

補足説明資料

蓋部が金属部へ衝突しない設置方法における
安全機能維持に関する説明資料

目 次

1. 概要	1
2. 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法における設計方針	1
3. 貯蔵用緩衝体の性能	2
4. 構造強度評価方針	7
5. 特定兼用キャスク本体及び蓋部の応力評価	10
6. バスケットの応力評価	25
7. 構造強度評価結果	33
8. 使用する解析コード	38
9. 設工認への引継ぎ事項	43
10. 参考文献	44
別紙 1 貯蔵用三次蓋の構造健全性について	
別紙 2 傾斜落下時の健全性について	
別紙 3 使用済燃料の再取出性について	
別紙 4 貯蔵用緩衝体を装着した MSF-24P(S) 型の安全機能評価 (例)	

1. 概要

本資料は、特定機器の設計の型式指定申請において、MSF-24P(S)型の設置方法（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法）の安全機能維持に関する補足説明を示す。

2. 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法における設計方針

MSF-24P(S)型の設置方法である、蓋部が金属部へ衝突しない設置方法が蓋部の金属部への衝突に対して安全機能が損なわれるおそれがないことを示すために、安全機能が損なわれるおそれのない輸送荷姿による設置方法と同等の安全性を有するものとして、貯蔵用緩衝体の緩衝性能について、次の設計方針を型式証明申請で定めている。

<貯蔵用緩衝体の性能^(注)>

貯蔵用緩衝体の装着により、特定兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法で設置することについて、(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（以下「金属キャスク構造規格」という）」に規定される供用状態Dに対して、貯蔵用緩衝体は、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が許容基準を満足するために必要な緩衝性能を有すること。

(注) 設置（変更）許可時に別途確認を要する条件として、型式証明申請書（本文 五 2.）に記載している。

3. 貯蔵用緩衝体の性能

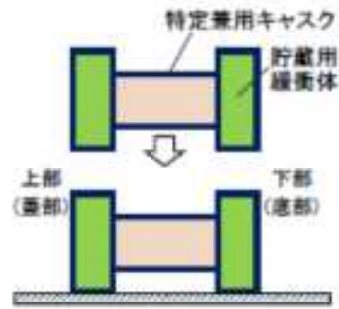
特定兼用キャスク貯蔵施設（以下「貯蔵施設」という。）での貯蔵状態における想定事象を仮設定し、各想定事象に対して特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件（貯蔵用緩衝体の具体的な緩衝性能）を定める。

3.1 想定事象

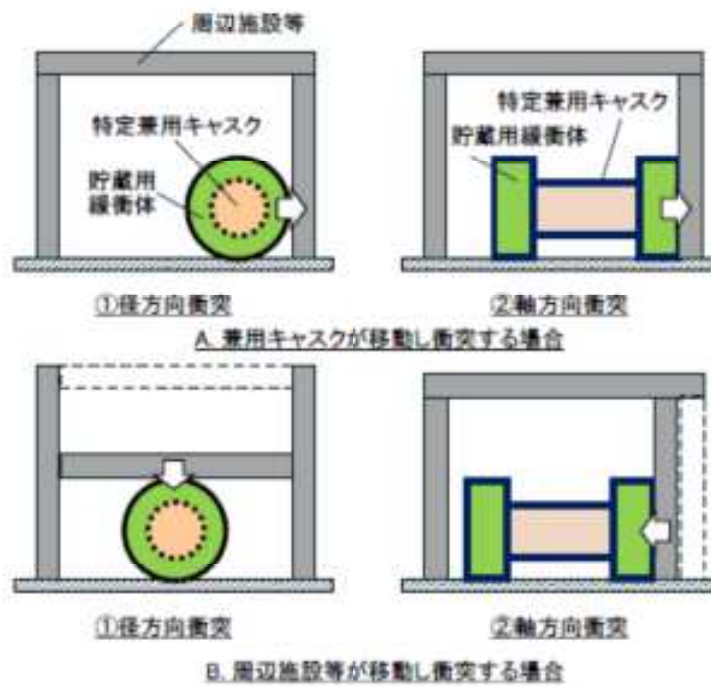
貯蔵施設内での貯蔵状態における想定事象を第1図及び第2図に示す。

状態図	想定事象	
<p data-bbox="236 304 373 338">・貯蔵状態</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="783 338 1206 416">・MSF-24P(S)型の水平落下 (以下、「水平落下」という。) <li data-bbox="783 450 1206 595">・MSF-24P(S)型と周辺施設等との径 方向/軸方向衝突 (以下、「径方向衝突」又は「軸方 向衝突」という。) 	<p data-bbox="1230 338 1353 371">第2図(1)</p> <p data-bbox="1230 450 1353 483">第2図(2)</p>

第1図 貯蔵状態における想定事象



(1) 水平落下



(2) 径方向衝突及び軸方向衝突

第2図 想定事象

3.2 代表事象

3.1で示した想定事象のうち、荷重作用位置を考慮し、貯蔵用緩衝体の性能及びMSF-24P(S)型の安全評価（構造強度評価）の評価対象とする事象（代表事象）を第1表に示す。また、各代表事象に対し、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件を第1表に併せて示す。本荷重条件に対する構造強度評価を4.から6.に、評価結果を7.に示す。

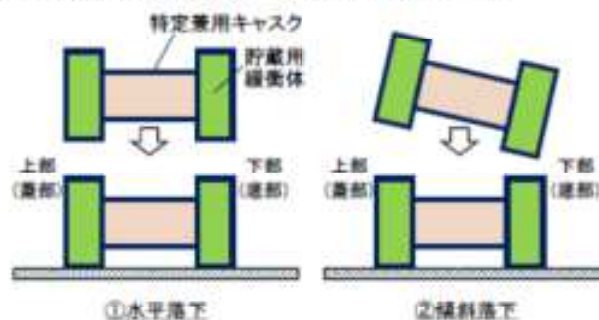
第1表 代表事象及び特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件

代表事象	代表事象と同等して扱う想定事象	特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件（第3図参照） ^(注1)
水平落下 ^(注2)	径方向衝突 ^(注3)	上部（蓋部）に作用する荷重 $4.30 \times 10^7 \text{N}$ 以下 下部（底部）に作用する荷重 $3.76 \times 10^7 \text{N}$ 以下
軸方向衝突（上部側）	—	上部（蓋部）に作用する荷重 $7.55 \times 10^7 \text{N}$ 以下
軸方向衝突（下部側）	—	下部（底部）に作用する荷重 $7.69 \times 10^7 \text{N}$ 以下

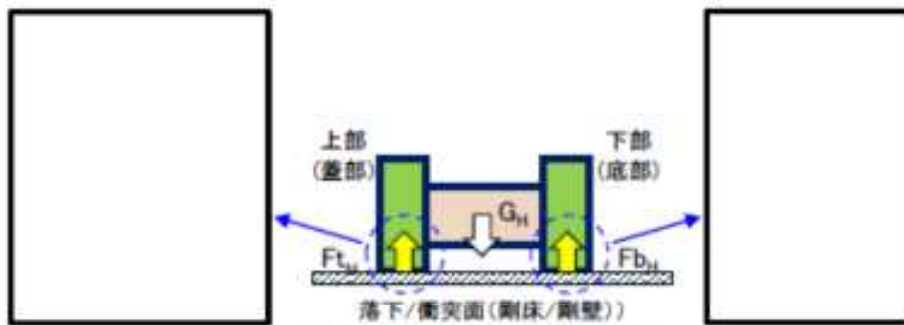
(注1) 表中に示す荷重値は、特定兼用キャスク本体に以下の衝撃加速度が作用した場合に上部（蓋部）又は下部（底部）に作用する荷重である。

- ・水平落下 : 衝撃加速度 650m/s^2
- ・軸方向衝突（上部側） : 衝撃加速度 600m/s^2
- ・軸方向衝突（下部側） : 衝撃加速度 600m/s^2

(注2) 水平落下において、MSF-24P(S)型が床面に対して傾斜して落下する場合（以下「傾斜落下」という。）がある。傾斜落下となる場合、細長い輸送物では落下エネルギーの一部が特定兼用キャスクの回転運動エネルギーとなり二次衝撃側の吸収エネルギーが増加する。特に、蓋密封部が二次衝撃側となる場合、密封性能を損なうおそれがあるため、二次衝撃側の衝撃加速度の影響を評価する必要がある。傾斜落下による密封性能への影響がなく、傾斜落下時にMSF-24P(S)型の健全性が維持されることを別紙2に示す。

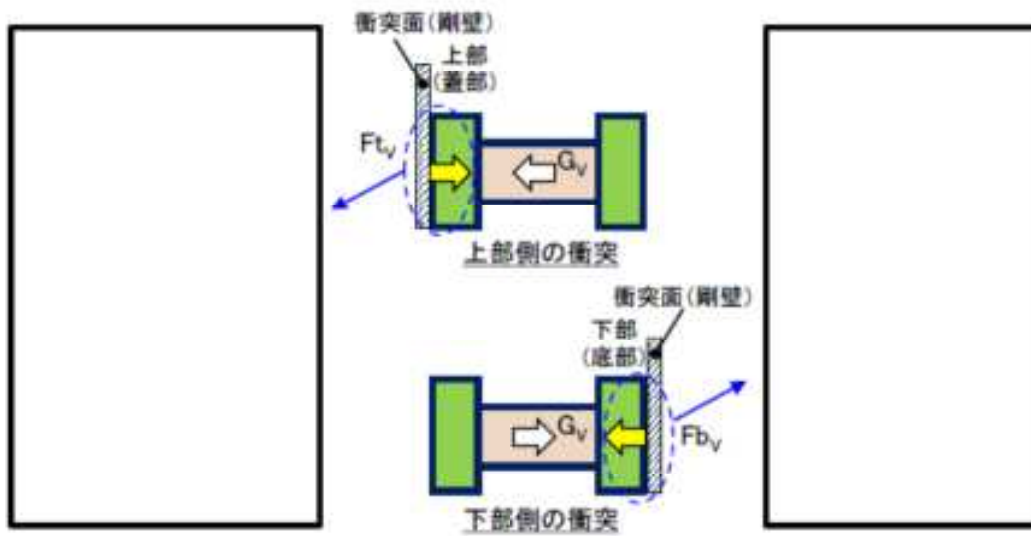


(注3) 径方向衝突は、水平落下と荷重作用位置が同一であり、水平落下と同等の事象として水平落下で代表する。



G_H : 特定兼用キャスク本体に生じる衝撃加速度 ($650m/s^2$)
 F_{t_H} : 特定兼用キャスク上部(蓋部)に作用する荷重 (4.30×10^4N)
 F_{b_H} : 特定兼用キャスク下部(底部)に作用する荷重 (3.76×10^4N)

(1) 水平落下



G_v : 特定兼用キャスク本体に生じる衝撃加速度 ($600m/s^2$)
 F_{t_v} : 特定兼用キャスク上部(蓋部)に作用する荷重 (7.55×10^4N)
 F_{b_v} : 特定兼用キャスク下部(底部)に作用する荷重 (7.69×10^4N)

(2) 軸方向衝突

第3図 代表事象におけるMSF-24P(S)型の安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件

4. 構造強度評価方針

3.2に示した代表事象及び荷重条件に対して、構造強度評価を行い、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足することを示す。

4.1 適用基準

特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材（強度部材）の構造強度評価は、金属キャスク構造規格の供用状態Dの基準等を適用する。金属キャスク構造規格の適用部材の分類を第2表に示す。

第2表 特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材（強度部材）の分類

部材名	金属キャスク構造規格 適用部材の分類
胴	密封容器
胴（底板）	
胴（フランジ）	
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	
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	
バスケット	バスケット ^(注2)

(注1) MSF-24P(S)型の外筒等は、多層キャスク（胴部が構造強度機能を有する複数の層で構成されているタイプのキャスク）の中間胴と同様に密封容器を支持する構造ではないが、中性子遮蔽材を保持する機能を有しているため、中間胴と同等に扱い、中間胴に準じた評価を行う。ただし、中間胴は密封容器を支持し、その損壊を防止する機能が要求されるため、密封容器との溶接部近接部分に対する特別な規定が設けられている（MCD-3710）が、外筒においてはこの機能は要求されないため、当該規定は参考としない。

(注2) 金属キャスク構造規格のバスケットの評価を参考とし、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年6月10日 法律第166号）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）を受けた評価に準じた評価（供用状態D）を行う。

4.2 評価方針

4.2.1 解析対象とする事象

解析対象とする事象としては、3.2（第1表）に示した代表事象について第3表のとおり評価を実施する。

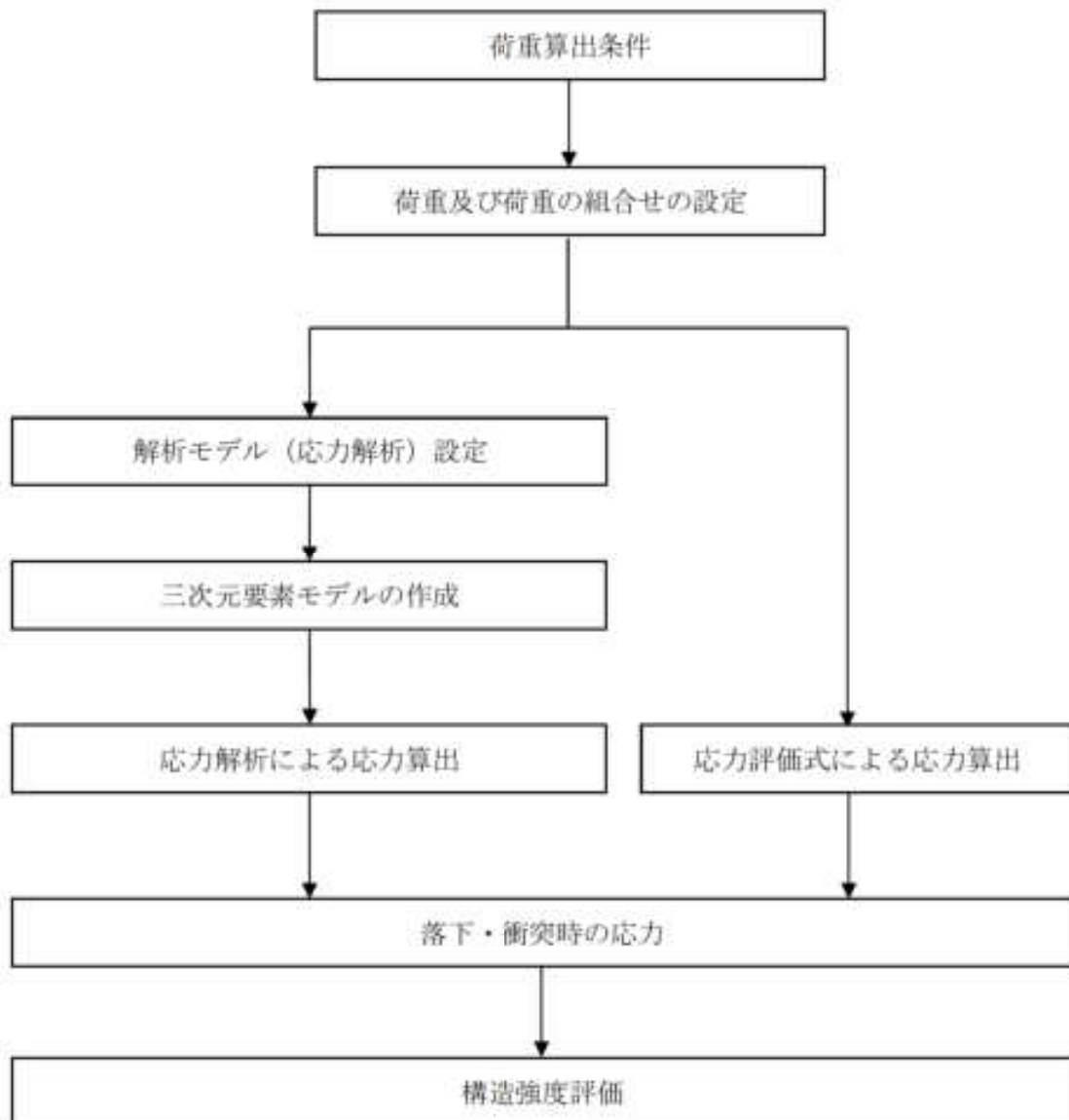
第3表 代表事象及び荷重条件

設計事象	供用状態	代表事象	包絡される事象	荷重条件
IV	D	水平落下	径方向衝突	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力 ・蓋間圧力 ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・側部中性子遮蔽材部圧力 ・底部中性子遮蔽材部圧力 ・ボルト初期締付力 ・衝撃荷重^(注1) ・熱荷重
		軸方向衝突 (上部側及び下部側)	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力 ・蓋間圧力 ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・側部中性子遮蔽材部圧力 ・底部中性子遮蔽材部圧力 ・自重 ・ボルト初期締付力 ・衝撃荷重 ・熱荷重

(注1) 自重による荷重は、衝撃荷重の慣性力による荷重に含まれる。

4.2.2 構造強度評価フロー

MSF-24P(S)型の落下・衝突時の構造強度評価フローを第4図に示す。



第4図 MSF-24P(S)型の落下・衝突時の構造強度評価フロー

5. 特定兼用キャスク本体及び蓋部の応力評価

5.1 基本方針

- (1) MSF-24P(S)型の応力計算モデルは、有限要素モデルを基本とし、モデルに落下荷重又は衝突荷重が作用するものとする。また、一部評価部位については、応力評価式により応力を算出する。応力評価箇所を第5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。
- (2) 許容応力について、(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」を用いて計算する際に、温度が中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。
ただし、比例法を用いる場合の端数処理は、小数第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。
- (3) 応力計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の設定

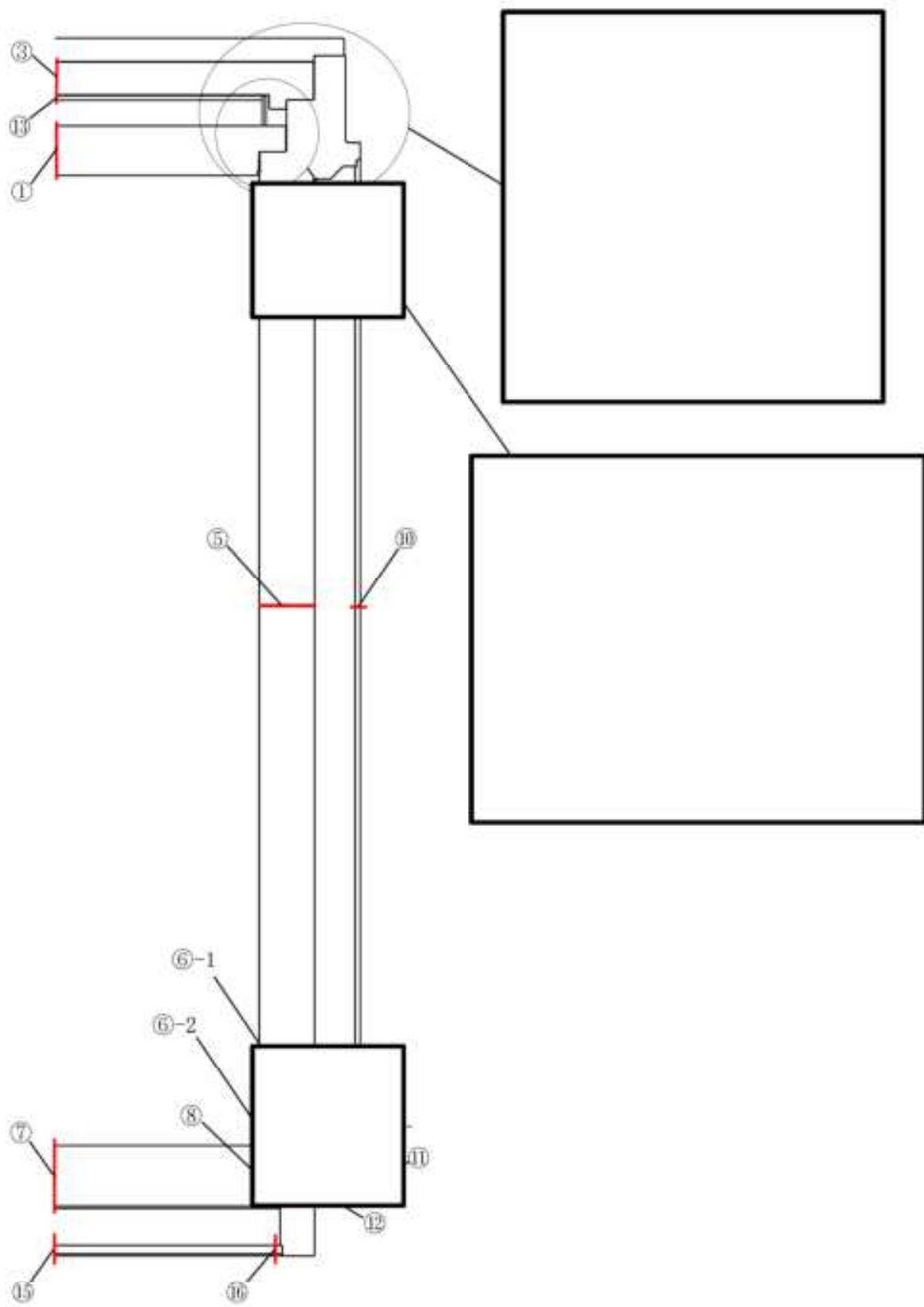
MSF-24P(S)型に作用する落下荷重又は衝突荷重は、3.2(第1表)で設定した荷重とする。

5.2.2 許容限界

許容限界を第4表から第6表に示す。

5.2.3 使用材料の許容応力

応力評価に用いる各部位の使用材料の許容応力を第7表に示す。



第5図 MSF-24P(S)型の応力評価箇所(1/2)

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

□内は商業機密のため、非公開とします。

No.	評価部位
①	一次蓋中央部
②	一次蓋端部
③	二次蓋中央部
④	二次蓋端部
⑤	胴中央部
⑥	胴下部
⑦	胴（底板）中央部
⑧	胴（底板）端部
⑨	外筒上部
⑩	外筒中央部
⑪	外筒下部
⑫	下部端板
⑬	蓋部中性子遮蔽材カバー中央部
⑭	蓋部中性子遮蔽材カバー端部
⑮	底部中性子遮蔽材カバー中央部
⑯	底部中性子遮蔽材カバー端部
⑰	一次蓋シール部（蓋側）
⑱	一次蓋シール部（胴側）
⑲	一次蓋ボルト
㉑	二次蓋ボルト
㉒	カバープレート
㉓	カバープレートボルト

第5図 MSF-24P(S)型の応力評価箇所(2/2)

第4表 許容限界 (密封容器)

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	圧縮応力 (一次)
供用状態 D	一次蓋中央部 一次蓋端部 二次蓋中央部 二次蓋端部 胴中央部 胴下部 胴 (底板) 中央部 胴 (底板) 端部 カバープレート	$2/3S_u$ ただし、オース テナイト系ス テンレス鋼に ついては $2/3S_u$ と $2.4S_u$ の小 さい方。	左欄の (注1) α 倍の値	S_u ただし、オース テナイト系ス テンレス鋼に ついては S_u と $3.6S_u$ の小 さい方。	—	$1.5S_u$ と $1.5B$ の 小さい方
供用状態 D	一次蓋シール部 (蓋側) 一次蓋シール部 (胴側)	S_y	S_y	S_y	S_y	—

(注1) α は純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さいほうの値とする。

第5表 許容限界 (密封容器)

許容応力 区分	評価部位	許容限界	
		平均引張応力	平均引張応力+曲げ応力
供用状態 D	一次蓋ボルト 二次蓋ボルト カバープレートボルト	S_y	S_y

第6表 許容限界 (中間胴)

許容応力 区分	評価部位	許容限界		
		一次応力 ^(注1)		
		引張	せん断	圧縮
供用状態 D	外筒上部 外筒中央部 外筒下部 下部端板 蓋部中性子遮蔽材カバー中央部 蓋部中性子遮蔽材カバー端部 底部中性子遮蔽材カバー中央部 底部中性子遮蔽材カバー端部	$2/3S_o$ ただし、オーステナイト系ステンレス鋼については $2/3S_o$ と $2.4S_o$ の小さい方を。	$2/3S_o/\sqrt{3}$ ただし、オーステナイト系ステンレス鋼については $2/3S_o$ と $2.4S_o$ の小さい方を $\sqrt{3}$ で除した値。	$1.5f_o^*$ $2/3S_o$ ただし、オーステナイト系ステンレス鋼については $2/3S_o$ と $2.4S_o$ の小さい方を。

(注1) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

第7表 使用材料の許容応力

材料	温度条件 (°C)	S (MPa)	S _w (MPa)	S _y (MPa)	S _e (MPa)	F (MPa)	F*	B (MPa)	評価部位
[]	[]	—	124	185	377	—	—	—	一次蓋中央部、一次蓋端部 一次蓋シール部（蓋側）
		—	124	185	377	—	—	—	二次蓋中央部、二次蓋端部
		—	122	183	377	—	—	90	胴中央部、胴下部
		—	—	185	—	—	—	—	一次蓋シール部（胴側）
		—	122	183	377	—	—	—	胴（底板）中央部、胴（底板）端部
		—	—	842	—	—	—	—	一次蓋ボルト カバープレートボルト
		—	—	844	—	—	—	—	二次蓋ボルト
		—	137	—	431	—	—	—	カバープレート
		—	—	234	426	234	280	—	外筒上部、外筒中央部、外筒下部
		—	—	159	429	205	214	—	下部端板
		—	—	235	427	235	282	—	蓋部中性子遮蔽材カバ-中央部 蓋部中性子遮蔽材カバ-端部
		—	—	159	429	205	214	—	底部中性子遮蔽材カバ-中央部 底部中性子遮蔽材カバ-端部

