

補足説明資料 3 - 1

3 条

設計基準対象施設の地盤

落下に対する安全機能維持に関する説明資料

枠囲みの範囲は、商業機密のため、非公開とします。

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	4
3. 貯蔵中の MSF-24P 型が貯蔵架台上から落下する場合の構造健全性評価	5
4. 使用する解析コード	9
5. 参考文献	15

別紙 1 貯蔵用緩衝体及び貯蔵用三次蓋の輸送用との構造差異による構造強度への影響確認

別紙 2 輸送時の 0.3m 落下時における構造健全性評価

別紙 3 貯蔵架台上からの落下時に生じる衝撃加速度計算

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、設計基準対象施設の地盤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3条

設計基準対象施設は、次条第二項の規定により算定する地震力（設計基準対象施設のうち、地震の発生によって生ずるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいもの（以下「耐震重要施設」という。）及び兼用キャスクにあっては、同条第三項に規定する基準地震動による地震力を含む。）が作用した場合においても当該設計基準対象施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。ただし、兼用キャスクにあっては、地盤により十分に支持されなくてもその安全機能が損なわれない方法により設けることができるときは、この限りでない。

2 耐震重要施設及び兼用キャスクは、変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。

3 耐震重要施設及び兼用キャスクは、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。ただし、兼用キャスクにあっては、地盤に変位が生じてもその安全機能が損なわれない方法により設けることができるときは、この限りでない。

b. 設置許可基準規則解釈別記4第3条

1 第3条第1項に規定する「設計基準対象施設を十分に支持することができる」とは、兼用キャスク貯蔵施設について、自重その他の貯蔵時に想定される荷重に加え、第4条第2項の規定により算定する地震力（兼用キャスクにあっては、基準地震動による地震力を含む。）が作用した場合においても、接地圧に対する十分な支持力を有する設計であることをいう。なお、兼用キャスクについては、上記に加え、基準地震動による地震力が作用することによって弱面上のずれ等が発生しないことを含め、基準地震動による地震力に対する支持性能が確保されていることを確認することが含まれる。

また、「安全機能が損なわれない方法」とは、以下のいずれかの方法をいう。

- ・兼用キャスクを基礎等に固定し、かつ、基準地震動による地震力が地盤に作用することによりその安全機能（第16条第2項第1号ハ及び第4項第1号から第3号までに示す臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能をいう。以下別記4において同じ。）を損なわない方法
- ・兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、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を損なわない方法

ここで、輸送荷姿（兼用キャスクの両端に緩衝体を取り付けた状態であって、車両運搬（核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（昭和53年総理府令第57号）第1条第1号の車両運搬をいう。）時の荷姿をいう。以下同じ。）その他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、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ないものとする。

- 2 第3条第2項については、本規程別記1第3条第2項のとおりとする。また、輸送荷姿その他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、地盤が変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがないものとする。
- 3 第3条第3項については、本規程別記1第3条第3項のとおりとする。また、輸送荷姿その他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、その安全機能が損なわれないものとする。

(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

「6. 地盤及び周辺斜面の安定性評価 6.1 安定性評価の基本方針」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】

『

地盤及び周辺斜面は、地震力に対してそれぞれ必要な状態を維持していること。

』

【確認内容】

『

(1) 兼用キャスクを設置する地盤については、以下のとおりとしていること。（別表参照）

1) 地盤の十分な支持を想定しない方法により設置する場合

①衝突に対して安全機能を損なわないことの確認を要しない場合（別表 *1）

兼用キャスクを輸送荷姿その他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、当該衝突に対してその安全機能が損なわれないものとし、その確認を要しない（地盤の安定性評価は不要）。

②安全機能を損なわないことの確認を要する場合（別表 *2）

（省略）

2) 地盤の十分な支持を想定する方法により設置する場合（別表 *3）

（省略）

(2) 兼用キャスクの周辺斜面については、以下のとおりとしていること。

（省略）

(3) 周辺施設が設置されている地盤は、設置許可基準規則の解釈別記2第4条第4項第2号①の規定（Cクラスに属する施設に適用されるものに限る。）による地震力に対して十分な支持力を有すること。

』

2. 要求事項への適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクを設置する地盤及び周辺斜面の安定性評価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、兼用キャスクの設計は、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) 兼用キャスクを設置する地盤については、以下のとおりとしていること。(別表参照)

①衝突に対して安全機能を損なわないことの確認を要しない場合(別表*1)

兼用キャスクを輸送荷姿その他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、当該衝突に対してその安全機能が損なわれないものとし、その確認を要しない(地盤の安定性評価は不要)。

②安全機能を損なわないことの確認を要する場合(別表*2)

(省略)

MSF-24P型は、貯蔵用緩衝体の装着により、蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法により貯蔵する設計であり、貯蔵架台に固定され、貯蔵架台は基礎等に固定せずに設置される。

したがって、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し、地盤の安定性評価は不要となる。

本設計方針への妥当性確認として、地盤の十分な支持が想定されない貯蔵施設に貯蔵中のMSF-24P型が、貯蔵架台上から落下することを想定した場合のMSF-24P型の構造健全性評価を実施し、構造健全性が維持される設計であることから、兼用キャスクの安全機能が損なわれないことを確認している(3.参照)。

[確認内容]

(2) 兼用キャスクの周辺斜面については、以下のとおりとしていること。

(省略)

(3) 周辺施設が設置されている地盤は、設置許可基準規則の解釈別記2第4条第4項第2号

①の規定(Cクラスに属する施設に適用されるものに限る。)による地震力に対して十分な支持力を有すること。

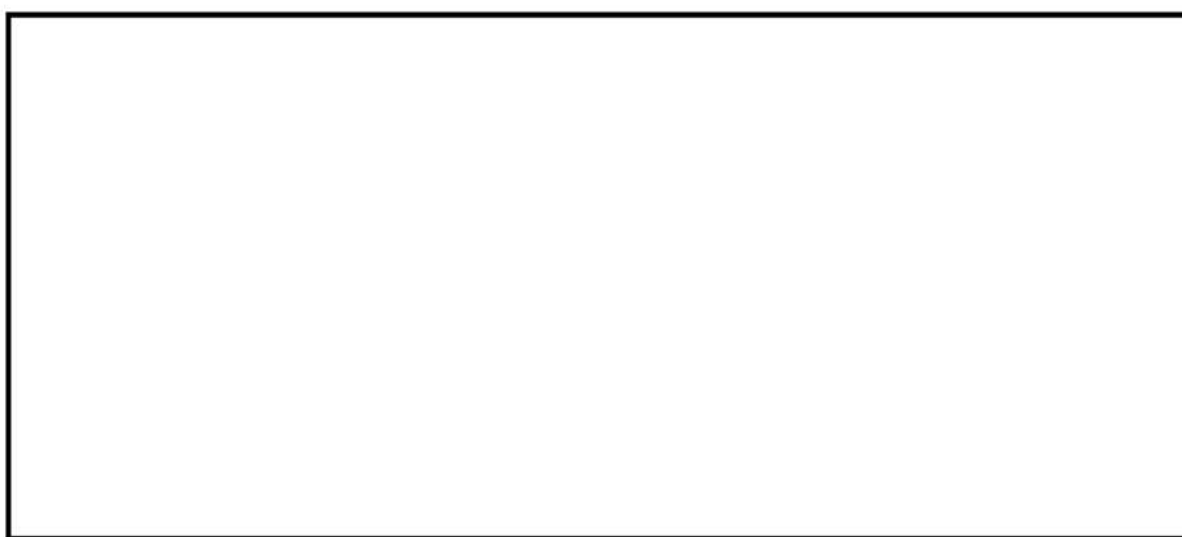
周辺斜面及び周辺施設が設置されている地盤に対する確認内容は、型式証明申請の範囲外である。

3. 貯蔵中の MSF-24P 型が貯蔵架台上から落下する場合の構造健全性評価

2. で示した、貯蔵中の MSF-24P 型が貯蔵架台上から落下（以下「貯蔵架台上からの落下」という。）することを想定した場合の MSF-24P 型の構造健全性評価の概要を以下に示す。

a. 貯蔵架台上からの落下状態

MSF-24P 型が貯蔵架台上から落下する場合の落下高さ（例）を第 1 図に示す。貯蔵架台の設計は、型式証明の範囲外であるため、落下高さは一例であるが、落下高さは、0.3m 程度となる。したがって、貯蔵架台上からの落下姿勢を 0.3m 高さからの水平落下（0.3m 水平落下）として設定する。



第 1 図 貯蔵架台上からの落下高さ（例）

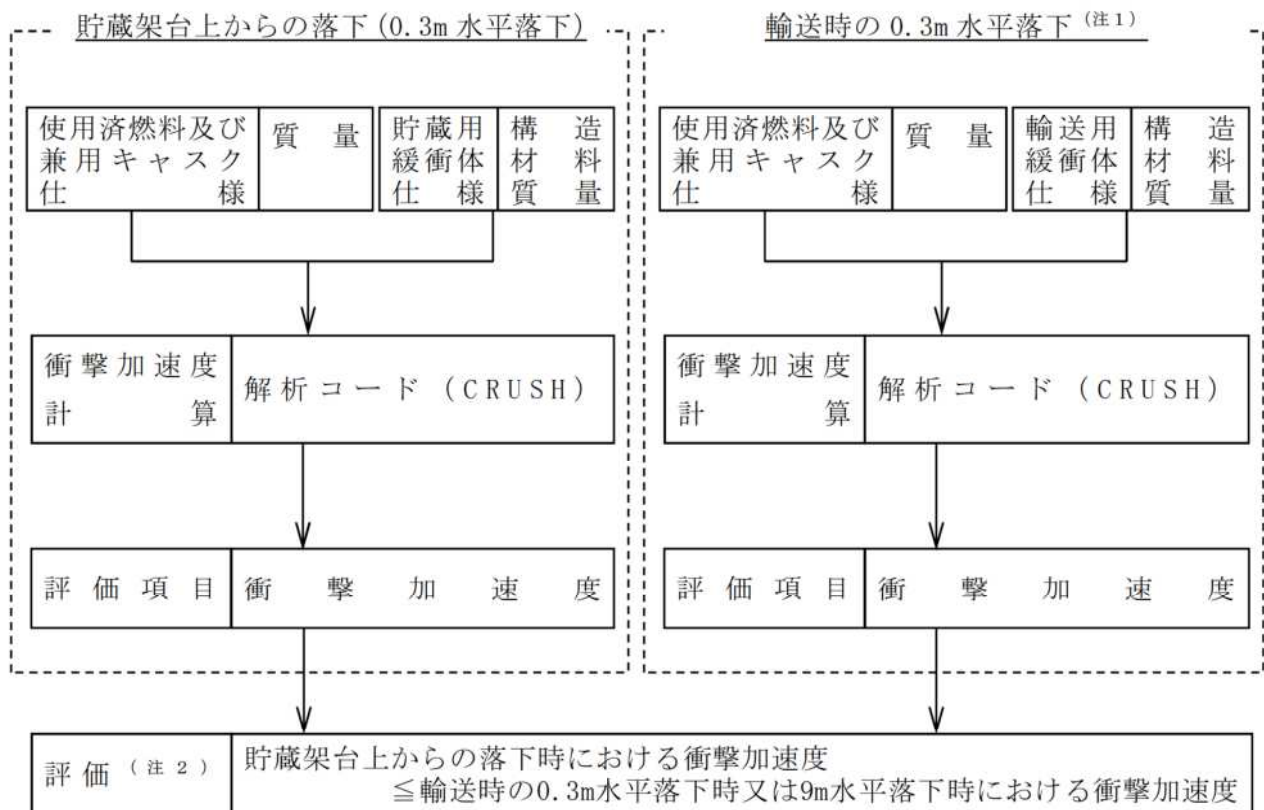
b. 貯蔵架台上からの落下時の構造健全性評価方法

MSF-24P 型は、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（以下「事業所外運搬規則」という）に規定される一般の試験条件のうち 0.3m 落下、及び特別の試験条件のうち 9m 落下において、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)⁽¹⁾（以下「金属キャスク構造規格」という。）に基づきその構造健全性が維持されることを確認しており、0.3m 落下時及び 9m 落下時にその安全機能が損なわれない設計である。

MSF-24P 型が貯蔵架台上から落下する場合の構造健全性評価は、貯蔵時と輸送時の緩衝体及び三次蓋の構造差異を踏まえた上で、貯蔵架台上からの落下時に発生する衝撃加速度が、一般の試験条件時における 0.3m 水平落下（以下「輸送時の 0.3m 水平落下」という。）時の衝撃加速度に比べ小さいことを示すことで、その安全機能が損なわれないことを示す。

貯蔵架台上からの落下時における構造健全性評価フローを第 2 図に示す。

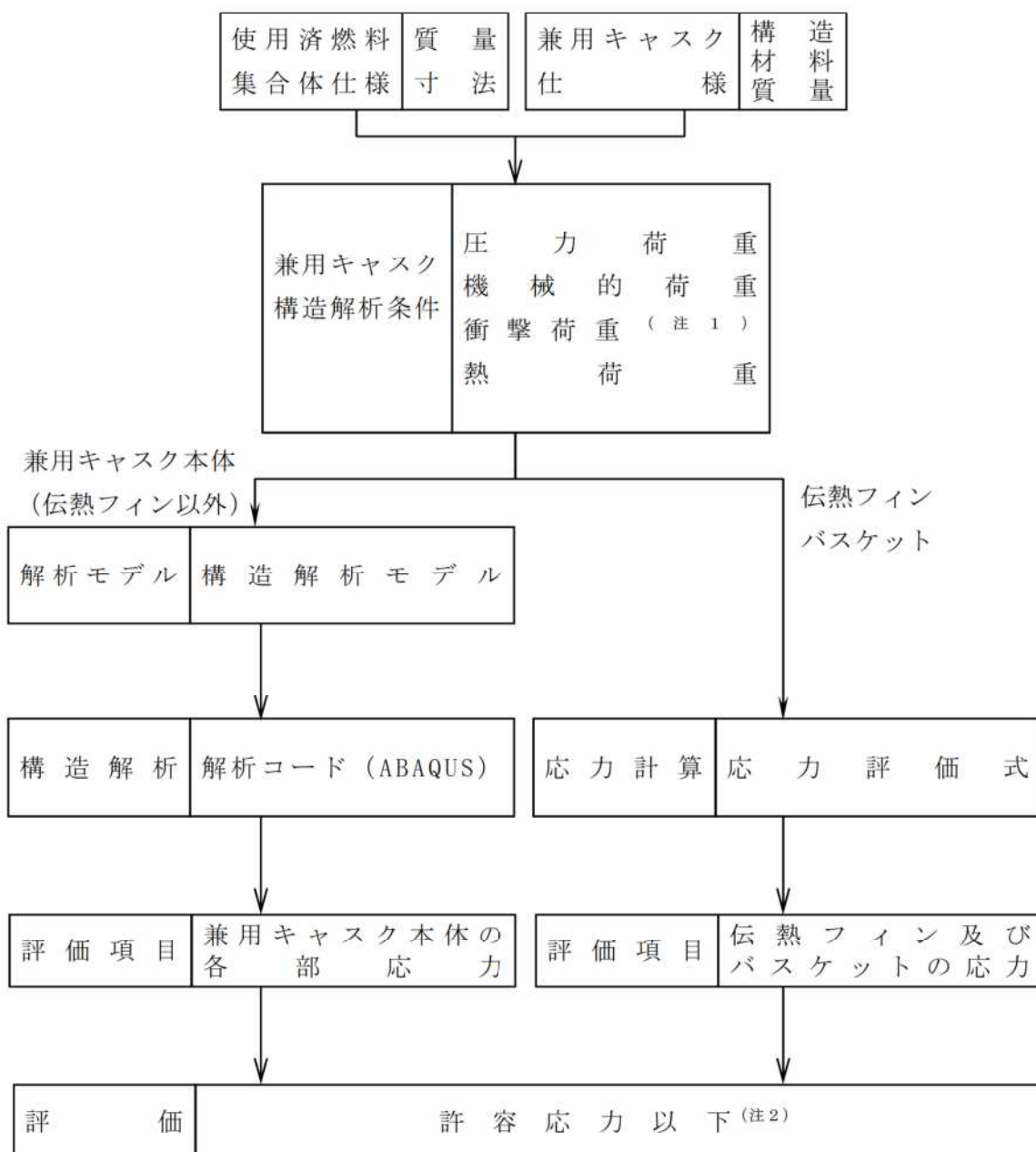
内は商業機密のため、非公開とします。



(注1) 輸送時の 0.3m 水平落下において、MSF-24P 型の構造健全性が維持されることは、第3図に示す評価フローに基づき確認済 (別紙2 参照)。

(注2) 貯蔵時と輸送時の緩衝体及び三次蓋の構造差異による落下時における構造強度への影響として、発生するひずみは、最大で約 7%の差異がある (別紙1 参照) が、輸送時の 0.3m 水平落下の構造健全性評価では、許容限界に対してそれを上回る 41%以上の余裕を有する (別紙2 参照)。構造健全性評価における荷重条件のうち、衝撃加速度以外の条件は輸送時と貯蔵時で差異はない。したがって、衝撃加速度の比較で構造健全性の評価が可能である。

第2図 貯蔵架台上からの落下時の構造健全性評価フロー



第3図 輸送時の0.3m落下時の構造健全性評価フロー (注3)

(注1) 衝撃荷重(衝撃加速度)以外の荷重条件は、貯蔵架台上からの落下時と輸送時の0.3m落下時で差異はない。落下時の衝撃加速度は、CRUSHコードにより算出する。

(注2) 輸送時の0.3m落下時の評価基準は、金属キャスク構造規格の供用状態B(弾性範囲の基準)である。但し、9m落下時においても、密封境界部及びバスケットは、弾性範囲の基準である。

(注3) 輸送時の0.3m落下時の構造健全性評価の詳細は、別紙2参照。

c. 貯蔵架台上からの落下時の構造健全性評価結果

b. に示した評価方法に基づき算出した貯蔵架台上からの落下時の衝撃加速度を第1表に示す（衝撃加速度の算出詳細は、別紙3参照）。第1表に示すとおり、貯蔵架台上からの落下時にMSF-24P型に生じる衝撃加速度は、輸送時の0.3m落下時に比べ小さい。貯蔵時と輸送時の緩衝体及び三次蓋の構造差異による構造強度への影響として、発生するひずみに約7%の差異が生じる（別紙1参照）が、輸送時の0.3m水平落下では、許容限界に対して41%以上の余裕を有する（別紙2参照）ことから、貯蔵架台上からの落下時において構造健全性は維持される。

第1表 貯蔵架台上からの構造健全性評価結果（落下時の衝撃加速度）

貯蔵架台上からの落下時の 衝撃加速度	輸送時の衝撃加速度
木材緩衝材例 ^(注) : 174 m/s ² 金属緩衝材例 : 147 m/s ²	0.3m 水平落下 200 m/s ²

(注) 熱による木材の圧潰特性の低下例（80%及び60%）を考慮した結果のうち衝撃加速度が大きい方を記載。

d. 使用済燃料の再取出性について

c. に示したとおり、貯蔵架台上からの落下時において、衝撃加速度は、輸送時の0.3m落下に比べ小さく、MSF-24P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2（別添）に示すとおり、燃料集合体の燃料被覆管は、輸送時の0.3m落下時においても弾性範囲に留まることから、燃料被覆管の構造健全性は維持される。したがって、安全機能への影響はなく、また、使用済燃料の再取出性に問題はない。

4. 使用する解析コード

a. 解析コード

MSF-24P 型の貯蔵架台上からの落下時、輸送時の 0.3m 落下時及び 9m 落下時の安全設計に用いられる解析コードについて、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。

