

Doc. No. MA035A-RC-A01 Rev.3

2020年11月25日

日立造船株式会社

補足説明資料 1-5

Hitz-B52 型の構造設計に関する説明資料

目 次

1. 設計方針-----	1
2. Hitz-B52 型の仕様-----	2
3. 構造強度評価-----	3
4. 参考文献-----	5

別紙 1 使用済燃料貯蔵施設における Hitz-B52 型のハンドリングフロー

別紙 2 構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の構造強度解析条件

別紙 3 トラニオンの構造強度解析条件及び評価

別紙 4 参考-構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の運搬時構造強度解析

別紙 5 構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の異常着床時構造強度解析

別紙 6 トラニオンボルトの構造強度解析条件及び評価

1. 設計方針

Hitz-B52 型は、自重、内圧、熱荷重等を考慮し、(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」⁽¹⁾ (以下「金属キャスク構造規格」という。) に基づき設計する。また、Hitz-B52 型は、設計条件として設定する地震力に対して概ね弾性状態にとどまる範囲で耐え得る設計とする。

2. Hitz-B52 型の仕様

(1) 構造

Hitz-B52 型の構造を図 1 に示す。Hitz-B52 型は、金属キャスク本体、蓋部、バスケット等で構成される。また、胴及び一次蓋は密封容器として設計されている。なお、Hitz-B52 型は貯蔵中、貯蔵建屋内の支持構造物である貯蔵架台を介して床面に固縛される。

a. 金属キャスク本体

金属キャスク本体の主要部は、胴、底板及び外筒等で構成されている。また、金属キャスク本体の取扱い及び貯蔵中の固縛のために、上部に 2 対のトラニオン、下部に 2 対のトラニオンが取り付けられている。

本体のシール部は、シール面の防食を目的としてステンレス鋼の肉盛溶接を行っている。

b. 蓋部

蓋部は、一次蓋及び二次蓋で構成されている。一次蓋及び二次蓋は、ともにボルトで金属キャスク本体上面に取り付けられている。

一次蓋及び二次蓋のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持するために金属ガスケットが取り付けられている。なお二次蓋は炭素鋼であるため、シール部には防食を目的としてステンレス鋼の肉盛溶接を行っている。

また、使用済燃料貯蔵施設への搬入時及び使用済燃料貯蔵施設からの搬出時には、三次蓋がボルトで金属キャスク上面に取り付けられる。

(2) 材質

Hitz-B52 型の主要な構成部材の材質を表 1 に示す。Hitz-B52 型は、基本的な安全機能を維持する上で重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定している。

(3) 寸法

Hitz-B52 型の代表寸法を表 2 に示す。

(4) 質量

Hitz-B52 型の質量を表 3 に示す。

3. 構造強度評価

(1) 評価対象及び評価事象

使用済燃料貯蔵施設内における Hitz-B52 型のハンドリングフローを別紙 1 に示す。このハンドリングフローに基づき、取扱時及び貯蔵中における Hitz-B52 型の密封容器及びトラニオン（トラニオンボルトを含む。以下同じ。）について、以下に示す事象を評価する。

a. 密封容器

Hitz-B52 型の貯蔵中の密封境界を構成する胴、底板、一次蓋及び一次蓋ボルトを評価対象とする。

蓋部に影響を与えると考えられる取扱い事象として、天井クレーンでの水平姿勢での吊上時（以下「水平吊上時」という。）、及び垂直姿勢での吊上時（以下「垂直吊上時」という。）が挙げられる。垂直吊上時においては、吊上時に発生する加速度による蓋の慣性力が、吊上方向と逆方向に作用し、蓋に曲げが発生することから、蓋シール部への影響があると考えられる。一方、水平吊上時において、蓋には吊上時に発生する加速度による慣性力が作用するが、蓋は蓋ボルトにより十分に締付けられていることから蓋シール部への影響は少ない。したがって、垂直吊上時を評価対象とする。

なお、垂直吊上時に Hitz-B52 型に発生する加速度は、鉛直方向に 3G（G：重力加速度）とする。

b. トラニオン

Hitz-B52 型のトラニオンは、吊上時及び貯蔵中の固定に使用され、以下に示す事象を評価対象とする。

(i) 上部トラニオン

上部トラニオンは、垂直吊上時及び水平吊上時に使用される。垂直吊上時及び水平吊上時に Hitz-B52 型に発生する加速度は、鉛直方向に 3G である。垂直吊上時には、一対のトラニオンで評価となるが、水平吊上時には、上部及び下部の二対のトラニオンで評価するため、垂直吊上時に上部トラニオンに発生する荷重は、水平吊上時に比べ大きい。このため、垂直吊上時を評価対象とする。

(ii) 下部トラニオン

下部トラニオンは、水平吊上時及び貯蔵架台への固縛に使用される。Hitz-B52 型はたて置き姿勢で貯蔵されるが、貯蔵中の地震により下部トラニオンに発生する荷重は、水平吊上時に比べ大きい。このため、貯蔵中の地震時を

評価対象とする。

なお、Hitz-B52 型に発生する加速度として、以下に示す値を設計条件として設定し、評価を行う。

- ・ 水平方向設計震度：1.4G
- ・ 鉛直方向設計震度：0.87G

(2) 解析方法及び解析条件

構造強度解析のフローを図 2 に示す。構造強度解析では、Hitz-B52 型に作用する荷重条件を評価事象毎に設定し、密封容器又はトラニオンに発生する応力が金属キャスク構造規格の各供用状態に定められた許容応力以下であることを確認する。

なお、Hitz-B52 型の密封容器に発生する応力は、想定される荷重をもとに Hitz-B52 型の実形状をモデル化し、有限要素法による構造解析コード (ABAQUS) を使用して求める。また、Hitz-B52 型のトラニオンに発生する応力は応力評価式により求める。

構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の解析条件を別紙 2 に、また応力評価式によるトラニオンの解析条件を別紙 3 に示す。さらに応力評価式によるトラニオンボルトの解析条件を別紙 6 に示す。

(3) 解析結果

密封容器 Hitz-B52 型の構造解析結果を表 4 及び表 5 に示す。

表 4 及び表 5 に示すとおり、Hitz-B52 型の密封容器及びトラニオンに発生する応力は、設計基準値を満足することを確認した。

4. 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 年 12 月)

表 1 Hitz-B52 型の主要な構成部材の材質

構成部材	材 質
金属キャスク本体	
洞	炭素鋼
底板	炭素鋼
外筒	炭素鋼
蓋部*1	
一次蓋	ステンレス鋼
二次蓋	炭素鋼
一次蓋ボルト	合金鋼
二次蓋ボルト	合金鋼
トラニオン	
上部トラニオン	析出硬化型ステンレス鋼
下部トラニオン	析出硬化型ステンレス鋼
上部トラニオンボルト	合金鋼
下部トラニオンボルト	合金鋼

注記*1：使用済燃料貯蔵施設への搬入時及び使用済燃料貯蔵施設からの搬出時には、ゴム O リングをシール材とした三次蓋を装着する。

表 2 Hitz-B52 型の代表寸法

構成部材	寸法 (mm)
金属キャスク本体	
胴内径	1550
板厚	224
外筒外径	2410
板厚	16
底板厚さ	265
全長	5425
全幅	2770
一次蓋	
蓋外径	1776
厚さ	136
ボルト	
呼び径×本数	<input type="text"/>
二次蓋	
蓋外径	2042
厚さ	163
ボルト	
呼び径×本数	<input type="text"/>
トランニオンボルト	
ボルト	
呼び径×本数	<input type="text"/>

表 3 Hitz-B52 型の質量

項目	質量 (トン)
A. 金属キャスク本体 (バスケット含む)	93.8
B. 一次蓋	4.1
C. 二次蓋	3.7
D. 三次蓋	1.9
E. 緩衝体 (上部及び下部の合計)	11.3
F. 使用済燃料集合体 (チャンネルボックスを含む)	16.0
G. 貯蔵建屋内での天井クレーンによる取扱い質量 (垂直吊上時) $A + B + C + D + F$ (水平吊上時) $A + B + C + D + E + F$	119.5 以下 130.8 以下
H. 貯蔵時質量 $A + B + C + F$	117.6 以下

表 4 密封容器の構造強度評価（垂直吊上時：供用状態 A）
（構造解析コードによる評価結果）

評価*1 位置	項目	応力の種類	評価結果 (MPa)	設計基準値 (MPa)
①	一次蓋中央部の 応力強さ	P_m	2	137
		$P_L + P_b$	14	205
		$P_L + P_b + Q$	59	411
②	一次蓋端部の 応力強さ	P_L	5	205
		$P_L + P_b$	12	205
		$P_L + P_b + Q$	41	411
③	一次蓋ボルトの 応力	平均引張応力	221	568
		平均引張応力+曲げ応力	406	852
④	胴シール部(一次蓋) の応力強さ	P_m	30	161
		$P_L + P_b$	54	161
		$P_L + P_b + Q$	53	161
⑤	胴上部の応力強さ	P_L	22	186
		$P_L + P_b$	48	186
		$P_L + P_b + Q$	49	372
⑥	胴中央部の応力強さ	P_m	7	124
		$P_L + P_b$	10	186
		$P_L + P_b + Q$	16	372
⑦	胴下部の応力強さ	P_L	4	183
		$P_L + P_b$	8	183
		$P_L + P_b + Q$	43	366
⑧	底板中央部の 応力強さ	P_m	1	122
		$P_L + P_b$	2	183
		$P_L + P_b + Q$	33	366
⑨	底板端部の応力強さ	P_L	3	183
		$P_L + P_b$	4	183
		$P_L + P_b + Q$	27	366
⑩	一次蓋シール部の 応力強さ	P_m	30	162
		$P_L + P_b$	54	162
		$P_L + P_b + Q$	61	162

注記*1：応力評価位置は図 3 参照。

表 5 トラニオン及びトラニオンボルトの構造強度評価結果
(応力評価式による評価結果)

項目	評価結果 (MPa)	設計基準値 (MPa)
上部トラニオンの応力 (垂直吊上時：供用状態 A)	541	653
上部トラニオンボルトの応力 (垂直吊上時：供用状態 A)	464	842
下部トラニオンの応力 (貯蔵中の地震時：供用状態 D)	282	591
下部トラニオンボルトの応力 (貯蔵中の地震時：供用状態 D)	416	480

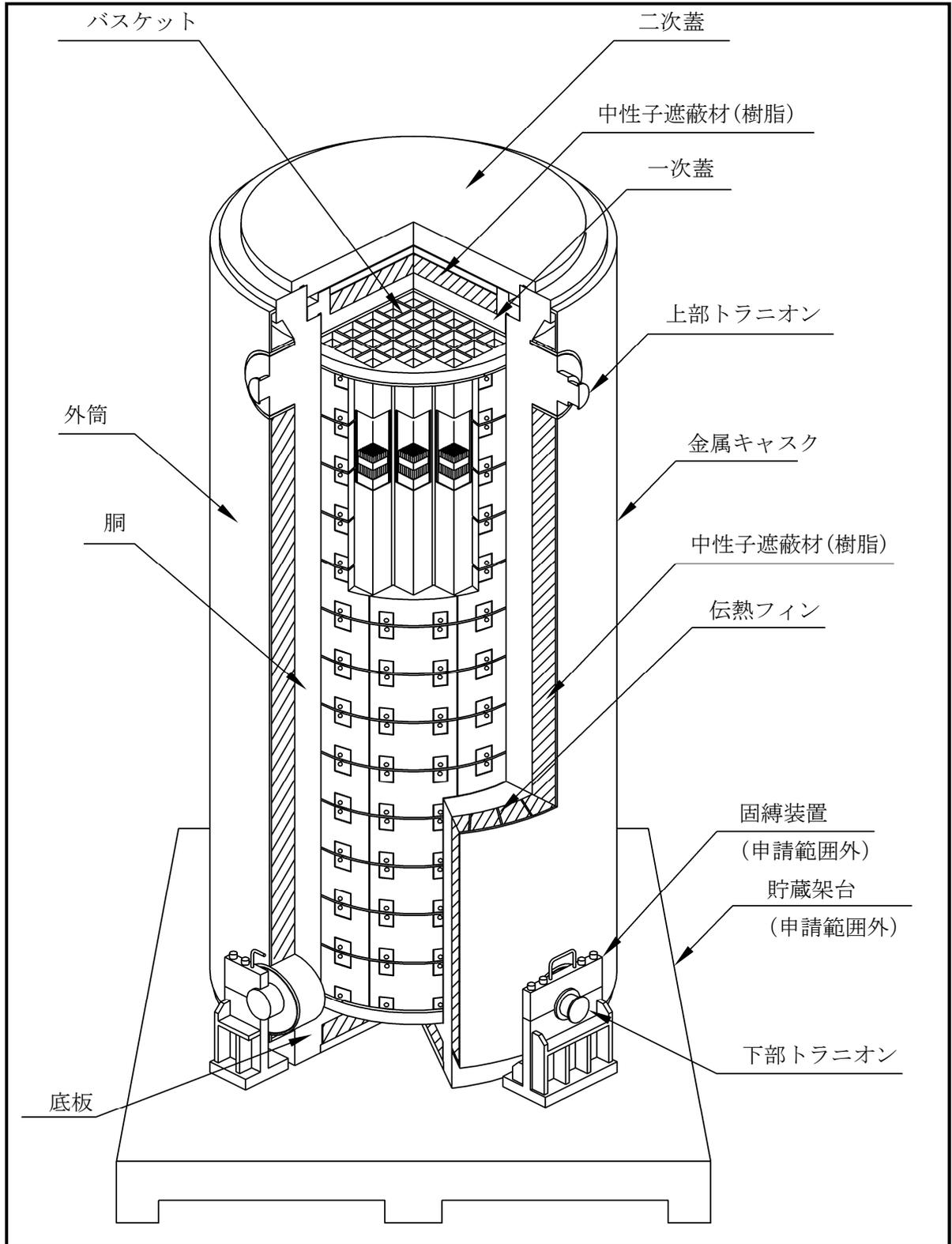
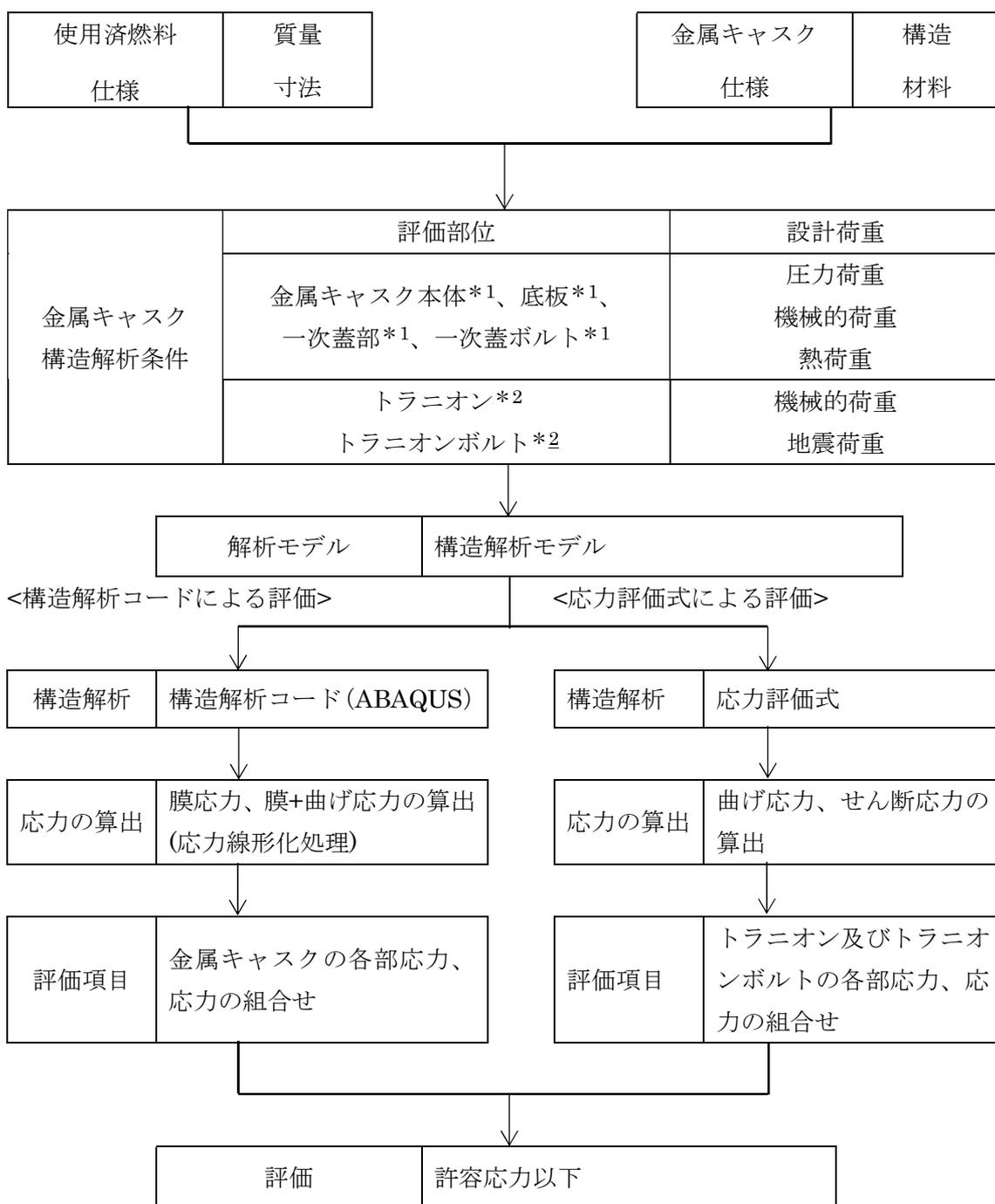


図1 Hitz-B52型構造図



注記*1：構造解析コードによる評価
*2：応力評価式による評価

図 2 構造強度解析フロー

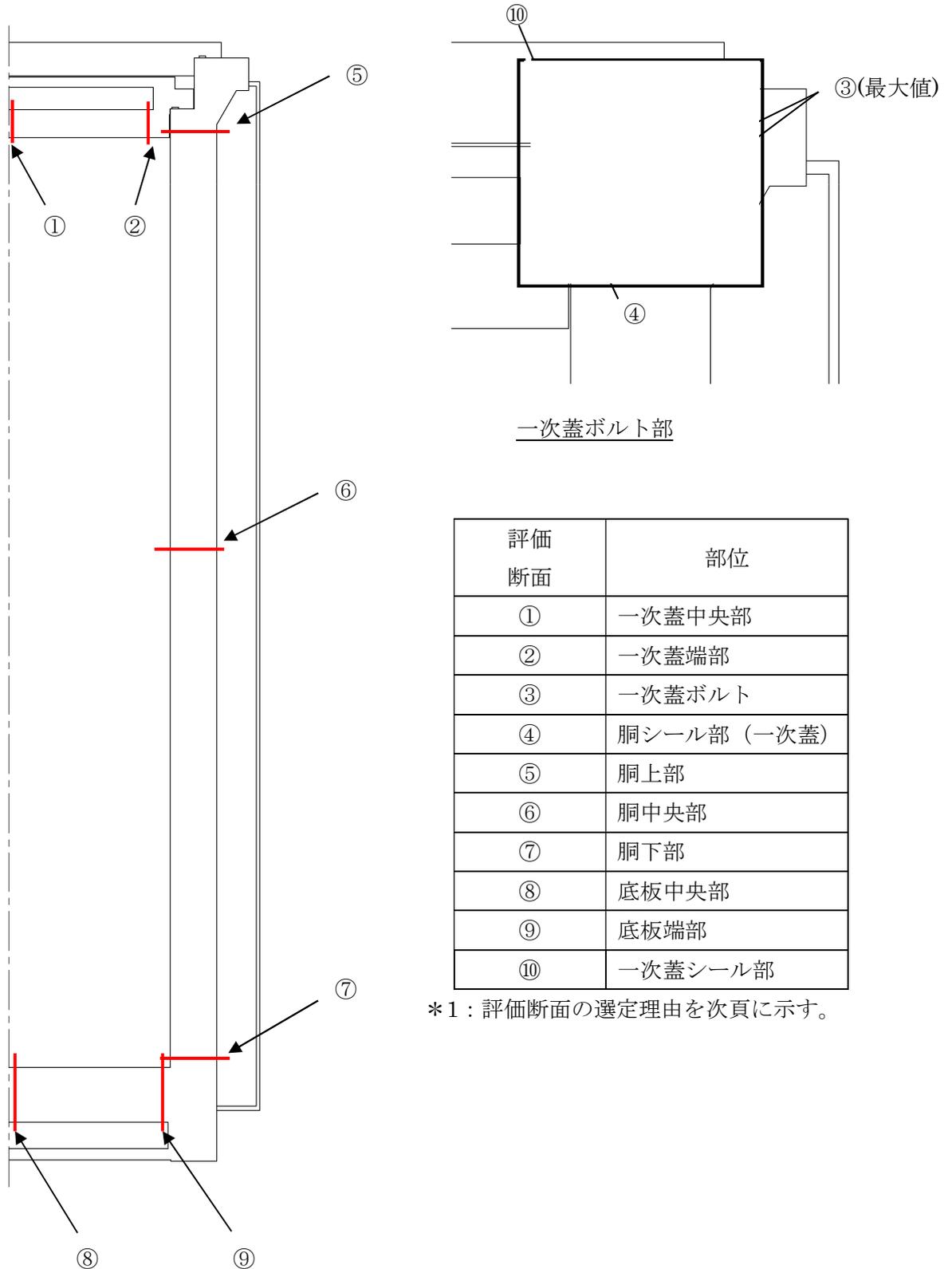


図3 密封容器の応力評価位置 (1/2)

評価断面	部位	評価断面の選定理由
①	一次蓋中央部	周辺支持円板として考えたときの曲げ応力最大部位となる一次蓋の中央部とした。
②	一次蓋端部	密封容器の範囲での軸方向板厚最小部となり、かつ形状不連続部の近傍であること、そして周辺固定円板として考えたときの曲げ応力最大部位となる一次蓋の最外部とした。
③	一次蓋ボルト	ボルト軸部のうち非埋め込み部の両端点を評価点とし、最大となるほうを評価値とした。
④	胴シール部 (一次蓋)	胴側のガスケット接触部(シール部)とした。
⑤	胴上部	密封容器の範囲での胴最上部であり、胴フランジテーパ部の直下とした。
⑥	胴中央部	胴の中央部とした。
⑦	胴下部	胴、底板の密封容器範囲での下部であり、かつ形状不連続部の近傍であることから、胴最下部とした。
⑧	底板中央部	周辺支持円板として考えたときの曲げ応力最大部位となる底板の中央部とした。
⑨	底板端部	周辺固定円板として考えたときの曲げ応力最大部位となる底板の最外部とした。
⑩	一次蓋シール部	胴ガスケット接触部の軸方向断面とした。

図 3 密封容器の応力評価位置 (2/2)

使用済燃料貯蔵施設における Hitz-B52 型のハンドリングフロー

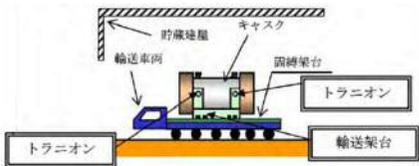
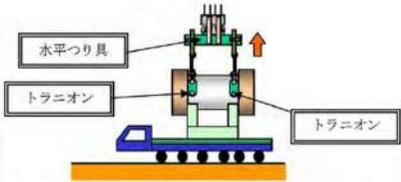
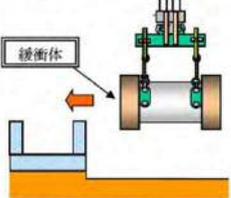
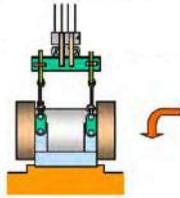
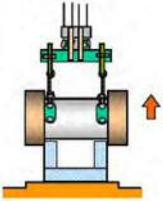
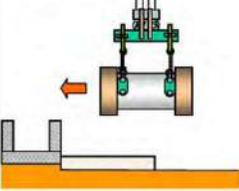
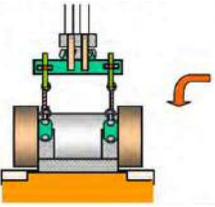
使用済燃料貯蔵施設における Hitz-B52 型のハンドリングフローを別紙 1-1 図に示す。

輸送車両により貯蔵建屋受入れ区域に搬入された Hitz-B52 型は、輸送用の緩衝体を取り付けた状態で、受入れ区域の天井クレーンで吊上げ、仮置架台又はたて起こし架台に設置される。Hitz-B52 型は輸送架台、仮置架台及びたて起こし架台にトラニオンを介して水平に設置される。なお、金属キャスクの角度は上部緩衝体側から見て、上方向を 0° 側とし、0° 側から時計回りに 90° 側、180° 側、270° 側と定義している。

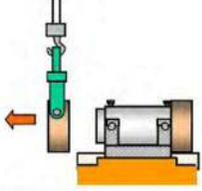
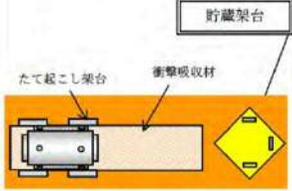
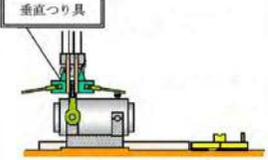
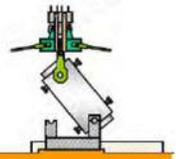
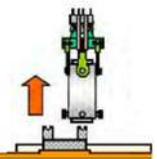
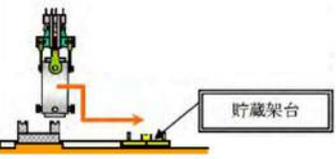
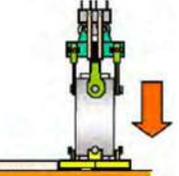
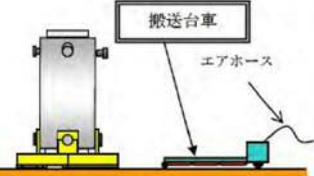
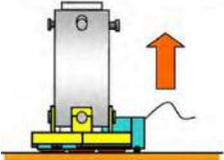
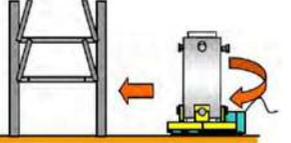
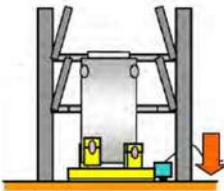
Hitz-B52 型は、たて起こし架台上で緩衝体を取り外し、受け入れ区域の天井クレーンでたて起こし、垂直吊上後に貯蔵架台に移送され、下部トラニオンを介して貯蔵架台上に固定された後、搬送機器等（搬送台車）により貯蔵架台ごと検査架台へ移送される。

検査架台で三次蓋を取り外した後、Hitz-B52 型は、搬送機器等（搬送台車）により貯蔵架台ごと受入れ区域から貯蔵区域の所定の貯蔵場所まで移送され、貯蔵架台と貯蔵建屋の床面を固定して貯蔵される。

