

添付書類 4

使用済燃料等の閉じ込めに関する説明書

目 次

1. 設計方針	1
2. HDP-69B(B)型の閉じ込め設計	2
2.1 閉じ込め機能に関する構造	2
2.2 閉じ込め評価	2
2.3 閉じ込め評価結果	3
3. 参考文献	5

別紙1 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価方法及び評価結果

別紙2 (一財)電力中央研究所の密封性能試験結果を適用することの妥当性

図表目次

図 2-1	HDP-69B(B)型の閉じ込め構造	6
図 2-2	HDP-69B(B)型のシール部詳細	7
図 2-3	金属ガスケット構造（ばね入りメタルCリング，眼鏡型）	8
図 2-4	金属キャスクの閉じ込め評価フロー	9
図 2-5	LMP の定数 $C=20$ における漏えい率と LMP	10
図 2-6	LMP の定数 $C=14$ における漏えい率と LMP	11
図 2-7	金属ガスケット（二次蓋）の長期密封性能試験結果（眼鏡型）	12

1. 設計方針

HDP-69B(B)型は、使用済燃料等を限定された区域に閉じ込めるため、本型式設計特定容器等を使用することができる使用済燃料貯蔵施設の範囲である金属キャスクの設計貯蔵期間 60 年を評価条件として、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を収納する空間を負圧に維持する設計とする。HDP-69B(B)型は、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、二次蓋及び一次蓋貫通孔シール部には、使用済燃料を収納する空間を負圧に維持するための性能を有する金属ガスケットを用いる。なお、一次蓋と二次蓋の間(以下「蓋間」という。)を正圧に維持することにより、使用済燃料を収納する空間を金属キャスク外部から隔離する設計とする。さらに、蓋間の圧力を測定することにより、閉じ込め機能について監視ができる設計とする。

また、本型式設計特定容器等を使用することができる使用済燃料貯蔵施設の範囲から、以下の項目を、HDP-69B(B)型の閉じ込め評価の条件とする。

- ・金属キャスクの設計貯蔵期間：60 年以下

2. HDP-69B(B)型の閉じ込め設計

2.1 閉じ込め機能に関する構造

HDP-69B(B)型の閉じ込め構造を図 2-1 に、シール部詳細を図 2-2 に、金属ガスケット構造（ばね入りメタルCリング，眼鏡型）を図 2-3 に示す。

HDP-69B(B)型は、使用済燃料等を限定された区域に閉じ込めるため、以下の配慮を行う。

- a. HDP-69B(B)型は、金属キャスク本体及び蓋部により使用済燃料を収納する空間を金属キャスク外部から隔離し、設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。
- b. HDP-69B(B)型は、蓋部を一次蓋，二次蓋の二重閉じ込め構造とし、その蓋間をあらかじめ正圧とし圧力障壁を形成することにより、放射性物質を金属キャスク内部に閉じ込める。また、使用済燃料を収納する空間に通じる貫通孔（ベント及びドレン用）のシール部を一次蓋に設ける。
- c. 蓋及び蓋貫通孔のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から金属ガスケットを用いる。なお、設計貯蔵期間を通じて金属ガスケットが使用済燃料を収納する空間を負圧に維持するための性能を有していることを確認できるよう、蓋及び蓋貫通孔のシール部にリークチェック孔を設ける。金属ガスケットの漏えい率は、設計貯蔵期間を通じて、蓋間の空間に充填されているヘリウムガスが蓋間の圧力を一定とした条件下で使用済燃料を収納する空間側に漏えいし、かつ、燃料被覆管からの核分裂生成ガスの放出を仮定しても、使用済燃料を収納する空間を負圧に維持できるように設定し、その漏えい率を満足していることを気密漏えい検査により確認する。さらに、その蓋間の圧力を測定するための圧力センサを取り付けることができる貫通孔を二次蓋に設けることにより閉じ込め機能を監視する。
- d. 一次蓋と二次蓋から成る閉じ込め機能が喪失した場合であっても、三次蓋を取り付けて輸送できる設計とする。

2.2 閉じ込め評価

金属キャスクの閉じ込め評価フローを図 2-4 に示す。HDP-69B(B)型の閉じ込め評価においては、以下の考え方にに基づき評価する。

- a. 閉じ込め評価では、設計貯蔵期間（60年）にわたって金属キャスク本体内部圧力が負圧を維持できる漏えい率（以下「基準漏えい率 Q_s 」という。）を求める。具体的な評価方法を別紙 1 に示す。
- b. 基準漏えい率 Q_s を求めるに当たっては、蓋間圧力は一定とし、蓋間空間のガスは金属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率の計算を行う。大気圧は、気象変化による圧力変動を考慮した値⁽¹⁾として 9.7×10^4 Pa とする。また、収納された使用済燃料の破損により発生したガスによる圧力上昇を考慮する。なお、使用済燃料の破損率は、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 %）

(1) (2), 及び日本の軽水炉における運転中の漏えい燃料発生率 (約 0.01 %以下) (1) を考慮し, 保守的な値として 0.1 %とする。

- c. 設計貯蔵期間後の金属キャスク本体内部の圧力は, 蓋間圧力と金属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金属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求められる。ここで, 漏えい率は, シールされる流体, シール部及び金属キャスク本体内部の温度, シール部の上流側と下流側の圧力等に依存する。
- d. 使用する金属ガスケットが設計貯蔵期間を通じて確保可能な漏えい率 (以下「金属ガスケットの設計漏えい率 Q_n 」という。) は HDP-69B(B) 型の閉じ込め評価の基準となる基準漏えい率 Q_s を満足できるものでなければならない。
- e. なお, 貯蔵開始前の気密漏えい検査で確認される漏えい率の判定基準 (以下「リークテスト判定基準 Q_t 」という。) は, 基準漏えい率 Q_s を下回るように設定する。

2.3 閉じ込め評価結果

使用環境を考慮して評価した結果, HDP-69B(B) 型の基準漏えい率 Q_s は 2.4×10^{-6} Pa \cdot m³/s となる。評価の詳細を別紙 1 に示す。

次に, 金属ガスケットの性能は, 金属キャスクのシール部が比較的高温下にあるため, 長期貯蔵中のクリープによる応力緩和を考慮した上で評価する必要がある。応力緩和による漏えい率への影響については, ラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) の考え方をを用いて評価する。ここで, (一財) 電力中央研究所で実施された長期密封性能試験結果においては LMP の定数 C を 20⁽³⁾ 又は 16⁽⁴⁾ とした場合が報告されている。一方, 原子力安全基盤機構における金属ガスケットの密封性能試験等では LMP の定数 C を 14⁽⁵⁾ とした場合が報告されている。LMP と漏えい率の関係は定数 C が 20 の場合は図 2-5⁽³⁾ に, 14 の場合は図 2-6⁽⁶⁾ に示すとおり整理されている。ここで LMP の定数 C を 20 及び 14 とした場合に対し, それぞれの金属ガスケットの LMP が約 11×10^3 及び 8.0×10^3 を超えないように設計すれば, 応力緩和を考慮しても初期の漏えい率が維持され, 設計貯蔵期間を通じて 10^{-10} Pa \cdot m³/s 以下を確保できることが示されている。

HDP-69B(B) 型の除熱評価の結果から, 金属ガスケット部の温度は 100 °C 以下である。この温度から設計貯蔵期間 (60 年間) に相当する LMP を算出すると LMP の定数 $C=20$ の場合は約 9.6×10^3 , $C=14$ の場合は約 7.4×10^3 となり, 設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率が維持されると判断される。また, 図 2-5 及び図 2-6 の LMP 計算式に示すとおり LMP の算出において定数 C に関しては単調増加し, $C=16$ の場合は $C=14$ と $C=20$ に包絡される。

また, 図 2-7 に示す (一財) 電力中央研究所で実施された実規模の金属キャスクの蓋部モデルによる長期密封性能試験結果において, 試験開始から 19 年以上 (平成 2 年 10 月から平成 22 年 1 月) が経過した二次蓋閉じ込め部の漏えい率に変化はなく, 金属ガ

ケットは試験開始時と同等の閉じ込め性能を保持することが確認されている⁽⁷⁾。なお、(一財)電力中央研究所の長期密封性能試験結果を適用することの妥当性は別紙2に示すとおりである。

さらに、日本原子力発電株式会社東海第二発電所で行われた乾式貯蔵容器の調査において、約7年間経過した金属ガスケットの一次蓋シール部の漏えい率は、貯蔵初期と同程度(約 10^{-10} Pa \cdot m³/s)に維持されているとの知見が得られている⁽⁸⁾。

以上より、HDP-69B(B)型で使用する金属ガスケットの設計漏えい率 Q_n は、使用環境を考慮しても基準漏えい率 Q_s (2.4×10^{-6} Pa \cdot m³/s)を満足する。

3. 参考文献

- (1) (一社)日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010(AESJ-SC-F002:2010)」(2010年7月)
- (2) M. A. McKinnon, A. L. Doherty, “Spent Nuclear Fuel Integrity During Dry Storage - Performance Tests and Demonstrations”, PNNL-11576 (1997)
- (3) 加藤治, 伊藤千浩, 「電力中央研究所報告 使用済燃料貯蔵容器用ガasketの長期密封特性」, (一財)電力中央研究所, U92009 (平成4年7月)
- (4) (一財)電力中央研究所, 「平成23年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備長期健全性等試験) 報告書」(平成24年3月)
- (5) (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」(平成16年6月)
- (6) (一財)電力中央研究所, 「使用済核燃料貯蔵の基礎」, 株式会社ERC出版(2014年4月20日)
- (7) (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) 報告書」(2010年3月)
- (8) 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」(平成21年6月25日)

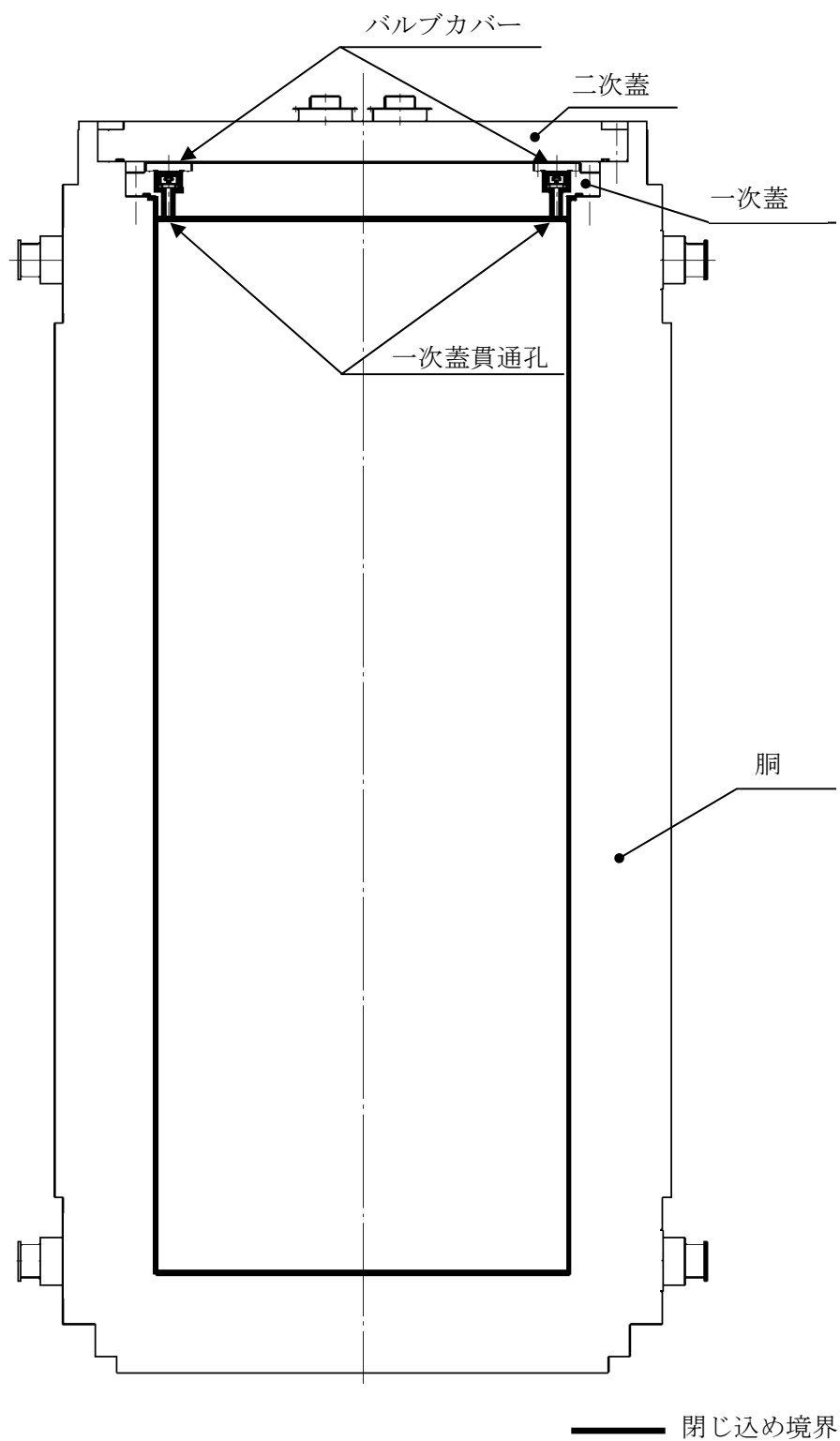


図 2-1 HDP-69B(B) 型の閉じ込め構造

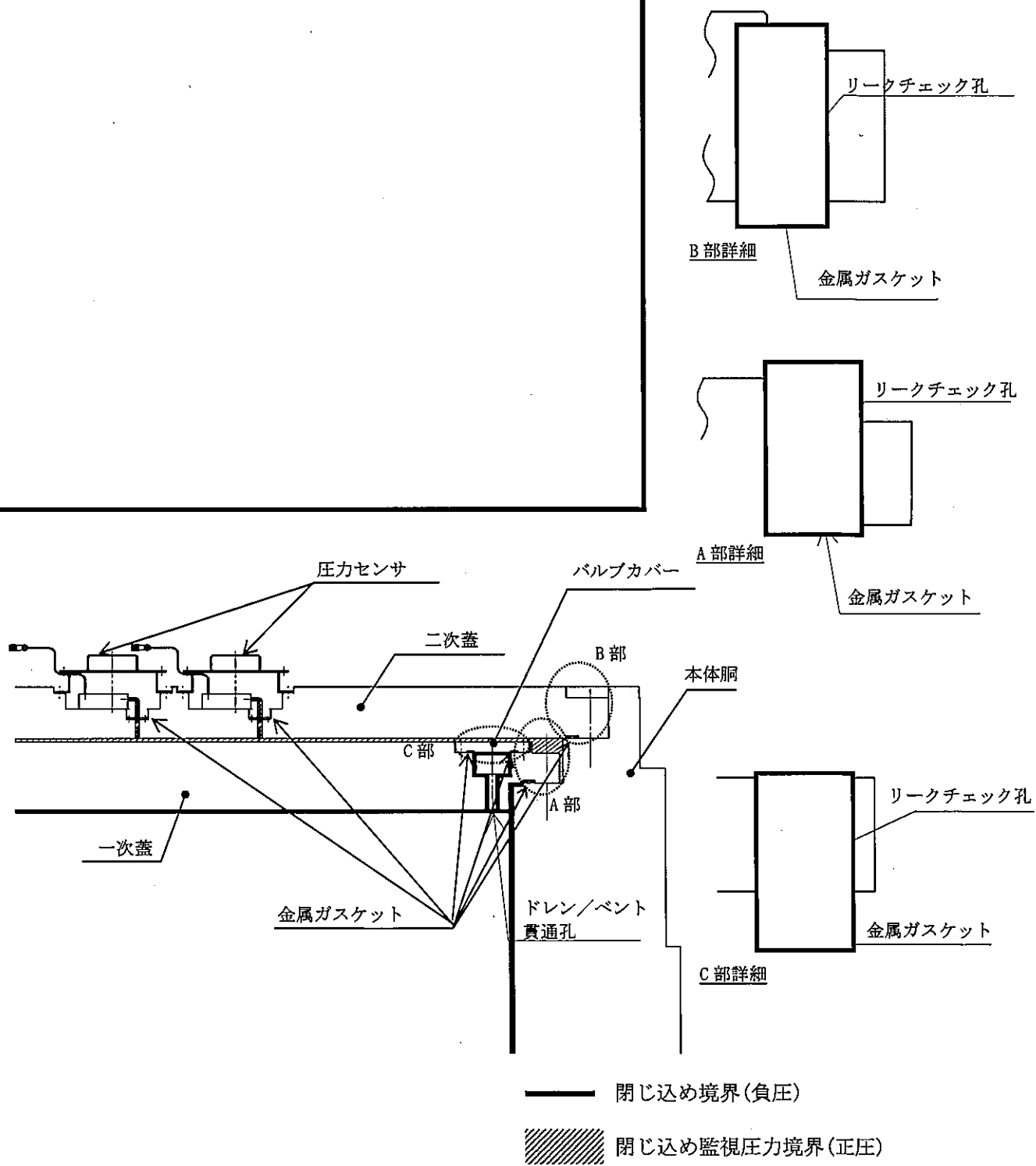
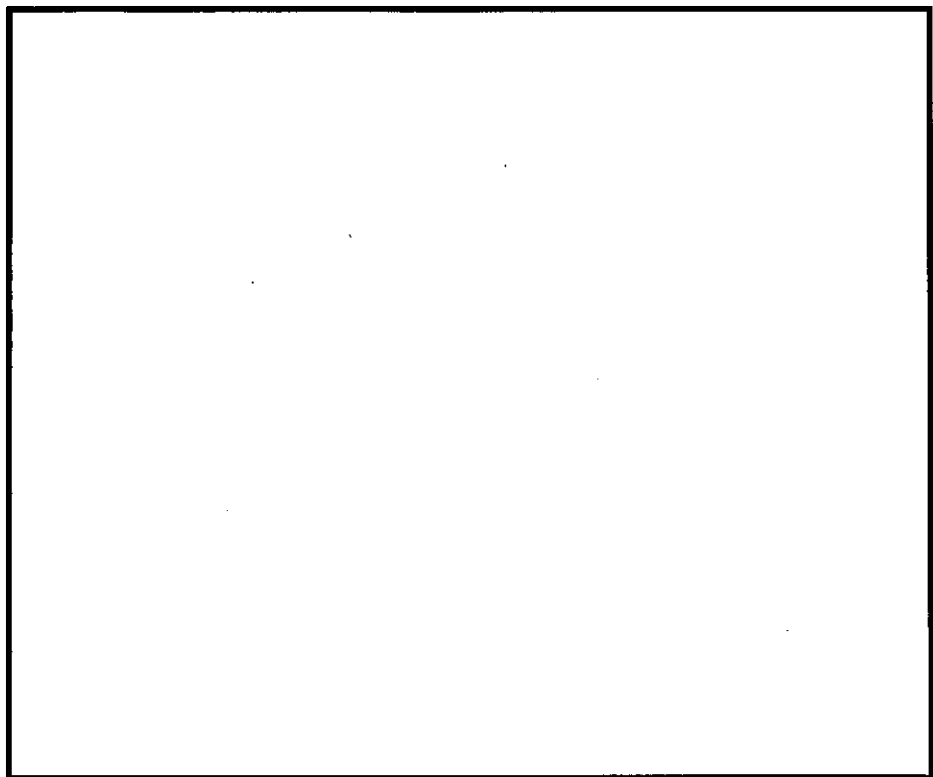
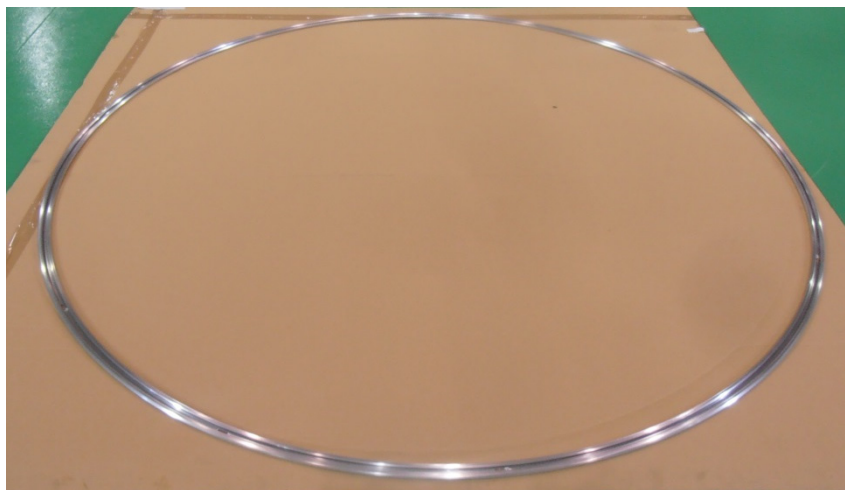
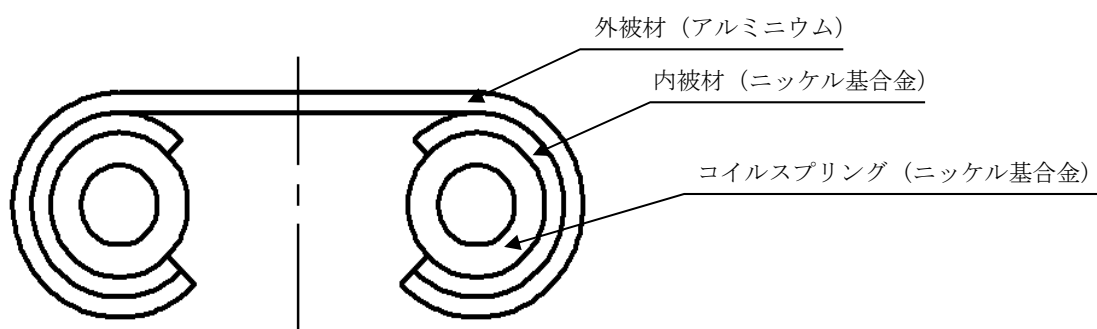


図 2-2 HDP-69B(B)型のシール部詳細



(a) 外観



(b) 内部構造図

図 2-3 金属ガスケット構造 (ばね入りメタルCリング, 眼鏡型)

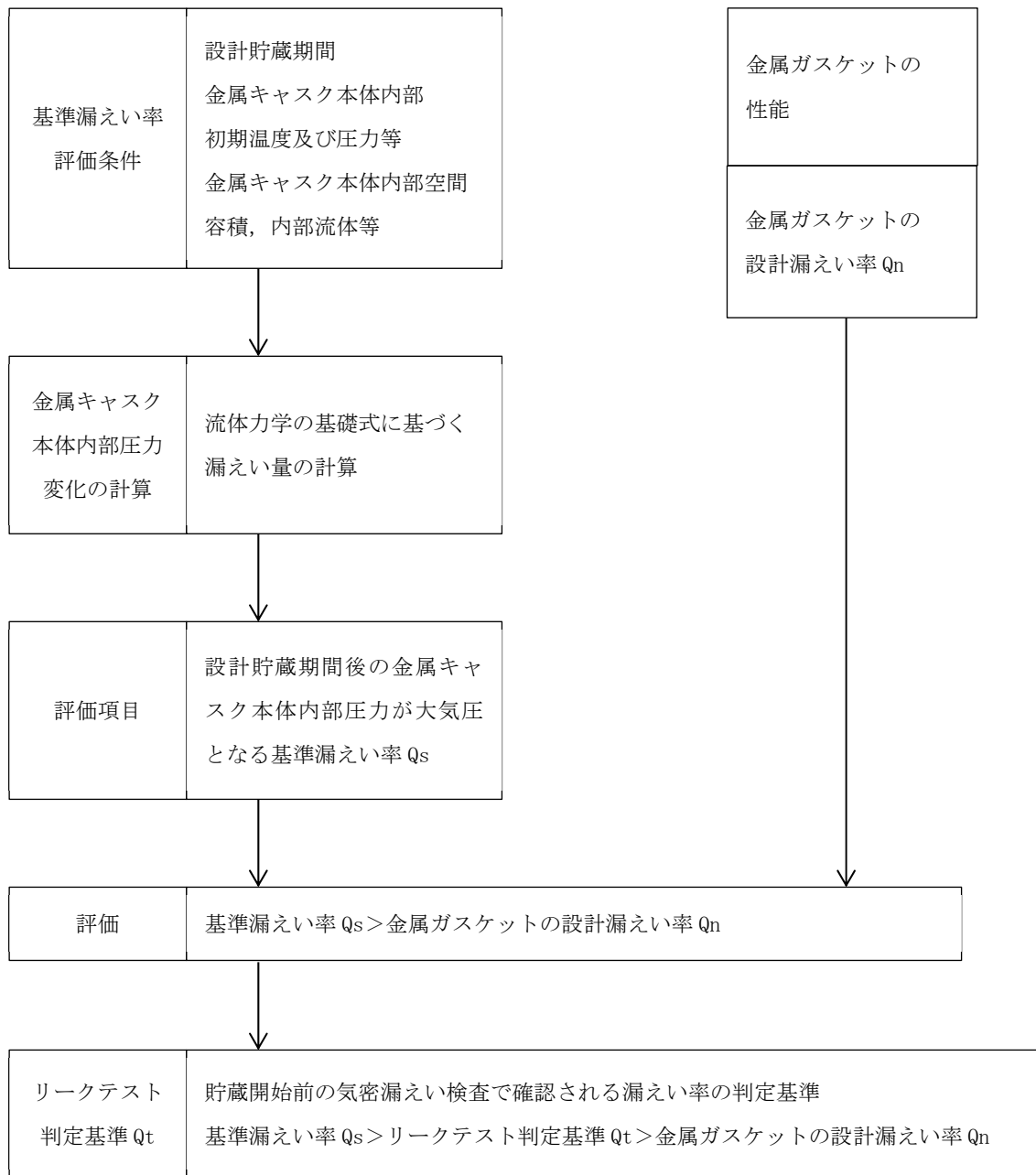
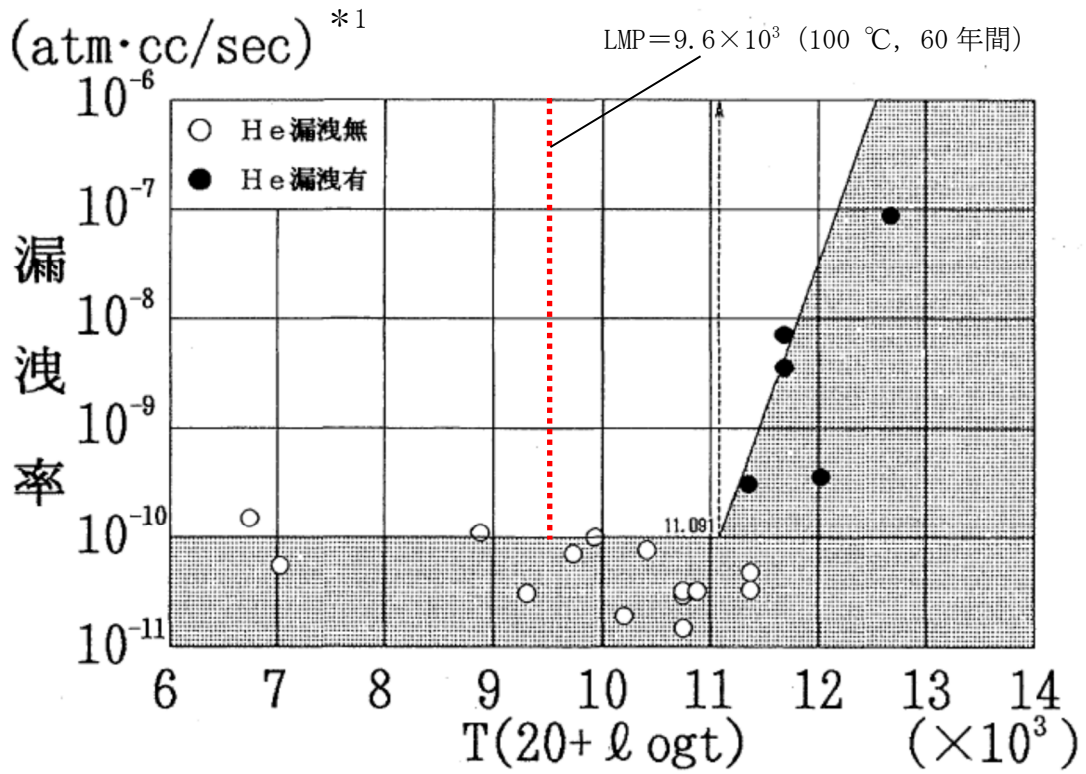


図 2-4 金属キャスクの閉じ込め評価フロー



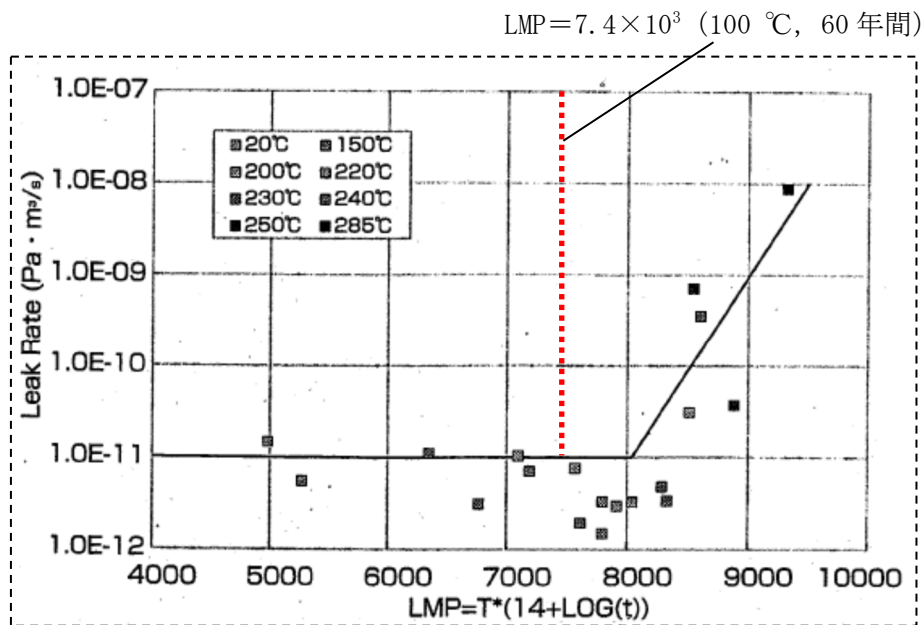
注記*1 : 1 atm·cc/sec \doteq 1×10^{-1} Pa·m³/s

$$LMP = T \cdot (20 + \lg t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

図 2-5 LMP の定数 C=20 における漏えい率と LMP⁽³⁾



$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

図 2-6 LMP の定数 C=14 における漏えい率と LMP⁽⁶⁾

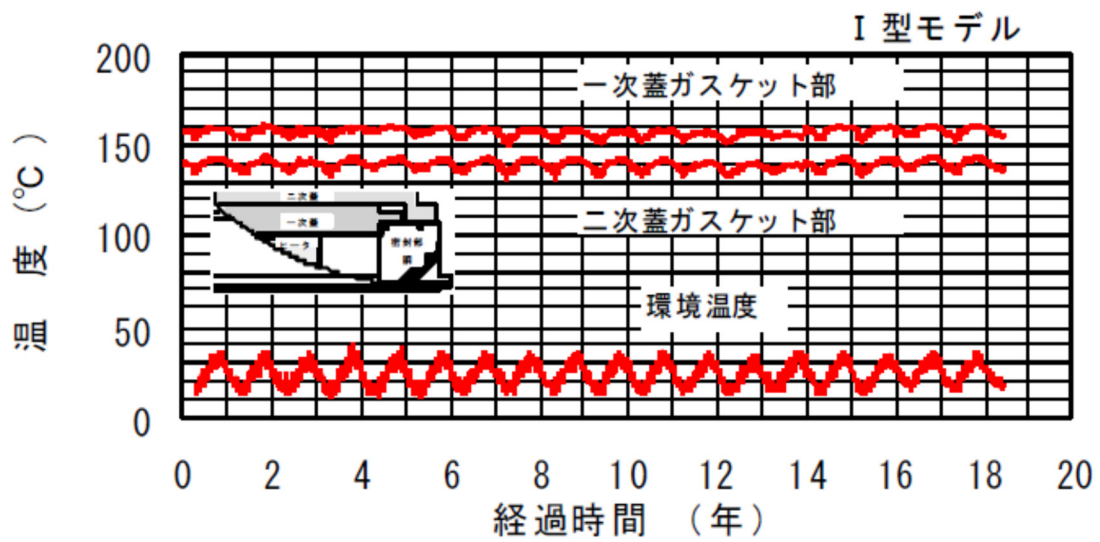
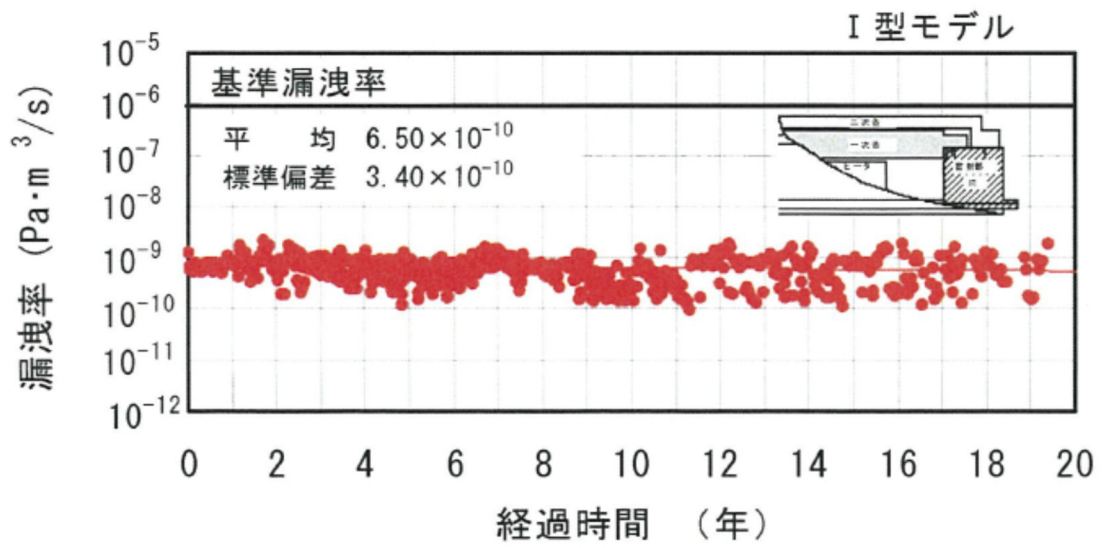


図 2-7 金属ガスケット（二次蓋）の長期密封性能試験結果（眼鏡型）⁽⁷⁾

基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価方法及び評価結果

1. 評価方法

HDP-69B(B)型の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t の計算フローを別紙 1-1 図に示す。また、漏えい率計算の概要を別紙 1-2 図に示す。

HDP-69B(B)型の閉じ込め評価の基準となる基準漏えい率 Q_s は、設計貯蔵期間（60年）経過後に金属キャスク本体内部の負圧が維持できるシール部の標準状態（大気圧，25℃）での漏えい率である。

基準漏えい率 Q_s は、貯蔵時における HDP-69B(B)型の温度、本体内部の空間容積及び圧力等を基に、金属キャスク本体内部の圧力が設計貯蔵期間経過後に大気圧となるように求めた漏えい孔径 D_0 を用い、標準状態における漏えい率として算出される。HDP-69B(B)型の蓋間から容器内への漏えい流路は、別紙 1-2 図に示すように、一次蓋の金属ガスケットからの流路と、一次蓋貫通孔のバルブカバー（二か所）の金属ガスケットからの流路がある。この二つの漏えい流路は金属ガスケットの仕様が異なるため、それぞれの金属ガスケット仕様を用いて個別に評価を行い、リークテスト判定基準 Q_t を適切に設定する。

基準漏えい率 Q_s の計算過程を以下に示す。

漏えい率は、日本原子力学会標準⁽¹⁾に基づき、以下の式①、②から求めている。時間が dt だけ変化する間に金属キャスク本体内部の圧力が dPd だけ変化する漏えい率を Q とすれば、金属キャスク本体内部空間容積は一定であることから、金属キャスク本体内部圧力の時間変化は、温度の違いを考慮してボイル・シャルルの法則により次式で与えられる。

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Q}{Vd} \cdot \frac{Td}{T} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

ここで、

dPd : 金属キャスク本体内部圧力の変化 (Pa)

Td : 金属キャスク本体内部代表温度 (K)

Q : 金属キャスク本体内部圧力 Pd のときのシール部の漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

T : シール部の代表温度 (=漏えいガスの温度) (K)

Vd : 金属キャスク本体内部空間容積 (m^3)

dt : 時間の変化 (s)

また、漏えい率 Q は以下のクヌッセンの式で求められる。

$$\begin{aligned}
 Q &= L \cdot Pa \\
 L &= (Fe + Fm) \cdot (Pu - Pd) \\
 Fe &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\
 Fm &= \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot Pa}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} Q \\ L \\ Fe \\ Fm \end{aligned}} \right\} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

ここで、

- Q : 漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
- L : 流れの平均圧力 Pa における体積漏えい率 (m^3/s)
- Fe : 連続流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- Fm : 自由分子流のコンダクタンス係数 ($\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)
- Pu : 上流側の圧力 (Pa)
- Pd : 下流側の圧力 (Pa)
- D_0 : 漏えい孔径 (m)
- a : 漏えい孔長 (m)
- Pa : 流れの平均圧力 (Pa), $Pa = (Pu + Pd)/2$
- μ : 漏えいガスの粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- T : シール部の代表温度 (=漏えいガスの温度) (K)
- M : 漏えいガスの分子量 (kg/mol)
- R_0 : 気体定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

式②を式①に代入すると、

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Td}{Vd \cdot T} \times \left\{ \frac{1}{2} Fe \cdot (Pu^2 - Pd^2) + Fm \cdot Pa \cdot (Pu - Pd) \right\} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

蓋間圧力 (上流側の圧力) Pu (Pa) を一定として、式③を時間 t で積分すれば、ある時間 t における金属キャスク本体内部圧力 (下流側の圧力) $Pd = Pd(t)$ が得られる。つまり、

Pd(t) =

$$\frac{Pu \cdot \{Fe' + (Pu + Pd_0) + Fm'\} - (Fe' \cdot Pu + Fm) \cdot (Pu - Pd_0) \cdot \exp\left\{-\frac{Td \cdot (2Fe' \cdot Pu + Fm)}{Vd \cdot T} \cdot t\right\}}{Fe' \cdot (Pu + Pd_0) + Fm' + Fe' \cdot (Pu - Pd_0) \cdot \exp\left\{-\frac{Td \cdot (2Fe' \cdot Pu + Fm)}{Vd \cdot T} \cdot t\right\}} \dots \textcircled{4}$$

ここで、

$$Fe' = \frac{1}{2} Fe = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \dots \textcircled{5}$$

$$Fm' = Fm \cdot Pa = \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot Pa} \times Pa = \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a} \dots \textcircled{6}$$

である。

上記を基に、一次蓋シール部で漏えいする場合の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t は、以下のように計算される。

式④に、HDP-69B(B)型の一次蓋シール部について、

T_d : 金属キャスク内部代表温度 (K) (535.15 K (262 °C) : 評価値 (内部ガス最高温度))

T : シール部の代表温度 (K) (250.75 K (-22.4 °C) : 設計値 (最低気温))

V_d : 金属キャスク本体内部空間容積 (m^3) (m^3 : 設計値)

P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa) (4.1×10^5 Pa : 設計値 (初期圧力一定))

P_{d_0} : 下流側 (金属キャスク本体内部) の初期圧力 (Pa) (8.0×10^4 Pa : 設計値)

a : 一次蓋シール部の漏えい孔長 (m) (m),

$$a = 2 \times \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2} \text{ (別紙1-3 図参照)}$$

D : 一次蓋金属ガスケットの断面径 (mm) (10 mm : 設計値)

H : 一次蓋の金属ガスケット溝深さ (mm) (mm : 設計値)

μ : Heの粘性係数 (Pa·s) (1.77×10^{-5} Pa·s : 文献値⁽²⁾ (-22.4 °Cの値))

M : Heの分子量 (kg/mol) (4.002602×10^{-3} kg/mol : 文献値⁽³⁾)

R_0 : 気体定数 (J/(mol·K)) (8.314472 J/(mol·K) : 文献値⁽³⁾)

t : 設計貯蔵期間 (60年 = $60 \times 365.25 \times 24 \times 60 \times 60$ s = 1.893456×10^9 s)

を代入して、金属キャスク本体内部圧力 P_d が 0.1 % の燃料破損⁽¹⁾ によるガス放出を想定した圧力上昇を考慮しても負圧を維持できる圧力となる漏えい孔径を繰り返し計算により求める。

ここで、0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇 ΔP は、次のとおり求められる。

$$\Delta P = P_{He} + P_{FP} \dots\dots\dots ⑦$$

ここで、

P_{He} : 使用済燃料内の初期封入ガス分圧 (Pa)

P_{FP} : FPガス分圧 (Pa)

使用済燃料内の初期封入ガス分圧 P_{He} 、FPガス分圧 P_{FP} は次のとおり求められる。

$$P_{He} = P_0 \times \frac{V_P}{V_d + V_P} \times \frac{T_d}{T_0} \dots\dots\dots ⑧$$

$$P_{FP} = \frac{m \times R_0 \times T_d}{V_d} \dots\dots\dots ⑨$$

ここで、

新型8×8燃料、新型8×8ジルコニウムライナ燃料を例にすると、

P_0 : 燃料棒初期内圧 (Pa) (Pa : 設計値)

V_P : 放出ガス体積 (m^3)

$$V_P = V_{P0} \times n \times N \times \alpha$$

V_{P0} : 燃料棒プレナム体積 (m^3 /本) (m^3 /本 : 設計値)

n : 燃料集合体1体当たりの燃料棒本数 (本) (62本 : 設計値)

N : 金属キャスク1基当たりの燃料集合体収納体数 (体) (69体 : 設計値)

α : 燃料棒破損率 (-) (0.001 : 原子力学会標準⁽¹⁾)

V_d : 金属キャスク本体内部空間容積 (m^3) (m^3 : 設計値)

T_d : 金属キャスク内部代表温度 (K)
(535.15 K (262 °C) : 評価値 (内部ガス最高温度))

T_0 : 燃料棒初期封入時温度 (K) (K (°C) : 設計値)

m : 放出FPガス量 (mol)

$$m = M_g \times N \times \alpha \times \beta$$

M_g : ガス生成量 (mol/体) (mol/体 : 燃焼計算コードORIGEN2による評価値)

β : ガス放出率 (-) (0.3 : 原子力学会標準⁽⁴⁾)

R_0 : 気体定数 (J/(mol·K)) (8.314472 J/(mol·K) : 文献値⁽³⁾)

0.1 %の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇は約 kPa (Pa を丸め) となる。同様に、高燃焼度 8×8 燃料で 0.1 %の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇を求めると約 kPa (Pa を丸め) となる。

漏えい孔径を繰り返し計算により求めると、漏えい孔径 D_0 は以下のとおりとなる。

$$Pd(t=60 \text{ 年}) = 9.7 \times 10^4 - \text{} \times 10^3 \text{ Pa} = \text{} \times 10^4 \text{ Pa のとき, } D_0 = \text{} \text{ m}$$

また、リークテスト判定基準 Q_t としては、0.1 %の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇及び設計貯蔵期間経過後にさらに蓋間空間ガス全量の金属キャスク本体内部への流入を仮定した圧力上昇を考慮した許容圧力 (MPa) においても負圧を維持できる値とする。基準漏えい率と同様に計算すると、以下のようになる。

$$Pd(t=60 \text{ 年}) = \text{} \text{ Pa のとき, 漏えい孔径: } D_0 = \text{} \text{ m}$$

次に、標準大気圧における基準漏えい率 Q_s とリークテスト判定基準 Q_t を算出する。標準状態の算出条件を別紙 1-1 表に示す。

基準漏えい率 Q_s は、先に得られた漏えい孔径 $D_0 = \text{} \text{ m}$ の漏えい孔に対して、別紙 1-1 表の条件をクヌッセンの式 (式②) に代入することで求められる。

また、リークテスト判定基準 Q_t も同様に、漏えい孔径 $D_0 = \text{} \text{ m}$ の漏えい孔に対して、別紙 1-1 表の条件をクヌッセンの式 (式②) に代入することで求められる。

一方、バルブカバーシール部で漏えいする場合についても、金属ガスケットの断面径 $D = 5.6 \text{ mm}$ 及び金属ガスケット溝深さ $H = \text{} \text{ mm}$ を用いて上記と同じ計算を実施することによって基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t が評価される。

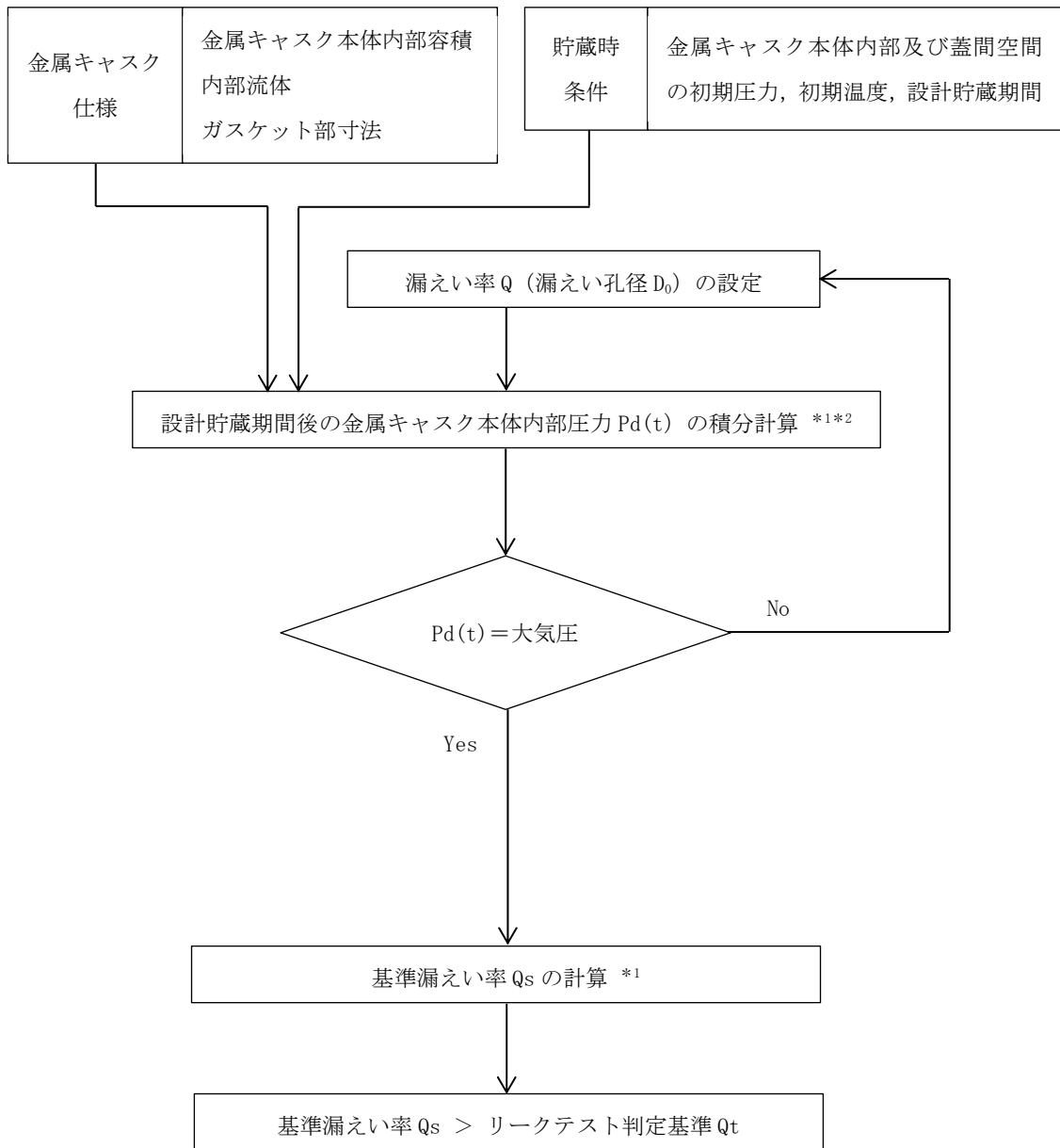
2. 評価結果

別紙 1-2 表に、一次蓋シール部で漏えいした場合とバルブカバーシール部で漏えいした場合の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t の比較を示す。別紙 1-2 表に示すとおり、一次蓋シール部で漏えいした場合とバルブカバーシール部で漏えいした場合の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t の評価結果は、同程度である。

