

【補足説明資料】
破損燃料用輸送容器に係る実施計画Ⅱ章の変更について

2019年11月22日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

構造強度評価に用いる容器内圧力の算出について



■ 計算条件

➤ 初期条件

初期圧力：0.1013[MPa abs]（大気圧）、初期温度：293.15[K]（=20℃）

➤ 燃料装荷後の輸送容器内部水の温度

除熱評価より $T_{\text{装荷}}=373.15\text{[K]}$ （=100℃）（一次蓋、二次蓋間の温度も保守的に100℃とする）

➤ 燃料棒内のガスの状態量

圧力：[MPa abs]、温度：[K]（=℃）、体積：[mm³]（=燃料1体あたりのガス容積[mm³]×7体）

■ 容器内部水及び気体の熱膨張を考慮した場合

➤ 容器本体及び一次蓋

- 容器内の水の質量 $M_{\text{水}}$ は、容器本体の容積及び初期温度（20℃）における水の比体積より $M_{\text{水},20^\circ\text{C}} = \text{}$ [kg]
- 燃料装荷後の水温100℃における水の体積は、水の比体積及び $M_{\text{水},20^\circ\text{C}}$ より $V_{\text{水},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [mm³]
- よって、水の温度上昇による体積変化は $\Delta V_{\text{水}} = \text{}$ [mm³]となり、この体積変化分だけ水が膨張室に侵入するため、温度上昇後の膨張室の気相容積は、 $V_{\text{膨張室},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [mm³]
- 以上から、膨張室内の気体分圧 $P_{\text{膨張室},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]であり、水の飽和蒸気圧（100℃）を考慮すると、容器の内圧は [MPa abs]であり、保守的に内圧を0.6[MPa abs]と設定

➤ 二次蓋

- 一次蓋シール部が漏えいした場合を二次蓋の内圧とし、この時の容器の気相容積は $V_{\text{膨張室},100^\circ\text{C}} + V_{\text{蓋間},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [mm³]
- 温度上昇後の蓋間の圧力は $P_{\text{蓋間},100^\circ\text{C}} = 0.129\text{[MPa abs]}$ となるため、蓋間由来の気体分圧 $P'_{\text{蓋間},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]
- 同様に、膨張室由来の気体分圧 $P'_{\text{膨張室},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]
- 以上から、二次蓋の内圧は [MPa abs]であり、保守的に0.45[MPa abs]と設定

■ 容器内部水及び気体の熱膨張に加えて、燃料破損による燃料棒内のガス放出を考慮した場合

➤ 容器本体及び一次蓋

- 装荷された燃料7体分のすべての燃料棒が破損し、密封されていたガスが放出した場合、容器の気相容積は $V_{\text{膨張室},100^\circ\text{C}}$ に加え、ガス容積分が増加するためその容積は $V_{\text{破損},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [mm³]
- 温度上昇後の燃料由来の気体分圧 $P_{\text{燃料},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]
- 膨張室内の気体分圧は [MPa abs]であり、水の飽和蒸気圧（100℃）を考慮すると、容器の内圧は [MPa abs]であり、保守的に内圧を2.0[MPa abs]と設定

➤ 二次蓋

- 一次蓋シール部が漏えいした場合を二次蓋の内圧とし、この時の容器の気相容積は $V_{\text{破損},100^\circ\text{C}} + V_{\text{蓋間},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [mm³]
- 温度上昇後の蓋間の圧力は $P_{\text{蓋間},100^\circ\text{C}} = 0.129\text{[MPa abs]}$ となるため、蓋間由来の気体分圧 $P'_{\text{蓋間},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]
- 同様に、膨張室由来の気体分圧 $P'_{\text{膨張室},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]、燃料由来の気体分圧 $P'_{\text{燃料},100^\circ\text{C}} = \text{}$ [MPa abs]
- 以上から、二次蓋の内圧は [MPa abs]であり、保守的に1.4[MPa abs]と設定

最高使用圧力が作用する場合の構造強度評価

- NFT型輸送容器では、一般の試験条件※でも燃料被覆管の健全性が維持されることを評価しているため、本輸送容器を使った構内輸送においても燃料被覆管の健全性は維持され则认为る。
- しかしながら、万一被覆管が破損した場合でも輸送容器の構造健全性が維持されるか評価。
- 破損燃料用輸送容器（7体及び2体）の胴、底板、一次蓋、二次蓋について、以下のとおり最高使用圧力による保守的な条件で評価を実施。また、この時の容器内温度分布は、破損した被覆管からペレットが放出し容器底部に堆積することを仮定。

※高さ0.3mからの自由落下により、縦姿勢では約60G、横姿勢では約30Gの衝撃加速度が生じる

設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋は1.4MPa)
	吊上げ時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋は1.4MPa)
II	搬送架台への衝突 (取扱いモードNo.7)	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋は1.4MPa)
	転倒防止台座への衝突 (取扱いモードNo.9) キャスクピットへの衝突 (取扱いモードNo.10)	輸送架台への衝突 (取扱いモードNo.3)	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋は1.4MPa)

最高使用圧力が作用する場合の構造強度評価

- 評価結果は以下のとおり。
- いずれの評価部位も許容応力以下である。

部位	一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) [MPa]				許容応力
	破損燃料用輸送容器 (7体)		破損燃料用輸送容器 (2体)		
	実施計画 記載値	最高使用圧力 における計算値	変更申請 記載値	最高使用圧力 における計算値	
胴中央部	9	9	9	9	369
底板中央部	21	51	21	50	369
底板外周部	10	20	10	19	369
胴下端部	17	29	16	29	369
底部中性子遮へい体外周部	25	46	25	46	369
上部トランニオン取付け部	21	23	20	22	369
下部トランニオン取付け部	32	36	30	35	369
一次蓋中央部	4	9	4	8	411
一次蓋フランジ部	8	9	7	9	411
二次蓋中央部	34	105	34	105	411
二次蓋外周部	25	64	25	64	411
二次蓋フランジ部	9	19	9	19	411

- 燃料破損による燃料棒内のガス放出を考慮した場合の内圧 (= 最高使用圧力) であっても輸送容器の構造健全性は維持される。

破損燃料用輸送容器（2体）に係る構造強度評価書

1. 破損燃料用輸送容器（2体）の概要

1. 1 破損燃料用輸送容器（2体）の構成

破損燃料用輸送容器（2体）は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。なお、バスケット以外の構成部材は破損燃料用輸送容器（7体）から流用して用いる。破損燃料用輸送容器（2体）の概要図を図1-1に示す。

（1）容器本体

容器本体は胴、底板、中性子遮へい体、外筒で構成される。低合金鋼の胴及び底板と蓋で放射性物質を閉じ込める耐圧バウンダリを構成する。

また、主に胴及び底板の低合金鋼がガンマ線遮へい機能を有し、胴と外筒の間および底板の底部に配置されたレジンが中性子遮へい機能を有する。

（2）蓋

蓋は一次蓋及び二次蓋で構成する。

一次蓋はステンレス鋼であり、複数本のボルトで容器本体フランジ面に取付けられる。一次蓋にはゴム製のOリングを設け容器本体フランジ面との密封性を確保する構造となっている。一次蓋のステンレス鋼がガンマ線遮へい機能を有する。

二次蓋もステンレス鋼であり、一次蓋の上から複数本のボルトで容器本体フランジ面に取付けられる。二次蓋にもゴム製のOリングを設け、容器本体フランジ面との密封性を確保できる構造となっている。