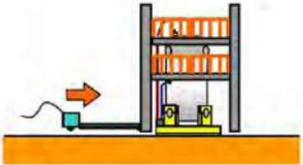
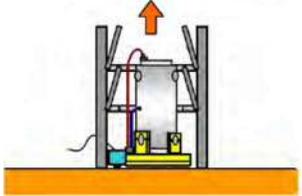
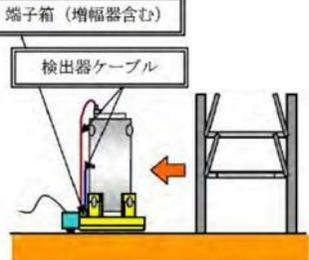
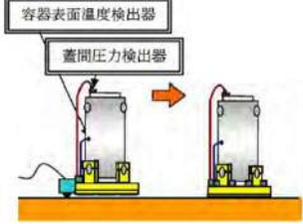
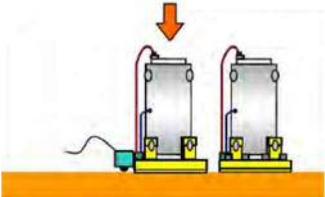
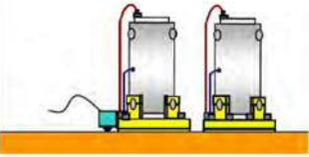
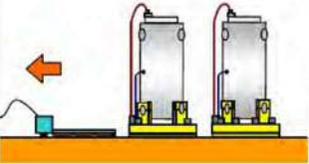
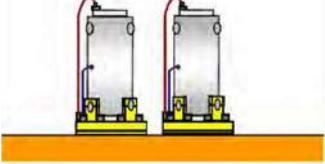
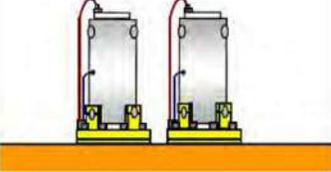
なお、別紙 1-1 図には、使用済燃料貯蔵施設での Hitz-B52 型の受入れから貯蔵場所への設置までの工程を記載しているが、使用済燃料貯蔵施設から搬出される場合においては、本工程と逆の手順にて取り扱うこととなる。

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード
1-1	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクを貯蔵建屋に搬入 輸送車両上にて外観検査、線量当量率測定、表面密度測定等実施 	1-2	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク水平つり上げ 
1-3	<ul style="list-style-type: none"> 仮置架台へ移送 	1-4	<ul style="list-style-type: none"> 仮置架台へ設置 
1-5	<ul style="list-style-type: none"> キャスク水平つり上げ 	1-6	<ul style="list-style-type: none"> たて起こし架台へ移送 
1-7	<ul style="list-style-type: none"> たて起こし架台へ設置 		

別紙 1-1 図 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクのハンドリングフロー (1/3)

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード
2-1	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝体の取外し 	2-2	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置 	2-3	<ul style="list-style-type: none"> つり具主アームを上部トラニオンに取り付け 
2-4	<ul style="list-style-type: none"> 主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キャスクをたて起こし 	2-5	<ul style="list-style-type: none"> トラニオン押さえを取り外した後、キャスクをつり上げ 	2-6	<ul style="list-style-type: none"> つり上げ高さを制限しながら横行・下降操作を繰り返し、貯蔵架台上まで移送 
2-7	<ul style="list-style-type: none"> キャスクを貯蔵架台に着床、固定 	2-8	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵架台下部に搬送台車を挿入 	2-9	<ul style="list-style-type: none"> 搬送台車浮上 
2-10	<ul style="list-style-type: none"> 旋回動作、走行動作により検査架台へ移送 	2-11	<ul style="list-style-type: none"> 搬送台車着床、貯蔵架台固定ボルト取り付け 	2-12	<ul style="list-style-type: none"> 三次蓋（輸送用）の取外し 

別紙 1-1 図 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクのハンドリングフロー (2/3)

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード
3-1	<ul style="list-style-type: none"> ・蓋間圧力検出器、キャスク表面温度検出器取り付け ・気密漏えい検査 ・貯蔵架台に搬送台車挿入 ・貯蔵架台固定ボルト取り外し 	3-2	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送台車浮上 	3-3	<ul style="list-style-type: none"> ・検査架台からキャスク拔出し 
3-4	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵場所まで移送 	3-5	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送台車の着床・貯蔵架台の設置 	3-6	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵架台の固定ボルト一部取り付け 
3-7	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送台車の抜取り 	3-8	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵架台の固定ボルト取り付け・確認 	3-9	<ul style="list-style-type: none"> ・表面温度及び蓋間圧力端子箱へケーブル接続 ・二重蓋間圧力検査、表面温度検査、据付検査 

別紙 1-1 図 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクのハンドリングフロー (3/3)

構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の構造強度解析条件

1. 概要

Hitz-B52 型の垂直吊上時及び運搬時における密封容器の構造強度解析条件を示す。

2. 解析条件

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型の密封容器の解析は、有限要素法による解析コード (ABAQUS) を使用する。解析モデルを別紙 2-1 図～別紙 2-6 図に示す。

解析モデルは、Hitz-B52 型の胴、底板、外筒、一次蓋、二次蓋等によりモデル化される。また、蓋のボルト貫通穴は寸法どおり穴としてモデル化する。蓋ボルト以外の構成部材にはソリッド要素を、また蓋ボルトについては、頭部にはソリッド要素を、ボルト部にはビーム要素を適用し、ソリッド要素であるボルト してモデル化した。モデル寸法は、公称寸法を用いた。一次蓋、二次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。なお、使用済燃料集合体及びバスケット (以下「内部収納物」という。) はモデル化せず胴内部に作用する荷重として考慮した。運搬時においては、三次蓋及び緩衝体はモデル化せず、慣性力のみを考慮した。また、解析モデルは三次元 360° モデルとした。

Hitz-B52 型の構成部材の物性値は、発電用原子力設備規格 材料規格 2012 年版 (2013 年追補) に基づいた。

(2) 荷重条件

a. 垂直吊上時

荷重条件を別紙 2-7 図に示す。

(i) 慣性力

モデル化した構成部材に対して、垂直吊上時に発生する加速度としては鉛直方向 3G を考慮し、その加速度による自重の慣性力を考慮する。

(ii) 圧力荷重

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

(iii) 機械的荷重

垂直吊上時に発生する鉛直方向 3G の加速度による内部収納物及び中性子遮蔽材 (蓋部、側部、底部) の慣性力を機械的荷重として考慮する。また、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

を機械的荷重として考慮する。

(iv) 熱荷重

除熱解析結果から得られる Hitz-B52 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。この時の基準温度を 20℃とする。

3

(3) 境界条件

a. 垂直吊上時

境界条件を別紙 2-98 図に示す。

垂直吊上時には、支持点である 1 対の上部トラニオンの吊上げ部の鉛直方向変位を拘束する。

(4) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-1312、MCD-1318.1 及び MCD-1321.1 に示される供用状態 A の設計基準に基づき以下のとおりとする。

a. 一次蓋、胴及び底板（シール部除く）

一次蓋 胴及び底板 に発生する応力強さが以下を満足すること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

P_L : 一次局部膜応力強さ

$P_L + P_b$: 一次膜+一次曲げ応力強さ

$P_L + P_b + Q$: 一次+二次応力強さ

S_m : 設計温度(一次蓋 120℃、胴 125℃、底板 150℃)における設計応力強さ

b. 胴シール部及び一次蓋シール部

胴シール部 及び一次蓋シール部 に発生する応力強さが以下を満足すること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

$P_L + P_b$: 一次膜+一次曲げ応力強さ

$P_L + P_b + Q$: 一次+二次応力強さ

S_y : 設計温度(一次蓋 120°C、胴 125°C)における設計降伏点

c. 一次蓋ボルト

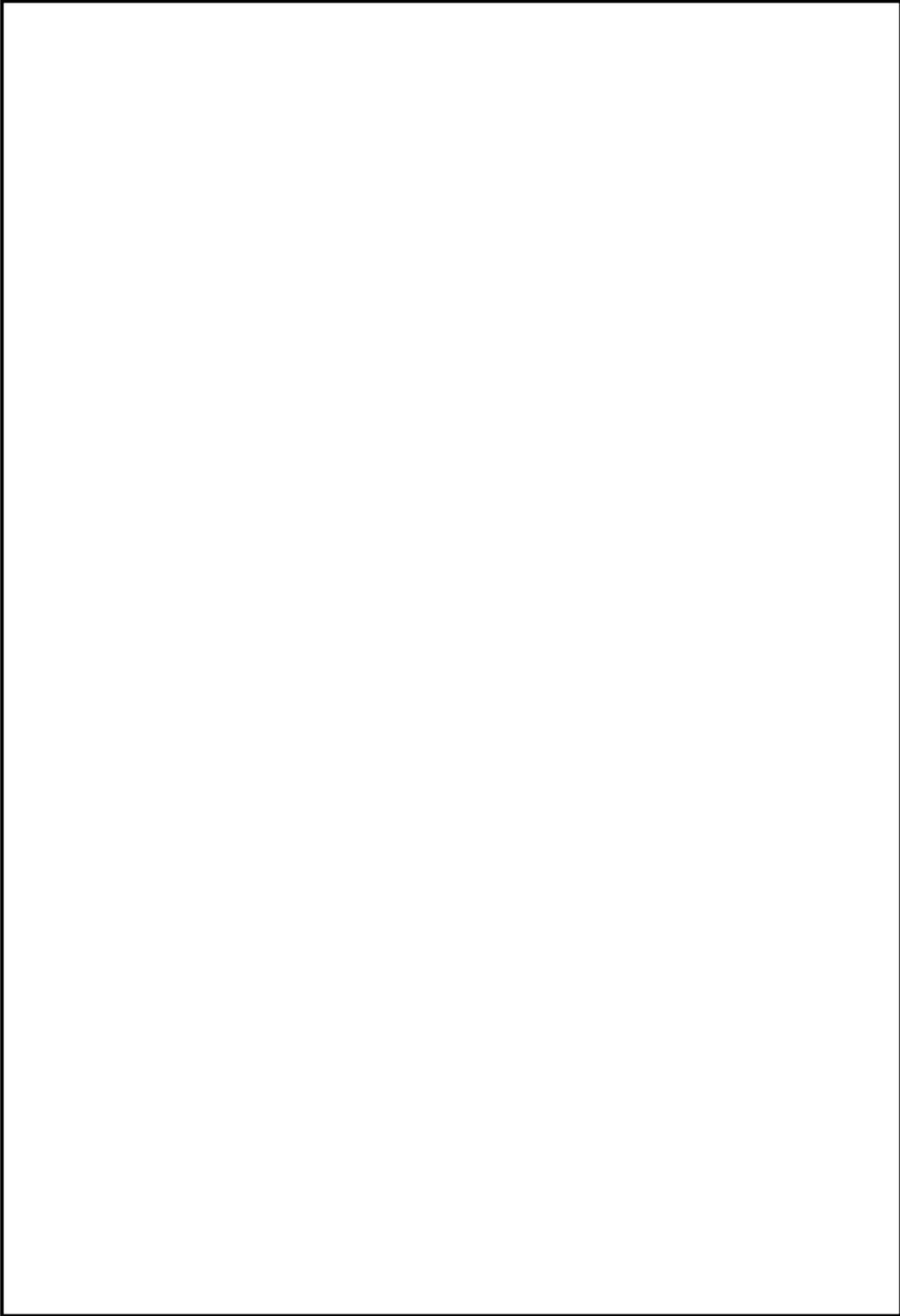
一次蓋ボルト に発生する各応力が以下を満足すること。

(平均引張応力) $\leq 2S_m$

(平均引張応力+曲げ応力) $\leq 3S_m$

ここで、

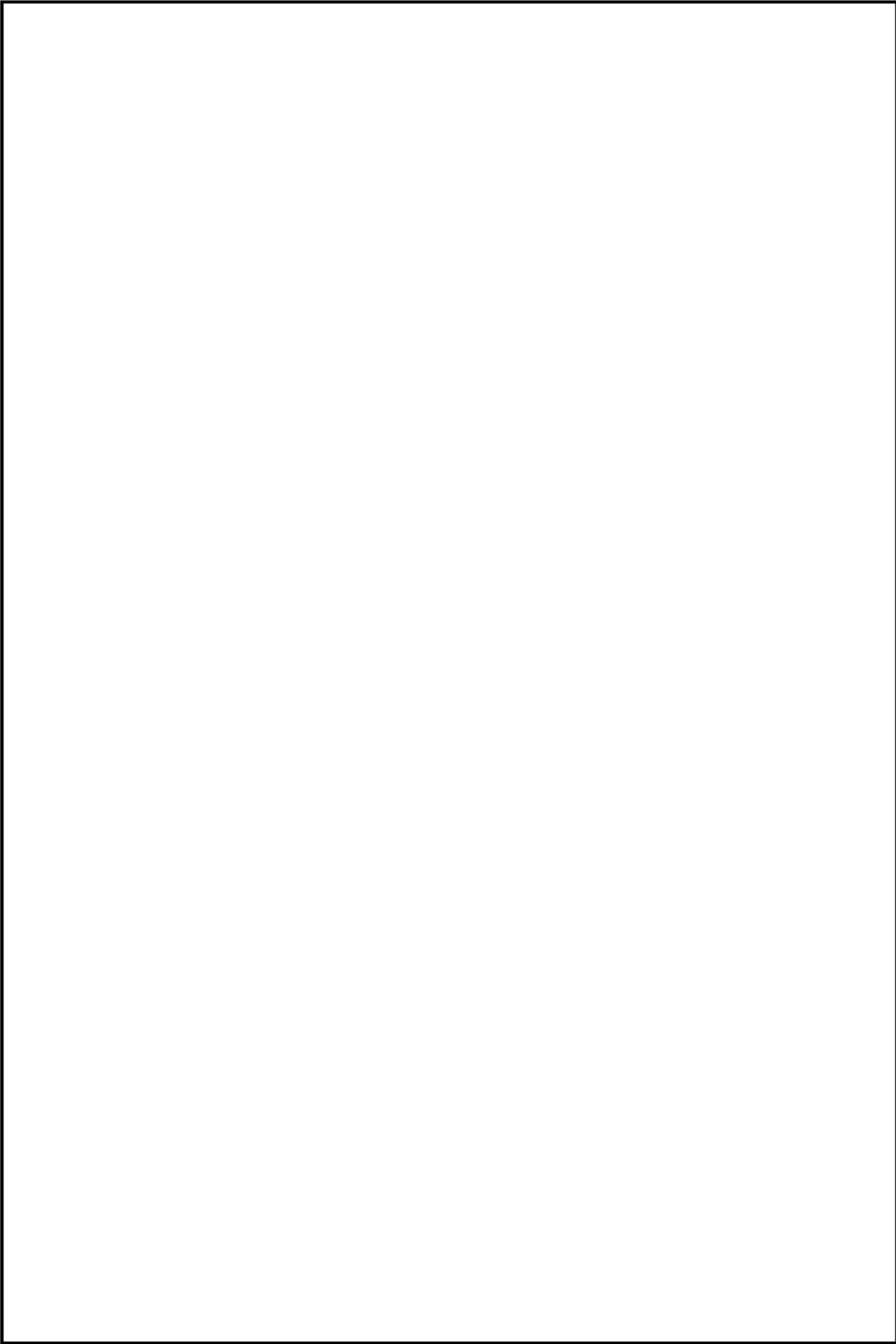
S_m : 設計温度 (一次蓋ボルト 100°C) における設計応力強さ



別紙 2-1 図 密封容器評価用解析モデル（全体図鳥瞰図その 1）

別紙 2-4

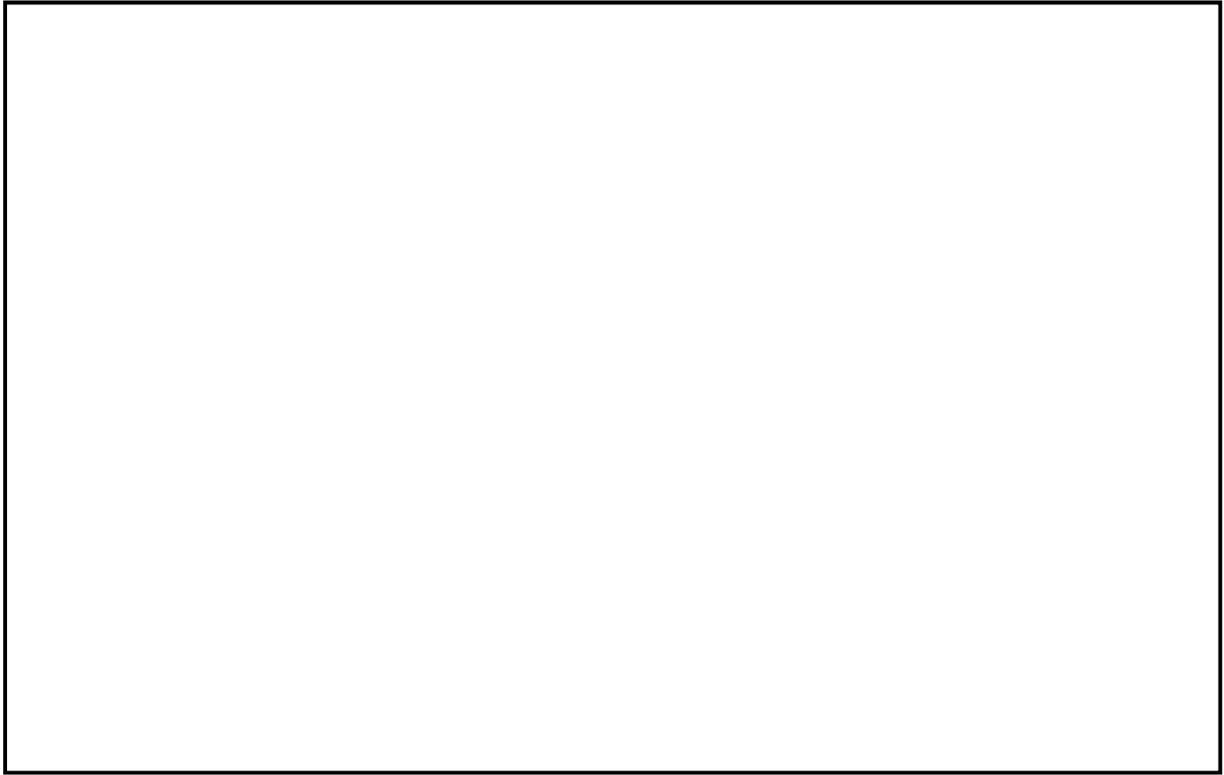
内は商業機密のため、非公開とします。



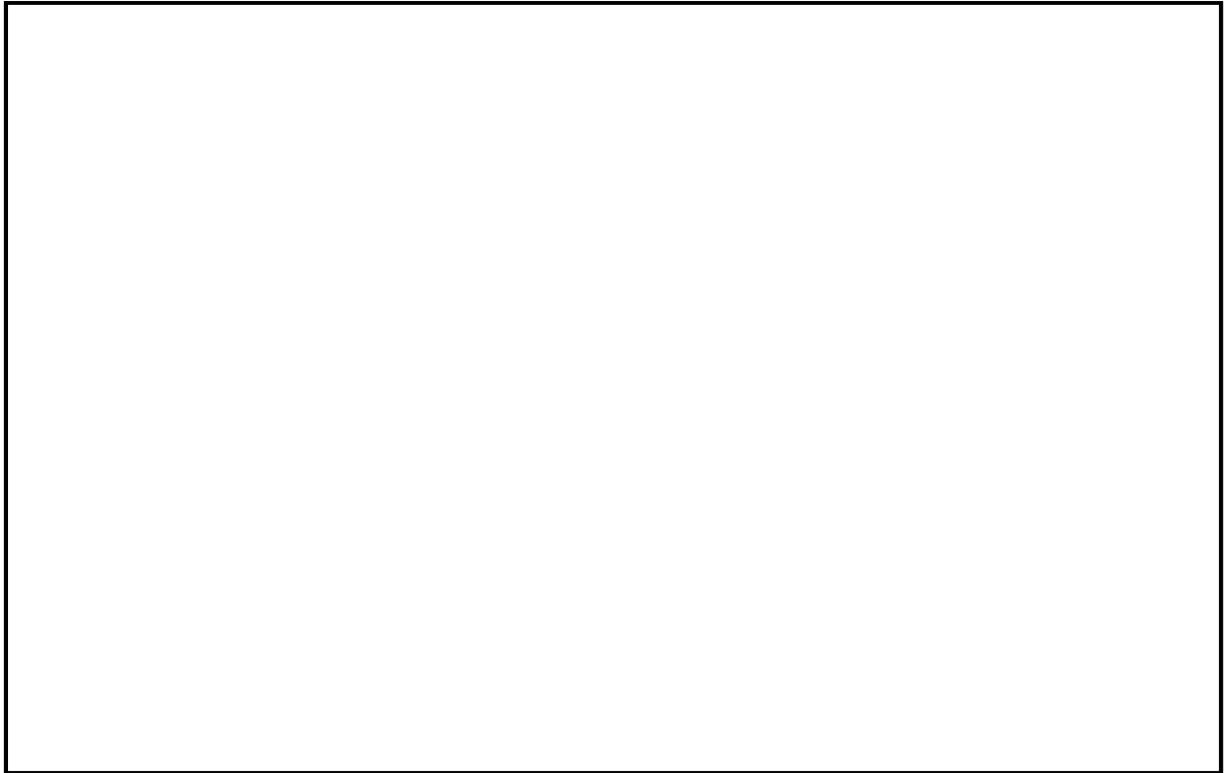
別紙 2-2 図 密封容器評価用解析モデル（全体鳥瞰図その 2）

別紙 2-5

内は商業機密のため、非公開とします。



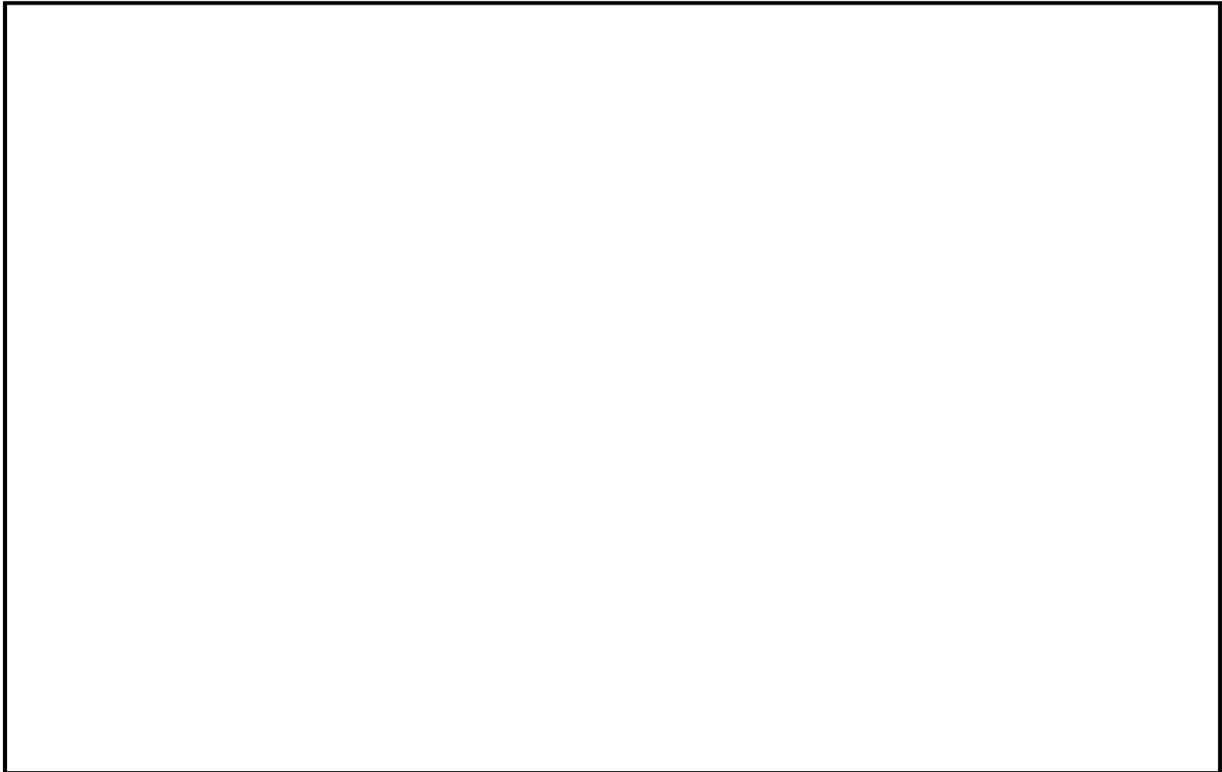
別紙 2-3 図 密封容器評価用解析モデル（上部詳細図）



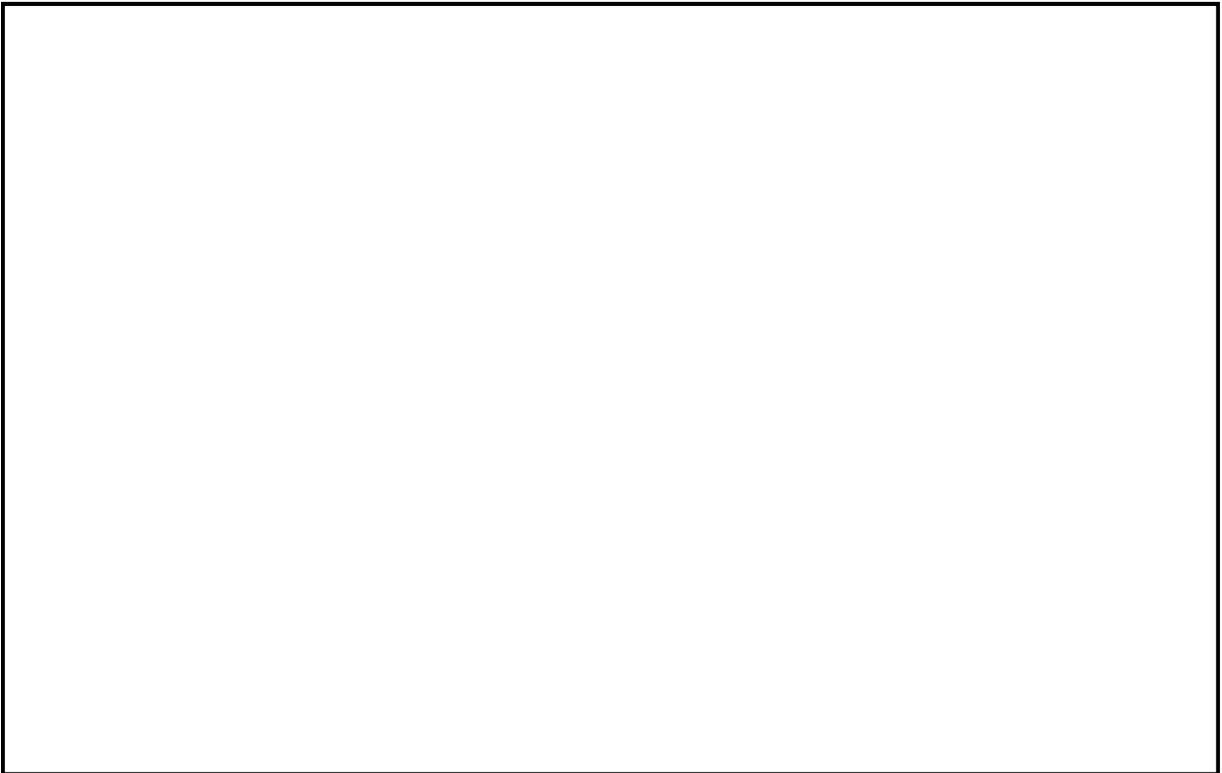
別紙 2-4 図 密封容器評価用解析モデル（上部詳細図、二次蓋非表示）

別紙 2-6

内は商業機密のため、非公開とします。



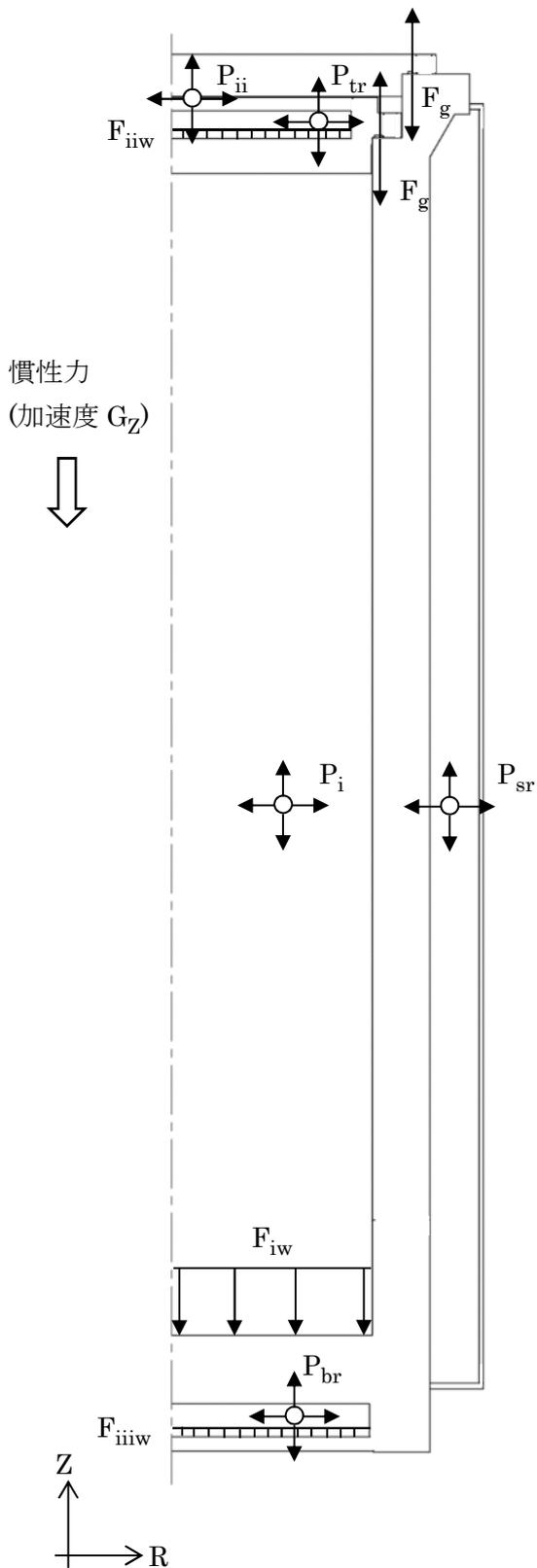
別紙 2-5 図 密封容器評価用解析モデル（上部詳細図、一次蓋及び二次蓋非表示）



