

強度計算の基本方針

設計及び工事計画認可申請 資料10-1

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-1-1
2. 強度評価の基本方針	資10-1-1
2.1 使用済燃料乾式貯蔵容器の構造及び強度	資10-1-1
2.2 消火器の構造及び強度	資10-1-1

1. 概要

兼用キャスクとして申請する使用済燃料乾式貯蔵容器及び火災防護設備のうち消火器に係る材料及び構造の設計については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（平成25年6月28日原子炉規制委員会規則第6号）（以下「技術基準規則」という。）第17条に規定されている設計基準対象施設に属するクラス3容器の設計を行うことから、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有する必要がある。

また、使用済燃料乾式貯蔵容器に係る材料及び構造の設計については、技術基準規則第26条第2項第6号二に規定される「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材は、使用される温度、放射線、荷重その他の条件に対し、適切な材料及び構造であること」にも適合する必要がある。

このため、本資料では、使用済燃料乾式貯蔵容器及び火災防護設備のうち消火器が、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有することを説明するものである。

さらに、上述の機器と評価条件が異なる自然現象等特殊な荷重を考慮した評価が必要な設備のうち竜巻の荷重を考慮した評価を別添1に、火山の影響による荷重を考慮した評価を別添2に示す。

2. 強度評価の基本方針

2.1 使用済燃料乾式貯蔵容器の構造及び強度

使用済燃料乾式貯蔵容器の強度評価については、クラス3容器として、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012年版）〈第I編 軽水炉規格〉 JSME S NC1-2012」（以下「設計・建設規格」という。）に基づく評価を実施するとともに、日本機械学会「金属キャスク構造規格（2007年版） JSME S FA1-2007」（以下「金属キャスク構造規格」という。）等に準じた評価を実施する。また、材料についても、設計・建設規格に基づく評価及び金属キャスク構造規格等に準じた評価に用いた材料を使用する。

これらのことから、使用済燃料乾式貯蔵容器が、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有することを説明する。

使用済燃料乾式貯蔵容器のうち貯蔵架台に係る強度評価については、クラス3支持構造物として、設計・建設規格に基づく評価を実施する。また、材料についても、設計・建設規格に基づく評価に用いた材料を使用する。

これらのことから、使用済燃料乾式貯蔵容器のうち貯蔵架台が、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有することを説明する。

2.2 消火器の構造及び強度

クラス3機器のうち容器であって完成品として消防法の規制を受ける「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」に基づき設定する火災区域又は火災区画に配備する消火器については、技術基準規則第17条第1項第3号及び第10号におけるクラス3容器の材料、構造及び強度の規定と消防法の材料、構造及び強度の規定が同等の水準であることを平成28年3月23日付け原規規発第1603231号

にて認可された工事計画の資料14-1-3「クラス3機器の強度計算の基本方針」にて確認しているため、消火器は消防法に適合したものを使用する設計とする。

クラス3容器の強度計算の基本方針

設計及び工事計画認可申請 資料10-2-1

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-2-1-1
2. 機器等の区分	資10-2-1-1
3. クラス3容器の強度計算の基本方針	資10-2-1-1

1. 概要

本資料は、クラス3容器となる使用済燃料乾式貯蔵容器が、設計・建設規格に基づき、十分な強度を有することを確認するための強度計算の基本方針について説明するものである。

2. 機器等の区分

申請範囲の容器について、技術基準規則に基づく機器等の区分を下表に示す。

区分	機器名	機器クラス ^(注1)	重大事故等機器クラス ^(注2)
容器	使用済燃料乾式貯蔵容器	クラス3	—

(注1) 設計基準対象施設としての区分

(注2) 重大事故等対処設備としての区分

3. クラス3容器の強度計算の基本方針

クラス3容器の材料及び構造については、技術基準規則第17条（材料及び構造）に規定されており、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（平成25年6月19日原規技発第1306194号）第17条11において設計・建設規格及び日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）JSME S NJ1-2012」（以下「材料規格」という。）によることが認められている。

よって、申請範囲のクラス3容器の評価は、設計・建設規格による評価を実施する。材料についても、材料規格に規定されている材料を使用する設計とする。

クラス 3 容器の強度計算方法

設計及び工事計画認可申請 資料10-2-2

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-2-2-1
2. 強度計算方法	資10-2-2-1
2.1 記号の定義	資10-2-2-2
2.2 強度計算方法	資10-2-2-7
3. 強度計算書のフォーマット	資10-2-2-14
3.1 強度計算書のフォーマットの概要	資10-2-2-14
3.2 記載する数値に関する注意事項	資10-2-2-14
3.3 強度計算書のフォーマット	資10-2-2-14

1. 概要

本資料は、資料10-2-1「クラス3容器の強度計算の基本方針」に基づき、クラス3容器である使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）及び使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）が十分な強度を有することを確認するための方法について説明するものであり、強度計算方法及び強度計算書のフォーマットにより構成する。

2. 強度計算方法

本項では、資料10-2-1「クラス3容器の強度計算の基本方針」に基づき、クラス3容器が十分な強度を有することを確認するための方法として適用する、設計・建設規格の規定に基づく強度計算方法について説明する。

なお、申請範囲の容器には、鏡板、フランジ付きさら形ふた板、管板、管台及び伸縮継手は使用しない。

2.1 記号の定義

容器の厚さ計算及びフランジの強度計算に用いる記号について以下に説明する。

	記号	単位	定 義
胴及び平板の厚さ計算に使用するもの	B	MPa	最高使用温度における材料規格Part3第3章図1及び図2により求めた値
	D_o	mm	円筒形胴の外径
	d	mm	平板の取付方法に応じ、設計・建設規格 表PVD-3310-1に示す平板の径又は最小内のり
	K	—	平板の取付け方法による係数で設計・建設規格 表PVD-3310-1に記載の値
	t	mm	平板の計算上必要な厚さ
	t_1	mm	胴の材料による制限最小厚さ
	t_2	mm	胴の計算上必要な厚さ
	t_s	mm	実際の使用最小厚さ
	P	MPa	最高使用圧力
	P_e	MPa	外面に受ける最高の圧力
	S	MPa	最高使用温度における材料規格 Part3 第 1 章表 3 に規定する材料の許容引張応力
	S_B	MPa	最高使用温度における材料規格 Part3 第 1 章表 3 に定める値の 2 倍の値、または材料規格 Part3 第 1 章表 6 に定める値の 0.9 倍の値のいずれか小さい方の値

	記 号	単 位	定 義
フランジの強度計算に使用するもの	A	mm	フランジの外径
	A_b	mm^2	実際に使用するボルトの総有効断面積
	A_m	mm^2	ボルトの総有効断面積
	A_{m1}	mm^2	使用状態でのボルトの総有効断面積
	A_{m2}	mm^2	ガスケット締付時のボルトの総有効断面積
	B	mm	フランジの内径
	C	mm	ボルト穴の中心円の直径
	D_g	mm	ガスケット接触面の外径
	d	mm^3	係数で、一体形フランジ及び一体形フランジとして計算する任意形フランジの場合は $\frac{U}{V} h_0 g_0^2$ 、 ルーズ形フランジの場合は $\frac{U}{V_L} h_0 g_0^2$ 、
	d_b	mm	ボルトのねじ部の谷の径と軸部の径の最小部の小さい方の径
	e	mm^{-1}	係数で、一体形フランジ及び一体形フランジとして計算する任意形フランジの場合は $\frac{F}{h_0}$ 、ルーズ形フランジの場合は $\frac{F_L}{h_0}$
	F	—	一体形フランジ及び一体形フランジとして計算する任意形フランジの係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 5 又は附属書 3 表 4 による。）
	f	—	ハブ応力修正係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 4 又は附属書 3 表 4 による。）

	記 号	単 位	定 義
フランジの強度計算に使用するもの	G	mm	ガスケット反力円の直径
	g ₀	mm	ハブ先端の厚さ
	g ₁	mm	フランジ背面のハブの厚さ
	H	N	内圧によってフランジに加わる全荷重
	H _D	N	内圧によってフランジの内径面に加わる荷重
	H _G	N	ガスケット荷重
	H _P	N	気密を十分に保つために、ガスケットに加える圧縮力
	H _T	N	内圧によってフランジに加わる全荷重と内圧によってフランジの内径面に加わる荷重との差
	h ₀	mm	$\sqrt{Bg_0}$
	h _D	mm	ボルト穴の中心円から H _D 作用点までの半径方向の距離
	h _G	mm	ボルト穴の中心円から H _G 作用点までの半径方向の距離
	h _T	mm	ボルト穴の中心円から H _T 作用点までの半径方向の距離
	L	—	係数 $L = \frac{et+1}{T} + \frac{t^3}{d}$
	M	N・mm	フランジに作用するモーメント
	M ₀	N・mm	使用状態でフランジに作用するモーメント
	M _g	N・mm	ガスケット荷重によるモーメント
	n	—	ボルトの本数
	P	MPa	最高使用圧力(内圧)
	P _e	MPa	最高使用圧力(外圧)

	記 号	単 位	定 義
フランジの強度計算に使用するもの	R	mm	ボルトの中心円からハブとフランジ背面との交点までの半径方向の距離 $R=g_1-\frac{C-B}{2}$
	S_0	MPa	最高使用温度における材料規格 Part3 第 1 章表 5 に規定するボルト材料の許容引張応力
	S_a	MPa	常温における材料規格 Part3 第 1 章表 5 に規定するボルト材料の許容引張応力
	S_{f0}	MPa	最高使用温度における材料規格 Part3 第 1 章表 3 に規定するフランジ材料の許容引張応力
	S_{fa}	MPa	常温における材料規格 Part3 第 1 章表 3 に規定するフランジ材料の許容引張応力（ガスケット締付時）
	T	—	$K=\left(\frac{A}{B}\right)$ の値によって定まる係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 7 又は図中の算式による。）
	t	mm	フランジの厚さ（ガスケット座面の高さ及びガスケット溝の深さは含めない）
	U	—	$K=\left(\frac{A}{B}\right)$ の値によって定まる係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 7 又は図中の算式による。）
	V	—	一体形フランジ及び一体形フランジとして計算する任意形フランジの係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 8 又は附属書 3 表 4 による。）

	記 号	単 位	定 義
フランジの強度計算に使用するもの	W	N	ボルト荷重
	W ₀	N	使用状態でのボルト荷重
	W _g	N	ガスケット締付時のボルト荷重
	W _{m1}	N	使用状態での必要な最小ボルト荷重
	W _{m2}	N	ガスケット締付時に必要な最小ボルト荷重
	Y	—	$K=\left(\frac{A}{B}\right)$ の値によって定まる係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 7 又は図中の算式による。）
	y	MPa	ガスケットの最小設計締付圧力（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 表 2 による。）
	Z	—	$K=\left(\frac{A}{B}\right)$ の値によって定まる係数（「压力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書 3 図 7 又は図中の算式による。）
	σ_H	MPa	ハブの軸方向応力
	σ_R	MPa	フランジの径方向応力
	σ_T	MPa	フランジの周方向応力

2.2 強度計算方法

クラス3容器の計算上必要な厚さ及びフランジの強度計算の方法を示す。

材料の許容引張応力は材料規格Part3第1章表3及び表5に応じた値を用いる。材料規格Part3第1章表3及び表5記載の温度の中間の値の場合は比例法を用いて計算し、小数第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

強度計算は材料規格に基づき適切な裕度を持った許容値を使用して実施することから、強度計算に用いる寸法は公称値を使用する。

2.2.1 胴

(1) 胴の形状（設計・建設規格PVC-3111）

容器の胴の形状は、設計・建設規格 PVC-3111に適合する円筒形とする。また、容器の継手は、設計・建設規格 PVC-3112に適合する溶接継手を使用する。

(2) 胴の厚さの計算

胴の厚さは、以下のa項及びb項から求められる計算上必要な厚さ以上であることを示して、強度に対する要求事項に適合することを確認する。

なお、胴の厚さの確認は公称値によるほか、胴のマイナス側の許容差を考慮した厚さによる確認も併せて行う。

a 材料による制限最小厚さ： t_1 （設計・建設規格 PVC-3121）

炭素鋼鋼板又は低合金鋼鋼板で作られたもの…………… 3 mm

上記以外の材料で作られたもの…………… 1.5 mm

b 以下の計算式による

区 分 ^(注1)	適用規格番号	計算式
円筒形 (外面圧) ^(注2)	設計・建設規格 PVC-3122(3)	胴の厚さが外径の0.1倍以下のもの $t_2 = \frac{3P_e D_o}{4B}$
円筒形 (外面圧) ^(注3)	設計・建設規格 PVC-3122(4)	胴の厚さが外径の0.1倍を超えるもの ・次の2つの計算式により計算した値の いずれか大きい方の値 $t_2 = \frac{D_o \left(\frac{P_e}{B} + 0.0833 \right)}{2.167}$ $t_2 = \frac{D_o}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2P_e}{S_B}} \right)$

(注1) 本容器は外面から圧力を受けるため、内面から圧力を受ける場合の計算式の記載は省略する。（設計・建設規格 PVC-3122(1)(2)）

(注2) 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）の評価に適用する。

(注3) 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）の評価に適用する。

2.2.2 平板

(1) 平板の厚さの計算

平板の厚さは、以下の計算上必要な厚さ以上であることを示して、強度に対する要求事項に適合することを確認する。

なお、平板の厚さの確認は公称値によるほか、平板のマイナス側の許容差を考慮した厚さによる確認も併せて行う。

適用規格番号	計算式
設計・建設規格 PVD-3310	$t=d \cdot \sqrt{\frac{KP}{S}}$

(2) 穴の補強計算

a 穴の形（設計・建設規格 PVD-3321）

容器の平板に設ける穴は、円形又はだ円形とする。

b 補強計算（設計・建設規格 PVD-3322）

穴をあける場合の板厚は、平板の厚さが以下の計算上必要な厚さ以上であることを示して、強度に対する要求事項に適合することを確認する。

穴の径がPVD-3310のdの値の1/2以下で、穴の補強計算を行う場合には、補強に有効な面積が、補強に必要な面積の1/2より大きいことを確認する。

適用規格番号	計算式
設計・建設規格 PVD-3322(1)b	穴の径がdの値の1/2以下の場合 $t=d \cdot \sqrt{\frac{2KP}{S}}$

2.2.3 フランジ（設計・建設規格 PVC-3710）

フランジは、「鋼製管フランジ」（日本産業規格 JIS B 2220-2004）（材料に関する部分を除く）又は「鋳鉄製管フランジ」（日本産業規格 JIS B 2239-2004）（材料に関する部分を除く）に適合するもの若しくは設計・建設規格 別表2に掲げるもの若しくは必要な強度を有することが確認できたものを使用する。

(1) フランジの強度計算

フランジの強度は、「圧力容器の構造—一般事項」（日本産業規格 JIS B 8265-2003）附属書3（規定）圧力容器のボルト締めフランジに準じて計算及び評価することで、必要な強度を有することを確認する。

なお、使用済燃料乾式貯蔵容器のフランジは、一体形フランジであるため、一体形フランジとして計算する。

以下に強度計算及び評価方法を示す。

使用状態及びガスケット締付時におけるボルトの強度計算及び評価は、以下のようになる。

項 目		計 算 式
計算上必要なボルト荷重	内圧によってフランジに加わる全荷重	$H = \frac{\pi}{4} G^2 \cdot P$
	気密を十分に保つためにガスケットに加える圧縮力	$H_p = W_{m2}$
	使用状態での必要な最小ボルト荷重	$W_{m1} = H + H_p$
	ガスケット締付時に必要な最小ボルト荷重	$W_{m2} = \pi \cdot G \cdot y$
実際のボルトの総有効断面積及び ボルトの総有効断面積及び	使用状態でのボルトの総有効断面積	$A_{m1} = \frac{W_{m1}}{S_0}$
	ガスケット締付時のボルトの総有効断面積	$A_{m2} = \frac{W_{m2}}{S_a}$
	ボルトの総有効断面積	A_m は、 A_{m1} 又は A_{m2} の大きい方の値
	実際に使用するボルトの総有効断面積	$A_b = n \frac{\pi}{4} d_b^2$
	評 価	A_b は A_m より大きいことを確認する。

項 目		計 算 式
フランジに作用するモーメント	使用状態でのボルト荷重	$W_0 = W_{m1}$
	ガスケット締付時のボルト荷重	$W_g = \frac{A_{m2} + A_b}{2} S_a$
	外圧によってフランジの内径面に加わる荷重	$H_D = \frac{\pi}{4} B^2 P_e$
	ガスケット荷重	$H_G = W_0 - H$
	内圧によってフランジに加わる全荷重と外圧によってフランジの内径面に加わる荷重との差	$H_T = H - H_D$
	使用状態でのフランジ荷重に対するモーメントアーム(一体形フランジ)	一体形
		$h_D = R - 0.5g_1$
		$h_G = \frac{C-G}{2}$
		$h_T = \frac{g_1 - R + h_G}{2}$
	使用状態でフランジに作用するモーメント(外圧を受けるフランジ)	$M_0 = H_D \cdot (h_D - h_G) + H_T \cdot (h_T - h_G)$
	ガスケット締付時にフランジに作用するモーメント	$M_g = W_g h_G$

使用状態及びガスケット締付時のフランジに作用するモーメントについて以下の応力計算を行い、フランジに作用する応力が許容応力より小さいことを確認する。

なお、評価する許容応力は、使用状態の場合は最高使用温度、ガスケット締付時の場合は常温における値とする。

項 目		計 算 式 ^(注1)	許容応力 ^(注1)
フランジに生じる応力	ハブの軸方向応力	$\sigma_H = \frac{fM}{Lg_1^2B}$	$1.5S_f$
	フランジの径方向応力	$\sigma_R = \frac{(1.33te+1)M}{Lt^2B}$	} S_f
	フランジの周方向応力	$\sigma_T = \frac{YM}{t^2B} - Z \sigma_R$	
	組合せ応力	$\frac{\sigma_H + \sigma_R}{2}$ $\frac{\sigma_H + \sigma_T}{2}$	

(注1) M、S_fは、それぞれ使用状態に対してはM₀、S_{f0}ガスケット締付時に対してはM_g、S_{fa}とする。

3. 強度計算書のフォーマット

3.1 強度計算書のフォーマットの概要

強度計算書のフォーマットは、容器の種類及び構造について以下の3.3項のフォーマットを必要に応じて組み合わせるものとし、フォーマット中に計算に必要な条件及び結果を記載する。

3.2 記載する数値に関する注意事項

計算に使用しないものや計算結果のないものは、計算結果表の欄には

—

 として記載する。

3.3 強度計算書のフォーマット

強度計算書のフォーマットは、以下のとおりである。

FORMAT-I	容器の胴の計算結果
FORMAT-II	容器の平板の計算結果
FORMAT-III	フランジの強度計算の計算結果

FORMAT- I

設備区分

施設

設備

容器

容器の胴の計算結果（円筒形、外面に圧力を受ける胴）

最高使用 圧力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	材 料	胴の外径 D _o (mm)	外圧チャー トより求め られる値 B (MPa)	材料規格よ り求められ る値 S _B (MPa)	材料による 制限最小厚さ t ₁ (mm)	計算上 必要な厚さ t ₂ (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
評価：								

FORMAT- II

容器の平板の計算結果

最高使用 圧 力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	材 料	許容 引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は 最小 内のり d (mm)	取り付け 方法	取付け 方法 による 係数 K (-)	計算上 必要な 厚さ t (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
評価：									

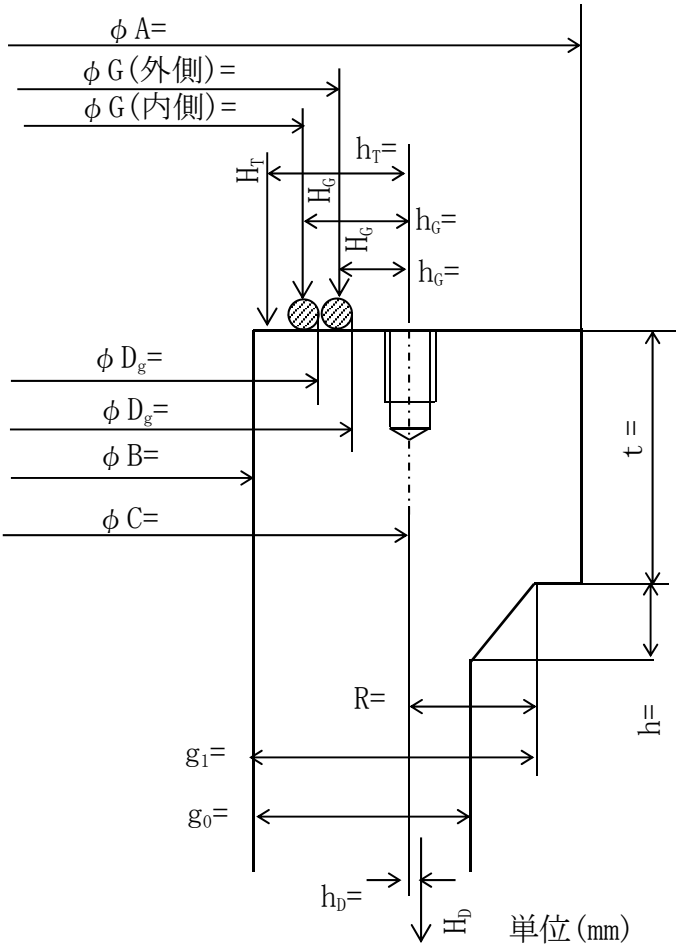
フランジの強度計算の計算結果

	材料	許容引張応力 (MPa)		ボルト 谷径 d _b (mm)	ボルト 本数 n (-)	ガスケット寸法 ^(注 1) 中心径 G (mm)		最小設計 締付圧力 y (N/mm)
		常 温	最高使用 温度			内側	外側	
フランジ		S _{fa} =	S _{f0} =	—	—	—		—
ボルト		S _a =	S ₀ =			—		—
ガスケット	—	—	—	—	—			

(注 1) 二重のガスケットを用いる場合は、内側寸法と外側寸法を記載する。

計算上必要なボルト荷重 (N)	使用状態における 必要な最小ボルト荷重 W _{m1}	
	ガスケット締付に 必要な最小ボルト荷重 W _{m2}	
ボルトの所要総有効断面積及び実 際のボルトの総有効断面積 (mm ²)	ボルトの所要 総有効断面積 A _m	
	実際に使用する ボルトの総有効断面積 A _b	
	評 価	
フランジに作用するモーメント (N・mm)	使用状態でフランジに 作用する全モーメント M ₀	
	ガスケット締付時にフランジに 作用するモーメント M _g	

フランジに生じる応力		使 用 状 態		ガスケット締付時	
		計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
ハブの軸方向応力 σ_{H}			$1.5S_{\text{f0}}=$		$1.5S_{\text{fa}}=$
フランジの半径方向応力 σ_{R}			$S_{\text{f0}}=$		$S_{\text{fa}}=$
フランジの周方向応力 σ_{T}					
応力の 組合せ	$\frac{\sigma_{\text{H}}+\sigma_{\text{R}}}{2}$				
	$\frac{\sigma_{\text{H}}+\sigma_{\text{T}}}{2}$				
評 価					



フランジ型式——一体形フランジ

クラス3容器の強度計算書

設計及び工事計画認可申請 資料10-2-3

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-2-3-1
2. クラス3容器の強度計算結果	資10-2-3-2
2.1 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）の強度計算結果	資10-2-3-2
2.2 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）の強度計算結果	資10-2-3-6

※本資料における については商業機密又は防護上の機密を含むため公開
できません。

1. 概要

本資料は、申請範囲のクラス3容器が十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

2. クラス3容器の強度計算結果

2.1 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）の強度計算結果

設備区分 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1） クラス3容器

(1) 胴の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVC-3122(3)）

最高使用 圧力 P (MPa)	最高使用 温度 (°C)	材 料	胴の外径 D _o (mm)	外圧チャートより求められる値 B (MPa)	材料規格より求められる値 S _B (MPa)	材料による制限最小厚さ t ₁ (mm)	計算上必要な厚さ t ₂ (mm)	実際使用最小厚さ t _s (mm)
0.41	150	GLF1		90	—	3	8	

評価：胴の最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。

(2) 平板（一次蓋）の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVD-3322(1)b）

最高使用 圧力 P (MPa)	最高使用 温度 (°C)	材 料	許容引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は最小の内径 d (mm)	取り付け方法	取り付け方法による係数 K (-)	計算上必要な厚さ t (mm)	実際使用最小厚さ t _s (mm)
0.41	150	GLF1	118			(a)	0.17	67	

評価：一次蓋の最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。

(3) 平板 (胴 (底板)) の厚さ計算結果 (設計・建設規格 PVD-3310)

最高使用 圧 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	材 料	許容 引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は 最小 内のり d (mm)	取り付け 方法	取付け 方法 による 係数 K (-)	計算上 必要な 厚さ t (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
0.41	150	GLF1	118	—		(o)	0.5	75	
評価：胴 (底板) の最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。									

(4) 平板 (カバープレート) の厚さ計算結果 (設計・建設規格 PVD-3310)

最高使用 圧 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	材 料	許容 引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は 最小 内のり d (mm)	取り付け 方法	取付け 方法 による 係数 K (-)	計算上 必要な 厚さ t (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
0.41	150	SUS304	130	—		(a)	0.17	5	
評価：カバープレートの最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。									

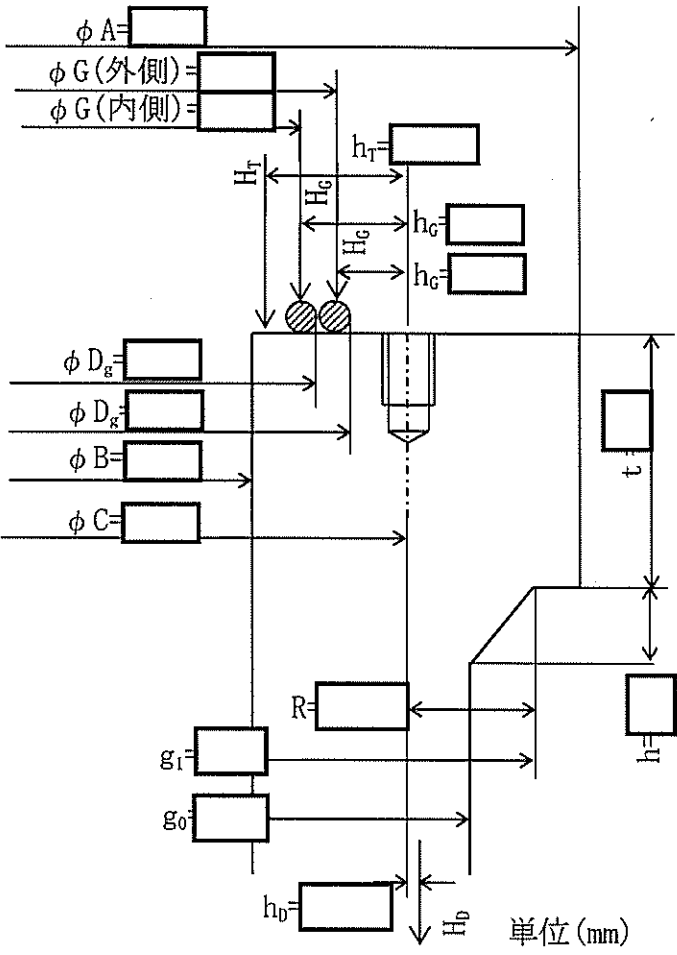
(5) フランジの強度計算の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVC-3710）

	材料	許容引張応力 (MPa)		ボルト 谷径 d_b (mm)	ボルト 本数 n (-)	ガスケット寸法 ^(注1) 中心径 G (mm)		最小設計 締付圧力 y (N/mm)
		常 温	最高使用 温度			内側	外側	
フランジ	GLF1	$S_{fa}=118$	$S_{fo}=118$	—	—	—		—
ボルト	SNB23-3	$S_a=200$	$S_o=200$			—		—
ガスケット	—	—	—	—	—			

(注1) 二重のガスケットを用いる場合は、内側寸法と外側寸法を記載する。

計算上必要なボルト荷重 (N)	使用状態における 必要な最小ボルト荷重 W_{m1}	5.501×10^6
	ガスケット締付に 必要な最小ボルト荷重 W_{m2}	4.405×10^6
ボルトの所要総有効断面積及び実 際のボルトの総有効断面積 (mm^2)	ボルトの所要 総有効断面積 A_m	2.751×10^4
	実際に使用する ボルトの総有効断面積 A_b	
	評 価	実際に使用するボルトの総有効断面積は、ボルトの所要総有効断面積より大きい。
フランジに作用するモーメント ($\text{N} \cdot \text{mm}$)	使用状態でフランジに 作用する全モーメント M_0	6.008×10^7
	ガスケット締付時にフランジに 作用するモーメント M_g	3.324×10^8

フランジに生じる応力		使 用 状 態		ガスケット締付時	
		計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
ハブの軸方向応力 σ_H		1	$1.5S_{f0}=177$	2	$1.5S_{fa}=177$
フランジの半径方向応力 σ_R		16	$S_{f0}=118$	88	$S_{fa}=118$
フランジの周方向応力 σ_T		3		15	
応力の 組合せ	$\frac{\sigma_H + \sigma_R}{2}$	9		45	
	$\frac{\sigma_H + \sigma_T}{2}$	2		9	
評 価		いずれの状態でも許容応力を上回っていない。			



フランジ型式——一体形フランジ

(6) カバープレートボルトの強度計算の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVC-3710）

	材料	許容引張応力 (MPa)		ボルト 谷径 d _b (mm)	ボルト 本数 n (-)	ガスケット寸法 ^(注 1) 中心径 G (mm)		最小設計 締付圧力 y (N/mm)
		常 温	最高使用 温度			内側	外側	
ボルト	SNB23-3	S _a =200	S ₀ =200			—		—
ガスケット	—	—	—	—	—			

(注 1) 二重のガスケットを用いる場合は、内側寸法と外側寸法を記載する。

計算上必要なボルト荷重 (N)	使用状態における 必要な最小ボルト荷重 W _{m1}	1.756×10 ⁵
	ガスケット締付に 必要な最小ボルト荷重 W _{m2}	1.713×10 ⁵
ボルトの所要総有効断面積及び実 際のボルトの総有効断面積 (mm ²)	ボルトの所要 総有効断面積 A _m	8.781×10 ²
	実際に使用する ボルトの総有効断面積 A _b	
	評 価	実際に使用するボルトの総有効断面積は、ボルトの所要総有効断面積より大きい。

2.2 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）の強度計算結果

設備区分 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2） クラス3容器

(1) 胴の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVC-3122 (4)）

最高使用 圧力 P (MPa)	最高使用 温度 (°C)	材 料	胴の外径 D _o (mm)	外圧チャ- トより求め られる値 B (MPa)	材料規格よ り求められ る値 S _B (MPa)	材料による 制限最小厚さ t ₁ (mm)	計算上 必要な厚さ t ₂ (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
0.41	155	GLF1		90	163	3	90	

評価：胴の最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。

(2) 平板（一次蓋）の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVD-3322 (1) b）

最高使用 圧力 P (MPa)	最高使用 温度 (°C)	材 料	許容 引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は 最小 内のり d (mm)	取り付け 方法	取付け 方法 による 係数 K (-)	計算上 必要な 厚さ t (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
0.41	155	GLF1	118			(a)	0.17	65	

評価：一次蓋の最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。

(3) 平板 (胴 (底板)) の厚さ計算結果 (設計・建設規格 PVD-3310)

最高使用 圧 P (MPa)	最高使用 温 (°C)	材 料	許容 引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は 最小 内のり d (mm)	取り付け 方法	取付け 方法 による 係数 K (-)	計算上 必要な 厚さ t (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
0.41	155	GLF1	118	—		(o)	0.5	73	
評価：胴 (底板) の最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。									

(4) 平板 (カバープレート) の厚さ計算結果 (設計・建設規格 PVD-3310)

最高使用 圧 P (MPa)	最高使用 温 (°C)	材 料	許容 引張応力 S (MPa)	穴の径 (mm)	径又は 最小 内のり d (mm)	取り付け 方法	取付け 方法 による 係数 K (-)	計算上 必要な 厚さ t (mm)	実際使用 最小厚さ t _s (mm)
0.41	155	SUS304	129	—		(a)	0.17	5	
評価：カバープレートの最小厚さは、すべて計算上必要な厚さ以上である。									

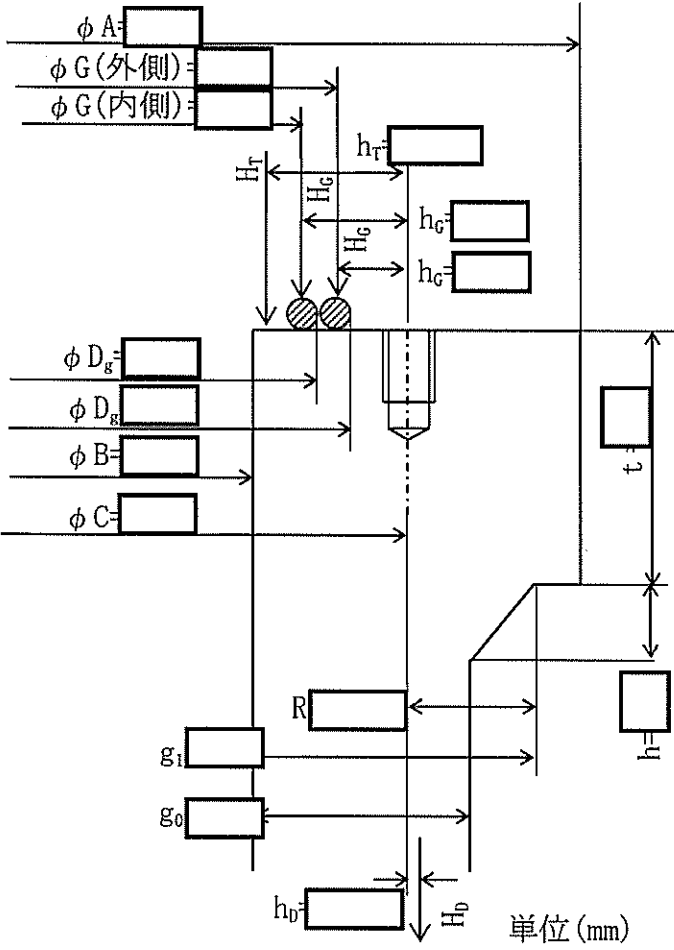
(5) フランジの強度計算の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVC-3710）

	材料	許容引張応力 (MPa)		ボルト 谷径 d_b (mm)	ボルト 本数 n (-)	ガスケット寸法 ^(注1) 中心径 G (mm)		最小設計 締付圧力 y (N/mm)
		常 温	最高使用 温度			内側	外側	
フランジ	GLF1	$S_{fa}=118$	$S_{f0}=118$	—	—	—		—
ボルト	SNB23-3	$S_a=200$	$S_0=200$			—		—
ガスケット	—	—	—	—	—			

(注1) 二重のガスケットを用いる場合は、内側寸法と外側寸法を記載する。

計算上必要なボルト荷重 (N)	使用状態における 必要な最小ボルト荷重 W_{m1}	5.323×10^6
	ガスケット締付に 必要な最小ボルト荷重 W_{m2}	4.286×10^6
ボルトの所要総有効断面積及び実 際のボルトの総有効断面積 (mm^2)	ボルトの所要 総有効断面積 A_m	2.662×10^4
	実際に使用する ボルトの総有効断面積 A_b	
	評 価	実際に使用するボルトの総有効断面積は、ボルトの所要総有効断面積より大きい。
フランジに作用するモーメント ($\text{N} \cdot \text{mm}$)	使用状態でフランジに 作用する全モーメント M_0	5.679×10^7
	ガスケット締付時にフランジに 作用するモーメント M_g	3.296×10^8

フランジに生じる応力		使 用 状 態		ガスケット締付時	
		計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
ハブの軸方向応力 σ_H		1	$1.5S_{f0}=177$	2	$1.5S_{fa}=177$
フランジの半径方向応力 σ_R		16	$S_{f0}=118$	89	$S_{fa}=118$
フランジの周方向応力 σ_T		3		15	
応力の 組合せ	$\frac{\sigma_H + \sigma_R}{2}$	8		46	
	$\frac{\sigma_H + \sigma_T}{2}$	2		9	
評 価		いずれの状態でも許容応力を上回っていない。			



フランジ型式——一体形フランジ

(6) カバープレートボルトの強度計算の厚さ計算結果（設計・建設規格 PVC-3710）

	材料	許容引張応力 (MPa)		ボルト 谷径 d_b (mm)	ボルト 本数 n (-)	ガスケット寸法 ^(注1) 中心径 G (mm)		最小設計 締付圧力 y (N/mm)
		常 温	最高使用 温度			内側	外側	
ボルト	SNB23-3	$S_a=200$	$S_0=200$			—		—
ガスケット	—	—	—	—	—			

(注 1) 二重のガスケットを用いる場合は、内側寸法と外側寸法を記載する。

計算上必要なボルト荷重 (N)	使用状態における 必要な最小ボルト荷重 W_{m1}	1.756×10^5
	ガスケット締付に 必要な最小ボルト荷重 W_{m2}	1.713×10^5
ボルトの所要総有効断面積及び実 際のボルトの総有効断面積 (mm^2)	ボルトの所要 総有効断面積 A_m	8.781×10^2
	実際に使用する ボルトの総有効断面積 A_b	
	評 価	実際に使用するボルトの総有効断面積は、ボルトの所要総有効断面積より大きい。

キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る
強度計算の基本方針

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-1

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資 10-3-1-1
2. 適用部材の分類	資 10-3-1-1
3. キャスク本体その他のキャスクを構成する部材の強度評価の基本方針	資 10-3-1-1

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）が、金属キャスク構造規格等に準じて、十分な強度を有することを確認するための強度計算の基本方針について説明するものである。

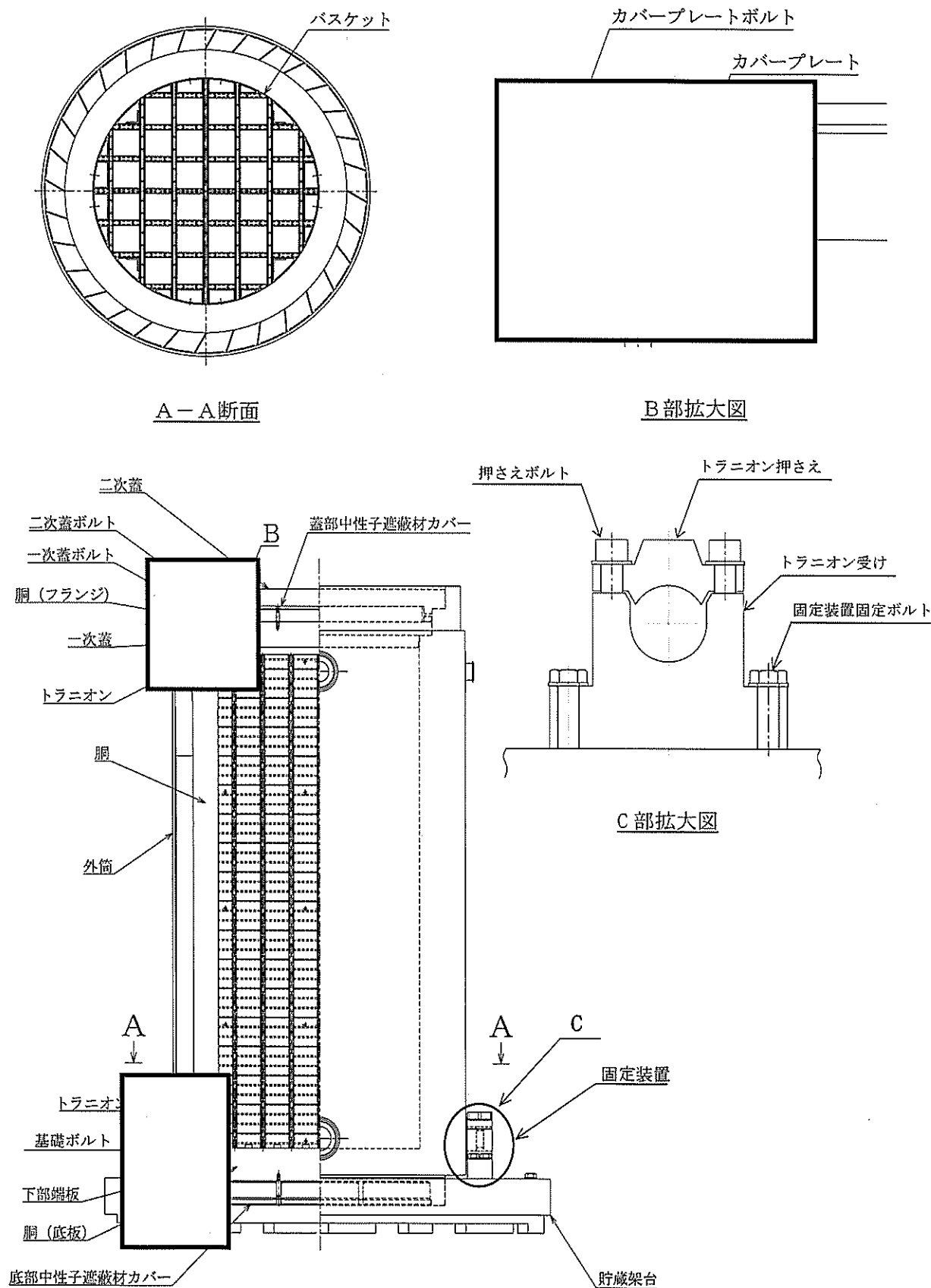
また、乾式キャスクのうち、貯蔵架台については、設計・建設規格に基づき、十分な強度を有することを確認するための強度計算の基本方針について説明するものである。

2. 適用部材の分類

乾式キャスク及び貯蔵架台の構造図を第2-1図に示す。これら機器等のうち、技術基準規則第26条に規定される4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）を確保するために必要な強度部材として、胴、一次蓋、二次蓋、バスケット、トラニオン、外筒、貯蔵架台等を評価対象とし、金属キャスク構造規格に基づく適用部材の分類を第2-1表に示す。

3. キャスク本体その他のキャスクを構成する部材の強度評価の基本方針

第2-1表に従い、金属キャスク構造規格、核燃料輸送物設計承認（令和2年11月30日付け原規規発第2011303号及び原規規発第2011304号）及び設計・建設規格による評価を実施する。



第 2-1 図 乾式キャスク及び貯蔵架台の構造図

第2-1表 乾式キャスク及び貯蔵架台の適用部材の分類

機器名	部材名	金属キャスク構造規格 適用部材の分類
乾式キャスク	胴	密封容器
	胴（底板）	
	胴（フランジ）	
	一次蓋	
	一次蓋ボルト	
	カバープレート	
	カバープレートボルト	
	二次蓋	
	二次蓋ボルト	
	外筒	中間胴 ^(注1)
	下部端板	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	
	底部中性子遮蔽材カバー	
	バスケット	バスケット ^(注2)
	トラニオン	トラニオン
貯蔵架台	貯蔵架台	— ^(注3)
	トラニオン押さえ	

(注1) 本申請の乾式キャスクの外筒等は、多層キャスク（胴部が構造強度機能を有する複数の層で構成されているタイプのキャスク）の中間胴と同様に密封容器を支持する構造ではないが、中性子遮蔽材を保持する機能を有しているため、中間胴と同等に扱い、中間胴に準じた評価を行う。ただし、中間胴は密封容器を支持し、その損壊を防止する機能が要求されるため、密封容器との溶接部近接部分に対する特別な規定が設けられている（MCD-3710）が、外筒等においてはこの機能は要求されないため、当該規定は参考としない。

(注2) 金属キャスク構造規格のバスケットの評価を参考とし、核燃料輸送物設計承認（令和2年11月30日付け原規規発第2011303号及び原規規発第2011304号）で承認を受けた評価に準じた評価を行う。

(注3) 金属キャスク構造規格の適用部材の分類範囲外のため、設計・建設規格に基づき、クラス3支持構造物として評価を行う。

密封容器の強度計算方法

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-2-1

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資 10-3-2-1-1
2. 適用基準	資 10-3-2-1-1
3. 記号の説明	資 10-3-2-1-2
4. 設計条件	資 10-3-2-1-6
4.1 基本仕様	資 10-3-2-1-6
4.2 設計事象	資 10-3-2-1-7
4.3 荷重の種類とその組合せ	資 10-3-2-1-15
5. 計算条件	資 10-3-2-1-16
5.1 解析対象とする事象	資 10-3-2-1-16
5.2 解析箇所	資 10-3-2-1-20
5.3 形状及び寸法	資 10-3-2-1-22
5.4 物性値	資 10-3-2-1-22
6. 応力解析	資 10-3-2-1-25
6.1 応力算出の概要	資 10-3-2-1-25
6.2 荷重条件の選定	資 10-3-2-1-28
6.3 応力計算と評価	資 10-3-2-1-28

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の密封容器が十分な強度を有することを確認するための方法について説明するものである。

2. 適用基準

密封容器の強度評価については、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、金属キャスク構造規格の密封容器を適用する。

3. 記号の説明

密封容器の強度評価に用いる記号について以下に説明する。

記号	単位	定 義
A	mm ²	カバープレートボルト最小断面積の合計値
A ₁	mm ²	接触面積
A _m	MPa	圧力変動の全振幅の許容値
A _{m2}	MPa	一次蓋及び二次蓋の圧力変動の全振幅の許容値
B	MPa	金属キャスク構造規格の別図 7-1 及び別図 7-2 から求めた値
D _G	mm	ガスケット反力の作用する位置（直径）
D ₀	mm	胴の外径
d _s	mm	カバープレートボルトの最小径
E	MPa	縦弾性係数
E ₀	MPa	「金属キャスク構造規格」別図 8-4 に使用されている縦弾性係数
E ₁	MPa	炭素鋼の縦弾性係数
E ₂	MPa	合金鋼の縦弾性係数
g	m/s ²	重力加速度
G ₁	－	水平方向加速度係数
G ₂	－	鉛直方向加速度係数
H	N	カバープレートに加わる内圧による全荷重
h ₁	mm	バスケットプレート全厚さ
h ₂	mm	バスケットプレート内幅
h ₃	mm	バスケットプレート B 全厚さ
h ₄	mm	バスケットプレート B 内幅
i	－	応力サイクルの型式
k	－	応力サイクルの総数
k'	N/m	被衝突物のバネ定数
K	－	応力集中係数

記号	単位	定 義
ℓ	mm	バスケットプレート長さ
L	mm	カバープレートボルト軸部の長さ
m	kg	衝突物の質量
m_G	kg	バスケット及び使用済燃料集合体の質量
m_r	kg	カバープレートの質量
M	N・mm	曲げモーメント
n	－	胴（底板）に接触するバスケットプレート ℓ 部の数
n_A	－	胴（底板）に接触するバスケットプレート A の ℓ 部の数
n_B	－	胴（底板）に接触するバスケットプレート B の ℓ 部の数
n_b	－	カバープレートボルトの本数
N_1	－	大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数
N_a	－	許容繰返し回数
N_c	－	各サイクルの繰返し回数
P	MPa	最高使用圧力
p	mm	胴の任意の 2 点間の距離
P_2	MPa	一次蓋又は二次蓋の最高使用圧力
P_a	MPa	許容外圧
P_b	MPa	一次曲げ応力強さ
P_L	MPa	一次局部膜応力強さ
P_m	MPa	一次一般膜応力強さ
Q	MPa	二次応力強さ
r	mm	ボルトピッチ半径
R	mm	胴の平均半径
S	MPa	$1.5S_m$ と $0.9S_y$ の小さい方
S_1	MPa	繰返しピーク応力強さ
S_2	MPa	一次蓋貫通孔部又は二次蓋貫通孔部の応力強さ

記号	単位	定 義
S_3	MPa	一次蓋貫通孔部又は二次蓋貫通孔部を無視した場合の一次蓋または二次蓋の応力強さ
S_a	MPa	繰返しピーク応力強さ
S_{b1}	MPa	ボルトに発生する応力強さ（変動前）
S_{b2}	MPa	ボルトに発生する応力強さ（変動後）
S_c	MPa	繰返しピーク応力強さ
S_c'	MPa	補正した繰返しピーク応力強さ
S_m	MPa	設計応力強さ
S_{m2}	MPa	一次蓋又は二次蓋の使用材料の設計応力強さ
S_p	MPa	各応力サイクルに対応したピーク応力強さ
S_u	MPa	設計引張強さ
S_y	MPa	設計降伏点
t	mm	板厚
T	°C	温度変動の許容値
T'	°C	温度変動の許容値
T_{max}	°C	胴の最高使用温度
U_f	—	疲労累積係数
V	m/s	衝突物の衝突速度
w	MPa	慣性力による分布荷重
W_{m2}	N	ガスケット締付け時のボルト荷重（ボルト 1 本当たり）
Z	mm ³	カバープレートボルトの断面係数
α	mm/(mm・°C)	2 点間の平均温度における瞬時熱膨張係数
α_1	mm/(mm・°C)	炭素鋼の瞬時熱膨張係数
α_2	mm/(mm・°C)	合金鋼の瞬時熱膨張係数
δ	m	被衝突物の変形量
ΔT	°C	最高使用温度(T_{max})と常温との差
$\Delta \sigma_1$	MPa	供用状態 A 及び B における応力強さの最大値

記号	単位	定 義
ρ	kg/mm ³	カバープレート材料(SUS304)の密度
σ_b	MPa	曲げ応力
σ_{b1}	MPa	カバープレートボルトに発生する曲げ応力
σ_c	MPa	圧縮応力
σ_m	MPa	平均引張応力
σ_{n1}	MPa	カバープレートに加わる内圧により発生するボルト荷重及びガスケット締付け時のボルト荷重による平均引張応力
σ_{n2}	MPa	カバープレートに加わる内圧による平均引張応力
σ_{n3}	MPa	ガスケット締付け時の平均引張応力
σ_p	MPa	バスケット底面との接触部である胴（底板）に発生する平均支圧応力
σ_{r1}	MPa	内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力
σ_{r2}	MPa	慣性力により発生する一次膜＋一次曲げ応力
σ_{r3}	MPa	内圧及び慣性力によりカバープレートに発生する一次膜＋一次曲げ応力
σ_{z1}	MPa	内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力
σ_{z2}	MPa	慣性力により発生する一次膜＋一次曲げ応力
σ_{z3}	MPa	内圧及び慣性力によりカバープレートに発生する一次膜＋一次曲げ応力
$\sigma_{\theta1}$	MPa	内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力
$\sigma_{\theta2}$	MPa	慣性力により発生する一次膜＋一次曲げ応力
$\sigma_{\theta3}$	MPa	内圧及び慣性力によりカバープレートに発生する一次膜＋一次曲げ応力

4. 設計条件

密封容器は、以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

密封容器の最高使用圧力と最高使用温度を第4-1表に示す。

第 4-1 表 密封容器の最高使用圧力と最高使用温度

	乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
最高使用圧力	0.41 MPa ^(注 1)	0.41 MPa ^(注 1)
最高使用温度	150 °C	155 °C

(注 1) 使用済燃料収納空間の最小圧力 (−0.1 MPa) と一次蓋-二次蓋空間の最大圧力 (0.31 MPa) の差圧

4.2 設計事象

4.2.1 乾式貯蔵建屋内での取扱い

使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「乾式貯蔵建屋」という。）内においては、使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン（以下「天井クレーン」という。）及び使用済燃料乾式貯蔵容器搬送台車（以下「搬送台車」という。）を用いて乾式キャスクを取り扱う。

天井クレーンは、乾式貯蔵建屋の取扱エリアにおいて、乾式キャスクの移動を安全かつ確実にを行う天井走行形クレーンである。天井クレーンは、乾式キャスクの安全機能を維持するため、一般産業施設として、フックを二重ワイヤで保持し乾式キャスクの落下を防止する対策を講じるとともに、浮き上がり防止機能を設け、天井クレーン自身の落下防止対策を講じる。また、その移動範囲を貯蔵中の乾式キャスクに影響を及ぼすことがないように乾式貯蔵建屋の貯蔵エリアを移動することができない設計とする。

搬送台車は、乾式貯蔵建屋の取扱エリアと貯蔵エリアの間において、乾式キャスクの移動を安全かつ確実にを行う搬送装置である。搬送台車は乾式キャスクの安全機能を維持するため、一般産業施設として、緊急停止できる機構を設けるとともに、人の誤操作等で逸走した場合でも、乾式キャスクが乾式貯蔵建屋の壁及び他の乾式キャスクへ衝突しない設計とする。

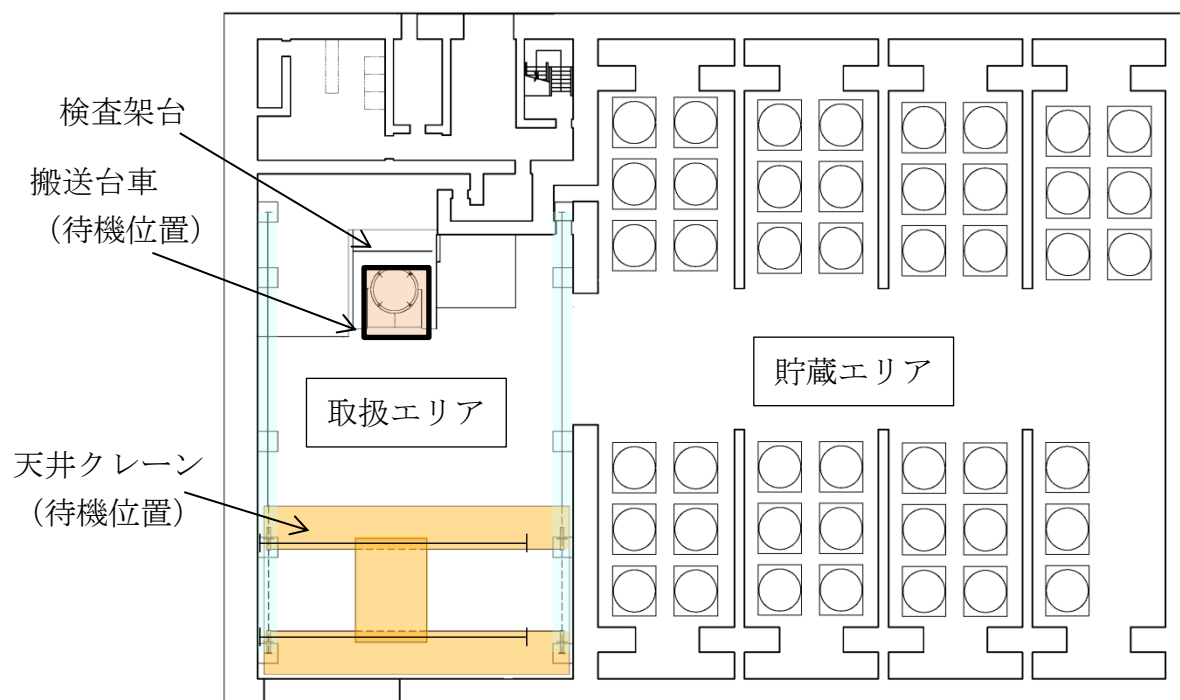
天井クレーン及び搬送台車の配置について第4-1図に示す。また、天井クレーンの主な仕様を第4-2表に、搬送台車の主な仕様を第4-3表に示す。

乾式キャスクの具体的な取扱い手順としては、第4-2図に示すように、始めに、天井クレーンを用いて乾式キャスクを車両から積み下ろし、緩衝体を取外す。次に、天井クレーンを用いて乾式キャスクを立て起こし、検査架台へ移送、検査架台内に設置した貯蔵架台に吊り下ろす。

下部トラニオンと貯蔵架台を固定した後に、天井クレーンを用いて三次蓋を取外し、監視装置を取付ける。

その後、搬送台車を用いて乾式キャスクを貯蔵エリアへ移動し、所定の位置にて貯蔵架台を乾式貯蔵建屋の床面にボルトで固縛する。

なお、燃料取扱棟においても既設の燃料取扱棟の天井クレーンを用いて乾式キャスクを取り扱う。



第4-1図 天井クレーン及び搬送台車の配置図

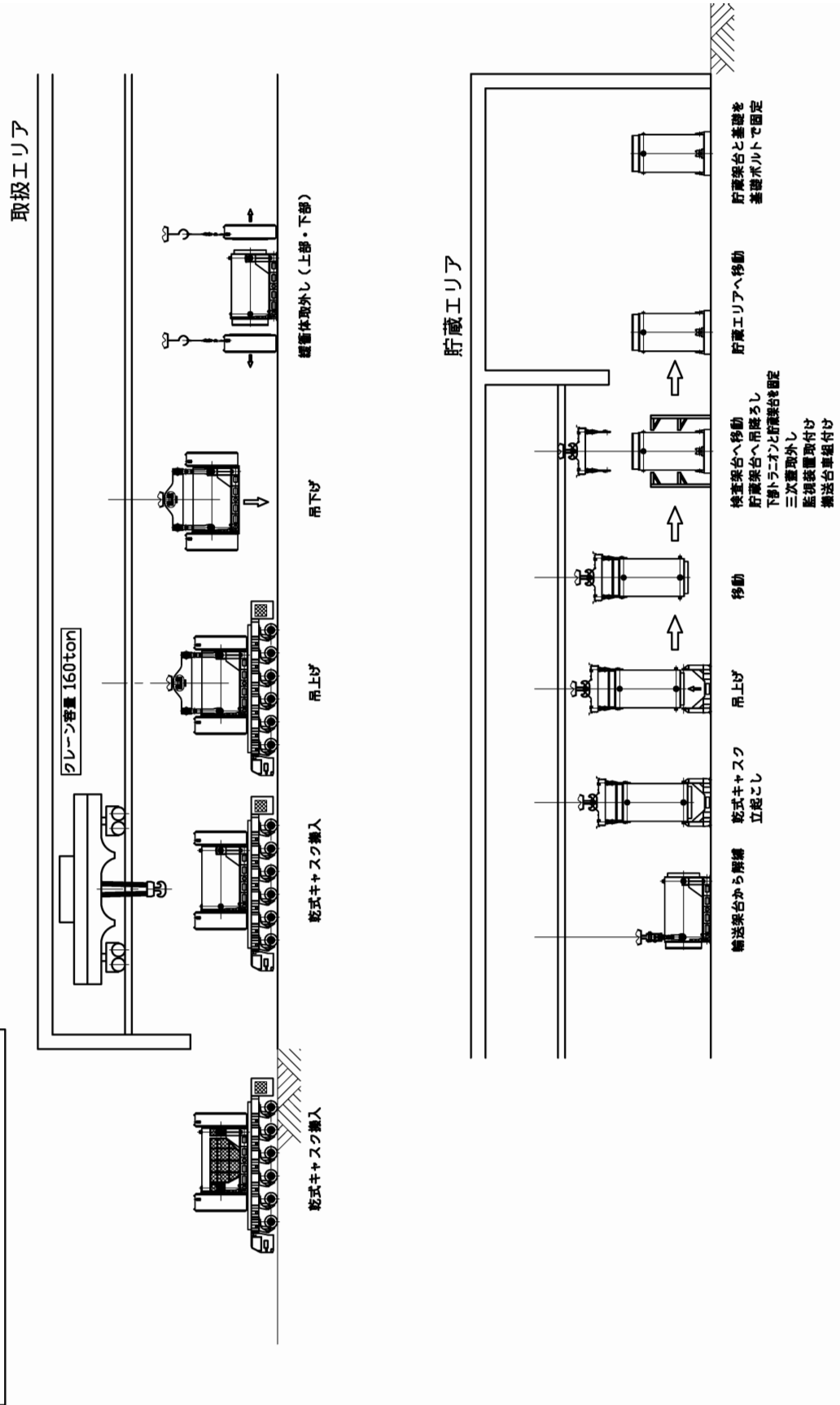
第4-2表 天井クレーンの主な仕様

容量 (トン)		主巻 : 160
巻上／巻下速度 (m／分)		最大 : 1.2
移動速度 (m／分)	走行	最大 : 18
	横行	最大 : 6

第4-3表 搬送台車の主な仕様

容量 (トン)	150
移動速度 (m／分)	最大 : 2

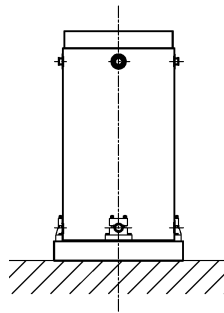
乾式貯蔵建屋フロー図（受入）



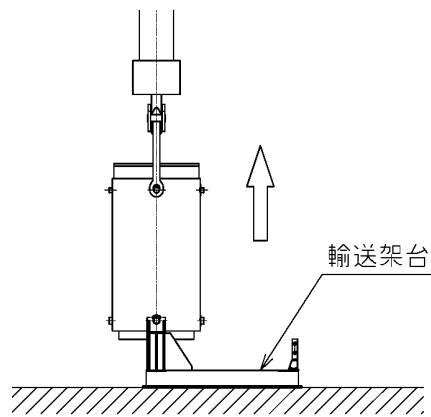
第 4-2 図 乾式キャスク取扱いフロー図

4.2.2 設計上考慮する事象の選定

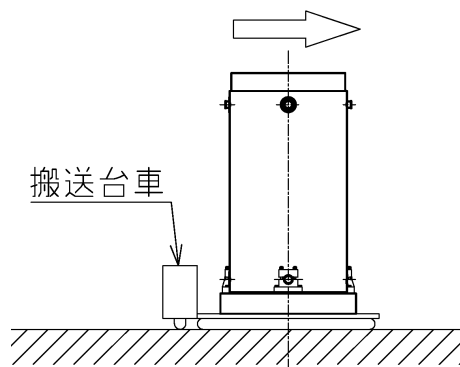
設計上考慮する事象として、燃料取扱棟、乾式貯蔵建屋内及び試験時における状態から選定事象を抽出し、その様態図を第4-3図に示す。また、第4-4表に各選定事象を金属キャスク構造規格 解説 MGB-1300を参考として、設計事象及び供用状態を分類した結果を示す。



(a) 貯蔵時

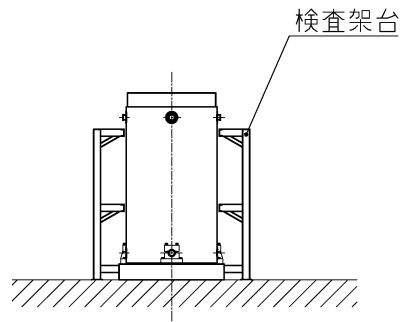


(b) 吊上げ時

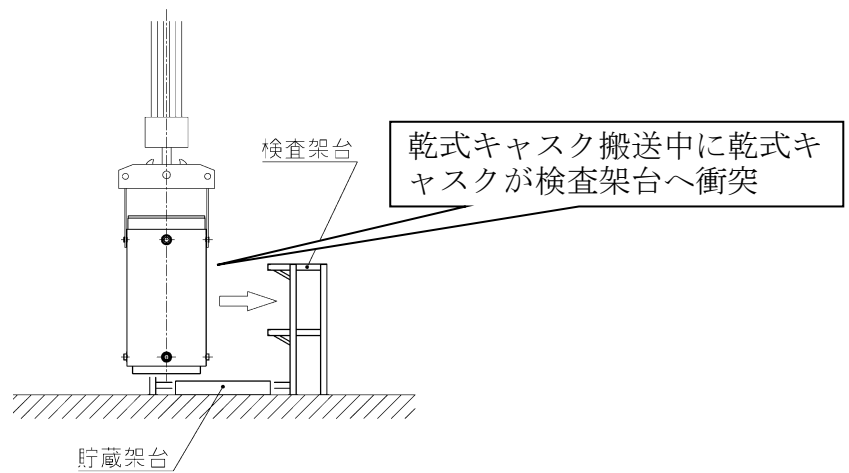


(c) 台車搬送時

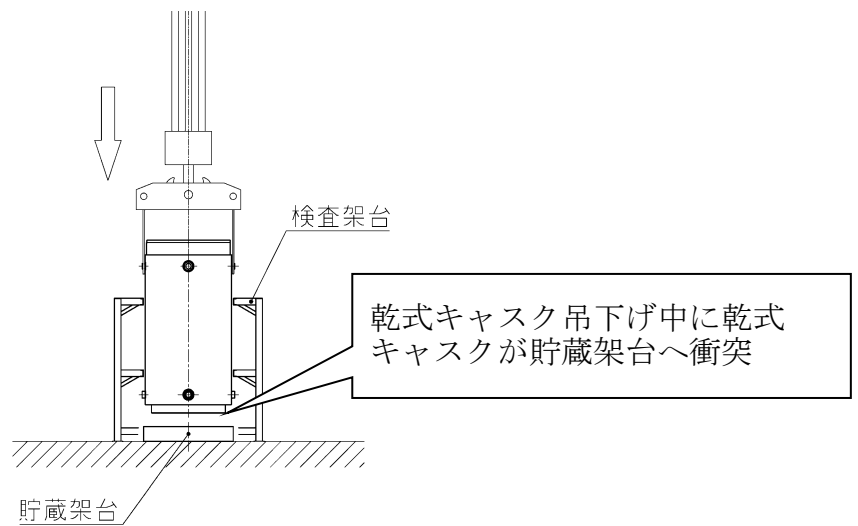
第4-3図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (1/3)



(d) 準備作業時

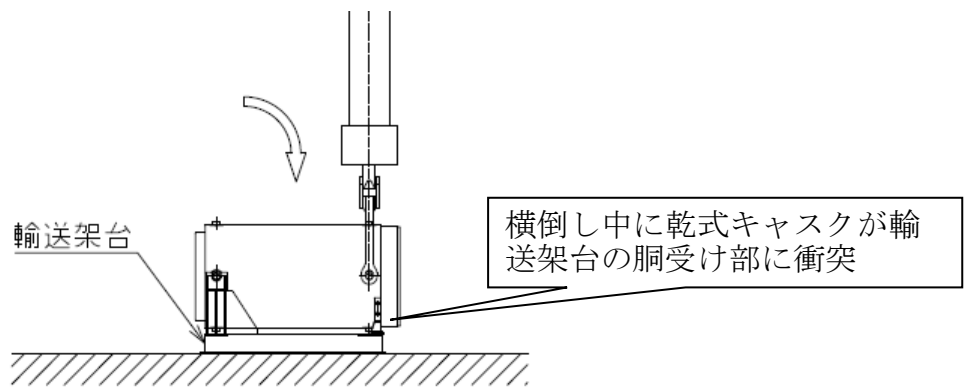


(e) 検査架台への衝突

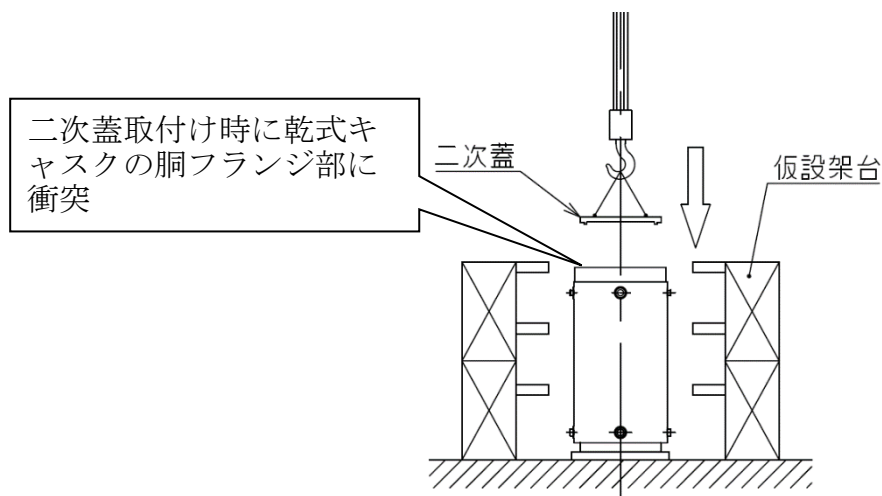


(f) 貯蔵架台への衝突

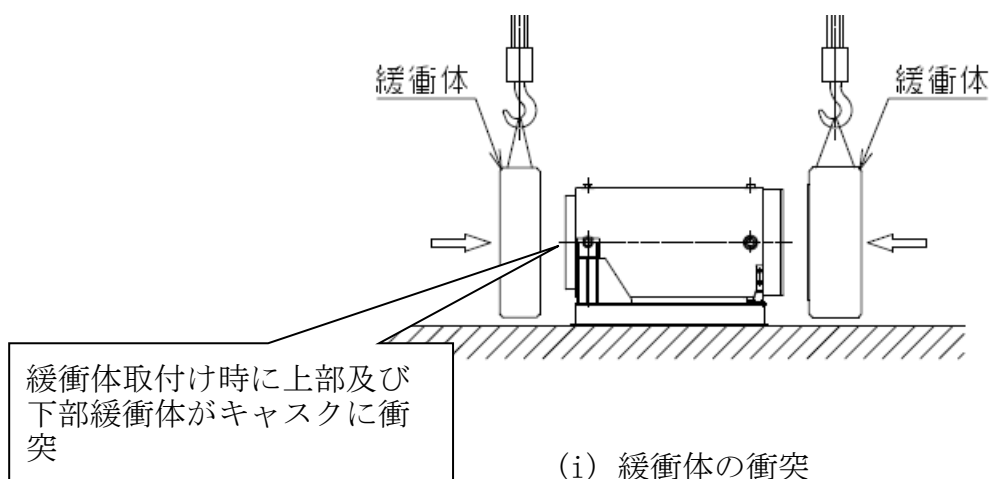
第 4-3 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (2/3)



(g) 横倒し時の衝突



(h) 二次蓋の衝突（燃料取扱棟内）



(i) 緩衝体の衝突

第 4-3 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (3/3)

第 4-4 表 燃料取扱棟、乾式貯蔵建屋内及び試験時における選定事象

設計事象	供用状態	燃料取扱棟、乾式貯蔵建屋内及び試験時における 選定事象
I	A	・貯蔵（貯蔵時）（第 4-3 図(a)） ・乾式キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時）（第 4-3 図(b)） ・搬送台車による搬送（台車搬送時）（第 4-3 図(c)） ・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）（第 4-3 図(d)）
II	B	・乾式キャスクの検査架台への衝突（検査架台への衝突時）（第 4-3 図(e)） ・乾式キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時）（第 4-3 図(f)） ・乾式キャスクのたて起こし架台への衝突（横倒し時の衝突時）（第 4-3 図(g)） ・二次蓋の乾式キャスクへの衝突（蓋の衝突時）（第 4-3 図(h)） ・緩衝体の乾式キャスクへの衝突（緩衝体の衝突時）（第 4-3 図(i)）
試験状態	試験状態	・耐圧試験（製造時）

4.3 荷重の種類とその組合せ

金属キャスク構造規格の解説表 MCD-1100-1-1を参考に、密封容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを選定し、荷重の種類とその組合せ結果を第4-5表に示す。なお、応力評価に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

第 4-5 表 密封容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計荷重 供用状態 評価事象 荷 重			圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
設計条件	設計条件	設計時 ^(注1)	○ ^(注3)	—	○	—	—	—
I	A ^(注2)	貯蔵時	○	○	○	—	—	○
		吊上げ時	○	— ^(注5)	○	○	—	○
II	B ^(注2)	検査架台への衝突時	○	—	○	—	○	○
試験状態	試験状態	試験時	○ ^(注4)	○	○	—	—	—

(注1) 最高使用圧力に対する評価条件である。

(注2) 評価事象の中で、他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

(注3) 本評価は、最高使用圧力（胴内圧力及び蓋間圧力）に対する評価を行うことを目的とするため、中性子遮蔽材部圧力は入力しない。

(注4) 耐圧試験圧力（最高使用圧力により定められる圧力）とする。耐圧試験は、一次蓋のみを取り付けた状態で行うため、一次蓋-二次蓋間圧力は作用しない。また、耐圧試験は使用済燃料を装荷せず常温で行うことから、中性子遮蔽材部の内圧は上昇しないため、中性子遮蔽材部圧力は作用しない。

(注5) 本状態での自重による荷重は、吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2 項で示した燃料取扱棟、乾式貯蔵建屋内及び試験時における選定事象のうち、第5-1表及び第5-2表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について評価を実施する。

第5-1表 代表事象（乾式キャスク（タイプ1））（1/2）

設計事象	供用状態	代表事象	包絡される事象	荷重条件	備考
設計条件	設計条件	設計時	—	・ 胴内圧力 ・ 蓋間圧力 ・ ボルト初期締付力	最高使用圧力に対する評価条件である。
I	A	貯蔵時	—	・ 胴内圧力 ・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ 自重 ・ ボルト初期締付力 ・ 熱荷重	供用状態Aのうち大半の期間を占める代表的事象。
		吊上げ時	・ 台車搬送時 ・ 準備作業時	・ 胴内圧力 ・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ ボルト初期締付力 ・ 吊上げ荷重^(注1) ・ 熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは吊上げ時である。

(注1)乾式キャスク（タイプ1）に1.3gの慣性力（下方向）を作用させた場合の荷重である。吊上げ時に乾式キャスク（タイプ1）へ発生する加速度係数（ G_2 ）は、金属キャスク構造規格 解説表MCD-3300-2-2に記載されるクレーン構造規格に基づいた以下の式により算出した値である。

$$G_2 = \text{衝撃係数} (=1.012) \times \text{作業係数} (=1.2) \\ = 1.3$$

第5-1表 代表事象（乾式キャスク（タイプ1））（2/2）

設計事象	供用状態	代表事象	包絡される事象	荷重条件	備考
Ⅱ	B	検査架台への衝突時	・貯蔵架台への衝突時 ・横倒し時の衝突時 ・蓋の衝突時 ・緩衝体の衝突時	・胴内圧力 ・蓋間圧力 ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・側部中性子遮蔽材部圧力 ・底部中性子遮蔽材部圧力 ・ボルト初期締付力 ・検査架台への衝突時荷重^(注1) ・熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは検査架台への衝突時である。
試験状態	試験状態	試験時	—	・胴内圧力 ・自重 ・ボルト初期締付力	最高使用圧力の1.25 倍の圧力を密封容器圧力とする。

（注1）乾式キャスク（タイプ1）に3.4gの慣性力（水平方向）を作用させた場合の荷重である。検査架台への衝突時に乾式キャスク（タイプ1）へ発生する加速度は、衝突物（乾式キャスク（タイプ1））の運動エネルギーが被衝突物（検査架台）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した値である。エネルギー保存則より、衝突物の運動エネルギーが被衝突物の変形エネルギーと釣り合うとして、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k' \delta^2$$

また、運動方程式より、

$$F = mgG_1 = k' \delta$$

以上より、

$$G_1 = \sqrt{\frac{k' V^2}{mg^2}}$$

$$= 3.4$$

ここで、

G_1 : 水平方向加速度係数(—)

k' : 被衝突物のバネ定数 ($=1.410 \times 10^9$ N/m)

V : 衝突物の衝突速度 ($=0.3$ m/s)

m : 衝突物の質量 ($=120500$ kg)

g : 重力加速度 ($=9.80665$ m/s²)

δ : 被衝突物の変形量 (m)

第5-2表 代表事象（乾式キャスク（タイプ2））（1/2）

設計事象	供用状態	代表事象	包絡される事象	荷重条件	備考
設計条件	設計条件	設計時	—	・ 胴内圧力 ・ 蓋間圧力 ・ ボルト初期締付力	最高使用圧力に対する評価条件である。
I	A	貯蔵時	—	・ 胴内圧力 ・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ 自重 ・ ボルト初期締付力 ・ 熱荷重	供用状態Aのうち大半の期間を占める代表的事象。
		吊上げ時	・ 台車搬送時 ・ 準備作業時	・ 胴内圧力 ・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ ボルト初期締付力 ・ 吊上げ荷重^(注1) ・ 熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは吊上げ時である。

(注1) 乾式キャスク（タイプ2）に1.3g（下方向）の慣性力を作用させた場合の荷重である。吊上げ時に乾式キャスク（タイプ2）へ発生する加速度係数（ G_2 ）は、金属キャスク構造規格 解説表MCD-3300-2-2に記載されるクレーン構造規格に基づいた以下の式により算出した値である。

$$G_2 = \text{衝撃係数} (=1.012) \times \text{作業係数} (=1.2) \\ = 1.3$$

第5-2表 代表事象（乾式キャスク（タイプ2））（2/2）

設計 事象	供用 状態	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考
Ⅱ	B	検査架 台への 衝突時	・貯蔵架台への衝突時 ・横倒し時の衝突時 ・蓋の衝突時 ・緩衝体の衝突時	・胴内圧力 ・蓋間圧力 ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・側部中性子遮蔽材部圧力 ・底部中性子遮蔽材部圧力 ・ボルト初期締付力 ・検査架台への衝突時荷重^(注1) ・熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは検査架台への衝突時である。
試験 状態	試験 状態	試験時	—	・胴内圧力 ・自重 ・ボルト初期締付力	最高使用圧力の1.25 倍の圧力を密封容器圧力とする。

(注1) 乾式キャスク（タイプ2）に3.4gの慣性力（水平方向）を作用させた場合の荷重である。検査架台への衝突時に乾式キャスク（タイプ2）へ発生する加速度は、衝突物（乾式キャスク（タイプ2））の運動エネルギーが被衝突物（検査架台）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した値である。エネルギー保存則より、衝突物の運動エネルギーが被衝突物の変形エネルギーと釣り合うとして、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k' \delta^2$$

また、運動方程式より、

$$F = mgG_1 = k' \delta$$

以上より、

$$G_1 = \sqrt{\frac{k' V^2}{mg^2}}$$

$$= 3.4$$

ここで、

G_1 : 水平方向加速度係数(—)

k' : 被衝突物のバネ定数 ($=1.410 \times 10^9$ N/m)

V : 衝突物の衝突速度 ($=0.3$ m/s)

m : 衝突物の質量 ($=119400$ kg)

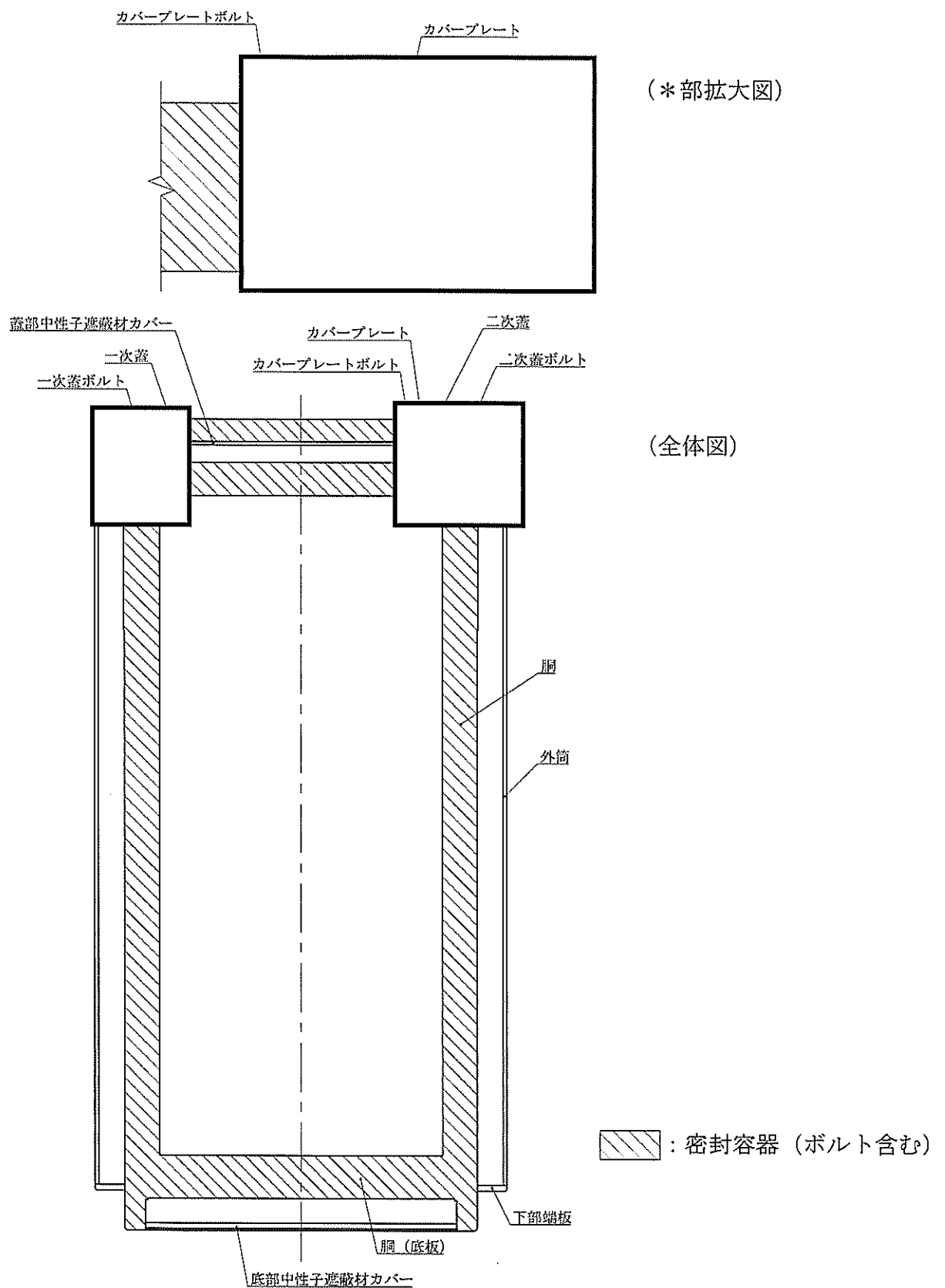
g : 重力加速度 ($=9.80665$ m/s²)

δ : 被衝突物の変形量 (m)

5.2 解析箇所

密封容器の応力評価を行う箇所は、次のとおりである。応力評価箇所を第5-1図に示す。

- (1) 胴
- (2) 胴（底板）
- (3) 一次蓋
- (4) 一次蓋（シール部）
- (5) 一次蓋ボルト
- (6) カバープレート
- (7) カバープレートボルト
- (8) 二次蓋
- (9) 二次蓋（シール部）
- (10) 二次蓋ボルト



第 5-1 図 密封容器の応力評価箇所

5.3 形状及び寸法

応力評価を行う部位の形状及び寸法は、強度計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算及び疲労解析に使用する材料の物性値を第5-3表に示す。

第 5-3 表 応力計算に使用する材料の物性値 (1/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	縦弾性 係数 (MPa)	平均 熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm・°C))	ポアソン 比 (-)
胴 胴 (底板) 一次蓋 二次蓋	炭素鋼 (GLF1)	20	202000	11.50	0.3
		25			
		50		11.80	
		75		11.90	
		100	198000	12.10	
		125		12.30	
		150	195000	12.40	
		175		12.60	
		200	192000	12.70	
底部中性子遮蔽材 カバー 下部端板 カバープレート	ステンレス鋼 (SUS304)	20	195000	15.30	0.3
		25			
		50		15.60	
		75		15.90	
		100	189000	16.10	
		125		16.40	
		150	186000	16.60	
		175		16.80	
		200	183000	17.00	
外筒 蓋部中性子遮蔽材 カバー	炭素鋼 (SGV480)	20	202000	11.50	0.3
		25			
		50		11.80	
		75		11.90	
		100	198000	12.10	
		125		12.30	
		150	195000	12.40	
		175		12.60	
		200	192000	12.70	

第 5-3 表 応力計算に使用する材料の物性値 (2/2)

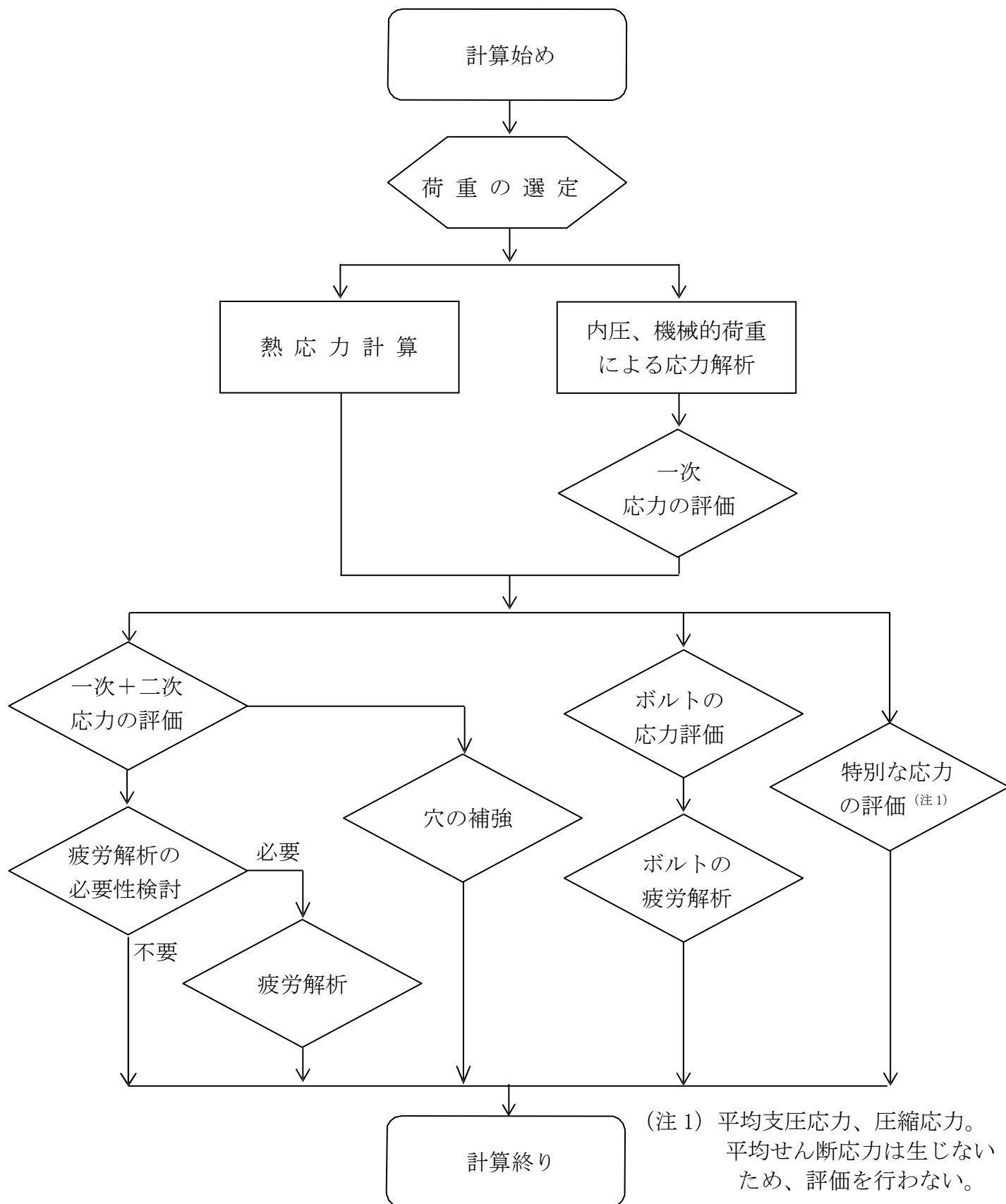
構成部材	材料	温度 (°C)	縦弾性 係数 (MPa)	平均 熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm $\cdot$ °C))	ポアソン 比 (-)
一次蓋ボルト 二次蓋ボルト カバープレート ボルト	合金鋼 (SNB23-3)	20	191000	11.50	0.3
		25			
		50		11.80	
		75		11.90	
		100	187000	12.10	
		125		12.30	
		150	184000	12.40	
		175		12.60	
		200	181000	12.70	
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630)	20	196000	11.10	0.3
		25			
		50		11.20	
		75		11.30	
		100	191000	11.40	
		125		11.40	
		150	188000	11.50	
		175		11.60	
		200	184000	11.60	

6. 応力解析

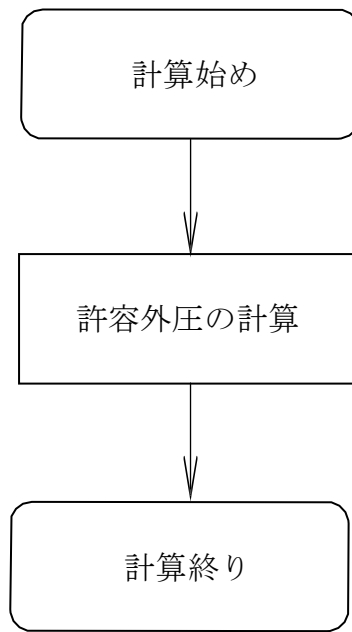
6.1 応力算出の概要

密封容器の応力評価フローを第6-1図に示す。密封容器の応力評価は、想定される圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重を基に、密封容器及び外筒等の実形状をモデル化し、解析コードであるABAQUSを用いて行う。ABAQUSは、有限要素法に基づく伝熱解析、応力解析の汎用解析コードである。また、カバープレート、カバープレートボルト及び胴（底板）（平均支圧応力のみ）の応力評価は、応力評価式を用いて行う。

また、外面に圧力を受ける密封容器の評価フローを第6-2図に示す。外面に圧力を受ける密封容器の評価は、応力評価式を用いて許容外圧の評価を行う。



第6-1図 密封容器の応力評価フロー



第6-2図 外面に圧力を受ける密封容器の評価フロー

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部位の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は、強度計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は以下の荷重を入力し行う。荷重条件として与えられるものは、次の3つである。

- a. 内圧
- b. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む乾式キャスクの設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

- c. 熱荷重

熱荷重は、密封容器に生じる温度変化、温度勾配による荷重をいう。密封容器の温度分布は各様態に応じた除熱解析で得られた温度分布結果を用いる。

(2) 解析モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては、密封容器の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは、三次元の180° 対称モデルとし、三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。また、モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件は強度計算書に示す。

(3) 応力評価位置については、令和2年11月30日付け原規規発第2011303号で承認を受けたMSF-32P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ1）の設計承認」という。）及び令和2年11月30日付け原規規発第2011304号で承認を受けたMSF-24P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ2）の設計承認」という。）と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。評価位置は強度計算書に示す。

(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

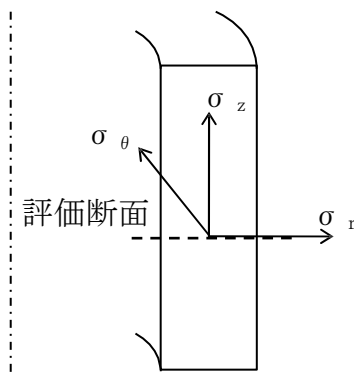
(5) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.3.2 応力の評価

応力の評価は、ABAQUSコードを用いた有限要素法及び機械工学便覧等による応力評価式により行う。評価の詳細は、強度計算書に示す。

応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を強度計算書に示す。なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

σ_r	: 半径方向の応力
σ_θ	: 円周方向の応力
σ_z	: 軸方向の応力
$\tau_{r\theta}$	: せん断応力
$\tau_{\theta z}$	: せん断応力
τ_{zr}	: せん断応力



(1) 密封容器（ボルトを除く。）の応力評価

密封容器の応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-1310に従い、以下の項目を評価する。

a. 一次応力強さ

金属キャスク構造規格 MCD-1311.1、MCD-1311.4、MCD-1318.1 及び MCD-1318.2に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

(i) 密封シール部以外

[設計条件、供用状態A及び供用状態B]

- ・一次一般膜応力強さ： $P_m \leq S_m$
- ・一次局部膜応力強さ： $P_L \leq 1.5S_m$
- ・一次膜＋一次曲げ応力強さ： $P_L + P_b \leq 1.5S_m$

[試験状態]

- ・一次一般膜応力強さ： $P_m \leq 0.9S_y$
- ・一次局部膜応力強さ： $P_L \leq 1.35S_y$
- ・一次膜＋一次曲げ応力強さ： $P_m + P_b \leq 1.35S_y$ ($P_m \leq 2/3S_y$ の場合)
 $: P_m + P_b \leq 2.15S_y - 1.2P_m$ ($P_m > 2/3S_y$ の場合)

(ii) 密封シール部

[供用状態A及び供用状態B]

- ・一次一般膜応力強さ： $P_m \leq S_y$
- ・一次局部膜応力強さ： $P_L \leq S_y$
- ・一次膜＋一次曲げ応力強さ： $P_L + P_b \leq S_y$

[試験状態]

- ・一次一般膜応力強さ： $P_m \leq 0.9S_y$
- ・一次局部膜応力強さ： $P_L \leq S_y$
- ・一次膜＋一次曲げ応力強さ： $P_L + P_b \leq S_y$

b. 一次＋二次応力強さ

金属キャスク構造規格 MCD-1312、MCD-1318.1及びMCD-1318.2に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

(i) 密封シール部以外

[供用状態A及び供用状態B]

- ・一次＋二次応力強さ： $P_L + P_b + Q \leq 3S_m$

(ii) 密封シール部

[供用状態A及び供用状態B]

- ・一次＋二次応力強さ： $P_L + P_b + Q \leq S_y$

[試験状態]

- ・一次＋二次応力強さ： $P_L + P_b + Q \leq S_y$

c. 疲労評価

金属キャスク構造規格 MCD-1314に基づき疲労評価を行う。なお、金属キャスク構造規格 MCD-1332に示される疲労解析不要の条件に適合する部位については、疲労解析を行わない。

また、疲労評価における繰り返し回数は以下のとおりとする。

- ・燃料装荷及び取出し：10回（燃料装荷及び取出しサイクルは通常1回であるが、保守側に10回とする。）
- ・吊上げ：200回（燃料装荷から取出しまでの一連の作業における吊上げ回数を20回と想定し、上記の燃料装荷及び取出し回数を10回とすることを踏まえ、200回と設定する。）
- ・検査架台衝突：3回（燃料装荷から取出しまでの一連の作業における検査架台への衝突は、複数の作業員による確認及び国内実績から想定されないが、保守側に3回と想定する。）
- ・貯蔵期間中の使用済燃料の崩壊熱低下による温度変動：10回（1回の貯蔵において1回の温度低下を想定し、上記の燃料装荷及び取出し回数を保守側に10回とすることを踏まえ、同じ回数に設定する。）

d. 特別な応力の検討

(a) 平均支圧応力の評価

金属キャスク構造規格 MCD-1316.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A及び供用状態B]

・平均支圧応力： $\sigma_p \leq S_y$

(支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値)

(b) 圧縮応力の評価

金属キャスク構造規格 MCD-1317に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A及び供用状態B]

・圧縮応力： $\sigma_c \leq \text{MIN}[S_m, B]$

(2) ボルトの応力評価

一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及びカバープレートボルトの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-1320に基づき以下の項目を評価する。

a. 平均引張応力及び平均引張応力+曲げ応力

金属キャスク構造規格 MCD-1321.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[設計条件]

・平均引張応力： $\sigma_m \leq S_m$

[供用状態A及び供用状態B]

・平均引張応力： $\sigma_m \leq 2S_m$

・平均引張応力+曲げ応力： $\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$

b. 疲労評価

金属キャスク構造規格 MCD-1322に基づき疲労評価を行う。疲労評価における繰返し回数は、6.3.2 (1) c. と同じとする。

(3) 外面に圧力を受ける密封容器の評価

外面に圧力を受ける密封容器の評価は、金属キャスク構造規格 MCD-1410に基づき、外面に圧力を受ける円筒形の胴として、以下の項目を評価する。

[供用状態A及び供用状態B]

・外面に受ける圧力： $P \leq P_a$

$$P_a = \frac{4Bt}{3D_0} \quad (t \leq 0.1D_0 \text{ の場合})$$

$$P_a = \text{MIN}[P_{a1}, P_{a2}] \quad (t > 0.1D_0 \text{ の場合})$$

$$P_{a1} = \left(\frac{2.167t}{D_0} - 0.0833 \right) B$$

$$P_{a2} = \frac{2St}{D_0} \left(1 - \frac{t}{D_0} \right)$$

ここで、

P_a : 許容外圧 (MPa)

B : 金属キャスク構造規格の別図7-1及び別図7-2から求めた値 (MPa)

t : 胴の厚さ (mm)

D_0 : 胴の外径 (mm)

S : $1.5S_m$ と $0.9S_y$ の小さい方 (MPa)

6.3.3 許容基準

密封容器の許容基準は、6.3.2項に示すとおり設定する。ここで、許容応力は、除熱解析結果を基に各部位で設定する温度に対応した値とする。各部位の許容応力値を定める温度を第6-1表及び第6-2表に示す。また、許容応力値を定める温度に対応する機械的強度を第6-3表及び第6-4表に示す。

さらに、第6-3表及び第6-4表に示す機械的強度から求められる許容基準を第6-5表に示す。なお、許容応力は、(一社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) JSME S NJ1-2012」による。

第 6-1 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)		
	設計時 ^(注 2) 貯蔵時	吊上げ時 ^(注 3) 検査架台への衝突時	試験時 ^(注 4)
胴	140	125	20
胴（フランジ部）	120	120	
胴（底板）	150	140	
一次蓋	115	120	
二次蓋	105	110	—
一次蓋ボルト	115	115	
二次蓋ボルト	105	110	
カバープレート ^(注 1)	115	120	20
カバープレートボルト ^(注 1)	115	120	—

(注1) カバープレート及びカバープレートボルトの温度は、一次蓋の温度と同じとする。

(注2) 設計時及び貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注3) 吊上げ時及び検査架台衝突時は三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時及び検査架台衝突時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

(注4) 耐圧試験は常温で実施するため、試験時の許容応力値を定める温度は、常温とする。

第 6-2 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)		
	設計時 ^(注 2) 貯蔵時	吊上げ時 ^(注 3) 検査架台への衝突時	試験時 ^(注 4)
胴	145	130	20
胴（フランジ部）	120	120	
胴（底板）	155	140	
一次蓋	115	115	
二次蓋	105	110	—
一次蓋ボルト	115	115	
二次蓋ボルト	110	110	
カバープレート ^(注 1)	115	115	20
カバープレートボルト ^(注 1)	115	115	—

(注1) カバープレート及びカバープレートボルトの温度は、一次蓋の温度と同じとする。

(注2) 設計時及び貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注3) 吊上げ時及び検査架台衝突時は三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時及び検査架台衝突時の許容応力値を定める温度は、「乾式キャスク（タイプ2）の設計承認」で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

(注4) 耐圧試験は常温で実施するため、試験時の許容応力値を定める温度は、常温とする。

第 6-3 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	設計応力 強さ S _m (MPa)	設計降伏点 S _y (MPa)	設計引張 強さ S _u (MPa)
胴	炭素鋼 (GLF1)	140	122	183	377
		125	124	185	377
胴（フランジ部）		120	124	185	377
胴（底板）		150	122	183	377
		140	122	183	377
一次蓋		115	124	185	377
		120	124	185	377
二次蓋		105	124	186	377
		110	124	186	377
—（注 1）		20	138	207	414
一次蓋ボルト	合金鋼 (SNB23-3)	115	281	846	921
二次蓋ボルト		105	283	850	927
		110	282	848	924
カバープレート ボルト		115	281	846	921
		120	281	844	918
カバープレート	ステンレス鋼 (SUS304)	115	137	164	435
		120	137	162	433
—（注 1）		20	137	205	520

（注1）試験状態の温度に対応する機械的強度を示す。

第 6-4 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	設計応力 強さ S _m (MPa)	設計降伏点 S _y (MPa)	設計引張 強さ S _u (MPa)
胴	炭素鋼 (GLF1)	145	122	183	377
		130	123	184	377
胴（フランジ部）		120	124	185	377
胴（底板）		155	121	182	377
		140	122	183	377
一次蓋		115	124	185	377
二次蓋		105	124	186	377
		110	124	186	377
—（注 1）		20	138	207	414
一次蓋ボルト	合金鋼 (SNB23-3)	115	281	846	921
二次蓋ボルト		110	282	848	924
カバープレート ボルト		115	281	846	921
カバープレート	ステンレス鋼 (SUS304)	115	137	164	435
—（注 1）		20	137	205	520

(注1) 試験状態の温度に対応する機械的強度を示す。

第 6-5 表 許容応力値(1/10)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		胴（シール部、底板以外）		
			許容応力値		許容応力
			乾式 キャスク (タイプ 1)	乾式 キャスク (タイプ 2)	
設計条件	一次一般膜応力強さ	P_m	122	122	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	183	183	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	183	183	$1.5S_m$
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	122	122	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	183	183	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	183	183	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	366	366	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	183	183	S_y (注 2)
	圧縮応力 (注 1)	σ_c	90	90	Min (S_m , B)
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台へ の衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	124	123	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	184	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	184	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	372	369	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	185	184	S_y (注 2)
	圧縮応力 (注 1)	σ_c	90	90	Min (S_m , B)
試験状態 (常温)	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	$0.9S_y$
	一次局部膜応力強さ	P_L	279	279	$1.35S_y$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	279	279	$1.35S_y$ (注 3)

(注1) 円筒形の軸方向の圧縮に対して適用する。

(注2) 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

(注3) $P_m \leq 2/3S_y$ のときの値

第 6-5 表 許容応力値 (2/10)

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力の種類		胴 (底板)		
			許容応力値		許容応力
			乾式 キャスク (タイプ 1)	乾式 キャスク (タイプ 2)	
設計条件	一次一般膜応力強さ	P_m	122	121	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	183	181	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	183	181	$1.5S_m$
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	122	121	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	183	181	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	183	181	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	366	363	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	183	182	S_y (注 1)
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台へ の衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	122	122	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	183	183	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	183	183	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	366	366	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	183	183	S_y (注 1)
試験状態 (常温)	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	$0.9S_y$
	一次局部膜応力強さ	P_L	279	279	$1.35S_y$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	279	279	$1.35S_y$ (注 2)

(注1) 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

(注2) $P_m \leq 2/3S_y$ のときの値

第 6-5 表 許容応力値 (3/10)

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力の種類		胴 (シール部)		
			許容応力値		許容応力
			乾式 キャスク (タイプ 1)	乾式 キャスク (タイプ 2)	
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	185	185	S_y
	一次局部膜応力強さ	P_L	185	185	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	185	185	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	185	185	S_y
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台への衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	185	185	S_y
	一次局部膜応力強さ	P_L	185	185	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	185	185	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	185	185	S_y
試験状態 (常温)	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	$0.9S_y$
	一次局部膜応力強さ	P_L	207	207	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	207	207	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	207	207	S_y

第 6-5 表 許容応力値(4/10)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		一次蓋（シール部以外）		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
設計条件	一次一般膜応力強さ	P_m	124	124	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	$1.5S_m$
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	124	124	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	372	372	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	185	185	S_y (注 1)
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台 への衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	124	124	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	372	372	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	185	185	S_y (注 1)
試験状態 (常温)	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	$0.9S_y$
	一次局部膜応力強さ	P_L	279	279	$1.35S_y$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	279	279	$1.35S_y$ (注 2)

(注1) 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

(注2) $P_m \leq 2/3S_y$ のときの値

第 6-5 表 許容応力値 (5/10)

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力の種類		一次蓋 (シール部)		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	185	185	S_y
	一次局部膜応力強さ	P_L	185	185	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	185	185	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	185	185	S_y
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台 への衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	185	185	S_y
	一次局部膜応力強さ	P_L	185	185	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	185	185	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	185	185	S_y
試験状態 (常温)	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	$0.9S_y$
	一次局部膜応力強さ	P_L	207	207	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	207	207	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	207	207	S_y

第 6-5 表 許容応力値 (6/10)

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力の種類		カバープレート		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
設計条件	一次一般膜応力強さ	P_m	137	137	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	205	205	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	205	205	$1.5S_m$
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	137	137	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	205	205	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	205	205	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	411	411	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	164	164	S_y (注 1)
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台 への衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	137	137	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	205	205	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	205	205	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	411	411	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	162	164	S_y (注 1)
試験状態 (常温)	一次一般膜応力強さ	P_m	184	184	$0.9S_y$
	一次局部膜応力強さ	P_L	276	276	$1.35S_y$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	276	276	$1.35S_y$ (注 2)

(注1) 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

(注2) $P_m \leq 2/3S_y$ のときの値

第 6-5 表 許容応力値(7/10)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		二次蓋（シール部以外）		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
設計条件	一次一般膜応力強さ	P_m	124	124	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	$1.5S_m$
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	一次一般膜応力強さ	P_m	124	124	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	372	372	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	186	186	S_y (注 1)
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台 への衝突時)	一次一般膜応力強さ	P_m	124	124	S_m
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	$1.5S_m$
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	$1.5S_m$
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	372	372	$3S_m$
	平均支圧応力	σ_p	186	186	S_y (注 1)

(注1) 支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の値

第 6-5 表 許容応力値(8/10)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		二次蓋（シール部）		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク （タイプ 1）	乾式キャスク （タイプ 2）	
供用状態 A 及び B （貯蔵時）	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	S_y
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	186	186	S_y
供用状態 A 及び B （吊上げ時） （検査架台 への衝突時）	一次一般膜応力強さ	P_m	186	186	S_y
	一次局部膜応力強さ	P_L	186	186	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ	$P_L + P_b$	186	186	S_y
	一次＋二次応力強さ	$P_L + P_b + Q$	186	186	S_y

第 6-5 表 許容応力値 (9/10)

(単位 : MPa)

許容応力 区分	応力の種類		一次蓋ボルト カバープレートボルト		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
設計条件	平均引張応力	σ_m	281	281	S_m
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	平均引張応力	σ_m	562	562	$2S_m$
	平均引張応力 + 曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	843	843	$3S_m$
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台 への衝突時)	平均引張応力	σ_m	562	562	$2S_m$
	平均引張応力 + 曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	843	843	$3S_m$

第 6-5 表 許容応力値(10/10)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類		二次蓋ボルト		
			許容応力値		許容応力
			乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)	
設計条件	平均引張応力	σ_m	283	282	S_m
供用状態 A 及び B (貯蔵時)	平均引張応力	σ_m	566	564	$2S_m$
	平均引張応力＋曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	849	846	$3S_m$
供用状態 A 及び B (吊上げ時) (検査架台 への衝突時)	平均引張応力	σ_m	564	564	$2S_m$
	平均引張応力＋曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	846	846	$3S_m$

バスケットの強度計算方法

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-2-2

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-3-2-2-1
2. 適用基準	資10-3-2-2-1
3. 記号の説明	資10-3-2-2-2
4. 設計条件	資10-3-2-2-4
4.1 基本仕様	資10-3-2-2-4
4.2 設計事象	資10-3-2-2-5
4.3 荷重の種類とその組合せ	資10-3-2-2-10
5. 計算条件	資10-3-2-2-11
5.1 解析対象とする事象	資10-3-2-2-11
5.2 解析箇所	資10-3-2-2-12
5.3 形状及び寸法	資10-3-2-2-18
5.4 物性値	資10-3-2-2-18
6. 応力解析の手順	資10-3-2-2-19
6.1 解析手順の概要	資10-3-2-2-19
6.2 荷重条件の選定	資10-3-2-2-20
6.3 応力計算と評価	資10-3-2-2-20

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、乾式キャスクのバスケットが十分な強度を有することを確認するための方法について説明するものである。

2. 適用基準

バスケットの強度評価については、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、金属キャスク構造規格のバスケットの評価を参考とし、令和2年11月30日付け原規規発第2011303号で承認を受けたMSF-32P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ1）の設計承認」という。）及び令和2年11月30日付け原規規発第2011304号で承認を受けたMSF-24P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ2）の設計承認」という。）で承認を受けた評価に準じた評価を行う。なお、評価事象の供用状態の分類については金属キャスク構造規格に準拠する。

3. 記号の説明

バスケットの強度評価に用いる記号について以下に説明する。

記号	単位	定 義
A_1	mm^2	評価位置①の断面積
A_2	mm^2	評価位置②の断面積
A_3	mm^2	評価位置③の断面積
b_1	mm	バスケットプレート幅 1
b_2	mm	バスケットプレート幅 2
b_3	mm	バスケットプレート幅 3
F	N	評価位置③に発生する荷重
f_c	MPa	許容圧縮応力
g	m/s^2	重力加速度
G_1	—	水平方向加速度係数
G_2	—	鉛直方向加速度係数
h_1	mm	バスケットプレート高さ 1
h_2	mm	バスケットプレート高さ 2
K_0	—	制限係数
L	mm	バスケットプレート長さ
M	$\text{N}\cdot\text{mm}$	評価位置③に発生する曲げモーメント
m_1	kg	バスケット重量
m_2	kg	第5-2図(1/2)に示す領域Ⅰ及びⅡに含まれるバスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の合計重量
N	—	バスケットプレートの段数
P_b	MPa	一次曲げ応力強さ
P_m	MPa	一次一般膜応力強さ
S	MPa	許容引張応力
S_m	MPa	設計応力強さ
S_y	MPa	設計降伏点
S_u	MPa	設計引張強さ
w	kg/mm	第5-2図(2/2)に示す領域Ⅲに含まれるバスケットプレート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の単位長さ当たりの重量
Z	mm^3	評価位置③の断面係数
α	—	純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれか小さい方の値

記号	単位	定 義
F	MPa	MIN[0.7S _u , S _y]により定まる値
λ	－	有効細長比
Λ	－	限界細長比
ν	－	係数
σ_{bH}	MPa	水平方向加速度により発生する曲げ応力
σ_c	MPa	圧縮応力
σ_{mH}	MPa	水平方向加速度により発生する一次一般膜応力
σ_{mV}	MPa	鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力
τ	MPa	平均せん断応力
τ_H	MPa	水平方向加速度により発生するせん断応力

4. 設計条件

バスケットは、以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

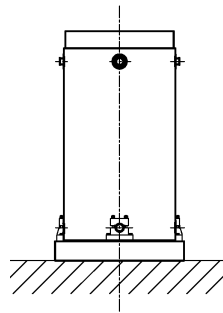
バスケットの基本仕様を第4-1表に示す。

第 4-1 表 バスケットの基本仕様

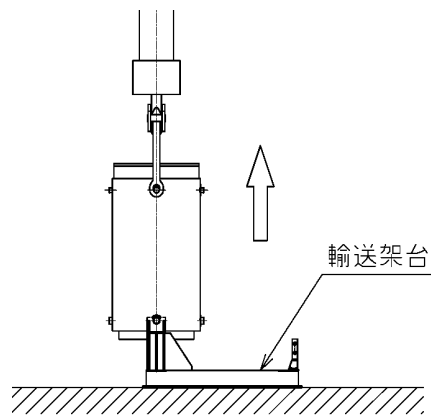
		乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
		アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	
材質	バスケット		

4.2 設計事象

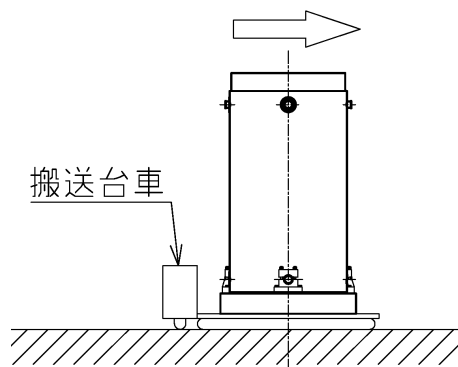
資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」と同様に、バスケットに係る設計上考慮する事象として、燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における状態から選定事象を抽出し、その様態図を第4-1図に示す。また、第4-2表に各選定事象を金属キャスク構造規格 解説 MGB-1300を参考として、設計事象及び供用状態に分類した結果を示す。



(a) 貯蔵時

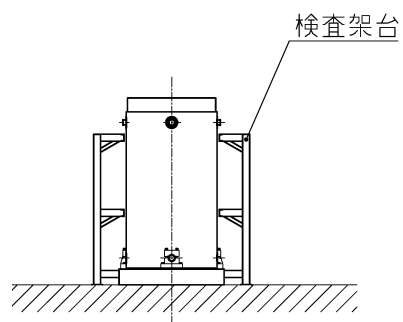


(b) 吊上げ時

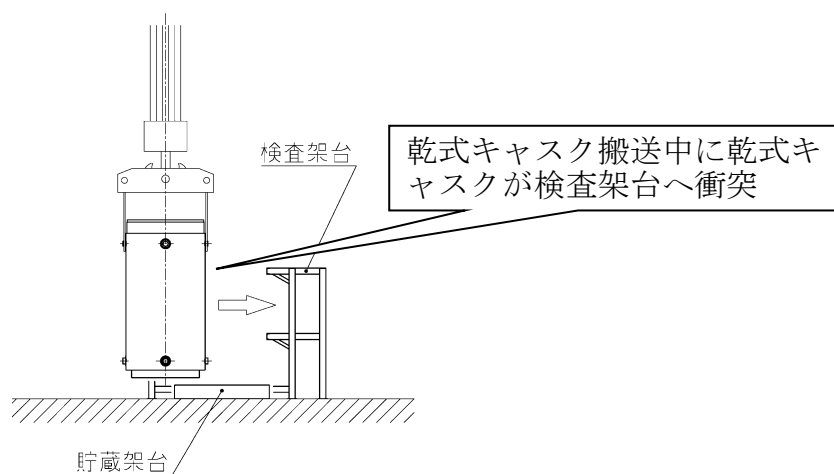


(c) 台車搬送時

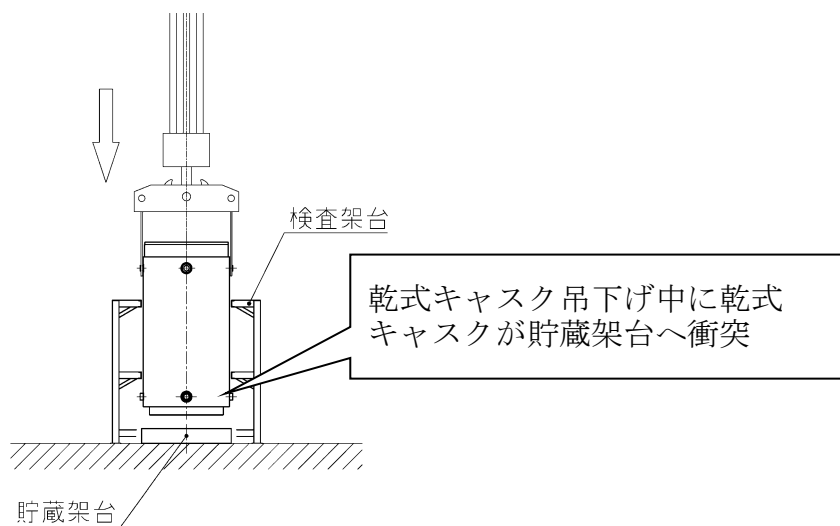
第4-1図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (1/3)



(d) 準備作業時

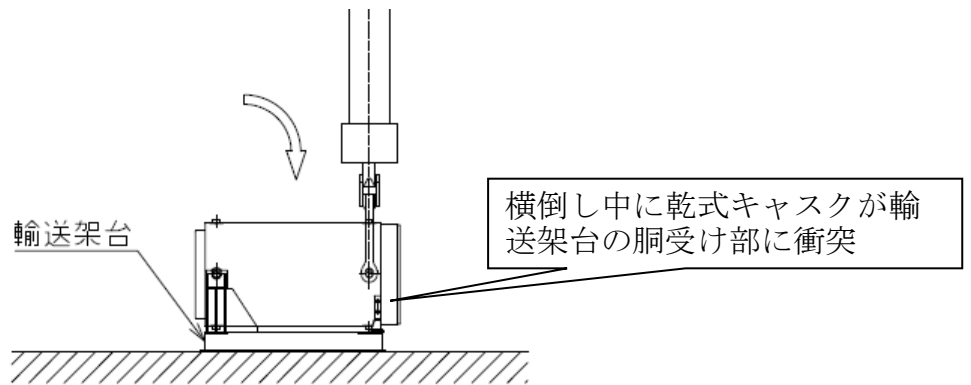


(e) 検査架台への衝突

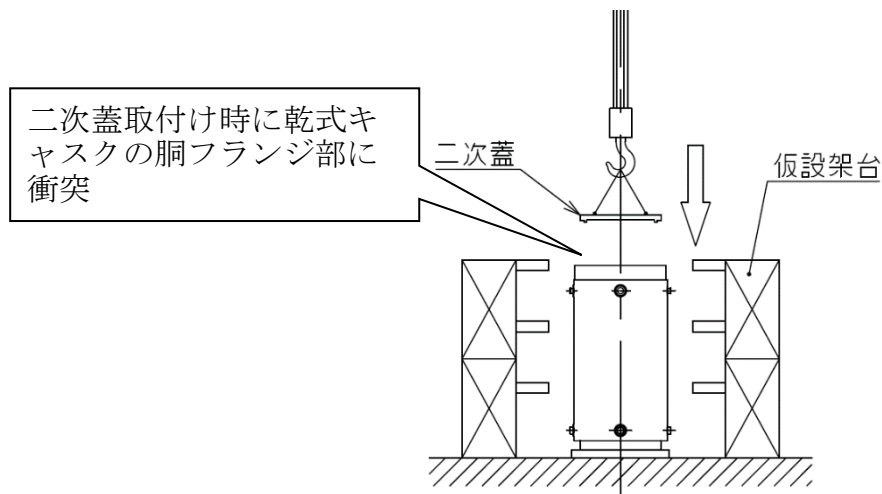


(f) 貯蔵架台への衝突

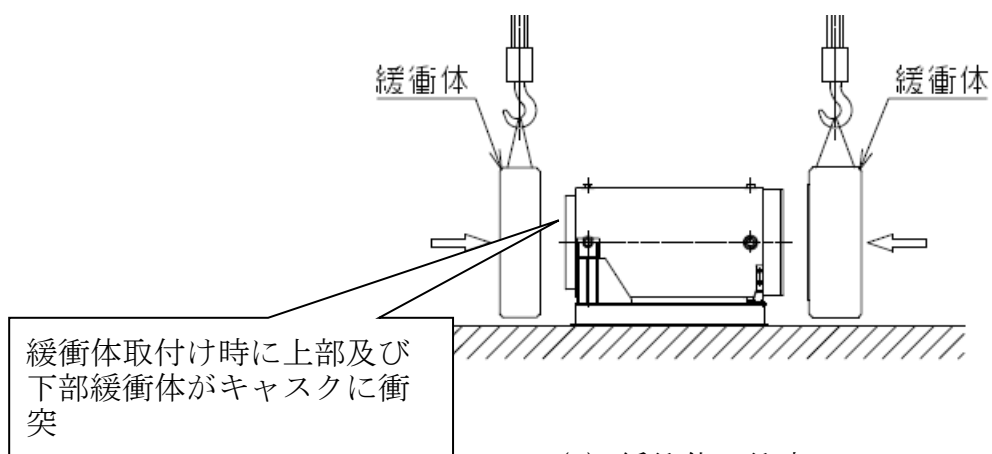
第 4-1 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (2/3)



(g) 横倒し時の衝突



(h) 二次蓋の衝突（燃料取扱棟内）



(i) 緩衝体の衝突

第 4-1 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (3/3)

第 4-2 表 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象

設計事象	供用状態	燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における 選定事象
I	A	・ 貯蔵（貯蔵時）（第 4-1 図(a)） ・ 乾式キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時）（第 4-1 図(b)） ・ 搬送台車による搬送（台車搬送時）（第 4-1 図(c)） ・ 貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）（第 4-1 図(d)）
II	B	・ 乾式キャスクの検査架台への衝突（検査架台への衝突時）（第 4-1 図(e)） ・ 乾式キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時）（第 4-1 図(f)） ・ 乾式キャスクのたて起こし架台への衝突（横倒し時の衝突時）（第 4-1 図(g)） ・ 二次蓋の乾式キャスクへの衝突（蓋の衝突時）（第 4-1 図(h)） ・ 緩衝体の乾式キャスクへの衝突（緩衝体の衝突時）（第 4-1 図(i)）

4.3 荷重の種類とその組合せ

金属キャスク構造規格の解説表MCD-2100-1を参考に、バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は応力計算書に記載する。

第 4-3 表 バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計荷重 供用状態 評価事象 荷 重			ボルト初期締付け力	自重による荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
Ⅰ	A (注1)	貯蔵時	— (注3)	○	—	—	— (注4)
		吊上げ時	— (注3)	— (注2)	○	—	— (注4)
Ⅱ	B (注1)	検査架台への衝突時	— (注3)	—	—	○	— (注4)

(注1) 評価事象の中で、他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

(注2) 本状態での自重による荷重は、吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

(注3) バスケットの構造材としてボルトを使用していないため、ボルト初期締付け力は入力しない。

(注4) バスケットは、バスケット同士又は胴により拘束されないため、熱荷重は発生しない。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2 項で示した燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象のうち、第5-1表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について評価を実施する。

第5-1表 代表事象

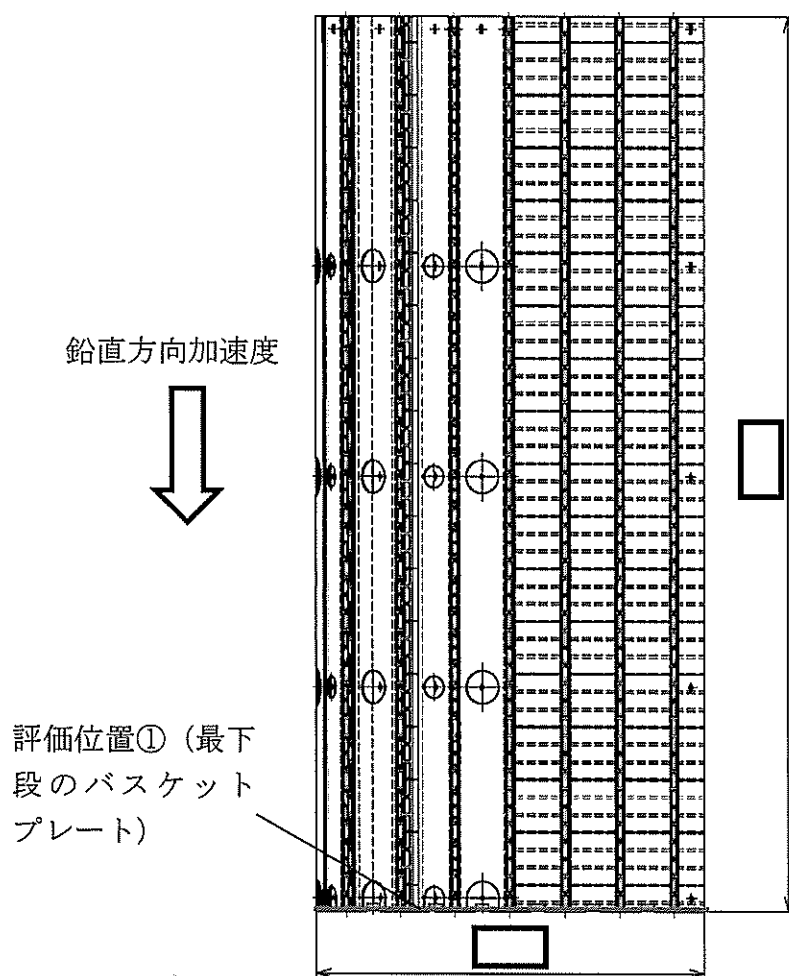
設計事象	供用状態	代表事象 (注1)	包絡される事象	荷重条件	備考
I	A	貯蔵時	—	・自重	供用状態 A のうち大半の期間を占める代表的事象。
		吊上げ時	・台車搬送時 ・準備作業時	・吊上げ荷重 ^(注1)	荷重条件が最も厳しいのは吊上げ時である。
II	B	検査架台への衝突時	・貯蔵架台への衝突時 ・横倒し時の衝突時 ・蓋の衝突時 ・緩衝体の衝突時	・検査架台への衝突時荷重 ^(注2)	荷重条件が最も厳しいのは検査架台への衝突時である。

(注1) 乾式キャスクに1.3gの慣性力（下方向）を作用させた場合の荷重である。慣性力の根拠は、資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に示す。

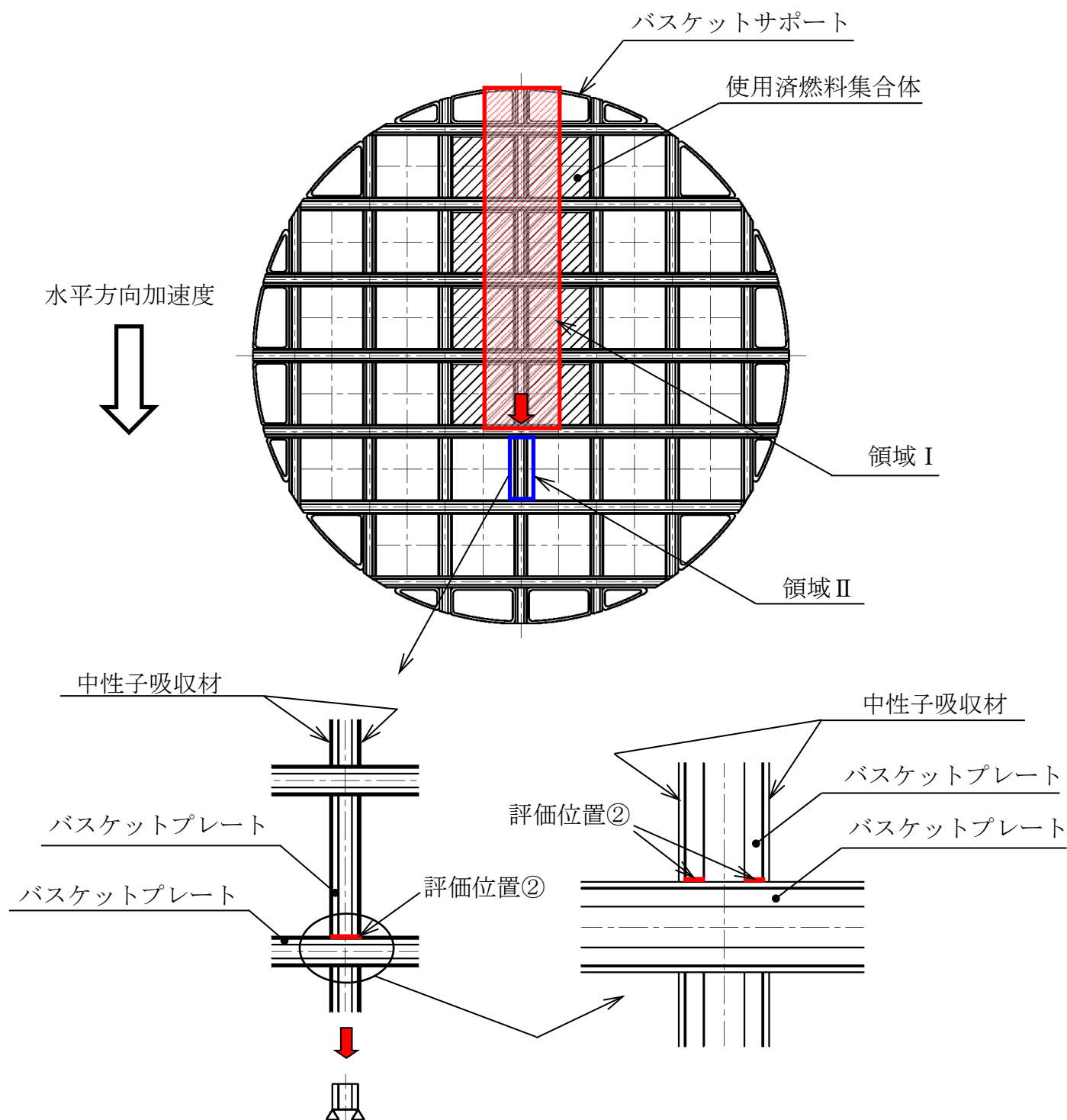
(注2) 乾式キャスクに3.4gの慣性力（水平方向）を作用させた場合の荷重である。慣性力の根拠は、資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に示す。

5.2 解析箇所

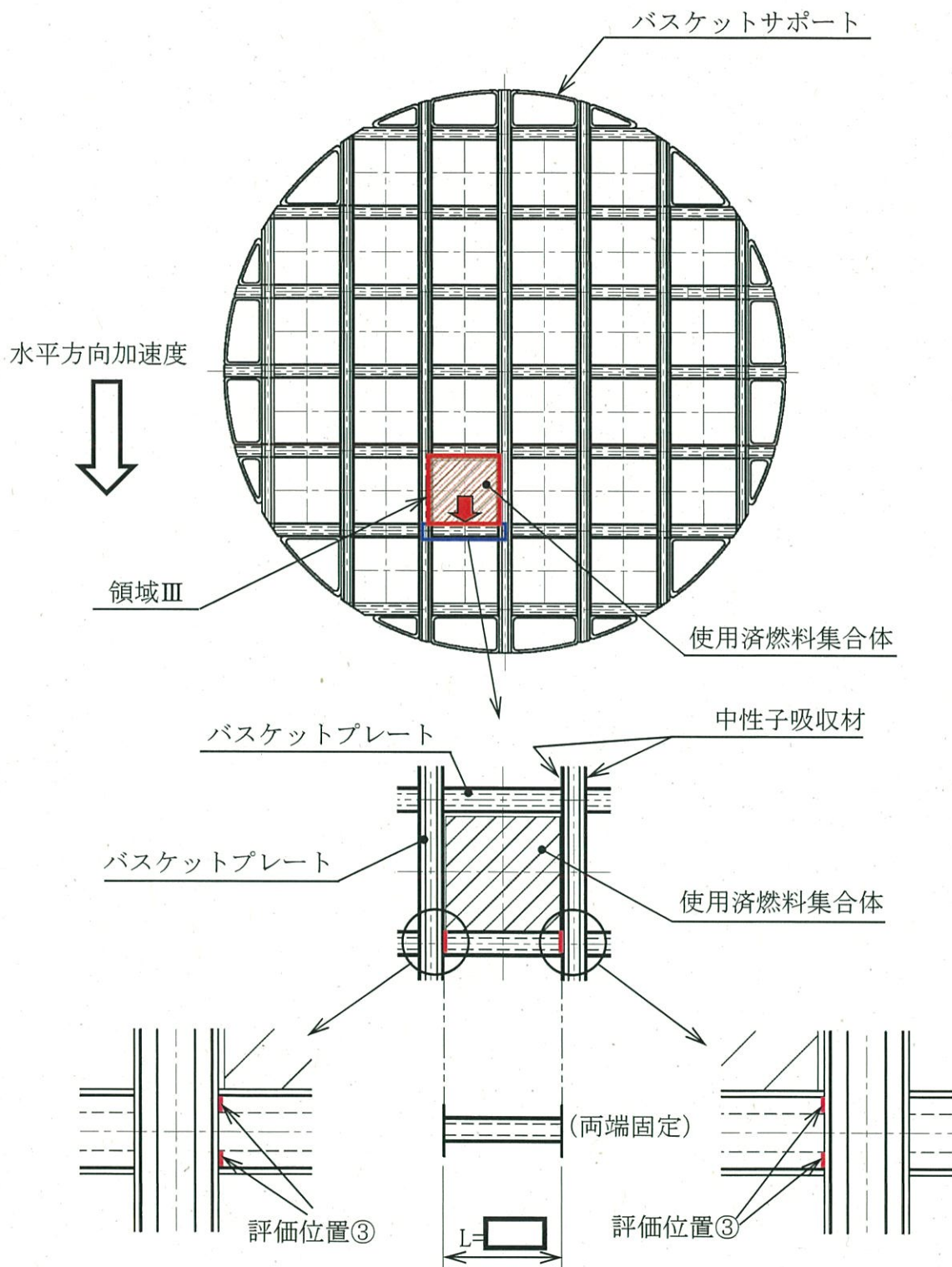
バスケットの応力評価を行う箇所は、次のとおりである。応力評価箇所を第5-1図から第5-4図に示す。なお、応力評価箇所は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同じである。



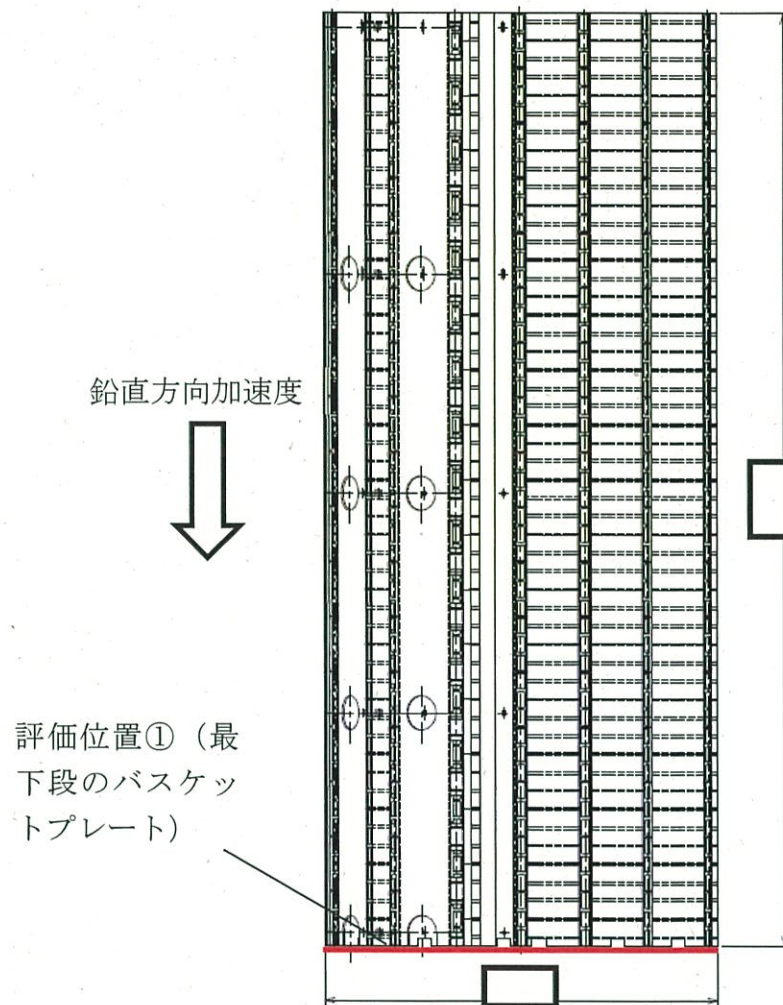
第 5-1 図 鉛直方向加速度に対するバスケットプレートの応力評価位置
乾式キャスク（タイプ 1）



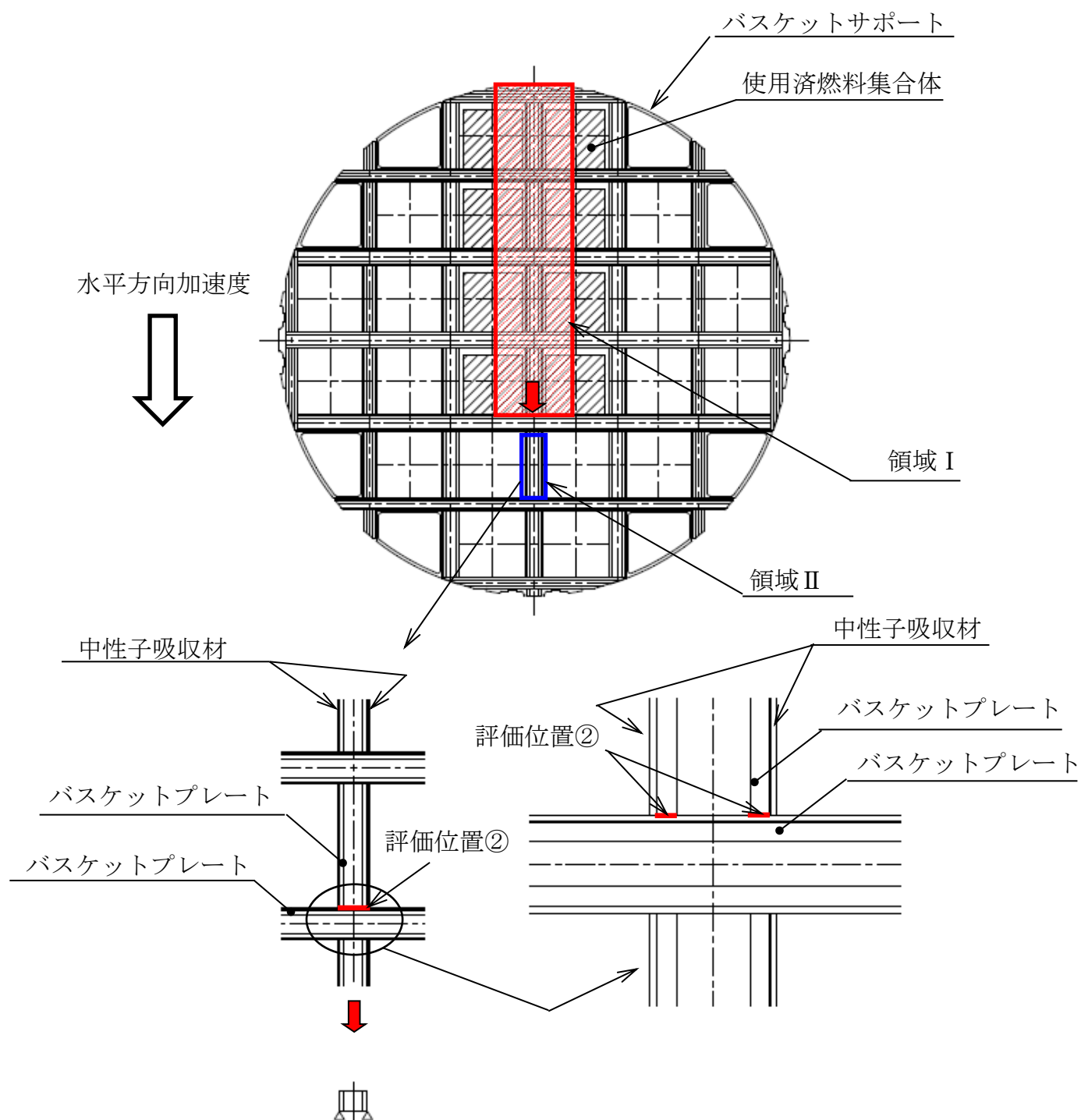
第 5-2 図 水平方向加速度に対するバスケットプレートの応力評価位置
乾式キャスク（タイプ 1）（1/2）



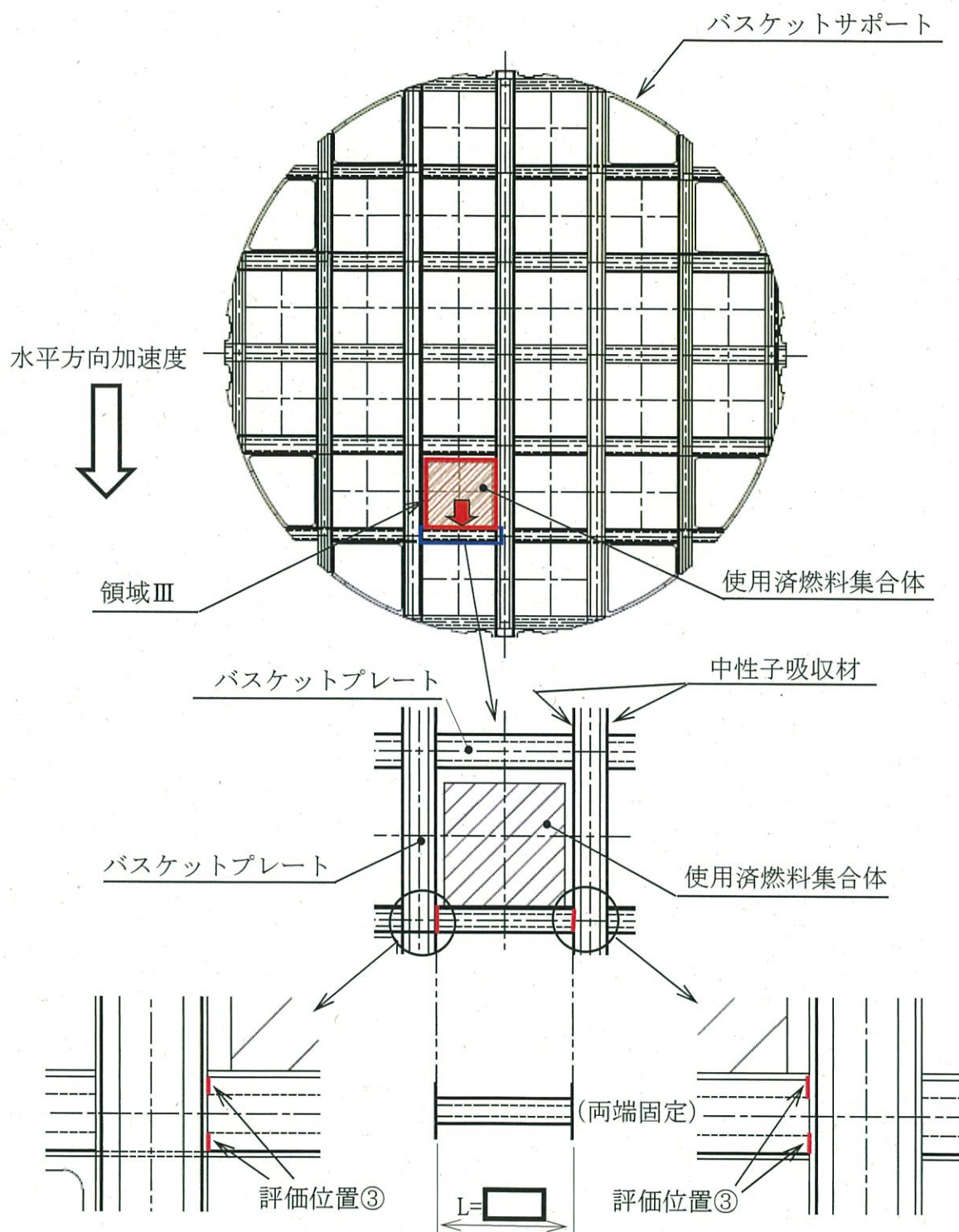
第5-2図 水平方向加速度に対するバスケットプレートの応力評価位置
乾式キャスク（タイプ1）（2/2）



第 5-3 図 鉛直方向加速度に対するバスケットプレートの応力評価位置
乾式キャスク (タイプ 2)



第 5-4 図 水平方向加速度に対するバスケットプレートの応力評価位置
乾式キャスク（タイプ 2）（1/2）



第 5-4 図 水平方向加速度に対するバスケットプレートの応力評価位置
乾式キャスク（タイプ 2）（2/2）

5.3 形状及び寸法

応力評価を行う部位の形状及び寸法は、強度計算書に示す。

5.4 物性値

応力評価に使用する材料の物性値を第5-3表に示す。使用する材料の物性値は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同じである。

第 5-3 表 応力評価に使用する材料の物性値

構成部材	材料	温度 (°C)	縦弾性 ^(注1) 係数 (MPa)
バスケット プレート	アルミニウ ム合金 (MB-A3004 -H112)	20	73900
		50	73300
		75	72800
		100	72100
		125	71400
		150	70600
		175	69800
		200	68900

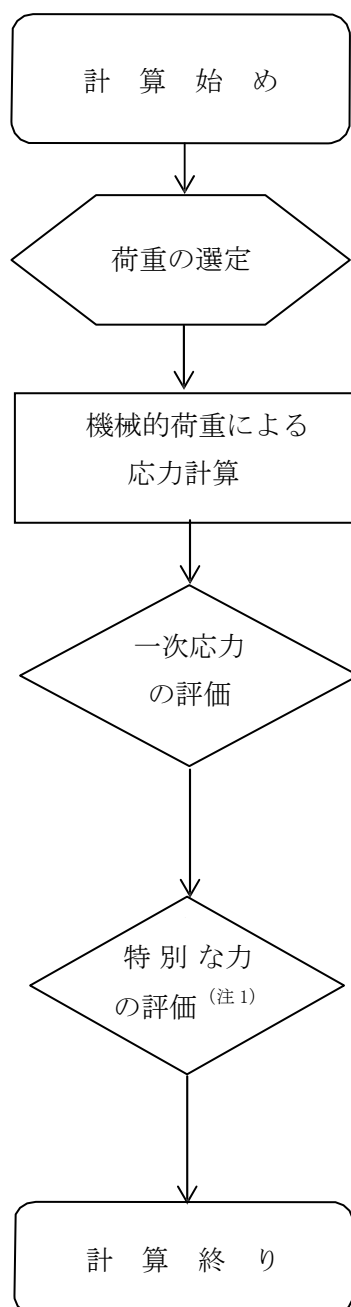
(注1) 圧縮応力の許容応力値の計算に使用。

6. 応力解析の手順

6.1 解析手順の概要

バスケットの応力評価フローを第6-1図に示す。

バスケットの応力評価は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認で示す評価事象と本書での評価事象において、荷重が作用する方向や荷重が作用する位置は同じであるため、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認で示す評価方法と同様に、想定される機械的荷重を基に、応力評価式を用いて行う。



(注1) せん断応力、圧縮応力。
なお、バスケットには、
局所的な支圧荷重は発生
しないため支圧応力は評
価不要である。

第6-1図 バスケットの応力評価フロー

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部位の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは以下の通りである。

a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

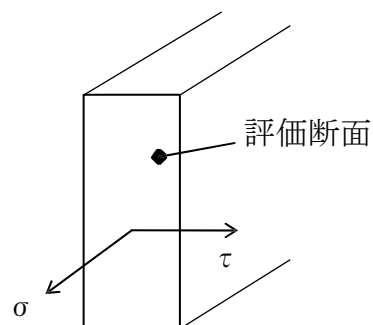
(2) 応力評価位置は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。評価位置は強度計算書に示す。

6.3.2 応力の評価

応力の評価は機械工学便覧等による応力評価式により行う。評価の詳細は、強度計算書に示す。

応力の計算結果は、「金属キャスク構造規格」MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力
 τ : せん断応力



バスケットの応力評価は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認を参考に、以下の項目を評価する。なお、各設計承認においては、輸送時に想定される短期的な荷重について評価を行っており、吊上げ時及び検査架台への衝突時については各設計承認と同様に評価する。貯蔵時の評価項目については、各設計承認と同じバスケット材料を用い平成29年9月26日付け原規規発第1709261号にて型式設計特定容器等の型式指定において指定を受けた長期荷重による応力評価と同様の評価を行う。

[供用状態 A（貯蔵時）]

- ・一次一般膜応力強さ： $P_m \leq S$
- ・一次一般膜＋一次曲げ応力強さ： $P_m + P_b \leq K_0 S$
- ・せん断応力： $\tau \leq 0.6 S$
- ・圧縮応力： $\sigma_c \leq f_c$

(f_c の算出式は[供用状態A及び供用状態B（吊上げ時）（検査架台への衝突時）]と同様)

[供用状態 A 及び供用状態 B（吊上げ時）（検査架台への衝突時）]

- ・一次一般膜応力強さ： $P_m \leq S_m$
- ・一次一般膜＋一次曲げ応力強さ： $P_m + P_b \leq \alpha S_m$
- ・せん断応力： $\tau \leq 0.6 S_m$
- ・圧縮応力： $\sigma_c \leq f_c \left(= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v} \right)$

ここで、

F : $\text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ により定まる値

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

6.3.3 許容基準

バスケットの許容基準は、6.3.2項に示すとおり設定する。ここで、許容応力は、除熱解析結果を基にバスケットで設定する温度に対応した値とする。バスケットの許容応力値を定める温度を第6-1表及び第6-2表に示す。また、許容応力値を定める温度に対応する機械的強度を第6-3表に示す。この値は、別紙2に記載するアルミニウム合金の材料特性（乾式キャスク（タイプ1）の設計承認及び乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同じ値）から算出した値である。

