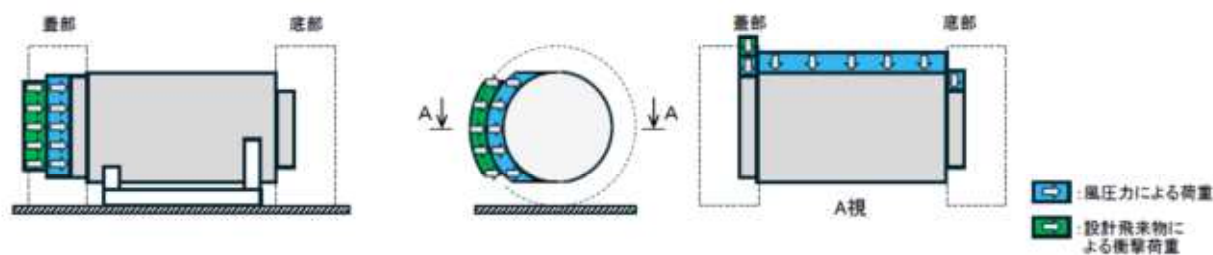
設計飛来物による衝撃荷重がMSF-24P(S)型蓋部以外に作用する場合の構造健全性について

1. 概要

型式指定申請書 添付書類3-2「竜巻による損傷防止に関する説明書」における設計竜巻荷重及びそれ以外の荷重の組み合わせに対する特定兼用キャスクの評価では、設計飛来物による衝撃荷重の作用位置を評価対象部位のうち、許容応力に対して余裕が小さく、最も厳しくなる蓋部（貯蔵用緩衝体によるエネルギー吸収及び貯蔵用緩衝体の構造体としての剛性を考慮しない）としている（別紙3-1図参照）。

設計飛来物による衝撃荷重がMSF-24P(S)型の蓋部以外に作用する場合において、設計飛来物による衝撃荷重は、衝突位置によらず同じであるため、衝突近傍以外の部位への影響は蓋部に作用する場合と同じとなるが、衝突近傍の部位への影響については個別の確認が必要である。

本別紙では、設計飛来物による衝撃荷重がMSF-24P(S)型の蓋部以外に衝突する場合として、MSF-24P(S)型の外殻を構成する部位のうち、板厚が最も薄い外筒への影響（側部への径方向衝突）を評価した。



(1) MSF-24P(S)型の軸方向衝突時

(2) MSF-24P(S)型の径方向衝突時

別紙3-1図 型式指定申請書 添付書類3-2「竜巻による損傷防止に関する説明書」
における設計竜巻荷重の作用方向

2. MSF-24P(S)型の側部衝突時における外筒の強度評価

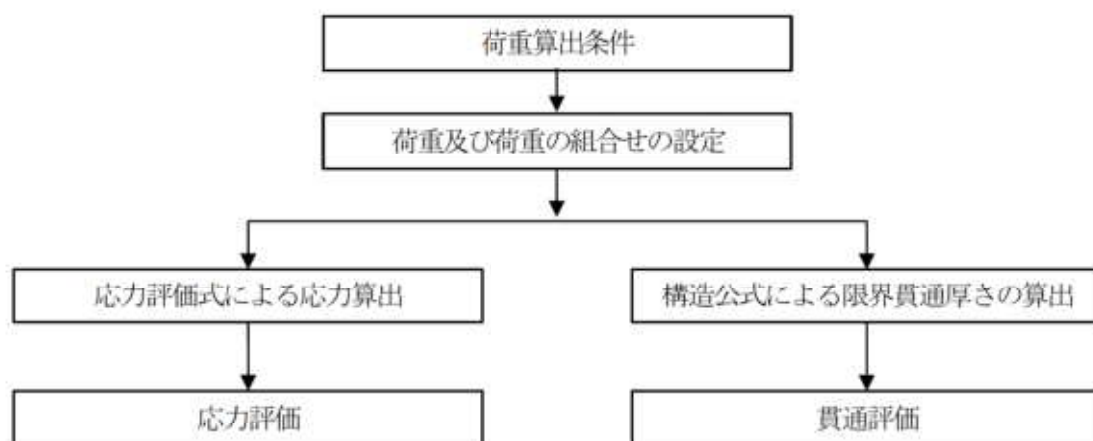
MSF-24P(S)型の側部衝突時における外筒の強度評価は、外筒全体の応力評価、及び設計飛来物による衝撃荷重が作用する位置の局部評価として貫通評価を行う。