①CRUSH コード

i 概要

CRUSH コード⁽²⁾ は、旧日本原子力研究所で開発された輸送容器等の落下衝突解析用計算コードである。

ii 機能

CRUSH コードは、落下衝突解析に際して以下の機能を有している。

- a) 緩衝体の緩衝材を互いに干渉しない 1 次元棒の集合体とみなし、1 次元棒の変形によって落下エネルギーを吸収すると仮定するもので、緩衝材の応力-ひずみ特性があれば、変形量、荷重及び加速度を求めることができる。
- b) 計算対象を 1 次元の体系にモデル化して解析を行うため、パラメトリック計算を容易に行うことができる。

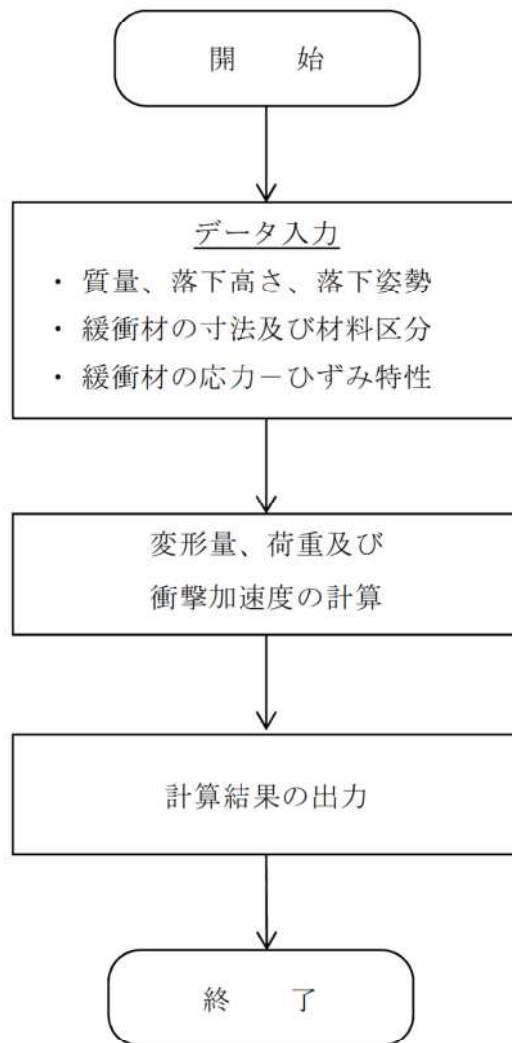
iii 計算フロー

CRUSH コードの計算フローを第 4 図に示す。

iv 使用実績及び検証

CRUSH コードは、国内の輸送容器の緩衝体設計に広く使用されており許認可の実績がある。また、CRUSH コードによる衝撃加速度の計算結果は、緩衝材に木材を用いた輸送容器の落下試験と比較し検証されている⁽²⁾⁽³⁾。

CRUSH コードの検証例を第 2 表に示す。



第4図 CRUSH コードの計算フロー

第2表 CRUSH コードの検証例⁽³⁾

(1) 衝撃加速度^(注)

試験条件	最大衝撃加速度 (m/s ²)	
	落下試験	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	598 (61G)	618 (63G)
9.3 m 傾斜落下	1451 (148G)	1510 (154G)

(2) 緩衝体変形量^(注)

試験条件	緩衝体変形量 (mm)	
	落下試験	CRUSH
9.3 m 頭部垂直落下	259	308
9.3 m 傾斜落下	253	314

(注) MSF-24P 型輸送容器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（頭部垂直落下及び傾斜落下）を実施し、落下試験で計測された容器本体の衝撃加速度及び緩衝体変形量を CRUSH 解析結果と比較し、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を検証した。

② ABAQUS コード

i 概要

ABAQUS コード⁽⁴⁾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、輸送容器の応力解析等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。

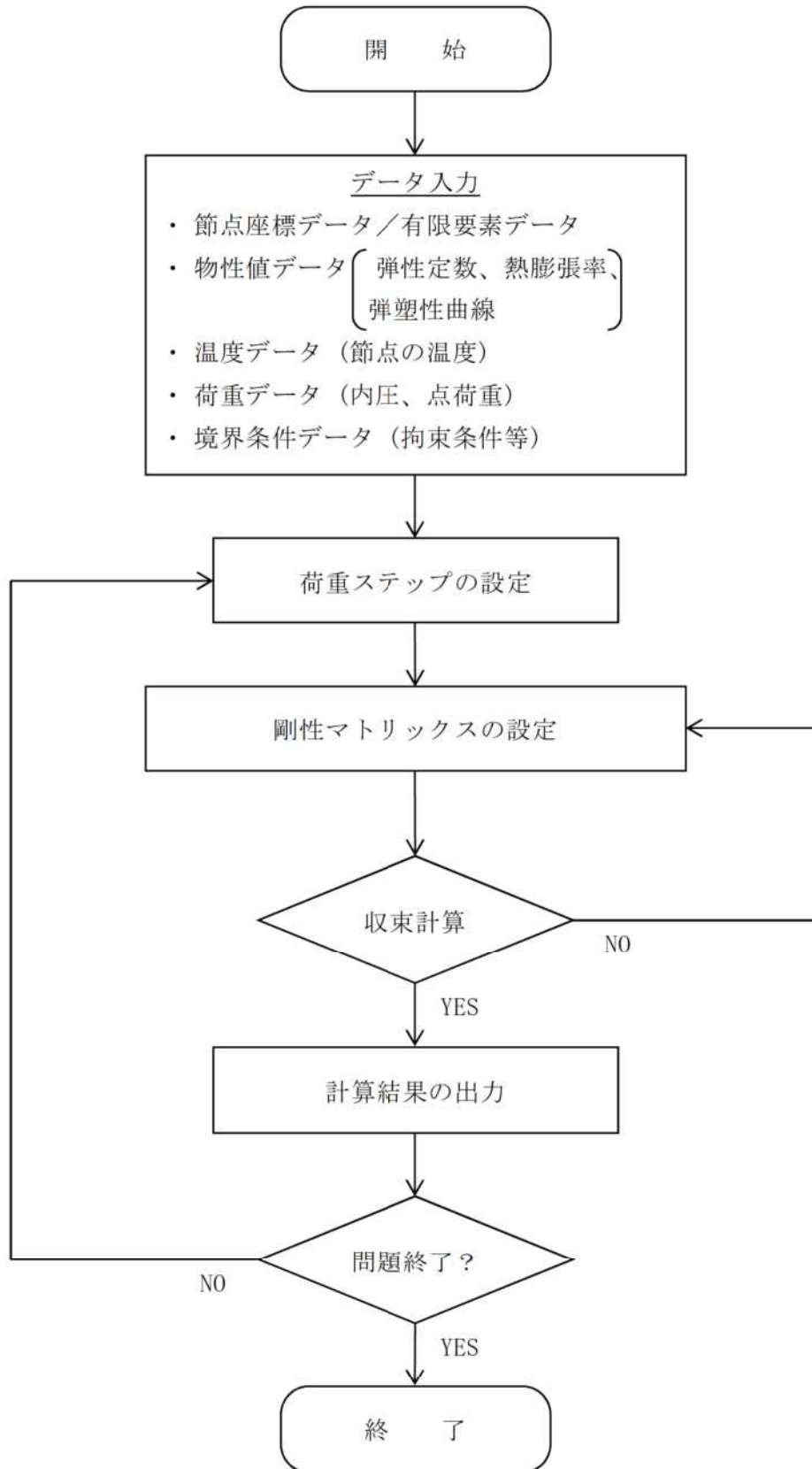
iii 計算フロー

ABAQUS コードの計算フローを第 5 図に示す。

iv 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、これまで多くの応力解析に対し許認可の実績がある。また、ABAQUS コードによる輸送容器の応力計算結果は、輸送容器の落下試験結果を基に算出される応力と比較し検証されている⁽³⁾。

ABAQUS コードの検証例を第 3 表に示す。



第5図 ABAQUS コードの計算フロー

第3表 ABAQUS コードの検証例⁽³⁾

(1) 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果^(注)

部位	変形モード	落下試験結果 より算出した 応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 (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

(2) 9.3 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果^(注)

部位	変形モード	落下試験結果 より算出した 応力 (MPa)	ABAQUS 解析結果 (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) MSF-24P 型輸送容器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（頭部垂直落下及び傾斜落下）を実施し、落下試験で計測された蓋部のひずみを基に、MSF-24P 型と落下試験モデルの寸法差等を考慮して 9.3m 頭部垂直落下時及び 9.3m 水平落下時に MSF-24P 型輸送容器に発生する応力を算出した。その応力と同じ落下条件での ABAQUS 解析による応力を比較し、ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を検証した。

5. 参考文献

- (1) (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(2007年版)(JSME S FA1-2007)」, (2007).
- (2) 幾島毅, 浅田和雄,「放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発, (I) 緩衝体付き輸送容器衝突計算コード CRUSH」, 日本原子力学会誌 Vol. 33 No. 4, (1991) .
- (3) 四国電力(株),「核燃料輸送物設計承認申請書の一部補正について」, 原子力発第 19317 号, (2019) .
- (4) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual(6.12)” , (2012).

貯蔵用緩衝体及び貯蔵用三次蓋の輸送用との構造差異による構造強度への影響確認

1. 概要

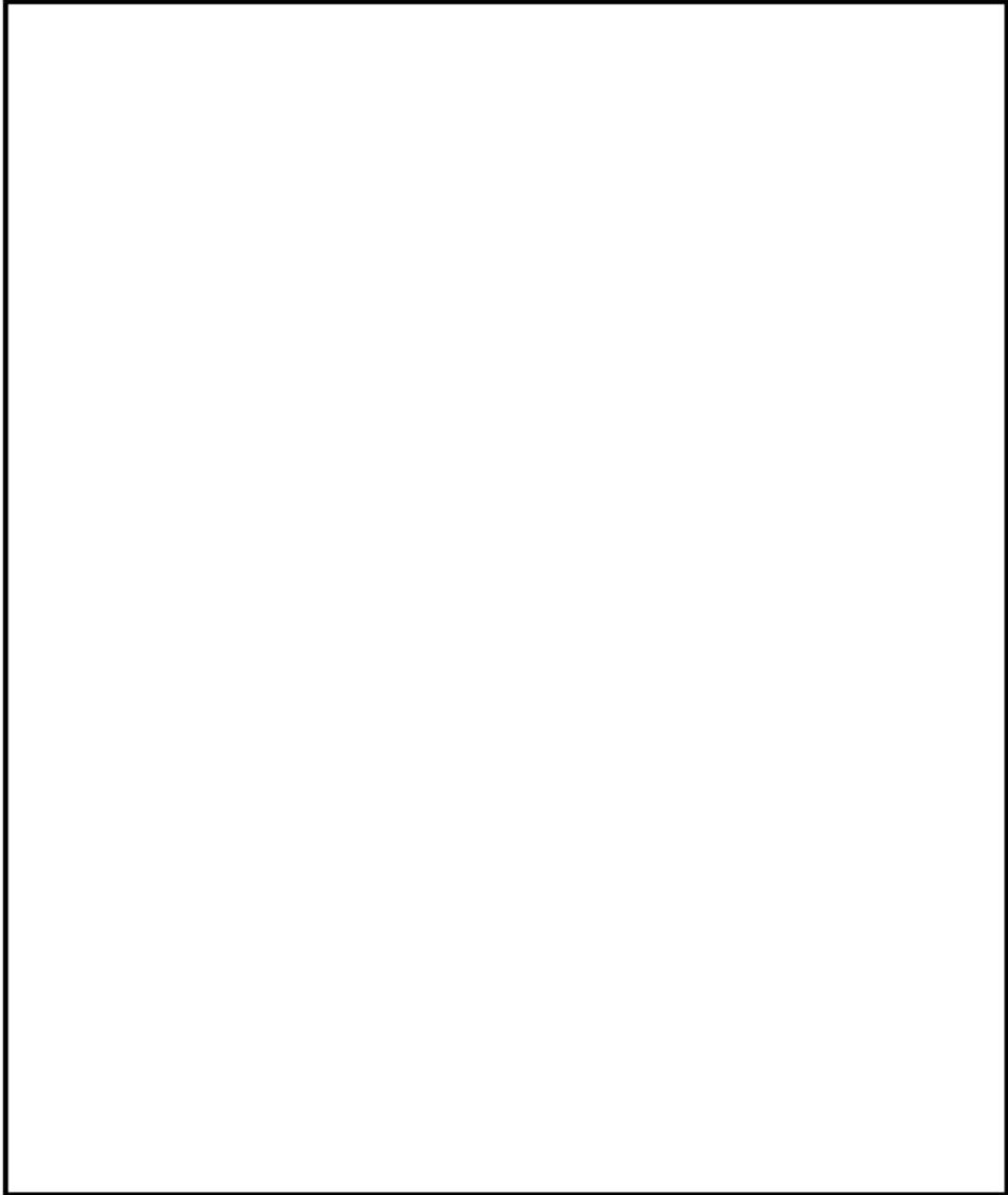
本別紙では、貯蔵用緩衝体及び貯蔵用三次蓋の構造と輸送用緩衝体及び輸送用三次蓋の構造との構造差異が構造強度に与える影響について、落下解析（動的解析）により確認した結果を示す。

2. 輸送用との構造差異

貯蔵用と輸送用の構造差異を別紙 1 - 1 表に示す。構造差異は、貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体ともに、一次蓋と二次蓋間の閉じ込め圧力監視のために二次蓋上に設置する圧力センサーケーブルを外側に引き出す目的で溝加工等を行うもの、及び緩衝材種の差異であり、引出し方法の違いにより、表に示す構造例①と構造例②の 2 パターンがある。

別紙 1 - 1 表 貯蔵用の輸送用の構造差異

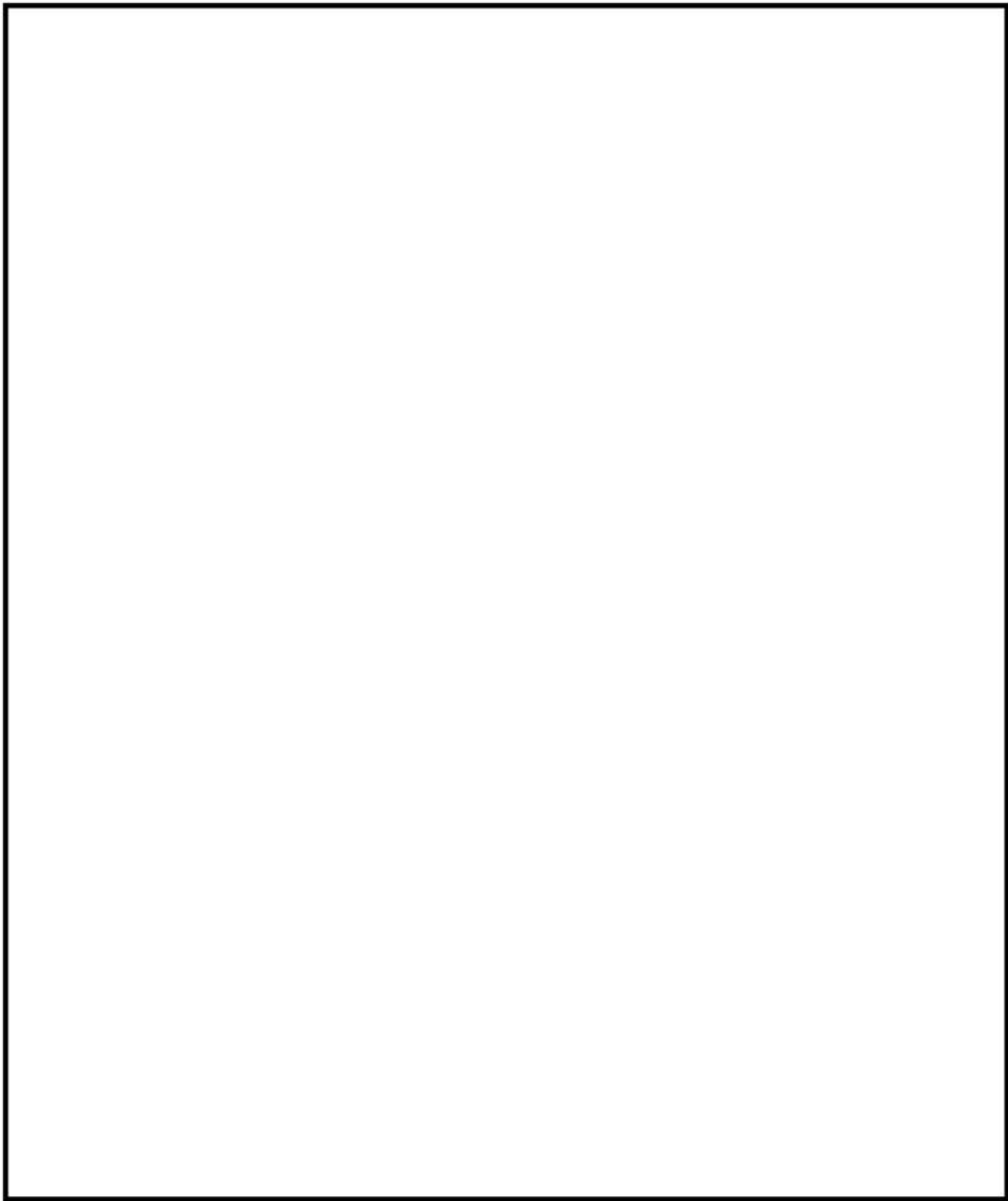
部位	緩衝材	構造例①（別紙 1 - 1 図）	構造例②（別紙 1 - 2 図）
貯蔵用 三次蓋			
貯蔵用 緩衝体			



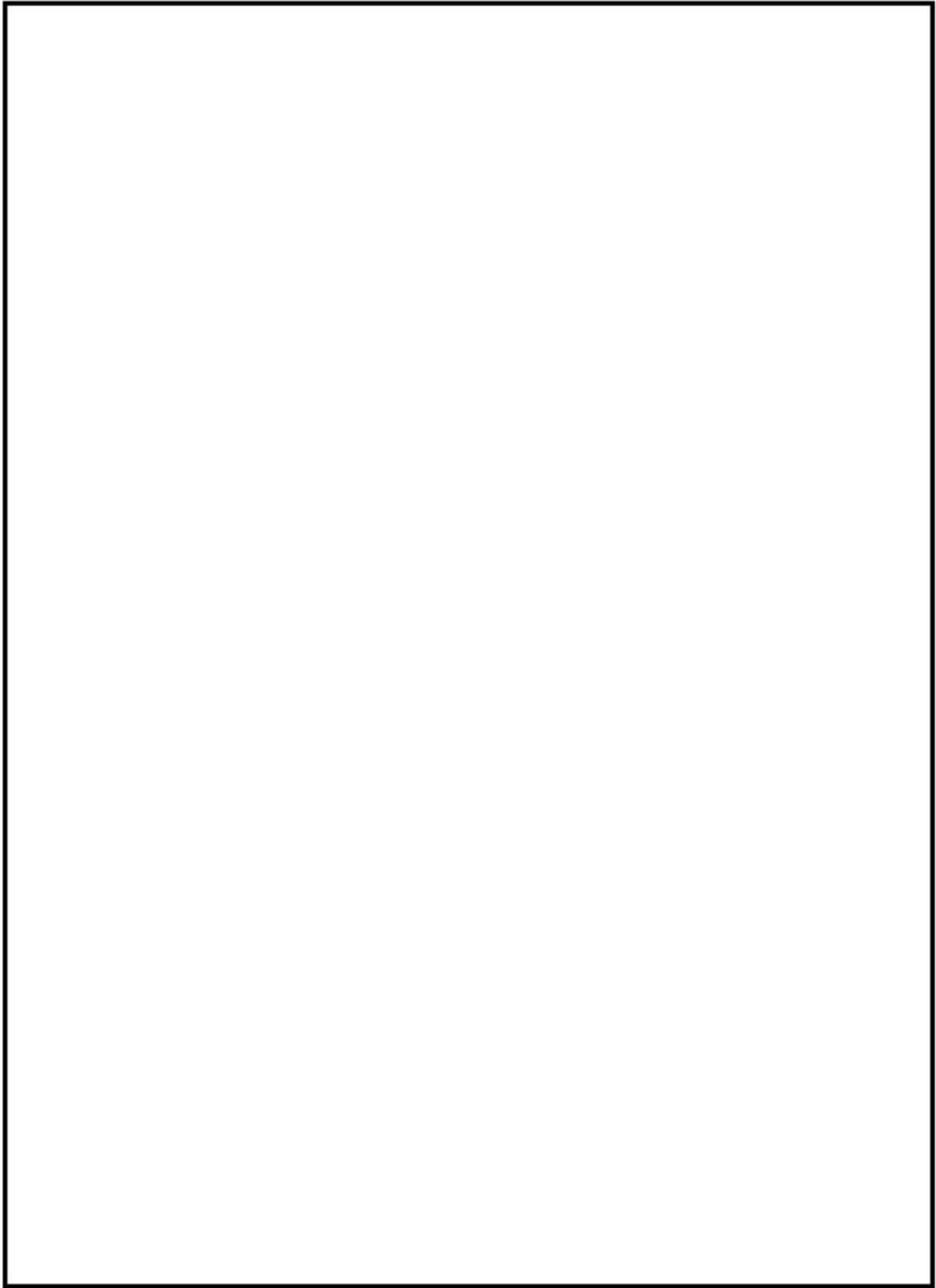
別紙 1 - 1 図 貯蔵用構造 (構造例①)