5.3 応力評価方法

5.3.1 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

(1) 荷重条件

水平落下及び軸方向衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

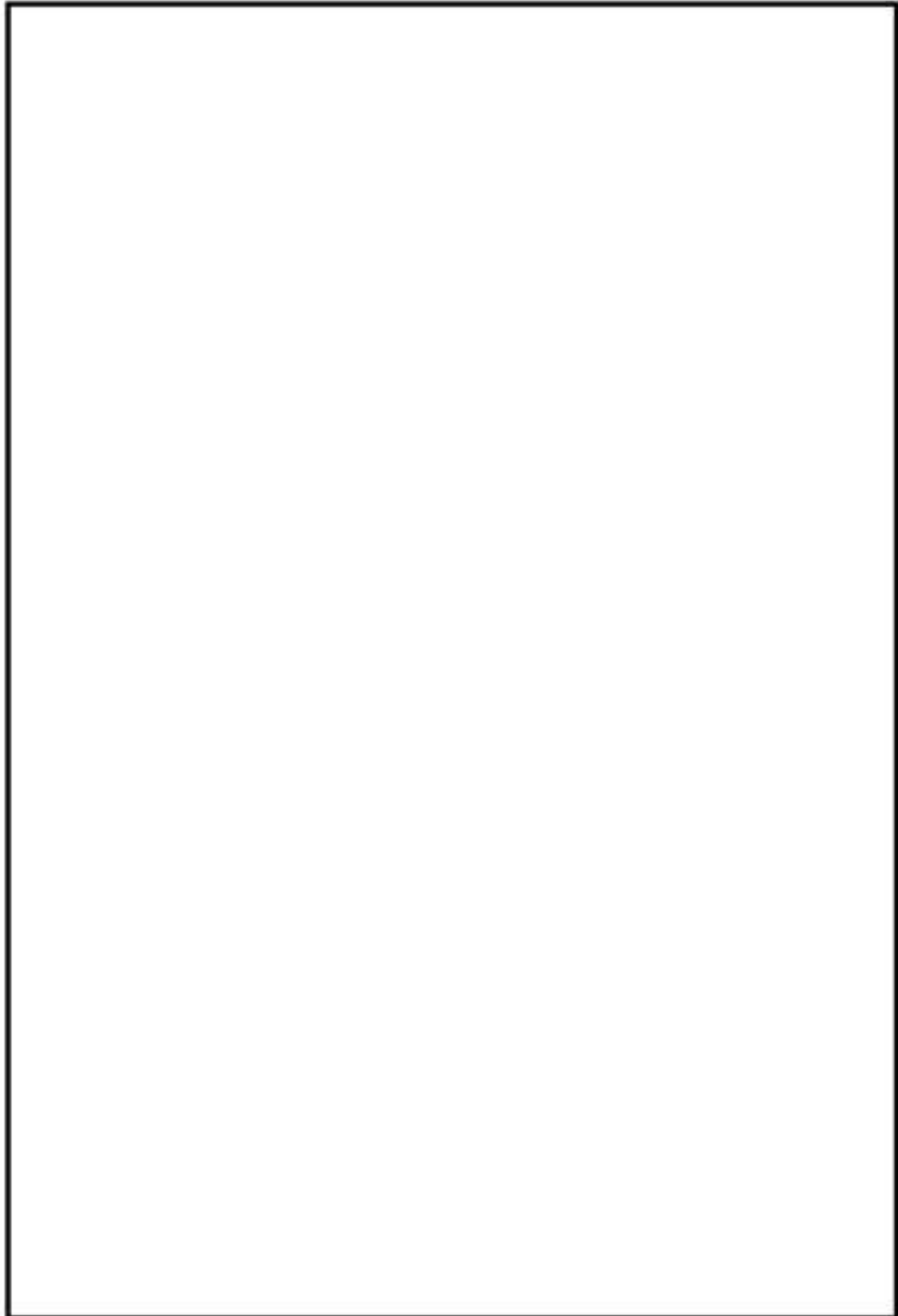
- ・密封容器内圧力 (MPa G)
- ・蓋間圧力 (MPa G)
- ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- ・底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- ・側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- ・一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- ・二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- ・貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- ・自重 (－)
- ・衝撃荷重^(B) (N)
- ・熱荷重 (－)

(注) 落下又は衝突により特定兼用キャスクに生じる衝撃加速度による自重の慣性力として落下又は衝突方向に作用させる。

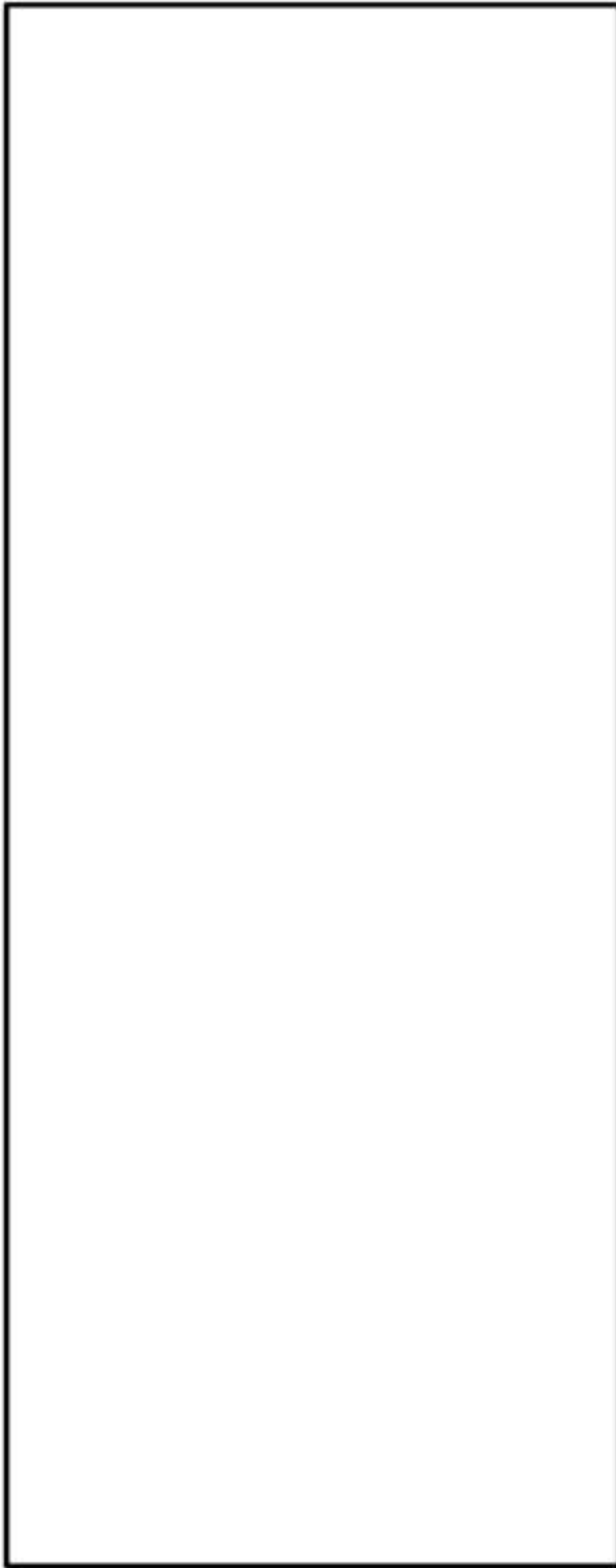
(2) 応力計算

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の応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。また、評価に用いる汎用解析コードABAQUSの検証及び妥当性確認等については、8.に示す。

解析モデルを第6図に、荷重及び境界条件を第7図から第9図に示す。



第6図 解析モデル



F_{iv} : 内部収納物の慣性力 (1.740×10^7 N) (注)

F_{ur} : 貯蔵用上部緩衝体反力 (4.30×10^7 N)

F_{ur} : 貯蔵用下部緩衝体反力 (3.76×10^7 N)

P_i : 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa G)

P_s : 蓋間圧力 (0.36 MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (側面) (MPa G)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (端板面) (MPa G)

P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{tr} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

(注) 衝撃加速度 (650 m/s^2) に加速度割増係数として $1.2^{(1)}$ を乗じた加速度による内部収納物の慣性力を作用させる。

P_{h1} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{h2} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{ha} : 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



- F_{1sr} : 内部収納物の慣性力 (径方向) (2.187×10^5 N)
- F_{1ss} : 内部収納物の慣性力 (軸方向) (1.338×10^7 N)
- F_{1ubr} : 貯蔵用上部緩衝体の慣性力 (径方向) (N)
- F_{1ubr} : 貯蔵用下部緩衝体の慣性力 (径方向) (N)
- F_{1ubr} : 貯蔵用下部緩衝体の慣性力 (軸方向) (N)
- P_1 : 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa G)
- P_{11} : 蓋間圧力 (0.36 MPa G)
- P_{1sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (側面) (MPa G)
- P_{1se} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (端面) (MPa G)
- P_{1sr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{1sr} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{b1} : 一次蓋ホルト初期締付力 (MPa)
- P_{b2} : 二次蓋ホルト初期締付力 (MPa)
- P_{b3} : 貯蔵用三次蓋ホルト初期締付力 (MPa)

内は商業機密のため、非公開とします。

第8図 荷重及び境界条件 (軸方向衝突 (上部側))

- F_{1sr} : 内部収納物の慣性力 (径方向) (2.187×10^5 N)
- F_{1ss} : 内部収納物の慣性力 (軸方向) (1.338×10^7 N)
- F_{2air} : 貯蔵用上部緩衝体の慣性力 (径方向) (N)
- F_{2air} : 貯蔵用上部緩衝体の慣性力 (軸方向) (N)
- F_{2abr} : 貯蔵用下部緩衝体の慣性力 (径方向) (N)
- P_i : 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa G)
- P_{1i} : 蓋閉圧力 (0.36 MPa G)
- P_{1sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (側面) (MPa G)
- P_{1sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (端板面) (MPa G)
- P_{1tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{1br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{b1} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{b2} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{bul} : 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

内は商業機密のため、非公開とします。

第9図 荷重及び境界条件 (軸方向衝突 (下部側))

5.3.2 カバープレート及びカバープレートボルト

(1) 荷重条件

水平落下及び軸方向衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・密封容器内圧力 (MPa G)
- ・蓋間圧力 (MPa G)
- ・カバープレートボルト初期締付力 (MPa)
- ・自重 (—)
- ・衝撃荷重^(B) (N)

(注) 落下又は衝突により特定兼用キャスクに生じる衝撃加速度による自重の慣性力として落下又は衝突方向に作用させる。

(2) 応力計算

カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算は、応力評価式により行う。

(a) カバープレート

密封容器内圧力と蓋間圧力の差圧及び軸方向衝突時に慣性力により発生する一次膜＋一次曲げ応力 (σ_{r3} 、 $\sigma_{\theta3}$ 、 σ_{z3}) は、カバープレートを周辺支持の円板としてモデル化し、密封容器内圧力と蓋間圧力の差圧により発生する応力 (σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 、 σ_{z1}) と慣性力により発生する応力 (σ_{r2} 、 $\sigma_{\theta2}$ 、 σ_{z2}) より次式で計算される。なお、水平落下時には慣性力により応力は発生しないため、一次膜＋一次曲げ応力は密封容器内圧力と蓋間圧力の差圧により発生する応力 (σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 、 σ_{z1}) となる。

$$\begin{aligned}\sigma_{r3} &= \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \\ \sigma_{\theta3} &= \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta2} \\ \sigma_{z3} &= \sigma_{z1} + \sigma_{z2}\end{aligned}$$

$$\sigma_{r1} = \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta1} &= \sigma_{r1} \\ \sigma_{z1} &= 0\end{aligned}$$

$$\sigma_{r2} = \frac{1.24 \cdot w \cdot r^2}{t^2}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta2} &= \sigma_{r2} \\ \sigma_{z2} &= 0\end{aligned}$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

P : 密封容器内圧力と蓋間圧力の差圧 (MPa・G)

$$P = P_2 - P_1$$

P₁ : 密封容器内圧力 (MPa・G)

P₂ : 蓋間圧力 (MPa・G)

r : ボルトピッチ半径 (mm)

t : 板厚 (mm)

w : 慣性力による分布荷重 (MPa)

$$w = t \cdot \rho \cdot G_v$$

ρ : カバープレート材料 (SUS304) の密度 (kg/mm³)

G_v : 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度 (m/s²)

(b) カバープレートボルト

水平落下時又は軸方向衝突時においてカバープレートボルトに発生する平均引張応力 (σ_{n1}又はσ_{n1}') 及び平均引張応力+曲げ応力 (σ_{n+b}又はσ_{n+b}') は、次式で計算される。なお、軸方向衝突時には、曲げ応力は発生しないため、平均引張応力+曲げ応力は平均引張応力と同じである。

(水平落下時)

$$\sigma_{n+b} = \sigma_{n1} + \sigma_{b1}$$

$$\sigma_{n1} = \sigma_{n2} + \sigma_{n3}$$

(軸方向衝突時)

$$\sigma_{n+b}' = \sigma_{n1}'$$

$$\sigma_{n1}' = \sigma_{n2} + \sigma_{n3} + \sigma_{n4}$$

$$\sigma_{n2} = \frac{H}{A}$$

$$\sigma_{n3} = \frac{H_p}{A}$$

$$\sigma_{n4} = \frac{m_r \cdot G_v}{A}$$

$$H = \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot P$$

$$H_p = W_m$$

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

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

σ_{n2} : 密封容器内圧力と蓋間圧力の差圧による平均引張応力 (MPa)

σ_{n3} : ガasket縮付時の平均引張応力 (MPa)

σ_{n4} : 慣性力による平均引張応力 (MPa)

A : カバープレートボルト最小断面積の合計値 (mm^2)

H : カバープレートに加わる内圧による全荷重 (N)

H_g : ガasketに加わる圧縮力 (N)

D_c : ガasket反力の作用する位置 (直径) (mm)

P : 密封容器内圧力と蓋間圧力の差圧 (MPa)

W_n : ガasket縮付け時に必要な最小ボルト荷重 (N)

M : 曲げモーメント (N \cdot mm)

$$M = m_r \cdot G_n \cdot L$$

m_r : カバープレートの質量 (kg)

G_v : 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度 (m/s^2)

G_n : 水平落下時に生じる衝撃加速度 (m/s^2)

L : カバープレートボルト軸部の長さ (mm)

Z : カバープレートボルト断面係数の合計値 (mm^3)

5.4 応力評価条件

各評価箇所の応力評価条件を第8表及び第9表に示す。

第8表 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の応力評価条件

項目	単位	数値
密封容器内圧力	MPa G	-0.101325
蓋間圧力	MPa G	0.36
蓋部中性子遮蔽材部圧力	MPa G	
底部中性子遮蔽材部圧力	MPa G	
側部中性子遮蔽材部圧力	MPa G	
一次蓋ボルトの初期締付力	MPa	
二次蓋ボルトの初期締付力	MPa	
貯蔵用三次蓋ボルトの初期締付力	MPa	
自重	m/s ²	
衝撃荷重（水平落下時に生じる衝撃加速度）	m/s ²	650
衝撃荷重（軸方向衝突時に生じる衝撃加速度）	m/s ²	600

第9表 カバープレート及びカバープレートボルトの応力評価条件

項目	記号	単位	数値
密封容器内圧力	P_1	MPa G	-0.101325
蓋間圧力	P_2	MPa G	0.36
ボルトピッチ半径	r	mm	
板厚	t	mm	
カバープレート材料の密度	ρ	kg/mm ³	7.93×10^{-6}
軸方向衝突時に生じる衝撃加速度	G_v	m/s ²	600
カバープレートボルト最小断面積の合計値	A	mm ²	
ガスケット反力の作用する位置（直径）	D_0	mm	
ガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重	W_a	N	1.851×10^5
カバープレートの質量	m_c	kg	10
水平落下時に生じる衝撃加速度	G_H	m/s ²	650
カバープレートボルト軸部の長さ	L	mm	
カバープレートボルト断面係数の合計値	Z	mm ³	

6. バスケットの応力評価

6.1 基本方針

落下荷重及び軸方向衝突荷重が作用した場合にバスケットに発生する応力が、許容応力以下であることを確認する。なお、応力評価に用いる寸法は公称値を使用する。

6.1.1 許容限界

バスケットの許容限界を第10表に示す。

6.1.2 使用材料の許容応力

バスケットの応力評価に用いる使用材料の許容応力を第11表に示す。

第10表 許容限界 (バスケット)

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	せん断応力
供用状態 (注1) D	バスケットプレート	$2/3S_u$	左欄の α 倍 (注2)	$1.2S_u$
				$1.5f_u^*$

(注1) JSME S FAI-2007 に規定されている材料を用いていないため、同規定は使用できない。このことから、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四十三条の二十六の三第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-DPC 17001) 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 の設計基準を許容限界として設定する。

(注2) α は純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さい方の値とする。

第11表 使用材料の許容応力

材料	温度条件 (°C)	S (MPa)	S_u (MPa)	S_y (MPa)	S_{11} (MPa)	評価部位
アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	195	—	36	56	113	バスケットプレート

6.2 応力評価方法

6.2.1 バスケット

(1) 荷重条件

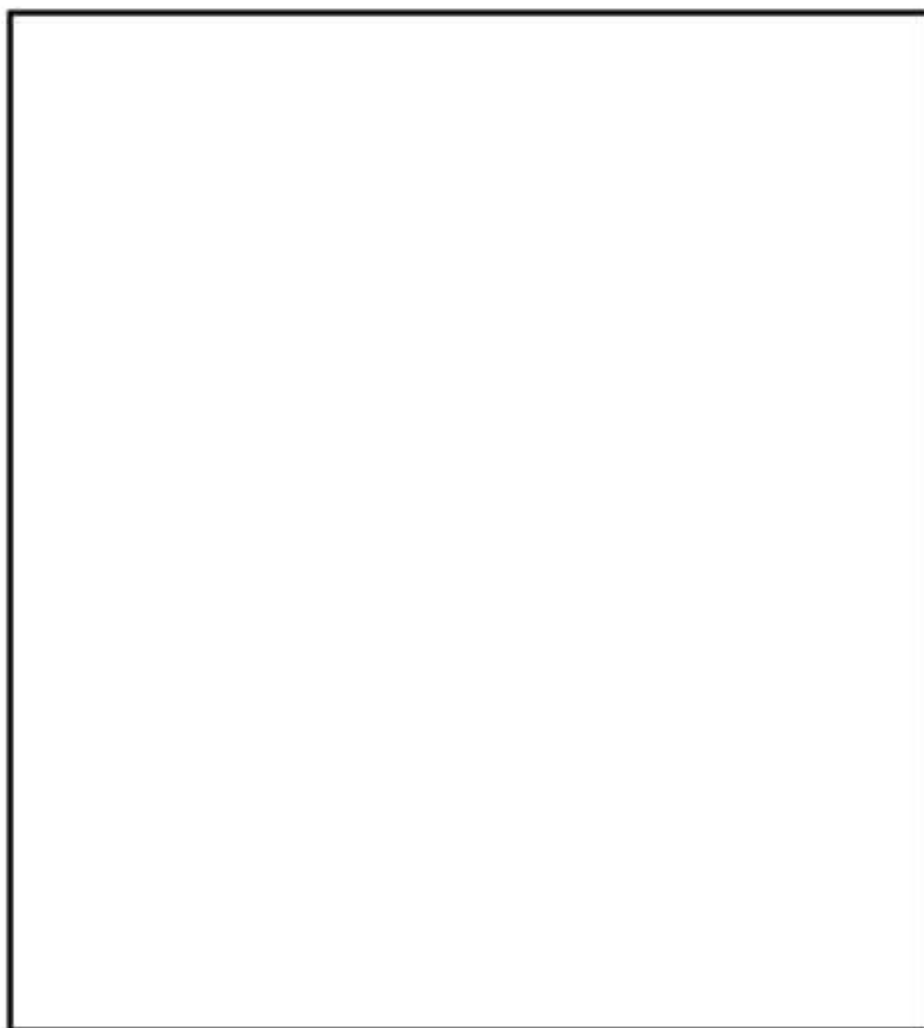
水平落下及び軸方向衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重 (一)
- ・衝撃荷重 (B)

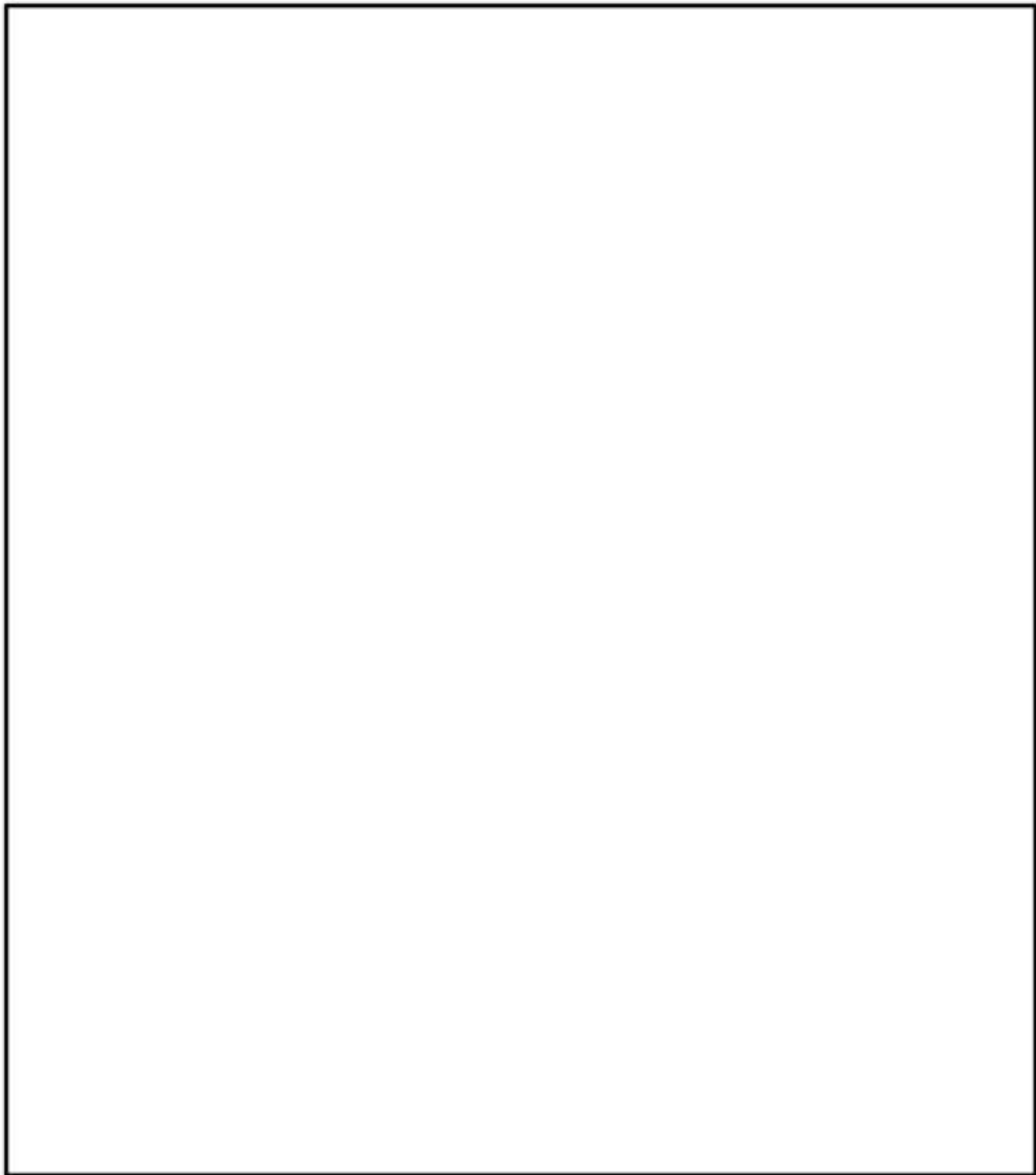
(注) 落下又は衝突により特定兼用キャスクに生じる衝撃加速度による自重の慣性力 (m/s^2) として落下又は衝突方向に作用させる。

(2) 応力計算

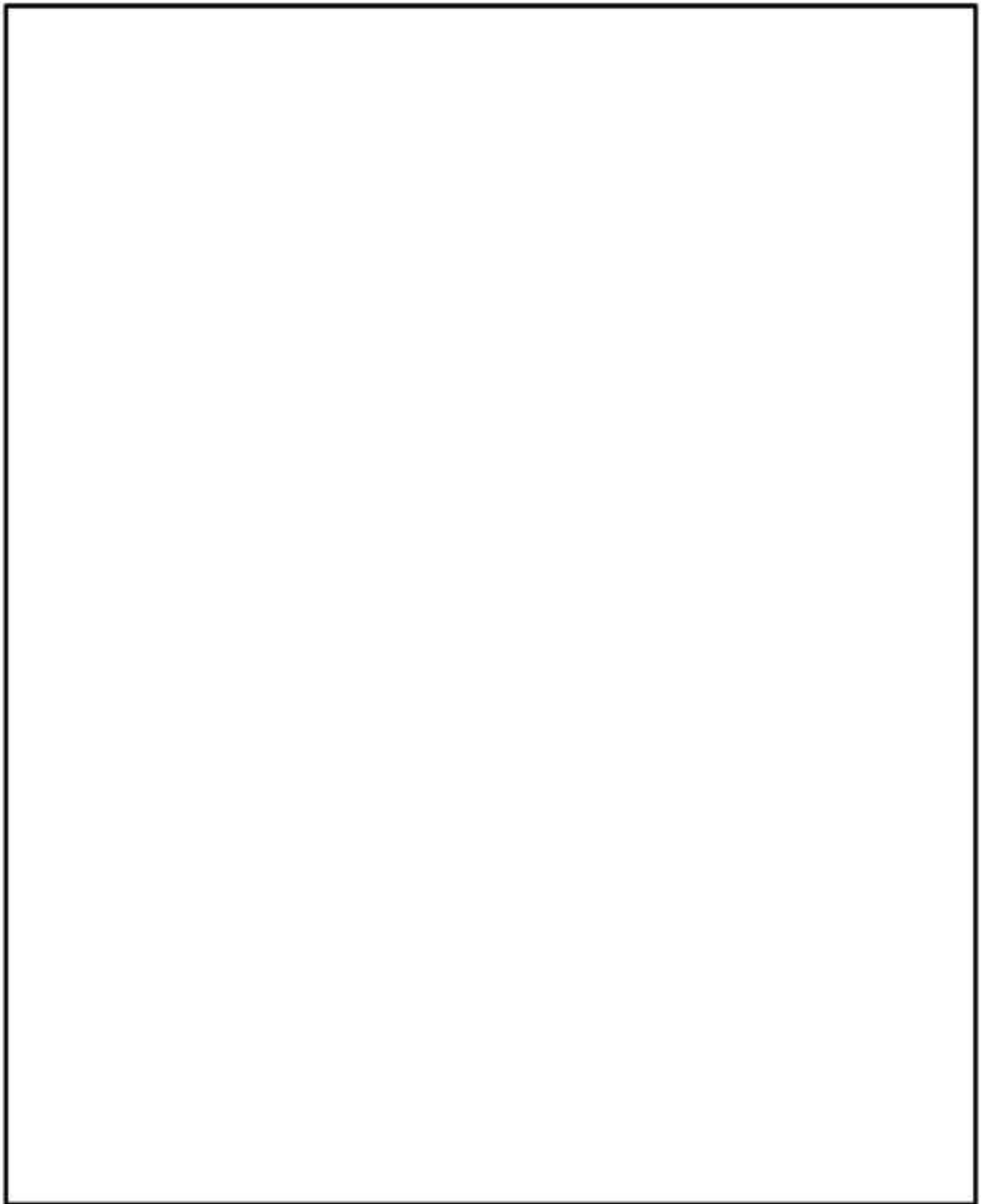
バスケットに発生する応力の計算は、応力評価式により行う。解析モデル及び応力評価位置を第10図及び第11図示す。



