

Doc No. 18-180-I-016 Rev.0

2021年4月28日

トランスニュークリア株式会社

補足説明資料 1-6

TK-26 型の構造設計に関する説明資料

本資料のうち、枠囲いの内容は、商業機密等に属しますので公開できません。

目 次

1. 設計方針	1
2. TK-26 型の仕様	2
2.1 構造	2
2.2 材質	2
2.3 寸法	2
2.4 質量	2
3. 構造強度解析	3
3.1 評価対象及び評価事象	3
3.2 解析方法及び解析条件	4
3.3 解析結果	4
4. 参考文献	5
別紙 1 使用済燃料貯蔵施設における TK-26 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および評価	

1. 設計方針

TK-26 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、TK-26 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留まる範囲で耐え得る設計とする。

2. TK-26 型の仕様

2.1 構造

TK-26 型の構造を第 1 図に示す。TK-26 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、胴及び蓋は密封容器として設計されている。なお、TK-26 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定される。

(1) 金属キャスク本体

金属キャスク本体の主要部は、胴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定のために、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。

(2) 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。

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、三次蓋がボルトにより金属キャスク本体上面に取り付けられる。

2.2 材質

TK-26 型の主要な構成部材の材質を第 1 表に示す。TK-26 型は、基本的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。

2.3 寸法

TK-26 型の代表寸法を第 2 表に示す。

2.4 質量

TK-26 型の質量を第 3 表に示す。

3. 構造強度解析

3.1 評価対象及び評価事象

使用済燃料貯蔵施設における TK-26 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 TK-26 型の密封容器及びトラニオンについて、以下に示す事象を評価する。

(1) 密封容器

TK-26 型の貯蔵時に密封境界を構成する胴、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。水平吊上時において、一次蓋には、吊上時に発生する加速度による慣性力が蓋と平行に鉛直下向きに作用し、一次蓋シール部及び胴シール部の表面に摩擦力によるせん断荷重が作用するが、ボルトにより胴フランジに十分に締付けられていることから、シール部への影響は小さい。一方、垂直吊上時においては、吊上時に発生する加速度による慣性力が鉛直下向きに作用し、一次蓋に曲げ変形が発生する。蓋の支持点であるシール部近傍は、慣性力による曲げモーメントの影響が大きいと考えられるため、垂直吊上時を評価事象とする。

なお、垂直吊上時に TK-26 型に発生する加速度として、鉛直方向 3G（G:重力加速度）を設定し、評価を行う。

(2) トラニオン

TK-26 型のトラニオンは、吊上時及び貯蔵中の固定に用いられる。トラニオンの評価事象として、以下に示す事象を評価する。

a. 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。垂直吊上時は、1 対の上部トラニオンで吊る条件で評価するため、上部トラニオンに発生する荷重は、水平吊上時に比べ垂直吊上時の方が大きい。よって、垂直吊上時を評価事象とする。

なお、垂直吊上時に TK-26 型に発生する加速度として、鉛直方向 3G を設計条件として設定し、評価を行う。

b. 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定に使用される。TK-26 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。よって、貯蔵中の地震時を評価対象とする。

なお、TK-26 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:1.5G
- ・ 鉛直方向:1.0G

3.2 解析方法及び解析条件

構造強度解析のフローを第 2 図に示す。構造強度解析では、TK-26 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、TK-26 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 TK-26 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、TK-26 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及び評価を別紙 3 に示す。

3.3 解析結果

密封容器及びトラニオンの構造強度解析結果を第 4 表及び第 5 表に示す。

第 4 表及び第 5 表に示すとおり、TK-26 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)

第1表 TK-26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	
胴	炭素鋼
外筒	炭素鋼
上部トラニオン	ステンレス鋼
下部トラニオン	ステンレス鋼
蓋部 ^(注1)	
一次蓋	炭素鋼
二次蓋	炭素鋼
一次蓋ボルト	合金鋼
二次蓋ボルト	合金鋼

(注 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。

第2表 TK-26型の代表寸法

構成部材	寸法 (mm)
<u>金属キャスク本体</u>	
胴内径	
板厚	
外筒外径	
板厚	
底板厚さ	
全長	5061
全幅	2900
<u>一次蓋</u>	
蓋外径	1994
厚さ	
ボルト	
呼び径×本数	
<u>二次蓋</u>	
蓋外径	2220
厚さ	
ボルト	
呼び径×本数	
<u>三次蓋</u>	
蓋外径	2506
厚さ	
ボルト	
呼び径×本数	

第3表 TK-26型の質量

項目	質量 (トン)
A. 金属キャスク本体	85.1
B. 一次蓋	5.4
C. 二次蓋	4.5
D. 三次蓋	2.6
E. バスケット	4.4
F. 緩衝体	12.2
G. 使用済燃料集合体 (バーナブルポイズン集合体を含む)	18.0
H. 貯蔵建屋内での天井クレーンによる取扱質量	
(垂直吊上時) A+B+C+D+E+G	120.0
(水平吊上時) A+B+C+D+E+F+G	132.2
I. 貯蔵時質量	
A+B+C+E+G	117.5 ^(注1)

(注1) 三次蓋取付けフランジ保護カバー重量を含む。

第4表 密封容器の構造強度評価結果（垂直吊上時：供用状態A）

（構造解析コードによる評価結果）

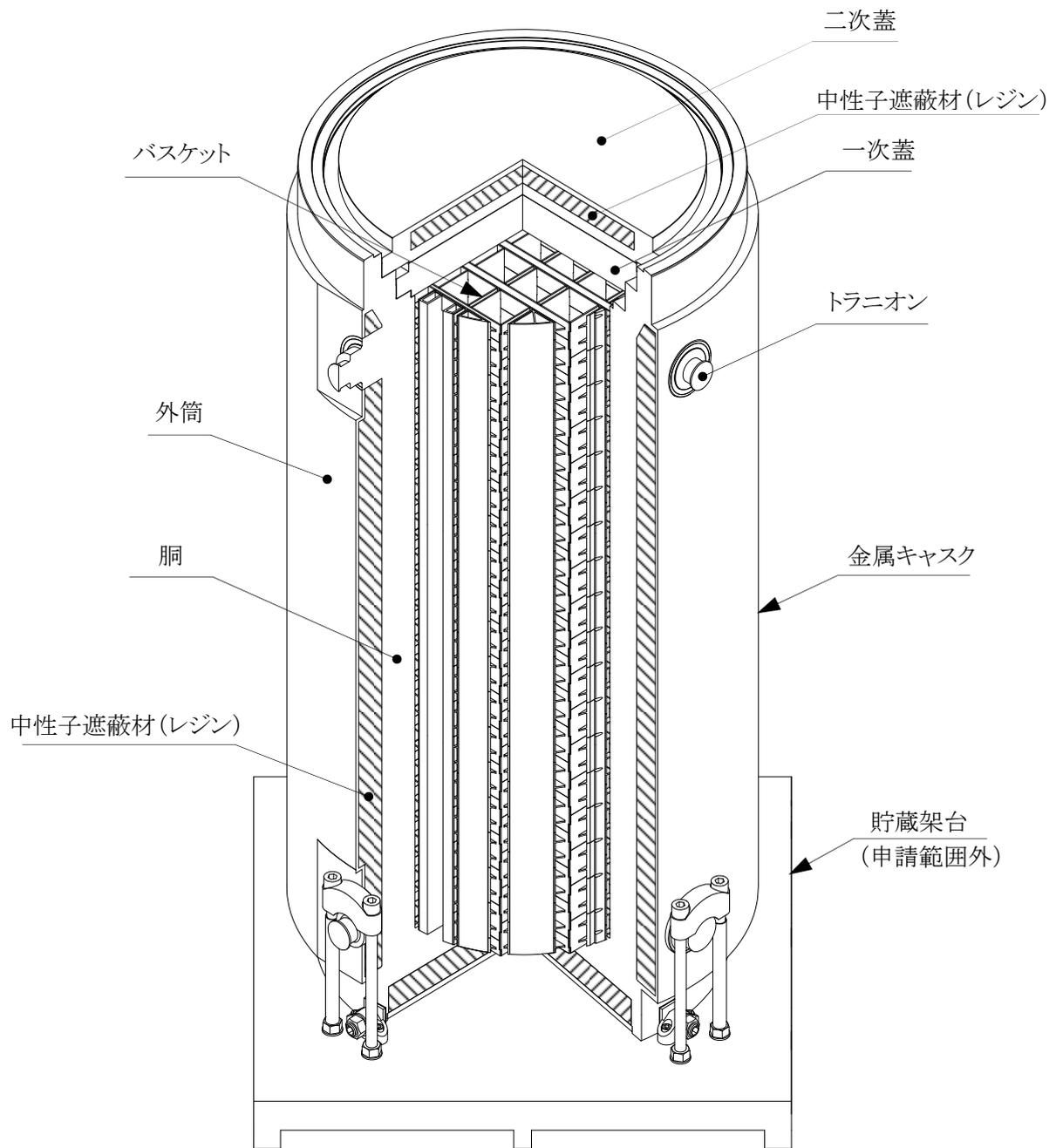
項目 ^(注1)		評価結果 (MPa)	設計基準値 (MPa)
一次蓋（中央部）の応力強さ		11	372
一次蓋（端部）の応力強さ		86	372
一次蓋ボルト の応力	平均引張応力	209	648
	平均引張応力+曲げ応力	263	972
胴（シール部）の応力強さ		33	182
胴（上部）の応力強さ		8	363
胴（中央部）の応力強さ		16	363
胴（下部）の応力強さ		49	363
底板（中央部）の応力強さ		28	363
底板（端部）の応力強さ		20	363
一次蓋（シール部）の応力強さ		15	185