さらに、第6-3表に示す機械的強度から求められる許容基準を第6-4表及び第6-5表に示す。

第 6-1 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)	
	貯蔵時 ^(注 1)	吊上げ時 ^(注 2) 検査架台への衝突時
バスケット	190	180

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注2) 吊上げ時及び検査架台への衝突時は、三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時及び検査架台への衝突時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

第 6-2 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)	
	貯蔵時 ^(注 1)	吊上げ時 ^(注 2) 検査架台への衝突時
バスケット	200	185

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注2) 吊上げ時及び検査架台への衝突時は、三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時及び検査架台への衝突時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ2）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

第 6-3 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	許容引張応 力 S (MPa)	設計応力 強さ S _m (MPa)	設計降伏点 S _y (MPa)	設計引張 強さ S _u (MPa)
バスケット プレート	アルミニウム 合金 (MB-A3004-H112)	180	19	36	56	122
		185	18	36	56	119
		190	17	36	56	116
		200	15	36	56	110

第 6-4 表 バスケットプレート用材料の許容応力値（乾式キャスク（タイプ 1））
（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値	許容応力
供用状態 A （貯蔵時）	一次一般膜応力強さ	P_m	17	S
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	17	$K_0 S$
	せん断応力	τ	10	$0.6 S$
	圧縮応力	σ_c	37	f_c
供用状態 A 及び B （吊上げ時） （検査架台へ の衝突時）	一次一般膜応力強さ	P_m	36	S_m
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ （評価位置①）	$P_m + P_b$	54	αS_m （注 1）
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ （評価位置③）	$P_m + P_b$	46	αS_m （注 2）
	せん断応力	τ	21	$0.6 S_m$
	圧縮応力（評価位置①）	σ_c	37	f_c
	圧縮応力（評価位置②）	σ_c	37	f_c

（注 1） $\alpha = 1.5$

（注 2） $\alpha = 1.3$

第 6-5 表 バスケットプレート用材料の許容応力値（乾式キャスク（タイプ 2））
（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類		許容応力値	許容応力
供用状態 A （貯蔵時）	一次一般膜応力強さ	P_m	15	S
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	15	$K_0 S$
	せん断応力	τ	9	$0.6 S$
	圧縮応力	σ_c	37	f_c
供用状態 A 及び B （吊上げ時） （検査架台へ の衝突時）	一次一般膜応力強さ	P_m	36	S_m
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ （評価位置①）	$P_m + P_b$	54	αS_m （注 1）
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ （評価位置③）	$P_m + P_b$	43	αS_m （注 2）
	せん断応力	τ	21	$0.6 S_m$
	圧縮応力（評価位置①）	σ_c	37	f_c
	圧縮応力（評価位置②）	σ_c	37	f_c

（注 1） $\alpha = 1.5$

（注 2） $\alpha = 1.2$

トラニオンの強度計算方法

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-2-3

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-3-2-3-1
2. 適用基準	資10-3-2-3-1
3. 記号の説明	資10-3-2-3-2
4. 設計条件	資10-3-2-3-5
4.1 基本仕様	資10-3-2-3-5
4.2 設計事象	資10-3-2-3-6
4.3 荷重の種類とその組合せ	資10-3-2-3-11
5. 計算条件	資10-3-2-3-12
5.1 解析対象とする事象	資10-3-2-3-12
5.2 解析箇所	資10-3-2-3-13
5.3 形状及び寸法	資10-3-2-3-16
5.4 物性値	資10-3-2-3-16
6. 応力解析	資10-3-2-3-17
6.1 応力算出の概要	資10-3-2-3-17
6.2 荷重条件の選定	資10-3-2-3-18
6.3 応力計算と評価	資10-3-2-3-18

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、乾式キャスクのトラニオンが十分な強度を有することを確認するための方法について説明するものである。

2. 適用基準

トラニオンの強度評価については、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、金属キャスク構造規格のトラニオンを適用する。

3. 記号の説明

トラニオンの強度評価に用いる記号について以下に説明する。

記号	単位	定 義
A_1	mm^2	評価位置①の断面積
A_2	mm^2	評価位置②の断面積
A_4	mm^2	評価位置④の断面積
A_5	mm^2	評価位置⑤の断面積
d_3	mm	嵌め込み部の外径
d_6	mm	嵌め込み部の外径
d_{32}	mm	外輪(穴)内径
d_{33}	mm	外輪(穴)外径
d_{61}	mm	トラニオン外径
d_{62}	mm	外輪(穴)内径
d_{63}	mm	外輪(穴)外径
E	MPa	トラニオンの縦弾性係数
E'	MPa	胴の縦弾性係数
E_i	MPa	状態 i のトラニオンの縦弾性係数
E_i'	MPa	状態 i の胴の縦弾性係数
E_0	MPa	設計疲労線図の基本縦弾性係数
E_t	MPa	解析に用いる縦弾性係数
F	MPa	S_y, S_u により決まる値
F_1	N	トラニオン押さえの固縛荷重
F_2	N	吊上げ時においてトラニオンに作用する荷重
F_{w1}	N	トラニオン自重による荷重
f_b	MPa	許容曲げ応力
f_p	MPa	許容支圧応力
f_s	MPa	許容せん断応力
f_t	MPa	許容引張応力
f_{31}	N	トラニオンに作用する摩擦力
f_{32}	N	トラニオンに作用する摩擦力
f_{61}	N	トラニオンに作用する摩擦力
f_{62}	N	トラニオンに作用する摩擦力

記号	単位	定 義
g	m/s^2	重力加速度
G_2	－	吊上げ時の加速度係数
i	－	応力サイクルの型式
k	－	応力サイクルの型式の総数
K_t	－	応力集中係数
K_r	－	表面粗さ係数
L_1	mm	評価位置①と荷重作用位置との距離
L_2	mm	評価位置②と荷重作用位置との距離
L_3	mm	0 点から反力 R_{32} の作用点までの距離
L_4	mm	評価位置④と荷重作用位置との距離
L_5	mm	評価位置⑤と荷重作用位置との距離
L_6	mm	0 点から反力 R_{62} の作用点までの距離
m	kg	吊上げ時における乾式キャスクの質量
M	$N \cdot mm$	曲げモーメント
N_a	－	許容繰返し回数
N_c	－	実際の繰返し回数
P_3	MPa	しまり嵌めによる支圧
P_6	MPa	しまり嵌めによる支圧
P_{3i}	MPa	状態 i での評価位置③の支圧応力
P_{6i}	MPa	状態 i での評価位置⑥の支圧応力
R_{31}	N	トラニオンに作用する反力
R_{32}	N	トラニオンに作用する反力
R_{61}	N	トラニオンに作用する反力
R_{62}	N	トラニオンに作用する反力
S	MPa	応力強さ
S_a	MPa	繰返しピーク応力強さ
S_u	MPa	設計引張強さ
S_y	MPa	設計降伏点
S_6	MPa	支圧応力
T_0	$^{\circ}C$	初期温度 ($=20^{\circ}C$)

記号	単位	定 義
T_{1i}	℃	状態 i のトラニオンの温度
T_{2i}	℃	状態 i のトラニオン接続部（胴側）の温度
U_f	－	疲労累積係数
W_1	kg	トラニオン自重
Z_1	mm ³	評価位置①の断面係数
Z_2	mm ³	評価位置②の断面係数
Z_4	mm ³	評価位置④の断面係数
Z_5	mm ³	評価位置⑤の断面係数
α_{1i}	－	状態 i のトラニオンの熱膨張率
α_{2i}	－	状態 i のトラニオン接続部（胴側）の熱膨張率
α_{3i}	－	状態 i の評価位置③でのしまり嵌め比
α_{6i}	－	状態 i の評価位置⑥でのしまり嵌め比
α_3	－	しまり嵌め比
α_6	－	しまり嵌め比
δ_3	mm	外輪(穴)と軸の初期しめしろ（直径差）
δ_6	mm	外輪(穴)と軸の初期しめしろ（直径差）
δ_{3i}	mm	トラニオン接続部のしめしろ（直径差）変化
δ_{6i}	mm	トラニオン接続部のしめしろ（直径差）変化
μ	－	摩擦係数
ν	－	ポアソン比
σ	MPa	評価断面に垂直な方向の応力
σ_{31}	MPa	評価位置③の反力 R_{31} による応力
σ_{32}	MPa	評価位置③の反力 R_{32} による応力
σ_{61}	MPa	評価位置⑥の反力 R_{61} による応力
σ_{62}	MPa	評価位置⑥の反力 R_{62} による応力
σ_b	MPa	曲げ応力
σ_T	MPa	組合せ応力
τ	MPa	せん断応力

4. 設計条件

トラニオンは、以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

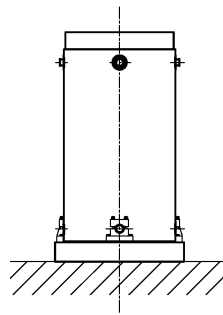
トラニオンの基本仕様を第4-1表に示す。

第 4-1 表 トラニオンの基本仕様

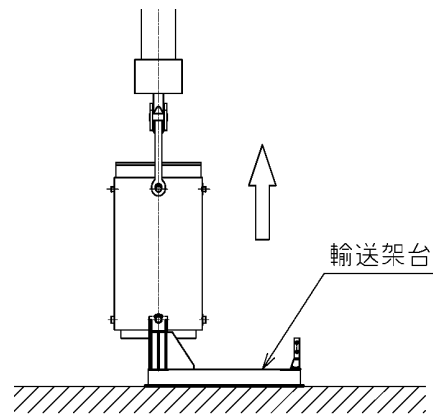
		乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
		SUS630	
材質	トラニオン		

4.2 設計事象

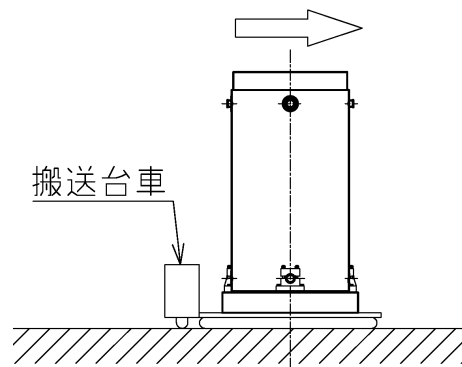
資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」と同様に、トラニオンに係る設計上考慮する事象として、燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における状態から選定事象を抽出し、その様態図を第4-1図に示す。また、第4-2表に各選定事象を金属キャスク構造規格 解説 MGB-1300を参考として、設計事象及び供用状態に分類した結果を示す。



(a) 貯蔵時

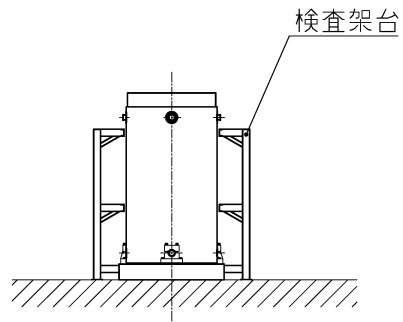


(b) 吊上げ時

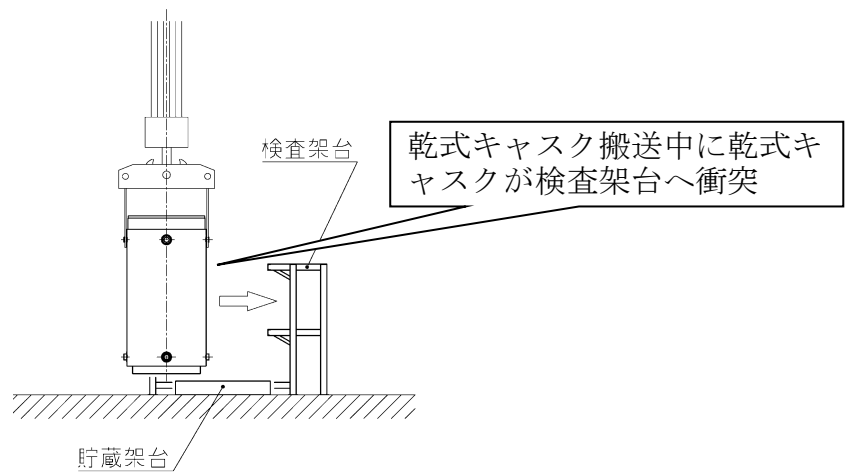


(c) 台車搬送時

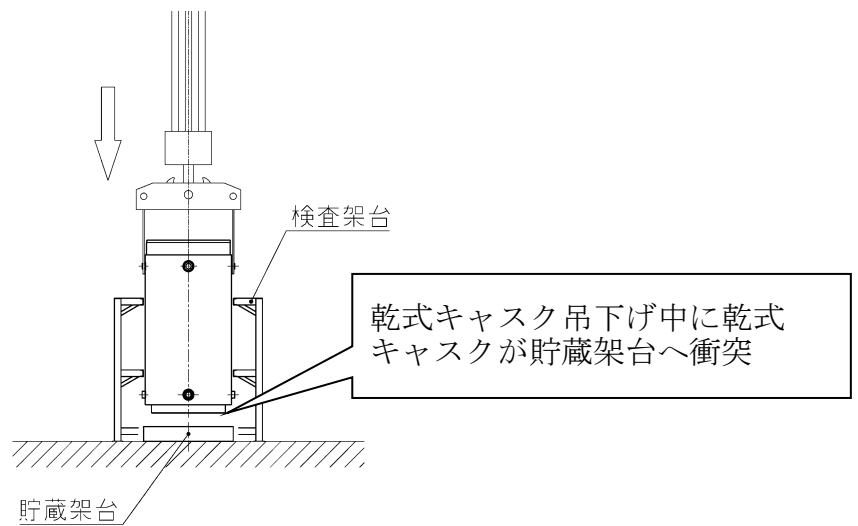
第4-1図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (1/3)



(d) 準備作業時

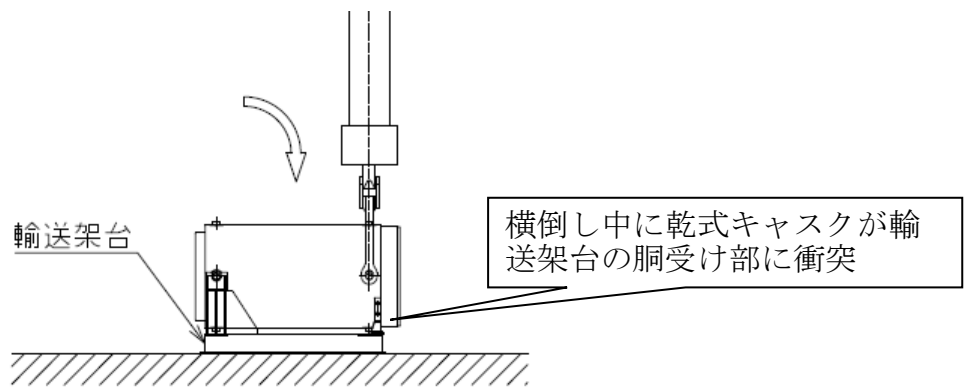


(e) 検査架台への衝突

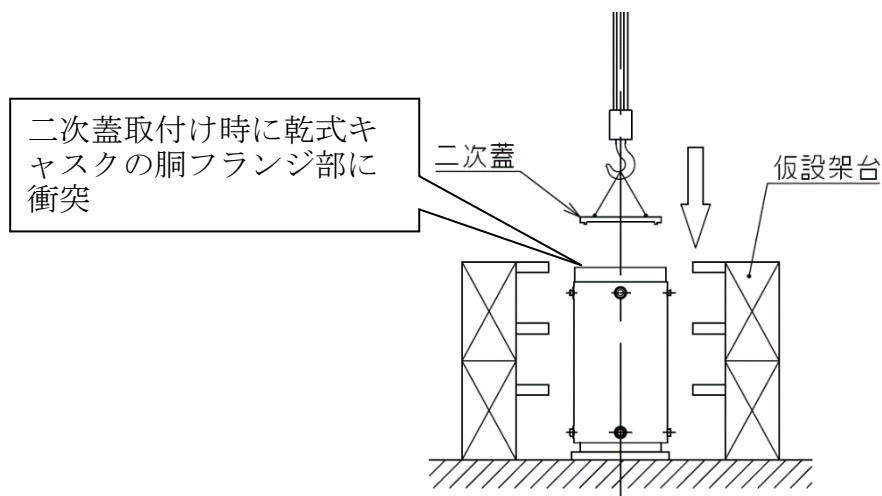


(f) 貯蔵架台への衝突

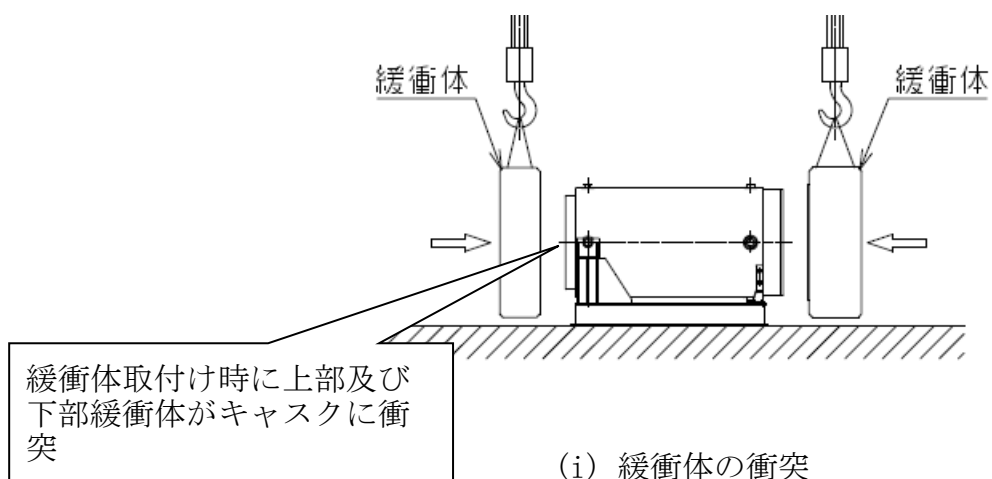
第 4-1 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (2/3)



(g) 横倒し時の衝突



(h) 二次蓋の衝突（燃料取扱棟内）



(i) 緩衝体の衝突

第 4-1 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (3/3)

第 4-2 表 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象

設計事象	供用状態	燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における 選定事象
I	A	・貯蔵（貯蔵時）（第 4-1 図(a)） ・乾式キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時）（第 4-1 図(b)） ・搬送台車による搬送（台車搬送時）（第 4-1 図(c)） ・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）（第 4-1 図(d)）
II	B	・乾式キャスクの検査架台への衝突（検査架台への衝突時）（第 4-1 図(e)） ・乾式キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時）（第 4-1 図(f)） ・乾式キャスクのたて起こし架台への衝突（横倒し時の衝突時）（第 4-1 図(g)） ・二次蓋の乾式キャスクへの衝突（蓋の衝突時）（第 4-1 図(h)） ・緩衝体の乾式キャスクへの衝突（緩衝体の衝突時）（第 4-1 図(i)）

4.3 荷重の種類とその組合せ

金属キャスク構造規格の解説表MCD-3100-1を参考に、トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は応力計算書に記載する。

第 4-3 表 トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計荷重 供用状態 評価事象 荷 重			ボルト初期締付け力	自重による荷重	吊上げ荷重	固縛荷重	熱荷重 ^(注4)
I	A ^(注1)	貯蔵時	— ^(注2)	○	—	○	○
		吊上げ時	— ^(注2)	— ^(注3)	○	—	○

(注1) 評価事象の中で、他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

(注2) トラニオンの構造材としてボルトを使用していないため、ボルト初期締付け力は入力しない。

(注3) 本状態での自重による荷重は、吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

(注4) 密封容器の熱膨張により生じる応力に限る。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2 項で示した燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象のうち、第5-1表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について評価を実施する。

第5-1表 代表事象

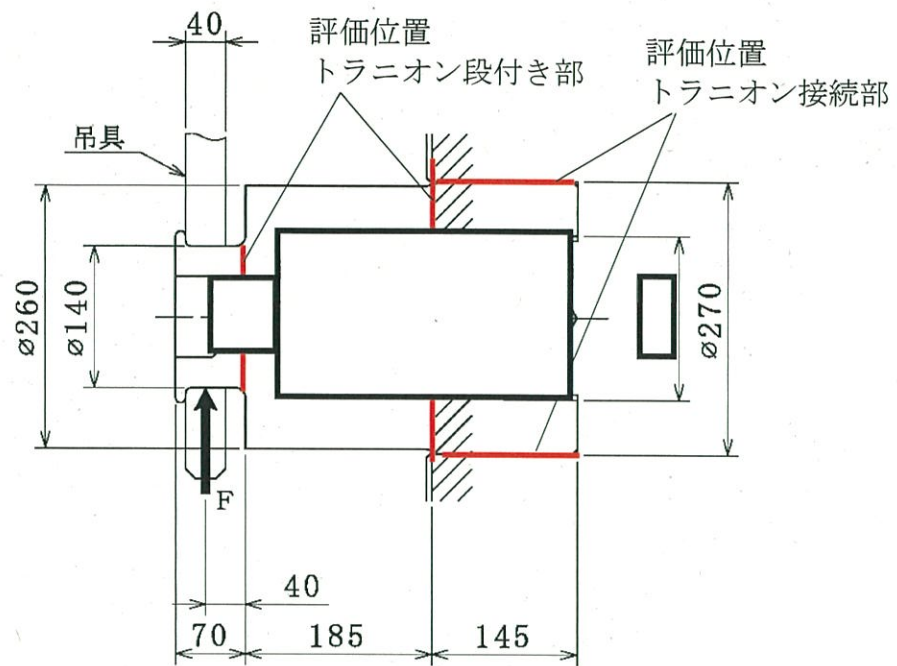
設計 事象	供用 状態	代表 事象 (注1)	包絡される 事象	荷重条件	備考
I	A	貯蔵時	—	・自重 ・固縛荷重 ・熱荷重	供用状態Aのうち大半の期間を占める代表的事象。
		吊上げ 時	・台車搬送時 ・準備作業時 ・検査架台への衝突時 ・貯蔵架台への衝突時 ・横倒し時の衝突時 ・蓋の衝突時 ・緩衝体の衝突時	・吊上げ荷重^(注1) ・熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは吊上げ時である。

(注1) 乾式キャスクに1.3gの慣性力（下方向）を作用させた場合の荷重である。慣性力の根拠は、「資料10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」に示す。

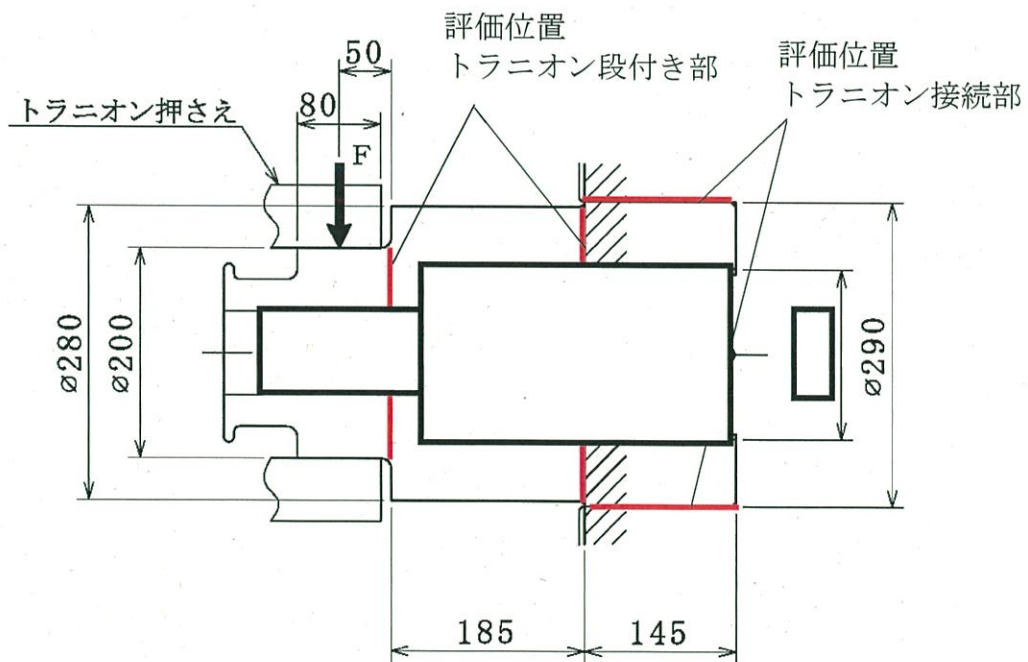
5.2 解析箇所

トラニオンの応力評価を行う箇所は、次のとおりである。応力評価箇所を第5-1図から第5-4図に示す。

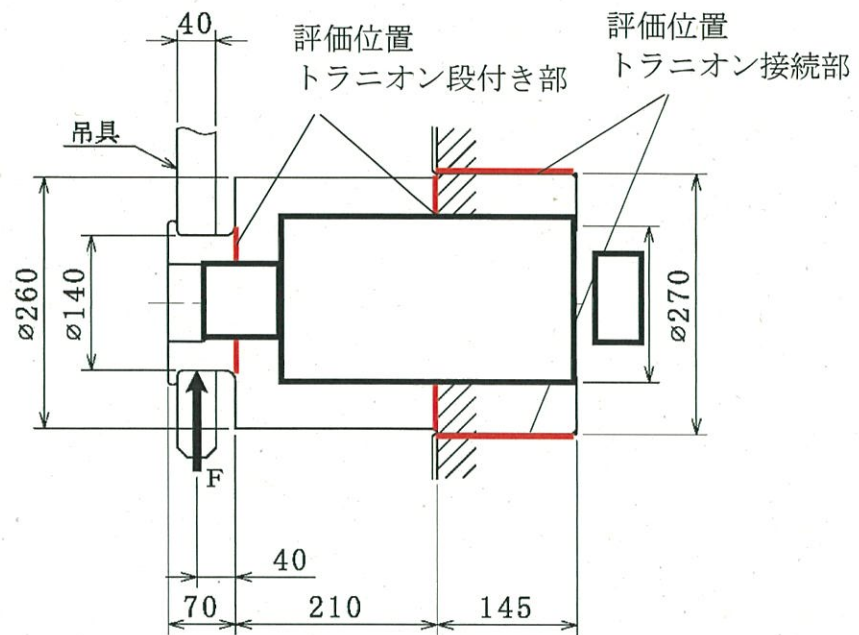
- (1) 上部トラニオン
 - ・トラニオン段付き部
 - ・トラニオン接続部
- (2) 下部トラニオン
 - ・トラニオン段付き部
 - ・トラニオン接続部



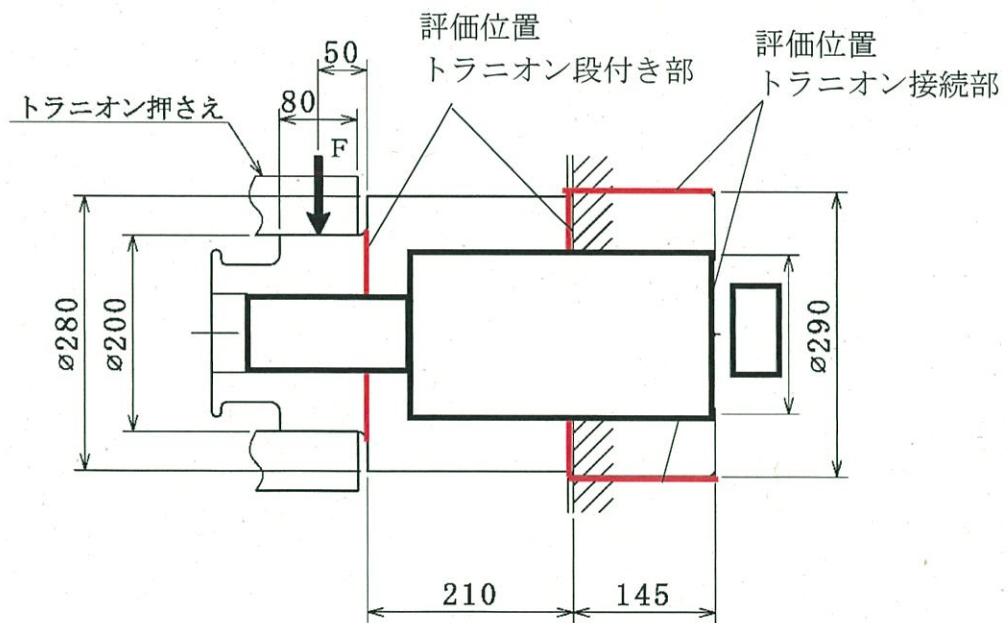
第5-1図 乾式キャスク（タイプ1）の上部トラニオンの評価位置



第5-2図 乾式キャスク（タイプ1）の下部トラニオンの評価位置



第5-3図 乾式キャスク（タイプ2）の上部トラニオンの評価位置



第5-4図 乾式キャスク（タイプ2）の下部トラニオンの評価位置

5.3 形状及び寸法

応力評価を行う部位の形状及び寸法は、強度計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値を第5-2表に示す。

第 5-2 表 応力計算に使用する材料の物性値

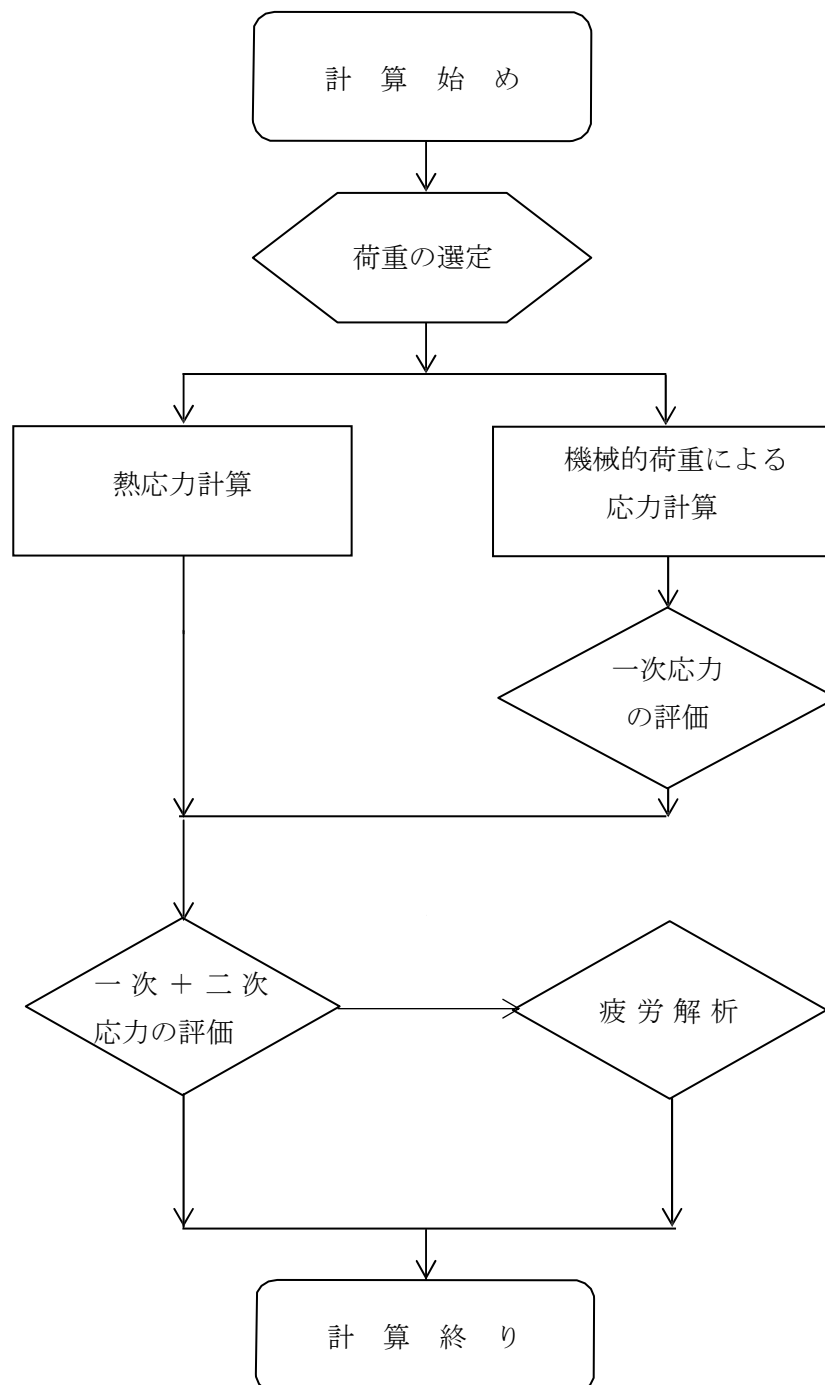
構成部材	材料	温度 (°C)	縦弾性 係数 (MPa)	平均 熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm・°C))	ポアソン 比 (—)
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630)	20	196000	11.10	0.3
		25			
		50		11.20	
		75		11.30	
		100	191000	11.40	
		125		11.40	
		150	188000	11.50	
		175		11.60	
		200	184000	11.60	
胴	炭素鋼 (GLF1)	20	202000	11.50	0.3
		25			
		50		11.80	
		75		11.90	
		100	198000	12.10	
		125		12.30	
		150	195000	12.40	
		175		12.60	
		200	192000	12.70	

6. 応力解析

6.1 応力算出の概要

トラニオンの応力評価フローを第6-1図に示す。

トラニオンの応力評価は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。



第6-1図 トラニオンの応力評価フロー

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部位の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は強度計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は以下の荷重を入力し行う。荷重条件として与えられるものは次の2つである。

a. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む乾式キャスクの設計質量を用いる。）、及びその他の付加荷重をいう。

b. 熱荷重

(2) 貯蔵時は、下部トラニオンを用いて固縛し、上部トラニオンは固縛に用いない。したがって、固縛荷重が作用する下部トラニオンを代表として応力計算を行う。

吊上げ時は、上部トラニオン2個を用いて吊上げ、下部トラニオンは吊上げに用いない。したがって、吊上げ荷重が作用する上部トラニオンを代表として応力計算を行う。

また、荷重作用位置は、荷重支持面の中央部とする。

(3) 応力評価位置は、令和2年11月30日付け原規規発第2011303号で承認を受けたMSF-32P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ1）の設計承認」という。）及び令和2年11月30日付け原規規発第2011304号で承認を受けたMSF-24P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ2）の設計承認」という。）と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。評価位置は強度計算書に示す。

(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

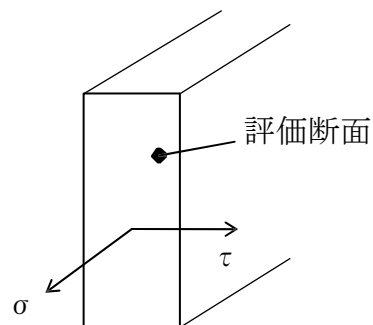
6.3.2 応力の評価

応力の評価は機械工学便覧等による応力評価式により行う。評価の詳細は、強度計算書に示す。

応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



トラニオンの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-3300に従い、以下の項目を評価する。

(1) 一次応力強さ

金属キャスク構造規格 MCD-3311.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A]

- ・せん断応力（一次） $\leq f_s \left(= \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right)$
- ・曲げ応力（一次） $\leq f_b \left(= f_t \right)$
- ・支圧応力（一次） $\leq f_p \left(= 1.25F \right)$
- ・組合せ応力（一次） $\leq f_t \left(= \frac{F}{1.5} \right)$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$$

(2) 一次＋二次応力強さ

金属キャスク構造規格 MCD-3312.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A]

- ・せん断応力（一次＋二次） $\leq 3f_s$
- ・曲げ応力（一次＋二次） $\leq 3f_b$
- ・支圧応力（一次＋二次） $\leq 1.5f_p$

ここで、 f_s 、 f_b 及び f_p は、6.3.2(1)に示すとおり。

6.3.3 許容基準

トラニオンの許容基準は、6.3.2項に示すとおり設定する。ここで、許容応力は、除熱解析結果を基に各部位で設定する温度に対応した値とする。各部位の許容応力値を定める温度を第6-1表及び第6-2表に示す。また、許容応力値を定める温度に対応する機械的強度を第6-3表及び第6-4表に示す。

さらに、第6-3表及び第6-4表に示す機械的強度から求められる許容応力を第6-5表及び第6-6表に示す。なお、許容応力は、(一社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) JSME S NJ1-2012」による。

第 6-1 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)	
	貯蔵時 ^(注 1)	吊上げ時 ^(注 2)
上部トラニオン 下部トラニオン	135	125
胴	140	125

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注2) 吊上げ時は三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

第 6-2 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)	
	貯蔵時 ^(注 1)	吊上げ時 ^(注 2)
上部トラニオン 下部トラニオン	140	125
胴	145	130

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注2) 吊上げ時は三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ2）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

第 6-3 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	設計降伏点 S_y (MPa)	設計引張強さ S_u (MPa)	F (MPa)
上部トラニオン 下部トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630)	125	653	845	591
		135	647	845	591
胴	炭素鋼 (GLF1)	125	185	377	185
		140	183	377	183

第 6-4 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	設計降伏点 S_y (MPa)	設計引張強さ S_u (MPa)	F (MPa)
上部トラニオン 下部トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630)	125	653	845	591
		140	645	845	591
胴	炭素鋼 (GLF1)	130	184	377	184
		145	183	377	183

第 6-5 表 トラニオン用材料の許容応力値（乾式キャスク（タイプ 1））

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時	
供用状態 A	せん断応力（一次応力）	227	227	f_s
	曲げ応力（一次応力）	394	394	f_b
	支圧応力（トラニオン側） （一次応力）	738	738	f_p
	支圧応力（本体側） （一次応力）	228	231	f_p
	組合せ応力（一次応力）	394	394	f_t
	せん断応力（一次＋二次応力）	682	682	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	1182	1182	$3f_b$
	支圧応力（トラニオン側） （一次＋二次応力）	1108	1108	$1.5f_p$
	支圧応力（本体側） （一次＋二次応力）	343	346	$1.5f_p$

第 6-6 表 トラニオン用材料の許容応力値（乾式キャスク（タイプ 2））

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時	
供用状態 A	せん断応力（一次応力）	227	227	f_s
	曲げ応力（一次応力）	394	394	f_b
	支圧応力（トラニオン側） （一次応力）	738	738	f_p
	支圧応力（本体側） （一次応力）	228	230	f_p
	組合せ応力（一次応力）	394	394	f_t
	せん断応力（一次＋二次応力）	682	682	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	1182	1182	$3f_b$
	支圧応力（トラニオン側） （一次＋二次応力）	1108	1108	$1.5f_p$
	支圧応力（本体側） （一次＋二次応力）	343	345	$1.5f_p$

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー
及び底部中性子遮蔽材カバーの強度計算方法

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-2-4

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-3-2-4-1
2. 適用基準	資10-3-2-4-1
3. 記号の説明	資10-3-2-4-2
4. 設計条件	資10-3-2-4-3
4.1 基本仕様	資10-3-2-4-3
4.2 設計事象	資10-3-2-4-4
4.3 荷重の種類とその組合せ	資10-3-2-4-9
5. 計算条件	資10-3-2-4-10
5.1 解析対象とする事象	資10-3-2-4-10
5.2 解析箇所	資10-3-2-4-11
5.3 形状及び寸法	資10-3-2-4-13
5.4 物性値	資10-3-2-4-13
6. 応力解析	資10-3-2-4-14
6.1 応力算出の概要	資10-3-2-4-14
6.2 荷重条件の選定	資10-3-2-4-16
6.3 応力計算と評価	資10-3-2-4-16

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、乾式キャスクの外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーが十分な強度を有することを確認するための方法について説明するものである。

2. 適用基準

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの強度評価については、資料10-3-1「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度計算の基本方針」に基づき、金属キャスク構造規格の中間胴を適用する。

3. 記号の説明

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの強度評価に用いる記号について以下に説明する。

記号	単位	定 義
F	MPa	S_y 、 S_u により決まる値
f_b	MPa	許容曲げ応力
f_c	MPa	許容圧縮応力
f_s	MPa	許容せん断応力
f_t	MPa	許容引張応力
S_u	MPa	設計引張強さ
S_y	MPa	設計降伏点
λ	—	有効細長比
Λ	—	限界細長比
ν	—	係数
σ_r	MPa	半径方向の応力
σ_z	MPa	軸方向の応力
σ_θ	MPa	円周方向の応力
$\tau_{r\theta}$	MPa	せん断応力
τ_{zr}	MPa	せん断応力
$\tau_{\theta z}$	MPa	せん断応力

4. 設計条件

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーは、以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

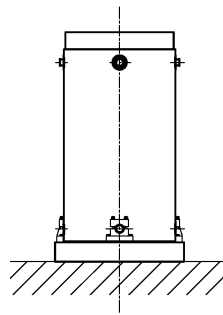
外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの基本仕様を第4-1表に示す。

第 4-1 表 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び
底部中性子遮蔽材カバーの基本仕様

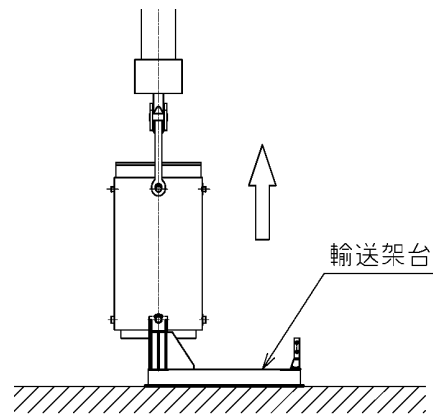
		乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
材質	外筒	SGV480	
	下部端板	SUS304	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	SGV480	
	底部中性子遮蔽材カバー	SUS304	

4.2 設計事象

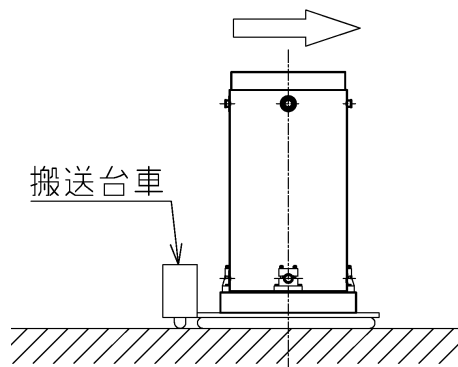
資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」と同様に、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーに係る設計上考慮する事象として、燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における状態から選定事象を抽出し、その様態図を第4-1図に示す。また、第4-2表に各選定事象を金属キャスク構造規格 解説 MGB-1300を参考として、設計事象及び供用状態に分類した結果を示す。



(a) 貯蔵時

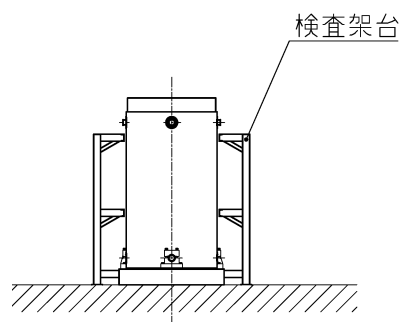


(b) 吊上げ時

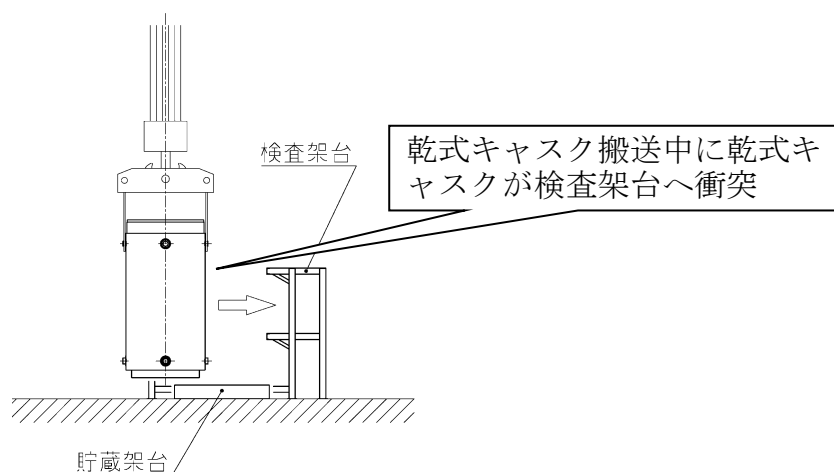


(c) 台車搬送時

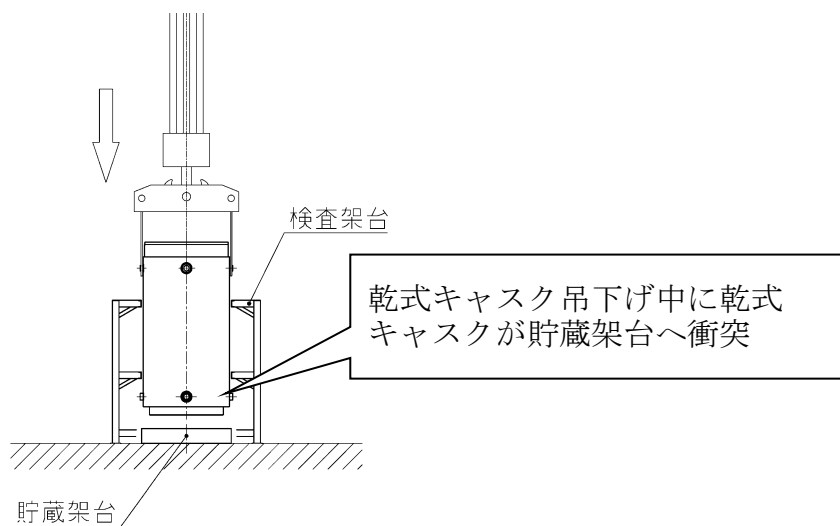
第4-1図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (1/3)



(d) 準備作業時

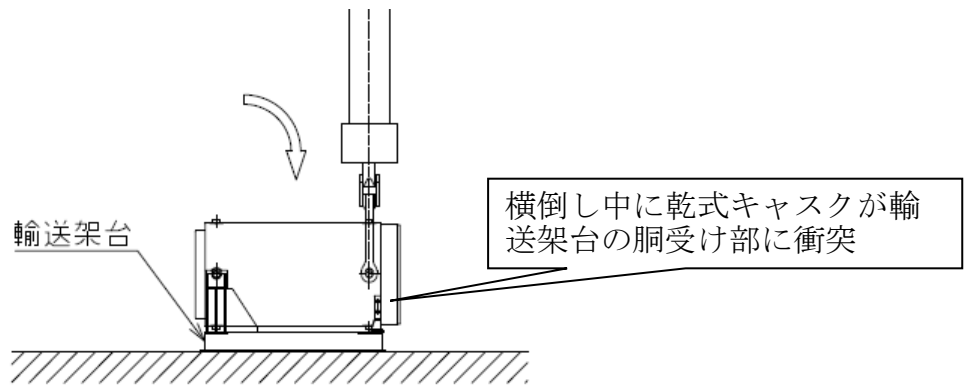


(e) 検査架台への衝突

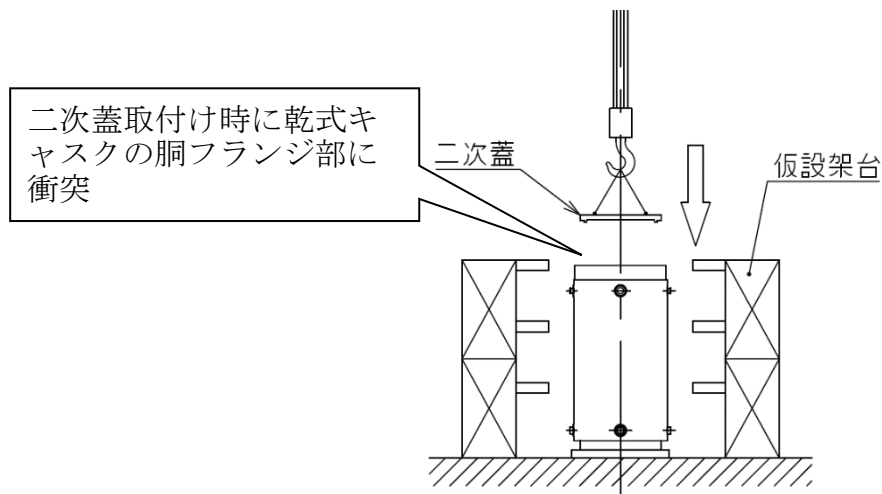


(f) 貯蔵架台への衝突

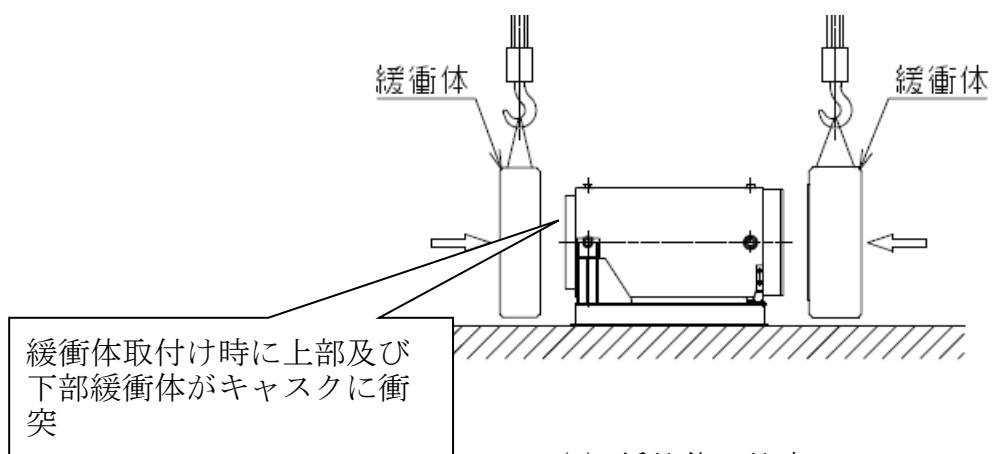
第 4-1 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (2/3)



(g) 横倒し時の衝突



(h) 二次蓋の衝突（燃料取扱棟内）



(i) 緩衝体の衝突

第 4-1 図 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象 (3/3)

第 4-2 表 燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における選定事象

設計事象	供用状態	燃料取扱棟及び乾式貯蔵建屋内における 選定事象
I	A	・ 貯蔵（貯蔵時）（第 4-1 図 (a)） ・ 乾式キャスクの吊上げ、吊下げ、移動（吊上げ時）（第 4-1 図 (b)） ・ 搬送台車による搬送（台車搬送時）（第 4-1 図 (c)） ・ 貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）（第 4-1 図 (d)）
II	B	・ 乾式キャスクの検査架台への衝突（検査架台への衝突時）（第 4-1 図 (e)） ・ 乾式キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時）（第 4-1 図 (f)） ・ 乾式キャスクのたて起こし架台への衝突（横倒し時の衝突時）（第 4-1 図 (g)） ・ 二次蓋の乾式キャスクへの衝突（蓋の衝突時）（第 4-1 図 (h)） ・ 緩衝体の乾式キャスクへの衝突（緩衝体の衝突時）（第 4-1 図 (i)）

4.3 荷重の種類とその組合せ

金属キャスク構造規格の解説表 MCD-3600-1を参考に、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は応力計算書に記載する。

第 4-3 表 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷 重			圧力による荷重	自重による荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
設計荷重	供用状態	評価事象					
I	A (注1)	貯蔵時	○	○	—	—	○
		吊上げ時	○	— (注2)	○	—	○
II	B (注1)	検査架台への衝突時	○	—	—	○	○

(注1) 評価事象の中で、他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

(注2) 本状態での自重による荷重は、吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2 項で示した燃料取扱棟及び乾式貯蔵施設内における選定事象のうち、第5-1表に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について評価を実施する。

第5-1表 代表事象

設計事象	供用状態	代表事象 (注1)	包絡される事象	荷重条件	備考
I	A	貯蔵時	—	・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ 自重 ・ 熱荷重	供用状態Aのうち大半の期間を占める代表的な事象。
		吊上げ時	・ 台車搬送時 ・ 準備作業時	・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ 吊上げ荷重^(注1) ・ 熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは吊上げ時である。
II	B	検査架台への衝突時	・ 貯蔵架台への衝突時 ・ 横倒し時の衝突時 ・ 蓋の衝突時 ・ 緩衝体の衝突時	・ 蓋間圧力 ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・ 側部中性子遮蔽材部圧力 ・ 底部中性子遮蔽材部圧力 ・ 検査架台への衝突時荷重^(注2) ・ 熱荷重	荷重条件が最も厳しいのは検査架台への衝突時である。

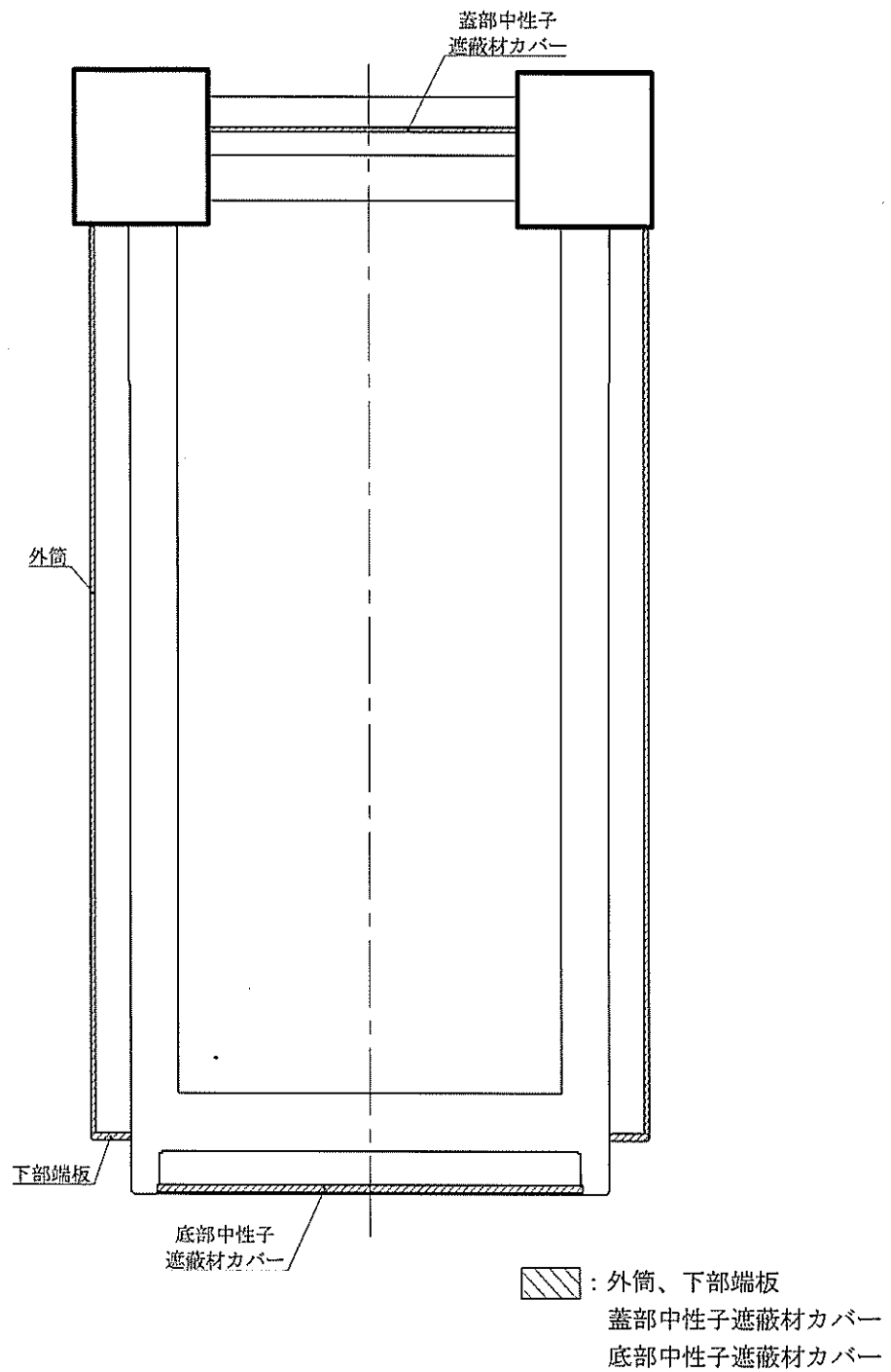
(注1) 乾式キャスクに1.3gの慣性力（下方向）を作用させた場合の荷重である。慣性力の根拠は、資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に示す。

(注2) 乾式キャスクに3.4gの慣性力（水平方向）を作用させた場合の荷重である。慣性力の根拠は、資料10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に示す。

5.2 解析箇所

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力評価を行う箇所は、次のとおりである。応力評価箇所を第5-1図に示す。

- (1) 外筒
- (2) 下部端板
- (3) 蓋部中性子遮蔽材カバー
- (4) 底部中性子遮蔽材カバー



第 5-1 図 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力評価箇所

5.3 形状及び寸法

応力評価を行う部位の形状及び寸法は、強度計算書に示す。

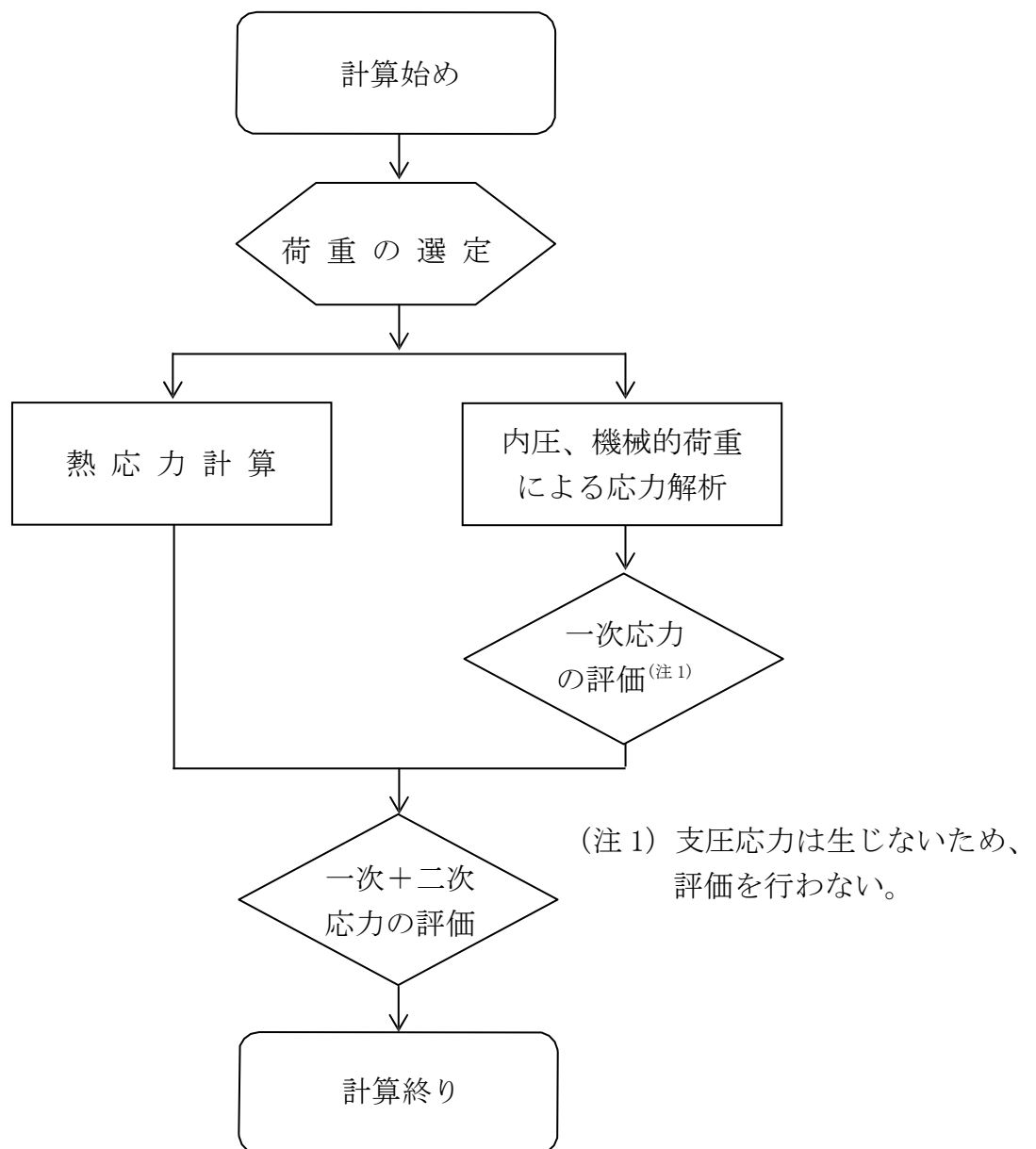
5.4 物性値

応力計算に使用する材料の物性値は、「資料10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」の第5-3表と同じである。

6. 応力解析

6.1 応力算出の概要

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力評価フローを第6-1図に示す。外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力評価は、想定される圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重を基に、密封容器、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの実形状をモデル化し、解析コードであるABAQUSを用いて行う。ABAQUSとは、有限要素法に基づく伝熱解析、応力解析の汎用解析コードである。



第6-1図 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー
及び底部中性子遮蔽材カバーの応力評価フロー

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4章に示しているが、各部位の計算においては、その部分について重要な荷重条件を選定して計算を行う。それぞれの部分について考慮した荷重は応力計算書に示す。

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

応力計算は「資料10-3-3-1 密封容器の強度計算書（乾式キャスク（タイプ1）」及び「資料10-3-3-2 密封容器の強度計算書（乾式キャスク（タイプ2）」に示す解析と同じである。応力計算の方法の詳細を以下に示す。

(1) 応力計算は以下の荷重を入力し行う。なお、荷重条件として与えられるものは次の3つである。

a. 内圧

内圧は、蓋間圧力、蓋部中性子遮蔽材部圧力、側部中性子遮蔽材部圧力、蓋部中性子遮蔽材部圧力及びその他の付加荷重をいう。

b. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む乾式キャスクの設計質量を用いる。）、吊上げ荷重、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

c. 熱荷重

熱荷重は、密封容器、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーに生じる温度変化、温度勾配による荷重をいう。密封容器、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの温度分布は各様態に応じた除熱解析で得られた温度分布結果を用いる。

(2) 解析モデルは次の方針に従う。

a. モデル化にあたっては、密封容器、外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。

b. 解析モデルは、三次元の180° 対称モデルとし、三次元固体（連続体）要素による解析モデルとする。また、モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件は強度計算書に示す。

(3) 応力評価位置については、令和2年11月30日付け原規規発第2011303号で承認を受けたMSF-32P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ1）」の設計承認」という。）及び令和2年11月30日付け原規規発第2011304号で承認を受けたMSF-24P型の核燃料輸送物設計承認（以下「乾式キャスク（タイプ2）」という。）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。評価位置は強度計算書に示す。

(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

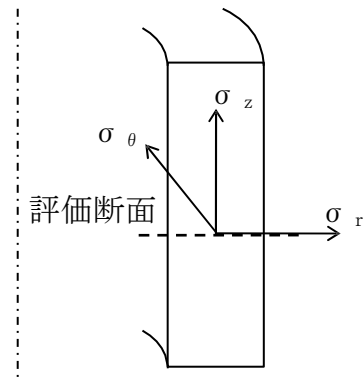
(5) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

6.3.2 応力の評価

応力の評価はABAQUSコードを用いた有限要素法により行う。評価の詳細は、強度計算書に示す。

応力の計算結果は、金属キャスク構造規格 MGB-1200 による定義に従い、応力の種類ごとに分類し、以下の評価を応力計算書に示す。なお、応力の記号とその方向は下記のとおりである。

σ_r : 半径方向の応力
 σ_θ : 円周方向の応力
 σ_z : 軸方向の応力
 $\tau_{r\theta}$: せん断応力
 $\tau_{\theta z}$: せん断応力
 τ_{zr} : せん断応力



外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-3700に従い、以下の項目を評価する。

(1) 一次応力強さ

金属キャスク構造規格 MCD-3721.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A及び供用状態B]

- ・引張応力（一次） $\leq f_t (= \frac{F}{1.5})$
- ・せん断応力（一次） $\leq f_s (= \frac{F}{1.5\sqrt{3}})$
- ・圧縮応力（一次） $f_c (= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v})$
- ・曲げ応力（一次） $\leq f_b (= f_t)$
- ・組合せ応力（一次） $\leq f_t (= \frac{F}{1.5})$

ここで、

$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(\text{RT})]$ (オーステナイト系ステンレス鋼)

$F = \text{MIN}[0.7S_u, S_y]$ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

(2) 一次＋二次応力強さ

金属キャスク構造規格 MCD-3722.1に基づき評価を行う。評価項目を以下に示す。

[供用状態A及び供用状態B]

- ・引張応力及び圧縮応力（一次＋二次） $\leq 3f_t$
- ・せん断応力（一次） $\leq 3f_s$
- ・曲げ応力（一次） $\leq 3f_b$

ここで、 f_t 、 f_s 及び f_b は、6.3.2(1)に示すとおり。

6.3.3 許容応力

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの許容応力は、6.3.2項に示すとおり設定する。ここで、許容応力は、除熱解析結果を基に各部位で設定する温度に対応した値とする。各部位の許容応力値を定める温度を第6-1表及び第6-2表に示す。また、許容応力値を定める温度に対応する機械的強度を第6-3表及び第6-4表に示す。

さらに、第6-3表及び第6-4表に示す機械的強度から求められる許容基準を第6-5表及び第6-6表に示す。なお、許容応力は、（一社）日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）JSME S NJ1-2012」による。

第 6-1 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)	
	貯蔵時 ^(注 1)	吊上げ時 ^(注 2) 検査架台への衝突時
外筒	135	120
下部端板	130	120
蓋部中性子遮蔽材カバー	110	115
底部中性子遮蔽材カバー	130	125

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注2) 吊上げ時及び検査架台衝突時は三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時及び検査架台衝突時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

第 6-2 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	許容応力値を定める温度(℃)	
	貯蔵時 ^(注 1)	吊上げ時 ^(注 2) 検査架台への衝突時
外筒	135	120
下部端板	135	120
蓋部中性子遮蔽材カバー	115	115
底部中性子遮蔽材カバー	135	125

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す解析結果を基に設定する。

(注2) 吊上げ時及び検査架台衝突時は三次蓋が取り付けられた状態であるため、吊上げ時及び検査架台衝突時の許容応力値を定める温度は、乾式キャスク（タイプ2）の設計承認で承認を受けた除熱解析結果を基に設定する。

第 6-3 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（乾式キャスク（タイプ 1））

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	設計降伏点 S_y (MPa)	設計引張 強さ S_u (MPa)	F (MPa)
外筒	炭素鋼 (SGV480)	120	235	428	235
		135	233	426	233
下部端板	ステンレス鋼 (SUS304)	120	162	433	205
		130	159	429	205
蓋部中性子 遮蔽材カバー	炭素鋼 (SGV480)	110	237	429	237
		115	236	428	236
底部中性子 遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304)	125	161	431	205
		130	159	429	205

第 6-4 表 許容応力値を定める温度に対応する機械的強度（乾式キャスク（タイプ 2））

部 位	材料	許容応力値 の設定温度 (℃)	設計降伏点 S_y (MPa)	設計引張 強さ S_u (MPa)	F (MPa)
外筒	炭素鋼 (SGV480)	120	235	428	235
		135	233	426	233
下部端板	ステンレス鋼 (SUS304)	120	162	433	205
		135	158	427	205
蓋部中性子 遮蔽材カバー	炭素鋼 (SGV480)	115	236	428	236
底部中性子 遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304)	125	161	431	205
		135	158	427	205

第 6-5 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 1））（1/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	外筒		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	155	156	f_t
	せん断応力（一次応力）	89	90	f_s
	圧縮応力（一次応力）	155	156	f_c
	曲げ応力（一次応力）	155	156	f_b
	組合せ応力（一次応力）	155	156	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	466	470	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	269	271	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	466	470	$3f_b$

第 6-5 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 1））（2/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	下部端板		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	136	136	f_t
	せん断応力（一次応力）	78	78	f_s
	圧縮応力（一次応力）	136	136	f_c
	曲げ応力（一次応力）	136	136	f_b
	組合せ応力（一次応力）	136	136	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	410	410	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	236	236	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	410	410	$3f_b$

第 6-5 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 1））（3/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	蓋部中性子遮蔽材カバー		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	158	157	f_t
	せん断応力（一次応力）	91	90	f_s
	圧縮応力（一次応力）	158	157	f_c
	曲げ応力（一次応力）	158	157	f_b
	組合せ応力（一次応力）	158	157	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	474	472	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	273	272	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	474	472	$3f_b$

第 6-5 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 1））（4/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	底部中性子遮蔽材カバー		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	136	136	f_t
	せん断応力（一次応力）	78	78	f_s
	圧縮応力（一次応力）	136	136	f_c
	曲げ応力（一次応力）	136	136	f_b
	組合せ応力（一次応力）	136	136	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	410	410	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	236	236	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	410	410	$3f_b$

第 6-6 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 2））（1/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	外筒		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	155	156	f_t
	せん断応力（一次応力）	89	90	f_s
	圧縮応力（一次応力）	155	156	f_c
	曲げ応力（一次応力）	155	156	f_b
	組合せ応力（一次応力）	155	156	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	466	470	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	269	271	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	466	470	$3f_b$

第 6-6 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 2））（2/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	下部端板		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	136	136	f_t
	せん断応力（一次応力）	78	78	f_s
	圧縮応力（一次応力）	136	136	f_c
	曲げ応力（一次応力）	136	136	f_b
	組合せ応力（一次応力）	136	136	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	410	410	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	236	236	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	410	410	$3f_b$

第 6-6 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 2））（3/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	蓋部中性子遮蔽材カバー		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	157	157	f_t
	せん断応力（一次応力）	90	90	f_s
	圧縮応力（一次応力）	157	157	f_c
	曲げ応力（一次応力）	157	157	f_b
	組合せ応力（一次応力）	157	157	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	472	472	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	272	272	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	472	472	$3f_b$

第 6-6 表 許容応力値（乾式キャスク（タイプ 2））（4/4）

（単位：MPa）

許容応力 区分	応力の種類	底部中性子遮蔽材カバー		
		許容応力値		許容 応力
		貯蔵時	吊上げ時 検査架台への 衝突時	
供用状態 A 及び B	引張応力（一次応力）	136	136	f_t
	せん断応力（一次応力）	78	78	f_s
	圧縮応力（一次応力）	136	136	f_c
	曲げ応力（一次応力）	136	136	f_b
	組合せ応力（一次応力）	136	136	f_t
	引張及び圧縮応力 （一次＋二次応力）	410	410	$3f_t$
	せん断応力（一次＋二次応力）	236	236	$3f_s$
	曲げ応力（一次＋二次応力）	410	410	$3f_b$

密封容器の強度計算書
(乾式キャスク (タイプ1))

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-1

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要.....	資 10-3-3-1-1
2. 形状・寸法・材料.....	資 10-3-3-1-1
3. 応力計算.....	資 10-3-3-1-4
3.1 応力評価位置.....	資 10-3-3-1-4
3.2 設計時.....	資 10-3-3-1-6
3.3 貯蔵時.....	資 10-3-3-1-12
3.4 吊上げ時.....	資 10-3-3-1-22
3.5 検査架台への衝突時.....	資 10-3-3-1-29
3.6 試験時.....	資 10-3-3-1-38
4. 繰返し荷重の評価.....	資 10-3-3-1-43
4.1 密封容器（ボルトを除く）の応力評価.....	資 10-3-3-1-43
4.2 ボルトの評価.....	資 10-3-3-1-49
5. 穴の補強.....	資 10-3-3-1-58
6. 外圧の評価.....	資 10-3-3-1-61

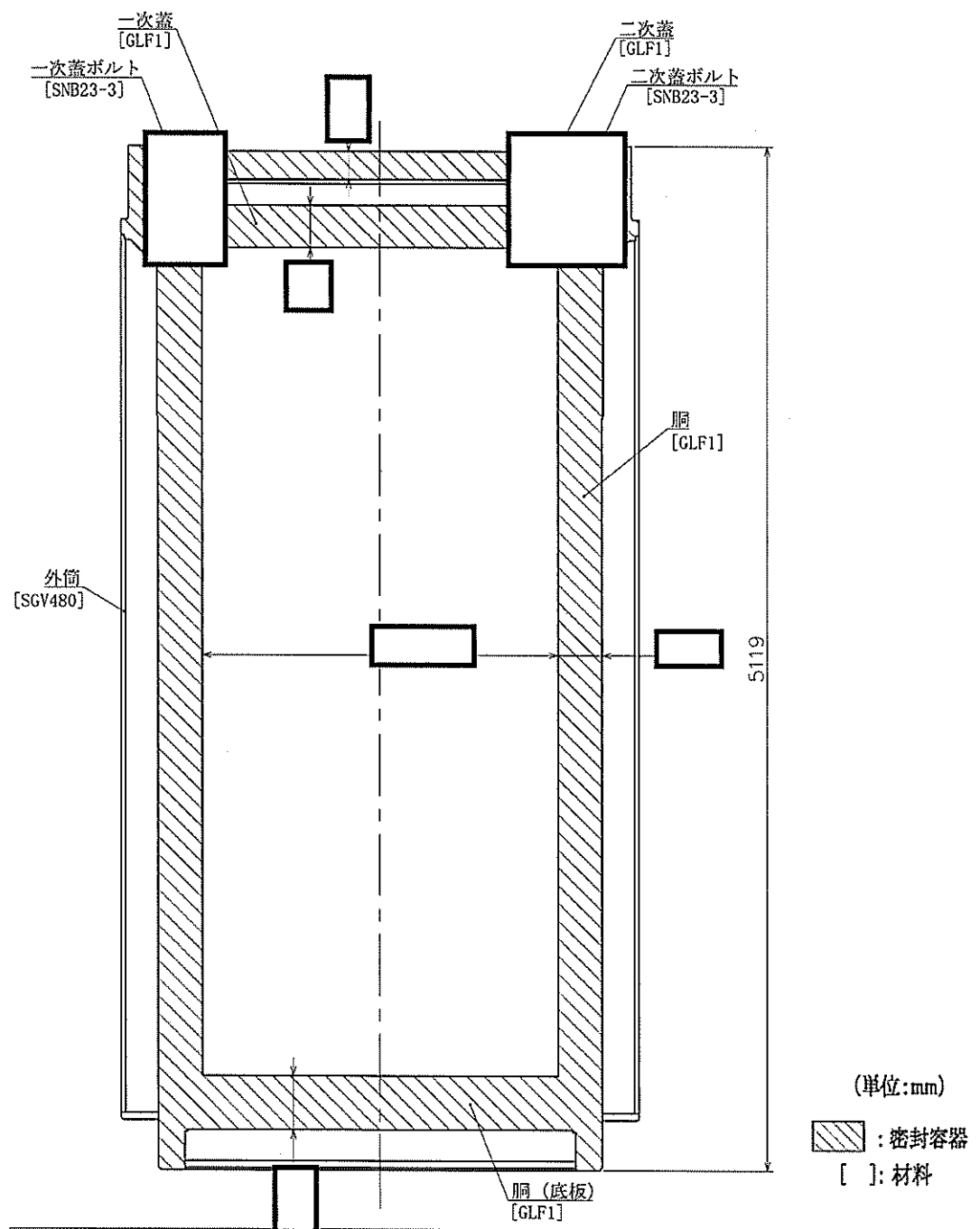
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

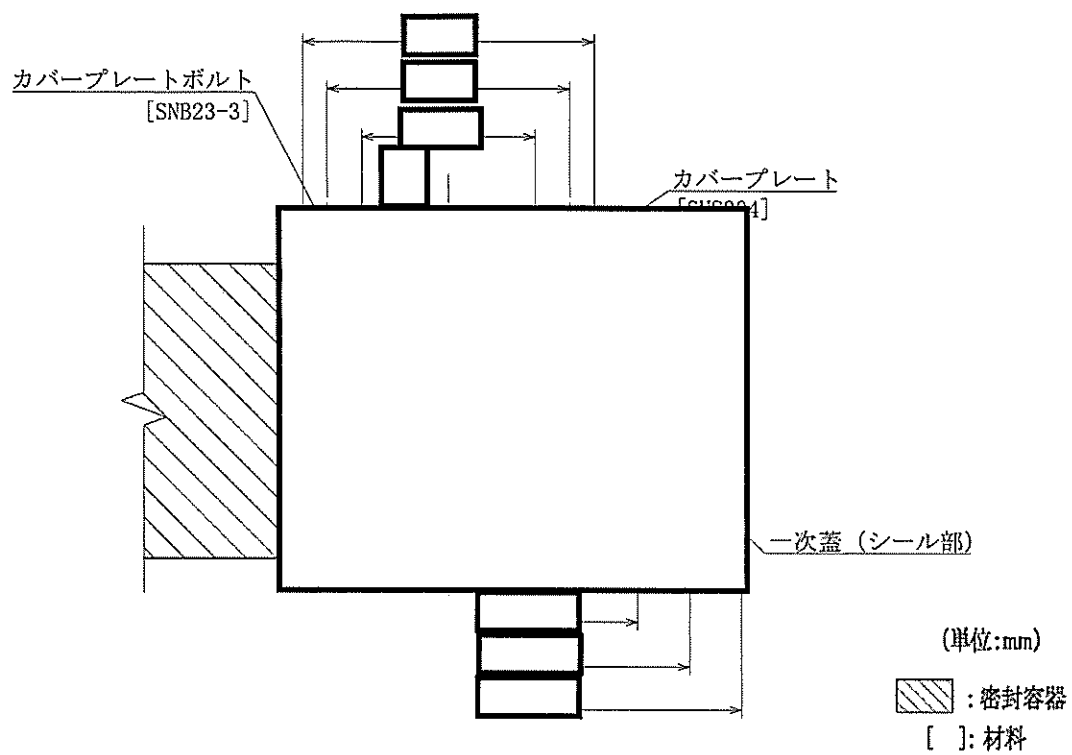
本資料は、資料 10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に基づき、乾式キャスク（タイプ 1）の密封容器が十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

2. 形状・寸法・材料

本資料で解析する密封容器の形状・寸法・材料を第 1-1 図に示す。



第1-1図 密封容器の形状・寸法・材料(1/2)

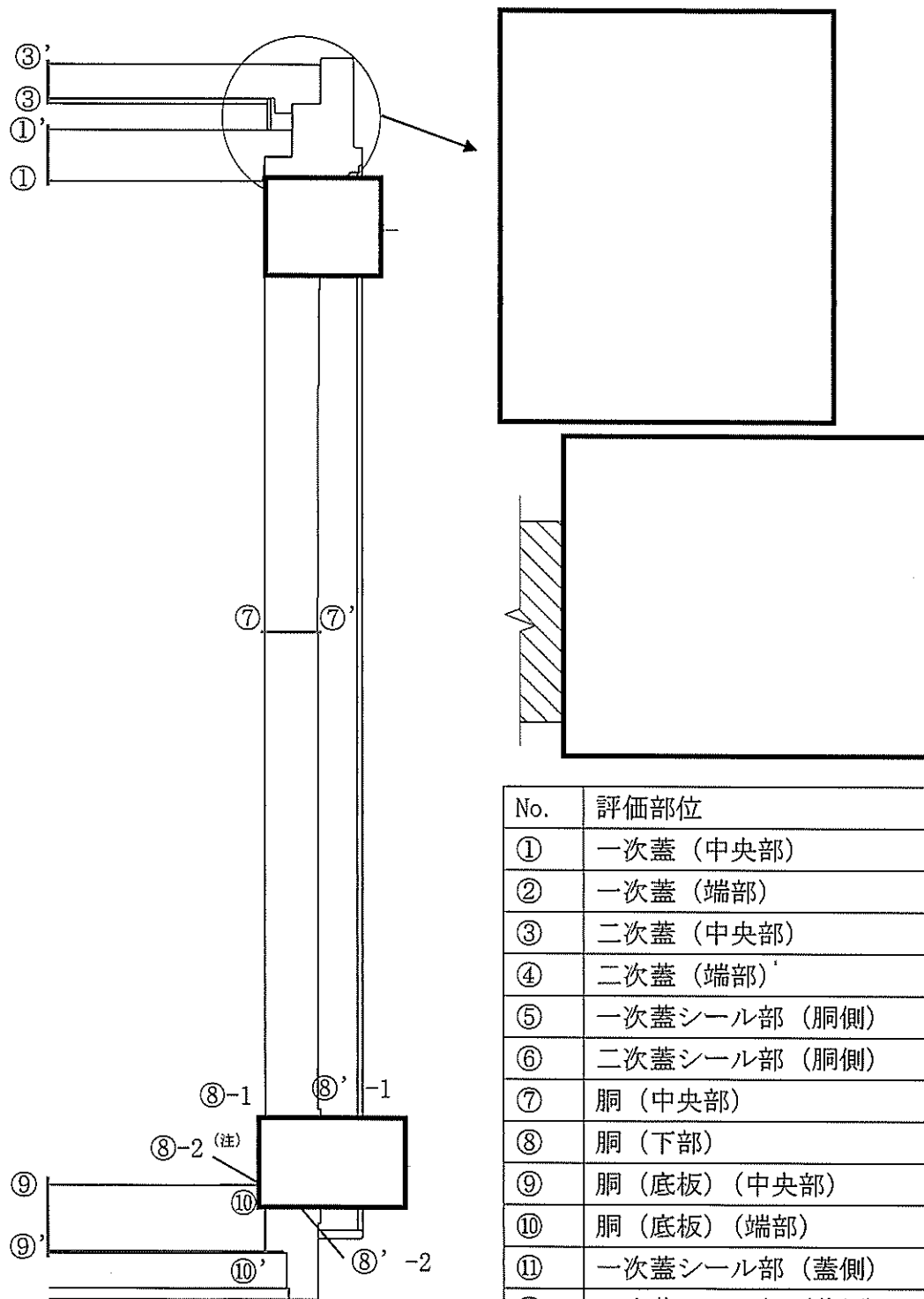


第1-1図 密封容器の形状・寸法・材料(2/2)
(カバープレート部詳細)

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

密封容器の応力評価位置を第3-1図に示す。乾式キャスク（タイプ1）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。



(注)評価断面⑧-2 は下部トラニオンを取り付けていない断面を含む。

No.	評価部位
①	一次蓋（中央部）
②	一次蓋（端部）
③	二次蓋（中央部）
④	二次蓋（端部）
⑤	一次蓋シール部（胴側）
⑥	二次蓋シール部（胴側）
⑦	胴（中央部）
⑧	胴（下部）
⑨	胴（底板）（中央部）
⑩	胴（底板）（端部）
⑪	一次蓋シール部（蓋側）
⑫	二次蓋シール部（蓋側）
⑬	一次蓋ボルト
⑭	二次蓋ボルト
⑮	カバープレート
⑯	カバープレートボルト

第 3-1 図 密封容器の応力評価位置

3.2 設計時

3.2.1 荷重条件

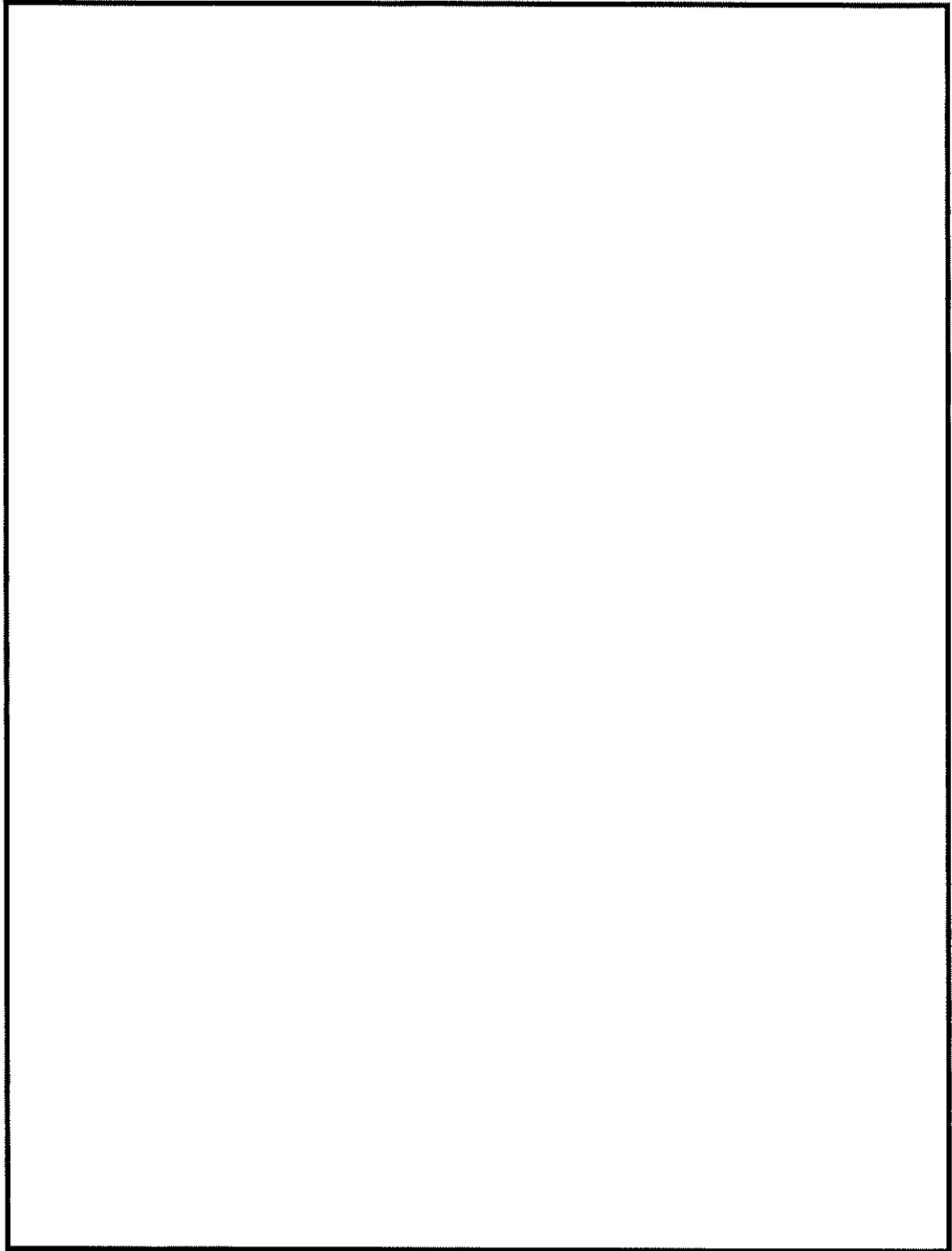
設計時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ ボルト初期締付力

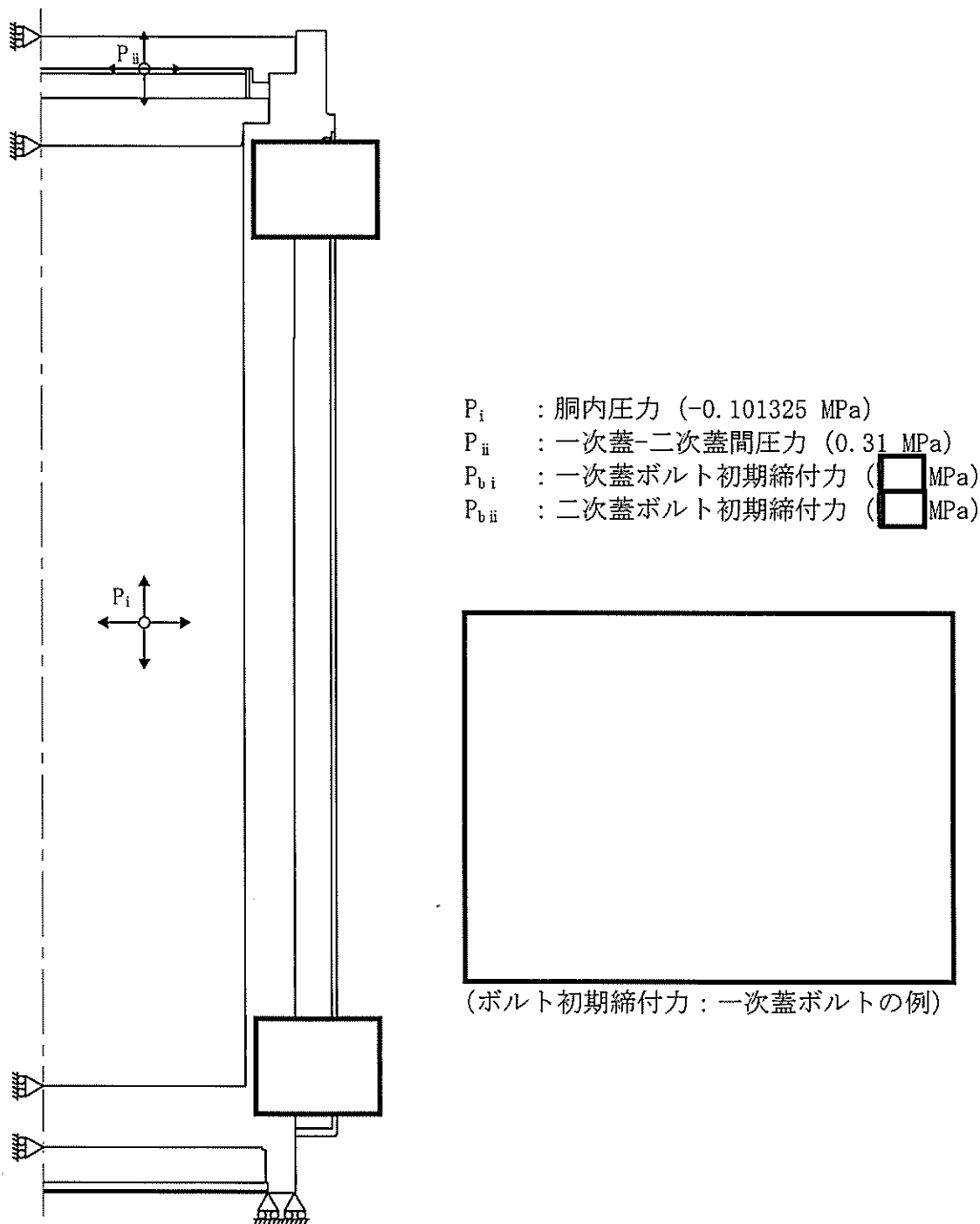
3.2.2 計算方法

- (1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-2図に、荷重及び境界条件を第3-3図に示す。



第 3-2 図 密封容器の解析モデル（設計時）



第 3-3 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（設計時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算は、応力評価式により行う。カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. カバープレート

内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力(σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 、 σ_{z1})は、カバープレートを周辺支持の円板としてモデル化し、次式(「日本機械学会 機械工学便覧(基礎編) α3材料力学」に示される等分布荷重が作用する場合の周辺支持円板の式)で計算される。カバープレートの最大応力は第3-1図⑮に発生する。

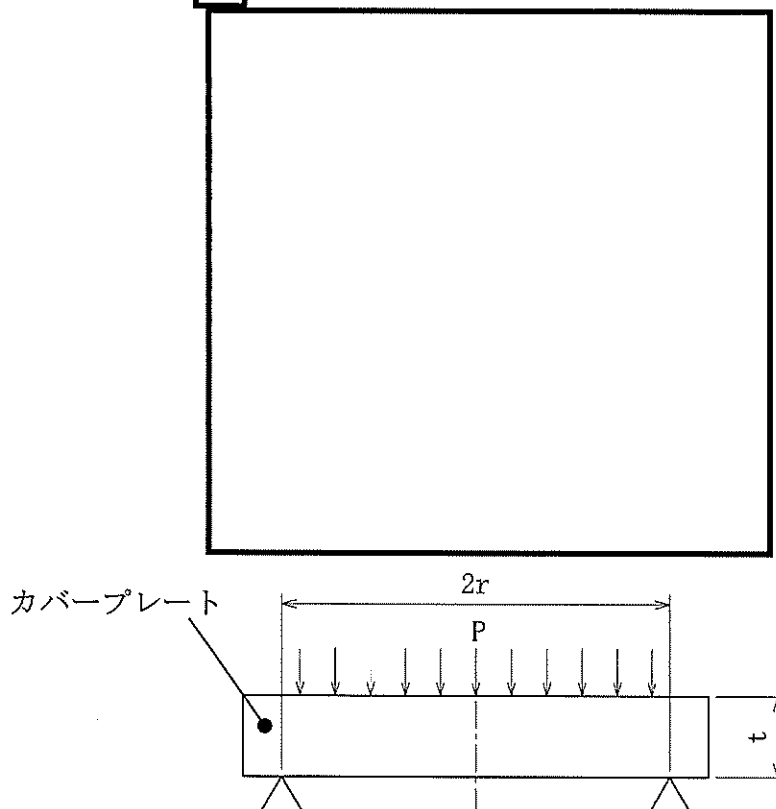
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_{\theta1} &= \sigma_{r1} \\ \sigma_{z1} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

P : 最高使用圧力(0.41 MPa)

r : ボルトピッチ半径(mm)

t : 板厚(mm)



b. カバープレートボルト

カバープレートに加わる内圧により発生するボルト荷重及びガスケット締付け時のボルト荷重による平均引張応力(σ_{n1})は、カバープレートに加わる内圧による平均引張応力(σ_{n2})とガスケット締付け時の平均引張応力(σ_{n3})の合計値で求められる。計算式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n1} &= \sigma_{n2} + \sigma_{n3} \\ \sigma_{n2} &= \frac{H}{A} \\ \sigma_{n3} &= \frac{W_{m2} \times n_b}{A} \\ H &= \frac{\pi}{4} \cdot D_G^2 \cdot P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

A : カバープレートボルト最小断面積の合計値 (mm²)

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \times n_b$$

d_s : カバープレートボルトの最小径 (mm)

n_b : カバープレートボルトの本数 (本)

H : カバープレートに加わる内圧による全荷重 (N)

D_G : ガスケット反力の作用する位置 (直径) (mm)

P : 最高使用圧力 (0.41 MPa)

W_{m2} : ガスケット締付け時のボルト荷重
(ボルト1本当たり) (N)

3.2.3 計算結果

応力計算結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-1 表 密封容器の応力評価（設計条件）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋（中央）	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	8	186
	①’	$P_L + P_b$	7	186
一次蓋（端部）	②－②’	P_L	5	186
二次蓋（中央）	③－③’	P_m	4	124
	③	$P_L + P_b$	24	186
	③’	$P_L + P_b$	26	186
二次蓋（端部）	④－④’	P_L	5	186
胴（中央）	⑦－⑦’	P_m	1	122
	⑦	$P_L + P_b$	1	183
	⑦’	$P_L + P_b$	1	183
胴（下部）	⑧－⑧’ －1	P_L	1	183
	⑧－⑧’ －2	P_L	1	183
胴（底板）（中央）	⑨－⑨’	P_m	1	122
	⑨	$P_L + P_b$	1	183
	⑨’	$P_L + P_b$	1	183
胴（底板）（端部）	⑩－⑩’	P_L	1	183
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	281
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	222	283
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレート ボルト	⑯	σ_m	166	281

3.3 貯蔵時

3.3.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 自重
- ・ ボルト初期締付力
- ・ 熱荷重

3.3.2 計算方法

(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-4図に、荷重及び境界条件を第3-5図に示す。温度分布は、「資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す貯蔵時の除熱解析結果を入力する。

なお、胴（底板）の平均支圧応力計算は、応力評価式により行う。

バスケット底面との接触部である胴（底板）に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2 \cdot g}{A_1} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

m_G : バスケット及び使用済燃料集合体の質量 (25400 kg)

G_2 : 鉛直方向加速度係数 (1)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

A_1 : 接触面積 (2.739×10^5 mm²)

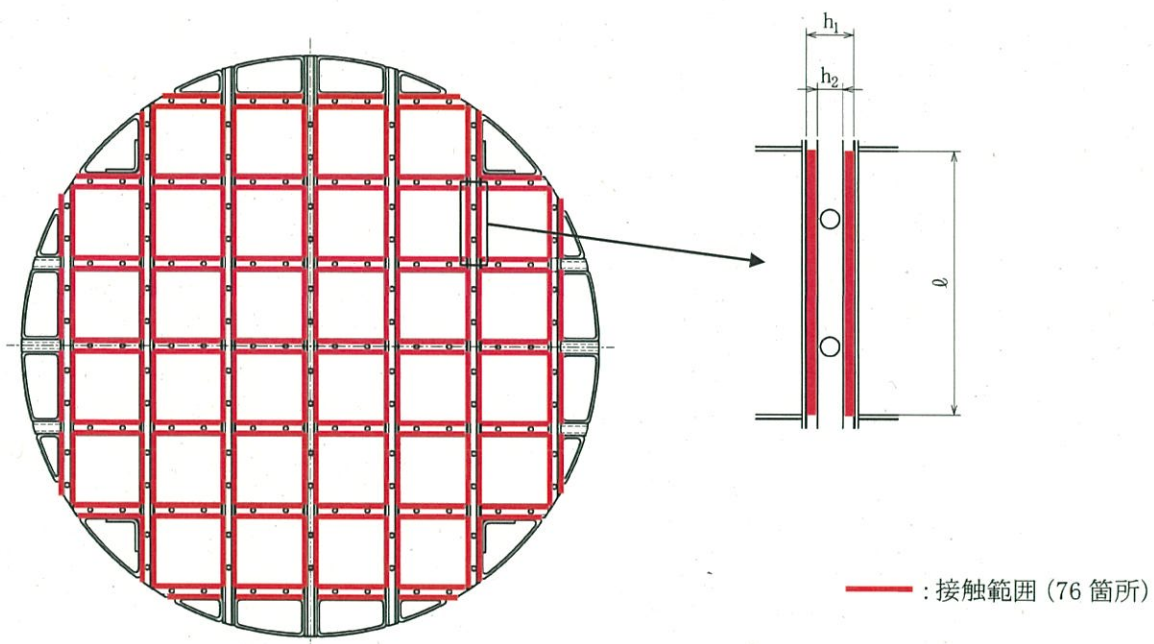
$$A_1 = (h_1 - h_2) \times \ell \times n$$

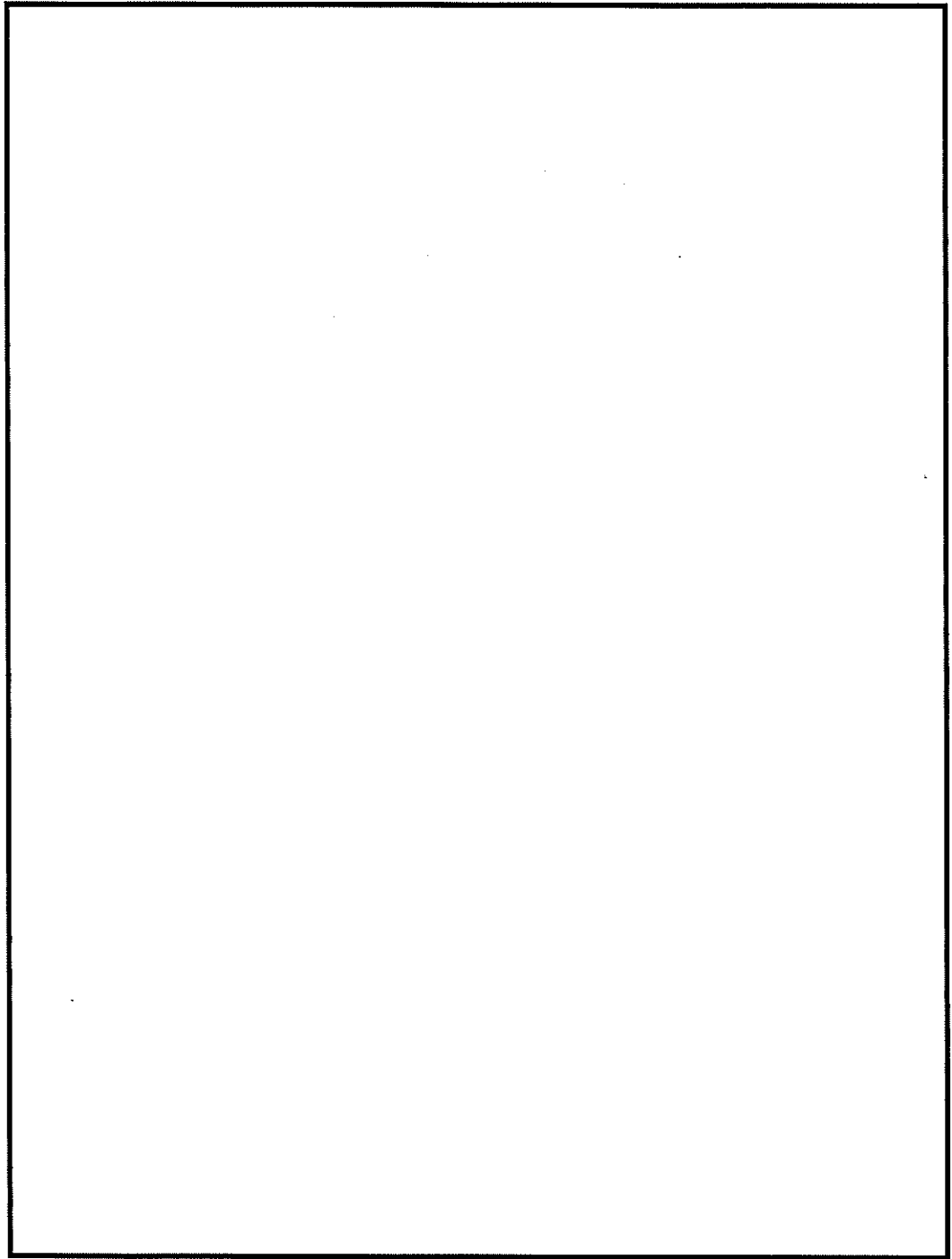
h_1 : バスケットプレート全厚さ (mm)

h_2 : バスケットプレート内幅 (mm)

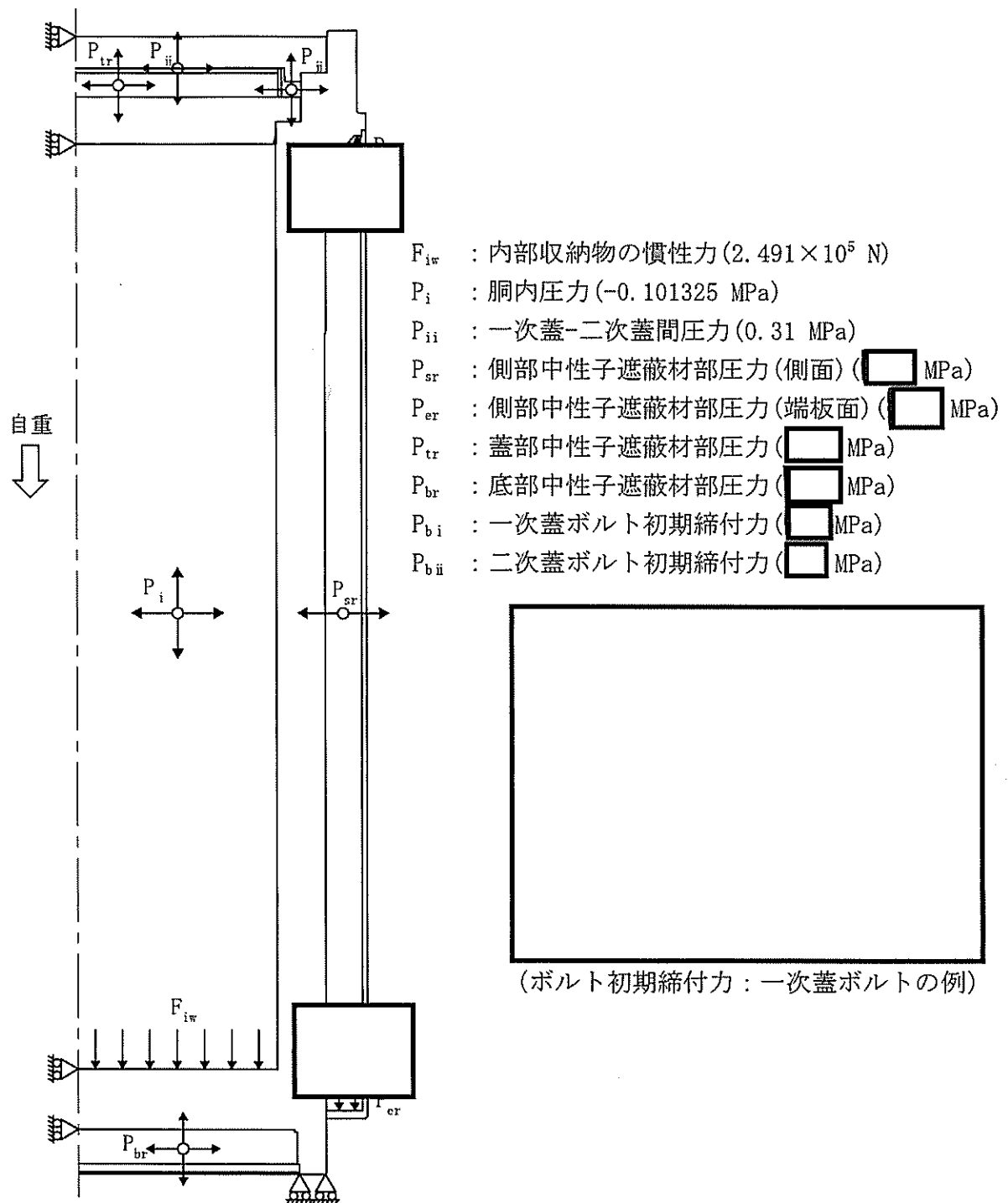
ℓ : バスケットプレート長さ (mm)

n : 胴 (底板) に接触するバスケットプレート ℓ 部の数 (76箇所)





第 3-4 図 密封容器の解析モデル（貯蔵時）



第 3-5 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（貯蔵時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算は、応力評価式により行う。カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. カバープレート

内圧及び慣性力によりカバープレートに発生する一次膜＋一次曲げ応力は、次式で計算される。なお、カバープレートは一次蓋に比べて薄く、カバープレート内の温度差は小さく熱荷重の影響は無視できることから、二次応力は無視できる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{r3} = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \\ \sigma_{\theta 3} = \sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} \\ \sigma_{z3} = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力(σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta 1}$ 、 σ_{z1})は、3.2.2(2)と同様である。

慣性力により発生する一次膜＋一次曲げ応力(σ_{r2} 、 $\sigma_{\theta 2}$ 、 σ_{z2})は、カバープレートを周辺支持の円板とモデル化し、次式(「日本機械学会 機械工学便覧(基礎編) α3材料力学」に示される等分布荷重が作用する場合の周辺支持円板の式)で計算される。カバープレートの最大応力は第3-1図⑮に発生する。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{r2} = \frac{1.24 \cdot w \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_{\theta 2} = \sigma_{r2} \\ \sigma_{z2} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

w : 慣性力による分布荷重

$$w = t \cdot \rho \cdot G_2 \cdot g$$

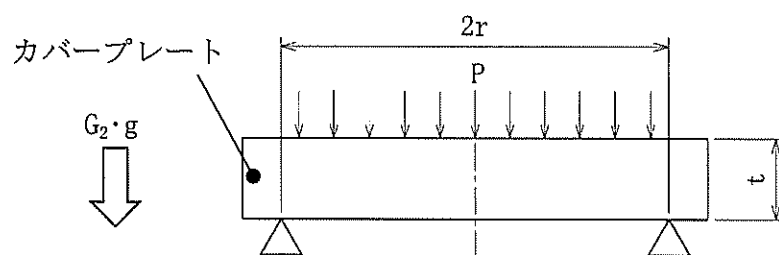
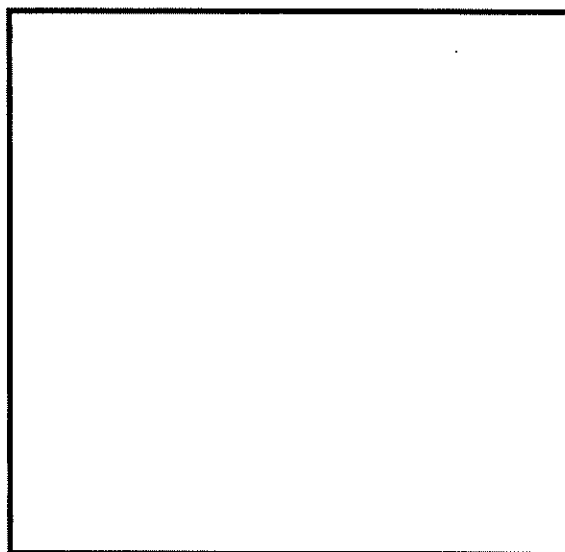
r : ボルトピッチ半径 (mm)

t : 板厚 (mm)

ρ : カバープレート材料(SUS304)の密度 ($7.93 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$)

G_2 : 鉛直方向加速度係数 (1)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)



b. カバープレートボルト

鉛直方向下向きの慣性力によりカバープレートボルトに発生する応力は圧縮応力であり、鉛直方向下向きの慣性力を考慮した場合の引張応力は3.2.2項の設計時の応力以下となる。また、鉛直方向下向きの慣性力による影響は小さいことから、評価結果は設計時と同じ値とする。

3.3.3 計算結果

応力計算結果を第3-2表に示す。第3-2表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-2 表 密封容器の応力評価（貯蔵時）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	9	186
	①’	$P_L + P_b$	8	186
	①	$P_L + P_b + Q$	10	372
	①’	$P_L + P_b + Q$	12	372
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	7	186
	②	$P_L + P_b + Q$	9	372
	②’	$P_L + P_b + Q$	6	372
二次蓋 (中央)	③－③’	P_m	5	124
	③	$P_L + P_b$	26	186
	③’	$P_L + P_b$	29	186
	③	$P_L + P_b + Q$	20	372
	③’	$P_L + P_b + Q$	31	372
二次蓋 (端部)	④－④’	P_L	5	186
	④	$P_L + P_b + Q$	23	372
	④’	$P_L + P_b + Q$	11	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	16	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	13	185
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	15	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥－⑥’	P_L	10	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	13	185
	⑥’	$P_L + P_b + Q$	12	185
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	122
	⑦	$P_L + P_b$	3	183
	⑦’	$P_L + P_b$	2	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	14	366
	⑦’	$P_L + P_b + Q$	7	366
	⑦－⑦’	σ_c	3	90

第 3-2 表 密封容器の応力評価（貯蔵時）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
胴 （下部）	⑧－⑧'－1	P_L	2	183
	⑧－1	$P_L + P_b + Q$	29	366
	⑧'－1	$P_L + P_b + Q$	18	366
	⑧－⑧'－1	σ_c	2	90
	⑧－⑧'－2	P_L	3	183
	⑧－2	$P_L + P_b + Q$	11	366
	⑧'－2	$P_L + P_b + Q$	17	366
	⑧－⑧'－2	σ_c	3	90
胴（底板） （中央）	⑨－⑨'	P_m	1	122
	⑨	$P_L + P_b$	2	183
	⑨'	$P_L + P_b$	2	183
	⑨	$P_L + P_b + Q$	22	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q$	8	366
	⑨	σ_p	1	183
胴（底板） （端部）	⑩－⑩'	P_L	1	183
	⑩	$P_L + P_b + Q$	16	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	19	366
	⑩	σ_p	1	183
一次蓋 （シール部）	⑪－⑪'	P_L	34	185
	⑪	$P_L + P_b + Q$	28	185
	⑪'	$P_L + P_b + Q$	61	185
二次蓋 （シール部）	⑫－⑫'	P_L	15	186
	⑫	$P_L + P_b + Q$	30	186
	⑫'	$P_L + P_b + Q$	11	186

第 3-2 表 密封容器の応力評価（貯蔵時）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	562
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	251	843
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	228	566
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	272	849
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレートボルト	⑯	σ_m	166	562

3.4 吊上げ時

3.4.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ ボルト初期締付力
- ・ 吊上げ荷重（自重含む）
- ・ 熱荷重

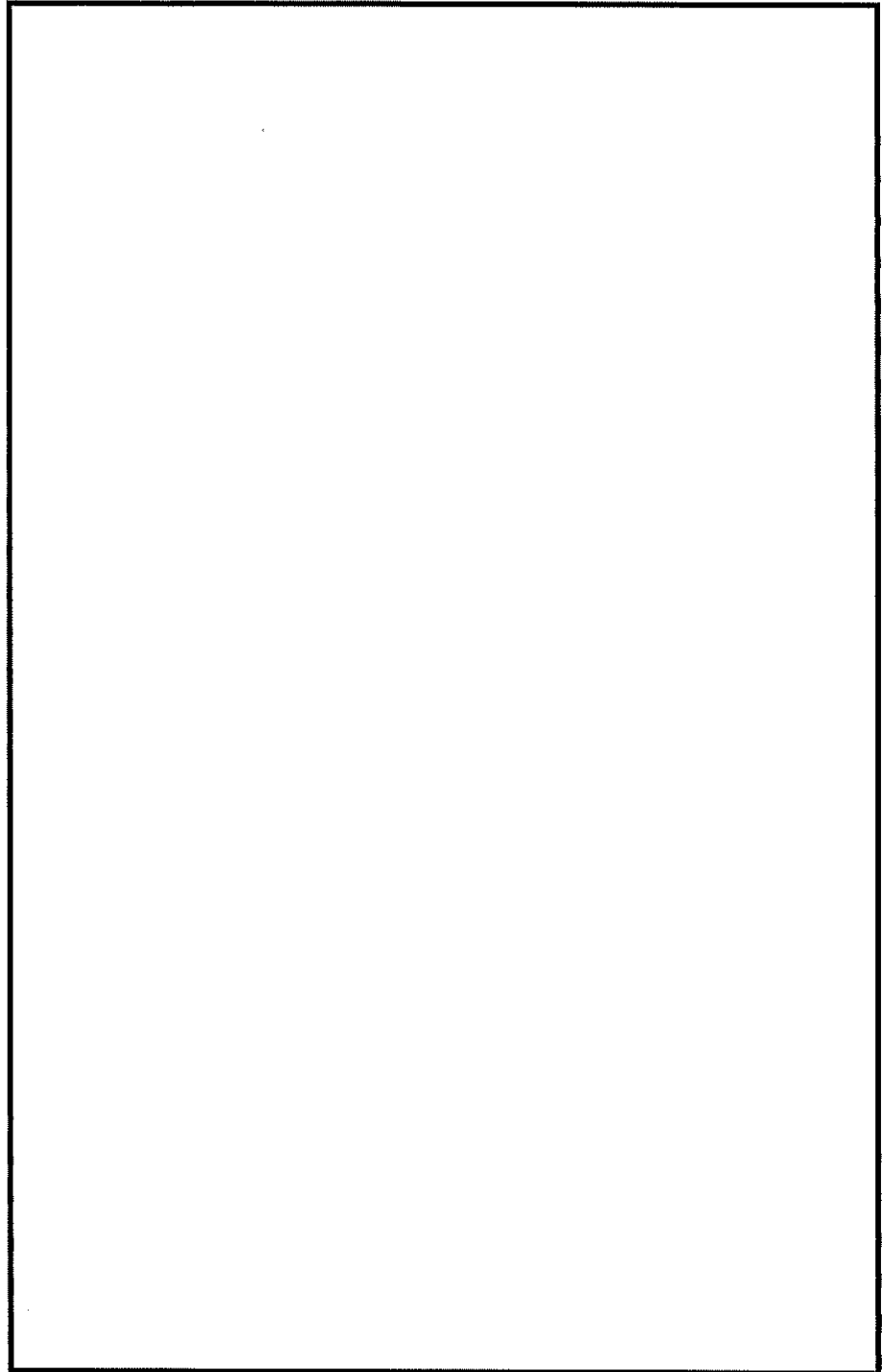
3.4.2 計算方法

(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

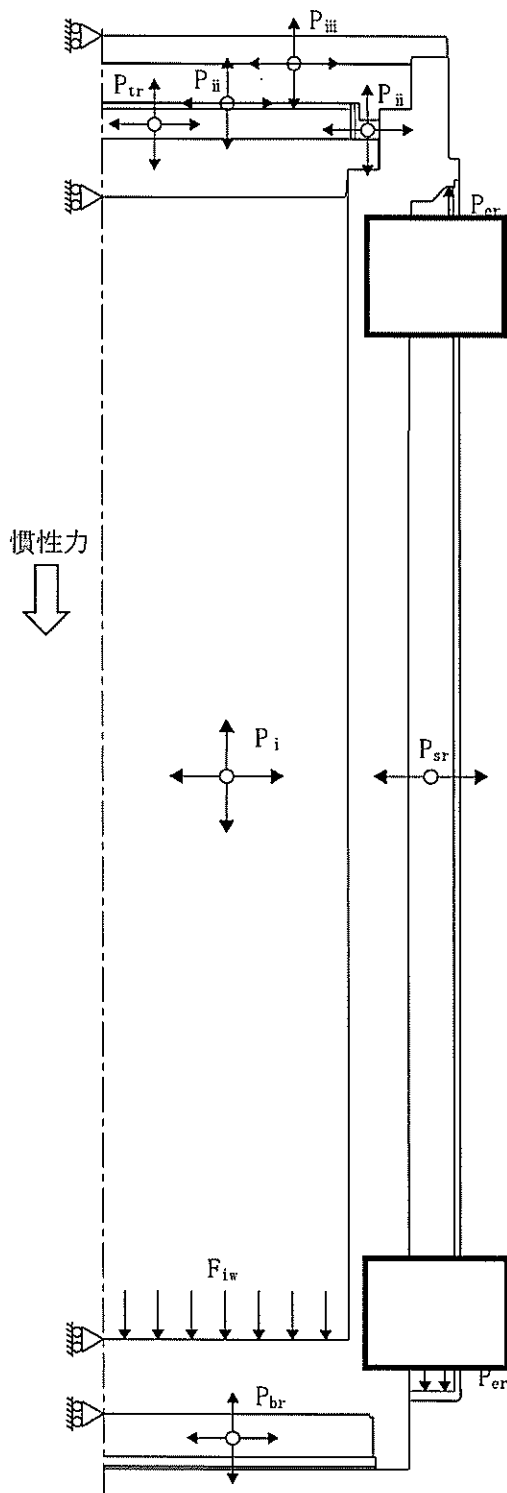
応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-6図に、荷重及び境界条件を第3-7図に示す。温度分布は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果を入力する^(注1)。

なお、胴（底板）の平均支圧応力計算は、応力評価式により行う。応力計算方法は、3.3.2(1)と同様である。ただし、鉛直方向加速度係数 $G_2=1.3$ とする。

(注1)乾式キャスクの取扱いは緩衝体取り外し後に行うが、乾式キャスクの温度分布が緩衝体取り外し状態の平衡状態になるまでには数日要するため、吊上げ時の応力計算に入力する温度分布は緩衝体装着時の温度分布（乾式キャスク（タイプ1）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果）を入力する。なお、一般の試験条件では構外輸送時の条件（周囲温度38℃、太陽熱ふく射有りの環境条件）で解析を行っており、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスク取扱い状態（緩衝体取り外し状態）よりも乾式キャスク各部位の温度は高くなる傾向であり、許容応力は保守側の設定となる。



第 3-6 図 密封容器の解析モデル（吊上げ時）



トラニオン(90° , 270° で支持)

F_{iw} : 内部収納物の慣性力 (3.239×10^5 N)

P_i : 胴内圧力 (-0.101325 MPa)

P_{ii} : 一次蓋-二次蓋間圧力 (0.31 MPa)

P_{iii} : 二次蓋-三次蓋間圧力 (0.22 MPa)

P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力(側面) (MPa)

P_{er} : 側部中性子遮蔽材部圧力(端板面) (MPa)

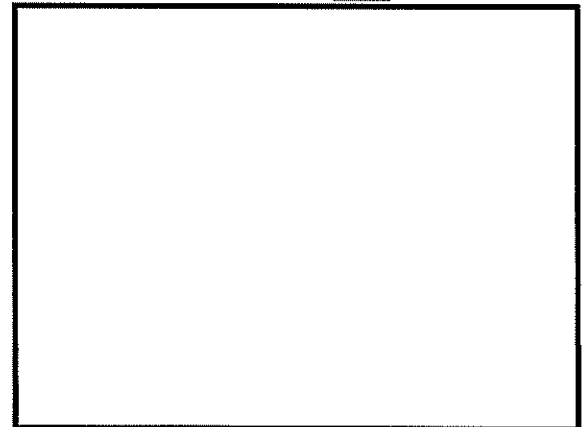
P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)

P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)

P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

第 3-7 図 荷重 (慣性力/内圧) 及び境界条件 (吊上げ時)

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算方法は、3.3.2(2)と同様である。ただし、鉛直方向加速度係数 $G_2=1.3$ とする。

なお、カバープレートボルトについては、鉛直方向下向きの慣性力によりカバープレートボルトに発生する応力は圧縮応力であり、鉛直方向下向きの慣性力を考慮した場合の引張応力は3.2.2項の設計時の応力以下となる。また、鉛直方向下向きの慣性力による影響は小さいことから、評価結果は設計時と同じ値とする。

3.4.3 計算結果

応力計算結果を第3-3表に示す。第3-3表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-3 表 密封容器の応力評価（吊上げ時）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	9	186
	①’	$P_L + P_b$	8	186
	①	$P_L + P_b + Q$	8	372
	①’	$P_L + P_b + Q$	11	372
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	5	186
	②	$P_L + P_b + Q$	8	372
	②’	$P_L + P_b + Q$	8	372
二次蓋 (中央)	③－③’	P_m	2	124
	③	$P_L + P_b$	9	186
	③’	$P_L + P_b$	11	186
	③	$P_L + P_b + Q$	9	372
	③’	$P_L + P_b + Q$	10	372
二次蓋 (端部)	④－④’	P_L	4	186
	④	$P_L + P_b + Q$	9	372
	④’	$P_L + P_b + Q$	11	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	13	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	12	185
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	14	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥－⑥’	P_L	10	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	17	185
	⑥’	$P_L + P_b + Q$	16	185
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	124
	⑦	$P_L + P_b$	4	186
	⑦’	$P_L + P_b$	3	186
	⑦	$P_L + P_b + Q$	13	372
	⑦’	$P_L + P_b + Q$	9	372
	⑦－⑦’	σ_c	3	90

第 3-3 表 密封容器の応力評価（吊上げ時）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
胴 （下部）	⑧－⑧’－1	P_L	2	186
	⑧－1	$P_L + P_b + Q$	13	372
	⑧’－1	$P_L + P_b + Q$	20	372
	⑧－⑧’－1	σ_c	2	90
	⑧－⑧’－2	P_L	3	186
	⑧－2	$P_L + P_b + Q$	12	372
	⑧’－2	$P_L + P_b + Q$	21	372
	⑧－⑧’－2	σ_c	3	90
胴（底板） （中央）	⑨－⑨’	P_m	1	122
	⑨	$P_L + P_b$	2	183
	⑨’	$P_L + P_b$	2	183
	⑨	$P_L + P_b + Q$	26	366
	⑨’	$P_L + P_b + Q$	6	366
	⑨	σ_p	2	183
胴（底板） （端部）	⑩－⑩’	P_L	1	183
	⑩	$P_L + P_b + Q$	18	366
	⑩’	$P_L + P_b + Q$	24	366
	⑩	σ_p	2	183
一次蓋 （シール部）	⑪－⑪’	P_L	33	185
	⑪	$P_L + P_b + Q$	29	185
	⑪’	$P_L + P_b + Q$	63	185
二次蓋 （シール部）	⑫－⑫’	P_L	13	186
	⑫	$P_L + P_b + Q$	22	186
	⑫’	$P_L + P_b + Q$	10	186

第 3-3 表 密封容器の応力評価（吊上げ時）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	248	562
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	249	843
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	205	564
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	217	846
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレートボルト	⑯	σ_m	166	562

3.5 検査架台への衝突時

3.5.1 荷重条件

検査架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

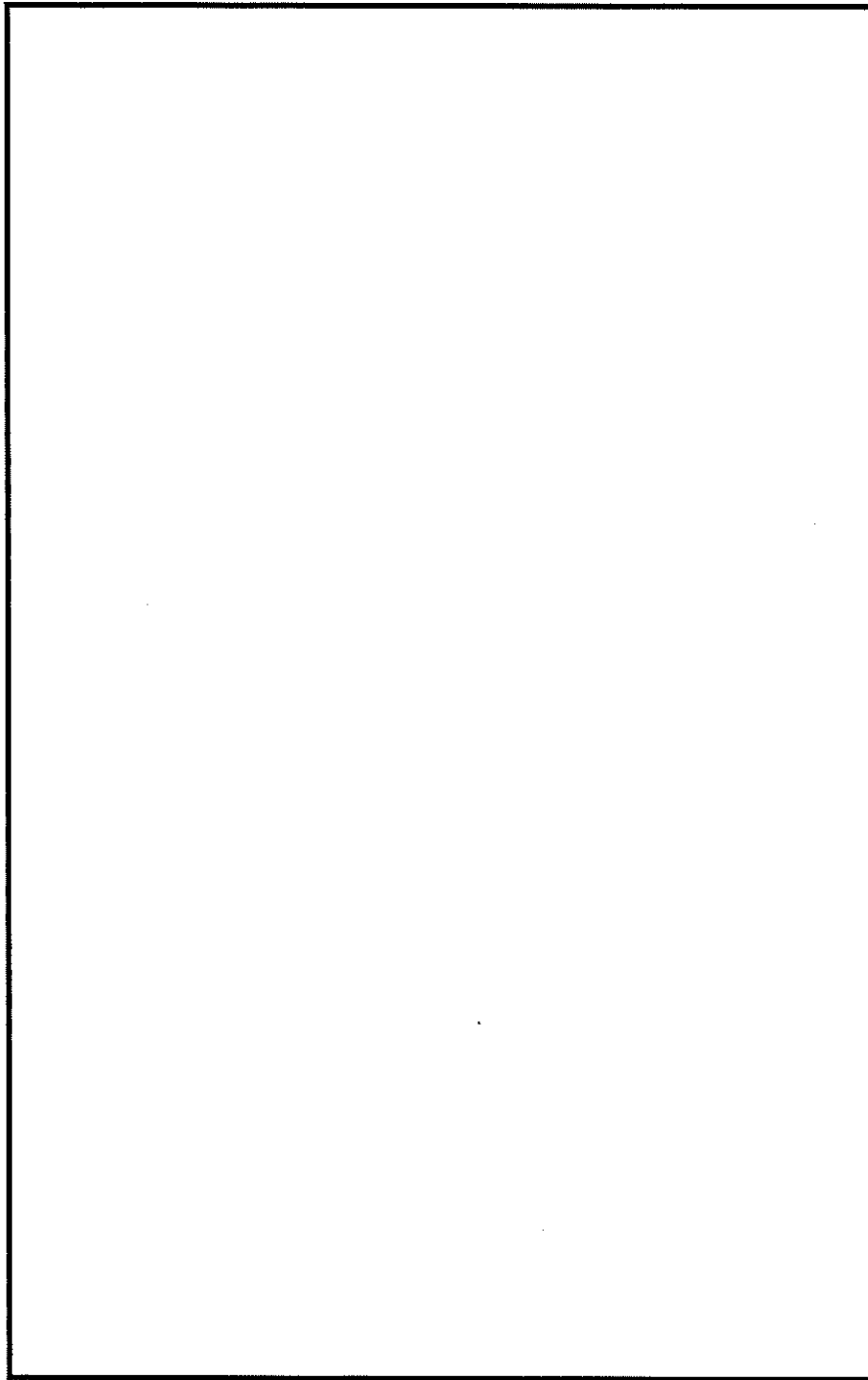
- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ ボルト初期締付力
- ・ 検査架台への衝突時荷重
- ・ 熱荷重

3.5.2 計算方法

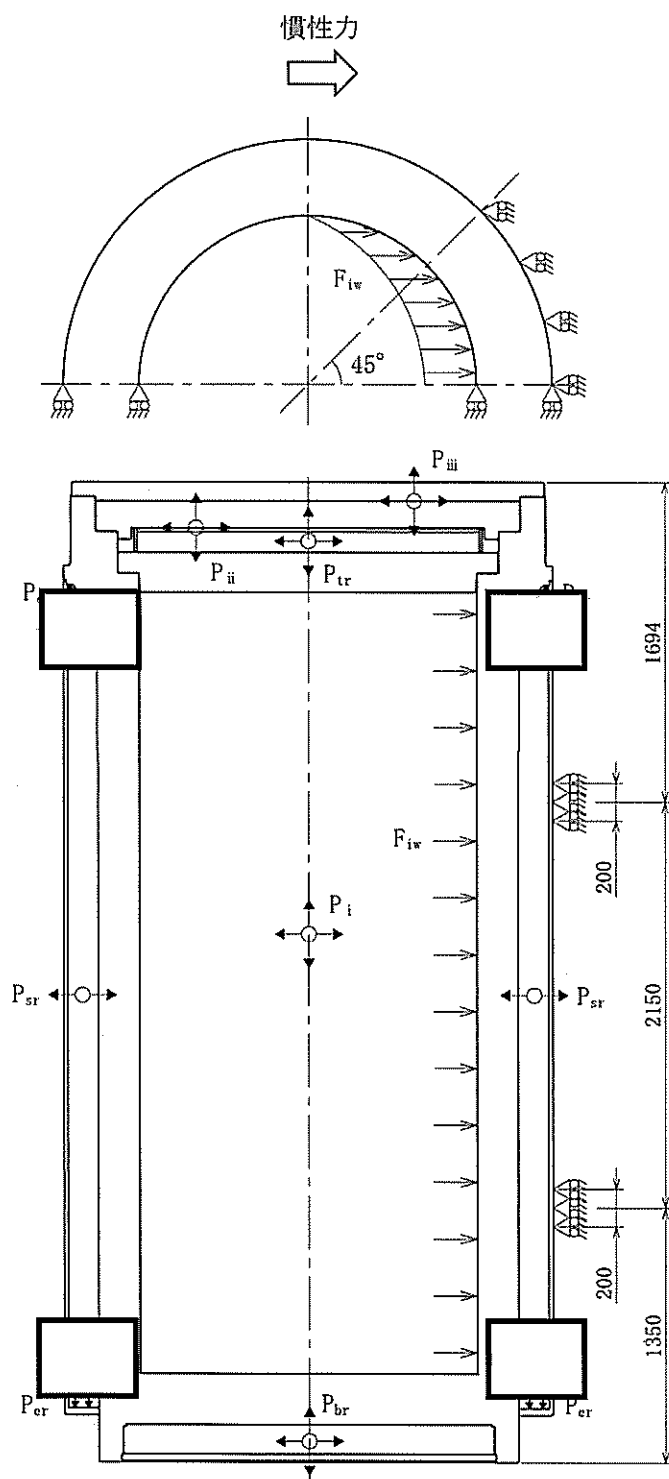
(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-8図に、荷重及び境界条件を第3-9図に示す。温度分布は、乾式キャスク（タイプ1）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果を入力する^(注1)。

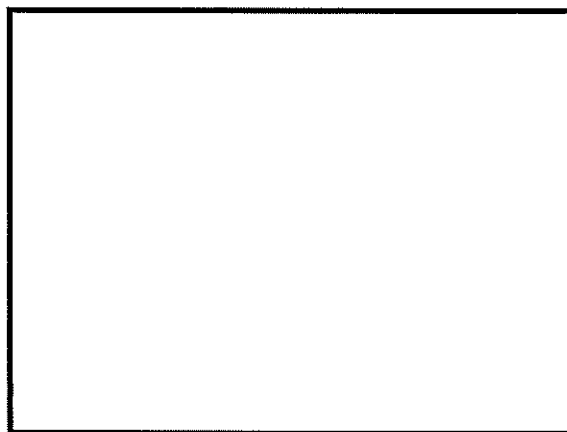
(注1)乾式キャスクの取扱いは緩衝体取り外し後に行うが、乾式キャスクの温度分布が緩衝体取り外し状態の平衡状態になるまでには数日要するため、検査架台への衝突時の応力計算に inputs する温度分布は緩衝体装着時の温度分布（乾式キャスク（タイプ1）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果）を入力する。なお、一般の試験条件では構外輸送時の条件（周囲温度38℃、太陽熱ふく射有りの環境条件）で解析を行っており、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスク取扱い状態（緩衝体取り外し状態）よりも乾式キャスク各部位の温度は高くなる傾向であり、許容応力は保守側の設定となる。



第 3-8 図 密封容器の解析モデル（検査架台への衝突時）



- F_{iw} : 内部収納物の慣性力 (8.470×10^5 N)
 P_i : 胴内圧力 (-0.101325 MPa)
 P_{ii} : 一次蓋-二次蓋間圧力 (0.31 MPa)
 P_{iii} : 二次蓋-三次蓋間圧力 (0.22 MPa)
 P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力(側面)
 (MPa)
 P_{er} : 側部中性子遮蔽材部圧力(端板面)
 (MPa)
 P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
 P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
 P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
 P_{bii} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
 P_{biii} : 三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

第 3-9 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（検査架台への衝突時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算は、応力評価式により行う。カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. カバープレート

水平方向の慣性力によりカバープレートに応力は発生しないため、カバープレートに発生する応力は3.2.2(2)と同じ値である。

b. カバープレートボルト

カバープレートボルトに発生する平均引張応力(σ_{n1}) + 曲げ応力(σ_{b1})は、次式で計算される。

平均引張応力(σ_{n1})は、3.2.2(2)と同じ値である。

カバープレートボルトの曲げ応力の解析モデルを第3-10図に示す。検査架台衝突時の慣性力に伴うカバープレートへ作用する荷重により、カバープレートボルトへ曲げモーメントが作用する。カバープレートは□本のカバープレートボルトを用いて一次蓋へ取り付けられており、この曲げモーメントは□本のカバープレートボルトへ負荷される。カバープレートボルトに発生する曲げ応力は、次式で計算される。

$$\sigma_{b1} = \frac{M}{n_b Z} \cdots \cdots (3.6)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = m_r \cdot G_1 \cdot g \cdot L$$

m_r : カバープレートの質量 (10 kg)

G_1 : 水平方向加速度係数 (3.4)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

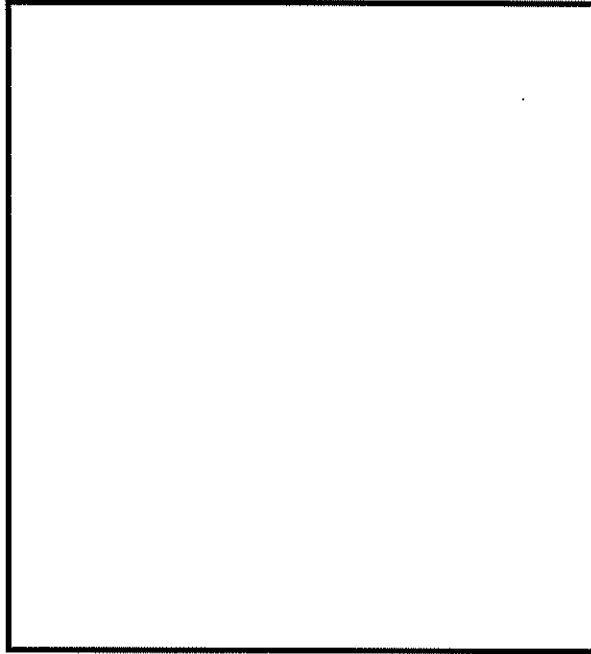
L : カバープレートボルト軸部の長さ □ mm)

Z : カバープレートボルトの断面係数 □ mm³)

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot d_s^3$$

d_s : カバープレートボルトの最小径 □ mm)

n_b : カバープレートボルトの本数 □ 本)



第3-10図 カバープレートボルトの曲げ応力の解析モデル

3.5.3 計算結果

応力計算結果を第3-4表に示す。第3-4表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-4 表 密封容器の応力評価（検査架台への衝突時）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	8	186
	①’	$P_L + P_b$	7	186
	①	$P_L + P_b + Q$	7	372
	①’	$P_L + P_b + Q$	9	372
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	7	186
	②	$P_L + P_b + Q$	10	372
	②’	$P_L + P_b + Q$	13	372
二次蓋 (中央)	③－③’	P_m	2	124
	③	$P_L + P_b$	10	186
	③’	$P_L + P_b$	11	186
	③	$P_L + P_b + Q$	10	372
	③’	$P_L + P_b + Q$	11	372
二次蓋 (端部)	④－④’	P_L	4	186
	④	$P_L + P_b + Q$	9	372
	④’	$P_L + P_b + Q$	11	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	17	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	17	185
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	16	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥－⑥’	P_L	10	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	16	185
	⑥’	$P_L + P_b + Q$	14	185
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	4	124
	⑦	$P_L + P_b$	8	186
	⑦’	$P_L + P_b$	7	186
	⑦	$P_L + P_b + Q$	15	372
	⑦’	$P_L + P_b + Q$	10	372
	⑦－⑦’	σ_c	3	90

第 3-4 表 密封容器の応力評価（検査架台への衝突時）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
胴 (下部)	⑧－⑧'－1	P_L	4	186
	⑧－1	$P_L + P_b + Q$	22	372
	⑧'－1	$P_L + P_b + Q$	19	372
	⑧－⑧'－1	σ_c	3	90
	⑧－⑧'－2	P_L	3	186
	⑧－2	$P_L + P_b + Q$	14	372
	⑧'－2	$P_L + P_b + Q$	25	372
	⑧－⑧'－2	σ_c	3	90
胴（底板） (中央)	⑨－⑨'	P_m	1	122
	⑨	$P_L + P_b$	1	183
	⑨'	$P_L + P_b$	1	183
	⑨	$P_L + P_b + Q$	26	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q$	4	366
胴（底板） (端部)	⑩－⑩'	P_L	3	183
	⑩	$P_L + P_b + Q$	20	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	25	366
一次蓋 (シール部)	⑪－⑪'	P_L	45	185
	⑪	$P_L + P_b + Q$	34	185
	⑪'	$P_L + P_b + Q$	103	185
二次蓋 (シール部)	⑫－⑫'	P_L	13	186
	⑫	$P_L + P_b + Q$	22	186
	⑫'	$P_L + P_b + Q$	10	186

第 3-4 表 密封容器の応力評価（検査架台への衝突時）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	562
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	264	843
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	207	564
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	228	846
カバースプレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバースプレート ボルト	⑯	σ_m	166	562
	⑯	$\sigma_m + \sigma_b$	169	843

3.6 試験時

3.6.1 荷重条件

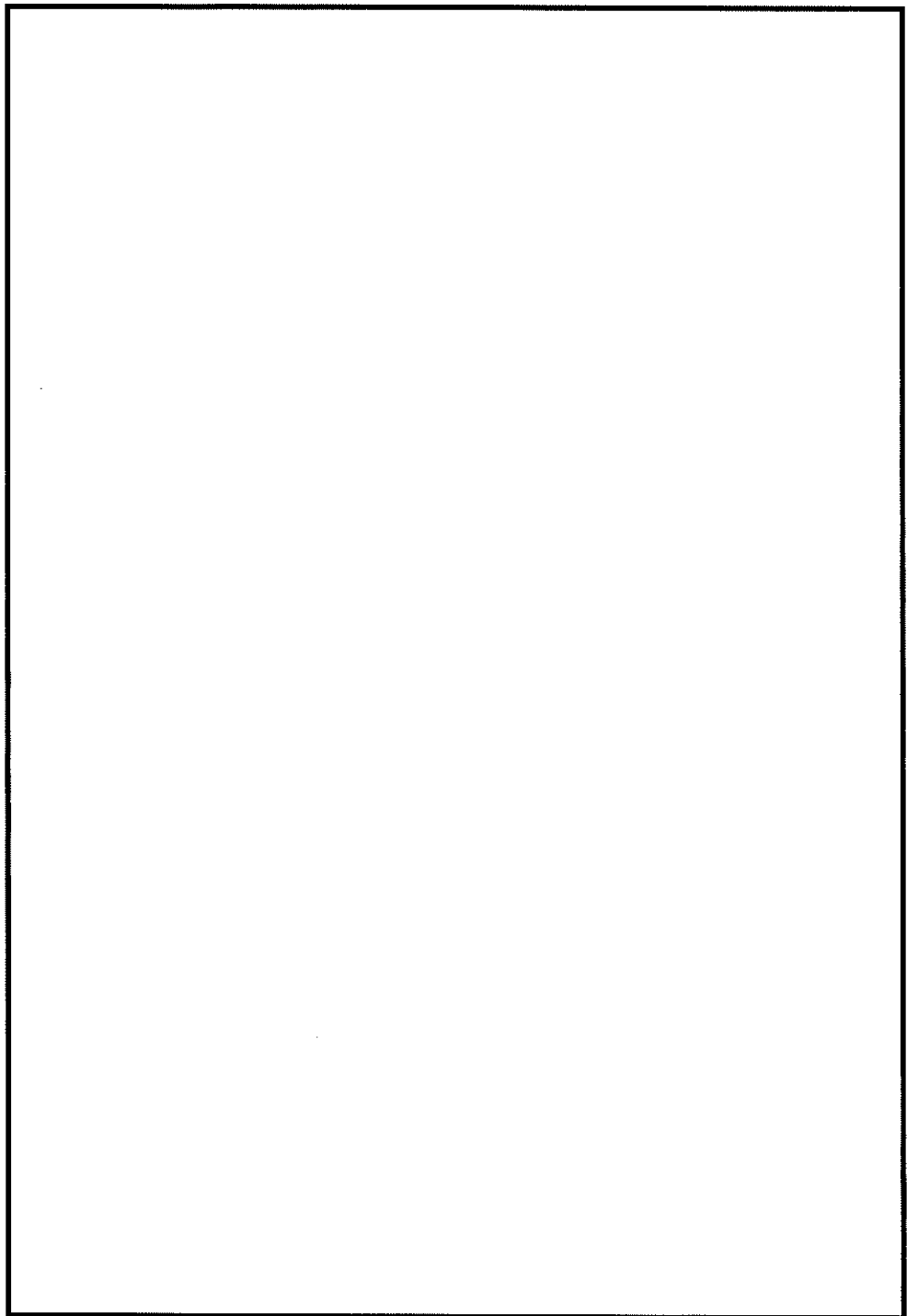
試験時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 自重
- ・ ボルト初期締付力

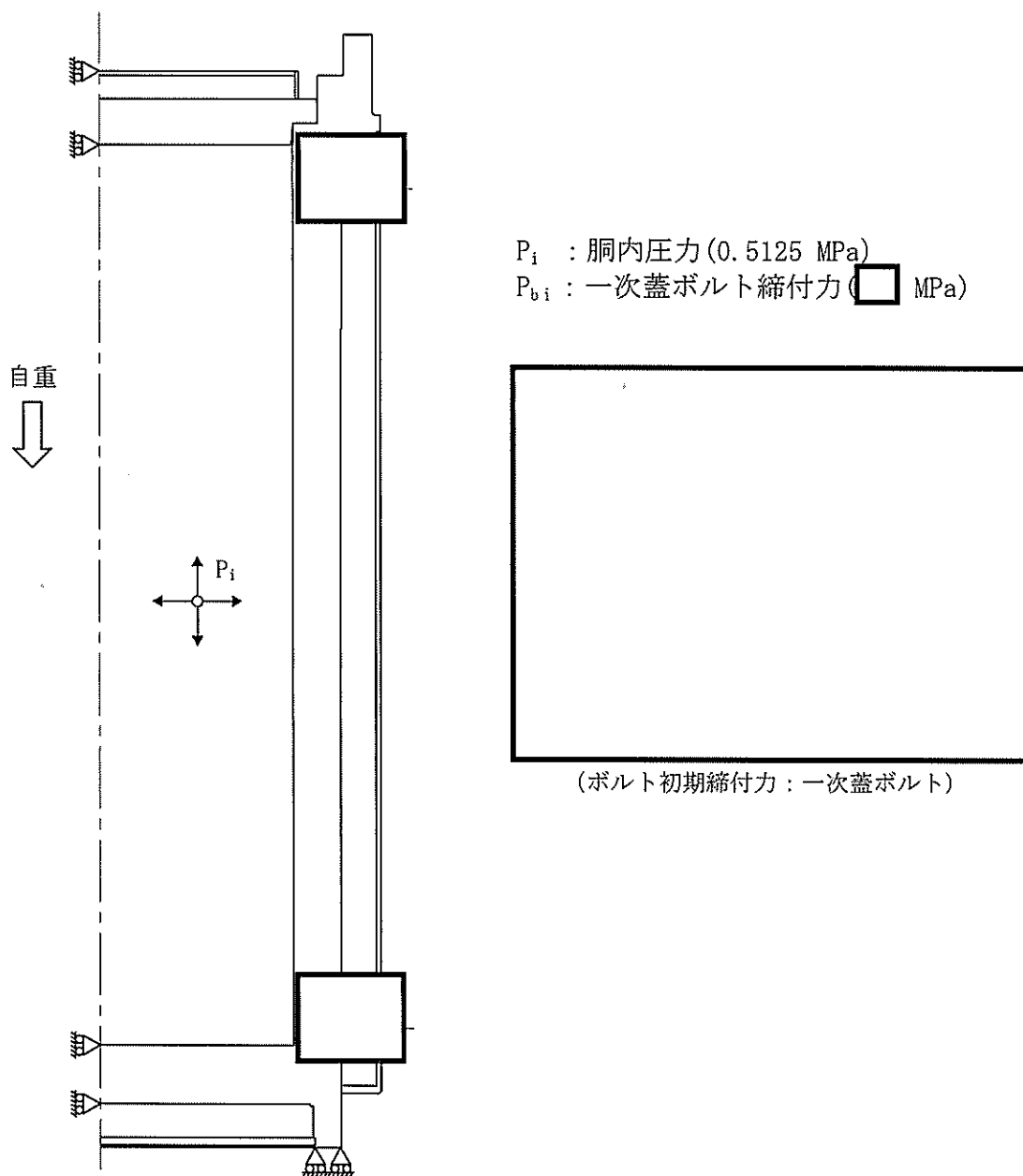
3.6.2 計算方法

(1) 一次蓋、胴及び胴（底板）

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-11図に、荷重及び境界条件を第3-12図に示す。耐圧試験は常温で行うため、温度分布は全ての部材を常温として入力する。



第 3-11 図 密封容器の解析モデル（試験時）



第 3-12 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（試験時）

(2) カバープレート

応力計算方法は、3.2.2(2)と同様である。ただし、 $P=0.5125$ MPaとする。

3.6.3 計算結果

応力計算結果を第3-5表に示す。第3-5表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-5 表 密封容器の応力評価（試験状態）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	2	186
	①	$P_m + P_b$	14	279
	①’	$P_m + P_b$	14	279
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	8	279
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	11	207
	⑤	$P_L + P_b + Q$	11	207
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	11	207
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	186
	⑦	$P_m + P_b$	3	279
	⑦’	$P_m + P_b$	2	279
胴 (下部)	⑧－⑧’ －1	P_L	3	279
	⑧－⑧’ －2	P_L	2	279
胴（底板） (中央)	⑨－⑨’	P_m	1	186
	⑨	$P_m + P_b$	4	279
	⑨’	$P_m + P_b$	5	279
胴（底板） (端部)	⑩－⑩’	P_L	2	279
一次蓋 (シール部)	⑪－⑪’	P_L	35	207
	⑪	$P_L + P_b + Q$	15	207
	⑪’	$P_L + P_b + Q$	67	207
カバープレート	⑮	$P_m + P_b$	4	276

