

【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

2020年1月14日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

今回の変更申請範囲



■ 燃料の分類と実施計画の対応は以下のとおり。

状態	燃料の状態	実施計画		
		2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備		2.12 使用済燃料共用プール設備 (添付資料-9,10)
		燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書 (添付資料-1-3)	破損燃料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 (添付資料-2-2)	
健全燃料	被覆管は健全	既認可の範囲	既認可の範囲※ 1	既認可の範囲 (通常ラック)
スペーサ部損傷燃料 (CB有り)	スペーサに損傷あるが燃料被覆管は健全			
スペーサずれ燃料 (CB有り)				
スペーサ部損傷燃料 (CB無し)	CB未装着のため、ガレキの影響で被覆管に影響を与える可能性を懸念	既認可の範囲	今回の変更申請範囲 (破損燃料用輸送容器 (7体))	既認可の範囲 (49体ラック)
漏えい燃料	SHIPPING検査により漏えいを確認済			
ハンドル部の変形が認められる燃料※ 3	小	記載を追加し、別途申請予定※ 2	今回の変更申請範囲 (破損燃料用輸送容器 (2体))	変更申請審査中 (25体ラック)
	大			

※ 1 : 添付資料-2-1「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」として認可済み

※ 2 : 添付資料-1-3「6.2. 3号機における燃料の取り扱い」を見直して対応することを検討中

※ 3 : 燃料ハンドルが変形したスペーサ部損傷燃料や漏えい燃料も含む (現在確認されていないが、今後発見される可能性あり)

※ : 上記以外の燃料が確認された場合は状況に応じて適切に対応する

【用語の定義】

- ・ 損傷燃料 : スペーサ部に損傷のある燃料
- ・ 漏えい燃料 : 燃料被覆管の貫通欠陥の程度が軽微な燃料
- ・ 変形燃料 : 燃料ハンドル部が変形した燃料
- ・ 破損燃料 : 燃料被覆管の貫通欠陥の程度が大きい燃料

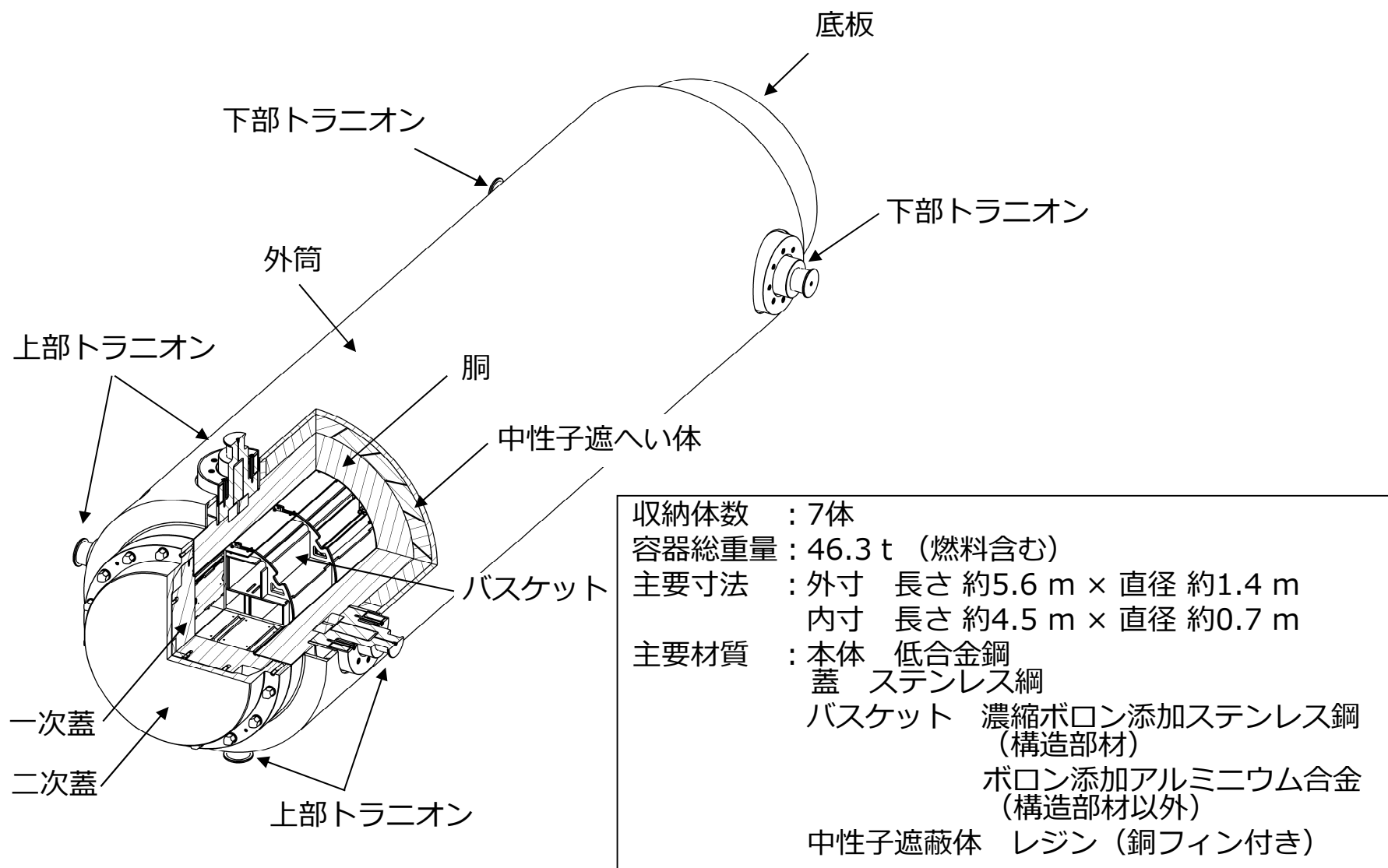
既認可輸送容器（7体収納）の設計経緯

- 3号機原子炉建屋の荷重条件から定格荷重50tのクレーンを設置。
- 既存容器では重量50tを超えるため、新たに輸送容器を設計。
- 3号機SFP燃料はガレキ落下により破損している可能性があったため、安全機能及び構造強度の設計条件に以下の条件を追加し、破損燃料も輸送できる容器として設計に反映。
 - 放射性物質の拡散を抑制
 - ⇒ ・ 収納缶及び収納缶が入るバスケットを設計し、破損燃料を収納缶に入れた輸送とする。
 - ・ 破損形態に応じて2種類の収納缶を設計・製造
 - ⇒ 収納缶（小）：既存容器のバスケット格子内のりやプールラック内のりから内寸を設定
 - 収納缶（大）：次スライドにて説明
- 収納体数は4体、7体、12体の3ケースを検討。

収納体数	4体	7体	12体
遮へい性能	@1m : 0.2 mSv/h	@1m : 0.3~0.4mSv/h	4体、7体よりも劣る
臨界性能	未臨界を確保	未臨界を確保	破損燃料を考慮すると成立しない
輸送回数	142回	81回	48回

- 12体収納は、破損燃料まで考慮すると未臨界を確保できないため廃案。
- 作業環境の雰囲気線量が高いことから、極力輸送回数を減らして作業員の総被ばく線量を低減させるため、輸送回数の少ない7体収納を採用。

輸送容器（7体収納）の概要

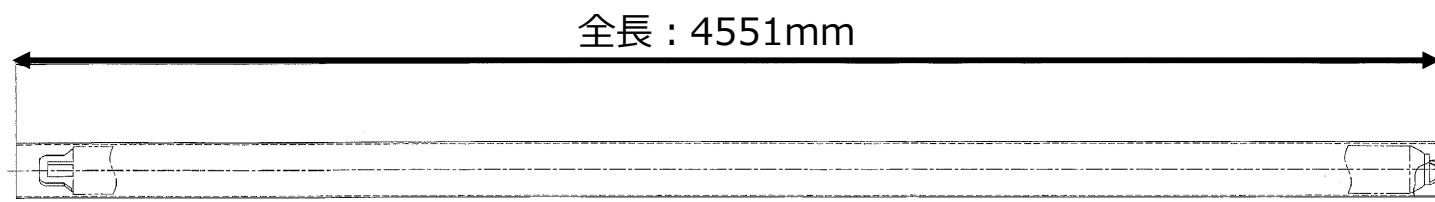


輸送容器（7体収納）のバスケット構造

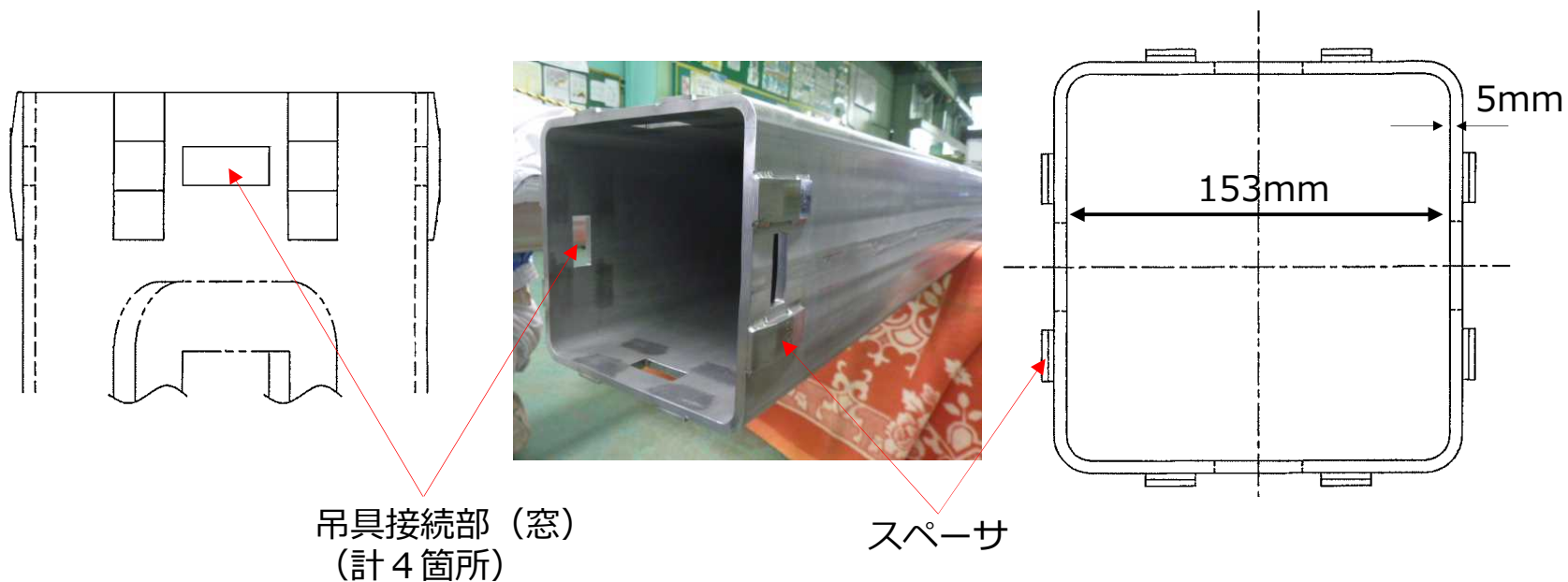
- バスケットは容器内において燃料集合体を所定の位置に保持して未臨界を確保するための構造物であり、ボロン添加ステンレス鋼（B-SUS）の枠板、SUS304の格子支持板、バスケット外周にボロン添加アルミニウム（B-Al）合金板で構成されている。
- 枠板同士が嵌め合う構造となっており、枠板で燃料集合体を直接支持する。
- ボロン添加アルミニウム合金板は、両端を格子支持板にボルトで固定する構造であり、構造強度部材としての機能は有していない。