第10図 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度に対するバスケットの
解析モデル及び応力評価位置



第 11 図 水平落下時に生じる衝撃加速度に対するバスケットの
解析モデル及び応力評価位置 (1/2)



第 11 図 水平落下時に生じる衝撃加速度に対するバスケットの
解析モデル及び応力評価位置 (2/2)

(a) 一次一般膜応力

(i) 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により発生する応力

最大応力が発生するのは評価位置①である。軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により発生する一次一般膜応力は、次式で計算される。

$$\sigma_{nV} = \frac{m_1 G_V}{A_1}$$

ここで、

- σ_{nV} : 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により発生する一次一般膜応力 (MPa)
- m_1 : バスケット質量 (kg)
- G_V : 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度 (m/s^2) (5.3.2 (2) (a)と同じ)
- A_1 : 評価位置①の断面積 (mm^2)

(ii) 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する応力

最大応力が発生するのは評価位置②である。水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する一次一般膜応力は、次式で計算される。

$$\sigma_{nH} = \frac{m_2 G_H}{A_2 N}$$

ここで、

- σ_{nH} : 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する一次一般膜応力 (MPa)
- m_2 : 第 11 図 (1/2) に示す領域 I 及び II に含まれるバスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の合計質量 (kg)
- G_H : 設計竜巻荷重により生じる径方向加速度 (m/s^2) (5.3.2 (2) (b)と同じ)
- A_2 : 評価位置②の断面積 (mm^2)
- N : バスケットプレートの段数 (-)

(b) 一次一般膜応力+一次曲げ応力

(i) 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により発生する応力

評価位置①には、軸方向衝突時に生じる衝撃加速度によって一次曲げ応力は発生しないため、一次一般膜応力+一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

(ii) 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する応力

最大応力が発生するのは評価位置③である。水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する一次曲げ応力は、バスケットプレートを両端固定梁としてモデル化し、次式で計算される。なお、評価位置③には水平落下時に生じる衝撃加速度により一次一般膜応力は発生しないため、一次一般膜応力+一次曲げ応力は、一次曲げ応力と同じとなる。

$$\sigma_{\text{bll}} = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{wG_{\text{H}}L^2}{12}$$

ここで、

- σ_{bll} : 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する曲げ応力 (MPa)
- M : 評価位置③に発生する曲げモーメント (N・mm)
- Z : 評価位置③の断面係数 (mm³)
- w : 第 11 図 (2/2) に示す領域Ⅲに含まれるバスケットプレート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の単位長さ当たりの重量 (kg/mm)
- G_{H} : 水平落下時に生じる衝撃加速度 (m/s²) (5.3.2 (2) (b) と同じ)
- L : バスケットプレート長さ (mm)

(c) せん断応力

(i) 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により発生する応力

軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により、バスケットプレートにせん断応力は発生しないため、評価を省略する。

(ii) 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する応力

最大応力が発生するのは評価位置③である。水平落下時に生じる衝撃加速度により発生するせん断応力は、次式で計算される。

$$\tau_{\text{H}} = \frac{F}{A_3}$$

$$F = \frac{wG_{\text{H}}L}{2}$$

ここで、

- τ_{H} : 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生するせん断応力 (MPa)
- F : 評価位置③に発生する荷重 (N)
- A_3 : 評価位置③の断面積 (mm²)
- w : 第 11 図 (2/2) に示す領域Ⅲに含まれるバスケットプレート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の単位長さ当たりの重量 (kg/mm)
- G_{H} : 水平落下時に生じる衝撃加速度 (m/s²) (5.3.2 (2) (b) と同じ)
- L : バスケットプレート長さ (mm)

(d) 圧縮応力

(i) 軸方向衝突時に生じる衝撃加速度により発生する応力

最大応力が発生するのは評価位置①である。発生する圧縮応力は、(a)(i)と同様に計算される。

(ii) 水平落下時に生じる衝撃加速度により発生する応力

最大応力が発生するのは評価位置②である。発生する圧縮応力は、(a)(ii)と同様に計算される。

6.3 応力評価条件

各評価箇所の応力評価条件を第12表に示す。

第12表 バスケットの応力評価条件

項目	記号	単位	数値
バスケット質量	m_1	kg	
評価位置①の断面積	A_1	mm ²	
第11図(1/2)に示す領域Ⅰ及びⅡに含まれるバスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の合計質量	m_2	kg	
評価位置②の断面積	A_2	mm ²	
バスケットプレートの段数	N	—	
評価位置③の断面係数	Z	mm ³	
第11図(2/2)に示す領域Ⅲに含まれるバスケットプレート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の単位長さ当たりの質量	w	kg/mm	
バスケットプレート長さ	L	mm	
評価位置③の断面積	A_3	mm ²	

7. 構造強度評価結果

特定兼用キャスク本体、蓋部及びバスケットの応力評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており、必要な強度を有することを確認した。応力評価結果を第13表に示す。バスケットプレートに生じる応力は、設計降伏点（56MPa）より低いため、バスケットプレートは弾性状態に留まる。

第13表 応力評価結果 (1/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
一次蓋	一次一般膜応力	9	16	3	251
	一次局部膜応力	20	76	20	377
	一次膜応力 +一次曲げ応力	18	152	28	377
二次蓋	一次一般膜応力	17	11	10	251
	一次局部膜応力	54	11	18	377
	一次膜応力 +一次曲げ応力	52	76	63	377
カバー プレート	一次膜応力 +一次曲げ応力	4	6	6	431

第13表 応力評価結果 (2/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
胴	一次一般膜応力	63	20	26	251
	一次局部膜応力	152	91	37	377
	一次膜応力+一次 曲げ応力	88	20	26	377
	圧縮応力 (一次)	36	20	36	135
胴 (底板)	一次一般膜応力	25	2	10	251
	一次局部膜応力	50	8	26	377
	一次膜応力+一次 曲げ応力	36	12	68	377

第13表 応力評価結果 (3/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
一次蓋 シール部 (蓋側)	一次膜応力 +一次曲げ応力	44	87	39	185
	一次+二次応力	83	180	69	185
一次蓋 シール部 (胴側)	一次膜応力 +一次曲げ応力	113	21	40	185
	一次+二次応力	121	32	42	185

第13表 応力評価結果 (4/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
外筒	引張 (一次応力)	166	36	37	284
	圧縮 (一次応力)	45	63	16	280
	せん断 (一次応力)	60	19	23	163
	曲げ (一次応力)	189	50	93	284
	組合せ (一次応力)	174	69	47	284

第13表 応力評価結果 (5/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
下部端板	引張 (一次応力)	19	3	13	286
	圧縮 (一次応力)	31	1	9	214
	せん断 (一次応力)	41	4	29	165
	曲げ (一次応力)	167	14	125	286
	組合せ (一次応力)	77	7	51	286

第13表 応力評価結果 (6/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
蓋部中性子 遮蔽材 カバー	引張 (一次応力)	24	28	—	284
	圧縮 (一次応力)	13	1	8	282
	せん断 (一次応力)	12	22	6	164
	曲げ (一次応力)	24	125	27	284
	組合せ (一次応力)	28	40	11	284

第13表 応力評価結果 (7/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
底部中性子 遮蔽材 カバー	引張 (一次応力)	33	1	30	286
	圧縮 (一次応力)	137	2	7	214
	せん断 (一次応力)	44	2	12	165
	曲げ (一次応力)	73	10	85	286
	組合せ (一次応力)	120	3	40	286

第13表 応力評価結果 (8/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)			評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
一次蓋 ボルト	平均引張応力	262	406	249	842
	平均引張応力 +曲げ応力	634	557	288	842
二次蓋 ボルト	平均引張応力	326	250	205	844
	平均引張応力 +曲げ応力	841	504	265	844
カバー プレート ボルト	平均引張応力	166	172	172	842
	平均引張応力 +曲げ応力	228	172	172	842

第13表 応力評価結果 (9/9)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)		評価基準値 (MPa)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側/下部側)	
バスケットプレート (評価位置①)	一次一般膜応力	—	15	75
	一次膜応力 + 一次曲げ応力	—	15	90
	圧縮応力	—	15	66
バスケットプレート (評価位置②)	一次一般膜応力	35	—	75
	圧縮応力	35	—	66
バスケットプレート (評価位置③)	一次膜応力 + 一次曲げ応力	24	—	90
	せん断応力	6	—	43

8. 使用する解析コード

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

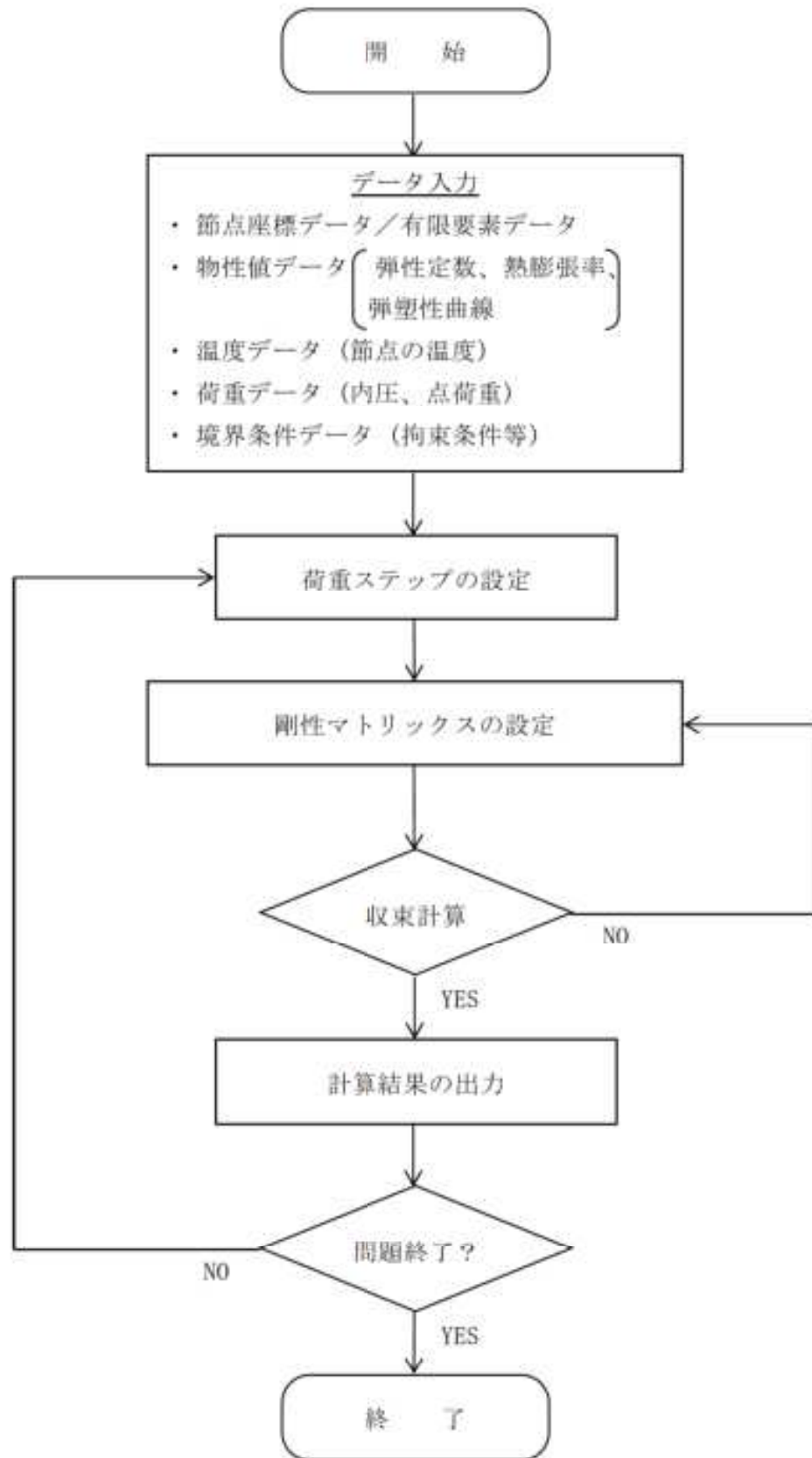
代表的な解析フローを第12図に示す。

iv 使用実績及び検証

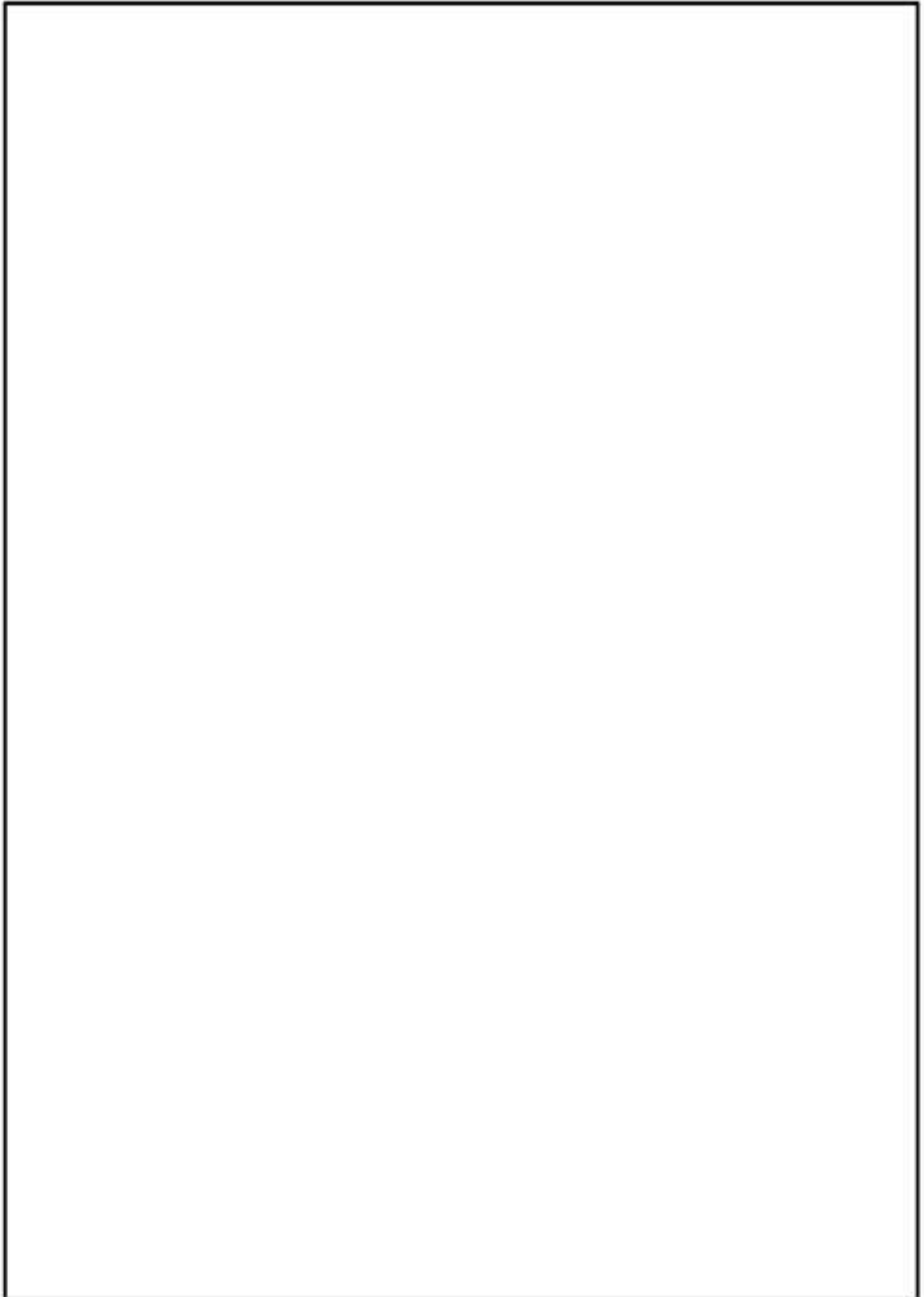
ABAQUS コードは、多くの応力解析に使用された実績がある。

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第13図に示す。

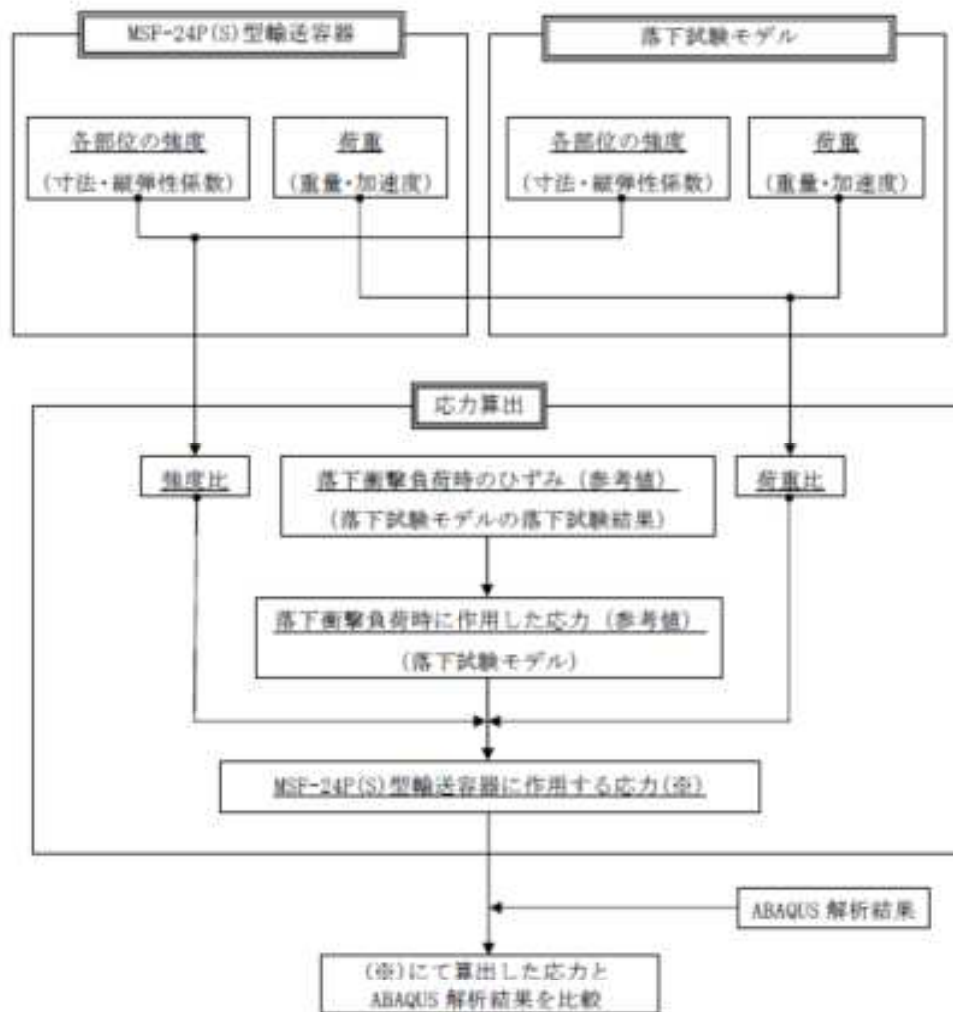
また、MSF-24P(S)型のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いた落下試験結果を基に、MSF-24P(S)型輸送容器の ABAQUS コードを用いた応力解析手法の妥当性を検証している (第14図)。



第 12 図 ABAQUS コードの解析フロー図



第 13 図 ABAQUS コードの検証例



(1) 検証手順

第 14 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」（○）章 A.10.2 より抜粋）

(e)-第A.83表 9.3 a 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。

(e)-第A.84表 9.3 a 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

第14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」(e)章A.10.2より抜粋)

9. 設工認への引継ぎ事項

貯蔵用緩衝体の性能に関する型式指定申請から設工認申請への引継ぎ事項として、前頁までの内容を踏まえ、次に示す事項を型式指定申請書本文 8.2「型式設計特定機器を使用することができる発電用原子炉施設の条件」において示す。

<貯蔵用緩衝体の性能に関する型式指定申請から設工認申請への引継ぎ事項>

貯蔵用緩衝体の装着により、特定兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法で設置することについて、金属キャスク構造規格に規定される供用状態 D に対して、貯蔵用緩衝体は、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が許容基準を満足するために必要な緩衝性能を有すること。

なお、次の想定事象に該当し、特定兼用キャスクに作用する荷重条件が下表を満足すれば、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が許容基準を満足するための緩衝性能を有するものとする。

想定事象	特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態 D の許容基準を満足するための荷重条件 ^(注1)
MSF-24P(S)型の水平落下 ^(注2)	上部（蓋部）に作用する荷重 $4.30 \times 10^7 \text{N}$ 以下 下部（底部）に作用する荷重 $3.76 \times 10^7 \text{N}$ 以下
MSF-24P(S)型と周辺施設等との径方向衝突	
MSF-24P(S)型と周辺施設等との軸方向衝突（上部側）	上部（蓋部）に作用する荷重 $7.55 \times 10^7 \text{N}$ 以下
MSF-24P(S)型と周辺施設等との軸方向衝突（下部側）	下部（底部）に作用する荷重 $7.69 \times 10^7 \text{N}$ 以下

(注1) 表中に示す荷重値は、特定兼用キャスク本体に以下の衝撃加速度が作用した場合に上部（蓋部）又は下部（底部）に作用する荷重である。

- ・ MSF-24P(S)型の水平落下及び MSF-24P(S)型と周辺施設等との径方向衝突
：衝撃加速度 650m/s^2
- ・ MSF-24P(S)型と周辺施設等との軸方向衝突（上部側）
：衝撃加速度 600m/s^2
- ・ MSF-24P(S)型と周辺施設等との軸方向衝突（下部側）
：衝撃加速度 600m/s^2

(注2) 水平落下において、MSF-24P(S)型が床面に対して傾斜して落下（傾斜落下）する場合においても、MSF-24P(S)型の健全性は維持される。

10. 参考文献

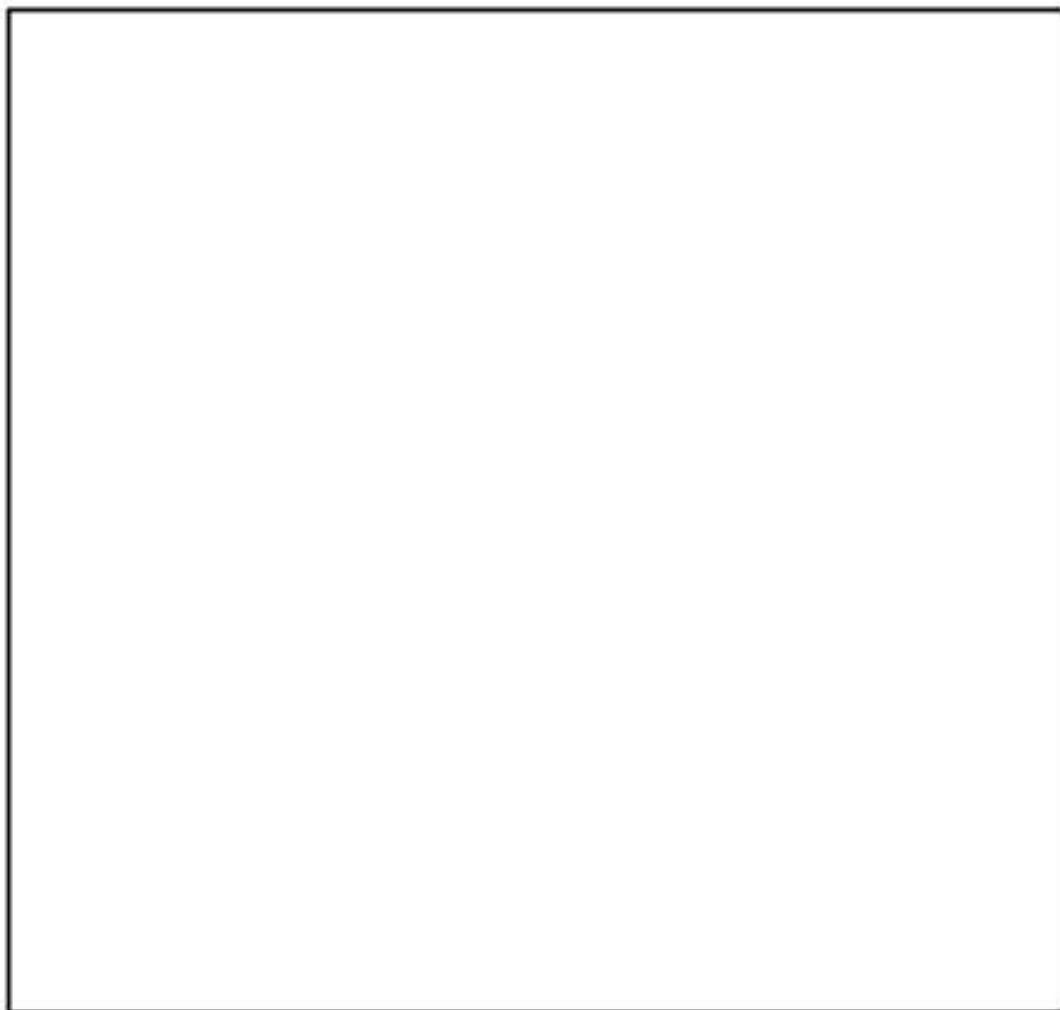
- (1) (独)原子力安全基盤機構,「金属キャスト貯蔵技術確証試験報告書 1/3 最終報告」, (2004).
- (2) Dassault Systèmes, “SIMULIA User Assistance 2018”.