4. 繰返し荷重の評価

4.1 密封容器（ボルトを除く）の応力評価

金属キャスク構造規格 MCD-1332により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(6)に示し、第4-1表にその評価結果のまとめを示す。第4-1表に示すとおり、金属キャスク構造規格 MCD-1332の規定に全て適合しているので、疲労解析を必要としない。

(1) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (1) (大気圧－使用圧力－大気圧の変動)

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数(N_1)は、燃料装荷及び燃料取出し想定回数である10 回として評価する。

$$N_1 = 10 \text{ (回)}$$

胴及び一次蓋について、金属キャスク構造規格 別図8-1において、設計温度における設計応力強さ(S_m)の3倍の値(366 MPa)を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数(N_a)は、

$$N_a = 3627 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 \leq N_a$$

であり、燃料装荷及び燃料取出し想定回数を10 回としても条件を満足する。

また、二次蓋については設計温度における設計応力強さ(S_m)の 3倍の値は372 MPa と大きくなるが、許容繰返し回数(N_a)は 3443 回であり、同様に条件を満足する。

(2) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (2) (燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態A及びBにおける圧力変動)

胴について、燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用状態A及びBにおける圧力変動の全振幅の許容値(A_m)は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_1}{S_m} = 0.096 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

P : 最高使用圧力(=0.41 MPa)

S_m : 設計応力強さ(=122 MPa)

S_1 : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、許容繰返し回数 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ(=86 MPa)

また、(4.1)式で計算される値を超えるものにあつては、許容値(A_m)は、次式で計算される。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、(4.1)式による値を超える
圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返
しピーク応力強さ(MPa)

(4.1)式より、圧力変動の全振幅の許容値(A_m)は、0.096 MPa となる。燃料装荷時、
燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用状態A及びBにおける実際の圧力は、密封容
器のため0.096 MPa を超える変動は生じないため、燃料装荷及び燃料取出し想定回
数を10 回としても条件を満足する。

次に、一次蓋及び二次蓋について同様に評価する。(4.1)式の A_m 、 P 及び S_m をそれ
ぞれ以下に示す条件に読み替えて計算すると、圧力変動の全振幅の許容値(A_{m2})は、
0.071 MPa となる。

A_{m2} : 一次蓋及び二次蓋の圧力変動の全振幅の許容値(MPa)

P_2 : 一次蓋又は二次蓋の最高使用圧力(0.31 MPa)
(最高使用圧力0.41 MPaと蓋間圧力0.31 MPaの小さい方)

S_{m2} : 一次蓋又は二次蓋の使用材料の設計応力強さ(124 MPa)
(一次蓋の設計応力強さ124 MPaと二次蓋の設計応力強さ124 MPaは同
じ値である)

一次蓋及び二次蓋において燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用
状態A及びBにおける実際の圧力の変動はほとんどないが、一次蓋と二次蓋間の圧力
を調整する可能性を考え、その回数を 240 回(一次蓋と二次蓋間の圧力は、燃料装
荷及び燃料取出し回数に係わらず、設計貯蔵期間の60年間に於いて3ヵ月毎の圧力監
視を行う。ここで、繰返し回数を保守側に3ヵ月毎の圧力監視毎に圧力調整すると
設定する。240回=4回/年×60年。)として(4.2)式を用いて評価すると、

$$S_a = 989 \text{ MPa}$$

$$A_{m2} = 0.8 \text{ MPa}$$

したがって、燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用状態A及びBに
おける圧力変動の全振幅を蓋間圧力($P_2=0.31 \text{ MPa}$)と仮定しても、

$$P_2 \leq A_{m2}$$

であり、繰返し回数を240回としても条件を満足する。

(3) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (3) (燃料装荷時及び燃料取出し時の温度差)
胴の任意の2点間の距離(p)は、次式で計算される。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 990 \text{ mm} \cdots \cdots (4.3)$$

ここで、

R : 胴の平均半径 (mm)

t : 胴の板厚 (mm)

燃料装荷時燃料取出し時において、相互の距離がpを超えない任意の2点間の温度差の許容値(T)は、次式で計算する。なお、2点間の平均温度は胴の最高使用温度($T_{\max}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$)とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 776\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、

E : 2点間の平均温度における縦弾性係数($1.95 \times 10^5\text{ MPa}$)

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数($13.20 \times 10^{-6}\text{ mm/(mm}\cdot^{\circ}\text{C)}$)

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、燃料装荷及び燃料取出しの回数(10回)を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ(3999 MPa)

したがって、任意の2点間において生じる温度差を最高使用温度($T_{\max}$)と常温との差($\Delta T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$)と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、燃料装荷及び燃料取出し想定回数を10回としても条件を満足する。

また、一次蓋及び二次蓋については、上記評価で代表できるため、同様に条件を満足する。

(4) 金属キャスク構造規格 MMCD-1332 (4) (燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態A及びBの温度差変動)

燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態A及びBにおいて、相互の距離がpを超えない任意の2点間の温度差の変動の全振幅の許容値(T)は、次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、

E : 2点間の平均温度における縦弾性係数($1.95 \times 10^5\text{ MPa}$)

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数($13.20 \times 10^{-6}\text{ mm/(mm}\cdot^{\circ}\text{C)}$)

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、(4.6)式により計算した値を超える温度差(T')の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ(MPa)

$$T' = \frac{S_1}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 16\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

S_1 : 金属キャスク構造規格 別図 8-1 において、 10^6 を許容繰返し回数とした場合にこれに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

供用状態 A 及び B において密封容器は密封状態であり、かつ温度変動する加熱源を収納していないので、任意の 2 点間の温度差の変動が (4. 6) 式により計算された値の $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ を超えることは、貯蔵期間における崩壊熱低下による 10 回と考えられ、(4. 5) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 3999\text{ MPa}$$

$$T = 776\text{ }^{\circ}\text{C}$$

したがって、胴の任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度 ($T_{\max}$) と常温との差 ($\Delta T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、繰返し回数を 10 回としても条件を満足する。

なお、一次蓋及び二次蓋については、上記評価で代表できるため、同様に条件を満足する。

(5) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトは同種の合金鋼を使用しており、一次蓋及び二次蓋は炭素鋼を使用している。したがって、合金鋼と炭素鋼の組合せで評価する。なお、カバープレート内の温度差は小さく熱荷重の影響は無視できることから、評価を無視する。

合金鋼と炭素鋼の部分の温度変動の許容値 (T) は、(4. 7) 式で計算する。なお、縦弾性係数及び熱膨張係数は密封容器の最高使用温度 ($T_{\max} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) に対する値とする。

$$T = \frac{S_1}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} = 296\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4. 7)$$

ここで、

S_1 : 金属キャスク構造規格 別図 8-2 において、許容繰返し回数 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ (86 MPa)

E_1 : 炭素鋼の縦弾性係数 (1.95×10^5 MPa)

E_2 : 合金鋼の縦弾性係数 (1.84×10^5 MPa)

α_1 : 炭素鋼の瞬時熱膨張係数 (13.20×10^{-6} mm/(mm $\cdot^{\circ}\text{C}$))

α_2 : 合金鋼の瞬時熱膨張係数 (13.20×10^{-6} mm/(mm $\cdot^{\circ}\text{C}$))

また、(4. 7) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (T) は、(4. 8) 式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-2において、(4.7)式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ(MPa)

(4.7)式より、温度変動の許容値は296 °Cとなる。したがって、異なる材料で作られた部分の温度変動を、最高使用温度(T_{max})と常温との差($\Delta T = 130$ °C)と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、繰返し回数を10回としても条件を満足する。

(6) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (6) (機械的荷重の変動)

供用状態A及びBにおける機械的荷重の変動回数は、以下に示すように全事象の合計回数の213 回と想定する。

燃料装荷時及び燃料取出し時	10 回
吊上げ時	200 回
検査架台への衝突時	3 回
合 計	213 回

この回数に対応する繰返しピーク応力強さ S_a は金属キャスク構造規格 別図8-1より、

$$S_a = 1040 \text{ MPa}$$

である。

第3-2表から第3-4表に示した供用状態A及びBにおける応力強さの最大値($\Delta \sigma_1 = 103 \text{ MPa}$)を機械的荷重により発生する応力の全振幅と考えたとしても、

$$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$$

であり、条件を満足する。

第4-1表 密封容器（ボルトを除く。）の疲労解析不要の評価結果

金属キャスク 構造規格 MCD-1332	繰返し荷重	設定繰返し 回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧－使用圧力－大気圧の変動	10	繰返し回数 $N_1 = 10$	$3S_m$ に対する 許容繰返し回数 $N_a = 3627$	$N_1 \leq N_a$ であるので 本条件を満足
(2)	燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時 を除く供用状態 A 及び B における圧力変動	240	圧力変動 の全振幅 $P = 0.31 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m = 0.8 \text{ MPa}$	$P \leq A_m$ であるので 本条件を満足
(3)	燃料装荷時及び燃料取出し時での 2 点間温度差	10	温度差 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差許容値 $T = 776 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であるので 本条件を満足
(4)	燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用 状態 A 及び B における 2 点間の温度差変動	10	温度差変動 の全振幅 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差変動許容値 $T = 776 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であるので 本条件を満足
(5)	異種材接合部での温度変動	10	温度変動 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T = 296 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であるので 本条件を満足
(6)	機械的荷重の変動	213	応力の全振幅 $2 \cdot \Delta \sigma_1 = 206 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動 回数 213 回 に対 する許容繰返し ピーク応力強さ $S_a = 1040 \text{ MPa}$	$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$ である ので本条件に対 する評価で考慮 する必要がない。

4.2 ボルトの評価

金属キャスク構造規格 MCD-1322に従って疲労解析を行う。

4.2.1 金属キャスク構造規格 MCD-1322及び別図8-4に対する検討

一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの金属キャスク構造規格別図8-4の使用条件に対する検討を以下の(1)から(4)に示す。以下の(1)から(4)に示すとおり、一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトは、金属キャスク構造規格 別図8-4の曲線1の使用条件を満足する。

- (1) 一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの最小引張強さは921 MPa、921MPa及び924 MPaであり、金属キャスク構造規格 MCD-1322に従い、設計疲労曲線として金属キャスク構造規格 別図8-4を使用する。
- (2) 一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの平均引張応力+曲げ応力は、264 MPa、169 MPa及び272 MPaであり、この値は $2.7S_u$ 以下であるため、設計疲労曲線として、金属キャスク構造規格 別図8-4の“曲線1”を使用する。
- (3) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋ボルトが mm、カバープレートボルトが mm、二次蓋ボルトが mmであって0.07 mm以上である。
- (4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は、

一次蓋ボルト

:

カバープレートボルト :

二次蓋ボルト

:

であって0.06以上である。

4.2.2 ボルトの疲労解析

4.2.2.1 疲労評価において考慮する事象

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ①燃料装荷及び燃料取出し時
- ②吊上げ時
- ③検査架台への衝突時
- ④貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）
- ⑤蓋間空間の圧力調整

4.2.2.2 ピーク応力強さの算出

4.2.2.1に示す事象において、一次蓋ボルト、カバースプレートボルト及び二次蓋ボルトの各応力サイクルに対応したピーク応力強さは、ピーク応力強さのサイクルにおいてその極大値の極小値の差であることより、次式で計算する。

$$S_p = K \cdot (|S_{b2} - S_{b1}|) \dots\dots\dots (4.9)$$

ここで、

S_p : 各応力サイクルに対応したピーク応力強さ (MPa)

K : ボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)
(金属キャスク構造規格 表MCD-1331-1による)

S_{b1} : ボルトに発生する応力強さ (変動前) (MPa)

S_{b2} : ボルトに発生する応力強さ (変動後) (MPa)

4.2.2.3 応力の変動

4.2.2.1に示す事象による応力変動は以下のとおり考慮する。

①燃料装荷及び燃料取り出し時

燃料装荷後のボルト締め付け時は、ボルトが締め付けられていない応力零状態からの変動、燃料取り出し時のボルト取り外し時は、ボルト締め付け時からの変動を考慮する。

②吊上げ時

吊上げ時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

③検査架台への衝突時

検査架台への衝突時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

④貯蔵時 (貯蔵期間における崩壊熱の低下)

貯蔵時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

⑤蓋間空間の圧力調整時

蓋間空間の圧力調整時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

4.2.2.4 繰返しピーク応力強さの算出

(4.9)式で求めた各応力サイクルに対応したピーク応力強さ(S_p)と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル並びに各事象の繰返し回数を第4-2表、第4-4表及び第4-6表に示す。

各応力サイクルに対応したピーク応力強さ(S_p)から、次式により繰返しピーク応力強さ(S_c 、 S_c')を求める。ここで、繰返しピーク応力強さ(S_c)は、金属キャスク構造規格 別図8-4に使用されている縦弾性係数(E_0)と解析に用いる縦弾性係数(E ：「資料10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」の「第5-3表 応力計算に使用する材料の物性値」に示す縦弾性係数と「第6-1表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ1）」の一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及びカバープレートボルトの温度から求められる値)との比を考慮し補正する。

$$\left. \begin{aligned} S_c &= \frac{1}{2} \cdot S_p \\ S_c' &= S_c \cdot \frac{E_0}{E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.10)$$

4.2.3 ボルトの疲労解析結果

金属キャスク構造規格 別図8-4より、補正した繰返しピーク応力強さ(S_c')に対する許容繰返し回数(N_a)を求める。疲労累積係数(U_f)は、金属キャスク構造規格 MCD-1322より以下式で計算される。

$$U_f = \sum_{i=1}^k \frac{N_c(i)}{N_a(i)} \dots\dots\dots (4.11)$$

ここで、

- N_c ： 各サイクルの繰返し回数(-)
- N_a ： 許容繰返し回数(-)
- i ： 応力サイクルの型式(-)
- k ： 応力サイクルの型式の総数(-)

各サイクルの繰返し回数(N_c)と許容繰返し回数(N_a)との比は第4-3表、第4-5表及び第4-7表に示すとおりとなり、供用状態A及びBによる疲労累積係数(U_f)は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-1322の規定を満足する。

第4-2表 応力差の変動（一次蓋ボルト）

i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	250 ^(注1)	C00	0	1000
2	C02	249 ^(注2)	C01	250 ^(注1)	4
3	C03	264 ^(注3)	C01	250 ^(注1)	56
4	C04	251 ^(注4)	C01	250 ^(注1)	4
5	C05	251 ^(注5)	—	^(注5)	

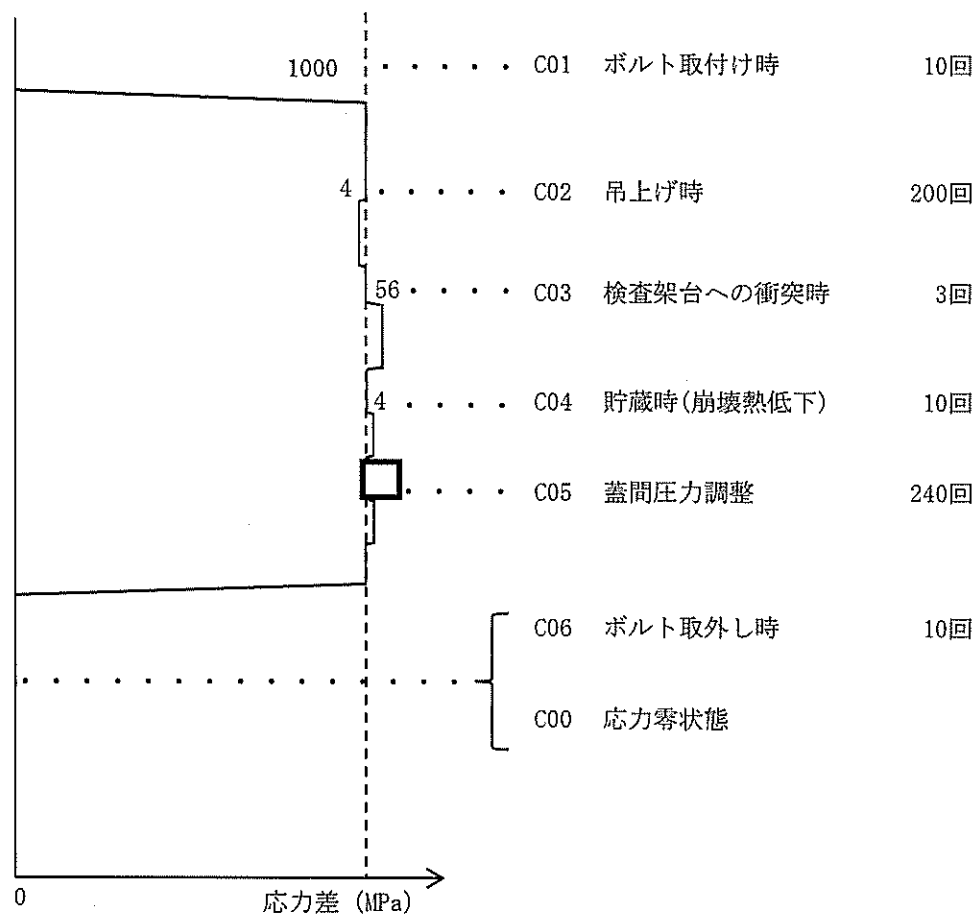
(注1) 第3-2表に示す貯蔵時の一次蓋ボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) は、応力値が保守的となるよう熱応力を考慮していない解析結果を示しているが、(注2) 及び(注3) に示す事象C02及びC03との差分を評価するため、同様の荷重条件である熱応力を考慮した解析結果である250 MPaを用いる。

(注2) 第3-3表に示す吊上げ時の一次蓋ボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$: 熱応力考慮) を用いる。

(注3) 第3-4表に示す検査架台への衝突時の一次蓋ボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$: 熱応力考慮) を用いる。

(注4) 保守側に使用済燃料の崩壊熱が無い状態を想定し、第3-2表に示す貯蔵時の一次蓋ボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$: 熱応力未考慮) を用いる。

(注5) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.31 MPaまで変化させた場合の応力とし、変動前は蓋ボルト初期締付力を用い、変動後は、貯蔵時（熱応力未考慮（蓋間空間の圧力は0.31 MPa））の解析結果を用いる。



第4-3表 疲労評価（一次蓋ボルト）

i	$S_p^{(注1)}$ (MPa)	S_c (MPa)	S_c' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	1000	500	557	1541	10	0.0065
2	4	2	3	10^6	200	0.0002
3	56	28	32	10^6	3	0.0001
4	4	2	3	10^6	10	0.0001
5	□	□	□	10^6	240	0.0003
疲労累積係数 $U_f=0.0072$						

(注1) S_p は第4-2表による。

第4-4表 応力差の変動（カバープレートボルト）

i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	166 ^(注1)	C00	0	664
2	C02	166 ^(注2)	C01	166 ^(注1)	0
3	C03	169 ^(注3)	C01	166 ^(注1)	12
4	C04	166 ^(注4)	C01	166 ^(注1)	0
5	C05	166 ^(注5)	—	^(注5)	

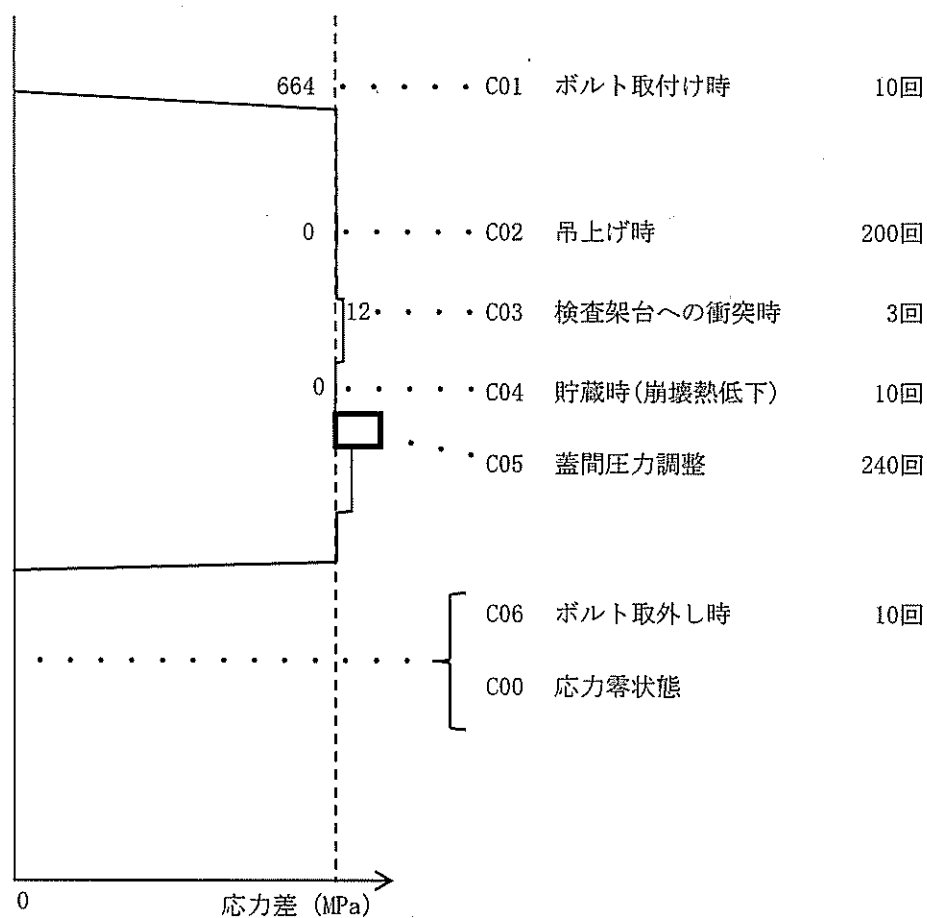
(注1) 第3-2表に示す貯蔵時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注2) 第3-3表に示す吊上げ時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注3) 第3-4表に示す検査架台への衝突時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注4) 3.3.2(2)に記載するようにカバープレートの二次応力は無視できることから、第3-2表に示す貯蔵時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注5) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.31 MPaまで変化させた場合の応力とし、変動前は、カバープレートボルト初期締付力を用い、変動後は貯蔵時(蓋間空間の圧力は0.31 MPa)の解析結果を用いる。



第4-5表 疲労評価 (カバープレートボルト)

i	$S_p^{(注1)}$ (MPa)	S_c (MPa)	S_c' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	664	332	370	2849	10	0.0036
2	0	0	0	—	200	—
3	12	6	7	10^6	3	0.0001
4	0	0	0	—	10	—
5				10^6	240	0.0003
疲労累積係数 $U_f=0.0040$						

(注1) S_p は第4-4表による。

第4-6表 応力差の変動（二次蓋ボルト）

i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	272 ^(注1)	C00	0	1088
2	C02	217 ^(注2)	C01	272 ^(注1)	220
3	C03	228 ^(注3)	C01	272 ^(注1)	176
4	C04	247 ^(注4)	C01	272 ^(注1)	100
5	C05	247 ^(注5)	—	 ^(注5)	

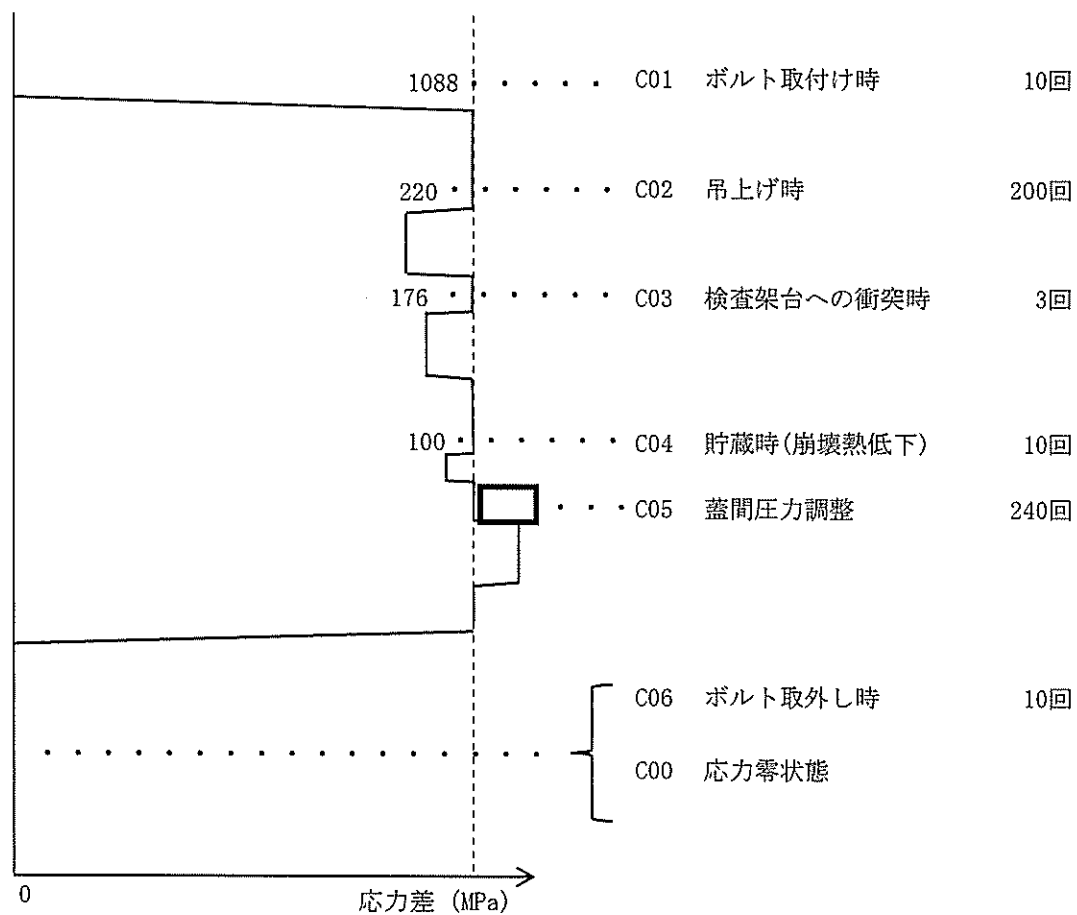
(注1) 第3-2表に示す貯蔵時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注2) 第3-3表に示す吊上げ時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注3) 第3-4表に示す検査架台への衝突時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注4) 保守側に使用済燃料の崩壊熱が無い状態を想定し、第3-2表に示す貯蔵時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力未考慮）を用いる。

(注5) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.31 MPaまで変化させた場合の応力とし、変動前は、蓋ボルト初期締付力を用い、変動後は貯蔵時（熱応力未考慮（蓋間空間の圧力は0.31 MPa））の解析結果を用いる。



第4-7表 疲労評価 (二次蓋ボルト)

i	$S_p^{(注1)}$ (MPa)	S_c (MPa)	S_c' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	1088	544	603	1311	10	0.0077
2	220	110	123	147173	200	0.0014
3	176	88	98	700879	3	0.0001
4	100	50	56	10^6	10	0.0001
5	 	 	 	435432	240	0.0006
疲労累積係数 $U_f = 0.0099$						

(注1) S_p は第4-6表による。

5. 穴の補強

金属キャスク構造規格 MCD-1700 により、一次蓋貫通孔及び二次蓋貫通孔の補強が不要となることを示す。

一次蓋貫通孔部及び二次蓋貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で計算する。

[illegible]

ここで、

S₂ : 一次蓋貫通孔部又は二次蓋貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0:「西田正孝、応力集中 増補版、森北出版(株)」より)

S₃ : 一次蓋貫通孔部又は二次蓋貫通孔部を無視した場合の一次蓋または二次蓋の応力強さ (MPa)

一次蓋貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S_3) と一次蓋貫通孔部の応力強さ (S_2) は第 5-1 表に、二次蓋貫通孔を無視した場合の二次蓋の応力強さ (S_3) と二次蓋貫通孔部の応力強さ (S_2) は第 5-2 表に示すとおりとなり、すべて許容応力を満足するため、一次蓋貫通孔部及び二次蓋貫通孔部の補強は不要となる。

第5-1表 一次蓋貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力分類	貫通孔を無視した場 合の応力強さ (S_3)	貫通孔部の 応力強さ (S_2)	許容応力値
設計時	P_m	1	4	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	8	32	186
貯蔵時	P_m	1	4	124
	P_L	7	28	186
	$P_L + P_b$	9	36	186
	$P_L + P_b + Q$	12	48	372
吊上げ時	P_m	1	4	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	9	36	186
	$P_L + P_b + Q$	11	44	372
検査架台 への 衝突時	P_m	1	4	124
	P_L	7	28	186
	$P_L + P_b$	8	32	186
	$P_L + P_b + Q$	13	52	372
試験状態	P_m	2	8	186
	P_L	8	32	279
	$P_m + P_b$	14	56	279

第5-2表 二次蓋貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力分類	貫通孔を無視した場 合の応力強さ (S_3)	貫通孔部の 応力強さ (S_2)	許容応力値
設計時	P_m	4	16	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	26	104	186
貯蔵時	P_m	5	20	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	29	116	186
	$P_L + P_b + Q$	31	124	372
吊上げ時	P_m	2	8	124
	P_L	4	16	186
	$P_L + P_b$	11	44	186
	$P_L + P_b + Q$	11	44	372
検査架台 への 衝突時	P_m	2	8	124
	P_L	4	16	186
	$P_L + P_b$	11	44	186
	$P_L + P_b + Q$	11	44	372

6. 外圧の評価

供用状態 A 及び B の場合に、密封容器の内圧は負圧であり、最高使用圧力(外圧) (P) は 0.41 MPa である。許容外圧 (P_a) は「資料 10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」第 6-5 表より 11.8 MPa であるので、金属キャスク構造規格 MCD-1410(1)の規定を満足する。

密封容器の強度計算書
(乾式キャスク (タイプ2))

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-2

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要.....	資 10-3-3-2-1
2. 形状・寸法・材料.....	資 10-3-3-2-1
3. 応力計算.....	資 10-3-3-2-4
3.1 応力評価位置.....	資 10-3-3-2-4
3.2 設計時.....	資 10-3-3-2-6
3.3 貯蔵時.....	資 10-3-3-2-12
3.4 吊上げ時.....	資 10-3-3-2-22
3.5 検査架台への衝突時.....	資 10-3-3-2-29
3.6 試験時.....	資 10-3-3-2-38
4. 繰返し荷重の評価.....	資 10-3-3-2-43
4.1 密封容器（ボルトを除く）の評価.....	資 10-3-3-2-43
4.2 ボルトの評価.....	資 10-3-3-2-49
5. 穴の補強.....	資 10-3-3-2-58
6. 外圧の評価.....	資 10-3-3-2-61

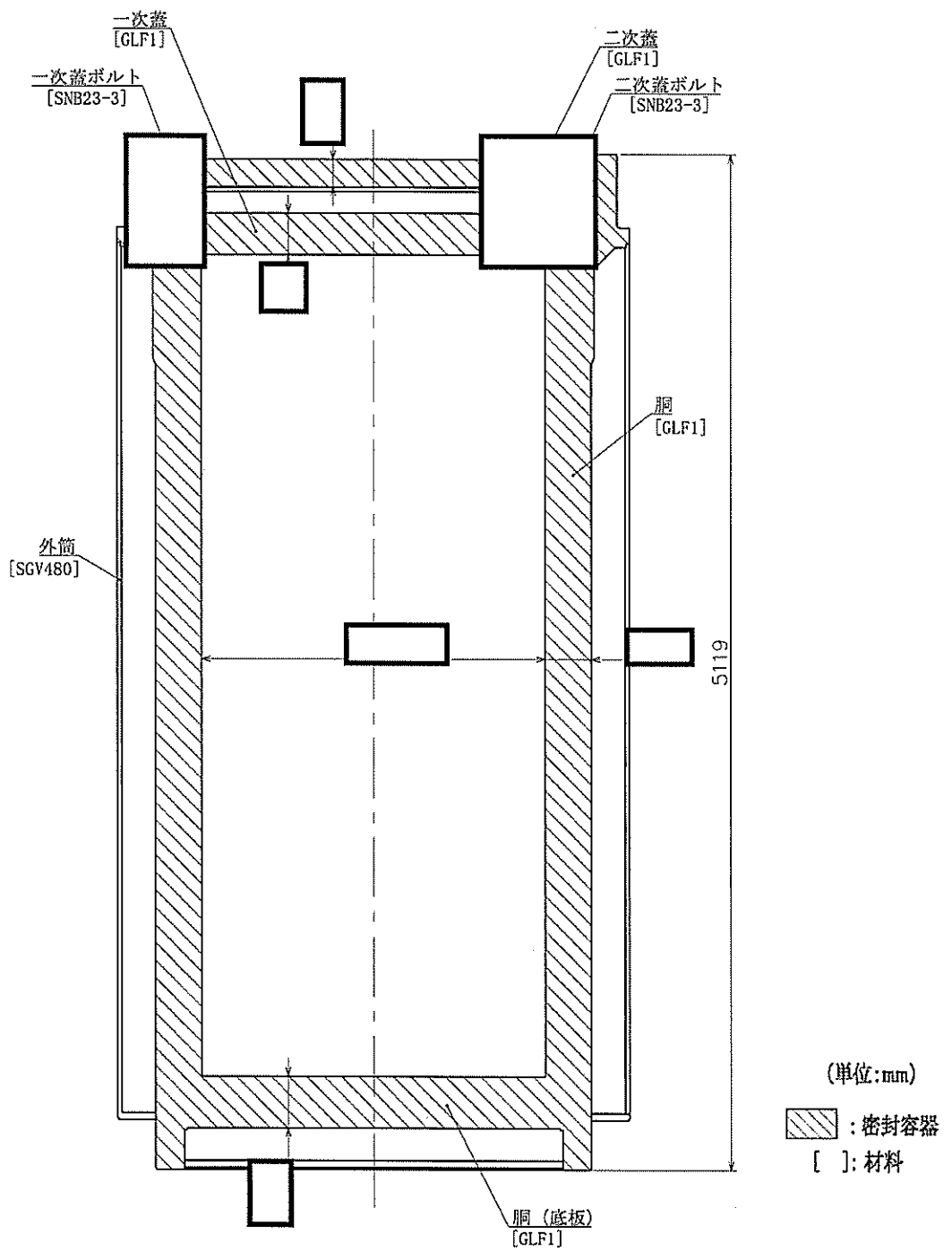
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

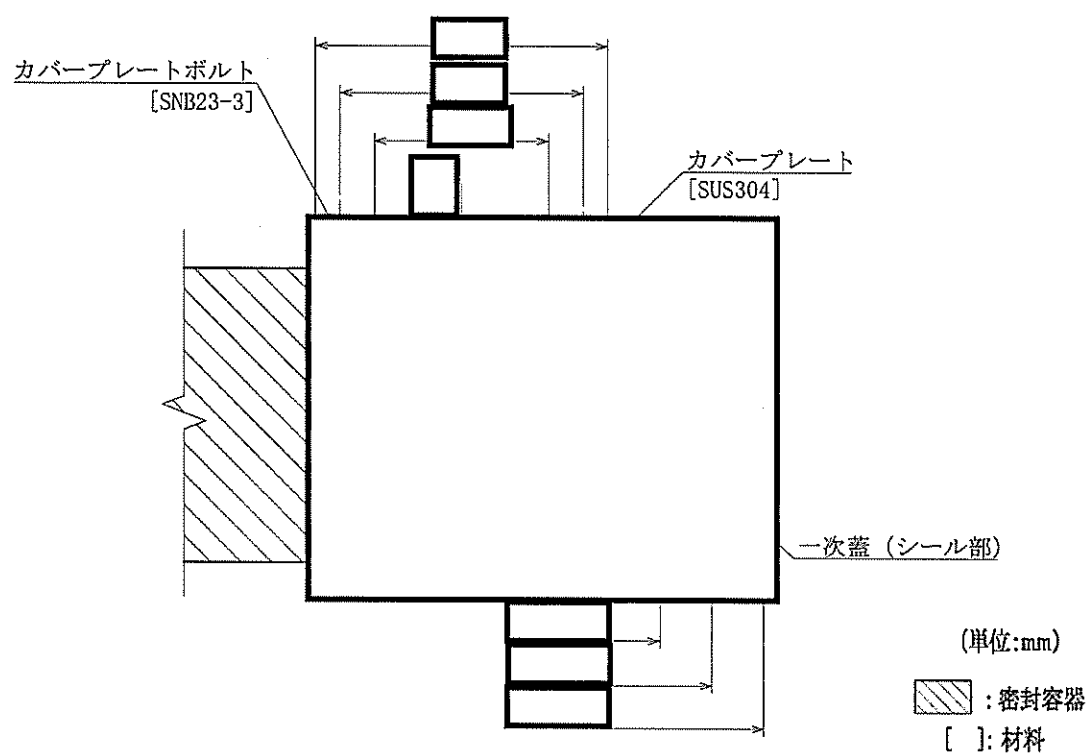
本資料は、資料 10-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に基づき、乾式キャスク（タイプ 2）の密封容器が十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

2. 形状・寸法・材料

本資料で解析する密封容器の形状・寸法・材料を第 1-1 図に示す。



第1-1図 密封容器の形状・寸法・材料(1/2)

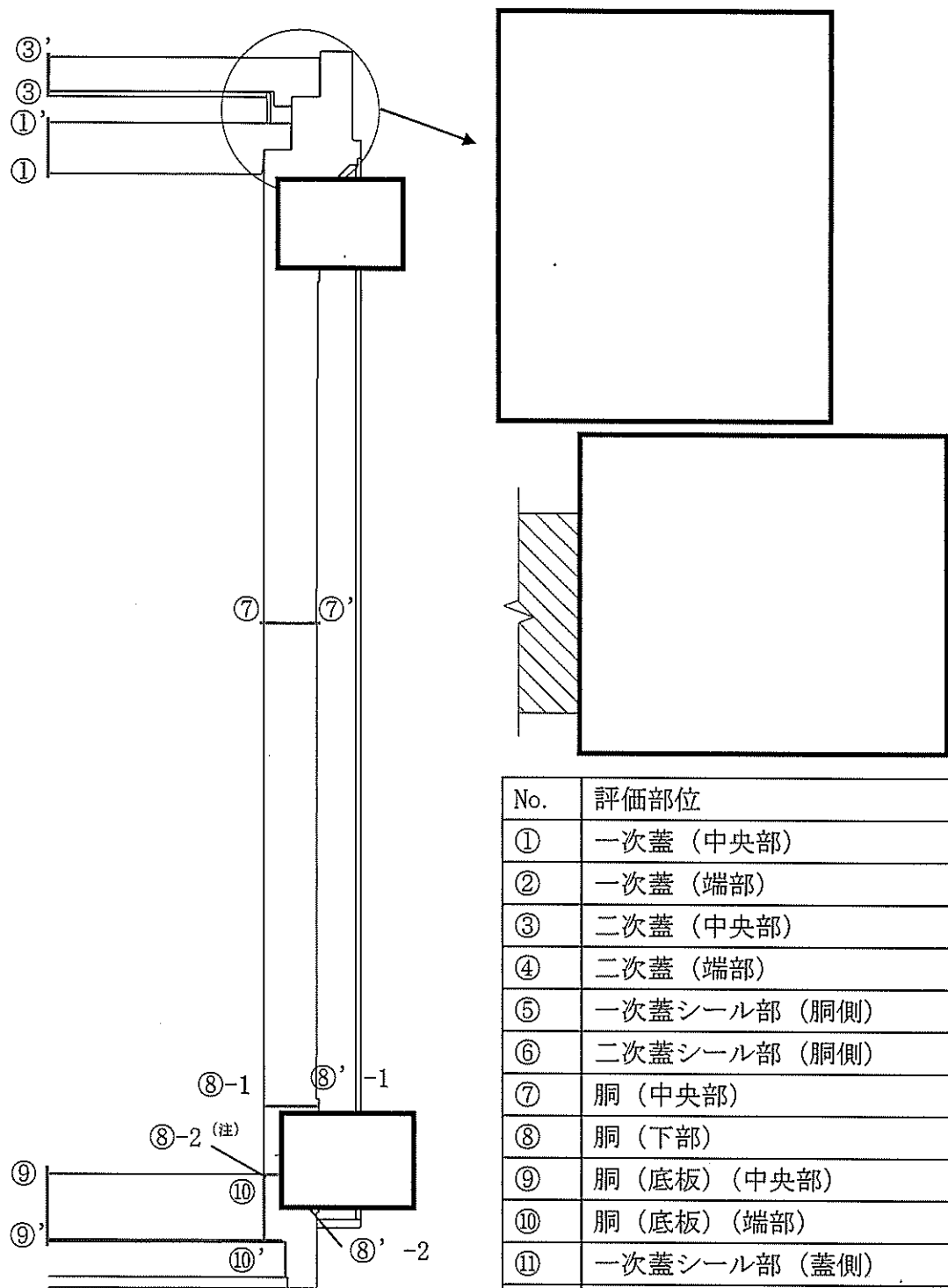


第1-1図 密封容器の形状・寸法・材料(2/2)
(カバープレート部詳細)

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

密封容器の応力評価位置を第3-1図に示す。乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。



(注) 評価断面⑧-2 は下部トラニオンを取り付けていない断面を含む。

No.	評価部位
①	一次蓋（中央部）
②	一次蓋（端部）
③	二次蓋（中央部）
④	二次蓋（端部）
⑤	一次蓋シール部（胴側）
⑥	二次蓋シール部（胴側）
⑦	胴（中央部）
⑧	胴（下部）
⑨	胴（底板）（中央部）
⑩	胴（底板）（端部）
⑪	一次蓋シール部（蓋側）
⑫	二次蓋シール部（蓋側）
⑬	一次蓋ボルト
⑭	二次蓋ボルト
⑮	カバースプレイト
⑯	カバースプレイトボルト

第 3-1 図 密封容器の応力評価位置

3.2 設計時

3.2.1 荷重条件

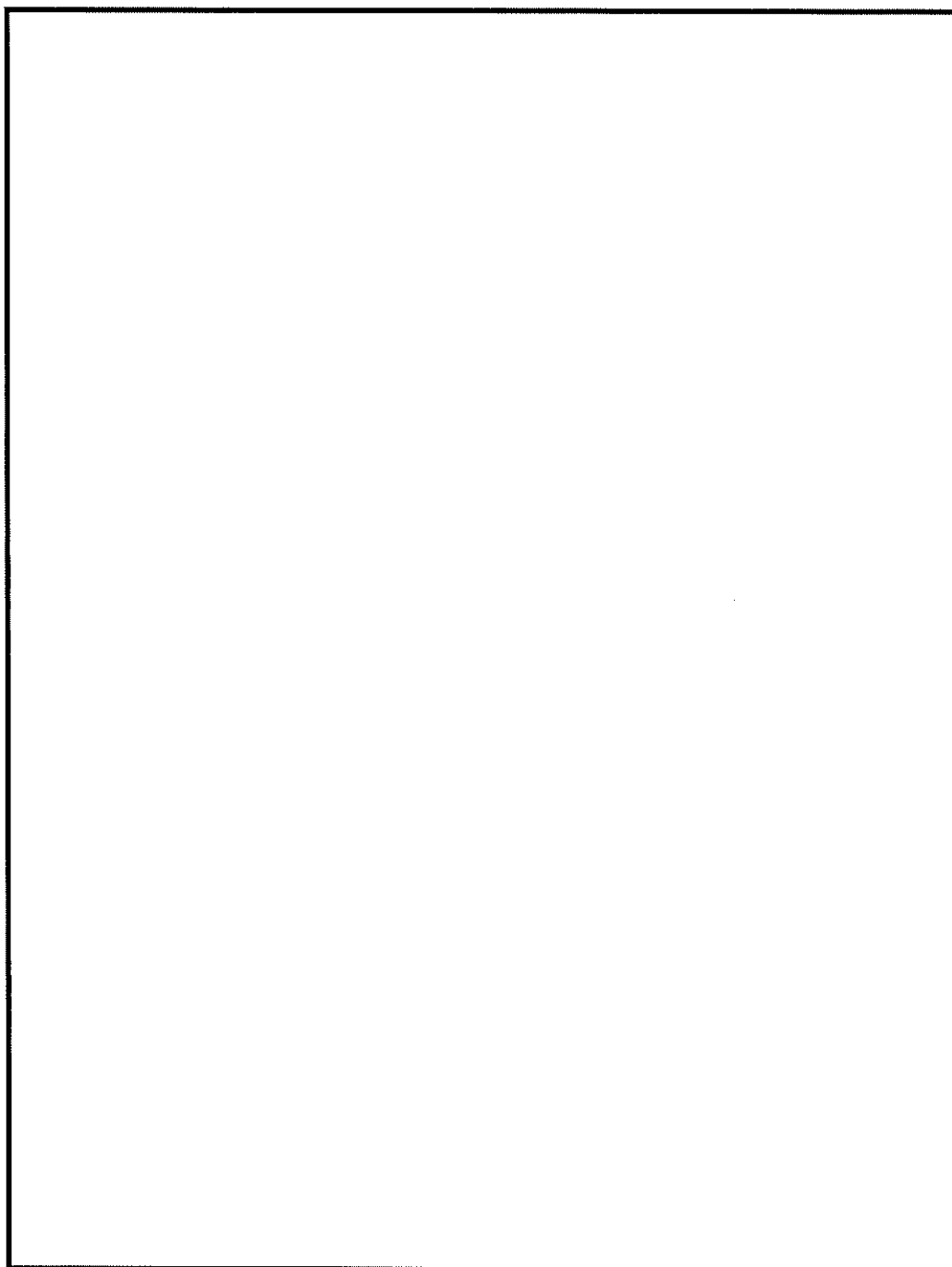
設計時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ ボルト初期締付力

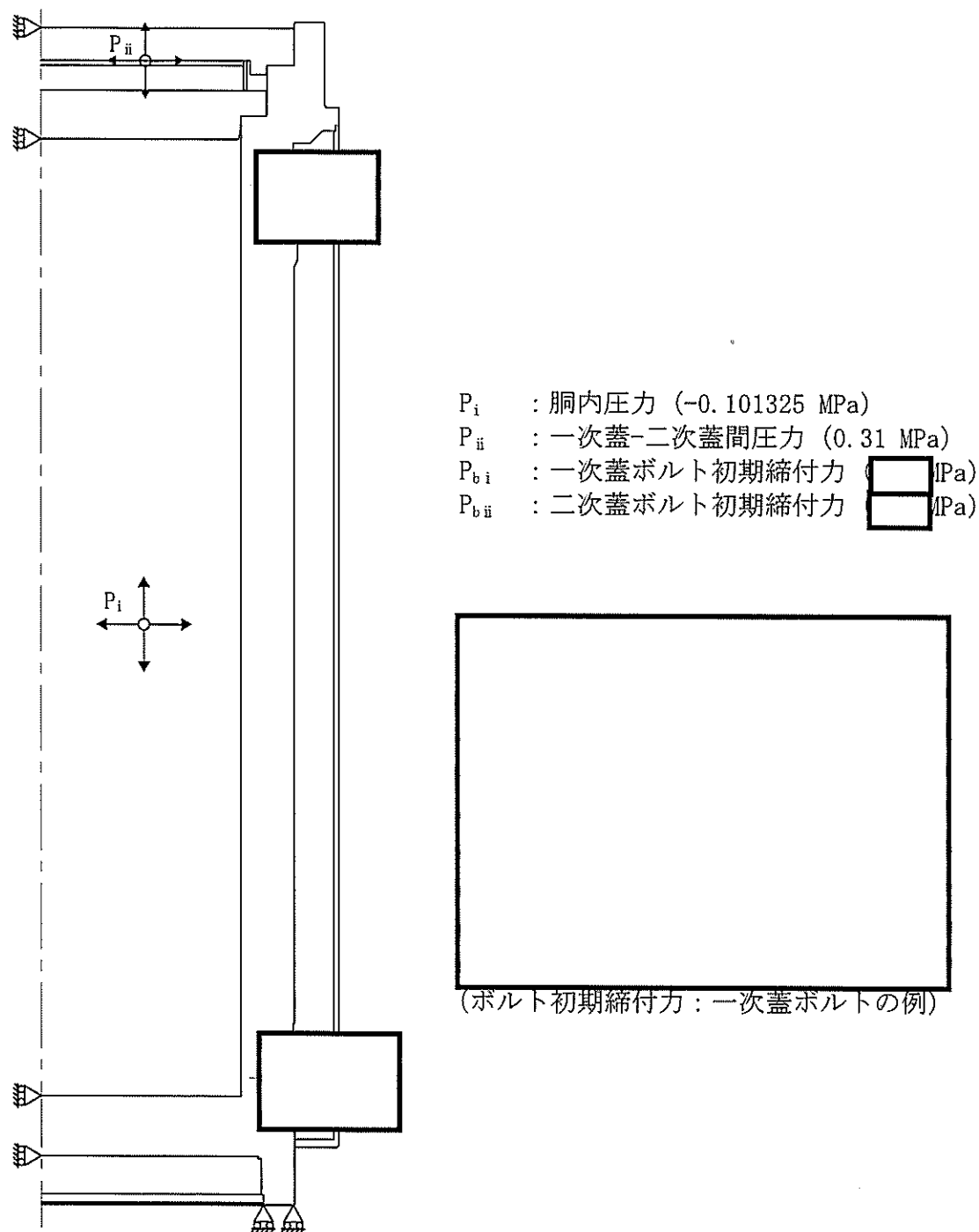
3.2.2 計算方法

- (1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-2図に、荷重及び境界条件を第3-3図に示す。



第 3-2 図 密封容器の解析モデル（設計時）



第 3-3 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（設計時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算は、応力評価式により行う。カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. カバープレート

内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力(σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 、 σ_{z1})は、カバープレートを周辺支持の円板としてモデル化し、次式(「日本機械学会 機械工学便覧(基礎編) α3材料力学」)に示される等分布荷重が作用する場合の周辺支持円板の式)で計算される。カバープレートの最大応力は第3-1図⑬に発生する。

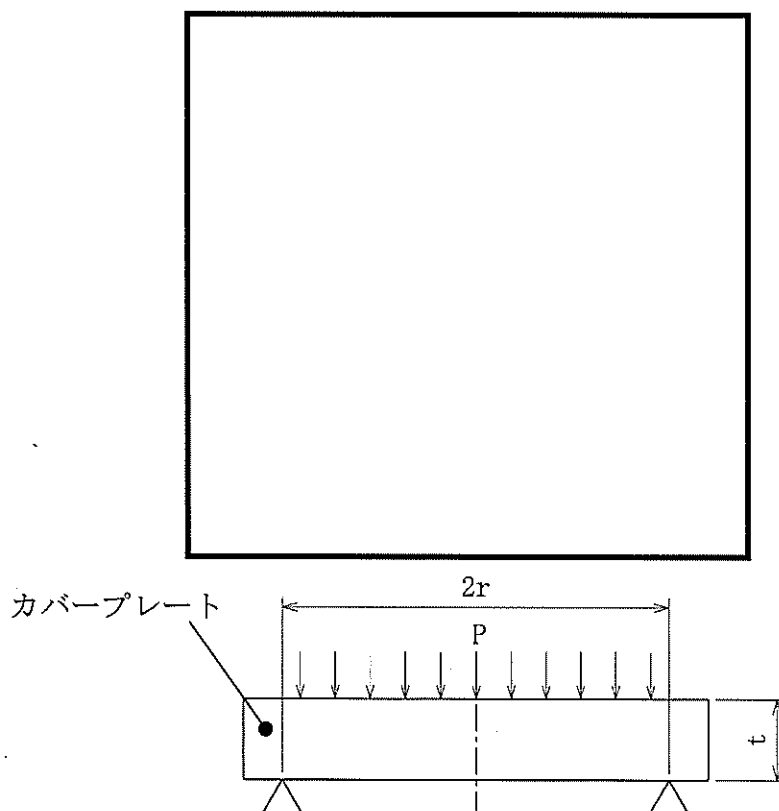
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_{\theta1} &= \sigma_{r1} \\ \sigma_{z1} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

P : 最高使用圧力(0.41 MPa)

r : ボルトピッチ半径(mm)

t : 板厚(mm)



b. カバープレートボルト

カバープレートに加わる内圧により発生するボルト荷重及びガスケット締付け時のボルト荷重による平均引張応力(σ_{n1})は、カバープレートに加わる内圧による平均引張応力(σ_{n2})とガスケット締付け時の平均引張応力(σ_{n3})の合計値で求められる。計算式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n1} &= \sigma_{n2} + \sigma_{n3} \\ \sigma_{n2} &= \frac{H}{A} \\ \sigma_{n3} &= \frac{W_{m2} \times n_b}{A} \\ H &= \frac{\pi}{4} \cdot D_G^2 \cdot P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

A : カバープレートボルト最小断面積の合計値 (mm²)

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \times n_b$$

d_s : カバープレートボルトの最小径 (mm)

n_b : カバープレートボルトの本数 (本)

H : カバープレートに加わる内圧による全荷重 (N)

D_G : ガスケット反力の作用する位置 (直径) (mm)

P : 最高使用圧力 (0.41 MPa)

W_{m2} : ガスケット締付け時のボルト荷重
(ボルト1本当たり) (N)

3.2.3 計算結果

応力計算結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-1 表 密封容器の応力評価（設計条件）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋（中央）	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	7	186
	①’	$P_L + P_b$	7	186
一次蓋（端部）	②－②’	P_L	5	186
二次蓋（中央）	③－③’	P_m	4	124
	③	$P_L + P_b$	22	186
	③’	$P_L + P_b$	25	186
二次蓋（端部）	④－④’	P_L	5	186
胴（中央）	⑦－⑦’	P_m	1	122
	⑦	$P_L + P_b$	1	183
	⑦’	$P_L + P_b$	1	183
胴（下部）	⑧－⑧’ －1	P_L	1	183
	⑧－⑧’ －2	P_L	1	183
胴（底板）（中央）	⑨－⑨’	P_m	1	121
	⑨	$P_L + P_b$	1	181
	⑨’	$P_L + P_b$	1	181
胴（底板）（端部）	⑩－⑩’	P_L	1	181
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	281
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	220	282
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレートボルト	⑯	σ_m	166	281

3.3 貯蔵時

3.3.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 自重
- ・ ボルト初期締付力
- ・ 熱荷重

3.3.2 計算方法

(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-4図に、荷重及び境界条件を第3-5図に示す。温度分布は、「資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」に示す貯蔵時の除熱解析結果を入力する。

なお、胴（底板）の平均支圧応力計算は、応力評価式により行う。

バスケット底面との接触部である胴（底板）に発生する平均支圧応力（ σ_p ）は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2 \cdot g}{A_1} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

m_G : バスケット及び使用済燃料集合体の質量 (22300 kg)

G_2 : 鉛直方向加速度係数 (1)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

A_1 : 接触面積 (2.341 × 10⁵ mm²)

$$A_1 = (h_1 - h_2) \times \ell \times n_A + (h_3 - h_4) \times \ell \times n_B$$

h_1 : バスケットプレートA全厚さ (mm)

h_2 : バスケットプレートA内幅 (mm)

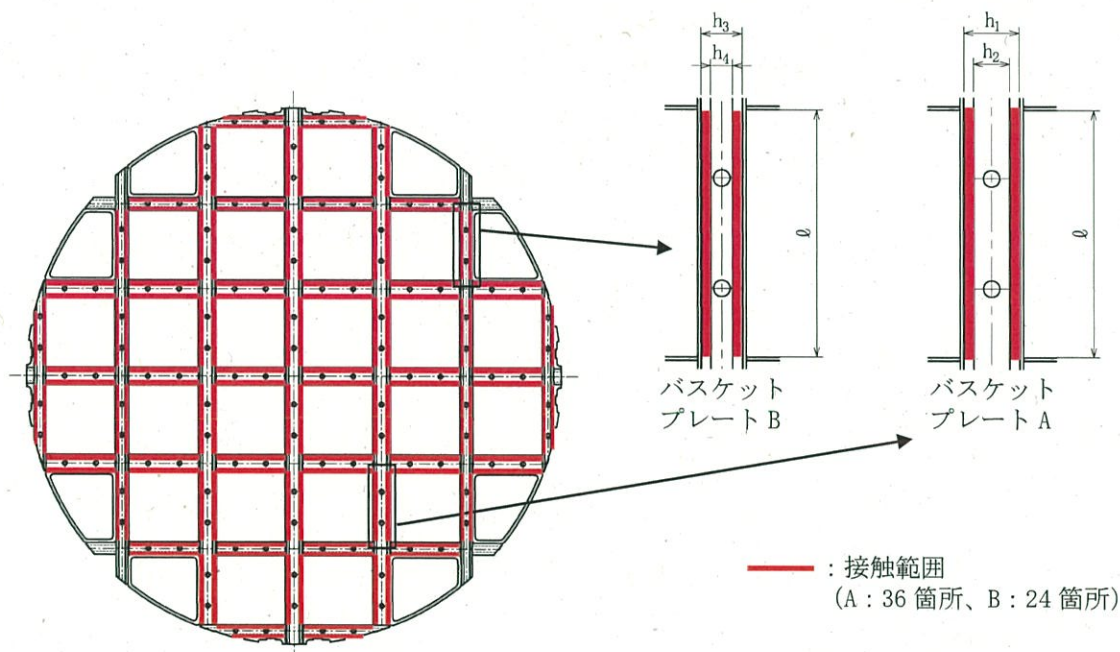
h_3 : バスケットプレートB全厚さ (mm)

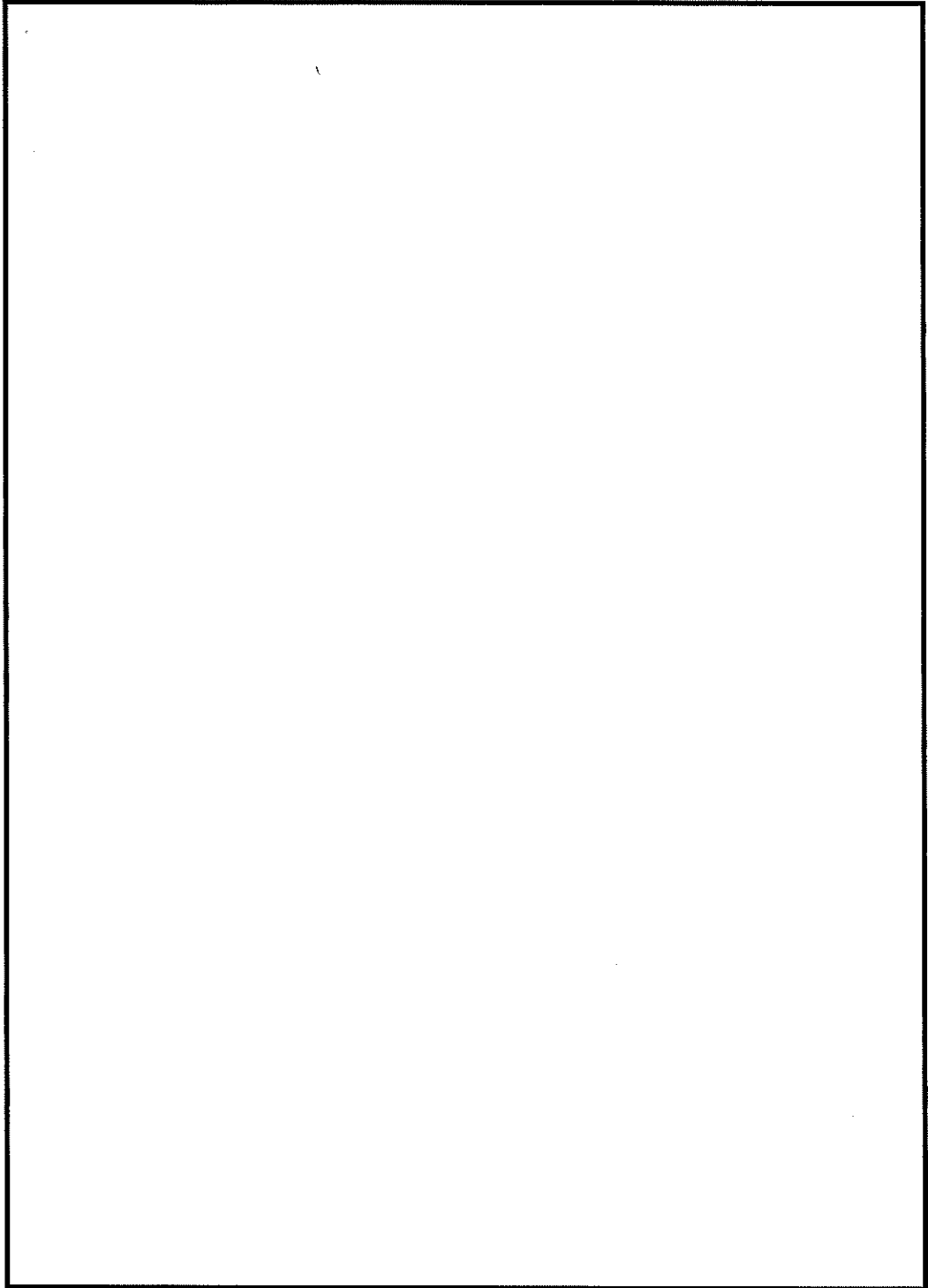
h_4 : バスケットプレートB内幅 (mm)

ℓ : バスケットプレート長さ (mm)

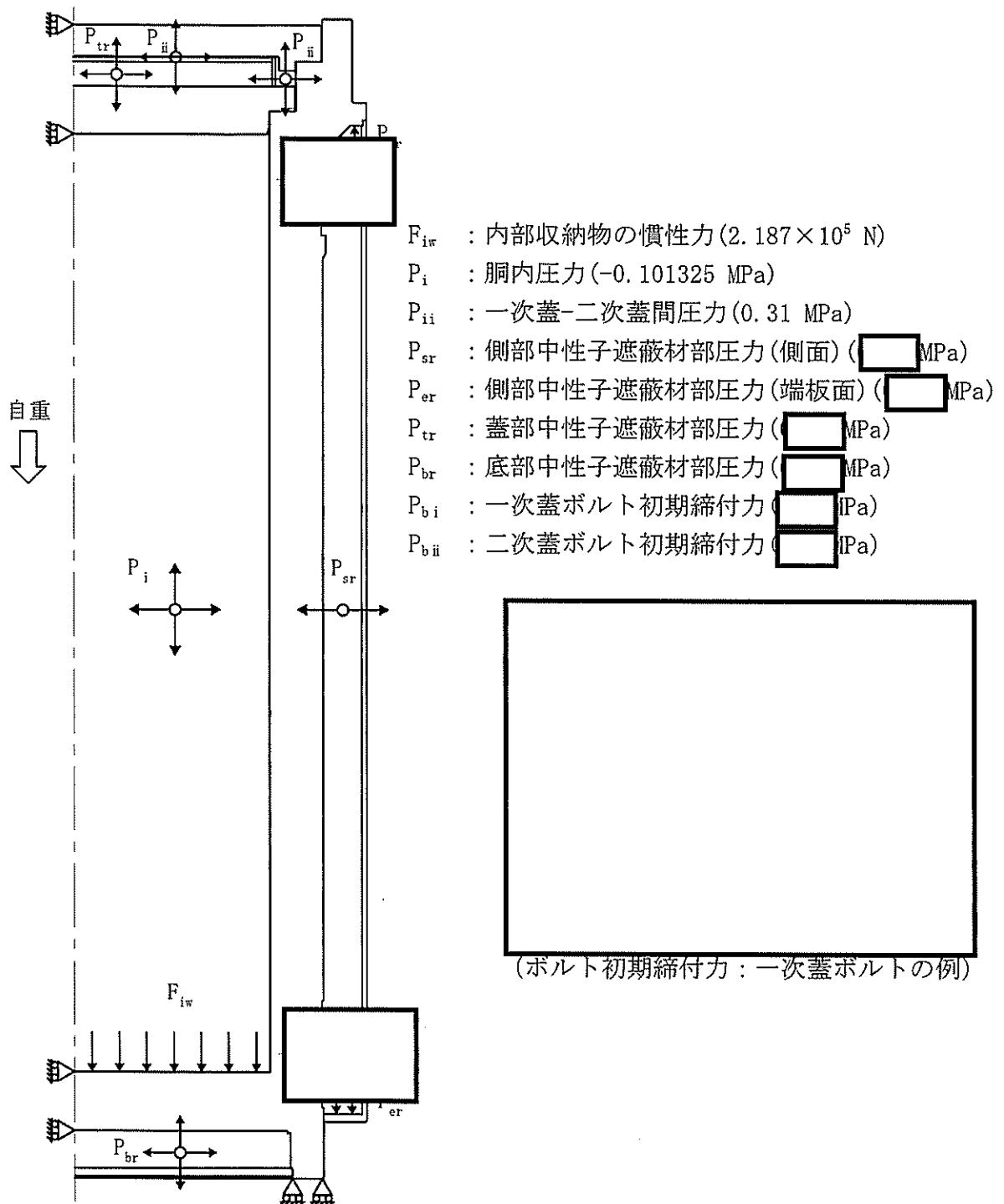
n_A : 胴（底板）に接触するバスケットプレートAの ℓ 部の数 (36箇所)

n_B : 胴（底板）に接触するバスケットプレートBの ℓ 部の数 (24箇所)





第 3-4 図 密封容器の解析モデル（貯蔵時）



第3-5図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（貯蔵時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算は、応力評価式により行う。カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. カバープレート

内圧及び慣性力によりカバープレートに発生する一次膜＋一次曲げ応力は、次式で計算される。なお、カバープレートは一次蓋に比べて薄く、カバープレート内の温度差は小さく熱荷重の影響は無視できることから、二次応力は無視できる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{r3} = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \\ \sigma_{\theta 3} = \sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} \\ \sigma_{z3} = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

内圧により発生する一次膜＋一次曲げ応力(σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta 1}$ 、 σ_{z1})は、3.2.2(2)と同様である。

慣性力により発生する一次膜＋一次曲げ応力(σ_{r2} 、 $\sigma_{\theta 2}$ 、 σ_{z2})は、カバープレートを周辺支持の円板とモデル化し、次式(「日本機械学会 機械工学便覧(基礎編) α3材料力学」に示される等分布荷重が作用する場合の周辺支持円板の式)で計算される。カバープレートの最大応力は第3-1図⑮に発生する。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{r2} = \frac{1.24 \cdot w \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_{\theta 2} = \sigma_{r2} \\ \sigma_{z2} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

w : 慣性力による分布荷重

$$w = t \cdot \rho \cdot G_2 \cdot g$$

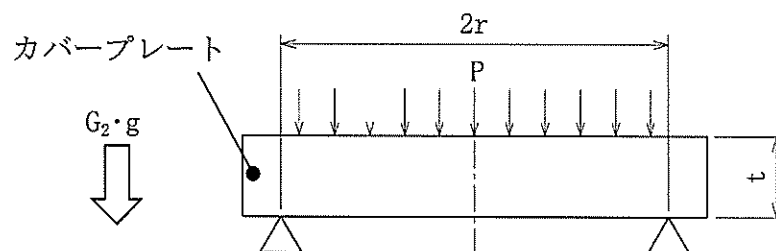
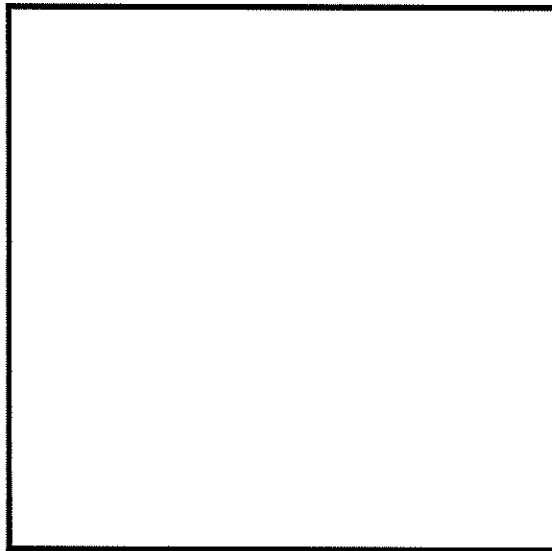
r : ボルトピッチ半径 (mm)

t : 板厚 (mm)

ρ : カバープレート材料 (SUS304) の密度 ($7.93 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$)

G_2 : 鉛直方向加速度係数 (1)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)



b. カバープレートボルト

鉛直方向下向きの慣性力によりカバープレートボルトに発生する応力は、圧縮応力であり、鉛直方向下向きの慣性力を考慮した場合の引張応力は3.2.2項の設計時の応力以下となる。また、鉛直方向下向きの慣性力による影響は小さいことから、評価結果は設計時と同じ値とする。

3.3.3 計算結果

応力計算結果を第3-2表に示す。第3-2表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-2 表 密封容器の応力評価（貯蔵時）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	8	186
	①’	$P_L + P_b$	8	186
	①	$P_L + P_b + Q$	9	372
	①’	$P_L + P_b + Q$	12	372
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	6	186
	②	$P_L + P_b + Q$	10	372
	②’	$P_L + P_b + Q$	7	372
二次蓋 (中央)	③－③’	P_m	4	124
	③	$P_L + P_b$	25	186
	③’	$P_L + P_b$	27	186
	③	$P_L + P_b + Q$	18	372
	③’	$P_L + P_b + Q$	30	372
二次蓋 (端部)	④－④’	P_L	5	186
	④	$P_L + P_b + Q$	22	372
	④’	$P_L + P_b + Q$	10	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	15	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	15	185
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	16	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥－⑥’	P_L	12	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	18	185
	⑥’	$P_L + P_b + Q$	15	185
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	122
	⑦	$P_L + P_b$	4	183
	⑦’	$P_L + P_b$	2	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	14	366
	⑦’	$P_L + P_b + Q$	9	366
	⑦－⑦’	σ_c	3	90

第 3-2 表 密封容器の応力評価（貯蔵時）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
胴 （下部）	⑧－⑧'－1	P_L	2	183
	⑧－1	$P_L + P_b + Q$	27	366
	⑧'－1	$P_L + P_b + Q$	20	366
	⑧－⑧'－1	σ_c	2	90
	⑧－⑧'－2	P_L	3	183
	⑧－2	$P_L + P_b + Q$	8	366
	⑧'－2	$P_L + P_b + Q$	11	366
	⑧－⑧'－2	σ_c	3	90
胴（底板） （中央）	⑨－⑨'	P_m	1	121
	⑨	$P_L + P_b$	2	181
	⑨'	$P_L + P_b$	2	181
	⑨	$P_L + P_b + Q$	25	363
	⑨'	$P_L + P_b + Q$	8	363
	⑨	σ_p	1	182
胴（底板） （端部）	⑩－⑩'	P_L	2	181
	⑩	$P_L + P_b + Q$	17	363
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	19	363
	⑩	σ_p	1	182
一次蓋 （シール部）	⑪－⑪'	P_L	34	185
	⑪	$P_L + P_b + Q$	28	185
	⑪'	$P_L + P_b + Q$	58	185
二次蓋 （シール部）	⑫－⑫'	P_L	15	186
	⑫	$P_L + P_b + Q$	28	186
	⑫'	$P_L + P_b + Q$	10	186

第 3-2 表 密封容器の応力評価（貯蔵時）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	562
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	251	843
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	224	564
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	267	846
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレートボルト	⑯	σ_m	166	562

3.4 吊上げ時

3.4.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ ボルト初期締付力
- ・ 吊上げ荷重（自重含む）
- ・ 熱荷重

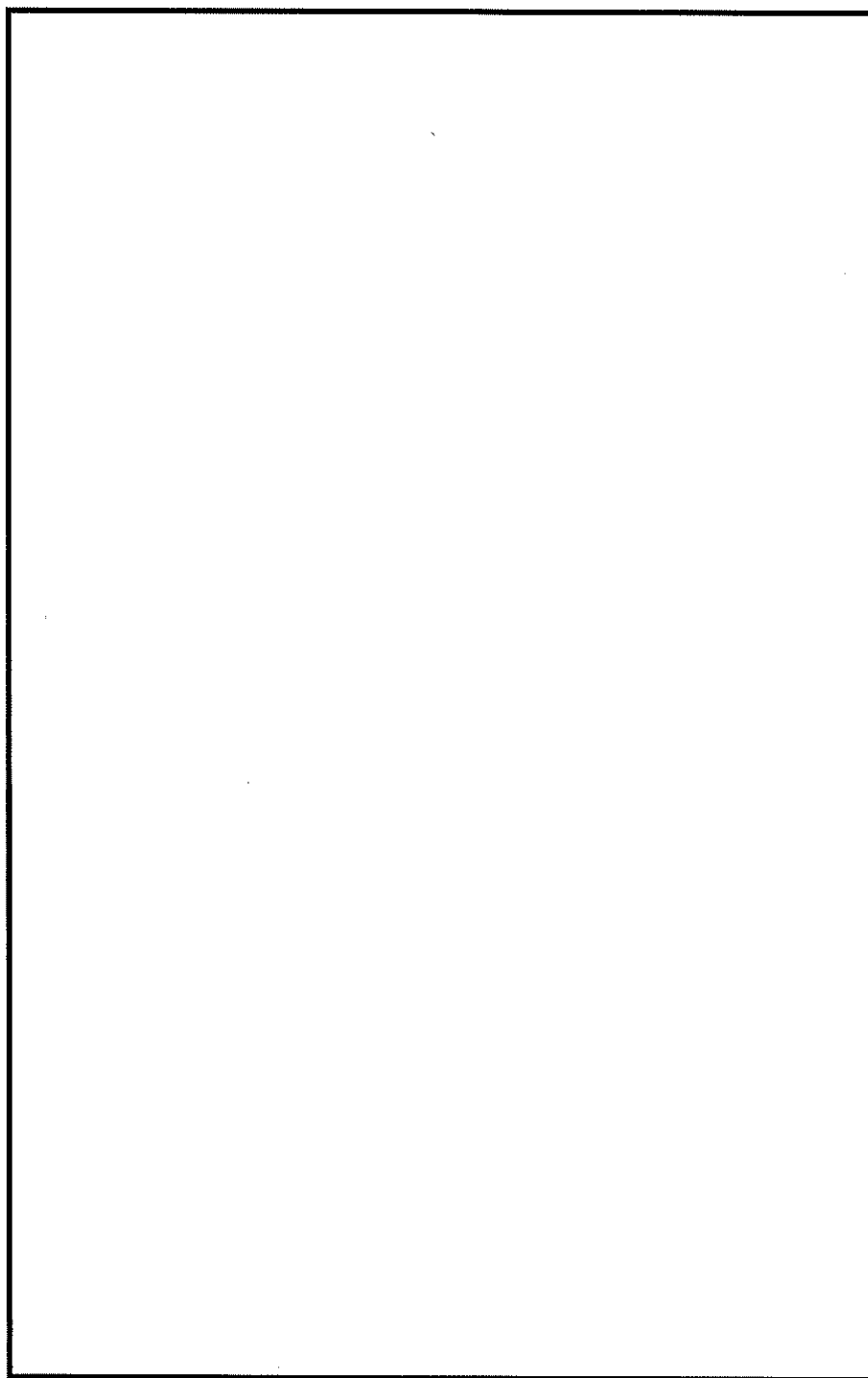
3.4.2 計算方法

(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

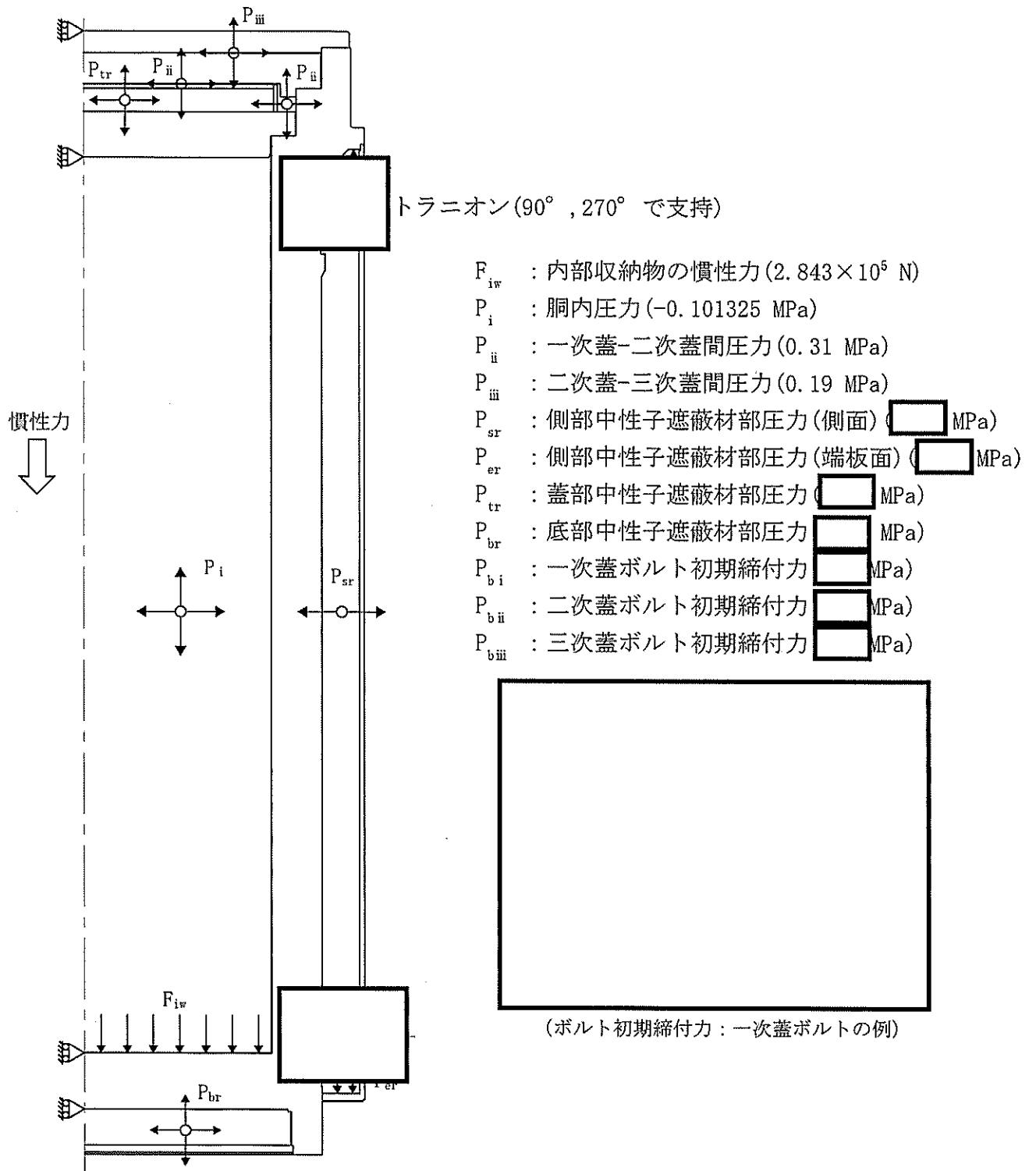
応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-6図に、荷重及び境界条件を第3-7図に示す。温度分布は、乾式キャスク（タイプ2）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果を入力する^(注1)。

なお、胴（底板）の平均支圧応力計算は、応力評価式により行う。応力計算方法は、3.3.2(1)と同様である。ただし、鉛直方向加速度係数 $G_2=1.3$ とする。

(注1)乾式キャスクの取扱いは緩衝体取り外し後に行うが、乾式キャスクの温度分布が緩衝体取り外し状態の平衡状態になるまでには数日要するため、吊上げ時の応力計算に入力する温度分布は緩衝体装着時の温度分布（乾式キャスク（タイプ2）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果）を入力する。なお、一般の試験条件では構外輸送時の条件（周囲温度38℃、太陽熱ふく射有りの環境条件）で解析を行っており、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスク取扱い状態（緩衝体取り外し状態）よりも乾式キャスク各部位の温度は高くなる傾向であり、許容応力は保守側の設定となる。



第 3-6 図 密封容器の解析モデル（吊上げ時）



第 3-7 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（吊上げ時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算方法は、3.3.2(2)と同様である。ただし、鉛直方向加速度係数 $G_2=1.3$ とする。

なお、カバープレートボルトについては、鉛直方向下向きの慣性力によりカバープレートボルトに発生する応力は圧縮応力であり、鉛直方向下向きの慣性力を考慮した場合の引張応力は3.2.2項の設計時の応力以下となる。また、鉛直方向下向きの慣性力による影響は小さいことから、評価結果は設計時と同じ値とする。

3.4.3 計算結果

応力計算結果を第3-3表に示す。第3-3表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-3 表 密封容器の応力評価（吊上げ時）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	8	186
	①’	$P_L + P_b$	7	186
	①	$P_L + P_b + Q$	7	372
	①’	$P_L + P_b + Q$	9	372
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	6	186
	②	$P_L + P_b + Q$	10	372
	②’	$P_L + P_b + Q$	10	372
二次蓋 (中央)	③－③’	P_m	2	124
	③	$P_L + P_b$	11	186
	③’	$P_L + P_b$	12	186
	③	$P_L + P_b + Q$	10	372
	③’	$P_L + P_b + Q$	12	372
二次蓋 (端部)	④－④’	P_L	4	186
	④	$P_L + P_b + Q$	9	372
	④’	$P_L + P_b + Q$	11	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	16	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	14	185
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	16	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥－⑥’	P_L	11	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	17	185
	⑥’	$P_L + P_b + Q$	16	185
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	123
	⑦	$P_L + P_b$	4	184
	⑦’	$P_L + P_b$	3	184
	⑦	$P_L + P_b + Q$	13	369
	⑦’	$P_L + P_b + Q$	10	369
	⑦－⑦’	σ_c	3	90

第 3-3 表 密封容器の応力評価（吊上げ時）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
胴 （下部）	⑧－⑧'－1	P_L	2	184
	⑧－1	P_L+P_b+Q	18	369
	⑧'－1	P_L+P_b+Q	21	369
	⑧－⑧'－1	σ_c	2	90
	⑧－⑧'－2	P_L	2	184
	⑧－2	P_L+P_b+Q	12	369
	⑧'－2	P_L+P_b+Q	14	369
	⑧－⑧'－2	σ_c	3	90
胴（底板） （中央）	⑨－⑨'	P_m	1	122
	⑨	P_L+P_b	2	183
	⑨'	P_L+P_b	1	183
	⑨	P_L+P_b+Q	28	366
	⑨'	P_L+P_b+Q	4	366
	⑨	σ_p	2	183
胴（底板） （端部）	⑩－⑩'	P_L	1	183
	⑩	P_L+P_b+Q	18	366
	⑩'	P_L+P_b+Q	23	366
	⑩	σ_p	2	183
一次蓋（シール部）	⑪－⑪'	P_L	34	185
	⑪	P_L+P_b+Q	28	185
	⑪'	P_L+P_b+Q	60	185
二次蓋（シール部）	⑫－⑫'	P_L	13	186
	⑫	P_L+P_b+Q	22	186
	⑫'	P_L+P_b+Q	10	186

第 3-3 表 密封容器の応力評価（吊上げ時）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	562
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	253	843
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	206	564
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	224	846
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレートボルト	⑯	σ_m	166	562

3.5 検査架台への衝突時

3.5.1 荷重条件

検査架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。

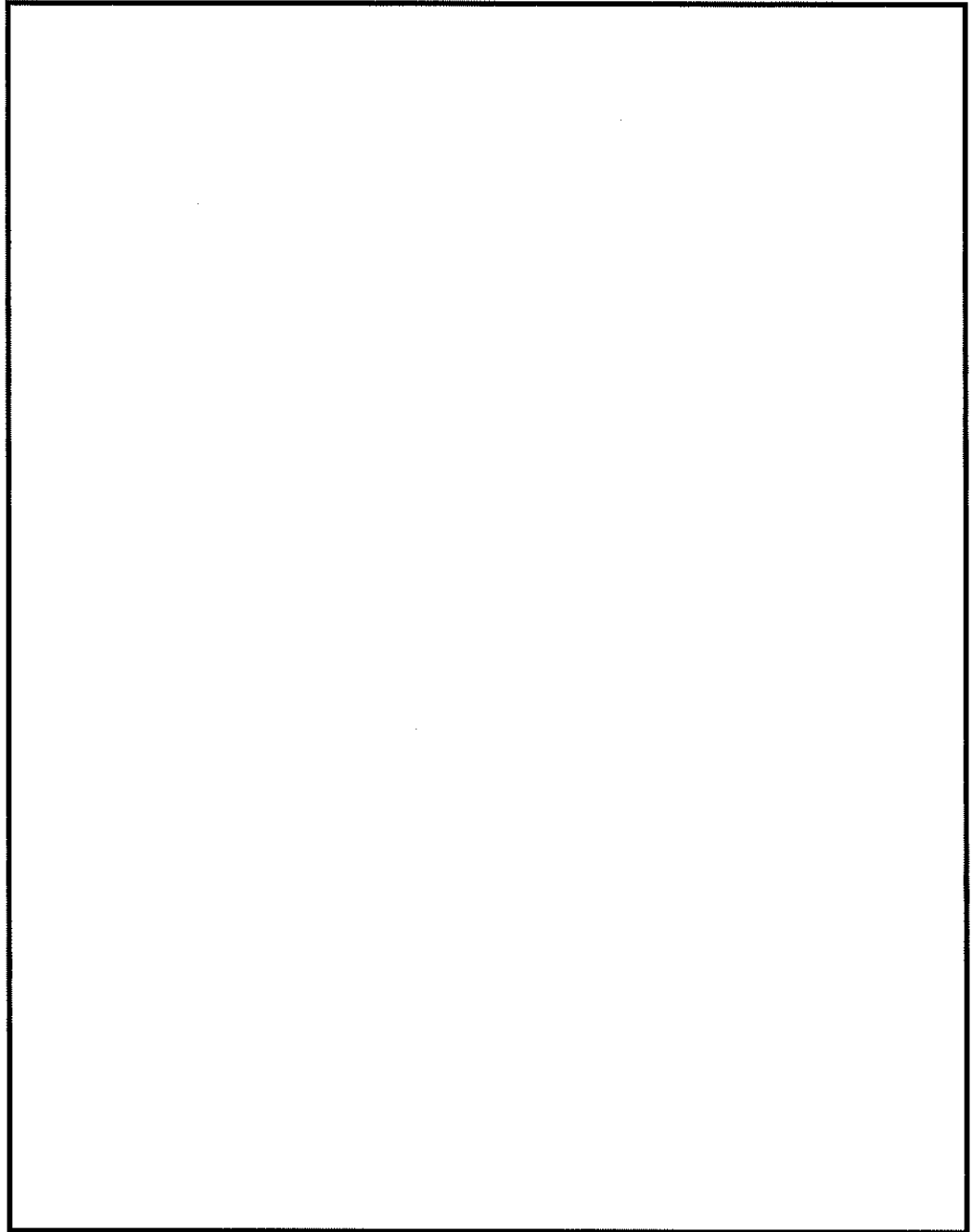
- ・ 胴内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ ボルト初期締付力
- ・ 検査架台への衝突時荷重
- ・ 熱荷重

3.5.2 計算方法

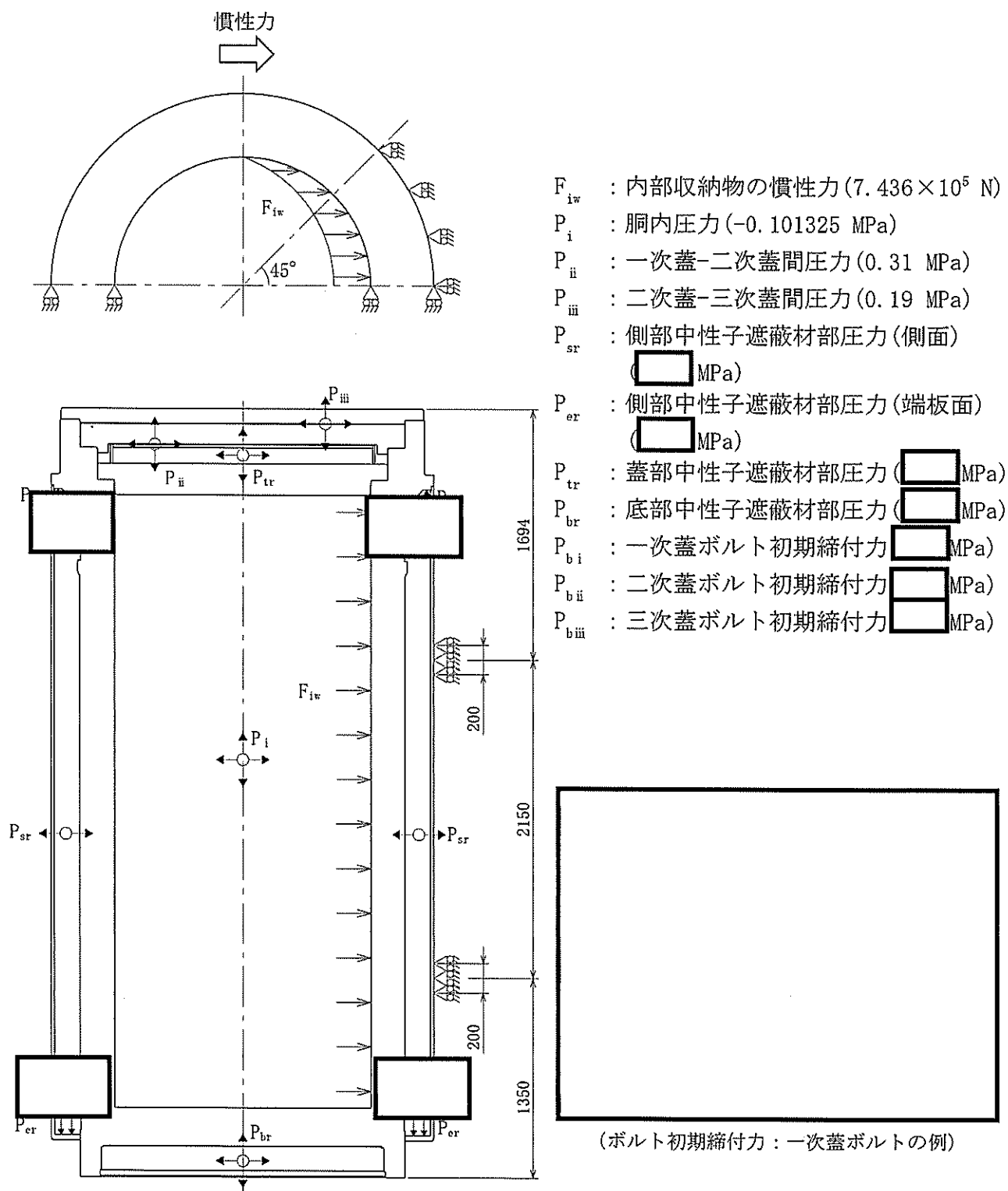
(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-8図に、荷重及び境界条件を第3-9図に示す。温度分布は、乾式キャスク（タイプ2）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果を入力する^(注1)。

(注1)乾式キャスクの取扱いは緩衝体取り外し後に行うが、乾式キャスクの温度分布が緩衝体取り外し状態の平衡状態になるまでには数日要するため、検査架台への衝突時の応力計算に入力する温度分布は緩衝体装着時の温度分布（乾式キャスク（タイプ2）の設計承認に示す一般の試験条件の除熱解析結果）を入力する。なお、一般の試験条件では構外輸送時の条件（周囲温度38℃、太陽熱ふく射有りの環境条件）で解析を行っており、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスク取扱い状態（緩衝体取り外し状態）よりも乾式キャスク各部位の温度は高くなる傾向であり、許容応力は保守側の設定となる。



第 3-8 図 密封容器の解析モデル（検査架台への衝突時）



第3-9図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（検査架台への衝突時）

(2) カバープレート及びカバープレートボルト

応力計算は、応力評価式により行う。カバープレート及びカバープレートボルトの応力計算の詳細は、以下に示すとおりである。

a. カバープレート

水平方向の慣性力によりカバープレートに応力は発生しないため、カバープレートに発生する応力は3.2.2(2)と同じ値である。

b. カバープレートボルト

カバープレートボルトに発生する平均引張応力(σ_{n1})＋曲げ応力(σ_{b1})は、次式で計算される。

平均引張応力(σ_{n1})は、3.2.2(2)と同じ値である。

カバープレートボルトの曲げ応力の解析モデルを第3-10図に示す。検査架台衝突時の慣性力に伴うカバープレートへ作用する荷重により、カバープレートボルトへ曲げモーメントが作用する。カバープレートは□本のカバープレートボルトを用いて一次蓋へ取り付けられており、この曲げモーメントは□本のカバープレートボルトへ負荷される。カバープレートボルトに発生する曲げ応力は、次式で計算される。

$$\sigma_{b1} = \frac{M}{n_b Z} \cdots \cdots \cdots (3.6)$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

M : 曲げモーメント(N・mm)

$$M = m_r \cdot G_1 \cdot g \cdot L$$

m_r : カバープレートの質量(10 kg)

G_1 : 水平方向加速度係数 (3.4)

g : 重力加速度(9.80665 m/s²)

L : カバープレートボルト軸部の長さ(□ mm)

Z : カバープレートボルトの断面係数(□ mm³)

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot d_s^3$$

d_s : カバープレートボルトの最小径(□ mm)

n_b : カバープレートボルトの本数(□ 本)



第3-10図 カバープレートボルトの曲げ応力の解析モデル

3.5.3 計算結果

応力計算結果を第3-4表に示す。第3-4表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-4 表 密封容器の応力評価（検査架台への衝突時）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	7	186
	①’	$P_L + P_b$	6	186
	①	$P_L + P_b + Q$	6	372
	①’	$P_L + P_b + Q$	9	372
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	6	186
	②	$P_L + P_b + Q$	10	372
	②’	$P_L + P_b + Q$	12	372
二次蓋 (中央)	③－③’	P_m	2	124
	③	$P_L + P_b$	11	186
	③’	$P_L + P_b$	13	186
	③	$P_L + P_b + Q$	12	372
	③’	$P_L + P_b + Q$	13	372
二次蓋 (端部)	④－④’	P_L	4	186
	④	$P_L + P_b + Q$	9	372
	④’	$P_L + P_b + Q$	11	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	16	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	16	185
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	16	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥－⑥’	P_L	13	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	20	185
	⑥’	$P_L + P_b + Q$	17	185
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	123
	⑦	$P_L + P_b$	8	184
	⑦’	$P_L + P_b$	7	184
	⑦	$P_L + P_b + Q$	15	369
	⑦’	$P_L + P_b + Q$	11	369
	⑦－⑦’	σ_c	3	90

第 3-4 表 密封容器の応力評価（検査架台への衝突時）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
胴 （下部）	⑧－⑧’－1	P_L	4	184
	⑧－1	$P_L + P_b + Q$	22	369
	⑧’－1	$P_L + P_b + Q$	21	369
	⑧－⑧’－1	σ_c	3	90
	⑧－⑧’－2	P_L	3	184
	⑧－2	$P_L + P_b + Q$	13	369
	⑧’－2	$P_L + P_b + Q$	17	369
	⑧－⑧’－2	σ_c	2	90
胴（底板） （中央）	⑨－⑨’	P_m	1	122
	⑨	$P_L + P_b$	1	183
	⑨’	$P_L + P_b$	1	183
	⑨	$P_L + P_b + Q$	27	366
	⑨’	$P_L + P_b + Q$	3	366
	⑨	σ_p	—	—
胴（底板） （端部）	⑩－⑩’	P_L	3	183
	⑩	$P_L + P_b + Q$	21	366
	⑩’	$P_L + P_b + Q$	25	366
	⑩	σ_p	—	—
一次蓋 （シール部）	⑪－⑪’	P_L	33	185
	⑪	$P_L + P_b + Q$	27	185
	⑪’	$P_L + P_b + Q$	60	185
二次蓋 （シール部）	⑫－⑫’	P_L	13	186
	⑫	$P_L + P_b + Q$	22	186
	⑫’	$P_L + P_b + Q$	10	186

第 3-4 表 密封容器の応力評価（検査架台への衝突時）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋ボルト	⑬	σ_m	249	562
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	257	843
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	207	564
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	236	846
カバープレート	⑮	$P_L + P_b$	3	205
カバープレート ボルト	⑯	σ_m	166	562
	⑯	$\sigma_m + \sigma_b$	169	843

3.6 試験時

3.6.1 荷重条件

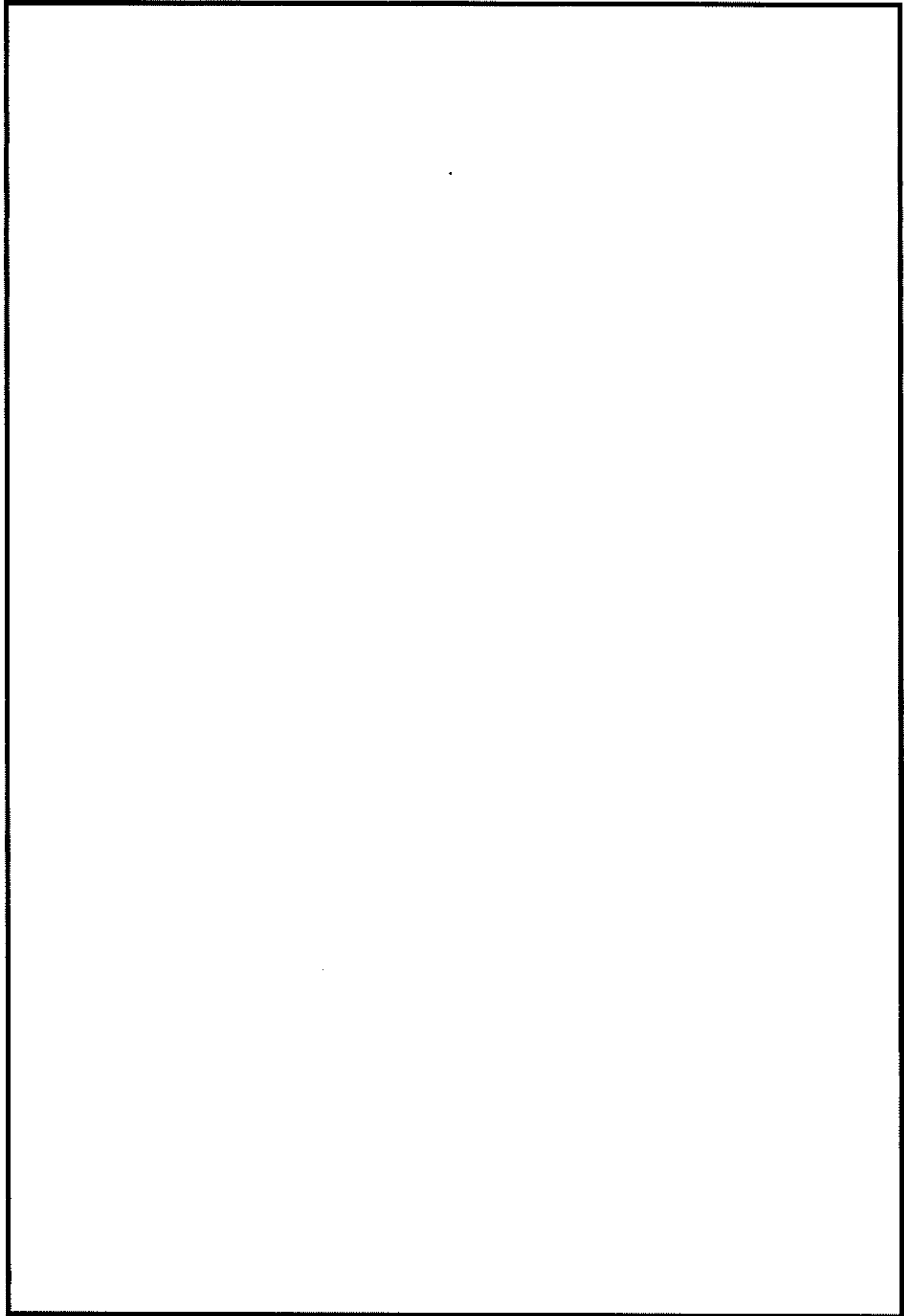
試験時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 胴内圧力
- ・ 自重
- ・ ボルト初期締付力

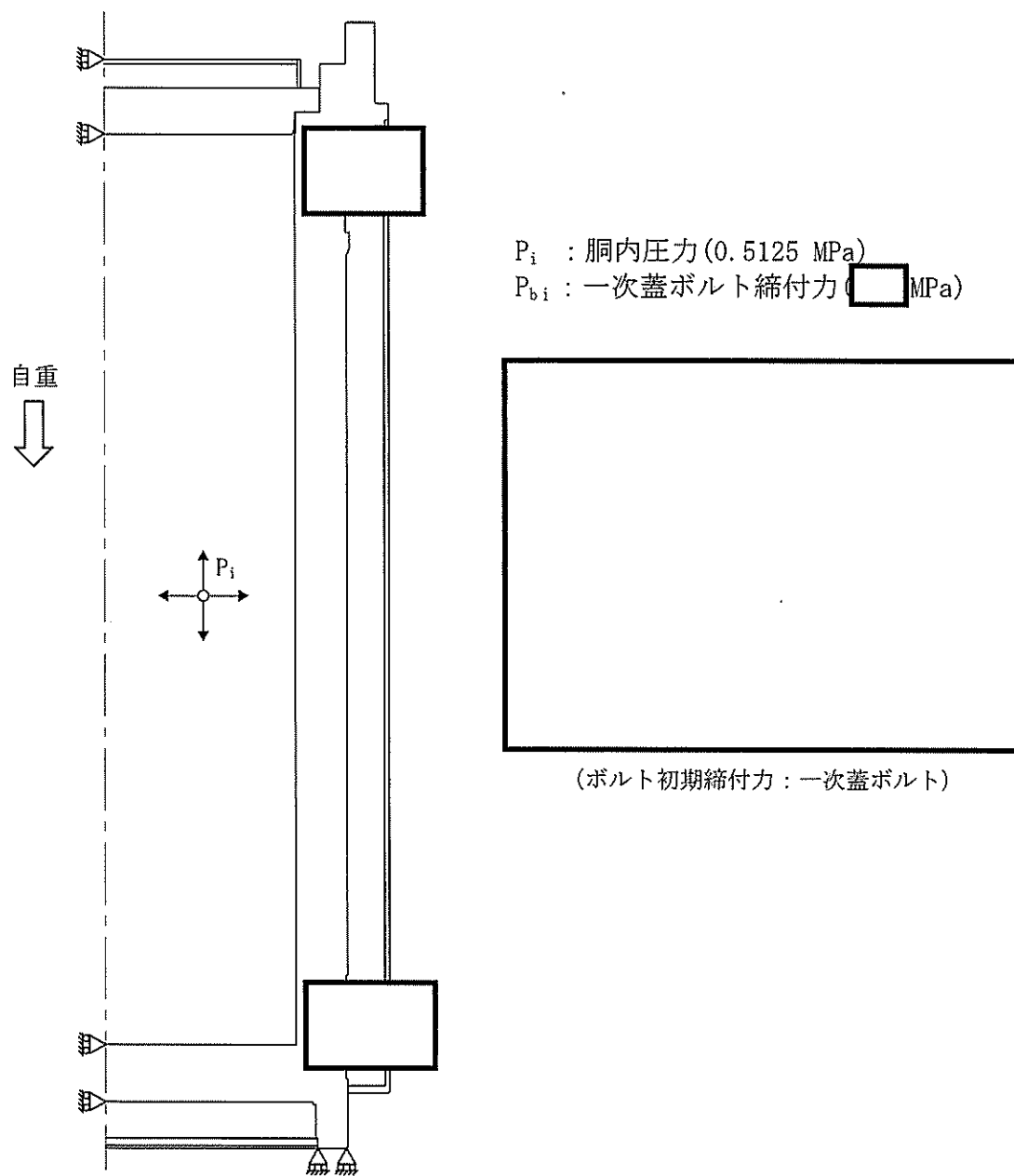
3.6.2 計算方法

(1) 一次蓋、胴及び胴（底板）

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-11図に、荷重及び境界条件を第3-12図に示す。耐圧試験は常温で行うため、温度分布は全ての部材を常温として入力する。



第 3-11 図 密封容器の解析モデル（試験時）



第 3-12 図 荷重（慣性力/内圧）及び境界条件（試験時）

(2) カバープレート

応力計算方法は、3.2.2(2)と同様である。ただし、 $P=0.5125$ MPaとする。

3.6.3 計算結果

応力計算結果を第3-5表に示す。第3-5表に示すとおり、密封容器に発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-5 表 密封容器及び二次蓋の応力評価（試験状態）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋 (中央)	①－①’	P_m	2	186
	①	$P_m + P_b$	13	279
	①’	$P_m + P_b$	13	279
一次蓋 (端部)	②－②’	P_L	8	279
胴 (一次蓋シール部)	⑤－⑤’	P_L	11	207
	⑤	$P_L + P_b + Q$	11	207
	⑤’	$P_L + P_b + Q$	11	207
胴 (中央)	⑦－⑦’	P_m	3	186
	⑦	$P_m + P_b$	3	279
	⑦’	$P_m + P_b$	2	279
胴 (下部)	⑧－⑧’ －1	P_L	3	279
	⑧－⑧’ －2	P_L	2	279
胴（底板） (中央)	⑨－⑨’	P_m	1	186
	⑨	$P_m + P_b$	4	279
	⑨’	$P_m + P_b$	5	279
胴（底板） (端部)	⑩－⑩’	P_L	3	279
一次蓋 (シール部)	⑪－⑪’	P_L	34	207
	⑪	$P_L + P_b + Q$	16	207
	⑪’	$P_L + P_b + Q$	63	207
カバープレート	⑮	$P_m + P_b$	4	276

4. 繰返し荷重の評価

4.1 密封容器（ボルトを除く）の応力評価

金属キャスク構造規格 MCD-1332により、疲労解析が不要となる条件を満足する評価の詳細を以下の(1)から(6)に示し、第4-1表にその評価結果のまとめを示す。第4-1表に示すとおり、金属キャスク構造規格 MCD-1332の規定に全て適合しているので、疲労解析を必要としない。

(1) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (1) (大気圧－使用圧力－大気圧の変動)

大気圧から使用圧力になり、再び大気圧に戻る繰返し回数(N_1)は、燃料装荷及び燃料取出し想定回数である10 回として評価する。

$$N_1 = 10 \text{ (回)}$$

胴及び一次蓋について、金属キャスク構造規格 別図8-1において、設計温度における設計応力強さ(S_m)の3倍の値(363 MPa)を繰返しピーク応力強さとした場合に、これに対応する許容繰返し回数(N_a)は、

$$N_a = 3723 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 \leq N_a$$

であり、燃料装荷及び燃料取出し想定回数を10 回としても条件を満足する。

また、二次蓋については設計温度における設計応力強さ(S_m)の 3倍の値は372 MPa と大きくなるが、許容繰返し回数(N_a)は 3443 回であり、同様に条件を満足する。

(2) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (2) (燃料装荷時、燃料取出し時及び耐压試験時を除く供用状態A及びBにおける圧力変動)

胴について、燃料装荷時、燃料取出し時及び耐压試験時を除く供用状態A及びBにおける圧力変動の全振幅の許容値(A_m)は、次式で計算する。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.097 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

P : 最高使用圧力(=0.41 MPa)

S_m : 設計応力強さ(=121 MPa)

S : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、許容繰返し回数 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ(=86 MPa)

また、(4.1)式で計算される値を超えるものにあつては、許容値(A_m)は、次式で計算される。

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S_a}{S_m} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、(4.1)式による値を超える
圧力変動の回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返
しピーク応力強さ(MPa)

(4.1)式より、圧力変動の全振幅の許容値(A_m)は、0.097 MPa となる。燃料装荷時、
燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用状態A及びBにおける実際の圧力は、密封容
器のため0.097 MPa を超える変動は生じないため、燃料装荷及び燃料取出し想定回
数を10 回としても条件を満足する。

次に、一次蓋及び二次蓋について同様に評価する。(4.1)式の A_m 、 P 及び S_m をそれ
ぞれ以下に示す条件に読み替えて計算すると、圧力変動の全振幅の許容値(A_{m2})は、
0.071 MPa となる。

A_{m2} : 一次蓋及び二次蓋の圧力変動の全振幅の許容値(MPa)

P_2 : 一次蓋又は二次蓋の最高使用圧力(0.31 MPa)
(最高使用圧力0.41 MPaと蓋間圧力0.31 MPaの小さい方)

S_{m2} : 一次蓋又は二次蓋の使用材料の設計応力強さ(124 MPa)
(一次蓋の設計応力強さ124 MPaと二次蓋の設計応力強さ124 MPaは同
じ値である)

一次蓋及び二次蓋において燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用
状態A及びBにおける実際の圧力の変動はほとんどないが、一次蓋と二次蓋間の圧力
を調整する可能性を考え、その回数を 240 回(一次蓋と二次蓋間の圧力は、燃料装
荷及び燃料取出し回数に係わらず、設計貯蔵期間の60年間に於いて3ヵ月毎の圧力監
視を行う。ここで、繰返し回数を保守側に3ヵ月毎の圧力監視毎に圧力調整すると
設定する。240回=4回/年×60年。)として(4.2)式を用いて評価すると、

$$S_a = 989 \text{ MPa}$$

$$A_{m2} = 0.8 \text{ MPa}$$

したがって、燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用状態A及びBに
おける圧力変動の全振幅を二次蓋の最高使用圧力($P_2=0.31 \text{ MPa}$)と仮定しても、

$$P_2 \leq A_{m2}$$

であり、繰返し回数を240回としても条件を満足する。

(3) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (3) (燃料装荷時及び燃料取出し時の温度差)
胴の任意の2点間の距離(p)は、次式で計算される。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 1018 \text{ mm} \cdots \cdots (4.3)$$

ここで、

R : 胴の平均半径 () mm)

t : 胴の板厚 () mm)

燃料装荷時及び燃料取出し時において、相互の距離がpを超えない任意の2点間の温度差の許容値(T)は、次式で計算する。なお、2点間の平均温度は胴の最高使用温度($T_{max}=155\text{ }^{\circ}\text{C}$)とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 770\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、

E : 2点間の平均温度における縦弾性係数($1.95 \times 10^5\text{ MPa}$)

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数($13.30 \times 10^{-6}\text{ mm/(mm}\cdot^{\circ}\text{C)}$)

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、燃料装荷及び燃料取出しの回数(10回)を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ(3999 MPa)

したがって、任意の2点間において生じる温度差を最高使用温度(T_{max})と常温との差($\Delta T=135\text{ }^{\circ}\text{C}$)と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、燃料装荷及び燃料取出し想定回数を10回としても条件を満足する。

また、一次蓋及び二次蓋については、上記評価で代表できるため、同様に条件を満足する。

(4) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (4) (燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態A及びBの温度差変動)

燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態A及びBにおいて、相互の距離がpを超えない任意の2点間の温度差の変動の全振幅の許容値(T)は、次式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、

E : 2点間の平均温度における縦弾性係数($1.95 \times 10^5\text{ MPa}$)

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数($13.30 \times 10^{-6}\text{ mm/(mm}\cdot^{\circ}\text{C)}$)

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-1において、(4.6)式により計算した値を超える温度差(T')の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ(MPa)

$$T' = \frac{S_1}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 16\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

S_1 : 金属キャスク構造規格 別図 8-1 においてにおいて、 10^6 を許容繰返し回数とした場合にこれに対応する繰返しピーク応力強さの値 (MPa)

供用状態 A 及び B において密封容器は密封状態であり、かつ温度変動する加熱源を収納していないので、任意の 2 点間の温度差の変動が (4.6) 式により計算された値の $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ を超えることは、貯蔵期間における崩壊熱低下による 10 回と考えられ、(4.5) 式を用いて評価すると、

$$S_a = 3999\text{ MPa}$$

$$T = 770\text{ }^{\circ}\text{C}$$

したがって、胴の任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅を最高使用温度 ($T_{\max}$) と常温との差 ($\Delta T = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$) と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、繰返し回数を 10 回としても条件を満足する。

なお、一次蓋及び二次蓋については、上記評価で代表できるため、同様に条件を満足する。

(5) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (5) (異なる材料で作られた部分の温度変動)

一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトは同種の合金鋼を使用しており、一次蓋及び二次蓋は炭素鋼を使用している。したがって、合金鋼と炭素鋼の組合せで評価する。なお、カバープレート内の温度差は小さく熱荷重の影響は無視できることから、評価を無視する。

合金鋼と炭素鋼の部分の温度変動の許容値 (T) は、(4.7) 式で計算する。なお、縦弾性係数及び熱膨張係数は密封容器の最高使用温度 ($T_{\max} = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$) に対する値とする。

$$T = \frac{S_1}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} = 293\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、

S_1 : 金属キャスク構造規格 別図 8-2 において、許容繰返し回数 10^6 回に対する繰返しピーク応力強さ (86 MPa)

E_1 : 炭素鋼の縦弾性係数 (1.95×10^5 MPa)

E_2 : 合金鋼の縦弾性係数 (1.84×10^5 MPa)

α_1 : 炭素鋼の瞬時熱膨張係数 (13.30×10^{-6} mm/(mm $\cdot^{\circ}\text{C}$))

α_2 : 合金鋼の瞬時熱膨張係数 (13.30×10^{-6} mm/(mm $\cdot^{\circ}\text{C}$))

また、(4.7) 式で計算される値を超えるものにあつては、許容値 (T) は、(4.8) 式で計算する。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格 別図8-2において、(4.7)式により計算した値を超える温度差の変動回数を許容繰返し回数とした場合、それに対応する繰返しピーク応力強さ(MPa)

(4.7)式より、温度変動の許容値は293 ℃となる。したがって、異なる材料で作られた部分の温度変動を、最高使用温度(T_{max})と常温との差($\Delta T = 135$ ℃)と仮定しても、
 $\Delta T \leq T$
 であり、繰返し回数を10回としても条件を満足する。

(6) 金属キャスク構造規格 MCD-1332 (6) (機械的荷重の変動)

供用状態A及びBにおける機械的荷重の変動回数は、以下に示すように全事象の合計回数の213 回と想定する。

燃料装荷・取出し時	10 回
吊上げ時	200 回
検査架台への衝突時	3 回
合 計	213 回

この回数に対応する繰返しピーク応力強さ S_a は金属キャスク構造規格 別図8-1より、

$$S_a = 1040 \text{ MPa}$$

である。

第3-2表から第3-4表に示した供用状態A及びBにおける応力強さの最大値($\Delta \sigma_1 = 60$ MPa)を機械的荷重により発生する応力の全振幅と考えたとしても、

$$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$$

であり、条件を満足する。

第4-1表 密封容器（ボルトを除く）の疲労解析不要の評価結果

金属キャスク 構造規格 MCD-1332	繰返し荷重	設定繰返し 回数	評価値	許容値	評価
(1)	大気圧－使用圧力－大気圧の変動	10	繰返し回数 $N_1 = 10$	$3S_m$ に対する 許容繰返し回数 $N_a = 3723$	$N_1 \leq N_a$ であるので 本条件を満足
(2)	燃料装荷時、燃料取出し時及び耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動	240	圧力変動 の全振幅 $P = 0.31 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m = 0.8 \text{ MPa}$	$P \leq A_m$ であるので 本条件を満足
(3)	燃料装荷時及び燃料取出し時での 2 点間温度差	10	温度差 $\Delta T = 135 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差許容値 $T = 770 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であるので 本条件を満足
(4)	燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B における 2 点間の温度差変動	10	温度差変動 の全振幅 $\Delta T = 135 \text{ }^\circ\text{C}$	温度差変動許容値 $T = 770 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であるので 本条件を満足
(5)	異種材接合部での温度変動	10	温度変動 $\Delta T = 135 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T = 293 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であるので 本条件を満足
(6)	機械的荷重の変動	213	応力の全振幅 $2 \cdot \Delta \sigma_1 = 120 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動 回数 213 回 に対する許容繰返し ピーク応力強さ $S_a = 1040 \text{ MPa}$	$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$ である ので本条件に 対する評価で考 慮する必要が ない。

4.2 ボルトの評価

金属キャスク構造規格 MCD-1322に従って疲労解析を行う。

4.2.1 金属キャスク構造規格 MCD-1322及び別図8-4に対する検討

一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの金属キャスク構造規格 別図8-4の使用条件に対する検討を以下の(1)から(4)に示す。以下の(1)から(4)に示すとおり、一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトは、金属キャスク構造規格 別図8-4の曲線1の使用条件を満足する。

- (1) 一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの最小引張強さは921 MPa、921MPa及び924 MPaであり、金属キャスク構造規格 MCD-1322に従い、設計疲労曲線として金属キャスク構造規格 別図8-4を使用する。
- (2) 一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの平均引張応力+曲げ応力は、257 MPa、169 MPa及び267 MPaであり、この値は $2.7S_m$ 以下であるため、設計疲労曲線として、金属キャスク構造規格 別図8-4の“曲線1”を使用する。
- (3) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋ボルトが mm、カバープレートボルトが mm、二次蓋ボルトが mmであって0.07 mm以上である。
- (4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比は、

一次蓋ボルト

:

カバープレートボルト :

二次蓋ボルト

:

であって0.06以上である。

4.2.2 ボルトの疲労解析

4.2.2.1 疲労評価において考慮する事象

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① 燃料装荷及び燃料取出し時
- ② 吊上げ時
- ③ 検査架台への衝突時
- ④ 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）
- ⑤ 蓋間空間の圧力調整

4.2.2.2 ピーク応力強さの算出

4.2.2.1に示す事象において、一次蓋ボルト、カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの各応力サイクルに対応したピーク応力強さは、ピーク応力強さのサイクルにおいてその極大値の極小値の差であることより、次式で計算する。

$$S_p = K \cdot (|S_{b2} - S_{b1}|) \dots\dots\dots (4.9)$$

ここで、

S_p : 各応力サイクルに対応したピーク応力強さ (MPa)

K : ボルトのねじ部の応力集中係数 (=4)
(金属キャスク構造規格 表MCD-1331-1による)

S_{b1} : ボルトに発生する応力強さ (変動前) (MPa)

S_{b2} : ボルトに発生する応力強さ (変動後) (MPa)

4.2.2.3 応力の変動

4.2.2.1に示す事象による応力変動は以下のとおり考慮する。

①燃料装荷及び燃料取り出し時

燃料装荷後のボルト締め付け時は、ボルトが締め付けられていない応力零状態からの変動、燃料取り出し時のボルト取り外し時は、ボルト締め付け時からの変動を考慮する。

②吊上げ時

吊上げ時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

③検査架台への衝突時

検査架台への衝突時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

④貯蔵時 (貯蔵期間における崩壊熱の低下)

貯蔵時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

⑤蓋間空間の圧力調整時

蓋間空間の圧力調整時は①の燃料装荷後のボルト締め付け時からの変動を考慮する。

4.2.2.4 繰返しピーク応力強さの算出

(4.9)式で求めた各応力サイクルに対応したピーク応力強さ(S_p)と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル並びに各事象の繰返し回数を第4-2表、第4-4表及び第4-6表に示す。

各応力サイクルに対応したピーク応力強さ(S_p)から、次式により繰返しピーク応力強さ(S_c 、 S_c')を求める。ここで、繰返しピーク応力強さ(S_c)は、金属キャスク構造規格 別図8-4に使用されている縦弾性係数(E_0)と解析に用いる縦弾性係数(E ：「資料10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」の「第5-3表 応力計算に使用する材料の物性値」に示す縦弾性係数と「第6-1表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ2)）」の一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及びカバープレートボルトの温度から求められる値)との比を考慮し補正する。

$$\left. \begin{aligned} S_c &= \frac{1}{2} \cdot S_p \\ S_c' &= S_c \cdot \frac{E_0}{E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.10)$$

4.2.3 ボルトの疲労解析結果

金属キャスク構造規格 別図8-4より、補正した繰返しピーク応力強さ(S_c')に対する許容繰返し回数(N_a)を求める。疲労累積係数(U_f)は、金属キャスク構造規格 MCD-1322より以下式で計算される。

$$U_f = \sum_{i=1}^k \frac{N_c(i)}{N_a(i)} \dots\dots\dots (4.11)$$

ここで、

- N_c ： 各サイクルの繰返し回数(-)
- N_a ： 許容繰返し回数(-)
- i ： 応力サイクルの型式(-)
- k ： 応力サイクルの型式の総数(-)

各サイクルの繰返し回数(N_c)と許容繰返し回数(N_a)との比は第4-3表、第4-5表及び第4-7表に示すとおりとなり、供用状態A及びBによる疲労累積係数(U_f)は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-1322の規定を満足する。

第4-2表 応力差の変動（一次蓋ボルト）

i	変動後		変動前		S_p (MPa)
	事象	S_{b2} (MPa)	事象	S_{b1} (MPa)	
1	C01	251 ^(注1)	C00	0	1004
2	C02	253 ^(注2)	C01	251 ^(注1)	8
3	C03	257 ^(注3)	C01	251 ^(注1)	24
4	C04	251 ^(注4)	C01	251 ^(注1)	0
5	C05	251 ^(注5)	—	注5)	

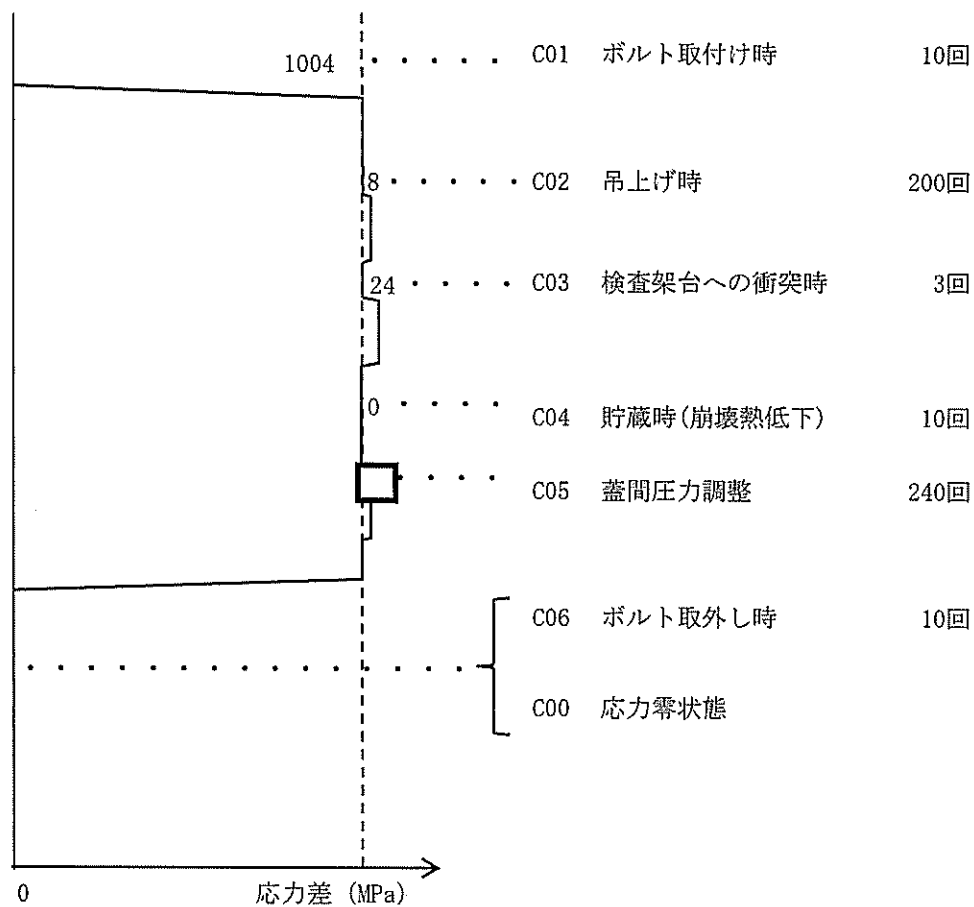
(注1) 第3-2表に示す貯蔵時の一次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注2) 第3-3表に示す吊上げ時の一次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注3) 第3-4表に示す検査架台への衝突時の一次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注4) 保守側に使用済燃料の崩壊熱が無い状態を想定し、第3-2表に示す貯蔵時の一次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力未考慮）を用いる。

(注5) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.31 MPaまで変化させた場合の応力とし、変動前は蓋ボルト初期締付力を用い、変動後は貯蔵時（熱応力未考慮（蓋間空間の圧力は0.31 MPa））の解析結果を用いる。



第4-3表 疲労評価（一次蓋ボルト）

i	$S_p^{(注1)}$ (MPa)	S_c (MPa)	S_c' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	1004	502	559	1529	10	0.0066
2	8	4	5	10^6	200	0.0002
3	24	12	14	10^6	3	0.0001
4	0	0	0	—	10	—
5	□	□	□	10^6	240	0.0003
疲労累積係数 $U_f = 0.0072$						

(注1) S_p は第4-2表による。

第4-4表 応力差の変動（カバープレートボルト）

i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	166 ^(注1)	C00	0	664
2	C02	166 ^(注2)	C01	166 ^(注1)	0
3	C03	169 ^(注3)	C01	166 ^(注1)	12
4	C04	166 ^(注4)	C01	166 ^(注1)	0
5	C05	166 ^(注5)	-	^(注5)	

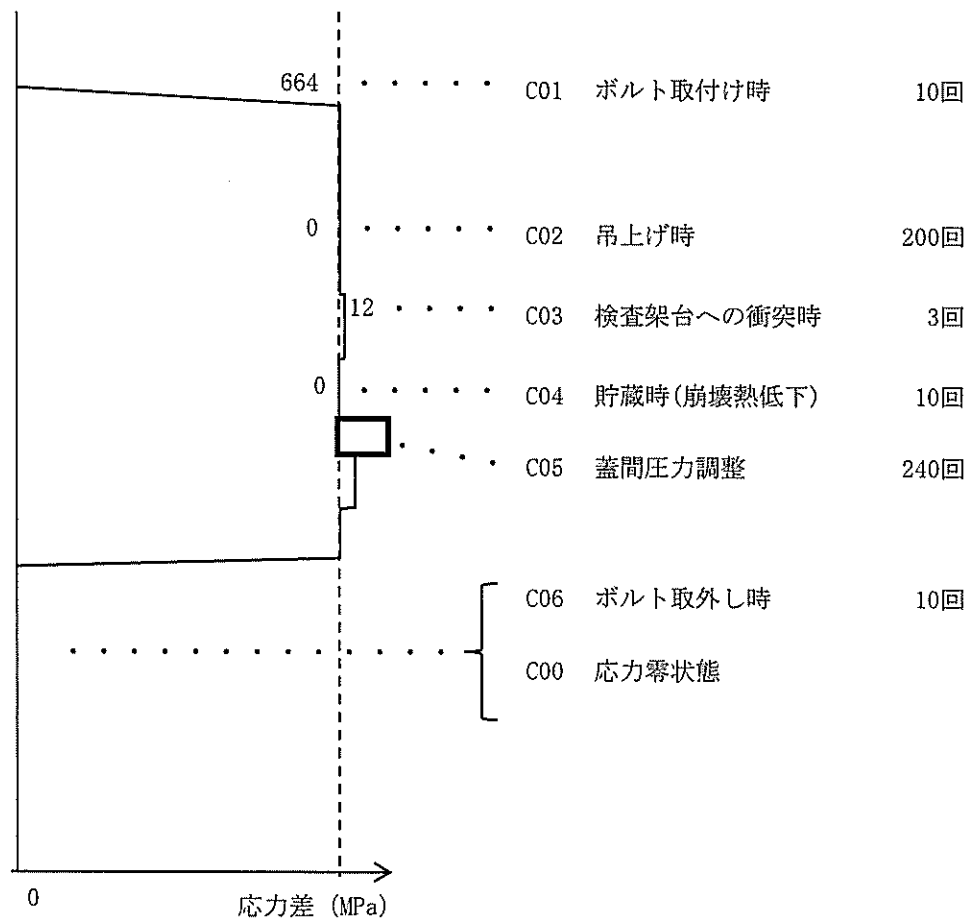
(注1) 第3-2表に示す貯蔵時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注2) 第3-3表に示す吊上げ時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注3) 第3-4表に示す検査架台への衝突時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注4) 3.3.2(2)に記載するようにカバープレートの二次応力は無視できることから、第3-2表に示す貯蔵時のカバープレートボルトの解析結果 ($\sigma_m + \sigma_b$) を用いる。

(注5) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.31 MPaまで変化させた場合の応力とし、変動前は、カバープレートボルト初期締付力を用い、変動後は貯蔵時(蓋間空間の圧力は0.31 MPa)の解析結果を用いる。



第4-5表 疲労評価 (カバープレートボルト)

i	$S_p^{(注1)}$ (MPa)	S_c (MPa)	S_c' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	664	332	370	2849	10	0.0036
2	0	0	0	—	200	—
3	12	6	7	10^6	3	0.0001
4	0	0	0	—	10	—
5				10^6	240	0.0003
疲労累積係数 $U_f=0.0040$						

(注1) S_p は第4-4表による。

第4-6表 応力差の変動（二次蓋ボルト）

i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	267 ^(注1)	C00	0	1068
2	C02	224 ^(注2)	C01	267 ^(注1)	172
3	C03	236 ^(注3)	C01	267 ^(注1)	124
4	C04	243 ^(注4)	C01	267 ^(注1)	96
5	C05	243 ^(注5)	—	^(注5)	

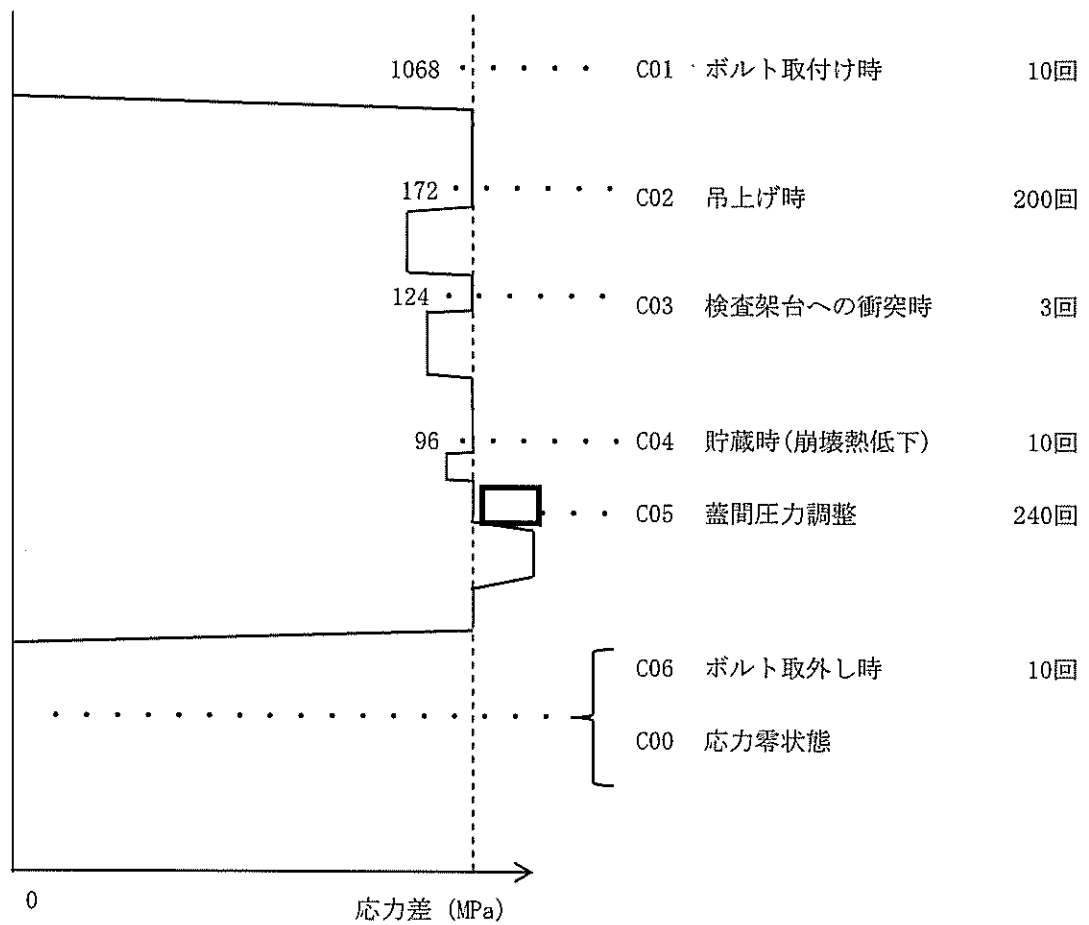
(注1) 第3-2表に示す貯蔵時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注2) 第3-3表に示す吊上げ時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注3) 第3-4表に示す検査架台への衝突時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力考慮）を用いる。

(注4) 保守側に使用済燃料の崩壊熱が無い状態を想定し、第3-2表に示す貯蔵時の二次蓋ボルトの解析結果（ $\sigma_m + \sigma_b$ ：熱応力未考慮）を用いる。

(注5) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.31 MPaまで変化させた場合の応力とし、変動前は蓋ボルト初期締付力を用い、変動後は貯蔵時（熱応力未考慮（蓋間空間の圧力は0.31 MPa））の解析結果を用いる。



第4-7表 疲労評価 (二次蓋ボルト)

i	$S_p^{(注1)}$ (MPa)	S_c (MPa)	S_c' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	1068	534	595	1347	10	0.0075
2	172	86	96	620226	200	0.0004
3	124	62	69	10^6	3	0.0001
4	96	48	54	10^6	10	0.0001
5				620226	240	0.0004
疲労累積係数 $U_f = 0.0085$						

(注1) S_p は第4-6表による。

5. 穴の補強

金属キャスク構造規格 MCD-1700 により、一次蓋貫通孔及び二次蓋貫通孔の補強が不要となることを示す。

一次蓋貫通孔部及び二次蓋貫通孔部の応力強さは、応力集中係数を用いて次式で計算する。

[illegible]

ここで、

S₂ : 一次蓋貫通孔部又は二次蓋貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0:「西田正孝、応力集中 増補版、森北出版(株)」より)

S₃ : 一次蓋貫通孔部又は二次蓋貫通孔部を無視した場合の一次蓋または二次蓋の応力強さ (MPa)

一次蓋貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S_3) と一次蓋貫通孔部の応力強さ (S_2) は第 5-1 表に、二次蓋貫通孔を無視した場合の二次蓋の応力強さ (S_3) と二次蓋貫通孔部の応力強さ (S_2) は第 5-2 表に示すとおりとなり、すべて許容応力を満足するため、一次蓋貫通孔部及び二次蓋貫通孔部の補強は不要となる。

第5-1表 一次蓋貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力分類	貫通孔を無視した場 合の応力強さ (S_3)	貫通孔部の 応力強さ (S_2)	許容応力値
設計時	P_m	1	4	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	7	28	186
貯蔵時	P_m	1	4	124
	P_L	6	24	186
	$P_L + P_b$	8	32	186
	$P_L + P_b + Q$	12	48	372
吊上げ時	P_m	1	4	124
	P_L	6	24	186
	$P_L + P_b$	8	32	186
	$P_L + P_b + Q$	10	40	372
検査架台 への 衝突時	P_m	1	4	124
	P_L	6	24	186
	$P_L + P_b$	7	28	186
	$P_L + P_b + Q$	12	48	372
試験状態	P_m	2	8	186
	P_L	8	32	279
	$P_m + P_b$	13	52	279

第5-2表 二次蓋貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力分類	貫通孔を無視した場 合の応力強さ (S_3)	貫通孔部の 応力強さ (S_2)	許容応力値
設計時	P_m	4	16	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	25	100	186
貯蔵時	P_m	4	16	124
	P_L	5	20	186
	$P_L + P_b$	27	108	186
	$P_L + P_b + Q$	30	120	372
吊上げ時	P_m	2	8	124
	P_L	4	16	186
	$P_L + P_b$	12	48	186
	$P_L + P_b + Q$	12	48	372
検査架台 への 衝突時	P_m	2	8	124
	P_L	4	16	186
	$P_L + P_b$	13	52	186
	$P_L + P_b + Q$	13	52	372

6. 外圧の評価

供用状態 A 及び B の場合に、密封容器の内圧は負圧であり、最高使用圧力(外圧) (P) は 0.41 MPa である。許容外圧 (P_a) は「資料 10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」第 6-5 表より 13.2 MPa であるので、金属キャスク構造規格 MCD-1410(1)の規定を満足する。

バスケットの強度計算書
(乾式キャスク (タイプ2))

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-4

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資10-3-3-4-1
2. 形状・寸法・材料	資10-3-3-4-1
3. 応力計算	資10-3-3-4-4
3.1 応力評価位置	資10-3-3-4-4
3.2 貯蔵時	資10-3-3-4-7
3.3 吊上げ時	資10-3-3-4-10
3.4 検査架台への衝突時	資10-3-3-4-12

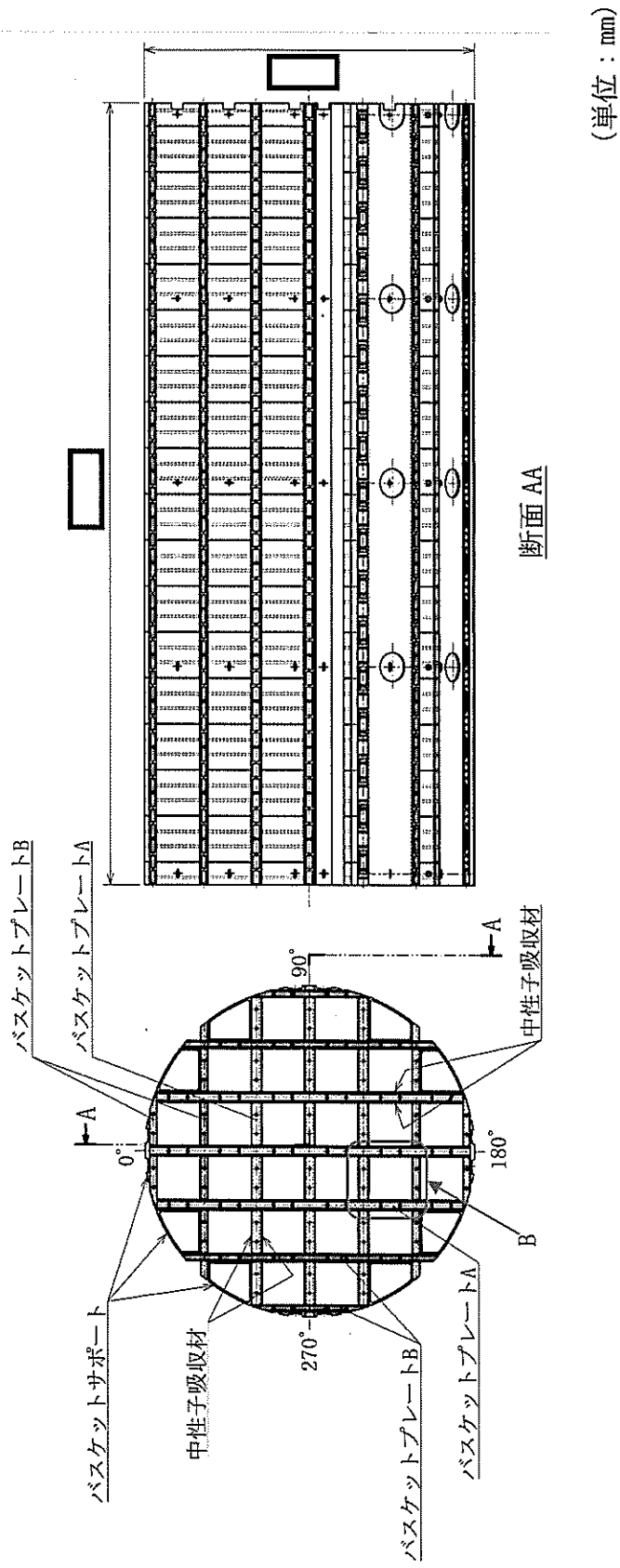
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

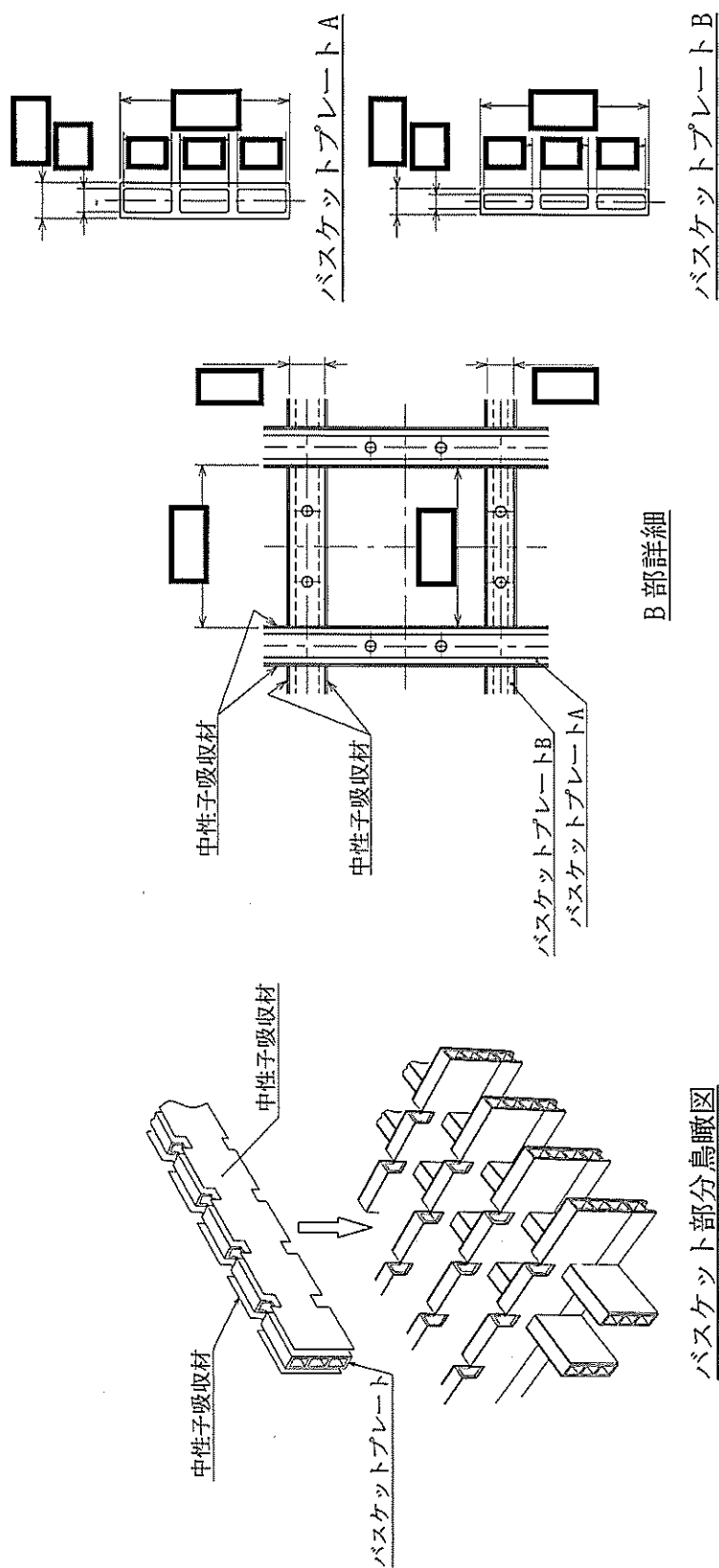
本資料は、資料 10-3-2-2「バスケットの強度計算方法」に基づき、乾式キャスク（タイプ 2）のバスケットが十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

2. 形状・寸法・材料

本資料で解析するバスケットの形状・寸法・材料を第2-1図に示す。



第2-1図 バスケットの形状・寸法・材料 (1/2)



(単位 : mm)

材料

バスケットプレート : アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)

中性子吸収材 : ほう素添加アルミニウム合金 (非強度部材)

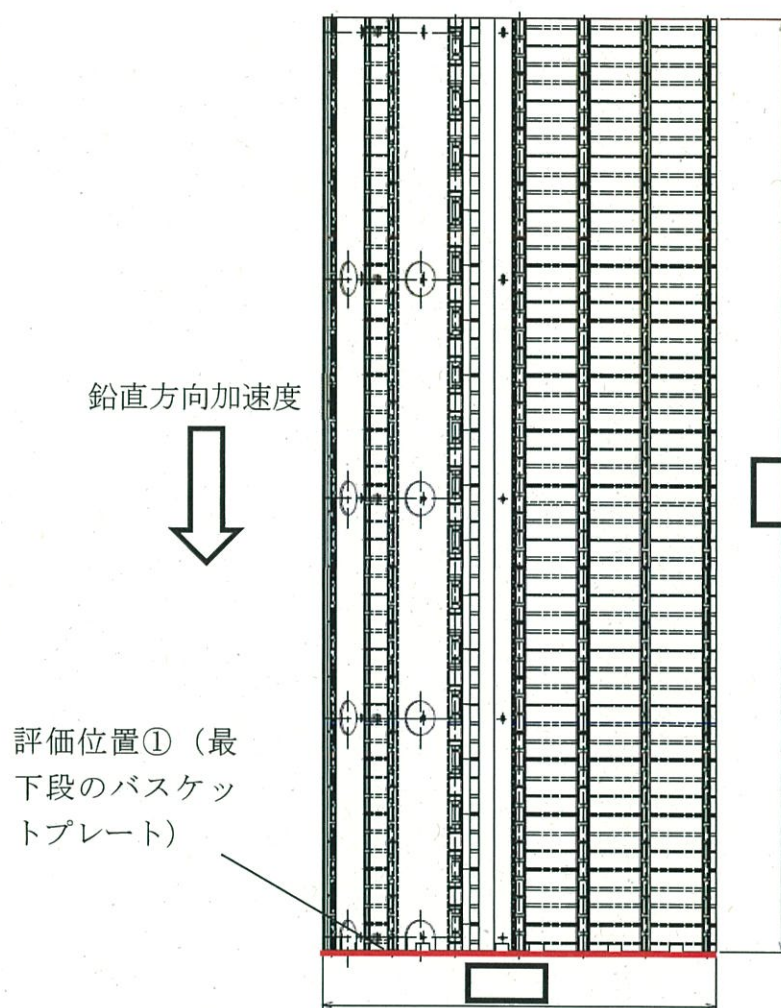
バスケットサポート : アルミニウム合金 (非強度部材)

第2-1図 バスケットの形状・寸法・材料 (2/2)

