

補足説明資料

蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法における  
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. 概要	1
2. MSF-24P 型の設置方法と安全機能維持との関係性について	1
3. 蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法における設計方針	5
4. 安全機能を損なわないための入力荷重の評価例	7
5. 審査における説明事項及び事業者審査への引継ぎ事項について	11
6. 使用する解析コード	12
7. 参考文献	18

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評価

別紙 3 輸送時の 9m 落下時における構造評価

## 1. 概要

本資料は、特定機器の設計の型式証明申請において、MSF-24P型の安全設計全般に係る設計方針として示す、MSF-24P型の設置方法（蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法）の安全機能維持に関する補足説明を示す。

## 2. MSF-24P型の設置方法と安全機能維持との関係性について

設置許可基準規則第3条（設計基準対象施設の地盤）及び第4条（地震による損傷の防止）、並びに審査ガイドでは、要求事項及び確認事項として、設置方法と安全機能維持の関係性が次の(1)及び(2)のとおり示されている。

MSF-24P型の設置方法（蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法）については、兼用キャスタ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されており、その場合、地盤の安定性評価は不要とされている。

### (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。

c. 設置許可基準規則第4条第6項

兼用キャスクは、次のいずれかの地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

- 一 兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定めるもの
- 二 基準地震動による地震力

d. 設置許可基準規則解釈別記4第4条第2項

第4条第6項に規定する「安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」ことを満たすために、兼用キャスクの設計に当たっては、以下の方針によること。

- 一 第6項に規定する地震力（以下「第6項地震力」という。）に対して、その安全機能が損なわれるおそれがないものであること。ただし、輸送荷姿により設置する場合は第6項地震力によって安全機能が損なわれるおそれがないものとし、輸送荷姿以外の兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、緩衝体の装着等により兼用キャスク蓋部が金属部へ衝突しない方法により設置する場合は、第6項地震力による兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対してその安全機能が損なわれるおそれがないものとする。

二 (略)

三 (略)

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

「4.自然現象に対する兼用キャスクの設計 4.3.1 地震に対する設計方針」及び「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。

『

4.3.1 地震に対する設計方針

4.3.1.1 基本方針

【審査における確認事項】

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

』

『

6.1 安定性評価の基本方針

【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)

次のいずれかにより確認すること。

a. 兼用キャスク蓋部の金属部への衝突評価を行う(地盤の安定性評価は不要)。

また、評価に当たっては「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にすること。

b. 地盤の沈下や基礎の傾斜等の評価を行う(地盤の安定性評価が必要)。

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)

』



### 3. 蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法における設計方針

MSF-24P 型は、地盤の十分な支持が想定されない貯蔵施設において、基礎等に固定せず、貯蔵用緩衝体を装着して設置される。本設置方法に関する、安全設計全般に係る設計方針及びその妥当性確認方法について以下に示す。

#### a. 具体的な設計方針（安全設計全般に係る設計方針）

MSF-24P 型は、貯蔵用緩衝体の装着により、地震時に想定される衝突事象に対してその安全機能が損なわれない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とする。

また、地震時に想定される衝突事象に対して MSF-24P 型の安全機能が損なわれないために、安全機能を担保する部材が日本機械学会 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。」）<sup>(注)</sup> の評価基準を満足する緩衝性能を有することを貯蔵用緩衝体の設計条件とする。

（注）供用状態 D は、Ss 地震時及び輸送時における特別の試験条件時に対応する。

#### b. 設計方針の妥当性確認方法

本設計方針への妥当性確認として、型式指定において、地盤の十分な支持が想定されない貯蔵施設に貯蔵中（横置き）の MSF-24P 型が地震時に想定される衝突に対し、貯蔵用緩衝体を装着した構造評価を行い、MSF-24P 型の安全機能を担保する部材が供用状態 D の許容基準を満足すること、及び許容基準を満足する入力荷重の評価を行う。詳細を以下に示す。

##### 1) 地震時に想定される事象に対する安全評価方針

- MSF-24P 型は、十分な支持を想定しない地盤上に横置き状態で貯蔵される。
- 貯蔵中の MSF-24P 型に地震力が作用しても、貯蔵架台上に横置き姿勢で設置された MSF-24P 型は転倒しないが、地盤の十分な支持が想定されないことから、基礎に衝突（落下）する場合が想定される。
- MSF-24P 型は、衝突事象に対して想定される衝突荷重に対して必要な緩衝性能を有する貯蔵用緩衝体の装着により、安全機能を担保する部材が供用状態 D の許容基準を満足することで安全機能を損なわない設計とする。
- 想定される落下高さは、貯蔵施設の設計に依存するため、想定される衝突事象に対して、MSF-24P 型の安全機能を担保する部材が供用状態 D の許容基準を満足する緩衝性能を有する貯蔵用緩衝体を装着することを設置（変更）許可への引継ぎ事項として示す。

## 2) 設置（変更）許可での確認事項

- ・ 設置（変更）許可では、型式証明で示した MSF-24P 型の設計方針に変更がないことに加え、型式証明での引継ぎ事項を満足する貯蔵用緩衝体を装着する設計方針であることを確認頂く。

## 3) 型式指定での説明事項

- ・ 型式指定において、詳細設計に対する評価として、地震時に想定される事象に対し、貯蔵用緩衝体を装着した構造評価を行い、MSF-24P 型の安全機能を担保する部材が供用状態 D の許容基準を満足すること、及び許容基準を満足する入力荷重の評価を行う。
- ・ また、貯蔵用緩衝体が型式指定の荷重評価に用いた条件（仕様）と同じであること、及び貯蔵施設で想定される衝突による荷重が型式指定で示す許容基準を満足する入力荷重値以下となることを設工認への引継ぎ事項として示す。

## 4) 設工認での説明事項

- ・ 設工認では、貯蔵用緩衝体が型式指定での引継ぎ事項を満足することを確認頂く。



c. 供用状態 D の許容基準について

地震時に想定される許容基準には、金属キャスク構造規格の供用状態 D の基準を適用することとする。評価部位及び適用する規格の詳細を第 1 表に示す。

第1表 地震時に想定される事象における強度評価の許容基準 (供用状態D)

部位	部材	担保する安全機能				強度評価対象部材	金属キヤスク構造規格における適用分類	金属キヤスク構造規格での許容基準 (供用状態D)
		臨界防止	遮蔽	除熱	閉じ込め			
容器本体	胴	—	○	○	○	○	密封容器	MCD-1311.3
	外筒・下部端板・底部中性子遮蔽材カバー	—	○	○	—	○	中間胴準拠 (注1)	MCD-3721.3
	蓋板	—	○	○	○	○	密封容器	MCD-1311.3
一次蓋	蓋ボルト	—	○	○	○	○	密封シール部 (密封蓋ボルト)	MCD-1321.2
	密封シール部	—	—	—	○	○	密封容器 (密封シール部)	MCD-1318.1
	蓋部中性子遮蔽材カバー	—	○	○	—	○	中間胴準拠 (注1)	MCD-3721.3
二次蓋	蓋板	—	○	○	—	○	密封容器	MCD-1311.3
	蓋ボルト	—	○	○	—	○	密封容器 (密封蓋ボルト)	MCD-1321.2
バスケット	バスケットプレート	○	—	○	—	○	バスケット (注2)	第2表参照
貯蔵用三次蓋	蓋板	—	○	—	—	— (注3)	—	—
	蓋ボルト	—	○	—	—	— (注3)	—	—

(注1) 外筒等は、多層キヤスク (胴部が構造強度を有する複数の層で構成されるタイプのキヤスク) の中間胴 (密封容器を構成する内筒の外側に配置される密封容器を支持する構造部位) 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、中間胴に準じた評価を行う。

(注2) バスケットは、金属キヤスク規格で評価を行うよう示されているが、アルミニウム合金に対する評価基準がないため、型式設計特定容器等の型式指定申請 (三菱重工業 (株))、型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について、(2017.) において認可を受けたバスケットの許容基準 (第2表参照) を適用する。

(注3) 貯蔵用三次蓋は、貯蔵時においてのみ使用され、金属キヤスク構造規格において分類のない部位である。貯蔵時の遮蔽機能を担う部材であるが、変形してもその機能は維持されるため強度評価対象外とする。

第2表 バスケットプレートの許容基準（供用状態D）

供用状態	D
許容基準	<p>各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。</p> $P_m \leq 2/3 S_u$ $P_m + P_b \leq 2/3 \alpha S_u$ $\tau \leq 1.2 S_m$ <p>併せて、各部位の応力は <math>S_y</math> 以下とすること。</p> <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>P_m</math> : 一次一般膜応力</li> <li><math>P_b</math> : 一次一般曲げ応力</li> <li><math>\tau</math> : 平均せん断応力</li> <li><math>S_m</math> : 設計応力強さ</li> <li><math>S_u</math> : 設計引張強さ</li> <li><math>S_y</math> : 設計降伏点</li> </ul>

#### 4. 安全機能を損なわないための入力荷重の評価例

3. b. で示した MSF-24P 型の安全機能を担保する部材が供用状態 D の許容基準を満足する入力荷重の評価例を示す。

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に適合するための技術上の要件を満足するように設計された特定兼用キャスクであり、一般の試験条件における 0.3m 落下（以下「輸送時の 0.3m 落下」という。）、及び特別の試験条件における 9m 落下（以下「輸送時の 9m 落下」という。）において、金属キャスク構造規格及び日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に基づきその構造健全性が維持されることで、その安全機能が損なわれない設計とする。

貯蔵時に想定される衝突事象に対しては、以下に示すとおり、輸送時の 9m 落下時に MSF-24P 型に生じる荷重相当であれば、安全機能が損なわれることはない見通しである。

##### 1) 輸送時の 9m 落下時に MSF-24P 型に生じる荷重

輸送時の 9m 落下（9m 水平落下）に MSF-24P 型に生じる荷重は  $9.299 \times 10^7$  N（衝撃加速度：692  $\text{m/s}^2$ ）である（別紙 3 参照）。

##### 2) 貯蔵時に安全機能を損なわないための入力荷重の見通し

貯蔵時の MSF-24P 型の構造は、輸送時の構造に対して差異があり、この構造差異による構造応答への影響は約 7% である（別紙 1 参照）。輸送時の 9m 水平落下では、上記 1) の荷重が作用した場合において、安全機能（貯蔵時）を担保する部材に発生する応力が評価基準に対し、21% 以上の余裕を有する設計である（第 3 表参照）。また、構造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、輸送時の 9m 落下時に MSF-24P 型に生じる荷重相当が作用しても安全機能は維持される。



第3表 輸送時の9m落下（9m水平落下）時における応力評価結果<sup>(注1)</sup>

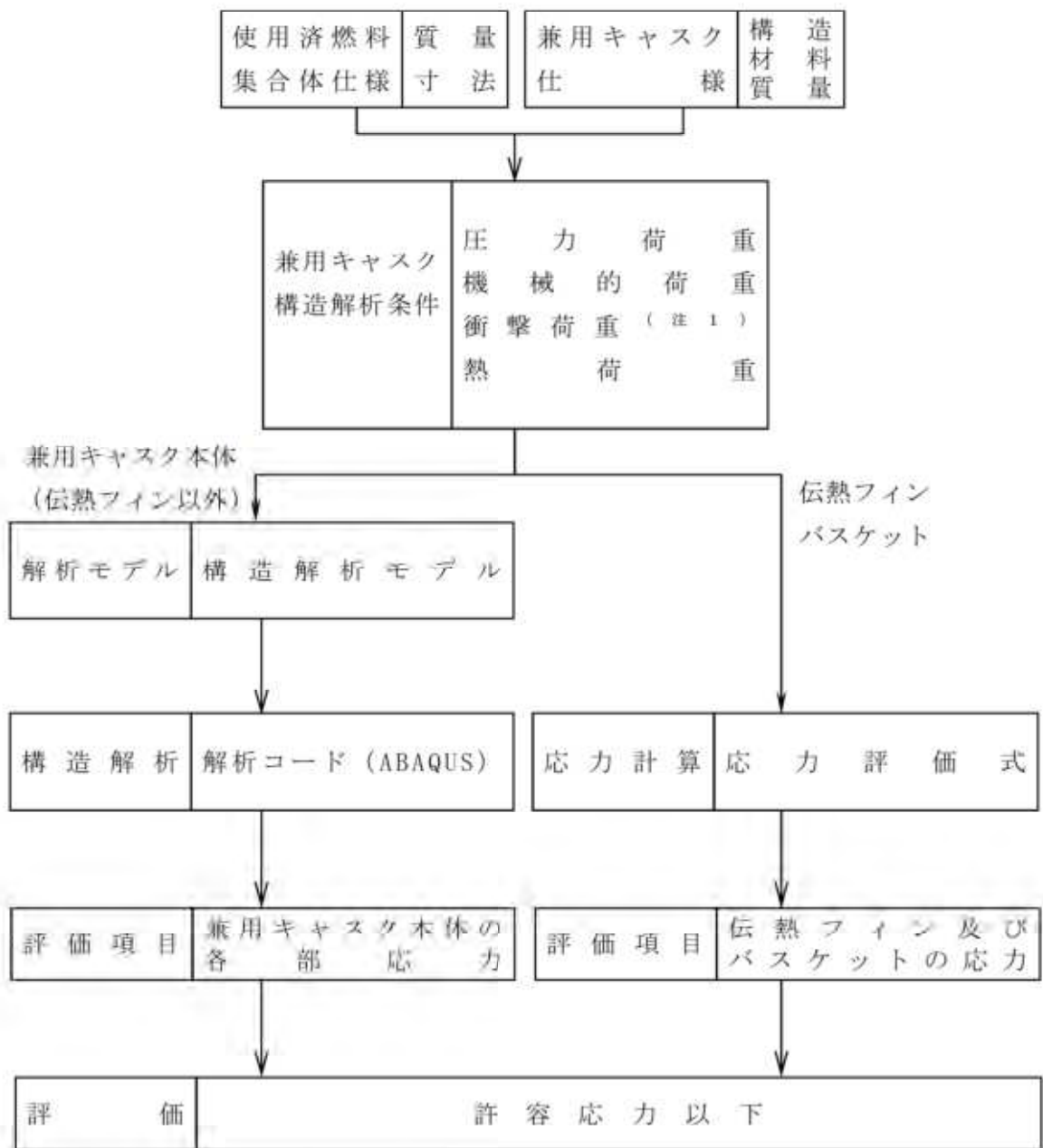
安全機能	評価位置	応力の種類	計算値 (MPa)	評価基準 (MPa) <sup>(注2)</sup>
閉じ込め <sup>(注3)</sup>	一次蓋密封シール部	$P_L+P_h+Q$	123	185 ( $S_y$ )
	一次蓋ボルト	$\sigma_m+\sigma_b$	643	846 ( $S_y$ )
臨界防止	バスケットプレート	$\sigma_c$	46	56 ( $S_y$ )
遮蔽・除熱	外筒	曲げ応力	205	282 ( $1.5f_t$ )

(注1) 第1図に示す評価フローにより評価した安全機能を担保する主な部位の応力（別紙3参照）のうち、評価基準に対する余裕が最も少ない結果を記載。

(注2) 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及び日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に規定される供用状態Dの評価基準を基に設定。

(注3) 貯蔵時の閉じ込め機能を担う部材は一次蓋である。





第1図 輸送時の0.3m落下時及び9m落下時の構造評価フロー (注2)

(注1) 衝撃荷重(衝撃加速度)以外の荷重条件は、兼用キャスク告示で定める地震力による衝突時と輸送時の0.3m落下時で差異はない。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落下時の構造評価の詳細は、別紙2参照。輸送時の9m落下時(9m水平落下)の構造評価の詳細は、別紙3参照。

a) 使用済燃料の再取出性について

別紙3に示すとおり、輸送時の9m落下時において、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3（別添）に示すとおり、9m水平落下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、輸送時の9m落下時にMSF-24P型に生じる荷重相当が作用しても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見通しである。

5. 審査における説明事項及び事業者審査への引継ぎ事項について

前頁までの内容を踏まえ、MSF-24P 型の安全設計全般に係る設計方針についての型式証明及び型式指定での説明事項、並びに事業者審査への引継ぎ事項を第 4 表に整理した。

第 4 表 MSF-24P 型の安全設計全般に係る設計方針に係る型式証明  
及び型式指定での説明事項、並びに事業者審査への引継ぎ事項

	型式証明での説明事項	型式指定での説明事項
設計方針	MSF-24P 型は、貯蔵用緩衝体の装着により、地震時に想定される衝突事象に対してその安全機能が損なわれない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とする。また、地震時に想定される衝突事象に対して、安全機能を担保する部材が供用状態 D <sup>(注1)</sup> の許容基準を満足する緩衝性能を有することを貯蔵用緩衝体の設計条件とする。	型式証明の設計方針に変更ないこと。
妥当性説明	(型式指定での妥当性確認方針を説明) (注2)	地盤の十分な支持が想定されない貯蔵施設に貯蔵中（横置き）の MSF-24P 型が地震時に想定される衝突に対し、貯蔵用緩衝体を装着した構造評価を行い、MSF-24P 型の安全機能を担保する部材が供用状態 D <sup>(注1)</sup> の許容基準を満足すること、及び許容基準を満足する入力荷重の評価を行う。
事業者審査への引継ぎ事項	(設置（変更）許可申請) 地震時に想定される衝突時において安全機能を担保する部材が供用状態 D <sup>(注1)</sup> の許容基準を満足する緩衝性能を有する貯蔵用緩衝体を装着すること。	(設工認申請) 貯蔵用緩衝体が上記の荷重評価に用いた条件（仕様）と同じであること、貯蔵施設で想定される衝突による荷重が型式指定で示す許容基準を満足する入力荷重値以下となること。

