

HDP-69BCH(B)型が特定兼用キャスクであること
の説明資料

<目次>

1. 概要
2. 輸送物の構造
3. 輸送物の評価について
 - 3.1 一般の試験条件
 - 3.2 特別の試験条件
 - 3.3 1 m貫通について
 - 3.4 伝熱フィン及び外筒の評価について
 - 3.5 使用する解析コード
4. 貯蔵用緩衝体の型式証明での説明範囲
5. 参考文献

【参考資料】

特になし

1. 概要

特定兼用キャスクは、使用済燃料集合体を工場等内に貯蔵する乾式キャスクとしてだけでなく、使用済燃料集合体の工場等外への運搬に使用する容器に兼用することができることを要求されるため、HDP-69BCH(B)型は、三次蓋、輸送用緩衝体等を装着した状態（以下「輸送物」という。）で運搬できる設計とする。

使用済燃料集合体の工場等外への運搬に使用することができる容器であることを示すには、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「外運搬規則」という。）の第六条（BM型輸送物に係る技術上の基準）又は第七条（BU型輸送物に係る技術上の基準）及び第十一条（核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準）に適合していることを示す必要がある。また、外運搬規則では、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に課する技術上の基準に係る細目を定める告示（以下「告示」という。）に試験要件が定められており、その試験要件に基づき、落下等の評価を行う必要がある。ここでは、告示に定められる輸送の一般の試験条件、特別の試験条件の落下時の HDP-69BCH(B)型（輸送物） の評価条件及び評価結果を示す。

本評価は、HDP-69BCH(B)型に衝突等による衝撃加速度及び衝撃荷重が加わった場合を想定した設計用の衝撃加速度及び衝撃荷重（以下「設計加速度及び設計荷重」という。）を設定し、その設計加速度及び設計荷重の条件で、HDP-69BCH(B)型の安全機能が損なわれない設計であることを示すものである。これにより、実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の第四条（地震）、第五条（津波）及び第六条（竜巻）への適合性を示すために、同じ設計加速度及び設計荷重を使用することについて、その妥当性を説明するものである。

本特定兼用キャスクの設置方法のうち、特定兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対してその安全機能を損なわない方法（以下「蓋部が金属部へ衝突しない設置方法」という。）は、貯蔵用緩衝体の装着により、兼用キャスク告示に定める地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない、蓋部が金属部へ衝突しない方法で設置できる設計とする。貯蔵用緩衝体が、特定兼用キャスクの安全機能を損なわないような十分な緩衝機能を有するための設計条件として、当該設計加速度及び設計荷重を適用すれば、供用状態Dを満足できる。

なお、外運搬規則への適合については、後段の型式指定における「外運搬規則第六条若しくは第七条及び第十一条に定める技術上の基準（容器に係るものに限る。）への適合性に関する説明書」において、その詳細の妥当性を説明するものとする。

2. 輸送物の構造

HDP-69BCH(B)型の輸送物縦断面図を図 2-1 に示す。HDP-69BCH(B)型の輸送物は、特定兼用キャスク（バスケット、一次蓋及び二次蓋含む）、モニタリングポートカバープレート（輸送用）、三次蓋及び輸送用緩衝体から構成される。

(1) モニタリングポートカバープレート（輸送用）

二次蓋の構造を図 2-2、モニタリングポートカバープレート（輸送用）の構造を図 2-3 に示す。二次蓋には、一次蓋と二次蓋で形成される空間にヘリウムを充填するため、この空間の圧力を検出するための貫通孔が設けられており、貫通孔にはモニタリングポートバルブが設置されている。輸送物の状態では、その外側にステンレス鋼製のモニタリングポートカバープレートが取り付けられる。モニタリングポートカバープレートと二次蓋との間には O リングが設けられている。

(2) 三次蓋

三次蓋の構造を図 2-4 に示す。三次蓋は炭素鋼製で、表面は塗装が施されている。三次蓋はボルトで特定兼用キャスク本体上部に取り付けられる。三次蓋と特定兼用キャスクの本体上部との接合面には蓋側に二重 O リングが設けられており、この二重の O リングの内側 O リングにより輸送中の密封境界を形成する。

(3) 輸送用緩衝体

上部緩衝体を図 2-5 に、下部緩衝体を図 2-6 に示す。

上部緩衝体は特定兼用キャスク本体上部に、下部緩衝体は特定兼用キャスク本体下部に各々ボルトで取り付けられ、落下等により特定兼用キャスクに加わる衝撃を吸収して特定兼用キャスクを保護する。上・下部緩衝体は、ステンレス鋼のカバープレートとリブから構成される溶接構造物の内部に緩衝材である木材を充填したものである。