（3）バスケット

バスケットは容器内において燃料集合体を所定の位置に保持するための構造物である。また、未臨界確保のためバスケット外周にボロン添加アルミニウム合金板を設置している。

燃料集合体はバスケット内に装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（大）に収納する。

（4）トラニオン

トラニオンは容器のクレーンでの取扱い（吊上げ）及び、構内輸送時の固縛のために容器上部及び下部にボルトで取付ける。

取扱い時（縦姿勢）は容器と吊具との接続を二重化して落下を防止するために、上部トラニオンは二対（4個）設ける。

構内輸送時（横姿勢）では上部トラニオンと下部トラニオンで架台等に固定するため、下部トラニオンは一対（2個）設ける。

1. 2 設備仕様

破損燃料用輸送容器（2体）の仕様を表1-1に示す。

表1-1 破損燃料用輸送容器（2体）の仕様

項目	数値等
重量（t） （燃料を含む）	約 44.3
全長（m）	約 5.6
外径（m）	約 1.4
収納体数（体）	2
基数（基）	1

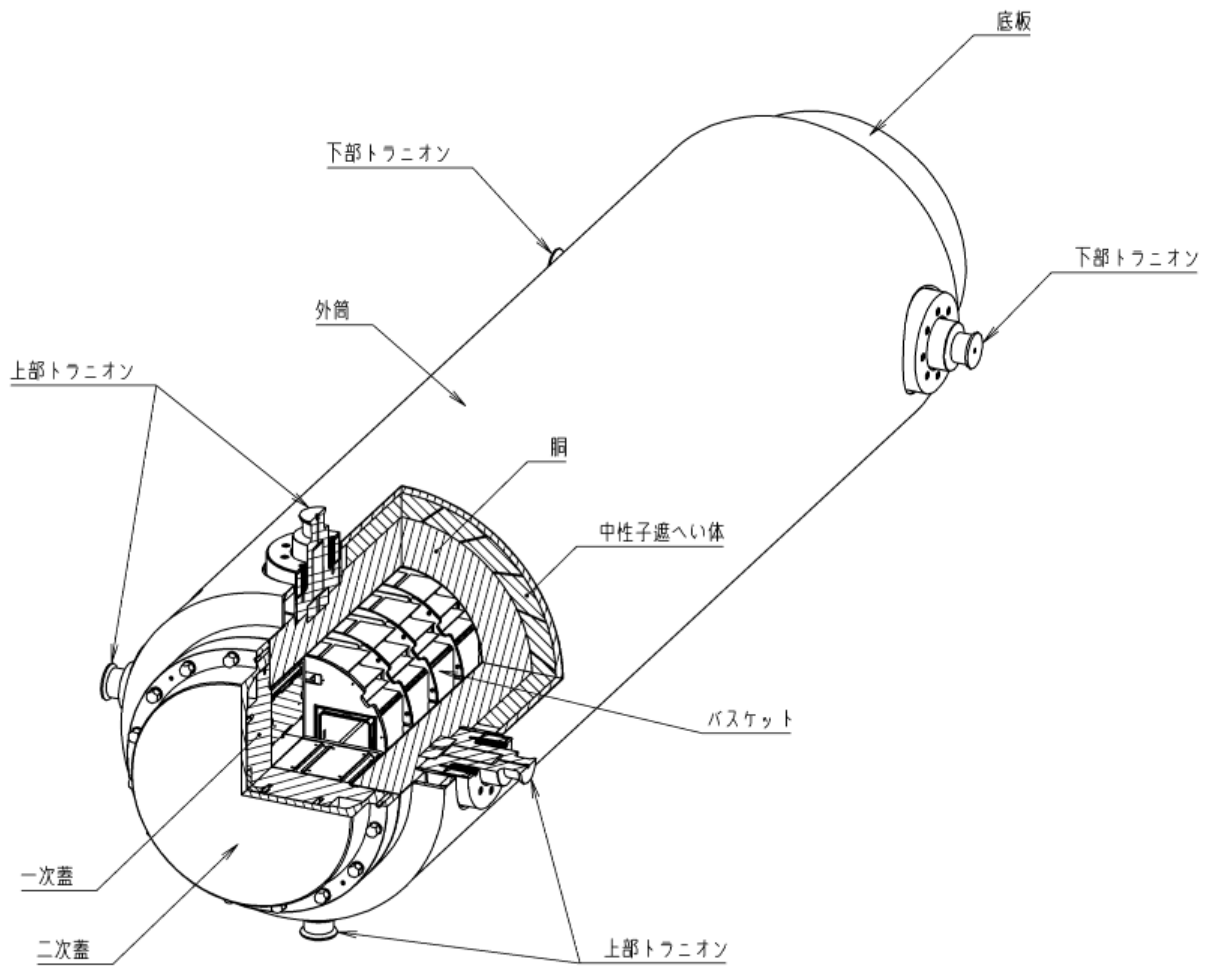


図 1 - 1 破損燃料用輸送容器 (2 体) 概要図

1. 3 構造強度評価の基本的な考え方

破損燃料用輸送容器（2 体）の構造強度の評価部位は、安全上重要な部位として容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケット、支持機能を有するトラニオンとする。

ただし、バスケットを除く構成部材は 3 号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は 3 号機構内用輸送容器の 7 体より少ないため容器質量は小さい。よって、容器の支持部材であるトラニオンについては、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.3. 構造強度評価」に包絡される。

従って、容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケットの各部の構造強度を評価する。

構造強度評価手法は、JSME S NC1-2005/2007 設計・建設規格（以下、「設計・建設規格」という。）を準用する。各評価対象部位の適用基準・規格を表 1－2 に示す。

表 1 - 2 構造強度に係る適用基準・規格

評価対象 部位	設計・建設規格 機器区分	構造強度 評価方法	考え方
容器本体, 蓋	クラス 3 容器	クラス 1 容器の規定を 準用	<p>容器本体及び蓋は設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より、クラス 3 容器に区分されると考えられる。</p> <p>圧力荷重についてはクラス 3 容器における規格計算式で評価することができるが、熱荷重や取扱時の衝撃荷重等の各種の負荷荷重が発生することから、これらの荷重については、応力解析によって発生応力を求めて評価する必要がある。</p> <p>したがって、構造強度評価手法は、同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス 1 容器を準用する。</p>
バスケット	ノンクラス	炉心支持構造物の規定 を準用	<p>バスケットは設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義に該当しないと考えられる。</p> <p>しかし、容器内において燃料を支持する部材であるため、構造強度評価手法は、炉心支持構造物を準用する。</p>

2. 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、破損燃料用輸送容器（2体）の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図2-1に示すハンドリングフローに基づき、破損燃料用輸送容器（2体）の取扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表2-1に示す。

1) 設計事象 I

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

2) 設計事象 II

容器本体及び蓋には、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

3) 設計事象 III 及び 設計事象 IV

破損燃料用輸送容器（2体）を取扱う設備及び運用においては、クレーンワイヤ及び吊具の二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、破損燃料用輸送容器（2体）の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