使用済燃料収納缶（小）の構造

- 使用済燃料収納缶（小）は、ステンレス鋼製の角缶構造である。上部には吊具を取り付けるための接続部（窓）を設け、接続部に吊具を取り付けできる構造としている。



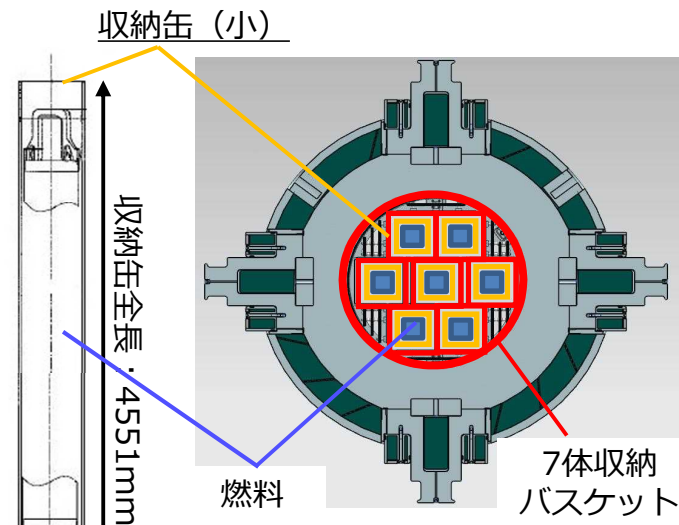
収納缶全体



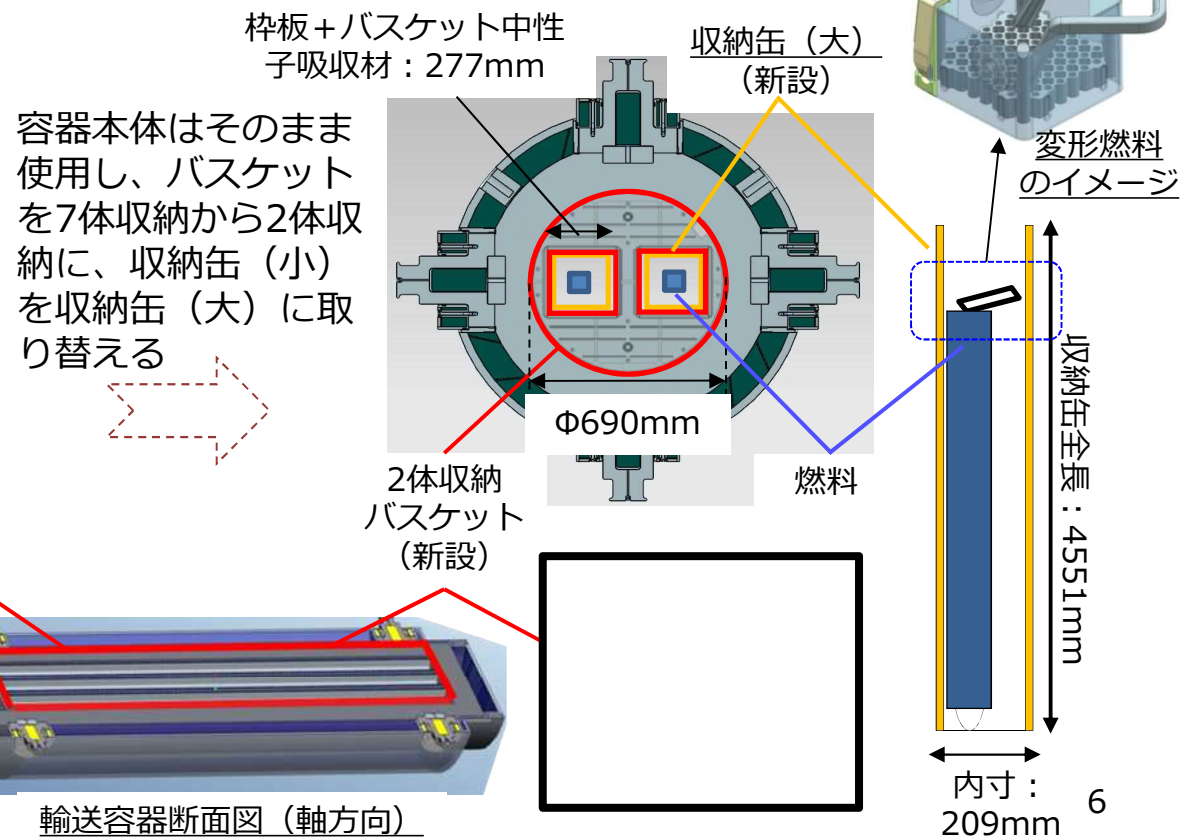
輸送容器（2体収納）の設計検討

- 3号機SFP内調査により、ハンドル部が変形した燃料を確認。
⇒ハンドル変形の大きい燃料は収納缶（小）にハンドルが干渉する可能性があるため、収納可能な大きいサイズの収納缶（大）及び収納缶（大）に対応したバスケットを新規設計。
- 最大重量のガレキ下部から発見されたハンドル変形燃料が約60度の曲がりで、現在確認されているものでは最大の変形量であるが、今後のガレキ撤去でより変形の大きい燃料が見つかる可能性があるため、保守的にハンドルが水平に傾倒した状態（下図）でも収納可能な内寸を設定。
- 収納缶（大）に対応したバスケットは未臨界が確実に確保され、幾何学的に最大収納となる2体を設定。

輸送容器（7体収納）

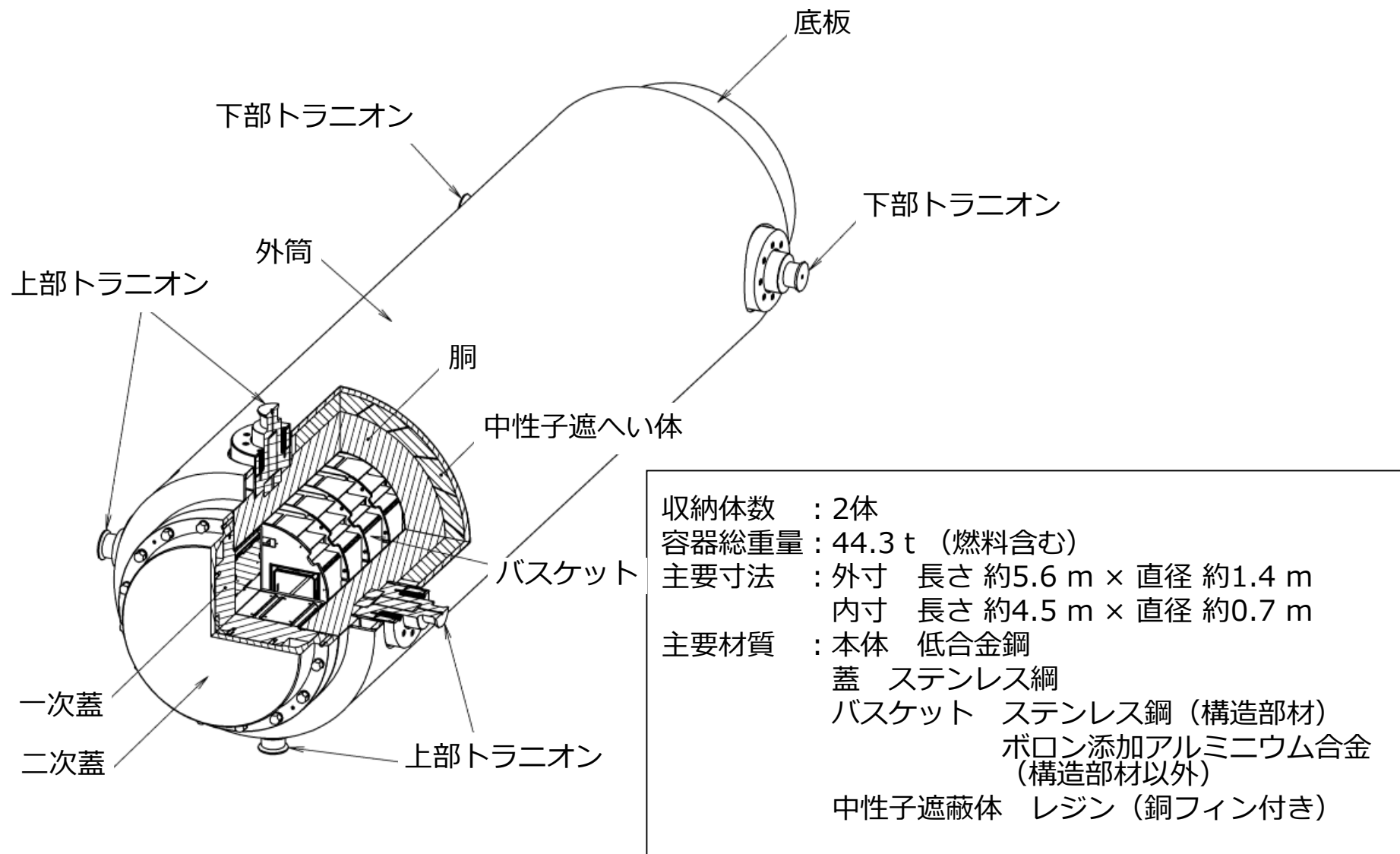


輸送容器（2体収納）



輸送容器断面図（軸方向）

輸送容器（2体収納）の概要



輸送容器（2体収納）のバスケット構造

- 2体収納バスケットは、ステンレス鋼（SUS）の枠板、SUS304の格子支持板、バスケット外周にボロン添加アルミニウム（B-Al）合金板で構成されている。
- 枠板で燃料集合体を直接支持する。
- ボロン添加アルミニウム合金板は、両端を中性子吸収材支持板に嵌め合って固定する構造であり、構造強度部材としての機能は有していない。中性子吸収材支持板は格子支持板にボルトで固定する構造である。
- スペースは、格子支持板を所定の位置に保持する役割であり、バスケットの構造強度部材の機能を有している。

使用済燃料収納缶（大）の構造

- 使用済燃料収納缶（大）は、ステンレス鋼製の角缶構造であり、側面には中性子吸収材のボロン添加アルミニウム（B-Al）合金を取り付けた構造である。上部には吊具を取り付けるための接続部（窓）を設け、接続部に吊具を取り付けできる構造としている。



安全評価における既認可からの変更点

- 構造強度
 - 荷重条件（容器質量，バスケット構造）が変わるため，2体収納の評価を実施
 - 2体収納のトラニオンの応力評価は，容器質量が小さくなるため7体収納の結果に包絡される
- 除熱機能
 - 収納体数が2体に減り崩壊熱量は小さくなるがバスケット構造が変わるため，2体収納の評価を実施
 - 軸対称断面モデルを用いて評価されるOリング及び蓋は崩壊熱量に比例するため，2体収納は7体収納の結果に包絡される

評価項目		既認可（7体収納）	既認可（7体収納）との主な変更点	
			破損燃料用輸送容器（7体収納）	破損燃料用輸送容器（2体収納）
構造強度	評価対象	容器本体，蓋，バスケット， トラニオン	同左	容器本体，蓋，バスケット
	評価条件	7体収納 の容器質量（燃料，収納缶等の収納物を含む）及び内部構造	同左	2体収納 の容器質量（燃料，収納缶等の収納物を含む）及び内部構造
	評価方法	評価対象ごとに荷重条件から応力計算	同左	同左
	新評価実施有無	－	不要	要
除熱機能	評価対象	中性子遮へい材， Oリング ，胴， 蓋 ，バスケット，燃料被覆管	同左	中性子遮へい材，胴，バスケット，燃料被覆管
	評価条件	7体収納 の崩壊熱量及び内部構造	同左	2体収納 の崩壊熱量及び内部構造
	評価方法	輪切り断面モデル及び 軸対称断面モデル を用いた評価	同左	輪切り断面モデルを用いた評価
	新評価実施有無	－	不要	要

安全評価における既認可からの変更点



- 密封機能
 - 構造強度及び除熱評価結果並びに容器構造から密封機能の維持を確認するが、新たに構造強度及び除熱評価を実施したため、2体収納の評価を実施
- 遮へい機能
 - 収納体数が2体に減り線源強度は小さくなるがバスケット構造が変わるため、2体収納の評価を実施
 - 7体収納と軸方向の燃焼度分布が同一（線源強度の分布が同様）のため、燃焼度分布が最大（線源強度最大）となる高さの線源強度を評価し、2体収納が7体収納の結果に包絡されることを確認する

評価項目		既認可（7体収納）	既認可（7体収納）との変更点	
			破損燃料用輸送容器（7体収納）	破損燃料用輸送容器（2体収納）
密封機能	評価対象	一次蓋及び二次蓋で構成する密封境界	同左	同左
	評価条件	構造強度（7体収納）及び除熱機能（7体収納）と同様	同左	構造強度（2体収納）及び除熱機能（2体収納）と同様
	評価方法	構造強度（7体収納）及び除熱（7体収納）評価結果並びに容器構造から密封機能の維持を確認	同左	構造強度（2体収納）及び除熱（2体収納）評価結果並びに容器構造から密封機能の維持を確認
	新評価実施有無	—	不要	要
遮へい機能	評価対象	容器上部，上部中性子遮へい体欠損部，容器側面，下部中性子遮へい体欠損部，容器下部，上部トラニオン，下部トラニオン	同左	容器側面
	評価条件	7体収納の線源強度及び内部構造	同左	2体収納の線源強度及び内部構造
	評価方法	径方向の評価モデル及び軸方向の評価モデルを用いた評価	同左	径方向の評価モデルを用いた評価
	新評価実施有無	—	不要	要