2.1 適用基準

外筒の応力評価は、型式指定申請書 添付書類 3-2 「竜巻による損傷防止に関する説明書」と同様に、金属キャスク構造規格の中間胴の規定（供用状態D）を適用した。また、外筒の貫通評価については、外筒の板厚が限界貫通厚さ以上であることを示す。

2.2 評価フロー

外筒の応力評価及び貫通評価フローを別紙3-2図に示す。荷重及び荷重の組み合わせは、型式指定申請書 添付書類 3-2-1 「竜巻に対する強度計算の基本方針」の 2.2.1 「荷重の種類」に記載の内容と同じである。



別紙3-2図 外筒の評価フロー

2.3 強度評価方法

(1) 応力評価

外筒の応力計算は、応力評価式により行う。

外筒の応力計算モデルを別紙3-3図に示す。風圧力は外筒外面に等分布荷重として作用させ、設計飛来物による衝撃荷重は、外筒の長さ方向（キャスク軸方向）の中央位置に保守的に集中荷重として作用させる。

別紙3-3図に示す外筒（中央部）には、曲げ応力 σ_{b1} が、外筒（端部）には、曲げ応力 σ_{b2} 及びせん断応力 τ が発生する。曲げ応力（ σ_{b1} 及び σ_{b2} ）、せん断応力 τ 及び組合せ応力 S は、次式で計算される。

また、応力評価の許容限界及び使用材料の許容応力を別紙3-1表及び別紙3-2表に示す。

$$\sigma_{b1} = \frac{M_1}{Z}$$

$$\sigma_{b2} = \frac{M_2}{Z}$$

$$\tau = \frac{W_W + W_M}{2A}$$

$$S = \sqrt{\sigma_{b2}^2 + 3\tau^2}$$

ここで、

M_1 : 外筒中央部に生じる曲げモーメント (N・mm)

$$M_1 = \frac{1}{24} W_W L + \frac{1}{8} W_M L$$

M_2 : 外筒端部に生じる曲げモーメント (N・mm)

$$M_2 = \frac{1}{12} W_W L + \frac{1}{8} W_M L$$

W_W : 風圧力による荷重 (N)

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重 (N)

(設計飛来物のうち、最も衝撃荷重が大きくなるトラックを選定)

L : 外筒長さ (mm)

Z : 断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{\pi (d_o^4 - d_i^4)}{32d_o}$$

A : 断面積 (mm²)

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

d_o : 外筒外径 (mm)

d_i : 外筒内径 (mm)



別紙3-3図 外筒の応力計算モデル

別紙3-1表 許容限界

許容応力 区分	評価部位	許容限界		
		一次応力		
供用状態D	外筒	せん断	曲げ	組合せ応力
		$2/3S_u/\sqrt{3}$	$2/3S_u$	$2/3S_u$

別紙3-2表 使用材料の許容応力^(注)

材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	評価部位
		—	426	外筒

(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) 貫通評価

設計飛来物が外筒に衝突する場合の限界貫通厚さは、次のBRL式により求められる。

$$t^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

ここで、

t : 限界貫通厚さ (m)

M : 設計飛来物の質量 (kg)

V : 設計飛来物の最大速度 (m/s)

K : 鋼板の材質に関する係数 (=1.0)

d : 設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m)

(設計飛来物の投影面積がS (m²)の場合 S=π d²/4)

2.4 強度評価結果

外筒の応力評価条件及び応力評価結果を別紙3-3表に、外筒の貫通評価条件及び貫通評価結果を別紙3-4表に示す。外筒に生じる応力は評価基準値を満足する。また、設計飛来物による限界貫通厚さは、外筒の板厚より小さい。したがって、MSF-24P(S)型の側部衝突時において、外筒は、十分な強度を有する。

別紙3-3表 外筒の応力評価条件及び応力評価結果

項目	風圧力による荷重 : W_w (N)	設計飛来物による衝撃荷重 : W_u (N)	外筒長さ : L (mm)	曲げモーメント : M_1 (N·mm)	曲げモーメント : M_2 (N·mm)
数値	2.28×10^5	8.45×10^5			