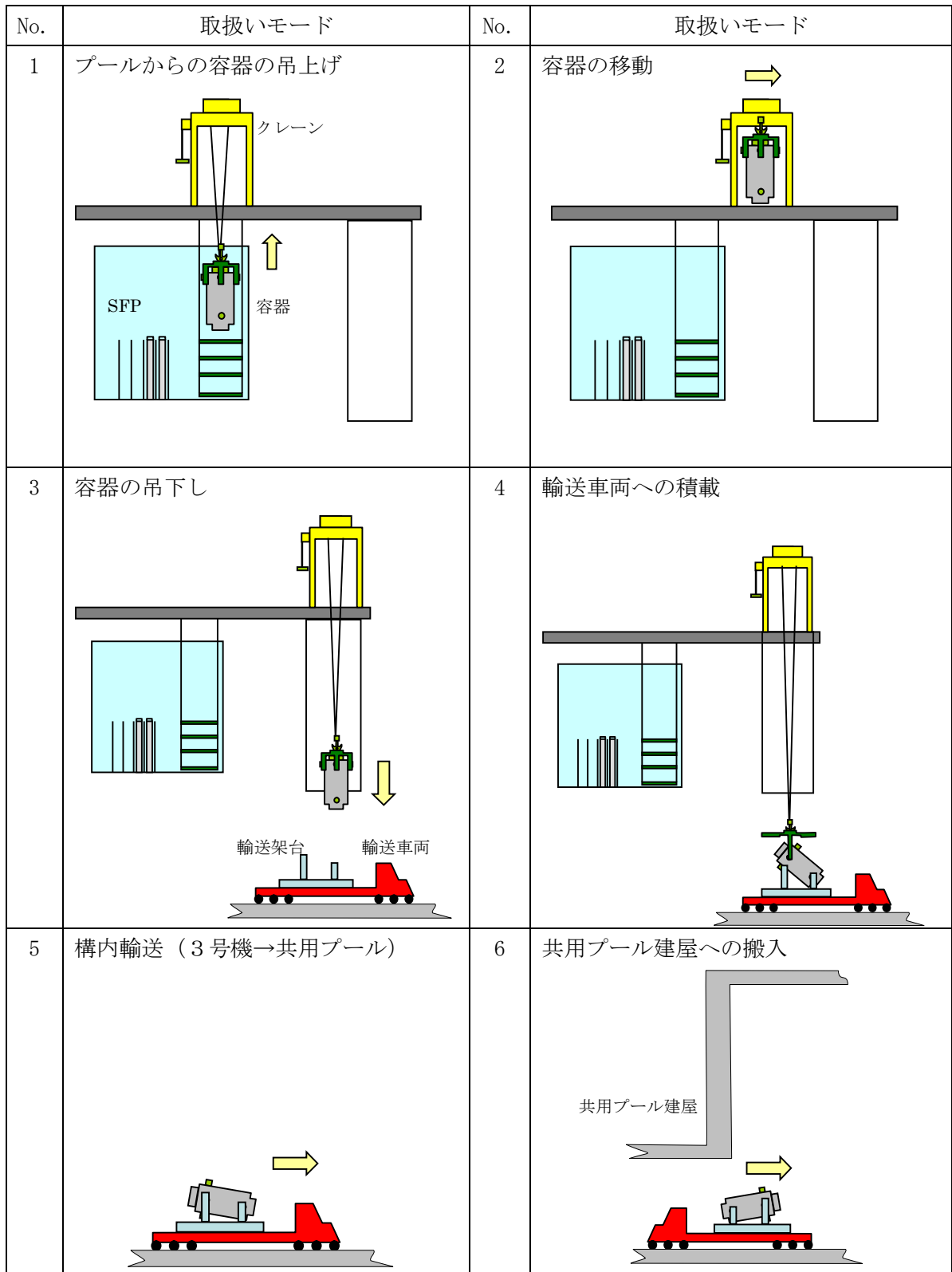


図 2 - 1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)

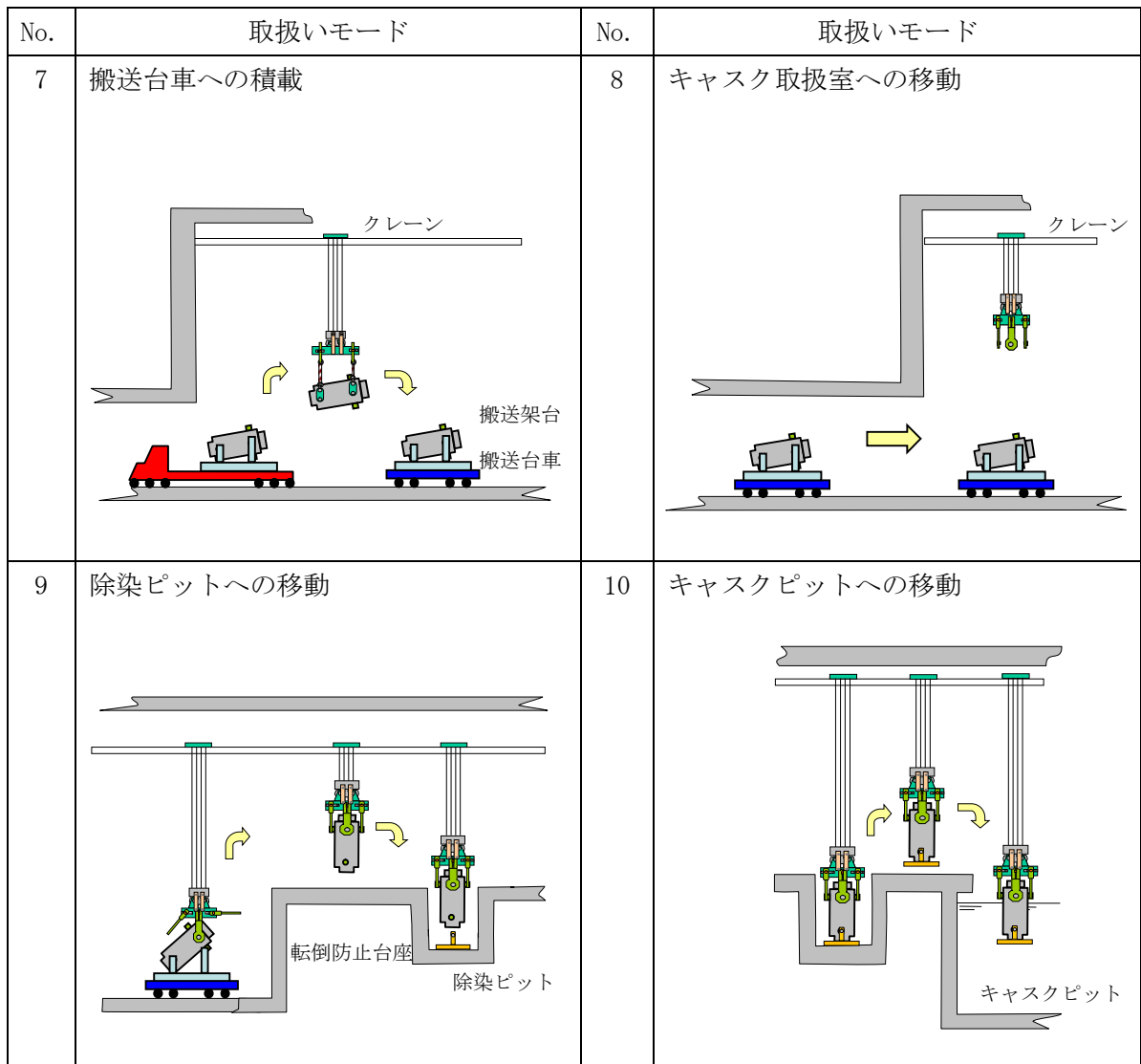


図 2 - 1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

表 2 - 1 設計事象の抽出 (1/2)

起回事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
破損燃料用輸送容器 (2 体) の落下	輸送車両取扱い時の落下 (No. 5)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 容器は輸送車両に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 容器は輸送車両で徐行して輸送 ● 輸送経路は輸送に関係する人及び車両以外の立入を制限	×		×
	搬送台車取扱い時の落下 (No. 8)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 容器は搬送台車に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 搬送台車はレール上を走行し, 走行範囲インターロック及び障害物検知装置を有している	×		×
	クレーン取扱時の落下 (No. 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10)	吊具の取付け不良 (3号機)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の ITV による目視確認 ● 取付け状態の吊具アーム部のリミットスイッチによる確認 ● 地切り後の ITV による取付け状態の確認, クレーンの荷重確認	×		×
		吊具の取付け不良 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の作業員による確認	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (3号機)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ, 吊具点検	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ, 吊具点検	×		×