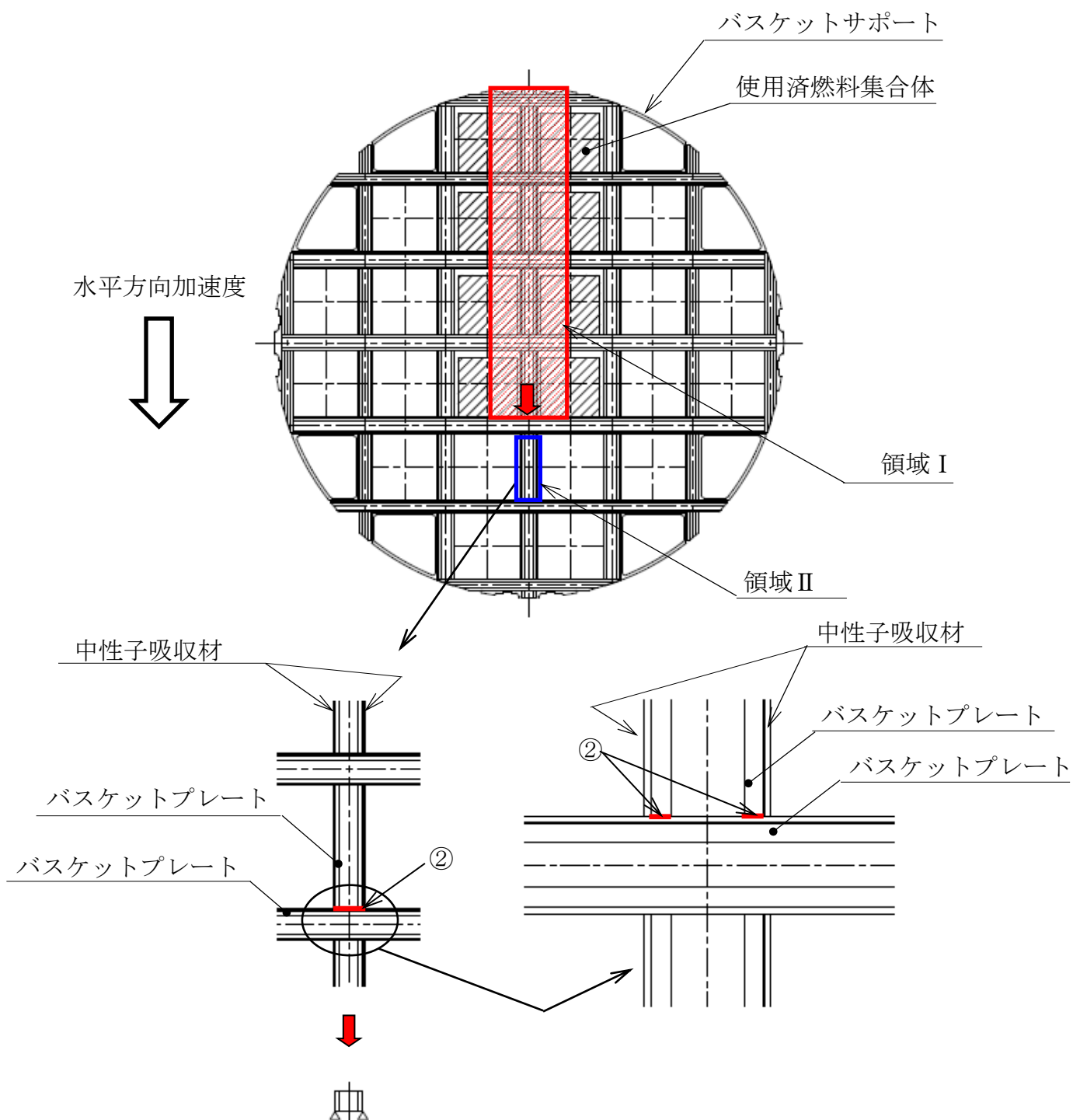
3. 応力計算

3.1 応力評価位置

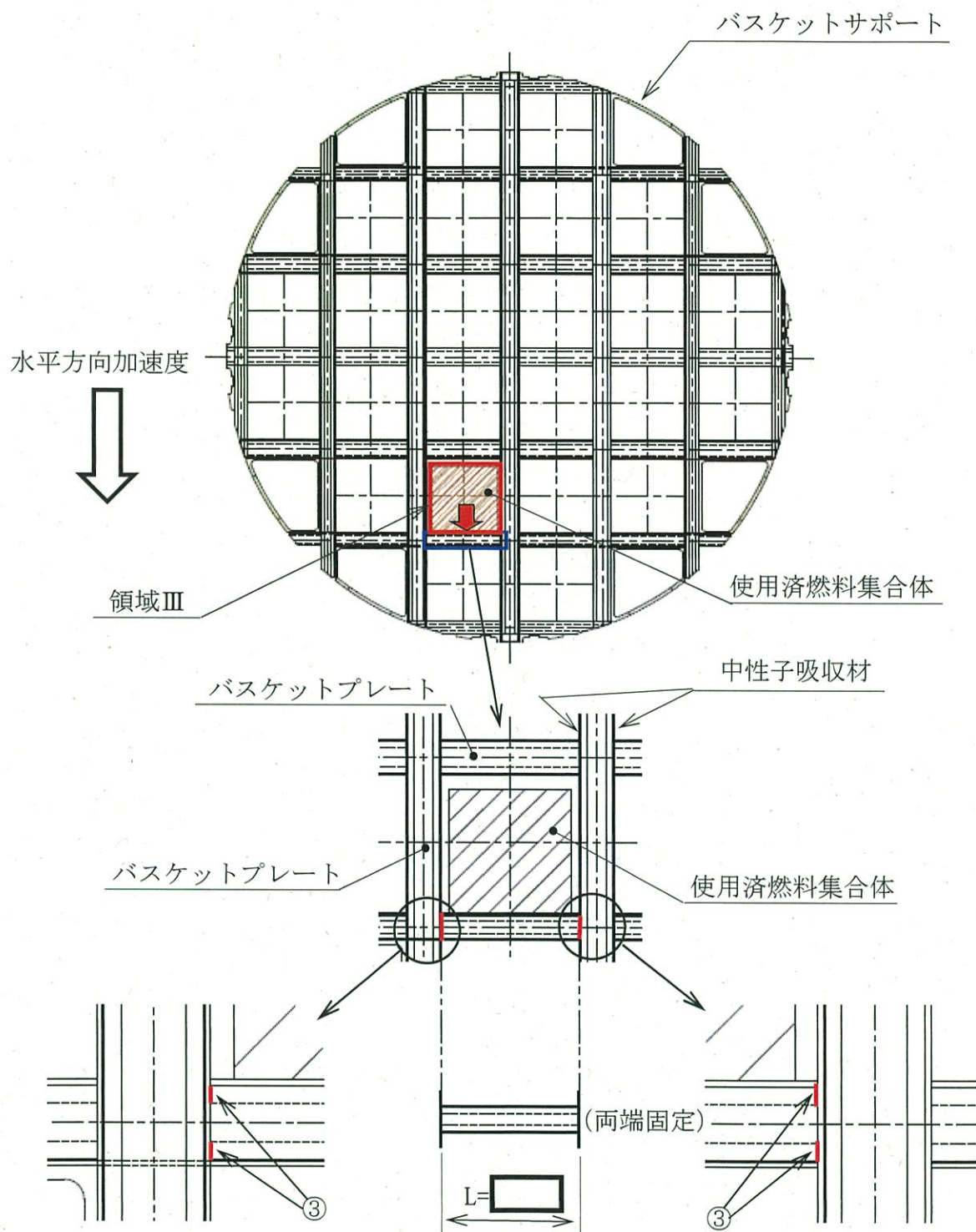
バスケットの解析モデル及び応力評価位置を第3-1図及び第3-2図に示す。乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。



第3-1図 バスケットの応力評価位置（鉛直方向加速度が作用する場合）



第3-2図 バスケットの応力評価位置（水平方向加速度が作用する場合）（1/2）



第3-2図 バスケットの応力評価位置（水平方向加速度が作用する場合）（2/2）

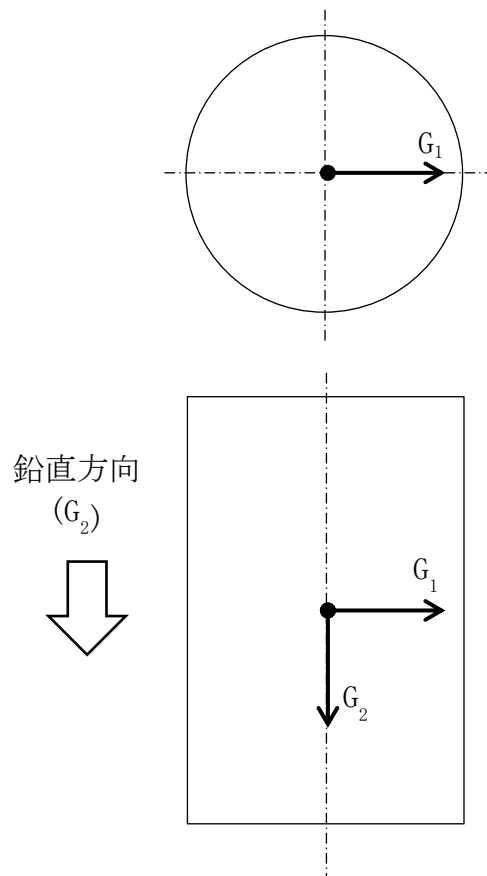
3.2 貯蔵時

3.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を第3-3図に示す。

- ・自重

貯蔵時 : $G_2 = 1g$
吊上げ時 : $G_2 = 1.3g$
検査架台への衝突時 : $G_1 = 3.4g$



第3-3図 各代表事象における荷重の方向

3.2.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）である。自重により発生する一次一般膜応力は、次式で計算される。

$$\sigma_{mV} = \frac{m_1 G_2 g}{A_1} \quad (3.1)$$

ここで、

σ_{mV} : 鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力 (MPa)

m_1 : バスケット重量 (=5600 kg)

G_2 : 貯蔵時の加速度係数 (=1)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

A_1 : 評価位置①の断面積 ($2.341 \times 10^5 \text{ mm}^2$)

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）には、自重によって一次曲げ応力は発生しないため、一次一般膜＋一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

(3) 平均せん断応力

最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）には、自重によってせん断応力は発生しないため、評価を実施しない。

(4) 圧縮応力

最大応力が発生するのは最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）である。最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）に発生する圧縮応力 (σ_c) は、(3.1)式で計算される。

3.2.3 計算結果

応力計算結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すように、発生する応力は許容応力値以下である。

第 3-1 表 バスケットの応力評価（貯蔵時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
バスケット プレート	①	P_m	1	15
	①	$P_m + P_b$	1	15
	—	τ	—	—
	①	σ_c	1	37

3.3 吊上げ時

3.3.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を第3-3図に示す。

- ・吊上げ荷重（自重を含む）

3.3.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）である。吊上げ荷重により発生する一次一般膜応力は、(3.1)式で計算される。

ここで、

σ_{mV}, m_1, g, A_1 : 3.2.2 項と同じ

G_2 : 吊上げ時の加速度係数（=1.3）

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）には、吊上げ荷重によって一次曲げ応力は発生しないため、一次一般膜＋一次曲げ応力は、一次一般膜応力と同じである。

(3) 平均せん断応力

最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）には、吊上げ荷重によってせん断応力は発生しないため、評価を実施しない。

(4) 圧縮応力

最大応力が発生するのは最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）である。最下段のバスケットプレート底面（第3-1図の評価位置①）に発生する圧縮応力（ σ_c ）は、(3.1)式で計算される。

ここで、

σ_{mV}, m_1, g, A_1 : 3.2.2 項と同じ

G_2 : 吊上げ時の加速度係数（=1.3）

3.3.3 計算結果

応力計算結果を第3-2表に示す。第3-2表に示すように、発生する応力は許容応力値以下である。

第3-2表 バスケットの応力評価（吊上げ時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
バスケット プレート	①	P_m	1	36
	①	$P_m + P_b$	1	54
	—	τ	—	—
	①	σ_c	1	37

3.4 検査架台への衝突時

3.4.1 荷重条件

検査架台への衝突時における荷重は次に示す組合せとする。荷重の方向を第3-3図に示す。

- ・検査架台への衝突時荷重

3.4.2 計算方法

(1) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのは第3-2図の評価位置②である。検査架台への衝突時荷重により発生する一次一般膜応力は、次式で計算される。

$$\sigma_{mH} = \frac{m_2 G_1 g}{A_2 N} \quad (3.2)$$

ここで、

- σ_{mH} : 水平方向加速度により発生する一次一般膜応力 (MPa)
- m_2 : 第3-2図(1/2)に示す領域Ⅰ及びⅡに含まれるバスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の合計重量 (=3661.5 kg)
- G_1 : 検査架台への衝突時の加速度係数 (=3.4)
- g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- A_2 : 評価位置②の断面積 (4.069×10^3 mm²)
- N : バスケットプレートの段数 (=17)

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

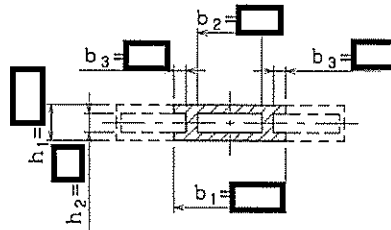
最大応力が発生するのは第3-2図の評価位置③である。検査架台への衝突時荷重により発生する一次曲げ応力は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bH} &= \frac{M}{Z} \\ M &= \frac{w G_1 g L^2}{12} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ここで、

- σ_{bH} : 水平方向加速度により発生する曲げ応力 (MPa)
- M : 評価位置③に発生する曲げモーメント (N・mm)
- Z : 評価位置③の断面係数 ($=2.431 \times 10^4$ mm³)
- $Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1}$
- h_1 : バスケットプレート高さ 1 (mm)
- b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)

- b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)
 h_2 : バスケットプレート高さ 2 (mm)
 b_3 : バスケットプレート幅 3 (mm)



(評価位置③の断面形状)

- w : 第 3-2 図 (2/2) に示す領域Ⅲに含まれるバスケットプレート、中性子吸収材及び使用済燃料集合体の単位長さ当たりの重量 (=0.20 kg/mm)
 G_1 : 検査架台への衝突時の加速度係数 (=3.4)
 g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
 L : バスケットプレート長さ (= mm)

(3) 平均せん断応力

最大応力が発生するのは第3-2図の評価位置③である。検査架台への衝突時荷重により発生するせん断応力は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_H &= \frac{F}{A_3} \\ F &= \frac{wG_1gL}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

ここで、

- τ_H : 水平方向加速度により発生するせん断応力 (MPa)
 F : 評価位置③に発生する荷重 (N)
 A_3 : 評価位置③の断面積 (=2.545×10³mm²)
 w, G_1, g, L : 3.4.2(2)と同じ

(4) 圧縮応力

最大応力が発生するのは第3-2図の評価位置②である。評価位置②に発生する圧縮応力 (σ_c) は、(3.2)式で計算される。

ここで、

- m_2, G_1, g, A_2, N : 3.4.2(1)と同じ

3.4.3 計算結果

応力計算結果を第3-3表に示す。第3-3表に示すように、発生する応力は許容応力値以下である。

第 3-3 表 バスケットの応力評価（検査架台への衝突時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
バスケット プレート	②	P_m	2	36
	③	$P_m + P_b$	2	43
	③	τ	1	21
	②	σ_c	2	37

トラニオンの強度計算書
(乾式キャスク (タイプ1))

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-5

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要.....	資 10-3-3-5-1
2. 形状・寸法・材料.....	資 10-3-3-5-1
3. 応力計算.....	資 10-3-3-5-3
3.1 応力評価位置.....	資 10-3-3-5-3
3.2 貯蔵時.....	資 10-3-3-5-3
3.3 吊上げ時.....	資 10-3-3-5-16

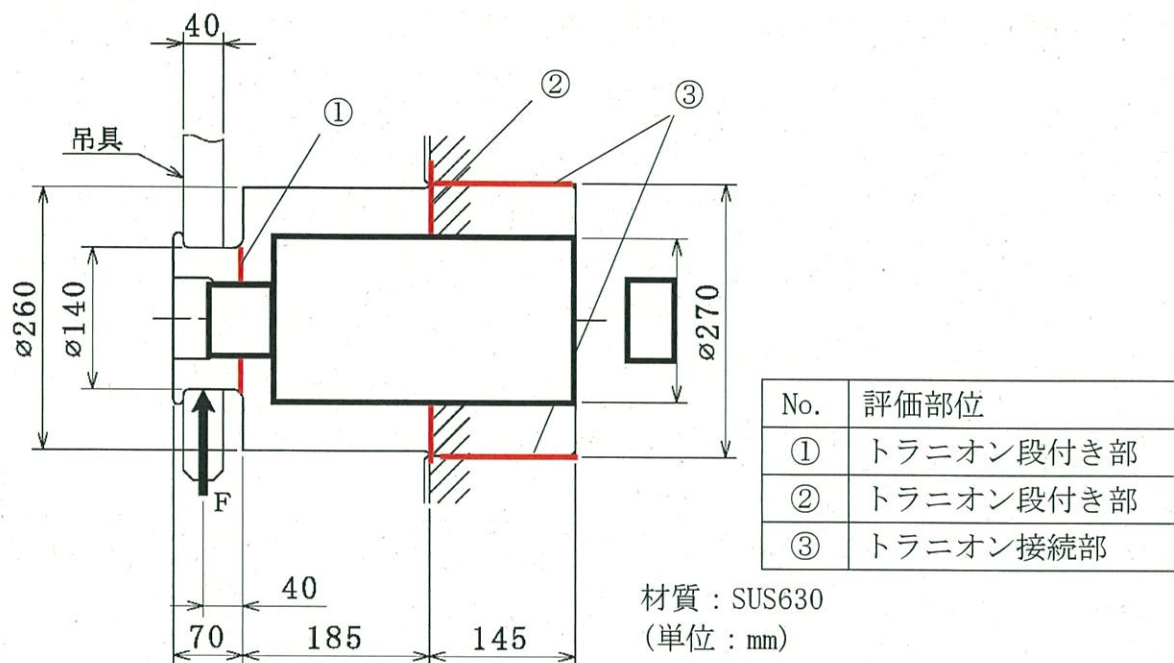
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

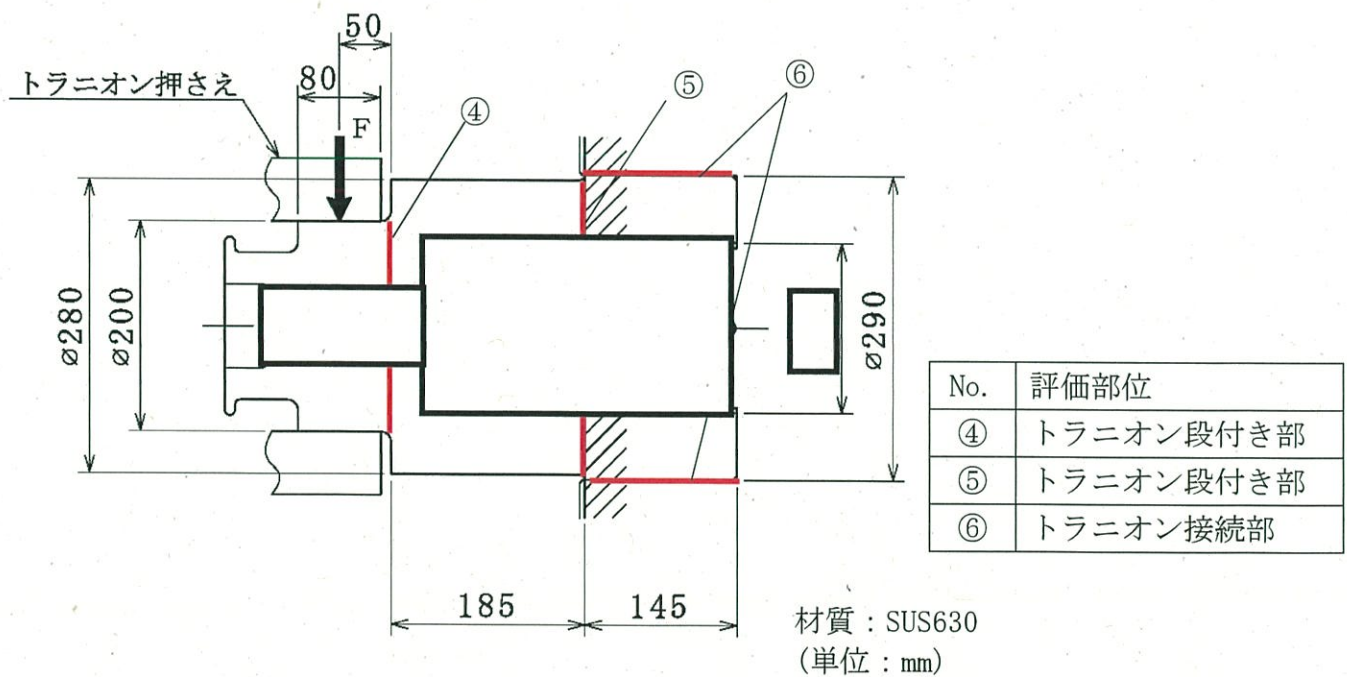
本資料は、資料 10-3-2-3「トラニオンの強度計算方法」に基づき、乾式キャスク（タイプ 1）のトラニオンが十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

2. 形状・寸法・材料

本資料で解析するトラニオンの形状・寸法・材料を第2-1図及び第2-2図に示す。



第2-1図 上部トラニオンの形状・寸法・材料・応力評価位置



第2-2図 下部トラニオンの形状・寸法・材料・応力評価位置

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

トラニオンの応力評価位置を第2-1図及び第2-2図に示す。乾式キャスク（タイプ1）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。

3.2 貯蔵時

3.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重
- ・固縛荷重
- ・熱荷重

3.2.2 計算方法

(1) トラニオン段付き部

(a) 一次応力

(i) せん断応力

トラニオンの自重により評価位置④に発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{W_1 \times g}{A_4} \quad (3.1)$$

ここで、

W_1 : トラニオン自重 (=110 kg)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

A_4 : 評価位置④の断面積 (=2.734×10⁴ mm²)

また、評価位置⑤に発生するせん断応力(τ)は、(3.1)式で計算される。ただし、(3.1)式の A_4 を A_5 とする。

ここで、

A_5 : 評価位置⑤の断面積 (=4.390×10⁴ mm²)

(ii) 曲げ応力

トラニオンの自重により評価位置④に発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z_4} \\ M &= W_1 \cdot g \cdot L_4 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

Z_4 : 評価位置④の断面係数 ($=7.722 \times 10^5 \text{ mm}^3$)

L_4 : 評価位置④と荷重作用位置との距離 ($=50 \text{ mm}$)

なお、トラニオン自重は、トラニオン重心位置に作用するが、保守的にトラニオン押さえの固縛荷重と同じ位置で作用するものとして評価する。

また、評価位置⑤に発生する曲げ応力 (σ_b) は、(3.2) 式で計算される。ただし、(3.2) 式の Z_4 及び L_4 を Z_5 及び L_5 とする。

ここで、

Z_5 : 評価位置⑤の断面係数 ($=1.977 \times 10^6 \text{ mm}^3$)

L_5 : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 ($=235 \text{ mm}$)

(iii) 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} \quad (3.3)$$

(b) 一次＋二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、熱荷重の考慮は不要である。

(i) せん断応力

トラニオンの自重及びトラニオン押さえの固縛荷重により評価位置④に発生するせん断応力 (τ) は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{F_1 + W_1 \times g}{A_4} \quad (3.4)$$

ここで、

F_1 : トラニオン押さえの固縛荷重 ($= \boxed{} \text{ N}$)

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

g : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

A_4 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

また、評価位置⑤に発生するせん断応力 (τ) は、(3.4) 式で計算される。ただし、(3.4) 式の A_4 を A_5 とする。

ここで、

A_5 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

(ii) 曲げ応力

トラニオンの自重及びトラニオン押さえの固縛荷重により評価位置④に発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z_4} \\ M &= F_1 \cdot L_4 + W_1 \cdot g \cdot L_4 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

ここで、

F_1 : 3.2.2 (1) (b) (i) と同じ

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

g : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

Z_4 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

L_4 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

なお、トラニオン自重は、トラニオン重心位置より作用するが、保守的にトラニオン押さえの固縛力と同じ位置で作用するものとして評価する。

また、評価位置⑤に発生する曲げ応力(σ_b)は、(3.5)式で計算される。ただし、(3.5)式の Z_4 及び L_4 を Z_5 及び L_5 とする。

ここで、

Z_5 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

L_5 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

(2) トラニオン接続部

(a) 一次応力

支圧応力が発生する箇所は第2-2図に示す下部トラニオンの評価位置⑥である。トラニオンの自重により発生する支圧応力(σ_{61} 及び σ_{62})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{61} &= R_{61} / (d_6 \cdot L_6 / 2) \\ \sigma_{62} &= R_{62} / (d_6 \cdot L_6 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} R_{61} &= \frac{F_{W1}L_5 + \mu F_{W1}(d_6/2) + F_{W1}L_6}{\mu d_6 + L_6} \\ R_{62} &= \frac{F_{W1}L_5 - \mu F_{W1}(d_6/2)}{\mu d_6 + L_6} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

F_{W1} : 作用荷重 (トラニオン自重による荷重)

$$F_{W1} = W_1 \times g$$

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

g : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

R_{61} : トラニオンに作用する反力 (N)

R_{62} : トラニオンに作用する反力 (N)

L_5 : 0 点から荷重作用点までの距離 (3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ)

L_6 : 0 点から反力 R_{62} の作用点までの距離 (=140 mm)

μ : 摩擦係数 (=0.35)

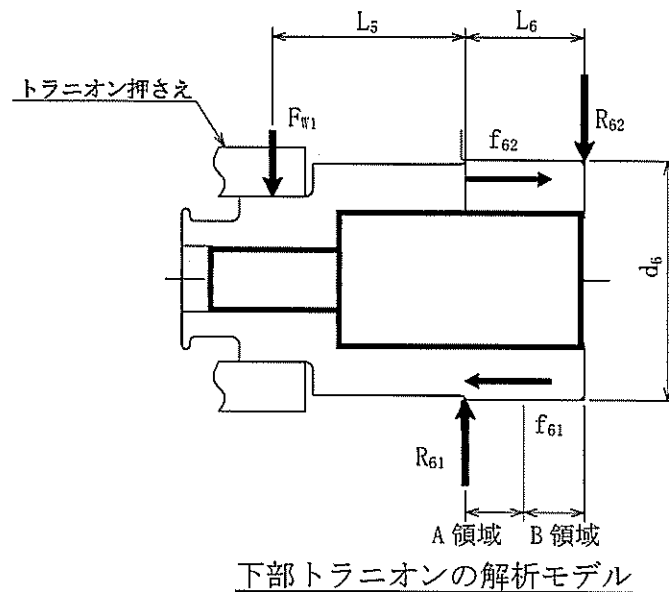
(「日本機械学会 機械工学便覧 (基礎編) $\alpha 2$ 機械力学」に示される鋼同士の摩擦係数より)

d_6 : 嵌め込み部の外径 (=290 mm)

f_{61} : トラニオンに作用する摩擦力 (N)

f_{62} : トラニオンに作用する摩擦力 (N)

$$f_{61} = \mu R_{61}, \quad f_{62} = \mu R_{62} \quad (3.8)$$



(b) 一次＋二次応力

(i) トラニオン自重及び固縛荷重による支圧応力

応力計算方法は、3.2.2(2)(a)と同様である。ただし、作用荷重は $(F_{W1}+F_I)$ とする。

(ii) しまり嵌めによる支圧応力

しまり嵌めによる支圧応力は次式（「機械設計便覧編集委員会 機械設計便覧（第3版）」に示される組合せ円筒の式）で計算される。

$$P_6 = \frac{\alpha_6}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}} \quad (3.9)$$

ここで、

ν : ポアソン比 (=0.3)

α_6 : しまり嵌め比 (= δ_6/d_{62})

δ_6 : 外輪(穴)と軸の初期しめ代 (直径差) (= mm)

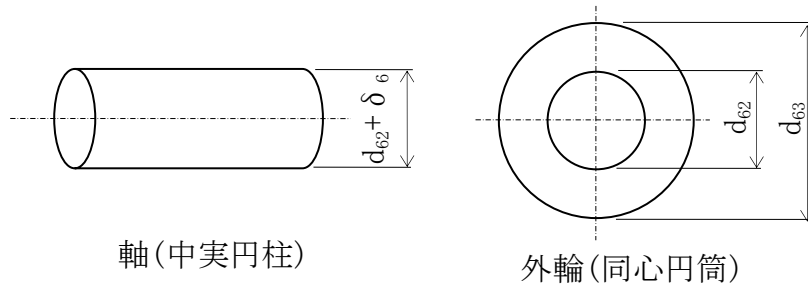
d_{62} : 外輪(穴)内径 (=290mm)

d_{63} : 外輪(穴)外径 (= mm)

(外輪(穴)外径の大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きい外輪(穴)内径の とした。)

E : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)

E' : 胴の縦弾性係数 (MPa)



しまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデル

(iii) 支圧応力（一次＋二次応力）

トラニオン自重、固縛荷重及びしまり嵌めによる支圧応力を加えた支圧応力 S_6 (MPa) は次式で計算される。

$$S_6 = \text{MAX}[\sigma_{61}, \sigma_{62}] + P_6 \quad (3.10)$$

3.2.3 計算結果

応力計算結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すとおり、発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-1表 トラニオンの応力評価（貯蔵時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
下部トラニオン 段付き部	④	せん断応力（一次応力）	1	227
		曲げ応力（一次応力）	1	394
		組合せ応力	2	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	16	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	28	1182
	⑤	せん断応力（一次応力）	1	227
		曲げ応力（一次応力）	1	394
		組合せ応力	2	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	10	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	51	1182
下部トラニオン 接続部	⑥	支圧応力（一次応力）	1	228 ^(注1)
		支圧応力（一次＋二次応力）	80	343 ^(注1)

（注1）下部トラニオン接続部（胴側）の方が許容応力は小さいため、下部トラニオン接続部（胴側）の評価基準値を示す。

3.2.4 疲労評価

金属キャスク構造規格 MCD-3313 に従って疲労解析を行う。

3.2.4.1 疲労評価において考慮する事象

疲労解析で考慮する事象は、以下とする。また、疲労評価における繰り返し回数は「資料 10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」と同様とする。

- ①燃料装荷及び燃料取出し時：10 回
- ②貯蔵時（トラニオン自重及び固縛荷重）：10 回
- ③貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）：10 回

3.2.4.2 ピーク応力強さの算出

(1) トラニオン段付き部

繰返しピーク応力強さは、次式（「ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 3（以下「ASME」という。）」に示される繰返しピーク応力強さの算出式）より計算される。

$$S_a = \frac{S K_t K_r \frac{E_0}{E_t}}{2} \quad (3.11)$$

ここで、

S_a : 繰返しピーク応力強さ (MPa)

S : 応力強さ (MPa)

K_t : 応力集中係数（「西田正孝，応力集中 増補版」より）

K_r : 表面粗さ係数（－）（＝1.24）（ASME Figure KD-320.6M(a)より）

E_0 : 設計疲労線図の基本縦弾性係数 (MPa)（ASME Figure KD-320.4Mより）

E_t : 解析に用いる縦弾性係数 (MPa)

（「資料 10-3-2-3 トラニオンの強度計算方法」の「第 5-3 表 応力計算に使用する材料の物性値」に示す縦弾性係数と「第 6-1 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 1）」のトラニオンの温度から求められる値）

また、トラニオン段付き部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 貯蔵時（トラニオン自重及び固縛荷重）による応力強さの変動

トラニオン自重及び固縛荷重による応力強さの変動(S)は、第3-1表の下部トラニオン段付き部に示す値より次式で計算される。

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

ここで、

σ_b : 第 3-1 表に示す曲げ応力 (一次+二次) (評価位置⑤)

τ : 第 3-1 表に示すせん断応力 (一次+二次) (評価位置⑤)

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、燃料装荷及び取出し時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(c) 貯蔵時 (貯蔵期間における崩壊熱の低下) による応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、崩壊熱低下時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(2) トラニオン接続部

繰返しピーク応力強さは、次式より計算される。ここで、繰返しピーク応力強さ (S_a) は、金属キャスク構造規格 別図 8-4 に使用されている縦弾性係数 (E_0) と解析に用いる縦弾性係数 (E) の比を考慮し補正する。

$$S_a = \frac{SK_t \frac{E_0}{E_t}}{2} \quad (3.12)$$

ここで、

S_a : 繰返しピーク応力強さ (MPa)

S : 応力強さの変動 (MPa)

K_t : 応力集中係数 (=4.0) (金属キャスク構造規格 表 MCD-1331-1 による)

E_0 : 設計疲労線図の基本縦弾性係数 (MPa)

(金属キャスク構造規格 別図 8-4 より)

E_t : 解析に用いる縦弾性係数 (MPa)

(「資料 10-3-2-3 トラニオンの強度計算方法」の「第 5-3 表 応力計算に使用する材料の物性値」に示す縦弾性係数と「第 6-1 表 許容応力値を定める温度 (乾式キャスク (タイプ 1))」の胴の温度から求められる値)

また、トラニオン接続部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 貯蔵時 (トラニオン自重及び固縛荷重) による応力強さの変動

トラニオン自重及び固縛荷重による応力強さの変動は、3.2.2(2)(b)(i) で計算される値である。

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

燃料装荷及び取出しの温度変化によるトラニオン接続部のしめ代（直径差）変化（ δ_{6i} ）は、次式により計算される。

$$\delta_{6i} = d_{62} \times \alpha_{2i} \times (T_{2i} - T_0) - d_{61} \times \alpha_{1i} \times (T_{1i} - T_0) \quad (3.13)$$

ここで、

- d_{62} : トラニオン接続部（胴側）の穴径（=290mm）
- d_{61} : トラニオン接続部（トラニオン側）の外径（= mm）
- α_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の熱膨張率（温度 T_{2i} ）（1/°C）
- α_{1i} : トラニオンの熱膨張率（温度 T_{1i} ）（1/°C）
- T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=I$; 140°C、 $i=0$; 20°C）
- T_{1i} : トラニオンの温度（ $i=I$; 135°C、 $i=0$; 20°C）
- T_0 : 初期温度（=20°C）
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

しめ代（直径差）変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{6i} = \frac{\alpha_{6i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}} \quad \left. \vphantom{P_{6i}} \right\} \quad (3.14)$$

$$S = P_{6I} - P_{60}$$

ここで、

- P_{6i} : しまり嵌めによる支圧 (MPa)
- ν : ポアソン比（=0.3）
- α_{6i} : しまり嵌め比（= δ_{6i}/d_{62} ）
- δ_{6i} : 外輪（穴）と軸のしめ代（直径差）（mm）
- d_{62} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{63} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
- E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

(c) 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）による応力強さの変動

貯蔵期間中の燃料の発熱量の低下による温度変化に対してトラニオン接続部のしめ代（直径差）変化（ δ_{6i} ）は、(3.13)式より計算される。なお、崩壊熱低下時は、使用済燃料の崩壊熱が無い状態とし、トラニオン及びトラニオン接続部（胴側）の温度は20°Cとする。

ただし、下記に示す記号については、以下のとおりとする。

- T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=B$; 140°C、 $i=E$; 20°C）

- T_{1i} : トラニオンの温度 ($i=B; 135^{\circ}\text{C}$ 、 $i=E; 20^{\circ}\text{C}$)
 T_0 : 初期温度 ($=20^{\circ}\text{C}$)
 i : 添え字 (貯蔵初期時 ; $i=B$, 崩壊熱低下時 ; $i=E$)

しめ代 (直径差) 変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{6i} = \frac{\alpha_{6i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}} \quad \left. \vphantom{\frac{\alpha_{6i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}}} \right\} \quad (3.15)$$

$$S = P_{6B} - P_{6E}$$

ここで、

- P_{6i} : しまり嵌めによる支圧
 ν : ポアソン比 $= 0.3$
 α_{6i} : しまり嵌め比 ($= \delta_{6i}/d_{62}$)
 δ_{6i} : 外輪(穴)と軸のしめ代 (直径差) (mm)
 d_{62} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
 d_{63} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
 E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
 E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)
 i : 添え字 (貯蔵初期時 ; $i=B$, 崩壊熱低下時 ; $i=E$)

3.2.5 疲労計算結果

金属キャスク構造規格 別図8-1及びASMEより、繰返しピーク応力強さ (S_a) に対する許容繰返し回数 (N_a) を求める。疲労累積係数 (U_f) は、金属キャスク構造規格 MCD-3313より以下式で計算される。

$$U_f = \sum_{i=1}^k \frac{N_c(i)}{N_a(i)} \quad (3.16)$$

ここで、

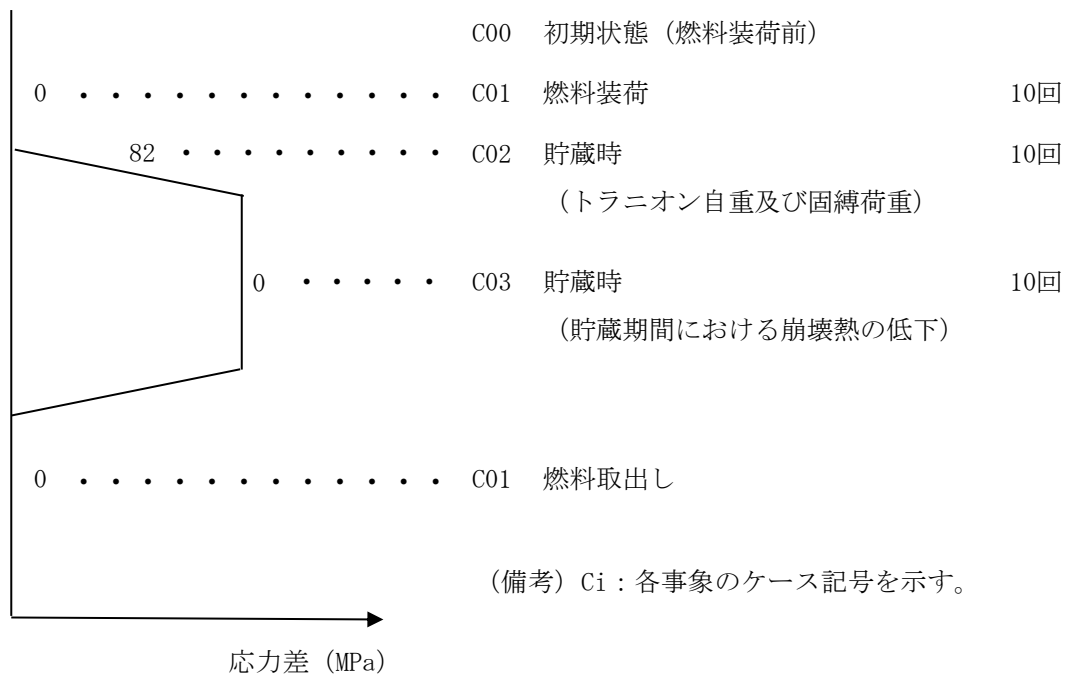
- N_c : 実際の繰返し回数 (-)
 N_a : 許容繰返し回数 (-)
 i : 応力サイクルの型式 (-)
 k : 応力サイクルの型式の総数 (-)

各サイクルの繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は第3-2表及び第3-3表に示すとおりとなり、疲労累積係数 (U_f) は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-3313の規定を満足する。

第 3-2 表 疲労解析結果（下部トラニオン段付き部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	0	0	—	10	—
2	54	82	10 ⁷	10	0.0001
3	0	0	—	10	—
疲労累積係数 U _f =0.0001					

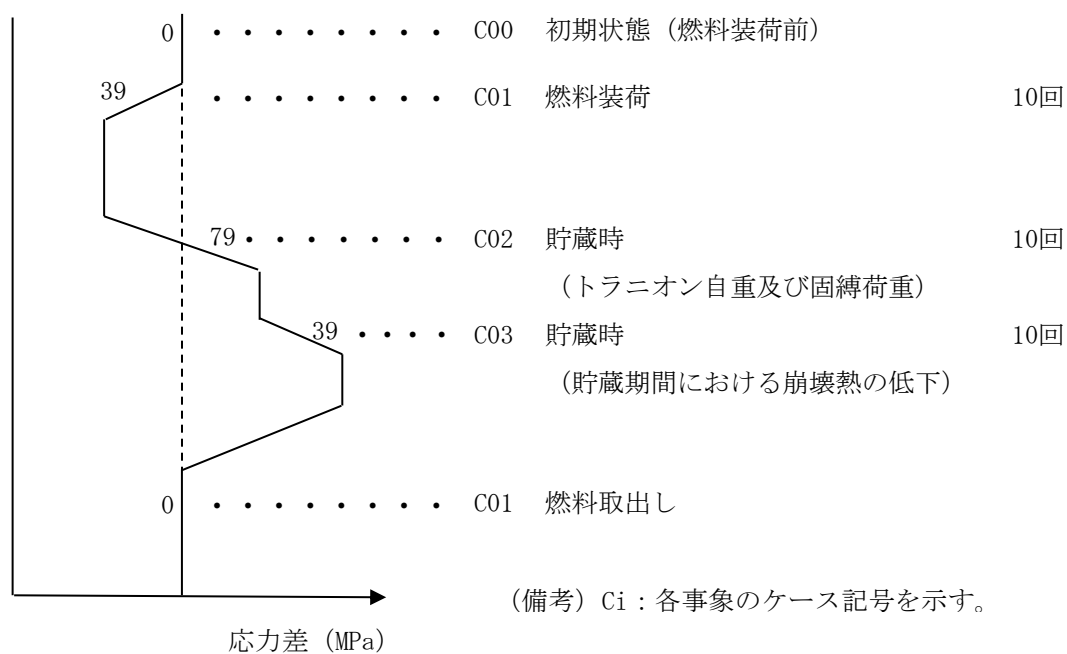
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第 3-3 表 疲労解析結果（下部トラニオン接続部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	18	39	10 ⁶	10	0.0001
2	37	79	10 ⁶	10	0.0001
3	18	39	10 ⁶	10	0.0001
疲労累積係数 U _f =0.0003					

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



3.3 吊上げ時

3.3.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・吊上げ荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

3.3.2 計算方法

(1) トラニオン段付き部

(a) 一次応力

(i) セン断応力

吊上げ荷重により評価位置①に発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_2}{A_1} \\ F_2 &= \frac{m \cdot G_2 \cdot g}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

ここで、

- F_2 : 吊上げ時においてトラニオンに作用する荷重 (N)
 A_1 : 評価位置①の断面積 ($=1.132 \times 10^4 \text{ mm}^2$)
 m : 吊上げ時における乾式キャスク (タイプ 1) の質量
($=120500 \text{ kg}$)
 G_2 : 吊上げ時の加速度係数 ($=1.3$)
 g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

また、評価位置②に発生するせん断応力 (τ) は、(3.17)式で計算される。
ただし、(3.17)式の A_1 を A_2 とする。

ここで、

- A_2 : 評価位置②の断面積 ($=3.542 \times 10^4 \text{ mm}^2$)

(ii) 曲げ応力

吊上げ荷重により評価位置①に発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z_1} \\ M &= F_2 \cdot L_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

ここで、

- F_2 : 3.3.2 (1) (a) (i) と同じ
 Z_1 : 評価位置①の断面係数 ($=2.505 \times 10^5 \text{ mm}^3$)
 L_1 : 評価位置①と荷重作用位置との距離 ($=40 \text{ mm}$)

また、評価位置②に発生する曲げ応力(σ_b)は、(3.18)式で計算される。ただし、(3.18)式の Z_1 及び L_1 を Z_2 及び L_2 とする。

ここで、

Z_2 : 評価位置②の断面係数 ($=1.534 \times 10^6 \text{ mm}^3$)

L_2 : 評価位置②と荷重作用位置との距離 ($=225 \text{ mm}$)

(iii) 組合せ応力

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、次式で計算される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} \quad (3.19)$$

(b) 一次＋二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、トラニオンに発生する一次＋二次応力は、3.3.2(1)(a)と同じである。

(2) トラニオン接続部

(a) 一次応力

支圧応力が発生する箇所は第2-1図に示す上部トラニオンの評価位置③である。
吊上げ荷重により発生する支圧応力(σ_{31} 及び σ_{32})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{31} &= R_{31} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \\ \sigma_{32} &= R_{32} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

ここで、

R_{31} : トラニオンに作用する反力 (N)

R_{32} : トラニオンに作用する反力 (N)

$$\left. \begin{aligned} R_{31} &= \frac{F_2 L_2 + \mu F_2 (d_3 / 2) + F_2 L_3}{\mu d_3 + L_3} \\ R_{32} &= \frac{F_2 L_2 - \mu F_2 (d_3 / 2)}{\mu d_3 + L_3} \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

F_2 : 3.3.2(1)(a)(i)と同じ

L_2 : 0点から荷重作用点までの距離 (=225 mm)

L_3 : 0点から反力 R_{32} の作用点までの距離 (=140 mm)

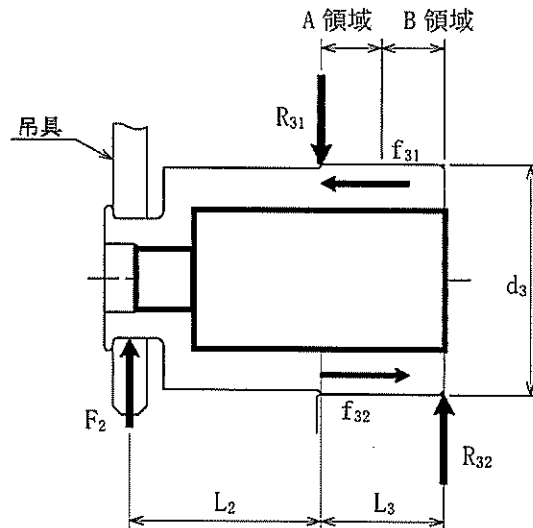
μ : 摩擦係数 (3.2.2(2)(a)と同じ)

d_3 : 嵌め込み部の外径 (=270 mm)

f_{31} : トラニオンに作用する摩擦力(N)

f_{32} : トラニオンに作用する摩擦力(N)

$$f_{31} = \mu R_{31}, \quad f_{32} = \mu R_{32} \quad (3.22)$$



上部トラニオンの解析モデル

(b) 二次応力

しまり嵌めによる支圧応力は次式（「機械設計便覧編集委員会 機械設計便覧（第3版）」に示される組合せ円筒の式）で計算される。

$$P_3 = \frac{\alpha_3}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \quad (3.23)$$

ここで、

ν : ポアソン比 (=0.3)

α_3 : しまり嵌め比 (= δ_3/d_{32})

δ_3 : 外輪(穴)と軸の初期しめ代 (直径差) (= mm)

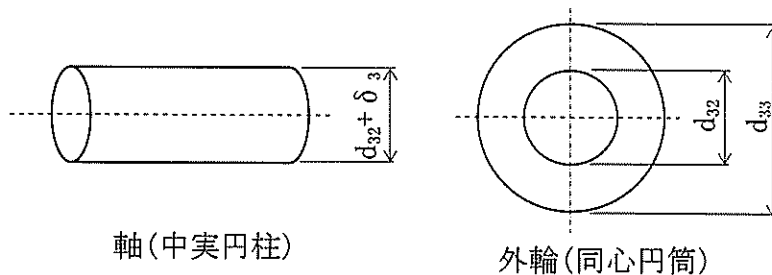
d_{32} : 外輪(穴)内径 (mm) (=270mm)

d_{33} : 外輪(穴)外径 (mm) (= mm)

(外輪(穴)外径の大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きい外輪(穴)内径の とした。)

E : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)

E' : 胴の縦弾性係数 (MPa)



しまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデル

(c) 一次+二次応力

一次+二次応力は、次式で計算される。

$$S = \text{MAX}[\sigma_{31}, \sigma_{32}] + P_3 \quad (3.24)$$

3.3.3 計算結果

応力計算結果を第3-4表に示す。第3-4表に示すとおり、発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-4表 トラニオンの応力評価（吊上げ時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
上部トラニオン 段付き部	①	せん断応力（一次応力）	68	227
		曲げ応力（一次応力）	123	394
		組合せ応力	171	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	68	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	123	1182
	②	せん断応力（一次応力）	22	227
		曲げ応力（一次応力）	113	394
		組合せ応力	120	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	22	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	113	1182
上部トラニオン 接続部	③	支圧応力（一次応力）	72	231 ^(注1)
		支圧応力（一次＋二次応力）	117	346 ^(注1)

（注1）上部トラニオン接続部（胴側）の方が許容応力は小さいため、上部トラニオン接続部（胴側）の評価基準値を示す。

3.3.4 疲労評価

金属キャスク構造規格 MCD-3313 に従って疲労解析を行う。

3.3.4.1 疲労評価において考慮する事象

疲労解析で考慮する事象は、以下とする。また、疲労評価における繰り返し回数は「資料 10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」と同様とする。

- ①燃料装荷及び燃料取出し時：10 回
- ②吊上げ時：200 回
- ③貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）：10 回

3.3.4.2 ピーク応力強さの算出

(1) トラニオン段付き部

繰返しピーク応力は、(3.11)式より計算される。

また、トラニオン段付き部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 吊上げ荷重による応力強さの変動

吊上げ荷重による応力強さの変動(S)は、第3-4表の上部トラニオン段付き部に示す値より次式で計算される。

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

ここで、

σ_b : 第3-4表に示す曲げ応力（一次＋二次）（評価位置①）

τ : 第3-4表に示すせん断応力（一次＋二次）（評価位置①）

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、燃料装荷及び取出し時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(c) 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）による応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、崩壊熱低下時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(2) トラニオン接続部

繰返しピーク応力は、(3.12)式より計算される。

また、トラニオン接続部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 吊上げ荷重による応力強さの変動

吊上げ荷重による応力強さの変動は、第3-4表の上部トラニオン接続部 支圧応力（一次応力）に示す値と同じである。

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

燃料装荷及び取出しの温度変化によるトラニオン接続部のしめ代（直径差）変化（ δ_{3i} ）は、(3.25)式より計算する。

$$\delta_{3i} = d_{32} \times \alpha_{2i} \times (T_{2i} - T_0) - d_{31} \times \alpha_{1i} \times (T_{1i} - T_0) \quad (3.25)$$

ここで、

- d_{32} : トラニオン接続部（胴側）の穴径（=270mm）
- d_{31} : トラニオン接続部（トラニオン側）の外径（= mm）
- α_{2i} : 3.2.4.2 (2)(b)と同じ
- α_{1i} : 3.2.4.2 (2)(b)と同じ
- T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=I; 140^\circ\text{C}$ 、 $i=0; 20^\circ\text{C}$ ）
- T_{1i} : トラニオンの温度（ $i=I; 135^\circ\text{C}$ 、 $i=0; 20^\circ\text{C}$ ）
- T_0 : 初期温度（=20℃）
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

しめ代（直径差）変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{3i} = \frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \quad \left. \vphantom{P_{3i}} \right\} \quad (3.26)$$

$$S = P_{3I} - P_{30}$$

ここで、

- P_{3i} : しまり嵌めによる支圧 (MPa)
- ν : ポアソン比=0.3
- α_{3i} : しまり嵌め比（= δ_{3i}/d_{32} ）
- δ_{3i} : 外輪（穴）と軸のしめ代（直径差） (mm)
- d_{32} : 3.3.2 (2)(b)と同じ
- d_{33} : 3.3.2 (2)(b)と同じ
- E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
- E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

(c) 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）による応力強さの変動

貯蔵期間中の燃料の発熱量の低下による温度変化に対してトラニオン接続部の締め代（直径差）変化（ δ_{3i} ）は、(3.25)式より計算される。なお、崩壊熱

低下時は、使用済燃料の崩壊熱が無い状態とし、トラニオン及びトラニオン接続部（胴側）の温度は20℃とする。

ただし、下記に示す記号については、以下のとおりとする。

T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=B$;140℃、 $i=E$;20℃）

T_{1i} : トラニオンの温度（ $i=B$;135℃、 $i=E$;20℃）

T_0 : 初期温度（=20℃）

i : 添え字（貯蔵初期時； $i=B$ ，貯蔵終了時； $i=E$ ）

しめ代（直径差）変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{3i} = \frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \quad \left. \vphantom{\frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}}} \right\} \quad (3.27)$$

$S = P_{3B} - P_{3E}$

ここで、

P_{3i} : しまり嵌めによる支圧(MPa)

ν : ポアソン比=0.3

α_{3i} : しまり嵌め比（= δ_{3i}/d_{32} ）

δ_{3i} : 外輪(穴)と軸のしめ代（直径差）（mm）

d_{32} : 3.3.2 (2) (b) と同じ

d_{33} : 3.3.2 (2) (b) と同じ

E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)

E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)

i : 添え字（貯蔵初期時； $i=B$ ，貯蔵終了時； $i=E$ ）

3.3.5 疲労計算結果

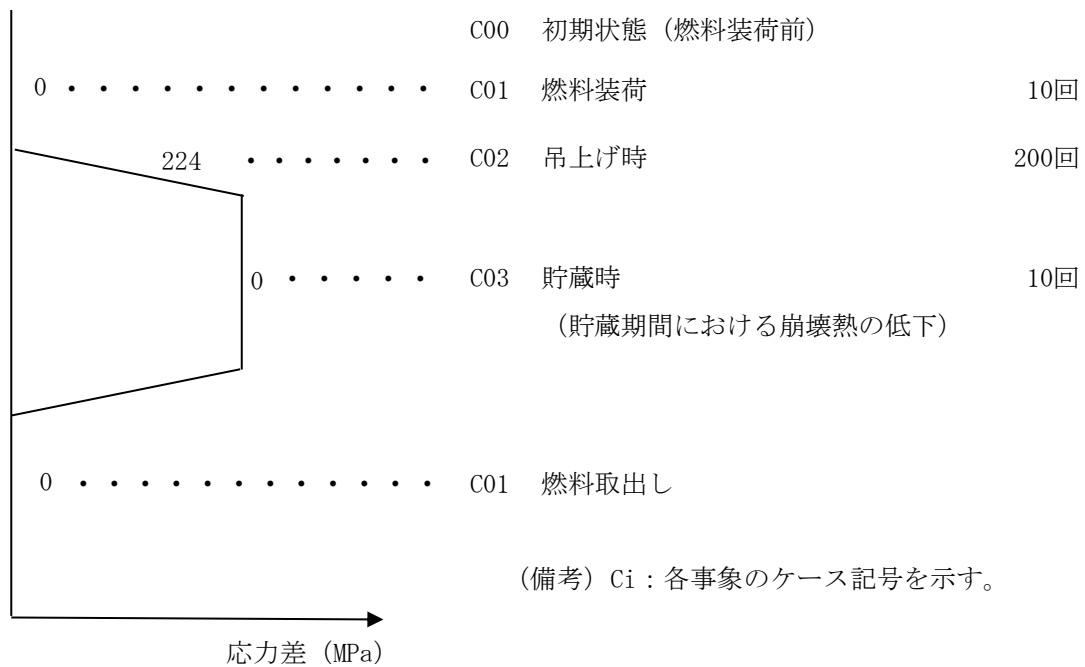
金属キャスク構造規格 別図8-1及びASMEより、繰返しピーク応力強さ(S_a)に対する許容繰返し回数(N_a)を求める。疲労累積係数(U_f)は、3.2.5と同様に求められる。

各サイクルの繰返し回数(N_c)と許容繰返し回数(N_a)との比は第3-5表及び第3-6表に示すとおりとなり、疲労累積係数(U_f)は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-3313の規定を満足する。

第 3-5 表 疲労解析結果（上部トラニオン段付き部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	0	0	—	10	—
2	171	224	10 ⁷	200	0.0001
3	0	0	—	10	—
疲労累積係数 U _f =0.0001					

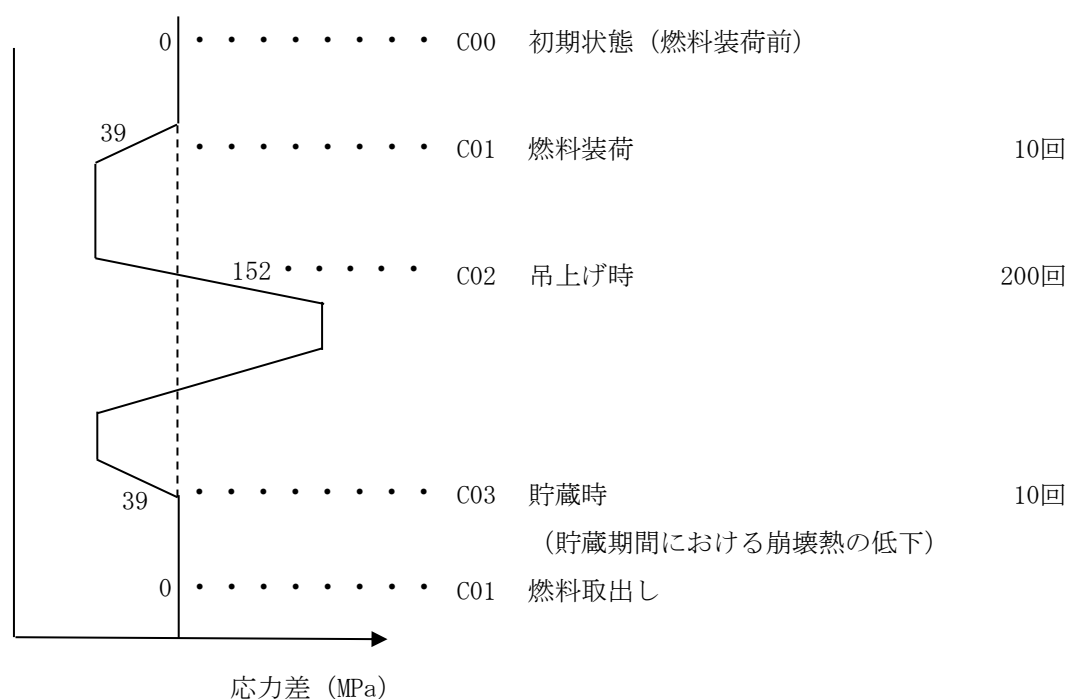
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第 3-6 表 疲労解析結果（上部トラニオン接続部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	18	39	10 ⁶	10	0.0001
2	72	152	62323	200	0.0033
3	18	39	10 ⁶	10	0.0001
疲労累積係数 U _f =0.0035					

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



トラニオンの強度計算書
(乾式キャスク (タイプ2))

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-6

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要.....	資 10-3-3-6-1
2. 形状・寸法・材料.....	資 10-3-3-6-1
3. 応力計算.....	資 10-3-3-6-3
3.1 応力評価位置.....	資 10-3-3-6-3
3.2 貯蔵時.....	資 10-3-3-6-3
3.3 吊上げ時.....	資 10-3-3-6-16

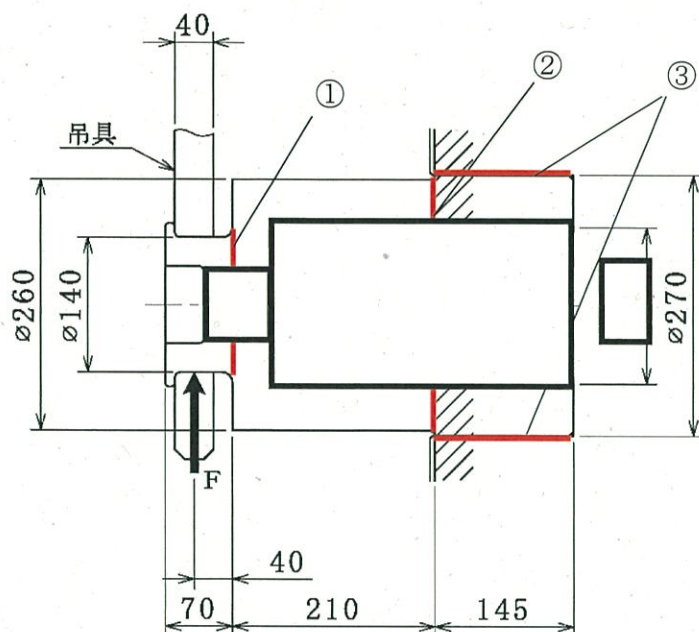
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料10-3-2-3「トラニオンの強度計算方法」に基づき、乾式キャスク（タイプ2）のトラニオンが十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

2. 形状・寸法・材料

本資料で解析するトラニオンの形状・寸法・材料を第2-1図及び第2-2図に示す。

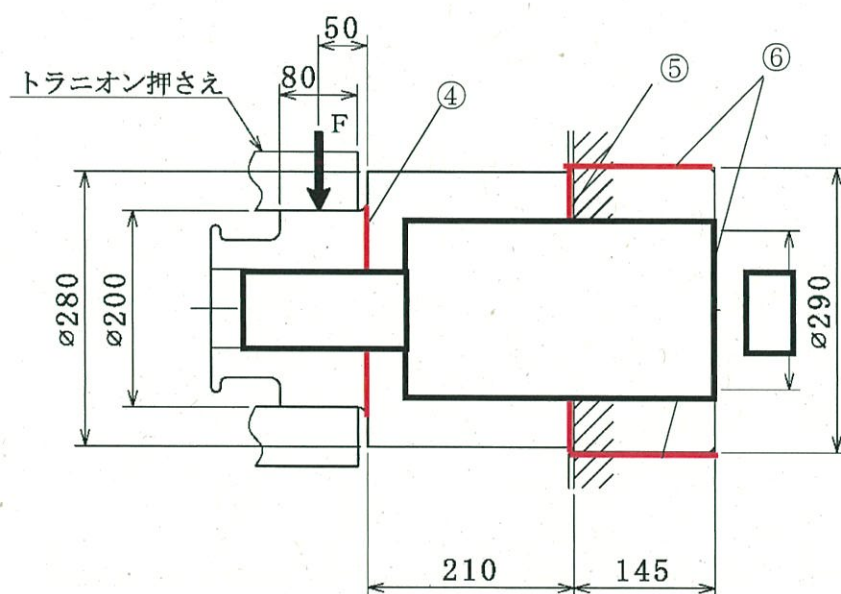


No.	評価部位
①	トラニオン段付き部
②	トラニオン段付き部
③	トラニオン接続部

材質：SUS630

(単位：mm)

第2-1図 上部トラニオンの形状・寸法・材料・応力評価位置



No.	評価部位
④	トラニオン段付き部
⑤	トラニオン段付き部
⑥	トラニオン接続部

材質：SUS630

(単位：mm)

第2-2図 下部トラニオンの形状・寸法・材料・応力評価位置

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

トラニオンの応力評価位置を第2-1図及び第2-2図に示す。乾式キャスク（タイプ2）の設計承認と同様に、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。

3.2 貯蔵時

3.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重
- ・固縛荷重
- ・熱荷重

3.2.2 計算方法

(1) トラニオン段付き部

(a) 一次応力

(i) せん断応力

トラニオンの自重により評価位置④に発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{W_1 \times g}{A_4} \quad (3.1)$$

ここで、

W_1 : トラニオン自重 (=120 kg)

g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

A_4 : 評価位置④の断面積 (=2.734×10⁴ mm²)

また、評価位置⑤に発生するせん断応力(τ)は、(3.1)式で計算される。ただし、(3.1)式の A_4 を A_5 とする。

ここで、

A_5 : 評価位置⑤の断面積 (=4.390×10⁴ mm²)

(ii) 曲げ応力

トラニオンの自重により評価位置④に発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z_4} \\ M &= W_1 \cdot g \cdot L_4 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

Z_4 : 評価位置④の断面係数 ($=7.722 \times 10^5 \text{ mm}^3$)

L_4 : 評価位置④と荷重作用位置との距離 ($=50 \text{ mm}$)

なお、トラニオン自重は、トラニオン重心位置に作用するが、保守的にトラニオン押さえの固縛荷重と同じ位置で作用するものとして評価する。

また、評価位置⑤に発生する曲げ応力 (σ_b) は、(3.2) 式で計算される。ただし、(3.2) 式の Z_4 及び L_4 を Z_5 及び L_5 とする。

ここで、

Z_5 : 評価位置⑤の断面係数 ($=1.977 \times 10^6 \text{ mm}^3$)

L_5 : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 ($=260 \text{ mm}$)

(iii) 組合せ応力

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} \quad (3.3)$$

(b) 一次+二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、熱荷重の考慮は不要である。

(i) せん断応力

トラニオンの自重及びトラニオン押さえの固縛荷重により評価位置④に発生するせん断応力 (τ) は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{F_1 + W_1 \times g}{A_4} \quad (3.4)$$

ここで、

F_1 : トラニオン押さえの固縛荷重 ($= \boxed{} \text{ N}$)

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

g : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

A_4 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

また、評価位置⑤に発生するせん断応力 (τ) は、(3.4) 式で計算される。ただし、(3.4) 式の A_4 を A_5 とする。

ここで、

A_5 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

(ii) 曲げ応力

トラニオンの自重及びトラニオン押さえの固縛荷重により評価位置④に発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_b = \frac{M}{Z_4} \\ M = F_1 \cdot L_4 + W_1 \cdot g \cdot L_4 \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

ここで、

F_1 : 3.2.2 (1) (b) (i) と同じ

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

g : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

Z_4 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

L_4 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

なお、トラニオン自重は、トラニオン重心位置より作用するが、保守的にトラニオン押さえの固縛力と同じ位置で作用するものとして評価する。

また、評価位置⑤に発生する曲げ応力(σ_b)は、(3.5)式で計算される。ただし、(3.5)式の Z_4 及び L_4 を Z_5 及び L_5 とする。

ここで、

Z_5 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

L_5 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

(2) トラニオン接続部

(a) 一次応力

支圧応力が発生する箇所は第2-2図に示す下部トラニオンの評価位置⑥である。トラニオンの自重により発生する支圧応力(σ_{61} 及び σ_{62})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{61} &= R_{61} / (d_6 \cdot L_6 / 2) \\ \sigma_{62} &= R_{62} / (d_6 \cdot L_6 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} R_{61} &= \frac{F_{W1}L_5 + \mu F_{W1}(d_6/2) + F_{W1}L_6}{\mu d_6 + L_6} \\ R_{62} &= \frac{F_{W1}L_5 - \mu F_{W1}(d_6/2)}{\mu d_6 + L_6} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

F_{W1} : 作用荷重 (トラニオン自重による荷重)

$$F_{W1} = W_1 \times g$$

W_1 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

g : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

R_{61} : トラニオンに作用する反力 (N)

R_{62} : トラニオンに作用する反力 (N)

L_5 : 0 点から荷重作用点までの距離 (3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ)

L_6 : 0 点から反力 R_{62} の作用点までの距離 (=140 mm)

μ : 摩擦係数 (=0.35)

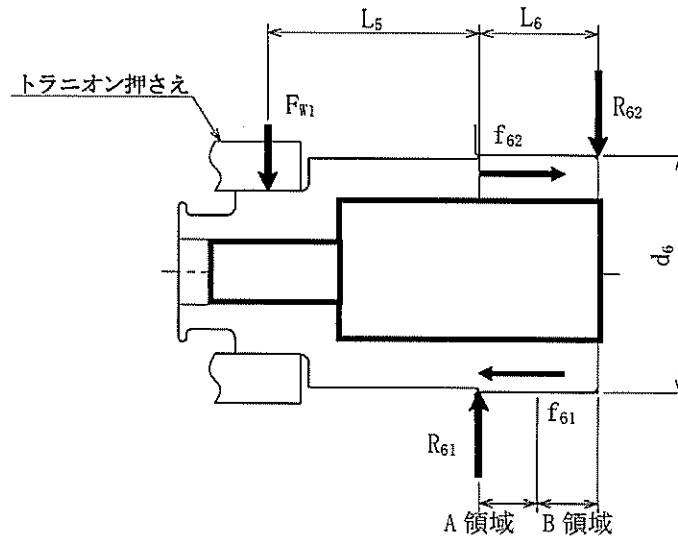
(「日本機械学会 機械工学便覧 (基礎編) $\alpha 2$ 機械力学」に示される鋼同士の摩擦係数より)

d_6 : 嵌め込み部の外径 (=290 mm)

f_{61} : トラニオンに作用する摩擦力 (N)

f_{62} : トラニオンに作用する摩擦力 (N)

$$f_{61} = \mu R_{61}, \quad f_{62} = \mu R_{62} \quad (3.8)$$



下部トラニオンの解析モデル

(b) 一次＋二次応力

(i) トラニオン自重及び固縛荷重による支圧応力

応力計算方法は、3.2.2(2)(a)と同様である。ただし、作用荷重は $(F_{w1}+F_1)$ とする。

(ii) しまり嵌めによる支圧応力

しまり嵌めによる支圧応力は次式（「機械設計便覧編集委員会 機械設計便覧（第3版）」に示される組合せ円筒の式）で計算される。

$$P_6 = \frac{\alpha_6}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}} \quad (3.9)$$

ここで、

ν : ポアソン比 (=0.3)

α_6 : しまり嵌め比 (= δ_6/d_{62})

δ_6 : 外輪(穴)と軸の初期しめ代(直径差) (= mm)

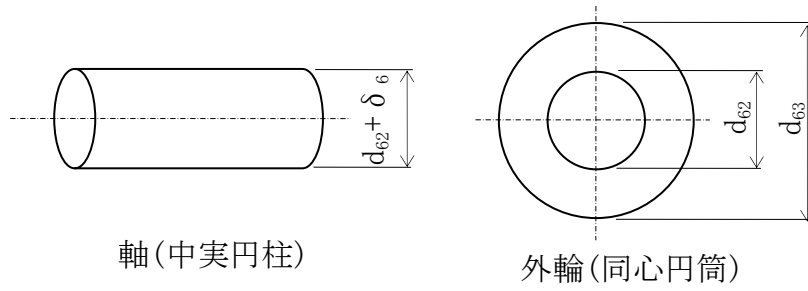
d_{62} : 外輪(穴)内径 (=290mm)

d_{63} : 外輪(穴)外径 (= mm)

(外輪(穴)外径の大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きい外輪(穴)内径の とした。)

E : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)

E' : 胴の縦弾性係数 (MPa)



しまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデル

(iii) 支圧応力（一次＋二次応力）

トラニオン自重、固縛荷重及びしまり嵌めによる支圧応力を加えた支圧応力 S_6 (MPa) は次式で計算される。

$$S_6 = \text{MAX}[\sigma_{61}, \sigma_{62}] + P_6 \quad (3.10)$$

3.2.3 計算結果

応力計算結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すように、発生する応力は許容応力値以下である。

第3-1表 トラニオンの応力評価（貯蔵時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
下部トラニオン 段付き部	④	せん断応力（一次応力）	1	227
		曲げ応力（一次応力）	1	394
		組合せ応力	2	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	16	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	28	1182
	⑤	せん断応力（一次応力）	1	227
		曲げ応力（一次応力）	1	394
		組合せ応力	2	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	10	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	56	1182
下部トラニオン 接続部	⑥	支圧応力（一次応力）	1	228 ^(注1)
		支圧応力（一次＋二次応力）	82	343 ^(注1)

（注1）下部トラニオン接続部（胴側）の方が許容応力は小さいため、下部トラニオン接続部（胴側）の評価基準値を示す。

3.2.4 疲労評価

金属キャスク構造規格 MCD-3313 に従って疲労解析を行う。

3.2.4.1 疲労評価において考慮する事象

疲労解析で考慮する事象は、以下とする。また、疲労評価における繰り返し回数は「資料 10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」と同様とする。

- ①燃料装荷及び燃料取出し時：10 回
- ②貯蔵時（トラニオン自重及び固縛荷重）：10 回
- ③貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）：10 回

3.2.4.2 ピーク応力強さの算出

(1) トラニオン段付き部

繰返しピーク応力強さは、次式（「ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 3（以下「ASME」という。）」に示される繰返しピーク応力強さの算出式）より計算される。

$$S_a = \frac{S K_t K_r \frac{E_0}{E_t}}{2} \quad (3.11)$$

ここで、

S_a : 繰返しピーク応力強さ (MPa)

S : 応力強さ (MPa)

K_t : 応力集中係数（「西田正孝，応力集中 増補版」より）

K_r : 表面粗さ係数（－）（＝1.24）（ASME Figure KD-320.6M(a)より）

E_0 : 設計疲労線図の基本縦弾性係数 (MPa)（ASME Figure KD-320.4Mより）

E_t : 解析に用いる縦弾性係数 (MPa)

（「資料 10-3-2-3 トラニオンの強度計算方法」の「第 5-3 表 応力計算に使用する材料の物性値」に示す縦弾性係数と「第 6-2 表 許容応力値を定める温度（乾式キャスク（タイプ 2））」のトラニオンの温度から求められる値）

また、トラニオン段付き部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 貯蔵時（トラニオン自重及び固縛荷重）による応力強さの変動

トラニオン自重及び固縛荷重による応力強さの変動(S)は、第3-1表の下部トラニオン段付き部に示す値より次式で計算される。

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

ここで、

σ_b : 第 3-1 表に示す曲げ応力 (一次+二次) (評価位置⑤)

τ : 第 3-1 表に示すせん断応力 (一次+二次) (評価位置⑤)

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、燃料装荷及び取出し時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(c) 貯蔵時 (貯蔵期間における崩壊熱の低下) による応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、崩壊熱低下時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(2) トラニオン接続部

繰返しピーク応力強さは、次式より計算される。ここで、繰返しピーク応力強さ (S_a) は、金属キャスク構造規格 別図 8-4 に使用されている縦弾性係数 (E_0) と解析に用いる縦弾性係数 (E) の比を考慮し補正する。

$$S_a = \frac{SK_t \frac{E_0}{E_t}}{2} \quad (3.12)$$

ここで、

S_a : 繰返しピーク応力強さ (MPa)

S : 応力強さの変動 (MPa)

K_t : 応力集中係数 (=4.0) (金属キャスク構造規格 表 MCD-1331-1 による)

E_0 : 設計疲労線図の基本縦弾性係数 (MPa)

(金属キャスク構造規格 別図 8-4 より)

E_t : 解析に用いる縦弾性係数 (MPa)

(「資料 10-3-2-3 トラニオンの強度計算方法」の「第 5-3 表 応力計算に使用する材料の物性値」に示す縦弾性係数と「第 6-2 表 許容応力値を定める温度 (乾式キャスク (タイプ 2))」の胴の温度から求められる値)

また、トラニオン接続部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 貯蔵時 (トラニオン自重及び固縛荷重) による応力強さの変動

トラニオン自重及び固縛荷重による応力強さの変動は、3.2.2(2)(b)(i) で計算される値である。

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

燃料装荷及び取出しの温度変化によるトラニオン接続部のしめ代（直径差）変化（ δ_{6i} ）は、次式により計算される。

$$\delta_{6i} = d_{62} \times \alpha_{2i} \times (T_{2i} - T_0) - d_{61} \times \alpha_{1i} \times (T_{1i} - T_0) \quad (3.13)$$

ここで、

- d_{62} : トラニオン接続部（胴側）の穴径（=290mm）
- d_{61} : トラニオン接続部（トラニオン側）の外径（= mm）
- α_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の熱膨張率（温度 T_{2i} ）（1/°C）
- α_{1i} : トラニオンの熱膨張率（温度 T_{1i} ）（1/°C）
- T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=I$; 145°C、 $i=0$; 20°C）
- T_{1i} : トラニオンの温度（ $i=I$; 140°C、 $i=0$; 20°C）
- T_0 : 初期温度（=20°C）
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

しめ代（直径差）変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{6i} = \frac{\alpha_{6i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}} \quad \left. \vphantom{P_{6i}} \right\} \quad (3.14)$$

$$S = P_{6I} - P_{60}$$

ここで、

- P_{6i} : しまり嵌めによる支圧 (MPa)
- ν : ポアソン比（=0.3）
- α_{6i} : しまり嵌め比（= δ_{6i}/d_{62} ）
- δ_{6i} : 外輪（穴）と軸のしめ代（直径差）（mm）
- d_{62} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{63} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
- E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

(c) 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）による応力強さの変動

貯蔵期間中の燃料の発熱量の低下による温度変化に対してトラニオン接続部のしめ代（直径差）変化（ δ_{6i} ）は、(3.13)式より計算される。なお、崩壊熱低下時は、使用済燃料の崩壊熱が無い状態とし、トラニオン及びトラニオン接続部（胴側）の温度は20°Cとする。

ただし、下記に示す記号については、以下のとおりとする。

- T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=B$; 145°C、 $i=E$; 20°C）

- T_{1i} : トラニオンの温度 ($i=B; 140^{\circ}\text{C}$ 、 $i=E; 20^{\circ}\text{C}$)
 T_0 : 初期温度 ($=20^{\circ}\text{C}$)
 i : 添え字 (貯蔵初期時 ; $i=B$, 崩壊熱低下時 ; $i=E$)

しめ代 (直径差) 変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{6i} = \frac{\alpha_{6i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{62}^2}{d_{63}^2 - d_{62}^2}} \quad \left. \vphantom{P_{6i}} \right\} \quad (3.15)$$

$$S = P_{6B} - P_{6E}$$

ここで、

- P_{6i} : しまり嵌めによる支圧
 ν : ポアソン比 $= 0.3$
 α_{6i} : しまり嵌め比 ($= \delta_{6i}/d_{62}$)
 δ_{6i} : 外輪(穴)と軸のしめ代 (直径差) (mm)
 d_{62} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
 d_{63} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
 E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
 E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)
 i : 添え字 (貯蔵初期時 ; $i=B$, 崩壊熱低下時 ; $i=E$)

3.2.5 疲労計算結果

金属キャスク構造規格 別図8-1及びASMEより、繰返しピーク応力強さ (S_a) に対する許容繰返し回数 (N_a) を求める。疲労累積係数 (U_f) は、金属キャスク構造規格 MCD-3313より以下式で計算される。

$$U_f = \sum_{i=1}^k \frac{N_c(i)}{N_a(i)} \quad (3.16)$$

ここで、

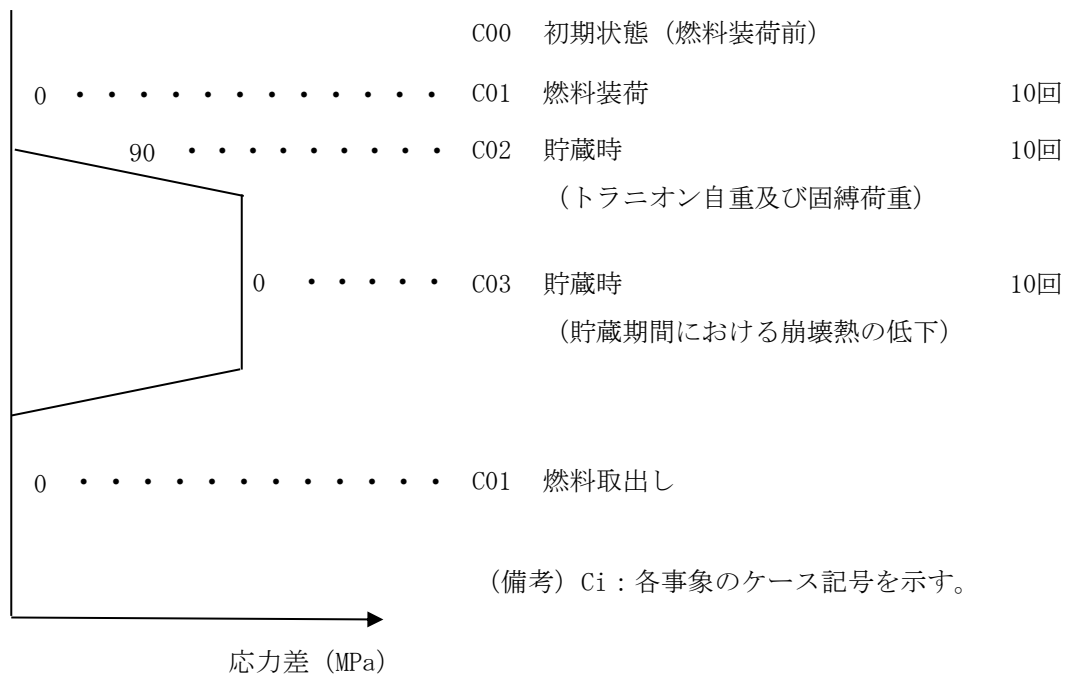
- N_c : 実際の繰返し回数 (-)
 N_a : 許容繰返し回数 (-)
 i : 応力サイクルの型式 (-)
 k : 応力サイクルの型式の総数 (-)

各サイクルの繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は第3-2表及び第3-3表に示すとおりとなり、疲労累積係数 (U_f) は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-3313の規定を満足する。

第 3-2 表 疲労解析結果（下部トラニオン段付き部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	0	0	—	10	—
2	59	90	10 ⁷	10	0.0001
3	0	0	—	10	—
疲労累積係数 U _f =0.0001					

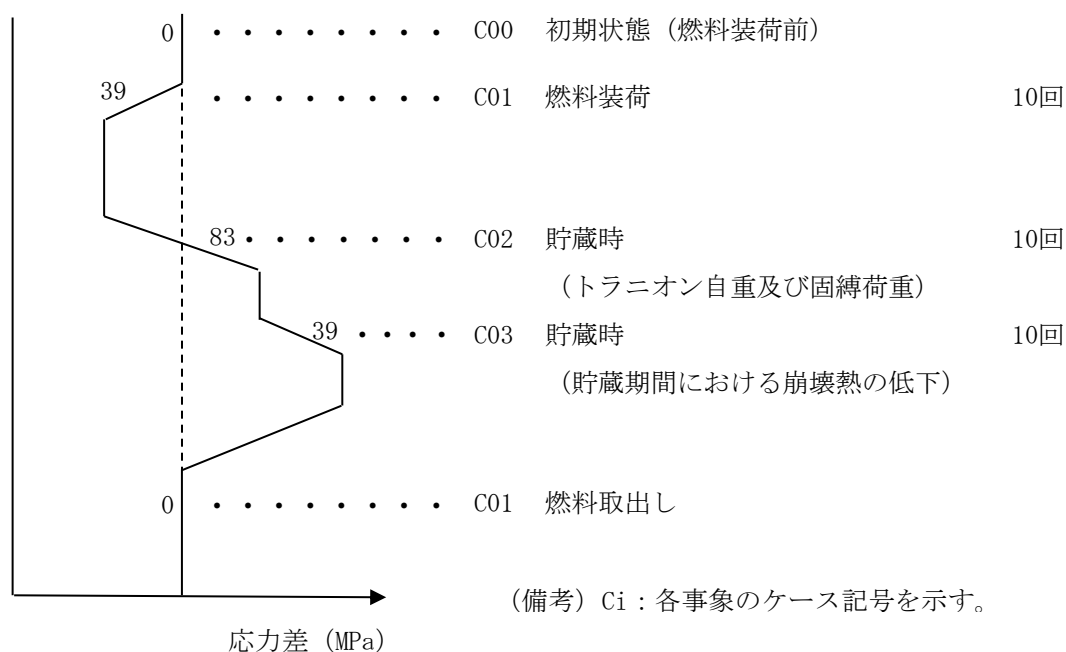
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第 3-3 表 疲労解析結果（下部トラニオン接続部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	18	39	10 ⁶	10	0.0001
2	39	83	10 ⁶	10	0.0001
3	18	39	10 ⁶	10	0.0001
疲労累積係数 U _f =0.0003					

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



3.3 吊上げ時

3.3.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・吊上げ荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

3.3.2 計算方法

(1) トラニオン段付き部

(a) 一次応力

(i) せん断応力

吊上げ荷重により評価位置①に発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_2}{A_1} \\ F_2 &= \frac{m \cdot G_2 \cdot g}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

ここで、

- F_2 : 吊上げ時においてトラニオンに作用する荷重 (N)
 A_1 : 評価位置①の断面積 ($=1.132 \times 10^4 \text{ mm}^2$)
 m : 吊上げ時における乾式キャスク (タイプ 2) の質量
($=119400 \text{ kg}$)
 G_2 : 吊上げ時の加速度係数 ($=1.3$)
 g : 重力加速度 (9.80665 m/s^2)

また、評価位置②に発生するせん断応力(τ)は、(3.17)式で計算される。
ただし、(3.17)式の A_1 を A_2 とする。

ここで、

- A_2 : 評価位置②の断面積 ($=3.542 \times 10^4 \text{ mm}^2$)

(ii) 曲げ応力

吊上げ荷重により評価位置①に発生する曲げ応力(σ_b)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z_1} \\ M &= F_2 \cdot L_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

ここで、

- F_2 : 3.3.2 (1) (a) (i) と同じ
 Z_1 : 評価位置①の断面係数 ($=2.505 \times 10^5 \text{ mm}^3$)
 L_1 : 評価位置①と荷重作用位置との距離 ($=40 \text{ mm}$)

また、評価位置②に発生する曲げ応力(σ_b)は、(3.18)式で計算される。ただし、(3.18)式の Z_1 及び L_1 を Z_2 及び L_2 とする。

ここで、

Z_2 : 評価位置②の断面係数 ($=1.534 \times 10^6 \text{ mm}^3$)

L_2 : 評価位置②と荷重作用位置との距離 ($=250 \text{ mm}$)

(iii) 組合せ応力

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、次式で計算される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} \quad (3.19)$$

(b) 一次＋二次応力

密封容器の熱膨張による応力は無視できるので、トラニオンに発生する一次＋二次応力は、3.3.2(1)(a)と同じである。

(2) トラニオン接続部

(a) 一次応力

支圧応力が発生する箇所は第2-1図に示す上部トラニオンの評価位置③である。
吊上げ荷重により発生する支圧応力(σ_{31} 及び σ_{32})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{31} &= R_{31} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \\ \sigma_{32} &= R_{32} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

ここで、

R_{31} : トラニオンに作用する反力 (N)

R_{32} : トラニオンに作用する反力 (N)

$$\left. \begin{aligned} R_{31} &= \frac{F_2 L_2 + \mu F_2 (d_3 / 2) + F_2 L_3}{\mu d_3 + L_3} \\ R_{32} &= \frac{F_2 L_2 - \mu F_2 (d_3 / 2)}{\mu d_3 + L_3} \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

F_2 : 3.3.2(1)(a)(i)と同じ

L_2 : 0点から荷重作用点までの距離 (=250 mm)

L_3 : 0点から反力 R_{32} の作用点までの距離 (=140 mm)

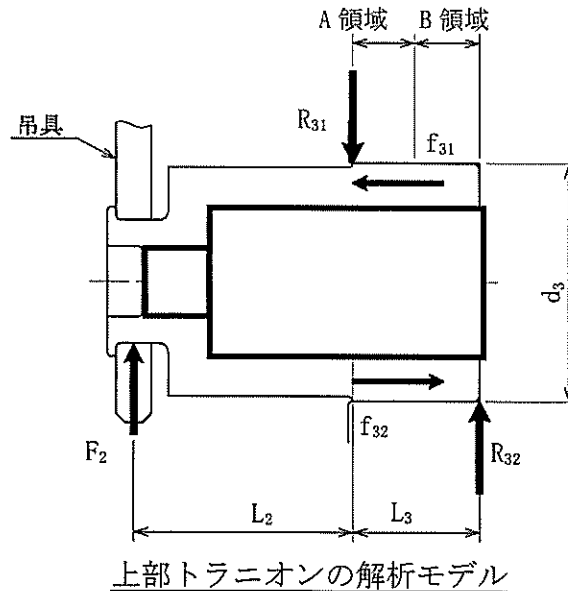
μ : 摩擦係数 (3.2.2(2)(a)と同じ)

d_3 : 嵌め込み部の外径 (=270 mm)

f_{31} : トラニオンに作用する摩擦力(N)

f_{32} : トラニオンに作用する摩擦力(N)

$$f_{31} = \mu R_{31}, \quad f_{32} = \mu R_{32} \quad (3.22)$$



(b) 二次応力

しまり嵌めによる支圧応力は次式（「機械設計便覧編集委員会 機械設計便覧（第3版）」に示される組合せ円筒の式）で計算される。

$$P_3 = \frac{\alpha_3}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \quad (3.23)$$

ここで、

ν : ポアソン比=0.3

α_3 : しまり嵌め比 ($= \delta_3/d_{32}$)

δ_3 : 外輪(穴)と軸の初期しめしろ (直径差) ($= \square$ mm)

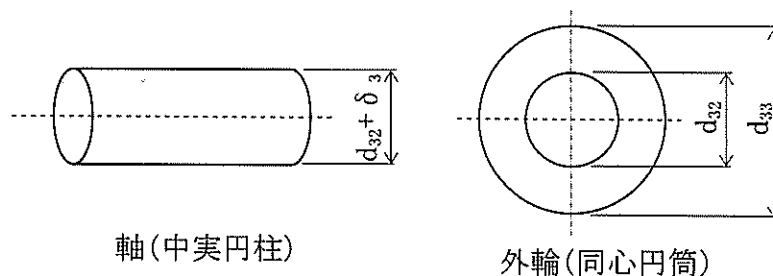
d_{32} : 外輪(穴)内径 (mm) ($=270$ mm)

d_{33} : 外輪(穴)外径 (mm) ($= \square$ mm)

(外輪(穴)外径の大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため、キャスク外径より大きい外輪(穴)内径の $\square$ とした。)

E : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)

E' : 胴の縦弾性係数 (MPa)



しまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデル

(c) 一次+二次応力

一次+二次応力は、次式で計算される。

$$S = \text{MAX}[\sigma_{31}, \sigma_{32}] + P_3 \quad (3.24)$$

3.3.3 計算結果

応力計算結果を第3-4表に示す。第3-4表に示すとおり、発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-4表 トラニオンの応力評価（吊上げ時）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価位置	応力分類	計算値	許容 応力値
上部トラニオン 段付き部	①	せん断応力（一次応力）	68	227
		曲げ応力（一次応力）	122	394
		組合せ応力	170	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	68	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	122	1182
	②	せん断応力（一次応力）	22	227
		曲げ応力（一次応力）	125	394
		組合せ応力	131	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	22	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	125	1182
上部トラニオン 接続部	③	支圧応力（一次応力）	76	230 ^(注1)
		支圧応力（一次＋二次応力）	120	345 ^(注1)

（注1）上部トラニオン接続部（胴側）の方が許容応力は小さいため、上部トラニオン接続部（胴側）の評価基準値を示す。

3.3.4 疲労評価

金属キャスク構造規格 MCD-3313 に従って疲労解析を行う。

3.3.4.1 疲労評価において考慮する事象

疲労解析で考慮する事象は、以下とする。また、疲労評価における繰り返し回数は「資料 10-3-2-1 密封容器の強度計算方法」と同様とする。

- ①燃料装荷及び燃料取出し時：10 回
- ②吊上げ時：200 回
- ③貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）：10 回

3.3.4.2 ピーク応力強さの算出

(1) トラニオン段付き部

繰返しピーク応力は、(3.11)式より計算される。

また、トラニオン段付き部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 吊上げ荷重による応力強さの変動

吊上げ荷重による応力強さの変動(S)は、第3-4表の上部トラニオン段付き部に示す値より次式で計算される。

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

ここで、

- σ_b : 第3-4表に示す曲げ応力（一次＋二次）（評価位置①）
- τ : 第3-4表に示すせん断応力（一次＋二次）（評価位置①）

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、燃料装荷及び取出し時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(c) 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）による応力強さの変動

トラニオン段付き部に熱荷重による応力は生じないため、崩壊熱低下時にトラニオン段付き部の応力は変動しない。

(2) トラニオン接続部

繰返しピーク応力は、(3.12)式より計算される。

また、トラニオン接続部の応力強さの変動は、以下のとおり計算される。

(a) 吊上げ荷重による応力強さの変動

吊上げ荷重による応力強さの変動は、第3-4表の上部トラニオン接続部 支圧応力（一次応力）に示す値と同じである。

(b) 燃料装荷及び取出しによる応力強さの変動

燃料装荷及び取出しの温度変化によるトラニオン接続部のしめ代（直径差）変化（ δ_{3i} ）は、(3.25)式より計算する。

$$\delta_{3i} = d_{32} \times \alpha_{2i} \times (T_{2i} - T_0) - d_{31} \times \alpha_{1i} \times (T_{1i} - T_0) \quad (3.25)$$

ただし、下記に示す記号については、以下のとおりとして計算する。

- d_{32} : トラニオン接続部（胴側）の穴径（=270mm）
- d_{31} : トラニオン接続部（トラニオン側）の外径（= mm）
- α_{2i} : 3.2.4.2 (2) (b) と同じ
- α_{1i} : 3.2.4.2 (2) (b) と同じ
- T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=I; 145^\circ\text{C}$ 、 $i=0; 20^\circ\text{C}$ ）
- T_{1i} : トラニオンの温度（ $i=I; 140^\circ\text{C}$ 、 $i=0; 20^\circ\text{C}$ ）
- T_0 : 初期温度（=20℃）
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

しめ代（直径差）変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{3i} = \frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \quad (3.26)$$

$$S = P_{3I} - P_{30}$$

ここで、

- P_{3i} : しまり嵌めによる支圧 (MPa)
- ν : ポアソン比=0.3
- α_{3i} : しまり嵌め比（= δ_{3i}/d_{32} ）
- δ_{3i} : 外輪(穴)と軸のしめ代（直径差） (mm)
- d_{32} : 3.3.2 (2) (b) と同じ
- d_{33} : 3.3.2 (2) (b) と同じ
- E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)
- E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)
- i : 添え字（燃料装荷時； $i=I$ ，燃料取出し時； $i=0$ ）

(c) 貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）による応力強さの変動

貯蔵期間中の燃料の発熱量の低下による温度変化に対してトラニオン接続部の締め代（直径差）変化（ δ_{3i} ）は、(3.25)式より計算される。なお、崩壊熱

低下時は、使用済燃料の崩壊熱が無い状態とし、トラニオン及びトラニオン接続部（胴側）の温度は20℃とする。

ただし、下記に示す記号については、以下のとおりとする。

T_{2i} : トラニオン接続部（胴側）の温度（ $i=B$;145℃、 $i=E$;20℃）

T_{1i} : トラニオンの温度（ $i=B$;140℃、 $i=E$;20℃）

T_0 : 初期温度（=20℃）

i : 添え字（貯蔵初期時； $i=B$ ，貯蔵終了時； $i=E$ ）

しめ代（直径差）変化による応力強さの変動は、次式より計算される。

$$P_{3i} = \frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'} \right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \quad \left. \vphantom{P_{3i}} \right\} \quad (3.27)$$

$$S = P_{3B} - P_{3E}$$

ここで、

P_{3i} : しまり嵌めによる支圧(MPa)

ν : ポアソン比=0.3

α_{3i} : しまり嵌め比（= δ_{3i}/d_{32} ）

δ_{3i} : 外輪(穴)と軸のしめ代（直径差）（mm）

d_{32} : 3.3.2 (2) (b) と同じ

d_{33} : 3.3.2 (2) (b) と同じ

E_i : トラニオンの縦弾性係数 (MPa)

E_i' : 胴の縦弾性係数 (MPa)

i : 添え字（貯蔵初期時； $i=B$ ，貯蔵終了時； $i=E$ ）

3.3.5 疲労計算結果

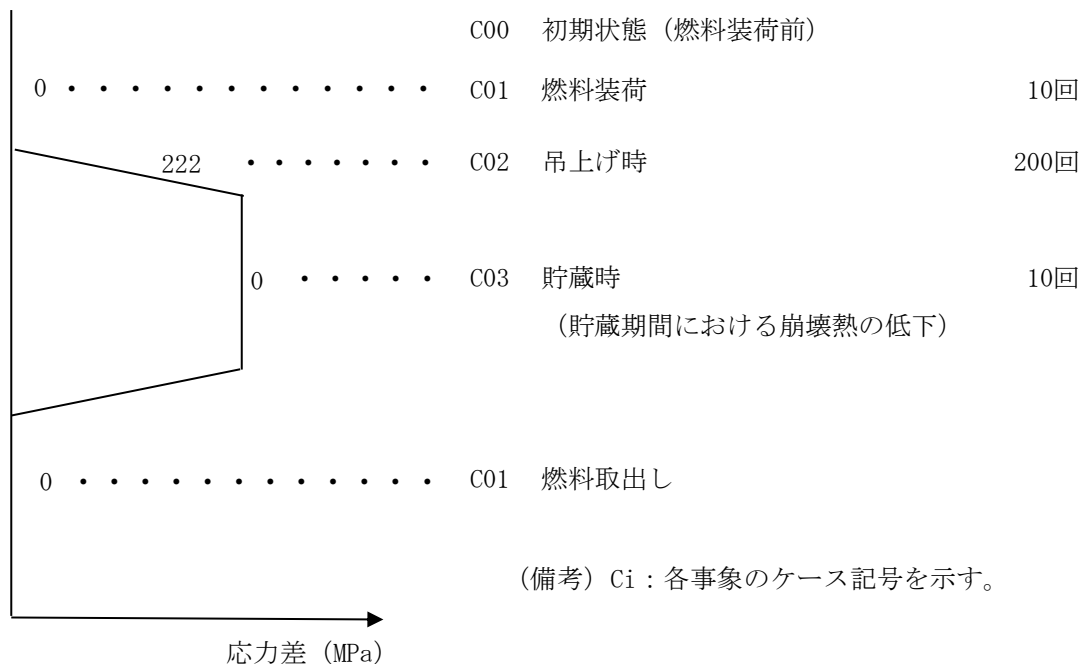
金属キャスク構造規格 別図8-1及びASMEより、繰返しピーク応力強さ(S_a)に対する許容繰返し回数(N_a)を求める。疲労累積係数(U_f)は、3.2.5と同様に求められる。

各サイクルの繰返し回数(N_c)と許容繰返し回数(N_a)との比は第3-5表及び第3-6表に示すとおりとなり、疲労累積係数(U_f)は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-3313の規定を満足する。

第 3-5 表 疲労解析結果（上部トラニオン段付き部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	0	0	—	10	—
2	170	222	10 ⁷	200	0.0001
3	0	0	—	10	—
疲労累積係数 U _f =0.0001					

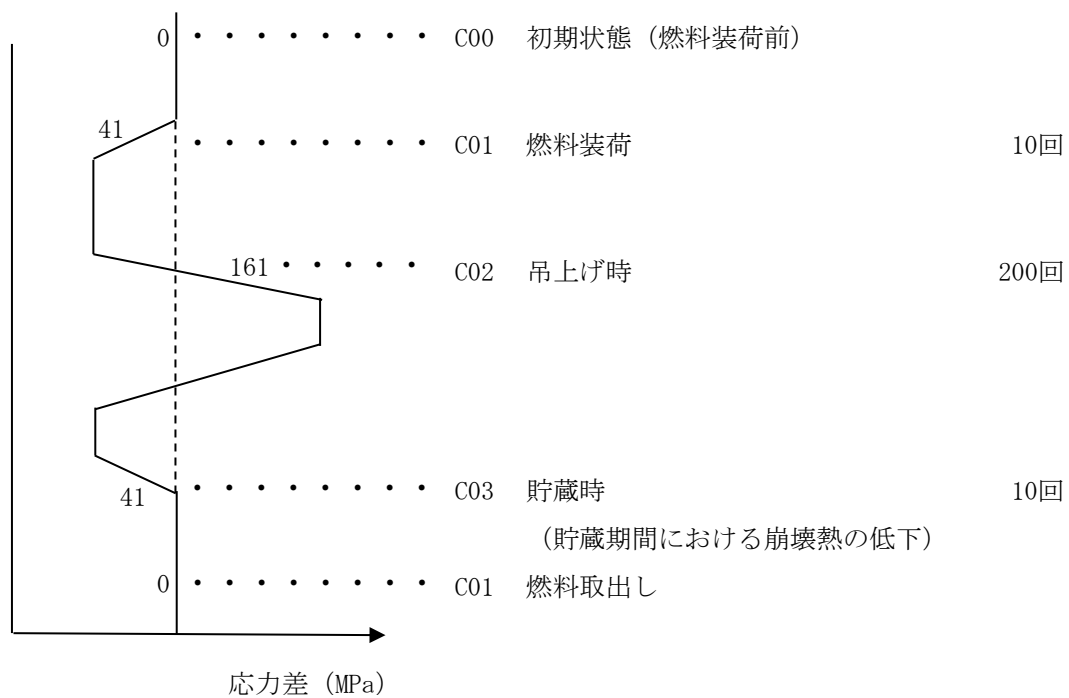
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第 3-6 表 疲労解析結果（上部トラニオン接続部）

i	S (MPa)	S _a (MPa)	N _a	N _c	N _c /N _a
1	19	41	10 ⁶	10	0.0001
2	76	161	48108	200	0.0042
3	19	41	10 ⁶	10	0.0001
疲労累積係数 U _f =0.0044					

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



貯蔵架台（タイプ1）の強度計算書

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-9

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要.....	資 10-3-3-9-1
2. 形状・寸法・材料.....	資 10-3-3-9-1
3. 応力計算.....	資 10-3-3-9-4
3.1 応力評価位置.....	資 10-3-3-9-4
3.2 貯蔵時.....	資 10-3-3-9-4
3.2.1 荷重条件.....	資 10-3-3-9-4
3.2.2 計算方法.....	資 10-3-3-9-4
3.2.3 計算結果.....	資 10-3-3-9-6

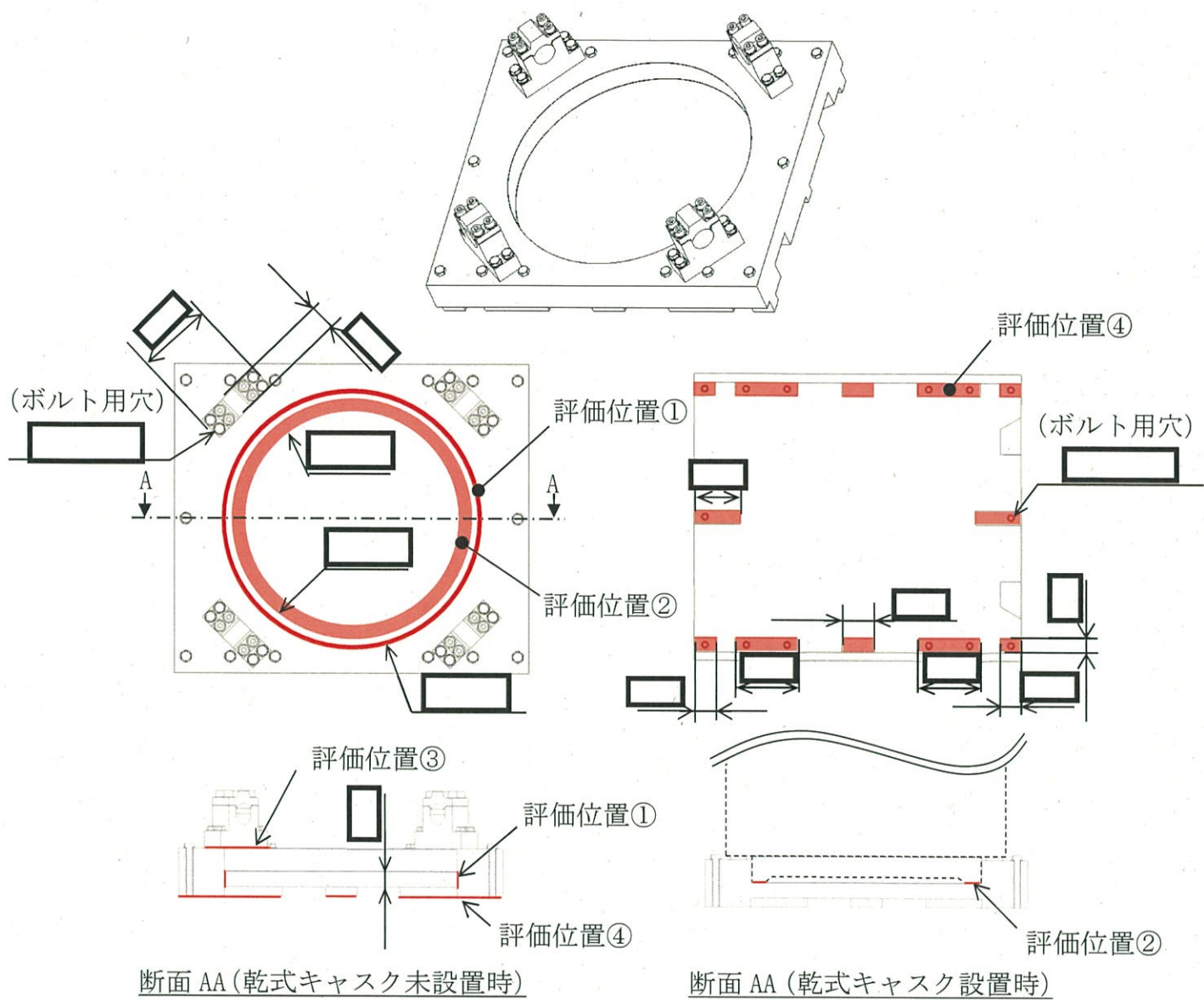
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料 10-3-2-5「貯蔵架台の強度計算方法」に基づき、貯蔵架台（タイプ 1）が十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

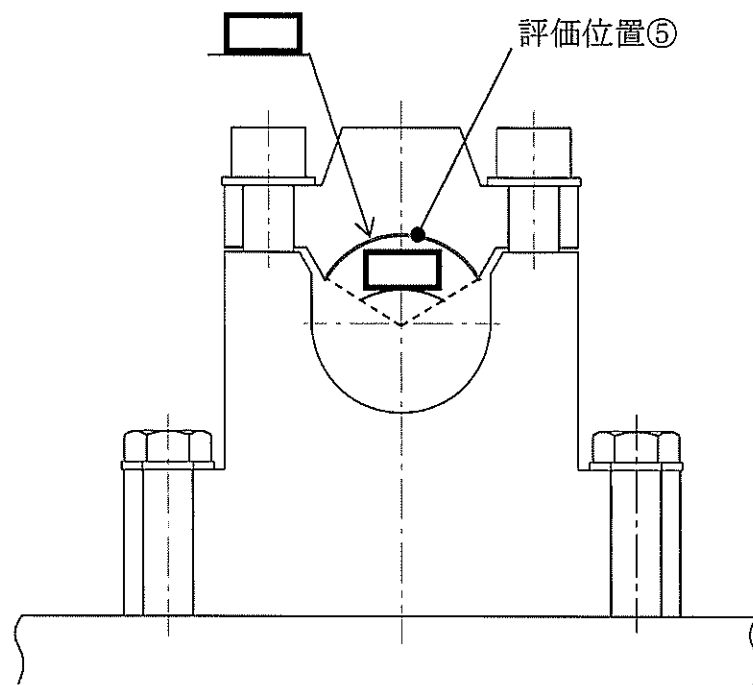
2. 形状・寸法・材料

本資料で解析する貯蔵架台（タイプ1）の形状・寸法・材料を第2-1図及び第2-2図に示す。



材質：SF490A
(単位：mm)

第2-1図 貯蔵架台の形状・寸法・材料・応力評価位置



材質：SM490A
(単位：mm)

第2-2図 トラニオン押さえの形状・寸法・材料・応力評価位置

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

貯蔵架台（タイプ1）の応力評価位置を第2-1図及び第2-2図に示す。構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。

3.2 貯蔵時

3.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・自重
- ・トラニオン押さえによる固縛荷重
- ・乾式キャスクの重量
- ・ボルトの初期締付け力

3.2.2 計算方法

(1) 貯蔵架台

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置①である。乾式キャスクの重量及び貯蔵架台（タイプ1）の自重による荷重、及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{F_1 + F_2 \times 4}{A_1} \quad (3.1)$$

ここで、

F_1 : 乾式キャスクの重量及び貯蔵架台（タイプ1）の自重による荷重
($=1.344 \times 10^6$ N)

F_2 : トラニオン押さえによる固縛荷重 ($=$ N)

A_1 : 評価位置①の断面積 ($=1.050 \times 10^6$ mm²)

(b) 支圧応力

貯蔵架台（タイプ1）に乾式キャスク（タイプ1）が設置される面において、応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置②である。また、最大応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置③である。

評価位置②において、乾式キャスク（タイプ1）の重量による荷重及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生する支圧応力（ σ_{p1} ）は、(3.2)式で計算される。

$$\sigma_{p1} = \frac{F_3 + F_2 \times 4}{A_2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{F_4 + F_5 \times 4}{A_3} \quad (3.3)$$

ここで、

F_3 : 乾式キャスク（タイプ1）の重量による荷重（ $=1.148 \times 10^6$ N）

F_2 : 3.2.2 (1) (a) と同じ

A_2 : 評価位置②の断面積（ $=7.403 \times 10^5$ mm²）

F_4 : 固定装置の自重による荷重（ $=3.923 \times 10^3$ N）

F_5 : 固定装置固定ボルトの初期締付け力（ $=$ N）

A_3 : 評価位置③の断面積（ $=1.280 \times 10^5$ mm²）

(c) 圧縮応力

最大応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置④である。乾式キャスクの重量及び貯蔵架台（タイプ1）の自重による荷重、及び基礎ボルトの初期締付け力により発生する圧縮応力（ σ_c ）は、次式で計算される。

$$\sigma_c = \frac{F_1 + F_6 \times 14}{A_4} \quad (3.4)$$

ここで、

F_1 : 3.2.2 (1) (a) と同じ

F_6 : 基礎ボルトの初期締付け力（ $=$ N）

A_4 : 評価位置④の断面積（ $=5.592 \times 10^5$ mm²）

(2) トラニオン押さえ

支圧応力が発生する箇所は第2-2図に示す評価位置⑤である。トラニオン押さえの自重による荷重、及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生する支圧応力(σ_{p3})は、次式で計算される。

$$\sigma_{p3} = \frac{F_7 + F_2}{A_5} \quad (3.5)$$

ここで、

F_7 : トラニオン押さえの自重による荷重 ($=9.807 \times 10^2$ N)

F_2 : 3.2.2 (1) (a) と同じ

A_5 : 評価位置⑤の断面積 ($=4.492 \times 10^4$ mm²)

3.2.3 計算結果

応力評価結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すとおり、発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-1表 貯蔵架台（タイプ1）の応力評価結果（貯蔵時）
（単位：MPa）

部位	応力分類	貯蔵時		許容応力値
		計算値	評価位置	
貯蔵架台	せん断応力	3	①	89
	支圧応力	4	②	291
		12	③	291
	圧縮応力	12	④	155
トラニオン押さえ	支圧応力	10	⑤	316

なお、本計算書では、資料 10-3-2-5「貯蔵架台の強度計算方法」に基づき、設計・建設規格のクラス3支持構造物として強度評価を行っているが、同規格のクラス1支持構造物の強度評価を実施した場合においても、十分な強度を有することを確認している。

貯蔵架台（タイプ2）の強度計算書

設計及び工事計画認可申請 資料10-3-3-10

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要.....	資 10-3-3-10-1
2. 形状・寸法・材料.....	資 10-3-3-10-1
3. 応力計算.....	資 10-3-3-10-4
3.1 応力評価位置.....	資 10-3-3-10-4
3.2 貯蔵時.....	資 10-3-3-10-4
3.2.1 荷重条件.....	資 10-3-3-10-4
3.2.2 計算方法.....	資 10-3-3-10-4
3.2.3 計算結果.....	資 10-3-3-10-6

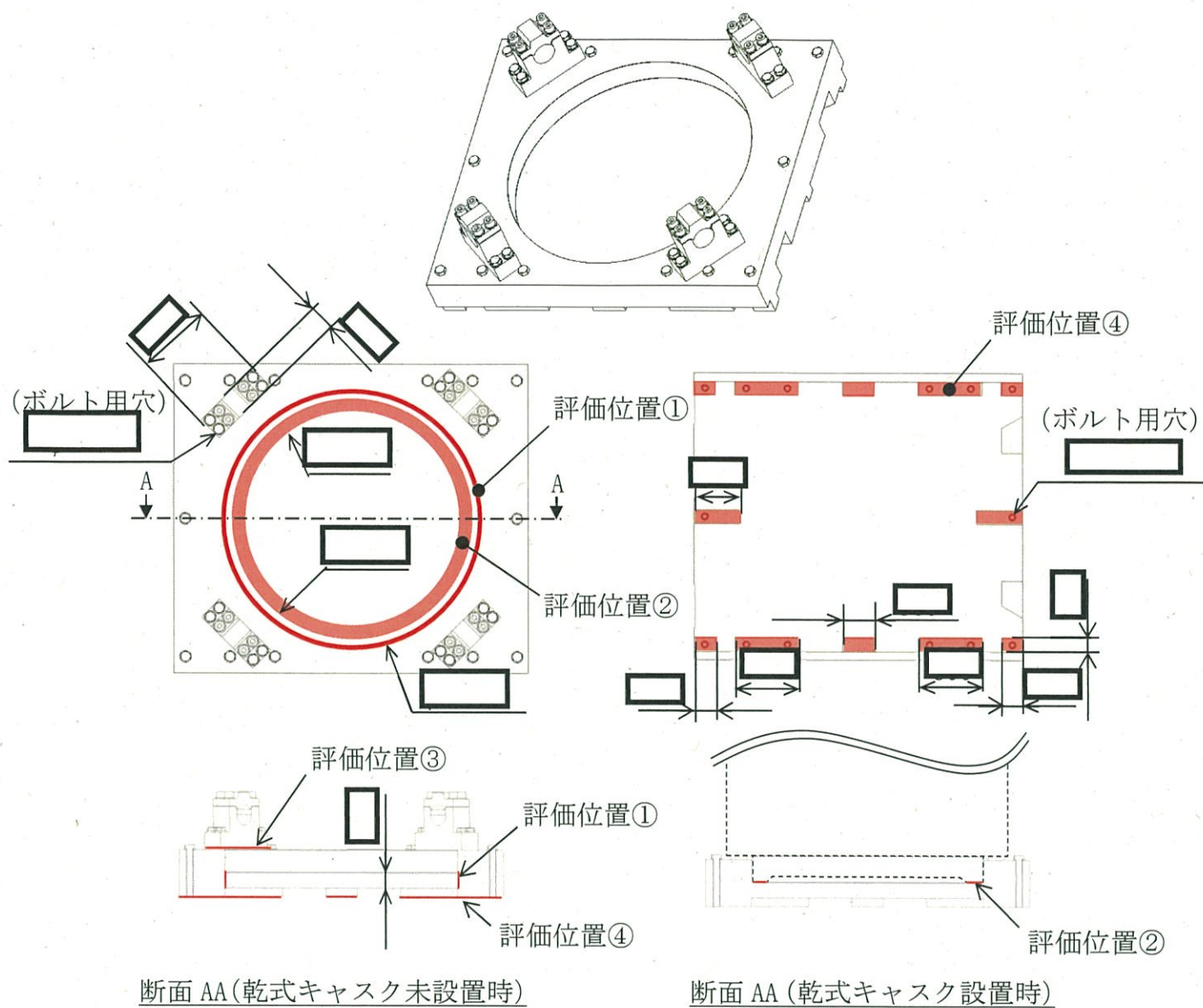
※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、資料 10-3-2-5「貯蔵架台の強度計算方法」に基づき、貯蔵架台（タイプ 2）が十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

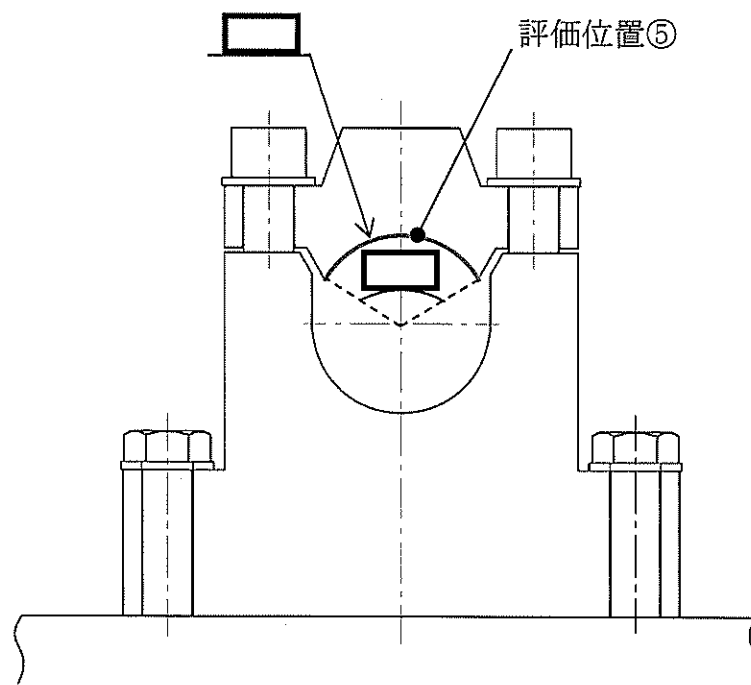
2. 形状・寸法・材料

本資料で解析する貯蔵架台（タイプ2）の形状・寸法・材料を第2-1図及び第2-2図に示す。



材質：SF490A
(単位：mm)

第2-1図 貯蔵架台の形状・寸法・材料・応力評価位置



材質：SM490A
(単位：mm)

第2-2図 トラニオン押さえの形状・寸法・材料・応力評価位置

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

貯蔵架台（タイプ2）の応力評価位置を第2-1図及び第2-2図に示す。構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。

3.2 貯蔵時

3.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 自重
- ・ トラニオン押さえによる固縛荷重
- ・ 乾式キャスクの重量
- ・ ボルトの初期締付け力

3.2.2 計算方法

(1) 貯蔵架台

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置①である。乾式キャスクの重量及び貯蔵架台（タイプ2）の自重による荷重、及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生するせん断応力(τ)は、次式で計算される。

$$\tau = \frac{F_1 + F_2 \times 4}{A_1} \quad (3.1)$$

ここで、

F_1 : 乾式キャスクの重量及び貯蔵架台（タイプ2）の自重による荷重
($=1.335 \times 10^6$ N)

F_2 : トラニオン押さえによる固縛荷重 ($=$ N)

A_1 : 評価位置①の断面積 ($=1.041 \times 10^6$ mm²)

(b) 支圧応力

貯蔵架台（タイプ2）に乾式キャスク（タイプ2）が設置される面において、応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置②である。また、最大応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置③である。

評価位置②において、乾式キャスク（タイプ2）の重量による荷重及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生する支圧応力（ σ_{p1} ）は、(3.2)式で計算される。

$$\sigma_{p1} = \frac{F_3 + F_2 \times 4}{A_2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{F_4 + F_5 \times 4}{A_3} \quad (3.3)$$

ここで、

- F_3 : 乾式キャスク（タイプ2）の重量による荷重（ $=1.139 \times 10^6$ N）
- F_2 : 3.2.2 (1) (a) と同じ
- A_2 : 評価位置②の断面積（ $=8.254 \times 10^5$ mm²）
- F_4 : 固定装置の自重による荷重（ $=3.923 \times 10^3$ N）
- F_5 : 固定装置固定ボルトの初期締付け力（ $=$ N）
- A_3 : 評価位置③の断面積（ $=1.280 \times 10^5$ mm²）

(c) 圧縮応力

最大応力が発生する箇所は第2-1図に示す評価位置④である。乾式キャスクの重量及び貯蔵架台（タイプ2）の自重による荷重、及び基礎ボルトの初期締付け力により発生する圧縮応力（ σ_c ）は、次式で計算される。

$$\sigma_c = \frac{F_1 + F_6 \times 14}{A_4} \quad (3.4)$$

ここで、

- F_1 : 3.2.2 (1) (a) と同じ
- F_6 : 基礎ボルトの初期締付け力（ $=$ N）
- A_4 : 評価位置④の断面積（ $=5.618 \times 10^5$ mm²）

(2) トラニオン押さえ

支圧応力が発生する箇所は第2-2図に示す評価位置⑤である。トラニオン押さえの自重による荷重、及びトラニオン押さえによる固縛荷重により発生する支圧応力(σ_{p3})は、次式で計算される。

$$\sigma_{p3} = \frac{F_7 + F_2}{A_5} \quad (3.5)$$

ここで、

F_7 : トラニオン押さえの自重による荷重 ($=9.807 \times 10^2$ N)

F_2 : 3.2.2 (1) (a) と同じ

A_5 : 評価位置⑤の断面積 ($=4.492 \times 10^4$ mm²)

3.2.3 計算結果

応力評価結果を第3-1表に示す。第3-1表に示すとおり、発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-1表 貯蔵架台（タイプ2）の応力評価結果（貯蔵時）
（単位：MPa）

部位	応力分類	貯蔵時		許容応力値
		計算値	評価位置	
貯蔵架台	せん断応力	3	①	89
	支圧応力	4	②	291
		12	③	291
	圧縮応力	12	④	155
トラニオン押さえ	支圧応力	10	⑤	313

なお、本計算書では、資料 10-3-2-5「貯蔵架台の強度計算方法」に基づき、設計・建設規格のクラス3支持構造物として強度評価を行っているが、同規格のクラス1支持構造物の強度評価を実施した場合においても、十分な強度を有することを確認している。

使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の
長期健全性について

目 次

	頁
1. 概要	資10-3-別紙1-1
2. 乾式キャスクの構成部材	資10-3-別紙1-1
3. 経年変化に関する評価条件	資10-3-別紙1-3
4. 経年変化に関する評価結果	資10-3-別紙1-6
5. 中性子遮蔽材の減損量評価	資10-3-別紙1-14

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第26条第2項第6号ニに基づき、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）を構成する部材の長期健全性について説明するものである。

2. 乾式キャスクの構成部材

乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の主要な構成部材の材質を第2-1表に示す。乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）は、基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定している。

第2-1表 乾式キャスク（タイプ1, 2）の主要な構成部材の材質

構成部材	材質
キャスク本体 胴 外筒 底部中性子遮蔽材カバー 下部端板 トラニオン 伝熱フィン 中性子遮蔽材（底部、側部）	炭素鋼（GLF1）（注1） 炭素鋼（SGV480）（注2） ステンレス鋼（SUS304） ステンレス鋼（SUS304） ステンレス鋼（SUS630） 銅（C1020） 樹脂（レジン）
バスケット バスケットプレート 中性子吸収材	アルミニウム合金（MB-A3004-H112） ほう素添加アルミニウム合金
蓋 部 一次蓋 蓋部中性子遮蔽材カバー 二次蓋 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 中性子遮蔽材（蓋部） 金属ガasket	炭素鋼（GLF1）（注3） 炭素鋼（SGV480）（注3） 炭素鋼（GLF1）（注3） 合金鋼（SNB23-3）（注4） 合金鋼（SNB23-3）（注4） 樹脂（レジン） ニッケル基合金/アルミニウム

（注1） 胴の表面のうち、一次蓋、二次蓋及び三次蓋との接触面は を、胴内面には を、また、胴外面のうち、大気に触れる部分については、塗装を施す。

（注2） 外筒の外表面には、塗装を施す。

（注3） 一次蓋及び二次蓋のうち、胴との接触面及びシール部は ドを、また、その他の表面には、 を施す。また、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面には を施す。

（注4） 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの表面には、 を施す。

3. 経年変化に関する評価条件

乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の主要な構成部材の経年変化に対する評価条件を以下に示す。

- ・ 乾式キャスク内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体収納時にその内部空間を真空乾燥し、不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、使用済燃料集合体を貯蔵する。
- ・ 設計貯蔵期間は60年間とする。
- ・ 乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の構成部材の温度は、資料13「使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における解析結果より、第3-1表に示す条件とする。（乾式キャスクの除熱設計、評価方法、評価対象燃料、評価条件については、同資料に示す。）
- ・ 乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の構成部材の中性子照射量は、資料14「使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に示す遮蔽解析結果より、第3-2表に示す条件とする。

第3-1表 乾式キャスク（タイプ1, 2）の主要な構成部位における最高温度

構成部材	最高温度 ^(注1) (°C)		温度制限値 (°C以下)
	乾式キャスク (タイプ1)	乾式キャスク (タイプ2)	
胴（本体部）	133	137	350
胴（フランジ部）	111	112	350
胴（底板）	143	147	350
一次蓋	108	109	350
一次蓋ボルト	109	110	350
二次蓋	98	99	350
二次蓋ボルト	100	101	350
外筒	126	129	350
下部端板	125	129	425
蓋部中性子遮蔽材カバー	105	106	350
底部中性子遮蔽材カバー	123	126	425
トラニオン	129	132	350
バスケット	184	191	250
伝熱フィン	127	131	200
金属ガスケット	108	109	130
中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）	132	136	149

第3-2表 乾式キャスク（タイプ1,2）の主要な構成部位における中性子照射量

	構造材中最大となる 全中性子照射量 (n/cm ²) (注1)	
	乾式キャスク (タイプ1)	乾式キャスク (タイプ2)
(1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト (注2)	4.8×10^{14}	5.9×10^{14}
(2) バスケット (注3)	1.5×10^{15}	1.5×10^{15}
(3) トラニオン (注2)	4.8×10^{14}	5.9×10^{14}
(4) 外筒	3.1×10^{12}	3.3×10^{12}
(5) 蓋部中性子遮蔽材カバー (注2)	4.8×10^{14}	5.9×10^{14}
(6) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー	7.4×10^{13}	8.2×10^{13}
(7) 中性子遮蔽材 (注4)	1.3×10^{14}	1.6×10^{14}
(8) 金属ガasket	1.8×10^{14}	2.0×10^{14}
(9) 伝熱フィン (注4)	1.3×10^{14}	1.6×10^{14}
(10) 使用済燃料被覆管	1.5×10^{15}	1.5×10^{15}

(注1) 遮蔽解析結果から得られた中性子束が60年間一定であると仮定して算出した値

(注2) 最大となる胴領域の値を記載

(注3) 最大となるキャビティ内領域（使用済燃料領域）の値を記載

(注4) 最大となる側部中性子遮蔽材領域の値を記載

4. 経年変化に関する評価結果

乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の主要な構成部材について、設計貯蔵期間における環境条件の影響（照射影響、熱的影響及び化学的影響）を考慮して、文献や試験データに基づき、経年変化の影響を評価した。乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の主要な構成部材毎に評価した具体的な内容を(1)～(9)に示す。

(1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト

【照射影響】

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼については、「K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).」において、中性子照射量が 10^{16} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、「(一社)日本機械学会、『発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) (JSME S NJ1-2012)』, (2012).」において、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入し、貯蔵する設計としている。一方で、炭素鋼は、「日本アルミニウム協会、『アルミニウムハンドブック第7版』, (2007).」において、淡水に完全に浸漬した条件においても腐食速度は十分に小さいことが示されている。したがって、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない。また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率1 %相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はないことが「(独)原子力安全基盤機構、『平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告』, (2004).」において示されている。

一次蓋と二次蓋の間の空間部（以下「蓋間空間」という。）には不活性ガスであるヘリウムを封入し、不活性雰囲気維持されるため、腐食の影響はない。また、胴外面及び一次蓋は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。なお、大気に触れる部分については、塗装等の防食措置により腐食を防止する。

(2) バスケット

【照射影響】

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポートに使用する炭素鋼（乾式キャスク（タイプ1）のみ）は、「K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).」及び「三菱重工業(株),『型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について』, (2017).」において、中性子照射量が 10^{16} n/cm²まで顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.5×10^{15} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10^{-5} 程度であり無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。

【熱的影響】

バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポートに使用する炭素鋼（乾式キャスク（タイプ1）のみ）は、「(一社)日本機械学会,『発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）(JSME S NJ1-2012)』, (2012).」及び「三菱重工業(株),『型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について』, (2017).」において、貯蔵状態における温度における設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

なお、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件（250℃）を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している。また、貯蔵時にバスケットプレートに発生する応力は1MPa未満と小さく、設計貯蔵期間中のバスケットプレートのクリープ変形量は無視し得る。

【化学的影響】

バスケットが置かれた空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分（10 wt%）を考慮しても腐食の影響はないことが、「(独)原子力安全基盤機構,『平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告』, (2004).」及び「(一社)日本原子力学会標準委員会,『使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010 (AESJ-SC-F002：2010)』, (2010).」に示されている。

また、乾式キャスク（タイプ1）のバスケットサポートに使用する炭素鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響はないことが「(独)原子力安全基盤機構,『平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告』, (2004).」において示されて

いる。

(3) トラニオン

【照射影響】

トラニオンに使用するステンレス鋼は、「土肥謙次，秀耕一郎，黛正己，恩地健雄，大岡紀一，『304ステンレス鋼のSCC特性に及ぼす中性子照射効果（その2）－熱鋭敏化材のSCC感受性に及ぼす照射影響－』，（一財）電力中央研究所，（1997）.」において、中性子照射量が 10^{17} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

トラニオンに使用するステンレス鋼は、「（一社）日本機械学会，『発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）（JSME S NJ1-2012）』，（2012）.」において、貯蔵状態の温度における設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

トラニオンの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じる。ここで、「（公社）腐食防食協会編，『腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版』，丸善（株），（2005）.」において、淡水中におけるステンレス鋼は不動態膜を形成するため、全面腐食の程度が不動態膜のない炭素鋼と比較して小さいこと、また、塩化物を含む環境であれば局部腐食が問題となることが示されているが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素及び塩化物が連続的に供給されないため腐食の影響はない。

(4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー

【照射影響】

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、「K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).」において、中性子照射量が 10^{16} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では 3.3×10^{12} n/cm²、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 5.9×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、「（一社）日本機械学会，

『発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）（JSME S NJ1-2012）』，（2012）.」において、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じる。一方、炭素鋼の腐食速度は、「（公社）腐食防食協会編，『腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版』，丸善（株），（2005）.」において、水中に溶存した酸素濃度に比例して増大することが示されているが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。また、蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、蓋部中性子遮蔽材カバーの外面は不活性雰囲気維持されるため、腐食の影響はない。なお、外筒の外面については、塗装等の防食措置により腐食を防止する。

（5）下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー

【照射影響】

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、「土肥謙次，秀耕一郎，黛正己，恩地健雄，大岡紀一，『304ステンレス鋼のSCC特性に及ぼす中性子照射効果（その2）－熱鋭敏化材のSCC感受性に及ぼす照射影響－』，（一財）電力中央研究所，（1997）.」において、中性子照射量が 10^{17} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 8.2×10^{13} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、「（一社）日本機械学会，『発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）（JSME S NJ1-2012）』，（2012）.」において、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じる。ここで、「（公社）腐食防食協会編，『腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版』，丸善（株），（2005）.」において、淡水中におけるステンレス鋼は不動態膜を形成するため、全面腐食の程度が不動態膜のない炭素鋼と比較して小さいこと、また、塩化物を含む環境であれば局部腐食が問題となることが示されているが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。

(6) 中性子遮蔽材

【照射影響】

中性子遮蔽材（レジン）は、「(財)原子力発電技術機構、『平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（金属キャスク貯蔵技術確証試験）報告書』, (2003).」及び「T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).」において、中性子照射量が 10^{15} n/cm²までは、顕著な質量減損は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響、化学的影響】

中性子遮蔽材は、「(財)原子力発電技術機構、『平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（金属キャスク貯蔵技術確証試験）報告書』, (2003).」において温度及び加熱時間に基づく質量減損量の評価式が示されており、設計貯蔵期間中の熱的（化学的）影響により質量減損（2%程度）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に2.5 %の質量減損を考慮する。

詳細は5. 章に示す。

(7) 金属ガasket

【照射影響】

金属ガasketに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、「H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol. 24, (1981).」及び「T. T. Claudson. “Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).」において、中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm²又は 10^{21} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 2.0×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

「加藤治, 伊藤千浩, 三枝利有, 『使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発』, 日本原子力学会誌, Vol. 38, No. 6, (1996).」において、高温時の健全性についてラーソン・ミラー・パラメータ（LMP）で評価すると、150 °Cでは100年以上閉じ込め機能を維持できることが示されている。また、「(一財)電力中央研究所, 『平成21年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書』, (2010).」において、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験（19年以上）が実施され、閉じ込め機能が維持されることが示されている。

【化学的影響】

蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し、その圧力を監視する設計としている。閉じ込め境界である一次蓋の金属ガスケット及び圧力監視境界である二次蓋の金属ガスケットの内側は不活性雰囲気であり、腐食を考慮する必要はない。

大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、「小崎明朗、『使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他』, (株) 日本原子力情報センター主催セミナー『使用済燃料貯蔵技術の現状と課題』, (1998).」において、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが示されている。また、「日本アルミニウム協会, 「アルミニウムハンドブック第7版」, (2007).」において、10年間海浜条件で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さが示されており、設計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約0.025mm及び約0.33mmであり、外被材の製造公差^(注)を含めても、板厚0.5mmより小さいため、閉じ込め機能に影響はない。

(注) 金属ガスケットの製造公差の例 (ノミナル寸法: 0.5mm、製造公差:



(8) 伝熱フィン

【照射影響】

伝熱フィンに使用する銅は、「S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).」において、中性子照射量が 10^{16} n/cm²までは、顕著な機械的特性変化は見られないことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm²であることから照射脆化の影響はない。

【熱的影響】

銅は、「(一財)日本規格協会, 『圧力容器の設計 (JIS B 8267:2015)』, (2015).」において、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

「(公社)腐食防食協会編, 『腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版』, 丸善(株), (2005).」に示されるとおり、銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属であることから、銅は腐食することはない、炭素鋼が選択的に腐食される。また、中性子遮蔽材(レジン)に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること、及び中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐食の影響はない。

伝熱フィンと胴及び外筒の接合部において、異種金属接触により胴及び外筒の腐

食が促進される可能性があるが、密閉系且つ淡水環境では、銅が接続された鋼の腐食速度が鋼単独の場合と同程度になることが「能登谷武紀、『密閉系淡水における銅-銅系のガルバニック腐食』、伸銅技術研究会誌 33巻、(1994).」に示されている。また、中性子遮蔽材の熱劣化により生じる水分量は限定的であり、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく、腐食の影響はない。

(9) 使用済燃料被覆管

【照射影響】

燃料被覆管に使用するジルカロイは、設計貯蔵期間中の中性子照射量が $1.5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ であり、「総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、『金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について』、(2009).」に示されるとおり、炉内の中性子照射量 ($10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2$) に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得ることが示されている。

【熱的影響】

熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある。

クリープひずみの進行については、予測式に基づく累積クリープひずみが1 %以下となるよう制限することで防止できることが「総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、『金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について』、(2009).」に示されており、燃料被覆管中の水素化物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが1%を超えることはない。

照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射されたPWR照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値が300 °C近傍であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性が小さいことが「総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、『金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について』、(2009).」に示されており、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。

燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射されたPWR燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が275 °C以下、周方向応力が100 MPa以下であることが「総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ、『金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キ

ャスクとその収納物の長期健全性について』, (2009).」に示されており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止する。

応力腐食割れについては、燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出がないこと、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されたよう素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていないこと、さらに、腐食性雰囲気での応力腐食割れ試験でジルカロイ-4の応力腐食割れのしきい応力は200 MPaであり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて十分低いため、応力腐食割れは発生しないと評価されることが「総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 『金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について』, (2009).」に示されている。

上記に示す通り、燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより、他の発生も同時に防ぐことができる。設計貯蔵期間中の燃料被覆管の温度及び周方向応力は、275℃及び100MPaを超えないことから、熱による経年変化を考慮する必要はない。

【化学的影響】

「(一社)日本原子力学会標準委員会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010 (AESJ-SC-F002: 2010)」, (2010).」において、残留水分が10 wt%以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さいことが示されており、健全性に影響はない。

5. 中性子遮蔽材の減損量評価

設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。

質量減損率は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$$

ここで、

Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)

E_p : 劣化パラメータ

$$E_p = T \times (77.6 + \ln(t))$$

T : 中性子遮蔽材温度 (K)

t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)

貯蔵中は、使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い、中性子遮蔽材の温度も低下するが、設計評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率算定においては、保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度（第3-1表を参照）が設計評価期間にわたり一定として質量減損率を算定する。

上記を基にすれば、設計評価期間経過後の劣化パラメータは、乾式キャスク（タイプ1）では、温度の高い底部中性子遮蔽材で約37000となり、質量減損率は約1.8 %と算定される。また、乾式キャスク（タイプ2）では、温度の高い底部中性子遮蔽材で約38000となり、質量減損率は約2.0 %と算定される。乾式キャスク（タイプ1）及び乾式キャスク（タイプ2）の遮蔽解析ではこれらを切り上げて2.5 %の質量減損があるとして評価する。

なお、中性子遮蔽材から放出される成分は水が支配的であり、水よりも水素含有率が高いガス成分はわずかである。したがって、遮蔽解析においては、中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため、中性子遮蔽材の質量減損の成分を全て水とし、この質量減損分を遮蔽体として無視している。

アルミニウム合金の材料特性について

目 次

	頁
1. 概要	資10-3-別紙2-1
2. 適用範圍	資10-3-別紙2-1
3. 材料規定	資10-3-別紙2-2
4. 製造管理規定	資10-3-別紙2-3

1. 概要

本書は、使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ 1）及び（タイプ 2）のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金（MB-A3004-H112）の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

2. 適用範囲

本材料を使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ 1）及び（タイプ 2）のバスケットプレートに適用するにあたり、本材料及びこれを使用するバスケットは以下の事項に適合すること。

- (1) バスケットが収納される使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ 1）及び（タイプ 2）の本体内部には、ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (2) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (3) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (4) 本材料はボルト材として使用しないこと。
- (5) 供用状態によらずバスケットプレートの発生応力は、弾性範囲内であること。
- (6) 供用状態によらずバスケットは長期間にわたる熱応力を生じない構造とすること。

3. 材料規定

本規定は、バスケットの強度計算に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4. に示す製造管理規定を満足しなければならない。

(1) 材料名称

材料の規定名称は第 3-1 表に示すものであること。

(2) 化学成分

化学成分は第 3-2 表に示す百分率の値の範囲内にあること。

(3) 設計応力強さ

設計応力強さは第 3-3 表の規定によること。

(4) 許容引張応力

許容引張応力は第 3-4 表の規定によること。

(5) 設計降伏点

設計降伏点は第 3-5 表の規定によること。

(6) 設計引張強さ

設計引張強さは第 3-6 表の規定によること。

(7) 縦弾性係数

縦弾性係数は第 3-7 表の規定によること。

(8) 熱膨張係数

熱膨張係数は第 3-8 表の規定によること。

4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、第 3-2 表に示す百分率の値の範囲内にあること。この場合において、化学成分は溶湯成分分析によること。化学成分の分析試験は、JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」（以下「JIS H 4100」という。）によること。
- (2) 材料の製造は、第 4-1 図に示す製造フローに従い、熱間押出成形加工されたものであること。
- (3) 材料は、熱間押出成形加工後、熱処理は行わず、空冷されたものであること。熱間加工によって得られるか又はごくわずかな冷間加工を加えただけの状態であること。質別 H112 は、JIS H 0001「アルミニウム、マグネシウム及びそれらの合金－質別記号」によること。
- (4) 機械的性質は、第 4-1 表に示す値に適合すること。
- (5) 製品の寸法の許容差は、以下及び JIS H 4100 によること。これを逸脱する寸法を適用する場合、機械的性質が第 4-1 表を満足することを確認すること。

- ・肉厚 : 16mm 以下

- ・押出比^(注1) : 10 以上

(注1) ビレットの押出方向に垂直な断面積と押出材の押出方向に垂直な断面積の比

- (6) 本材料は、耐食性向上等を目的として表面処理を行う場合がある。表面処理を行う場合、機械的性質が第 4-1 表を満足することを確認すること。
- (7) 本材料は、第 4-1 図の製造フローの各段階において、第 4-2 表に示す品質管理を行う。
- (8) 上記規定以外の規定については、JIS H 4100 又は EN 755-1「Aluminium and aluminium alloys- Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery」によること。

第 3-1 表 材料の規定名称

材料の名称	記号	質別
バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	MB-A3004	H112

第 3-2 表 化学成分規定

記号	化学成分 (mass%)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他		Al
										個々	合計	
MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下	残部

第 3-3 表 材料の各温度における設計応力強さ S_m (注 1)(注 2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	37	37	37	37	37	37	36	31	25	21	17

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-4 表 材料の各温度における許容引張応力 S (注 1)(注 2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)									
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	250
MB-A3004	37	37	37	37	29	21	15	11	8	8

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-5 表 材料の各温度における設計降伏点 S_y (注 1)(注 2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-6 表 材料の各温度における設計引張強さ S_u (注 1)(注 2)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)										
	-40 ~40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

第 3-7 表 材料の各温度における縦弾性係数 (注 1)

単位：MPa

記号	温 度 (°C)											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	73900	73300	72800	72100	71400	70600	69800	68900	67900	66900	65800	64600

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

第 3-8 表 材料の各温度における熱膨張係数 (注 1)

単位： $\times 10^{-6}$ mm/mm・°C

記号	区分 (注 2)	温 度 (°C)											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	A	22.75	23.52	24.02	24.42	24.76	25.05	25.35	25.68	26.06	26.54	27.14	27.91
	B	22.61	23.14	23.48	23.76	23.99	24.17	24.33	24.48	24.63	24.79	24.99	25.24

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 区分 A は瞬時熱膨張係数、区分 B は常温から当該温度までの平均熱膨張係数を表す。

第 4-1 表 機械的性質 (注 1)

記号	引張試験 (試験温度：常温)			シャルピー衝撃試験 (注 2) (試験温度：-40 °C)
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
MB-A3004	185 以上	85 以上	15 以上	41 以上

(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

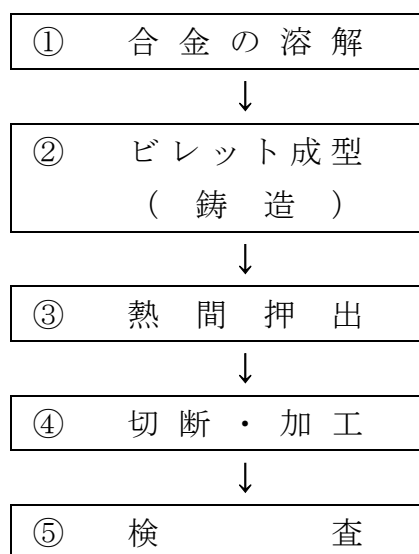
(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

第 4-2 表 管理程度表 ^(注 1)

製造工程 (注 2)	管理項目		材料保証 (規定)	製造管理 (参考)
①合金の溶解	材料特性 (初期材)	化学成分（溶湯）	○	—
⑤検査		引張強度特性	—	○
		シャルピー 衝撃特性	—	○
		組織観察	—	○
③熱間押出	製造条件	押出比	○	—
		押出条件	—	○
		押出冷却条件	—	○
		整直条件	—	○
		質別	○	—

(注 1) 設計貯蔵期間における設計強度特性保証に係る材料管理程度一覧である。

(注 2) 製造工程は第 4-1 図の製造フローに対応する。



第 4-1 図 製造フロー

竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針

目 次

	頁
1. 概要	資10 別添1-1-1
2. 強度評価の基本方針	資10 別添1-1-1
2.1 評価対象施設	資10 別添1-1-1
2.2 評価方針	資10 別添1-1-1
3. 構造強度設計	資10 別添1-1-2
3.1 構造強度の設計方針	資10 別添1-1-2
3.2 機能維持の方針	資10 別添1-1-3
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	資10 別添1-1-8
4.1 荷重及び荷重の組合せ	資10 別添1-1-8
4.2 許容限界	資10 別添1-1-13
5. 強度評価方法	資10 別添1-1-16
5.1 建屋・構造物に関する評価式	資10 別添1-1-17
6. 適用規格	資10 別添1-1-22

※本資料における については商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第7条及びその「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（以下「解釈」という。）に適合する設計とするため、資料2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち資料2-2-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」（以下「資料2-2-3」という。）に基づき、竜巻の影響を考慮する施設が、設計竜巻に対して要求される強度を有することを確認するための強度評価方針について説明するものである。

強度評価は、資料2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち資料2-2-1「竜巻への配慮に関する基本方針」（以下「資料2-2-1」という。）に示す適用規格を用いて実施する。

竜巻の影響を考慮する施設の具体的な計算の方法及び結果は、別添1-2「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 評価対象施設」に示す評価対象施設を対象として、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で示す設計竜巻荷重及びそれと組み合わせる荷重を適切に組み合わせた荷重により生じる応力等が「4.2 許容限界」で示す許容限界内にあることを「5. 強度評価方法」に示す計算方法を使用し、「6. 適用規格」に示す適用規格を用いて確認する。

2.1 評価対象施設

資料2-2-3の「3. 要求機能及び性能目標」にて構造強度上の性能目標を設定している竜巻の影響を考慮する施設を強度評価の対象とする。強度評価を行うにあたり、評価対象施設を以下のとおり分類する。

(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設

屋内の竜巻より防護すべき施設を防護する外殻となる、竜巻より防護すべき施設を内包する施設とする。具体的には、使用済燃料乾式貯蔵建屋が該当する。

2.2 評価方針

竜巻の影響を考慮する施設は、資料2-2-3の「3. 要求機能及び性能目標」にて設定している構造強度設計上の性能目標を達成するため、「2.1 評価対象施設」で分類した竜巻より防護すべき施設を内包する施設について、竜巻に対する強度評価を実施する。

強度評価の評価方針は、「衝突評価」の方針及び「構造強度評価」の方針に分類でき、評価対象施設はこれらの評価を実施する。

2.2.1 評価の分類

(1) 衝突評価

衝突評価は、竜巻による設計飛来物による衝撃荷重に対する直接的な影響の評価として、評価対象施設に貫通が生じないことを評価する。

評価対象施設の構造及び当該施設の機能を考慮し、飛来物の衝突により想定される損傷モードを以下のとおり分類し、それぞれの評価方針を設定する。

a. 建屋・構造物

(a) 貫通

(2) 構造強度評価

構造強度評価は、竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重により生じる応力等に対し、評価対象施設が、当該施設の機能を保持可能な構造強度を有することを評価する。

構造強度評価は、評価対象施設の構造を考慮し、以下の分類ごとに評価方針を設定する。

a. 建屋・構造物

(a) 裏面剥離

(b) 転倒及び脱落

3. 構造強度設計

資料2-2-1で設定している設計竜巻に対し、「2.1 評価対象施設」で設定している施設が、構造強度設計上の性能目標を達成するよう、資料2-2-3の「4. 機能設計」で設定している施設が有する機能を踏まえ、構造強度の設計方針を設定する。

施設の構造強度の設計方針を設定し、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、施設の構造強度を保持するよう構造設計と評価方針を設定する。

3.1 構造強度の設計方針

資料2-2-3の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度上の性能目標を達成するための設計方針を「2.1 評価対象施設」で設定している評価対象施設分類ごとに示す。

(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設

竜巻より防護すべき施設を内包する施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋は、資料2-2-3の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.1(3) 性能目標」で設定してい

る構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突することを防止するために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材が必要な部材厚さを有し、内包する竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないために、竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材が終局状態に至るようなひずみを生じない設計とする。

3.2 機能維持の方針

資料2-2-3の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度上の性能目標を達成するために、「3.1 構造強度の設計方針」に示す設計方針を踏まえ、資料2-2-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を適切に考慮して、施設の構造設計及びそれを踏まえた評価方針を設定する。

(1) 竜巻より防護すべき施設を内包する施設

竜巻より防護すべき施設を内包する施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋の機能維持の方針を以下に示す。

a. 構造設計

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び資料2-2-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

使用済燃料乾式貯蔵建屋に作用する荷重は、外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、耐震壁を介し、直接岩盤等に支持する基礎版へ伝達する構造とする。また、使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能を維持するため、自然冷却のための給排気口を設ける。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造計画を第3-1表に示す。

b. 評価方針

(a) 衝突評価

使用済燃料乾式貯蔵建屋の衝突評価については、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物による衝撃荷重に対し、屋根スラブ及び外壁が設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.1(3) 強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。

また、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材であるスライディングドアの衝突評価については、設計飛来物が施設の外殻を構成

する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物による衝撃荷重に対し、スライディングドアが設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.2(3) 強度評価方法」により算出した厚さを基に評価を行う。

(b) 構造強度評価

使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造強度評価については、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えない確認として、設計飛来物による衝撃荷重に対し、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、屋根スラブ及び外壁が、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。評価方法としては、「5.1.1(3) 強度評価方法」に示す強度評価式により算出した厚さを基に評価を行う。

また、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、構造躯体が終局状態に至らないことを解析により確認する。評価方法としては、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルを用いて算出した耐震壁のせん断ひずみを基に評価を行う。

以上に示す構造設計と作用する荷重の伝達を基に、評価対象部位を第3-2表に示すとおり設定する。

第3-1表 使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造計画(1/2)

施設名称	計画の概要		説明図	
	主体構造	支持構造		
【位置】				

第3-1表 使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造計画(2/2)

施設 名称	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
使用済 燃料乾 式貯蔵 建屋	鉄筋コン クリート造の 屋根及び外 壁等で構成 する。	荷重は建屋の 外殻を構成す る屋根及び外 壁に作用し、 耐震壁を介 し、直接岩盤 等に支持する 基礎版へ伝達 する設計とす る。	