項目	外筒外径 : d_o (mm)	外筒内径 : d_i (mm)	断面係数 : Z (mm ³)	断面積 : A (mm ²)
数値				

項目	曲げ応力 : σ_{b1} (MPa)	曲げ応力 : σ_{b2} (MPa)	評価基準値 : $2/3S_u$ (MPa)	せん断応力 : τ (MPa)	評価基準値 : $2/3S_u/\sqrt{3}$ (MPa)
数値	42	42	284	25	163

項目	組合せ応力 : S (MPa)	評価基準値 : $2/3S_u$ (MPa)
数値	61	284

別紙3-4表 貫通評価条件及び貫通評価結果

飛来物の種類	評価条件				限界貫通厚さ : t (mm)	外筒の板厚 (mm)
	設計飛来物の質量 : M (kg)	設計飛来物の最大速度 : V (m/s)	投影面積 : S (m ²) (注)	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 : d (m)		
鋼製パイプ	8.4	49	0.002	0.050	7.4	
鋼製材	135	57	0.06	0.276	10.4	
コンクリート板	540	30	0.15	0.437	7.0	
コンテナ	2300	60	6.24	2.818	7.2	
トラック	4750	34	2.47	1.773	8.7	

(注) 型式指定申請書 添付書類3-2-1「竜巻に対する強度計算の基本方針」の第2-2表に示す寸法より、投影面積が最小となる値。

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4-1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3-2「竜巻による損傷防止に関する説明書」において、強度評価を記載していない。

本別紙では、貯蔵用三次蓋の竜巻に対す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4-1図 貯蔵用三次蓋の設置状態