別紙 2-6 図 密封容器評価用解析モデル（下部詳細図）

別紙 2-7

内は商業機密のため、非公開とします。

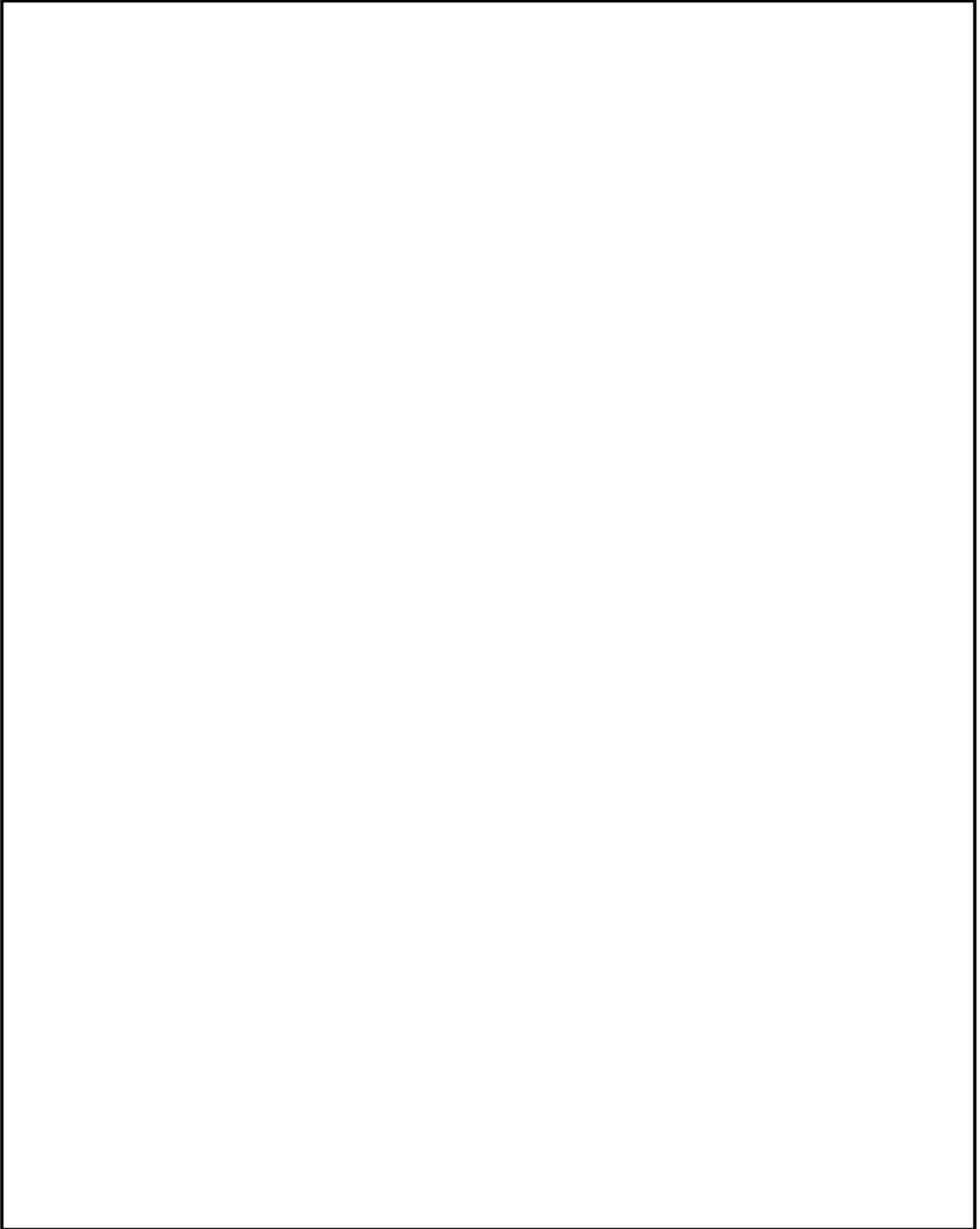


慣性加速度(Z 方向)	
$G_Z =$	-29.50 [m/s ²]
胴内内圧	
$P_i =$	-0.101325 [MPa G]
一次蓋-二次蓋間圧力	
$P_{ii} =$	<input type="text"/>
側部中性子遮蔽材部圧力	
$P_{sr} =$	<input type="text"/>
蓋部中性子遮蔽材部圧力	
$P_{tr} =$	<input type="text"/>
底部中性子遮蔽材部圧力	
$P_{br} =$	<input type="text"/>
ガスケット反力(等分布荷重)	
$F_g =$	<input type="text"/>
内部収納物慣性力(等分布荷重)	
$F_{iw} =$	<input type="text"/>
蓋部中性子遮蔽材慣性力(等分布荷重)	
$F_{iiw} =$	<input type="text"/>
底部中性子遮蔽材慣性力(等分布荷重)	
$F_{iiiw} =$	<input type="text"/>
熱荷重	
温度分布：貯蔵時	

別紙 2-7 図 垂直吊上時の荷重条件

別紙 2-8

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 2-8 図 垂直吊上時の境界条件

別紙 2-9



内は商業機密のため、非公開とします。

トラニオンの構造強度解析条件及び評価

1. 概要

Hitz-B52 型の垂直吊上時及び貯蔵中の地震時におけるトラニオンの構造強度解析条件及び評価を示す。

2. トラニオンの構造

Hitz-B52 型の構造を別紙 3-1 図に示す。金属キャスク本体の取扱い時及び貯蔵中の固縛のために、上部に 2 対のトラニオン、下部に 2 対のトラニオンが取付けられている。トラニオンの構造を別紙 3-2 図及び別紙 3-3 図に示す。

なお、上部トラニオン及び下部トラニオンは、金属キャスク本体への取付け位置により、2 種類の構造が存在する。各トラニオンの使用目的を別紙 3-1 表に示す。

2

3. 上部トラニオンの構造強度評価

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型の垂直吊上時における上部トラニオンの評価は、応力評価式により行う。解析モデルを別紙 3-2 図に示す。

(2) 荷重条件

Hitz-B52 型の垂直吊上時の質量は、119.5 トンである。垂直吊上時における評価は、1 対の上部トラニオン (90° - 270° 側) を用いて行う。また、垂直吊上時に発生する加速度として、鉛直方向 3G を考慮する。

2

(3) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-3311.1 に示される供用状態 A (通常輸送時および吊上げ時) の設計基準に基づき以下のとおりとする。

$$\text{(一次曲げ応力とせん断応力の合成による応力強さ)} \leq S_y$$

ここで、

$$S_y : \text{設計温度}(125^\circ\text{C}) *1 \text{における設計降伏点} = 653 \text{ MPa}$$

注記*1: 貯蔵時の除熱解析結果に基づき設定した。

(4) 構造強度評価

a. 上部トラニオンに作用する荷重

垂直吊上時に上部トラニオンに作用する荷重 F_m (N) は、次のとおりに求められる。

$$F_m = \frac{m_1 \cdot G_2}{n}$$

ここで、

F_m : 上部トラニオン 1 個に作用する荷重 (N)

n : トラニオンの数 = 2 個

m_1 : 吊上時における Hitz-B52 型の質量 = 1.195×10^5 kg

G_2 : 鉛直方向加速度 = 3G

G : 重力加速度 = 9.80665 m/s²

したがって、

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{1.195 \times 10^5 \times 3 \times 9.80665}{2} \\ &= \underline{1.76 \times 10^6 \text{ N}} \end{aligned}$$

2

2

b. 上部トラニオンに発生する曲げ応力

別紙 3-2 図に示す上部トラニオンの断面①～③に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$M = F_m \cdot X$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

F_m : 前記 a.項と同様

X : モーメントアーム (mm)

C : 中立軸からの距離 (mm)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

c. 上部トラニオンに発生するせん断応力

別紙 3-2 図に示す上部トラニオンの断面①～③に発生するせん断応力 τ (MPa) は、次式で計算する。

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

ここで、

F_m : 前記 a.項と同様

A : 別紙 3-2 図の各評価断面の断面積 (mm²)

d. 上部トラニオンに発生する組合せ応力

別紙 3-2 図に示す上部トラニオンの断面①～③に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) とせん断応力 τ (MPa) の合成による応力強さ σ_T (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$$



ここで、

σ_b : 前記 b.項と同様

τ : 前記 c.項と同様

e. 計算条件及び計算結果

別紙 3-2 図に示す上部トラニオンの断面①～③に発生する応力の計算条件と計算結果を別紙 3-2 表に示す。

全ての評価断面における曲げ応力とせん断応力の合成による応力強さは設計基準を満足している。

4. 下部トラニオンの構造強度評価

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型は、別紙 3-1 図に示すように貯蔵中はたて置き姿勢であり、貯蔵建屋内の支持構造物である貯蔵架台に、下部トラニオン 4 個を固縛することで床面に固縛される。貯蔵中に地震力が作用する場合の下部トラニオンに発生する応力は、鉛直方向及び水平方向の荷重を下部トラニオン 4 個で支持するとして、応力評価式を用いて求める。

2

(2) 荷重条件

下部トラニオンの構造強度評価は、たて置き姿勢で貯蔵されている Hitz-B52 型に対して、地震によって発生する加速度として以下に示す設計震度を考慮して行う。

- ・ 水平方向設計震度：1.4G
- ・ 鉛直方向設計震度：0.87G

(3) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-3311.3 に示される供用状態 D の設計基準に基づき以下のとおりとする。

$$\text{(曲げ応力)} \leq 1.5 f_b$$

$$\text{(せん断応力)} \leq 1.5 f_s$$

$$\text{(組合せ応力)} \leq 1.5 f_t$$

ここで、

f_b : 設計温度(125°C)*1における許容曲げ応力 (MPa) (= F/1.5)

f_s : 設計温度(125°C)*1における許容せん断応力 (MPa) (=F/1.5√3)

f_t : 設計温度(125°C)*1における許容引張応力 (MPa) (=F/1.5)

F : 1.2S_y と 0.7S_u の小さい方の値

S_y : 設計温度(125°C)*1における設計降伏点

S_u : 設計温度(125°C)*1における設計引張強さ

注記*1 : 貯蔵時の除熱解析結果に基づき設定した。

(4) 構造強度評価

a. 下部トラニオンに作用する荷重

地震時に下部トラニオンに作用する荷重と方向及び作用する位置を別紙 3-4 図に示す。別紙 3-4 図に示す回転中心まわりの回転モーメントの釣り合いより、下部トラニオンに作用する地震荷重は、次のとおり求められる。

$$F_m = \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_g)}{a_1 + 2 \cdot \frac{a_2^2}{a_1}}$$

ここで、

F_m : 下部トラニオン 1 個に作用する地震荷重 (N)

m_2 : 貯蔵時の Hitz-B52 型の質量 = 1.176×10^5 kg

G_1 : 水平方向加速度 = $C_H \cdot G$

G_2 : 鉛直方向加速度 = $(1 - C_V) \cdot G$

C_H : 水平方向設計震度 = 1.4

C_V : 鉛直方向設計震度 = 0.87

G : 重力加速度 = 9.80665 m/s^2

h_{CG} : Hitz-B52 型の底面から重心位置までの高さ = 2719 mm

a_1 : 支点 O から固縛装置④のトラニオンへの荷重作用点までの距離
= 2294 mm

a_2 : 支点 O から固縛装置⑥のトラニオン固縛金具中心までの距離
= 999 mm

a_g : 支点 O から金属キャスク中心までの距離 = 999 mm

したがって、

$$F_m = 1.34 \times 10^6 \text{ N}$$

b. 下部トラニオンに発生する曲げ応力

別紙 3-3 図に示す下部トラニオンの断面④、⑤に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$M = F_m \cdot X$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

F_m : 前記 a. 項と同様

X : モーメントアーム (mm)

- C : 中立軸からの距離 (mm)
I : 断面二次モーメント (mm⁴)

c. 下部トラニオンに発生するせん断応力

別紙 3-3 図に示す下部トラニオンの断面④、⑤に発生するせん断応力 τ (MPa) は、次式で計算する。

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

ここで、

- F_m : 前記 a.項と同様
 A : 別紙 3-3 図の各評価断面の断面積 (mm²)

d. 下部トラニオンに発生する組合せ応力

別紙 3-3 図に示す下部トラニオンの断面④、⑤に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) とせん断応力 τ (MPa) の組合せ応力 σ_T (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$$

ここで、

- σ_b : 前記 b.項と同様
 τ : 前記 c.項と同様

e. 計算条件及び計算結果

別紙 3-3 図に示す下部トラニオンの断面④、⑤に発生する応力の計算条件と計算結果を別紙 3-3 表に示す。

全ての評価断面における曲げ応力、せん断応力及び組合せ応力は設計基準を満足している。



別紙 3-1 表 Hitz-B52 型のトラニオンの使用目的

項目	取り付け位置(方位)	使用目的	構造図
上部トラニオン	90°、270°	垂直吊上げ 及び 水平吊上げ	別紙 3-2 図
上部トラニオン	0°、180°	垂直吊上げ	別紙 3-2 図
下部トラニオン	90°、270°	水平吊上げ 及び 貯蔵時固縛	別紙 3-3 図
下部トラニオン	0°、180°	貯蔵時固縛	別紙 3-3 図

別紙 3-2 表 垂直吊上時に上部トラニオンに発生する応力計算条件及び計算結果

評価断面	荷重 : F_m (N)	モーメント アーム : X (mm)	中立軸から の距離 : C (mm)	トラニオン 断面積 : A (mm ²)	トラニオン断面 二次モーメント : I (mm ⁴)
①	<u>1.76×10^6</u>	60	70		
②	<u>1.76×10^6</u>	150	100		
③	<u>1.76×10^6</u>	378	205		

2

評価断面	曲げ応力	せん断応力	垂直応力とせん断応力の 合成による応力強さ	
	σ_b (MPa)	τ (MPa)	σ_T (MPa)	設計基準値 (MPa)
①	<u>392</u>	<u>115</u>	<u>440</u>	653
②	<u>492</u>	<u>129</u>	<u>541</u>	653
③	<u>142</u>	25	<u>149</u>	653

2

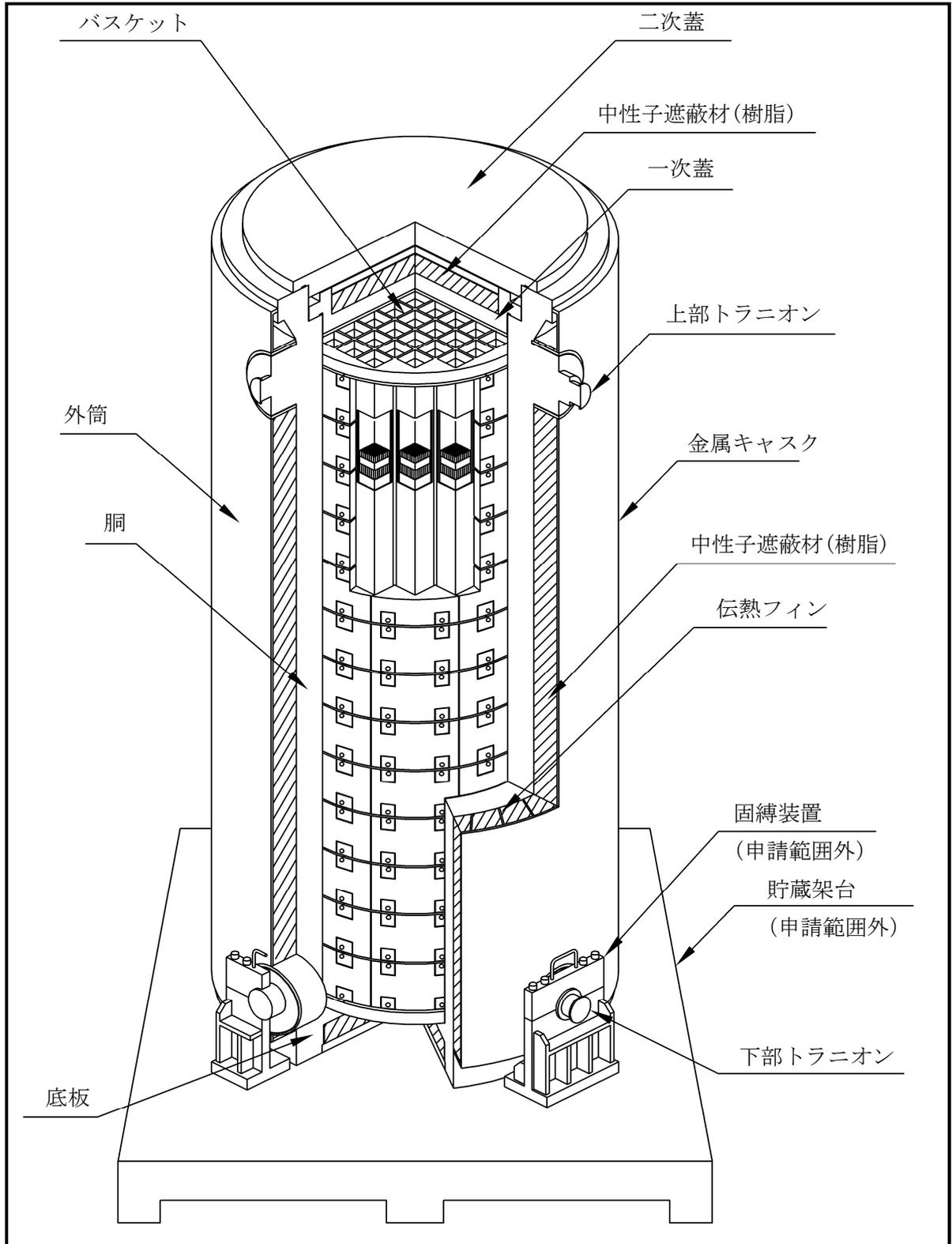
別紙 3-3 表 貯蔵中の地震時に下部トラニオンに発生する応力計算条件及び計算結果

評価断面	荷重 : F_m (N)	モーメント アーム : X (mm)	中立軸から の距離 : C (mm)	トラニオン 断面積 : A (mm ²)	トラニオン断面 二次モーメント : I (mm ⁴)
④	<u>1.34×10^6</u>	90	100		
⑤	<u>1.34×10^6</u>	318	205		

2

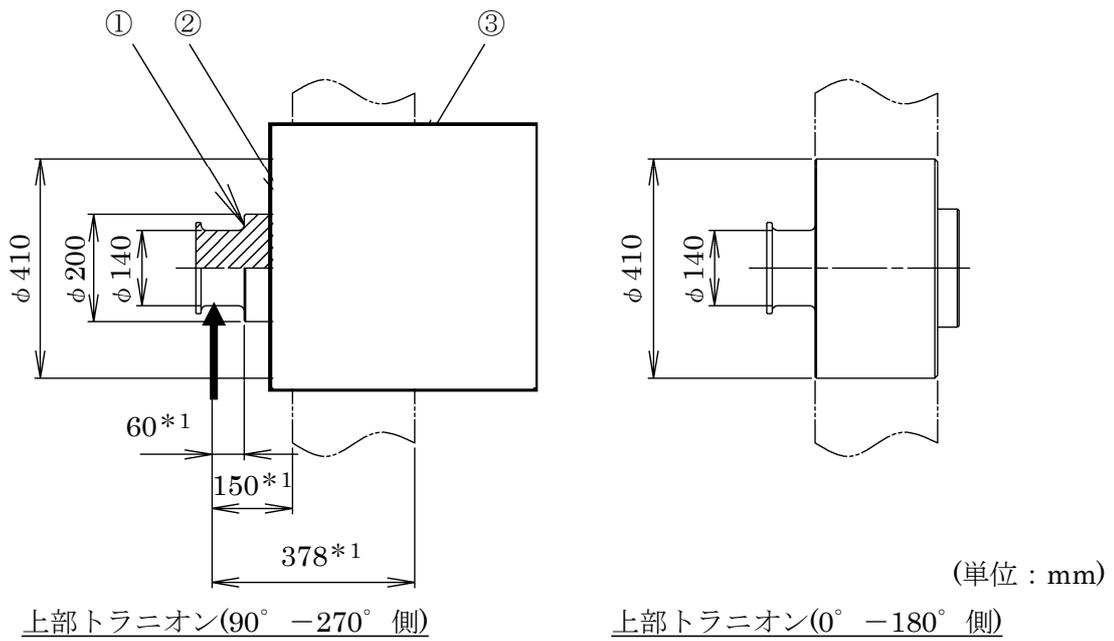
評価断面	曲げ応力		せん断応力		垂直応力とせん断応力 の組合せ	
	σ_b (MPa)	設計基準値 (MPa)	τ (MPa)	設計基準値 (MPa)	σ_T (MPa)	設計基準値 (MPa)
④	225	591	98	341	<u>282</u>	591
⑤	91	591	<u>20</u>	341	98	591

2



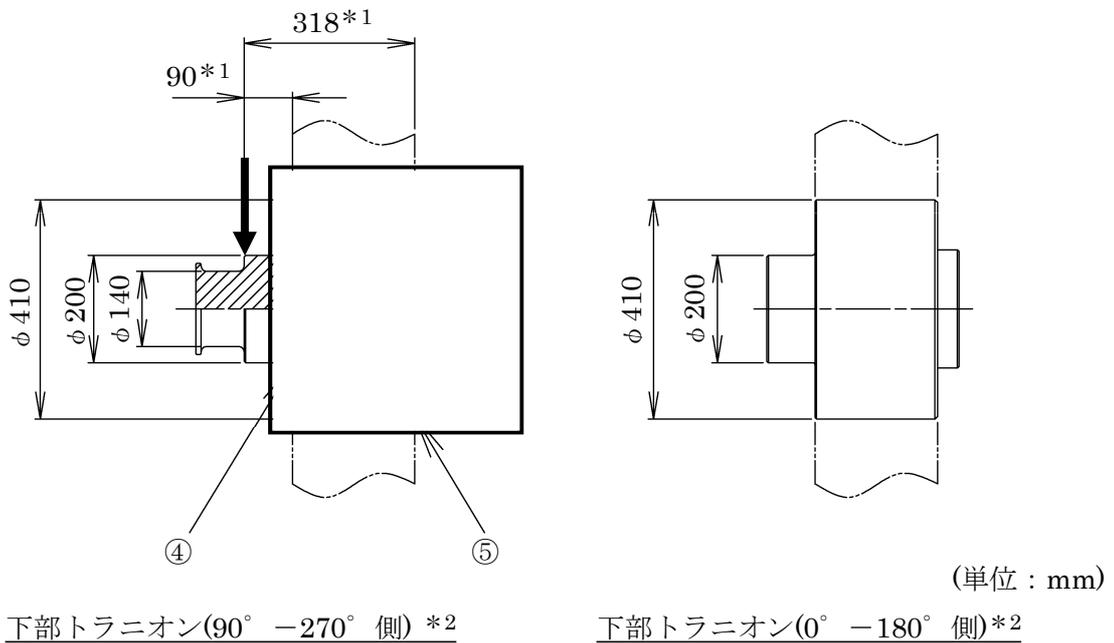
別紙 3-1 図 Hitz-B52 型構造図

□ 内は商業機密のため、一部非公開とします。



注記*1 : 吊上時の荷重作用点までの距離 (モーメントアーム)

