

6.2 荷重条件の選定

荷重条件は4.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以下の通りである。

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MSF-24P(S)型の設計質量を用いる。）、吊上げ荷重及びその他の付加荷重をいう。

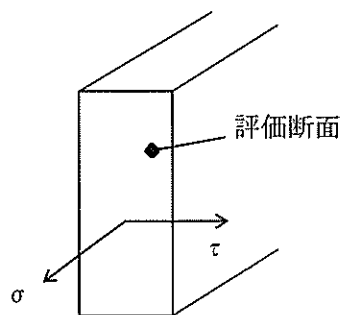
(2) 応力評価位置は、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。評価位置は第5-1図に示す。応力評価は、この応力評価位置について行う。

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



バスケットの応力評価は、使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号：T-DPC17001)を受けた応力評価と同様に、以下の項目を評価する。

[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： $\tau \leq 0.6S$
- ・圧縮応力： $\sigma_c \leq f_c \left(= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu} \right)$

[供用状態 A (吊上げ時)]

- ・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： $\tau \leq 0.6S_m$
- ・圧縮応力： $\sigma_c \leq f_c \left(= \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu} \right)$

ここで、

F : MIN[0.7S_w, S_v]により定まる値

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

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

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6-2表に示す。この値は、添付書類12「特定兼用キャスクが使用される条件の下における健全性に関する説明書」別紙1に記載するアルミニウム合金の材料特性から算出した値である。

さらに、第6-2表に示す機械的強度から求められる許容基準を第6-3表に示す。

第6-1表 許容応力値を定める温度

部 位	許容応力値を定める温度(°C)
	貯蔵時 ^(注1) 吊上げ時
バスケット	□

(注1)貯蔵時及び吊上げ時の許容応力値を定める温度は、添付書類9「特定兼用
キャスク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。

第6-2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 (°C)	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)	□	16	36	56	113

第 6-3 表 許容応力値

(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	16	S
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ	$P_m + P_b$	16	$K_0 S$ (注 1)
	せん断応力	τ	9	0.6S
	圧縮応力	σ_c	37	f_c
供用状態 A (吊上げ時)	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	$P_m + P_b$	43	αS_m (注 2)
	せん断応力	τ	21	0.6 S_m
	圧縮応力	σ_c	37	f_c

(注 1) $K_0 = 1$

(注 2) $\alpha = 1.2$

添付書類 5-3-2-3 トラニオンの強度計算方法

本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	1
3. 記号の説明	2
4. 設計条件	5
4.1 基本仕様	5
4.2 設計事象	5
4.3 荷重の種類とその組合せ	6
5. 計算条件	7
5.1 解析対象とする事象	7
5.2 解析箇所	8
5.3 形状及び寸法	10
5.4 物性値	10
6. 応力解析の手順	11
6.1 応力計算の概要	11
6.2 荷重条件の選定	12
6.3 応力計算と評価	12

1. 概要

本資料は、添付書類5-3-1「特定兼用キャスクの強度計算の基本方針」に基づき、MSF-24P(S)型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、添付書類5-3-1「特定兼用キャスクの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
A_6	mm^2	評価位置⑥の断面積
a_1	mm	重心から上部トラニオンに作用する荷重の作用点までの距離
a_2	mm	重心から胴上部固縛位置までの距離
b	mm	重心から下部トラニオンに作用する荷重の作用点までの距離
d_3	mm	上部トラニオン嵌め込み部の外径
d_7	mm	下部トラニオン嵌め込み部の外径
d_{31}	mm	上部トラニオン接続部（トラニオン側）の外径
d_{32}	mm	上部トラニオンの外輪(穴)内径
d_{33}	mm	上部トラニオンの外輪(穴)外径
d_{71}	mm	下部トラニオン接続部（トラニオン側）の外径
d_{72}	mm	下部トラニオンの外輪(穴)内径
d_{73}	mm	下部トラニオンの外輪(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_L	N	下部トラニオンに作用する荷重
F_U	N	上部トラニオンに作用する荷重
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
g	m/s^2	重力加速度
G_1	-	鉛直方向加速度係数（貯蔵時）

記号	単位	定義
G_2	-	鉛直方向加速度係数（吊上げ時）
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_{11}	mm	評価位置①と荷重作用位置との距離
L_{12}	mm	評価位置①と荷重作用位置との距離
L_{21}	mm	評価位置②と荷重作用位置との距離
L_{22}	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_{42}	mm	評価位置④と荷重作用位置との距離
L_{51}	mm	評価位置⑤と荷重作用位置との距離
L_{52}	mm	評価位置⑤と荷重作用位置との距離
L_{61}	mm	評価位置⑥と荷重作用位置との距離
L_{62}	mm	評価位置⑥と荷重作用位置との距離
L_7	mm	0点から反力 R_{72} の作用点までの距離
m	kg	貯蔵時及び吊上げ時における MSF-24P(S) 型の質量
M_L	N・mm	下部トラニオンの曲げモーメント
M_U	N・mm	上部トラニオンの曲げモーメント
N_a	-	許容繰返し回数
N_c	-	実際の繰返し回数
P_3	MPa	上部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力
P_7	MPa	下部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力
P_{3i}	MPa	状態 i での上部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力
P_{7i}	MPa	状態 i での下部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力
R_{31}	N	上部トラニオンに作用する反力
R_{32}	N	上部トラニオンに作用する反力
R_{71}	N	下部トラニオンに作用する反力
R_{72}	N	下部トラニオンに作用する反力
S	MPa	応力強さの変動
S_3	MPa	上部トラニオンの支圧応力
S_7	MPa	下部トラニオンの支圧応力
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

記号	単位	定義
T_0	°C	初期温度 (=20°C)
T_{1i}	°C	状態 i のトラニオンの温度
T_{2i}	°C	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
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
Z_6	mm ³	評価位置⑥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 の上部トラニオンのしまり嵌め比
α_{7i}	-	状態 i の下部トラニオンのしまり嵌め比
α_3	-	上部トラニオンのしまり嵌め比
α_7	-	下部トラニオンのしまり嵌め比
δ_3	mm	上部トラニオンの外輪(穴)と軸の初期しめ代 (直径差)
δ_7	mm	下部トラニオンの外輪(穴)と軸の初期しめ代 (直径差)
δ_{3i}	mm	上部トラニオン接続部のしめ代 (直径差)
δ_{7i}	mm	下部トラニオン接続部のしめ代 (直径差)
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_{71}	MPa	評価位置⑦の反力 R_{71} による応力
σ_{72}	MPa	評価位置⑦の反力 R_{72} による応力
σ_b	MPa	曲げ応力
σ_{bL}	MPa	下部トラニオンの曲げ応力
σ_{bU}	MPa	上部トラニオンの曲げ応力
σ_{TL}	MPa	下部トラニオンの組合せ応力
σ_{TU}	MPa	上部トラニオンの組合せ応力
τ	MPa	せん断応力
τ_L	MPa	下部トラニオンのせん断応力
τ_U	MPa	上部トラニオンのせん断応力

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

材質	トラニオン	SUS630
----	-------	--------

4.2 設計事象

添付書類 5-3-2-1 「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、貯蔵施設内における選定事象について、各選定事象を金属キャスク構造規格 解説 MGB-1300及び解説表MGA-2200-1を参考に、設計事象及び供用状態に分類した結果を第4-2表に示す。

第 4-2 表 貯蔵施設内における選定事象

設計事象	供用状態	貯蔵施設内における選定事象
I	A	<ul style="list-style-type: none">・貯蔵（貯蔵時）・MSF-24P(S)型の水平吊上げ、水平吊下げ、水平移動（吊上げ時）・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）

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-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選定した結果を第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は強度計算書に記載する。

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。

(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で示した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選定した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	包絡される事象	荷重条件	備考
I	A	貯蔵時	・準備作業時	<ul style="list-style-type: none"> ・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である。また、準備作業時の荷重条件等は貯蔵時と同じである。
		吊上げ時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・吊上げ荷重^(注1) ・熱荷重 	—

(注1) MSF-24P(S)型に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、添付書類5-3-2-1「密封容器の強度計算方法」に示す。

5.2 解析箇所

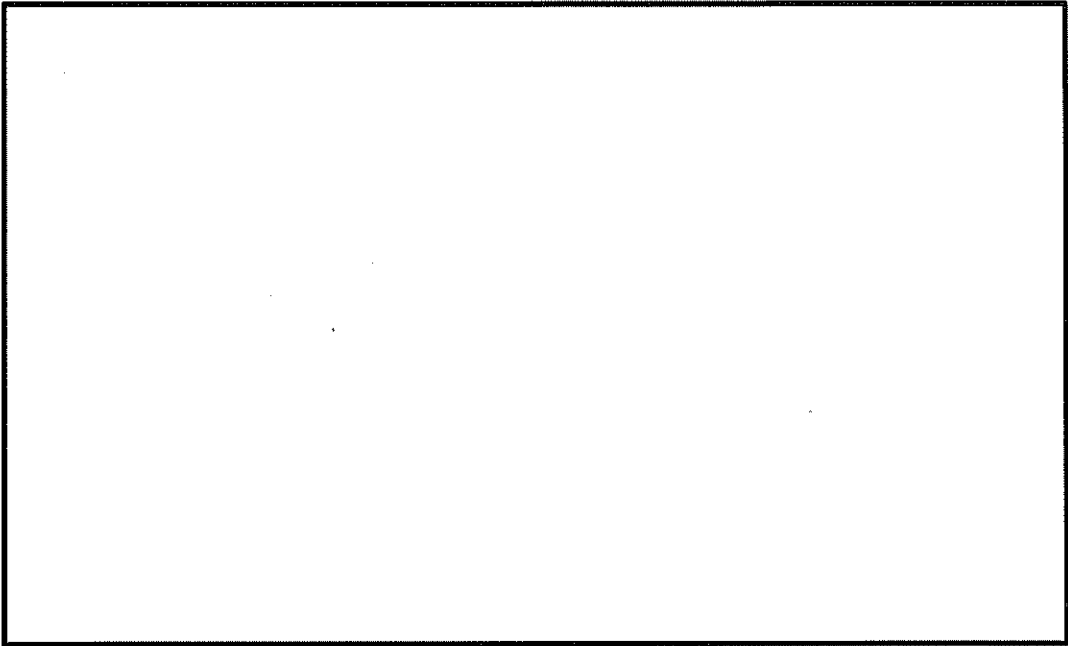
トラニオンの応力評価を行う箇所は、次のとおりである。応力評価箇所を第5-1図及び第5-2図に示す。

(1) 上部トラニオン

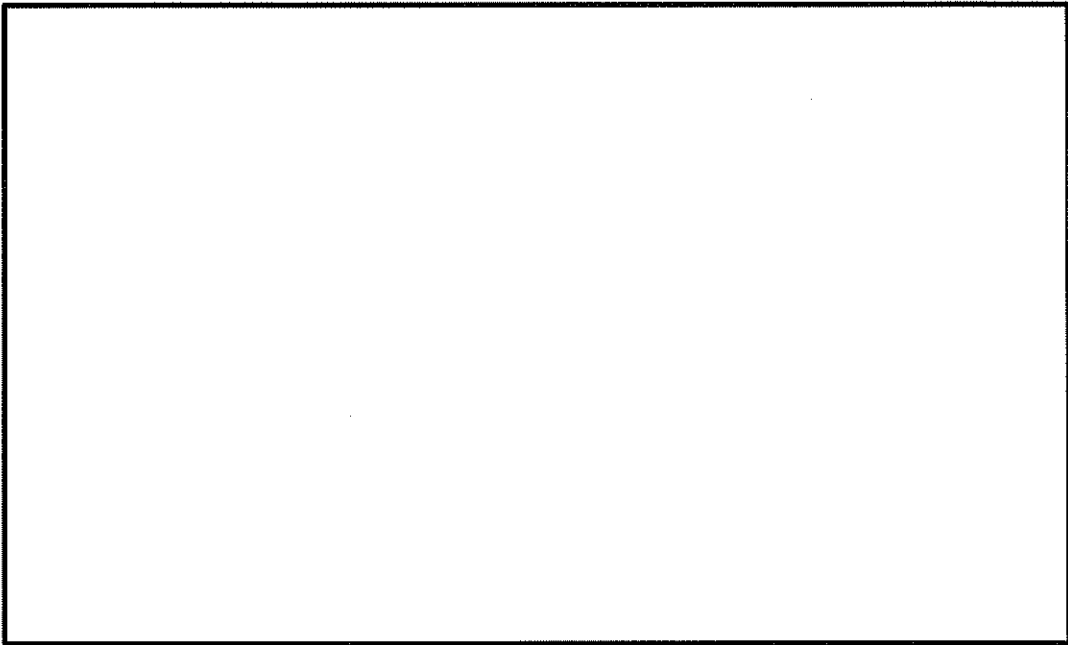
- ・トラニオン段付き部
- ・トラニオン接続部

(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 上部トラニオンの評価位置



第5-2図 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。

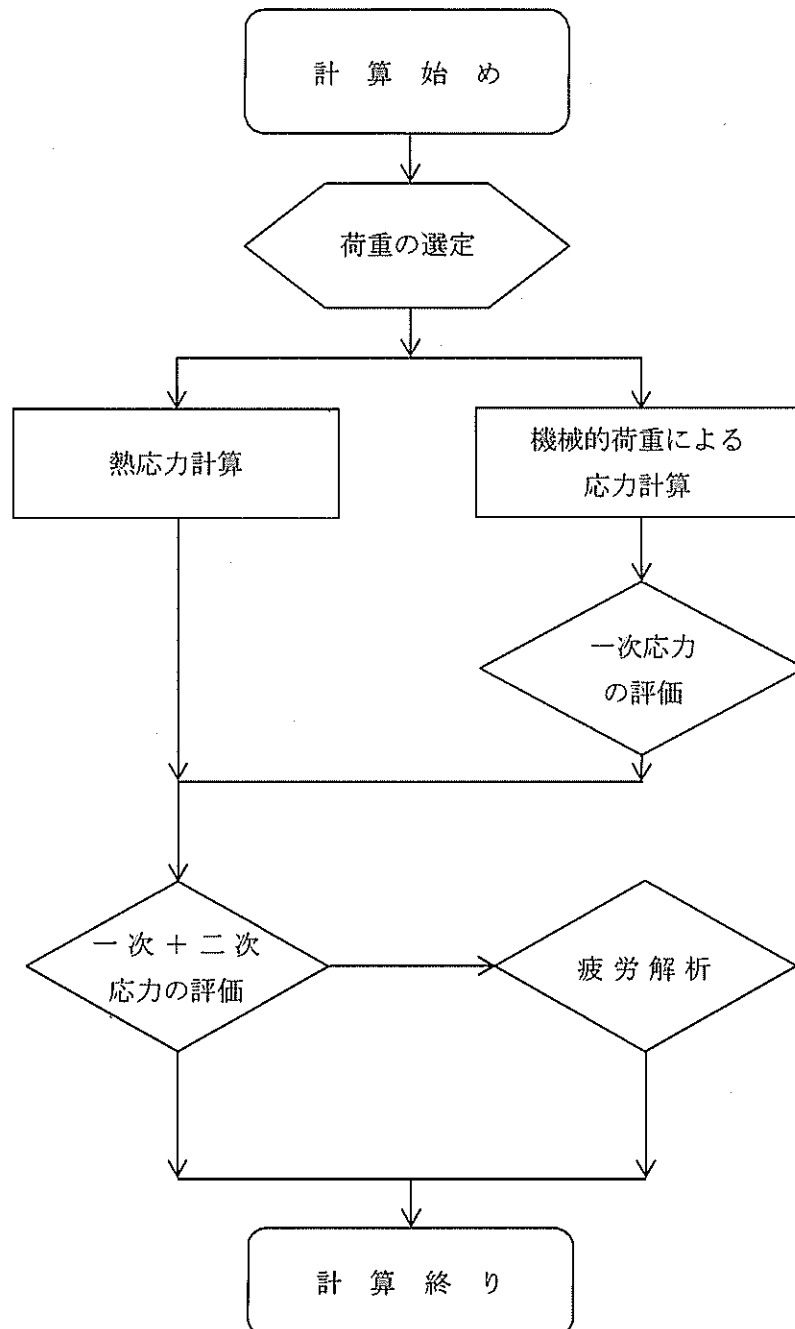
第 5-2 表 応力計算に使用する材料の物性値

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 \cdot °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		11.20	
		50			
		75	191000	11.30	
		100		11.40	
		125		11.40	
		150	188000	11.50	
		175		11.60	
		200		11.60	
胴	炭素鋼	20	202000	11.50	0.3
		25		11.80	
		50			
		75	198000	11.90	
		100		12.10	
		125		12.30	
		150	195000	12.40	
		175		12.60	
		200		12.70	

6. 応力解析の手順

6.1 応力計算の概要

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.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以下の通りである。

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MSF-24P(S)型の設計質量を用いる。）、吊上げ荷重及びその他の付加荷重をいう。

b. 熱荷重

(2) 貯蔵時は、上部トラニオン2個及び下部トラニオン2個を用いて固縛する。また、吊上げ時は、上部トラニオン2個及び下部トラニオン2個を用いて吊上げる。荷重作用位置は、荷重支持面の中央部とする。

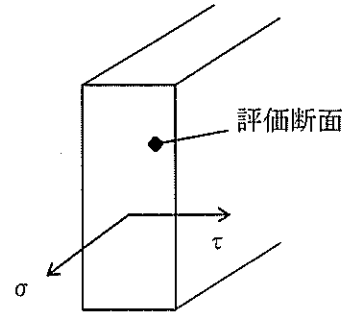
(3) 応力評価位置は、構造及び材料の不連続性及び代表性を考慮して設定する。評価位置は強度計算書に示す。応力評価は、この応力評価位置について行う。

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



トランシオンの応力評価は、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) $\leq f_b (=f_t)$
- ・支圧応力 (一次) $\leq f_p (=1.25F)$
- ・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

トランニオンの許容基準は、6.3.2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6-2表に示す。

さらに、第6-2表に示す機械的強度から求められる許容応力を第6-3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 JSME S NJ1-2012」による。

第6-1表 許容応力値を定める温度

部 位	許容応力値を定める温度(°C)	
	貯蔵時 ^(注1)	吊上げ時
上部トラニオン 下部トラニオン	□	
胴		

(注1) 貯蔵時及び吊上げ時の許容応力値を定める温度は、添付書類9「特定兼用キャスク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。

第6-2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 (°C)	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)	□	647	845	591
胴	炭素鋼 □		183	377	183

第 6-3 表 許容応力値

(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	せん断応力 (一次応力)	227	f_s
	曲げ応力 (一次応力)	394	f_b
	支圧応力 (トラニオン側) (一次応力)	738	f_p
	支圧応力 (本体側) (一次応力)	228	f_p
	組合せ応力 (一次応力)	394	f_t
	せん断応力 (一次+二次応力)	682	$3f_s$
	曲げ応力 (一次+二次応力)	1182	$3f_b$
	支圧応力 (トラニオン側) (一次+二次応力)	1108	$1.5f_p$
	支圧応力 (本体側) (一次+二次応力)	343	$1.5f_p$

添付書類 5-3-2-4 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

目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	1
3. 記号の説明	2
4. 設計条件	3
4.1 基本仕様	3
4.2 設計事象	3
4.3 荷重の種類とその組合せ	4
5. 計算条件	5
5.1 解析対象とする事象	5
5.2 解析箇所	6
5.3 形状及び寸法	8
5.4 物性値	8
6. 応力解析の手順	9
6.1 応力計算の概要	9
6.2 荷重条件の選定	11
6.3 応力計算と評価	11

1. 概要

本資料は、添付書類 5—3—1「特定兼用キャスクの強度計算の基本方針」に基づき、MSF-24P(S)型の外筒、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、添付書類 5—3—1「特定兼用キャスクの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

材質	外筒	
	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	

4.2 設計事象

添付書類 5-3-2-1 「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、貯蔵施設内における選定事象について、各選定事象を金属キャスク構造規格 解説 MGB-1300及び解説表 MGA-2200-1を参考に、設計事象及び供用状態に分類した結果を第4-2表に示す。

第 4-2 表 貯蔵施設内における選定事象

設計事象	供用状態	貯蔵施設内における選定事象
I	A	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵（貯蔵時） ・MSF-24P(S)型の水平吊上げ、水平吊下げ、水平移動（吊上げ時） ・貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）

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-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選定した結果を第4-3表に示す。応力評価に用いる荷重は強度計算書に記載する。

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

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	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
I	A (注1)	貯蔵時	○	○	—	—	○
		吊上げ時	○	— (注2)	○	—	○

(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で示した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選定した代表事象について評価を実施する。

第5-1表 代表事象

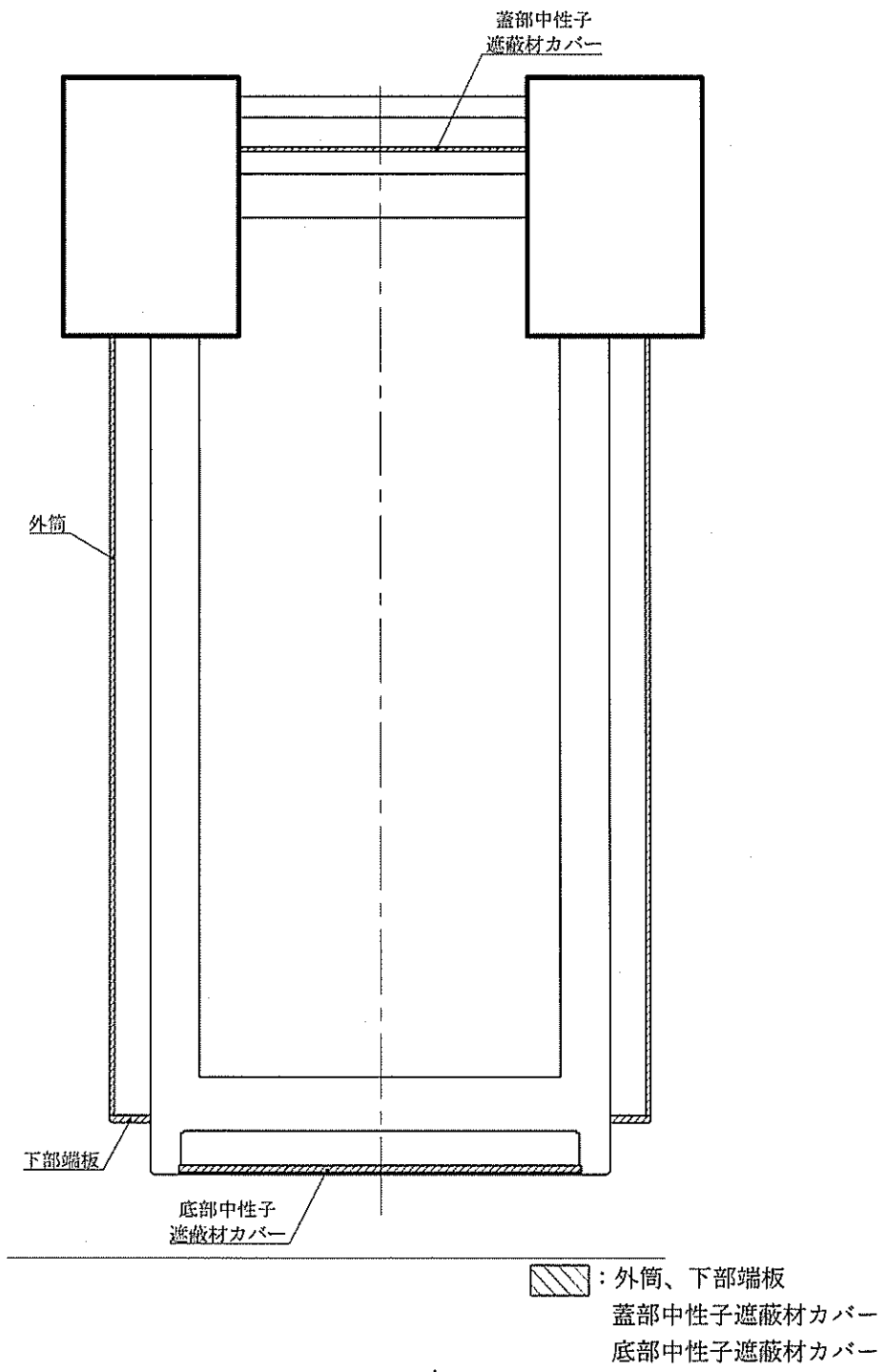
設計事象	供用状態	代表事象	包絡される事象	荷重条件	備考
I	A	貯蔵時	・準備作業時	<ul style="list-style-type: none"> ・蓋間圧力 ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・側部中性子遮蔽材部圧力 ・底部中性子遮蔽材部圧力 ・自重 ・熱荷重 	供用状態Aのうち大半の期間を占める代表的事象である。また、準備作業時の荷重条件等は貯蔵時と同じである。
		吊上げ時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・蓋間圧力 ・蓋部中性子遮蔽材部圧力 ・側部中性子遮蔽材部圧力 ・底部中性子遮蔽材部圧力 ・吊上げ荷重^(注1) ・熱荷重 	—

(注1) MSF-24P(S)型に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、添付書類5-3-2-1「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。

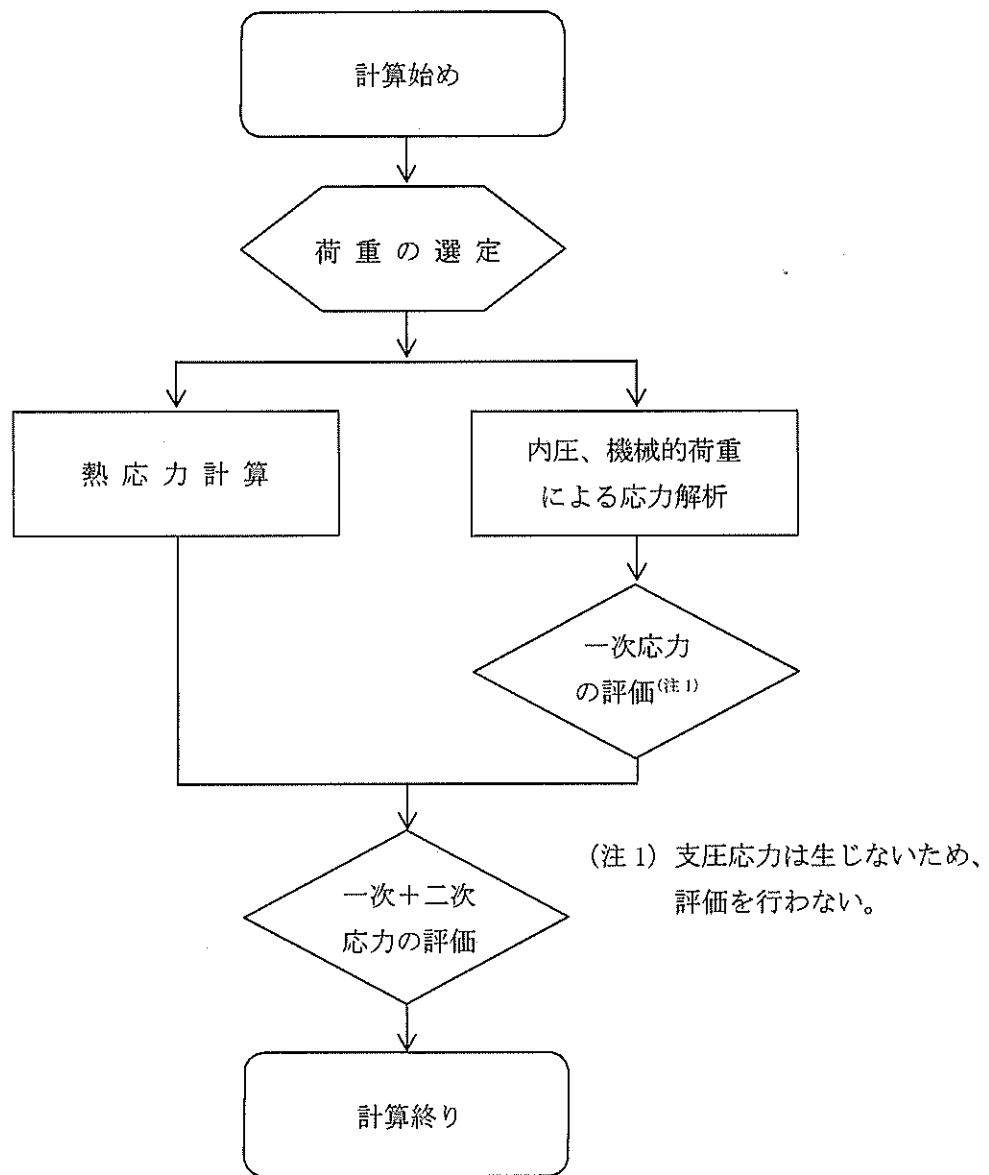
5.4 物性値

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

6. 応力解析の手順

6.1 応力計算の概要

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。



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. 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

応力計算は、添付書類5-3-3-1「密封容器の強度計算書」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。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、底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MSF-24P(S)型の設計質量を用いる。）、吊上げ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等に生じる温度変化、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等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、三次元の360°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。モデル図及び境界条件は強度計算書に示す。

(3) 応力評価位置は、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。応力評価は、この応力評価位置について行う。

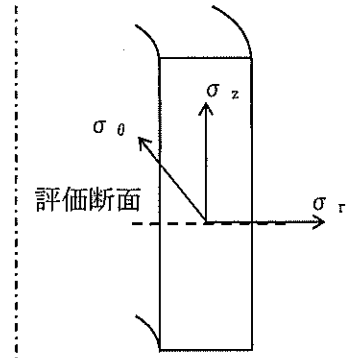
(4) 溶接部については、母材と同等の物性値及び機械的性質を用いる。

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]

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

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]

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

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許容基準は、6.3.2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6-2表に示す。

さらに、第6-2表に示す機械的強度から求められる許容応力を第6-3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 JSME S NJ1-2012」による。

第 6-1 表 許容応力値を定める温度

部 位	許容応力値を定める温度(°C)	
	貯蔵時 ^(注1)	吊上げ時
外筒	□	□
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		

(注1) 貯蔵時の許容応力値を定める温度は、添付書類9「特定兼用キャスク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。

第 6-2 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 (°C)	設計降伏点 S _y (MPa)	設計引張 強さ S _u (MPa)	F (MPa)
外筒	炭素鋼 □	□	234	426	234
下部端板	ステンレス鋼 □		159	429	205
蓋部中性子 遮蔽材カバー	炭素鋼 □		235	427	235
底部中性子 遮蔽材カバー	ステンレス鋼 □		159	429	205

第 6-3 表 許容応力値 (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
供用状態 A	引張応力 (一次応力)	156	f_t
	せん断応力 (一次応力)	90	f_s
	圧縮応力 (一次応力)	156	f_c
	曲げ応力 (一次応力)	156	f_b
	組合せ応力 (一次応力)	156	f_t
	引張及び圧縮応力 (一次+二次応力)	468	$3f_t$
	せん断応力 (一次+二次応力)	270	$3f_s$
	曲げ応力 (一次+二次応力)	468	$3f_b$

第 6-3 表 許容応力値 (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
供用状態 A	引張応力 (一次応力)	136	f_t
	せん断応力 (一次応力)	78	f_s
	圧縮応力 (一次応力)	136	f_c
	曲げ応力 (一次応力)	136	f_b
	組合せ応力 (一次応力)	136	f_t
	引張及び圧縮応力 (一次+二次応力)	410	$3f_t$
	せん断応力 (一次+二次応力)	236	$3f_s$
	曲げ応力 (一次+二次応力)	410	$3f_b$

第 6-3 表 許容応力値 (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
供用状態 A	引張応力 (一次応力)	156	f_t
	せん断応力 (一次応力)	90	f_s
	圧縮応力 (一次応力)	156	f_c
	曲げ応力 (一次応力)	156	f_b
	組合せ応力 (一次応力)	156	f_t
	引張及び圧縮応力 (一次+二次応力)	470	$3f_t$
	せん断応力 (一次+二次応力)	271	$3f_s$
	曲げ応力 (一次+二次応力)	470	$3f_b$

第 6-3 表 許容応力値 (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
供用状態 A	引張応力 (一次応力)	136	f_t
	せん断応力 (一次応力)	78	f_s
	圧縮応力 (一次応力)	136	f_c
	曲げ応力 (一次応力)	136	f_b
	組合せ応力 (一次応力)	136	f_t
	引張及び圧縮応力 (一次+二次応力)	410	$3f_t$
	せん断応力 (一次+二次応力)	236	$3f_s$
	曲げ応力 (一次+二次応力)	410	$3f_b$

添付書類 5 - 3 - 3 特定兼用キャスクの強度計算書

添付書類 5-3-3-1 密封容器の強度計算書

本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

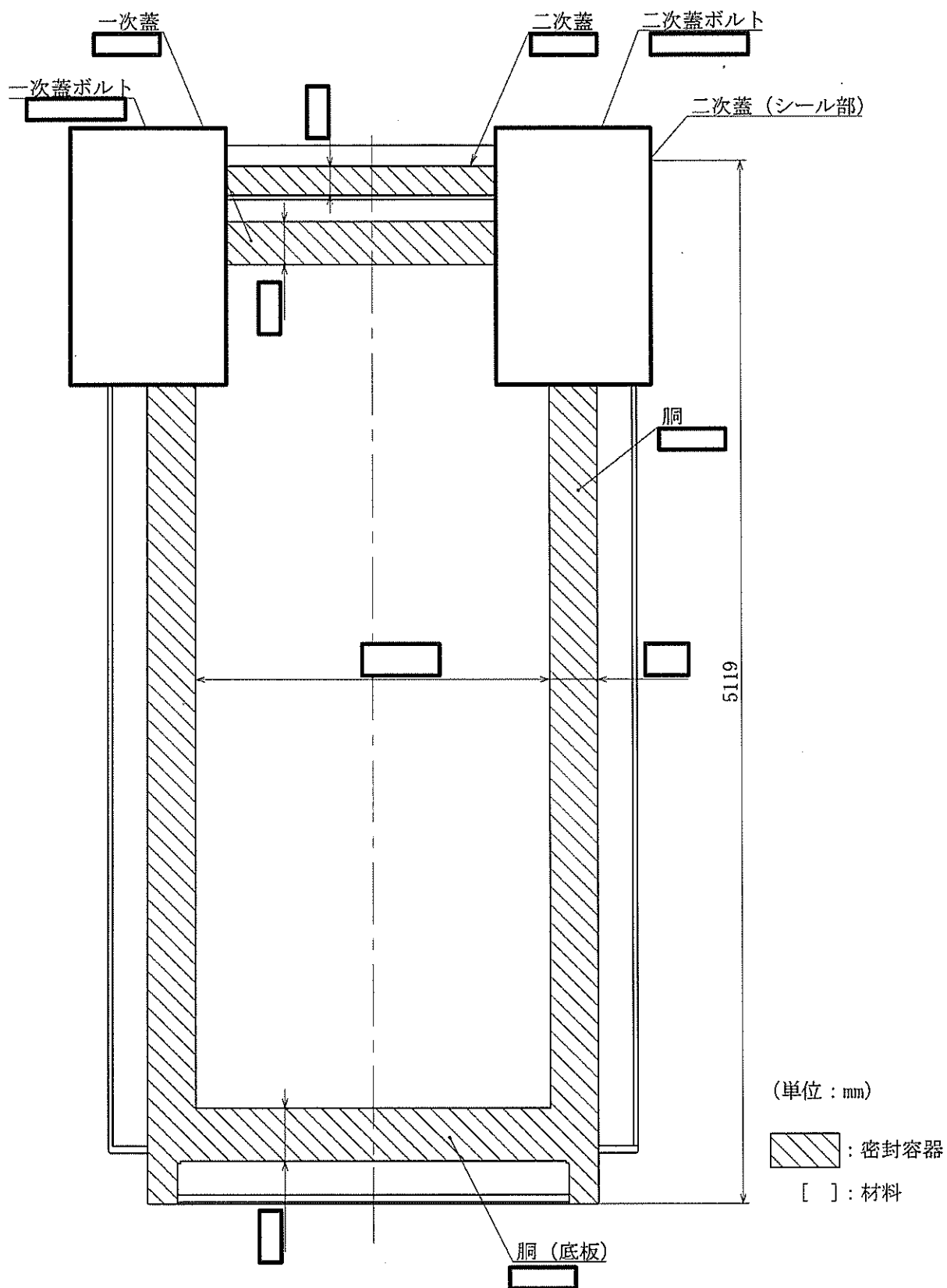
1. 概要	1
2. 形状・寸法・材料	1
3. 応力計算	4
3.1 応力評価位置	4
3.2 設計時	6
3.3 貯蔵時	12
3.4 吊上げ時	20
3.5 試験時	27
4. 繰返し荷重の評価	32
4.1 密封容器（ボルトを除く）の応力評価	32
4.2 ボルトの評価	38
5. 穴の補強	47
6. 外圧の評価	49

1. 概要

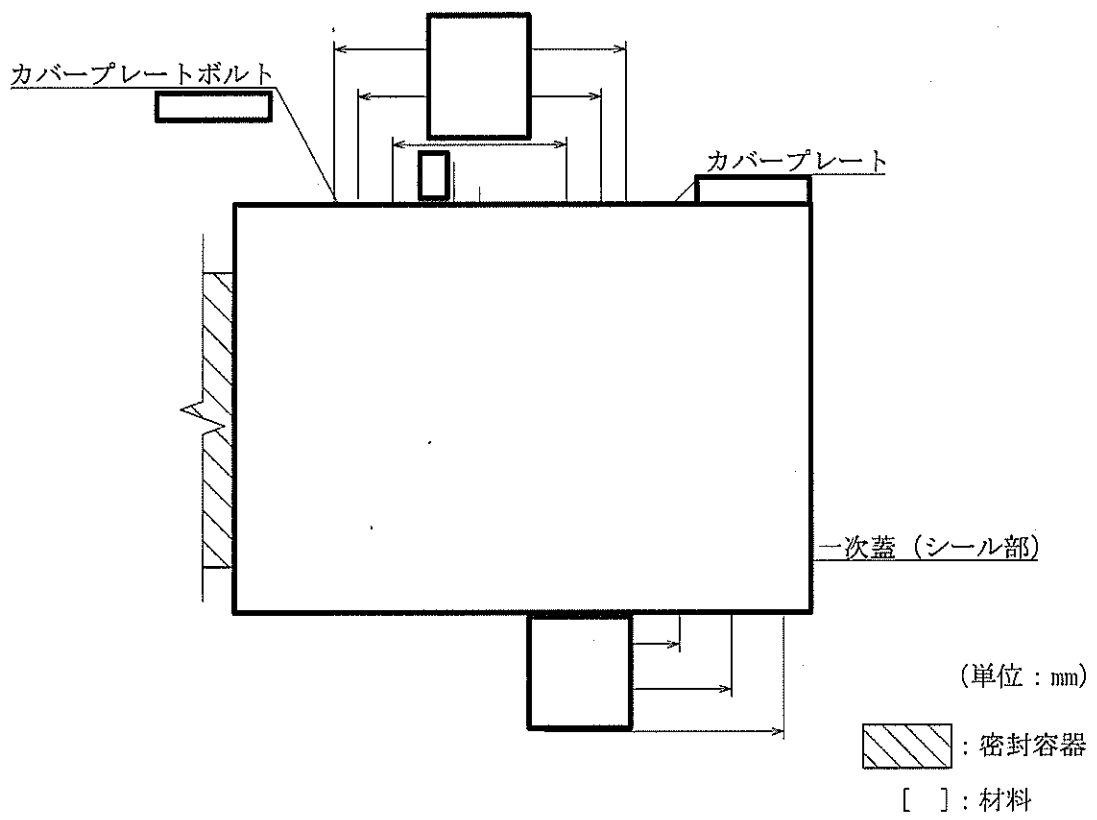
本資料は、添付書類 5-3-2-1 「密封容器の強度計算方法」に基づき、MSF-24P(S)型の密封容器が十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

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 2-1 図に示す。



第2-1図 密封容器の形状・寸法・材料(1/2)

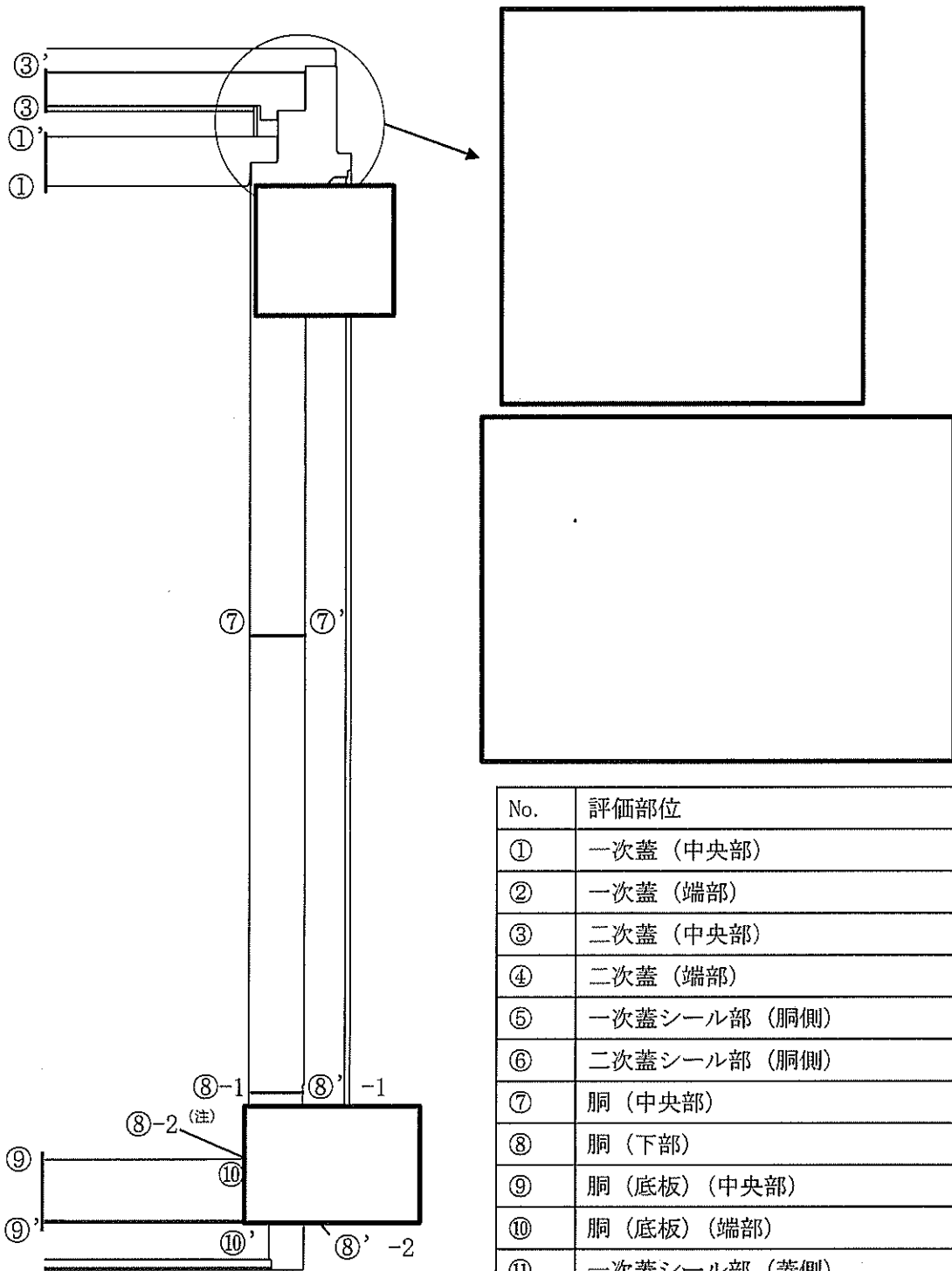


第2-1図 密封容器の形状・寸法・材料(2/2)
(カバープレート部詳細)

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。



(注) 評価断面⑧-2 は下部トランニオンを
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

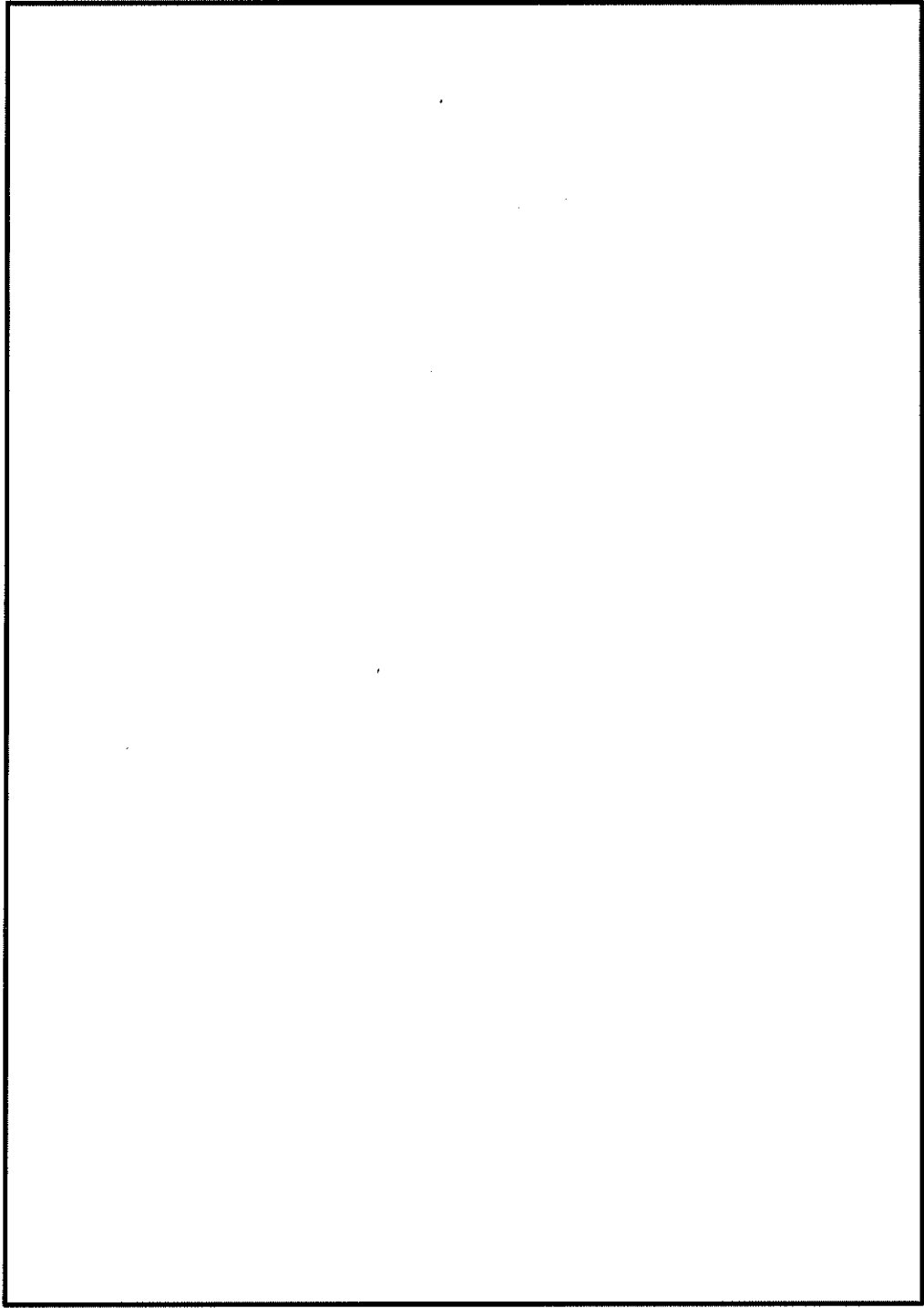
設計時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 密封容器内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 一次蓋ボルト初期締付力
- ・ 二次蓋ボルト初期締付力
- ・ 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力

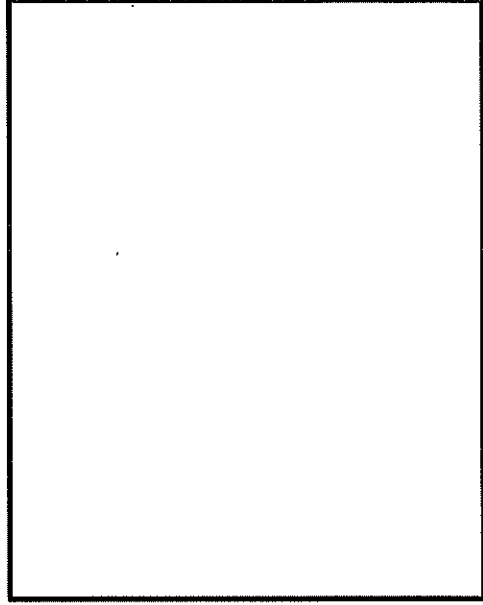
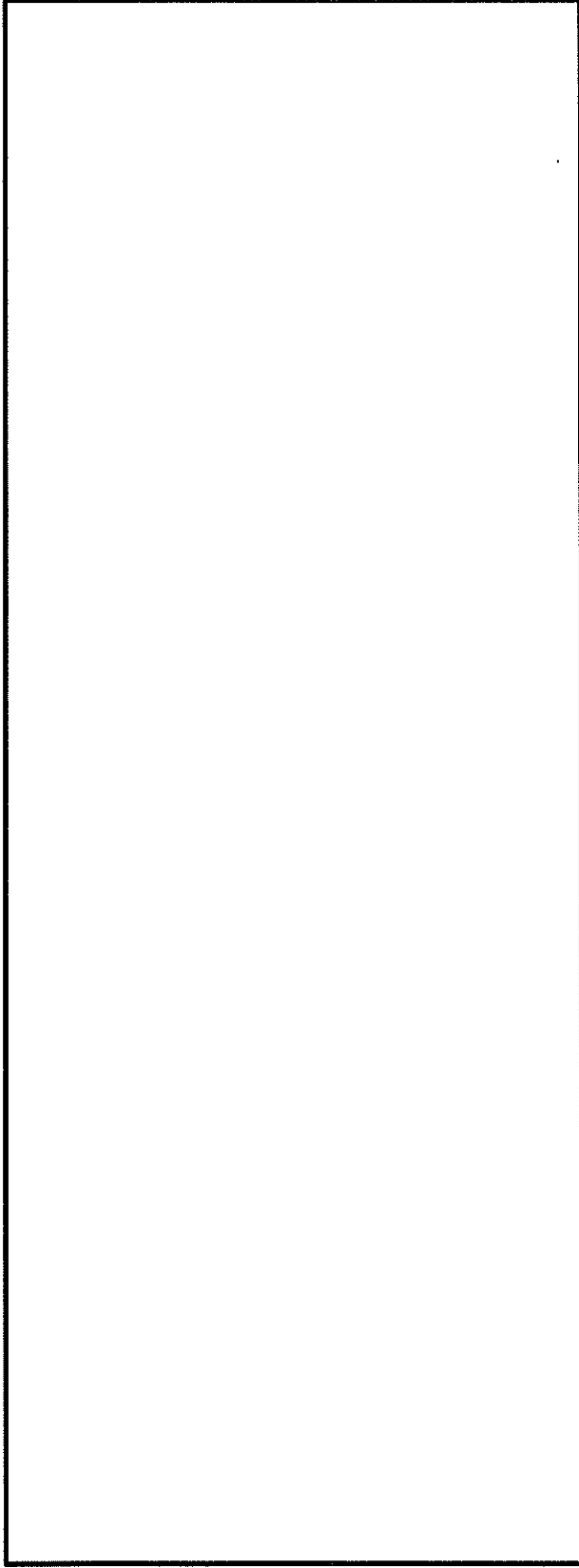
3.2.2 計算方法

- (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）



- P_i : 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 蓋間圧力 (0.31 MPa G)
- P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{bia} : 二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)
- P_{bim} : 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

第 3-3 図 荷重 (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。

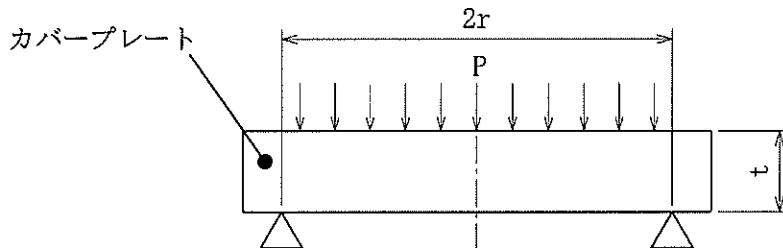
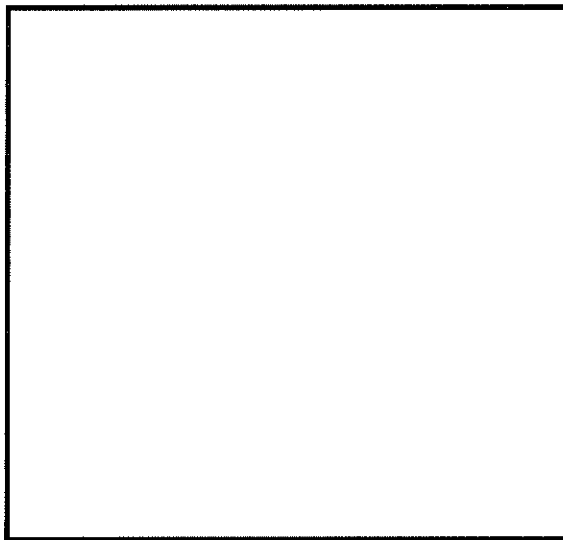
a. カバープレート

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（設計時）

（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（中央部）	①-①'	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	6	186
	①'	$P_L + P_b$	6	186
一次蓋（端部）	②-②'	P_L	4	186
二次蓋（中央部）	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（中央部）	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）（中央部）	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	248	280
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	220	281
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	280

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。

- ・ 密封容器内圧力
- ・ 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
- ・ 一次蓋ボルト初期締付力
- ・ 二次蓋ボルト初期締付力
- ・ 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力
- ・ 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、添付書類9「特定兼用キャスク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。

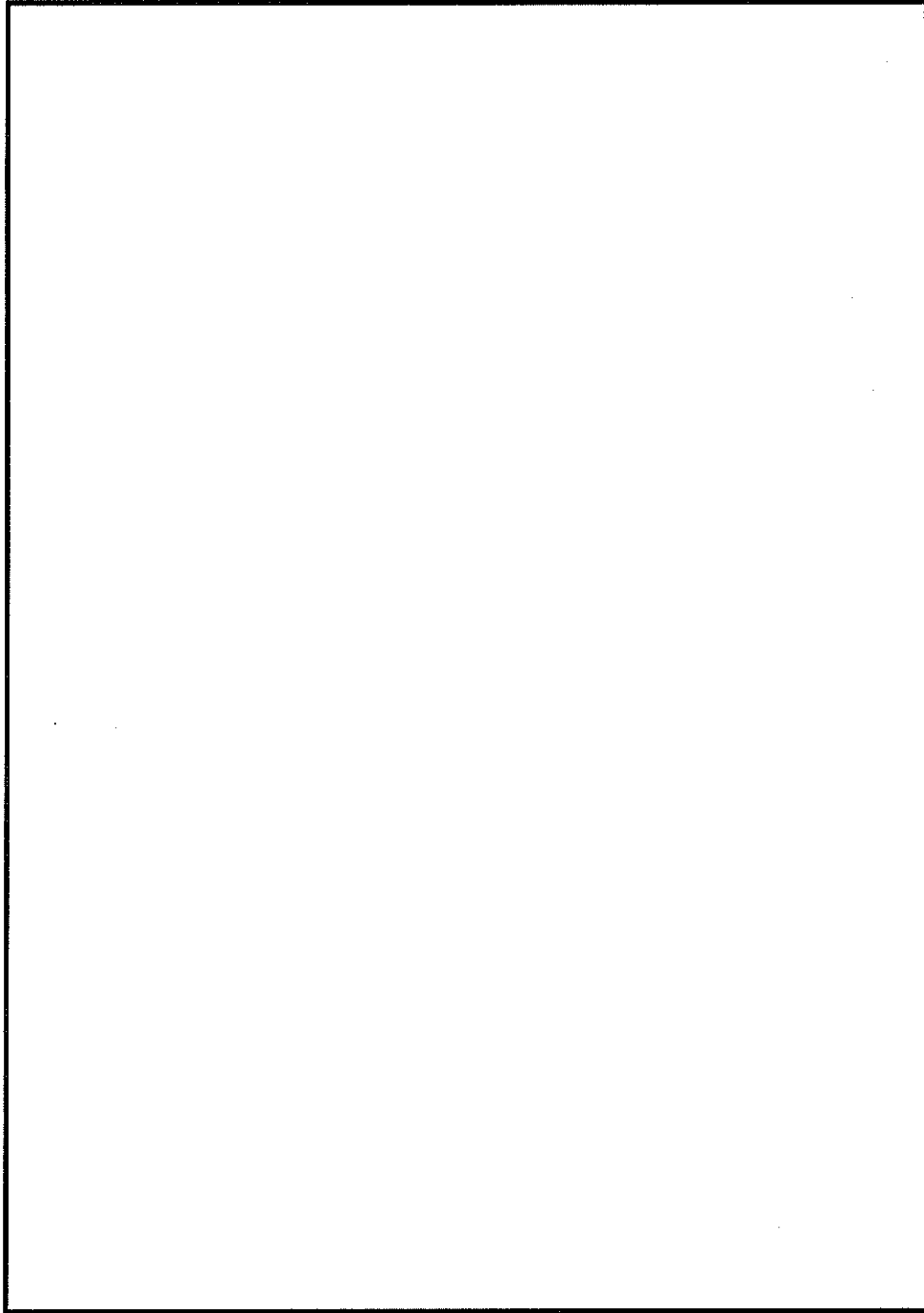
なお、胴の平均支圧応力計算は、応力評価式により行う。

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

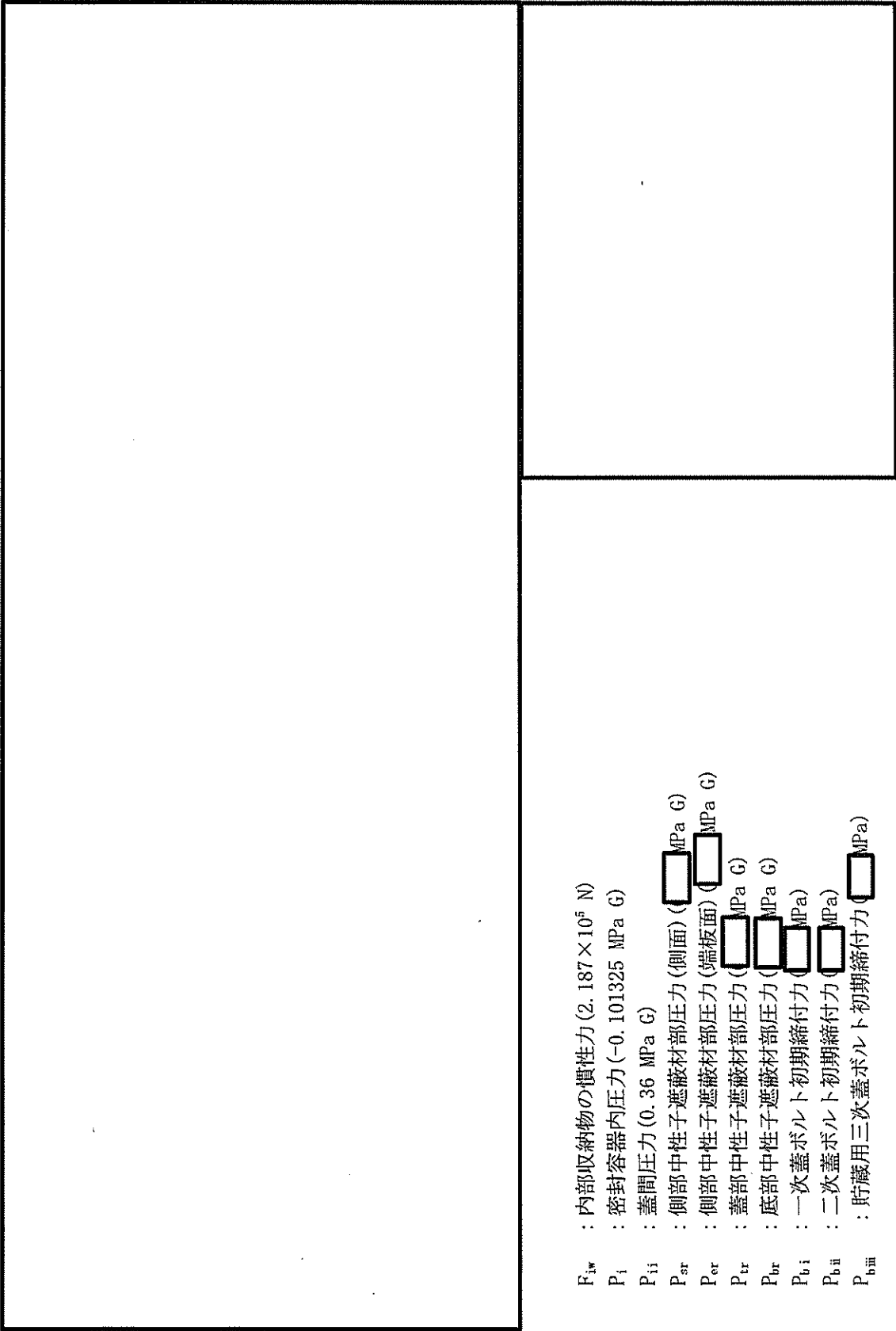
$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_1 \cdot g}{A_1} \dots\dots\dots (3.3)$$

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_1 : 鉛直方向加速度係数 (1)
- g : 重力加速度(9.80665 m/s²)
- A_1 : バスケットと胴内面の接触面積(5.794×10⁶ mm²)



第 3-4 図 密封容器の解析モデル (貯蔵時)



- F_{iw} : 内部収納物の慣性力 (2.187×10^5 N)
- P_1 : 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa G)
- P_{ii} : 蓋間圧力 (0.36 MPa G)
- P_{sr} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (側面) (MPa G)
- P_{or} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (端板面) (MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- 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} : 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

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

鉛直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。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。

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3-6図に示す。鉛直方向下向き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。

$$\sigma_{b1} = \frac{M}{n_b Z} \dots\dots\dots (3.4)$$

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 : 鉛直方向加速度係数 (1)

g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

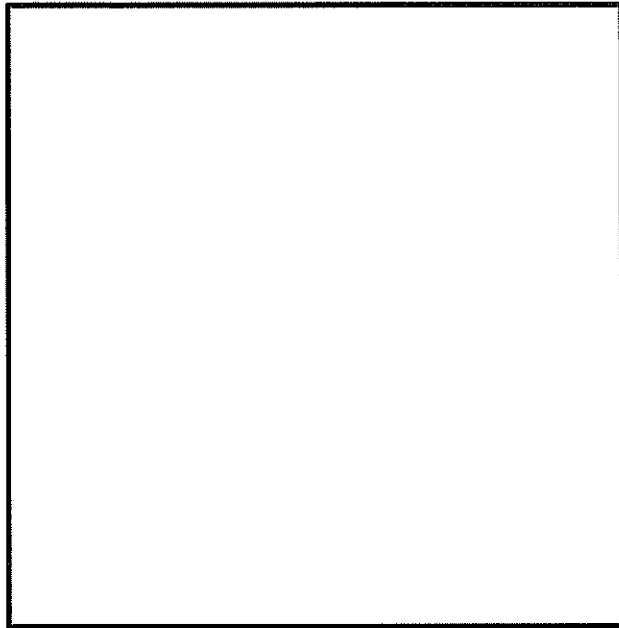
L : カバープレートボルト軸部の長さ (□ mm)

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3-6図 カバープレートボルトの曲げ応力の解析モデル

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 （中央部）	①-①'	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	8	186
	①'	$P_L + P_b$	7	186
	①	$P_L + P_b + Q$	8	372
	①'	$P_L + P_b + Q$	13	372
一次蓋 （端部）	②-②'	P_L	6	186
	②	$P_L + P_b + Q$	27	372
	②'	$P_L + P_b + Q$	25	372
二次蓋 （中央部）	③-③'	P_m	5	124
	③	$P_L + P_b$	25	186
	③'	$P_L + P_b$	28	186
	③	$P_L + P_b + Q$	27	372
	③'	$P_L + P_b + Q$	32	372
二次蓋 （端部）	④-④'	P_L	5	186
	④	$P_L + P_b + Q$	19	372
	④'	$P_L + P_b + Q$	21	372
胴 （一次蓋シール部）	⑤-⑤'	P_L	15	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	75	185
	⑤'	$P_L + P_b + Q$	61	185
胴 （二次蓋シール部）	⑥-⑥'	P_L	13	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	46	185
	⑥'	$P_L + P_b + Q$	39	185
胴 （中央部）	⑦-⑦'	P_m	4	122
	⑦	$P_L + P_b$	4	183
	⑦'	$P_L + P_b$	3	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	366
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	17	366
	⑦	σ_D	1	183
	⑦-⑦'	σ_C	15	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	4	183
	⑧-1	$P_L + P_b + Q$	79	366
	⑧' -1	$P_L + P_b + Q$	106	366
	⑧-⑧' -1	σ_c	35	90
	⑧-⑧' -2	P_L	5	183
	⑧-2	$P_L + P_b + Q$	105	366
	⑧' -2	$P_L + P_b + Q$	105	366
	⑧-⑧' -2	σ_c	20	90
胴 (底板) (中央部)	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'	$P_L + P_b + Q$	10	366
胴 (底板) (端部)	⑩-⑩'	P_L	3	183
	⑩	$P_L + P_b + Q$	58	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	42	366
一次蓋 (シール部)	⑪-⑪'	P_L	34	185
	⑪	$P_L + P_b + Q$	29	185
	⑪'	$P_L + P_b + Q$	80	185
二次蓋 (シール部)	⑫-⑫'	P_L	15	185
	⑫	$P_L + P_b + Q$	25	185
	⑫'	$P_L + P_b + Q$	21	185

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	250	560
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	380	840
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	227	562
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	431	843
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	560
	⑯	$\sigma_m + \sigma_b$	167	840

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。

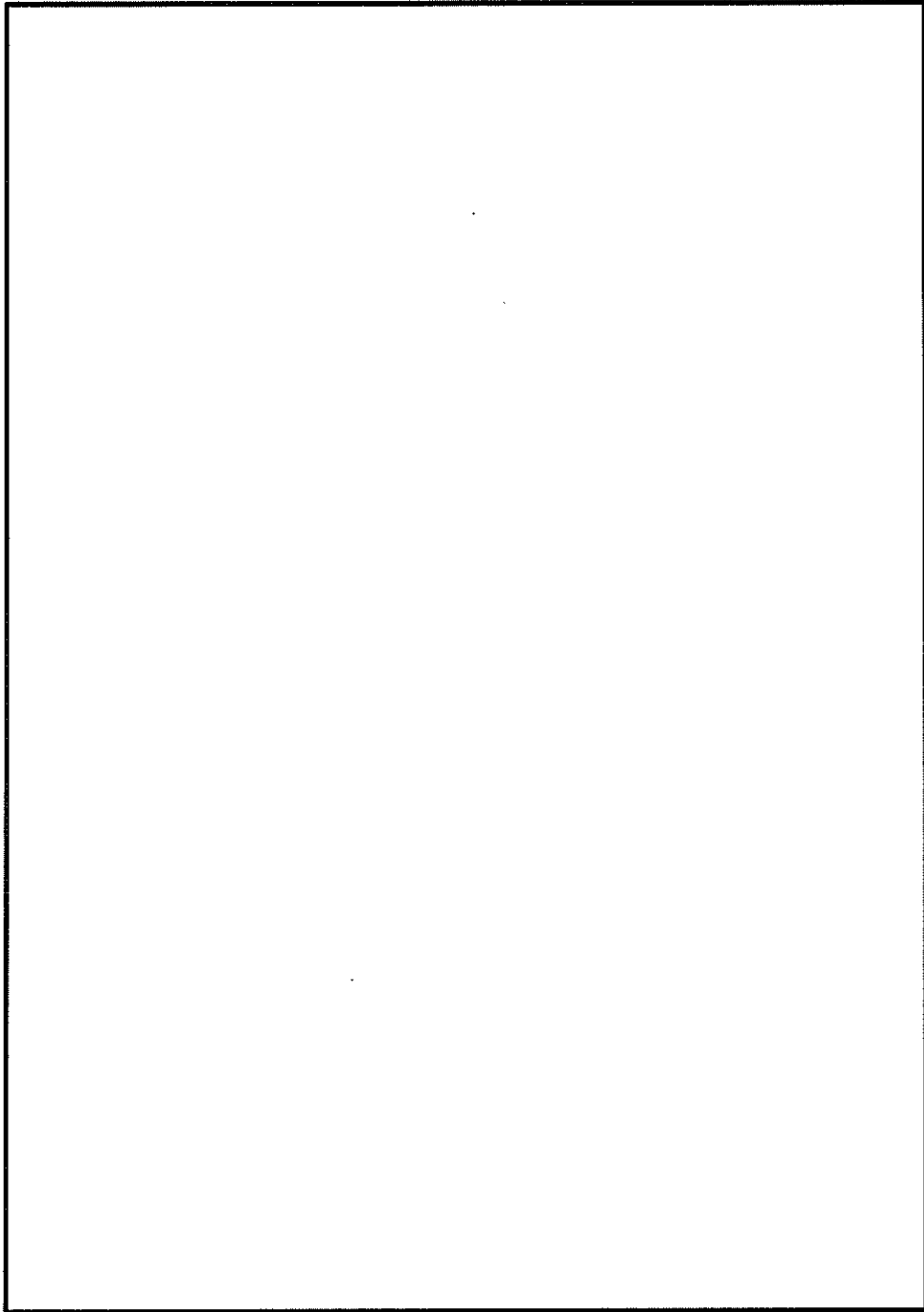
- ・ 密封容器内圧力
- ・ 蓋間圧力
- ・ 蓋部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 側部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 底部中性子遮蔽材部圧力
- ・ 一次蓋ボルト初期締付力
- ・ 二次蓋ボルト初期締付力
- ・ 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力
- ・ 吊上げ荷重（自重含む）
- ・ 熱荷重

