

Doc No. 16-180-I-021 Rev. 1

2021年6月10日

トランスニュークリア株式会社

補足説明資料 2-1

TK-26型を使用済燃料貯蔵施設において使用する場合の
想定事象に対する安全評価に関する説明資料

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. 想定事象の選定及び様態.....	2
2.1 想定事象の選定.....	2
2.2 想定事象の様態.....	2
3. TK-26 型及び付帯設備の仕様	4
3.1 構造	4
3.2 材質	5
3.3 寸法	5
3.4 質量	5
4. 構造強度解析	6
4.1 評価手法	6
4.2 解析方法及び解析条件.....	6
4.3 解析結果	6
5. 想定事象に対する TK-26 型の閉じ込め機能の健全性.....	7
6. 参考文献	8
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 TK-26 型の落下及び転倒事象時に発生する衝撃加速度又は TK-26 型への重量物落下事象時の衝撃荷重について	
別紙 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	
別紙 4 構造解析コード (ABAQUS) による特別の試験条件における密封容器の構造強度解析条件及び結果	

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、設計最大評価事故（安全設計上想定される事故のうち、公衆が被ばくする線量を評価した結果、その線量が最大となるものをいう。）が発生した場合において、事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものでなければならない。

TK-26 型は、使用済燃料貯蔵施設における TK-26 型の取扱いに起因し、TK-26 型の基本的安全機能に影響を及ぼすことが想定される事象（以下、「想定事象」という。）に対して、外部へ放射性物質を放出することはなく事故事象に至ることのない設計とする。

2. 想定事象の選定及び様態

2.1 想定事象の選定

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。想定事象として以下を選定した。

- (1) 仮置架台への水平落下
- (2) 衝撃吸収材への垂直落下
- (3) 貯蔵架台への垂直落下
- (4) たて起こし架台への転倒衝突
- (5) 衝撃吸収材への転倒衝突
- (6) 三次蓋の二次蓋への落下

2.2 想定事象の様態

2.1 「想定事象の選定」にて選定した想定事象の様態を以下に示す。

(1) 仮置架台への水平落下

TK-26 型は、上部トラニオン及び下部トラニオンを介して仮置架台に設置される。仮置架台へ設置する際に仮置架台へ水平落下した場合、上部トラニオン及び下部トラニオンが仮置架台のトラニオン受け部へ衝突する（第 1 図参照）。なお、TK-26 型を仮置架台へ設置する際には、金属キャスク本体の上部及び下部に事業所外運搬用の緩衝体を取り付けられた状態である。

(2) 衝撃吸収材への垂直落下

TK-26 型は、たて起こし架台上でたて起こされた後、衝撃吸収材の上方を通過し、貯蔵架台の上方に移送される。衝撃吸収材の上方を通過中に TK-26 型が落下した場合、金属キャスク本体の底部が衝撃吸収材へ衝突する（第 2 図参照）。なお、TK-26 型を貯蔵架台に移送する際には、三次蓋が取り付けられた状態である。

(3) 貯蔵架台への垂直落下

TK-26 型は、たて起こし架台上でたて起こされた後、衝撃吸収材の上方を通過し、貯蔵架台の上方に移送される。TK-26 型が貯蔵架台の上方に位置する際に落下した場合、金属キャスク本体の底部が貯蔵架台へ衝突する（第 3 図参照）。なお、TK-26 型を貯蔵架台に移送する際には、三次蓋が取り付けられた状態である。

(4) たて起こし架台への転倒衝突

TK-26 型は、仮置架台からたて起こし架台へ移送され、緩衝体を取り外された後、下部トラニオンを回転中心とし、上部トラニオンを使用してたて起こされる。TK-26 型が

たて起こし架台側へ転倒した場合、上部トラニオンがたて起こし架台のトラニオン受け部へ衝突する（第 4 図参照）。なお、TK-26 型をたて起こす際には、三次蓋が取り付けられた状態である。

(5) 衝撃吸収材への転倒衝突

TK-26 型は、仮置架台からたて起こし架台へ移送され、緩衝体を取り外された後、下部トラニオンを回転中心とし、上部トラニオンを使用してたて起こされる。TK-26 型が衝撃吸収材側へ転倒した場合、金属キャスク本体の上部が衝撃吸収材へ衝突する（第 5 図参照）。なお、TK-26 型をたて起こす際には、三次蓋が取り付けられた状態である。

(6) 三次蓋の二次蓋への落下

TK-26 型は、貯蔵架台へ設置された後、搬送台車等により検査架台へ移送され、三次蓋が取り外される。三次蓋が取り外される際に、二次蓋上で落下した場合、三次蓋が二次蓋へ衝突する（第 6 図参照）。

3. TK-26 型及び付帯設備の仕様

TK-26 型の仕様及び使用済燃料貯蔵施設の付帯設備である仮置架台、たて起こし架台並びに貯蔵架台の仕様例を以下に示す。

3.1 構造

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。胴及び蓋部（一次蓋、一次蓋ボルト）は、（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。）に基づき密封容器として設計されている。

(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。

(3) 付帯設備の構造及び TK-26 型との取合い

仮置架台及びたて起こし架台は、1 対の上部トラニオン及び 1 対の下部トラニオンを使用して TK-26 型を支持する。TK-26 型をたて起こす際は、たて起こし架台に設置された状態で上部トラニオンにより吊上げ、1 対の下部トラニオンを回転中心としてたて起こされる。

貯蔵架台は、TK-26 型を使用済燃料貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）の床面に固定するための支持構造物であり、2 対の下部トラニオンを介して TK-26 型が固定される。

衝撃吸収材は、たて起こし架台及びその周辺（TK-26 型のたて起こし方向）に敷設され、TK-26 型のたて起こしや貯蔵架台への移送時の万一の転倒・落下時において TK-26 型に発生する衝撃を緩和する。

3.2 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、並びに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。

また、仮置架台、たて起こし架台及び貯蔵架台の主要な材質（例）を第 2 表に示す。

3.3 寸法

TK-26 型の代表寸法を第 3 表に示す。

3.4 質量

TK-26 型の質量を第 4 表に示す。

4. 構造強度解析

4.1 評価手法

2.1「想定事象の選定」にて選定した事象において、TK-26型が付帯設備（仮置架台、たて起こし架台、貯蔵架台及び衝撃吸収材）に衝突する際に衝突部の変形により吸収されるエネルギー、あるいは、破断に必要な力を評価することで、TK-26型に作用する衝撃加速度又は衝撃荷重を算出する。

算出された衝撃加速度又は衝撃荷重を第5表に示す。また、衝撃加速度又は衝撃荷重の算出方法を別紙2に示す。想定事象のうち、(1) 仮置架台への水平落下及び(4) たて起こし架台への転倒衝突については、衝撃加速度が「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」（以下、「事業所外運搬」という。）で定めるBM型輸送物に係る特別の試験条件（落下試験I）（以下、「特別の試験条件」という。）で発生する衝撃加速度（9m水平落下： \square ）を下回り、衝撃力の作用する位置が特別の試験条件と同じ又は蓋部近傍に荷重が直接作用しないことから、特別の試験条件の構造強度解析条件に含まれる事象である。

また、(2) 衝撃吸収材への垂直落下及び(3) 貯蔵架台への垂直落下についても、衝撃加速度が特別の試験条件で発生する衝撃加速度（9m底部垂直加速度： \square ）を下回り、衝撃力の作用する位置が特別の試験条件と同じ又は蓋部近傍に荷重が直接作用しないことから、特別の試験条件の構造強度解析条件に含まれる事象である。

(5) 衝撃吸収材への転倒衝突及び(6) 三次蓋の二次蓋への落下の事象については、衝撃加速度又は衝撃荷重が特別の試験条件で発生する衝撃加速度又は衝撃荷重を下回るものの、蓋部近傍に荷重が直接作用することから、構造強度解析を実施する。

4.2 解析方法及び解析条件

構造強度解析フローを第7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想定事象毎に設定し、貯蔵時に密封境界を構成する部材に発生する応力が金属キャスク構造規格にて定義されている供用状態Dの許容応力以下であることを確認する。

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。構造解析コード（ABAQUS）による密封容器の解析条件を別紙3に示す。

4.3 解析結果

(5) 衝撃吸収材への転倒衝突及び(6) 三次蓋の二次蓋への落下事象における密封容器の構造強度解析結果を第6表及び第7表に示す。TK-26型の密封境界を構成する部材に発生する応力は、設計基準を満足することを確認した。

なお、特別の試験条件における密封容器の構造強度解析結果は別紙4に示すとおりであり、特別の試験条件においてTK-26型の密封境界を構成する部材に発生する応力は、金属

キャスク構造規格にて定義されている供用状態 D の許容応力以下である。

5. 想定事象に対する TK-26 型の閉じ込め機能の健全性

4.3「解析結果」に示す構造強度解析結果より、密封境界を構成する部材に発生する応力は設計基準を満足しており、閉じ込め機能の健全性は維持される。したがって、使用済燃料貯蔵施設において TK-26 型を使用する場合、取扱いに起因する事象を考慮しても公衆に対し放射線被ばくを及ぼす可能性のある事故に至ることはなく、使用済燃料貯蔵施設への影響はない。

6. 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
三次蓋	ステンレス鋼
一次蓋ボルト	合金鋼
二次蓋ボルト	合金鋼
三次蓋ボルト	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 仮置架台、たて起こし架台及び貯蔵架台の主要な材質（例）

付帯設備	材質
仮置架台	炭素鋼
たて起こし架台	炭素鋼
貯蔵架台	炭素鋼

第3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4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
(たて起こし) 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5表 TK-26型の落下及び転倒事象時に発生する衝撃加速度
又はTK-26型への重量物落下事象時の衝撃荷重

No.	想定事象	衝撃加速度 又は衝撃荷重	評価方法	評価結果
(1)	仮置架台への 水平落下	46 G	9m 水平落下の 衝撃加速度 <input type="checkbox"/> G 以下 であることを確認	別紙2
(2)	衝撃吸収材への 垂直落下	11 G	9m 底部垂直落下の 衝撃加速度 <input type="checkbox"/> G 以下 であることを確認	別紙2
(3)	貯蔵架台への 垂直落下	39 G	9m 底部垂直落下の 衝撃加速度 <input type="checkbox"/> G 以下 であることを確認	別紙2
(4)	たて起こし架台 への転倒衝突	73 G	9m 水平落下の 衝撃加速度 <input type="checkbox"/> G 以下 であることを確認	別紙2
(5)	衝撃吸収材への 転倒衝突	34 G (蓋部近傍)	ABAQUS コードによる 解析 (蓋部近傍 50 G)	第6表
(6)	三次蓋の二次蓋 への落下	8.32×10^5 N	ABAQUS コードによる解析 (衝撃荷重 8.32×10^5 N)	第7表

第6表 衝撃吸収材への転倒衝突時の評価結果（供用状態D）

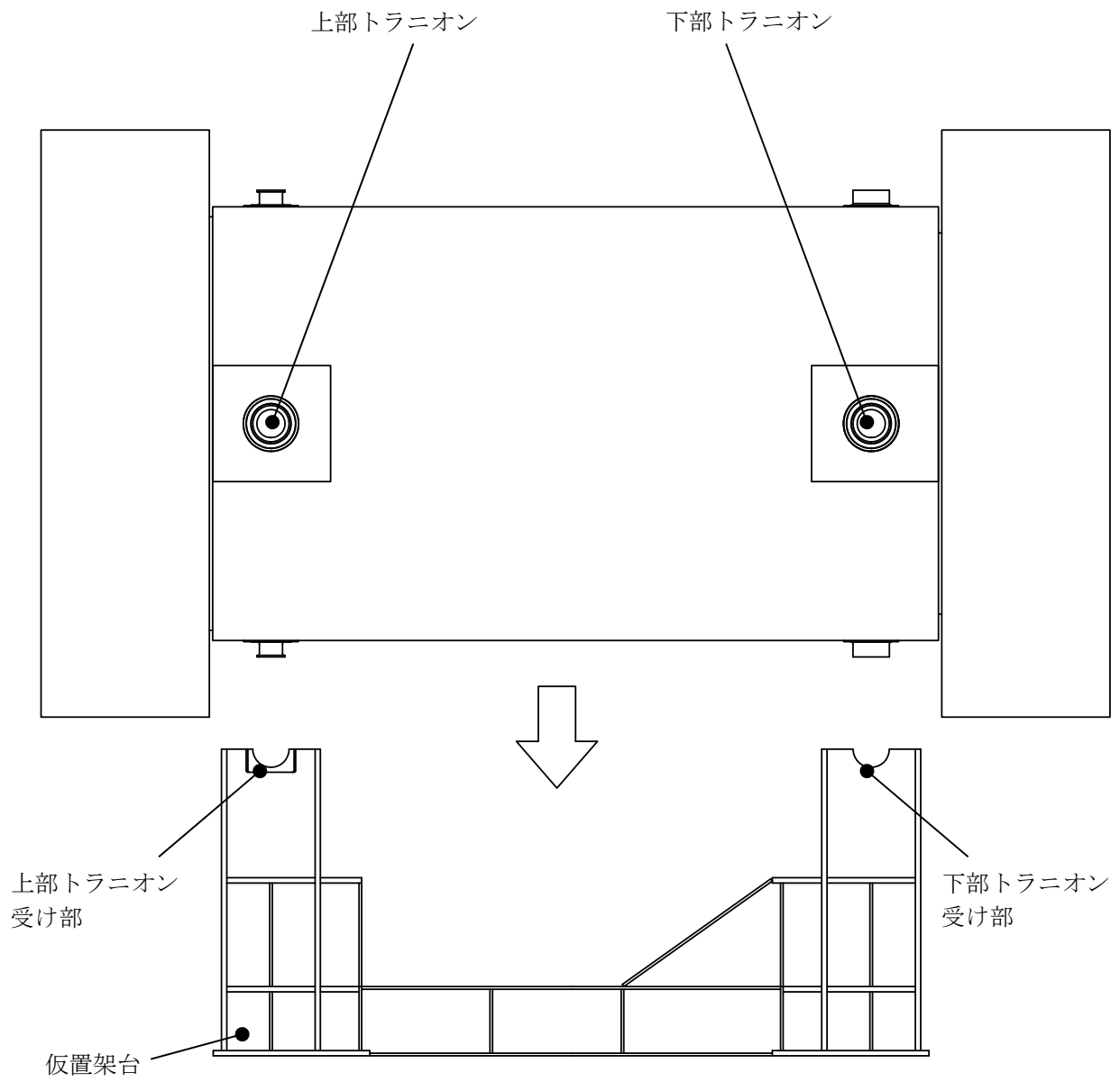
項目 ^(注1)		評価条件	評価結果	設計基準値
一次蓋ボルト の応力	平均引張応力	50 G (蓋部近傍)	216 MPa	973 MPa
	平均引張応力+曲げ応力		401 MPa	973 MPa
胴（シール部）の応力強さ			68 MPa	182 MPa
一次蓋（シール部）の応力強さ			84 MPa	185 MPa
胴（上部）の応力強さ			75 MPa	377 MPa
胴（中央部）の応力強さ			16 MPa	251 MPa
胴（下部）の応力強さ			4 MPa	377 MPa
底板（中央部）の応力強さ			2 MPa	251 MPa
底板（端部）の応力強さ			4 MPa	377 MPa