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 1-1 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、本書の本文に強度評価を記載していない。

本別紙では、貯蔵用三次蓋の水平落下及び軸方向衝突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1-1図 貯蔵用三次蓋の設置状態

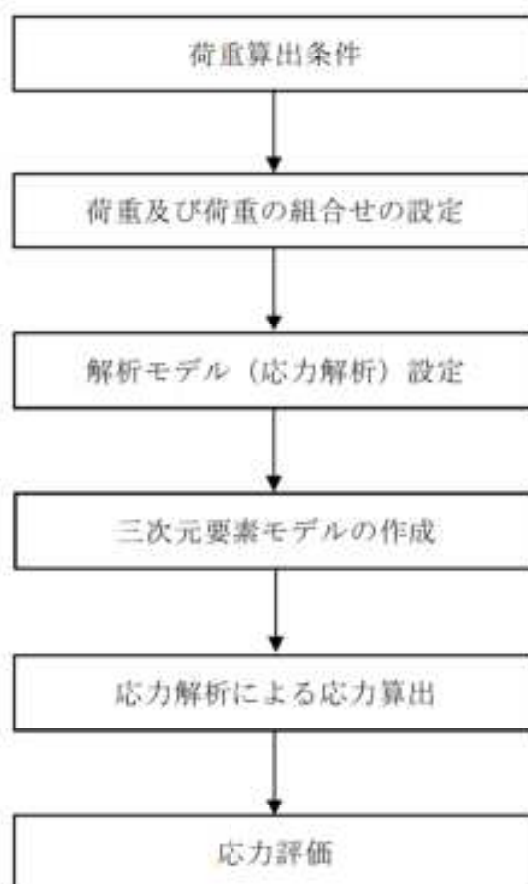
2. 貯蔵用三次蓋の強度評価

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

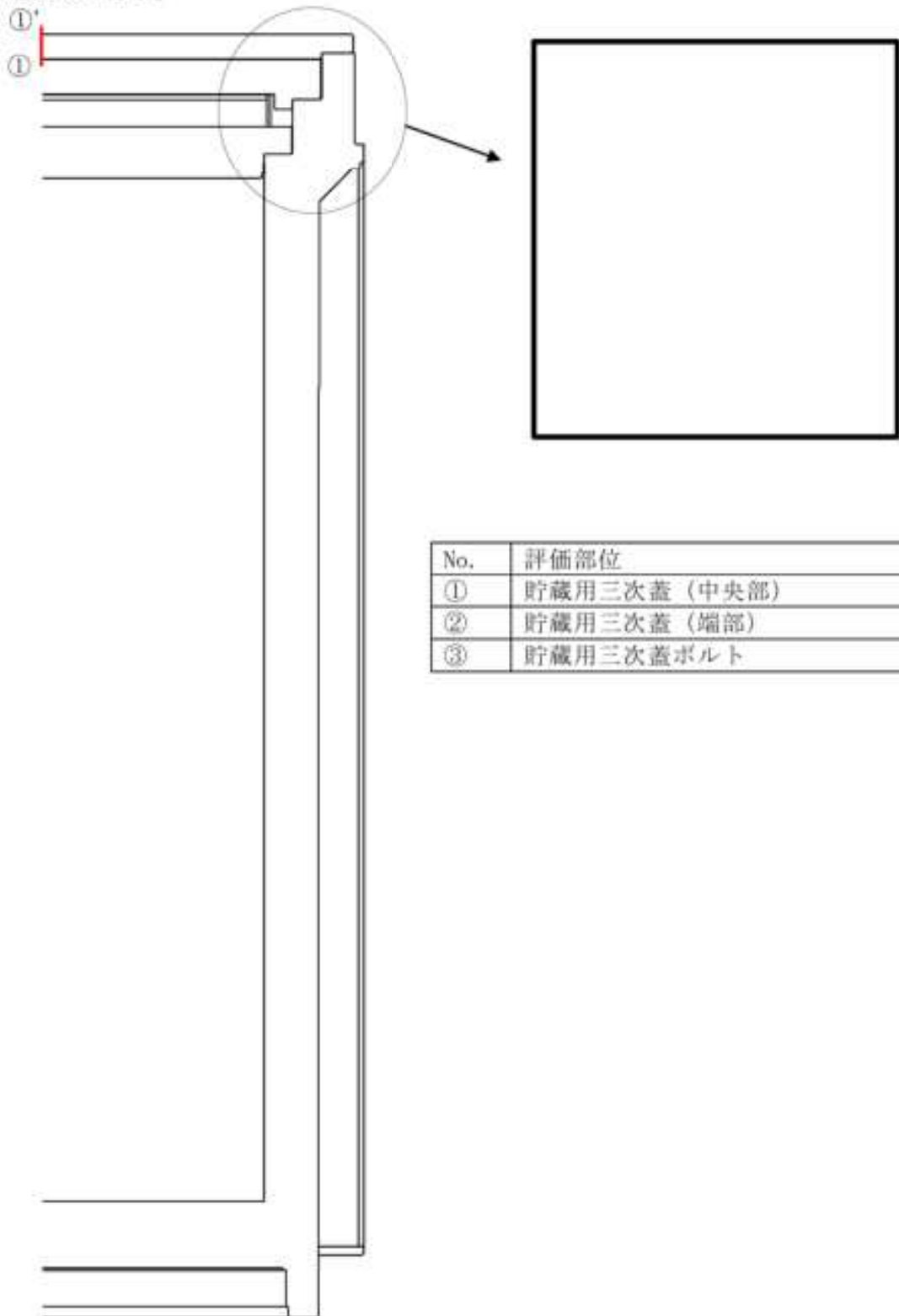
貯蔵用三次蓋の応力評価フローを別紙1-2図に示す。



別紙1-2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1～3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。



No.	評価部位
①	貯蔵用三次蓋（中央部）
②	貯蔵用三次蓋（端部）
③	貯蔵用三次蓋ボルト

別紙1～3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、本書の本文 5.3.1「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 1-1 表及び別紙 1-2 表に示す。

別紙 1-1 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 1-2 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	—	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1～3表に示す。応力は評価基準値を満足しており、水平落下及び軸方向衝突に対し十分な強度を有することを確認した。

別紙1～3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)
		水平落下	軸方向衝突 (上部側)	軸方向衝突 (下部側)	
貯蔵用 三次蓋	一次一般膜応力	46	13	9	248
	一次局部膜応力	63	93	49	373
	一次膜応力 +一次曲げ応力	61	44	48	373
貯蔵用 三次蓋ボルト	平均引張応力	280	165	355	846
	平均引張応力 +曲げ応力	497	230	440	846

傾斜落下時の健全性について

1. 概要

本書の本文に示す水平落下において、MSF-24P(S)型が床面に対して傾斜して落下する場合（以下「傾斜落下」という。）がある。傾斜落下となる場合、細長い輸送物では落下エネルギーの一部が特定兼用キャスクの回転運動エネルギーとなり二次衝撃側の吸収エネルギーが増加する。特に、蓋密封部が二次衝撃側となる場合、密封性能を損なうおそれがあるため、二次衝撃側の衝撃加速度の影響を評価する必要がある。本別紙では、落下試験結果を基にした密封性能の評価の結果、傾斜落下時に MSF-24P(S)型の健全性が維持されることを示す。

2. MSF-24P(S)型の落下試験結果に基づく密封性能評価

MSF-24P(S)型の傾斜落下条件下における密封性能について落下試験結果（別添 1 参照）に基づき評価を行った。

2.1 MSF-24P(S)型の密封設計

別紙 2-1 図に MSF-24P(S)型及び落下試験モデルの蓋部構造の比較を示す。

MSF-24P(S)型の胴フランジ、一次蓋及び二次蓋の剛性を落下試験モデルよりも高めることで蓋密封部の変形量を低減させる等の反映により、落下試験モデルよりも密封性能を向上させている。

2.2 MSF-24P(S)型の密封性能評価

傾斜落下において、MSF-24P(S)型の密封性能が維持されることを、落下試験により密封性能が維持されることが実証されている落下試験モデル及びその落下試験結果を用いて評価する。

落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられた金属ガスケットと胴フランジ面との口開き量の増加、金属ガスケットの相対横ずれ量の増加、金属ガスケットの圧縮量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するリークパスの発生とガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、MSF-24P(S)型の蓋、胴フランジ及び蓋ボルトの変形量が落下試験モデルに比べて小さいことを示すことにより、MSF-24P(S)型の密封性能を検証する。

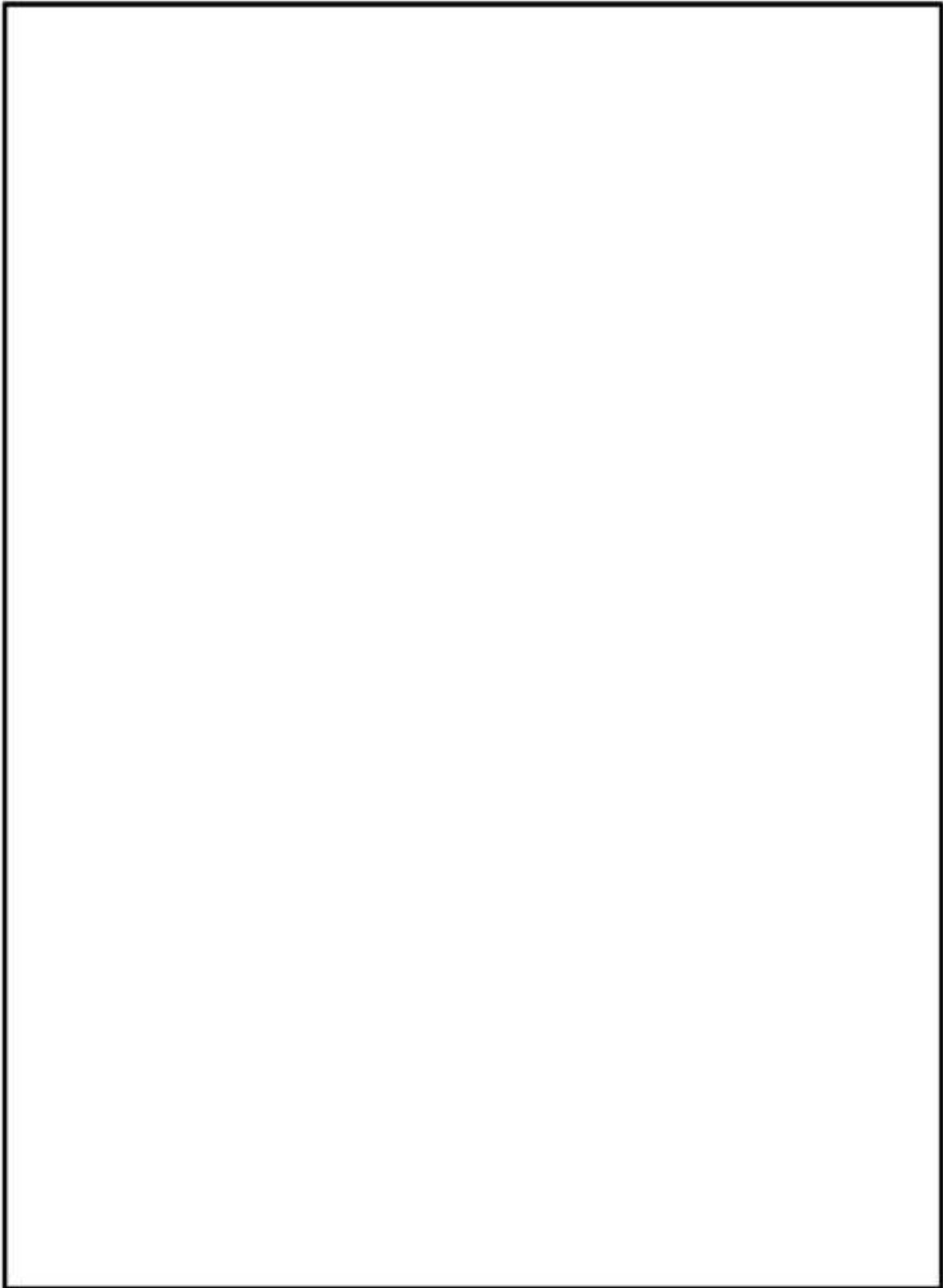
また、MSF-24P(S)型の三次蓋構造に対して落下試験モデルは二次蓋構造であるが、荷重の伝達経路と蓋密封部の構造について、MSF-24P(S)型の貯蔵用三次蓋周辺部（最外の蓋）と落下試験モデルの二次蓋周辺部（最外の蓋）は同様であり、MSF-24P(S)型の二次

蓋周辺部及び一次蓋周辺部（内側の蓋）と落下試験モデルの一次蓋周辺部（内側の蓋）と同様である。したがって、MSF-24P(S)型の蓋密封部（二次蓋及び一次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（一次蓋）と比較する。また、MSF-24P(S)型の貯蔵用三次蓋は密封境界ではないが、MSF-24P(S)型の蓋部を構成する部材であることから、落下試験モデルの落下試験モデルの蓋密封部（二次蓋）と比較する。

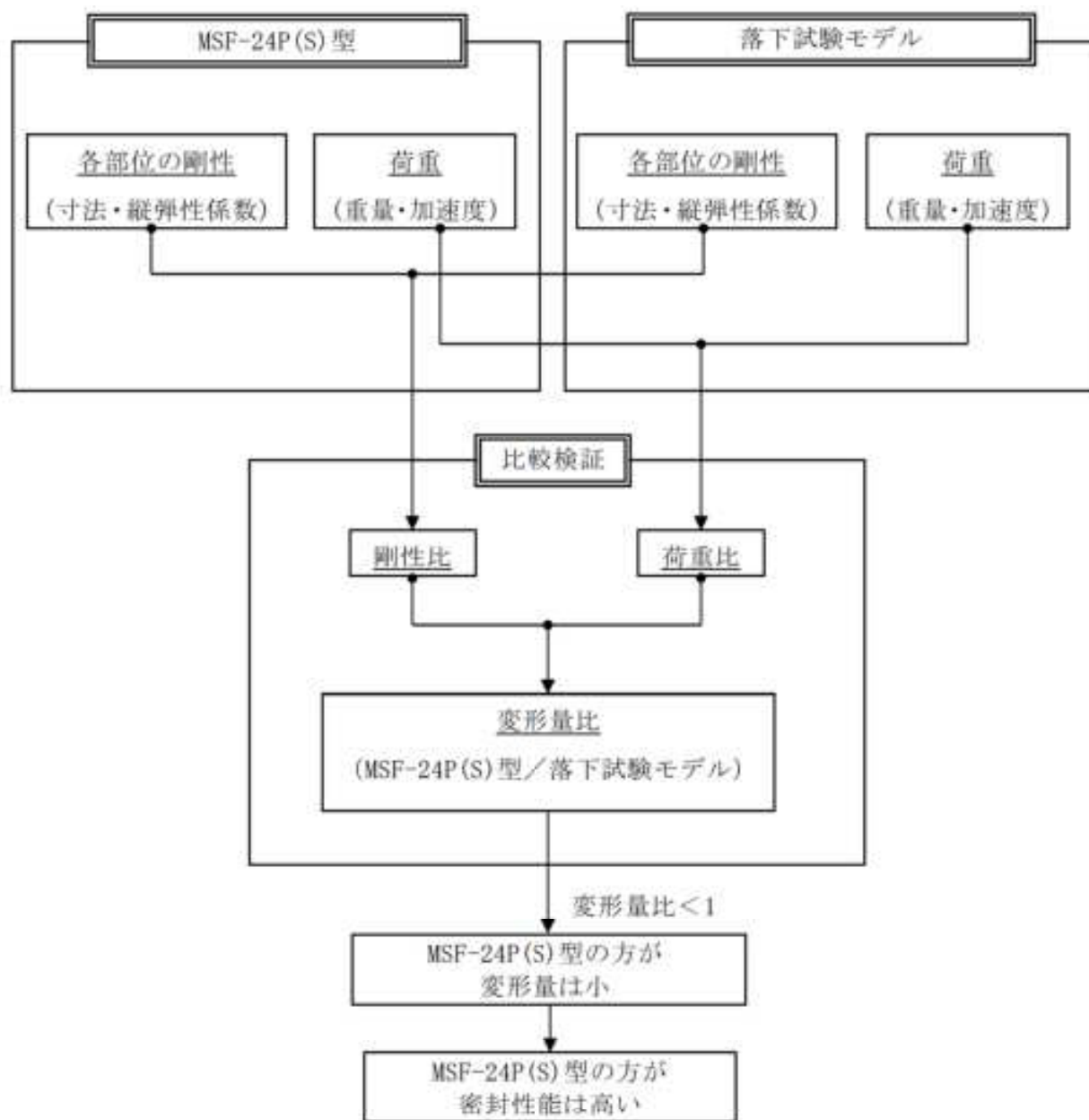
2.2.1 評価手順

密封性能評価方法の手順を以下に示す。（別紙2-2図参照）

- (1) MSF-24P(S)型と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位（胴フランジ、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋、貯蔵用三次蓋ボルト）の各変形モード（曲げ、圧縮、引張、オーバル変形）の剛性に影響する寸法を抽出する。
- (2) 各部位の剛性に影響する設計条件（材質、設計温度、縦弾性係数）を抽出する。
- (3) 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-24P(S)型と落下試験モデルの各部位の剛性比を算出する。
- (4) 落下衝撃力を決定する設計条件（キャスク重量、落下時の衝撃加速度）を抽出し、MSF-24P(S)型と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- (5) 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下衝撃負荷時の変形量比を算出する。
- (6) (5)で算出した変形量比が1以下(MSF-24P(S)型の方が小さい)であれば、落下試験モデルに比べて、より高い密封性能を有していることが示される。



別紙2-1図 MSF-24P(S)型及び落下試験モデルの蓋密封部構造の比較



別紙 2 - 2 図 密封性能評価手順

2.2.2 評価結果及びまとめ

傾斜落下において、MSF-24P(S)型の密封性能が維持されていることを落下試験結果を用いて評価した。評価結果を以下に示す。

<傾斜落下の評価結果>

傾斜落下時の蓋部の変形量比較結果を別紙2-1表に示す（評価詳細は別添2参照）。全ての評価部位において変形量比は1以下であり、MSF-24P(S)型の蓋部の変形量は落下試験モデルに比べ小さい。したがって、MSF-24P(S)型は、落下試験モデルに比べて高い密封性能を有している。

別紙2-1表 傾斜落下時の蓋部の変形量評価結果

部位 ^(注1)	変形モード	荷重比 ^(注2)	剛性比 ^(注2)	変形量比 ^(注2)
一次蓋	曲げ	0.51	1.58	0.32
一次蓋ボルト	引張	0.51	0.98	0.52
	曲げ	0.51	0.98	0.52
二次蓋	曲げ	0.41	3.86	0.11
二次蓋ボルト	引張	0.41	0.86	0.48
	曲げ	0.41	0.86	0.48
貯蔵用三次蓋	曲げ	0.50	0.55	0.90
貯蔵用三次蓋ボルト	引張	0.50	1.00	0.50
	曲げ	0.50	1.41	0.35
胴フランジ (二次蓋側)	曲げ	0.76	1.16	0.65
胴フランジ (貯蔵用三次蓋側)	曲げ	0.76	1.25	0.61

(注1) 部位は、MSF-24P(S)型の各部位を示す。

(注2) 荷重比、剛性比及び変形量比は全て、落下試験モデルに対するMSF-24P(S)型の比を示す。

MSF キャスクの落下試験について

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（実機大モデル）による落下試験結果について説明する。

1. 試験目的

本試験は、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て 9.3 m 落下試験（垂直及び傾斜）を実施し、容器の胴及び蓋に取り付けた加速度計によりデータを取得するとともに、落下後の緩衝体の変形量等を測定した。

2. 試験項目

(1) 頭部垂直落下

9.3 m の高さから落下試験モデル頭部を下側にして、垂直姿勢にて落下させた。

(2) 傾斜落下

9.3 m の高さから 10 ° 傾斜させた状態で水平方向に落下させる。なお、底部側が一次衝突、頭部側が二次衝突するよう傾斜させ、落下させた。

3. 試験装置

(1) 落下試験モデル

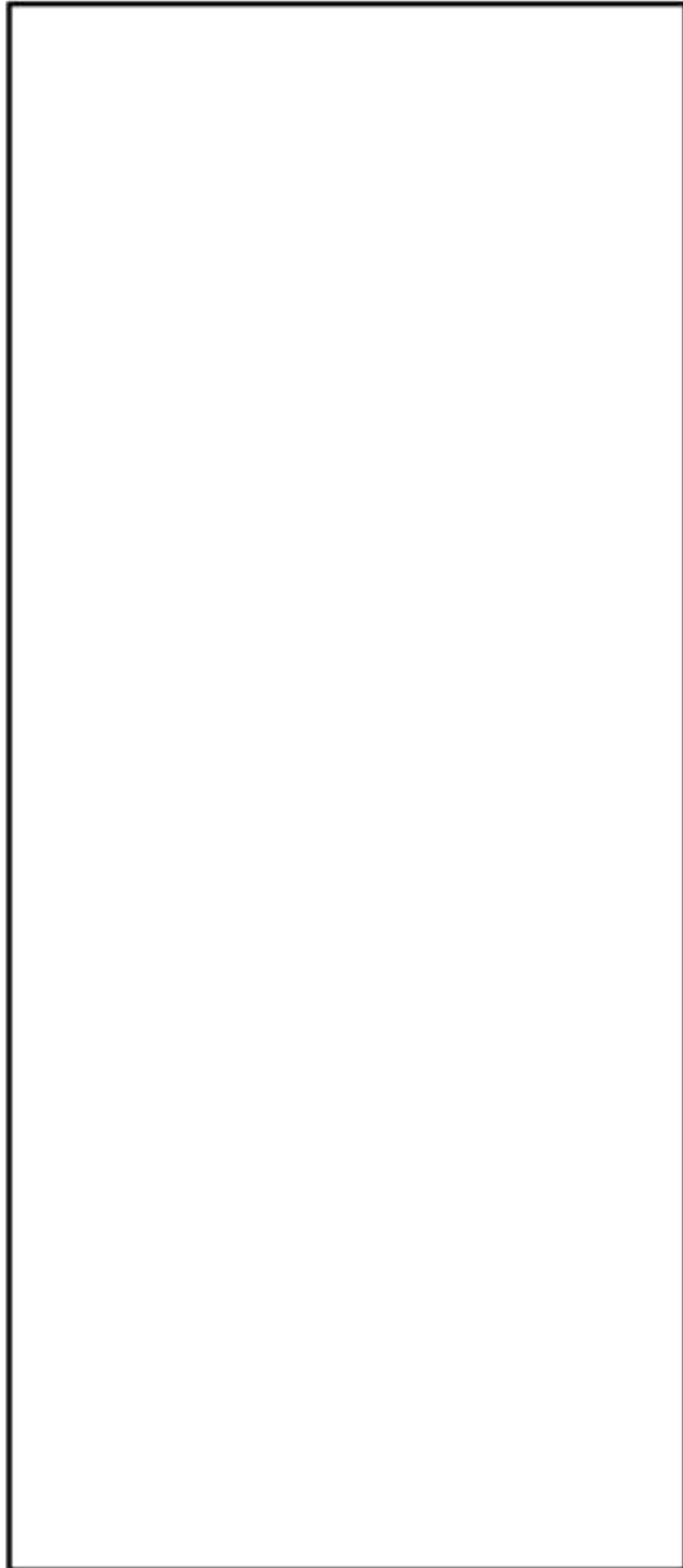
落下試験モデルは、BWR 燃料集合体を 69 体収納する設計である。本体は、胴（鍛造材）、中性子遮蔽材及び外筒（炭素鋼）から構成され、胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。

蓋部は、一次蓋と二次蓋の二重構造とし、本体胴フランジに、金属ガスケットを取り付けた一次蓋及び二次蓋をボルトにより締結することで密封性を維持する構造としている。

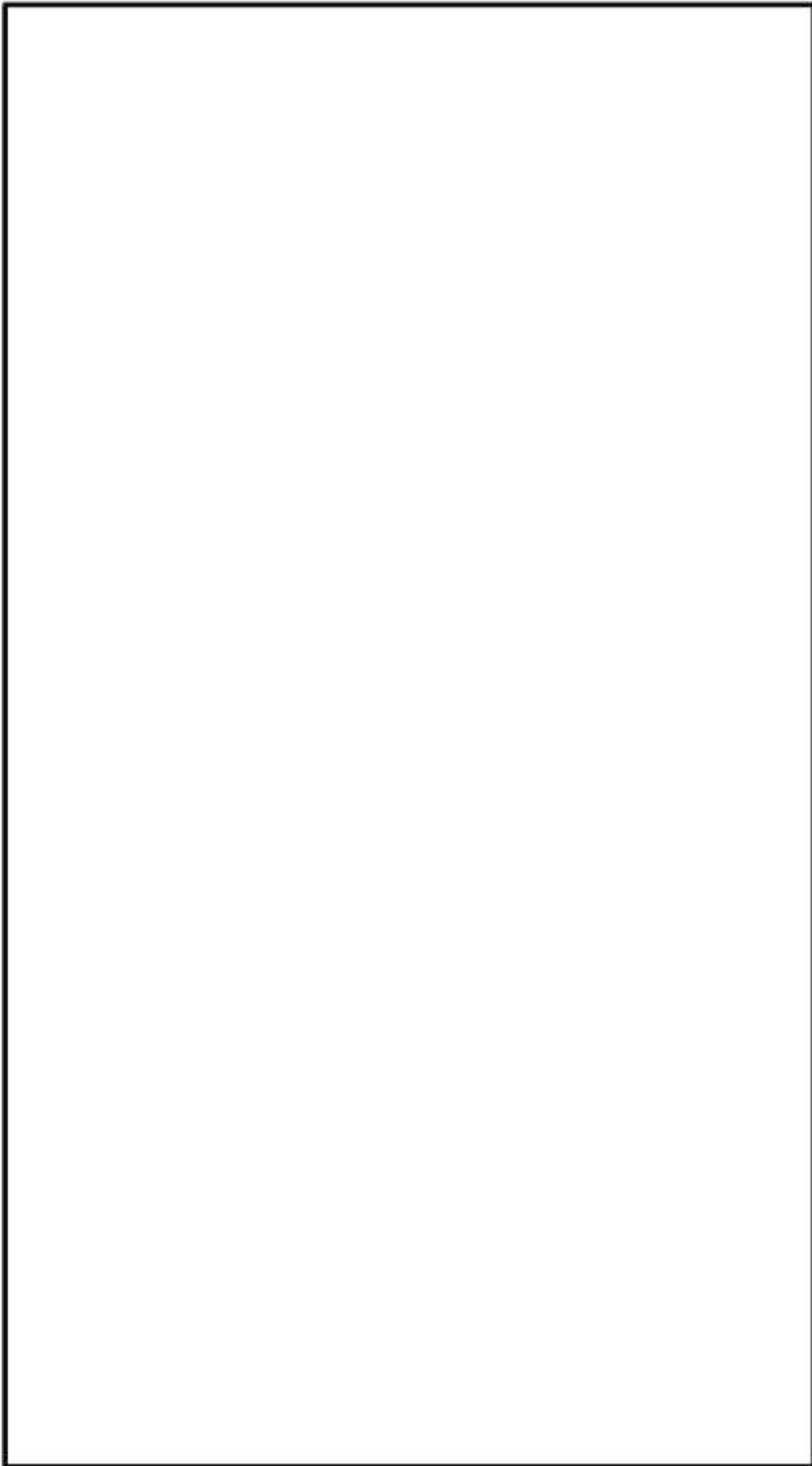
バスケットはアルミニウム合金の角パイプからなる構造とし、キャビティ内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造としている。落下試験時には、独立した 69 個のバスケットセルに燃料集合体を模擬した重量体を挿入した。