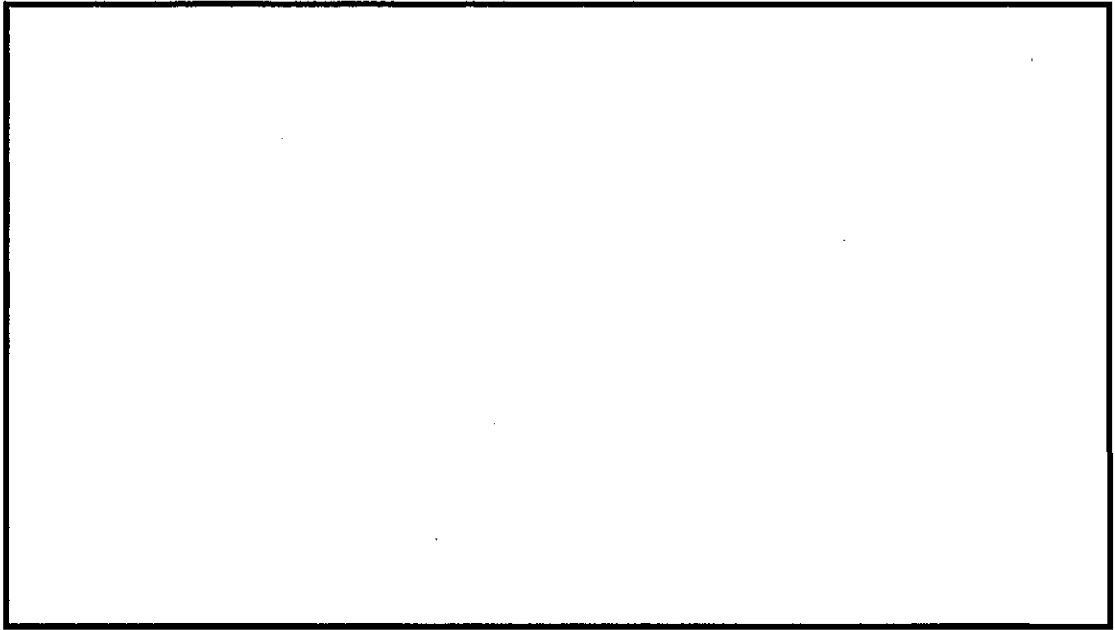



図 2-1 輸送物縦断面図

 内は商業機密のため、非公開とします。

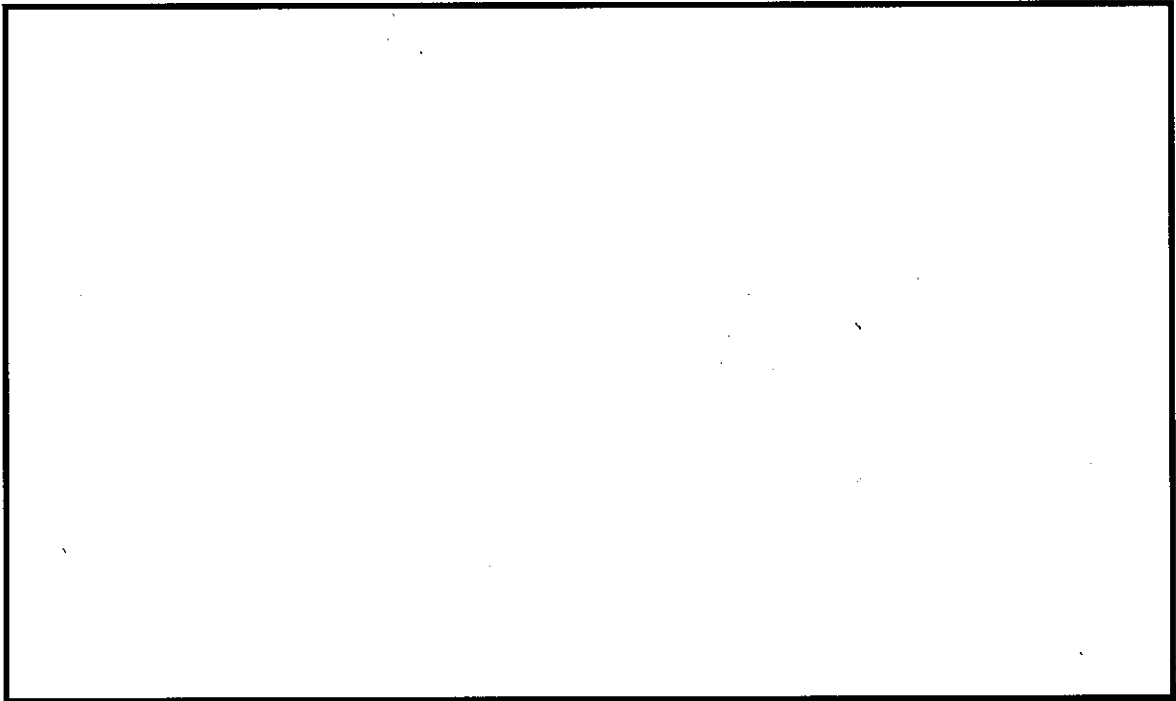


図 2-2 二次蓋の構造

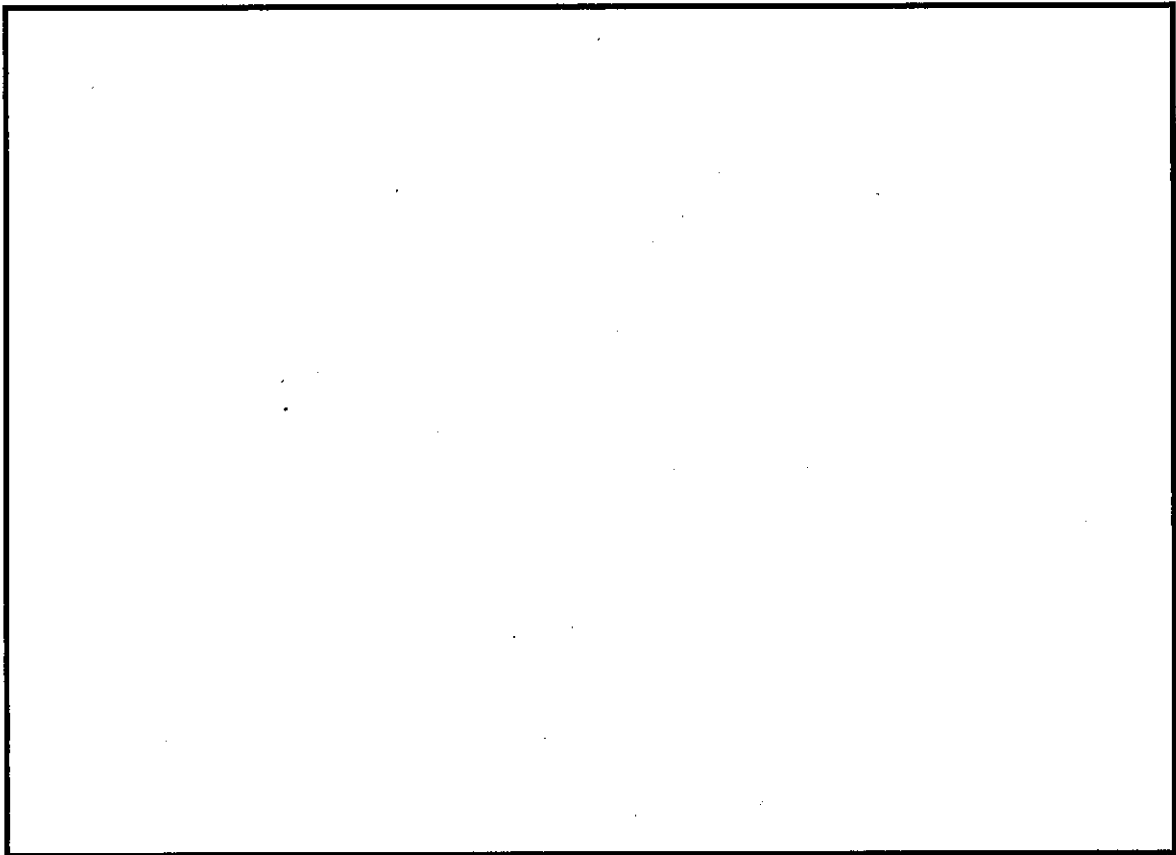



図 2-3 モニタリングポートカバープレート（輸送用）の構造

 内は商業機密のため、非公開とします。

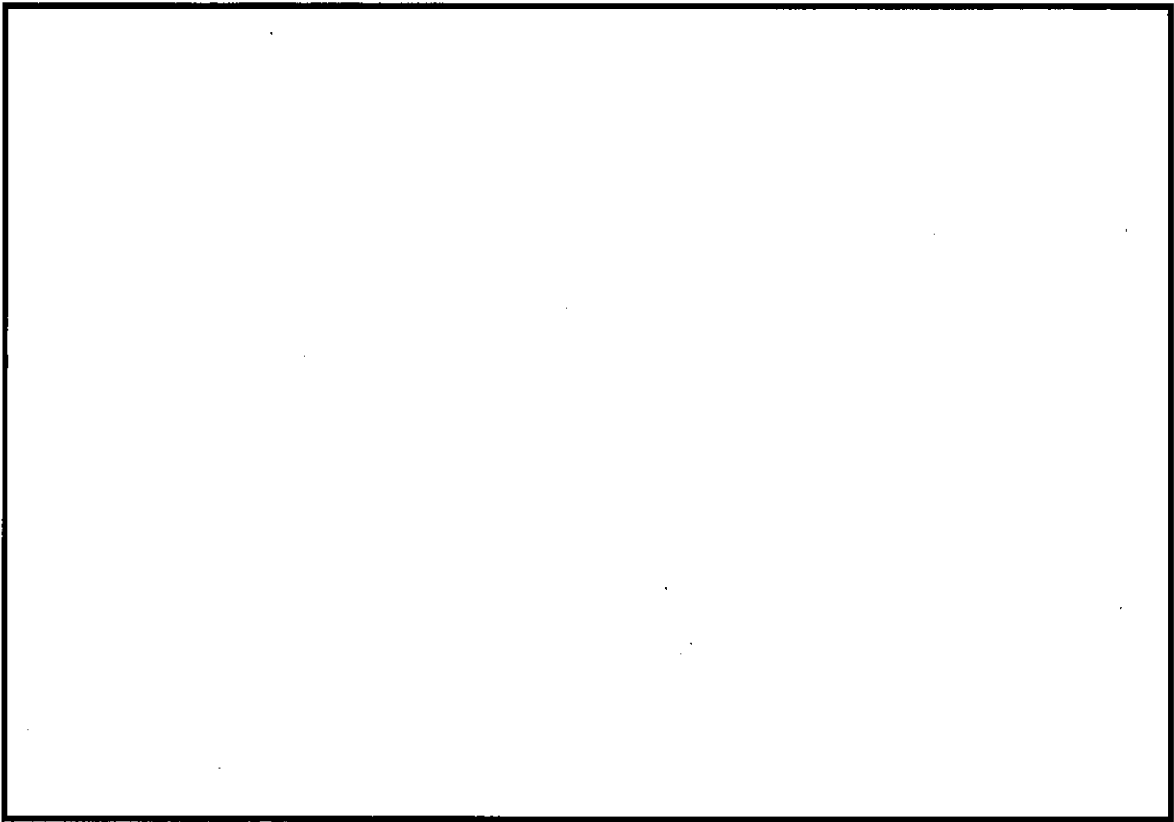



図 2-4 三次蓋の構造

 内は商業機密のため、非公開とします。

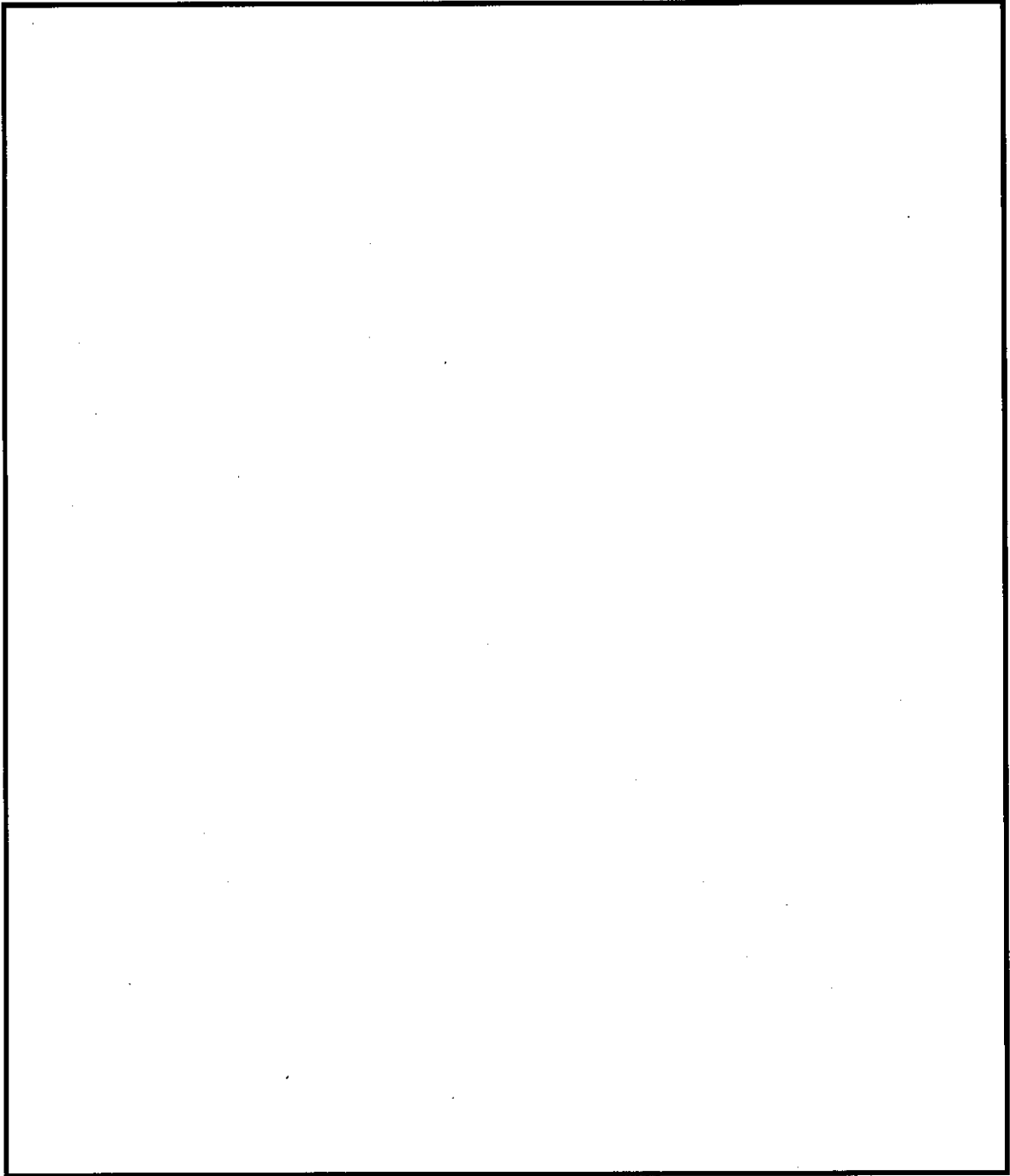



図 2-5 上部緩衝体の構造

 内は商業機密のため、非公開とします。

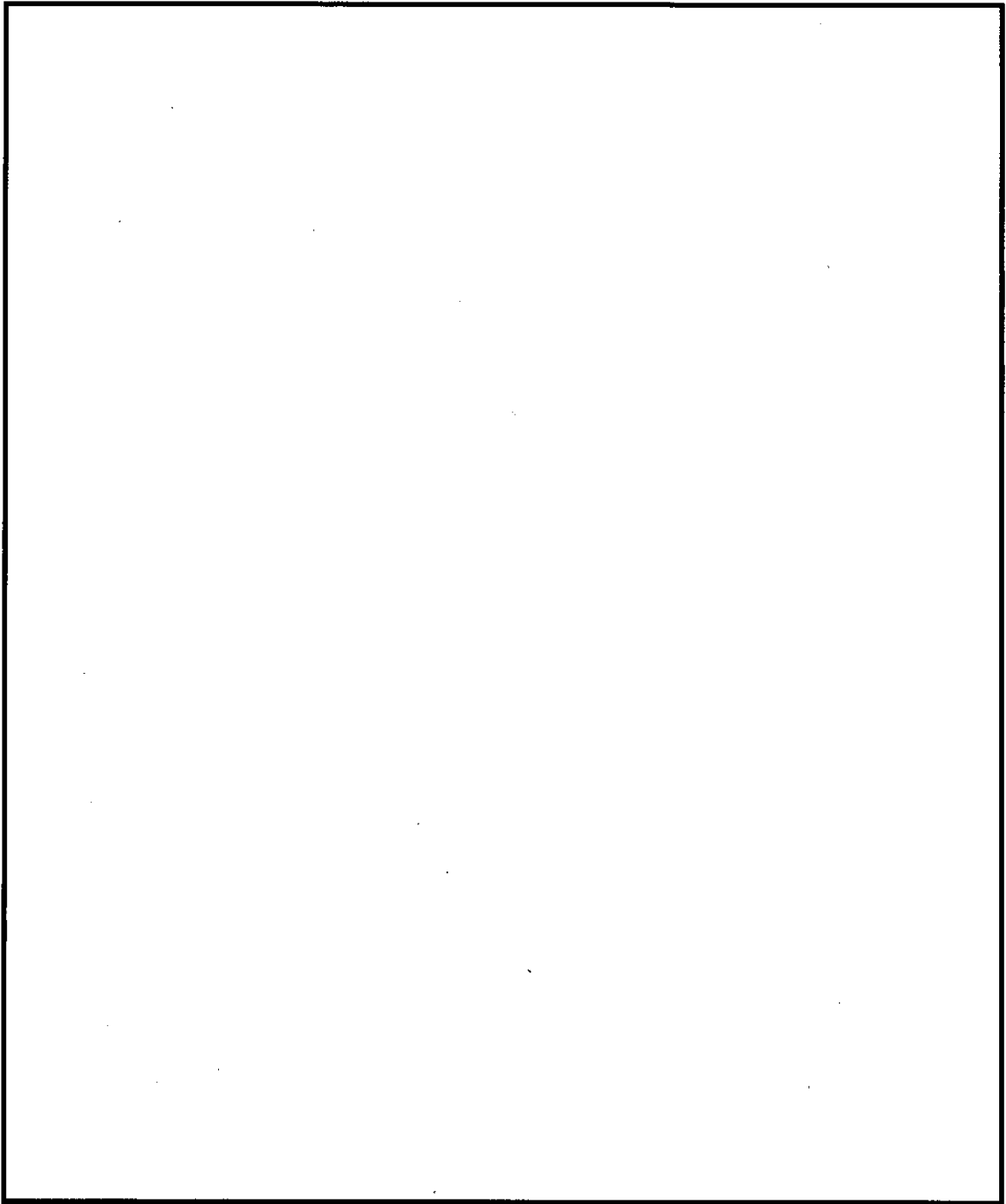



図 2-6 下部緩衝体の構造

 内は商業機密のため、非公開とします。

3. 輸送物の評価について

3.1 一般の試験条件

(1) 輸送物の評価方法

外運搬規則及び告示には、輸送中に誤操作等で輸送物が時々遭遇する軽微な事象を代表する条件として、一般の試験条件が規定され、その判定基準は輸送が継続できることである。一般の試験条件では、輸送物の総重量に応じて、輸送物の落下時の評価を行う必要がある。HDP-69BCH(B)型の輸送物の総重量は、132.2 tであり、告示に基づき、輸送時の評価として、落下時の構造強度評価を行い、密封境界が弾性範囲に留まることを示す。

落下時の輸送物の姿勢を図 3.1-1 に示す。図 3.1-1 に示すように、輸送物が落下した場合、落下エネルギーは特定兼用キャスク本体の上下部に取り付けられた輸送用緩衝体の変形によって吸収される。姿勢によって、生じる輸送用緩衝体の変形量や衝撃荷重は異なり、落下時の評価では、輸送用緩衝体の変形量及び輸送物に生じる衝撃加速度及び衝撃荷重を算出し、その衝撃加速度及び衝撃荷重を包絡する設計加速度及び設計荷重を入力条件として、特定兼用キャスク各部の応力評価を行う。構造強度の解析フロー図を図 3.1-2 に示す。特定兼用キャスクは、有限要素法による三次元モデルを用いて評価する。解析コードには、ABAQUS コードを用いる。また、トラニオン及びバスケットは、材料力学による工学式を用いて評価する。

密封境界が弾性範囲に留まる時の輸送物に生じる荷重、加速度及び輸送用緩衝体の変形量を表 3.1-1 に示す。表 3.1-1 に示す衝撃荷重は、特定兼用キャスクと輸送用緩衝体の接触面において特定兼用キャスク側に生じる力である。この衝撃荷重を輸送物の総重量で割ることにより、衝撃加速度が求められ、衝撃加速度に余裕を持たせて設計加速度を設定する。また、設計加速度と衝撃加速度の比から設計荷重を設定する。

表 3.1-1 一般の試験条件の落下評価時に生じる荷重、加速度及び緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃荷重*1 : F (N)	衝撃加速度 : G_A (m/s^2)	設計荷重 : (N)	設計加速度 : G_D (m/s^2)	緩衝体の 変形量: δ (mm)
垂直落下	頭部	3.41×10^7	259	3.88×10^7	294	25.2
	底部	3.53×10^7	268	3.88×10^7	294	24.4
水平落下		2.13×10^7	161	2.60×10^7	196	51.3

注記*1 : 0.3 m 落下時の衝撃荷重

(2) 評価条件

a. HDP-69BCH(B)型の評価

HDP-69BCH(B)型の三次元モデル図を図 3.1-3 に、落下姿勢ごとの荷重条件及び境界条件を図 3.1-4 から図 3.1-6 に、応力評価位置を図 3.1-7 に示す。図 3.1-3 に示すように、HDP-69BCH(B)型は 1/2 でモデル化する。また、落下姿勢ごとの荷重条件及び境界条件は図 3.1-4 から図 3.1-6 のように設定し、圧力及び温度分布を考慮して評価を行い、図 3.1-7 に示す応力評価位置の応力を算出する。

b. バスケットの評価 (垂直落下時)

垂直落下時にバスケットには自重による慣性力が作用し、圧縮応力 σ_c (MPa) が生じる。圧縮応力 σ_c (MPa) は以下の式から求められる。

$$\sigma_c = \rho \cdot L \cdot G_V \quad (1)$$

ここで、

- ρ : バスケット材料(ほう素添加ステンレス鋼)の密度 (kg/mm³)
- L : バスケット全長(mm)
- G_V : 垂直落下時の加速度 (m/s²)

c. バスケットの評価 (水平落下時、横板)

水平落下時のバスケットプレート(横板)の解析モデルを図 3.1-8 に示す。水平落下時に、バスケットプレートの横板には、燃料集合体、伝熱プレート、バスケットプレート自体の慣性力により曲げ応力が生じる。バスケットプレートを、図 3.1-8 に示すように両端固定で、特定兼用キャスク軸方向には単位幅の梁とすると、両端部断面に生じる曲げ応力 σ_b (MPa) は以下の式で求められる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm/mm)
- Z : 断面係数 (mm³/mm)

曲げモーメントは、以下の式で求められる。

$$M = \frac{1}{12} \cdot (w_1 + w_2 + w_3) \cdot G_H \cdot \ell^2 \quad (3)$$

ここで、

- w_1 : 燃料集合体の単位面積あたりの重量 (kg/mm²)
- w_2 : 伝熱プレートの単位面積あたりの重量 (kg/mm²)
- w_3 : バスケットプレートの単位面積あたりの重量 (kg/mm²)
- G_H : 水平落下時の加速度 (m/s²)

ℓ : バスケットプレート幅 (mm)

また、バスケットプレートは、その 1/2 の幅でスリットが存在し、縦板がはめ込まれており、荷重を受け持つ幅は 1/2 であることを考慮して断面係数 Z は以下の式で求められる。

$$Z = \frac{t^2}{6} \cdot 0.5 \quad (4)$$

ここで、

t : バスケットプレートの板厚 (mm)

式(2)から式(4)を用いて、バスケットプレートに生じる曲げ応力を求める。

また、図 3.1-8 に示すバスケットプレートの断面に生じるせん断応力 τ は、単位長さあたりに作用する荷重 F (N/mm)、単位長さあたりのせん断断面積 A (mm²/mm) とすると、以下の式で求められる。

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (5)$$

単位長さあたりのせん断断面積 A は、バスケットプレートの板厚 t と同じである。また、単位長さあたりに作用する荷重 F は、以下の式で求められる。

$$F = (w_1 + w_2 + w_3) \cdot G_H \cdot \ell \quad (6)$$

式(4)から式(6)を用いて、バスケットプレートに生じるせん断応力を求める。

図 3.1-8 に示すバスケットプレートの断面に生じる応力強さ S は、以下の式で求められる。

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \quad (7)$$

式(2)から得られた曲げ応力 σ_b 、式(5)から得られたせん断応力 τ を式(7)に代入し、応力強さ S を算出する。

d. バスケットプレート (水平落下時、縦板)

水平落下時のバスケットプレート (縦板) の解析モデルを 図 3.1-9 に示す。 図 3.1-9 に示すようにバスケットプレートの縦板最下面には自重、 の燃料集合体の重量、 の横板及び の伝熱プレートの重量による慣性力が荷重として作用する。したがって、バスケットプレートの縦板に生じる圧縮応力 σ_c (MPa) は以下の式で求められる。

$$\sigma_c = (w_v + \text{ } w_f + \text{ } w_{hc} + w_{ha}) \cdot G_H / (L \cdot t) \quad (8)$$

ここで、

 内は商業機密のため、非公開とします。

w_v : 縦板 1 枚分の重量 (kg)

w_f : 燃料集合体 1 体分の重量 (kg)

w_{hc} : のバスケットプレート横板 1 枚の重量 (kg)

w_{ha} : の伝熱プレート の重量 (kg)

G_H : 水平落下時の加速度 (m/s^2)

L : バスケットプレートの軸方向長さ (mm)

t : バスケットプレートの板厚 (mm)