(注1) 応力評価位置は、第8図参照。

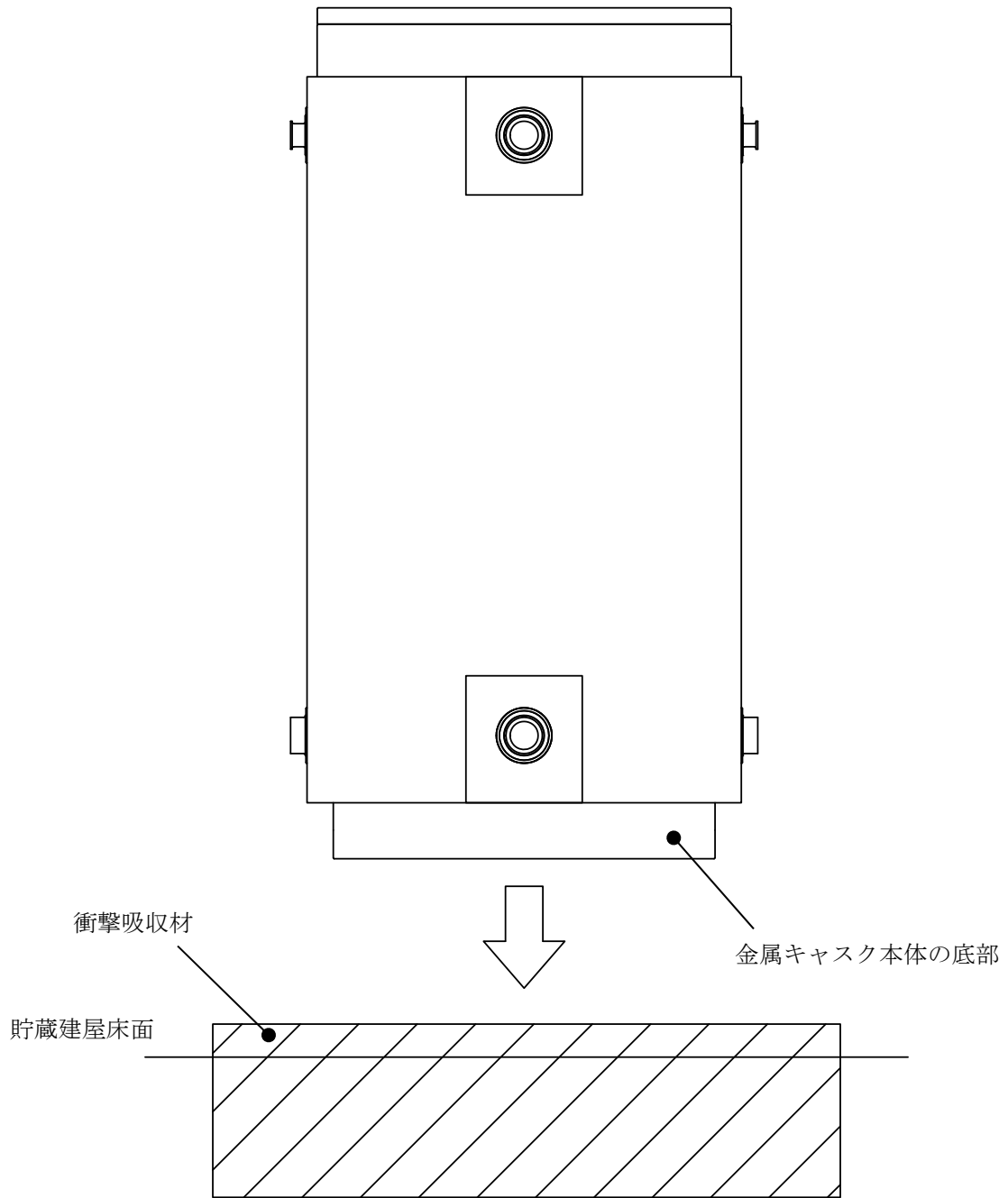
第7表 三次蓋の二次蓋への落下時の評価結果（供用状態D）

項目 ^(注1)		評価条件	評価結果	設計基準値
一次蓋ボルト の応力	平均引張応力	8.32×10 ⁵ N	208 MPa	973 MPa
	平均引張応力+曲げ応力		223 MPa	973 MPa
胴（シール部）の応力強さ			32 MPa	182 MPa
一次蓋（シール部）の応力強さ			16 MPa	185 MPa
胴（上部）の応力強さ			1 MPa	377 MPa
胴（中央部）の応力強さ			3 MPa	251 MPa
胴（下部）の応力強さ			1 MPa	377 MPa
底板（中央部）の応力強さ			1 MPa	251 MPa
底板（端部）の応力強さ			1 MPa	377 MPa