3.4.2 計算方法

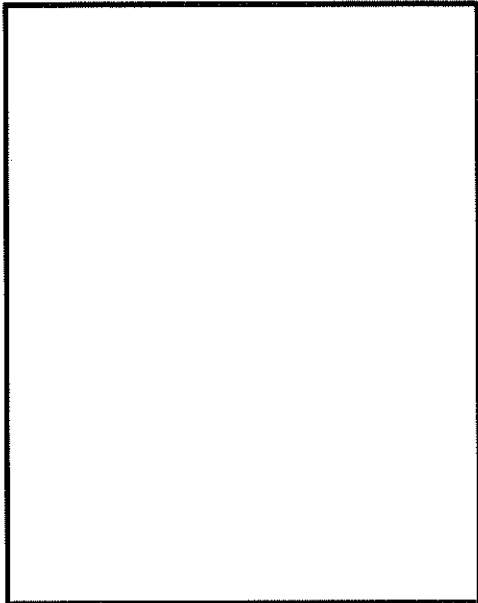
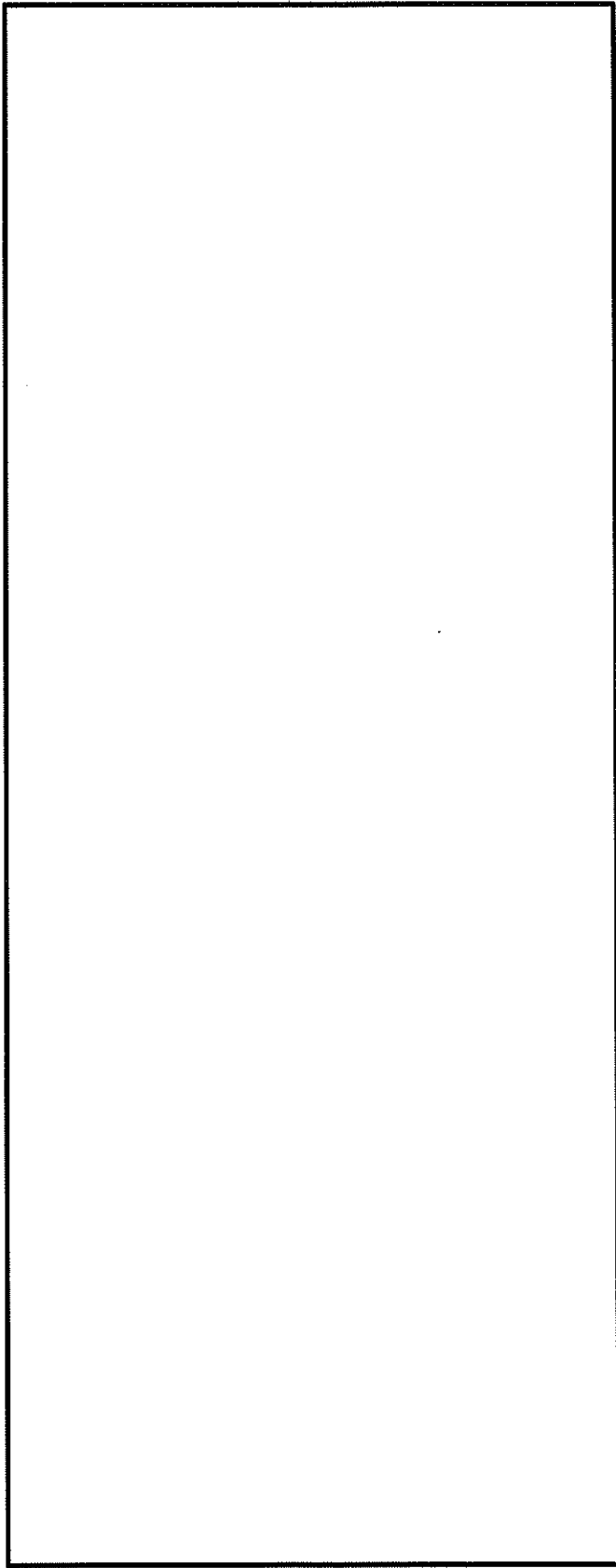
(1) 一次蓋、二次蓋、胴、胴（底板）、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

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3-7図に、荷重及び境界条件を第3-8図に示す。温度分布は、添付書類9「特定兼用キャスク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 $G_1=1.3$ とする。



第 3-7 図 密封容器の解析モデル (吊上げ時)



- F_{iw} : 内部収納物の慣性力 (2.843×10^5 N)
- P_i : 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa G)
- P_{in} : 蓋間圧力 (0.36 MPa G)
- P_{str} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (側面) (MPa G)
- P_{str} : 側部中性子遮蔽材部圧力 (端板面) (MPa G)
- P_{tr} : 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- P_{br} : 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)
- 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} : 貯蔵用三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

第 3-8 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 $G_1=1.3$ 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 (中央部)	①-①'	P_m	1	124
	①	$P_L + P_b$	8	186
	①'	$P_L + P_b$	7	186
	①	$P_L + P_b + Q$	8	372
	①'	$P_L + P_b + Q$	11	372
一次蓋 (端部)	②-②'	P_L	7	186
	②	$P_L + P_b + Q$	21	372
	②'	$P_L + P_b + Q$	20	372
二次蓋 (中央部)	③-③'	P_m	5	124
	③	$P_L + P_b$	25	186
	③'	$P_L + P_b$	28	186
	③	$P_L + P_b + Q$	26	372
	③'	$P_L + P_b + Q$	30	372
二次蓋 (端部)	④-④'	P_L	5	186
	④	$P_L + P_b + Q$	17	372
	④'	$P_L + P_b + Q$	19	372
胴 (一次蓋シール部)	⑤-⑤'	P_L	16	185
	⑤	$P_L + P_b + Q$	51	185
	⑤'	$P_L + P_b + Q$	42	185
胴 (二次蓋シール部)	⑥-⑥'	P_L	13	185
	⑥	$P_L + P_b + Q$	27	185
	⑥'	$P_L + P_b + Q$	23	185
胴 (中央部)	⑦-⑦'	P_m	4	122
	⑦	$P_L + P_b$	5	183
	⑦'	$P_L + P_b$	3	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	23	366
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	15	366
	⑦	σ_p	1	183
	⑦-⑦'	σ_c	11	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	4	183
	⑧-1	P_L+P_b+Q	66	366
	⑧' -1	P_L+P_b+Q	84	366
	⑧-⑧' -1	σ_c	26	90
	⑧-⑧' -2	P_L	6	183
	⑧-2	P_L+P_b+Q	93	366
	⑧' -2	P_L+P_b+Q	97	366
	⑧-⑧' -2	σ_c	16	90
胴（底板） (中央部)	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	9	366
胴（底板） (端部)	⑩-⑩'	P_L	4	183
	⑩	P_L+P_b+Q	49	366
	⑩'	P_L+P_b+Q	39	366
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	71	185
二次蓋（シール部）	⑫-⑫'	P_L	15	185
	⑫	P_L+P_b+Q	25	185
	⑫'	P_L+P_b+Q	18	185

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	250	560
	⑬	$\sigma_m + \sigma_b$	299	840
二次蓋ボルト	⑭	σ_m	226	562
	⑭	$\sigma_m + \sigma_b$	339	843
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	560
	⑯	$\sigma_m + \sigma_b$	168	840

3.5 試験時

3.5.1 荷重条件

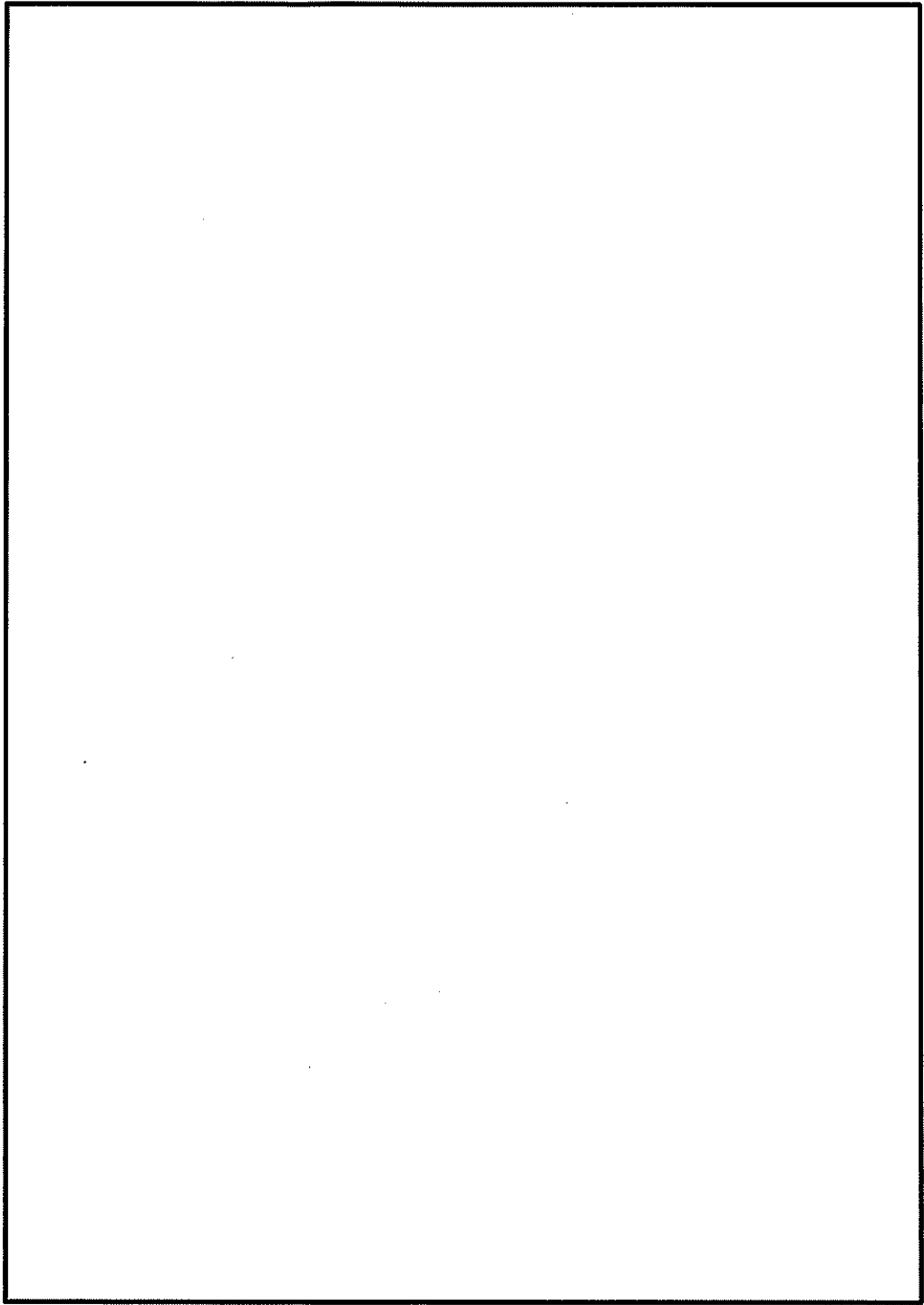
試験時における荷重は次に示す組合せとする。

- ・ 密封容器内圧力
- ・ 自重
- ・ 一次蓋ボルト初期締付力

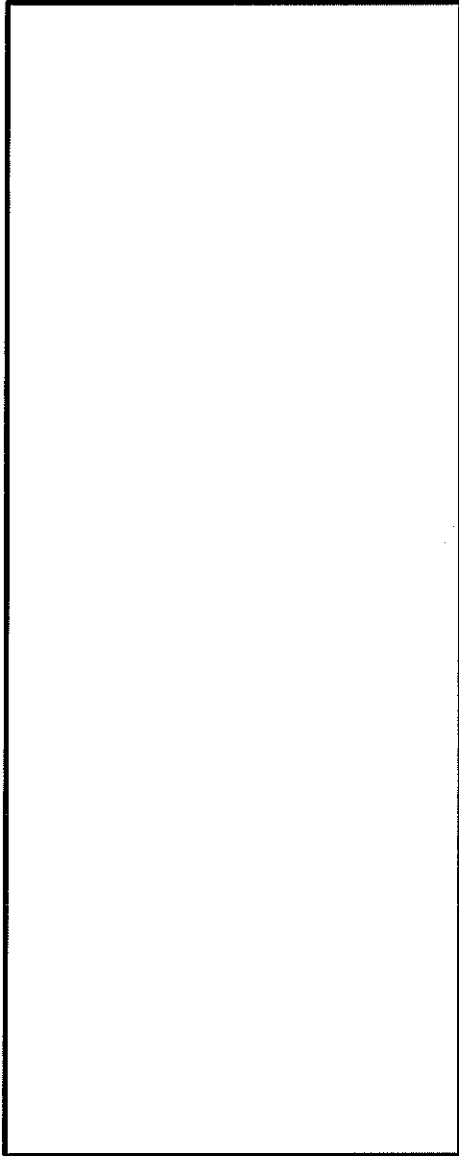
3.5.2 計算方法

(1) 一次蓋、胴及び胴（底板）

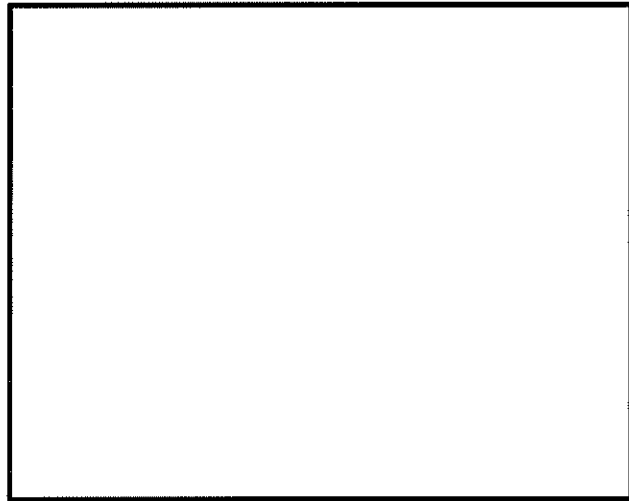
応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。三次元固体要素による解析モデルを第3-9図に、荷重及び境界条件を第3-10図に示す。耐圧試験は常温で行うため、温度分布は全ての部材を常温として入力する。



第 3-9 図 密封容器の解析モデル (試験時)



P_i : 密封容器内圧力 (0.5125 MPa G)
 P_{bi} : 一次蓋ボルト初期締付力 MPa)



第 3-10 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。

3.5.3 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 密封容器及び二次蓋の応力評価（試験時）

（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 (中央部)	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	9	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 (中央部)	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	2	279
	⑧-⑧' -2	P_L	3	279
胴 (底板) (中央部)	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'	$P_L + P_b + Q$	61	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ため、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_i)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。

$$N_i = 10 \text{ (回)}$$

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、

$$N_i \leq N_a$$

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。

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

ここで、

P : 最高使用圧力(=0.41 MPa)

S_m : 設計応力強さ(=122 MPa)

S' : 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。

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

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、0.083 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 (0.36 MPa)

(最高使用圧力0.41 MPaと蓋間圧力0.36 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年間において3ヵ月毎の圧力監視を行うことを想定する。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、

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

$$A_{m2} = 0.9 \text{ MPa}$$

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($P_2 = 0.36 \text{ MPa}$)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。

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

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点間の温度差の変動の全振幅の許容値(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 °C) とする。

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

ここで、

E : 2点間の平均温度における縦弾性係数 (1.95 × 10⁵ MPa)

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数 (13.20 × 10⁻⁶ mm/(mm・°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(ΔT = 130 °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。

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

ここで、

E : 2点間の平均温度における縦弾性係数 (1.95 × 10⁵ MPa)

α : 2点間の平均温度における瞬時熱膨張係数 (13.20 × 10⁻⁶ mm/(mm・°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)

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

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 (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 8-1 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)

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。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2)} \quad \dots\dots\dots (4. 8)$$

ここで、

S_a : 金属キャスク構造規格 別図 8-1 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、こ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210回と想定する。

燃料装荷・取出し時	10 回
吊上げ時	200 回
<hr/>	
合 計	210 回

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

$$S_n = 1047 \text{ MPa}$$

である。

第3-2表及び第3-3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($\Delta \sigma_1 = 106$ 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、

$$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_n$$

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

金属キヤスク 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 $P=0.36 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m=0.9 \text{ MPa}$	$P \leq A_m$ 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の温度差	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 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)	異なる材料で作られた部分の温度変動	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	210	応力の全振幅 $2 \cdot \Delta \sigma_1=212 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動回数 210回 に対する 許容繰返しピーク 応力強さ $S_a=1047 \text{ MPa}$	$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$ 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915 MPa、915MPa及び918 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、380 MPa、168 MPa及び431 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 0.25 mm、二次蓋ボルトが mm であって 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	:	<input type="text"/>
カバープレートボルト	:	<input type="text"/>
二次蓋ボルト	:	<input type="text"/>

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貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）
- ④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と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。

④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 繰り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 : 添付書類 5-3-2-1「密封容器の強度計算方法」の「第5-2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」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）

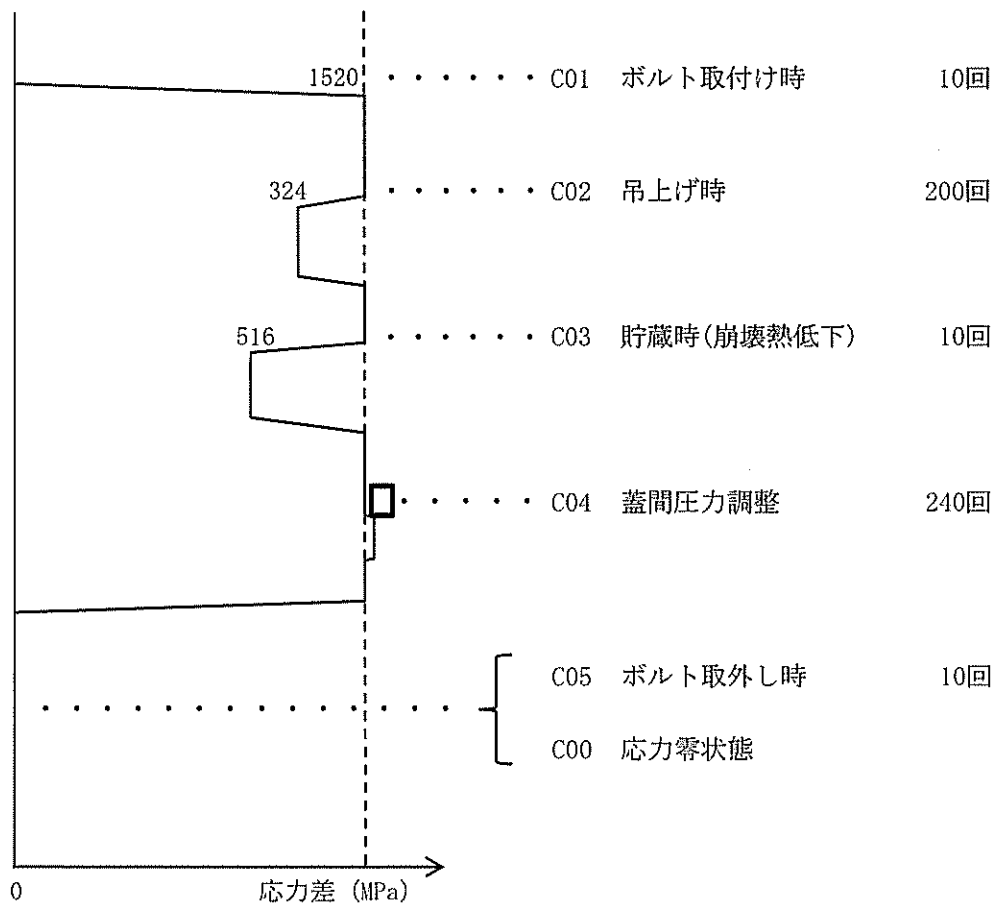
i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	380 ^(注1)	C00	0	1520
2	C02	299 ^(注2)	C01	380 ^(注1)	324
3	C03	251 ^(注3)	C01	380 ^(注1)	516
4	C04	251 ^(注4)	-	□ ^(注4)	□

(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) 保守側に使用済燃料の崩壊熱が無い状態を想定し、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4) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.36 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0.36 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	1520	760	846	672	10	0.0149
2	324	162	181	22633	200	0.0089
3	516	258	288	5994	10	0.0017
4				10^6	240	0.0003
疲労累積係数						$U_f = 0.0258$

(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)

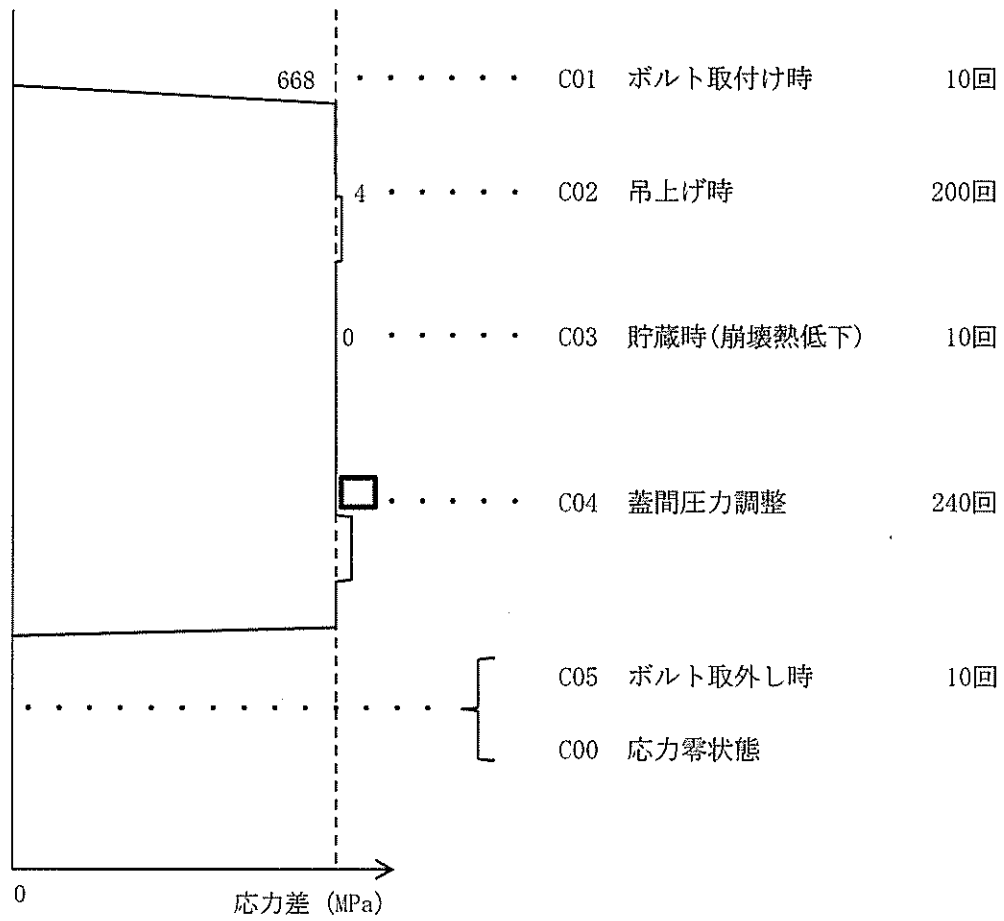
i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	167 ^(注1)	C00	0	668
2	C02	168 ^(注2)	C01	167 ^(注1)	4
3	C03	167 ^(注3)	C01	167 ^(注1)	0
4	C04	167 ^(注4)	-	□ ^(注4)	□

(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) 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4) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.36 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0.36 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	668	334	372	3471	10	0.0029
2	4	2	3	10^6	200	0.0002
3	0	0	0	—	10	—
4				10^6	240	0.0003
疲労累積係数 $U_f = 0.0034$						

(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）

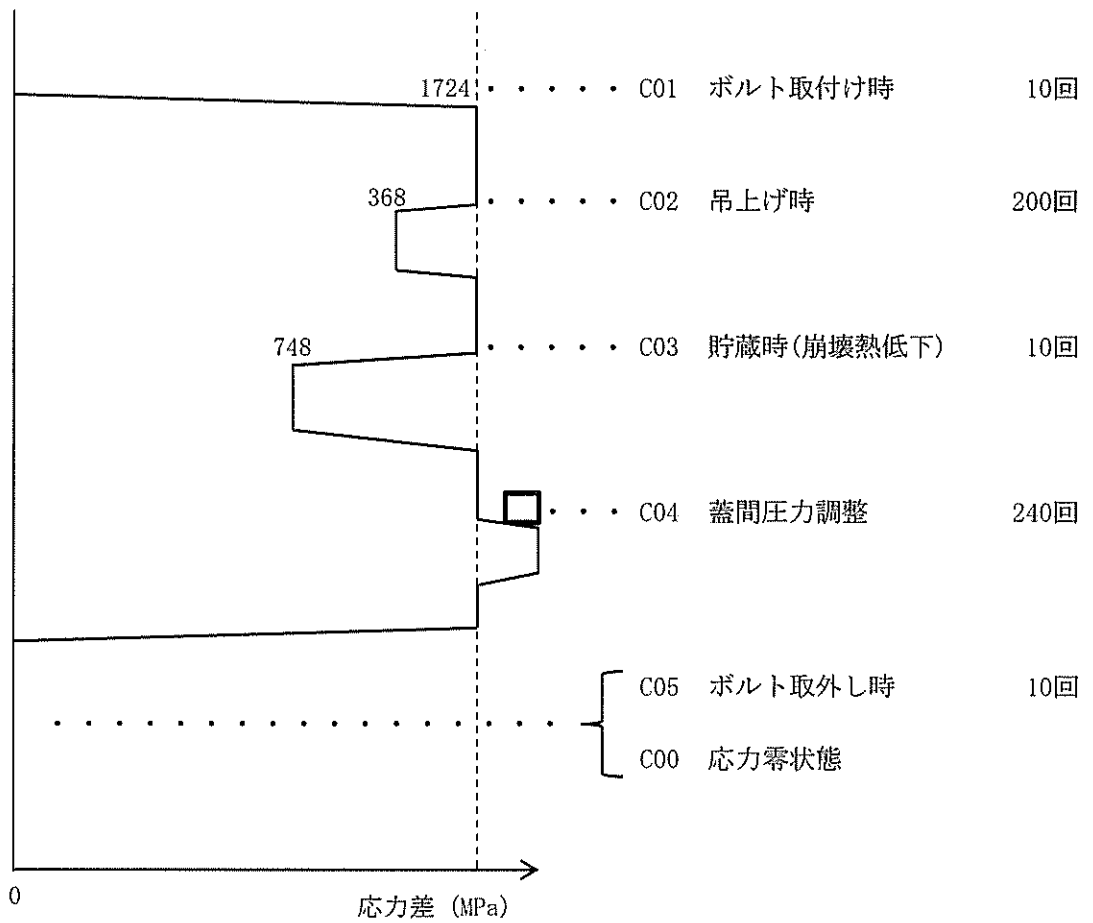
i	変動後		変動前		S _p (MPa)
	事象	S _{b2} (MPa)	事象	S _{b1} (MPa)	
1	C01	431 ^(注1)	C00	0	1724
2	C02	339 ^(注2)	C01	431 ^(注1)	368
3	C03	244 ^(注3)	C01	431 ^(注1)	748
4	C04	244 ^(注1)	-	□ ^(注4)	□

(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) 保守側に使用済燃料の崩壊熱が無い状態を想定し、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4) 保守側に蓋間圧力を0 MPaから0.36 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0.36 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	1724	862	960	526	10	0.0191
2	368	184	205	14910	200	0.0135
3	748	374	417	2762	10	0.0037
4				700879	240	0.0004
疲労累積係数						$U_f = 0.0367$

(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。

$$S_2 = K \cdot S_3 \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

ここで、

S_2 : 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」)

S_3 : 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	4	16	186
	P _L +P _b	6	24	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	27	108	372
吊上げ時	P _m	1	4	124
	P _L	7	28	186
	P _L +P _b	8	32	186
	P _L +P _b +Q	21	84	372
試験時	P _m	2	8	186
	P _L	9	36	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	25	100	186
貯蔵時	P _m	5	20	124
	P _L	5	20	186
	P _L +P _b	28	112	186
	P _L +P _b +Q	32	128	372
吊上げ時	P _m	5	20	124
	P _L	5	20	186
	P _L +P _b	28	112	186
	P _L +P _b +Q	30	120	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、添付書類 5-3-2-1 「密封容器の強度計算方法」第 6-3 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。

添付書類 5-3-3-2 バスケットの強度計算書

本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

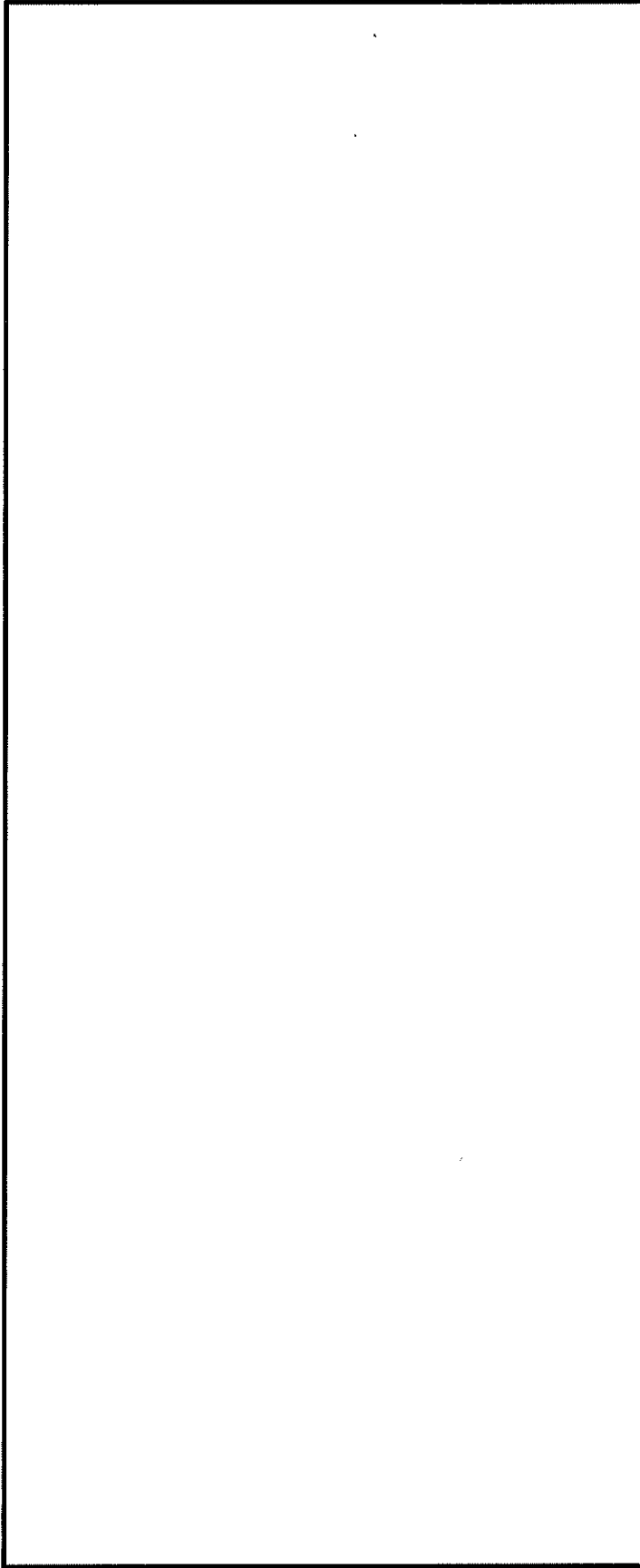
1. 概要	1
2. 形状・寸法・材料	1
3. 応力計算	4
3.1 応力評価位置	4
3.2 貯蔵時	7
3.3 吊上げ時	10

1. 概要

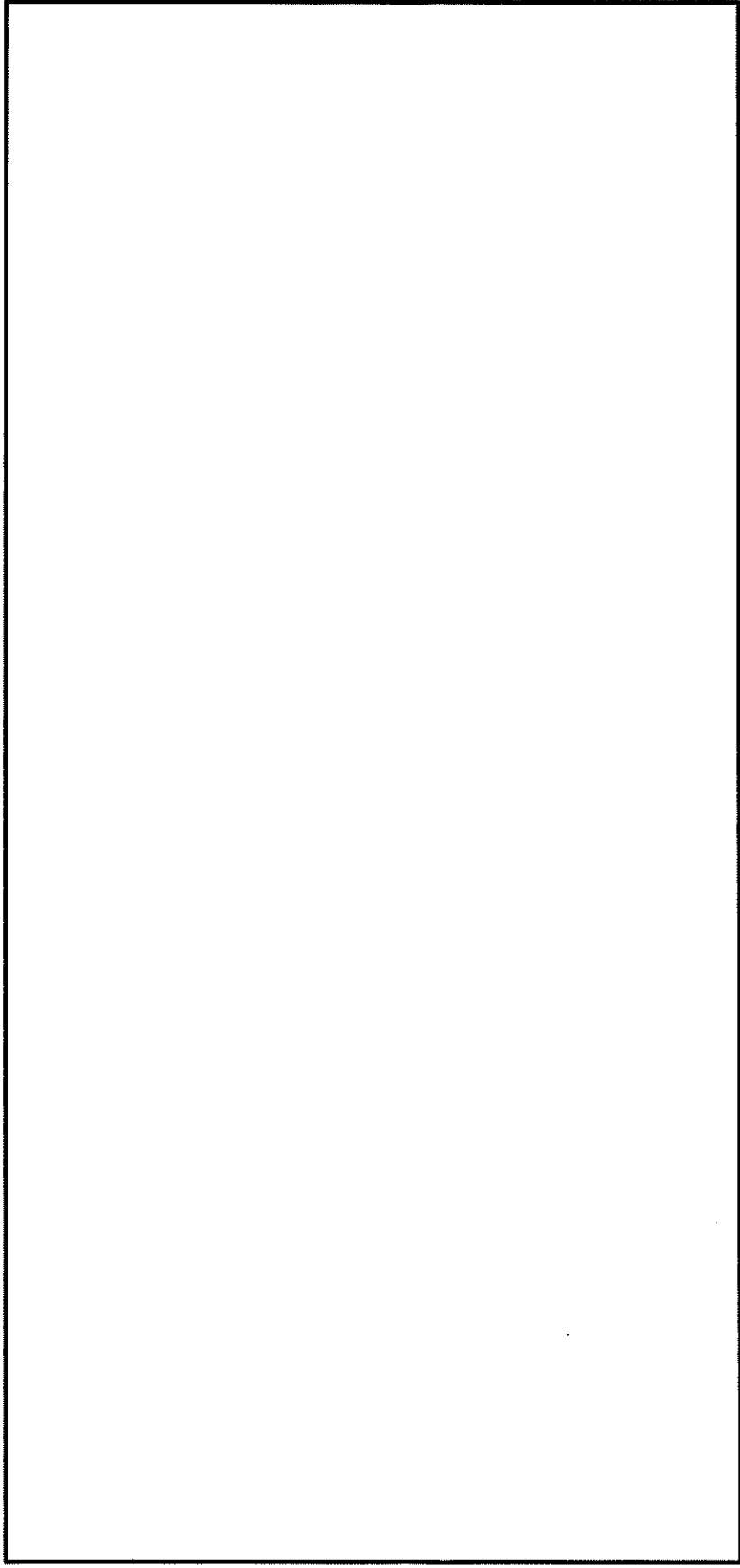
本資料は、資料5-3-2-2「バスケットの強度計算方法」に基づき、MSF-24P(S)型のバスケットが十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

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

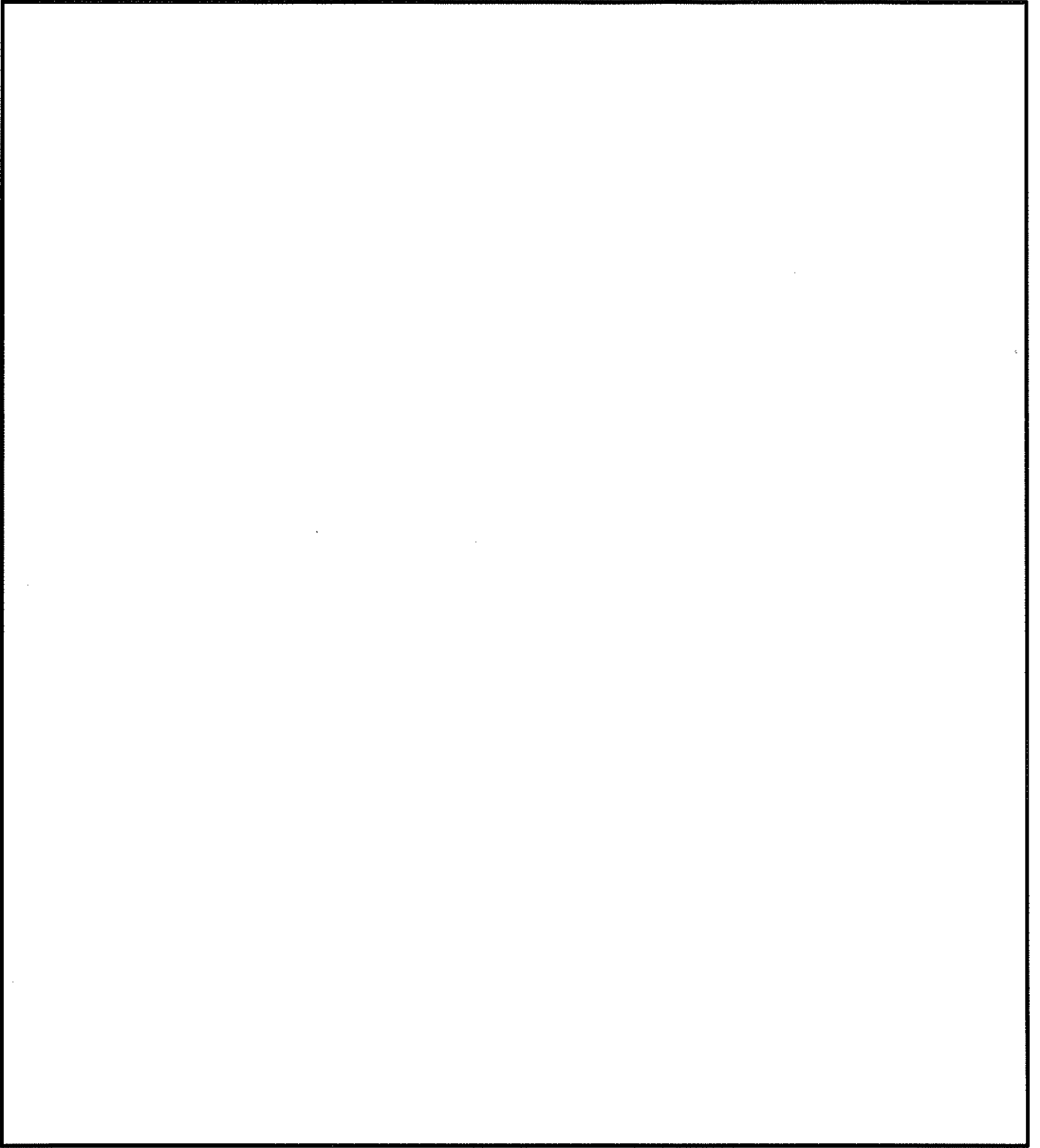
- バスケットプレート : アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)
- 中性子吸収材 : ほう素添加アルミニウム合金 (非強度部材)
- バスケットサポート : アルミニウム合金 (非強度部材)

第2-1図 バスケットの形状・寸法・材料 (2/2)

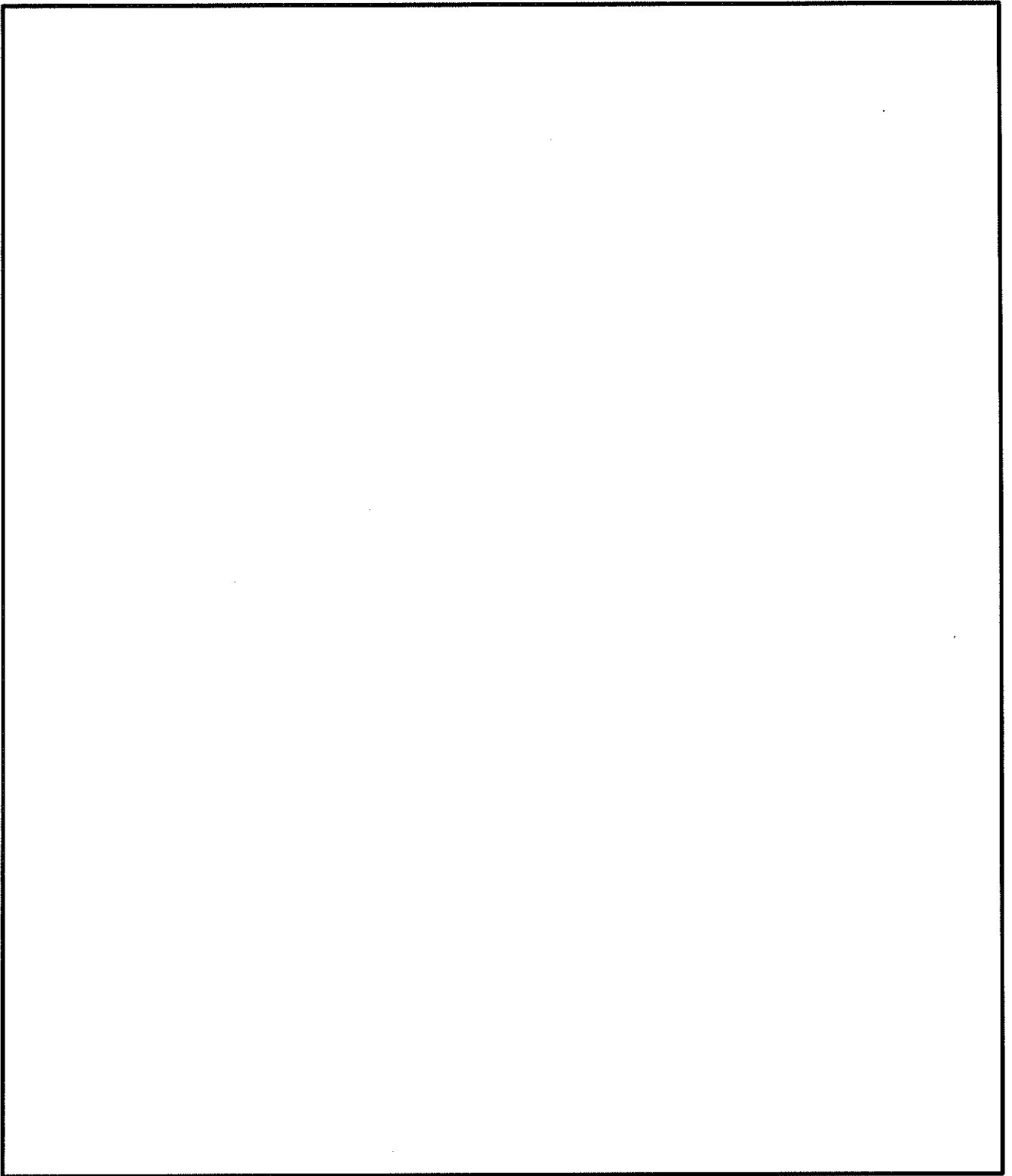
3. 応力計算

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図に示す。



第 3-1 図 バスケットプレートの応力評価位置 (1/2)



第 3-1 図 バスケットプレートの応力評価位置 (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。

- ・自重

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第3-1図(1/2)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。

$$\sigma_m = \frac{mGg}{A_1N} \quad (3.1)$$

ここで、

- σ_m : 一次一般膜応力 (MPa)
- m : 第3-1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 (= kg)
- G : 鉛直方向加速度係数 (貯蔵時) (=1)
- g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- A_1 : 評価位置①の断面積 (mm²)
- N : バスケットプレートの段数 (=)

(2) 一次一般膜+一次曲げ応力

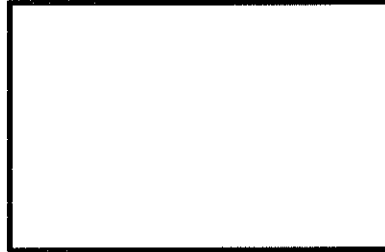
最大応力が発生するのは第3-1図(2/2)の評価位置②である。自重により発生する一次曲げ応力は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= \frac{wGgL^2}{12} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、

- σ_b : 曲げ応力 (MPa)
- M : 評価位置②に発生する曲げモーメント (N・mm)
- Z : 評価位置②の断面係数 (= 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②の断面形状)

- w : 第 3-1 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 (= kg/mm)
- G : 鉛直方向加速度係数 (貯蔵時) (=1)
- 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3-1図(2/2)の評価位置②である。自重により発生するせん断応力は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F}{A_2} \\ F &= \frac{wGgL}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ここで、

- τ : せん断応力 (MPa)
- F : 評価位置②に発生する荷重 (N)
- A_2 : 評価位置②の断面積 (= mm²)
- w 、 G 、 g 、 L : 3.2.2(2)と同じ

(4) 圧縮応力

最大応力が発生するのは第3-1図(1/2)の評価位置①である。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、

- m 、 G 、 g 、 A_1 、 N : 3.2.2(1)と同じ

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。また、バスケットプレートに発生する応力は、設計降伏点(56 MPa)より低いため、バスケットプレートは弾性状態に留まる。

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	16
	②	$P_m + P_b$	1	16
	②	τ	1	9
	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。

- ・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第3-1図(1/2)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_m 、 m 、 g 、 A_1 、 N : 3.2.2(1)と同じ

G : 鉛直方向加速度係数（吊上げ時）(=1.3)

(2) 一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのは第3-1図(2/2)の評価位置②である。吊上げ荷重により発生する一次曲げ応力は、(3.2)式で計算される。

ここで、

σ_b 、 M 、 Z 、 h_1 、 b_1 、 b_2 、 h_2 、 b_3 、 w 、 g 、 L : 3.2.2(2)と同じ

G : 鉛直方向加速度係数（吊上げ時）(=1.3)

(3) 平均せん断応力

最大応力が発生するのは第3-1図(2/2)の評価位置②である。吊上げ荷重により発生するせん断応力は、(3.3)式で計算される。

ここで、

τ 、 F 、 A_2 、 w 、 g 、 L : 3.2.2(3)と同じ

G : 鉛直方向加速度係数（吊上げ時）(=1.3)

(4) 圧縮応力

最大応力が発生するのは第3-1図(1/2)の評価位置①である。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、

m 、 g 、 A_1 、 N : 3.2.2(1)と同じ

G : 鉛直方向加速度係数（吊上げ時）(=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。また、バスケットプレートに発生する応力は、設計降伏点(56 MPa)より低いいため、バスケットプレートは弾性状態に留まる。

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
	②	P_m+P_b	1	43
	②	τ	1	21
	①	σ_c	1	37

添付書類 5-3-3-3 トラニオンの強度計算書

本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

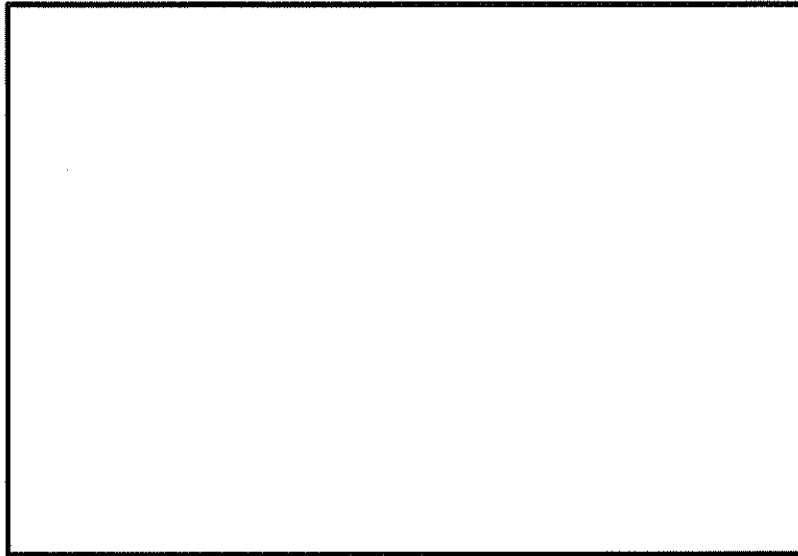
1. 概要	1
2. 形状・寸法・材料	1
3. 応力計算	4
3.1 応力評価位置	4
3.2 貯蔵時	4
3.3 吊上げ時	13
3.4 疲労評価	20

1. 概要

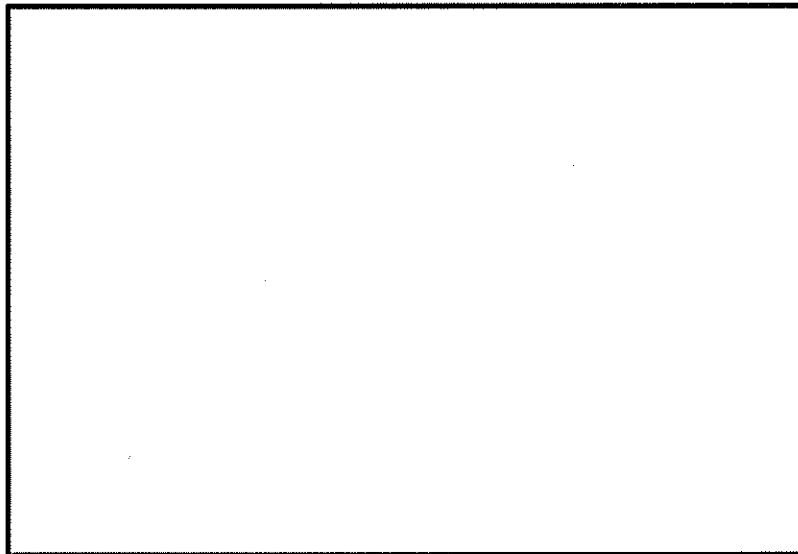
本資料は、添付書類5-3-2-3「トラニオンの強度計算方法」に基づき、MSF-24P(S)型のトラニオンが十分な強度を有することの確認結果を示すものである。

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。



貯蔵時



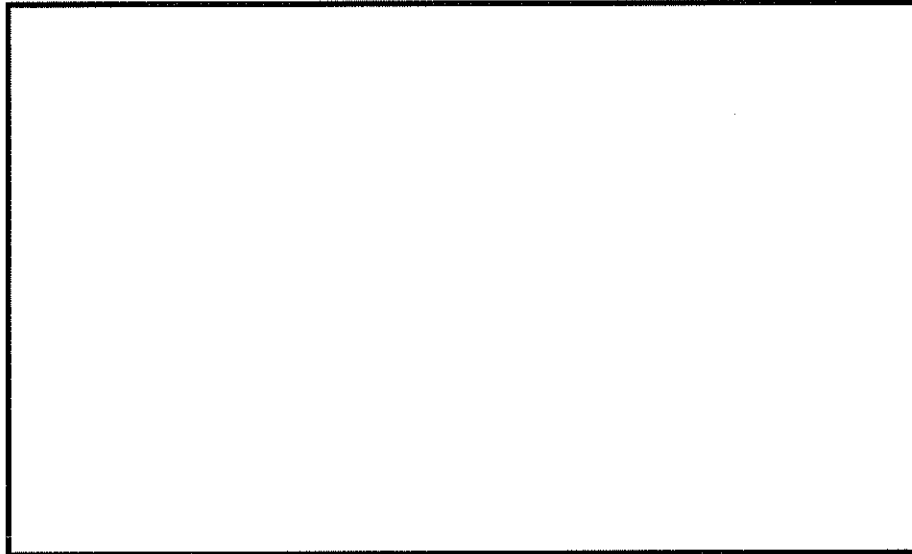
吊上げ時

No.	評価部位
①	上部トラニオン段付き部
②	上部トラニオン段付き部
③	上部トラニオン接続部

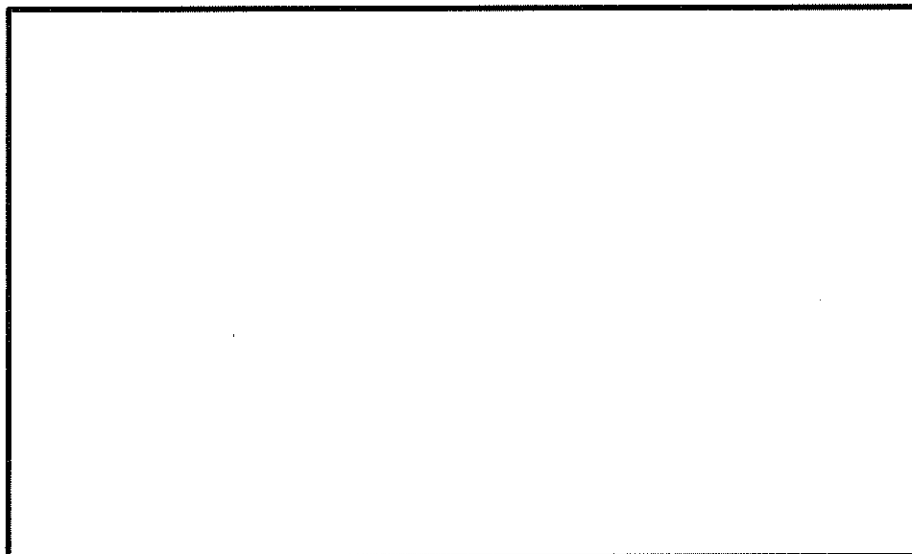
材質：SUS630

(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



貯蔵時



吊上げ時

No.	評価部位
④	下部トラニオン段付き部
⑤	下部トラニオン段付き部
⑥	下部トラニオン段付き部
⑦	下部トラニオン接続部

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。

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。

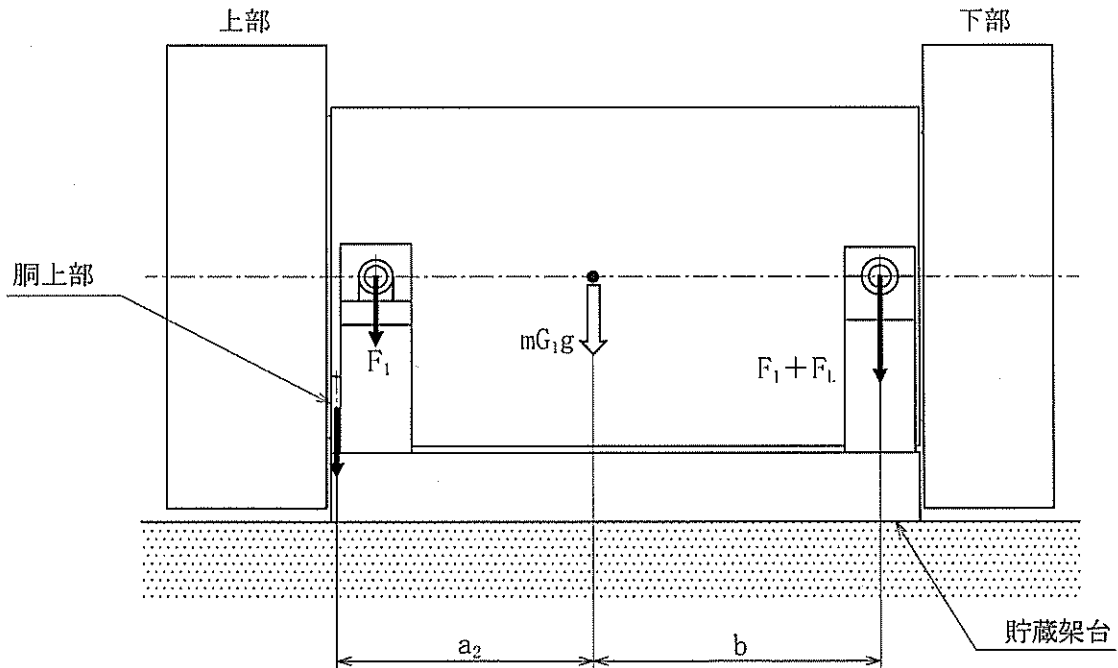
- ・ 自重
- ・ 固縛荷重
- ・ 熱荷重

3.2.2 計算方法

(1) トラニオン段付き部

(a) 一次応力

貯蔵時において、MSF-24P(S)型の自重は、胴上部及び下部トラニオンで受けるため、自重による一次応力は下部トラニオンのみに発生する。(第3-1図参照)



第3-1図 トラニオンに作用する荷重（貯蔵時）

(i) せん断応力

自重により評価位置⑤に発生するせん断応力(τ_L)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_L &= \frac{F_L}{A_5} \\ F_L &= \frac{a_2}{2(a_2+b)} m G_1 g \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ここで、

- F_L : 下部トラニオンに作用する荷重 (N)
- A_5 : 評価位置⑤の断面積 (= mm²)
- m : 貯蔵時及び吊上げ時における MSF-24P(S)型の質量 (=134600 kg)
- G_1 : 鉛直方向加速度係数(貯蔵時) (=1)
- g : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- a_2 : 重心から胴上部固縛位置までの距離 (= mm)
- b : 重心から下部トラニオンに作用する荷重の作用点までの距離 (= mm)

また、評価位置⑥に発生するせん断応力(τ_L)は、(3.1)式で計算される。ただし、(3.1)式の A_5 を A_6 とする。

ここで、

- A_6 : 評価位置⑥の断面積 (= mm²)

(ii) 曲げ応力

自重により評価位置⑤に発生する曲げ応力(σ_{bL})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bL} &= \frac{M_L}{Z_5} \\ M_L &= F_L L_{51} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、

- M_L : 下部トラニオンの曲げモーメント (N・mm)
- Z_5 : 評価位置⑤の断面係数 (= mm³)
- F_L : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ
- L_{51} : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (=55 mm)

また、評価位置⑥に発生する曲げ応力(σ_{bL})は、(3.2)式で計算される。ただし、(3.2)式の Z_5 及び L_{51} を Z_6 及び L_{61} とする。

ここで、

Z_6 : 評価位置⑥の断面係数 (= mm³)

L_{61} : 評価位置⑥と荷重作用位置との距離 (=265 mm)

(iii) 組合せ応力

せん断応力(τ_L)と曲げ応力(σ_{bL})との組合せ応力(σ_{TL})は、次式で計算される。

$$\sigma_{TL} = \sqrt{\sigma_{bL}^2 + 3\tau_L^2} \quad (3.3)$$

(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。

貯蔵時において、MSF-24P(S)型は、上部トラニオン及び下部トラニオンを用いて固縛されるため、固縛荷重による二次応力が上部トラニオン及び下部トラニオンに発生する。(第3-1図参照)

(i) せん断応力

①上部トラニオン

トラニオン押さえ(貯蔵架台)の固縛荷重により評価位置①に発生するせん断応力(τ_U)は、次式で計算される。

$$\tau_U = \frac{F_1}{A_1} \quad (3.4)$$

ここで、

F_1 : トラニオン押さえの固縛荷重 (= N)

A_1 : 評価位置①の断面積 (= mm²)

評価位置①の内径は mm であるが、保守的に近傍の内径 mm として評価する。

また、評価位置②に発生するせん断応力(τ_U)は、(3.4)式で計算される。ただし、(3.4)式の A_1 を A_2 とする。

ここで、

A_2 : 評価位置②の断面積 (= mm²)

②下部トラニオン

自重及びトラニオン押さえ(貯蔵架台)の固縛荷重により評価位置⑤に発生する下部トラニオンのせん断応力(τ_U)は、次式で計算される。

$$\tau_L = \frac{F_1 + F_L}{A_5} \quad (3.5)$$

ここで、

- F_1 : 3.2.2 (1) (b) (i) と同じ
- F_L : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ
- A_5 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

また、評価位置⑥に発生する下部トラニオンのせん断応力 (τ_L) は、(3.5)式で計算される。ただし、(3.5)式の A_5 を A_6 とする。

ここで、

- A_6 : 3.2.2 (1) (a) (i) と同じ

(ii) 曲げ応力

① 上部トラニオン

トラニオン押さえ(貯蔵架台)の固縛荷重により評価位置①に発生する曲げ応力(σ_{bu})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bu} &= \frac{M_0}{Z_1} \\ M_0 &= F_1 \cdot L_{11} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ここで、

- M_0 : 上部トラニオンの曲げモーメント (N・mm)
- F_1 : 3.2.2 (1) (b) (i) と同じ
- Z_1 : 評価位置①の断面係数 (= mm³)
評価位置①の内径は mm であるが、保守的に近傍の内径 mm として評価する。
- L_{11} : 評価位置①と荷重作用位置との距離 (=35 mm)

また、評価位置②に発生する上部トラニオンの曲げ応力(σ_{bu})は、(3.6)式で計算される。ただし、(3.6)式の Z_1 及び L_{11} を Z_2 及び L_{21} とする。

ここで、

- Z_2 : 評価位置②の断面係数 (= mm³)
- L_{21} : 評価位置②と荷重作用位置との距離 (=245 mm)

②下部トラニオン

自重及びトラニオン押さえの固縛荷重により評価位置⑤に発生する曲げ応力(σ_{bL})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bL} &= \frac{M_L}{Z_5} \\ M_L &= F_1 \cdot L_{51} + F_L L_{51} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

ここで、

- F_1 : 3.2.2 (1) (b) (i)と同じ
- F_L : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ
- Z_5 : 3.2.2 (1) (a) (ii)と同じ
- L_{51} : 3.2.2 (1) (a) (ii)と同じ

また、評価位置⑥に発生する曲げ応力(σ_{bL})は、(3.7)式で計算される。ただし、(3.7)式の Z_5 及び L_{51} を Z_6 及び L_{61} とする。

ここで、

- Z_6 : 3.2.2 (1) (a) (ii)と同じ
- L_{61} : 3.2.2 (1) (a) (ii)と同じ

(2) トラニオン接続部

(a) 一次応力

貯蔵時において、MSF-24P(S)型の自重は、胴上部及び下部トラニオンで受けるため、自重による一次応力は下部トラニオンのみに発生する。(第3-1図参照)

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⑦である。自重により発生する支圧応力(σ_{r1} 及び σ_{r2})は、次式で計算される。

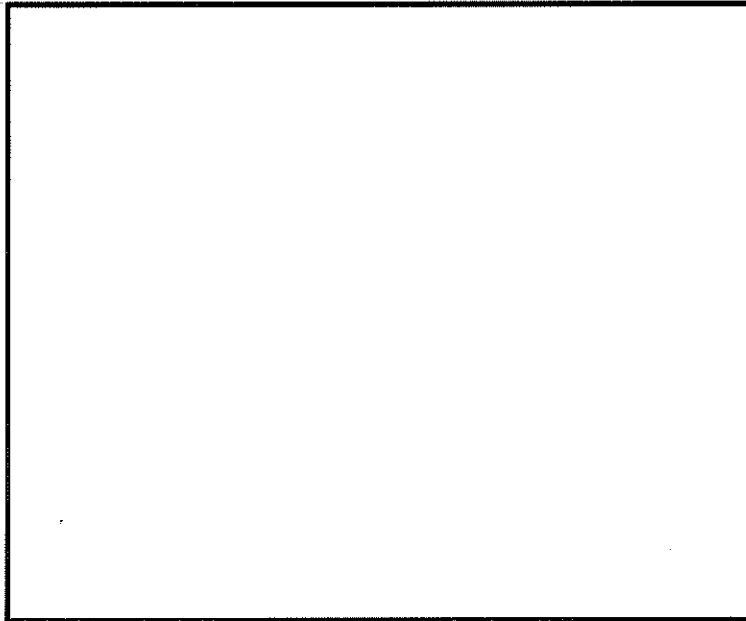
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= R_{71} / (d_7 \cdot L_7 / 2) \\ \sigma_{r2} &= R_{72} / (d_7 \cdot L_7 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} R_{71} &= \frac{F_L L_{61} + \mu F_L (d_7 / 2) + F_L L_7}{\mu d_7 + L_7} \\ R_{72} &= \frac{F_L L_{61} - \mu F_L (d_7 / 2)}{\mu d_7 + L_7} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

- R_{71} : 下部トラニオンに作用する反力 (N)
- R_{72} : 下部トラニオンに作用する反力 (N)
- F_L : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ

- L_{61} : 0 点から荷重作用点までの距離 (3.2.2 (1)(a)(ii)と同じ)
 L_7 : 0 点から反力 R_{72} 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_7 : 下部トラニオン嵌め込み部の外径 (=290 mm)



下部トラニオン接続部の解析モデル

(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。

貯蔵時において、MSF-24P(S)型は、上部トラニオン及び下部トラニオンを用いて固縛されるため、固縛荷重による二次応力が上部トラニオン及び下部トラニオンに発生する。(第3-1図参照)

(i) 自重及び固縛荷重による支圧応力

①上部トラニオン

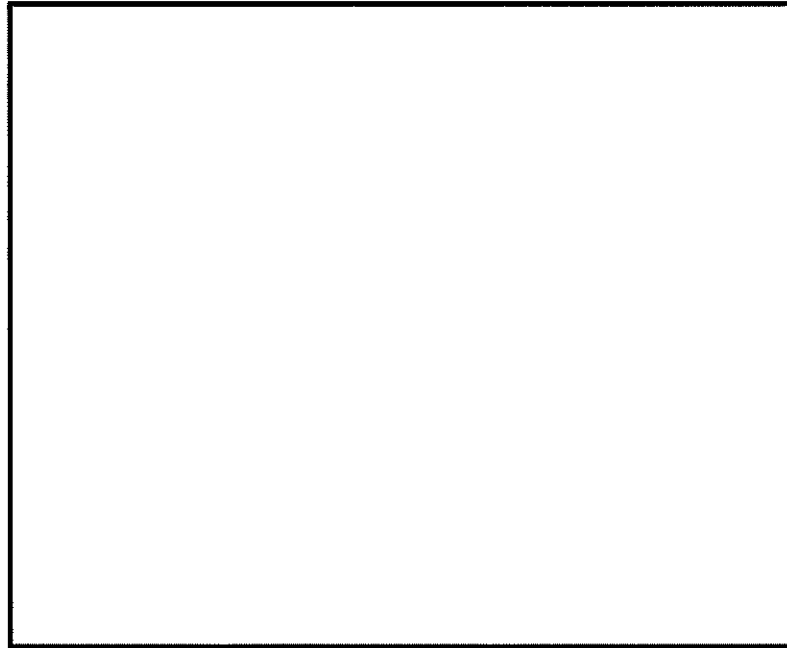
評価位置③の固縛荷重により発生する支圧応力(σ_{31} 及び σ_{32})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{31} &= R_{31} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \\ \sigma_{32} &= R_{32} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} R_{31} &= \frac{F_1 L_{21} + \mu F_1 (d_3/2) + F_1 L_3}{\mu d_3 + L_3} \\ R_{32} &= \frac{F_1 L_{21} - \mu F_1 (d_3/2)}{\mu d_3 + L_3} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

- R_{31} : 上部トラニオンに作用する反力 (N)
 R_{32} : 上部トラニオンに作用する反力 (N)
 F_1 : 3.2.2 (1) (b) (i) と同じ
 L_{21} : 0点から荷重作用点までの距離 (3.2.2 (1) (b) (ii) と同じ)
 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 : 上部トラニオン嵌め込み部の外径 (=270 mm)



上部トラニオン接続部の解析モデル

②下部トラニオン

評価位置⑦の自重及び固縛荷重による支圧応力の計算方法は、3.2.2 (2) (a) と同様である。ただし、作用荷重 (F_L) は $F_1 + F_L$ とする。