第3-2表 竜巻の影響を考慮する施設 強度評価対象部位

分類	施設名称	評価対象部位	評価項目	評価項目 分類	選定理由
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ 外壁	衝突	貫通	外殻に面する部分への設計飛来物の衝突を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、施設の外殻を構成する屋根スラブ及び外壁を評価対象部位として選定する。
			構造強度	裏面剥離	外殻に面する部分への設計飛来物の衝突を考慮し、施設の外殻を構成する部材自体の脱落が生じないことを確認するため、施設の外殻を構成する外壁、屋根スラブを評価対象部位として選定する。
		耐震壁	構造強度	転倒及び 脱落	外殻に面する部分への竜巻による荷重の作用を考慮し、施設の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落が生じないことを確認するため、構造躯体が終局状態に至らないこと確認する。具体的には、竜巻による荷重は、外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、耐震壁を介し、直接岩盤等に支持する基礎版へ伝達するため、構造躯体のうち、耐震壁を評価対象部位として選定する。
			衝突	貫通	外殻に面する部分への設計飛来物の衝突を考慮し、外殻に面する部材に貫通が生じないことを確認するため、施設の外殻を構成するスライディングドアを評価対象部位として選定する。

4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せを、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に、許容限界を「4.2 許容限界」に示す。

4.1 荷重及び荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価にて考慮する荷重及び荷重の組合せは、資料2-2-1の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」を踏まえ、以下のとおり設定する。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重(F_d)

常時作用する荷重は、持続的に生じる荷重であり、自重及び上載荷重とする。

b. 竜巻による荷重(W_T)

竜巻による荷重は、設計竜巻の以下の特性を踏まえ、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物による衝撃荷重とする。設計竜巻の特性値を第4-1表に示す。

・ 竜巻の最大気圧低下量($\Delta P_{\max}$)

$$\Delta P_{\max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

ρ : 空気密度(=1.22kg/m³)

V_{Rm} : 竜巻の最大接線風速(m/s)

・ 竜巻の最大接線風速(V_{Rm})

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

V_D : 竜巻の最大風速(m/s)

V_T : 竜巻の移動速度(m/s)

・ 竜巻の移動速度(V_T)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D : 竜巻の最大風速(m/s)

第4-1表 設計竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 $\Delta P_{\max}$ (N/m ²)
100	15	85	8,900

(a) 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重は、竜巻の最大風速による荷重である。

竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として設定されるが、鉛直方向の風圧力に対して脆弱と考えられる竜巻の影響を考慮する施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

風圧力による荷重は、施設の形状により変化するため、施設の部位ごとに異なる。そのため、施設及び評価対象部位に対して厳しくなる方向からの風を想定し、施設の部位ごとに荷重を設定する。

ガスト影響係数(G)は設計竜巻の風速が最大瞬間風速をベースとしていること等から、施設の形状によらず竜巻影響評価ガイドを参照して、 $G=1.0$ とする。空気密度(ρ)は「建築物荷重指針・同解説」((社)日本建築学会(2004改定))より $\rho=1.22\text{kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧については施設の形状に影響を受けないため、設計竜巻の設計用速度圧(q)は施設の形状によらず $q=6,100\text{N/m}^2$ と設定する。

(b) 気圧差による荷重(W_p)

竜巻の影響を考慮する施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋は自然冷却のための給排気口を設けており、気圧差は発生しないことから、気圧差による荷重は考慮しない。

(c) 飛来物による衝撃荷重(W_M)

設計飛来物である鋼製材及び乗用車の衝突による影響が大きくなる向きで竜巻の影響を考慮する施設に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

衝突評価においても、飛来物の衝突による影響が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

飛来物の寸法、重量及び飛来速度を第4-2表に示す。設計飛来物の飛来速度については、設置(変更)許可を受けたとおり設定する。

第4-2表 飛来物の諸元

	鋼製材(設計飛来物)	乗用車(設計飛来物)
寸 法(m)	4.2×0.3×0.2	4.6×1.6×1.4
重 量(kg)	135	2,000
水平方向の飛来速度(m/s)	57	47
鉛直方向の飛来速度(m/s)	38	32

c. 運転時の状態で作用する荷重(F_p)

竜巻の影響を考慮する施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋は運転時の状態で作用する荷重は発生しないことから、運転時の状態で作用する荷重は考慮しない。

(2) 荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の設計に用いる竜巻の荷重は、設計竜巻の風圧力による荷重(W_w)及び飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重 W_{T2} を以下のとおり設定する。

$$W_{T2} = W_w + W_M$$

竜巻の影響を考慮する施設に W_{T2} の荷重を作用させる。施設の設計竜巻による荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造を踏まえ適切な組合せを設定する。施設分類を踏まえた荷重の組合せの考え方を以下に示す。

a. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設（第4-3表）

設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重として、風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重の組合せとする。

上記の荷重の組合せの考え方を踏まえ、評価対象施設における評価項目ごとの荷重の組合せを第4-3表に示す。

第4-3表 竜巻の影響を考慮する施設の荷重の組合せ

分類	強度評価の対象施設	評価項目	荷重					運転時の状態 で作用する荷重 (F_P)
			常時作用する荷重 (F_d)		風圧力による荷重 (W_W)	気圧差による荷重 (W_P)	飛来物による 衝撃荷重 (W_H)	
			自重	上載荷重				
竜巻より防護すべき施設を 内包する施設	使用済燃料乾式貯蔵建屋	衝突	—	—	—	○	—	
		構造強度	○	○	—	○	—	

(○：考慮する荷重を示す。)

(3) 荷重の算定方法

「4.1(1) 荷重の種類」で設定している荷重の算出式を以下に示す。

a. 記号の定義

荷重の算出に用いる記号を第4-4表に示す。

第4-4表 荷重の算出に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	施設の受圧面積
C	—	風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定する。）
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	N	自重による荷重
m	kg	質量
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	設計竜巻の風速
W _M	N	飛来物による衝撃荷重
W _W	N	風圧力による荷重
ρ	kg/m ³	空気密度

b. 自重による荷重の算出

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

c. 竜巻による荷重の算出

(a) 風圧力による荷重(W_W)

風圧力による荷重は、「建築基準法施行令」及び「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会）に準拠して、次式のとおり算出する。

$$W_W = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

$$\text{ここで、} q = \frac{1}{2} \rho V_D^2$$

(b) 飛来物による衝撃荷重(W_M)

飛来物による衝撃荷重は、飛来物が衝突する施設、評価対象部位及び評価方法に応じて適切に設定する必要があるため、個別計算書にその算出方法を含めて記載する。

評価条件を第4-5表に示す。

第4-5表 評価条件

最大風速 V_D (m/s)	空気密度 ρ (kg/m ³)	ガスト影響係数 G (—)	設計用速度圧 q (N/m ²)
100	1.22	1.0	6,100

4.2 許容限界

許容限界は、資料2-2-3の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標及び「3.2 機能維持の方針」に示す評価方針を踏まえて、評価項目ごとに設定する。

「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で設定している荷重及び荷重の組合せを含めた、評価項目ごとの許容限界を第4-6表に示す。

施設の許容限界の詳細は、計算書で評価対象部位の損傷モードを踏まえ評価項目を選定し、評価項目ごとに許容限界を定める。

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」((社)日本電気協会)及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」((社)日本電気協会)(以下「JEAG4601」という。)を準用できる施設については、JEAG4601に基づく制限値を許容限界に設定する。その他施設や衝撃荷重のみを考慮する施設については、既往の実験式に基づき許容限界を設定する。

4.2.1 建屋・構造物

(1) 許容限界の設定

a. 衝突評価

(a) 貫通 (第4-6表)

建屋・構造物の衝突による貫通評価においては、設計飛来物による衝撃荷重に対し、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、施設の最小部材厚さ又は衝突面の部材厚さを許容限界として設定する。

b. 構造強度評価

(a) 裏面剥離（第4-6表）

設計飛来物による衝撃荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する評価方針としていることを踏まえ、施設の最小部材厚さを許容限界として設定する。

(b) 転倒及び脱落（第4-6表）

設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、構造躯体が終局状態に至らないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ、JEAG4601で示す鉄筋コンクリート耐震壁の終局せん断ひずみを基に設定した制限値を許容限界として設定する。

第4-6表 許容限界

施設分類	施設名称	荷重の組合せ	評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
					応力等の状態	限界状態	
竜巻より防護すべき施設を内包する施設	使用済燃料乾式貯蔵建屋	W_M	屋根スラブ 外壁	衝突	せん断	貫通	施設の最小部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。
				構造強度	せん断	裏面剥離によるコンクリート片の飛散	施設の最小部材厚さが裏面剥離限界厚さ以上とする。
		$F_d + W_{T2}$	耐震壁	構造強度	せん断	部材の破断による部材自体の転倒及び脱落	JEAG4601で示す鉄筋コンクリート耐震壁の終局せん断ひずみを基に設定した制限値以下とする。
		W_M	スライディングドア	衝突	せん断	貫通	施設の衝突面の部材厚さが貫通限界厚さ以上とする。

5. 強度評価方法

評価手法は、適用性に留意の上、規格及び基準類や既往の文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とし、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参照して、設計竜巻による荷重は地震荷重と同様に施設に作用する場合は、地震荷重と同様に外力として評価をするため、JEAG4601を適用可能とする。

風圧力による荷重の影響を考慮する施設については、建築基準法施行令等に基づき風圧力による荷重を考慮し、設備の受圧面に対して等分布荷重として扱って良いことから、評価上高さの1/2または荷重作用点より高い重心位置に集中荷重として作用するものとする。

設計竜巻による荷重が作用する場合に強度評価を行う施設のうち、強度評価方法として、定式化された評価式を用いた解析法を以下に示す。ただし、定式化された評価式を用いない場合の解析法については、個別計算書にその強度評価方法を含めて記載する。

5.1 建屋・構造物に関する評価式

5.1.1 鉄筋コンクリート造構造物

(1) 評価条件

- a. 貫通限界厚さは、NEI07-13に示されているDegen式を用いて算定する。
Degen式における貫入深さは、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている修正NDRC式を用いて算定する。
- b. 裏面剥離限界厚さは、NEI07-13に示されているChang式を用い算定する。
- c. 荷重は力学における標準式を用いて算出する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を第5-1表に示す。

第5-1表 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
屋根スラブ、外壁	・貫通（せん断） ・裏面剥離（せん断）
耐震壁	・転倒及び脱落（せん断）

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

Degen式による貫入限界厚さの算定に用いる記号を第5-2表に、修正NDRC式による貫入深さの算定に用いる記号を第5-3表に、Chang式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号を第5-4表に、力学における標準式による荷重の算定に用いる記号を第5-5表に示す。

第5-2表 Degen式による貫入限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	cm	設計飛来物直径
e	cm	貫通限界厚さ（コンクリート）
X	cm	貫入深さ
α_e	—	低減係数

第5-3表 修正NDRC式による貫入深さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	cm	設計飛来物直径
D	kgf/cm ³	設計飛来物直径密度 $D=W/d^3$
F_c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度
N	—	設計飛来物の形状係数
V	m/s	設計飛来物の衝突速度
W	kgf	設計飛来物重量
X	cm	貫入深さ

第5-4表 Chang式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	cm	設計飛来物直径
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度
S	cm	裏面剥離限界厚さ
V	cm/s	設計飛来物の衝突速度
V_0	cm/s	飛来物基準速度
W	kgf	設計飛来物重量
α_s	—	低減係数

第5-5表 力学における標準式による荷重の算定に用いる記号

記号	単位	定義
F_m	N	設計飛来物による衝撃荷重
L_1	m	設計飛来物の最も短い辺の全長
m	kg	設計飛来物の質量
V	m/s	設計飛来物の衝突速度
τ	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間

b. 評価方法

(a) Degen式による貫通限界厚さの算定

Degen式を以下に示す。

1. $52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合

$$e = \alpha_e \{0.69 + 1.29(X/d)\} \cdot d$$

1. $52 \geq X/d$ の場合

$$e = \alpha_e \{2.2(X/d) - 0.3(X/d)^2\} \cdot d$$

修正NDRC式を以下に示す。

$X/d \leq 2.0$ の場合

$$X/d = 2 \left\{ (12,145/\sqrt{Fc}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1,000)^{1.8} \right\}^{0.5}$$

$X/d \geq 2.0$ の場合

$$X/d = (12,145/\sqrt{Fc}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1,000)^{1.8} + 1$$

(b) Chang式による裏面剥離限界厚さの算定

Chang式を以下に示す。

$$S = 1.84 \alpha_s \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left(\frac{W \cdot V^2}{980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

(c) 力学における標準式による荷重の算定

4. 設計飛来物による衝撃荷重

$$F_m = m \cdot V / \tau = m \cdot V^2 / L_1$$

5.1.2 鋼製構造物

(1) 評価条件

- a. 飛来物が竜巻の影響を考慮する施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」で用いられているBRL式を用いて算出する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を第5-6表に示す。

第5-6表 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	評価内容
スライディングドア	貫通（せん断）

(3) 強度評価方法

a. 記号の定義

BRL式による貫入限界厚さの算定に用いる記号を第5-7表に示す。

第5-7表 BRL式による貫入限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
A	mm ²	設計飛来物の諸元から算出される等価面積
d	cm	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	設計飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ
V	m/s	設計飛来物の衝突速度

b. 評価方法

(a) BRL式による貫通限界厚さの算定

BRL式を以下に示す。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

4. 等価直径

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

6. 適用規格

適用する規格、基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針（平成2年8月30日原子力安全委員会）
- ・ 建築物荷重指針・同解説（（社）日本建築学会、2004改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会、2005制定）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ ISES 7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月 高温構造安全技術研究組合）
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書

目 次

	頁
1. 概要	資10 別添1-2-1
2. 基本方針	資10 別添1-2-2
2.1 位置	資10 別添1-2-2
2.2 構造概要	資10 別添1-2-3
2.3 評価方針	資10 別添1-2-11
2.4 適用規格	資10 別添1-2-13
3. 強度評価方法	資10 別添1-2-14
3.1 記号の定義	資10 別添1-2-14
3.2 評価対象部位	資10 別添1-2-16
3.3 荷重及び荷重の組合せ	資10 別添1-2-17
3.4 許容限界	資10 別添1-2-19
3.5 評価方法	資10 別添1-2-21
4. 評価条件	資10 別添1-2-25
4.1 貫通評価	資10 別添1-2-25
4.2 裏面剥離評価	資10 別添1-2-27
4.3 変形評価	資10 別添1-2-28
5. 強度評価結果	資10 別添1-2-29
5.1 貫通評価	資10 別添1-2-29
5.2 裏面剥離評価	資10 別添1-2-29
5.3 変形評価	資10 別添1-2-30

※本資料における については商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

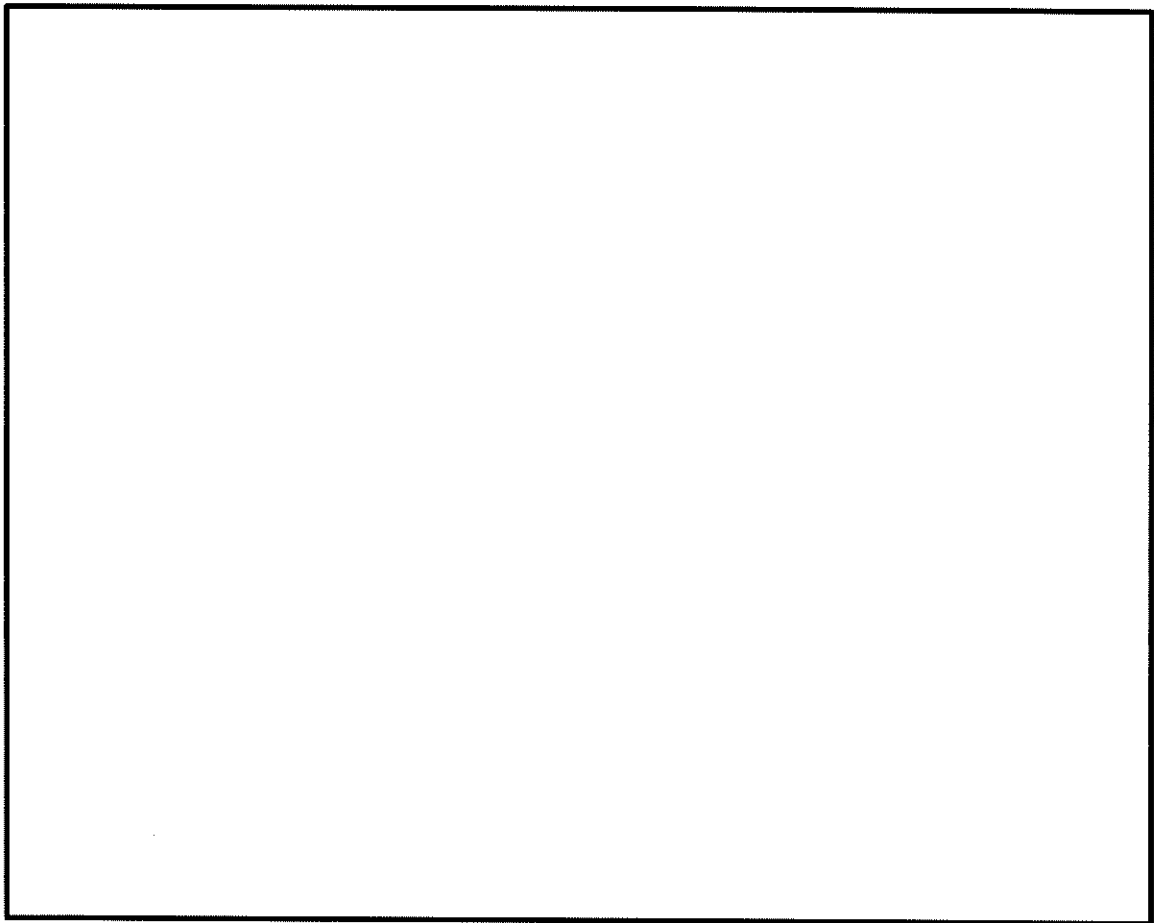
本資料は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋が、設置（変更）許可を受けた設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを計算により確認するものである。

2. 基本方針

使用済燃料乾式貯蔵建屋について、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、使用済燃料乾式貯蔵建屋の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す位置に配置する。使用済燃料乾式貯蔵建屋の配置図を第2-1図に示す。



第2-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の配置図

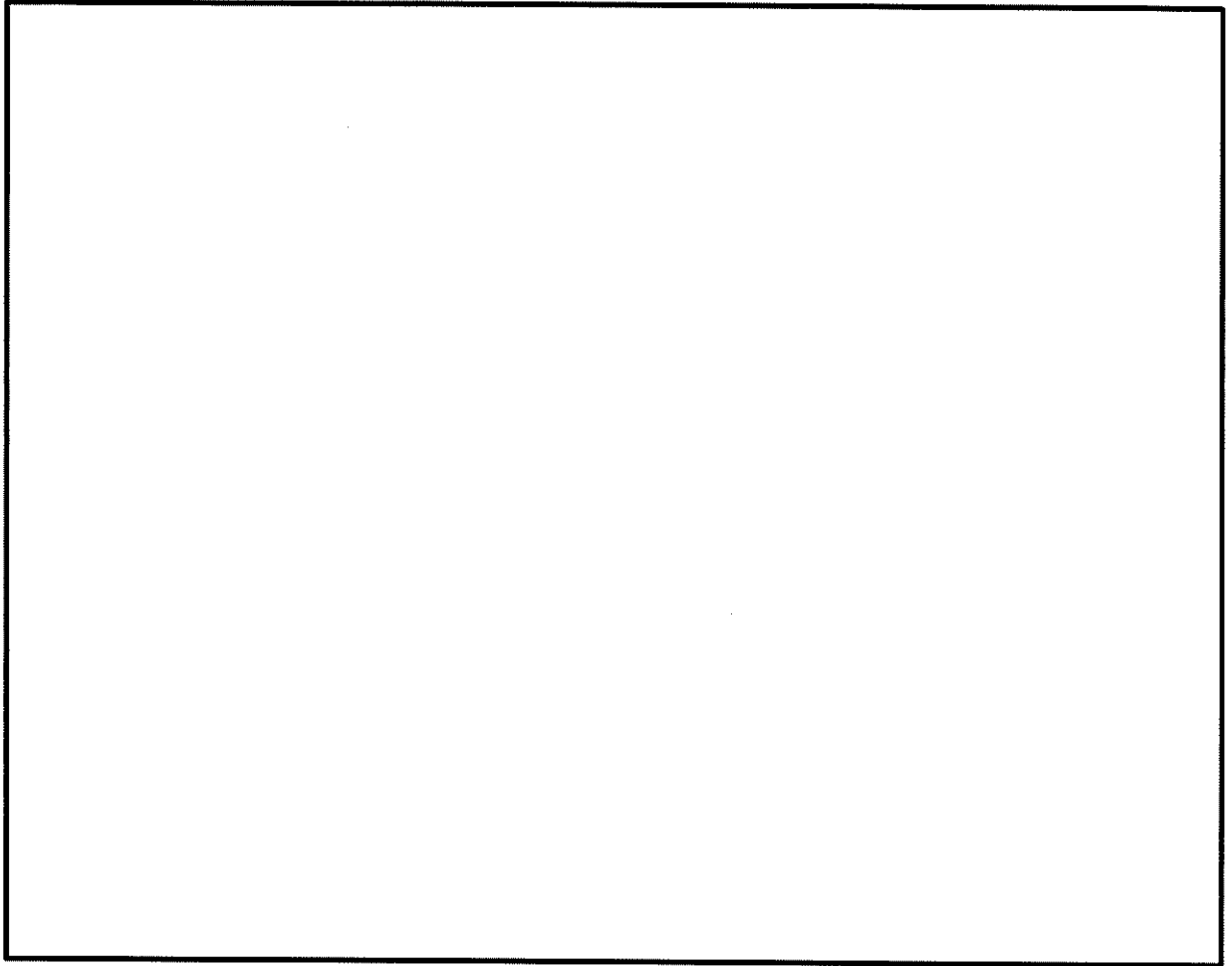
2.2 構造概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器を45基収納することができる鉄筋コンクリート造の建屋であり、外殻を構成する部材としてスライディングドアが設置されている。

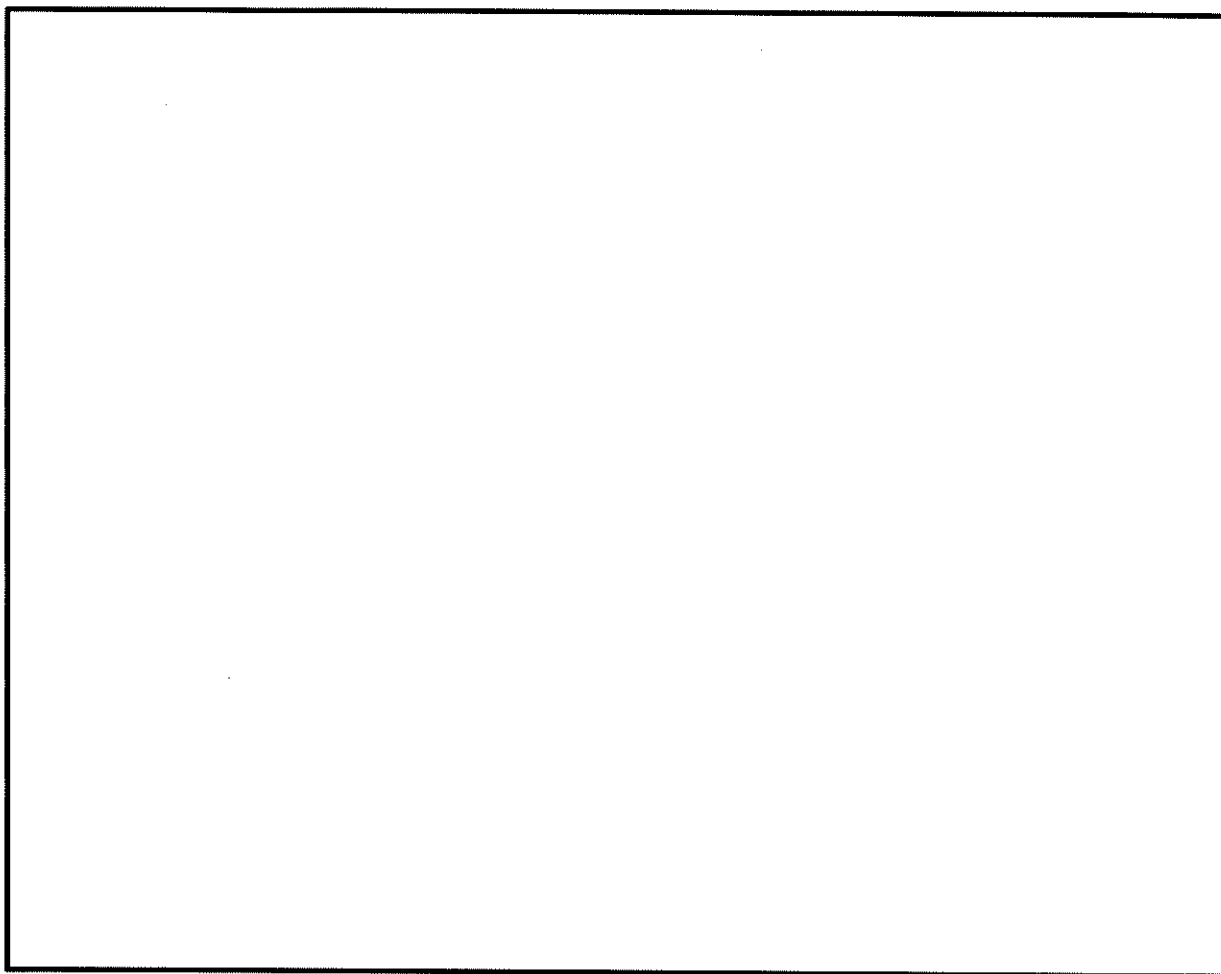
使用済燃料乾式貯蔵建屋に作用する荷重は、外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し、耐震壁を介し、直接岩盤等に支持する基礎版へ伝達する構造とする。また、使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能を維持するため、自然冷却のための給排気口を設ける。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図及び概略断面図並びにスライディングドアの概要図を第2-2図～第2-4図に示す。



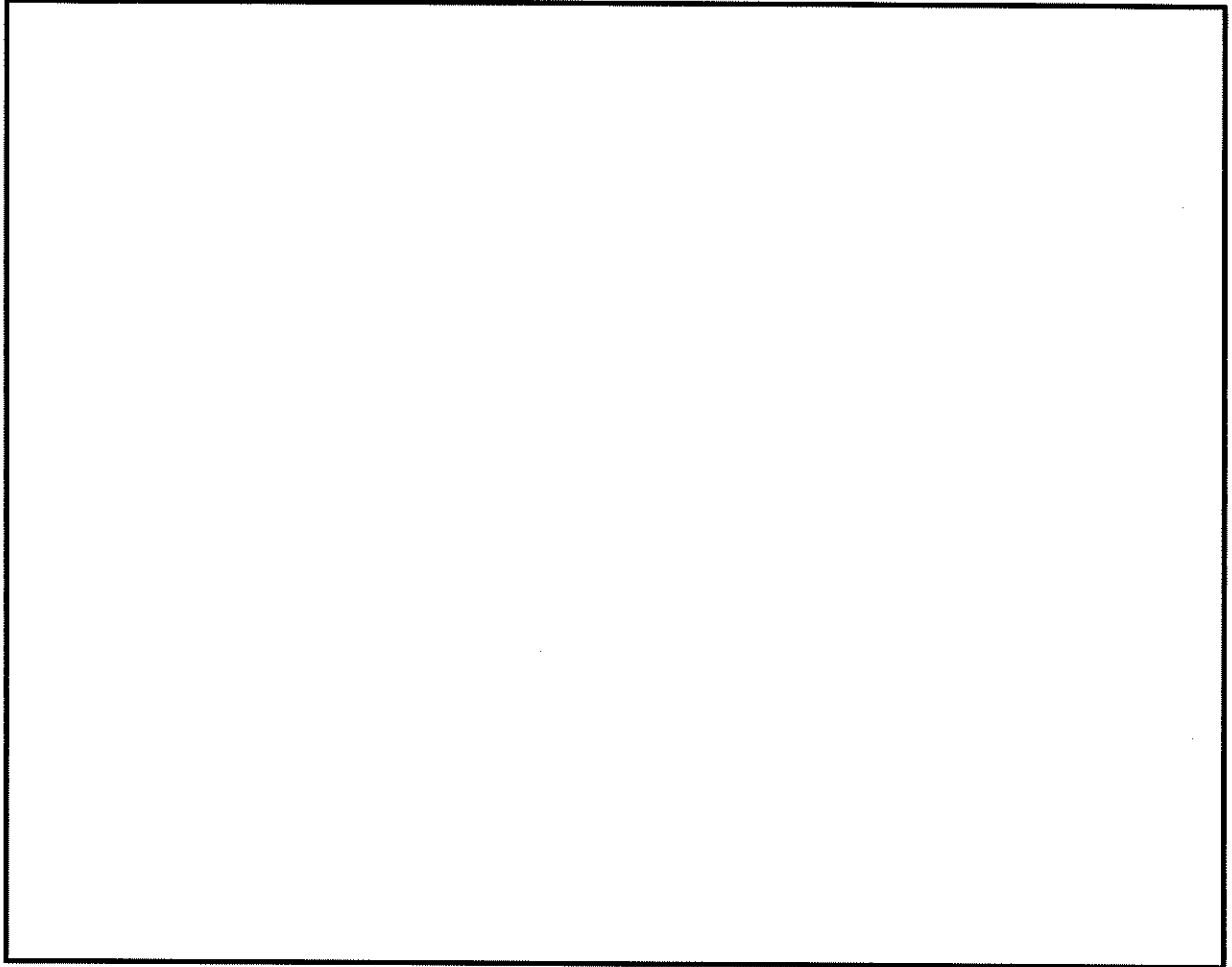
第2-2図 (1/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図



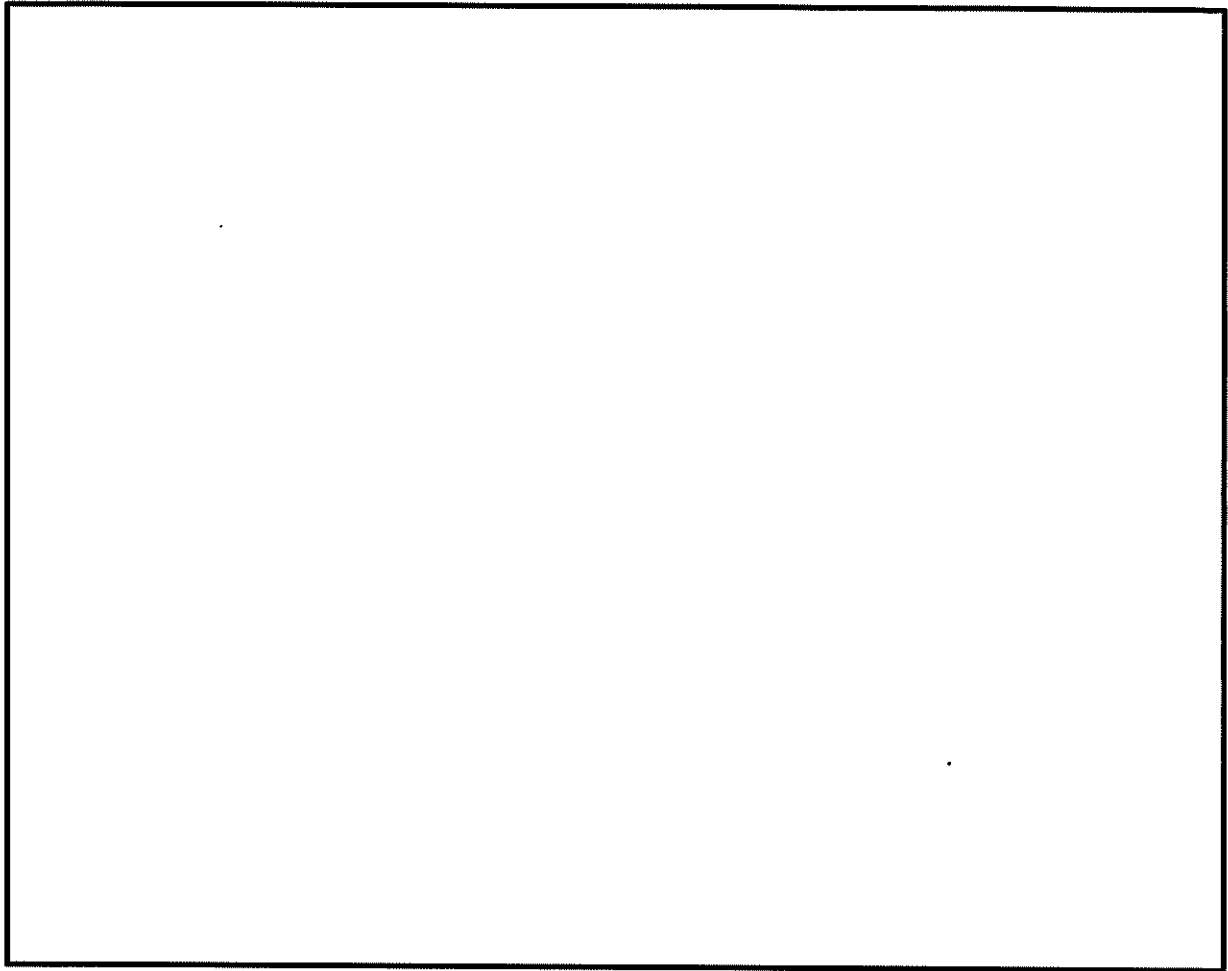


第2-2図 (2/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

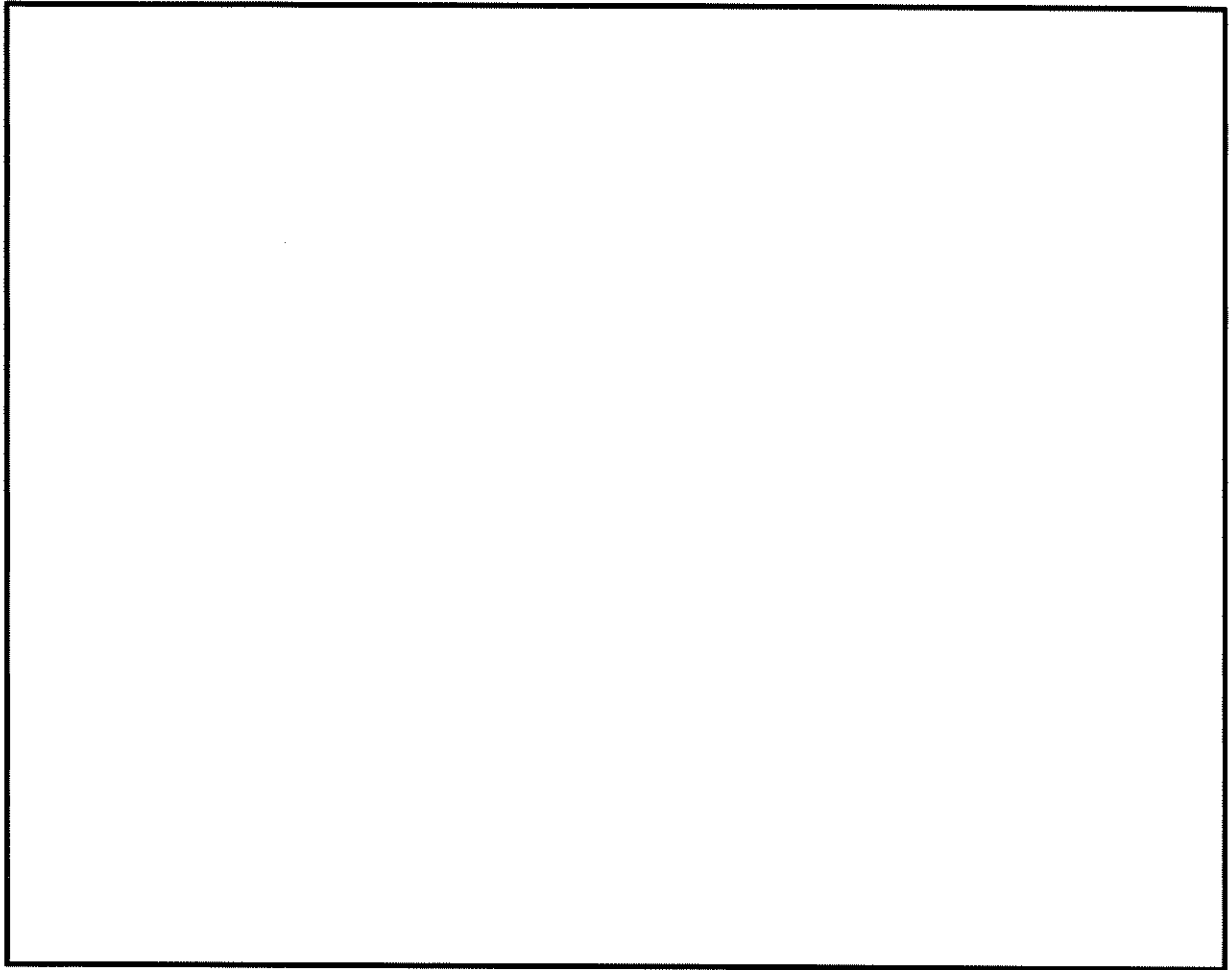




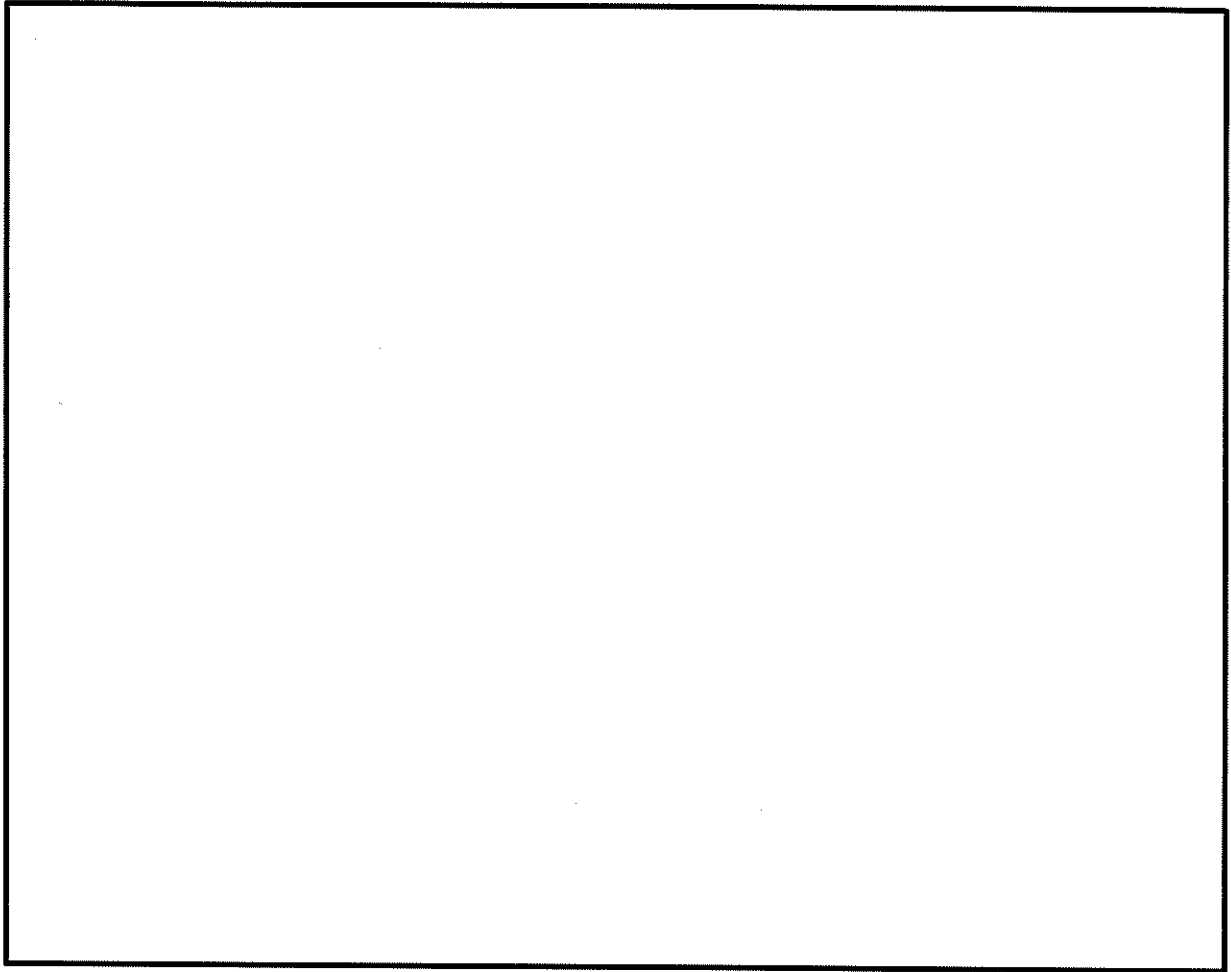
第2-2図 (3/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図



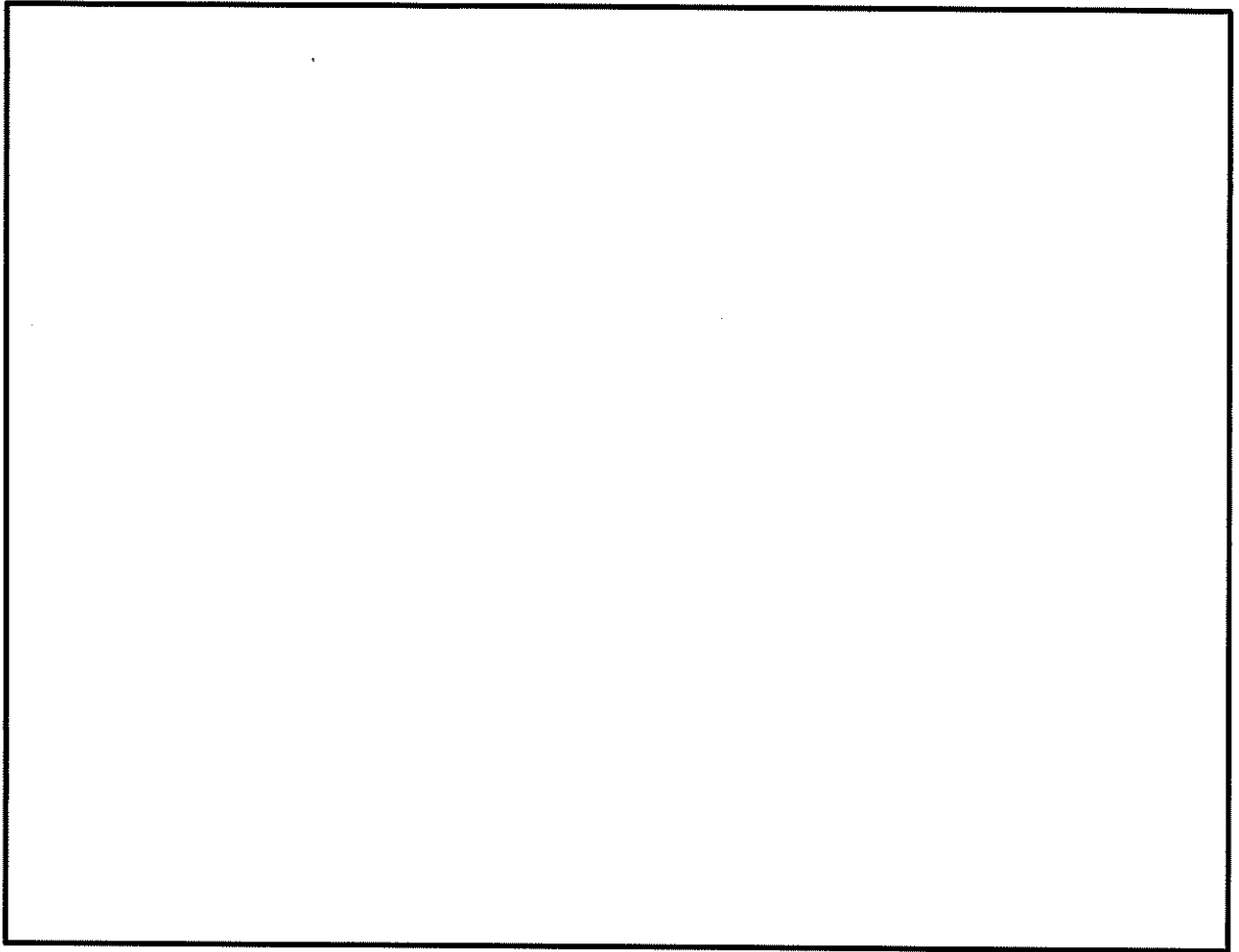
第2-3図 (1/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (A-A断面)



第2-3図 (2/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (B-B断面)



第2-3図 (3/3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図 (C-C断面)



第2-4図 スライディングドアの概要図

2.3 評価方針

使用済燃料乾式貯蔵建屋の強度評価は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材に対する「衝突評価」を行う。また、飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響並びに、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材の転倒及び脱落の影響に対する「構造強度評価」を行う。

衝突評価及び裏面剥離に係る構造強度評価において、飛来物が使用済燃料乾式貯蔵建屋の給排気口に飛来することも考慮し、給排気口のラビリンス構造を構成する壁についても外殻を構成する部材として扱う。

2.3.1 衝突評価

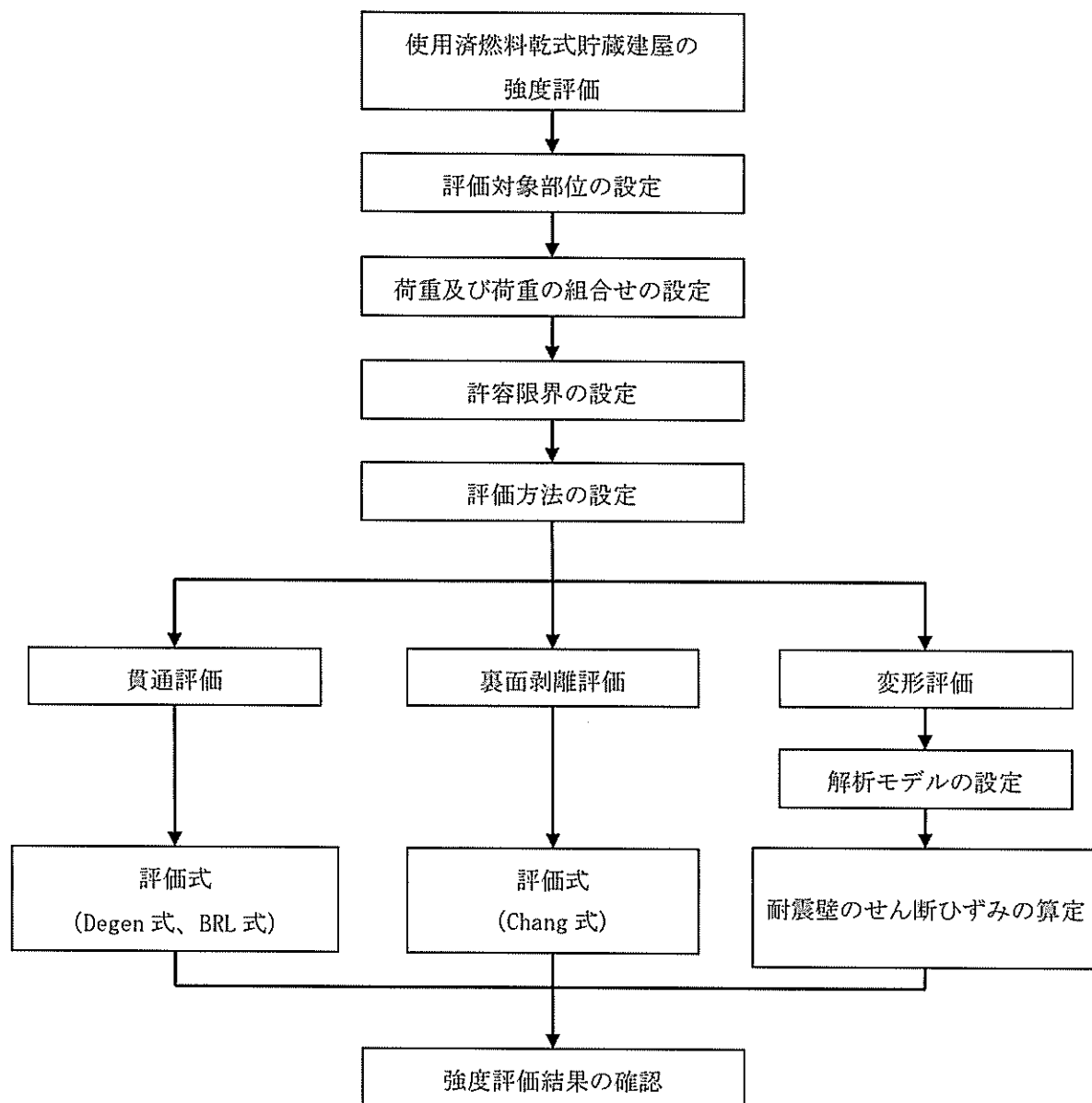
飛来物が使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、飛来物による衝撃荷重に対し、屋根スラブ、外壁及びスライディングドアが飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。（以下「貫通評価」という。）

2.3.2 構造強度評価

飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、屋根スラブ及び外壁が、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。（以下「裏面剥離評価」という。）

また、使用済燃料乾式貯蔵建屋の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計荷重に対し、構造躯体が終局状態に至らないことを解析により確認する。評価方法としては、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルを用いて算出した耐震壁のせん断ひずみが、JEAG4601で示す鉄筋コンクリート耐震壁の終局せん断ひずみを基に設定した制限値以下であることを解析により確認する。（以下「変形評価」という。）

使用済燃料乾式貯蔵建屋の設計荷重作用時の強度評価フローを第2-5図に示す。



第2-5図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の設計荷重作用時の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格、基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針（平成2年8月30日原子力安全委員会）
- ・ 建築物荷重指針・同解説（（社）日本建築学会、2004改定）
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会、2005制定）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（（社）日本電気協会）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・ ISES 7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月 高温構造安全技術研究組合）
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価に用いる記号を第3-1表～第3-3表に示す。

第3-1表 貫通評価に用いる記号(1/2) (Degen式)

記号	単位	定義	
D	kgf/cm ³	飛来物直径密度 $D=W/d^3$	
d	cm	飛来物直径	
e	cm	貫通限界厚さ (コンクリート)	
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	
N	—	飛来物の形状係数	
V	m/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
W	kgf	飛来物重量	
X	cm	貫入深さ	
α_e	—	低減係数	

第3-1表 貫通評価に用いる記号(2/2) (BRL式)

記号	単位	定義
d	cm	飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ (鋼製部材)
V	m/s	飛来物の衝突速度 (水平)

第3-2表 裏面剥離評価に用いる記号 (Chang式)

記号	単位	定義	
d	cm	飛来物直径	
f_c'	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	
S	cm	裏面剥離限界厚さ	
V	cm/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
V_0	cm/s	飛来物基準速度	
W	kgf	飛来物重量	
α_s	—	低減係数	

第3-3表 変形評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
C	—	風力係数
G	—	ガスト影響係数
L_1	m	飛来物の最も短い辺の全長
m	kg	飛来物の質量
q	N/m ²	設計用速度圧
V	m/s	飛来物の衝突速度 (水平)
τ	s	飛来物と被衝突体の接触時間

3.2 評価対象部位

使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価対象部位は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。

3.2.1 貫通評価

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、屋根スラブ、外壁及びスライディングドアを評価対象部位として設定する。

3.2.2 裏面剥離評価

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離を生じないことの確認において、屋根スラブ及び外壁を評価対象部位として設定する。

3.2.3 変形評価

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落が生じないことの確認において、耐震壁を評価対象部位として設定する。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組み合わせは、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

3.3.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を、以下に示す。

(1) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、下式により算定する。

風力係数 C は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

(2) 飛来物による衝撃荷重 (W_H)

飛来物による衝撃荷重 W_H については、第3-4表に示す飛来物の衝突に伴う荷重としている。

第3-4表 飛来物の諸元

飛来物	長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	57	38
乗用車	4.6×1.6×1.4	2,000	47	32

(3) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 F_d として、自重及び上載荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて、設計竜巻荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを第3-5表に示す。

第3-5表 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位	荷重の組合せ	
貫通評価	屋根スラブ及び外壁	W_M	
	スライディングドア	W_M	
裏面剥離評価	屋根スラブ及び外壁	W_M	
変形評価	耐震壁	複合荷重 W_{T2}	$W_W + W_M + F_d$

W_W : 風圧力による荷重 W_M : 飛来物による衝撃荷重 F_d : 常時作用する荷重

3.4 許容限界

使用済燃料乾式貯蔵建屋の許容限界は、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界を踏まえて、評価対象部位ごとに、評価内容に応じて設定する。

3.4.1 貫通評価

屋根スラブ及び外壁の貫通に対する許容限界は、最小部材厚さとする。

スライディングドアの貫通に対する許容限界は、スライディングドアの衝突面の部材厚さとする。

貫通評価の許容限界を第3-6表に示す。

第3-6表 貫通評価の許容限界

		許容限界
		部材厚さ (mm)
貫通評価	屋根スラブ	
	外壁	
	スライディングドア	

3.4.2 裏面剥離評価

屋根スラブ及び外壁の裏面剥離に対する許容限界は、最小部材厚さとする。

裏面剥離評価の許容限界を第3-7表に示す。

第3-7表 裏面剥離評価の許容限界

		許容限界
		部材厚さ (mm)
裏面剥離評価	屋根スラブ	
	外壁	

3.4.3 変形評価

耐震壁の変形に対する許容限界は、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」((社)日本電気協会)で示す鉄筋コンクリート耐震壁の終局せん断ひずみを基に設定した制限値を許容限界として設定する。

変形評価の許容限界を第3-8表に示す。

第3-8表 変形評価の許容限界

		許容限界
		せん断ひずみ
変形評価	耐震壁	2.0×10^{-3}

3.5 評価方法

3.5.1 貫通評価

(1) 屋根スラブ及び外壁

貫通限界厚さ e を、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すDegen式を用いて算出し、許容限界を超えないことを確認する。

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$ の場合

$$e = \alpha_e \{0.69 + 1.29 (X/d)\} \cdot d$$

$1.52 \geq X/d$ の場合

$$e = \alpha_e \{2.2 (X/d) - 0.3 (X/d)^2\} \cdot d$$

ここで、貫入深さ(X)は、

$X/d \leq 2.0$ の場合

$$X/d = 2 \{ (12,145 / \sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1,000)^{1.8} \}^{0.5}$$

$X/d \geq 2.0$ の場合

$$X/d = (12,145 / \sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1,000)^{1.8} + 1$$

(2) スライディングドア

貫通限界厚さ T を、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すBRL式を用いて算出し、許容限界を超えないことを確認する。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

3.5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さ S を、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すChang式を用いて算定し、許容限界を超えないことを確認する。

$$S = 1.84 \alpha_s \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left(\frac{W \cdot V^2}{980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

3.5.3 変形評価

設計荷重により耐震壁に発生するせん断ひずみを算定し、許容限界を超えないことを確認する。

耐震壁のせん断ひずみは、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルを用いて算出する。解析には、解析コード「TDAPⅢ」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

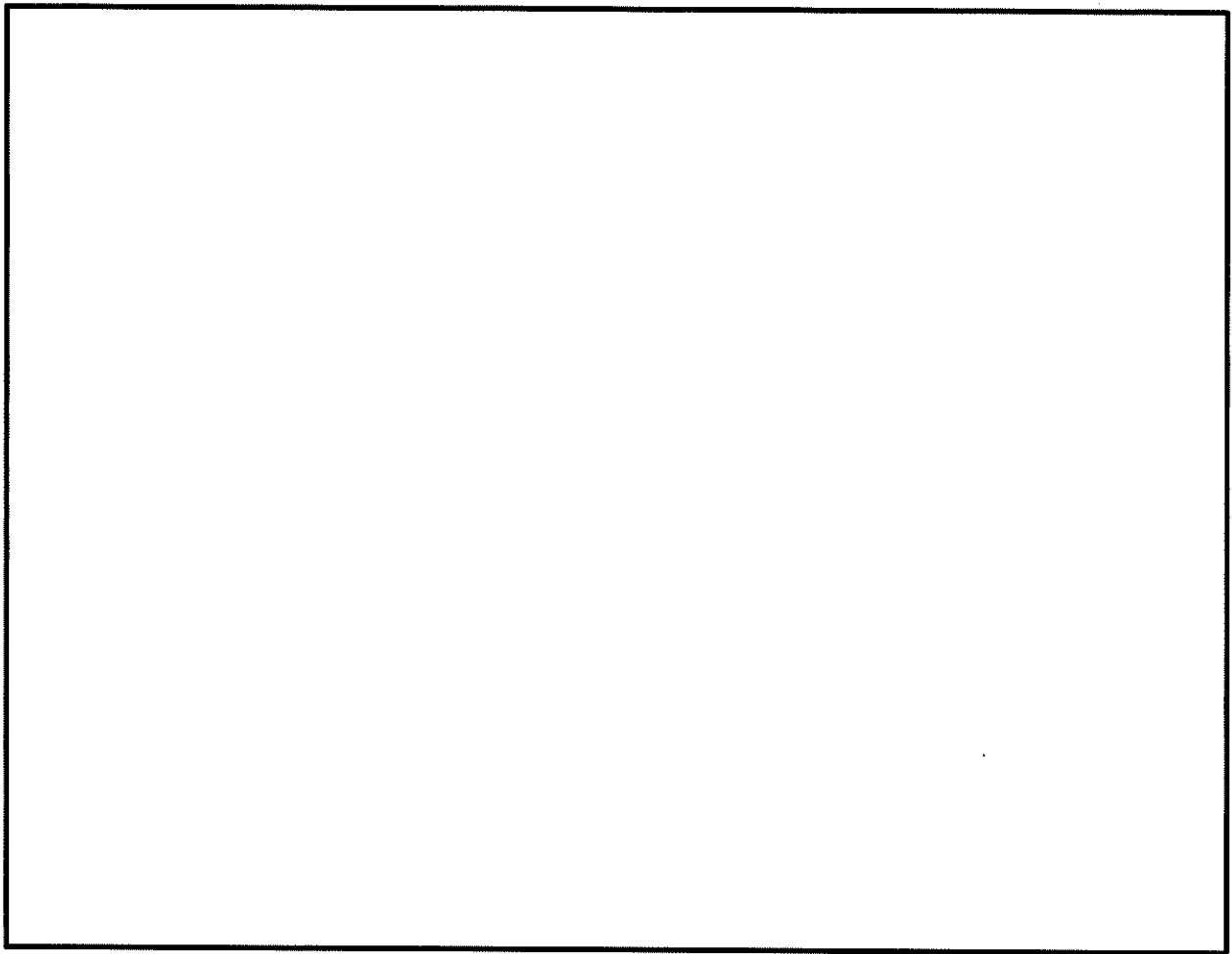
荷重組合せは、風圧力による荷重 W_w 、飛来物による衝撃荷重 W_M 及び常時作用する荷重 F_d を考慮する。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の解析モデル図を第3-1図、せん断スケルトンカーブ（Q- γ 関係）を第3-9表に示す。解析モデル及びせん断スケルトンカーブ（Q- γ 関係）の詳細は、資料9-12-1「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析」による。

設計荷重のうち、風圧力による荷重 W_w は、使用済燃料乾式貯蔵建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算定する。

飛来物による衝撃荷重 W_M は、飛来物と被衝突体の接触時間を設定し、飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重による力積が等しいものとして算定した静的な飛来物による衝撃荷重 F_m を、最上部である質点番号1に作用させる。飛来物による衝撃荷重の算定式を以下に示す。

$$W_M = F_m = m \cdot V / \tau = m \cdot V^2 / L_1$$



第3-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の解析モデル図

第3-9表 (1/2) せん断スケルトンカーブ (Q- γ 関係) (EW方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	Q ₁ (kN)	γ_1	Q ₂ (kN)	γ_2	Q ₃ (kN)	γ_3
1	3.50×10^5	1.75×10^{-4}	4.73×10^5	5.24×10^{-4}	9.59×10^5	4.00×10^{-3}
2	3.82×10^5	1.79×10^{-4}	5.16×10^5	5.36×10^{-4}	1.03×10^6	4.00×10^{-3}
3	5.51×10^5	1.83×10^{-4}	7.44×10^5	5.49×10^{-4}	1.47×10^6	4.00×10^{-3}
4	5.44×10^5	1.88×10^{-4}	7.34×10^5	5.65×10^{-4}	1.42×10^6	4.00×10^{-3}
5	5.45×10^5	1.95×10^{-4}	7.36×10^5	5.84×10^{-4}	1.39×10^6	4.00×10^{-3}

第3-9表 (2/2) せん断スケルトンカーブ (Q- γ 関係) (NS方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	Q ₁ (kN)	γ_1	Q ₂ (kN)	γ_2	Q ₃ (kN)	γ_3
1	2.78×10^5	1.75×10^{-4}	3.75×10^5	5.24×10^{-4}	7.80×10^5	4.00×10^{-3}
2	3.20×10^5	1.79×10^{-4}	4.32×10^5	5.36×10^{-4}	8.86×10^5	4.00×10^{-3}
3	5.36×10^5	1.83×10^{-4}	7.24×10^5	5.49×10^{-4}	1.41×10^6	4.00×10^{-3}
4	5.44×10^5	1.88×10^{-4}	7.35×10^5	5.65×10^{-4}	1.40×10^6	4.00×10^{-3}
5	5.48×10^5	1.95×10^{-4}	7.40×10^5	5.84×10^{-4}	1.38×10^6	4.00×10^{-3}

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 貫通評価

屋根スラブ、外壁及びスライディングドアの評価に用いる条件を第4-1表～第4-3表に示す。

第4-1表 屋根スラブの貫通評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値	単位
α_e	低減係数	鋼製材	1.0	—
		乗用車	0.65	—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6	cm
		乗用車	169	cm
F_c	コンクリートの設計基準強度		305	kgf/cm ²
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14	—
		乗用車	0.72	—
D	飛来物直径密度 W/d^3	鋼製材	0.00639	kgf/cm ³
		乗用車	0.000415	kgf/cm ³
W	飛来物重量	鋼製材	135	kgf
		乗用車	2,000	kgf
V	飛来物の衝突速度（鉛直）	鋼製材	38	m/s
		乗用車	32	m/s

第4-2表 外壁の貫通評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値	単位
α_e	低減係数	鋼製材	1.0	—
		乗用車	0.65	—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6	cm
		乗用車	169	cm
F_c	コンクリートの設計基準強度		305	kgf/cm ²
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14	—
		乗用車	0.72	—
D	飛来物直径密度 W/d^3	鋼製材	0.00639	kgf/cm ³
		乗用車	0.000415	kgf/cm ³
W	飛来物重量	鋼製材	135	kgf
		乗用車	2,000	kgf
V	飛来物の衝突速度（水平）	鋼製材	57	m/s
		乗用車	47	m/s

第4-3表 スライディングドアの貫通評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値	単位
d	飛来物の等価直径	鋼製材	7.8	cm
		乗用車	169	cm
K	鋼板の材質に関する係数		1.0	—
M	飛来物の質量	鋼製材	135	kgf
		乗用車	2,000	kgf
V	飛来物の衝突速度（水平）	鋼製材	57	m/s
		乗用車	47	m/s

4.2 裏面剥離評価

屋根スラブ及び外壁の評価に用いる条件を第4-4表、第4-5表に示す。

第4-4表 屋根スラブの裏面剥離評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値	単位
α_s	低減係数	鋼製材	1.0	—
		乗用車	0.6	
V	飛来物の衝突速度（鉛直）	鋼製材	3,800	cm/s
		乗用車	3,200	
V_0	飛来物基準速度	鋼製材	6,096	cm/s
		乗用車	6,096	
d	飛来物直径	鋼製材	27.6	cm
		乗用車	169	
f_c'	コンクリートの設計基準強度		305	kgf/cm ²
W	飛来物重量	鋼製材	135	kgf
		乗用車	2,000	

第4-5表 外壁の裏面剥離評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値	単位
α_s	低減係数	鋼製材	1.0	—
		乗用車	0.6	
V	飛来物の衝突速度（水平）	鋼製材	5,700	cm/s
		乗用車	4,700	
V_0	飛来物基準速度	鋼製材	6,096	cm/s
		乗用車	6,096	
d	飛来物直径	鋼製材	27.6	cm
		乗用車	169	
f_c'	コンクリートの設計基準強度		305	kgf/cm ²
W	飛来物重量	鋼製材	135	kgf
		乗用車	2,000	

4.3 変形評価

耐震壁の評価に用いる条件を第4-6表、第4-7表に示す。

第4-6表 使用済燃料乾式貯蔵建屋の風力係数及び受圧面積

(1) EW方向

質点 番号	高さ EL. (m)	風力係数C		受圧面積A (m ²)	
		風上	風下	風上	風下
1		0.8	0.4	407	407
2		0.8	0.4	225	225
3		0.8	0.4	268	268
4		0.8	0.4	191	191
5		0.8	0.4	373	373

(2) NS方向

質点 番号	高さ EL. (m)	風力係数C		受圧面積A (m ²)	
		風上	風下	風上	風下
1		0.8	0.4	353	353
2		0.8	0.4	296	296
3		0.8	0.4	152	152
4		0.8	0.4	134	134
5		0.8	0.4	280	280

第4-7表 飛来物による衝撃荷重の評価条件^(注)

記号	記号の説明	数値	単位
L ₁	飛来物の最も短い辺の全長	1.4	m
m	飛来物の質量	2,000	kg
V	飛来物の衝突速度 (水平)	47	m/s

(注) 飛来物のうち、W₀が大きくなる乗用車を用いる。

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

貫通限界厚さと許容限界の比較を第5-1表に示す。貫通限界厚さが許容限界を超えないことを確認した。

第5-1表 評価結果（貫通評価）

評価項目	部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
貫通限界 厚さ	屋根スラブ	鋼製材		
		乗用車		
	外壁	鋼製材		
		乗用車		
	スライディングドア	鋼製材		
		乗用車		

5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さと許容限界の比較を第5-2表に示す。裏面剥離限界厚さが許容限界を超えないことを確認した。

第5-2表 評価結果（裏面剥離評価）

評価項目	部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
裏面剥離 限界厚さ	屋根スラブ	鋼製材		
		乗用車		
	外壁	鋼製材		
		乗用車		

5.3 変形評価

耐震壁のせん断ひずみと許容限界の比較を第5-3表に示す。せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。

第5-3表 評価結果（耐震壁の変形評価）

(1) EW方向

評価項目	質点番号	評価結果 ($\times 10^{-3}$)	許容限界
せん断ひずみ	1	0.0031	2.0×10^{-3}
	2	0.0037	
	3	0.0033	
	4	0.0039	
	5	0.0050	

(2) NS方向

評価項目	質点番号	評価結果 ($\times 10^{-3}$)	許容限界
せん断ひずみ	1	0.0037	2.0×10^{-3}
	2	0.0045	
	3	0.0031	
	4	0.0035	
	5	0.0043	

使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する
装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び
警報動作範囲に関する説明書

設計及び工事計画認可申請 資料11
伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資11-1
2. 乾式キャスクの密封設計	資11-2
2.1 評価基準	資11-2
2.2 密封設計概要	資11-2
2.3 密封設計評価方法	資11-3
2.4 評価条件及び評価結果	資11-6
3. 密封監視装置の構成	資11-13
3.1 密封監視装置の構成	資11-13
3.2 密封監視装置の仕様	資11-13
4. 計測範囲及び警報動作範囲	資11-18
4.1 計測範囲	資11-18
4.2 警報動作範囲	資11-19
別添1 使用済燃料貯蔵用容器の監視頻度の妥当性に関する説明書	

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）は、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができる設計とし、かつ、その機能を適切に監視できることを確認するため、密封性を監視する装置（以下、「密封監視装置」という。）を設けている。

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下、「技術基準規則」という。）第 26 条第 2 項第 6 号イ及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」の第 26 条に基づき、乾式キャスクの密封設計、密封監視装置の構成並びに計測範囲及び警報動作範囲について説明するものである。

2. 乾式キャスクの密封設計

2.1 評価基準

乾式キャスクの密封機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

- ・長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。
- ・乾式キャスク内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、乾式キャスク内部の負圧を維持できること。
- ・密封境界部の漏えい率は、上記を満たすものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。
- ・密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（乾式キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積）、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。

2.2 密封設計概要

(1) 設計方針

密封設計にあたっては、周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。

(2) 乾式キャスクの密封構造

乾式キャスクの密封境界は、第 2-1 図に示すように、胴、一次蓋、ベントバルブカバー、ドレンバルブカバー及び金属ガスケットから構成される。密封境界を構成する金属ガスケットの仕様について第 2-1 表に示す。

一次蓋の外側には第 2-2 図に示すように二次蓋及び金属ガスケットが取り付けられており、胴及び一次蓋の内部は負圧、一次蓋と二次蓋の間は正圧とすることにより、密封監視のための圧力障壁を設ける。

一次蓋と二次蓋間の圧力（以下、「蓋間圧力」という。）を密封監視装置により監視し、乾式キャスクの密封機能の健全性を確認する。

万一、一次蓋または二次蓋のいずれかの金属ガスケットに漏えいが生じた場合は蓋間圧力が低下するため、密封機能低下が検出できる。一次蓋の金属ガスケットに漏えいが生じた場合でも、胴及び一次蓋の内部の負圧は維持され、内部の気体が直接大気中に放出されることはない。

第 2-1 表 密封境界を構成する金属ガスケットの仕様

	タイプ 1			タイプ 2		
使用箇所	一次蓋	ドレンバルブカバー	ベントバルブカバー	一次蓋	ドレンバルブカバー	ベントバルブカバー
材質	アルミニウム／ニッケル基合金					
外径※						
太さ	φ 10mm			φ 10mm		

※密封境界部の中心径を記載

2.3 密封設計評価方法

(1) 評価方法

乾式キャスクの漏えい率の考え方を第 2-3 図、乾式キャスクの密封評価フローを第 2-4 図、密封評価に係る構造図を第 2-5 図に示す。

漏えい率は、シールされる流体、シール部温度及び漏えいの上流側と下流側の圧力に依存する。したがって、乾式キャスク本体内部の圧力変化は、蓋間圧力と乾式キャスク本体内部圧力の圧力差のもとで、ある漏えい率をもつシール部を通して乾式キャスク本体内部へ流入する気体の漏えい量を積分することによって得られる。

密封評価では、設計貯蔵期間（60 年）中に乾式キャスク本体内部の負圧が維持できる漏えい率を、乾式キャスクの密封評価基準となる基準漏えい率として求め、使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認する。また、基準漏えい率以下にリークテスト判定基準を設定し、貯蔵開始時のリークテストで当該判定基準より漏えい率が小さいことを確認することにより閉じ込め機能が維持される設計とする。

基準漏えい率及びリークテスト判定基準を求めるにあたっては、保守的に蓋間圧力は一定とし、蓋間空間のガスは乾式キャスク本体内部側にのみ漏えいするものとして漏えい計算を行う。また、第 2-3 図に示すように、大気圧への到達となる基準圧力は、気象変化による圧力変動を考慮した値 9.7×10^4 Pa とする。さらに、燃料破損に伴う圧力上昇を考慮することとし、使用済燃料の破損率としては、「(一社) 日本原子力学会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010」, (2010).」に基づき、米国の使用済燃料の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率（約 0.01 %）、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率（約 0.01 %以下）を考慮し、保守的な値として 0.1 %を想定する。さらに、リークテスト判定基準を求めるにあたっては、蓋間空間ガスの全量流入による圧力上昇を考慮する。

(2) 漏えい率計算手順

- a) 乾式キャスク本体内部圧力の変化は、ボイル・シャルルの法則に基づき、以下のよう求める。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{Q}{V_d} \times \frac{T_d}{T} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、

- P_d : 乾式キャスク本体内部圧力 (Pa)
 T_d : 乾式キャスク本体内部温度 (K)
 Q : 乾式キャスク本体内部圧力 P_d のときのシール部の漏えい率 (Pa・m³/s)
 T : 漏えい気体の温度 (K)
 V_d : 乾式キャスク本体内部の空間容積 (m³)
(乾式キャスク本体内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積)
 t : 時間 (s)

また、ここで漏えい率 Q は、「International Organization for Standardization, “Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages”, ISO 12807, (1996).」に基づき、以下のクヌッセンの式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot P_a \\ L &= (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d) \\ F_c &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ F_m &= \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{\frac{T}{M}}}{a \cdot P_a} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、

- Q : 漏えい率 (Pa・m³/s)
 L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (m³/s)
 F_c : 連続流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))
 F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))
 P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa)
 P_d : 下流側 (乾式キャスク本体内部) の圧力 (Pa)
 D_0 : 相当漏えい孔径 (m)
 a : 漏えい孔長 (m)
 P_a : 流れの平均圧力 (Pa)

$$P_a = \frac{P_u + P_d}{2}$$

- μ : 漏えい気体の粘性係数 (Pa・s)
 T : 漏えい気体の温度 (K)
 M : 漏えい気体の分子量 (kg/mol)
 R_0 : ガス定数 (J/(mol・K))

- b) 漏えい孔径 D_0 を設定し (2.2) の式により漏えい率 Q を求める。 Q を (2.1) の式に入力し、時間 t で積分することにより、設計貯蔵期間経過後の乾式キャスク本体内部圧力 P_d を求める。
- c) b) により求めた P_d が正圧の場合はより小さな漏えい孔径 D_0 を、負圧の場合はより大きい漏えい孔径 D_0 を設定して、a)～b) を繰り返し、 P_d が大気圧 (9.7×10^4 Pa) となる漏えい孔径 D_0 を求める。
- d) 判定基準である金属ガスケットの漏えい率と比較するため、c) により求めた D_0 を固定し、(2.2) の式に金属ガスケットの漏えい率を求めた試験条件 ($P_u = 1.01 \times 10^5$ Pa、 $P_d = 0$ Pa、 $T = 298.15$ K) を入力し、基準漏えい率 Q_s を求める。
- e) 蓋間空間ガスの全量流入による圧力上昇を考慮し、b) により求めた P_d が設計貯蔵期間経過後に大気圧となる漏えい孔径 D_t からリークテスト判定基準 Q_t を定める。

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

- ・設計貯蔵期間中において使用済燃料の崩壊熱は低下していくが、使用済燃料の崩壊熱低下による乾式キャスク本体内部温度の温度低下を考慮せず、乾式キャスク本体内部温度は初期温度で一定とする。
- ・設計貯蔵期間中において上流側（蓋間）の圧力は漏えいにより低下していくが、漏えいによる圧力低下を考慮せず、初期圧力で一定とする。

2.4 評価条件及び評価結果

密封評価の評価条件及び評価結果を第 2-2 表及び第 2-3 表に示す。使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認した。また、基準漏えい率以下にリークテスト判定基準を設定しており、これを満足することにより閉じ込め機能が維持される設計となっている。

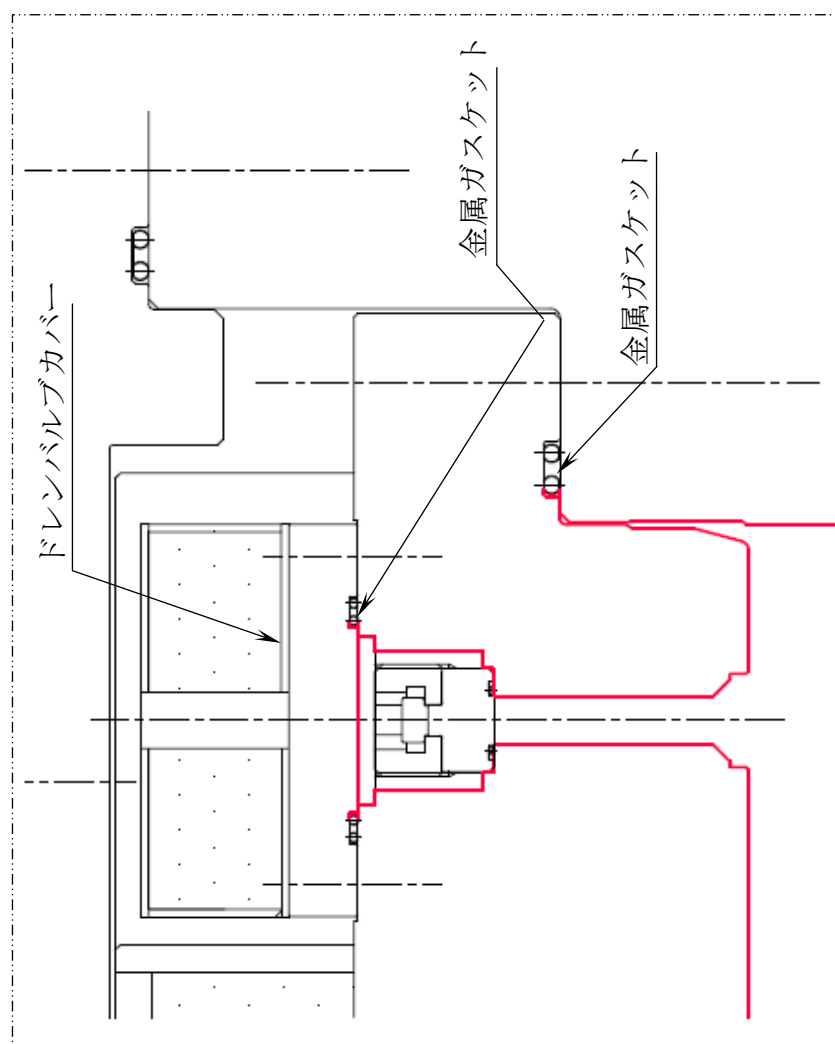
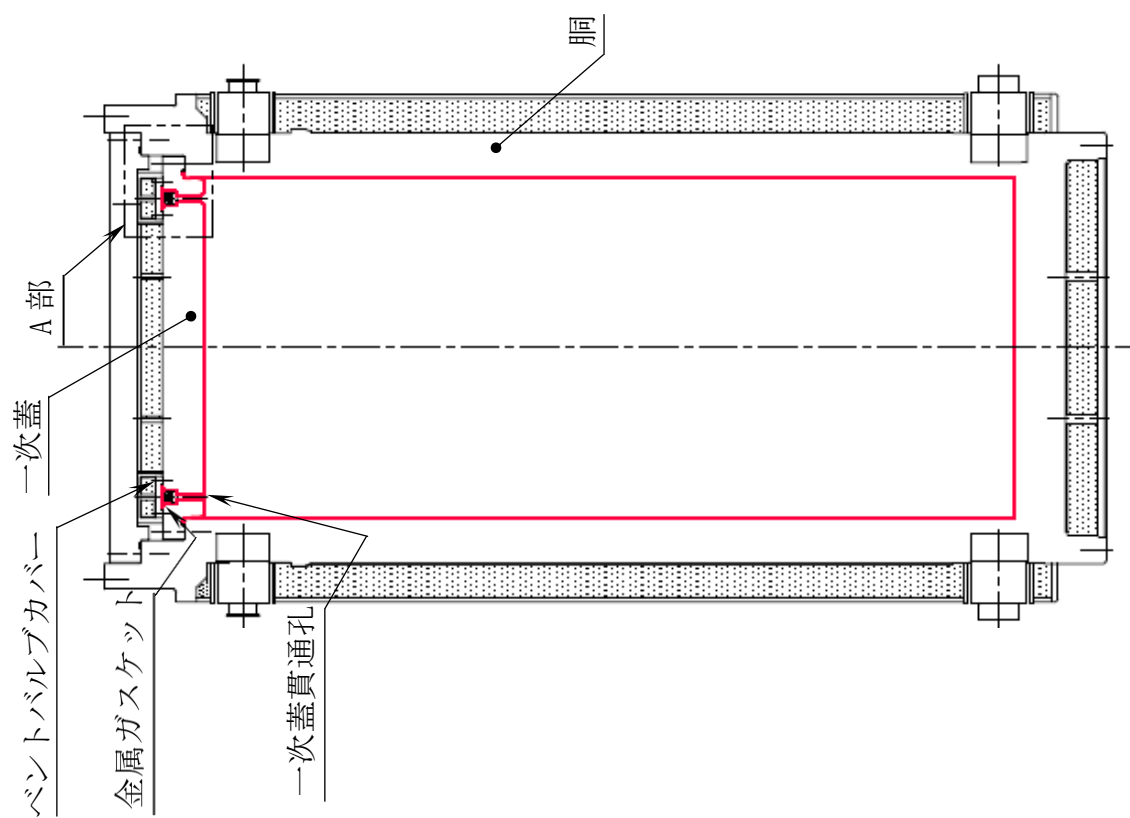
第 2-2 表 密封評価条件及び評価結果（基準漏えい率 Q_s ）

	タイプ 1	タイプ 2
D_0 : 漏えい孔径 (m)	5.57×10^{-6}	5.51×10^{-6}
a : 漏えい孔長 (m)	4.56×10^{-3}	
μ : 漏えい気体（ヘリウム）の粘性係数 (Pa・s)	1.985×10^{-5} (25°C)	
R_0 : ガス定数 (J/(mol・K))	8.3144598	
T : 漏えい気体の温度 (K)	298.15	
M : 漏えい気体（ヘリウム）の分子量 (kg/mol)	0.004002602	
P_a : 流れの平均圧力 (Pa)	5.05×10^4	
P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa)	1.01×10^5 (大気圧)	
P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa)	0 (真空)	
Q_s : 基準漏えい率 (Pa・m ³ /s)	2.58×10^{-6}	2.49×10^{-6}
Q_n : 金属ガスケットの漏えい率 (注 1)	1×10^{-8} Pa・m ³ /s 以下	

(注 1) 「“METAL SEALS TECHNICAL CATALOG”, Technetics Group. , (2017).」及び「(一財)電力中央研究所, 平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書 , (2010) .」に基づき設定

第 2-3 表 密封評価条件及び評価結果（リークテスト判定基準 Q_t ）

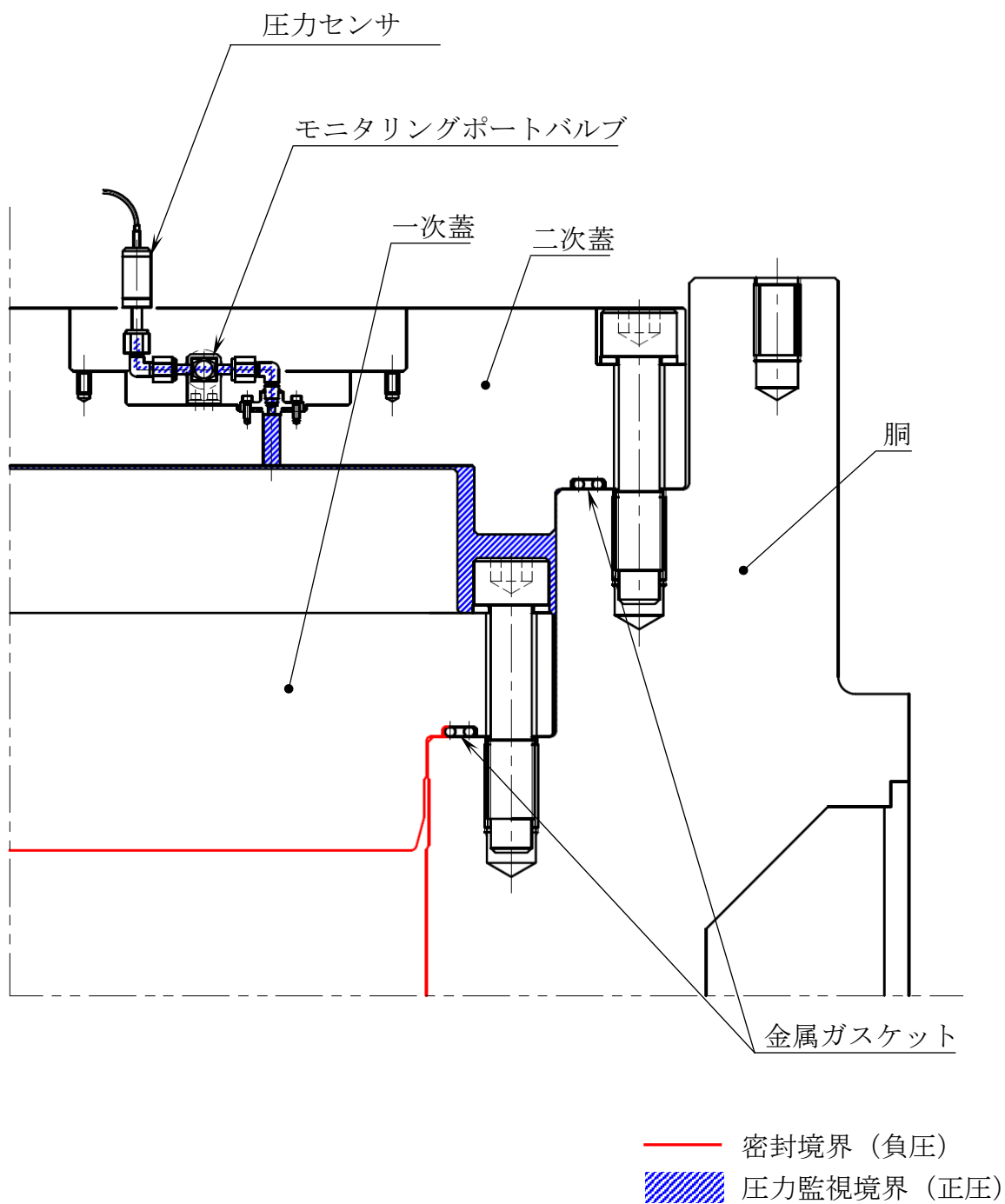
	タイプ 1	タイプ 2
D_t : 漏えい孔径 (m)	4.86×10^{-6}	4.79×10^{-6}
a : 漏えい孔長 (m)	4.56×10^{-3}	
μ : 漏えい気体（ヘリウム）の粘性係数 (Pa・s)	1.985×10^{-5} (25°C)	
R_0 : ガス定数 (J/(mol・K))	8.3144598	
T : 漏えい気体の温度 (K)	298.15	
M : 漏えい気体（ヘリウム）の分子量 (kg/mol)	0.004002602	
P_a : 流れの平均圧力 (Pa)	5.05×10^4	
P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa)	1.01×10^5 (大気圧)	
P_{d0} : 下流側の初期圧力 (Pa)	0 (真空)	
Q_t : リークテスト判定基準 (Pa・m ³ /s)	1.60×10^{-6}	1.52×10^{-6}
基準漏えい率 Q_s > リークテスト判定基準 Q_t > 金属ガスケットの漏えい率 Q_n		



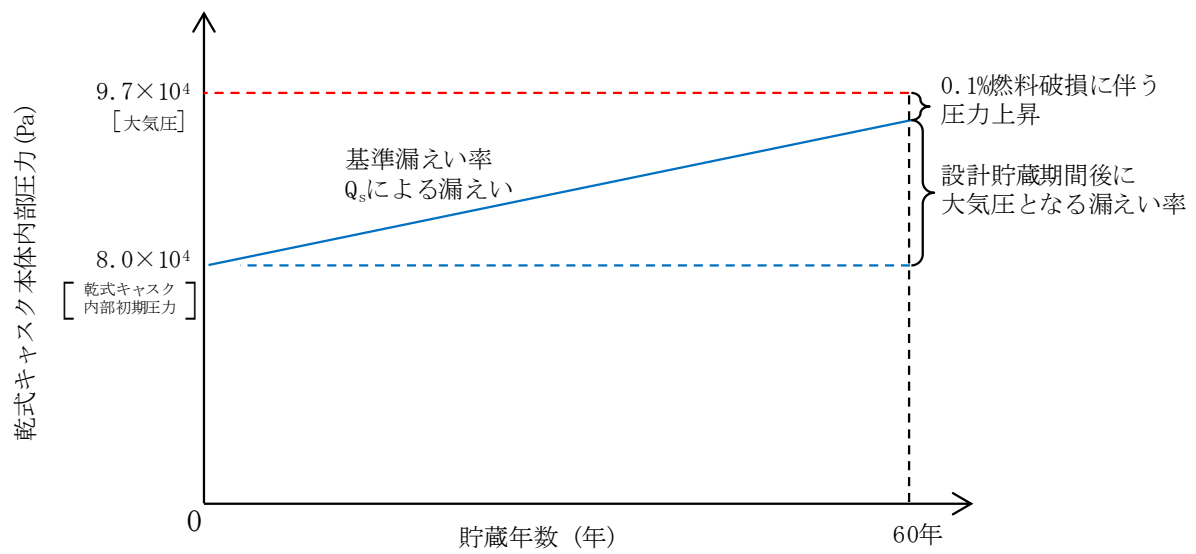
A 部詳細

密封境界

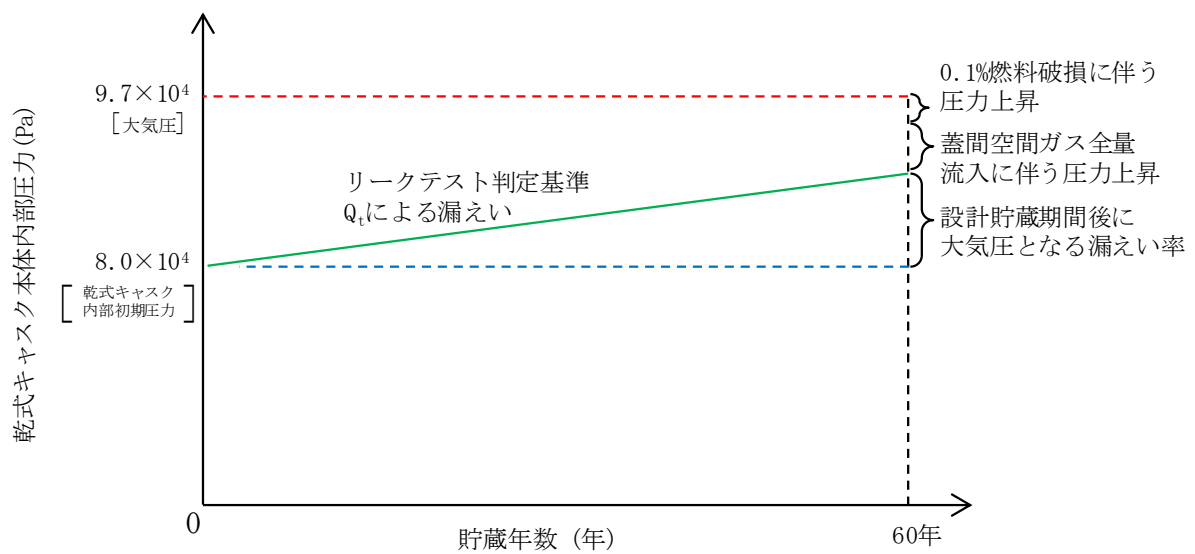
第 2-1 図 密 封 構 造



第2-2図 密 封 監 視 構 造

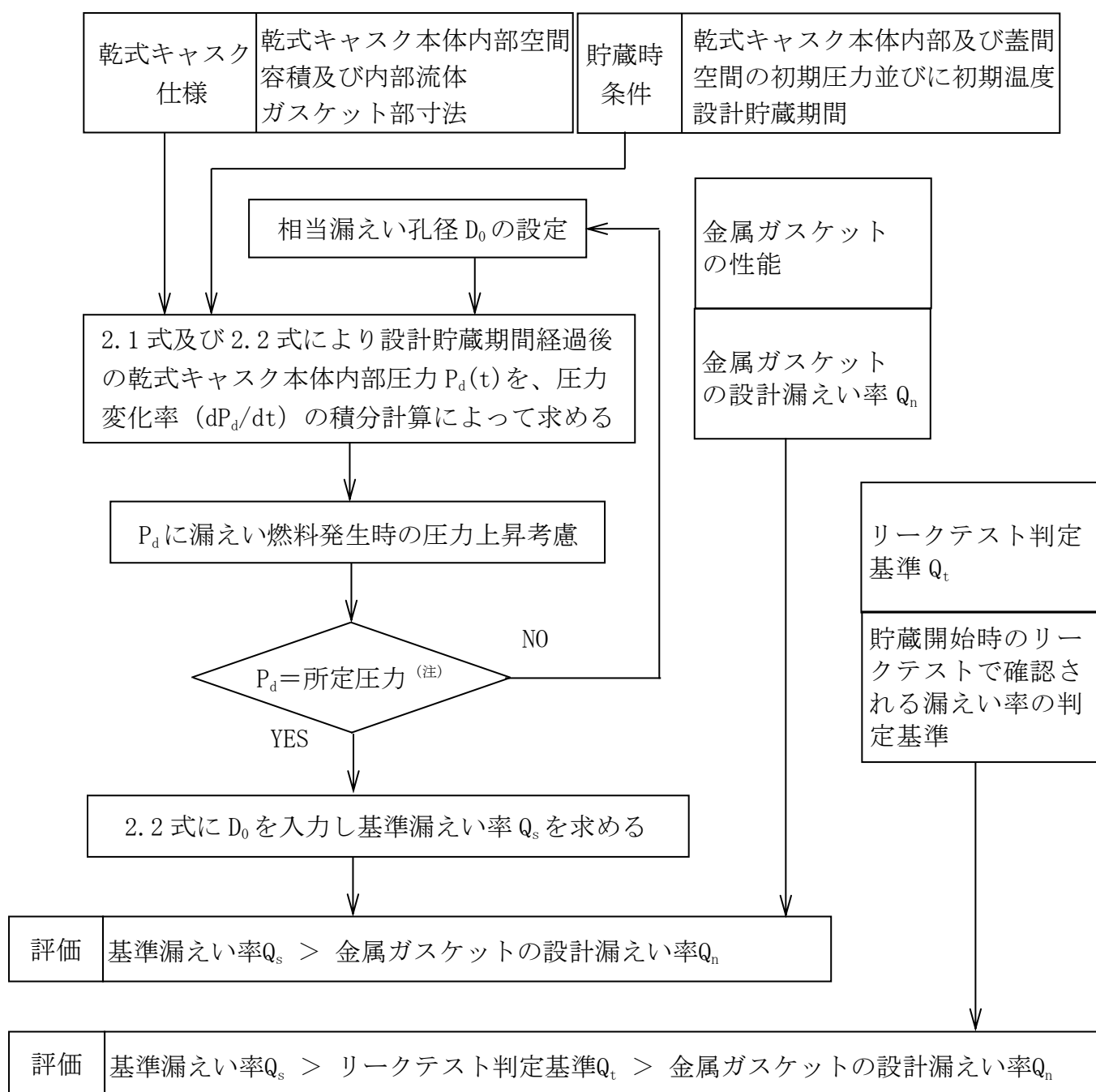


(a) 基準漏えい率による漏えい



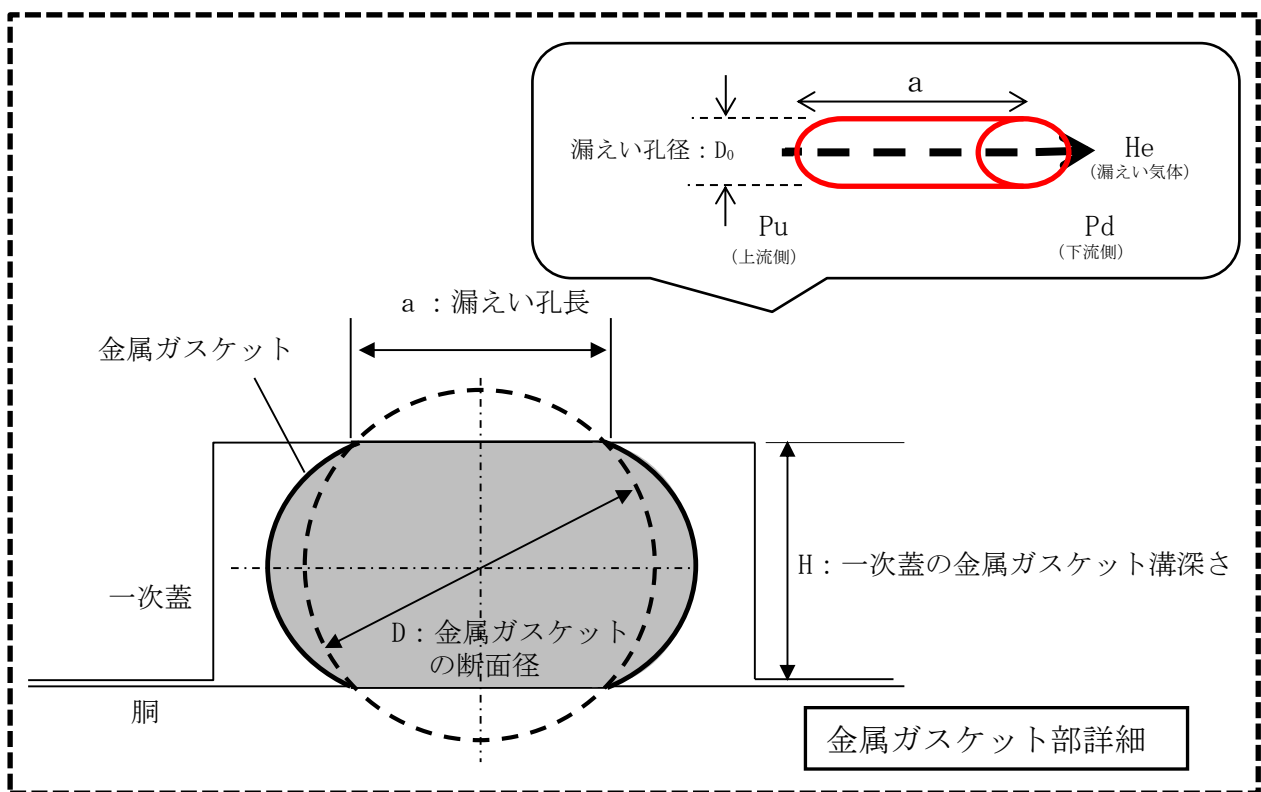
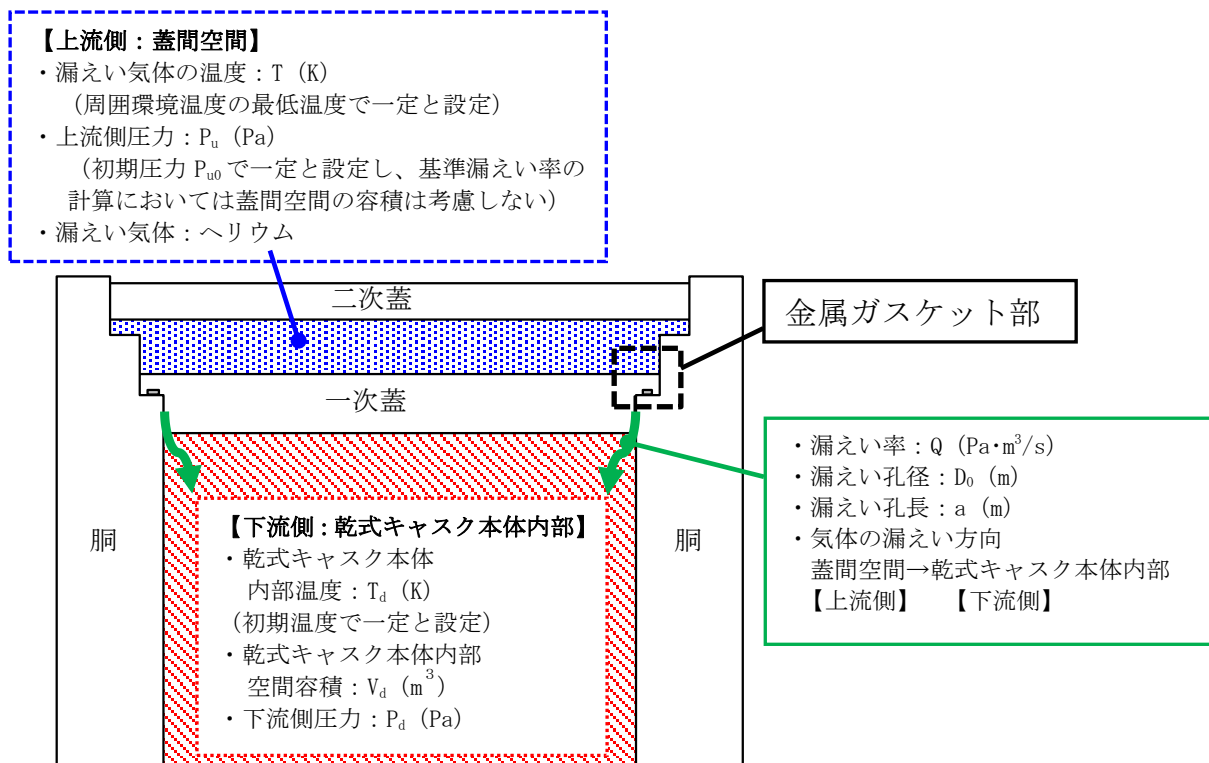
(b) リークテスト判定基準による漏えい

第 2-3 図 乾式キャスクの漏えい率の考え方



(注)所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 Pa とする。

第 2-4 図 乾式キャスクの密封評価フロー図



第 2-5 図 密封評価に係る構造図

3. 密封監視装置の構成

3.1 密封監視装置の構成

本密封監視装置は、蓋間圧力を監視することにより、乾式キャスクの密封機能を監視する装置である。

密封監視装置の構成図及び系統図を第 3-1 図及び第 3-2 図に示す。

密封監視装置の圧力検出は、弾性圧力検出器（以下、「圧力センサ」という。）により行われる。圧力センサを乾式キャスクの一次蓋、二次蓋間空間へつながる貫通孔であるモニタリングポート内のモニタリングポートバルブへ接続し、圧力センサからの電気信号をセンサケーブルを介してデータロガーにより圧力値に変換かつ表示し、蓋間圧力を検知する。

圧力センサは各乾式キャスクの蓋部に 1 個設置する。また、データロガーについては、測定できる位置に接続できるよう、可搬型のものを共用で 1 個設置する。圧力センサの取り付け位置等を第 3-3 図に、データロガーの保管場所を第 3-4 図に示す。

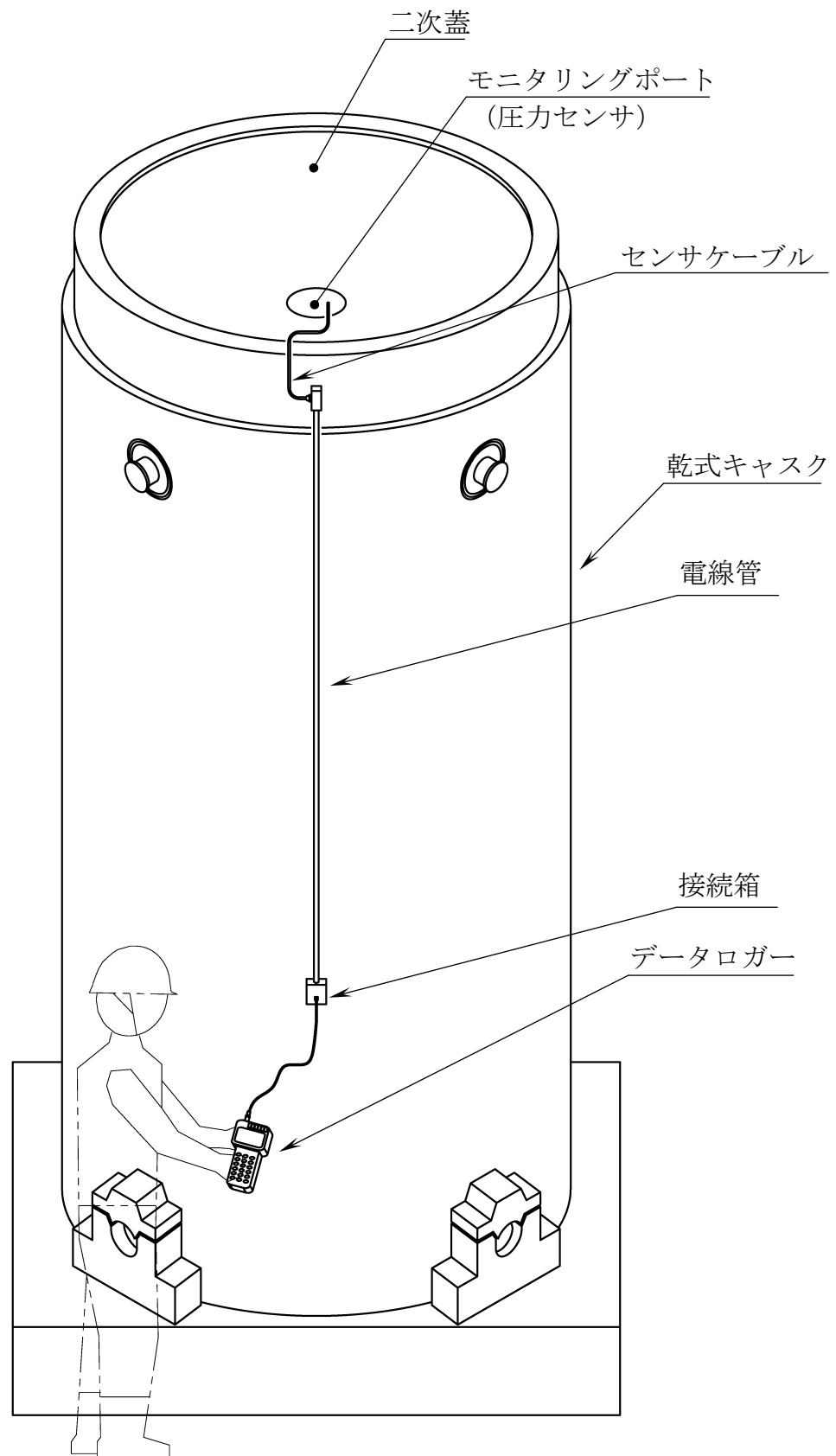
3.2 密封監視装置の仕様

密封監視装置の仕様を第 3-1 表に示す。

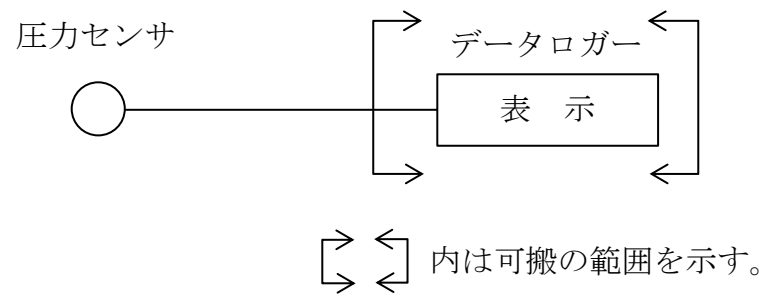
なお、蓋間圧力を正圧とすることにより密封監視のための圧力隔壁を設けるため、第 3-1 表に示す計測範囲にて蓋間圧力の監視が可能である。

第 3-1 表 密封監視装置の仕様

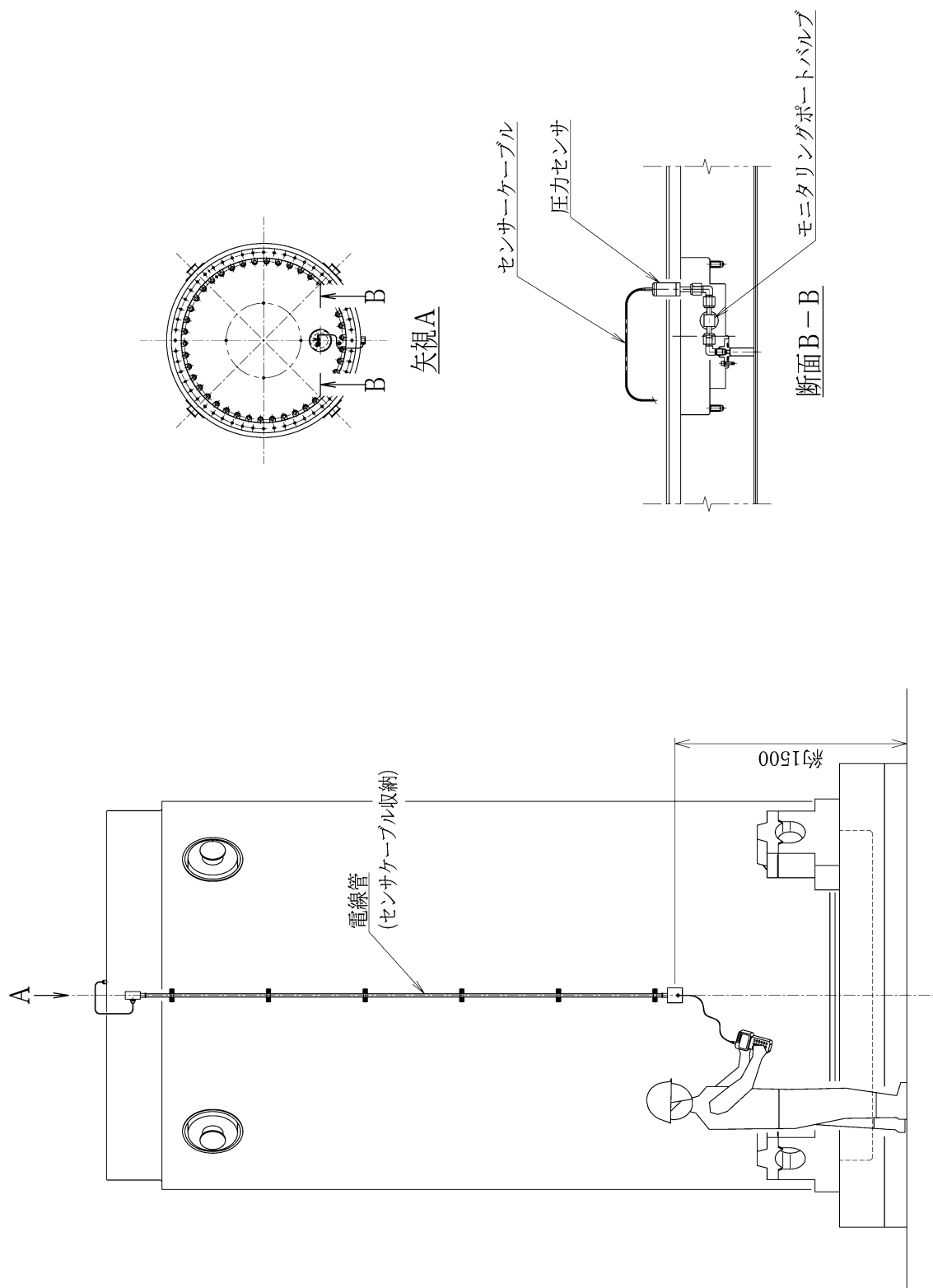
項 目	仕 様
名 称	使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力計
計 器 の 種 類	弾性圧力検出器
計器の個数（個／基）	1
計 測 対 象	蓋 間 圧 力
計 測 範 囲 （MPa）	-0.10 ～ 0.40
取 付 位 置	二 次 蓋



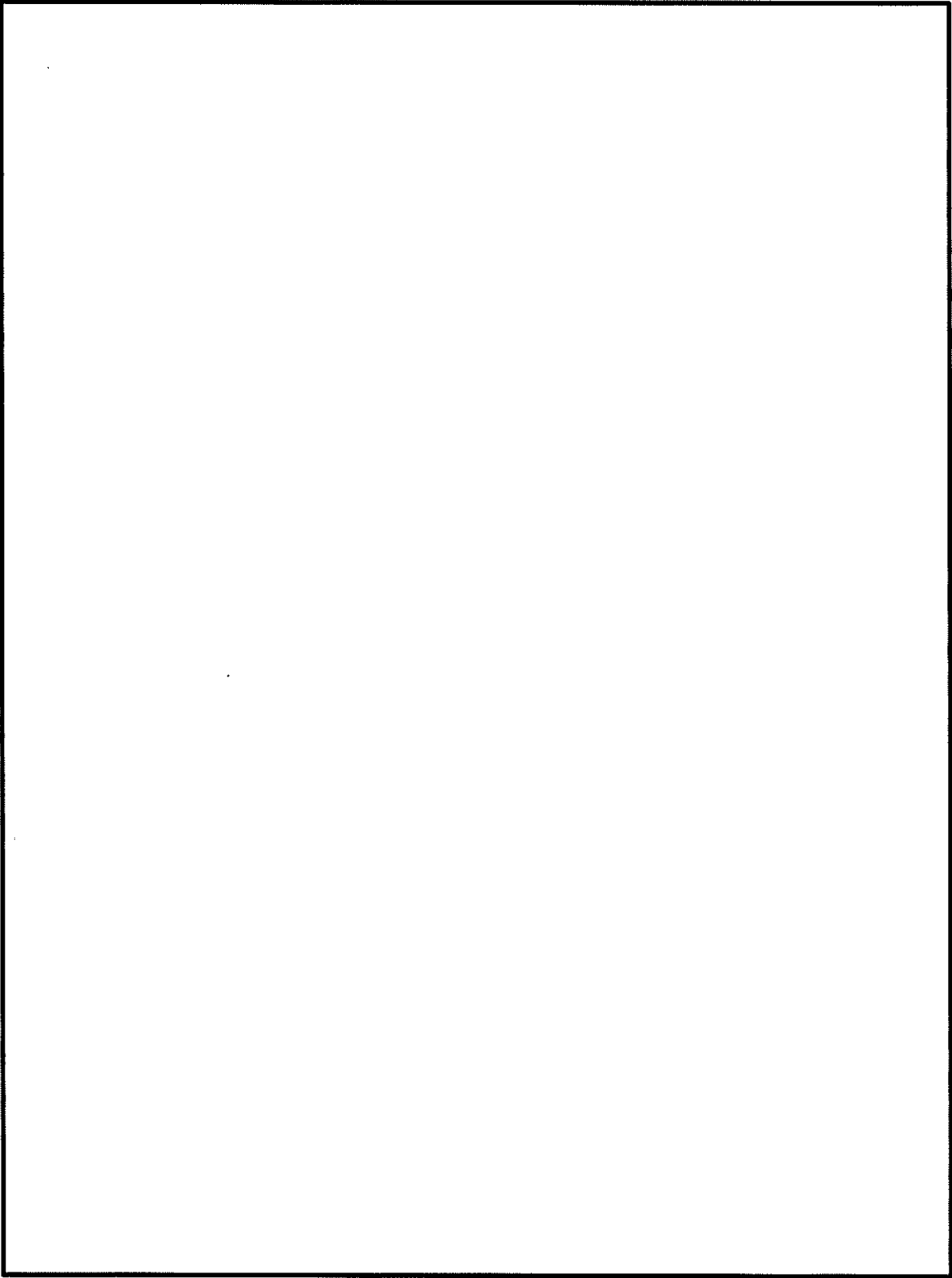
第 3-1 図 密封監視装置の構成



第 3-2 図 密封監視装置系統図



第 3-3 図 圧力センサの取り付け位置



第3-4図 データローガー保管場所

4. 計測範囲及び警報動作範囲

4.1 計測範囲

密封監視装置の計測範囲について、第 4-1 表に示す。

第 4-1 表 計測範囲（乾式キャスク タイプ 1 及びタイプ 2 共通）

項目	設定値	計測範囲の設定に関する考え方
計測範囲 (MPa)	-0.10 ～ 0.40	貯蔵時に一次蓋の密封シール部に漏えいが生じた場合でも、燃料収納空間（乾式キャスク本体内部の空間）側の放射性物質等が乾式キャスク外部に放出されることが無いよう、乾式キャスクへの燃料装荷作業において燃料収納空間側の圧力は負圧に、蓋間圧力は正圧に設定する。 また、一次蓋の密封シール部の漏えいにより一次蓋、二次蓋間に封入された気体（ヘリウムガス）がすべて乾式キャスクの燃料収納空間側に漏えいしたとしても、乾式キャスクの燃料収納空間が正圧とならないよう、蓋間圧力を設定する。 上記を踏まえ、蓋間圧力は最大 0.31MPa となるように設定し、計測範囲は蓋間圧力を包絡するよう設定している。

4.2 警報動作範囲

乾式キャスクの密封機能の監視に係る評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

- ・ 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の乾式キャスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。

本容器では基準漏えい率を下回る漏えい率の金属ガスケットを使用するが、密封シール部の異常を判断し、閉じ込め機能の修復等必要な措置を講じるため、仮に周囲の環境温度の変化を考慮したとしても基準漏えい率により最短で約 5 年で蓋間圧力が大気圧になる圧力を管理基準値 (0.06MPa) として設ける。

これを踏まえ保守的に、3 ヶ月に 1 回蓋間圧力の圧力監視を行うことで、乾式キャスクが内包する放射性物質が乾式キャスク外部に放出される前に密封シール部の異常を検知することができ、管理値を下回った場合はヘリウムガスを充填する等の措置を講じることができるため、警報は設けない。

監視頻度の妥当性については、別添 1「使用済燃料貯蔵用容器の監視頻度の妥当性に関する説明書」に示す。

使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が 臨界に達しないことに関する説明書

設計及び工事計画認可申請 資料12

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資12-1
2. 乾式キャスク（タイプ1）の臨界防止設計	資12-2
2.1 評価基準	資12-3
2.2 評価方法	資12-3
2.3 評価対象燃料	資12-10
2.4 評価条件	資12-11
2.5 評価結果	資12-13
3. 乾式キャスク（タイプ2）の臨界防止設計	資12-14
3.1 評価基準	資12-15
3.2 評価方法	資12-15
3.3 評価対象燃料	資12-22
3.4 評価条件	資12-23
3.5 評価結果	資12-25

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第26条第2項第1号及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」の第26条に基づき、輸送・貯蔵兼用キャスクとして申請する使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）（タイプ1及びタイプ2）に収納した使用済燃料が臨界に達するおそれがないことを説明するものである。

2. 乾式キャスク（タイプ1）の臨界防止設計

乾式キャスクの臨界防止機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

以下を踏まえ臨界防止設計が妥当であること。

1) 配置・形状

乾式キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を乾式キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

乾式キャスク（タイプ1）は、使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するための断面形状が中空状であるバスケットプレート、及び適切な位置に配置された中性子吸収材により臨界を防止する。臨界評価によって、乾式キャスク（タイプ1）の中性子実効増倍率が設計基準以下となり、乾式キャスク（タイプ1）に収納した使用済燃料が臨界に達するおそれがないことを確認する。

なお、設計貯蔵期間を通じたバスケットの構造健全性については、資料10-3「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度に関する説明書」に示す。

2.1 設計基準

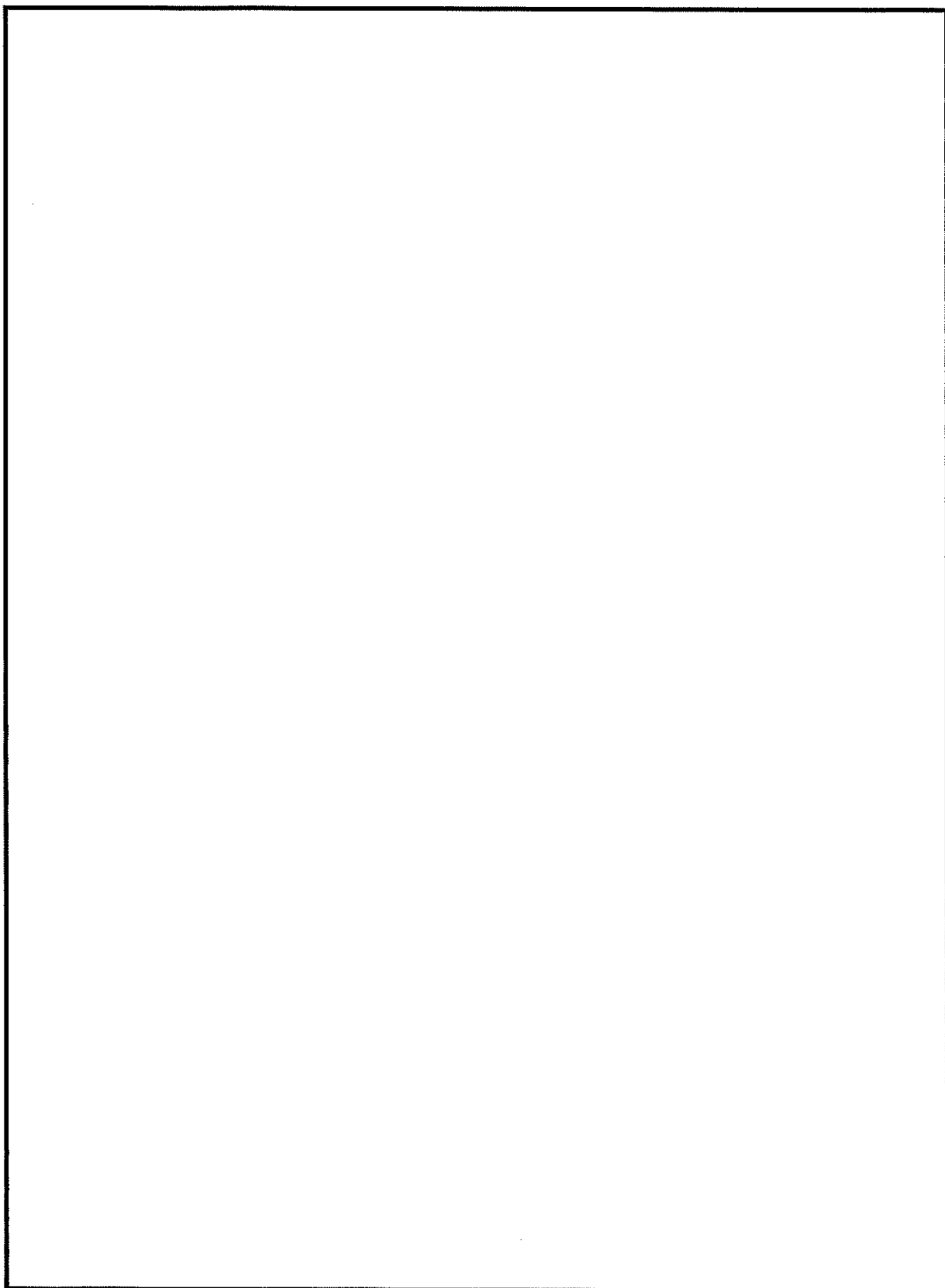
乾式キャスク（タイプ1）の設計基準は、使用済燃料貯蔵設備への搬入から搬出までの乾燥状態、及び使用済燃料集合体を収納する際の冠水状態において、技術的に想定されるいかなる場合にも、中性子実効増倍率（ k_{eff} ）が「臨界安全ハンドブック第2版，日本原子力研究所 JAERI 1340，（1999）」に基づき0.95以下とする。

2.2 評価方法

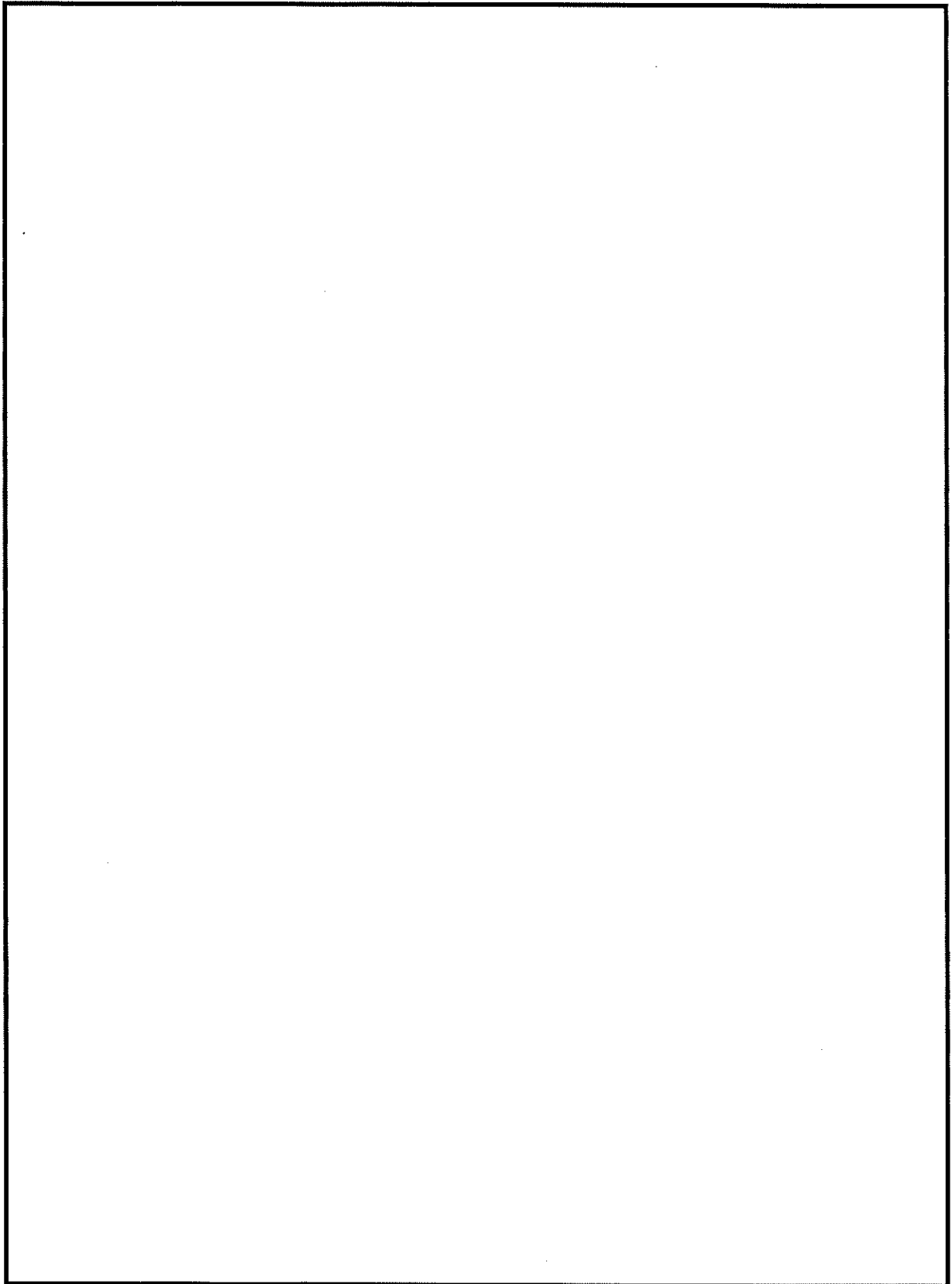
乾式キャスク（タイプ1）の中性子実効増倍率は、第2-1図から第2-6図に示した乾式キャスク（タイプ1）の実形状を模擬した三次元臨界解析モデルを用いて、臨界解析コードを使用して求める。なお、解析モデルの詳細説明については後述の2.4章に示す。

臨界解析には、SCALEコードシステムを用い、中性子実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれるKENO-VIコードを用いる。

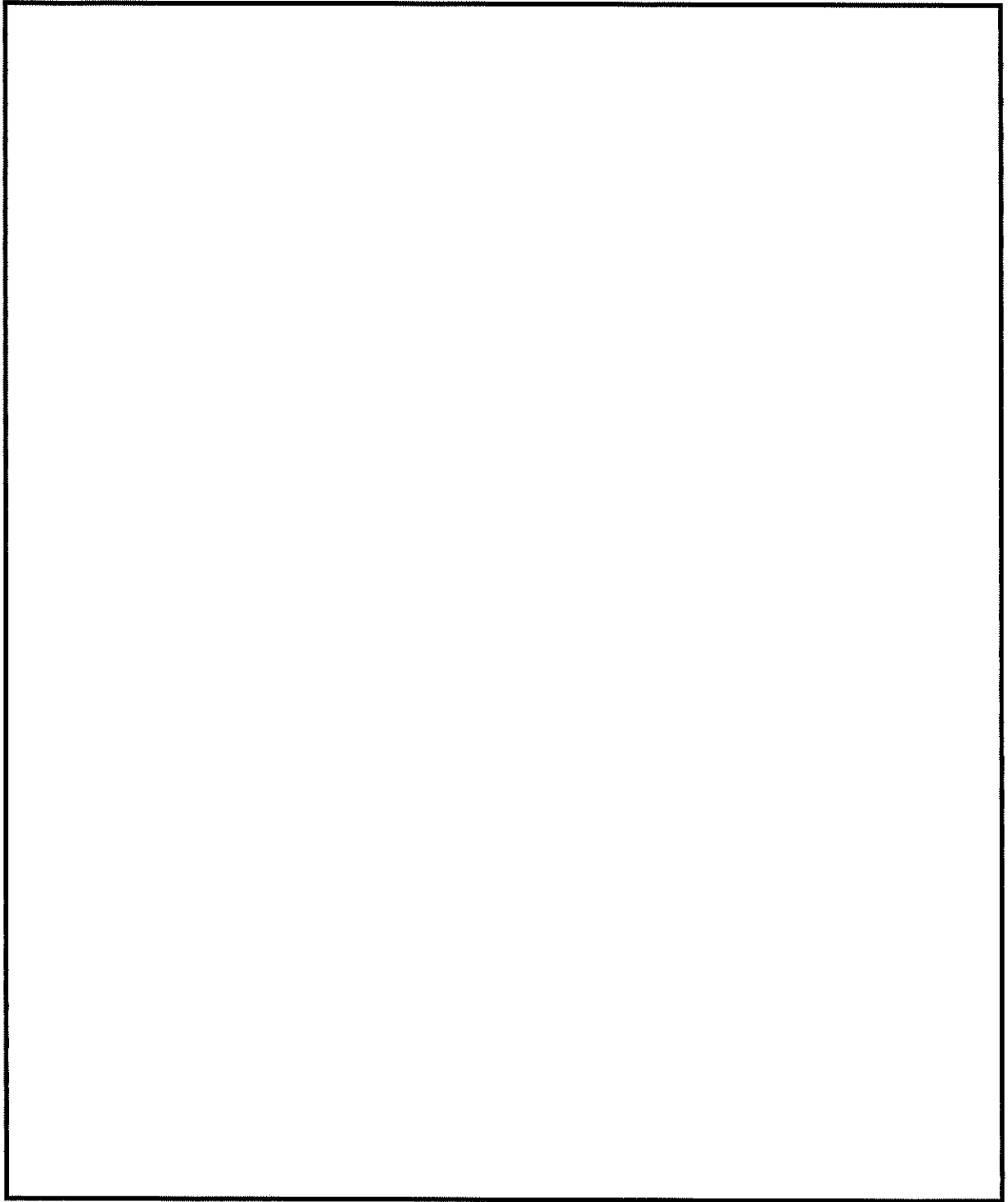
群定数計算には共鳴処理コードBONAMI、CENTRM及びPMCを用い、核データライブラリはSCALEコードシステムの内蔵ライブラリデータの一つであるENDF/B-VIIに基づいて作成された252群断面積ライブラリを用いる。



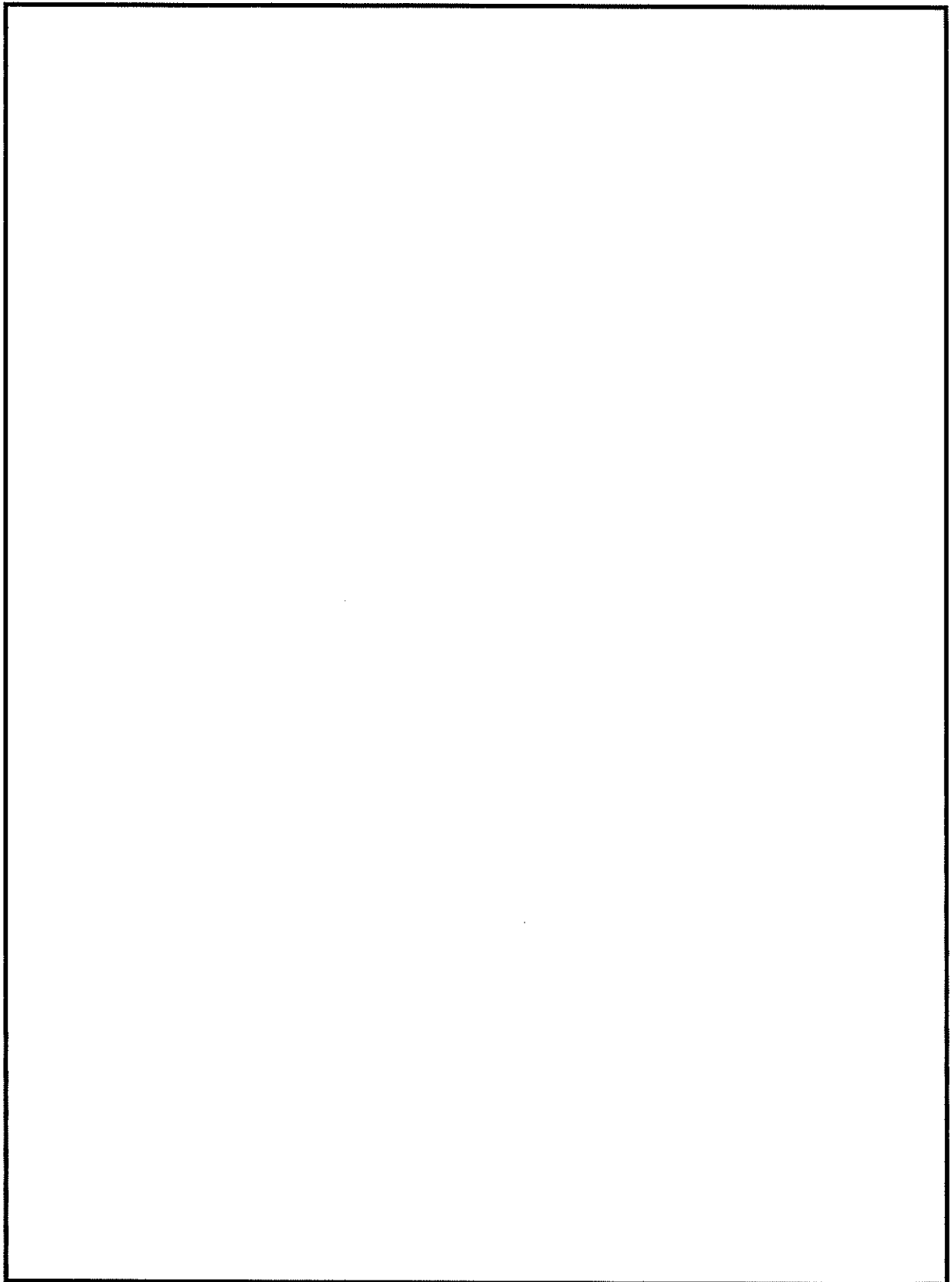
第2-1図 臨界解析モデル 乾燥状態（縦断面図）



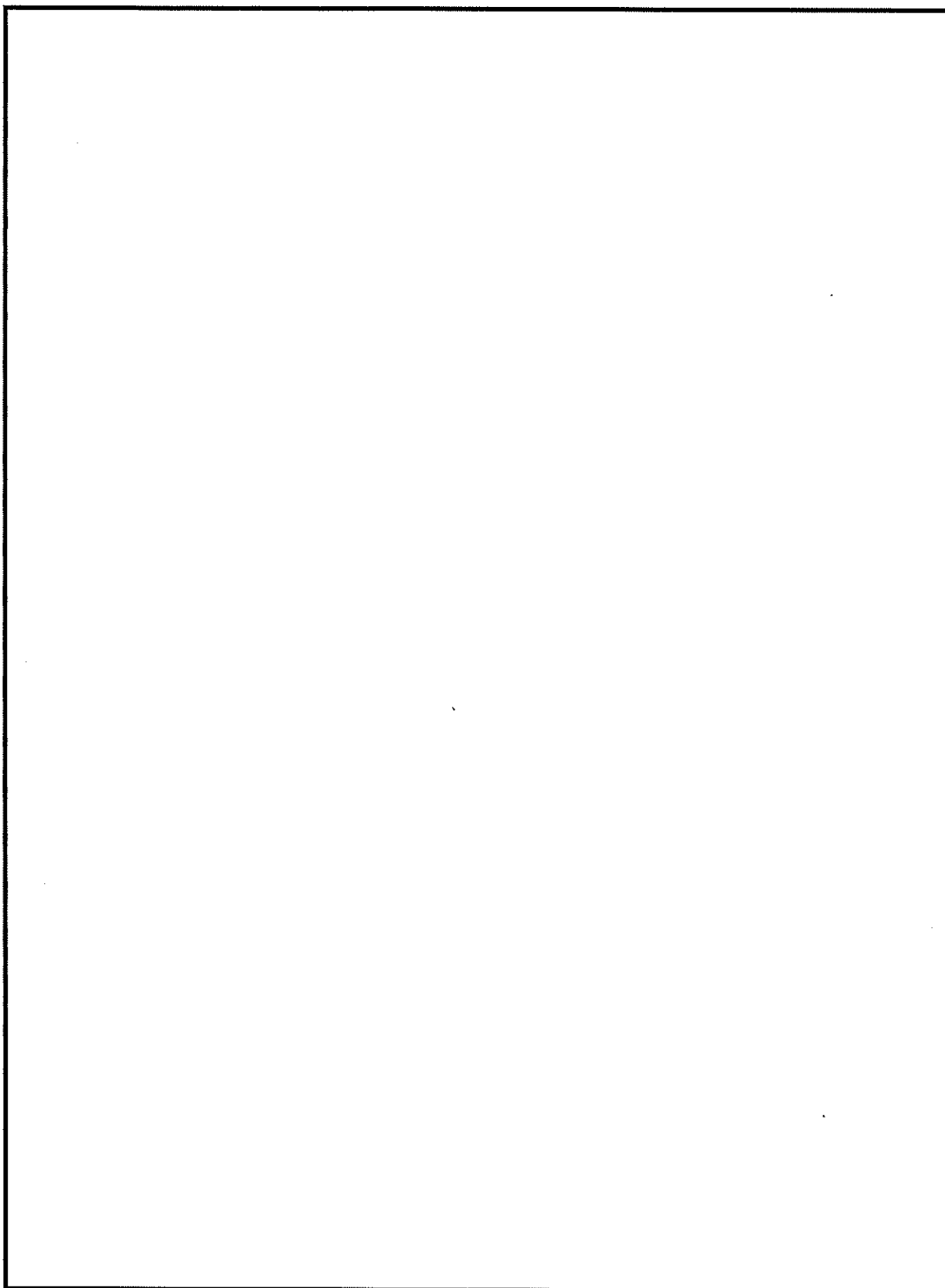
第2-2図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域横断面図）



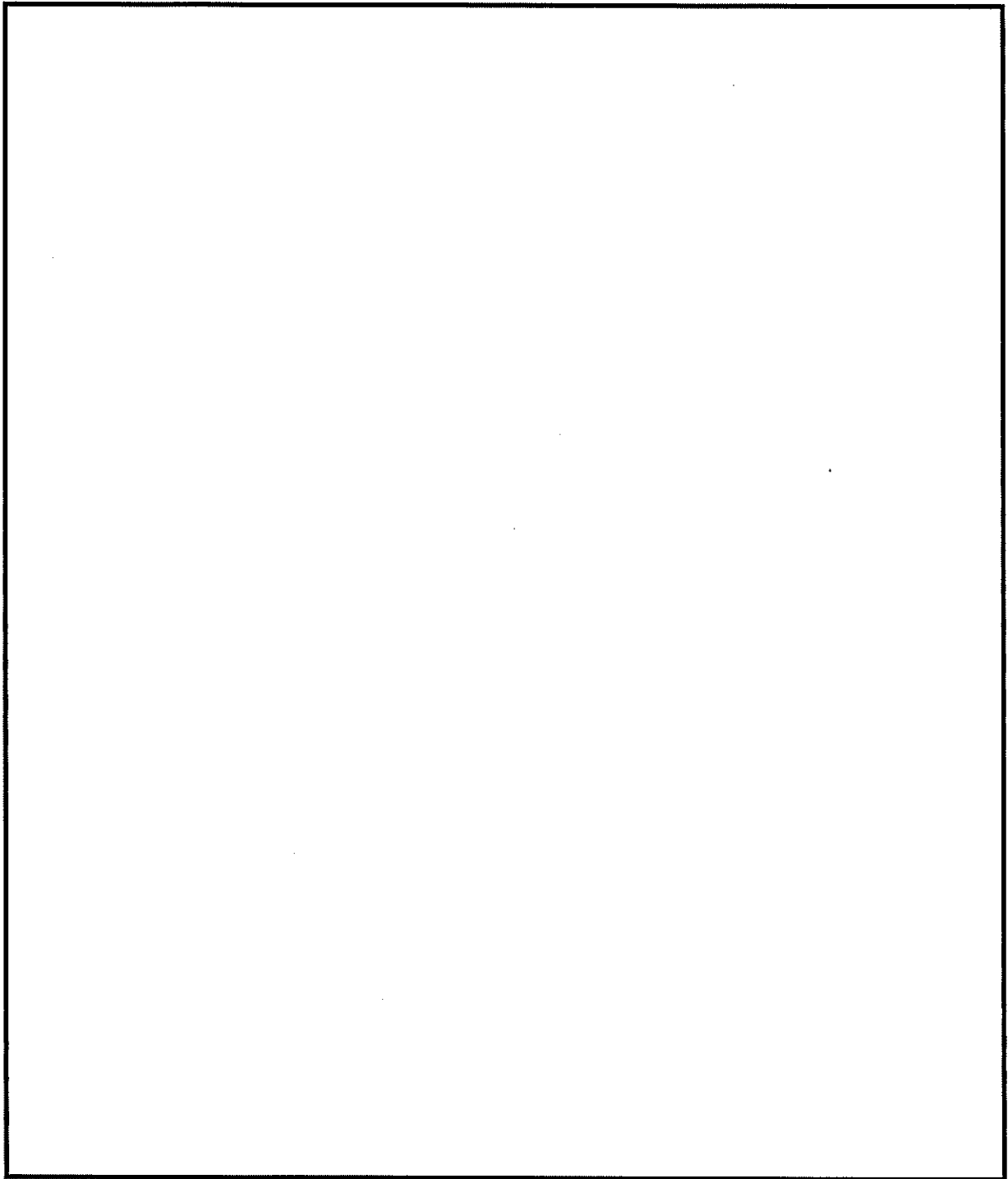
第2-3図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域拡大図）



第2-4図 臨界解析モデル 冠水状態（縦断面図）



第2-5図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域横断面図）



第2-6図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域拡大図）

2.3 評価対象燃料

乾式キャスク（タイプ1）に収納可能な使用済燃料集合体は、中央部では14×14燃料48,000MWd/t型及び39,000MWd/t型である。また、外周部では、14×14燃料39,000MWd/t型である。

臨界解析は、中性子実効増倍率が最も大きくなるように、中央部へ収納する燃料集合体は14×14燃料48,000MWd/t型（A型）、外周部へ収納する燃料集合体は14×14燃料39,000MWd/t型（A型）を収納した条件にて実施する。燃料集合体の仕様を第2-1表に示す。

第2-1表 臨界解析に用いる使用済燃料集合体の仕様

項目	単位	中央部	外周部
		14×14 燃料	
		48,000MWd/t 型	39,000MWd/t 型
		A型	A型
燃料材質	—	二酸化ウラン	
被覆管材質	—	ジルカロイ-4	
燃料密度	%理論密度	95	
燃料棒直径	cm	1.072	
ペレット直径	cm	0.929	
被覆管肉厚	cm	0.062	
燃料有効長	cm	364.2	
燃料棒配列	—	14×14	
燃料集合体当たりの 燃料棒数	本	179	
燃料棒ピッチ	cm	1.41 ^(注1)	
燃料集合体の幅	cm	19.74 ^(注2)	
初期濃縮度	wt%		

（注1）燃料棒ピッチ変化なしの場合

（注2）（燃料棒ピッチ）×（燃料棒配列数）を臨界解析上の集合体の幅とする。

2.4 評価条件

臨界解析モデルでは以下に示すように、臨界評価上厳しい条件を設定する。

- (1) 乾式キャスク（タイプ1）に収納する使用済燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニアを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、中性子実効増倍率の評価に当たってはガドリニアの存在を無視する。
- (2) 乾式キャスク（タイプ1）が無限に配列している体系とし、中性子遮蔽材は真空とすることで、乾式キャスク間相互の中性子干渉を考慮する。
- (3) 乾式キャスク（タイプ1）のバスケットプレート周囲には中性子吸収材が配置されているが、中性子の吸収が小さくなるように、中性子吸収材のほう素添加量を仕様上の下限值とする。なお、設計貯蔵期間（60年間）経過後の中性子吸収材中のほう素の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても 10^{-5} 程度であり影響は無視できる。
- (4) 中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート幅、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚及びバスケット格子内のりの公差を考慮する。
- (5) バスケットプレート及び中性子吸収材は、中性子の吸収が小さくなるように、実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し、それ以外の部分は無視する。
- (6) バスケット格子内の使用済燃料集合体は、保守的に燃焼に伴う反応度低下を考慮せず、中性子実効増倍率が最大となるように、乾式キャスク（タイプ1）内に配置された状態を仮定する。
- (7) 乾式キャスク（タイプ1）は、内部を真空乾燥し、ヘリウムが封入されて貯蔵されるが、乾燥状態の臨界評価では乾式キャスク（タイプ1）内部は真空とする。また、冠水状態の臨界評価では乾式キャスク（タイプ1）内の水密度を 1.0 g/cm^3 とする。

上記臨界解析条件を第2-2表に示す。

第2-2表 臨界解析条件

項目		乾燥状態	冠水状態
使用済燃料集合体の種類		14×14燃料 48,000MWd/t型 (A型) (中央部) 14×14燃料 39,000MWd/t型 (A型) (外周部)	
濃縮度			
収納体数		32体	
燃料配置		第2-2図のとおり	第2-5図のとおり
寸法 条件 (注1)	バスケット プレート幅	A-A断面 cm (最小) B-B断面 cm (最小)	A-A断面 cm (最小) B-B断面 cm (最小)
	バスケット プレート内幅	A-A断面 cm (最大) B-B断面 cm (最大)	A-A断面 cm (最小) B-B断面 cm (最小)
	バスケット格子 内のり	cm (最小)	cm (最大)
	中性子吸収材 板厚	cm (最小)	cm (最小)
	ほう素添加量	^{10}B 面密度 g/cm ² (中性子吸収材に含まれるほう素添加量の仕様 (^{10}B 面密度 g/cm ² 以上) を基に設定)	
乾式キャスク内雰囲気		真空	冠水
乾式キャスク外雰囲気		真空	
乾式キャスク配列		無限配列 (完全反射境界条件)	
バーナブルポイズン集合体		無し	
中性子遮蔽材		真空中に置換	

(注1) 乾燥状態は第2-2図、冠水状態は第2-5図のとおり。

2.5 評価結果

乾式キャスク（タイプ1）の臨界解析結果は、第2-3表に示すとおりであり、中性子実効増倍率は設計基準を満足している。

第2-3 表 臨界解析結果

項目	中性子実効増倍率 ^(注1)	設計基準
解析結果（乾燥）	0.388 ($\sigma < 0.001$)	0.95 以下
解析結果（冠水）	0.908 ($\sigma < 0.001$)	