（注1）応力評価位置は、第3図参照。

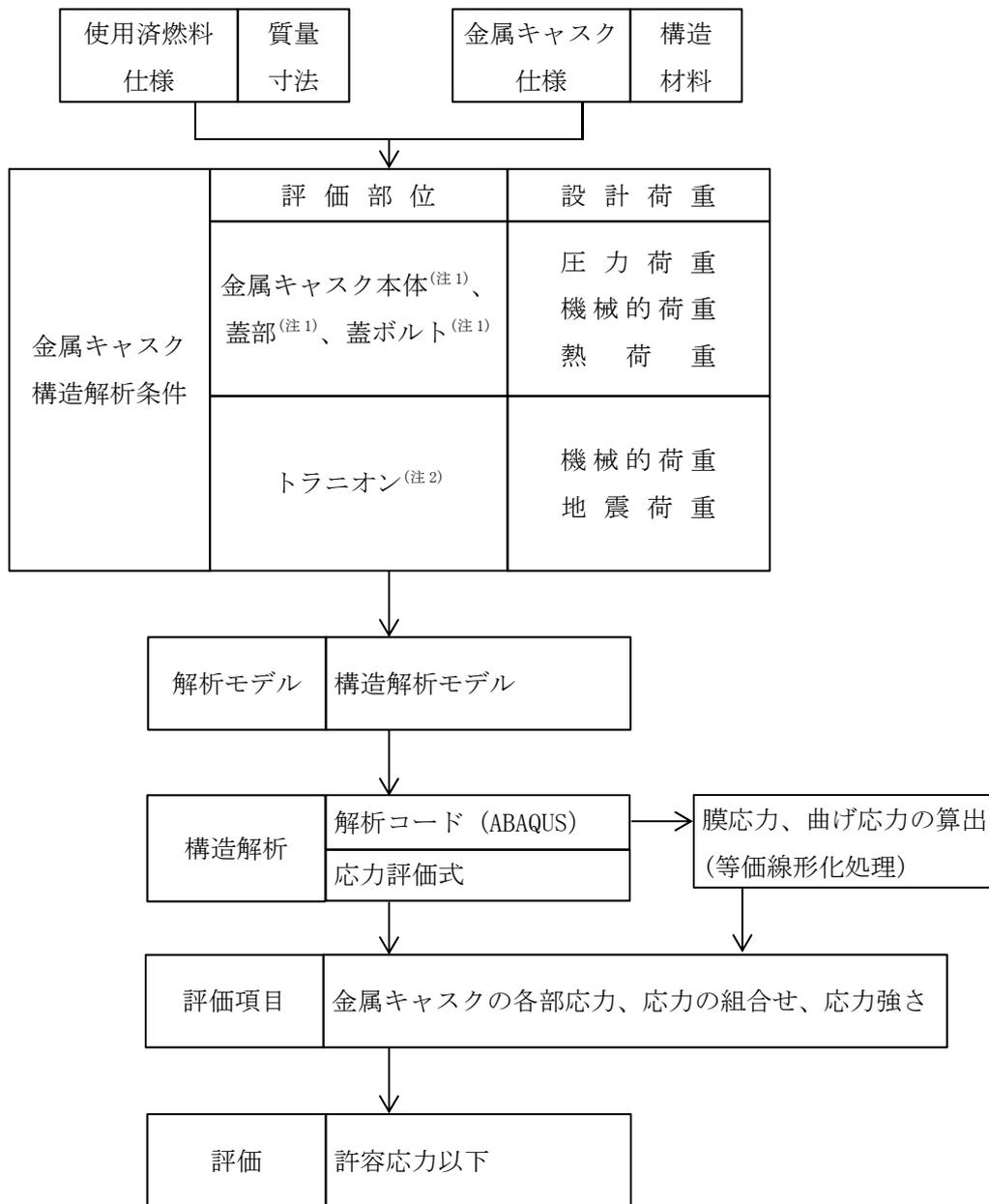
第5表 トラニオンの構造強度評価結果

（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強さ （垂直吊上時：供用状態A）	457	636
下部トラニオンの応力強さ （貯蔵中[地震時]：供用状態D）	219	588