材質は基本的に実機と同じ又は相当材である。また、胴内、一二次蓋間は計装配線の関係から開放されており、大気圧である。

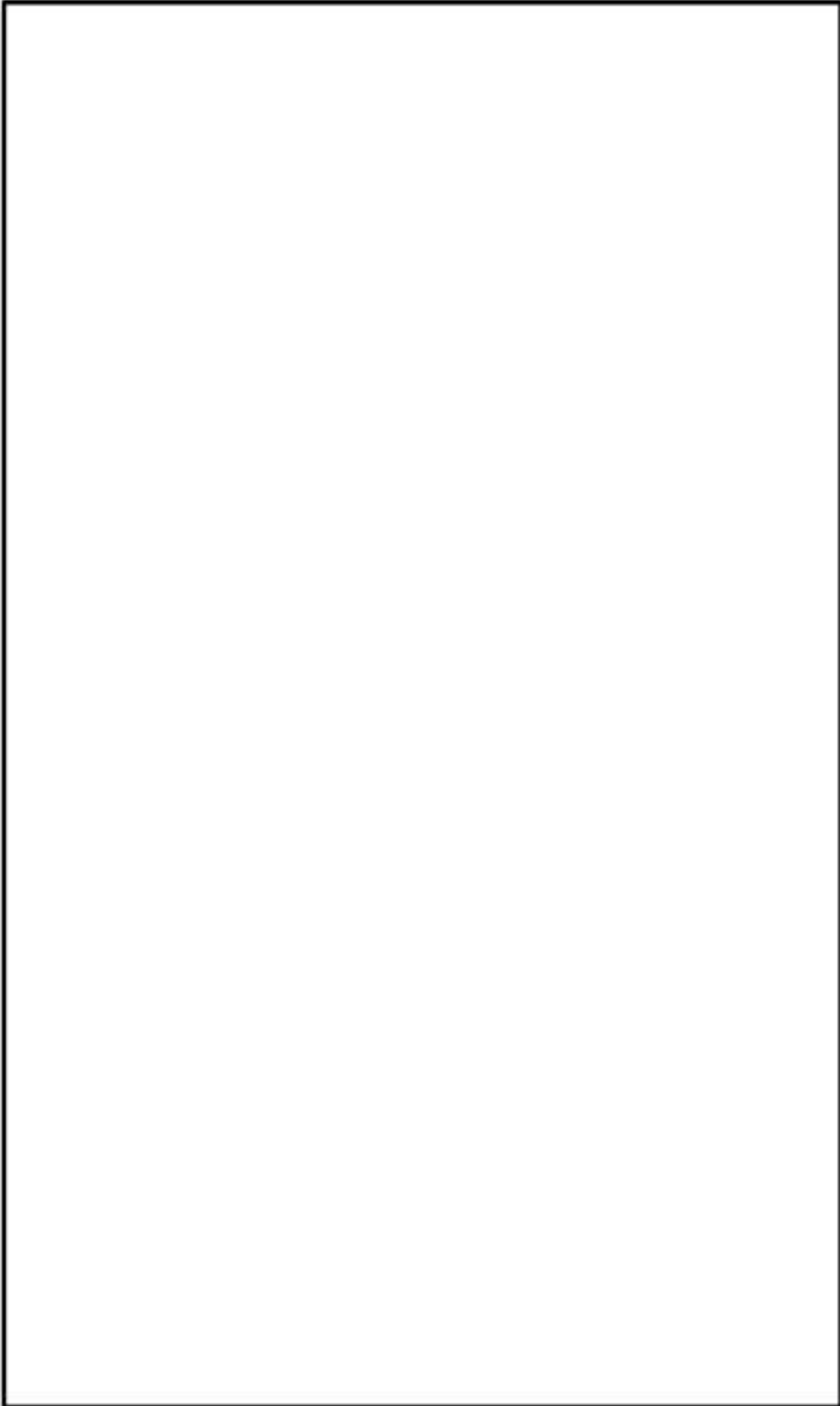
落下試験モデルの概要図を別紙 2 - 3 図～別紙 2 - 7 図に示す。



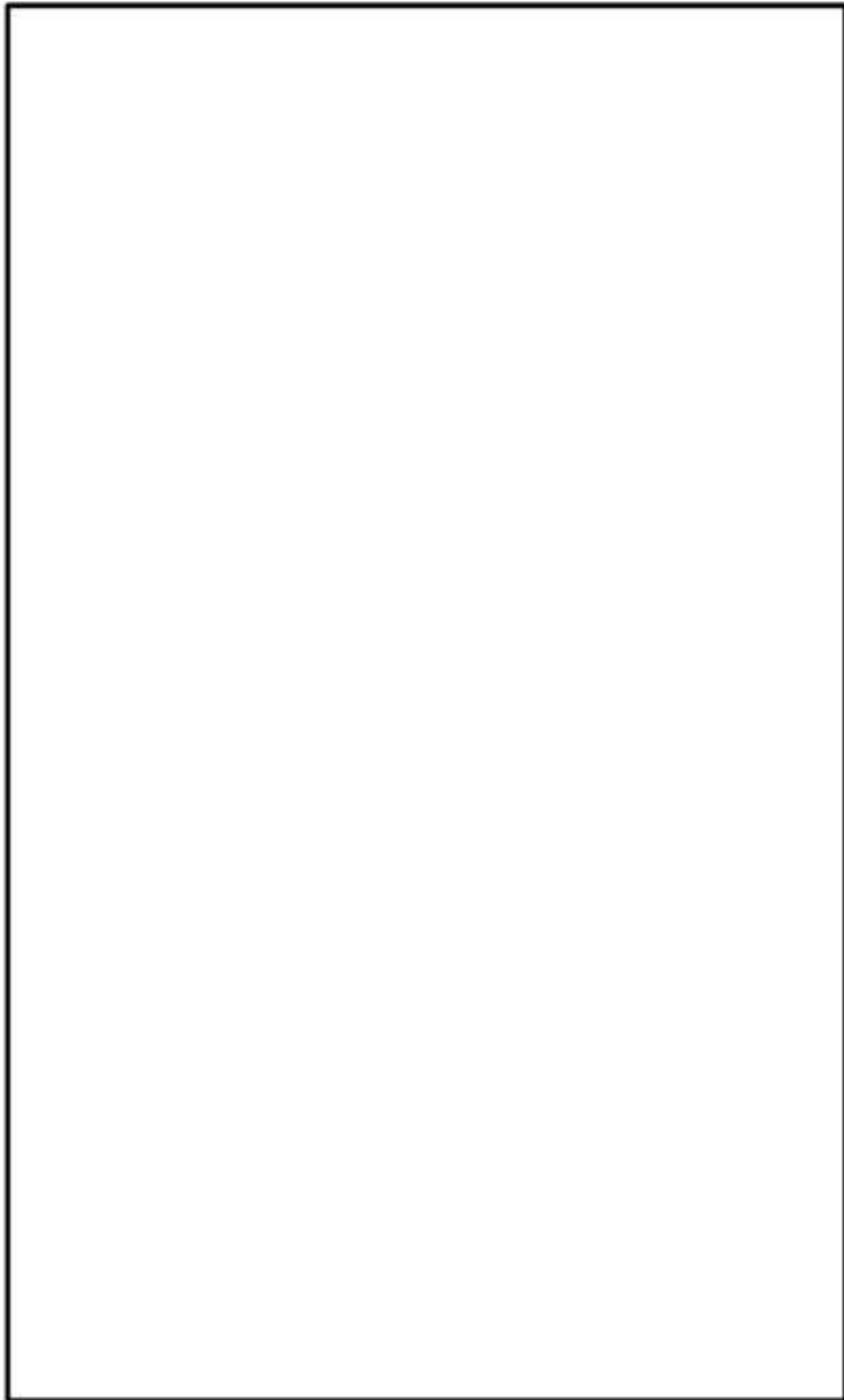
別紙2-3図 落下試験モデル全体図



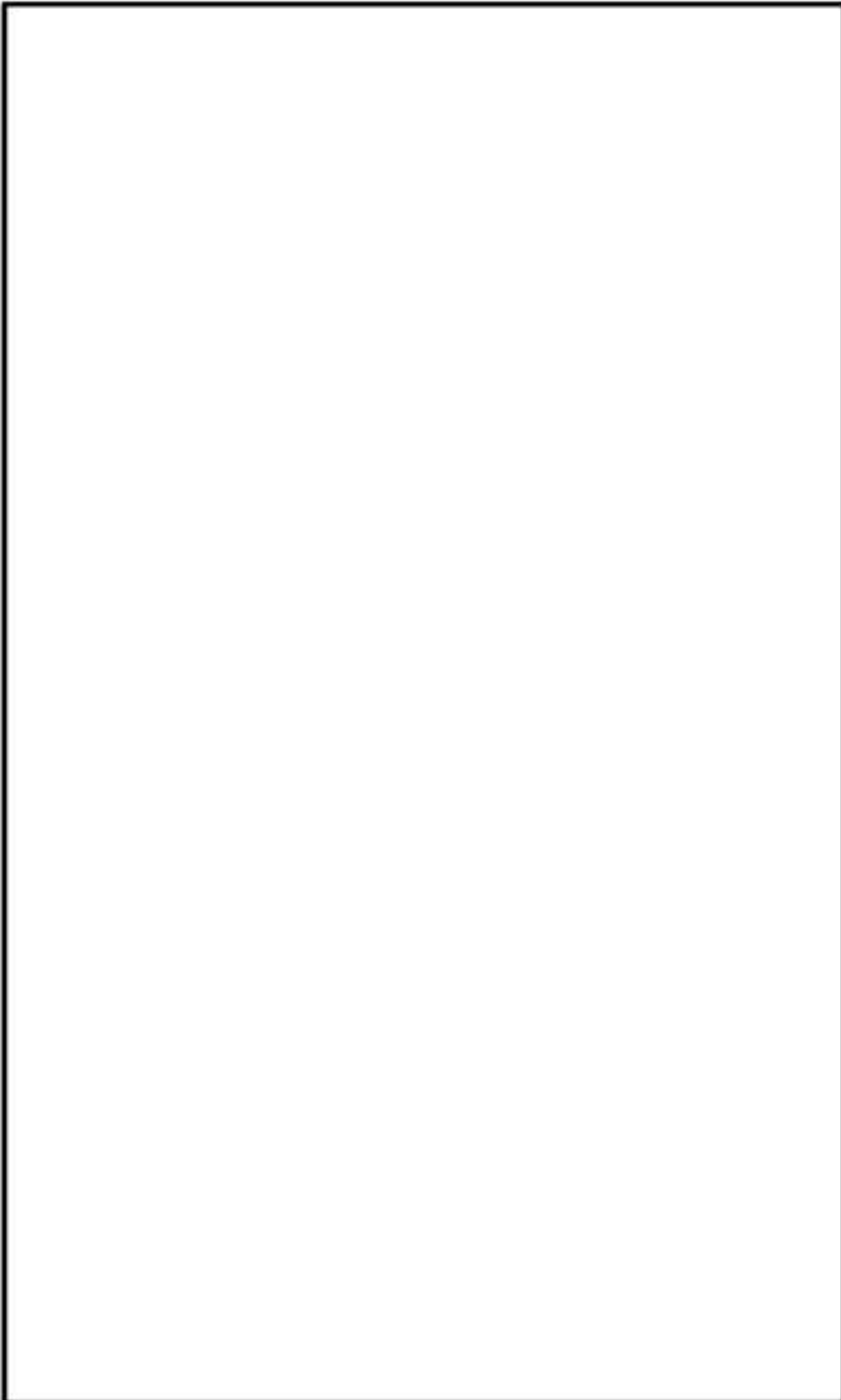
別紙2-4図 一次蓋（落下試験モデル）



別紙2-5図 二次蓋（落下試験モデル）



別紙2-6図 上部緩衝体（落下試験モデル）



別紙2-7図 下部緩衝体（落下試験モデル）

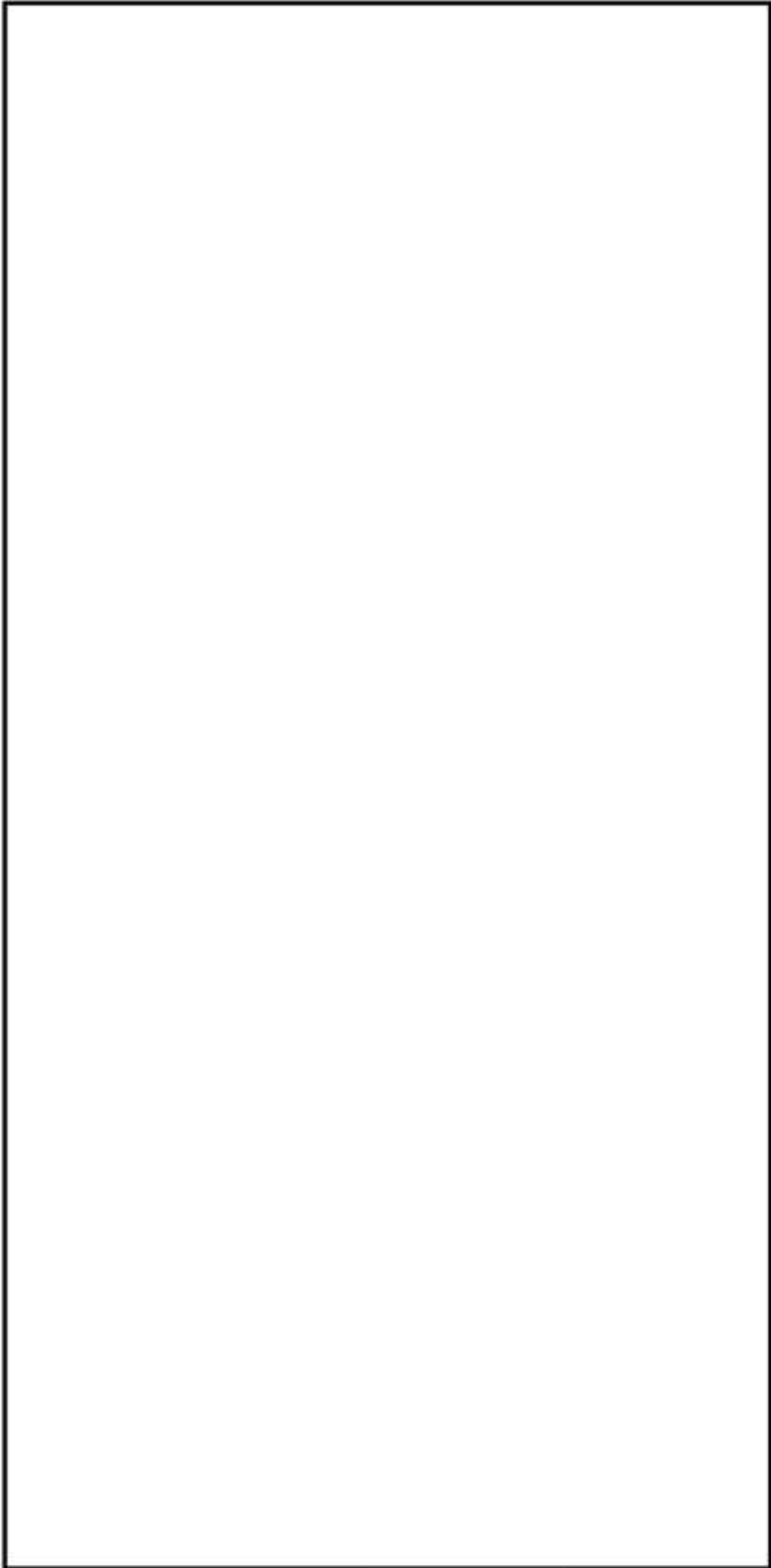
(2) 測定項目及び測定方法

a. 測定項目

落下試験モデルを用いた落下試験において測定した主な測定項目と測定部位及び測定器等について別紙2-2表に示す。また、加速度計及びひずみゲージの取付位置を別紙2-8図に示す。

別紙2-2表 落下試験における主な測定項目

測定項目	測定部位	測定器等
緩衝体変形量	上部・下部緩衝体	スケール
加速度	胴、一次蓋、二次蓋	加速度計
ひずみ (参考値)	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	ひずみゲージ
蓋の横ずれ (参考値)	一次蓋、二次蓋	隙間ゲージ デプスゲージ



別紙2-8図 加速度計及びびびり計の取り付け位置

4. 試験結果

(1) 頭部 9.3 m 垂直落下

別紙 2-9 図に頭部 9.3 m 垂直落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に頭部 9.3 m 垂直落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

別紙 2-3 表に緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

別紙 2-10 図に胴中央の加速度履歴を示す。別紙 2-4 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量 (参考値)

別紙 2-5 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋については蓋の横ずれが確認され、横ずれ量は最大 0.24 mm であった。二次蓋については、蓋の横ずれは生じなかった。

d. ボルトに作用する応力 (参考値)

別紙 2-6 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率 (参考値)

別紙 2-7 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 (5×10^{-4} Pa m³/s [= 5×10^{-3} ref cm³/s]) を満足した。また、二次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。

別紙2-3表 9.3 m 頭部垂直落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	259	<input type="text"/>

別紙2-4表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	59
胴上部 (180°)	落下方向	63
胴中央	落下方向	72
一次蓋	落下方向	448
二次蓋	落下方向	533

別紙2-5表 9.3 m 頭部垂直落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

部位	位置	横ずれ量 ^(注1) (mm)
一次蓋	0°側	-0.24
	90/270°側	0.02 / -0.15
	180°側	-0.04
二次蓋	0°側	0.0
	90/270°側	0.0 / 0.0
	180°側	0.0

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

別紙2-6表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大応力 (参考値)

部位	位置	応力成分	最大応力 ^(注1) (MPa)	基準値 ^(注2) (MPa)
一次蓋ボルト	0°側	膜	468	890
		曲げ	164	890
	90°側	膜	508	890
		曲げ	216	890
	180°側	膜	413	890
		曲げ	201	890
二次蓋ボルト	0°側	膜	-29	890
		曲げ	14	890
	90°側	膜	-27	890
		曲げ	11	890
	180°側	膜	-50	890
		曲げ	32	890

(注1)膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT)とした。

別紙2-7表 9.3 m 頭部垂直落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
一次蓋	1.0×10^{-8}	3.9×10^{-6}
二次蓋	2.0×10^{-11}	1.7×10^{-11}

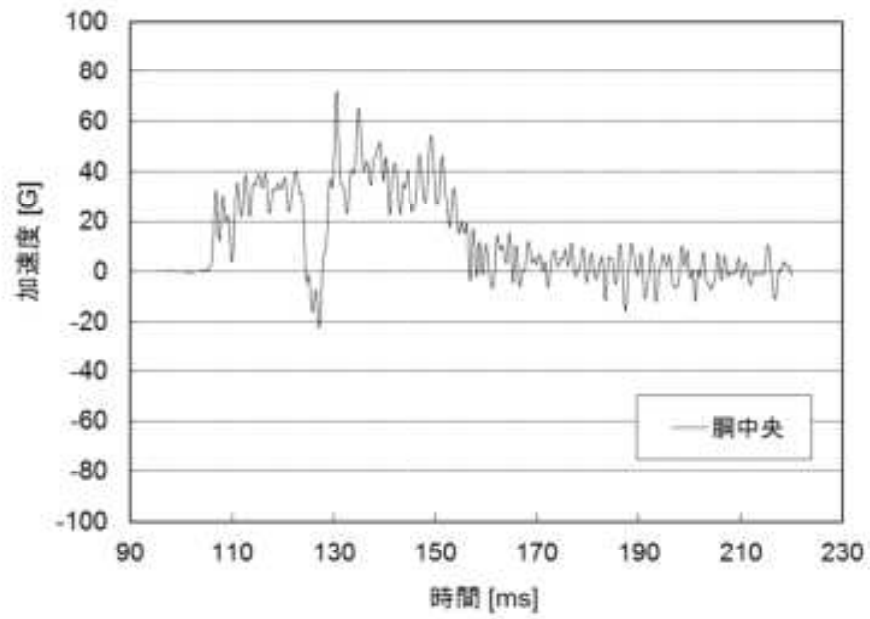


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

別紙2-9図 9.3 m 頭部垂直落下試験時の落下試験モデル写真



別紙2-10図 9.3 m 頭部垂直落下時の落下方向加速度履歴

(2) 9.3 m 傾斜落下

別紙 2-11 図に 9.3 m 傾斜落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に 9.3 m 傾斜落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

別紙 2-8 表に各緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

別紙 2-12 図に胴上部、胴中央及び胴下部の加速度履歴を示す。別紙 2-9 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量 (参考値)

別紙 2-10 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋及び二次蓋ともに落下側及び反落下側のずれ量が大きく、最大の横ずれ量は一次蓋の落下側の 0.81 mm であった。

d. ボルトに作用する応力 (参考値)

別紙 2-11 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率 (参考値)

別紙 2-12 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。二次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 ($5 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ [$=5 \times 10^{-3} \text{ ref cm}^3/\text{s}$]) を満足した。

別紙2-8表 9.3 m 傾斜落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	253	□
下部緩衝体	174	

別紙2-9表 9.3 m 傾斜落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	150
胴中央	落下方向	85
胴下部	落下方向	77
一次蓋	落下方向	149
二次蓋	落下方向	148

別紙2-10表 9.3 m 傾斜落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

部位	位置	横ずれ量 ^(注1) (mm)
一次蓋	落下側	-0.81
	側面	0.14 / 0.21
	反落下側	-0.07
二次蓋	落下側	0.09
	側面	0.02 / -0.01
	反落下側	-0.79

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

別紙2-11表 9.3 m 傾斜落下時の最大応力 (参考値)

部位	位置	応力成分	最大応力 ^(注1) (MPa)	基準値 ^(注2) (MPa)
一次蓋ボルト	反落下側	膜	-5	890
		曲げ	4	890
	側面	膜	3	890
		曲げ	21	890
	落下側	膜	74	890
		曲げ	82	890
二次蓋ボルト	反落下側	膜	-14	890
		曲げ	141	890
	側面	膜	-18	890
		曲げ	181	890
	落下側	膜	178	890
		曲げ	243	890

(注1)膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、S_y(RT)とした。

別紙2-12表 9.3 m 傾斜落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

部位	落下試験前 (Pa m ³ /s)	落下試験後 (Pa m ³ /s)
一次蓋	< 1×10 ⁻¹¹	< 1×10 ⁻¹¹
二次蓋	7.4×10 ⁻⁹	1.6×10 ⁻⁶

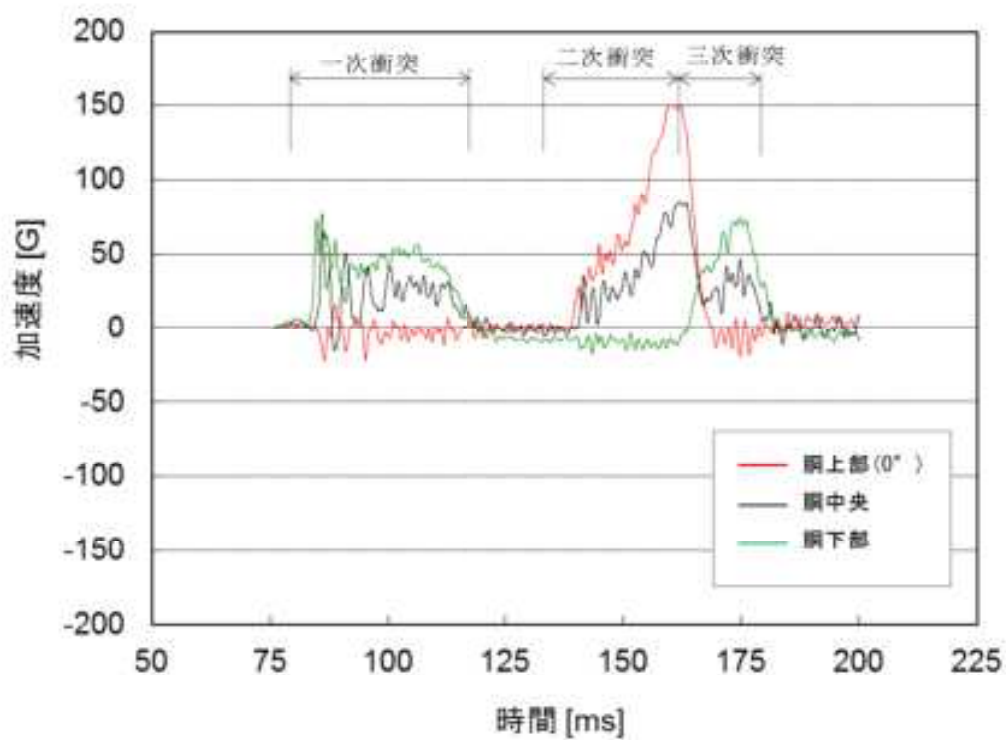


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

別紙2-11 図 9.3 m 傾斜落下試験時の落下試験モデル写真



別紙2-12図 9.3 m 傾斜落下時の落下方向加速度履歴

傾斜落下時の蓋部変形量評価の詳細

MSF-24P(S)型の傾斜落下時評価に使用する荷重は、各部位の質量及び落下時の衝撃加速度を用いて算出した。MSF-24P型及び実機大落下試験モデルの各部位質量を別紙2-13表に示す。また、傾斜落下時の衝撃加速度を別紙2-14表に示す。MSF-24P(S)型及び実機大落下試験モデルに対して、これらの質量及び衝撃加速度を用いて荷重を算出し、胴フランジ部、蓋部及び蓋ボルト部の荷重比を評価した。

以下に荷重比にあわせて剛性比及び変形量比の算出方法を記載する。

別紙2-13表 質量

項目	MSF-24P(S)型 (kg)	実機大 落下試験モデル (kg)
一次蓋	□	4,500
二次蓋		2,900
貯蔵用三次蓋		—
総質量	134,600	127,300

別紙2-14表 衝撃加速度

MSF-24P(S)型 (m/s ²) (注1)	実機大 落下試験モデル (m/s ²)
□	1451 (148 g) (注2)