式(8)を用いて、バスケットプレートの縦板に生じる圧縮応力を算出する。

(3) 評価基準

特定兼用キャスクの評価基準を以下に示す。評価基準は、金属キャスク構造規格の値を用いる。

- a. 各蓋ボルト以外の輸送容器の胴、底板、一次蓋、二次蓋、三次蓋及び底部中性子遮蔽材カバーは発生応力を分類し、各応力強さが以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5 S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5 S_m$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

P_L : 一次局部膜応力強さ

P_b : 一次曲げ応力強さ

Q : 二次応力強さ

S_m : 金属キャスク構造規格¹⁾別表 5-1 に示される設計応力強さ

- b. 各蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2 S_m$$

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

ここで、

S_m : 金属キャスク構造規格¹⁾別表 5-2 に示される設計応力強さ

- c. 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部は発生応力を分類し、各応力強さが以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

内は商業機密のため、非公開とします。

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格¹⁾別表5-8に示される設計降伏点

ただし、一次蓋密封シール部に対して上記基準は熱的試験のみ適用する。

d. バスケットにおいては、以下の基準を適用する。

(a)各部位の応力強さが以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_m + P_b \leq 1.5 S_m$$

ここで、

S_m : 金属キャスク構造規格 事例規格²⁾表2に示される設計応力強さ

(b)各部位の平均圧縮応力は以下に示す f_c を超えないこととする。

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

ここで、

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

S_y : 金属キャスク構造規格 事例規格²⁾表3に示される設計降伏点

$S_y(RT)$: 金属キャスク構造規格 事例規格²⁾表3に示される40°Cにおける設計降伏点

(4) 評価結果

評価結果を以下に示す。

a. HDP-69BCH(B)型の評価結果

落下姿勢ごとの応力評価結果を表3.1-2から表3.1-7に示す。落下姿勢ごとの一次応力、一次+二次応力について、特定兼用キャスクの密封境界を構成する部位、シール部及びボルトで評価を行い、評価結果は評価基準を満足する。

b. バスケットの評価結果

落下姿勢ごとのバスケットプレートの評価条件及び評価結果を表3.1-8から表3.1-10に示す。落下姿勢ごとのバスケットプレートの評価を行い、評価結果は評価基準を満足する。

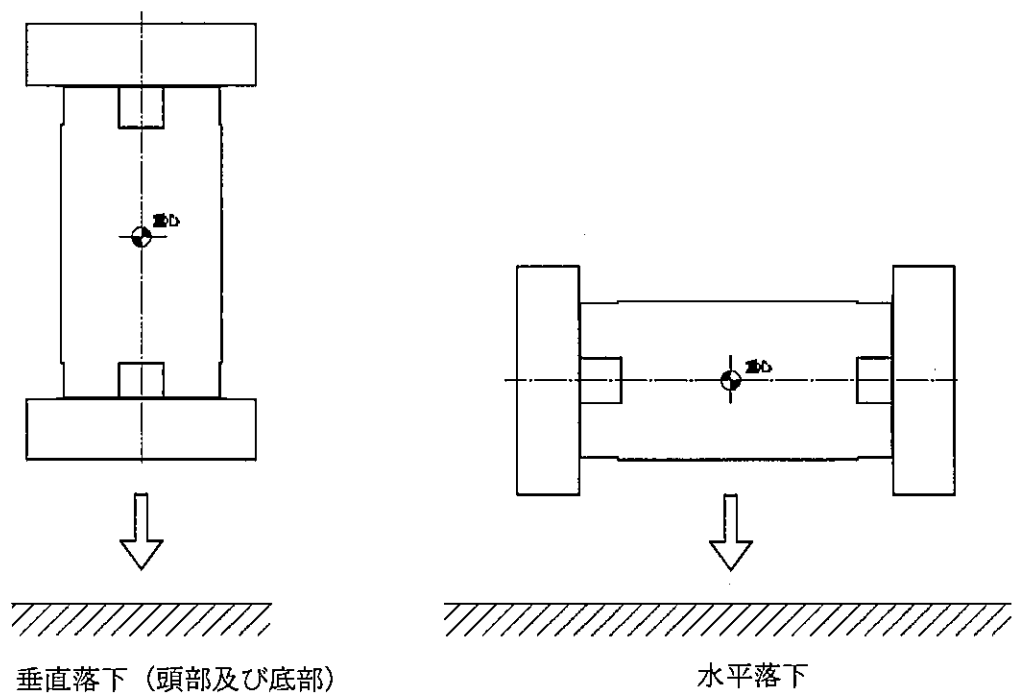
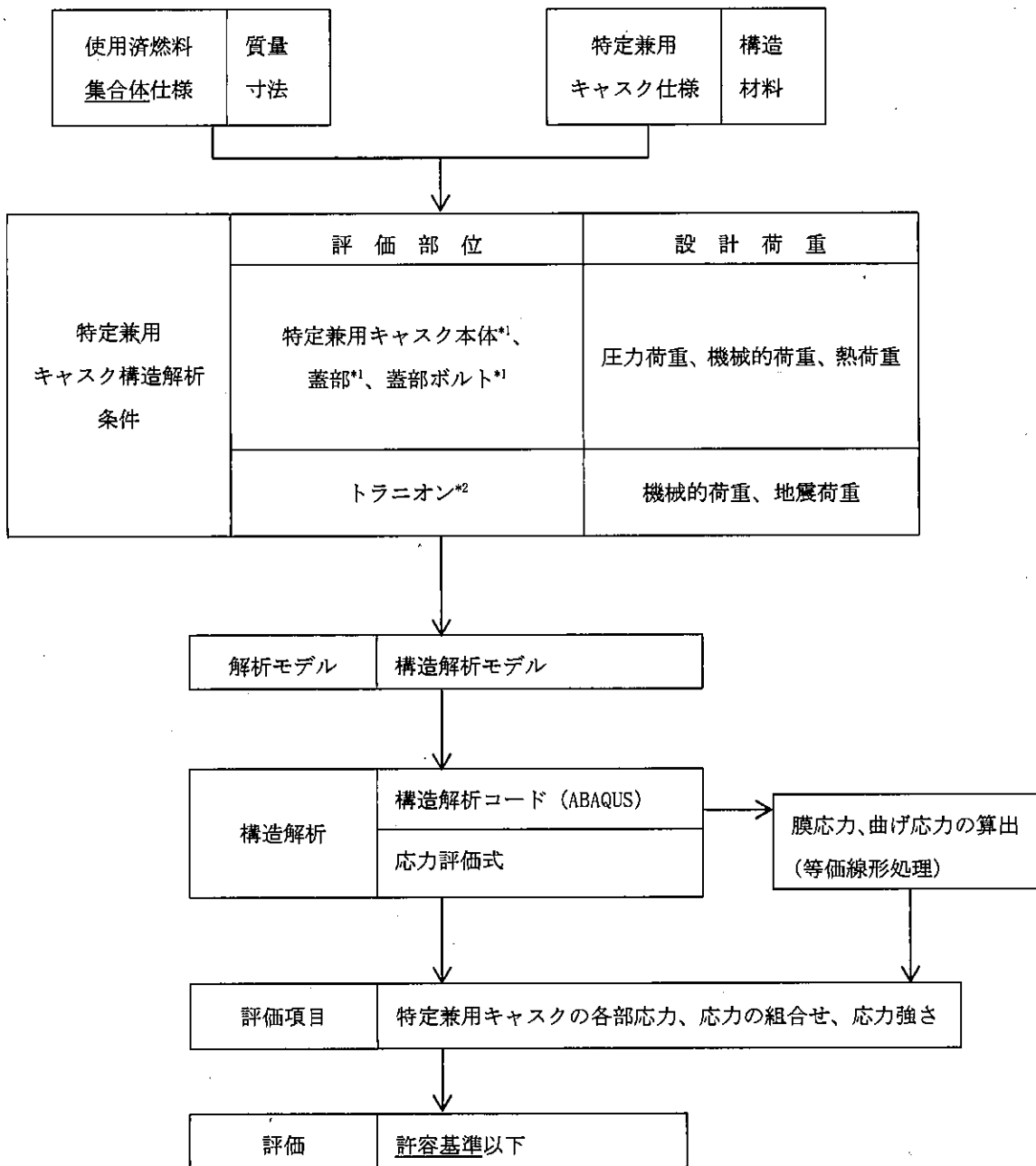


図 3.1-1 落下評価時の姿勢



注記*1：構造解析コード又は応力評価式による評価

*2：応力評価式による評価

図 3.1-2 構造強度解析フロー図

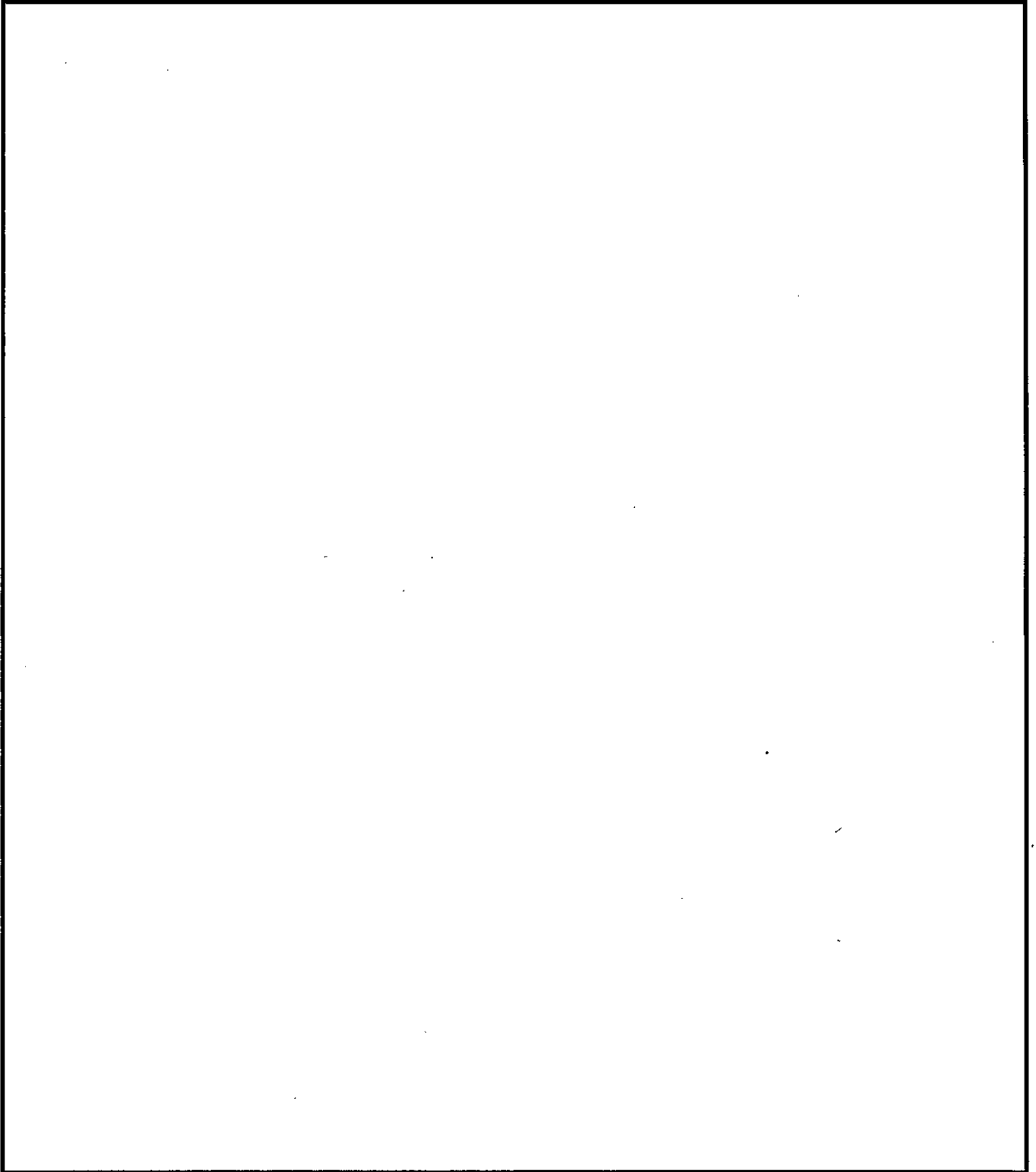


図 3.1-3 三次元 1/2 解析モデル

内は商業機密のため、非公開とします。

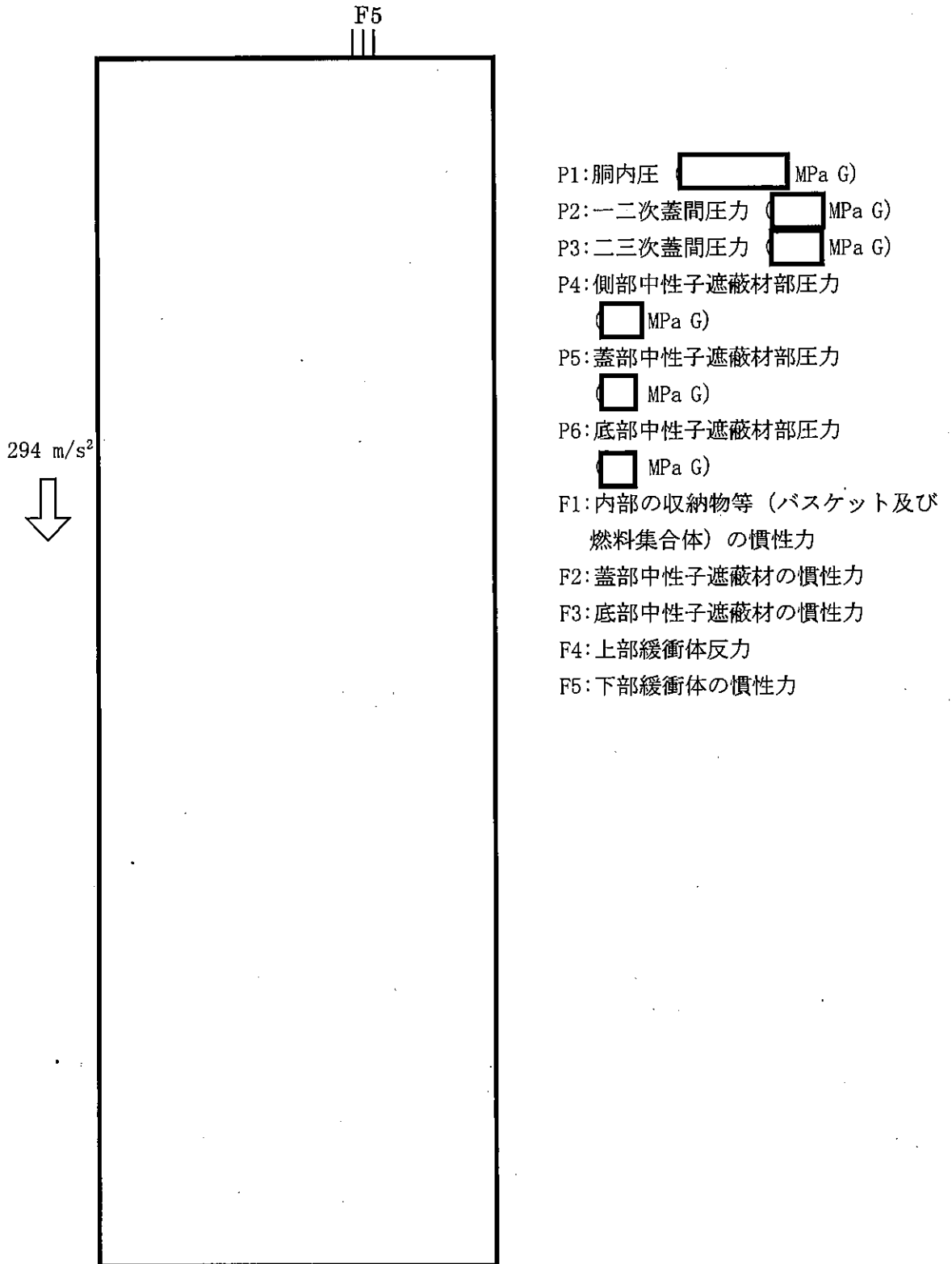


図 3.1-4 頭部垂直落下時の荷重条件及び境界条件 (一般の試験条件)