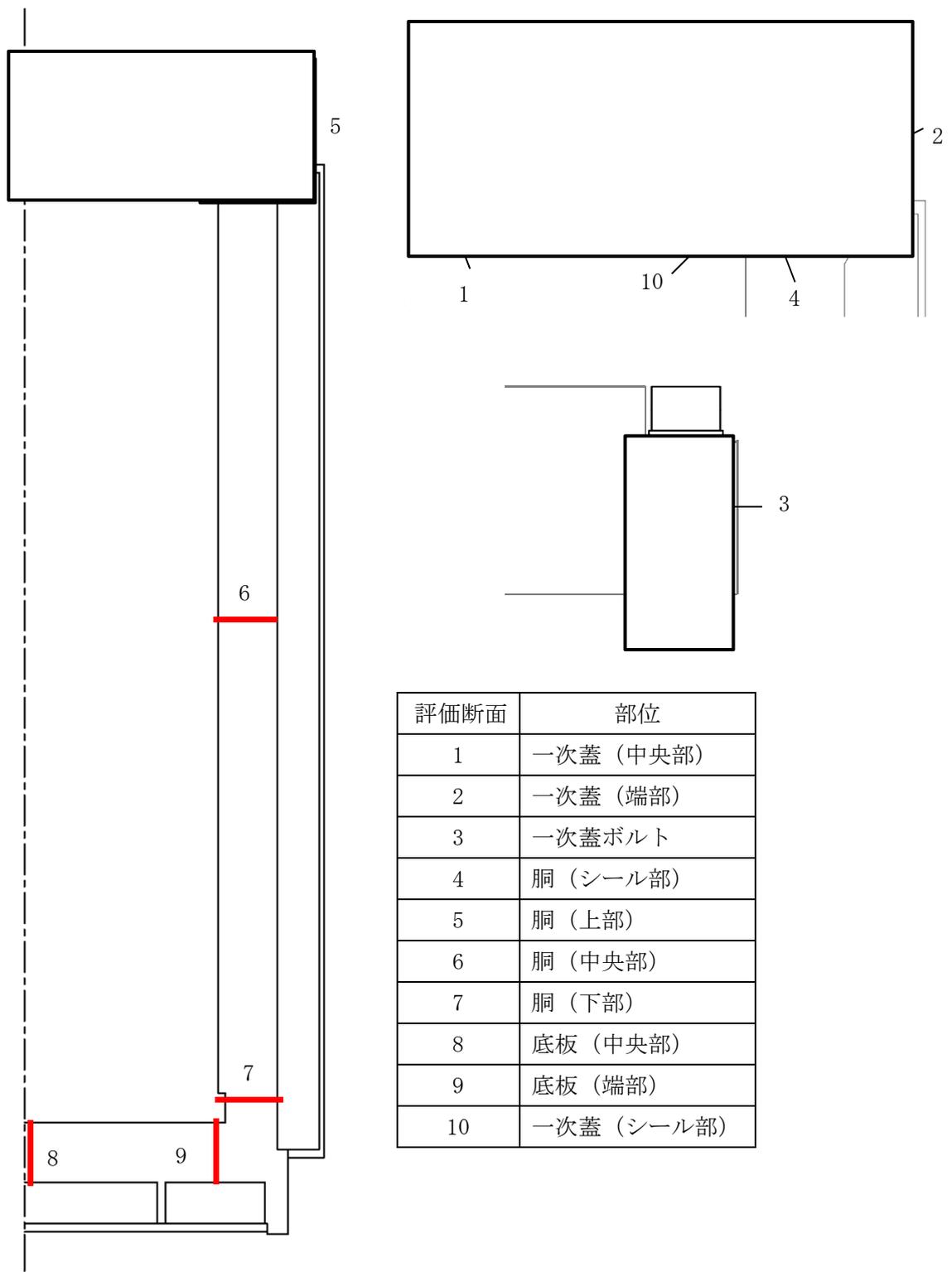
第1図 TK-26型構造図



(注1) 解析コードによる評価

(注2) 応力評価式による評価

第2図 構造強度解析フロー



第3図 密封容器の応力評価位置

使用済燃料貯蔵施設における TK-26 型のハンドリングフロー

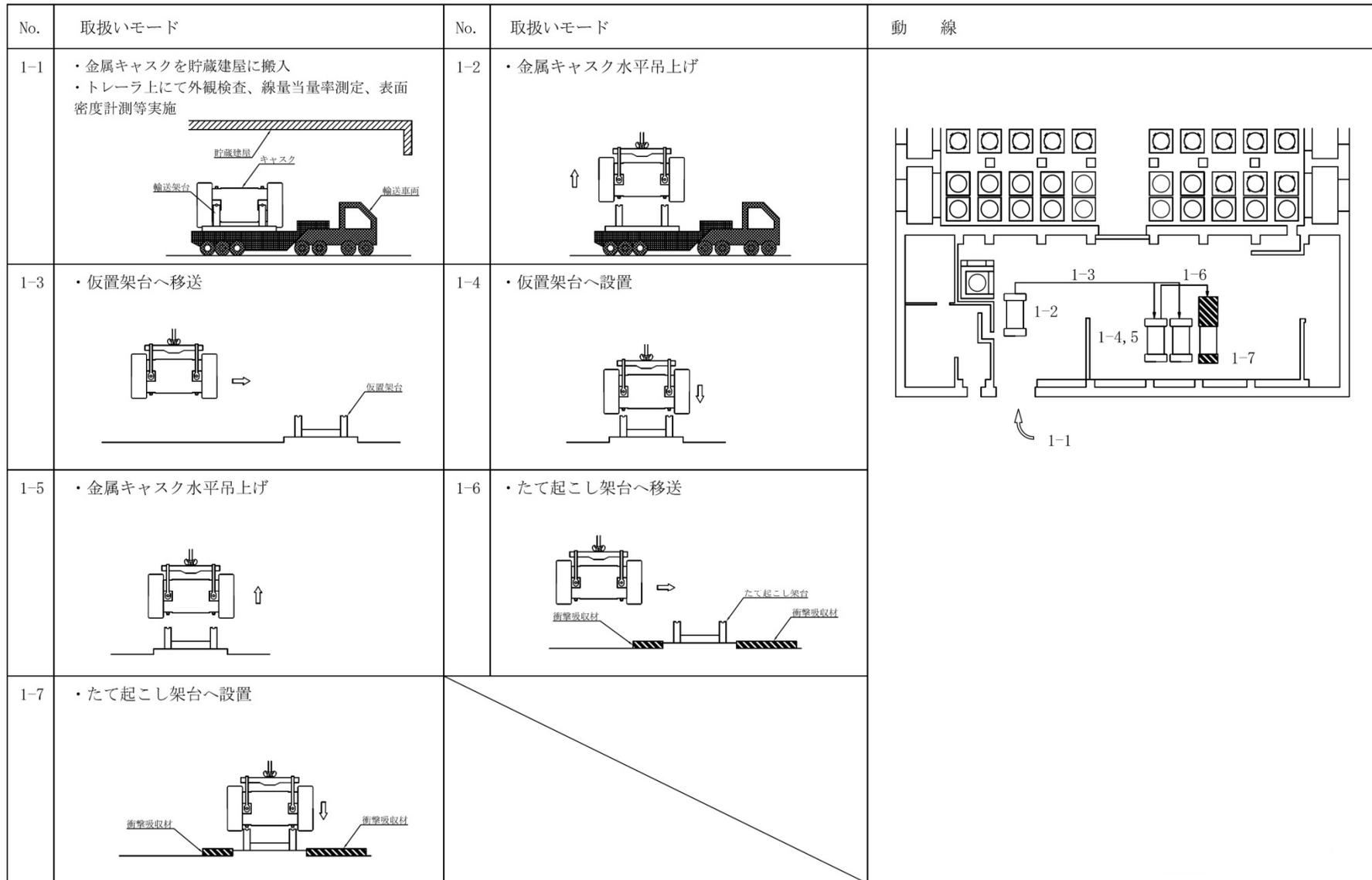
使用済燃料貯蔵施設における TK-26 型のハンドリングフローを別紙 1-1 図に示す。

トレーラにより貯蔵建屋受入れ区域に搬入された TK-26 型は、事業所外運搬に必要な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。TK-26 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。TK-26 型は、たて起こし架台上で緩衝体を取り外し、受入れ区域の天井クレーンでたて起こし、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。

また、検査架台で三次蓋を取り外した後、TK-26 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 TK-26 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、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。