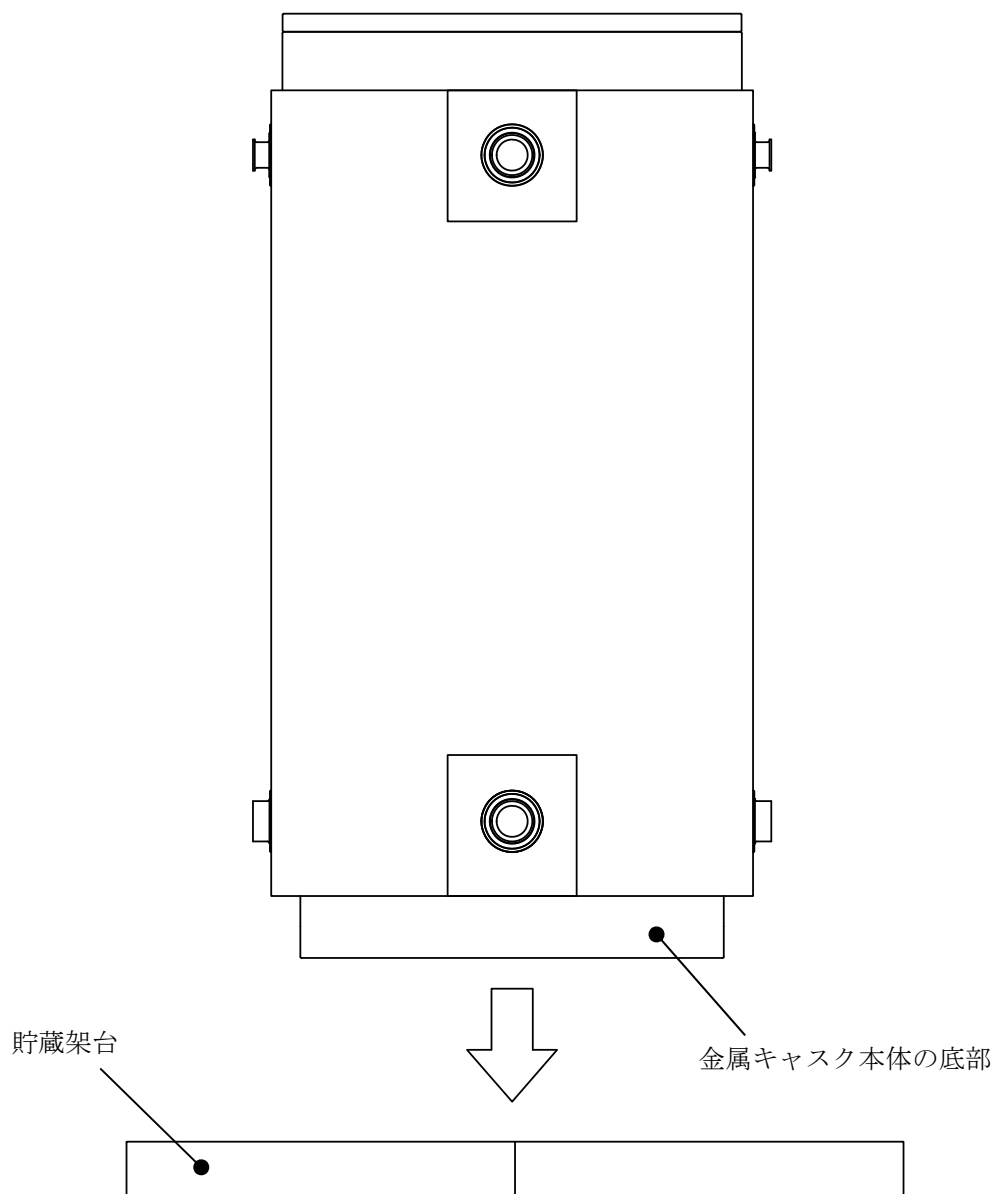
(注1) 応力評価位置は、第8図参照。



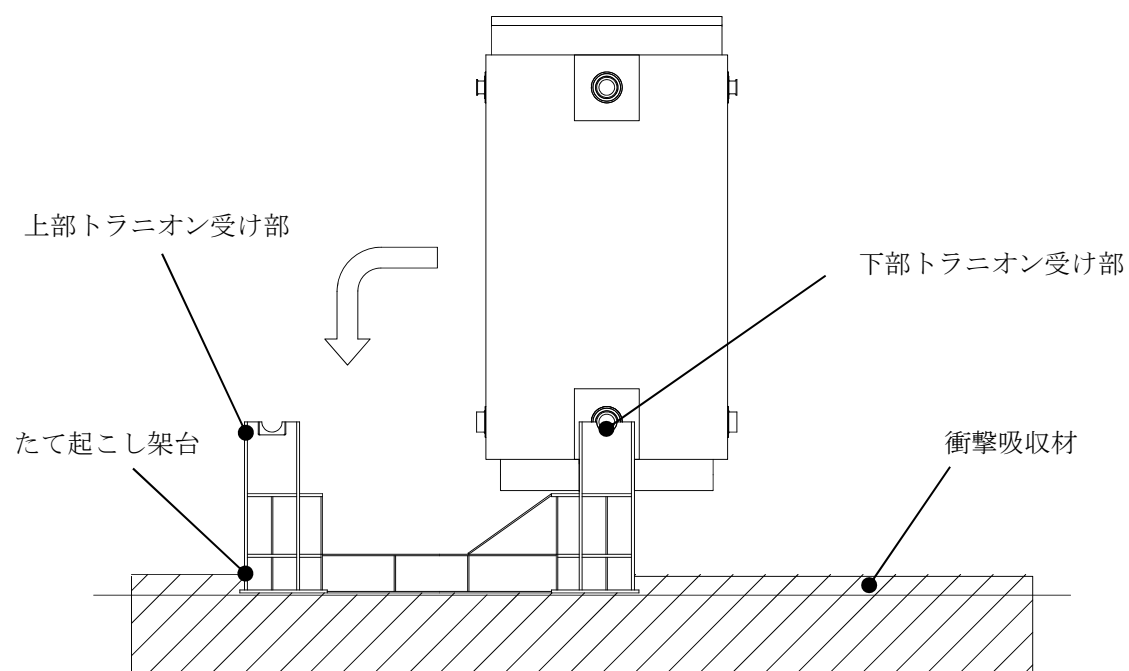
第1図 仮置架台への水平落下



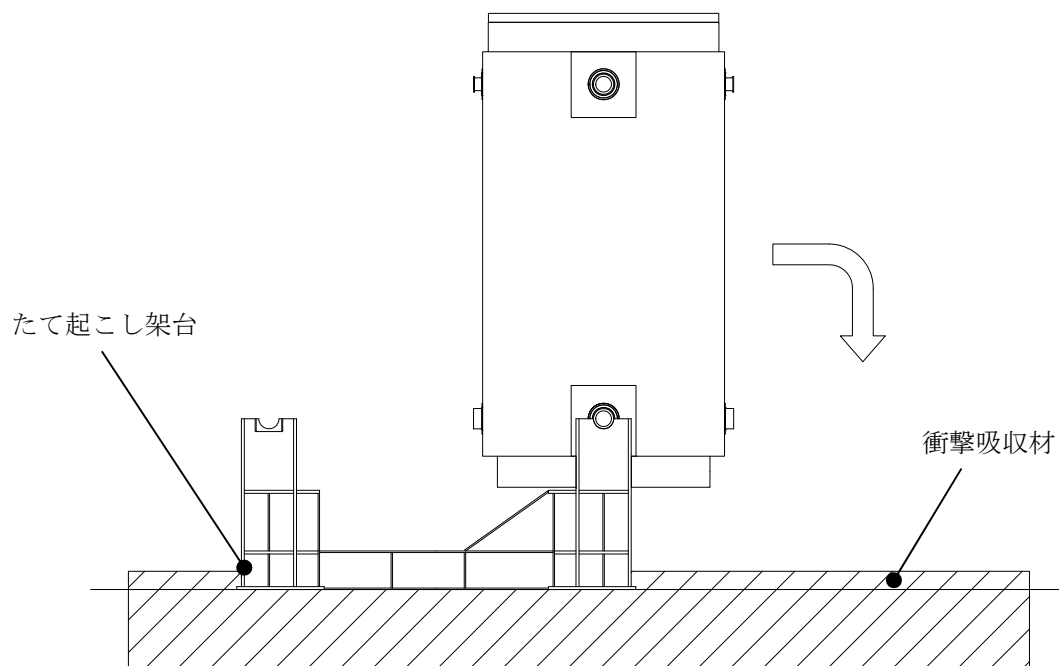
第2図 衝撃吸収材への垂直落下



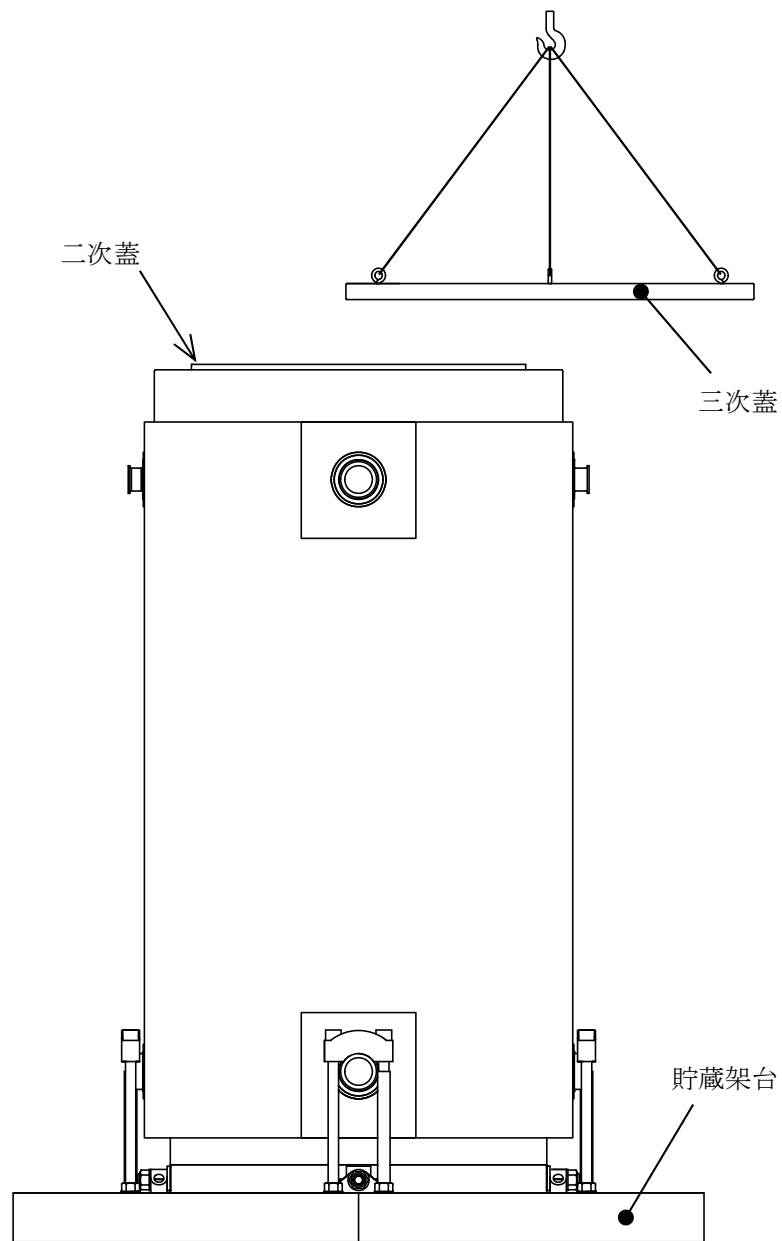
第3図 貯蔵架台への垂直落下



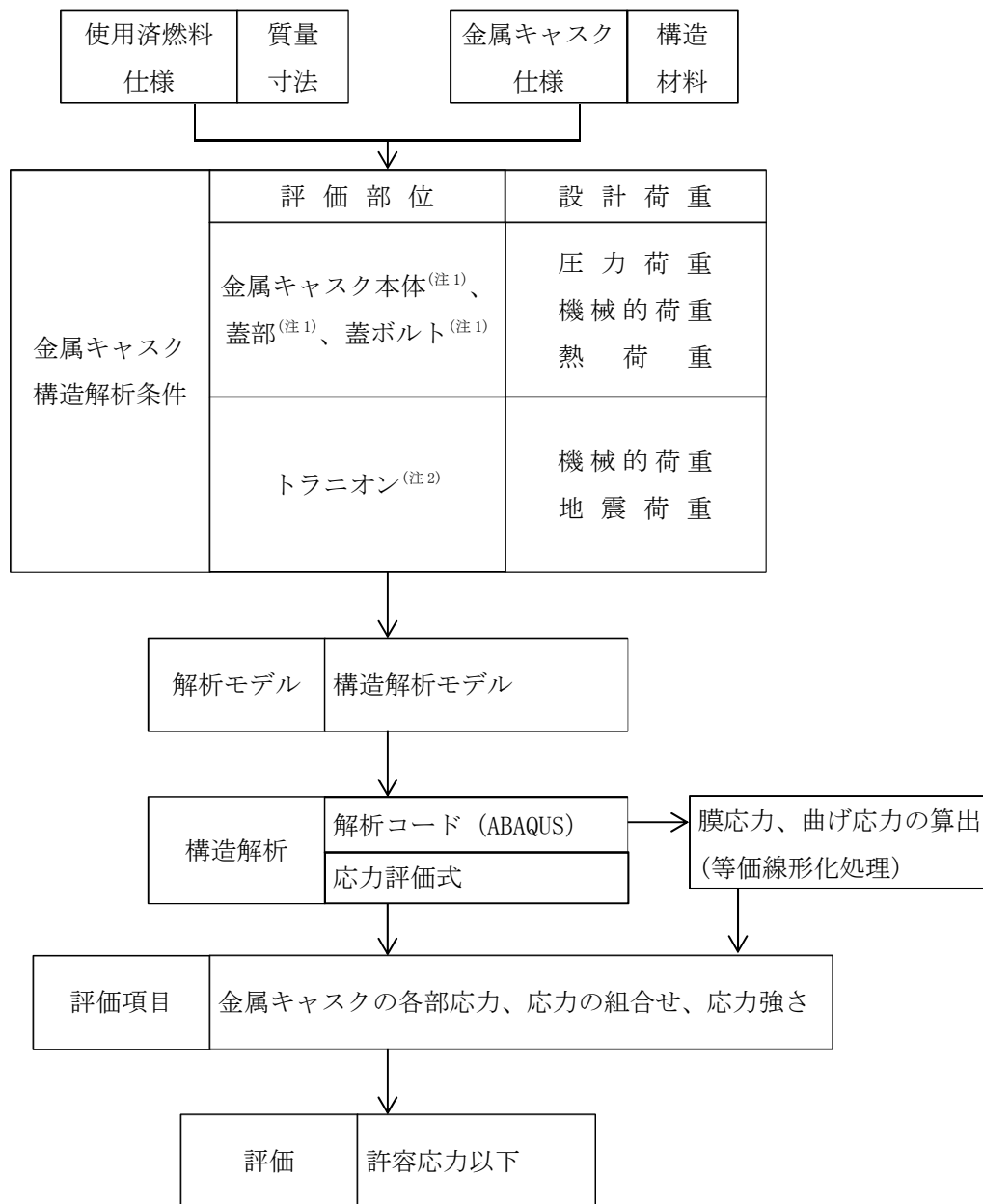
第4図 たて起こし架台への転倒衝突



第 5 図 衝撃吸収材への転倒衝突



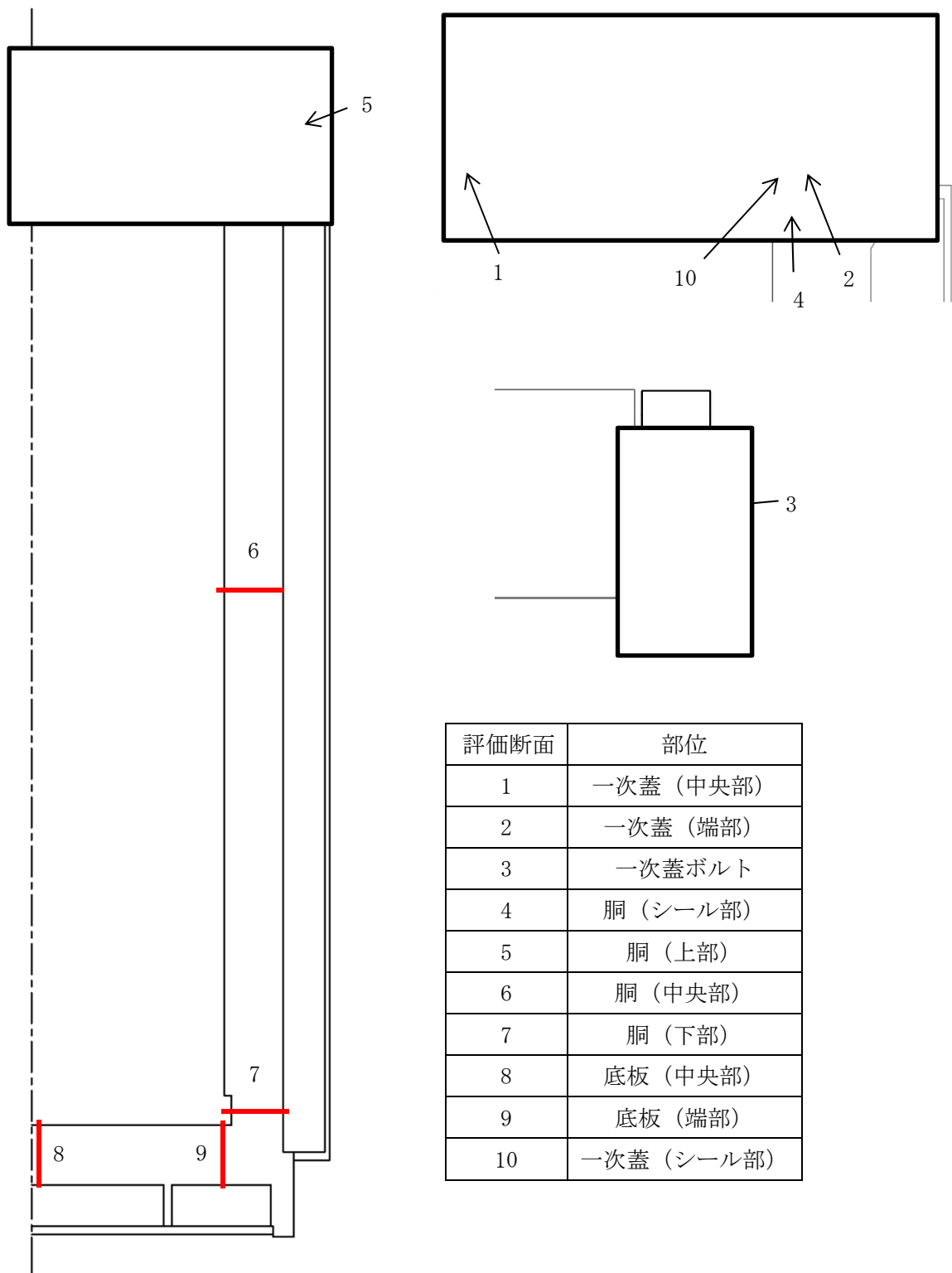
第 6 図 三次蓋の二次蓋への落下



(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7図 構造強度解析フロー



第8図 密封容器評価応力評価位置

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。

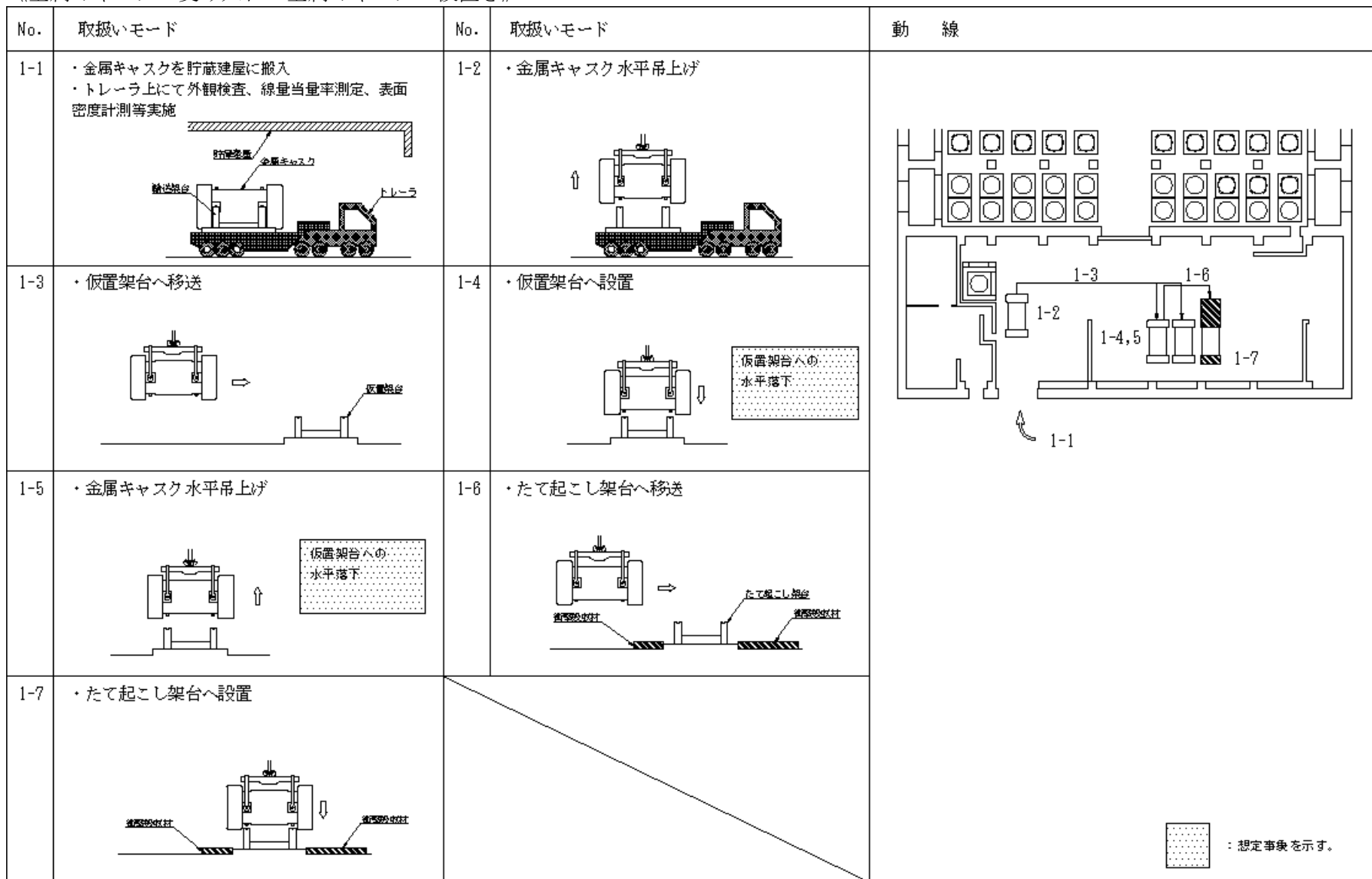
トレーラにより貯蔵建屋受入れ区域に搬入された TK-26 型は、事業所外運搬に必要な緩衝体を取り付けた状態で、受入れ区域の天井クレーンで吊上げ、仮置架台又はたて起こし架台に設置される。

TK-26 型は、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、垂直吊上げ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、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、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。

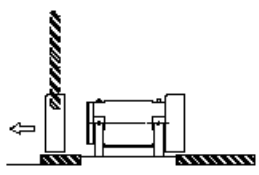
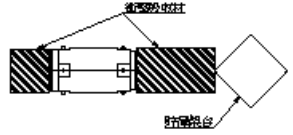
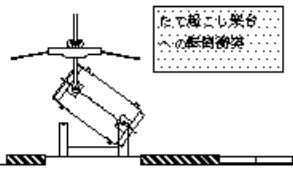
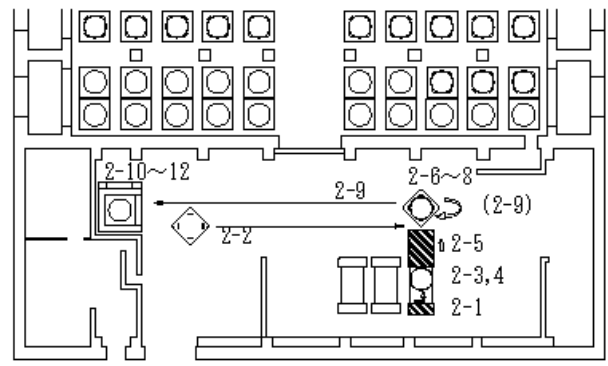

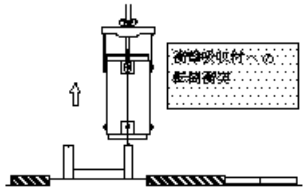
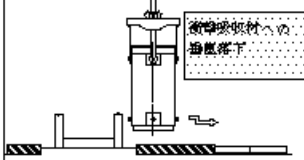
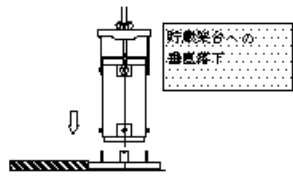
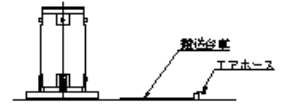
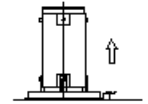
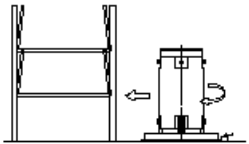
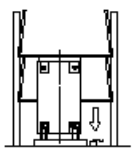
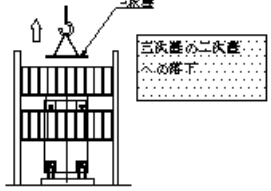
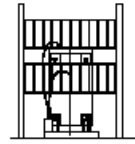
《金属キャスクの受け入れ～金属キャスクの仮置き》



別紙 1-2

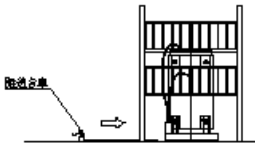
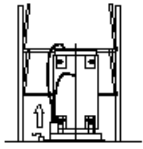
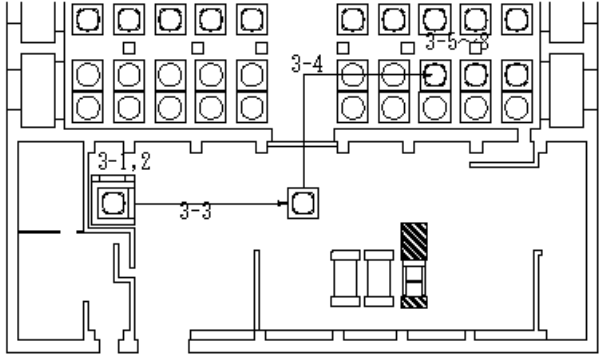
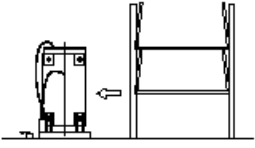
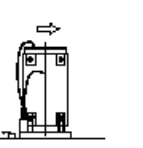
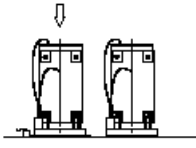
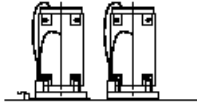
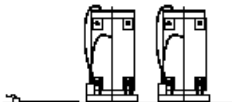
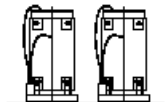
別紙 1-1 図 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクハンドリングフロー (1/3)

《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 	 <p style="text-align: right;">  : 想定事象を示す。 </p>
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 1-1 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)

TK-26 型の落下及び転倒事象時に発生する衝撃加速度
又は TK-26 型への重量物落下事象時の衝撃荷重について

1. 概要

使用済燃料貯蔵施設における TK-26 型の取扱いに起因し、TK-26 型の基本的安全機能に影響を及ぼすことが想定される事象（以下、「想定事象」という。）として、以下を選定している。

- (1) 仮置架台への水平落下
- (2) 衝撃吸収材への垂直落下
- (3) 貯蔵架台への垂直落下
- (4) たて起こし架台への転倒衝突
- (5) 衝撃吸収材への転倒衝突
- (6) 三次蓋の二次蓋への落下

各事象において TK-26 型に生じる衝撃加速度又は衝撃荷重の算出過程について記載する。

2. 衝撃加速度又は衝撃荷重の算出

2.1 仮置架台への水平落下

(1) 評価事象

貯蔵建屋に搬入された TK-26 型は、トレーラ上で輸送架台と切り離され、緩衝体に取り付けられた状態で仮置架台へ設置される。仮置架台へ設置する際に TK-26 型が水平落下した場合、仮置架台へ衝突する。ここでは、TK-26 型が仮置架台に衝突した場合の衝撃加速度について算出する。