したがって、HDP-69B(B)型の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t としては、より値の小さい一次蓋シール部で漏えいした場合を代表として、それぞれ $Q_s = 2.4 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q_t = 1.6 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ とする。また、これにより、気密漏えい検査においては、三か所の漏えい率の合計がリークテスト判定基準 Q_t を超えないように、それぞれの判定基準を設定することができる。

3. 参考文献

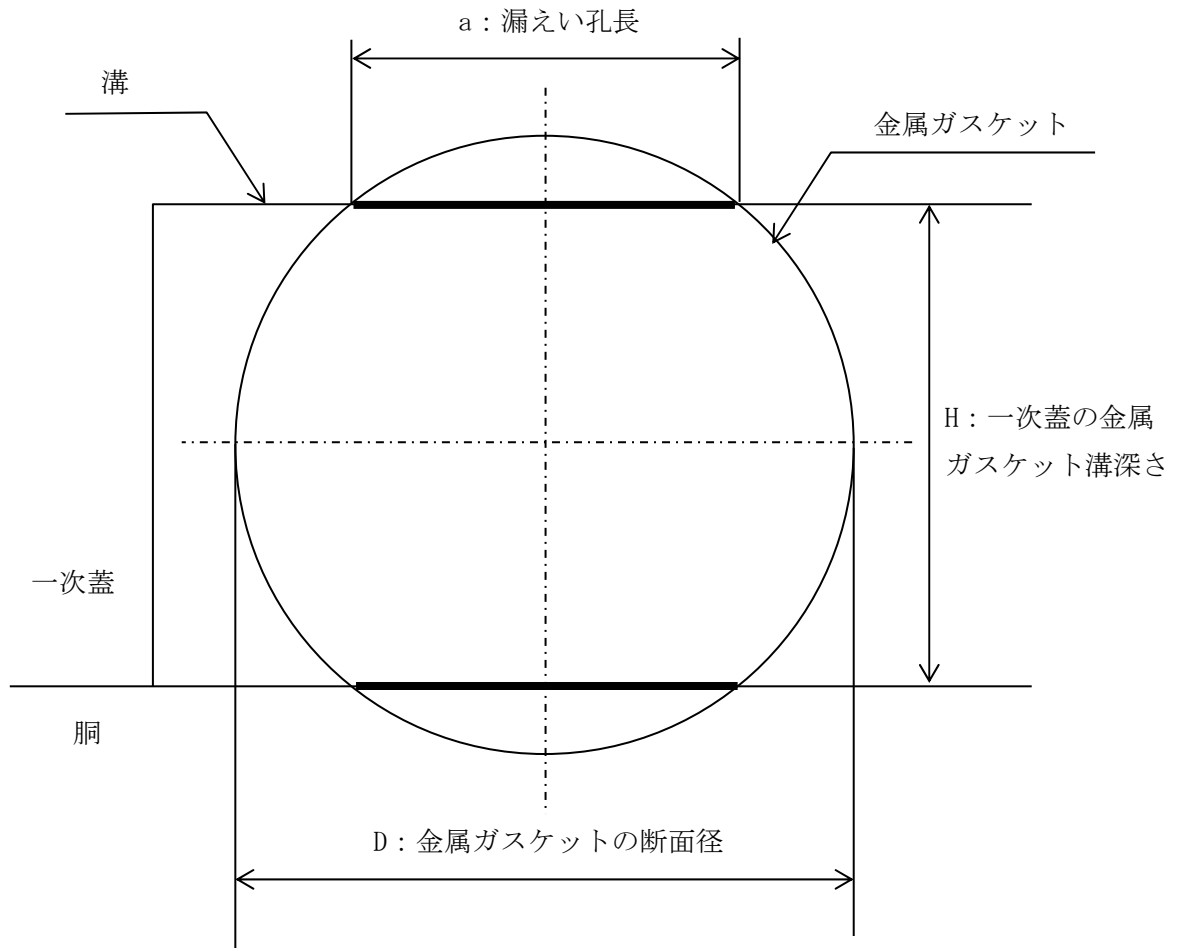
- (1) (一社)日本原子力学会,「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010(AESJ-SC-F002:2010)」(2010年7月)
- (2) (一社)日本機械学会,「伝熱工学資料 改訂第4版」
- (3) 「国立天文台編 理科年表 平成19年」,丸善(株)(2006)
- (4) (一社)日本原子力学会,「日本原子力学会標準 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準:2013」(AESJ-SC-F006:2013)(2014年11月)



注記*1：クヌッセンの式に基づく計算

*2：ボイル・シャルルの法則に基づく計算

別紙 1-1 図 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の計算フロー



別紙 1-3 図 漏えい孔長

別紙1-1表 標準状態の算出条件

項目	評価条件	備考
圧力	上流側圧力： 0.101 MPa 下流側圧力： 0 MPa	大気圧
温度	25 °C	
内部流体	ヘリウム 分子量： 4.002602×10^{-3} kg/mol 粘性係数： 1.98×10^{-5} Pa·s (25 °C)	

別紙1-2表 一次蓋シール部で漏えいした場合とバルブカバーシール部で漏えいした場合の漏えい率評価結果の比較

	一次蓋シール部で漏えいした場合	バルブカバーシール部で漏えいした場合
金属ガスケットの断面径	10 mm	5.6 mm
金属ガスケット溝深さ	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> mm
漏えい孔長	<input type="text"/> m	<input type="text"/> m
基準漏えい率 Q_s における漏えい孔径	<input type="text"/> m	<input type="text"/> m
基準漏えい率 Q_s	$2.4 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	$2.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
リークテスト判定基準 Q_t における漏えい孔径	<input type="text"/> m	<input type="text"/> m
リークテスト判定基準 Q_t	$1.6 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	$1.7 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

(一財) 電力中央研究所の密封性能試験結果を適用することの妥当性

1. 妥当性の説明

HDP-69B(B)型の閉じ込め評価では、図 2-5 に示す (一財) 電力中央研究所で実施された長期密封性能試験結果⁽¹⁾を基に、HDP-69B(B)型に使用する金属ガスケットは長期貯蔵中における応力緩和による漏えい率への影響を考慮しても、設計貯蔵期間 (60 年) を通じて初期の漏えい率が維持できることを示している。

また、上記に加え、図 2-7 に示す (一財) 電力中央研究所で実施された実規模の金属キャスク蓋部モデルによる長期密封性能試験結果⁽²⁾からも金属ガスケットの漏えい率が維持できることを補足的に説明している。

これらの試験で使用した金属ガスケットと HDP-69B(B)型の金属ガスケットの仕様比較及び仕様相違点に対する評価を別紙 2-1 表に示す。別紙 2-1 表に示すとおり、仕様の一部 (断面径及び内径) について相違点はあるが、HDP-69B(B)型の閉じ込め評価において、(一財) 電力中央研究所の試験結果を適用することは妥当である。

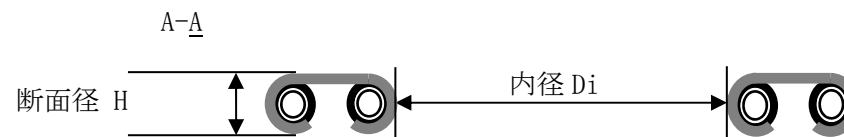
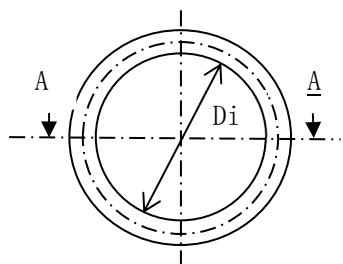
2. 参考文献

- (1) 加藤治, 伊藤千浩, 「電力中央研究所報告 使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (一財)電力中央研究所, U92009 (平成4年7月)
- (2) (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) 報告書」(2010年3月)
- (3) (一財)原子力発電技術機構, 「平成12年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」(平成13年3月)
- (4) 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)

別紙 2-1 表 金属ガスケットの仕様比較及び仕様相違点に対する評価

項目	(一財) 電力中央研究所の 長期密封性能試験		HDP-69B(B)型	仕様相違点に対する評価	
	要素試験 ⁽¹⁾	実規模試験 ⁽²⁾			
タイプ	ばね入りメタルCリング			相違なし	
材質	外被材：アルミニウム 内被材：ニッケル基合金 コイルスプリング：ニッケル基合金			相違なし	
H：断面径 (mm)	一次蓋	5.5	6.1 * ¹	10	(一財) 原子力発電技術機構で実施された金属ガスケットの密封性能試験において、断面径が大きいものほど高いLMP値まで漏れにくい傾向があることが報告されている ⁽³⁾ 。 HDP-69B(B)型の金属ガスケット断面径は(一財)電力中央研究所の試験と同等であり、HDP-69B(B)型の金属ガスケットの閉じ込め性能は(一財)電力中央研究所の試験で用いられたガスケットと同等である。
	バルブ カバー		—		
Di：内径 (mm)	一次蓋	176	1767 * ¹	～1700 程度	金属ガスケットの周長の違いによるクリープ変形の閉じ込め性能への影響は無いと評価されている ⁽⁴⁾ 。したがって、内径の違いは、初期の漏えい率を長期間維持できるかという観点では影響は無い。
	バルブ カバー		—	～100 程度	

注記*1：実規模試験の断面径（H）及び内径（Di）は、漏えい率測定を実施した二次蓋の値を示す。



添付書類 5

使用済燃料等の除熱に関する説明書

目 次

1. 設計方針	1
2. 除熱設計	2
3. 参考文献	5

別紙 1 除熱解析のモデル化及び解析条件について

別添 1 塗装の放射率設定根拠

別添 2 形態係数の算出過程

別添 3 燃料集合体領域の等価熱伝導率算出式中の係数Kについて

別紙 2 二次元除熱解析モデルの妥当性について

図表目次

図 2-1	HDP-69B(B)型の構造図	6
図 2-2	除熱解析フロー図	7
図 2-3	使用済燃料の収納配置条件（配置(i)）（新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料を混載収納する場合）	8
図 2-4	使用済燃料の収納配置条件（配置(ii)）（新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料を混載収納する場合）	9
図 2-5	使用済燃料の収納配置条件（配置(iii)）（新型8×8燃料のみを収納する場合）	10
図 2-6	HDP-69B(B)型に収納する使用済燃料の設計崩壊熱量軸方向分布（使用済燃料69体分の設計崩壊熱量を示す。）	11
図 2-7	全体モデル形状図	12
図 2-8	全体モデル要素分割図	13
図 2-9	輪切りモデル形状図	14
図 2-10	輪切りモデル要素分割図	15
図 2-11	燃料集合体モデル形状図（新型8×8燃料，新型8×8ジルコニウムライナ燃料の場合）	16
図 2-12	燃料集合体モデル形状図（高燃焼度8×8燃料の場合）	16
図 2-13	燃料集合体モデル要素分割図	17
図 2-14	配置(i)の除熱解析結果（全体モデル）	18
図 2-15	配置(i)の除熱解析結果（輪切りモデル）	19
図 2-16	配置(i)の除熱解析結果（燃料集合体モデル）	19
図 2-17	配置(ii)の除熱解析結果（全体モデル）	20
図 2-18	配置(ii)の除熱解析結果（輪切りモデル）	21
図 2-19	配置(ii)の除熱解析結果（燃料集合体モデル）	21
図 2-20	配置(iii)の除熱解析結果（全体モデル）	22
図 2-21	配置(iii)の除熱解析結果（輪切りモデル）	23
図 2-22	配置(iii)の除熱解析結果（燃料集合体モデル）	23
表 2-1	除熱機能の設計基準	24
表 2-2	使用済燃料の仕様	25
表 2-3	使用済燃料の崩壊熱量計算条件及び結果	26
表 2-4	使用済燃料の軸方向燃焼度分布（配置(i)及び(iii)）	27
表 2-5	使用済燃料の軸方向燃焼度分布（配置(ii)）	28
表 2-6	除熱解析結果	29

1. 設計方針

HDP-69B(B)型は、使用済燃料の健全性及び基本的安全機能を有する金属キャスク構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計とする。具体的な設計方針は以下のとおりである。

- ・燃料被覆管の温度を、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制限される値以下に維持できる設計とした。
- ・金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計とした。

また、本型式設計特定容器等を使用することができる使用済燃料貯蔵施設の範囲から、以下の項目を、HDP-69B(B)型が使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計の条件とする。

- ・金属キャスクの貯蔵場所：貯蔵建屋内
- ・貯蔵区域における金属キャスク周囲温度：45 °C
- ・貯蔵区域における貯蔵建屋壁面温度：65 °C

2. 除熱設計

(1) 除熱機能に関する構造

HDP-69B(B)型は、使用済燃料の崩壊熱を熱伝導、対流、ふく射により HDP-69B(B)型の外表面に伝え、周囲の空気等に伝達する。HDP-69B(B)型の構造図を図 2-1 に示す。HDP-69B(B)型は、除熱のために以下の設計上の配慮を行っている。

- a. 金属キャスクの内部には、強度部材のバスケットプレート（ほう素添加ステンレス鋼）と熱伝導率の高い伝熱プレート（アルミニウム合金）で構成されたバスケットを設け、その中に使用済燃料を収納する。
- b. 使用済燃料を収納する空間には、熱伝導率の高いヘリウムガスを充填する。
- c. 側部の中性子遮蔽材（熱伝導率の低い樹脂）の内部には、炭素鋼及び銅からなる伝熱フィンを設け、熱伝導性能を向上させる。

(2) 設計基準

HDP-69B(B)型の除熱機能の設計基準を表 2-1 に示す。

(3) 解析モデル及び解析条件

HDP-69B(B)型の除熱解析は、図 2-2 に示す除熱解析フローに従って行う。

a. 使用済燃料の収納配置

HDP-69B(B)型に収納される使用済燃料の収納配置は配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)の3つである。これら収納配置における使用済燃料の配置条件をそれぞれ図 2-3、図 2-4 及び図 2-5 に示す。除熱解析は、配置(i)、配置(ii)及び配置(iii)それぞれについて行う。

b. 使用済燃料の崩壊熱量設定

HDP-69B(B)型に収納される使用済燃料の仕様を表 2-2 に示す。使用済燃料の崩壊熱量は、燃料集合体の種類、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求められる。使用済燃料の崩壊熱量の計算に用いる計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

除熱解析に使用する金属キャスク 1 基当たりの崩壊熱量（以下「設計崩壊熱量」という。）は、使用済燃料の軸方向燃焼度分布を考慮して次式のとおり設定した（図 2-6 参照）。

$$[\text{設計崩壊熱量}] = [\text{使用済燃料 (平均燃焼度}^{*1}) \text{ 1 体当たりの崩壊熱量 (軸方向燃焼度分布を考慮}^{*2})] \times 1.05^{*3} \times [\text{収納体数}]$$

注記*1：平均燃焼度とは，金属キャスク 1 基当たりに収納される使用済燃料に対する燃焼度の平均値を表す。

*2：使用済燃料の軸方向燃焼度の平均値に対する燃焼度の比（ピーキングファクター（以下「PF」という。)) を用いて考慮する。PF は，収納する使用済燃料の軸方向燃焼度分布を包絡するように設定している。

*3：ORIGEN2 コードの計算結果に 5 %の保守性を考慮する。

表 2-3 より，使用済燃料 1 体当たりの崩壊熱量は配置(i)では新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料，配置(ii)では高燃焼度 8×8 燃料の値が大きいため，これらの値を用いて配置(i)及び配置(ii)の設計崩壊熱量を設定した。

配置(i)，配置(ii) 及び配置(iii)の設計崩壊熱量は，以下のとおり計算した。

(配置(i)：新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納した場合)

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.2118 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 69 \text{ (体)} = 15.34 \text{ (kW)}$$

(配置(ii)：高燃焼度 8×8 燃料を収納した場合)

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.2116 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 69 \text{ (体)} = 15.33 \text{ (kW)}$$

(配置(iii)：新型 8×8 燃料を収納した場合)

$$[\text{設計崩壊熱量}] = 0.1432 \text{ (kW/体)} \times 1.05 \times 69 \text{ (体)} = 10.37 \text{ (kW)}$$

c. 解析モデル

除熱解析は、HDP-69B(B)型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法による伝熱解析コード(ABAQUS)を用いて行った。使用した解析モデルは以下の3つである。

- ・金属キャスク熱解析モデル
 - ①軸方向全体モデル（以下「全体モデル」という。）
 - ②径方向輪切りモデル（以下「輪切りモデル」という。）
- ・燃料被覆管熱解析モデル
 - ③燃料集合体モデル

各解析モデルの形状図及び要素分割図を図2-7～図2-13に示す。また、モデル化の方法を別紙1に示す。

各解析モデルで評価する部位は次のとおりである。

- ①全体モデル : 胴（底板）、金属ガスケット、中性子遮蔽材（蓋部、底部）、蓋部、トラニオン
- ②輪切りモデル : バスケット、胴、中性子遮蔽材（側部）、外筒
- ③燃料集合体モデル : 燃料被覆管

全体モデル解析では、平均燃焼度の使用済燃料が69体収納されている条件（発熱量の総量が設計崩壊熱量となる。）とした。輪切りモデル解析では、中央部の37体の使用済燃料は最高燃焼度の崩壊熱量とし、発熱量の総量が設計崩壊熱量となるように外周部の発熱量を調整した（さらに、軸方向への熱逃げを考慮した。詳細は別紙1に示す。）。燃料集合体モデル解析では最高燃焼度の崩壊熱量を用いた。

d. 境界条件

HDP-69B(B)型周囲の環境として、以下の条件を用いる（詳細条件を別紙1に示す。）。

- ・貯蔵姿勢 : たて置き
- ・周囲温度 : 45 °C
- ・貯蔵建屋壁面温度 : 65 °C

(4) 除熱解析結果

HDP-69B(B)型の除熱解析結果を表2-6及び図2-14～図2-22に示す。

解析の結果、燃料被覆管の温度及び金属キャスク各部位の温度は表2-1に示す設計基準値を満足しており、HDP-69B(B)型は使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する設計となっていることを確認した。

3. 参考文献

- (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)」(平成 19 年 3 月)
- (2) (独)原子力安全基盤機構,「平成 19 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」(平成 20 年 3 月)
- (3) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007 年版) JSME S FA1-2007」(2007 年 12 月)
- (4) N. Kumagai, et al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. 15th Int. Symp. on PATRAM(2007)
- (5) (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 年 3 月)
- (6) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007 年版) JSME S FA1-2007, 事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定(JSME S FA-CC-004)」(2009)
- (7) 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」(平成 21 年 6 月 25 日)

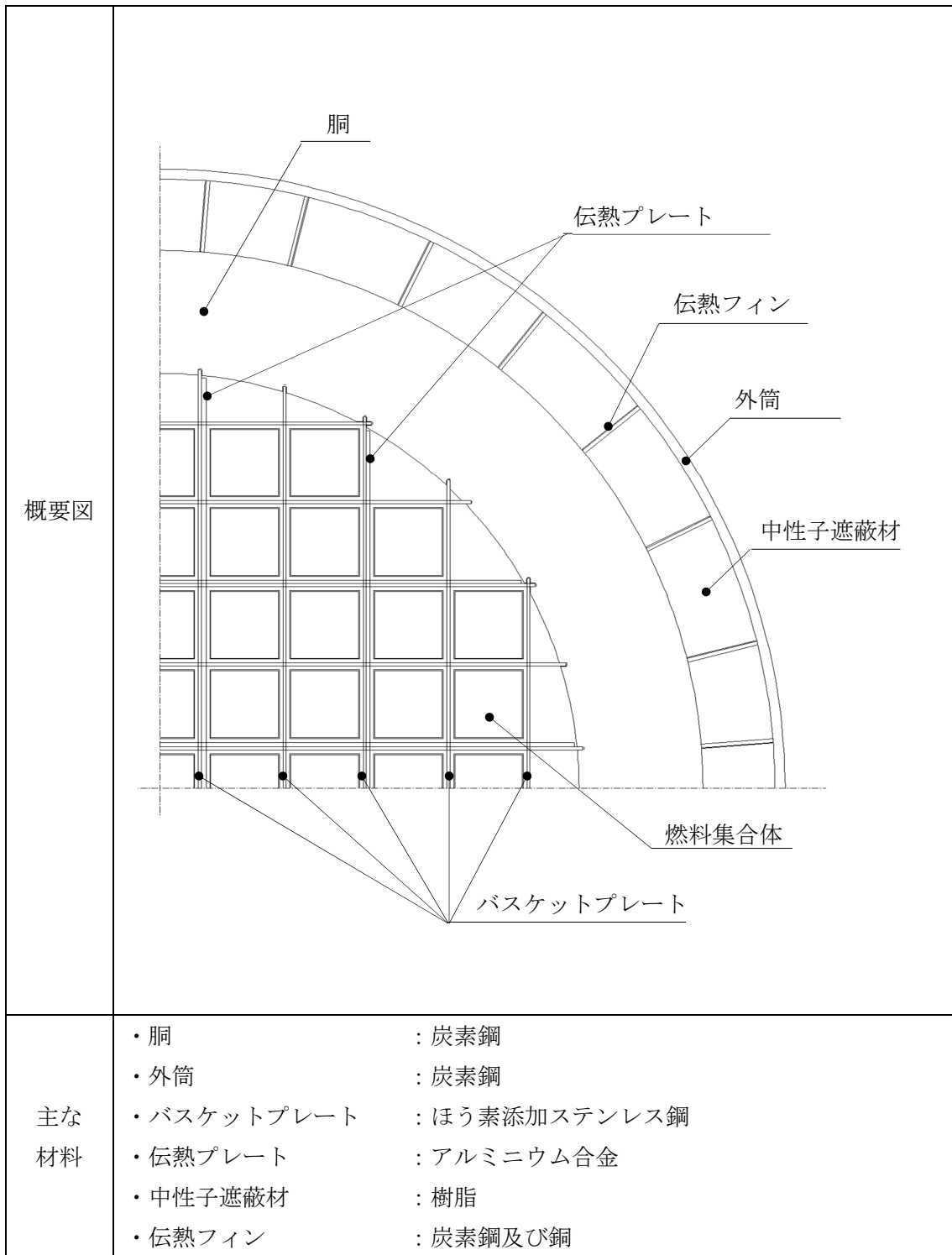


図 2-1 HDP-69B(B)型の構造図

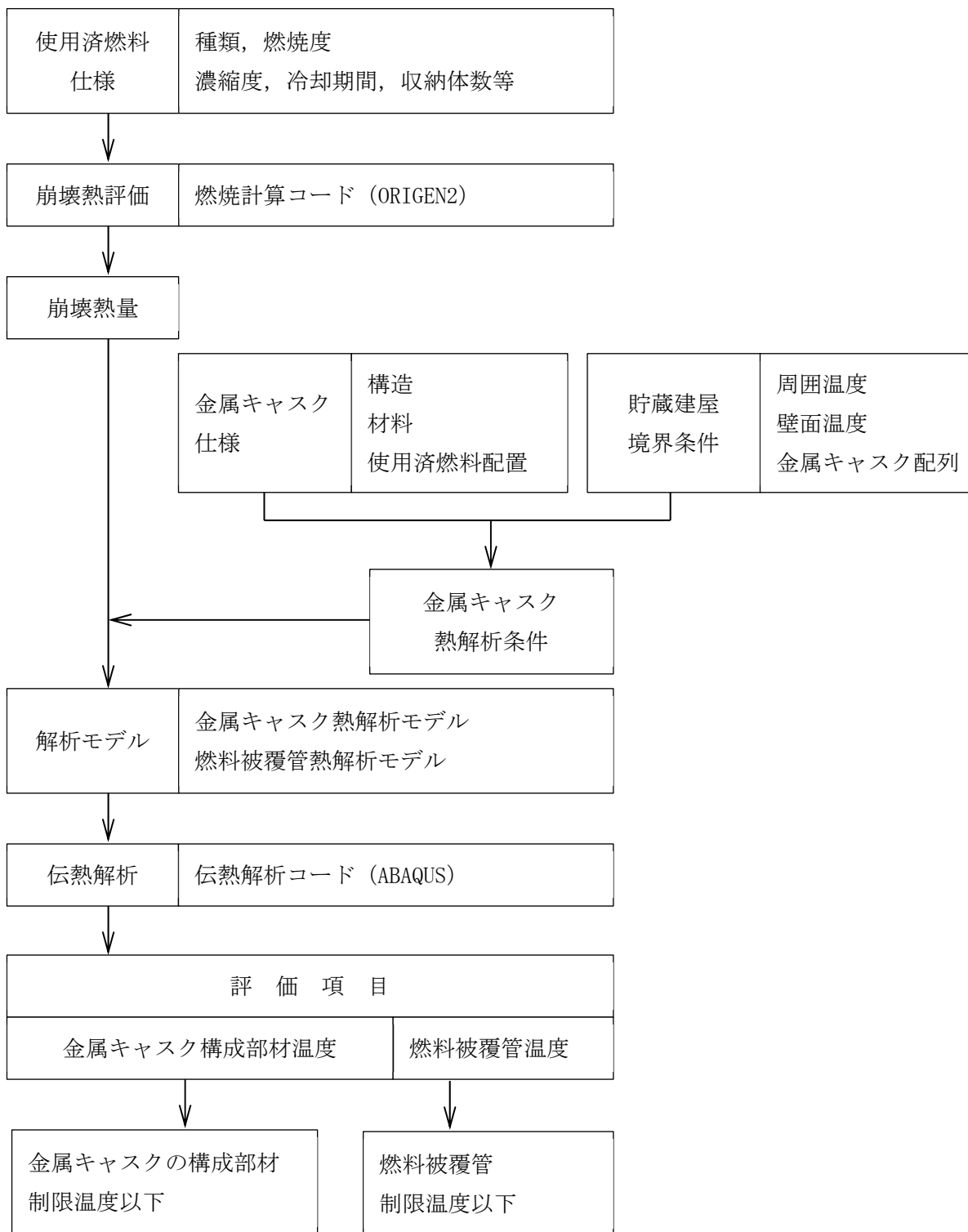
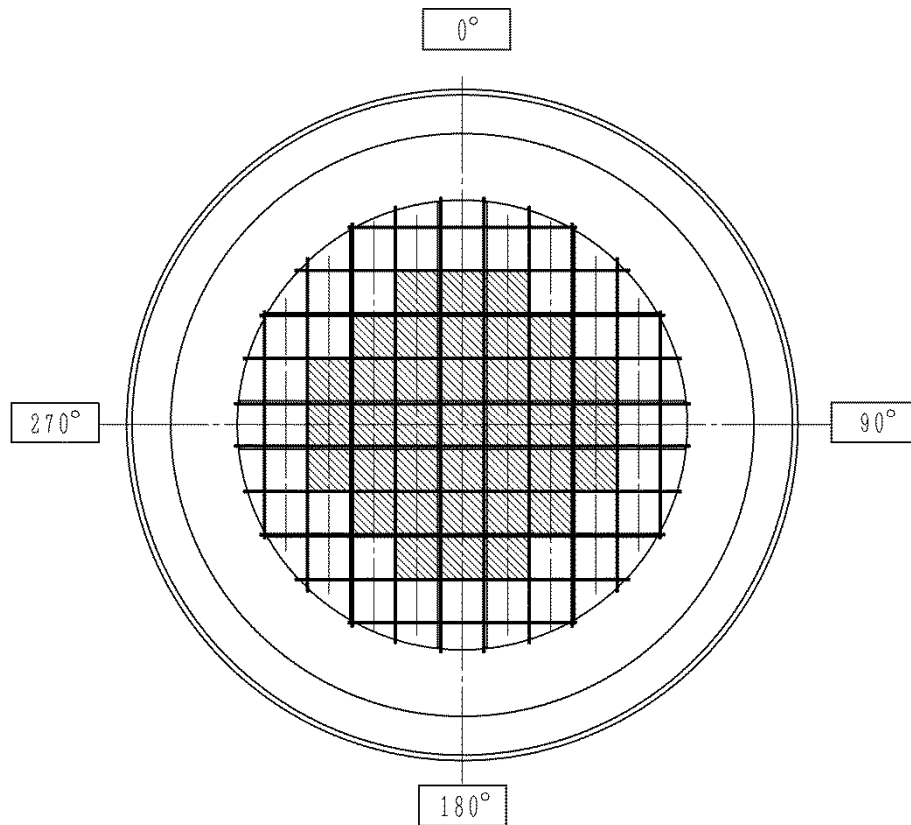


図 2-2 除熱解析フロー図



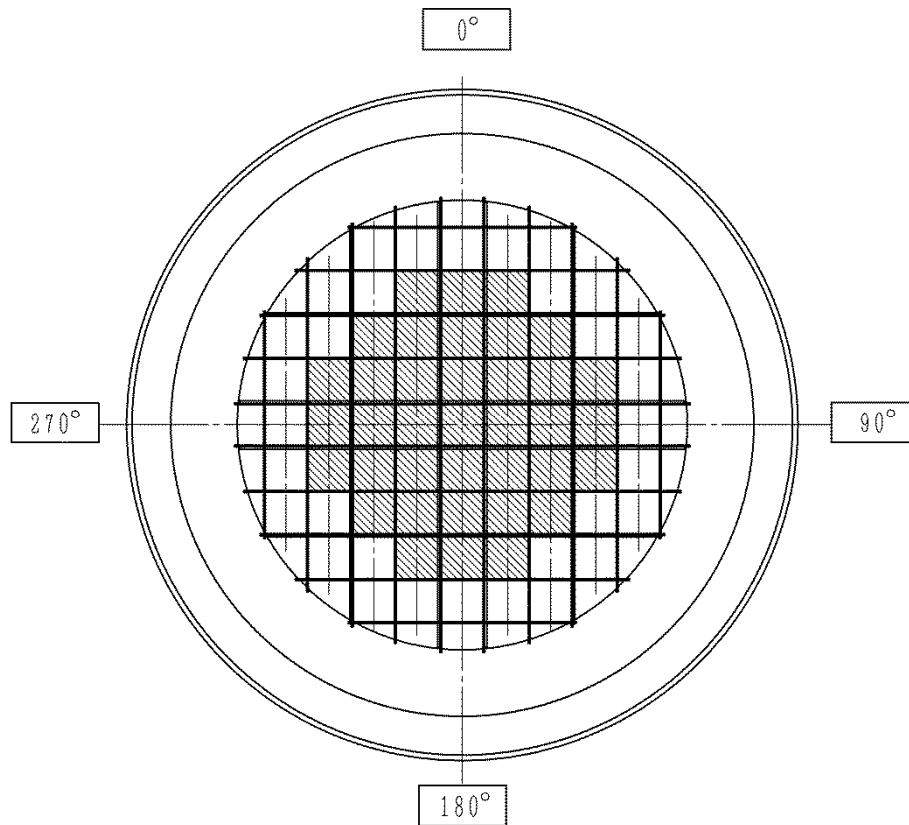
燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 18 年以上

燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 18 年以上

金属キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 金属キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 12.1 kW*1 以下

注記*1: 使用済燃料 1 体当たりの軸方向燃焼度の平均値を用いた (PF=1 とした) 値。

図 2-3 使用済燃料の収納配置条件 (配置(i))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載収納する場合)



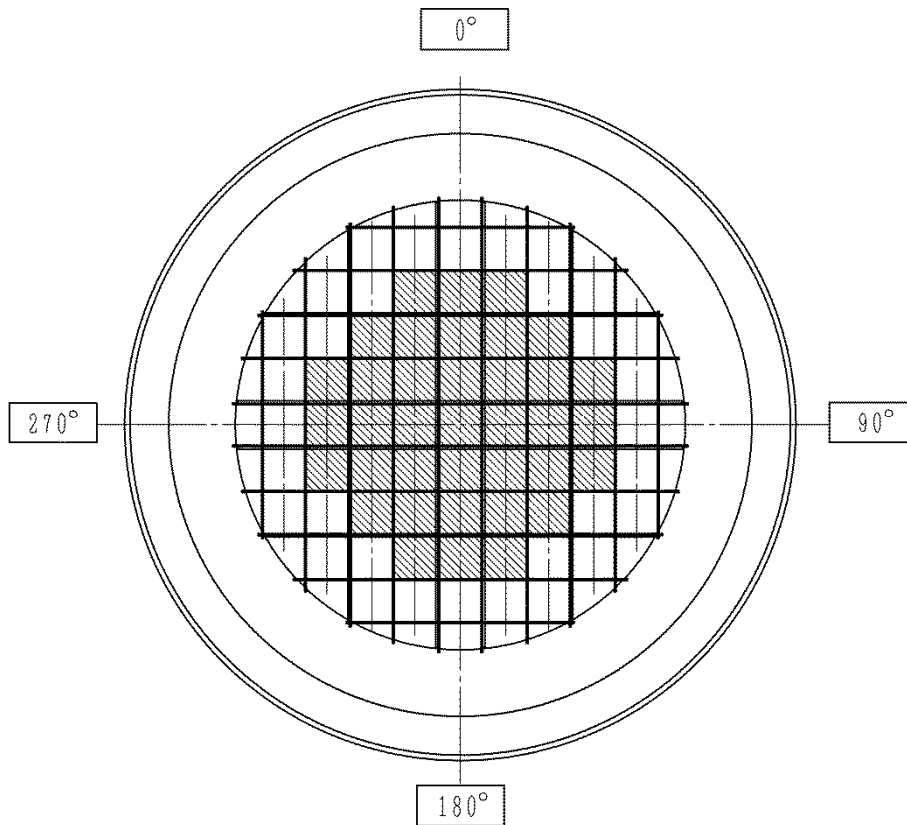
燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 22 年以上

燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 48,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 20 年以上

金属キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 金属キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 13.8 kW*1 以下

注記*1: 使用済燃料 1 体当たりの軸方向燃焼度の平均値を用いた (PF=1 とした) 値。

図 2-4 使用済燃料の収納配置条件 (配置(ii))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載収納する場合)



燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 28 年以上

燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 28 年以上

金属キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下
 金属キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 8.4 kW*1 以下

注記*1 : 使用済燃料 1 体当たりの軸方向燃焼度の平均値を用いた (PF=1 とした) 値。

図 2-5 使用済燃料の収納配置条件 (配置(iii))
 (新型 8×8 燃料のみを収納する場合)

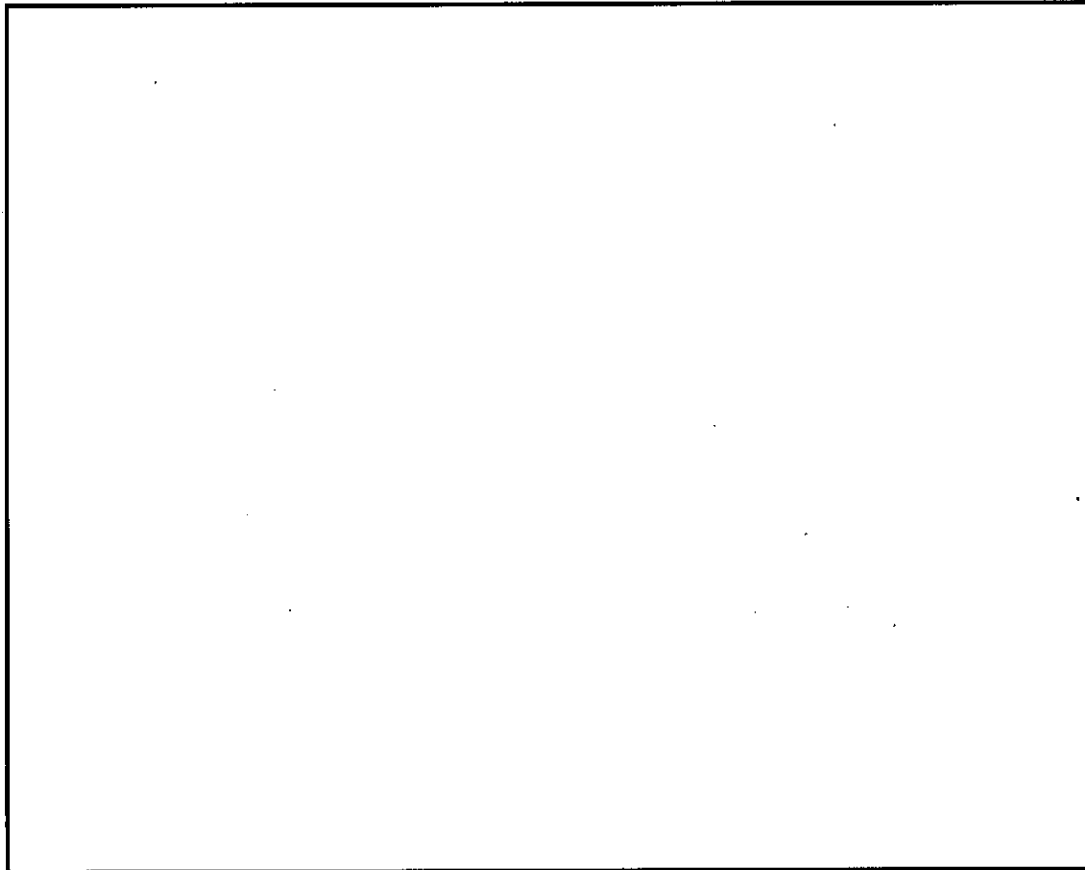


図 2-6 HDP-69B(B)型に収納する使用済燃料の設計崩壊熱量軸方向分布
(使用済燃料 69 体分の設計崩壊熱量を示す。)