(ii) しまり嵌めによる支圧応力

評価位置③及び⑦のしまり嵌めによる支圧応力 (P_3 及び P_7) 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。

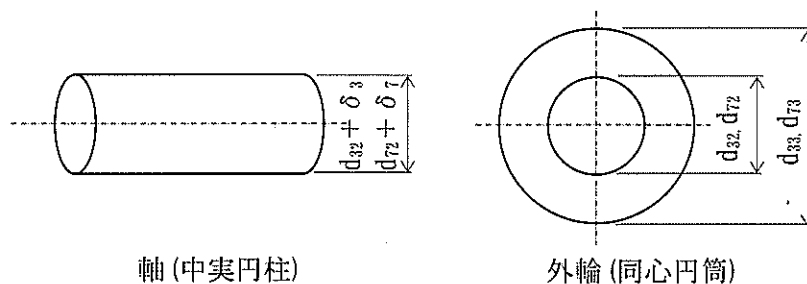
$$\left. \begin{aligned}
 P_3 &= \frac{\alpha_3}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \\
 P_7 &= \frac{\alpha_7}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{1+\nu}{E'}\right) + \frac{2}{E'} \frac{d_{72}^2}{d_{73}^2 - d_{72}^2}}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

ここで、

- ν : ポアソン比 (=0.3)
- α_3 : 上部トラニオンのしまり嵌め比 (= δ_3/d_{32})
- α_7 : 下部トラニオンのしまり嵌め比 (= δ_7/d_{72})
- δ_3 : 上部トラニオンの外輪(穴)と軸の初期しめ代(直径差) (= mm)
- δ_7 : 下部トラニオンの外輪(穴)と軸の初期しめ代(直径差) (= mm)
- d_{32} : 上部トラニオンの外輪(穴)内径 (=270mm)
- d_{33} : 上部トラニオンの外輪(穴)外径 (= mm)

- d_{72} : 下部トラニオンの外輪(穴)内径 (=290mm)
- d_{73} : 下部トラニオンの外輪(穴)外径 (= mm)

- 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)

評価位置③及び⑦の自重、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_3 及び S_7 は次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned}
 S_3 &= \text{MAX} [\sigma_{31}, \sigma_{32}] + P_3 \\
 S_7 &= \text{MAX} [\sigma_{71}, \sigma_{72}] + P_7
 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

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
上部トラニオン 段付き部	①	せん断応力（一次応力）	—	—
		曲げ応力（一次応力）	—	—
		組合せ応力（一次応力）	—	—
		せん断応力（一次+二次応力）	29	682
		曲げ応力（一次+二次応力）	44	1182
	②	せん断応力（一次応力）	—	—
		曲げ応力（一次応力）	—	—
		組合せ応力（一次応力）	—	—
		せん断応力（一次+二次応力）	9	682
		曲げ応力（一次+二次応力）	48	1182
上部トラニオン 接続部	③	支圧応力（一次応力）	—	—
		支圧応力（一次+二次応力）	75	343 ^(注1)
下部トラニオン 段付き部	⑤	せん断応力（一次応力）	12	227
		曲げ応力（一次応力）	23	394
		組合せ応力（一次応力）	31	394
		せん断応力（一次+二次応力）	23	682
		曲げ応力（一次+二次応力）	44	1182
	⑥	せん断応力（一次応力）	8	227
		曲げ応力（一次応力）	42	394
		組合せ応力（一次応力）	45	394
		せん断応力（一次+二次応力）	14	682
		曲げ応力（一次+二次応力）	83	1182
下部トラニオン 接続部	⑦	支圧応力（一次応力）	30	228 ^(注1)
		支圧応力（一次+二次応力）	100	343 ^(注1)

（注1）トラニオン接続部（胴側）の方が許容応力は小さいため、トラニオン接続部（胴側）の評価基準値を示す。

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。

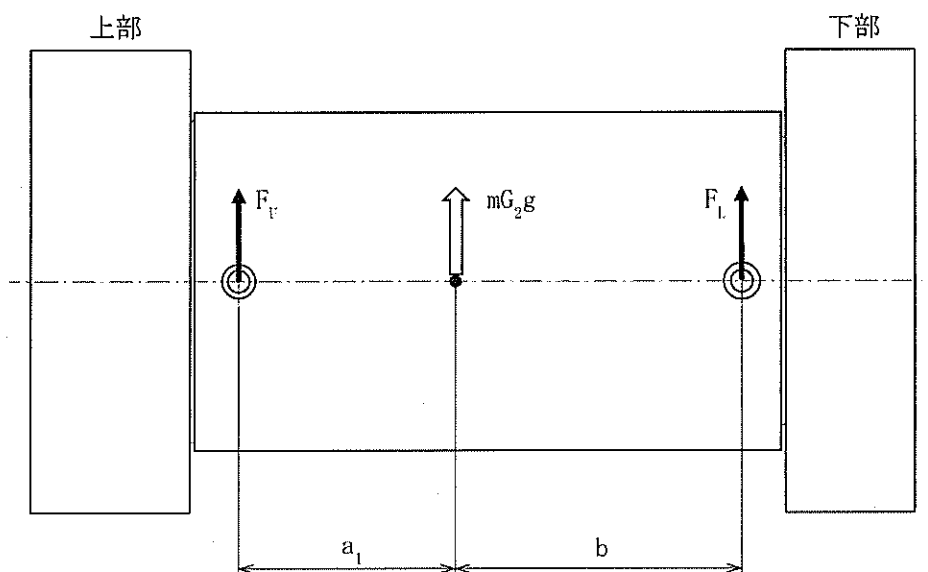
- ・吊上げ荷重（自重を含む。）
- ・熱荷重

3.3.2 計算方法

(1) トラニオン段付き部

(a) 一次応力

吊上げ時において、MSF-24P(S)型の吊上げ荷重は、上部トラニオン及び下部トラニオンに作用する。（第3-2図参照）



第3-2図 トラニオンに作用する荷重（吊上げ時）

(i) せん断応力

①上部トラニオン

吊上げ荷重により評価位置①に発生するせん断応力(τ_U)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_U &= \frac{F_U}{A_1} \\ F_U &= \frac{b}{2(a_1+b)} mG_2g \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

ここで、

- F_U : 上部トラニオンに作用する荷重 (N)
- A_1 : 3.2.2 (1) (b) (i)と同じ
- m : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ
- G_2 : 鉛直方向加速度係数 (吊上げ時) (=1.3)
- g : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ
- a_1 : 重心から上部トラニオンに作用する荷重の作用点までの距離 (= mm)
- b : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ

また、評価位置②に発生するせん断応力(τ_D)は、(3.14)式で計算される。ただし、(3.14)式の A_1 を A_2 とする。

ここで、

- A_2 : 3.2.2 (1) (b) (i)と同じ

②下部トラニオン

吊上げ荷重により評価位置④に発生するせん断応力(τ_L)は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_L &= \frac{F_L}{A_4} \\ F_L &= \frac{a_1}{2(a_1+b)} mG_2g \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

ここで、

- F_L : 下部トラニオンに作用する荷重 (N)
- A_4 : 評価位置④の断面積 (= mm²)
評価位置④の内径は mm であるが、保守的に近傍の内径 mm として評価する。
- m : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ
- G_2 : 3.3.2 (1) (a) (i)と同じ
- g : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ

- a_1 : 3.3.2 (1) (a) (i)と同じ
 b : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ

また、評価位置⑤及び⑥に発生するせん断応力 (τ_1) は、(3.15)式で計算される。ただし、(3.15)式の A_1 を A_5 又は A_6 とする。

ここで、

- A_5 : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ
 A_6 : 3.2.2 (1) (a) (i)と同じ

(ii) 曲げ応力

①上部トラニオン

吊上げ荷重により評価位置①に発生する曲げ応力 (σ_{bU}) は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bU} &= \frac{M_U}{Z_1} \\ M_U &= F_U \cdot L_{12} \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

ここで、

- M_U : 上部トラニオンの曲げモーメント (N・mm)
 F_U : 3.3.2 (1) (a) (i)と同じ
 Z_1 : 3.2.2 (1) (b) (ii)と同じ
 L_{12} : 評価位置①と荷重作用位置との距離 (=40 mm)

また、評価位置②に発生する上部トラニオンの曲げ応力 (σ_{bU}) は、(3.16)式で計算される。ただし、(3.16)式の Z_1 及び L_{12} を Z_2 及び L_{22} とする。

ここで、

- Z_2 : 3.2.2 (1) (b) (ii)と同じ
 L_{22} : 評価位置②と荷重作用位置との距離 (=250 mm)

②下部トラニオン

吊上げ荷重により評価位置④に発生する下部トラニオンの曲げ応力 (σ_{bL}) は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bL} &= \frac{M_L}{Z_4} \\ M_L &= F_L L_{12} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

ここで、

- M_L : 下部トラニオンの曲げモーメント (N・mm)

F_{L1} : 3.3.2 (1) (a) (i) と同じ

Z_1 : 評価位置④の断面係数 (= \square mm³)

評価位置④の内径は \square mm であるが、保守的に近傍の内径 \square mm として評価する。

L_{12} : 評価位置④と荷重作用位置との距離 (=40 mm)

また、評価位置⑤及び⑥に発生する曲げ応力(σ_{bU})は、(3.17)式で計算される。ただし、(3.17)式の Z_1 及び L_{12} を Z_5 又は Z_6 及び L_{52} 又は L_{62} とする。

ここで、

Z_5 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

Z_6 : 3.2.2 (1) (a) (ii) と同じ

L_{52} : 評価位置⑤と荷重作用位置との距離 (=130 mm)

L_{62} : 評価位置⑥と荷重作用位置との距離 (=340 mm)

(iii) 組合せ応力

せん断応力(τ_U 及び τ_L)と曲げ応力(σ_{bU} 及び σ_{bL})との組合せ応力(σ_{TU} 及び σ_{TL})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{TU} &= \sqrt{\sigma_{bU}^2 + 3\tau_U^2} \\ \sigma_{TL} &= \sqrt{\sigma_{bL}^2 + 3\tau_L^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

(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

吊上げ時において、吊上げ荷重は、上部トラニオン及び下部トラニオンに作用する。(第3-2図参照) 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及び第2-2図に示す下部トラニオンの評価位置⑦である。

① 上部トラニオン

吊上げ荷重により評価位置③に発生する支圧応力(σ_{31} 及び σ_{32})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{31} &= R_{31} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \\ \sigma_{32} &= R_{32} / (d_3 \cdot L_3 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} R_{31} &= \frac{F_U L_{22} + \mu F_U (d_3/2) + F_U L_3}{\mu d_3 + L_3} \\ R_{32} &= \frac{F_U L_{22} - \mu F_U (d_3/2)}{\mu d_3 + L_3} \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

R_{31} : 上部トラニオンに作用する反力 (N)

R_{32} : 上部トラニオンに作用する反力 (N)

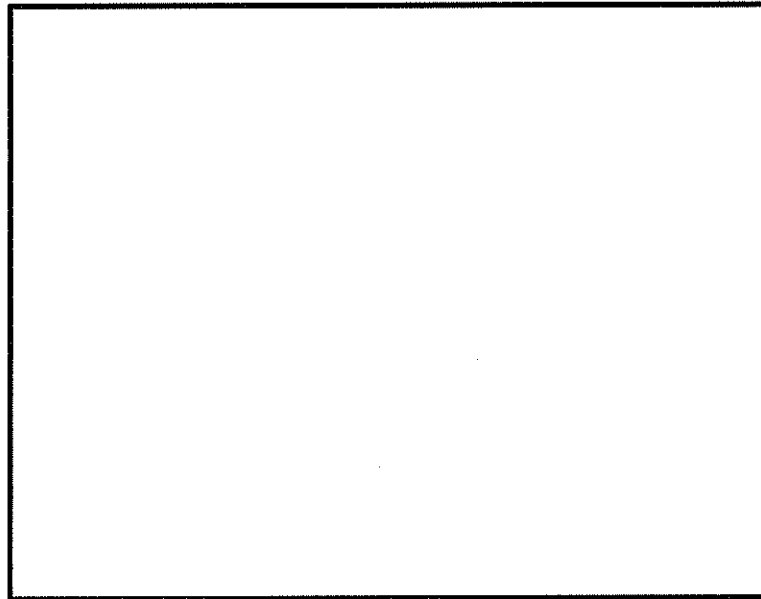
F_U : 3.3.2(1)(a)(i)と同じ

L_{22} : 0点から荷重作用点までの距離 (3.3.2(1)(a)(ii)と同じ)

L_3 : 0点から反力 R_{32} の作用点までの距離 (3.2.2(2)(b)(i)と同じ)

μ : 摩擦係数 (3.2.2(2)(a)と同じ)

d_3 : 上部トラニオン嵌め込み部の外径 (3.2.2(2)(b)(i)と同じ)



上部トラニオン接触部の解析モデル

②下部トラニオン

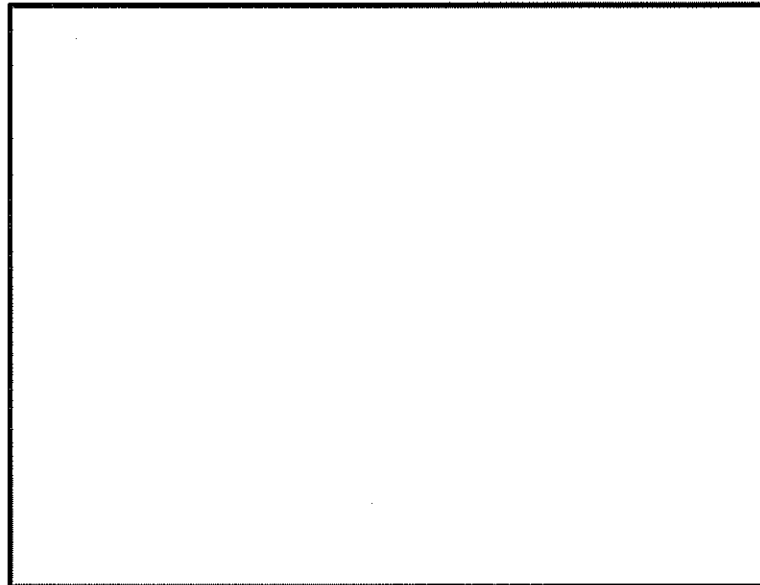
吊上げ荷重により評価位置⑦の下部トラニオンに発生する支圧応力(σ_{71} 及び σ_{72})は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{71} &= R_{71} / (d_7 \cdot L_7 / 2) \\ \sigma_{72} &= R_{72} / (d_7 \cdot L_7 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} R_{71} &= \frac{F_L L_{62} + \mu F_L (d_7/2) + F_L L_7}{\mu d_7 + L_7} \\ R_{72} &= \frac{F_L L_{62} - \mu F_L (d_7/2)}{\mu d_7 + L_7} \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

- R_{71} : 下部トラニオンに作用する反力 (N)
- R_{72} : 下部トラニオンに作用する反力 (N)
- F_L : 3.3.2 (1) (a) (i)と同じ
- L_{62} : 0点から荷重作用点までの距離 (3.3.2(1) (a) (ii)と同じ)
- L_7 : 0点から反力 R_{72} の作用点までの距離 (3.2.2(2) (a)と同じ)
- μ : 摩擦係数 (3.2.2(2) (a)と同じ)
- d_7 : 嵌め込み部の外径 (3.2.2(2) (a)と同じ)



下部トラニオン接続部の解析モデル

(b) 二次応力

評価位置③及び⑦のしまり嵌めによる支圧応力 (P_3 及び P_7) は、3.2.2(2) (b) (ii)で計算される値と同じである。

(c) 一次+二次応力

評価位置③及び⑦の吊上げ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_3 及び S_7 は次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} S_3 &= \text{MAX}[\sigma_{31}, \sigma_{32}] + P_3 \\ S_7 &= \text{MAX}[\sigma_{71}, \sigma_{72}] + P_7 \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

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、発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-2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）	48	227
		曲げ応力（一次応力）	82	394
		組合せ応力（一次応力）	117	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	48	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	82	1182
	②	せん断応力（一次応力）	14	227
		曲げ応力（一次応力）	80	394
		組合せ応力（一次応力）	84	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	14	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	80	1182
上部トラニオン 接続部	③	支圧応力（一次応力）	49	228 ^(注1)
		支圧応力（一次＋二次応力）	94	343 ^(注1)
下部トラニオン 段付き部	④	せん断応力（一次応力）	36	227
		曲げ応力（一次応力）	62	394
		組合せ応力（一次応力）	88	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	36	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	62	1182
	⑤	せん断応力（一次応力）	14	227
		曲げ応力（一次応力）	63	394
		組合せ応力（一次応力）	68	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	14	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	63	1182
	⑥	せん断応力（一次応力）	9	227
		曲げ応力（一次応力）	64	394
		組合せ応力（一次応力）	66	394
		せん断応力（一次＋二次応力）	9	682
		曲げ応力（一次＋二次応力）	64	1182
下部トラニオン 接続部	⑦	支圧応力（一次応力）	41	228 ^(注1)
		支圧応力（一次＋二次応力）	84	343 ^(注1)

(注1) トラニオン接続部（胴側）の方が許容応力は小さいため、トラニオン接続部（胴側）の評価基準値を示す。

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。

3.4.1 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添付書類 5-3-2-1 「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（吊上げ荷重）：200 回
- ③貯蔵時（自重及び固縛荷重）：10 回
- ④貯蔵時（貯蔵期間における崩壊熱の低下）：10 回

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。

$$S_a = \frac{SK_t K_r \frac{E_0}{E_t}}{2} \quad (3.24)$$

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（「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)

（添付書類 5-3-2-3 「トラニオンの強度計算方法」の「第 5-2 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」の上部トラニオン及び下部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(S)は、以下のとおり計算される。

(a) 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。

(b) 吊上げ時（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3-2表の上部トラニオン段付き部及び下部トラニオン段付き部示す値より次式で計算される。

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} \quad (3.25)$$

ここで、

σ_b : 第3-2表に示す曲げ応力（一次＋二次）

τ : 第3-2表に示すせん断応力（一次＋二次）

(c) 貯蔵時（自重及び固縛荷重）による応力強さの変動

自重及び固縛荷重による応力強さの変動は、第3-1表の上部トラニオン段付き部及び下部トラニオン段付き部に示す値より(3.25)式で計算される。

ここで、

σ_b : 第3-1表に示す曲げ応力（一次＋二次）

τ : 第3-1表に示すせん断応力（一次＋二次）

(d) 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_t)の比を考慮し補正する。

$$S_a = \frac{SK_t \frac{E_0}{E_t}}{2} \quad (3.26)$$

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 8-1 より)

E_t : 解析に用いる縦弾性係数 (MPa)

(添付書類 5-3-2-3 「トラニオンの強度計算方法」の「第5-2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」の上部トラニオン及び下部トラニオン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(S)は、以下のとおり計算される。

(a) 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) (δ_{3i} 及び δ_{7i})は、次式により計算される。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{3i} &= d_{32} \times \alpha_{3i} \times (T_{2i} - T_0) - d_{31} \times \alpha_{1i} \times (T_{1i} - T_0) \\ \delta_{7i} &= d_{72} \times \alpha_{2i} \times (T_{2i} - T_0) - d_{71} \times \alpha_{1i} \times (T_{1i} - T_0) \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

ここで、

- d_{32} : 上部トラニオン接続部(胴側)の穴径 (=270mm)
- d_{31} : 上部トラニオン接続部(トラニオン側)の外径 (= mm)
- d_{72} : 下部トラニオン接続部(胴側)の穴径 (=290mm)
- d_{71} : 下部トラニオン接続部(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}) ($1/^\circ\text{C}$)
- α_{1i} : トラニオンの熱膨張率(温度 T_{1i}) ($1/^\circ\text{C}$)
- T_{2i} : トラニオン接続部(胴側)の温度 ($i=I$; $^\circ\text{C}$, $i=0$; 20°C)
- T_{1i} : トラニオンの温度 ($i=I$; $^\circ\text{C}$, $i=0$; 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。

$$\left. \begin{aligned} P_{3i} &= \frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'}\right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \\ P_{7i} &= \frac{\alpha_{7i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'}\right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{72}^2}{d_{73}^2 - d_{72}^2}} \\ S_3 &= P_{3I} - P_{30} \\ S_7 &= P_{7I} - P_{70} \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

ここで、

- P_{3i} : 上部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力(MPa)
- P_{7i} : 下部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力(MPa)
- ν : ポアソン比 (=0.3)
- α_{3i} : 上部トラニオンのしまり嵌め比 (= δ_{3i}/d_{32})
- α_{7i} : 下部トラニオンのしまり嵌め比 (= δ_{7i}/d_{72})
- δ_{3i} : 上部トラニオン接続部のしめ代(直径差) (mm)

- δ_{7i} : 下部トラニオン接続部のしめ代 (直径差) (mm)
- d_{32} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{33} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{72} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{73} : 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 ; $i=0$)

(b) 吊上げ時 (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3-2表の上部トラニオン接続部 支圧応力 (一次応力) 及び下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。

(c) 貯蔵時 (自重及び固縛荷重) による応力強さの変動

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。

(d) 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崩壊熱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) (δ_{3i} 及び δ_{7i}) は、(3.27) 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 ($i=B$; \square °C, $i=E$; 20°C)
- T_{1i} : トラニオンの温度 ($i=B$; \square °C, $i=E$; 20°C)
- T_0 : 初期温度 (=20°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。

$$\left. \begin{aligned}
 P_{3i} &= \frac{\alpha_{3i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'}\right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{32}^2}{d_{33}^2 - d_{32}^2}} \\
 P_{7i} &= \frac{\alpha_{7i}}{\left(\frac{1-\nu}{E_i} + \frac{1+\nu}{E_i'}\right) + \frac{2}{E_i'} \frac{d_{72}^2}{d_{73}^2 - d_{72}^2}} \\
 S_3 &= P_{3B} - P_{3E} \\
 S_7 &= P_{7B} - P_{7E}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

ここで、

- P_{3i} : 上部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力 (MPa)
- P_{7i} : 下部トラニオンのしまり嵌めによる支圧応力 (MPa)
- ν : ポアソン比 (=0.3)
- α_{3i} : 上部トラニオンのしまり嵌め比 (= δ_{3i}/d_{32})
- α_{7i} : 下部トラニオンのしまり嵌め比 (= δ_{7i}/d_{72})
- δ_{3i} : 上部トラニオン接続部のしめ代 (直径差) (mm)
- δ_{7i} : 下部トラニオン接続部のしめ代 (直径差) (mm)
- d_{32} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{33} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{72} : 3.2.2 (2) (b) (ii) と同じ
- d_{73} : 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; $i=E$)

3.4.3 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。

$$U_f = \sum_{i=1}^k \frac{N_c(i)}{N_a(i)} \quad (3.30)$$

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 (—)

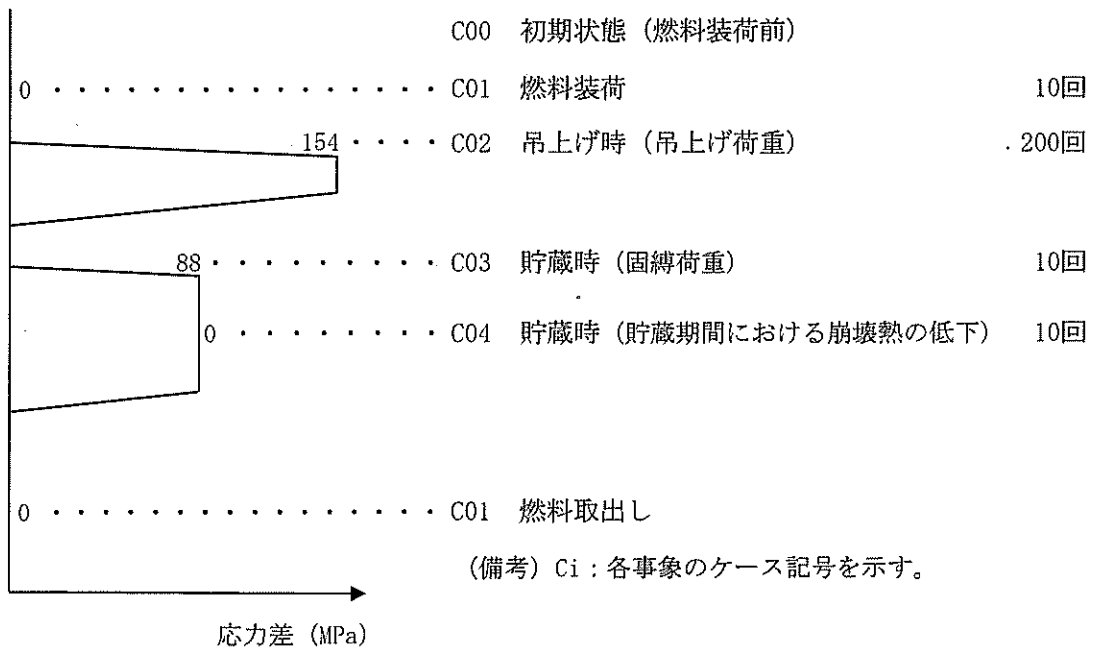
各サイクルの繰返し回数(N_c)と許容繰返し回数(N_a)との比は第3-3表から第3-6表に示すとおりとなり、疲労累積係数(U_f)は1.0以下であり、金属キャスク構造規格 MCD-3313の規定を満足する。

第 3-3 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 ₀	N _c	N _c /N ₀
1	0	0	—	10	—
2	117	154	10 ⁷	200	0.0001
3	67	88	10 ⁷	10	0.0001
4	0	0	—	10	—

疲労累積係数 U_f=0.0002

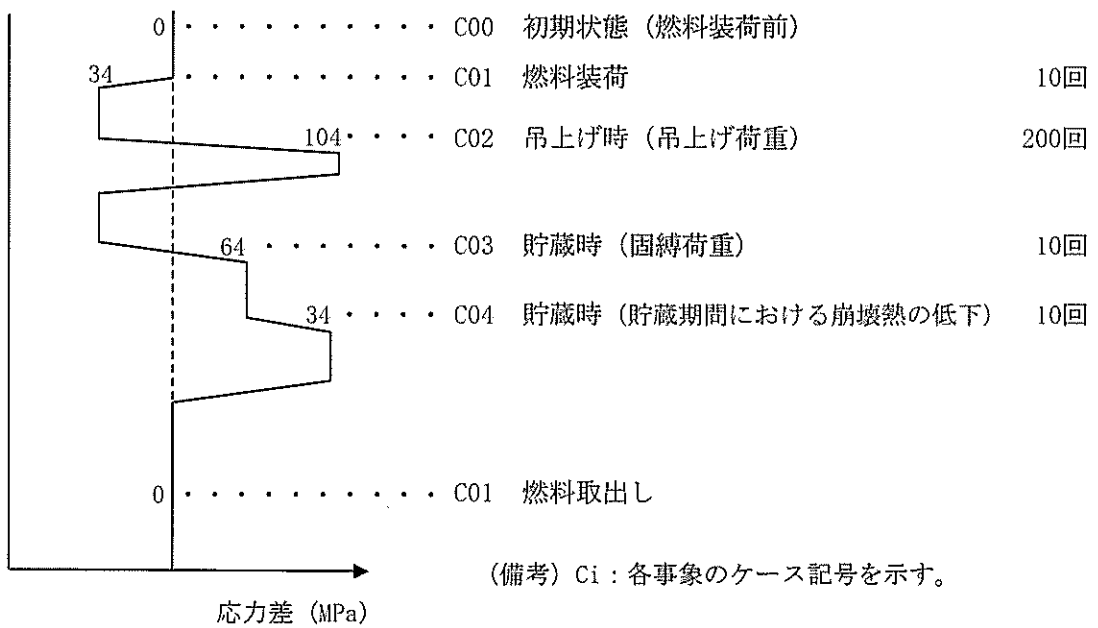
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第3-4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	16	34	10 ⁶	10	0.0001
2	49	104	302322	200	0.0007
3	30	64	10 ⁶	10	0.0001
4	16	34	10 ⁶	10	0.0001
疲労累積係数 U _f =0.0010					

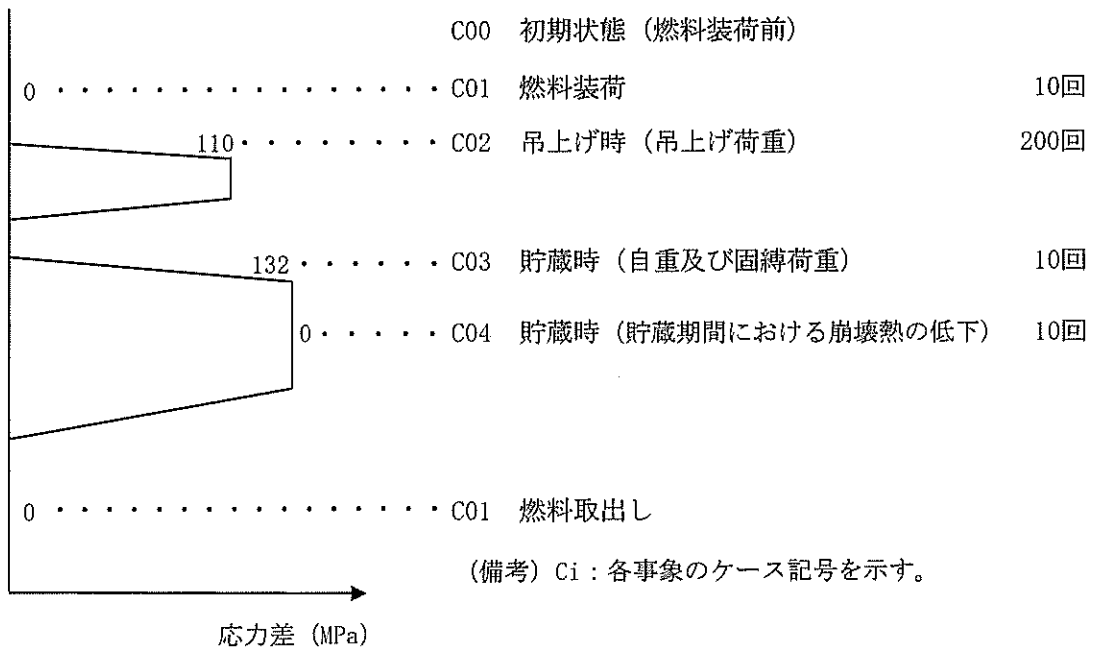
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第3-5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	88	110	10 ⁷	200	0.0001
3	87	132	10 ⁷	10	0.0001
4	0	0	—	10	—
疲労累積係数 U _f =0.0002					

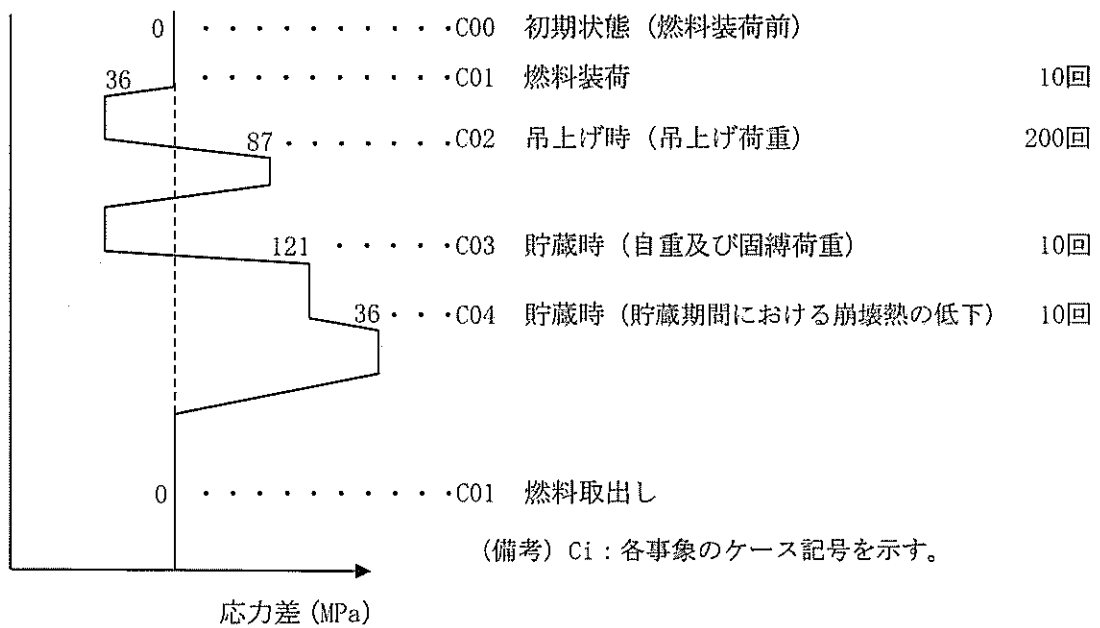
以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



第3-6表 疲労解析結果（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	17	36	10 ⁶	10	0.0001
2	41	87	902664	200	0.0003
3	57	121	161114	10	0.0001
4	17	36	10 ⁶	10	0.0001
疲労累積係数 U _f =0.0006					

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。



添付書類 5-3-3-4 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書

目 次

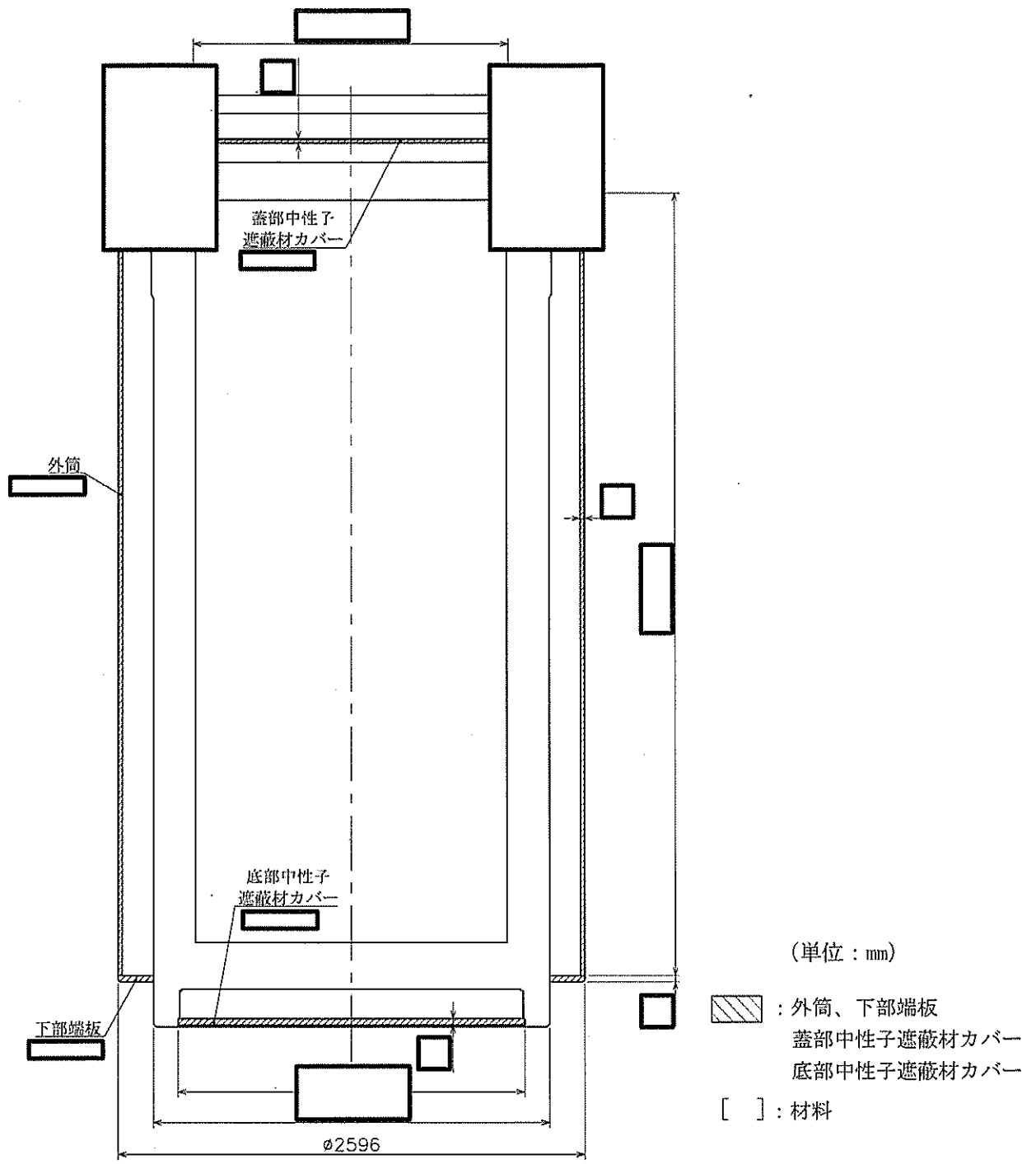
1. 概要.....	1
2. 形状・寸法・材料.....	1
3. 応力計算.....	3
3.1 応力評価位置.....	3
3.2 貯蔵時.....	5
3.3 吊上げ時.....	10

1. 概要

本資料は、資料 5-3-2-4「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」に基づき、MSF-24P(S)型の外筒、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・寸法・材料を第2-1図に示す。

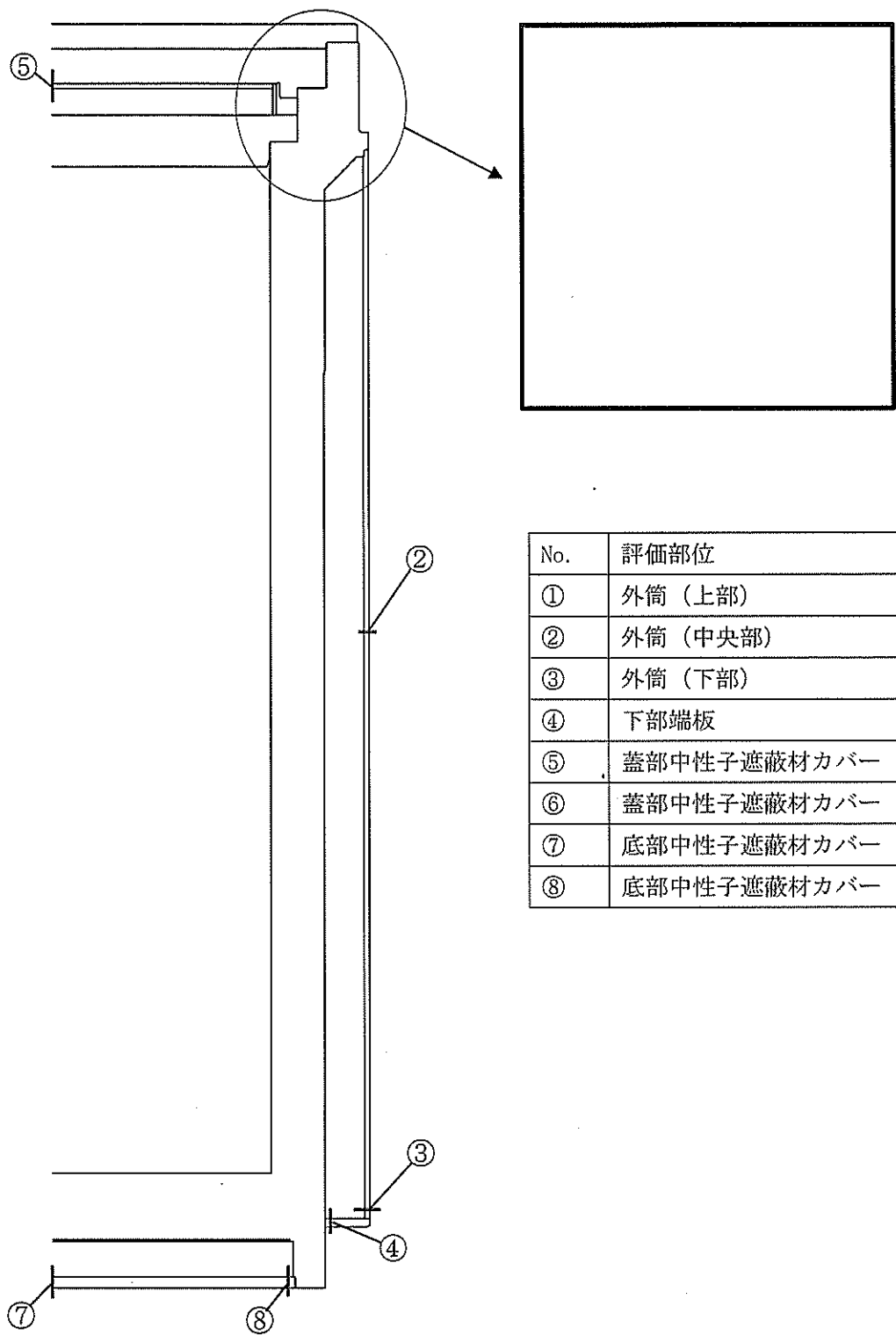


第2-1図 外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの形状・寸法・材料

3. 応力計算

3.1 応力評価位置

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位置を第3-1図に示す。



No.	評価部位
①	外筒（上部）
②	外筒（中央部）
③	外筒（下部）
④	下部端板
⑤	蓋部中性子遮蔽材カバー（中央部）
⑥	蓋部中性子遮蔽材カバー（端部）
⑦	底部中性子遮蔽材カバー（中央部）
⑧	底部中性子遮蔽材カバー（端部）

第3-1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位置

3.2 貯蔵時

3.2.1 荷重条件

貯蔵時における荷重は、添付書類 5-3-3-1 「密封容器の強度計算書」の3.3.1と同じである。

3.2.2 計算方法

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。計算方法は、添付書類 5-3-3-1 「密封容器の強度計算書」の3.3.2と同じである。

3.2.3 応力計算結果

応力計算結果を第3-1表から第3-4表に示す。第3-1表から第3-4表に示すとおり、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発生する応力は、許容応力値以下である。

第 3-1 表 外筒の応力評価 (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
外筒 (上部)	①	引張応力 (一次応力)	18	156
	①	圧縮応力 (一次応力)	2	156
	①	せん断応力 (一次応力)	13	90
	①	曲げ応力 (一次応力)	60	156
	①	組合せ応力 (一次応力)	25	156
	①	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	76	468
	①	せん断応力 (一次+二次応力)	24	270
	①	曲げ応力 (一次+二次応力)	51	468
外筒 (中央部)	②	引張応力 (一次応力)	36	156
	②	圧縮応力 (一次応力)	1	156
	②	せん断応力 (一次応力)	1	90
	②	曲げ応力 (一次応力)	4	156
	②	組合せ応力 (一次応力)	33	156
	②	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	43	468
	②	せん断応力 (一次+二次応力)	3	270
	②	曲げ応力 (一次+二次応力)	5	468
外筒 (下部)	③	引張応力 (一次応力)	10	156
	③	圧縮応力 (一次応力)	3	156
	③	せん断応力 (一次応力)	13	90
	③	曲げ応力 (一次応力)	60	156
	③	組合せ応力 (一次応力)	26	156
	③	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	92	468
	③	せん断応力 (一次+二次応力)	24	270
	③	曲げ応力 (一次+二次応力)	111	468

第 3-2 表 下部端板の応力評価（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
下部端板	④	引張応力（一次応力）	4	136
	④	圧縮応力（一次応力）	2	136
	④	せん断応力（一次応力）	5	78
	④	曲げ応力（一次応力）	20	136
	④	組合せ応力（一次応力）	10	136
	④	引張/圧縮応力（一次+二次応力）	53	410
	④	せん断応力（一次+二次応力）	26	236
	④	曲げ応力（一次+二次応力）	117	410

第 3-3 表 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価 (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
蓋部中性子 遮蔽材 カバー (中央部)	⑤	引張応力 (一次応力)	-	156
	⑤	圧縮応力 (一次応力)	1	156
	⑤	せん断応力 (一次応力)	1	90
	⑤	曲げ応力 (一次応力)	1	156
	⑤	組合せ応力 (一次応力)	1	156
	⑤	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	3	470
	⑤	せん断応力 (一次+二次応力)	1	271
	⑤	曲げ応力 (一次+二次応力)	2	470
蓋部中性子 遮蔽材 カバー (端部)	⑥	引張応力 (一次応力)	-	156
	⑥	圧縮応力 (一次応力)	1	156
	⑥	せん断応力 (一次応力)	1	90
	⑥	曲げ応力 (一次応力)	1	156
	⑥	組合せ応力 (一次応力)	1	156
	⑥	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	20	470
	⑥	せん断応力 (一次+二次応力)	6	271
	⑥	曲げ応力 (一次+二次応力)	18	470

第 3-4 表 底部中性子遮蔽材カバーの応力評価 (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
底部中性子 遮蔽材 カバー (中央部)	⑦	引張応力 (一次応力)	3	136
	⑦	圧縮応力 (一次応力)	1	136
	⑦	せん断応力 (一次応力)	4	78
	⑦	曲げ応力 (一次応力)	10	136
	⑦	組合せ応力 (一次応力)	6	136
	⑦	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	41	410
	⑦	せん断応力 (一次+二次応力)	8	236
	⑦	曲げ応力 (一次+二次応力)	14	410
底部中性子 遮蔽材 カバー (端部)	⑧	引張応力 (一次応力)	5	136
	⑧	圧縮応力 (一次応力)	-	136
	⑧	せん断応力 (一次応力)	6	78
	⑧	曲げ応力 (一次応力)	39	136
	⑧	組合せ応力 (一次応力)	11	136
	⑧	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	46	410
	⑧	せん断応力 (一次+二次応力)	13	236
	⑧	曲げ応力 (一次+二次応力)	34	410

3.3 吊上げ時

3.3.1 荷重条件

吊上げ時における荷重は、添付書類 5-3-3-1 「密封容器の強度計算書」の3.4.1と同じである。

3.3.2 計算方法

応力計算は、解析コードABAQUSにより行う。計算方法は、添付書類 5-3-3-1 「密封容器の強度計算書」の3.4.2と同じである。

3.3.3 応力計算結果

応力計算結果を第3-5表から第3-8表に示す。第3-5表から第3-8表に示すとおり、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発生する応力は、許容応力値以下である。

第3-5表 外筒の応力評価（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
外筒 (上部)	①	引張応力（一次応力）	18	156
	①	圧縮応力（一次応力）	-	156
	①	せん断応力（一次応力）	13	90
	①	曲げ応力（一次応力）	60	156
	①	組合せ応力（一次応力）	25	156
	①	引張/圧縮応力（一次＋二次応力）	58	468
	①	せん断応力（一次＋二次応力）	9	270
	①	曲げ応力（一次＋二次応力）	35	468
外筒 (中央部)	②	引張応力（一次応力）	36	156
	②	圧縮応力（一次応力）	1	156
	②	せん断応力（一次応力）	1	90
	②	曲げ応力（一次応力）	4	156
	②	組合せ応力（一次応力）	33	156
	②	引張/圧縮応力（一次＋二次応力）	40	468
	②	せん断応力（一次＋二次応力）	2	270
	②	曲げ応力（一次＋二次応力）	5	468
外筒 (下部)	③	引張応力（一次応力）	10	156
	③	圧縮応力（一次応力）	3	156
	③	せん断応力（一次応力）	13	90
	③	曲げ応力（一次応力）	60	156
	③	組合せ応力（一次応力）	26	156
	③	引張/圧縮応力（一次＋二次応力）	92	468
	③	せん断応力（一次＋二次応力）	24	270
	③	曲げ応力（一次＋二次応力）	112	468

第 3-6 表 下部端板の応力評価（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
下部端板	④	引張応力（一次応力）	4	136
	④	圧縮応力（一次応力）	2	136
	④	せん断応力（一次応力）	5	78
	④	曲げ応力（一次応力）	19	136
	④	組合せ応力（一次応力）	10	136
	④	引張/圧縮応力（一次＋二次応力）	53	410
	④	せん断応力（一次＋二次応力）	26	236
	④	曲げ応力（一次＋二次応力）	119	410

第 3-7 表 蓋部中性子遮蔽材カバーの応力評価 (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
蓋部中性子 遮蔽材 カバー (中央部)	⑤	引張応力 (一次応力)	-	156
	⑤	圧縮応力 (一次応力)	1	156
	⑤	せん断応力 (一次応力)	1	90
	⑤	曲げ応力 (一次応力)	1	156
	⑤	組合せ応力 (一次応力)	1	156
	⑤	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	3	470
	⑤	せん断応力 (一次+二次応力)	1	271
	⑤	曲げ応力 (一次+二次応力)	2	470
蓋部中性子 遮蔽材 カバー (端部)	⑥	引張応力 (一次応力)	-	156
	⑥	圧縮応力 (一次応力)	1	156
	⑥	せん断応力 (一次応力)	1	90
	⑥	曲げ応力 (一次応力)	1	156
	⑥	組合せ応力 (一次応力)	1	156
	⑥	引張/圧縮応力 (一次+二次応力)	14	470
	⑥	せん断応力 (一次+二次応力)	4	271
	⑥	曲げ応力 (一次+二次応力)	14	470

第3-8表 底部中性子遮蔽材カバーの応力評価（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
底部中性子 遮蔽材 カバー (中央部)	⑦	引張応力（一次応力）	3	136
	⑦	圧縮応力（一次応力）	1	136
	⑦	せん断応力（一次応力）	4	78
	⑦	曲げ応力（一次応力）	10	136
	⑦	組合せ応力（一次応力）	6	136
	⑦	引張/圧縮応力（一次+二次応力）	40	410
	⑦	せん断応力（一次+二次応力）	6	236
	⑦	曲げ応力（一次+二次応力）	13	410
底部中性子 遮蔽材 カバー (端部)	⑧	引張応力（一次応力）	5	136
	⑧	圧縮応力（一次応力）	-	136
	⑧	せん断応力（一次応力）	6	78
	⑧	曲げ応力（一次応力）	39	136
	⑧	組合せ応力（一次応力）	11	136
	⑧	引張/圧縮応力（一次+二次応力）	41	410
	⑧	せん断応力（一次+二次応力）	11	236
	⑧	曲げ応力（一次+二次応力）	32	410

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

1. はじめに	別紙 1-1
2. 解析コードの概要	別紙 1-2
2.1 ABAQUS	別紙 1-2

1. はじめに

本資料は、添付書類5「強度に関する説明書」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 ABAQUS

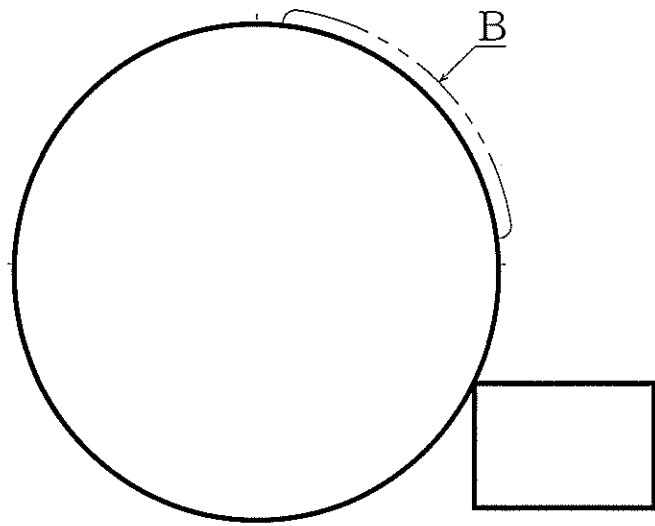
項目	コード名
	ABAQUS
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 2018 HF4
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析
コードの概要	<p>米国 HKS (Hibbitt, Karlsson & Sorensen) 社によって開発され、現在はダッソー・システムズ (株) によって保守されている有限要素法による構造解析用汎用コードである。</p> <p>応力解析、熱応力解析、伝熱解析などを行うことができ、特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、多くの民間・国立研究所、大学及び産業界で利用されている実績を持つ。</p>
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	<p>ABAQUS Ver. 2018 HF4 は JSME クラス「クラス3容器」である特定兼用キャスクの3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、適用機能による応力解析を行い、解析解が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析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。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、自動車、航空宇宙、防衛、工業製品、学術研究などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本申請で使用する3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・本申請において使用するバージョンは、発電用原子炉の既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンアップにおいて、今回使用している解析機能に影響が生じていないことを確認している。 ・検証の体系と本申請で使用する体系が同等であることから、解析解が理論モデルによる理論解を再現できることをもって、解析機能の妥当性も確認できる。 ・本申請における構造に対し使用する要素、応力解析に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

添付書類 6 構造図

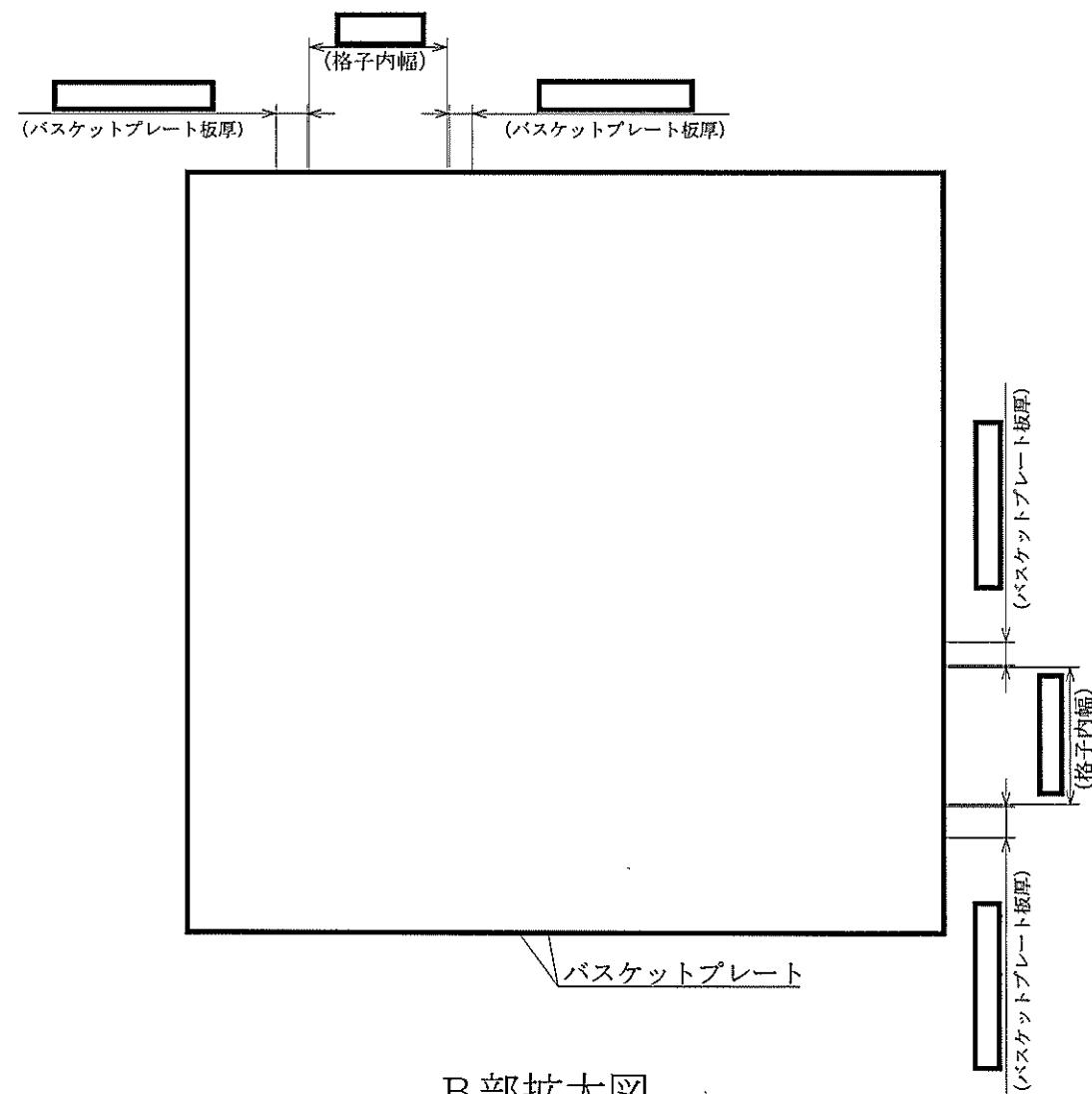
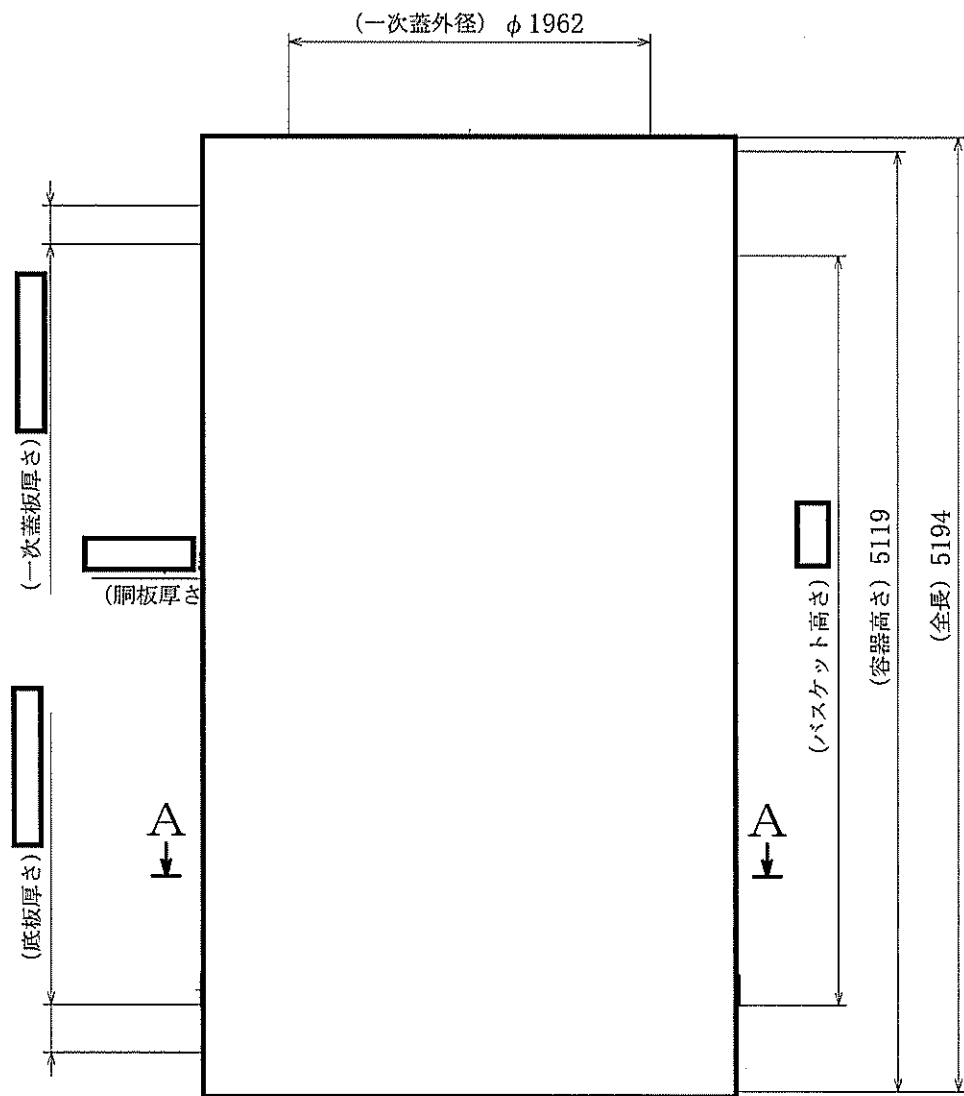
本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

第1図 特定兼用キャスクの構造図 MSF-24P(S)型 (1/2)	1
第2図 特定兼用キャスクの構造図 MSF-24P(S)型 (2/2)	2
第1図及び第2図「特定兼用キャスクの構造図 MSF-24P(S)型」の補足	3



A-A断面

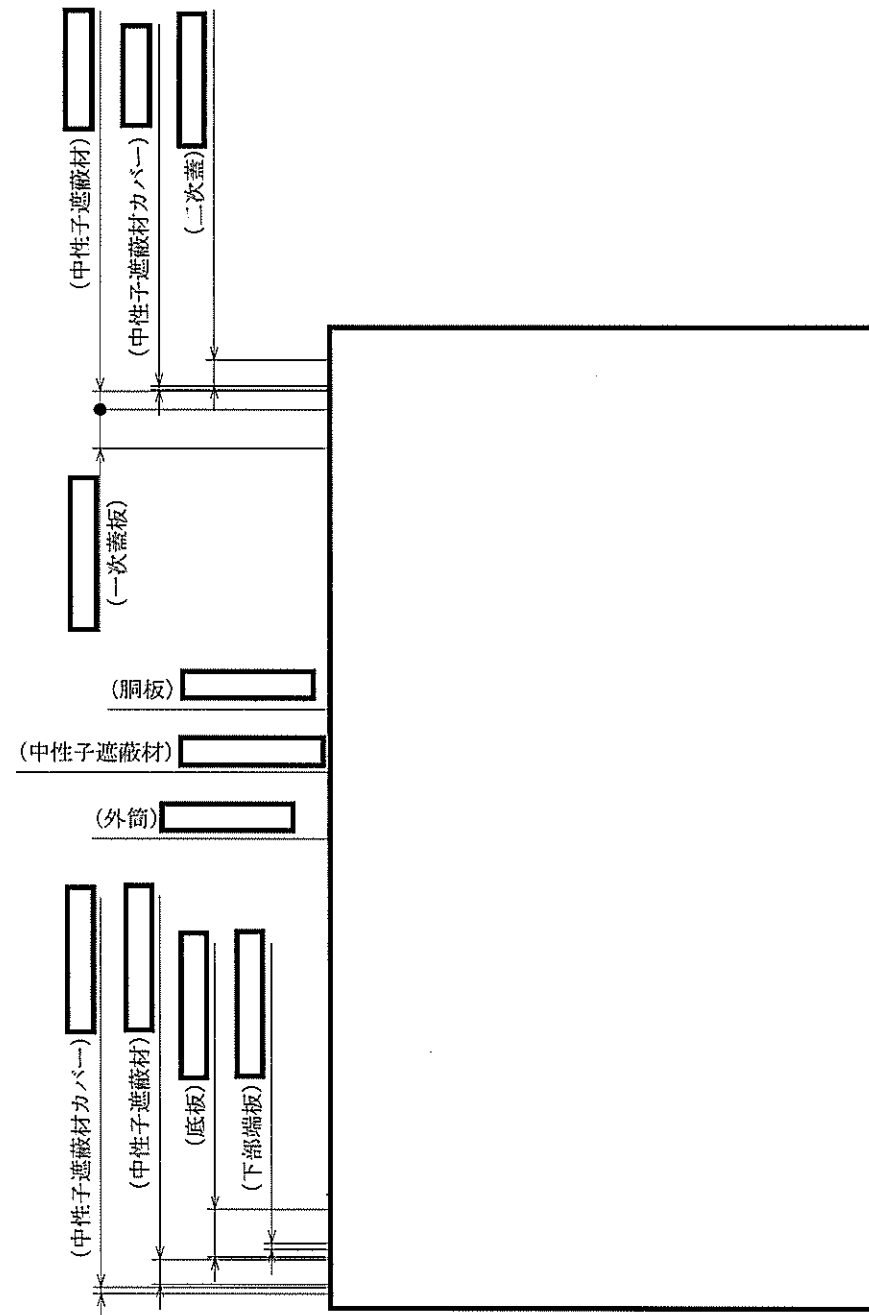


B部拡大図

主要目表			
名称及び型式	—	MSF-24P (S) 型	
種類	—	鍛造キャスク (鋼-レジン遮蔽体タイプ)	
容量	体	24	
最高使用圧力	MPa	(差圧) 0.41	
最高使用温度	容器	℃	150
	バスケット	℃	195
材料	胴板	—	[Redacted Box]
	一次蓋板	—	
	底板	—	
	バスケットプレート	—	

(注) 寸法の単位はmmである。

第1図
型式設計特定機器の型式指定申請
特定兼用キャスクの構造図 MSF-24P (S) 型 (1/2)
三菱重工業株式会社



主要目表						
放射線遮蔽材	種類	部位		冷却方法	材料	
		鍛造キャスク (鋼-レジン遮蔽体タイプ)	胴部	銅板		自然冷却
中性子遮蔽材				自然冷却	レジン	
外筒				自然冷却		
下部端板				自然冷却		
底部	底板		自然冷却			
	中性子遮蔽材		自然冷却	レジン		
	中性子遮蔽材カバー		自然冷却			
蓋部	一次蓋		一次蓋板		自然冷却	
			中性子遮蔽材		自然冷却	レジン
			中性子遮蔽材カバー		自然冷却	
	二次蓋		自然冷却			

(注) 寸法の単位はmmである。

第2図

型式設計特定機器の型式指定申請
特定兼用キャスクの構造図 MSF-24P (S) 型 (2/2)
三菱重工業株式会社

第1図及び第2図 「特定兼用キャスクの構造図 MSF-24P(S)型」の補足

(1) MSF-24P(S)型の寸法許容範囲

MSF-24P(S)型に関する公称値の許容範囲は次のとおり。

名 称		適用寸法 (mm)		
		最大値	公称値	最小値
全	長	[]	5,194	[]
外	径		2,596	
容 器	洞 内 径		[]	
	洞 板 厚 さ		[]	
	一 次 蓋 外 径		1,962	
	一 次 蓋 板 厚 さ		[]	
	底 板 厚 さ		[]	
	高 さ		5,119	
バ ス ケ ッ ト	外 径		[]	
	高 さ		[]	
	格 子 内 幅	[]		
	ハ スケ ッ ト フ レ ー ト 板 厚	[]		

また、MSF-24P(S)型に関する放射線遮蔽材の公称値の許容範囲は次のとおり。

名 称		適用寸法 (mm)			
		最大値	公称値	最小値	
放射線遮蔽材	胴部	胴板			
		中性子遮蔽材			
		外筒			
		下部端板			
	底部	底板			
		中性子遮蔽材			
		中性子遮蔽カバー			
	蓋部	一次蓋	一次蓋板		
			中性子遮蔽材		
			中性子遮蔽カバー		
		二次蓋			

(2) 許容範囲の根拠

許容範囲の根拠となる許容差等は次のとおり。

名 称		許容値 (mm)	根 拠
全	長		
外	径		
容 器	洞 内 径		
	洞 板 厚 さ		
	一 次 蓋 外 径		
	一 次 蓋 板 厚 さ		
	底 板 厚 さ		
	高 さ		
バ ス ケ ッ ト	外 径		
	高 さ		
	格 子 内 幅		
	バスケットプレート板厚		



名 称		許容値 (mm)	根 拠	
放射線遮蔽材	胴部	胴板		
		中性子遮蔽材		
		外筒		
		下部端板		
	底部	底板		
		中性子遮蔽材		
		中性子遮蔽材カバー		
	蓋部	一次蓋		一次蓋板
				中性子遮蔽材
				中性子遮蔽材カバー
二次蓋				

添付書類 7 容量、最高使用圧力及び最高使用温度の
設定根拠に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 容量、最高使用圧力及び最高使用温度の設定根拠	2

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（昭和53年12月28日 通商産業省令第77号）別表第三に基づき、特定兼用キャスクの容量、最高使用圧力及び最高使用温度の設定根拠について説明するものである。

2. 容量、最高使用圧力及び最高使用温度の設定根拠

名称及び型式		MSF-24P(S)型
容量	体	24
最高使用圧力	MPa	(差圧) 0.41
最高使用温度	℃	容器：150 バスケット：195
<p>【設定根拠】</p> <p>1. 容量</p> <p>MSF-24P(S)型の容量は、特定兼用キャスクに要求される安全機能を満足する容量である24体とする。収納する使用済燃料集合体の仕様について第1表に示す。また、24体のうち中央部の12体については、第2表に示すバーナブルポイズン集合体を挿入して収納することができる。</p> <p>2. 最高使用圧力</p> <p>MSF-24P(S)型の最高使用圧力は、通常貯蔵時に想定される最高圧力を上回るように設定する。</p> <p>通常貯蔵時において、一次蓋と二次蓋の間の圧力は、仮に一次蓋金属ガスケットに漏えいが生じたとしても胴及び一次蓋の内部が負圧を維持するとともに、適切に漏えい率が監視できる圧力として最大0.31 MPaGとする。また、容器の胴及び一次蓋の内部圧力については、放射性物質を容器内に閉じ込めるため、設計貯蔵期間（60年）を通じて負圧を維持することから、保守的に真空(-0.1 MPaG)とする。よって、最高使用圧力は、一次蓋の内外面に受ける差圧の最大値として、保守的に0.41 (MPa)とする。</p> <p>3. 最高使用温度</p> <p>MSF-24P(S)型の最高使用温度は、通常貯蔵時に想定される最高温度を上回るように設定する。</p> <p><input type="checkbox"/> 以上冷却した使用済燃料を24体収納した際に、容器を構成する胴及び一次蓋のうち、より温度が高い胴の最高温度^(注)は142℃、バスケットの最高温度は188℃であることから、これを上回る温度として150℃及び195℃とする。</p> <p>(注) MSF-24P(S)型の最大崩壊熱量（15.8kW）に対して余裕をみて設定した設計崩壊熱量（18.1kW）を入力条件とした除熱解析結果である。</p>		