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。



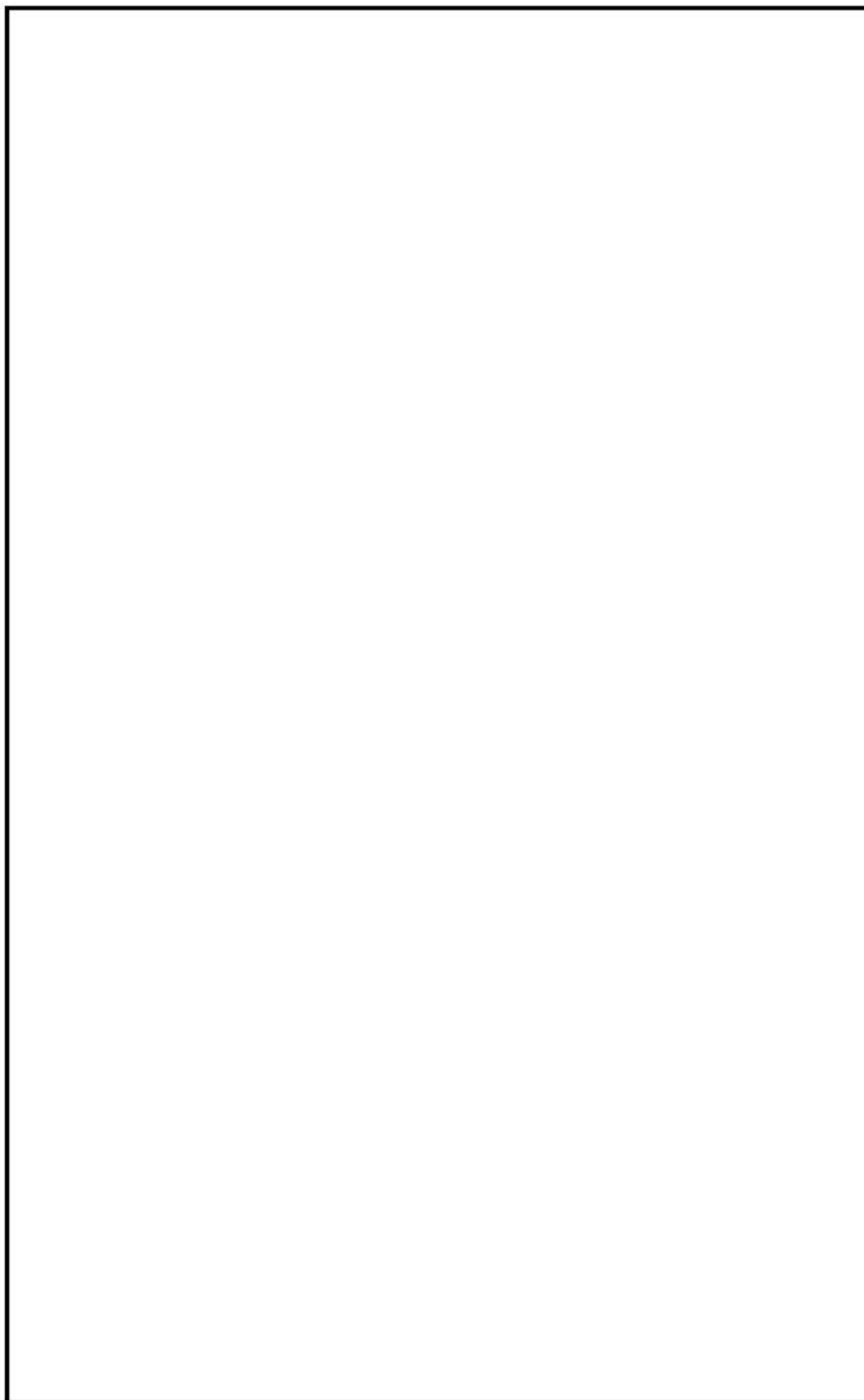
別紙 1 - 2 図 貯蔵用構造 (構造例②)



別紙 1 - 3 図 貯蔵用三次蓋

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

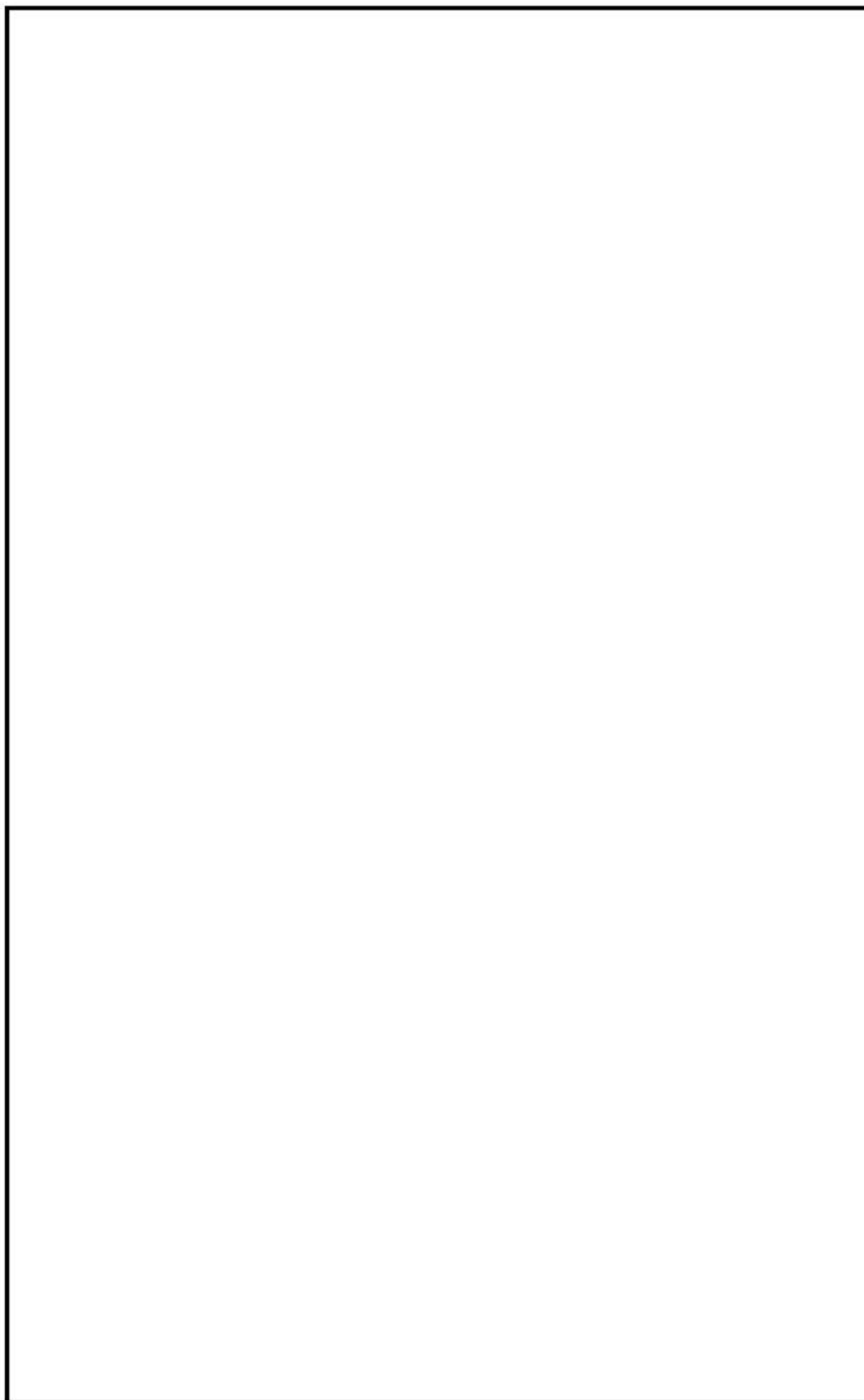
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1 - 4 図 (a) 貯蔵用上部緩衝体 (構造例①) 緩衝材 : 木材)

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

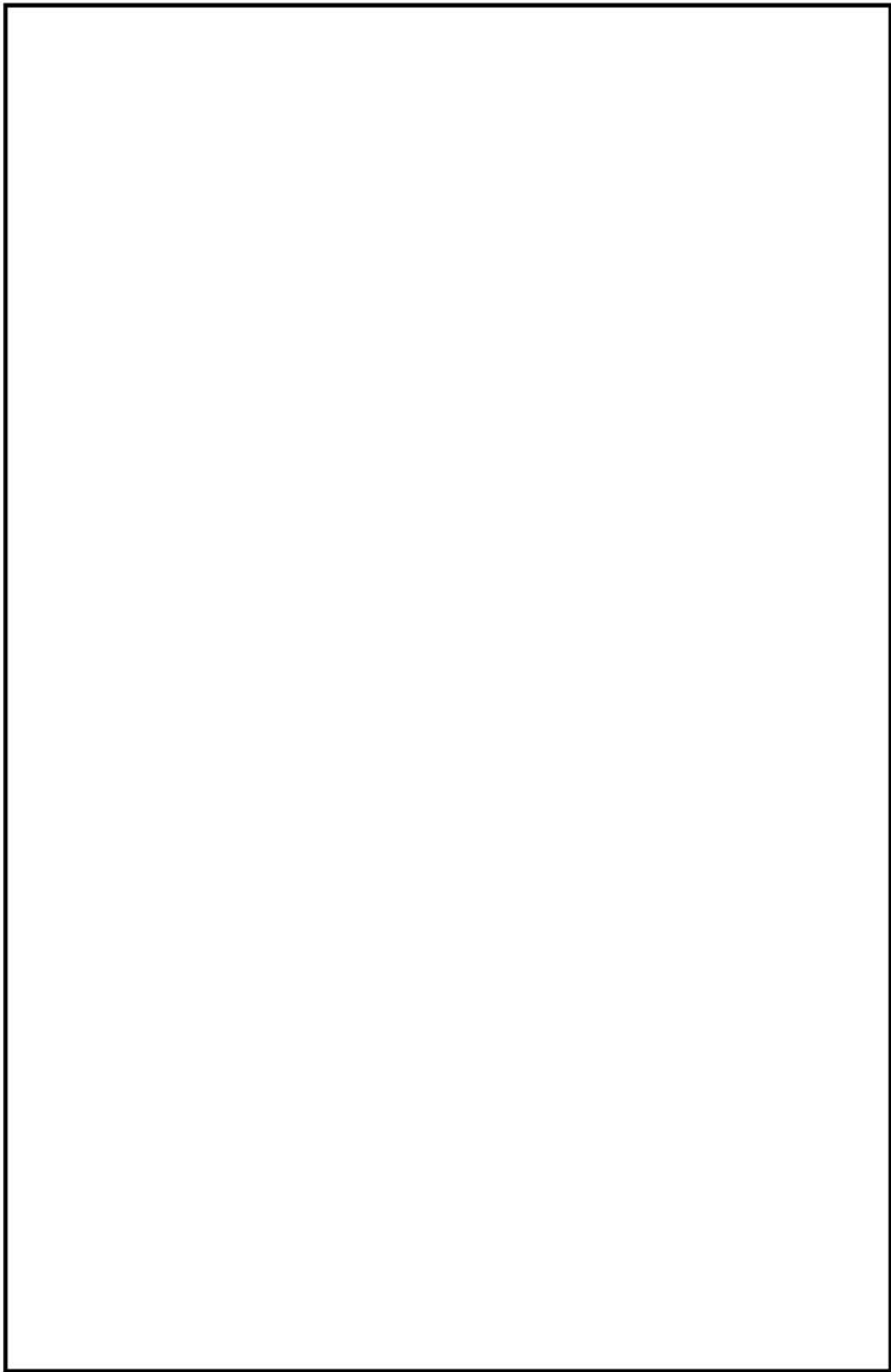
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1 - 4 図 (b) 貯蔵用上部緩衝体 (構造例①) 緩衝材 : 金属

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

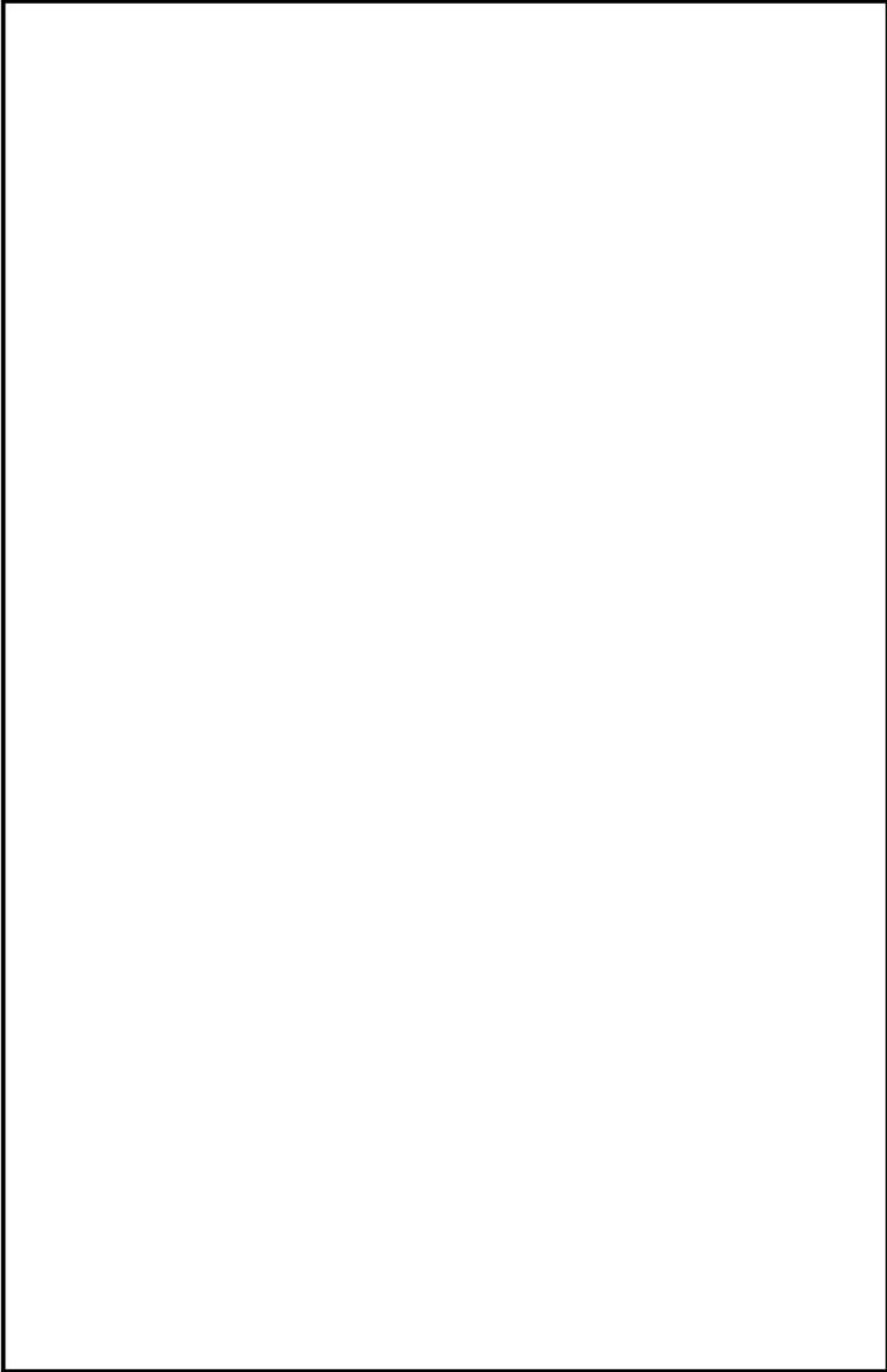
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1 - 5 図 (a) 貯蔵用上部緩衝体 (構造例②) 緩衝材 : 木材)

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。



別紙 1 - 5 図 (b) 貯蔵用上部緩衝体 (構造例②) 緩衝材 : 金属

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。

3. 輸送用と貯蔵用の構造差異による構造強度への影響

別紙 1-1 表に示した貯蔵用の構造例①及び構造例②と輸送用との構造強度への影響有無を確認する。構造強度への影響有無の確認は、緩衝材が木材の場合を代表して評価する。

なお、緩衝材が金属の場合は、緩衝材の圧潰特性を調整し、緩衝体が木材の構造と比べて衝撃吸収性能（落下時の衝撃加速度）が同程度となる設計とするため、構造強度への影響は緩衝材が木材の場合と同等である。

構造強度への影響確認は、貯蔵用の構造例①及び構造例②の MSF-24P 型が水平姿勢で落下した場合の蓋部の構造応答（ひずみ）について、同じ姿勢で落下した輸送用の蓋部の構造応答と比べて有意な差異があるかどうかを動的解析により評価した。構造強度への影響確認方法及び影響確認結果を以下に示す。