(注 1) 金属キャスク構造規格に規定される供用状態であり、供用状態 D は、Ss 地震時及び輸送時における特別の試験条件時に対応する。

(注 2) 貯蔵時に想定される衝突事象に対して、輸送時の 9m 落下時に MSF-24P 型に生じる荷重相当であれば、安全機能が損なわれることはない見通しである。

## 6. 使用する解析コード

### a. 解析コード

MSF-24P 型の兼用キャスク告示地震力による衝突時、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<sup>(1)</sup> 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。

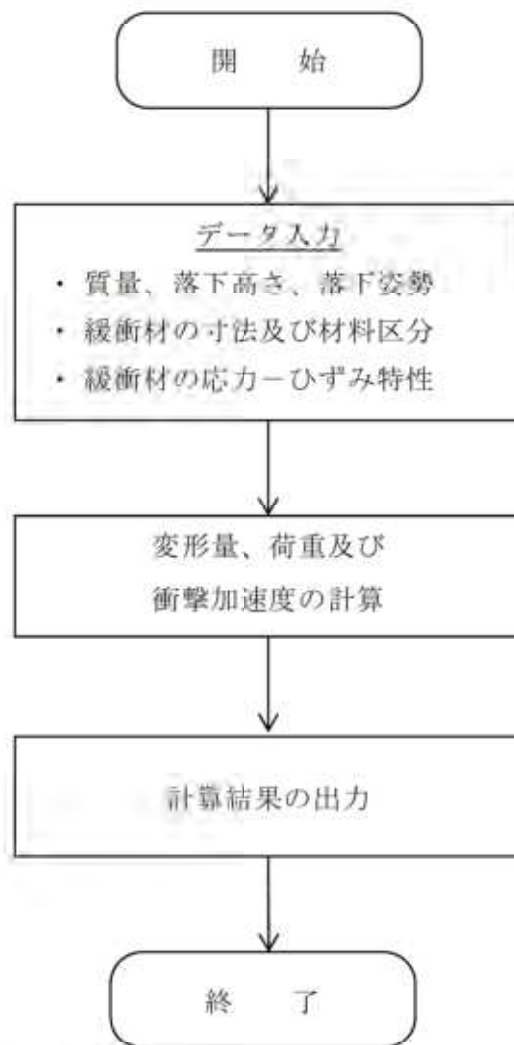
##### iii 計算フロー

CRUSH コードの計算フローを第 2 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<sup>(1)(2)</sup>。

CRUSH コードの検証例を第 5 表に示す。



第2図 CRUSH コードの計算フロー



第5表 CRUSH コードの検証例<sup>(注)</sup>

(1) 衝撃加速度<sup>(注)</sup>

試験条件	最大衝撃加速度 (m/s <sup>2</sup> )	
	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<sup>(注)</sup>

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<sup>(注)</sup>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。

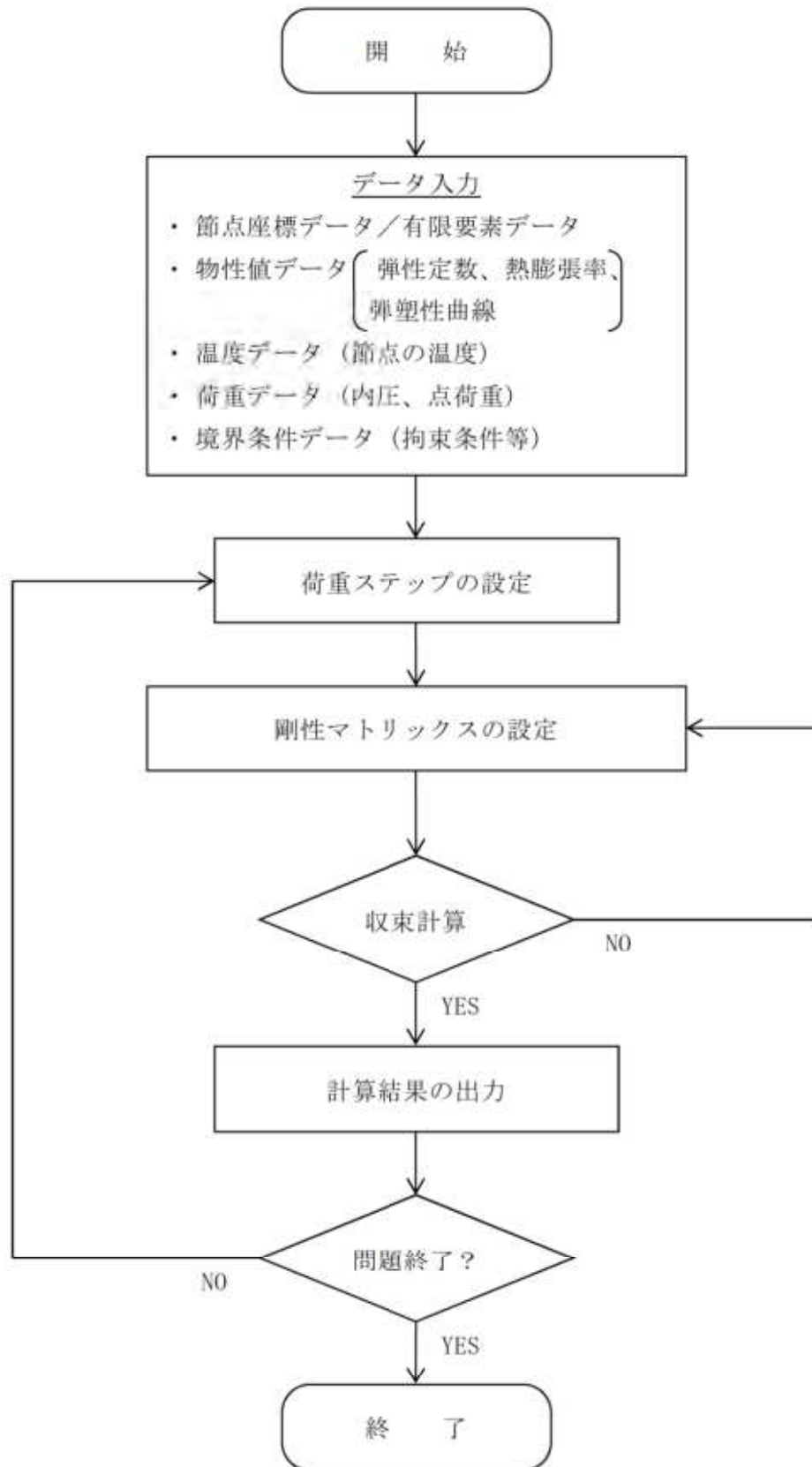
### iii 計算フロー

ABAQUS コードの計算フローを第3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<sup>(2)</sup>。

ABAQUS コードの検証例を第6表に示す。



第3図 ABAQUS コードの計算フロー

第6表 ABAQUS コードの検証例<sup>(注)</sup>

(1) 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果<sup>(注1)</sup>

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 <sup>(注2)</sup>	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<sup>(注1)</sup>

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1) 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。

(注2) ABAQUS コードによる 9.3m 頭部垂直落下時においては、内部収納物（使用済燃料及びバスケット）の遅れ衝突<sup>(注3)</sup>による影響を保守的に評価するモデル化を行っており、二次蓋ボルトの応力は落下試験結果より算出した応力に比べて 4 倍程度大きい傾向を示している。

(注3) 頭部垂直姿勢で MSF-24P 型が落下する場合、内部収納物は、MSF-24P 型本体（一次蓋）が落下するタイミングに対して時差をもって一次蓋に衝突する。MSF-24P 型本体が落下後に減速した状態で内部収納物は一次蓋に衝突するため、内部収納物と一次蓋が衝突する際の相対速度は大きくなる。ABAQUS コードによる解析では、この効果を保守的に考慮している。内部収納物による衝撃力は、一次蓋から二次蓋に伝達されるため、遅れ衝突の影響は二次蓋ボルトに生じるが、二次蓋から三次蓋には伝達されないため、三次蓋ボルトの ABAQUS コードによる応力は、落下試験結果より算出した応力と同程度となっている。

## 7. 参考文献

- (1) 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) .
- (2) 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) . (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 20339 号, (2020) .にて最終補正)
- (3) 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

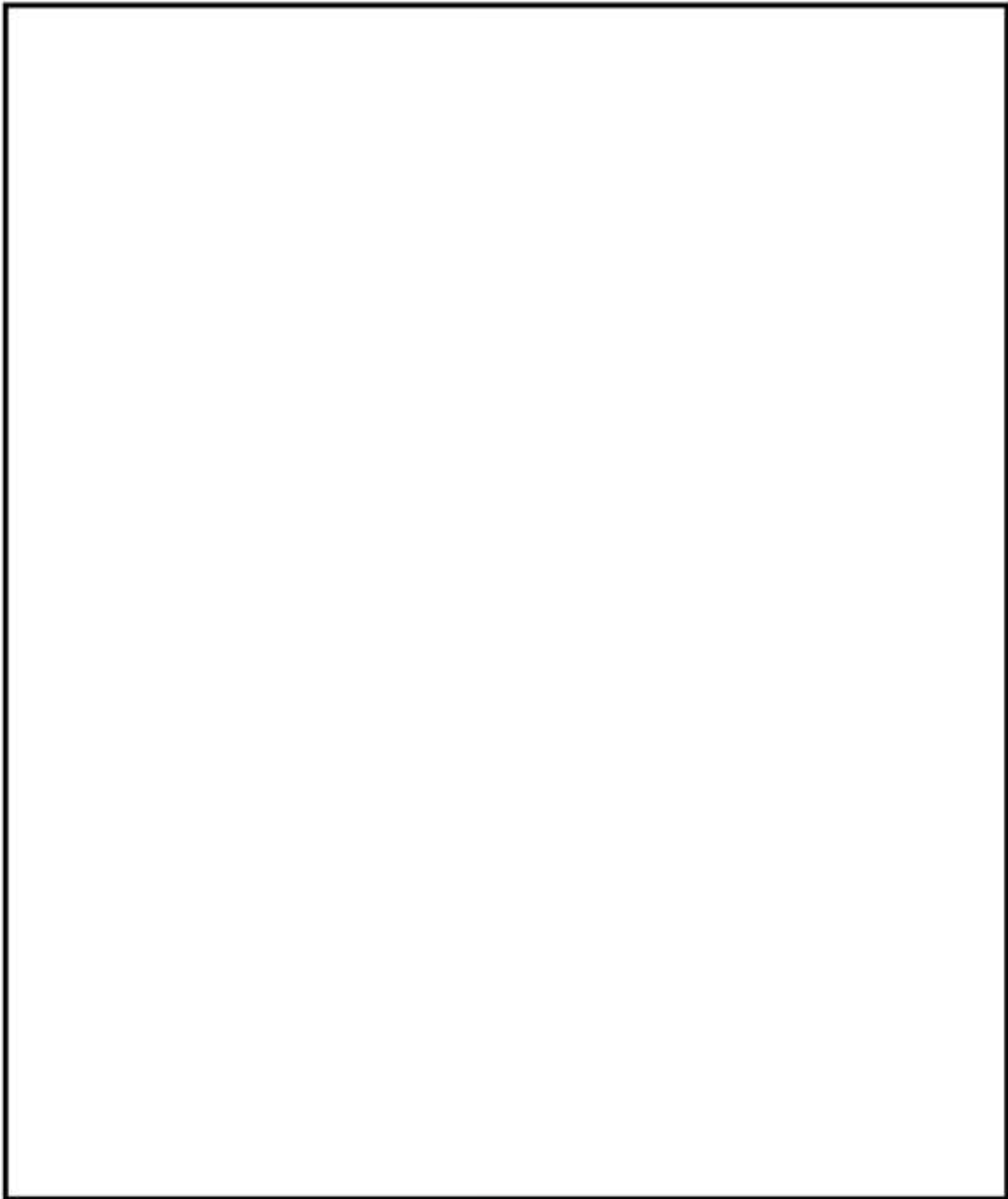
本別紙では、貯蔵用緩衝体及び貯蔵用三次蓋の構造と輸送用緩衝体及び輸送用三次蓋の構造との構造差異が構造強度に与える影響について、落下解析（動的解析）により確認した結果を示す。

## 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 貯蔵用と輸送用の構造差異

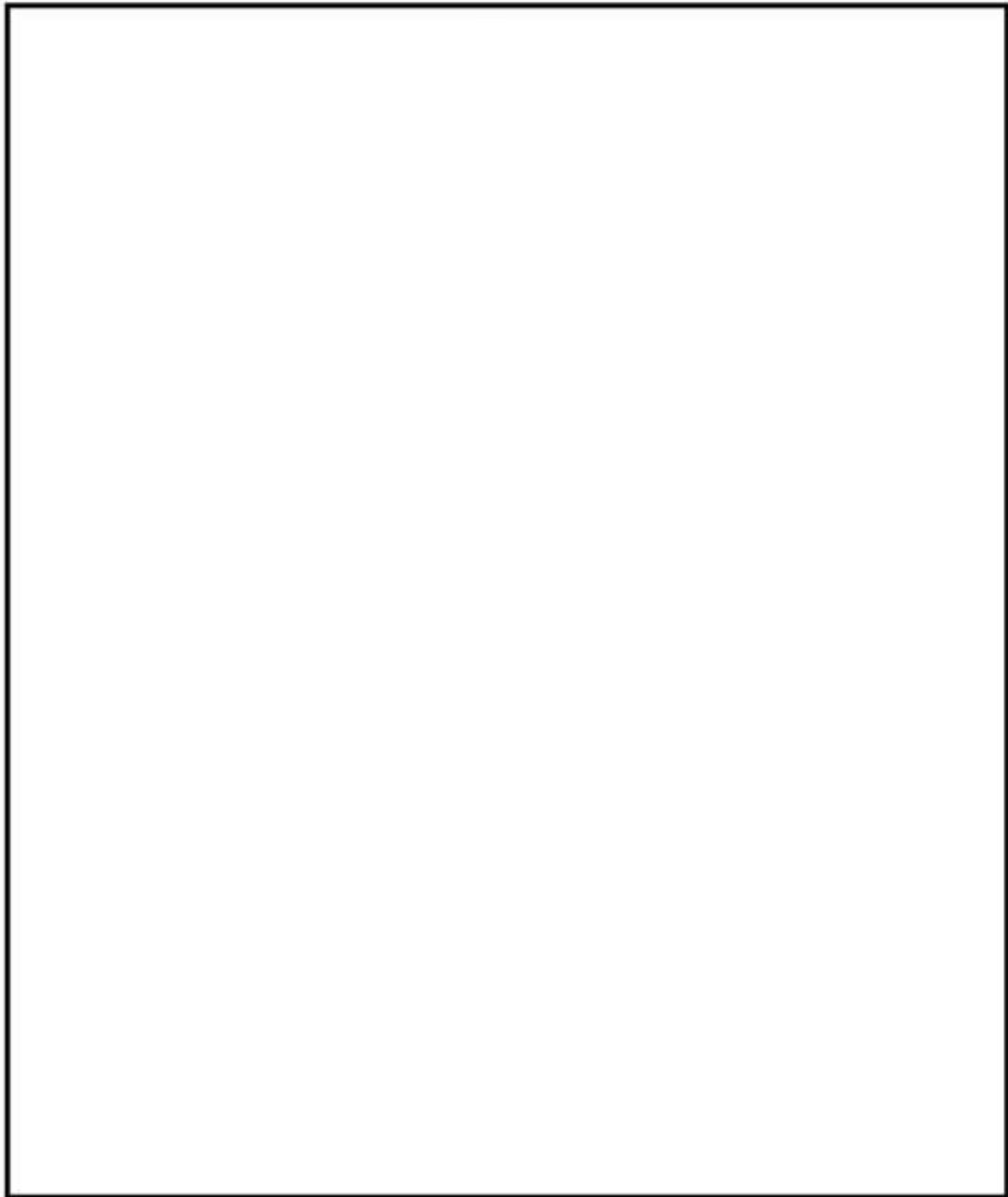
部位	緩衝材	構造例①（別紙 1-1 図）	構造例②（別紙 1-2 図）
貯蔵用 三次蓋			
貯蔵用 緩衝体			