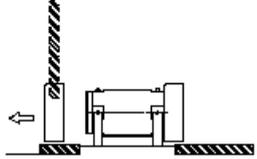
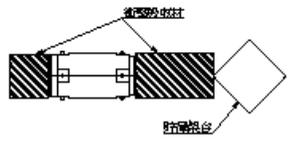
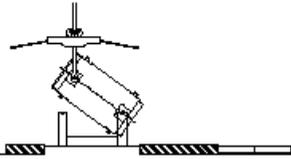
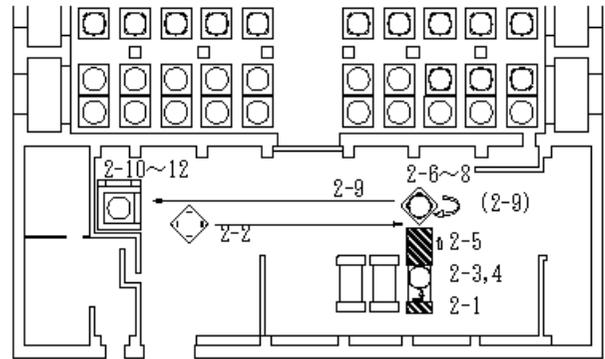
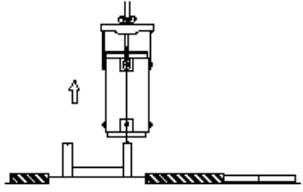
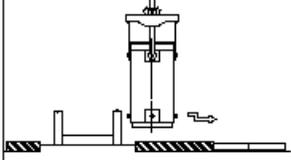
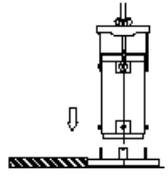
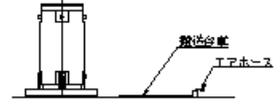
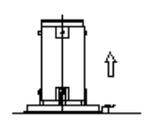
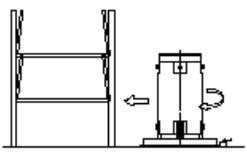
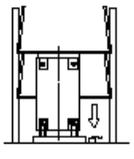
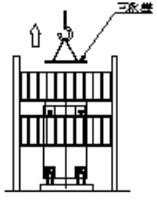
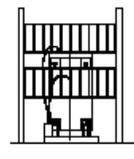
《金属キャスクの受け入れ～金属キャスクの仮置き》



別紙 1-2

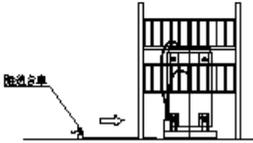
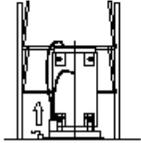
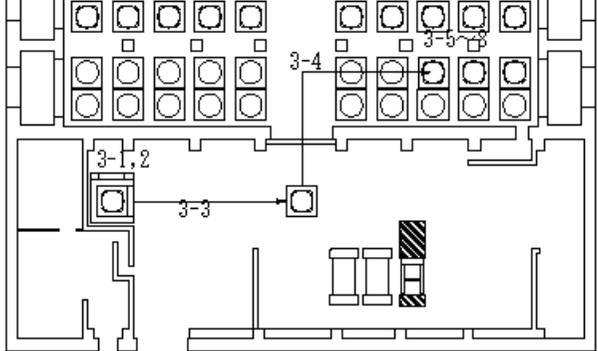
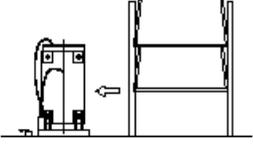
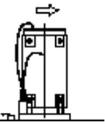
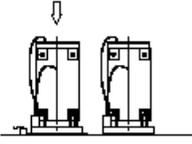
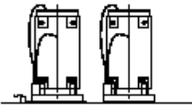
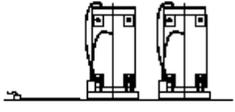
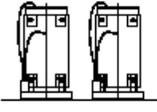
別紙 1-1 図 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクハンドリングフロー (1/3)

《緩衝体取外し～金属キャスクのたて起こし～検査架台への移送》

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	動 線
2-1	・緩衝体の取外し 	2-2	・貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置 	2-3	・金属キャスクをたて起こし 	
2-4	・金属キャスクを吊上げ 	2-5	・横行及び下降操作を繰返し、貯蔵架台上まで移送 	2-6	・金属キャスクを貯蔵架台に着床 	
2-7	・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入 	2-8	・搬送台車浮上 	2-9	・旋回及び走行動作により検査架台へ移送 	
2-10	・搬送台車着床 	2-11	・三次蓋（輸送用）の取外し 	2-12	・貯蔵前検査を実施。その後、圧力センサ、表面温度センサを取付け 	

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

《検査架台～貯蔵場所への設置》

No.	取扱いモード	No.	取扱いモード	動 線
3-1	・貯蔵架台に搬送台車挿入 	3-2	・搬送台車浮上 	
3-3	・検査架台から金属キャスク拔出し 	3-4	・貯蔵場所まで移送 	
3-5	・搬送台車の着床及び貯蔵架台の設置 	3-6	・貯蔵架台の固縛ボルト一部取付け 	
3-7	・搬送台車の抜取り 	3-8	・貯蔵架台の固縛ボルト取付け 	

別紙 1-4

別紙 1-1 図 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスク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

TK-26 型の垂直吊上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

TK-26 型の密封容器の解析は、有限要素法による構造解析コード(ABAQUS)を使用する。解析モデルを別紙 2-1 図～別紙 2-3 図に示す。

TK-26 型の垂直吊上時は、三次蓋が装着された状態である。

解析モデルは、TK-26 型の胴、外筒、一次蓋、二次蓋、三次蓋等をモデル化する。蓋ボルト以外の構成部材にはソリッド要素及びシェル要素を、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、はり要素を適用した。モデル寸法は公称寸法を用いた。一次蓋、二次蓋及び三次蓋は蓋ボルトにより胴に取付けられ、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、バスケット、伝熱フィン及び中性子遮蔽体はモデル化せず、使用済燃料集合体及びバスケットは、胴内部に作用する荷重として、伝熱フィン及び中性子遮蔽材は外筒端板に作用する荷重として考慮した。また、解析モデルは、周方向の対称性を考慮し、三次元 180° 対称モデルとした。

TK-26 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した。

(2) 荷重条件及び境界条件

荷重条件及び境界条件を別紙 2-4 図に示す。

a. 荷重条件

(a) 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、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。

(b) 圧力荷重

圧力荷重として、胴内圧、一次蓋－二次蓋間及び二次蓋－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) 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（バスケット及び使用済燃料集合体）、伝熱フィン及び中性子遮蔽材の慣性力を機械的荷重として考慮する。また、蓋ボルトの初期締付力を考慮する。さらに、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。