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

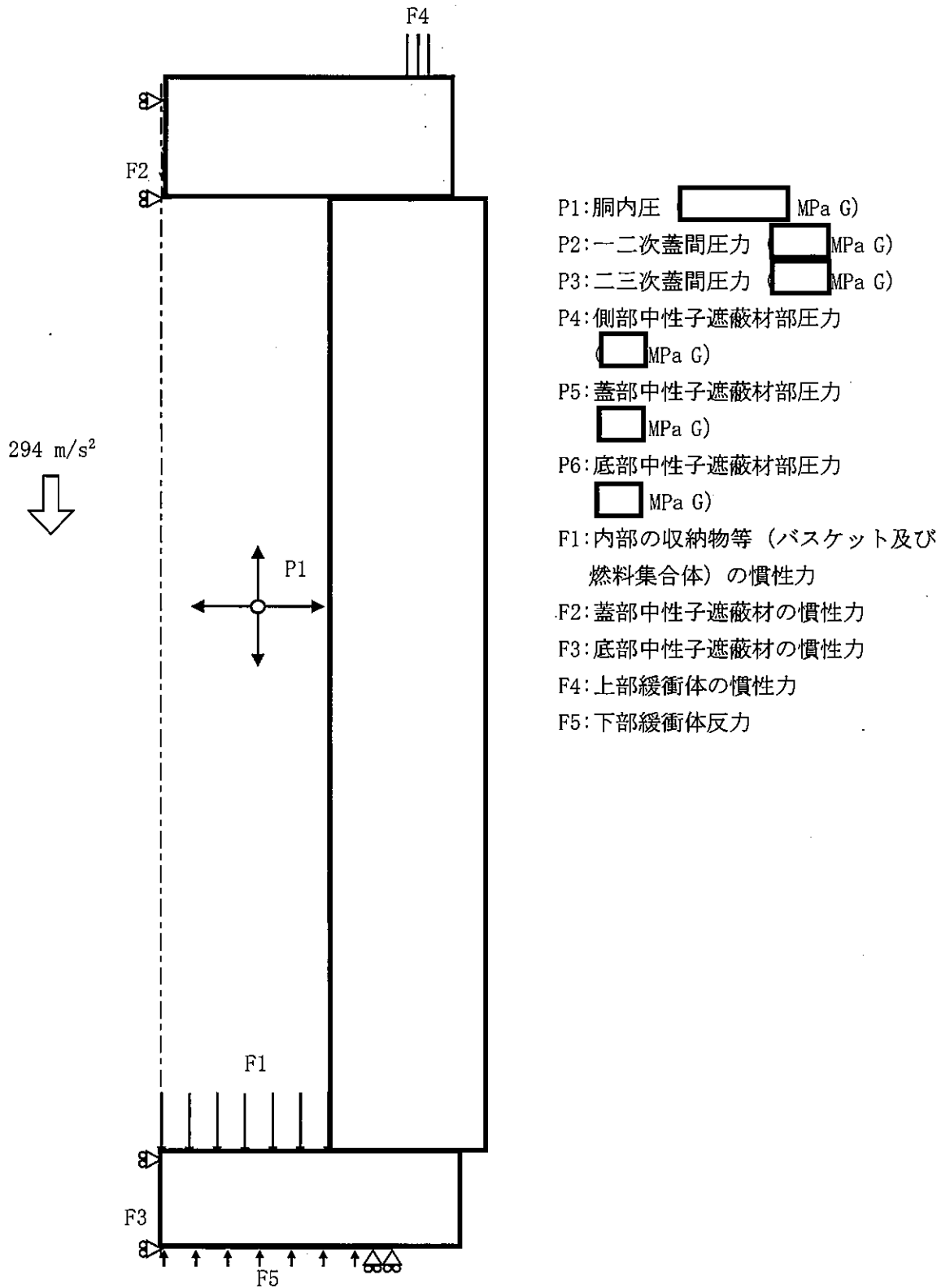
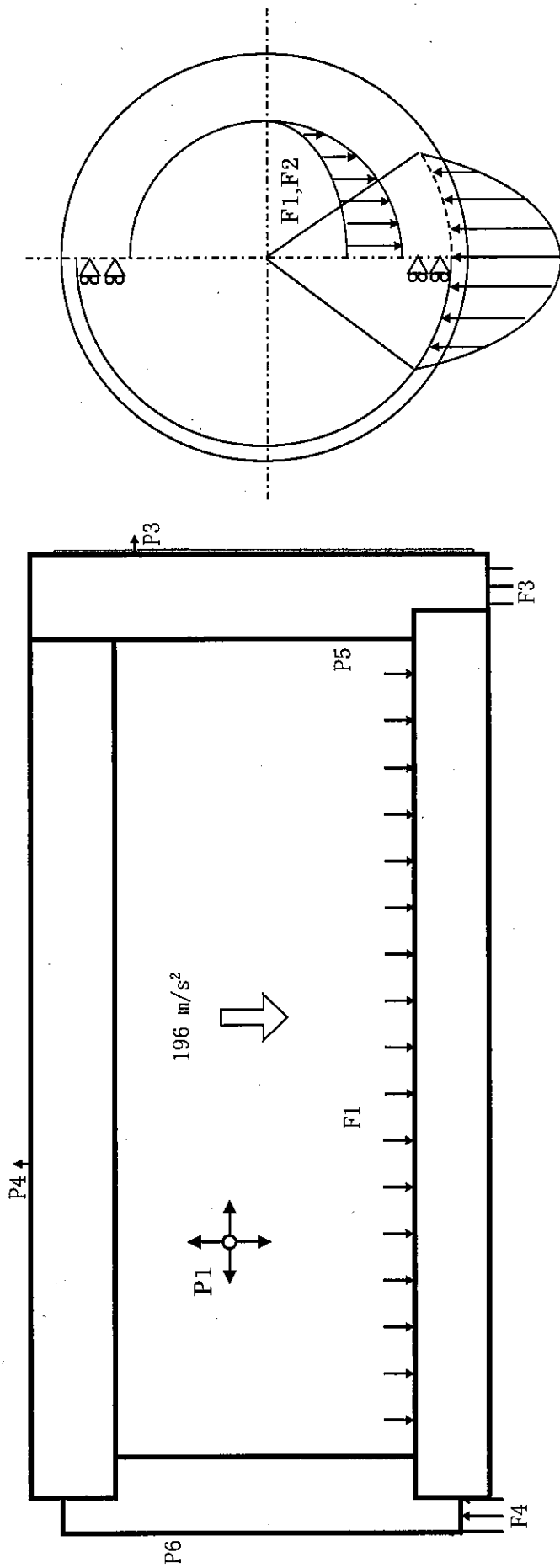


図 3.1-5 底部垂直落下時の荷重条件及び境界条件 (一般の試験条件)

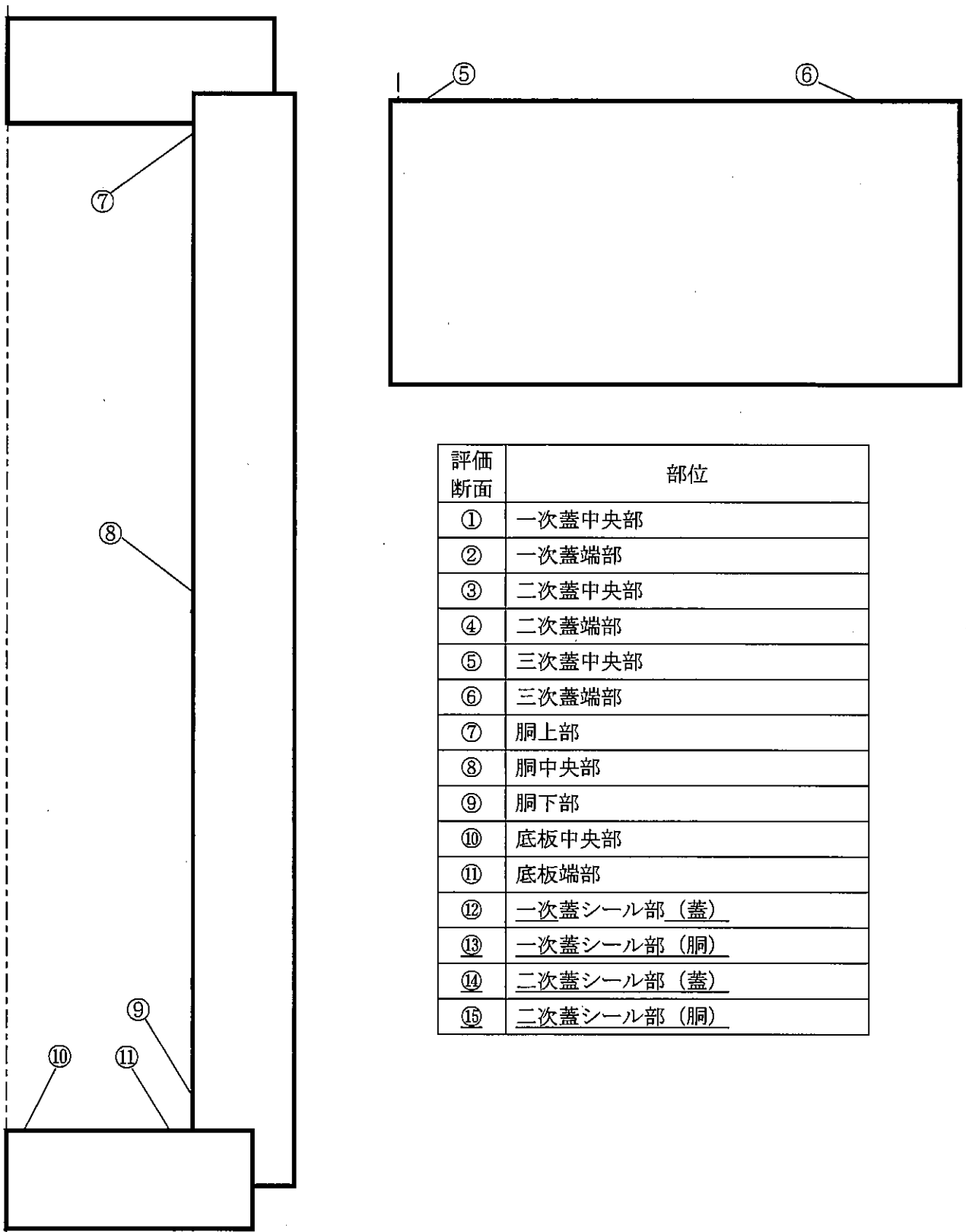
内は商業機密のため、非公開とします。



- P1: 胴内圧 (MPa G)
- P2: 二次蓋間圧力 (MPa G)
- P3: 二次蓋間圧力 (MPa G)
- P4: 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P5: 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P6: 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- F1: 内部の収納物等 (バスケット及び燃料集合体) の慣性力
- F2: 底部中性子遮蔽材の慣性力
- F3: 上部緩衝体反力
- F4: 下部緩衝体反力

図 3.1-6 水平落下時の荷重条件及び境界条件 (一般の試験条件)

内は商業機密のため、非公開とします。



評価断面	部位
①	一次蓋中央部
②	一次蓋端部
③	二次蓋中央部
④	二次蓋端部
⑤	三次蓋中央部
⑥	三次蓋端部
⑦	胴上部
⑧	胴中央部
⑨	胴下部
⑩	底板中央部
⑪	底板端部
⑫	一次蓋シール部 (蓋)
⑬	一次蓋シール部 (胴)
⑭	二次蓋シール部 (蓋)
⑮	二次蓋シール部 (胴)

図 3.1-7 応力評価位置

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

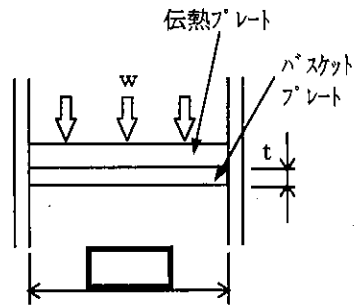


図 3.1-8 水平落下時のバスケットプレート（横板）の解析モデル

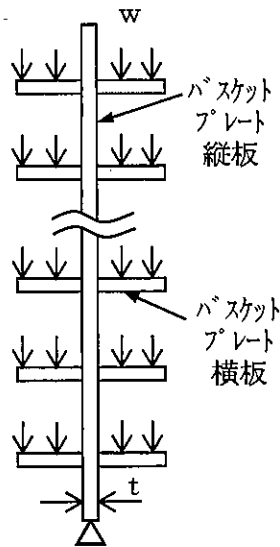


図 3.1-9 水平落下時のバスケットプレート（縦板）の解析モデル

内は商業機密のため、非公開とします。

表 3.1-2 頭部垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価(一般の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	P_m	—	36	110	S_m	124
		$P_L + P_b$	内	80		$1.5 S_m$	186
			外	16		$1.5 S_m$	186
	②	P_L	—	46		$1.5 S_m$	186
二次蓋	③	P_m	—	8	110	S_m	158
		$P_L + P_b$	内	20		$1.5 S_m$	237
			外	35		$1.5 S_m$	237
	④	P_L	—	24		$1.5 S_m$	237
三次蓋	⑤	P_m	—	20	100	S_m	160
		$P_L + P_b$	内	65		$1.5 S_m$	240
			外	27		$1.5 S_m$	240
	⑥	P_L	—	64		$1.5 S_m$	240
胴	⑦	P_L	—	16	130	$1.5 S_m$	184
	⑧	P_m	—	9		S_m	123
	⑨	P_L	—	4		$1.5 S_m$	184
底板	⑩	P_m	—	1	140	S_m	122
		$P_L + P_b$	内	10		$1.5 S_m$	183
	外		10	$1.5 S_m$		183	
⑪	P_L	—	6	$1.5 S_m$	183		
一次蓋 シール部	⑫	P_L	二	39	110	S_y	186
	⑬	P_L	二	29	130	S_y	184
		$P_L + P_b$	内	36		S_y	184
二次蓋 シール部	⑭	P_L	—	11	110	S_y	237
	⑮	P_L	二	51	130	S_y	184
		$P_L + P_b$	内	53		S_y	184

注記*1 : 図 3.1-7 参照

注記*2 : P_m : 一次一般膜応力強さ P_L : 一次局部膜応力強さ P_b : 一次曲げ応力強さ

表 3.1-3 頭部垂直落下時の容器本体に対する（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価
（一般の試験条件）

部位	断面 No. *1	応力の種類*2	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	—	内	100	110	3 S _m	372
			外	24			
	②	—	内	41			
			外	95			
二次蓋	③	—	内	22	110	3 S _m	474
			外	34			
	④	—	内	25			
			外	28			
三次蓋	⑤	—	内	66	100	3 S _m	480
			外	29			
	⑥	—	内	74			
			外	70			
胴	⑦	—	内	30	130	3 S _m	369
			外	58			
	⑧	—	内	28			
			外	12			
	⑨	—	内	30			
			外	18			
底板	⑩	—	内	27	140	3 S _m	366
			外	33			
	⑪	—	内	31			
			外	13			
一次蓋 シール部	⑫	—	内	46	110	S _y	186
	⑬	—	内	41	130	S _y	184
二次蓋 シール部	⑭	—	内	13	110	S _y	237
	⑮	—	内	55	130	S _y	184
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	351	110	2 S _m	564
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	492		3 S _m	846
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	245	100	2 S _m	568
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	358		3 S _m	852
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	187	100	2 S _m	568
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	265		3 S _m	852