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

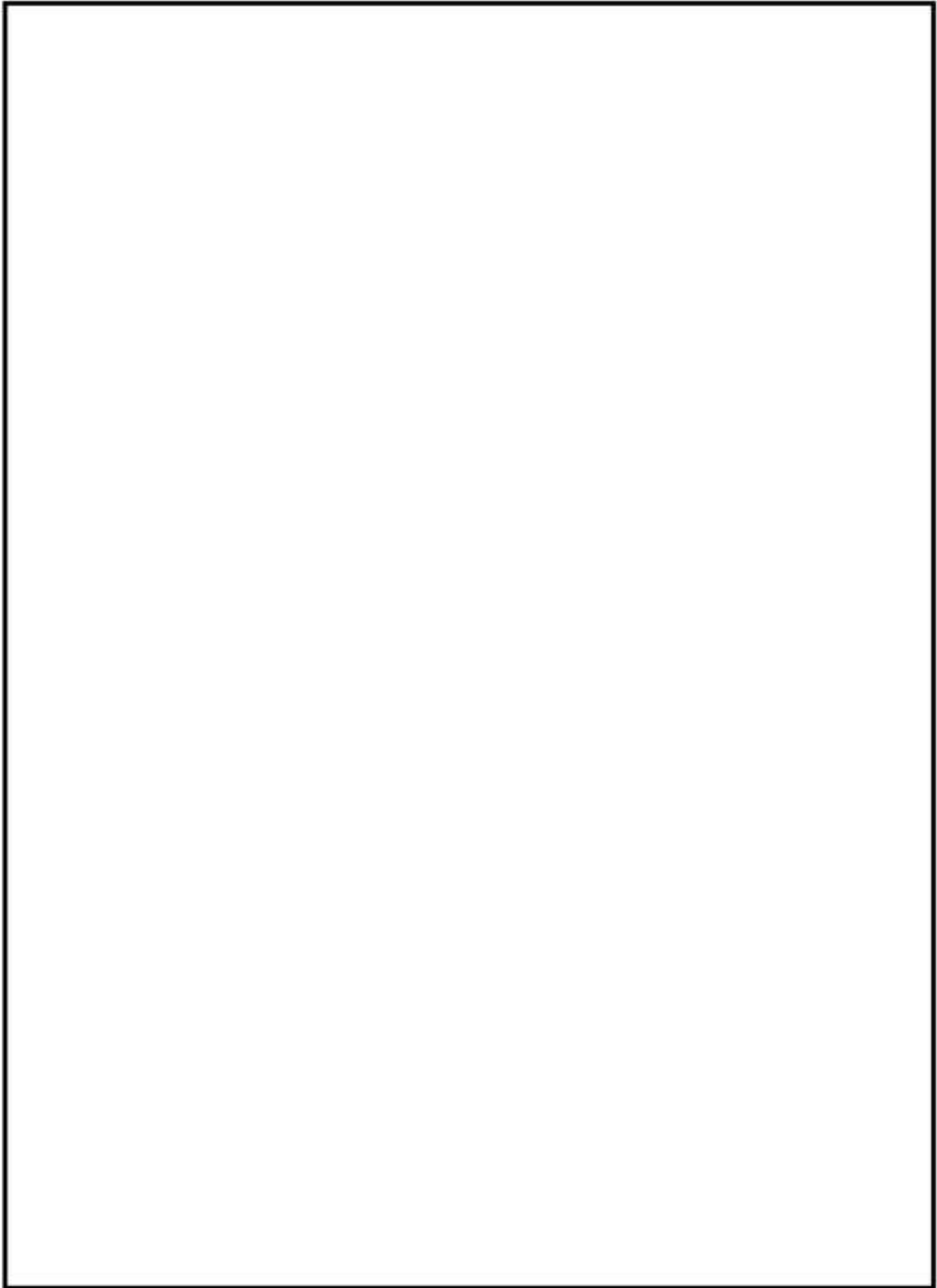
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1 - 2 図 貯蔵用構造 (構造例②)

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

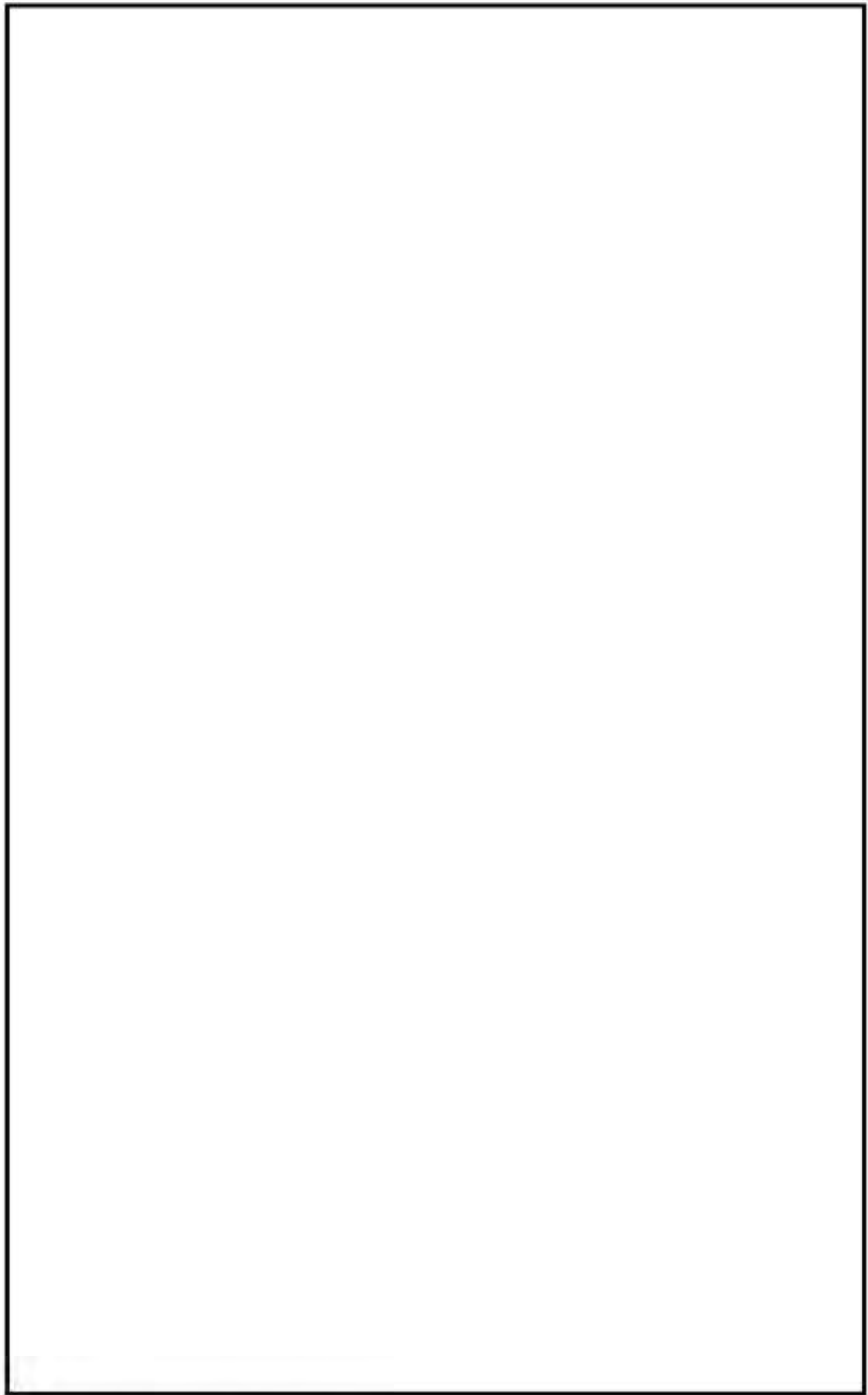
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1 - 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

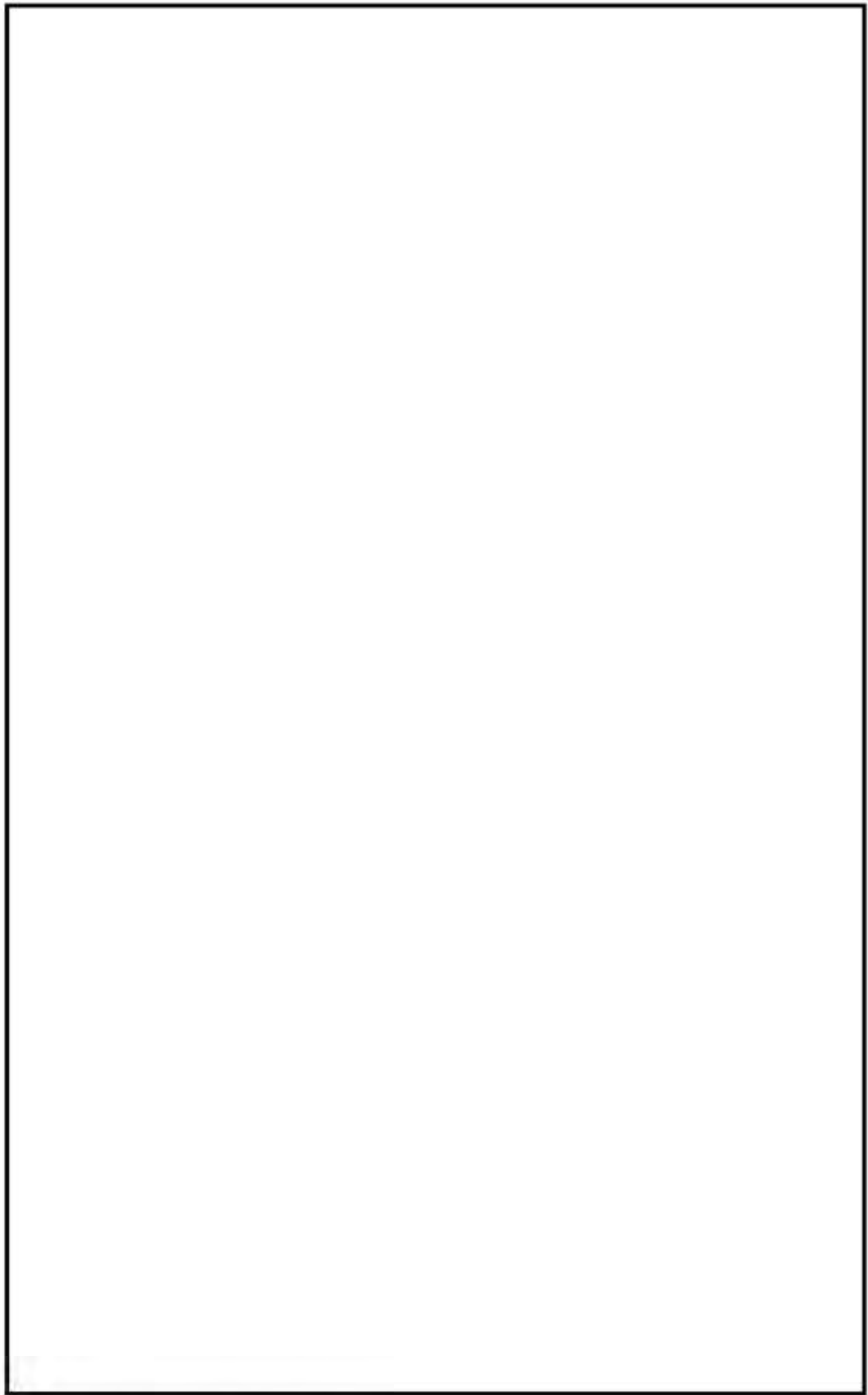
内は商業機密のため、非公開とします。



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。

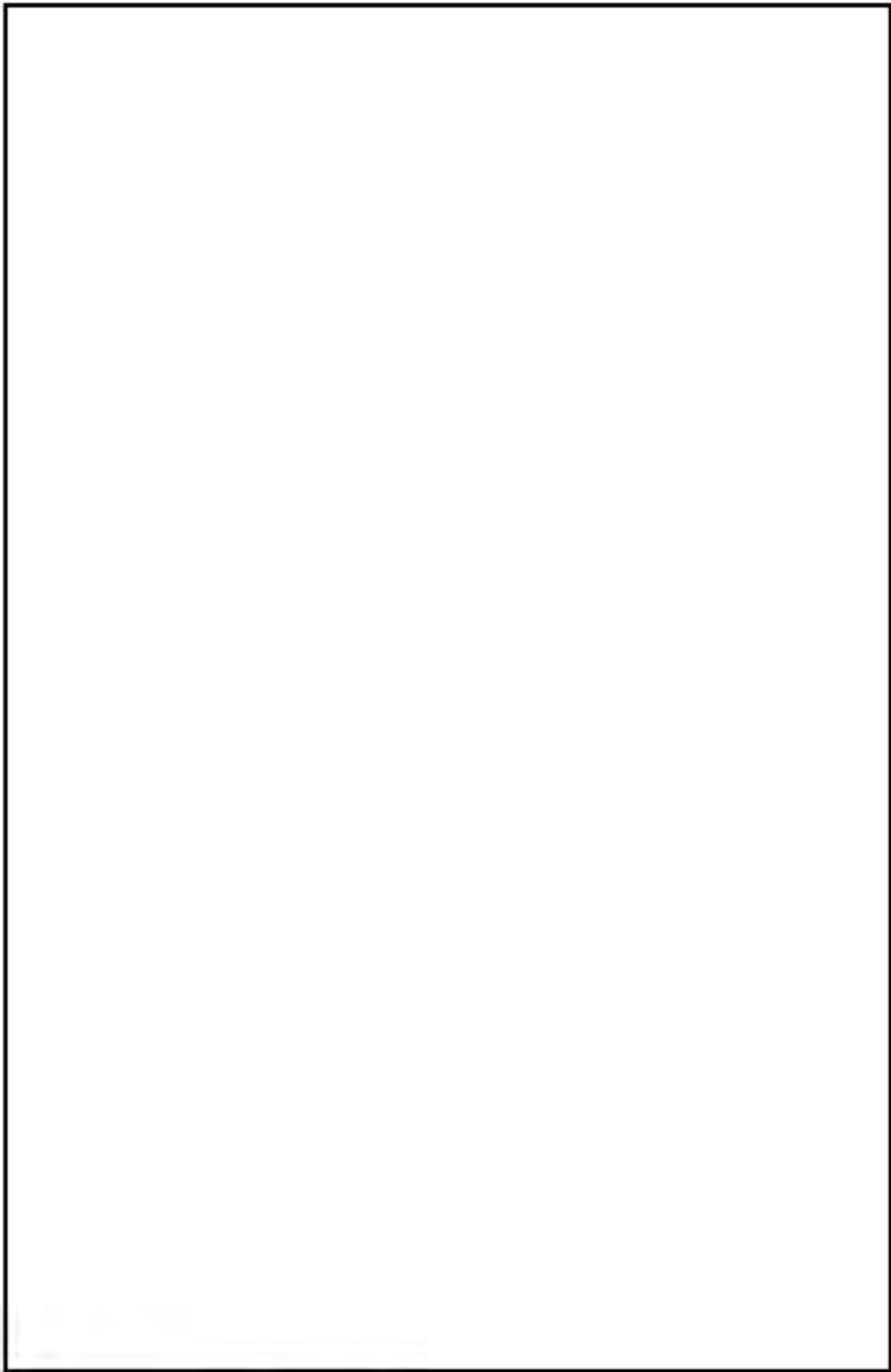


別紙 1 - 4 図 (b) 貯蔵用上部緩衝体 (構造例① 緩衝材 : 金属)

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。

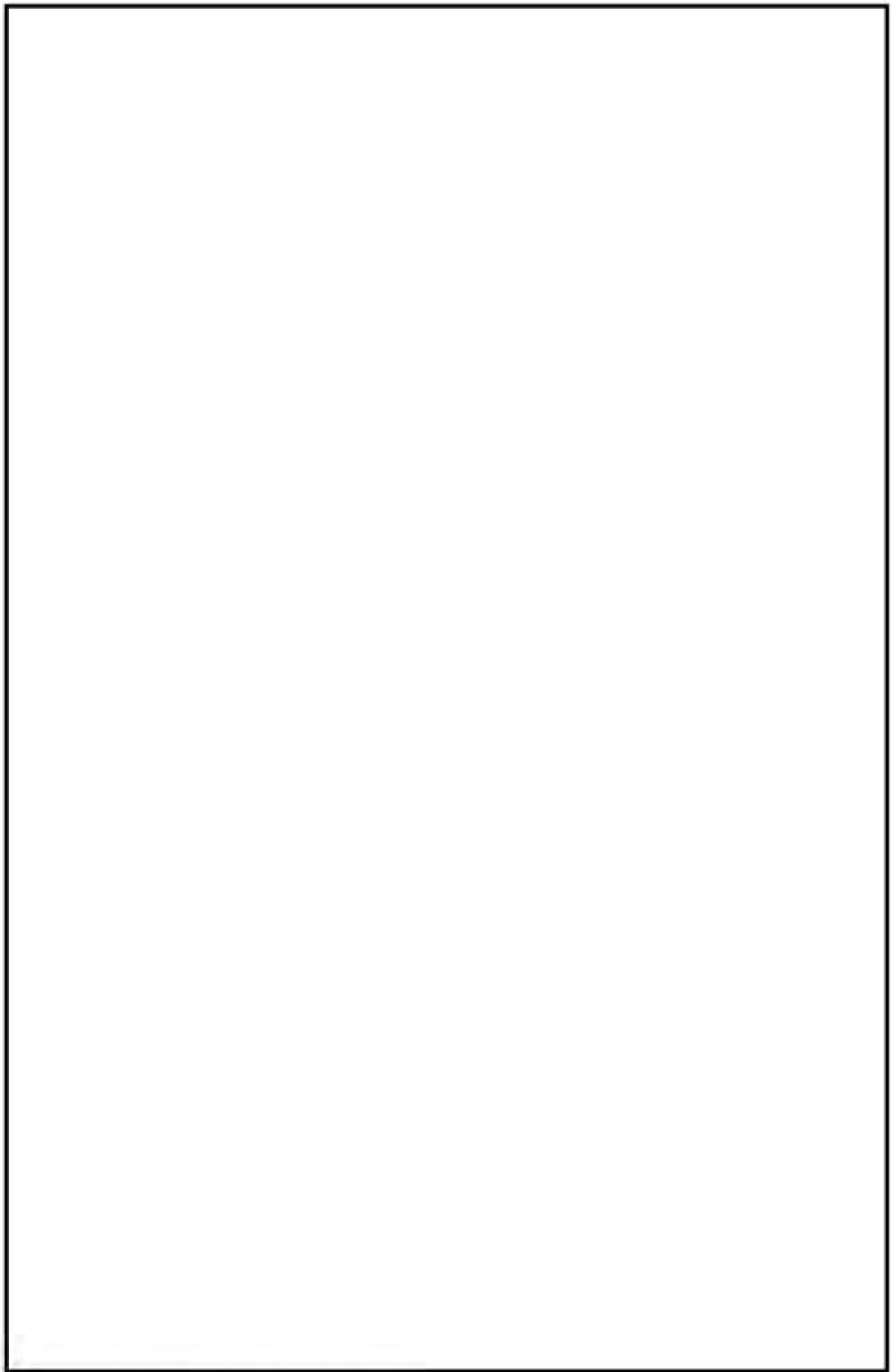




別紙 1 - 5 図 (a) 貯蔵用上部緩衝体 (構造例②) 緩衝材：木材)