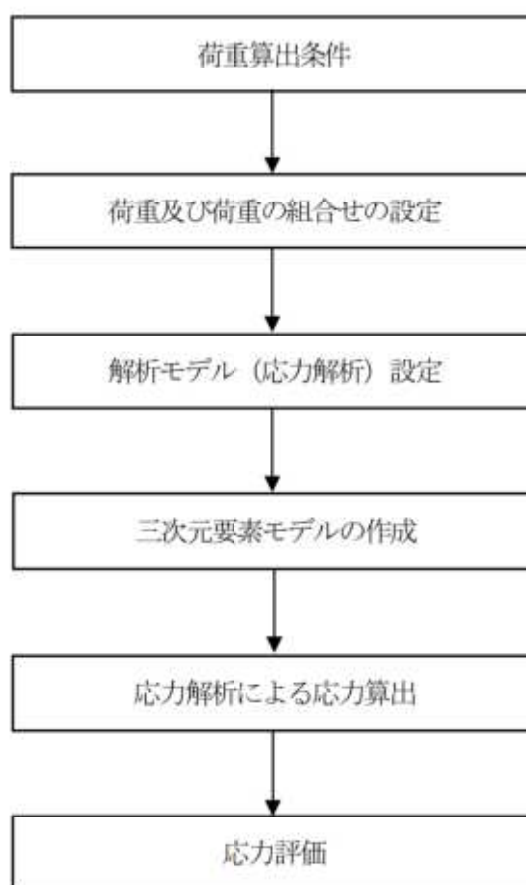
2. 貯蔵用三次蓋の強度評価

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

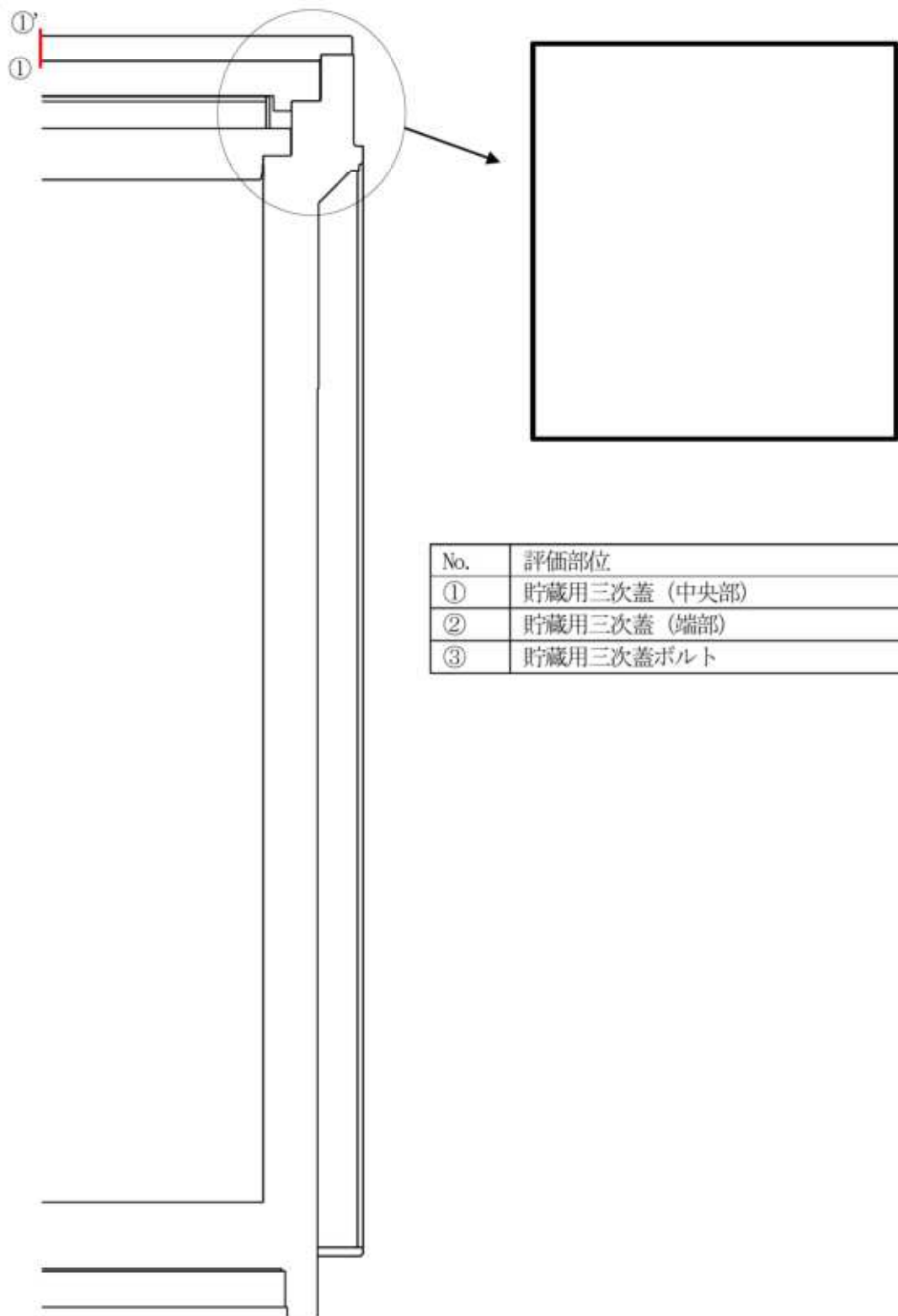
貯蔵用三次蓋の応力評価フローを別紙4-2図に示す。



別紙4-2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4-3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4-3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 3-2-2 「竜巻に対する強度計算書」の 4.3.1 「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 4-1 表及び別紙 4-2 表に示す。

別紙 4-1 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
供用状態 D	貯蔵用三次蓋 (中央部・端部)	$2/3S_u$	S_u	S_u
		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 4-2 表 使用材料の許容応力^(注)

材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	評価部位
□	—	—	373	貯蔵用三次蓋 (中央部・端部)
	846	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4-3表に示す。応力は評価基準値を満足しており、竜巻に対し十分な強度を有することを確認した。

別紙4-3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 (MPa)		評価基準値 MPa
		軸方向に設計竜巻荷重が作用する場合	径方向に設計竜巻荷重が作用する場合	
貯蔵用 三次蓋	一次一般膜応力	9	9	248
	一次局部膜応力	55	12	373
	一次膜応力+一次曲げ応力	45	11	373
貯蔵用 三次蓋ボルト	平均引張応力	389	194	846
	平均引張応力+曲げ応力	503	277	846