(注1) 傾斜落下の衝撃加速度は、水平落下の衝撃加速度に対して、傾斜落下時の二次衝突時の加速度と水平落下の加速度比（落下試験により得られた値、1.6倍）を考慮した値を用いた。

(注2) 9.3m 傾斜落下試験時における二次蓋の最大加速度（別紙2-9表に示す計測値）

1. 寸法

MSF-24P(S)型及び実機大落下試験モデルの蓋密封部を構成する各部位(胴フランジ、蓋、蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、圧縮、オーバル変形)の剛性に影響する寸法及び数量を別紙2-15表に示す(構造図は別紙2-1図参照)。

別紙2-15表 寸法及び数量

部位	寸法/数量	MSF-24P(S)型	実機大 落下試験モデル
本体	[Blank area for dimensions and quantities]		
一次蓋			
二次蓋			
貯蔵用 三次蓋			

2. 縦弾性係数

MSF-24P(S)型及び実機大落下試験モデルの各部位の材質及び温度を別紙2-16表に示す。
また、別紙2-16表の条件より決定される各部位の縦弾性係数を別紙2-17表に示す。

別紙2-16表 材質及び温度

部位	MSF-24P(S)型		実機大 落下試験モデル	
	材質 (規格)	温度 (設計温度)	材質 (規格)	温度
胴フランジ				常温
一次蓋				
二次蓋				
貯蔵用三次蓋				
一次蓋ボルト				
二次蓋ボルト				
貯蔵用三次蓋ボルト				—

別紙2-17表 縦弾性係数

部位	MSF-24P(S)型	実機大 落下試験モデル
胴フランジ		
一次蓋		
二次蓋		
貯蔵用三次蓋		
一次蓋ボルト		
二次蓋ボルト		
貯蔵用三次蓋ボルト		

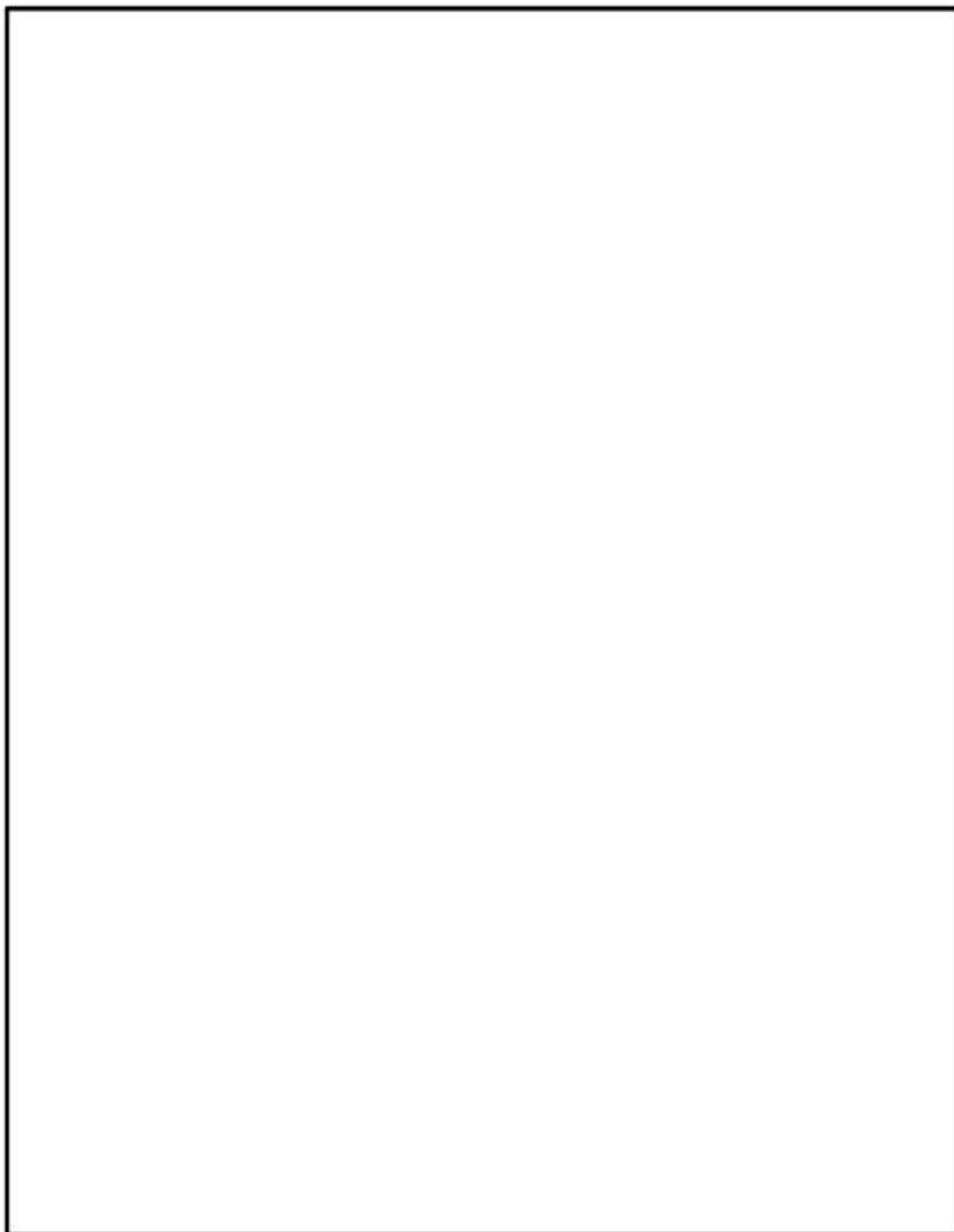
3. 傾斜落下時評価

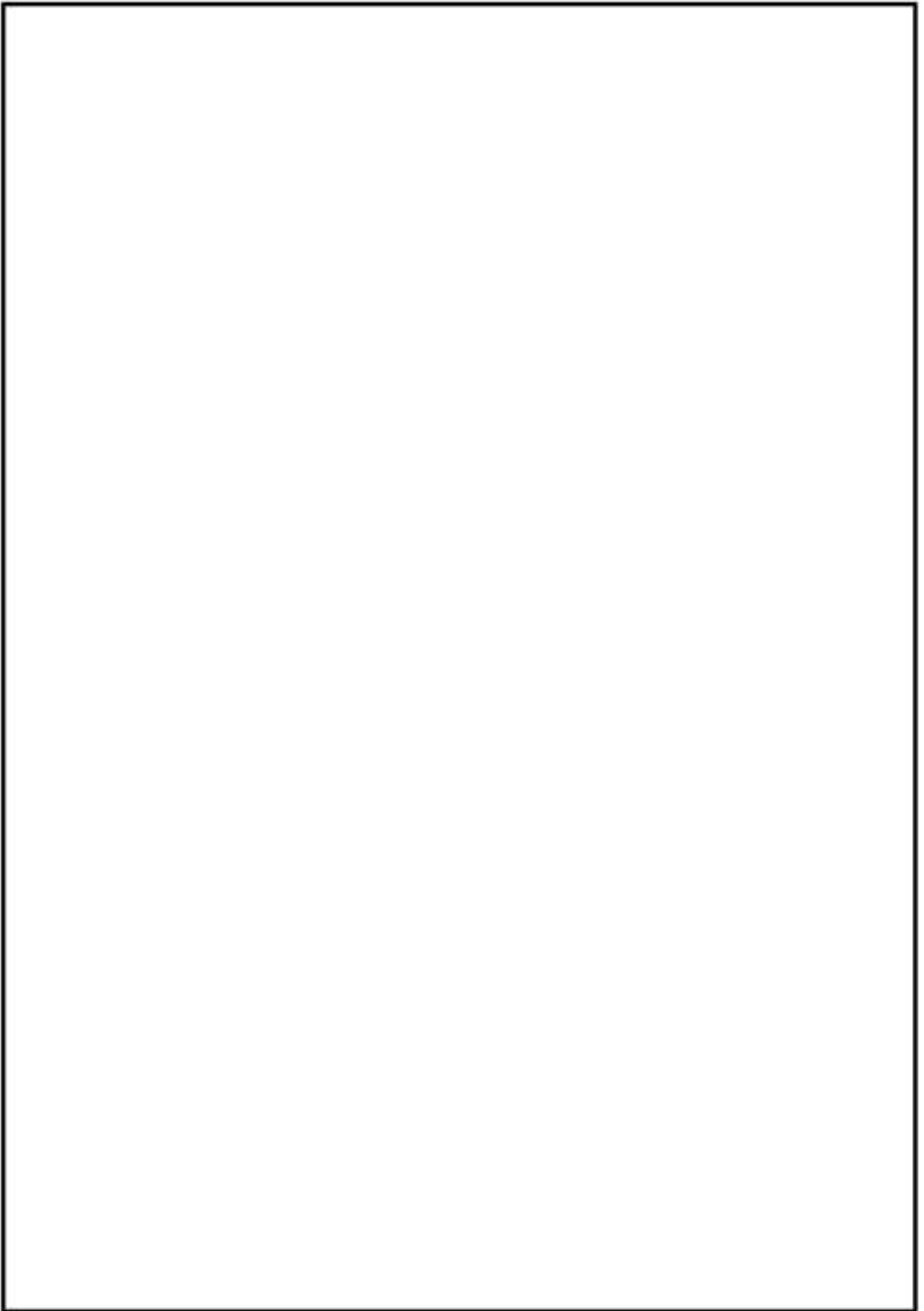
傾斜落下時には、胴フランジ及び蓋の曲げ変形、並びに蓋ボルトの引張及び曲げ変形が生じ、蓋密封部の漏えいを防止するためには、これらの変形を抑制する必要がある。したがって、胴フランジ、蓋及び蓋ボルトの変形について評価を行う。

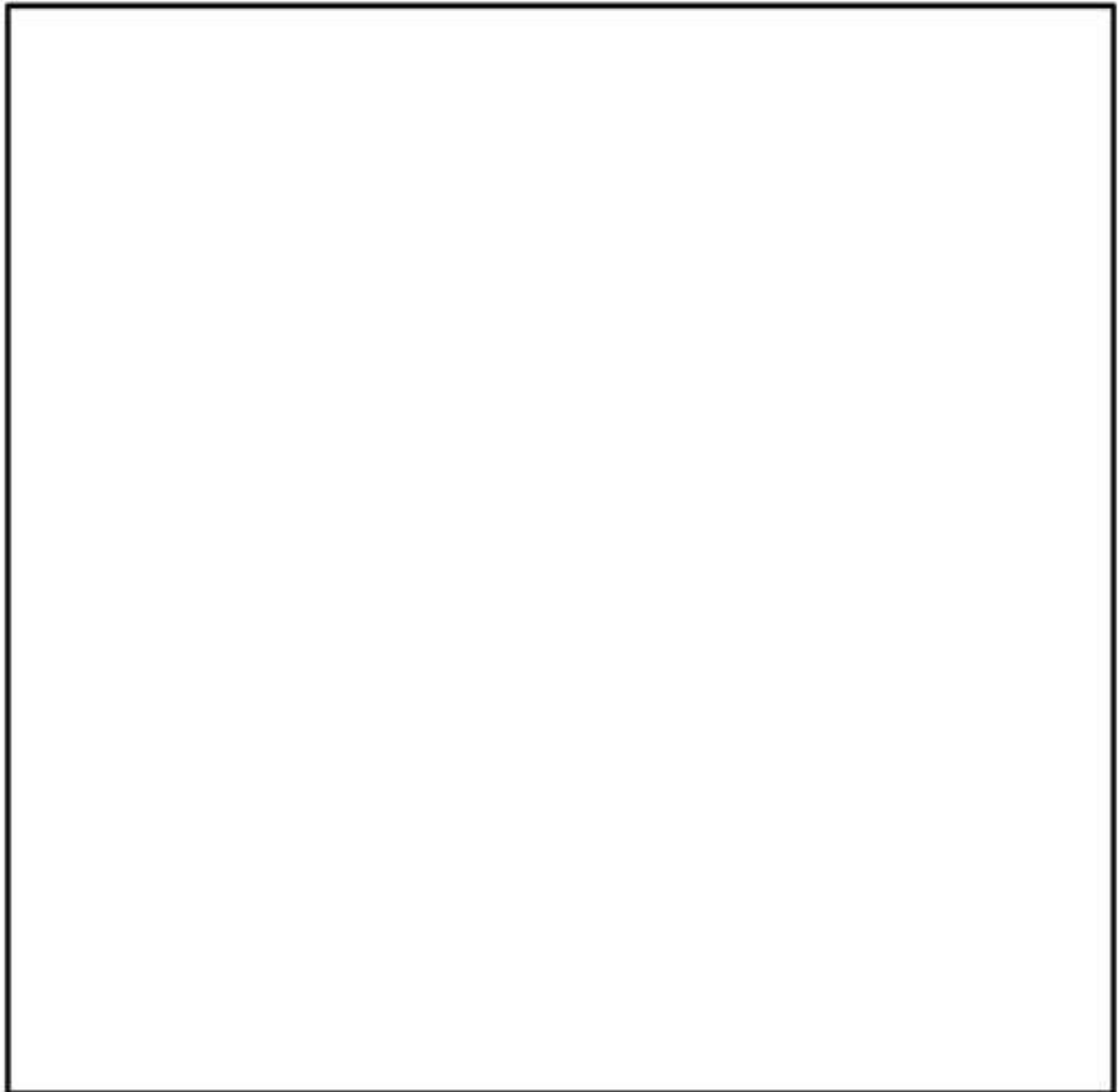
MSF-24P(S)型と実機大落下試験モデルとの各部の荷重比、剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。