(2) 評価条件

TK-26 型は、上部トラニオン及び下部トラニオンを介して、仮置架台に設置される。仮置架台への水平落下時に、TK-26 型と仮置架台は、上部トラニオン及び下部トラニオンとトラニオン受け部が衝突するものとする。

(3) 衝撃加速度の算出

仮置架台への水平落下時に、TK-26 型に作用する加速度は、上部トラニオン及び下部トラニオンとトラニオン受け部との衝撃力を求め、それぞれの衝撃力の合計値を TK-26 型の質量で除することにより衝撃加速度を求める。

a. 上部トラニオン及び下部トラニオンとトラニオン受け部との衝撃力

仮置架台への水平落下時において、トラニオン受け部は剛とし、別紙 2-1 図に示す評価位置でトラニオンが損傷すると考える。トラニオンが仮置架台のトラニオン受け部と衝突する場合、評価位置ではトラニオンの曲げ及びせん断により損傷すると考えられるが、保守的に純曲げのみにより損傷すると想定する。トラニオンが反力による曲げモーメントのみを受けて破壊に至るとすれば、作用する衝撃加速度が最大となるのはトラニオン全断面が塑性に至り破壊する寸前であり、その最大反力 F_B (N) は塑性破壊が生じる極限曲げモーメント M_P (N・mm) を用いた以下の式で与えられる。

$$F_B = M_P / L$$

$$M_P = S_y \cdot Z_P$$

ここで、

S_y : 設計降伏点 = 636 (MPa)

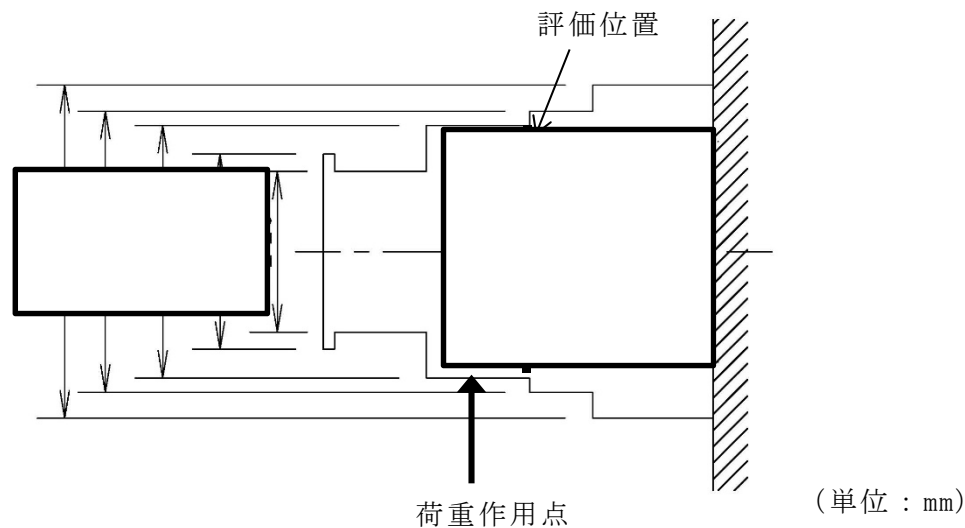
Z_P : 塑性断面係数 = $(d_o^3 - d_i^3) / 6$ (mm³)

d_o : 評価断面外径 = 220 (mm)

d_i : 評価断面内径 = 152 (mm)

L : モーメントアーム = 51 (mm)

したがって、 $F_B = 1.48 \times 10^7$ (N) と算出される。



別紙 2-1 図 トラニオン形状図

b. 衝撃加速度の算出

仮置架台への水平落下では、上部トラニオン（2個）及び下部トラニオン（2個）の塑性崩壊により発生する衝撃力が作用する。したがって、TK-26型に作用する衝撃加速度 α (G) は以下の式より求まる。

$$\alpha = \frac{4F_B}{m \cdot g}$$

ここで、

F_B : トラニオンに生じる最大反力 = 1.48×10^7 (N)

m : 水平吊上時のキャスク質量 = 1.322×10^5 (kg)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

したがって、 $\alpha = 46$ (G) と算出される。

2.2 衝撃吸収材への垂直落下

(1) 評価事象

TK-26 型は、たて起こし架台上でたて起こされた後、衝撃吸収材の上方を通過し、貯蔵架台の上方に移送される。衝撃吸収材の上方を通過中に TK-26 型が落下した場合、金属キャスク本体の底部が衝撃吸収材へ衝突する。ここでは、TK-26 型が衝撃吸収材に衝突した場合の衝撃加速度について算出する。

(2) 評価条件

金属キャスク本体の底部が衝撃吸収材と衝突する。また、たて起こし架台近傍の床面に敷設される衝撃吸収材の圧潰応力を 3 (MPa) とする。

(3) 衝撃加速度の算出

衝撃吸収材との衝突により TK-26 型に作用する衝撃加速度 α (G) は、TK-26 型の落下エネルギーが衝撃吸収材の変形によって全て吸収されるものとして以下の式により算出される。

$$\alpha = \frac{\sigma \times A}{m \times g}$$

ここで、

σ : 衝撃吸収材の圧潰応力 = 3 (MPa)

A : TK-26 型の衝撃吸収材への貫入面積 = $\pi / 4 \times d^2$ (mm²)

d : 金属キャスク本体の底部直径 = (mm)

m : TK-26 型の質量 (垂直吊上時) = 1.200×10^5 (kg)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

したがって、 $\alpha = 11$ (G) と算出される。

2.3 貯蔵架台への垂直落下

(1) 評価事象

TK-26 型は、たて起こし架台上でたて起こされた後、衝撃吸収材の上方を通過し、貯蔵架台の上方に移送される。TK-26 型が貯蔵架台の上方に位置する際に落下した場合、金属キャスク本体の底部が貯蔵架台へ衝突する。ここでは、TK-26 型が貯蔵架台に衝突した場合の衝撃加速度について算出する。

(2) 評価条件

金属キャスク本体の底部が貯蔵架台と衝突する。なお、貯蔵架台上方における TK-26 型の吊上げ高さは貯蔵架台上面から 100mm とする。

(3) 衝撃加速度の算出

貯蔵架台との衝突により TK-26 型に作用する加速度 α (G) は、TK-26 型の落下エネルギーが貯蔵架台の変形によって全て吸収されるものとして以下の式により算出される。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \times v^2}{m \times g}}$$

ここで、

K : 貯蔵架台のバネ定数 = 8.50×10^9 (N/m)

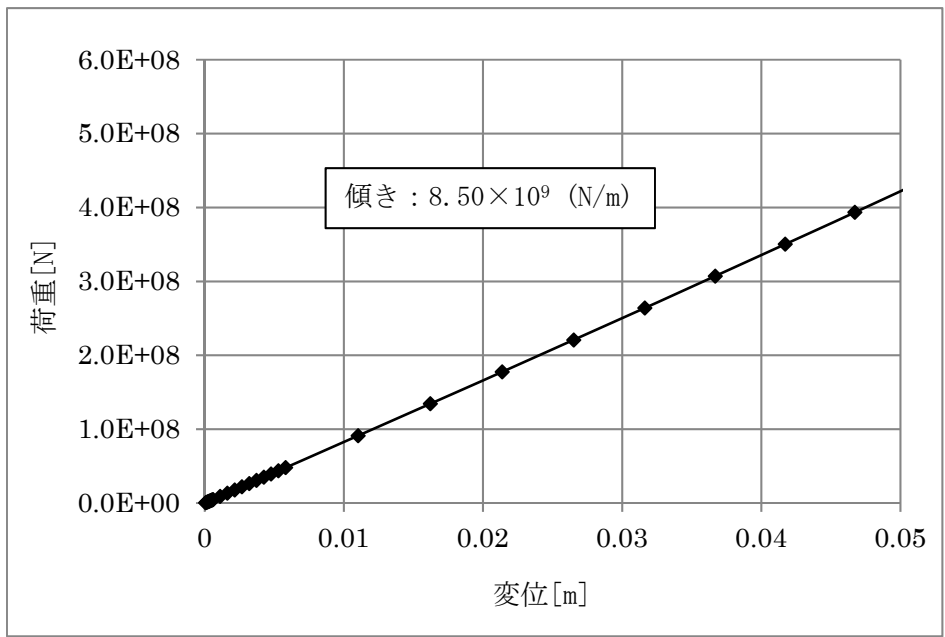
v : TK-26 型の落下速度 = 1.4 (m/s)

m : TK-26 型の質量 (垂直吊上時) = 1.200×10^5 (kg)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

したがって、 $\alpha = 39$ (G) と算出される。

なお、貯蔵架台のバネ定数は、TK-26 型と貯蔵架台が接触する範囲に荷重を作用させた場合の静解析 (ABAQUS コードによる解析) の変位結果から算出した値である。貯蔵架台のバネ定数を算出した解析結果を別紙 2-2 図に示す。



別紙 2-2 図 貯蔵架台のバネ定数解析結果

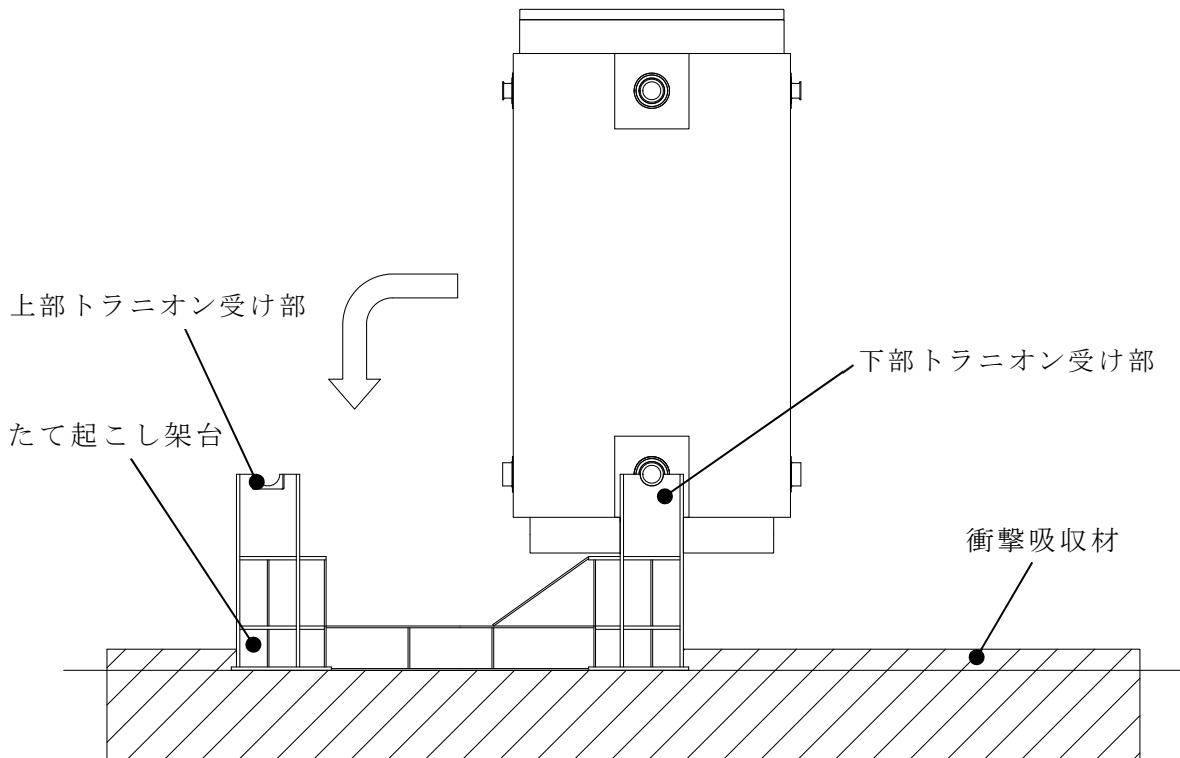
2.4 たて起こし架台への転倒衝突

(1) 評価事象

TK-26 型は、仮置架台からたて起こし架台へ移送され、緩衝体を取り外された後、下部トラニオンを回転中心とし、上部トラニオンを使用してたて起こされる。TK-26 型がたて起こし架台側へ転倒した場合、上部トラニオンがたて起こし架台のトラニオン受け部へ衝突する。ここでは、たて起こし架台のトラニオン受け部へ衝突する際に TK-26 型に発生する衝撃加速度について算出する。

(2) 評価条件

TK-26 型が直立状態からたて起こし架台側へ転倒し、上部トラニオンとたて起こし架台のトラニオン受け部が衝突するものとする（別紙 2-3 図参照）。



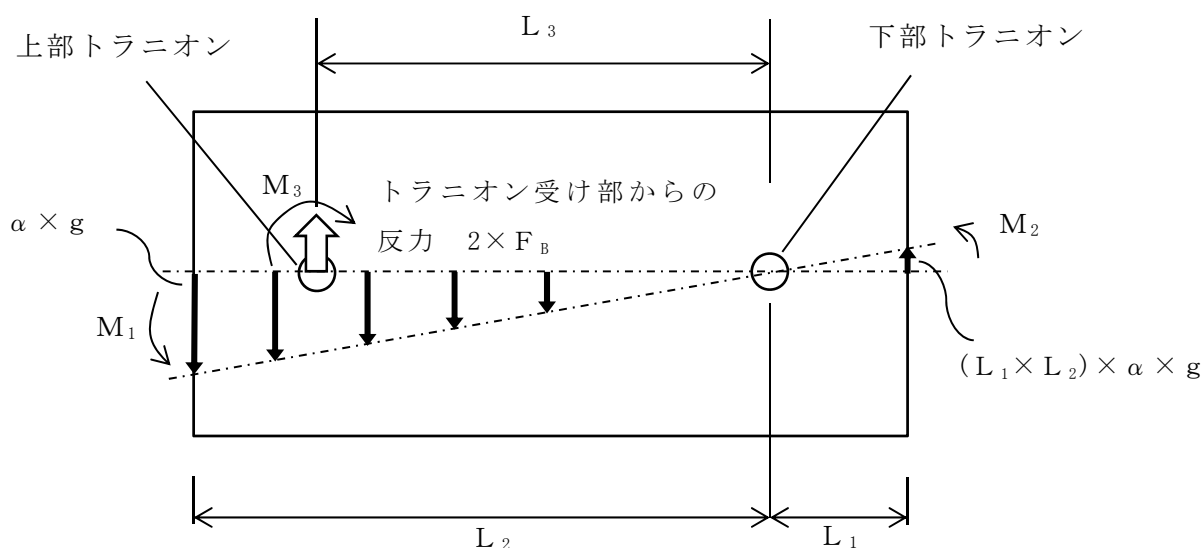
別紙 2-3 図 たて起こし架台への転倒衝突

(3) 衝撃加速度の算出

仮置架台への水平落下時と同様にたて起こし架台のトラニオン受け部からの反力 F_B を求める。下部トラニオンを回転中心としたたて起こし架台への転倒衝突では、上部トラニオン受け部（2箇所）にそれぞれ荷重 F_B が作用するため、下部トラニオンを回転中心として回転運動するモードにおいてモーメントが釣り合った状態になる。この時の状態図を別紙 2-4 図に示す。

M_1 及び M_2 は下部トラニオンを支点として反時計回り、 M_3 は時計回りであるから、 $M_1 + M_2 = M_3$ となる。

- M_1 : 慣性力によるモーメント（蓋側）
- M_2 : 慣性力によるモーメント（底側）
- M_3 : 荷重（ $2 \times F_B$ ）の作用によるモーメント
- L_1 : TK-26 型の底面から下部トラニオンまでの長さ
- L_2 : TK-26 型の上面から下部トラニオンまでの長さ
- L_3 : 上部トラニオン～下部トラニオン間の長さ
- F_B : 上部トラニオンがたて起こし架台のトラニオン受け部から受ける反力
- α : 蓋部に生じる衝撃加速度（G）
- g : 重力加速度



別紙 2-4 図 転倒落下時のモーメント状態図

TK-26 型の質量分布が軸方向に一様であると仮定すると、モーメントは以下の関係にある。

$$\begin{aligned} \text{モーメント} &= \text{距離} \times \text{力} \\ &= \text{距離} \times (\text{衝撃加速度} \times \text{質量}) \\ &= \text{距離} \times (\text{衝撃加速度} \times \text{分布荷重} \times \text{分布長さ}) \end{aligned}$$