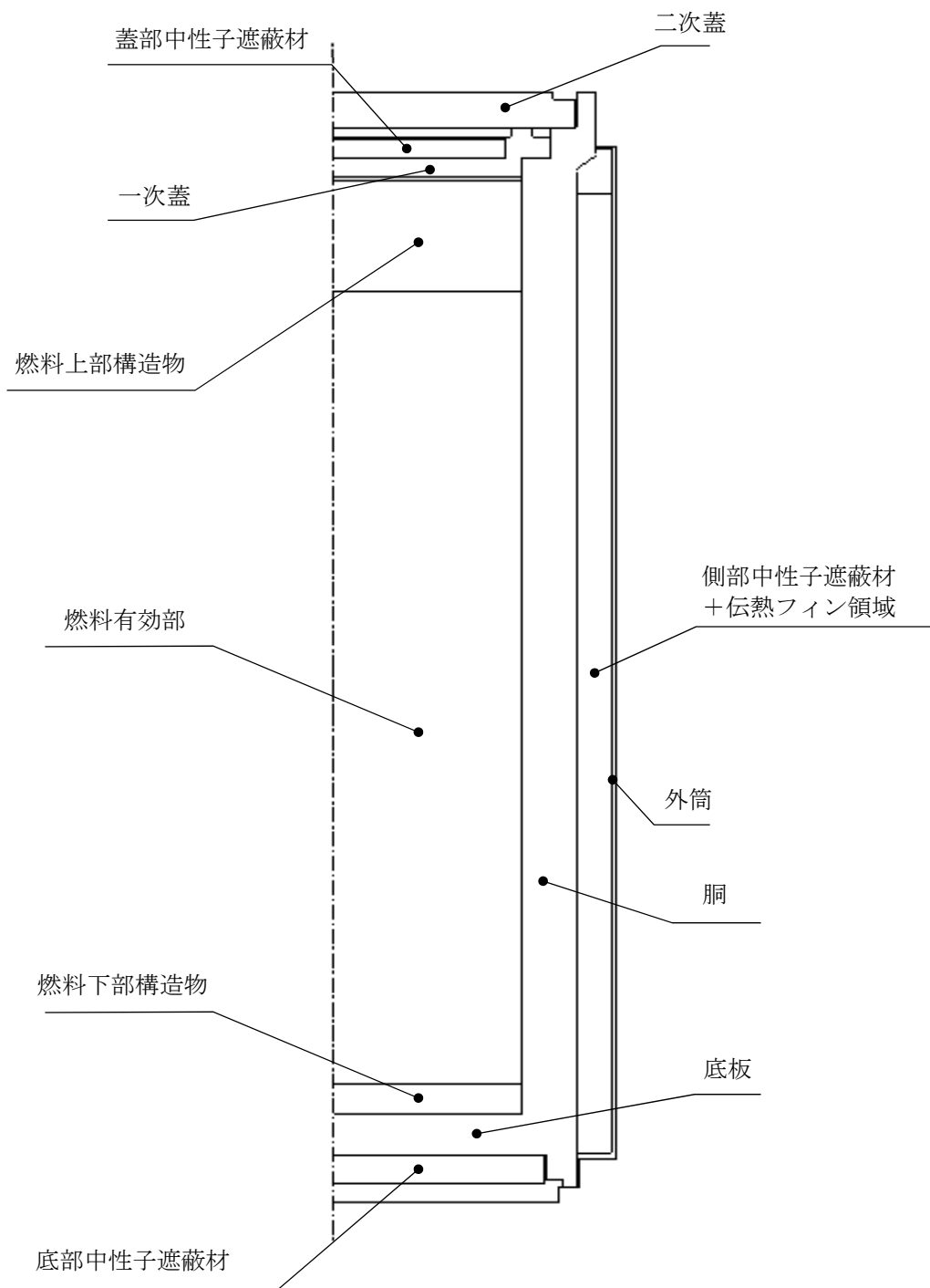


図 2-7 全体モデル形状図

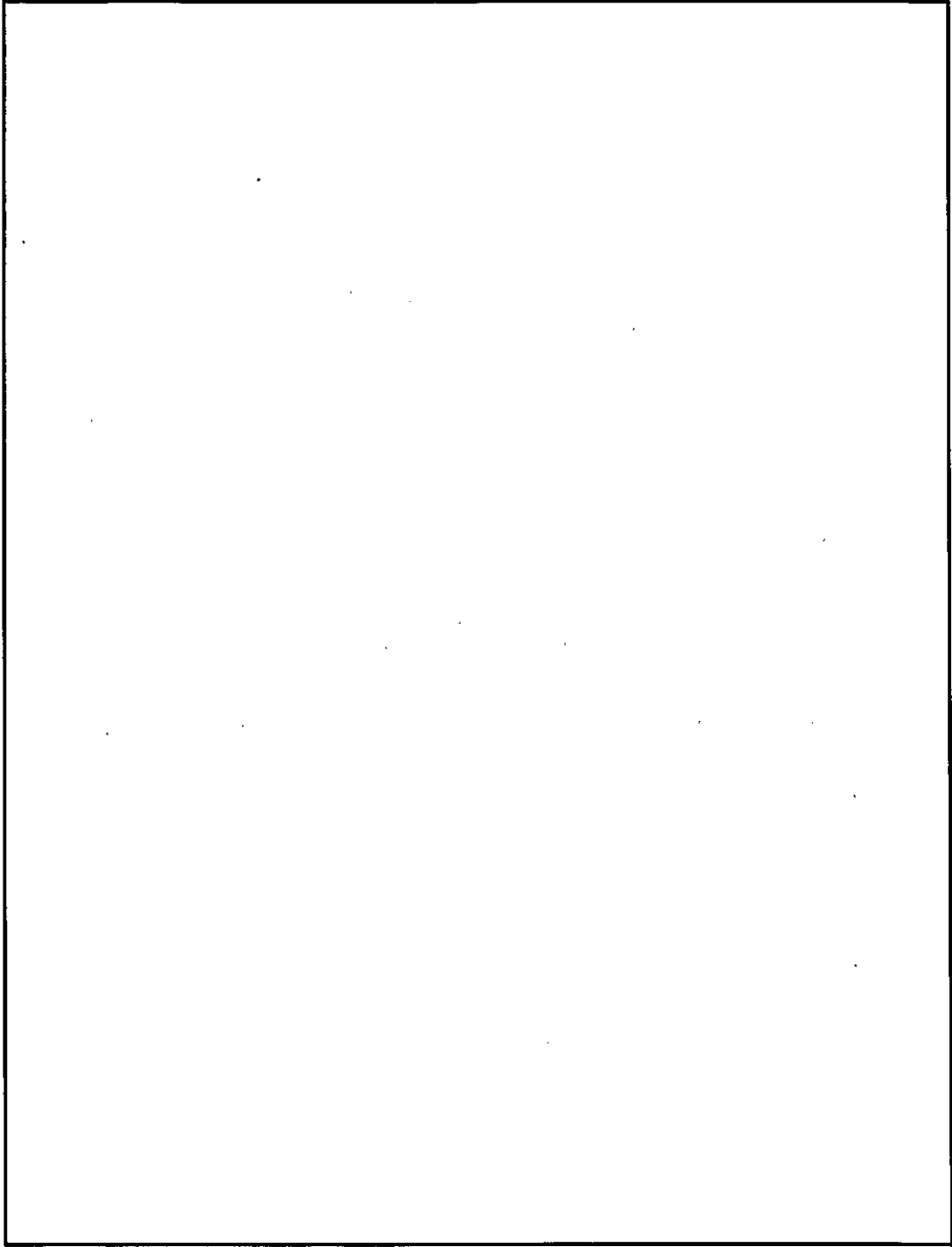


図 2-8 全体モデル要素分割図

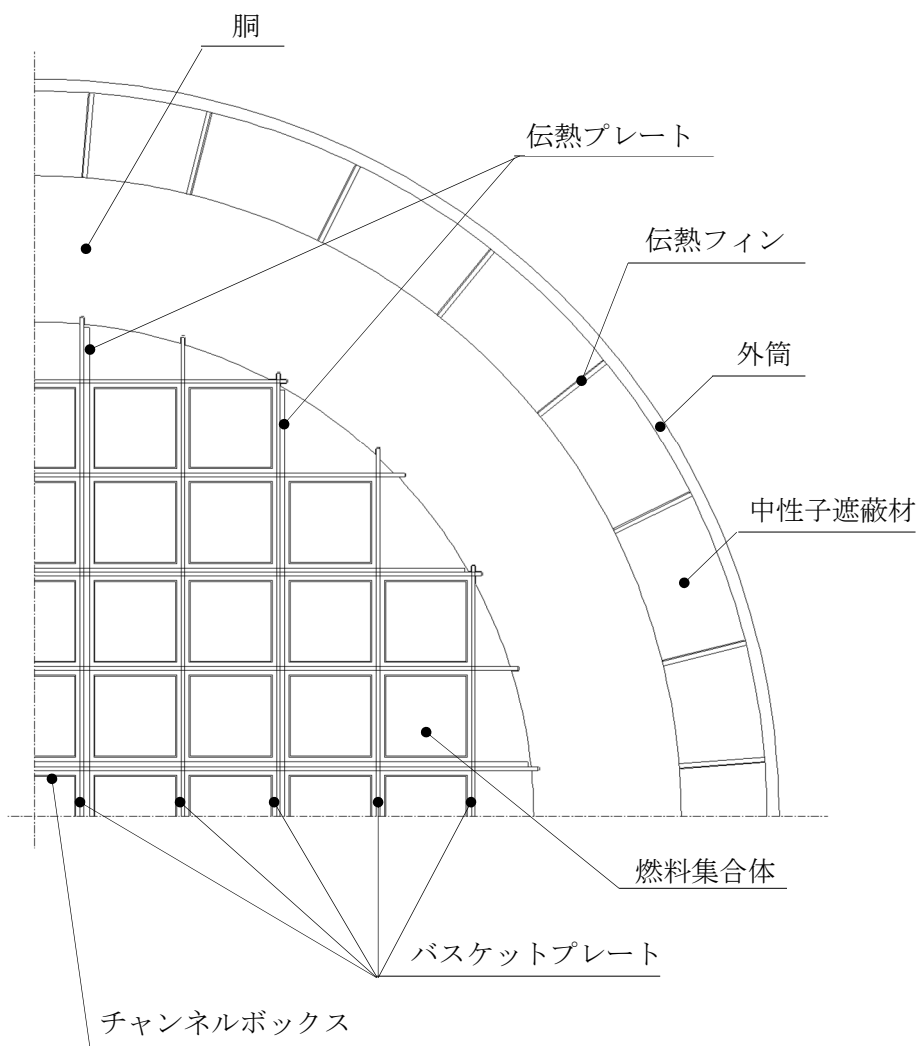


図 2-9 輪切りモデル形状図

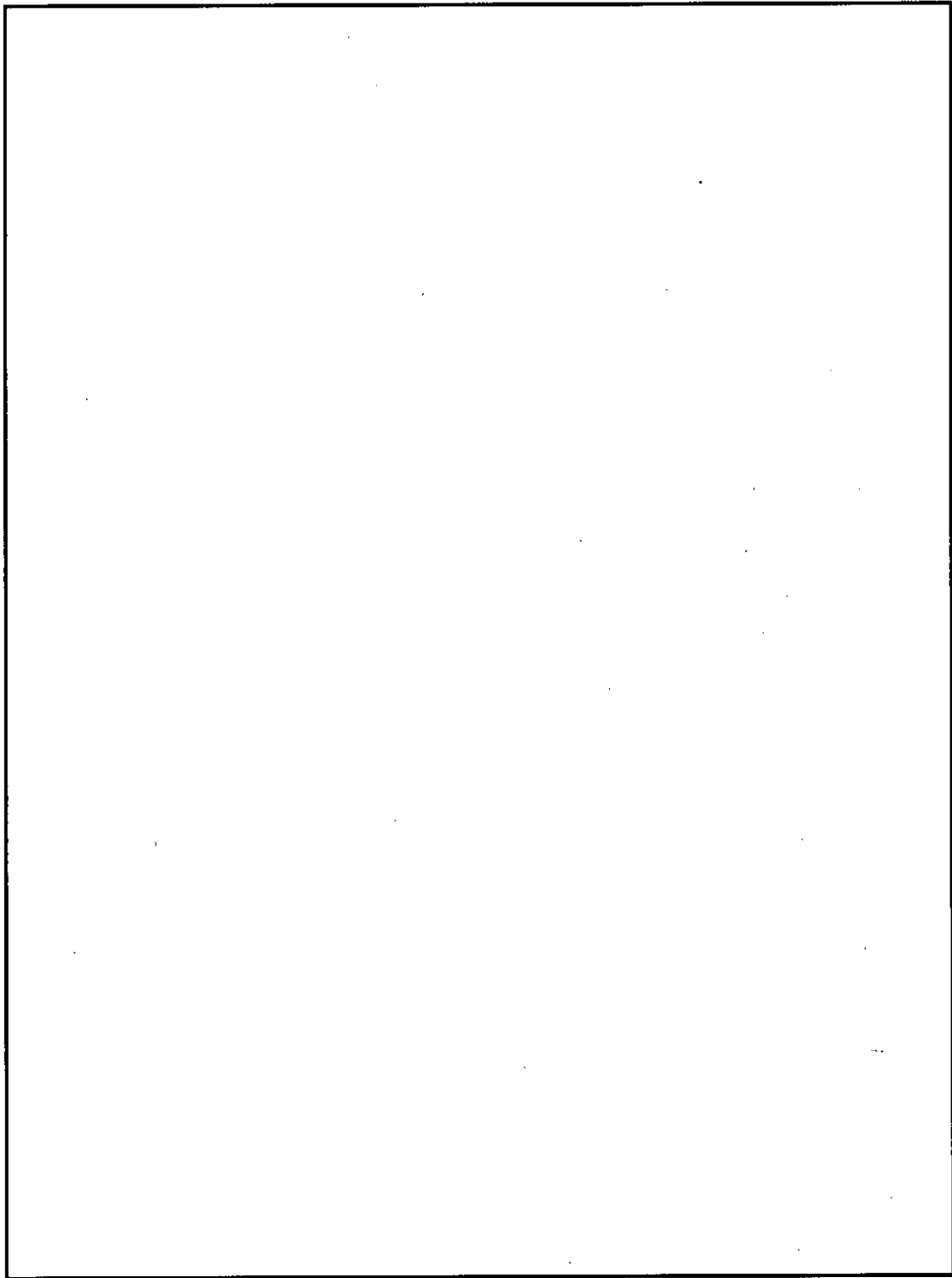
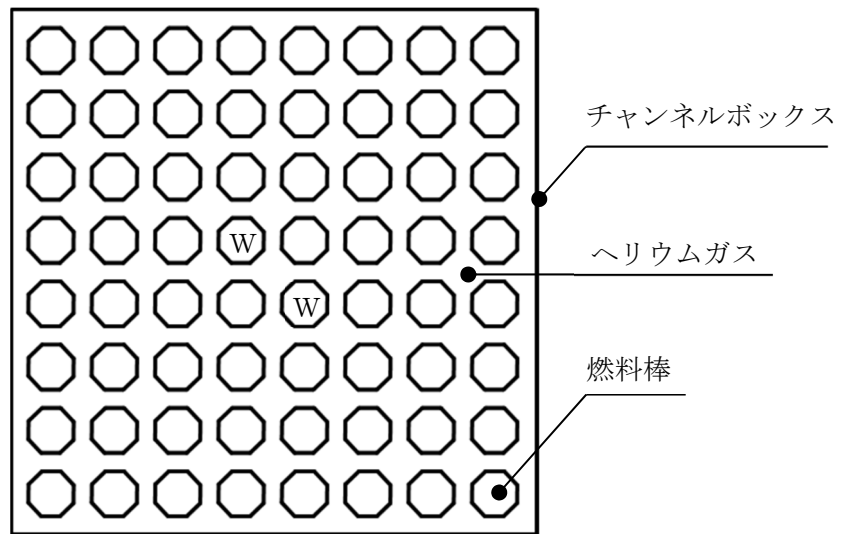
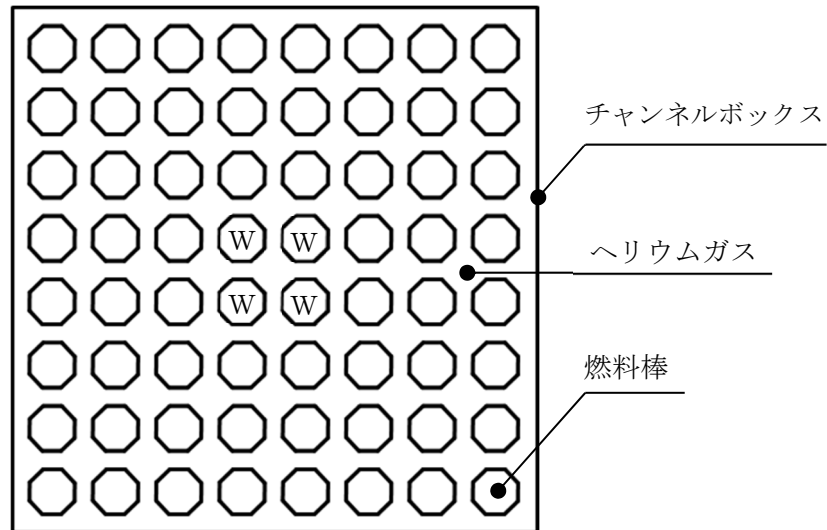


図 2-10 輪切りモデル要素分割図



注記：Wはウォーターロッドであり，発熱はない。

図 2-11 燃料集合体モデル形状図
(新型 8×8 燃料，新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の場合)



注記：Wはウォーターロッドであり，発熱はない。

図 2-12 燃料集合体モデル形状図
(高燃焼度 8×8 燃料の場合)

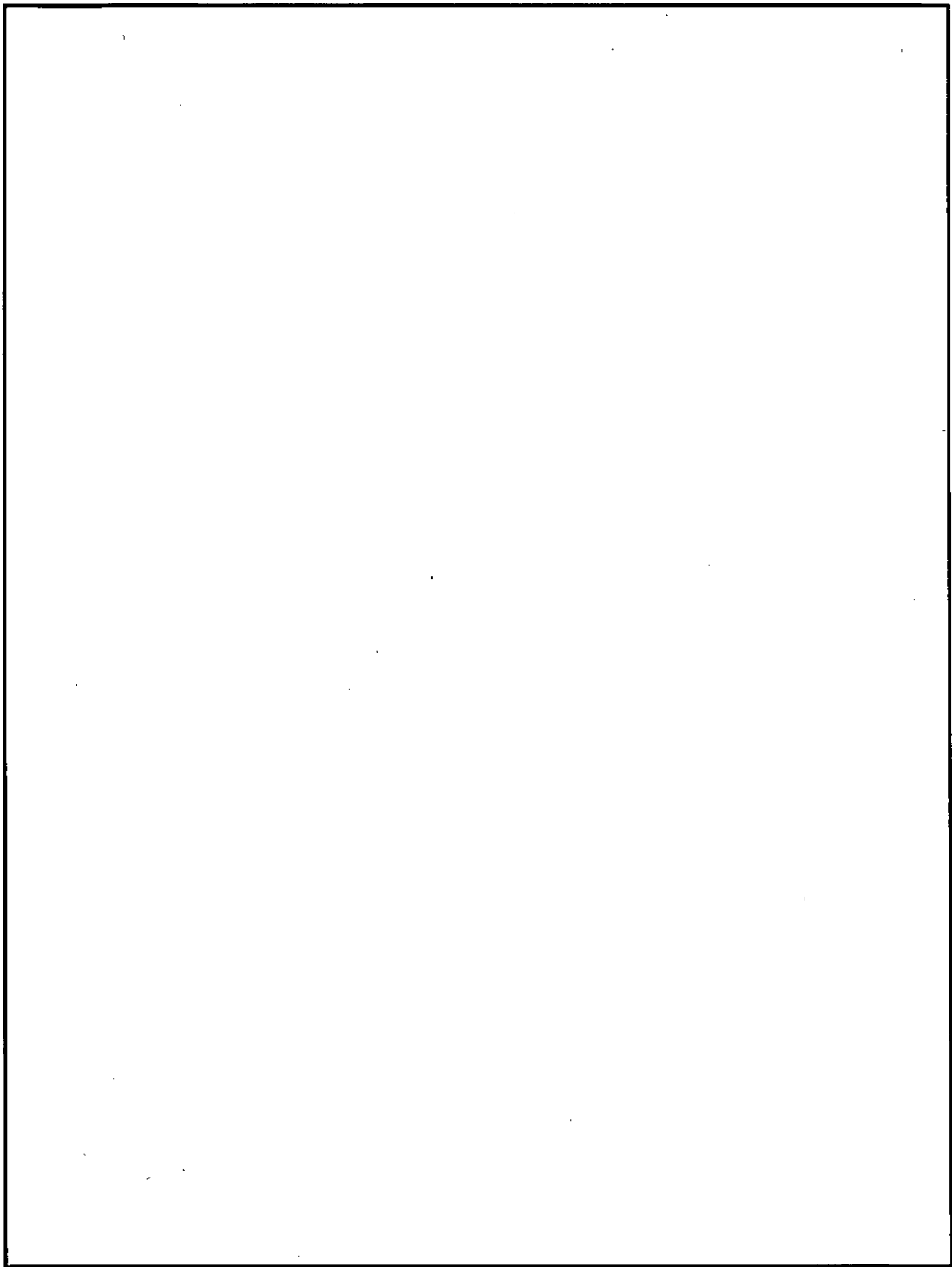


図 2-13 燃料集合体モデル要素分割図

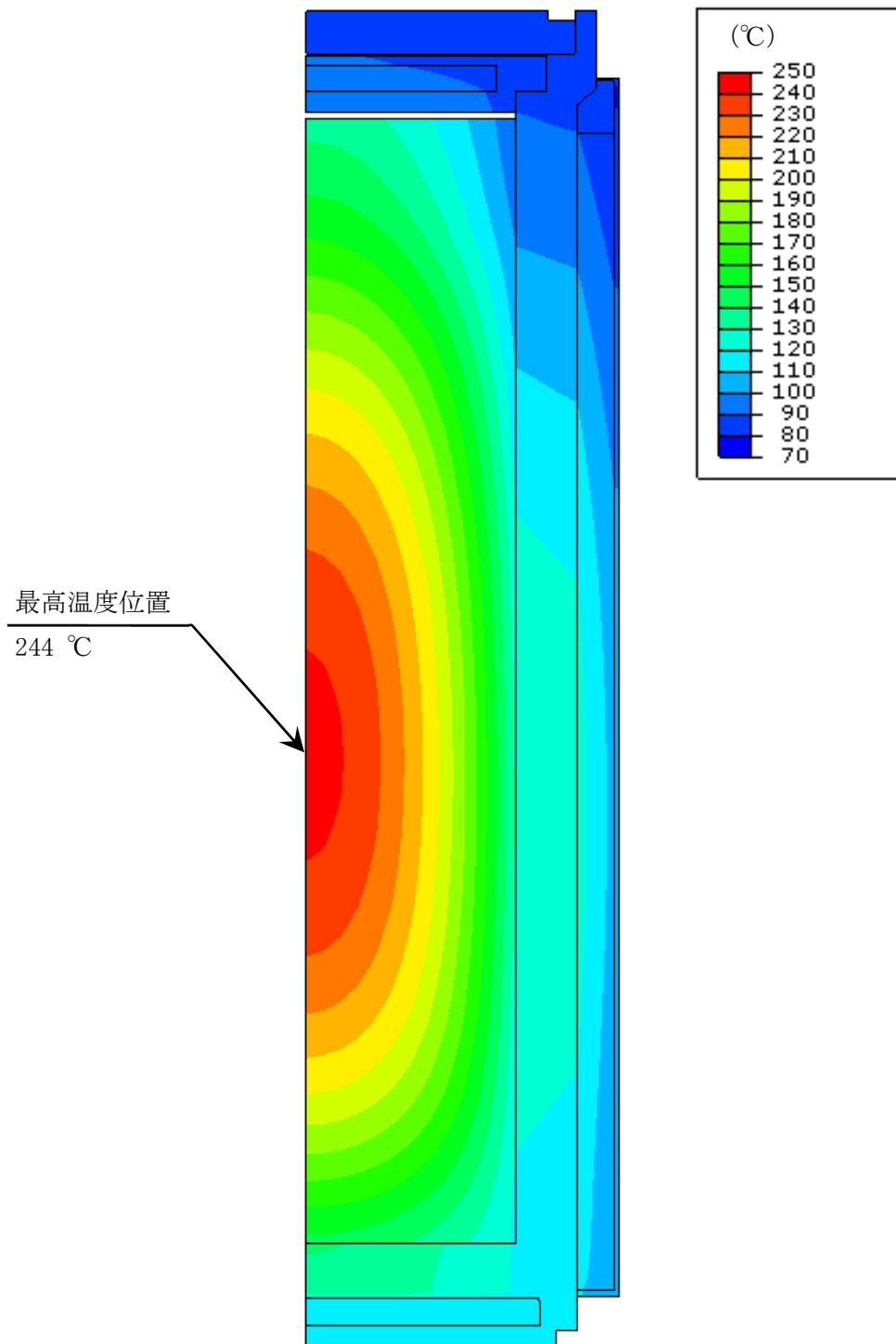


図 2-14 配置(i)の除熱解析結果 (全体モデル)

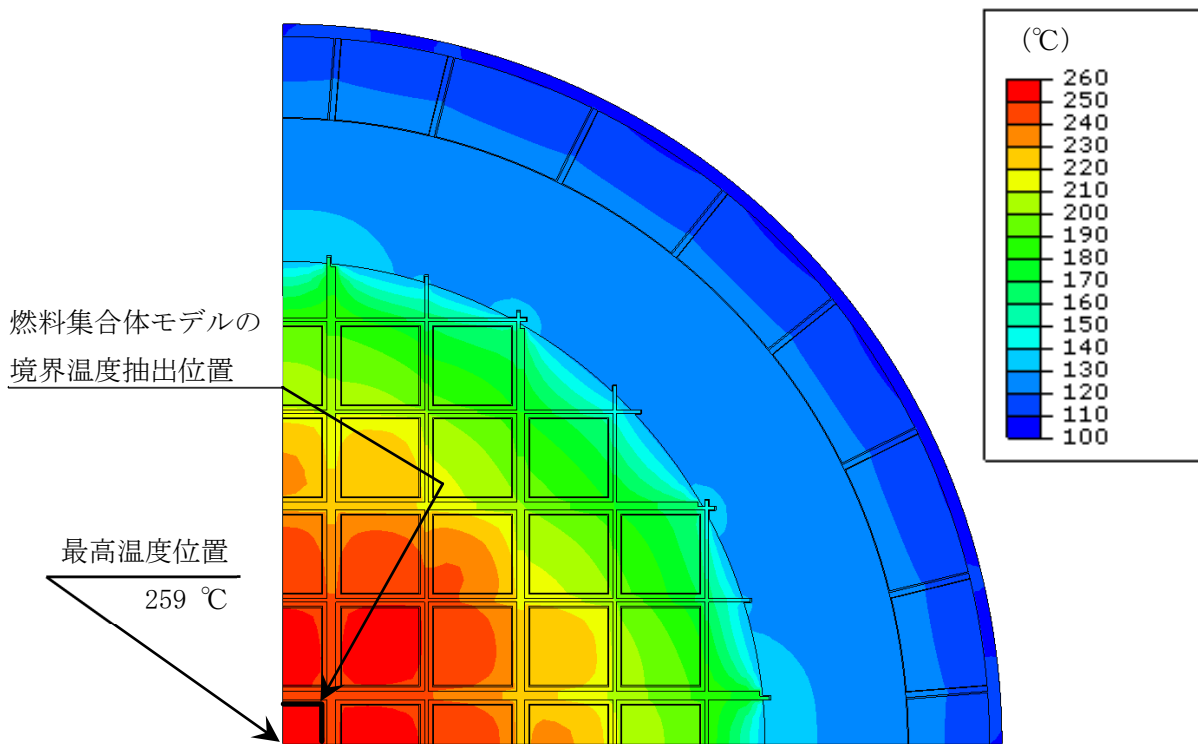


図 2-15 配置(i)の除熱解析結果(輪切りモデル)

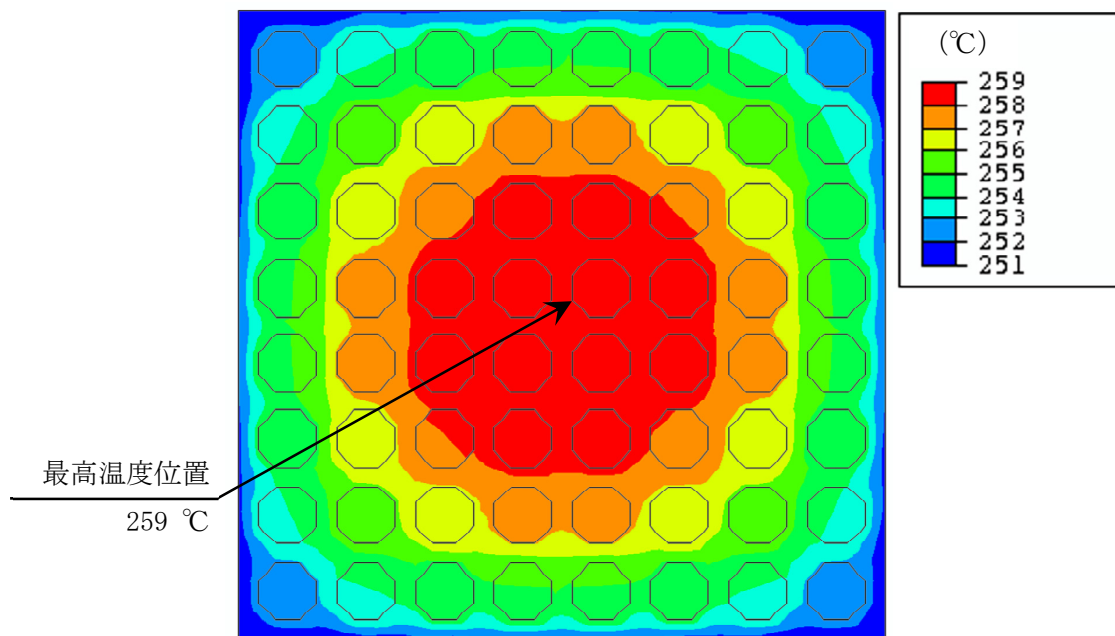


図 2-16 配置(i)の除熱解析結果(燃料集合体モデル)

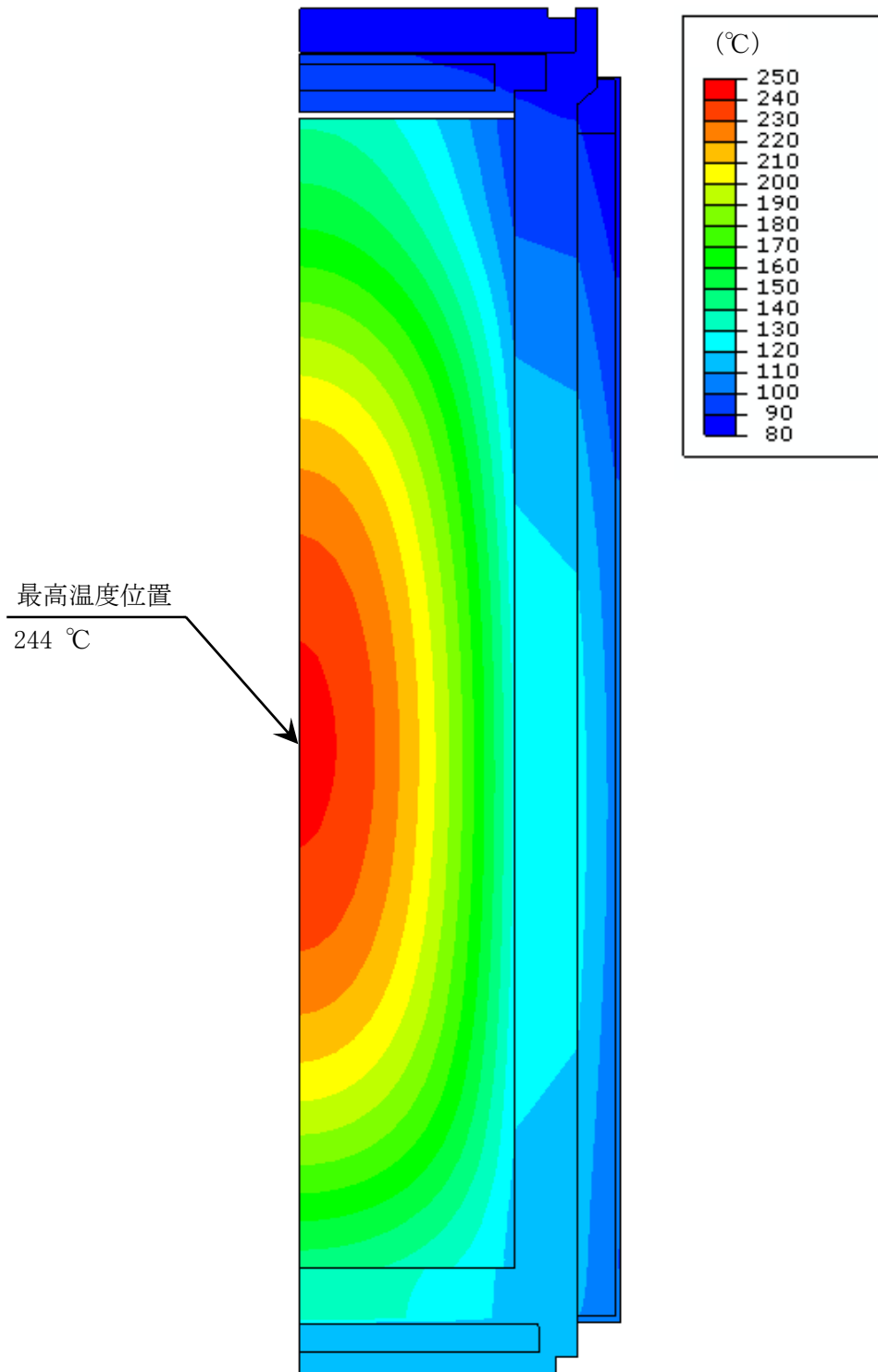


図 2-17 配置(ii)の除熱解析結果 (全体モデル)

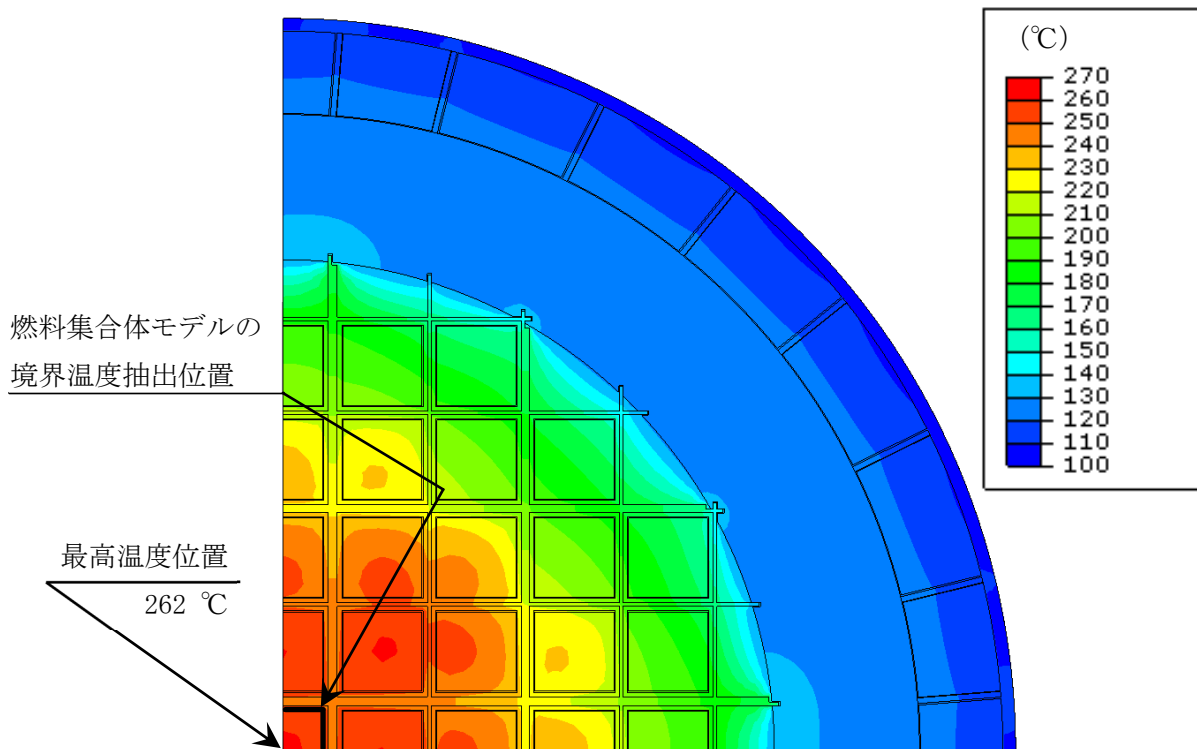


図 2-18 配置(ii)の除熱解析結果(輪切りモデル)

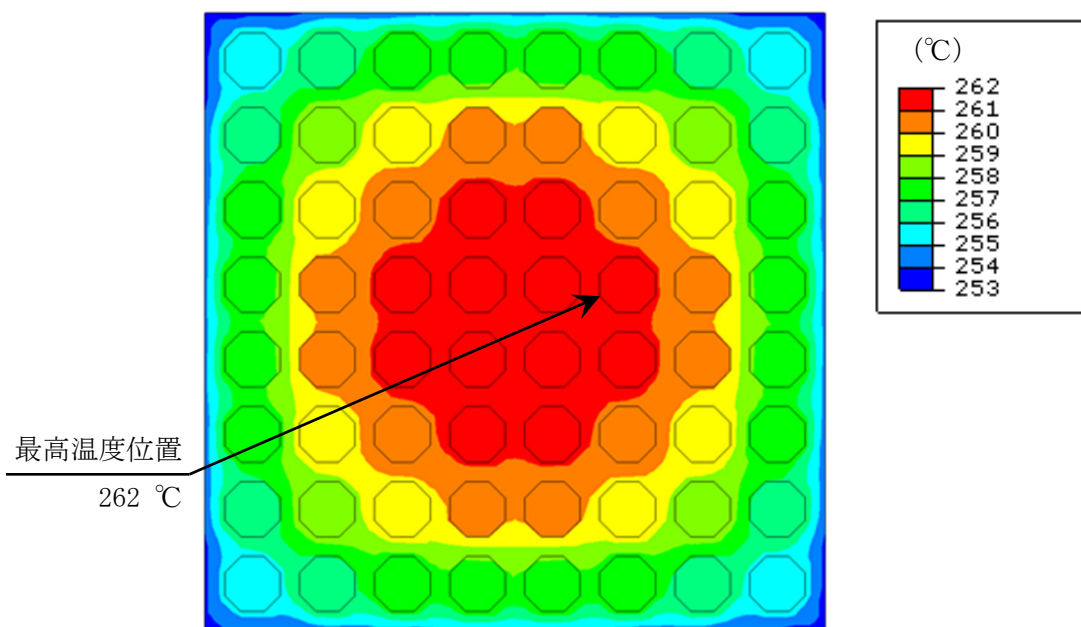


図 2-19 配置(ii)の除熱解析結果(燃料集合体モデル)

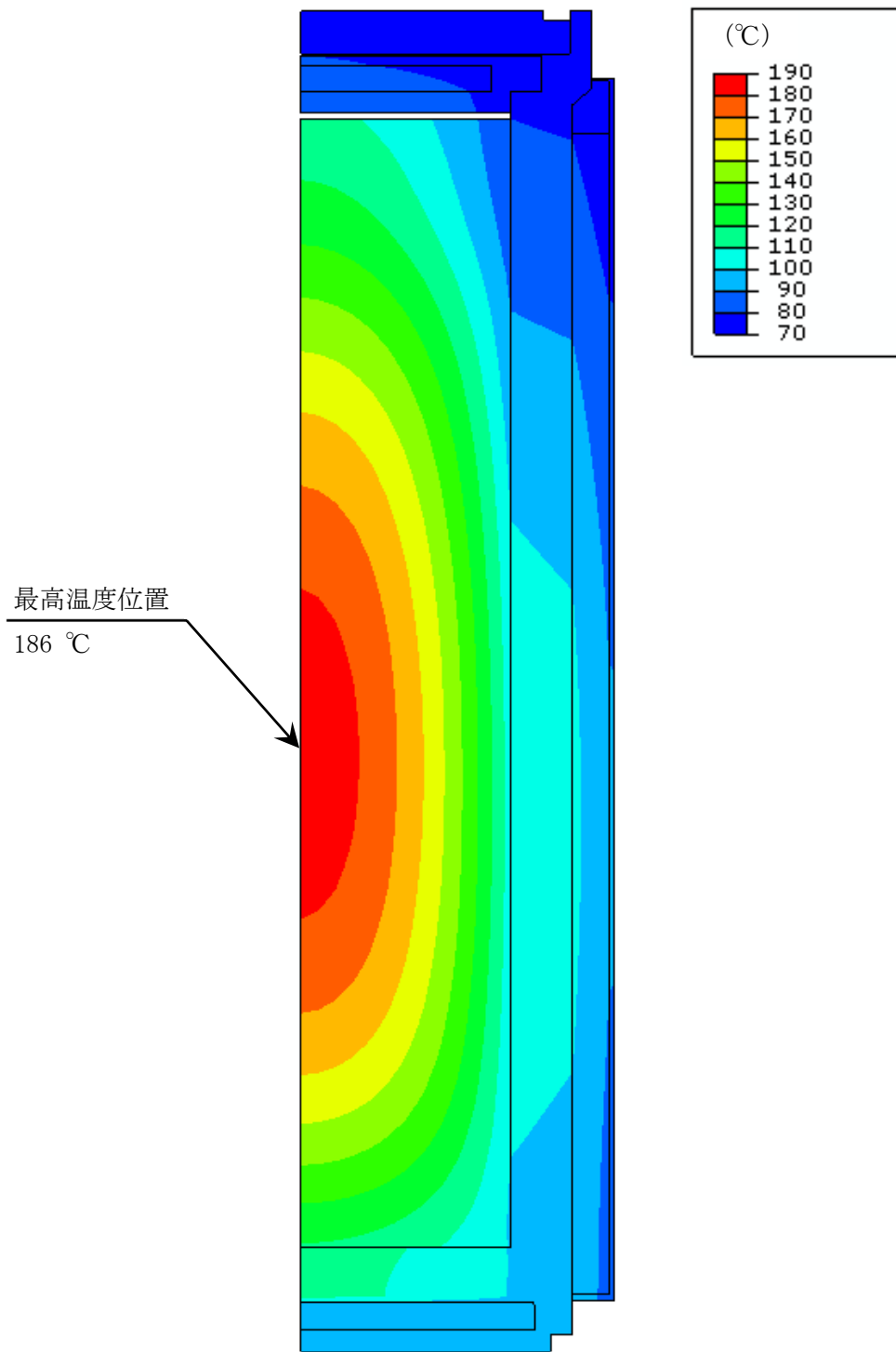


図 2-20 配置(iii)の除熱解析結果 (全体モデル)

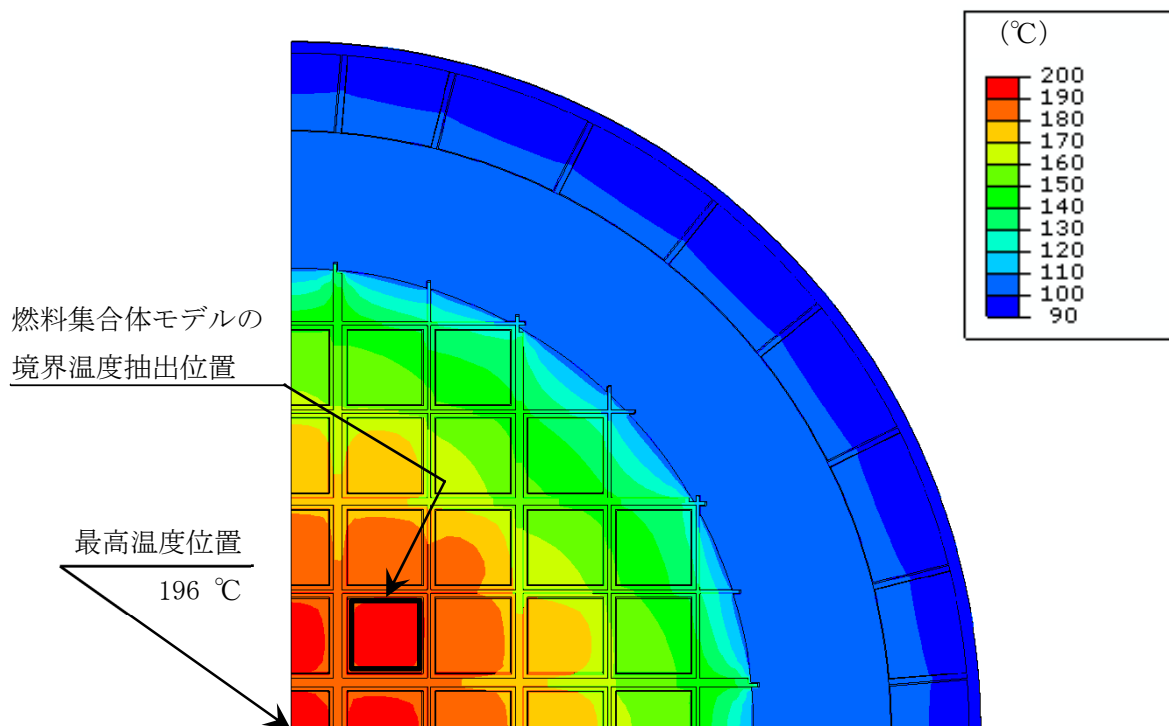


図 2-21 配置(iii)の除熱解析結果 (輪切りモデル)

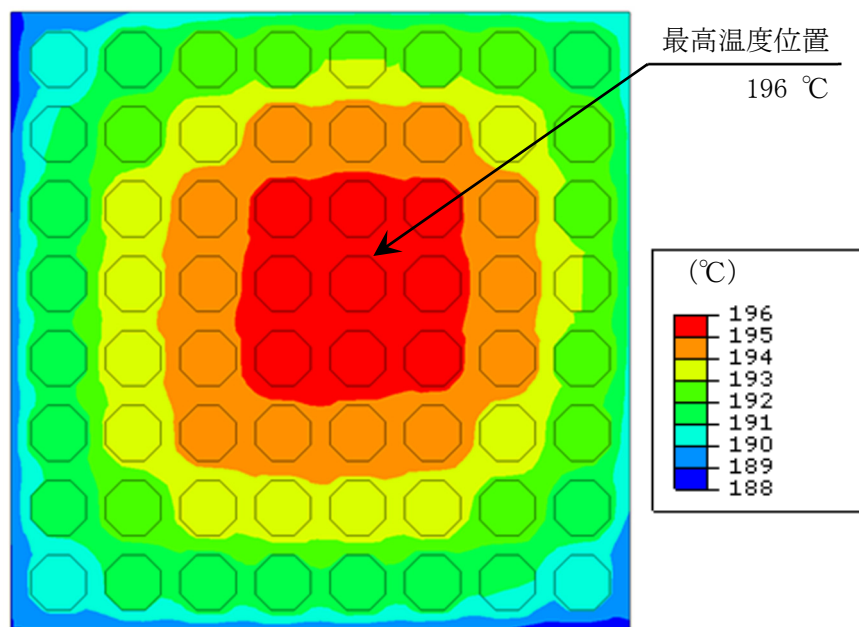


図 2-22 配置(iii)の除熱解析結果 (燃料集合体モデル)

表 2-1 除熱機能の設計基準

対象となる部位		設計基準値 (°C)	設計基準値の考え方
燃料 被覆管	新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料	300 ⁽¹⁾⁽²⁾	燃料被覆管の累積クリープ量が 1 % を超えない温度、照射硬化回復現象 により燃料被覆管の機械的特性が 著しく低下しない温度及び水素化 物の再配向による燃料被覆管の機 械的特性の低下が生じない温度以 下とした。
	高燃焼度 8×8 燃料		
	新型 8×8 燃料	200 ⁽¹⁾⁽²⁾	
金属 キャスク	胴、外筒及び蓋部	350 ⁽³⁾	(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」 ⁽³⁾ (以下「金属キ ャスク構造規格」という。) で定めて いる温度範囲の上限値を設計基準 値と設定した。
	トランニオン	350 ⁽³⁾	
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	150 ⁽⁴⁾	樹脂開発メーカーの文献 ⁽⁴⁾ を参考に 遮蔽性能の健全性が維持される設 計基準値として 150 °Cを設定し た。 (ただし、熱による中性子遮蔽材 の重量減損が僅かに生じるため、 遮蔽評価上、保守的に重量減損を 考慮している。)
	金属ガスケット	130 ⁽⁵⁾	長期密封性能試験 ⁽⁵⁾ で、130 °C～ 140 °C一定の状態での閉じ込め機能 が維持できることを確認している ため、設計基準値として 130 °Cと 設定した。
	バスケットプレート (ほう素添加 ステンレス鋼)	300 ⁽⁶⁾	金属キャスク構造規格のバスケッ ト用ボロン添加ステンレス鋼の事 例規格 ⁽⁶⁾ で定めている温度範囲の 上限値を設計基準値と設定した。

表 2-2 使用済燃料の仕様

項目		仕様		
種類		新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
形状	集合体幅 (mm)	約 132 又は約 134		
	全長 (mm)	約 4,350 又は約 4,470		
質量 (kg)		約 270		
初期濃縮度 (wt%)		3.1 以下	3.1 以下	3.7 以下
最高燃焼度*1 (MWd/t)		34,000 以下	40,000 以下	48,000 以下
最短冷却期間*2 (年)		28	18	18
収納体数 (体)		69		

注記*1：最高燃焼度とは、収納する使用済燃料 1 体の燃焼度の最大値を示す。

*2：最短冷却期間とは、収納する使用済燃料の最短の冷却期間を示す。

表 2-3 使用済燃料の崩壊熱量計算条件及び結果

使用済燃料の収納配置条件		配置 (i)		配置 (ii)		配置 (iii)	
種類		新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	新型 8×8 燃料	
計算条件	平均燃焼度*1 (MWd/t)	34,000	34,000	40,000	40,000	29,000	
	最高燃焼度*2 (MWd/t)	40,000	40,000	—	48,000	34,000	
	比出力 (MW/t)	25.3	26.2	25.3	26.2	25.3	
	照射期間 (日)	燃料集合体 (平均燃焼度*1)	1,344	1,298	1,582	1,527	1,147
		燃料集合体 (最高燃焼度*2)	1,582	1,527	—	1,833	1,344
	初期濃縮度*3 (%)	2.88	3.35	2.88	3.35	2.88	
	冷却期間 (年)	18	18	22	22 / 20*4	28	
	ウラン質量 (kg)	177	174	177	174	177	
ピーキングファクター	表 2-4	表 2-4	表 2-5	表 2-5	表 2-4		
計算結果	使用済燃料 1 体当たりの 崩壊熱量 (PF 考慮) (W)	平均燃焼度	211.8	201.3	207.4	211.6	143.2
		最高燃焼度	266.9	251.8	—	275.1	174.4
収納体数 (体)		69					
HDP-69B(B)型 1 基当たりの設計崩壊熱量*5 (kW)		15.34		15.33		10.37	

注記*1：平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料に対する使用済燃料の種類ごとの燃焼度の平均値を示す。

*2：最高燃焼度とは、収納する使用済燃料 1 体の燃焼度の最大値を示す。

*3：収納される使用済燃料の種類ごとの最小値を用いる。

*4：燃焼度 40,000 MWd/t 時の冷却期間は 22 年，燃焼度 48,000 MWd/t 時の冷却期間は 20 年である。

*5：除熱解析に用いる設計崩壊熱量算出時は、崩壊熱量計算結果に 5 %の保守性を考慮する。

表 2-4 使用済燃料の軸方向燃焼度分布 (配置(i)及び(iii))

種類	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料				高燃焼度 8×8 燃料				新型 8×8 燃料			
	配置(i)								配置(iii)			
使用済燃料の 収納配置条件												
燃焼度 (MWd/t)	34,000		40,000		34,000		40,000		29,000		34,000	
	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2
(上部)												
(下部)												

注記*1: ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

*2: ピーキングファクター

表 2-5 使用済燃料の軸方向燃焼度分布 (配置(ii))

種類	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料		高燃焼度 8×8 燃料			
	配置(ii)					
使用済燃料の 収納配置条件						
燃焼度 (MWd/t)	40,000		40,000		48,000	
	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2	ノード*1	PF*2
(上部)						
(下部)						

注記*1: ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

*2: ピーキングファクター

表 2-6 除熱解析結果

対象となる部位		評価結果 (°C)		設計基準値 (°C)
		最高温度	配置 (i) 配置 (ii)	
燃料 被覆管*1	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 高燃焼度 8×8 燃料	262*2	259 262	300
	新型 8×8 燃料	196*3	—	200
金属 キャスク	胴	135	135 134	350
	胴 (底板)	142	142 139	350
	外筒	113	113 113	350
	一次蓋	97	96 97	350
	二次蓋	86	85 86	350
	一次蓋ボルト	90	89 90	350
	二次蓋ボルト	86	85 86	350
	中性子遮蔽材 (蓋部, 底部, 側部)	128*4	128*4 128*4	150
	金属ガスケット	90	89 90	130
	バスケットプレート (ほう素添加ステンレス鋼)	251	248 251	300
トラニオン	120	120 118	350	

注記*1：燃料棒の最高温度とした。なお，燃料棒には二酸化ウラン，ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して均質化した物性値を設定している。

*2：照射硬化回復試験の結果，BWR 燃料では，約 270 °C では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている⁽⁷⁾。

*3：配置(iii)における解析結果を示す。

*4：蓋部，底部，側部中性子遮蔽材のうち，最も高い温度を示す。

除熱解析のモデル化及び解析条件について

1. 伝熱形態について

HDP-69B(B)型の伝熱形態を別紙 1-1 図に示す。

使用済燃料から発生した崩壊熱は、主に胴内に充填されたヘリウムガスの熱伝導とふく射によりチャンネルボックスに伝えられ、さらにチャンネルボックスからバスケットプレート及び伝熱プレートに伝えられる。バスケットプレート及び伝熱プレートに伝えられた熱は、主に熱伝導によりバスケットプレート端部に伝わり、さらにバスケットプレート端部からヘリウムガスの熱伝導とふく射により胴内面に伝えられる。続いて、胴内面に伝えられた熱は、熱伝導により金属キャスク表面に伝えられ、ふく射と空気の自然対流により金属キャスク周囲の大気に拡散される。なお、側部中性子遮蔽材領域では、主に炭素鋼及び銅製の伝熱フィンの熱伝導により熱が伝えられる。

2. 除熱解析のモデル化及び解析条件

除熱解析は、HDP-69B(B)型の実形状を軸方向断面、径方向断面にそれぞれ二次元で、燃料集合体の実形状を径方向断面に二次元でモデル化し、有限要素法による伝熱解析コード(ABAQUS)を用いて行った。使用した解析モデルは以下の3つである。

- ・ 金属キャスク熱解析モデル
 - ①軸方向全体モデル (以下「全体モデル」という。)
 - ②径方向輪切りモデル (以下「輪切りモデル」という。)
- ・ 燃料被覆管熱解析モデル
 - ③燃料集合体モデル

これら3つの解析モデルの入出力フローを別紙 1-2 図に示す。また、解析に使用する物性値を別紙 1-1 表及び別紙 1-2 表に、HDP-69B(B)型外表面の熱伝達率を別紙 1-3 表に、解析に使用する放射率を別紙 1-4 表に示す。

各解析モデルの概要及び解析条件を以下に示す。

(1) 全体モデル

全体モデルは、金属キャスク全体を二次元の軸対称体としてモデル化したものであり、蓋部及び底部の温度を評価するためのモデルである。全体モデルの形状図を別紙 1-3 図に示す。

全体モデルは二次元モデルであるため、収納物である使用済燃料及びバスケットは均質化して等価熱伝導率を設定した。側部中性子遮蔽材及び伝熱フィンに関しても、これらを均質化して等価熱伝導率を設定した。以下で、これらモデル化の詳細を述べる。

a. 燃料均質化領域の熱伝導率

(i) 径方向

使用済燃料及びバスケットが収納される領域（以下「燃料均質化領域」という。）の径方向熱伝導率は、内部発熱を伴う円柱の場合の式(1)を用いて計算した⁽¹⁾。

$$\lambda_{r1} = \frac{q \cdot R^2}{4(T_1 - T_2)} \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、
 λ_{r1} : 燃料均質化領域の径方向等価熱伝導率 (W/(m・K))
 q : 単位体積発熱量 (W/m³)
 R : 燃料均質化領域外半径 (m)
 T_1 : 燃料均質化領域最高温度 (K)
 T_2 : 燃料均質化領域外面平均温度 (K)

輪切りモデルで軸方向を断熱条件とし、周囲環境温度を-25℃、38℃、100℃とした3ケースの予備解析により T_1 及び T_2 を求め、式(1)を用いて温度依存性のある λ_{r1} を設定した。なお、各ケースで求められる λ_{r1} の代表温度は、 T_1 と T_2 の平均値とした。

(ii) 軸方向

燃料均質化領域の軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して式(2)により計算した。

$$\lambda = \frac{\sum(V_i \cdot \lambda_i)}{V} \dots\dots\dots (2)$$

- ここで、
 λ : 等価熱伝導率 (W/(m・K))
 V_i : 各構成部材の体積 (m³)
 λ_i : 各構成部材の熱伝導率 (W/(m・K))
 V : 均質化した領域の体積 (m³)