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の一例として、6m 高さからの水平姿勢での落下とする。

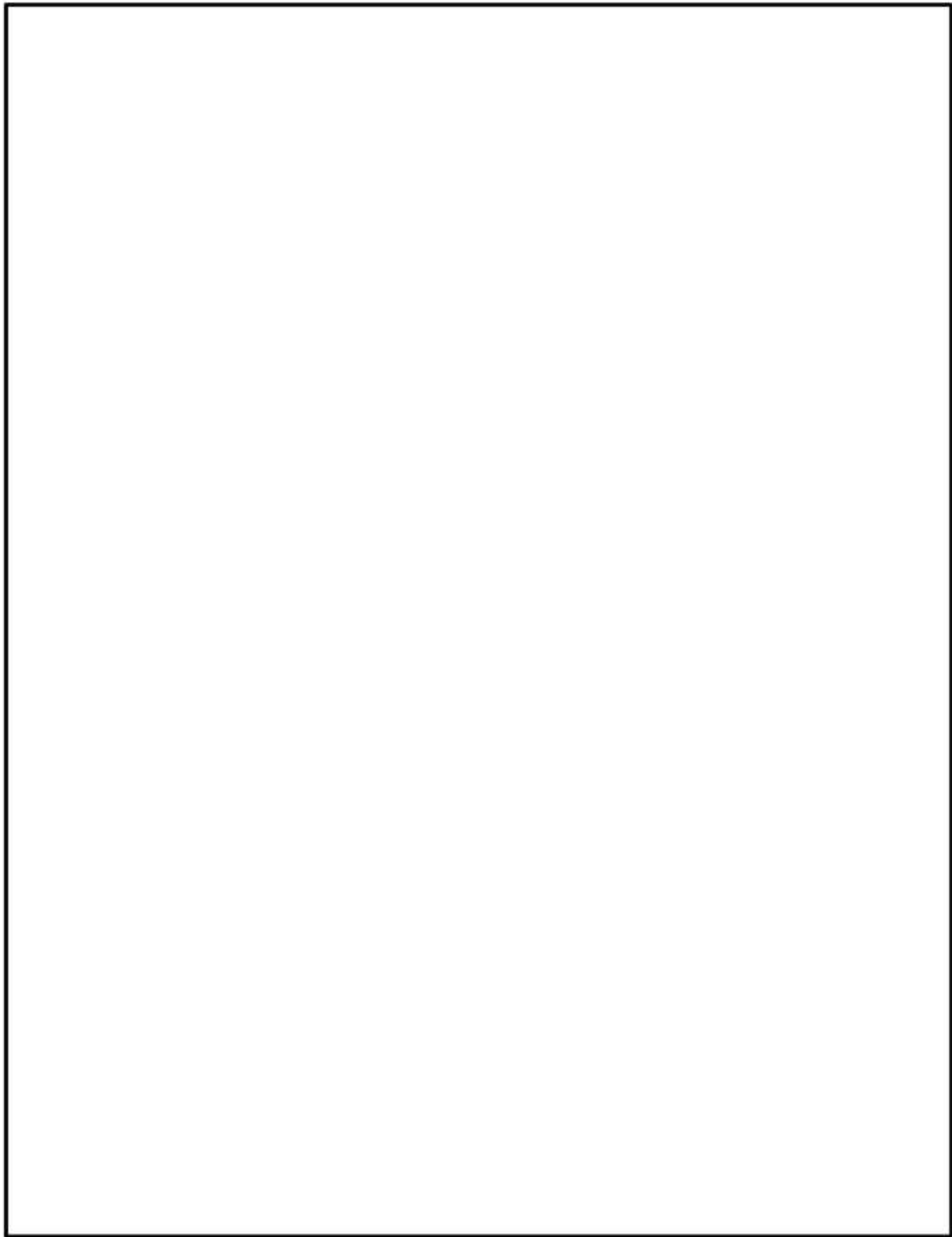
##### c. 解析モデル

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。



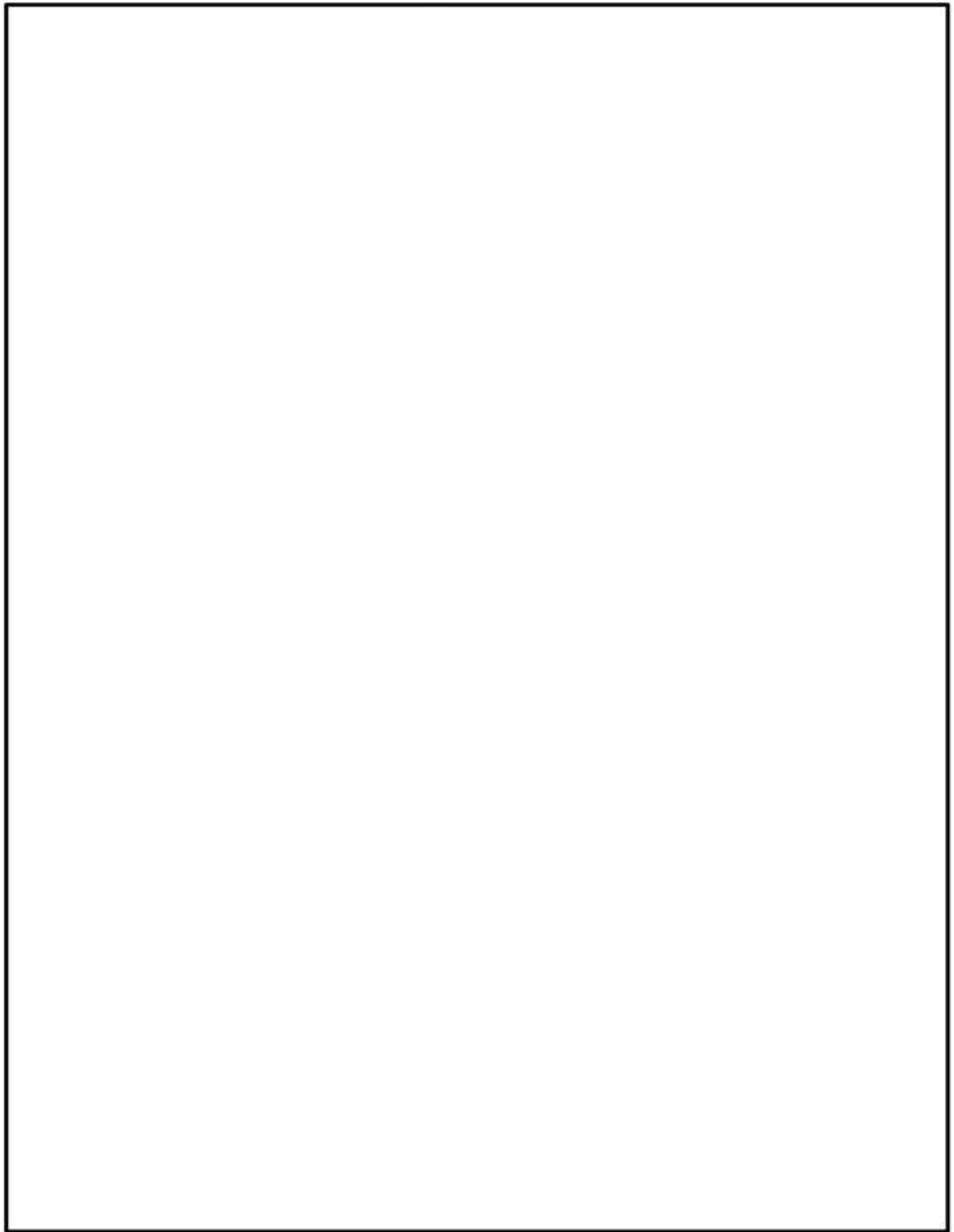
別紙 1 - 6 図 解析モデル (1/3)

(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 1-10



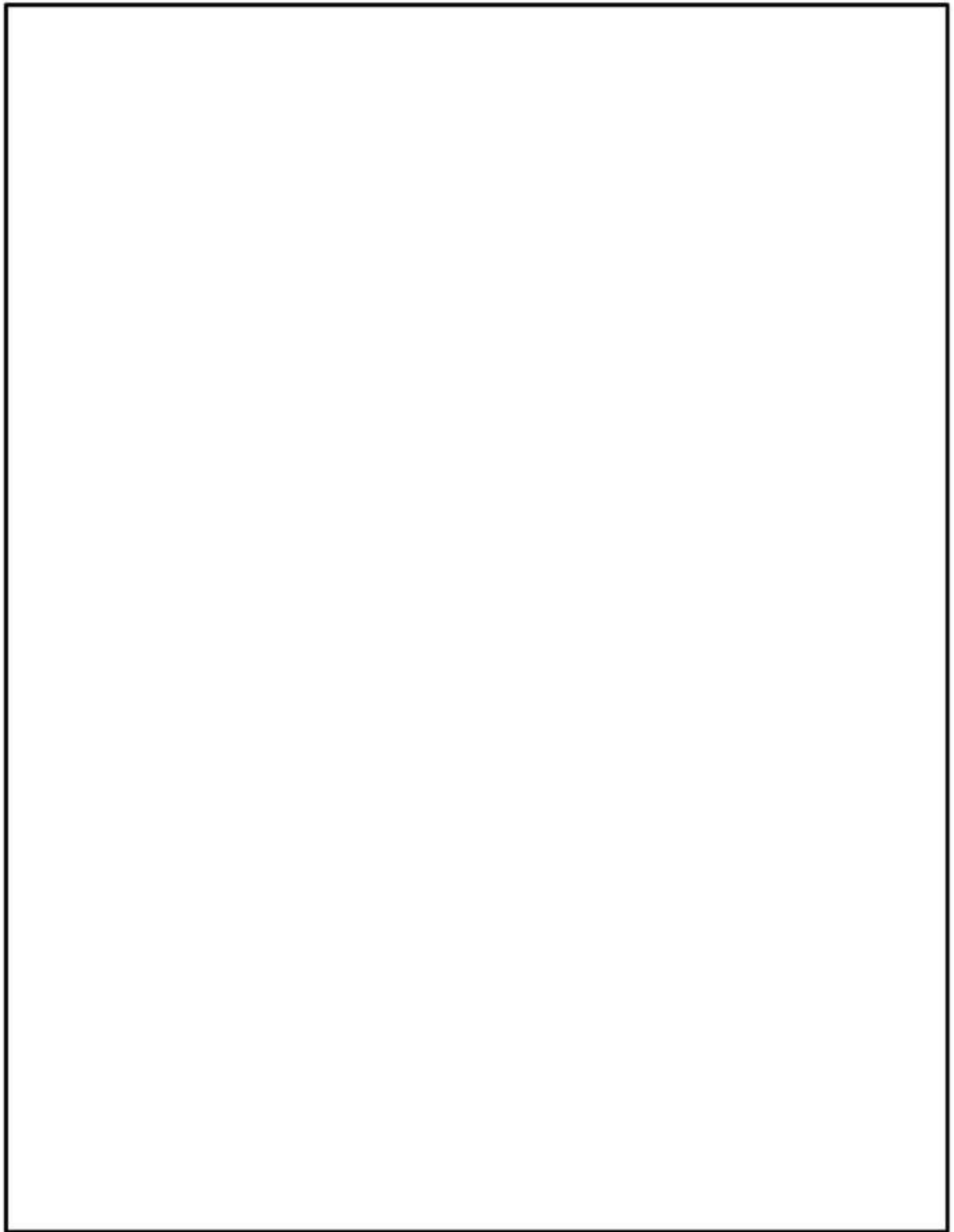
別紙 1 - 6 図 解析モデル (2/3)

(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 1-11



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。

別紙 1-12



#### 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 inputs 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。

#### g. 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。

#### h. 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	$3.22 \times 10^{-4}$	1.00	$3.31 \times 10^{-4}$	1.02	$3.23 \times 10^{-4}$
二次蓋シール部	$8.83 \times 10^{-4}$	0.99	$9.14 \times 10^{-4}$	1.02	$8.95 \times 10^{-4}$
一次蓋ボルト	$3.29 \times 10^{-3}$	1.00	$3.30 \times 10^{-3}$	1.00	$3.30 \times 10^{-3}$
二次蓋ボルト	$4.06 \times 10^{-3}$	1.05	$4.12 \times 10^{-3}$	1.07	$3.85 \times 10^{-3}$
三次蓋ボルト	$1.89 \times 10^{-3}$	0.94	$1.93 \times 10^{-3}$	0.96	$2.01 \times 10^{-3}$

## 輸送時の 0.3m 落下時における構造評価

### 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、輸送時の 0.3m 落下時における MSF-24P 型の構造評価の詳細を示す。

### 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 ( $m/s^2$ )

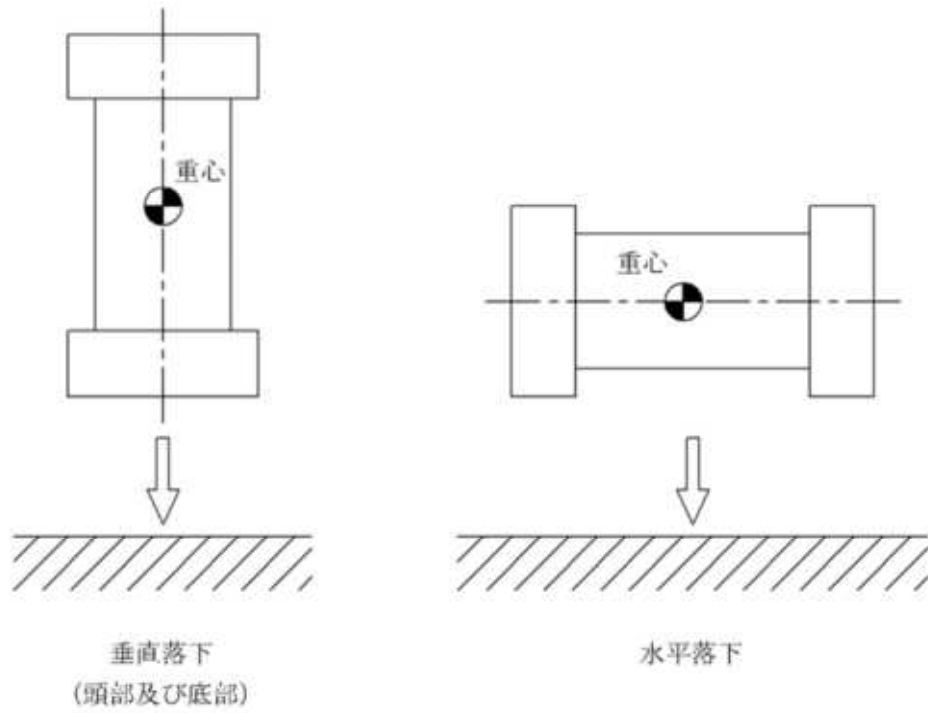
$H$  : 落下高さ (mm)