表 2 - 1 設計事象の抽出 (2/2)

起回事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
破損燃料用輸送容器 (2 体) の衝突	クレーン移動時 (走行, 横行) の衝突 (No. 2, 7, 9, 10)	ブレーキの故障 (3号機)	以下の対策, 設計により容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● I T Vにより移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤 (シーケンサ、インバータ等) による停止機能の作動	×		×
		ブレーキの故障 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤 (シーケンサ、インバータ等) による停止機能の作動	×		×
		操作員の誤操作 (3号機)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● I T Vにより移動経路に障害物がないことの確認	×		×
		操作員の誤操作 (共用プール)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認	×		×
	クレーン吊下げ時の衝突 (垂直吊り) (No. 3, 4, 9, 10)	ブレーキの故障	以下の設計により容器の輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットへ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットに衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 構内用輸送容器が輸送架台, 転倒防止台座, キャスクピットに衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○
	クレーン吊下げ時の衝突 (水平吊り) (No. 7)	ブレーキの故障	以下の設計により容器の搬送架台へ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で搬送架台に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 容器が搬送架台に衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○

3. 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、破損燃料用輸送容器（2体）に発生する荷重を評価する。

1) 内圧

内圧は、除熱評価結果から設定した容器内部水の温度（℃）から、下記の通り設定した。

① 容器内部水及び気体の熱膨張を考慮した場合の内圧

(a) 容器本体及び一次蓋の内圧

容器本体及び一次蓋の内圧は0.6（MPa）とする。

(b) 二次蓋の内圧

二次蓋の内圧は0.45（MPa）とする。

② 容器内部水及び気体の熱膨張に加えて、燃料破損による燃料棒内のガス放出を考慮した場合の内圧（最高使用圧力）

(a) 容器本体及び一次蓋の最高使用圧力

容器本体及び一次蓋の最高使用圧力は2.0（MPa）とする。

(b) 二次蓋の最高使用圧力

二次蓋の最高使用圧力は1.4（MPa）とする。

③ 試験時圧力

(a) 容器本体及び一次蓋の試験時圧力

容器本体及び一次蓋の試験時圧力は3.0（MPa）とする。

(b) 二次蓋の試験時圧力

二次蓋の試験時圧力は2.1（MPa）とする。

2) 熱荷重

破損燃料用輸送容器（2体）よりも3号機構内用輸送容器（7体）のほうが崩壊熱が大きいいため温度勾配も大きく、発生する熱荷重も大きくなるため、安全側に3号機構内用輸送容器（7体）における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

3) 設計事象Ⅰの加速度

取扱い時及び構内輸送時の加速度

① 取扱い時（吊上げ時）

破損燃料用輸送容器（2体）を吊り上げる際に発生する加速度 $*3^{-1}$ は以下のとおり。
なお、吊上げ時の姿勢は縦姿勢である。

- ・容器軸方向加速度：1.32（G）

*3-1 クレーン構造規格より設定

② 構内輸送時

破損燃料用輸送容器(2体)を構内輸送する際に発生する加速度^{*3-2}は以下のとおり。
なお、構内輸送時の姿勢は横姿勢である。

- ・前後方向加速度：2.0 (G)
- ・上方向加速度：2.0 (G)
- ・下方向加速度：3.0 (G) (自重を考慮)
- ・左右方向加速度：1.0 (G)

*3-2 金属キャスク構造規格の「荷重の組合せと許容基準」より設定

4) 設計事象Ⅱの加速度の導出

事象発生時に破損燃料用輸送容器(2体)が有する運動エネルギーを被衝突物(輸送架台、搬送架台、転倒防止台座)の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

① 輸送架台への衝突(取扱いモード No. 3)

縦姿勢で破損燃料用輸送容器(2体)の下部トラニオンが輸送架台後部支持脚にクレーンの巻下げ速度(0.025m/s)で衝突する場合について評価する。

破損燃料用輸送容器(2体)の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器(2体)に生じる衝撃加速度を求める。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし、 α ：衝撃加速度 (G)

K：輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数 (2.882×10^{10} N/m)

V：クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

m：破損燃料用輸送容器(2体)の質量 (4.43×10^4 kg)

g：重力加速度 (9.8 m/s²)

発生する衝撃加速度は3.29Gとなり、余裕をみて4.0Gを評価加速度とする。

② 破損燃料用輸送容器（2体）の搬送台車上の搬送架台への衝突（取扱いモードNo.7）

横姿勢で破損燃料用輸送容器（2体）を搬送台車上の搬送架台に積載する際に、破損燃料用輸送容器（2体）が搬送台車上の搬送架台に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

破損燃料用輸送容器（2体）を剛体として、破損燃料用輸送容器（2体）の有する運動エネルギーを搬送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器（2体）に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：搬送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $5.738 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は4.07Gとなり、余裕をみて5.0Gを評価加速度とする。

③ 転倒防止台座への衝突及びキャスクピット床面への衝突（取扱いモードNo.9,10）

縦姿勢で破損燃料用輸送容器（2体）が転倒防止台座に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合及び、転倒防止台座を取り付けた破損燃料用輸送容器（2体）がキャスクピット床面に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として、容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器（2体）に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $4.407 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は9.10Gとなり、余裕をみて10Gを評価加速度とする。

5) 各設計事象における荷重条件

破損燃料用輸送容器（2体）の各設計事象における荷重条件を表3-1～表3-3に示す。なお、破損燃料用輸送容器（2体）の設計事象及び荷重条件については、抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表 3-1 荷重条件（胴、底板及び蓋）（1/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋は1.4MPa） ボルト初期締付け力 以下の荷重のうち最大となるもの ・ 構内輸送時荷重 ・ 吊上げ時荷重 ・ 搬送架台への衝突時荷重 ・ 転倒防止台座への衝突時荷重
I	構内輸送時	—	<u>内圧：0.6MPa</u> <u>（二次蓋は0.45MPa）</u> ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重
	吊上げ時	—	<u>内圧：0.6MPa</u> <u>（二次蓋は0.45MPa）</u> ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向：1.32G （自重を考慮） 熱荷重

表 3 - 1 荷重条件 (胴, 底板及び蓋) (2/2)

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
II	搬送架台への衝突 (取扱いモード No. 7)	—	<u>内圧 : 0.6MPa</u> <u>(二次蓋は 0.45MPa)</u> ボルト初期締付け力 搬送架台への衝突時荷重 下方向 : 5.0G (自重を考慮) 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 (取扱いモード No. 9) キャスクピットへの衝突 (取扱いモード No. 10)	輸送架台への衝突 (取扱いモード No. 3)	<u>内圧 : 0.6MPa</u> <u>(二次蓋は 0.45MPa)</u> ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向 : 10G (自重を考慮) 熱荷重
試験 状態	試験時	—	試験時圧力 : 3.0MPa (二次蓋は 2.1MPa) ボルト初期締付け力

表 3-2 荷重条件 (ポートカバー及びボルト) (1/2)

設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
設計条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは1.4MPa)
I	構内輸送時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは1.4MPa) ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G (自重を考慮) 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	吊上げ時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは1.4MPa) ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向：1.32G (自重を考慮)

表 3-2 荷重条件 (ポートカバー及びボルト) (2/2)