安全評価における既認可からの変更点

- 臨界防止機能
 - 想定されるいかなる場合にも未臨界を確保しなければならないため、保守的に燃料被覆管が破損し、ペレットが収納缶外まで放出されることを仮定して評価を実施
- 輸送容器の落下時の線量評価
 - 収納体数が2体に減り核分裂生成物の放出量は小さくなるため、2体収納は7体収納の結果に包絡される

評価項目		既認可（7体収納）	既認可（7体収納）からの変更点	
			破損燃料用輸送容器（7体収納）	破損燃料用輸送容器（2体収納）
臨界防止機能	評価条件	7体収納バスケット，収納缶（小），燃料条件（燃料形状を維持したまま収納缶内で燃料棒が広がる）	7体収納バスケット，収納缶（小），燃料条件（燃料破損を仮定し，燃料粒子が収納缶外へ漏えい・堆積する）	2体収納バスケット，収納缶（大），燃料条件（燃料破損を仮定し，燃料粒子が収納缶外へ漏えい・堆積する）
	評価方法	燃料条件，製造公差，境界条件など最も保守的に設定して評価	同左	同左
	新評価実施有無	－	要	要
輸送容器の落下時の線量評価	評価条件	収納した7体すべてが破損	同左	収納した2体すべてが破損
	評価方法	大気中への核分裂生成物の放出量から線量当量率を評価	同左	同左
	新評価実施有無	－	不要	不要

輸送容器（2体収納）の使用前検査確認項目



確認事項	確認項目		確認内容	検査対象	確認要否
構造強度	材料確認		実施計画に記載されている主な材料について確認する。	容器, バスケット, 放射線遮へい材	<u>バスケットのみ検査対象</u> ※1
	強度・漏えい確認	耐圧・漏えい確認	確認圧力で保持した後, 確認圧力に耐えていることを確認する。耐圧確認終了後, 耐圧部分からの漏えいの有無を確認する。	容器	構造が変わらないため <u>検査不要</u> ※2
構造強度 遮へい機能	構造確認	寸法確認	実施計画に記載されている主要寸法を確認する。	容器, バスケット, 放射線遮へい材	<u>バスケットのみ検査対象</u> ※1
		外観確認	各部の外観を確認する。		
除熱機能	機能確認	伝熱確認	代表1基について容器内部に使用済燃料を模擬するヒータを挿入して発熱させ, 温度を確認する。	容器, バスケット	発熱量が7体に包絡されるため, <u>検査不要</u>
密封機能	機能確認	取合確認	密封境界を構成する蓋等が容器と取合い密封境界の構成に問題が無いことを確認する。	容器	2体収納バスケットに変わり, バスケットと一次蓋との取合確認が必要なため <u>検査対象</u>
臨界防止機能	機能確認	材料確認 寸法確認 外観確認	バスケットの材料及び主要寸法が, 実施計画評価の前提条件となっている値を満足していることを確認し, バスケットの外観に異常のないことを確認する。	バスケット	2体収納バスケットは新規設備となるため <u>検査対象</u>

※1：容器及び放射線遮へい材は7体収納と変わらないため検査不要

※2：容器本体, 蓋, ポートカバーは7体収納と変わらない

輸送容器（7体収納）の除熱機能検査

- 検査手順
 - 容器内部に使用済燃料を模擬するヒータを挿入して発熱させ、定常状態における容器各部の温度を立会により確認する。
- 判定基準
 - 環境温度を38℃として補正した容器各部の温度が最高使用温度を超えないこと。
- 検査結果
 - 判定基準に対して十分裕度がある。

計測部位	補正温度	判定基準
キャスク容器	65.9℃	135℃
バスケット	65.6℃	170℃

輸送容器（2体収納）の除熱機能検査の必要性について

- 7体収納と2体収納の伝熱経路の比較
 - 容器は同一の輸送容器を使うことから、胴より外側の伝熱経路は同一である。
 - 胴内部の主要な伝熱パスは、水とステンレス鋼であり、輸送容器(7体収納)と同じである。

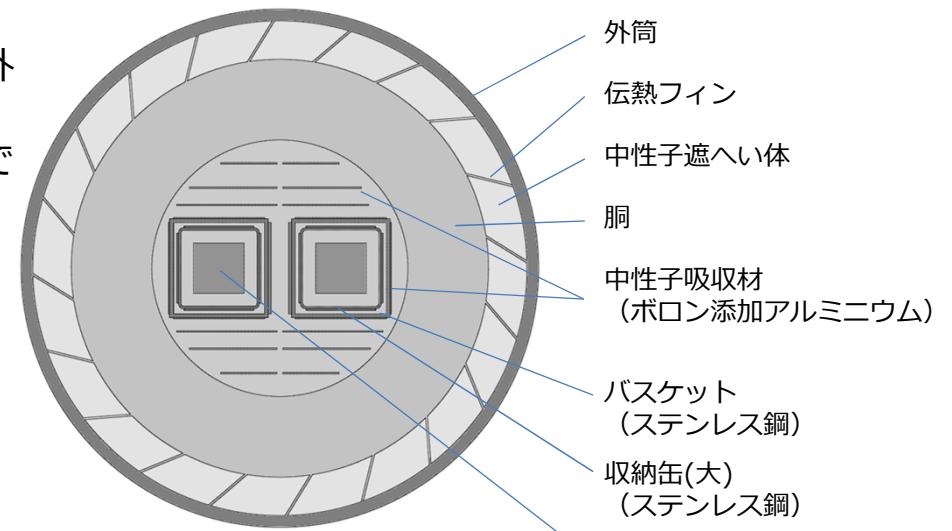
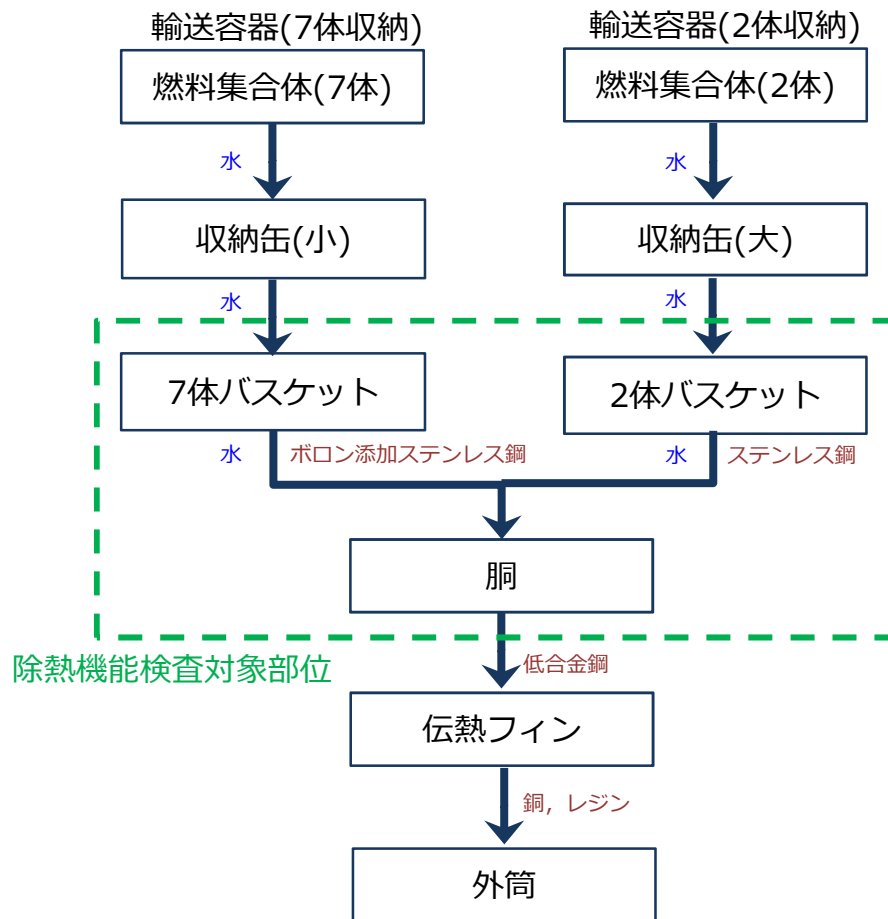


図 輸送容器(2体収納)断面

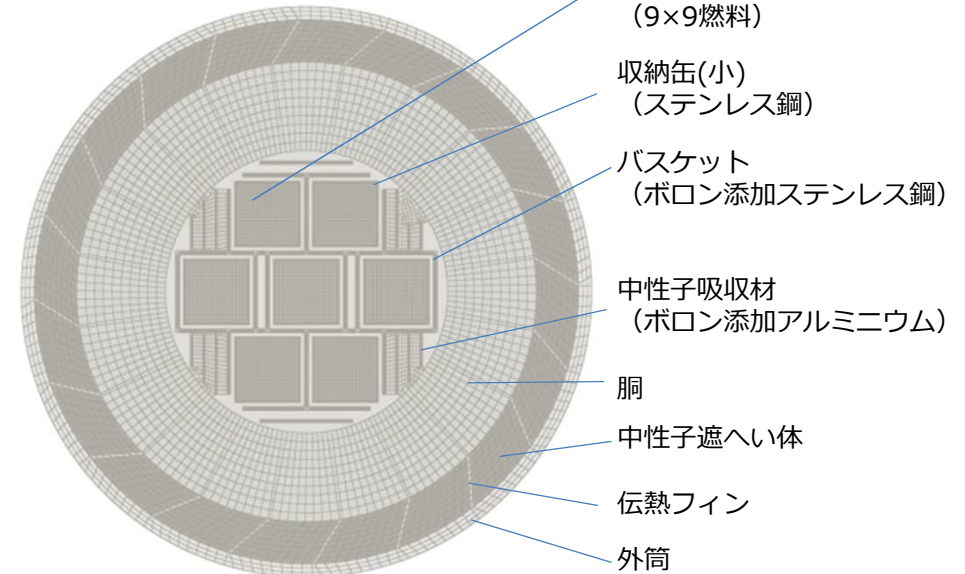


図 輸送容器(7体収納)断面

輸送容器（2体収納）の除熱機能検査の必要性について

- 7体収納と2体収納の規定発熱量の比較
 - 規定発熱量は以下のとおり7体収納時のほうが2体収納時より大きい。

	7体収納	2体収納
規定発熱量	3.91kW	0.76kW

- まとめ
 - 7体収納と2体収納で伝熱パスは同一であり、発熱量は2体収納時のほうが小さいため7体収納時より低い温度が測定されると想定される。
 - また、7体収納と同様の評価手法・解析コードを用いて評価された除熱評価においても、2体収納は7体収納に包絡されることを確認している。
 - 以上より、2体収納時の除熱機能検査は不要と考える。

【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

2020年1月14日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

□ ①燃料有効部を均質化して解析しているが、その妥当性を説明すること

『日本原子力学会標準：使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013(AESJ-SC-F006:2013)』に則り評価を行っている。
また、原子力学会が発行している中性子遮蔽ハンドブック（1993年4月）には、TN-12キャスクを例として、学会標準に則り燃料有効部を均質化した場合の計算結果（C）と測定値（E）を比較したところ $C/E \sim 1.1$ であるため、計算結果が安全側となっており、モデルの妥当性について記載されている。

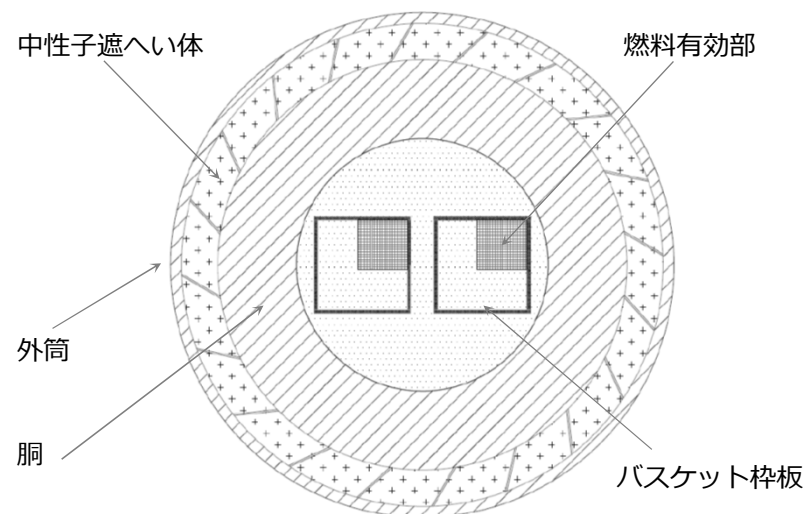
□ ②バスケット構造のモデル化が保守的になっていることを説明すること

『日本原子力学会標準：使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013(AESJ-SC-F006:2013)』に則り評価を行っている。