注記*1：図 3.1-7 参照

注記*2： σ_m ：平均引張応力 σ_b ：平均曲げ応力

表 3.1-4 底部垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価(一般の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	P_m	—	7	110	S_m	124
		$P_L + P_b$	内	15		$1.5 S_m$	186
			外	2		$1.5 S_m$	186
	②	P_L	—	21		$1.5 S_m$	186
二次蓋	③	P_m	—	1	110	S_m	158
		$P_L + P_b$	内	6		$1.5 S_m$	237
			外	6		$1.5 S_m$	237
	④	P_L	—	20		$1.5 S_m$	237
三次蓋	⑤	P_m	—	2	100	S_m	160
		$P_L + P_b$	内	31		$1.5 S_m$	240
			外	34		$1.5 S_m$	240
	⑥	P_L	—	23		$1.5 S_m$	240
胴	⑦	P_L	—	7	130	$1.5 S_m$	184
	⑧	P_m	—	9		S_m	123
	⑨	P_L	—	28		$1.5 S_m$	184
底板	⑩	P_m	—	10	140	S_m	122
		$P_L + P_b$	内	37		$1.5 S_m$	183
			外	56		$1.5 S_m$	183
	⑪	P_L	—	22		$1.5 S_m$	183
一次蓋 シール部	⑫	P_L	二	10	110	S_y	186
	⑬	P_L	二	16	130	S_y	184
$P_L + P_b$		内	38	S_y		184	
二次蓋 シール部	⑭	P_L	二	8	110	S_y	237
	⑮	P_L	二	19	130	S_y	184
		$P_L + P_b$	内	40		S_y	184

注記*1 : 図 3.1-7 参照

注記*2 : P_m : 一次一般膜応力強さ P_L : 一次局部膜応力強さ P_b : 一次曲げ応力強さ

表3.1-5 底部垂直落下時の容器本体に対する（一次+二次）応力及び蓋ボルトの評価

（一般の試験条件）

部位	断面 No. *1	応力の種類*2	表面	応力強さ 又は応力 (MPa)	温度 (°C)	評価 基準	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	—	内	2	110	3 S _m	372
			外	10			
	②	—	内	37			
			外	49			
二次蓋	③	—	内	5	110	3 S _m	474
			外	7			
	④	—	内	25			
			外	22			
三次蓋	⑤	—	内	31	100	3 S _m	480
			外	32			
	⑥	—	内	32			
			外	16			
胴	⑦	—	内	11	130	3 S _m	369
			外	10			
	⑧	—	内	28			
			外	11			
	⑨	—	内	26			
			外	41			
底板	⑩	—	内	74	140	3 S _m	366
			外	32			
	⑪	—	内	37			
			外	52			
一次蓋 シール部	⑫	—	内	29	110	S _y	186
	⑬	—	内	30	130	S _y	184
二次蓋 シール部	⑭	—	内	15	110	S _y	237
	⑮	—	内	40	130	S _y	184
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	296	110	2 S _m	564
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	361		3 S _m	846
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	246	100	2 S _m	568
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	248		3 S _m	852
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	230	100	2 S _m	568
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	279		3 S _m	852

注記*1：図 3.1-7 参照

注記*2： σ_m ：平均引張応力 σ_b ：平均曲げ応力

表 3.1-6 水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価(一般の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	P_m	—	8	110	S_m	124
		$P_L + P_b$	内	11		$1.5 S_m$	186
			外	13		$1.5 S_m$	186
	②	P_L	—	22		$1.5 S_m$	186
二次蓋	③	P_m	—	17	110	S_m	158
		$P_L + P_b$	内	20		$1.5 S_m$	237
			外	20		$1.5 S_m$	237
	④	P_L	—	30		$1.5 S_m$	237
三次蓋	⑤	P_m	—	5	100	S_m	160
		$P_L + P_b$	内	83		$1.5 S_m$	240
			外	91		$1.5 S_m$	240
	⑥	P_L	—	51		$1.5 S_m$	240
胴	⑦	P_L	—	28	130	$1.5 S_m$	184
	⑧	P_m	—	18		S_m	123
	⑨	P_L	—	23		$1.5 S_m$	184
底板	⑩	P_m	—	9	140	S_m	122
		$P_L + P_b$	内	10		$1.5 S_m$	183
			外	17		$1.5 S_m$	183
	⑪	P_L	—	15		$1.5 S_m$	183
一次蓋 シール部	⑫	P_L	—	10	110	S_y	186
	⑬	P_L	—	28	130	S_y	184
		$P_L + P_b$	内	43		S_y	184
二次蓋 シール部	⑭	P_L	—	20	110	S_y	237
	⑮	P_L	—	55	130	S_y	184
		$P_L + P_b$	内	58		S_y	184

注記*1 : 図 3.1-7 参照

注記*2 : P_m : 一次一般膜応力強さ P_L : 一次局部膜応力強さ P_b : 一次曲げ応力強さ

表 3.1-7 水平落下時の容器本体に対する（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価
（一般の試験条件）

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	—	内	16	110	3 S _m	372
			外	16			
	②	—	内	40			
			外	52			
二次蓋	③	—	内	20	110	3 S _m	474
			外	19			
	④	—	内	38			
			外	30			
三次蓋	⑤	—	内	83	100	3 S _m	480
			外	89			
	⑥	—	内	57			
			外	54			
胴	⑦	—	内	32	130	3 S _m	369
			外	35			
	⑧	—	内	31			
			外	28			
	⑨	—	内	42			
			外	35			
底板	⑩	—	内	39	140	3 S _m	366
			外	38			
	⑪	—	内	41			
			外	51			
一次蓋 シール部	⑫	—	内	31	110	S _y	186
	⑬	—	内	40	130	S _y	184
二次蓋 シール部	⑭	—	内	24	110	S _y	237
	⑮	—	内	54	130	S _y	184
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	313	110	2 S _m	564
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	471		3 S _m	846
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	272	100	2 S _m	568
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	621		3 S _m	852
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	354	100	2 S _m	568
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	602		3 S _m	852

注記*1：図 3.1-7 参照

注記*2： σ_m ：平均引張応力 σ_b ：平均曲げ応力

表 3.1-8 垂直落下時のバスケットプレートの応力計算条件及び応力計算結果
(一般の試験条件)

評価位置	バスケット 材料の密度 : ρ (kg/mm ³)	バスケット 全長 : L (mm)	垂直落下時の 加速度 : G_V (m/s ²)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	評価 基準	評価基準値 (MPa)
バスケット プレート			294	11	S_m	146

表 3.1-9 水平落下時のバスケットプレート(横板)の応力計算条件及び応力計算結果
(一般の試験条件)

評価位置	単位面積あたり の重量 (燃料集合体分) : w_1 (kg/mm ²)	単位面積あたり の重量 (伝熱プレート分) : w_2 (kg/mm ²)	単位面積あたり の重量(バスケット プレート分) : w_3 (kg/mm ²)	水平落下時 の加速度 : G_H (m/s ²)	バスケット プレート幅 : l (mm)
バスケット プレート				196	

評価位置	バスケット プレートの板 厚: t (mm)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	せん断 応力: τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	評価基準	評価基準値 (MPa)
バスケット プレート				72	$1.5 S_m$	219

表 3.1-10 水平落下時のバスケットプレート(縦板)の応力計算条件及び応力計算結果
(一般の試験条件)

評価位置	縦板の重量 : w_v (kg)	燃料集合体 の重量 : w_f (kg)	横板の重量 : w_{hc} (kg)	伝熱プレート の重量 : w_{ha} (kg)	水平落下時の 加速度: G_H (m/s ²)
バスケット プレート					196

評価位置	軸方向長さ : L (mm)	バスケット プレートの 板厚: t (mm)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	評価基準	評価基準値 (MPa)
バスケット プレート			26	S_m	146

内は商業機密のため、非公開とします。

3.2 特別の試験条件

(1) 輸送物の評価方法

外運搬規則及び告示には、輸送物が遭遇する最も厳しいと考えられる事象を代表する条件として、特別の試験条件が規定され、その判定基準は臨界防止と放射性物質の制御されない放出に至らないことである。特別の試験条件も一般の試験条件と同様に、輸送物の総重量に応じて、輸送物の落下時の評価を行う必要がある。

HDP-69BCH(B)型の輸送物の総重量は、132.2 t であり、告示に基づき、落下時の構造強度評価を行い、密封境界がおおむね弾性範囲に留まることを示す。評価方法は、3.1 項と同様に、輸送用緩衝体の変形量及び輸送物に生じる衝撃加速度を算出し、その衝撃加速度を包絡する設計加速度を入力条件として、特定兼用キャスク各部、バスケットを評価する。なお、評価方法は、3.1 と同様である。

特別の試験条件の落下評価時の輸送物に生じる荷重、加速度及び緩衝体の変形量を表 3.2-1 に示す。表 3.2-1 に示す設計加速度を用いて、落下時の評価を行う。

表 3.2-1 特別の試験条件の落下評価時の輸送物に生じる荷重、加速度及び緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃荷重*1 : F (N)	衝撃加速度 : G_A (m/s^2)	設計荷重 : (N)	設計加速度 : G_D (m/s^2)	緩衝体の 変形量: δ (mm)
垂直落下	頭部	7.34×10^7	555	7.78×10^7	588	258
	底部	7.71×10^7	584	8.41×10^7	637	257
水平落下		7.56×10^7	573	8.41×10^7	637	338

注記*1 : 9 m 落下時の衝撃荷重

(2) 評価条件

a. HDP-69BCH(B)型の評価

3.1と同様に、特定兼用キャスク本体及び蓋部は三次元解析モデルを用いて、圧力及び温度分布を考慮して評価を行う。落下姿勢ごとの荷重条件及び境界条件は図3.2-1から図3.2-3に示す。

b. バスケットの評価

3.1と同様に、材料工学による工学式を用いて評価を行う。

(3) 評価基準

特定兼用キャスクの評価基準を以下に示す。評価基準値は、金属キャスク構造規格の値を用いる。

a. 各蓋ボルト以外の輸送容器の胴、底板、一次蓋、二次蓋、三次蓋、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以下の基準を適用する。なお、蓋部中性子遮蔽材カバーの溶接部分は、溶接効率を考慮する。各部位について発生応力を分類し、各応力強さが以下に示す基準値以下であること。

i) オーステナイト系ステンレス鋼以外

$$P_m \leq 2/3 S_u$$

$$P_L \leq S_u$$

$$P_L + P_b \leq S_u$$

ここで、 P_m ：一次一般膜応力強さ

P_L ：一次局部膜応力強さ

P_b ：一次曲げ応力強さ

Q ：二次応力強さ

S_m ：金属キャスク構造規格¹⁾別表5-1に示される設計応力強さ

ii) オーステナイト系ステンレス鋼

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

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

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

b. 一次蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2/3 S_u$$

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

c. 二次蓋ボルト及び三次蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq S_y$$

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

d. 二次蓋密封シール部に対しては各部位について発生応力を分類し、各応力強さが以

下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

e. 三次蓋と本体の0リング取付け位置での相対口開き変形量が、0リングの初期締付け代より小さいこと。

f. バスケットにおいては、以下の基準を適用する。ただし、バスケットに塑性変形が生じる場合には、熱荷重も考慮して変形量を算定してその変形量を考慮した上で臨界解析を行うこと。

(a) 各部位の応力強さが以下に示す基準値以下であること。

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

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

ここで、 S_u ： 金属キャスク構造規格 事例規格³⁾ 表4に示される設計引張強さ

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c^* の 1.5 倍を超えないこととする。

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

ここで、 $F^* = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(RT)]$

(4) 評価結果

評価結果を以下に示す。

a. HDP-69BCH(B)型の評価結果

各姿勢の応力評価結果を表 3.2-2 から表 3.2-4 に示す。特定兼用キャスクの密封境界を構成する部位は、設計基準値を満足する。落下姿勢ごとの一次応力について、特定兼用キャスクの密封境界を構成する部位、シール部及びボルトで評価を行い、評価結果は評価基準を満足する。

b. バスケットの評価結果

落下姿勢ごとのバスケットプレートの評価を行い、評価結果は評価基準を満足することを示す。計算条件と計算結果は表 3.2-5 から表 3.2-7 に示す。垂直落下時の評価については、加速度の大きい底部落下で評価を行う。表 3.2-5 から表 3.2-7 の評価結果は評価基準を満足している。

なお、250℃におけるバスケットプレート材料の設計降伏点 S_y は 204 MPa であるので、バスケットプレート(横板)には塑性変形が生じる。そこで、臨界評価への影響を確認するため、以下のように変形量を評価する。

発生曲げ応力 σ_b は、 であり、全断面降伏が生じる $1.5S_y (=306 \text{ MPa})$ より

内は商業機密のため、非公開とします。

小さい。したがって、弾塑性領域における変形である。



最終塑性関節②での最大たわみ δ は、以下の式で求められる。

(9)

A rectangular area containing a redacted equation, labeled (9) on the right.

A rectangular area containing a redacted equation.

(10)

A rectangular area containing a redacted equation, labeled (10) on the right.

(11)

(12)

A rectangular area containing a redacted equation, labeled (12) on the right.