第1表 使用済燃料集合体の仕様 (1/2)

燃料集合体の種類と型式		中央部 (注)				外周部 (注)			
		17×17 燃料							
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型
項 目									
種 類	軽水炉 (PWR) 使用済燃料								
性 状	固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)								
燃料集合体1体の仕様	ウラン重量 (kg 以下)	□							
	放射能の量 (収納物平均) (PBq 以下)	□							
	初期濃縮度 (wt% 以下)	4.2		3.7		4.2		3.7	
	最高燃焼度 (MWd/t 以下)	□							
	冷却日数 (日以上)								
特定兼用キャスク1基当たりの仕様	収納体数 (注) (体以下)	12				12			
		24							
	平均燃焼度 (MWd/t 以下)	□							
	放射能の量 (PBq 以下)	□							
	最大崩壊熱量 (kW 以下)	15.8							

(注) 燃料集合体は第1図に示すとおり収納位置が制限される。

第1表 使用済燃料集合体の仕様 (2/2)

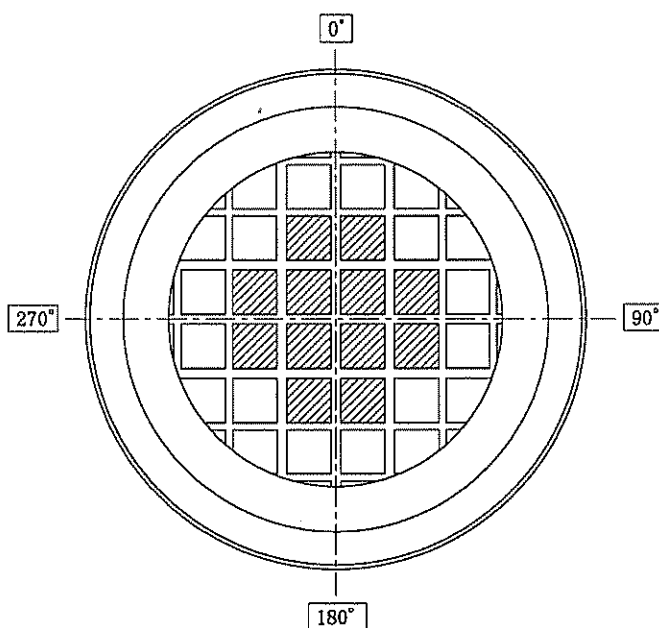
燃料集合体の種類と型式		中央部 (注)				外周部 (注)			
		15×15 燃料							
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
項目	種類	軽水炉 (PWR) 使用済燃料							
	性状	固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)							
燃料集合体1体の仕様	ウラン重量 (kg 以下)	□							
	放射能の量 (収納物平均) (PBq 以下)	□							
	初期濃縮度 (wt% 以下)	4.1		3.5		4.1		3.5	
	最高燃焼度 (MWd/t 以下)	□							
	冷却日数 (日以上)	□							
特定兼用キャスク1基当たりの仕様	収納体数 (注) (体以下)	12				12			
		24							
	平均燃焼度 (MWd/t 以下)	□							
	放射能の量 (PBq 以下)	□							
	最大崩壊熱量 (kW 以下)	15.8							

(注) 燃料集合体は第1図に示すとおり収納位置が制限される。

第2表 バーナブルポイズン集合体の仕様

項目	仕様	
	17×17燃料用	15×15燃料用
照射期間 (日以下)		
冷却期間 (日以上)		
収納体数 ^(注) (体以下)		

(注) バーナブルポイズン集合体は第1図に示すとおり収納位置が制限される。



▨ : 燃焼度が 48,000MWd/t 以下の使用済燃料集合体の収納位置

(中央部 12 体、

□ : 燃焼度が 44,000MWd/t 以下の使用済燃料集合体の収納位置 (外周部 12 体)

第1図 使用済燃料集合体の収納位置

添付書類 8 核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書

本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

1. 概要	1
2. MSF-24P(S)型の臨界防止設計	2
2.1 評価基準	3
2.2 評価方法	3
2.3 評価対象燃料	16
2.4 評価条件	17
2.5 評価結果	19

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

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」（平成25年6月28日 原子力規制委員会規則第6号）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」（平成25年6月19日 原規技発第1306194号）の第26条に基づき、MSF-24P(S)型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. MSF-24P(S)型の臨界防止設計

兼用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」（平成31年3月13日 原規技発第1903131号）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

兼用キャスクの配置、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

使用済燃料を兼用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。

MSF-24P(S)型は、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、及び中性子吸収能力を有するほう素を偏在することなく添加した中性子吸収材を適切な位置に配置することにより、特定兼用キャスク単体として、使用済燃料集合体を収納した条件下で、臨界を防止する設計とする。

バスケットプレートは、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を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで、設計貯蔵期間を通じて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に必要な構造健全性を維持する設計とする。

また、MSF-24P(S)型の特定兼用キャスク貯蔵施設（以下「貯蔵施設」という。）への搬入から搬出までの乾燥状態、及びMSF-24P(S)型に使用済燃料集合体を収納する際に冠水状態となること等、技術的に想定されるいかなる場合でも、中性子実効増倍率が0.95以下となるように設計する。

MSF-24P(S)型の臨界評価においては、特定兼用キャスク相互の中性子干渉を考慮しても、中性子実効増倍率が0.95以下となるようにするため、特定兼用キャスク単体による臨界防止評価において、特定兼用キャスクの境界条件を完全反射境界条件（無限配列）として、特定兼用キャスク相互の中性子干渉による影響を考慮し、複数の特定兼用キャスクが接近する等の技術的に想定されるいかなる場合でも臨界に達するおそれがない設計とするとともに、未臨界性に有意な影響を与える因子については以下のとおり考慮する。

- (1) 乾燥状態及び冠水状態で臨界評価を実施する。
- (2) バスケット格子内の使用済燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるように、配置する。

- (3) 特定兼用キャスク周囲を完全反射境界条件（無限配列）とする。
- (4) バスケットプレート幅、バスケット格子内のり及び中性子吸収材板厚等の寸法条件について公差を考慮し、中性子吸収材のほう素添加量を仕様上の下限値とする。
- (5) 燃焼度クレジット（使用済燃料集合体の燃焼に伴う反応度低下）は考慮しない。
- (6) 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。また、バーナブルポイズン集合体は考慮しない。

臨界評価によって、MSF-24P(S)型の中性子実効増倍率が評価基準以下となり、MSF-24P(S)型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、バスケットの構造健全性については、添付書類5「強度に関する説明書」に示す。

2.1 評価基準

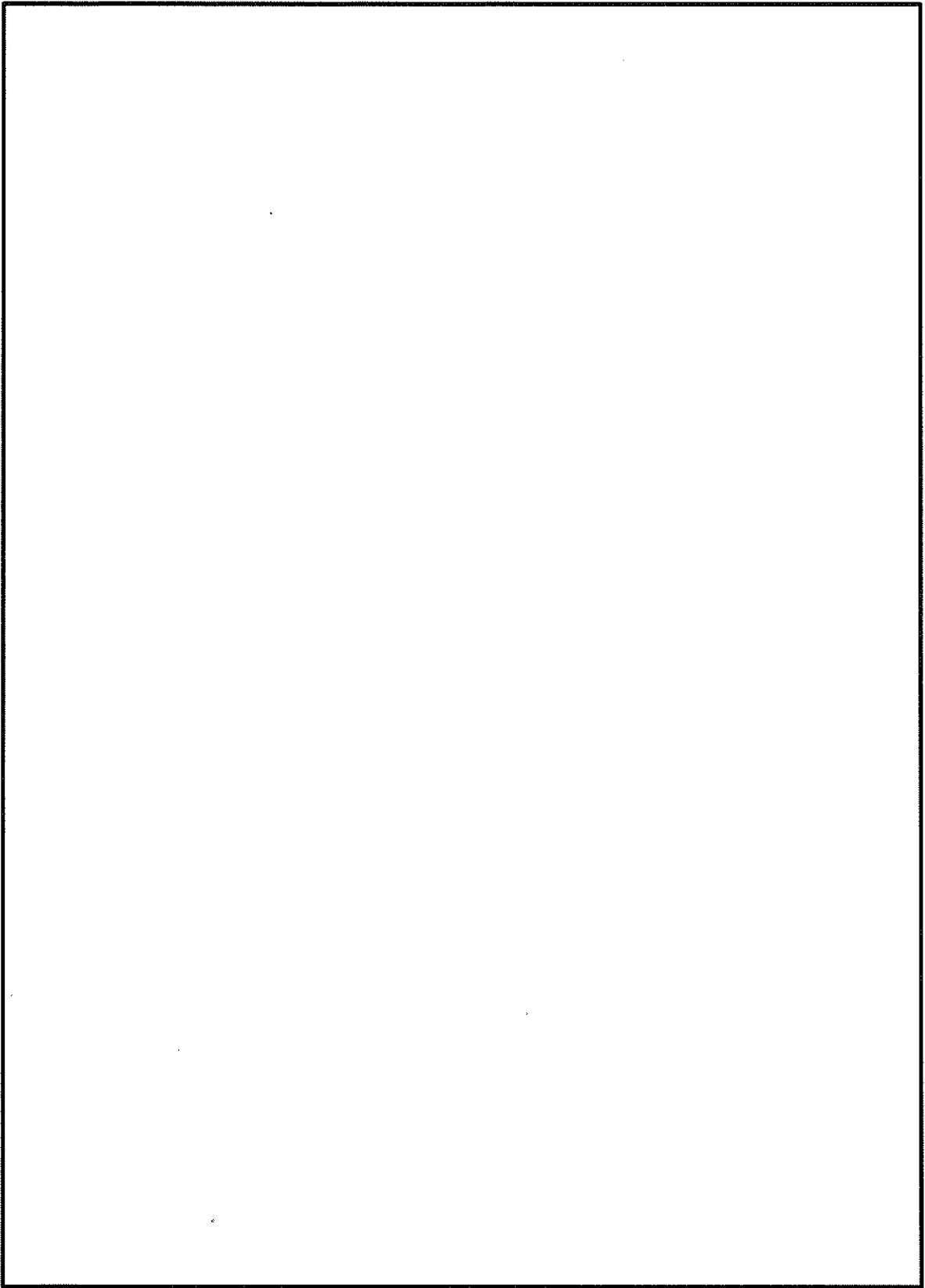
MSF-24P(S)型の評価基準は、貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及びMSF-24P(S)型に使用済燃料集合体を収納する際に冠水状態となること等、技術的に想定されるいかなる場合でも、中性子実効増倍率(k_{eff})が「臨界安全ハンドブック第2版，日本原子力研究所 JAERI 1340，(1999)」に基づき0.95以下とする。

2.2 評価方法

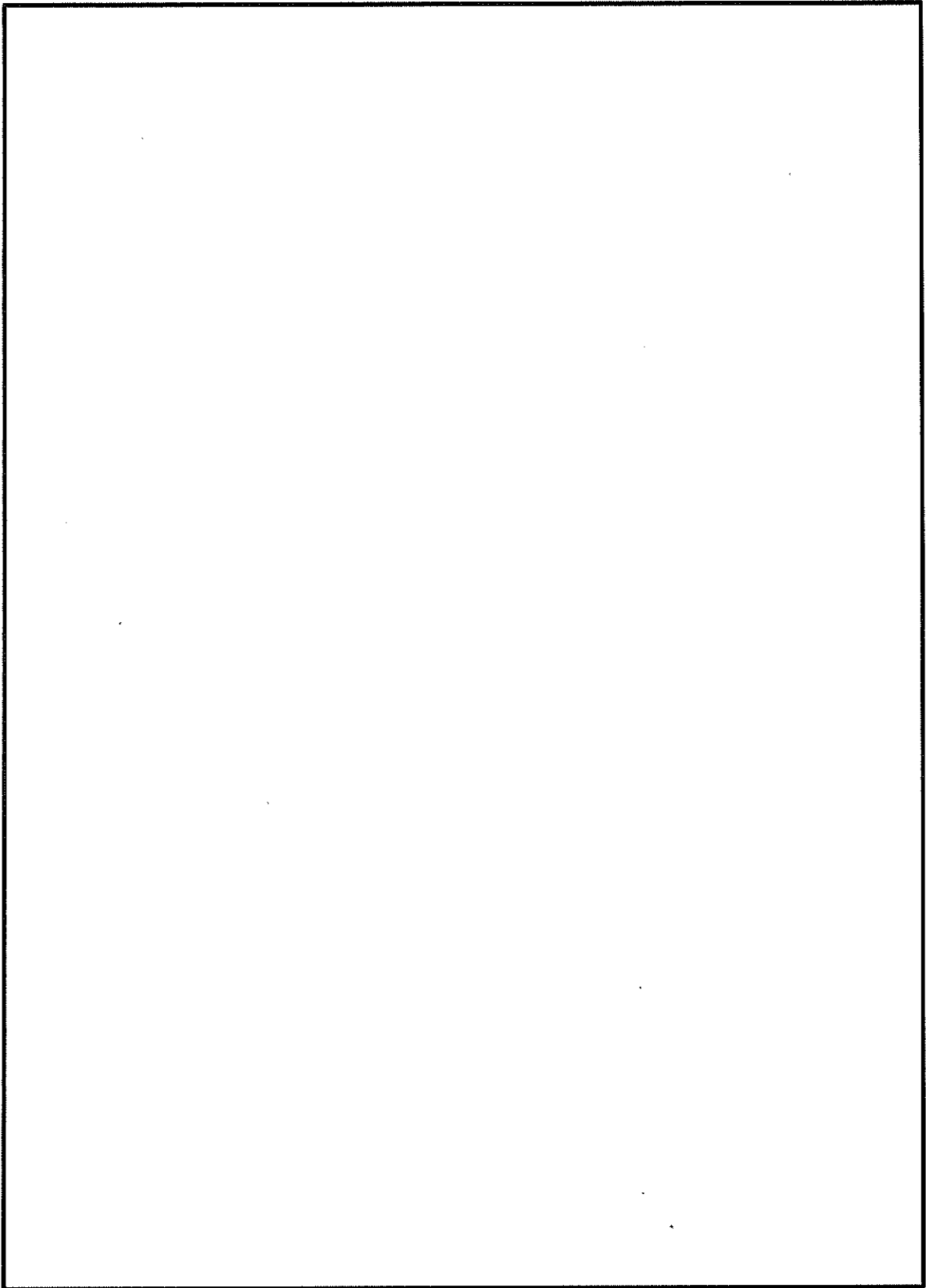
MSF-24P(S)型の中性子実効増倍率は、第2-1図から第2-12図に示したMSF-24P(S)型の実形状を模擬した三次元臨界解析モデルを用いて、臨界解析コードを使用して求める。なお、解析モデルの詳細説明については後述の2.4に示す。

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。

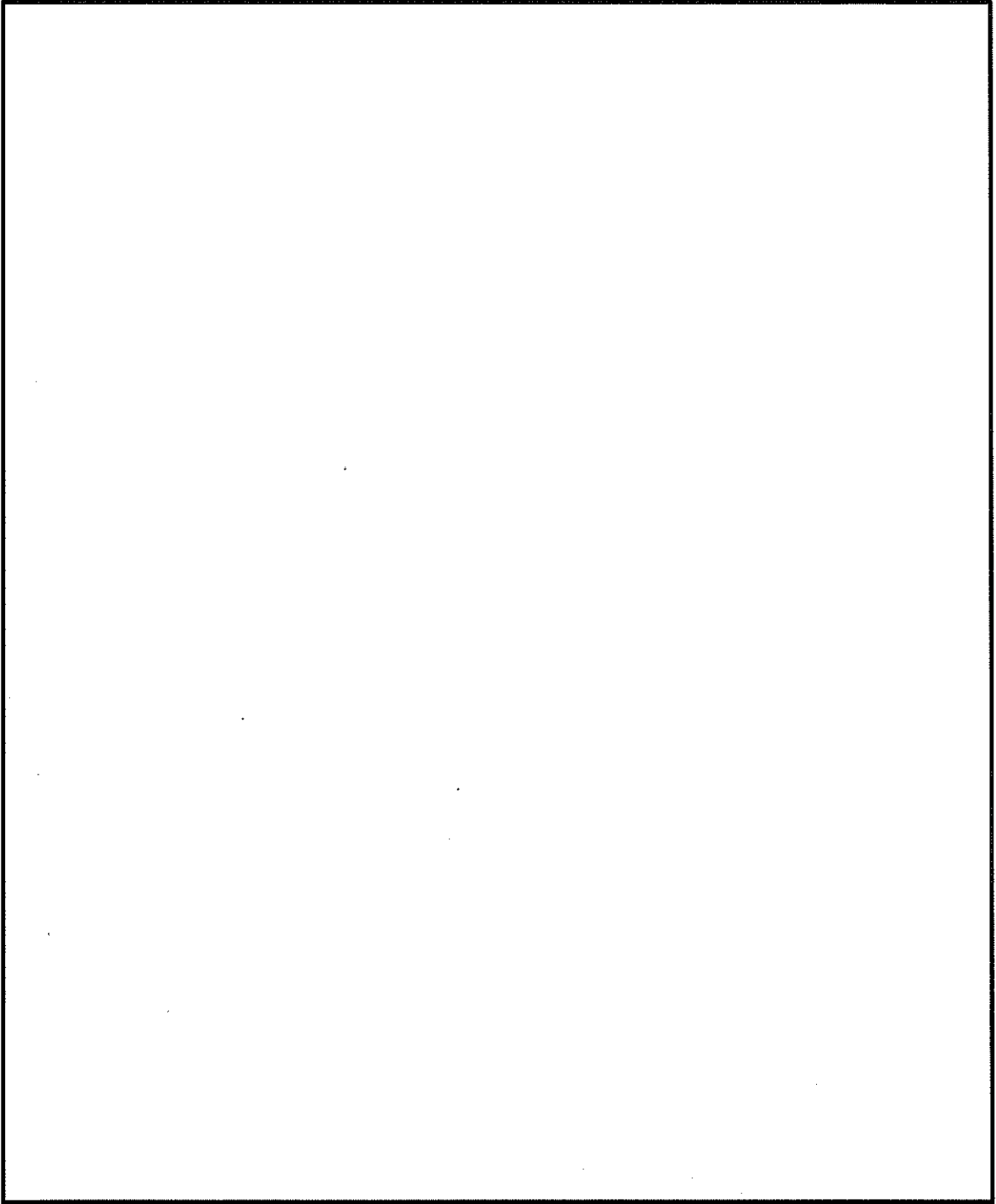
群定数計算には共鳴処理コードBONAMI、CENTRM及びPMCを用い、核データライブラリはSCALEコードシステムの内蔵ライブラリデータのの一つであるENDF/B-VIIに基づいて作成された252群断面積ライブラリを用いる。



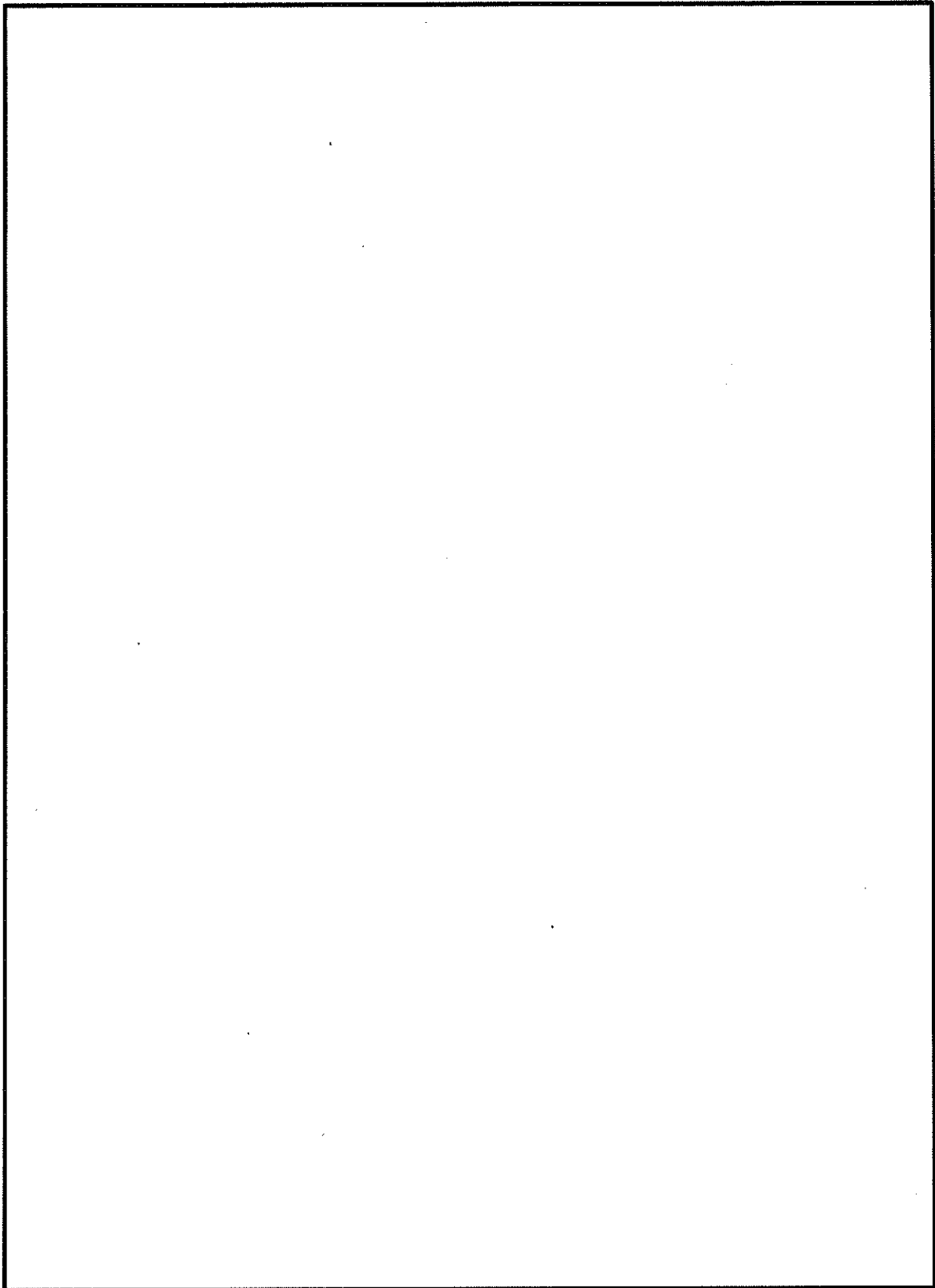
第2-1図 臨界解析モデル 乾燥状態（縦断面図）（17×17燃料収納時）



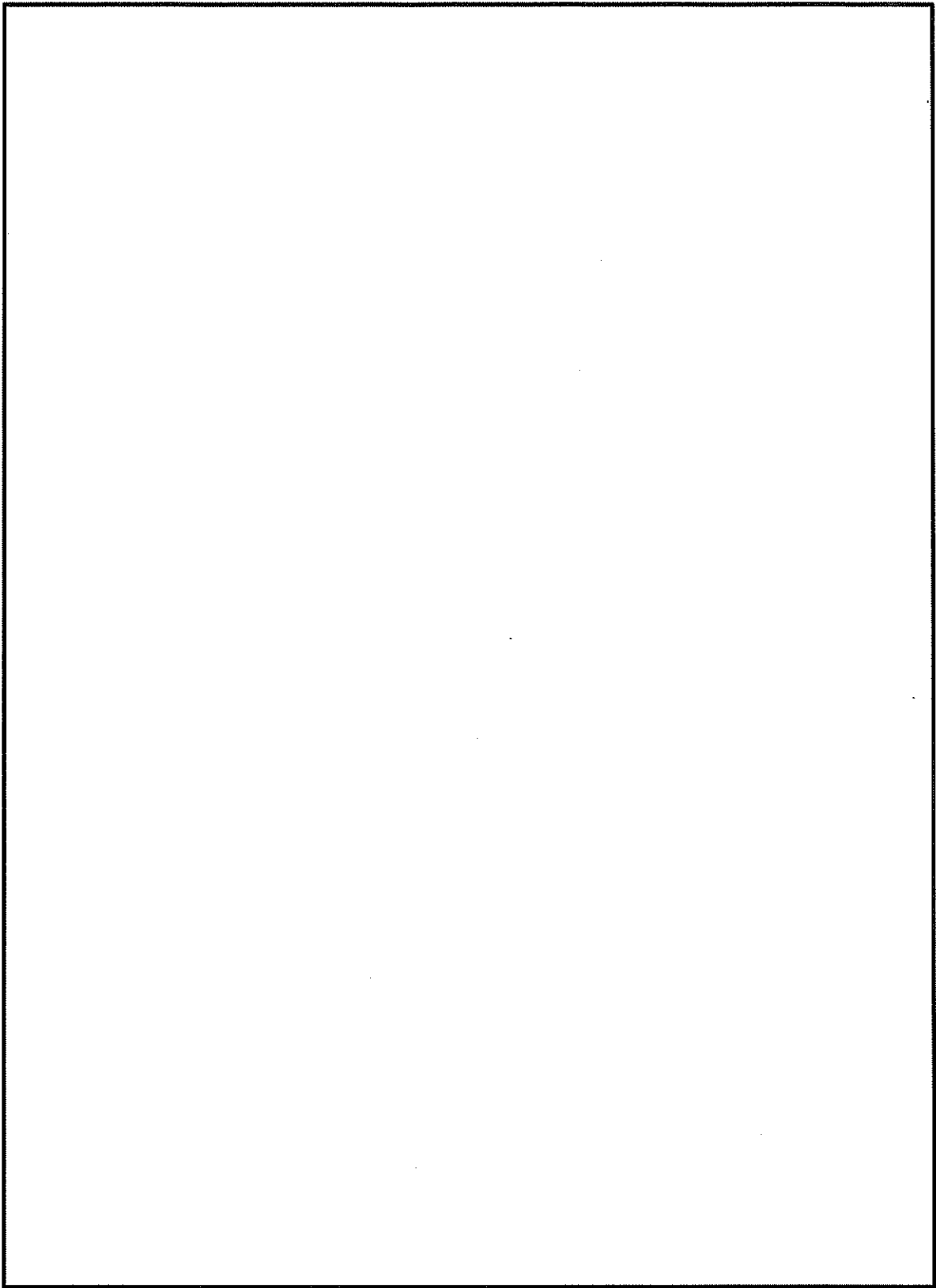
第2-2図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域横断面図）（17×17燃料収納時）



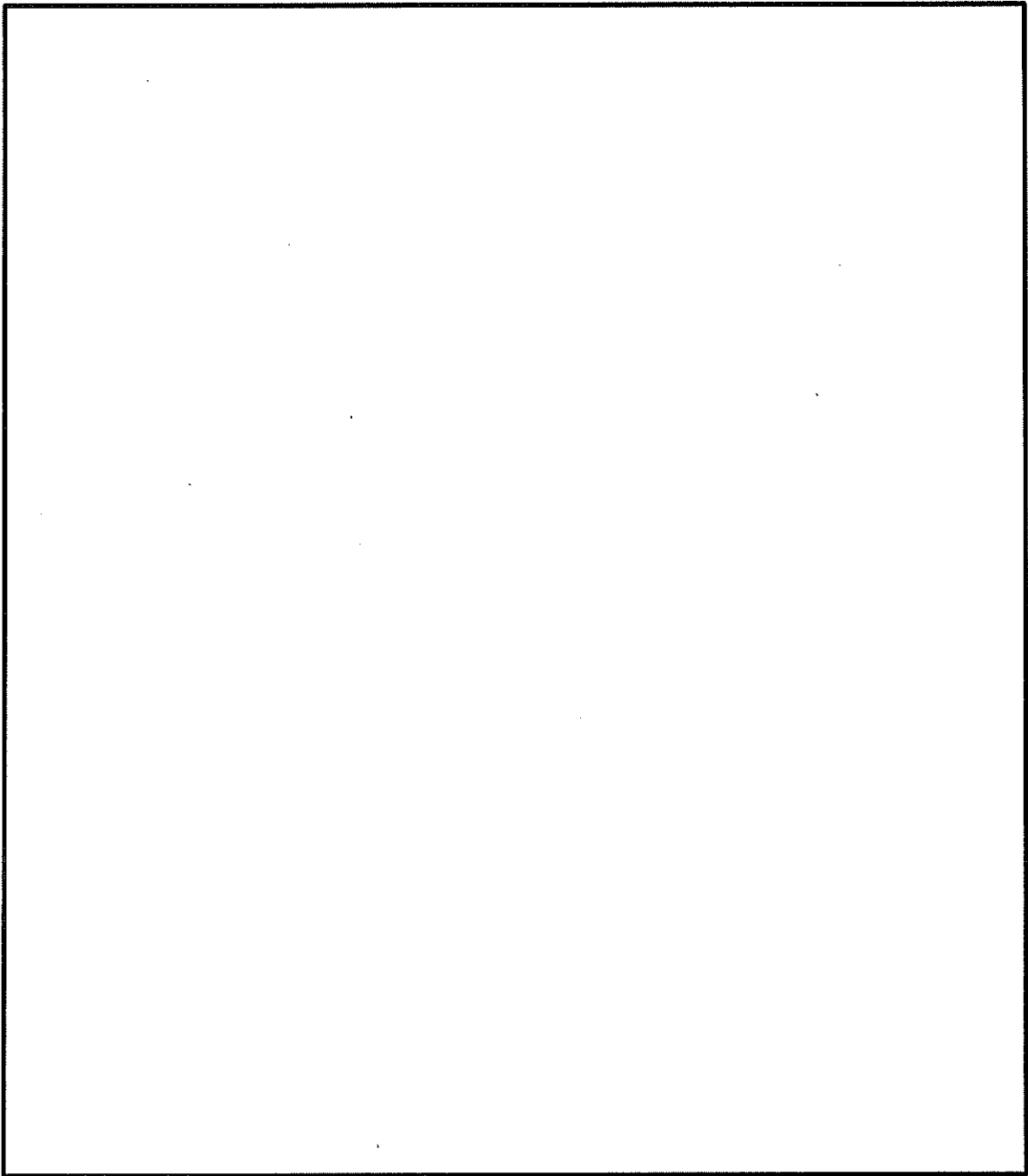
第2-3図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域拡大図）（17×17燃料収納時）



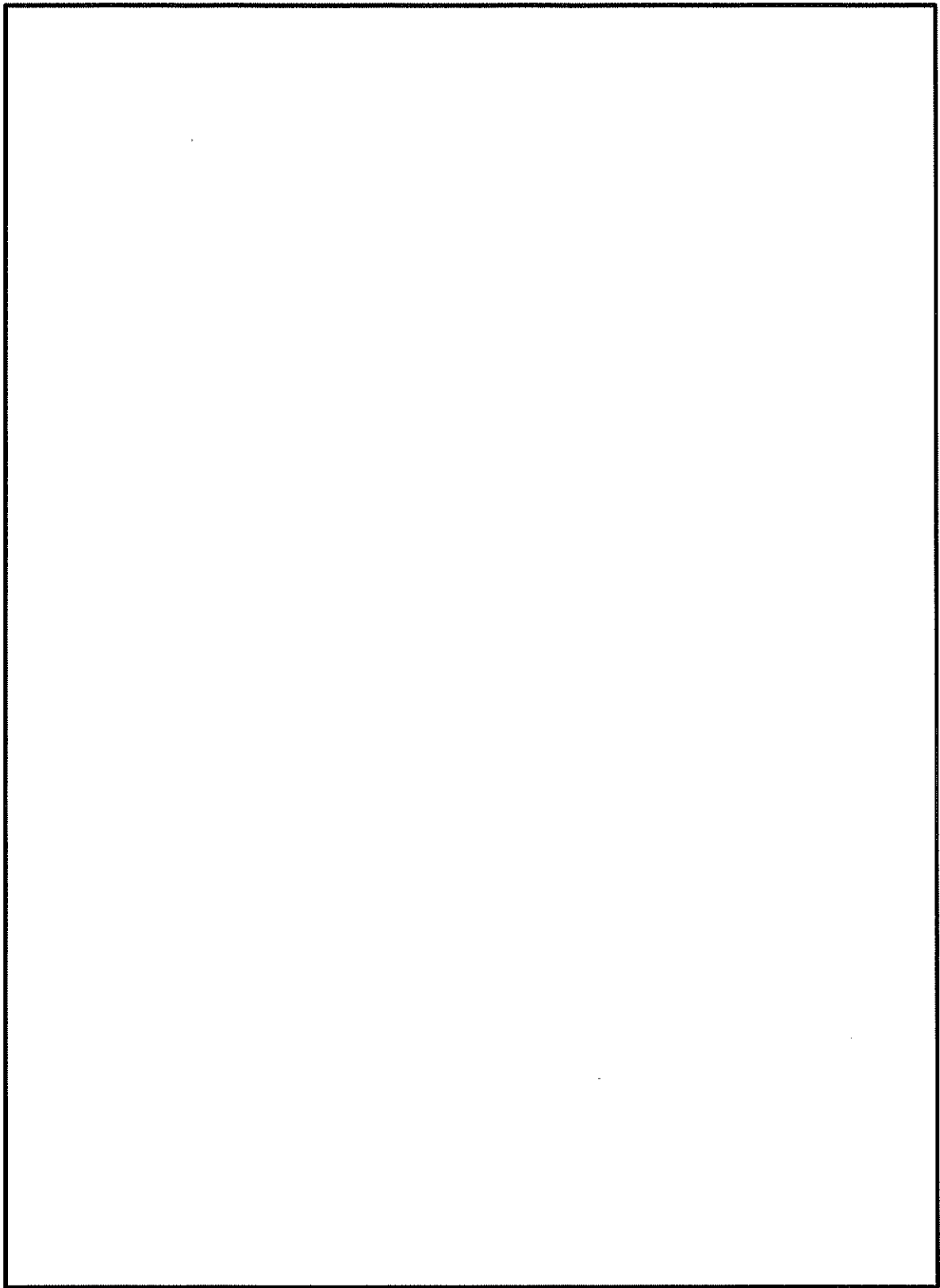
第2-4図 臨界解析モデル 冠水状態（縦断面図）（17×17燃料収納時）



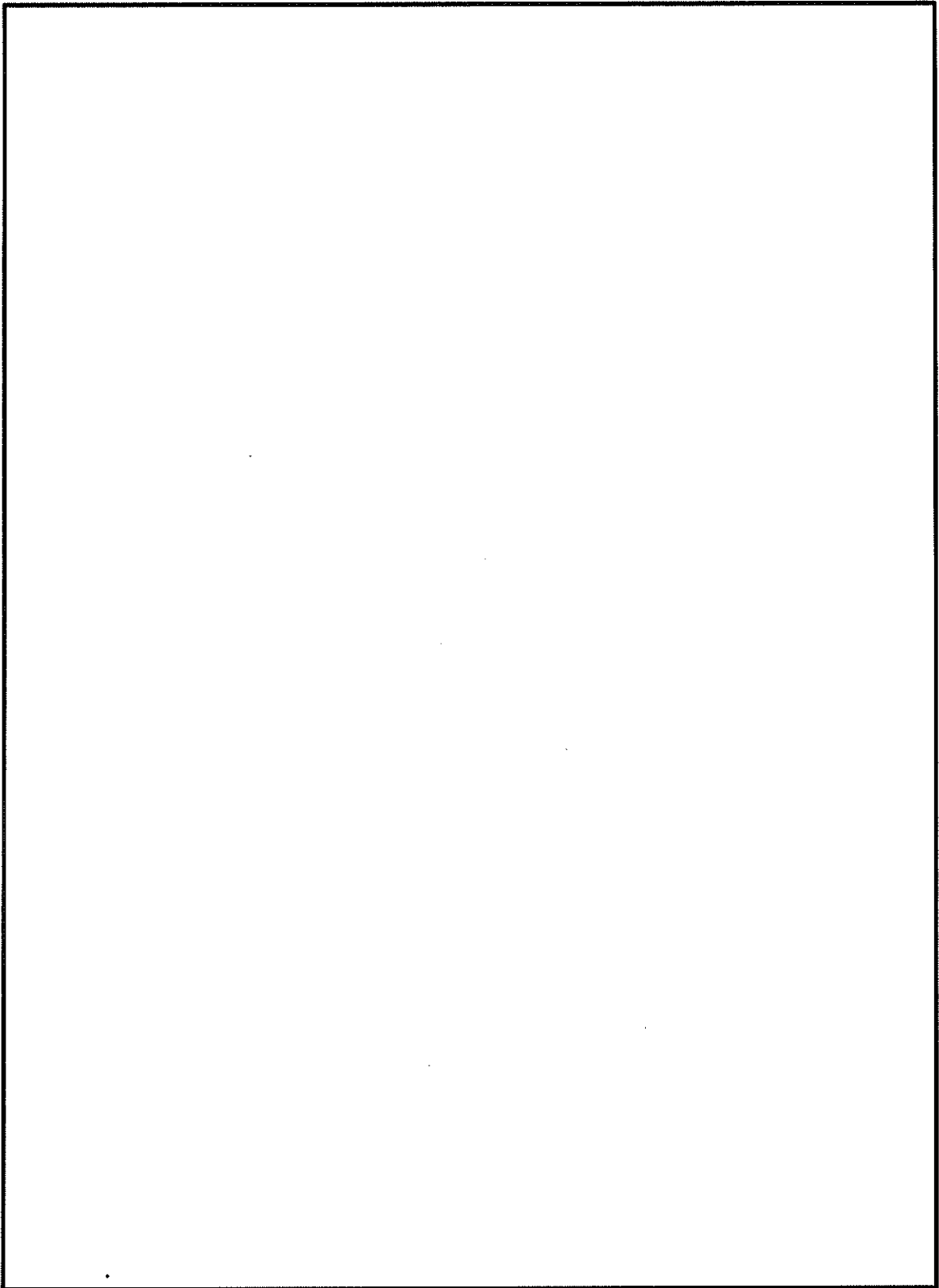
第2-5図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域横断面図）（17×17燃料収納時）



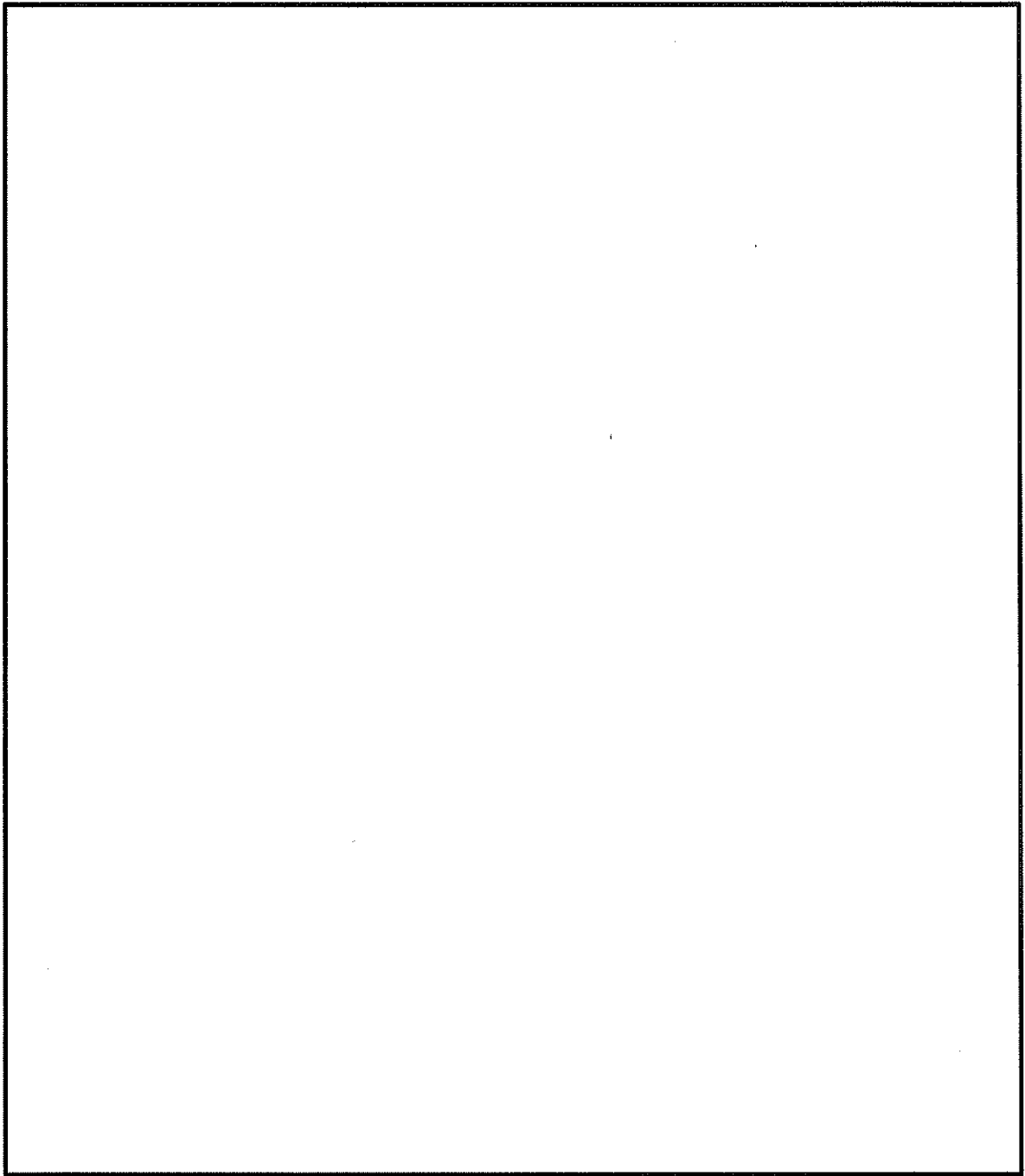
第2-6図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域拡大図）（17×17燃料収納時）



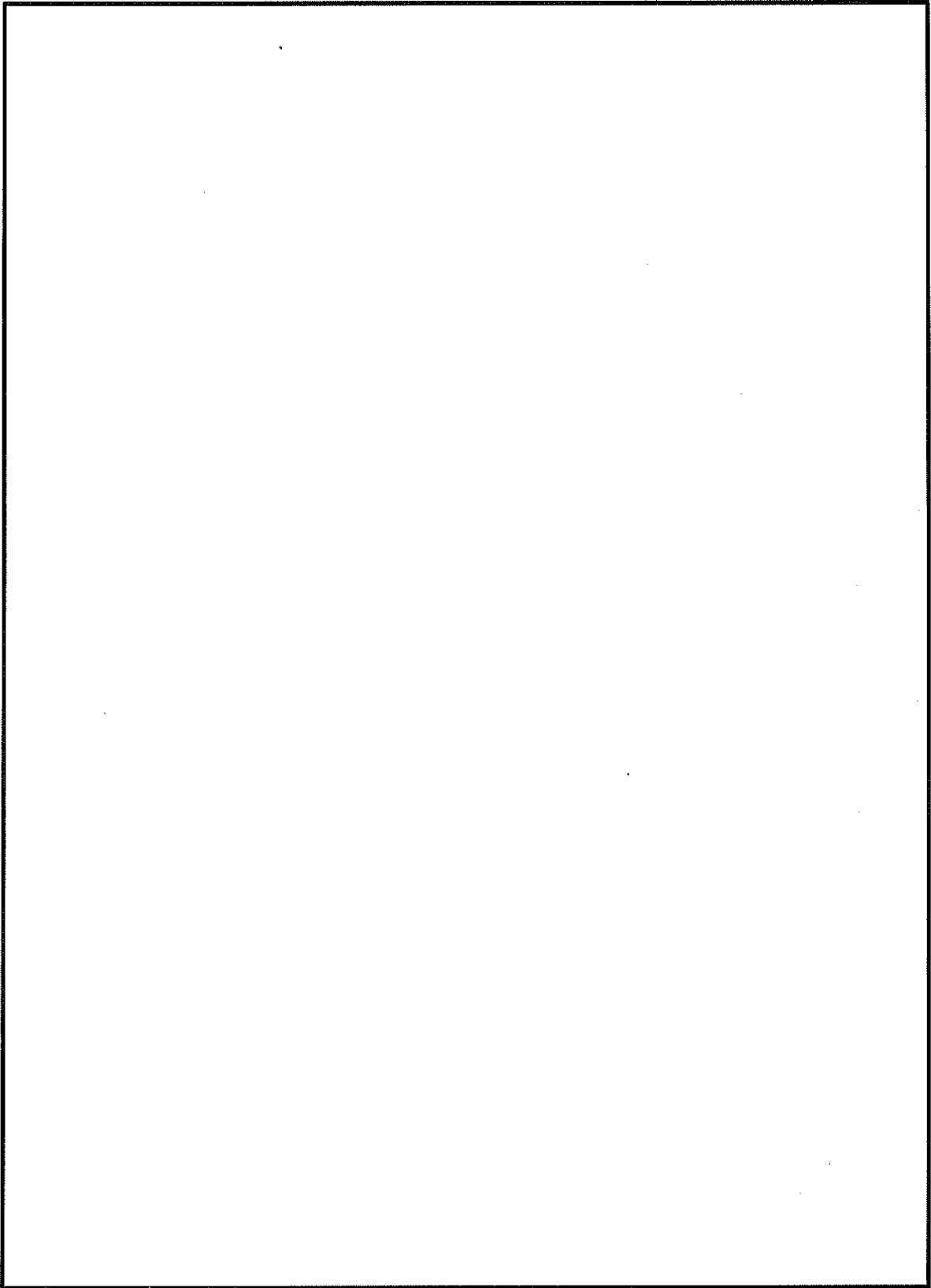
第2-7図 臨界解析モデル 乾燥状態（縦断面図）（15×15燃料収納時）



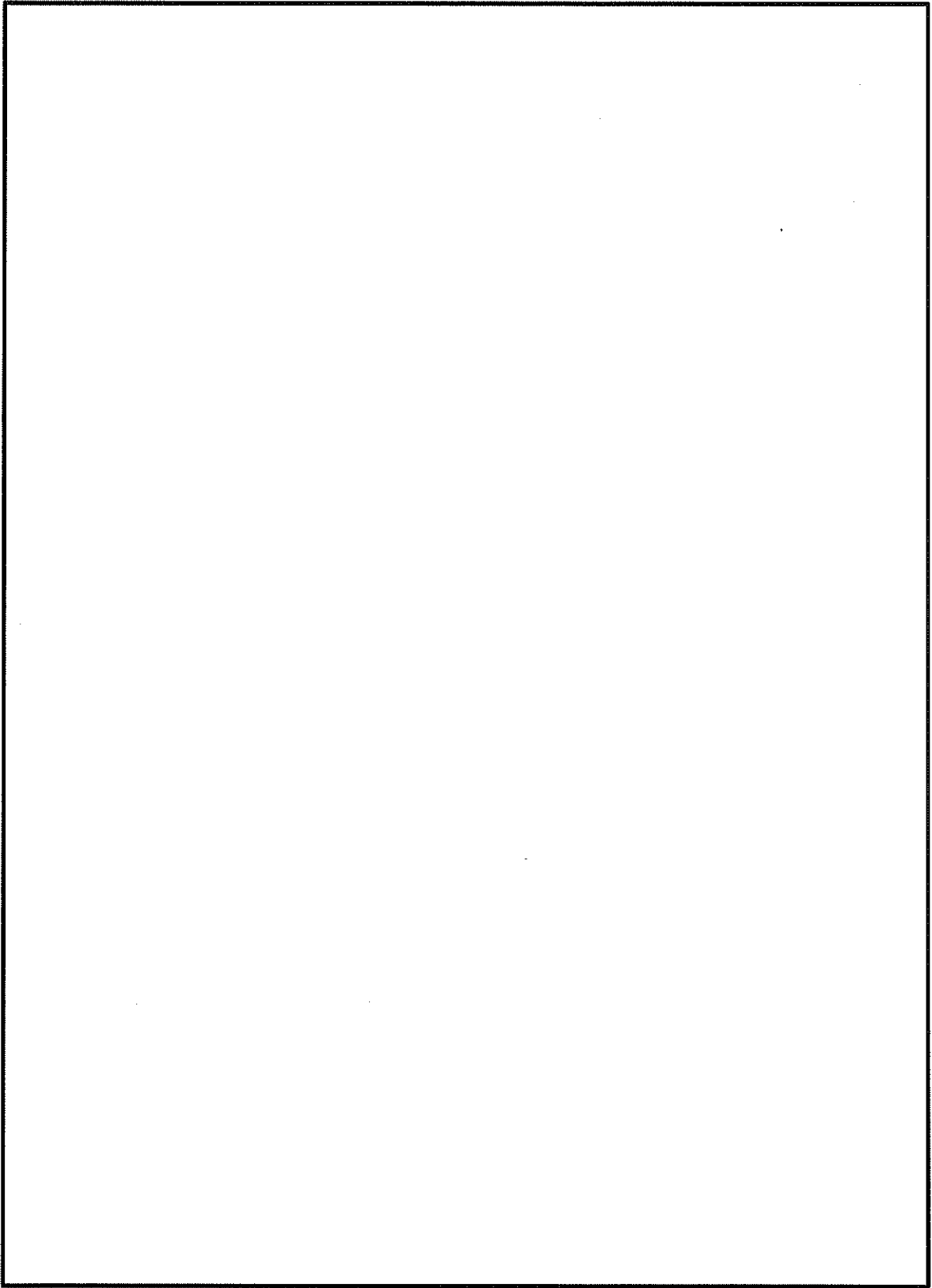
第2-8図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域横断面図）（15×15燃料収納時）



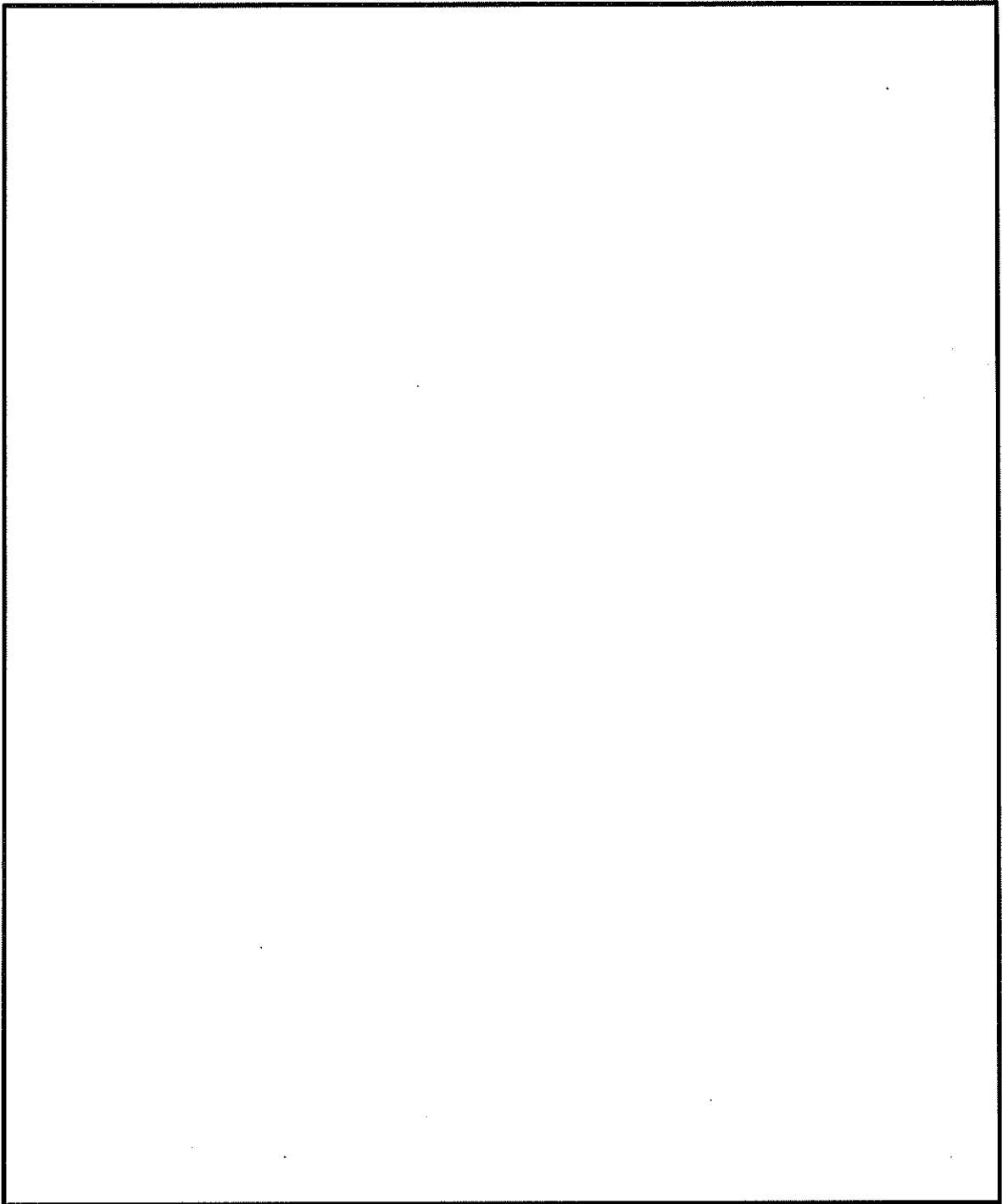
第2-9図 臨界解析モデル 乾燥状態（燃料領域拡大図）（15×15燃料収納時）



第2-10図 臨界解析モデル 冠水状態 (縦断面図) (15×15燃料収納時)



第2-11図 臨界解析モデル 冠水状態 (燃料領域横断面図) (15×15燃料収納時)



第2-12図 臨界解析モデル 冠水状態（燃料領域拡大図）（15×15燃料収納時）

2.3 評価対象燃料

MSF-24P(S)型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、並びに15×15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）及び15×15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	17×17 燃料	15×15 燃料
		48,000MWd/t 型	48,000MWd/t 型
		A型	A型
燃料材質	—	二酸化ウラン	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4
燃料密度	%理論密度		
燃料棒直径	cm		
ペレット直径	cm		
被覆管肉厚	cm	0.057	0.062
燃料有効長	cm		
燃料棒配列	—	17×17	15×15
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	264	204
燃料棒ピッチ ^(注1)	cm		
燃料集合体の幅 ^(注2)	cm		
初期濃縮度	wt%	4.2	4.1

(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) MSF-24P(S)型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) MSF-24P(S)型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、兼用キャスク間相互の中性子干渉を考慮する。
- (3) MSF-24P(S)型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値とする。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^{-6} 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、MSF-24P(S)型内に配置された状態を仮定する。
- (7) MSF-24P(S)型は、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MSF-24P(S)型内部は真空とする。また、冠水状態の臨界評価ではMSF-24P(S)型内の水密度を 1.0g/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		17×17燃料 48,000MWd/t型 (A型) 15×15燃料 48,000MWd/t型 (A型)	
濃縮度		4.2wt% (17×17燃料) 4.1wt% (15×15燃料)	
収納体数		24体	
燃料配置		第2-2図及び第2-8図 のとおり	第2-5図及び第2-11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 <input type="text"/> cm (最小) B-B断面 <input type="text"/> cm (最小) C-C断面 <input type="text"/> cm (最小)	A-A断面 <input type="text"/> cm (最小) B-B断面 <input type="text"/> cm (最小) C-C断面 <input type="text"/> cm (最小)
	バスケット プレート内幅	A-A断面 <input type="text"/> cm (最大) B-B断面 <input type="text"/> cm (最大) C-C断面 <input type="text"/> cm (最大)	A-A断面 <input type="text"/> cm (最小) B-B断面 <input type="text"/> cm (最小) C-C断面 <input type="text"/> cm (最小)
	バスケット格子 内のり	<input type="text"/> cm (最小)	<input type="text"/> cm (最大)
	中性子吸収材 板厚	<input type="text"/> cm (最小)	<input type="text"/> cm (最小)
ほう素添加量		中性子吸収材に含まれるほう素添加量を仕様上の下限値に 設定 (¹⁰ B面密度 <input type="text"/> g/cm ²)	
MSF-24P(S)型内雰囲気		真空	冠水
MSF-24P(S)型外雰囲気		真空	
MSF-24P(S)型配列		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		真空に置換	

(注1) 乾燥状態は第2-2図及び第2-8図、冠水状態は第2-5図及び第2-11図のとおり。

2.5 評価結果

MSF-24P(S)型の臨界解析結果は、第2-3表に示すとおりであり、中性子実効増倍率は評価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)		評価基準
	17×17 燃料収納時	15×15 燃料収納時	
解析結果 (乾燥)	0.385 ($\sigma < 0.001$)	0.380 ($\sigma < 0.001$)	0.95 以下
解析結果 (冠水)	0.912 ($\sigma < 0.001$)	0.911 ($\sigma < 0.001$)	

(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。

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

1. はじめに	別紙1-1
2. 解析コードの概要	別紙1-2
2.1 SCALE	別紙1-2

1. はじめに

本資料は、添付書類8「核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書」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 SCALE

項目 \ コード名	SCALE
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	2016 年
使用したバージョン	6.2.1
コードの概要	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) により米国原子力規制委員会 (NRC) の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算の CSAS6 モジュールを用い、モンテカルロコードとして KENO-VI、断面積ライブラリは ENDF/B-VII ベースの 252 群ライブラリを使用している。
コードの検証 及び 妥当性確認 (新規基準対応 以降のみ)	SCALE 6.2.1 は、モンテカルロコードによる MSF-24P(S) 型の未臨界性評価に使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認している。 ・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。 【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通りである。 ・ OECD/NEA によりまとめられた臨界実験ベンチマーク集 (INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS (OECD/NEA)) に登録されている臨界実験から、MSF-24P(S) 型仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した <input type="checkbox"/> ケースのベンチマーク解析を実施している。ベンチマーク解析結果は臨界実験を良く再現しており、妥当な結果が得られることを確認している。

添付書類 9 特定兼用キャスクの冷却能力に関する説明書

本資料における は商業機密のため、非公開とします。

目 次

1. 概要	1
2. MSF-24P(S)型の除熱設計	2
2.1 評価基準	4
2.2 評価方法	5
2.3 評価対象燃料	15
2.4 評価条件	15
2.5 評価結果	23

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

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」（平成25年6月28日 原子力規制委員会規則第6号）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」（平成25年6月19日 原規技発第1306194号）第26条に基づき、MSF-24P(S)型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. MSF-24P(S)型の除熱設計

兼用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」（平成31年3月13日 原規技発第1903131号）に以下のとおり示されている。

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

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) 兼用キャスク各部の温度評価

a. 兼用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兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び兼用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、兼用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、兼用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) で求めた兼用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。

MSF-24P(S)型は、動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を伝導、対流、ふく射により特定兼用キャスクの外表面に伝え、周囲空気等に伝達することにより除去する設計とし、使用済燃料の健全性及び特定兼用キャスクの安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度を制限される値以下に維持する方針とする。

MSF-24P(S)型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。

燃料被覆管の温度は、設計貯蔵期間を通じて、燃料被覆管のクリープ破損及び燃料被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から、燃料被覆管の累積クリープひずみが1%を超えない温度、照射硬化の回復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り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ため、貯蔵する使用済燃料の種類ごとに以

下の制限を設ける。

- ・ 17×17燃料 48,000MWd/t型 (A型及びB型) 275℃以下
- ・ 17×17燃料 39,000MWd/t型 (A型及びB型) 275℃以下
- ・ 15×15燃料 48,000MWd/t型 (A型及びB型) 275℃以下
- ・ 15×15燃料 39,000MWd/t型 (A型及びB型) 275℃以下

また、MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの安全機能を維持する観点から、特定兼用キャスクの温度を構成部材の健全性が維持される温度以下に制限する設計とし、MSF-24P(S)型の主要な構成部材の温度は、以下の制限を設ける。

- ・ 胴、外筒及び蓋部 350℃以下
- ・ 中性子遮蔽材 149℃以下
- ・ 金属ガスケット 130℃以下
- ・ バスケットプレート 250℃以下

MSF-24P(S)型の除熱機能に関する評価は、収納する使用済燃料の種類、燃焼度、冷却期間等の条件を基に、除熱評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで求めた使用済燃料の崩壊熱量及び使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納配置を考慮する。

さらに、MSF-24P(S)型は、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために、特定兼用キャスク外表面の温度を測定できる設計とする。

除熱評価によって、燃料被覆管及び特定兼用キャスク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。

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1)	燃料被覆管の累積クリープひずみが1%を超えない温度、照射硬化の回復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り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。
特定兼用 キャスク	胴、外筒及び蓋部	350 ^(注2)	安全機能を有する構成部材及び構造強度の維持が必要な構成部材は、健全性が維持できる温度以下とする。
	中性子遮蔽材	149 ^(注3)	
	金属ガスケット	130 ^(注4)	
	バスケットプレート	250 ^(注5)	
	トランニオン	350 ^(注2)	
	伝熱フィン	200 ^(注6)	
	下部端板及び 底部中性子遮蔽材カバー	425 ^(注2)	

(注1) 「(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).」

(注2) 「(一社)日本機械学会、『使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)』, (2007).」

(注3) 「BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).」

(注4) 「(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 (中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査) 報告書』, (2010).」

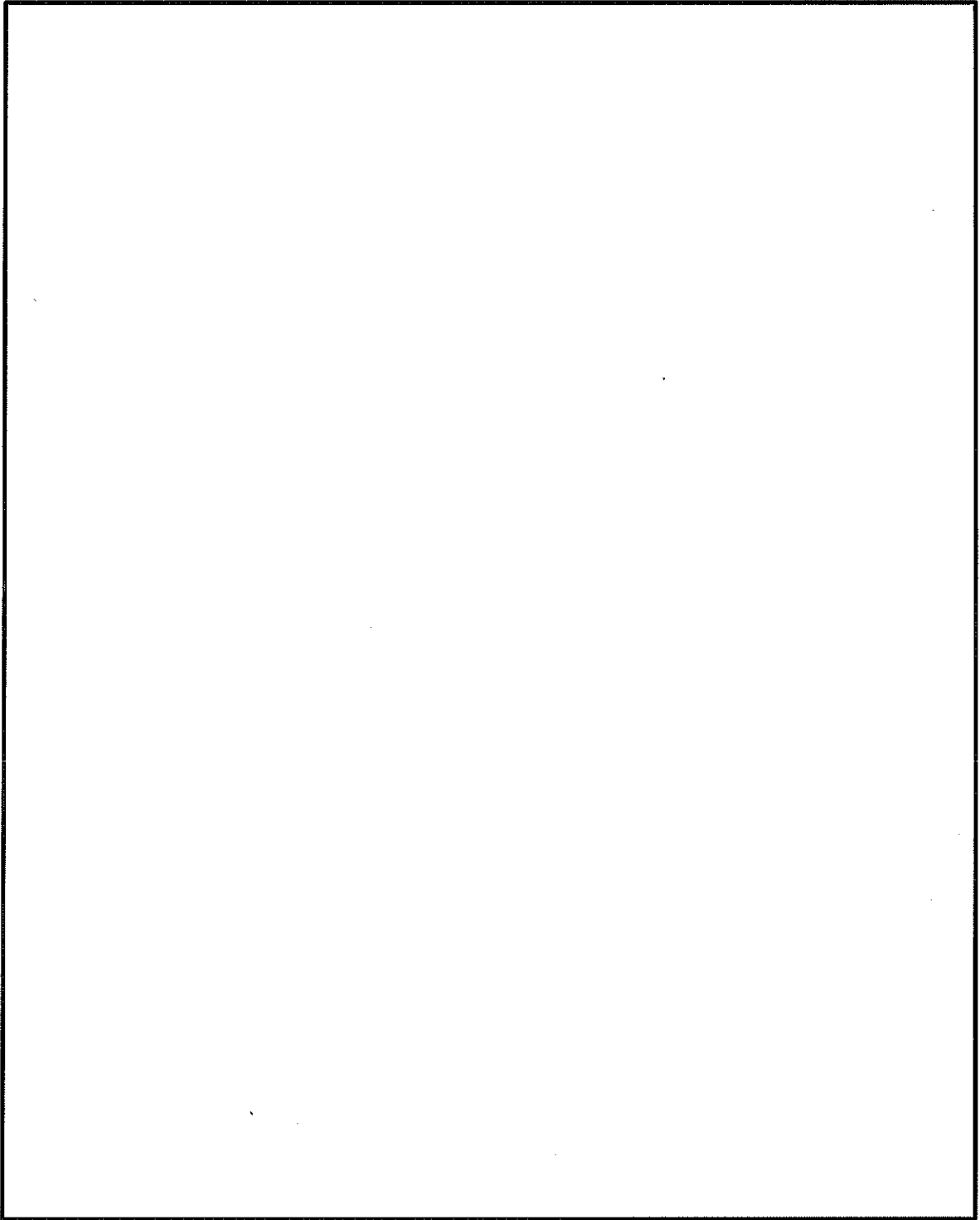
(注5) 「三菱重工業(株),『型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について』, (2017).」

(注6) 「(一財)日本規格協会、『圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)』, (2015).」

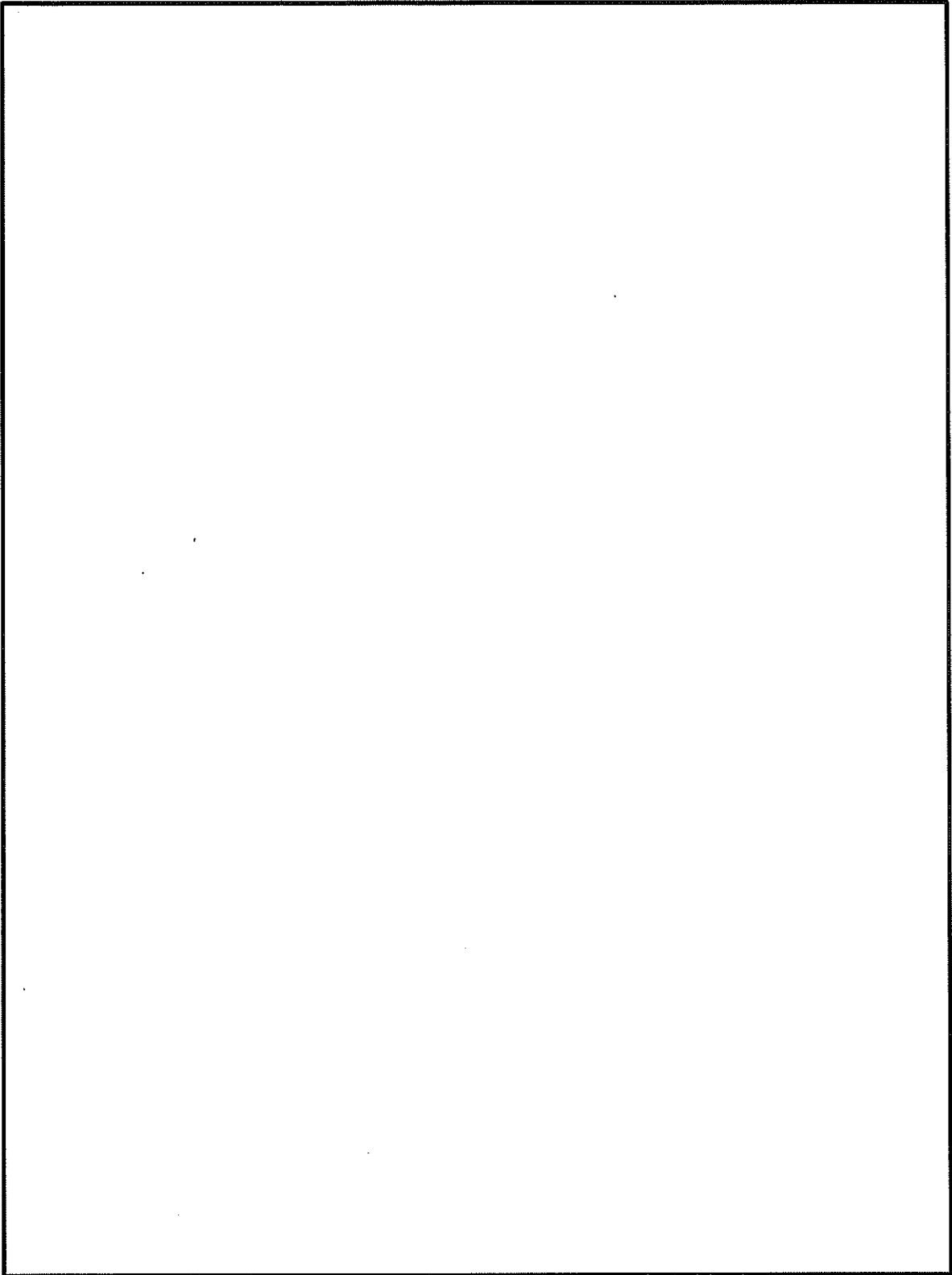
2.2 評価方法

MSF-24P(S)型の除熱解析は、MSF-24P(S)型の三次元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。また、貯蔵用緩衝体は申請範囲外であるが、特定兼用キャスク及び使用済燃料の温度を保守的に評価するために、特定兼用キャスクの上部及び下部には、添付書類13「外運搬規則第六条若しくは第七条及び第十一条に定める技術上の基準(容器に係るものに限る。)への適合性に関する説明書」の「(ロ)章B 熱解析」に示す熱解析モデルにおいてモデル化した、原子力発電所から再処理工場に輸送する際に装着する輸送用の緩衝体をモデル化する。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。