輸送容器の胴より内側のチャンネルボックス，中性子吸収材（バスケット，収納缶に設置）は，遮へい能力を有するが，保守的に，遮へい効果を考慮していない。

以下に，具体的なモデル化の考え方を示す。

- ・燃料有効部：チャンネルボックス板枠外側までの領域に対して、密度を均質化して組成設定する。
- ・収納缶：燃料有効部に，収納缶も均質化して重量を含めて設定する。
- ・バスケット：公称値で実態通りモデル化する。



遮へい解析モデル（全体R-θ体系）

□ ③遮へい評価において、軸方向からの線源の寄与に対する考え方について説明すること

収納燃料は3号機構内用輸送容器と同一であるため、軸方向の燃焼度分布も同一であることから収納燃料からの線量も同一となる。

従って、軸方向の燃焼度分布が最大となる高さにおける水平断面の径方向の線量分布が3号機構内用輸送容器に包絡されていれば、いずれの高さ方向における評価点位置についても包絡されていることがわかる。以上から、破損燃料用輸送容器（2体）の遮へい評価として径方向の線量評価を行うこととした。なお、軸方向は燃焼度分布が最大となるピーキングファクタ(PF) 1.3が無限に続くような円柱状のモデルとして、軸方向からの寄与を考慮している。

評価結果として、3号機構内用輸送容器(7体)及び破損燃料用輸送容器（2体）を比較し、3号機構内用輸送容器(7体)の結果が大きいことを確認している。

破損燃料用輸送容器（2体）の落下

1. 想定事象

破損燃料用輸送容器（2体）の取扱い中に、何らかの原因で破損燃料用輸送容器（2体）が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

2. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

本破損燃料用輸送容器は、最大 2 体の燃料を輸送することが可能な容器である。これは既に構内輸送に用いている 3 号機構内用輸送容器の燃料収納体数 7 体より少ない。また、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る。

従って、核分裂生成物の放出量及び線量の評価は「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） 1.8. 構内用輸送容器の落下」の評価に包絡される。

破損燃料用輸送容器（2体）内水の放射線分解による水素ガス発生について

1. 容器内水の放射線分解による水素ガス発生

本破損燃料用輸送容器のような密閉した槽内での容器内水の放射線分解により発生する水素ガスの水中濃度はある飽和値に達する。ここでは、水素ガス発生評価を以下に示す。

2. 評価方法

「添付資料－2－1－3 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（4号機）」と同じく、類似の環境下における水の放射線分解による水素ガス定常濃度評価^{*1}をベースに、液相定常水素ガス濃度が照射線量率の平方根に比例する^{*2}として、水素ガス濃度の評価を行う。

3. 評価結果

破損燃料用輸送容器（2体）は3号機構内用輸送容器より燃料収納体数が少ないことから、照射線量率は3号機構内用輸送容器より小さい。

従って、水素ガスの水中濃度は「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）」の評価に包絡されるため、水素の爆発下限である空気との混合比4%に対して十分低い値であり問題ない。

*1 Sunaryo, 1993, "A Study on Yields and Chemical Behavior of Radiolysis Products of High Temperature Water", University of Tokyo.

*2 Y. Fujita, M. Ebihara, "EVALUATION OF HYDROGEN YIELD IN SPENT FUEL TRANSPORT PACKAGE" The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of radioactive Materials (PATRAM 2010), October 3-8 2010, London, UK Poster Session 210 (2010)

(参考) 構内用輸送容器 (7 体) 内の放射線分解による水素ガス発生量評価

1. 基本的考え方

容器内水の放射線分解による水素ガス発生量を評価し、爆発下限である空気との混合比 4%以下であることを確認する。

2. 評価条件

(1) 液相水素濃度

参考文献 [1] の計算機シミュレーションより、ガンマ線による放射線分解生成物濃度を表 1 に示す。表 1 に示すように、25°Cの空気飽和水をガンマ線で 1Gy/s の吸収線量率で照射した場合の定常水素濃度は 1.67×10^{-5} mol/L と評価されている。

表 1 ガンマ線照射による定常水素濃度^[1]

照射量 (Gy/s)	定常水素濃度 (mol/L)
1	1.67×10^{-5}

(2) 吸収線量率

燃料による線量当量は解析コード (DOT3.5) を用いて評価した。また、吸収線量は線量当量と同じと仮定した場合の評価結果を表 2 に示す。

表 2 ガンマ線照射による吸収線量率

吸収線量率 (Gy/s)
0.29

(3) 吸収線量と液相水素濃度の関係

液相の定常水素濃度は吸収線量率に依存し、脱気系では吸収線量率の平方根に比例し、空気飽和系では吸収線量率の影響は小さい^[1]。ここでは、吸収線量率の平方根に比例するとする^[2]。

1Gy/s での定常水素濃度を 1.67×10^{-5} mol/L とすると、吸収線量率 E (Gy/s) での定常水素濃度 C は下記式から求められる。

$$C = 1.67 \times 10^{-5} \times (E / 1)^{0.5} \quad \dots (式 1)$$

(4) 水素の溶解度

水に対する気体 (水素) の溶解度を表 3 に示す^[3]。気体の分圧が 1atm (1.013×10^5 Pa) であるとき温度 t°C の溶媒 1cm³ に溶解する気体の体積 (cm³) を 0°C, (1.013×10^5 Pa に換算した値) である。

表 3 水に対する気体(水素)の溶解度

水温(°C)	溶解度	
	(cm ³ /cm ³)	(mol/L) *
25	0.0175	7.8125×10 ⁻⁴
100	0.0160	7.1429×10 ⁻⁴

* : 0°C, 1atm での理想気体 1mol の体積を 22.4L とする

(5) 気相と液相の水素濃度の関係

気相が理想気体で近似でき、かつ、溶解度が小さい範囲で Henry の法則が成立すると、ガスの溶解度と分圧には下記の関係が成り立つ^[4]。

$$P = H \times x \quad \dots (式 2)$$

P : 気相の水素分圧 [Pa]

H : ヘンリー定数 [Pa]

x : モル分率 [-] = 液相の水素のモル濃度 / 水のモル濃度

ここで、温度が一定であれば、ヘンリー定数、水のモル濃度は一定である。水素分圧は液相の水素のモル濃度に比例する。上記(4)より、水素分圧 1.013×10⁵ [Pa] の時の水素溶解度は 7.14×10⁻⁴ mol/L であることから、水素濃度 C [mol/L] の時の水素分圧 P は下式から求める。

$$P = 1.013 \times 10^5 \times C / (7.14 \times 10^{-4}) \quad \dots (式 3)$$

3. 水素濃度評価

水の放射線分解により発生した水素の分圧を P [Pa], 初期の空気の圧力を 1.013×10⁵ [Pa] とすると、水素の濃度は下式より求める。

$$\text{水素濃度}[\%] = P / (P + 1.013 \times 10^5) \times 100 \quad \dots (式 4)$$

4. 評価結果

上記より、水素濃度は、1.24[%]となり、爆発下限値 4%より小さいことから、水素発生による特別な対策は不要である。また、(式 3)より内圧上昇も 1.28×10³[Pa] となり、大気圧の 1/100 程度であり、作業上の特別な考慮は不要である。

参考文献

- [1] Sunaryo, 1993, "A Study on Yields and Chemical Behavior of Radiolysis Products of High Temperature Water", University of Tokyo.
- [2] Y. Fujita, M. Ebihara, "EVALUATION OF HYDROGEN YIELD IN SPENT FUEL TRANSPORT PACKAGE" The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of radioactive Materials (PATRAM 2010), October 3-8 2010, London, UK Poster Session 210 (2010)
- [3] 化学便覧基礎編 改訂第三版 社団法人日本化学会 (昭和 59 年)
- [4] 化学工学便覧 改訂第七版 公益社団法人化学工学会 (平成 23 年)

破損燃料用輸送容器（2体）に係る除熱評価書

1. 基本的考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び破損燃料用輸送容器（2体）の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、容器内に充填した水及び空気の自然対流及び熱伝導により胴に伝える。
- b. 胴に伝えられた熱は主として中性子遮へい部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝える。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒から大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、自然冷却により冷却されるものとして、キャスク側面への太陽放射熱により除熱条件が厳しくなる横姿勢（輸送時）の各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

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体より少ないため崩壊熱量は小さい。また、軸方向の評価対象部位であるOリング及び蓋については、3号機構内用輸送容器の評価において、軸方向の評価対象部位を安全側に評価されるようにバスケット等の内部構造の熱伝導率を最も保守的な条件を仮定して評価しているため、「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） 1.4. 除熱機能」の評価に包絡される。

従って、径方向の評価対象部位である燃料、バスケット、胴、中性子遮へい体の各部の温度を評価する。

2. 設計基準

設計基準を表 1 に示す。

表 1 設計基準

対象部位	材質	設計基準	設計基準温度 (°C)	備考
中性子遮へい材	レジン	使用可能温度	149	メーカーカタログ
胴	低合金鋼	構造強度が確保される制限温度	350	設計・建設規格
バスケット	ステンレス鋼	構造強度が確保される制限温度	425	設計・建設規格
燃料被覆管	ジルカローイ-2	照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下となる温度 ^{*1, *2}	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムラッパ燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

3. 燃料仕様および崩壊熱量

3号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を包絡する条件で崩壊熱量を ORIGEN2 コードにより評価する。燃料条件及び崩壊熱量を表 2 に示す。

表 2 燃料条件及び崩壊熱量

燃料タイプ	9×9 燃料
燃焼度 (MWd/t)	52,000
冷却期間 (日) ^{*1}	3,207
収納体数 (体)	2
崩壊熱量 (kW)	1.18

*1 : 2019 年 3 月 31 日時点での冷却期間

4. 評価条件

破損燃料用輸送容器 (2 体) の除熱評価は輪切り断面モデルを用いて行う。輪切り断面モデル形状図を図 1 に示す。また、評価条件を表 3 に示す。

表3 評価条件

項目		横姿勢 (輸送時)
収納体数	(体)	2
崩壊熱量	(kW)	1.18
周囲温度	(°C)	38
太陽熱放射 (W/m ²) *1	水平に輸送される表面 (曲面)	400*2

*1: 太陽熱放射は1日につき12時間ごと、7日間受ける。また、輸送時は水平面に対して7°傾斜しているが傾斜角が緩いため、太陽放射熱は角度0°として取り扱う。

*2: 「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技術上の基準に係る細目等を定める告示別記第四」に基づき設定する。