設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
II	搬送架台への衝突 (取扱いモード No. 7)	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは 1.4MPa) ボルト初期締付け力 搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G (自重を考慮) 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 (取扱いモード No. 9) キャスクピットへの衝突 (取扱いモード No. 10)	輸送架台への衝突 (取扱いモード No. 3)	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは 1.4MPa) ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G (自重を考慮) 熱荷重
試験状態	試験時	—	試験時圧力：3.0MPa (二次蓋ポートカバーは 2.1MPa)

表 3-3 荷重条件 (バスケット)

設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
設計条件	設計時	—	転倒防止台座への衝突時荷重* 3-3 下方向：10G (自重を考慮)
I	構内輸送時	吊上げ時	構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G (自重を考慮) 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
II	搬送架台への衝突 (取扱いモード No. 7)	—	搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G (自重を考慮)
	転倒防止台座への衝突 (取扱いモード No. 9) キャスクピットへの衝突 (取扱いモード No. 10)	輸送架台への衝突 (取扱いモード No. 3)	転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G (自重を考慮)

* 3-3 設計時のうち荷重条件が最も厳しいのは転倒防止台座への衝突荷重である

4. 設計基準

1) 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋は設計・建設規格 クラス 1 容器に関する規定 PVB-3000 に準じて評価を実施する。容器本体及び蓋の許容応力を表 4-1～表 4-6 に示す。

① 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5S_m$$

(c) 一次膜＋一次曲げ応力 (P_L+P_b)

$$P_L+P_b \leq 1.5S_m$$

(d) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq S_m$$

② 設計事象 I, II における許容応力

設計事象 I, II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q)

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

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq B$$

(e) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq 2S_m$$

(f) ボルトの平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$$

③ 試験状態における許容応力

試験状態における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq 0.9S_y$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5(0.9S_y)$$

(c) 一次一般膜+一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5(0.9S_y)$$

2) バスケット

バスケットは設計・建設規格 炉心支持構造物に関する規定 CSS-3000 に準じて評価を実施する。バスケットの許容応力を表 4-7 に示す。

① 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次一般膜+一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5S_m$$

② 設計事象 I, II における許容応力

設計事象 I, II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次+二次応力 (P_m+P_b+Q)

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

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 軸圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq f_c$$

表 4-1 胴及び底板の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	123	
	一次局部膜応力	P_L	184	
	一次膜+曲げ応力	P_L+P_b	184	
設計事象 I, II	一次+二次応力	P_L+P_b+Q	369	
	平均せん断応力	τ	73	
	平均支圧応力	σ_b	184	
	圧縮応力	σ_c	95	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	165	
	一次局部膜応力	P_L	247	
	一次一般膜+曲げ応力	P_m+P_b	247	

材質： GLF1 相当材 (ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1)

設計温度： 135 (°C)

表 4-2 一次蓋の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜+曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I, II	一次+二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	153	
	一次局部膜応力	P_L	229	
	一次一般膜+曲げ応力	P_m+P_b	229	

材質： SUSF304

設計温度： 100 (°C)

表 4-3 ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜+曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I, II	一次+二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	143	
	一次局部膜応力	P_L	214	
	一次一般膜+曲げ応力	P_m+P_b	214	

材質： SUS304

設計温度： 135 (°C)

表 4-4 二次蓋，二次蓋ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜+曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I, II	一次+二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	155	
	一次局部膜応力	P_L	232	
	一次一般膜+曲げ応力	P_m+P_b	232	

材質： SUSF304

設計温度： 95 (°C)

表 4-5 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	216	
設計事象 I, II	平均引張応力	σ_m	432	
	平均引張応力+曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	648	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 135 (°C)

表 4-6 二次蓋ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	223	
設計事象 I, II	平均引張応力	σ_m	446	
	平均引張応力+曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	669	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 95 (°C)

表 4-7 バスケットの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考	
設計条件	一次一般膜応力	P_m	133		
	一次一般膜+曲げ応力	P_m+P_b	199		
設計事象 I, II	一次+二次応力	P_m+P_b+Q	399		
	平均せん断応力	τ	79		
	平均支圧応力	σ_b	150		
	軸圧縮 応力	枠板 長手方向	σ_c	96	
		枠板 長手方向以外		88	
		格子支持板外周部 0° -180° 方向		56	
		格子支持板外周部 90° -270° 方向		129	
スペーサ		129			

材質： SUS304

設計温度： 170 (°C)

5. 評価方法及び評価モデル

5. 1 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋の主な構造部材の応力評価箇所を図5-1, 図5-2に示す。荷重条件は表3-1に示したとおりである。

1) 設計条件

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

最高使用圧力及びボルト初期締付け力と下記の設計事象の組合せで各部に発生する最大の応力を評価する。

(a) 最高使用圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルを図5-3に示す。

(b) 設計事象による機械的荷重が作用する場合

i. 構内輸送時

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルを図5-4に示す。構内輸送時は輸送容器に対し上下, 前後及び左右方向の加速度が組み合わさって作用する。

ii. 吊上げ時

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルを図5-5に示す。

iii. 搬送架台への衝突時

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図5-4と同様。

iv. 転倒防止台座への衝突時

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルを図5-6に示す。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

(a) 最高使用圧力による応力

最高使用圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び, 一次膜+曲げ応力(P_L+P_b)は(2)式で計算する。なお, ポートカバー, 二次蓋ポートカバーは周囲の構造から独立しているため, 一次局部膜応力(P_L)は発生しない。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_y &= \sigma_x \\ \sigma_z &= -P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- P : 最高使用圧力
- r : ポートカバーOリング平均半径
二次蓋ポートカバーは締付けボルトピッチ円半径
- t : ポートカバー最小板厚

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力及びガスケット締付による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット（Oリング）締付時のボルト荷重により発生する平均引張応力（ σ_{m1} ）は(3)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m1} &= \frac{W_{m1}}{A} \\ W_{m1} &= H + H_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- W_{m1} : 必要な最小ボルト荷重
- A : 全数のボルト最小断面積
- H : フランジに加わる最高使用圧力による全荷重
- H_p : 気密を十分保つために、Oリング又は継手接触面にかける圧縮力（ゴム製Oリングのため $H_p=0N$ ）

また、ガスケット（Oリング）締付け時の平均引張応力（ σ_{m2} ）は(4)式で計算する。

$$\sigma_{m2} = \frac{W_{m2}}{A} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- W_{m2} : ガスケット締付時に必要な最小ボルト荷重（ゴム製Oリングのため $W_{m2}=0N$ ）

2) 設計事象 I 構内輸送時

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 構内輸送時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図 5-4 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 5-7 に示す。熱荷重は、3号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上、平均せん断応力（ τ ）が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力（ σ_b ）は(5)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_b \cdot G_z}{A_b} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- m_b : バスケットの質量
- G_z : 後方向加速度
- A_b : 接触面積

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力（ σ_c ）は(6)式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_c \cdot G_z}{A_c} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

- m_c : 容器の質量
- G_z : 後方向加速度
- A_c : 胴の断面積

② ポートカバー、二次蓋ポートカバー

構内輸送時の機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。また、熱荷重は評価部位の寸法が小さく、温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって、最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次＋二次応力（ P_L+P_b+Q ）は、(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力（ P_L+P_b ）となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

$$\sigma_{m3} = \frac{F_s}{A_s} \dots\dots\dots (7)$$

ここで，

F_s : ボルト初期締付け力

A_s : ボルト最小断面積

(c) 構内輸送時に作用する加速度による平均引張応力

構内輸送時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

$$\sigma_{m4} = \frac{mG}{A} \dots\dots\dots (8)$$

ここで，

m : 作用する質量

G : 加速度

A : 全数のボルト最小断面積

(d) 構内輸送時に作用する加速度による曲げ応力

構内輸送時に作用する加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{1}{n} \cdot \frac{mG\ell_b}{8Z} \dots\dots\dots (9)$$