3.1 解析条件

a. 解析コード

構造強度への影響確認のために実施する動的解析には、衝撃計算コード LS-DYNA を使用する。

b. 落下姿勢

構造強度への影響確認のため一例として、6m 高さからの水平姿勢での落下とする。

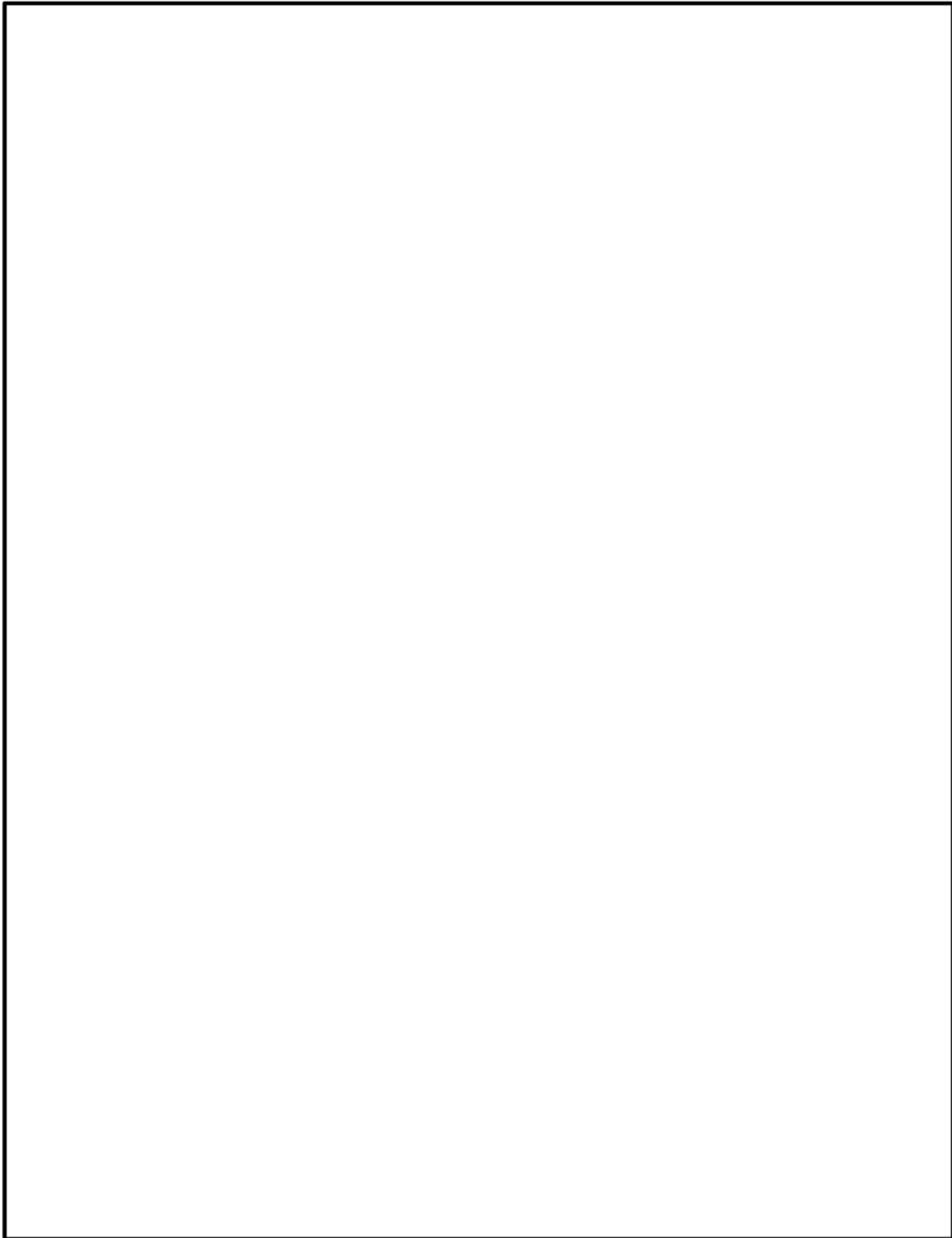
c. 解析モデル

解析モデル図を別紙 1-6 図に示す。

本解析モデルは、胴、外筒、下部端板、中性子遮蔽材、一次蓋、二次蓋、貯蔵用又は輸送用の三次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用又は輸送用の三次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、貯蔵用又は輸送用の緩衝体、内部収納物であるバスケット及び燃料集合体等より構成される。

胴、外筒、下部端板、中性子遮蔽材、一次蓋、二次蓋、貯蔵用又は輸送用の三次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用又は輸送用の三次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、貯蔵用又は輸送用の上部緩衝体及び下部緩衝体（外鋼板は除く）、バスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート、使用済燃料集合体はソリッド要素とし、緩衝体外鋼板、リブ及びペローズはシェル要素としてモデル化した。

また、解析モデルは、構造の対称性を考慮し、三次元 180° 対称モデルとした。

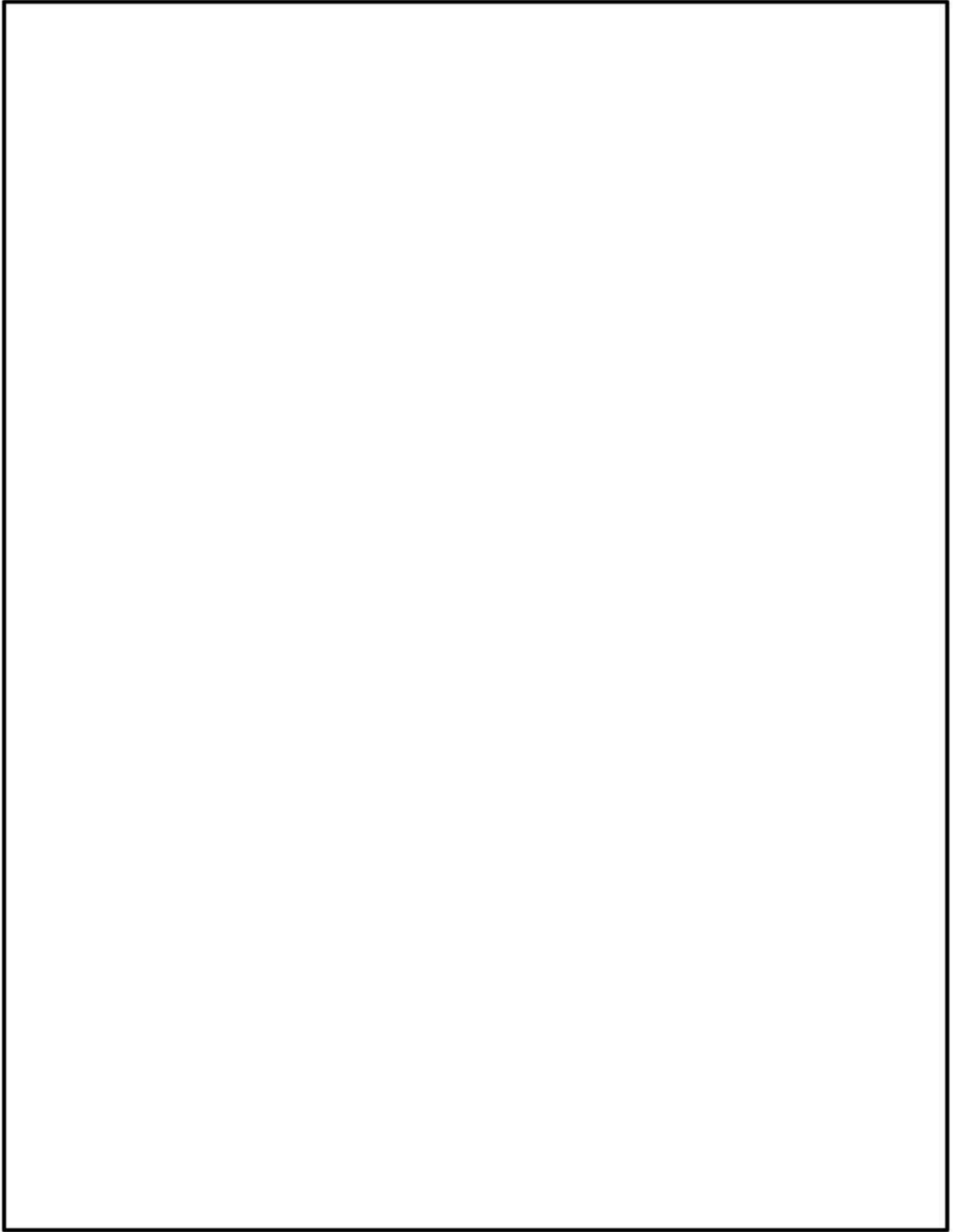


別紙 1 - 6 図 解析モデル (1/3)

(輸送時モデル)

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。

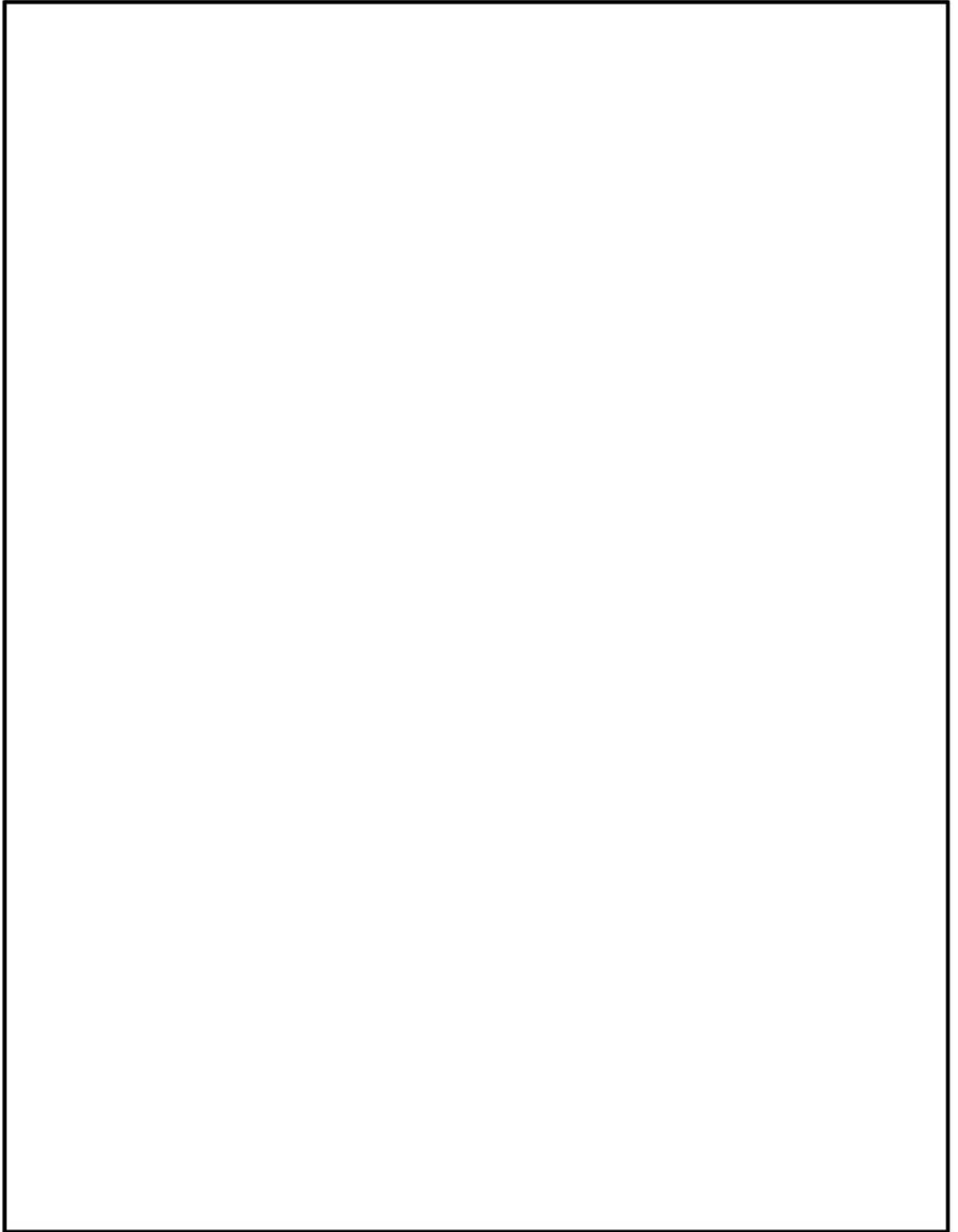


別紙 1 - 6 図 解析モデル (2/3)

(貯蔵時モデル 構造例①)

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。



別紙 1 - 6 図 解析モデル (3/3)

(貯蔵時モデル 構造例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。

d. 材料特性

貯蔵用又は輸送用緩衝体を含む兼用キャスクの各構成部品は、中性子遮蔽材を除き、全て等方性を有する弾塑性体としてモデル化し、材料特性は材料構成式の多直線近似により設定した。また、炭素鋼製及びステンレス鋼製の構成部品については、材料特性のひずみ速度依存性を考慮した。

e. 緩衝材の圧潰特性

緩衝体の緩衝材（木材）に入力する圧潰特性には、設計貯蔵期間中の緩衝材の緩衝性能の変化（補足説明資料 16-6 「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95JY215）」参照）を考慮し、一例として、残存強度比が 0.8 の場合の強度低下を考慮（別紙 2-2 図の圧潰特性に 0.8 を乗じる）した圧潰特性を入力した。

f. 荷重条件

兼用キャスクに作用する供用中の荷重として、ボルトの締付力、蓋部の金属ガスケットの反力、内圧、自重を考慮した。

e. 境界条件

本解析は 180° モデルであるため、対称面に対称条件を用いた。

f. 初速度条件

MSF-24P 型の落下高さの位置エネルギーに相当する衝突速度を MSF-24P 型の初速度として入力した。

3.2 評価項目

構造強度への影響確認として、構造差異による影響が大きいと考えられる蓋部の構成部材を対象とし、一次蓋シール部、二次蓋シール部、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、三次蓋ボルトの相当ひずみについて差異を比較する。

3.3 評価結果

3.2 に示した評価項目の出力結果を別紙 1 - 2 表に示す。貯蔵時構造（構造例①及び構造例②）の評価項目の結果は、輸送時構造の結果に比べて最大で 7%程度の差異が確認された。したがって、輸送時の落下評価結果を用いて貯蔵時の構造健全性を評価する際には、7%程度のひずみの差異が生じることを考慮する必要がある。

別紙 1 - 2 表 評価項目の出力結果（各部の相当ひずみ）

対象部位	貯蔵時構造				輸送時構造 (③)
	構造例①	比(①/③)	構造例②	比(②/③)	
一次蓋シール部	3.22×10^{-4}	1.00	3.31×10^{-4}	1.02	3.23×10^{-4}
二次蓋シール部	8.83×10^{-4}	0.99	9.14×10^{-4}	1.02	8.95×10^{-4}
一次蓋ボルト	3.29×10^{-3}	1.00	3.30×10^{-3}	1.00	3.30×10^{-3}
二次蓋ボルト	4.06×10^{-3}	1.05	4.12×10^{-3}	1.07	3.85×10^{-3}
三次蓋ボルト	1.89×10^{-3}	0.94	1.93×10^{-3}	0.96	2.01×10^{-3}

輸送時の 0.3m 落下時の構造健全性評価

1. 概要

MSF-24P 型は、使用済燃料集合体を貯蔵する機能を有するとともに、使用済燃料の原子力発電所敷地外への運搬に使用する輸送容器としての機能を併せもつ兼用キャスクである。そのため、事業所外運搬規則に定める BM 型輸送物に係る一般の試験条件（0.3m 落下試験）に適合する設計としている。

本別紙では、0.3m 落下時における MSF-24P 型の構造健全性評価の詳細を示す。

2. 落下時の衝撃加速度

輸送物が 0.3 m 落下した場合、その落下エネルギーは容器本体の上下部に取り付けられた緩衝体の変形によって吸収される。本項では、0.3m 落下時の緩衝体の変形量及び衝撃加速度について評価し、輸送容器の健全性を評価する。緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析条件を以下に述べる。

2.1 落下姿勢

輸送物の落下姿勢として次の 2 種類を考える（別紙 2 - 1 図参照）。

- ①垂直落下
- ②水平落下

2.2 解析方法

緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析方法を以下に示す。

①輸送物の落下エネルギーは緩衝体の弾塑性変形によって全て吸収されるものとする。この仮定では、緩衝体を除いた輸送物及び落下試験台を剛体とし、落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視することになるので、落下による緩衝体の変形を大きく評価することにより保守側の解析となる。

②解析に用いる輸送物の質量に関する数値は、輸送物最大総質量 134.4 トンを用いる。

落下エネルギーは次式で与えられる。

$$E_k = mgH$$

ただし、

E_k : 輸送物の落下エネルギー (N・mm)

m : 輸送物最大総質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

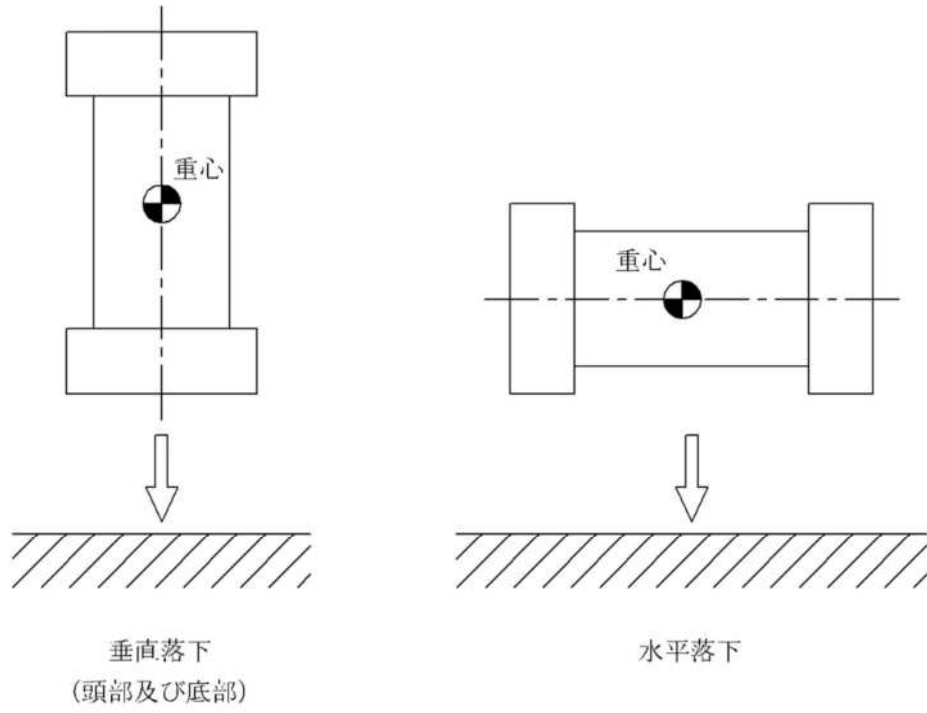
H : 落下高さ (mm)

計算条件と計算結果を別紙 2 - 1 表に示す。

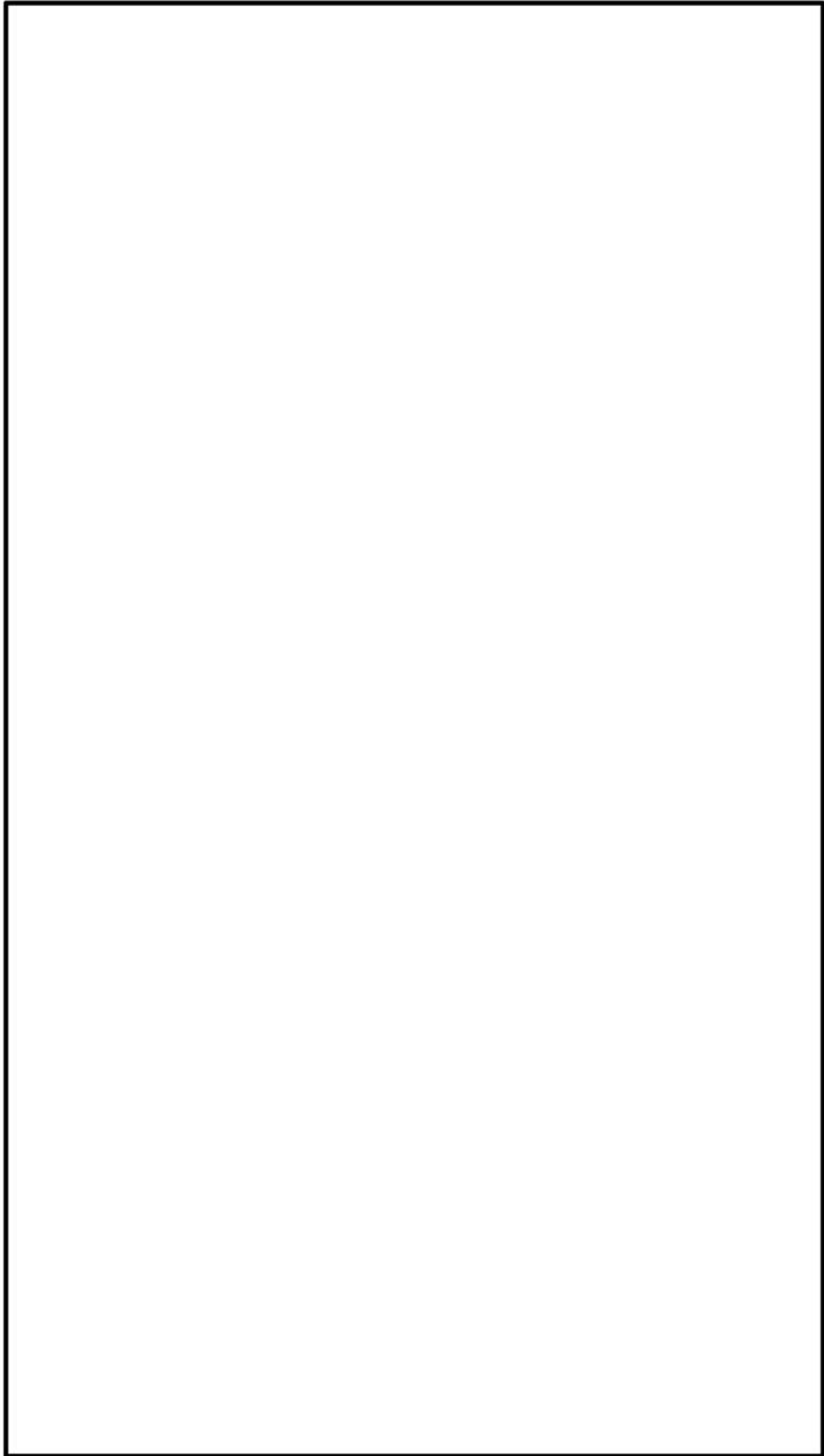
別紙 2 - 1 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大 総質量 : m (kg)	重力加速度 : g (m/s^2)	落下高さ : H (mm)	輸送物の 落下エネルギー : E_k (N・mm)
数値	1.344×10^5	9.80665	300	3.955×10^8