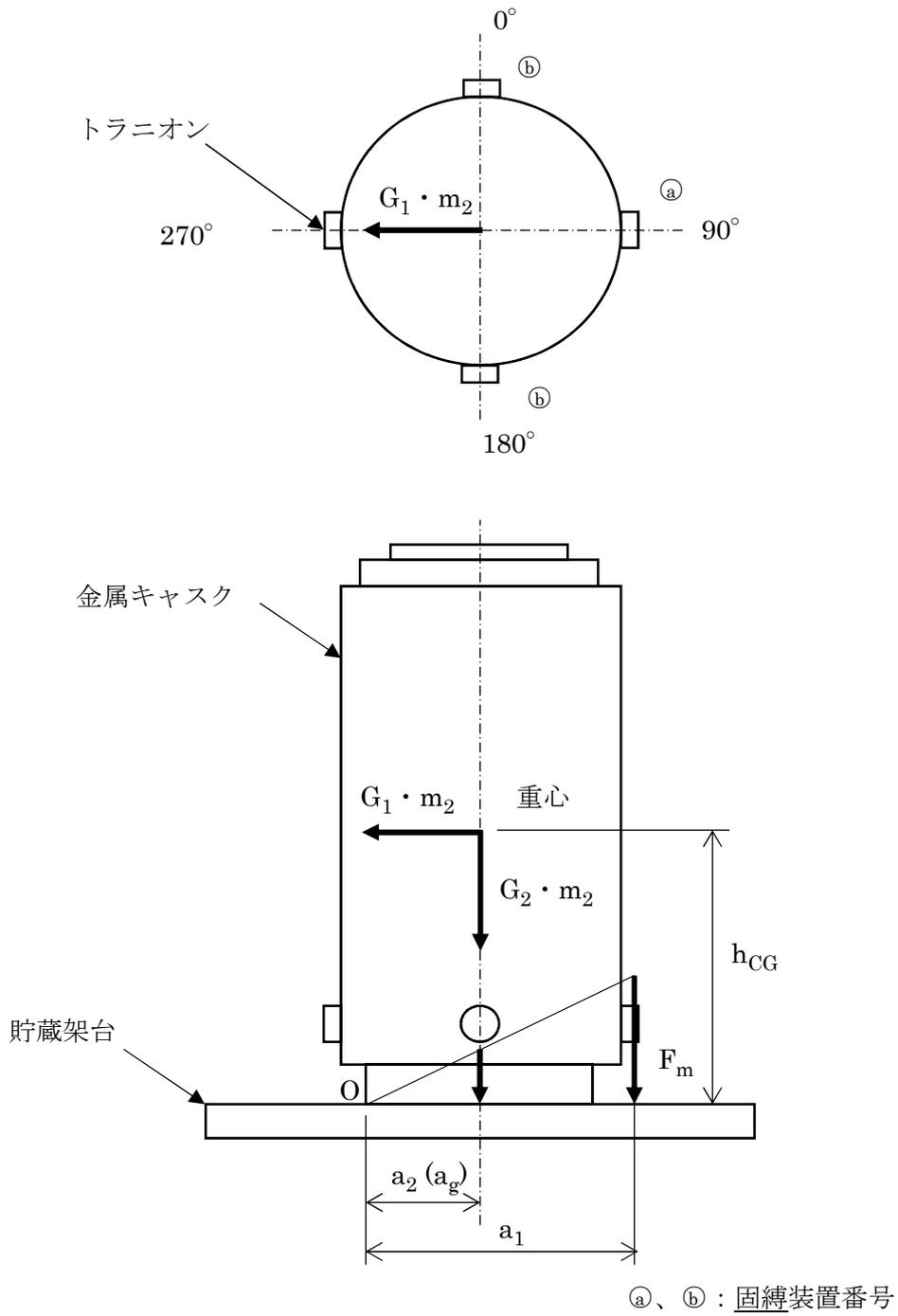
別紙 3-2 図 上部トラニオンの構造と解析モデル



注記*1 : 貯蔵時の荷重作用点までの距離 (モーメントアーム)

*2 : いずれの下部トラニオンも同様の荷重を受けるが、断面の小さい 90° -270° 側のトラニオンを評価対象とする。

別紙 3-3 図 下部トラニオンの構造と解析モデル



別紙 3-4 図 貯蔵中の地震時に下部トランニオンに作用する荷重

参考-構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の運搬時構造強度解析

1. 概要

Hitz-B52 型の水平姿勢での金属キャスクの車両運搬時 (以下「運搬時」という。) における密封容器の構造強度解析条件および結果を示す。なお本資料は輸送に関するものであるため、参考資料とする。

2. 解析条件

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型の密封容器の解析は、有限要素法による解析コード (ABAQUS) を使用する。解析モデルは別紙 2-1 図～別紙 2-6 図と同様とする。

解析モデルは、Hitz-B52 型の胴、底板、外筒、一次蓋、二次蓋等によりモデル化される。また、蓋のボルト貫通穴は寸法どおり穴としてモデル化する。蓋ボルト以外の構成部材にはソリッド要素を、また蓋ボルトについては、頭部にはソリッド要素を、ボルト部にはビーム要素を適用し、ソリッド要素であるボルト [] [] としてモデル化した。モデル寸法は、公称寸法を用いた。一次蓋、二次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。なお、使用済燃料集合体及びバスケット (以下「内部収納物」という。) はモデル化せず胴内部に作用する荷重として考慮した。運搬時においては、三次蓋及び緩衝体はモデル化せず、慣性力のみを考慮した。また、解析モデルは三次元 360° モデルとした。

Hitz-B52 型の構成部材の物性値は、発電用原子力設備規格 材料規格 2012 年版 (2013 年追補) に基づいた。

(2) 荷重条件

a. 運搬時

荷重条件を別紙 4-1 図に示す。

(i) 慣性力

モデル化した構成部材に対して、運搬時に発生する加速度としては、水平姿勢で前方向 (Z 方向) に 2G、左右方向 (X 方向) に 1G 及び下方向 (-Y 方向) に 3G*1 を考慮し、その加速度による自重の慣性力を考慮する。
注記*1: 国土交通省自動車運搬固縛指針 (平成 23 年 3 月改訂) による。

(ii) 圧力荷重

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

(iii) 機械的荷重

運搬時に水平姿勢で発生する前方向（Z 方向）2G、左右方向（X 方向）1G 及び下方向（-Y 方向）3G の加速度による内部収納物、中性子遮蔽材（蓋部、側部、底部）、三次蓋及び緩衝体の慣性力を機械的荷重として考慮する。また、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を機械的荷重として考慮する。

(iv) 熱荷重

除熱解析結果から得られる Hitz-B52 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。

(3) 境界条件

a. 運搬時

境界条件を別紙 4-2 図に示す。

運搬時には、水平姿勢に対して支持点である上部及び下部の 2 対のトランニオン支持部の鉛直方向変位、下部トランニオン支持部の前後方向変位、並びに上部及び下部トランニオンの左右方向変位を拘束する。

(4) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-1312、MCD-1318.1 及び MCD-1321.1 に示される供用状態 A の設計基準に基づき以下のとおりとする。

a. 一次蓋、胴及び底板（シール部除く）

一次蓋 、胴及び底板 に発生する応力強さが以下を満足すること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

P_L : 一次局部膜応力強さ

$P_L + P_b$: 一次膜+一次曲げ応力強さ

$P_L + P_b + Q$: 一次+二次応力強さ

S_m : 設計温度(一次蓋 120°C、胴 125°C、底板 150°C)における設計応力強さ

b. 胴シール部及び一次蓋シール部

胴シール部 及び一次蓋シール部 に発生
する応力強さが以下を満足すること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

$P_L + P_b$: 一次膜+一次曲げ応力強さ

$P_L + P_b + Q$: 一次+二次応力強さ

S_y : 設計温度(一次蓋 120°C、胴 125°C)における設計降伏点

c. 一次蓋ボルト

一次蓋ボルト に発生する各応力が以下を満足すること。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

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

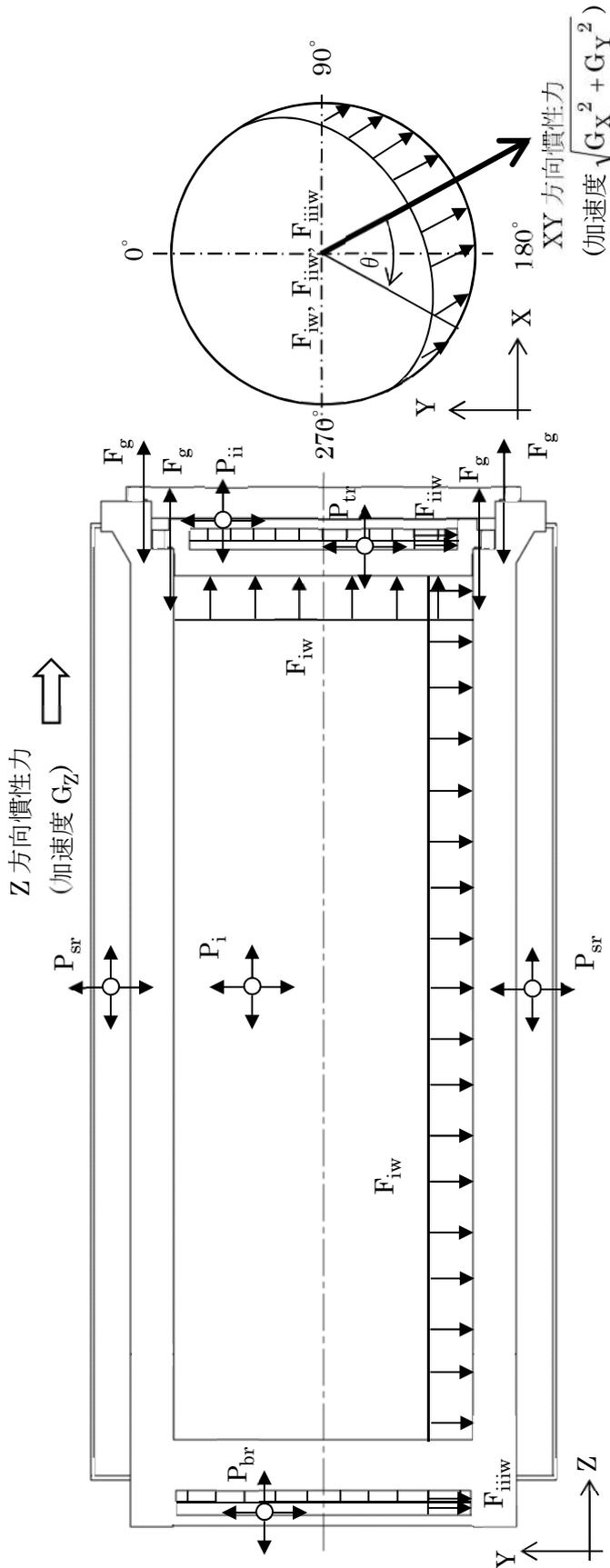
ここで、

S_m : 設計温度 (一次蓋ボルト 100°C) における設計応力強さ

3. 解析結果

密封容器 Hitz-B52 型の運搬時構造解析結果を別紙 4-1 表に示す。

別紙 4-1 表に示すとおり、Hitz-B52 型の密封容器に発生する応力は、設計基準
値を満足することを確認した。



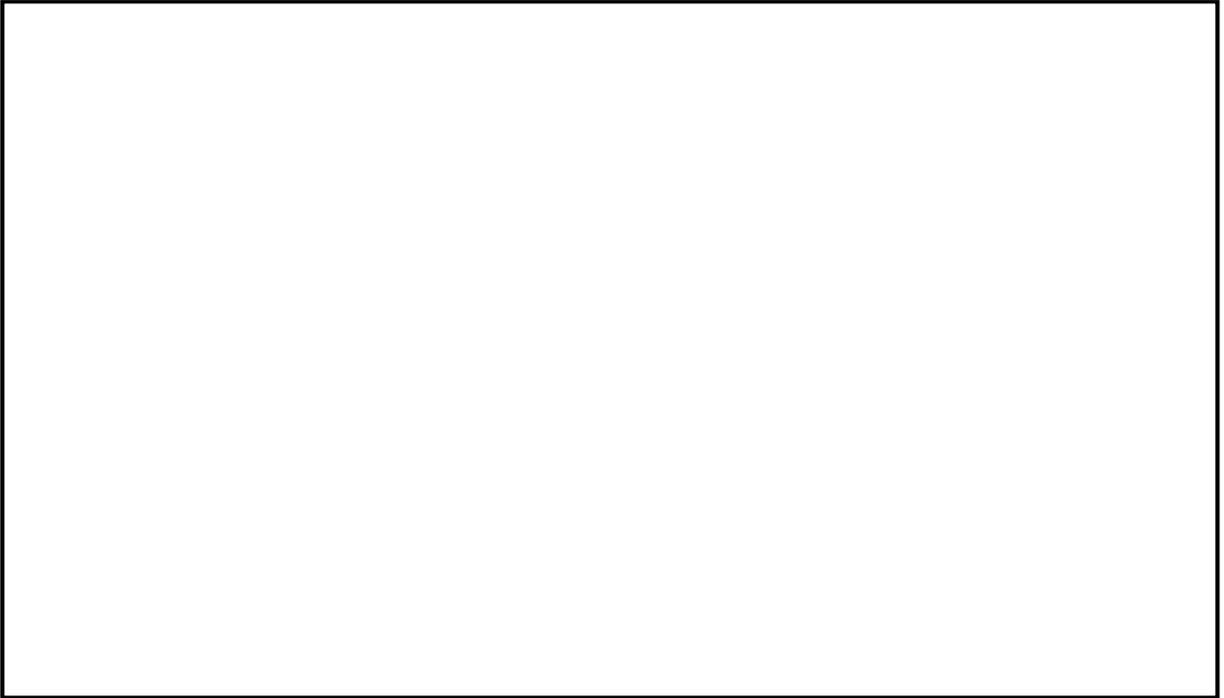
- 慣性加速度(X方向)
 $G_X = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- 慣性加速度(Y方向)
 $G_Y = -29.50 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- 慣性加速度(Z方向)
 $G_Z = 19.70 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- 胴内内圧
 $P_i = -0.101325 \text{ [MPa G]}$
- 一次蓋-二次蓋間圧力
 $P_{ii} =$
- 側部中性子遮蔽材部圧力
 $P_{sr} =$
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力
 $P_{tr} =$
- 底部中性子遮蔽材部圧力
 $P_{br} =$
- ガスケット反力(等分布荷重)
 $F_g =$
- 内部収納物慣性力
 X、Y方向(偏分布荷重、最大)
 $F_{iwa} =$
- Z方向(等分布荷重)
 $F_{iwb} =$
- 蓋部中性子遮蔽材慣性力
 X、Y方向(偏分布荷重、最大)
 $F_{iiaa} =$
- Z方向(等分布荷重)
 $F_{iibb} =$
- 底部中性子遮蔽材慣性力
 X、Y方向(偏分布荷重、最大)
 $F_{iiia} =$
- Z方向(等分布荷重)
 $F_{iiib} =$
- 熱荷重
 温度分布：貯蔵時

※内部収納物、蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の慣性力
 金属キャスク軸方向：等分布
 金属キャスク周方向：cos分布(範囲180°)

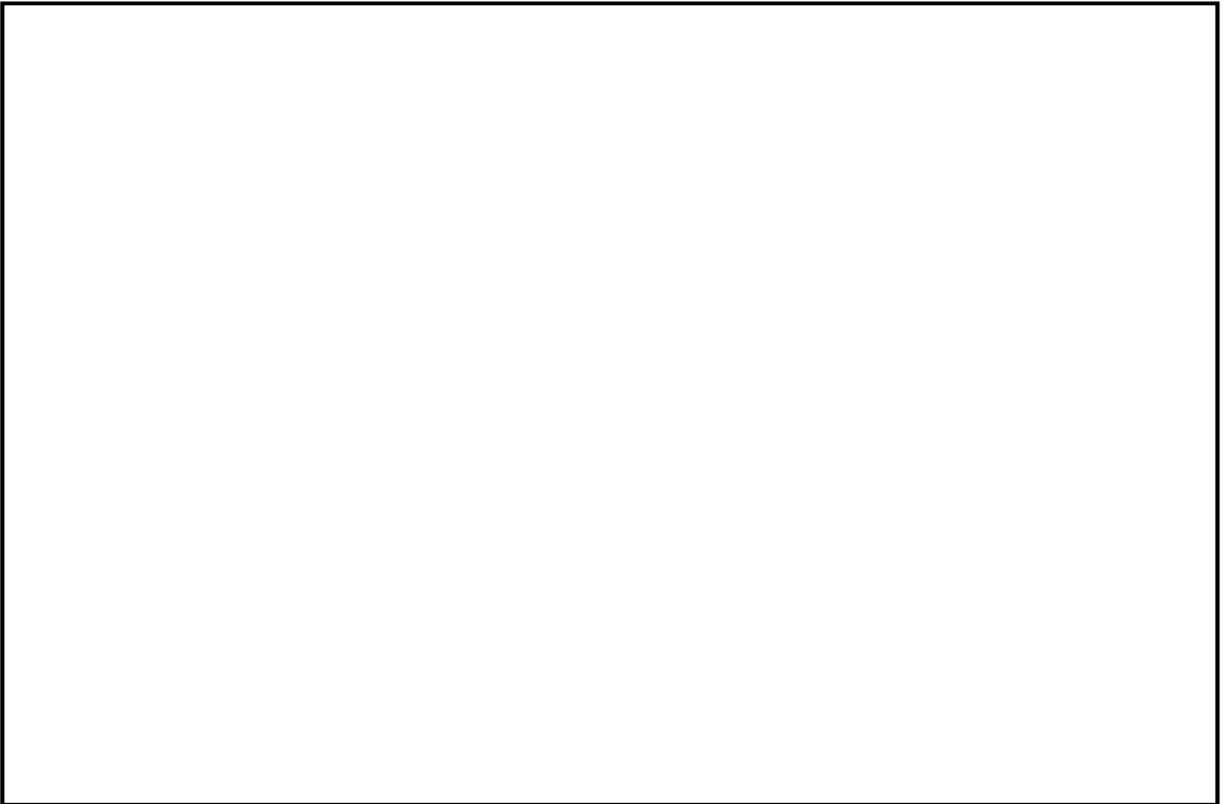
別紙 4-1 図 運搬時の荷重条件

別紙 4-4

内は商業機密のため、非公開とします。



Y方向(鉛直方向)の拘束位置



X方向(左右方向)およびZ方向(前後方向)の拘束位置

別紙 4-2 図 運搬時の境界条件

別紙 4-5



内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 4-1 表 密封容器の構造強度評価（運搬時：供用状態 A）
（構造解析コードによる評価結果）

評価*1 位置	項目	応力の種類	評価結果 (MPa)	設計基準値 (MPa)
①	一次蓋中央部の 応力強さ	P_m	1	137
		$P_L + P_b$	5	205
		$P_L + P_b + Q$	52	411
②	一次蓋端部の 応力強さ	P_L	3	205
		$P_L + P_b$	6	205
		$P_L + P_b + Q$	39	411
③	一次蓋ボルトの 応力	平均引張応力	221	568
		平均引張応力+曲げ応力	380	852
④	胴シール部(一次蓋) の応力強さ	P_m	26	161
		$P_L + P_b$	48	161
		$P_L + P_b + Q$	50	161
⑤	胴上部の応力強さ	P_L	9	186
		$P_L + P_b$	17	186
		$P_L + P_b + Q$	20	372
⑥	胴中央部の応力強さ	P_m	7	124
		$P_L + P_b$	8	186
		$P_L + P_b + Q$	14	372
⑦	胴下部の応力強さ	P_L	13	183
		$P_L + P_b$	24	183
		$P_L + P_b + Q$	49	366
⑧	底板中央部の 応力強さ	P_m	3	122
		$P_L + P_b$	7	183
		$P_L + P_b + Q$	31	366
⑨	底板端部の応力強さ	P_L	11	183
		$P_L + P_b$	16	183
		$P_L + P_b + Q$	34	366
⑩	一次蓋シール部の 応力強さ	P_m	31	162
		$P_L + P_b$	58	162
		$P_L + P_b + Q$	63	162

注記*1：応力評価位置は本文図 3 参照。

参考-構造解析コード (ABAQUS) による密封容器の異常着床時構造強度解析

1. 概要

Hitz-B52 型が垂直姿勢で、金属キャスクの貯蔵架台にキャスク底部が衝突する場合（以下「異常着床時」という。）における密封容器の構造強度解析条件および結果を示す。なお、Hitz-B52 型の取扱事象において、供用状態 A 及び B に関しては、吊上げ時（垂直姿勢）に比べて異常着床時の発生応力のほうが小さくなることから、吊上げ時を代表事象とし、異常着床時の評価は参考として取り扱うものとする。

3

2. 解析条件

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型の密封容器の解析は、有限要素法による解析コード (ABAQUS) を使用する。解析モデルは別紙 2-1 図～別紙 2-6 図と同様とする。

解析モデルは、Hitz-B52 型の胴、底板、外筒、一次蓋、二次蓋等によりモデル化される。また、蓋のボルト貫通穴は寸法どおり穴としてモデル化する。蓋ボルト以外の構成部材にはソリッド要素を、また蓋ボルトについては、頭部にはソリッド要素を、ボルト部にはビーム要素を適用し、ソリッド要素であるボルト してモデル化した。モデル寸法は、公称寸法を用いた。一次蓋、二次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され、蓋と胴との接触が考慮されている。なお、使用済燃料集合体及びバスケット（以下「内部収納物」という。）はモデル化せず胴内部に作用する荷重として考慮した。また、解析モデルは三次元 360° モデルとした。

Hitz-B52 型の構成部材の物性値は、発電用原子力設備規格 材料規格 2012 年版 (2013 年追補) に基づいた。

(2) 荷重条件

a. 異常着床時

荷重条件を別紙 5-1 図に示す。

(i) 慣性力

貯蔵架台への異常着床時に発生する加速度として、別紙 5-1 図に示すとおり、金属キャスク本体の底部が貯蔵架台へ衝突する加速度が 3G (Doc.No.MA035A-RC-A03 (Hitz-B52 型の異常事象時の評価について) 参照) となるよう入力し、その加速度による自重の慣性力を考慮する。

(ii) 圧力荷重

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

(iii) 機械的荷重

貯蔵架台への異常着床時に発生する加速度による内部収納物、中性子遮蔽材（蓋部、側部、底部）の慣性力を機械的荷重として考慮する。また、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を機械的荷重として考慮する。

(iv) 熱荷重

除熱解析結果から得られる Hitz-B52 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。

(3) 境界条件

a. 異常着床時

境界条件を別紙 5-2 図に示す。

異常着床時には、Hitz-B52 型と貯蔵架台の衝突面であるキャスク本体の底面の変位を拘束する。

(4) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-1311.1、MCD-1312、MCD-1318.1 及び MCD-1321.1 に示される供用状態 B の設計基準に基づき以下のとおりとする。

a. 一次蓋、胴及び底板（シール部除く）

一次蓋 、胴及び底板 に発生する応力強さが以下を満足すること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

P_L : 一次局部膜応力強さ

$P_L + P_b$: 一次膜+一次曲げ応力強さ

$P_L + P_b + Q$: 一次+二次応力強さ

S_m : 設計温度(一次蓋 120°C、胴 125°C、底板 150°C)における設計応力強さ

b. 胴シール部及び一次蓋シール部

胴シール部 及び一次蓋シール部 に発生する応力強さが以下を満足すること。

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力強さ

$P_L + P_b$: 一次膜+一次曲げ応力強さ

$P_L + P_b + Q$: 一次+二次応力強さ

S_y : 設計温度(一次蓋 120°C、胴 125°C)における設計降伏点

c. 一次蓋ボルト

一次蓋ボルト に発生する各応力が以下を満足すること。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

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

ここで、

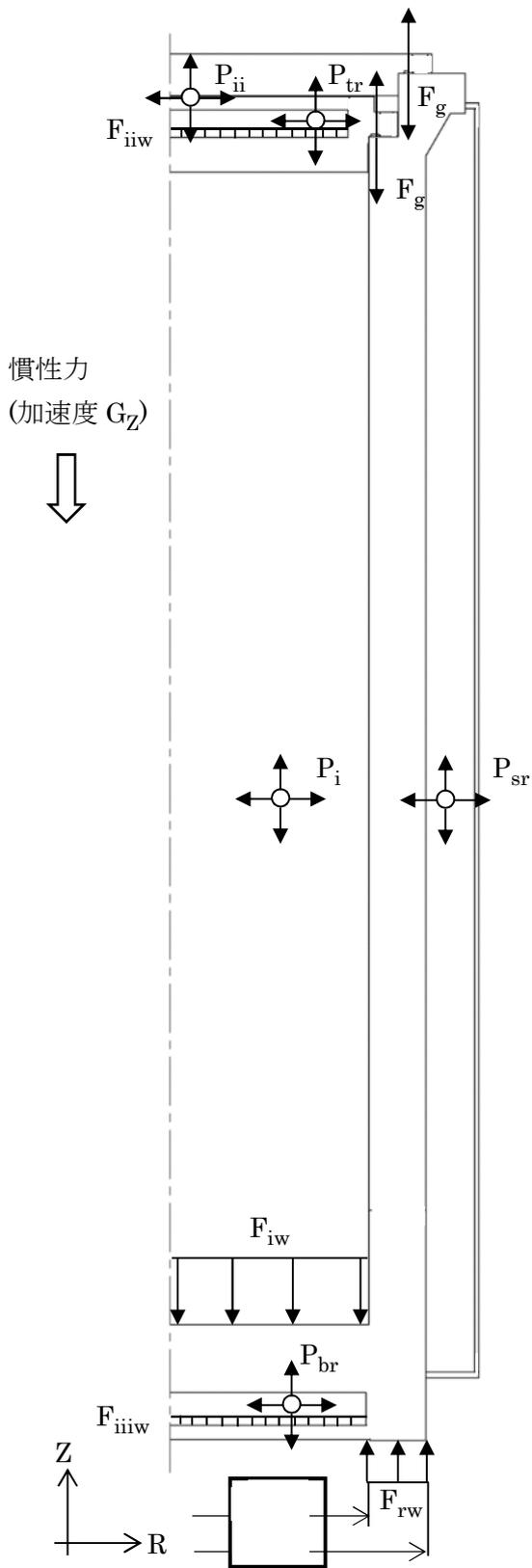
S_m : 設計温度 (一次蓋ボルト 100°C) における設計応力強さ

3. 解析結果

密封容器 Hitz-B52 型の異常事象時構造解析結果を別紙 5-1 表に示す。また、応力コ
ンター図を別紙 5-3 図及び別紙 5-4 図に、変形図を別紙 5-5 図及び別紙 5-6 図に示す。