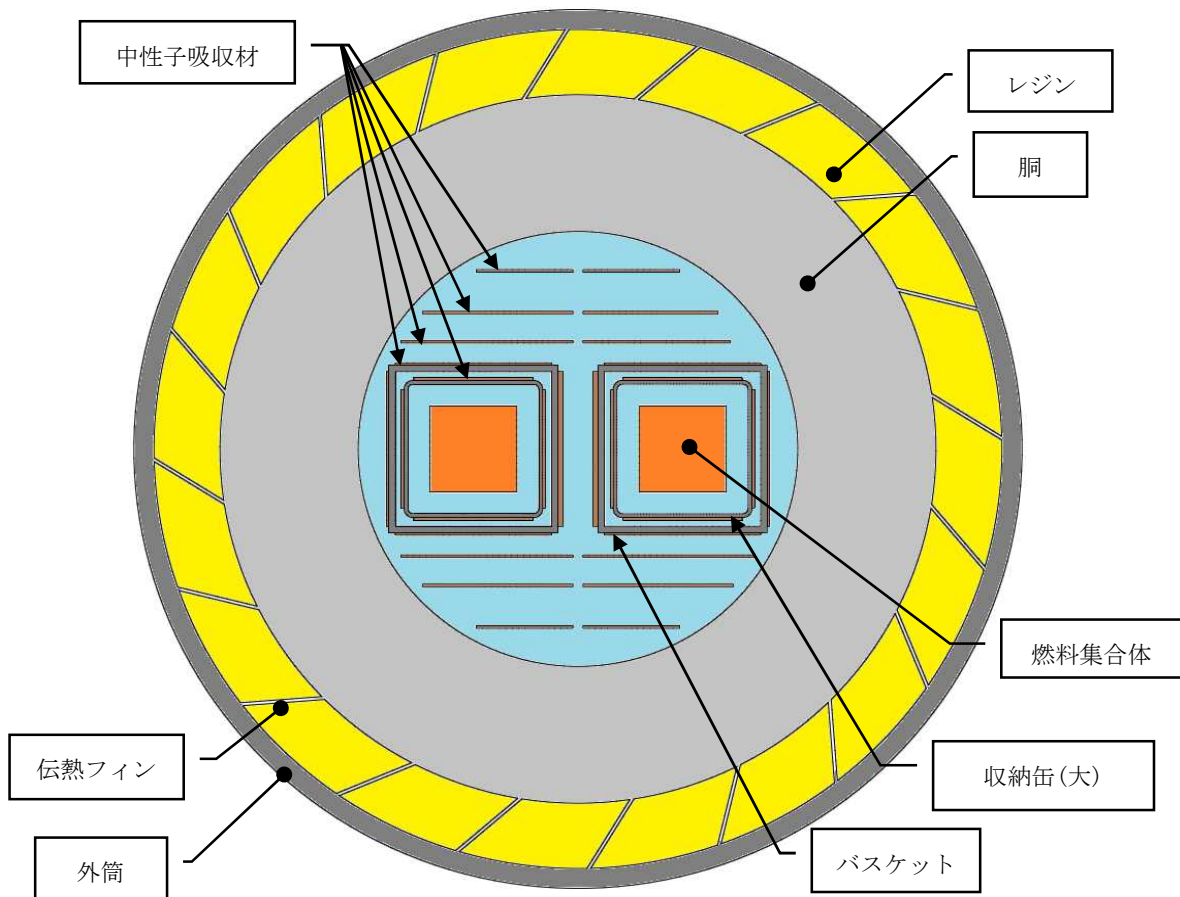


図1 輪切り断面モデル形状図

4. 1 伝熱形態

輸送容器における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は以下とする。

- ① 崩壊熱は、燃料被覆管からチャンネルボックスへ水の熱伝導および放射により伝わる。
- ② チャンネルボックス表面に伝わった熱は、収納缶へ水の熱伝導で伝わる。
- ③ 収納缶表面に伝わった熱は、バスケットへ水の熱伝導で伝わる。
- ④ バスケット表面に伝わった熱は、容器の本体胴内面へ水の熱伝導で伝わる。
- ⑤ 本体胴内面に伝わった熱は、本体胴外面へ熱伝導により伝わる。
- ⑥ 本体胴外面に伝わった熱は、外筒へ伝熱フィンの熱伝導により伝わる。
- ⑦ 外筒に伝わった熱は、周囲の空気との自然対流および放射により除熱する。

4. 2 境界条件

屋外の輸送を考慮し、境界条件は以下のとおりとする。

- ・ 環境温度：38℃*1（太陽放射熱を考慮）
- ・ 運用姿勢：水平面に対して7° 傾斜
- ・ 周辺環境：輸送数は1基とし、周囲に他の発熱体が無いものとし、外表面からの放射を考慮する

太陽放射熱は、輸送法令に定められる一般の試験条件を考慮する。外気温度38℃の大気中において1日につき12時間ごとに太陽放射を7日間受ける。輸送容器表面に負荷する太陽放射熱を図2*1に示す。

* 1：「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技術上の基準に係る細目等を定める告示 別記第四」に基づき設定する。

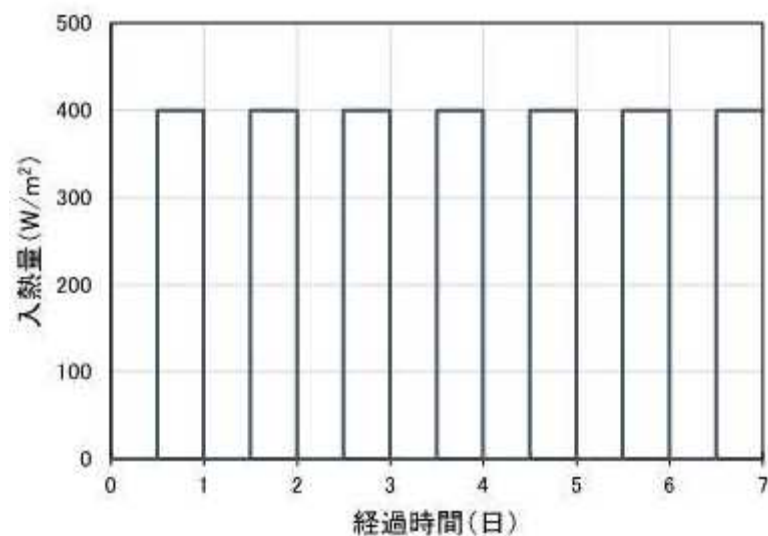


図2 太陽放射入熱量の時刻歴

4. 3 計算モデル

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体より少ないため崩壊熱量は小さい。また、軸方向の評価対象部位であるリング及び蓋については、3号機構内用輸送容器の評価において、軸方向の評価対象部位の安全側に評価されるようにバスケット等の内部構造の熱伝導率を安全側に包絡する最も保守的な条件を仮定して評価しているため、3号機構内用輸送容器（7体）の評価に包絡される。

従って、計算モデルは径方向の評価対象を評価する輪切り断面モデルを使用する。輪切り断面モデルは最も発熱量が高い断面について、燃料集合体、収納缶、バスケット、胴体、レジン、伝熱フィンおよび外筒をモデル化したものである。計算モデルを図3に示す。

計算モデルは以下の条件を考慮する。

- ・ 輸送容器、バスケット、収納缶の寸法は、公称値とする。（除熱解析では、伝熱経路が評価で重要となるため、除熱解析では通例、公称値を用いて評価を行う。保守性については、崩壊熱量や軸方向分布などのその他の条件で確保している。）ただし、評価基準値に対して余裕のない部位や隣接部材間のギャップなどわずかな寸法の相違が温度計算結果に影響を与える場合は、安全側の設定とする。
- ・ 発熱量は、燃焼分布を考慮して中央断面位置に相当する発熱量を用いる。
- ・ 容器外表面からの大気自然対流による熱伝達率を考慮する。
- ・ 燃料集合体については、燃料集合体断面モデルで求めた等価物性を有する、均一モデルでモデル化を行っている。
- ・ 燃料の配置は、収納缶の中央に配置する。（燃料温度を保守的に評価するため、収納缶から離して配置している。）

表 2 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
外筒厚さ (mm)		
中性子遮へい体厚さ (mm)		
胴厚さ (mm)		
本体胴内径 (mm)		

表 3 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
板厚 (mm)		
内のり (mm)		

表 4 使用済燃料収納缶 (大) の主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
板厚 (mm)		
内のり (mm)		
中性子吸収材 カバー厚さ (mm)		
ボロン添加アルミニウム 合金板厚 (mm) ※1		

※1 : 1 枚あたりの厚さ

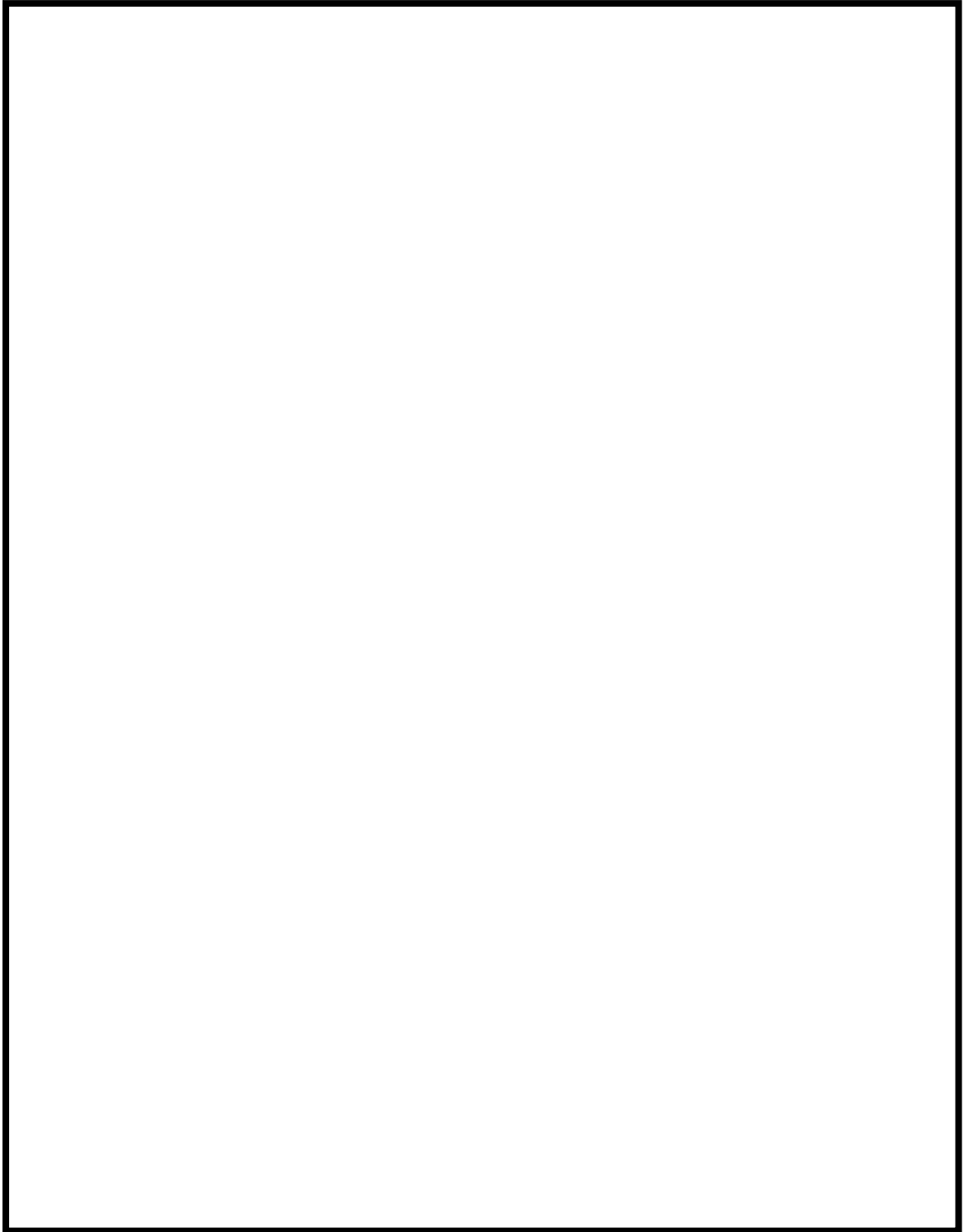


図3 除熱解析モデル（輪切り断面モデル）

5. 評価方法

輪切り断面モデルで容器中央部断面の燃料、バスケット、胴、中性子遮へい体の温度を評価する。解析にはABAQUSコードを用いる。

6. 評価結果

評価結果を表5に示す。表5に示すとおり、破損燃料用輸送容器（2体）を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており、熱的健全性は維持される。

また、燃料被覆管の温度は110℃であり、水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており、燃料の健全性は維持される。

破損燃料用輸送容器（2体）と構内用輸送容器（7体）を比較すると、構内用輸送容器（7体）で169℃であった燃料中心の温度が本評価では110℃と大幅に低下した。これは同程度の発熱密度の燃料集合体が7体から2体に減少しているためである。

よって、破損燃料輸送容器（2体）は構内用輸送容器（7体）の評価に包絡される。

表5 評価結果（各部温度）

対象部位	材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
中性子遮へい材	レジン	72	149	メーカーカタログ
胴	低合金鋼	71	350	設計・建設規格
バスケット	ステンレス鋼	89	425	設計・建設規格
燃料被覆管	ジルカロイ-2	110	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライテ 燃料 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