また TK-26 型に生じる衝撃加速度の分布は蓋部を最大として下部トラニオンで 0 になるように直線的に変化するので、下部トラニオンを頂点とした三角形となる。このため、力として全質量に蓋部の衝撃加速度の 1/2 を乗じる。また、距離（モーメントアーム）は全ての力が三角形の重心で作用した場合と等価であるので、蓋部で生じる衝撃加速度を α (G)、単位長さあたりの質量を m 、分布長さを L_2 とすると、蓋側に発生するモーメント M_1 は以下のとおりとなる。

$$M_1 = \frac{2}{3} \times L_2 \times \left(\frac{\alpha \times g}{2} \times m \times L_2 \right)$$

底側に発生するモーメント M_2 も M_1 式と同様に考え、以下のとおりとなる。

$$M_2 = \frac{2}{3} \times L_1 \times \left(\frac{L_1}{L_2} \times \frac{\alpha \times g}{2} \times m \times L_1 \right)$$

上部トラニオンに発生するモーメント M_3 は、 $2 \times F_B$ の荷重が距離 L_3 の位置で作用しているので、以下のとおりとなる。

$$M_3 = 2 \times F_B \times L_3$$

以上の式より、蓋部に生じる衝撃加速度 α (G) は次式のとおりとなる。

$$\alpha = \frac{6 \times F_B \times L_3}{m \times g \times \left(L_2^2 + \frac{L_1^3}{L_2} \right)}$$

ここで、

- m : 単位長さあたりの TK-26 型の質量 = 1.200×10^5 (kg/mm)
- L_1 : 金属キャスク本体の底面から下部トラニオンまでの長さ = (mm)
- L_2 : 金属キャスク本体の上面から下部トラニオンまでの長さ = (mm)
- L_3 : 上部トラニオンー下部トラニオン間の長さ = (mm)
- F_B : 上部トラニオンがたて起こし架台トラニオン受け部から受ける反力
= 1.48×10^7 (N) (別紙 2 2.1(3) 参照)
- g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

したがって、 $\alpha = 73$ (G) と算出される。

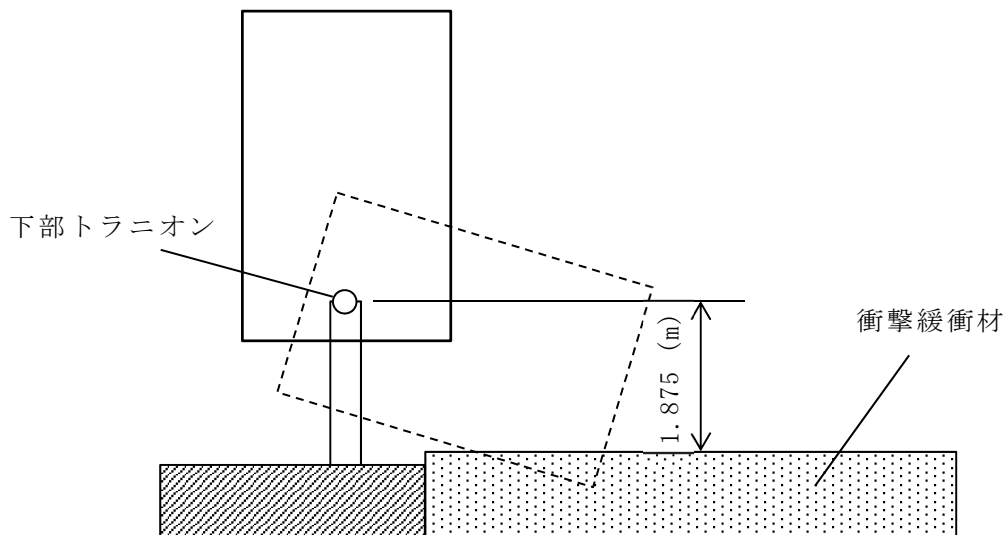
2.5 衝撃吸収材への転倒衝突

(1) 評価事象

TK-26 型は、仮置架台からたて起こし架台へ移送され、緩衝体を取り外された後、下部トラニオンを回転中心とし、上部トラニオンを使用してたて起こされる。TK-26 型が衝撃吸収材側へ転倒した場合、金属キャスク本体の上部が衝撃吸収材へ衝突する。ここでは、衝撃吸収材へ衝突する場合の TK-26 型に発生する衝撃加速度について算出する。

(2) 評価条件

TK-26 型は直立状態から下部トラニオンを中心として衝撃吸収材上面へ転倒するものとし、衝撃吸収材上面から下部トラニオン中心軸までの距離は 1.875m とする（別紙 2-5 図参照）。また、たて起こし架台近傍の床面に敷設される衝撃吸収材の圧潰応力を 3 MPa とする。



別紙 2-5 図 衝撃吸収材への転倒衝突

(3) 衝撃加速度の算出

a. 衝突エネルギーEの計算

TK-26 型の位置エネルギー E_p (N・m) がすべて回転系のエネルギーに変換されたものと考え回転速度を求める。ここで TK-26 型の回転エネルギー E_t (N・m) と運動エネルギー E_m (N・m) は、下式で表すことができる (別紙 2-6 図参照)。

$$\text{位置エネルギー} : E_p = m \times g \times (h_1 + h_2)$$

$$\text{回転エネルギー} : E_t = \frac{1}{2} \times I \times \omega^2$$

$$\text{運動エネルギー} : E_m = \frac{1}{2} \times m_{\text{eff}} \times V_c^2$$

ここで、

h_1 : 転倒落下前の TK-26 型の重心の下部トラニオン位置からの高さ
= (m)

h_2 : 衝撃吸収材への衝突時における TK-26 型の重心の下部トラニオン位置からの高さ = (m)

m : TK-26 型の質量 = 1.200×10^5 (kg)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

I : 下部トラニオンまわりの慣性モーメント = 7.53×10^5 (kg・m²)

ω : 角速度 (rad/s)

m_{eff} : TK-26 型の等価質量 (kg)

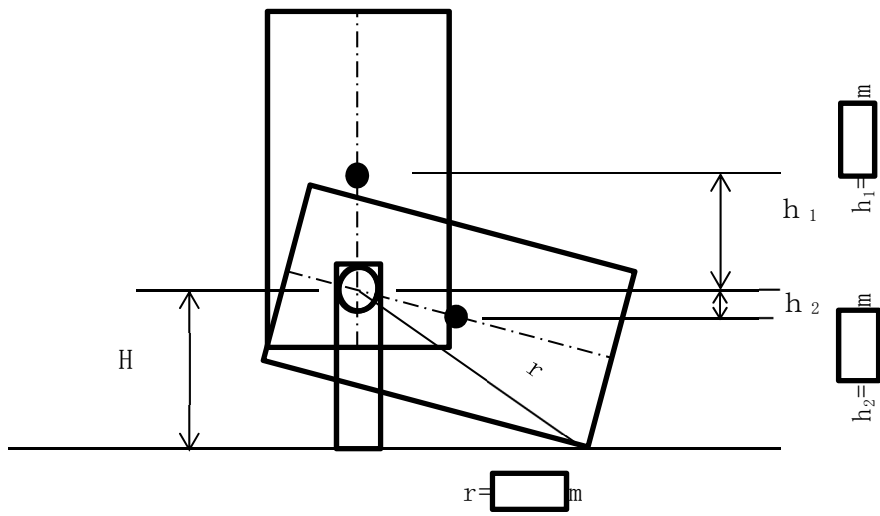
V_c : TK-26 型が衝撃吸収材に衝突する際の速度 (m/s)

$$V_c = \omega \times r$$

r : 下部トラニオンから金属キャスク本体の上端部までの長さ = (m)

以上より、衝撃吸収材への衝突時における運動エネルギー E_m (N・m) は、以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{1}{2} \times m_{\text{eff}} \times V_c^2 \\ &= m \times g \times (h_1 + h_2) \\ &= 2.53 \times 10^6 \text{ (N・m)} \end{aligned}$$



別紙 2-6 図 衝撃吸収材への転倒時における位置関係

b. 衝撃吸収材への転倒衝突で発生する衝撃加速度と貫入深さの評価

TK-26 型の転倒落下において、衝撃吸収材に貫入面積 A (m^2) の一様な貫入変形が生じるとすると、衝撃加速度 α (m/s^2) は衝撃吸収材の圧潰応力 σ ($=3\text{MPa}$) 及び TK-26 型の等価質量 m_{eff} (kg) を用いると、下式で表すことができる。

$$\alpha = \frac{\sigma \times A}{m_{\text{eff}}}$$

また、衝撃吸収材への衝突エネルギー E_m ($=2.53 \times 10^6$ ($\text{N} \cdot \text{m}$)) と衝撃吸収材の圧潰応力 σ (MPa) の関係より、貫入体積 V (m^3) は、下式で表すことができる。

$$V = E_m / \sigma$$

次に、貫入体積 V (m^3) と TK-26 型の幾何学的形状から、貫入深さ D (m) 及び貫入面積 A (m^2) を求める。

(i) 貫入深さ D の算出

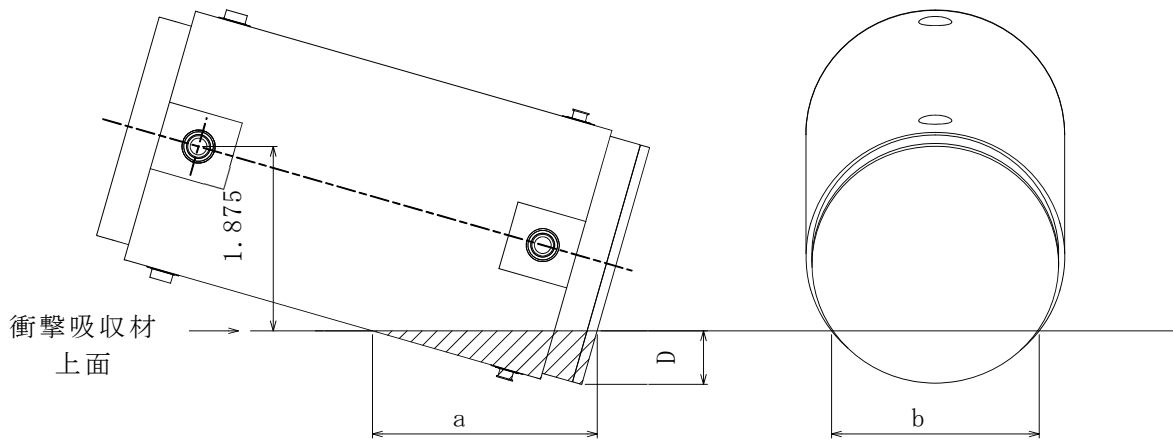
貫入体積 V (m^3) 及び TK-26 型の幾何学的形状より、貫入深さ D ($=0.586\text{m}$) を求めた (別紙 2-7 図参照)。

(ii) 貫入面積 A 算出

貫入深さ D より定まる貫入長さ a (m) 及び貫入幅 b (m) (別紙 2-7 図参照) については相当する貫入面積は別紙 2-8 図 (a) に示す形状となるが、面積を保守側に大きく見積もるように別紙 2-8 図 (b) に示す放物線で近似し、放物線の面積として貫入面積 A (m^2) を下式により求めた。

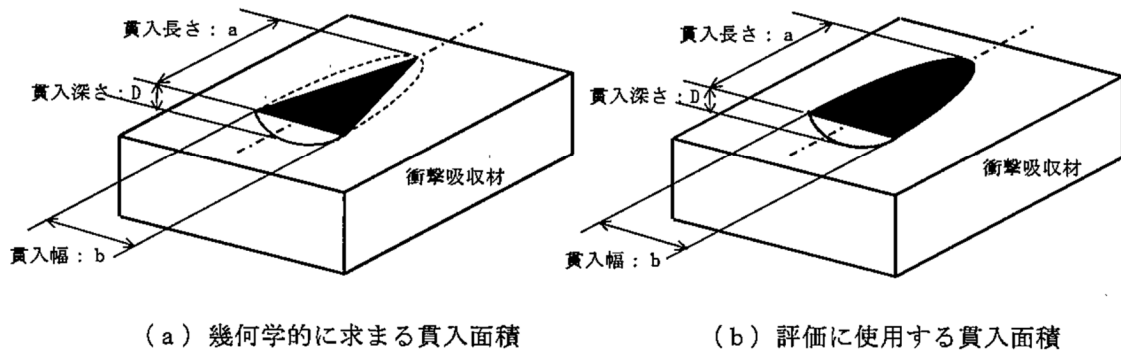
$$\begin{aligned} A &= \frac{2}{3} \times a \times b \\ &= 3.92 \text{ (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

以上より、衝撃加速度 α は 34 (G) と算出される。



(単位：m)

別紙 2-7 図 衝撃吸収材への貫入図



(a) 幾何学的に求まる貫入面積

(b) 評価に使用する貫入面積

別紙 2-8 図 衝撃吸収材への貫入面積

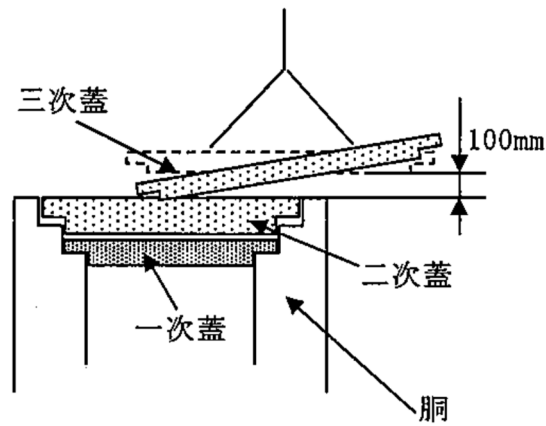
2.6 三次蓋の二次蓋への落下

(1) 評価事象

TK-26 型は、貯蔵架台へ設置された後、搬送台車等により検査架台へ移送され、三次蓋が取り外される。三次蓋が取り外される際に、二次蓋上で落下した場合、三次蓋が二次蓋へ衝突する。その場合の TK-26 型の二次蓋に作用する衝撃力について算出する。

(2) 評価条件

三次蓋の吊上げ高さを二次蓋上面から 100mm と設定する（別紙 2-9 図参照）。



別紙 2-9 図 三次蓋の二次蓋への落下

(3) 衝撃荷重の算出

二次蓋を周辺固定の円板として、二次蓋中央に集中荷重が作用するものとする。また、二次蓋の変形量からバネ定数を算出し、位置エネルギーが消費される際の変位から荷重を算出する。

二次蓋を周辺固定円板とモデル化した場合の二次蓋のバネ定数 K (N/m) は、二次蓋の中央に作用する荷重 P (N) と二次蓋中央の変形量 w (m) から以下の式を用いて算出される。

$$K = P/w = (E \times t^3) / (0.217 \times a^2)$$

ここで、

t : 二次蓋の厚さ = (m) (二次蓋の最小厚さ)

E : 二次蓋の縦弾性係数 = (MPa)

a : 二次蓋の半径 = 1.071 (m)

したがって、 $K = 2.71 \times 10^8$ (N/m) と算出される。

次に、三次蓋質量が落下高さ 50mm^(注1) から落下した場合、落下時荷重 F (N) は以下の式で求められる。

$$F = \sqrt{2 \times m \times g \times h \times K}$$

ここで、

m : 三次蓋の質量 = 2.600×10^3 (kg)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

h : 落下高さ = 0.05 (m)

したがって、 $F = 8.32 \times 10^5$ (N) と算出される。

(注1) 100mm の高さから落下する場合、三次蓋の吊り上げ部を支点に回転落下すると考えると、重心位置は 100mm の半分の 50mm となる。

3. まとめ

想定事象において TK-26 型に発生する衝撃加速度又は衝撃荷重について算出した結果を別紙 2-1 表に示す。

別紙 2-1 表 TK-26 型の落下及び転倒事象時に発生する衝撃加速度又は衝撃荷重

No.	想定事象	衝撃加速度 又は衝撃荷重
(1)	仮置架台への水平落下	46 G
(2)	衝撃吸収材への垂直落下	11 G
(3)	貯蔵架台への垂直落下	39 G
(4)	たて起こし架台への転倒衝突	73 G
(5)	衝撃吸収材への転倒衝突	34 G (蓋部近傍)
(6)	三次蓋の二次蓋への落下	8.32×10^5 N