- ③緩衝体の変形量と衝撃力の計算は CRUSH コードを用いて行う。このコードにおいては、エネルギー吸収に寄与する部材は安全側に内部の木材のみとして、緩衝体の変形量を単軸変形法 (UDM) により求めている。
- ④衝撃力については解析と実験との比較検証により得られた誤差 $\pm 20\%$ を考慮した荷係数 1.2 を③で求められる衝撃力に乗じる。
- ⑤木材は、木目 (又は積層) 方向と、木目 (又は積層) と直角方向で圧潰特性が異なる。各々の方向における特性を別紙 2 - 2 図に示す。木目 (又は積層) 方向とある角度を持つ落下方向に対しては、異方性の影響を考慮する。
- ⑥水平落下においては、上部緩衝体と下部緩衝体の吸収エネルギー比を 50% ずつとして解析している。また、緩衝体の変形量は、上部緩衝体と下部緩衝体の変形が大きい方の値としている。



別紙 2 - 1 図 落下姿勢



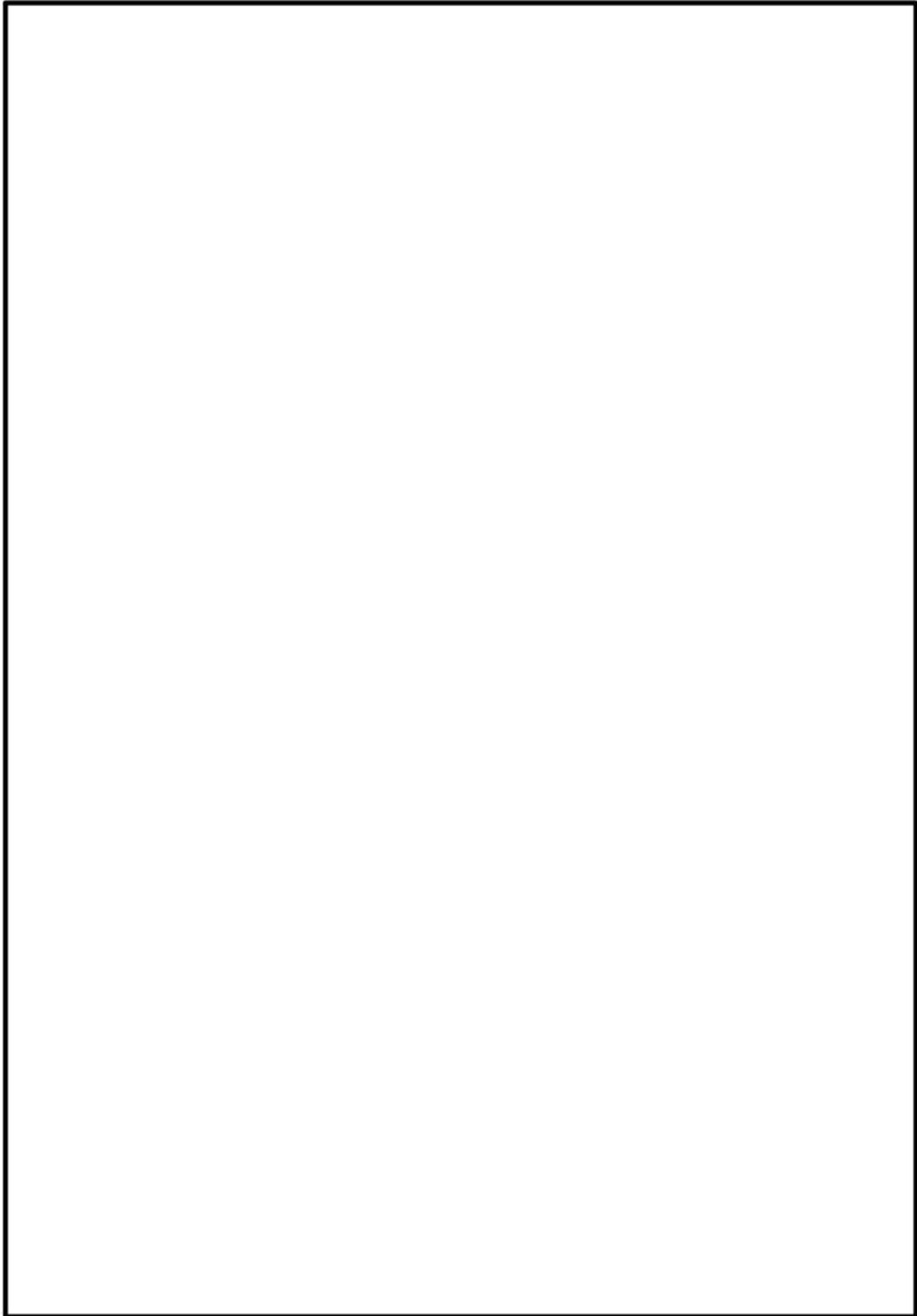
別紙 2 - 2 図 緩衝材（木材）の圧潰特性

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

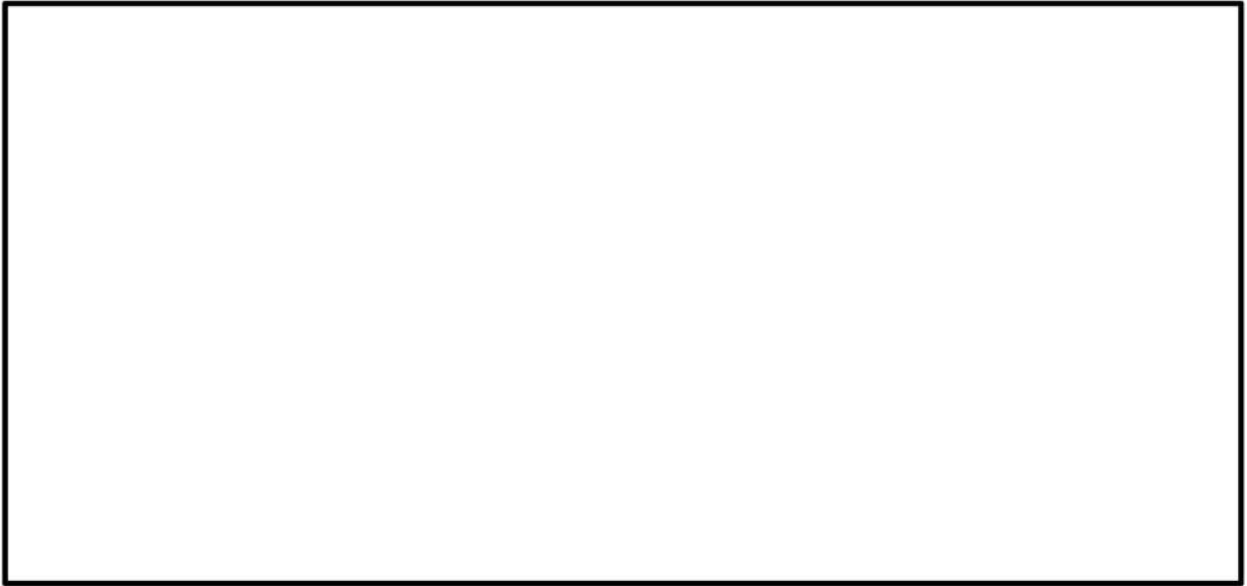
内は商業機密のため、非公開とします。

2.3 解析モデル

各落下方向の解析モデルを別紙 2 - 3 図及び別紙 2 - 4 図に示す。斜線を施した部分、すなわち緩衝体内の木材が変形量 δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。



別紙 2 - 3 図 垂直落下解析モデル



別紙 2 - 4 図 水平落下解析モデル

2.4 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

2.1~2.3 に示した方法により求めた落下エネルギー E_k に対応する変形量 δ と衝撃加速度 G を別紙 2 - 2 表に示す。

ここで、衝撃加速度 G は次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

m : 輸送物質質量 (kg)

別紙 2 - 2 表 0.3m 落下時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 : F (N)	衝撃 加速度 G : (m/s ²)	設計 加速度 ^(注1) (m/s ²)	緩衝体の 変形量 : δ (mm)	評価基準 変形量 ^(注2) : δ_{max} (mm)
垂直 落下	頭部	3.555×10^7	265	270	26	684
	底部	3.417×10^7	255	260	27	608
水平落下		2.686×10^7	200	210	42	374.5

(注1)設計加速度とは、衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注2)評価基準変形量とは、それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

3. 落下時の兼用キャスク本体（伝熱フィンを除く）の応力評価

3.1 解析モデル

MSF-24P 型の兼用キャスク本体の解析は、有限要素法による構造解析コード（ABAQUS コード）を使用し、三次元有限要素を用いた別紙 2 - 5 図に示す三次元 180 ° 対称モデルを用いる。

MSF-24P 型の構成部材の物性値として入力する縦弾性係数及び熱膨張係数には、金属キャスク構造規格別表 6 - 1 及び別表 6 - 2 に示される値を使用する。

3.2 荷重条件及び境界条件

0.3m 垂直落下（頭部・底部）及び 0.3m 水平落下における荷重条件及び境界条件を別紙 2 - 6 図から別紙 2 - 8 図に示す。解析条件を以下に示す。

(1) 荷重条件

a. 機械的荷重・慣性力

0.3m 頭部垂直落下時に作用する荷重は以下のとおりである。

- ・ 衝撃加速度（ 270 m/s^2 ）による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 下部緩衝体の自重による慣性力が胴（底板）外面に働く。
- ・ 内部の収納物等（バスケット、燃料集合体）の慣性力が一次蓋内面に働く。
- ・ 落下時の上部緩衝体反力が三次蓋外面に働く。

0.3m 底部垂直落下時に作用する荷重は以下のとおりである。

- ・ 衝撃加速度（ 260 m/s^2 ）による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋上面に働く。
- ・ 内部の収納物等（バスケット、燃料集合体）の慣性力が胴（底板）内面に働く。

0.3m 水平落下時に作用する荷重は以下のとおりである。

- ・ 衝撃加速度（ 210 m/s^2 ）による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・ 内部の収納物等（バスケット、燃料集合体）の慣性力が胴内面へ働く。
- ・ 落下時の上・下部緩衝体反力が胴フランジ面及び底板に働く。

また、蓋ボルトの初期締付力、一次蓋及び二次蓋の金属ガスケットの締付反力等を機械的荷重として考慮する。

b. 圧力荷重

圧力荷重として、胴内圧、一次蓋－二次蓋間の圧力、二次蓋－三次蓋間の圧力、中性子遮蔽材部（蓋部、側部、底部）の圧力を考慮する。

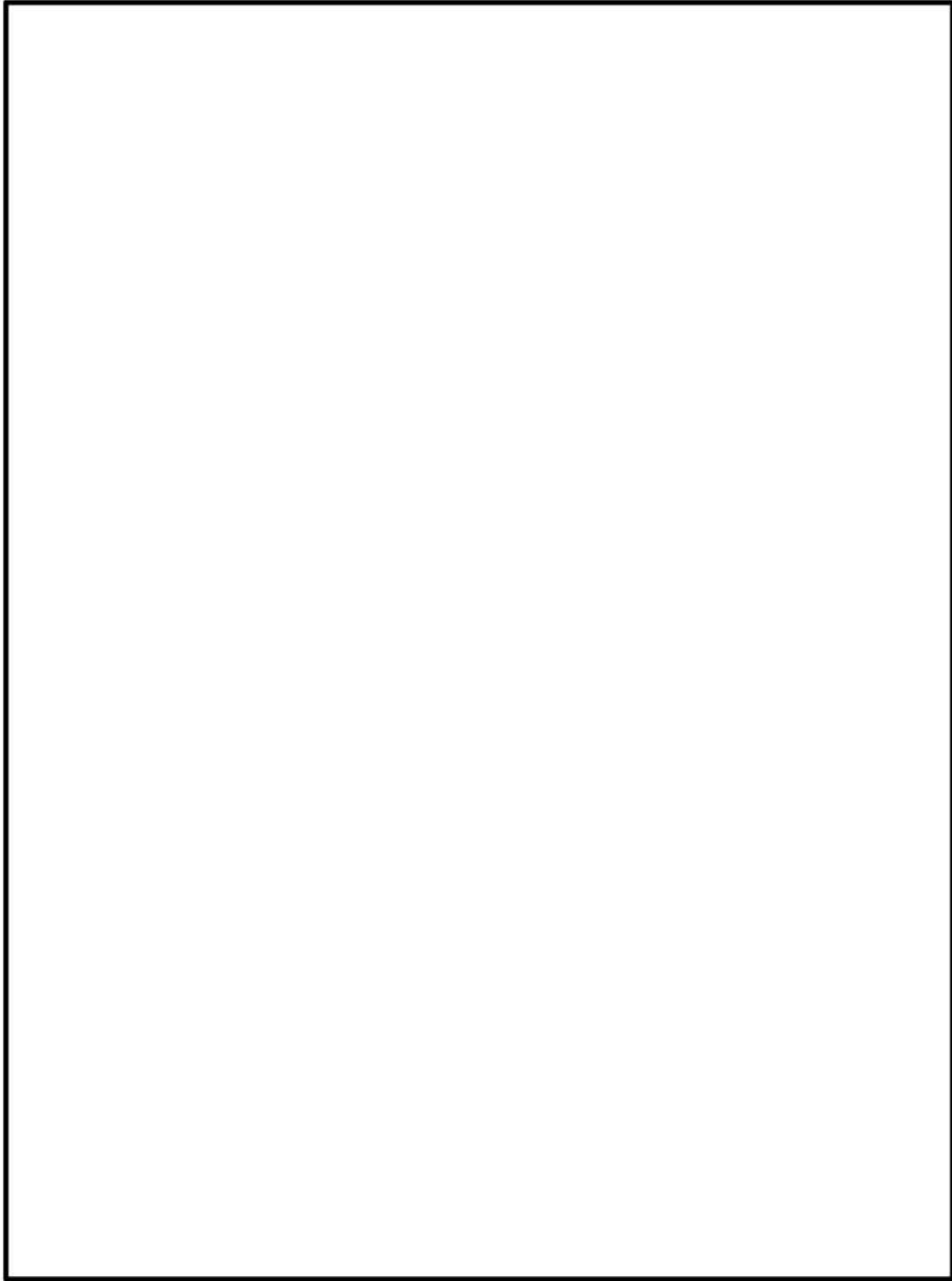
c. 熱荷重

除熱解析結果から得られる MSF-24P 型の温度分布を入力することで、モデル化した構成部材の熱荷重を考慮する。

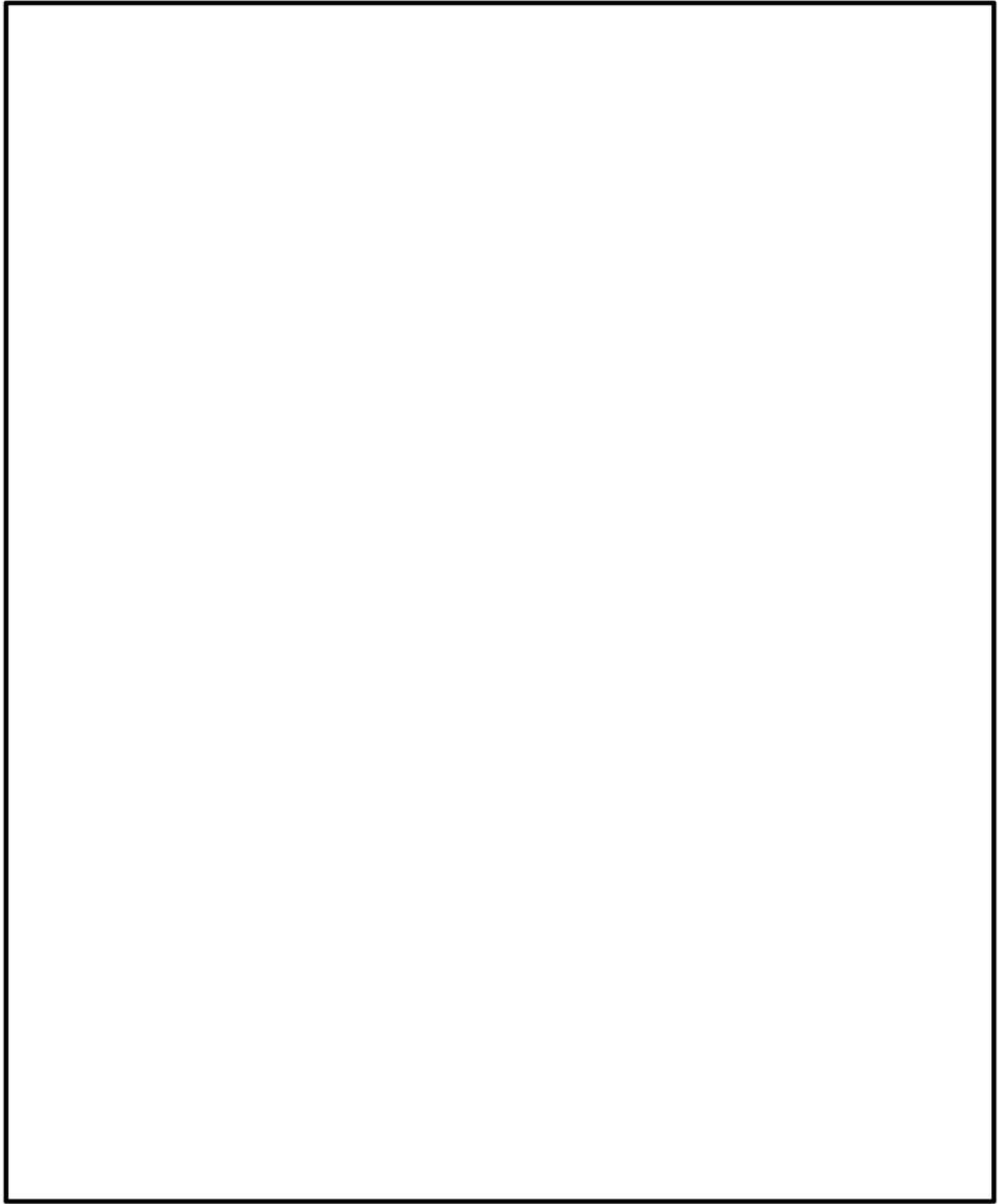
(2) 境界条件

0.3m 頭部垂直落下及び底部垂直落下時には、衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点の法線方向変位を拘束し、他は変位自由とした。