このとき、バスケットの軸方向の材料不連続性を以下のように考慮した。

バスケットは菓子折り構造で上下のプレート同士は接触する構造だが、燃料均質化領域の軸方向熱伝導率の算出に当たっては、バスケットの製造公差を考慮して製造公差分のギャップによる非接触部を仮定した。具体的には、別紙1-4図に示すようにバスケットは直交しているプレートで構成されており、ギャップは軸方向に互い違いに生じることになるため、別紙1-5図に示すようにギャップを有した2つのプレートが並列にあるとして、製造公差の許容値に相当する最大ギャップを仮定してバスケットの軸方向熱伝導率を計算した⁽²⁾。この値を用いて、式(2)により燃料均質化領域の軸方向熱伝導率を計算した。

b. 側部中性子遮蔽材領域の熱伝導率

(i) 径方向

側部中性子遮蔽材及び伝熱フィンのある領域（以下「側部中性子遮蔽材領域」という。）の径方向熱伝導率は、熱通過を伴う円筒の場合の式(3)を用いて計算した⁽¹⁾。

$$\lambda_{r2} = Q \times \frac{\ln(R_4/R_3)}{2\pi(T_3 - T_4)} \dots\dots\dots (3)$$

- ここで、 λ_{r2} : 側部中性子遮蔽材領域の径方向等価熱伝導率 (W/(m・K))
Q : 軸方向単位長さ当たりの発熱量 (W/m)
R₃ : 胴外面の半径 (m)
R₄ : 外筒内面の半径 (m)
T₃ : 胴外面の平均温度 (K)
T₄ : 外筒内面の平均温度 (K)

輪切りモデルで軸方向を断熱条件とし、周囲環境温度を-25℃、38℃、100℃とした3ケースの予備解析によりT₃及びT₄を求め、式(3)から温度依存性のある λ_{r2} を設定した。なお、各ケースで求められる λ_{r2} の代表温度は、T₃とT₄の平均値とした。

(ii) 軸方向

側部中性子遮蔽材領域の軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して式(2)により計算した。

c. 解析条件

発熱条件として、軸方向の発熱分布を考慮した設計崩壊熱量となるように燃料有効部の発熱密度を設定した。

全体モデルの外部境界条件を別紙1-5表に示す。周囲温度を45℃、貯蔵建屋壁面温度を65℃とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面へのふく射による放熱を考慮した。なお、金属キャスク底面から貯蔵架台への伝熱は保守側に断熱とした。

(2) 輪切りモデル

輪切りモデルは、燃料集合体が最高温度となる金属キャスクの径方向断面を二次元でモデル化したものであり、中性子遮蔽材（側部）、胴、バスケット等の温度を評価するためのモデルである。輪切りモデルの形状図を別紙1-6図に示す。

燃料集合体は均質化して等価熱伝導率を設定した。バスケットプレート、伝熱プレート及びこれら交差部に関しても、均質化して等価熱伝導率を設定した。以下で、これらモデル化の詳細を述べる。

a. 燃料集合体領域の熱伝導率

燃料集合体が収納されるチャンネルボックス内面より内側の領域（以下「燃料集合体領域」という。）の熱伝導率は、円柱形状の内部発熱体の伝熱基礎式を基に正方形角柱形状に当てはめた以下の式(4)を用いて計算した。

$$\lambda_f = \frac{q W^2}{K(T_5 - T_6)} \dots\dots\dots (4)$$

- ここで、
 λ_f : 燃料集合体領域の等価熱伝導率 (W/(m・K))
 q : 軸方向燃焼度の最大領域における単位体積発熱量 (W/m³)
 W : 燃料集合体領域外形寸法 (m)
 K : 係数 (－) (別添 3 に算出過程を示す。)
 T_5 : 燃料棒最高温度 (K)
 T_6 : チャンネルボックス温度 (K)

燃料集合体モデルで軸方向を断熱条件とし、チャンネルボックス温度を 27 °C、127 °C、327 °Cとした 3 ケースの予備解析により T_5 及び T_6 を求め、式(4)から温度依存性のある λ_f を設定した。なお、各ケースで求められる λ_f の代表温度は、 T_5 と T_6 の平均値とした。

b. バスケットプレート、伝熱プレート及びこれら交差部の熱伝導率

バスケットプレート及び伝熱プレートは菓子折り構造により格子状となるように配置され、その交差部には切欠きを有する。バスケットプレート、伝熱プレート及びこれら交差部の熱伝導率には、この切欠きを考慮してモデル化したバスケットモデルによる予備解析から求められる等価熱伝導率を設定した。

c. 軸方向への熱移動

輪切りモデルでは、軸方向への熱移動がモデル化されないため実際より高温の結果を与える。そこで、全体モデルによる解析結果を用いて、以下の方法で軸方向への熱移動を考慮した。

(i) 外周部燃料領域の軸方向熱移動

外周部の 32 体の燃料集合体領域では、全体モデル解析における燃料均質化領域での軸方向熱移動量を差し引いた発熱密度を設定した。なお、中央部の 37 体の燃料集合体領域では、最高燃焼度の軸方向燃焼度最大領域の崩壊熱量に相当する発熱密度を設定し、軸方向熱移動は考慮しない。

(ii) 胴内面～外筒外面の軸方向熱移動

全体モデル解析における胴内面から外筒外面の軸方向への熱移動量と一致するように、胴内面及び外筒外面に吸熱を与えた。このとき、胴内面及び外筒外面の温度が全体モデルの温度と一致するように吸熱量を調整した。

軸方向への熱移動に関する概念を別紙 1-7 図に示す。また、輪切りモデルの軸方向熱移動量の設定方法と温度分布の関係を別紙 1-8 図に示す。輪切りモデルにおける胴内面より内側の軸方向熱移動量は全体モデルを上回り、また、輪切りモデルの温度は全体モデルより保守的な温度となる。

輪切りモデルに設定した発熱条件を別紙 1-6 表、別紙 1-7 表及び別紙 1-8 表に、熱移動量を別紙 1-9 表、別紙 1-10 表及び別紙 1-11 表に示す。

d. 解析条件

輪切りモデルの外部環境条件を別紙 1-12 表に示す。周囲温度を 45 °C、貯蔵建屋壁面温度を 65 °C とし、周囲空気への自然対流熱伝達及び貯蔵建屋壁面へのふく射による放熱を考慮した。

(3) 燃料集合体モデル

燃料集合体モデルは、燃料集合体の軸方向中央断面を二次元でモデル化したものであり、燃料被覆管の温度を評価するためのモデルである。燃料棒は正八角形でモデル化し、断面積等価となるように寸法を設定した。燃料集合体モデルの形状図を別紙 1-9 図及び別紙 1-10 図に示す。

a. 燃料棒の熱伝導率

燃料棒の熱伝導率は、二酸化ウラン、ヘリウムガス及びジルカロイの体積割合を考慮して式(2)により計算した。

b. 解析条件

発熱条件として、最高燃焼度燃料の PF 最大領域の崩壊熱量に相当する発熱密度を設定した。また、伝熱形態として熱伝導及びふく射を考慮し、軸方向への伝熱を無視し断熱とした。境界条件は、輪切りモデル解析で最高温度となるチャンネルボックスの温度を設定した。

c. ふく射計算の手法

燃料棒の中心節点及びチャンネルボックスの節点に別紙 1-11 図に示すとおりふく射接続要素を設定し、6 種類のふく射接続を考慮した（別紙 1-12 図、別紙 1-13 図、

別紙 1-14 図)。この 6 ケースのふく射接続におけるふく射移動量は、伝熱解析コード (ABAQUS) コードにより下式にて考慮される。この式の入力条件となる燃料棒表面積、形態係数及び放射率は、別紙 1-13 表に示す値を用いた。なお、同表に示すとおりふく射計算に使用する燃料棒の表面積は、解析モデルとは異なり実燃料棒の表面積を設定した。

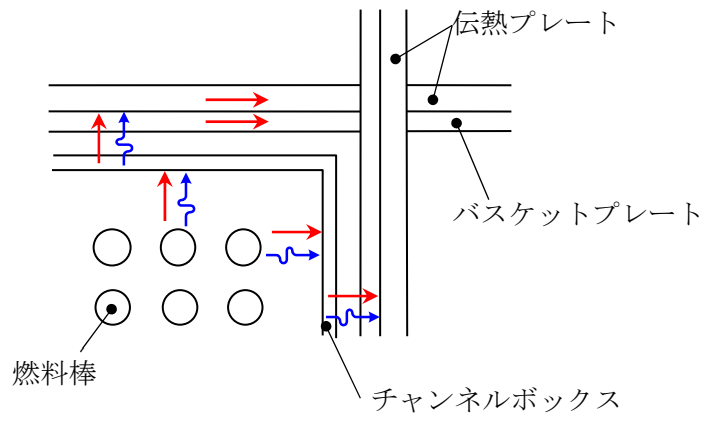
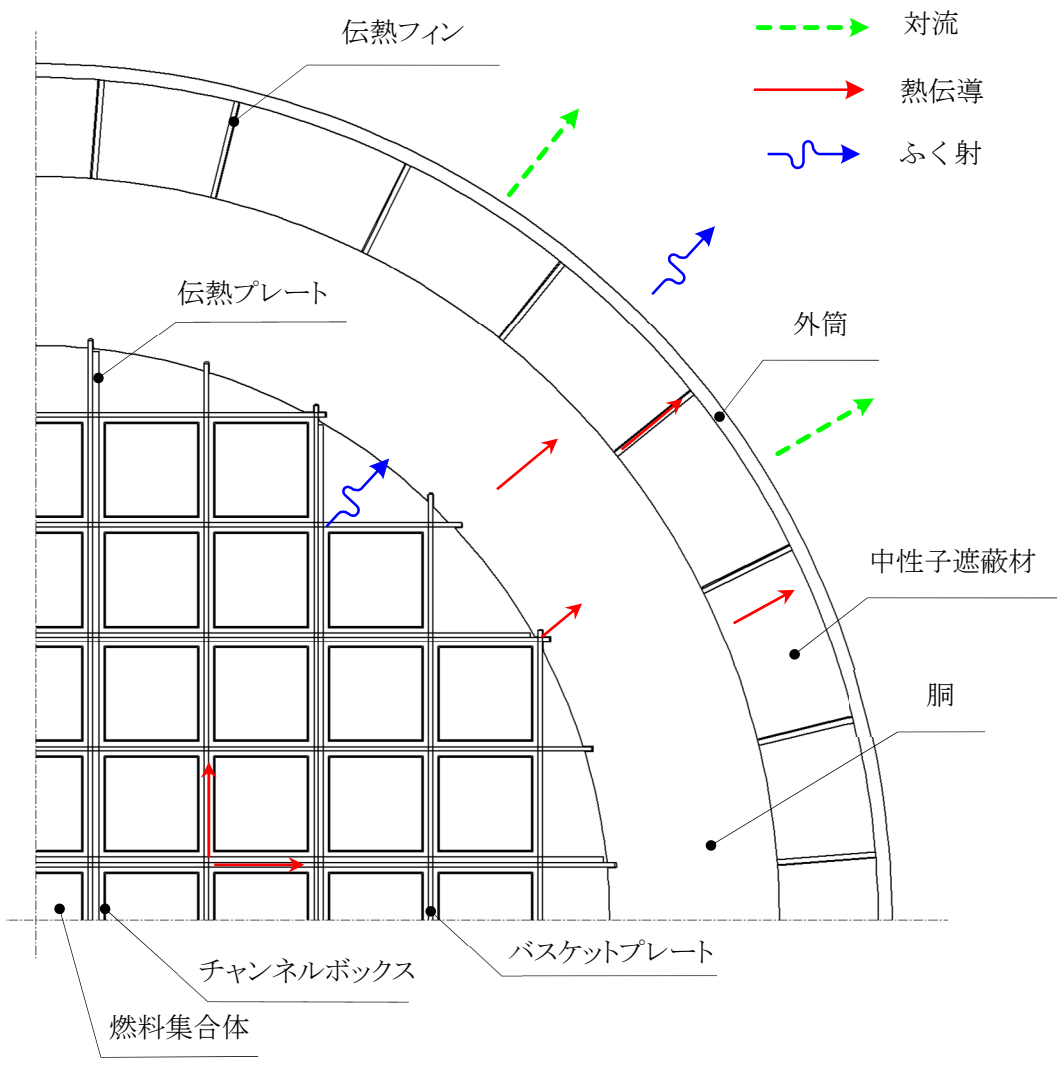
$$Q_r = F_\epsilon \cdot \sigma \cdot A (T_a^4 - T_b^4) \dots\dots\dots (5)$$

$$F_\epsilon = \frac{F_{ab}}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1} \dots\dots\dots (6)$$

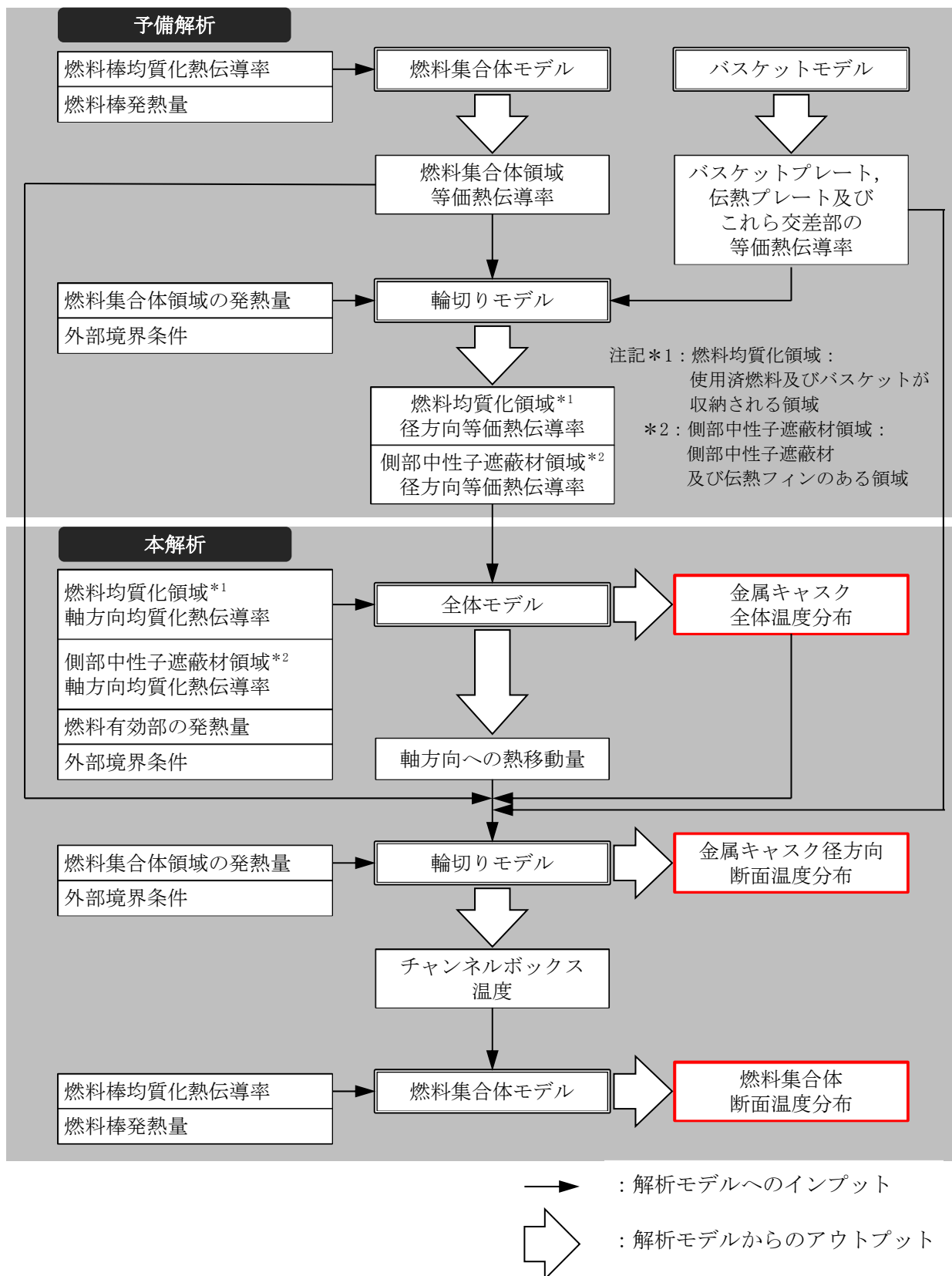
- ここで、
- Q_r : ふく射移動量 (W)
 - F_ϵ : 総括放射係数 (-)
 - σ : ステファン・ボルツマン係数 ((W・m²)/K⁴)
 - A : 燃料棒表面積 (m²)
 - T_a : 燃料棒 a の温度 (K)
 - T_b : 燃料棒 b の温度 (K)
 - F_{ab} : 燃料棒 a から燃料棒 b への形態係数 (-)
 - ϵ_a : 燃料棒 a の放射率 (-)
 - ϵ_b : 燃料棒 b の放射率 (-)

3. 参考文献

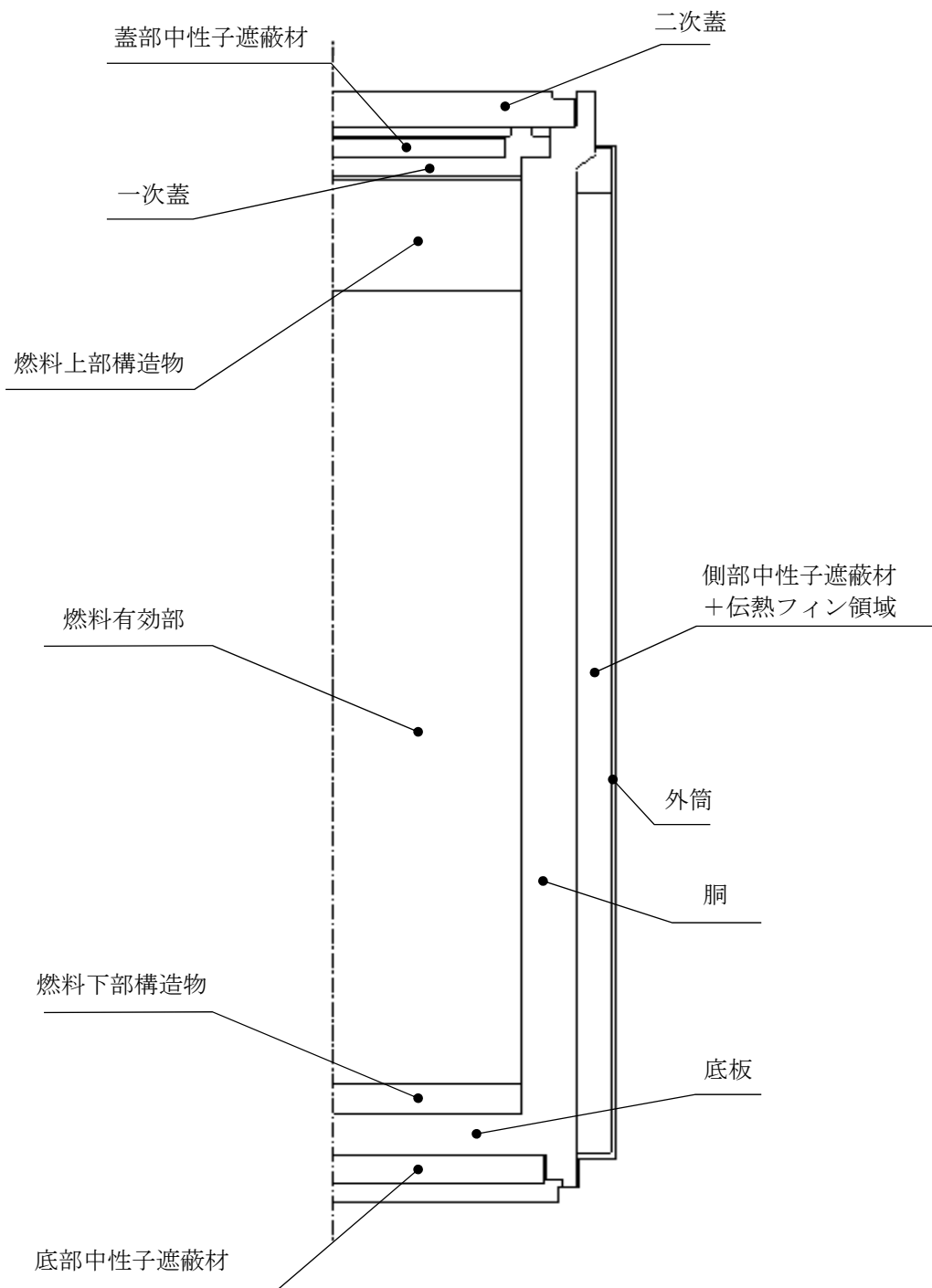
- (1) (一社)日本機械学会, 「伝熱ハンドブック」(1993), P. 6, 7
- (2) (一社)日本機械学会, 「JSME テキストシリーズ 伝熱工学 改訂第8版」(2012), P. 31
- (3) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」(2003), P. 314, 317, 318, 328, 329
- (4) N. Kumagai, et al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. 15th Int. Symp. on PATRAM(2007)
- (5) (一社)日本機械学会, 「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版) JSME S FA1-2007, 事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定(JSME S FA-CC-004)」(2009)
- (6) (一社)日本原子力学会, 「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年11月), P. 200, 201
- (7) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」(1975), P. 148, 149
- (8) R. Shiegel, J. R. Howell, “THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER Second Edition”, Hemisphere Publishing Corporation(1981), P. 828
- (9) D. L. Hagrman, et al., ” MATPRO-VERSION 11 A HANDBOOK OF MATERIALS PROPERTIES FOR USE IN THE ANALYSIS OF LIGHT WATER REACTOR FUEL ROD BEHAVIOR”, NUREG/CR-0497 TREE-1280 R3(1979)



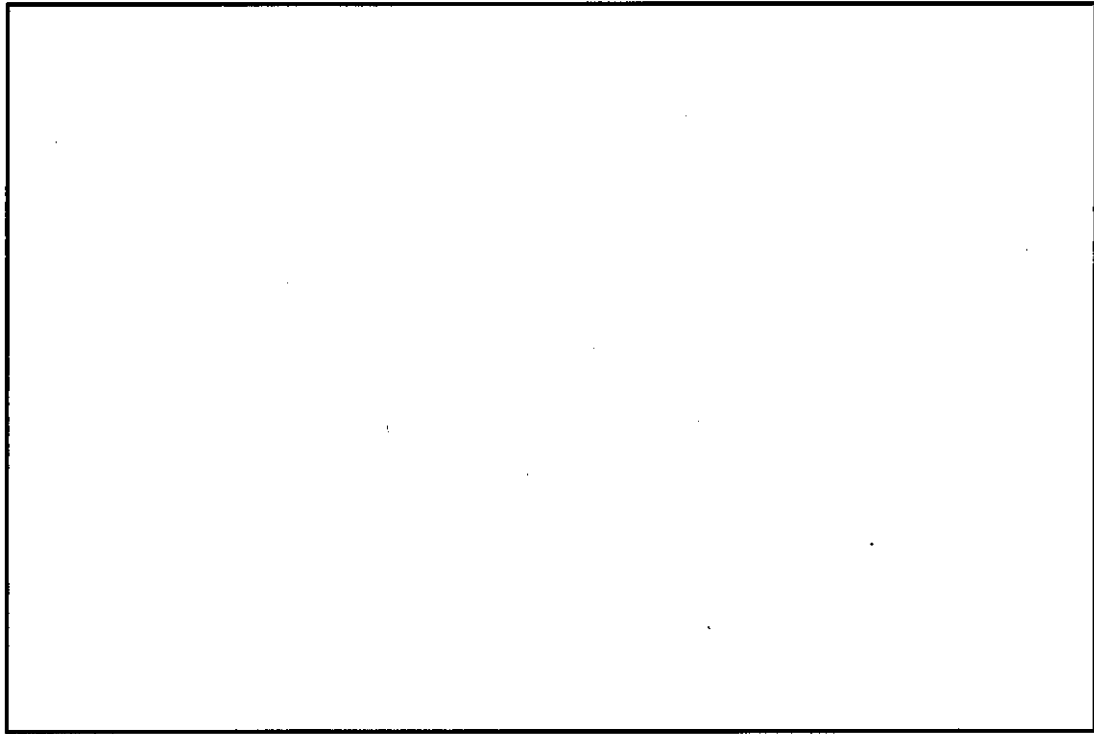
別紙 1-1 図 伝熱形態図



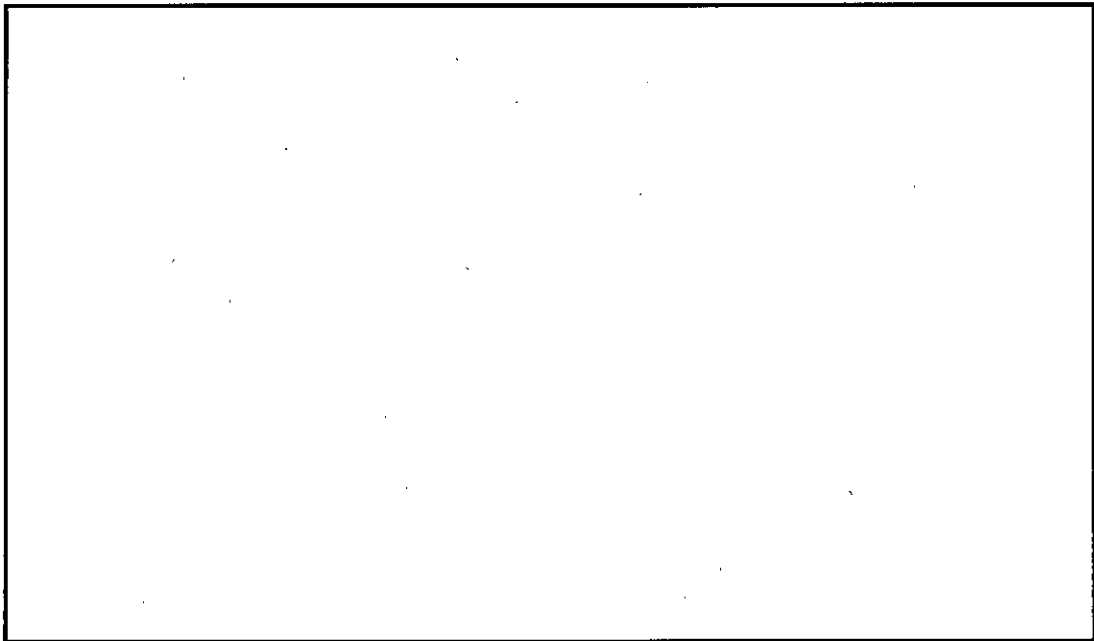
別紙 1-2 図 除熱解析モデルの入出力フロー図



別紙 1-3 図 全体モデル形状図



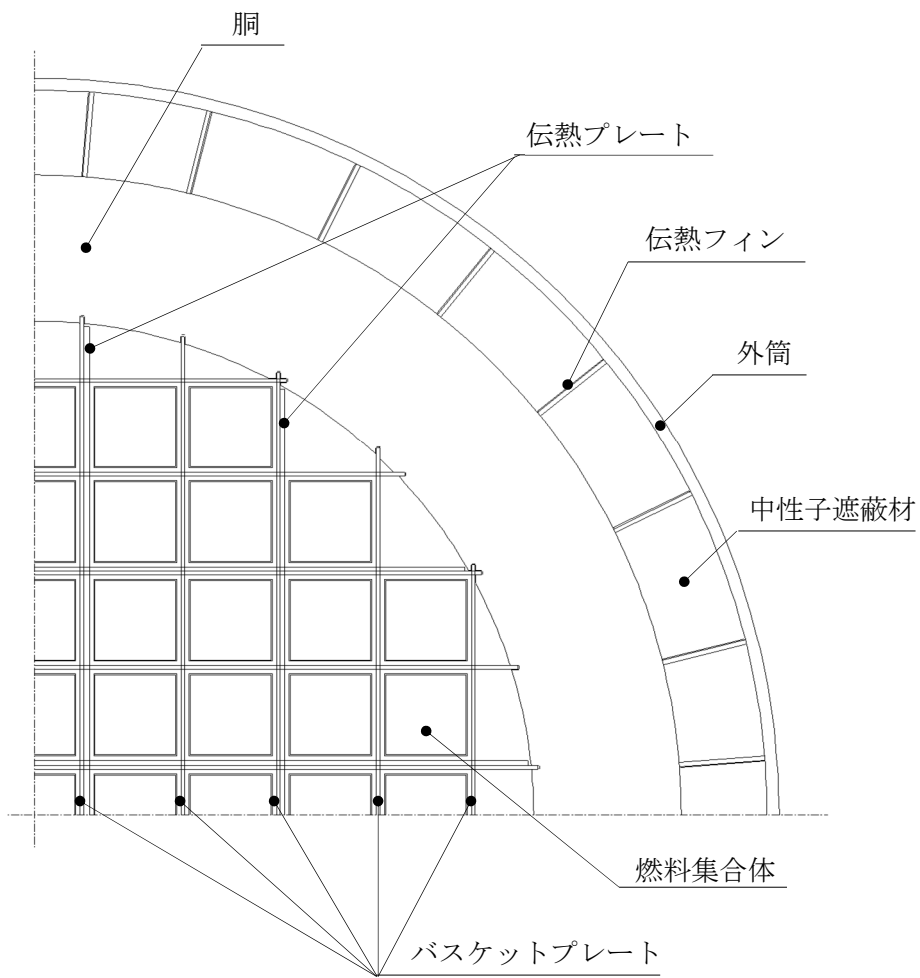
別紙 1-4 図 バスケットの構造



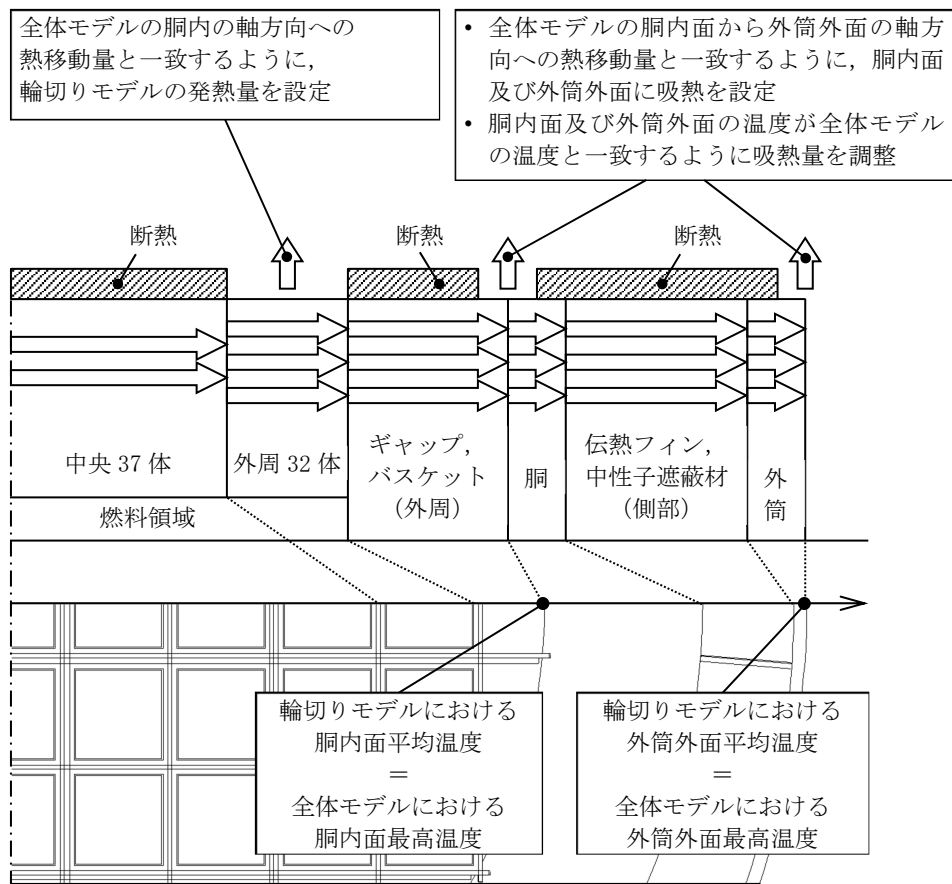
別紙 1-5 図 バスケットの軸方向等価熱伝導率の求め方

別紙 1-11

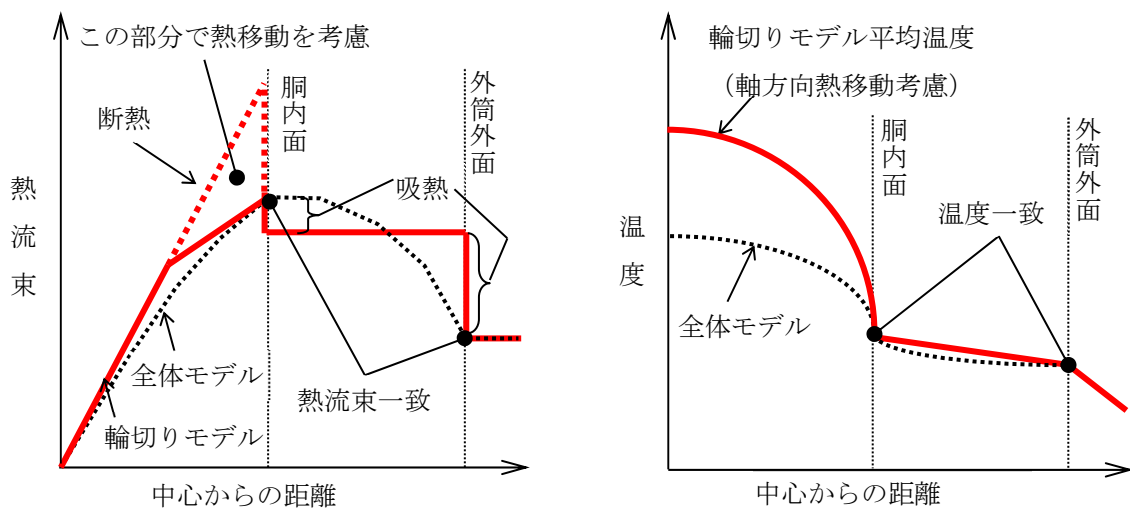
□ 内は商業機密のため、非公開とします。



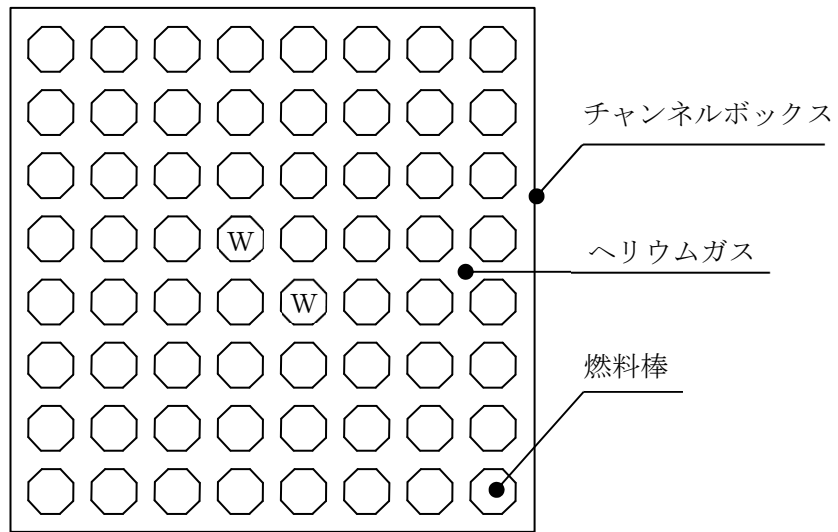
別紙 1-6 図 輪切りモデル形状図



別紙 1-7 図 輪切りモデルの軸方向熱移動モデル化概念図

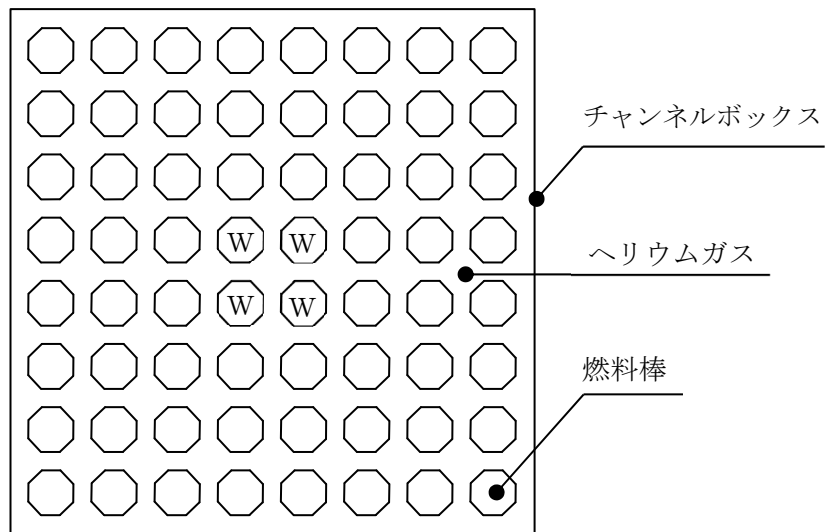


別紙 1-8 図 輪切りモデルの軸方向熱移動量の設定方法と温度分布の関係 (一次元的概念図)



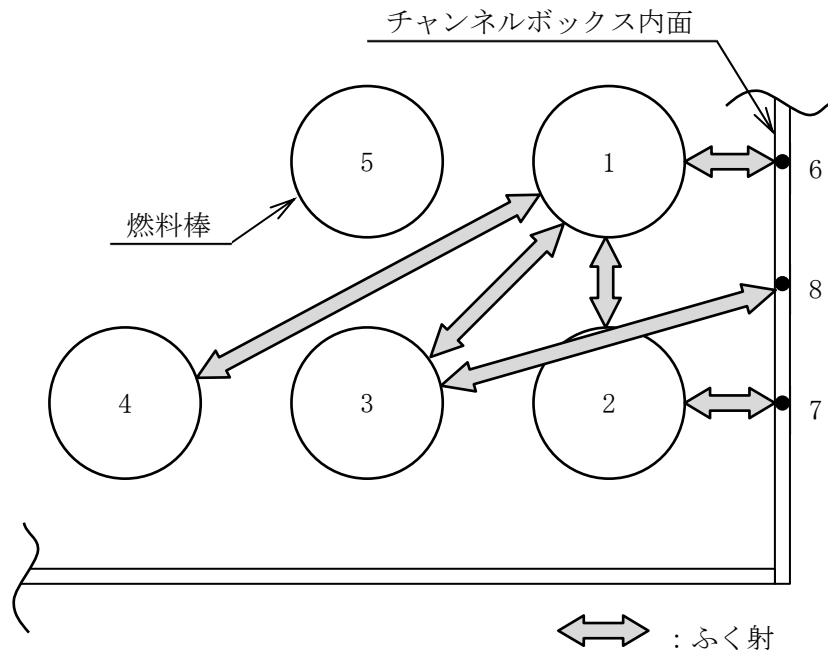
注記*1：Wはウォーターロッドであり，発熱はない。

別紙 1-9 図 燃料集合体モデル形状図
(新型 8×8 燃料，新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の場合)

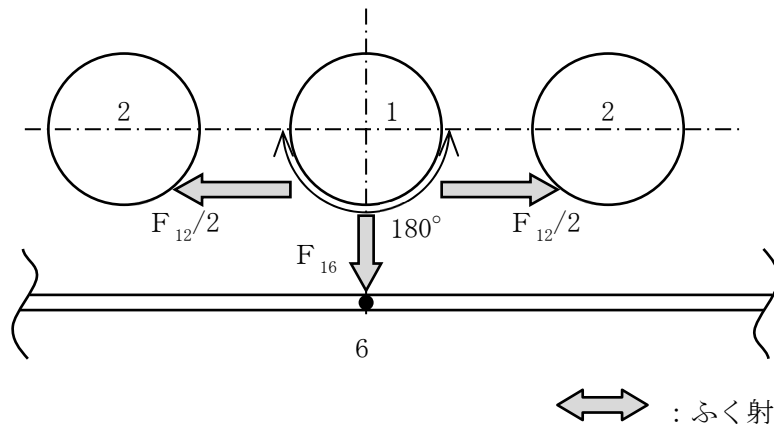


注記*1：Wはウォーターロッドであり，発熱はない。

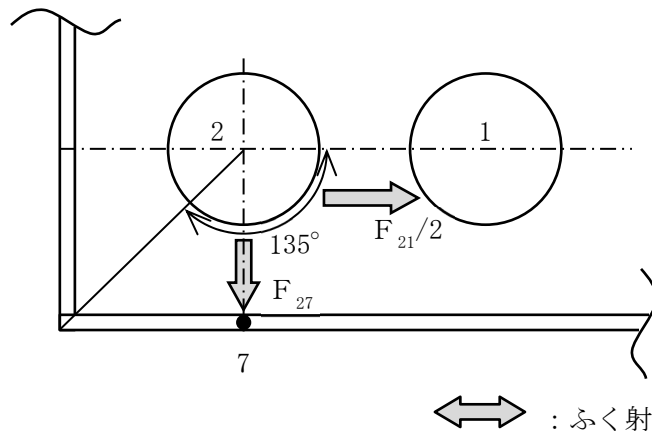
別紙 1-10 図 燃料集合体モデル形状図
(高燃焼度 8×8 燃料の場合)



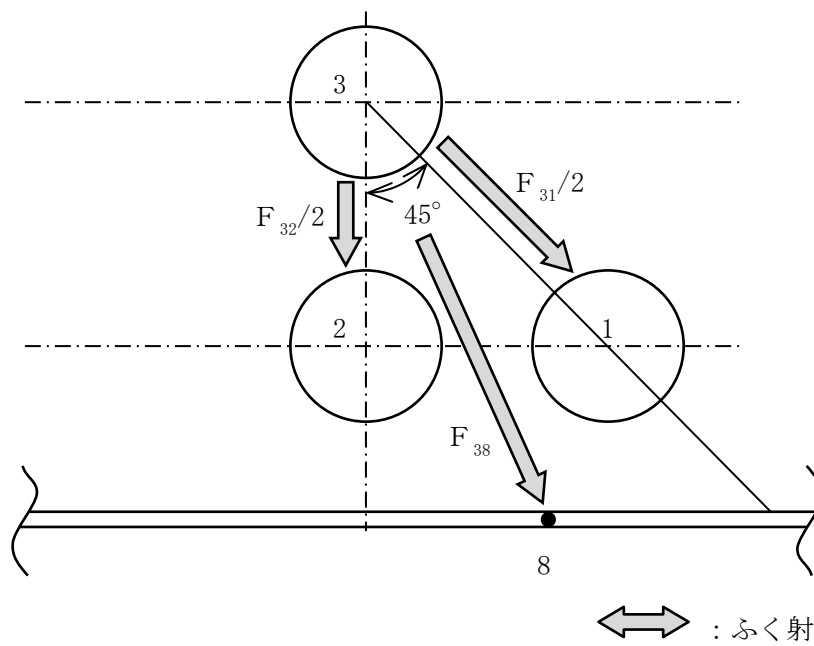
別紙 1-11 図 燃料集合体モデルのふく射接続の種類



別紙 1-12 図 燃料棒 1-チャンネルボックス 6 間の形態係数算出モデル



別紙 1-13 図 燃料棒 2-チャンネルボックス 7 間の形態係数算出モデル



別紙 1-14 図 燃料棒 3-チャンネルボックス 8 間の形態係数算出モデル

別紙 1-1 表 材料の物性値

構成部材	材料	温度 (°C)	熱伝導率 (W/(m・K))
胴 外筒 一次蓋 二次蓋	炭素鋼* ¹	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
蓋部中性子遮蔽材 底部中性子遮蔽材 側部中性子遮蔽材	樹脂* ²	—	0.6
バスケットプレート	ほう素添加 ステンレス鋼* ³	25	13.5
		50	13.9
		100	14.9
		150	15.8
		200	16.7
		250	17.6
		300	18.5
		350	19.4
伝熱プレート	アルミニウム合金* ¹	26.85	222
伝熱フィン	炭素鋼* ¹	26.85	43.0
		226.85	38.6
		526.85	27.7
	銅* ¹	26.85	398
		326.85	383
		526.85	371
内部気体	ヘリウム* ¹	26.85	0.1527
		126.85	0.1882
		226.85	0.2212
		326.85	0.2523
周囲気体	空気* ¹	26.85	0.02614
		126.85	0.03305
		226.85	0.03951

注記*1：参考文献(3)参照。

*2：使用する樹脂は、参考文献(4)に示すものである。

*3：使用するほう素添加ステンレス鋼は、参考文献(5)に示すものである。

別紙 1-2 表 均質化領域の物性値

解析モデル	均質化領域	温度 (°C)	熱伝導率 (W/(m・K))	
			径方向	軸方向
全体モデル	燃料均質化領域* ¹ (燃料ハンドル部)			
	燃料均質化領域* ¹ (燃料グリッド部)			
	燃料均質化領域* ¹ (燃料上部プレナム部)			
	燃料均質化領域* ¹ (燃料有効部)			
	燃料均質化領域* ¹ (燃料下部タイプレート部)			
	側部中性子遮蔽材領域* ²			
輪切りモデル	燃料集合体領域* ³			
燃料集合体モデル	燃料棒			

注記*1：使用済燃料及びバスケットが収納される領域。

*2：側部中性子遮蔽材及び伝熱フィンのある領域。

*3：燃料集合体が収納されるチャンネルボックス内面より内側の領域。

別紙 1-3 表 HDP-69B(B)型外表面の熱伝達率

部位	形状	温度 (K)	温度 (°C)	熱伝達率*1 (W/(m ² ・K))
金属キャスク外表面 (側面)	垂直円筒	293.15	20	$1.55 \times \Delta T^{1/3}$
		373.15	100	$1.31 \times \Delta T^{1/3}$
		473.15	200	$1.11 \times \Delta T^{1/3}$
金属キャスク外表面 (上面)	上向き水平平板	293.15	20	$1.57 \times \Delta T^{1/3}$
		373.15	100	$1.32 \times \Delta T^{1/3}$
		473.15	200	$1.12 \times \Delta T^{1/3}$
金属キャスク外表面 (下部端板)	下向き水平平板	293.15	20	$0.965 \times \Delta T^{1/5}$
		373.15	100	$0.944 \times \Delta T^{1/5}$
		473.15	200	$0.924 \times \Delta T^{1/5}$

注記*1：熱伝達率は下記の式を用いて計算する。

$$h = 0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta T}{\nu^2} \times P r \right)^{1/3} \quad (\text{垂直円筒})^{(6)}$$

$$h = 0.13 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta T}{\nu^2} \times P r \right)^{1/3} \quad (\text{上向き水平平板})^{(6)}$$

$$h = 0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta \Delta T}{\nu^2} \times D^3 \times P r \right)^{1/5} \quad (\text{下向き水平平板})^{(6)}$$

- ここで、 h : 熱伝達率 (W/(m²・K))
 λ : 熱伝導率 (W/(m・K))
 g : 重力加速度 (=9.80665 (m/s²))
 β : 体積膨張係数 (1/K)
 ΔT : 周囲空気と外表面の温度差 (K)
 ν : 動粘性係数 (m²/s)
 $P r$: プラントル数 (-)
 D : 代表長さ (m)

別紙 1-4 表 材料の放射率

構成部材	材料	放射率* ¹
胴（内面）	炭素鋼	0.055
一次蓋（上面） 二次蓋（下面）	炭素鋼	0.17
蓋部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼	0.15
一次蓋（下面）	炭素鋼	0.61
バスケットプレート	ほう素添加ステンレス鋼	0.15
伝熱プレート	アルミニウム合金	0.055
外筒（外表面） 胴（外表面） 二次蓋（外表面） 貯蔵建屋壁面	塗装	0.8

注記*1：参考文献(7)参照。塗装の設定根拠の詳細は別添 1 を参照。一次蓋（下面）では、金属ガスケット及び蓋部中性子遮蔽材温度を保守的に評価するため、酸化を考慮。また、胴（内面）では、燃料被覆管及びバスケット温度を保守的に評価するため、より小さな値を仮定。