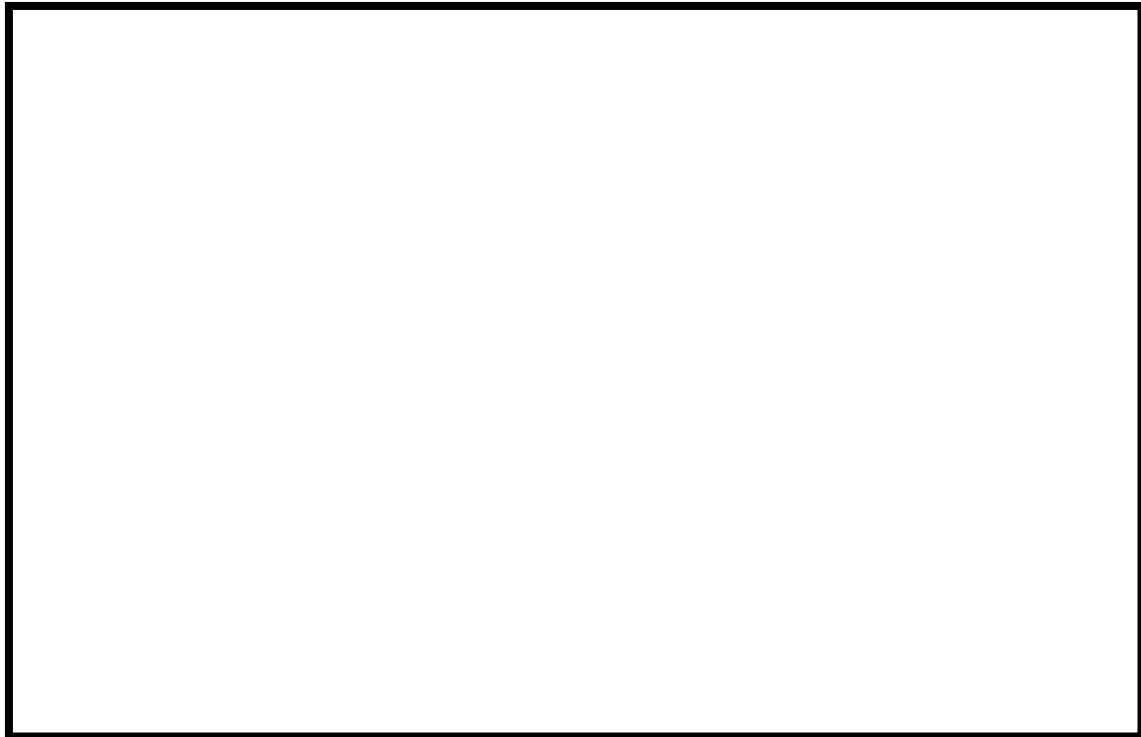


図4 各部の温度評価

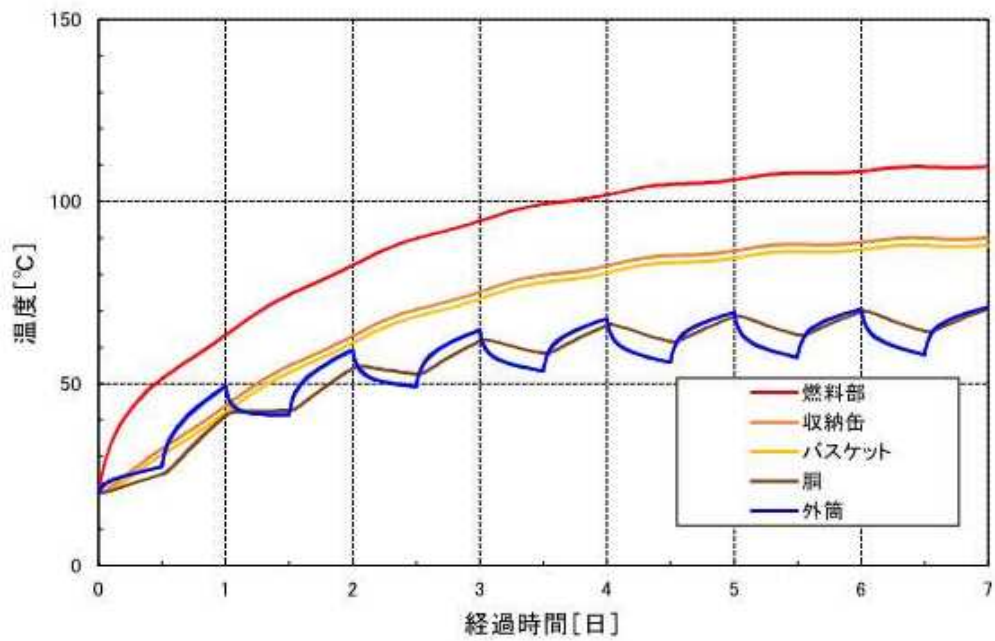


図5 各部の温度評価 (時刻歴)

破損燃料用輸送容器（2体）に係る密封評価書

1. 基本的考え方

破損燃料用輸送容器（2体）の密封は容器本体及び一次蓋より構成される密封容器とこれに付属するポート部のカバーから構成される。容器本体と一次蓋、各ポートカバーのガスケットにはゴム製Oリングが使用されている。一次蓋で構成される破損燃料用輸送容器（2体）の密封境界を図1に示す。

また、一次蓋を覆う形で二次蓋を容器本体に取付ける構造となっており、容器本体と二次蓋のガスケットはゴム製Oリングが使用され、一次蓋に漏えいが発生しても二次蓋で密封を確保できる構造となっている。二次蓋で構成される破損燃料用輸送容器（2体）の密封境界を図2に示す。

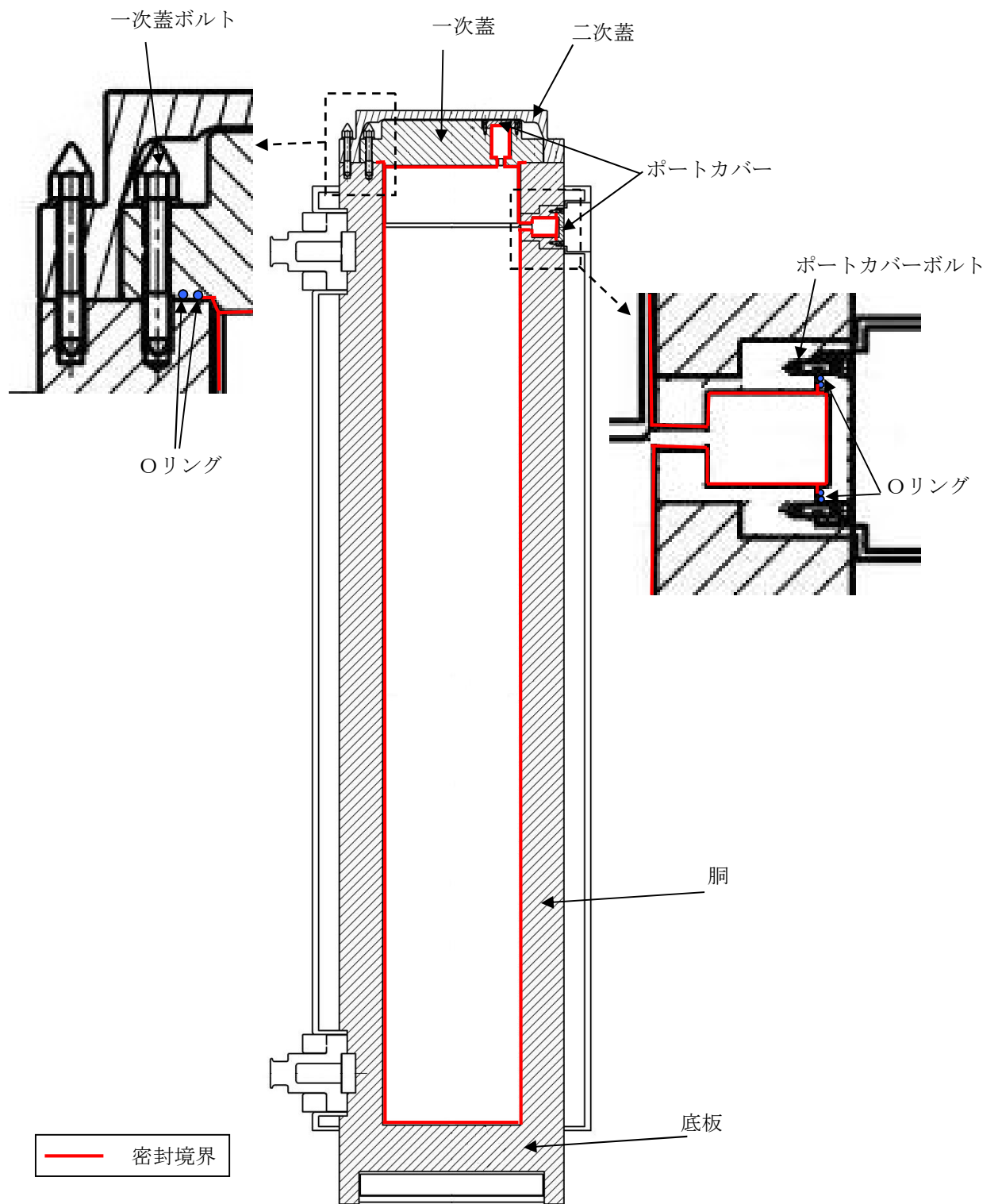


図1 一次蓋で構成する容器密封境界

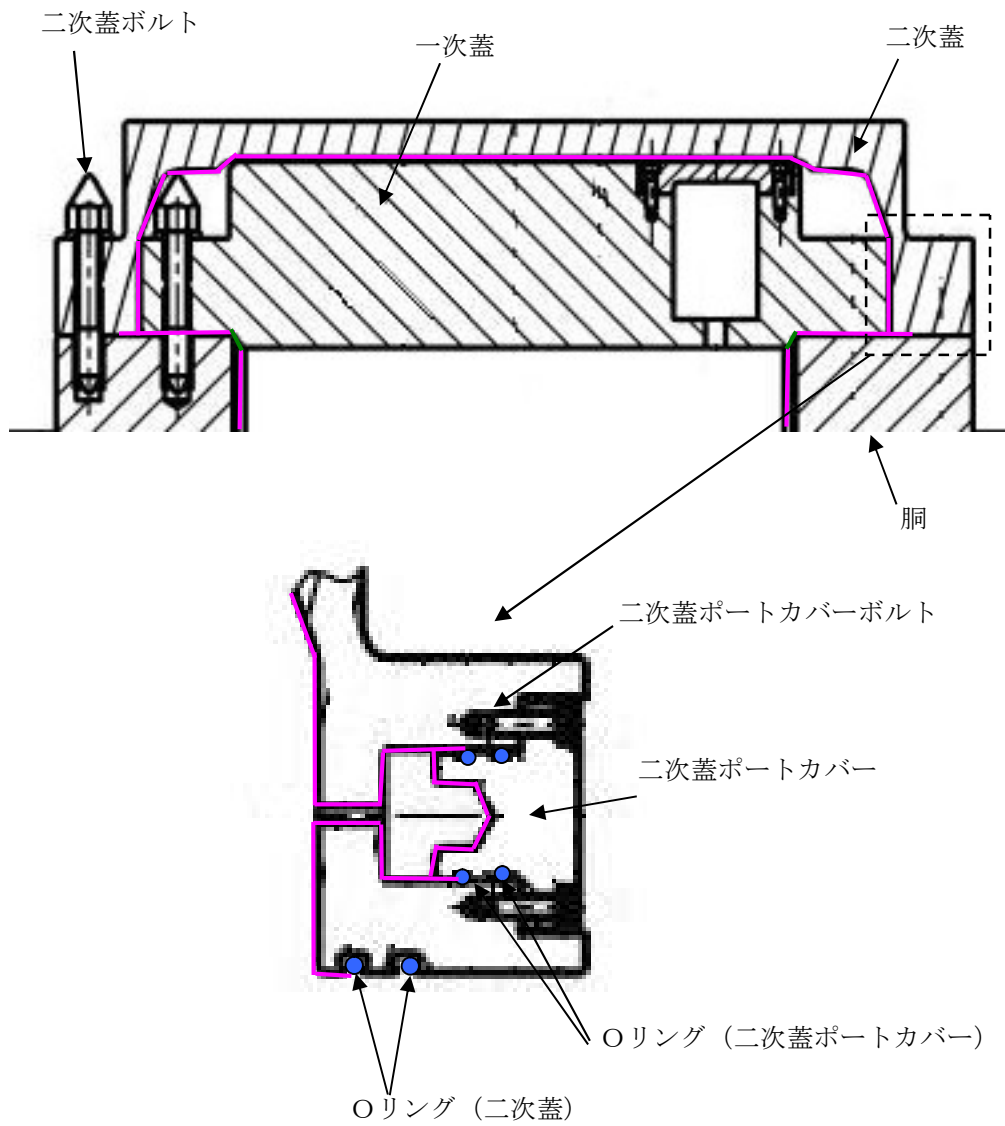


図2 二次蓋で構成する密封境界

2. 評価方法

密封機能の評価にあたっては、構造強度評価結果、除熱機能評価結果、容器構造から、破損燃料用輸送容器（2体）の密封機能が維持されることを確認する。

3. 評価結果

(1) 構造強度評価結果

構造強度報告書（実施計画 2.11 章 添 2-2-2 の 1.3 項）に示したとおり、構造強度評価から破損燃料用輸送容器（2体）の密封境界を構成する胴、底板、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、ポートカバー及びポートカバーボルトは想定される荷重条件に対して十分な強度を有しており、密封境界の構造健全性に問題がないことが確認されている。