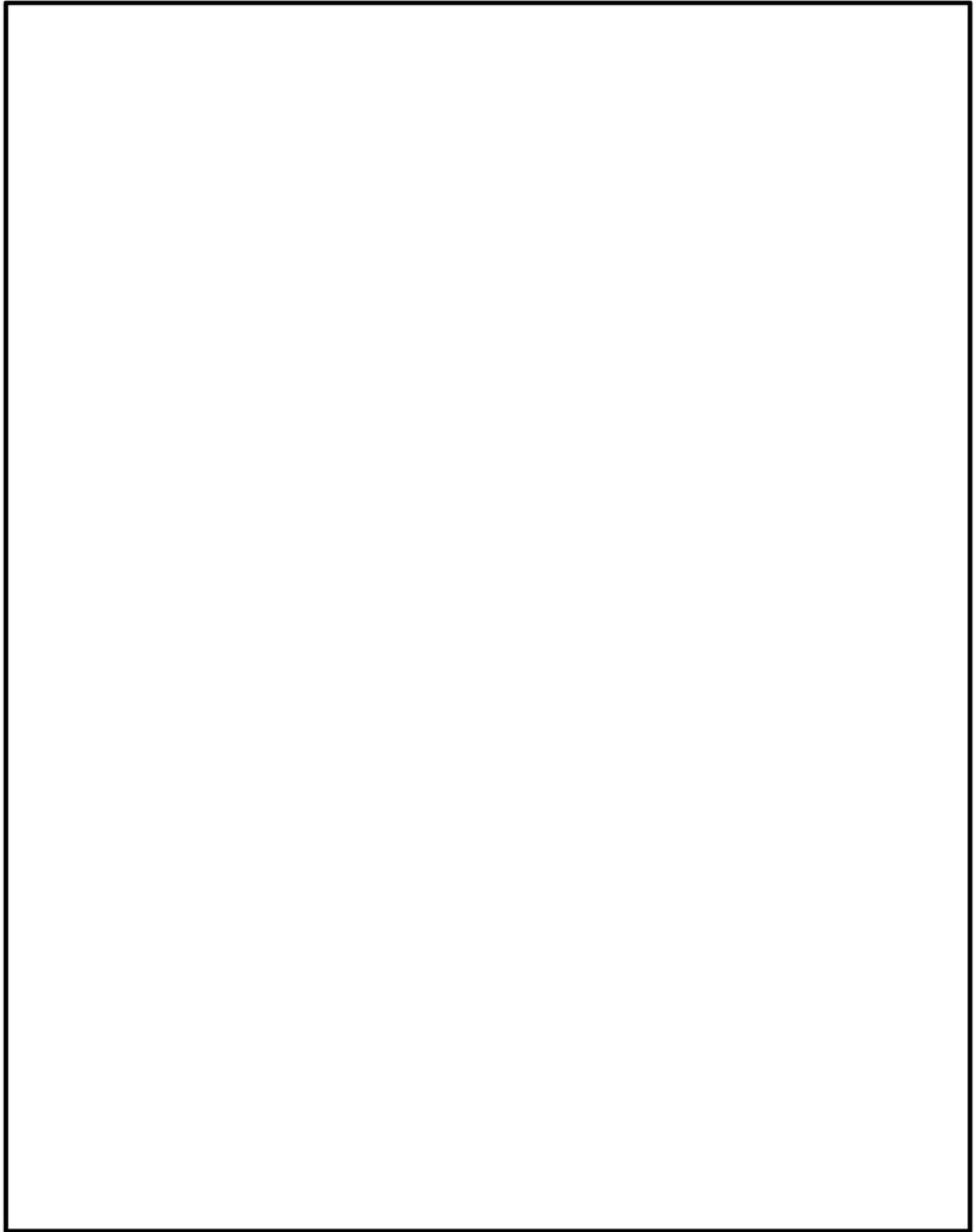
0.3m 水平落下時には、上・下部緩衝体に取り付く面（反力を受ける面）の上・下 1 箇所の Y 方向変位を拘束した。また、 0° - 180° 面の対称面において X 方向の変位を拘束した。



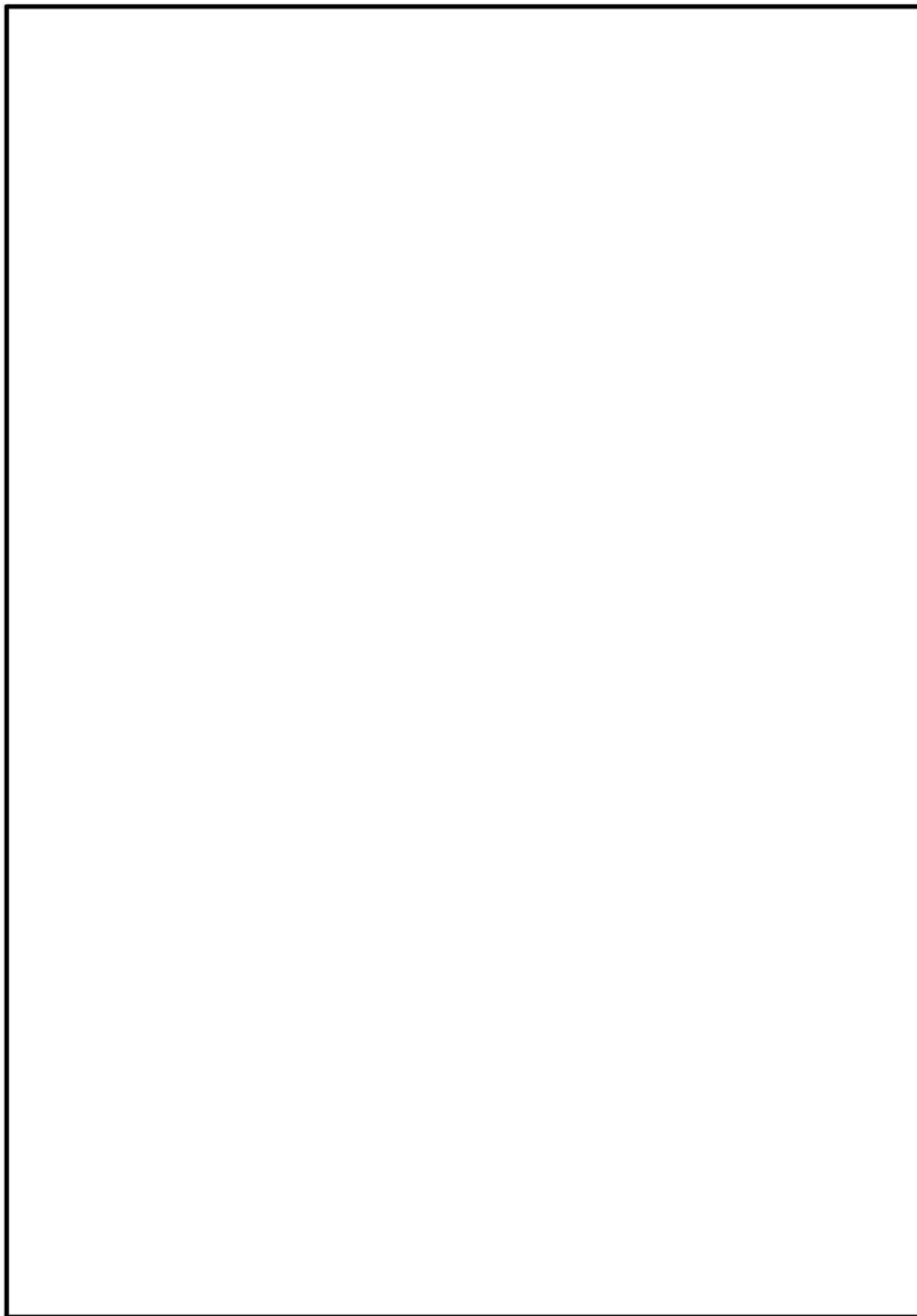
別紙 2 - 5 図 解析モデル



別紙 2 - 6 図 頭部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



別紙 2 - 7 図 底部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



別紙 2-8 図 0.3 m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

3.3 評価基準

胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋、蓋ボルト及び蓋密封シール部に発生する応力の評価基準値は、金属キャスク構造規格を適用した。また、金属キャスク構造規格に評価基準値の記載がない、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は、中性子遮蔽材を保持する構造物であることを考慮し、設計・建設規格〈第I編 軽水炉規格〉のクラス1支持構造物の規定を適用した。

(1) 蓋ボルト以外の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$$

ここで、

P_m : 一次一般膜応力

P_L : 一次局部膜応力

P_b : 一次曲げ応力

Q : 二次応力

S_m : 金属キャスク構造規格 別表第 5-1 に示される設計応力強さ

(2) 蓋ボルト

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

$$(\text{平均引張応力} + \text{曲げ応力}) \leq 3S_m$$

ここで、

S_m : 金属キャスク構造規格 別表第 5-2 に示される設計応力強さ

(3) 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

$$P_L + P_b + Q \leq S_y$$

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格 別表第 5-8 に示される設計降伏点

(4) 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

- a. 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t を超えないこと。一次+二次応力については、b. の圧縮応力との差が f_t の 3 倍を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

S_u : 金属キャスク構造規格¹⁾ 別表 5-9 に示される設計引張強さ

$S_y(\text{RT})$: 金属キャスク構造規格¹⁾ 別表 5-8 に示される 40 °C における設計降伏点

- b. 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c を超えないこと。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$v : v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

- c. 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s を超えないこと。一次+二次応力については f_s の 3 倍を超えないこと。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

- d. 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b を超えないこと。一次+二次応力については f_b の 3 倍を超えないこと。

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

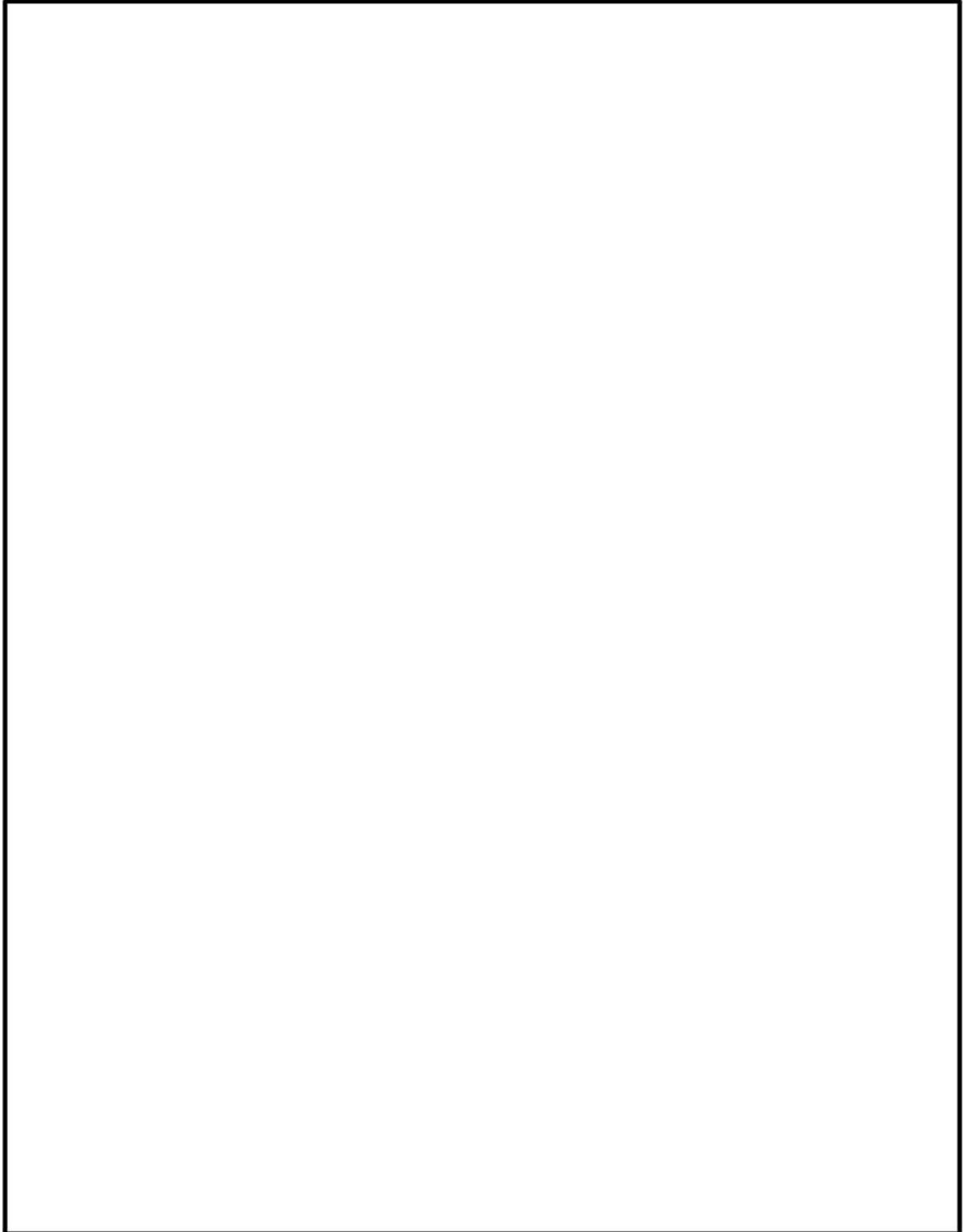
(5) 余裕率

上記に示した評価基準に対して、解析結果は、次に示す余裕率（MS）を用いて評価する。
したがって、余裕率は0以上であれば評価基準を満足する。

$$\text{余裕率 (MS)} = \text{評価基準値} / \text{解析結果} - 1$$

3.4 解析結果

主要な位置（別紙 2 - 9 図参照）に対する応力解析結果を別紙 2 - 3 表から別紙 2 - 8 表に示す。0.3m 落下時において、すべての評価位置において、評価基準を満足した。



別紙第 2 - 9 図 応力評価位置

別紙 2 - 3 表 頭部 0.3m 垂直落下時の一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
一次蓋	①	P_m	—	7	[]	124	16.7
		P_L+P_b	内	64		186	1.90
	外		65	186		1.86	
	②	P_L	—	33		186	4.63
二次蓋	③	P_m	—	5		124	23.8
		P_L+P_b	内	30		186	5.20
	外		34	186		4.47	
	④	P_L	—	6		186	30.0
三次蓋	⑤	P_m	—	7		137	18.5
		P_L+P_b	内	26		205	6.88
	外		16	205		11.8	
	⑥	P_L	—	36		205	4.69
胴	⑦	P_L	—	43		186	3.32
	⑧	P_m	—	9		123	12.6
		P_L+P_b	内	9	184	19.4	
	外		9	184	19.4		
	⑨-1	P_L	—	5	184	35.8	
	⑨-2	P_L	—	6	184	29.6	
胴(底板)	⑩	P_m	—	1	122	121	
		P_L+P_b	内	6	183	29.5	
	外		6	183	29.5		
⑪	P_L	—	5	183	35.6		
外筒	⑫	引張	—	7	156	21.2	
		圧縮	—	24	156	5.50	
		せん断	—	14	90	5.42	
		曲げ	—	45	156	2.46	
	⑬	引張	—	39	156	3.00	
		圧縮	—	4	156	38.0	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	156	155	
	⑭	引張	—	7	156	21.2	
		圧縮	—	2	156	77.0	
		せん断	—	9	90	9.00	
		曲げ	—	37	156	3.21	

(注1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力

(注3) 断面①~⑪の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫~⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(注4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙 2 - 3 表 頭部 0.3m 垂直落下時の一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
下部端板	⑮	引張	—	2	[Redacted]	136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	4		78	18.5
		曲げ	—	12		136	10.3
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	7		157	21.4
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	8		90	10.2
		曲げ	—	18		157	7.72
	⑰	引張	—	17		157	8.23
		圧縮	—	—		157	—
		せん断	—	10		90	8.00
		曲げ	—	70		157	1.24
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	1		136	135
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	2		78	38.0
		曲げ	—	4		136	33.0
	⑲	引張	—	2	136	67.0	
		圧縮	—	1	136	135	
		せん断	—	3	78	25.0	
		曲げ	—	16	136	7.50	
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	16	186	10.6	
	㉑	P_L	—	31	185	4.96	
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	48	185	2.85	
	㉓	P_L	—	14	185	12.2	

(注1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力

(注3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(注4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙 2 - 4 表 頭部 0.3m 垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注 2)	余裕率 (MS) (注 3)
一次蓋	①	-	内	66	[Redacted]	372	4.63
			外	63			4.90
	②	-	内	48		372	6.75
			外	49			6.59
二次蓋	③	-	内	30		372	11.4
			外	34			9.94
	④	-	内	18		372	19.6
			外	21			16.7
三次蓋	⑤	-	内	26		411	14.8
			外	22			17.6
	⑥	-	内	85		411	3.83
			外	36	10.4		
胴	⑦	-	内	76	372	3.89	
			外	37		9.05	
	⑧	-	内	22	369	15.7	
			外	9		40.0	
	⑨-1	-	内	9	369	40.0	
			外	17		20.7	
	⑨-2	-	内	24		14.3	
			外	23		15.0	
胴(底板)	⑩	-	内	21	366	16.4	
			外	4		90.5	
	⑪	-	内	21	366	16.4	
			外	23		14.9	

(注 1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注 2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(注 3) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙2-4表 頭部0.3m垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価(2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (℃)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
外筒	⑫	引張	—	28	[Redacted]	470	15.7
		せん断	—	14		271	18.3
		曲げ	—	14		470	32.5
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	82		470	4.73
		せん断	—	18		271	14.0
		曲げ	—	85		470	4.52
下部端板	⑮	引張	—	48		410	7.54
		せん断	—	24		236	8.83
		曲げ	—	107		410	2.83
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	8		472	58.0
		せん断	—	11		272	23.7
		曲げ	—	23		472	19.5
	⑰	引張	—	11		472	41.9
		せん断	—	8		272	33.0
		曲げ	—	64		472	6.37
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	35	410	10.7	
		せん断	—	2	236	117	
		曲げ	—	6	410	67.3	
	⑲	引張	—	29	410	13.1	
		せん断	—	3	236	77.6	
		曲げ	—	9	410	44.5	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	24	186	6.75	
			外	21		7.85	
	㉑	—	内	43		185	3.30
			外	38			3.86
一次蓋 シール部	㉒	—	内	25	185	6.40	
			外	96		0.92	
	㉓	—	内	14		185	12.2
			外	14			12.2
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	289	562	0.94	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	323	843	1.60	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	212	564	1.66	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	323	846	1.61	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	204	564	1.76	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	216	846	2.91	

(注1) 別紙2-9図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫~⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面㉑~㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

(注4) 余裕率=評価基準値/解析結果-1で算出される。

別紙 2 - 5 表 底部 0.3m 垂直落下時の一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
一次蓋	①	P_m	—	2	[]	124	61.0
		P_L+P_b	内	16		186	10.6
			外	15		186	11.4
	②	P_L	—	12		186	14.5
二次蓋	③	P_m	—	1		124	123
		P_L+P_b	内	5		186	36.2
			外	4			45.5
	④	P_L	—	5		186	36.2
三次蓋	⑤	P_m	—	8		137	16.1
		P_L+P_b	内	39		205	4.25
			外	35			4.85
	⑥	P_L	—	28		205	6.32
胴	⑦	P_L	—	6		186	30.0
	⑧	P_m	—	11		123	10.1
		P_L+P_b	内	11	184	15.7	
			外	11		15.7	
	⑨-1	P_L	—	16	184	10.5	
	⑨-2	P_L	—	23		7.00	
胴(底板)	⑩	P_m	—	5	122	23.4	
		P_L+P_b	内	24	183	6.62	
			外	30		5.10	
⑪	P_L	—	11	183	15.6		
外筒	⑫	引張	—	12	156	12.0	
		圧縮	—	—	156	—	
		せん断	—	8	90	10.2	
		曲げ	—	39	156	3.00	
	⑬	引張	—	37	156	3.21	
		圧縮	—	1	156	155	
		せん断	—	1	90	89.0	
		曲げ	—	1	156	155	
	⑭	引張	—	12	156	12.0	
		圧縮	—	5	156	30.2	
		せん断	—	7	90	11.8	
		曲げ	—	27	156	4.77	