別紙 1-5 表 全体モデルの境界条件

項目	境界条件
周囲温度（℃）	45
貯蔵建屋壁面温度（℃）	65
貯蔵建屋壁面放射率	0.8
金属キャスク表面放射率	0.8
金属キャスク側面から 貯蔵建屋内壁面への形態係数	0.232* ¹
金属キャスク表面熱伝達率 （側面，上面，下部端板）	別紙 1-3 表による
底部熱移動	断熱

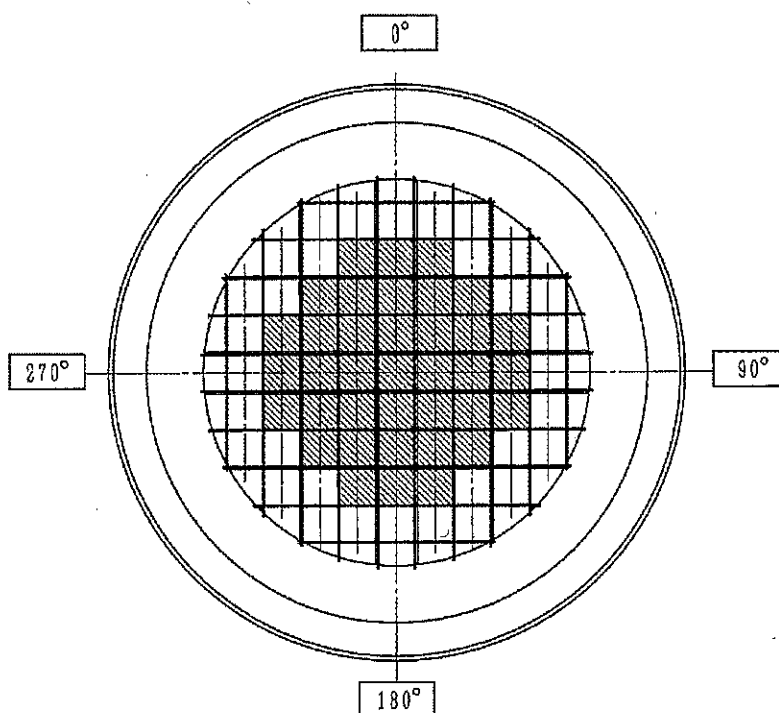
注記*1：金属キャスク配列ピッチ寸法 3.5 m から算出される値。算出過程は別添 2 参照。

別紙 1-6 表 輪切りモデルの発熱条件 (配置(i))

対象	収納体数 (体)	発熱量 (kW) *1	
		軸方向への 熱移動考慮前	軸方向への 熱移動考慮後
中央に収納される 使用済燃料	37	11.7	11.7
外周に収納される 使用済燃料	32	5.45	2.20
合計	69	17.1 *2	13.9

注記*1: 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm) の発熱量を、燃料有効長 (3,708 mm) 当たりに換算した値。なお、表中の値は端数処理した値であるため、合計値が一致しない場合がある。

*2: 輪切りモデルの評価対象断面は PF 最大領域であり、軸方向への熱移動考慮前における発熱量の合計値は設計発熱量 (15.34 kW) を上回る。



: 燃焼度 40,000 MWd/t に相当する発熱量。

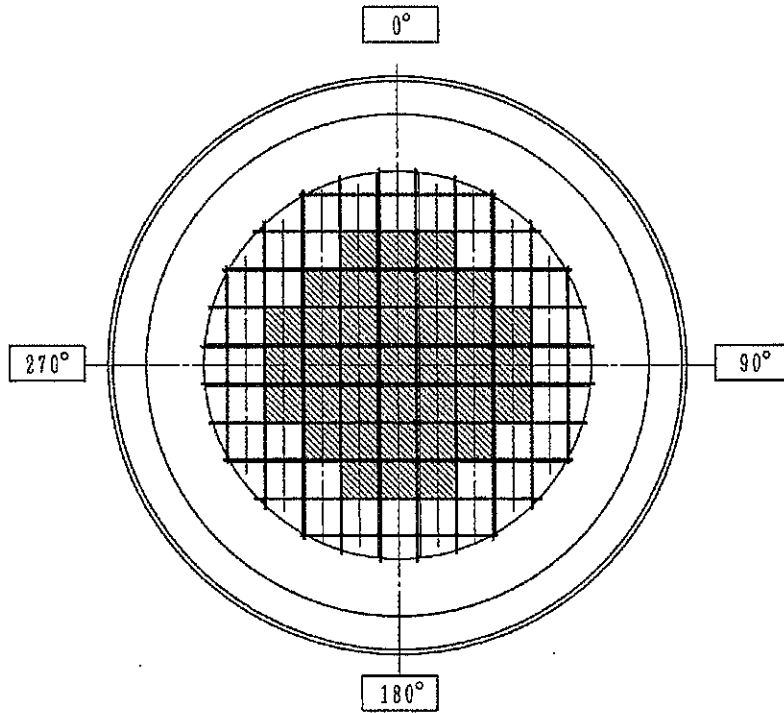
: 発熱量の総量が、設計崩壊熱量 (燃焼度 34,000 MWd/t に相当する発熱量 69 体分) となるように調整した発熱量。軸方向への熱逃げを考慮することでより小さな値となる。

別紙 1-7 表 輪切りモデルの発熱条件 (配置 (ii))

対象	収納体数 (体)	発熱量 (kW)* ¹	
		軸方向への 熱移動考慮前	軸方向への 熱移動考慮後
中央に収納される 使用済燃料	37	12.3	12.3
外周に収納される 使用済燃料	32	5.17	1.53
合計	69	17.5* ²	13.8

注記*1: 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm) の発熱量を、燃料有効長 (3,708 mm) 当たりに換算した値。なお、表中の値は端数処理した値であるため、合計値が一致しない場合がある。

*2: 輪切りモデルの評価対象断面は PF 最大領域であり、軸方向への熱移動考慮前における発熱量の合計値は設計発熱量 (15.33 kW) を上回る。



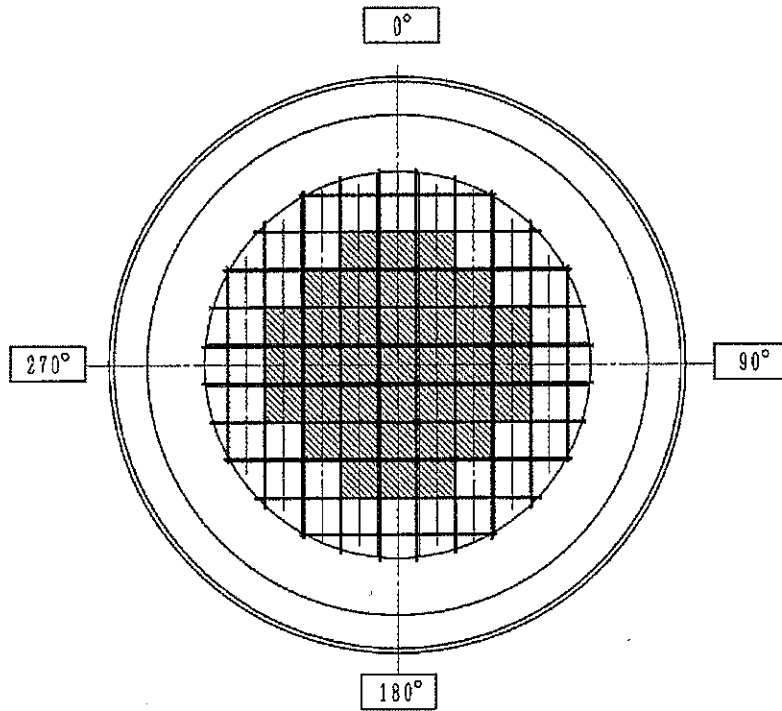
- : 燃焼度 48,000 MWd/t に相当する発熱量。
- : 発熱量の総量が、設計崩壊熱量 (燃焼度 40,000 MWd/t に相当する発熱量 69 体分) となるように調整した発熱量。軸方向への熱逃げを考慮することでより小さな値となる。

別紙 1-8 表 輪切りモデルの発熱条件 (配置(iii))

対象	収納体数 (体)	発熱量 (kW) *1	
		軸方向への 熱移動考慮前	軸方向への 熱移動考慮後
中央に収納される 使用済燃料	37	7.53	7.53
外周に収納される 使用済燃料	32	3.94	1.78
合計	69	11.5*2	9.30

注記*1: 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm) の発熱量を、燃料有効長 (3,708 mm) 当たりに換算した値。なお、表中の値は端数処理した値であるため、合計値が一致しない場合がある。

*2: 輪切りモデルの評価対象断面は PF 最大領域であり、軸方向への熱移動考慮前における発熱量の合計値は設計発熱量 (10.37 kW) を上回る。



: 燃焼度 34,000 MWd/t に相当する発熱量。

: 発熱量の総量が、設計崩壊熱量 (燃焼度 29,000 MWd/t に相当する発熱量 69 体分) となるように調整した発熱量。軸方向への熱逃げを考慮することでより小さな値となる。

別紙 1-9 表 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動量 (配置 (i))

部位	軸方向への熱移動量 (kW) *1
中央に収納される 使用済燃料 (37 体)	0
外周に収納される 使用済燃料 (32 体)	3.26
胴	1.51
伝熱フィン, 中性子遮蔽材 (側部)	0
外筒	0.58

注記*1: 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm)
の熱移動量を燃料有効長 (3,708 mm) 当たりに換算した値。

別紙 1-10 表 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動量 (配置 (ii))

部位	軸方向への熱移動量 (kW) *1
中央に収納される 使用済燃料 (37 体)	0
外周に収納される 使用済燃料 (32 体)	3.63
胴	1.55
伝熱フィン, 中性子遮蔽材 (側部)	0
外筒	0.58

注記*1: 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm)
の熱移動量を燃料有効長 (3,708 mm) 当たりに換算した値。

別紙 1-11 表 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動量 (配置 (iii))

部位	軸方向への熱移動量 (kW) *1
中央に収納される 使用済燃料 (37 体)	0
外周に収納される 使用済燃料 (32 体)	2.16
胴	0.79
伝熱フィン, 中性子遮蔽材 (側部)	0
外筒	0.55

注記*1: 輪切りモデルの評価対象断面である PF 最大領域 (mm)
の熱移動量を燃料有効長 (3,708 mm) 当たりに換算した値。

別紙 1-12 表 輪切りモデルの境界条件

項目	境界条件
周囲温度 (°C)	45
貯蔵建屋壁面温度 (°C)	65
貯蔵建屋壁面放射率	0.8
金属キャスク表面放射率	0.8
金属キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数	0.232 ^{*1}
金属キャスク表面熱伝達率 (側面)	別紙 1-3 表による。

注記*1：金属キャスク配列ピッチ寸法 3.5 m から算出される値。算出過程は別添 2 参照。

別紙 1-13 表 燃料集合体モデルにおけるふく射計算入力条件

No.	接続ケース*1			燃料棒 a の 表面積 (mm ² /mm) *3	形態係数	放射率	
	記号	燃料棒(a)	燃料棒(b) CB*2(b)			燃料棒(a)*7	燃料棒(b) CB*2(b)*7
1	F ₁₂	燃料棒(1)	燃料棒(2)		0.128*4	0.8	0.8
2	F ₁₃	燃料棒(1)	燃料棒(3)		0.0860*5	0.8	0.8
3	F ₁₄	燃料棒(1)	燃料棒(4)		0.0133*5	0.8	0.8
4	F ₁₆	燃料棒(1)	CB(6)		0.372*6	0.8	0.8
5	F ₂₇	燃料棒(2)	CB(7)		0.311*6	0.8	0.8
6	F ₃₈	燃料棒(3)	CB(8)		0.0180*6	0.8	0.8

注記*1：別紙 1-11 図参照。

*2：CB はチャンネルボックス。

*3：単位長さ（1 mm）当たりの燃料棒の表面積（燃料棒外径 mm）。

*4：平行に配置された円柱 A₁、A₂ 間の放射形態係数の式⁽⁸⁾より算出。

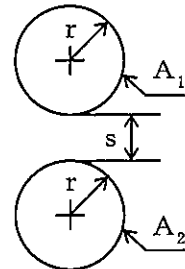
$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{\pi} \left(\sqrt{X^2 - 1} + \sin^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - X \right)$$

ここで、

$$X = 1 + \frac{s}{2r} = \text{$$

したがって、

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{\pi} \left(\text{$$



*5：伝熱解析コード(ABAQUS)により算出。

*6：下式より算出。

$$F_{16} = F_{61} = \frac{180^\circ}{360^\circ} - F_{12} = 0.5 - 0.128 = 0.372 \quad (\text{別紙 1-12 図参照})$$

$$F_{27} = F_{72} = \frac{135^\circ}{360^\circ} - F_{12}/2 = 0.375 - 0.128/2 = 0.311 \quad (\text{別紙 1-13 図参照})$$

$$F_{38} = F_{81} = \frac{45^\circ}{360^\circ} - F_{32}/2 - F_{31}/2 \quad (\text{別紙 1-14 図参照})$$

$$= 0.125 - 0.128/2 - 0.0860/2 = 0.0180$$

*7：ジルカロイの放射率として参考文献(9)より 0.8 とした。

塗装の放射率設定根拠

「別紙 1-4 表 材料の放射率」において塗装に適用した放射率 0.8 は、参考文献(3)に示された塗料の放射率 0.7~0.9 の平均値である。その設定の根拠を以下に示す。

「別紙 1-4 表 材料の放射率」のうち、放射率 0.8 が設定されている構成部材は、外筒（外表面）、胴（外表面）、二次蓋（外表面）並びに貯蔵建屋壁面である。これら構成部材の放射率に係る文献値及び解析入力値を別添 1-1 表に示す。また、HDP-69B(B)型の表面の塗装に使用予定である の塗装の放射率の実測値を別添 1-1 表に併せて示す。解析に適用した放射率（解析入力値）は、貯蔵建屋壁面の仕様が制約とならないように、コンクリートに比べて放射率がより小さい塗装を代表して適用することとし、塗料の放射率 0.7~0.9 の平均値 0.8 とした。解析入力値は放射率の実測値より小さく、HDP-69B(B)型の内部の温度をより高く評価する観点から保守的な設定である。

別添 1-1 表 塗装の放射率設定

構成部材	仕様	放射率		
		文献値	解析入力値	実測値
外筒（外表面） 胴（外表面） 二次蓋（外表面）	塗装	0.7~0.9 ⁽³⁾	0.8	0.84*1
貯蔵建屋壁面	コンクリート	0.94 ⁽³⁾		—

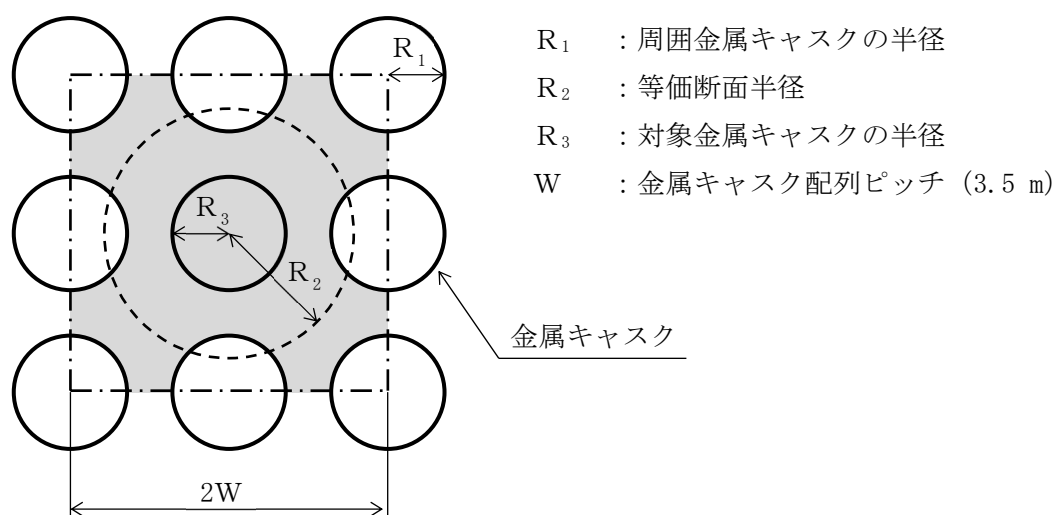
注記*1：HDP-69B(B)型の表面に使用予定である塗料の実測値。

形態係数の算出過程

「別紙 1-5 表 全体モデルの境界条件」及び「別紙 1-12 表 輪切りモデルの境界条件」において設定している金属キャスク表面から貯蔵建屋壁面への形態係数は、金属キャスク側面から貯蔵建屋の天井及び床面への形態係数として求めた。以下に、この形態係数の算出過程を示す。

はじめに、別添 2-1 図の金属キャスクの貯蔵配置に示すように、中心に配置された対象金属キャスクの周囲の金属キャスクで囲まれた空間（一辺が $2W$ の正方形の空間）のうち、周囲の金属キャスクを除く面積（別添 2-1 図の灰色のエリア）の等価断面半径 R_2 を式 (1) で求めた。

$$R_2 = \sqrt{4W^2/\pi - 3R_1^2} \dots\dots\dots (1)$$



別添 2-1 図 金属キャスクの貯蔵配置

金属キャスク表面から貯蔵建屋内壁面への形態係数は、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」の附属書 AT に基づき、円環フィン形状の形態係数を求める式から算出した。算出式及び各ふく射面の定義をそれぞれ式 (2) から式 (5) 及び別添 2-2 図に示す。ここで、金属キャスク長さを L とし、 b に R_3 を、 a に R_2 を、 c に L を代入して、2 面から 3 面への形態係数 F_{23} を求めた。形態係数の算出条件及び結果を別添 2-1 表に示す。

以上より、「別紙 1-5 表 全体モデルの境界条件」及び「別紙 1-12 表 輪切りモデルの境界条件」において設定している金属キャスク表面から貯蔵建屋壁面への形態係数は、別添 2-1 表の 2 面から 3 面への形態係数 F_{23} の 0.232 である。

$$\begin{cases} A_n \cdot F_{nk} = A_k \cdot F_{kn} \\ \sum_n F_{kn} = 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

n = 1, 2, 3, ...M

ここで, A_n : n面の面積 (m²)

F_{kn} : k面よりn面への形態係数 (-)

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left[\cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left\{ \sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{XA} \right) + B \sin^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) - \frac{\pi A}{2} \right\} \right] \dots\dots (3)$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \tan^{-1} \left(\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left\{ \frac{4(X^2-1) + (Y^2/X^2)(X^2-2)}{Y^2+4(X^2-1)} \right\} \right] \dots\dots (4)$$

$$- \frac{Y}{2\pi X} \left[\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \sin^{-1} \left\{ \frac{4(X^2-1) + (Y^2/X^2)(X^2-2)}{Y^2+4(X^2-1)} \right\} \right]$$

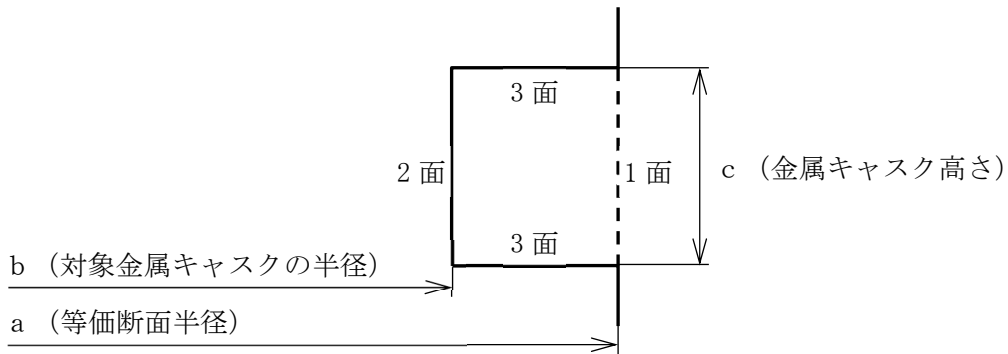
$$F_{13} = 1 - F_{12} - F_{11} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, X = a / b

Y = c / b

A = X² + Y² - 1

B = Y² - X² + 1



別添 2-2 図 各ふく射面の定義

別添 2-1 表 形態係数の算出条件及び結果

算出条件	形状 (m)	R_1	1.325
		a (R_2)	3.214
		b (R_3)	1.250
		c (L)	5.607
		W	3.50
	係数 (-)	X	2.57
		Y	4.49
		A	25.73
		B	14.51
算出結果	形態係数 (-)	F_{12}	0.298
		F_{21}	0.767
		F_{23}	0.232

燃料集合体領域の等価熱伝導率算出式中の係数Kについて

燃料集合体領域の等価熱伝導率 λ_f は、以下の式(1)を用いて計算する。

$$\lambda_f = \frac{q W^2}{K(T_5 - T_6)} \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、
 λ_f : 燃料集合体領域の等価熱伝導率 (W/(m・K))
 q : 軸方向燃焼度の最大領域における単位体積発熱量 (W/m³)
 W : 燃料集合体領域外形寸法 (m)
 K : 係数 (—)
 T_5 : 燃料棒最高温度 (K)
 T_6 : チャンネルボックス温度 (K)

以下で、式(1)中の係数Kについてその算出過程を示す。

矩形内部が一様の熱伝導率 k 、発熱密度 q で、境界温度が 0 K の場合 (別添 3-1 図) の理論解は、式(2)で得られる*1。

$$\frac{\theta(x, y)}{u''' L^2 / k} = 0.29469 \dots\dots\dots (2)$$

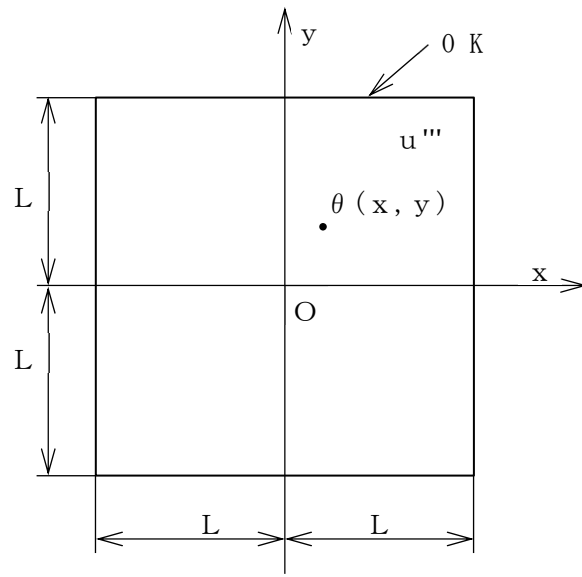
- ここで、
 $\theta(x, y)$: 矩形内部の温度 (K)
 u''' : 矩形内部の発熱密度 (W/m³)
 L : 矩形長さ (m)
 k : 矩形内部の熱伝導率 (W/(m・K))

$\theta(x=0, y=0) = T_5 - T_6$, $u''' = q$, $2L = W$, $k = \lambda_f$ とすると、

$$\frac{\theta(x, y)}{u''' L^2 / k} = \frac{4(T_5 - T_6)}{q W^2 / \lambda_f} = \frac{4}{K} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、 $K = 4/0.29469 = 13.57$ となる。

注記*1: Vedat S. Arpaci, "CONDUCTION HEAT TRANSFER", ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY (1966), P. 219, 220, 465



別添 3-1 図 矩形内部温度分布理論モデル

二次元除熱解析モデルの妥当性について

HDP-69B(B)型の除熱解析で用いた二次元の輪切りモデルと全体モデルを組み合わせた解析手法（以下「2D モデル」という。）の妥当性を確認するため、HDP-69B(B)型の三次元モデル（以下「3D モデル」という。）を用いた除熱解析を行い、2D モデルと 3D モデルの除熱解析結果を比較する。

1. 3D モデルの概要

3D モデル図を別紙 2-1 図に示す。3D モデルは、バスケットプレート及び伝熱プレートを均質化することなくモデル化し、燃料集合体は 1 体ずつ燃料集合体領域（チャンネルボックス内面より内側の領域）を直方体形状で均質化してモデル化している。このため、3D モデルは実形状に即した軸方向及び径方向への熱移動を評価できるモデルとなっている。ただし、トラニオンや蓋ボルト等の除熱解析の評価結果に大きな影響を与えないと考えられる部位はモデル化を省略している。3D モデルと 2D モデルの各部位のモデル化方針の比較を別紙 2-1 表に示す。また、3D モデルによる 2D モデルの妥当性確認フロー図を別紙 2-2 図に示す。

2. 解析条件

3D モデル及び 2D モデルを用いた除熱解析の条件の比較を別紙 2-2 表に示す。発熱条件は 2D モデルの配置(i)の条件とする。

3. 解析結果

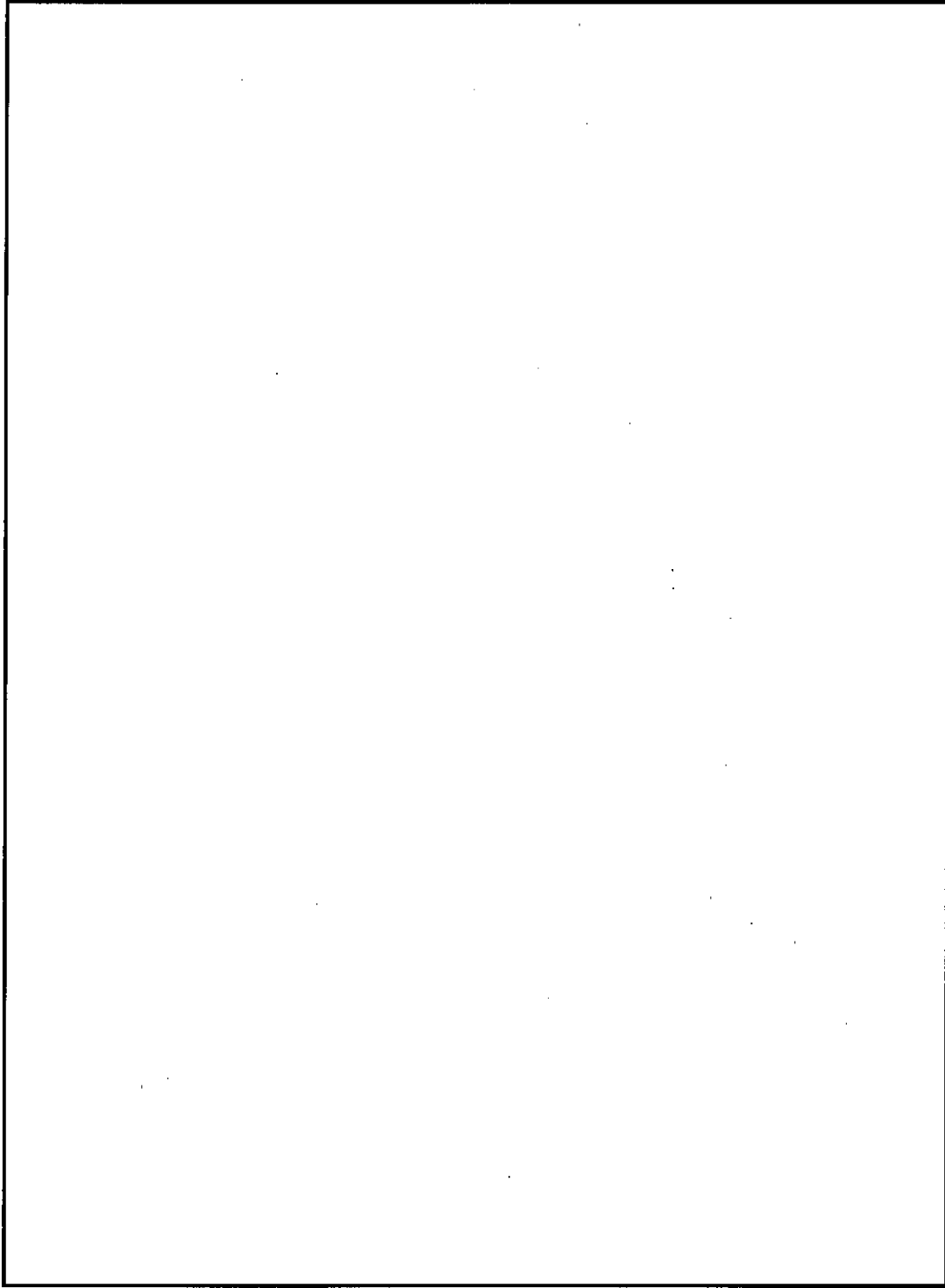
3D モデルと 2D モデル（全体モデル、輪切りモデル）の除熱解析結果の比較を別紙 2-3 表に示す。また、温度分布の比較を別紙 2-3 図及び別紙 2-4 図に示す。

別紙 2-3 表より、中性子遮蔽材、胴及び蓋部、金属ガスケット、バスケット並びに燃料集合体の温度は、すべての部位において 2D モデルの方が 3D モデルよりも高い結果となった。また、燃料集合体領域で最高温度となる金属キャスク径方向断面における、軸方向及び径方向の熱移動量の割合を別紙 2-4 表に示す。別紙 2-4 表より、軸方向及び径方向の熱移動量の割合は 3D モデルと 2D モデル（全体モデル）で同等である。

4. まとめ

2Dモデルを用いた除熱解析で得られている評価部位の最高温度は、3Dモデルを用いた除熱解析で得られた評価部位の最高温度よりもすべての評価部位において高い結果となり、2Dモデルは保守的な除熱解析モデルといえる。また、軸方向及び径方向の熱移動量の割合は、3Dモデルと2Dモデル（全体モデル）で同等の結果となり、2Dモデル（全体モデル）における均質化領域の物性値と軸方向熱移動の設定方法は妥当であるといえる。

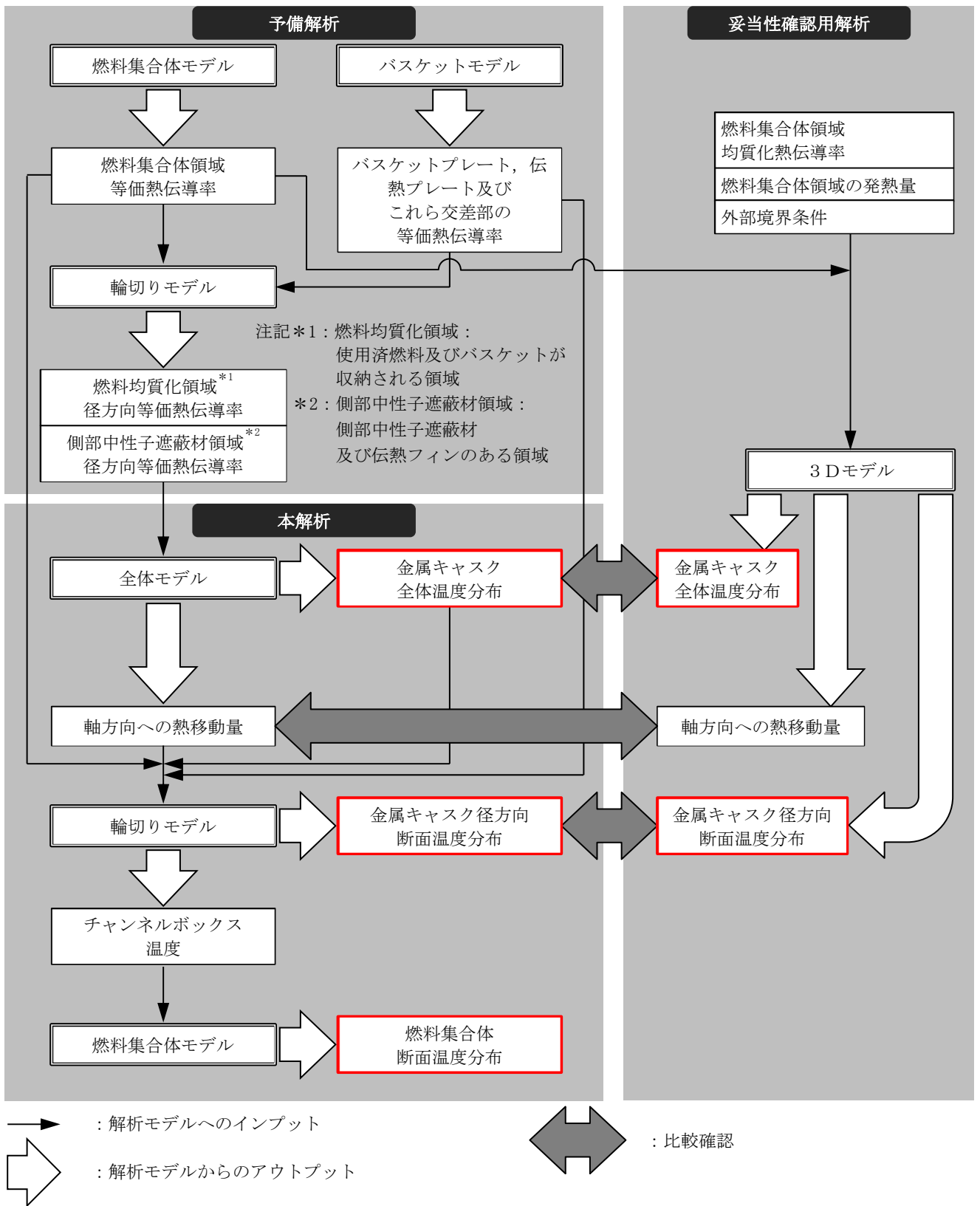
以上より、2DモデルによるHDP-69B(B)型の除熱解析手法は妥当である。



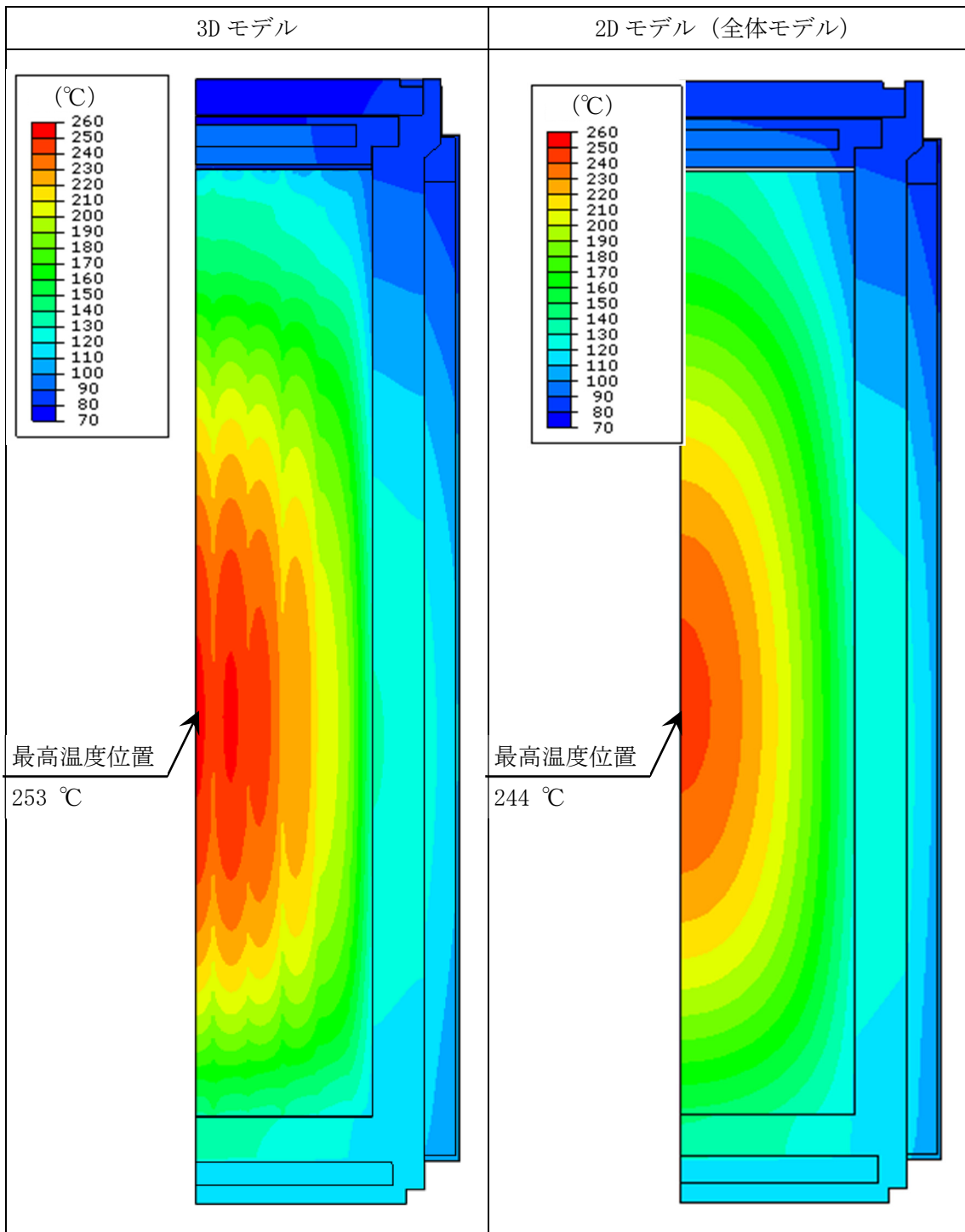
別紙 2-1 図 3D モデル (1/4 対称モデル)

別紙 2-3

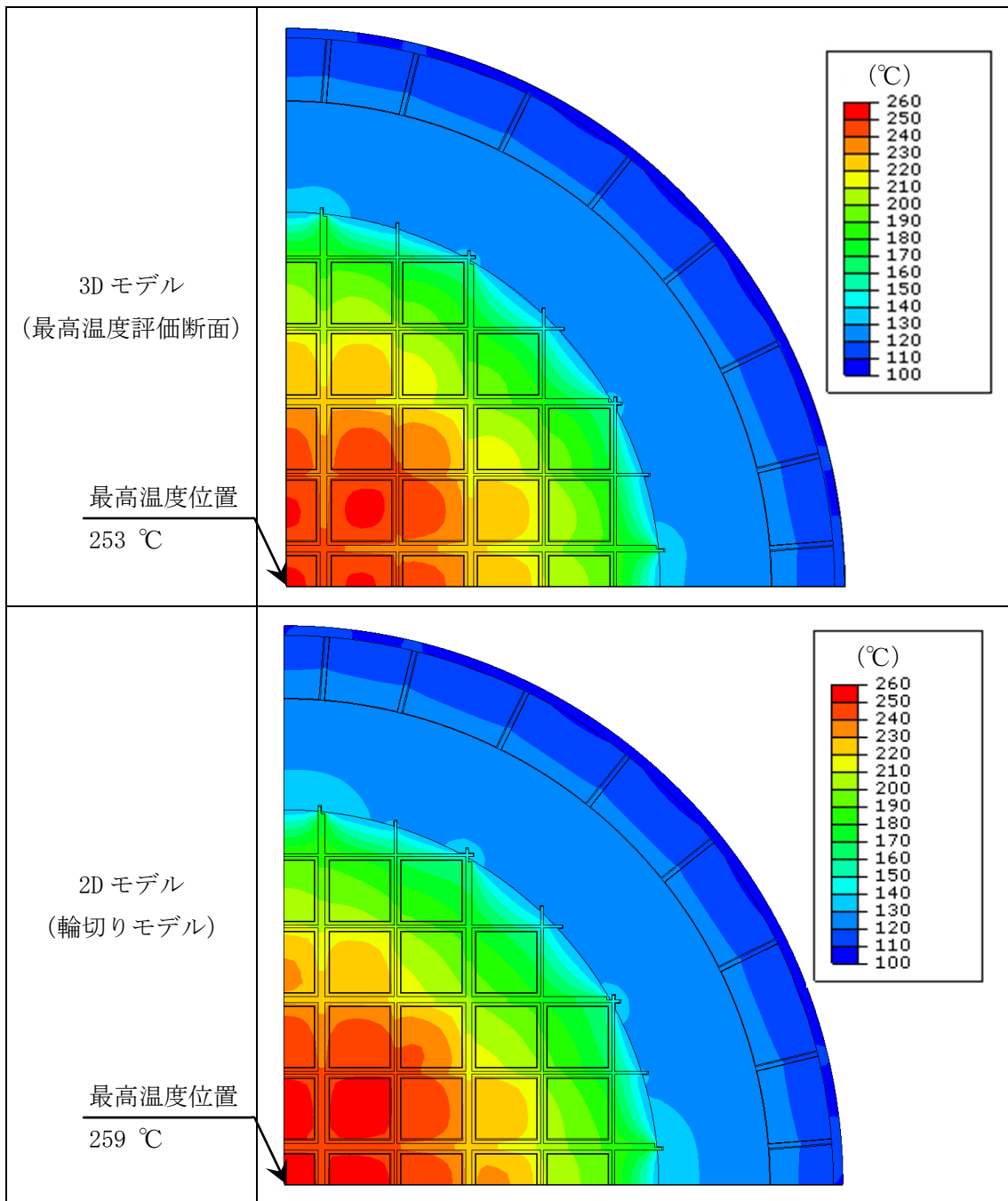
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 2-2 図 3D モデルによる 2D モデルの妥当性確認フロー図



別紙 2-3 図 温度分布の比較 (1/2)



別紙 2-4 図 温度分布の比較 (2/2)

別紙 2-1 表 モデル化方針

項目	3D モデル	2D モデル
燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・ チャンネルボックスより内部を直方体形状で均質化。 ・ 軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 ・ 燃料有効部の径方向熱伝導率は、燃料集合体モデルから求められる等価熱伝導率を設定。 ・ 燃料有効部以外の径方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 	<p>(全体モデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料集合体、バスケット等を均質化。 ・ 軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 ・ 径方向熱伝導率は、輪切りモデルから求められる等価熱伝導率を設定。 <p>(輪切りモデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ チャンネルボックスより内部を正形状で均質化。 ・ 燃料集合体モデルから求められる等価熱伝導率を設定。
バスケット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 切欠き、ギャップを無視し、軸方向に連続体としてモデル化。 ・ 軸方向熱伝導率は、軸方向接触面にギャップが存在すると仮定して設定。 ・ 径方向熱伝導率は、バスケットモデルから求められる等価熱伝導率を設定。 	<p>(全体モデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料集合体、バスケット等を均質化。 ・ 軸方向熱伝導率は、軸方向接触面にギャップが存在すると仮定して設定。 <p>(輪切りモデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 径方向熱伝導率は、バスケットモデルから求められる等価熱伝導率を設定。
伝熱フィン及び側部中性子遮蔽材	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実形状をモデル化。 	<p>(全体モデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 軸方向熱伝導率は、構成部材の体積割合を考慮して均質化した熱伝導率を設定。 ・ 径方向熱伝導率は、輪切りモデルから求められる等価熱伝導率を設定。 <p>(輪切りモデル)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実形状をモデル化。
トラニオン	省略	同左
蓋ボルト	省略	同左
金属ガスケット	省略	同左

別紙 2-2 表 解析条件

項目	3D モデル	2D モデル	
伝熱解析コード	ABAQUS	同左	
発熱量	15.34 kW (配置(i)の設計崩壊熱量)	同左	
使用済燃料の軸方向の発熱量設定	使用済燃料の軸方向の崩壊熱量分布を考慮(ノードごとに発熱密度を設定)。	同左	
使用済燃料の収納配置ごとの崩壊熱量設定	中央部の使用済燃料 37 体は, 最高燃焼度の発熱量で設定。外周部の使用済燃料 32 体は, 使用済燃料の収納体数全数 (69 体) の総発熱量が設計崩壊熱量となるように設定。	全体モデルではすべて平均燃焼度の発熱量で設定。輪切りモデルでは外周部の使用済燃料 32 体に軸方向の熱移動を考慮。中央部の使用済燃料 37 体は, 最高燃焼度の発熱量で設定。	
境界条件	周囲空気温度	45 °C	同左
	貯蔵建屋壁面温度	65 °C	同左
	貯蔵建屋壁面放射率	0.8	同左
	金属キャスク表面放射率	0.8	同左
	金属キャスク表面から貯蔵建屋壁面への形態係数	0.232* ¹	同左
	金属キャスク側面表面熱伝達率	垂直平板の乱流自然対流熱伝達の式* ² $h = 0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta T}{\nu^2} \times P r \right)^{1/3}$	同左
	金属キャスク上面表面熱伝達率	加熱水平上面の乱流自然対流熱伝達の式* ² $h = 0.13 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta T}{\nu^2} \times P r \right)^{1/3}$	同左
	金属キャスク下部端板表面熱伝達率	加熱水平下面の層流自然対流熱伝達の式* ² $h = 0.6 \frac{\lambda}{D} \left(\frac{g \beta \Delta T}{\nu^2} \times D^3 \times P r \right)^{1/5}$	同左
	底部熱移動	断熱	同左

注記*1: 金属キャスク配列ピッチ 3.5 m から算出される値。

*2: 記号の説明を以下に示す。

h: 熱伝達率 (W/(m²・K)), λ: 熱伝導率 (W/(m・K)), g: 重力加速度 (m/s²),

β: 体積膨張係数 (1/K), ΔT: 周囲空気と外表面の温度差 (K),

ν: 動粘性係数 (m²/s), Pr: プラントル数 (-), D: 代表長さ (m)

別紙 2-3 表 除熱解析結果の比較 (配置(i))

評価部位	最高温度 (°C)		温度比較 (°C) (2D モデル) - (3D モデル)
	3D モデル	2D モデル (配置(i))	
中性子遮蔽材* ¹	125	128 (輪切りモデル)	+3
胴及び蓋部	135	142 (全体モデル)	+7
金属ガスケット* ²	94	96 (全体モデル)	+2
バスケット	245	248 (輪切りモデル)	+3
燃料集合体	253	259 (輪切りモデル)	+6

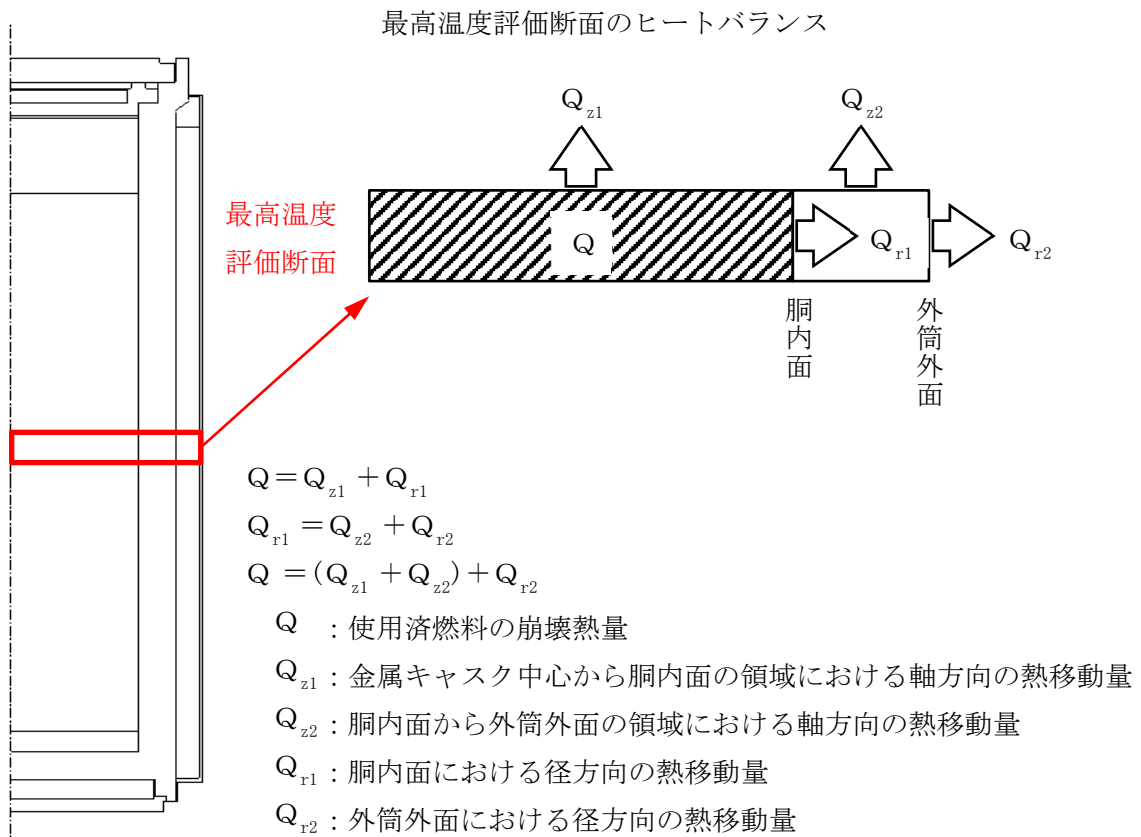
注記*1：蓋部，側部，底部中性子遮蔽材のうち最高温度となる部位。

*2：保守側に評価するため，一次蓋の最高温度とした。なお，一次蓋金属ガスケット設置位置の最高温度は，3D モデルの場合 88 °C，2D モデル (全体モデル) の場合 89 °Cである。