式(9)から式(12)を用いた時の計算条件と計算結果を表3.2-8に示す。バスケットの変形は と評価される。臨界評価においては、バスケットプレート(横板)に対して上記計算値を安全側に の塑性変形が生じるものとして評価する。臨界評価の詳細は、16条の補足説明資料である、「16条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設 HDP-69BCH(B)型の臨界防止機能」の参考1に示す。

内は商業機密のため、非公開とします。

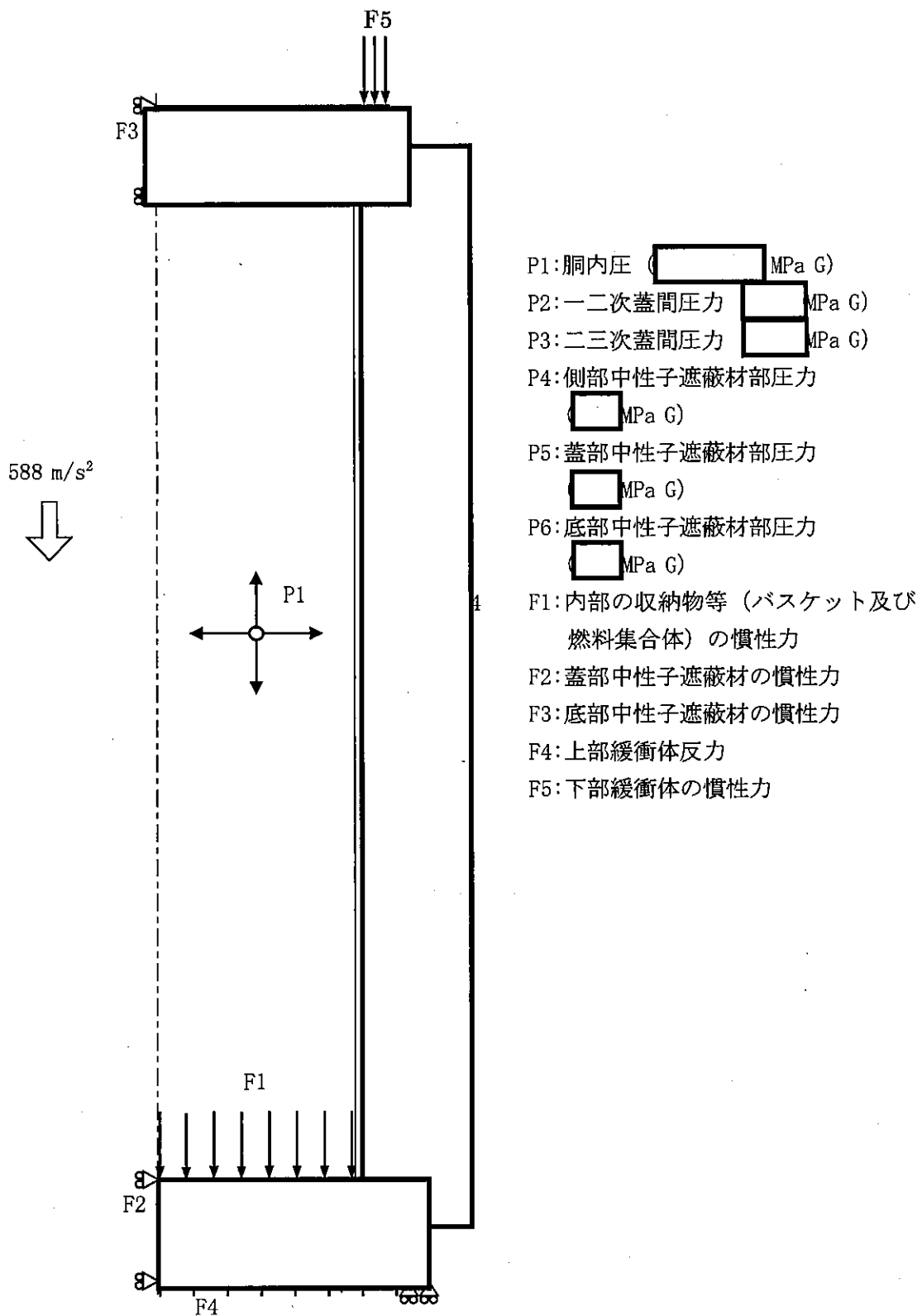


図 3.2-1 頭部垂直落下時の荷重条件及び境界条件(特別の試験条件)

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

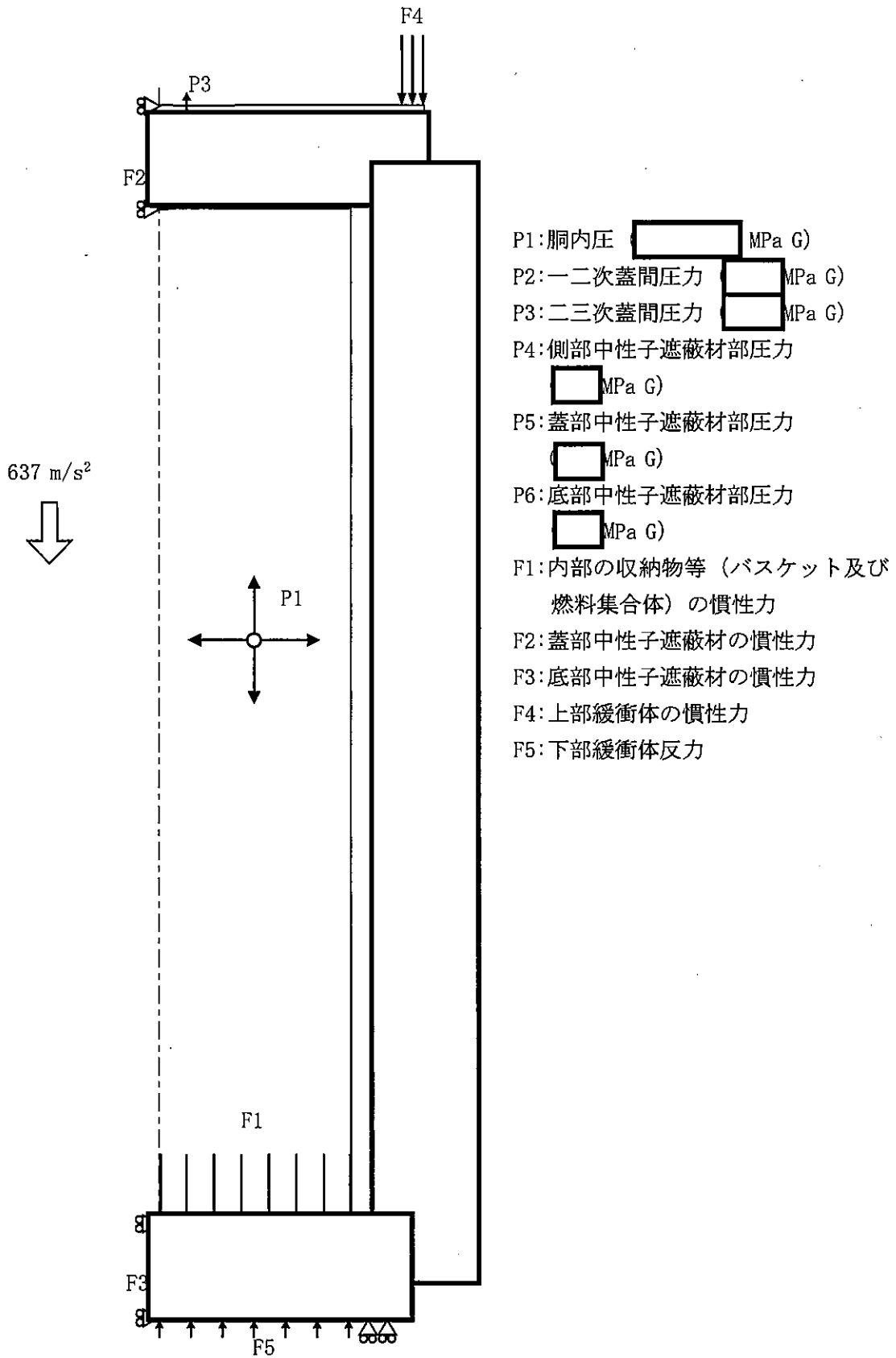


図 3.2-2 底部垂直落下時の荷重条件及び境界条件(特別の試験条件)

内は商業機密のため、非公開とします。

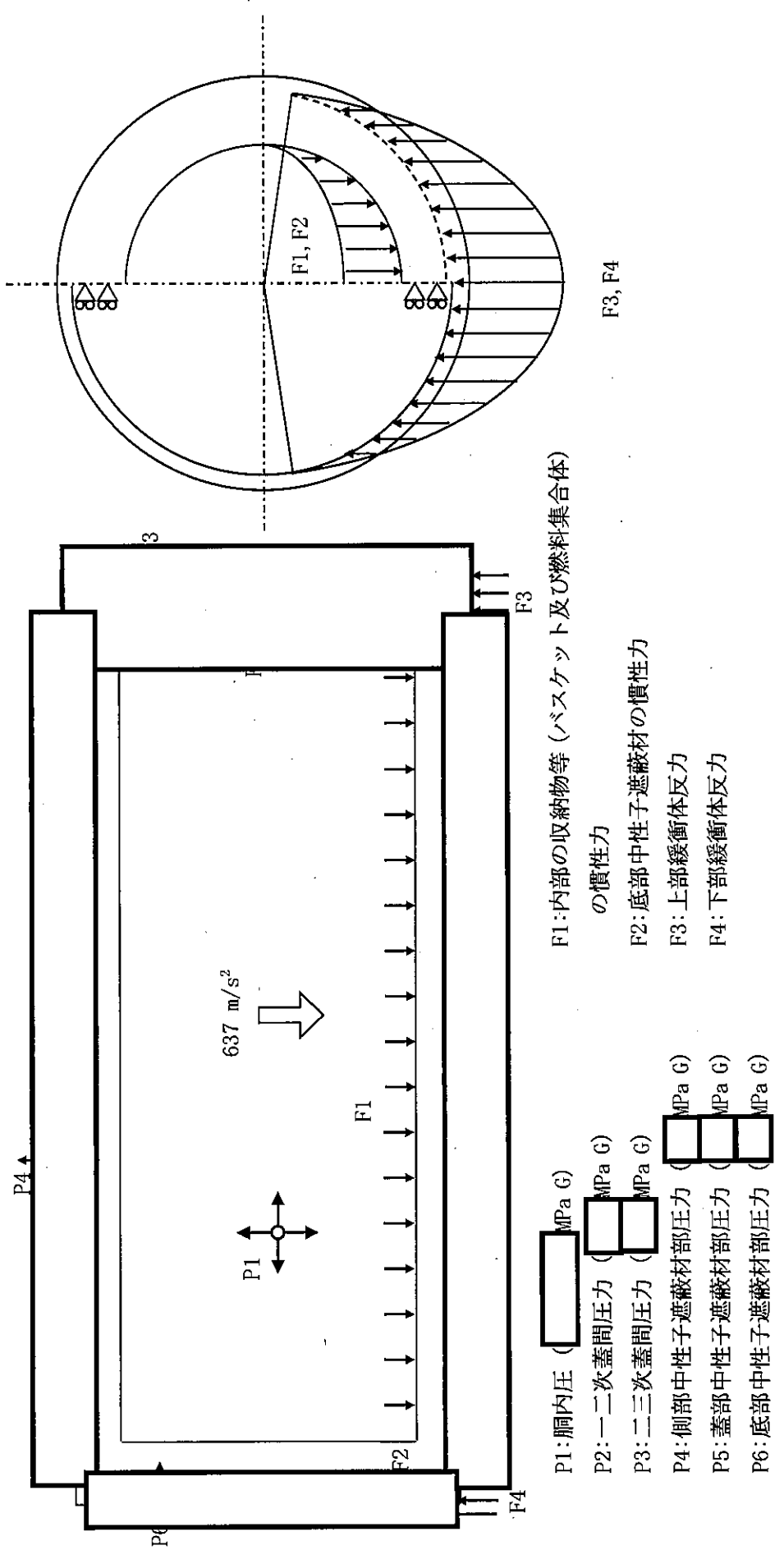


図 3.2-3 水平落下時の荷重条件及び境界条件(特別の試験条件)

内は商業機密のため、非公開とします。

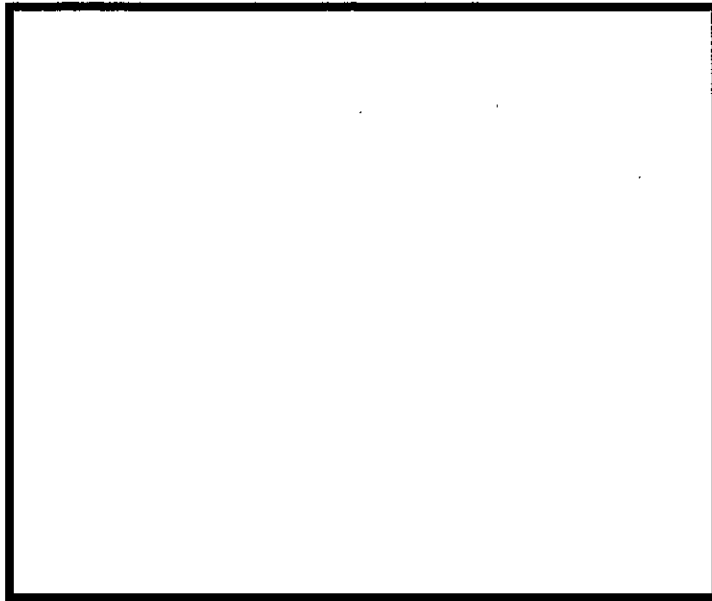


図 3.2-4 バスケットプレート(横板)の変形量計算モデル


 内は商業機密のため、非公開とします。

表 3.2-2 頭部垂直落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価 (特別の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	P_m	—	79	110	$2/3 S_u$	251
			内	173		S_u	377
		外	33	S_u		377	
	②	P_L	—	82		S_u	377
二次蓋	③	P_m	—	5	110	$2/3 S_u$	286
			内	16		S_u	429
		外	7	S_u		429	
	④	P_L	—	32		S_u	429
三次蓋	⑤	P_m	—	23	100	$2/3 S_u$	287
			内	27		S_u	431
		外	19	S_u		431	
	⑥	P_L	—	117		S_u	431
胴	⑦	P_L	—	31	130	S_u	377
	⑧	P_m	—	18		$2/3 S_u$	251
	⑨	P_L	—	7		S_u	377
底板	⑩	P_m	—	1	140	$2/3 S_u$	251
			内	16		S_u	377
		外	14	S_u		377	
	⑪	P_L	—	9		S_u	377
一次蓋 シール部	⑫	P_L	—	81	110	S_y	186
	⑬	P_L	—	51	130	S_y	184
	⑬	P_L+P_b	内	53	130	S_x	184
二次蓋 シール部	⑭	P_L	—	28	110	S_x	237
	⑮	P_L	—	94	130	S_x	184
	⑮	P_L+P_b+Q	内	100	130	S_x	184
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	459	110	$2/3 S_u$	616
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	664		S_u	924
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	260	100	S_y	853
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	472		S_y	853
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	144	100	S_y	853
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	240		S_y	853

注記*1 : 図 3.1-7 参照

注記*2 : P_m : 一次一般膜応力強さ P_L : 一次局部膜応力強さ P_b : 一次曲げ応力強さ、
 σ_m : 平均引張応力 $\sigma_m+\sigma_b$: 平均引張応力+曲げ応力

表 3.2-3 底部垂直落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価(特別の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価基準値 (MPa)
一次蓋	①	P_m	—	11	110	$2/3 S_u$	251
		$P_L + P_b$	内	22		S_u	377
			外	3		S_u	377
	②	P_L	—	23		S_u	377
二次蓋	③	P_m	—	1	110	$2/3 S_u$	286
		$P_L + P_b$	内	19		S_u	429
			外	18		S_u	429
	④	P_L	—	22		S_u	429
三次蓋	⑤	P_m	—	1	100	$2/3 S_u$	287
		$P_L + P_b$	内	8		S_u	431
			外	7		S_u	431
	⑥	P_L	—	12		S_u	431
胴	⑦	P_L	—	11	130	S_u	377
	⑧	P_m	—	19		$2/3 S_u$	251
	⑨	P_L	—	63		S_u	377
底板	⑩	P_m	—	22	140	$2/3 S_u$	251
		$P_L + P_b$	内	85		S_u	377
			外	127		S_u	377
	⑪	P_L	—	50		S_u	377
一次蓋 シール部	⑫	P_L	—	12	110	S_y	186
	⑬	P_L	—	20	130	S_y	184
	⑭	$P_L + P_b$	内	47	130	S_y	184
二次蓋 シール部	⑮	P_L	—	13	110	S_y	237
	⑯	P_L	—	26	130	S_y	184
	⑰	$P_L + P_b$	内	55	130	S_y	184
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	293	110	$2/3 S_u$	616
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	345		S_u	924
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	246	100	S_y	853
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	253		S_y	853
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	228	100	S_y	853
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	253		S_y	853

注記*1: 図 3.1-7 参照

注記*2: P_m : 一次一般膜応力強さ P_L : 一次局部膜応力強さ P_b : 一次曲げ応力強さ、
 σ_m : 平均引張応力 $\sigma_m + \sigma_b$: 平均引張応力+曲げ応力