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 型の衝撃吸収材への転倒衝突及び三次蓋の二次蓋への落下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

2.1 解析モデル

TK-26 型の密封容器の構造強度解析は、有限要素法による構造解析コード（ABAQUS）を使用する。衝撃吸収材への転倒衝突における解析モデルを別紙 3-1 図に、三次蓋の二次蓋への落下における解析モデルを別紙 3-2 図に示す。

TK-26 型が衝撃吸収材へ転倒衝突する事象では、三次蓋が取り付けられている。また、三次蓋が二次蓋へ落下する事象では、三次蓋が取り外されている。

解析モデルは、TK-26 型の胴、外筒、一次蓋、二次蓋、三次蓋等でモデル化される。蓋ボルト以外の構成部材にはソリッド及びシェル要素を、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。モデル寸法に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接続され、蓋部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はモデル化せず胴内部に作用する荷重として考慮した。蓋部及び底部中性子遮蔽材は、衝撃吸収材への転倒衝突時にはそれぞれ蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバーのモデル上の質量に含めて考慮し、三次蓋の二次蓋への落下時にはモデル化せずに荷重として考慮した。また、伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材は、衝撃吸収材への転倒衝突時には外筒のモデル上の質量に含めて考慮し、三次蓋の二次蓋への落下時には荷重として外筒端板（下部）内側に考慮した。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線膨張係数には、（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」（以下、「金属キャスク構造規格」という。）の別表 6-1 及び別表 6-2 に示される値を使用した。

2.2 荷重条件及び境界条件

衝撃吸収材への転倒衝突における荷重条件及び境界条件を別紙 3-3 図に、三次蓋の二次蓋への落下における荷重条件及び境界条件を別紙 3-4 図に示す。

(1) 衝撃吸収材への転倒衝突

a. 荷重条件

(i) 慣性力

衝撃吸収材への転倒衝突時に金属キャスクに発生する加速度として、別紙 3-3 図に示すとおり、回転中心となる下部トラニオン加速度を 0(G)とし、金属キャスク本体の蓋部近傍加速度が 50(G)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、一次蓋と二次蓋間の圧力、二次蓋と三次蓋間の圧力、及び中性子遮蔽材部（蓋部、側部、底部）の圧力を考慮する。

(iii) 機械的荷重

衝撃吸収材への転倒衝突時に発生する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）の慣性力を機械的荷重として考慮する。また、衝撃吸収材からの反力を機械的荷重として考慮する。

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

(iv) 熱荷重

除熱解析結果の温度分布から熱応力解析を行い、モデル化した構成部材の熱荷重を考慮する。なお、衝撃吸収材への転倒衝突事象では、三次蓋が装着された状態である取扱時における除熱解析結果を用いる。

b. 境界条件

境界条件として、転倒衝突時の回転中心となる 1 対の下部トラニオンの変位を拘束する。

(2) 三次蓋の二次蓋への落下

a. 荷重条件

(i) 慣性力

TK-26 型のたて置きの状態を考慮し、モデル化した構成部材に対して、鉛直方向 1 (G) を設定し、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

三次蓋の二次蓋への落下時に生じる荷重を二次蓋中央に作用させる。また、蓋ボルトの初期締付力、一次蓋及び二次蓋の金属ガスケットの締付反力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 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。なお、三次蓋が二次蓋へ落下する事象では、三次蓋が取り外された状態である貯蔵時における除熱解析結果を用いる。

b. 境界条件

境界条件として、TK-26 型と貯蔵架台の接続面である金属キャスク本体の底面の変位を拘束する。

2.3 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-1311.3、MCD-1318.1 及び MCD-1321.2 に示される供用状態 D の設計基準に基づき、各部の評価基準を以下のとおりとする。

(1) 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。

$$P_m \leq 2/3 S_u$$

$$P_L \leq S_u$$

$$P_L + P_b \leq S_u$$

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

$P_L + P_b$: 一次膜＋一次曲げ応力強さ

S_u : 設計温度（一次蓋：℃、胴：℃）^(注1)における設計引張強さ

（注1）取扱時の除熱解析結果に基づき設定

(2) 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、

$P_L + P_b + Q$: 一次＋二次応力強さ

S_y : 設計温度（胴（シール部）：℃、一次蓋（シール部）：℃）^(注1)における設計降伏点

（注1）取扱時の除熱解析結果に基づき設定

(3) 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。

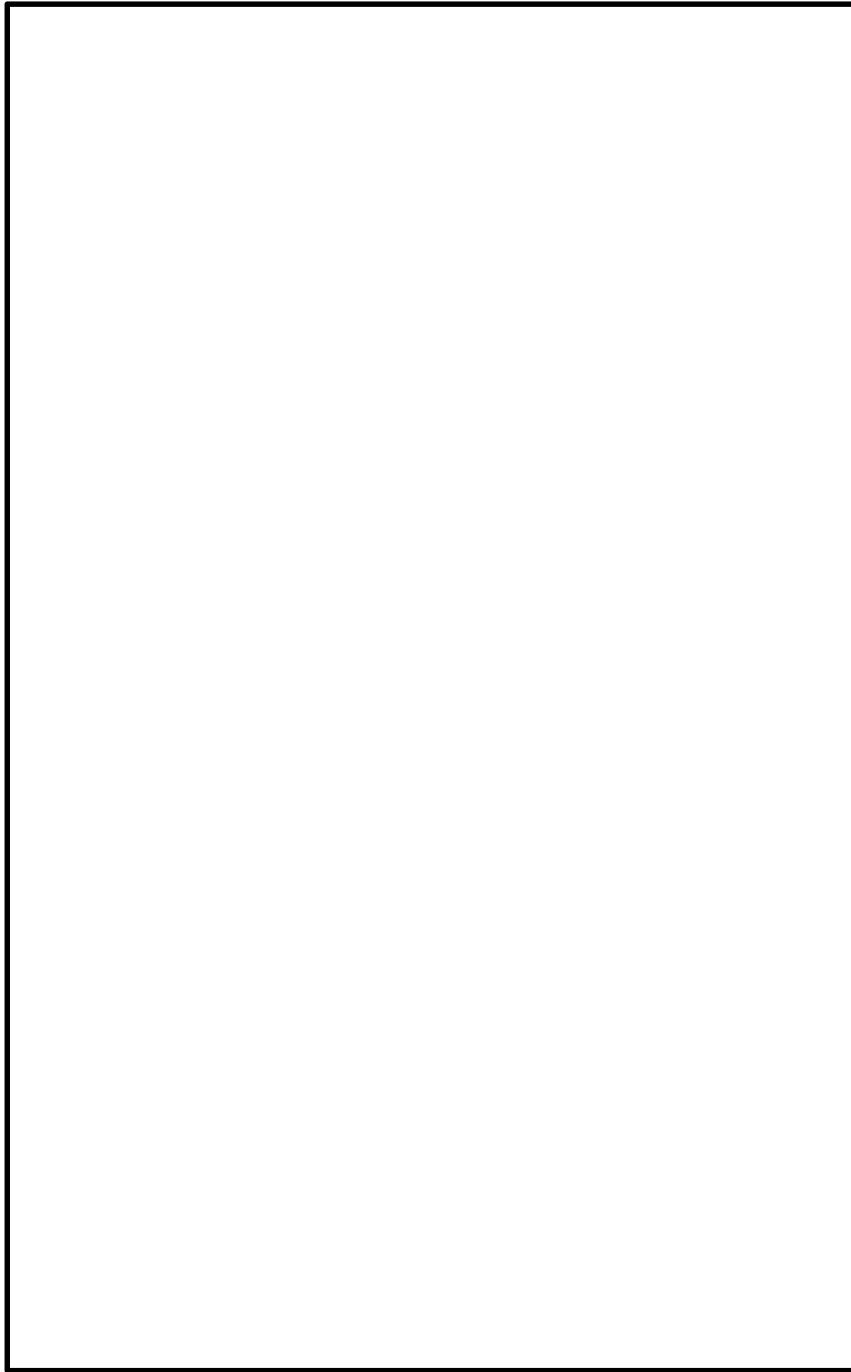
$$(\text{平均引張応力}) \leq S_y$$

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

ここで、

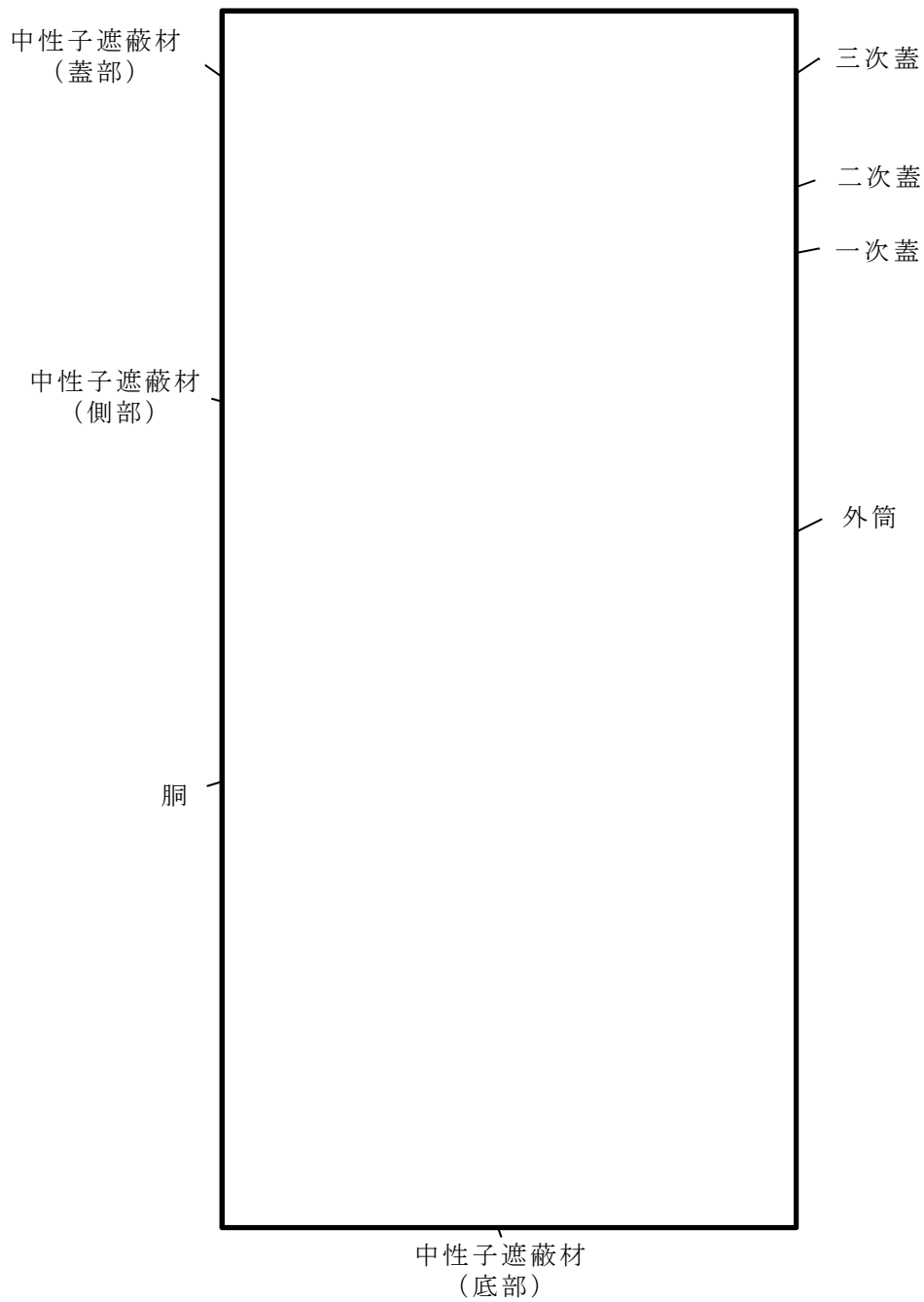
S_y : 設計温度（℃）^(注1)における設計降伏点

（注1）取扱時の除熱解析結果に基づき設定



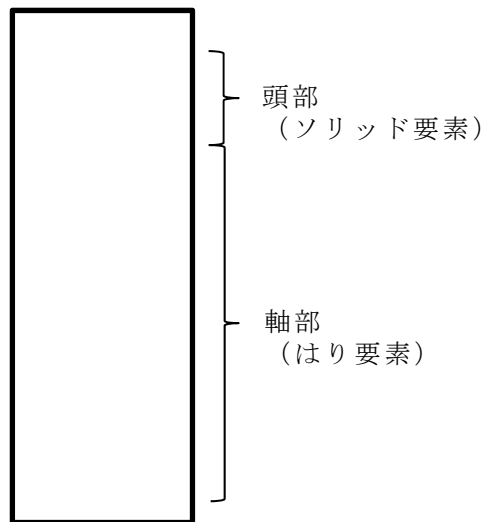
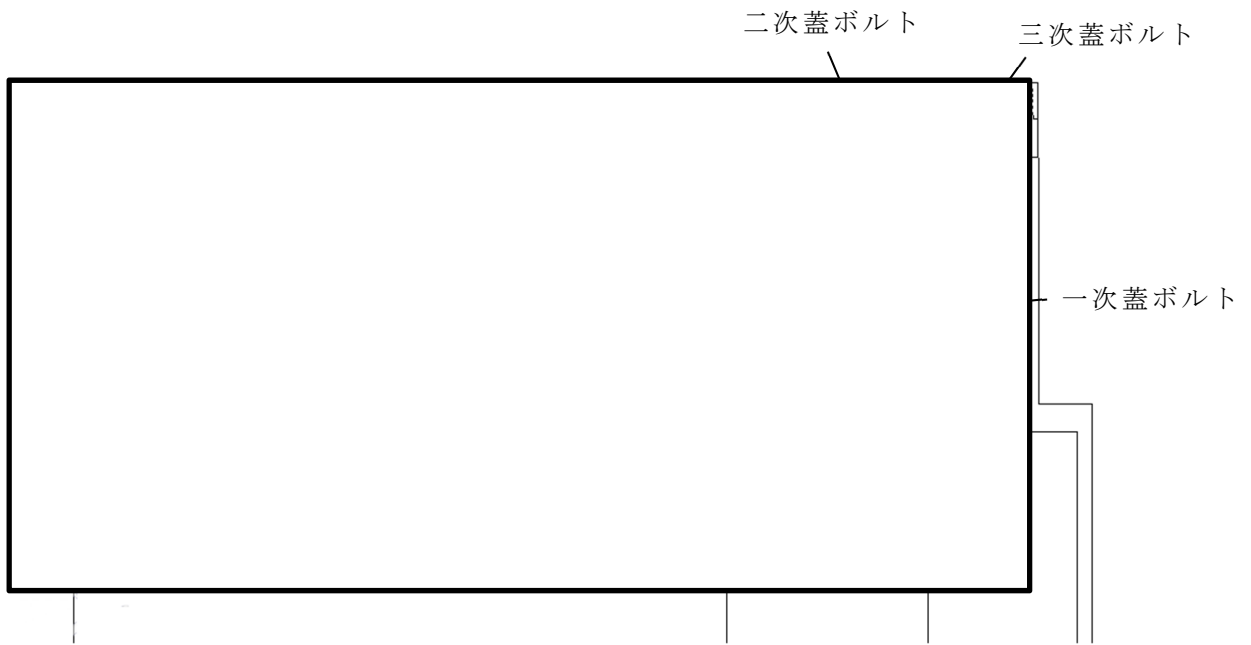
要素分割図

別紙 3-1 図 衝撃吸収材への転倒衝突解析モデル(1/3)