別紙 5-1 表に示すとおり、Hitz-B52 型の密封容器に発生する応力は、設計基準値を満足することを確認した。

3

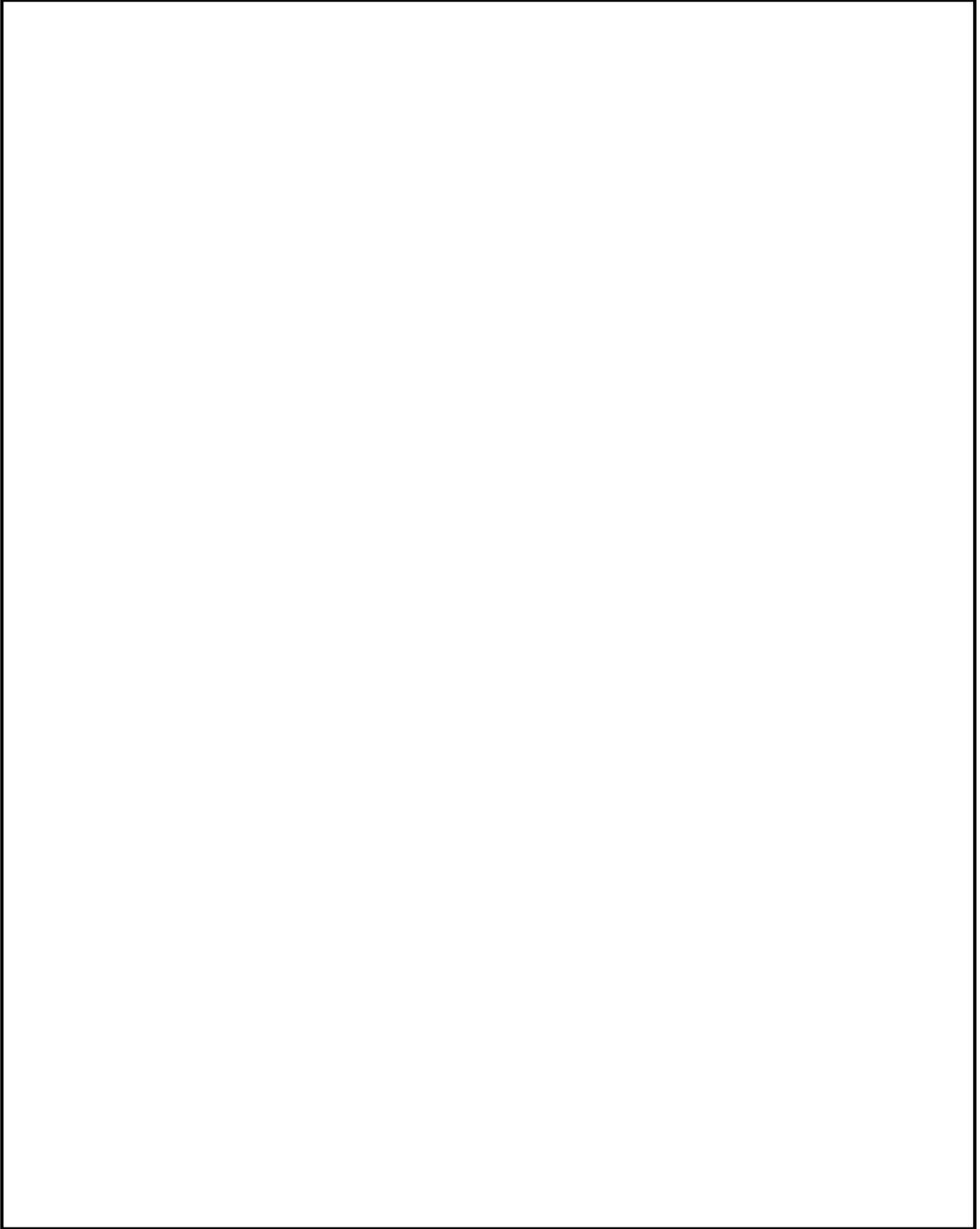


別紙 5-1 図 異常着床時の荷重条件

慣性加速度(Z 方向)	$G_z = -29.50 \text{ [m/s}^2\text{]}$
胴内内圧	$P_i = -0.101325 \text{ [MPa G]}$
一次蓋-二次蓋間圧力	$P_{ii} =$ <input type="text"/>
側部中性子遮蔽材部圧力	$P_{sr} =$ <input type="text"/>
蓋部中性子遮蔽材部圧力	$P_{tr} =$ <input type="text"/>
底部中性子遮蔽材部圧力	$P_{br} =$ <input type="text"/>
ガスケット反力(等分布荷重)	$F_g =$ <input type="text"/>
内部収納物慣性力(等分布荷重)	$F_{iw} =$ <input type="text"/>
蓋部中性子遮蔽材慣性力(等分布荷重)	$F_{iww} =$ <input type="text"/>
底部中性子遮蔽材慣性力(等分布荷重)	$F_{iiww} =$ <input type="text"/>
支持面反力(等分布荷重)	$F_{rw} =$ <input type="text"/>
熱荷重	温度分布：貯蔵時（基準温度 20℃）

別紙 5-4

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 5-2 図 異常着床時の境界条件

別紙 5-5

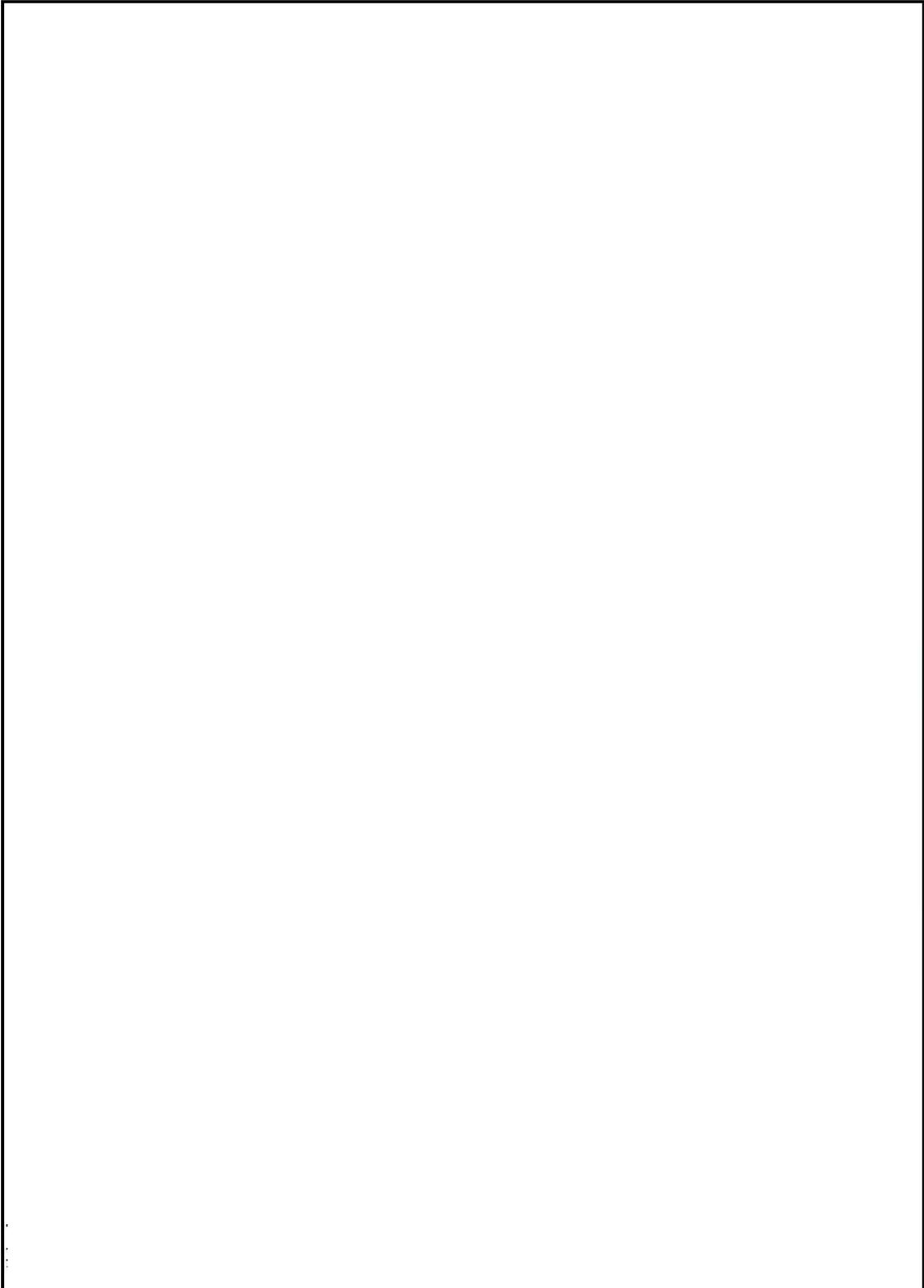
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 5-1 表 密封容器の構造強度評価（異常着床時：供用状態 B）

（構造解析コードによる評価結果）

評価*1 位置	項目	応力の種類	評価結果 (MPa)	設計基準値 (MPa)
①	一次蓋中央部の 応力強さ	P_m	2	137
		$P_L + P_b$	14	205
		$P_L + P_b + Q$	59	411
②	一次蓋端部の 応力強さ	P_L	4	205
		$P_L + P_b$	11	205
		$P_L + P_b + Q$	40	411
③	一次蓋ボルトの 応力	平均引張応力	220	568
		平均引張応力+曲げ応力	362	852
④	胴シール部(一次蓋) の応力強さ	P_m	29	161
		$P_L + P_b$	46	161
		$P_L + P_b + Q$	50	161
⑤	胴上部の応力強さ	P_L	6	186
		$P_L + P_b$	15	186
		$P_L + P_b + Q$	17	372
⑥	胴中央部の応力強さ	P_m	5	124
		$P_L + P_b$	6	186
		$P_L + P_b + Q$	12	372
⑦	胴下部の応力強さ	P_L	2	183
		$P_L + P_b$	5	183
		$P_L + P_b + Q$	44	366
⑧	底板中央部の 応力強さ	P_m	1	122
		$P_L + P_b$	1	183
		$P_L + P_b + Q$	33	366
⑨	底板端部の応力強さ	P_L	3	183
		$P_L + P_b$	3	183
		$P_L + P_b + Q$	28	366
⑩	一次蓋シール部の 応力強さ	P_m	30	162
		$P_L + P_b$	55	162
		$P_L + P_b + Q$	58	162

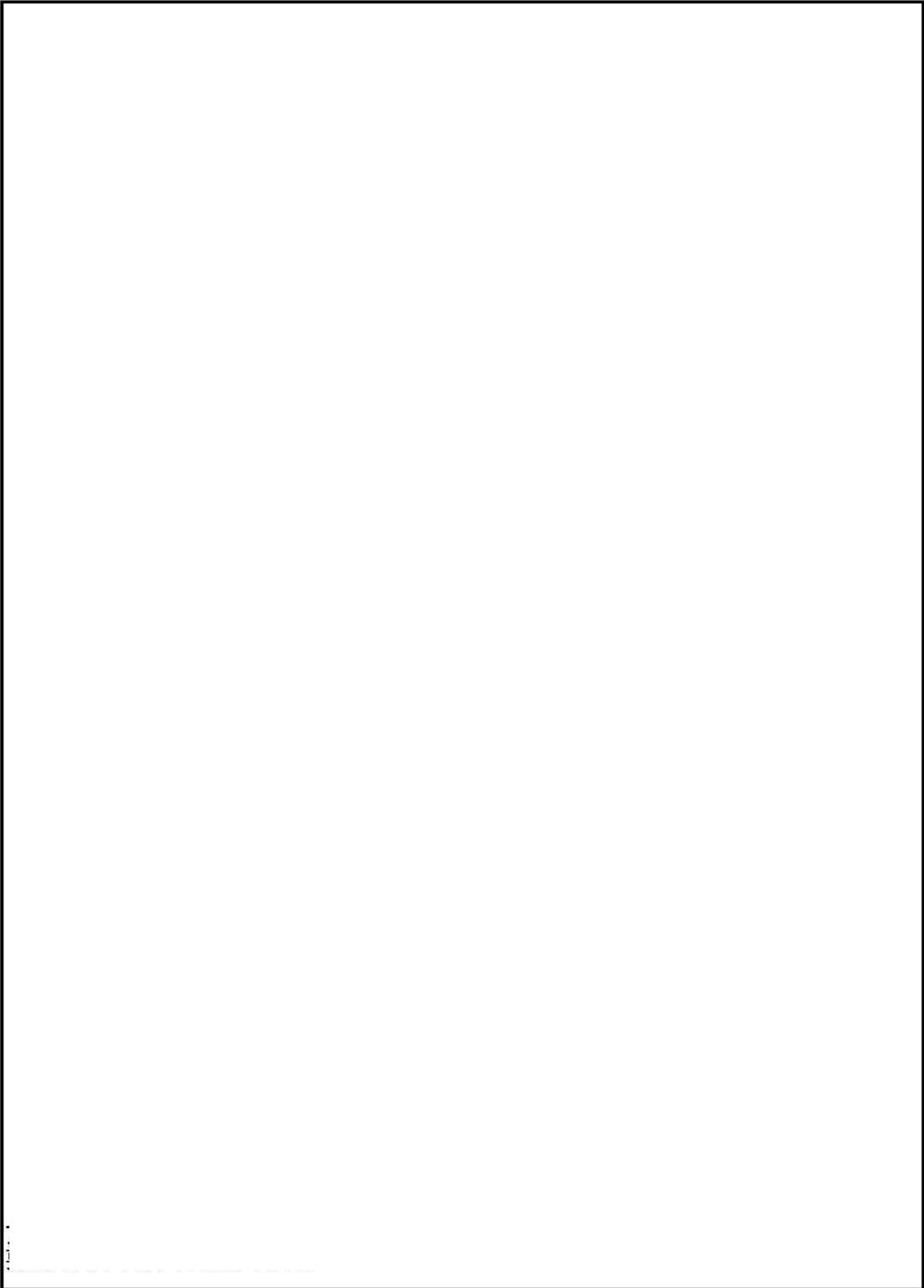
注記*1：応力評価位置は本文図 3 参照。



別紙 5-3 図 応力コンター図 (一次応力、トレスカ応力)

別紙 5-7

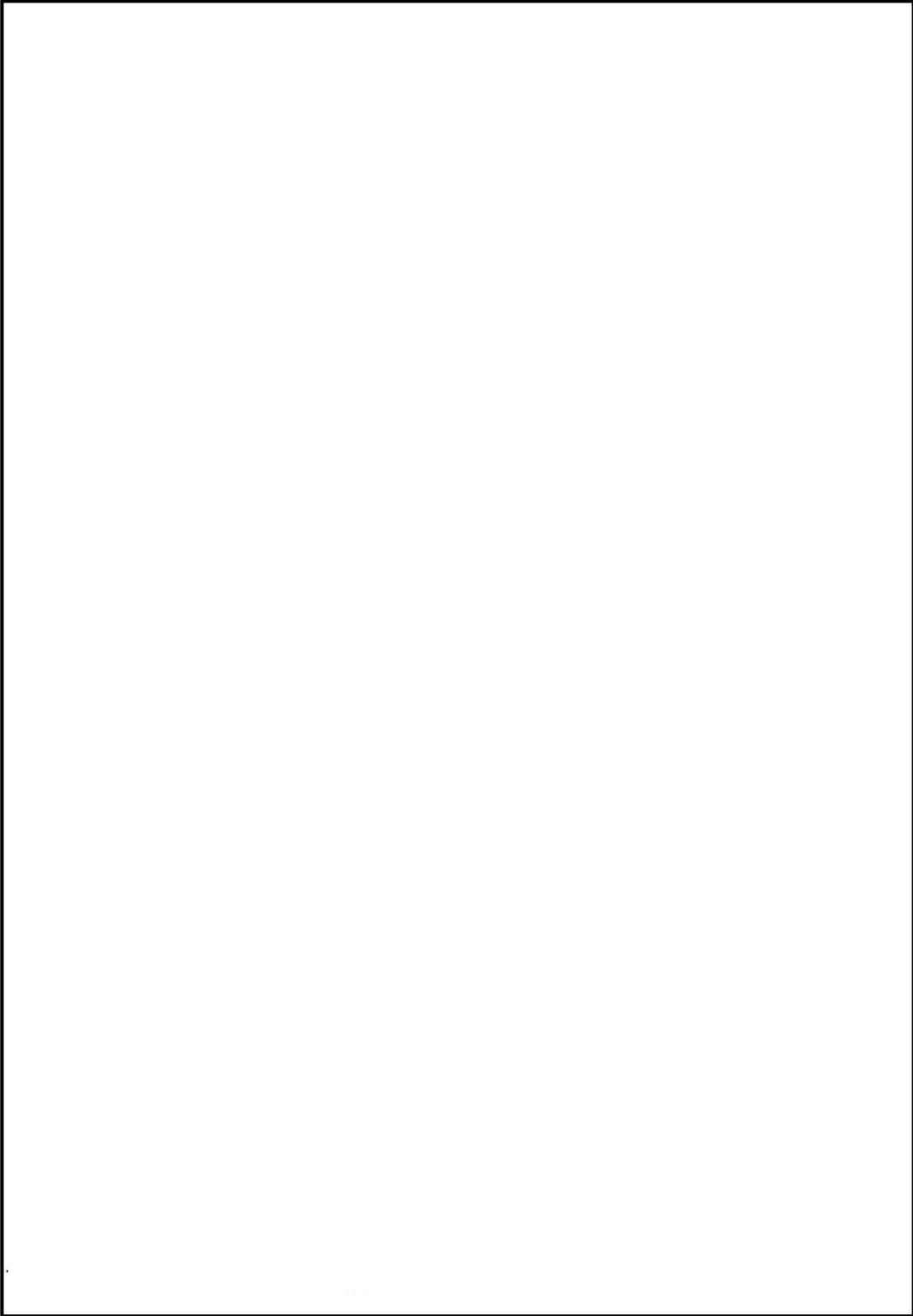
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 5-4 図 応力コンター図（一次+二次応力、トレスカ応力）

別紙 5-8

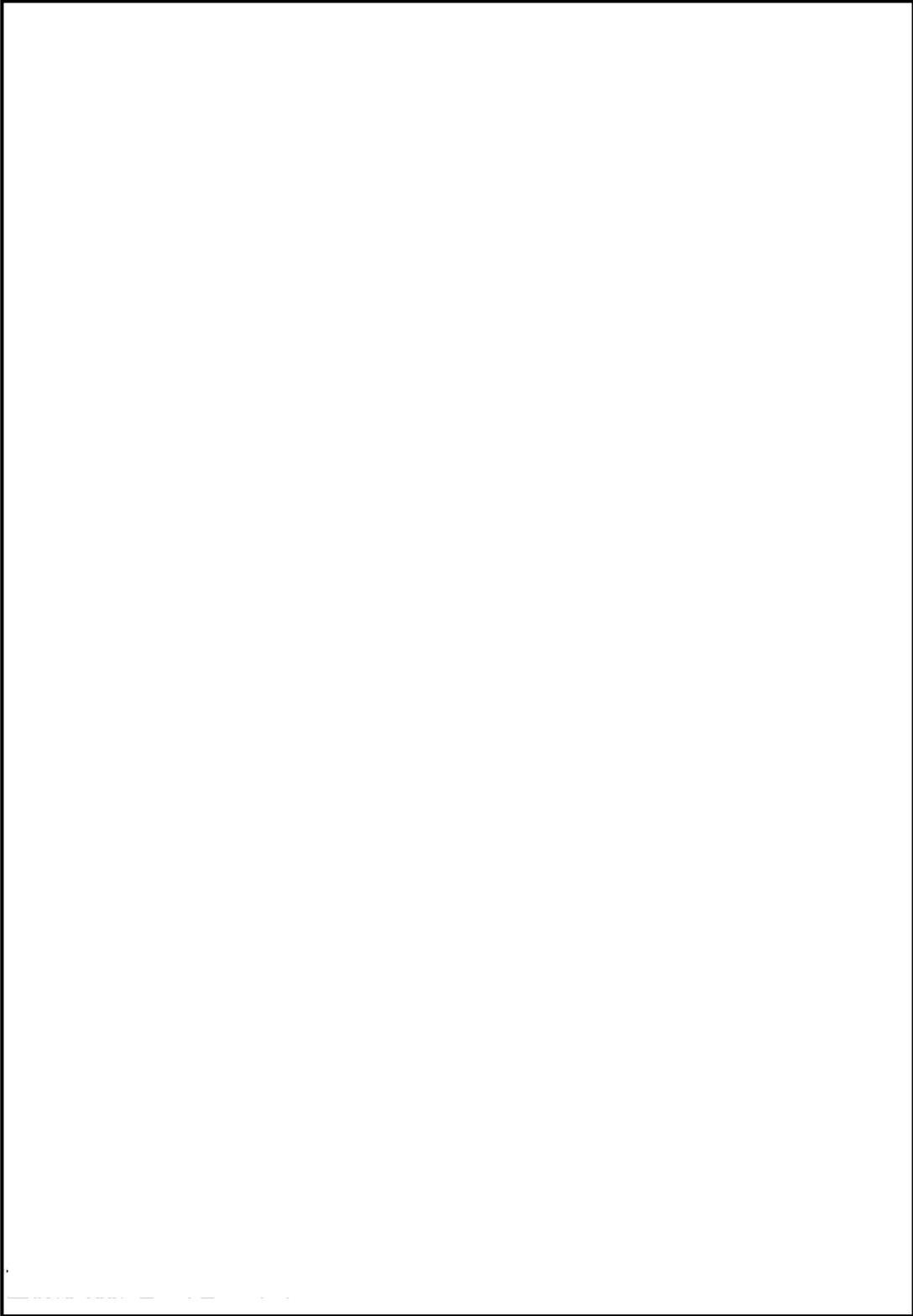
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 5-5 図 変形図 (一次応力)

別紙 5-9

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 5-6 図 変形図 (一次+二次応力)

別紙 5-10

内は商業機密のため、非公開とします。

トラニオンボルトの構造強度解析条件及び評価について

1. 概要

Hitz-B52 型の垂直吊上時及び貯蔵中の地震時におけるトラニオンボルトの強度解析条件及び評価を示す。

2. トラニオンの構造

Hitz-B52 型の構造は別紙 3 の 2. に示す通りである。構造図を別紙 6-1 図に示す。各々のトラニオンは  のトラニオンボルトによってキャスク本体に取り付けられている。

3. 上部トラニオンボルトの強度評価

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型の垂直吊上時における上部トラニオンの評価は、応力評価式により行う。上部トラニオンの解析モデルを別紙 6-2 図に、トラニオンボルトの解析モデルを別紙 6-4 図に示す。

(2) 荷重条件

Hitz-B52 型の垂直吊上時の質量は、119.5 トンである。垂直吊上時における評価は、1 対の上部トラニオン (90° - 270° 側) を用いて行う。また、垂直吊上時に発生する加速度として、鉛直方向 3G を考慮する。

(3) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-3321.2 に示される供用状態 A(通常輸送時および吊上げ時)の設計基準に基づき以下のとおりとする。

$$(\text{吊上げ荷重及び初期締付力により生じる引張応力}) \leq S_y$$

ここで、

S_y : トラニオンの設計温度(125°C)(※1)における設計降伏点 = 842 MPa

※1 : 貯蔵時の除熱解析結果に基づき設定した。

(4) 構造強度評価

a. 上部トラニオンボルトに作用する最大引張荷重

垂直吊上時に上部トラニオンボルトに作用する荷重のうち、最大引張荷重はトラニオンボルト(9)及び(10)に作用する。この時ボルト(9)の荷重 f_9 (N) は、トラニオン中立軸まわりのモーメントのつり合いより次式で計算する。

$$f_9 = \frac{F_m l y_9}{2\{y_c(y_7 + y_8 + y_9) + (y_7^2 + y_8^2 + y_9^2)\}}$$

ここで、

F_m : 上部トラニオン 1 個に作用する荷重 = 1.76×10^6 N(※2)

l : モーメントアーム = 378 mm

y_i : トラニオン中心軸から各ボルトまでの距離

y_c : トラニオン中心軸から押込側の重心までの距離

※2 : 別紙 3-8 別紙 3-2 表より

したがって、

$$f_9 = 7.28 \times 10^5 \text{ N}$$

b. 上部トラニオンボルトに発生する最大引張応力

別紙 6-2 図に示す上部トラニオンボルト(9)の断面に発生する最大の引張応力 σ_9 (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma_9 = \phi_s \frac{f_9}{A_s}$$

ここで、

f_9 : トラニオンボルト(9)に作用する荷重

A_s : トラニオンボルトの有効断面積

ϕ_s : 内力係数

※3 : 別紙 6-7 5.項に示すとおり

したがって、

$$\sigma_9 = 136 \text{ MPa}$$

- c. 上部トラニオンボルトに付加される初期締付応力
各トラニオンボルトの初期締付応力 σ_h (MPa)は、次式で計算する。

$$\sigma_h = \frac{F_h}{A_s}$$

ここで、

F_h : 初期締付軸力の最大値

A_s : トラニオンボルトの有効断面積

※4 : 別紙 6-7 6.項に示すとおり

したがって、

$$\sigma_h = 328 \text{ MPa}$$

- d. 上部トラニオンボルトに発生する引張応力強さ
上部トラニオンボルトに発生する最大引張応力 σ_g (MPa)と初期締付応力 σ_h (MPa)の合成による引張応力強さ σ (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma = \sigma_g + \sigma_h$$

ここで、

σ_g : 前記 b 項と同様

σ_h : 前記 c 項と同様

したがって、

$$\sigma = 464 \text{ MPa}$$

- e. 計算条件及び計算結果

上部トラニオンボルトに発生する応力の計算条件と計算結果を別紙 6-1 表に示す。

最大引張応力と初期締付応力の合成による応力強さは設計基準を満足している。

4. 下部トラニオンボルトの強度評価

(1) 解析モデル

貯蔵中に地震力が作用する場合の下部トラニオンボルトに発生する応力は、応力評価式を用いて求める。

下部トラニオンの解析モデルを別紙 6-3 図に、トラニオンボルトの解析モデルを別紙 6-4 図に示す。

(2) 荷重条件

下部トラニオンボルトの構造強度評価は、たて置き姿勢で貯蔵されている Hitz-B52 型に対して、地震によって発生する加速度として以下に示す設計震度を考慮して行う。

- ・ 水平方向設計震度：1.4G
- ・ 鉛直方向設計震度：0.87G

(3) 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-3323 に示される供用状態 D の設計基準に基づき以下のとおりとする。トラニオンにはシアディスクが取り付けられており、トラニオンボルトにはせん断応力は作用しないため、引張応力についてのみ評価することとする。

$$(\text{地震荷重及び初期締付力により生じる引張応力}) \leq 1.5f_t = 480 \text{ MPa}$$

ここで、

$$f_t : \text{許容引張応力} = F / 2$$

$$F : 1.2S_y \text{ と } 0.7S_u \text{ の小さい方の値}$$

$$S_y : \text{トラニオンの設計温度}(125^\circ\text{C})(\text{※5})\text{における設計降伏点} = 842 \text{ MPa}$$

$$S_u : \text{トラニオンの設計温度}(125^\circ\text{C})(\text{※5})\text{における設計引張強さ} = 915 \text{ MPa}$$