表 3.2-4. 水平落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価(特別の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類*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	評価 基準値 (MPa)
一次蓋	①	P_m	—	20	110	$2/3 S_u$	251
		$P_L + P_b$	内	20		S_u	377
			外	38		S_u	377
	②	P_L	—	28		S_u	377
二次蓋	③	P_m	—	40	110	$2/3 S_u$	286
		$P_L + P_b$	内	41		S_u	429
			外	48		S_u	429
	④	P_L	—	57		S_u	429
三次蓋	⑤	P_m	—	10	100	$2/3 S_u$	287
		$P_L + P_b$	内	90		S_u	431
			外	98		S_u	431
	⑥	P_L	—	62		S_u	431
胴	⑦	P_L	—	78	130	S_u	377
	⑧	P_m	—	58		$2/3 S_u$	251
	⑨	P_L	—	74		S_u	377
底板	⑩	P_m	—	22	140	$2/3 S_u$	251
		$P_L + P_b$	内	23		S_u	377
			外	34		S_u	377
	⑪	P_L	—	41		S_u	377
一次蓋 シール部	⑫	P_L	—	22	110	S_y	186
	⑬	P_L	—	81	130	S_y	184
	⑭	$P_L + P_b$	内	90	130	S_y	184
二次蓋 シール部	⑮	P_L	—	50	110	S_y	237
	⑯	P_L	—	130	130	S_y	184
	⑰	$P_L + P_b$	内	106	130	S_y	184
一次蓋 ボルト	—	σ_m	—	333	110	$2/3 S_u$	616
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	847		S_u	924
二次蓋 ボルト	—	σ_m	—	309	100	S_y	853
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	743		S_y	853
三次蓋 ボルト	—	σ_m	—	396	100	S_y	853
		$\sigma_m + \sigma_b$	—	726		S_y	853

注記*1: 図 3.1-7 参照

注記*2: P_m : 一次一般膜応力強さ P_L : 一次局部膜応力強さ P_b : 一次曲げ応力強さ、
 σ_m : 平均引張応力 $\sigma_m + \sigma_b$: 平均引張応力+曲げ応力

表 3.2-5 垂直落下時のバスケットプレートの応力計算条件及び計算結果 (特別の試験条件)*1

評価位置	バスケット 材料の密度 : ρ (kg/mm ³)	バスケット 全長: L (mm)	垂直落下時の 加速度 : G_V (m/s ²)	応力強さ : S (MPa)	評価基準値 : $2/3 S_u$ (MPa)
バスケット プレート			637	23	292

注記*1: 垂直落下時の衝撃加速度の大きい底部落下時の結果

表 3.2-6 水平落下時のバスケットプレート(横板)の応力計算条件及び計算結果 (特別の試験条件)

評価位置	単位面積あたり の質量 (燃料集合体分) : w_1 (kg/mm ²)	単位面積あたり の質量 (伝熱プレート分) : w_2 (kg/mm ²)	単位面積あたり の質量(バスケット プレート分) : w_3 (kg/mm ²)	水平落下時 の加速度 : G_H (m/s ²)	バスケット プレート幅: l (mm)
バスケット プレート				637	

評価位置	バスケット プレートの板厚 : t (mm)	曲げ応力 : σ_b (MPa)	せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	評価基準値 : S_u (MPa)
バスケット プレート				233	438

表 3.2-7 水平落下時のバスケットプレート(縦板)の応力計算条件及び計算結果 (特別の試験条件)

評価位置	縦板の重量 : w_v (kg)	燃料集合体 の重量 : w_f (kg)	横板の重量 : w_{hc} (kg)	伝熱プレート の重量 : w_{ha} (kg)	水平落下時 の加速度: G_H (m/s ²)
バスケット プレート				63	637

評価位置	軸方向長さ : L (mm)	バスケット プレートの 板厚: t (mm)	圧縮応力 : σ_c (MPa)	評価基準値 : $2/3 S_u$ (MPa)
バスケット プレート			85	292

内は商業機密のため、非公開とします。

表 3.2-8 バスケットプレートの変位計算条件及び計算結果 (特別の試験条件)

評価位置	バスケット プレートの 支持幅 : l (mm)	バスケットプレート 材料の 縦弾性係数 : E (MPa)	単位長さ あたりの 断面二次モ ーメント : I (mm ³)	バスケットプレート 材料の 設計降伏点 : S_y (MPa)	バスケット プレートの 板厚 : t (mm)	単位長さ あたりの 塑性断面 係数: Z_P (mm ²)	変形量 : δ (mm)
バスケット プレート		200000		204			

内は商業機密のため、非公開とします。

3.3 1 m 貫通について

(1) 輸送物の評価方法

特別の試験条件では、輸送物が 1 m の高さから直径 150 mm の軟鋼棒へ落下した場合の評価を行う必要がある。ここでは、落下時の評価に引きつづいて 1 m 貫通が生じるものと想定して評価を行う。

(2) 評価条件

輸送物が最大破損を受けるよう垂直及び水平方向に落下し、衝突時に輸送物の重心の真下に軟鋼棒があるとして評価を行う。評価は垂直方向落下における蓋部及び底部について行う。また、水平方向落下においては外筒が衝突して変形し、破損する可能性があるため、胴について行う。

輸送物の落下時に軟鋼棒が圧潰することにより HDP-69BCH(B)型に加わる最大荷重 F_{bar} (N) は以下の式から求められる。最大荷重計算条件及び計算結果を表 3.3-1 に示す。

$$F_{\text{bar}} = \sigma_u \cdot A \quad (13)$$

ここで、

σ_u : 軟鋼棒の設計引張強さ (MPa)

A : 軟鋼棒の断面積 (mm^2)

評価部位が押しぬきせん断によって板にせん断破壊を引き起こすのに必要な力 F (N) は以下の式から求められる。

$$F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S \quad (14)$$

ここで、

d : 軟鋼棒直径 (mm)

t : 板厚 (mm)

S : せん断強さ (MPa)

(3) 評価基準

評価部位が、せん断で破壊しないことを示すために、「落下時に軟鋼棒により部材がせん断破壊を引き起こすのに必要な力 < 軟鋼棒が圧潰することにより特定兼用キャスクに作用する最大荷重」であることを確認する。

(4) 評価結果

評価結果を以下に示す。

a. 蓋部の貫通強度 (垂直落下)

蓋部については、輸送時に密封境界を構成する蓋部が貫通しないことを確認する。計算条件及び計算結果を表 3.3-2 に示す。蓋部は、基準を満足し、貫通することはない。

b. 胴の貫通強度（水平落下）

輸送時に密封境界を構成する胴が貫通しないことを確認する。計算条件及び計算結果を表 3.3-3 に示す。胴は、基準を満足し、貫通することはない。

表 3.3-1 特定兼用キャスクに加わる最大荷重計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径: d (mm)	軟鋼棒の設計引張強さ : σ_u (MPa)	最大荷重: F_{bar} (N)
数値	150	400	7.07×10^6

表 3.3-2 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果（蓋部）

項目	軟鋼棒直径 : d (mm)	板厚: t (mm)	せん断強さ : S (MPa)	せん断破壊に 必要な力: F (N)	最大荷重 : F_{bar} (N)
数値	150	□ *1	□ *2	2.84×10^7	7.07×10^6

注記*1 :

注記*2 :

表 3.3-3 せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果（胴）

項目	軟鋼棒直径 : d (mm)	板厚: t (mm)	せん断強さ : S (MPa)	せん断破壊に 必要な力: F (N)	最大荷重 : F_{bar} (N)
数値	150	□ *1	□ *2	2.52×10^7	7.07×10^6

注記*1 :

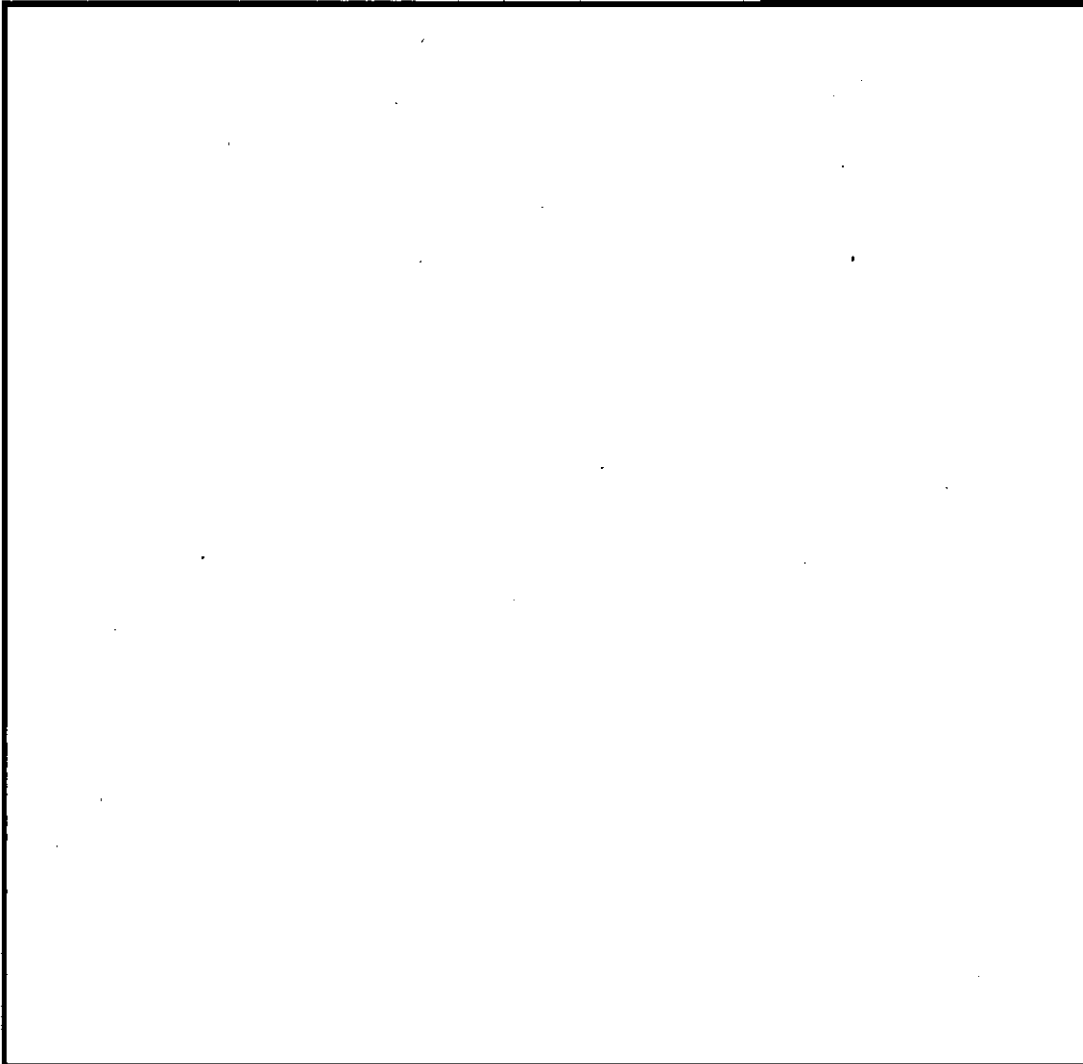
注記*2 :

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

3.4 伝熱フィン及び外筒の評価について

(1) 輸送物の評価方法

HDP-69BCH(B)型の伝熱フィン及び外筒の構造の概要図を図 3.4-1 に示す。HDP-69BCH(B)型は、胴の外側に放射状に伝熱フィンが配置され、



したがって、落下による荷重を受けた場合でも、外筒の構造健全性が維持されれば、伝熱フィンや中性子遮蔽材が有する除熱機能や遮蔽機能への影響はない。そこで、HDP-69BCH(B)型に、表 3.1-1 に示す一般の試験条件の落下評価時の設計荷重及び設計加速度が生じた場合、また、表 3.2-1 に示す特別の試験条件の落下評価時の設計荷重及び設計加速度が生じた場合でも、外筒の機能が損なわれないことを確認するため、3.2と同様に、有限要素法による三次元モデルを用いて評価する。

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

(2) 評価条件

応力評価位置を図 3.4-2 に示す。なお、使用する三次元モデルは図 3.1-3、荷重条件及び境界条件は、図 3.1-6 (一般の試験条件) 及び図 3.2-3 (特別の試験条件) と同様である。

(3) 評価基準

外筒においては以下の基準を適用する。

(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。

$$f_t = \frac{F}{1.5} \quad (\text{一般の試験条件})$$

$$f_t = \frac{S_u}{1.5} \quad (\text{特別の試験条件})$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[S_y, 0.7 S_u]$$

f_t : 許容引張応力

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

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c 。又は 1.5 倍の f_c を超えないこと。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \quad (\text{一般の試験条件})$$

$$1.5 f_c = 1.5 \left\{ 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \cdot \frac{F}{\nu} \quad (\text{特別の試験条件})$$

ここで、

$$F = \begin{cases} \text{MIN}[S_y, 0.7 S_u] & (\text{一般の試験条件}) \\ \text{MIN}[1.2 S_y, 0.7 S_u] & (\text{特別の試験条件}) \end{cases}$$

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

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

(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。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \quad (\text{一般の試験条件})$$

$$f_s = \frac{S_u}{1.5\sqrt{3}} \quad (\text{特別の試験条件})$$

(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。

$$f_b = \frac{F}{1.5} \quad (\text{一般の試験条件})$$

$$f_b = \frac{S_u}{1.5} \quad (\text{特別の試験条件})$$

(4) 評価結果

外筒の評価結果を表 3.4-1 及び表 3.4-2 に示す。外筒の評価結果は基準値を満足しており、特別の試験条件においても外筒に破断が生じることはなく、伝熱フィン及び中性子遮蔽材に影響するような変形は生じない。