(注1) 解析結果はモンテカルロ計算の統計誤差(σ)の3倍を加えた値($k_{eff} + 3\sigma$)とする。

3. 乾式キャスク（タイプ2）の臨界防止設計

乾式キャスクの臨界防止機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

以下を踏まえ臨界防止設計が妥当であること。

1) 配置・形状

乾式キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を乾式キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

乾式キャスク（タイプ2）は、使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するための断面形状が中空状であるバスケットプレート、及び適切な位置に配置された中性子吸収材により臨界を防止する。臨界評価によって、乾式キャスク（タイプ2）の中性子実効増倍率が設計基準以下となり、乾式キャスク（タイプ2）に収納した使用済燃料が臨界に達するおそれがないことを確認する。

なお、設計貯蔵期間を通じたバスケットの構造健全性については、資料10-3「キャスク本体その他のキャスクを構成する部材に係る強度に関する説明書」に示す。

3.1 設計基準

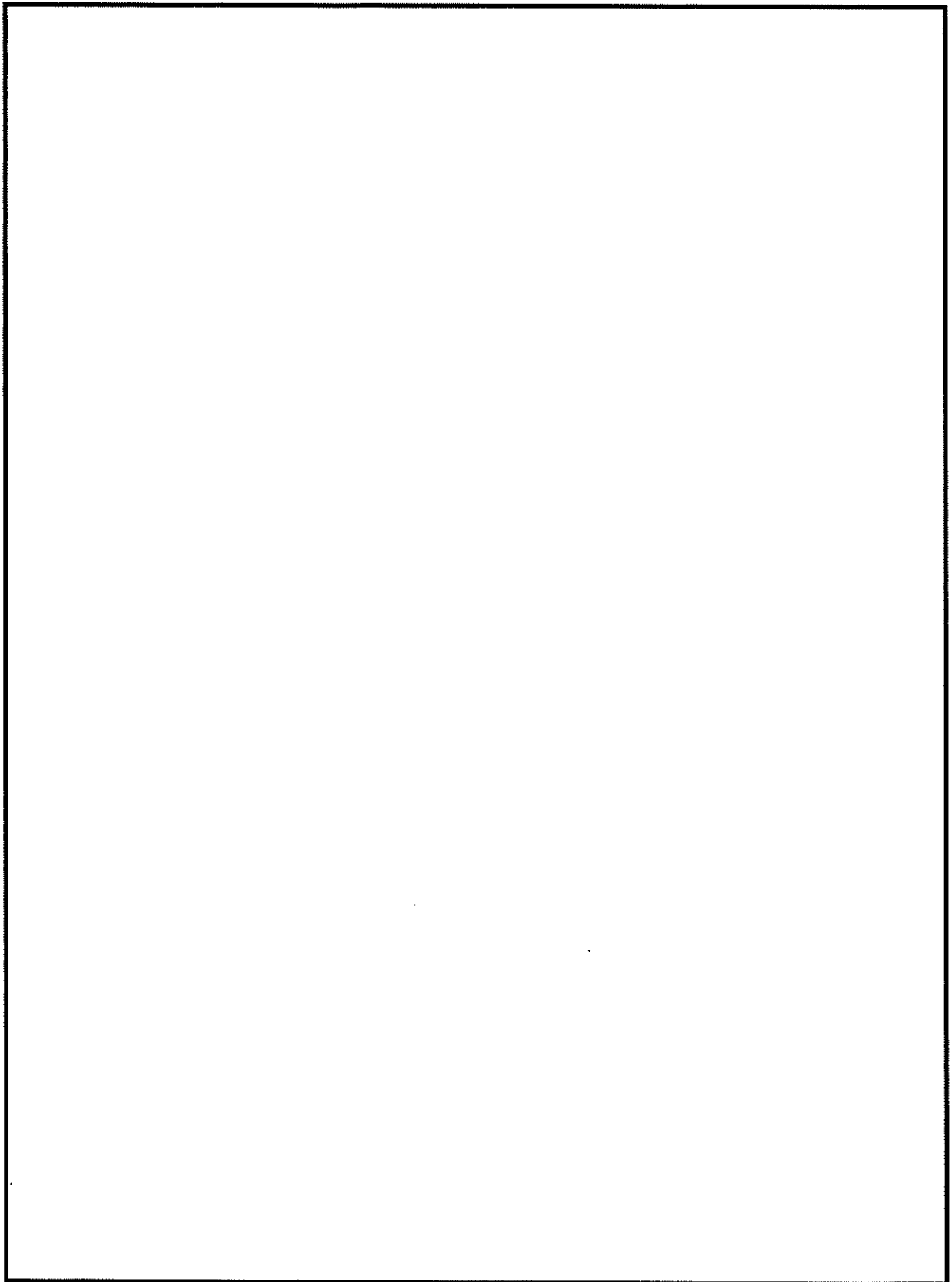
乾式キャスク（タイプ2）の設計基準は、使用済燃料貯蔵設備への搬入から搬出までの乾燥状態、及び使用済燃料集合体を収納する際の冠水状態において、技術的に想定されるいかなる場合にも、中性子実効増倍率（ k_{eff} ）が「臨界安全ハンドブック第2版，日本原子力研究所 JAERI 1340，（1999）」に基づき0.95以下とする。

3.2 評価方法

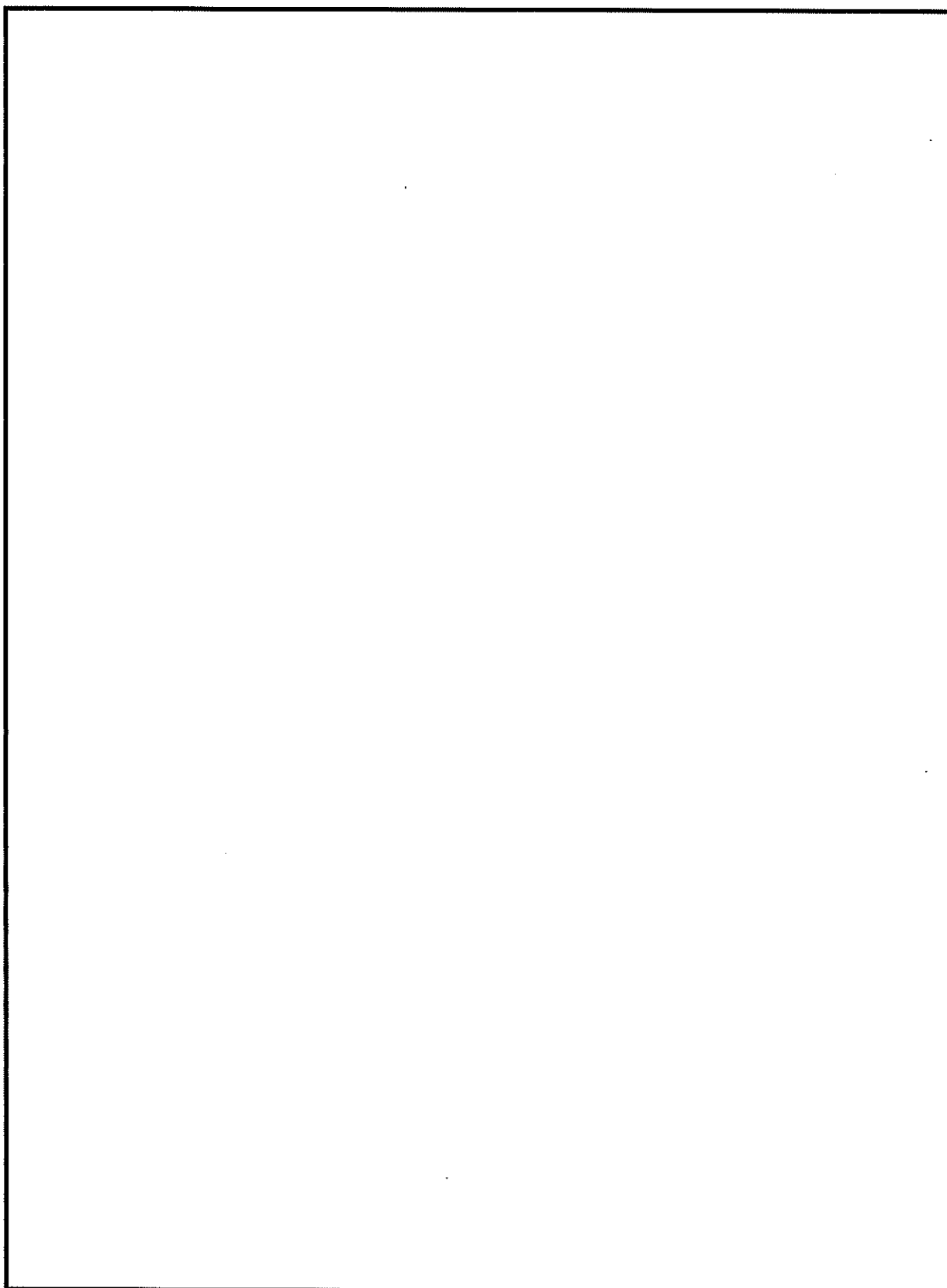
乾式キャスク（タイプ2）の中性子実効増倍率は、第3-1図から第3-6図に示した乾式キャスク（タイプ2）の実形状を模擬した三次元臨界解析モデルを用いて、臨界解析コードを使用して求める。なお、解析モデルの詳細説明については後述の3.4章に示す。

臨界解析には、SCALEコードシステムを用い、中性子実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれるKENO-VIコードを用いる。

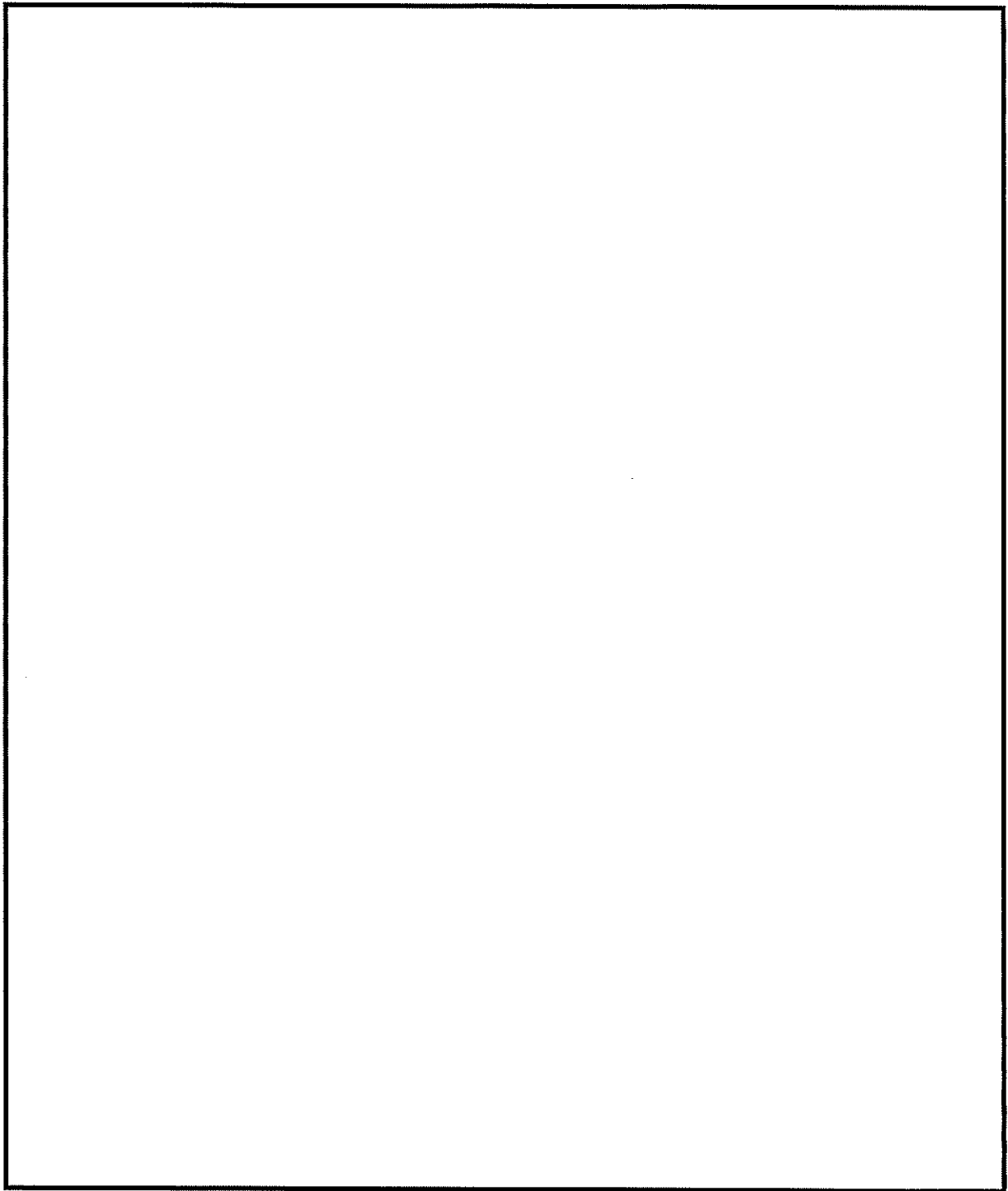
群定数計算には共鳴処理コードBONAMI、CENTRM及びPMCを用い、核データライブラリはSCALEコードシステムの内蔵ライブラリデータの一つであるENDF/B-VIIに基づいて作成された252群断面積ライブラリを用いる。



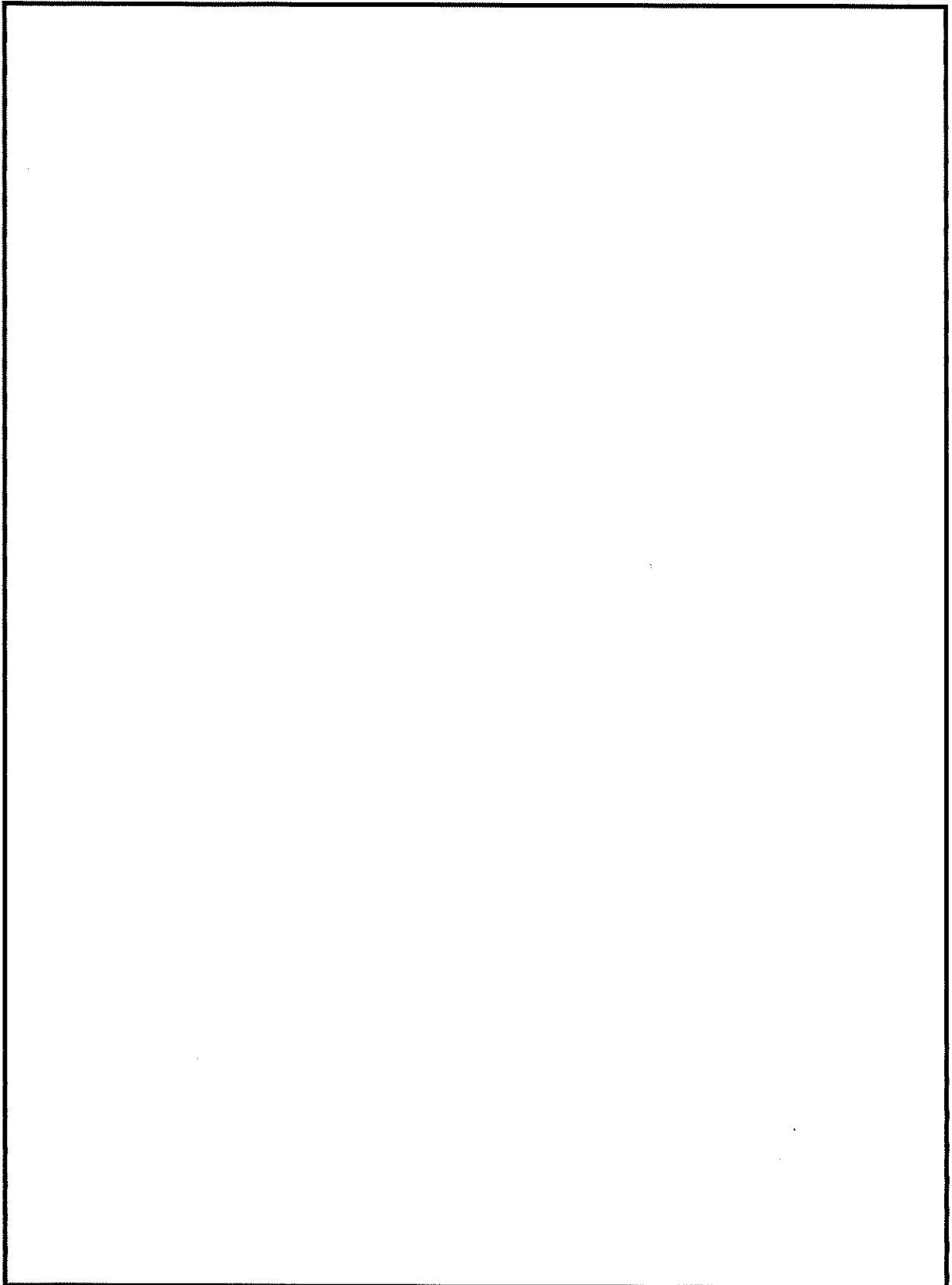
第3-1図 臨界解析モデル 乾燥状態（縦断面図）



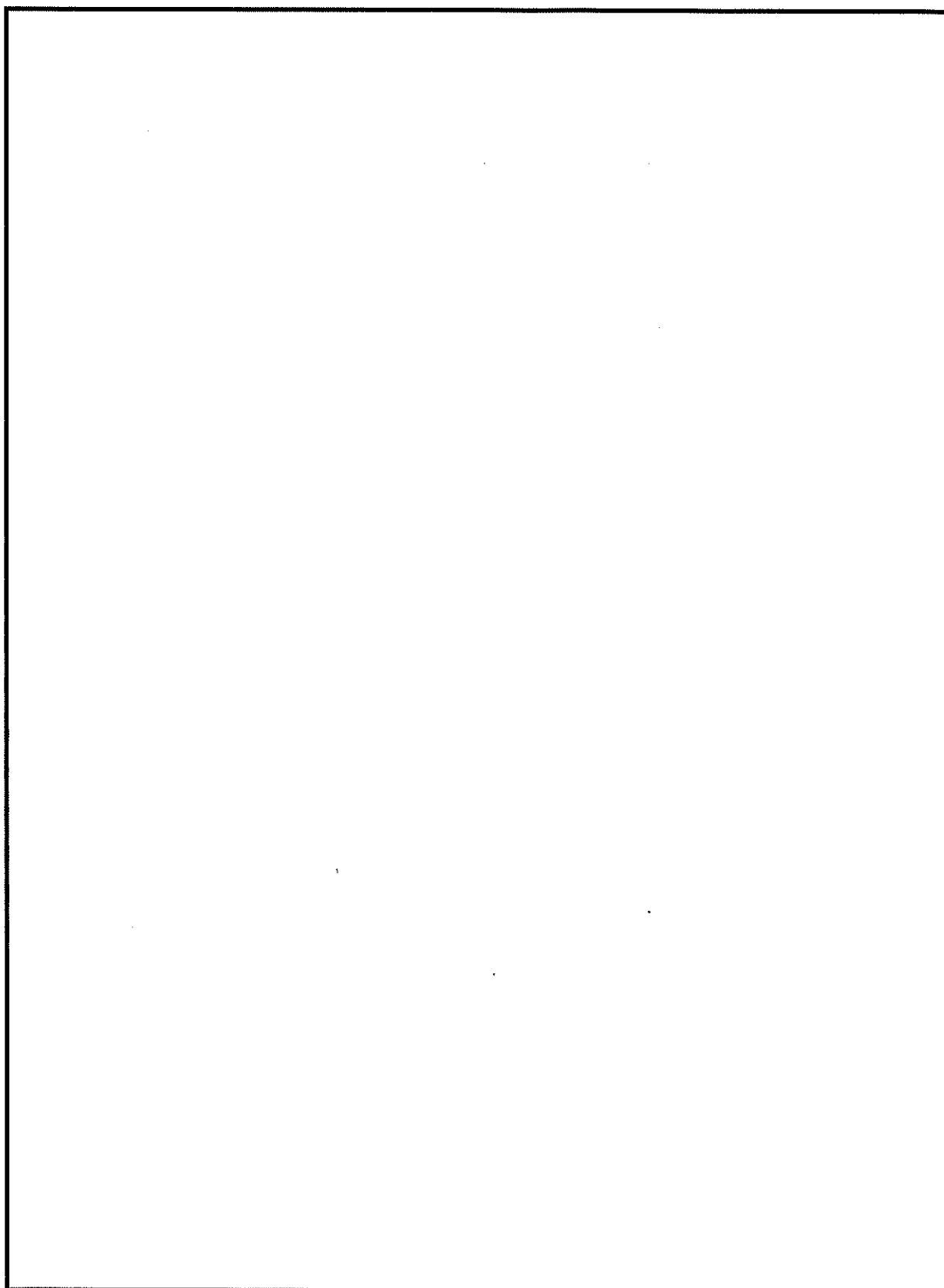
第3-2図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域横断面図）



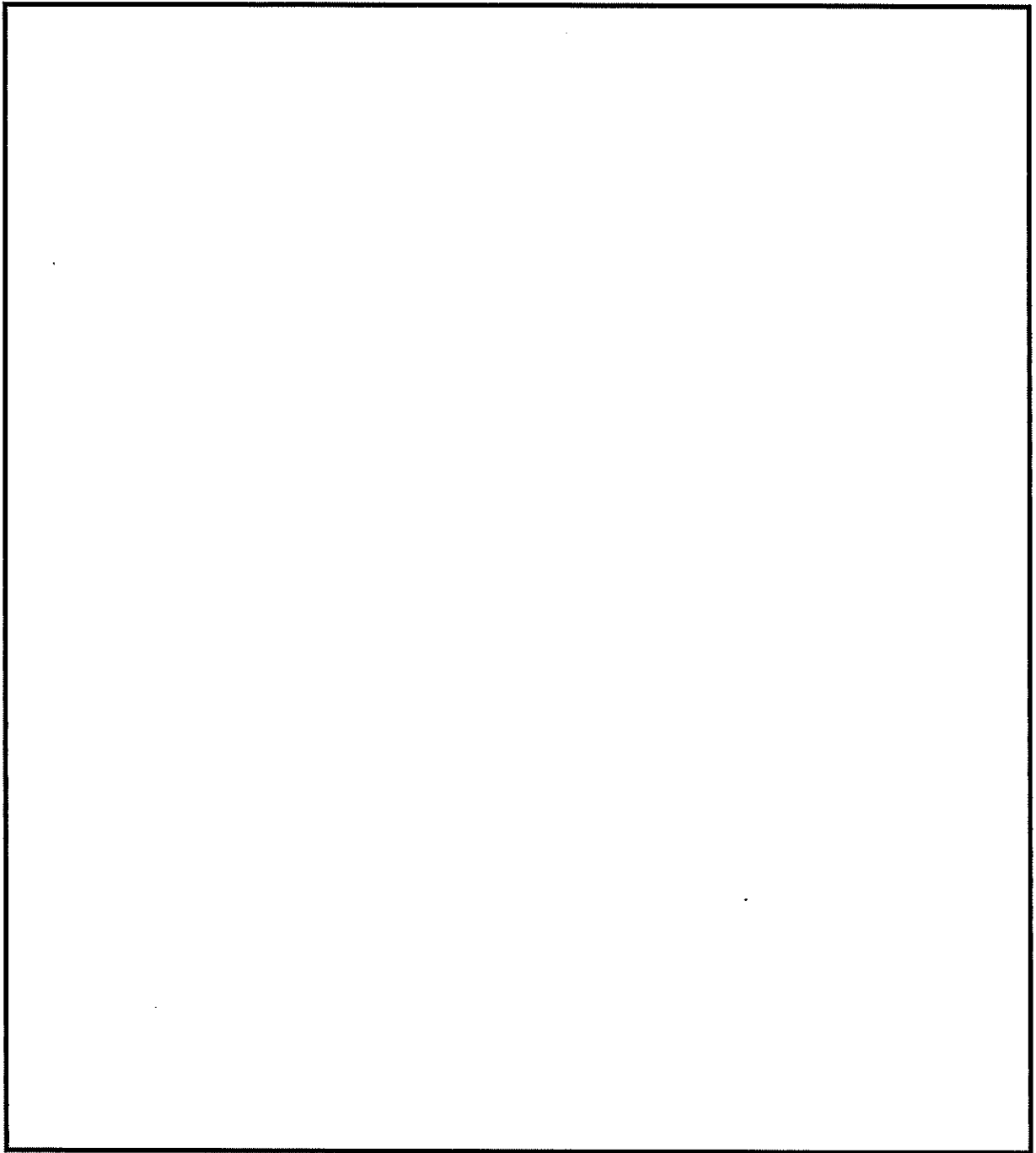
第3-3図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域拡大図）



第3-4図 臨界解析モデル 冠水状態（縦断面図）



第3-5図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域横断面図）



第3-6図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域拡大図）

3.3 評価対象燃料

乾式キャスク（タイプ2）に収納可能な使用済燃料集合体は、中央部及び外周部ともに17×17燃料48,000MWd/t型及び39,000MWd/t型である。

臨界解析は、中性子実効増倍率が最も大きくなるように、17×17燃料48,000MWd/t型（A型）を収納した条件にて実施する。燃料集合体の仕様を第3-1表に示す。

第 3-1 表 臨界解析に用いる使用済燃料集合体の仕様

項目	単位	17×17 燃料
		48,000MWd/t 型
		A 型
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-4
燃料密度	%理論密度	95
燃料棒直径	cm	0.95
ペレット直径	cm	0.819
被覆管肉厚	cm	0.057
燃料有効長	cm	364.8
燃料棒配列	—	17×17
燃料集合体当たりの 燃料棒数	本	264
燃料棒ピッチ	cm	1.26 ^(注1)
燃料集合体の幅	cm	21.42 ^(注2)
初期濃縮度	wt%	

(注 1) 燃料棒ピッチ変化なしの場合

(注 2) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。

3.4 評価条件

臨界解析モデルでは以下に示すように、臨界評価上厳しい条件を設定する。

- (1) 乾式キャスク（タイプ2）に収納する使用済燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニアを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、中性子実効増倍率の評価に当たってはガドリニアの存在を無視する。
- (2) 乾式キャスク（タイプ2）が無限に配列している体系とし、中性子遮蔽材は真空とすることで、乾式キャスク間相互の中性子干渉を考慮する。
- (3) 乾式キャスク（タイプ2）のバスケットプレート周囲には中性子吸収材が配置されているが、中性子の吸収が小さくなるように、中性子吸収材のほう素添加量を仕様上の下限值とする。なお、設計貯蔵期間（60年間）経過後の中性子吸収材中のほう素の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても 10^{-5} 程度であり影響は無視できる。
- (4) 中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート幅、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚及びバスケット格子内のりの公差を考慮する。
- (5) バスケットプレート及び中性子吸収材は、中性子の吸収が小さくなるように、実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し、それ以外の部分は無視する。
- (6) バスケット格子内の使用済燃料集合体は、保守的に燃焼に伴う反応度低下を考慮せず、中性子実効増倍率が最大となるように、乾式キャスク（タイプ2）内に配置された状態を仮定する。
- (7) 乾式キャスク（タイプ2）は、内部を真空乾燥し、ヘリウムが封入されて貯蔵されるが、乾燥状態の臨界評価では乾式キャスク（タイプ2）内部は真空とする。また、冠水状態の臨界評価では乾式キャスク（タイプ2）内の水密度を 1.0g/cm^3 とする。

上記臨界解析条件を第3-2表に示す。

第3-2表 臨界解析条件

項目		乾燥状態	冠水状態
使用済燃料集合体の種類		17×17燃料 48,000MWd/t型 (A型)	
濃縮度			
収納体数		24体	
燃料配置		第3-2図のとおり	第3-5図のとおり
寸法 条件 (注1)	バスケット プレート幅	A-A断面 cm (最小) B-B断面 cm (最小) C-C断面 cm (最小)	A-A断面 cm (最小) B-B断面 cm (最小) C-C断面 cm (最小)
	バスケット プレート内幅	A-A断面 cm (最大) B-B断面 cm (最大) C-C断面 cm (最大)	A-A断面 cm (最小) B-B断面 cm (最小) C-C断面 cm (最小)
	バスケット格子 内のり	cm (最小)	cm (最大)
	中性子吸収材 板厚	cm (最小)	cm (最小)
ほう素添加量		¹⁰ B面密度 g/cm ² (中性子吸収材に含まれるほう素添加量の仕様 (¹⁰ B面密度 g/cm ² 以上) を基に設定)	
乾式キャスク内雰囲気		真空	冠水
乾式キャスク外雰囲気		真空	
乾式キャスク配列		無限配列 (完全反射境界条件)	
バーナブルポイズン集合体		無し	
中性子遮蔽材		真空中に置換	

(注1) 乾燥状態は第3-2図、冠水状態は第3-5図のとおり。

3.5 評価結果

乾式キャスク（タイプ2）の臨界解析結果は、第3-3表に示すとおりであり、中性子実効増倍率は設計基準を満足している。

第3-3 表 臨界解析結果

項目	中性子実効増倍率 ^(注1)	設計基準
解析結果（乾燥）	0.385 ($\sigma < 0.001$)	0.95 以下
解析結果（冠水）	0.912 ($\sigma < 0.001$)	

(注1) 解析結果はモンテカルロ計算の統計誤差(σ)の3倍を加えた値($k_{eff} + 3\sigma$)とする。

使用済燃料貯蔵用容器の 冷却能力に関する説明書

設計及び工事計画認可申請 資料13

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資13-1
2. 乾式キャスク（タイプ1）の除熱設計	資13-2
2.1 評価基準	資13-3
2.2 評価方法	資13-3
2.3 評価対象燃料	資13-9
2.4 評価条件	資13-9
2.5 評価結果	資13-17
3. 乾式キャスク（タイプ2）の除熱設計	資13-20
3.1 評価基準	資13-21
3.2 評価方法	資13-21
3.3 評価対象燃料	資13-27
3.4 評価条件	資13-27
3.5 評価結果	資13-35
4. 乾式キャスクの除熱機能を阻害しないことの説明	資13-38
5. 除熱機能に関する監視について	資13-39
5.1 乾式キャスクの除熱機能の監視装置	資13-39
5.2 乾式キャスクの除熱機能を阻害していないことの監視装置	資13-40
5.3 除熱機能に関する監視装置の取付箇所及び保管場所について	資13-41
5.4 除熱機能の監視頻度について	資13-42

別添1 使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能を阻害しないことの説明書

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第26条第2項第2号及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」第26条に基づき、輸送・貯蔵兼用キャスクとして申請する使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）（タイプ1及びタイプ2）が使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できることを説明するものである。

2. 乾式キャスク（タイプ1）の除熱設計

乾式キャスクの除熱機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 乾式キャスク各部の温度評価

a. 乾式キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び乾式キャスク周囲の温度を条件とし、及び乾式キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び乾式キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、乾式キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、乾式キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と2) で求めた乾式キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

乾式キャスク（タイプ1）は、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できるように、使用済燃料から発生する崩壊熱を伝導、対流、ふく射により金属キャスクの外表面に伝え、周囲の空気等に伝達し除去する。乾式キャスク（タイプ1）内部のバスケットは、アルミニウム合金製のバスケットプレート、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材等により構成され、必要な伝熱性能を確保する。側部中性子遮蔽材部には除熱を促進するための銅製の伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。除熱評価によって、燃料被覆管の温度が温度制限値以下となり、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できることを確認する。なお、乾式キャスク各部の温度及び健全性については、資料10-3別紙1「使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について」に示す。

2.1 評価基準

評価基準を第2-1表に示す。

第2-1表 評価基準

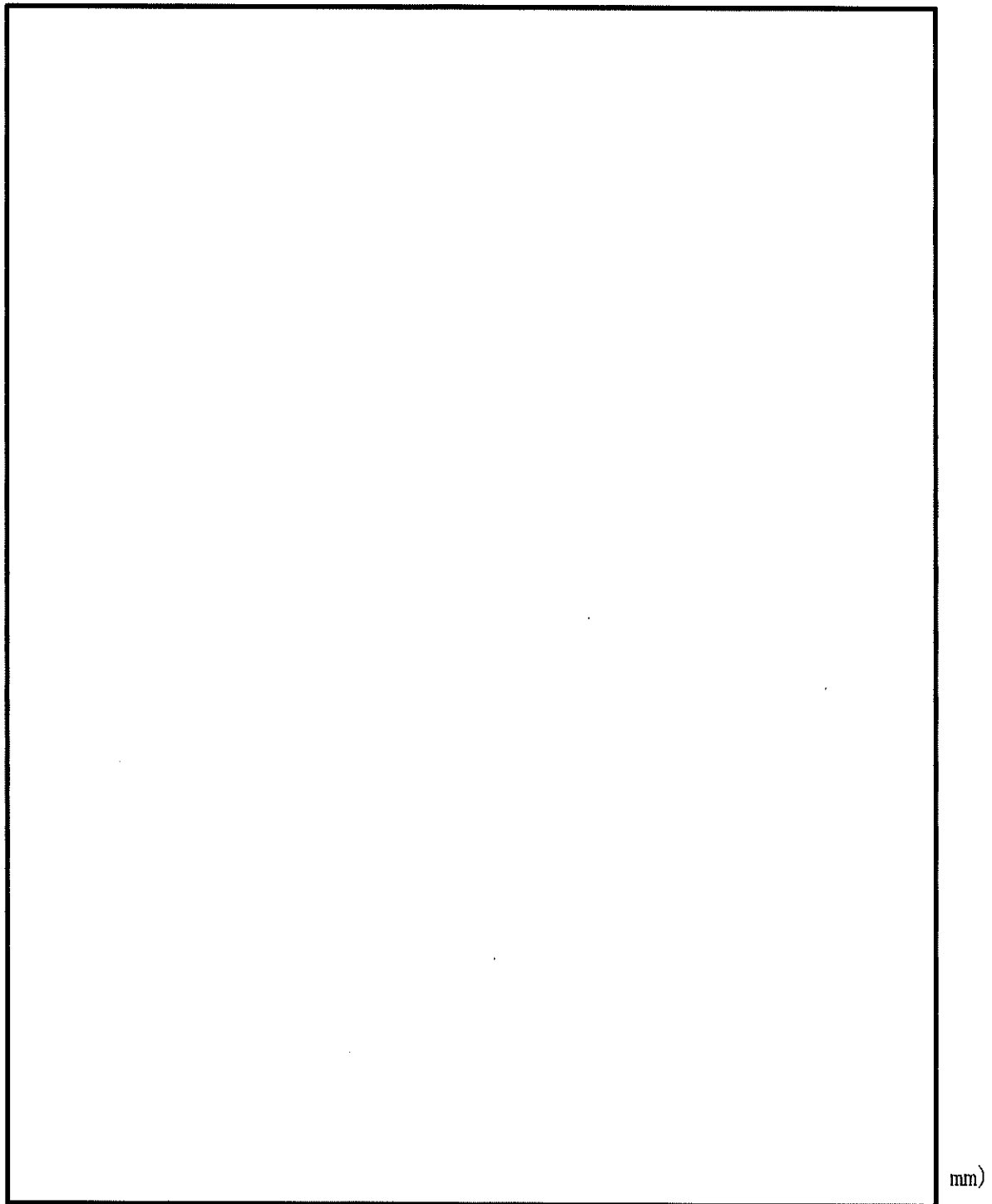
対象となる部位	温度制限値 (°C)	温度制限の考え方
燃料被覆管	275 ^(注)	燃料被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下とする。

(注)「(独)原子力安全基盤機構,『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証試験に関する試験最終成果報告書)』,(2007).」

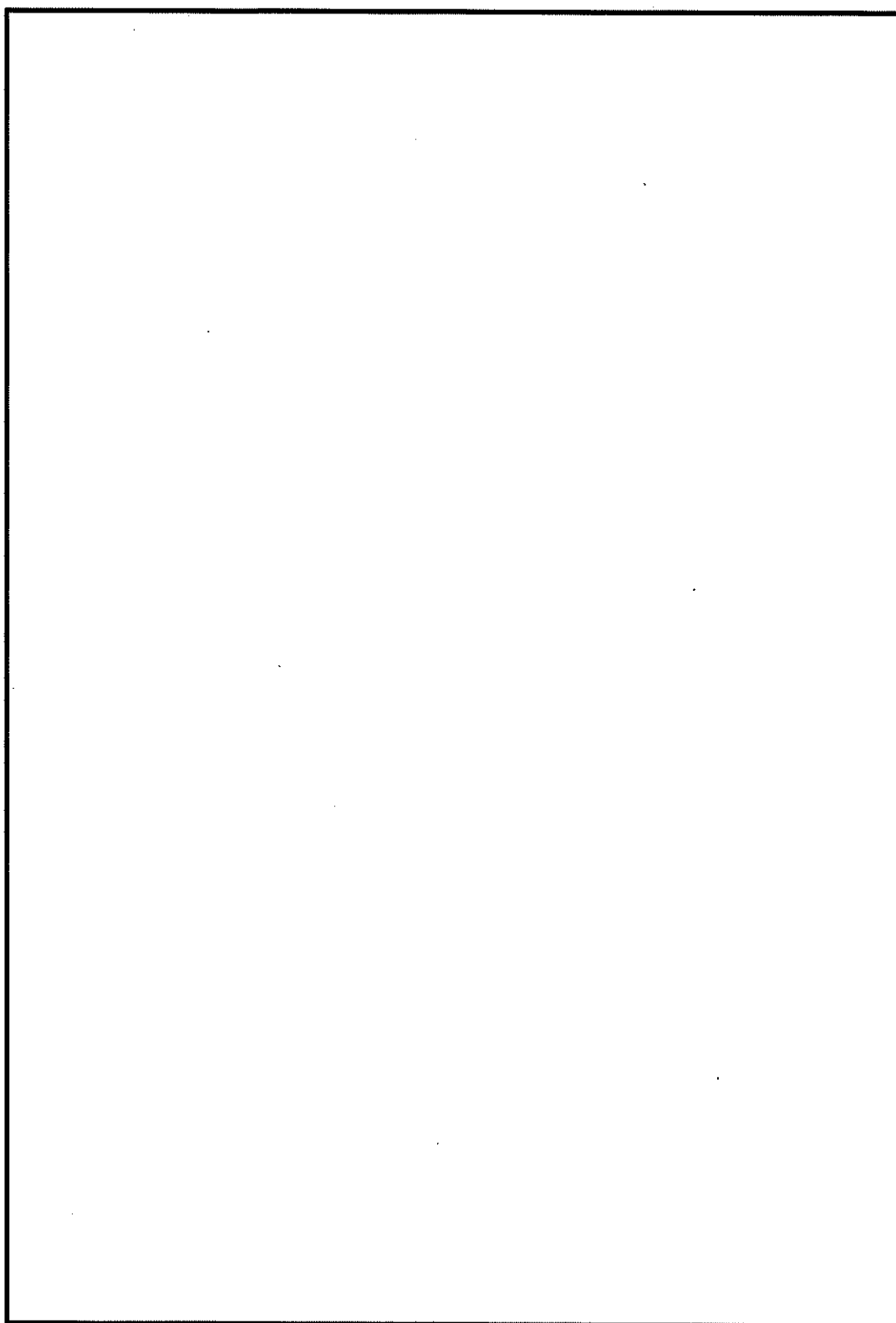
2.2 評価方法

乾式キャスク(タイプ1)の除熱解析は、乾式キャスク(タイプ1)の三次元180°対称全体モデル(以下「全体モデル」という。)及び燃料集合体モデルを用いて行う。燃料集合体モデルは、燃料被覆管の最高温度が発生する軸方向中央部についてモデル化する。全体モデルを第2-1図に、燃料集合体モデルを第2-2図に示す。

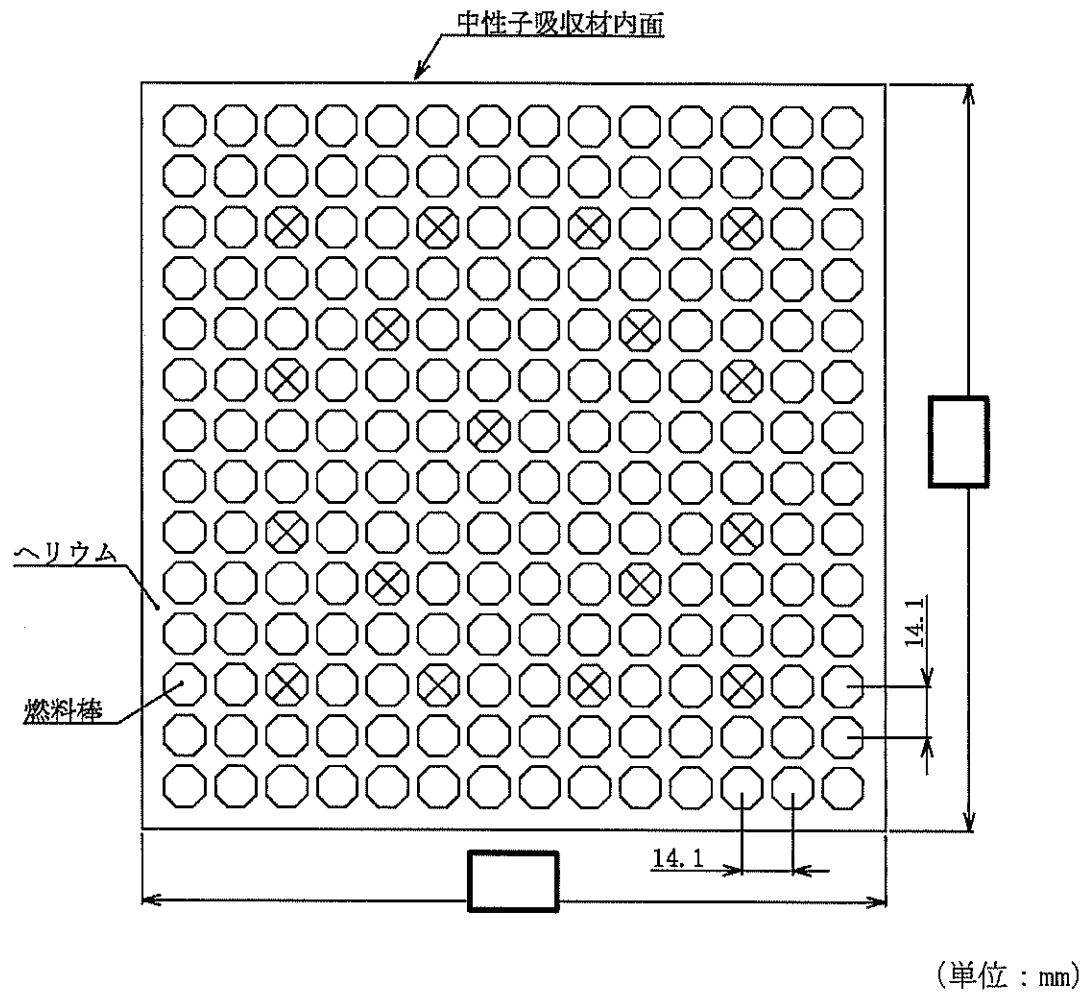
除熱解析には汎用解析コードABAQUSを用いる。全体モデル要素分割図を第2-3図に、燃料集合体モデル要素分割図を第2-4図に示す。なお、評価に用いる汎用解析コードABAQUSの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。



第2-1図 乾式キャスク（タイプ1）の全体モデル形状図(1/2)（縦断面図）

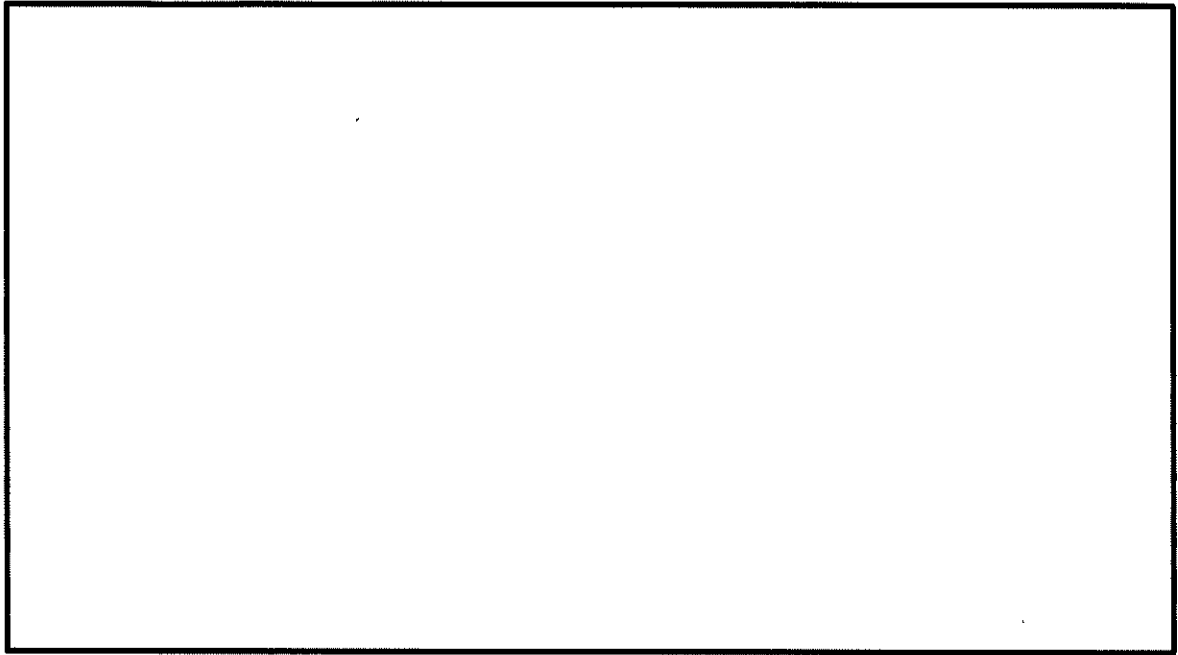


第2-1図 乾式キャスク（タイプ1）の全体モデル形状図(2/2)（横断面図）



(注) ⊗は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

第2-2図 乾式キャスク（タイプ1）の燃料集合体モデル形状図

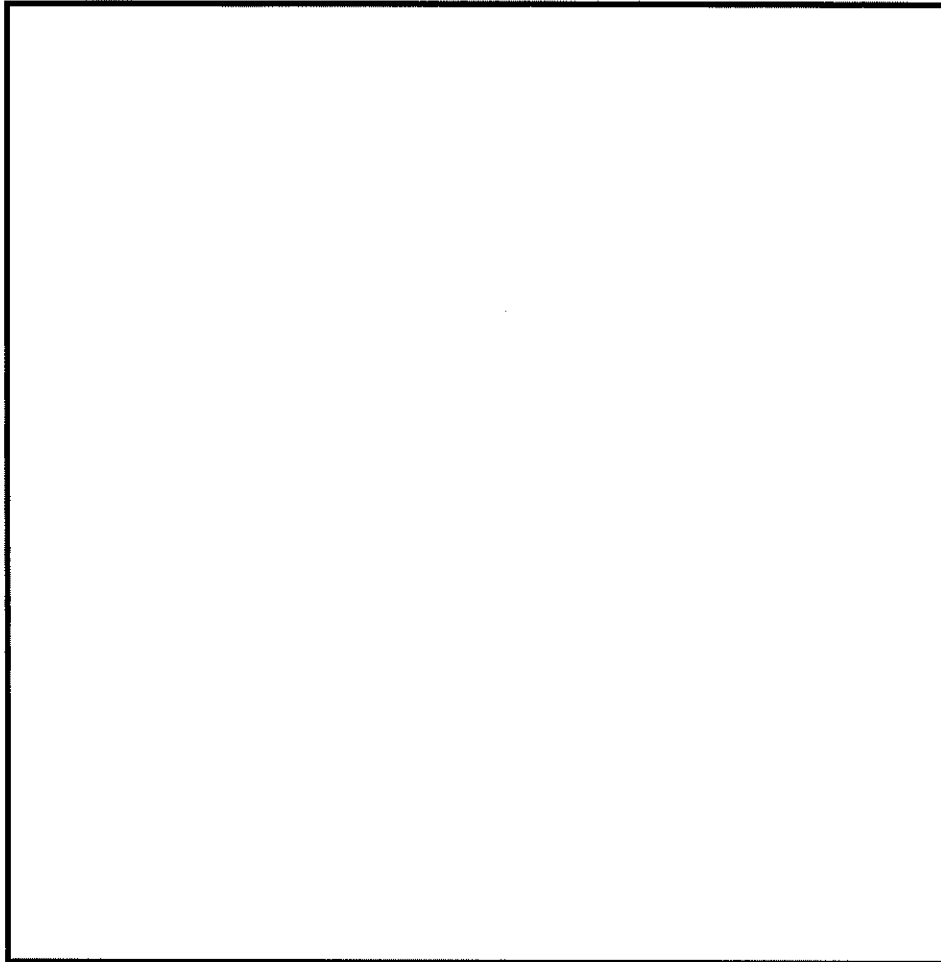


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

第2-3図 全体モデル要素分割図



第2-4図 燃料集合体モデル要素分割図

2.3 評価対象燃料

乾式キャスク（タイプ1）に収納可能な使用済燃料集合体は、中央部では14×14燃料48,000MWd/t型及び39,000MWd/t型である。また外周部では、14×14燃料39,000MWd/t型である。除熱解析は、最も崩壊熱量が大きい14×14燃料48,000MWd/t型を対象とし、中央部に14×14燃料48,000MWd/t型を収納した条件にて実施する。

2.4 評価条件

除熱解析の条件は以下のとおりである。使用済燃料の崩壊熱量は、資料14「使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に示すORIGEN2コードによる解析にて算出された結果を適用する。崩壊熱量の計算には、使用済燃料集合体平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を包含する燃焼度分布（以下「ピーキングファクター」という。）を考慮する。乾式キャスク（タイプ1）1基当たりの崩壊熱量を第2-2表に示す。なお、A型及びB型は計算条件が同じであるため、同じ崩壊熱量となる。

- (1) 全体モデルでは、燃料集合体を均質体としてモデル化し、ピーキングファクターを考慮した発熱分布を与える。この熱は、ヘリウムガスの熱伝導とふく射により燃料集合体からバスケット、バスケットから胴に伝わる。
- (2) 全体モデルでは、中央領域16体のうち中心4体に14×14燃料48,000MWd/t型における最高燃焼度の崩壊熱量を入力する。一方、中心4体を除く12体には、中央部16体の崩壊熱量が14×14燃料48,000MWd/t型における平均燃焼度の崩壊熱量16体分となるように調整した崩壊熱量を入力する。また、外周領域16体については、14×14燃料39,000MWd/t型における平均燃焼度の崩壊熱量を入力する。
- (3) 燃料集合体モデルでは、燃料集合体の温度が最も高くなる燃料有効部中央の径方向断面についてモデル化する。
- (4) 燃料集合体モデルでは、燃料棒を1本ずつの独立した均質体としてモデル化する。
- (5) 崩壊熱量は、胴から各部材の熱伝導により金属キャスク外表面に伝わり、金属キャスク外表面から自然対流及びふく射により周囲に放熱される。

乾式キャスク（タイプ1）の貯蔵姿勢、周囲温度及び貯蔵建屋壁面温度を第2-3表に示す。また、除熱解析に使用する材料の熱的性質を第2-4表、第2-5表及び第2-6表に示す。さらに、使用済燃料集合体の収納条件を第2-5図に示す。

第2-2表 乾式キャスク（タイプ1）1基当たりの崩壊熱量（除熱解析の適用条件）

使用済燃料集合体の種類		中央部		外周部	
		14×14燃料			
		48,000MWd/t型		39,000MWd/t型	
		A型	B型	A型	B型
計算条件	最高燃焼度 (MWd/t)	48,000		39,000	
	平均燃焼度 (MWd/t)	45,000		33,000	
	平均比出力 (MW/t)	34.0			
	照射期間 (日)				
	初期濃縮度 (wt%) (注1)				
	冷却期間 (年)	15		25	
	ウラン質量 (kg/体)				
	(上部)				
ピーキング ファクター (注2)					
計算結果	(下部)				
	燃料集合体 1体当たりの崩壊熱量 (W)	675.9 (平均燃焼度)		378.9 (平均燃焼度)	
収納体数 (体)		16		16	
		32			
1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		16.9			

(注1) 収納される使用済燃料集合体の最小値を用いる。

(注2) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

(注3) 除熱解析では、ピーキングファクターを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。

第2-3表 評価条件

項目	評価条件
貯蔵姿勢	たて置き
周囲温度 (°C)	50
貯蔵建屋壁面温度 (°C)	65

第2-4表 材料の熱的性質 (1/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 ^(注) (W/(m・K))
胴 一次蓋 二次蓋	炭素鋼 (GLF1)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼 (SGV480)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
下部端板 底部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304)	26.85	16.0
		126.85	16.5
		326.85	19.0
		526.85	22.5
		726.85	25.7
トラニオン	析出硬化系 ステンレス鋼 (SUS630)	20	17.3
		125	18.9
		225	20.7
		325	22.2
		425	23.3
		525	23.9
		625	24.5
		700	25.1

(注) 炭素鋼及びステンレス鋼は「(一社)日本機械学会,『伝熱工学資料 改訂第4版』, (1986).」、析出硬化系ステンレス鋼は「American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)”, (2010).」に基づく。

第2-4表 材料の熱的性質 (2/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 ^(注) (W/(m・K))
蓋部中性子遮蔽材 底部中性子遮蔽材 側部中性子遮蔽材	レジン	—	0.646
バスケットプレート	アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	20 125 200	162.1 170.1 173.6
中性子吸収材	ほう素添加 アルミニウム合金	—	110 (長手方向) 70 (板厚方向)
伝熱フィン	銅 (C1020)	26.85 326.85 526.85	398 383 371
内部気体	ヘリウム	26.85 126.85 226.85 326.85	0.1527 0.1882 0.2212 0.2523
周囲気体	空気	26.85 126.85 226.85	0.02614 0.03305 0.03951

(注) レジンは「BISCO PRODUCTS, Inc, “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).」、アルミニウム合金は「American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)”, (2010).」、ほう素添加アルミニウム合金は中性子吸収材メーカー資料、銅、ヘリウム及び空気は「(一社) 日本機械学会, 『伝熱工学資料 改訂第4版』, (1986).」に基づく。

第2-5表 乾式キャスク（タイプ1）外表面の熱伝達率

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 ^(注) (W/(m ² ・K))
乾式キャスク外表面 (側面)	垂直円筒	293.15	20	$1.55 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$
乾式キャスク外表面 (上面)	上向き 水平平板	293.15	20	$1.57 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.32 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.12 \times \Delta t^{1/3}$
乾式キャスク外表面 (下部端板)	下向き 水平平板	293.15	20	$0.918 \times \Delta t^{1/5}$
		373.15	100	$0.898 \times \Delta t^{1/5}$
		473.15	200	$0.878 \times \Delta t^{1/5}$

(注) 熱伝達率は「(一社) 日本原子力学会, 『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)』, (2014).」に基づき下記の式を用いて計算する。

$$h = 0.129\lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times \text{Pr} \right)^{1/3} \quad (\text{垂直円筒})$$

$$h = 0.13\lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times \text{Pr} \right)^{1/3} \quad (\text{上向き水平平板})$$

$$h = 0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times D^3 \times \text{Pr} \right)^{1/5} \quad (\text{下向き水平平板})$$

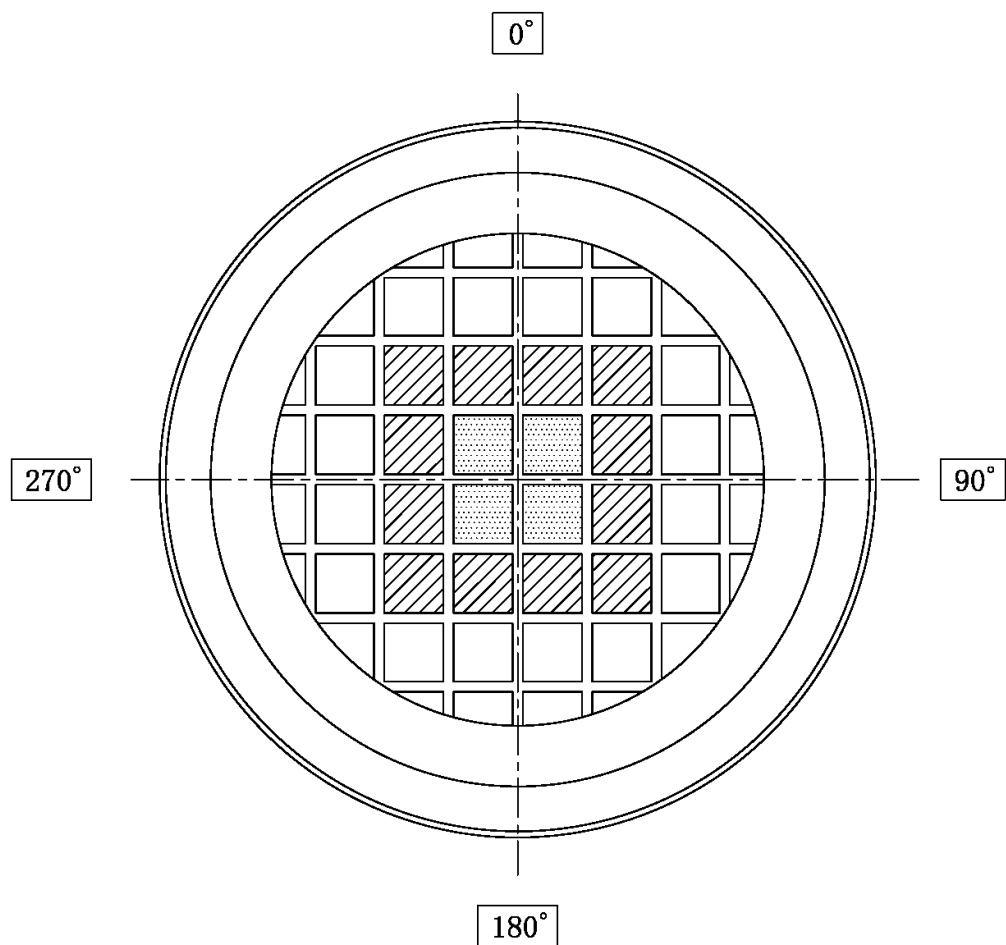
ここで、

- h : 熱伝達率 (W/(m²・K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m・K))
- g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- β : 体積膨張係数 (1/K)
- Δt : 周囲気体 (空気) と外表面の温度差 (K)
- D : 代表長さ (m)
- Pr : プラントル数 (—)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)

第2-6表 材料の熱的性質（その他）

材料	ふく射率 (一)	吸収率 (一)
塗装面 ^(注)	0.8	0.5

(注) ふく射率は「(一社) 日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).」、吸収率は「三菱重工業(株), 「化学試験報告書 エポキシ系樹脂の熱特性測定結果」, (2006).」に基づく。また、評価が保守側となるように、キャスク同士のふく射は無視する。



-  : 14×14燃料48,000MWd/t型における最高燃焼度の崩壊熱量
(中央部16体のうち中心4 体)
-  : 中央部16体の崩壊熱量が14×14燃料48,000MWd/t型における
平均燃焼度の崩壊熱量16体分となるように調整した崩壊熱量
(中央部16体のうち中心4体を除く12 体)
-  : 14×14燃料39,000MWd/t型における平均燃焼度の崩壊熱量
(外周部16体)

第2-5図 使用済燃料集合体の収納条件

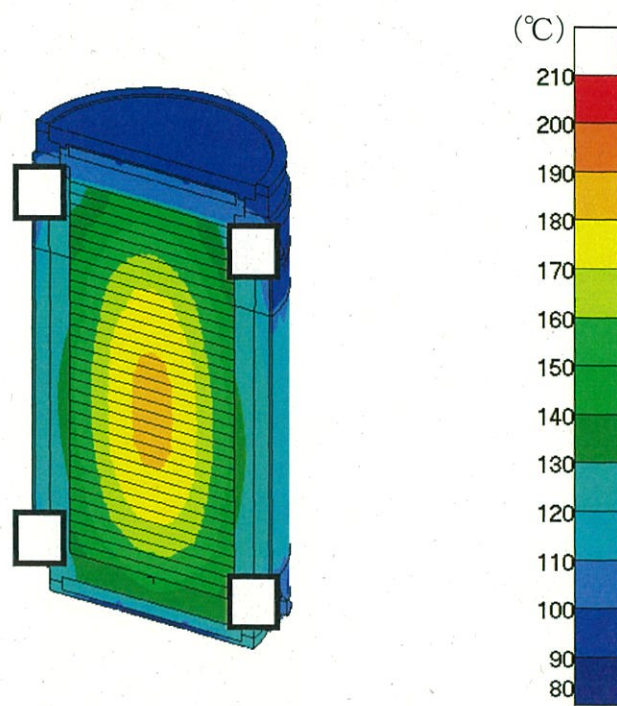
2.5 評価結果

評価結果を第2-7表に示す。また、全体モデルの温度分布を第2-6図に、燃料集合体モデルの温度分布を第2-7図に示す。

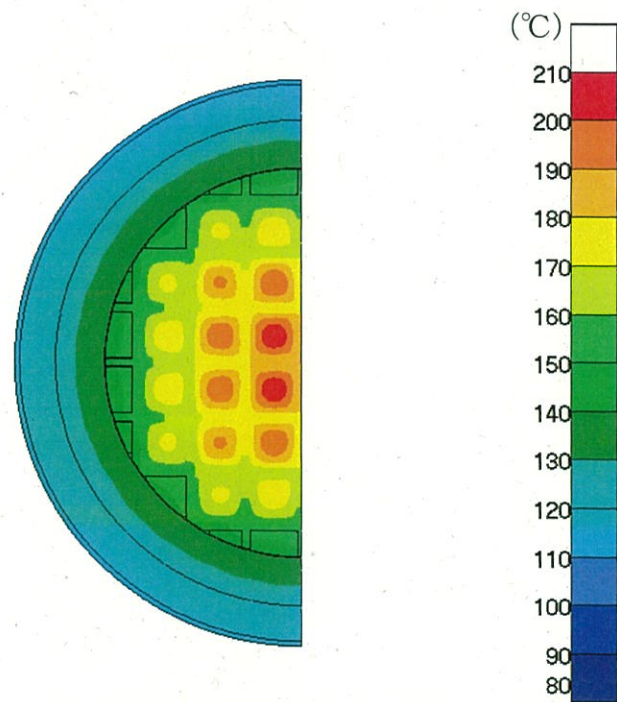
本表に示すとおり、燃料被覆管の温度は温度制限値を下回っており、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できる。

第2-7表 評価結果

対象となる部位	評価結果 (℃)	温度制限値 (℃)
燃料被覆管	209	275

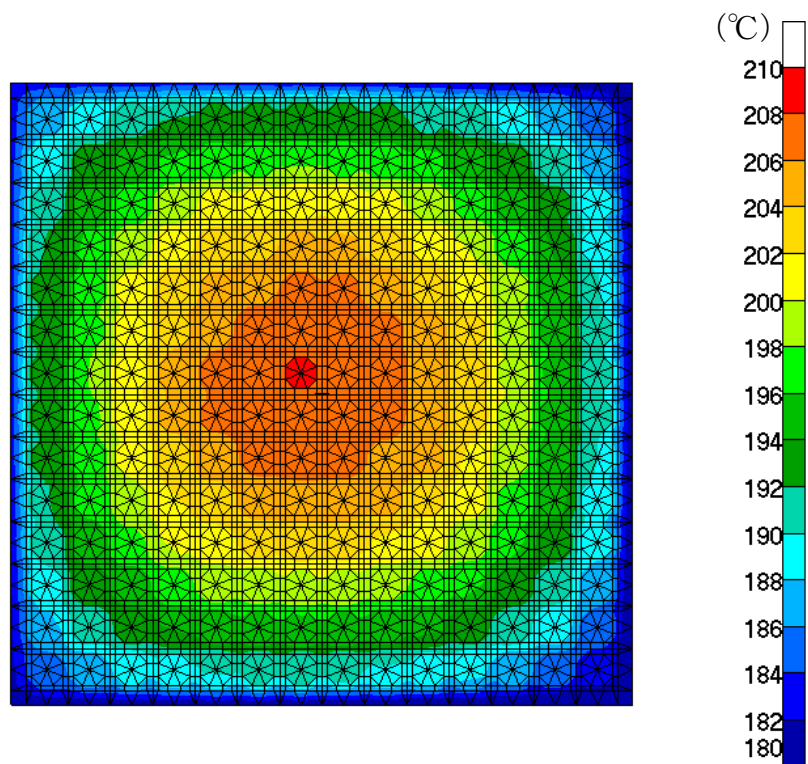


(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

第2-6図 除熱解析結果 (全体モデル)



第2-7図 除熱解析結果（燃料集合体モデル）

3. 乾式キャスク（タイプ2）の除熱設計

乾式キャスクの除熱機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 乾式キャスク各部の温度評価

a. 乾式キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び乾式キャスク周囲の温度を条件とし、及び乾式キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び乾式キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、乾式キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、乾式キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と2) で求めた乾式キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

乾式キャスク（タイプ2）は、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できるように、使用済燃料から発生する崩壊熱を伝導、対流、ふく射により金属キャスクの外表面に伝え、周囲の空気等に伝達し除去する。乾式キャスク（タイプ2）内部のバスケットは、アルミニウム合金製のバスケットプレート、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材等により構成され、必要な伝熱性能を確保する。側部中性子遮蔽材部には除熱を促進するための銅製の伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。除熱評価によって、燃料被覆管の温度が温度制限値以下となり、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できることを確認する。なお、乾式キャスク各部の温度及び健全性については、資料10-3別紙1「使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について」に示す。

3.1 評価基準

評価基準を第3-1表に示す。

第3-1表 評価基準

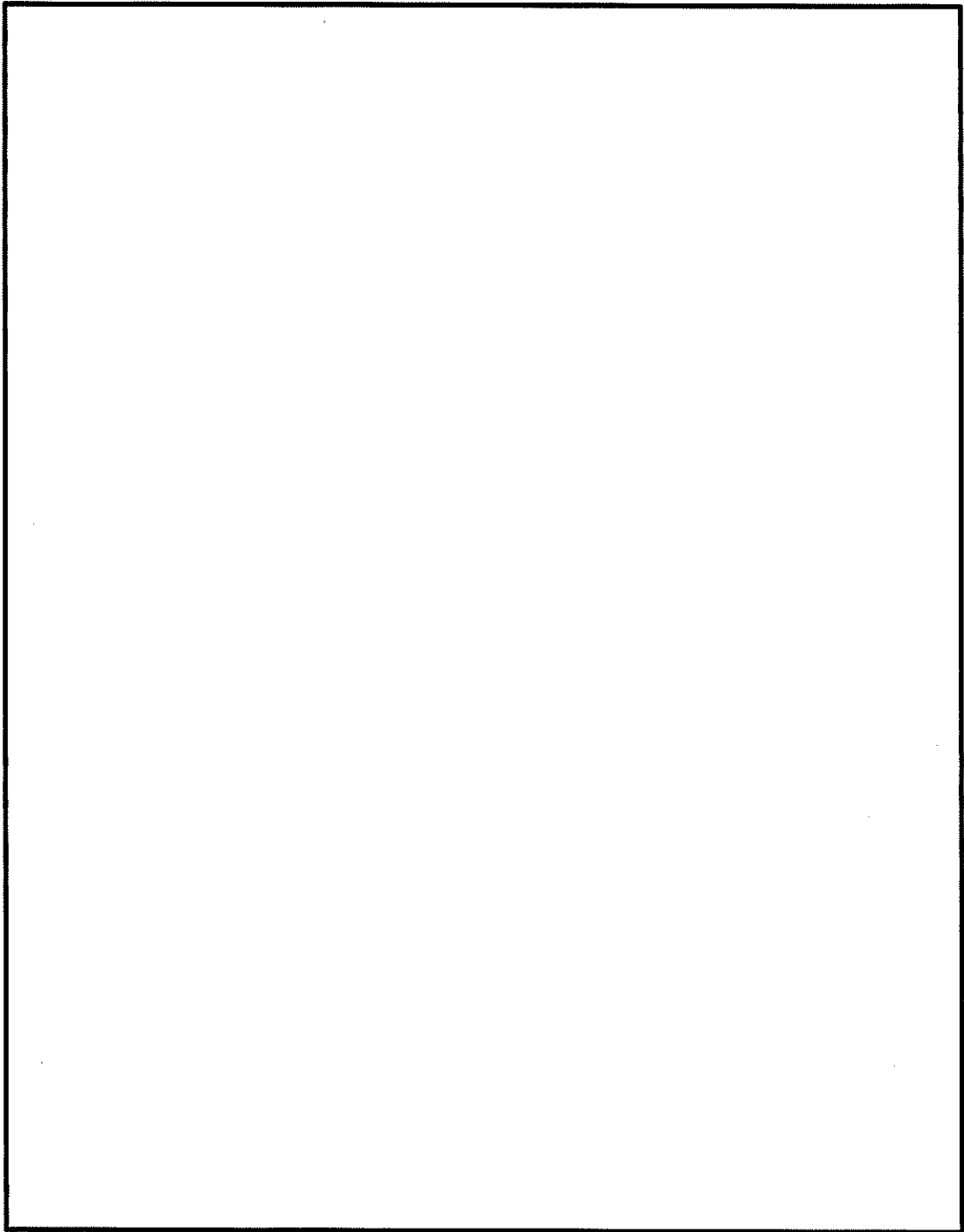
対象となる部位	温度制限値 (℃)	温度制限の考え方
燃料被覆管	275 ^(注)	燃料被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度、照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下とする。

(注)「(独)原子力安全基盤機構,『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証試験に関する試験最終成果報告書)』,(2007).」

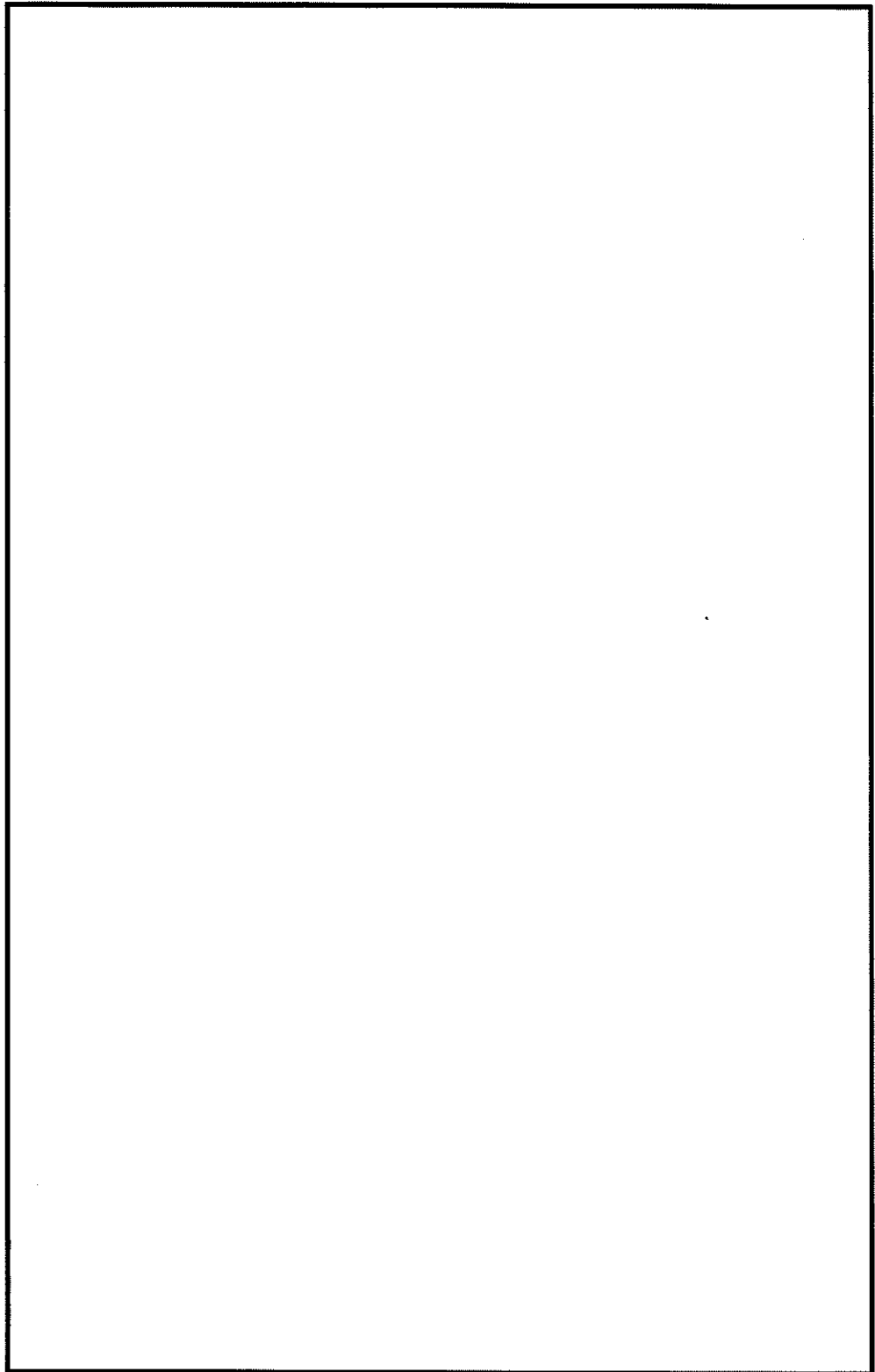
3.2 評価方法

乾式キャスク(タイプ2)の除熱解析は、乾式キャスク(タイプ2)の三次元180°対称全体モデル(以下「全体モデル」という。)及び燃料集合体モデルを用いて行う。燃料集合体モデルは、燃料被覆管の最高温度が発生する軸方向中央部についてモデル化する。全体モデルを第3-1図に、燃料集合体モデルを第3-2図に示す。

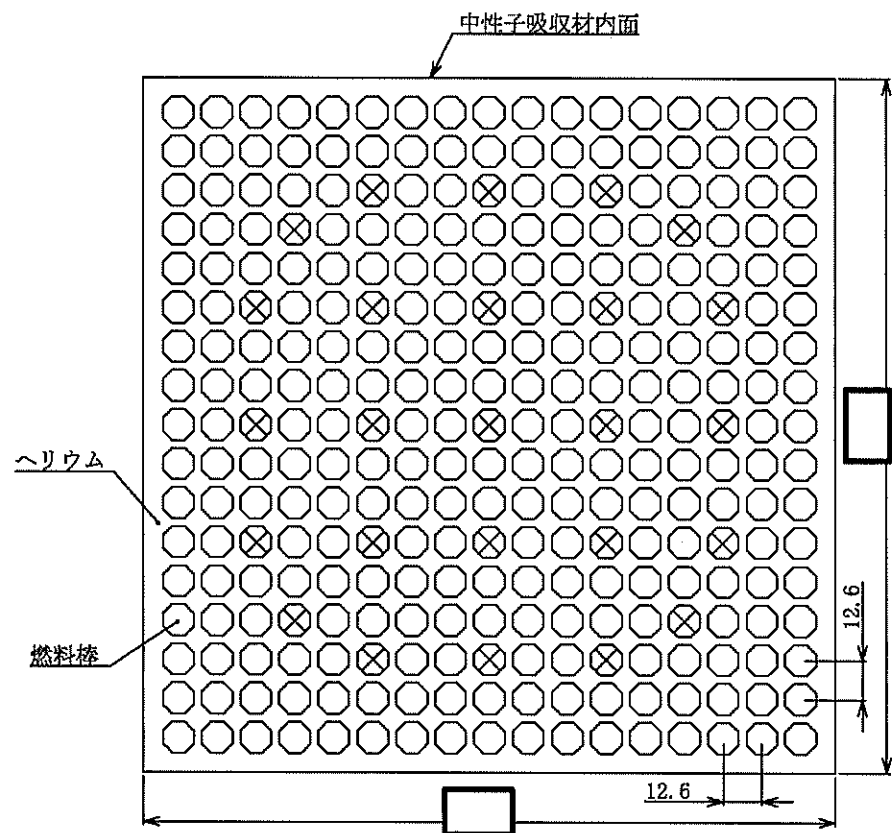
除熱解析には汎用解析コードABAQUSを用いる。全体モデル要素分割図を第3-3図に、燃料集合体モデル要素分割図を第3-4図に示す。なお、評価に用いる汎用解析コードABAQUSの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。



第3-1図 乾式キャスク（タイプ2）の全体モデル形状図(1/2)（縦断面図）



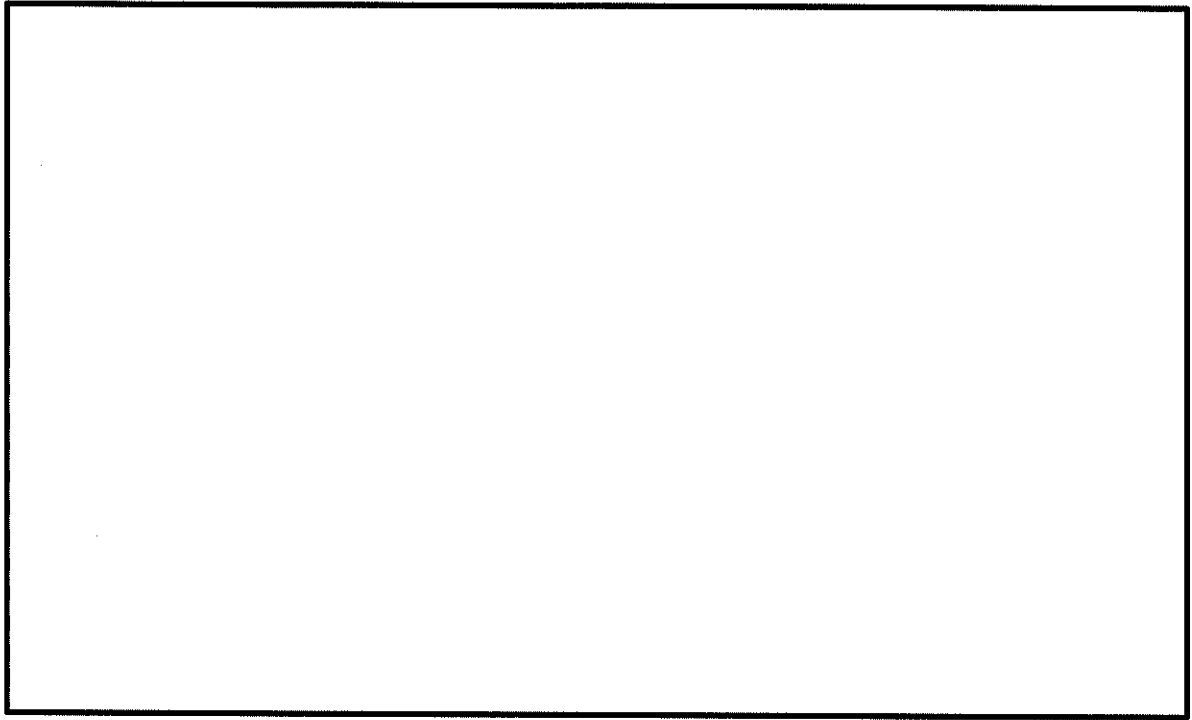
第3-1図 乾式キャスク（タイプ2）の全体モデル形状図(2/2)（横断面図）



(単位：mm)

(注) ⊗は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

第3-2図 乾式キャスク（タイプ2）の燃料集合体モデル形状図

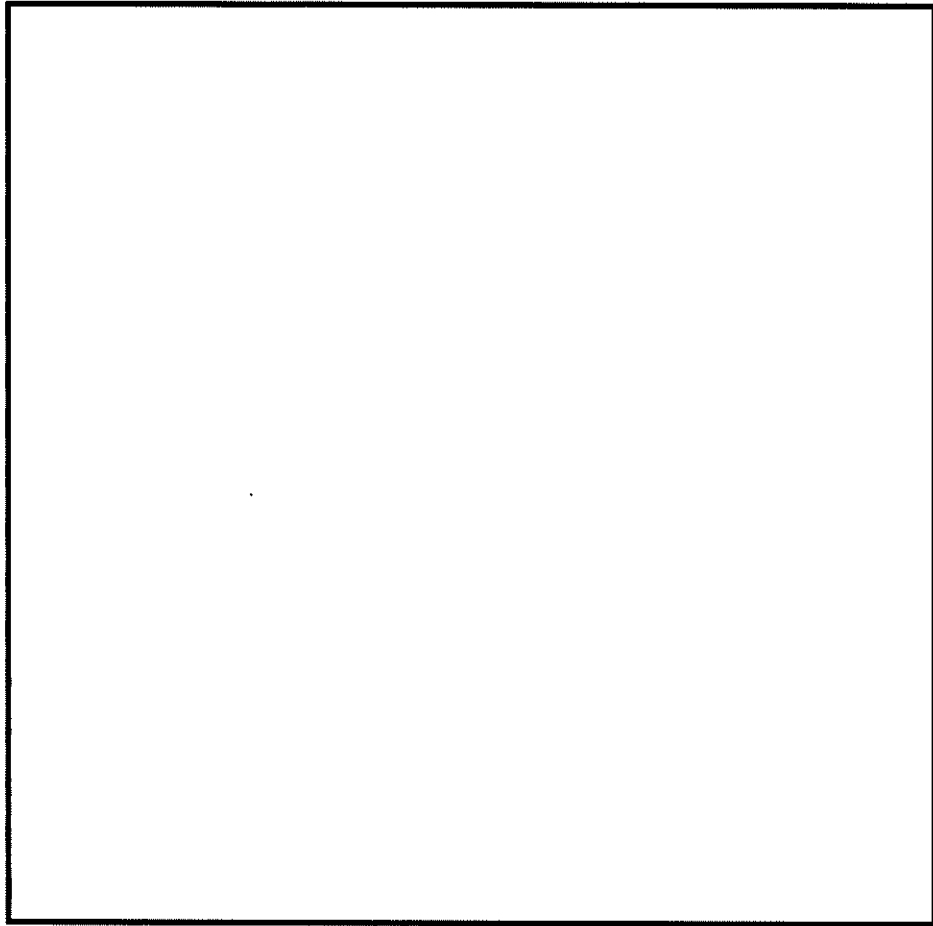


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

第3-3図 全体モデル要素分割図



第3-4図 燃料集合体モデル要素分割図

3.3 評価対象燃料

乾式キャスク（タイプ2）に収納する使用済燃料集合体は、 17×17 燃料48,000MWd/t型の（A型）及び（B型）である。ここで、乾式キャスク（タイプ2）の仕様では、（A型）の冷却期間が15年以上であるのに対して、（B型）の冷却期間が17年以上であることから、これらのうち最も崩壊熱量が大きい 17×17 燃料48,000MWd/t型（A型）を対象として除熱解析を実施する。

3.4 評価条件

除熱解析の条件は以下のとおりである。使用済燃料の崩壊熱量は、資料14「使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」に示すORIGEN2コードによる解析にて算出された結果を適用する。崩壊熱量の計算には、使用済燃料集合体平均燃焼度に対するピーキングファクターを考慮する。乾式キャスク（タイプ2）1基当たりの崩壊熱量を第3-2表に示す。なお、A型の方がB型よりも冷却期間が短いことから、崩壊熱量がより大きいため、A型を評価対象としている。

- (1) 全体モデルでは、燃料集合体を均質体としてモデル化し、ピーキングファクターを考慮した発熱分布を与える。この崩壊熱量は、ヘリウムガスの熱伝導とふく射により燃料集合体からバスケット、バスケットから胴に伝わる。
- (2) 全体モデルでは、中央領域12体に最高燃焼度の崩壊熱量を入力する。一方、外周部12体には、キャスクに収納する24体の崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量24体分となるように調整した崩壊熱量を入力する。
- (3) 燃料集合体モデルでは、燃料集合体の温度が最も高くなる燃料有効部中央の径方向断面についてモデル化する。
- (4) 燃料集合体モデルでは、燃料棒を1本ずつの独立した均質体としてモデル化する。
- (5) 崩壊熱量は、胴から各部材の熱伝導により金属キャスク外表面に伝わり、金属キャスク外表面から自然対流及びふく射により周囲に放熱される。

乾式キャスク（タイプ2）の貯蔵姿勢、周囲温度及び貯蔵建屋壁面温度を第3-3表に示す。また、除熱解析に使用する材料の熱的性質を第3-4表、第3-5表及び第3-6表に示す。さらに、使用済燃料集合体の収納条件を第3-5図に示す。

第3-2表 乾式キャスク（タイプ2）1基当たりの崩壊熱量（除熱解析の適用条件）

使用済燃料集合体の種類		17×17燃料
		48,000MWd/t型
		A型
計算条件	最高燃焼度 (MWd/t)	48,000
	平均燃焼度 (MWd/t)	44,000
	平均比出力 (MW/t)	38.4
	照射期間 (日)	
	初期濃縮度 (wt%) (注1)	
	冷却期間 (年)	15 (注2)
	ウラン質量 (kg/体)	
	ピーキング ファクター (注3)	
計算結果	燃料集合体 1体当たりの崩壊熱量 (W)	754.0 (平均燃焼度)
収納体数 (体)		24
1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注4)		18.1

(注1) 収納される使用済燃料集合体の最小値を用いる。

(注2) 回収ウラン燃料については、発熱量が通常のウラン燃料と同等以下となる期間（20年以上）冷却したものを中央部に収納する。

(注3) ノードは燃料有効部を軸方向に□したものである。

(注4) 除熱解析では、ピーキングファクターを考慮した崩壊熱量から計算した設計崩壊熱量を用いる。

第3-3表 評価条件

項目	評価条件
貯蔵姿勢	たて置き
周囲温度 (°C)	50
貯蔵建屋壁面温度 (°C)	65

第3-4表 材料の熱的性質 (1/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 ^(注) (W/(m・K))
胴 一次蓋 二次蓋	炭素鋼 (GLF1)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼 (SGV480)	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
下部端板 底部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304)	26.85	16.0
		126.85	16.5
		326.85	19.0
		526.85	22.5
		726.85	25.7
トラニオン	析出硬化系 ステンレス鋼 (SUS630)	20	17.3
		125	18.9
		225	20.7
		325	22.2
		425	23.3
		525	23.9
		625	24.5
		700	25.1

(注) 炭素鋼及びステンレス鋼は「(一社)日本機械学会,『伝熱工学資料 改訂第4版』, (1986).」、析出硬化系ステンレス鋼は「American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)”, (2010).」に基づく。

第3-4表 材料の熱的性質 (2/2)

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 ^(注) (W/(m・K))
蓋部中性子遮蔽材 底部中性子遮蔽材 側部中性子遮蔽材	レジン	—	0.646
バスケットプレート	アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	20 125 200	162.1 170.1 173.6
中性子吸収材	ほう素添加 アルミニウム合金	—	110 (長手方向) 70 (板厚方向)
伝熱フィン	銅 (C1020)	26.85 326.85 526.85	398 383 371
内部気体	ヘリウム	26.85 126.85 226.85 326.85	0.1527 0.1882 0.2212 0.2523
周囲気体	空気	26.85 126.85 226.85	0.02614 0.03305 0.03951

(注) レジンは「BISCO PRODUCTS, Inc, “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).」、アルミニウム合金は「American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)”, (2010).」、ほう素添加アルミニウム合金は中性子吸収材メーカー資料、銅、ヘリウム及び空気は「(一社) 日本機械学会, 『伝熱工学資料 改訂第4版』, (1986).」に基づく。

第3-5表 乾式キャスク（タイプ2）外表面の熱伝達率

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 ^(注) (W/(m ² ・K))
乾式キャスク外表面 (側面)	垂直円筒	293.15	20	$1.55 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta t^{1/3}$
乾式キャスク外表面 (上面)	上向き 水平平板	293.15	20	$1.57 \times \Delta t^{1/3}$
		373.15	100	$1.32 \times \Delta t^{1/3}$
		473.15	200	$1.12 \times \Delta t^{1/3}$
乾式キャスク外表面 (下部端板)	下向き 水平平板	293.15	20	$0.898 \times \Delta t^{1/5}$
		373.15	100	$0.879 \times \Delta t^{1/5}$
		473.15	200	$0.860 \times \Delta t^{1/5}$

(注) 熱伝達率は「(一社) 日本原子力学会, 『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)』, (2014).」に基づき、下記の式を用いて計算する。

$$h = 0.129\lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times \text{Pr} \right)^{1/3} \quad (\text{垂直円筒})$$

$$h = 0.13\lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times \text{Pr} \right)^{1/3} \quad (\text{上向き水平平板})$$

$$h = 0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times D^3 \times \text{Pr} \right)^{1/5} \quad (\text{下向き水平平板})$$

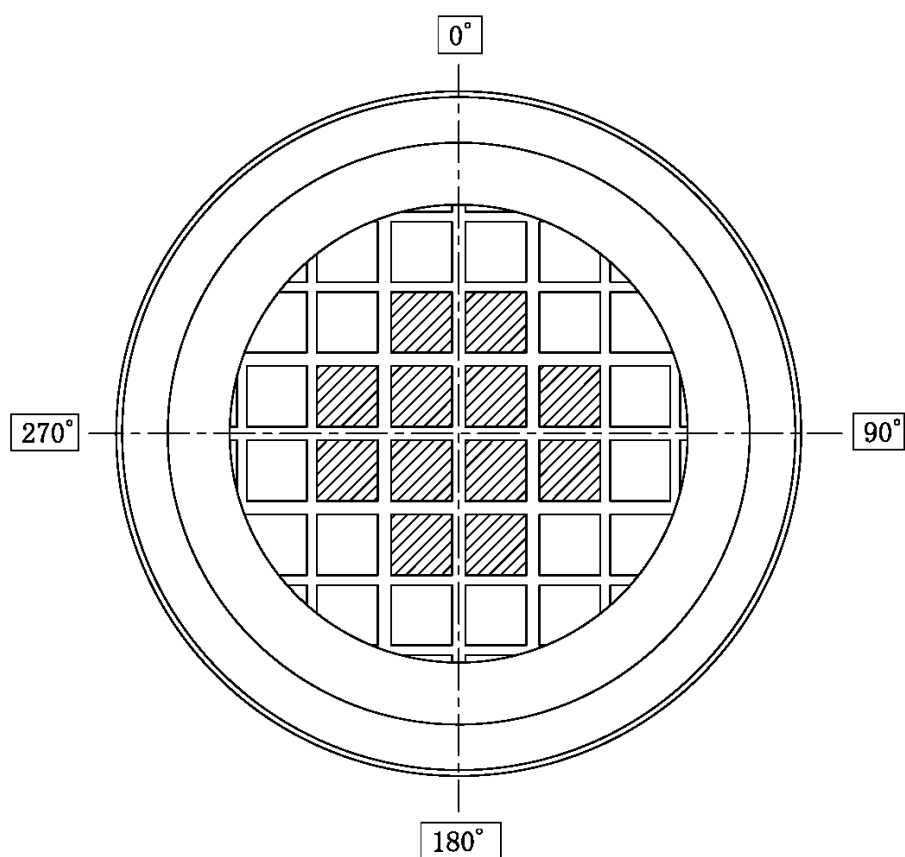
ここで、

- h : 熱伝達率 (W/(m²・K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m・K))
- g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- β : 体積膨張係数 (1/K)
- Δt : 周囲気体 (空気) と外表面の温度差 (K)
- D : 代表長さ (m)
- Pr : プラントル数 (—)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)

第3-6表 材料の熱的性質（その他）

材料	ふく射率 (－)	吸収率 (－)
塗装面 ^(注)	0.8	0.5

(注) ふく射率は「(一社) 日本機械学会, 『伝熱工学資料 改訂第4版』, (1986).」、吸収率は「三菱重工業(株), 『化学試験報告書 エポキシ系樹脂の熱特性測定結果』, (2006).」に基づく。また、評価が保守側となるように、キャスク同士のふく射は無視する。



 : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部12 体)

 : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12体) で平均化した崩壊熱量 (外周部12 体)

第3-5図 使用済燃料集合体の収納条件

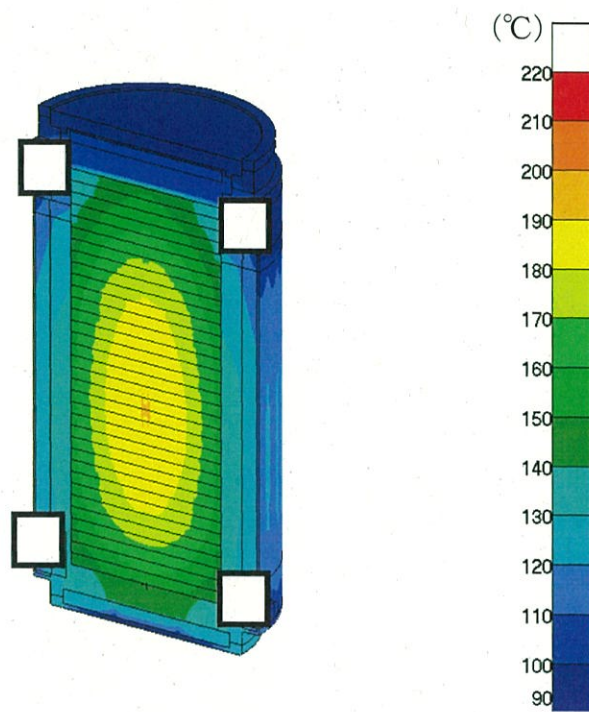
3.5 評価結果

評価結果を第3-7表に示す。また、全体モデルの温度分布を第3-6図に、燃料集合体モデルの温度分布を第3-7図に示す。

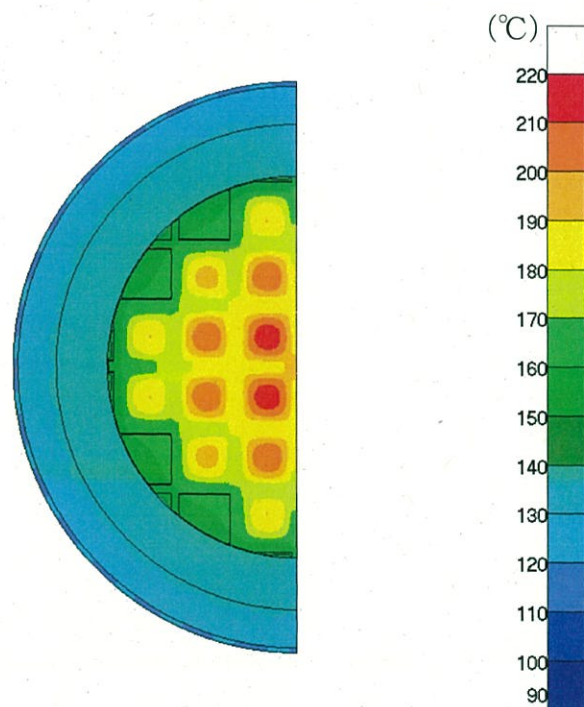
本表に示すとおり、燃料被覆管の温度は温度制限値を下回っており、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できる。

第3-7表 評価結果

対象となる部位	評価結果 (℃)	温度制限値 (℃)
燃料被覆管	219	275

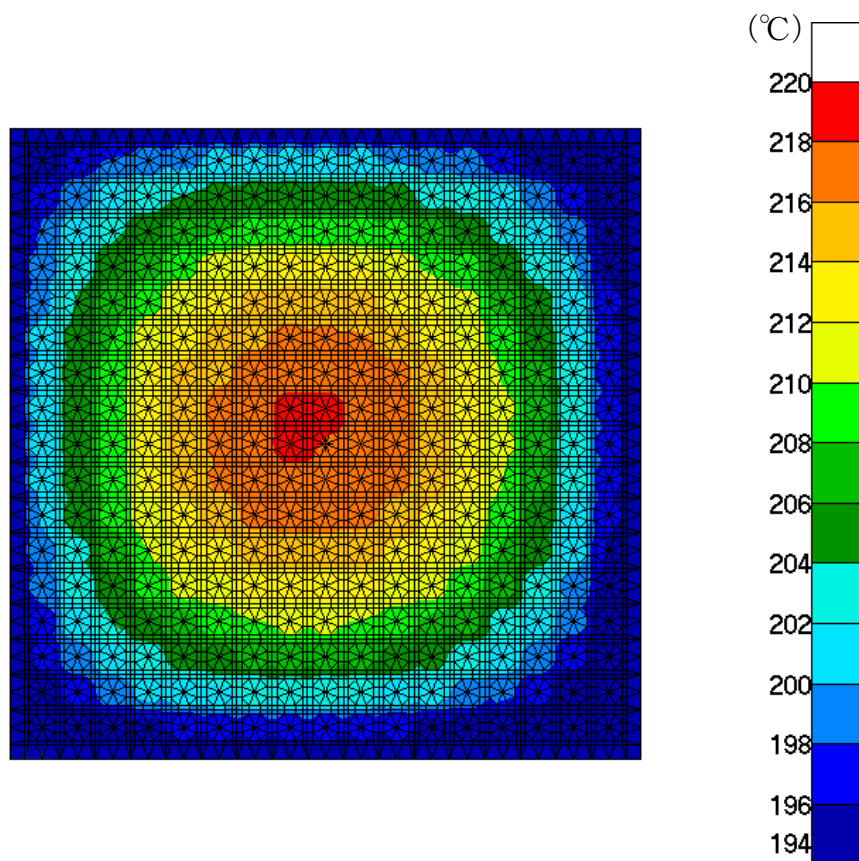


(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

第3-6図 除熱解析結果 (全体モデル)



第3-7図 除熱解析結果（燃料集合体モデル）

4. 乾式キャスクの除熱機能を阻害しないことの説明

乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）については、使用済燃料乾式貯蔵建屋内（以下「乾式貯蔵建屋」という。）で貯蔵することとしており、それぞれ貯蔵時の周囲温度を50℃として容器の除熱機能の評価を行っている。

除熱に関する貯蔵建屋の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

- ・貯蔵建屋を設置する場合は、乾式キャスクの除熱機能を阻害しないこと。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

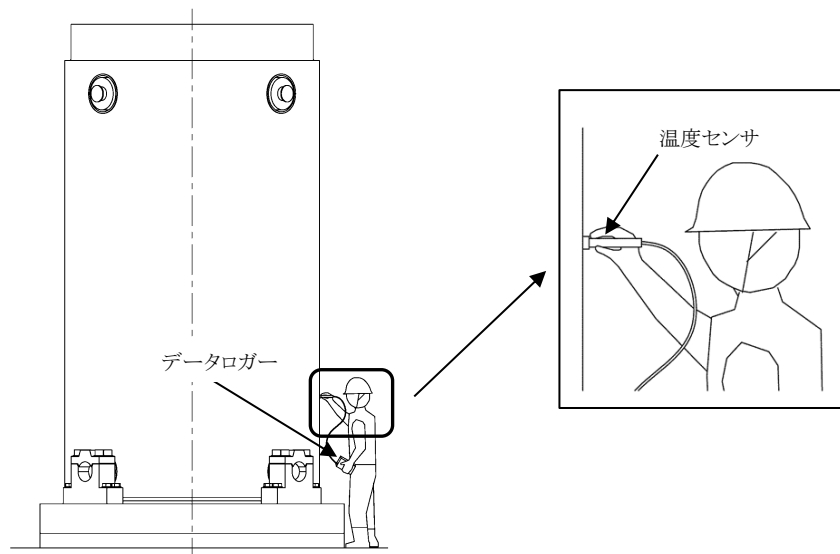
乾式貯蔵建屋は、乾式キャスクの除熱を阻害しないように自然対流が行える構造とするため給排気口を設ける設計としている。乾式貯蔵建屋が、乾式キャスク（タイプ1及びタイプ2）の除熱機能を阻害しないことを別添1「使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能を阻害しないことの説明書」に示す。

また、乾式貯蔵建屋の給排気口が積雪等により閉塞しないことについては、資料2-1「発電用原子炉施設の自然現象等への配慮に関する説明書」に示す。

5. 除熱機能に関する監視について

5.1 乾式キャスクの除熱機能の監視装置

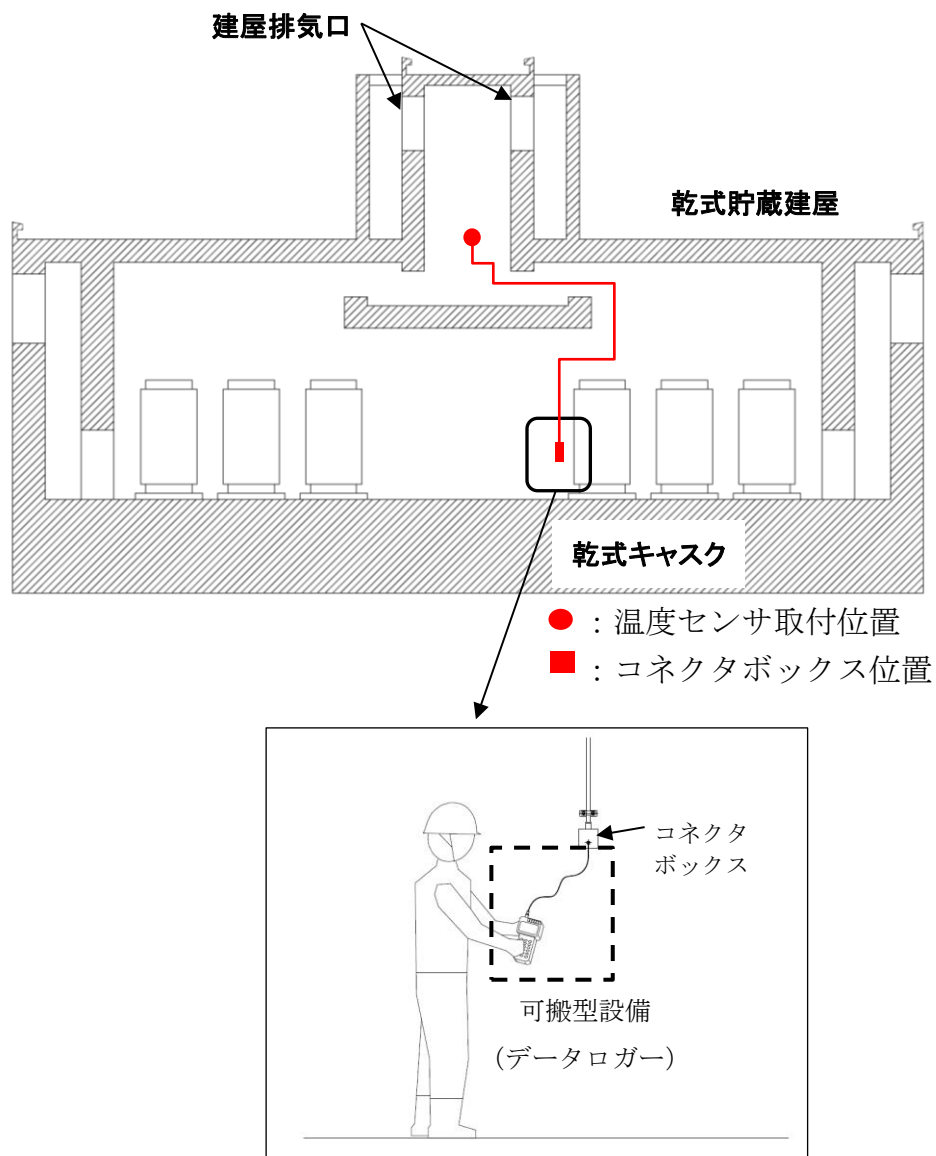
乾式キャスク（タイプ1 及びタイプ2）の除熱機能が維持されていることを監視するため、可搬型設備として使用済燃料乾式貯蔵容器表面温度計（以下「キャスク表面温度計」という。）を設置する。キャスク表面温度計は、第5-1 図に示すとおり、温度センサを乾式キャスクの外表面に接触させ、乾式キャスク（タイプ1 及びタイプ2）の表面温度を測定できる設計とする。



第5-1 図 キャスク表面温度計による測定方法

5.2 乾式キャスクの除熱機能を阻害していないことの監視装置

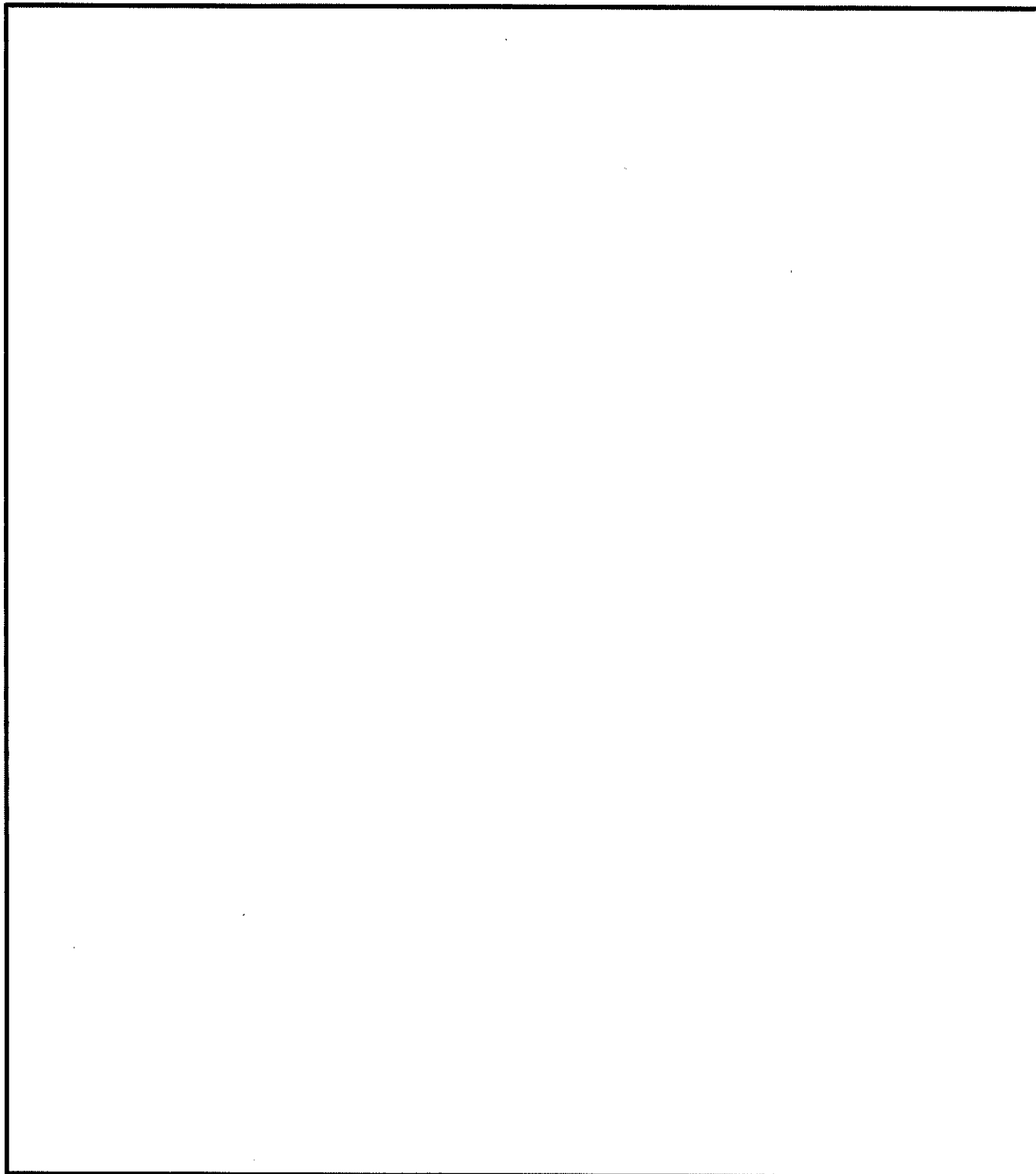
乾式貯蔵建屋が乾式キャスク（タイプ1 及びタイプ2）の除熱機能を阻害していないことを監視するため、常設設備（一部可搬型設備）として使用済燃料乾式貯蔵建屋内雰囲気温度計（以下「建屋内雰囲気温度計」という。）を設置する。建屋内雰囲気温度計は第 5-2 図に示すとおり、乾式貯蔵建屋内の雰囲気温度を測定できる設計とする。



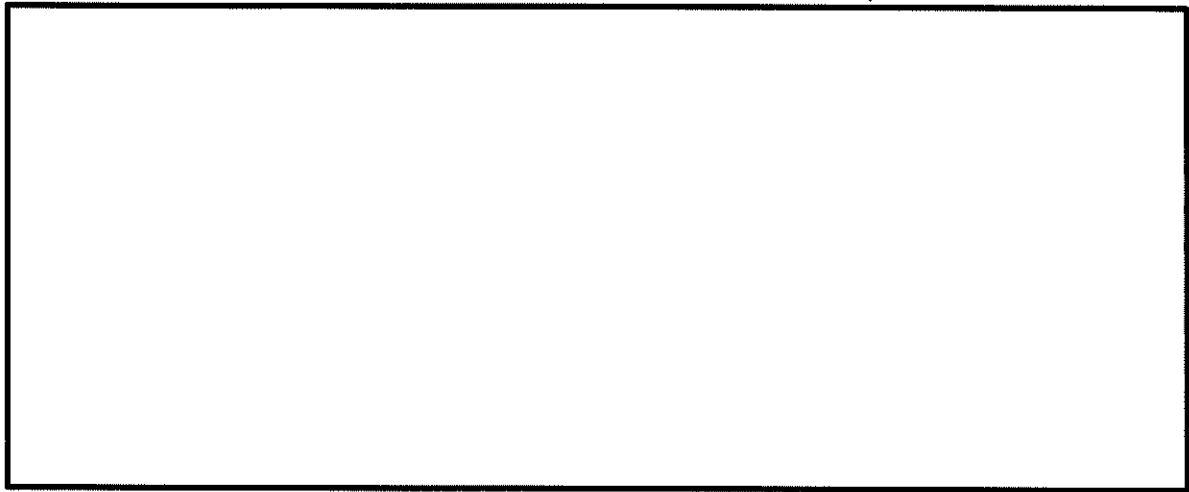
第 5-2 図 建屋内雰囲気温度計による測定方法

5.3 除熱機能に関する監視装置の取付箇所及び保管場所について

キャスク表面温度計及び建屋内雰囲気温度計の取付箇所及び保管場所について、第 5-3 図に示す。



第 5-3 図 キャスク表面温度計及び建屋内雰囲気温度計の取付箇所及び保管場所 (1/2)



第 5-3 図 キャスク表面温度計及び建屋内雰囲気温度計の取付箇所及び保管場所 (2/2)

5.4 除熱機能の監視頻度について

乾式キャスクの除熱機能の監視に関する評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

- ・乾式キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、乾式キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。

乾式キャスク表面温度は、貯蔵開始直後が最も高く、使用済燃料の発熱量低下とともに乾式キャスクの表面温度は低下する。また、資料 10-3 別紙 1「使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について」に示すとおり、設計貯蔵期間中（60 年間）の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して必要な耐食性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持するため、設計貯蔵期間中において、乾式キャスクの除熱機能は低下することはないが、資料 11「使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」に示す蓋間圧力の監視に合わせ、3 ヶ月に 1 度の頻度で、キャスク表面温度計による測定を行う。

建屋内雰囲気温度計による測定頻度についても、キャスク表面温度計による測定に合わせて 3 ヶ月に 1 度の頻度で測定する。

使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能を
阻害しないことの説明書

目 次

	頁
1. 概要	資 13 別添 1-1
2. 除熱設計	資 13 別添 1-1
3. 除熱性能評価	資 13 別添 1-3
3.1 評価方法	資 13 別添 1-3
3.2 評価条件	資 13 別添 1-3
3.3 評価モデル	資 13 別添 1-3
3.4 計算方法	資 13 別添 1-7
4. 評価結果	資 13 別添 1-8

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

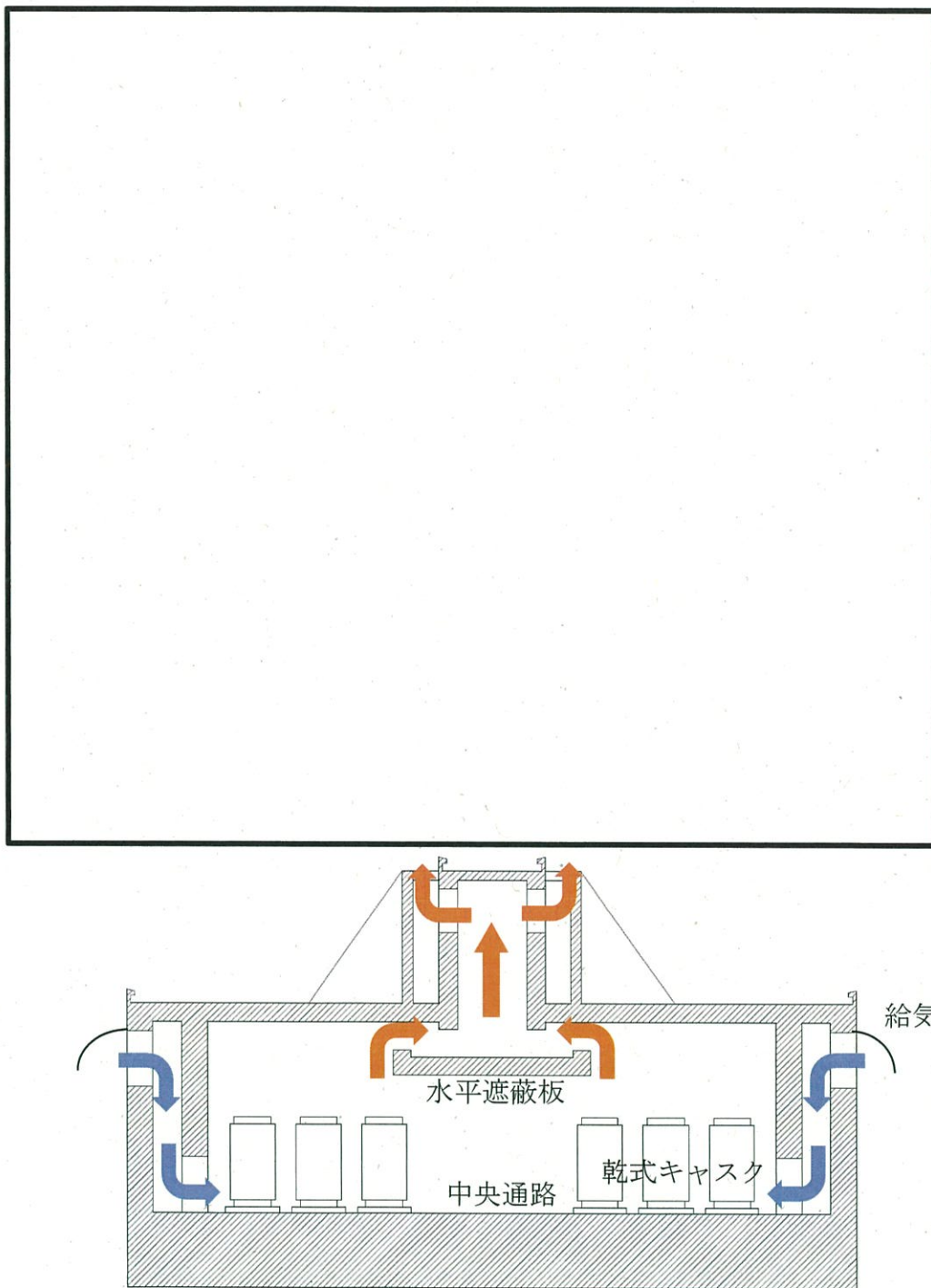
1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「乾式貯蔵建屋」という。）は、使用済燃料を収納した使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）を 45 基貯蔵できる容量を有しており、給気口及び排気口を有する構造により、乾式貯蔵建屋内の空気の自然対流で、貯蔵した乾式キャスクを連続的に冷却する設計である。

本資料は、乾式貯蔵建屋の除熱設計により、乾式キャスクの除熱機能を阻害しないことを説明するものである。

2. 除熱設計

乾式貯蔵建屋の貯蔵エリアの形状を第 2-1 図に示す。貯蔵エリアは、4 つの区画に区切られており、1 区画あたり、給排気口を各 2 組配置し、乾式キャスクを最大 12 基貯蔵できる設計としている。各区画の流路は、中央通路を挟んで対称に形成され、給気口から流入した空気は、貯蔵した乾式キャスクと熱交換し、乾式貯蔵建屋頂部の排気口から排出される。



第 2-1 図 乾式貯蔵建屋の除熱設計

3. 除熱性能評価

3.1 評価方法

乾式貯蔵建屋では、乾式キャスクの冷却を空気の自然対流によって行うため、乾式貯蔵建屋の除熱性能は、熱ドラフト力と空気の圧力損失で決まる。

熱ドラフト力は、乾式貯蔵建屋内の空気と外気との密度差（排気温度と給気温度の温度差による空気の密度差）及び給排気口の高低差（ドラフト高さ）で決まる。一方、圧力損失は乾式貯蔵建屋内を空気が流れることによって生じる流路の圧力損失のことであり、流路の圧力損失係数と通過流量で決まる。

ここで、排気温度が 50℃以下の場合、乾式キャスクの健全性が確保されるため、給排気温度差（50℃-33℃=17℃）による乾式貯蔵建屋の熱ドラフト力が空気の圧力損失より大きいことを評価する。

3.2 評価条件

除熱性能評価における評価条件を第 3-1 表に示す。

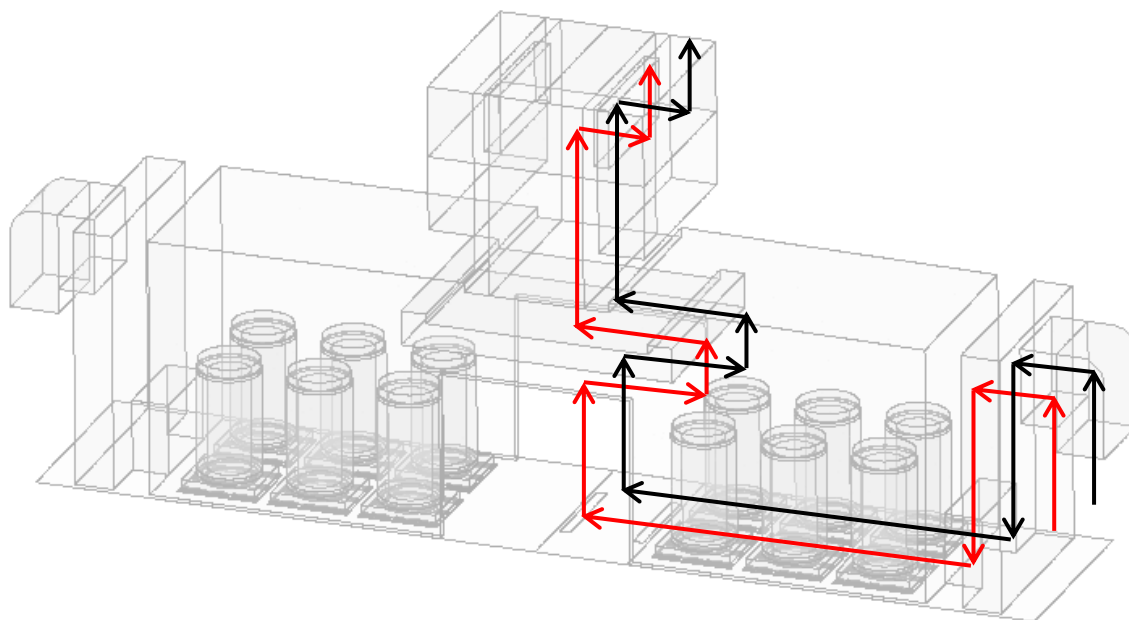
第 3-1 表 除熱評価の評価条件

項 目	条 件	備 考
乾式キャスクの外径	2596mm	
乾式キャスクの全長	5349mm	床面から乾式キャスク頂部までの高さ
乾式キャスクの発熱量(q)	16kW/基	
給気温度 (T_{in})	33℃	冷暖房設計用乾球温度・露点温度における TAC2.5%温度*の最高温度（空気調和・衛生工学便覧[第 14 版]）
排気温度 (T_{out})	50℃	乾式キャスクの除熱機能に関する評価条件

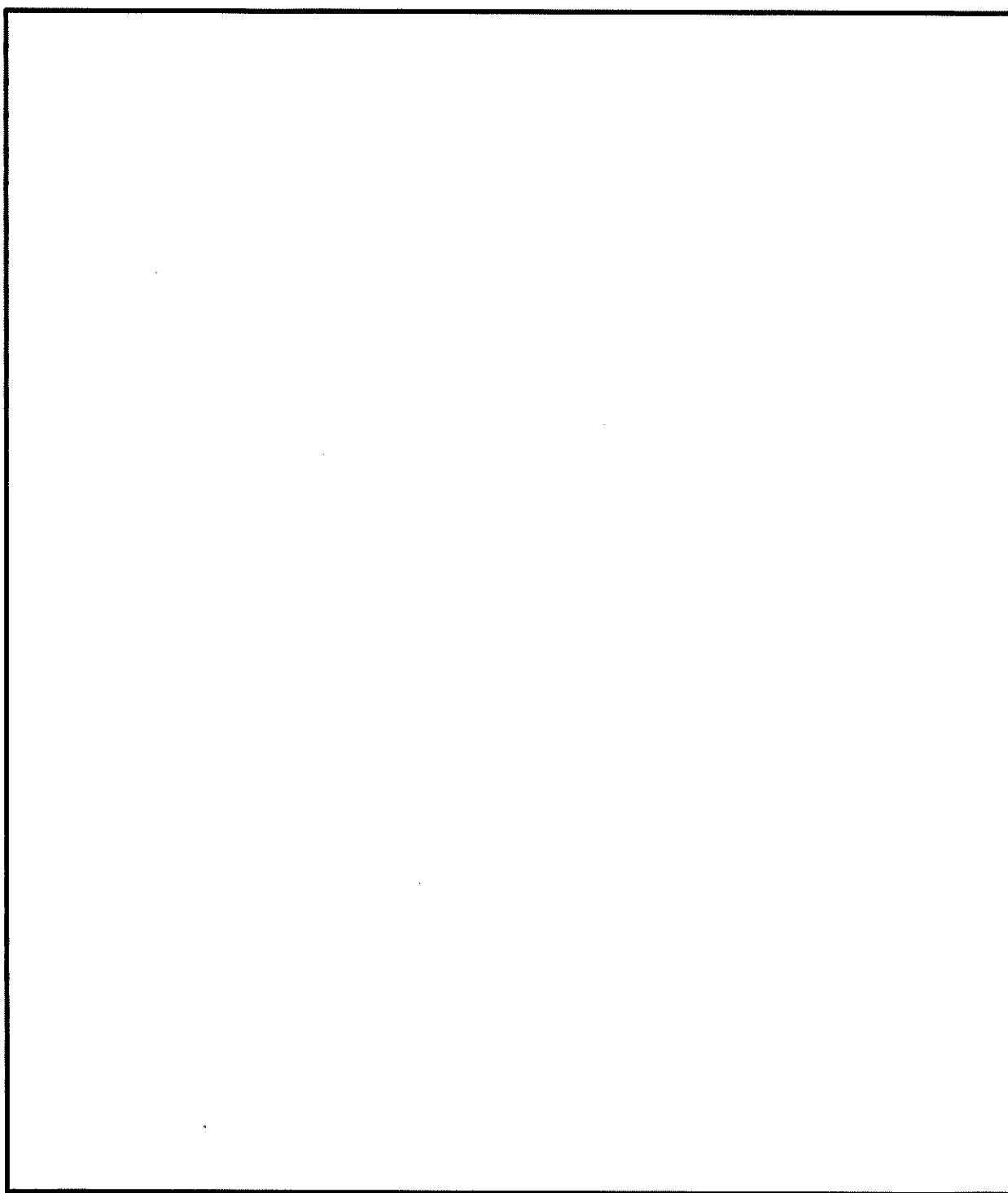
※ TAC2.5%温度とは、夏季（6～9 月）のうち高温側 2.5%（約 73 時間）は、その温度を超過することを許容する温度である。

3.3 評価モデル

除熱性能評価において想定する空気の流路、及び各流路の寸法を第 3-1 図、第 3-2 図に示す。流路は各区画内で中央通路を挟んで対称であるため、片側の流路の乾式キャスク 1 列分で評価を実施する。また、第 3-2 図に示す 12 か所の圧力損失箇所における流路寸法、圧力損失係数を第 3-2 表に示す。



第 3-1 図 除熱評価において想定する空気の流路



第 3-2 図 除熱評価において想定する各流路の寸法

第 3-2 表 想定する流路における圧力損失箇所と圧力損失係数

対象流路		部位	流路寸法[m] ※1	圧力損失の要素 (添付 1 参照)	圧力損失 係数 ζ
給気経路	給気口への取込	①	$(3.60 - 0.06) / 2 \times (3.20 - 0.06)$	・ 曲がり (H/W=1.0) 1.20 ・ 管入口 0.50	1.70
	給気口	②	$(3.60 - 0.06) / 2 \times (3.20 - 0.06)$	・ 防護柵 0.70	0.70
	給気風路の曲がり	③	$(3.90 - 0.06) / 2 \times (1.63 - 0.06)$	・ 曲がり (H/W=2.0) 1.10×2	2.20
	貯蔵エリアへの吐出口	④	$(3.90 - 0.06) / 2 \times (3.00 - 0.06)$	・ 管出口 0.88	0.88
キャスクを横切る流れ		⑤	$(8.13 - 0.06) / 2 \times (5.349 - 0.012)$	・ 円柱 0.74×3	2.22
上昇流 1		⑥	$(8.13 - 0.06) / 2 \times (8.58 - 0.06) / 2$	・ 曲がり (H/W=1.5) 1.10×2	2.20
上昇流 2		⑦	$(8.13 - 0.06) / 2 \times (2.541 - 0.06 - 0.012)$	・ 曲がり (H/W=3.0) 0.98×2	1.96
水平遮蔽板の入口		⑧	$(8.13 - 0.06) / 2 \times (1.43 - 0.06)$	・ 管入口 0.50	0.50
水平遮蔽板の出口		⑨	$(8.13 - 0.06) / 2 \times (1.53 - 0.06)$	・ 管出口 0.88	0.88
排気経路	排気風路の曲がり	⑩	$(8.13 - 0.06) / 2 \times (3.98 - 0.06) / 2$	・ 曲がり (H/W=4.0) 0.92×2	1.84
	排気口	⑪	$(5.70 - 0.06) / 2 \times (2.50 - 0.06)$	・ 管入口 0.50 ・ 防護柵 0.70 ・ 曲がり (H/W=2.0) 1.10	2.30
	排気口からの放出	⑫	$(5.70 - 0.06) / 2 \times (1.89 - 0.06)$	・ 整流板 0.52 ・ 管出口 0.88	1.40

※1 流路寸法については、乾式貯蔵建屋の施工許容差及び乾式キャスクと貯蔵架台の機械公差を考慮し、以下のとおり設定する。

- ・ 乾式貯蔵建屋は、JASS 5N「建築工事標準仕様書・同解説 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事」に従って設置するため、その施工許容差を考慮する。水平方向については、位置の許容差（ $\pm 0.02\text{m}$ ）と断面寸法の許容差（ $-0.005\text{m} \sim +0.015\text{m}$ ）を保守的に考慮すると、 0.05m （ $0.02\text{m} + 0.015\text{m} \times 2$ ）となる。垂直方向については、位置の許容差（ $\pm 0.03\text{m}$ ）と断面寸法の許容差（ $-0.005\text{m} \sim +0.015\text{m}$ ）を保守的に考慮すると、 0.06m （ $0.03\text{m} + 0.015\text{m} \times 2$ ）となる。よって、計算の簡便性から、流路寸法が保守的に一律 0.06m 狭くなることを想定する。
- ・ 乾式キャスクと貯蔵架台の高さ方向を考慮する流路（⑤、⑦）では、乾式キャスクの高さ方向の許容差（ $\pm 0.01\text{m}$ ）と貯蔵架台の高さ方向の許容差（ $\pm 0.0012\text{m}$ ）を保守的に考慮し、流路寸法が 0.012m 狭くなることを想定する。

3.4 計算方法

(1) 熱ドラフト力 H_{th} の計算

熱ドラフト力 H_{th} は、以下の式で表される。

$$H_{th} = (\rho_{in} - \rho_{out}) \times g \times h$$

ここで、

H_{th} : 熱ドラフト (Pa)

ρ_{in} : 外気の密度 (1.112 kg/m³)

ρ_{out} : 排気の密度 (1.054 kg/m³)

g : 重力加速度 (9.81 m/s²)

h : ドラフト高さ (18.1 m)

(2) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

$$\Delta P = \sum_i \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2}$$

$$W_i = \frac{q \cdot n}{C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}$$

ここで、

ΔP : 圧力損失 (Pa)

ζ_i : 圧力損失係数 (-)

W_i : 通過風量 (質量流量) (kg/s)

ρ_i : 通風路の空気密度 (kg/m³)

A_i : 通風路の断面積 (m²)

q : キャスク発熱量 (16 kW/基)

n : 評価領域のキャスク基数 (3 基)

C_p : 空気の比熱 (1.007 kJ/kg・°C)

T_{out} : 排気温度 (50 °C)

T_{in} : 給気温度 (33 °C)

4. 評価結果

給気温度 33℃かつ排気温度 50℃のときの熱ドラフト力 H_{th} と圧力損失 ΔP の算出結果を示す。

(1) 熱ドラフト力 H_{th}

$$\begin{aligned} H_{th} &= (\rho_{in} - \rho_{out}) \times g \times h \\ &= (1.112 - 1.054) \times 9.81 \times 18.1 \\ &= 10.29 \end{aligned}$$

(2) 圧力損失 ΔP

第 3-2 表に示す圧力損失係数を基に給排気温度差 17℃のときの各流路の圧力損失の算出結果（第 4-1 表）から、流路全体の圧力損失 ΔP は、以下のとおりとなる。

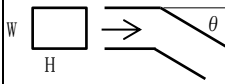
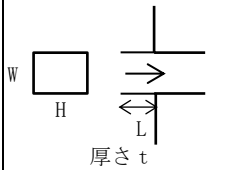
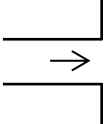
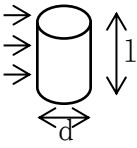
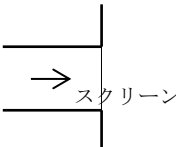
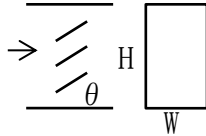
$$\begin{aligned} \Delta P &= \sum_i \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2} \\ &= 2.07 \end{aligned}$$

以上より、自然対流による空気の圧力損失（2.07Pa）に対して、乾式貯蔵建屋の熱ドラフト力（10.29Pa）が大きく、除熱性能は満足される。

第 4-1 表 各流路の圧力損失の算出結果

対象流路		部位	流路面積 A_i (m^2)	圧力損失係数 ζ_i	空気温度 $T(^{\circ}C)$	空気密度 ρ_i (kg/m^3)	熱量 $q \cdot n$ (kW)	質量流量 $W_i = \frac{q \cdot n}{C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}$ (kg/s)	圧力損失 $\Delta P_i = \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2}$ (Pa)
給気経路	給気口への取込	①	5.55	1.70	33 (T_{in})	1.112			0.20
	給気口	②	5.55	0.70					0.09
	給気風路の曲がり	③	3.01	2.20					0.87
	貯蔵エリアへの吐出口	④	5.64	0.88					0.10
キャスクを横切る流れ		⑤	21.53	2.22	50 (T_{out})	1.054	16×3	2.81	0.02
上昇流 1		⑥	17.18	2.20					0.03
上昇流 2		⑦	9.96	1.96					0.08
水平遮蔽板の入口		⑧	5.52	0.50					0.07
水平遮蔽板の出口		⑨	5.93	0.88					0.10
排気経路	排気風路の曲がり	⑩	7.90	1.84					0.12
	排気口	⑪	6.88	2.30					0.19
	排気口からの放出	⑫	5.16	1.40					0.20
合計 $\Delta P = \sum_i \Delta P_i$									2.07

各圧力損失箇所の圧力損失係数

項目	形状	文献記載内容※	圧力損失係数														
曲がり		長方形エルボ <table><tr><td>θ \ H/W</td><td>1.0</td><td>1.5</td><td>2.0</td><td>3.0</td><td>4.0</td><td>5.0</td></tr><tr><td>90°</td><td>1.2</td><td>1.1</td><td>1.1</td><td>0.98</td><td>0.92</td><td>0.89</td></tr></table>	θ \ H/W	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	90°	1.2	1.1	1.1	0.98	0.92	0.89	$\zeta = 0.92 \sim 1.2$
θ \ H/W	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0											
90°	1.2	1.1	1.1	0.98	0.92	0.89											
管入口		管入口 (短管付き、壁付き) <table><tr><td>t/D \ L/D</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0.5</td></tr></table> $D=2HW/(H+W)$, $L=0$, $t=0$	t/D \ L/D	0	0	0.5	$\zeta = 0.5$										
t/D \ L/D	0																
0	0.5																
管出口		管出口 (壁付き) $\zeta = 0.88$	$\zeta = 0.88$														
円柱		円柱 (流れに直角) <table><tr><td>l/d</td><td>2</td><td>5</td></tr><tr><td>ζ</td><td>0.68</td><td>0.74</td></tr></table> $l=5349$ 、 $d=2596$ のため、 $l/d=2.06$ $l/d=5$ のとき抵抗係数 $C_D=0.74$	l/d	2	5	ζ	0.68	0.74	$\zeta = 0.74$								
l/d	2	5															
ζ	0.68	0.74															
防護柵		スクリーン付き直接吹き出し <table><tr><td>n (開口率)</td><td>0.7</td></tr><tr><td>ζ</td><td>1.58</td></tr></table> 開口率が 70%以上であるため、 $\zeta = 1.58 - 0.88$ (管出口) $= 0.70$	n (開口率)	0.7	ζ	1.58	$\zeta = 0.70$										
n (開口率)	0.7																
ζ	1.58																
整流板		長方形ダクト内平行翼ダンパ $L/R=NW / 2 (H+W)=1.5$ N :羽枚数=5, $H=1890$, $W=2850$ <table><tr><td>L/R \ θ</td><td>0</td></tr><tr><td>1.5</td><td>0.52</td></tr></table>	L/R \ θ	0	1.5	0.52	$\zeta = 0.52$										
L/R \ θ	0																
1.5	0.52																

※ 空気調和衛生工学便覧第 14 版より引用

使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の
放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書

設計及び工事計画認可申請 資料14

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資 14-1
2. 乾式キャスク（タイプ 1）の遮蔽設計	資 14-2
2.1 設計基準	資 14-3
2.2 評価方法	資 14-3
2.3 評価条件	資 14-8
2.4 評価結果	資 14-19
3. 乾式キャスク（タイプ 1）の放射線遮蔽材の熱除去	資 14-20
4. 乾式キャスク（タイプ 2）の遮蔽設計	資 14-21
4.1 設計基準	資 14-22
4.2 評価方法	資 14-22
4.3 評価条件	資 14-27
4.4 評価結果	資 14-38
5. 乾式キャスク（タイプ 2）の放射線遮蔽材の熱除去	資 14-39
別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要	

※本資料における については、商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第26条第2項第6号ロ及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」第26条に基づき、輸送・貯蔵兼用キャスクとして申請する使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）（タイプ1及びタイプ2）が使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有すること並びに放射線の遮蔽及び熱除去の評価について説明するものである。

2. 乾式キャスク（タイプ1）の遮蔽設計

乾式キャスクの遮蔽機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 乾式キャスクの遮蔽機能評価

- a. 乾式キャスクからの線量当量率は、乾式キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリを使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の乾式キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。
- b. 乾式キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、乾式キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

乾式キャスク（タイプ1）は、一般公衆及び放射線業務従事者に対して、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料から放出される放射線を遮蔽する。ガンマ線遮蔽材には、十分な厚みを有する鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材には、水を多く含有するレジンを用いる。遮蔽評価によって、乾式キャスク（タイプ1）の表面及び表面から 1m 離れた位置の線量当量率が設計基準以下となり、乾式キャスク（タイプ1）が適切な遮蔽能力を有することを確認する。

2.1 設計基準

乾式キャスク（タイプ1）の設計基準は、遮蔽材の設計貯蔵期間中の経年変化を考慮しても、乾式キャスク（タイプ1）の最大線量当量率が2mSv/h以下、及び乾式キャスク（タイプ1）表面から1m離れた位置の線量当量率が100 μ Sv/h以下とする。

2.2 評価方法

乾式キャスク（タイプ1）の遮蔽解析においては、遮蔽材の最小厚さを考慮し、乾式キャスク（タイプ1）の実形状を軸方向断面に二次元でモデル化する。

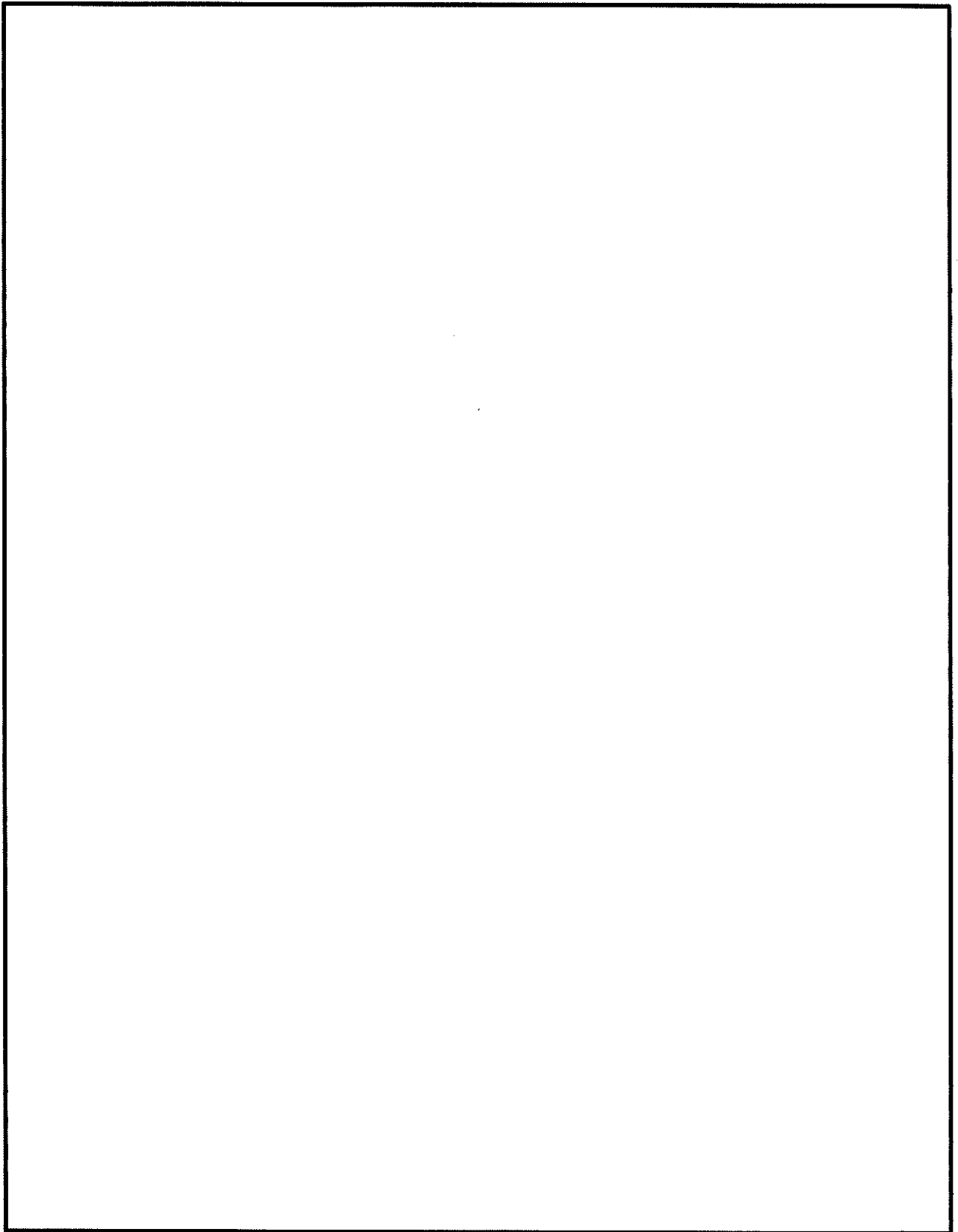
乾式キャスク（タイプ1）の遮蔽解析モデルを第2-1図から第2-4図に示す。なお、上部と下部のトラニオン周辺については、当該部近傍の線束から遮蔽評価を行う。

遮蔽計算はガンマ線、中性子共にDOT3.5コードにより遮蔽材を透過したガンマ線及び中性子の線束を計算し、乾式キャスク（タイプ1）表面及び表面から1m離れた位置の線量当量率を求める。

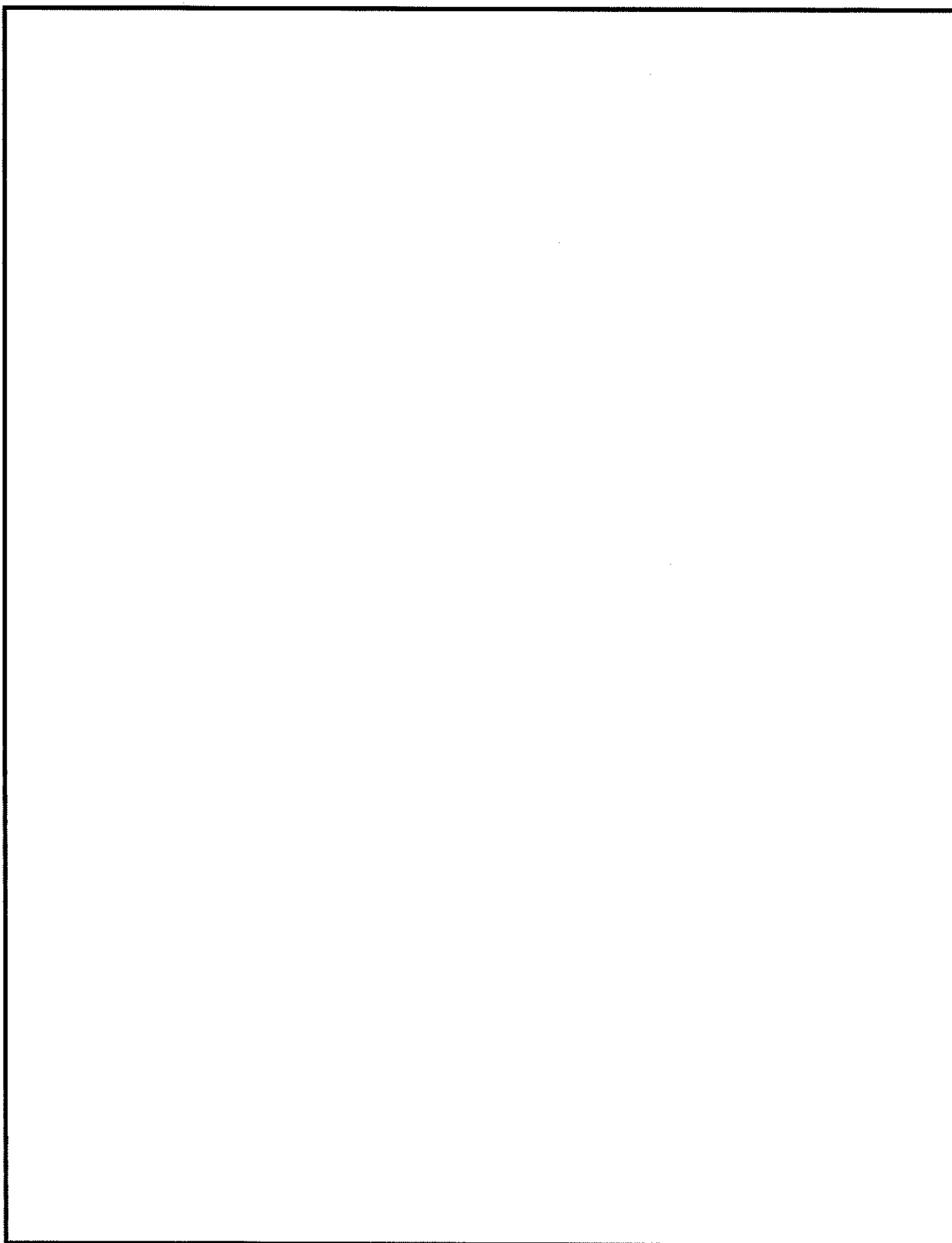
また、二次ガンマ線の効果についてもDOT3.5コードにより中性子が遮蔽材内で吸収される際に発生する二次ガンマ線の線束を計算し、乾式キャスク（タイプ1）表面及び表面から1m離れた位置の線量当量率を求める。

ライブラリとしてはJENDL-3.3に基づくMATXSLIB-J33データ（以下「MATXSLIB-J33」という。）を用い、線束から線量当量率への変換はICRP Pub. 74に基づく。

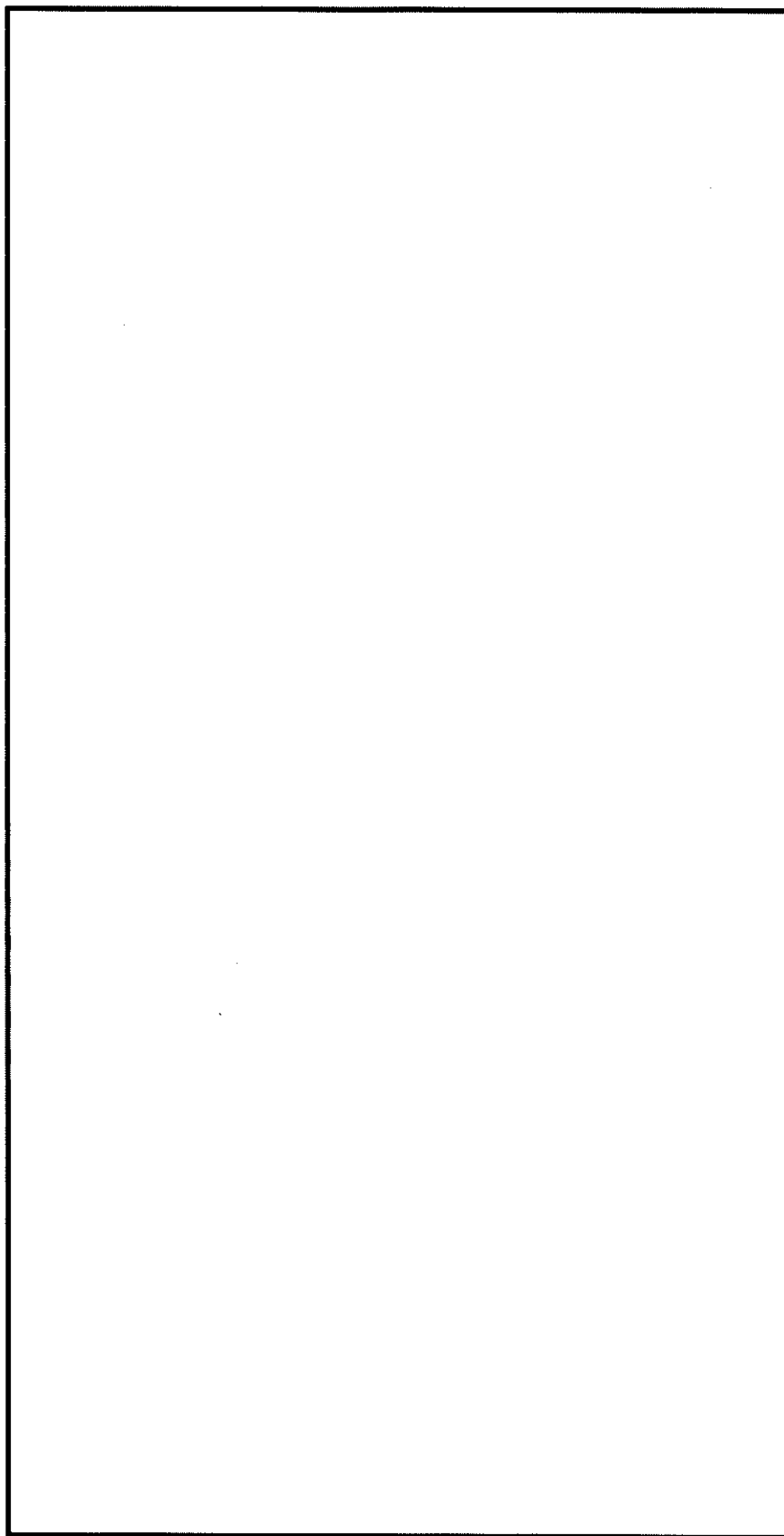
線源としては核分裂生成物、アクチノイドによる線源及び構造材の放射化による線源を考えた。線源強度はORIGEN2.2UPJコード及び放射化計算式により連続照射を仮定して求める。また、ライブラリとしては、ORIGEN2.2UPJコード内蔵のPWRU50及びPWRUのデータを用いる。