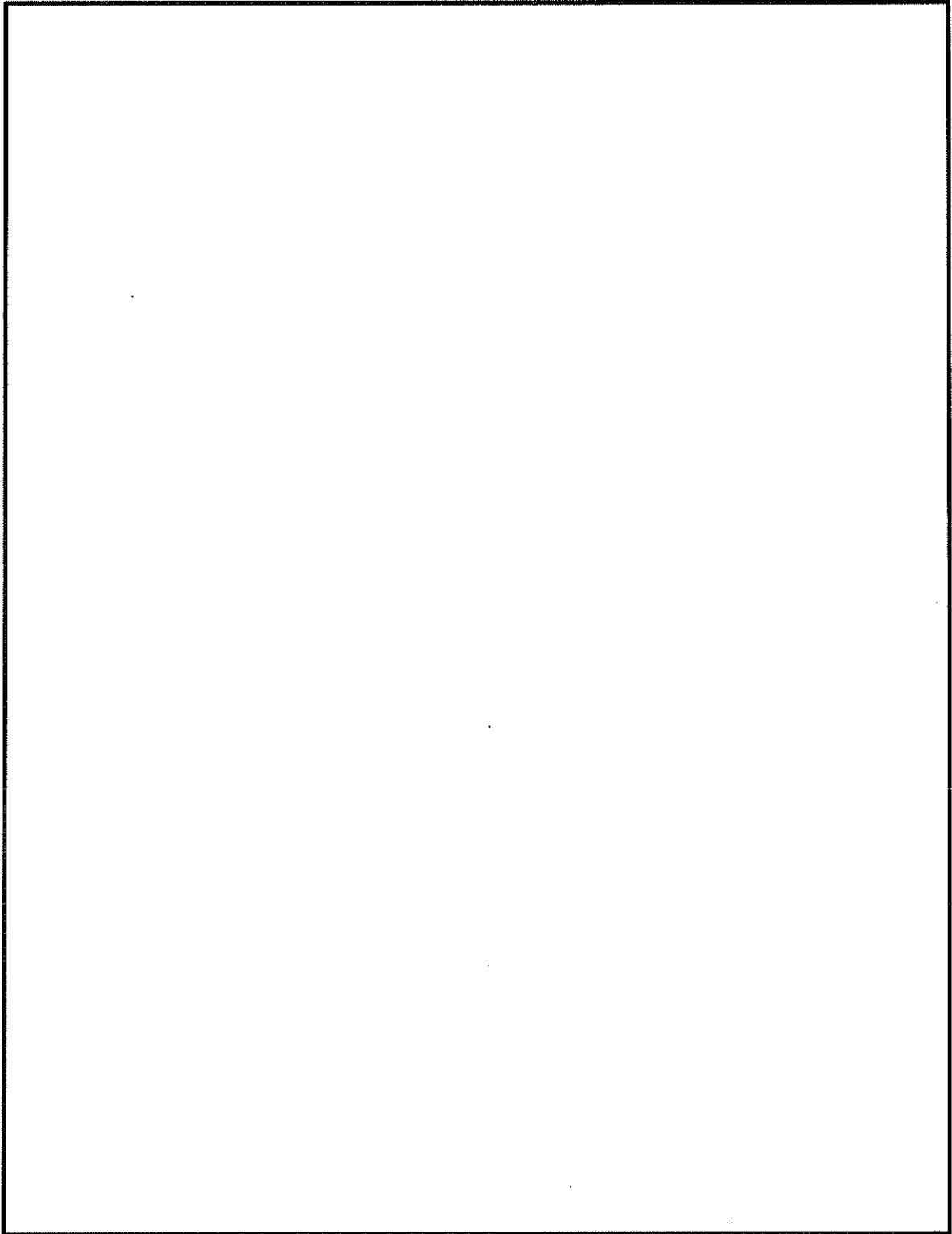
除熱解析には汎用解析コードABAQUSを用いる。全体モデル要素分割図を第2-3図に、燃料集合体モデル要素分割図を第2-4図に示す。なお、評価に用いる汎用解析コードABAQUSの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。



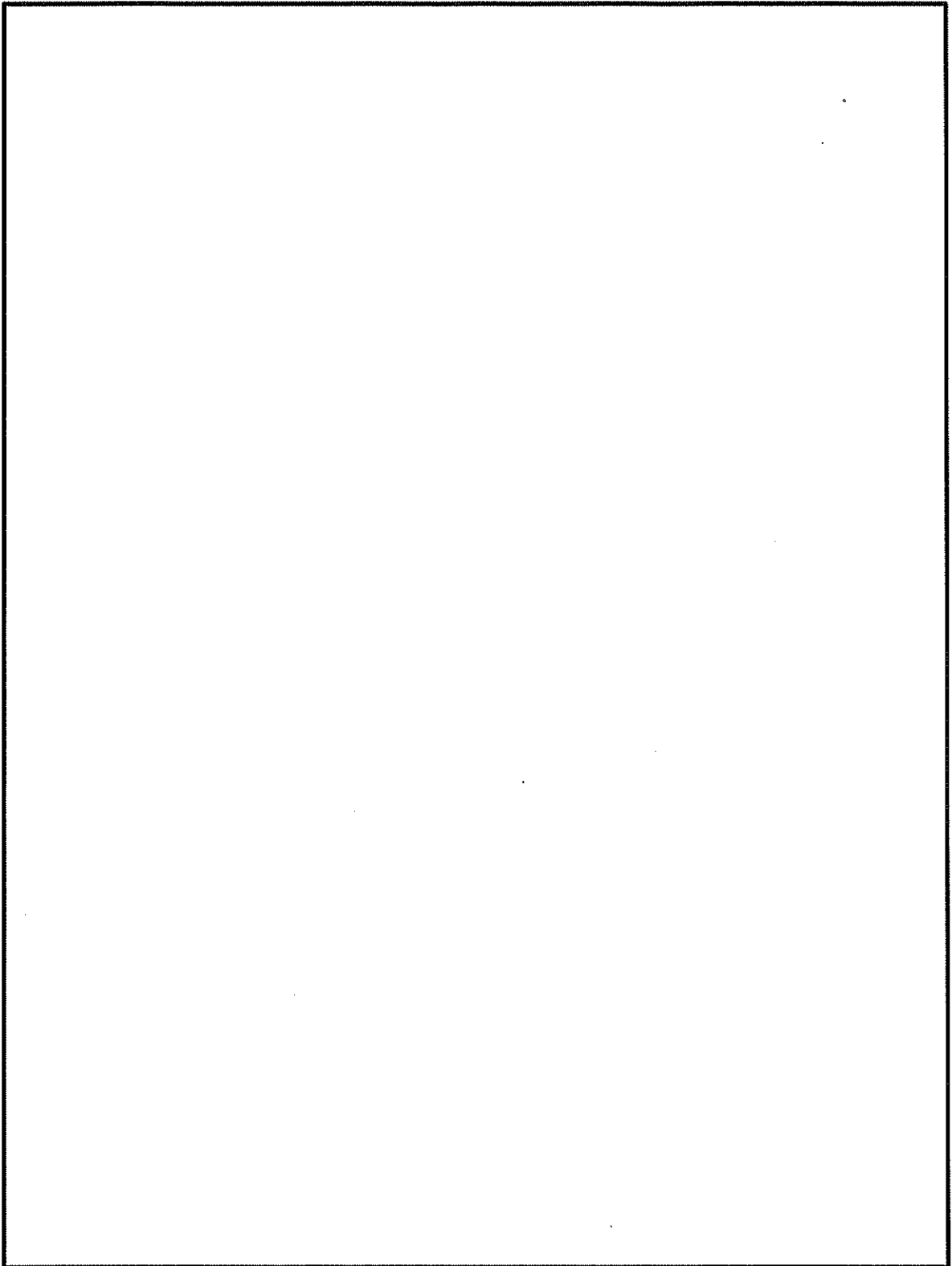
第2-1図 MSF-24P(S)型の全体モデル形状図(1/4) (17×17燃料収納時、縦断面図)



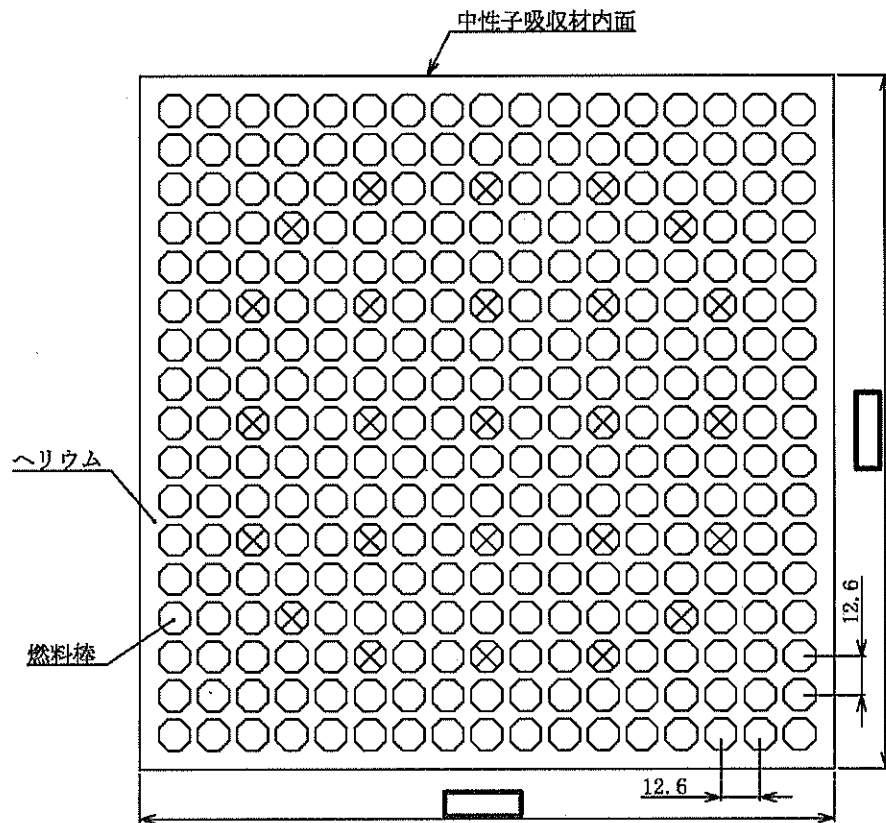
第2-1図 MSF-24P(S)型の全体モデル形状図(2/4) (17×17燃料収納時、横断面図)



第2-1図 MSF-24P(S)型の全体モデル形状図(3/4) (15×15燃料収納時、縦断面図)



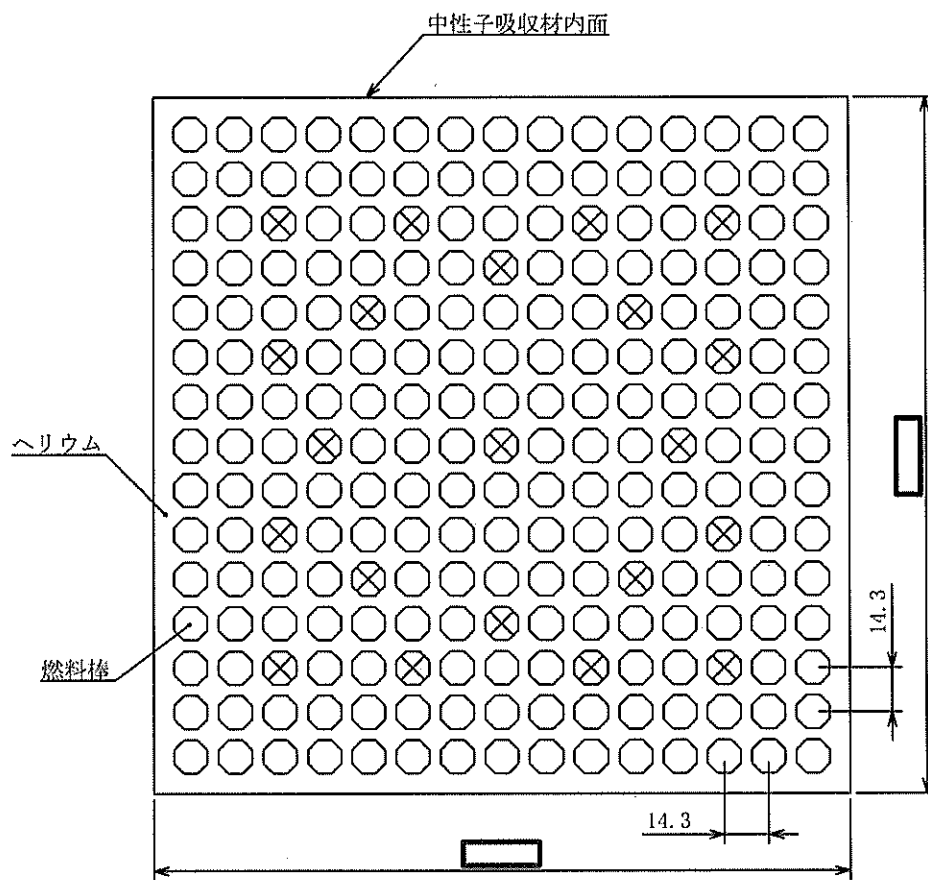
第2-1図 MSF-24P(S)型の全体モデル形状図(4/4) (15×15燃料収納時、横断面図)



(単位：mm)

(注) ⊗は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

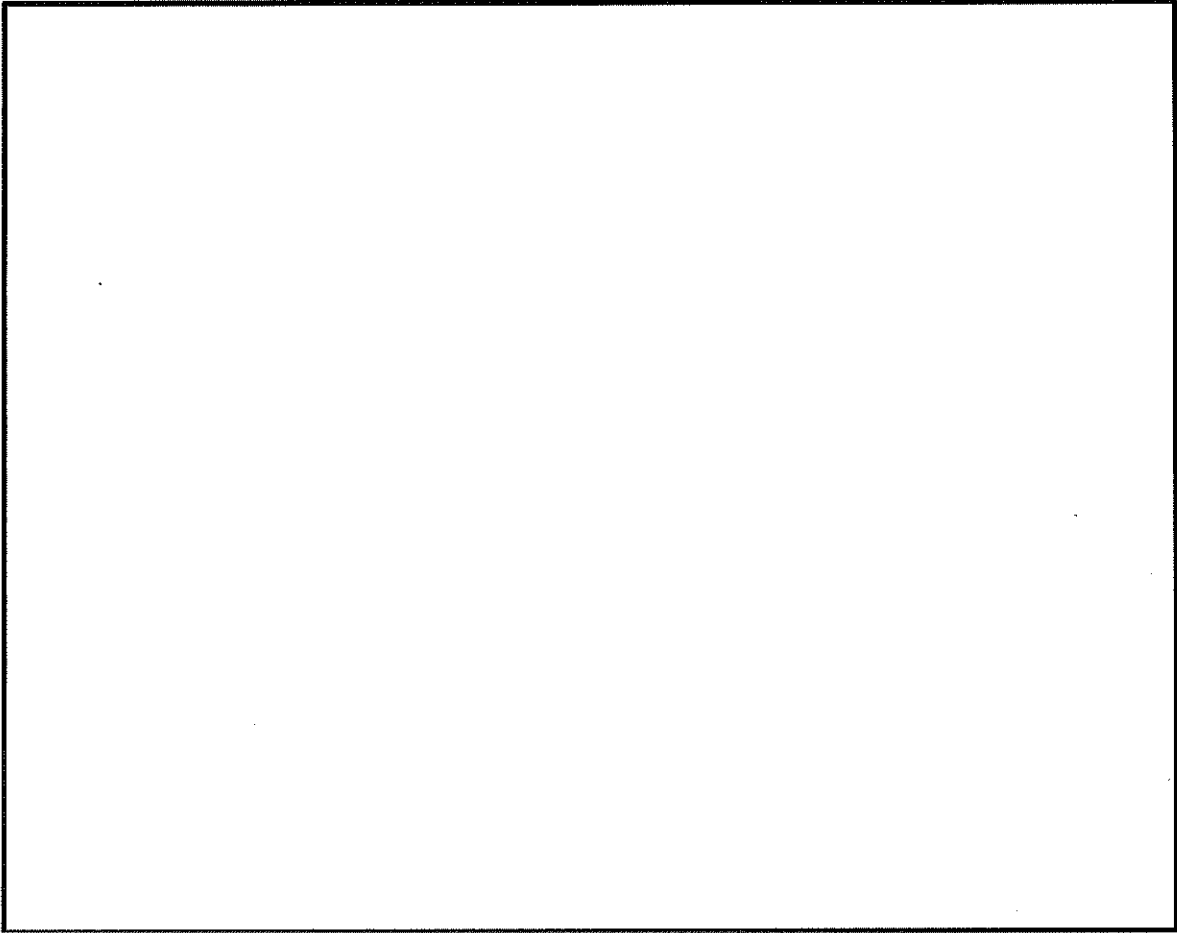
第2-2図 MSF-24P(S)型の燃料集合体モデル形状図(1/2) (17×17燃料)



(単位 : mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンブル等であり、発熱はない。

第2-2図 MSF-24P(S)型の燃料集合体モデル形状図(2/2) (15×15燃料)

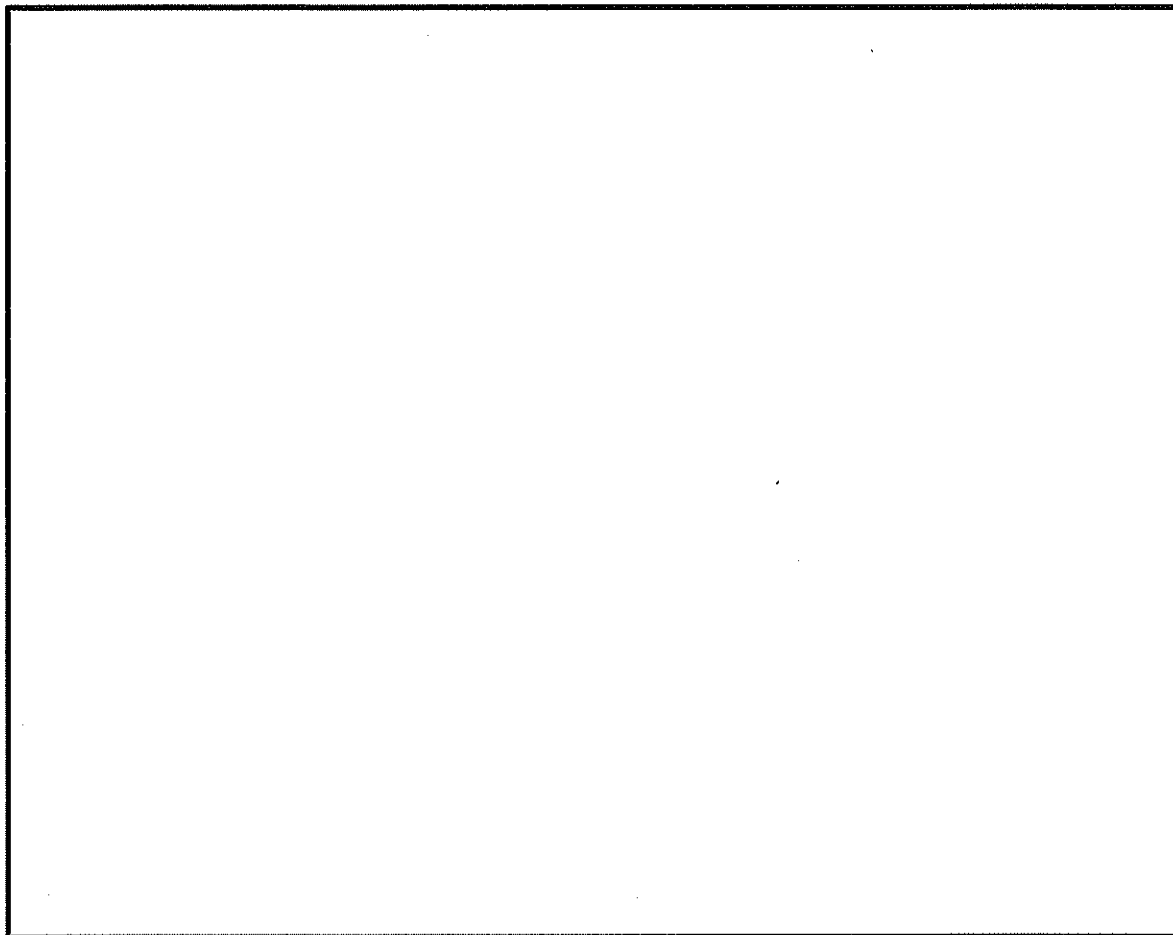


(モデル全体)

(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(1/2) (17×17燃料収納時)

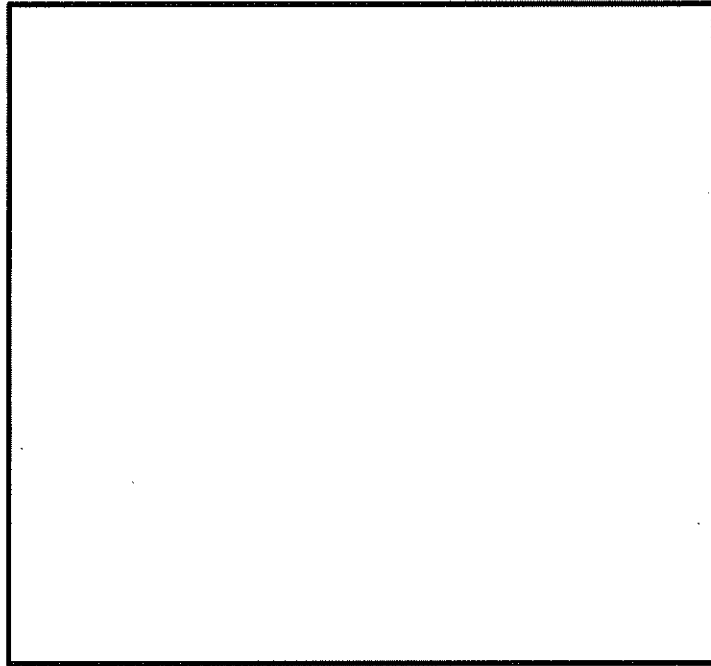


(モデル全体)

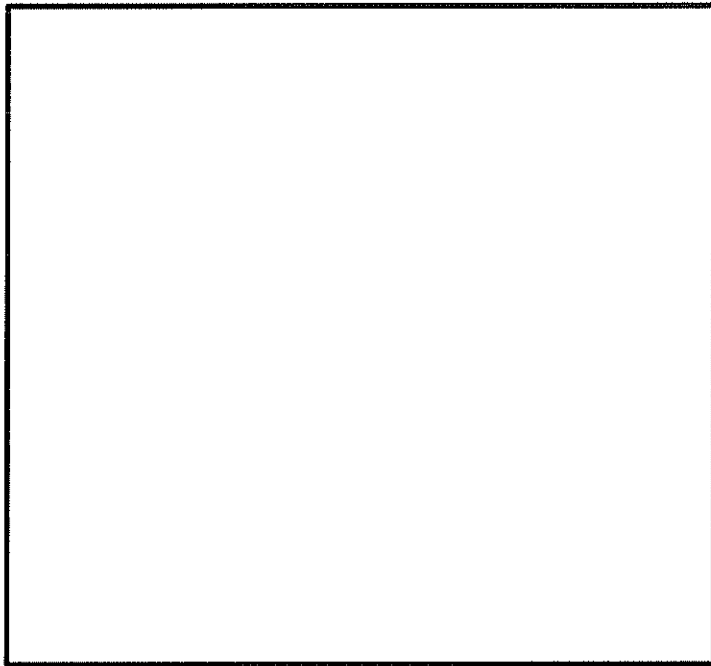
(バスケット)

(燃料集合体領域)

第2-3図 全体モデル要素分割図(2/2) (15×15燃料収納時)



第2-4図 燃料集合体モデル要素分割図(1/2) (17×17燃料)



第2-4図 燃料集合体モデル要素分割図(2/2) (15×15燃料)

2.3 評価対象燃料

MSF-24P(S)型に収納する使用済燃料集合体のうち、最も崩壊熱量が大きい17×17燃料48,000MWd/t型(A型)及び15×15燃料48,000MWd/t型(A型)を対象として除熱解析を実施する。

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、添付書類10「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。MSF-24P(S)型1基当たりの崩壊熱量を第2-2表に示す。

- (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、特定兼用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特定兼用キャスク外表面に伝わり、特定兼用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。

MSF-24P(S)型の貯蔵姿勢、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物性値を第2-4表に、MSF-24P(S)型外表面の熱伝達率を第2-5表に、解析に使用するふく射率を第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 MSF-24P(S)型1基当たりの崩壊熱量(1/2) (17×17燃料)

使用済燃料集合体の種類		17×17燃料 48,000MWd/t型		17×17燃料 39,000MWd/t型	
		A型	B型	A型	B型
計算 条件	最高燃焼度 (MWd/t)	<div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	平均燃焼度 (MWd/t)				
	平均比出力 (MW/t)				
	照射期間 (日)				
	初期濃縮度 (wt%) (注1)				
	冷却期間 (年)				
	ウラン質量 (kg/体)				
	(上部)				
ピーキング ファクター (注2)					
(下部)					
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)	719.2 (平均燃焼度)	657.4 (最高燃焼度)	627.2 (最高燃焼度)
収納体数 (体)		24			
1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		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) 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2-2表 MSF-24P(S)型1基当たりの崩壊熱量(2/2) (15×15燃料)

使用済燃料集合体の種類		15×15燃料 48,000MWd/t型		15×15燃料 39,000MWd/t型	
		A型	B型	A型	B型
計算 条件	最高燃焼度 (MWd/t)	<div style="border: 2px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	平均燃焼度 (MWd/t)				
	平均比出力 (MW/t)				
	照射期間 (日)				
	初期濃縮度 (wt%) (注1)				
	冷却期間 (年)				
	ウラン質量 (kg/体)				
	(上部)				
ピーキング ファクター (注2)					
(下部)					
計算 結果	燃料集合体 1体当たりの崩壊熱量 (W)	755.0 (平均燃焼度)	720.3 (平均燃焼度)	656.1 (最高燃焼度)	626.1 (最高燃焼度)
収納体数 (体)		24			
1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW) (注3)		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) 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	横置き
周囲温度 (°C)	45
貯蔵建屋壁面温度 (°C)	65

第2-4表 材料の物性値 (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 	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
貯蔵用三次蓋	炭素鋼 	26.85	51.6
		226.85	47.8
		526.85	38.2
外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼 	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 	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 材料の物性値 (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 バスケットサポート	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	—	
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 、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 MSF-24P(S)型外表面の熱伝達率

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率 ^(注) (W/(m ² ·K))
MSF-24P(S)型外表面 (水平面)	水平円筒	293.15	20	1.20 × Δ t ^{1/3}
		373.15	100	1.02 × Δ t ^{1/3}
		473.15	200	0.863 × Δ t ^{1/3}
MSF-24P(S)型外表面 (垂直面)	垂直平板	293.15	20	1.55 × Δ t ^{1/3}
		373.15	100	1.31 × Δ t ^{1/3}
		473.15	200	1.11 × Δ t ^{1/3}

(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。

$$h = 0.1 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} Pr \right)^{1/3} \quad (\text{水平円筒})$$

$$h = 0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} Pr \right)^{1/3} \quad (\text{垂直平板})$$

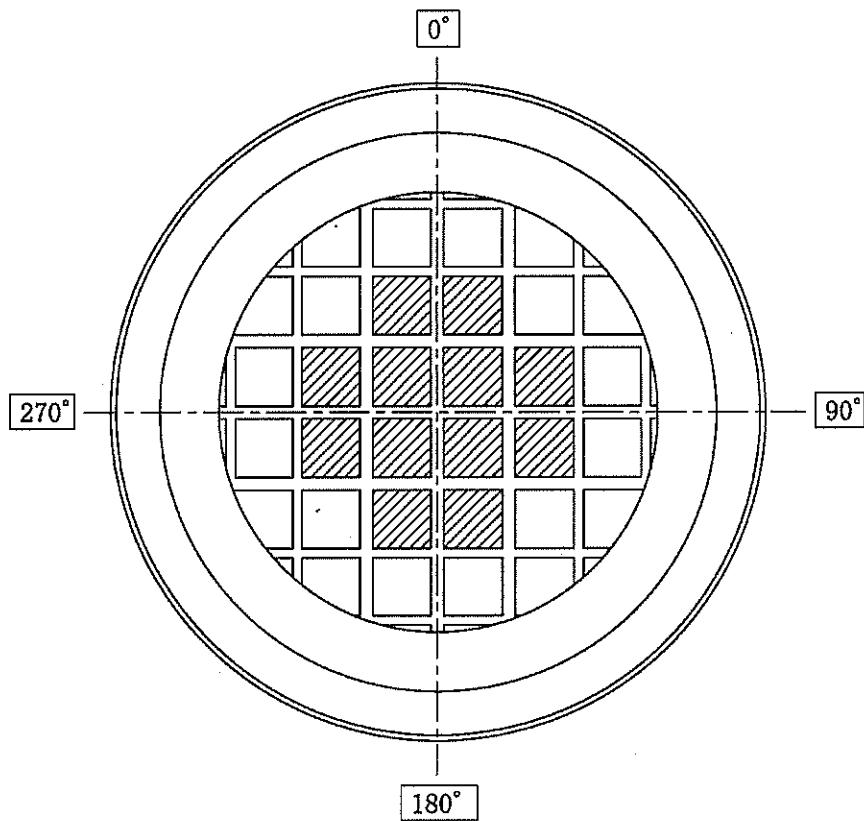
ここで、


- 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)
- Δ t : 周囲空気と外表面の温度差 (K)
- Pr : プラントル数 (-)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)


第2-6表 材料のふく射率

材料	ふく射率 (一)
塗装面 (注)	0.8

(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).」に基づく。また、評価が保守側となるように、特定兼用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

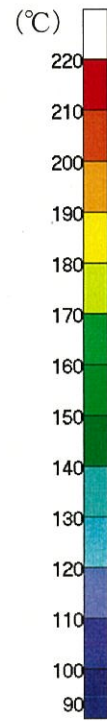
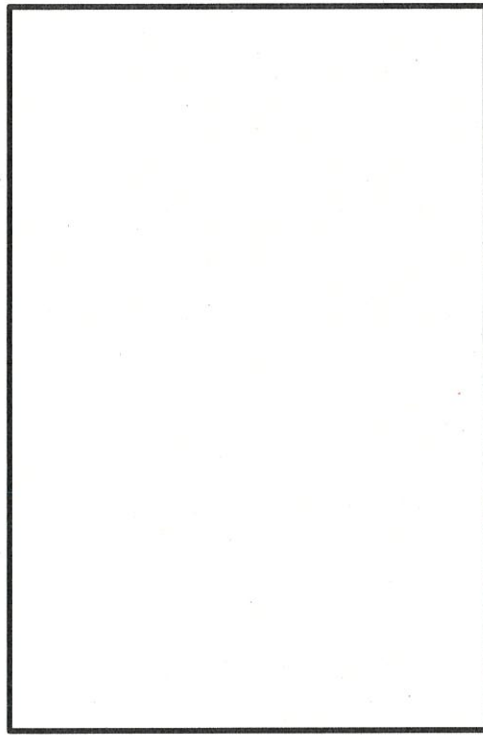
2.5 評価結果

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。

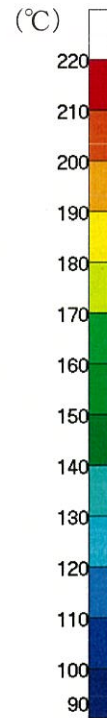
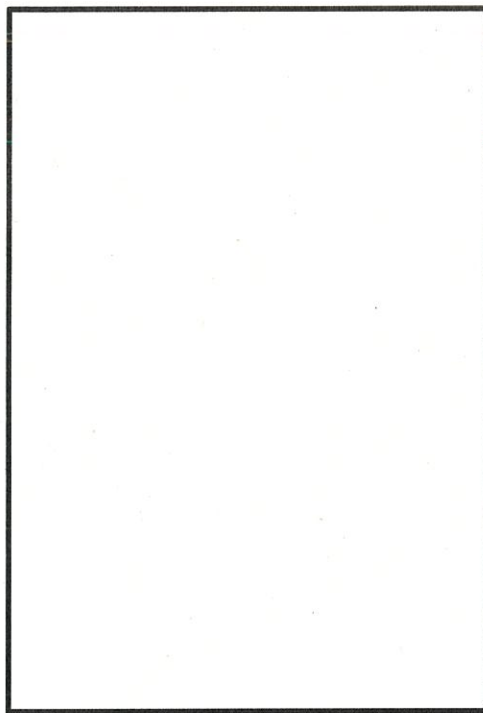
本表に示すとおり、燃料被覆管及び特定兼用キャスクの温度は温度制限値を下回っており、使用済燃料の崩壊熱を安全に除去できる。

第2-7表 評価結果

対象となる部位	評価結果 (°C)		温度制限値 (°C)	
	17×17燃料 収納時	15×15燃料 収納時		
燃料被覆管	215	215	275	
特定兼用 キャスク	胴 (本体部)	132	132	350
	胴 (フランジ部)	119	119	350
	胴 (底板)	142	142	350
	一次蓋	118	118	350
	一次蓋ボルト	118	118	350
	二次蓋	112	112	350
	二次蓋ボルト	112	112	350
	外筒	123	123	350
	下部端板	123	123	425
	蓋部中性子遮蔽材カバー	116	116	350
	底部中性子遮蔽材カバー	124	124	425
	トラニオン	127	127	350
	バスケット	187	188	250
	伝熱フィン	126	126	200
金属ガスケット	118	118	130	
中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	135	135	149	

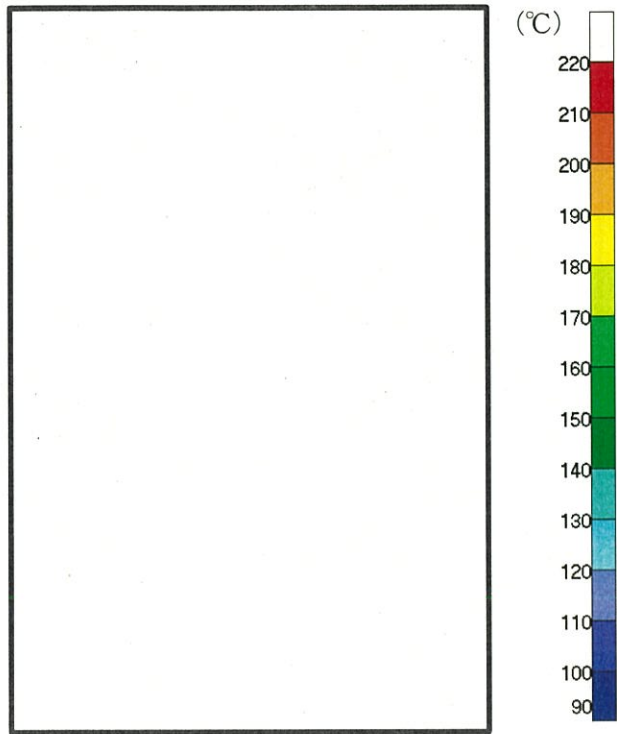


(全体)

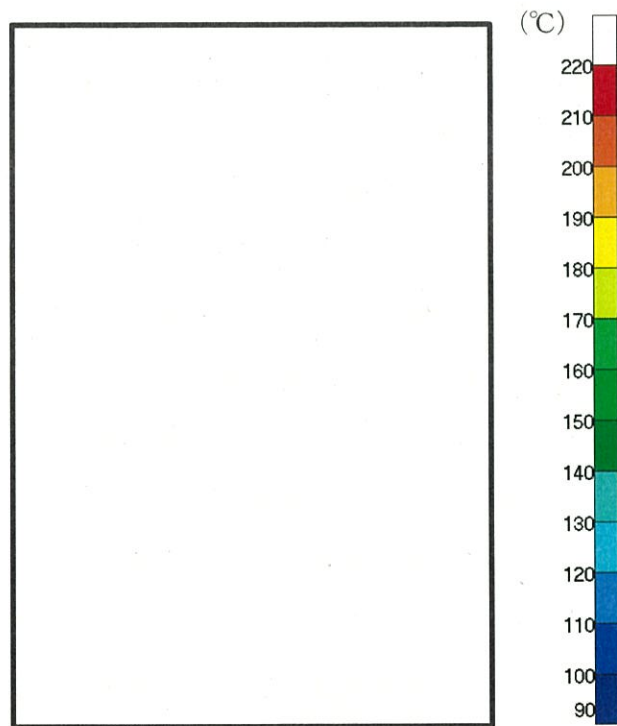


(燃料集合体最高温度位置断面)

第2-6図 除熱解析結果(1/2) (17×17燃料収納時、全体モデル)

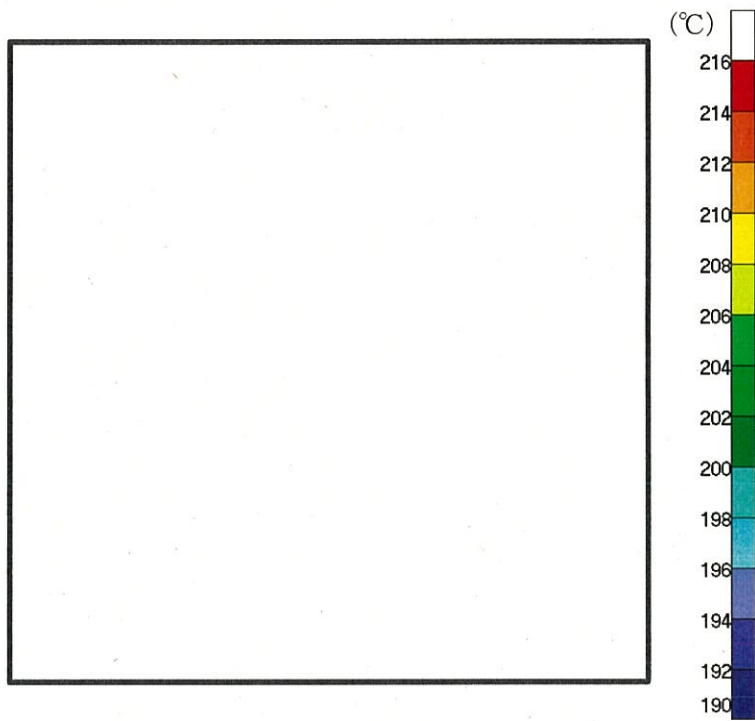


(全体)

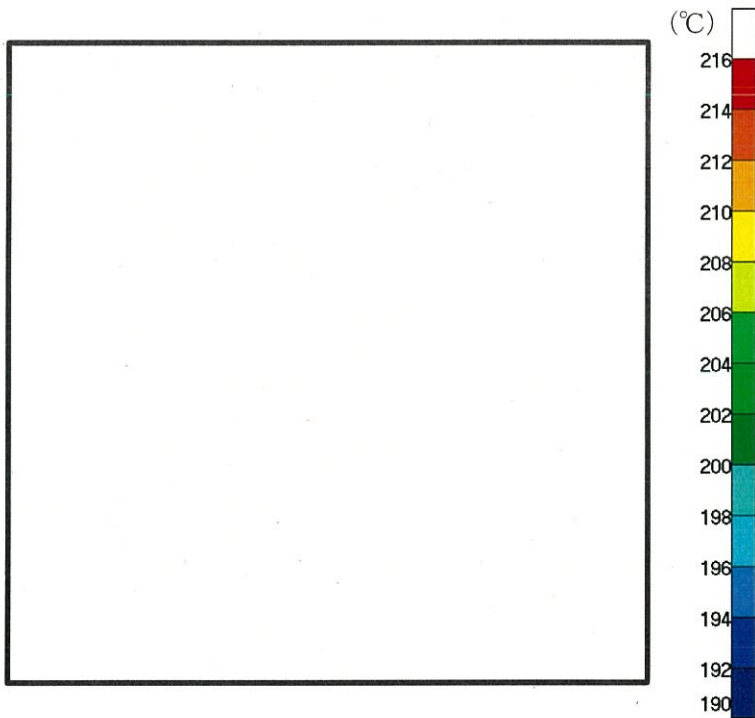


(燃料集合体最高温度位置断面)

第2-6図 除熱解析結果(2/2) (15×15燃料収納時、全体モデル)



第2-7図 除熱解析結果(1/2) (17×17燃料収納時、燃料集合体モデル)



第2-7図 除熱解析結果(2/2) (15×15燃料収納時、燃料集合体モデル)

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

1. はじめに	別紙1-1
2. 解析コードの概要	別紙1-2
2.1 ABAQUS	別紙1-2

1. はじめに

本資料は、添付資料9「特定兼用キャスクの冷却能力に関する説明書」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 ABAQUS

項目	コード名
	ABAQUS
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 2018 HF4
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素）による伝熱解析
コードの概要	<p>米国HKS (Hibbitt, Karlsson & Sorensen) 社によって開発され、現在はダッソー・システムズ(株)によって保守されている有限要素法による構造解析用汎用コードである。</p> <p>応力解析、熱応力解析、伝熱解析などを行うことができ、特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、多くの民間・国立研究所、大学及び産業界で利用されている実績を持つ。</p>
検証(Verification)及び 妥当性確認(Validation)	<p>ABAQUS Ver. 2018 HF4は JSMEクラス「クラス3容器」である特定兼用キャスクの3次元有限要素法（ソリッド要素）による伝熱解析に使用している。</p> <p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・伝熱工学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、適用機能による伝熱解析を行い、解析解が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析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。 <p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、自動車、航空宇宙、防衛、工業製品、学術研究などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本申請で使用する3次元有限要素法（ソリッド要素）による伝熱解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・本申請において使用するバージョンは、発電用原子炉の既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンアップにおいて、今回使用している解析機能に影響が生じていないことを確認している。 ・検証の体系と本申請で使用する体系が同等であることから、解析解が理論モデルによる理論解を再現できることを持って、解析機能の妥当性も確認できる。 ・本申請における構造に対し使用する要素、伝熱解析に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

添付書類10 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

目 次

1. 概要	1
2. MSF-24P(S)型の遮蔽設計	2
2.1 評価基準	3
2.2 評価方法	3
2.3 評価条件	5
2.4 評価結果	13
3. MSF-24P(S)型の放射線遮蔽材の熱除去	14

別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要

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」（平成25年6月28日 原子力規制委員会規則第6号）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」（平成25年6月19日 原規技発第1306194号）第26条に基づき、MSF-24P(S)型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及び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. MSF-24P(S)型の遮蔽設計

兼用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」（平成31年3月13日 原規技発第1903131号）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) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

- a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用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、設計貯蔵期間中の兼用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. 兼用キャスク表面の線量当量率を2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から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。

MSF-24P(S)型は、使用済燃料から放出される放射線を特定兼用キャスクの本体及び蓋部により遮蔽する設計とし、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、中性子遮蔽材にはレジンを用いる。設計貯蔵期間における特定兼用キャスクの中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力の低下を考慮しても、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から1m離れた位置における最大線量当量率は、それぞれ2mSv/h以下、100 μ Sv/h以下となるように設計する。

MSF-24P(S)型の遮蔽機能に関する評価は、収納する使用済使用済燃料の種類、燃焼度、冷却期間等の条件を基に、遮蔽評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで、線源強度を求める。特定兼用キャスクの実形状を三次元でモデル化して求めた特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率が評価基準以下となり、特定兼用キャスクが適切な遮蔽能力を有することを確認する。

2.1 評価基準

MSF-24P(S)型の評価基準は、設計貯蔵期間における中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力の低下を考慮しても、特定兼用キャスク表面の最大線量当量率を2 mSv/h以下、及び特定兼用キャスク表面から1 m離れた位置における最大線量当量率を100 μ Sv/h以下とする。

2.2 評価方法

MSF-24P(S)型の遮蔽解析においては、遮蔽材の最小厚さを考慮し、MSF-24P(S)型の実形状に基づき三次元体系のモデルでモデル化する。なお、遮蔽解析モデルでは保守的に貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体をモデル化しない。

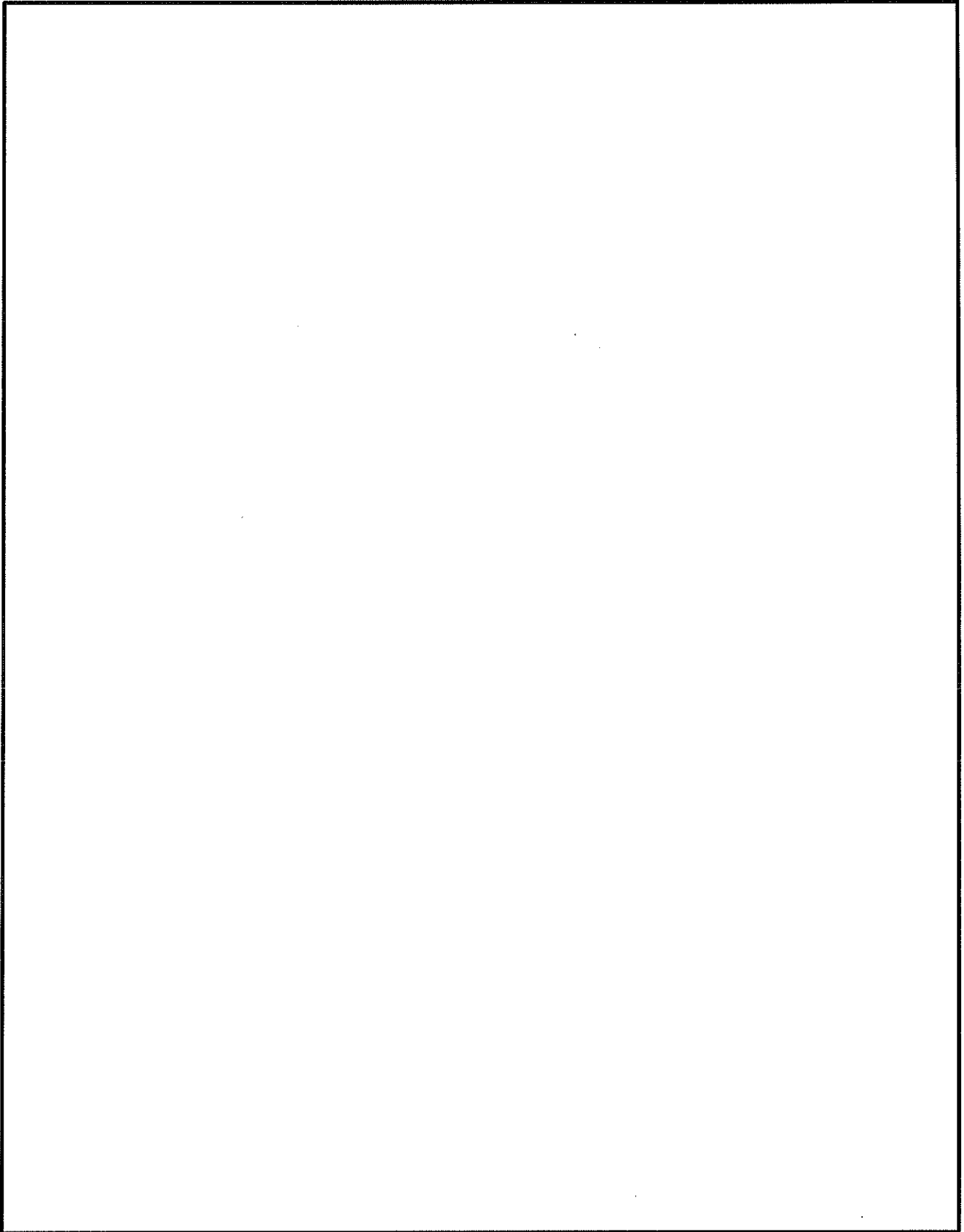
MSF-24P(S)型の遮蔽解析モデルを第2-1図に示す。

遮蔽計算はガンマ線、中性子共にMCNP5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、MSF-24P(S)型表面及び表面から1 m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MCNP5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、MSF-24P(S)型表面及び表面から1 m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FSXLIB-J33データ及びEPDL97に基づくMCPLIB84データをそれぞれ中性子束及びガンマ線束評価に対して用い、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、アクチノイド及び放射化した構造材を考えた。線源強度は、核分裂生成物及びアクチノイドに対してORIGEN2.2UPJコード、放射化した構造材に対して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のデータをそれぞれ48,000MWd/t型燃料及び39,000MWd/t型燃料に対して用いる。



第 2-1 図 MSF-24P(S)型遮蔽解析モデル

2.3 評価条件

2.3.1 線源条件

MSF-24P(S)型の収納物の線源条件を第2-1表及び第2-2表に示す。

MSF-24P(S)型の中心領域に12体を配置し、外周領域に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) 使用済燃料及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件 (17×17燃料)

項 目		17×17 燃料 48,000MWd/t 型		17×17 燃料 39,000MWd/t 型		
		A 型	B 型	A 型	B 型	
燃焼度 (MWd/t)	中央部					
	外周部					
平均比出力 (MW/t) (注1)						
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)						
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 (17×17 燃料)

項 目		17×17 燃料 48,000MWd/t 型		17×17 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								
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)									
⁶⁰ Co の崩壊定数 (1/日)						3.600 × 10 ⁻¹			

第 2-2 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 (15×15 燃料)

項 目		15×15 燃料 48,000MWd/t 型		15×15 燃料 39,000MWd/t 型		
		A 型	B 型	A 型	B 型	
燃焼度 (MWd/t)	中央部					
	外周部					
平均比出力 (MW/t) (注 1)						
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)						
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 2-2 表 (2/2) 使用済燃料の線源強度計算条件 (15×15 燃料)

項 目		15×15 燃料 48,000MWd/t 型		15×15 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								
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)									
⁶⁰ Co の崩壊定数 (1/日)						3.600×10 ⁻¹			

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 2-3 表及び第 2-4 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 (1/日)

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 2-3 表及び第 2-4 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 (「添付書類 8 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 2-3 表及び第 2-4 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し、Watt 型 ^{239}Pu スペクトルを用いた。

第2-3表 燃料の種類と型式毎の線源強度 (17×17 燃料)

(MSF-24P(S)型1基当たり)

項 目	17×17 燃料 48,000MWd/t 型 ^(注1)		17×17 燃料 39,000MWd/t 型 ^(注2)	
	A 型	B 型	A 型	B 型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.073×10^{17}	1.007×10^{17}	9.067×10^{16}	8.518×10^{16}
構造材放射化ガンマ線 ^(注3) (⁶⁰ Co TBq)	5.922×10^2	6.024×10^2	5.801×10^2	5.736×10^2
燃料有効部中性子 ^(注4) (n/s)	1.205×10^{10}	1.120×10^{10}	8.408×10^9	7.811×10^9

(注1) 中央部12体の燃焼度を []、外周部12体の燃焼度を [] とした MSF-24P(S) 型1基当たりの線源強度である。

(注2) 中央部12体及び外周部12体の燃焼度を全て [] とした MSF-24P(S) 型1基当たりの線源強度である。

(注3) []

(注4) 記載値は実効増倍率 keff を考慮した全中性子源強度である。

第2-4表 燃料の種類と型式毎の線源強度 (15×15燃料)

(MSF-24P(S)型1基当たり)

項 目	15×15燃料 48,000MWd/t型 ^(注1)		15×15燃料 39,000MWd/t型 ^(注2)	
	A型	B型	A型	B型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.062×10^{17}	9.967×10^{16}	9.018×10^{16}	8.474×10^{16}
構造材放射化ガンマ線 ^(注3) (⁶⁰ Co TBq)	4.438×10^2	4.984×10^2	4.919×10^2	4.880×10^2
燃料有効部中性子 ^(注1) (n/s)	1.266×10^{10}	1.175×10^{10}	8.380×10^9	7.787×10^9

(注1) 中央部12体の燃焼度を []、外周部12体の燃焼度を [] としたMSF-24P(S)型1基当たりの線源強度である。

(注2) 中央部12体及び外周部12体の燃焼度を全て [] としたMSF-24P(S)型1基当たりの線源強度である。

(注3) []

2.3.3 中性子遮蔽材の経年変化の考慮について

MSF-24P(S)型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、添付書類12「特定兼用キャスクが使用される条件の下における健全性に関する説明書」に示す。

2.3.4 評価対象燃料

遮蔽解析に用いる燃料タイプは、第2-3表及び第2-4表より、燃料有効部ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い、17×17燃料 48,000MWd/t型（A型）及び15×15燃料48,000MWd/t型（A型）とする。

2.4 評価結果

MSF-24P(S)型の遮蔽解析により得られた線量当量率を第2-5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、MSF-24P(S)型は評価基準を満足している。

第2-5表 線量当量率の評価結果

(単位：μSv/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	17×17 燃料収納時	1528.9	395.6	207.1	84.6	64.8	60.1
	15×15 燃料収納時	1639.6	422.1	220.2	83.0	67.1	50.4
評価基準		2,000 以下			100 以下		

3. MSF-24P(S)型の放射線遮蔽材の熱除去

放射線遮蔽材の温度は、「添付書類9 特定兼用キャスク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、MSF-24P(S)型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。MSF-24P(S)型の除熱設計、評価方法、評価対象燃料、評価条件等については、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 (°C)	温度制限値 (°C)
外筒	123 (注1)	350
蓋部	118 (注2)	350
胴	142 (注3)	350
中性子遮蔽材	135 (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。

計算機プログラム（解析コード）の概要

目 次

1. はじめに	別紙1-1
2. 解析コードの概要	別紙1-2
2.1 ORIGEN2	別紙1-2
2.2 MCNP5	別紙1-3

1. はじめに

本資料は、添付書類10「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 ORIGEN2

項目 \ コード名	ORIGEN2
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1980 年
使用したバージョン	2.2-UPJ
コードの概要	<p>本解析コードは、使用済燃料等の核種生成量、崩壊熱量並びに中性子及びガンマ線の線源強度を評価するために米国オークリッジ国立研究所で開発され公開された燃焼計算コードであり、使用済燃料輸送キャスク、原子力発電所施設、再処理施設、廃棄物処理施設等幅広く設計に利用されている。</p> <p>本解析（使用済燃料の線源強度及び崩壊熱）では、コード付属のライブラリを用いている。</p>
コードの検証及び妥当性確認 (新規制基準対応以降のみ)	<p>ORIGEN2 は、線源強度及び崩壊熱解析に使用している。</p> <p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現により確認している。 ・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。 <p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・米国原子力学会 (ANS), 「ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials」, Nuclear Technology vol.62, (1983 年 9 月) において、ANS 標準崩壊熱との比較及び使用済燃料中のウラン、プルトニウム、アメリシウムなどの組成の実測値との比較により妥当性の確認を行っている。 ・今回の使用目的は上記妥当性確認内容と合致しており、本計算機コードの使用は妥当である。

2.2 MCNP5

項目	コード名
	MCNP5
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所 (LANL)
開発時期	2010年 (初版開発時期 2003年)
使用したバージョン	1.60
コードの概要	<p>三次元連続エネルギーモンテカルロコード MCNP5 コードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発された、中性子、光子及び電子輸送問題を解くための汎用モンテカルロコードである。</p> <p>このコードは二次曲面の論理演算によって表現された任意の三次元領域を取扱うことができ、形状モデルや断面積データを正確に取り扱うことができる。</p> <p>幾何形状の設定の自由度が大きいことや、断面積の取り扱いに連続エネルギーを採用していること等の利点がある。</p> <p>本解析では、ガンマ線評価において EPDL97 をもとに作成された断面積ライブラリ MCPLIB84 (ロスアラモス国立研究所にて整備されたもの) を、中性子評価においては JENDL-3.3 をもとに作成された断面積ライブラリ FSXLIB-J33 (日本原子力研究所にて整備されたもの) を用いている。</p>
コードの検証及び妥当性確認 (新規基準対応以降のみ)	<p>MCNP5は、特定兼用キャスク内使用済燃料からのガンマ線及び中性子のキャスク外面の線量当量率計算に使用している。</p> <p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現及び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。 ・ MCNP5 コードは、ガンマ線及び中性子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ガンマ線及び中性子の放射線束分布解析は可能であり、放射線束に線量換算係数を乗じることで MCNP5 コードはガンマ線及び中性子線量計算に適用可能である。 <p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本原子力学会, 「モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化 平成 23 年度報告書」, (2012 年 3 月) において、使用済燃料輸送容器体系での放射線透過試験での測定値に対してベンチマーク解析を実施しており、解析結果が測定値と同様の傾向を示している。今回の遮蔽計算は、上記妥当性確認における実験体系と同様に、使用済燃料を線源としたキャスク容器における線量率を計算するものであり、上記妥当性確認内容と合致している。 ・ 断面積ライブラリ MCPLIB84 及び FSXLIB-J33 については、「M. Ue

	<p>yama, M. Osaki, “Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code”, PATRAM 2019, (2019).」において、乾式貯蔵容器体系での放射線透過試験での測定値に対してベンチマーク解析を実施しており、測定値と計算値が概ね一致していることを確認している。</p> <p>上記妥当性確認では、線源条件及び遮蔽条件が今回の使用目的と合致している。</p>
--	--

添付書類11 特定兼用キャッシュの閉じ込めに関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. MSF-24P(S)型の密封設計	2
2.1 評価基準	2
2.2 密封設計概要	2
2.3 評価方法	6
2.4 評価条件及び評価結果	12

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」（平成 25 年 6 月 28 日 原子力規制委員会規則第 6 号）（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」（平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306194 号）の第 26 条に基づき、MSF-24P(S)型に収納する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、かつ、その機能を適切に監視できることについて説明するものである。

2. MSF-24P(S)型の密封設計

2.1 評価基準

兼用キャスクの閉じ込め機能の評価基準は、「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」（平成 31 年 3 月 13 日 原規技発第 1903131 号）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（以下「蓋間圧力」という。）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。
- ・兼用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、兼用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。
- ・閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（兼用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

MSF-24P(S)型は、長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、特定兼用キャスクの蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料集合体を内封する空間を不活性雰囲気を保つとともに負圧に維持する設計とする。また、MSF-24P(S)型は、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計として、特定兼用キャスクの蓋部を一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋との空間部（以下「蓋間」という。）を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計とする。さらに、MSF-24P(S)型は、蓋間の圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

(2) MSF-24P(S)型の閉じ込め構造

MSF-24P(S)型の閉じ込め境界は、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。閉じ込め境界を構成する金属ガスケットの仕様を第 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、蓋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。

また、二次蓋に貫通部を設け、圧力センサ（圧力計）を設置できる構造とし、蓋間圧力を

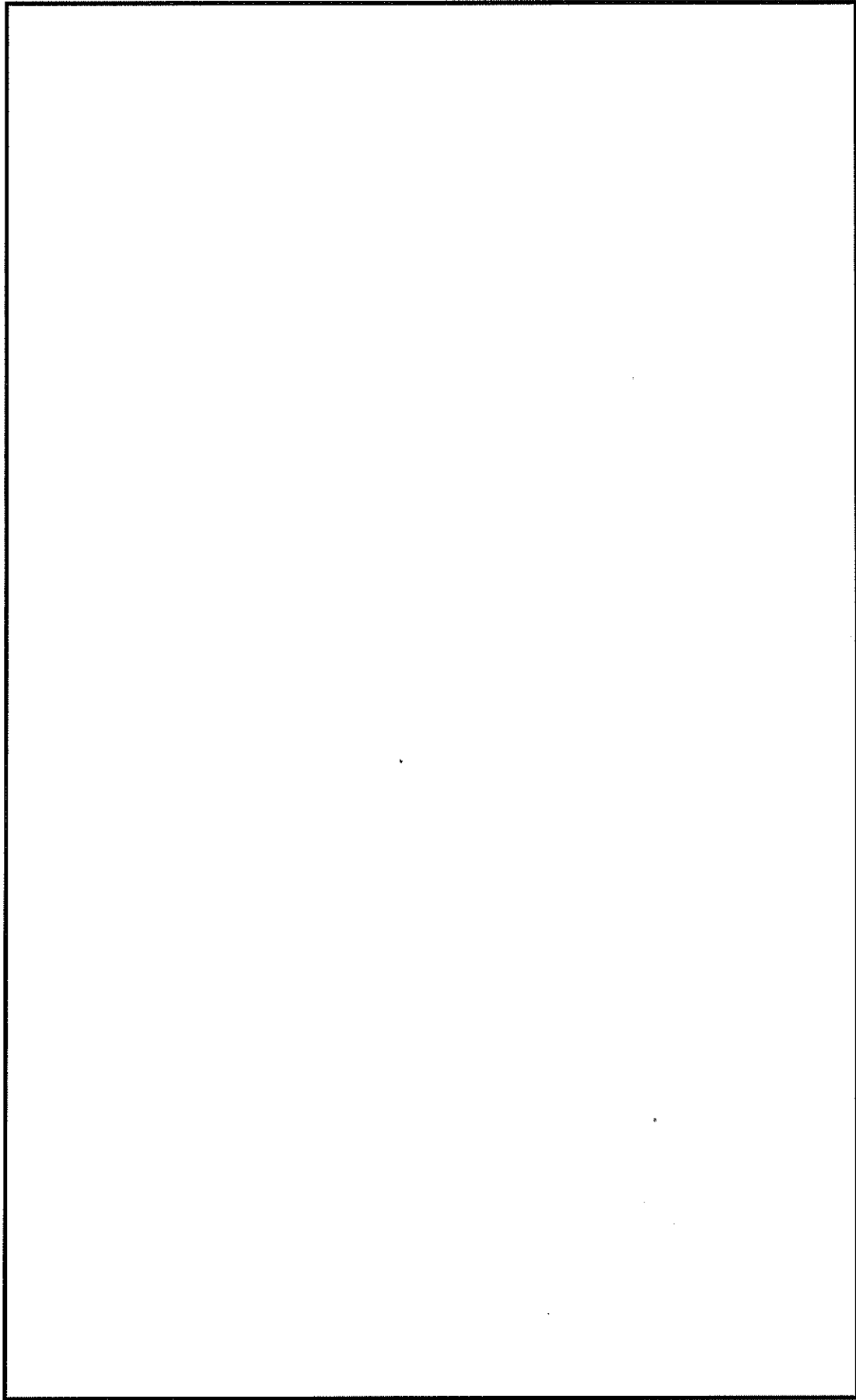
測定することにより、閉じ込め機能を監視する。

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、閉じ込め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 閉じ込め境界を構成する金属ガスケットの仕様

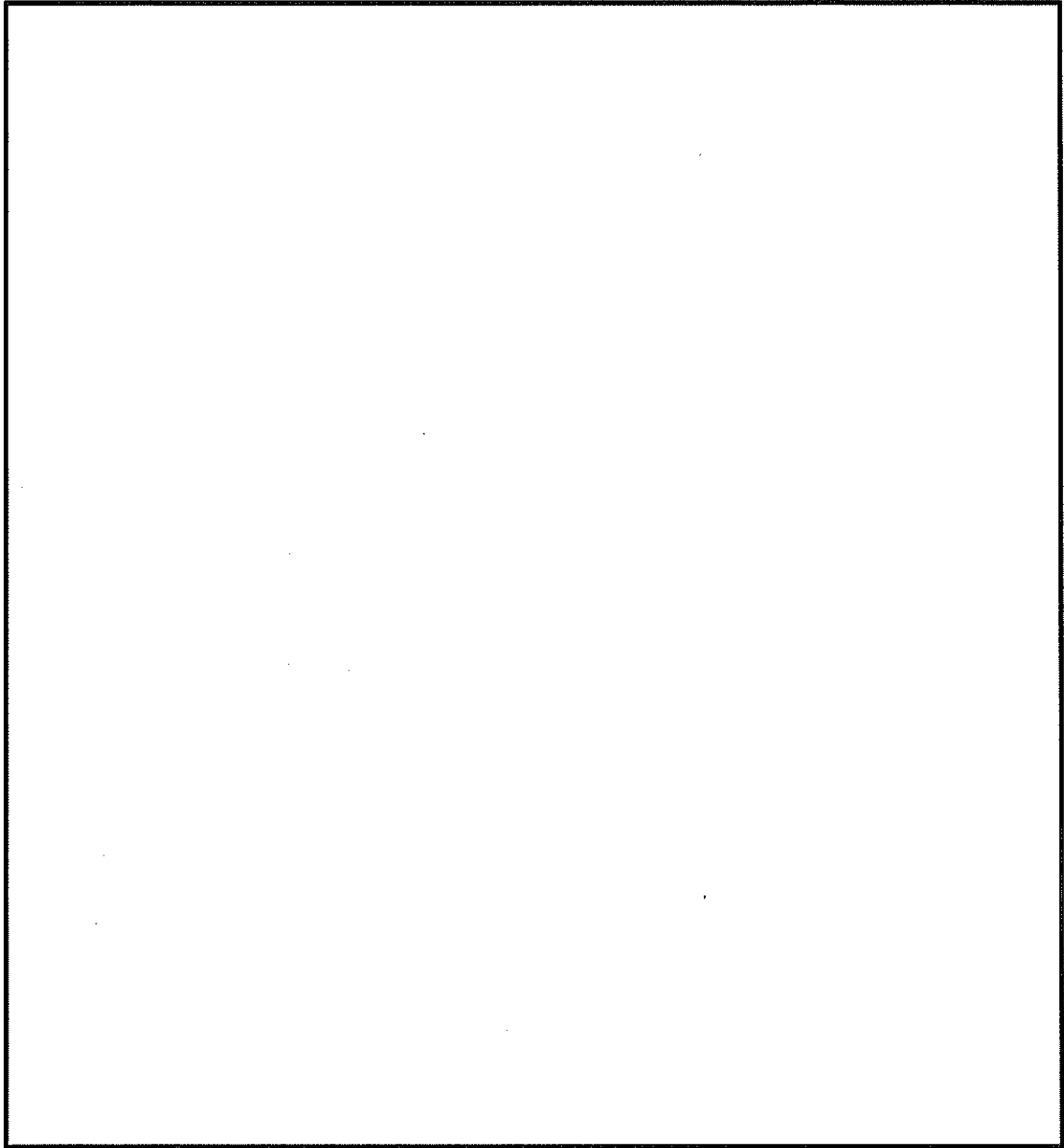
	一次蓋	ドレンバルブカバー	ベントバルブカバー
材質	アルミニウム/ニッケル基合金		
外径 (注)			
断面径			

(注) 閉じ込め境界部の中心径を記載



—— 閉じ込め境界

第2-1図 閉じ込め構造



—— 閉じ込め境界 (負圧)
▨ 圧力監視境界 (正圧)

第 2-2 図 閉じ込め監視構造

2.3 評価方法

(1) 概要

MSF-24P(S)型の漏えい率の考え方を第 2-3 図、MSF-24P(S)型の閉じ込め評価フローを第 2-4 図、閉じ込め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、特定兼用キャスク本体内部の圧力変化は、蓋間圧力と特定兼用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特定兼用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。

閉じ込め評価では、設計貯蔵期間（60 年）中に特定兼用キャスク本体内部の負圧が維持できる漏えい率を、特定兼用キャスクの閉じ込め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、蓋間空間のガスは特定兼用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 9.7×10^1 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：2021」, (2022).」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（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) 特定兼用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 : 特定兼用キャスク本体内部圧力 (Pa)
- T_d : 特定兼用キャスク本体内部温度 (K)
- Q : 特定兼用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 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
- T : 漏えい気体の温度 (K)
- V_d : 特定兼用キャスク本体内部の空間容積 (m^3)
(特定兼用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。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot P_a \\ L &= (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d) \\ F_c &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ F_m &= \frac{\sqrt{2 \pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot P_a} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、