※5：貯蔵時の除熱解析結果に基づき設定した。

(4) 構造強度評価

a. 下部トラニオンボルトに作用する最大引張荷重

地震時に下部トラニオンボルトに作用する最大引張荷重はボルト(3)及びボルト(4)に作用する。この時ボルト(3)の荷重 f_3 (N) は、次式で計算する。

$$f_3 = \frac{F_m l y_3}{2\{y_c(y_1 + y_2 + y_3) + (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2)\}}$$

ここで、

F_m : 下部トラニオン 1 個に作用する荷重 = 1.34×10^6 N(※6)

l : モーメントアーム = 318 mm

y_1 : トラニオン中心軸から各ボルトまでの距離

y_c : トラニオン中心軸から押込側の重心までの距離

※6 : 別紙 3-9 別紙 3-3 表より

したがって、

$$f_3 = 4.67 \times 10^5 \text{ N}$$

b. 下部トラニオンボルトに発生する最大引張応力

別紙 6-3 図に示す下部トラニオンボルト(3)の断面に発生する最大の引張応力 σ_3 (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma_3 = \phi_s \frac{f_3}{A_s}$$

ここで、

f_3 : トラニオンボルトに作用する荷重

A_s : トラニオンボルトの有効断面積

ϕ_s : 内力係数

※7 : 別紙 6-7 5.項に示すとおり

したがって、

$$\sigma_3 = 88 \text{ MPa}$$

- c. 下部トラニオンボルトに付加される初期締付応力

下部トラニオンボルトの初期締付応力 σ_h (MPa)は、次式で計算する。

$$\sigma_h = \frac{F_h}{A_s}$$

ここで、

F_h : 初期締付軸力の最大値

A_s : トラニオンボルトの有効断面積

※8 : 別紙 6-7 6.項に示すとおり

したがって、

$$\sigma_h = 328 \text{ MPa}$$

- d. 下部トラニオンボルトに発生する引張応力強さ

下部トラニオンボルトに発生する最大引張応力 σ_3 (MPa)と初期締付応力 σ_h (MPa)の合成による引張応力強さ σ (MPa) は、次式で計算する。

$$\sigma = \sigma_3 + \sigma_h$$

ここで、

σ_3 : 前記 b 項と同様

σ_h : 前記 c 項と同様

したがって、

$$\sigma = 416 \text{ MPa}$$

- e. 計算条件及び計算結果

下部トラニオンボルトに発生する応力の計算条件と計算結果を別紙 6-2 表に示す。

最大引張応力と初期締付応力の合成による応力強さは設計基準を満足している。

5. 内力係数

トラニオンボルトの内力係数 ϕ_s は機械工学便覧より引張ばね定数 K_t と圧縮ばね定数 K_c を用いて次式で計算する。

$$\phi_s = \frac{t}{t + c}$$

ここで、

K_t : 引張ばね定数

K_c : 圧縮ばね定数

※9 : 文献(1)よりトラニオンボルトの寸法及び縦弾性係数から計算

※10 : 文献(1)よりトラニオンの寸法及び縦弾性係数から計算

したがって、

$$\phi_s = \text{$$

6. 初期締付軸力の最大値

初期締付軸力の最大値 F_h は文献(1)より、初期締付トルク目標値 T_{fM} から次式で計算する。

$$F_h = \frac{(1 + \text{} / 100)}{\text{min m}} f_M$$

ここで、

T_{fM} : 初期締付トルク目標値

K_{\min} : トルク係数の最小値

d_m : トラニオンボルトの呼び径

q : トルクレンチの最大誤差(%)

※11 : 標準 T 系列(一般用途)における、工具メーカーの標準締付トルク

※12 : ねじの寸法及び、ねじ面とナット座面の摩擦係数から計算

※13 : 工具メーカーのカタログに記載されている誤差の最大値

したがって、

$$F_h = \text{$$

別紙 6-1 表 垂直吊上時に上部トラニオンボルトに発生する応力計算条件及び計算結果

評価対象	荷重 F_m (N)	モーメントアーム l (mm)	中立軸からボルトまでの距離 y_1 (mm)	中立軸から押込側重心 までの距離 y_c (mm)	ボルト断面積 A_s (mm ²)
上部トラニオンボルト (9)	1.76×10^6	378	y_7 : <input type="text"/> y_8 : <input type="text"/> y_9 : <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

評価対象	吊上荷重による引張応力 σ_9 (MPa)	最大初期締付応力 σ_h (MPa)	応力強さ σ (MPa)	設計基準値 S_y (MPa)
上部トラニオンボルト (9)	136	328	464	842

内は商業機密のため、非公開とします。

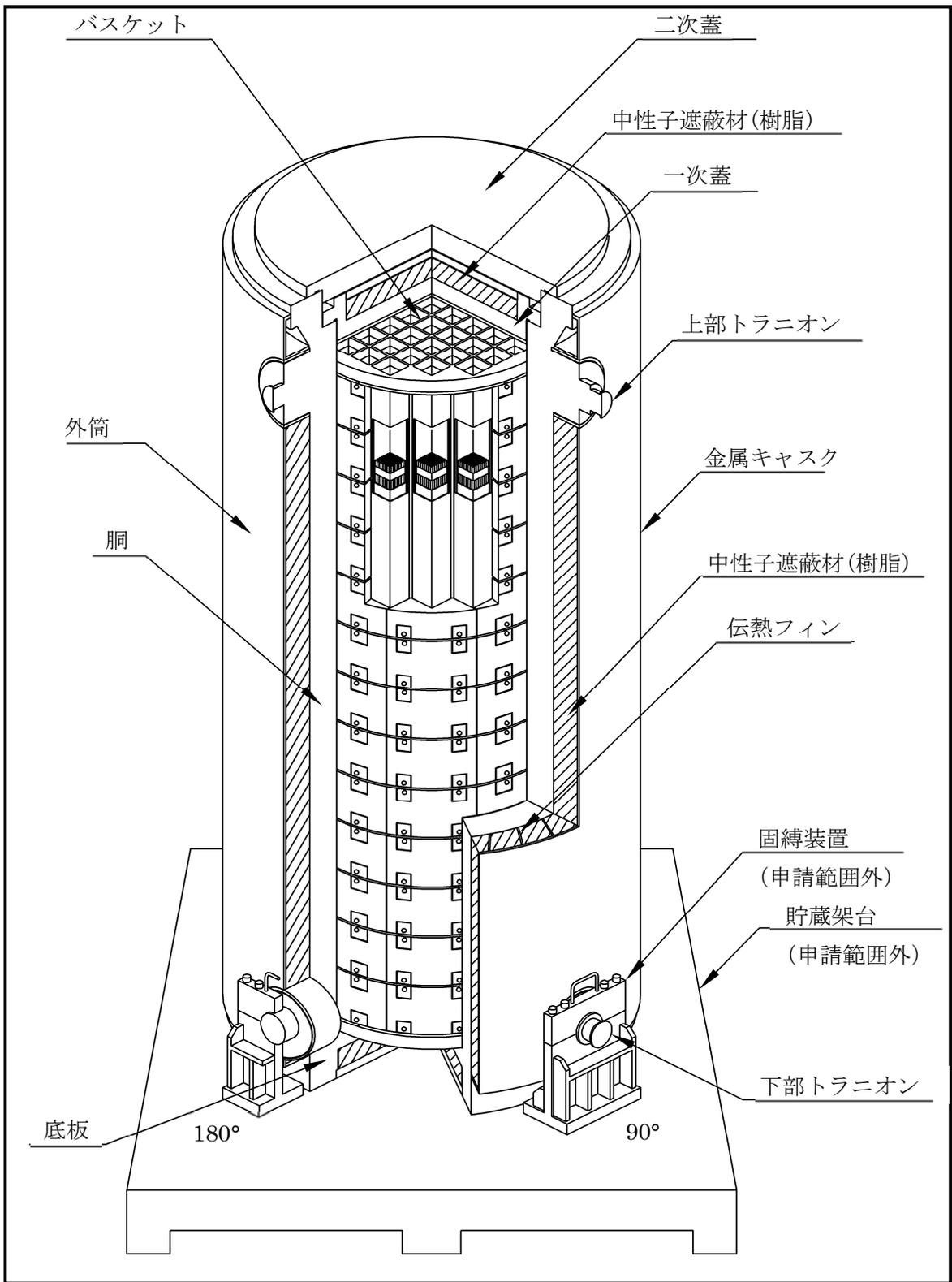
別紙 6-2 表 地震時に下部トラニオンボルトに発生する応力計算条件及び計算結果

評価対象	荷重 F_m (N)	モーメントアーム l (mm)	中立軸からボルトまでの距離 y_1 (mm)	中立軸から押込側重心 までの距離 y_c (mm)	ボルト断面積 A_s (mm ²)
下部トラニオンボルト (3)	1.34×10^6	318	y_1 : <input type="text"/> y_2 : <input type="text"/> y_3 : <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

評価対象	地震荷重による引張応力 σ_3 (MPa)	最大初期締付応力 σ_h (MPa)	応力強さ σ (MPa)	設計基準値 $1.5 f_t$ (MPa)
下部トラニオンボルト (3)	88	328	416	480

別紙 6-9

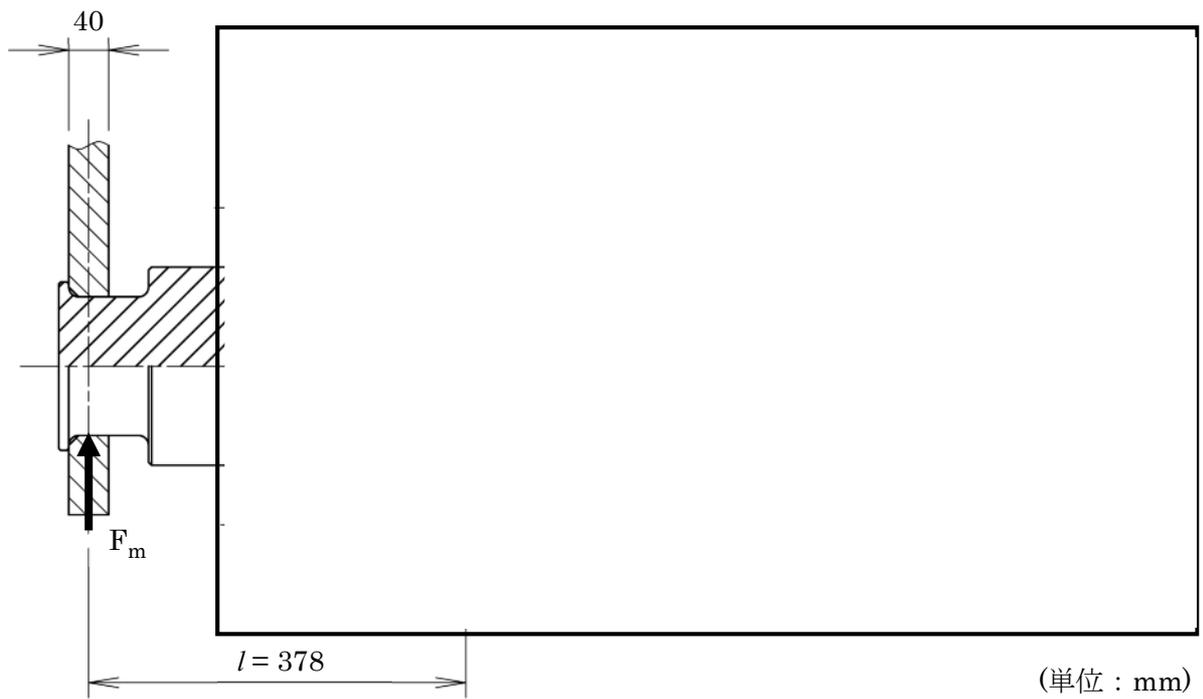
内は商業機密のため、非公開とします。



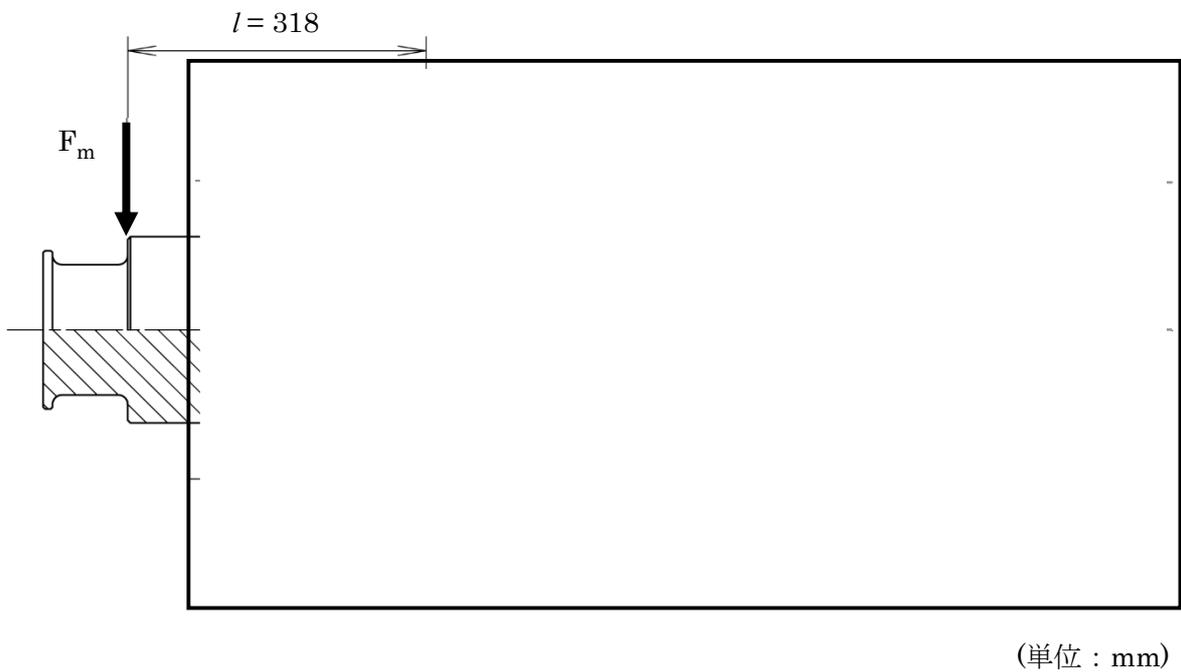
別紙 6-1 図 Hitz-B52 型構造図

別紙 6-10

 内は商業機密のため、一部非公開とします。



別紙 6-2 図 上部トラニオンの構造と解析モデル(90° - 270° 側)



別紙 6-3 図 下部トラニオンの構造と解析モデル(90° - 270° 側)



(単位 : mm)

別紙 6-4 図 トラニオンボルト

7. 参考文献

- (1) 山本晃、株式会社養賢堂、「ねじ締結の原理と設計」 (2014 年)

Doc. No. MA035A-RC-A02-3 Rev.2

2020年11月25日

日立造船株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52型）

質問管理票に対する回答（構造関連）（その3）

番号	項目	質問日	コメント内容
42	構造設計	2018/10/19	<p>補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料 (Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0) (平成 30 年 10 月 19 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> 別紙 3-1 3.上部トラニオンの構造強度評価 (2)荷重条件において金属キャスクの質量が「119.1トン」となっているため申請書本文との整合性を確認して統一した記載にすること。

(回答) -2019/3/6 済

トラニオンの構造強度評価における荷重条件において、整合性をとるため本文表 3 に示す質量に見直しを行う。別紙の見直し箇所を以下に示す。

<別紙 3-1 頁>

1. 上部トラニオンの構造強度評価

(1) 解析モデル

Hitz-B52 型の垂直吊上時における上部トラニオンの評価は、応力評価式により行う。解析モデルを別紙 3-2 図に示す。

(2) 荷重条件

Hitz-B52 型の垂直吊上時の質量は、119.5 トンである。垂直吊上時における評価は、1 対の上部トラニオン (90° -270° 側) を用いて行う。また、垂直吊上時に発生する加速度として、鉛直方向 3G を考慮する。

<別紙 3-1～別紙 3-2 頁>

(3) 構造強度評価

a. 上部トラニオンに作用する荷重

垂直吊上時に上部トラニオンに作用する荷重 F_m (N) は、次のとおりに求められる。

$$F_m = \frac{m_1 \cdot G_2}{n}$$

ここで、

F_m : 上部トラニオン 1 個に作用する荷重 (N)

- n : トラニオンの数 = 2 個
 m_1 : 吊上時における Hitz-B52 型の質量 = 1.195×10^5 kg
 G_2 : 鉛直方向加速度 = 3G
 G : 重力加速度 = 9.80665 m/s²

したがって、

$$F_m = \frac{1.195 \times 10^5 \times 3 \times 9.80665}{2}$$

$$= 1.76 \times 10^6 \text{ N}$$

<別紙 3-5 頁>

(4) 構造強度評価

a. 下部トラニオンに作用する荷重

地震時に下部トラニオンに作用する荷重と方向及び作用する位置を別紙 3-4 図に示す。別紙 3-4 図に示す回転中心まわりの回転モーメントの釣り合いより、下部トラニオンに作用する地震荷重は、次のとおり求められる。

$$F_m = \frac{m_2 \cdot (G_1 \cdot h_{CG} - G_2 \cdot a_g)}{a_1 + 2 \cdot \frac{a_2^2}{a_1}}$$

ここで、

- F_m : 下部トラニオン 1 個に作用する地震荷重 (N)
 m_2 : 貯蔵時の Hitz-B52 型の質量 = 1.176×10^5 kg
 G_1 : 水平方向加速度 = $C_H \cdot G$
 G_2 : 鉛直方向加速度 = $(1 - C_V) \cdot G$
 C_H : 水平方向設計震度 = 1.4
 C_V : 鉛直方向設計震度 = 0.87
 G : 重力加速度 = 9.80665 m/s²
 h_{CG} : Hitz-B52 型の底面から重心位置までの高さ = 2719 mm
 a_1 : 支点 O から固縛装置㉔のトラニオンへの荷重作用点までの距離
 = 2294 mm
 a_2 : 支点 O から固縛装置㉕のトラニオン固縛金具中心までの距離
 = 999 mm
 a_g : 支点 O から金属キャスク中心までの距離 = 999 mm

したがって、

$$F_m = 1.34 \times 10^6 \text{ N}$$

<別紙 3-8 頁>

別紙 3-2 表 垂直吊上時に上部トラニオンに発生する応力計算条件及び計算結果

評価断面	荷重： F_m (N)	モーメント アーム： X (mm)	中立軸から の距離： C (mm)	トラニオン 断面積： A (mm^2)	トラニオン断面 二次モーメント ： I (mm^4)
①	1.76×10^6	60	70		
②	1.76×10^6	150	100		
③	1.76×10^6	378	205		

評価断面	曲げ応力	せん断応力	垂直応力とせん断応力の 合成による応力強さ	
	σ_b (MPa)	τ (MPa)	σ_T (MPa)	設計基準値 (MPa)
①	<u>392</u>	<u>115</u>	<u>440</u>	653
②	<u>492</u>	<u>129</u>	<u>541</u>	653
③	<u>142</u>	<u>25</u>	<u>149</u>	653

<別紙 3-9 頁>

別紙 3-3 表 貯蔵中の地震時に下部トラニオンに発生する応力計算条件及び計算結果

評価断面	荷重： F_m (N)	モーメント アーム： X (mm)	中立軸から の距離： C (mm)	トラニオン 断面積： A (mm^2)	トラニオン断面 二次モーメント ： I (mm^4)
④	1.34×10^6	90	100		
⑤	1.34×10^6	318	205		

評価断面	曲げ応力		せん断応力		垂直応力とせん断応力 の組合せ	
	σ_b (MPa)	設計基準値 (MPa)	τ (MPa)	設計基準値 (MPa)	σ_T (MPa)	設計基準値 (MPa)
④	225	591	98	341	<u>282</u>	591
⑤	<u>91</u>	591	<u>20</u>	341	<u>98</u>	591

番号	項目	質問日	コメント内容
43	構造設計	2018/10/19	<p>補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料 (Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0) (平成 30 年 10 月 19 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> 別紙 3-11 別紙 3-2 図「上部トラニオンの構造と解析モデル」において、「※1：吊上時の荷重作用点までの距離(モーメントアーム)が「60mm」と設定している根拠を説明すること。

(回答) -2019/2/20 済

トラニオンの設計においては垂直吊上時に使用する吊具のアーム幅を 40mm と設定し、設計及び評価を実施している。トラニオンに吊りアームを固定する条件において荷重作用点までの距離(モーメントアーム)が最も長くなるように、吊りアームがトラニオン端部に位置していると設定した。この時の荷重作用点を吊りアームの中心軸位置とし、モーメントアームを 60mm に設定した。

吊りアームを記載した概略図を図 43-1 に記す。

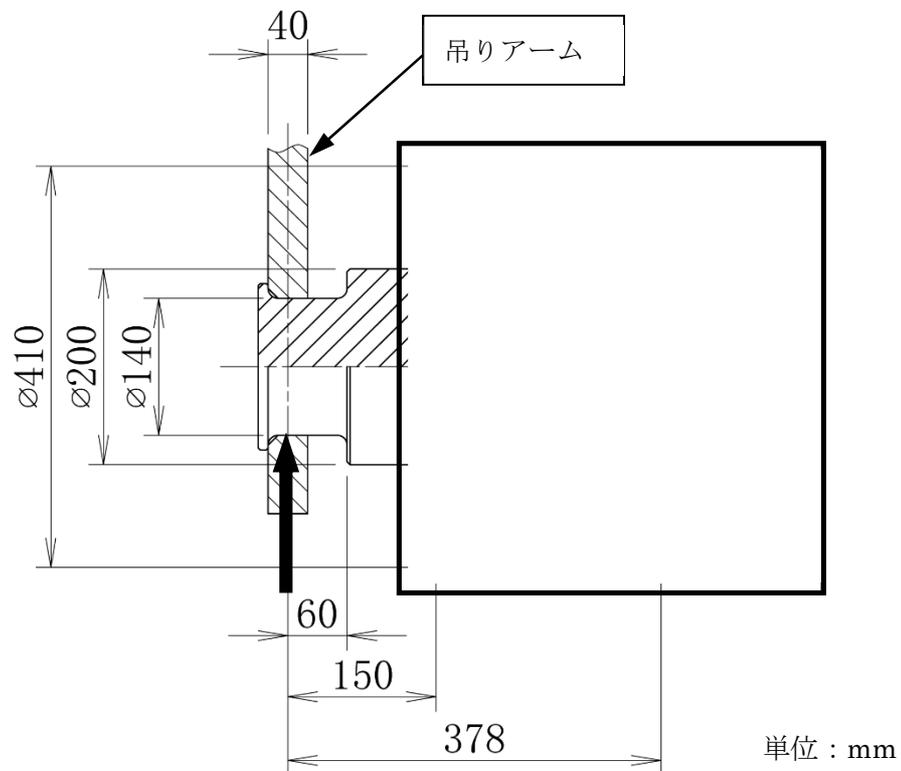


図 43-1 上部トラニオンの構造と解析モデル(吊上時)

番号	項目	質問日	コメント内容
44	構造設計	2018/10/19	<p>補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料 (Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0) (平成 30 年 10 月 19 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 別紙 3-5 a1 : 「固定金具中心」を「固定金具作用点」等に修正するとともに、別紙 3-11 別紙 3-3 図「下部トラニオンの構造と解析」の「※1 貯蔵時の荷重作用点までの距離(モーメントアーム)」と別紙 3-12 別紙 3-4 図「貯蔵中の地震時に下部トラニオンに作用する荷重」の「F_m」の記載位置の整合性がとれるように記載すること。

(回答) - 2019/2/20 済

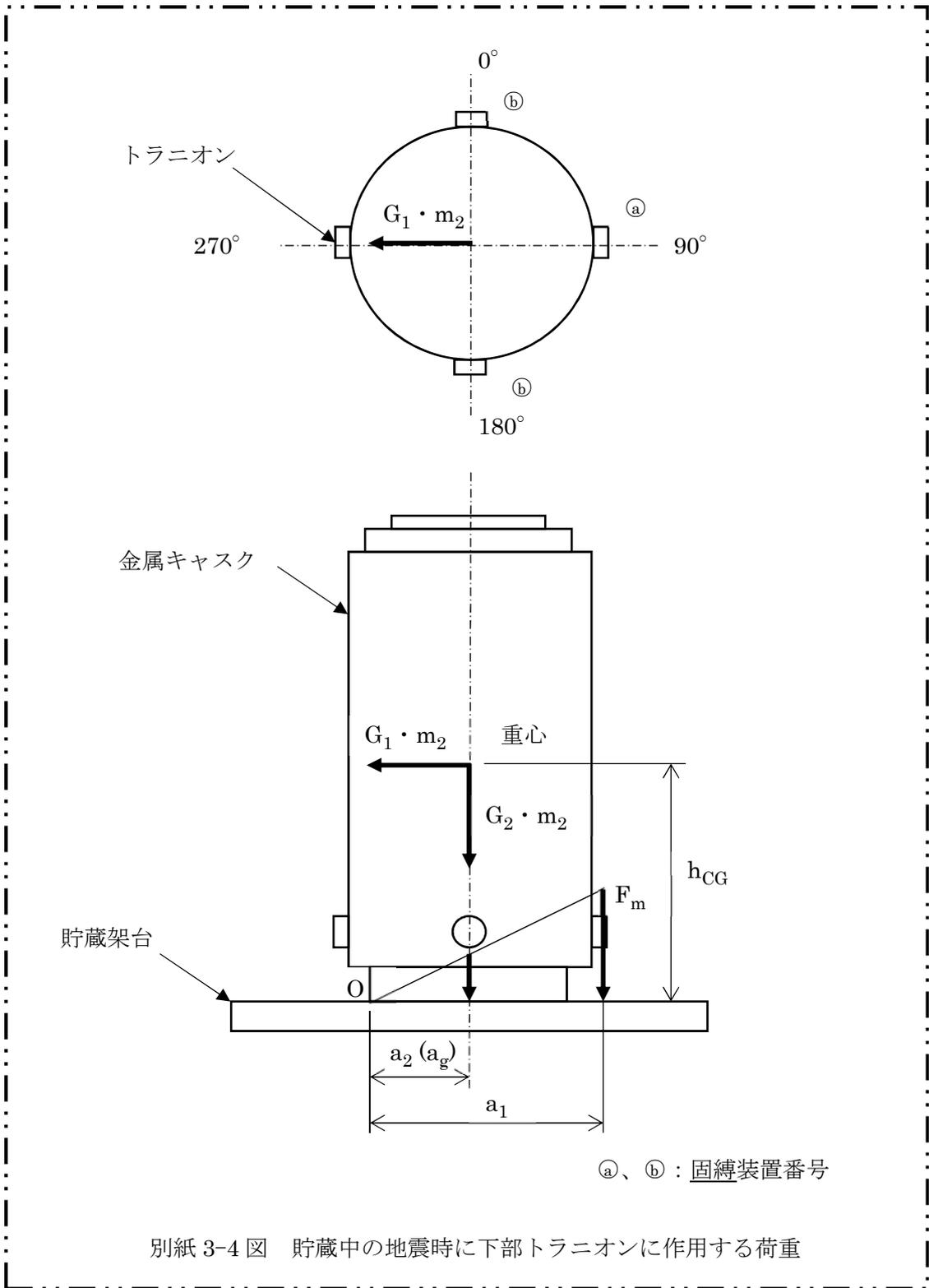
補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料(Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0)の別紙 3-5 について下記のとおり見直しを行う。

a₁ : 支点 O から固縛装置④のトラニオンへの荷重作用点までの距離 = 2294 mm

補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料(Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0)の別紙 3-12 別紙 3-4 図について下記のとおり見直しを行う。