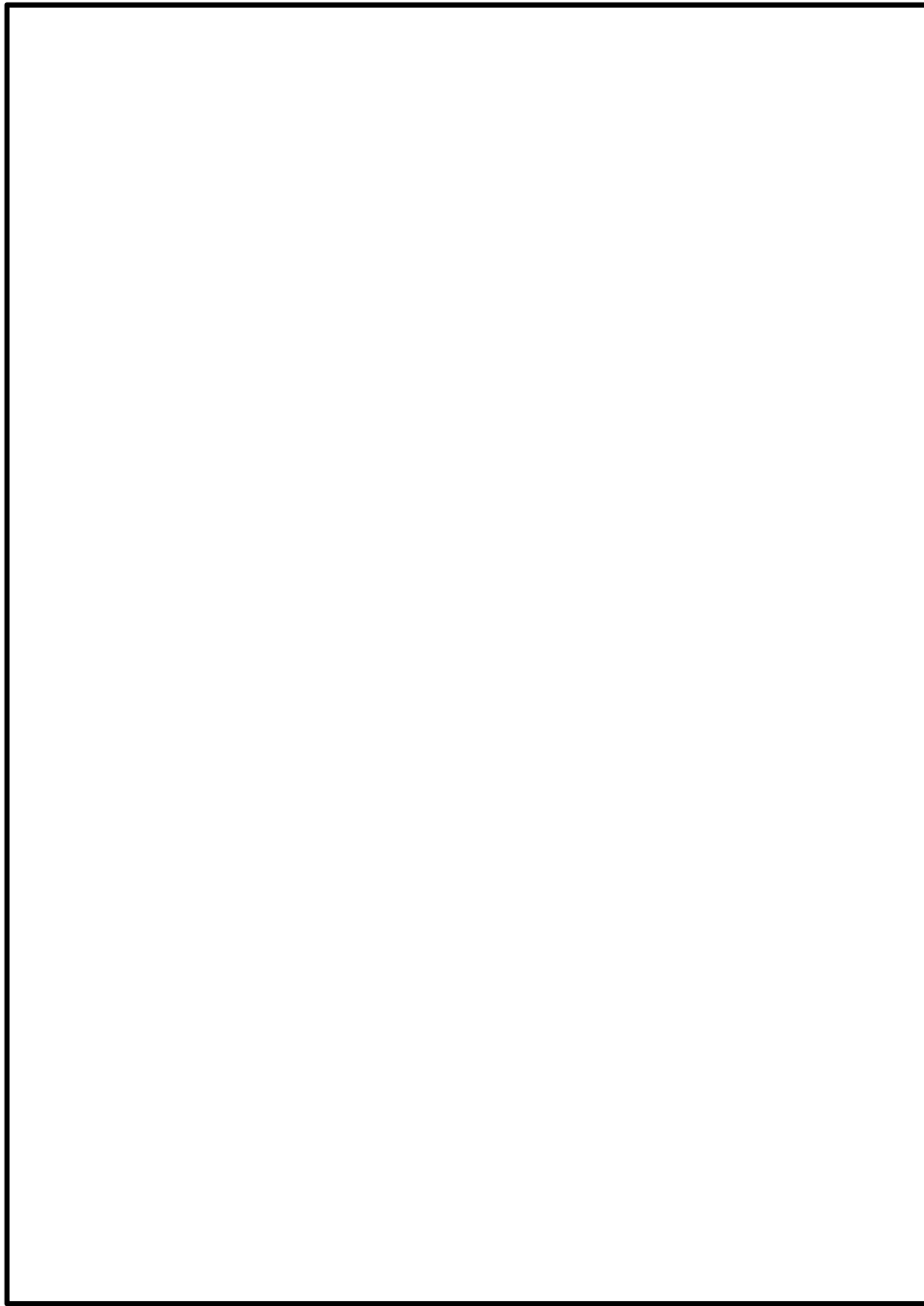
部材定義図

別紙 3-1 図 衝撃吸収材への転倒衝突解析モデル (2/3)



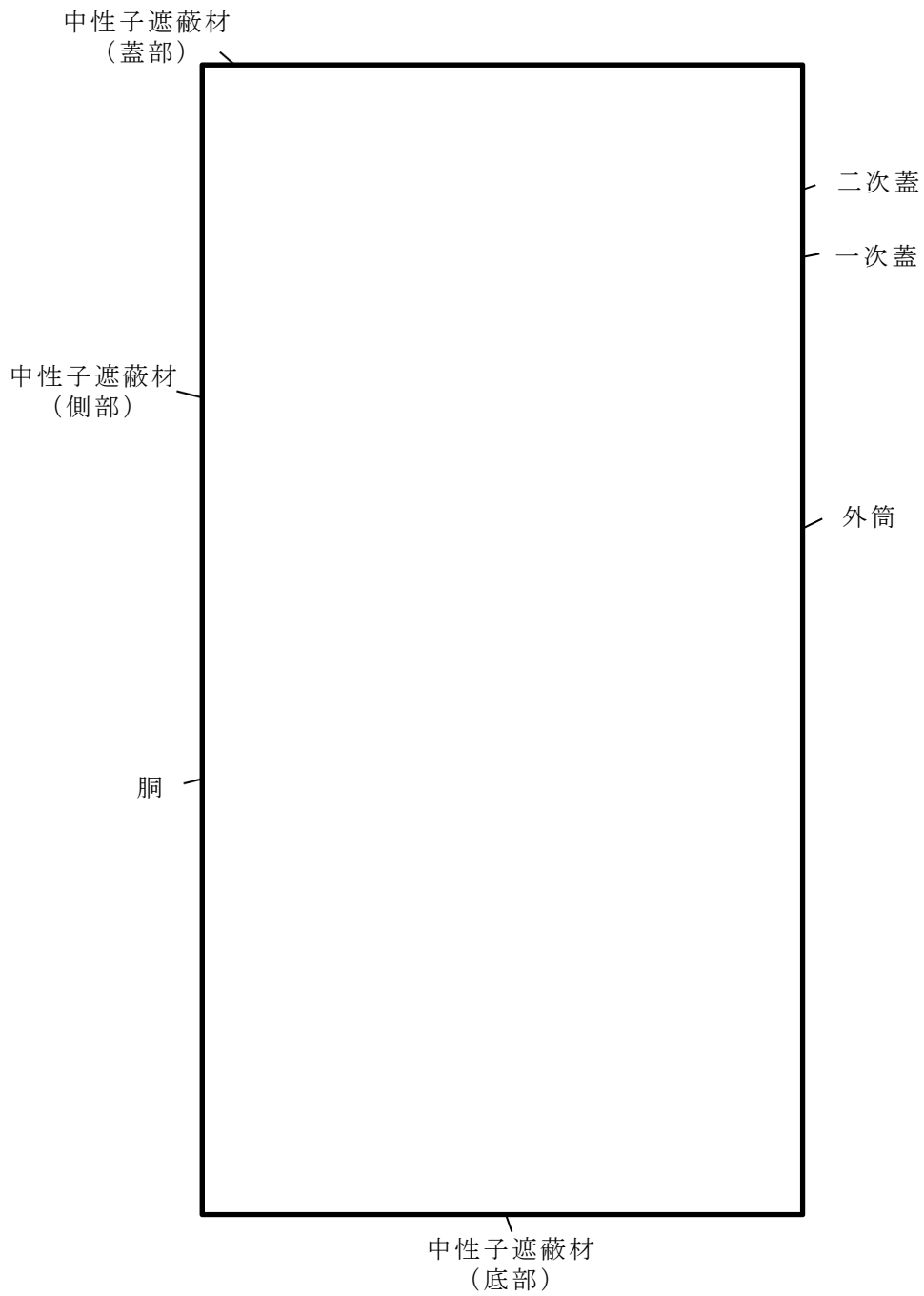
部材定義図：蓋部拡大

別紙 3-1 図 衝撃吸収材への転倒衝突解析モデル (3/3)



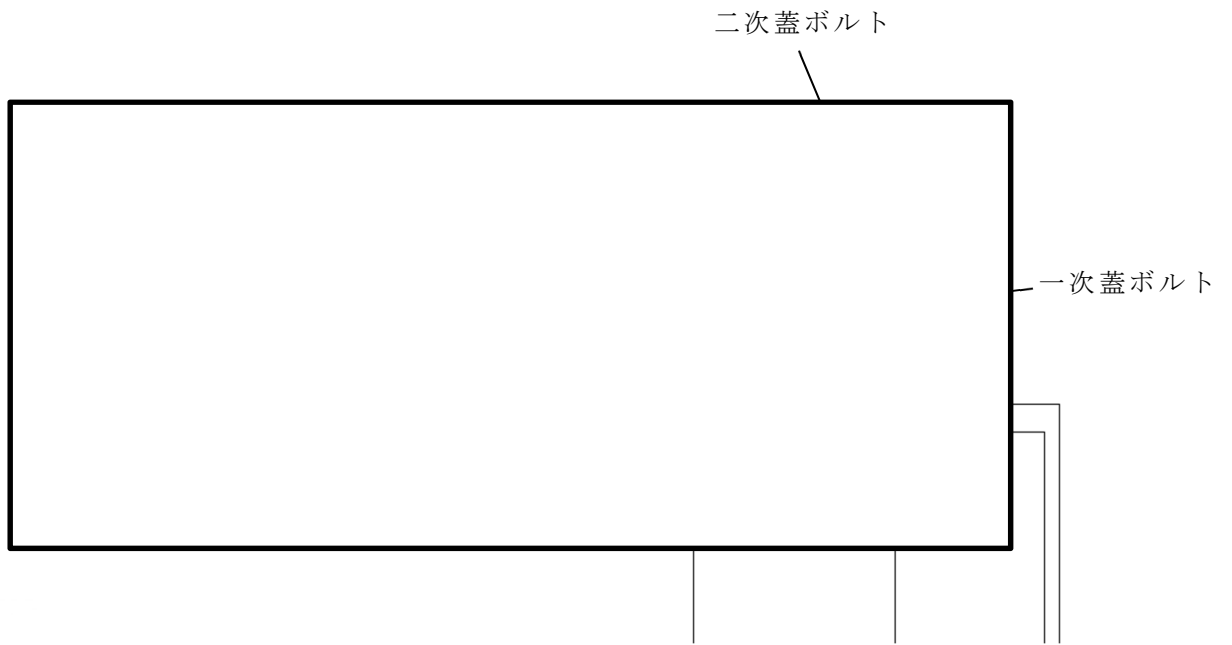
要素分割図

別紙 3-2 図 三次蓋の二次蓋への落下解析モデル(1/3)



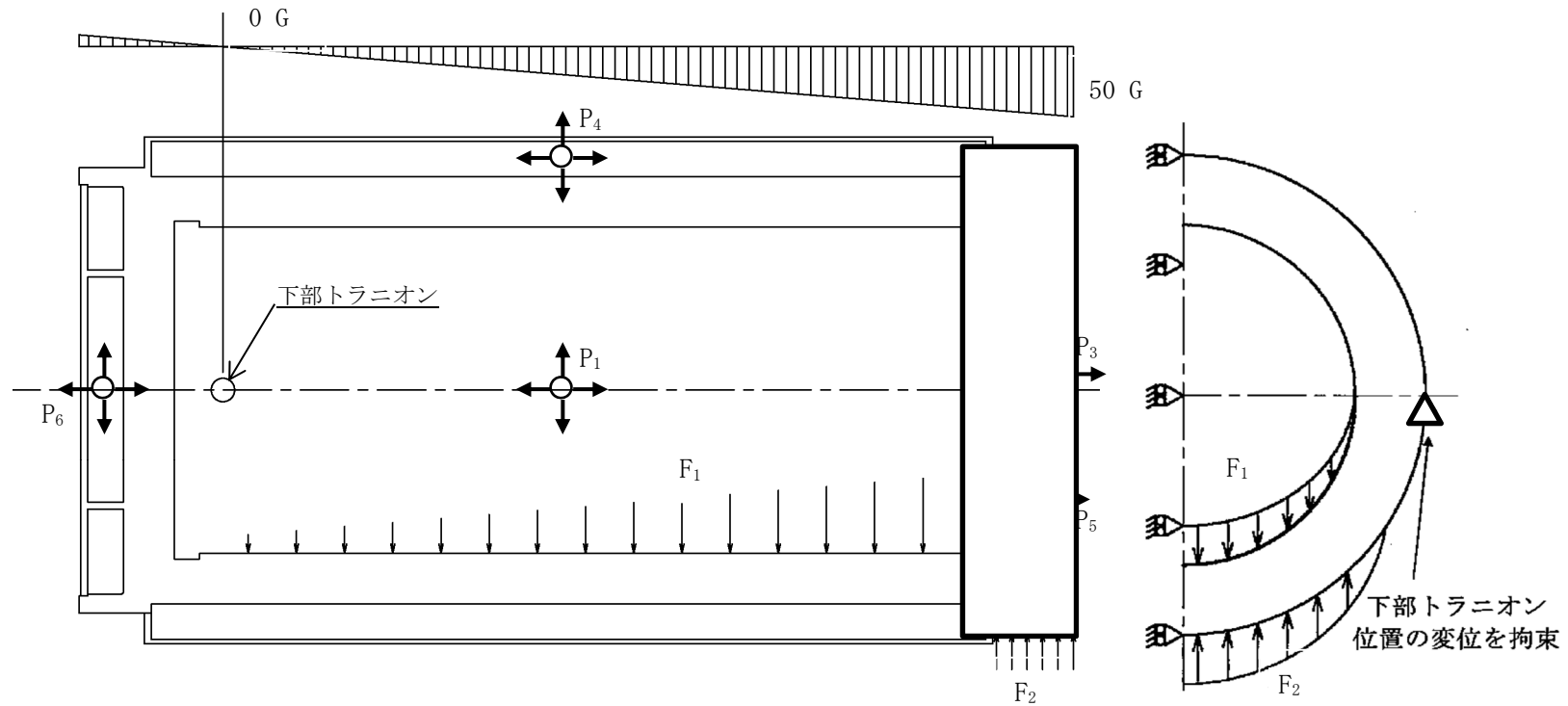
部材定義図

別紙 3-2 図 三次蓋の二次蓋への落下解析モデル (2/3)



部材定義図：蓋部拡大

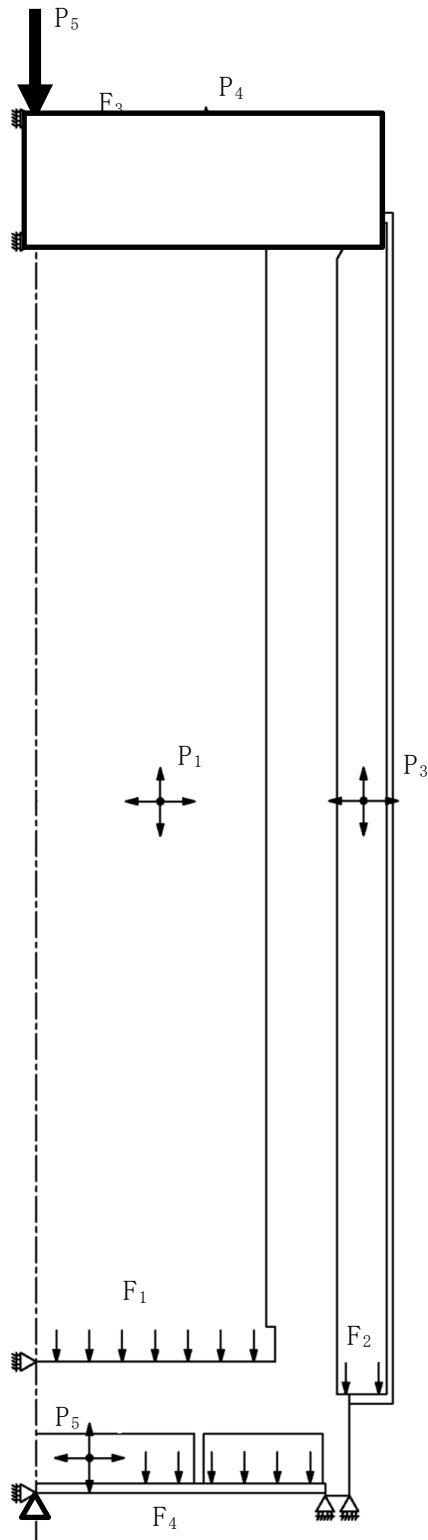
別紙 3-2 図 衝撃吸収材への転倒衝突解析モデル (3/3)



- P₁ : 胴内圧 (-0.101325 MPaG)
- P₂ : 一次蓋-二次蓋間圧力 (MPaG)
- P₃ : 二次蓋-三次蓋間圧力 (MPaG)
- P₄ : 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPaG)
- P₅ : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPaG)
- P₆ : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPaG)
- F₁ : 内部収納物の慣性力
- F₂ : 衝撃吸収材からの反力

- 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 3-3 図 衝撃吸収材への転倒衝突時の荷重条件及び境界条件