a. 胴フランジ部

胴フランジの曲げ変形に対する荷重比、剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。



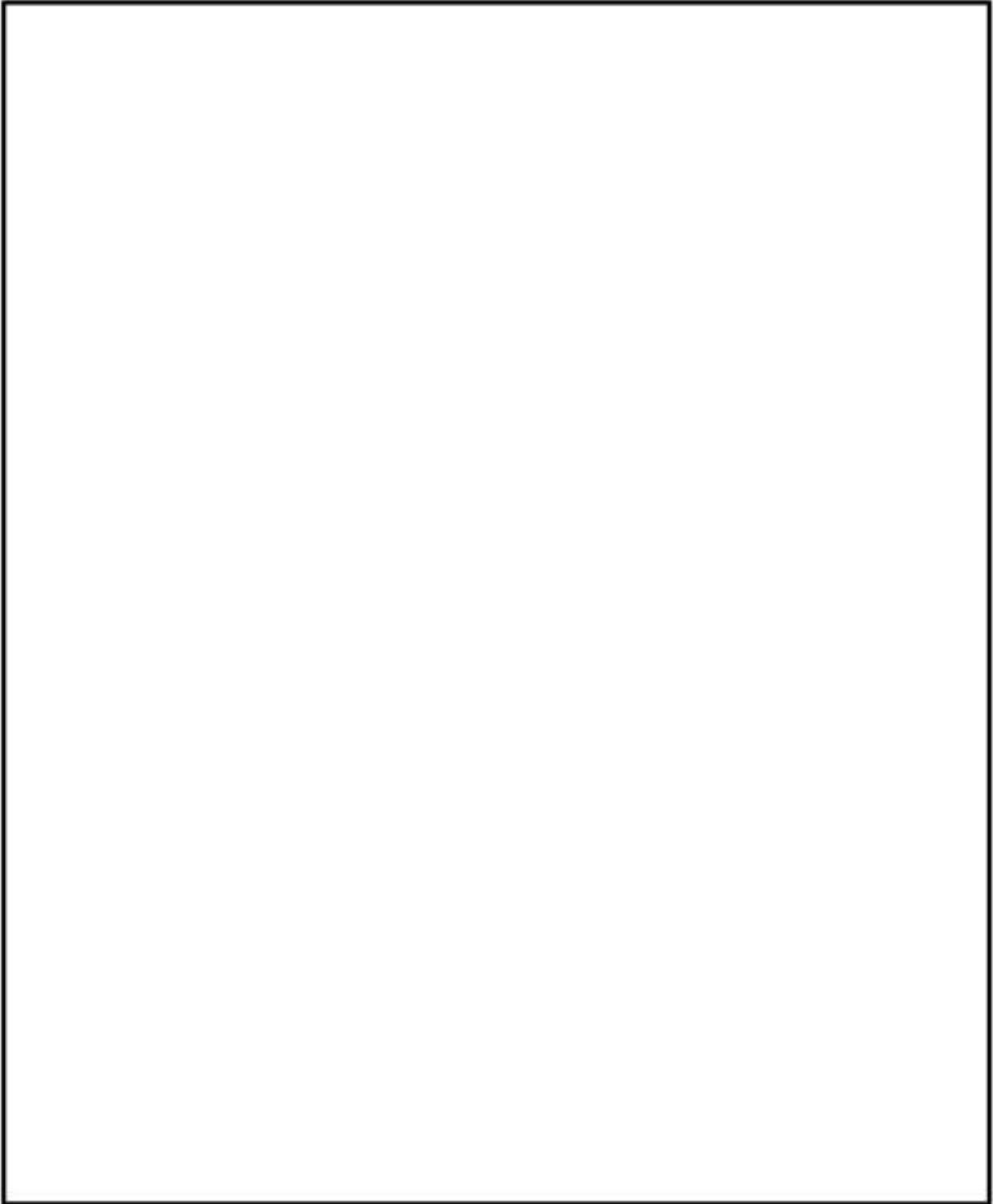


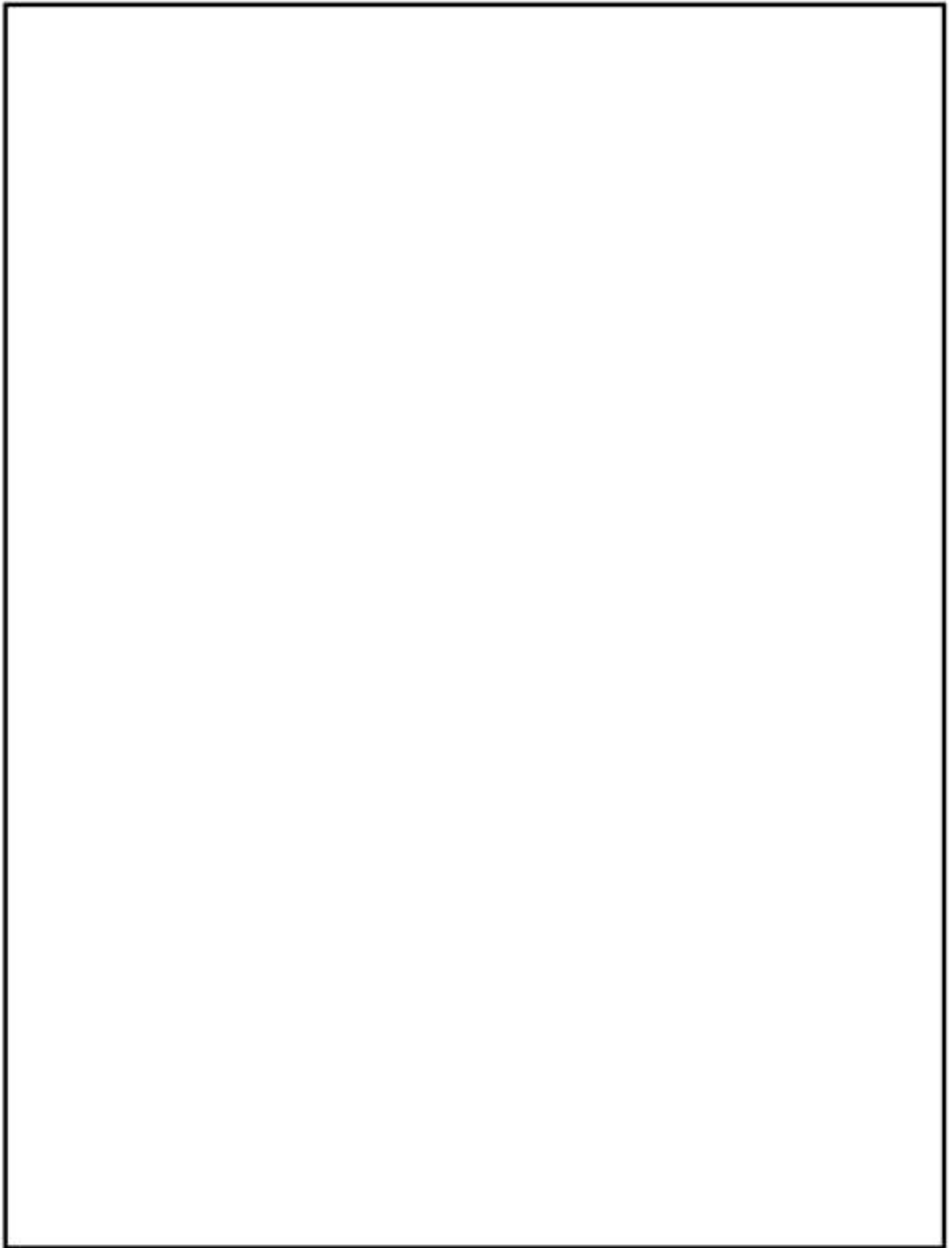


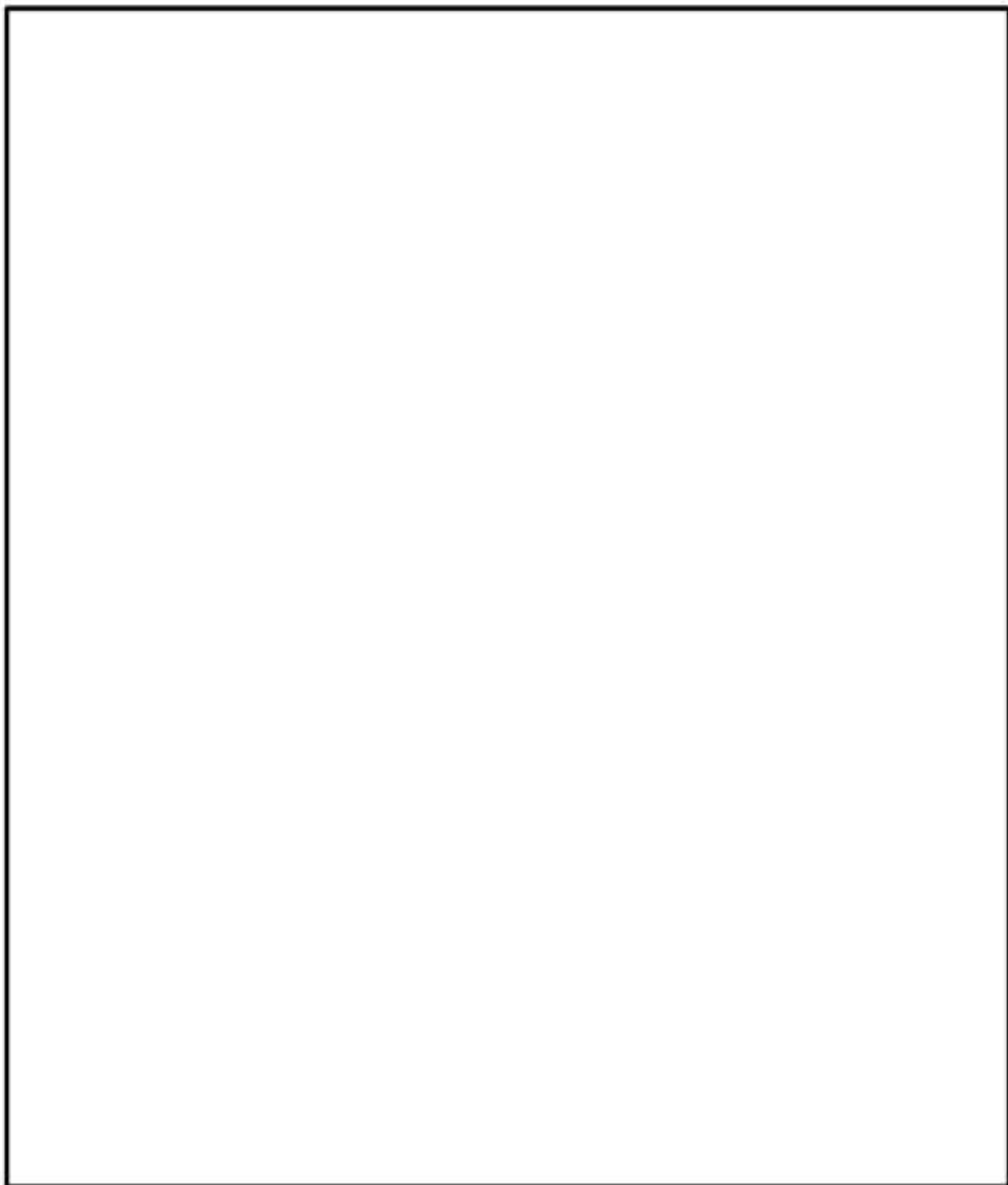
b. 蓋部

蓋の曲げ変形に対する荷重比、剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。



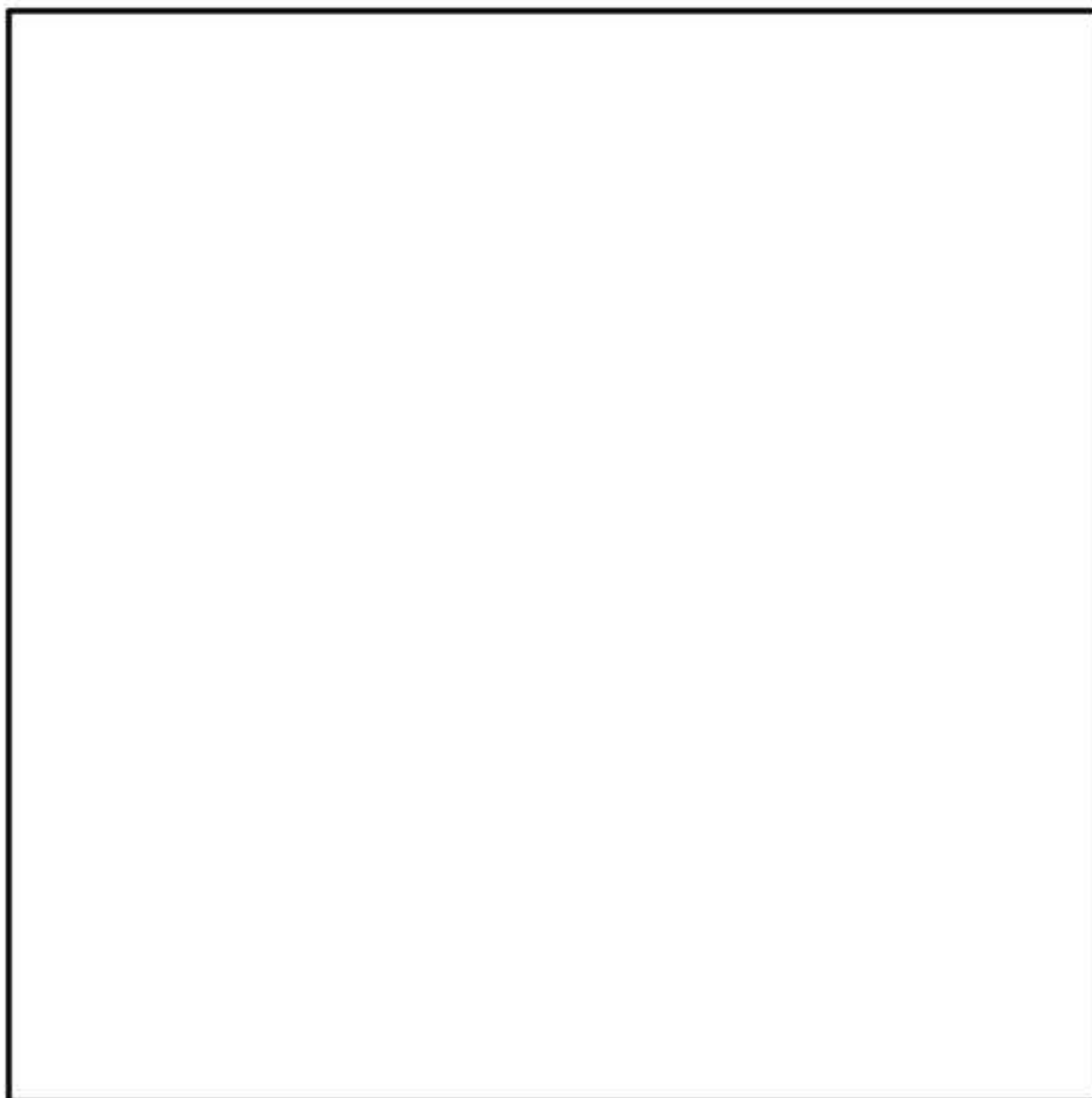


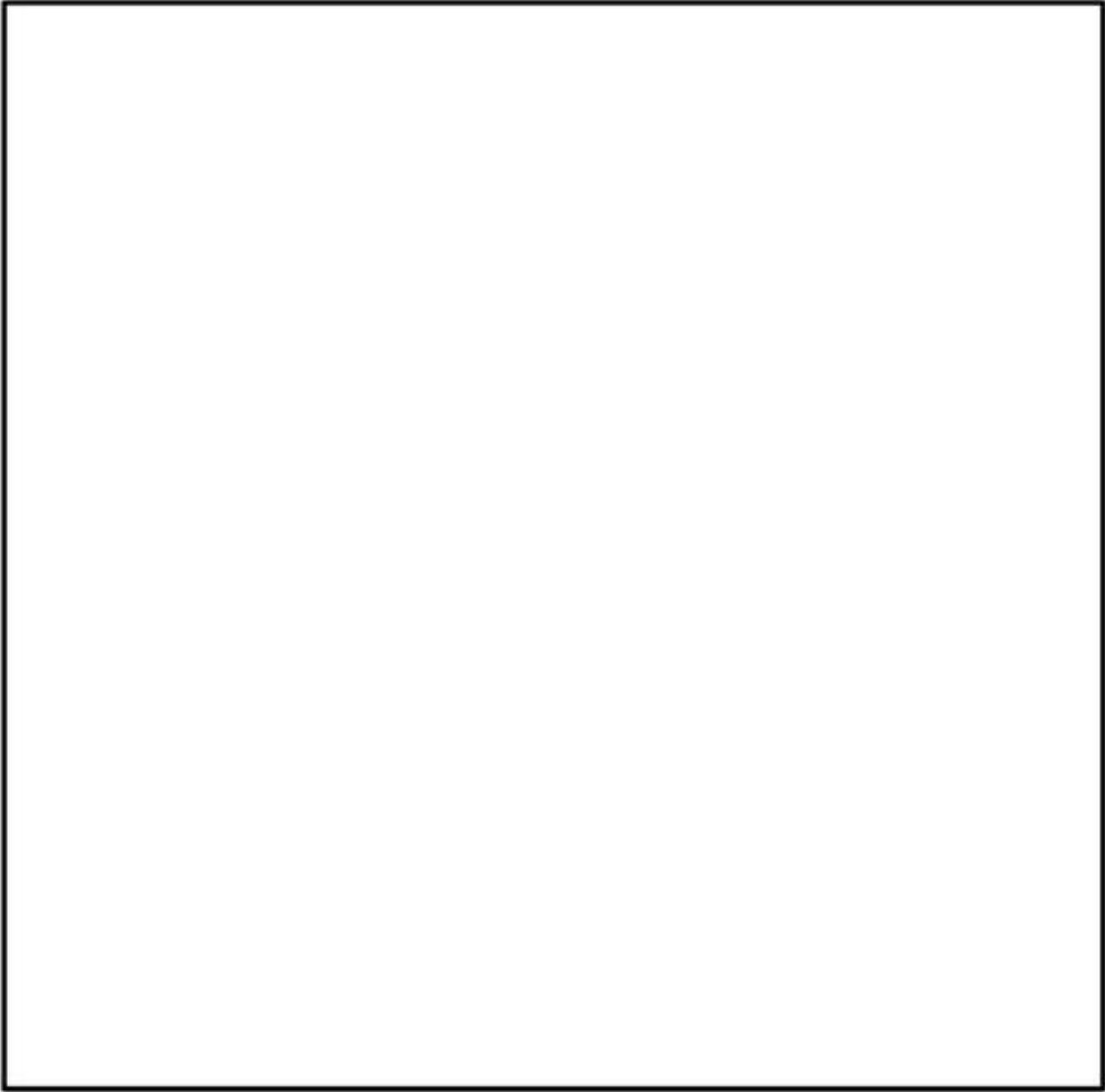


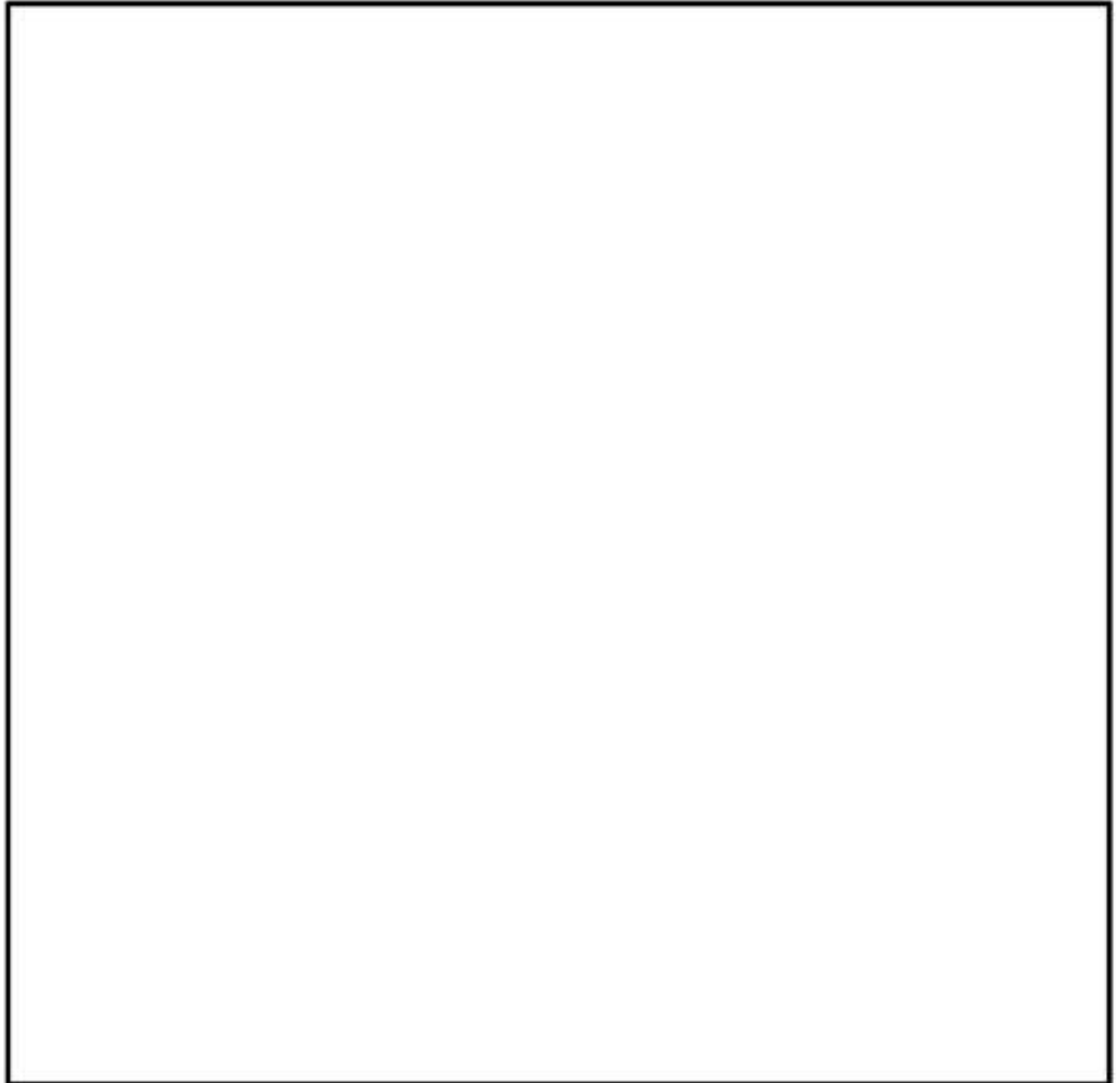


c. 蓋ボルト部

蓋ボルトの引張及び曲げに対する荷重比、剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。







(参考文献)

- (1) Warren C. Young, Richard G. Budynas, "Roark's Formulas For Stress and Strain Seventh edition", the McGraw-Hill Companies. (2002)
- (2) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 基礎編 α3 材料力学」, (2005).

使用済燃料の再取出性について

本別紙では、本書の本文に示す水平落下及び軸方向衝突が生じた際において使用済燃料の取出性に問題ないことを示す。

本書の本文7.（第13表）に示すとおり、水平落下時及び軸方向衝突時において、MSF-24P(S)型の蓋部は弾性範囲に留まる設計であることから、蓋の開放が可能である。また、別紙3-1表に示すとおり、水平落下時及び軸方向衝突時に燃料集合体の燃料被覆管に発生する荷重は、PWR照射済燃料棒を用いた動的衝撃試験において破断が確認されていない荷重に比べ十分小さいことから、燃料ペレットが燃料被覆管から脱落することはない。したがって、水平落下時及び軸方向衝突時に使用済燃料の再取出性に問題はない。

別紙3-1表 水平落下時及び軸方向衝突時に燃料棒に発生する荷重

事象	燃料棒に生じる荷重 ^(注1)	燃料棒の破損が確認されていない荷重 ^(注2)
水平落下	□	0.9 kN/mm
軸方向衝突	□	33 kN

(注1) 燃料棒に生じる荷重は以下のとおり算出される。

(1) 水平落下

落下方向最下部の燃料棒1本当たりに生じる単位長さあたりの荷重は以下の式で表される。

$$F = (W_f + W_c) \cdot n \cdot G_H$$

ここで、

F：落下方向最下部の燃料棒1本当たりに生じる単位長さあたりの圧縮荷重(N)

W_f：ペレット単位長さあたり質量(kg/mm)

$$= \square$$

W_c：被覆管単位長さあたり質量(kg/mm)

$$= \square$$

n：落下方向最下部の燃料棒を含め上部にある燃料棒の数量(本)

$$= 15(\text{本})$$

G_H：水平落下時衝撃加速度(m/s²) (内部収納物の加速度割増係数1.2を考慮)

$$= 780(\text{m/s}^2)$$

したがって、

$$F = \square$$

(2) 軸方向衝突

落下方向最下部の燃料棒 1 本あたりに生じる荷重は以下の式で表される。

$$F = m \cdot G_v$$

ここで、

F : 落下方向最下部の燃料棒 1 本あたりに生じる圧縮荷重 (N)

m : 燃料棒 1 本あたりの質量 (kg)

$$= \boxed{}$$

G_v : 軸方向衝突時衝撃加速度 (m/s^2)

$$= 600 (m/s^2)$$

したがって、

$$F = \boxed{}$$

(注 2) 出典は以下のとおり。

T. Hirose, M. Ozawa, A. Yamauchi, "Fuel Rod Mechanical Behaviour Under Dynamic Load Condition on High Burnup Spent Fuel of BWR and PWR", International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: An Integrated Approach to the Back-End of the Fuel Cycle, 15-19 June 2015, Vienna, Austria.

貯蔵用緩衝体を装着した MSF-24P(S) 型の安全機能評価 (例)

1. 概要

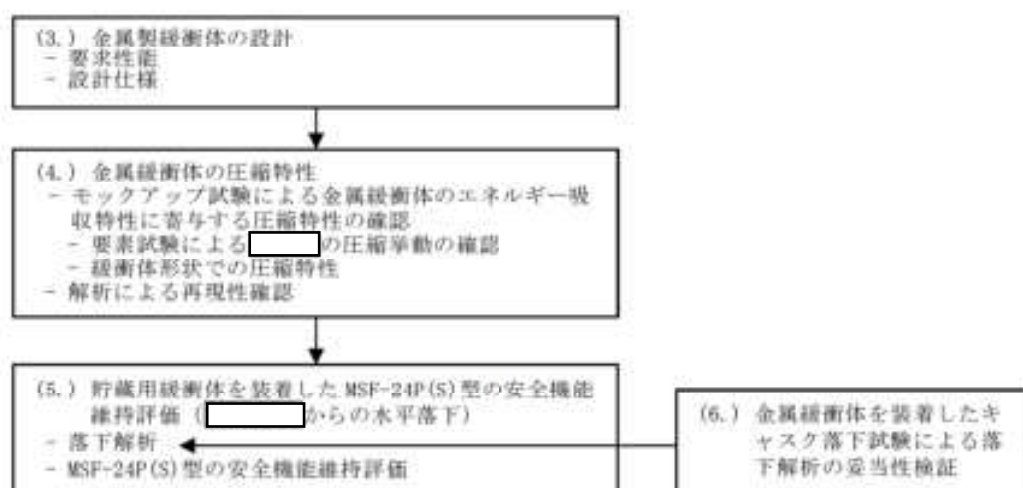
本別紙では、貯蔵用緩衝体として開発した金属製の貯蔵用緩衝体（以下「金属緩衝体」という。）の設計（例）及び性能検証を示すとともに、金属緩衝体を装着した状態における MSF-24P(S) 型の安全機能維持評価（例）を示す。

2. 検討方針

金属緩衝体の設計検討及び性能検証、並びに本金属緩衝体を装着した MSF-24P(S) 型の安全機能維持評価フローを別紙 4 - 1 図に示す。

金属緩衝体の要求性能、それを満足する構造、設計仕様を 3. で示した上で、金属緩衝体の圧縮特性について 4. で考察する。4. では、金属緩衝体の要素体として [] と圧縮挙動の関係について調査し、これを基に構造体としての金属緩衝体の圧縮特性を試験及び解析を用いて確認する。5. では、4. で確認された解析手法を用いて金属緩衝体を装着した MSF-24P(S) 型の想定高さ [] からの水平落下時に特定兼用キャスク本体に作用する荷重を落下解析で評価し、MSF-24P(S) 型の安全機能維持について評価する。

最後に、6. において、金属緩衝体を装着したキャスクの落下試験により解析による落下解析の妥当性を検証する。



別紙 4 - 1 図 貯蔵用緩衝体の設計検討及び性能検証、並びに貯蔵用緩衝体を装着した MSF-24P(S) 型の安全機能維持評価フロー

3. 金属緩衝体の設計

3.1 要求性能

貯蔵用緩衝体は、貯蔵施設での貯蔵状態における想定事象に対し、特定兼用キャスクの4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能、閉じ込め機能）を維持するために、想定事象において特定兼用キャスクに作用する荷重が、本書の本文3.2に示す、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件以下とする必要がある。

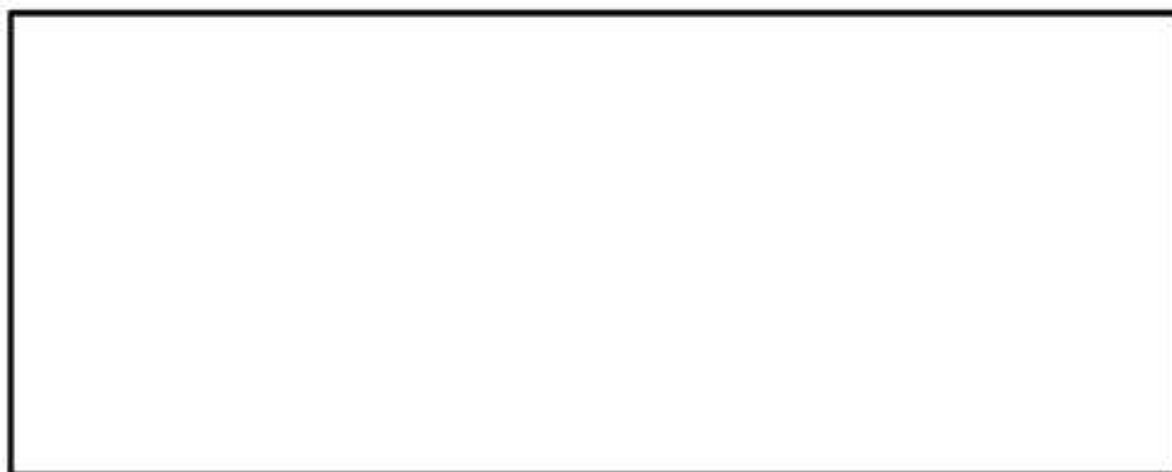
ここでは、MSF-24P(S)型の貯蔵状態における想定事象として、貯蔵状態にあるMSF-24P(S)型が高さ []（例）から床面に落下する事象を想定し、水平落下時に特定兼用キャスクに作用する荷重が、上記の荷重条件を満足することを性能要求とする。

3.2 貯蔵用緩衝体の仕様

性能要求を満足させるように設計した金属緩衝体の仕様（例）を以下に示す。

(1) 構造

金属緩衝体の形状を別紙4-2図に示す。金属緩衝体を構成する緩衝材は、内径 [] []、外径 []、厚さ []の []に、 [] []構造である。金属緩衝体は、特定兼用キャスクの両端にボルトで取付けられる。また、金属緩衝体は [] []が設置されており、特定兼用キャスク本体とは、 []で取り合う。



別紙4-2図 MSF-24P(S)型の金属緩衝体形状（例）

(2) 材料

金属緩衝体の使用環境として、MSF-24P(S)型に収納される使用済燃料の崩壊熱により、最高温度が約 100℃となること、及び設計貯蔵期間（60 年）中、連続して使用される可能性があることを踏まえ、緩衝材の材料として、エネルギー吸収性能が高く、耐熱劣化性及び耐食性を有する [] を使用する。 [] が小さい [] として、加工性、入手性等も考慮の上、 [] を用いる。

4. 金属緩衝体の圧縮特性

4.1 [] の圧縮挙動

(1) [] の形状

緩衝材として適する [] について考察することを目的として、 [] [] に着目し、別紙 4-3 図に示す 6 案の要素体を基に圧縮特性の傾向を調査した。 [] については、 [] とした。 [] については [] [] と、 [] の 2 種類を、また、 [] として設定し、それぞれ [] の要素体で検討を実施した。



別紙 4-3 図 圧縮特性の傾向を調査した [] 形状（要素体）

(2) 解析による考察

別紙 4-3 図に示した要素体に静的に圧縮荷重を付与した際の挙動を FEM 解析 (LS-DYNA コード) で確認した。解析モデルには、6 面体ソリッド要素を使用し、材料特性は、 [] [] を入力した。解析では、要素体の下面を剛

壁で支持し、上面を剛体平面で下方向に相対変位を与えた。解析により得られた各要素体の荷重－変位特性を別紙4－4図に、変形及び応力分布図を別紙4－5図に示す。

なお、別紙4－5図は、圧縮挙動を考察するにあたり、特徴のあるNo.2、No.3、No.5及びNo.6のケースのみを表示した。

緩衝材は、大きな荷重を発生させずにひずみエネルギーを蓄えられることが理想であり、適度な荷重を維持しつつ変形が進む（荷重－変位曲線にプラトーな領域を持つ）特徴を有することが好ましい。別紙4－4図に示すとおり、全般的に[]の方が荷重は低く、さらに、[]

[]が確認できる。これは、別紙4－5図から、[]

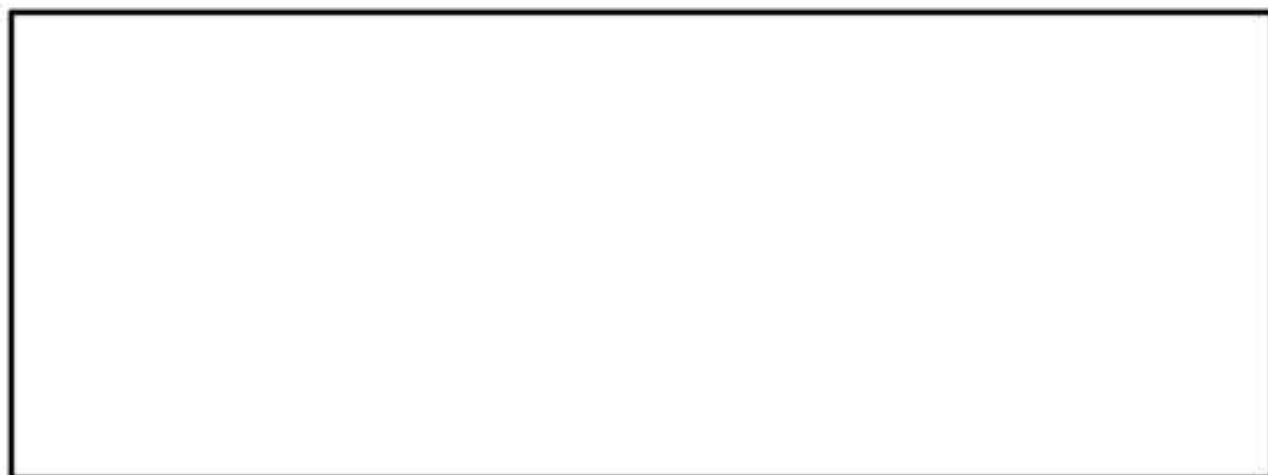
[]

[]

[]また、

[]

[]と考えられる。



別紙4－4図 解析による要素体の荷重－変位特性



別紙4-5図 解析による要素体の変形状態及び応力分布

(3) 試験による考察

解析により得られた結果を踏まえ、比較的小さい荷重で変形が進んだ No. 2、No. 3 及び No. 6 を対象とし、要素体の圧縮試験を実施した。別紙4-3図に示した要素体の形状を基に、で供試体を作成し、別紙4-6図に示す圧縮試験機を用い、供試体の上下面を支持した上で、鉛直方向に荷重を付与した。室温状態において、準静的な条件としてひずみ速度 10 mm/min で圧潰し、変位と荷重を計測した。

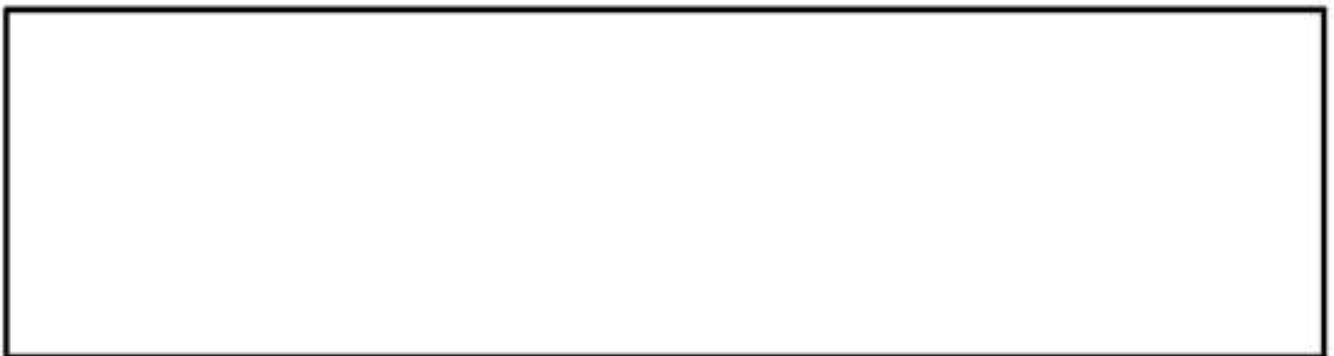
試験後の試験片の変形状態を別紙4-7図に、試験により得られた荷重と変位の関係を別紙4-8図に示す。試験は各ケース3回ずつ実施し、別紙4-8図中には(2)で実施した解析結果(別紙4-4図)も併せて示す。3回の試験からは再現性を有しており、また荷重を付与することによって一部分が完全に塑性変形又は崩壊し、局所的に荷重が低下する点が確認できる。No. 2 及び No. 3 のでは、全般的に試験により得られた荷重は、解析より若干荷重が低い傾向があるものの両者の傾向は概ね一致している。また、No. 6 のでは、金属部が完全に塑性崩壊し破断しており、解析ではこの状態が考慮されないため、解析と試験の荷重に相違が生じている。