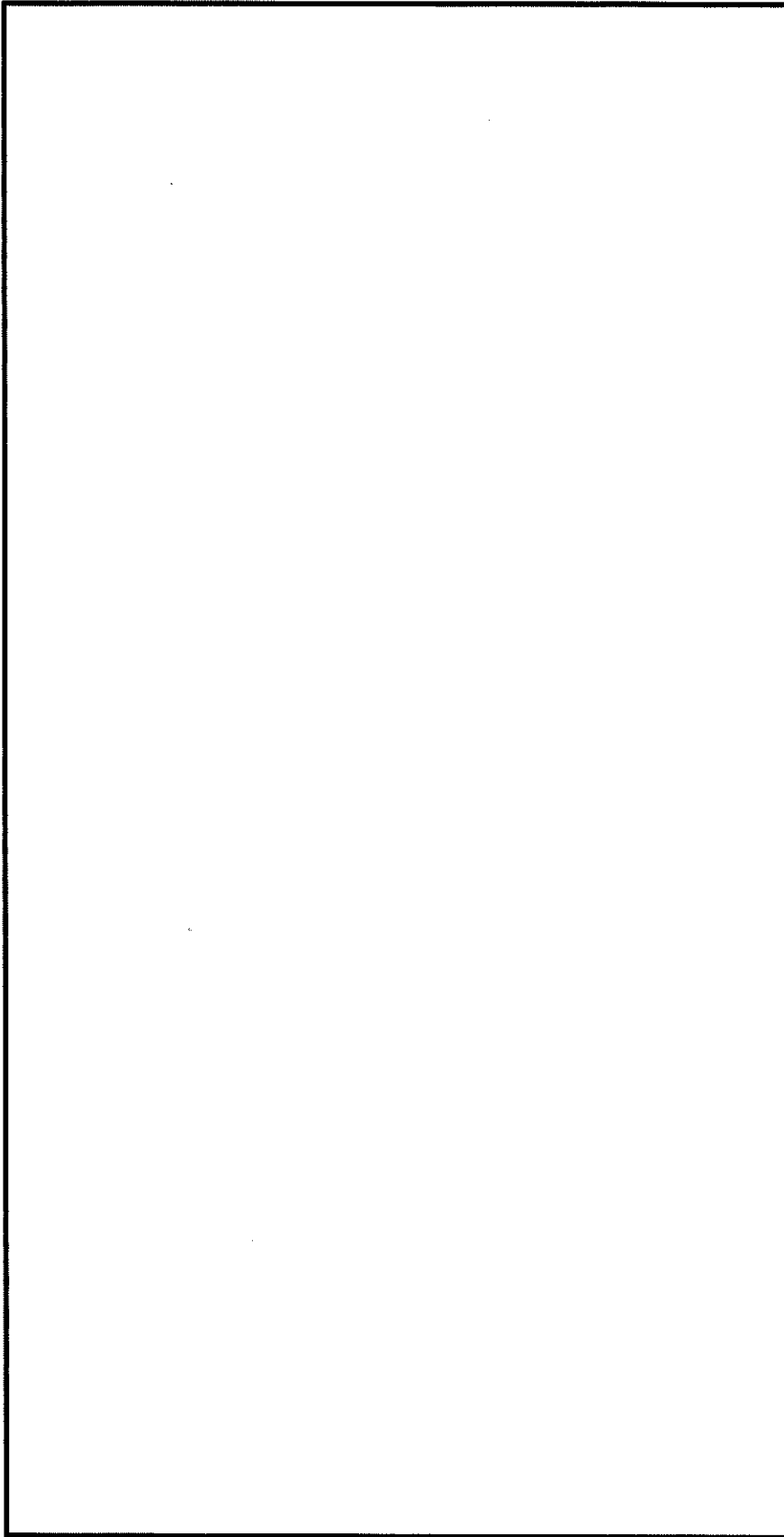
第2-1図 乾式キャスク（タイプ1）遮蔽解析モデル（頭部）



第2-2図 乾式キャスク（タイプ1）遮蔽解析モデル（底部）



第 2-3 図 乾式キャスク（タイプ 1）遮蔽解析モデル（上部トラニオン部）



第 2-4 図 乾式キャスク（タイプ 1）遮蔽解析モデル（下部トランニオン部）

2.3 評価条件

2.3.1 線源条件

乾式キャスク（タイプ1）の収納物の線源条件を第2-1表に示す。

乾式キャスク（タイプ1）の中心領域に16体を配置し、外周領域には16体を配置する条件とする。線源強度の計算には、使用済燃料平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を包含する燃焼度分布（以下「ピーキングファクター」という。）を考慮する。

第 2-1 表 (1/2) 使用済燃料の線源強度計算条件 項 目			14×14 燃料 48, 000MWd/t 型		14×14 燃料 39, 000MWd/t 型					
			A 型	B 型	A 型	B 型				
燃焼度 (MWd/t)	中央部		48, 000		39, 000					
	外周部		—							
平均比出力 (MW/t) (注 1)			34. 0							
照射 期間 (日)	使用済 燃料	中央部								
		外周部								
初期濃縮度 (wt%) (注 2)										
冷却期間 (年)							15		25	
ウラン質量 (kg/体)										
(上部)										
ピーキングファクター (注 3)										
(下部)										

(注1) 比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注2) 初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注3) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

第 2-1 表 (2/2) 使用済燃料の線源強度計算条件

項 目		14×14 燃料 48,000MWd/t 型		14×14 燃料 39,000MWd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型
使用済燃料 ⁵⁹ Co 含有量 (g/体)	上部ノズル				
	上部プレナム				
	燃料有効部				
	下部プレナム				
	下部ノズル				
⁵⁹ Co 原子量 (-)		58.93			
アボガドロ定数 (mol ⁻¹)		6.022×10 ²³			
2,200m/s の中性子による ⁵⁹ Co の (n, γ) 反応断面積 (cm ²)		3.72×10 ⁻²³			
使用済燃料 炉内照射 熱中性子束 (n/(cm ² ・s))	上部ノズル				
	上部プレナム				
	燃料有効部				
	下部プレナム				
	下部ノズル				
⁶⁰ Co の崩壊定数 (1/日)		3.600×10 ⁻⁴			

2.3.2 線源強度及びエネルギー

(1) 使用済燃料のガンマ線源強度

使用済燃料のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2.2UPJ コードにより行う。得られた使用済燃料のガンマ線源強度を第 2-2 表に示す。

(2) 構造材放射化ガンマ線源強度

使用済燃料の構造材の放射化によるガンマ線源強度は、次式で計算する。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、

A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 : ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ : 2,200m/s の中性子による ^{59}Co の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

ϕ : 炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ : ^{60}Co の崩壊定数

T_1 : 照射日数 (日)

T_2 : 冷却期間 (日)

である。

得られた使用済燃料の構造材の放射化によるガンマ線源強度を第 2-2 表に併せて示す。

(3) 中性子源強度

使用済燃料から自発核分裂及び (α , n) 反応により発生する中性子 (一次中性子) の線源強度の計算は ORIGEN2.2UPJ コードにより行う。

また、体系の増倍効果を考慮し、全中性子源強度 (N_s) を次式で求める。

$$N_s = N_0 / (1 - k_{\text{eff}})$$

ここで、

N_0 : 使用済燃料の一次中性子源強度

k_{eff} : 使用済燃料貯蔵状態における実効増倍率 (「資料 12 核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書」の臨界解析モデルにおいて、燃焼を考慮した核種組成を用いて算出した結果)

得られた中性子源強度を第 2-2 表に併せて示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源と、増倍による ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂線源であり、(α , n) 反応による線源はわずかである。このため、計算に用いる線源のエネルギースペクトル

は、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとする。計算に使用する MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造のエネルギースペクトルを第 2-3 表に示す。

第 2-2 表 燃料の種類と型式毎の線源強度
(乾式キャスク 1 基当たり)

項目	14×14 燃料 ^(注 1)	
	A 型	B 型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.043×10^{17}	1.043×10^{17}
構造材放射化ガンマ線 (^{60}Co TBq)	2.320×10^2	3.242×10^2
燃料有効部中性子 ^(注 2) (n/s)	1.167×10^{10}	1.167×10^{10}

(注 1) 中央部 16 体の燃焼度を 48,000MWd/t、外周部 16 体の燃焼度を 39,000MWd/t とした乾式キャスク 1 基当たりの線源強度である。

(注 2) 記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度である。

第2-3 表 (1/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
1	1.9640×10^7	0.0
2	1.7333×10^7	7.1068×10^{-6}
3	1.6905×10^7	7.1168×10^{-6}
4	1.6487×10^7	2.3679×10^{-5}
5	1.5683×10^7	3.8351×10^{-5}
6	1.4918×10^7	2.6859×10^{-5}
7	1.4550×10^7	3.3510×10^{-5}
8	1.4191×10^7	4.1648×10^{-5}
9	1.3840×10^7	5.1106×10^{-5}
10	1.3499×10^7	1.3919×10^{-4}
11	1.2840×10^7	1.0178×10^{-4}
12	1.2523×10^7	1.0173×10^{-4}
13	1.2214×10^7	2.9166×10^{-4}
14	1.1618×10^7	4.0815×10^{-4}
15	1.1052×10^7	5.6132×10^{-4}
16	1.0513×10^7	7.5714×10^{-4}
17	1.0000×10^7	1.0017×10^{-3}
18	9.5123×10^6	1.3031×10^{-3}
19	9.0484×10^6	1.6677×10^{-3}
20	8.6071×10^6	2.1011×10^{-3}
21	8.1873×10^6	2.6077×10^{-3}
22	7.7880×10^6	3.1908×10^{-3}
23	7.4082×10^6	3.8525×10^{-3}
24	7.0469×10^6	4.5922×10^{-3}
25	6.7032×10^6	1.7082×10^{-3}
26	6.5924×10^6	3.6982×10^{-3}
27	6.3763×10^6	6.2932×10^{-3}
28	6.0653×10^6	7.2431×10^{-3}
29	5.7695×10^6	8.2509×10^{-3}
30	5.4881×10^6	9.3018×10^{-3}
31	5.2205×10^6	1.0392×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第2-3表 (2/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
32	4.9659×10^6	1.1505×10^{-2}
33	4.7237×10^6	1.2627×10^{-2}
34	4.4933×10^6	2.8588×10^{-2}
35	4.0657×10^6	3.2856×10^{-2}
36	3.6788×10^6	3.6741×10^{-2}
37	3.3287×10^6	1.9654×10^{-2}
38	3.1664×10^6	2.0424×10^{-2}
39	3.0119×10^6	2.1082×10^{-2}
40	2.8650×10^6	2.1652×10^{-2}
41	2.7253×10^6	2.2135×10^{-2}
42	2.5924×10^6	2.2516×10^{-2}
43	2.4660×10^6	1.5172×10^{-2}
44	2.3852×10^6	3.8325×10^{-3}
45	2.3653×10^6	3.8122×10^{-3}
46	2.3457×10^6	7.6572×10^{-3}
47	2.3069×10^6	1.5347×10^{-2}
48	2.2313×10^6	2.3101×10^{-2}
49	2.1225×10^6	2.3115×10^{-2}
50	2.0190×10^6	2.3053×10^{-2}
51	1.9205×10^6	2.2901×10^{-2}
52	1.8268×10^6	2.2666×10^{-2}
53	1.7377×10^6	2.2355×10^{-2}
54	1.6530×10^6	2.2004×10^{-2}
55	1.5724×10^6	2.1598×10^{-2}
56	1.4957×10^6	2.1145×10^{-2}
57	1.4227×10^6	2.0594×10^{-2}
58	1.3534×10^6	2.0103×10^{-2}
59	1.2873×10^6	1.9470×10^{-2}
60	1.2246×10^6	1.8918×10^{-2}
61	1.1648×10^6	1.8267×10^{-2}
62	1.1080×10^6	3.4600×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第2-3表 (3/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
63	1.0026×10^6	1.3667×10^{-2}
64	9.6164×10^5	1.8336×10^{-2}
65	9.0718×10^5	1.5015×10^{-2}
66	8.6294×10^5	1.4367×10^{-2}
67	8.2085×10^5	1.3721×10^{-2}
68	7.8082×10^5	1.3089×10^{-2}
69	7.4274×10^5	1.2471×10^{-2}
70	7.0651×10^5	1.1860×10^{-2}
71	6.7206×10^5	1.1273×10^{-2}
72	6.3928×10^5	1.0699×10^{-2}
73	6.0810×10^5	1.0143×10^{-2}
74	5.7844×10^5	9.6048×10^{-3}
75	5.5023×10^5	9.0856×10^{-3}
76	5.2340×10^5	8.5905×10^{-3}
77	4.9787×10^5	1.5764×10^{-2}
78	4.5049×10^5	1.4011×10^{-2}
79	4.0762×10^5	6.3973×10^{-3}
80	3.8774×10^5	6.0174×10^{-3}
81	3.6883×10^5	1.0970×10^{-2}
82	3.3373×10^5	9.6698×10^{-3}
83	3.0197×10^5	1.0399×10^{-3}
84	2.9850×10^5	3.8871×10^{-4}
85	2.9720×10^5	7.9979×10^{-4}
86	2.9452×10^5	2.1589×10^{-3}
87	2.8725×10^5	4.1145×10^{-3}
88	2.7324×10^5	7.4626×10^{-3}
89	2.4724×10^5	3.3784×10^{-3}
90	2.3518×10^5	3.1601×10^{-3}
91	2.2371×10^5	2.9551×10^{-3}
92	2.1280×10^5	2.7629×10^{-3}
93	2.0242×10^5	2.5808×10^{-3}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第2-3表 (4/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
94	1.9255×10^5	2.4112×10^{-3}
95	1.8316×10^5	2.2536×10^{-3}
96	1.7422×10^5	2.1003×10^{-3}
97	1.6573×10^5	1.9635×10^{-3}
98	1.5764×10^5	1.8282×10^{-3}
99	1.4996×10^5	1.7085×10^{-3}
100	1.4264×10^5	1.5902×10^{-3}
101	1.3569×10^5	1.4845×10^{-3}
102	1.2907×10^5	1.3841×10^{-3}
103	1.2277×10^5	1.2870×10^{-3}
104	1.1679×10^5	1.2015×10^{-3}
105	1.1109×10^5	2.6529×10^{-3}
106	9.8037×10^4	2.2188×10^{-3}
107	8.6517×10^4	7.4464×10^{-4}
108	8.2500×10^4	5.4581×10^{-4}
109	7.9500×10^4	1.3244×10^{-3}
110	7.2000×10^4	7.8610×10^{-4}
111	6.7379×10^4	1.7442×10^{-3}
112	5.6562×10^4	6.2161×10^{-4}
113	5.2475×10^4	8.9579×10^{-4}
114	4.6309×10^4	7.4565×10^{-4}
115	4.0868×10^4	8.3838×10^{-4}
116	3.4307×10^4	2.9816×10^{-4}
117	3.1828×10^4	3.8306×10^{-4}
118	2.8500×10^4	1.6590×10^{-4}
119	2.7000×10^4	1.0196×10^{-4}
120	2.6058×10^4	1.3467×10^{-4}
121	2.4788×10^4	6.3727×10^{-5}
122	2.4176×10^4	6.1419×10^{-5}
123	2.3579×10^4	1.7116×10^{-4}
124	2.1875×10^4	2.4606×10^{-4}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第2-3 表 (5/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
125	1.9305×10^4	3.7413×10^{-4}
126	1.5034×10^4	2.5774×10^{-4}
127	1.1709×10^4	7.1002×10^{-5}
128	1.0595×10^4	1.0656×10^{-4}
129	9.1188×10^3	1.2223×10^{-4}
130	7.1017×10^3	8.4112×10^{-5}
131	5.5308×10^3	5.7866×10^{-5}
132	4.3074×10^3	2.5643×10^{-5}
133	3.7074×10^3	1.4160×10^{-5}
134	3.3546×10^3	1.2189×10^{-5}
135	3.0354×10^3	1.0497×10^{-5}
136	2.7465×10^3	4.6848×10^{-6}
137	2.6126×10^3	4.3477×10^{-6}
138	2.4852×10^3	7.7780×10^{-6}
139	2.2487×10^3	6.6958×10^{-6}
140	2.0347×10^3	1.2941×10^{-5}
141	1.5846×10^3	8.8961×10^{-6}
142	1.2341×10^3	6.1158×10^{-6}
143	9.6112×10^2	4.2041×10^{-6}
144	7.4852×10^2	2.8898×10^{-6}
145	5.8295×10^2	1.9864×10^{-6}
146	4.5400×10^2	1.3652×10^{-6}
147	3.5358×10^2	9.3853×10^{-7}
148	2.7536×10^2	6.4498×10^{-7}
149	2.1445×10^2	4.4325×10^{-7}
150	1.6702×10^2	3.0474×10^{-7}
151	1.3007×10^2	2.0940×10^{-7}
152	1.0130×10^2	1.4393×10^{-7}
153	7.8893×10^1	9.8925×10^{-8}
154	6.1442×10^1	6.7991×10^{-8}
155	4.7851×10^1	4.6727×10^{-8}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第2-3表 (6/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
156	3.7267×10^1	3.2011×10^{-8}
157	2.9023×10^1	2.2183×10^{-8}
158	2.2603×10^1	1.5172×10^{-8}
159	1.7603×10^1	1.0425×10^{-8}
160	1.3710×10^1	7.1675×10^{-9}
161	1.0677×10^1	4.9253×10^{-9}
162	8.3153×10^0	3.3851×10^{-9}
163	6.4760×10^0	2.3267×10^{-9}
164	5.0435×10^0	1.5990×10^{-9}
165	3.9279×10^0	1.0991×10^{-9}
166	3.0590×10^0	7.6574×10^{-10}
167	2.3824×10^0	5.0871×10^{-10}
168	1.8554×10^0	3.5680×10^{-10}
169	1.4450×10^0	2.4520×10^{-10}
170	1.1254×10^0	1.6858×10^{-10}
171	8.7642×10^{-1}	1.1583×10^{-10}
172	6.8256×10^{-1}	7.9611×10^{-11}
173	5.3158×10^{-1}	5.4719×10^{-11}
174	4.1399×10^{-1}	1.0597×10^{-10}
175	1.0000×10^{-1}	1.4269×10^{-11}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

2.3.3 中性子遮蔽材の経年変化の考慮について

乾式キャスク（タイプ1）の構成部材のうち中性子遮蔽材については、設計貯蔵期間中の経年変化により質量減損が発生するため、遮蔽評価上、保守的に2.5%の質量減損を考慮する。質量減損量の評価については、資料10-3別紙1「使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について」に示す。

2.3.4 評価対象燃料

乾式キャスク（タイプ1）に収納する使用済燃料のうち、中央部及び外周部それぞれの領域で最も線源強度の高い14×14燃料、48,000MWd/t型（B型）及び14×14燃料、39,000MWd/t型（B型）を対象として遮蔽解析を実施する。

2.4 評価結果

乾式キャスク（タイプ1）の遮蔽解析により得られた線量当量率を第2-4表に示す。なお、評価結果は、側部、蓋部、底部における線量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり、乾式キャスク（タイプ1）は設計基準を満足している。

第2-4表 線量当量率の評価結果

（単位： μ Sv/h）

	表面			表面から 1m 離れた位置		
	側部	蓋部	底部	側部	蓋部	底部
線量当量率	1564.4	264.0	178.0	83.8	54.9	61.0
設計基準	2,000 以下			100 以下		

3. 乾式キャスク（タイプ1）の放射線遮蔽材の熱除去

放射線遮蔽材の温度は、「資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における解析結果より、第3-1表に示すとおりであり、乾式キャスク（タイプ1）における放射線遮蔽材の最高温度は温度制限値を超えることはない。乾式キャスク（タイプ1）の除熱設計、評価方法、評価対象燃料、評価条件については、同資料に示す。

第3-1表 放射線遮蔽材の熱除去評価結果

放射線遮蔽材	最高温度（℃）	温度制限値（℃）
外筒	126 ^(注1)	350
蓋部	108 ^(注2)	350
胴	143 ^(注3)	350
中性子遮蔽材	132 ^(注4)	149

(注1) 外筒及び下部端板のうち、最高となる温度。

(注2) 一次蓋、二次蓋及び蓋部中性子遮蔽材カバーのうち、最高となる温度。

(注3) 胴及び底部中性子遮蔽材カバーのうち、最高となる温度。

(注4) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度。

4. 乾式キャスク（タイプ2）の遮蔽設計

乾式キャスクの遮蔽機能の評価基準は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に以下のとおり示されている。

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 乾式キャスクの遮蔽機能評価

a. 乾式キャスクからの線量当量率は、乾式キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリを使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の乾式キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。

b. 乾式キャスク表面の線量当量率を2mSv/h 以下とし、かつ、乾式キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率を100 μ Sv/h 以下とすること。

乾式キャスク（タイプ2）は、一般公衆及び放射線業務従事者に対して、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料から放出される放射線を遮蔽する。ガンマ線遮蔽材には、十分な厚みを有する鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材には、水を多く含有するレジンを用いる。遮蔽評価によって、乾式キャスク（タイプ2）の表面及び表面から1m離れた位置の線量当量率が設計基準以下となり、乾式キャスク（タイプ2）が適切な遮蔽能力を有することを確認する。

4.1 設計基準

乾式キャスク（タイプ2）の設計基準は、遮蔽材の設計貯蔵期間中の経年変化を考慮しても、乾式キャスク（タイプ2）表面の最大線量当量率が2mSv/h以下、及び乾式キャスク（タイプ2）表面から1m離れた位置の線量当量率が100 μ Sv/h以下とする。

4.2 評価方法

乾式キャスク（タイプ2）の遮蔽解析においては、遮蔽材の最小厚さを考慮し、乾式キャスク（タイプ2）の実形状を軸方向断面に二次元でモデル化する。

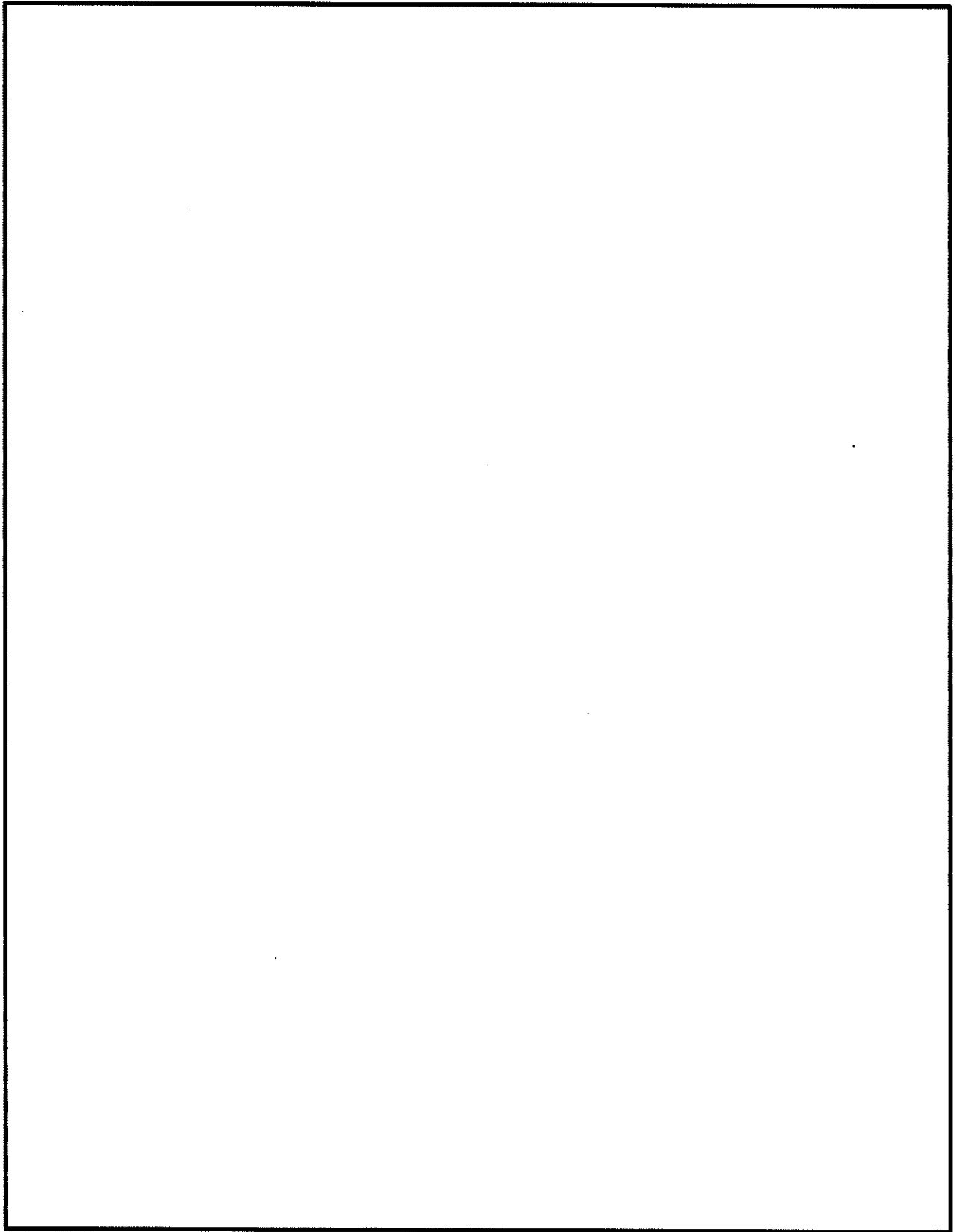
乾式キャスク（タイプ2）の遮蔽解析モデルを第4-1図から第4-4図に示す。なお、上部と下部のトラニオン周辺については、当該部近傍の線束から遮蔽評価を行う。

遮蔽計算はガンマ線、中性子共にDOT3.5コードにより遮蔽材を透過したガンマ線及び中性子の線束を計算し、乾式キャスク（タイプ2）表面及び表面から1m離れた位置の線量当量率を求める。

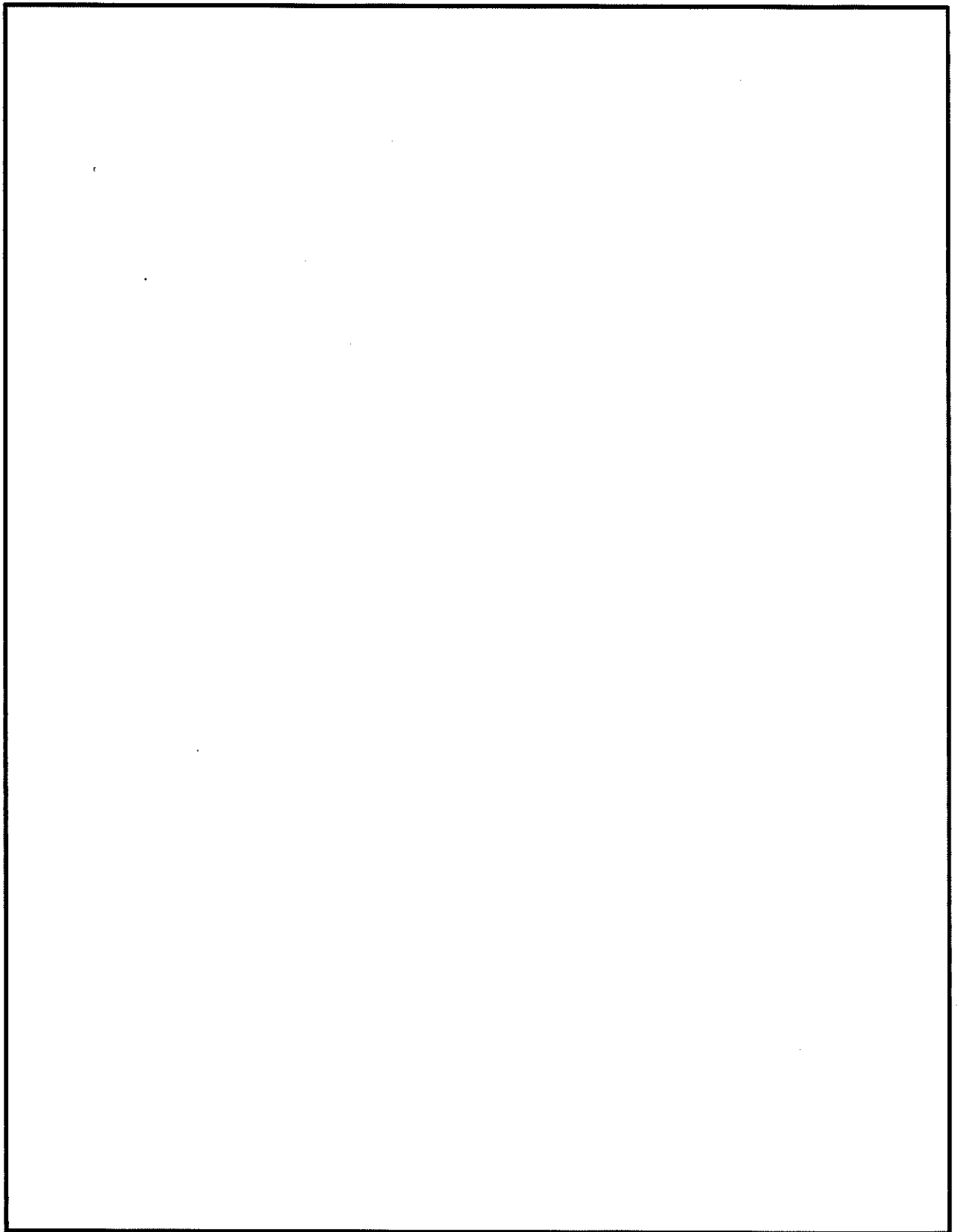
また、二次ガンマ線の効果についてもDOT3.5コードにより中性子が遮蔽材内で吸収される際に発生する二次ガンマ線の線束を計算し、乾式キャスク（タイプ2）表面及び表面から1m離れた位置の線量当量率を求める。

ライブラリとしてはJENDL-3.3に基づくMATXSLIB-J33データ（以下「MATXSLIB-J33」という。）を用い、線束から線量当量率への変換はICRP Pub. 74に基づく。

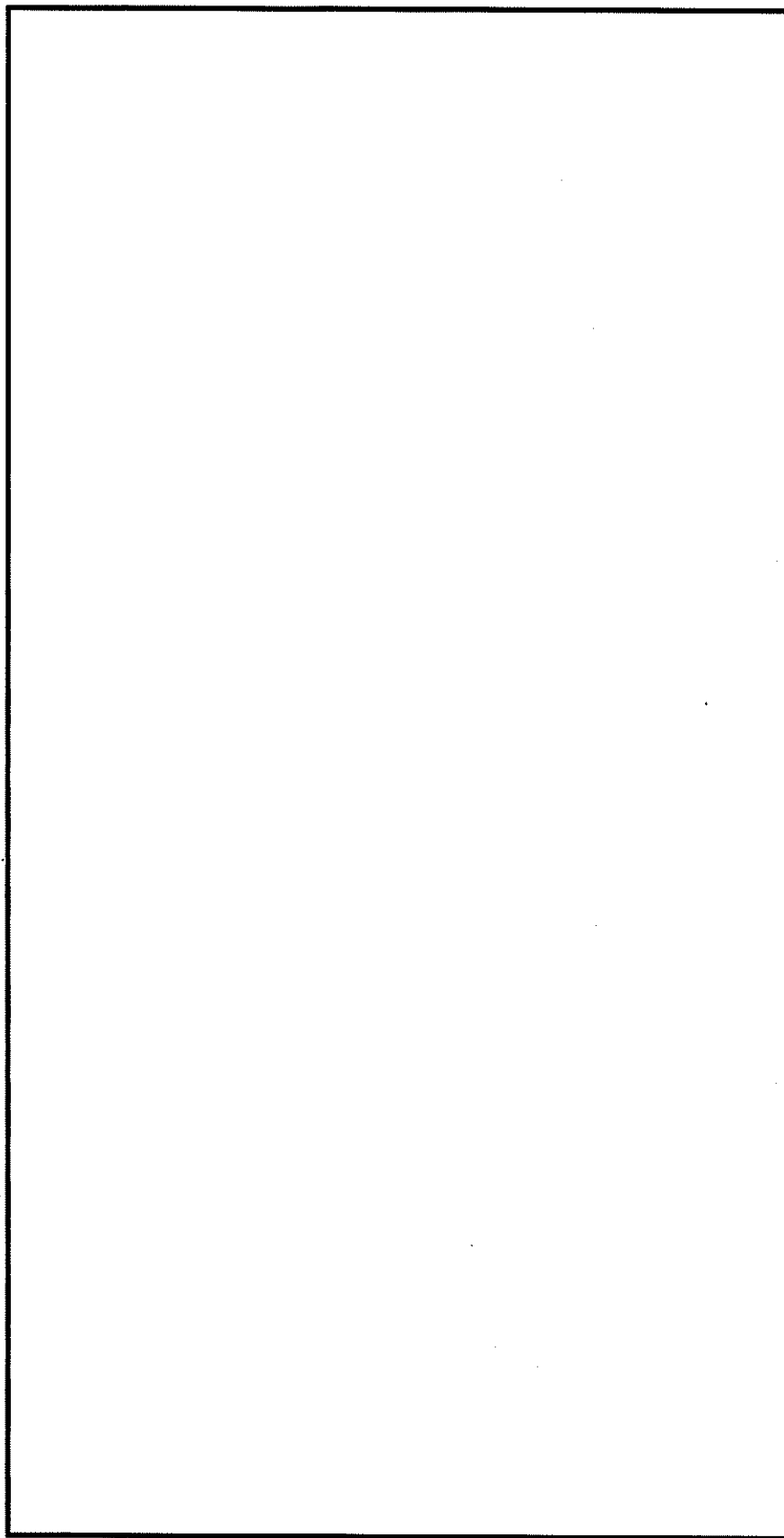
線源としては核分裂生成物、アクチノイドによる線源及び構造材の放射化による線源を考えた。線源強度はORIGEN2.2UPJコード及び放射化計算式により連続照射を仮定して求める。また、ライブラリとしては、ORIGEN2.2UPJコード内蔵のPWRU50のデータを用いる。



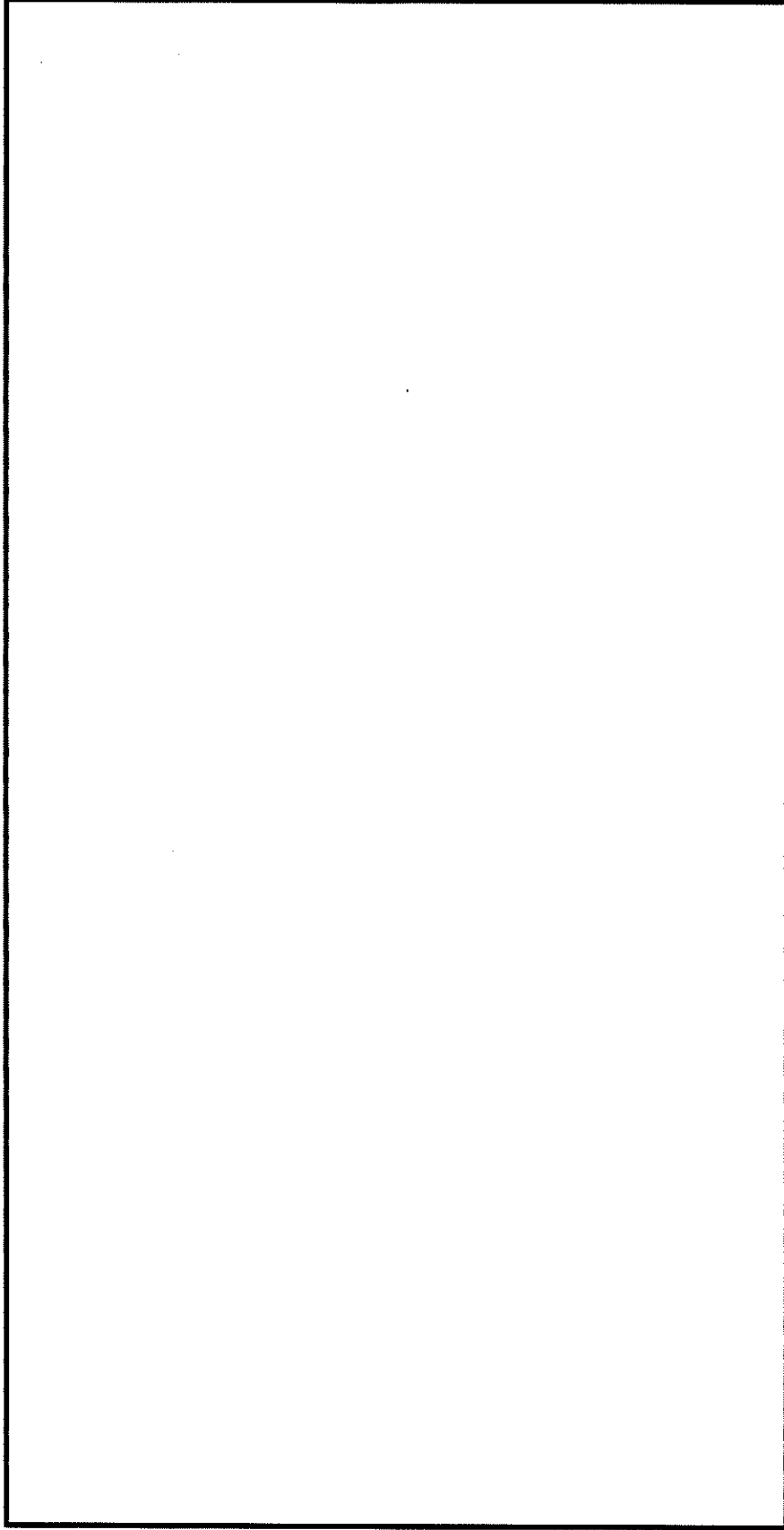
第4-1図 乾式キャスク（タイプ2）遮蔽解析モデル（頭部）



第4-2図 乾式キャスク（タイプ2）遮蔽解析モデル（底部）



第4-3図 乾式キャスク（タイプ2）遮蔽解析モデル（上部トラニオン部）



第4-4図 乾式キャスク（タイプ2）遮蔽解析モデル（下部トラニオン部）

4.3 評価条件

4.3.1 線源条件

乾式キャスク（タイプ2）の収納物の線源条件を第4-1表に示す。

乾式キャスク（タイプ2）の中心領域に12体を配置し、外周領域には12体を配置する条件とする。線源強度の計算には、使用済燃料平均燃焼度に対するピーキングファクターを考慮する。

第 4-1 表 (1/2) 使用済燃料及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件

項 目			17×17 燃料 48,000MWd/t 型			
			A 型	B 型		
燃焼度 (MWd/t)		中央部	48,000			
		外周部	44,000			
平均比出力 (MW/t) (注 1)			38.4			
照射 期間 (日)	使用済 燃料	中央部				
		外周部				
	バーナブルポイズン 集合体					
初期濃縮度 (wt%) (注 2)						
冷却期間 (年)			15 (注 3)	17		
ウラン質量 (kg/体)						
(上部)						
ピーキングファクター (注 4)						
(下部)						

(注 1) 比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注 2) 初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注 3) 回収ウラン燃料については、放射エネルギー及び発熱量が通常のウラン燃料と同等
以下となる期間 (20 年以上) 冷却したものを中央部に収納する。

(注 4) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

第 4-1 表 (2/2) 使用済燃料及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件

項 目		17×17 燃料 48,000MWd/t 型			
		A 型	B 型		
使用済燃料 ⁵⁹ Co 含有量 (g/体)	上部ノズル				
	上部プレナム				
	燃料有効部				
	下部プレナム				
	下部ノズル				
バーナブルポイズン集合体 ⁵⁹ Co 含有量 (g/体)	上部ノズル				
	上部プレナム				
	燃料有効部				
⁵⁹ Co 原子量 (-)				58.93	
アボガドロ定数 (mol ⁻¹)				6.022×10 ²³	
2,200m/s の中性子による ⁵⁹ Co の (n, γ) 反応断面積 (cm ²)				3.72×10 ⁻²³	
使用済燃料 炉内照射 熱中性子束 (n/(cm ² ・s))	上部ノズル				
	上部プレナム				
	燃料有効部				
	下部プレナム				
	下部ノズル				
バーナブルポイズン集合体 炉内照射熱中性子束 (n/(cm ² ・s))	上部ノズル				
	上部プレナム				
	燃料有効部				
バーナブルポイズン集合体冷却期間 (年)				15	
⁶⁰ Co の崩壊定数 (1/日)				3.600×10 ⁻⁴	

4.3.2 線源強度及びエネルギー

(1) 使用済燃料のガンマ線源強度

使用済燃料のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2.2UPJ コードにより行う。得られた使用済燃料のガンマ線源強度を第 4-2 表に示す。

(2) 構造材放射化ガンマ線源強度

使用済燃料の構造材の放射化によるガンマ線源強度は、次式で計算する。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、

A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 : ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ : 2,200m/s の中性子による ^{59}Co の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

ϕ : 炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ : ^{60}Co の崩壊定数

T_1 : 照射日数 (日)

T_2 : 冷却期間 (日)

である。

得られた使用済燃料の構造材の放射化によるガンマ線源強度を第 4-2 表に併せて示す。

(3) 中性子源強度

使用済燃料から自発核分裂及び (α , n) 反応により発生する中性子 (一次中性子) の線源強度の計算は ORIGEN2.2UPJ コードにより行う。

また、体系の増倍効果を考慮し、全中性子源強度 (N_s) を次式で求める。

$$N_s = N_0 / (1 - k_{\text{eff}})$$

ここで、

N_0 : 使用済燃料の一次中性子源強度

k_{eff} : 使用済燃料貯蔵状態における実効増倍率 (「資料 12 核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書」の臨界解析モデルにおいて、燃焼を考慮した核種組成を用いて算出した結果)

得られた中性子源強度を第 4-2 表に併せて示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源と、増倍による ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂線源であり、(α , n) 反応による線源はわずかである。このため、計算に用いる線源のエネルギースペクトル

は、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとする。計算に使用する MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造のエネルギースペクトルを第 4-3 表に示す。

第 4-2 表 燃料の種類と型式毎の線源強度
(乾式キャスク 1 基当たり)

項目	17×17 燃料 ^(注 1)	
	A 型	B 型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.073×10^{17}	1.007×10^{17}
構造材放射化ガンマ線 ^(注 2) (^{60}Co TBq)	5.922×10^2	6.024×10^2
燃料有効部中性子 ^(注 3) (n/s)	1.205×10^{10}	1.120×10^{10}

(注 1) 中央部 12 体の燃焼度を 48,000MWd/t、外周部 12 体の燃焼度を 44,000MWd/t とした乾式キャスク 1 基当たりの線源強度である。

(注 2) バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注 3) 記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度である。

第 4-3 表 (1/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
1	1.9640×10^7	0.0
2	1.7333×10^7	7.1068×10^{-6}
3	1.6905×10^7	7.1168×10^{-6}
4	1.6487×10^7	2.3679×10^{-5}
5	1.5683×10^7	3.8351×10^{-5}
6	1.4918×10^7	2.6859×10^{-5}
7	1.4550×10^7	3.3510×10^{-5}
8	1.4191×10^7	4.1648×10^{-5}
9	1.3840×10^7	5.1106×10^{-5}
10	1.3499×10^7	1.3919×10^{-4}
11	1.2840×10^7	1.0178×10^{-4}
12	1.2523×10^7	1.0173×10^{-4}
13	1.2214×10^7	2.9166×10^{-4}
14	1.1618×10^7	4.0815×10^{-4}
15	1.1052×10^7	5.6132×10^{-4}
16	1.0513×10^7	7.5714×10^{-4}
17	1.0000×10^7	1.0017×10^{-3}
18	9.5123×10^6	1.3031×10^{-3}
19	9.0484×10^6	1.6677×10^{-3}
20	8.6071×10^6	2.1011×10^{-3}
21	8.1873×10^6	2.6077×10^{-3}
22	7.7880×10^6	3.1908×10^{-3}
23	7.4082×10^6	3.8525×10^{-3}
24	7.0469×10^6	4.5922×10^{-3}
25	6.7032×10^6	1.7082×10^{-3}
26	6.5924×10^6	3.6982×10^{-3}
27	6.3763×10^6	6.2932×10^{-3}
28	6.0653×10^6	7.2431×10^{-3}
29	5.7695×10^6	8.2509×10^{-3}
30	5.4881×10^6	9.3018×10^{-3}
31	5.2205×10^6	1.0392×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第 4-3 表 (2/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
32	4.9659×10^6	1.1505×10^{-2}
33	4.7237×10^6	1.2627×10^{-2}
34	4.4933×10^6	2.8588×10^{-2}
35	4.0657×10^6	3.2856×10^{-2}
36	3.6788×10^6	3.6741×10^{-2}
37	3.3287×10^6	1.9654×10^{-2}
38	3.1664×10^6	2.0424×10^{-2}
39	3.0119×10^6	2.1082×10^{-2}
40	2.8650×10^6	2.1652×10^{-2}
41	2.7253×10^6	2.2135×10^{-2}
42	2.5924×10^6	2.2516×10^{-2}
43	2.4660×10^6	1.5172×10^{-2}
44	2.3852×10^6	3.8325×10^{-3}
45	2.3653×10^6	3.8122×10^{-3}
46	2.3457×10^6	7.6572×10^{-3}
47	2.3069×10^6	1.5347×10^{-2}
48	2.2313×10^6	2.3101×10^{-2}
49	2.1225×10^6	2.3115×10^{-2}
50	2.0190×10^6	2.3053×10^{-2}
51	1.9205×10^6	2.2901×10^{-2}
52	1.8268×10^6	2.2666×10^{-2}
53	1.7377×10^6	2.2355×10^{-2}
54	1.6530×10^6	2.2004×10^{-2}
55	1.5724×10^6	2.1598×10^{-2}
56	1.4957×10^6	2.1145×10^{-2}
57	1.4227×10^6	2.0594×10^{-2}
58	1.3534×10^6	2.0103×10^{-2}
59	1.2873×10^6	1.9470×10^{-2}
60	1.2246×10^6	1.8918×10^{-2}
61	1.1648×10^6	1.8267×10^{-2}
62	1.1080×10^6	3.4600×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第 4-3 表 (3/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
63	1.0026×10^6	1.3667×10^{-2}
64	9.6164×10^5	1.8336×10^{-2}
65	9.0718×10^5	1.5015×10^{-2}
66	8.6294×10^5	1.4367×10^{-2}
67	8.2085×10^5	1.3721×10^{-2}
68	7.8082×10^5	1.3089×10^{-2}
69	7.4274×10^5	1.2471×10^{-2}
70	7.0651×10^5	1.1860×10^{-2}
71	6.7206×10^5	1.1273×10^{-2}
72	6.3928×10^5	1.0699×10^{-2}
73	6.0810×10^5	1.0143×10^{-2}
74	5.7844×10^5	9.6048×10^{-3}
75	5.5023×10^5	9.0856×10^{-3}
76	5.2340×10^5	8.5905×10^{-3}
77	4.9787×10^5	1.5764×10^{-2}
78	4.5049×10^5	1.4011×10^{-2}
79	4.0762×10^5	6.3973×10^{-3}
80	3.8774×10^5	6.0174×10^{-3}
81	3.6883×10^5	1.0970×10^{-2}
82	3.3373×10^5	9.6698×10^{-3}
83	3.0197×10^5	1.0399×10^{-3}
84	2.9850×10^5	3.8871×10^{-4}
85	2.9720×10^5	7.9979×10^{-4}
86	2.9452×10^5	2.1589×10^{-3}
87	2.8725×10^5	4.1145×10^{-3}
88	2.7324×10^5	7.4626×10^{-3}
89	2.4724×10^5	3.3784×10^{-3}
90	2.3518×10^5	3.1601×10^{-3}
91	2.2371×10^5	2.9551×10^{-3}
92	2.1280×10^5	2.7629×10^{-3}
93	2.0242×10^5	2.5808×10^{-3}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第 4-3 表 (4/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
94	1.9255×10^5	2.4112×10^{-3}
95	1.8316×10^5	2.2536×10^{-3}
96	1.7422×10^5	2.1003×10^{-3}
97	1.6573×10^5	1.9635×10^{-3}
98	1.5764×10^5	1.8282×10^{-3}
99	1.4996×10^5	1.7085×10^{-3}
100	1.4264×10^5	1.5902×10^{-3}
101	1.3569×10^5	1.4845×10^{-3}
102	1.2907×10^5	1.3841×10^{-3}
103	1.2277×10^5	1.2870×10^{-3}
104	1.1679×10^5	1.2015×10^{-3}
105	1.1109×10^5	2.6529×10^{-3}
106	9.8037×10^4	2.2188×10^{-3}
107	8.6517×10^4	7.4464×10^{-4}
108	8.2500×10^4	5.4581×10^{-4}
109	7.9500×10^4	1.3244×10^{-3}
110	7.2000×10^4	7.8610×10^{-4}
111	6.7379×10^4	1.7442×10^{-3}
112	5.6562×10^4	6.2161×10^{-4}
113	5.2475×10^4	8.9579×10^{-4}
114	4.6309×10^4	7.4565×10^{-4}
115	4.0868×10^4	8.3838×10^{-4}
116	3.4307×10^4	2.9816×10^{-4}
117	3.1828×10^4	3.8306×10^{-4}
118	2.8500×10^4	1.6590×10^{-4}
119	2.7000×10^4	1.0196×10^{-4}
120	2.6058×10^4	1.3467×10^{-4}
121	2.4788×10^4	6.3727×10^{-5}
122	2.4176×10^4	6.1419×10^{-5}
123	2.3579×10^4	1.7116×10^{-4}
124	2.1875×10^4	2.4606×10^{-4}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第 4-3 表 (5/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
125	1.9305×10^4	3.7413×10^{-4}
126	1.5034×10^4	2.5774×10^{-4}
127	1.1709×10^4	7.1002×10^{-5}
128	1.0595×10^4	1.0656×10^{-4}
129	9.1188×10^3	1.2223×10^{-4}
130	7.1017×10^3	8.4112×10^{-5}
131	5.5308×10^3	5.7866×10^{-5}
132	4.3074×10^3	2.5643×10^{-5}
133	3.7074×10^3	1.4160×10^{-5}
134	3.3546×10^3	1.2189×10^{-5}
135	3.0354×10^3	1.0497×10^{-5}
136	2.7465×10^3	4.6848×10^{-6}
137	2.6126×10^3	4.3477×10^{-6}
138	2.4852×10^3	7.7780×10^{-6}
139	2.2487×10^3	6.6958×10^{-6}
140	2.0347×10^3	1.2941×10^{-5}
141	1.5846×10^3	8.8961×10^{-6}
142	1.2341×10^3	6.1158×10^{-6}
143	9.6112×10^2	4.2041×10^{-6}
144	7.4852×10^2	2.8898×10^{-6}
145	5.8295×10^2	1.9864×10^{-6}
146	4.5400×10^2	1.3652×10^{-6}
147	3.5358×10^2	9.3853×10^{-7}
148	2.7536×10^2	6.4498×10^{-7}
149	2.1445×10^2	4.4325×10^{-7}
150	1.6702×10^2	3.0474×10^{-7}
151	1.3007×10^2	2.0940×10^{-7}
152	1.0130×10^2	1.4393×10^{-7}
153	7.8893×10^1	9.8925×10^{-8}
154	6.1442×10^1	6.7991×10^{-8}
155	4.7851×10^1	4.6727×10^{-8}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

第 4-3 表 (6/6) 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注)
156	3.7267×10^1	3.2011×10^{-8}
157	2.9023×10^1	2.2183×10^{-8}
158	2.2603×10^1	1.5172×10^{-8}
159	1.7603×10^1	1.0425×10^{-8}
160	1.3710×10^1	7.1675×10^{-9}
161	1.0677×10^1	4.9253×10^{-9}
162	8.3153×10^0	3.3851×10^{-9}
163	6.4760×10^0	2.3267×10^{-9}
164	5.0435×10^0	1.5990×10^{-9}
165	3.9279×10^0	1.0991×10^{-9}
166	3.0590×10^0	7.6574×10^{-10}
167	2.3824×10^0	5.0871×10^{-10}
168	1.8554×10^0	3.5680×10^{-10}
169	1.4450×10^0	2.4520×10^{-10}
170	1.1254×10^0	1.6858×10^{-10}
171	8.7642×10^{-1}	1.1583×10^{-10}
172	6.8256×10^{-1}	7.9611×10^{-11}
173	5.3158×10^{-1}	5.4719×10^{-11}
174	4.1399×10^{-1}	1.0597×10^{-10}
175	1.0000×10^{-1}	1.4269×10^{-11}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

4.3.3 中性子遮蔽材の経年変化の考慮について

乾式キャスク（タイプ2）の構成部材のうち中性子遮蔽材については、設計貯蔵期間中の経年変化により質量減損が発生するため、遮蔽評価上、保守的に2.5%の質量減損を考慮する。質量減損量の評価については、資料10-3別紙1「使用済燃料乾式貯蔵容器を構成する部材の長期健全性について」に示す。

4.3.4 評価対象燃料

乾式キャスク（タイプ2）に収納する使用済燃料のうち、最も線源強度の高い17×17燃料 48,000MWd/t型（A型）を対象として遮蔽解析を実施する。

4.4 評価結果

乾式キャスク（タイプ2）の遮蔽解析により得られた線量当量率を第4-4表に示す。なお、評価結果は、側部、蓋部、底部における線量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり、乾式キャスク（タイプ2）は設計基準を満足している。

第4-4表 線量当量率の評価結果

（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

	表面			表面から 1m 離れた位置		
	側部	蓋部	底部	側部	蓋部	底部
線量当量率	1825.3	335.0	223.9	86.0	69.0	60.4
設計基準	2,000 以下			100 以下		

5. 乾式キャスク（タイプ2）の放射線遮蔽材の熱除去

放射線遮蔽材の温度は、「資料13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書」における解析結果より、第5-1表に示すとおりであり、乾式キャスク（タイプ2）における放射線遮蔽材の最高温度は温度制限値を超えることはない。乾式キャスク（タイプ2）の除熱設計、評価方法、評価対象燃料、評価条件については、同資料に示す。

第5-1表 放射線遮蔽材の熱除去評価結果

放射線遮蔽材	最高温度（℃）	温度制限値（℃）
外筒	129 ^{（注1）}	350
蓋部	109 ^{（注2）}	350
胴	147 ^{（注3）}	350
中性子遮蔽材	136 ^{（注4）}	149

（注1） 外筒及び下部端板のうち、最高となる温度。

（注2） 一次蓋、二次蓋及び蓋部中性子遮蔽材カバーのうち、最高となる温度。

（注3） 胴及び底部中性子遮蔽材カバーのうち、最高となる温度。

（注4） 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度。

外運搬規則第二十一条第二項の規定による
容器の設計に関する原子力規制委員会の承認を
受けたことに関する説明書

設計及び工事計画認可申請 資料 15
伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資15-1
2. 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）の設計承認	資15-1
3. 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）の設計承認	資15-1
4. 今後の手続きについて	資15-1

1. 概要

本資料は、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則別表第二に基づき、輸送・貯蔵兼用キャスクとして申請する使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1及びタイプ2）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第21条第2項の規定による容器の設計に関する原子力規制委員会の承認（以下「設計承認」という。）を受けたことについて説明するものである。

2. 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）の設計承認

使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）については、令和2年11月30日付け原規規発第2011303号において、以下のとおり承認を受けている。なお、当該設計承認については、資料3「設備別記載事項の設定根拠に関する説明書」に示す使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1）に収納する燃料集合体の仕様と同仕様の使用済燃料集合体を収納するものとして承認を受けている。

設計承認番号	J / 2 0 3 2 / B (M) F - 9 6
核燃料輸送物の名称	M S F - 3 2 P 型

3. 使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）の設計承認

使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）については、令和2年11月30日付け原規規発第2011304号において、以下のとおり承認を受けている。なお、当該設計承認については、資料3「設備別記載事項の設定根拠に関する説明書」に示す使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ2）に収納する燃料集合体の仕様と同仕様の使用済燃料集合体を収納するものとして承認を受けている。

設計承認番号	J / 2 0 3 3 / B (M) F - 9 6
核燃料輸送物の名称	M S F - 2 4 P 型

4. 今後の手続きについて

使用済燃料乾式貯蔵容器（タイプ1及びタイプ2）について、供用を開始する前までに核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第59条第3項の規定による容器に関する原子力規制委員会の承認（以下「容器承認」という。）を受ける。また、供用中は当該設計承認及び当該容器承認に係る使用する期間の更新等に必要な手続きを継続して行う。

生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び
熱除去についての計算書

設計及び工事計画認可申請 資料16

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資 16-1
2. 生体遮蔽装置の設計並びに放射線の遮蔽及び熱除去に関する基本方針	
	資 16-1
2.1 基本方針	資 16-1
2.2 放射線の遮蔽及び熱除去の評価	資 16-1
2.3 適用基準及び適用規格等	資 16-2
3. 遮蔽設計	資 16-3
4. 放射線の遮蔽及び熱除去の評価	資 16-3
4.1 放射線の遮蔽評価	資 16-3
4.1.1 評価方針	資 16-3
4.1.2 評価条件及び評価結果	資 16-9
4.2 熱除去の評価	資 16-11
4.2.1 評価方針	資 16-11
4.2.2 評価条件及び評価結果	資 16-12
4.3 放射線の遮蔽及び熱除去の評価のまとめ	資 16-13

別紙 1 計算機プログラム（解析コード）の概要

※本資料における については商業機密又は防護上の機密を含むため公開できません。

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）」第42条並びにその「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（以下「解釈」という。）に基づき放射線業務従事者の放射線障害防止及び発電所周辺の空間線量率の低減のために設置する使用済燃料乾式貯蔵建屋の補助遮蔽について、それらの設計並びに放射線の遮蔽及び熱除去の評価について説明するものである。

2. 生体遮蔽装置の設計並びに放射線の遮蔽及び熱除去に関する基本方針

2.1 基本方針

補助遮蔽は、技術基準規則第42条及びその解釈に基づき、以下のとおり遮蔽設計及び評価を行う。

通常運転時において放射線業務従事者が受ける線量が「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示（平成27年8月31日原子力規制委員会告示第8号 改正：令和2年3月18日原子力規制委員会告示第7号）」（以下「線量告示」という。）に定められた線量限度を超えないように設計する。遮蔽設計に際しては、関係各場所への立入頻度、滞在時間等を考慮した上で、放射線業務従事者の放射線被ばくが十分安全に管理できるように、生体遮蔽装置の放射線の遮蔽能力について、管理区域境界での線量率が $1.3\text{mSv}/3\text{月}$ ($0.0026\text{mSv}/\text{h}$) 以下となることを確認する。

人の居住の可能性のある敷地境界外（以下「敷地境界外」という。）の線量については解釈に示される年間 $50\mu\text{Sv}$ 以下となることを確認する。

2.2 放射線の遮蔽及び熱除去の評価

使用済燃料乾式貯蔵建屋における放射線の遮蔽評価は、使用済燃料乾式貯蔵建屋の管理区域の外側の区域に滞在する放射線業務従事者が受ける線量率が $1.3\text{mSv}/3\text{月}$ ($0.0026\text{mSv}/\text{h}$) 以下となることを確認する。使用済燃料乾式貯蔵建屋の放射線の遮蔽評価に当たっては、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド（平成31年3月13日原子力規制委員会）」を参照して評価する。

使用済燃料乾式貯蔵建屋における熱除去の評価は、遮蔽体（鉄筋コンクリート）の温度上昇が最も厳しい箇所について、線量計算で求める遮蔽体のガンマ線入射線束よりガンマ線による発熱量を求めて遮蔽体の温度上昇を計算し、その結果がコンクリートのガンマ線及び中性子線遮蔽能力に対する温度制限値以下となることを確認する。

2.3 適用基準及び適用規格等

生体遮蔽装置の設計並びに放射線の遮蔽及び熱除去の評価に適用する基準及び規格等は、以下のとおりとする。

- ・原子力発電所放射線遮へい設計規程 (JEAC4615-2008) (平成15年5月23日制定)
- ・技術基準規則
- ・解釈
- ・線量告示
- ・原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド (平成31年3月13日原子力規制委員会)
- ・QAD : A Series of Point Kernel General Purpose Shielding Programs (R. E. Malenfant, LA-3573, 1967)
- ・Fundamental Aspects of Reactor Shielding (H. Goldstein, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., U.S.A., 1959)
- ・発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針 (平成2年8月30日原子力安全委員会決定)
- ・QAD-CGGP2 and G33-GP2 : Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP (Y. Sakamoto and S. Tanaka, JAERI-M 90-110, 1990)
- ・PHOTX, Photon Interaction Cross Section Library (Oak Ridge National Laboratory Radiation Shielding Information Center Data Package DLC-136, 1988)
- ・SCATTERINGコードの概要 (平成14年3月三菱重工業 MAPI-1021 改7)
- ・G-33 CODE (Melvin L. Couchman and George H. Anno, NUS-TM-NA-42, November 1965)
- ・Reactor Physics Constants (ANL-5800, July 1963)
- ・A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering (Ward W. Engle Jr., Neutron Physics Division, Oak Ridge National Laboratory, 1973)
- ・The Libraries FSXLIB and MATXSLIB based on JENDL-3.3 (K. Kosako, et al., JAERI-Data/Code 2003-011, 2003)
- ・外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数 ((社)日本アイソトープ協会 ICRP Publ. 74, 1998)
- ・日本原子力学会標準「放射線遮へい計算のための線量換算係数：2010」(AESJ-SC-R002: 2010)
- ・A USER' S MANUAL FOR MASH 1.0 - A MONTE CARLO ADJOINT SHIELDING CODE SYSTEM (J. O. Johnson, et al, ORNL/MT-11778, 1992)
- ・使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について〔金属キャスク方式〕((財)原子力安全研究協会, 平成12年3月)

- ・ Engineering Compendium on Radiation Shielding (R. G. Jaeger, Vol. II 9.1.12.6, 1975)
- ・ 高温 (175℃) を受けたコンクリートの強度性状 (セメント・コンクリートNo. 449, July 1984)
- ・ 高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究 (日本建築学会構造系論文集第457号1994年3月)

3. 遮蔽設計

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、遮蔽設計基準線量率を満足するための十分な遮蔽厚さを有するものとし、「2.1 基本方針」に示す判断基準を超えない設計とする。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の開口部又は室内換気のための配管やケーブル等を施設するために必要な貫通部については、必要に応じて次の放射線漏えい防止措置を講じた設計とする。

- ・ 開口部を設ける場合、人が容易に接近できないような場所への開口部設置
- ・ 貫通部に対する遮蔽補強
- ・ 線源と貫通部との位置関係により、貫通部から線源が直視できない措置

使用済燃料乾式貯蔵建屋の配置図及び遮蔽設計区分を第3-1図に、遮蔽設計基準を第3-1表に示す。

4. 放射線の遮蔽及び熱除去の評価

4.1 放射線の遮蔽評価

4.1.1 評価方針

使用済燃料乾式貯蔵建屋の放射線の遮蔽評価に当たって、基本的な評価方針を本項において示す。なお、各々の評価に対する詳細な条件については、「4.1.2 評価条件及び評価結果」に示す。

(1) 評価の概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋の放射線の遮蔽評価では、使用済燃料乾式貯蔵建屋の管理区域の外側の区域に滞在する放射線業務従事者が受ける線量率及び敷地境界外において一般公衆が受ける線量を計算し、その結果が判断基準を満足することを評価する。使用済燃料乾式貯蔵建屋を透過する放射線の線源となるものは、使用済燃料乾式貯蔵容器である。

(2) 線量計算

直接線は、放射線源からの放射線が物質中を減衰しながら評価点に達し線量を与える。スカイシャイン線は、放射線源からの放射線が空気中で散乱されて評価点に達し線量を与える。したがって、これらの計算に必要な主な条件は線源条件及び遮蔽体条件、評価点までの距離である。これらの条件を用いて線量を確認する。

線量計算に当たっては、施設の位置、遮蔽構造及び地形条件を適切に模擬し、線源からのガンマ線及び中性子線量評価が可能な以下の解析コードを使用する。

a. QAD-CGGP2R(ver. 1.04)コード

点減衰核積分法による線源及び遮蔽体を直方体、円筒、球などの3次元形状で模擬した計算体系による遮蔽解析コードであり、敷地境界外及び管理区域境界における直接ガンマ線量を計算する。この計算の基本式を以下に示す。なお、QADコードの概要については、QAD : A Series of Point Kernel General Purpose Shielding Programs (R. E. Malenfant, LA-3573, 1967)に示されている。

$$D(r) = F \cdot \int_V \frac{S(r', E) \cdot B(\mu \cdot |r - r'|, E) \cdot e^{-\mu |r - r'|}}{4\pi \cdot |r - r'|^2} \cdot dV$$

ここで、

r	: 線量率を計算する位置 (cm)
r'	: 個々の点線源の位置 (cm)
$D(r)$	: r 点での線量率 (mSv/h)
$S(r', E)$	: r' 点におけるエネルギー E のガンマ線源強度 (MeV/(cm ³ ・s))
μ	: エネルギー E のガンマ線の線減衰係数 (cm ⁻¹)
$B(\mu \cdot r - r' , E)$	: エネルギー E の線量ビルドアップ係数
V	: 線源領域全空間 (cm ³)
F	: エネルギー E の線量率換算係数 ((mSv/h)/(MeV/(cm ² ・s)))
$\mu \cdot r - r' $	: 減衰距離

QAD-CGGP2R(ver. 1.04)コードでは、エネルギー第 j 群の線量率を求めるのに上式を近似的に次式で計算し、線量率 D_j をすべての線源エネルギー群について加えることにより全線量率が計算される。

$$D_j = \sum_i F_j \cdot \frac{S_{ij}}{4\pi \cdot R_i^2} \cdot e^{(-\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k)} \cdot B_{ij}$$

ここで、

j	: エネルギー群番号
i	: 線源点番号
k	: 物質番号
F_j	: 線量率換算係数 ((mSv/h)/(MeV/(cm ² ・s)))
S_{ij}	: i 番目の線源点で代表される領域の体積で重みづけされたエネルギー j 群の点線源強度 (MeV/s)
R_i	: i 番目の線源点と計算点の距離 (cm)
B_{ij}	: ビルドアップ係数
μ_{jk}	: 領域 k における、エネルギー j 群のガンマ線に対する線減衰係数 (cm ⁻¹)
t_k	: 領域 k をガンマ線が透過する距離 (cm)

上記のうち、 F_j については、Fundamental Aspects of Reactor Shielding (H. Goldstein, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., U. S. A., 1959)に基づくガンマ線束から照射線量率への換算係数((R/h)/(MeV/(cm²・s)))に照射線量から空気カーマへの換算係数(Gy/R)及び「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針(平成2年8月30日原子力安全委員会決定)」に基づく空気カーマから実効線量への換算係数(mSv/Gy)を乗じることでコード内で算出される値を、 B_{ij} については、QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP (Y. Sakamoto and S. Tanaka, JAERI-M 90-110, 1990)に記載のGP型ビルドアップ係数の算出式にてコード内で算出される値を、 μ_{jk} については、PHOTX, Photon Interaction Cross Section Library (Oak Ridge National Laboratory Radiation Shielding Information Center Data Package DLC-136, 1988)に基づく質量減衰係数(cm²/g)に物質の密度(g/cm³)を乗じることでコード内で算出される値を用いる。なお、文献に記載のない値については内挿計算する。

b. SCATTERING(ver. 90m)コード

点減衰核積分法を使用した1回散乱近似法による遮蔽解析コードであり、敷地境界外におけるスカイシャインガンマ線量を計算

する。この計算の基本式を以下に示す。なお、SCATTERINGコードの概要については、SCATTERINGコードの概要(平成14年3月三菱重工業 MAPI-1021 改7)に示されている。

$$D = \int_V \frac{S(E)}{4\pi \cdot R^2} \cdot e^{-b} \cdot B(E, b^0) \cdot K(E') \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) \cdot \frac{N}{r^2} \cdot B(E', b') \cdot e^{-b'} \cdot dV$$

ここで、

D	: スカイシャインガンマ線量率 (μ Gy/h)
V	: 散乱体積 (cm^3)
$S(E)$	: 線源エネルギー E の線源強度 (MeV/s)
R	: 線源点から散乱点までの距離 (cm)
b	: 減衰距離 ($b = \sum_i \sum_j \mu_i x_j$)
$K(E')$	: 散乱エネルギー E' に対する空気カーマ率換算係数 ((μ Gy/h)/(MeV/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)))
$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta)$	: Klein-Nishinaの微分散乱断面積 (cm^2)
θ	: 散乱角 (rad)
N	: 空気中の電子数密度 (cm^{-3})
r	: 散乱点から計算点までの距離 (cm)
$B(E, b^0)$	: 線源エネルギー E のガンマ線の線源点から散乱点までの空気以外の遮蔽体 b^0 に対するビルドアップ係数 ($b^0 = \sum_k \sum_n \mu_k x_n$)
$B(E', b')$	: 線源エネルギー E' のガンマ線の散乱点から計算点までの空気を含む遮蔽体 b' に対するビルドアップ係数 ($b' = \sum_\ell \sum_m \mu'_\ell x'_m$)
μ_i, μ_k, μ'_ℓ	: 線源エネルギー E 、散乱エネルギー E' における物質 i, k, ℓ の線減衰係数 (cm^{-1})
x_j, x_n, x'_m	: 領域 j, n, m の透過距離 (cm)

上記のうち、 $K(E')$ については、Fundamental Aspects of Reactor Shielding (H. Goldstein, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., U. S. A., 1959)に基づくガンマ線束から照射線量率への換算係数((R/h)/(MeV/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)))に照射線量から空気カー

マへの換算係数(Gy/R)を乗じることでコード内で算出される値を、 $B(E, b^0)$ 及び $B(E', b')$ については、G-33 CODE (Melvin L. Couchman and George H. Anno, NUS-TM-NA-42, November 1965)に示される計算式によりコード内で算出される値を、 μ_i 、 μ_k 、 μ'_ℓ については、Reactor Physics Constants (ANL-5800, July 1963)に基づく質量減衰係数(cm^2/g)に物質の密度(g/cm^3)を乗じることでコード内で算出される値を用いる。なお、文献に記載のない値については内挿計算する。

c. ANISN(ver. ANISN-W)コード

ボルツマンの輸送方程式をDiscrete Ordinates Sn法に基づき、一次元(球、円筒、平板)形状について計算する数値計算コードであり、管理区域境界における中性子線量を計算する。この計算の基本式を以下に示す。なお、ANISNコードの概要については、A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering (Ward W. Engle Jr., Neutron Physics Division, Oak Ridge National Laboratory, 1973)に示されている。

$$\Omega \nabla \phi(\mathbf{r}, \Omega, E) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, \Omega, E) = \iint \Sigma_s(\mathbf{r}; \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E) \phi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE' + Q(\mathbf{r}, \Omega, E)$$

ここで、

$\phi(\mathbf{r}, \Omega, E)$	: 角度束(位置 $\mathbf{r}$ で単位ベクトル Ω 方向の単位立体角あたりに進む Ω に垂直な面を単位時間あたりに通過するエネルギー E の中性子線の数) ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)
Σ_t	: 全マクロ断面積(cm^{-1})
Σ_s	: マクロ散乱断面積(cm^{-1})
$Q(\mathbf{r}, \Omega, E)$	: 中性子線発生数($\text{n}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$)

上記のうち、 Σ_t 及び Σ_s については、JENDL-3.3に基づくSn計算コード用の核断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 (The Libraries FSXLIB and MATXSLIB based on JENDL-3.3 (K. Kosako, et al., JAERI-Data/Code 2003-011, 2003)) を、中性子線束から実効線量率への換算係数については、外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数 ((社)日本アイソトープ協会 ICRP Publ. 74,

1998) よりAPジオメトリーにおける実効線量換算係数を用いる。なお、文献に記載のない値については、日本原子力学会標準「放射線遮へい計算のための線量換算係数：2010」(AESJ-SC-R002: 2010) に記載されるエネルギー群構造に対応した線量換算係数の算出方法に準拠し、補完計算する。

d. DORT(ver. 3.2)コード

ボルツマンの輸送方程式をDiscrete Ordinates Sn法に基づき、二次元 (X, Y)、(R, Z) 及び (R, θ) について計算する数値計算コードであり、敷地境界外における中性子線量を計算する。この計算の基本式を以下に示す。なお、DORTコードの概要については、A USER'S MANUAL FOR MASH 1.0 - A MONTE CARLO ADJOINT SHIELDING CODE SYSTEM (J. O. Johnson, et al, ORNL/MT-11778, 1992) に示されている。

$$\Omega \nabla \phi(\mathbf{r}, \Omega, E) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \phi(\mathbf{r}, \Omega, E) = \iint \Sigma_s(\mathbf{r}; \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E) \phi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE' + Q(\mathbf{r}, \Omega, E)$$

ここで、

$\phi(\mathbf{r}, \Omega, E)$	: 角度 Ω (位置 $\mathbf{r}$ で単位ベクトル Ω 方向の単位立体角あたりに進む Ω に垂直な面を単位時間あたりに通過するエネルギー E の中性子線の数) (n/(cm ² ·s))
Σ_t	: 全マクロ断面積 (cm ⁻¹)
Σ_s	: マクロ散乱断面積 (cm ⁻¹)
$Q(\mathbf{r}, \Omega, E)$	: 中性子線発生数 (n/(cm ³ ·s))

上記のうち、 Σ_t 及び Σ_s についてはJENDL-3.3に基づくSn計算コード用の核断面積ライブラリ MATXS-LIB-J33 (The Libraries FSXLIB and MATXS-LIB based on JENDL-3.3 (K. Kosako, et al., JAERI-Data/Code 2003-011, 2003)) を、中性子線束から実効線量率への換算係数については、外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数 ((社)日本アイソトープ協会 ICRP Publ. 74, 1998) よりROTジオメトリーにおける実効線量換算係数を用いる。なお、文献に記載のない値については、日本原子力学会標準「放射線遮へい計算のための線量換算係数：2010」(AESJ-SC-R002: 2010)

に記載されるエネルギー群構造に対応した線量換算係数の算出方法に準拠し、補完計算する。

(3) 生体遮蔽装置

評価で考慮する生体遮蔽装置は以下のとおりである。

・補助遮蔽（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

使用済燃料乾式貯蔵建屋の貯蔵エリア壁厚さ[]及び天井厚さ[]ならびに取扱エリア壁厚さ[]にマイナス側許容差5mmを考慮する。また、使用済燃料乾式貯蔵建屋の材料は鉄筋コンクリートであるが、鉄筋の遮蔽能力はコンクリートより大きいので、すべてコンクリートとして評価する。コンクリート密度は 2.15g/cm^3 とする。

4.1.2 評価条件及び評価結果

評価方針は、「4.1.1 評価方針」に示すとおりであるが、この方針をもとに各々の評価条件を考慮して線量を評価する。

(1) 線源

使用済燃料乾式貯蔵建屋には、使用済燃料乾式貯蔵容器を貯蔵保管する。使用済燃料乾式貯蔵容器はガンマ線及び中性子線源であり、容器表面から1m離れた位置で $100\mu\text{Sv/h}$ となるように放射線源強度を規格化し、ガンマ線100%、中性子線100%のいずれか保守的な線量を評価する。その際、ガンマ線及び中性子線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるよう使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について〔金属キャスク方式〕（（財）原子力安全研究協会、平成12年3月）に記載の包絡スペクトルを設定する。貯蔵エリアには使用済燃料乾式貯蔵容器48基を貯蔵するスペースがあることから、保守的な評価を行うため、48基貯蔵したと仮定して線量を評価する。また、取扱エリアにおいて使用済燃料乾式貯蔵容器を取り扱う際には、使用済燃料乾式貯蔵容器の位置を限定できないため、取扱エリアに2基存在するとして線量を評価する。このとき、評価が保守側になるよう容器同士の相互遮蔽効果は無視し、線源は空気として評価する。使用済燃料乾式貯蔵容器の線源条件を第4-1-2-1表に、エネルギースペクトルを第4-1-2-2表及び第4-1-2-3表に示す。

(2) 線量評価

評価は、使用済燃料乾式貯蔵建屋外表面の線量率及び敷地境界外での線量について行う。

a. 管理区域境界の線量率評価

線量計算に当たっては、施設の位置、遮蔽構造及び地形条件を適切に模擬し、線源からのガンマ線及び中性子線量評価が可能な 4.1.1(2) に示す計算コードを使用し、管理区域境界における線量率が「2.1 基本方針」に示す $1.3\text{mSv}/3\text{月}$ ($0.0026\text{mSv}/\text{h}$) 以下を満足していることを確認する。ガンマ線量計算モデルを第 4-1-2-1 図、中性子線量計算モデルを第 4-1-2-2 図に示す。

b. 敷地境界外の線量評価

線量計算に当たっては、前項と同じく、4.1.1(2) に示す計算コードを使用し、敷地境界外における直接線及びスカイシャイン線の合計値が年間 $50\mu\text{Sv}$ 以下を満足していることを確認する。ガンマ線量計算モデルを第 4-1-2-3 図、中性子線量計算モデルを第 4-1-2-4 図に示す。

(3) 評価結果

a. 管理区域境界の線量率

使用済燃料乾式貯蔵建屋外表面における最大点の線量率は、貯蔵エリア側でガンマ線 $4.4\times 10^{-5}\text{mSv}/\text{h}$ 、中性子線 $1.7\times 10^{-4}\text{mSv}/\text{h}$ 、取扱エリア側でガンマ線 $1.7\times 10^{-3}\text{mSv}/\text{h}$ 、中性子線 $1.2\times 10^{-3}\text{mSv}/\text{h}$ であり、「2.1 基本方針」に示す $1.3\text{mSv}/3\text{月}$ ($0.0026\text{mSv}/\text{h}$) 以下を満足している。

b. 敷地境界外の線量

敷地境界外の最大線量評価地点 (EL.170m、乾式貯蔵施設から 500m 離れた地点) を第 4-1-2-5 図に示す。敷地境界外の最大線量評価地点における使用済燃料乾式貯蔵建屋からの線量は、年間でガンマ線 $1.6\times 10^{-1}\mu\text{Sv}$ 、中性子線 $5.8\times 10^{-2}\mu\text{Sv}$ であり、これに、通常運転時の他施設からの線量を加えた合計値は第 4-1-2-4 表に示すとおり、年間 $50\mu\text{Sv}$ 以下を満足している。このとき、使用済燃料乾式貯蔵建屋からの線量は、評価結果の線量が大きいガンマ線の評価結果を代表とした。

4.2 熱除去の評価

4.2.1 評価方針

(1) 評価の概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋の熱除去に関する設計のために、放射線による遮蔽体の温度上昇を確認し、その結果が遮蔽機能上問題ないことを評価する。

評価に当たっては、遮蔽体の温度上昇が最も厳しい箇所について、線量計算で求める遮蔽体のガンマ線入射線束よりガンマ線による発熱量を求めて遮蔽体の温度上昇を確認し、その結果が、コンクリートのガンマ線遮蔽能力に対する温度制限値 170℃以下^(注)、中性子線遮蔽能力に対する温度制限値 80℃以下^(注)のうち、より厳しい 80℃以下となることを評価する。

(注) 温度制限値とする 170℃及び 80℃は、Engineering Compendium on Radiation Shielding (R. G. Jaeger, Vol. II 9.1.12.6, 1975)によるコンクリートのガンマ線遮蔽能力に対する温度制限値 177℃、中性子線遮蔽能力に対する温度制限値 88℃をそれぞれ保守的に切り下げて設定する。

なお、強度評価上は、既往の文献である高温(175℃)を受けたコンクリートの強度性状(セメント・コンクリート No. 449, July 1984)及び高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究(日本建築学会構造系論文集第 457 号 1994 年 3 月)によると、コンクリートを 175℃程度、91 日間加熱した試験でも、コンクリートの圧縮強度の低下及び剛性の低下は小さいとされている。

(2) ガンマ線による発熱量の計算

遮蔽体のガンマ発熱の分布は、ガンマ線束分布にコンクリートのエネルギー吸収係数を乗じて次式で求める。

$$H(x) = 5.77 \times 10^{-13} \cdot \mu_e \cdot \phi(x)$$

ここで、

$H(x)$	:	壁内側表面からの距離 x におけるガンマ線による発熱量 (kJ/(cm ³ ・h))
μ_e	:	コンクリートのエネルギー吸収係数 (cm ⁻¹)
$\phi(x)$	:	距離 x でのガンマ線束 (MeV/(cm ² ・s))

上記のうち、 μ_e は Reactor Physics Constants (ANL-5800, July 1963) に基づきコンクリート密度を乗じることでエネルギー毎の吸収係数を算出する。

(3) 遮蔽体における温度上昇の計算

4.2.1(2)により計算したガンマ線による発熱量を用いて、次の熱伝導方程式により上昇温度を計算する。

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} = -\frac{H(x)}{K}$$

ここで、

$T(x)$: 壁内側表面からの距離 x における
コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)

$H(x)$: 壁内側表面からの距離 x における
ガンマ線による発熱量 ($\text{kJ}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$)

K : コンクリートの熱伝導率 ($\text{kJ}/(\text{cm} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$) ($0.054 \text{kJ}/(\text{cm} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$)

また、壁表面の境界条件は次式で与えられる。

$$Q = h_c \cdot \Delta T$$

ここで、

Q : 壁表面から伝熱される熱量
($\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$)

h_c : 自然対流熱伝達係数 ($\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$)
使用済燃料乾式貯蔵建屋壁表面と空気の場合は
 $h_c = 4.73 \times 10^{-4} \cdot \Delta T^{1/3}$

ΔT : 壁表面と空気の温度差 ($^{\circ}\text{C}$)

4.2.2 評価条件及び評価結果

(1) ガンマ線入射線束の評価点の設定

遮蔽体のガンマ線入射線束の評価点は、入射線束が最も大きくなるように遮蔽体内面を評価点とする。

(2) ガンマ線入射線束の設定

通常運転時における使用済燃料乾式貯蔵建屋への入射線束は「4.1 放射線の遮蔽評価」と同様の遮蔽計算の線源及びモデルを使用し、4.1.1(2)に示す計算コードを用いて計算した結果、

使用済燃料乾式貯蔵建屋のガンマ線入射線束は $3.7 \times 10^4 \text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ である。

- (3) 遮蔽体におけるガンマ線による発熱量及び温度上昇の評価
通常運転時における使用済燃料乾式貯蔵建屋のガンマ発熱による温度上昇は約 $3 \times 10^{-4} \text{°C}$ となる。

- (4) 熱除去の評価結果

4.2.2(3)に示すとおり通常運転時における使用済燃料乾式貯蔵建屋の温度上昇は 0.001°C 以下となり、放射線による温度上昇の影響は無視できる程度に小さく、コンクリートのガンマ線及び中性子線遮蔽能力に対する温度制限値を十分満足するものである。

4.3 放射線の遮蔽及び熱除去の評価のまとめ

使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽体コンクリートについて、放射線の遮蔽及び熱除去の評価を行った結果、それぞれの判断基準を満足していることから、遮蔽機能上問題がないものとして評価する。

第 3-1 表 遮蔽設計基準

区 分		外部放射線に係る 設計基準線量率
管理区域外	第 I 区分	$\leq 1.3 \text{ mSv/3 月}$
管理区域内	第 II 区分	$\leq 0.01 \text{ mSv/h}$
	第 III 区分	$\leq 0.15 \text{ mSv/h}$
	第 IV 区分	$> 0.15 \text{ mSv/h}$

第 4-1-2-1 表 線源条件

項 目	評 価 条 件
線 源	使用済燃料乾式貯蔵容器
線 源 数	貯蔵エリア：48 基 取扱エリア：2 基
発生する放射線	ガンマ線または中性子線
放射線発生数	容器表面から 1m 離れた位置でガンマ線 または中性子線それぞれ $100 \mu\text{Sv/h}$ と なるように規格化

第 4-1-2-2 表 エネルギースペクトル (ガンマ線)

代表エネルギー (MeV)	スペクトル
10.0	2.23×10^{-3}
8.0	2.08×10^{-2}
6.5	2.62×10^{-2}
5.0	2.23×10^{-2}
4.0	2.88×10^{-2}
3.0	1.82×10^{-2}
2.5	2.23×10^{-2}
2.0	1.86×10^{-2}
1.66	3.64×10^{-2}
1.33	4.69×10^{-2}
1.0	3.67×10^{-2}
0.8	4.73×10^{-2}
0.6	6.67×10^{-2}
0.4	4.73×10^{-2}
0.3	6.67×10^{-2}
0.2	1.14×10^{-1}
0.1	3.79×10^{-1}

第 4-1-2-3 表 (1/5) エネルギースペクトル (中性子線)

群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
1	1.7333×10^1	1.9640×10^1	0.00
2	1.6905×10^1	1.7333×10^1	0.00
3	1.6487×10^1	1.6905×10^1	0.00
4	1.5683×10^1	1.6487×10^1	0.00
5	1.4918×10^1	1.5683×10^1	0.00
6	1.4550×10^1	1.4918×10^1	0.00
7	1.4191×10^1	1.4550×10^1	0.00
8	1.3840×10^1	1.4191×10^1	0.00
9	1.3499×10^1	1.3840×10^1	0.00
10	1.2840×10^1	1.3499×10^1	0.00
11	1.2523×10^1	1.2840×10^1	0.00
12	1.2214×10^1	1.2523×10^1	0.00
13	1.1618×10^1	1.2214×10^1	0.00
14	1.1052×10^1	1.1618×10^1	0.00
15	1.0513×10^1	1.1052×10^1	0.00
16	1.0000×10^1	1.0513×10^1	0.00
17	9.5123×10^0	1.0000×10^1	0.00
18	9.0484×10^0	9.5123×10^0	0.00
19	8.6071×10^0	9.0484×10^0	0.00
20	8.1873×10^0	8.6071×10^0	0.00
21	7.7880×10^0	8.1873×10^0	0.00
22	7.4082×10^0	7.7880×10^0	0.00
23	7.0469×10^0	7.4082×10^0	0.00
24	6.7032×10^0	7.0469×10^0	0.00
25	6.5924×10^0	6.7032×10^0	0.00
26	6.3763×10^0	6.5924×10^0	0.00
27	6.0653×10^0	6.3763×10^0	0.00
28	5.7695×10^0	6.0653×10^0	0.00
29	5.4881×10^0	5.7695×10^0	0.00
30	5.2205×10^0	5.4881×10^0	0.00
31	4.9659×10^0	5.2205×10^0	0.00
32	4.7237×10^0	4.9659×10^0	1.24×10^{-3}
33	4.4933×10^0	4.7237×10^0	9.33×10^{-3}
34	4.0657×10^0	4.4933×10^0	3.89×10^{-2}
35	3.6788×10^0	4.0657×10^0	8.56×10^{-2}

第 4-1-2-3 表 (2/5) エネルギースペクトル (中性子線)

群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
36	3.3287×10^0	3.6788×10^0	1.44×10^{-1}
37	3.1664×10^0	3.3287×10^0	8.28×10^{-2}
38	3.0119×10^0	3.1664×10^0	8.20×10^{-2}
39	2.8650×10^0	3.0119×10^0	7.79×10^{-2}
40	2.7253×10^0	2.8650×10^0	7.38×10^{-2}
41	2.5924×10^0	2.7253×10^0	6.81×10^{-2}
42	2.4660×10^0	2.5924×10^0	6.04×10^{-2}
43	2.3852×10^0	2.4660×10^0	3.54×10^{-2}
44	2.3653×10^0	2.3852×10^0	8.28×10^{-3}
45	2.3457×10^0	2.3653×10^0	7.95×10^{-3}
46	2.3069×10^0	2.3457×10^0	1.51×10^{-2}
47	2.2313×10^0	2.3069×10^0	2.73×10^{-2}
48	2.1225×10^0	2.2313×10^0	3.48×10^{-2}
49	2.0190×10^0	2.1225×10^0	2.88×10^{-2}
50	1.9205×10^0	2.0190×10^0	2.39×10^{-2}
51	1.8268×10^0	1.9205×10^0	2.00×10^{-2}
52	1.7377×10^0	1.8268×10^0	1.63×10^{-2}
53	1.6530×10^0	1.7377×10^0	1.25×10^{-2}
54	1.5724×10^0	1.6530×10^0	9.53×10^{-3}
55	1.4957×10^0	1.5724×10^0	7.52×10^{-3}
56	1.4227×10^0	1.4957×10^0	5.99×10^{-3}
57	1.3534×10^0	1.4227×10^0	4.74×10^{-3}
58	1.2873×10^0	1.3534×10^0	3.69×10^{-3}
59	1.2246×10^0	1.2873×10^0	2.86×10^{-3}
60	1.1648×10^0	1.2246×10^0	2.23×10^{-3}
61	1.1080×10^0	1.1648×10^0	1.76×10^{-3}
62	1.0026×10^0	1.1080×10^0	2.48×10^{-3}
63	9.6164×10^{-1}	1.0026×10^0	7.20×10^{-4}
64	9.0718×10^{-1}	9.6164×10^{-1}	7.48×10^{-4}
65	8.6294×10^{-1}	9.0718×10^{-1}	4.63×10^{-4}
66	8.2085×10^{-1}	8.6294×10^{-1}	3.44×10^{-4}
67	7.8082×10^{-1}	8.2085×10^{-1}	2.61×10^{-4}
68	7.4274×10^{-1}	7.8082×10^{-1}	2.32×10^{-4}
69	7.0651×10^{-1}	7.4274×10^{-1}	2.12×10^{-4}
70	6.7206×10^{-1}	7.0651×10^{-1}	1.94×10^{-4}

第 4-1-2-3 表 (3/5) エネルギースペクトル (中性子線)

群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
71	6.3928×10^{-1}	6.7206×10^{-1}	1.77×10^{-4}
72	6.0810×10^{-1}	6.3928×10^{-1}	1.62×10^{-4}
73	5.7844×10^{-1}	6.0810×10^{-1}	1.47×10^{-4}
74	5.5023×10^{-1}	5.7844×10^{-1}	1.28×10^{-4}
75	5.2340×10^{-1}	5.5023×10^{-1}	1.12×10^{-4}
76	4.9787×10^{-1}	5.2340×10^{-1}	9.79×10^{-5}
77	4.5049×10^{-1}	4.9787×10^{-1}	1.60×10^{-4}
78	4.0762×10^{-1}	4.5049×10^{-1}	1.22×10^{-4}
79	3.8774×10^{-1}	4.0762×10^{-1}	5.01×10^{-5}
80	3.6883×10^{-1}	3.8774×10^{-1}	4.52×10^{-5}
81	3.3373×10^{-1}	3.6883×10^{-1}	7.79×10^{-5}
82	3.0197×10^{-1}	3.3373×10^{-1}	6.38×10^{-5}
83	2.9850×10^{-1}	3.0197×10^{-1}	6.58×10^{-6}
84	2.9720×10^{-1}	2.9850×10^{-1}	2.45×10^{-6}
85	2.9452×10^{-1}	2.9720×10^{-1}	5.01×10^{-6}
86	2.8725×10^{-1}	2.9452×10^{-1}	1.34×10^{-5}
87	2.7324×10^{-1}	2.8725×10^{-1}	2.48×10^{-5}
88	2.4724×10^{-1}	2.7324×10^{-1}	4.27×10^{-5}
89	2.3518×10^{-1}	2.4724×10^{-1}	1.84×10^{-5}
90	2.2371×10^{-1}	2.3518×10^{-1}	1.66×10^{-5}
91	2.1280×10^{-1}	2.2371×10^{-1}	1.50×10^{-5}
92	2.0242×10^{-1}	2.1280×10^{-1}	1.36×10^{-5}
93	1.9255×10^{-1}	2.0242×10^{-1}	3.08×10^{-6}
94	1.8316×10^{-1}	1.9255×10^{-1}	0.00
95	1.7422×10^{-1}	1.8316×10^{-1}	0.00
96	1.6573×10^{-1}	1.7422×10^{-1}	0.00
97	1.5764×10^{-1}	1.6573×10^{-1}	0.00
98	1.4996×10^{-1}	1.5764×10^{-1}	0.00
99	1.4264×10^{-1}	1.4996×10^{-1}	0.00
100	1.3569×10^{-1}	1.4264×10^{-1}	0.00
101	1.2907×10^{-1}	1.3569×10^{-1}	0.00
102	1.2277×10^{-1}	1.2907×10^{-1}	0.00
103	1.1679×10^{-1}	1.2277×10^{-1}	0.00
104	1.1109×10^{-1}	1.1679×10^{-1}	0.00
105	9.8037×10^{-2}	1.1109×10^{-1}	0.00

第 4-1-2-3 表 (4/5) エネルギースペクトル (中性子線)

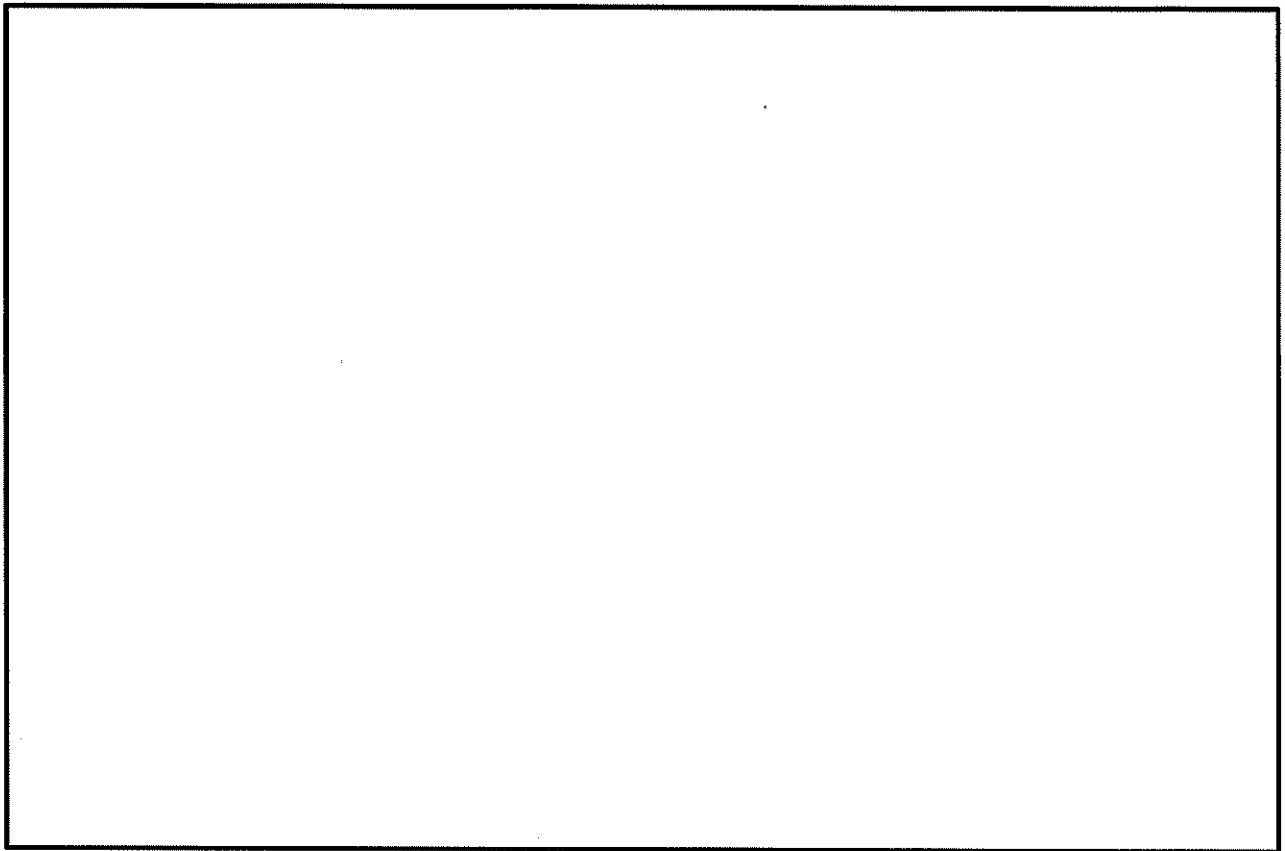
群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
106	8.6517×10^{-2}	9.8037×10^{-2}	0.00
107	8.2500×10^{-2}	8.6517×10^{-2}	0.00
108	7.9500×10^{-2}	8.2500×10^{-2}	0.00
109	7.2000×10^{-2}	7.9500×10^{-2}	0.00
110	6.7379×10^{-2}	7.2000×10^{-2}	0.00
111	5.6562×10^{-2}	6.7379×10^{-2}	0.00
112	5.2475×10^{-2}	5.6562×10^{-2}	0.00
113	4.6309×10^{-2}	5.2475×10^{-2}	0.00
114	4.0868×10^{-2}	4.6309×10^{-2}	0.00
115	3.4307×10^{-2}	4.0868×10^{-2}	0.00
116	3.1828×10^{-2}	3.4307×10^{-2}	0.00
117	2.8500×10^{-2}	3.1828×10^{-2}	0.00
118	2.7000×10^{-2}	2.8500×10^{-2}	0.00
119	2.6058×10^{-2}	2.7000×10^{-2}	0.00
120	2.4788×10^{-2}	2.6058×10^{-2}	0.00
121	2.4176×10^{-2}	2.4788×10^{-2}	0.00
122	2.3579×10^{-2}	2.4176×10^{-2}	0.00
123	2.1875×10^{-2}	2.3579×10^{-2}	0.00
124	1.9305×10^{-2}	2.1875×10^{-2}	0.00
125	1.5034×10^{-2}	1.9305×10^{-2}	0.00
126	1.1709×10^{-2}	1.5034×10^{-2}	0.00
127	1.0595×10^{-2}	1.1709×10^{-2}	0.00
128	9.1188×10^{-3}	1.0595×10^{-2}	0.00
129	7.1017×10^{-3}	9.1188×10^{-3}	0.00
130	5.5308×10^{-3}	7.1017×10^{-3}	0.00
131	4.3074×10^{-3}	5.5308×10^{-3}	0.00
132	3.7074×10^{-3}	4.3074×10^{-3}	0.00
133	3.3546×10^{-3}	3.7074×10^{-3}	0.00
134	3.0354×10^{-3}	3.3546×10^{-3}	0.00
135	2.7465×10^{-3}	3.0354×10^{-3}	0.00
136	2.6126×10^{-3}	2.7465×10^{-3}	0.00
137	2.4852×10^{-3}	2.6126×10^{-3}	0.00
138	2.2487×10^{-3}	2.4852×10^{-3}	0.00
139	2.0347×10^{-3}	2.2487×10^{-3}	0.00
140	1.5846×10^{-3}	2.0347×10^{-3}	0.00

第 4-1-2-3 表 (5/5) エネルギースペクトル (中性子線)

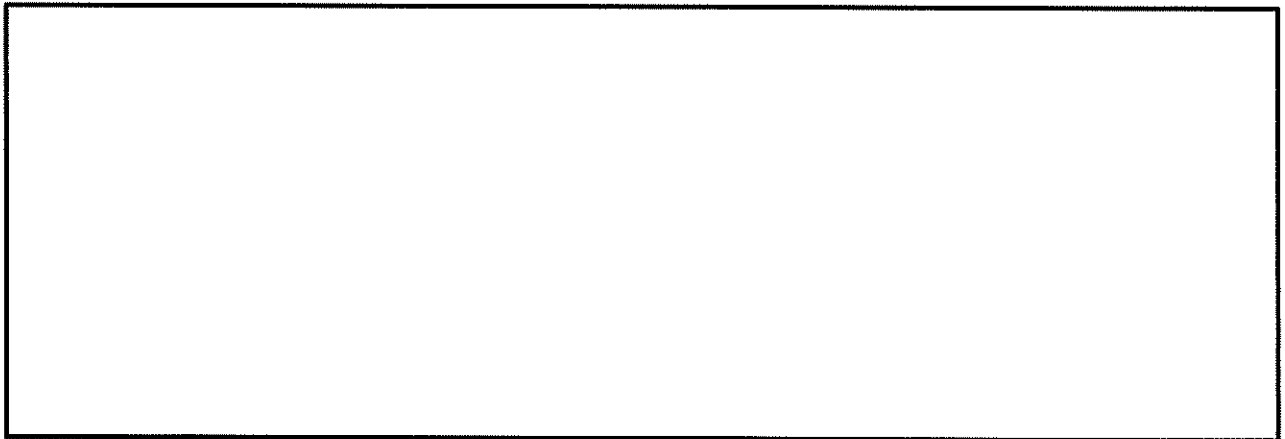
群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
141	1.2341×10^{-3}	1.5846×10^{-3}	0.00
142	9.6112×10^{-4}	1.2341×10^{-3}	0.00
143	7.4852×10^{-4}	9.6112×10^{-4}	0.00
144	5.8295×10^{-4}	7.4852×10^{-4}	0.00
145	4.5400×10^{-4}	5.8295×10^{-4}	0.00
146	3.5358×10^{-4}	4.5400×10^{-4}	0.00
147	2.7536×10^{-4}	3.5358×10^{-4}	0.00
148	2.1445×10^{-4}	2.7536×10^{-4}	0.00
149	1.6702×10^{-4}	2.1445×10^{-4}	0.00
150	1.3007×10^{-4}	1.6702×10^{-4}	0.00
151	1.0130×10^{-4}	1.3007×10^{-4}	0.00
152	7.8893×10^{-5}	1.0130×10^{-4}	0.00
153	6.1442×10^{-5}	7.8893×10^{-5}	0.00
154	4.7851×10^{-5}	6.1442×10^{-5}	0.00
155	3.7267×10^{-5}	4.7851×10^{-5}	0.00
156	2.9023×10^{-5}	3.7267×10^{-5}	0.00
157	2.2603×10^{-5}	2.9023×10^{-5}	0.00
158	1.7603×10^{-5}	2.2603×10^{-5}	0.00
159	1.3710×10^{-5}	1.7603×10^{-5}	0.00
160	1.0677×10^{-5}	1.3710×10^{-5}	0.00
161	8.3153×10^{-6}	1.0677×10^{-5}	0.00
162	6.4760×10^{-6}	8.3153×10^{-6}	0.00
163	5.0435×10^{-6}	6.4760×10^{-6}	0.00
164	3.9279×10^{-6}	5.0435×10^{-6}	0.00
165	3.0590×10^{-6}	3.9279×10^{-6}	0.00
166	2.3824×10^{-6}	3.0590×10^{-6}	0.00
167	1.8554×10^{-6}	2.3824×10^{-6}	0.00
168	1.4450×10^{-6}	1.8554×10^{-6}	0.00
169	1.1254×10^{-6}	1.4450×10^{-6}	0.00
170	8.7642×10^{-7}	1.1254×10^{-6}	0.00
171	6.8256×10^{-7}	8.7642×10^{-7}	0.00
172	5.3158×10^{-7}	6.8256×10^{-7}	0.00
173	4.1399×10^{-7}	5.3158×10^{-7}	0.00
174	1.0000×10^{-7}	4.1399×10^{-7}	0.00
175	1.0000×10^{-11}	1.0000×10^{-7}	0.00

第 4-1-2-4 表 敷地境界外における
直接線及びスカイシャイン線の評価結果

線		源	年間線量 ($\mu\text{Sv}/$ 年)
3 号機 原子炉格納容器		スカイシャイン線	3.8×10^{-1}
		直接線	2.3×10^{-2}
補助 建屋 原子 炉	1, 2 号機	直接・スカイシャイン線	8.4×10^{-1}
	3 号機	直接・スカイシャイン線	2.0×10^0
1－固体廃棄物貯蔵 庫		直接・スカイシャイン線	9.1×10^{-4}
2－固体廃棄物貯蔵 庫		直接・スカイシャイン線	6.3×10^{-1}
雑固体処理建屋		スカイシャイン線	3.6×10^{-5}
		直接線	2.8×10^{-5}
蒸気発生器保管庫		スカイシャイン線	1.9×10^{-2}
		直接線	4.5×10^{-2}
使用済燃料 乾式貯蔵建屋		直接・スカイシャイン線	1.6×10^{-1}
合		計	4.1



(平面図)

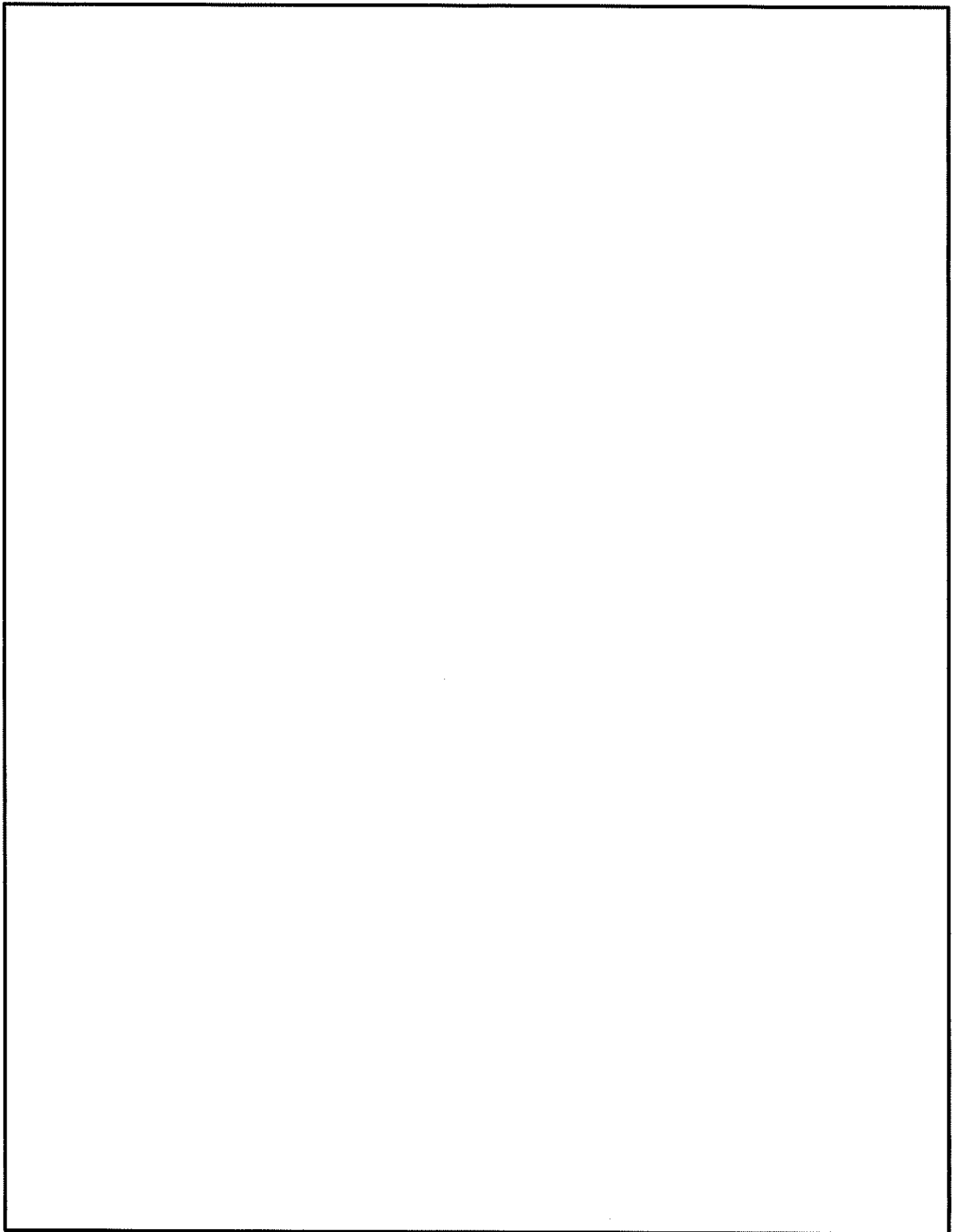


(A-A 断面図)

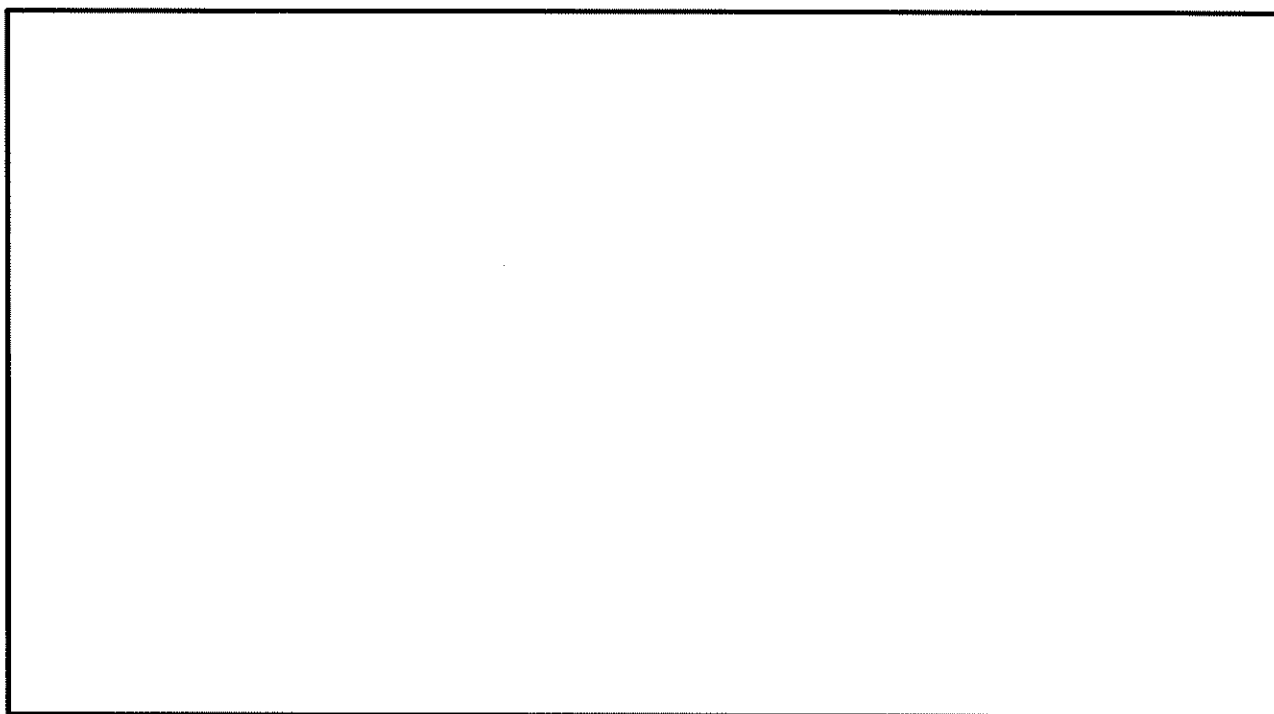
区 分	基準線量率
I	$\leq 1.3 \text{ mSv/3 月}$
II	$\leq 0.01 \text{ mSv/h}$
III	$\leq 0.15 \text{ mSv/h}$
IV	$> 0.15 \text{ mSv/h}$

() 内は取扱時を示す

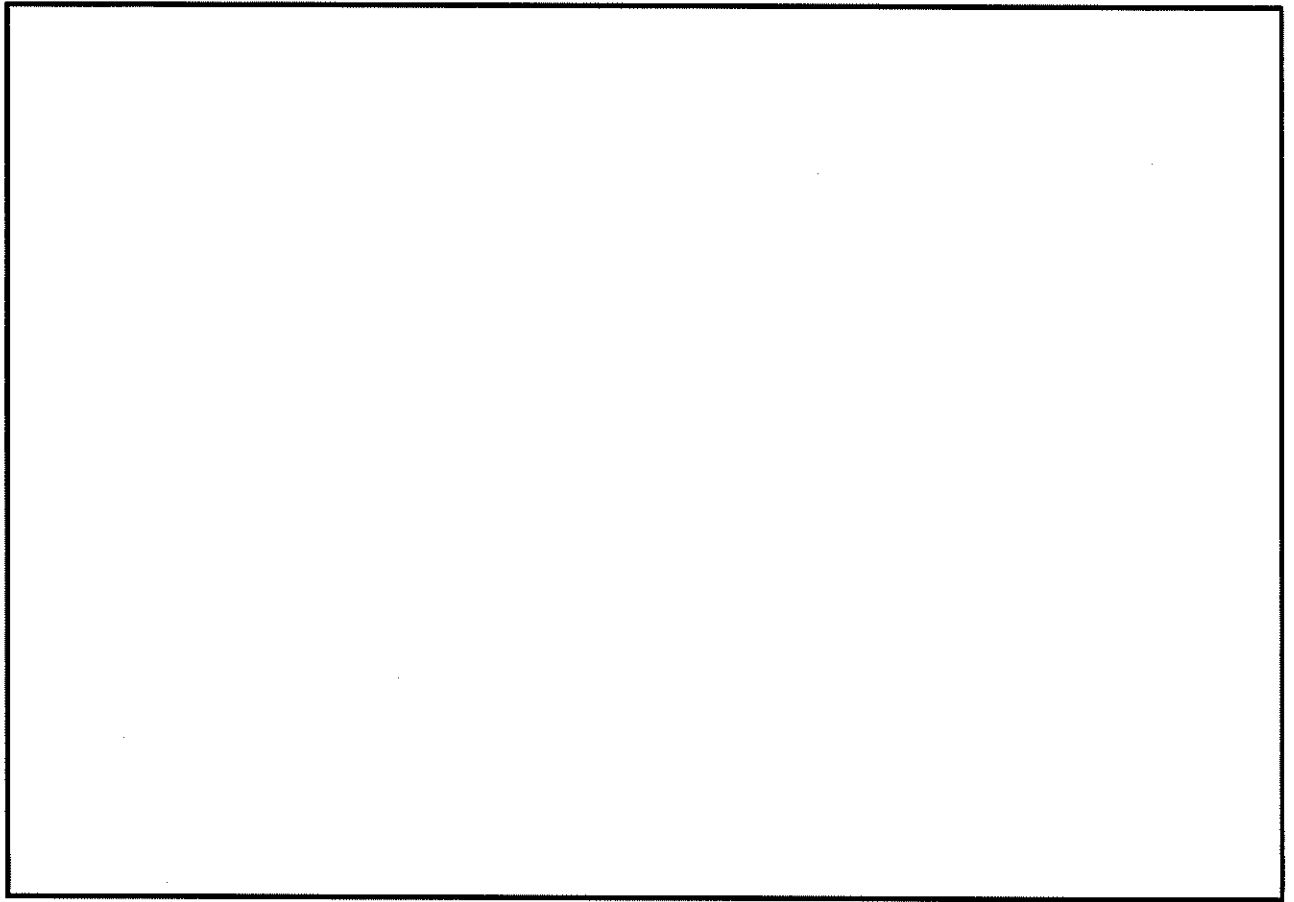
第 3-1 図 使用済燃料乾式貯蔵建屋 配置図及び遮蔽設計区分



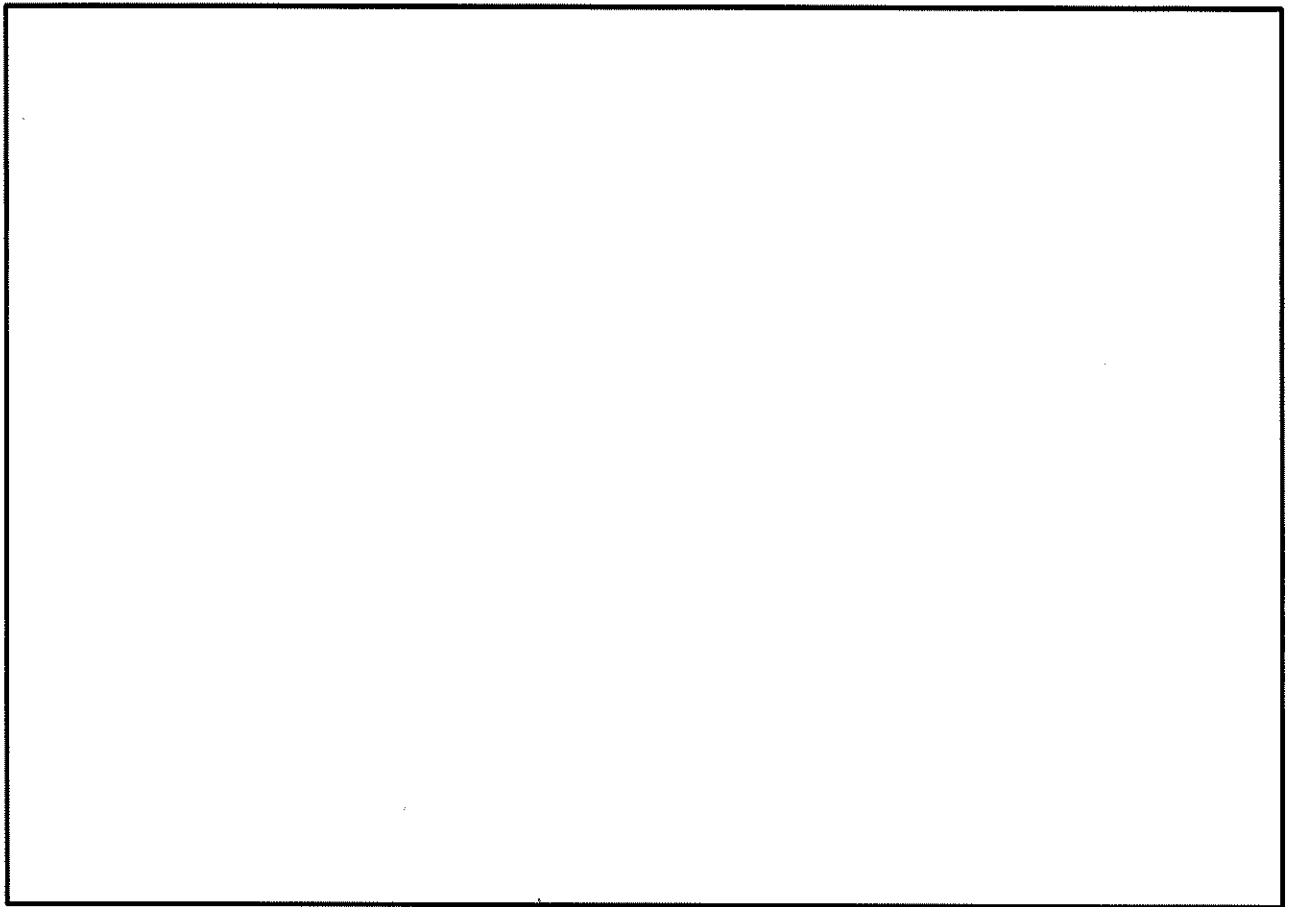
第 4-1-2-1 図 (1/2) 管理区域境界におけるガンマ線量計算モデル
(貯蔵エリア)



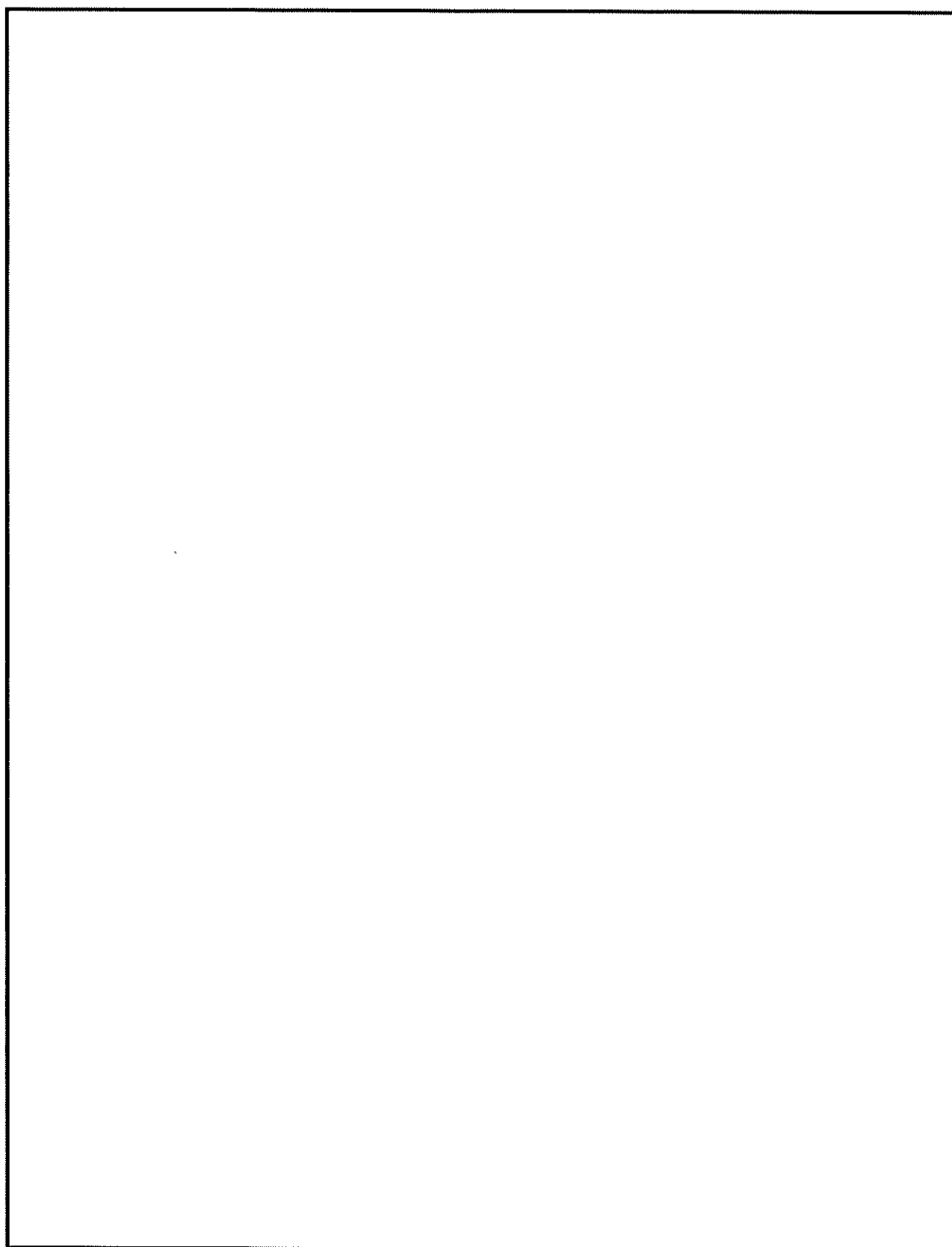
第 4-1-2-1 図(2/2) 管理区域境界におけるガンマ線量計算モデル
(取扱時における取扱エリア)



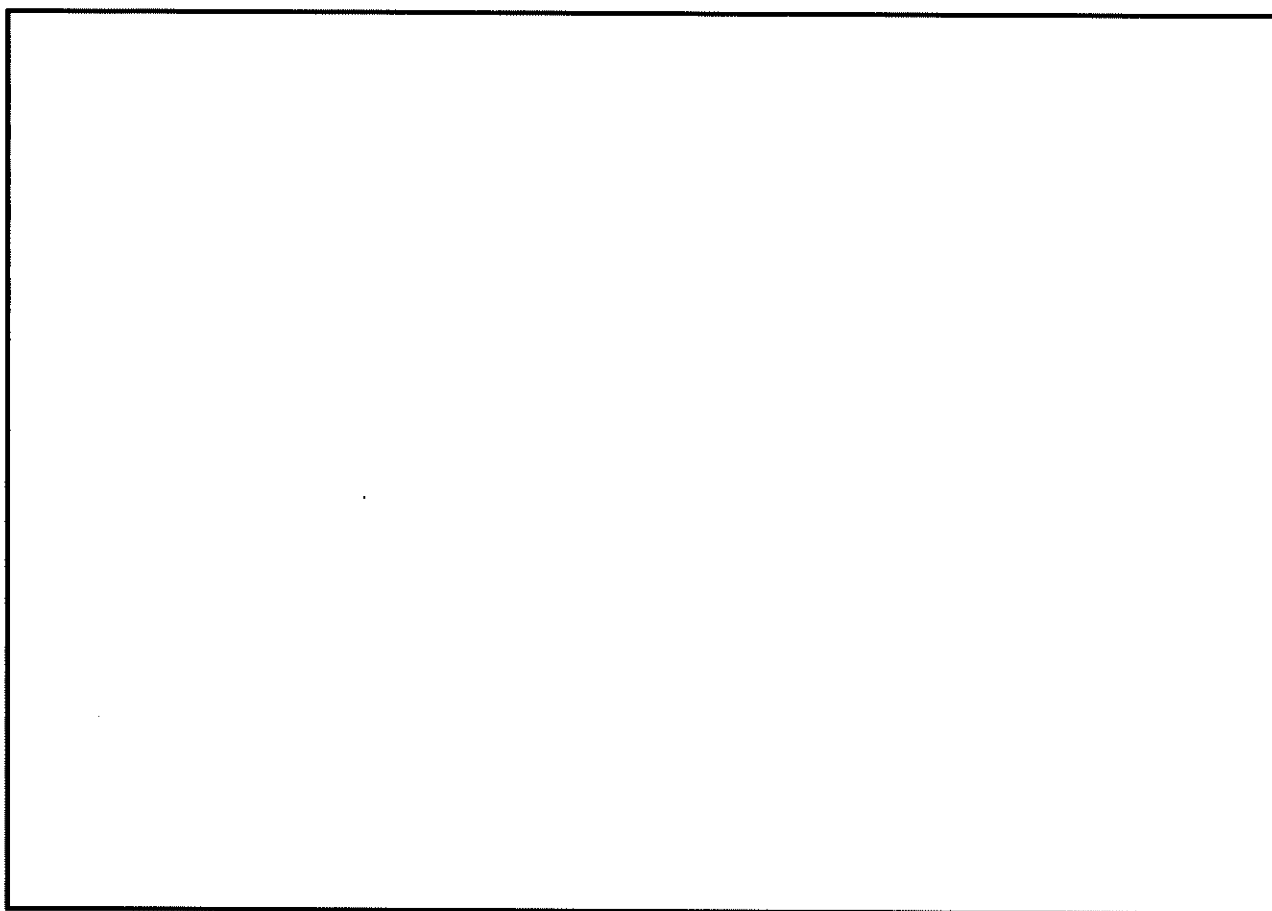
第 4-1-2-2 図(1/2) 管理区域境界における中性子線量計算モデル
(貯蔵エリア)



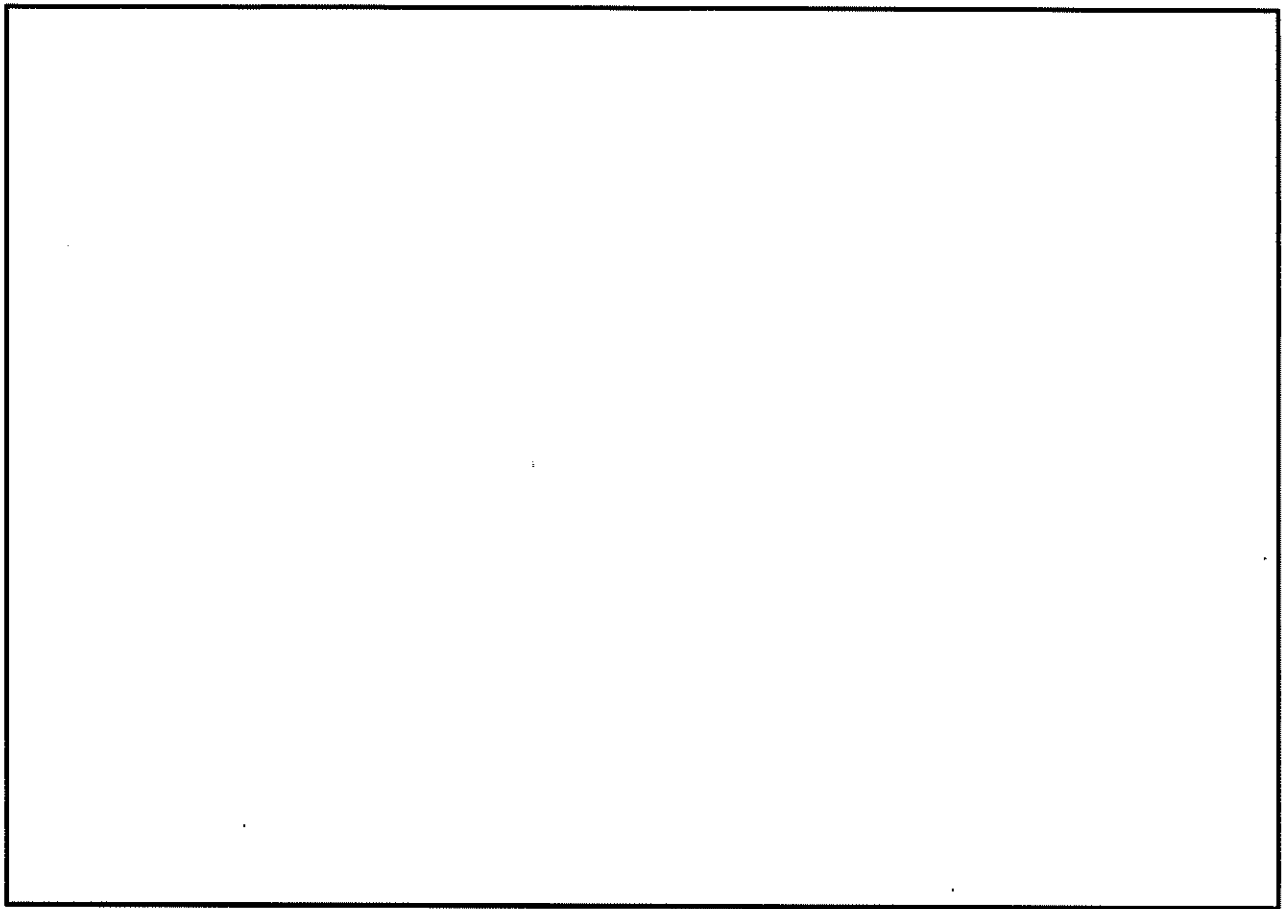
第 4-1-2-2 図 (2/2) 管理区域境界における中性子線量計算モデル
(取扱時における取扱エリア)



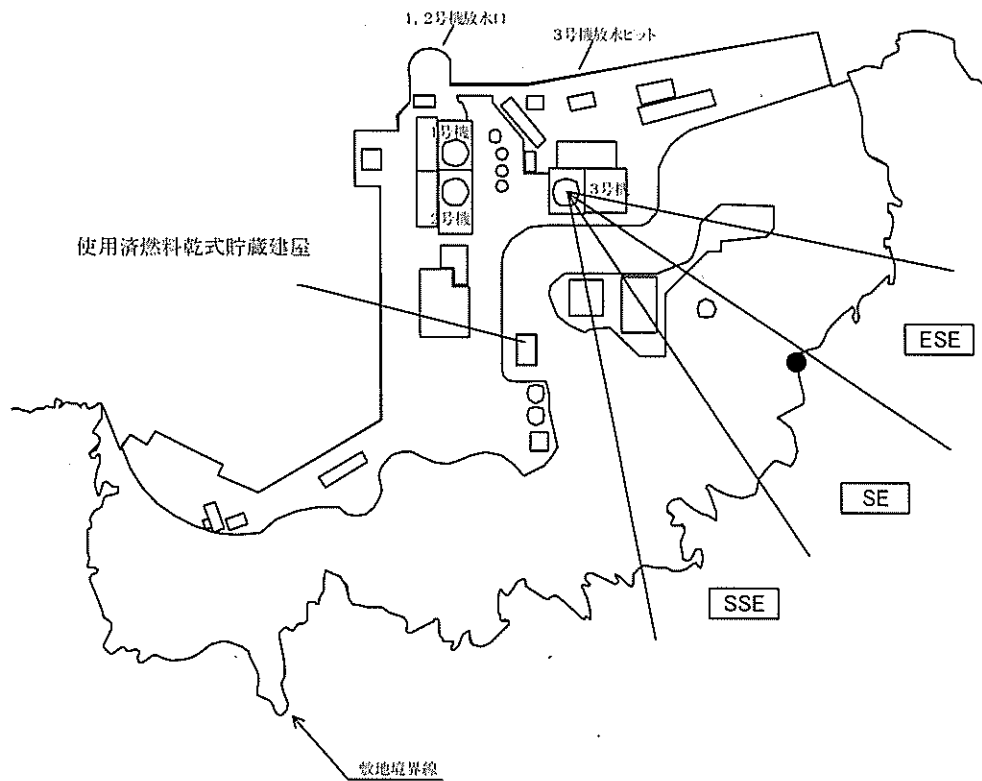
第 4-1-2-3 図 (1/2) 敷地境界外におけるガンマ線量計算モデル
(直接線量計算モデル)



第 4-1-2-3 図 (2/2) 敷地境界外におけるガンマ線量計算モデル
(スカイシャイン線量計算モデル)



第 4-1-2-4 図 敷地境界外における中性子線量計算モデル



第 4-1-2-5 図 敷地境界外の線量評価地点

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

	頁
1. はじめに.....	資 16 別紙 1-1
2. 解析コードの概要	資 16 別紙 1-2
2.1 QAD-CGGP2R.....	資 16 別紙 1-2
2.2 SCATTERING.....	資 16 別紙 1-4
2.3 ANISN.....	資 16 別紙 1-6
2.4 DORT.....	資 16 別紙 1-8

1. はじめに

本資料は、資料 16「生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書」において使用した解析コードについて説明するものである。

2. 解析コードの概要

2.1 QAD-CGGP2R

対象：直接ガンマ線量計算

項目 \ コード名	QAD-CGGP2R
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所及び日本原子力研究開発機構
開発時期	1967 年
使用したバージョン	Ver. 1.04
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの直接ガンマ線計算）
コードの概要	本解析コードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分法解析コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所が ICRP1990 年勧告の国内関連法令・規則への取り入れに合わせて、実効線量率等を計算できるように改良したバージョンである。 本解析コードは、線源及び遮蔽体を直方体、円筒、球などの三次元形状で模擬した計算体系でガンマ線の実効線量率及び空気カーマ率等を点減衰核積分法により計算することができる。
検証(Verification)及び 妥当性確認(Validation)	使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの直接ガンマ線計算について、QAD-CGGP2R コードを使用して実施している。 【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。 ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ QAD-CGGP2R コードは、線量率計算を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら計算条件が与えられれば線量率計算は可能であり、QAD-CGGP2R コードは直接ガンマ線量計算に適用可能である。 【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

	・ JRR-4 散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発事業団、1967））と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と QAD-CGGP2R コードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの直接ガンマ線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、ガンマ線の補助遮蔽の遮蔽体透過後の線量率を計算する。 ・ 今回の直接ガンマ線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」（JEAC4615-2008）では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための点減衰核積分コード / 散乱線計算コードとして、SPAN コード、SCATTERING コード、QAD コードが、燃料移送遮蔽のための点減衰核積分コードとして SPAN-SLAB が挙げられている。

2.2 SCATTERING

対象：スカイシャインガンマ線量計算

項目 \ コード名	SCATTERING
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所及び三菱重工業（株）
開発時期	1974 年
使用したバージョン	Ver. 90m
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からのスカイシャインガンマ線計算）
コードの概要	点減衰核積分法を使用した 1 回散乱近似法によるスカイシャインガンマ線量の解析コードであり、ガンマ線が空气中で散乱を受けた後、観測点に到達する散乱線量（スカイシャインガンマ線量）を計算する。
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からのスカイシャインガンマ線計算について、SCATTERING コードを使用して実施している。 【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。 ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ SCATTERINGコードは、線量率計算を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら計算条件が与えられれば線量率計算は可能であり、SCATTERINGコードはスカイシャインガンマ線量計算に適用可能である。 【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。 ・ 米国Radiation Research Associates (RRA) が1977年に米国カンザス州立大学において⁶⁰Co線源を用いたスカイシャインガンマ線のベンチマーク試験の実験値と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致してい

	ることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、横壁よりも天井が薄い形状で、スカイシャインガンマ線量が比較的多い体系での実験による実験値と、SCATTERINGコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からのスカイシャインガンマ線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、遮蔽が側壁より薄い天井を透過した後のスカイシャインガンマ線の線量率を計算する。 ・ 今回のスカイシャインガンマ線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008)では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための点減衰核積分コード/散乱線計算コードとして、SPANコード、SCATTERINGコード、QADコードが、燃料移送遮蔽のための点減衰核積分コードとしてSPAN-SLABが挙げられている。

2.3 ANISN

対象：中性子線量計算

項目 \ コード名	ANISN
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1967 年
使用したバージョン	ANISN-W
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの中性子線計算）
コードの概要	本解析コードは、米国オークリッジ国立研究所にて中性子線の遮蔽計算を目的として開発されたコードであり、1次元ボルツマン輸送計算式による中性子線及びガンマ線の放射線束分布の算出が可能である。 今回の評価では、JENDL-3.3をもとに作成された断面積ライブラリ MATXSLIB-J33（旧日本原子力研究所にて整備されたもの）を用いている。本ライブラリは許認可での使用実績がある。
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの中性子線計算について、ANISNコードを使用して実施している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ ANISN コードは、中性子線の放射線束分布解析を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら解析条件が与えられれば中性子線の放射線束分布解析は可能であり、線量換算係数を乗じることで ANISN コードは中性子線量計算に適用可能である。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。 ・ OKTAVIAN 透過実験の実測値 (Yamamoto, J., et al.: “Numerical Tables and Graphs of Leakage Neutron Spectra from Slabs of Typical Shiel

	ding Materials with D-T Neutron Source,” OK TAVIAN Report A-83-05, Osaka Univ. (1983)) と計算値を比較した。 ・実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・上記妥当性確認では、コンクリートを通過した中性子線スペクトルの実測値と ANISN コードによる計算値を比較している。 ・今回の使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの中性子線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、コンクリートの深層透過による放射線束分布を解析し、線量率を計算する。 ・今回の中性子線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEA C4615-2008)では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための輸送計算コードとして、ANISN コード及び DOT コードが挙げられている。 ・断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 については、TRANSX コード (ver. 2.15、修正パッチ (International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, “TRANSX patches”, https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm), 適用) により、計算コード入力用に処理して用いている。 ・MATXSLIB-J33 については、海上技術安全研究所による実験値 (大西世紀 ほか, 「²⁵²Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第7巻 第3号 研究報告, (2007)) と MATXSLIB-J33 による計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。上記妥当性確認では、放射線エネルギーが使用済燃料乾式貯蔵容器のエネルギースペクトルと同等となっており、今回の使用目的と合致している。

2.4 DORT

対象：中性子線量計算

項目 \ コード名	DORT
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1987 年
使用したバージョン	Ver. 3.2
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの中性子線計算）
コードの概要	本解析コードは、米国オークリッジ国立研究所にて中性子線の遮蔽計算を目的として開発されたコードであり、2次元ボルツマン輸送計算式による中性子線及びガンマ線の放射線束分布の算出が可能であり、DOTコードの後継コードである。 今回の評価では、JENDL-3.3をもとに作成された断面積ライブラリ MATXS-LIB-J33（旧日本原子力研究所にて整備されたもの）を用いている。本ライブラリは許認可での使用実績がある。
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの中性子線計算について、DORTコードを使用して実施している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ DORT コードは、中性子線の放射線束分布解析を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら解析条件が与えられれば中性子線の放射線束分布解析は可能であり、線量換算係数を乗じることでDORT コードは中性子線量計算に適用可能である。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。 ・ OKTAVIAN 施設からの中性子スカイシャイン線測定値 (T. Nakamura, et al, “Neutron Skyshine f

	rom Intense 14-MeV Neutron Source Facility,” Nucl. Sci. Eng., 90, 281-297 (1985)) と計算値を比較した。 ・実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・上記妥当性確認では、天井の薄い実験施設からの中性子スカイシャイン線の測定値と DOT コードによる計算値を比較している。 ・DOT コードは、DORT コードのバージョンアップ前の計算コードであり、バージョン変更において解析機能に有意な差がないことを確認している。 ・今回の使用済燃料乾式貯蔵建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器からの中性子線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、天井の薄い体系での中性子スカイシャイン線による線量率を計算する。 ・今回の中性子線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEA C4615-2008) では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための輸送計算コードとして、ANISN コード及び DORT コードの前身である DOT コードが挙げられている。 ・断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 については、TRANSX コード (ver. 2.15、修正パッチ (International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, “TRANSX patches”, https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm,) 適用) により、計算コード入力用に処理して用いている。 ・MATXSLIB-J33 については、海上技術安全研究所による実験値 (大西世紀 ほか, 「²⁵²Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第7巻 第3号 研究報告, (2007)) と MATXSLIB-J33 による計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。上記妥当性確認では、放射線エネルギーが使用済燃料乾式貯蔵容器のエネルギースペクトルと同等となっており、今回の使用目的と合致している。

設計及び工事に係る品質マネジメントシステム に関する説明書

設計及び工事計画変更認可申請 資料 17-1

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資 17-1- 1
2. 基本方針	資 17-1- 1
2.1 設計に係る品質管理の方法により行った管理の実績 又は行おうとしている管理の計画	資17-1- 1
2.2 工事及び検査に係る品質管理の方法、組織等についての 具体的な計画	資17-1- 2
2.3 設工認対象設備の施設管理	資17-1- 2
2.4 設工認で記載する設計、工事及び検査以外 の品質保証活動	資17-1- 2
3. 設工認における設計、工事及び検査 に係る品質管理の方法等	資 17-1- 3
3.1 設計、工事及び検査に係る組織（組織内外の相互関係 及び情報伝達に関する事項を含む。）	資17-1- 3
3.1.1 設計に係る組織	資17-1- 4
3.1.2 工事及び検査に係る組織	資17-1- 4
3.1.3 調達に係る組織	資17-1- 4
3.2 設工認における設計、工事及び検査の 各段階とその審査	資17-1- 6
3.2.1 設計、工事及び検査のグレード分けの適用	資17-1- 6
3.2.2 設計、工事及び検査の各段階とその審査	資17-1- 6
3.3 設計に係る品質管理の方法	資17-1- 9
3.3.1 適合性確認対象設備に対する要求事項の明確化 ...	資17-1- 9
3.3.2 各条文の対応に必要な適合性確認対象設備 の選定	資17-1- 9
3.3.3 設工認における設計及び設計のアウトプット に対する検証	資17-1-12
3.3.4 設計における変更	資17-1-20
3.4 工事に係る品質管理の方法	資17-1-20
3.4.1 設工認に基づく具体的な設備の 設計の実施（設計3）	資17-1-20
3.4.2 具体的な設備の設計に基づく工事の実施	資17-1-21
3.5 使用前事業者検査の方法	資17-1-22
3.5.1 使用前事業者検査での確認事項	資17-1-22

3.5.2 設計の結果と使用前事業者検査対象の 繋ぎの明確化	資17-1-23
3.5.3 使用前事業者検査の計画	資17-1-24
3.5.4 検査計画の管理	資17-1-27
3.5.5 主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査 の管理	資17-1-27
3.5.6 使用前事業者検査の実施	資17-1-27
3.6 設工認における調達管理の方法	資17-1-31
3.6.1 供給者の技術的評価	資17-1-31
3.6.2 供給者の選定	資17-1-31
3.6.3 調達物品等の調達管理	資17-1-31
3.6.4 供給者の品質保証監査	資17-1-33
3.7 文書及び記録の管理、識別管理及び トレーサビリティ	資17-1-34
3.7.1 文書及び記録の管理	資17-1-34
3.7.2 識別管理及びトレーサビリティ	資17-1-38
3.8 不適合管理	資17-1-39
4. 適合性確認対象設備の施設管理	資 17-1-39
様式-1 本設工認に係る設計の実績、工事 及び検査の計画【施設（設備）】(例)	資17-1-41
様式-2 適合性確認対象設備の抽出と適用条文等の整理(例) ..	資17-1-42
様式-3 設備リスト(例)	資17-1-43
様式-4 設工認添付書類星取表(例)	資17-1-44
様式-5 各条文の設計の考え方(例)	資17-1-48
様式-6 要求事項との対比表(例)	資17-1-49
様式-7 基準適合性を確保するための設計結果と 適合性確認状況一覧表(例)	資17-1-50
様式-8 適合性確認対象設備ごとの調達に係るグレード分け 及び実績(設備関係)(例)	資17-1-51
添付-1 当社におけるグレード分けの考え方	資17-1-52
添付-2 技術基準規則ごとの基本設計方針の作成に 当たっての基本的な考え方	資17-1-58
添付-3 設工認における解析管理について	資17-1-60
添付-4 当社における設計管理・調達管理について	資17-1-65

1. 概要

本資料は、設工認品質管理計画に基づき、設計に係る品質管理の方法により行った管理の実績又は行おうとしている管理の計画、並びに、工事及び検査に係る品質管理の方法、組織等についての具体的な計画を記載する。

2. 基本方針

本資料では、設工認における「設計に係る品質管理の方法により行った管理の実績又は行おうとしている管理の計画」及び「工事及び検査に係る品質管理の方法、組織等についての具体的な計画」を、以下のとおり説明する。

2.1 設計に係る品質管理の方法により行った管理の実績又は行おうとしている管理の計画

「設計に係る品質管理の方法により行った管理の実績又は行おうとしている管理の計画」として、以下に示す2つの段階を経て実施した設計の管理の方法を「3. 設工認における設計、工事及び検査に係る品質管理の方法等」に記載する。

具体的には、組織について「3.1 設計、工事及び検査に係る組織（組織内外の相互関係及び情報伝達に関する事項を含む。）」に、実施する各段階について「3.2 設工認における設計、工事及び検査の各段階とその審査」に、品質管理の方法について「3.3 設計に係る品質管理の方法」に、調達管理の方法について「3.6 設工認における調達管理の方法」に、文書及び記録の管理、識別管理、トレーサビリティについて「3.7 文書及び記録の管理、識別管理及びトレーサビリティ」に、不適合管理の方法について「3.8 不適合管理」に記載する。