(d) 熱荷重

除熱解析結果から得られる TK-26 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。

b. 境界条件

吊上時の支持点である 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。

(3) 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. 一次蓋及び胴（シール部除く）

一次蓋及び胴に発生する応力強さが以下を満足すること。

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

ここで、

$P_L + P_b + Q$: 一次＋二次応力強さ

S_m : 設計温度（一次蓋 : °C、胴 : °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。

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

ここで、

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

c. 一次蓋ボルト

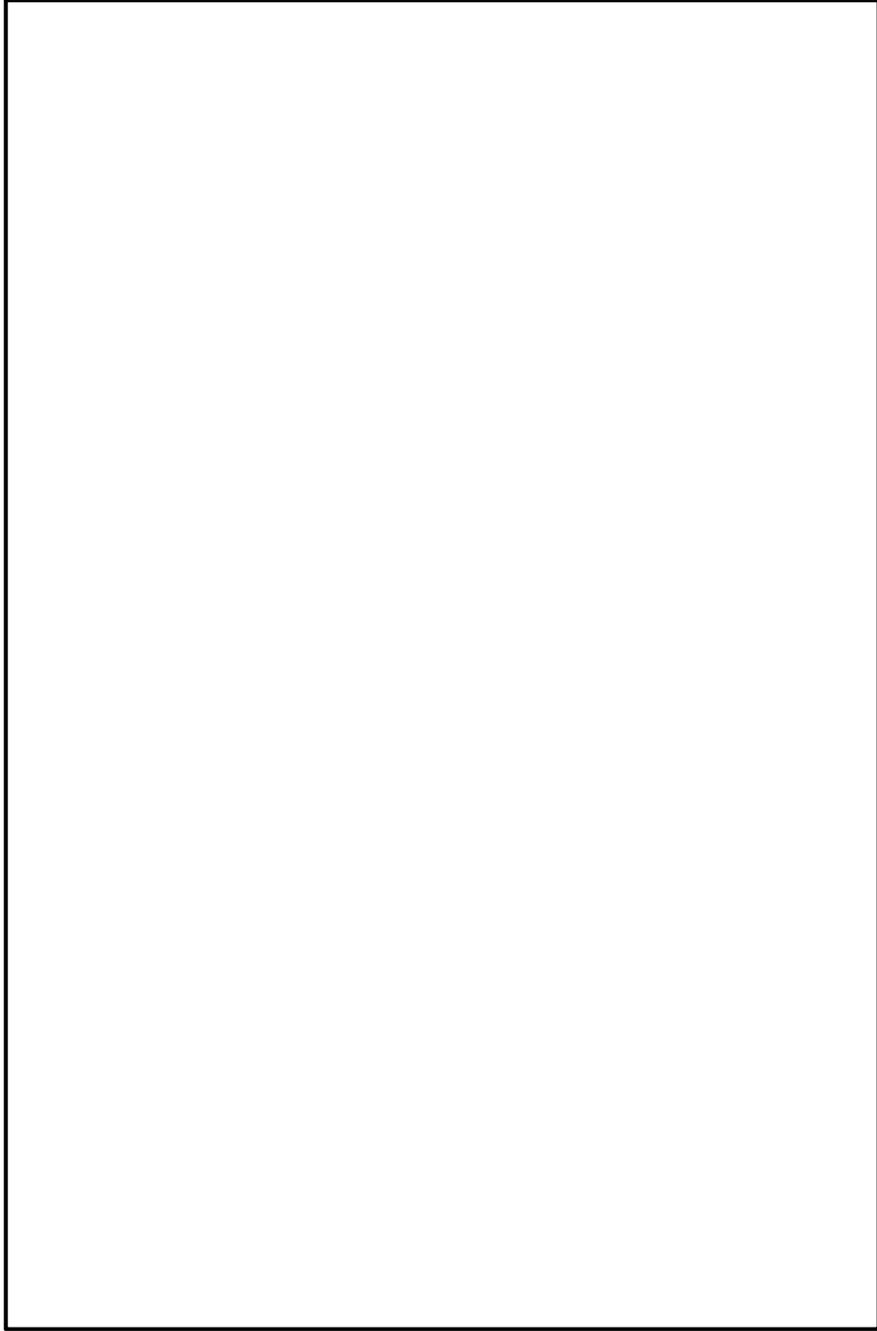
一次蓋ボルトに発生する各応力が以下を満足すること。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

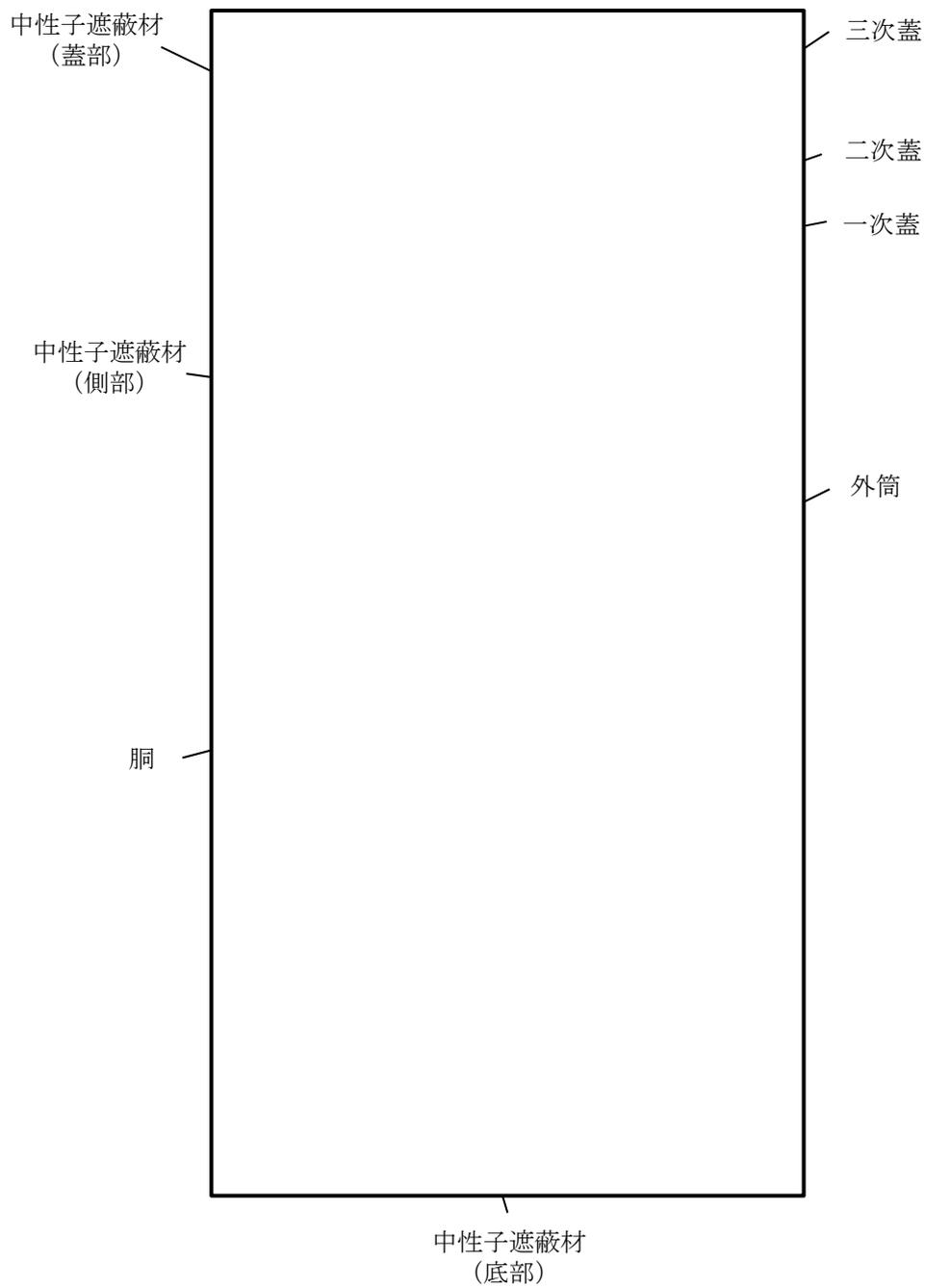
$$(\text{平均引張応力} + \text{曲げ応力}) \leq 3S_m$$