別紙4-6図 圧縮試験



別紙4-7図 圧縮試験による要素体の変形状態

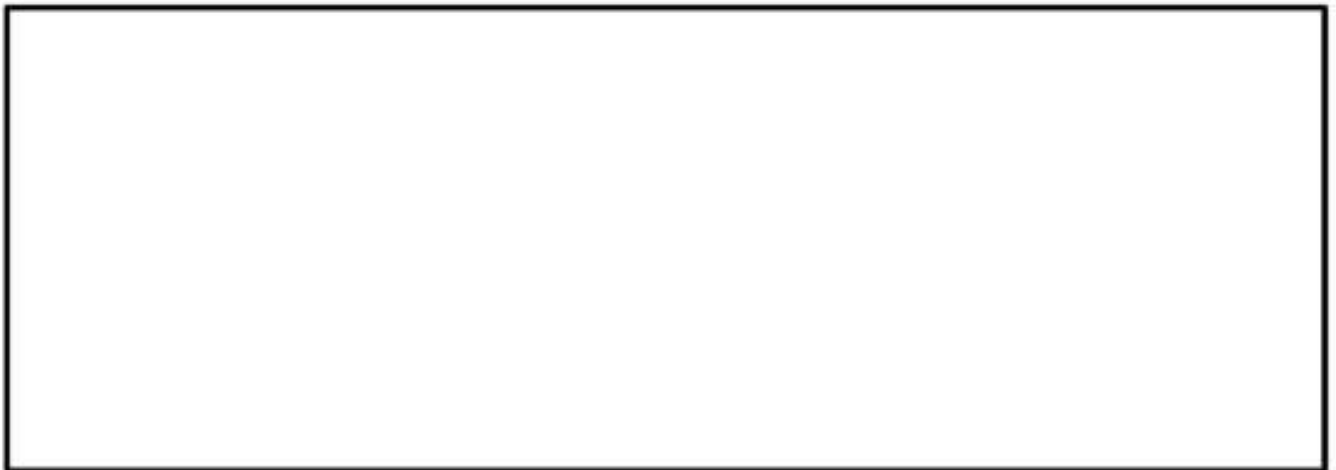


別紙4-8図 圧縮試験による要素体の荷重-変位特性

(4) []の圧縮特性

低荷重のまま変形が進む傾向を有していること、及びその挙動が解析で再現でき圧縮特性を工学的に制御しやすいことから[]が好ましく、さらに、[]の中でもより荷重がより低いまま適度にひずみエネルギーを蓄えられる[]を設計案として採用することとした。[]を維持し、金属製緩衝体全体の寸法も考慮して、[]として別紙4-2図に示す設計案を策定した。

ここで、スケール比の影響を確認するため、(1)の要素体（別紙4-3図のNo.2）と相似な形状で、別紙4-2図に示す実設計の[]となる供試体を作成し、同様の圧縮試験を実施して両者を比較した。ひずみと応力の関係、及びひずみとひずみエネルギーの関係を2/3スケールの試験結果（別紙4-8図のNo.2、1回目の試験結果）と比較して別紙4-9図に示す。スケール比の相違を考慮し、応力は荷重を供試体の初期圧縮面積で、ひずみは試験機の圧縮量を供試体の初期高さで除して算出し、ひずみエネルギーは単位体積当たりで算出している。これらの試験結果の傾向はよく一致しており、圧潰挙動にスケール比の影響が無く、後述の試験も含めスケール試験の有効性が確認された。また、ひずみ及び応力の関係では、[]があるものの、吸収エネルギーは、低ひずみ時においてはほぼ直線的に単調増加している。



別紙4-9図 スケール比の影響（応力-ひずみ特性、ひずみエネルギー-ひずみ特性）

4.2 貯蔵用緩衝体形状での圧縮特性

金属緩衝体は、要素体の [] に構成されたものであり、圧縮時の接触面形状や [] 等、要素体圧縮時とは境界条件に差異がある。その影響を確認するため、本節では金属緩衝体形状での圧縮特性を試験及び解析で確認した。さらに、試験と解析の結果を比較することにより、解析による再現性についても確認した。

(1) 圧縮試験

試験に使用した供試体を別紙4-10図に示す。金属緩衝体の上半分を1/4スケール比で製作したものであり、緩衝材の []、配置及び鋼板構造缶体を含めて実機設計を再現した。供試体は特定兼用キャスク本体を模擬した半円状の炭素鋼のサドルを設置し、金属緩衝体の下面をベースプレートに固定した。緩衝材の材料は実機設計と同じく [] である。別紙4-11図に示す圧縮試験機を用いて載荷速度0.05mm/sで準静的に圧縮荷重を付与し、圧縮試験機の変位及び荷重を計測した。



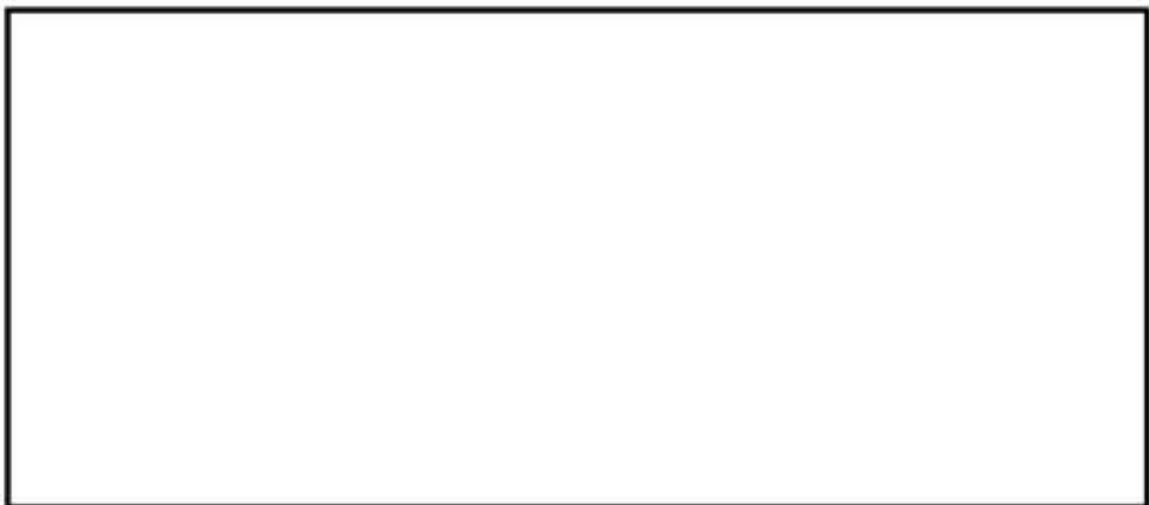
別紙4-10図 金属緩衝体圧縮試験供試体



別紙 4 - 11 図 金属緩衝体圧縮試験

(2) 再現解析

圧縮挙動を解析で適切に再現できることを確認するため、(1)で実施した圧縮試験の体系を解析で再現する。本解析は、後述の MSF-24P(S) 型落下時の挙動を評価するための落下解析に使用することを考慮し、衝突という非線形性の強い現象の再現に対応する計算コードとして LS-DYNA を用い、数値積分法は動的陽解法を用いた。解析モデルを別紙 4 - 12 図に示す。緩衝体圧縮試験に使用したベースプレートモデル化し、ベースプレートの下面を完全固定した。また、金属緩衝体の上部に剛体壁をモデル化し、剛体壁と金属緩衝体の間に接触を定義して剛体壁を鉛直下向きに強制変位を与えた。供試体の材料特性は弾塑性特性を考慮し、で得た応力-ひずみ特性を入力した。



別紙 4 - 12 図 金属緩衝体圧縮試験解析モデル

(3) 評価結果

試験及び解析によって得られた荷重－変位特性、及びひずみエネルギーと変形量との関係を別紙4－13図に、金属製緩衝体の変形状態を別紙4－14図に示す。別紙4－13図の試験結果からは、までは荷重が低いまま変形が進み、から荷重が高くなっており、プラトーな領域が再現できている。最大荷重は変位のときにおいて、荷重曲線において荷重が立ち上がる点の変位及びひずみエネルギーはそれぞれ約、約であり、このときのひずみエネルギーは、実機設計のサイズに換算するとに相当する。落下時にと想定し、兼用キャスク半基分のにおける位置エネルギーがであることを考慮すると、兼用キャスクがから水平に落下する状態においては、荷重曲線の立ち上がる領域範囲内で使用できることが確認できる。

また、別紙4－14図からは、金属緩衝体の変形している領域は、に限られており、される構造体であっても、変形する部分は限定され、要素体の圧縮特性（別紙4－9図参照）と同じ傾向にあると考えられる。したがって、要素体で考察した圧縮特性の傾向を有するを組み込むことで、金属緩衝体は意図したとおりのエネルギー吸収性能を有する。

さらに、試験結果と解析結果を比較すると、荷重－変位曲線、及び試験後の変形挙動ともに、両者は良く一致している。このことから、設計案のを有する金属緩衝体の圧縮挙動を解析により再現できることも確認された。



別紙4－13図 金属緩衝体圧縮試験により得られた圧縮特性



別紙4-14図 金属緩衝体の変形状態

5. 貯蔵用緩衝体を装着した MSF-24P(S)型の安全機能維持評価

金属製緩衝体を装着した MSF-24P(S)型の 水平落下時の健全性を 4. で構築した落下解析手法を用いて評価する。

5.1 安全機能維持の評価基準

水平落下時に特定兼用キャスクに生じる荷重が、以下に示す(本書の本文 3.2 参照)、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態 D の許容基準を満足するための荷重条件以下となることを安全機能維持の評価基準とする。

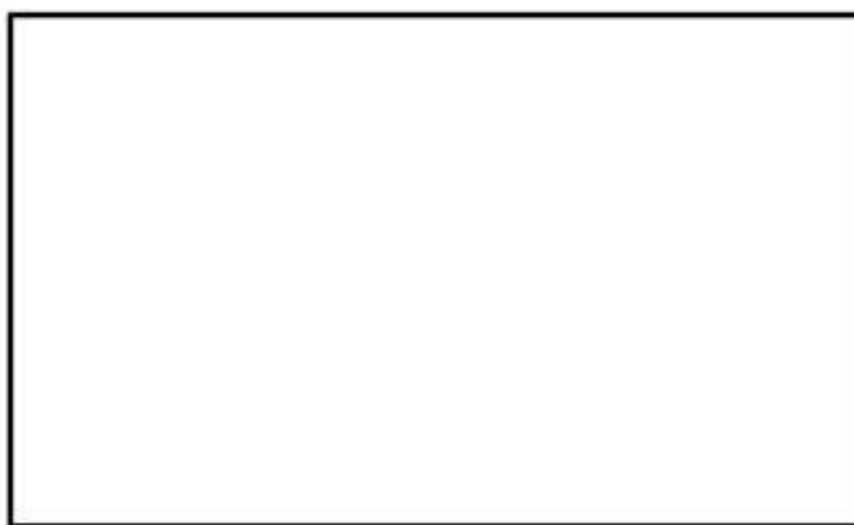
- ・上部(蓋部)に作用する荷重: $4.30 \times 10^7 \text{N}$ 以下 (注)
- ・下部(底部)に作用する荷重: $3.76 \times 10^7 \text{N}$ 以下 (注)

(注) 上記の荷重値は、特定兼用キャスク本体に衝撃加速度 650m/s^2 の衝撃加速度が作用した場合に上部(蓋部)又は下部(底部)に作用する荷重である。

5.2 貯蔵緩衝体を装着した特定兼用キャスクの落下解析

(1) 解析モデル及び解析条件

4. で構築した金属緩衝体の落下解析手法を踏襲し、金属緩衝体を装着した MSF-24P(S) 型を 高さから床面に水平落下させた際の挙動を解析評価した。水平落下解析モデルを別紙 4-15 図に示す。金属緩衝体を装着した状態の MSF-24P(S) 型を実機サイズでモデル化し、MSF-24P(S) 型本体内部のバスケット及び使用済燃料集合体についてもモデル化した。床面は剛壁面とし、 高さからの自由落下を想定した際の落下速度である を初速度として付与し、水平状態の姿勢でキャスクを床面に衝突させた。



別紙 4-15 図 水平落下解析モデル

(2) 解析結果

落下解析により得られた MSF-24P(S) 型本体 (3 か所) の衝撃加速度時刻歴を別紙 4-16 図に示す。MSF-24P(S) 型本体 3 か所の加速度履歴の傾向はほぼ一致している。衝撃加速度の最大値は 431 m/s^2 (約 44G) であった。また、MSF-24P(S) 型の上部 (蓋部) 及び下部 (底部) に作用する反力時刻歴を別紙 4-17 図に示す。上部 (蓋部) に作用する反力の最大値は $2.75 \times 10^7 \text{ N}$ 、下部 (底部) に作用する反力の最大値は $2.29 \times 10^7 \text{ N}$ であった。落下後の金属緩衝体の変形図を別紙 4-18 図に示す。別紙 4-18 図より、MSF-24P(S) 型落下時に床面に接触する金属緩衝体の衝突部が直線状に永久変形していることが分かる。しかしながら、変形した部分は、金属製緩衝体の一部であり、金属緩衝体のその他の部分や MSF-24P(S) 型本体に変形はない。



別紙4-16図 水平落下時のMSF-24P(S)型本体の衝撃加速度時刻歴



別紙4-17図 水平落下時のMSF-24P(S)型上部（蓋部）及び下部（底部）の反力時刻歴



別紙4-18図 水平落下後の金属緩衝体の変形図

5.3 安全機能維持評価

水平落下時に特定兼用キャスクに生じる衝撃加速度が、5.1に示した特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足するための荷重条件以下となることを安全機能維持の評価基準とする。

5.2の結果により、金属緩衝体を装着したMSF-24P(S)型の□水平落下では、金属緩衝体の一部が変形するもののMSF-24P(S)型本体に変形は認められず、また、特定兼用キャスク上部（蓋部）及び下部（底部）に作用する衝撃荷重は、5.1に示す荷重条件（許容基準値）を下回る値であった。したがって、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を満足されることから、□水平落下において、MSF-24P(S)型の安全機能は維持される。

また、本書の本文3.2に示すとおり、水平落下において、MSF-24P(S)型が床面に対して傾斜して落下する場合（傾斜落下）において、蓋密封部が二次衝撃側となる場合でも密封性能への影響はない。

6. 落下試験による落下解析の妥当性確認

金属緩衝体を装着したキャスクの落下試験を実施し、金属緩衝体を装着したキャスクの安全機能維持評価における衝突荷重算出に用いる落下解析手法の妥当性を検証した。

6.1 落下試験

(1) 落下試験供試体

落下試験に使用した供試体及びその諸元をそれぞれ別紙4-19図及び別紙4-1表に示す。落下試験供試体は、金属緩衝体を装着したキャスクを1/10スケールでモデル化したものであり、質量、重心位置、重心回りの慣性モーメント等、落下の運動に関するパラメータをスケール則に則って調整した。落下試験では、金属緩衝体の変形挙動、及びキャスクの落下挙動を検証することを主な目的とするため、金属緩衝体の固定構造やキャスクとの勘合部について実機を模擬し、落下運動や衝突挙動に直接寄与しないキャスク内構造物及びキャスクに収納する使用済燃料は模擬していない。

また、落下試験供試体には、別紙4-20図に示すとおり、胴の上部、中央部及び下部の3か所に加速度計を設置し、落下によって落下試験供試体に生じる衝撃加速度を直接計測した。



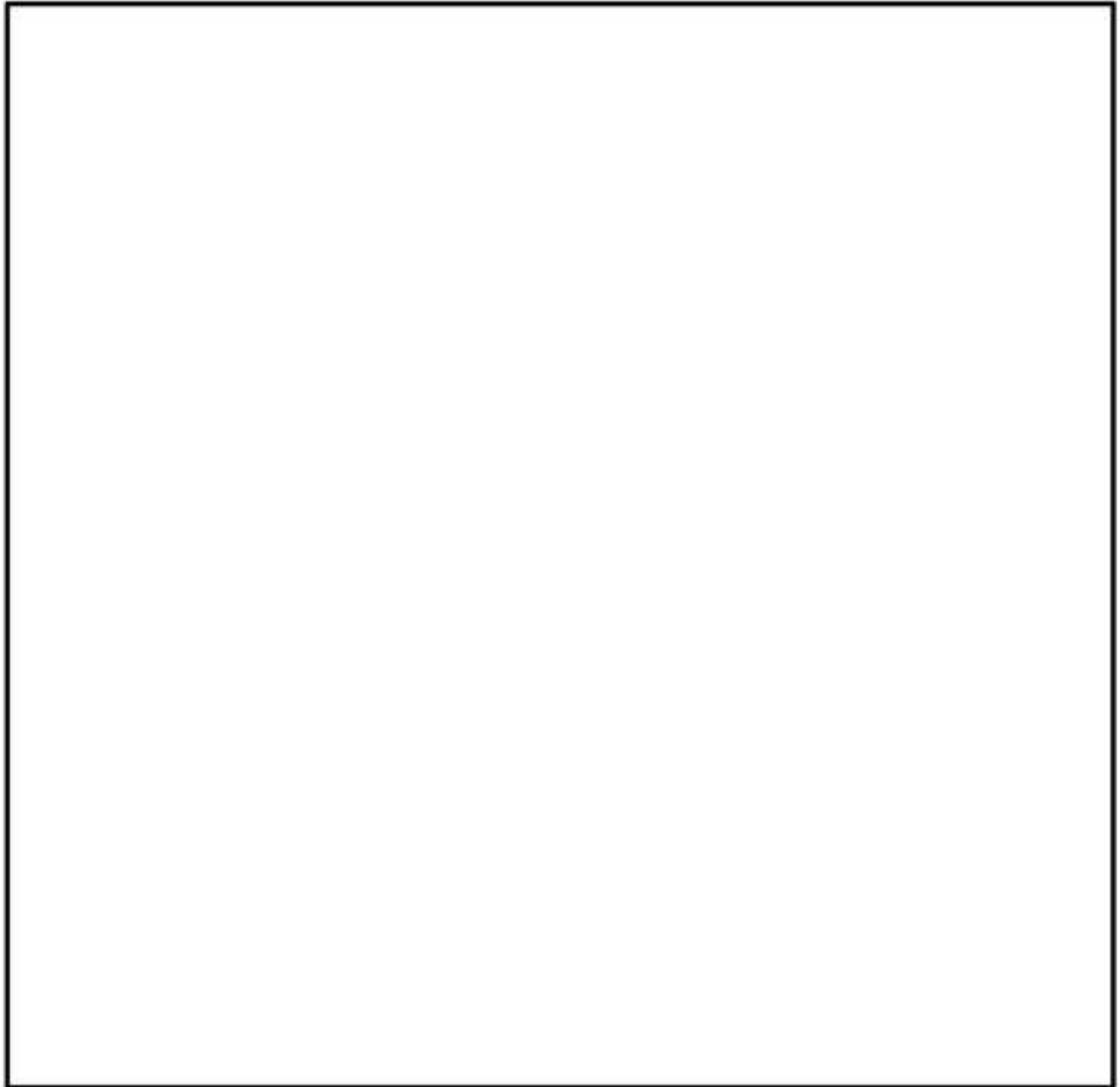
別紙4-19図 落下試験供試体

別紙4-1表 落下試験供試体諸元

項目	落下試験供試体	実機兼用キャスク	スケール比
キャスク外径 (金属緩衝体外径)			
全長			
質量			
重心位置			
重心まわりの慣性モーメント			

(2) 試験方法

試験概要を別紙4-20図に示す。設計条件として想定する 水平落下を模擬するために、落下試験供試体の左右両端にワイヤーを介しクレーンで の高さまで水平に吊り上げ、ワイヤーに設置した切離し装置を切り離すことによってキャスクを落下させた。落下試験供試体に設置した加速度計で衝撃加速度を計測する他、地面に設置した高速度カメラで落下時のキャスクの挙動（位置、速度及び姿勢）を観察した。



別紙4-20図 落下試験概要

(3) 試験結果

衝撃加速度の計測結果を別紙4-20図(b)に、試験後の金属緩衝体の写真を別紙4-20(c)に示す。高速度カメラで分析の結果、落下試験供試体は、衝突直前に底部(写真左側)が 9.6° 下になる傾斜角で、速度 [] で地面に衝突し、別紙4-20図(b)に示すとおり、落下試験供試体の下部が地面に先に衝突して跳ね上がり、これによりキャスクが時計回りに回転し、約0.01秒後には上部(写真右側)が衝突した。最大加速度は後者の方が大きく、499G(約4900 m/s²)が計測されており、これは実機スケールでは49.9Gに相当する。また、別紙4-20図(c)に示すとおり、金属緩衝体外周の一部が [] 変形した

ものの、金属緩衝体の内周や落下試験供試体本体に変形が生じず、金属緩衝体の性能を維持できることが確認された。

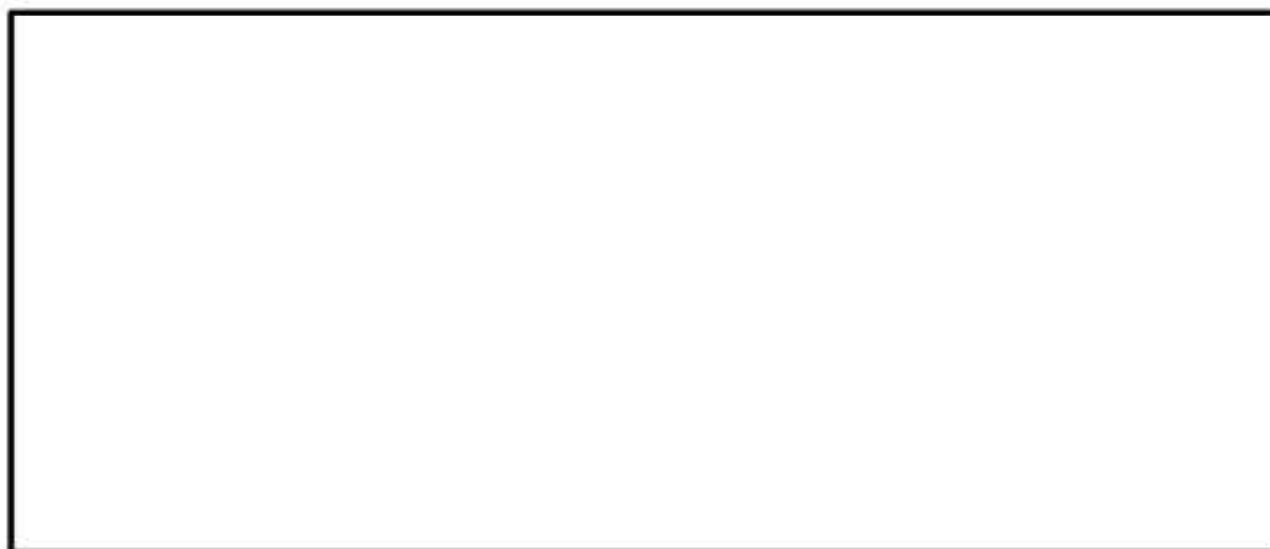
6.2 再現解析

落下解析手法の妥当性を試験結果で検証するにあたり、落下試験供試体による落下試験の再現解析を5.の安全機能維持評価で使用した落下解析手法を用いて実施した。

(1) 解析モデル及び解析条件

解析モデルを別紙4-21図に示す。解析コードはLS-DYNAを使用し、5.の落下解析に使用したものと同様の手法で作成した。落下試験供試体の設計を反映し、金属緩衝体は落下試験供試体本体との隙間及び金属緩衝体のボルト固定方法について落下試験を再現した状態としてモデル化するとともに、金属緩衝体の設置方向も落下試験に合わせた。

初期条件については、落下試験において地面に衝突する直前の状態を高速度カメラで計測された傾斜角 9.6° の姿勢とし、速度 で床面に衝突させた。

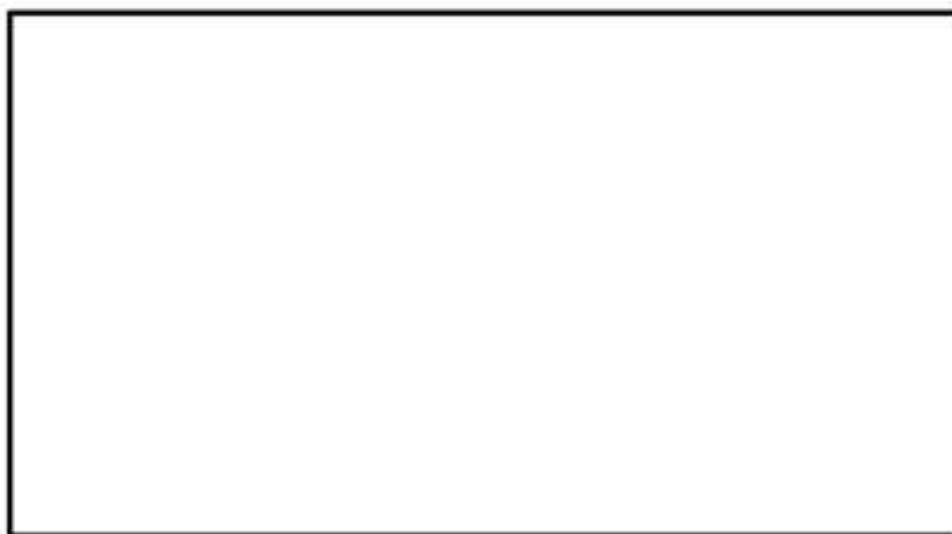


別紙4-21図 落下試験解析モデル

(2) 解析結果

別紙4-20図に示す3か所の加速度計設置位置における衝撃加速度の時刻歴解析結果を試験結果と比較して別紙4-22図に示す。二次衝突のタイミング（一次衝突0.002s、二次衝突0.011s）は、解析結果と試験結果でほぼ一致しており、また、一次衝突の衝撃加速度についても比較的良好に一致している。二次衝突においては、解析結果の衝撃加速度が試験結果と比較して大きい結果となったが、これは解析モデルにおける金属緩衝体の剛性

が落下試験の試験体より高く設定されたためと推測される。二次衝突の衝撃加速度の増加部分の面積（力積に相当）は、ほぼ同じであることも併せて、落下挙動として適切に再現されていると考えられる。また、本傾向は、解析により評価される衝撃加速度が保守的となる傾向を有するものであり、解析で作用荷重を評価する観点では有効であると考えられる。衝突終了後の金属緩衝体の変形状態について、落下試験供試体と解析結果を比較したものを別紙4-23図に示す。が両者でよく一致しており、解析手法が妥当であることが確認された。



別紙4-22図 衝撃加速度の比較



別紙4-23図 金属緩衝体変形状態の比較

7. まとめ

貯蔵用緩衝体として開発した金属緩衝体の設計例及び性能検証を示すとともに、金属緩衝体を装着した状態における MSF-24P(S)型の落下解析結果に基づく安全機能維持評価（例）を示した。結論を以下に示す。

- (1) を緩衝材として使用し、設定することにより、緩衝材として適した圧縮特性を有する金属製緩衝体を設計することができる。想定高さ等の設計条件が異なる場合においても、本別紙で示したプロセスと同様に設定し、目的のエネルギー吸収性能を持たせることで、各設計条件に応じた金属製緩衝体の設計が可能である。
- (2) 設計された金属緩衝体を装着した MSF-24P(S)型を想定高さから落下させる事象を落下解析で評価した結果、MSF-24P(S)型に作用する荷重は、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部材が金属キャスク構造規格に規定される供用状態 D の許容基準を満足することから、MSF-24P(S)型の安全機能は維持される。
- (3) 金属緩衝体を装着したキャスクの落下試験結果とその落下解析結果との比較により、落下時の兼用キャスクの挙動及び金属緩衝体の変形状態がよく再現できること、及び兼用キャスクに生じる衝撃加速度が保守的な傾向を示すことが確認されることから、本落下解析手法は妥当である。