計算条件と計算結果を別紙 2 - 1 表に示す。

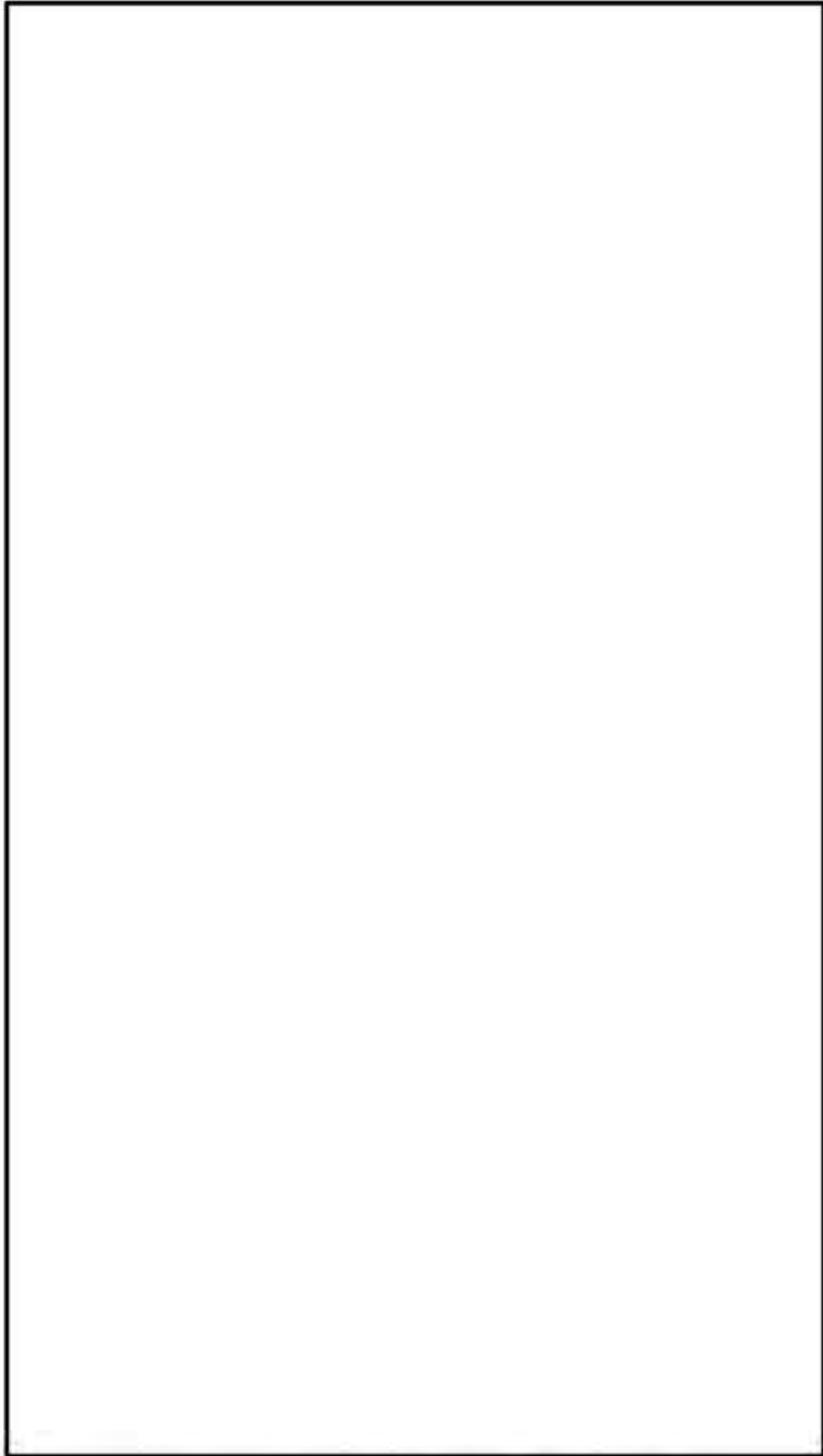
別紙 2 - 1 表 輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

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	$1.344 \times 10^5$	9.80665	300	$3.955 \times 10^8$

- 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  $\pm 20\%$  を考慮した負荷係数 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

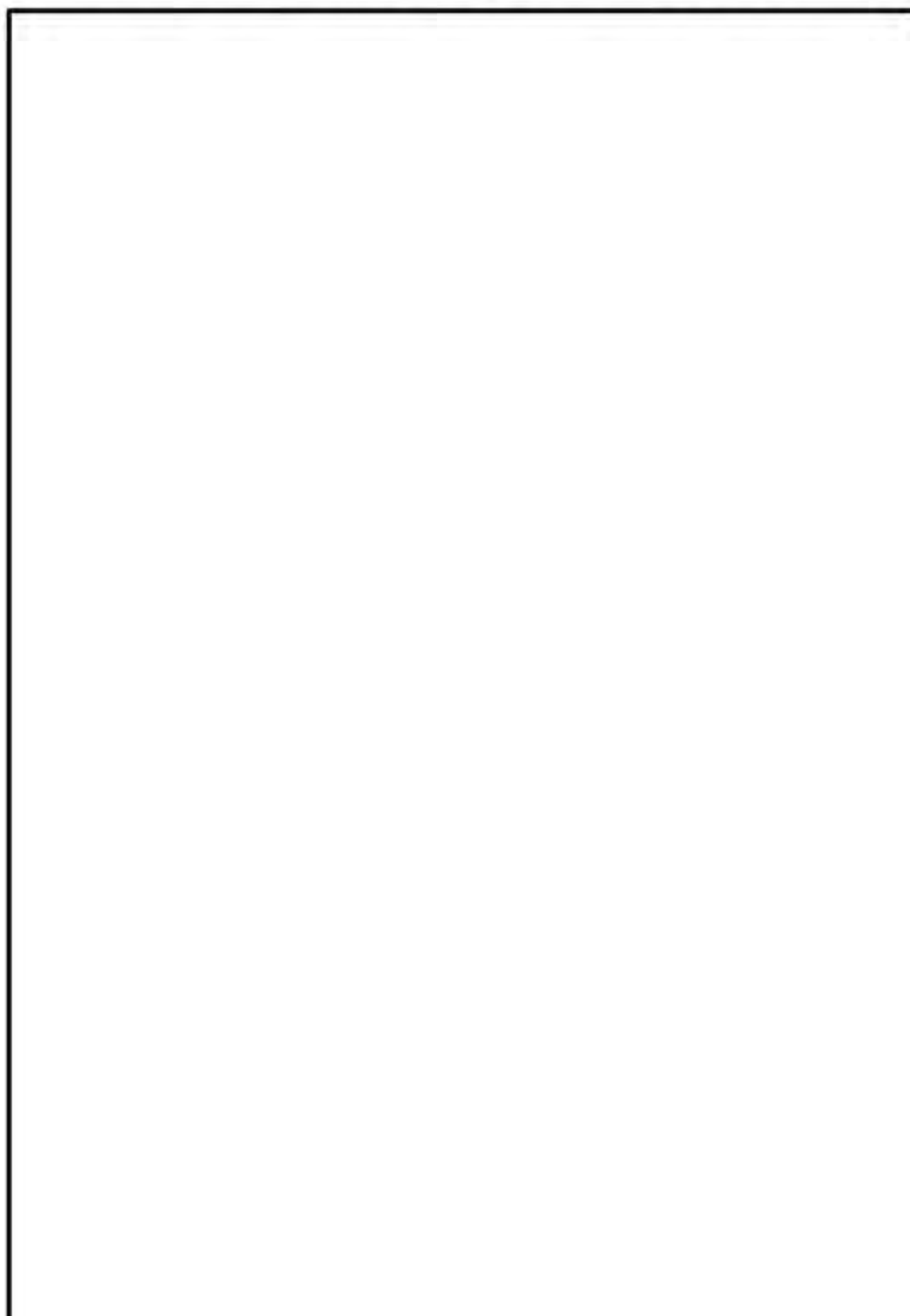
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙2-4



### 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  $\delta$  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

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 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 $\delta$ 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 <sup>2</sup> )	設計 加速度 <sup>(注1)</sup> (m/s <sup>2</sup> )	緩衝体の 変形量 : $\delta$ (mm)	評価基準 変形量 <sup>(注2)</sup> : $\delta_{max}$ (mm)
垂直 落下	頭部	$3.555 \times 10^7$	265	270	26	684
	底部	$3.417 \times 10^7$	255	260	27	608
水平落下		$2.686 \times 10^7$	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。

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. 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（ $270 \text{ m/s}^2$ ）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（ $260 \text{ m/s}^2$ ）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（ $210 \text{ m/s}^2$ ）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、三次蓋—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。

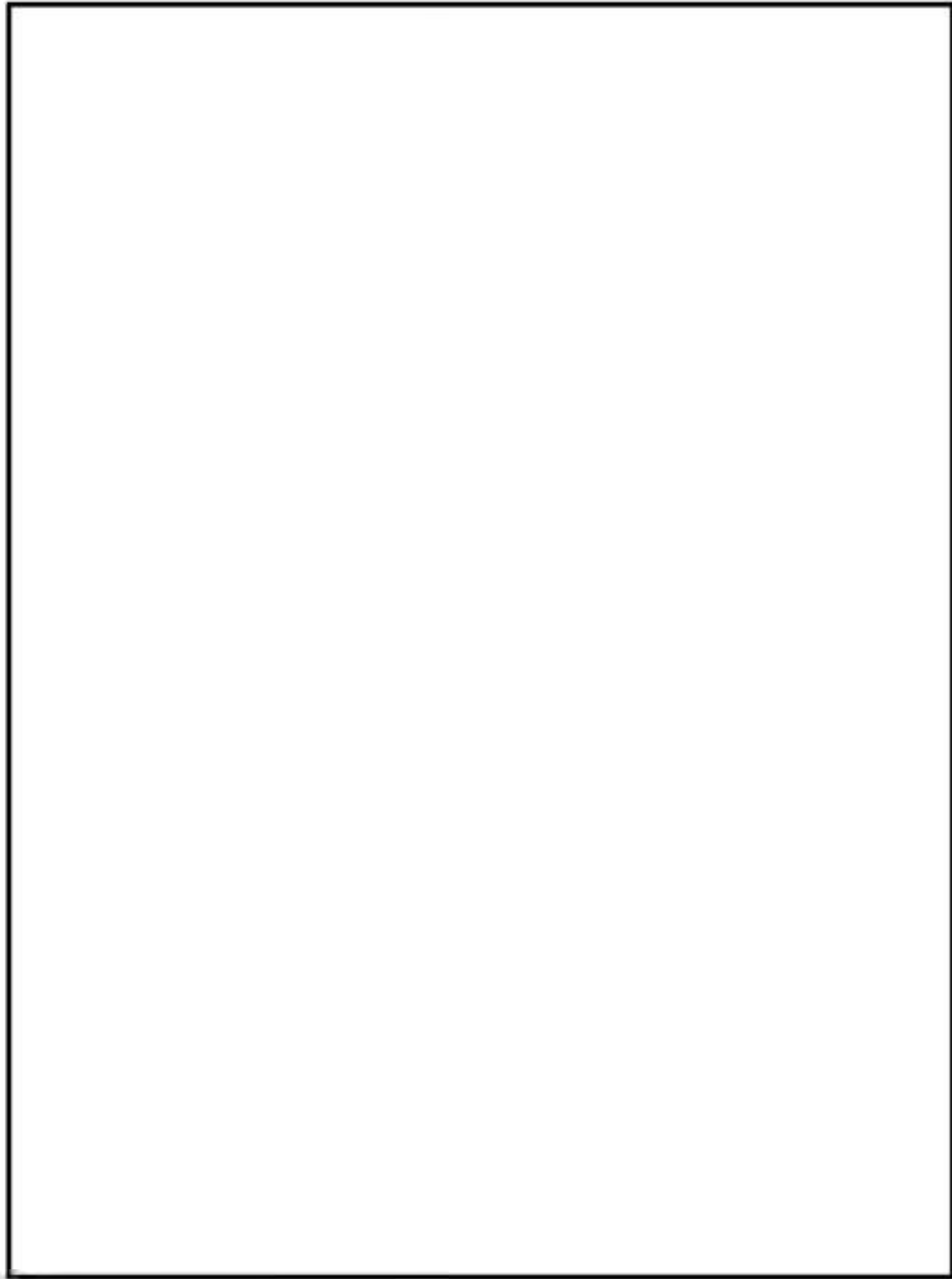
c. 熱荷重

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。

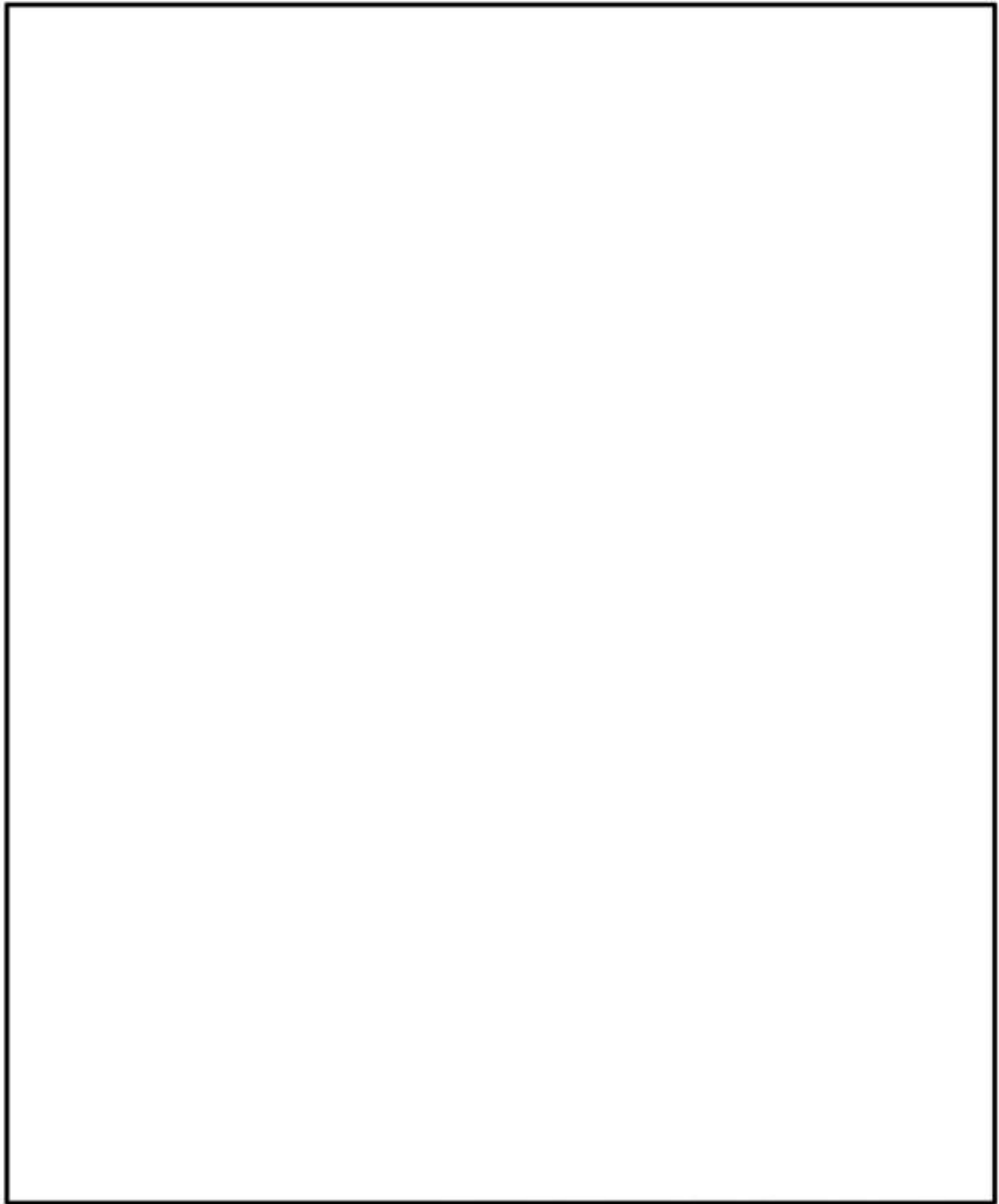
0.3m 水平落下時には、上・下部緩衝体を取り付く面（反力を受ける面）の上・下 1 箇所の Y 方向変位を拘束した。また、 $0^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  面の対称面において X 方向の変位を拘束した。