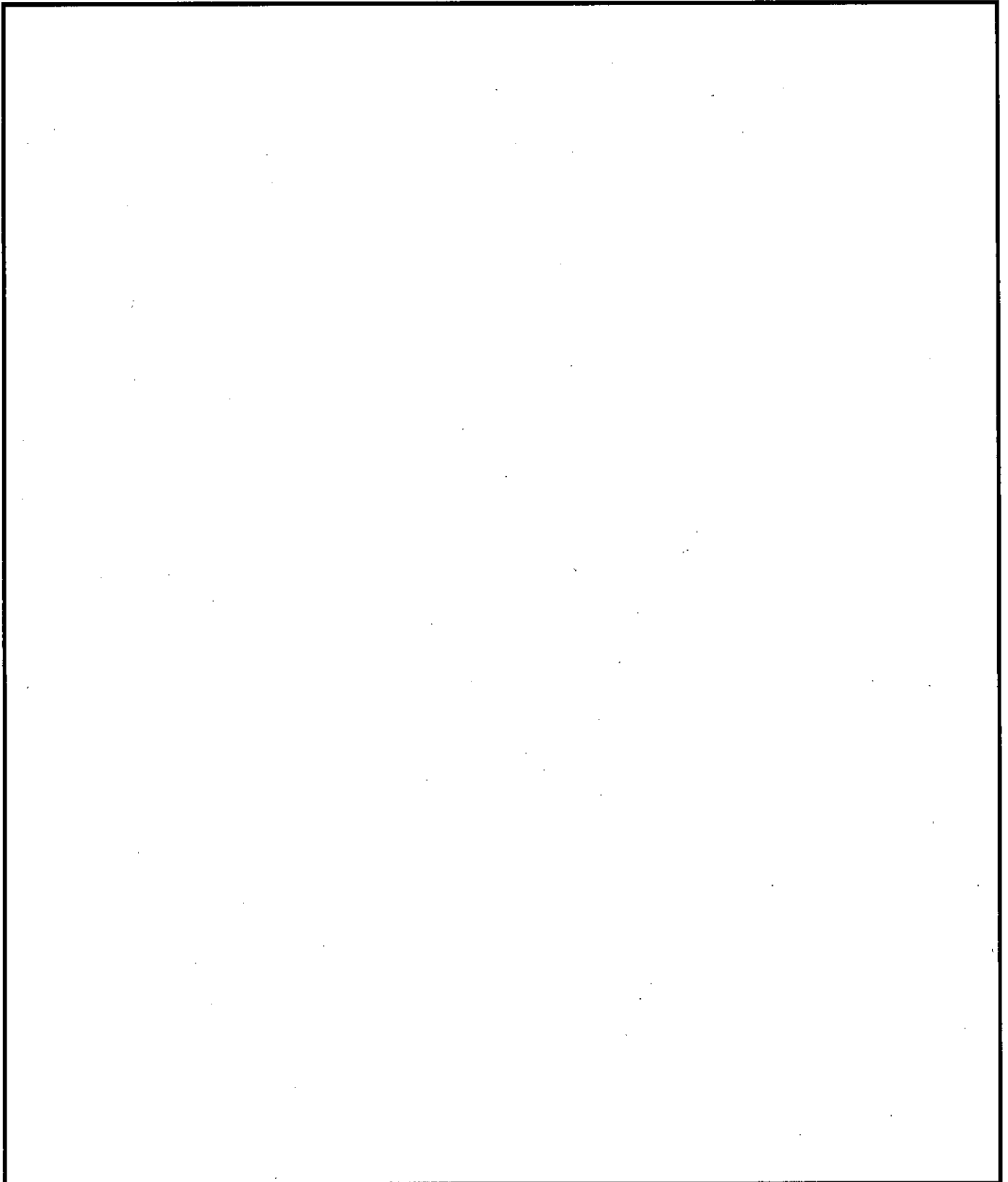
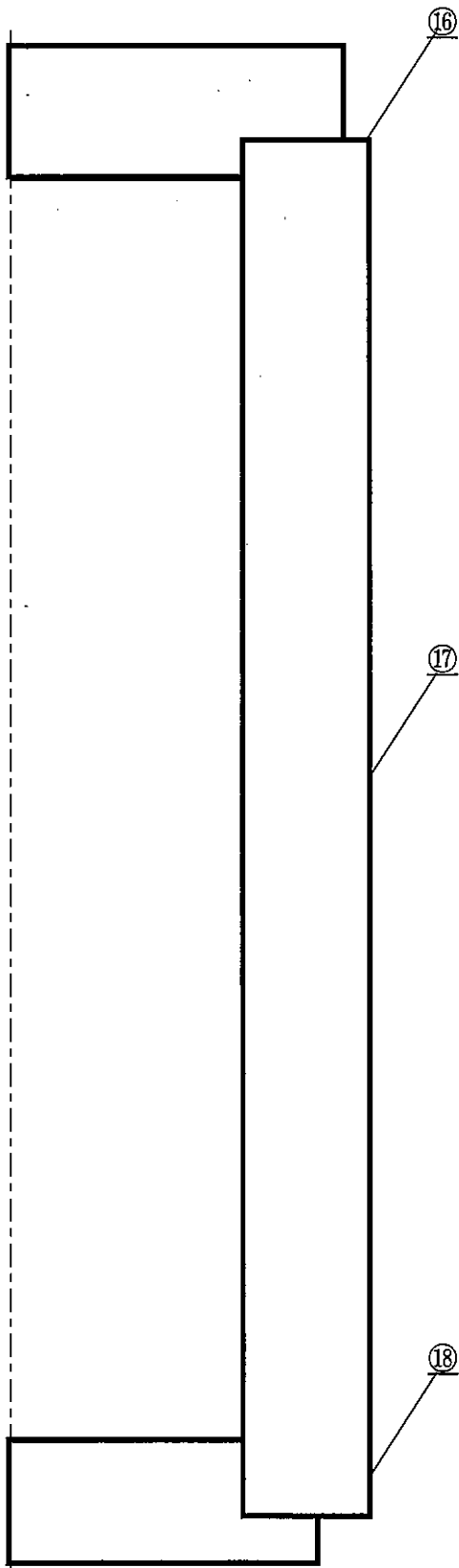


図 3.4-1 伝熱フィン及び外筒の構造と落下時に伝熱フィンに作用する荷重の概要図

内は商業機密のため、非公開とします。



評価断面	部位
⑬	外筒上部
⑭	外筒中央部
⑮	外筒下部

図 3.4-2 応力評価位置

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 3.4-1 水平落下時の外筒に対する一次応力の評価(一般の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類 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	評価 基準値 (MPa)
外筒	⑯	引張	—	2	110	$\frac{F}{1.5}$	139
		圧縮	—	—		—	—
		せん断	—	6		$\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$	80
		曲げ	—	70		$\frac{F}{1.5}$	139
	⑰	引張	—	25	110	$\frac{F}{1.5}$	139
		圧縮	—	—		—	—
		せん断	—	1		$\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$	80
		曲げ	—	7		$\frac{F}{1.5}$	139
	⑱	引張	—	5	110	$\frac{F}{1.5}$	139
		圧縮	—	—		—	—
		せん断	—	2		$\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$	80
		曲げ	—	47		$\frac{F}{1.5}$	139

注記*1: 図 3.4-2 参照

表 3.4-2 水平落下時の外筒に対する一次応力の評価(特別の試験条件)

部位	断面 No. *1	応力分類 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	評価 基準値 (MPa)
外筒	⑩	引張	—	6	110	$\frac{S_u}{1.5}$	248
		圧縮	—	—		—	—
		せん断	—	35		$\frac{S_u}{1.5\sqrt{3}}$	143
		曲げ	—	158		$\frac{S_u}{1.5}$	248
	⑪	引張	—	85	110	$\frac{S_u}{1.5}$	248
		圧縮	—	—		—	—
		せん断	—	0		$\frac{S_u}{1.5\sqrt{3}}$	143
		曲げ	—	2		$\frac{S_u}{1.5}$	248
	⑫	引張	—	9	110	$\frac{S_u}{1.5}$	248
		圧縮	—	—		—	—
		せん断	—	8		$\frac{S_u}{1.5\sqrt{3}}$	143
		曲げ	—	97		$\frac{S_u}{1.5}$	248

注記*1 : 図 3.4-2 参照

3.5 使用する解析コード

(1) 概要

ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの応力解析等に広く利用されている。

(2) 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. 定常、非定常の弾性・弾塑性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、歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することが可能である。
- c. モデルの形状は一次元～三次元、また連続体についても取り扱うことが可能である。
- 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、速度力（慣性力）、圧力、遠心力、コリオリ力等が取り扱える。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。

(3) 解析フロー

代表的な解析フローを図 3.5-1 に示す。

(4) 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、数多くの研究期間や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。また、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致していることを確認している。

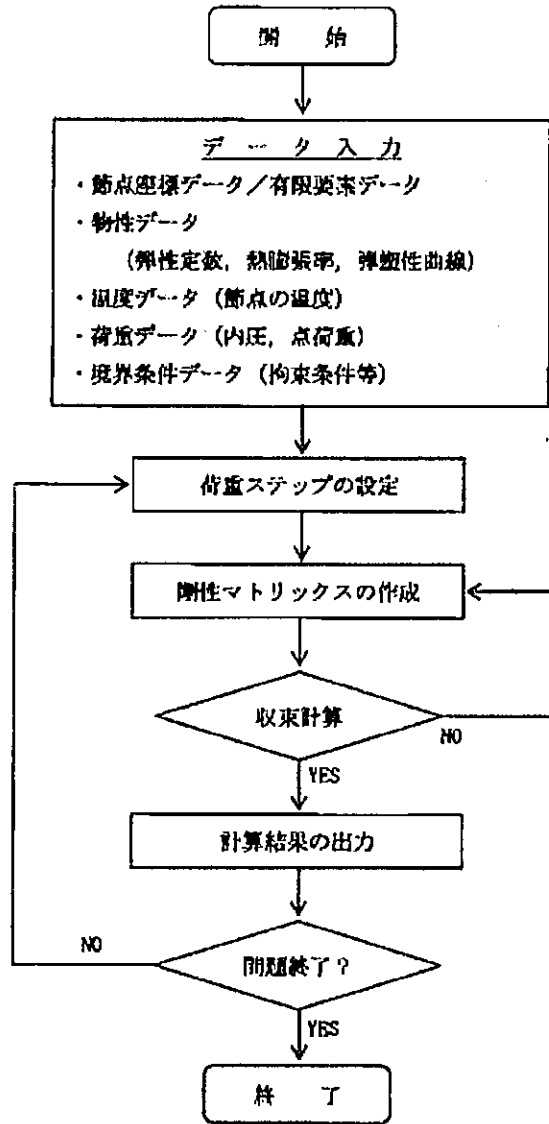


図 3.5-1 ABAQUS コードの解析フロー図

4. 貯蔵用緩衝体の型式証明での説明範囲

(1) 貯蔵用緩衝体の説明範囲と事業者への条件

蓋部が金属部へ衝突しない設置方法において、HDP-69BCH(B)型は、その両端に貯蔵用緩衝体を装着した状態で貯蔵する。貯蔵用緩衝体は周辺施設に分類され、その設計方針及び詳細設計は、事業者により申請される後段審査（設置(変更)許可及び設工認）で確認される。貯蔵用緩衝体の型式証明での説明範囲を表 4-1 に、後段審査も含めた貯蔵用緩衝体の審査のフローを図 4-1 に示す。

型式証明では、特定兼用キャスクの設計方針として、貯蔵用緩衝体を装着できること、及び、貯蔵用緩衝体を装着した状態で特定兼用キャスクに衝撃力が作用した場合に、発生する応力が供用状態 D を満足するような設計荷重及び設計加速度を定義する方針とし、設計荷重及び設計加速度の設定値及び詳細な設定方法については、型式指定において確認いただく。後段の設置(変更)許可申請では、貯蔵用緩衝体の設計において設計荷重及び設計加速度を定義する方針であること、設工認では、設計荷重及び設計加速度の設定方法を含めた詳細な貯蔵用緩衝体の設計について確認いただく。

(2) 貯蔵用緩衝体の成立性について

HDP-69BCH(B)型は、特定兼用キャスクとして設計する方針である。輸送用緩衝体の設計では、外運搬規則に適合するように別途設定する設計加速度及び設計荷重を設計条件とすることにより、3. の評価結果に示したように、HDP-69BCH(B)型は供用状態 D を満足できる。

貯蔵用緩衝体は、HDP-69BCH(B)型の両端に装着することで、貯蔵架台からの転倒等の、第 6 項地震力に起因する事象が生じて、HDP-69BCH(B)型が安全機能を損なわないことを設計条件とする。輸送用緩衝体の設計に適用する設計加速度及び設計荷重の条件は、上記のとおり HDP-69BCH(B)型が供用状態 D を満足できることを確認しているため、これを貯蔵用緩衝体の設計条件に適用することで、HDP-69BCH(B)型が供用状態 D を満足する貯蔵用緩衝体を設計することができる。

表 4-1 貯蔵用緩衝体に関する型式証明での説明範囲

項目	型式証明での説明範囲	型式指定での説明範囲
設計方針	<ul style="list-style-type: none"> ・ HDP-69BCH(B)型は、貯蔵用緩衝体を装着できること ・ 特定兼用キャスクに荷重が作用しても、安全機能を担保する部材が供用状態 D*¹ の評価基準を満足できる荷重を設定した方針であること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 型式証明の設計方針にしたがって、HDP69BCH(B)型は、貯蔵用緩衝体を装着できること ・ 特定兼用キャスクに荷重が作用しても、安全機能を担保する部材が供用状態 D*¹ の評価基準を満足できる荷重を設定していること。
成立性	—* ²	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計方針にしたがって設定した荷重において、特定兼用キャスクの貯蔵時の安全機能を担保する部材に発生する応力が供用状態 D の評価基準を満足すること
事業者審査への引継ぎ事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設置(変更)許可申請において、貯蔵用緩衝体の設計条件となる荷重は、特定兼用キャスクの安全機能が損なわれない荷重以下とする方針であること 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設工認申請において、第6項地震力に起因する衝突事象を設定して、貯蔵用緩衝体を詳細設計し、特定兼用キャスクに作用する荷重が型式指定で設定した貯蔵用緩衝体の設計条件となる荷重以下であること

注記*1：金属キャスク構造規格⁽¹⁾に規定される供用状態

注記*2：HDP-69BCH(B)型は、特定兼用キャスクとして、設計する方針であり、外運搬で使用する輸送用緩衝体設計のために別途設定する設計加速度及び設計荷重を貯蔵用緩衝体の設計条件として適用すれば、供用状態 D の評価基準を満足することができる。

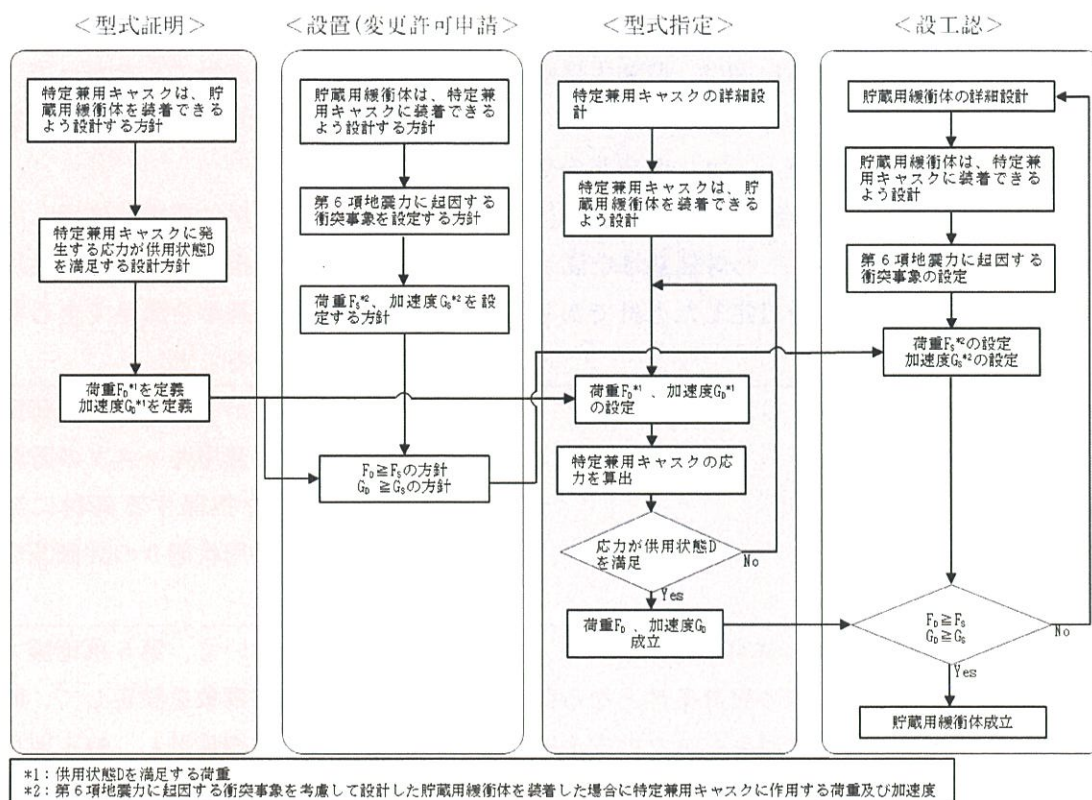


図 4-1 貯蔵用緩衝体の設計に関する説明のフロー

5. 参考文献

- (1) (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) (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、事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定” JSME S FA-CC-004、(2009)