ここで，

n : ボルト本数

m : 作用する質量

G : 加速度

ℓ_b : ボルト長さ

Z : ボルトの断面係数

なお，二次蓋ポートカバーボルトには取付け構造上，曲げ応力は発生しない。

3) 設計事象 I 吊上げ時

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 吊上げ時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-5 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-7 と同様。

熱荷重は, 3号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上, 平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

吊上げ時の機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。また, 熱荷重は評価部位の寸法が小さく, 温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって, 最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) は, (2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト, 二次蓋ボルト, ポートカバーボルト, 二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 吊上げ時に作用する加速度による平均引張応力
引張方向への加速度がかからないため平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 吊上げ時に作用する加速度による曲げ応力
曲げ方向への加速度がかからないため曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

4) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突 (横姿勢)

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合
解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 搬送架台衝突時の機械的荷重が作用する場合
解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-4 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合
解析コード ABAQUS の軸対称固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-7 と同様。
熱荷重は, 3号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力
構造上, 平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力
底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(f) 圧縮応力
胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

搬送架台への衝突による機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。
また, 熱荷重は評価部位の寸法が小さく, 温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。
したがって, 最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) は, (2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

なお，一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトには引張方向への加速度がかからないため平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

なお，二次蓋ポートカバーボルトには，曲げ応力がかかる方向へ加速度がかからないため曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

5) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突 (縦姿勢)

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 転倒防止台座衝突時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-6 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-7 と同様。

熱荷重は，3号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上，平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

転倒防止台座への衝突による機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。また、熱荷重は評価部位の寸法が小さく，温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって，最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

引張方向への加速度がかからないため平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

曲げ方向への加速度がかからないため曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

6) 試験状態

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 試験時圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 自重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-6 と同様。ただし，加速度は 1.0G とする。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

(a) 試験時の圧力による応力

試験時圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び，一次一般膜+曲げ応力(P_m+P_b)は(2)式で試験時圧力を用いて計算する。なお，ポートカバー，二次蓋ポートカバーは周囲の構造から独立しているため，一次局部膜応力(PL)は発生しない。