- Q : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
- L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (m^3/s)
- F_c : 連続流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa)
- P_d : 下流側 (特定兼用キャスク本体内部) 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)

$$P_a = \frac{P_u + P_d}{2}$$

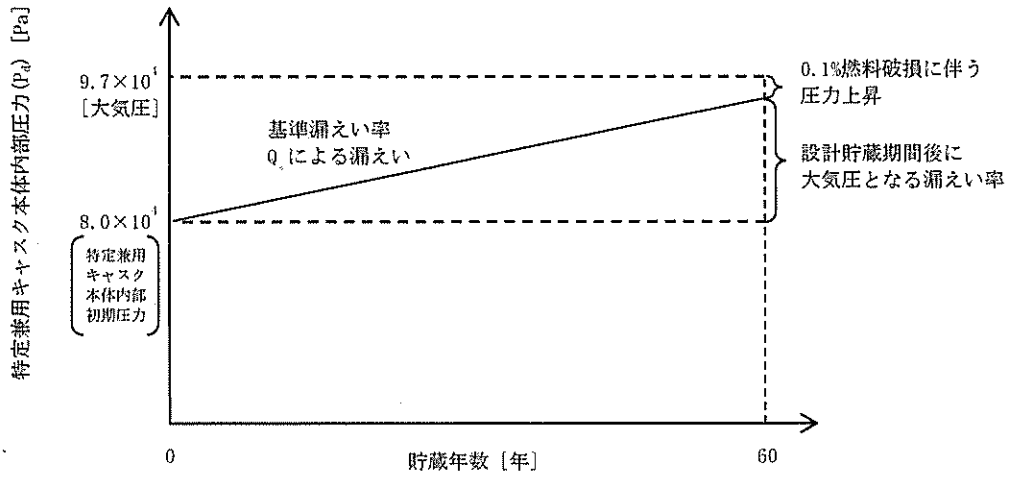
- μ : 漏えい気体の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- T : 漏えい気体の温度 (K)
- M : 漏えい気体の分子量 (kg/mol)
- R_0 : ガス定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

- 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特定兼用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 ($9.7 \times 10^1 \text{ Pa}$) 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 ($P_u = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $P_d = 0 \text{ Pa}$, $T = 298.15 \text{ K}$) を入力し、基準漏えい率 Q_s を求める。

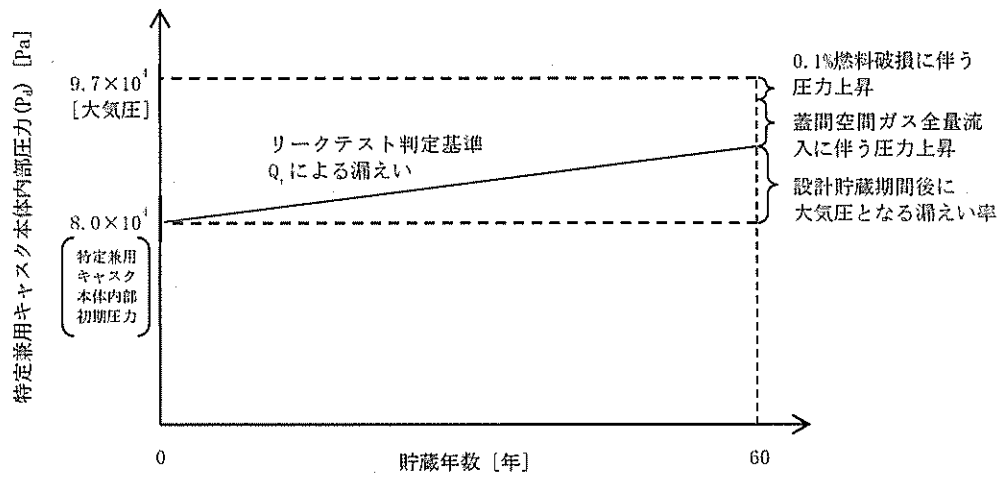
- e) 蓋間空間ガスの全量流入による圧力上昇を考慮し、b)により求めた P_a が設計貯蔵期間経過後に大気圧となる漏えい孔径 D_r からリークテスト判定基準 Q_r を定める。

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特定兼用キャスク本体内部温度の温度低下を考慮せず、特定兼用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。

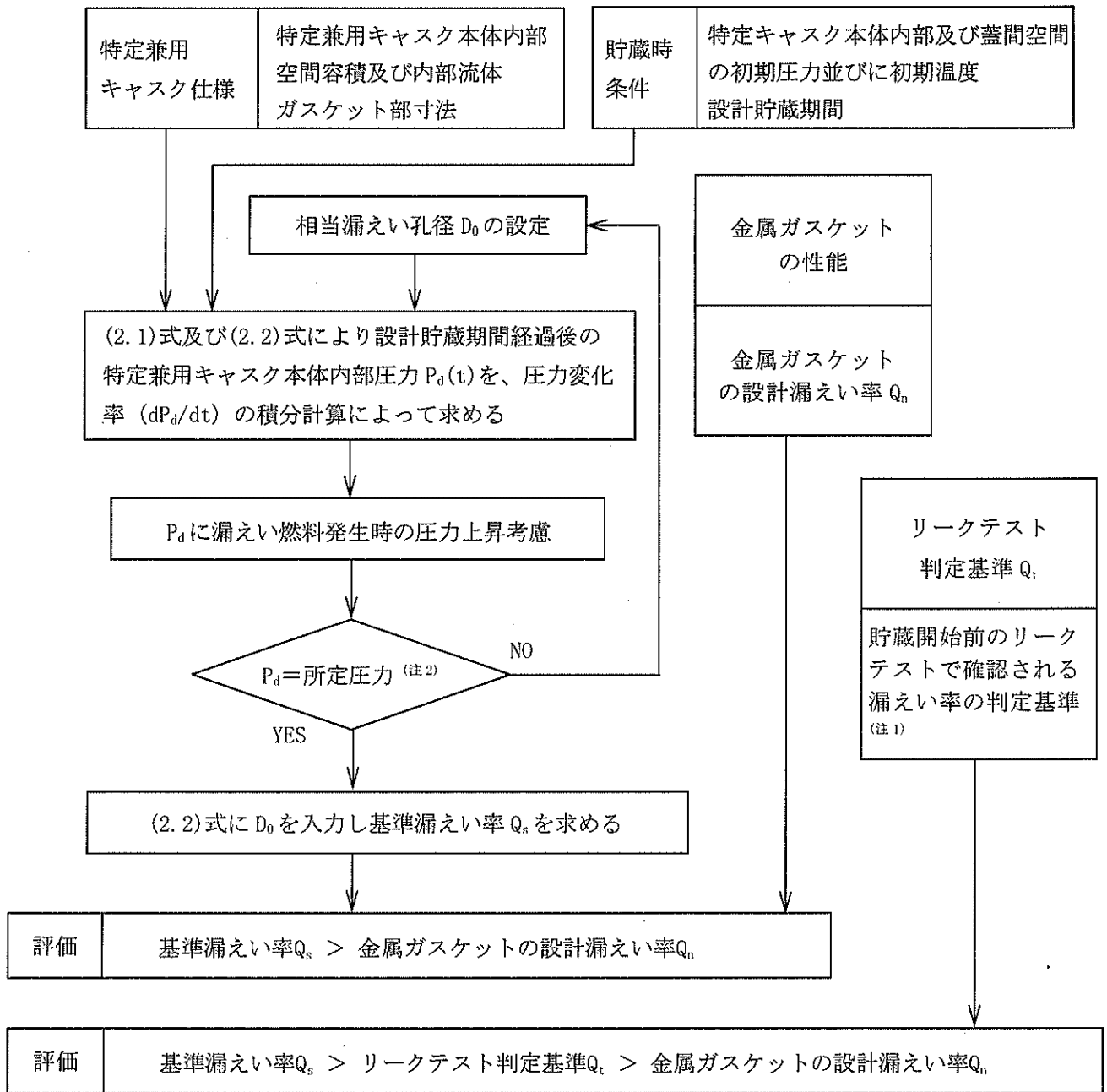


(a) 基準漏えい率による漏えい



(b) リークテスト判定基準による漏えい

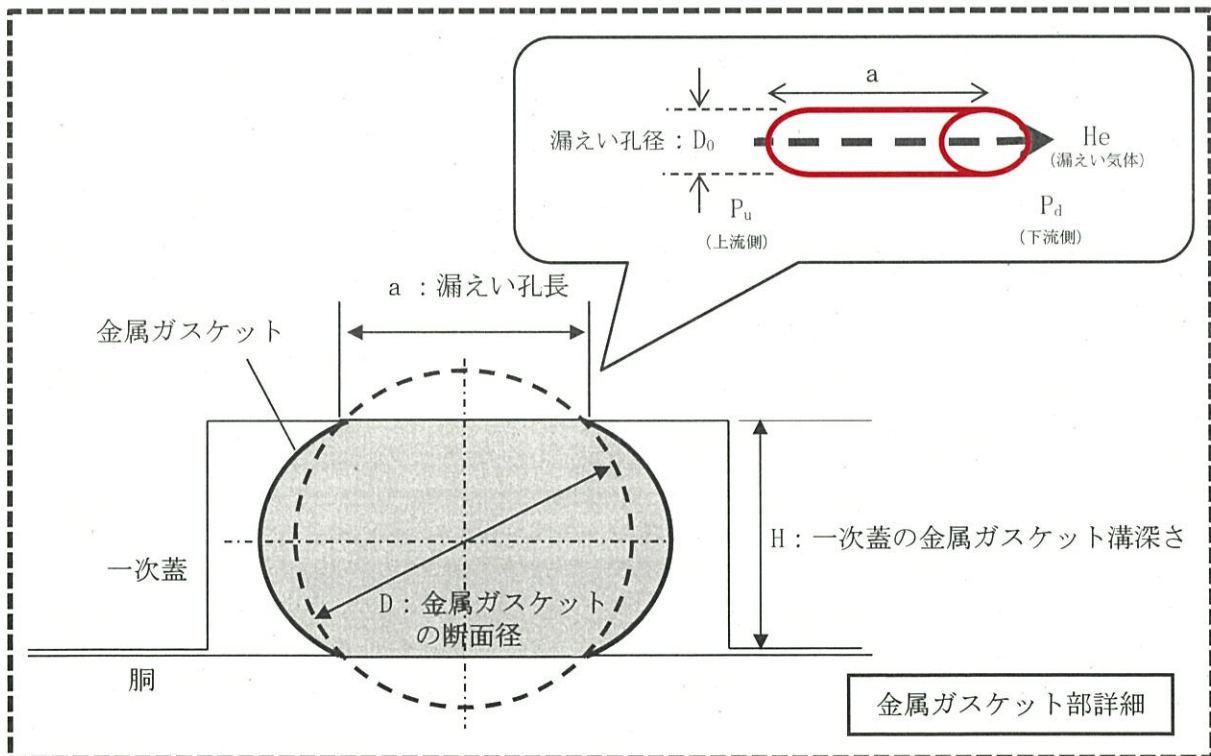
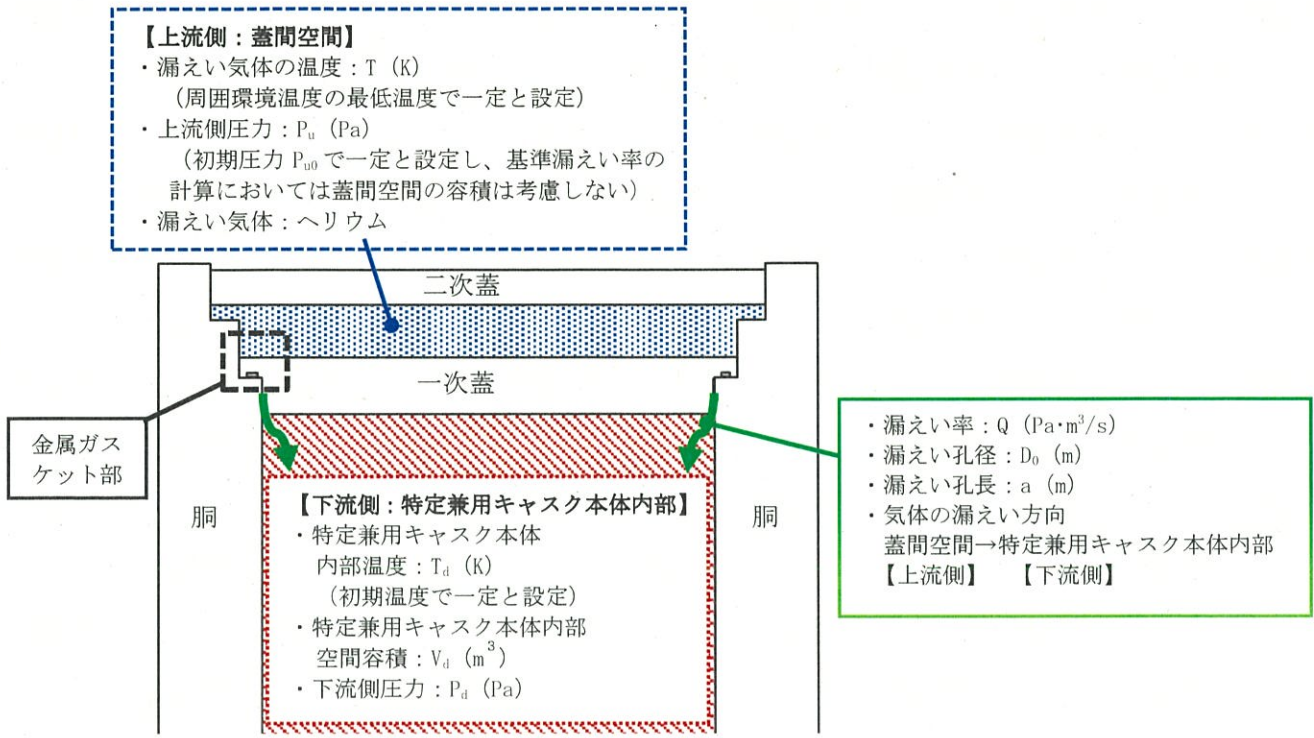
第2-3図 特定兼用キャスクの漏えい率の考え方



(注1) 貯蔵開始前のリークテストにおいて、一次蓋、ドレンバルブ部及びベントバルブ部の3箇所
の漏えい率の合計値がリークテスト判定基準以下であることを確認する。

(注2) 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 特定兼用キャスクの閉じ込め評価フロー図



第2-5図 閉じ込め評価に係る構造図

2.4 評価条件及び評価結果

閉じ込め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 閉じ込め評価条件及び評価結果 (基準漏えい率 Q_s)

	17×17 燃料収納時	15×15 燃料収納時
D_0 : 漏えい孔径 (m)	[REDACTED]	
a : 漏えい孔長 (m)		
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)	5.05×10^1	
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}	2.57×10^{-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 閉じ込め評価条件及び評価結果 (リークテスト判定基準 Q_t)

	17×17 燃料収納時	15×15 燃料収納時
D_t : 漏えい孔径 (m)		
a : 漏えい孔長 (m)		
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 ¹	
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)	1.61 × 10 ⁻⁶	1.60 × 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		

添付書類12 特定兼用キャッシュが使用される条件の下における
健全性に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. MSF-24P(S)型の構成部材	1
3. 経年変化に関する評価条件	3
4. 経年変化に関する評価結果	6
5. 中性子遮蔽材の減損量評価	14

別紙1 バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

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」（平成25年6月28日 原子力規制委員会規則第6号）第26条第2項第6号ハ及びニ並びに「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26条に基づき、MSF-24P(S)型を構成する部材が使用される温度、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、並びに使用済燃料被覆管の著しい腐食又は変形を防止できることについて説明するものである。

2. MSF-24P(S)型の構成部材

MSF-24P(S)型の主要な構成部材の材質を第2-1表に示す。MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの構成部材について、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、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。また、MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスク本体内面、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、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムガスとともに封入し、特定兼用キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆措置を施す設計とする。

第2-1表 MSF-24P(S)型の主要な構成部材の材質

構成部材	材質
特定兼用キャスク本体	<p>炭素鋼 [] (注1)</p> <p>炭素鋼 [] (注2)</p> <p>ステンレス鋼 []</p> <p>ステンレス鋼 []</p> <p>ステンレス鋼 (SUS630)</p> <p>銅 (C1020)</p> <p>レジン (エポキシ系樹脂)</p>
<p>胴</p> <p>外筒</p> <p>底部中性子遮蔽材カバー</p> <p>下部端板</p> <p>トランオン</p> <p>伝熱フィン</p> <p>中性子遮蔽材 (底部、側部)</p>	<p>アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)</p> <p>ほう素添加アルミニウム合金</p>
バスケット	
バスケットプレート	
中性子吸収材	
<p>蓋 部</p> <p>一次蓋</p> <p>蓋部中性子遮蔽材カバー</p> <p>二次蓋</p> <p>貯蔵用三次蓋</p> <p>一次蓋ボルト</p> <p>二次蓋ボルト</p> <p>貯蔵用三次蓋ボルト</p> <p>中性子遮蔽材 (蓋部)</p> <p>金属ガスケット</p>	<p>炭素鋼 [] (注3)</p> <p>炭素鋼 [] (注3)</p> <p>炭素鋼 [] (注3)</p> <p>炭素鋼 [] (注2)</p> <p>ニッケルクロムモリブデン鋼 [] (注4)</p> <p>ニッケルクロムモリブデン鋼 [] (注4)</p> <p>ニッケルクロムモリブデン鋼 [] (注4)</p> <p>レジン (エポキシ系樹脂)</p> <p>ニッケル基合金/アルミニウム</p>

(注1) 胴の表面のうち、一次蓋及び二次蓋との接触面は [] 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) 外筒及び貯蔵用三次蓋の外表面には、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 [] 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、二次蓋ボルト及び貯蔵用三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

MSF-24P(S)型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。

- ・ 特定兼用キャスク内面、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。
- ・ MSF-24P(S)型の構成部材の温度は、添付書類9「特定兼用キャスク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。
- ・ MSF-24P(S)型の構成部材の中性子照射量は、添付書類10「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 MSF-24P(S)型の主要な構成部材及び使用済燃料の最高温度

構成部材等	最高温度 (°C)
胴 (本体部)	132
胴 (フランジ部)	119
胴 (底板)	142
一次蓋	118
一次蓋ボルト	118
二次蓋	112
二次蓋ボルト	112
貯蔵用三次蓋	110
貯蔵用三次蓋ボルト	110
外筒	123
下部端板	123
蓋部中性子遮蔽材カバー	116
底部中性子遮蔽材カバー	124
トラニオン	127
バスケット	188
伝熱フィン	126
金属ガスケット	118
中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	135
使用済燃料 (燃料被覆管)	215

第3-2表 MSF-24P(S)型の主要な構成部材及び使用済燃料の中性子照射量

構成部材等	構成部材等で最大となる全中性子照射量 (n/cm ²) (注1)
(1) 胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋及び蓋ボルト (注2)	6.9×10^{14}
(2) バスケット (注3)	1.5×10^{15}
(3) トラニオン (注3)	6.9×10^{14}
(4) 外筒	3.7×10^{12}
(5) 蓋部中性子遮蔽材カバー (注2)	6.9×10^{14}
(6) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー	8.4×10^{13}
(7) 中性子遮蔽材 (注4)	1.6×10^{14}
(8) 金属ガスケット	2.5×10^{14}
(9) 伝熱フィン (注4)	1.6×10^{14}
(10) 使用済燃料 (燃料被覆管)	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

(注3) 最大となるキャビティ内領域 (使用済燃料領域) の値

(注4) 最大となる側部中性子遮蔽材領域の値

4. 経年変化に関する評価結果

MSF-24P(S)型の主要な構成部材及び使用済燃料(燃料被覆管)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。MSF-24P(S)型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、貯蔵用三次蓋及び蓋ボルト

【照射影響】

胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三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、「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 6.9×10^{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、貯蔵用三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 (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】

特定兼用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、貯蔵用三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。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。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は、「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は、「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、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。

本アルミニウム合金材を使用するにあたっては、設計貯蔵期間における設計用強度を保証するために、別紙1に示す製造管理規定を満足するように製造管理を行う。

本アルミニウム合金は、0.1%から1.0%程度のクリープひずみが予め付与されている場合において、クリープひずみが材料の機械的特性に影響を与えないことが「(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).」に示されている。MSF-24P(S)型のバスケットは、バスケットプレートを格子状に組み立てる構造であり、バスケットプレートの勘合部には組立てに支障のないように適度な隙間を有し、また、バスケットプレートの外周も拘束していないため有意な熱応力が発生しない。したがって、貯蔵中にバスケットに考慮すべき長期荷重はバスケットの自重のみであり、添付書類5-3-3-2「バスケットの強度計算書」に示すとおり、発生する応力は極めて小さい(1MPa以下)。設計貯蔵期間経過後のクリープひずみが0.1%に到達するためには、10MPa以上の応力環境下に置かれ続ける必要があるが、バスケットプレートに発生する応力は10MPaに対して十分な安全裕度があるため、クリープが設計上の制約条件とならない。

本アルミニウム合金は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件を模擬した条件での材料試験において脆性破壊することなく、かつ、衝撃吸収特性が低下しないことを確認している。さらに、MSF-

24P(S)型では、「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」(昭和53年12月28日総理府令第57号)(以下「事業所外運搬規則」という。)で規定される特別の試験条件においても、バスケットに塑性変形が生じないようにバスケットプレートの発生応力が設計降伏点以下となるように設計している。したがって、設計貯蔵期間経過後の輸送も含めて、事業所外運搬規則で規定される特別の試験条件による衝撃荷重が作用した場合においても延性き裂進展に対して十分な余裕を有しており、破壊靱性に対する特別な配慮は不要である。

【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:2021(AESJ-SC-F002:2021)』(2022).」に示されている。

(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 6.9×10^{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(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】

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 3.7×10^{12} n/cm²、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 6.9×10^{11} 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 (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。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表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、外筒の外表面については、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 8.4×10^{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 (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(1.9%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.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.S.Byun, K.Farrell, “Tensile Properties of Inconel 718 after Low Temperature Neutron Irradiation”, Journal of Nuclear Materials, 318, (2003).」において、中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm²又は 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 2.5×10^{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】

伝熱フィンに使用する銅は、「(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、伝熱フィン、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、閉鎖環境かつ淡水環境では、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鋼-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ることに加え、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(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 1.5×10^{15} n/cm²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($10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm²)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℃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℃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。

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】

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。

また、「(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: 2021 (AESJ-SC-F002: 2021)」, (2022).」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）が設計貯蔵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、設計貯蔵期間経過後の劣化パラメータは、温度の高い底部中性子遮蔽材で約37100となり、質量減損率は約1.9%と算定される。遮蔽解析ではこれを切り上げて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。

バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

目 次

1. 概要	別紙 1-1
2. 適用範囲	別紙 1-2
3. 材料規定	別紙 1-3
3.1 材料名称	別紙 1-3
3.2 化学成分	別紙 1-3
3.3 設計応力強さ	別紙 1-3
3.4 許容引張応力	別紙 1-3
3.5 設計降伏点	別紙 1-3
3.6 設計引張強さ	別紙 1-3
3.7 縦弾性係数	別紙 1-3
3.8 熱膨張係数	別紙 1-3
4. 製造管理規定	別紙 1-7

1. 概要

本書は、MSF-24P(S)型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。

本材料は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年6月10日法律第166号）第43条の26の3第1項の規定により、使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定（指定の番号：T-DPC17001）を受けた金属製の乾式キャスク（MSF-21P型）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）と同じ材料である。

2. 適用範囲

本材料を MSF-24P (S) 型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) 設計貯蔵期間（供用期間）は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中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。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。
- (6) 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。
- (7) 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、設計貯蔵期間における熱劣化を考慮した設計評価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。

3.1 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。

3.2 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。

3.3 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。

3.4 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。

3.5 設計降伏点

設計降伏点は第 3-5 表の規定によること。

3.6 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。

3.7 縦弾性係数

縦弾性係数は第 3-7 表の規定によること。

3.8 熱膨張係数

熱膨張係数は第 3-8 表の規定によること。

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 \cdot °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。

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 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℃)
	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。

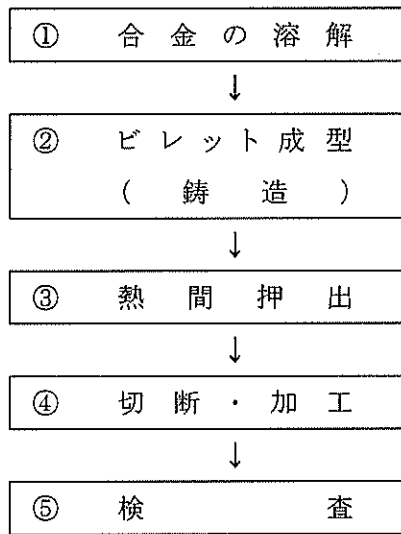
(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

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

添付書類13 外運搬規則第六条若しくは第七条及び第十一条に
定める技術上の基準（容器に係るものに限る。）への
適合性に関する説明書

目 次

(イ)章 核燃料輸送物の説明	(イ)-1
A. 目的及び条件	(イ)-1
B. 核燃料輸送物の種類	(イ)-5
C. 輸送容器	(イ)-5
D. 輸送容器の収納物	(イ)-29
(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析	(ロ)-1
A. 構造解析	(ロ)-A-1
A.1 構造設計	(ロ)-A-1
A.1.1 概要	(ロ)-A-1
A.1.2 設計基準	(ロ)-A-2
A.2 重量及び重心	(ロ)-A-23
A.3 材料の機械的性質	(ロ)-A-24
A.4 輸送物の要件	(ロ)-A-40
A.4.1 化学的及び電氣的反応	(ロ)-A-40
A.4.2 低温強度	(ロ)-A-42
A.4.3 密封装置	(ロ)-A-44
A.4.4 吊上装置	(ロ)-A-44
A.4.4.1 応力評価	(ロ)-A-44
A.4.4.2 上部トラニオンの疲労評価	(ロ)-A-51
A.4.5 固縛装置	(ロ)-A-53
A.4.6 圧 力	(ロ)-A-59
A.4.7 振 動	(ロ)-A-59
A.4.8 輸送物の要件に対する評価結果の要約	(ロ)-A-61
A.5 一般の試験条件	(ロ)-A-62
A.5.1 熱的試験	(ロ)-A-62
A.5.1.1 温度及び圧力の要約	(ロ)-A-62
A.5.1.2 熱膨張	(ロ)-A-64
A.5.1.3 応力計算	(ロ)-A-64

A. 5. 1. 4	許容応力との比較	(p)-A-73
A. 5. 2	水噴霧	(p)-A-73
A. 5. 3	自由落下	(p)-A-74
A. 5. 3. 1	落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度	(p)-A-74
A. 5. 3. 2	落下時の応力計算	(p)-A-83
A. 5. 4	積み重ね試験	(p)-A-116
A. 5. 5	貫通	(p)-A-119
A. 5. 6	角又は縁落下	(p)-A-120
A. 5. 7	結果の要約及びその評価	(p)-A-120
A. 6	特別の試験条件	(p)-A-128
A. 6. 1	強度試験・落下試験Ⅰ（9m落下時）	(p)-A-128
A. 6. 1. 1	垂直落下	(p)-A-131
A. 6. 1. 2	水平落下	(p)-A-140
A. 6. 1. 3	コーナー落下	(p)-A-147
A. 6. 1. 4	傾斜落下	(p)-A-149
A. 6. 1. 5	結果の要約	(p)-A-150
A. 6. 2	強度試験・落下試験Ⅱ（1m落下時）	(p)-A-150
A. 6. 2. 1	結果の要約	(p)-A-153
A. 6. 3	熱的試験	(p)-A-154
A. 6. 3. 1	温度及び圧力の要約	(p)-A-154
A. 6. 3. 2	熱膨張	(p)-A-156
A. 6. 3. 3	許容応力との比較	(p)-A-158
A. 6. 4	浸漬	(p)-A-161
A. 6. 5	結果の要約及びその評価	(p)-A-162
A. 7	強化浸漬試験	(p)-A-167
A. 8	放射性収納物	(p)-A-170
A. 9	核分裂性輸送物	(p)-A-171
A. 9. 1	核分裂性輸送物に係る一般の試験条件	(p)-A-171
A. 9. 2	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件	(p)-A-173
A. 10	付属書類	(p)-A-178
B.	熱解析	(p)-B-1
B. 1	概要	(p)-B-1
B. 2	材料の熱的性質	(p)-B-3
B. 3	構成要素の仕様	(p)-B-7
B. 4	一般の試験条件	(p)-B-8
B. 4. 1	熱解析モデル	(p)-B-8

B. 4. 1. 1	解析モデル	(p)-B-8
B. 4. 1. 2	試験モデル	(p)-B-25
B. 4. 2	最高温度	(p)-B-25
B. 4. 3	最低温度	(p)-B-34
B. 4. 4	最大内圧	(p)-B-34
B. 4. 5	最大熱応力	(p)-B-38
B. 4. 6	結果の要約及びその評価	(p)-B-39
B. 5	特別の試験条件	(p)-B-43
B. 5. 1	熱解析モデル	(p)-B-43
B. 5. 1. 1	解析モデル	(p)-B-43
B. 5. 1. 2	試験モデル	(p)-B-52
B. 5. 2	輸送物の評価条件	(p)-B-53
B. 5. 3	輸送物温度	(p)-B-53
B. 5. 4	最大内圧	(p)-B-64
B. 5. 5	最大熱応力	(p)-B-68
B. 5. 6	結果の要約及びその評価	(p)-B-69
B. 6	付属書類	(p)-B-73
C.	密封解析	(p)-C-1
C. 1	概要	(p)-C-1
C. 2	密封装置	(p)-C-1
C. 2. 1	密封装置	(p)-C-1
C. 2. 2	密封装置の貫通部	(p)-C-1
C. 2. 3	密封装置のガスケット及び溶接部	(p)-C-1
C. 2. 4	蓋	(p)-C-2
C. 3	一般の試験条件	(p)-C-2
C. 3. 1	放射性物質の漏えい	(p)-C-2
C. 3. 2	密封装置の加圧	(p)-C-6
C. 3. 3	冷却材汚染	(p)-C-6
C. 3. 4	冷却材損失	(p)-C-6
C. 4	特別の試験条件	(p)-C-6
C. 4. 1	核分裂生成ガス	(p)-C-6
C. 4. 2	放射性物質の漏えい	(p)-C-6
C. 5	結果の要約及びその評価	(p)-C-8
C. 6	付属書類	(p)-C-9

D.	遮蔽解析	(p)-D-1
D.1	概要	(p)-D-1
D.2	線源仕様	(p)-D-1
D.2.1	ガンマ線源	(p)-D-6
D.2.2	中性子源	(p)-D-11
D.3	モデル仕様	(p)-D-18
D.3.1	解析モデル	(p)-D-18
D.3.2	解析モデル各領域における原子個数密度	(p)-D-26
D.4	遮蔽評価	(p)-D-34
D.5	結果の要約及びその評価	(p)-D-45
D.6	付属書類	(p)-D-48
E.	臨界解析	(p)-E-1
E.1	概要	(p)-E-1
E.2	解析対象	(p)-E-1
E.2.1	収納物	(p)-E-1
E.2.2	輸送容器	(p)-E-5
E.2.3	中性子吸収材	(p)-E-5
E.3	モデル仕様	(p)-E-6
E.3.1	解析モデル	(p)-E-6
E.3.2	解析モデル各領域における原子個数密度	(p)-E-21
E.4	未臨界評価	(p)-E-23
E.4.1	計算条件	(p)-E-23
E.4.2	核燃料輸送物への水の浸入等	(p)-E-23
E.4.3	計算方法	(p)-E-24
E.4.4	計算結果	(p)-E-24
E.5	ベンチマーク試験	(p)-E-26
E.6	結果の要約及びその評価	(p)-E-34
E.7	付属書類	(p)-E-35
F.	核燃料輸送物の経年変化の考慮	(p)-F-1
F.1	考慮すべき経年変化要因	(p)-F-1
F.2	安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価	(p)-F-1
F.3	安全解析における経年変化の考慮内容	(p)-F-15
F.4	付属資料	(p)-F-22
G.	外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価	(p)-G-1

(ハ)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法	(ハ)-1
A. 核燃料輸送物の取扱い方法	(ハ)-1
A.1 装荷方法	(ハ)-1
A.2 貯蔵方法	(ハ)-3
A.3 取出し方法	(ハ)-3
A.4 空容器の準備	(ハ)-5
A.5 核燃料輸送物の発送前検査	(ハ)-7
A.6 使用済燃料の長期健全性に関する状況調査	(ハ)-17
B. 保守条件	(ハ)-19
B.1 外観検査	(ハ)-19
B.2 耐圧検査	(ハ)-19
B.3 気密漏えい検査	(ハ)-19
B.4 遮蔽検査	(ハ)-19
B.5 未臨界検査	(ハ)-19
B.6 熱検査	(ハ)-19
B.7 吊上検査	(ハ)-19
B.8 作動確認検査	(ハ)-20
B.9 補助系の保守	(ハ)-20
B.10 密閉装置の弁、ガスケット等の保守	(ハ)-20
B.11 輸送容器の保管	(ハ)-20
B.12 記録の保管	(ハ)-20
B.13 その他	(ハ)-20
(ニ)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項	(ニ)-1
参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明	(参)-A-1

(注) 本資料における「輸送物」とは、「核燃料輸送物」を指すものとする。

(4) 章 核燃料輸送物の説明

(イ)章 核燃料輸送物の説明

A. 目的及び条件

1. 使用目的 軽水炉型原子力発電所 (PWR) の使用済燃料を、原子力発電所から再処理工場に輸送するため。
2. 輸送容器の型名 MSF-24P(S) 型
3. 輸送物の種類 BM 型核分裂性輸送物
4. 輸送制限個数 なし
5. 輸送指数 10 以下
6. 臨界安全指数 0
7. 輸送物の総重量 134.4 トン以下 (輸送架台は含まず)
8. 輸送容器の外形寸法 外径約 3.6 m、長さ約 6.8 m (上・下部緩衝体を含む)
9. 輸送容器の重量 117.7 トン以下 (輸送架台は含まず)
10. 輸送容器の材質 胴—炭素鋼
外筒—炭素鋼
一次蓋—炭素鋼
二次蓋—炭素鋼
三次蓋—ステンレス鋼
中性子遮蔽材—レジン
伝熱フィン—銅
バスケット—ほう素添加アルミニウム合金
及びアルミニウム合金
緩衝体—ステンレス鋼及び木材
11. 輸送容器に収納する核燃料物質の仕様 核燃料物質の仕様を (イ)-第 A.1 表に示す。
12. 輸送形態 車両による陸上輸送あるいは船による海上輸送
いずれの場合も本書に示す緩衝体を装着し専用積載として輸送
13. 冷却方法 自然空気冷却
14. 使用予定年数 60 年 (設計評価期間)
15. 輸送容器の使用予定回数 10 回
16. 貯蔵予定期間 60 年 (設計貯蔵期間)
17. その他特記事項 本輸送物の運搬は、周囲温度-20℃以上で実施する。

(イ)-第 A.1 表 輸送容器 1 基に収納する核燃料物質の仕様 (1/2)

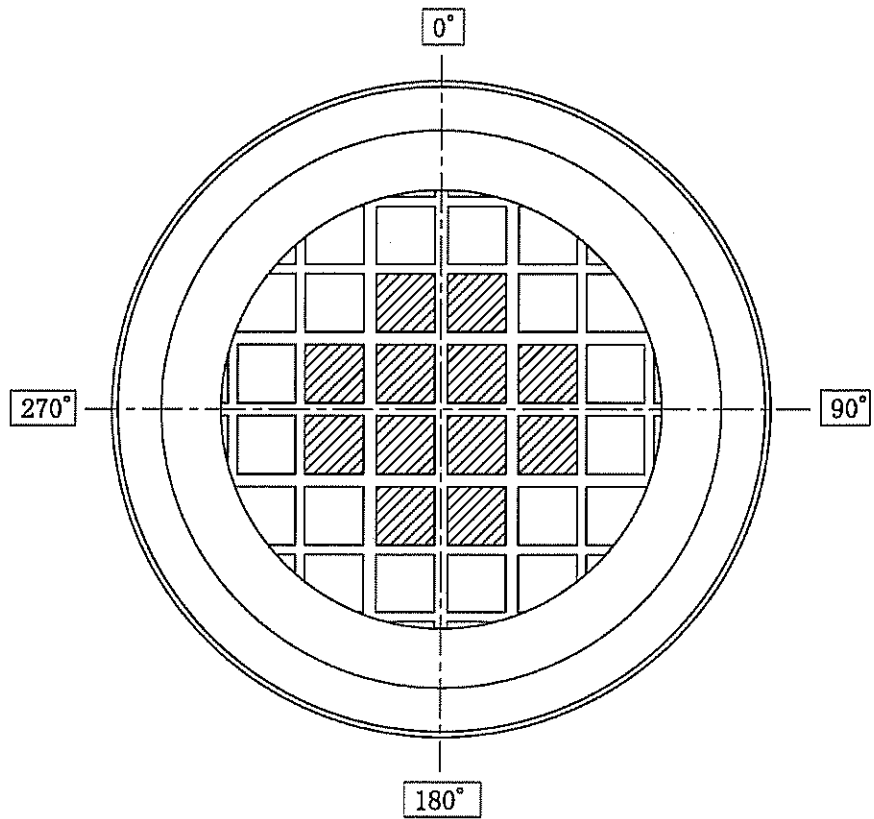
燃料集合体の種類と型式		中央部 (注)				外周部 (注)			
		17×17 燃料							
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
種 類		軽水炉 (PWR) 使用済燃料							
性 状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)							
燃料集合体 1 体の仕様	ウラン重量 (kg 以下)	[]							
	放射能の量 (収納物平均) (PBq 以下)								
	初期濃縮度 (wt% 以下)	4.2	3.7	4.2	3.7				
	最高燃焼度 (MWd/t 以下)	[]							
	冷却日数 (日以上)								
輸送容器 1 基当たりの仕様	収納体数 (注) (体以下)	12				12			
		24							
	平均燃焼度 (MWd/t 以下)	[]							
	放射能の量 (PBq 以下)								
	発熱量 (kW 以下)	15.8							



(注) 燃料集合体は(イ)-第 A.1 図に示すとおり収納位置が制限される。

(イ)-第 A.1 表 輸送容器 1 基に収納する核燃料物質の仕様 (2/2)

燃料集合体の種類と型式		中央部 ^(注)				外周部 ^(注)			
		15×15 燃料							
		48,000Mwd/t 型		39,000Mwd/t 型		48,000Mwd/t 型		39,000Mwd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型
種 類		軽水炉 (PWR) 使用済燃料							
性 状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体)							
燃料集合体 1 体の仕様	ウラン重量 (kg 以下)	□							
	放射能の量 (収納物平均) (PBq 以下)								
	初期濃縮度 (wt% 以下)	4.1	3.5	4.1	3.5				
	最高燃焼度 (MWD/t 以下)	□							
	冷却日数 (日以上)								
輸送容器 1 基当たりの仕様	収納体数 ^(注) (体以下)	12				12			
		24							
	平均燃焼度 (Mwd/t 以下)	□							
	放射能の量 (PBq 以下)								
	発熱量 (kW 以下)	15.8							

(注) 燃料集合体は(イ)-第 A.1 図に示すとおり収納位置が制限される。



 : 中央部 (12 体)
 : 外周部 (12 体)

(イ)-第 A.1 図 燃料集合体の収納位置

B. 核燃料輸送物の種類

BM 型核分裂性輸送物

C. 輸送容器

1. 設計の概要

輸送物の全体図を(イ)-第 C. 1 図に、断面図を(イ)-第 C. 2 図に示す。

輸送容器外形は円筒形状である。輸送容器は輸送中には、(イ)-第 C. 3 図に示すように輸送架台によこ置き状態に保持され、固縛装置で固定される。落下衝撃を緩和するため、容器の上部及び下部に緩衝体に取り付けられている。

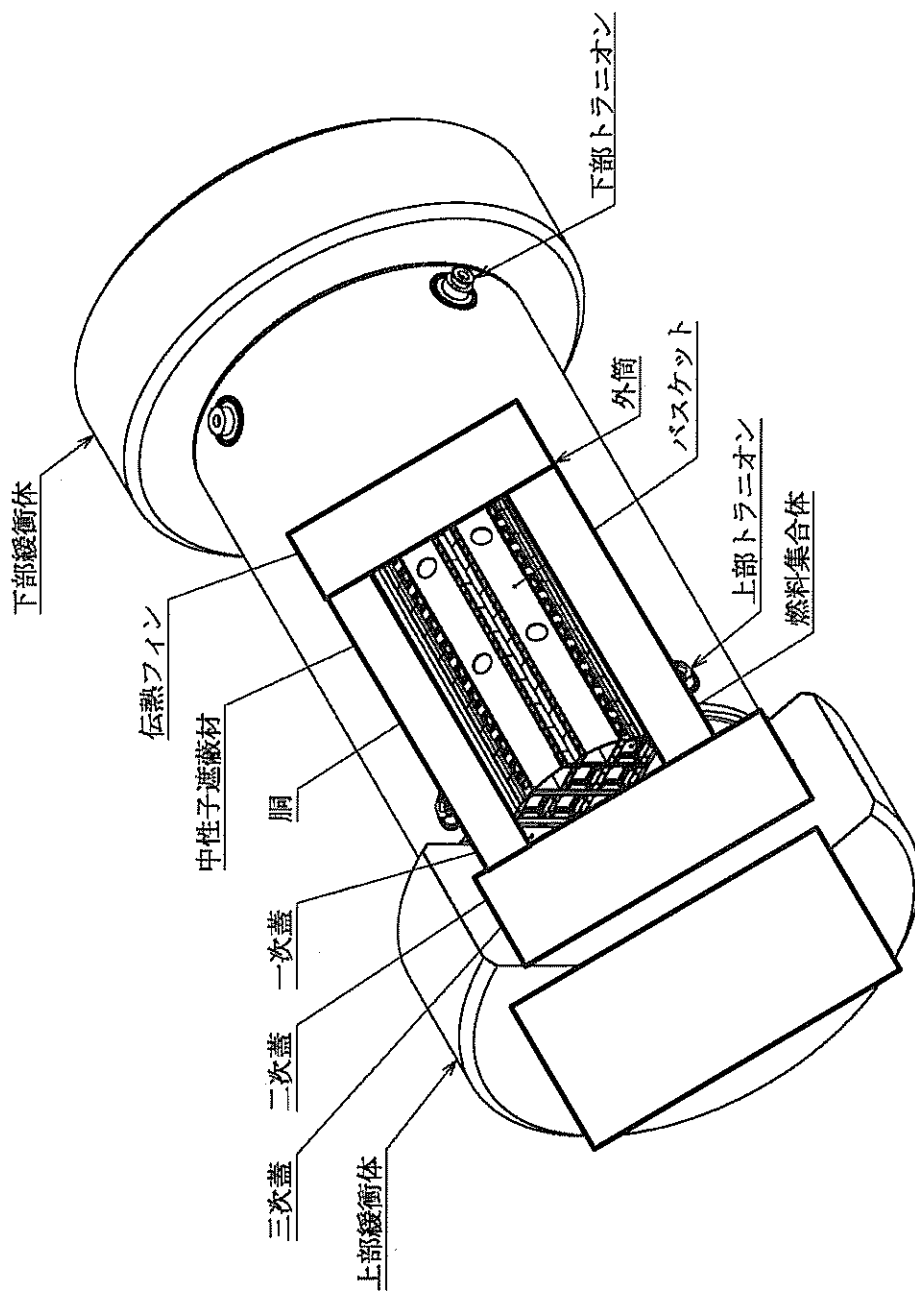
輸送容器は原子力発電所での取り扱い時にはよこ置き又はたて置き状態に保持される。燃料集合体の出し入れは、原子力発電所内の所定場所においてたて置き状態に保持された容器の上部から行われる。輸送容器の取扱いは容器に設けられたトラニオンを使用して行われる。

輸送容器は、一次蓋、二次蓋及び三次蓋を有し、三重の密封構造となっている。輸送容器における密封装置は胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートで構成され、密封境界は(イ)-第 C. 4 図に示すとおりである。

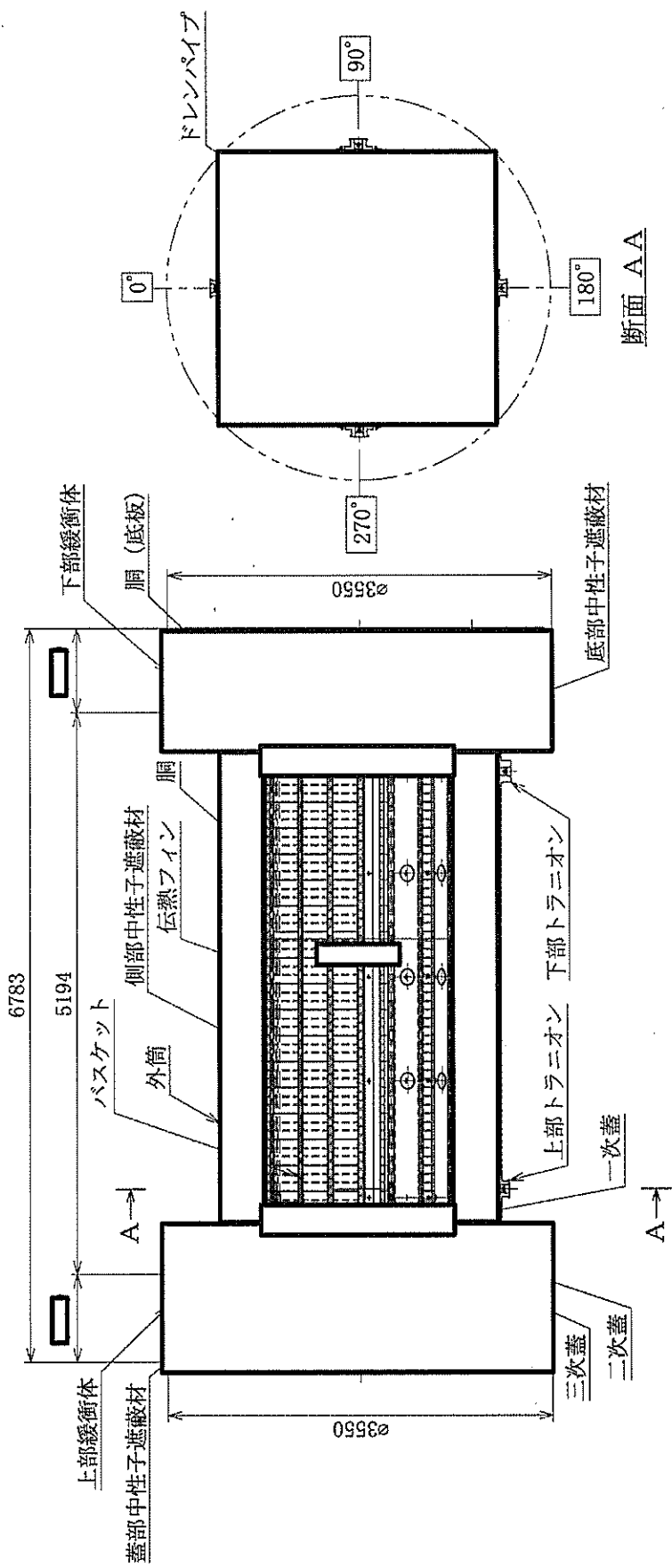
輸送容器の主な遮蔽材は、炭素鋼及びレジンである。炭素鋼は主にガンマ線遮蔽材、レジン中性子遮蔽材として用いられている。胴と外筒の間に中性子遮蔽材であるレジンを充填されている。また、レジンにはキャスク本体下部及び一次蓋部にも充填されている。

一次蓋と胴に囲まれる空間（以下「胴内」という。）には、燃料集合体より発生する崩壊熱の除去を容易にするため、ヘリウムが約 0.05 MPa 充填される。また、燃料集合体を輸送中に保持するために胴内にバスケットが収納されている。

バスケットは、断面形状が中空状のアルミニウム合金製のバスケットプレートから構成された格子構造であり、個々の使用済燃料集合体がキャスク本体内部に配置されたバスケットの所定の格子内に収納される。また、使用済燃料の未臨界性を維持するために、中性子吸収材を併せて配置している。



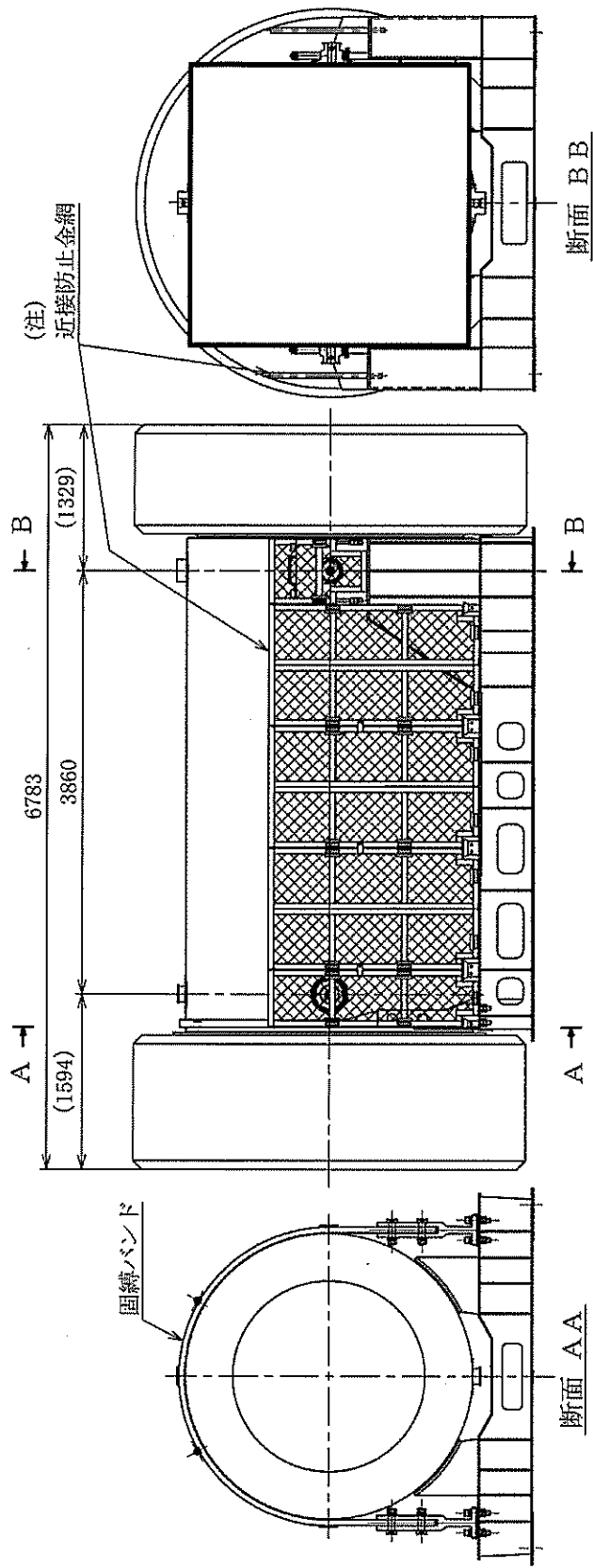
(イ)-第 C.1 図 輸送物全体図 (鳥瞰図)



(単位：mm)

(注)各部品を一断面に集約したものであり、実際の断面形状とは異なる。

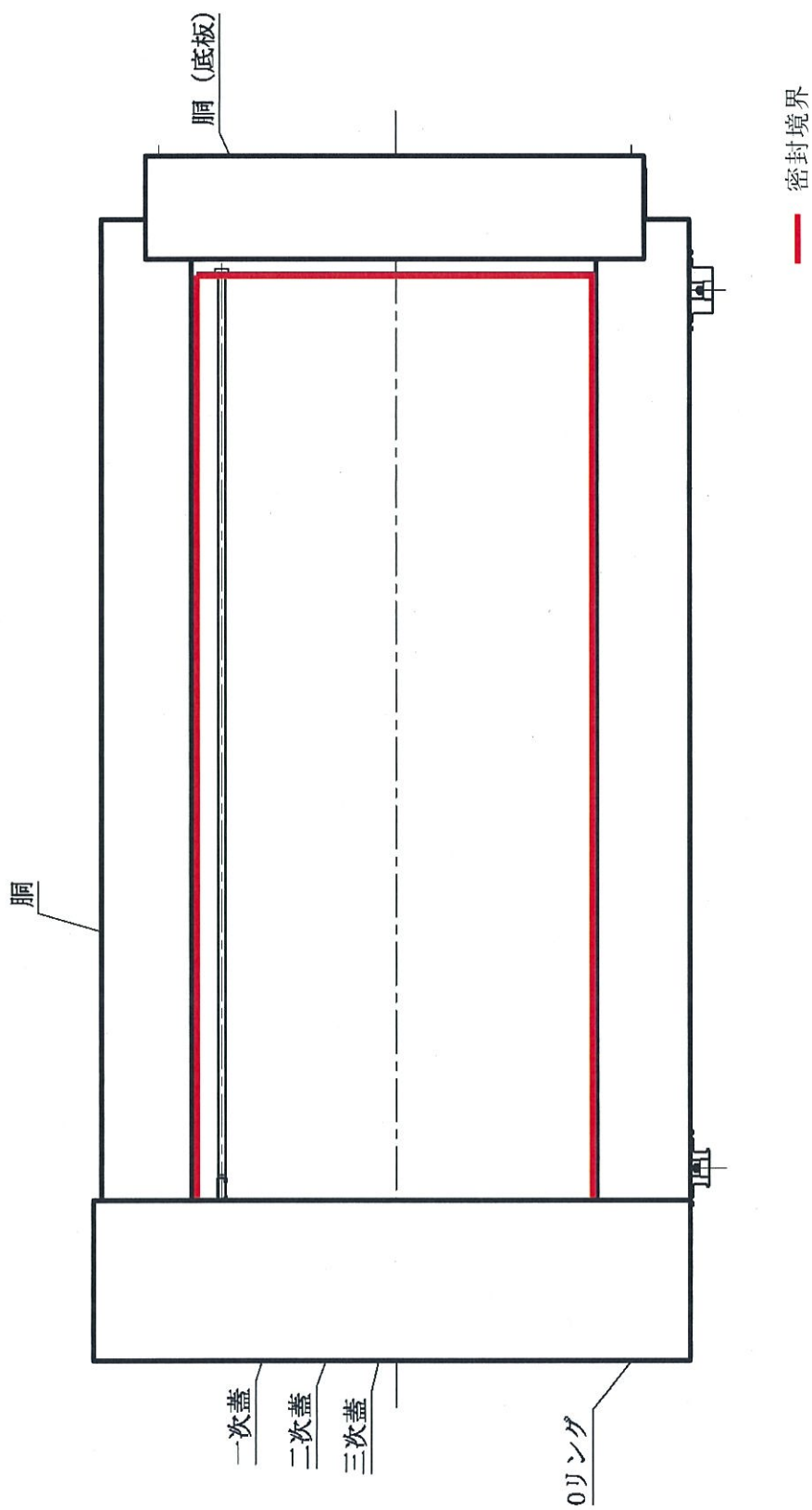
(1)-第 C.2 図 輸送容器断面図



(単位：mm)

(注) 取り付けない場合がある。

(1)-第 C.3 図 輸送荷姿



(注)各部品を一断面に集約したものであり、実際の断面形状とは異なる。

(イ)-第 C. 4 図 密封境界

2. 構造

輸送容器は(イ)-第 C. 1 図及び(イ)-第 C. 2 図に示すようにキャスク本体、一次蓋、二次蓋、三次蓋、バスケット及び緩衝体により構成される。

付属機器として、輸送架台がある。また、輸送架台には近接防止金網を取り付ける場合がある。

(1) キャスク本体

本体縦断面図を(イ)-第 C. 5 図に、横断面図を(イ)-第 C. 6 図に示す。

キャスク本体の主要部は胴、中性子遮蔽材及び外筒等で構成されている。

輸送容器の密封境界を形成する胴は炭素鋼製の単層構造であり、胴の炭素鋼は主要なガンマ線遮蔽材である。胴内面には []、胴の表面のうち、一次蓋、二次蓋及び三次蓋との接触面には []、胴外面のうち、外気接触面には塗装が施されている。

外筒は、上部が胴に溶接され、下部は下部端板に溶接されている。外筒は炭素鋼製であり、外表面には塗装が施されている。

下部端板はステンレス鋼製であり、胴の下部に溶接され、外筒及び胴とともに中性子遮蔽材（レジン）を保持している。胴と外筒の間には除熱を促進するための伝熱フィンを設けている。

胴（底板）と底部中性子遮蔽材カバーで形成されている空間には中性子遮蔽材（レジン）が充填されている。

また、胴内には、一次蓋に設けられた貫通孔を介して胴内の加圧並びに水抜きが可能なようにドレンパイプが設けられている。ドレンパイプの上端部は、ゴムパッキンを介して一次蓋に設けられた貫通孔へ接続されている。

キャスク本体上部には、上部トラニオンが取り付けられている。上部トラニオンは、吊上専用のトラニオン並びに吊上、よこ置き時の固縛に使用可能な吊上、固縛兼用のトラニオンがあり、これらのトラニオンが各一対ずつ設けられている。上部トラニオンの構造は(イ)-第 C. 7 図に示すとおりである。

キャスク本体下部には、下部トラニオンが取り付けられている。下部トラニオンは、水平吊り、輸送架台への積載及び横置き時の固縛に使用する吊上、固縛兼用のトラニオン並びにたて置き時の固縛に使用可能な固縛専用のトラニオンがあり、これらのトラニオンが各一対ずつ設けられている。下部トラニオンの構造は(イ)-第 C. 7 図に示すとおりである。

輸送容器又は輸送物は原子力発電所において、垂直吊り又は水平吊りで取り扱われる。輸送船及びトレーラへの積み降ろしでは輸送架台の付いた状態で水平吊りされる。輸送時には輸送架台に固縛され、輸送架台は船倉やトレーラ荷台に固定される。

輸送容器を単体で垂直吊りする場合には、一对の上部トラニオンの外径φ140 mmの部分が使用される。

輸送容器又は輸送物を単体で水平吊りする場合には、上・下部トラニオンの90°、270°方向の二対の外径φ140 mmの部分が使用される。

輸送架台に固縛した輸送容器又は輸送物を水平吊りする場合には、単体の水平吊りと同様に上・下部トラニオンの90°、270°方向の二対の外径φ140 mmの部分が使用される。

輸送架台への固縛は、輸送容器のキャスク本体上部、並びに下部トラニオンの90°、270°方向の一对の外径φ200 mmの部分が使用される。

(2) 一次蓋

一次蓋の構造を(イ)-第C.8図に示す。一次蓋は炭素鋼製であり、本の一次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。一次蓋の炭素鋼は、主要なガンマ線遮蔽材である。

また、一次蓋には、頭部側の中性子遮蔽のために、中性子遮蔽材(レジン)が充填されており、炭素鋼製の蓋部中性子遮蔽材カバーで覆われている。

一次蓋のシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

胴との接触面及びシール部には、また、その他の表面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面にはが施されている。

一次蓋には内水の排水、真空乾燥及びヘリウム充填のために貫通孔が2ヶ所設けられており、それぞれの貫通孔にはベントバルブ及びドレンバルブが設置されている。ベントバルブ及びドレンバルブの構造を(イ)-第C.9図に示す。これらの貫通孔上にはステンレス鋼製のカバープレートが取り付けられる。カバープレートのシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

なお、一次蓋は外側を二次蓋に覆われており、不用意に一次蓋ボルトが外されないようになっている。

(3) 二次蓋

二次蓋の構造を(イ)-第C.10図に示す。二次蓋は炭素鋼製であり、本の二次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。二次蓋の炭素鋼は、主要なガンマ線遮蔽材である。

二次蓋のシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

胴との接触面及びシール部には、その他の表面にはが施されている。

二次蓋には、一次蓋と二次蓋で形成される空間にヘリウムを充填するための貫通孔

と、この空間の圧力を検出するための貫通孔が設けられており、それぞれの貫通孔にはモニタリングポートバルブが設置されている。モニタリングポートバルブの構造を(イ)-第 C. 11 図に示す。輸送中はその外側にモニタリングポートカバープレートが取り付けられる。モニタリングポートカバープレートのシール部には O リングが設けられている。

なお、二次蓋は外側を三次蓋に覆われており、不用意に二次蓋ボルトが外されないようになっている。

(4) 三次蓋

三次蓋の構造を(イ)-第 C. 12 図に示す。三次蓋はステンレス鋼製であり、本の三次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。三次蓋のステンレス鋼は、主要なガンマ線遮蔽材である。

三次蓋には、二次蓋と三次蓋で形成される空間の圧力を開放するための貫通孔が設けられており、貫通孔にはリリースバルブが設置されている。リリースバルブの構造を(イ)-第 C. 13 図に示す。輸送中はその外側にリリースバルブカバープレートが取り付けられる。

三次蓋及びリリースバルブカバープレートのシール部には二重の O リングが設けられており、この二重の O リングの内側 O リングにより輸送中の密封境界を形成する。

なお、三次蓋は外側を緩衝体に覆われており、不用意に三次蓋ボルトが外されないようになっている。

(5) バスケット

バスケットは、個々の燃料集合体がキャスク本体内部の所定の格子内に収納できるよう設けられる。バスケットの構造を(イ)-第 C. 14 図に示す。バスケットは、断面形状が中空状のアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成されたバスケットと、アルミニウム合金製のバスケットサポートにより構成される。また、燃料集合体の未臨界性を維持するために、中性子吸収材を併せて配置している。

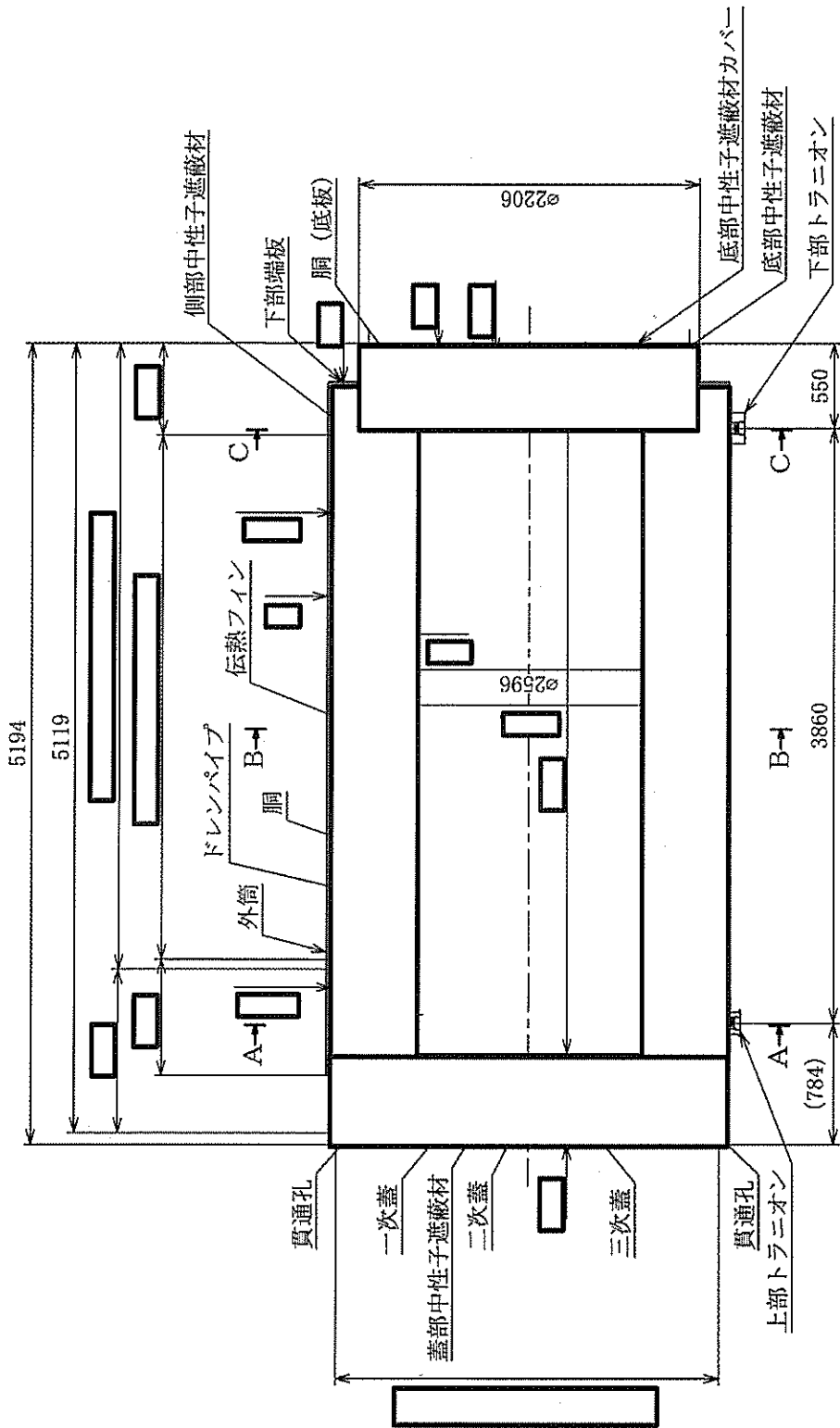
(6) 緩衝体

上部緩衝体はキャスク本体上部に、下部緩衝体はキャスク本体下部に各々本のボルトで取り付けられ、落下等により輸送容器に加わる衝撃を吸収して輸送容器を保護する。

上部緩衝体を(イ)-第 C. 15 図に、下部緩衝体を(イ)-第 C. 16 図に示す。

上部及び下部緩衝体は、ステンレス鋼のカバープレートとリブから構成される溶接構造物の内部に、緩衝材である木材 () を充填した

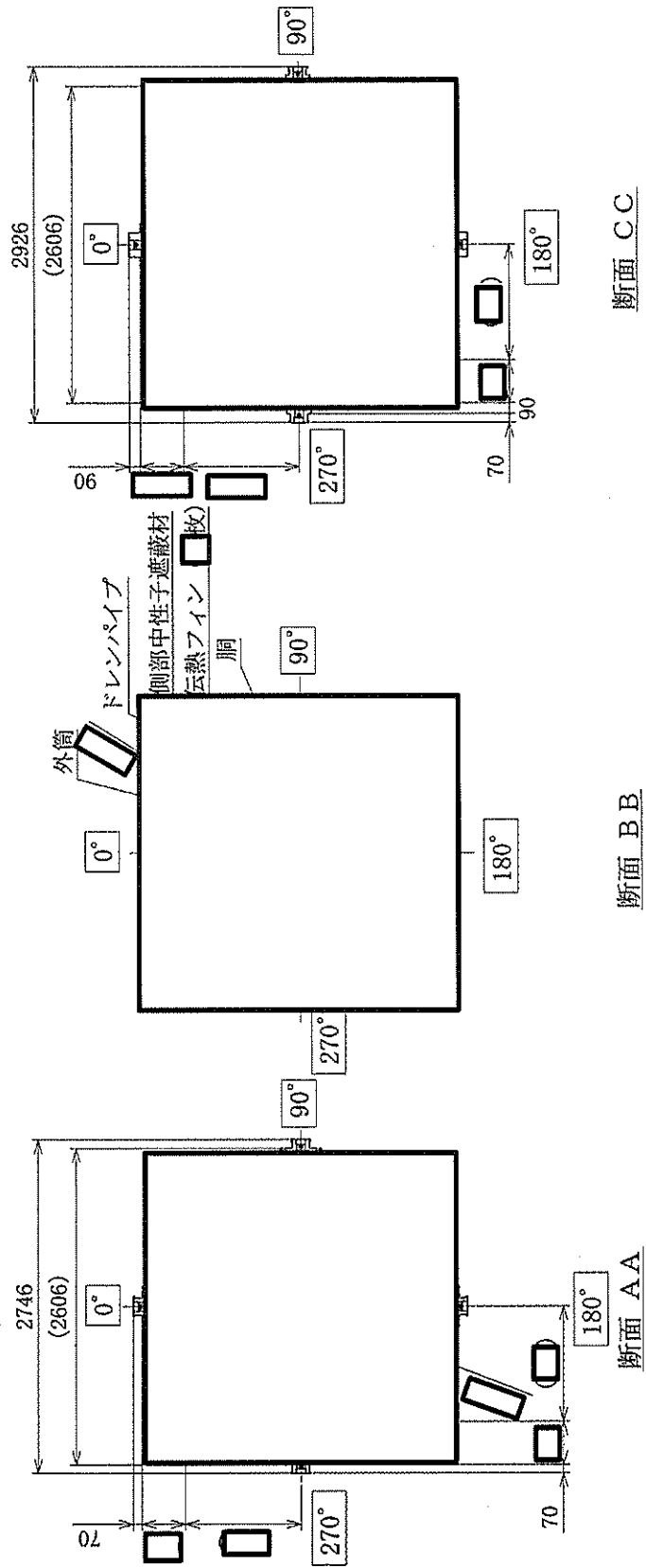
ものである。



(単位：mm)