別紙 2 - 5 図 解析モデル

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。

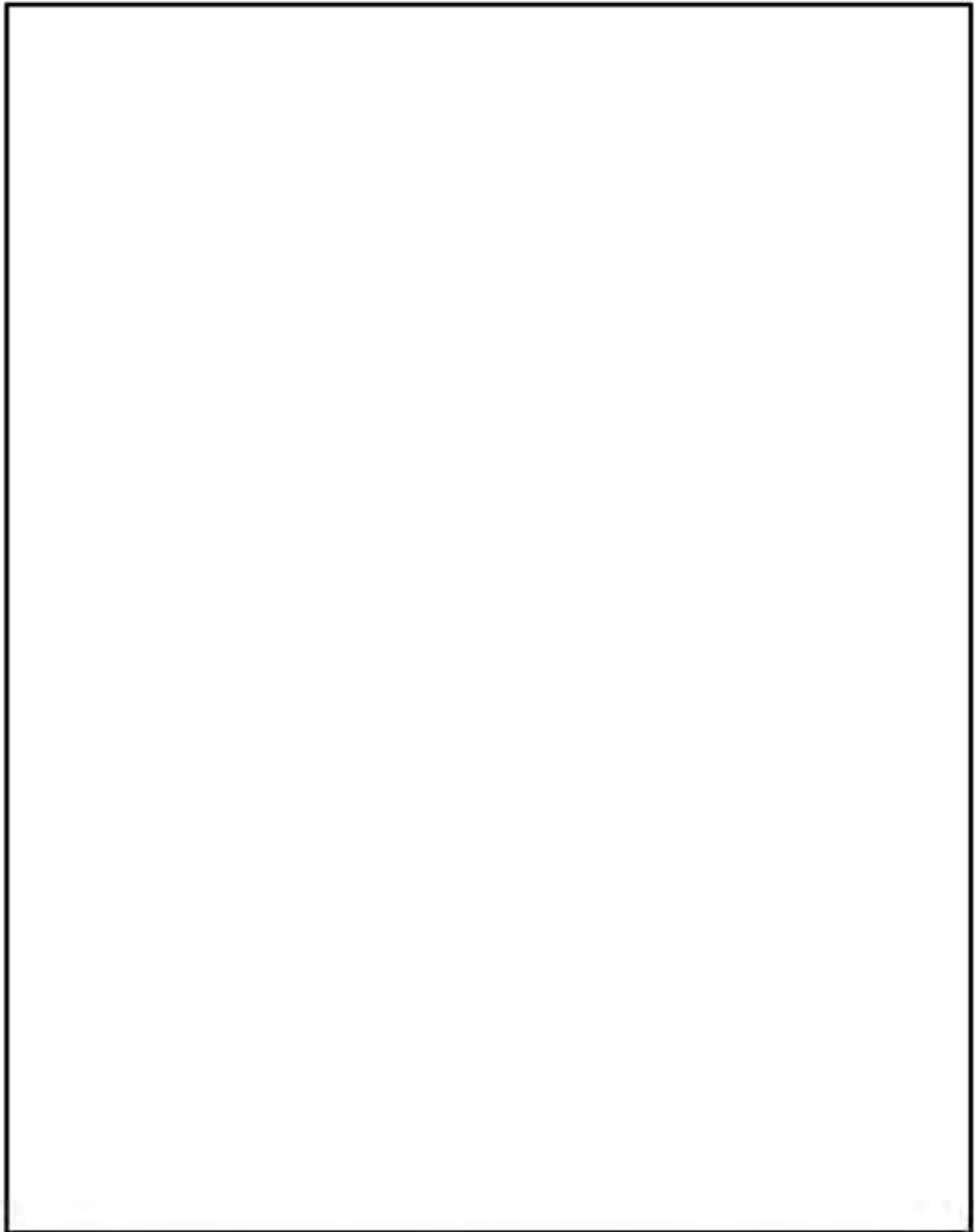


別紙 2 - 6 図 頭部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

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 2-10

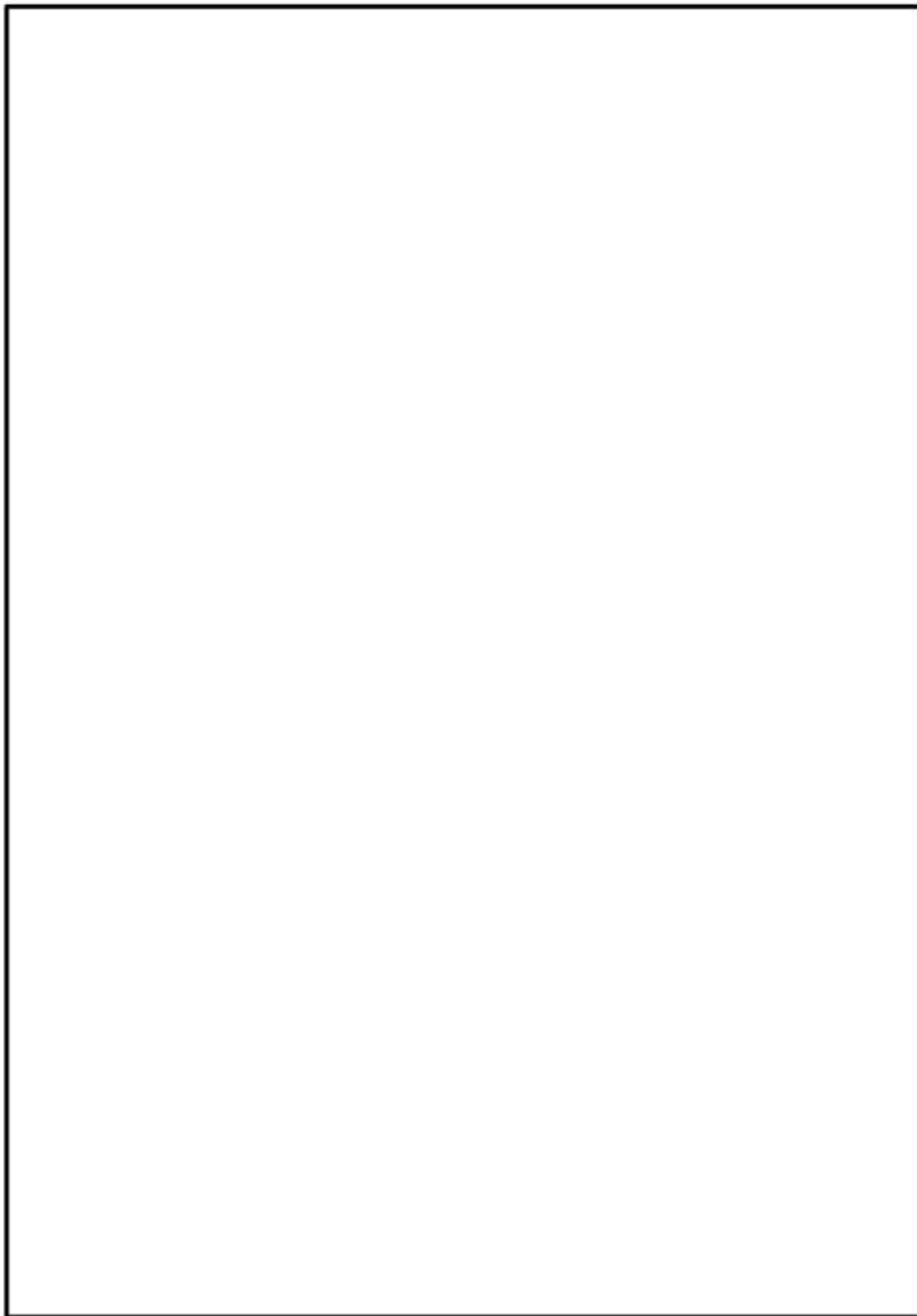


別紙 2-7 図 - 底部 0.3 m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

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 2-11



別紙2-8図 0.3 m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

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。



### 3.3 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

$$P_n \leq S_n$$

$$P_L \leq 1.5S_n$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_n$$

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

ここで、

$P_n$  : 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

$S_n$  : 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

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_n$$

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

ここで、

$S_n$  : 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

$$P_n \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

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、

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

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$  (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 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 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、

$\lambda$  : 有効細長比

$\Lambda$  : 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。

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

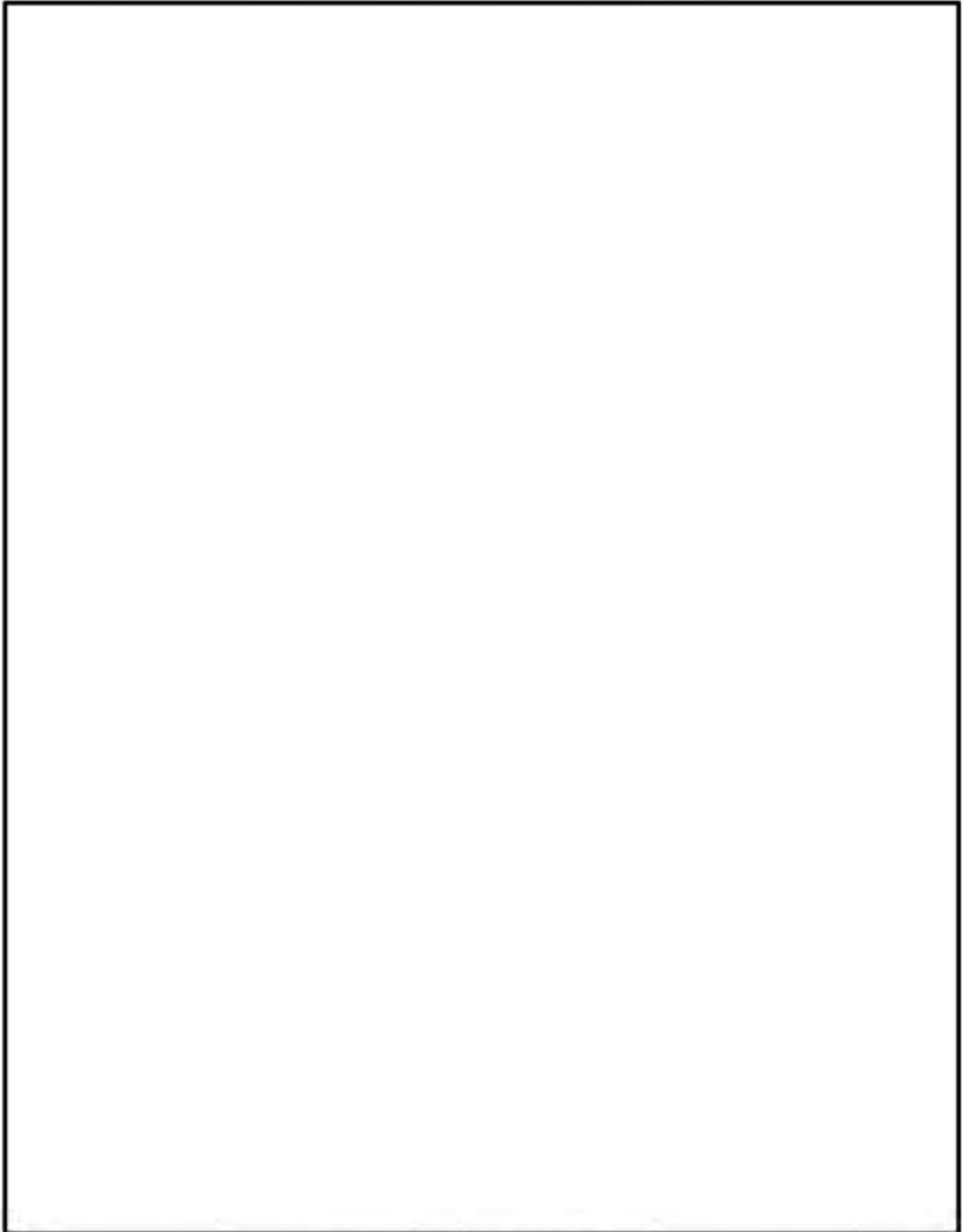
(5) 余裕率

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

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 (℃)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
一次蓋	①	$P_a$	—	7	[ ]	124	16.7
		$P_L+P_b$	内	64		186	1.90
	外		65	1.86			
	②	$P_L$	—	33		186	4.63
二次蓋	③	$P_a$	—	5		124	23.8
		$P_L+P_b$	内	30		186	5.20
	外		34	4.47			
	④	$P_L$	—	6		186	30.0
三次蓋	⑤	$P_a$	—	7		137	18.5
		$P_L+P_b$	内	26		205	6.88
	外		16	11.8			
	⑥	$P_L$	—	36		205	4.69
胴	⑦	$P_L$	—	43		186	3.32
	⑧	$P_a$	—	9		123	12.6
		$P_L+P_b$	内	9	184	19.4	
	外		9	19.4			
	⑨-1	$P_L$	—	5	184	35.8	
	⑨-2	$P_L$	—	6		29.6	
胴(底板)	⑩	$P_a$	—	1	122	121	
		$P_L+P_b$	内	6	183	29.5	
	外		6	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)  $P_a$ : 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  $P_a$  に対する基準値は  $S_a$ 、 $P_L$  及び  $P_L+P_b$  に対する基準値は  $1.5S_a$  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	㉔	$P_t$	—	16	186	10.6	
	㉕	$P_t$	—	31	185	4.96	
一次蓋 シール部	㉖	$P_t$	—	48	185	2.85	
	㉗	$P_t$	—	14	185	12.2	

(注1) 別紙2-9図 参照

(注2)  $P_a$ : 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㉔～㉗の $P_t$ に対する基準値は $S_t$ 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 (℃)	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<sub>0</sub>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	-	$\sigma_a$	-	289	562	0.94	
		$\sigma_a + \sigma_b$	-	323	843	1.60	
二次蓋 ボルト	-	$\sigma_a$	-	212	564	1.66	
		$\sigma_a + \sigma_b$	-	323	846	1.61	
三次蓋 ボルト	-	$\sigma_a$	-	204	564	1.76	
		$\sigma_a + \sigma_b$	-	216	846	2.91	

(注1) 別紙2-9図参照

(注2)  $\sigma_a$ : 平均引張応力、 $\sigma_b$ : 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㉒~㉓に対する基準値は $S_t$ である。蓋ボルトの基準  
値は $\sigma_a$ に対して $2S_a$ 、 $\sigma_a + \sigma_b$ に対して $3S_a$ である。なお、蓋ボルトの $2S_a$ 及び $3S_a$ の値は、 $S_t$   
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	$P_a$	—	2	[ ]	124	61.0
		$P_t+P_b$	内	16		186	10.6
			外	15			11.4
	②	$P_t$	—	12		186	14.5
二次蓋	③	$P_a$	—	1		124	123
		$P_t+P_b$	内	5		186	36.2
			外	4			45.5
	④	$P_t$	—	5		186	36.2
三次蓋	⑤	$P_a$	—	8		137	16.1
		$P_t+P_b$	内	39		205	4.25
			外	35			4.85
	⑥	$P_t$	—	28		205	6.32
胴	⑦	$P_t$	—	6		186	30.0
	⑧	$P_a$	—	11		123	10.1
		$P_t+P_b$	内	11	184	15.7	
			外	11		15.7	
	⑨-1	$P_t$	—	16	184	10.5	
	⑨-2	$P_t$	—	23		7.00	
胴(底板)	⑩	$P_a$	—	5	122	23.4	
		$P_t+P_b$	内	24	183	6.62	
			外	30		5.10	
⑪	$P_t$	—	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)  $P_a$ : 一次一般膜応力、 $P_t$ : 一次局部膜応力、 $P_b$ : 一次曲げ応力

(注3) 断面①~⑪の  $P_a$  に対する基準値は  $S_m$ 、 $P_t$  及び  $P_t+P_b$  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	[Redacted]	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	㉔	$P_t$	—	12	186	14.5	
	㉕	$P_t$	—	14	185	12.2	
一次蓋 シール部	㉖	$P_t$	—	36	185	4.13	
	㉗	$P_t$	—	25	185	6.40	

(注1) 別紙2-9図 参照

(注2)  $P_a$  : 一次一般膜応力、 $P_b$  : 一次局部膜応力、 $P_c$  : 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㉔～㉗の  $P_t$  に対する基準値は  $S_t$  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	369	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<sub>0</sub>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	[ ]	470	8.21
		せん断	-	7		271	37.7
		曲げ	-	19		470	23.7
	⑬	引張	-	41		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	-	$\sigma_a$	-	249	562	1.25	
		$\sigma_a + \sigma_b$	-	250	843	2.37	
二次蓋 ボルト	-	$\sigma_a$	-	196	564	1.87	
		$\sigma_a + \sigma_b$	-	202	846	3.18	
三次蓋 ボルト	-	$\sigma_a$	-	234	564	1.41	
		$\sigma_a + \sigma_b$	-	326	846	1.59	

(注1) 別紙2-9図参照

(注2)  $\sigma_a$ : 平均引張応力、 $\sigma_b$ : 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 $3f_v$ 、曲げ  
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面㉒~㉓に対する基準値は $S_r$ である。蓋ボルトの基準  
値は $\sigma_a$ に対して $2S_b$ 、 $\sigma_a + \sigma_b$ に対して $3S_b$ である。なお、蓋ボルトの $2S_b$ 及び $3S_b$ の値は、 $S_r$   
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	$P_m$	—	3	[ ]	124	40.3
		$P_L+P_b$	内	8		186	22.2
			外	10			17.6
	②	$P_L$	—	10		186	17.6
二次蓋	③	$P_m$	—	6		124	19.6
		$P_L+P_b$	内	15		186	11.4
			外	20			8.30
	④	$P_L$	—	19		186	8.78
三次蓋	⑤	$P_m$	—	13		137	9.53
		$P_L+P_b$	内	23		205	7.91
			外	22			8.31
	⑥	$P_L$	—	24		205	7.54
胴	⑦	$P_L$	—	66		186	1.81
	⑧	$P_m$	—	21		123	4.85
		$P_L+P_b$	内	20	184	8.20	
			外	29		5.34	
	⑨-1	$P_L$	—	20	184	8.20	
	⑨-2	$P_L$	—	31	184	4.93	
胴(底板)	⑩	$P_m$	—	11	122	10.0	
		$P_L+P_b$	内	12	183	14.2	
	外		13	13.0			
⑪	$P_L$	—	18	183	9.16		
外筒	⑫	引張	—	77	156	1.02	
		圧縮	—	20	156	6.80	
		せん断	—	30	90	2.00	
		曲げ	—	87	156	0.79	
	⑬	引張	—	41	156	2.80	
		圧縮	—	13	156	11.0	
		せん断	—	3	90	29.0	
		曲げ	—	7	156	21.2	
	⑭	引張	—	14	156	10.1	
		圧縮	—	18	156	7.66	
		せん断	—	20	90	3.50	
		曲げ	—	86	156	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(℃)	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	㉔	P <sub>1</sub>	—	15	186	11.4	
	㉕	P <sub>1</sub>	—	67	185	1.76	
一次蓋 シール部	㉖	P <sub>1</sub>	—	40	185	3.62	
	㉗	P <sub>1</sub>	—	57	185	2.24	