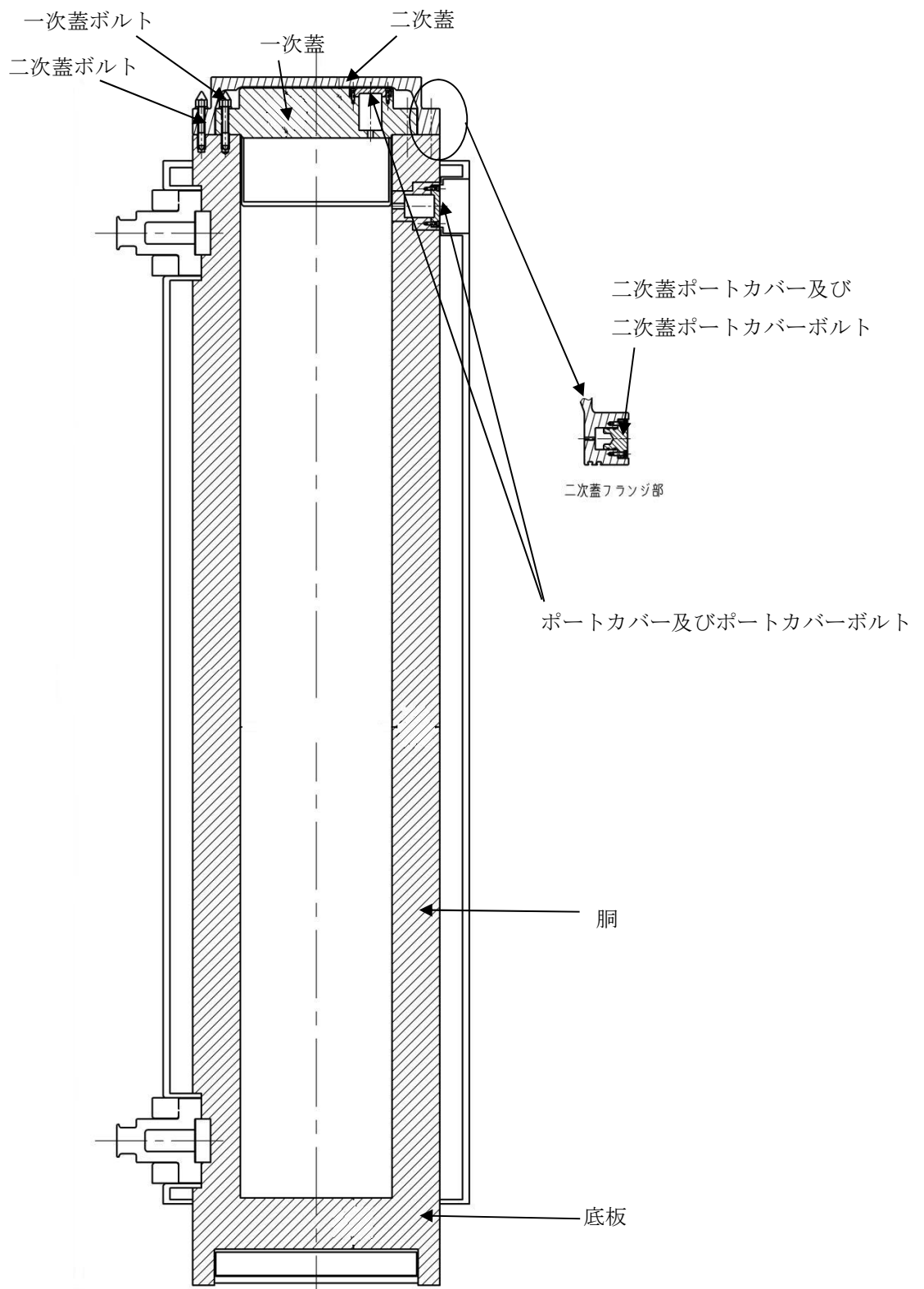


図 5 - 1 容器本体及び蓋の応力評価箇所

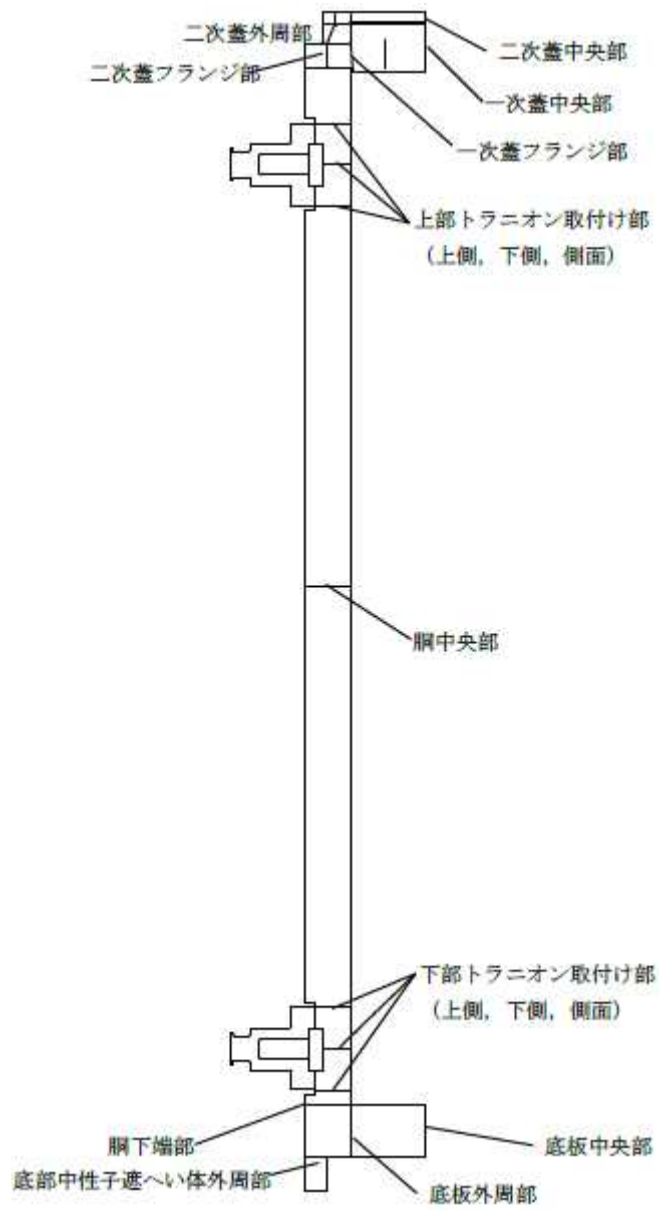


図 5 - 2 容器本体及び蓋の応力評価箇所 (胴, 底板, 蓋の詳細)



図 5 - 3 破損燃料用輸送容器（2体）の解析モデル
（設計条件，設計事象 I，II 及び試験状態の内圧並びにボルト初期締付け力作用時）



上下・前後方向加速度作用時のモデル
(設計事象Ⅱの搬送架台衝突時も同様)



左右方向加速度作用時のモデル

図5-4 破損燃料用輸送容器(2体)の解析モデル
(設計時及び設計事象Ⅰの構内輸送時)



図 5 - 5 破損燃料用輸送容器 (2体) の解析モデル
(設計時及び設計事象 I の吊上げ時)



図 5 - 6 破損燃料用輸送容器 (2体) の解析モデル
(設計時及び設計事象Ⅱの転倒防止台座への衝突時並びに試験時)



図 5 - 7 破損燃料用輸送容器 (2体) の解析モデル (熱荷重作用時)

5. 2 バスケット

バスケットの応力評価箇所を図5-8に示す。荷重条件は表3-3に示したとおりである。

1) 設計条件

① 一次一般膜応力

最大応力が発生する箇所は、転倒防止台座への衝突時の図5-8の評価点①及び⑦である。評価点①及び⑦の一次一般膜応力(P_m)は、(10)式で計算する。

$$P_m = \frac{m_{1,7}G_Z}{A_{1,7}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- G_Z : 加速度

② 一次膜応力+一次曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、転倒防止台座への衝突時の図5-8の評価点④である。評価点④の一次一般膜+一次曲げ応力(P_m+P_b)は、(11)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} P_m+P_b &= \frac{M_4}{Z_4} \\ M_4 &= \frac{m_4G_Zl_4}{24} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

- m_4 : 評価点④に作用する質量
- G_Z : 加速度
- M_4 : 評価点④に生じる曲げモーメント
- Z_4 : 評価点④における枠板の断面係数
- l_4 : 評価点④における等分布荷重が作用する長さ

2) 設計事象 I 構内輸送時

① 一次+二次応力

最大応力が発生する箇所は、図5-8の評価点①である。
熱荷重は発生しないため、一次+二次応力(P_m+P_b+Q)は、(12)式で計算する一次一般膜+一次曲げ応力(P_m+P_b)である。

$$\left. \begin{aligned}
 P_m &= \frac{m_{1,7}G_Z}{A_{1,7}} \\
 P_b &= \frac{1}{n_{\text{span}}} \cdot \frac{m_1 G_X l_{\text{pitch}}}{12Z_1}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで,

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- m_1 : 評価点①に作用する質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- G_X, G_Z : 加速度
- Z_1 : 評価点①における枠板の断面係数
- n_{span} : 格子支持板によって支持されるスパンの数
- l_{pitch} : 枠板の支持ピッチ

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-8 の評価点④である。

左右方向加速度により発生する平均せん断応力(τ)は、(13)式で計算する。

$$\tau = \frac{m_4 G_Y}{A_4} \dots\dots\dots (13)$$

ここで,

- m_4 : 評価点④に作用する質量
- A_4 : 評価点④の断面積
- G_Y : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 5-8 の評価点①, ③及び⑦である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 5-8 の評価点①及び⑦である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

3) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突（横姿勢）

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は，図5－8の評価点①である。

熱荷重は発生しないため，一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は，(14)式で計算する一次一般膜＋一次曲げ応力(P_m+P_b)である。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{m_1 G_X}{A_1} \quad , \quad \frac{m_{1,7} G_Z}{A_{1,7}} \\ P_b &= \frac{1}{n_{\text{span}}} \cdot \frac{m_1 G_X l_{\text{pitch}}}{12Z_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで，

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- m_1 : 評価点①に作用する質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- A_1 : 評価点①の断面積
- G_X, G_Z : 加速度
- Z_1 : 評価点①における枠板の断面係数
- n_{span} : 格子支持板によって支持されるスパンの数
- l_{pitch} : 枠板の支持ピッチ

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は，図5－8の評価点⑦である。

前後方向加速度により発生する平均せん断応力(τ)は，(15)式で計算する。

$$\tau = \frac{m_7 G_X}{A_7} \dots\dots\dots (15)$$

ここで，

- m_7 : 評価点⑦に作用する質量
- A_7 : 評価点⑦の断面積
- G_X : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図5－8の評価点①及び④である。平均支圧応力(σ_b)は(16)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_1 G_X}{A_1} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、

- m_1 : 評価点①に作用する質量
- A_1 : 評価点①の断面積
- G_X : 加速度

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 5-8 の評価点①である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

4) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突(縦姿勢)

① 一次+二次応力

最大応力が発生する箇所は、図 5-8 の評価点④である。
熱荷重は発生しないため、転倒防止台座への衝突に発生する一次+二次応力(P_m+P_b+Q)は(11)式で計算する。

② 平均せん断応力

構造上、平均せん断応力(τ)は発生しない。

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 5-8 の評価点①、③及び⑦である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 5-8 の評価点①及び⑦である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