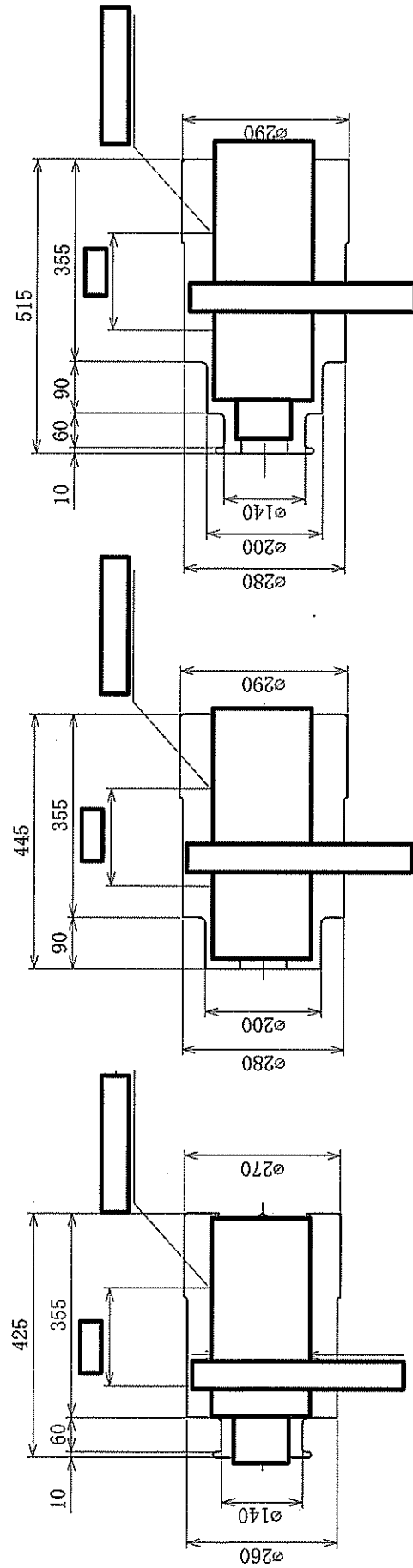
(注)各部品を一断面に集約したものであり、実際の断面形状とは異なる。

(イ)第 C.5 図 本体縦断面図



(単位：mm)

(1)-第 C. 6 図 本体横断面図



上部トラニオン (吊上専用)
(0°, 180°)
及び

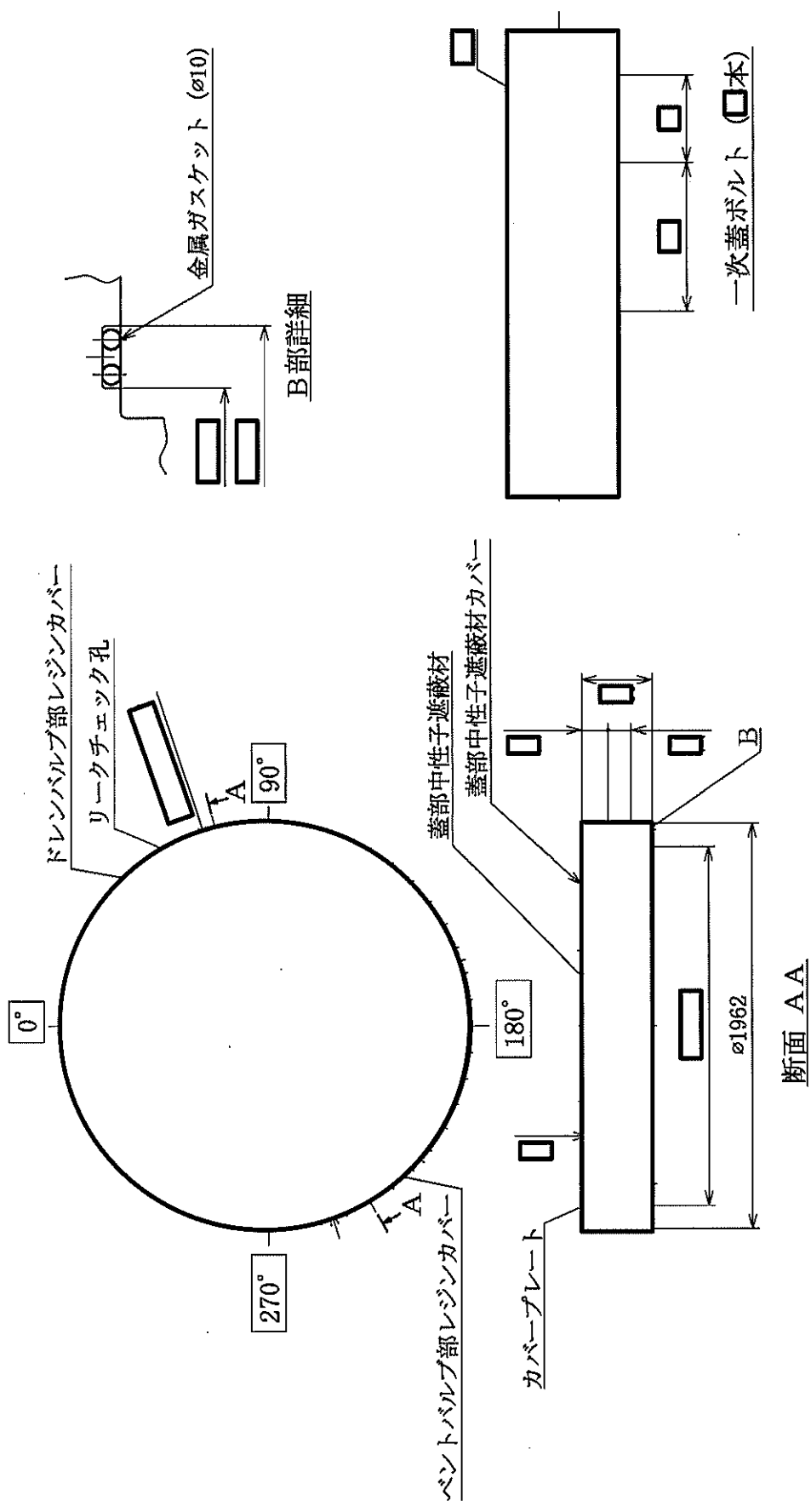
下部トラニオン (固縛専用)
(0°, 180°)

下部トラニオン (吊上・固縛兼用)
(90°, 270°)

上部トラニオン (吊上・固縛兼用)
(90°, 270°)

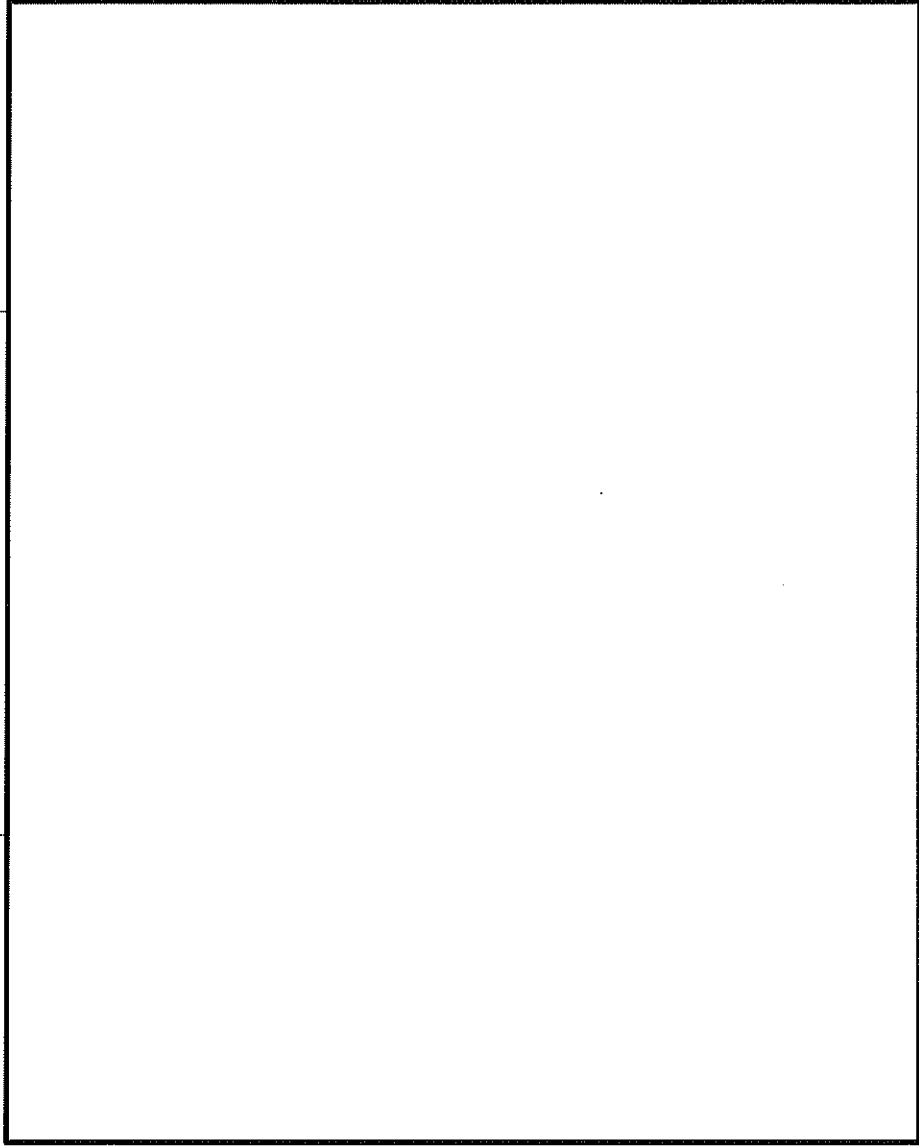
(単位：mm)

(1)-第C.7図 トラニオン



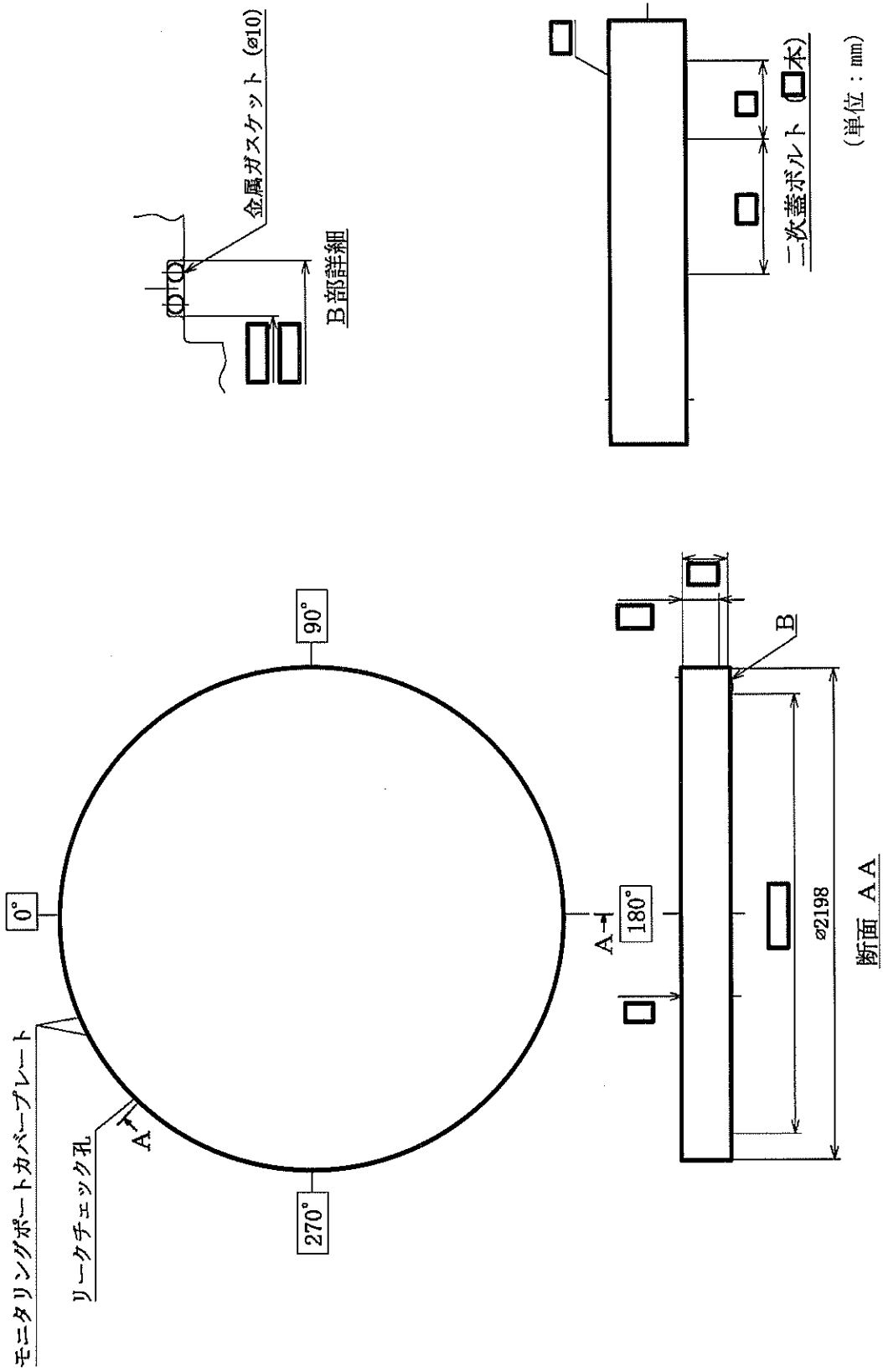
(単位：mm)

(イ)-第 C. 8 図 一次蓋

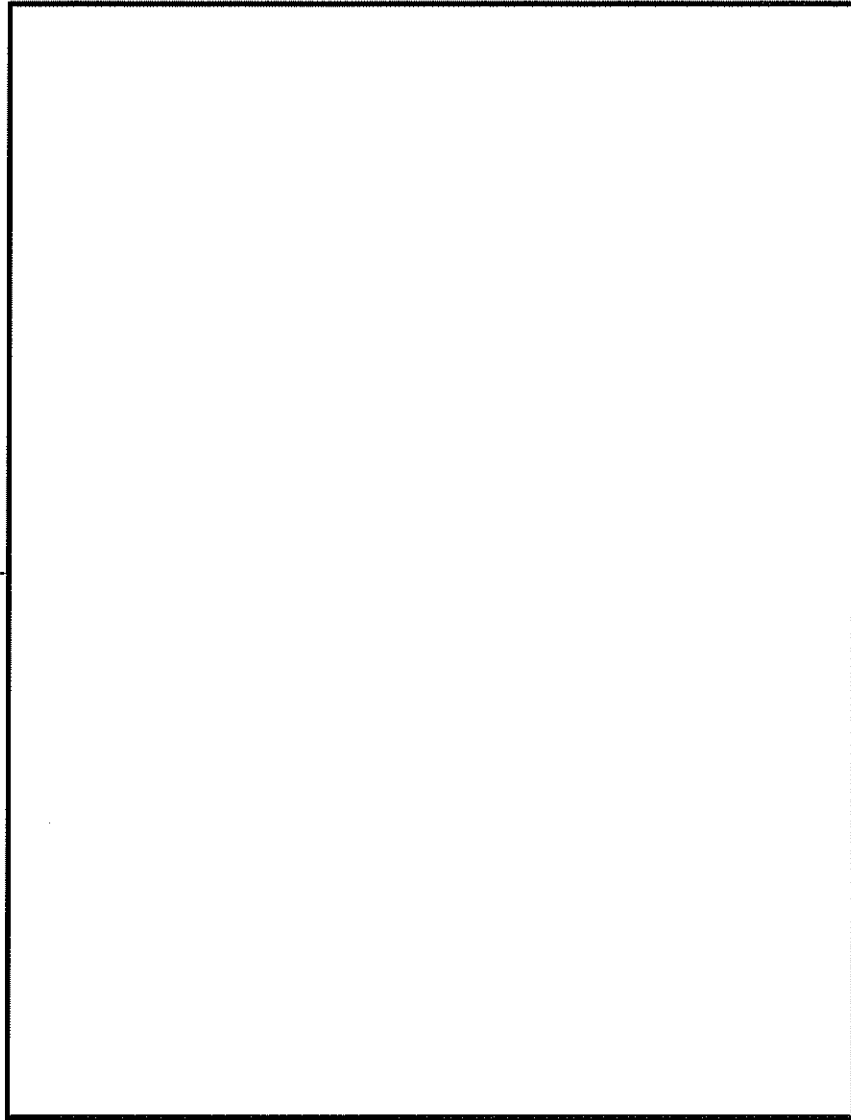


(单位：mm)

(4)-第 C.9 图 一次盖贯通孔

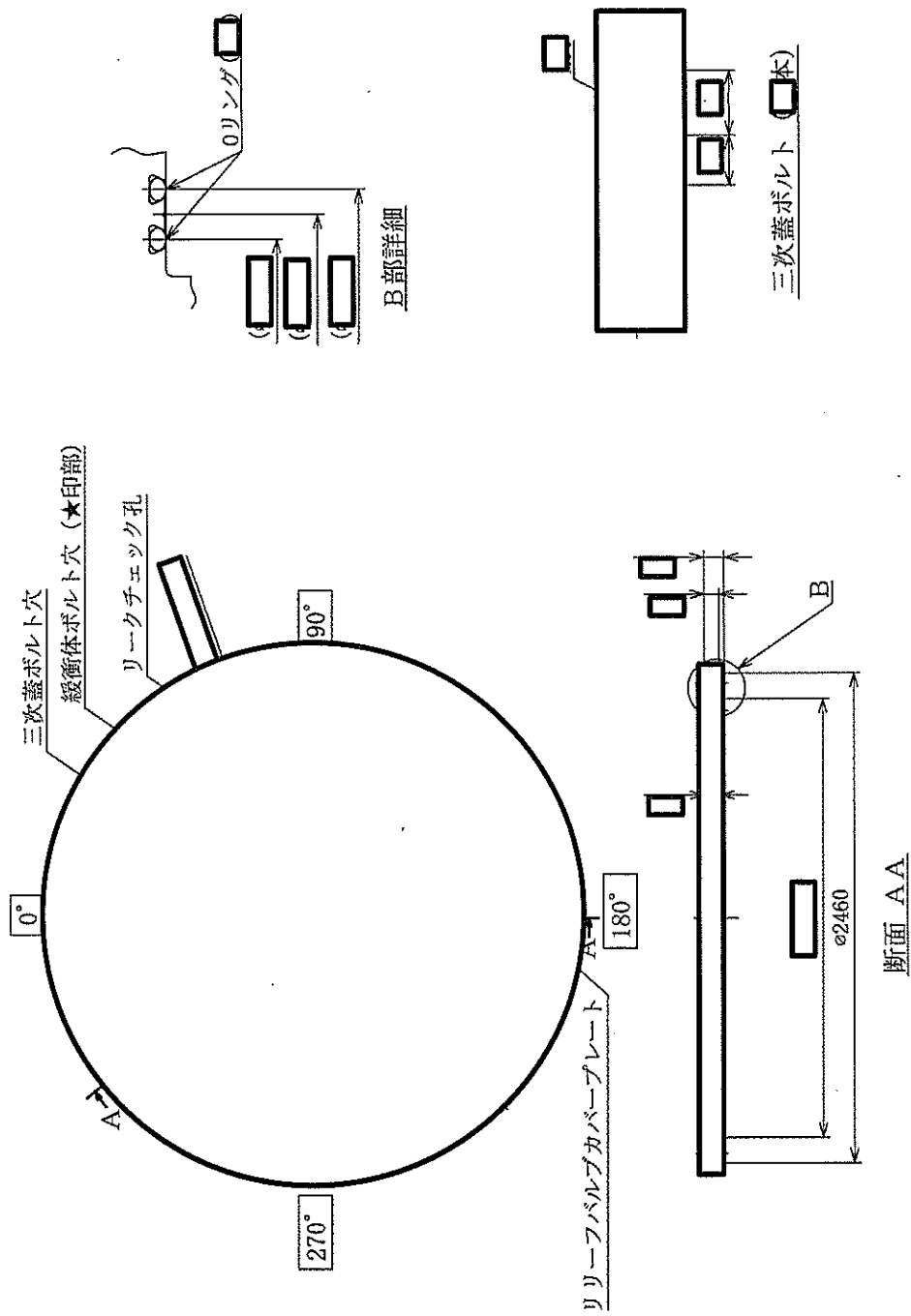


(イ)-第 C.10 図 二次蓋



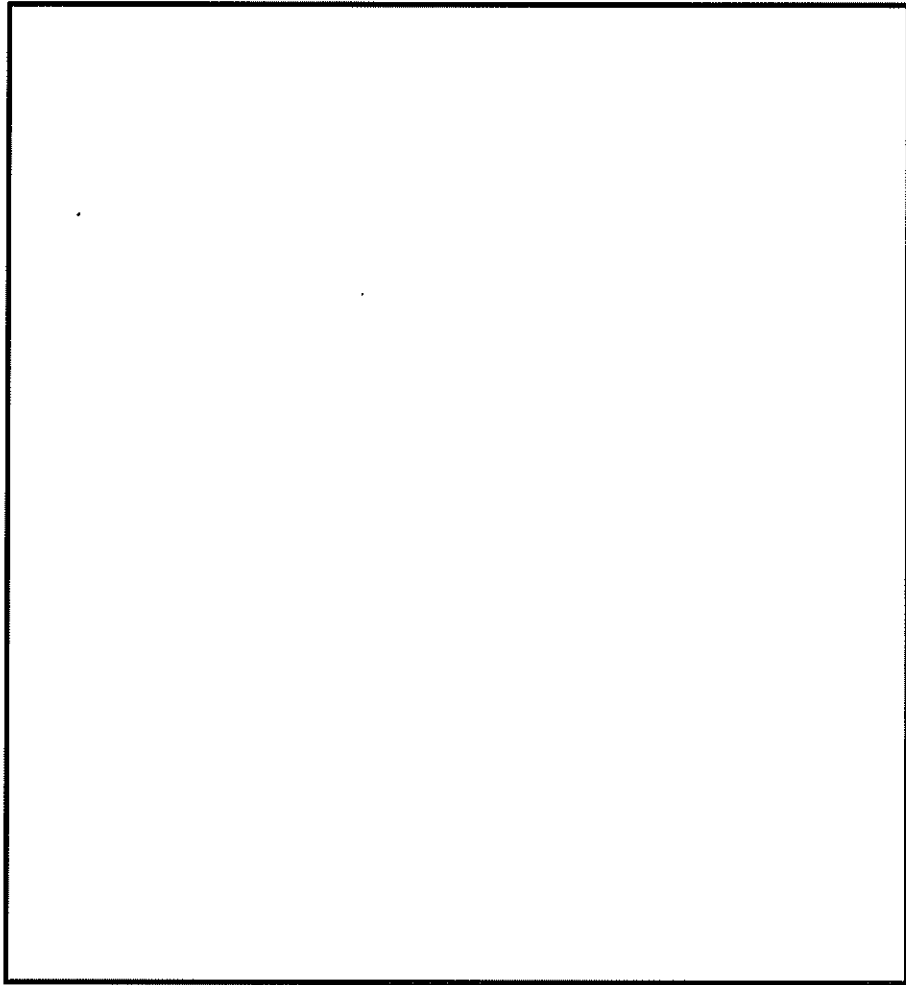
(单位：mm)

(4)-第 C. 11 图 二次盖板通孔



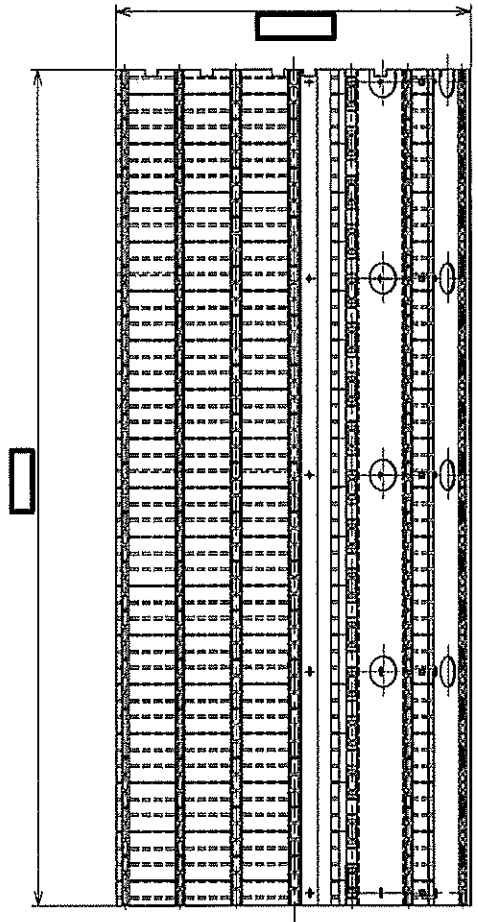
(単位: mm)

(イ)-第 C.12 図 三次蓋

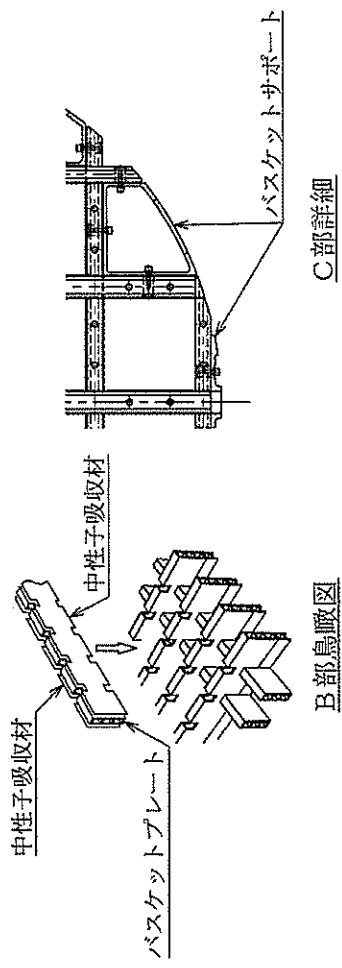
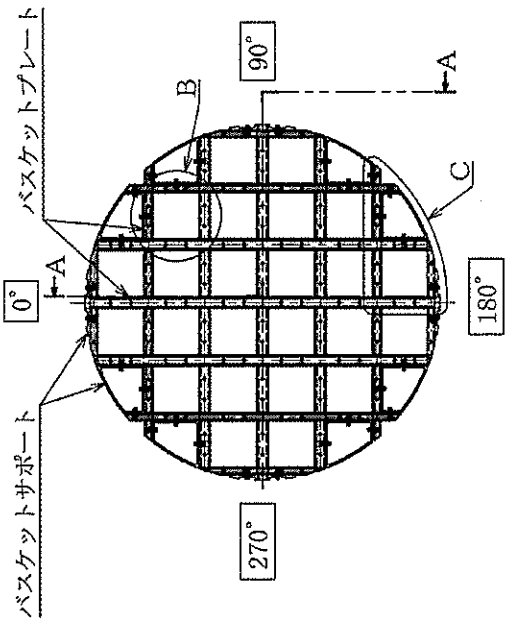


(單位：mm)

(1)-第 C. 13 圖 三次蓋貫通孔

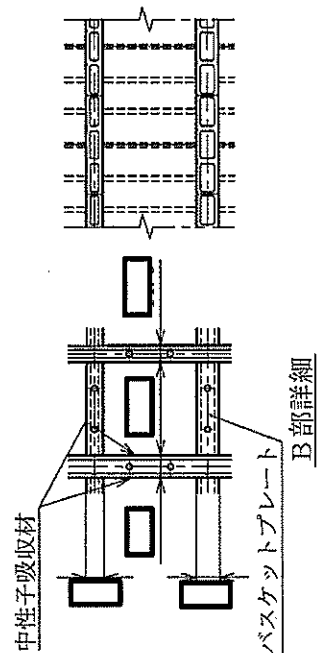


断面 A.A.



B部鳥瞰図

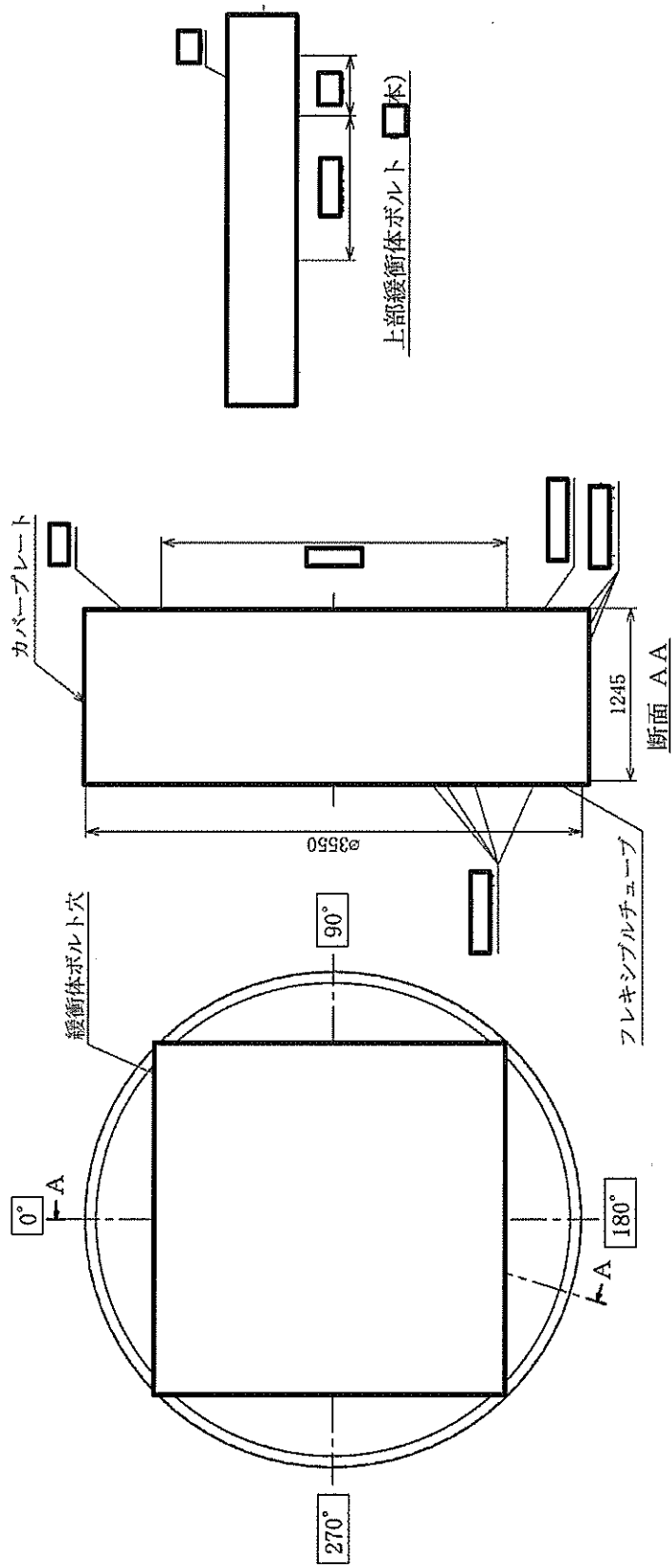
C部詳細



B部詳細

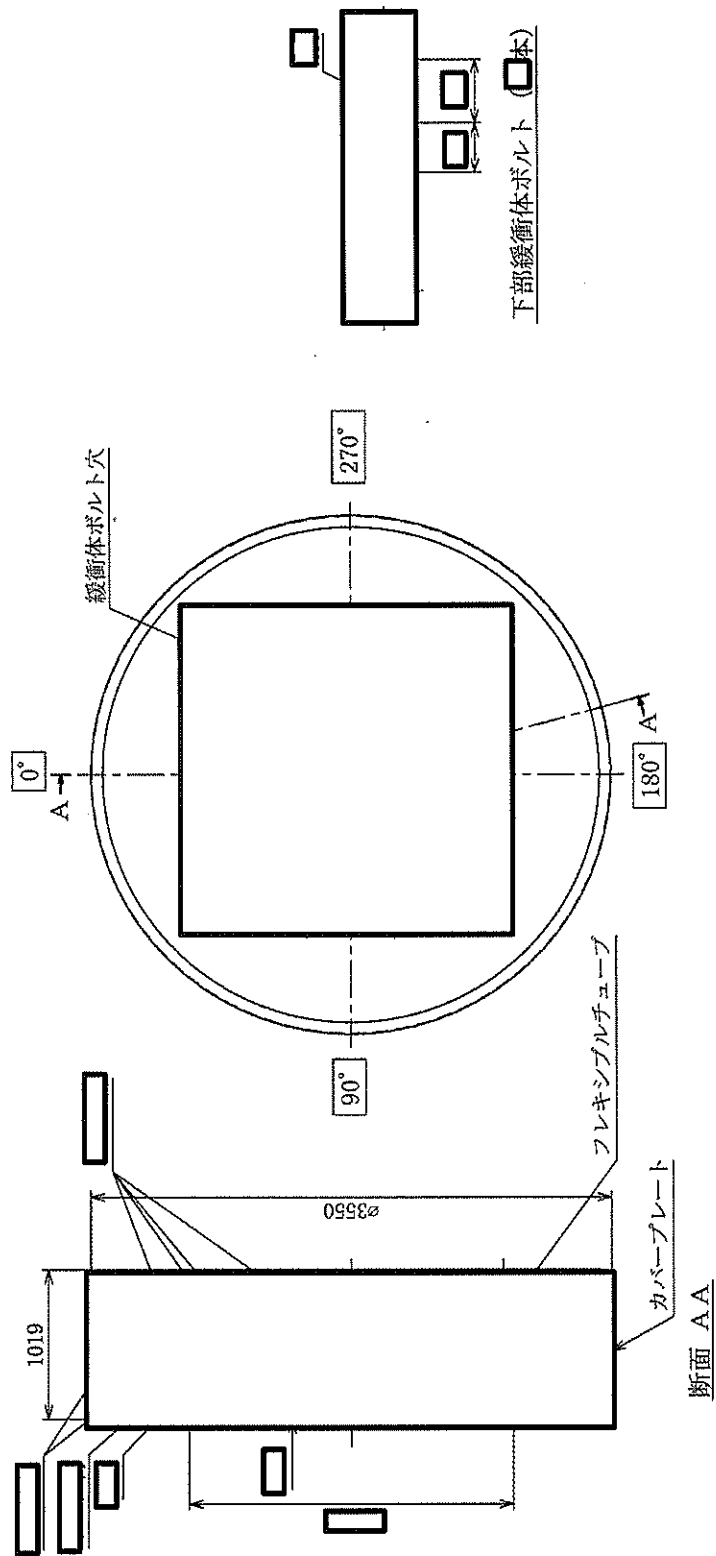
(単位：mm)

(1)-第 C.14 図 バスケット



(単位 : mm)

(イ)-第 C.15 図 上部緩衝体



(単位：mm)

(イ)-第 C.16 図 下部緩衝体

3. 材質

下記(イ)-第C.1表のとおりである。

(イ)-第C.1表 材質


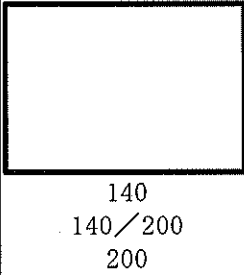






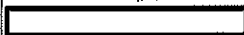

部位	部品	材料	規格 (注)
キャスク 本体	胴	炭素鋼	[] — — JIS H3100 C1020P JIS G 4303 SUS630-H1150 []
	外筒	炭素鋼	
	下部端板	ステンレス鋼	
	側部中性子遮蔽材	レジン (エポキシ系樹脂)	
	底部中性子遮蔽材	レジン (エポキシ系樹脂)	
	伝熱フィン	銅	
	トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼	
	底部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼	
一次蓋	蓋板	炭素鋼	[] — [] —
	蓋部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼	
	カバープレート	ステンレス鋼	
	中性子遮蔽材	レジン (エポキシ系樹脂)	
	蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	[]
	金属ガスケット	アルミニウム/ニッケル基合金	—
二次蓋	蓋板	炭素鋼	[] — [] —
	モニタリングポートカバープレート	ステンレス鋼	
	Oリング	EPDM	
	蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	
	金属ガスケット	アルミニウム/ニッケル基合金	—
三次蓋	蓋板	ステンレス鋼	[] — [] —
	蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	
	リリーフバルブカバープレート	ステンレス鋼	
	Oリング	EPDM	
バスケット	中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	—
	バスケットプレート	アルミニウム合金	MB-A3004-H112
	バスケットサポート	アルミニウム合金	MB-A3004-H112
緩衝体	緩衝材	木材 ([]) 木材 ([]) 木材 ([])	— — —
	上部緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	[]
	下部緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	
	カバープレート	ステンレス鋼	
	リブ	ステンレス鋼	

(注) 記載の規格材料又は相当品を使用する。

4. 寸法（公称）

下記(イ)-第 C. 2 表に各部品の代表寸法を示す。

(イ)-第 C. 2 表 輸送容器各部の寸法

部品名	寸法 (mm)	参照図
<u>キャスク本体</u> 胴内径 板厚 外筒外径 板厚 下部端板厚さ 側部中性子遮蔽材厚さ 伝熱フィン板厚 枚数 上部トラニオン外径 下部トラニオン外径 (90° , 270°) 下部トラニオン外径 (0° , 180°) 底部中性子遮蔽材厚さ 底部中性子遮蔽材カバー厚さ 底板厚さ 全長 全幅	 2596  140 140/200 200  5119 2926	(イ)-第 C. 5 図 (イ)-第 C. 6 図 (イ)-第 C. 7 図
<u>二次蓋</u> 蓋外径 厚さ 蓋ボルト径 金属ガスケット断面径 蓋部中性子遮蔽材厚さ	1962  10 	(イ)-第 C. 8 図 (イ)-第 C. 9 図
<u>三次蓋</u> 蓋外径 厚さ 蓋ボルト径 金属ガスケット断面径	2198  10	(イ)-第 C. 10 図 (イ)-第 C. 11 図
<u>三次蓋</u> 蓋外径 厚さ 蓋ボルト径 Oリング断面径 蓋板用 カバープレート用	2460 	(イ)-第 C. 12 図 (イ)-第 C. 13 図
<u>バスケット</u> 外径 長さ 格子数 格子内幅	 24 個 	(イ)-第 C. 14 図
<u>緩衝体</u> 外径 上部緩衝体ボルト径 下部緩衝体ボルト径 上部緩衝体長さ 下部緩衝体長さ	3550  1245 1019	(イ)-第 C. 15 図 (イ)-第 C. 16 図

5. 重量

本輸送物の総重量は 134.4 トン以下であり、その詳細を(イ)-第 C.3 表に示す。

(イ)-第 C.3 表 輸送物重量

輸送容器各部及び収納物	重量 (トン)
A. キャスク本体	83.7 以下
B. 一次蓋	5.6 以下
C. 二次蓋	4.5 以下
D. 三次蓋	3.3 以下
E. バスケット	5.6 以下
F. 緩衝体	
①上部緩衝体	8.72 以下
②下部緩衝体	6.24 以下
G. 燃料集合体	16.7 以下
H. 輸送容器総重量 A+B+C+D+E+F	117.7 以下
I. 輸送物総重量 A+B+C+D+E+F+G	134.4 以下

D. 輸送容器の収納物

輸送容器の収納物は、使用済燃料集合体である。

輸送容器に収納可能な PWR 燃料集合体の仕様を (イ)-第 D.1 表に示す。

(イ)-第 D.1 図は本輸送容器に収納する燃料集合体 (17×17 燃料) の代表的な全体図である。17×17 燃料 (A 型) 及び 17×17 燃料 (B 型) の断面図を (イ)-第 D.2 図及び (イ)-第 D.3 図に、15×15 燃料 (A 型) 及び 15×15 燃料 (B 型) の断面図を (イ)-第 D.4 図及び (イ)-第 D.5 図に示す。これらの図及び表に示されているように、燃料集合体は正方配列された燃料棒で構成され、両端及び中間部数箇所が支持格子により保持されている。燃料は低濃縮の UO_2 ペレットでジルカロイ製の被覆管の中に充填され、両端に端栓を溶接して密封されている。また、燃料には、可燃性毒物である Gd_2O_3 を含むものがある。

燃料集合体は燃料集合体単独あるいは、バーナブルポイズン集合体 (容器当たり最大 12 体) を挿入した状態で本輸送容器に収納することができる。バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体は、(イ)-第 A.1 図に示す中央部に収納する。バーナブルポイズン集合体の仕様例を (イ)-第 D.2 表に示す。

(イ)-第 D.6 図及び (イ)-第 D.7 図は、バーナブルポイズン集合体 (17×17 燃料用) 及びバーナブルポイズン集合体 (15×15 燃料用) の断面図であり、(イ)-第 D.8 図は、燃料集合体へのバーナブルポイズン集合体の代表的な挿入図である。

収納物の燃焼条件及び冷却日数は、(イ)-第 D.3 表に示すとおりである。燃料集合体は上述のようにジルカロイ製の被覆管とセラミック状の UO_2 ペレットが主であり、照射に伴って発生する核分裂生成ガスが被覆管内の空隙に蓄積されている。

収納物の主要な放射性核種と放射能の量 (放射能強度) は (イ)-第 D.4 表に示すとおりである。

また、輸送容器 1 基あたりの最大崩壊熱量は (イ)-第 A.1 表に示すとおり 15.8 kW に制限される。

燃料集合体は (イ)-第 C.14 図に示したバスケットに格納して胴内に収納され、胴内は水抜き、乾燥された上、不活性ガスのヘリウムが充填される。

(イ)-第 D.1 表 燃料集合体の型式及び仕様 (1/2)

燃料集合体の 種類と型式	17×17 燃料			
	48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
	A 型	B 型	A 型	B 型
主要な燃料緒元				
材質				
燃料	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)
被覆管	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4
燃料密度 (理論密度比 %)				
初期濃縮度 (U-235 wt%)	4.2 以下 (集合体平均)	4.2 以下 (集合体平均)	3.7 以下 (集合体平均)	3.7 以下 (集合体平均)
形状				
集合体長さ(mm)	約 4100	約 4100	約 4100	約 4100
燃料有効長(mm)				
燃料棒直径(mm)				
燃料棒ピッチ(mm)	12.6	12.6	12.6	12.6
集合体幅(mm)	214	214	214	214
重量				
集合体重量(kg)	680 以下	680 以下	680 以下	680 以下
UO ₂ 重量(kg)				
ウラン重量(kg)				

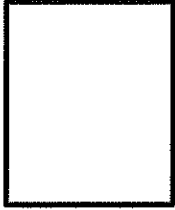
(注) 可燃性毒物として Gd₂O₃ を含むものがある。

(イ)-第D.1表 燃料集合体の型式及び仕様 (2/2)

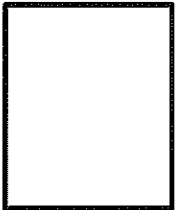
燃料集合体の 種類と型式	15×15 燃料			
	48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
	A型	B型	A型	B型
主要な燃料緒元				
材質				
燃料	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)	UO ₂ (注)
被覆管	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4
燃料密度 (理論密度比 %)				
初期濃縮度 (U-235 wt%)	4.1 以下 (集合体平均)	4.1 以下 (集合体平均)	3.5 以下 (集合体平均)	3.5 以下 (集合体平均)
形状				
集合体長さ (mm)	約 4100	約 4100	約 4100	約 4100
燃料有効長 (mm)				
燃料棒直径 (mm)				
燃料棒ピッチ (mm)	14.3	14.3	14.3	14.3
集合体幅 (mm)	214	214	214	214
重量				
集合体重量 (kg)	670 以下	670 以下	670 以下	670 以下
UO ₂ 重量 (kg)				
ウラン重量 (kg)				

(注) 可燃性毒物として Gd₂O₃ を含むものがある。

(イ)-第D.2表 バーナブルポイズン集合体の仕様例 (1/2)

型 式	17×17 燃料用
緒 元	
①形状、全長等 バーナブルポイズン集合体 外形 (mm) 全長 (mm) バーナブルポイズン棒 吸収材有効長 (mm) 外径 (mm) 内径 (mm)	161×161 3961 
②重 量 総重量 (kg)	
③材 料 吸収材 被覆管 シンプルプラグ ホールドダウンアセンブリ	ホウケイ酸ガラス ステンレス鋼 ステンレス鋼 ステンレス鋼 インコネル

(イ)-第D.2表 バーナブルポイズン集合体の仕様例 (2/2)

型 式	15×15 燃料用
緒 元	
①形状、全長等 バーナブルポイズン集合体 外形 (mm) 全長 (mm) バーナブルポイズン棒 吸収材有効長 (mm) 外径 (mm) 内径 (mm)	156×156 3964 
②重 量 総重量 (kg)	
③材 料 吸収材 被覆管 シンプルプラグ ホールドダウンアセンブリ	ホウケイ酸ガラス ステンレス鋼 ステンレス鋼 ステンレス鋼 インコネル

(イ)-第 D.3 表 収納物の燃焼条件 (1/2)

燃焼条件			燃料集合体の種類と型式		17×17 燃料			
					48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
					A 型	B 型	A 型	B 型
燃料集合体	最高燃焼度 ^(注1) (MWd/t)	中央部						
		外周部						
	平均燃焼度 ^(注2) (MWd/t)							
	平均比出力 (MW/t)							
冷却日数								
バーナブル ポイズン 集合体	照射日数							
	冷却日数							

(注 1) 最高燃焼度は燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度は収納する全燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

(イ)-第 D.3 表 収納物の燃焼条件 (2/2)

燃焼条件			燃料集合体の種類と型式		15×15 燃料			
					48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
					A 型	B 型	A 型	B 型
燃料集合体	最高燃焼度 ^(注1) (MWD/t)	中央部						
		外周部						
	平均燃焼度 ^(注2) (MWD/t)							
	平均比出力 (MW/t)							
冷却日数								
バーナブル ポイズン 集合体	照射日数							
	冷却日数							

(注 1) 最高燃焼度は燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度は収納する全燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

(イ)-第 D.4 表 主要核種の種類及び量 (1/2) (注)

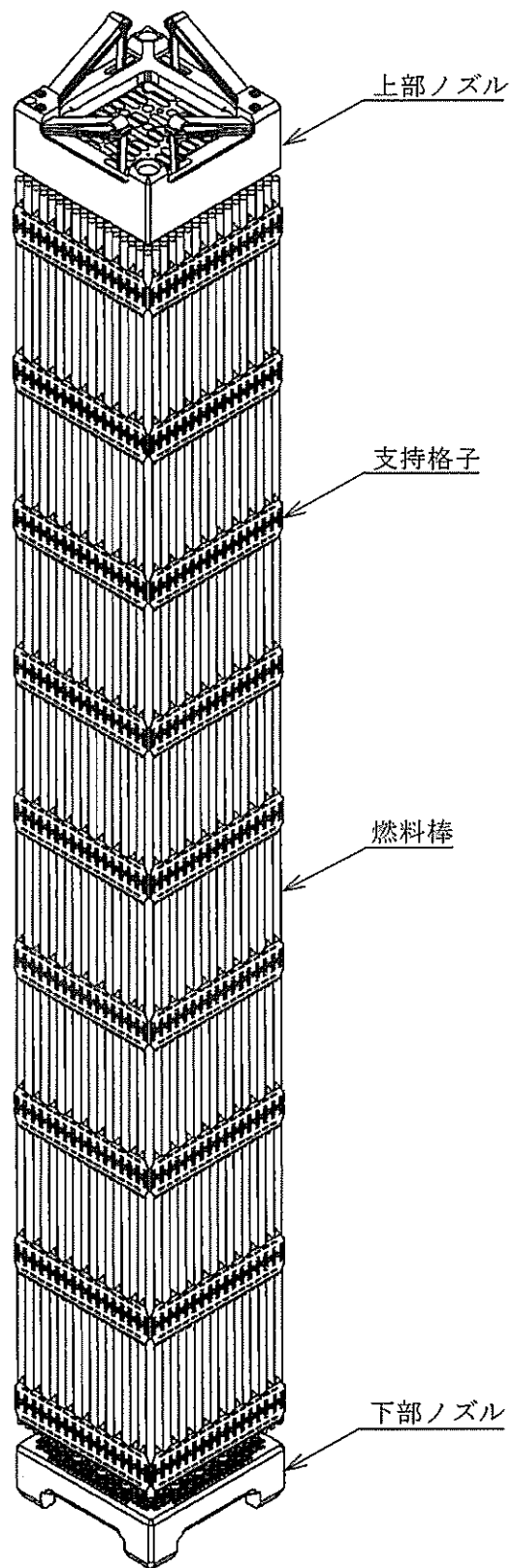
項目	燃料集合体の種類と型式	17×17 燃料 (A型)
① 燃料集合体収納体数 (体)		24
② 最大放射能強度 (PBq) (輸送容器 1 基当たり)		
③ 主要核種の放射能強度 (PBq) (②を主要核種ごとに分類)		
[核種]		
79Se		
90Sr		
90Y		
93Zr		
93mNb		
99Tc		
106Ru		
106Rh		
107Pd		
113mCd		
121mSn		
125Sb		
125mTe		
126Sn		
126Sb		
126mSb		
134Cs		
135Cs		
137Cs		
137mBa		
144Ce		
144Pr		
146Pm		
147Pm		
151Sm		
152Eu		
154Eu		
155Eu		
3H		
85Kr		
その他		
合計		

(注)放射能強度は平均燃焼度に対する ORIGEN2 コードによる計算値である。

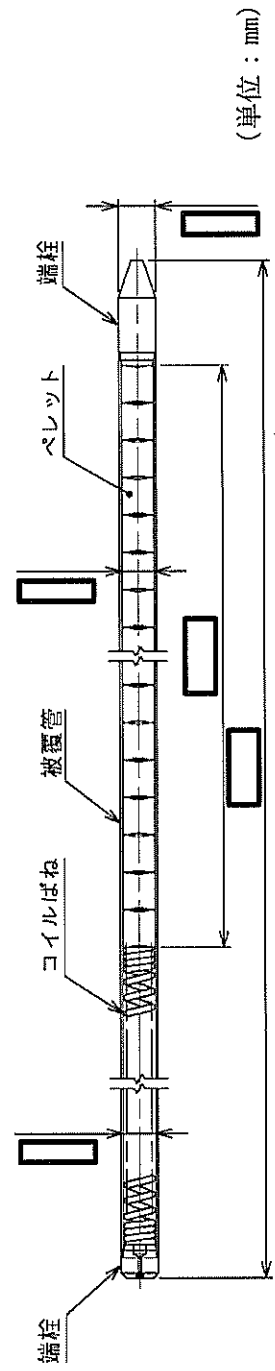
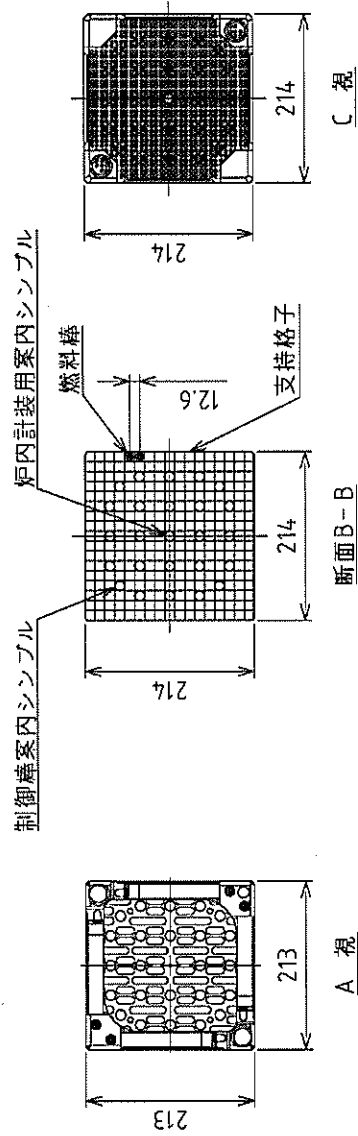
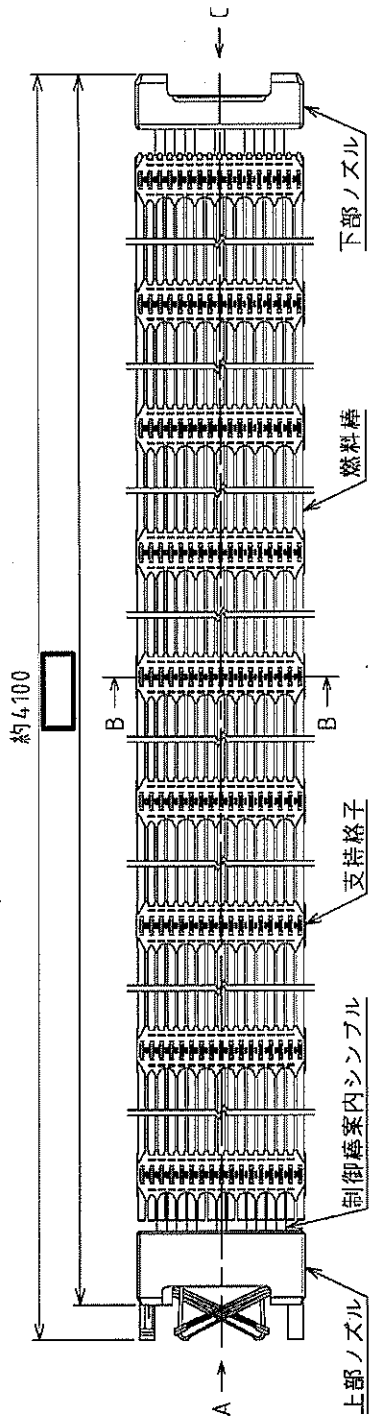
(イ)-第D.4表 主要核種の種類及び量 (2/2) (注)

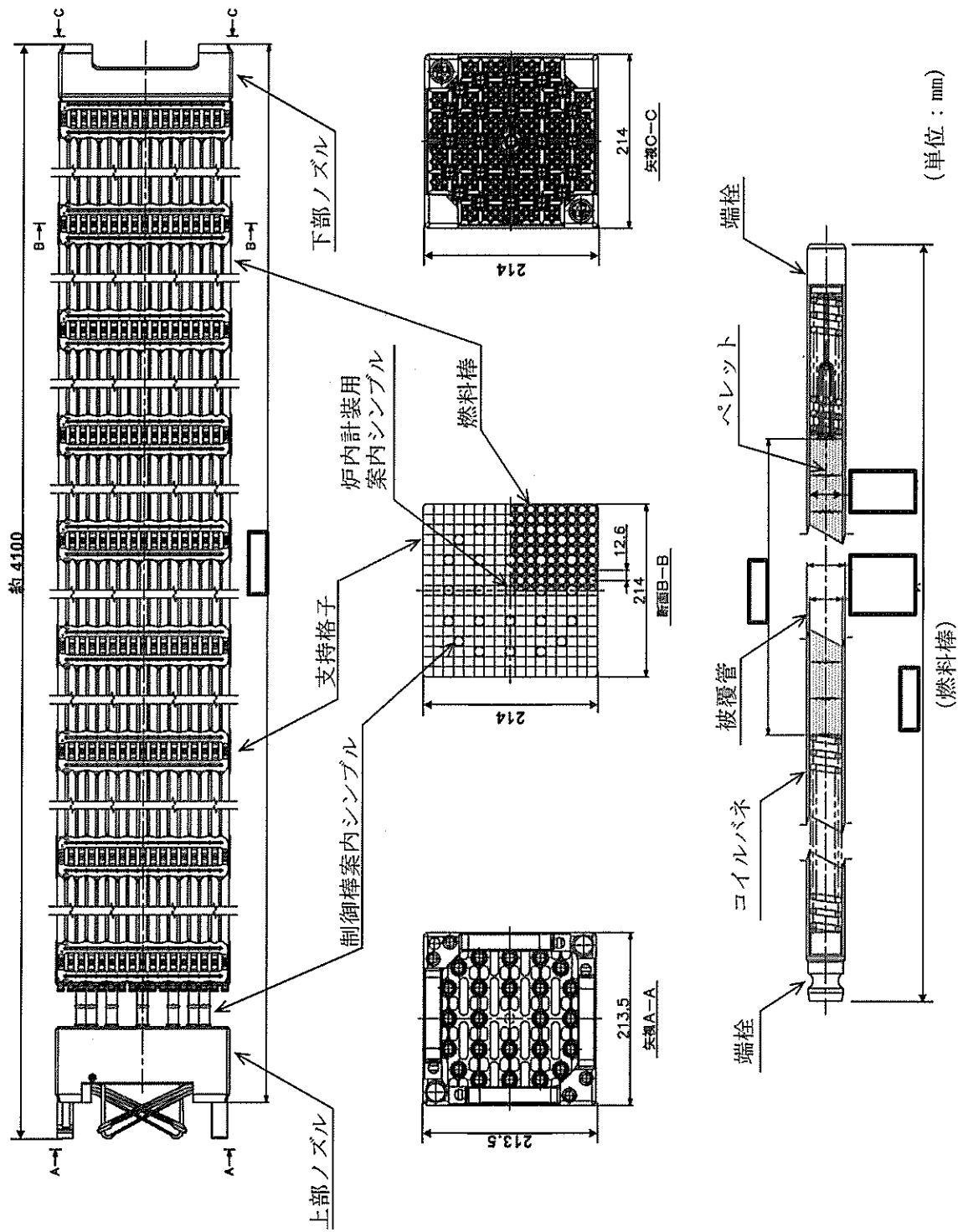
項目	燃料集合体の種類と型式	15×15 燃料 (A型)
① 燃料集合体収納体数 (体)		24
② 最大放射能強度 (PBq) (輸送容器1基当たり)		
③ 主要核種の放射能強度 (PBq) (②を主要核種ごとに分類)		
[核種]		
79Se		
90Sr		
90Y		
93Zr		
93mNb		
99Tc		
106Ru		
106Rh		
107Pd		
113mCd		
121mSn		
125Sb		
125mTe		
126Sn		
126Sb		
126mSb		
134Cs		
135Cs		
137Cs		
137mBa		
144Ce		
144Pr		
146Pm		
147Pm		
151Sm		
152Eu		
154Eu		
155Eu		
3H		
85Kr		
その他		
合計		

(注)放射能強度は平均燃焼度に対する ORIGEN2 コードによる計算値である。

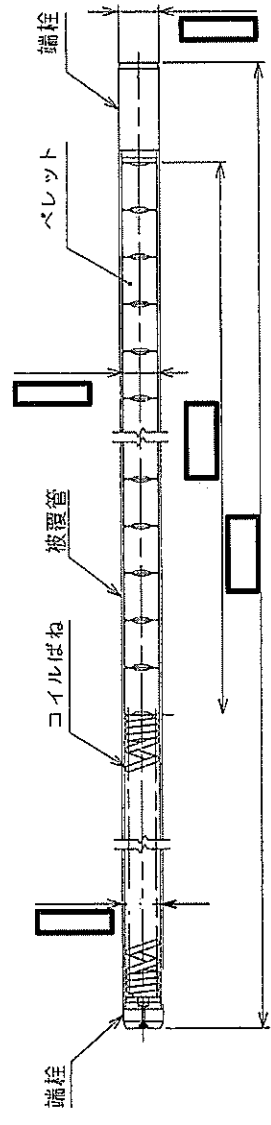
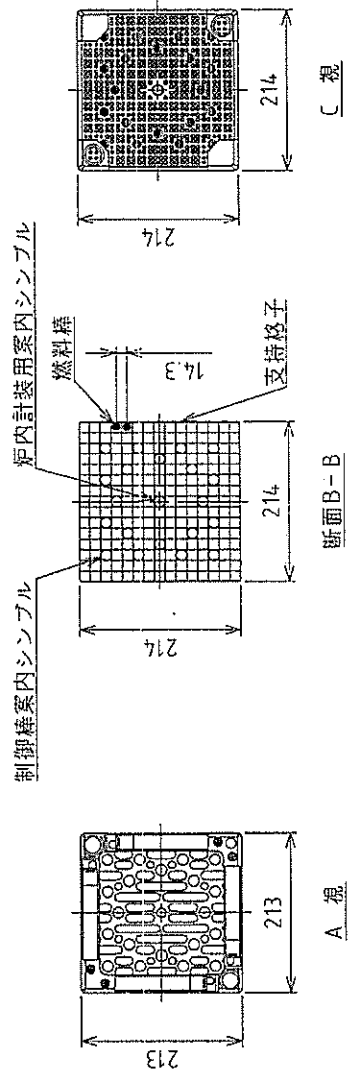
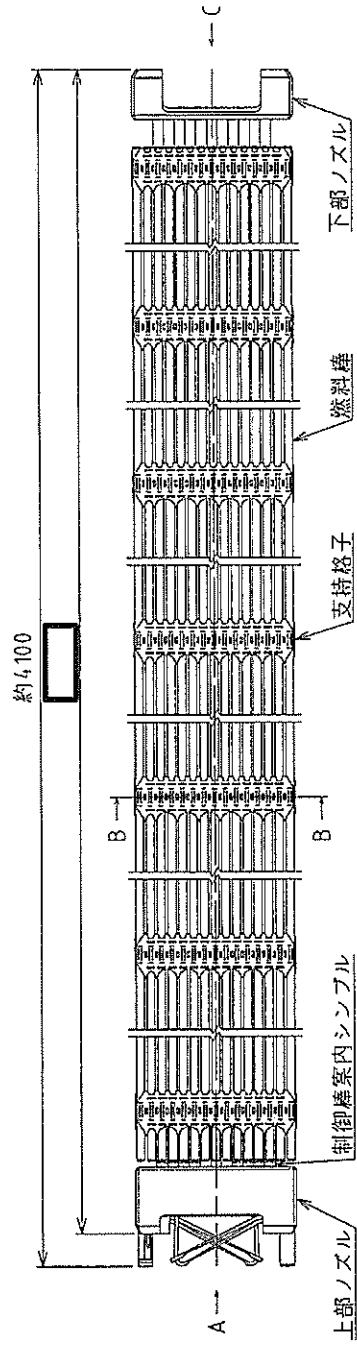


(イ)-第D.1図 PWR燃料集合体全体図 (17×17燃料 代表例)





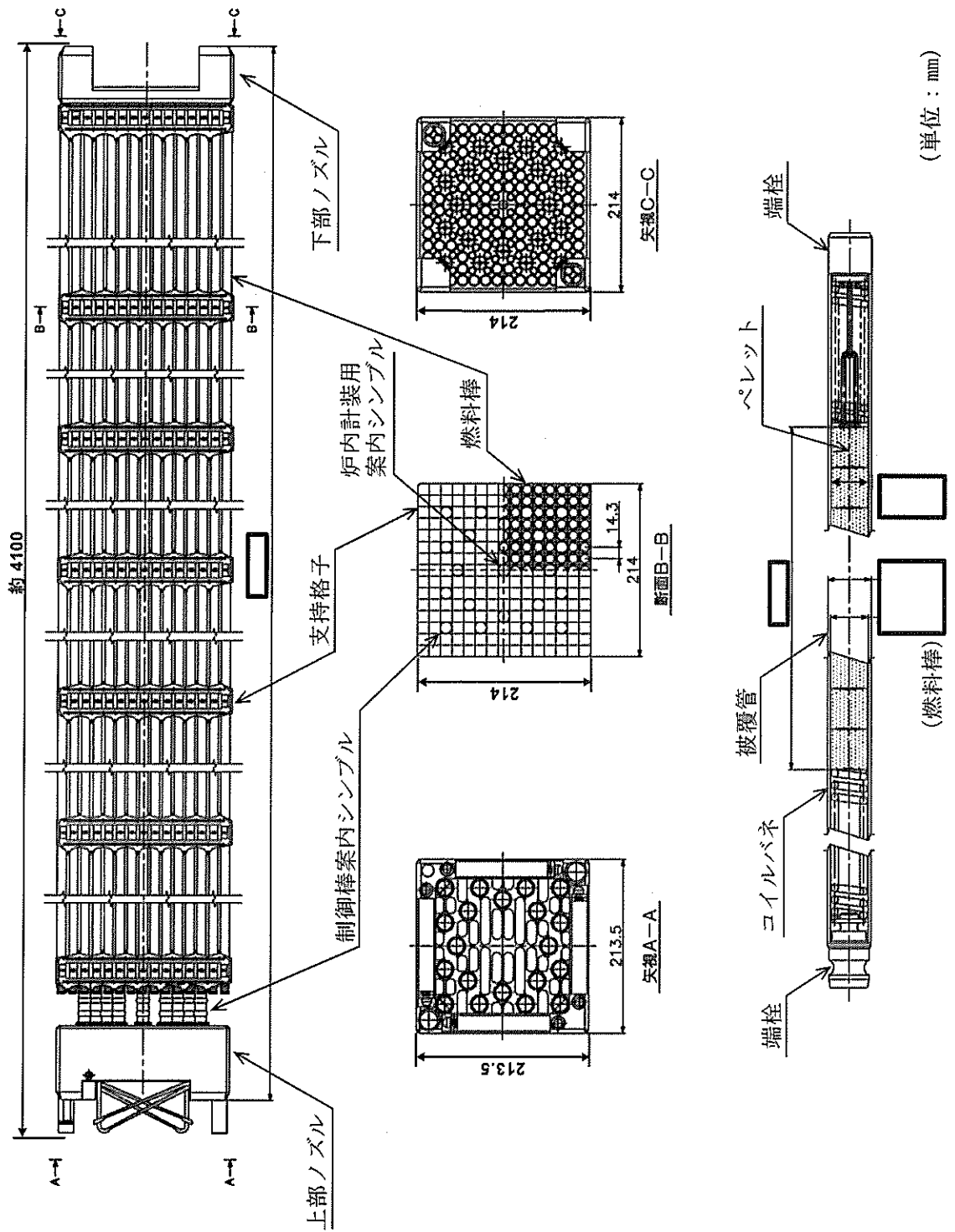
(イ) 第D.3図 PWR燃料集合体 (17×17燃料 (B型) 代表例)



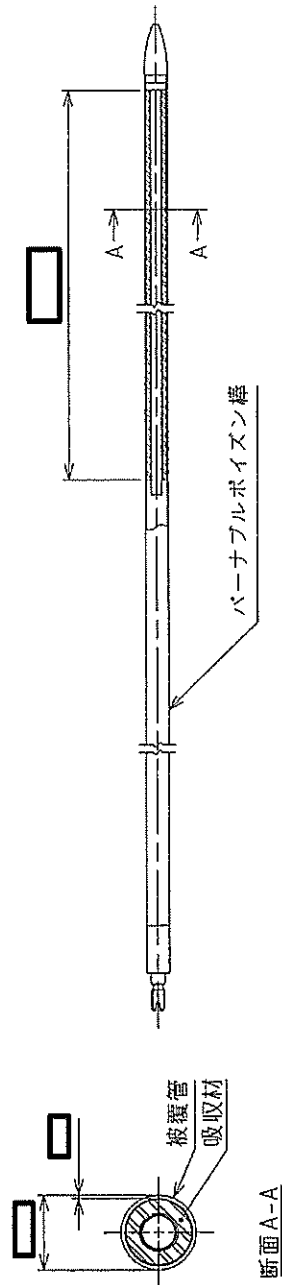
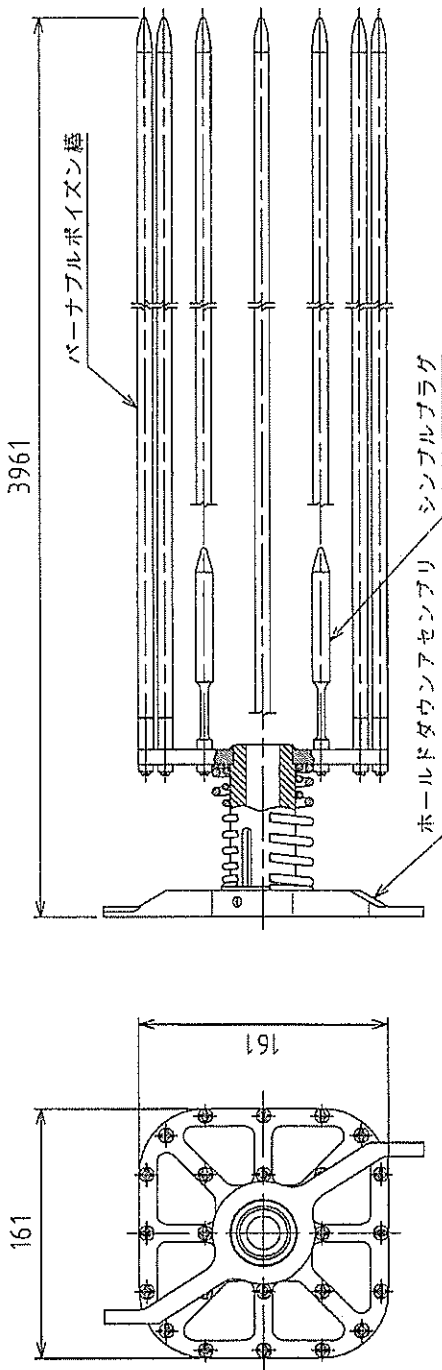
(単位：mm)