別紙 2-4 表 最高温度評価断面における軸方向及び径方向の熱移動量割合の比較

項目	記号	3D モデル (%)	2D モデル (全体モデル) (%)
胴内面	Q_{r1}	85	81
	Q_{z1}	15	19
外筒外面	Q_{r2}	86	85
	Q_{z2}	14	15

注記：表中の記号は下図参照。



添付書類 6

火災及び爆発の防止に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 火災及び爆発の防止の設計方針	2
3. 火災及び爆発の防止の設計	3

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型の火災及び爆発の防止について説明するものである。

2. 火災及び爆発の防止の設計方針

HDP-69B(B)型は、発火性又は引火性物質を使用せず、実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用すること、及び、過電流による過熱による損傷の原因となる動力を使用しないことにより、火災及び爆発を防止する設計とする。

3. 火災及び爆発の防止の設計

HDP-69B(B)型には発火性又は引火性物質を使用せず、主な構造材には炭素鋼又はステンレス鋼等の不燃性である金属材料を使用し、その他の材料についても実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用することで、火災及び爆発を防止する設計とする。中性子遮蔽材は、炭素鋼又はステンレス鋼等の金属材料によって囲まれた空間に密閉する構造とし、火災及び爆発を防止する設計とする。

また、HDP-69B(B)型は事業所外運搬に使用する輸送容器の機能を持つ金属キャスクであるため、「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）の特別の試験条件として規定される耐火試験の条件においても技術上の基準値を満足する十分な堅牢性を有する設計とする。

なお、HDP-69B(B)型の外部の火災及び爆発によってHDP-69B(B)型の基本的安全機能が損なわれないことについては、使用済燃料貯蔵施設の設計及び工事の計画の認可申請時に別途確認するものとする。

資料 7

添付書類 7

耐震性に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 耐震設計の基本方針	2
2.1 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力	2
2.2 基準地震動による地震力	2
3. 耐震評価	3
3.1 密封容器	3
3.2 バスケット	3
3.3 トラニオン	3
3.4 その他	3

図表目次

表 2-1 耐震設計条件..... 4

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型の耐震評価における地震力の設定の考え方を示すとともに、「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）に基づき、HDP-69B(B)型がその地震力による損壊により公衆に放射線障害を及ぼさないこと、及びHDP-69B(B)型がその地震力に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないことを説明するものである。

2. 耐震設計の基本方針

HDP-69B(B)型は、技術基準規則第7の2の要求に基づき、設計条件として設定する地震力に対して基本的安全機能が損なわれない設計とする。そのため、(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」(以下「金属キャスク構造規格」という。)に基づき、以下のとおり設計する。

- (1) 通常貯蔵時に生じる荷重と、弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力を組合せた荷重条件で、発生する応力が弾性状態に留まる設計とする。
- (2) 通常貯蔵時に生じる荷重と、基準地震動による地震力を組合せた荷重条件で、HDP-69B(B)型は、破断延性限界に十分な余裕を有し、閉じ込め機能を担保する密封シール部については、変形を弾性域に抑える設計とする。

また、本型式設計特定容器等を使用することができる使用済燃料施設の範囲から、以下の項目を、HDP-69B(B)型の地震時の構造強度評価の条件とする。

- ・金属キャスクの貯蔵姿勢：たて置き
- ・金属キャスクの固定方式：下部トラニオン固定
- ・貯蔵区域における地震力：水平方向 1.40 G
鉛直方向 0.87 G

HDP-69B(B)型の耐震設計に適用する弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力と基準地震動による地震力は、以下のとおり設定する。

2.1 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力

弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力には、使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請書(以下「型式証明申請書」という。)の特定容器等を使用することができる使用済燃料貯蔵施設の範囲に規定される貯蔵区域における地震力を適用する。この地震力を弾性設計用地震動 S_d^* に相当する地震力(以下「 S_d^* 地震力」という。)とし、表2-1に示す。

2.2 基準地震動による地震力

基準地震動による地震力には、型式証明申請書の特定容器等を使用することができる使用済燃料貯蔵施設の範囲に規定される貯蔵区域における地震力を適用する。この地震力を基準地震動 S_s に相当する地震力(以下「 S_s 地震力」という。)とし、表2-1に示す。

3. 耐震評価

S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合について、密封容器、バスケット、トラニオン等各部に発生する応力を評価した。それぞれの応力評価の結果の概要を以下に示す。

3.1 密封容器

S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合に以下の部位に発生する応力を評価した。

- ・ 一次蓋（シール部含む。）及び一次蓋ボルト
- ・ 二次蓋（シール部含む。）及び二次蓋ボルト
- ・ 胴（一次蓋シール部及び二次蓋シール部含む。）
- ・ 底板及び底部中性子遮蔽材カバー

応力評価の結果、上記の部位に発生する応力は金属キャスク構造規格に示す許容応力を満足することを確認した。

3.2 バスケット

S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合にバスケットプレートに発生する応力を評価した。応力評価の結果、上記の部位に発生する応力は金属キャスク構造規格に示す許容応力を満足することを確認した。

3.3 トラニオン

HDP-69B(B)型の貯蔵姿勢がたて置きで、下部トラニオンがトラニオン固定装置に固定された状態であることから、 S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合に下部トラニオンに発生する応力を評価した。応力評価の結果、上記の部位に発生する応力は金属キャスク構造規格に示す許容応力を満足することを確認した。

3.4 その他

外筒は、HDP-69B(B)型の遮蔽機能を損なうおそれがないよう、外筒内部に配置される中性子遮蔽材を保持する機能が求められることから、 S_d^* 地震力及び S_s 地震力が作用する場合に外筒に発生する応力を評価した。応力評価の結果、上記の部位に発生する応力は金属キャスク構造規格に示す許容応力を満足することを確認した。

以上から、 S_d^* 地震力が作用する場合、HDP-69B(B)型の各部に発生する応力は金属キャスク構造規格に示す許容応力を満足することから、HDP-69B(B)型は弾性状態に留まる範囲で耐え得る。また、 S_s 地震力が作用する場合、HDP-69B(B)型の各部に発生する応力は金属キャスク構造規格に示す許容応力を満足し、破断延性限界に十分な余裕を有し、閉じ込め機能を担保する密封シール部については、変形を弾性域に抑えられることから、HDP-69B(B)型は基本的安全機能が保持できる。

なお、HDP-69B(B)型の地震時における応力評価の詳細は、「添付書類8 耐圧強度及び耐食性に関する説明書」に記載する。

表 2-1 耐震設計条件

区分	水平方向	鉛直方向
S _d *地震力* ¹	1.40 G	0.87 G
S _s 地震力	1.40 G	0.87 G

注記*1：より高い地震力であるS_s地震力を保守的に設定する。

添付書類 8

耐圧強度及び耐食性に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 適用部材の分類	2
3. 強度評価の基本方針	3
4. HDP-69B(B)型の耐圧強度及び耐食性に対する設計	4

図表目次

図 2-1	HDP-69B(B)型の構造図	10
表 2-1	HDP-69B(B)型の適用部材の分類	11

1. 概要

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要な容器等の材料及び構造は「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）第14条に規定されており、適切な材料を使用し、十分な構造及び強度を有することが要求されている。

本書は、HDP-69B(B)型が使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で十分な構造、強度及び耐食性を有することを説明するものである。

2. 適用部材の分類

HDP-69B(B)型の構造図を図 2-1 に示す。これら構成部材のうち、技術基準規則第 14 条に規定される基本的安全機能を確保する上で必要な強度部材として、密封容器を評価対象とする。また、(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」(以下「金属キャスク構造規格」という。)に規定されるバスケット及びトラニオン、加えて、一次蓋と同様に金属ガスケットを用いて金属キャスクの閉じ込め機能を有する二次蓋、中性子遮蔽材を支持する外筒(端板を含む。)及び圧力監視のために圧力に対して十分な強度が求められる蓋部中性子遮蔽材カバーを評価対象とする。適用部材の分類を表 2-1 に示す。

3. 強度評価の基本方針

表 2-1 に従い、「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則の解釈」（令和 2 年 2 月 5 日制定 原規規発第 2002054 号-3）、金属キャスク構造規格及び（社）日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005（2007 年追補版含む。）」（以下「設計・建設規格」という。）による評価を実施する。

4. HDP-69B(B)型の耐圧強度及び耐食性に対する設計

基本的な安全機能を維持する上で重要となる HDP-69B(B)型の構成部材は、密封容器（二次蓋を含む。）、バスケット及びトラニオン、加えて、中性子遮蔽材を支持する外筒（端板を含む。）及び蓋部中性子遮蔽材カバーである。これらの構成部材について応力評価を行い、当該部材に発生する応力が許容応力以下となり、HDP-69B(B)型が基本的な安全機能を維持するために必要な耐圧強度を有することを示す。また、HDP-69B(B)型の主要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して使用済燃料を不活性ガスとともに封入し、金属キャスク表面の必要な個所に塗装等の防錆処置を施すことにより、金属キャスク及び使用済燃料の腐食等を防止するよう設計していることを示す。なお、HDP-69B(B)型を構成する部材のうち中性子遮蔽材、金属バスケット及び伝熱フィン、HDP-69B(B)型の耐圧強度を担保する部材ではないことから、耐食性についてのみ評価する。

4.1 材料について

(1) 機械的強度及び化学的組成

a. 密封容器は、その使用される圧力、温度、水質、放射線、荷重その他の使用条件に対して適切な機械的強度及び化学的組成（使用中の応力その他の使用条件に対する適切な耐食性を含む。）を有する材料を使用する。機械的強度及び化学的組成は、「添付書類 9 当該申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織に関する説明書」表 8-1 材料検査にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを確認する。

- ・密封容器に使用する材料は、金属キャスク構造規格 MCM-1110 に従い別表 1-1 に示される材料の規格に適合するものを選定し、MCM-1200 で規定される機械試験によって、適切な機械的強度及び化学的組成を有する材料であることを確認する。
- ・規定に基づく機械的強度を用いて、使用する圧力及び荷重に対して適切な強度を有することを「添付書類 8 耐圧強度及び耐食性に関する説明書」における強度評価によって確認する。
- ・密封容器に使用する材料は、「添付書類 8-5 金属キャスクの耐食性に関する説明書」にて温度、水質及び放射線に対して適切な耐食性を有することを確認する。

(2) 破壊じん性

a. 密封容器に使用する材料にあつては、当該密封容器が使用される圧力、温度、放射線、荷重その他の使用条件に対して適切な破壊じん性を有することを機械試験その他の評価方法により確認する。破壊じん性は、「添付書類 9 当該申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織

に関する説明書」表 8-1 材料検査にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを確認する。

- ・密封容器に使用する材料は，金属キャスク構造規格 MCM-1334 で規定される破壊じん性試験を行い，MCM-1334.2 の判定基準を満足することで適切な破壊じん性を有することを確認する。
- ・密封容器に使用するボルト材料は，金属キャスク構造規格 MCM-1331 で規定される破壊じん性試験を行い，表 MCM-1331-1 の判定基準を満足することで適切な破壊じん性を有することを確認する。

(3) 非破壊試験

- a. 密封容器に使用する材料は，有害な欠陥がないことを非破壊試験により確認する。「添付書類 9 当該申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織に関する説明書」表 8-1 材料検査にて金属キャスク構造規格の非破壊試験の規定を満足することを確認する。
- ・密封容器に使用する材料は，金属キャスク構造規格 MCM-1410 で規定される非破壊試験を行い，MCM-1440 の判定基準を満足することで有害な欠陥がないことを確認する。

4.2 構造及び強度について

(1) 延性破断の防止

- a. 密封容器，バスケット，トラニオン，外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーは，取扱い時及び貯蔵時において，全体的な変形を弾性域に抑える設計とする。「補添付書類 8 耐圧強度及び耐食性に関する説明書」にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを評価する。

取扱い時及び貯蔵時の評価条件は以下のとおりである。

(a) 貯蔵時

- ・金属キャスクの姿勢：たて姿勢
- ・金属キャスクの固定方式：下部トラニオン固定
- ・鉛直方向加速度：自重 (1 G)

(b) 取扱い時（吊上げ時）

- ・金属キャスクの姿勢：たて姿勢
- ・金属キャスクの固定方式：上部トラニオンで吊上げ
- ・鉛直方向加速度：1.3 G

- ・密封容器は、取扱い時及び貯蔵時において、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-1311.1, MCD-1318.1 及び MCD-1321.1 の規定を満足し、全体的な変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。
- ・バスケットは、取扱い時及び貯蔵時において、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-2311 の規定を満足し、全体的な変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。
- ・トランシオンは、取扱い時及び貯蔵時において、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-3311.1 の規定を満足し、全体的な変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。
- ・外筒は、取扱い時及び貯蔵時において、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-3721.1 の規定を満足し、全体的な変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。
- ・蓋部中性子遮蔽材カバーは、取扱い時及び貯蔵時において、一次応力評価結果が設計・建設規格 PVD-3310 の考え方に基づいた許容応力を満足し、全体的な変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。

b. 密封容器は、破断延性限界に十分な余裕を有し、金属キャスクに要求される機能に影響を及ぼさない設計とする。また、閉じ込め機能を担保する密封シール部については、変形を弾性域に抑える設計とする。「添付書類 8 耐圧強度及び耐食性に関する説明書」にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを評価する。

評価条件は、貯蔵架台への衝突時である。

(a) 貯蔵架台への衝突時

- ・金属キャスクの姿勢：たて姿勢
- ・鉛直方向加速度：5 G

- ・密封容器は、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-1311.3 及び MCD-1321.2 の規定を満足し、破断延性限界に十分な余裕を有し、金属キャスクに要求される機能に影響を及ぼさない設計であることを確認する。
- ・密封シール部は、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-1318.1 の規定を満足し、変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。

c. 密封容器は、試験状態において、全体的な塑性変形が生じない設計とする。また、密封シール部については、変形を弾性域に抑える設計とする。「添付書類 8

耐圧強度及び耐食性に関する説明書」にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを評価する。

試験時の評価条件は以下のとおりである。

(a) 試験時

- ・金属キャスクの姿勢：たて姿勢
- ・鉛直方向加速度：自重（1 G）

- ・密封容器は、試験状態において、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-1311.4 の規定を満足し、全体的な塑性変形が生じない設計であることを確認する。
- ・密封シール部は、試験状態において、一次応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-1318.2 の規定を満足し、変形を弾性域に抑える設計であることを確認する。

(2) 疲労破壊の防止

- a. 密封容器，バスケット，トラニオン及び外筒は，取扱い時及び貯蔵時において，疲労破壊が生じない設計とする。「添付書類 8 耐圧強度及び耐食性に関する説明書」にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを評価する。
- ・密封容器（ボルトを除く。）は，金属キャスク構造規格 MCD-1314 の疲労評価を実施し，金属キャスク構造規格 MCD-1332 の規定により，取扱い時及び貯蔵時において疲労解析不要であることを確認する。
 - ・密封容器のボルトは，金属キャスク構造規格 MCD-1322 の規定により，疲労評価を行い，取扱い時及び貯蔵時において疲労破壊が生じない設計であることを確認する。
 - ・バスケットは，取扱い時及び貯蔵時において，一次応力と二次応力を加えた評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-2312 の規定を満足し，疲労破壊が生じない設計であることを確認する。
 - ・トラニオンは，取扱い時及び貯蔵時において，金属キャスク構造規格 MCD-3313 の規定により疲労評価を行い，疲労破壊が生じない設計であることを確認する。
 - ・外筒は，取扱い時及び貯蔵時において，一次応力と二次応力を加えた評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-3722.1 の規定を満足し，疲労破壊が生じない設計であることを確認する。
 - ・蓋部中性子遮蔽材カバーは，設計・建設規格のクラス 3 容器にて評価要求がないため評価を省略する。

(3) 座屈による破壊の防止

a. 密封容器，バスケット，トラニオン，外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーは，取扱い時及び貯蔵時において，座屈が生じない設計とする。「添付書類 8 耐圧強度及び耐食性に関する説明書」にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを評価する。

- ・密封容器は，取扱い時及び貯蔵時において圧縮応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-1317 の規定を満足し，座屈が生じない設計であることを確認する。
- ・バスケットは，取扱い時及び貯蔵時において圧縮応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-2317 の規定を満足し，座屈が生じない設計であることを確認する。
- ・外筒は，取扱い時及び貯蔵時において圧縮応力評価結果が金属キャスク構造規格 MCD-3721.1 の規定を満足し，座屈が生じない設計であることを確認する。
- ・トラニオン及び蓋部中性子遮蔽材カバーは，取扱い時及び貯蔵時において圧縮応力が作用するような評価事象はなく，座屈が生じないことを確認する。

4.3 密封容器の主要な耐圧部の溶接部について

密封容器の主要な耐圧部の溶接部は，次のとおりとし，各種検査により，適用基準及び適用規格に適合していることを確認する。「添付書類 9 当該申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織に関する説明書」表 8-3，表 8-4 及び表 8-5 の検査を行う。

- ・密封容器の主要な耐圧部の溶接部は，不連続で特異な形状でない設計であることを確認する。
- ・密封容器の主要な耐圧部の溶接部は，金属キャスク構造規格 MCN-2300 の規定に従い表 MCN-2300-1 の非破壊試験を行い，溶接による割れが生ずるおそれがなく，かつ，健全な溶接部の確保に有害な溶込み不良その他の欠陥がないことを確認する。
- ・密封容器の主要な耐圧部の溶接部は，金属キャスク構造規格 MCN-2320 の規定により，母材の強度と同等以上の適切な強度を有することを確認する。
- ・溶接施工法及び溶接設備並びに適切な技能を有する溶接士であることの確認を行う。

4.4 耐圧試験について

密封容器は，適切な耐圧試験を行ったとき，これに耐え，かつ，著しい漏えいがないことを確認する。「添付書類 9 当該申請に係る型式設計特定容器等の設計及び製作に係る品質管理の方法並びにその実施に係る組織に関する説明書」表 8-1 耐圧・漏えい検査にて金属キャスク構造規格の規定を満足することを確認する。

- ・密封容器は、金属キャスク構造規格 MCT-1200 に規定される耐圧試験を行い、耐圧試験に耐え、かつ、著しい漏えいがないことを確認する。

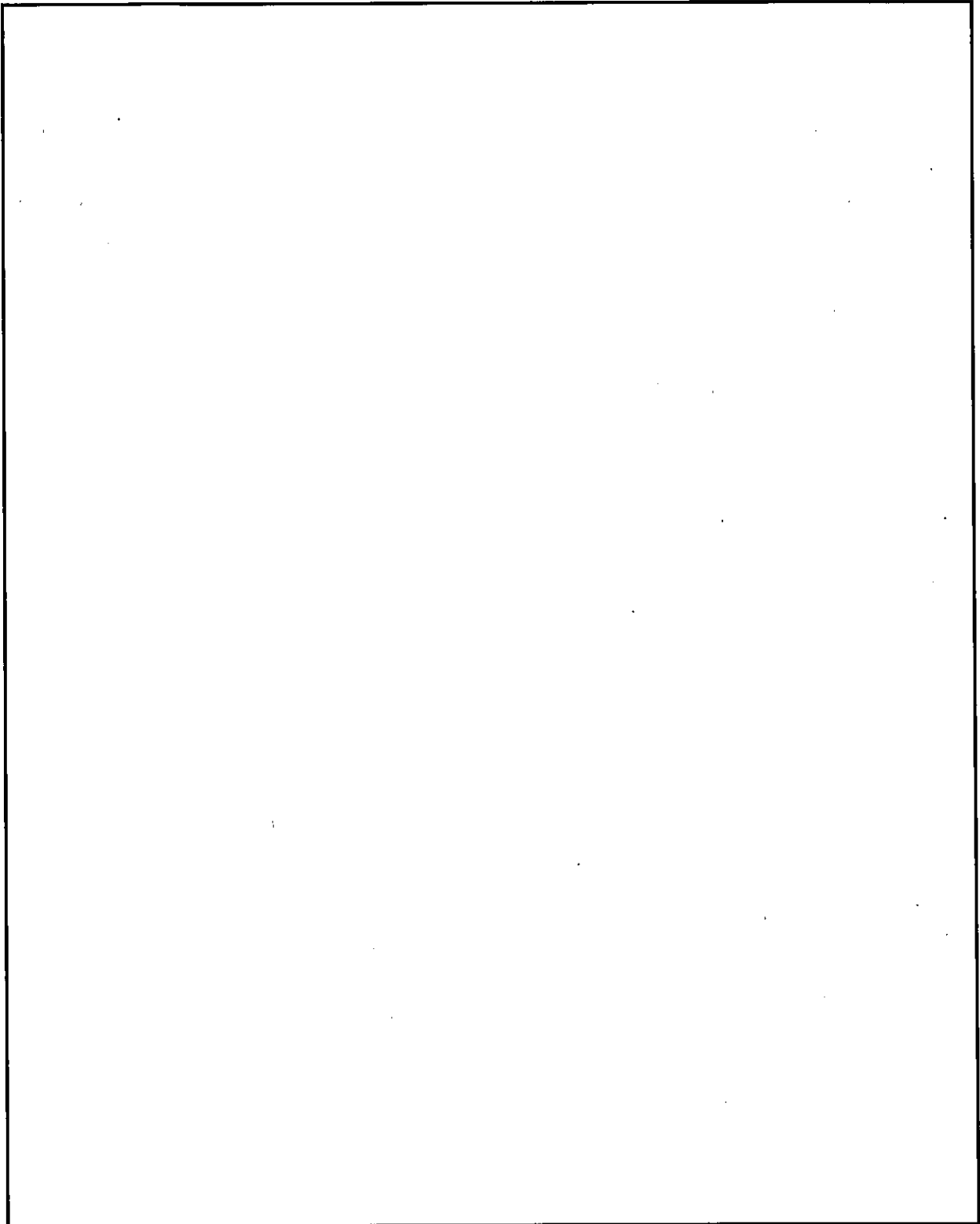


図 2-1 HDP-69B(B)型の構造図

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2-1 HDP-69B(B)型の適用部材の分類

機器名	部材名	金属キャスク構造規格 適用部材の分類	技術基準規則 第 14 条の分類		
			容器等	容器	密封容器
HDP-69B(B)型	胴	密封容器	容器等	容器	密封容器
	底板				
	底部中性子遮蔽材カバー*1				
	一次蓋				
	一次蓋ボルト				
	カバープレート				
	カバープレートボルト				
	二次蓋	—*2	—	—	
	二次蓋ボルト	—	—	—	
	バスケット	バスケット*3	—	—	
	トラニオン	トラニオン*3	—	—	
	外筒(端板含む。)	—*4	—	—	
蓋部中性子遮蔽材カバー	—*5	—	—		

注記*1：底部中性子遮蔽材カバーは、金属キャスクの自重を受けることから、底板と同様に密封容器の一部として評価を行う。

*2：二次蓋は一次蓋と同様に金属ガスケットを用いて金属キャスクの閉じ込め機能を有していることから、構造強度評価手法としては一次蓋と同様、金属キャスク構造規格の密封容器の規定を用いる。

*3：バスケット及びトラニオンは、技術基準規則第 14 条に規定される密封容器を支える支持構造物ではないが、金属キャスク構造規格に規定される強度部材であるので、金属キャスク構造規格のバスケット及びトラニオンの規定を用いる。

*4：外筒（端板を含む。）は、放射性物質の閉じ込め境界ではないが、自らが遮蔽体であると同時に、外筒内部に配置される中性子遮蔽材を保持する機能が求められる。類似の機能を持つ部材として、金属キャスク構造規格に示される中間胴があり、外筒の構造強度評価手法としては中間胴の規定を用いる。ただし、中間胴は密封容器を支持し、その損壊を防止する機能が要求されるため、密封容器との溶接部近接部分に対する特別な規定が設けられている（金属キャスク構造規格 MCD-3710）が、外筒においてはこの機能は要求されないため、当該規定は適用しない。

*5：蓋部中性子遮蔽材カバーは、一次蓋の中性子遮蔽材を覆うカバーであり、一次蓋と二次蓋の間にヘリウムガスを封入して圧力を監視することから、圧力に対して十分な強度が求められる。このため、蓋部中性子遮蔽材カバーの構造強度評価手法としては、圧力荷重に対する評価要求が定められている設計・建設規格のクラス 3 容器の規定を用いる。

添付書類 8-1

密封容器の強度に関する説明書

添付書類 8-1-1

密封容器の応力解析の方針

目 次

1. 概要	1
2. 適用基準	2
3. 記号	3
3.1 記号の説明	3
4. 設計条件	6
4.1 基本仕様	6
4.2 設計事象	6
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 解析対象	7
5.3 形状及び寸法	7
5.4 物性値	7
5.5 許容応力	7
6. 応力解析の手順	9
6.1 解析手順の概要	9
6.2 荷重条件の選定	9
6.3 応力計算と評価	9
6.3.1 応力計算の方法	9
6.3.2 応力の評価	10
6.3.3 数値の丸め方	11
7. 引用文献	12

図表目次

図 5-1	密封容器及び二次蓋の応力解析対象.....	13
図 6-1	密封容器及び二次蓋の応力解析フロー図.....	14
表 4-1	密封容器及び二次蓋の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ.....	15
表 5-1	代表事象.....	16
表 5-2	応力計算に使用する材料の物性値.....	19
表 6-1	密封容器用材料の許容応力.....	20
表 6-2	密封容器用材料（ボルト用材料）の許容応力.....	22
表 6-3	二次蓋用材料の許容応力.....	23
表 6-4	二次蓋用材料（ボルト用材料）の許容応力.....	24
表 6-5	数値の丸め方一覧表.....	25

1. 概要

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要な容器等の材料及び構造は「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」（令和2年3月17日 原子力規制委員会規則第8号）（以下「技術基準規則」という。）第14条に規定されており，適切な材料を使用し，十分な構造及び強度を有することが要求されている。

本書は，HDP-69B(B)型の密封容器及び二次蓋に関する応力解析の方針を述べるものである。

なお，HDP-69B(B)型は一次蓋と二次蓋で多重の閉じ込め構造を形成し，二次蓋には一次蓋と同等の閉じ込め性能を要求するため，二次蓋は一次蓋と同様の応力評価を行う。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 適用基準

密封容器の強度評価基準については、(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」(以下「金属キャスク構造規格」という。)を適用する。

ただし、二次蓋は一次蓋と同様に金属ガスケットを用いて金属キャスクの閉じ込め機能を有していることから、応力評価手法としては一次蓋と同様、金属キャスク構造規格の密封容器の規定を用いる。

3. 記号

3.1 記号の説明

本書及び「添付書類 8-1-2 密封容器の応力計算書」（以下「応力計算書」という。）において、応力評価に関する下記の記号を使用する。ただし、本文中に特記のある場合は、この限りでない。

なお、応力計算書の字体及び大きさについては本書と異なる場合がある。

記号	記号の説明	単位
A	断面積	mm ²
A _b	ボルトの最小軸断面積	mm ²
A _m	圧力変動の全振幅の許容値	MPa
A _{m2}	二次蓋の圧力変動の全振幅の許容値	MPa
B	金属キャスク構造規格別図 7-2 の縦軸の B 値	MPa
C _H	水平方向設計震度	—
C _S	供用状態 A の貯蔵時の状態において、S _d *地震力が作用する場合の供用状態	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
d	直径	mm
d _s	ボルトの最小径	mm
D _S	供用状態 A の貯蔵時の状態において、S _s 地震力が作用する場合の供用状態	—
D _G	ガスケット反力の作用する位置	mm
E	縦弾性係数	MPa
E _o	設計疲労線図の縦弾性係数	MPa
E _c	カバープレートの縦弾性係数	MPa
E _{c b}	カバープレートボルトの縦弾性係数	MPa
F _b	ボルトの初期締付け力	N
G	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
G ₁	水平方向加速度	m/s ²
G ₂	鉛直方向加速度	m/s ²
H	フランジに加わる内圧による全荷重	N
H _P	ガスケット接触面にかける圧縮力	N
K	応力集中係数	—
m	質量	kg
m _G	バスケット及び使用済燃料集合体の質量	kg

記号	記号の説明	単位
m_{l1}	一次蓋の質量	kg
m_{l2}	二次蓋の質量	kg
m_{l3}	カバープレートの質量	kg
N_1	大気圧から使用圧力になり，再び大気圧に戻る繰返し回数	—
N_a	許容繰返し回数	—
N_c	各サイクルの繰返し回数	—
P	圧力	MPa
P_2	二次蓋の最高使用圧力	MPa
P_a	許容外圧	MPa
P_b	一次曲げ応力強さ	MPa
$P_{d.o}$	最高使用圧力（外圧）	MPa
P_L	一次局部膜応力強さ	MPa
P_m	一次一般膜応力強さ	MPa
Q	二次応力強さ	MPa
r	ボルトピッチ半径	mm
R	密封容器の平均半径	mm
S	ピーク応力強さ	MPa
S_a	想定圧力変動回数に対応する繰返しピーク応力強さ	MPa
S_b	ボルト締付け時に発生する応力強さ	MPa
S_c	一次蓋貫通孔部の応力強さ	MPa
S_d^*	弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方	—
S_ℓ	繰返しピーク応力強さ	MPa
S_ℓ'	縦弾性係数で補正した繰返しピーク応力強さ	MPa
S_m	設計応力強さ	MPa
S_{m2}	二次蓋の使用材料の設計応力強さ	MPa
S_P	ピーク応力強さの範囲	MPa
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
S_u	設計引張強さ	MPa
S_y	設計降伏点	MPa
t	板厚	mm
t_{21}	二次蓋の計算上必要な厚さ	mm
t_{22}	直径が $1/2 d$ 以下の穴を設けた場合の計算上必要な厚さ	mm

記号	記号の説明	単位
T	温度	$^{\circ}\text{C}$
T_{max}	最高使用温度	$^{\circ}\text{C}$
T_r	締付けトルク	$\text{N}\cdot\text{mm}$
ΔT	最高使用温度と常温との差	$^{\circ}\text{C}$
U_f	疲労累積係数	—
W_{m1}	使用状態での必要な最小ボルト荷重	N
W_{m2}	ガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重	N
α	熱膨張係数	$\text{mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$
α_c	カバープレートの瞬時熱膨張係数	$\text{mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$
α_{cb}	カバープレートボルトの瞬時熱膨張係数	$\text{mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$
σ_{b1}	ボルト初期締付け時の垂直応力	MPa
$\Delta\sigma_1$	供用状態A及びBにおける応力強さの最大値	MPa
$\Delta\sigma_2$	地震力のみによる全振幅について評価した応力強さの最大値	MPa
σ_c	圧縮応力	MPa
σ_{n1}	平均引張応力	MPa
σ_{n2}	ガスケット締付け時の平均引張応力	MPa
σ_p	平均支圧応力	MPa
σ_r	半径方向の応力	MPa
σ_s	平均せん断応力	MPa
σ_{θ}	円周方向の応力	MPa
σ_z	軸方向の応力	MPa
τ_{b1}	ボルト初期締付け時のねじり応力	MPa
$\tau_{r\theta}$	せん断応力	MPa
$\tau_{\theta z}$	せん断応力	MPa
τ_{zr}	せん断応力	MPa

4. 設計条件

密封容器及び二次蓋は以下の設計条件に耐えるように設計する。

4.1 基本仕様

密封容器及び二次蓋に作用する圧力と最高使用温度を以下に示す。

密封容器	貯蔵時圧力	-0.101325 MPa
	最高使用圧力	1.0 MPa
	試験時圧力	1.25 MPa
	最高使用温度	150 °C* ¹
二次蓋	最高使用圧力	0.4 MPa
	最高使用温度	110 °C* ¹

注記*1：最高使用温度は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す解析結果から得られた温度を保守側に設定した値である。

4.2 設計事象

設計上考慮する事象として、使用済燃料貯蔵施設内及び試験時における選定事象を以下に示す。

設計事象	供用状態	使用済燃料貯蔵施設内及び試験時における選定事象* ¹
I	A	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵（貯蔵時） 金属キャスクの吊上げ，吊下げ，移動（吊上げ時） 搬送台車による搬送（台車搬送時） 貯蔵前作業及び搬出前作業（準備作業時）
II	B	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクの支持脚への衝突（支持脚への衝突時） 金属キャスクの貯蔵架台への衝突（貯蔵架台への衝突時） 搬送台車による搬送中の急停止（搬送中の急停止時）
I + S _d * ¹	C _s	<ul style="list-style-type: none"> S_d*地震時（貯蔵時（S_d*地震力が作用する場合））
I + S _s	D _s	<ul style="list-style-type: none"> S_s地震時（貯蔵時（S_s地震力が作用する場合））
試験状態	試験状態	<ul style="list-style-type: none"> 耐圧試験（試験時）

注記*1：本書及び応力計算書において、事象を（ ）内の呼称とする場合がある。

4.3 荷重の種類とその組合せ

密封容器及び二次蓋の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 4-1 に示す。応力解析に用いる荷重は、応力計算書に記載する。

5. 計算条件

5.1 解析対象とする事象

4.2 節で示した使用済燃料貯蔵施設内及び試験時における選定事象のうち、表 5-1 に示すように荷重条件等を考慮して代表事象を選定し、代表事象について解析を実施する。

5.2 解析対象

応力解析の対象は、次のとおりである（図 5-1 参照）。

- (1) 胴
- (2) 底板
- (3) 一次蓋
- (4) 一次蓋ボルト
- (5) カバープレート
- (6) カバープレートボルト
- (7) 底部中性子遮蔽材カバー
- (8) 一次蓋（シール部）
- (9) カバープレート（シール部）

また、一次蓋と同様に金属ガスケットを用いて金属キャスクの閉じ込め機能を有する二次蓋についても、以下の部位について併せて応力解析を行う（図 5-1 参照）。

- (10) 二次蓋
- (11) 二次蓋ボルト
- (12) 二次蓋（シール部）

5.3 形状及び寸法

応力解析を行う部位の形状及び寸法は、応力計算書に示す。

5.4 物性値

応力計算及び疲労解析の必要性検討に使用する材料の物性値を表 5-2 に示す。応力計算に使用する物性値は、「添付書類 5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に記載する除熱解析で得られた温度を基に、その温度依存性を考慮する。なお、常温は 20 °C とする。

5.5 許容応力

(1) 密封容器

密封容器の許容値基準は、金属キャスク構造規格 MCD-1300 及び MCD-1400 による。

許容応力は、最高使用温度に対する値を用いる。

(2) 二次蓋

二次蓋は、通常貯蔵時において密封境界を構成する部材ではないが、圧力監視境界と

しての耐圧機能に加え，一次蓋に加え多重の閉じ込め機能を有する部材として設けられたものであるので，閉じ込め機能に係る部位について一次蓋と同様の基準を用いて評価する。したがって，二次蓋の許容値基準は，金属キャスク構造規格 MCD-1300 によるものとする。

6. 応力解析の手順

6.1 解析手順の概要

密封容器の応力解析フローを図 6-1 に示す。

密封容器の応力解析は、想定される内圧、機械的荷重及び熱荷重を基に、密封容器の実形状をモデル化し、解析コードである ABAQUS 及び応力評価式を用いて行う。

ABAQUS とは、有限要素法に基づく応力解析の汎用解析コードであり、解析対象を形状、材料等の不連続部で小さなメッシュに分割することで行う。

なお、二次蓋についても密封容器と同様に評価を行う。

6.2 荷重条件の選定

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

6.3 応力計算と評価

6.3.1 応力計算の方法

(1) 応力計算は荷重ごとに行う。荷重条件として与えられるものは次の 3 つである。

- a. 内圧
- b. 機械的荷重

機械的荷重は、自重（使用済燃料集合体を含む HDP-69B(B) 型（吊上げ時、支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時においては三次蓋を含む。）の貯蔵時の設計質量を用いる。）、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。

- c. 熱荷重

熱荷重は、密封容器及び二次蓋に生じる温度変化、温度勾配による荷重であって、「添付書類5 使用済燃料等の除熱に関する説明書」に記載する温度分布計算の結果から得られるものをいう。

(2) 解析モデルは次の方針に従う。

- a. モデル化に当たっては、密封容器、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー及び二次蓋の形状の対称性及び荷重の対称性を考慮する。
- b. 解析モデルは三次元の 180° 対称モデルとし、固体要素及びはり要素による解析モデルとする。

また、モデル化に当たり対称性を考慮して境界条件を設定する。モデル図及び境界条件を応力計算書に示す。

(3) 構造及び材料の不連続性を考慮して、応力評価位置をとる。応力評価位置は、応力計算書に示す。

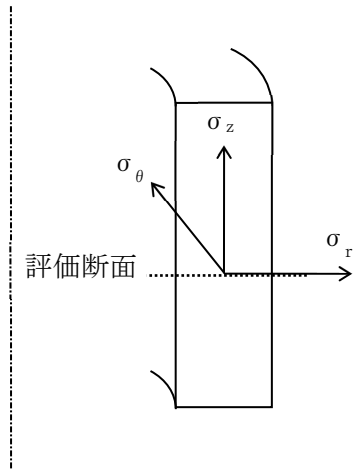
(4) 応力評価は、この応力評価位置について行う。

6.3.2 応力の評価

応力の計算結果は、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以下のとおりである。
ただし、計算結果は許容応力との比較を行うため、絶対値にて記載する。

- 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



密封容器用材料の許容応力を表 6-1 及び表 6-2 に、二次蓋用材料の許容応力を表 6-3 及び表 6-4 に示す。

(1) 密封容器（ボルトを除く。）の応力評価

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

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 平均せん断応力
 - (b) 平均支圧応力
 - (c) 圧縮応力

(2) 二次蓋の応力評価

二次蓋の応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-1310 を用いて、以下の項目を評価する。

- a. 一次応力強さ
- b. 一次+二次応力強さ
- c. 繰返し荷重の評価
- d. 特別な応力の検討
 - (a) 平均せん断応力
 - (b) 平均支圧応力

(3) ボルトの応力評価

一次蓋ボルト及びカバープレートボルトの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-1320 に従い評価する。

二次蓋ボルトの応力評価は、金属キャスク構造規格 MCD-1320 を用いて評価する。

6.3.3 数値の丸め方

数値は原則として安全側に丸めて使用する。

また、規格、基準等により決まる数値については丸めず、規格、基準等を内挿して使用する場合は原則として安全側に処理する。

表示する数値の丸め方を表 6-5 に示す。

7. 引用文献

文献番号は、本書及び応力計算書において共通である。

- (1) (社)日本機械学会,「機械工学便覧 新版」,丸善株式会社(1987)
- (2) 西田正孝,「応力集中 増補版」,森北出版(株)(1973)

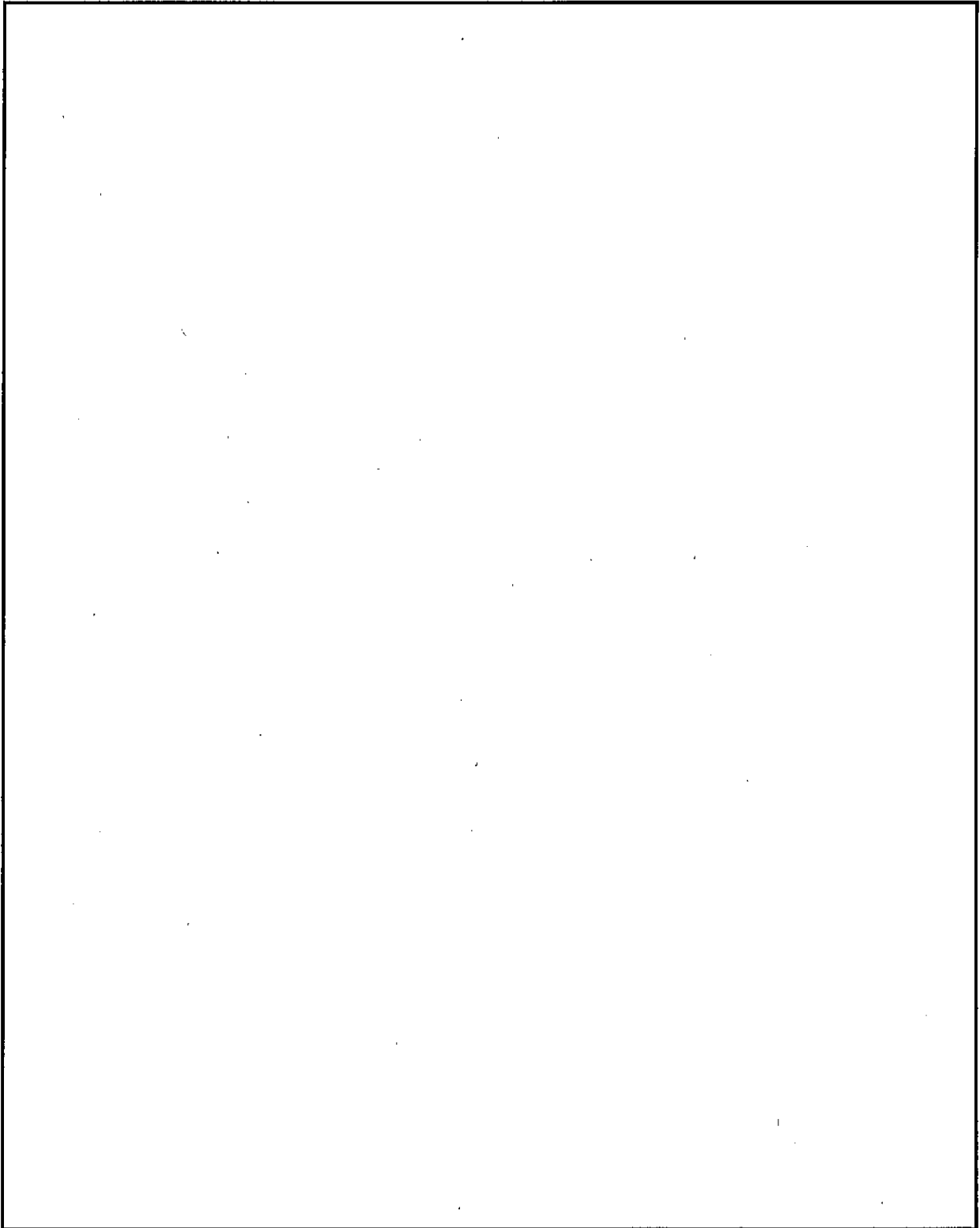


図 5-1 密封容器及び二次蓋の応力解析対象

内は商業機密のため、非公開とします。

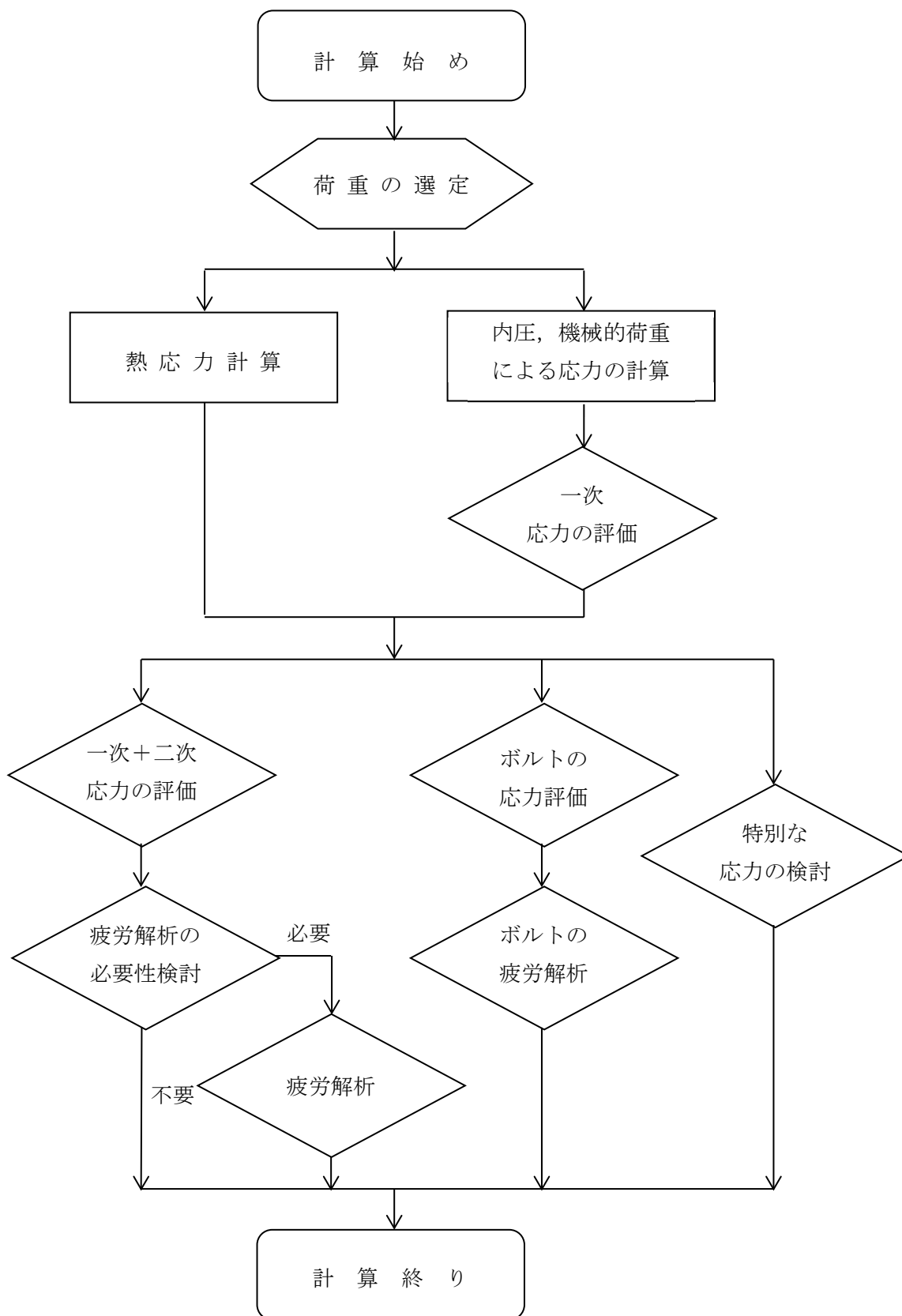


図 6-1 密封容器及び二次蓋の応力解析フロー図

表 4-1 密封容器及び二次蓋の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

荷 重			圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重	地震荷重
設計事象	供用状態	評価事象							
設計条件	設計条件	設計時 ^{*1}	○	— ^{*5}	○	○	○	—	—
I	A ^{*2}	貯蔵時 ^{*3}	○	○	○	—	—	○	—
		吊上げ時 ^{*3}	○	— ^{*5}	○	○	—	○	—
II	B ^{*2}	衝撃荷重作用時 ^{*3}	○	— ^{*5}	○	—	○	○	—
I + S _d [*]	C _s	S _d [*] 地震力が作用する場合	○	○	○	—	—	— ^{*6}	○ ^{*7}
I + S _s	D _s	S _s 地震力が作用する場合	○	○	○	—	—	— ^{*6}	○ ^{*7}
試験状態	試験状態	試験時	○ ^{*4}	○	○	—	—	—	—