ここで、

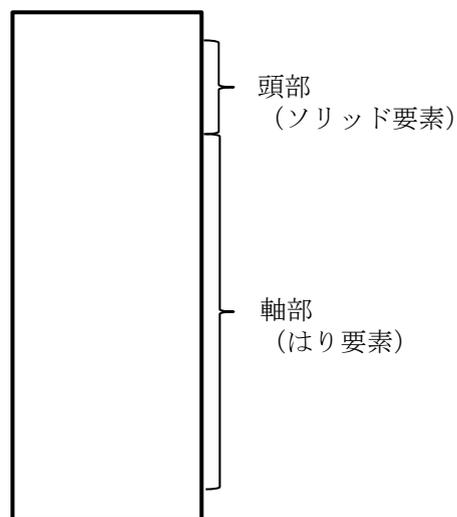
S_m : 設計温度 (一次蓋ボルト : °C) における設計応力強さ



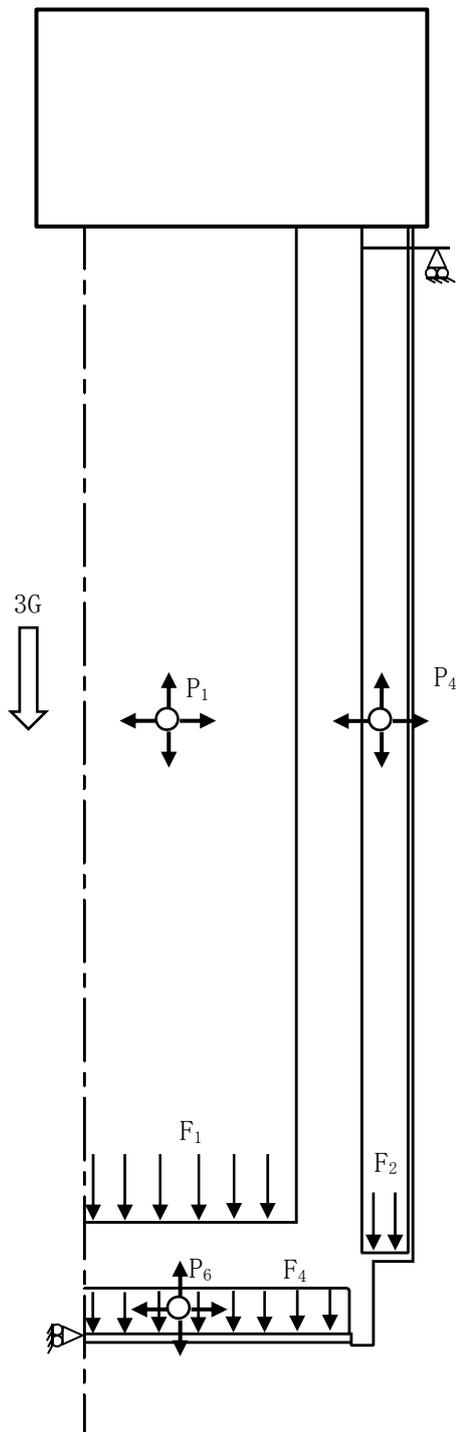
別紙 2-1 図 密封容器評価用解析モデル (要素分割図)



別紙 2-2 図 密封容器評価用解析モデル (部材定義図)



別紙 2-3 図 密封容器評価用解析モデル (部材定義図：蓋部拡大)



- P_1 : 胴内圧 (-0.101325 MPaG)
- P_2 : 一次蓋-二次蓋間圧力 (MPaG)
- P_3 : 二次蓋-三次蓋間圧力 (MPaG)
- P_4 : 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPaG)
- P_5 : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPaG)
- P_6 : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPaG)
- F_1 : 内部収納物の慣性力
- F_2 : 側部中性子遮蔽材及び伝熱フィン
の慣性力
- F_3 : 蓋部中性子遮蔽材の慣性力
- F_4 : 底部中性子遮蔽材の慣性力
- 一次蓋金属ガスケット反力 (N/mm)
- 二次蓋金属ガスケット反力 (N/mm)
- 一次蓋ボルト初期締付力 (N)
- 二次蓋ボルト初期締付力 (N)
- 三次蓋ボルト初期締付力 (N)

別紙 2-4 図 垂直吊上時の荷重条件及び境界条件

トラニオンの構造強度解析条件及び評価

1. 概要

TK-26 型の垂直吊上時及び貯蔵中（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

TK-26 型の構造を別紙 3-1 図に示す。トラニオンの構造を別紙 3-2 図及び別紙 3-3 図に示す。上部トラニオン及び下部トラニオンは、キャスク本体への取付位置により、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。

3. 垂直吊上時の構造強度評価

(1) 解析モデル

TK-26 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

TK-26 型の垂直吊上時の質量は、120ton(=1.20×10⁵ kg) 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°) 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-3311.1 に示される供用状態 A（垂直吊上時）の設計基準に基づき以下のとおりとする。

$$(\text{合成による応力強さ}) \leq S_y$$

ここで、

S_y : 設計温度 (°C) における設計降伏点

(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 は、次のとおり求められる。

$$F = \frac{W \cdot a \cdot g}{n}$$

ここで、

- F : 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 : TK-26 型の質量=1.20×10⁵ kg (吊上時)
- a : 鉛直方向加速度係数=3
- g : 重力加速度=9.80665 m/s²

したがって、

$$F = 1.20 \times 10^5 \times 3 \times 9.80665 / 2$$

$$= 1.77 \times 10^6 \text{ N}$$

- b. 上部トラニオンに発生する曲げ応力

上部トラニオンの各断面に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で求められる。

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

$$M = F \cdot X$$

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

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
- F : 上部トラニオン 1 個に作用する荷重 (N)
- X : モーメントアーム (mm)
- C : 中立軸からの距離 (mm)
- I : 評価断面の断面二次モーメント (mm⁴)
- d_o : 評価断面の外径 (mm)
- d_i : 評価断面の内径 (mm)

- c. 上部トラニオンに発生するせん断応力

上部トラニオンの各断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は、次式で求められる。

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

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

ここで、

- A : 評価断面の断面積 (mm²)

- d. 上部トラニオンに発生する応力強さ

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ の合成による応力強さ S (MPa) は、次式で求

められる。

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

e. 計算条件及び計算結果

上部トラニオンの各評価断面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。

いずれの評価断面においても、設計基準値を満足している。

4. 貯蔵中（地震時）の構造強度評価

(1) 解析モデル

貯蔵時において、TK-26 型は縦置き姿勢で下部トラニオン 4 個により貯蔵架台に固定される。

貯蔵中に地震力が作用する場合に発生する荷重は、下部トラニオン 4 個で支持するとして、トラニオンに発生する応力の評価は、応力評価式により行う。

(2) 荷重条件

地震により発生する加速度として、以下に示す値を設定し、評価を行う。

- ・水平方向：1.5G
- ・鉛直方向：1.0G

(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。

$$\text{(曲げ応力)} \quad \leq 1.5f_b$$

$$\text{(せん断応力)} \quad \leq 1.5f_s$$

$$\text{(組合せ応力)} \quad \leq 1.5f_t$$

ここで、

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

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

f_t : 設計温度(°C^(注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(°C^(注1))における設計降伏点

S_u : 設計温度(°C^(注1))における設計引張強さ

(注1) 貯蔵時の除熱解析結果に基づき設定

(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関係を別紙 3-4 図に示す。回転中心まわりの回転モーメントのつり合いより、下部トラニオンに作用する地震荷重は、次式で求められる。

$$F_s = \frac{\{G_H \cdot H + (G_v - G_c) \cdot R\} m \cdot g}{L + 2 \cdot \frac{R^2}{L}}$$

ここで、

F_s : 下部トラニオンに作用する地震荷重 (N)

m : TK-26 型の質量 = 1.18×10^5 kg

g : 重力加速度 = 9.80665 m/s²

H : TK-26 型の底面から重心位置までの高さ = mm

R : 回転中心から TK-26 型の重心位置までの距離 = mm

L : 回転中心から下部トラニオンまでの距離 = mm

G_H : 地震による水平方向の設計加速度 = 1.5 G

G_v : 地震による鉛直方向の設計加速度 = 1.0 G

G_c : 重力加速度 = 1.0 G

したがって、

$$F_s = 1.26 \times 10^6 \text{ N}$$

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各断面に発生する曲げ応力 σ_b (MPa) は、次式で求められる。

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

$$M = F_s \cdot X$$

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

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

X : モーメントアーム (mm)

C : 中立軸からの距離 (mm)

I : 評価断面の断面二次モーメント (mm⁴)

d_o : 評価断面の外径 (mm)

d_i : 評価断面の内径 (mm)

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各断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は、次式で求められる。

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

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

ここで、

A : 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

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ による組合せ応力 σ_T (MPa) は、次式で求められる。