(1)-第 D.4 図 PWR 燃料集合体 (15×15 燃料 (A 型) 代表例)

燃料棒

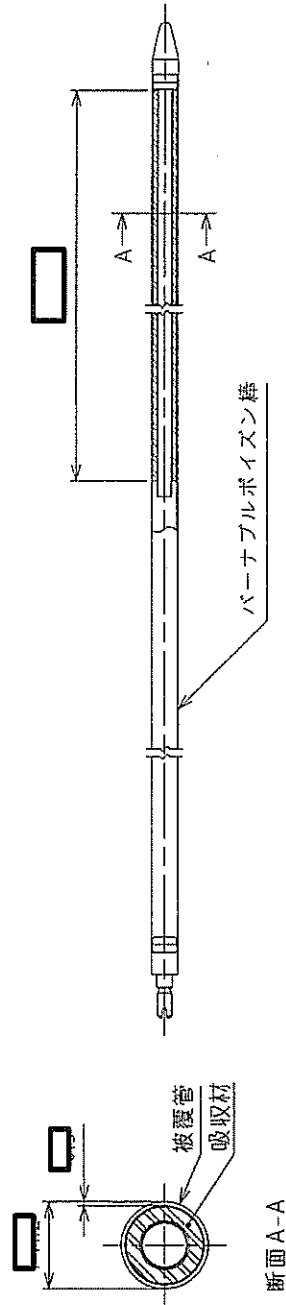
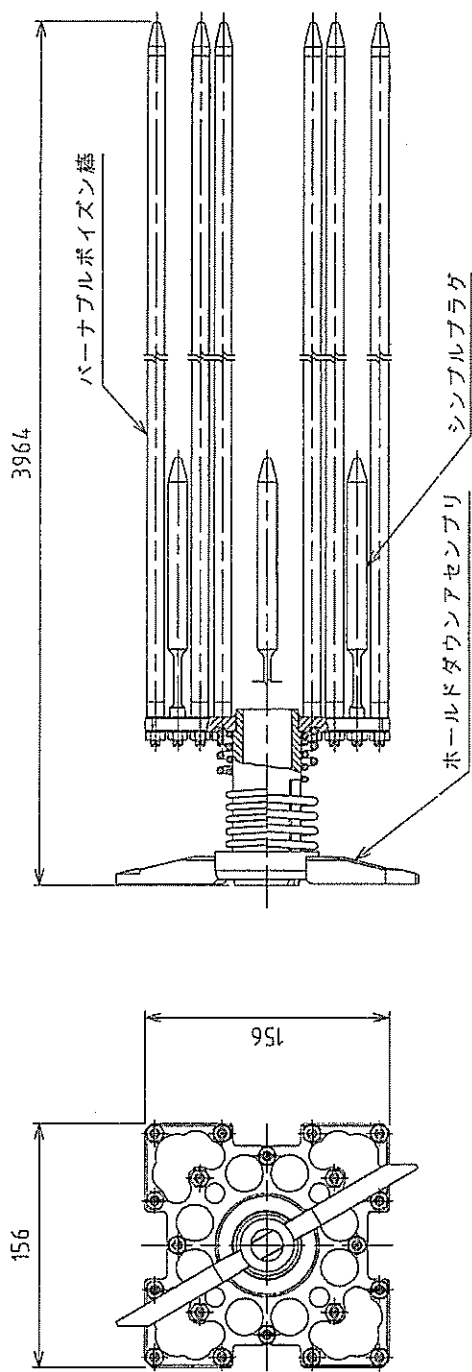


(イ)-第 D.5 図 PWR 燃料集合体 (15×15 燃料 (B 型) 代表例)



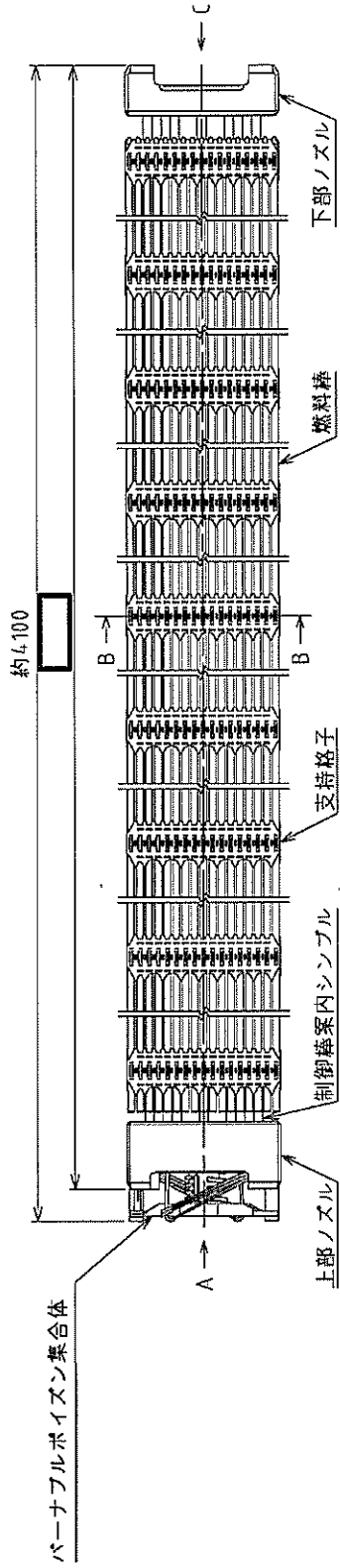
(単位：mm)

(イ)-第 D. 6 図 バーナブルポイズン集合体 (17×17 燃料用 代表例)

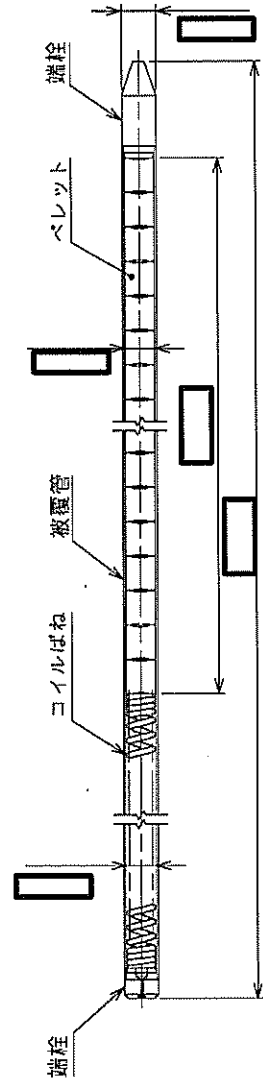
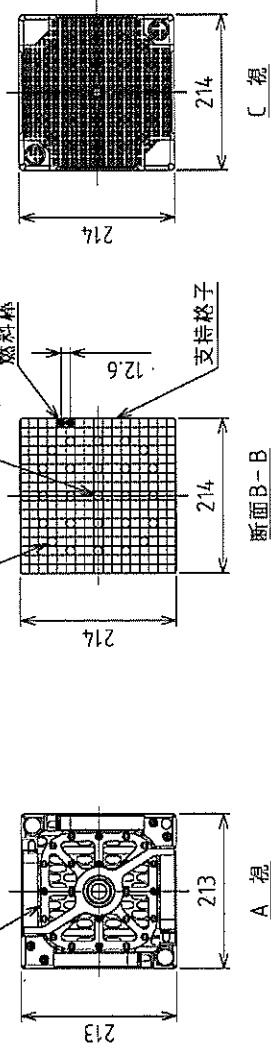


(単位：mm)

(イ)-第D.7図 バーナブルポイズン集合体 (15×15 燃料用 代表例)



バーナブルポイズン集合体



燃料棒

※バーナブルポイズン棒は、制御棒案内シンブル内に挿入される。

(イ)-第 D. 8 図 バーナブルポイズン集合体挿入図 (17×17 燃料 (A型) 代表例)

(四)章 核燃料輸送物の安全解析

(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析

本輸送物に関する安全解析は、本輸送物が「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（昭和五十三年十二月二十八日付、総理府令第五十七号）」（以下「規則」という。）及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（平成2年11月28日付、科学技術庁告示第5号）」（以下「告示」という。）に基づいて、経年変化を考慮した上で BM 型核分裂性輸送物としての技術上の基準に適合することを示すために行った。

本解析の概要は以下のとおりである。

A. 構造解析

構造解析では、通常輸送時において輸送物のき裂、破損等の生じないことを確認するほか、密封解析の前提となる密封装置の健全性を一般及び特別の試験条件において確認している。

また、熱及び遮蔽解析の評価条件を得るために一般及び特別の試験条件における輸送物の状態を評価している。

さらに、本輸送物は BM 型核分裂性輸送物であるため、未臨界評価のために核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の状態についても評価している。

B. 熱解析

熱解析では、構造解析の評価結果に基づいて、一般及び特別の試験条件における輸送物各部の温度及び圧力を評価し、構造、密封、遮蔽及び臨界解析の評価条件を与えている。

また、一般の試験条件における輸送物の近接表面温度基準(85 °C)に適合することを確認している。

C. 密封解析

密封解析では、構造及び熱解析の評価結果並びに発送前検査における気密漏えい検査合格基準に基づいて、一般及び特別の試験条件における放射性物質の漏えい率を評価し、基準値を満足することを示している。

D. 遮蔽解析

遮蔽解析では、構造及び熱解析の評価結果に基づいて、通常輸送時並びに一般及び特別の試験条件における輸送物表面あるいは表面から 1 m 離れた位置の線量当量率を評価し、基準値を満足することを示している。

E. 臨界解析

臨界解析では、構造解析の評価結果に基づいて、通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の孤立系及び配列系の各状態のいずれの場合にも未臨界であることを示している。

F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

本輸送容器は、使用済燃料乾式貯蔵施設における貯蔵後の輸送にも用いられるため、設計評価期間（60 年）中の輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化について考慮する事項を示している。

G. 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価

以上の結果及び(イ)章の核燃料輸送物の説明を総合して、本輸送物の設計が規則及び告示に定める技術基準に適合していることを示している。

以下、(ロ)章 A～G に各解析、評価の詳細を示す。

(四)章 A 構 造 解 析

A. 構造解析

A.1 構造設計

A.1.1 概要

輸送容器は、(イ)-第 C.1 図及び(イ)-第 C.2 図に示すようにキャスク本体、バスケット、一次蓋、二次蓋及び三次蓋等により構成される。胴は、(イ)-第 C.4 図に示すように三次蓋とともに密封境界を構成しており、胴内の圧力に耐えられる構造になっている。外筒は中性子遮蔽材を保持する構造になっている。輸送容器は、熱応力及び振動に対しても耐えられる構造になっている。

一次蓋は、(イ)-第 C.8 図に示すように一次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は金属ガスケットを用いて行い、通常の輸送時における圧力等の負荷に耐え密封性能を維持できる構造になっている。

二次蓋は、(イ)-第 C.10 図に示すように二次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は金属ガスケットを用いて行い、圧力等の負荷に耐え密封性能を維持できる構造になっている。

三次蓋は、(イ)-第 C.12 図に示すように三次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は O リングを用いて行い、密封境界として圧力等の負荷に耐えられる構造になっている。三次蓋は、(イ)-第 C.2 図に示すように上部緩衝体によって覆われている。

(イ)-第 C.14 図に示すバスケットは、胴内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造になっている。

(イ)-第 C.15 図及び(イ)-第 C.16 図に示す上部及び下部緩衝体は、キャスク本体の上部及び下部にそれぞれボルトによって取り付けられる構造になっており、落下等による機械的衝撃を吸収する。

(イ)-第 C.7 図に示す上部トラニオンは、輸送容器の吊上げ荷重に耐えられる構造になっている。下部トラニオンは、輸送容器のたて起し及びよこ倒し時にかかる荷重に耐えられる構造になっている。また輸送容器は(イ)-第 C.3 図に示すように、胴上部及び下部トラニオンにより輸送架台に固定され、輸送中の加速度に耐えられる。

A.1.2 設計基準

1. 設計で考慮する条件

本輸送容器の構造設計では「規則」及び「告示」に基づいて以下の条件等を考慮した。

(1) 通常の輸送条件

- a. 輸送容器の材質間又は輸送容器の材質と放射性収納物間において危険な物理的作用又は化学反応の生じるおそれのないこと。
- b. 密封装置は不用意に開かれないこと。
- c. 輸送容器の吊上装置としてのトラニオンは吊上荷重の3倍に耐えること。
- d. 固縛装置は輸送中発生する上下及び輸送方向加速度2g及び左右方向1gの加速度に耐えること。
- e. 輸送容器の構成部品は、運搬中に予想される周囲温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、き裂、破損等の生じるおそれがないこと。
- f. 輸送容器の振動について考慮すること。

(2) 一般の試験条件

- a. $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の環境に1週間放置の熱的試験に耐えること。
- b. 水噴霧試験に耐えること。
- c. 0.3 m自由落下試験に耐えること。
- d. 自重の5倍の荷重による積み重ね試験に耐えること。
- e. 6 kg棒貫通試験に耐えること。

(3) 特別の試験条件

- a. 9 m落下試験に耐えること。
- b. 1 m貫通試験に耐えること。
- c. 上記の試験条件に置いた後、火災試験に耐えること。
- d. 15 mの水中浸漬(0.15 MPa Gの外圧)試験に耐えること。

ただし、a及びbについては最大の破損を受けるような順序で連続して行われること。

(4) 原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る追加条件

- a. 200 mの水中浸漬(2 MPa Gの水圧)試験(強化浸漬試験)に耐えること。

(5) 核分裂性輸送物に係る試験条件

- a. 次の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた後の輸送物の損傷状態を評価すること。
 - (a) 以下の連続試験
 - i. 水噴霧試験
 - ii. 0.3 m 自由落下試験
 - (b) 積み重ね試験
 - (c) 6 kg 棒貫通試験
- b. 次の核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下に順次置いた後の輸送物の損傷状態を評価すること。
 - (a) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件
 - (b) 9 m 落下試験
 - (c) 1 m 貫通試験
 - (d) 火災試験
 - (e) 0.9 m の水中浸漬試験

なお、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件の中で機械的（強度）試験においては、本輸送物が使用される $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度範囲を考慮する。

2. 設計基準

各解析項目に対して材質、温度、負荷係数等の設計条件を考慮して適用数式、要素及び解析基準を決定した。

この中で、輸送容器の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋、蓋ボルト、蓋密封シール部及びトラニオンに発生する応力の設計基準値は、金属キャスク構造規格¹⁾を適用した。

金属キャスク構造規格に設計基準値の記載がない、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、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構造であることを考慮し中間胴と同等に扱い、金属キャスク構造規格の中間胴の規定を適用した。アルミニウム合金製のバスケットについては、金属キャスク構造規格のバスケットの考え方を基本として設計基準値を設定した。また、燃料被覆管については、一般の試験条件における荷重負荷時の変形を防止するため、設計基準値を降伏応力以下とした。

三次蓋とキャスク本体の O リング取付位置の相対口開き変形量については、O リングが閉じ込め機能を維持できる設計基準値とした。

各試験条件に対しての応力及び変形量の設計基準値を以下に示す。また、設計条件及び解析方法の要約を(ロ)-第 A.1 表に示す。

(1) 通常の輸送条件（吊上装置及び固縛装置）

- a. トラニオン本体は応力強さが設計降伏点以下であること。ここで、応力強さとは主応力の差の絶対値をいう。
- b. トラニオン接続部は以下に示す一次支圧応力 f_p' を超えないこと。一次＋二次支圧応力については f_p' の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_p' = 1.25S_y$$

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第 5-8 に示される設計降伏点

- c. 吊上装置については疲労評価を行うこと。

(2) 一般の試験条件（熱的試験及び自由落下試験）

- a. 蓋ボルト以外の輸送容器の胴、一次蓋、二次蓋、三次蓋は発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_L \leq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

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

ここで、

P_m : 一次一般膜応力

P_L : 一次局部膜応力

P_b : 一次曲げ応力

Q : 二次応力

S_m : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第 5-1 に示される設計応力強さ

- b. 蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq 2S_m$$

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

ここで、

S_m : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第 5-2 に示される設計応力強さ

- c. 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部は発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

ここで、

S_y : 金属キャスク構造規格¹⁾別表第 5-8 に示される設計降伏点

- d. 三次蓋とキャスク本体の O リング取付位置での相対口開き変形量が、O リングの初期締め付け代より小さいこと。
- e. 外筒、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においては以下の基準を適用する。ただし、各溶接部については、各構成部材と同じ基準を適用する。
- (a) 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t を超えないこと。一次＋二次応力については、(b) の圧縮応力との差が f_t の 3 倍を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで、

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

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

S_u : 金属キャスク構造規格¹⁾別表 5-9 に示される設計引張強さ

$S_y(\text{RT})$: 金属キャスク構造規格¹⁾別表 5-8 に示される 40 °C における設計降伏点

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c を超えないこと。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

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

(c) 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s を超えないこと。一次＋二次応力については f_s の 3 倍を超えないこと。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

(d) 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b を超えないこと。一次＋二次応力については f_b の 3 倍を超えないこと。

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

f. バスケットにおいては、以下の基準を適用する。

(a) 各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_m$$

$$P_m + P_b \leq \alpha S_m$$

$$\tau \leq 0.6 S_m$$

(一次圧縮応力) $\leq f_c$

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

S_m : 付属書類 A. 10.5 (a)-第 A. 94 表に示される設計応力強さ

P_m : 一次一般膜応力

P_b : 一次曲げ応力

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 のいずれかの小さい方の値

τ : 平均せん断応力

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

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

g. 燃料被覆管については応力強さが降伏応力以下であること。

(3) 一般の試験条件（積み重ね試験及び6 kg 棒貫通試験）

- a. 積み重ね試験に対しては胴に発生する応力強さが設計降伏点を超えないこと。
- b. 6 kg 棒貫通試験に対しては、せん断で破壊しないこと。

(4) 特別の試験条件

- a. 蓋ボルト以外の輸送容器の胴、二次蓋及び三次蓋は以下の基準を適用する。

(a) 各部位について発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

i) オーステナイト系ステンレス鋼以外

$$P_m \leq 2/3S_u$$

$$P_L \leq S_u$$

$$P_L + P_b \leq S_u$$

ii) オーステナイト系ステンレス鋼

$$P_m \leq \text{MIN}[2.4S_m, 2/3S_u]$$

$$P_L \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u]$$

$$P_L + P_b \leq \text{MIN}[3.6S_m, S_u]$$

- b. 二次蓋ボルト及び三次蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

$$(\text{平均引張応力}) \leq S_y$$

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

- c. 二次蓋密封シール部に対しては各部位について発生応力を分類し、各応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq S_y$$

$$P_L \leq S_y$$

$$P_L + P_b \leq S_y$$

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

- d. 三次蓋とキャスク本体のOリング取付位置の相対口開き変形量が、Oリングの初期締め付け代より小さいこと。

- e. 外筒、下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーにおいては以下の基準を適用する。ただし、各溶接部については、各構成部材と同じ基準を適用する。

(a) 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで、

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

$$F = \text{MIN}[3.6S_m, S_u] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_c = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

$$F = \text{MIN}[0.7S_u, 1.2S_y] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$F = \text{MIN}[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(\text{RT})] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

(c) 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s を超えないこと。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

ここで、

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

$$F = \text{MIN}[3.6S_m, S_u] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

(d) 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b を超えないこと。

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

ここで、

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

$$F = \text{MIN}[3.6S_m, S_u] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

f. バスケットにおいては、以下の基準を適用する。

(a) 各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leq 2/3S_u$$

$$P_m + P_b \leq 2/3 \alpha S_u$$

$$\tau \leq 1.2S_m$$

ここで、

$$S_u : \text{付属書類 A. 10.5 (v)-第 A. 97 表に示される設計引張強さ}$$

(b) 各部位の一次圧縮応力は f_c^* の 1.5 倍を超えないこととする。 f_c^* の値は、以下に示す f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値。

$$f_c^* = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

ここで、

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

g. 1 m 貫通試験に対しては、せん断で破断しないこと。

(5) 強化浸漬試験

- a. 輸送容器の胴（底板）及び蓋部は以下の基準を適用する。

$$P_L + P_b \leq S_0 \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)}$$

$$P_L + P_b \leq \text{MIN} [3.6S_0, S_0] \text{ (オーステナイト系ステンレス鋼)}$$

- b. 外圧を受ける胴にあっては、外面に受ける圧力が金属キャスク構造規格¹⁾に示される胴の厚さ等によって定まる許容外圧 P_a の1.5倍以下であること。

3. 余裕率

適用数式及び要素による結果のうち、定量的な基準のあるものについては次に示す余裕率 MS を用いて評価する。

$$\text{余裕率 (MS)} = \frac{\text{解析基準値}}{\text{解析結果}} - 1$$

したがって、余裕率は0以上あれば良いとする。

余裕率を用いられないものは、該当箇所にその基準等を記載した。なお、解析基準値は A.3 に示す材料の機械的性質及び B. に示す温度等に基づいて決定する。^(注)

(注) 設計降伏点、設計引張強さ、縦弾性係数等の値は、A.3 に示す引用文献中で与えられている温度依存データを内挿することによって求める。

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (1/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷		要素	適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数				
通常の輸送条件	化学的及び電氣的反応	(ロ)-第A.3表	表による	-	腐食	-	活性	活性の有無	無	
	2) 電氣的反応	(ロ)-第A.3表	表による	-	腐食	-	電位差	反応の有無	無	
低温強度	1) 構成部品	(ロ)-第A.4表	表による	-	材質	-	き裂・破損	-20℃でのき裂・破損の有無	無	
	2) 低温時の強度	(ロ)-第A.4表	表による	-	材質	-	脆性破壊	-20℃での脆化の有無	無	
密封装置	三次蓋	(イ)-第C.2図	-	-	誤操作による開放	-	誤操作の可否	緩衝体等に覆われての誤操作の可否	否	

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (2/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件					解析方法			備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷		適用数式又は要素	解析基準		
					種類	負荷係数			要素	
吊上装置	トラニオン本体	(ロ)-第A.10図	SUS630		吊上荷重	3 1.3	曲げとせん断 疲労評価	$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$ N_c	S_y N_a	(注1)
	トラニオン接続部 (トラニオン側)	(ロ)-第A.10図	SUS630		吊上荷重	3 1.3	支圧 疲労評価	$\sigma_P = \text{MAX}[\sigma_{PH}, \sigma_{PE}]$ $\sigma_P = \text{MAX}[\sigma_{PH}, \sigma_{PE}] + \sigma_{PE}$ N_c	1.25 S_y 1.5×1.25 S_y N_a	(注2)
	トラニオン接続部 (胴側)	(ロ)-第A.10図			同上	同上	同上	同上	同上	
固縛装置	トラニオン本体	(ロ)-第A.14図	SUS630		上下、前後2g (下方向は自重を 考慮し、3g)	1	曲げとせん断	$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$	S_y	
	トラニオン接続部 (トラニオン側)	(ロ)-第A.14図	SUS630		上下、前後2g (下方向は自重を 考慮し、3g)	1	支圧	$\sigma_P = \text{MAX}[\sigma_{PH}, \sigma_{PE}]$ $\sigma_P = \text{MAX}[\sigma_{PH}, \sigma_{PE}] + \sigma_{PE}$	1.25 S_y 1.5×1.25 S_y	
	トラニオン接続部 (胴側)	(ロ)-第A.14図			同上	同上	同上	同上	同上	
	圧力	-	-		周囲圧力の降下	-	内圧	同上	密封性	良
	振動	(ロ)-第A.15図			振動による力	-	振動	固有振動数	加振源の 振動数	(注3)

(注1) S: 応力強さ、 σ_b : 曲げ応力、 τ : せん断応力、 S_y : 設計降伏点、 N_c : 使用計画回数、 N_a : 許容繰返し回数

(注2) σ_P : 支圧応力、 σ_{PH} 、 σ_{PE} : 吊上げ荷重による支圧応力 (一次応力)、 σ_{PE} : しまり嵌め荷重による支圧応力 (二次応力)

(注3) 輸送容器の胴、一次蓋及び二次蓋の材質は、である。

(D)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (3/13)

条件	解析項目及びその評価	参照図表	材質	温度	設計条件			解析方法			備考
					種類	設計負荷 負荷係数	要素	通用数式又は要素	解析 基準		
熱的試験											
1) 応力計算											
	胴	(D)-第A.17図			内圧、熱膨張及び初期縮付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$	(注4)	
	胴(底板)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋	-			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋	-			同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋	-			同上	1	同上	同上	同上		
	外筒	-			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b	(注5)	
一般の試験条件											
	下部端板	-			同上	1	同上	同上	同上		
	蓋部中性子遮蔽材カバー	-			同上	1	同上	同上	同上		
	底部中性子遮蔽材カバー	-			同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋シール部(蓋)	-			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y		
	一次蓋シール部(胴)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋シール部(蓋)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋シール部(胴)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋ボルト	-			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	(注6)	
	二次蓋ボルト	-			同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋ボルト	-			同上	1	同上	同上	同上		
	ガスケットの密封性	-	EPDM	-	同上	1	変形量	口開き変形量		初期締付け代	

(注4) P_m : 一次一般膜応力、 P_L : 一次局部応力、 P_b : 一次曲げ応力、 Q : 二次応力、 S_m : 設計応力強さ

(注5) f_t : 許容引張応力、 f_c : 許容圧縮応力、 f_s : 許容せん断応力、 f_b : 許容曲げ応力

(注6) σ_m : 平均引張応力、 σ_b : 曲げ応力

(D)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (4/13)

条件	解析項目及びその評価	参照図表	材質	温度	設計条件			解析方法			備考
					種類	設計負荷		適用数式又は要素	解析基準		
						種類	負荷係数			要素	
水噴霧	—	—	水噴霧	—	—	—	吸水による脆化、水溜	吸水性 水切	無 良		
自由落下											
1) 緩衝体の変形量と衝撃加速度											
垂直落下	(D)-第A.23図 (D)-第A.24図		落下エネルギー	—	1	エネルギー 吸収	吸水による脆化、水溜	$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mgH$	(注7)	
水平落下	(D)-第A.25図		落下エネルギー	—	1	エネルギー 吸収		$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
コーナ-落下	(D)-第A.26図 (D)-第A.27図		落下エネルギー	—	1	エネルギー 吸収		$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mgH$		
2) 垂直落下											
胴	(D)-第A.28図 (D)-第A.29図		内圧、慣性力 熱膨張及び 初期締付トルク		1	応力強さ		P_m P_L P_t+P_b P_t+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$		
胴 (底板)	—		同上		1	同上		同上	同上		
一次蓋	—		同上		1	同上		同上	同上		
二次蓋	—		同上		1	同上		同上	同上		
三次蓋	—		同上		1	同上		同上	同上		
外筒	—		同上		1	応力		引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b		
下部端板	—		同上		1	同上		同上	同上		
蓋部中性子遮蔽材カバー	—		同上		1	同上		同上	同上		
底部中性子遮蔽材カバー	—		同上		1	同上		同上	同上		

(注7) E_a : 吸収エネルギー, σ_c : 圧縮応力, V : 変形量, E_k : 輸送物の落下エネルギー, m : 輸送物最大総質量, g : 重力加速度, H : 落下高さ

(D)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (5/13)

条件	解析項目及びその評価	参照図表	材質	温度	設計条件		設計負荷		解析方法		備考
					種類	要素	負荷係数	要素	適用数式又は要素	解析基準	
2) 垂直落下 (続き)	一次蓋シール部 (蓋)	-			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y		
	一次蓋シール部 (胴)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋シール部 (蓋)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	二次蓋シール部 (胴)	-			同上	1	同上	同上	同上		
	一次蓋ボルト	-			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$		
	二次蓋ボルト	-			同上	1	同上	同上	同上		
	三次蓋ボルト	-			同上	1	同上	同上	同上		
	ガスケットの密封性	-		EPDM		同上	1	変形量	口開き変形量	初期締 付け代	
	バスケット	(D)-第 A.31 図		アルミニウ ム合金		慣性力	1	圧縮	$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_v}{A}$	S_m f_c	(注 8)
	燃料被覆管	-		ジルカロイ		内圧及び慣性力	1	応力強さ	S	σ_y	(注 9)
3) 水平落下											
胴	(D)-第 A.32 図				内圧、慣性力 熱膨張及び 初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$		
	-				同上	1	同上	同上	同上		
	-				同上	1	同上	同上	同上		
	-				同上	1	同上	同上	同上		
	-				同上	1	同上	同上	同上		
外筒	-				同上	1	応力強さ	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b		

(注 8) W_b : バスケット合計質量、 G_v : 垂直落下時の衝撃加速度、 A : バスケットプレートと胴の接触面積(注 9) σ_y : 設計降伏点

(ロ) - 第 A. 1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (6/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件				解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷	適用数式又は要素	解析基準	
		種類	要素	種類	要素	適用数式又は要素	解析基準	
一般の試験条件	3) 水平落下 (続き)							
	下部端板	-			同上	同上	同上	同上
	蓋部中性子遮蔽材カバ-	-			同上	同上	同上	同上
	底部中性子遮蔽材カバ-	-			同上	同上	同上	同上
	一次蓋シール部 (蓋)	-			同上	応力強さ	P_L $P_L + P_b + Q$	S_y S_y
	一次蓋シール部 (胴)	-			同上	同上	同上	同上
	二次蓋シール部 (蓋)	-			同上	同上	同上	同上
	二次蓋シール部 (胴)	-			同上	同上	同上	同上
	一次蓋ボルト	-			同上	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$
	二次蓋ボルト	-			同上	同上	同上	同上
	三次蓋ボルト	-			同上	同上	同上	同上
	ガスケットの密封性	-	EPDM	-	同上	同上	同上	同上
	バスケット	(ロ) - 第 A. 33 図 (ロ) - 第 A. 34 図 (ロ) - 第 A. 35 図 (ロ) - 第 A. 36 図	アルミニウム合金		慣性力	1	変形量	初期締付け代
	燃料被覆管	-	ジルカロイ		内圧及び慣性力	1	応力強さ	σ_y

— 垂直及び水平落下の結果並びに特別の試験条件の結果を引用して評価—

(注 10) W_I, W_{II} : バスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量、 G_H : 水平落下時の衝撃加速度、 A : 断面積、

N : バスケットプレートの数、 M : 曲げモーメント、 Z : 断面係数、 F : せん断力、 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

(ロ) - 第 A. 1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (7/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件				解析方法		備考	
		参照図表	材質	温度	設計負荷	適用数式又は要素	解析基準		
			種類	負荷係数	要素				
一般の試験条件	積み重ね 1) 軸に直角方向 2) 軸方向	(ロ) - 第 A. 37 図 (ロ) - 第 A. 38 図	[Redacted]	輸送物質量の 5 倍 輸送物質量の 5 倍	1 1	曲げ 圧縮	$\sigma_b = \frac{M_{\max} d_0}{2I}$ $\sigma_c = \frac{W}{A}$	S_y S_y	(注 11)
		(ロ) - 第 A. 39 図							

(注 11) M_{\max} : 最大曲げモーメント、 d_0 : 円筒外径、 I : 断面二次モーメント、 W : 荷重

(注 12) E_s : せん断エネルギー、 d : 直径、 t : 板厚、 S : せん断強さ

(D)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (8/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件				解析方法		備考				
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準		
						種類	要素					
9 m 落下試験 1) エネルギー吸収と衝撃力 垂直落下 水平落下 コーナー落下 2) 垂直落下 特別の試験条件												
	(D)-第A.23 図 (D)-第A.24 図			-	落下エネルギー	エネルギー吸収	1		$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mGH$		
	(D)-第A.25 図 (D)-第A.26 図 (D)-第A.27 図			-	落下エネルギー	エネルギー吸収	1		$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mGH$		
	(D)-第A.40 図 (D)-第A.41 図			-	落下エネルギー	エネルギー吸収	1		$E_a = \sum \sigma_c V$	$E_k = mGH$		
	-				内圧、慣性力及び初期縮付トルク	応力強さ	1		P_a P_L P_L+P_b	$2/3S_u$ S_u S_u	(注 13)	
	-				同上	同上	1		同上	同上		
	-				同上	同上	1		同上	同上		
	-				同上	同上	1		P_a P_L P_L+P_b	MIN(2.4S _u , 2/3S _u) MIN(3.6S _u , S _u) MIN(3.6S _u , S _u)	f_t 1.5f _c f _s f _b	
	-				同上	応力	1		引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	同上 同上 同上 同上		
	-				同上	同上	1		同上	同上		
-				内圧、慣性力、熱膨張及び初期縮付トルク	応力強さ	1		P_a P_L+P_b+Q	S_y S_y			
-				同上	同上	1		同上	同上			

(注 13) S_u: 設計引張強さ

(ロ) 第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (9/13)

条件	解析項目及びその評価	参照図表	材質	温度	設計条件			解析方法			備考
					種類	設計負荷		適用数式又は要素	解析基準		
						負荷係数	要素				
2) 垂直落下 (続き)	二次蓋ボルト	—			1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	S_y S_y	初期縮付け代 2/3 S_u 1.5 f_c (注 14)		
	三次蓋ボルト	—			1	同上	同上	同上			
	ガスケットの密封性	—	EPDM	変形量	1	変形量	口開き変形量				
	バスケット	—	アルミニウム 合金	圧縮	2.6	圧縮	$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_v}{A}$				
3) 水平落下	胴	(ロ) 第 A.42 図			1	応力強さ	P_m P_L $P_L + P_b$	2/3 S_u S_u S_u			
	胴 (底板)	—			1	同上	同上	同上			
	二次蓋	—			1	同上	同上	同上			
	三次蓋	—			1	同上	P_m P_L $P_L + P_b$	MIX(2, 4S, 2/3S _u) MIN(3, 6S, S _u) MIN(3, 6S, S _u)			
外筒	外筒	—			1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t 1.5 f_c f_s f_b			
	下部端板	—			1	同上	同上	同上			
	底部中性子遮蔽材カバ-	—			1	同上	同上	同上			
	二次蓋シール部 (蓋)	—			1	応力強さ	P_L $P_L + P_b + Q$	S_y S_y			
二次蓋シール部 (胴)	二次蓋シール部 (胴)	—			1	同上	同上	同上			
	二次蓋ボルト	—			1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m + \sigma_b$	S_y S_y			
	三次蓋ボルト	—			1	同上	同上	同上			

(注 14) f_c : f_c の値を算出する際に S_y とあるのを 1.2 S_y と読み替えて算出した値

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (10/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件				解析方法			備考
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷 負荷係数	要素	適用数式又は要素	
3) 水平落下 (続き)	ガスケットの密封性	-	EPDM	-	同上	1	変形量	口開き変形量 $\sigma_c = (W_I + W_{II}) \cdot \frac{G_H}{A \cdot N}$	初期縮 付け代
特別の試験条件	4) コーナー落下							一 垂直及び水平落下の結果を引用して評価一	
	二次蓋ボルト					1	引張	$\sigma_t = \sigma_{11} + \phi \sigma_{12}$	S_y (注 15)
	三次蓋ボルト					1	同上	同上	同上
	5) 傾斜落下							一 垂直及び水平落下の結果及び A.10.3 を引用して評価一	
	1) 貫通試験								
2) 水平落下	三次蓋					1	せん断	$F_{bar} = \sigma_u \cdot A$ $F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S$	F (注 16)
	底部中性子遮蔽材カバー					1	せん断	$F_{bar} = \sigma_u \cdot A$ $F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S$	F
	胴					1	せん断	$F_{bar} = \sigma_u \cdot A$ $F = \pi \cdot d \cdot t \cdot S$	F

(注 15) σ_t : 各荷重によりボルトに生じる引張応力、 σ_{11} : 初期縮付力、熱応力、胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力、 ϕ : ボルト内力係数、 σ_{12} : 慣性力により生じる引張応力

(注 16) F_{bar} : 最大荷重、 σ_u : SS400 の設計引張強さ、F: 貫通荷重

(ロ) - 第 A. 1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (11/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件				設計方法			備考	
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷		適用数式又は要素		解析基準
						負荷係数	要素			
熱的試験										
胴	(ロ) - 第 A. 43 図				内圧及び初期縮付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b	$2/3S_u$ S_u S_u	
胴 (底板)	—				同上	1	同上	同上	同上	
二次蓋	—				同上	1	同上	同上	同上	
三次蓋	—				同上	1	同上	P_m P_L P_L+P_b	MIN(2.4S _m , 2/3S _d) MIN(3.6S _m , S _d) MIN(3.6S _m , S _d)	
外筒	—				同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t $1.5f_c$ f_s f_b	
下部端板	—				同上	1	同上	同上	同上	
底部中性子遮蔽材カバー	—				同上	1	同上	同上	同上	
二次蓋シール部 (蓋)	—				内圧、熱膨張及び初期縮付トルク	1	応力強さ	P_L P_L+P_H+Q	S_y S_y	
二次蓋シール部 (胴)	—				同上	1	同上	同上	同上	
二次蓋ボルト	—				同上	1	引張	σ_m	S_y	
三次蓋ボルト	—				同上	1	引張と曲げ	$\sigma_m + \sigma_b$	S_y	
ガスケットの密封性	—				同上	1	同上	同上	同上	
15 m 浸漬	—		EPDM	—	変形量	1	変形量	口開き変形量	初期縮付け代	
三次蓋	(ロ) - 第 A. 44 図				外圧	1	応力強さ (曲げ)	$S = \sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	MIN(3.6 S_m , S_d)	(注 17)

(注 17) P : 差圧、a : 円板の半径

(ロ)-第A.1表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (12/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件					解析方法		備考	
		参照図表	材質	温度	種類	設計負荷 負荷係数	要素	適用数式又は要素		解析基準
使用済核燃料 の追加試験条件 輸送物	強化浸漬									
	1) 胴	—			外圧	1	圧力	P_o	$1.5P_a$	(注 18)
	2) 胴 (底板)	—			外圧	1	応力強さ (曲げ)	$S = \sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	S_u	
	3) 三次蓋	(ロ)-第A.45図			外圧	1	応力強さ (曲げ)	$S = \sigma_b = 0.75 \frac{P \cdot a^2}{t^2}$	S_u	

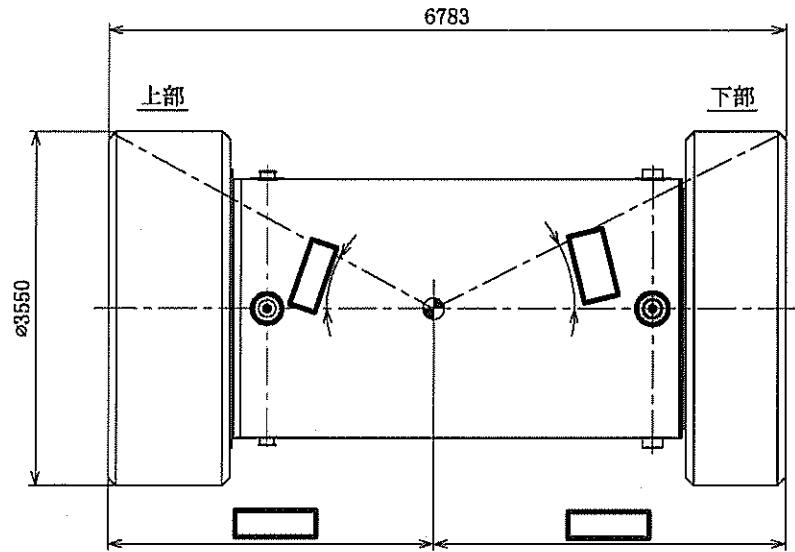
(注 18) P_o : 外圧、 P_a : 許容外圧

(ロ)-第 A.1 表 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (13/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件				解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷	適用数式又は要素	解析基準	
		種類	負荷係数	要素				
核分裂性輸送物に係る試験条件	一般の試験条件							
	1) 水噴霧 2) 0.3 m 自由落下 3) 積み重ね 4) 6 kg 棒貫通							前述の一般の試験条件に対する解析結果を引用して評価
	特別の試験条件							
	1) 9 m 落下 2) 1 m 落下 3) 火災試験 4) 0.9 m 浸漬	(ロ)-第 A.46 図						前述の 9 m 落下に対する設計条件及び解析方法と同一 前述の特別の試験条件に対する解析結果を引用して評価

A.2 重量及び重心

通常時における輸送物の質量は、(イ)章 C の 5. に記載したとおり 134.4 トン以下である。また、輸送物の重心の位置は、(ロ)-第 A.1 図に示すとおりである。



(単位 : mm)

(ロ)-第 A.1 図 重心の位置

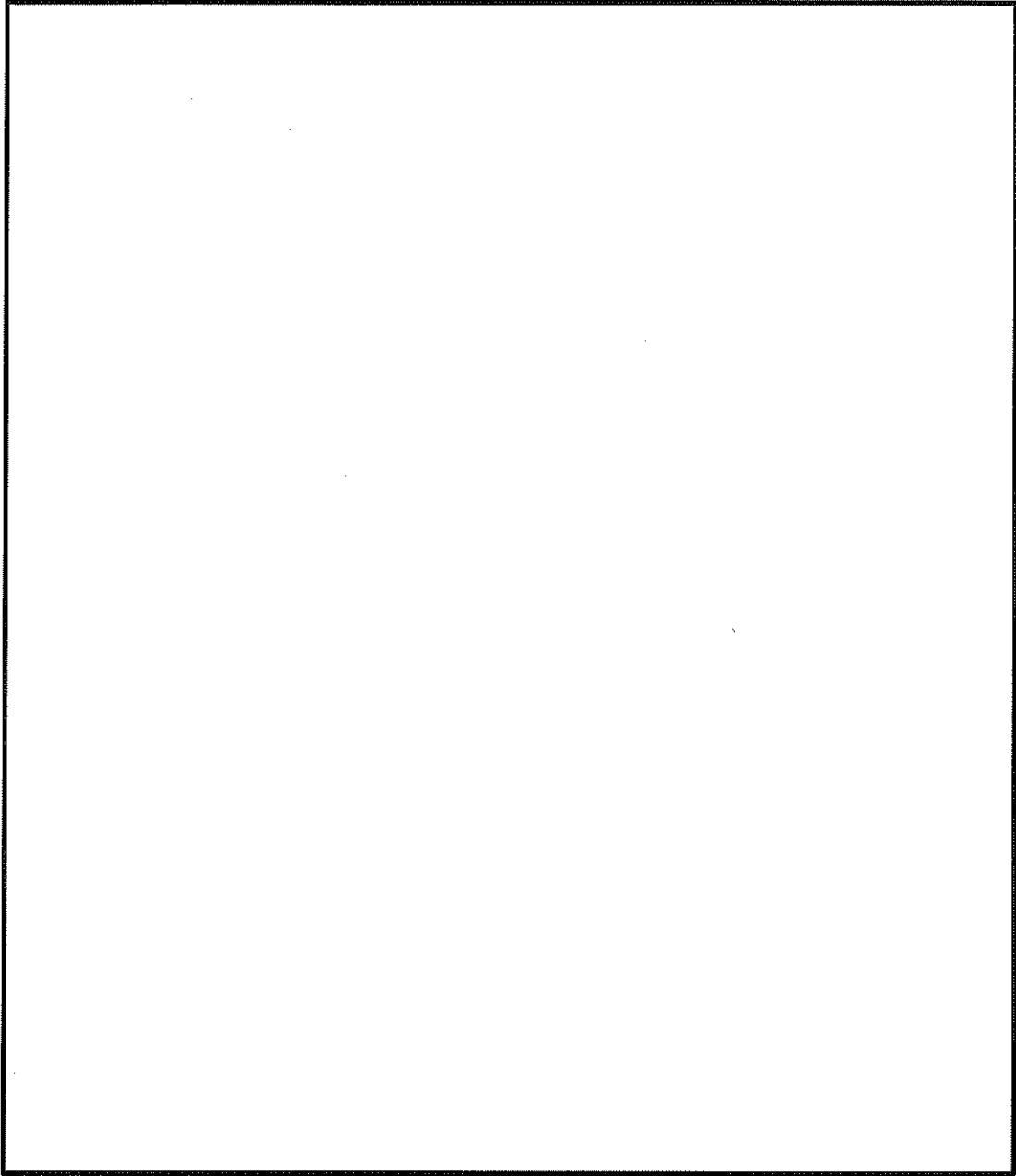
A.3 材料の機械的性質

解析に用いる材料の機械的性質を(□)-第 A.2 表に示す。ステンレス鋼、炭素鋼、析出硬化系ステンレス鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼、アルミニウム合金及びジルカロイの温度に対する機械的性質の変化を(□)-第 A.2 図～(□)-第 A.9 図に示す。これらは、主に金属キャスク構造規格¹⁾より引用した。なお、緩衝体の材料の機械的性質については、A.5.3 に示す。

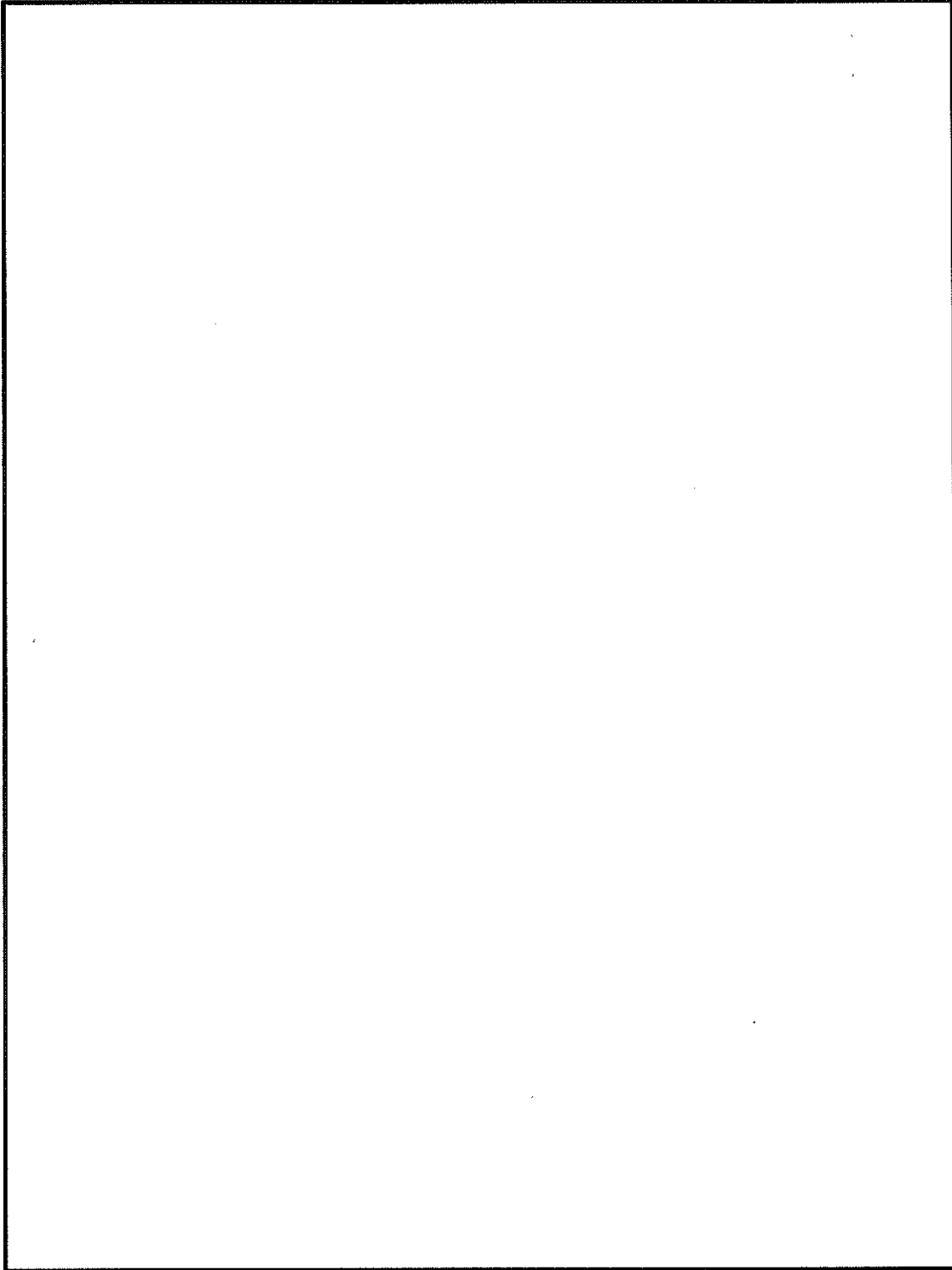
(□)-第 A.2 表 材料の機械的性質 (常温)

材料	設計引張強さ (MPa)	設計降伏点 (MPa)	熱膨張係数 (mm/mm°C)	ポアソン比	縦弾性係数 (MPa)
ステンレス鋼 ^{1), 2)} (<input type="text"/>)	<input type="text"/>			0.3	<input type="text"/>
ステンレス鋼 ^{1), 2)} (<input type="text"/>)				0.3	
炭素鋼 ^{1), 2)} (<input type="text"/>)				0.3	
析出硬化系ステンレス鋼 ^{1), 2)} (SUS630-H1150)	930	725	11.10×10^{-6}	0.3	1.96×10^5
ニッケルクロムモリブデン鋼 ^{1), 2)} (<input type="text"/>)	<input type="text"/>			0.3	<input type="text"/>
炭素鋼 ^{1), 2)} (<input type="text"/>)				0.3	
アルミニウム合金 ^(注1) (MB-A3004-H112)	153	56	22.61×10^{-6}	—	7.39×10^4
ジルカロイ-4 ³⁾	—	735	—	—	—

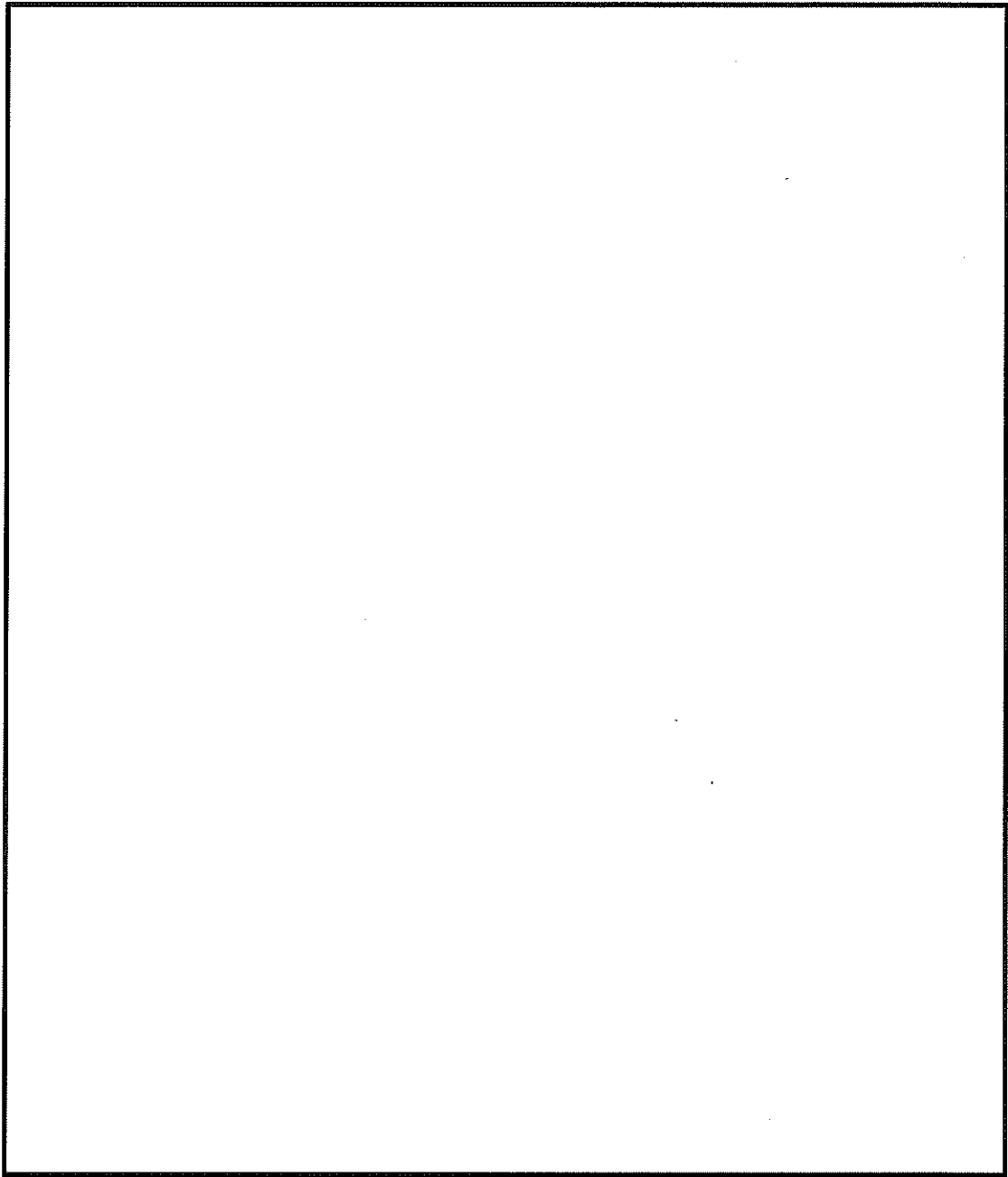
(注1) アルミニウム合金の機械的性質の詳細については付属書類 A.10.5 を参照。



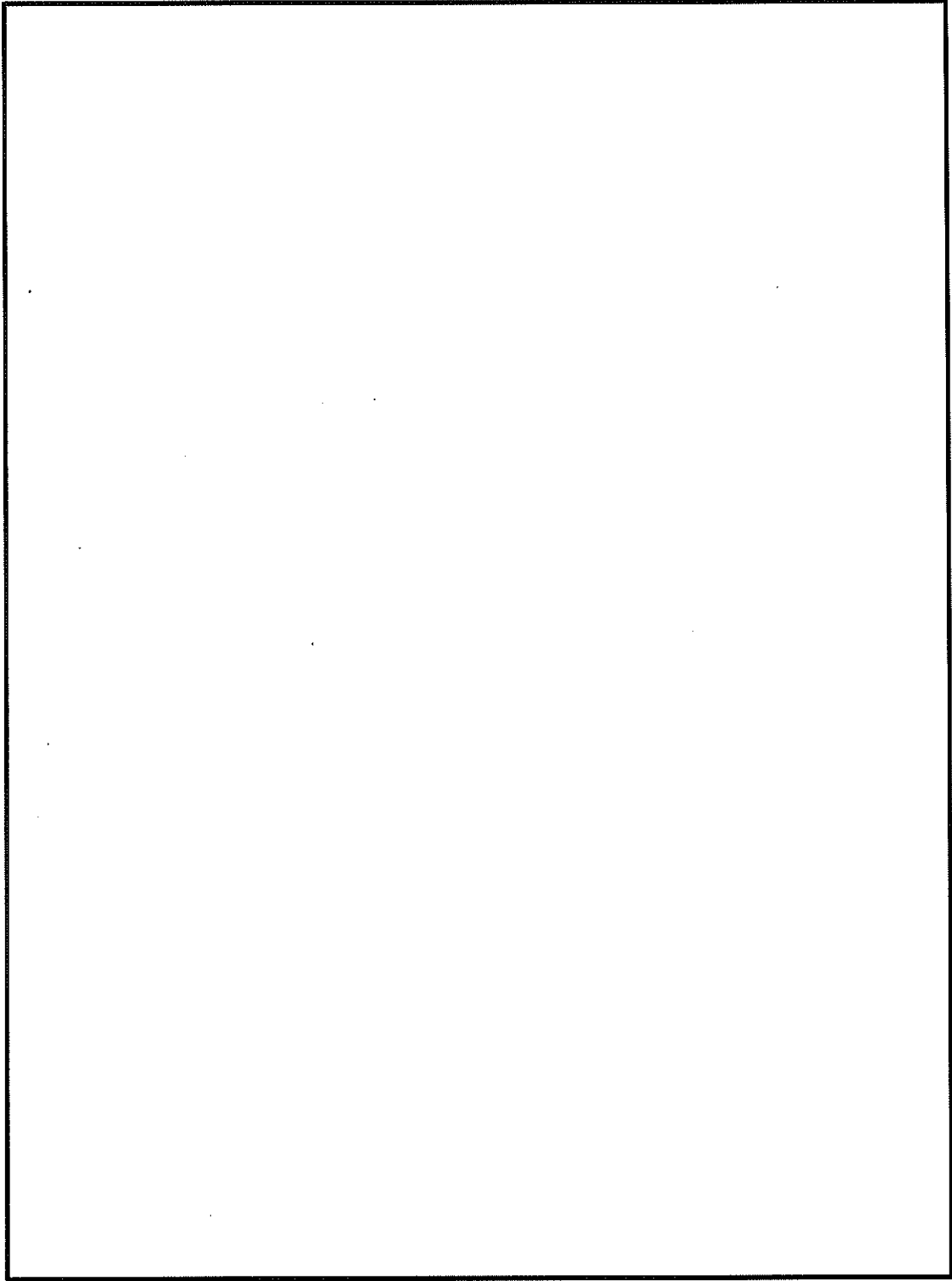
(□)-第 A. 2 図 ステンレス鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 2)}



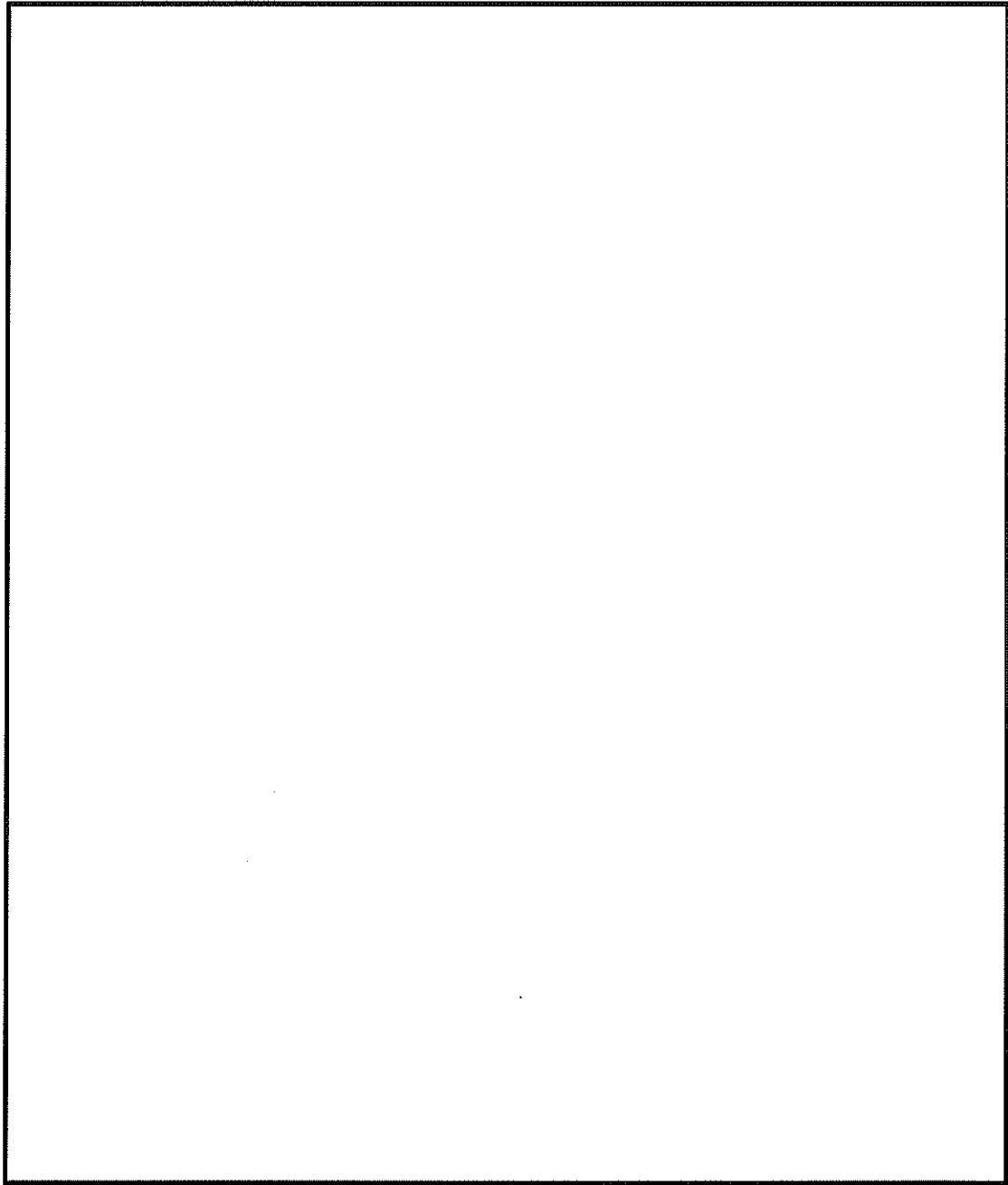
(p)-第 A. 2 図 ステンレス鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 2)}



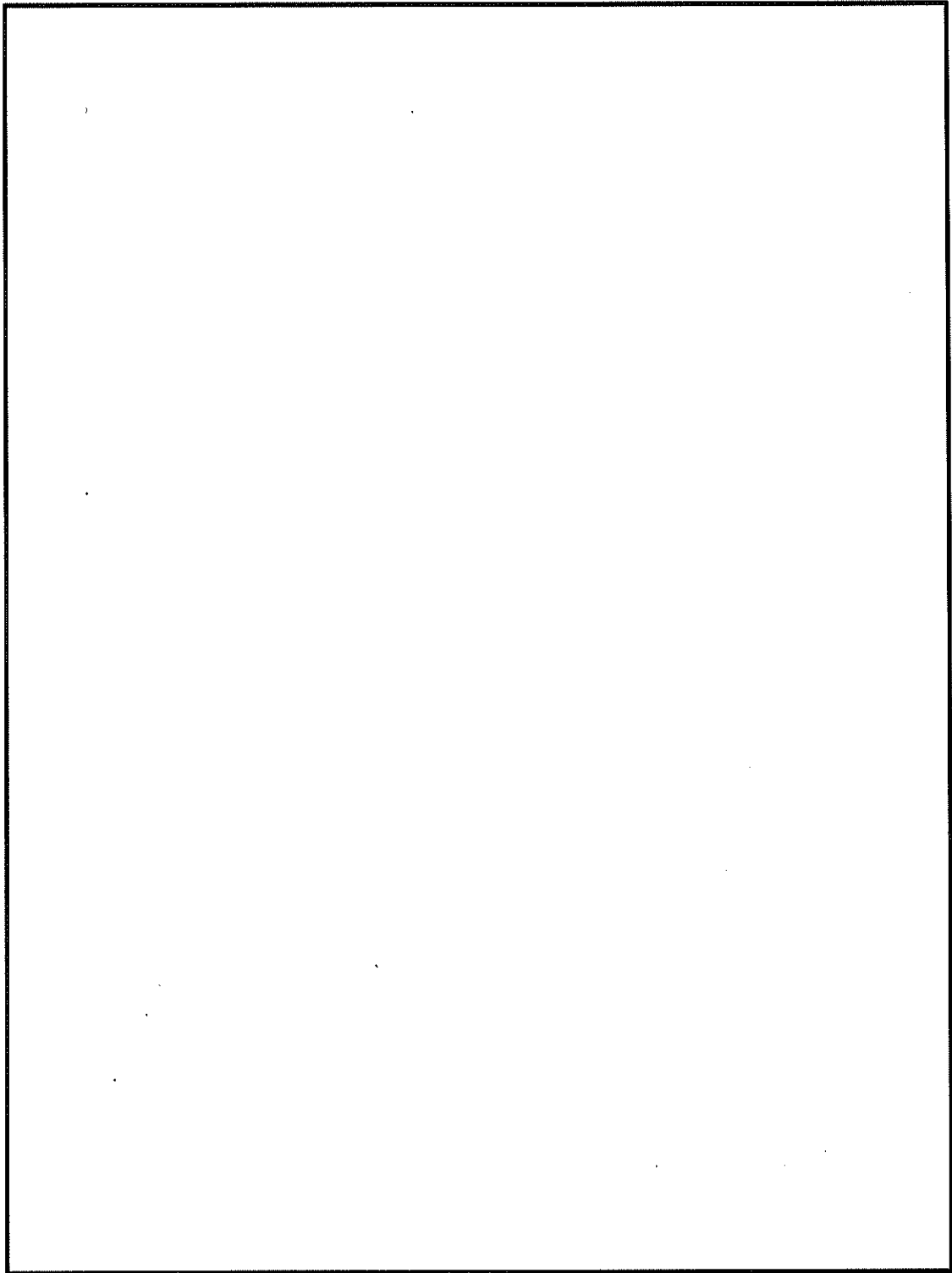
(p)-第 A.3 図 ステンレス鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 2)}



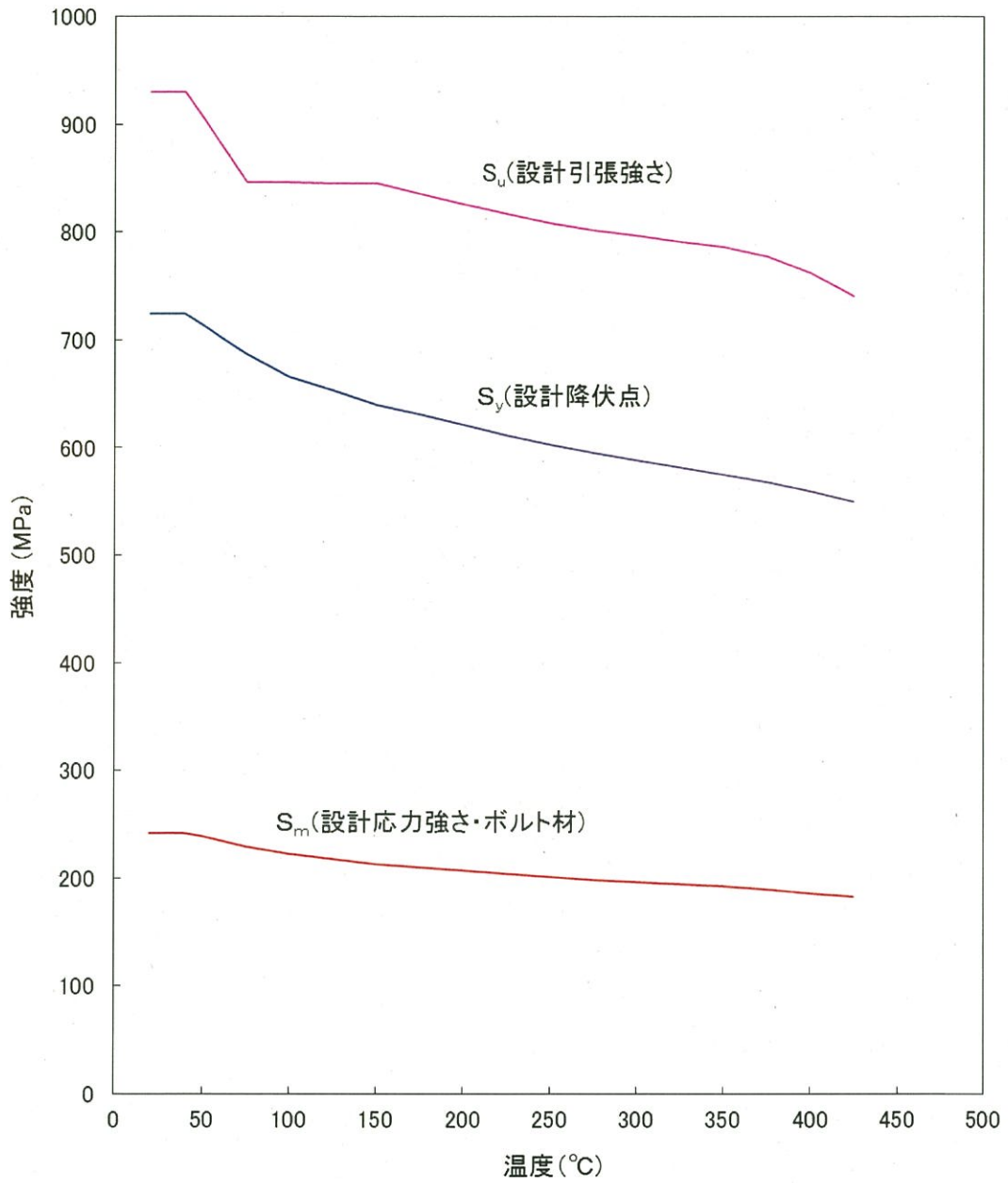
(□)-第 A. 3 図 ステンレス鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 2)}



(ア)-第 A. 4 図 炭素鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 2)}



(□)-第 A. 4 図 炭素鋼 () の温度に対する機械的性質の変化(2/2) ^{1), 2)}



(□)-第 A. 5 図 析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630-H1150) の
温度に対する機械的性質の変化(1/2) ^{1), 2)}