(注1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力

(注3) 断面①～⑪の P_m に対する基準値は S_m 、 P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値 f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(注4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙 2 - 5 表 底部 0.3m 垂直落下時の一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力 分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(℃)	評価 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS) (注 4)
下部端板	⑮	引張	—	7		136	18.4
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	11		78	6.09
		曲げ	—	43		136	2.16
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	2		157	77.5
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	4		157	38.2
	⑰	引張	—	—		157	—
		圧縮	—	3		157	51.3
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	9		157	16.4
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	13		136	9.46
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	6		78	12.0
		曲げ	—	20		136	5.80
	⑲	引張	—	14		136	8.71
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	8		78	8.75
		曲げ	—	57		136	1.38
二次蓋 シール部	⑳	P_L	—	12		186	14.5
	㉑	P_L	—	14		185	12.2
一次蓋 シール部	㉒	P_L	—	36		185	4.13
	㉓	P_L	—	25	185	6.40	

(注 1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注 2) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部膜応力、 P_b : 一次曲げ応力

(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t 、圧縮応力に対する基準値は f_c 、せん断応力に対する基準値は f_s 、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(注 4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙 2 - 6 表 底部 0.3m 垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注 2)	余裕率 (MS) (注 3)
一次蓋	①	-	内	15	[Redacted]	372	23.8
			外	17			20.8
	②	-	内	22		372	15.9
			外	14			25.5
二次蓋	③	-	内	5		372	73.4
			外	4			92.0
	④	-	内	6		372	61.0
			外	8			45.5
三次蓋	⑤	-	内	37		411	10.1
			外	37			10.1
	⑥	-	内	37		411	10.1
			外	55	6.47		
胴	⑦	-	内	26	372	13.3	
			外	15		23.8	
	⑧	-	内	24	369	14.3	
			外	11		32.5	
	⑨-1	-	内	13	369	27.3	
			外	29		11.7	
	⑨-2	-	内	21		16.5	
			外	44		7.38	
胴(底板)	⑩	-	内	49	366	6.46	
			外	34		9.76	
	⑪	-	内	20	366	17.3	
			外	34		9.76	

(注 1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注 2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(注 3) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙2-6表 底部0.3m垂直落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
外筒	⑫	引張	—	51	[Redacted]	470	8.21
		せん断	—	7		271	37.7
		曲げ	—	19		470	23.7
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	87		470	4.40
		せん断	—	15		271	17.0
		曲げ	—	49		470	8.59
下部端板	⑮	引張	—	40		410	9.25
		せん断	—	11		236	20.4
		曲げ	—	58		410	6.06
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	—		472	—
		せん断	—	4		272	67.0
		曲げ	—	9		472	51.4
	⑰	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	11		472	41.9
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	33		410	11.4
		せん断	—	8		236	28.5
		曲げ	—	26		410	14.7
	⑲	引張	—	15	410	26.3	
		せん断	—	9	236	25.2	
		曲げ	—	61	410	5.72	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	22	186	7.45	
			外	9		19.6	
	㉑	—	内	21		185	7.80
			外	18		9.27	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	63		1.93	
	㉓	—	内	25		185	6.40
			外	24		6.70	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	249	562	1.25	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	250	843	2.37	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	196	564	1.87	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	202	846	3.18	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	234	564	1.41	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	326	846	1.59	

(注1) 別紙2-9図 参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫～⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面㉑～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
より小さい。

(注4) 余裕率=評価基準値/解析結果-1で算出される。

別紙 2 - 7 表 0.3m 水平落下時の一次応力の評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
一次蓋	①	P _m P _L +P _b	—	3	[Redacted]	124	40.3
			内	8			22.2
	②	P _L	外	10		186	17.6
			—	10			17.6
二次蓋	③	P _m P _L +P _b	—	6		124	19.6
			内	15			186
	④	P _L	外	20		186	
			—	19			8.78
三次蓋	⑤	P _m P _L +P _b	—	13		137	9.53
			内	23			205
	⑥	P _L	外	22		205	
			—	24			7.54
胴	⑦	P _L	—	66		186	1.81
	⑧	P _m P _L +P _b	—	21		123	4.85
			内	20			184
	⑨-1	P _L	外	29		184	
			—	20	8.20		
⑨-2	P _L	—	31	4.93			
胴(底板)	⑩	P _m P _L +P _b	—	11	122	10.0	
			内	12		183	14.2
	⑪	P _L	外	13	13.0		
外筒	⑫	引張 圧縮 せん断 曲げ	—	77	156	1.02	
			—	20		6.80	
			—	30		2.00	
			—	87		0.79	
	⑬	引張 圧縮 せん断 曲げ	—	41	156	2.80	
			—	13		11.0	
			—	3		29.0	
			—	7		21.2	
	⑭	引張 圧縮 せん断 曲げ	—	14	156	10.1	
			—	18		7.66	
			—	20		3.50	
			—	86		0.81	

(注1) 別紙 2 - 9 図 参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、P_L : 一次局部膜応力、P_b : 一次曲げ応力

(注3) 断面①~⑩の P_m に対する基準値は S_m、P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は 1.5S_m である。断面⑫~⑭における引張応力に対する基準値は f_t、圧縮応力に対する基準値は f_c、せん断応力に対する基準値は f_s、曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(注4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙2-7表 0.3m水平落下時の一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力 分類 (注2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
下部端板	⑮	引張	—	8	[Redacted]	136	16.0
		圧縮	—	13		136	9.46
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	63		136	1.15
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	2		157	77.5
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	13		157	11.0
	⑰	引張	—	14		157	10.2
		圧縮	—	5		157	30.4
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	24		157	5.54
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	5		136	26.2
		圧縮	—	30		136	3.53
		せん断	—	17		78	3.58
		曲げ	—	11		136	11.3
	⑲	引張	—	12	136	10.3	
		圧縮	—	56	136	1.42	
		せん断	—	16	78	3.87	
		曲げ	—	67	136	1.02	
二次蓋 シール部	⑳	P _L	—	15	186	11.4	
	㉑	P _L	—	67	185	1.76	
一次蓋 シール部	㉒	P _L	—	40	185	3.62	
	㉓	P _L	—	57	185	2.24	

(注1) 別紙2-9図 参照

(注2) P_m : 一次一般膜応力、P_L : 一次局部膜応力、P_b : 一次曲げ応力

(注3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t、圧縮応力に対する基準値は f_c、せん断応力に対する基準値は f_s、曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(注4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

別紙2-8表 0.3m水平落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準値 (MPa) (注2)	余裕率 (MS) (注3)
一次蓋	①	—	内	7	[Redacted]	372	52.1
			外	12			30.0
	②	—	内	15		372	23.8
			外	13			27.6
二次蓋	③	—	内	14		372	25.5
			外	18			19.6
	④	—	内	54		372	5.88
			外	32			10.6
三次蓋	⑤	—	内	25		411	15.4
			外	25			15.4
	⑥	—	内	43		411	8.55
			外	64	5.42		
胴	⑦	—	内	101	372	2.68	
			外	78		3.76	
	⑧	—	内	23	369	15.0	
			外	36		9.25	
	⑨-1	—	内	25	369	13.7	
			外	24		14.3	
	⑨-2	—	内	43		7.58	
			外	32		10.5	
胴(底板)	⑩	—	内	33	366	10.0	
			外	11		32.2	
	⑪	—	内	39	366	8.38	
			外	45		7.13	

(注1) 別紙2-9図 参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(注3) 余裕率=評価基準値/解析結果-1で算出される。

別紙2-8表 0.3m水平落下時の一次+二次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注1)	応力の 種類 (注2)	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度(°C)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
外筒	⑫	引張	—	99	[Redacted]	470	3.74
		せん断	—	26		271	9.42
		曲げ	—	72		470	5.52
	⑬	引張	—	64		470	6.34
		せん断	—	3		271	89.3
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	86		470	4.46
		せん断	—	30		271	8.03
		曲げ	—	134		470	2.50
下部端板	⑮	引張	—	60		410	5.83
		せん断	—	33		236	6.15
		曲げ	—	146		410	1.80
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑰	引張	—	12		472	38.3
		せん断	—	6		272	44.3
		曲げ	—	25		472	17.8
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	64		410	5.40
		せん断	—	17		236	12.8
		曲げ	—	8		410	50.2
	⑲	引張	—	80	410	4.12	
		せん断	—	16	236	13.7	
		曲げ	—	59	410	5.94	
二次蓋 シール部	⑳	—	内	36	186	4.16	
			外	25		6.44	
	㉑	—	内	61		185	2.03
			外	62		1.98	
一次蓋 シール部	㉒	—	内	28	185	5.60	
			外	70		1.64	
	㉓	—	内	57		185	2.24
			外	56		2.30	
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	251	562	1.23	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	590	843	0.42	
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	241	564	1.34	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	596	846	0.41	
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	285	564	0.97	
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	468	846	0.80	

(注1) 別紙2-9図参照

(注2) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(注3) 断面⑫~⑱における引張応力に対する基準値は $3f_t$ 、せん断応力に対する基準値は $3f_s$ 、曲げ
 応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面㉑~㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準
 値は σ_m に対して $2S_m$ 、 $\sigma_m + \sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお、蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は、 S_y
 より小さい。

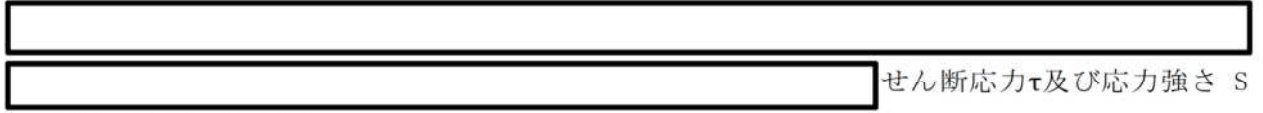
(注4) 余裕率 = 評価基準値 / 解析結果 - 1 で算出される。

4. 落下時の伝熱フィンの応力評価

4.1 0.3m 垂直落下

(1) 応力計算方法

垂直落下時には、伝熱フィンの胴側取付部において伝熱フィン及び中性子遮蔽材の自重による慣性力により以下の式に示すせん断応力 τ (MPa) が生じる。なお、別紙 2-10 図のとおり、



の算出式を以下に示す。

$$\tau = \frac{(W_1 + W_2)G_v}{A}$$

$$S = 2 \tau$$

ここで、

τ : せん断応力 (MPa)

S : 応力強さ (MPa)

W_1 : 伝熱フィンの軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)

W_2 : 中性子遮蔽材の軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)

G_v : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積 (mm^2/mm)



別紙 2-10 図 伝熱フィン取付部の応力計算モデル

(2) 評価基準

伝熱フィン、中性子遮蔽材領域の除熱機能の向上を目的として胴と外筒の間に取付けられる伝熱部材であり、密封容器の構造強度を担保するものではないものの、本評価では、必要な除熱機能が維持されることを確認するため、伝熱フィンについては落下時に伝熱フィン取付部の健全性が維持されることを確認する。

なお、解析結果は、評価基準に対して、次に示す余裕率 (MS) を用いて評価する。したがって、余裕率は 0 以上であれば評価基準を満足する。

$$\text{余裕率 (MS)} = \text{評価基準値} / \text{解析結果} - 1$$

(3) 計算条件及び計算結果

計算条及び計算結果を別紙 2 - 9 表に示す。表に示すように、評価基準値を満足する。

別紙 2 - 9 表 伝熱フィン取付部計算条件及び計算結果

伝熱フィンの軸方向単位長さ当たり重量 : W_1 (kg/mm)	中性子遮蔽材の軸方向単位長さ当たり重量 : W_2 (kg/mm)	垂直落下時の衝撃加速度 : G_v (m/s ²)	フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積 : A (mm ² /mm)
		270	

伝熱フィンの温度 (°C)	せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
120	3	6	63	9.50

4.2 0.3m 水平落下

水平落下時には、伝熱フィンの鉛直上側に位置する中性子遮蔽材の重量による荷重が伝熱フィンに作用するが、伝熱フィンは鉛直下側の中性子遮蔽材により支えられるため、伝熱フィンへの影響はない (別紙 2 - 11 図参照)。



別紙 2 - 11 図 水平落下時に伝熱フィンに作用する荷重

5. 落下時のバスケットの応力評価

5.1 0.3m 垂直落下

(1) 応力計算方法

バスケットは、頭部側と底部側で同様な構造である。設計加速度は、頭部垂直落下の方が大きいいため、頭部垂直落下の値を用いて評価する。

垂直落下時に最下段のバスケットプレートには、それより上部にあるバスケットプレートを含む自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_V}{A_1}$$

ここで、

W_b : バスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材の合計質量 (kg)

G_V : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

$$A_1 = (b_{A1} - b_{A2}) L_1 \cdot n_A + (b_{B1} - b_{B2}) L_1 \cdot n_B$$

b_{A1} : バスケットプレート A 幅 1 (mm)

b_{A2} : バスケットプレート A 幅 2 (mm)

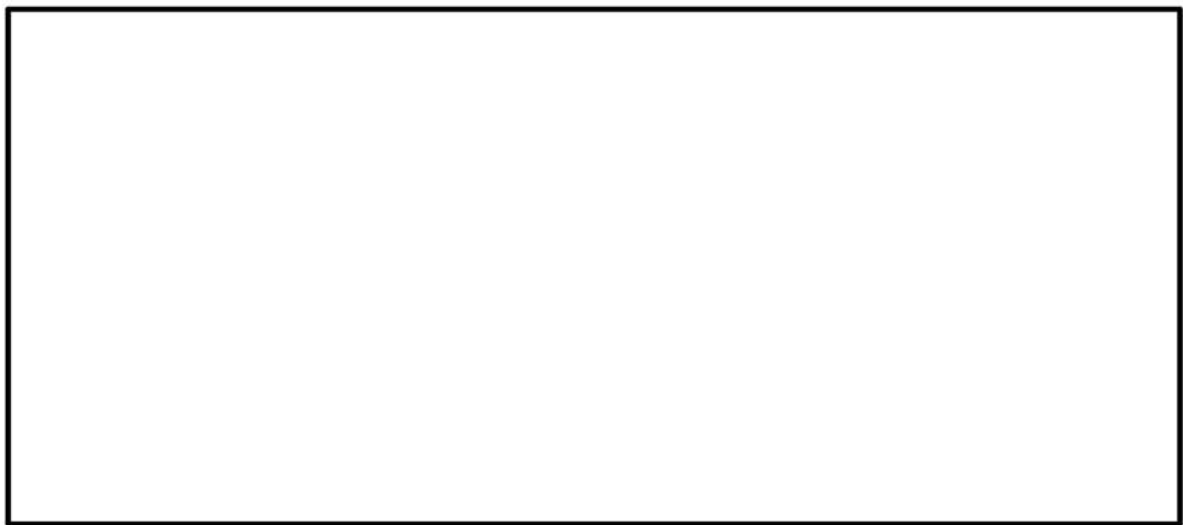
b_{B1} : バスケットプレート B 幅 1 (mm)

b_{B2} : バスケットプレート B 幅 2 (mm)

L_1 : バスケットプレート長さ (mm)

n_A : 胴に接触するバスケットプレート A L_1 部の個数 (-)

n_B : 胴に接触するバスケットプレート B L_1 部の個数 (-)



別紙 2-12 図 バスケットプレートの応力計算モデル

(2) 評価基準

アルミニウム合金製のバスケットプレートについては、金属キャスク構造規格のバスケットの考え方を基本として、以下のとおり評価基準値を設定した。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_m + P_b \leq \alpha S_m$$

$$\tau \leq 0.6 S_m$$

ここで、

S_m : 設計応力強さ

P_m : 一次一般膜応力

P_b : 一次曲げ応力

α : 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 のいずれかの小さい方の値

τ : 平均せん断応力

なお、解析結果は、評価基準に対して、次に示す余裕率 (MS) を用いて評価する。したがって、余裕率は 0 以上であれば評価基準を満足する。

$$\text{余裕率 (MS)} = \text{評価基準値} / \text{解析結果} - 1$$

(3) 計算条件及び計算結果

計算条件と計算結果を別紙 2-10 表に示す。表に示すように、評価位置において評価基準値を満足する。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットプレートは、塑性変形しない。

別紙 2-10 表 バスケットプレートの応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット 合計質量 : W_b (kg)	垂直落下時の 衝撃加速度 : G_v (m/s ²)
数値	5600	270

項目	バスケット プレートの タイプ	バスケット プレート 全厚さ : b_1 (mm)	バスケット プレート 内幅 : b_2 (mm)	バスケット プレート長 さ : L_1 (mm)	胴に接触す るバスケット プレート L_1 部の個数 : n (-)	バスケット プレートと胴 の接触面積 : A_1 (mm ²)
数値						

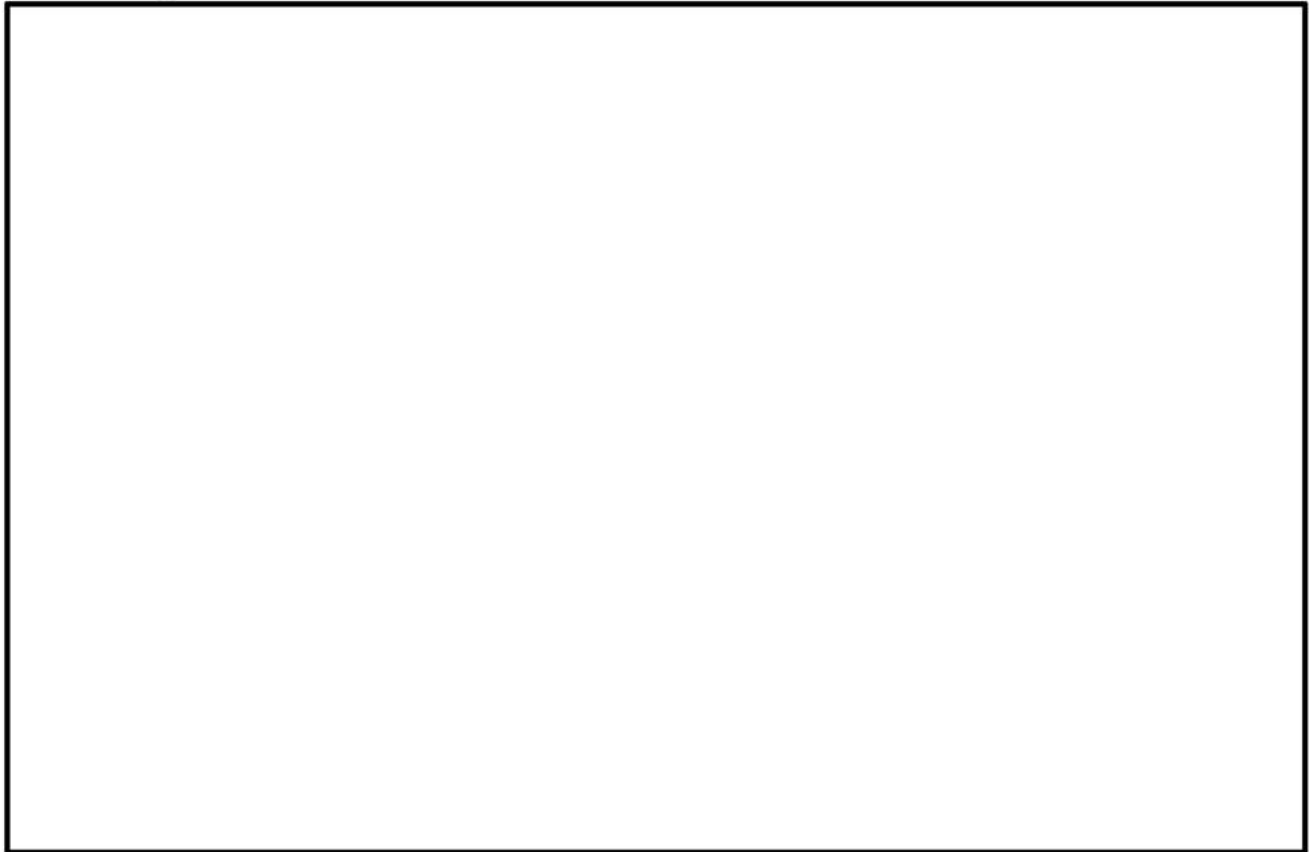
項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	7	36	4.14
	B	7		4.14