(注1) 別紙2-9図 参照

(注2) P<sub>0</sub>: 一次一般膜応力、P<sub>1</sub>: 一次局部膜応力、P<sub>2</sub>: 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<sub>t</sub>、圧縮応力に対する基準値は f<sub>c</sub>、せん断応力に対する基準値は f<sub>v</sub>、曲げ応力に対する基準値は f<sub>b</sub> である。断面㉔～㉗の P<sub>1</sub> に対する基準値は S<sub>p</sub> 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(℃)	評価 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
外筒	⑩	引張	—	99	[Redacted]	470	3.74
		せん断	—	26		271	9.42
		曲げ	—	72		470	5.52
	⑪	引張	—	64		470	6.34
		せん断	—	3		271	89.3
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑫	引張	—	86		470	4.46
		せん断	—	30		271	8.03
		曲げ	—	134		470	2.50
下部端板	⑬	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	⑭	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑮	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	⑯	引張	—	64	410	5.40	
		せん断	—	17	236	12.8	
		曲げ	—	8	410	50.2	
	⑰	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	⑱	—	内	36	186	4.16	
		—	外	25		6.44	
	⑲	—	内	61		185	2.03
		—	外	62		1.98	
一次蓋 シール部	⑳	—	内	28	185	5.60	
		—	外	70		1.64	
	㉑	—	内	57		185	2.24
		—	外	56		2.30	
一次蓋 ボルト	—	$\sigma_a$	—	251	562	1.23	
		$\sigma_a + \sigma_b$	—	590	843	0.42	
二次蓋 ボルト	—	$\sigma_a$	—	241	564	1.34	
		$\sigma_a + \sigma_b$	—	596	846	0.41	
三次蓋 ボルト	—	$\sigma_a$	—	285	564	0.97	
		$\sigma_a + \sigma_b$	—	468	846	0.80	

(注1) 別紙2-9図参照

(注2)  $\sigma_a$ : 平均引張応力、 $\sigma_b$ : 曲げ応力

(注3) 断面⑩~⑱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 $3f_v$ 、曲げ  
応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑲~㉑に対する基準値は $S_s$ である。蓋ボルトの基準  
値は $\sigma_a$ に対して $2S_b$ 、 $\sigma_a + \sigma_b$ に対して $3S_b$ である。なお、蓋ボルトの $2S_b$ 及び $3S_b$ の値は、 $S_s$   
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。

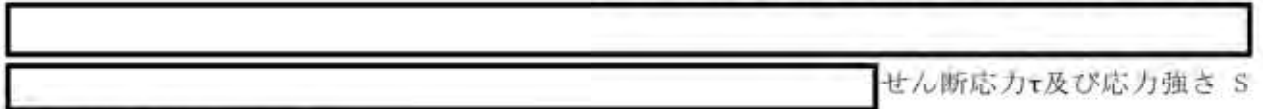


#### 4. 落下時の伝熱フィンの応力評価

##### 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  $\tau$  (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、

$\tau$  : 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 ( $m/s^2$ )

$A$  : 伝熱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

計算条件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 <sup>2</sup> )	伝熱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 <sup>2</sup> /mm)
		270	

せん断応力 : $\tau$ (MPa)	応力強さ : $S$ (MPa)	基準値 : $S_m$ (MPa)	余裕率 (-)
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ので、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 $\sigma_c$ (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 ( $mm^2$ )

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

$b_{A1}$  : 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)

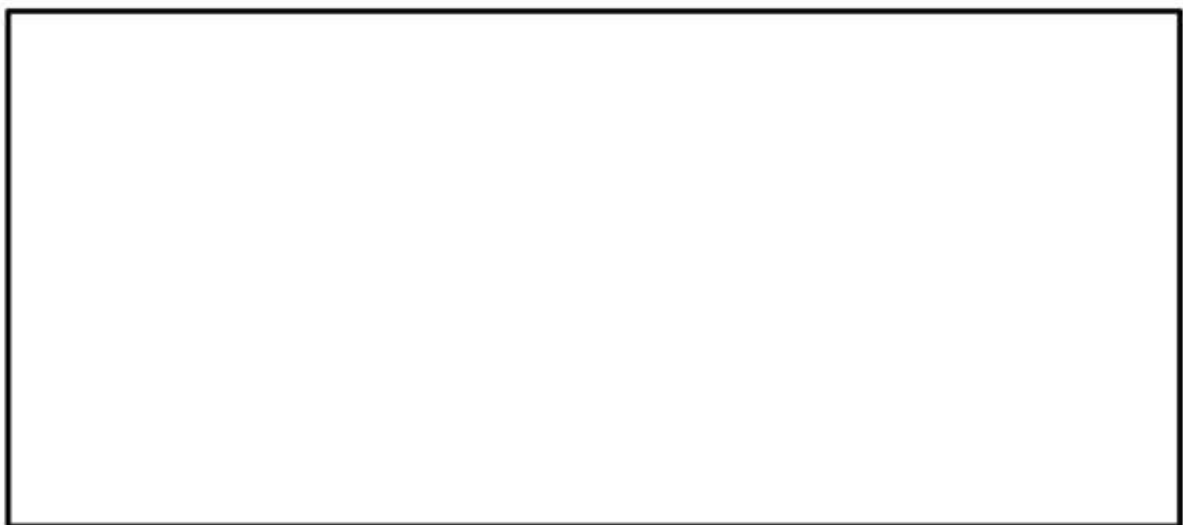
$b_{B1}$  : バスケットプレート B 幅 1 (mm)

$b_{B2}$  : 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

$\alpha$  : 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

$\tau$  : 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 <sup>2</sup> )
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 <sup>2</sup> )
数値						

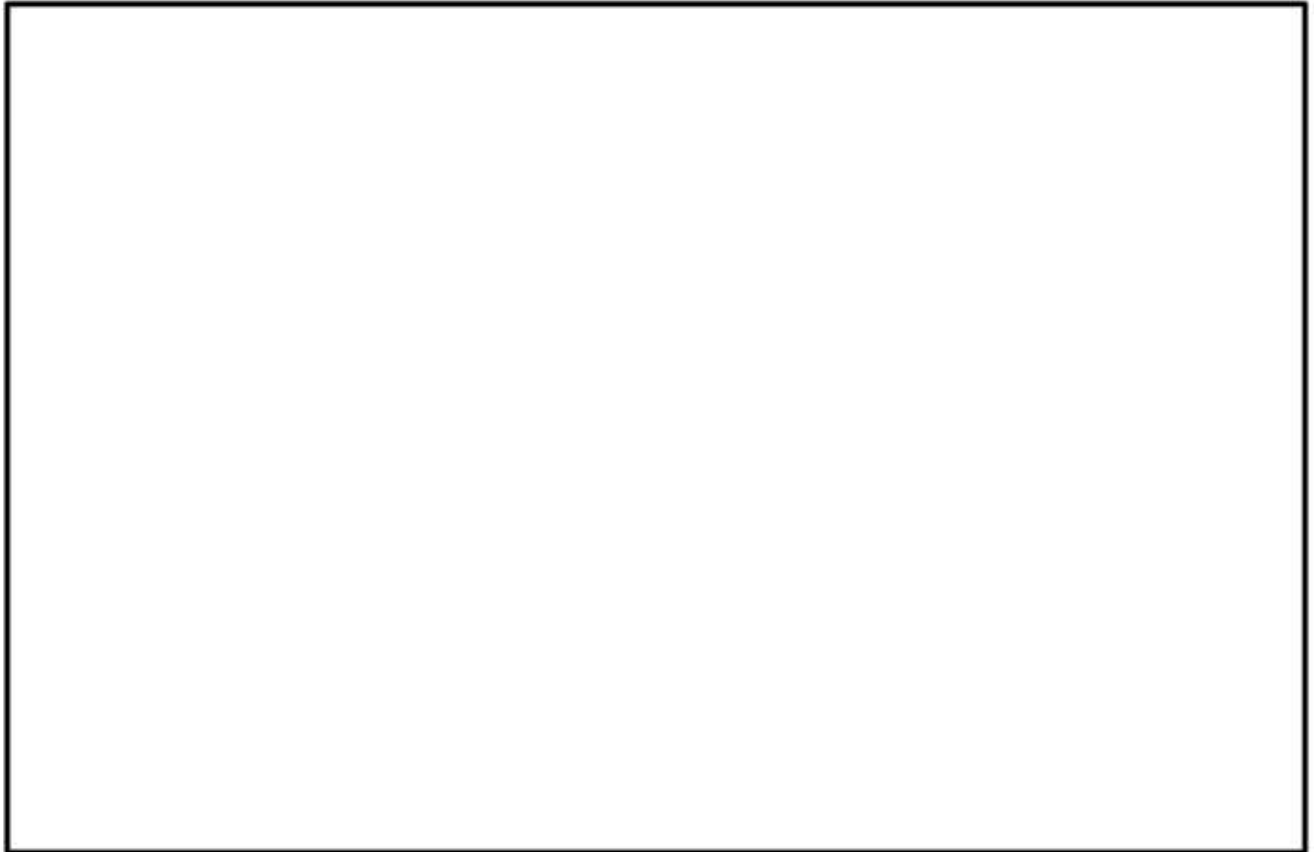
項目	バスケット プレートの タイプ	圧縮応力 : $\sigma_c$ (MPa)	基準値 : $S_a$ (MPa)	余裕率 (-)
数値	A	7	36	4.14
	B	7		4.14

## 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  $\sigma_c$  (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 ( $m/s^2$ )

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。

N : バスケットプレートの数 (枚)

A : 断面積 (mm<sup>2</sup>)

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

b<sub>1</sub> : バスケットプレート幅 1 (mm)

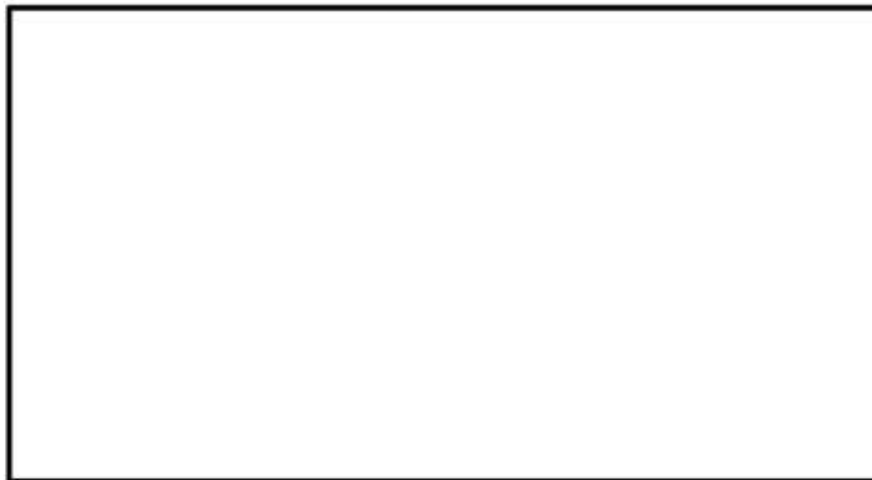
b<sub>2</sub> : バスケットプレート幅 2 (mm)

h<sub>1</sub> : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b<sub>3</sub> : バスケットプレート幅 3 (mm)

b<sub>4</sub> : バスケットプレート幅 4 (mm)

h<sub>2</sub> : 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 : $W_1$ (kg)	領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数(BP無, BP有) : $N_1$ (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 <sup>(注1)</sup> : $W_I$ (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 <sup>(注2)</sup> : $W_{II}$ (kg)	水平落下時の衝撃加速度 : $G_H$ (m/s <sup>2</sup> )
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 <sup>2</sup> )
数値							

項目	バスケットプレートの数 : $N$ (枚)	圧縮応力 : $\sigma_c$ (MPa)	基準値 : $S_n$ (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

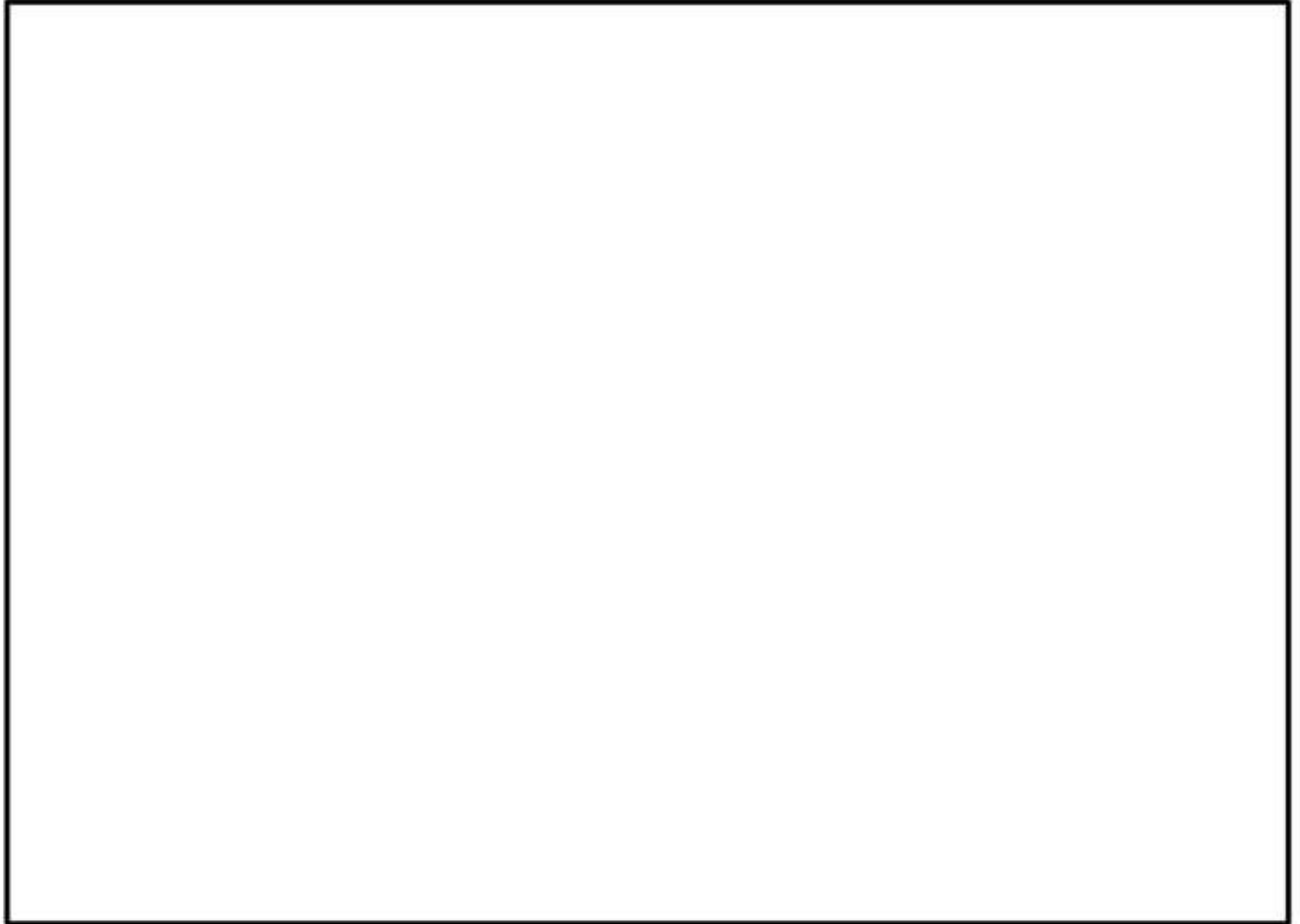
--



(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  $\sigma_b$  及びせん断応力  $\tau$  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、

$\sigma_b$  : 曲げ応力 (MPa)

$\tau$  : せん断応力 (MPa)

$M$  : 曲げモーメント (N・mm)

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。

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

Z : 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

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

A : 断面積 (mm<sup>2</sup>)

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

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<sub>H</sub> : 水平落下時の衝撃加速度 (m/s<sup>2</sup>)

W<sub>f</sub> : 燃料集合体の質量 (kg)

W<sub>b</sub> : 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)

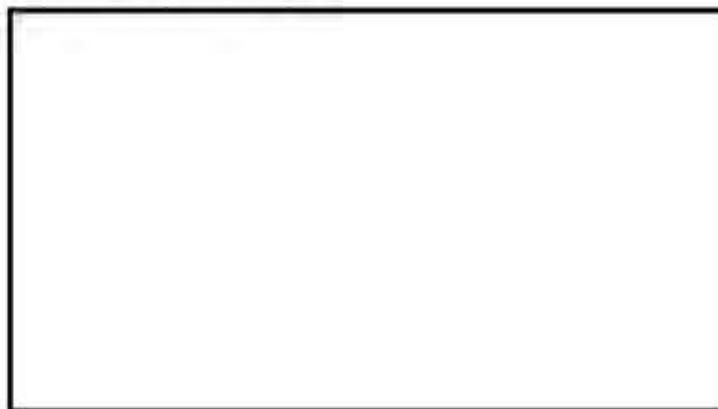
h<sub>1</sub> : バスケットプレート高さ 1 (mm)

b<sub>1</sub> : バスケットプレート幅 1 (mm)

b<sub>2</sub> : バスケットプレート幅 2 (mm)

h<sub>2</sub> : バスケットプレート高さ 2 (mm)

b<sub>3</sub> : 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 : $G_0$ ( $m/s^2$ )
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 : $M$ ( $N \cdot mm$ )	断面係数 : $Z$ ( $mm^3$ )	曲げ応力 : $\sigma_b$ (MPa)	基準値 : $\alpha S_m$ (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 : $\tau$ (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  $\sigma_c$  (MPa) と内圧による各方向応力  $\sigma_z$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  (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、