また、これらの方法により行った管理の具体的な実績を、「様式-1 本設工認に係る設計の実績、工事及び検査の計画（例）」（以下「様式-1」という。）に取りまとめる。

- ・ 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（以下「実用炉規則」という。）別表第二対象設備のうち、設工認対象設備に対する実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）の条文ごとの基本設計方針の作成
- ・ 作成した条文ごとの基本設計方針を基に、実用炉規則の別表第二に示された事項に対して必要な設計を含む技術基準規則等への適合に必要な設備の設計（作成した条文ごとの基本設計方針に対し、工事を継続又は完了している設備の設計実績等を用いた技術基準規則等への適合に必要な設備の設計を含む。）

これらの設計に係る記載事項には、設計の要求事項として明確にしている事項及びその審査に関する事項、設計の体制として組織内外の相互関係、設計開発の各段

階における審査等に関する事項並びに外部の者との情報伝達に関する事項等を含めて記載する。

2.2 工事及び検査に係る品質管理の方法、組織等についての具体的な計画

「工事及び検査に係る品質管理の方法、組織等についての具体的な計画」として、設工認の申請（届出）時点で設置されている設備、工事を継続又は完了している設備を含めた設工認対象設備の工事及び検査に係る品質管理の方法を「3. 設工認における設計、工事及び検査に係る品質管理の方法等」に記載する。

具体的には、組織について「3.1 設計、工事及び検査に係る組織（組織内外の相互関係及び情報伝達に関する事項を含む。）」に、実施する各段階について「3.2 設工認における設計、工事及び検査の各段階とその審査」に、品質管理の方法について「3.4 工事に係る品質管理の方法」及び「3.5 使用前事業者検査の方法」に、調達管理の方法について「3.6 設工認における調達管理の方法」に、文書及び記録の管理、識別管理、トレーサビリティについて「3.7 文書及び記録の管理、識別管理及びトレーサビリティ」に、不適合管理の方法について「3.8 不適合管理」に記載する。

また、これらの工事及び検査に係る品質管理の方法、組織等についての具体的な計画を、様式－1を用いて示す。

工事及び検査に係る記載事項には、工事及び検査に係る要求事項として明確にする事項及びその審査に関する事項、工事及び検査の体制として組織内外の相互関係（使用前事業者検査の独立性、資源管理及び物品の状態保持に関する事項を含む。）、工事及び検査に必要なプロセスを踏まえた全体の工程及び各段階における監視、測定、妥当性確認及び検査等に関する事項（文書及び記録の管理、識別管理、トレーサビリティ等に関する事項を含む。）並びに外部の者との情報伝達に関する事項等を含めて記載する。

2.3 設工認対象設備の施設管理

適合性確認対象設備は、必要な機能・性能を発揮できる状態に維持されていることが不可欠であり、その維持の管理の方法について「4. 適合性確認対象設備の施設管理」で記載する。

2.4 設工認で記載する設計、工事及び検査以外の品質保証活動

設工認に必要な設計、工事及び検査は、設工認品質管理計画に基づく品質保証体制の下で実施するため、上記以外の責任と権限、原子力安全の重視、必要な要員の力量管理を含む資源の管理及び不適合管理を含む評価及び改善については、保安規定品質マネジメントシステム計画に従った管理を実施する。

また、当社の品質保証活動は、健全な安全文化の育成及び維持活動と一体となった活動を実施している。

3. 設工認における設計、工事及び検査に係る品質管理の方法等

設工認における設計、工事及び検査に係る品質管理は、保安規定品質マネジメントシステム計画に基づき実施する。

また、特定重大事故等対処施設にかかわる秘匿性を保持する必要がある情報については以下の管理を実施する。

(1) 秘密情報の管理

「実用発電用原子炉に係る特定重大事故等対処施設に関する審査ガイドにおける航空機等の特性等」（平成26年9月18日原子力規制委員会）及び同ガイドを用いて作成した情報を含む文書（以下「秘密情報」という。）については、秘密情報の管理に係る管理責任者の指定、秘密情報を扱う者の名簿での登録管理、電子情報に第三者がアクセスできないよう専用のサーバーによる管理等を実施する。

(2) セキュリティの観点から非公開とすべき情報の管理

上記(1)以外の特定重大事故等対処施設に関する情報を含む文書については、電子情報に第三者がアクセスできないよう専用のサーバーによる管理、並びに特定重大事故等対処施設に係る調達の際に施設名が特定されない名称にするとともに、調達要求事項に秘密保持に係る要求を設け情報管理を行う等の管理を実施する。

以下に、設計、工事及び検査、調達管理等のプロセスを示す。

3.1 設計、工事及び検査に係る組織（組織内外の相互関係及び情報伝達に関する事項を含む。）

設工認に基づく設計、工事及び検査は、第3.1-1図に示す本店組織及び発電所組織に係る体制で実施する。

また、設計（「3.3 設計に係る品質管理の方法」）、工事（「3.4 工事に係る品質管理の方法」）、検査（「3.5 使用前事業者検査の方法」）並びに調達（「3.6 設工認における調達管理の方法」）の各プロセスにおける具体的な体制については第3.1-1表に示す。

第3.1-1表に示す主管する箇所に属するグループリーダー及び課長（以下「主管する箇所の長」という。）は、担当する設備に関する設計及び工事並びに調達について、責任と権限を持つ。

発電所長から指名を受けた検査責任者は、担当する検査について責任と権限を持つ。

各主任技術者は、それぞれの職務に応じた監督を行うとともに、相互の職務について適宜情報提供を行い、意思疎通を図る。

設計から工事及び検査への設計結果の伝達、当社から供給者への情報伝達など、組織内外の情報伝達については、設工認に従い確実に実施する。

3.1.1 設計に係る組織

設工認に基づく設計は、第3.1-1表に示す主管箇所のうち、「3.3 設計に係る品質管理の方法」に係る箇所が設計を実施する。

この設計は、設計を主管する箇所を統括する部長の責任の下で実施する。

また、具体的な体制について、設工認に示す設計の段階ごとに様式－1に取りまとめる。

3.1.2 工事及び検査に係る組織

設工認に基づく工事は、第3.1-1表に示す主管箇所のうち、「3.4 工事に係る品質管理の方法」に係る箇所が工事を実施する。

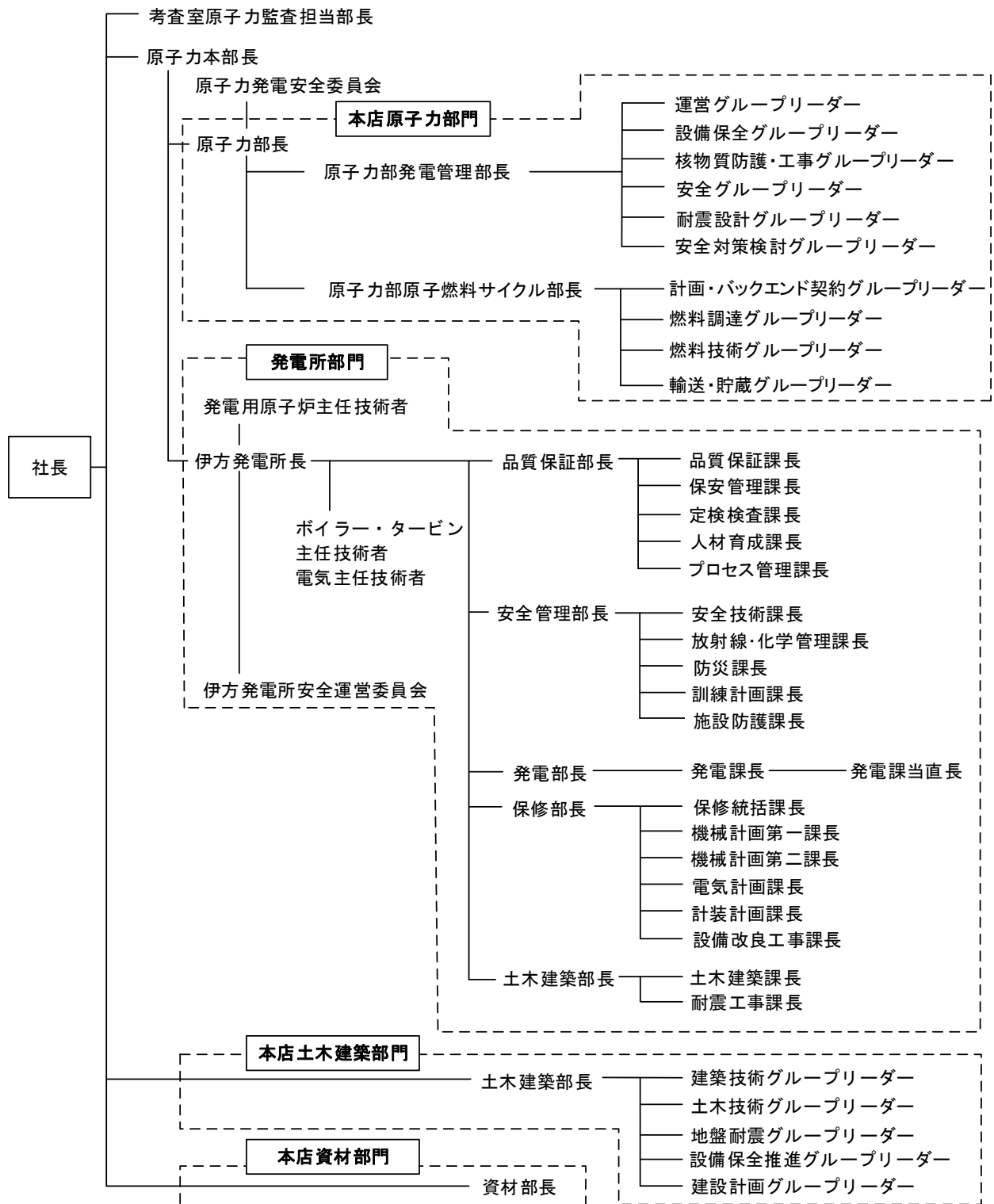
設工認に基づく検査は、第3.1-1表に示す主管箇所のうち工事を主管する箇所とは別の箇所の者を検査責任者として発電所長が指名して実施する。

また、設工認に基づき実施した具体的な体制について、設工認に示す工事及び検査の段階ごとに様式－1に取りまとめる。

3.1.3 調達に係る組織

設工認に基づく調達は、第3.1-1表に示す主管箇所のうち、「3.6 設工認における調達管理の方法」に係る箇所が調達を実施する。

また、設工認に基づき実施した具体的な体制について、設工認に示す設計、工事及び検査の段階ごとに様式－1に取りまとめる。



※主管する箇所の長とは、各プロセスを主管するグループリーダー及び課長をいう。

第3.1-1図 本店組織及び発電所組織に係る体制（令和3年3月1日時点）

第3.1-1表 各プロセスの実施の体制

項番号	プロセス	主管箇所
3.3	設計に係る品質管理の方法	本店原子力部門 本店土木建築部門
3.4 3.5	工事に係る品質管理の方法 使用前事業者検査の方法	本店原子力部門 本店土木建築部門 発電所部門
3.6	設工認における調達管理の方法	本店原子力部門 本店土木建築部門 本店資材部門 発電所部門

3.2 設工認における設計、工事及び検査の各段階とその審査

3.2.1 設計、工事及び検査のグレード分けの適用

設工認における設計は、設工認申請（届出）時点で設置されている設備を含めた設工認対象設備に対し、第3.2-1表に示す「設工認における設計、工事及び検査の各段階」に従って技術基準規則等の要求事項への適合性を確保するために必要な設備の設計である。

従って、設工認の設計には、「3.3 設計に係る品質管理の方法」に示す設計を一律適用することで、1つのグレードで管理する。

ただし、工事及び検査については、「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」に示すグレード分けの考え方を適用し、管理を実施する。

3.2.2 設計、工事及び検査の各段階とその審査

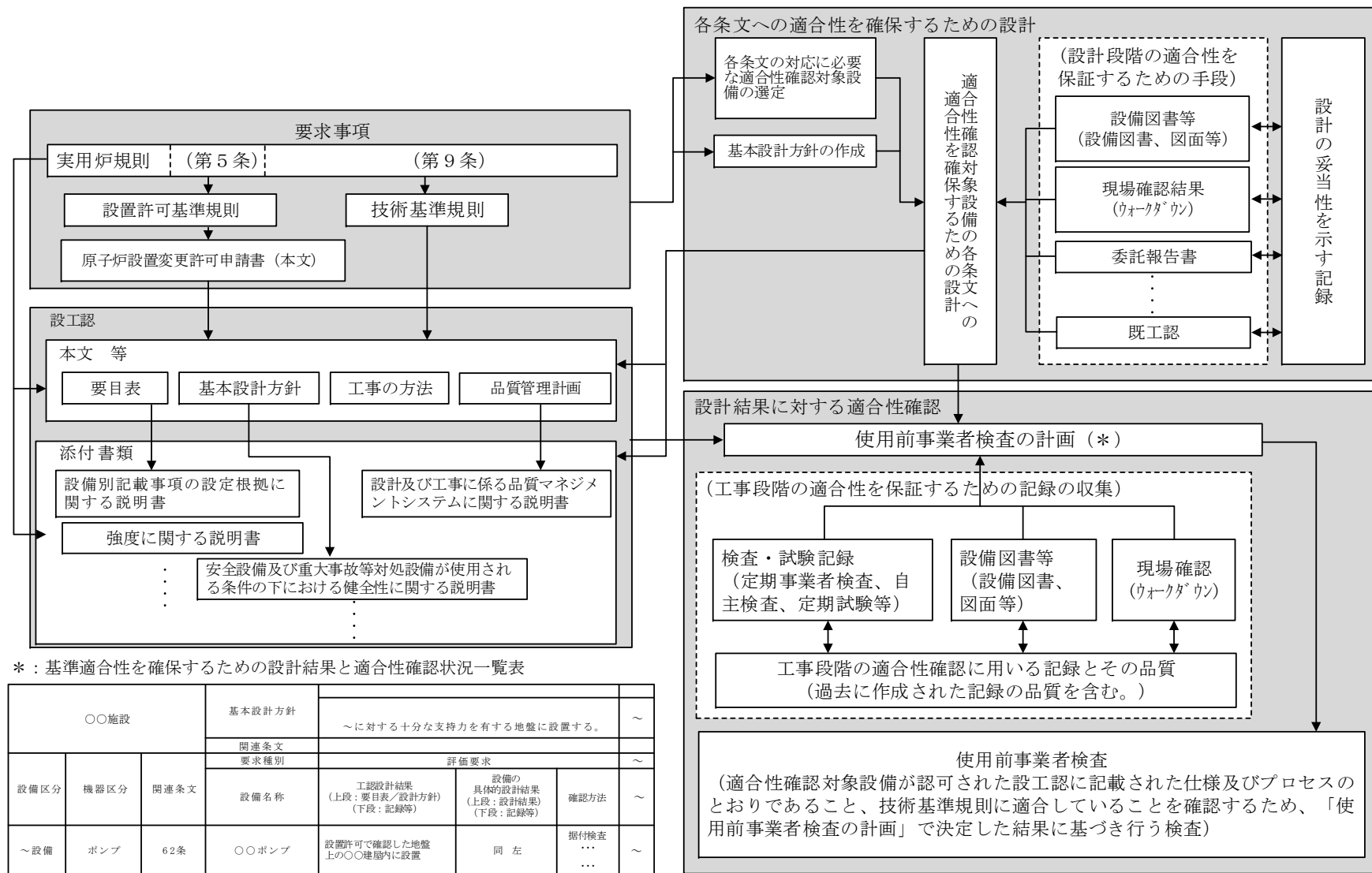
設工認における設計、工事及び検査の各段階と保安規定品質マネジメントシステム計画との関係を第3.2-1表に示す。

また、適合性確認に必要な作業と検査の繋がりを第3.2-1図に示す。

設計を主管する箇所の長は、第3.2-1表に示す「保安規定品質マネジメントシステム計画の対応項目」に示す設計の審査（以下「レビュー」という。）を実施するとともに、記録を管理する。

このレビューについては、第3.1-1表に示す設計及び工事を主管する箇所の中で設計に係る専門家を含めて実施する。

なお、実用炉規則別表第二対象設備のうち、設工認の申請（届出）が不要な工事及び主要な耐圧部の溶接部に対する必要な検査は、「3.4 工事に係る品質管理の方法」以降の必要な事項を適用して工事及び検査を実施し、認可された設工認に記載された仕様及びプロセスのとおり工事されていること、技術基準規則に適合していることを使用前事業者検査により確認する。



第3.2-1 図 適合性確認に必要な作業と検査の繋がり

第 3.2-1 表 設工認における設計、工事及び検査の各段階

各段階			保安規定品質マ ネジメントシス テム計画の対応 項 目	概 要
設計	3.3	設計に係る品質管理の方法	7.3.1	適合性を確保するために必要な設計を実施するための計画
	3.3.1	適合性確認対象設備に対する要求事項の明確化	7.3.2	設計に必要な技術基準規則等の要求事項の明確化
	3.3.2	各条文の対応に必要な適合性確認対象設備の選定		要求事項に対応するための設備・運用の抽出
	3.3.3(1)	基本設計方針の作成(設計1)	7.3.3	要求事項を満足する基本設計方針の作成
	3.3.3(2)	適合性確認対象設備の各条文への適合性を確保するための設計(設計2)		適合性確認対象設備に必要な設計の実施
	3.3.3(4) ※	設計のアウトプットに対する検証	7.3.4 7.3.5	設計資料のレビュー 要求事項への適合性を確保するために必要な設計の妥当性のチェック
	3.3.4	設計における変更	7.3.7	設計対象の追加や変更時の対応
工事及び検査	3.4.1	設工認に基づく具体的な設備の設計の実施(設計3)	7.3.3 7.3.5	設工認を実現するための具体的な設計
	3.4.2	具体的な設備の設計に基づく工事の実施	—	適合性確認対象設備の工事の実施
	3.5.1	使用前事業者検査での確認事項	—	適合性確認対象設備が、設工認に適合していることを確認
	3.5.2	設計の結果と使用前事業者検査対象の繋がり の明確化	—	検査に先立ち設計の結果と使用前事業者検査の対象との繋がりを整理
	3.5.3	使用前事業者検査の計画	—	適合性確認対象設備が、認可された設工認に記載された仕様及びプロセスのとおりであることを確認する計画と方法の決定
	3.5.4	検査計画の管理	—	使用前事業者検査を実施する際の工程管理
	3.5.5	主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査の管理	—	主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査を実施する際のプロセスの管理
	3.5.6	使用前事業者検査の実施	7.3.6 8.2.4	認可された設工認に記載された仕様及びプロセスのとおりであることを確認
調達	3.6	設工認における調達管理の方法	7.4 8.2.4	設工認に必要な設計、工事及び検査に係る調達管理

※：「3.2.2 設計、工事及び検査の各段階とその審査」で述べている「設計の各段階におけるレビュー」の各段階を示す

3.3 設計に係る品質管理の方法

設計を主管する箇所の長は、設工認における技術基準規則等への適合性を確保するための設計として、「要求事項の明確化」、「適合性確認対象設備の選定」、「基本設計方針の作成」及び「適合性を確保するための設計」、「設計のアウトプットに対する検証」を実施する。

以下にそれぞれの活動内容を示す。

3.3.1 適合性確認対象設備に対する要求事項の明確化

設計を主管する箇所の長は、以下の事項により、設工認に必要な要求事項を明確にする。

- ・「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 5 号）」（以下「設置許可基準規則」という。）及び「伊方発電所原子炉設置変更許可申請書」（以下「設置変更許可申請書」という。）
- ・技術基準規則

また、必要に応じて以下を参照する。

- ・設置変更許可申請書の添付書類
- ・設置許可基準規則の解釈
- ・技術基準規則の解釈

3.3.2 各条文の対応に必要な適合性確認対象設備の選定

設計を主管する箇所の長は、技術基準規則への適合性を確保するため、設置変更許可申請書に記載されている設備及び技術基準規則への対応に必要な適合性確認対象設備を、実際に使用する際の系統・構成で必要となる設備又は運用を考慮し、以下に従って抽出する。

また、適合性確認対象設備に必要な技術基準規則の要求事項に対する設計を確実に実施するために、以下に従って各施設に適用される技術基準規則の条項号を明確にする。

(1) 各施設と適用条文の整理

- a. 設計を主管する箇所は、適合性確認対象設備を明確にするため、設工認に関連する工事において追加・変更となる設備又は運用を、要求事項への適合性を確保するために実際に使用する際の系統・構成で必要となる設備又は運用を考慮しつつ第 3.3-1 図に示すフローに基づき抽出する。

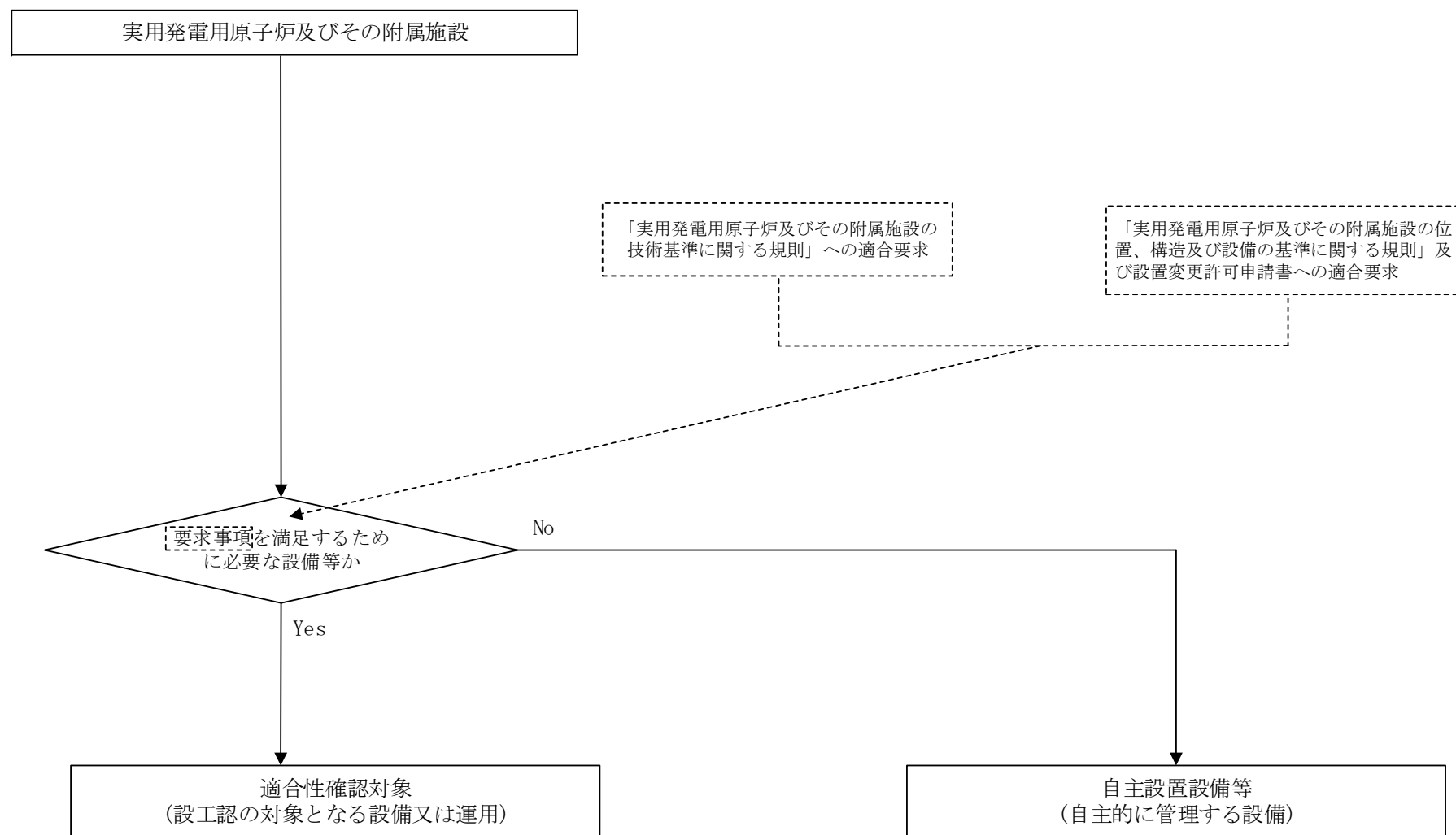
抽出した結果を「様式-2 適合性確認対象設備の抽出と適用条文等の整理（例）」（以下「様式-2」という。）の「設備等」欄に整理し、実用炉規則別表第二の該当する施設・設備区分を明確にする。

- b. 設計を主管する箇所は、技術基準規則の条文と実用炉規則別表第二の各施設との関係を明確にし、明確にした結果とその理由を様式-2 の「適用要否判断」欄及び「理由」欄に取りまとめる。

(2) 適合性確認対象設備の整理

設計を主管する箇所は、設工認で適合性を確認する必要がある条文について、(1)で抽出した結果を「様式-3 設備リスト（例）」（以下「様式-3」という。）の「設備等」欄に整理するとともに、常設/可搬/運用、既設/新設、実用炉規則別表第二に関連する施設・設備区分、兼用の有無及び設置変更許可申請書添付書類八主要設備の記載有無を明確にする。

設計を主管する箇所の長は、様式-2 及び様式-3 について、記入漏れ等の不備がなく、全て作成されていることを確認し、承認する。



第3.3-1 図 適合性確認対象設備の抽出について

3.3.3 設工認における設計及び設計のアウトプットに対する検証

設計を主管する箇所の長は、適合性確認対象設備の技術基準規則等への適合性を確保するための設計を以下のとおり実施する。

- ・「3.3.3 (1) 基本設計方針の作成（設計 1）」（以下「設計 1」という。）として、技術基準規則等の適合性確認対象設備に必要な要求事項を基に、必要な設計を漏れなく実施するための基本設計方針を明確化する。
- ・「3.3.3 (2) 適合性確認対象設備の各条文への適合性を確保するための設計（設計 2）」（以下「設計 2」という。）として、「設計 1」の結果を用いて適合性確認対象設備に必要な詳細設計を実施する。
- ・設計 1 及び設計 2 の結果を用いて、設工認に必要な書類等を作成する。
- ・「設計のアウトプットに対する検証」として、上記書類等について、検証を実施する。

これらの具体的な活動を以下のとおり実施する。

(1) 基本設計方針の作成（設計 1）

設計を主管する箇所の長は、様式-3で整理した適合性確認対象設備に対する詳細設計を設計2で実施するに先立ち、以下により技術基準規則等の適合性確認対象設備に必要な要求事項を具体化し、漏れなく適用するための設計項目を明確にした基本設計方針を技術基準規則の条文ごとに作成する。

なお、基本設計方針の作成に当たっての統一的な考え方を「添付-2 技術基準規則ごとの基本設計方針の作成に当たっての基本的な考え方」に示す。

- a. 様式-2 及び様式-3 で明確にした適合性確認対象設備を実用炉規則別表第二の設備区分ごとに、「様式-4 設工認添付書類星取表（例）」（以下「様式-4」という。）に整理する。

また、設計基準対象施設と重大事故等対処設備の分類、各機器の耐震重要度分類、機器クラス、兼用する際の登録の考え方、工事及び検査の有無並びに必要な設工認の添付書類との関連性を整理する。

- b. 基本設計方針の作成に合わせて以下の事項について「様式-5 各条文の設計の考え方（例）」（以下「様式-5」という。）に取りまとめる。
 - ・基本設計方針として記載する事項とそれらの技術基準規則への適合性の考え方（理由）
 - ・基本設計方針として記載しない場合の考え方
 - ・詳細な検討が必要な事項として含めるべき実用炉規則別表第二に示された添付書類とその関係
- c. 「様式-6 要求事項との対比表（例）」（以下「様式-6」という。）に基本設計方針の作成に必要な情報として、技術基準規則の各条文及び

その解釈、並びに関係する設置変更許可申請書本文及びその添付書類八に記載されている内容を原文のまま引用し、その内容を見ながら設計すべき項目を基本設計方針として漏れなく作成する。

- d. 作成した基本設計方針については、第3.3-1表に示す要求種別を明確にする。

設計を主管する箇所の長は、様式-4、様式-5及び様式-6について、記入漏れ等の不備がなく、全て作成されていることを確認し、承認する。

(2) 適合性確認対象設備の各条文への適合性を確保するための設計（設計2）

設計を主管する箇所の長は、様式-3で整理した適合性確認対象設備に対し、要求事項への適合性を確保するため、設計1の結果を用いて詳細設計を実施する。

具体的には、適合性確認対象設備に係る設計すべき項目を明確化した様式-4及び様式-6（適合性確認対象設備、技術基準規則、作成が必要な設工認本文・添付資料の項目、基本設計方針との関係）を踏まえ、適合性確認対象設備を技術基準規則に適合させるための必要となる詳細設計（対象設備の仕様の決定含む。）を実施し、設備の具体的設計の方針を決定する。

また、設計の流れを第3.3-2図に示す。

- a. 第3.3-1表に示す「要求種別」ごとの「主な設計事項」に示す内容について、「3.7.1 文書及び記録の管理」で管理されている品質記録や「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達図書をインプットとして、基本設計方針に対し、適合性確認対象設備が技術基準規則等の必要な設計要求事項への適合性を確保するための設計の方針（要求機能、性能目標、防護方針等を含む）を定める。

- b. 様式-5で明確にした詳細な検討を必要とした事項を含めて詳細設計を実施するとともに、以下に該当する場合は、その内容に従った詳細設計を実施する。

- (a) 評価（解析を含む。）を行う場合（適合性確認対象設備の仕様の決定含む。）

詳細設計として評価（解析を含む。）を行う場合は、基本設計方針を基に詳細な評価方針及び評価方法を定め、評価を実施する。

また、評価の実施において、解析を行う場合は、「3.3.3(2)c. 詳細設計の品質を確保する上で重要な活動の管理」に基づく管理により品質を確保する。

(b) 複数の機能を兼用する設備の設計を行う場合

複数の機能（施設間を含む。）を兼用する設備の設計を行う場合は、兼用する全ての機能を踏まえた設計を確実に実施するために、組織間の情報伝達を確実に実施し、兼用する機能ごとの系統構成を把握し、兼用する機能を集約したうえで、兼用する全ての機能を満たすよう設計を実施する。

(c) 設備設計を他設備の設計に含めて設計を行う場合

設備設計を他設備の設計に含めて設計を行う場合は、設計を確実に実施するために、組織間の情報伝達を確実に実施し、設計をまとめて実施する側で複数の対象を考慮した設計を実施したのち、設計を委ねている側においても設計結果を確認する。

(d) 他号機と共用する設備の設計を行う場合

他号機と共用する設備の設計を行う場合は、設計が確実に行われることを確実にするため、組織間の情報伝達を確実にを行い、号機ごとの設計範囲を明確にし、必要な設計が確実に行われるよう管理する。

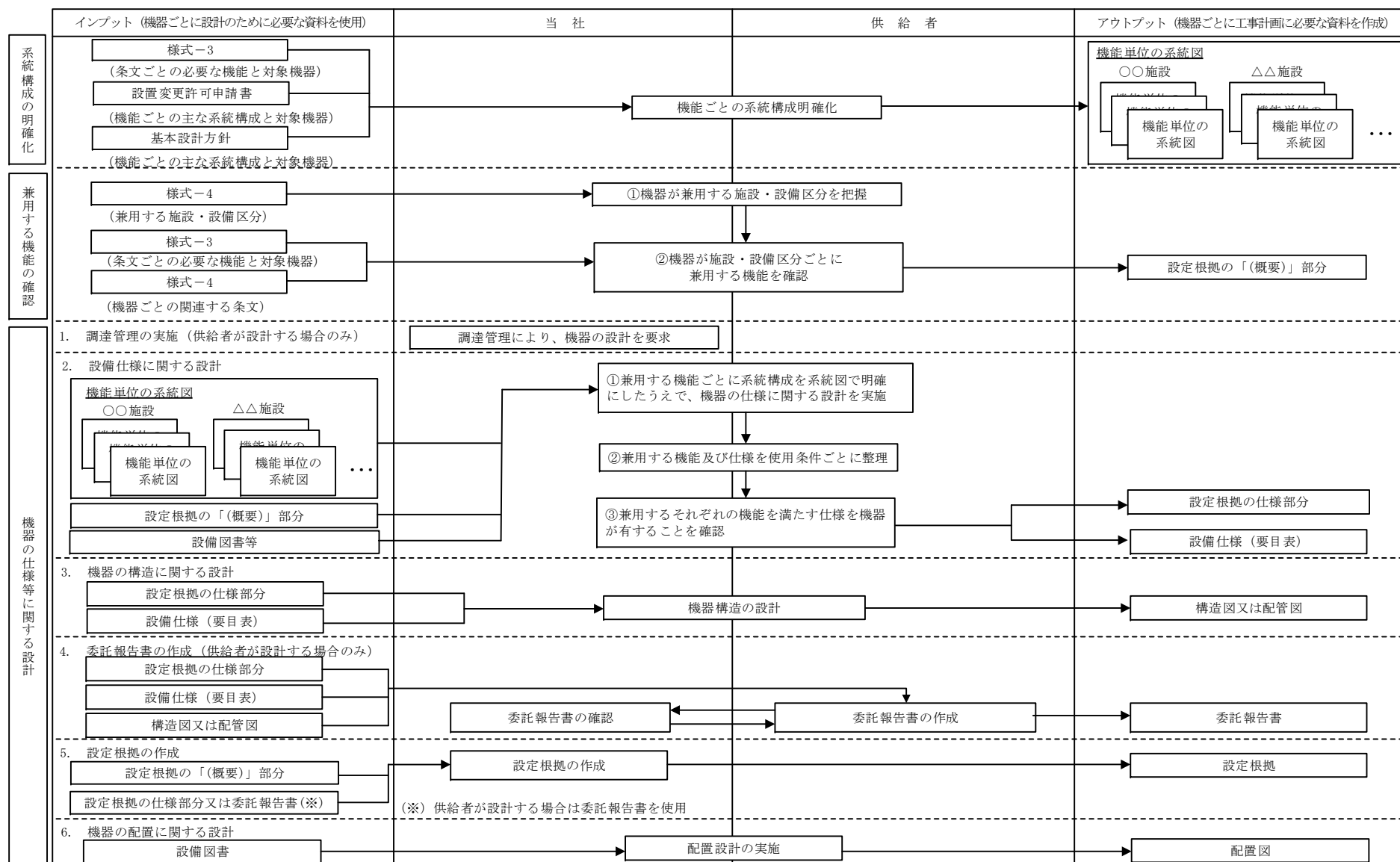
これらの設計として実施したプロセスを様式－1で明確にする。

設計を主管する箇所の長は、詳細設計結果をまとめた設計資料について、条文ごとの基本設計方針に対する必要な設計が行われているか、詳細な検討が必要な事項について必要な設計が行われているかの観点で確認する。

第3.3-1表に示す要求種別のうち「運用要求」に分類された基本設計方針については、設計を主管する箇所の長にて、保安規定に必要な対応を取りまとめる。

第 3.3-1 表 要求種別ごとの適合性の確保に必要となる主な設計事項とその妥当性を示すための記録との関係

要求種別			主な設計事項	設計方針の妥当性を示す記録
設備	設計 要求	設置 要求	必要となる機能・性能を有する設備の選定	設置変更許可申請書に記載した機能を持つために必要な設備の選定 ・設計資料 等
		機能 要求	目的とする機能・性能を実際に発揮させるために必要な具体的な系統構成・設備構成	設置変更許可申請書の記載を基にした実際に使用する系統構成・設備構成の決定 ・設計資料 ・有効性評価結果（設置変更許可申請書での安全解析の結果を含む。） ・系統図 ・設備図書（図面、構造図、仕様書） 等
			目的とする機能・性能を実際に発揮させるために必要な設備の具体的な仕様 仕様設計 構造設計 強度設計（クラスに応じて） 耐震設計（クラスに応じて） 耐環境設計 配置設計	・設計資料 ・設備図書（図面、構造図、仕様書） ・インターロック線図 ・算出根拠（計算式等） ・カタログ 等
		評価 要求	対象設備が目的とする機能・性能を持つことを示すための方法とそれに基づく評価 仕様決定のための解析 技術基準規則に適合していることを確認するための解析 条件設定のための解析 実証試験	・設計資料 ・解析計画（解析方針） ・委託報告書（解析結果） ・手計算結果 等
運用	運用要求		保安規定で定める必要がある運用方法とそれに基づく計画 維持又は運用のための計画の作成	—



第3.3-2図 主要な設備の設計

c. 詳細設計の品質を確保する上で重要な活動の管理

設計を主管する箇所の長は、詳細設計の品質を確保する上で重要な活動となる、「調達による解析」及び「手計算による自社解析」について、以下の活動を実施し、品質を確保する。

(a) 調達による解析の管理

基本設計方針に基づく詳細設計で解析を実施する場合は、解析結果の品質を確保するため、設工認品質管理計画に基づく品質保証活動を行ううえで、特に以下の点に配慮した活動を実施し、品質を確保する。

イ. 調達による解析

調達により解析を実施する場合は、解析の品質を確保するために、供給者に対して「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」（平成26年3月改定 一般社団法人 原子力安全推進協会）（以下「解析ガイドライン」という。）に基づき解析業務を実施すること等を発注仕様書の調達要求事項として明確にし、供給者に品質保証体制の下で解析ガイドラインに従った解析業務を実施させるよう「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達管理を実施する。

また、先行プラント等で使用実績のない計算機プログラム（解析コード）による解析結果を用いる場合は、供給者に計算機プログラム（解析コード）が適正であることを確認させる。

解析業務の調達管理に関する具体的な活動内容を「添付-3 設工認における解析管理について」に示す。

ロ. 解析業務の計画書

解析業務を実施するに当たり、供給者にあらかじめ解析業務の計画書を策定させる。

解析業務の計画書には、以下に示す事項の計画を明確にさせる。

- ・解析業務の作業手順（デザインレビュー、審査方法、時期等を含む。）
- ・解析結果の検証
- ・業務報告書の確認
- ・解析業務の変更管理

ハ. 計算機プログラム（解析コード）の管理

計算機プログラムについては評価目的に応じた解析結果を保証するための重要な役割を持っていることから、使用実績や使用目的に応じ、計算機プログラムが適正なものであることを以下のような方法により検証し、使用させる。

- ・簡易モデル、標準計算事例を用いた解析結果との比較
- ・実機運転データとの比較
- ・大型実験又はベンチマーク試験結果との比較
- ・他の計算機プログラムによる計算結果との比較 等

ニ. 解析業務で用いる入力情報の伝達について

解析業務に用いる入力情報については、根拠となる設備図書等を供給者と共有し、最新性を確保する。

ホ. 入力根拠の作成

供給者に、解析業務の計画書に基づき解析ごとの入力根拠を明確にした入力根拠書を作成させ、計算機プログラムへの入力間違いがないか確認させることで、入力根拠の妥当性及び入力データが正しく入力されたことの品質を確保する。

当社は、解析業務の計画書が策定されていること及び解析業務の手順に基づき一連の解析プロセスが適切に実施されていることなどを供給者への立入調査等により確認する。

(b) 手計算による自社解析

自社で実施する解析（手計算）は、評価を実施するために必要な計算方法及び入力データを明確にしたうえで、当該業務の力量を持つ要員が実施する。

また、実施した解析結果に間違いがないようにするために、入力根拠、入力結果及び解析結果について、解析を実施した者以外の者によるダブルチェックを実施し、解析結果の品質を確保する。

(3) 設工認の作成

設計を主管する箇所の長は、設工認の設計として実施した設計 1 及び設計 2 からのアウトプットを基に、設工認に必要な書類等を以下のとおり取りまとめる。

a. 要目表の作成

設計2の設計結果を取りまとめた図面等の設計資料を基に実用炉規則別表第二の「記載すべき事項」の要求に従って、必要な事項（種類、主要寸法、材料、個数 等）を設備ごとに表（要目表）又は図面等に取りまとめる。

b. 施設ごとの基本設計方針の作成及び「適用基準及び適用規格」の作成

設計1で作成した基本設計方針を基に実用炉規則別表第二に示された発電用原子炉施設の施設ごとの基本設計方針としてまとめ直すことにより、設工認として必要な基本設計方針を作成する。

また、技術基準規則に規定される機能・性能を満足させるための基本的な規格及び基準を「適用基準及び適用規格」として取りまとめる。

c. 工事の方法の作成

適合性確認対象設備が、期待される機能を確実に発揮することを示すため、当該工事の手順並びに使用前事業者検査の項目及び方法を記載するとともに、工事中の従事者及び公衆に対する放射線管理や他の設備に対する悪影響防止等の観点から特に留意すべき事項を「工事の方法」として取りまとめる。

d. 各添付書類の作成

設計2の設計結果を取りまとめた図面等の設計資料を基に基本設計方針に対して詳細な設計結果及び設計の妥当性に関する説明が必要な事項を取りまとめた様式-5及び様式-6を用いて、実用炉規則別表第二に示された添付書類を作成する。

なお、実用炉規則別表第二に示された添付資料において、解析コードを使用している場合には、添付資料の別紙として「計算機プログラム（解析コード）の概要」を作成する。

e. 設工認案のチェック

設計を主管する箇所の長は、作成した設工認案について、以下の要領でチェックする。

- (a) 設計を主管する箇所でのチェック分担を明確にしてチェックする。
- (b) 設計を主管する箇所の長は、チェックの結果としてコメントが付されている場合は、その反映要否を検討し、必要に応じ資料を修正したうえで、再度チェックする。
- (c) 必要に応じこれらを繰り返し、設工認案のチェックを完了する。

(4) 設計のアウトプットに対する検証

設計を主管する箇所の長は、「3.3.3 設工認における設計及び設計のアウトプットに対する検証」の設計1及び設計2のアウトプットを取りまとめた設計資料及び設工認案について、設計に係る専門家を含めてレビューを実施するとともに、設工認案が設計のインプット（「3.3.1 適合性確認対象設備に対する要求事項の明確化」及び「3.3.2 各条文の対応に必要な適合性確認対象設備の選定」参照）で与えられた要求事項を満たしていることの検証を、当該業務を直接実施した者以外の者に実施させる。

(5) 設工認の承認

設計を主管する箇所の長は、「(3)e. 設工認案のチェック」及び「(4) 設計のアウトプットに対する検証」が終了した後、主任技術者の確認を受け、原子力部発電管理部長又は原子力部原子燃料サイクル部長の承認を得る。

3.3.4 設計における変更

設計を主管する箇所の長は、設計対象の追加又は変更が必要となった場合、「3.3.1 適合性確認対象設備に対する要求事項の明確化」～「3.3.3 設工認における設計及び設計のアウトプットに対する検証」の各設計結果のうち、影響を受けるものについて必要な詳細設計を実施し、影響を受けた段階以降の設計結果を必要に応じ修正する。

3.4 工事に係る品質管理の方法

工事を主管する箇所の長は、設工認に基づく具体的な設備の設計（設計3）及びその結果を反映した設備を導入するために必要な工事を、以下に示す管理を適用して実施する。

3.4.1 設工認に基づく具体的な設備の設計の実施（設計3）

工事を主管する箇所の長は、工事段階において、以下の何れかの方法で、設計3を実施する。

(1) 自社で設計する場合

工事を主管する箇所の長は、「設計3」を実施する。

(2) 「設計3」を本店組織の工事を主管する箇所の長が調達し、発電所組織の工事を主管する箇所の長が管理する場合

本店組織の工事を主管する箇所の長は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達により「設計3」を実施する。

また、発電所組織の工事を主管する箇所の手長は、その調達の中で供給者が実施する「設計3」の管理を、調達管理として、詳細設計の検証及び妥当性確認を行うことにより管理する。

- (3) 「設計3」を発電所組織の工事を主管する箇所の手長が調達し、管理する場合

発電所組織の工事を主管する箇所の手長は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達により「設計3」を実施する。

また、発電所組織の工事を主管する箇所の手長は、その調達の中で供給者が実施する「設計3」の管理を、調達管理として、詳細設計の検証及び妥当性確認を行うことにより管理する。

- (4) 「設計3」を本店組織の工事を主管する箇所の手長が調達し、管理する場合
本店組織の工事を主管する箇所の手長は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達により「設計3」を実施する。

また、本店組織の工事を主管する箇所の手長は、その調達の中で供給者が実施する「設計3」の管理を、調達管理として、詳細設計の検証及び妥当性確認を行うことにより管理する。

- (5) 「設計3」を本店組織の工事を主管する箇所の手長が調達し、本店組織及び発電所組織の工事を主管する箇所の手長が管理する場合

本店組織の工事を主管する箇所の手長は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達により「設計3」を実施する。

また、本店組織及び発電所組織の工事を主管する箇所の手長は、その調達の中で供給者が実施する「設計3」の管理を、調達管理として、詳細設計の検証及び妥当性確認を行うことにより管理する。

3.4.2 具体的な設備の設計に基づく工事の実施

工事を主管する箇所の手長は、設工認に基づく設備を設置するための工事を「工事の方法」に記載された工事の手順並びに「3.6 設工認における調達管理の方法」に従い実施する。

この工事の中で使用前事業者検査を実施する場合は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に従った調達物品等の検証の中で使用前事業者検査を含めて実施する。

ただし、適合性確認対象設備のうち、設工認申請（届出）時点で既に工事が完了している設備、既に工事を着手し工事を継続している設備については、以下のとおり取り扱う。

(1) 設工認申請（届出）時点で既に設置している適合性確認対象設備

設工認に基づく設備のうち、設工認申請（届出）時点で既に工事が完了している適合性確認対象設備については、「3.5 使用前事業者検査の方法」の段階から実施する。

(2) 既に工事を着手し工事を継続している適合性確認対象設備

設工認に基づく設備のうち、既に工事を着手し工事を継続している適合性確認対象設備については、「3.6 設工認における調達管理の方法」に従い、着手時点のグレードに応じた工事を継続して実施するとともに、「3.5 使用前事業者検査の方法」の段階から実施する。

3.5 使用前事業者検査の方法

使用前事業者検査は、適合性確認対象設備が認可（届出）された設工認に記載された仕様及び実施したプロセスのとおり工事されていること、技術基準規則に適合していることを確認するため、保安規定「第8章 施設管理」に基づく使用前事業者検査を計画し、工事を主管する箇所からの独立性を確保した検査体制の下、実施する。

3.5.1 使用前事業者検査での確認事項

使用前事業者検査は、適合性確認対象設備が、認可（届出）された設工認に記載された仕様及びプロセスのとおり工事されていること、技術基準規則に適合していることを確認するために以下の項目について検査を実施する。

① 設備の仕様の適合性確認

② 実施した工事が、「3.4.1 設工認に基づく具体的な設備の設計の実施（設計3）」及び「3.4.2 具体的な設備の設計に基づく工事の実施」に記載したプロセス並びに「工事の方法」のとおり行われていること。

これらの項目のうち、①を設工認品質管理計画の第3.5-1表に示す検査として、②を品質マネジメントシステムに係る検査（以下「QA検査」という。）として実施する。

また、QA検査では上記②に加え、上記①のうち工事を主管する箇所（供給者を含む。）が実施する検査（工事を主管する箇所が採取した記録・ミルシートや検査における自動計測等。）の信頼性の確認（記録確認検査や抜取検査の信頼性確保）を行い、設工認に基づく工事の信頼性を確保する。

3.5.2 設計の結果と使用前事業者検査対象の繋がり の明確化

検査責任者は、設計 1～3 の結果と適合性確認対象の繋がり を明確化するために様式-7「基準適合性を確保するための設計結果と適合性確認状況一覧表（例）」（以下「様式-7」という。）を以下のとおり使用前事業者検査に先立ちとりまとめる。

（1）基本設計方針の整理

検査責任者は、設計 1 で実施した基本設計方針の内容を以下の流れで分類し、技術基準規則への適合性の確保が必要な要求事項を整理する。

- a. 基本設計方針を設計項目となるまとまりごとに整理する。
- b. 整理した設計方針を分類するためのキーワードを抽出する。
- c. 抽出したキーワードをもとに要求事項を第 3.3-1 表に示す要求種別に分類する。
- d. 整理した結果について、設計項目となるまとまりごとに様式-7 の「基本設計方針」欄に整理する。
- e. 適合性確認が不要な以下の基本設計方針を様式-7 の該当する基本設計方針を網掛けすることにより区別し、設計が必要な要求事項に変更があった条文に対応した基本設計方針を明確にする。

- ・定義

- 基本設計方針で使用されている用語の説明

- ・冒頭宣言

- 設計項目となるまとまりごとの概要を示し、冒頭宣言以降の基本設計方針で具体的な設計項目が示されているもの

- ・規制要求に変更のない既設設備に適用される基本設計方針

- 既設設備のうち、過去に当該要求事項に対応するための設計が行われており、様式-2 で従来の技術基準規則から変更がないとした条文に対応した基本設計方針

- ・適合性確認対象設備に適用されない基本設計方針

- 当該適合性確認対象設備に適用されず、設計が不要となる基本設計方針

（2）設計結果の反映

検査責任者は、設計 2 で実施した詳細設計の結果を、様式-7 の「工認設計結果（要目表／設計方針）」欄に整理するとともに、設計 3 で実施した設備の具体的設計結果の結果を様式-7 の「設備の具体的設計結果」欄に取りまとめる。

設工認に基づく設備の設置において、設工認申請（届出）時点で設置されている設備については、既の実施された具体的な設計の結果が設工認に適合していることを確認し、設計 2 の結果を満たす具体的な設計の結果を様式-7 の「設備の具体的設計結果」欄に取りまとめる。

3.5.3 使用前事業者検査の計画

検査責任者は、適合性確認対象設備が、認可（届出）された設工認に記載された仕様及びプロセスのとおり工事されていること、技術基準規則に適合していることを確認するため、技術基準規則に適合するよう実施した設計結果を取りまとめた様式-7 に示された「工認設計結果（要目表／設計方針）」欄ごとに設計の妥当性確認を含む使用前事業者検査を計画する。

使用前事業者検査は、「工事の方法」に記載された使用前事業者検査の項目及び方法並びに第 3.3-1 表の要求種別ごとに第 3.5-1 表に示す確認項目、確認視点及び主な検査項目をもとに計画を策定する。

適合性確認対象設備のうち、技術基準規則上の措置（運用）に必要な設備についても、使用前事業者検査を計画する。

(1) 使用前事業者検査の方法の決定

検査責任者は、「工事の方法」に記載された使用前事業者検査の項目及び方法並びに第 3.3-1 表の要求種別ごとに定めた第 3.5-1 表に示す確認項目、確認視点及び主な検査項目を使って、確認項目ごとの設計結果に関する具体的な検査概要及び判定基準を以下の手順により使用前事業者検査の方法として明確にする。

第 3.5-1 表の検査項目ごとの概要及び判定基準の考え方を第 3.5-2 表に示す。

- a. 様式-7 の「工認設計結果（要目表／設計方針）」欄及び「設備の具体的設計結果」欄に記載された内容と該当する要求種別を基に検査項目を決定する。
- b. 決定された検査項目より、第 3.5-2 表に示す「検査項目、概要、判定基準の考え方について（代表例）」を参照し適切な検査方法を決定する。
- c. 決定した各設備に対する以下の内容を、様式-7 の「確認方法」欄に取りまとめる。なお、「確認方法」欄では、以下の内容を明確にする。
 - (a) 検査項目
 - (b) 検査方法

第 3. 5-1 表 要求事項に対する確認項目及び確認の視点

要求種別			確認項目	確認視点	主な検査項目
設備	設計要求	設置要求	名称、取付箇所、個数	設計要求どおりの名称、取付箇所、個数が設置されていることを確認する。	・据付検査 ・状態確認検査 ・外観検査
		機能要求	系統構成、系統隔離、可搬設備の接続性	実際に使用できる系統構成になっていることを確認する。	・材料検査 ・寸法検査 ・漏えい検査
			容量、揚程等の仕様（要目表）	要目表の記載どおりであることを確認する。	・外観検査 ・据付検査
			上記以外の所要の機能要求事項	目的とする能力（機能・性能）が発揮できることを確認する。	・耐圧検査 ・機能・性能検査 ・特性検査 ・状態確認検査 主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査（検査項目は本設工認の「工事の方法」に記載）
		評価要求	評価のインプット条件等の要求事項	評価条件を満足していることを確認する。	・状態確認検査
			評価結果を設計条件とする要求事項	内容に応じて、設置要求、系統構成、機能要求として確認する。	内容に応じて、設置要求、系統構成、機能要求の検査を適用
運用	運用要求		手順確認	（保安規定） 手順化されていることを確認する。	・状態確認検査

第3. 5-2表 検査項目、検査概要及び判定基準の考え方について（代表例）

検査項目	検査概要	判定基準の考え方
材料検査	・使用されている材料が設工認の記載のとおりであること。また、関係規格※1等に適合することを記録又は目視により確認する。	・使用されている材料が設工認の記載のとおりであること。また、関係規格等に適合すること。
寸法検査	・主要寸法が設工認の記載の数値に対して許容範囲内であることを記録又は目視により確認する。	・主要寸法が設工認の記載の数値に対して許容範囲内にあること。
外観検査	・有害な欠陥のないことを記録又は目視により確認する。	・機能・性能に影響を及ぼす有害な欠陥のないこと。
据付検査 （組立て及び据付け状態 を確認する検査）	・常設設備の組立て状態、据付け位置及び状態が設工認の記載のとおりであることを記録又は目視により確認する。	・設工認の記載のとおりに設置されていること。
耐圧検査	・技術基準規則の規定に基づく検査圧力で所定時間保持し、検査圧力に耐え、異常のないことを記録又は目視により確認する。	・検査圧力に耐え、異常のないこと。
漏えい検査	・耐圧検査終了後、技術基準規則の規定に基づく検査圧力により漏えいの有無を記録又は目視により確認する。	・検査圧力により著しい漏えいのないこと。
建物・構築物 構造検査	・建物・構築物が設工認の記載のとおり製作され、組立てられていること。また、関係規格※1等に適合することを記録又は目視により確認する。	・主要寸法が設工認の記載の数値に対して許容範囲内にあること。また、関係規格等に適合すること。
機能・性能検査 特性検査	・系統構成確認検査 可搬型設備の実際に使用する系統構成及び可搬型設備等の接続が可能なことを記録又は目視により確認する。	・実際に使用する系統構成が可能なこと。 ・可搬型設備等の接続が可能なこと。
	・運転性能検査、通水検査、系統運転検査、容量確認検査 設計で要求される機能・性能について、実際に使用する系統状態又は模擬環境により試運転等を行い、機器単体又は系統の機能・性能を記録又は目視により確認する。	・実際に使用する系統構成になっていること。 ・目的とする機能・性能が発揮できること。
	・絶縁耐力検査 電気設備と大地との間に、試験電圧を連続して規定時間加えたとき、絶縁性能を有することを記録（工場での試験記録等を含む。）又は目視により確認する。	・目的とする絶縁性能を有すること。
	・ロジック回路動作検査、警報検査、インターロック検査 電気設備又は計測制御設備についてロジック確認、インターロック確認及び警報確認等を行い、設備の機能・性能又は特性を記録又は目視により確認する。	・ロジック、インターロック及び警報が正常に動作すること。
	・外観検査 建物、構築物、非常用電源設備等の完成状態を記録又は目視により確認する。	・機能・性能に影響を及ぼす有害な欠陥のないこと。 ・設工認の記載のとおりに設置されていること。
	・計測範囲確認検査、設定値確認検査 計測制御設備の計測範囲又は設定値を記録（工場での校正記録等を含む。）又は目視により確認する。	・計測範囲又は設定値が許容範囲内であること。
状態確認検査	・設置要求における機器保管状態、設置状態、接近性、分散配置及び員数が設工認の記載のとおりであることを記録又は目視により確認する。	・機器保管状態、設置状態、接近性、分散配置及び員数が適切であること。
	・評価要求に対するインプット条件（耐震サポート等）との整合性確認を記録又は目視により確認する。	・評価条件を満足していること。
	・運用要求における手順が整備され、利用できることを確認する。	・運用に用いる手順が整備され、利用できることが確認できること。

※1 設計の時に採用した適用基準又は適用規格

3.5.4 検査計画の管理

検査責任者は、使用前事業者検査を適切な時期で実施するため、関係箇所と調整のうえ、発電所全体の主要工程等を加味した適合性確認の検査計画を作成し、使用前事業者検査の実施時期及び使用前事業者検査が確実に行われることを以下のとおり管理する。

- ・検査の管理は、使用前事業者検査工程表を作成し、これを管理する。
- ・使用前事業者検査の進捗状況に応じ、検査計画又は主要工程の変更を伴う場合は、速やかに関係組織と調整を行うとともに、検査工程を変更する。

3.5.5 主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査の管理

検査責任者は、溶接が特殊工程であることを踏まえ、工程管理等の計画を策定し、溶接施工工場におけるプロセスの適切性の確認及び監視を行う。

また、溶接継手に対する要求事項は、溶接部詳細一覧表（溶接方法、溶接材料、溶接施工法、熱処理条件、検査項目等）により管理し、これに係る関連図書を含め、業務の実施に当たって必要な図書を溶接施工工場に提出させ、それをレビューし、必要な管理を実施する。

3.5.6 使用前事業者検査の実施

検査責任者は、社内規定に基づき、検査要領書を定めるとともに、検査体制を構築し、使用前事業者検査を実施する。

(1) 使用前事業者検査の独立性確保

使用前事業者検査は、組織的独立を確保して実施する。

(2) 使用前事業者検査の体制

使用前事業者検査の体制は、第3.5-1図を参考に当該検査における力量を有する者等で構成される体制とし、検査要領書で明確にする。

a. 統括責任者（発電所長）

発電所における保安に関する業務を統括する。

b. 主任技術者（発電用原子炉主任技術者、ボイラー・タービン主任技術者、電気主任技術者）

検査内容、手法等に対しての指導・監督を行う。

検査要領書の制定又は改正する場合にはその内容を審査する。

(a) 発電用原子炉主任技術者は、主に原子炉の核的特性や性能に係る事項等、原子炉施設の運転に関する保安の監督を行う。

- (b) ボイラー・タービン主任技術者は、主に機械設備の構造、機能及び性能に係る事項等、機械設備の工事、維持及び運用（電気設備に係るものを除く。）に関する保安の監督を行う。
- (c) 電気主任技術者は、主に電気設備の構造、機能及び性能に係る事項等、電気設備の工事、維持及び運用（電気設備）に関する保安の監督を行う。
- c. 品質保証責任者
発電所における保安に関する品質保証活動を統括する。
品質保証の観点から、検査が適切に実施されるための指導・助言を行う。検査要領書の制定又は改正する場合はその内容を審査する。
- d. 検査責任者
検査の責任者として検査を実施し、検査項目毎の判定結果を踏まえ、技術基準に適合することを最終判断する。
- e. 検査判定者
検査責任者のもと、検査項目毎の判定業務等を実施する。なお、技術担当者を体制に含めない場合は、検査の進行を実施する。
- f. 技術担当者
検査責任者のもと検査要領書に従い、検査を進行し、検査判定に係る事項（検査のプロセス確認含む。）について確認等を行う。なお、確認は必要に応じて技術員と分担して実施する。
- g. 技術員
技術担当者の検査進行のもと検査要領書に従い、検査判定に係る事項についての確認等を実施する。
- h. 技術助勢員 A
技術担当者の検査進行のもと検査要領書に従い、検査条件の確認、検査の判定に係る本設計器、仮設計器、弁開度、警報、表示灯等の読み取りや記録を行い、技術担当者又は技術員に報告する。
- i. 技術助勢員 B
技術担当者の検査進行のもと検査要領書に従い、検査対象機器、検査用機器及び検査用資機材の取扱い、操作等の検査に係る助勢を実施する。
- j. 運転操作責任者
検査に係る運転操作の統括的責任を有する者で、当直長が行う。
- k. 運転操作担当者
運転操作責任者の指示のもと、検査に係る運転操作を実施する。

(3) 使用前事業者検査の検査要領書の制定

検査責任者は、適合性確認対象設備が、認可（届出）された設工認に記載された仕様及びプロセスのとおり工事されていること、技術基準規則に適合していることを確認するため、「3.5.3(1) 使用前事業者検査の方法の決定」にて決定した様式-7の確認方法を基に、使用前事業者検査を実施するための検査要領書を定める。

また、検査要領書には、検査目的、検査対象範囲、検査項目、検査方法、判定基準、検査体制、不適合管理、検査手順、検査工程、設備概要及び検査成績書の事項等を記載し、主任技術者及び品質保証責任者の審査を経て制定する。

なお、検査要領書には使用前事業者検査の確認対象範囲として含まれる技術基準規則の条文を明確にする。

各検査項目における代替検査を行う場合、「3.5.6(4) 代替検査の確認方法の決定」に従い、代替による使用前事業者検査の方法を決定する。

(4) 代替検査の確認方法の決定

a. 代替検査の決定

検査責任者は、使用前事業者検査実施にあたり、以下の条件に該当する場合には代替検査の評価を行い、その結果を当該の検査要領書に添付する。

b. 代替検査の条件

代替検査を用いる場合は、通常の方法で検査ができない場合であり、例えば以下の場合をいう。

- (a) 当該検査対象の記録がない場合（プロセス評価を実施し検査の成立性を証明する必要がある場合）
- (b) 耐圧検査で圧力を加えることができない場合
- (c) 構造上外観が確認できない場合
- (d) 系統に実注入ができない場合
- (e) 電路に通電できない場合 等

c. 代替検査の評価

検査責任者は、代替検査を用いる場合、代替検査として用いる方法が本来の検査目的に対する代替性を有していることの評価を実施する。その結果は、「(3) 使用前事業者検査の検査要領書の制定」で作成する検査要領書の一部として添付し、該当する主任技術者による審査を経て適用する。

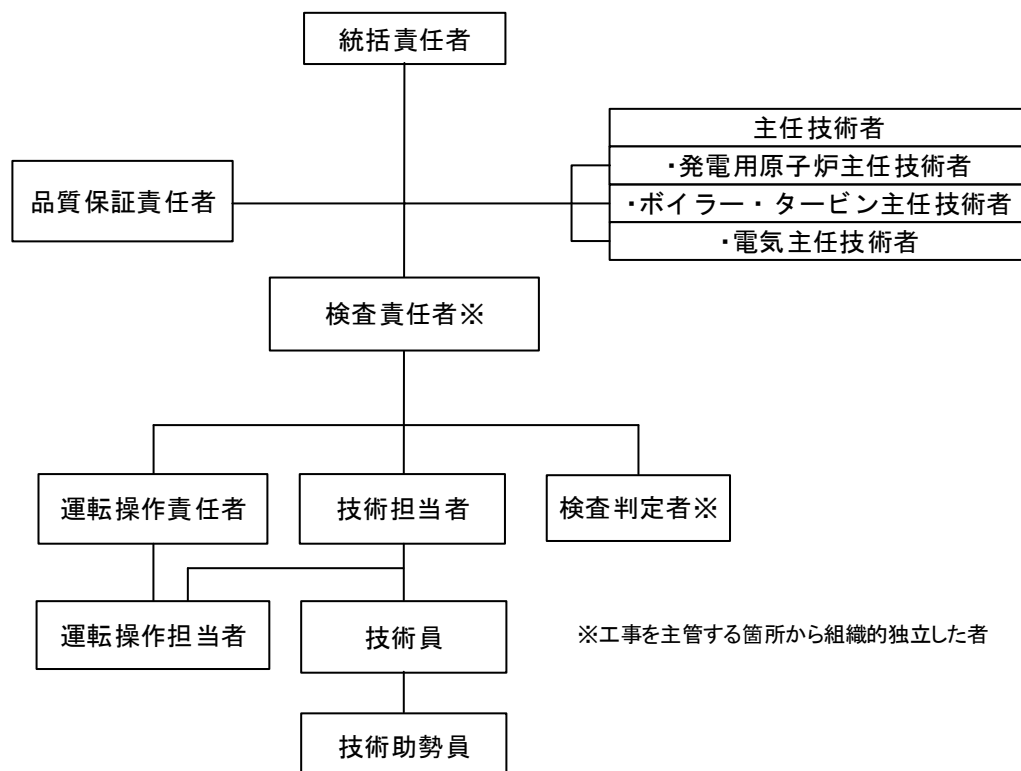
検査目的に対する代替性の評価においては、以下の内容を明確にする。

- (a) 設備名称
- (b) 検査項目
- (c) 検査目的
- (d) 通常の方法で検査ができない理由
 - (例) 既存の発電用原子炉施設に悪影響を及ぼすことによる困難性
 - 現状の設備構成上の困難性
 - 作業環境における困難性 等
- (e) 代替検査の手法及び判定基準
- (f) 検査目的に対する代替性の評価

(5) 使用前事業者検査の実施

検査責任者は、検査要領書に基づき、確立された検査体制の下で、使用前事業者検査を実施する。

検査責任者は、立会又は検査判定者からの報告により、検査項目毎の判定基準を満足していること、検査が検査要領書に従って適切に実施されたことを確認し、工事が設工認に従って行われ、検査対象機器等が技術基準に適合していることを最終判断する。また、検査結果を統括責任者(発電所長)及び主任技術者に報告する。



第3.5-1図 検査実施体制 (例)

3.6 設工認における調達管理の方法

設工認で行う調達管理は、その管理を確実にするために社内規定に基づき以下に示す管理を実施する。

3.6.1 供給者の技術的評価

調達を主管する箇所の長は、供給者が当社の要求事項に従って調達物品等を供給する技術的な能力を有することの判断根拠として、供給者の技術的評価を実施する。（「添付-4 当社における設計管理・調達管理について」の「1. 供給者の技術的評価」参照）

3.6.2 供給者の選定

調達を主管する箇所の長は、設工認に必要な調達を行う場合、原子力安全に及ぼす影響に応じたグレード分けの区分（品質保証上の重要度分類）を明確にしたうえで、「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」の表-2及び表-3 調達管理程度表を踏まえて、調達に必要な要求事項を明確にし、発注手続きを行い、資材部門へ供給者の選定を依頼する。

資材部門は、全社規定である「資材調達業務要領」に基づき供給者の選定（契約業務を含む。）を実施する。

なお、原子燃料の調達については、調達を主管する箇所の長自らが、「原子燃料調達業務要領」に基づき供給者の選定（契約業務を含む。）を実施する。

3.6.3 調達物品等の調達管理

当社は、調達物品等の調達管理に係る業務の実施に際し、原子力安全に及ぼす影響に応じたグレード分けを適用している。

設工認に適用した機器ごとの現行の各グレードに該当する実績は様式-8「適合性確認対象設備ごとの調達に係るグレード分け及び実績（設備関係）（例）」（以下「様式-8」という。）に取りまとめる。

設工認に係る品質管理として、発注仕様書の作成のための設計から調達までの業務フロー及び各段階の管理、組織内外の相互関係を「添付-4 当社における設計管理・調達管理について」の第1表に示す。

また、調達に関する品質保証活動を行うに当たっては、原子力安全に及ぼす影響に応じたグレード分けの区分（品質保証上の重要度分類）を明確にしたうえで、「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」の表-2及び表-3 調達管理程度表を踏まえて、以下の調達管理に係る業務を実施する。

また、一般産業用工業品については、原子力施設に使用するに当たっての評価に必要な要求事項を発注仕様書に含める。

(1) 発注仕様書の作成

調達を主管する箇所の長は、グレード分けの区分（品質保証上の重要度分類）及び「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」の表-2及び表-3 調達管理程度表を踏まえて、業務の内容に応じて、以下のa. ～l. のうち必要な調達要求事項を明確にした発注仕様書を作成し、供給者の業務実施状況を適切に管理する。（「3.6.3(2) 調達物品等の管理」参照）

- a. 供給者の業務の範囲
- b. 技術的要求事項（適用法令、機能・性能、製作・据付、試験・検査、洗浄、梱包などに関する事項）
- c. 品質保証計画の提出に関する事項
- d. 検査・試験、監査等のための供給者への立入に関する事項
- e. 提出書類に関する事項
- f. 不適合の報告及び処理に関する事項
- g. 供給者の下請負先に対する管理
- h. 材料の管理に関する事項
- i. 許認可申請等に係る解析業務に関する事項（「添付-3 設工認における解析管理について」参照）
- j. 健全な安全文化を育成及び維持するための活動に関する要求事項
- k. 一般産業用工業品を原子炉施設に使用するに当たっての要求事項
- l. 調達を担当する箇所の長が供給先で検査を行う際に原子力規制委員会の職員が同行して工場等の施設に立ち入る場合があることに関する事項

(2) 調達物品等の管理

調達を主管する箇所の長は、発注仕様書で要求した製品が確実に納品されるよう調達物品等が納入されるまでの間、発注仕様書の調達要求事項に従い、業務の実施に当たって必要な図書（品質保証計画書、作業要領書、試験・検査要領書等）を供給者に提出させ、それを審査し承認するなどの調達物品等に応じた必要な管理を実施する。

(3) 調達物品等の検証

調達を主管する箇所の長は、調達物品等が発注仕様書の調達要求事項を満たしていることを確認するために、以下の該当する項目により調達物品等の検証を実施する。

なお、供給先で検証を実施する場合、あらかじめ発注仕様書の調達要求事項で検証の要領及び調達物品等のリリースの方法を明確にしたうえで、検証を行う。

a. 工程確認

調達物品等の検証方法や製作に係る製作手法等並びにそれらを踏まえた工程が適切であることを確認することにより検証する。

b. 試験・検査

発注仕様書の調達要求事項に基づき供給者から以下の項目のうち、必要な項目を含む試験・検査要領書を提出させ、それを事前に審査、承認したうえで、工場又は発電所において試験・検査要領書に基づき試験・検査を実施し、当社が立会い又は記録確認することにより検証する。

- ・ 目的、検査項目（立会項目を含む。）、検査対象範囲
- ・ 適用法令、規格
- ・ 検査内容（体制、時期、頻度を含む。）、検査方法、検査手順
- ・ 判定基準
- ・ 記録項目、様式
- ・ 使用する測定機器
- ・ 試験・検査員の資格等

可搬式ポンプ等の一般産業用工業品を購入する場合で、設備個々の機能・性能を工事又は検査の段階の中で確認できないものについては、当社にて受入後に、機能・性能を確認するための試験・検査を実施する。

c. 受入検査

調達物品等の受入れに当たり、受入検査を実施し、現品又はその他の記録を確認することにより検証する。

d. 供給者から提出される書類の確認

供給者から提出される最終図、工事報告書等調達した役務の実施状況の書類を確認することにより検証する。

また、調達物品等を受入（検収）するまでに調達要求した書類が全て提出されていることを確認することにより検証する。

e. 許認可申請等に係る解析業務の確認

当社は、供給者への立入調査等により供給者が解析業務の計画書を策定し、解析業務の手順に基づき一連の解析プロセスが適切に実施されていること等を確認することにより検証する。（「添付-3 設工認における解析管理について」参照）

f. 供給者の品質保証監査（「3.6.4 供給者の品質保証監査」参照）

3.6.4 供給者の品質保証監査

供給者に対する監査を主管する箇所の長は、供給者の品質保証活動（健全な安全文化を育成及び維持するための活動を含む。）が適切で、かつ、確実に行わ

れていることを確認するために、必要に応じて供給者の品質保証監査を実施する。

（供給者の品質保証監査を実施する場合の例）

（設備） 供給者が発生させた調達物品等に係る重大な欠陥等の不適合事象に対する是正処置の実施状況を確認する場合

（役務） 定期検査時の主要元請負会社について、各社3年ごとに1回、品質保証活動の実施状況を確認する場合

ただし、当該供給者が ISO9001 等の公的認証を取得している場合、認証更新時の審査報告書の確認をもって監査に代えることができる。

また、供給者の発注先（以下「外注先」という。）について、下記に該当する場合は、直接外注先に監査を行う。

- ・当社が行う供給者に対する監査において、供給者における外注先の品質保証活動の確認が不十分と認められる場合
- ・トラブル等で必要と認めた場合

3.7 文書及び記録の管理、識別管理及びトレーサビリティ

3.7.1 文書及び記録の管理

（1）適合性確認対象設備の設計、工事及び検査に係る文書及び記録

「3.1 設計、工事及び検査に係る組織（組織内外の相互関係及び情報伝達に関する事項を含む。）」の第3.1-1表に示す各プロセスを主管する長は、設計、工事及び検査に係る文書及び記録について、保安規定品質マネジメントシステム計画に示す規定文書に基づく記録を「原子力発電所品質保証基準」等に従って管理する。

設工認に係る主な記録の品質マネジメントシステム上の位置付けを第3.7-1表に示すとともに、技術基準規則等への適合性を確保するための活動に用いる文書及び記録を第3.7-1図に示す。

（2）供給者が所有する当社の管理下でない設計図書を設計、工事及び検査に用いる場合の管理

設工認において供給者が所有する当社の管理下でない図書を設計、工事及び検査に用いる場合、当社が供給者評価等により品質保証体制を確認した供給者で、かつ、対象設備の設計を実施した供給者が所有する設計当時から現在に至るまでの品質が確認された設計図書が当該設備としての識別が可能な場合において、適用可能な図書として扱う。

当該設備に関する図書がない場合で、代替可能な図書が存在する場合は、供給者の品質保証体制をプロセス調査することによりその図書の品質を確認し、設工認に対する適合性を保証するための図書として用いる。

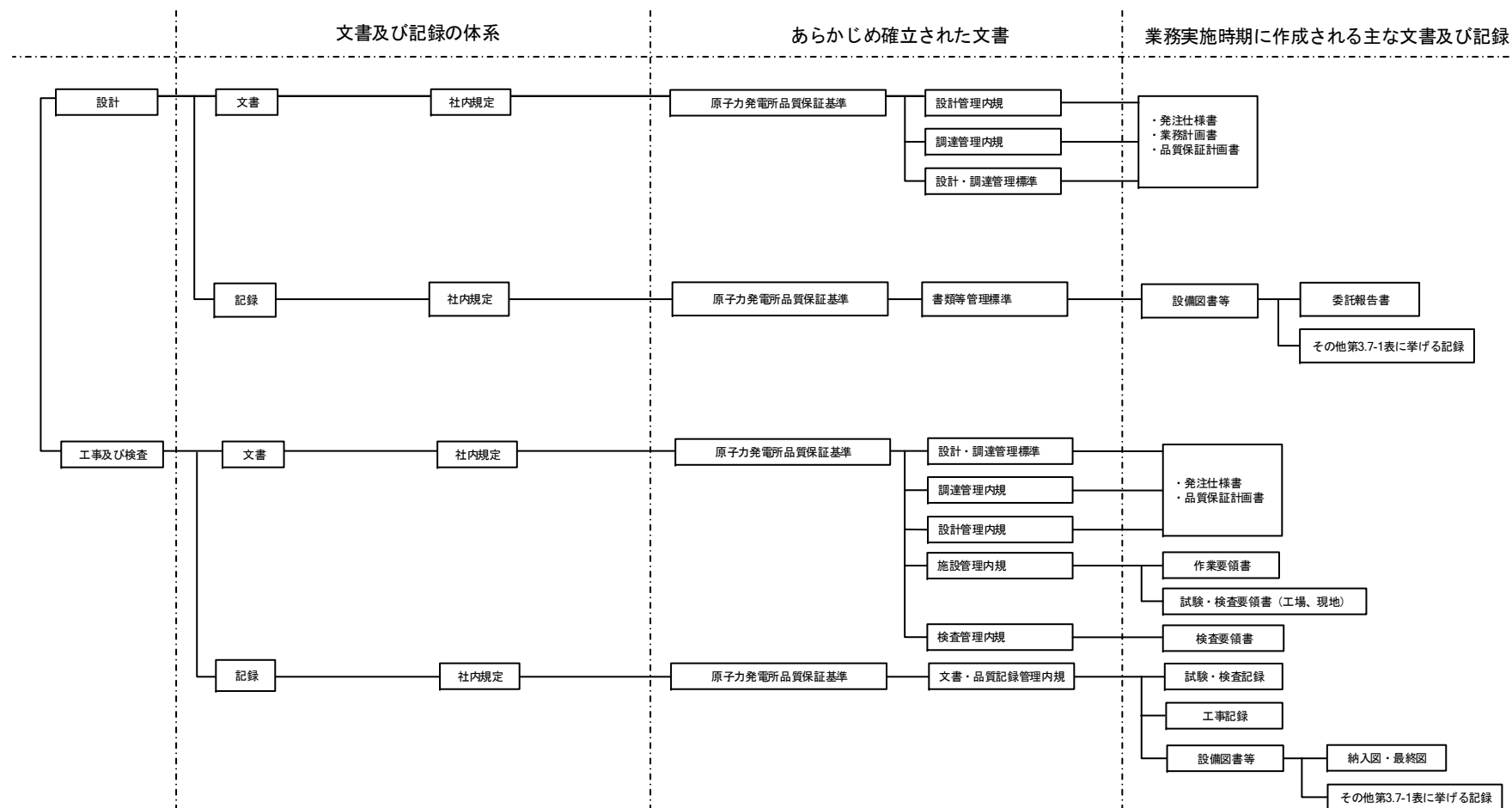
この供給者が所有する図書は、当社の文書管理下で第 3.7-1 表に示す記録として管理する。

(3) 使用前事業者検査に用いる文書及び記録

使用前事業者検査として、記録確認検査を実施する場合に用いる記録は、第 3.7-1 表に示す文書及び記録を用いて実施する。

第 3.7-1 表 記録の品質マネジメントシステム上の位置付け

主な記録の種類	品質マネジメントシステム上の位置付け
納入図、最終図	設備の工事中の図書であり、このうち図面等の最新版の維持が必要な図書においては、工事完了後に「設備図書」として管理する図書
設備図書 (完本図書)	品質保証体制下で作成され、建設当時から設備の改造等に合わせて最新版に管理している図書
既工認	設置又は改造当時の設工認の認可を受けた図書で、当該設工認に基づく検査の合格を以って、その設備の状態を示す図書
設計記録	作成当時の適合性確認対象設備の設計内容が確認できる記録（自社解析の記録を含む。）
工事記録	設置又は改造当時の設備の点検状況を記録した図書（試験・検査記録等を含む。）
委託報告書	品質保証体制下の調達管理を通じて行われた業務委託の結果の記録（解析結果を含む。）
供給者から入手した 設計図書等	供給者を通じて入手した供給者所有の設計図書、製作図書等
製品仕様書又は仕様が 確認できるカタログ等	供給者が発行した製品仕様書又は仕様が確認できるカタログ等で、設計に関する事項が確認できる図書
現場確認結果 (ウォークダウン)	品質保証体制下で確認手順書を作成し、その手順書に基づき現場の適合状態を確認した記録



第3.7-1図 設計、工事及び検査に係る品質管理の方法等に関する文書体系

3.7.2 識別管理及びトレーサビリティ

(1) 計測器の管理

a. 当社所有の計測器の管理

工事を主管する箇所の長は、計測器の管理を以下のとおり実施する。

(a) 校正・検証

予め定めた間隔又は使用前に、国際又は国家計量標準にトレーサブルな計量標準に照らして校正若しくは検証又はその両方を行う。

また、このような標準が存在しない場合には、校正又は検証に用いた基準を記録する。

なお、適合性確認対象設備で、調達当時の考え方によりトレーサブルな記録がない場合は、調達当時の計測器の管理として、国際又は国家計量標準につながる管理が行われていたことを確認する。

(b) 識別管理

イ. 計測器の管理システム等による識別

計測器の校正の状態を明確にするため、計測器の校正周期を統合型保修管理システム（一部台帳管理）に定め、有効期限内であることを識別する。

また、計測器が故障等で使用できない場合は、「使用不可表示や保管場所からの撤去等」の適切な識別を実施する。

ロ. 計測器管理ラベルによる識別

計測器の校正の状態を明確にするため、「校正済ラベル」に必要事項を記載し、計測器の目立ちやすいところに貼り付けて識別する。

b. 当社所有以外の計測器の管理

工事を主管する箇所の長は、供給者の所有する計測器を使用する場合は、計測器が適切に管理されていることを使用する前までに確認する。

(2) 機器、弁及び配管等の管理

工事を主管する箇所の長は、機器、弁及び配管等は、刻印、タグ、銘板、塗装表示等にて管理する。

3.8 不適合管理

設工認に基づく設計、工事及び検査において発生した不適合については「改善措置活動管理標準」又は「品質保証総括内規」に基づき処置を行う。

4. 適合性確認対象設備の施設管理

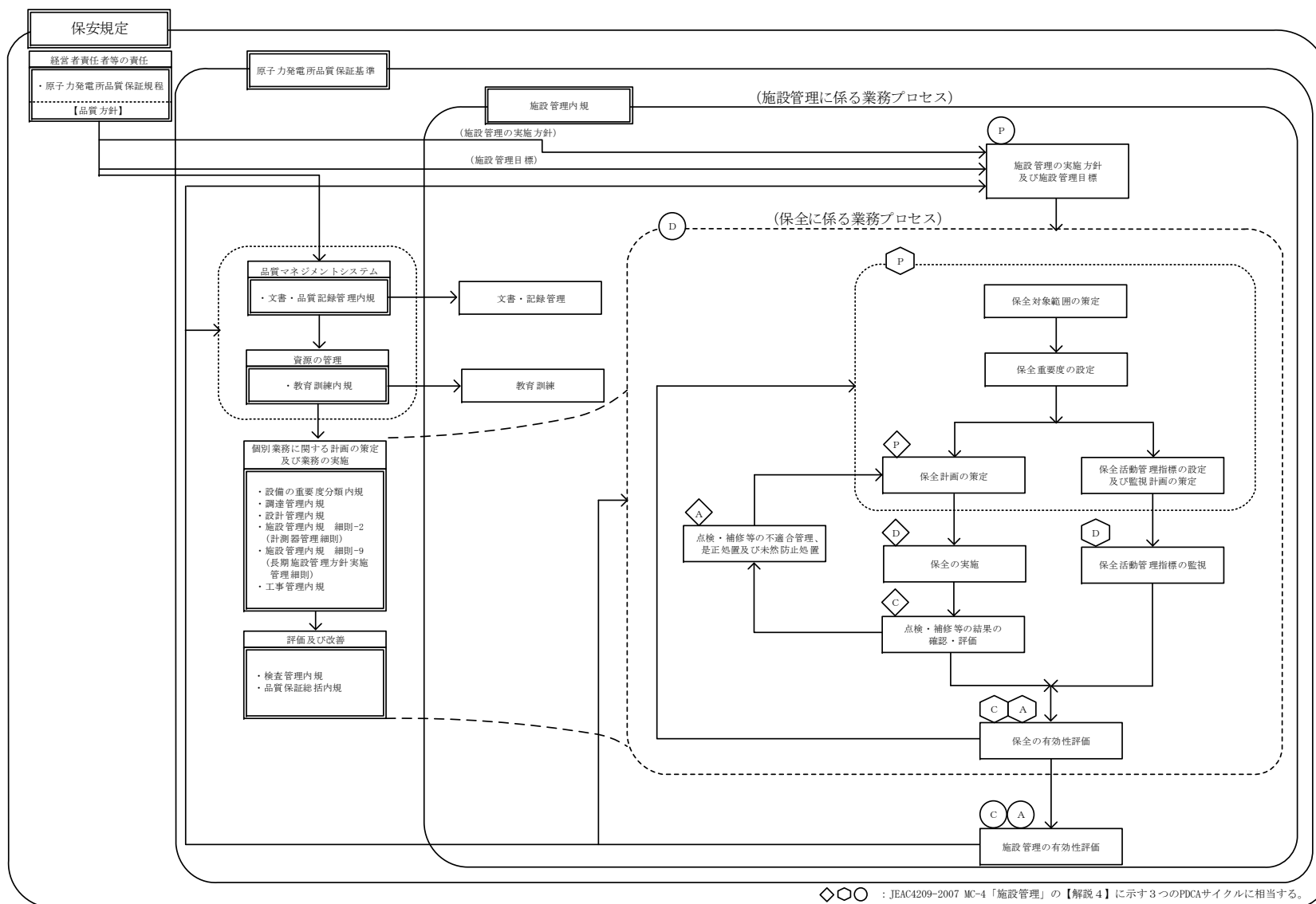
設工認に基づく工事は、「施設管理内規」の「保全計画の策定」の中の「設計および工事の計画の策定」に基づき実施する。

また、特定重大事故等対処施設に関わる秘匿性を保持する必要がある情報については、3.(1)、(2)に示す「秘密情報の管理」及び「セキュリティの観点から非公開とすべき情報の管理」を実施している。

施設管理に係る業務のプロセスと品質マネジメントシステムの文書との関連を第4-1図に示す。

設工認申請（届出）時点で設置されている設備は、既に巡視点検又は日常の保守点検（月次の外観点検、動作確認）等の点検に加え保全計画の点検計画に従い分解点検、機能・性能試験等を実施し、異常のないことを確認している。

適合性確認対象設備については、技術基準規則への適合性を使用前事業者検査を実施することにより確認し、適合性確認対象設備の使用開始後においては、施設管理に係る業務プロセスに基づき保全重要度に応じた点検計画を策定し保全を実施することにより、適合性を維持する。



第4-1図 施設管理に係る業務プロセスと品質マネジメントシステムの文書との関連

本設工認に係る設計の実績、工事及び検査の計画【 施設（設備）】（例）

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.1	適合性確認対象設備に対する要求事項の明確化							
	3.3.2	各条文の対応に必要な適合性確認対象設備の選定							
	3.3.3(1)	基本設計方針の作成（設計1）							
	3.3.3(2)	適合性確認対象設備の各条文への適合性を確保するための設計（設計2）							
	3.3.3(3)	設工認の作成							
	3.3.3(4)	設計のアウトプットに対する検証							
	3.3.3(5)	設工認の承認							
工事及び検査	3.4.1	設工認に基づく具体的な設備の設計の実施（設計3）							
	3.4.2	具体的な設備の設計に基づく工事の実施							
	3.5.2	設計の結果と使用前事業者検査対象の繋がり の明確化							
	3.5.3	使用前事業者検査の計画							
	3.5.4	検査計画の管理							
	3.5.5	主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査の管理							
	3.5.6	使用前事業者検査の実施							
	3.7.2	識別管理及びトレーサビリティ							

適合性確認対象設備の抽出と適用条文等の整理(例)

施設区分					適用要否判断	理由 ※適用される項号を明確にし、その理由を記載する。
設備区分						
設備等						
3	特殊な設計による発電用原子炉施設					
4	設計基準対象施設の地盤					
5	地震による損傷の防止					
6	津波による損傷の防止					
7	外部からの衝撃による損傷の防止					
8	立入りの防止					
9	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止					
10	急傾斜地の崩壊の防止					
11	火災による損傷の防止					
12	発電用原子炉施設内における溢水等による損傷の防止					
13	安全避難通路等					
14	安全設備					
15	設計基準対象施設の機能					
16	全交流動力電源喪失対策設備					
17	材料及び構造					
18	使用中の亀裂等による破壊の防止					

○：適用条文であり、今回の申請で適合性を確認する必要があるもの
△：適用条文であるが、既に適合性が確認されている又は工事計画に係る内容に影響しないことが明らかなもの
×：適用を受けない条文

設備リスト(例)

設置許可基準 規則／技術基 準規則 条文	設置許可基準規則及び解釈	技術基準規則及び解釈	必要な機能等	設備等	常設／可搬 ／運用	既設／新設	詳細設計に関する事項			兼用の 有無 主：○ 兼：△ 無：×	実用炉規則別表 第二に関連する 設備区分	設置許可申請 書添付書類八 主要設備の記 載有無 記載有：○ 記載無：×	備考
							実用炉規則別 表第二に記載 されているか 記載有：○ 記載無：×	既工認に記載 がされていないか 記載有：×	記載箇所 が(a)～ (c)のうち どこに対 応するか※				

※ 1 (a)～(c)の分類は以下のとおり。

(a)：既工認にされていない設備（要目表、基本設計方針を新規作成）

(b)：既工認に設備のうち、使用目的変更、使用条件変更、機器クラスアップ等を伴う設備（要目表、基本設計方針を変更）

(c)：実用炉規則別表第二の記載要求事項のうち、要目標に該当しない設備（基本設計方針のみに記載）

設工認添付書類星取表(例)

伊方〇号機 申請対象設備								基本設計方針						別表第二 添付書類[取手の定義]○:有 △:既工認済込 □:兼用先の要求 ●:他号機にて作成 ー:なし										備考						
								【耐震重要度分類】※ 耐震重要度分類については、「設工認添付書類星取表 略語の定義」参照 【機器クラス】※ 機器クラスについては、「設工認添付書類星取表 略語の定義」参照 ※運用及び可搬型のSA設備については斜線とする。 【申請区分】 「○」:基本設計方針の変更あり 「×」:基本設計方針の変更なし 「△」:記載の適正化						【設備区分】 設備区分については、「設工認添付書類星取表 略語の定義」参照 【機器クラス】 機器クラスについては、「設工認添付書類星取表 略語の定義」参照 【申請区分】 「○」:基本設計方針の変更あり 「×」:基本設計方針の変更なし 「△」:記載の適正化						設備共通						「各施設(設備)」				
																				要目表										
別表第二			機器名	条文	兼用する場合の施設・設備区分		工事及び検査の有無	設計基準対象施設(DB)			重大事故等対処施設(SA)			「◎」:申請対象(新規) 「○」:申請対象(既工認登録済み) 「□」:申請対象(既工認登録なし) 「△」:記載の適正化 「×」:なし																
発電用原子炉施設の種別	設備区分	機器区分			主登録	兼用登録		工事	耐震重要度分類 (当該設備)	機器クラス (当該設備)	申請区分	設備区分 (当該設備)	機器クラス (当該設備)											申請区分						

設工認添付書類星取表 略語の定義 (1/3)

耐震重要度分類（設計基準対象施設）略語の定義

		略語	定義
設計基準対象施設	耐震重要度分類	S	耐震重要度分類におけるSクラス(津波防護施設、津波防止設備、津波監視設備及び使用済燃料乾式貯蔵容器を除く)
		S*	Sクラス施設のうち、津波防護施設、浸水防止施設、津波監視設備及び使用済燃料乾式貯蔵容器。なお、基準地震動による地震力に対して、それぞれの施設及び設備に要求される機能（津波防護機能、浸水防止機能及び津波監視機能をいう。）並びに使用済燃料乾式貯蔵容器に要求される機能を保持するものとする。
		B	耐震重要度分類におけるBクラス（B-1及びB-2を除く）
		B-1	Bクラスの設備のうち、共振のおそれがあるため、弾性設計用地震動Sdに2分の1を乗じたものによる地震力に対して耐震性を保持できる設計とするもの
		B-2	Bクラスの設備のうち、波及的影響によって、耐震重要施設がその安全機能を損なわないように設計するもの
		C	耐震重要度分類におけるCクラス（C-1, C-2及びC-3を除く）
		C-1	Cクラスの設備のうち、波及的影響によって、耐震重要施設がその安全機能を損なわないように設計するもの
		C-2	Cクラスの設備のうち、基準地震動による地震力に対して火災感知及び消火の機能並びに溢水伝ばを防止する機能を保持できる設計とするもの
		C-3	Cクラスの設備のうち、基準地震動による地震力に対して非常時における海水の取水機能を保持できる設計とするもの
		—	当該施設において設計基準対象施設として使用しないもの

設工認添付書類呈取表 略語の定義(2/3)

機器クラス（設計基準対象施設） 略語の定義

		略語	定義
設計基準対象施設	機器クラス	クラス1	技術基準規則第二条第二項第三十二号に規定する「クラス1容器」、「クラス1管」、「クラス1ポンプ」、「クラス1弁」又はこれらを支持する構造物
		クラス2	技術基準規則第二条第二項第三十三号に規定する「クラス2容器」、「クラス2管」、「クラス2ポンプ」、「クラス2弁」又はこれらを支持する構造物
		クラス3	技術基準規則第二条第二項第三十四号に規定する「クラス3容器」又は「クラス3管」
		クラス4	技術基準規則第二条第二項第三十五号に規定する「クラス4管」
		格納容器 ^(注1)	技術基準規則第二条第二項第二十八号に規定する「原子炉格納容器」
		炉心支持構造物	原子炉压力容器の内部において燃料集合体を直接に支持するか又は拘束する部材
		火力技術基準	発電用火力設備に関する技術基準を定める省令の規定を準用するもの
		Non	上記以外の容器、管、ポンプ、弁又は支持構造物
		—	当該施設において設計基準対象施設として使用しないもの又は上記以外のもの

設工認添付書類呈取表 略語の定義(3/3)

耐震重要度分類・機器クラス（重大事故等対処設備）略語の定義

		略語	定義
重大事故等 対処設備	設備 分類	特重	技術基準規則第二条第二項第八号に規定する「特定重大事故等対処施設」
		常設耐震／防止	技術基準規則第四十九条第一号第一項に規定する「常設耐震重要重大事故防止設備」
		常設／防止	技術基準規則第四十九条第一号第二項に規定する「常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備」
		常設／緩和	技術基準規則第四十九条第一号第三項に規定する「常設重大事故緩和設備」
		常設／その他	常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備以外の常設重大事故等対処設備
		可搬／防止	重大事故防止設備のうち可搬型のもの
		可搬／緩和	重大事故緩和設備のうち可搬型のもの
		可搬／その他	可搬型重大事故防止設備及び可搬型重大事故緩和設備以外の可搬型重大事故等対処設備
		—	当該施設において重大事故等対処設備として使用しないもの
	重大事故等 機器 クラス	SAクラス2	技術基準規則第二条第二項第三十八号に規定する「重大事故等クラス2容器」、「重大事故等クラス2管」、「重大事故等クラス2ポンプ」、「重大事故等クラス2弁」又はこれらを支持する構造物
		SAクラス3	技術基準規則第二条第二項第三十九号に規定する「重大事故等クラス3容器」、「重大事故等クラス3管」、「重大事故等クラス3ポンプ」又は「重大事故等クラス3弁」
		火力技術基準	発電用火力設備に関する技術基準を定める省令の規定を準用するもの 又は、使用条件を踏まえ、定格負荷状態において十分な強度を有していることを確認できる一般産業品規格を準用するもの
		—	当該施設において重大事故等対処設備として使用しないもの又は上記以外のもの

(注1) 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年版(2007年追補版含む))
 <第I編 軽水炉規格> JSME S NC1-2005/2007」又は「発電用原子力設備規格
 設計・建設規格(2012年版)<第I編 軽水炉規格> JSME S NC1-2012」
 (日本機械学会)における「クラスMC」である。

各条文の設計の考え方（例）

第〇条（〇〇〇〇〇）					
1. 技術基準の条文、解釈への適合性に関する考え方					
No.	基本設計方針で 記載する事項	適合性の考え方（理由）	項一号	解釈	説明資料等
①					
②					
③					
④					
⑤					
⑥					
⑦					
2. 設置許可本文のうち、基本設計方針に記載しないことの考え方					
No.	項目	考え方	説明資料等		
①					
②					
③					
④					
⑤					
3. 設置許可添付書類八のうち、基本設計方針に記載しないことの考え方					
No.	項目	考え方	説明資料等		
①					
②					
③					
4. 詳細な検討が必要な事項（説明資料等）					
No.	記載先				
a					
b					
c					
d					
e					

要求事項との対比表（例）

実用発電用原子炉及びその附属施設の 技術基準に関する規則	技術基準規則の解釈	設工認 基本設計方針	設置変更許可申請書 本文	設置変更許可申請書 添付書類八	備 考

基準適合性を確保するための設計結果と適合性確認状況一覧表(例)

〇〇施設			基本設計方針						
			関連条文			〇〇条			△△条
設備区分	機器区分	関連条文	要求種別						
			設備名称	工認設計結果 (上段：要目表／設計方針) (下段：記録等)	設備の 具体的設計結果 (上段：設計結果) (下段：記録等)	確認方法	工認設計結果 (上段：要目表／設計方針) (下段：記録等)	設備の 具体的設計結果 (上段：設計結果) (下段：記録等)	確認方法
		〇〇条							
		△△条							
技術基準要求設備 (要目表として記載要求のない設備)		◇◇条							
		☆☆条							

適合性確認対象設備ごとの調達に係るグレード分け及び実績（設備関係）（例）

[illegible]

当社におけるグレード分けの考え方

当社では設計管理（保安規定品質マネジメントシステム計画「7.3 設計開発」）、調達管理（保安規定品質マネジメントシステム計画「7.4 調達」）及び検査（保安規定品質マネジメントシステム計画「8.2.4 機器等の検査等」）に係る業務の実施に際し、原子力安全に及ぼす影響に応じたグレード分けの考え方を適用している。

これらのグレード分けの考え方の適用については以下のとおりである。

1. 当社におけるグレード分けの考え方

当社におけるグレード分けは、発電用軽水炉型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針に基づく安全上の機能別重要度（安全性）と発電への影響度（信頼性）に応じて、品質マネジメントシステム要求事項の適用の程度についてグレード分けを行っている。このグレード分けは、社内規定（原子力発電所品質保証基準）に以下に示す表-1 品質保証上の重要度分類表（A、B 1、B 2、C）（以下「品質重要度」という。）を規定している。

各設備のグレード分けについては、表-1による対象設備に対する安全上の機能別重要度と発電への影響度を踏まえて、社内規定（設備の重要度分類管理内規）に品質重要度を規定し、これに基づき品質保証活動を実施する。

表-1 品質保証上の重要度分類表

安全上の機能別重要度区分 (安全性)		定 義		クラス 1			クラス 2		クラス 3		その他
				PS-1	MS-1		PS-2	MS-2	PS-3	MS-3	ー
				その損傷又は故障により発生する事象によって、(a)炉心の著しい損傷(b)燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し原子炉圧力バウングリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器 2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器		1) 敷地外へ過度の放射性物質の放出の恐れのある設備 2) 通常運転時等に作動を要求されるもので、その故障により炉心冷却が損なわれる可能性の高い設備	1) PS-2の設備の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える影響を十分小さくする設備 2) 異常事態への対応上特に重要な設備	1) 異常状態の起因事象となるものであって、PS-1及びPS-2以外の設備 2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を低く抑える設備	1) 運転時の異常な過度変化があっても、MS-1、MS-2とあいまって事象を緩和する設備 2) 異常事態への対応上必要な設備	1) PS-1、2、3及びMS-1、2、3以外の設備
発電への影響度区分 (信頼性)		具 体 的 用 意 範 囲		原子炉冷却圧力バウングリを構成する機器・配管系、制御棒駆動装置圧力ハウジング、炉心支持構造物	原子炉停止系、残留熱を除去する系統、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器及び格納容器バウングリ	工学的安全施設の間接系及び補助施設、制御室空調系設備	化学体積制御設備の抽出・浄化系、放射性廃棄物処理設備、使用済燃料ピット、燃料取扱設備	使用済燃料ピットの補給水系、燃料集合体落下事故時放射能を低減する系、加圧器ヒータ、制御室外原子炉停止装置	主蒸気系、主給水系、計装配管、試料採取管、液体及び固体放射性廃棄物処理系、送電線、変圧器、化学体積制御設備浄化系	一次冷却系補助水設備、試料採取系、通信連絡設備、放射線監視設備、消火系非常用照明	
R1	その故障により発電停止となる設備	発電のために必要な設備であり、その故障により直ちに発電停止となる設備						B 1			
R2	その故障がプラント運転に重大な影響を及ぼす設備 (R1を除く)	R1以外で (1) 発電のために必要な設備であり、その故障により直ちに出力制限となる設備 (2) 発電のために必要な設備でその機能が回復しない場合に管理上の制限により発電停止又は出力制限となる設備			A			B 2			
R3	上記以外でその故障がプラント稼働にほとんど影響を及ぼさない設備	R1、R2以外の設備			B 1						C

1.1 設計管理に係るグレード分けの適用

設計管理に係る品質保証活動については、保安規定品質マネジメントシステム計画「7.3 設計開発」を適用することから、社内規定（原子力発電所品質保証基準等）において、工事段階における設計管理は、以下の改造工事、取替工事、ソフトウェア変更等に関する設計と規定している。

設計管理に係る活動内容を「添付-4 当社における設計管理・調達管理について」に示す。

「7.3 設計開発」を適用しない改造工事、取替工事、ソフトウェア変更等については、「7.4 調達」に従い品質保証活動を実施する。

【改造工事、取替工事等】

- ・ 発電用原子炉設置変更許可申請に係る工事
- ・ 設計及び工事計画認可申請（届出）に係る工事
- ・ 品質重要度分類A、Bクラスの設備において、機能的、性能的、構造的又は材料的に原設計を変更する場合又は新規設計する場合
- ・ 火災、溢水、自然災害（地震、津波、竜巻、火山）、有毒ガスに係る評価に影響する工事（品質重要度クラスCを含む。）

なお、令和2年3月31日までに実施した設計管理の適用については、以下の改造工事、取替工事等に関する設計であって既設設備を機能的、構造的又は材料的に原設計を変更する場合又は機能を追加する場合に適用し、伊方発電所において過去に実績のある設計の場合は、この限りではないと規定している。

【改造工事、取替工事等】

- ・ 設置変更許可申請に係る工事
- ・ 工事計画認可（届出）申請に係る工事
- ・ 品質重要度クラスA、Bの設備に係る工事
- ・ 火災、溢水、自然災害（地震、津波、竜巻、火山）に係る評価に影響する工事（品質重要度クラスCを含む。）

1.2 調達管理に係るグレード分けの適用

調達管理（解析業務委託を含む。）に係る品質保証活動については、保安規定品質マネジメントシステム計画「7.4 調達」を適用することから、調達する製品及び役務の品質重要度に応じて表-2及び表-3に示す調達管理程度を踏まえて、発注仕様書で調達要求事項を明確にし、品質保証活動を実施する。

設工認における調達管理に係る活動内容を「3.6 設工認における調達管理の方法」に示すとともに、その業務フローを「添付-4 当社における設計管理・調達管理について」の第2表及び第3表に示す。

1.3 検査に係るグレード分けの適用

検査に係る品質保証活動については、保安規定品質マネジメントシステム計画「8.2.4 機器等の検査等」を適用することから、表-4に示す検査のグレードを踏まえて、検査の独立の程度を明確にし、品質保証活動を実施する。

表-2 調達管理程度表（原子力施設関係）

要求項目	重要度 クラスA/B (注)	重要度クラスC (注)	
		設計及び工事計画認可 (届出) に係る 製品または役務を 調達する場合	左記以外
4. 調達要求事項			
(1) 供給者の業務の範囲	○	○	○
(2) 技術的要求事項	○	○	○
(3) 品質保証計画の提出に関する事項	○	○	× 〔(9) 項を要求する 場合は○〕
(4) 検査・試験、監査等のための供給者への立入に関する事項	○	×	×
(5) 提出書類に関する事項	○	○	○
(6) 不適合の報告および処理に関する事項	○	○	○
(7) 供給者の下請先に対する管理	○	×	×
(8) 材料の管理に関する事項	○	×	×
(9) 許認可申請等に係る解析業務に関する事項	標準本文の規定による		
(10) 健全な安全文化を育成および維持するための活動に関する要求事項	○	○	○
6. 供給者の評価、選定			
(1) 供給者の評価	○	○	×
(2) 供給者の選定	—	—	—
7. 調達物品等の検証			
(1) 確認事項 a. 工程確認 b. 検査・試験および監査 c. 供給者から提出される文書 d. 供給者が実施する検査の立ち合い e. 許認可申請等に係る解析業務の確認 (標準本文の規定による) f. 提出書類に関する確認	○	○	○
(2) 供給者に対する指導・助言	○	×	×
(3) 調達物品等の受入（検収）時点で調達要求事項を満足していることが確認できない場合の後の処理方法	○	×	×
8. 品質保証計画に関する監査	○	×	×

○：基本的要求事項

×：原則として要求を必要としない事項（調達内容に応じて、必要な要求事項を助助する）

—：該当しない事項

(注)：消耗品およびカタログ等をもとに購入する一般産業用工業品は重要度クラスCの「左記以外」にて管理する。

表-3 調達管理程度表（原子燃料関係）

要求項目	国内ウラン燃料及NFBC (1号炉新燃料の輸送を含む)	取替炉心設計	使用済燃料の輸送	低レベル放射性固体廃棄物の輸送	返還廃棄物の事業所外廃棄	炉心管理コードシステム	使用済燃料乾式貯蔵容器
4. 調査要求事項							
(1) 供給者の業務の範囲	○	○	○	○	○	○	○
(2) 技術的要求事項	○	○	○	○	○	○	○
(3) 品質保証計画の提出に関する事項	○	○※1	○	○	○	○	○
(4) 検査・試験、監査等のための供給者への立入に関する事項	○	○	○	○	○	○	○
(5) 提出書類に関する事項	○	○	○	○	○	○	○
(6) 不適合の報告および処理に関する事項	○	○	○	○	○	○	○
(7) 供給者の下請先に対する管理	○	○	○	○	○	○	○
(8) 材料の管理に関する事項	○	—	○	○	○	—	○
(9) 許認可申請等に係る解体業務に関する事項	許認可申請等に係る場合は「○」						
(10) 健全な安全文化を育成及び維持するための活動に関する要求事項	○	○	○	○	○	○	○
6. 供給者の評価、選定							
(1) 供給者の評価	○	○	○	○	○	○	○
(2) 供給者の選定	○※2	—	○	○	○	—	—
7. 調査物品等の検証							
(1) 確認事項 a. 工程確認 b. 検査・試験および監査 c. 供給者から提出される文書 d. 供給者が実施する検査の立ち合い e. 許認可申請等に係る解体業務の確認 (標準本文の規定による) f. 提出書類に関する確認	○	○	○	○	○	○	○
(2) 供給者に対する指導・助言	○	○	○	○	○	○	○
(3) 調査物品等の受入（検収）時点で調査要求事項を満足していることが確認できない場合の後処理方法	○	○	○	○	○	○	○
8. 品質保証計画に関する監査	○	○	○	○	○	○	○

○：基本的要求事項※3

—：該当しない事項

※1：関係会社による解体のみの場合は、品質保証計画の提出は省略可能

※2：NFBCの場合は、該当しない事項

※3：使用済燃料の輸送、低レベル放射性固体廃棄物の輸送及び返還廃棄物の事業所外廃棄に係る役割については、契約時点において、令和元年6月26日に廃止した「原子燃料循環利用調査管理標準」の要求事項となっていない場合は、該当しない事項とする。

表-4 検査段階に係るグレード分け

検査の内容 設備の重要度	①機能・性能を確認 する最終段の検査	②機器の構造等を 確認する検査	③事後検証 可能な検査
クラス 1	A	B	C
クラス 2 常設 SA 設備			
上記以外の設備			

技術基準規則ごとの基本設計方針の作成に当たっての基本的な考え方

1. 設置変更許可申請書との整合性を確保する観点から、設置変更許可申請書本文に記載している適合性確認対象設備に関する設置許可基準規則に適合するための「設備の設計方針」及び設備と一体となって適合性を担保するための「運用」を基にした詳細設計を記載する。
2. 技術基準規則の本文及び解釈への適合性を確保する観点から、設置変更許可申請書本文以外に示すべき詳細設計が必要な要求事項がある場合は、その理由を様式-5 に明確にしたうえで記載する。
3. 自主的に設置したものは、原則として記載しない。
4. 基本設計方針は、必要に応じて並び替えることにより、技術基準規則の記載順となるように構成し、箇条書きにするなど表現を工夫する。
5. 基本設計方針の作成に当たっては、必要に応じ、以下に示す考え方で作成する。
 - (1) 設置変更許可申請書本文記載事項のうち、「性能」を記載している設計方針は、技術基準規則への適合性を確保するうえで、その「性能」を持たせるために特定できる手段がわかるように記載する。

また、技術基準規則の本文及び解釈への適合性を確保する観点から、設置変更許可申請書本文に対応した事項以外に必要となる運用を付加する場合も同様に記載する。

なお、手段となる「仕様」が要目表で明確な場合は記載しない。
 - (2) 設置変更許可申請書本文記載事項のうち、運転管理段階で実現すべき事項は保安規定に規定する。このため、設備設計の前提条件を担保する事項で、これに該当する事項は、保安規定に規定する旨を基本設計方針に記載する。また、必要に応じ、当該施設に関連する実用炉規則別表第二に示す添付資料の中で、その詳細を記載する。
 - (3) 設置変更許可申請書本文で評価を伴う記載がある場合は、設工認の添付資料として担保する条件を以下の方法を使い分けることにより記載する。
 - a. 評価結果が示されている場合、評価結果を受けて必要となった措置のみを設工認の対象とする。

- b. 今後、評価することが示されている場合、評価する段階（設計又は工事）を明確にし、評価の方法及び条件、その評価結果に応じて取る措置の両者を設計対象とする。
- (4) 各条文のうち、要求事項が該当しない条文については、該当しない旨の理由を記載する。
- (5) 条項号のうち、適用する設備がない要求事項は、「適合するものであることを確認する」という設工認の審査の観点を踏まえ、当該要求事項の対象となる設備を設置しない旨を記載する。
- (6) 技術基準規則の解釈等に示された指針、原子力規制委員会文書、(旧)原子力安全・保安院文書、他省令の呼び込みがある場合は、以下の要領で記載する。
 - a. 設置時に適用される要求など、特定の版の使用が求められている場合は、引用する文書名及び版を識別するための情報（施行日等）を記載する。
 - b. 監視試験片の試験方法を示した規格など、条文等で特定の版が示されているが施設管理等の運用管理の中で評価する時点でエンドースされた最新の版による評価を継続して行う必要がある場合は、保安規定等の運用の担保先を示すとともに、当該文書名及び必要に応じてそのコード番号を記載する。
 - c. 解釈等に示された条文番号は、当該文書改正時に変更される可能性があることを考慮し、条文番号は記載せず、条文が特定できる表題で記載する。
 - d. 条件付の民間規格又は設置変更許可申請書の評価結果等を引用する場合は、可能な限りその条件等を文章として反映する。

また、設置変更許可申請書の添付書類を呼び込む場合は、対応する本文のタイトルを呼び込む。

なお、文書名を呼び込む場合においても「技術評価書」の呼び込みは行わない。

設工認における解析管理について

設工認に必要な解析のうち、調達を通じて実施した解析については、「3.6 設工認における調達管理の方法」により社内規定（設計／調達管理標準）に基づき、以下のとおり品質保証活動を実施する。

なお、事業者と供給者の解析業務の流れを第1図に示すとともに、設工認の解析業務の調達の流れを第2図に示す。

1. 発注仕様書の作成

設計を主管する箇所の長は、解析業務に係る必要な品質保証活動として、解析ガイドライン※に基づき解析業務を実施すること等を調達要求事項として明確にした発注仕様書を作成する。

※解析ガイドラインは、「原子力発電所における安全のための品質保証規程」(JEAC4111-2009)や「品質マネジメントシステム-要求事項」(ISO9001:2008)の要求事項に基づいた品質マネジメントシステムが事業者及び供給者に構築されていることが前提で、解析業務の品質を向上させるために特に実施すべき事項を具体的にまとめたものである。

2. 解析業務の計画

設計を主管する箇所の長は、供給者から解析業務を実施する前までに業務計画書（目的、業務範囲、体制、解析業務の計画書の策定方針※等）を提出させ、発注仕様書で明確にした調達要求事項が適切に反映され、解析業務に係る内容が明確になっていることを確認し、承認する。

※ 解析業務の計画書は業務計画書に含む場合がある。

なお、供給者は、解析業務を実施するに当たり、あらかじめ解析業務の計画を策定し、解析業務の計画書により文書化する。

解析業務の計画書には、以下に示す事項の計画を明確にする。

- ・ 解析業務の作業手順（デザインレビュー、審査方法、時期等を含む。）
- ・ 解析結果の検証
- ・ 業務報告書の確認
- ・ 解析業務の変更管理

また、設計を主管する箇所の長は、契約締結後に当社の理由により契約内容等に変更の必要性が生じた場合は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に基づき必要な手続きを実施する。

3. 解析業務の実施

設計を主管する箇所の長は、供給者から報告書が提出されるまでに解析業務が適切に実施されていることを供給者への立入調査等により確認する。

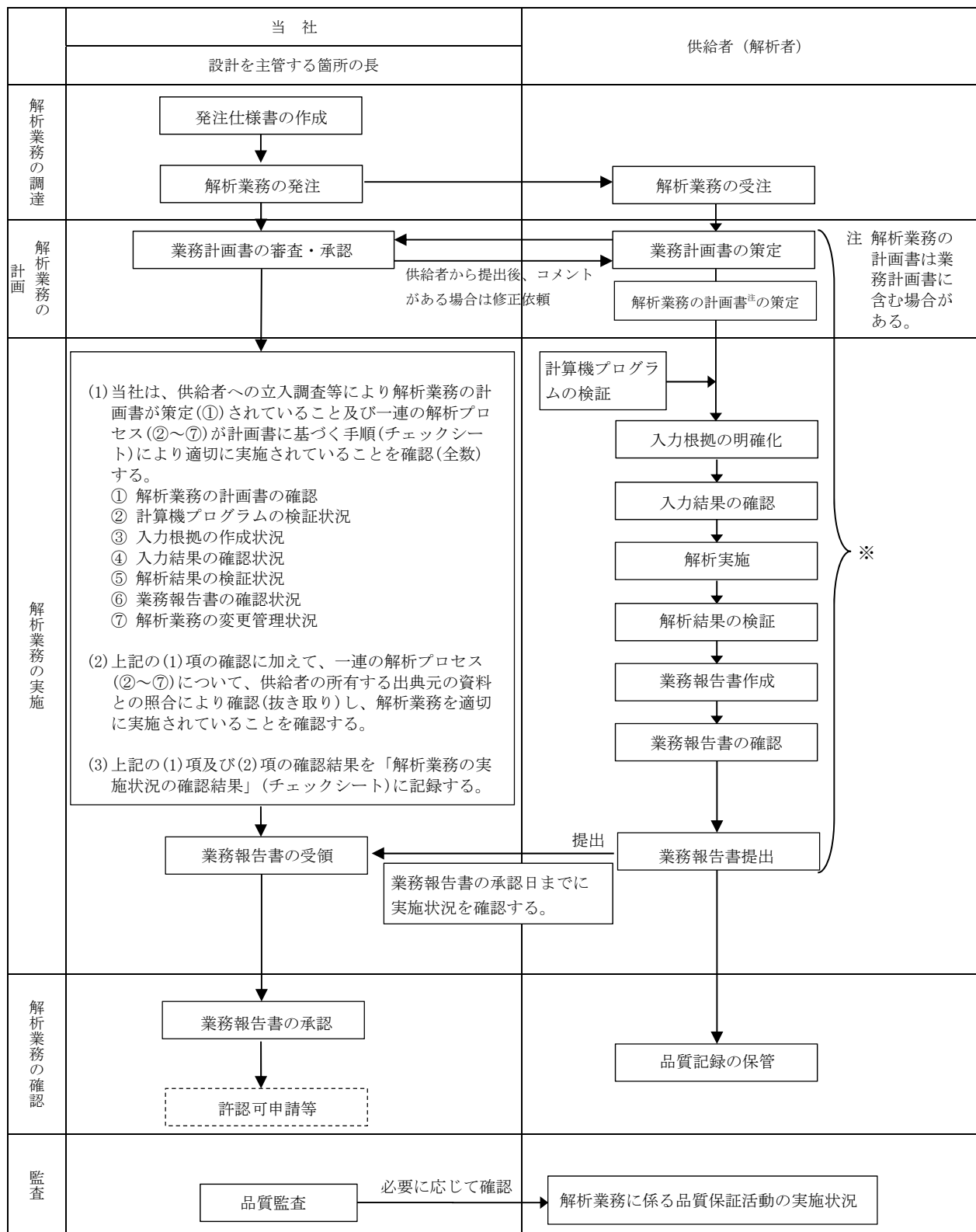
当社の供給者に対する確認内容を以下に示すとともに、具体的な確認の観点を第1表に示す。

【供給者への立入調査等による確認】

- (1) 供給者が当社からの要求事項に基づき解析業務の手順（チェックシート）等を定めた解析業務の計画書（以下の①）を策定していることを確認する。
- (2) 供給者が当該計画書に定めた解析業務の手順（チェックシート）に基づき一連の解析プロセス（以下の②～⑦）が適切に実施されていることを全数確認する。
- (3) 上記の(1)項及び(2)項の確認に加えて、一連の解析プロセス（以下の②～⑦）について、供給者の所有する出典元の資料との照合により確認（抜き取り）する。
- (4) 上記の(1)項～(3)項の確認結果を「解析業務の実施状況の確認結果」（チェックシート）に記録する。
 - ① 解析業務の計画書の確認
 - ② 計算機プログラムの検証状況
 - ③ 入力根拠の作成状況
 - ④ 入力結果の確認状況
 - ⑤ 解析結果の検証状況
 - ⑥ 業務報告書の確認状況
 - ⑦ 解析業務の変更管理状況

4. 業務報告書の確認

設計を主管する箇所の長は、供給者から提出された業務報告書が要求事項に適合していること、また、供給者が実施した解析結果が適切に反映されていることを確認し、承認する。



※：解析業務に変更が生じた場合は、各段階において変更内容を反映する。

第1図 解析業務の流れ

管理の段階	設計、工事及び検査の業務フロー		組織内外の部門間の相互関係 ◎：主管箇所 ○：関連箇所			実施内容	添付 (記載項目)	証拠書類
	当社	供給者	本店	発電所	供給者			
発注仕様書の作成	「発注仕様書」の作成		◎	—	—	設計を主管する箇所の長は、「発注仕様書」を作成し、解析業務に係る要求事項を明確にする。	・ 3.6.1 供給者の技術的評価 ・ 3.6.2 供給者の選定 ・ 3.6.3 調達物品等の調達管理	・ 発注仕様書
解析業務の計画	「業務計画書」の 審査、承認	「業務計画書」の作成、確認 「解析業務の計画書」 ^注 の 作成、確認	◎	—	○	設計を主管する箇所の長は、発注仕様書で明確にした解析業務に係る要求事項が供給者から提出された「業務の計画書」に適切に反映され、解析業務に係る内容が明確にされていることを確認する。	・ 3.6.3 調達物品等の調達管理	・ 業務計画書 (供給者から提出)
解析業務の実施	解析実施状況の確認	解析業務の実施	◎	—	○	設計を主管する箇所の長は、供給者への立入調査等により解析業務の計画書が策定され、一連の解析プロセス(計算機プログラムの検証状況／入力根拠の作成状況／入力結果の確認状況／解析結果の検証状況等)が当該計画書に基づく手順(チェックシート)により適切に実施されていることを確認(全数)する。 また、上記の確認に加えて、一連の解析プロセスについて、供給者の所有する出典元の資料との照合により確認(抜き取り)し、解析業務を適切に実施されていることを確認する。 これらの確認結果を「解析業務の実施状況の確認結果」(チェックシート)に記録する。	・ 3.6.3 調達物品等の調達管理	・ 解析業務の実施状況の確認結果(チェックシート)
業務報告書の確認	「業務報告書」の承認	「業務報告書」の 作成、確認	◎	—	○	設計を主管する箇所の長は、供給者から提出された「業務報告書」で、供給者が解析業務の計画に基づき適切に解析業務を実施したことを確認する。	・ 3.6.3 調達物品等の調達管理	・ 業務報告書 (供給者から提出)

注 解析業務の計画書は業務計画書に含む場合がある。

第2図 設工認に係る調達管理の流れ（解析）

第1表 解析業務を実施する供給者に対する確認の観点

No.	確認項目	確認の観点
1	解析業務の計画書	・解析業務の作業手順、解析結果の検証、業務報告書の確認等について、計画（どの段階で、何を目的に、どのような内容で、誰が実施するのか）を明確にしていること。
2	計算機プログラムの検証	・計算機プログラムは、適正なものであることを事前に検証し、計算機プログラム名称及びバージョンをリストへ登録していること。（バージョンアップがある場合は、その都度検証を行い、リストへ登録していること。） ・登録されていない計算機プログラムを使用する場合は、その都度、検証を行うこと。
3	入力根拠の作成	・解析業務計画書に基づき解析ごとに入力根拠を明確にしていること。
4	入力結果の確認	・計算機プログラムへの入力が正確に実施されたことをエコーバック等により確認していること。
5	解析結果の検証	・解析結果は、解析業務の計画書で定めたチェックシート等により検証されていること。
6	業務報告書の確認	・計算機プログラムを用いた解析結果又は汎用表計算ソフトウェアを用いた計算結果等を当社の指定する書式に加工、編集して業務報告書としてまとめていること。 ・作成された業務報告書が解析業務の計画書の内容を満足していることを確認すること。
7	解析業務の変更管理	・解析業務に変更が生じた場合は、変更内容を文書化し、解析業務の各段階においてその変更内容を反映していること。

当社における設計管理・調達管理について

1. 供給者の技術的評価

調達を主管する箇所の長は、供給者が当社の要求事項に従って調達物品等を供給する技術的な能力を判断するための根拠として、品質重要度に応じて「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」の表-2及び表-3 調達管理程度表を踏まえて、以下に示す評価項目（(1)項又は(2)項のいずれかで評価）について供給者の技術的評価を実施する。

(1) 調達実績（前年又は前々年）のある場合

工事、購入、委託等により調達した調達物品等に関し、工事竣工評価報告書、委託報告書等により供給者の供給能力上問題がなかったことを確認する。

(2) 調達実績（前年又は前々年）のない場合

供給能力の評価は、品質保証体制及び供給者の技術能力に関する次のいずれかの項目で実施する。

- a. 供給者における調達物品等の供給実績
- b. 調達物品等の使用実績
- c. 製品サンプル等

2. 設計管理・調達管理について

設計及び工事を主管する箇所の長は、保安規定品質マネジメントシステム計画「7.3 設計開発」を適用する場合は、社内規定（設計／調達管理標準又は設計管理内規）に基づき以下に示す「2.1 設計開発の計画」から「2.8 設計開発の変更管理」までの設計管理に係る発注仕様書の作成のための設計等の各段階の活動を実施する。設計管理に係る業務フロー及び各段階の管理、組織内外の相互関係を第1表に示す。

また、保安規定品質マネジメントシステム計画「7.3 設計開発」の適用外で保安規定品質マネジメントシステム計画「7.4 調達」を適用する場合は、「3.6 設工認における調達管理の方法」に示す発注仕様書の作成のための設計等の各段階の活動を実施するとともに、その業務フロー及び各段階の管理、組織内外の相互関係を第2表及び第3表に示す。

2.1 設計開発の計画

設計開発の対象となった工事について、工事内容、工事時期、官庁手続き、工事に関与する組織間のインターフェイス及び責任を割り当てた業務分担（体制）等を明確にした設計開発に係る計画を策定する。

2.2 設計開発に用いる情報

設計開発のインプットとして、以下の要求事項を明確にした設計検討書等を作成する。

- (1) 機能及び性能等に関する要求事項
- (2) 適用される法令、基準及び規格
- (3) 適用可能な場合には、以前の類似した設計からの反映事項
- (4) 設計に不可欠なその他の要求事項

2.3 設計開発のレビュー

設計レビュー会議等を開催し、設計開発のインプットの適切性をレビューし、レビューの結果及び必要な処置があればその記録は品質記録として管理する。

なお、レビューへの参加者には、設計開発に係る専門家を含め実施する。

2.4 設計開発の結果に係る情報

設計開発のインプットの要求事項を踏まえて設計開発のアウトプットとして発注仕様書を作成する。

2.5 設計開発の検証（発注段階）

発注仕様書の承認過程で、発注仕様書が設計開発のインプットの要求事項を満足していることを確実にするために対比して検証し、検証の結果及び必要な処置があればその記録は品質記録として管理する。

なお、検証は原設計者以外の者が実施する。

2.6 設計開発の検証（設備の設計段階）

供給者から提出される設計図書及び試験・検査要領書等の審査・承認の段階で、調達要求事項を満足していることを検証し、検証の結果及び必要な処置があればその記録は品質記録として管理する。

なお、検証は原設計者以外の者が実施する。

2.7 設計開発の妥当性確認

工事段階で実施する試験・検査の結果により、設計開発の妥当性を確認する。

2.8 設計開発の変更管理

設計開発の変更を要する場合、変更内容を明確にするとともに以下に従って手続きを実施する。

- (1) 当該設計変更に伴う影響及び他の設計に対する影響を評価し、設計管理の必要な各段階に応じて「2.2 設計開発に用いる情報」、「2.3 設計開発のレビュー」、「2.4 設計開発の結果に係る情報」、「2.5 設計開発の検証（発注段階）」、「2.6 設計開発の検証（設備の設計段階）」、「2.7 設計開発の妥当性確認」の要求事項に基づく管理を行う。
- (2) 変更内容及び変更レビューの結果の記録並びに必要な処置があればその記録は品質記録として管理する。

第1表 設計管理に係る業務フロー（標準的な業務フロー）

管理の段階	設計、工事及び検査の業務フロー		組織内外の部門間の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実施内容	保安規定品質マネジメント システム計画等 （記載項目）	証拠書類
	当 社	供給者	本 店	伊 方 発 電 所	供 給 者			
発注仕様書の作成のための設計	設計開発計画 ↓ 設計開発に用いる情報 ↓ 設計開発のレビュー ↓ 設計開発の結果に係る情報 ↓ 設計開発の検証		◎	○	—	設計を主管する箇所の長は、工事内容、工事時期、官庁手続き、工事に関与する組織間のインターフェイス及び明確な責任を割り当てた業務分担（体制）等を明確にした「工事計画説明書」を作成し、工事を計画する。	・ 7. 3. 1 設計開発計画 ・ 7. 3. 2 設計開発に用いる情報 ・ 7. 3. 3 設計開発の結果に係る情報 ・ 7. 3. 4 設計開発のレビュー ・ 7. 3. 5 設計開発の検証 （「添付-4 当社における設計管理・調達管理について」参照）	・ 工事計画説明書
						設計を主管する箇所の長は、設計・開発へのインプット項目として要求事項を「設計検討書等」で明確にする。		・ 設計検討書等
						設計を主管する箇所の長は、「設計検討書等」にて明確にした設計・開発へのインプット項目について、設計レビュー会議等において設計・開発に係る専門家を含めてその適切性をレビューし、承認する。		・ 設計検討書等 ・ 議事録
						設計を主管する箇所の長は、設計・開発へのインプット項目を踏まえて、設計・開発からのアウトプットとして「発注仕様書」を作成する。		・ 発注仕様書
						設計を主管する箇所の長は、設計・開発へのインプット項目を明確にした「設計検討書等」とその設計・開発からのアウトプットを明確にした「発注仕様書」の内容から要求事項を満たしていることを確認し、「発注仕様書」を承認する。		・ 設計検討書等 ・ 発注仕様書
発 注	供給者の評価・選定・発注		◎	—	○	設計を主管する箇所の長は、供給者が当社の要求事項に従って調達物品等を供給する技術的な能力を判断するための根拠として、「供給者の評価記録」を用いて、供給者の技術的評価を実施し、発注手続きを行い、資材部へ供給者の選定を依頼する。 資材部門は、全社規定である「資材調達業務要領」に基づき、供給者の選定（契約業務を含む。）を実施する。	・ 7. 4. 1 調達プロセス （添付資料「3. 6. 1 供給者の技術的評価」、「3. 6. 2 供給者の選定」及び「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」参照）	・ 供給者の評価記録
設備の詳細設計	設計開発の検証	供給者の設計 ↓ 詳細設計図書	—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、調達要求事項を確実にするため、供給者から提出される「品質保証計画書」及び「試験・検査要領書（工場）」について、審査・承認する。		・ 品質保証計画書 ・ 試験・検査要領書(工場)
						工事を主管する箇所の長は、供給者の詳細設計の結果を「納入図」として提出させ、「コメント処理票」により審査・承認し、「最終図」を提出させる。		・ 納入図 ・ コメント処理票 ・ 最終図
工事及び検査	設計開発の妥当性確認 (工場での試験・検査)	製 作	—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、承認した「試験・検査要領書（工場）」に基づき、供給者が実施する試験・検査について、その結果を立会い又は記録確認により確認する。	・ 7. 3. 5 設計開発の検証 ・ 7. 3. 6 設計開発の妥当性確認 （「添付-4 当社における設計管理・調達管理について」参照）	・ 試験・検査成績書(工場)
	設計開発の検証	現地作業 関連図書				工事を主管する箇所の長は、調達要求事項を確実にするため、供給者から提出される「作業要領書」及び「試験・検査要領書（現地）」について、審査・承認する。		・ 作業要領書 ・ 試験・検査要領書(現地)
	設計開発の妥当性確認 (現地での試験・検査)	現地据付工事				工事を主管する箇所の長は、承認した「作業要領書」に基づき、現地据付工事の作業管理を実施する。 工事を主管する箇所の長は、承認した「試験・検査要領書（現地）」に基づき、供給者が実施する試験・検査について、その結果を立会い又は記録確認により確認する。		・ 工事記録 ・ 試験・検査成績書(現地)

第2表 調達管理に係る業務フロー（標準的な業務フロー（1））

管理の段階	設計、工事及び検査の業務フロー		組織内外の部門間の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実施内容	保安規定品質マネジメントシステム計画等 （記載項目）	証拠書類
	当 社	供給者	本 店	伊 方 発 電 所	供 給 者			
計 画	工事の計画		◎	○	—	設計を主管する箇所の長は、工事内容、工事時期、官庁手続き、工事に関与する組織間のインターフェイス及び明確な責任を割り当てた業務分担（体制）等を明確にした「工事計画説明書」を作成し、工事を計画する。	・7.4.1 調達プロセス ・7.4.2 調達要求事項 （添付資料「3.6.1 供給者の技術的評価」、「3.6.2 供給者の選定」及び「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」参照）	・工事計画説明書
発注仕様書作成	発注仕様書作成		◎	○	—	設計を主管する箇所の長は、調達要求事項を明確にした「発注仕様書」を作成し、審査・承認する。		・発注仕様書
発 注	供給者の評価・選定・発注		◎	—	○	設計を主管する箇所の長は、供給者が当社の要求事項に従って調達物品等を供給する技術的な能力を判断するための根拠として、「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」の表-2 調達管理程度表を踏まえて、供給者の技術的評価を実施し、発注手続きを行い、資材部へ供給者の選定を依頼する。 資材部門は、全社規定である「資材調達業務要領」に基づき、供給者の選定（契約業務を含む。）を実施する。		・供給者の評価記録
設備の詳細設計		供給者の設計	—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、調達要求事項を確実にするため、供給者から提出される「品質保証計画書」及び「試験・検査要領書（工場）」について、審査・承認する。 工事を主管する箇所の長は、供給者の詳細設計の結果を「納入図」として提出させ、「コメント処理票」により審査・承認し、「最終図」を提出させる。	・7.4.3調達物品等の検証 （添付資料「3.6.3 調達物品等の調達管理」参照）	・品質保証計画書 ・試験・検査要領書(工場) ・納入図 ・コメント処理票 ・最終図
工事及び検査	調達物品等の検証 (工場での試験・検査)	製作	—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、承認した「試験・検査要領書（工場）」に基づき、供給者が実施する試験・検査について、その結果を立会い又は記録確認により確認する。		・試験・検査成績書(工場)
	調達物品等の検証	現地作業 関連図書	—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、調達要求事項を確実にするため、供給者から提出される「作業要領書」及び「試験・検査要領書（現地）」について、審査・承認する。		・作業要領書 ・試験・検査要領書(現地)
	調達物品等の検証 (現地での試験・検査)	現地据付工事	—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、承認した「作業要領書」に基づき、現地据付工事の作業管理を実施する。 工事を主管する箇所の長は、承認した「試験・検査要領書（現地）」に基づき、供給者が実施する試験・検査について、その結果を立会い又は記録確認により確認する。		・工事記録 ・試験・検査成績書(現地)

第3表 調達管理に係る業務フロー（標準的な業務フロー（2））

管理の段階	設計、工事及び検査の業務フロー		組織内外の部門間の相互関係 ◎:主担当 ○:関連			実施内容	保安規定品質マネジメント システム計画等 (記載項目)	証拠書類
	当 社	供給者	本店	伊方発電所	供給者			
計画	工事の計画		◎	○	—	設計を主管する箇所の長は、工事内容、工事時期、官庁手続き、工事に関与する組織間のインターフェイス及び明確な責任を割り当てた業務分担（体制）等を明確にした「工事計画説明書」を作成し、工事を計画する。	・ 7. 4. 1 調達プロセス ・ 7. 4. 2 調達要求事項 (添付資料「3. 6. 1 供給者の技術的評価」、「3. 6. 2 供給者の選定」及び「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」参照)	・ 工事計画説明書
発注仕様書作成	発注仕様書作成		◎	○	—	設計を主管する箇所の長は、調達要求事項を明確にした「発注仕様書」を作成し、審査・承認する。		・ 発注仕様書
発注	供給者の評価・選定・発注		◎	—	○	設計を主管する箇所の長は、供給者が当社の要求事項に従って調達物品等を供給する技術的な能力を判断するための根拠として、「添付-1 当社におけるグレード分けの考え方」の表-2 調達管理程度表を踏まえて、供給者の技術的評価を実施し、発注手続きを行い、資材部へ供給者の選定を依頼する。 資材部門は、全社規定である「資材調達業務要領」に基づき、供給者の選定（契約業務を含む。）を実施する。		・ 供給者の評価記録
工事及び検査	調達物品等の検証		—	◎	◎	工事を主管する箇所の長は、供給者から提出が必要な「検査成績書」等の資料が全て提出されていることを確認し、調達物品等の受入検査を実施する。	・ 7. 4. 3 調達物品等の検証 (添付資料「3. 6. 3 調達物品等の調達管理」参照)	・ 検査成績書

本設工認に係る設計の実績、工事及び検査の計画

設計及び工事計画認可申請 資料17-2

伊 方 発 電 所 第 3 号 機

目 次

	頁
1. 概要	資17-2-1
2. 基本方針	資17-2-1
3. 設計及び工事に係るプロセスとその実績又は計画	資17-2-1

1. 概要

本資料は、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に基づく設計に係るプロセスの実績、工事及び検査に係るプロセスの計画について説明するものである。

2. 基本方針

本設計及び工事計画の設計に係るプロセスとその実績について、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書」に示した設計の段階ごとに、組織内外の部門関係、進捗実績及び具体的な活動実績について説明する。

工事及び検査に関する計画として、組織内外関係、進捗実績及び具体的な活動計画について説明する。

適合性確認対象設備ごとの調達に係る管理のグレードと実績について説明する。

3. 設計及び工事に係るプロセスとその実績又は計画

「設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書」に基づき実施した、本設計及び工事計画の設計の実績、工事及び検査の計画について、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書」の様式-1により示す。

また、適合性確認対象設備ごとの調達に係る管理のグレードと実績について、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書」の様式-8により示す。

設工認に係る設計の実績、工事及び検査の計画

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.1	適合性確認対象設備に対する 要求事項の明確化	◎	—	—	○	設置変更許可申請書、設置許可基準規則、技術基準規則	様式-2（主条文）	
	3.3.2	各条文の対応に必要な適合性 確認対象設備の選定	◎	—	—	○	技術基準規則、 様式-2（主条文）	様式-2	
							設置変更許可申請書、設置許可基準規則、様式-2	様式-3	
	3.3.3(1)	基本設計方針の作成（設計1）	◎	—	—	○	様式-2、3、技術基準規則、実用炉規則別表第二	様式-4	
							設置変更許可申請書、設置許可基準規則、技術基準規則、実用炉規則別表第二	様式-5、6	
	3.3.3(2)	適合性確認対象設備の各条文への適合性を確保するための設計（設計2）	◎	—	—	○	様式-4、6	設計資料	詳細を以下に示す。

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)	要目表							
		核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（要目表）	
		放射線管理施設	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（要目表）	
		火災防護設備	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（要目表）	
		資料2 発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、品質記録（既工事計画、委託報告書）、調達図書（委託報告書）	設計資料（発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書）	
		資料 3 設備別記載事項の設定根拠に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（設備別記載事項の設定根拠に関する説明書）	

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)	資料 4 安全設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（安全設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書）	
		資料 5 発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、品質記録（既工事計画）、調達図書（委託報告書）	設計資料（発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書）	
		資料 6 発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	◎	—	—	○	様式-4、6（基本設計方針）、品質記録（既工事計画）	設計資料（発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書）	
		資料 7 安全避難通路に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（安全避難通路に関する説明書）	

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)	資料 8 非常用照明に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（非常用照明に関する説明書）	
		資料 9 耐震性に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、品質記録（既工事計画）、調達図書（委託報告書）	設計資料（耐震性に関する説明書）	
		資料 10 強度に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、品質記録（既工事計画）、調達図書（委託報告書）	設計資料（強度に関する説明書）	
		資料 11 使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書）	

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)	資料 12 使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書）	
		資料 13 使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明書）	
		資料 14 使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽材の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書）	
		資料 15 外運搬規則第二十一条第二項の規定による容器の設計に関する原子力規制委員会の承認を受けたことに関する説明書	◎	—	—	○	様式-4、6（基本設計方針）、品質記録（核燃料輸送物設計承認書）	設計資料（外運搬規則第二十一条第二項の規定による容器の設計に関する原子力規制委員会の承認を受けたことに関する説明書）	

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)	資料 16 生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（生体遮蔽装置の放射線の遮蔽及び熱除去についての計算書）	
		添付図面							
		主要設備の配置の状況を明示した平面図及び断面図	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（主要設備の配置の状況を明示した平面図及び断面図）	
		安全避難通路を明示した図面	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（安全避難通路を明示した図面）	
		非常用照明の取付箇所を明示した図面	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（非常用照明の取付箇所を明示した図面）	
		核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設に係る機器の配置を明示した図面	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設に係る機器の配置を明示した図面）	

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2		組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
				本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)		核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造図	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造図）	
			使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の検出器の取付箇所を明示した図面	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の検出器の取付箇所を明示した図面）	
			放射線管理施設に係る機器の配置を明示した図面	◎	—	—	○	様式-4、6（基本設計方針）	設計資料（放射線管理施設に係る機器の配置を明示した図面）	
			放射線管理施設の構造図	◎	—	—	○	様式-4、6（基本設計方針）	設計資料（放射線管理施設の構造図）	
			火災防護設備に係る機器の配置を明示した図面及び構造図	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（火災防護設備に係る機器の配置を明示した図面及び構造図）	

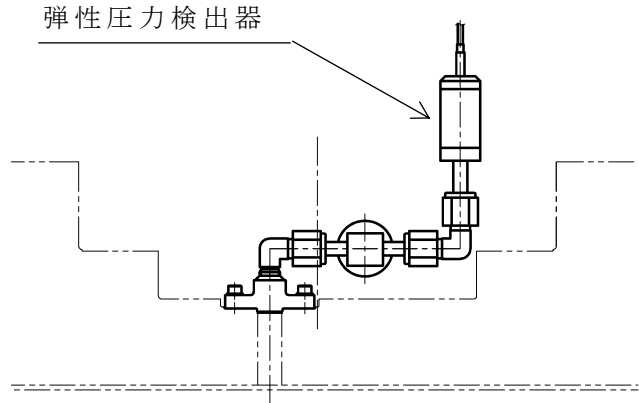
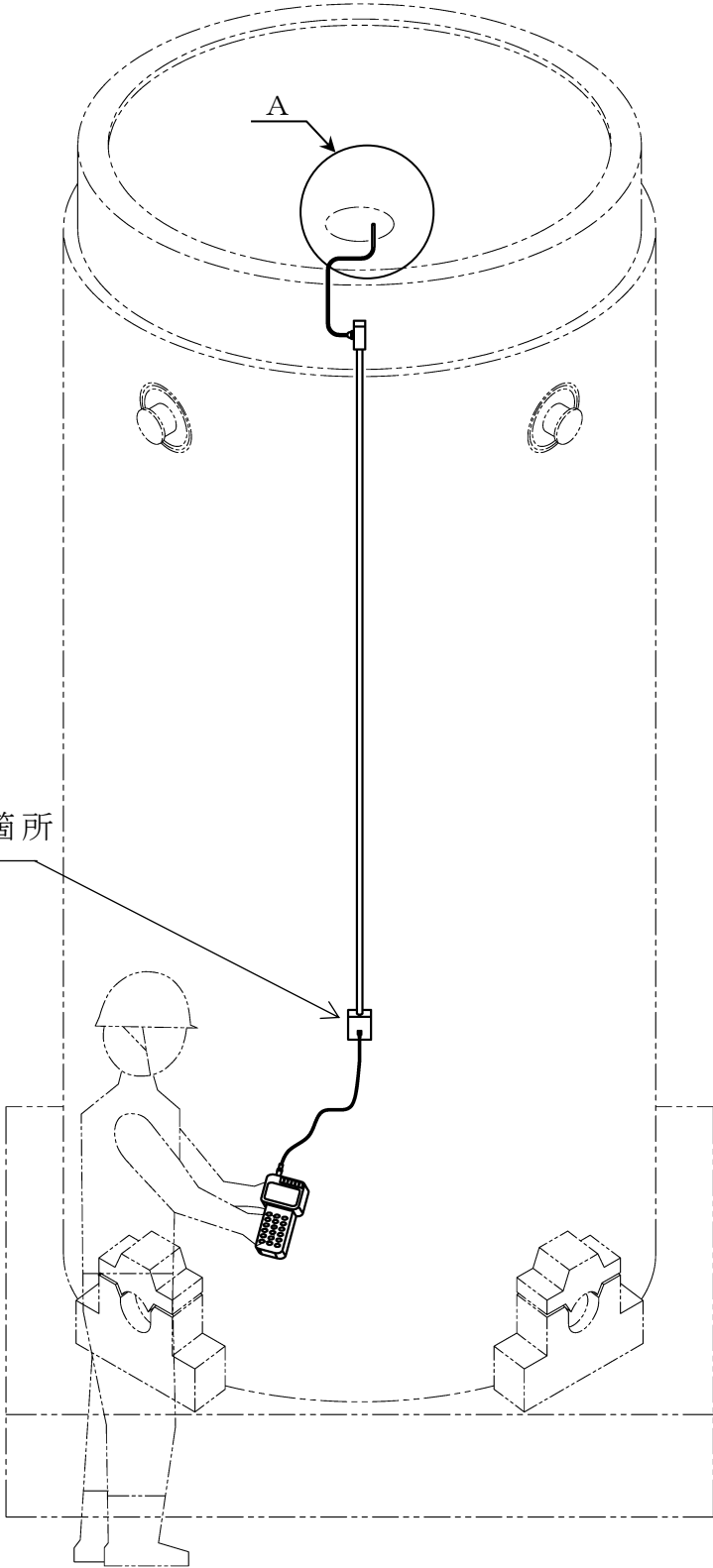
各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2		組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
				本店	発電所	供給者				
設計	3.3.3(2)		火災防護設備に係る主配管の配置を明示した図面	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（火災防護設備に係る主配管の配置を明示した図面）	
			火災防護設備の系統図	◎	—	○	○	様式-4、6（基本設計方針）、調達図書（委託報告書）	設計資料（火災防護設備の系統図）	
	3.3.3(3)	設工認の作成		◎	—	—	○	様式-4、6（基本設計方針）、設計資料	設工認申請書案	
	3.3.3(4)	設計のアウトプットに対する検証		◎	○	—	○	設工認申請書案	伊方発電所安全運営委員会議事録（レビューの記録）、設工認確認チェックシート（検証の記録）	
	3.3.3(5)	設工認の承認		◎	○	—	○	設工認申請書案	設工認申請書、決定書	

各段階		プロセス（設計対象） 実績：3.3.1～3.3.3(5) 計画：3.4.1～3.7.2	組織内外の相互関係 ◎：主担当 ○：関連			実績 (○) ／ 計画 (△)	インプット	アウトプット	備考
			本店	発電所	供給者				
工事及び検査	3.4.1	設工認に基づく具体的な設備の設計の実施（設計3）	◎	◎	○	△	基本設計方針、設計資料	調達図書	
	3.4.2	具体的な設備の設計に基づく工事の実施	◎	◎	○	△	調達図書	工事記録	
	3.5.2	設計の結果と使用前事業者検査対象の繋がり の明確化	○	◎	—	△	設工認申請書	様式-7（左欄、中欄）	
	3.5.3	使用前事業者検査の計画	○	◎	—	△	様式-7（左欄、中欄）	様式-7（右欄）	
	3.5.4	検査計画の管理	○	◎	○	△	様式-7（右欄）	使用前事業者検査工程表	
	3.5.5	主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査の管理	—	◎	○	△	様式-7（右欄）	使用前事業者検査工程表	
	3.5.6	使用前事業者検査の実施	○	◎	○	△	様式-7	検査記録	様式-7 に従い検査要領書を作成し、使用前事業者検査を実施
	3.7.2	識別管理及びトレーサビリティ	◎	◎	○	△	—	工事記録、検査記録	

適合性確認対象設備ごとの調達に係るグレード分け及び実績（設備関係）

施設区分／設備区分／機器区分			名 称		グレードの区分			業務区分		備 考
					品質重要度分類			用 業 務 画 → 7 ・ 3 設 計 開 発 の 適	保 安 規 定 品 質 マ ネ ジ メ ン ト シ ス テ の 適	
核燃料物質の取扱施設及び	使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料貯蔵用容器	使用済燃料乾式貯蔵容器 (タイプ1) (1, 2, 3号機共用)		－	○	－	○	－	
			使用済燃料乾式貯蔵容器 (タイプ2)		－	○	－	○	－	
		使用済燃料貯蔵用容器の 密封性を監視する装置	使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力計		－	－	○	○	－	
放射線管理施設	生体遮蔽装置	生体遮蔽装置	補助遮蔽	貯蔵エリア (1, 2, 3号機 共用)	－	－	○	○	－	
				取扱エリア (1, 2, 3号機 共用)	－	－	○	○	－	
火災防護設備	火災区域 画構造物及び	－	使用済燃料乾式貯蔵建屋		－	－	○	○	－	
	消火設備	主配管	重油タンク周辺消火水供給 ライン分岐点 (1, 2, 3号機共用) ～ 使用済燃料乾式貯蔵建屋 消火水供給ライン第一分岐点 (1, 2, 3号機共用)		－	－	○	○	－	

可搬型設備（データロガー）取付箇所



A 部 詳 細

主 要 目 表		
計 器 の 種 類	弾性圧力検出器	
計 測 範 囲	-0.10～0.40 MPa	
取 付 箇 所	保管場所（注1）： 使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL.25.3m	
	取付箇所（注1）： 〔各使用済燃料乾式貯蔵容器 1 個 使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL.25.3m〕	
	系 統 名 （ ラ イ ン 名 ）	使用済燃料乾式貯蔵容器 の二次蓋
	設 置 床	使用済燃料乾式貯蔵建屋 EL.25.3m
	溢 水 防 護 上 の 区 画 番 号	—
	溢 水 防 護 上 の 配 慮 が 必 要 な 高 さ	—
個数(1 基あたり)	1（注2）	

（注1）本設備は可搬型設備（データロガー）を含むため可搬型設備の保管場所及び取付箇所について記載する。

（注2）各使用済燃料乾式貯蔵容器に対する常設設備の個数を示しており、可搬型設備（データロガー）の個数については使用済燃料乾式貯蔵容器共通で1個とする。

設計及び工事計画認可申請	第2-2-3 図
伊 方 発 電 所 第 3 号 機	
核燃料物質の取扱施設及び 貯蔵施設の構造図 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力計	
四 国 電 力 株 式 会 社	