5.2 0.3m 水平落下

(1) バスケットプレート縦板

a. 応力計算方法

水平落下時にバスケットプレート縦板切欠部には、別紙 2-13 図に示すように、領域 I の範囲にあるバスケットプレート、バスケットサポート及び燃料集合体の自重による慣性力並びに、領域 II のバスケットプレートの自重による慣性力が作用し、圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。



別紙 2-13 図 バスケットプレート縦板の応力計算モデル

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \cdot N} G_H$$

ここで、

W_I : 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 (kg)

W_{II} : 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

N_f : 領域 I の範囲にある燃料集合体の数 (体)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

N : バスケットプレートの数 (枚)

A : 断面積 (mm²)

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2$$

b₁ : バスケットプレート幅 1 (mm)

b₂ : バスケットプレート幅 2 (mm)

h₁ : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b₃ : バスケットプレート幅 3 (mm)

b₄ : バスケットプレート幅 4 (mm)

h₂ : バスケットプレート高さ 2 (mm)



別紙 2-14 図 バスケットプレートの断面形状 (圧縮による膜応力評価)

b. 評価基準

0.3m 水平落下の評価基準は、5.1 に示す 0.3m 垂直落下と同じである。

c. 計算条件及び計算結果

計算条件と計算結果を別紙 2-11 表に示す。表に示すように、評価基準値を満足する。なお、180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットプレートは、塑性変形しない。

別紙 2-11 表 バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 : W_f (kg)	領域 I の範囲にある燃料集合体の数 (BP 無, BP 有) : N_f (体)	領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 ^(注 1) : W_I (kg)	領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 ^(注 2) : W_{II} (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値					210

項目	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)	バスケットプレート幅 4 : b_4 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	断面積 : A (mm ²)
数値							

項目	バスケットプレートの数 : N (枚)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	基準値 : S_m (MPa)	余裕率 (-)
数値		12	36	2.00

(注 1) 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は、以下のとおりである。

バスケットプレートの質量
 中性子吸収材の質量
 バスケットサポートの質量
 燃料集合体の合計質量

--

(注 2) 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

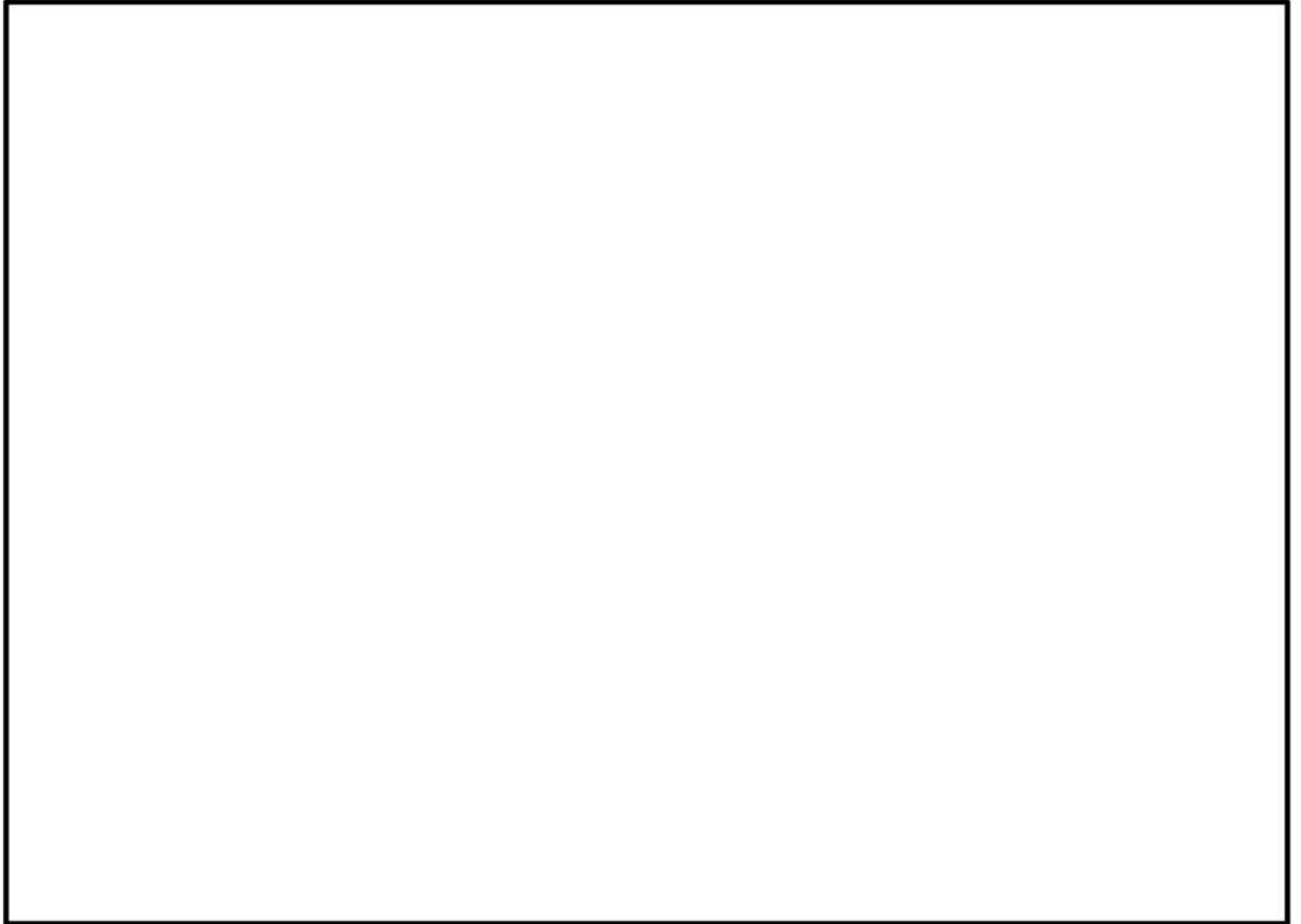
バスケットプレートの質量
 中性子吸収材の質量

--

(2) バスケットプレート横板

a. 応力計算方法

水平落下時にバスケットプレート横板切欠部には、別紙 2-15 図に示すように、バスケットプレート、中性子吸収材及び燃料集合体の自重による慣性力により曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。



別紙 2-15 図 バスケットプレート横板の応力計算モデル

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

$$\tau = \frac{F}{A}$$

ここで、

σ_b : 曲げ応力 (MPa)

τ : せん断応力 (MPa)

M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = \frac{w \cdot \ell^2}{12} G_H$$

Z : 断面係数 (mm³)

$$Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1}$$

A : 断面積 (mm²)

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2)$$

F : せん断力 (N)

$$F = w \times \ell / 2 \times G_H$$

w : 分布荷重 (kg/mm)

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N}$$

ℓ : バスケットセルの内幅 (mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s²)

W_f : 燃料集合体の質量 (kg)

W_b : バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

N : バスケットプレートの数 (段)

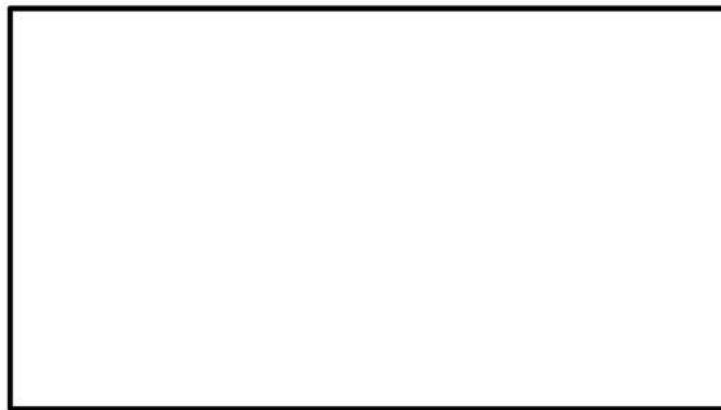
h_1 : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)

b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)

h_2 : バスケットプレート高さ 2 (mm)

b_3 : バスケットプレート幅 3 (mm)



別紙 2-16 図 バスケットプレートの断面形状 (曲げ応力評価)

b. 評価基準

0.3m 水平落下の評価基準は、5.1 に示す 0.3m 垂直落下と同じである。

c. 計算条件及び計算結果

計算条件と計算結果を別紙 2-12 表に示す。表に示すように、評価基準値を満足する。なお、180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また、バスケットに生じる応力は、設計降伏点 (56 MPa) より低いので、バスケットプレートは、塑性変形しない。

別紙 2-12 表 バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量 (BP 有) : W_f (kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b (kg)	バスケットプレートの数 : N (枚)	バスケットセルの内幅 : l (mm)	分布荷重 : w (kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H (m/s ²)
数値						210

項目	バスケットプレート高さ 1 : h_1 (mm)	バスケットプレート幅 1 : b_1 (mm)	バスケットプレート幅 2 : b_2 (mm)	バスケットプレート高さ 2 : h_2 (mm)	バスケットプレート幅 3 : b_3 (mm)
数値					

項目	曲げモーメント : M (N・mm)	断面係数 : Z (mm ³)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	基準値 : αS_m (MPa)	余裕率 (—)
数値			8	46	4.75

項目	せん断力 : F (N)	断面積 : A (mm ²)	せん断応力 : τ (MPa)	基準値 : $0.6S_m$ (MPa)	余裕率 (—)
数値			2	21	9.50

別添 0.3m 落下時の燃料被覆管の応力評価

1. 概要

0.3m 落下時における燃料被覆管の構造健全性として、燃料被覆管の応力評価の詳細を示す。

2. 燃料被覆管の応力評価

2.1 0.3m 垂直落下

垂直落下時に燃料被覆管に生じる応力は、落下衝撃による圧縮応力 σ_c (MPa) と内圧による各方向応力 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ (MPa) である。垂直落下時において最大応力強さ S (MPa) は、燃料被覆管内面に生じるので燃料被覆管内面のみ評価する。

① 落下衝撃により生じる圧縮応力

落下衝撃により生じる圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = -\frac{WG_V}{A}$$

ここで、

W : 燃料被覆管最下端における質量 (kg)

G_V : 垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A : 燃料被覆管の断面積 (mm^2)

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

d_o : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管の内径 (mm)

② 内圧による各方向応力

内圧 P_o により生じる各方向応力は、以下の式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_r = -\frac{\frac{K^2}{R^2} - 1}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{K^2}{R^2} + 1}{K^2 - 1} P_o$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (MPa)

σ_r : 半径方向応力 (MPa)

σ_θ : 周方向応力 (MPa)

$$K = \frac{b}{a}$$

b : 燃料被覆管外半径 (mm)

$$b = \frac{d_o}{2}$$

a : 燃料被覆管内半径 (mm)

$$a = \frac{d_i}{2}$$

P_o : 内圧 (MPa)

$$R = \frac{r}{a} \quad (\text{内面においては } R=1)$$

r : 評価位置 ($a \leq r \leq b$)

③応力強さ

垂直落下時に生じる圧縮応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、以下の式で与えられる。

$$S = \text{Max} \{ |\sigma_{rL} - \sigma_{\theta L}|, |\sigma_{\theta L} - \sigma_{zL}|, |\sigma_{zL} - \sigma_{rL}| \}$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_\theta$$

$$\sigma_{zL} = \sigma_c + \sigma_z$$

燃料被覆管材料 (ジルカロイ-4) の 215 °C における照射後の降伏応力 σ_y は、589 MPa であるので、余裕率 MS は、次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の諸式を用いて燃料に対して計算した結果を別紙 2-13 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは降伏応力以下である。

別紙2-13表 0.3m垂直落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料		15×15燃料	
	A型	B型	A型	B型
燃料被覆管最下端における質量：W (kg)				
衝撃加速度：G _v (m/s ²)	270	270	270	270
燃料被覆管外径：d _o (mm)				
燃料被覆管内径：d _i (mm)				
内圧：P _o (MPa)				
応力強さ：S (MPa)	105	102	126	120
降伏応力：σ _y (MPa)	589	589	589	589
余裕率：MS (-)	4.60	4.77	3.67	3.90

2.2 0.3m 水平落下

水平落下時に生じる応力は、落下衝撃による曲げ応力 σ_b(MPa)と内圧による各方向応力 σ_z、σ_r、σ_θ(MPa)である。水平落下時において最大応力強さ S(MPa)は、外面に生じるので外面のみ評価する。

①落下衝撃により生じる圧縮応力

燃料被覆管は支持格子により支持される連続梁とみなすことができ、1つの支持スパン内の部分を考えると両端固定梁となる。したがって、落下衝撃により生じる最大曲げ応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{Md_o}{2I}$$

$$M = \frac{1}{12}(W_f + W_c)\ell^2 \times G_H$$

$$I = \frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4)$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

G_H : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

W_f : ペレット単位長さ当たり質量 (kg/mm)

W_c : 燃料被覆管単位長さ当たり質量 (kg/mm)

- ℓ : 支持スパン (mm)
- d_o : 燃料被覆管外径 (mm)
- d_i : 燃料被覆管内径 (mm)

②内圧による各方向応力

内圧 P_o により生じる各方向応力は、2.1②と同じである。

③応力強さ

水平落下時に生じる曲げ応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、以下の式で与えられる。

$$S = \text{Max} (| \sigma_{rL} - \sigma_{\theta L} | , | \sigma_{\theta L} - \sigma_{zL} | , | \sigma_{zL} - \sigma_{rL} |)$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_\theta$$

$$\sigma_{zL} = -\sigma_b + \sigma_z$$

以上の諸式を用いて燃料に対して計算した結果を別紙 2-14 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは降伏応力以下である。

別紙 2-14 表 0.3m 水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料		15×15燃料	
	A型	B型	A型	B型
ペレット単位長さ当たり質量： W_f (kg/mm)				
燃料被覆管単位長さ当たり質量： W_c (kg/mm)				
衝撃加速度： G_H (m/s ²)	210	210	210	210
支持スパン： ℓ (mm)				
燃料被覆管外径： d_o (mm)				
燃料被覆管内径： d_i (mm)				
内圧： P_o (MPa)				
応力強さ： S (MPa)	141	140	207	195
降伏応力： σ_y (MPa)	589	589	589	589
余裕率： MS (-)	3.17	3.20	1.84	2.02

貯蔵架台上からの落下時に生じる衝撃加速度計算

1. 概要

貯蔵中の MSF-24P 型が、貯蔵架台上から落下（落下高さ 0.3m）する場合における衝撃加速度の計算詳細を以下に示す。

2. 落下時の衝撃加速度

貯蔵用緩衝体を装着した MSF-24P 型が貯蔵架台から落下した場合において、その落下エネルギーは容器本体の上下部に取り付けられた貯蔵用緩衝体の変形によって吸収される。本項では、落下時の貯蔵用緩衝体の変形量及び衝撃加速度について評価する。貯蔵用緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析条件を以下に述べる。

2.1 落下姿勢

MSF-24P 型が貯蔵架台から落下する場合の落下姿勢として、0.3m 高さから水平姿勢での落下とする。

2.2 解析方法

緩衝体の変形量及び衝撃加速度は、CRUSH コードにより算出する。解析方法は、別紙 2 の 2.2 に示す方法と同様であるが、緩衝材の圧潰特性については、別紙 2 の 2.2 に示す条件に対して以下を変更して実施する。

①緩衝材の圧潰特性は、以下のとおりとする。

- ・緩衝材が木材の場合は、別紙 2 - 2 図の圧潰特性に対して、設計貯蔵期間中の緩衝体の緩衝材の緩衝性能の変化（補足説明資料 16-6 「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95JY215）」参照）を考慮し、一例として、残存強度比が 0.6 及び 0.8 の場合の強度低下を考慮（別紙 2 - 2 図の圧潰特性に 0.6 又は 0.8 を乗じる）した圧潰特性を入力する。
- ・緩衝材が金属の場合は、一例として、別紙 3 - 1 図の圧潰特性を入力する。

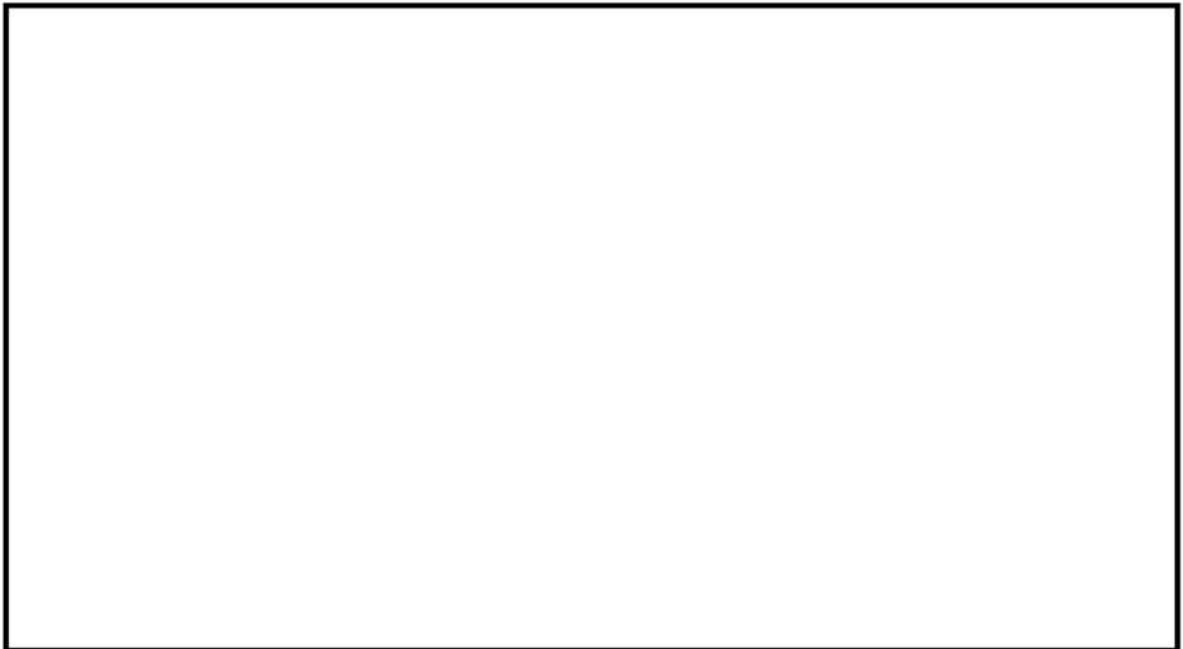


別紙 3 - 1 図 緩衝材が金属の場合の圧潰特性（一例）

2.3 解析モデル

水平落下時の解析モデルは、以下のとおりとする。

- ・緩衝材が木材の場合は、別紙 2 - 4 図に示したモデルと同じである。
- ・緩衝材が金属の場合は、別紙 3 - 2 図のとおりである。



別紙 3 - 2 図 水平落下解析モデル
（緩衝材が金属の場合の一例）

2.4 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

2.1～2.3に示した方法により求めた0.3m高さからの落下エネルギーに対応する変形量 δ と衝撃加速度 G を別紙3-1表に示す。

ここで、衝撃加速度 G は次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

F : 解析で求めた衝撃力 (N)

M : MSF-24P型の質量 (kg)

別紙3-1表 貯蔵架台上からの落下時における衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢	落下高さ : H(mm)	緩衝材の種類	圧潰特性 の残存率 (残存強度比) (注1)	衝撃力 : F(N)	衝撃 加速度 G : (m/s ²)	緩衝体の変形量 : δ (mm)	評価基準 変形量 (注2) : δ_{max} (mm)
水平 落下	300	木材	0.6	1.943×10^7	145	54	374.5
			0.8	2.332×10^7	174	47	
		金属	—	2.003×10^6	147	42	

(注1)緩衝材が木材の場合、設計貯蔵期間中における緩衝体(緩衝材)の緩衝性能変化を考慮し、一例として、残存強度比が0.6及び0.8の各場合の強度低下を加味した圧潰特性を入力する。なお、金属の場合は残存強度比を考慮しない(経年変化による強度変化なし)。

(注2)評価基準変形量とは、落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。