- ・ 固縛装置④のトラニオンへ作用する荷重 F_m の位置を別紙 3-11 別紙 3-3 図に合わせて端部へ移動した。

訂正した図を次頁に示す。



別紙 3-4 図 貯蔵中の地震時に下部トラニオンに作用する荷重

番号	項目	質問日	コメント内容
45	構造設計	2018/10/19	<p>補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料 (Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0) (平成 30 年 10 月 19 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 別紙 3-11 別紙 3-3 図「下部トラニオンの構造と解析」の R 部の応力集中についての考え方を説明すること。

番号	項目	質問日	コメント内容
103	構造設計	2019/2/20	<p>使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請(Hitz-B52 型)質問管理表に対する回答(構造関連)(その 3) (Doc.No.MA035A-RC-A02-3_Rev.0) (平成 31 年 2 月 20 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ トラニオン R 部の評価については、R 部の曲率、応力集中係数及び許容繰り返し回数について具体的数値を示して考え方を説明すること。

(回答)

Hitz-B52 型キャスクにおいて、トラニオンの強度評価は金属キャスク構造規格に基づいて設計することとしており、直径が変わる箇所(R 部)への応力集中は疲労評価にて考慮している。トラニオンにはキャスクの熱膨張により生じる二次応力は影響しないことから、疲労評価においては一次応力から繰返しピーク応力強さを求めることとしており、R 部への応力集中による応力集中係数及び繰返しピーク応力強さから計算される許容繰り返し回数が実際の繰り返し回数に対して十分に大きいことを確認している。

図 45-1 に評価対象としているトラニオンの解析モデルを示す。

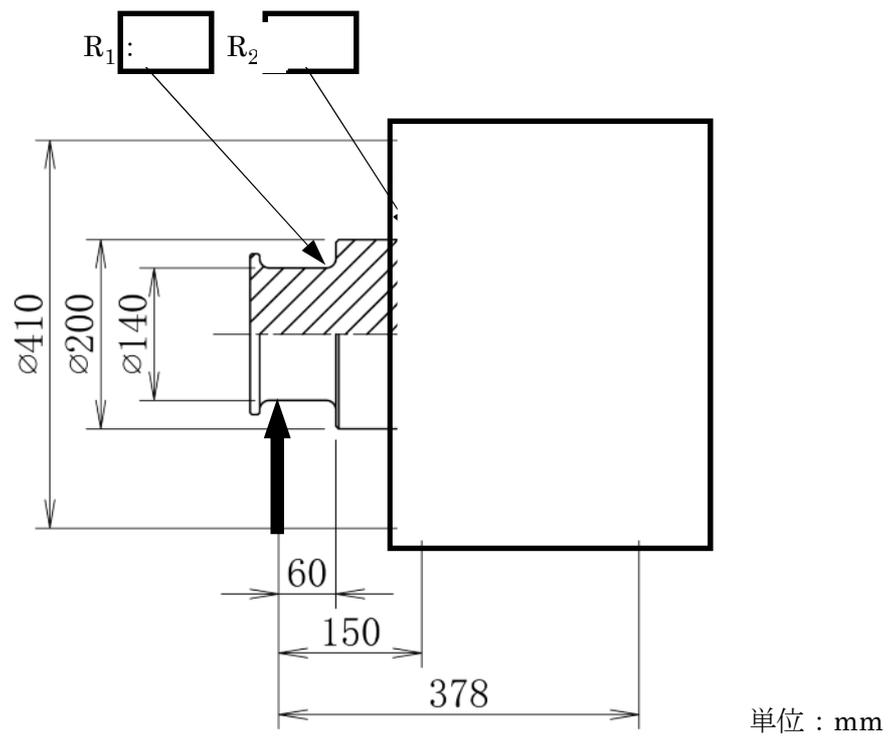


図 45-1 トラニオンの構造と解析モデル(90° -270° 側)

以下にトラニオンの疲労評価の計算を示す。

a. トラニオンに作用する荷重

トラニオンに作用する荷重 F は実際に作用する荷重を考慮して決定する。

$$F = \frac{Wag}{n}$$

ここで、

W : 垂直吊時にける Hitz-B52 型の重量 = 1.195×10^5 kg

a : 負荷係数 = 1.30^(※1)

g : 重力加速度 = 9.80665 m/s²

n : トラニオンの数 = 2

※1 : 厚生労働省告示第三百九十九号「クレーン構造規格」より作業係数($\phi=1.08$)と衝撃係数($\Psi=1.20$)の積として求めた 1.296 を丸めて 1.30 とした。

したがって、

$$F = 7.62 \times 10^5 \text{ N}$$

b. 各部の応力強さ

上部トラニオンの各 R 部に発生する応力強さ S はせん断応力 τ と曲げ応力 σ から求められる。

$$S = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$

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

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

ここで、

F : トラニオンに作用する荷重

A : トラニオン各部の断面積 $A_1 = \boxed{}$ $A_2 = \boxed{}$

M : トラニオン各部における曲げモーメント。荷重とモーメントアームの積として求める $M_1 = 7.62 \times 10^5 \times 60 = 45720000 \text{ N} \cdot \text{mm}$

$$M_2 = 7.62 \times 10^5 \times 150 = 114300000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

C : トラニオン各部の円筒-半径 $C_1 = 70\text{mm}$ 、 $C_2 = 100\text{mm}$

I : トラニオン各部の断面二次モーメント $I_1 = \boxed{}$ $I_2 = \boxed{}$

したがって、

$$S_1 = \boxed{}$$

$$S_2 = \boxed{}$$

c. 繰り返しピーク応力強さ

上部トラニオンの各 R 部に発生する繰り返しピーク応力強さ S_a は次式により求められる。

$$S_a = \frac{S}{2} \times K_t \times \frac{E_0}{E_t}$$

ここで、

S : 各 R 部の応力強さ $S_1 = \boxed{}$ $S_2 = \boxed{}$

E_0 : 基本縦弾性係数 = 207000 MPa

E_t : トラニオンの解析基準温度(125℃)^(※2)における縦弾性係数 = 189500 MPa

K_t : 応力集中係数 $K_{t1} = \boxed{}$ $K_{t2} = \boxed{}$

※2 : 貯蔵時の除熱解析結果に基づく

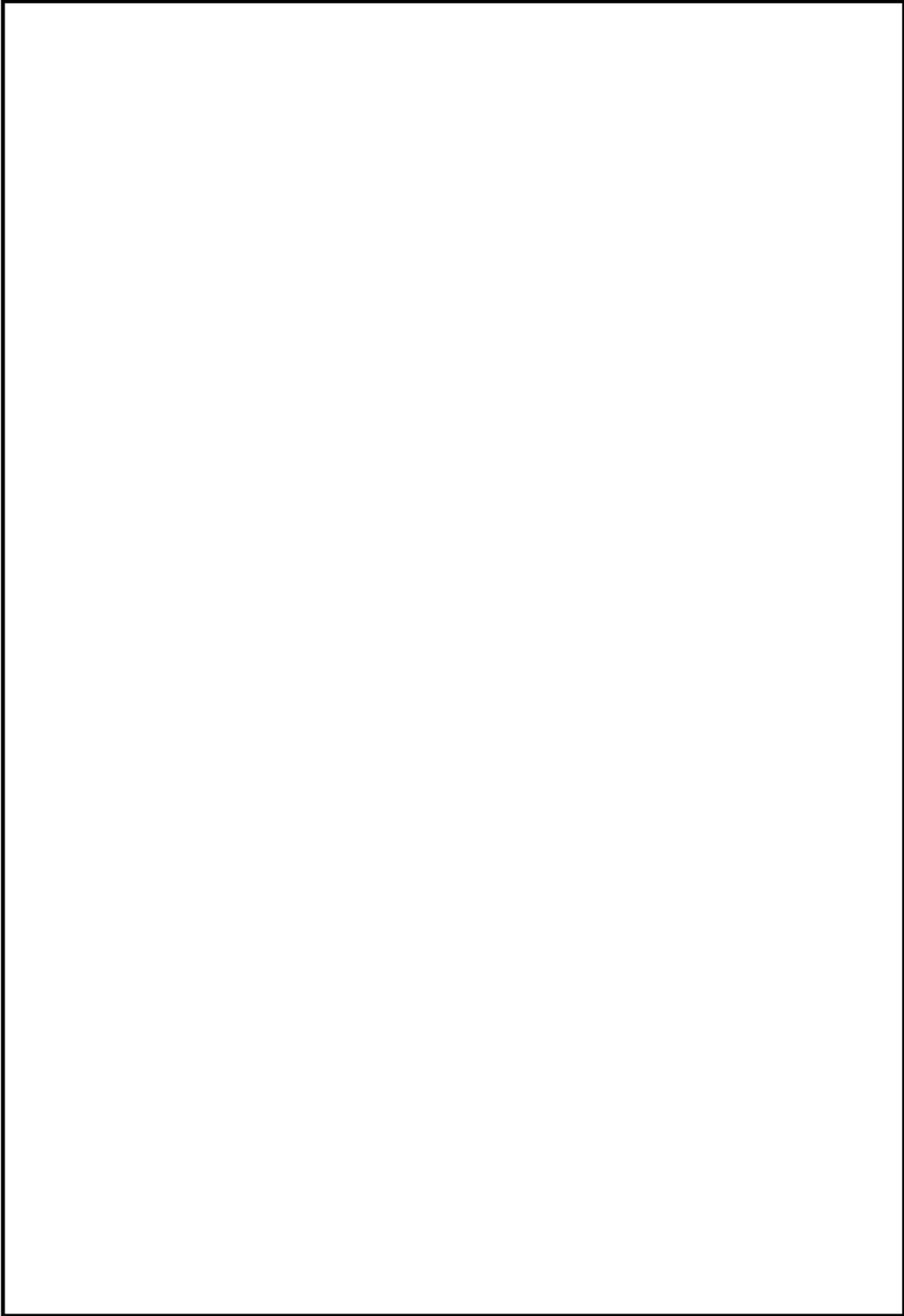
※3 : より

したがって、

$S_{a1} = \boxed{}$

$S_{a2} = \boxed{}$

2



d. 許容繰り返し回数

R₁部の許容繰り返し回数 N_{a1} は(※4)より

R₂部の許容繰り返し回数 N_{a2} は(※4)より

※4 :

△
2

e. 実際の繰り返し回数

トラニオンの実際の繰り返し回数は想定される輸送回数(10回)と吊上げ回数(20回)の積で求められる。

したがって実際の繰り返し回数は 2×10^2 回となり、許容繰り返し回数 N_{a1}、N_{a2} 共に十分余裕がある。

番号	項目	質問日	コメント内容
46	構造設計	2018/11/9	<p>【Hitz-B52 型のバスケットの構造健全性に係る説明資料】 (Doc.No.MA035A-RC-Z07 Rev.0) (平成 30 年 11 月 9 日 説明資料)</p> <p>9 月 26 日の【Hitz-B52 型のバスケット構造説明図】 (Doc.No.MA035A-RC-Z07 Rev.0) の補足資料とのことであるが、本資料の位置づけを明確にすること。また、資料の中で使用されている条件等の根拠を説明すること。</p>

(回答) - 2019/2/20 済

1. 本資料の位置付けについて

【Hitz-B52 型のバスケットの構造健全性に係る説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-Z07-1 Rev.0) の位置付けについて、当該資料は【Hitz-B52 型のバスケット構造説明図】(Doc.No.MA035A-RC-Z07 Rev.0) の補足資料としていたが、想定しうる最も厳しい評価条件として核分裂性輸送物に係る特別の試験条件を評価例に用いて説明しているため、当該資料は補足ではなく「参考」として取り扱うものとし、標題を「参考資料」に変更すると共に、概要で当該資料の位置付けを以下の通り説明する。

1. 概要

本書は、使用済燃料を幾何学的に配置し収納する Hitz-B52 型のバスケットについて、貯蔵時の構造健全性を説明する上で参考として、貯蔵時および輸送時の中で最も厳しい条件である核分裂性輸送物に係る特別の試験条件を想定し、構造健全性に係る成立性の確認を説明するものである。

この評価において、バスケットの伝熱部材であるアルミニウム合金は、構造強度部材ではないため質量の影響は考慮するが構造強度には寄与しないものとして扱うものと仮定する。

2. 条件等の根拠について

【Hitz-B52 型のバスケットの構造健全性に係る説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-Z07-1 Rev.0) の評価例に用いている評価条件を以下に示す通り追記する。

2. 評価条件

1) 評価対象事象

バスケットの構造健全性に係る成立性確認のため、荷重条件が最も厳しい核分裂性輸送物に係る特別の試験条件における水平落下事象のみを対象とする。

2) 評価対象部位

水平落下事象における構造強度部材の中で使用済燃料の幾何学的配置と中性子吸収材の保持に係る最も重要な部材としてコンパートメントとサポートプレートの評価対象部位とし、サポートプレートを連結するクランプについては、水平落下時のバスケットの変形量評価において、として評価に加えるものとする。

3) 荷重条件

荷重条件に用いる衝撃加速度は、告示※の核分裂性輸送物に係る特別の試験条件で求められている最大の破損を受ける条件として 0.3m 落下後の 9.0m 落下を想定し、落下時に生じるエネルギーの総和が同等となる 9.3m 落下を落下条件とする。

9.3m 落下で生じる衝撃加速度は、緩衝体付き輸送容器衝突計算コードで計算された加速度に 1.2 を乗じた保守的な値を使用する。

$$\text{計算値} \times 1.2 =$$

このとき、緩衝体付き輸送容器衝突計算コードに用いる緩衝材の応力ひずみ特性は、加速度が最も厳しい条件となる環境温度が -20°C の場合の値を使用する。

4) 許容値

バスケットの構造強度評価では、表 1 に示す金属キャスク構造規格⁽¹⁾のバスケットの供用状態 D に基づく許容応力を用いて確認する。

表 1 バスケットの許容応力一覧表（供用状態 D 抜粋）

許容応力区分	応力の種類	材料の種類	許容応力 ボルト以外の評価部位
供用状態 D	応力強さ	炭素鋼	$P_m \leq \frac{2}{3} S_u$ $P_m + P_b \leq S_u$
		オーステナイト系 ステンレス鋼	$P_m \leq \text{MIN} \left[2.4 S_m, \frac{2}{3} S_u \right]$ $P_m + P_b \leq \text{MIN} [3.6 S_m, S_u]$
	純せん断応力	炭素鋼	$\tau \leq 1.2 S_m$
		オーステナイト系 ステンレス鋼	
	支圧応力	炭素鋼	$\sigma_p \leq 2 S_y$ $\sigma_p \leq 3 S_y^{*1}$
		オーステナイト系 ステンレス鋼	
	圧縮応力	炭素鋼	$\sigma_b(\text{一次}) \leq 1.5 f_c^*$ $\sigma_b(\text{一次} + \text{二次}) \leq 1.5 f_c$
		オーステナイト系 ステンレス鋼	

※1: $3S_y$ は支圧荷重の作用幅から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合の値。

f_c^* : 許容圧縮応力 f_c の値を算出する際、設計降伏点 S_y および常温設計降伏点 $S_y(RT)$ は、 $1.2S_y$ および $1.2S_y(RT)$ に読み替える。ただし、使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼の $1.35S_y$ は読み替えない。

番号	項目	質問日	コメント内容
47	構造設計	2018/11/9	<p>【Hitz-B52 型のバスケットの構造健全性に係る説明資料】 (Doc.No.MA035A-RC-Z07 Rev.0) (平成 30 年 11 月 9 日 説明資料)</p> <p>P.13 参考文献は「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク 構造規格」とすること。</p>

(回答) -2019/2/20 済

【Hitz-B52 型のバスケットの構造健全性に係る説明資料】 (Doc.No.MA035A-RC-Z07-1 Rev.0) の P.13 の参考文献を「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格」に変更する。

番号	項目	質問日	コメント内容
102	構造設計	2018/10/19	<p>補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料 (Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0) (平成 30 年 10 月 19 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ トラニオンボルトの構造強度解析条件及び評価について説明すること。

(回答)

補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型 構造設計に関する説明資料(Doc.No.MA035A-RC-A01)の別紙 6 のとおり説明する。

Doc. No. MA035A-RC-A02-4 Rev.0

2020年11月25日

日立造船株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52型）

質問管理票に対する回答（構造関連）（その4）

番号	項目	質問日	コメント内容
37	構造設計	2018/10/19	<p>【補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型の構造設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.0) (平成 30 年 10 月 19 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 別紙 2-2 (2) 荷重条件 (iv) 熱荷重について、基準温度を記載すること。また、運搬時の三次蓋が設置された状況での熱荷重を評価したのであれば、説明すること。

(回答)

各事象の評価に対して、三次蓋の有無及び解析モデルへの三次蓋の考慮について表 37-1 に示す。

表 37-1 各事象における三次蓋の有無および熱荷重の考慮

No.	事象	運用時の 三次蓋の有無	三次蓋の解析モデルへの考慮	
			構造解析 (熱荷重)	構造解析 (自重)
1	貯蔵時	無	無	無
2	垂直吊上げ時	有	無	無
3	運搬時	有	無	有
4	異常着床時	有	無	無

表 37-1 に示す事象 3 については三次蓋の自重は考慮しているが、熱荷重は考慮していない。事象 2 及び 4 については、三次蓋の自重及び熱荷重は考慮していない。この三次蓋の有無の影響について以下のとおり評価を実施した。

1. 除熱解析モデル

三次蓋有りの場合の除熱解析は、三次蓋無しの場合と同様、三次蓋を含めた Hitz-B52 型の実形状を基に軸方向断面を二次元軸対称でモデル化した。この全体モデルの解析モデルを図 37-1 に示す。

輪切りモデル及び燃料集合体モデルについては「Doc. No. MA035A-RC-B01 補足説明資料 1-4 Hitz-B52 型の除熱設計に関する説明資料」の別紙 1 に示すものと同様とした。

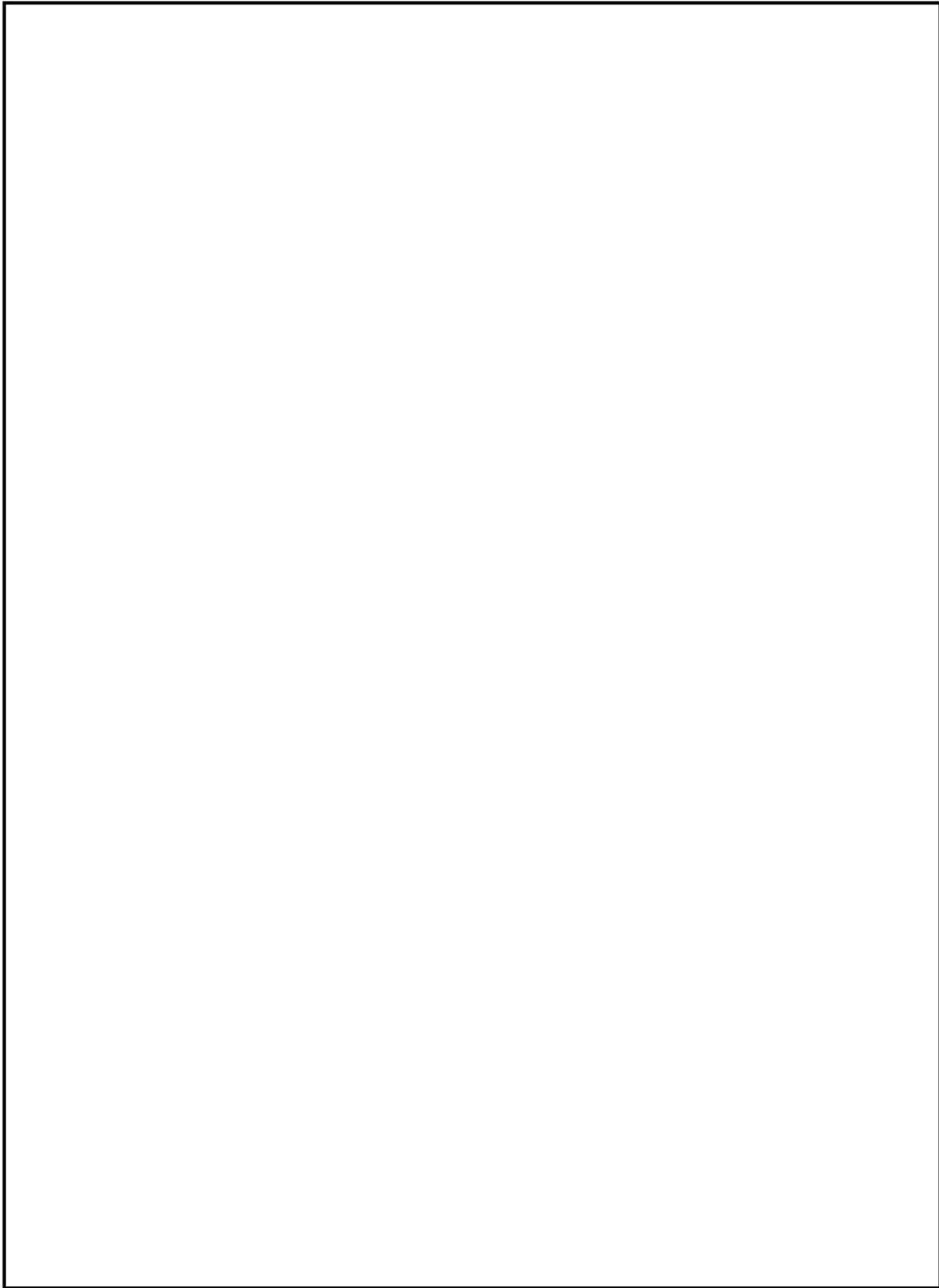


図 37-1 解析モデル（全体モデル）

2. 除熱解析条件

除熱解析条件は、「Doc. No. MA035A-RC-B01 補足説明資料 1-4 Hitz-B52 型の除熱設計に関する説明資料」の別紙 1 に示す条件と同様とした。

3. 除熱解析結果

三次蓋有り及び三次蓋無し（貯蔵時）の除熱解析結果を表 37-1 及び図 37-2～図 37-5 に示す。

表 37-1 除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (°C)		設計基準値 (°C)
		三次蓋無し	三次蓋有り	
燃料 被覆管*1	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 高燃焼度 8×8 燃料	255	255	300
金属 キャスク	胴	123	123	375
	底板	145	145	375
	外筒	112	112	375
	一次蓋	119	120	425
	二次蓋	87	87	375
	一次蓋ボルト	97	97	350
	二次蓋ボルト	88	88	350
	中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）	129	129	149
	金属ガスケット	95	96	130
	コンパートメント	236	236	350
	中性子吸収材（B-Al）	236	236	370
	伝熱部材	146	147	370
	伝熱フィン	117	117	200
トラニオン	121	121	425	

注記*1：燃料棒の最高温度とした。なお、燃料棒には二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して均質化した物性値を使用している。