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

e. 計算条件及び計算結果

下部トラニオンの各断面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。

いずれの評価断面においても、設計基準値を満足している。

別紙 3-1 表 TK-26 型のトラニオンの使用目的

項目	取付位置 (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(a)
上部トラニオン	0°、180°	垂直吊上げ	別紙 3-2 図(b)
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(a)
下部トラニオン	0°、180°	貯蔵時固縛	別紙 3-3 図(b)

別紙 3-2 表 垂直吊上時における上部トラニオンに発生する
応力の計算条件及び計算結果

評価位置	上部トラニオン 1個に作用する荷重 F(N)	モーメント アーム X (mm)	中立軸から の距離 C (mm)	評価断面の 外径 d _o (mm)	評価断面の 内径 d _i (mm)
Ⓐ	1.77×10 ⁶				
Ⓑ	1.77×10 ⁶				
Ⓒ	1.77×10 ⁶				
Ⓓ	1.77×10 ⁶				

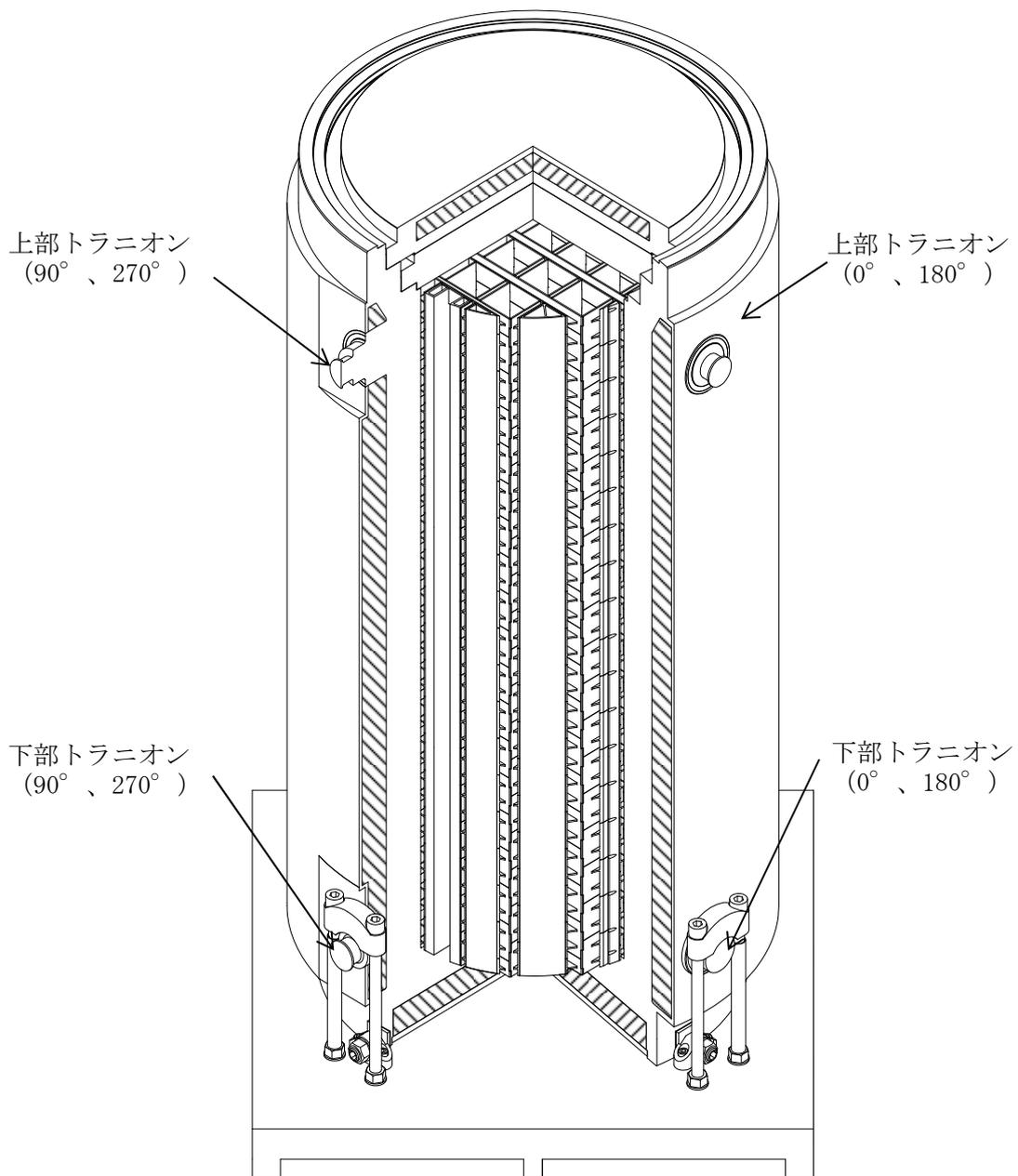
評価位置	曲げ応力 σ _b (MPa)	せん断応力 τ (MPa)	応力強さ S (MPa)	設計基準値 (MPa)
Ⓐ	394	115	457	636
Ⓑ	329	89.1	374	636
Ⓒ	295	61.0	320	636
Ⓓ	284	47.7	300	636

別紙 3-3 表 貯蔵中（地震時）における下部トラニオン各断面に発生する

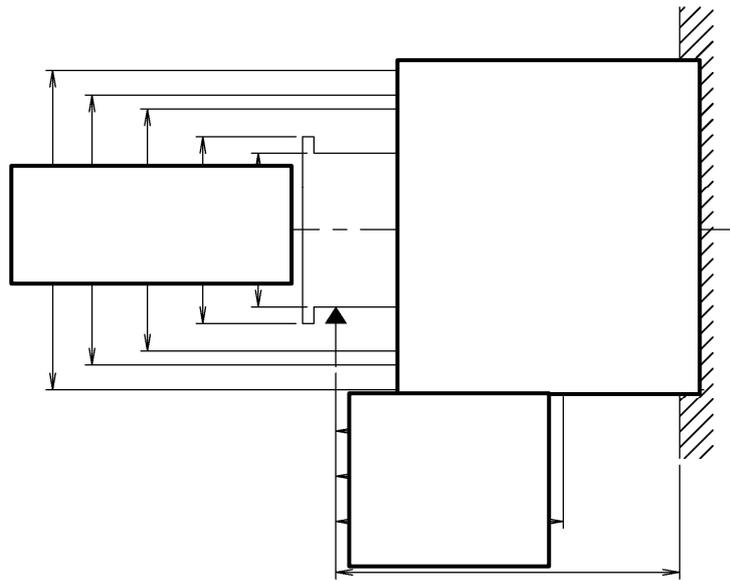
応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 (N)	モーメント アーム X (mm)	中立軸から の距離 C (mm)	評価断面の 外径 d_o (mm)	評価断面の 内径 d_i (mm)
Ⓑ	1.26×10^6				
Ⓒ	1.26×10^6				
Ⓓ	1.26×10^6				

評価位置	曲げ応力		せん断応力		組合せ応力	
	σ_b (MPa)	設計基準値 (MPa)	τ (MPa)	設計基準値 (MPa)	S (MPa)	設計基準値 (MPa)
Ⓑ	117	588	64	339	161	588
Ⓒ	183	588	70	339	219	588
Ⓓ	189	588	34	339	198	588