(2) 除熱評価結果

構造強度報告書（実施計画 2.11 章 添 2-2-2 の 1.4 項）に示したとおり、除熱機能評価からOリングの最高温度は 82℃以下で、設計基準温度である 300℃を大きく下回ることから、密封境界の熱的健全性に問題ないことが確認されている。

対象部位	材質	評価結果（℃）	設計基準温度（℃）
Oリング	ふっ素ゴム	82	300 ^{*1}

^{*1}：「[複合材料技術集成](#)」産業技術センター, 1976

(3) 容器構造

破損燃料用輸送容器（2体）の密封境界を構成する一次蓋及び各ポートカバーは、ガスケットにゴム製のOリングを使用し、複数のボルトで容器本体に締付ける構造であり、締付けトルクの管理により密封機能を担保する。

各ポートカバーは3号機に空の容器を移動する前に、共用プールで締付けトルクを管理し、密封機能を担保する。

一次蓋は3号機で燃料装填後に容器本体に締付ける際に、締付けトルクを管理し、密封機能を担保する。

二次蓋も一次蓋と同様にガスケットにゴム製のOリングを使用し、複数のボルトで容器本体に締付けトルクを管理して締付ける構造であり、万が一、一次蓋の密封機能が喪失した場合でも、二次蓋で密封機能を担保する。

(4) まとめ

以上から、破損燃料用輸送容器（2体）の密封性能は維持される。

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

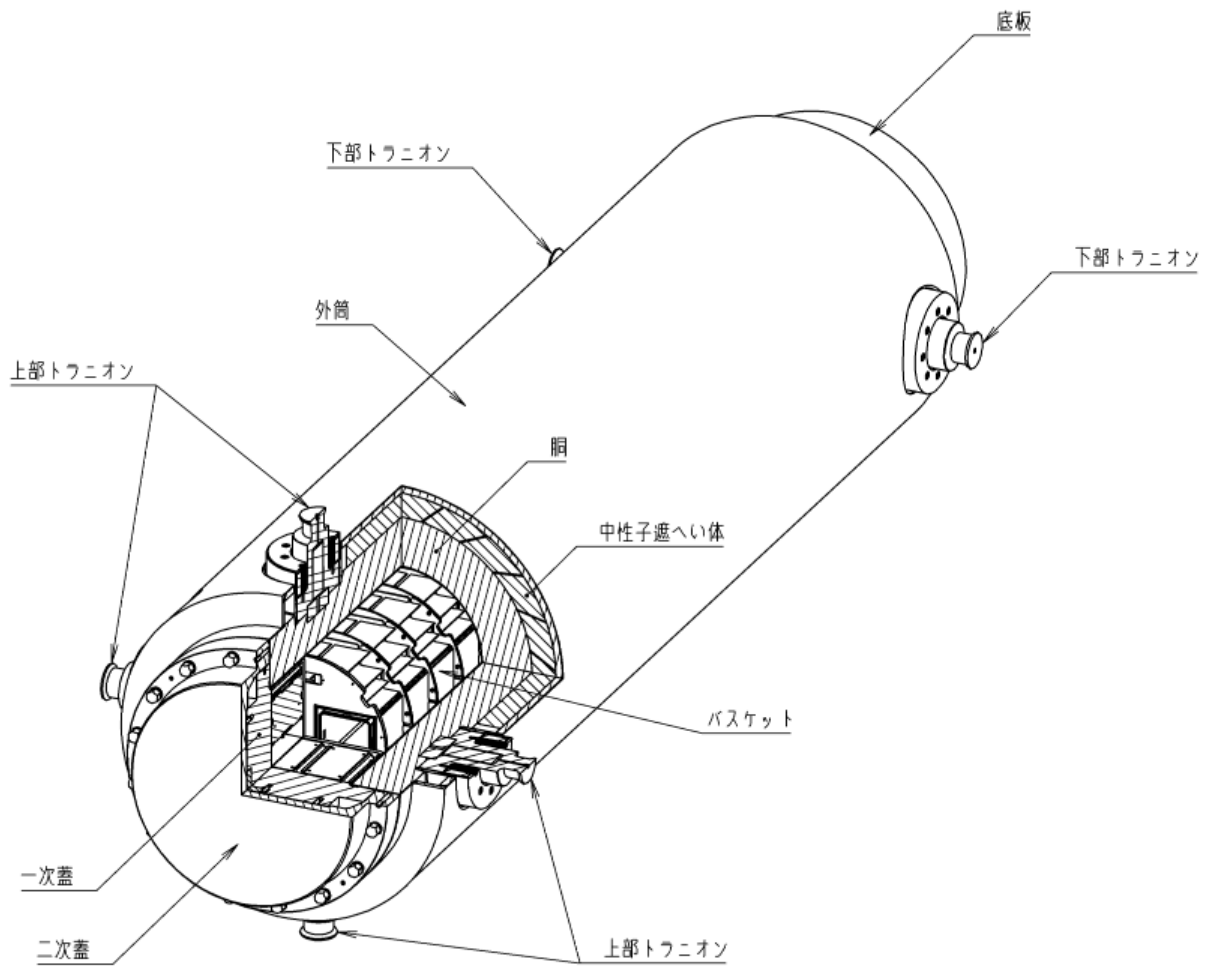


図 1 - 1 破損燃料用輸送容器 (2 体) 概要図

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。

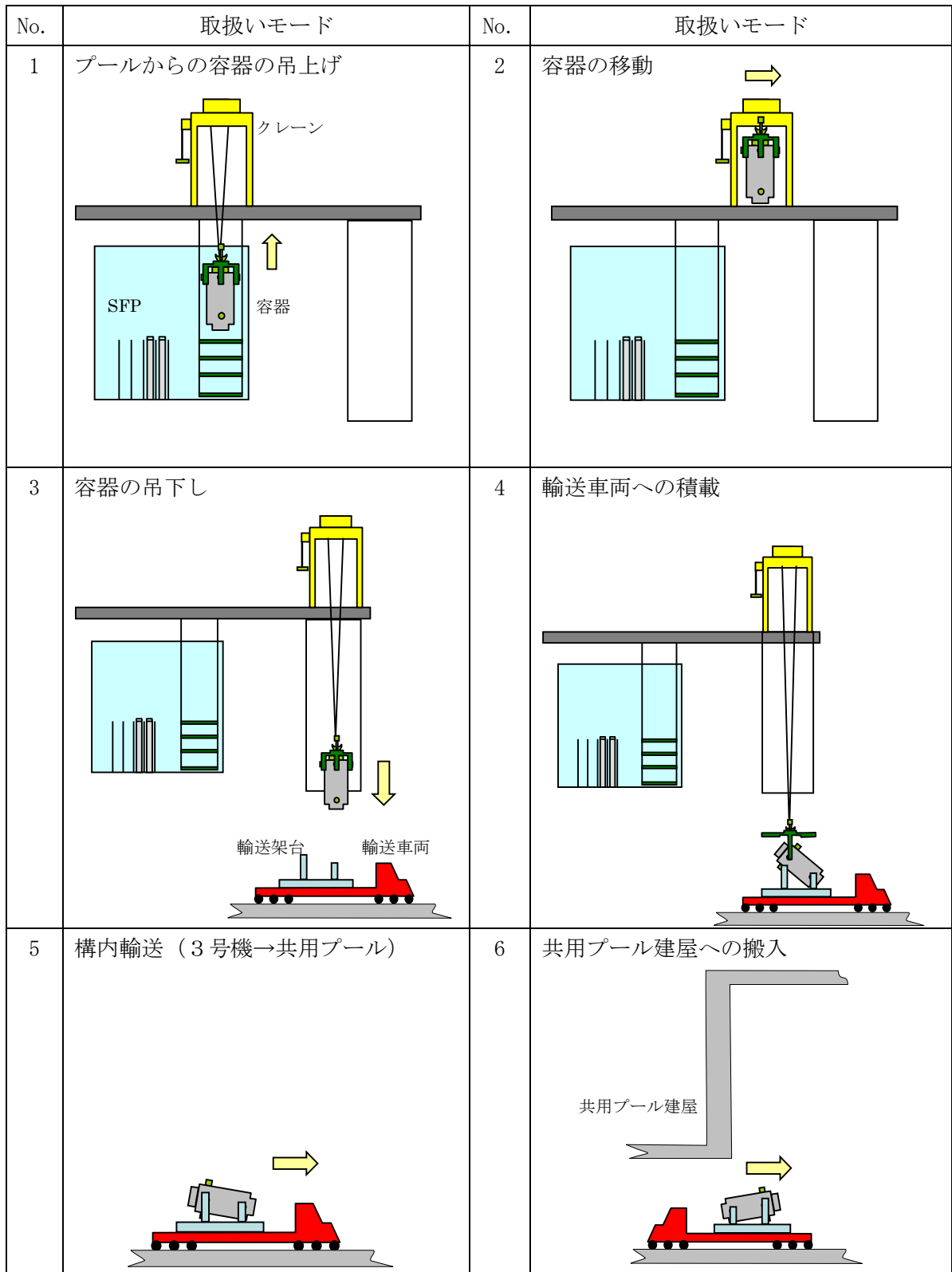


図 2 - 1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)

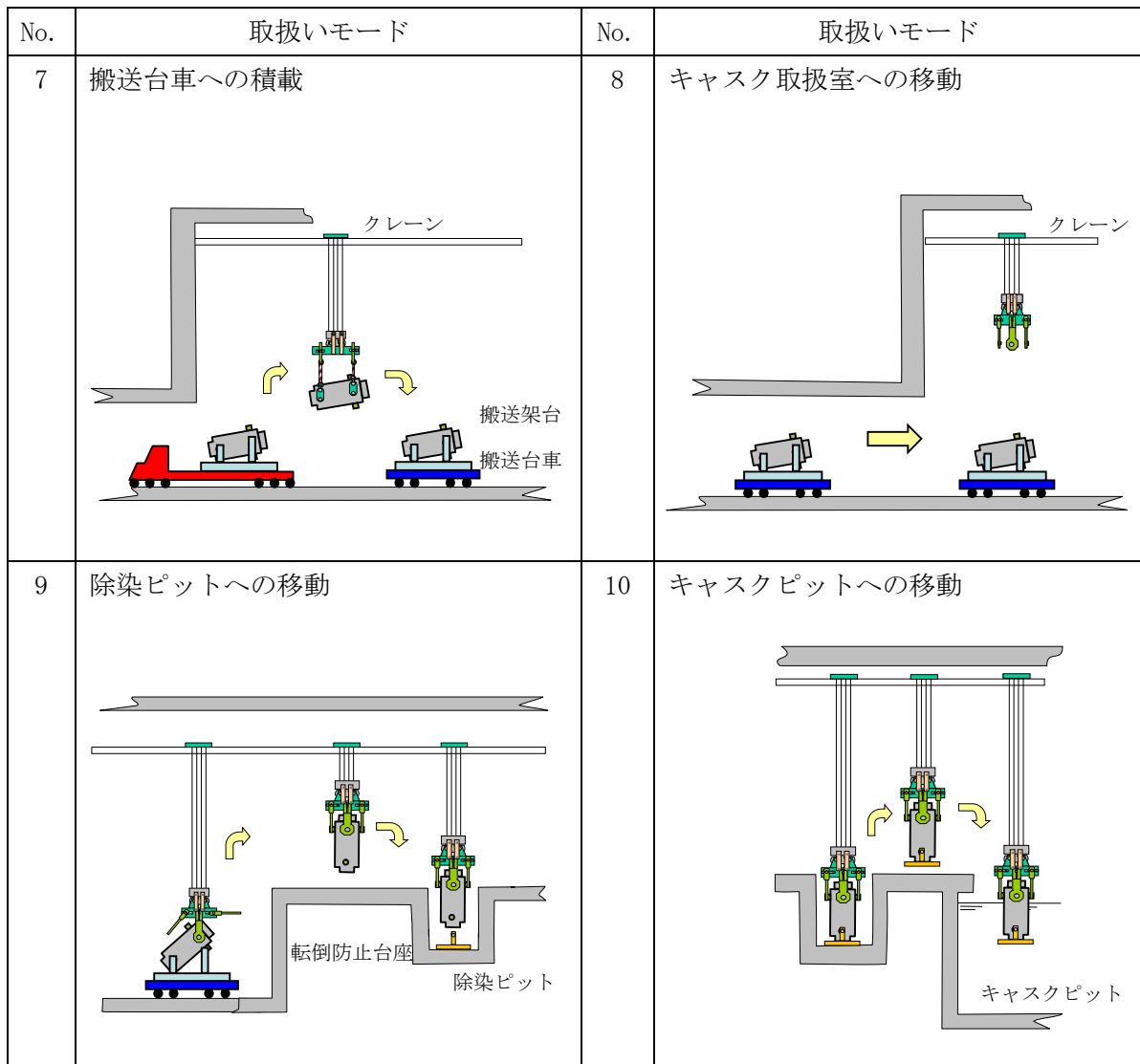


図 2 - 1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

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	—	内圧：0.6MPa (二次蓋は0.45MPa) 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	—	内圧：0.6MPa (二次蓋は0.45MPa) 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)	—	内圧 : 0.6MPa (二次蓋は 0.45MPa) 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)	内圧 : 0.6MPa (二次蓋は 0.45MPa) 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) *4-1