注記*1：最高使用圧力に対する評価条件で、供用状態A及びBの一次応力評価を代表する事象

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

*3：一次応力評価は、設計時の評価に包絡されるため、評価を省略する。

*4：耐圧試験圧力（最高使用圧力により定められる圧力）とする。

*5：本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

*6：シール部及び蓋ボルトの一次＋二次応力評価に当たっては、熱荷重を考慮する。また、密封容器変形量の評価に当たっても、熱荷重を考慮する。

*7：シール部を除く部位の一次＋二次応力評価に当たっては、荷重条件は地震力のみとして計算を行い、振幅を考慮して応力強さの最大値を2倍して求める。

表 5-1 代表事象(1/3)

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
設計条件	設計条件	設計時*2	—	<ul style="list-style-type: none"> ・最高使用圧力：1.0 MPa ・ボルト初期締付け力 ・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：5G（自重考慮） 	供用状態 A 及び B の中で荷重条件が最も厳しいのは貯蔵架台への衝突時である。
I	A	貯蔵時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 ・トランニオン固定ボルトによる押付け力 ・熱荷重 	供用状態 A のうち大半の期間を占める代表的事象
		吊上げ時	<ul style="list-style-type: none"> ・台車搬送時 ・準備作業時 	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・ボルト初期締付け力 ・吊上げ時荷重 鉛直方向加速度（下方向） ：1.3G（自重考慮） ・熱荷重 	荷重条件が最も厳しいのは吊上げ時である。

注記*1：本事象について応力解析を行う。

*2：供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象

内は商業機密のため、非公開とします。

表 5-1 代表事象 (2/3)

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
II	B	支持脚への衝突時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・ボルト初期締付け力 ・支持脚への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向）：2.5G（自重考慮） ・熱荷重 	—
		貯蔵架台への衝突時	・搬送中の急停止時	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・ボルト初期締付け力 ・貯蔵架台への衝突時荷重 鉛直方向加速度（下方向）：5G（自重考慮） ・熱荷重 	荷重条件が最も厳しいのは、貯蔵架台への衝突時である。

注記*1：本事象について応力解析を行う。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 5-1 代表事象 (3/3)

設計事象	供用状態	代表事象*1	包絡される事象	荷重条件	備考
I + S _d *	C _s	貯蔵時 〔S _d *地震力が作用する場合〕	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 ・地震力*2 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G ・熱荷重 	—
I + S _s	D _s	貯蔵時 〔S _s 地震力が作用する場合〕	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：-0.101325 MPa ・蓋間圧力：0.4 MPa ・蓋部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・側部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・底部中性子遮蔽材部圧力：<input type="text"/> MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 ・地震力 水平方向：1.40G 鉛直方向：0.87G ・熱荷重 	—
試験状態	試験状態	試験時	—	<ul style="list-style-type: none"> ・密封容器内圧力：1.25 MPa ・自重 ・ボルト初期締付け力 	—

注記*1：本事象について応力解析を行う。

*2：より高い地震力であるS_s地震力を保守的に設定する。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 5-2 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 (-)
胴 底板 一次蓋	炭素鋼 (GLF1)	20	203000	9.73	0.3
		50	201000	10.10	
		75	200000	10.39	
		100	198000	10.69	
		125	196000	11.00	
		150	195000	11.28	
		175	193000	11.56	
		200	191000	11.85	
二次蓋 底部中性子 遮蔽材 カバー	炭素鋼 (SGV480)	20	202000	9.73	0.3
		50	200000	10.10	
		75	198000	10.39	
		100	197000	10.69	
		125	195000	11.00	
		150	193000	11.28	
		175	192000	11.56	
		200	190000	11.85	
カバープレート	ステンレス鋼 (SUS304)	20	195000	15.21	0.3
		50	193000	15.49	
		75	191000	15.68	
		100	190000	15.87	
		125	188000	16.05	
		150	186000	16.21	
		175	184000	16.37	
		200	183000	16.52	
一次蓋ボルト カバープレート ボルト 二次蓋ボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	20	192000	11.14	0.3
		50	189000	11.40	
		75	188000	11.62	
		100	186000	11.82	
		125	185000	12.00	
		150	184000	12.21	
		175	182000	12.37	
		200	180000	12.54	

表 6-1 密封容器用材料の許容応力 (1/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*2					
		炭素鋼					
		シール部以外			シール部		
		胴, 一次蓋, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー			胴, 一次蓋		
		GLF1	SGV480	許容値基準	GLF1	許容値 基準	
設計条件	一次一般膜応力強さ P_m	122	155	S_m	—	S_y	
	一次局部膜応力強さ P_L	183	232	$1.5 S_m$	183	S_y	
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	183	232	$1.5 S_m$	—	S_y	
供用状態 A及びB *1	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	366	465	$3 S_m$	183	S_y	
	平均せん断応力 σ_s	—	—	$0.6 S_m$	—	—	
	平均支圧応力 σ_p	183	—	S_y *3	—	—	
	圧縮応力*4 σ_c	95	—	$\text{Min}(S_m, B)$	—	—	
	最高使用圧力(外圧) P_{do}	15	—	P_a	—	—	
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	183	232	$\text{Min}(S_y, 2/3 S_u)$	—	S_y	
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	274	348	$\text{Min}(1.5 S_y, S_u)$	183	S_y	
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *5	366	465	$3 S_m$	183	S_y	
	平均せん断応力 σ_s	—	—	$0.6 S_m$	—	—	
	平均支圧応力 σ_p	183	—	S_y *3	—	—	
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	251	282	$2/3 S_u$	—	S_y	
	一次膜+一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	377	424	S_u	183	S_y	
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *5	366	465	$3 S_m$	183	S_y	
	平均せん断応力 σ_s	—	—	$0.4 S_u$	—	—	
	平均支圧応力 σ_p	377	—	S_u *3	—	—	
試験状態	一次一般膜応力強さ P_m	186	238	$0.9 S_y$	—	$0.9 S_y$	
	一次局部膜応力強さ P_L	279	357	$1.35 S_y$	207	S_y	
	一次一般膜+一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	279	357	$1.35 S_y$ *6	—	—	
	一次+二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	—	—	—	207	S_y	

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価は設計条件に包絡されるため評価を省略する。

*2：評価すべき応力が発生しないか，又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

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

*4：円筒形の軸方向の圧縮に対して適用する。

*5：地震力のみによる全振幅について評価する。

*6：ただし， $P_m \leq 2/3 S_y$ のときの値

表 6-1 密封容器用材料の許容応力 (2/2)

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力*2			
		ステンレス鋼			
		カバープレート			
		シール部以外		シール部	
		SUS304	許容値基準	SUS304	許容値基準
設計条件	一次一般膜応力強さ P_m	—	S_m	—	S_y
	一次局部膜応力強さ P_L	—	$1.5 S_m$	—	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	205	$1.5 S_m$	155	S_y
供用状態 A及びB *1	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	—	$3 S_m$	—	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y *3	—	—
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	—	$1.2 S_m$	—	Min ($1.2 S_m, S_y$)
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	—	$1.8 S_m$	—	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *4	—	$3 S_m$	—	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y *3	—	—
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	—	Min ($2.4 S_m, 2/3 S_u$)	—	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	—	Min ($3.6 S_m, S_u$)	—	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ *4	—	$3 S_m$	—	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.4 S_u$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_u *3	—	—
試験状態	一次一般膜応力強さ P_m	—	$0.9 S_y$	—	$0.9 S_y$
	一次局部膜応力強さ P_L	—	$1.35 S_y$	—	S_y
	一次一般膜＋一次曲げ応力強さ $P_m + P_b$	276	$1.35 S_y$ *5	—	—
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	—	—	205	S_y

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価は設計条件に包絡されるため評価を省略する。

*2：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

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

*4：地震力のみによる全振幅について評価する。

*5：ただし、 $P_m \leq 2/3 S_y$ のときの値

表 6-2 密封容器用材料（ボルト用材料）の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力	
		低合金鋼	
		一次蓋ボルト カバープレートボルト	
		SNB23-3	許容値基準
設計条件	平均引張応力	277	S_m
供用状態 A, B 及び C _s	平均引張応力	554	$2S_m$
	平均引張応力+曲げ応力	831	$3S_m$
供用状態 D _s	平均引張応力	831	S_y
	平均引張応力+曲げ応力	831	S_y

表 6-3 二次蓋用材料の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力 ^{*2}			
		炭素鋼			
		シール部以外		シール部	
		SGV480	許容値 基準	SGV480	許容値 基準
設計条件	一次一般膜応力強さ P_m	158	S_m	—	S_y
	一次局部膜応力強さ P_L	237	$1.5 S_m$	236	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	237	$1.5 S_m$	—	S_y
供用状態 A及びB ^{*1}	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$	474	$3 S_m$	236	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y ^{*3}	—	—
供用状態 C_s	一次一般膜応力強さ P_m	236	Min ($S_y, 2/3 S_u$)	—	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	355	Min ($1.5 S_y, S_u$)	236	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ ^{*4}	474	$3 S_m$	236	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.6 S_m$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_y ^{*3}	—	—
供用状態 D_s	一次一般膜応力強さ P_m	286	$2/3 S_u$	—	S_y
	一次膜＋一次曲げ応力強さ $P_L + P_b$	429	S_u	236	S_y
	一次＋二次応力強さ $P_L + P_b + Q$ ^{*4}	474	$3 S_m$	236	S_y
	平均せん断応力 σ_s	—	$0.4 S_u$	—	—
	平均支圧応力 σ_p	—	S_u ^{*3}	—	—

注記*1：供用状態A及びBの一次応力評価は設計条件に包絡されるため評価を省略する。

*2：評価すべき応力が発生しないか、又は評価上厳しくない項目は「—」とする。

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

*4：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 6-4 二次蓋用材料（ボルト用材料）の許容応力

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力の種類	許容応力	
		低合金鋼	
		二次蓋ボルト	
		SNB23-3	許容値基準
設計条件	平均引張応力	282	S_m
供用状態 A, B 及び C_s	平均引張応力	565	$2S_m$
	平均引張応力+曲げ応力	847	$3S_m$
供用状態 D_s	平均引張応力	848	S_y
	平均引張応力+曲げ応力	848	S_y

表 6-5 数値の丸め方一覧表

数値の種類	単位	処理桁	処理法	表示桁
最高使用圧力	MPa	—	—	設計値
最高使用温度	℃	—	—	設計値
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
熱膨張係数	mm/(mm・℃)	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
許容応力	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位
応力の計算値	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
長さ	mm	—	—	設計値
加速度	m/s ²	—	—	設計値
設計震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁
角度	°	—	—	設計値
質量	kg	—	—	設計値
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁

添付書類 8-1-2

密封容器の応力計算書

目 次

1. 概要	1
1.1 形状・寸法・材料	1
1.2 計算結果	1
2. 応力計算	2
2.1 応力評価位置	2
2.2 設計時	2
2.2.1 荷重条件	2
2.2.2 応力計算	2
2.2.3 計算結果	4
2.3 貯蔵時	4
2.3.1 荷重条件	4
2.3.2 応力計算	4
2.3.3 計算結果	5
2.4 吊上げ時	5
2.4.1 荷重条件	5
2.4.2 応力計算	5
2.4.3 計算結果	5
2.5 支持脚への衝突時	6
2.5.1 荷重条件	6
2.5.2 応力計算	6
2.5.3 計算結果	6
2.6 貯蔵架台への衝突時	6
2.6.1 荷重条件	6
2.6.2 応力計算	7
2.6.3 計算結果	7
2.7 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)	7
2.7.1 荷重条件	7
2.7.2 応力計算	7
2.7.3 計算結果	8
2.8 貯蔵時 (S_S 地震力が作用する場合)	8
2.8.1 荷重条件	8
2.8.2 応力計算	8

2.8.3 計算結果	8
2.9 試験時	9
2.9.1 荷重条件	9
2.9.2 応力計算	9
2.9.3 計算結果	9
3. 応力評価	10
3.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の応力評価	10
3.2 ボルトの応力評価	10
3.3 特別な応力の評価	10
4. 繰返し荷重の評価	11
4.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の評価	11
4.2 ボルトの評価	16
4.2.1 金属キャスク構造規格 MCD-1322 及び 金属キャスク構造規格別図 8-4 に対する検討	16
4.2.2 一次蓋ボルトの疲労解析	16
4.2.3 カバープレートボルトの疲労解析	19
4.2.4 二次蓋ボルトの疲労解析	20
5. 穴の補強	21
6. 外圧の評価	22
7. 二次蓋の厚さの評価	23
7.1 応力計算	23
7.2 計算結果	23

図表目次

図 1-1	密封容器の形状・寸法・材料	24
図 1-2	二次蓋の形状・寸法・材料	25
図 2-1	密封容器及び二次蓋の応力評価位置	26
図 2-2	密封容器及び二次蓋の解析モデル（設計時）	27
図 2-3	密封容器及び二次蓋の解析モデル（貯蔵時）	28
図 2-4	密封容器及び二次蓋の解析モデル（吊上げ時）	29
図 2-5	密封容器及び二次蓋の解析モデル（支持脚への衝突時）	30
図 2-6	密封容器及び二次蓋の解析モデル（貯蔵架台への衝突時）	31
図 2-7	密封容器及び二次蓋の解析モデル（地震時）	32
図 2-8	密封容器の解析モデル（試験時）	33
表 2-1	一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果 （設計時）	34
表 2-2	カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）	35
表 2-3	カバープレートボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）	35
表 2-4	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時）	36
表 2-5	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時）	36
表 2-6	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果 （支持脚への衝突時）	36
表 2-7	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵架台への衝突時）	37
表 2-8	底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果 （貯蔵時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合））	37
表 2-9	カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果（試験時）	37
表 3-1	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（設計条件）	38
表 3-2	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）	39
表 3-3	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_s ）	41
表 3-4	密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 D_s ）	44
表 3-5	密封容器の応力計算結果と許容応力（試験状態）	47
表 4-1	密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の疲労解析不要の評価結果	48
表 4-2	①の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	49

表 4-3	②及び③の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	49
表 4-4	④の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	50
表 4-5	応力差の変動（一次蓋ボルト）	51
表 4-6	一次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果	52
表 4-7	疲労累積係数（一次蓋ボルト）	52
表 4-8	①の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	53
表 4-9	②及び③の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	53
表 4-10	④の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	54
表 4-11	応力差の変動（カバープレートボルト）	55
表 4-12	カバープレートボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果	56
表 4-13	疲労累積係数（カバープレートボルト）	56
表 4-14	①の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	57
表 4-15	②及び③の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの 計算条件及び計算結果	57
表 4-16	④の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果	58
表 4-17	応力差の変動（二次蓋ボルト）	59
表 4-18	二次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果	60
表 4-19	疲労累積係数（二次蓋ボルト）	60
表 5-1	一次蓋貫通孔部の応力強さ	61
表 7-1	二次蓋の計算上必要な厚さの計算条件及び計算結果	62

1. 概要

本書は、HDP-69B(B)型の密封容器及び二次蓋に関する応力計算書である。

なお、HDP-69B(B)型は一次蓋と二次蓋で多重の閉じ込め構造を形成し、二次蓋には一次蓋と同等の閉じ込め性能を要求するため、二次蓋は一次蓋と同様の応力評価を行う。

1.1 形状・寸法・材料

本書で評価する密封容器の形状・寸法・材料を図1-1に示す。また、二次蓋の形状・寸法・材料を図1-2に示す。

1.2 計算結果

計算結果を表3-1から表3-5に示す。なお、応力評価位置については、評価上最も厳しい部位を選定し、代表評価位置として本書に記載している。

表中の「－」は、評価すべき応力が発生しない、又は評価上厳しくないため評価を省略している。

注記：図表は一括して巻末に示す。

2. 応力計算

2.1 応力評価位置

密封容器及び二次蓋の応力評価位置を図2-1に示す。

2.2 設計時

2.2.1 荷重条件

設計時における荷重は次に示す組合せとする。

- 最高使用圧力 (1.0 MPa)
- ボルト初期締付け力
- 貯蔵架台への衝突時荷重 (自重を含む。)

2.2.2 応力計算

(1) 一次蓋, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー及び二次蓋

応力計算は, 解析コードABAQUSにより行う。三次元固体 (連続体) 要素及び三次元はり要素による解析モデルを図2-2に示す。

(2) 一次蓋ボルト, カバープレート, カバープレートボルト及び二次蓋ボルト。

一次蓋ボルト, カバープレート, カバープレートボルト及び二次蓋ボルトの応力計算は以下に示すとおりである。

a. 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト

最高使用圧力におけ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}) は次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n1} &= \frac{W_{m1}}{A} \\ W_{m1} &= H + H_P \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot D_G^2 \cdot P + H_P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで,

- A : ボルト最小断面積の合計値
一次蓋ボルト (= mm²)
二次蓋ボルト (= mm²)
- H : フランジ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
一次蓋ボルト (直径: 1740 mm)
二次蓋ボルト (直径: 1956 mm)
- H_P : 気密を十分保つために, ガスケット接触面にかける圧縮力
一次蓋ボルト (= N)
二次蓋ボルト (= N)

- P : 最高使用圧力
 一次蓋ボルト (=1.0 MPa)
 二次蓋ボルト (=0.4 MPa)

また、ガスケット締付け時の平均引張応力 (σ_{n2}) は次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n2} &= \frac{W_{m2}}{A} \\ W_{m2} &= H_P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

- W_{m2} : ガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重
 一次蓋ボルト (= N)
 二次蓋ボルト (= N)

なお、(2.1)式で用いる、気密を十分に保つためにガスケット接触面にかかる圧縮力 (H_P) は、荷重としてより大きいガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重 (W_{m2}) で代表している。

計算条件及び計算結果を表 2-1 に示す。

b. 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 ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$) は、カバープレートを周辺支持の円板にモデル化し、次式(1)で計算する。カバープレートの最大応力は図 2-1⑩に発生する。また、カバープレート(シール部)に発生する応力はカバープレートの最大応力より小さいが、カバープレートに発生する応力と同じ値とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_\theta &= \sigma_r \\ \sigma_z &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで、

- P : 内圧 (=1.0 MPa)
 r : ボルトピッチ半径 (=76.5 mm)
 t : 板厚 (=35 mm)

計算条件及び計算結果を表 2-2 に示す。

c. カバープレートボルト

最高使用圧力におけ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(2.1)式により同様に計算する。

ただし、

- A : ボルト最小断面積の合計値 (= mm²)
 D_G : ガスケット反力の作用する位置 (直径: 111 mm)
 H_P : 気密を十分保つために、ガスケット接触面にかかる圧縮力 (= N)

P : 最高使用圧力 (=1.0 MPa)

また、ガスケット締付け時の平均引張応力 (σ_{n2}) は(2.2)式により同様に計算する。

計算条件及び計算結果を表 2-3 に示す。

2.2.3 計算結果

応力計算結果を表3-1に示す。なお、表3-1には各評価位置のそれぞれにおいて計算値が最大となる解析ケースでの値を示している。

2.3 貯蔵時

2.3.1 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 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 自重
- トラニオン固定ボルトによる押付け力
- 熱荷重

2.3.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

- a. 一次蓋, 一次蓋ボルト, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー, 二次蓋及び二次蓋ボルト

応力計算方法は、2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図 2-3 に示す。

- b. カバープレート及びカバープレートボルト

カバープレート及びカバープレートボルトについては、2.2 節の設計時より圧力が低いことより本項以降、試験時まで評価を省略する。

(2) 平均支圧応力

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

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

m_G : バスケット及び使用済燃料集合体の質量 (=28300 kg)

G_2 : 鉛直方向加速度 (=1G)

A : 支圧荷重を受ける面積 (= mm²)

計算条件及び計算結果を表 2-4 に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は 2.2.2(1) の計算方法と同様である。

2.3.3 計算結果

応力計算結果を表3-2に示す。

2.4 吊上げ時

2.4.1 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 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 吊上げ荷重 (自重を含む。)
- 熱荷重

2.4.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

一次蓋, 一次蓋ボルト, 胴, 底板, 底部中性子遮蔽材カバー, 二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は, 2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図 2-4 に示す。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は, 2.3.2(2)と同様である。ただし, $G_2=1.3G$ とする。

計算条件及び計算結果を表 2-5 に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) の計算方法は 2.2.2(1)と同様である。

2.4.3 計算結果

応力計算結果を表3-2に示す。

2.5 支持脚への衝突時

2.5.1 荷重条件

支持脚への衝突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 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 支持脚への衝突時荷重 (自重を含む。)
- 熱荷重

2.5.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

一次蓋，一次蓋ボルト，胴，底板，底部中性子遮蔽材カバー，二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図2-5に示す。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は，2.3.2(2)と同様である。ここで， $G_2=2.5G$ とする。

計算条件及び計算結果を表2-6に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) の計算方法は2.2.2(1)と同様である。

2.5.3 計算結果

応力計算結果を表3-2に示す。

2.6 貯蔵架台への衝突時

2.6.1 荷重条件

貯蔵架台への衝突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 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 貯蔵架台への衝突時荷重 (自重を含む。)

- 熱荷重

2.6.2 応力計算

(1) 一次+二次応力

一次蓋，一次蓋ボルト，胴，底板，底部中性子遮蔽材カバー，二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図 2-6 に示す。

(2) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は，2.3.2(2)と同様である。ここで， $G_2=5G$ とする。

計算条件及び計算結果を表 2-7 に示す。

(3) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) の計算方法は 2.2.2(1)と同様である。

2.6.3 計算結果

応力計算結果を表 3-2 に示す。

2.7 貯蔵時 (S_d *地震力が作用する場合)

2.7.1 荷重条件

貯蔵時において S_d *地震力が作用する場合の荷重は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力 (-0.101325 MPa)
- 蓋間圧力 (0.4 MPa)
- 蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 側部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- 底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa)
- ボルト初期締付け力
- 自重
- 地震力
- 熱荷重

2.7.2 応力計算

(1) 一次応力

一次蓋，一次蓋ボルト，胴，底板，底部中性子遮蔽材カバー，二次蓋及び二次蓋ボルトの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。

解析モデルを図 2-7 に示す。

水平方向加速度 (G_1) 及び鉛直方向加速度 (G_2) として次の値を用いる。鉛直方向加速度については、プラスの方向とマイナスの方向を自重の加速度と組み合わせて考慮する。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= C_H \cdot G \\ G_2 &= (1 \pm C_V) \cdot G \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、

- C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)
- C_V : 鉛直方向設計震度 (=0.87)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

(2) 一次+二次応力

a. シール部を除く、一次蓋、胴、底板、底部中性子遮蔽材カバー及び二次蓋
 応力計算の方法は、(1)と同様である。ただし、荷重条件は地震力のみとして計算を行い、振幅を考慮して応力強さの最大値を2倍して求める。

b. シール部、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルト
 応力計算の方法は、(1)と同様である。ただし、荷重条件として熱荷重を含める。

(3) 平均支圧応力

バスケット底面との接触部である底板に発生する平均支圧応力 (σ_p) の計算方法は、2.3.2(2)と同様である。ただし、 $G_2 = (1 + C_V) \cdot G$ とする。

ここで、 C_V : (1)と同じ
 計算条件及び計算結果を表 2-8 に示す。

2.7.3 計算結果

応力計算結果を表3-3に示す。

2.8 貯蔵時 (S_s 地震力が作用する場合)

2.8.1 荷重条件

貯蔵時において S_s 地震力が作用する場合の荷重条件は、 S_s 地震力と S_d *地震力を同じとしているため2.7.1項と同様である。

2.8.2 応力計算

計算方法及び計算結果は2.7.2項と同様である。

2.8.3 計算結果

応力計算結果を表3-4に示す。

2.9 試験時

2.9.1 荷重条件

試験時における荷重条件は次に示す組合せとする。

- 密封容器内圧力（最高使用圧力の1.25倍の圧力）
- ボルト初期締付け力
- 自重

2.9.2 応力計算

(1) 一次蓋，胴，底板及び底部中性子遮蔽材カバー

一次蓋，胴，底板及び底部中性子遮蔽材カバーの応力計算方法は，2.2.2(1)と同様である。解析モデルを図2-8に示す。

(2) カバープレート

カバープレートの応力計算方法は2.2.2(2)b.と同様である。ただし， $P=1.25\text{ MPa}$ とする。

計算条件及び計算結果を表2-9に示す。

2.9.3 計算結果

応力計算結果を表3-5に示す。

3. 応力評価

3.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の応力評価

各供用状態における応力計算結果と許容応力を表3-1から表3-5に示す。

表3-1から表3-5に示すように、各供用状態の一次一般膜応力強さ（ P_m ）、一次局部膜応力強さ（ P_L ）、一次膜＋一次曲げ応力強さ（ $P_L + P_b$ ）及び一次応力と二次応力を加えて求めた応力強さ（ $P_L + P_b + Q$ ）は、金属キャスク構造規格MCD-1311、MCD-1312及びMCD-1318における各規定を満足する。

3.2 ボルトの応力評価

表3-1から表3-4に示すように、各供用状態における平均引張応力及び平均引張応力＋曲げ応力は、金属キャスク構造規格MCD-1321における規定を満足する。

3.3 特別な応力の評価

(1) 平均せん断応力

各供用状態において純せん断荷重を受ける箇所がないため、評価を省略する。

(2) 平均支圧応力

表3-2から表3-4に示すように、各供用状態の平均支圧応力（ σ_p ）は、金属キャスク構造規格MCD-1316における規定を満足する。

(3) 圧縮応力

表3-2に示すように、各供用状態の圧縮応力（ σ_c ）は、金属キャスク構造規格MCD-1317における規定を満足する。

4. 繰返し荷重の評価

4.1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の評価

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、表4-1にその評価結果のまとめを示す。なお、燃料装荷及び取出しサイクルは通常1回であるが、本評価においては10回に想定しても、その条件を満足することを示す。

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

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

$$N_1 = 10 \text{ (回)}$$

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の許容繰返し回数（ N_a ）は、

$$N_a = 3627 \text{ (回)}$$

である。したがって、

$$N_1 \leq N_a$$

であり、条件を満足する。

また、二次蓋については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（474 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1650回であり、同様に条件を満足する。

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

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

$$A_m = \frac{1}{3} \cdot P \cdot \frac{S}{S_m} = 0.23 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

P : 最高使用圧力（=1.0 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、次式で計算する。

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

ここで、

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

(4.1)式より, 圧力変動の全振幅の許容値 (A_m) は, 0.23 MPa となる。燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における実際の圧力は, 密封容器のため 0.23 MPa を超える変動は生じないと考えられるが, 変動回数を安全側に燃料装荷及び取出し想定回数である 10 回として (4.2)式を用いて評価すると,

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

$$A_m = 10 \text{ MPa}$$

となる。したがって, 燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動の全振幅を最高使用圧力 ($P = 1.0 \text{ MPa}$) と仮定しても,

$$P \leq A_m$$

であり, 条件を満足する。

次に, 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, 0.07 MPa となる。

A_{m2} : 二次蓋の圧力変動の全振幅の許容値 (MPa)

P_2 : 二次蓋の最高使用圧力 (=0.4 MPa)

S_{m2} : 二次蓋の使用材料の設計応力強さ (=158 MPa)

二次蓋において燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B における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 100 回として (4.2)式を用いて評価すると,

$$S_a = 1413 \text{ MPa}$$

$$A_{m2} = 1.1 \text{ MPa}$$

となる。したがって, 燃料装荷時及び燃料取出し時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動の全振幅を二次蓋の最高使用圧力 ($P_2 = 0.4 \text{ MPa}$) と仮定しても,

$$P_2 \leq A_{m2}$$

であり, 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)

密封容器の任意の 2 点間の距離 (p) は, 次式で計算する。

$$p = 2 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 969 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで,

R : 密封容器の平均半径 (=955 mm)

t : 密封容器の板厚 (=246 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 を超えない密封容器の任意の 2 点間の温度差の許容値 (T) は、次式で計算する。なお、2 点間の平均温度は密封容器の最高使用温度 ($T_{max}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$) とする。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 808\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、

- E : 2 点間の平均温度における縦弾性係数 ($=1.95 \times 10^5\text{ MPa}$)
- α : 2 点間の平均温度における瞬時熱膨張係数 ($=12.69 \times 10^{-6}\text{ mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$)
- S_a : 金属キャスク構造規格別図 8-1 において、燃料装荷及び取出しの回数 (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 ($=3999\text{ MPa}$)

したがって、密封容器の任意の 2 点間の距離 (p) は 969 mm であるが、任意の 2 点間において生じる温度差を保守側に最高使用温度 (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、条件を満足する。なお、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 (4.3) 式にて計算された p の値を超えない任意の 2 点間の温度差の変動の全振幅の許容値 (T) は、次式で計算する。

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

ここで、

- E, α : (3) と同じ
- 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)

$$T' = \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha} = 17\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

ここで、

- 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 (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)式により計算した値の17℃を超えることはないと考えられるが、変動回数を安全側に燃料装荷及び取出し想定回数である10回として(4.5)式を用いて評価すると、

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

$$T = 808 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、密封容器の任意の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、条件を満足する。なお、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、カバープレート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、カバープレートはステンレス鋼を使用している。ここでは、縦弾性係数及び熱膨張係数の差が大きく、評価が厳しくなる組合せであるカバープレートとカバープレートボルトを代表として評価する。

カバープレートとカバープレートボルト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。

$$T = \frac{S}{2 \cdot (E_c \cdot \alpha_c - E_{cb} \cdot \alpha_{cb})} = 61 \text{ }^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、

- S : 金属キャスク構造規格別図 8-2 において、許容繰返し回数 10^{11} 回に対応する繰返しピーク応力強さ (=94 MPa)
- E_c : カバープレートの縦弾性係数 (= 1.86×10^5 MPa)
- E_{cb} : カバープレートボルトの縦弾性係数 (= 1.84×10^5 MPa)
- α_c : カバープレートの瞬時熱膨張係数 (= 17.04×10^{-6} mm/(mm \cdot °C))
- α_{cb} : カバープレートボルトの瞬時熱膨張係数 (= 13.06×10^{-6} mm/(mm \cdot °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。

$$T = \frac{S_a}{2 \cdot (E_c \cdot \alpha_c - E_{cb} \cdot \alpha_{cb})} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ここで、

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

(4.7)式より、温度変動の許容値は61℃となるが、燃料装荷時及び燃料取出し時における温度変動を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T=130$ ℃) と仮定すると、この温度 ($T=61$ ℃) を超える。一方、燃料装荷時及び燃料取出し時以外においては、温度変動する加熱源を収納していないので、61℃を超える温度変動はないと考えられる。したがって、著しい温度差が生じる変動回数を燃料装荷及び取出し想定回数である10回として評価すると、

$$S_a = 4881 \text{ MPa}$$

$$T = 3184 \text{ }^\circ\text{C}$$

したがって、供用状態A及びBにおいて生じる温度変動を最高使用温度 (T_{max}) と常温との差 ($\Delta T=130$ ℃) と仮定しても、

$$\Delta T \leq T$$

であり、条件を満足する。

(6) 金属キャスク構造規格 MCD-1332(6) (機械的荷重により生じる応力の全振幅)

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216回と想定する。

燃料装荷時及び取出し時	10回
吊上げ時	200回
支持脚への衝突時	3回
貯蔵架台への衝突時	3回
合 計	216回

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

$$S_a = 1034 \text{ MPa}$$

である。

表 3-2 に示した供用状態A及びBにおける応力強さの最大値 ($\Delta \sigma_1=92$ MPa) の2倍を機械的荷重により発生する応力の全振幅と考えたとしても、

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

であり、条件を満足する。

また、供用状態C_s及びD_sにおける機械的荷重の変動回数は、地震時

(S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合) の最大回数である 10^4 回と想定する。この回数に対応する繰り返しピーク応力強さ S_a は金属キャスク構造規格別図 8-1 より、

$$S_a = 262 \text{ MPa}$$

である。

表 3-3 及び表 3-4 に示した地震力のみによる全振幅について評価した応力強さの最大値 ($\Delta \sigma_2=217$ MPa) は、

$$\Delta \sigma_2 \leq S_a$$

であり、条件を満足する。

(7) 検討結果

以上の(1)から(6)の評価結果のまとめを表4-1に示す。表4-1に示すとおり、金属キャスク構造規格MCD-1332の規定にすべて適合しているため、疲労解析を必要としない。

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。なお、本項においても燃料装荷及び取出しサイクルの回数を10回に想定しても規定を満足することを示す。

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

- (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1000 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、358 MPa、142 MPa及び277 MPaであり、この値は $2.7S_m$ 以下であるため、設計疲労曲線として金属キャスク構造規格別図8-4の“曲線1”を使用する。
- (3) ねじは三角ねじであり、ねじ底部の半径は一次蓋ボルトが mm、カバープレートボルトが mm、二次蓋ボルトが mmであって0.07 mm以上である。
- (4) シャンク部の直径に対するシャンク部の端の丸みの半径の比（小数点以下第4位を切捨て）は以下に示されるとおり

一次蓋ボルト : = 0.062

カバープレートボルト : = 0.065

二次蓋ボルト : = 0.062

であって、0.06以上である。したがって金属キャスク構造規格別図8-4の適合条件を満足する。

4.2.2 一次蓋ボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① 一次蓋ボルトの取付け・取外し時
- ② 吊上げ時

- ③ 衝突時（支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時）
- ④ 地震時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合）

①の事象において、一次蓋ボルトの取付け・取外し時におけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さは、ボルト初期締付け時の垂直応力（ σ_{b1} ）とボルト初期締付け時のねじり応力（ τ_{b1} ）を合成した応力にボルトねじ部の応力集中係数（ K ）を考慮した値で求める。計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 S &= K \cdot S_b \\
 S_b &= \sqrt{\sigma_{b1}^2 + 4 \cdot \tau_{b1}^2} \\
 \sigma_{b1} &= \frac{F_b}{A_b} \\
 \tau_{b1} &= \frac{Tr}{\frac{\pi \cdot d_s^3}{16}}
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

ここで、

- S : ボルトのピーク応力強さ (MPa)
- K : ボルトねじ部の応力集中係数 (=4)
- S_b : ボルト締付け時に発生する応力強さ (MPa)
- σ_{b1} : ボルト初期締付け時の垂直応力 (MPa)
- τ_{b1} : ボルト初期締付け時のねじり応力 (MPa)
- F_b : ボルトの初期締付け力 (= N)
- A_b : ボルトの最小軸断面積 (= mm²)
- Tr : ボルトの締付けトルク (= N・mm)
- d_s : ボルトの最小径 (= mm)

①の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-2に示す。

②及び③の事象において、一次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）は、①で求めたボルト締付け時に発生する応力強さ（ S_b ）に一次蓋の慣性力により一次蓋ボルトへ作用する荷重（ボルトの初期締付け力と反対方向の荷重）を考慮し、次式により計算する。

$$S = K \cdot \left(S_b + \frac{m_{d1} \cdot G_2}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

ここで、

- S_b, K : (4.9) 式に同じ
- m_{d1} : 一次蓋の質量 (=3700 kg)
- G_2 : 鉛直方向の加速度

- 吊上げ時 (= -1.3G)
- 支持脚への衝突時 (= -2.5G)
- 貯蔵架台への衝突時 (= -5.0G)

A : ボルト最小断面積の合計値 (= mm²)

②及び③の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-3に示す。

④の事象においては、地震動のみによる疲労解析を行うため、一次蓋の慣性力により一次蓋ボルトへ作用する荷重のみを考慮し、一次蓋ボルトのピーク応力強さ (S) は、次式により計算する。

$$S = K \cdot \left(\pm \frac{m_{e1} \cdot G_2}{A} \right) \dots\dots\dots (4.11)$$

ここで、

- K : (4.9) 式に同じ
- A, m_{e1} : (4.10)式に同じ
- G₂ : 鉛直方向の加速度
G₂ = C_v · G
- C_v : 鉛直方向設計震度
S_d*地震時 (=0.87)
S_s 地震時 (=0.87)
- G : 重力加速度 (9.80665 m/s²)

④の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-4に示す。

(4.9)式, (4.10)式及び(4.11)式で求めたボルトのピーク応力強さ (S) と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲 (S_P) 並びに各事象の繰返し回数を表4-5に示す。

各応力サイクルに対応したピーク応力強さの範囲 (S_P) から、次式により繰返しピーク応力強さ (S_e, S_e') を求める。ここで、繰返しピーク応力強さ (S_e) は、金属キャスク構造規格別図8-4に使用されている設計疲労線図の縦弾性係数 (E₀=2.07×10⁵ MPa) と解析に用いる縦弾性係数 (E=1.84×10⁵ MPa) との比を考慮し補正する。

$$\left. \begin{aligned} S_e &= \frac{1}{2} \cdot S_P \\ S_e' &= S_e \cdot \frac{E_0}{E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.12)$$

繰返しピーク応力強さ (S_e, S_e') の計算条件及び計算結果を表4-6に示す。

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_0') に対する許容繰返し回数 (N_a) を求める。各サイクルの繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は表4-7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は1.0以下であり、地震時における疲労累積係数との和も1.0以下となるため、金属キャスク構造規格MCD-1322の規定を満足する。

4.2.3 カバープレートボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① カバープレートボルトの取付け・取外し時
- ② 吊上げ時
- ③ 衝突時 (支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時)
- ④ 地震時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合)

①の事象において、カバープレートボルトの取付け・取外し時におけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さ (S) は(4.9)式により同様に求める。また、②及び③の事象におけるボルトのピーク応力強さ (S) の計算は(4.10)式、④の事象におけるボルトのピーク応力強さ (S) の計算は(4.11)式により同様に求める。ここで、

$K, S_b, \sigma_{b1}, \tau_{b1}$: (4.9) 式に同じ
G_2	: (4.10), (4.11)式に同じ
F_b	: ボルト初期締付け力 (= <input type="text"/> N)
A_b	: ボルト最小軸断面積 (= <input type="text"/> mm ²)
T_r	: ボルト締付けトルク (= <input type="text"/> N・mm)
d_s	: ボルトの最小径 (= <input type="text"/> mm)
m_{e3}	: カバープレートの質量 (=8 kg)
A	: ボルト最小断面積の合計値 (= <input type="text"/> mm ²)

①の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-8に、②及び③の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-9に、④の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さ (S) の計算条件及び計算結果を表4-10に示す。

ボルトのピーク応力強さ (S) と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲 (S_P) 並びに各事象の繰返し回数を表4-11に示す。

繰返しピーク応力強さ (S_e, S_e') は、(4.12)式により同様に求める。

繰返しピーク応力強さ (S_e, S_e') の計算条件及び計算結果を表4-12に示す。

各サイクルの繰返し回数 (N_c) と許容繰返し回数 (N_a) との比は表4-13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は1.0以下であり、地震時における疲労

累積係数との和も1.0以下となるため、金属キャスク構造規格MCD-1322の規定を満足する。

4.2.4 二次蓋ボルトの疲労解析

疲労解析で考慮する事象は以下とする。

- ① 二次蓋ボルトの取付け・取外し時
- ② 吊上げ時
- ③ 衝突時（支持脚への衝突時及び貯蔵架台への衝突時）
- ④ 地震時（ S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合）

①の事象において、二次蓋ボルトの取付け・取外し時におけるボルト締付け力によるボルトのピーク応力強さ（ S ）は(4.9)式により同様に求める。また、②及び③の事象におけるボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算は(4.10)式、④の事象におけるボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算は(4.11)式により同様に求める。ここで、

- $K, S_b, \sigma_{b1}, \tau_{b1}$: (4.9) 式に同じ
- G_2 : (4.10), (4.11)式に同じ
- F_b : ボルト初期締付け力 (= N)
- A_b : ボルト最小軸断面積 (= mm²)
- T_r : ボルト締付けトルク (= N・mm)
- d_s : ボルトの最小径 (= mm)
- m_{L2} : 二次蓋の質量 (=4600 kg)
- A : ボルト最小断面積の合計値 (= mm²)

①の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-14に、②及び③の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-15に、④の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さ（ S ）の計算条件及び計算結果を表4-16に示す。

ボルトのピーク応力強さ（ S ）と各事象の回数を考慮して定めた応力サイクル及びそれに対応するピーク応力強さの範囲（ S_p ）並びに各事象の繰返し回数を表4-17に示す。

繰返しピーク応力強さ（ S_e, S_e' ）は、(4.12)式により同様に求める。なお、縦弾性係数 E は $E=1.86 \times 10^5$ MPaに読み替える。

繰返しピーク応力強さ（ S_e, S_e' ）の計算条件及び計算結果を表4-18に示す。

各サイクルの繰返し回数（ N_c ）と許容繰返し回数（ N_e ）との比は表4-19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は1.0以下であり、地震時における疲労累積係数との和も1.0以下となるため、金属キャスク構造規格MCD-1322の規定を満足する。

5. 穴の補強

金属キャスク構造規格MCD-1700により，一次蓋貫通孔の補強が不要となることを示す。
一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。

$$S_c = K \cdot S \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで，

S_c : 一次蓋貫通孔部の応力強さ (MPa)

K : 応力集中係数 (=4.0⁽²⁾)

S : 一次蓋貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (MPa)

一次蓋貫通孔を無視した場合の一次蓋の応力強さ (S) と一次蓋貫通孔部の応力強さ (S_c) は表5-1に示すとおりとなり，すべて許容応力を満足するため，一次蓋貫通孔の補強は不要となる。

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_{d0} ）は0.65 MPaである。許容外圧（ P_a ）は「添付書類8-1-1 密封容器の応力解析の方針」表6-1（1/2）より15 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。

7. 二次蓋の厚さの評価

ここでは、設計・建設規格クラス3容器の規定である、平板の必要板厚の計算を行い、二次蓋の板厚が基準を満足していることを示す。

7.1 応力計算

二次蓋の計算上必要な厚さ (t_{21}) は設計・建設規格PVD-3310の規定中 (PVD-5) 式から、次式で表される。

$$t_{21} = d \cdot \sqrt{\frac{K \cdot P}{S}} \dots\dots\dots (7.1)$$

ここで、

- t_{21} : 二次蓋の計算上必要な厚さ (mm)
- d : 二次蓋ボルトピッチの円の直径 (=2045 mm)
- P : 最高使用圧力 (=0.4 MPa)
- S : 最高使用温度における付録材料図表 Part5 表 5 又は表 6 に規定する材料の許容引張応力 (=120 MPa)
- K : 平板の取付方法による係数 (=0.17, 表 PVD-3310-1 (a) に相当)

であり、計算上必要な厚さは $t_{21}=48.68$ mm である。

設計・建設規格PVD-3322による、直径が1/2 d以下の穴を設けた場合の計算上必要な厚さ (t_{22}) は (PVD-6) 式から

$$t_{22} = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot P}{S}} \dots\dots\dots (7.2)$$

であり、計算上必要な厚さは $t_{22}=68.85$ mm である。

二次蓋の計算上必要な厚さの計算条件及び計算結果を表7-1に示す。

7.2 計算結果

以上の計算から、図1-2に示す穴を除く二次蓋の最小厚さ (=90 mm) は二次蓋の計算上必要な厚さ t_{21} 及び t_{22} を上回っており、設計・建設規格PVD-3310及びPVD-3322の規定を満足する。

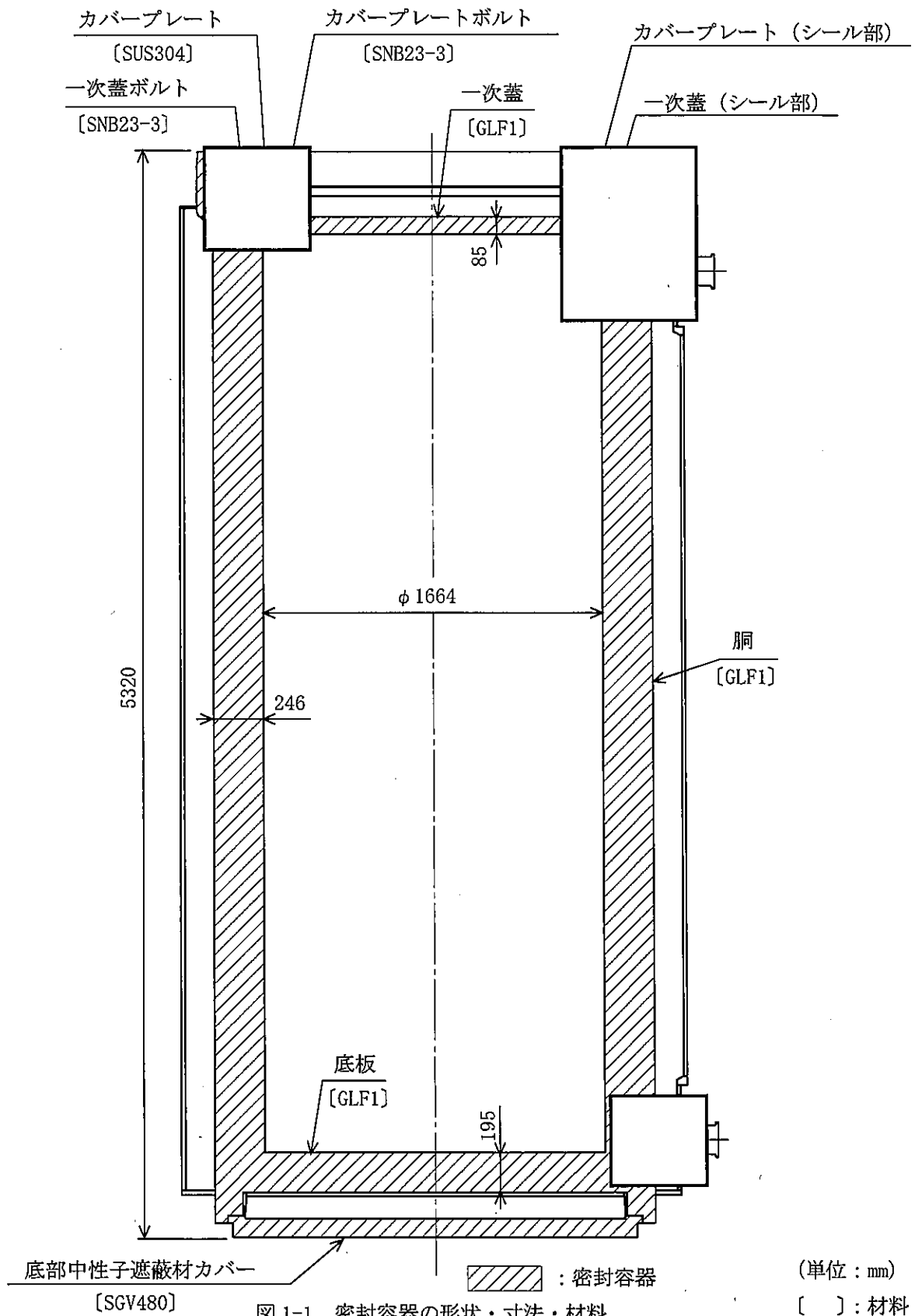
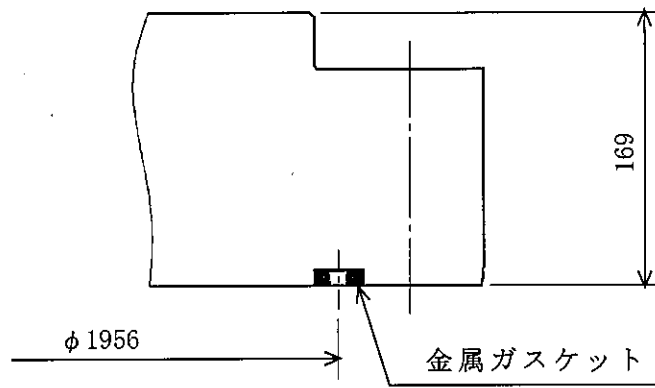
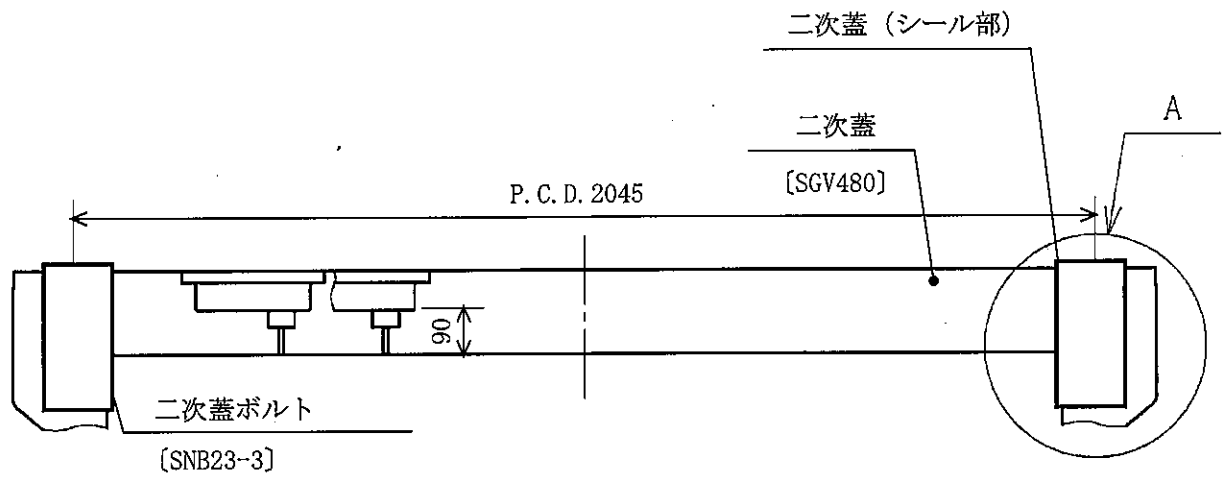