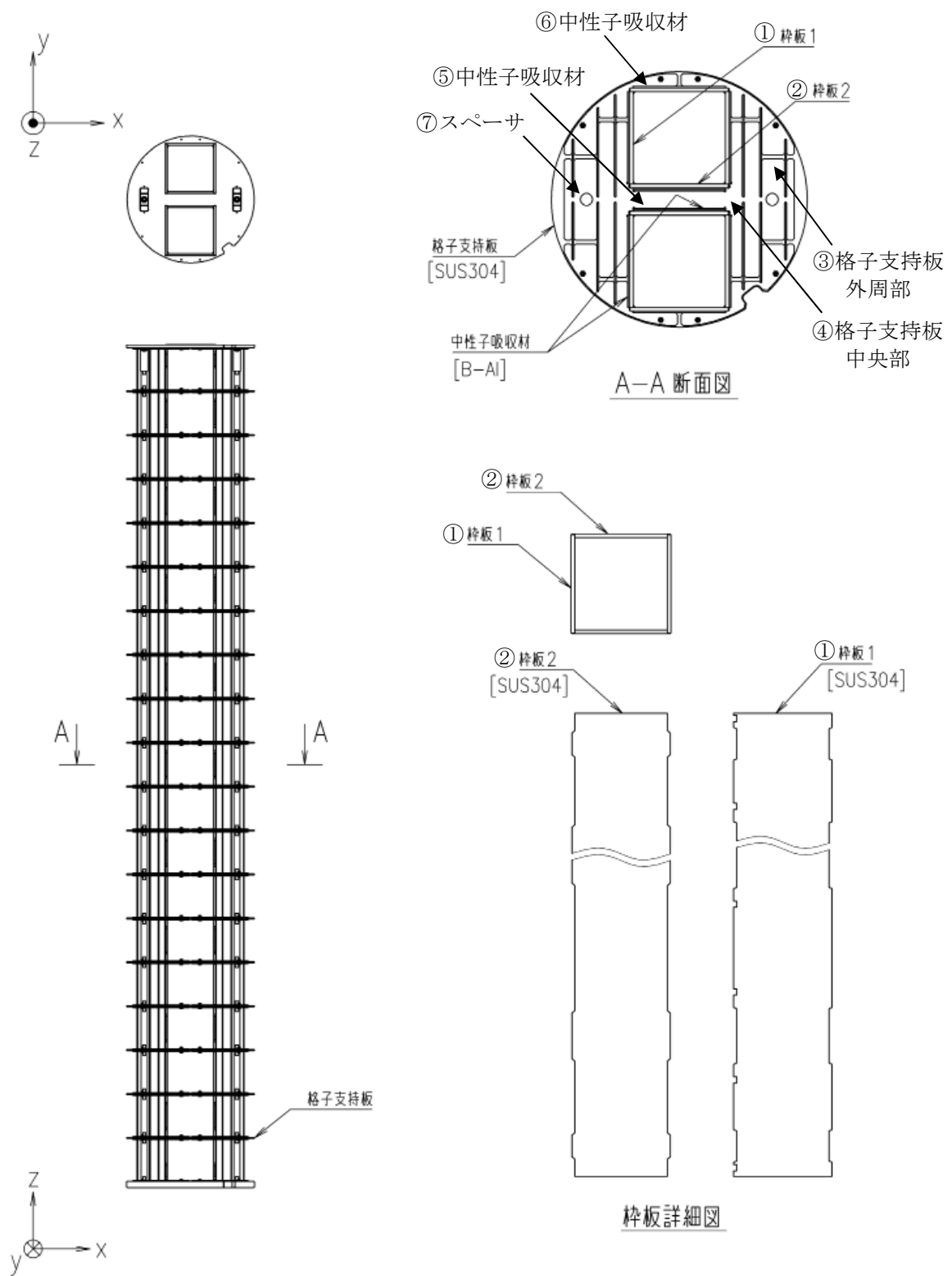


図5-8 バスケットの応力評価箇所

6. 評価結果

評価結果を表6-1～表6-5に示す。いずれも、許容応力に対して十分に余裕がある。
このため、破損燃料内用輸送容器（2体）の構造健全性は維持される。

表 6 - 1 容器本体及び蓋の評価結果 (胴, 底板, 蓋) 1/2

(単位 : MPa)

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次局部膜応力 (P_L)		一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b)		一次一般膜+曲げ応力 (P_m+P_b)		一次+二次応力 (P_L+P_b+Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴中央部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	8	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	9	369
		試験状態	7	165	—	—	—	—	9	247	—	—
底板中央部		設計条件	5	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	21	369
		試験状態	3	165	—	—	—	—	6	247	—	—
底板外周部		設計条件	—	—	5	184	10	184	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	10	369
		試験状態	—	—	3	247	—	—	6	247	—	—
胴下端部		設計条件	—	—	12	184	22	184	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	16	369
		試験状態	—	—	5	247	—	—	10	247	—	—
底部中性子遮 へい体外周部	設計条件	—	—	10	184	13	184	—	—	—	—	
	I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	25	369	
	試験状態	—	—	6	247	—	—	10	247	—	—	
上部トラニオ ン取付け部	設計条件	—	—	11	184	22	184	—	—	—	—	
	I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	20	369	
	試験状態	—	—	7	247	—	—	10	247	—	—	

表 6 - 1 容器本体及び蓋の評価結果 (胴, 底板, 蓋) 2/2

(単位 : MPa)

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次局部膜応力 (P_L)		一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b)		一次一般膜+曲げ応力 (P_m+P_b)		一次+二次応力 (P_L+P_b+Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
下部トラニオン取付け部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	—	—	18	184	31	184	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	30	369
		試験状態	—	—	7	247	—	—	9	247	—	—
一次蓋 中央部		設計条件	3	137	—	—	8	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	4	411
		試験状態	3	153	—	—	—	—	10	229	—	—
一次蓋 フランジ部		設計条件	—	—	7	205	8	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	7	411
		試験状態	—	—	8	229	—	—	8	229	—	—
二次蓋 中央部	SUSF304	設計条件	61	137	—	—	102	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	34	411
		試験状態	92	155	—	—	—	—	154	232	—	—
二次蓋 外周部		設計条件	—	—	36	205	64	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	25	411
		試験状態	—	—	46	232	—	—	95	232	—	—
二次蓋フランジ部		設計条件	—	—	9	205	18	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	—	—	9	411
		試験状態	—	—	13	232	—	—	27	232	—	—

表 6 - 2 容器本体及び蓋の評価結果 (ポートカバー)

(単位 : MPa)

部位	材質	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b)		一次一般膜+曲げ応力 (P_m+P_b)		一次+二次応力 (P_L+P_b+Q)	
			計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値
ポートカバー	SUS304	設計条件	2	137	17	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	17	411
		試験状態	3	143	—	—	26	214		
二次蓋 ポートカバー	SUSF304	設計条件	2	137	7	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	7	411
		試験状態	3	155	—	—	11	232	—	—

表 6 - 3 容器本体及び蓋の評価結果 (ボルト)

(単位 : MPa)

部位	材料	設計事象	平均引張応力 (σ_m)		平均引張応力+曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋 ボルト	SUS630 H1150	設計条件	101	216	—	—
		I, II	316	432	346	648
二次蓋 ボルト		設計条件	125	216	—	—
		I, II	325	432	343	648
ポートカバー ボルト		設計条件	39	216	—	—
		I, II	227	432	229	648
二次蓋ポート カバーボルト		設計条件	21	223	—	—
		I, II	216	446	216	669

表 6 - 4 容器本体及び蓋の評価結果 (平均支圧応力及び圧縮応力)

(単位 : MPa)

部位	設計事象	平均支圧応力 (σ_b)		圧縮応力 (σ_c)	
		計算値	許容応力	計算値	許容応力
底板	I, II	1	184	—	—
胴	I, II	—	—	7	95

表 6-5 バスケットの評価結果

(単位：MPa)

部位	応力の種類	設計条件		設計事象 I		設計事象 II				許容 応力	
				構内輸送時		搬送架台への 衝突		転倒防止台座への 衝突			
		計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)		
バスケット	一次一般膜応力 (Pm)	13	①, ⑦	—	—	—	—	—	—	133	
	一次一般膜+一次曲げ応力 (Pm+Pb)	31	④	—	—	—	—	—	—	199	
	一次+二次応力 (Pm+Pb+Q)	—	—	13	①	16	①	31	④	399	
	平均せん断応力 (τ)	—	—	1	④	1	⑦	0	④, ⑦	79	
	平均支圧応力 (σ_b)	—	—	3	①, ③, ⑦	2	①, ④	13	①, ③, ⑦	150	
	軸圧縮 応力 (σ_c)	枠板 長手方向	—	—	3	①	1	①	13	①	96
		枠板 長手方向以外	—	—	2	①	2	①	0	①, ②	88
		格子支持板外周部 0° -180° 方向	—	—	2	③	2	③	0	③	56
		格子支持板外周部 90° -270° 方向	—	—	1	③	0	③	0	③	129
		スペーサ	—	—	3	⑦	1	⑦	13	⑦	129