*4-1 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

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) *4-2

*4-2 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

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) [*4-3](#)

[*4-3](#) 胴及び底板に合わせて設定

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) [*4-4](#)

[*4-4](#) 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

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) [*4-5](#)

[*4-5](#) 胴及び底板に合わせて設定

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) *4-6

*4-6 二次蓋に合わせて設定

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	梘板 長手方向	σ_c	96	
		梘板 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) *4-7

*4-7 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

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。

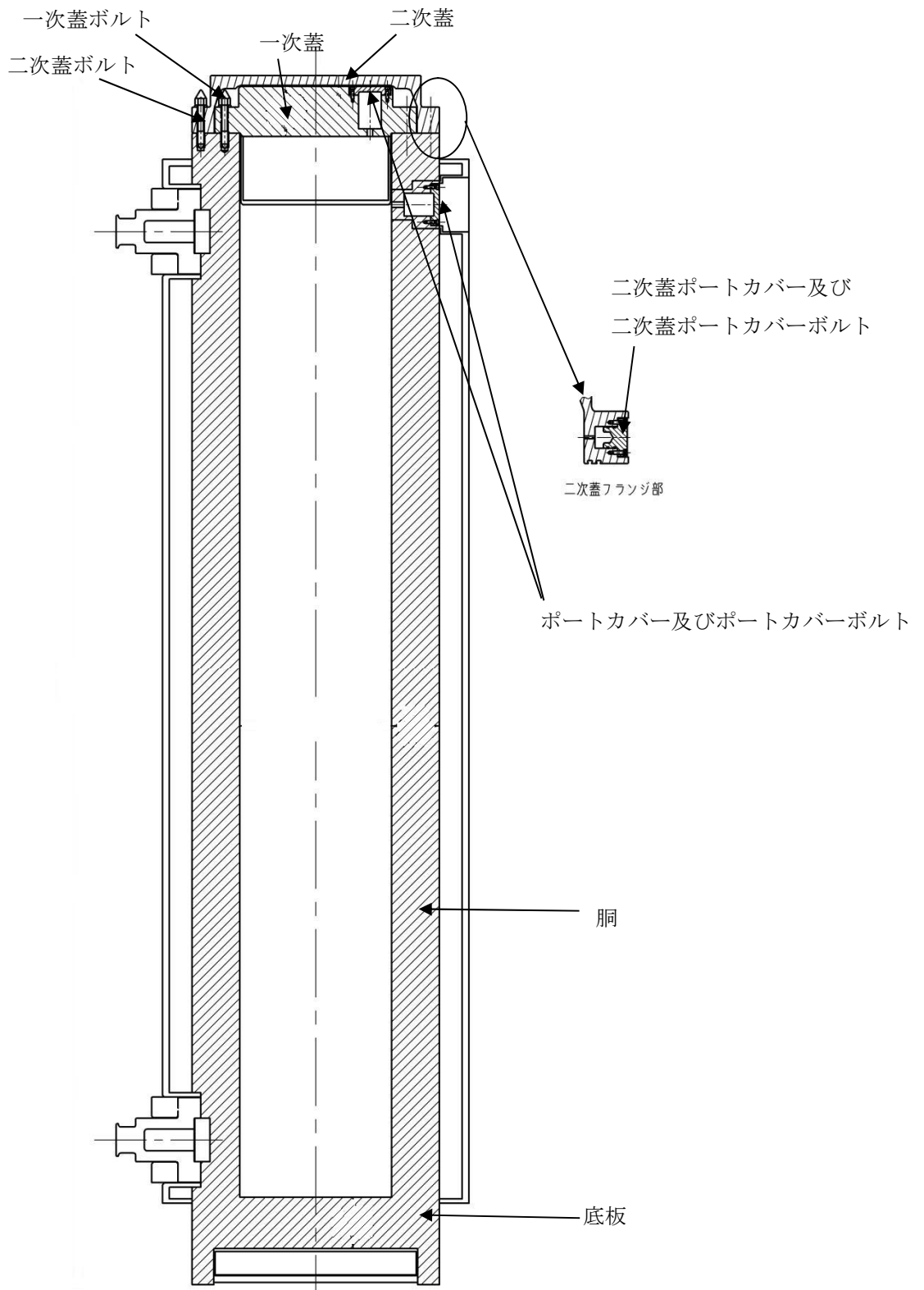


図 5 - 1 容器本体及び蓋の応力評価箇所

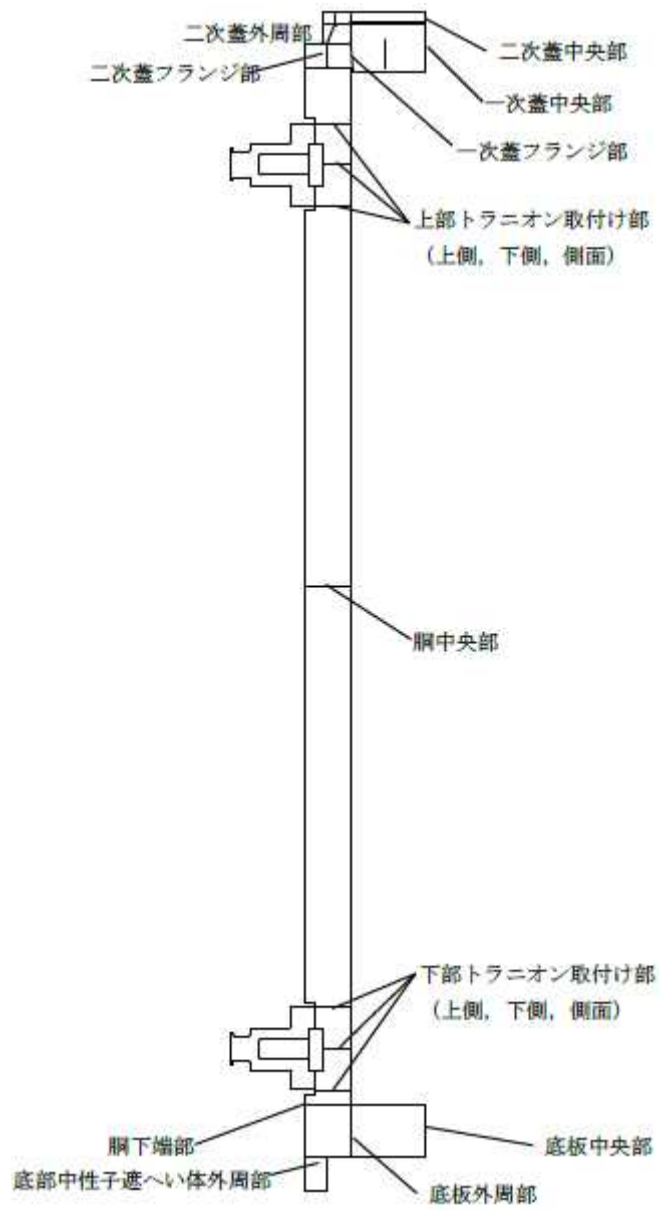


図 5 - 2 容器本体及び蓋の応力評価箇所 (胴, 底板, 蓋の詳細)



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。

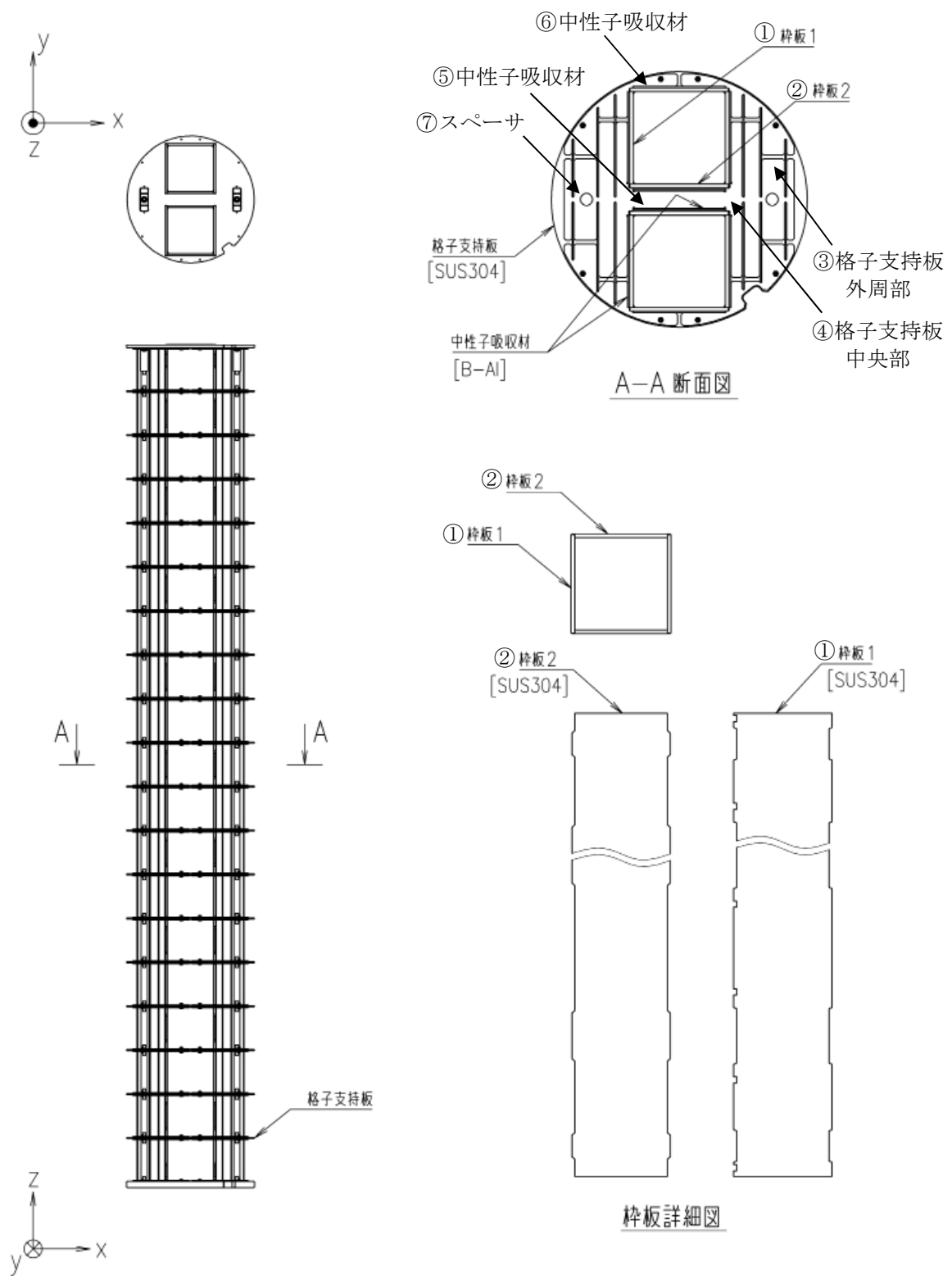


図5-8 バスケットの応力評価箇所

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

設計事象Ⅱの加速度の導出に用いられるバネ定数について

評価書本文では、抽出された代表的な取扱いモードに対して荷重を算出し強度評価を行っている。荷重の算出にあたり設計事象Ⅱでは、設計当初のバネ定数が用いられているため保守性を確認する。

実際の衝突対象のバネ定数を表1に示す。いずれのバネ定数も実施計画記載値に包絡されているため保守的な評価と言える。

表1 衝突対象のバネ定数

取扱いモード	事象	バネ定数 [N/m]	
			実施計画 記載値
容器の吊下ろし (No. 3)	3号機原子炉建屋地上階 床面への衝突	4.402×10^9	2.882×10^{10}
	輸送架台への衝突	2.353×10^{10}	
搬送台車への積載 (No. 7)	搬送架台への衝突	4.075×10^{10}	5.738×10^{10}
除染ピットへの移動及び キャスクピットへの移動 (No. 9, 10)	除染ピット用転倒防止台 座への衝突	4.407×10^{11}	4.407×10^{11}
	キャスクピット用転倒防 止台座への衝突	2.548×10^{11}	