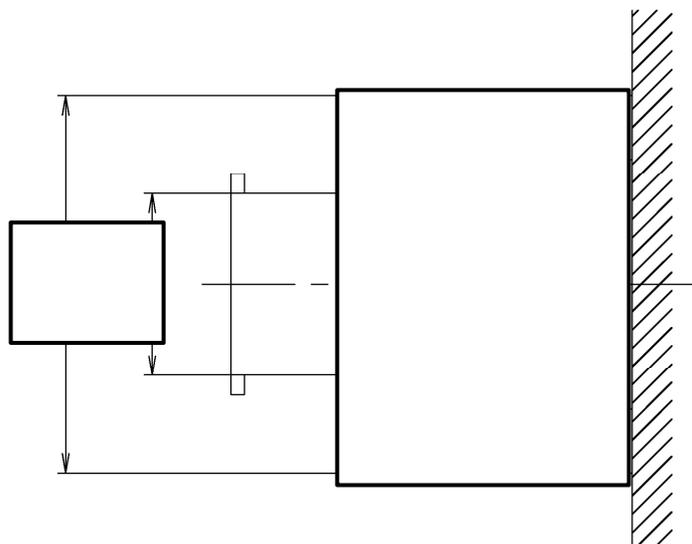
別紙 3-1 図 TK-26 型構造図



荷重作用点

(単位：mm)

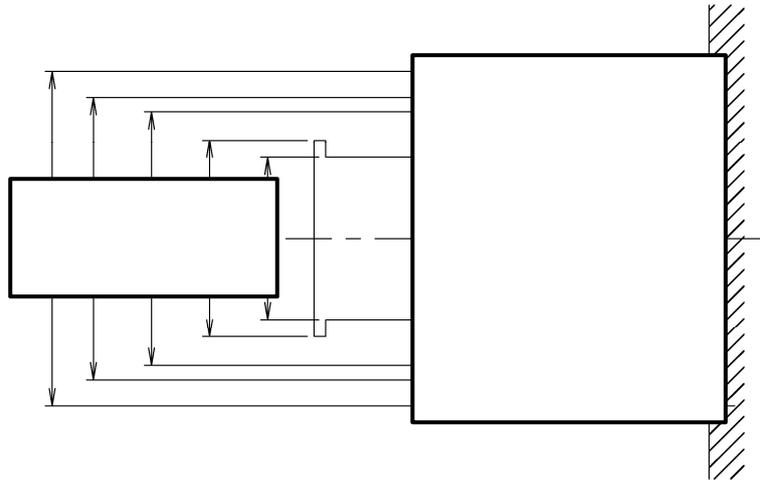
(a) 上部トラニオン (90° -270° 側)



(単位：mm)

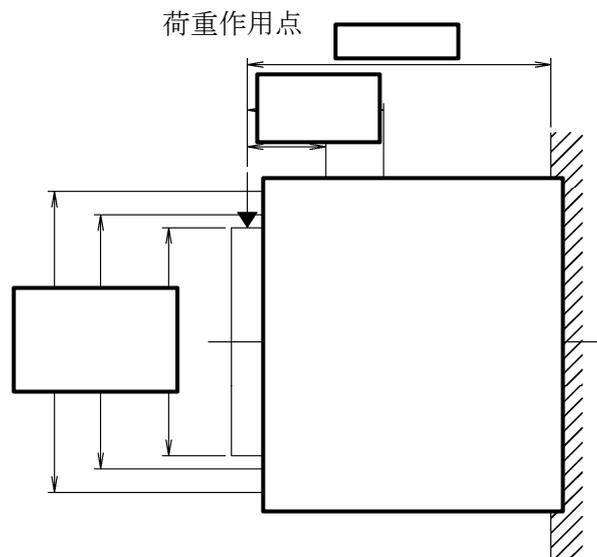
(b) 上部トラニオン (0° -180° 側)

別紙 3-2 図 上部トラニオン構造



(単位：mm)

(a) 下部トラニオン (90° -270° 側)

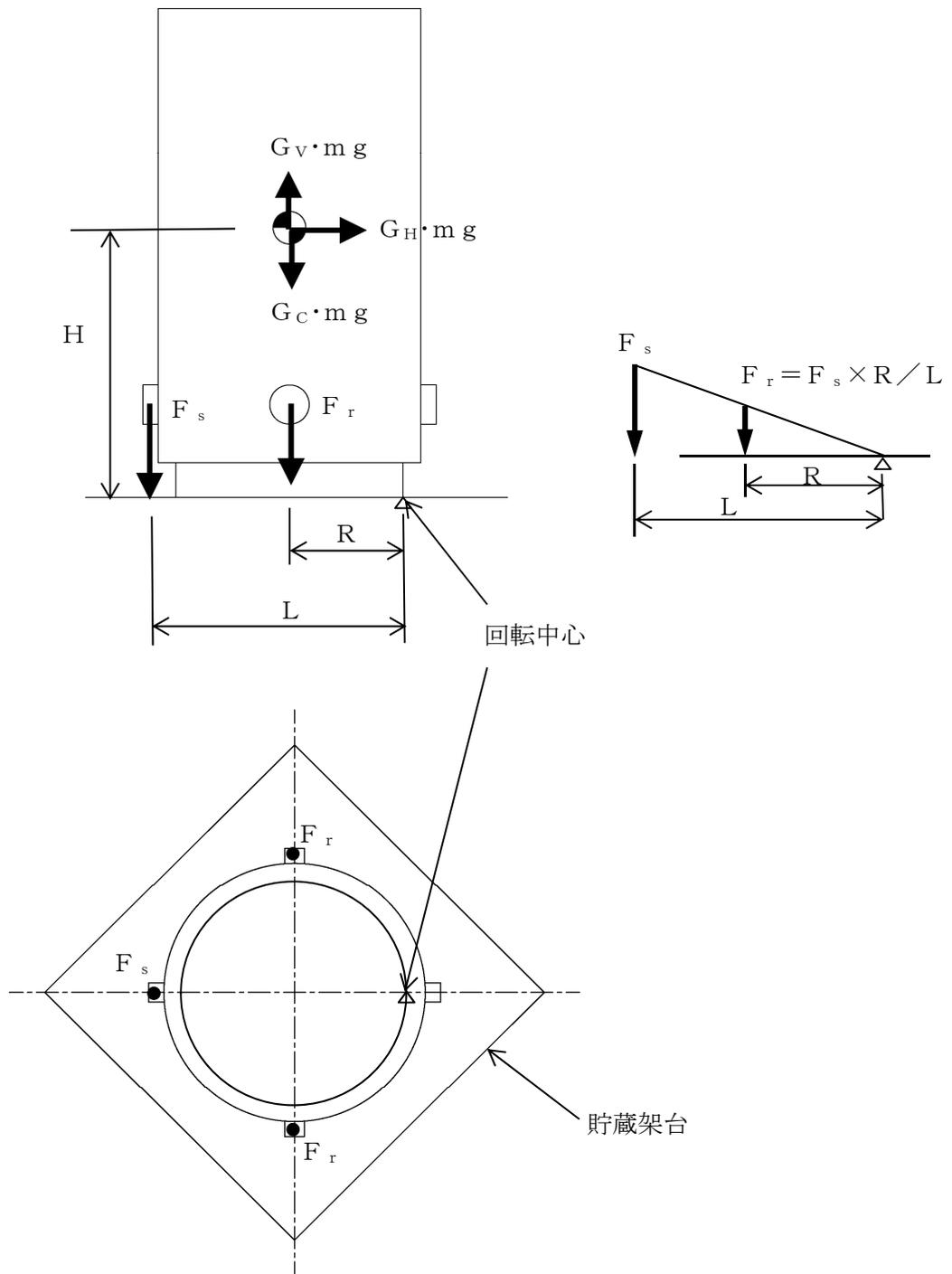


(単位：mm)

(b) 下部トラニオン (0° -180° 側)

注) 下部トラニオンはいずれも同様の荷重が作用するが、モーメントアームの大きい 0° -180° 側のトラニオンを評価対象とする。

別紙 3-3 図 下部トラニオン構造



別紙 3-4 図 貯蔵中（地震時）に下部トラニオンに作用する荷重