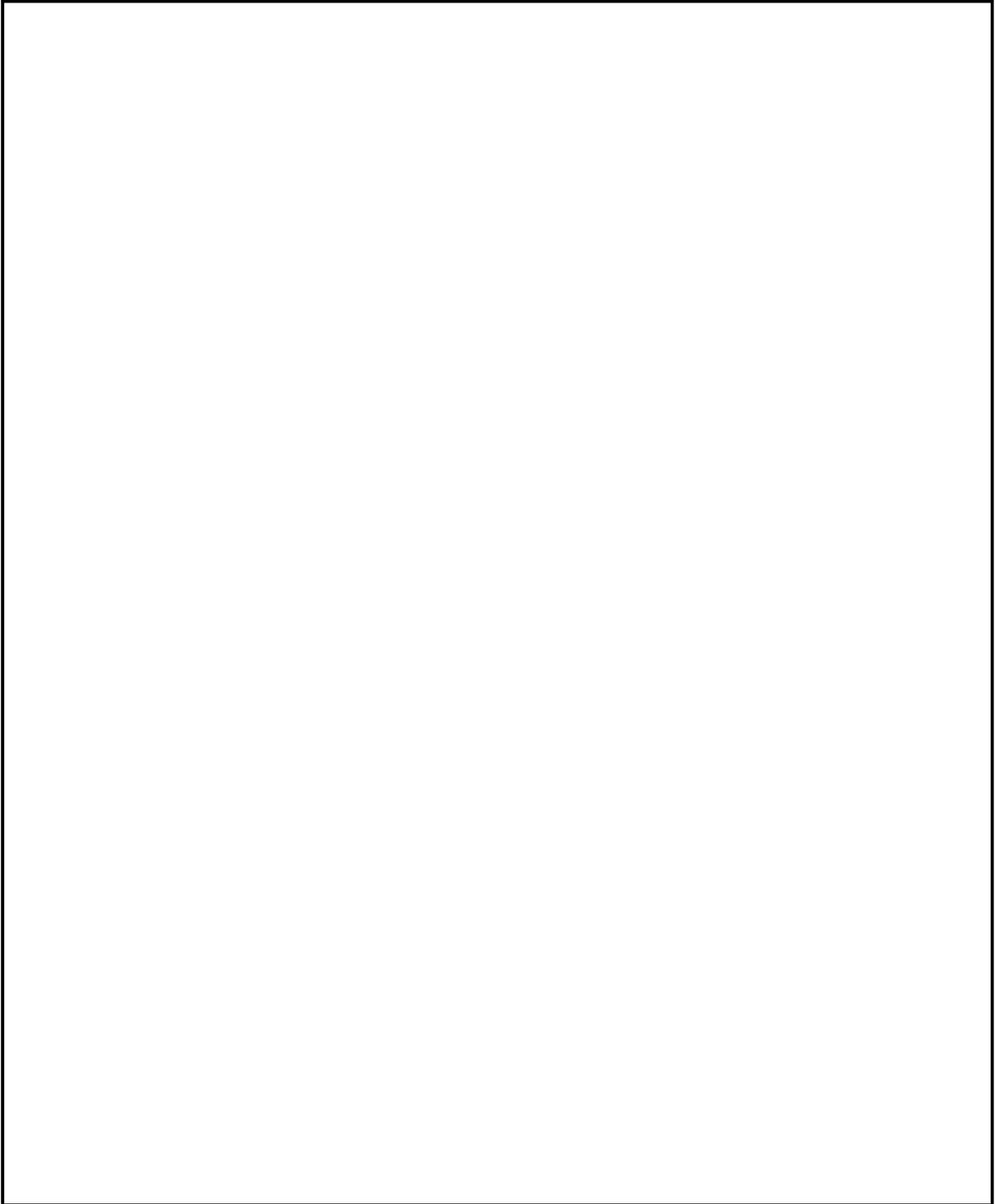


図 37-2 解析結果（全体モデル）

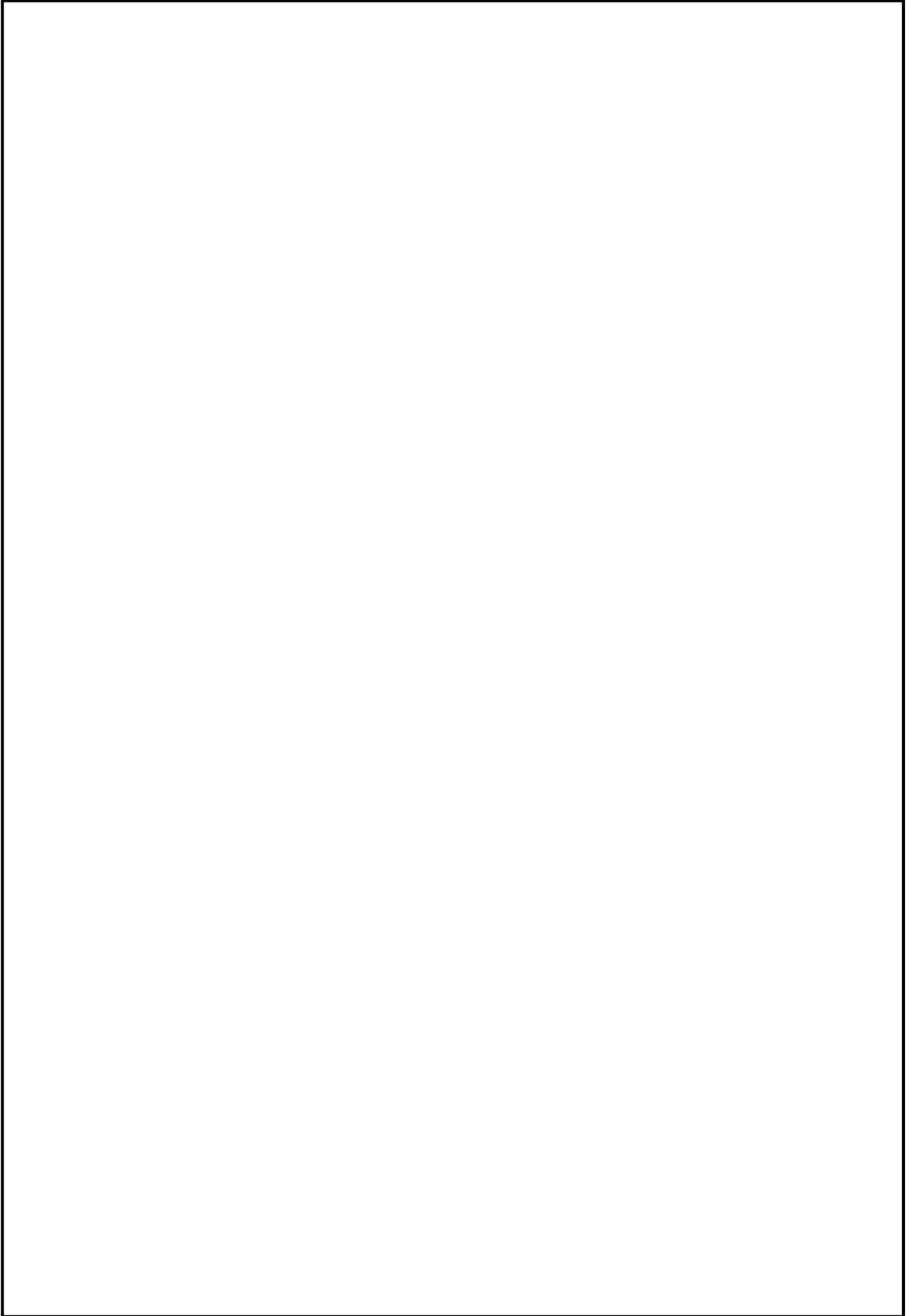


図 37-3 解析結果（輪切りモデル）



図 37-4 解析結果 (燃料集合体モデル)

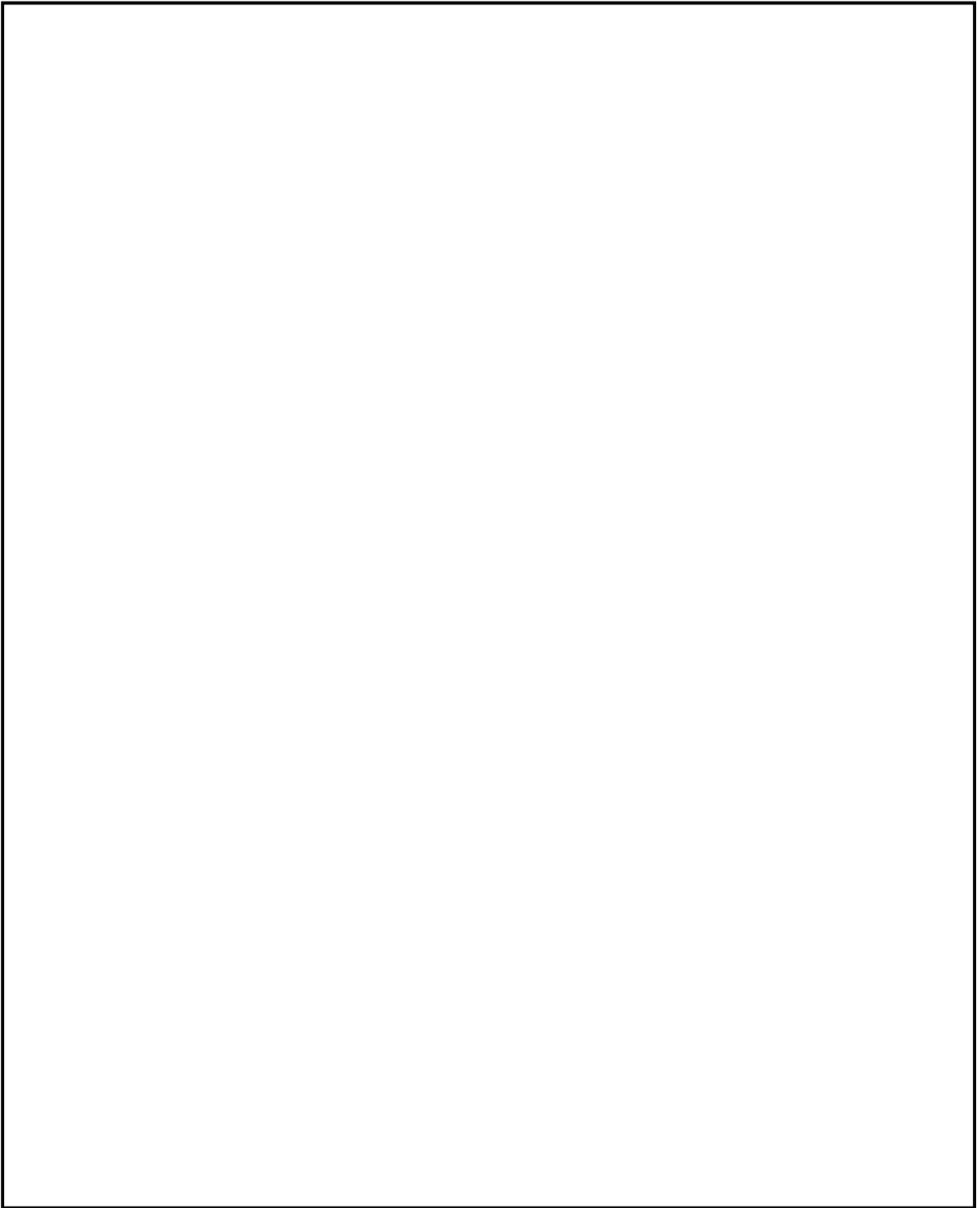


図 37-5 解析結果（全体モデル、蓋部周辺）

4. 熱応力の検討

得られた除熱解析結果より、解析モデルの三次蓋の有無による蓋部周辺における熱応力の影響を考察する。

三次蓋の有無による温度の相違を表 37-2 に示す。

ここで、熱応力が生じる要因は、①部材間の熱膨張差による相互拘束により生じるもの、及び②部材内に生じる温度勾配により生じるものの 2 ケースが考えられるが、ここでは前者①に着目し、三次蓋が存在する場合に生じる蓋部周辺における熱応力の増加程度を、常温(20℃)からの上昇温度の差異によって考察する。

表 37-3 に示すとおり、三次蓋の有無による常温 (20℃) からの上昇温度の差異は、最大 4.5%となる。一方で、閉じ込め機能に対し重要な部位である密封シール部 (一次蓋シール部で最大の熱応力が発生するため一次蓋シール部(Doc.No.MA035A-RC-A01 Rev.2 補足説明資料 1-5 の 13 頁の図 3、評価断面④)とする) の熱応力を表 37-2 に示す。

表 37-2 一次蓋シール部の熱応力

事象	評価断面	a. 一次+二次 応力 PL+Pb+Q(O)*1 [MPa]	b. 一次膜+一次 曲げ応力 PL+Pb(O)*1 [MPa]	c.二次応力 (計算 c=a-b) Q(O)*1 [MPa]
貯蔵時	一次蓋	58	12	46
吊上時	シール部	61	15	46
運搬時	(評価断面④)	57	13	44

注記*1 : PL+Pb+Q(O)、PL+Pb(O)及び Q(O)は、それぞれ評価断面(外側)の応力である。

したがって、三次蓋有りの場合の密封シール部の熱応力の増加は、上記のとおり発生する二次応力の最大値に対し、 $46 \text{ [MPa]} \times 4.5 \text{ [%]} = 2.07 \text{ [MPa]}$ 程度と推測される。

以上より、三次蓋の有無に対する構造解析結果への影響はわずかであることが確認できることから、構造解析は貯蔵時の除熱解析結果を用いて実施した。

各部位の評価点及び蓋部詳細部の解析結果を図 37-6～図 37-8 に示す。

表 37-2 三次蓋の有無による温度の相違

部位	評価点	除熱解析結果			備考
		三次蓋有り [°C]	三次蓋無し [°C]	温度差 [°C]	
胴フランジ部	(1)				
	(2)				蓋シール部周辺
	(3)				蓋シール部周辺
	(4)				
	(5)				
一次蓋	(1)				
	(2)				
	(3)				
	(4)				蓋シール部周辺
	(5)				
	(6)				
	(7)				
	(8)				
	(9)				蓋シール部周辺
二次蓋	(1)				
	(2)				
	(3)				
	(4)				蓋シール部周辺
	(5)				
	(6)	蓋シール部周辺			
最大温度差					
最小温度差					

表 37-3 三次蓋の有無による密封シール部周辺に生じる上昇温度の差異

部位	評価点	常温 T ₀ [°C]	除熱解析結果		上昇温度		上昇温度 差異 ^{※3} [%]
			三次蓋有り T ₁ [°C]	三次蓋無し T ₂ [°C]	三次蓋有り ΔT ₁ ^{※1} [°C]	三次蓋無し ΔT ₂ ^{※2} [°C]	
胴フランジ部	(1)						
	(2)						
	(3)						
	(4)						
	(5)						
一次蓋	(1)						
	(2)						
	(3)						
	(4)						
	(5)						
	(6)						
	(7)						
	(8)						
	(9)						
二次蓋	(1)						
	(2)						
	(3)						
	(4)						
	(5)						
	(6)						
最大							
最小							

注※1 : $\Delta T_1 = T_1 - T_0$

※2 : $\Delta T_2 = T_2 - T_0$

※3 : $(\Delta T_1 - \Delta T_2) / \Delta T_2$

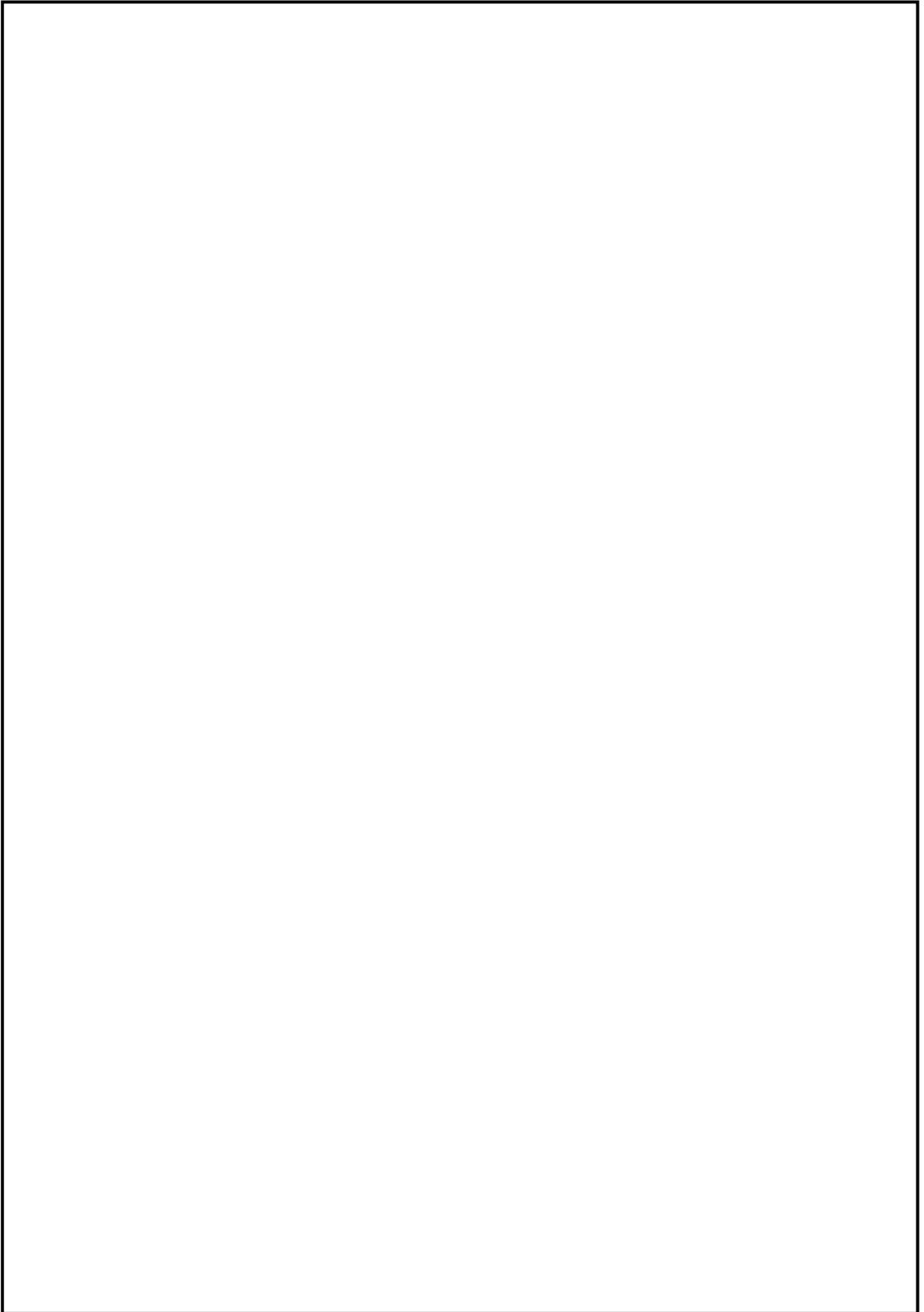


図 37-6 温度分布図 (胴フランジ部)

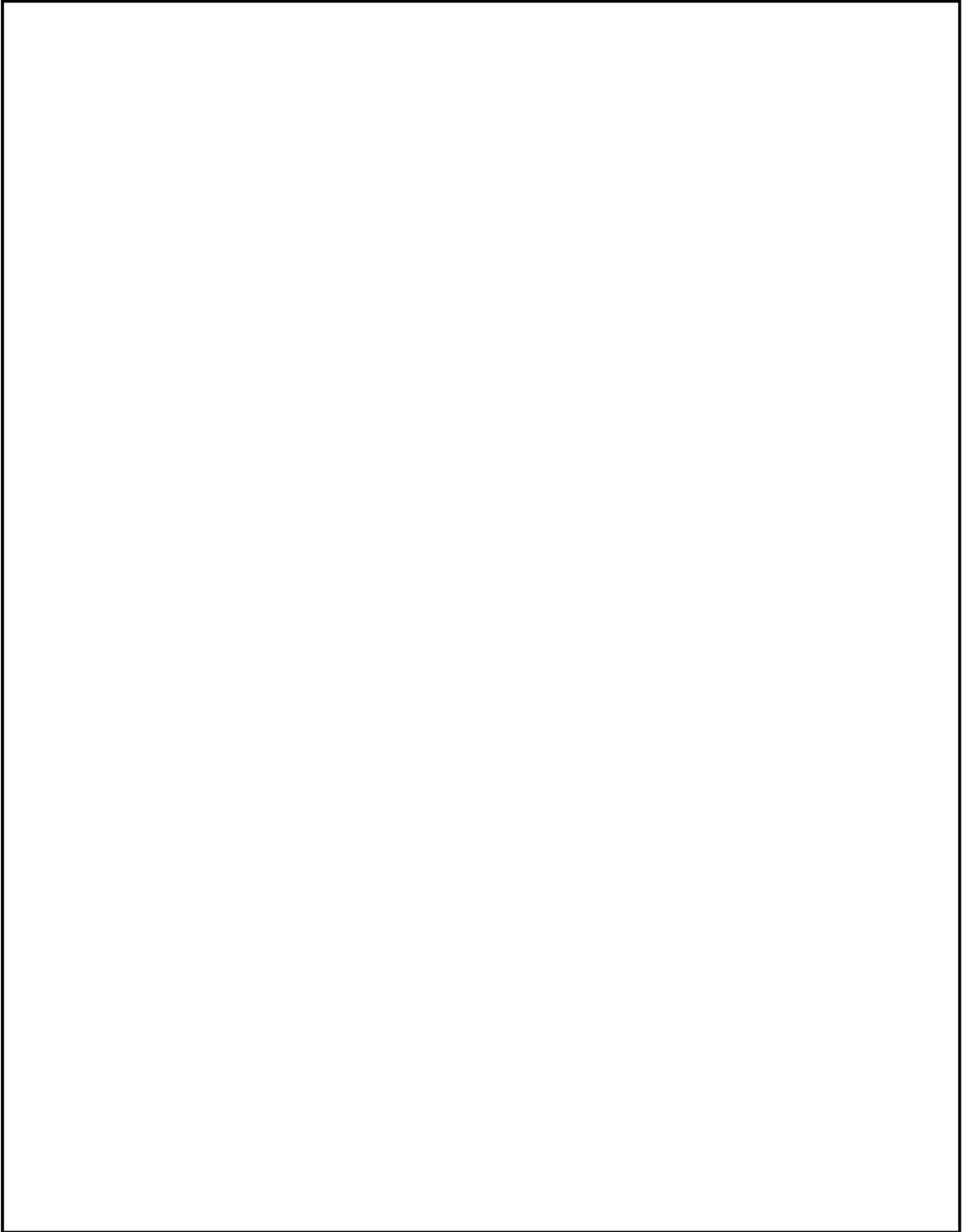


図 37-7 温度分布図（一次蓋）

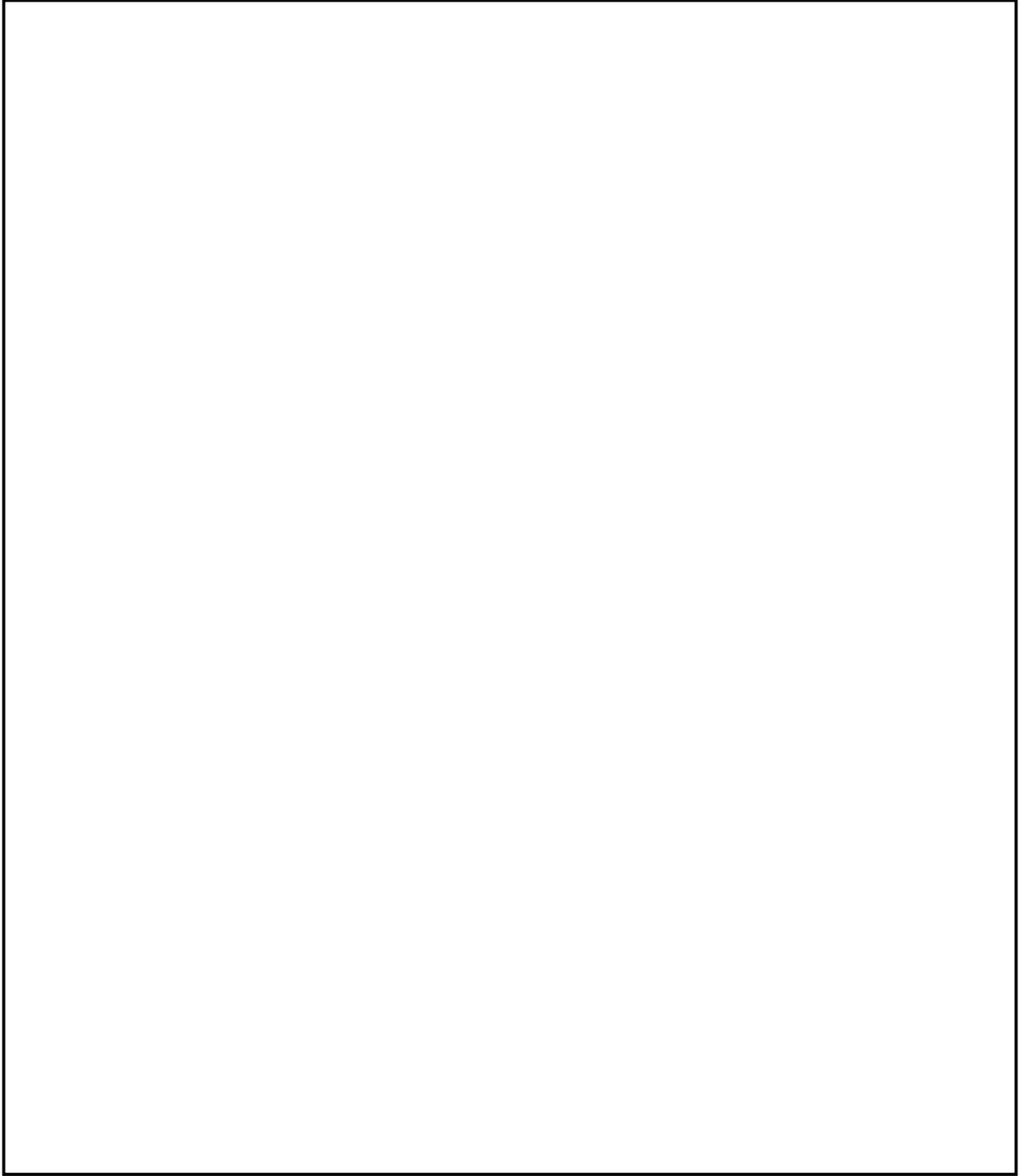


図 37-8 温度分布図（二次蓋）

5. 三次蓋による応力評価

表 37-1 に示すとおり、貯蔵時と運搬時には三次蓋の荷重を考慮していることから、吊上時及び異常着床時について三次蓋の荷重の影響について、以下のとおり評価を行う。

(1) 下向きの加速度によって三次蓋から本体に作用する荷重

吊上時及び異常着床時には下向きに 3G の加速度がかかることから、三次蓋によって発生する慣性力は、 $1900[\text{kg}] \times 9.80665[\text{m/s}^2] \times 3[\text{G}] = 5.590 \times 10^4 [\text{N}]$ となる。この慣性力は、フランジを介して胴部に影響を及ぼすが、一次蓋に対しては、直接影響を及ぼさない。

そして、この三次蓋の慣性力によって増加する胴部の圧縮方向の応力は、

$$(\text{三次蓋の慣性力 } 5.590 \times 10^4 [\text{N}]) / (\text{胴部断面積 } 1.248 \times 10^6 [\text{m}^2]) = 0.05 [\text{MPa}]$$

となり、胴部の設計基準値の 124MPa に対して十分小さく、本体の密封性には影響しない。

(2) 一次蓋ボルトに発生する平均引張応力

Hitz-B52 型の蓋部の構造から、三次蓋の荷重が直接一次蓋には負荷されない構造となっており（下記図 37-2 参照）、さらに吊上時及び異常着床時には、加速度は Hitz-B52 型に対し下向きとなり、一次蓋ボルトの初期締付力に対して引張力を増加させないため、密封部である一次蓋ボルトには影響を及ぼさない。

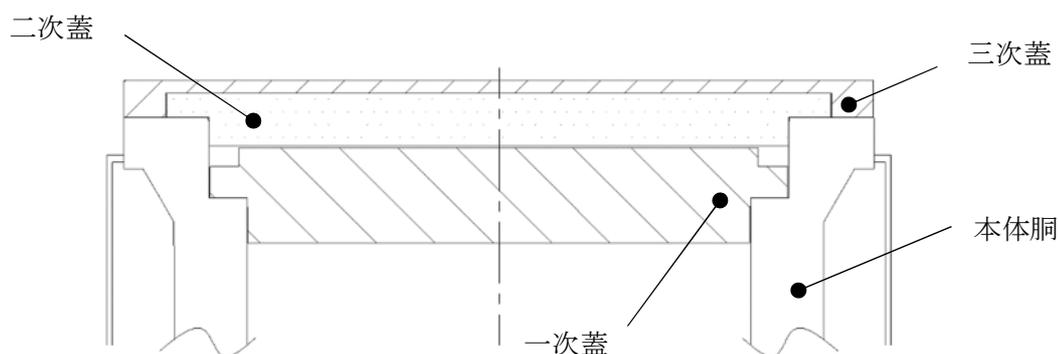


図 37-2 一次蓋、二次蓋、三次蓋及び本体の構造

以上より、吊上時、異常着床時の三次蓋の荷重に対する、密封性への影響はほとんどない。

6. 基準温度

基準温度を 20℃としていることから、補足説明資料 1-5 Hitz-B52 型の構造設計に関する説明資料の別紙 2、別紙 4 及び別紙 5 において、下記のとおり見直しを行う。(アンダーライン部に説明資料の追加箇所を示す。)

別紙 2-2 頁、別紙 4-2 頁及び別紙 5-2 頁

(iv) 熱荷重

除熱解析結果から得られる Hitz-B52 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。この時の基準温度を 20℃とする。