$\sigma_z$  : 軸方向応力 (MPa)

$\sigma_r$  : 半径方向応力 (MPa)

$\sigma_\theta$  : 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。

$$S = \text{Max} \{ |\sigma_{rz} - \sigma_{\theta z}|, |\sigma_{\theta z} - \sigma_{zz}|, |\sigma_{zz} - \sigma_{rz}| \}$$

ここで、

$$\sigma_{rz} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta z} = \sigma_\theta$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_r + \sigma_z$$

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  $\sigma_y$  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 <sub>v</sub> (m/s <sup>2</sup> )	270	270	270	270
燃料被覆管外径：d <sub>o</sub> (mm)				
燃料被覆管内径：d <sub>i</sub> (mm)				
内圧：P <sub>o</sub> (MPa)				
応力強さ：S (MPa)	105	102	126	120
降伏応力：σ <sub>y</sub> (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<sub>b</sub>(MPa)と内圧による各方向応力σ<sub>z</sub>、σ<sub>r</sub>、σ<sub>θ</sub>(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。

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

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

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

ここで、

M：曲げモーメント (N・mm)

G<sub>H</sub>：水平落下時の衝撃加速度 (m/s<sup>2</sup>)

I：断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)

W<sub>f</sub>：ペレット単位長さ当たり質量 (kg/mm)

W<sub>c</sub>：燃料被覆管単位長さ当たり質量 (kg/mm)

- $\ell$  : 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、

$$\begin{aligned} \sigma_{rL} &= \sigma_r \\ \sigma_{\theta L} &= \sigma_\theta \\ \sigma_{zL} &= -\sigma_b + \sigma_z \end{aligned}$$

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： $W_r$ (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 <sup>2</sup> )	210	210	210	210
支持スパン： $\ell$ (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： $\sigma_y$ (MPa)	589	589	589	589
余裕率： $MS$ (-)	3.17	3.20	1.84	2.02

### 輸送時の 9m 落下時における構造評価

#### 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 型輸送物に係る特別の試験条件（9m 落下試験）に適合する設計としている。

本別紙では、輸送時の 9m 落下事象のうち、9m 水平落下時における MSF-24P 型の構造評価の詳細を示す。

#### 2. 落下時の衝撃加速度

輸送物が 9 m 落下した場合、その落下エネルギーが、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、輸送物に加わる衝撃が十分緩和されることを示し、それに対する輸送物の健全性を検討する。

##### 2.1 落下姿勢

輸送物の落下姿勢として水平姿勢での落下を対象とする。

##### 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 に示す方法と同様に行う。落下エネルギーの計算条件と計算結果を別紙 3 - 1 表に示す。

別紙 3 - 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 <sup>2</sup> )	落下高さ : H (mm)	輸送物の 落下エネルギー : E <sub>k</sub> (N・mm)
数値	1.344 × 10 <sup>5</sup>	9.80665	9000	1.187 × 10 <sup>10</sup>

##### 2.3 解析モデル

水平落下時の解析モデルは、別紙 2 - 4 図に示すモデルと同じである。



## 2.4 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

落下エネルギー $E_k$ に対応する変形量 $\delta$ と衝撃加速度 $G$ を別紙3-2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)

$M$  : 輸送物質量 (kg)

別紙3-2表 9m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 <sup>(注1)</sup> ( $m/s^2$ )	緩衝体の 変形量 : $\delta$ (mm)	設計基準 変形量 <sup>(注2)</sup> : $\delta_{max}$ (mm)
水平落下	$9,299 \times 10^7$	692	710	273	374.5

(注1)設計加速度とは、得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注2)設計基準変形量とは、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

別紙2の3.1と同様に、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。

### 3.2 荷重条件及び境界条件

9m水平落下における荷重条件及び境界条件を別紙3-1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

9m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 ( $710 \text{ m/s}^2$ ) による自重の慣性力が落下方向に働く。
- ・胴内面には、衝撃加速度 ( $710 \text{ m/s}^2$ ) に加速度割増係数として1.2を乗じた加速度による内部収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が働く。
- ・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

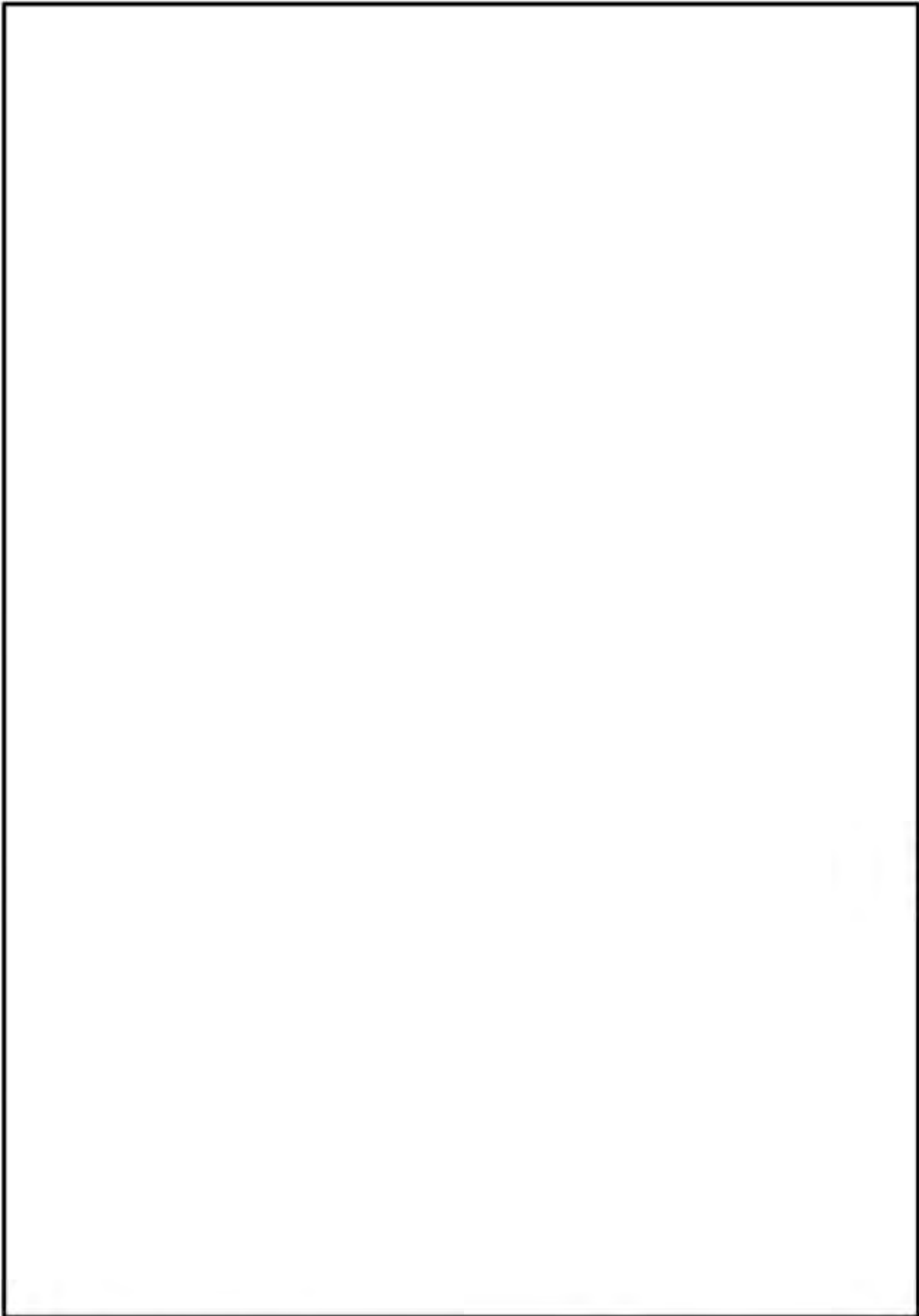
圧力荷重として、胴内圧、一次蓋－二次蓋間の圧力、二次蓋－三次蓋間の圧力、中性子遮蔽材部（蓋部、側部、底部）の圧力を考慮する。

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

9m 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 X 方向変位を拘束した。また、 $0^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  面の対称面において Y 方向の変位を拘束した。



別紙3-1 図 9 m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

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。

### 3.3 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設計基準値は、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

##### i) オーステナイト系ステンレス鋼以外

$$P_m \leq 2/3S_u$$

$$P_L \leq S_u$$

$$P_L + P_b \leq S_u$$

##### ii) オーステナイト系ステンレス鋼

$$P_m \leq \text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$$

$$P_L \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u]$$

$$P_L + P_b \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u]$$

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

$S_m$  : 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

$S_u$  : 金属キャスク構造規格 別表第 5-9 に示される設計引張強さ

#### (2) 蓋ボルト

$$\text{(平均引張応力)} \leq S_y$$

$$\text{(平均引張応力+曲げ応力)} \leq S_y$$

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

#### (3) 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

(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  $f_t$  の 1.5 倍を超えないこと。

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

ここで、

$F = \text{MIN}[0.7S_u, 1.2S_y]$  (オーステナイト系ステンレス鋼以外)

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(\text{RT})]$  (オーステナイト系ステンレス鋼)

$S_y(\text{RT})$  : 金属キャスク構造規格 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  $f_c$  の 1.5 倍を超えないこと。

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

ここで、

$\lambda$  : 有効細長比

$\Lambda$  : 限界細長比

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

c. 各部位の一次せん断応力は以下に示す  $f_s$  の 1.5 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  $f_b$  の 1.5 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

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

別紙3-3表 9m水平落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価 (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)	解析 基準値 (MPa) (注3)	余裕率 (MS) (注4)
一次蓋	①	$P_m$	—	11	[Redacted]	251	21.8
		$P_L+P_b$	内	4		377	93.2
	外		22	16.1			
	②	$P_L$	—	22		377	16.1
二次蓋	③	$P_m$	—	18		251	12.9
		$P_L+P_b$	内	29		377	12.0
	外		40	8.42			
	④	$P_L$	—	57		377	5.61
三次蓋	⑤	$P_m$	—	48		270	4.62
		$P_L+P_b$	内	45		406	8.02
	外		76	4.34			
	⑥	$P_L$	—	60		406	5.76
胴	⑦	$P_L$	—	172		377	1.19
	⑧	$P_m$	—	67		251	2.74
		$P_L+P_b$	内	66		377	4.71
	外		94	3.01			
	⑨-1	$P_L$	—	68	377	4.54	
	⑨-2	$P_L$	—	108		2.49	
胴(底板)	⑩	$P_m$	—	27	251	8.29	
		$P_L+P_b$	内	28	377	12.4	
	外		38	8.92			
⑪	$P_L$	—	56	377	5.73		
外筒	⑫	引張	—	185	282	0.52	
		圧縮	—	51	282	4.52	
		せん断	—	95	162	0.70	
		曲げ	—	174	282	0.62	
	⑬	引張	—	119	282	1.36	
		圧縮	—	53	282	4.32	
		せん断	—	7	162	22.1	
		曲げ	—	18	282	14.6	
	⑭	引張	—	33	282	7.54	
		圧縮	—	50	282	4.64	
		せん断	—	69	162	1.34	
		曲げ	—	205	282	0.37	

(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①~④及び⑦~⑩の  $P_m$  に対する基準値は  $2/3S_u$ 、 $P_L$  及び  $P_L+P_b$  に対する基準値は  $S_u$  である。断面⑤及び⑥の  $P_m$  に対する基準値は  $\text{MIN}[2.4S_u, 2/3S_u]$ 、 $P_L$  及び  $P_L+P_b$  に対する基準値は  $\text{MIN}[3.6S_u, S_u]$  である。断面⑪~⑭に示す引張応力に対する基準値は  $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は  $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は  $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は  $1.5f_b$  である。

(注4) 余裕率=評価基準値/解析結果-1で算出される。

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3-3表 9m水平落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価(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)	解析 基準値 (MPa) (注 3)	余裕率 (MS) (注4)
下部端板	⑮	引張	—	22	[ ]	218	8.90
		圧縮	—	35		218	5.22
		せん断	—	41		126	2.07
		曲げ	—	171		218	0.27
蓋部中性 子遮蔽材 カバー	⑯	引張	—	5		283	55.6
		圧縮	—	1		283	282
		せん断	—	14		163	10.6
		曲げ	—	32		283	7.84
	⑰	引張	—	34		283	7.32
		圧縮	—	10		283	27.3
		せん断	—	14		163	10.6
		曲げ	—	58		283	3.87
底部中性 子遮蔽材 カバー	⑱	引張	—	5		217	42.4
		圧縮	—	89		217	1.43
		せん断	—	46		125	1.71
		曲げ	—	21		217	9.33
	⑲	引張	—	36		217	5.02
		圧縮	—	142		217	0.52
		せん断	—	47		125	1.65
		曲げ	—	140		217	0.55
二次蓋 シール部	⑳	$P_L+P_b+Q$	内	127	186	0.46	
		$P_L+P_b+Q$	外	63		1.95	
	㉑	$P_L+P_b+Q$	内	149	185	0.24	
		$P_L+P_b+Q$	外	155		0.19	
一次蓋 シール部	㉒	$P_L+P_b+Q$	内	43	186	3.32	
		$P_L+P_b+Q$	外	85		1.18	
	㉓	$P_L+P_b+Q$	内	115	185	0.60	
		$P_L+P_b+Q$	外	123		0.50	
一次蓋 ボルト	—	$\sigma_n$	—	263	846	2.21	
		$\sigma_n+\sigma_b$	—	643	846	0.31	
二次蓋 ボルト	—	$\sigma_n$	—	314	848	1.70	
		$\sigma_n+\sigma_b$	—	809	848	0.04	
三次蓋 ボルト	—	$\sigma_n$	—	420	848	1.01	
		$\sigma_n+\sigma_b$	—	767	848	0.10	

(注1) 別紙2-9図参照

(注2)  $P_n$ :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、 $\sigma_n$ :平均引張応力、 $\sigma_b$ :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 $1.5f_t$ 、圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$ 、せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$ 、曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ 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 $S_y$ である。

(注4) 余裕率=評価基準値/解析結果-1で算出される。



#### 4. 落下時の伝熱フィンへの応力評価

別紙2の4.2で示したとおり、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。

#### 5. 9m 水平落下時のバスケットの応力評価

##### (1) 応力計算方法

9m 水平落下時にバスケットプレート縦板及びバスケットプレート横板に生じる応力は、別紙2の5.2に示した0.3m 水平落下と同様の方法で求められる。ここで、9m 水平落下時の衝撃加速度には、加速度割増係数として1.2を衝撃加速度に乗じて算出する。

##### (2) 設計基準

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、以下のとおり設計基準値を設定した。

$$P_b \leq 2/3 S_u$$

$$P_a + P_b \leq 2/3 \alpha S_u$$

$$\tau \leq 1.2 S_a$$

ここで、

$S_u$  : 設計引張強さ

$P_a$  : 一次一般膜応力

$P_b$  : 一次曲げ応力

$\alpha$  : 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

$\tau$  : 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 3-4 表及び別紙 3-5 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3-4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(BP無, BP有) : $W_f$ (kg)	領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数(BP無, BP有) : $N_I$ (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 <sup>2</sup> )
数値					852

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 <sup>2</sup> )
数値							

項目	バスケットプレートの数 : $N$ (枚)	圧縮応力 : $\sigma_c$ (MPa)	基準値 : $(2/3)S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値		46	79	0.71

(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

--

別紙3-5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						852

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 : $M$ ( $N \cdot mm$ )	断面係数 : $Z$ ( $mm^3$ )	曲げ応力 : $\sigma_b$ (MPa)	基準値 : $(2/3) \alpha$ $S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			32	103	2.21

項目	せん断力 : $F$ (N)	断面積 : $A$ ( $mm^2$ )	せん断応力 : $\tau$ (MPa)	基準値 : $1.2S_u$ (MPa)	余裕率 (-)
数値			8	43	4.37

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。

別添 9m 水平落下時の燃料被覆棒に発生する荷重評価

9m 水平落下時において燃料被覆管に発生する荷重を別紙 3-6 表に示す。9m 水平落下時に発生する荷重は、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。

別紙 3-6 表 9m 水平落下時に燃料棒に発生する荷重

燃料棒に生じる荷重 <sup>(注 1)</sup>	燃料棒の破損が確認されていない荷重 <sup>(注 2)</sup>
0.00948 kN/mm	0.9 kN/mm

(注 1) 燃料棒に生じる荷重は以下のとおり算出される。

落下方向最下部の燃料棒 1 本あ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 本あたりに生じる単位長さあたりの圧縮荷重(N)

$W_f$  : バレット単位長さ当たり質量(kg/mm)

$$= \boxed{\phantom{0000}} \text{ (kg/mm)}$$

$W_c$  : 被覆管単位長さ当たり質量(kg/mm)

$$= \boxed{\phantom{0000}} \text{ (kg/mm)}$$

$n$  : 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)

$$= 17 \text{ (本)}$$

$G_H$  : 水平落下時衝撃加速度( $m/s^2$ ) (内部収納物の加速度割増係数 1.2 を考慮)

$$= 852 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

したがって、

$$F = 0.00948 \text{ (kN/mm)}$$

(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.