- P_1 : 胴内圧 (-0.101325 MPaG)
- P_2 : 一次蓋 - 二次蓋間圧力 MPaG)
- P_3 : 側部中性子遮蔽材部圧力 MPaG)
- P_4 : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 MPaG)
- P_5 : 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
- F_5 : 三次蓋の二次蓋への落下荷重
(8.32×10^5 N)
- 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)

別紙 3-4 図 三次蓋の二次蓋への落下時の荷重条件及び境界条件

構造解析コード（ABAQUS）による特別の試験条件における 密封容器の構造強度解析条件及び結果

1. 概要

TK-26 型は、使用済燃料集合体を貯蔵する機能を有するとともに、使用済燃料集合体の事業所外運搬に用いる輸送容器としての機能を併せもつ金属製の乾式キャスクである。そのため、核燃料物質等の工場又は事業所外運搬に関する規則に定める BM 型輸送物に係る特別の試験条件において、基本的安全機能を維持することが要求される。

次項より、9m 水平落下時及び 9m 底部垂直落下時における密封容器の構造強度解析条件及び結果を示す。

2. 解析条件

2.1 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。輸送時の状態は、三次蓋が取り付けられた状態であるため、解析モデルは衝撃吸収材への転倒衝突における解析モデルと同じ解析モデルを用いる。

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線膨張係数には、（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」（以下、「金属キャスク構造規格」という。）の別表 6-1 及び別表 6-2 に示される値を使用した。

2.2 荷重条件及び境界条件

9m 水平落下における荷重条件及び境界条件を別紙 4-1 図に示す。また、9m 底部垂直落下における荷重条件及び境界条件を別紙 4-2 図に示す。以下にこれらの試験条件における解析条件を記載する。

(1) 荷重条件

a. 慣性力

モデル化した構成部材に対して、9m 水平落下時に発生する加速度として、落下方向の加速度 75 G を考慮し、その加速度による自重の慣性力を考慮する。同様に、9m 底部垂直落下時に発生する加速度として、落下方向の加速度 76 G 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－二次蓋間の圧力、二次蓋－三次蓋間の圧力、

中性子遮蔽材部（蓋部、側部、底部）の圧力を考慮する。

c. 機械的荷重

(i) 9m 水平落下

9m 水平落下時に発生する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）の慣性力を機械的荷重として考慮する。

また、金属キャスク本体の上部及び下部に取り付けられた事業所外運搬用の緩衝体からの反力を機械的荷重として考慮する。さらに、蓋ボルトの初期締付力、一次蓋及び二次蓋の金属ガスケットの締付反力を機械的荷重として考慮する。

(ii) 9m 底部垂直落下

9m 底部垂直落下時に発生する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）の慣性力を機械的荷重として考慮する。

また、金属キャスク本体の下部に取り付けられた事業所外運搬用の緩衝体からの反力を機械的荷重として考慮する。さらに、蓋ボルトの初期締付力、一次蓋及び二次蓋の金属ガスケットの締付反力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。なお、温度分布は、事業所外運搬（一般の試験条件）における除熱解析結果を用いる。

(2) 境界条件

9m 水平落下では、上部及び下部緩衝体に取り付けられる面（反力を受ける面）の各 1 箇所の落下方向（鉛直方向）の変位を拘束した。

9m 底部垂直落下では、下部緩衝体に取り付けられる面（反力を受ける面）の 1 箇所の落下方向（鉛直方向）の変位を拘束した。

2.3 設計基準

金属キャスク構造規格 MCD-1311.3、MCD-1318.1 及び MCD-1321.2 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。

(1) 一次蓋及び胴（シール部除く）

一次蓋び胴に発生する応力強さが以下を満足すること。

$$P_L + P_b \leq S_u$$

ここで、

P_L : 一次局部膜応力強さ

P_b : 一次曲げ応力強さ

S_u : 設計温度 (一次蓋 : °C、胴 : °C) (注1) における設計引張強さ

(注1) 事業所外運搬 (一般の試験条件) の除熱解析結果に基づき設定

(2) 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、

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_y : 設計温度 (胴 (シール部) : °C、一次蓋 (シール部) : °C) (注1) における設計降伏点

(注1) 事業所外運搬 (一般の試験条件) の除熱解析結果に基づき設定

(3) 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。

$$(\text{平均引張応力}) \leq S_y$$

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

ここで、

S_y : 設計温度 (°C) (注1) における設計降伏点

(注1) 事業所外運搬 (一般の試験条件) の除熱解析結果に基づき設定

3. 解析結果

9m 水平落下時及び 9m 底部垂直落下時の構造強度解析結果をそれぞれ、別紙 4-1 表及び別紙 4-2 表に示す。別紙 4-1 表及び別紙 4-2 表に示すとおり、特別の試験条件において TK-26 型の貯蔵時に密封境界を構成する部材に発生する応力は、設計基準を満足することを確認した。

別紙 4-1 表 9m 水平落下時の構造強度評価結果

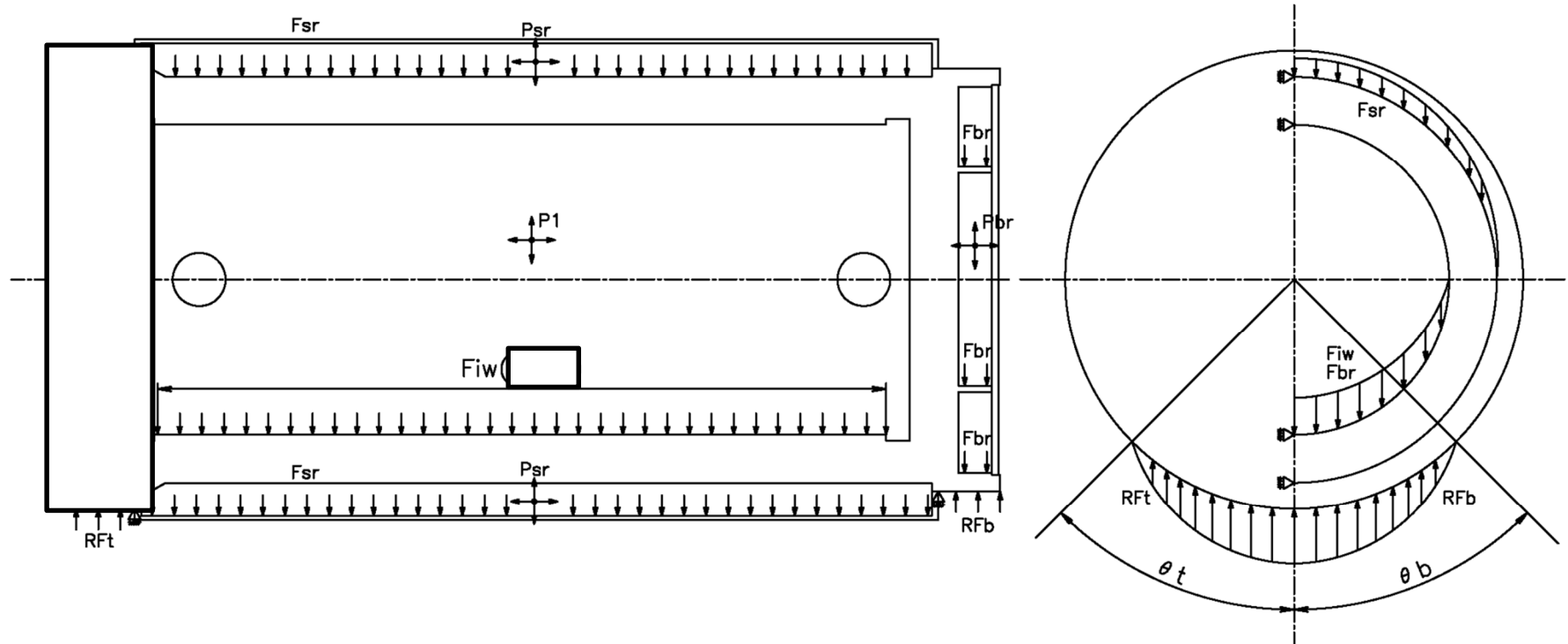
項目 ^(注1)		評価結果 (MPa)	設計基準値 (MPa)
一次蓋（中央部）の応力強さ		17	251
一次蓋（端部）の応力強さ		120	377
一次蓋ボルト の応力	平均引張応力	221	696
	平均引張応力+曲げ応力	461	1044
胴（シール部）の応力強さ		107	182
胴（上部）の応力強さ		134	377
胴（中央部）の応力強さ		60	251
胴（下部）の応力強さ		63	377
底板（中央部）の応力強さ		26	251
底板（端部）の応力強さ		42	377
一次蓋（シール部）の応力強さ		74	185

（注1）応力評価位置は、別紙 4-3 図参照。

別紙 4-2 表 9m 底部垂直落下時の構造強度評価結果

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		28	377
一次蓋（端部）の応力強さ		55	377
一次蓋ボルト の応力	平均引張応力	207	696
	平均引張応力+曲げ応力	215	1044
胴（シール部）の応力強さ		57	182
胴（上部）の応力強さ		12	377
胴（中央部）の応力強さ		25	251
胴（下部）の応力強さ		64	377
底板（中央部）の応力強さ		95	377
底板（端部）の応力強さ		17	377
一次蓋（シール部）の応力強さ		27	185

（注1）応力評価位置は、別紙 4-3 図参照。

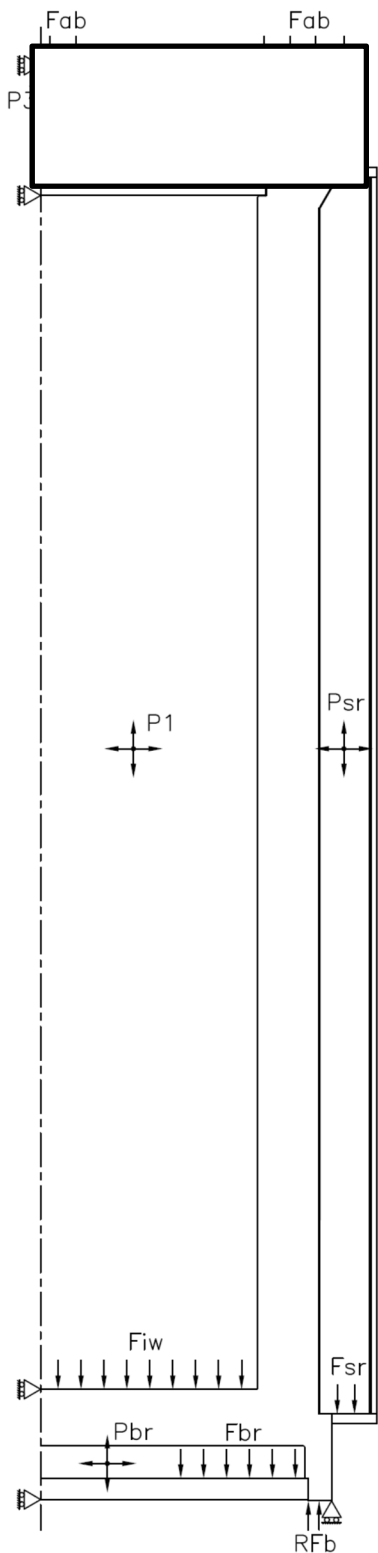


- P_1 : 胴内圧 (-0.101325 MPaG)
- P_2 : 一次蓋-二次蓋間圧力 () MPaG
- P_3 : 二次蓋-三次蓋間圧力 () MPaG
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 () MPaG
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 () MPaG
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 () MPaG
- F_{iw} : 内部収納物の慣性力
- F_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部の慣性力

- F_{sr} : 側部中性子遮蔽材部の慣性力
- F_{br} : 底部中性子遮蔽材部の慣性力
- R_{ft} : 上部緩衝体からの反力
- R_{fb} : 下部緩衝体からの反力

- 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

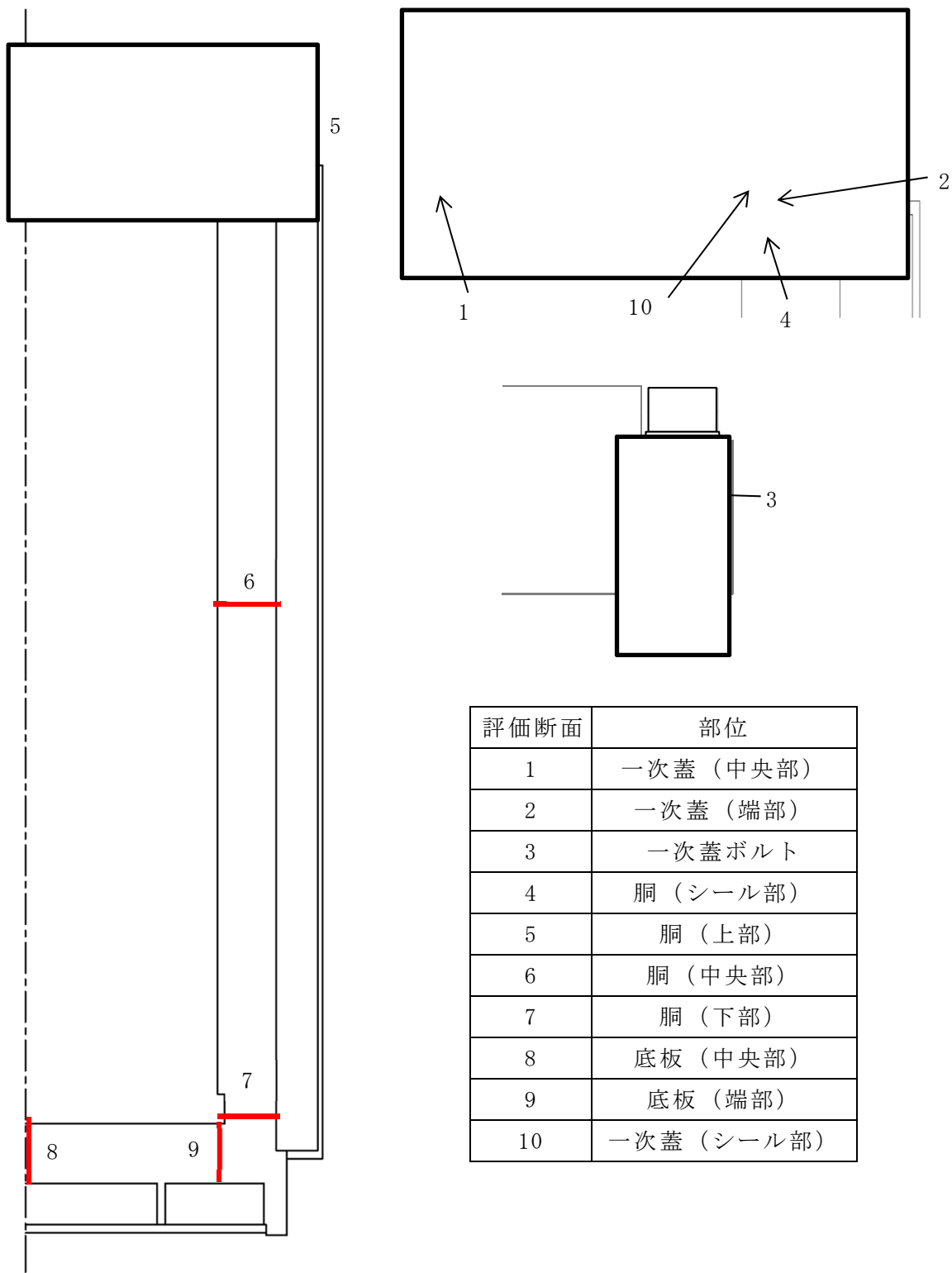
別紙 4-1 図 9m 水平落下時の荷重条件及び境界条件



- 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_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 () MPaG)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 () MPaG)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 () MPaG)
- F_{iw} : 内部収納物の慣性力
- F_{sr} : 側部中性子遮蔽材部の慣性力
- F_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部の慣性力
- F_{br} : 底部中性子遮蔽材の慣性力
- F_{ab} : 上部緩衝体の慣性力
- RF_b : 下部緩衝体からの反力

- 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 4-2 図 9m 底部垂直落下時の荷重条件及び境界条件



評価断面	部位
1	一次蓋（中央部）
2	一次蓋（端部）
3	一次蓋ボルト
4	胴（シール部）
5	胴（上部）
6	胴（中央部）
7	胴（下部）
8	底板（中央部）
9	底板（端部）
10	一次蓋（シール部）

別紙 4-3 図 密封容器評価応力評価位置