図 1-1 密封容器の形状・寸法・材料



(単位 : mm)
 [] : 材料

図 1-2 二次蓋の形状・寸法・材料

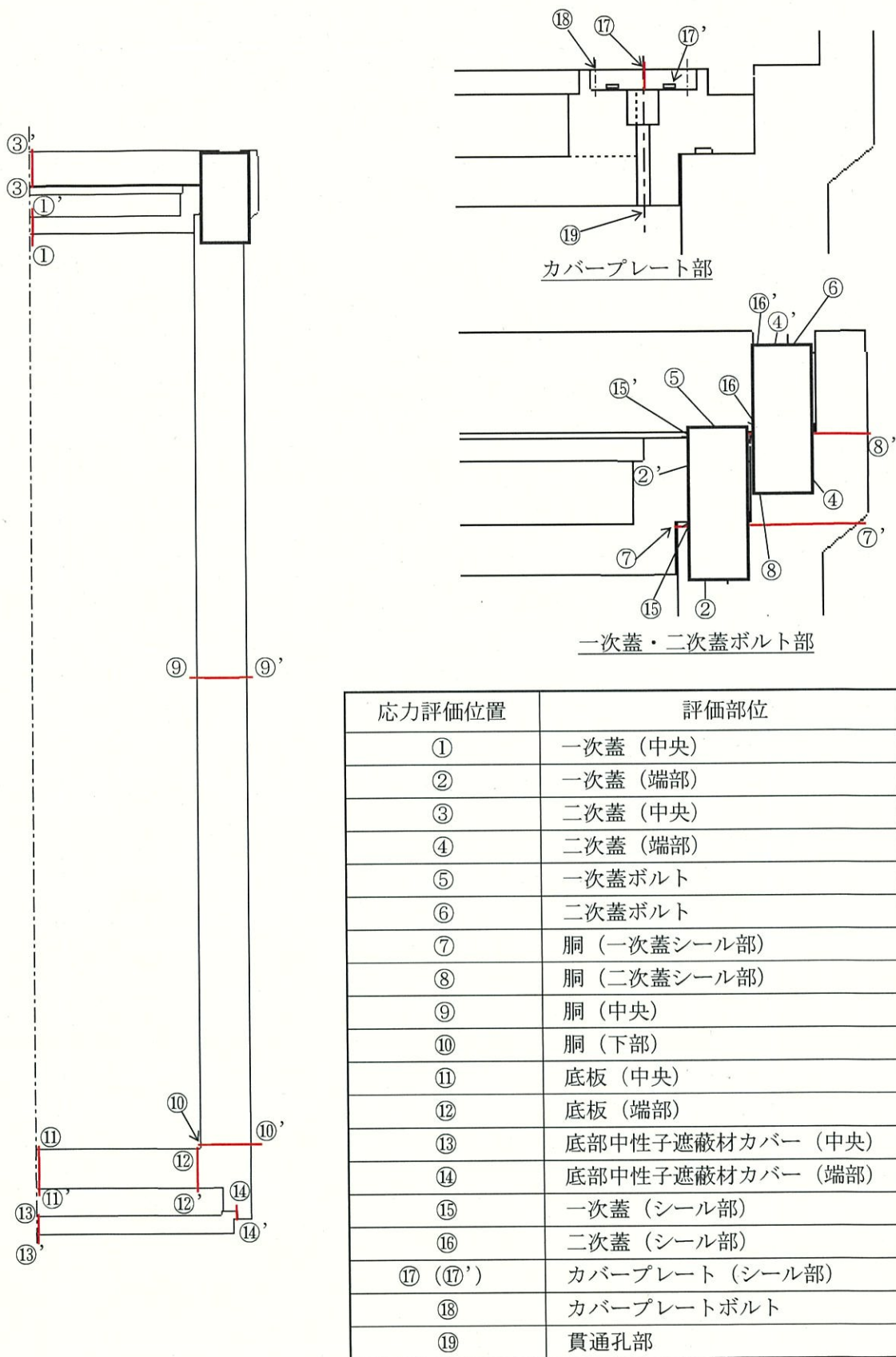


図 2-1 密封容器及び二次蓋の応力評価位置

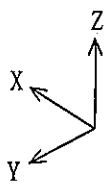
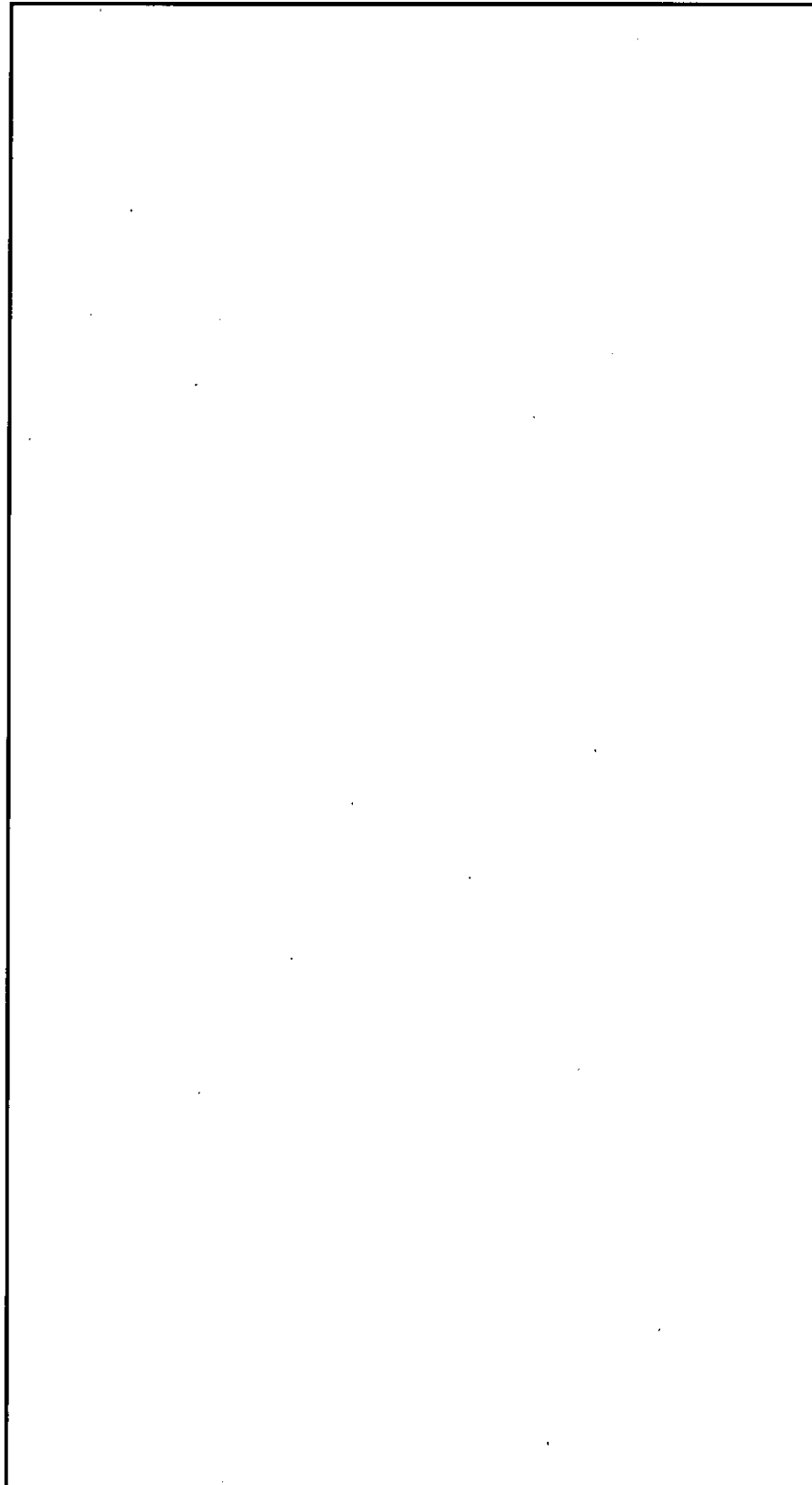


図 2-2 密封容器及び二次蓋の解析モデル（設計時）

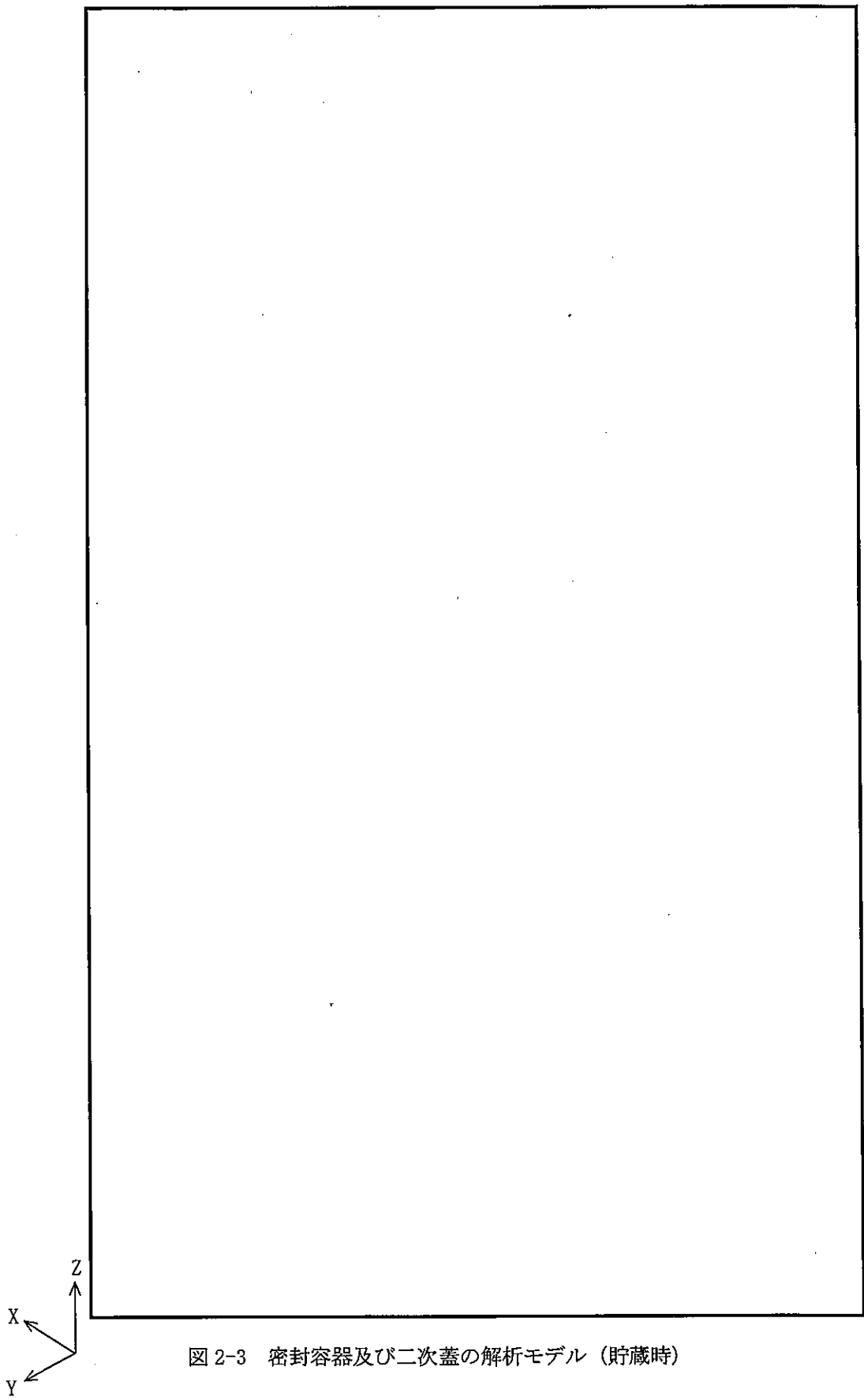


図 2-3 密封容器及び二次蓋の解析モデル（貯蔵時）

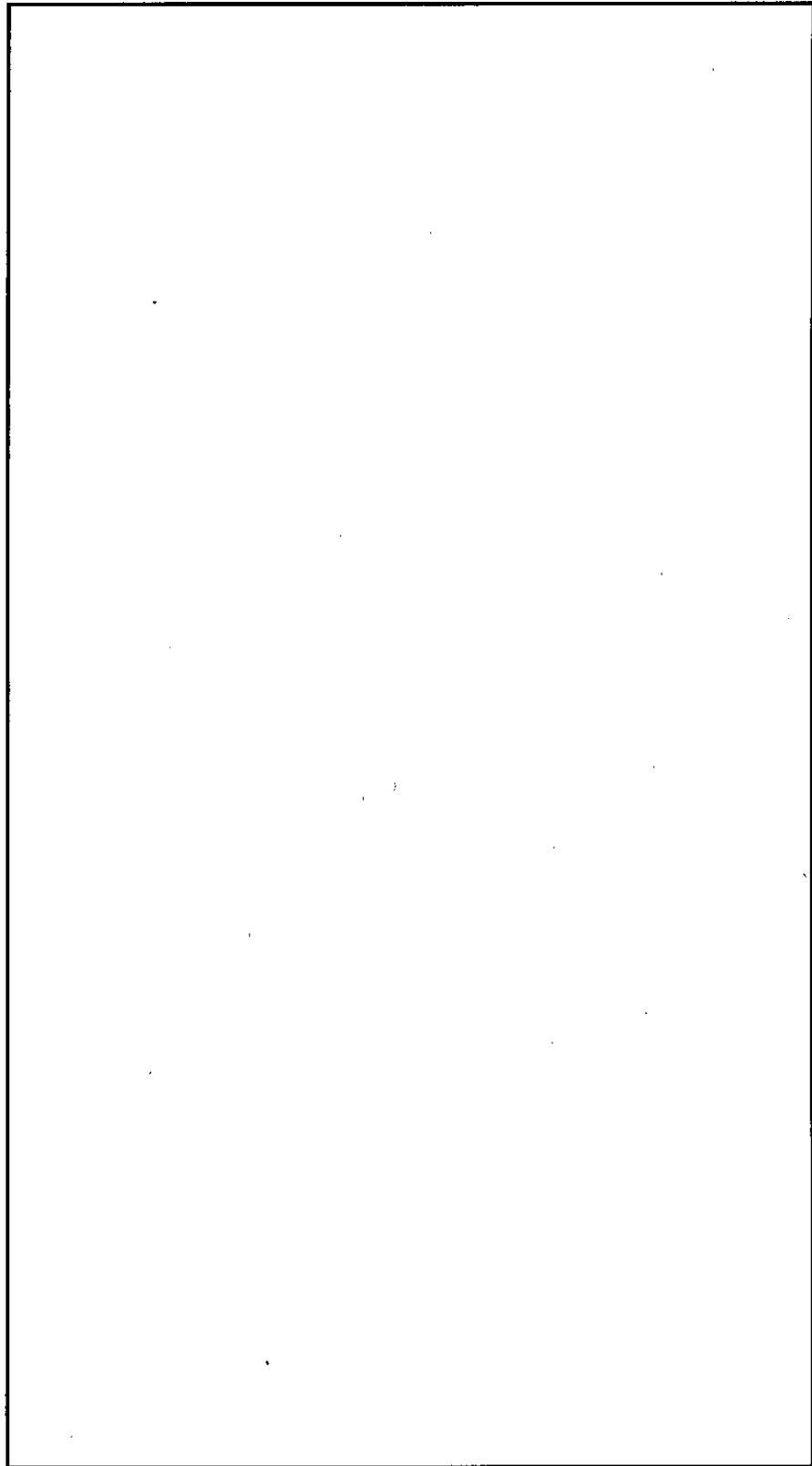
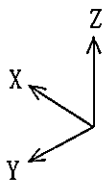


図 2-4 密封容器及び二次蓋の解析モデル（吊上げ時）

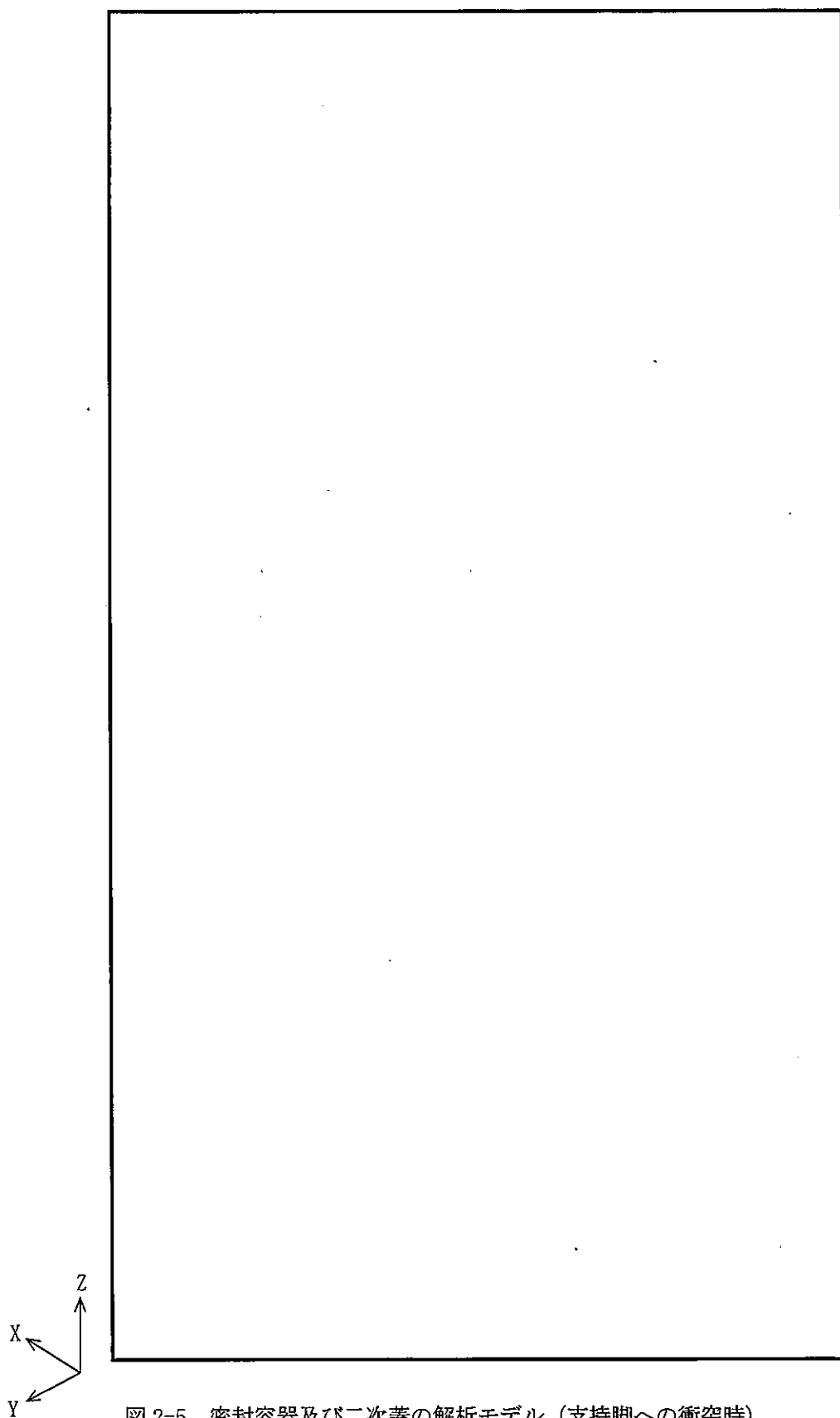


図 2-5 密封容器及び二次蓋の解析モデル（支持脚への衝突時）

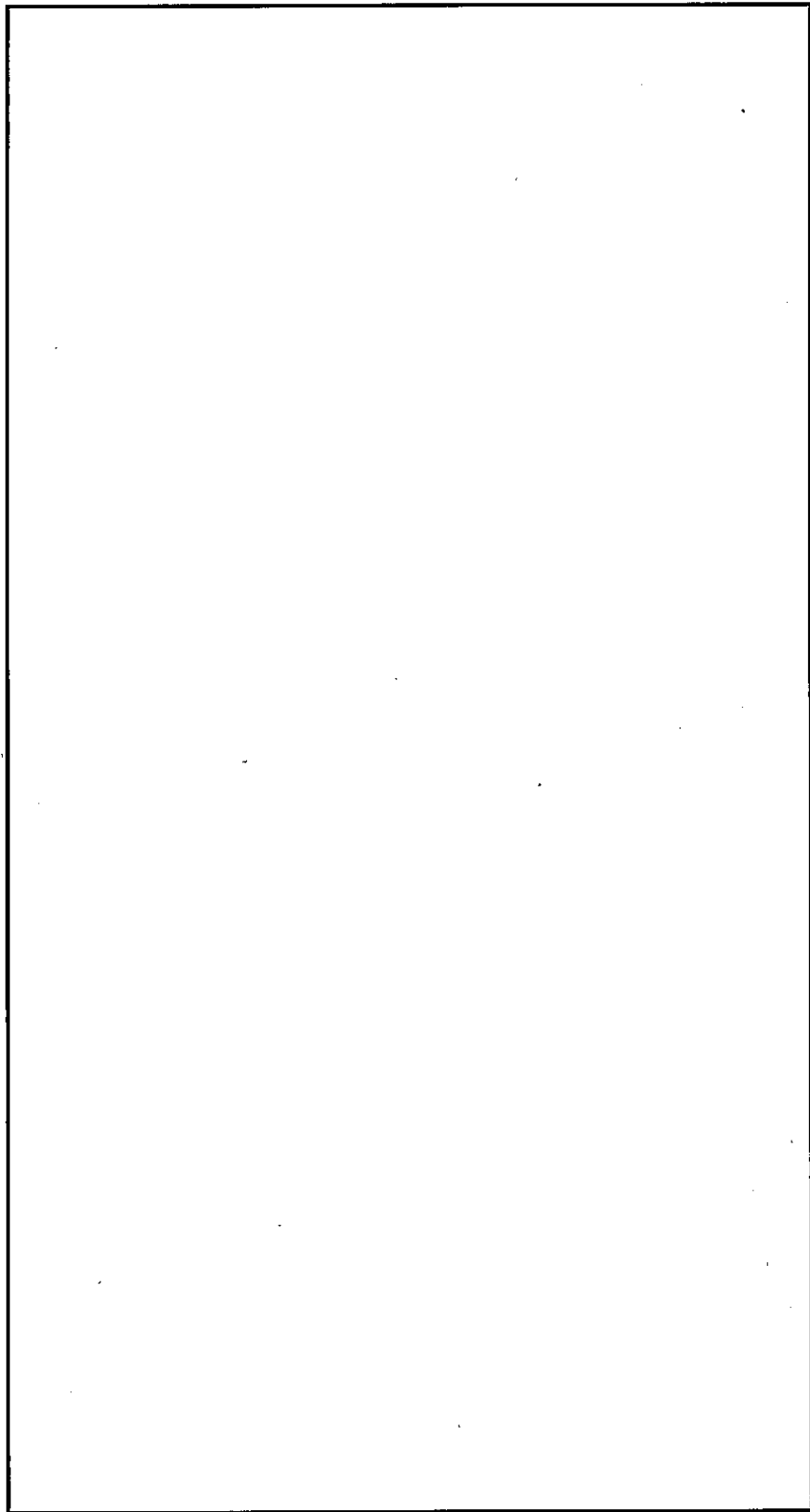
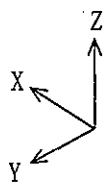


図 2-6 密封容器及び二次蓋の解析モデル (貯蔵架台への衝突時)

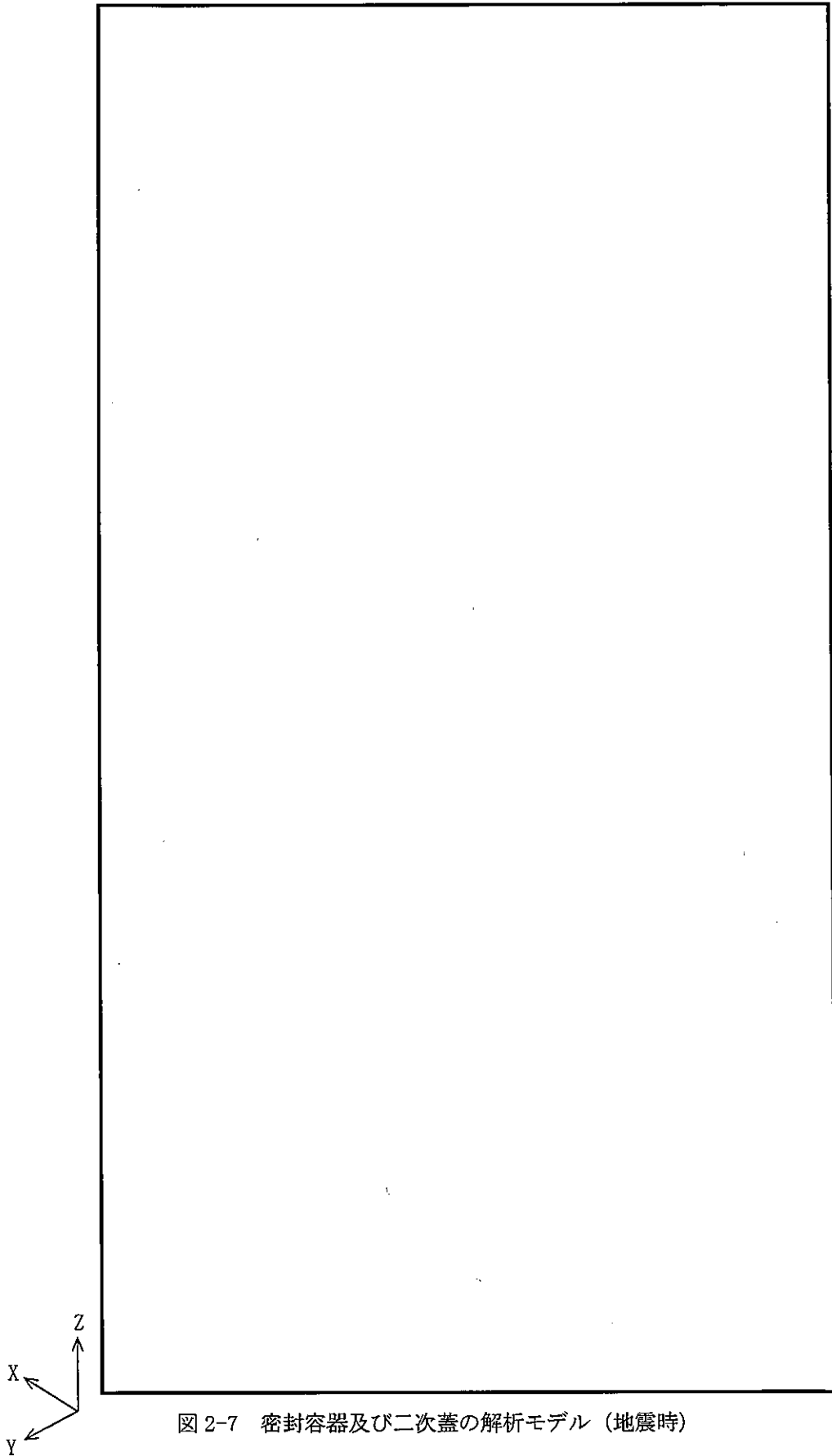


図 2-7 密封容器及び二次蓋の解析モデル (地震時)

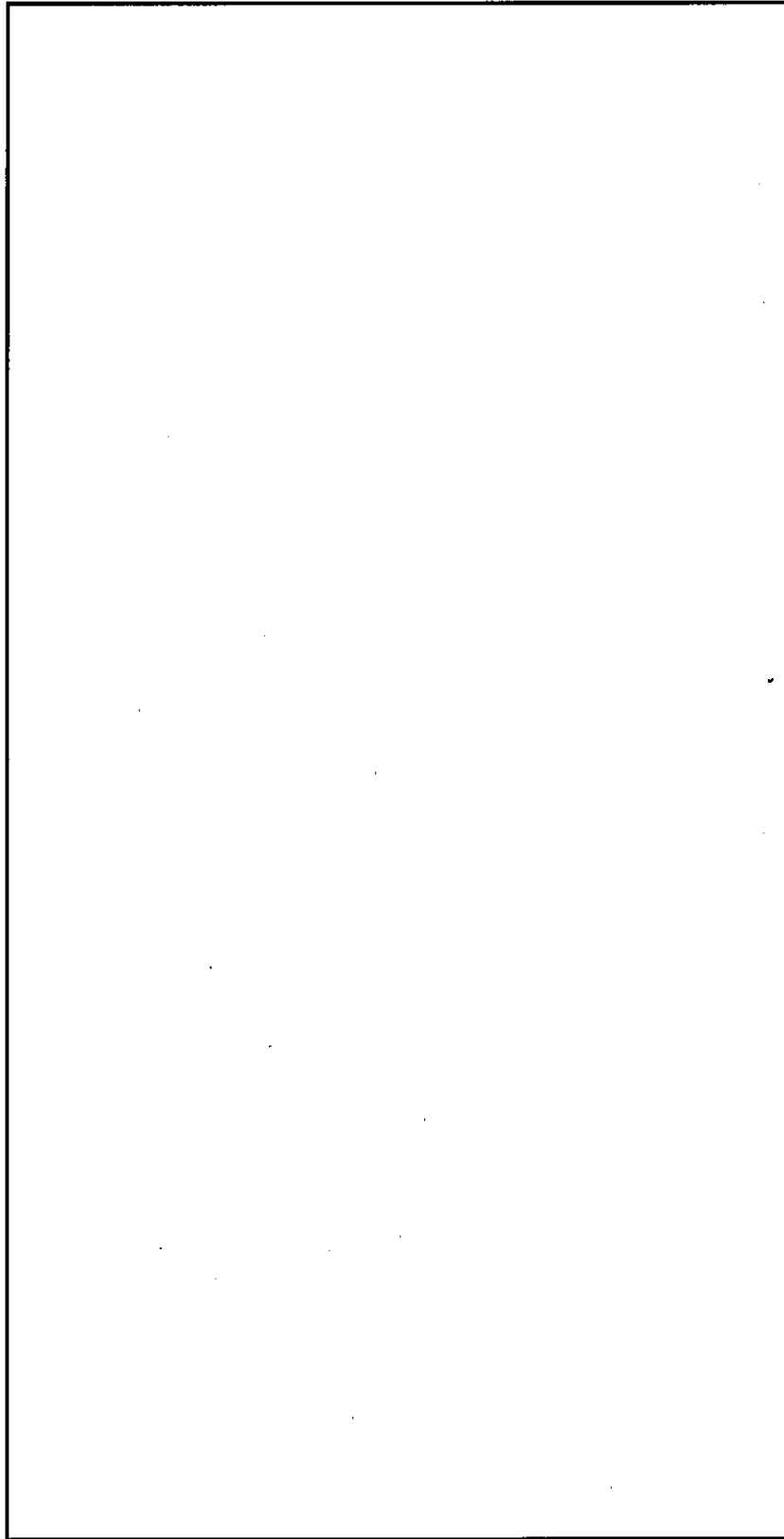
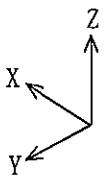


図 2-8 密封容器の解析モデル (試験時)

表 2-1 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果
(設計時)

項目	記号	数値	単位
ボルト最小断面積の合計値 (一次蓋)	A	<input type="text"/>	mm ²
ボルト最小断面積の合計値 (二次蓋)		<input type="text"/>	mm ²
フランジに加わる内圧による全荷重 (一次蓋)	H	<input type="text"/>	N
フランジに加わる内圧による全荷重 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
ガスケット反力の作用する位置 (一次蓋)	D _G	1740	mm
ガスケット反力の作用する位置 (二次蓋)		1956	mm
ガスケット接触面にかける圧縮力 (一次蓋)	H _P	<input type="text"/>	N
ガスケット接触面にかける圧縮力 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
最高使用圧力 (一次蓋)	P	1.0	MPa
最高使用圧力 (二次蓋)		0.4	MPa
使用状態での必要な最小ボルト荷重 (一次蓋)	W _{m1}	<input type="text"/>	N
使用状態での必要な最小ボルト荷重 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
平均引張応力 (一次蓋)	σ _{n1}	116	MPa
平均引張応力 (二次蓋)		84	MPa
ガスケット締付け時に必要な 最小ボルト荷重 (一次蓋)	W _{m2}	<input type="text"/>	N
ガスケット締付け時に必要な 最小ボルト荷重 (二次蓋)		<input type="text"/>	N
ガスケット締付け時の 平均引張応力 (一次蓋)	σ _{n2}	74	MPa
ガスケット締付け時の 平均引張応力 (二次蓋)		67	MPa

表 2-2 カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）

項目	記号	数値	単位
内圧	P	1.0	MPa
ボルトピッチ半径	r	76.5	mm
板厚	t	35	mm
半径方向の応力	σ_r	6	MPa
円周方向の応力	σ_θ	6	MPa
軸方向の応力	σ_z	0	MPa

表 2-3 カバープレートボルトに発生する応力の計算条件及び計算結果（設計時）

項目	記号	数値	単位
カバープレートボルト 最小断面積の合計値	A	<input type="text"/>	mm ²
フランジに加わる内圧による全荷重	H	<input type="text"/>	N
ガスケット反力の作用する位置	D _G	111	mm
ガスケット接触面にかける圧縮力	H _P	<input type="text"/>	N
最高使用圧力	P	1.0	MPa
使用状態での必要な最小ボルト荷重	W _{m1}	<input type="text"/>	N
平均引張応力	σ_{n1}	142	MPa
ガスケット締付け時に必要な 最小ボルト荷重	W _{m2}	<input type="text"/>	N
ガスケット締付け時の 平均引張応力	σ_{n2}	134	MPa

表 2-4 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（貯蔵時）

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	1G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-5 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（吊上げ時）

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	1.3G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-6 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果（支持脚への衝突時）

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	2.5G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-7 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵架台への衝突時)

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	5G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-8 底板に発生する平均支圧応力の計算条件及び計算結果
(貯蔵時 (S_d *地震力又は S_s 地震力が作用する場合))

項目	記号	数値	単位
バスケット及び 使用済燃料集合体の質量	m_G	28300	kg
鉛直方向加速度	G_2	1.87G	m/s^2
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
支圧荷重を受ける面積	A		mm^2
底板に発生する 平均支圧応力	σ_p	1	MPa

表 2-9 カバープレートに発生する応力の計算条件及び計算結果 (試験時)

項目	記号	数値	単位
内圧	P	1.25	MPa
ボルトピッチ半径	r	76.5	mm
板厚	t	35	mm
半径方向の応力	σ_r	8	MPa
円周方向の応力	σ_θ	8	MPa
軸方向の応力	σ_z	0	MPa

表 3-1 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（設計条件）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋（中央）	①－①’	P_m	10	122
	①	$P_L + P_b$	21	183
	①’	$P_L + P_b$	4	183
一次蓋（端部）	②－②’	P_L	23	183
二次蓋（中央）	③－③’	P_m	1	158
	③	$P_L + P_b$	1	237
	③’	$P_L + P_b$	1	237
二次蓋（端部）	④－④’	P_L	19	237
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	116	277
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	84	282
胴（一次蓋 シール部）	⑦－⑦’	P_L	11	183
胴（二次蓋 シール部）	⑧－⑧’	P_L	17	183
胴（中央）	⑨－⑨’	P_m	4	122
胴（下部）	⑩－⑩’	P_L	8	183
底板（中央）	⑪－⑪’	P_m	3	122
	⑪	$P_L + P_b$	16	183
	⑪’	$P_L + P_b$	22	183
底板（端部）	⑫－⑫’	P_L	10	183
底部中性子遮蔽材 カバー（中央）	⑬－⑬’	P_m	1	155
	⑬	$P_L + P_b$	1	232
	⑬’	$P_L + P_b$	1	232
底部中性子遮蔽材 カバー（端部）	⑭－⑭’	P_L	7	232
一次蓋 （シール部）	⑮－⑮’	P_L	12	183
二次蓋 （シール部）	⑯－⑯’	P_L	7	236
カバープレート	⑰	$P_L + P_b$	6	205
カバープレート （シール部）	⑰’	$P_L + P_b$	6	155
カバープレート ボルト	⑱	平均引張応力	142	277

表 3-2 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）（1/2）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価 位置	応力分類	計算値				許容 応力
			貯蔵時	吊上げ 時	支持脚 への 衝突時	貯蔵架台 への 衝突時	
一次蓋 (中央)	①	$P_L + P_b + Q$	9	9	9	8	366
	①'	$P_L + P_b + Q$	14	14	14	14	366
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b + Q$	44	45	44	44	366
	②'	$P_L + P_b + Q$	55	58	57	54	366
二次蓋 (中央)	③	$P_L + P_b + Q$	11	12	11	10	474
	③'	$P_L + P_b + Q$	17	17	16	15	474
二次蓋 (端部)	④	$P_L + P_b + Q$	33	34	34	32	474
	④'	$P_L + P_b + Q$	16	27	27	15	474
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	241	243	241	240	554
	⑤	平均引張応力 + 曲げ応力	332	358	331	329	831
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	244	244	243	243	565
	⑥	平均引張応力 + 曲げ応力	272	277	271	271	847
胴（一次蓋 シール部）	⑦	$P_L + P_b + Q$	25	31	25	25	183
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	11	12	12	11	183
胴（二次蓋 シール部）	⑧	$P_L + P_b + Q$	37	39	37	37	183
	⑧'	$P_L + P_b + Q$	9	9	9	9	183
胴 (中央)	⑨	$P_L + P_b + Q$	18	17	19	19	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q$	7	8	8	7	366
	⑨-⑨'	σ_c	8	7	9	9	95
胴 (下部)	⑩	$P_L + P_b + Q$	21	27	37	20	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q$	35	18	19	17	366
	⑩-⑩'	σ_c	5	4	6	5	95

表 3-2 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態A及びB）（2/2）

（単位：MPa）

部 位	応力 評価 位置	応力分類	計算値				許容 応力
			貯蔵時	吊上げ 時	支持脚 への 衝突時	貯蔵架台 への 衝突時	
底板 (中央)	⑪	$P_L + P_b + Q$	31	32	34	36	366
	⑪'	$P_L + P_b + Q$	29	28	25	20	366
	⑪	σ_p	1	1	1	1	183
底板 (端部)	⑫	$P_L + P_b + Q$	27	26	26	19	366
	⑫'	$P_L + P_b + Q$	25	17	21	21	366
	⑫	σ_p	1	1	1	1	183
底部中性子遮蔽材 カバー(中央)	⑬	$P_L + P_b + Q$	8	15	15	10	465
	⑬'	$P_L + P_b + Q$	8	36	39	10	465
底部中性子遮蔽材 カバー(端部)	⑭	$P_L + P_b + Q$	37	76	92	57	465
	⑭'	$P_L + P_b + Q$	21	17	18	16	465
一次蓋 (シール部)	⑮	$P_L + P_b + Q$	29	29	29	29	183
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	56	59	59	56	183
二次蓋 (シール部)	⑯	$P_L + P_b + Q$	18	18	18	17	236
	⑯'	$P_L + P_b + Q$	9	13	12	9	236

表 3-3 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_S）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	5	183
	①	$P_L + P_b$	9	274
	①'	$P_L + P_b$	2	274
	①	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
	①'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	2	366
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	18	274
	②'	$P_L + P_b$	18	274
	②	$P_L + P_b + Q^{*1}$	46	366
	②'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	49	366
二次蓋 (中央)	③-③'	P_m	1	236
	③	$P_L + P_b$	15	355
	③'	$P_L + P_b$	16	355
	③	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	474
	③'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	474
二次蓋 (端部)	④	$P_L + P_b$	30	355
	④'	$P_L + P_b$	30	355
	④	$P_L + P_b + Q^{*1}$	54	474
	④'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	66	474
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	241	554
		平均引張応力 + 曲げ応力	337	831
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	244	565
		平均引張応力 + 曲げ応力	274	847

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-3 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_S）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
胴 (一次蓋 シール部)	⑦	$P_L + P_b$	10	183
	⑦'	$P_L + P_b$	10	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	183
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	12	183
胴 (二次蓋 シール部)	⑧	$P_L + P_b$	16	183
	⑧'	$P_L + P_b$	16	183
	⑧	$P_L + P_b + Q$	37	183
	⑧'	$P_L + P_b + Q$	9	183
胴 (中央)	⑨-⑨'	P_m	2	183
	⑨	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
胴 (下部)	⑩	$P_L + P_b$	30	274
	⑩'	$P_L + P_b$	30	274
	⑩	$P_L + P_b + Q^{*1}$	51	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	83	366
底板 (中央)	⑪-⑪'	P_m	3	183
	⑪	$P_L + P_b$	7	274
	⑪'	$P_L + P_b$	9	274
	⑪	$P_L + P_b + Q^{*1}$	8	366
	⑪'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	9	366
	⑪	σ_p	1	183

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-3 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態 C_S）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
底板 (端部)	⑫	$P_L + P_b$	10	274
	⑫'	$P_L + P_b$	10	274
	⑫	$P_L + P_b + Q^{*1}$	24	366
	⑫'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	32	366
	⑫	σ_p	1	183
底部中性子遮蔽 材カバー(中央)	⑬-⑬'	P_m	10	232
	⑬	$P_L + P_b$	16	348
	⑬'	$P_L + P_b$	23	348
	⑬	$P_L + P_b + Q^{*1}$	19	465
	⑬'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	12	465
底部中性子遮蔽 材カバー(端部)	⑭	$P_L + P_b$	91	348
	⑭'	$P_L + P_b$	91	348
	⑭	$P_L + P_b + Q^{*1}$	217	465
	⑭'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	152	465
一次蓋 (シール部)	⑮	$P_L + P_b$	7	183
	⑮'	$P_L + P_b$	7	183
	⑮	$P_L + P_b + Q$	30	183
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	61	183
二次蓋 (シール部)	⑯	$P_L + P_b$	9	236
	⑯'	$P_L + P_b$	9	236
	⑯	$P_L + P_b + Q$	18	236
	⑯'	$P_L + P_b + Q$	12	236

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-4 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態D_S）（1/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	5	251
	①	$P_L + P_b$	9	377
	①'	$P_L + P_b$	2	377
	①	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
	①'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	2	366
一次蓋 (端部)	②	$P_L + P_b$	18	377
	②'	$P_L + P_b$	18	377
	②	$P_L + P_b + Q^{*1}$	46	366
	②'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	49	366
二次蓋 (中央)	③-③'	P_m	1	286
	③	$P_L + P_b$	15	429
	③'	$P_L + P_b$	16	429
	③	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	474
	③'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	474
二次蓋 (端部)	④	$P_L + P_b$	30	429
	④'	$P_L + P_b$	30	429
	④	$P_L + P_b + Q^{*1}$	54	474
	④'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	66	474
一次蓋ボルト	⑤	平均引張応力	241	831
		平均引張応力 + 曲げ応力	337	831
二次蓋ボルト	⑥	平均引張応力	244	848
		平均引張応力 + 曲げ応力	274	848

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-4 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態D_S）（2/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
胴 (一次蓋 シール部)	⑦	$P_L + P_b$	10	183
	⑦'	$P_L + P_b$	10	183
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	183
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	12	183
胴 (二次蓋 シール部)	⑧	$P_L + P_b$	16	183
	⑧'	$P_L + P_b$	16	183
	⑧	$P_L + P_b + Q$	37	183
	⑧'	$P_L + P_b + Q$	9	183
胴 (中央)	⑨-⑨'	P_m	2	251
	⑨	$P_L + P_b + Q^{*1}$	5	366
	⑨'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	4	366
胴 (下部)	⑩	$P_L + P_b$	30	377
	⑩'	$P_L + P_b$	30	377
	⑩	$P_L + P_b + Q^{*1}$	51	366
	⑩'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	83	366
底板 (中央)	⑪-⑪'	P_m	3	251
	⑪	$P_L + P_b$	7	377
	⑪'	$P_L + P_b$	9	377
	⑪	$P_L + P_b + Q^{*1}$	8	366
	⑪'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	9	366
	⑪	σ_p	1	377

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-4 密封容器及び二次蓋の応力計算結果と許容応力（供用状態D_S）（3/3）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
底板 (端部)	⑫	$P_L + P_b$	10	377
	⑫'	$P_L + P_b$	10	377
	⑫	$P_L + P_b + Q^{*1}$	24	366
	⑫'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	32	366
	⑫	σ_p	1	377
底部中性子遮蔽 材カバー(中央)	⑬-⑬'	P_m	10	282
	⑬	$P_L + P_b$	16	424
	⑬'	$P_L + P_b$	23	424
	⑬	$P_L + P_b + Q^{*1}$	19	465
	⑬'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	12	465
底部中性子遮蔽 材カバー(端部)	⑭	$P_L + P_b$	91	424
	⑭'	$P_L + P_b$	91	424
	⑭	$P_L + P_b + Q^{*1}$	217	465
	⑭'	$P_L + P_b + Q^{*1}$	152	465
一次蓋 (シール部)	⑮	$P_L + P_b$	7	183
	⑮'	$P_L + P_b$	7	183
	⑮	$P_L + P_b + Q$	30	183
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	61	183
二次蓋 (シール部)	⑯	$P_L + P_b$	9	236
	⑯'	$P_L + P_b$	9	236
	⑯	$P_L + P_b + Q$	18	236
	⑯'	$P_L + P_b + Q$	12	236

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 3-5 密封容器の応力計算結果と許容応力（試験状態）

（単位：MPa）

部 位	応力評価位置	応力分類	計算値	許容応力
一次蓋 (中央)	①-①'	P_m	13	186
	①	$P_L + P_b$	27	279
	①'	$P_L + P_b$	5	279
一次蓋 (端部)	②-②'	P_L	25	279
胴 (一次蓋 シール部)	⑦-⑦'	P_L	11	207
	⑦	$P_L + P_b + Q$	26	207
	⑦'	$P_L + P_b + Q$	6	207
胴 (中央)	⑨-⑨'	P_m	5	186
胴 (下部)	⑩-⑩'	P_L	5	279
底板 (中央)	⑪-⑪'	P_m	2	186
	⑪	$P_L + P_b$	11	279
	⑪'	$P_L + P_b$	16	279
底板 (端部)	⑫-⑫'	P_L	8	279
底部中性子遮蔽 材カバー(中央)	⑬-⑬'	P_m	1	238
	⑬	$P_L + P_b$	1	357
	⑬'	$P_L + P_b$	1	357
底部中性子遮蔽 材カバー(端部)	⑭-⑭'	P_L	3	357
一次蓋 (シール部)	⑮-⑮'	P_L	15	207
	⑮	$P_L + P_b + Q$	13	207
	⑮'	$P_L + P_b + Q$	21	207
カバープレート	⑰	$P_L + P_b$	8	276
カバープレート (シール部)	⑰'	$P_L + P_b$	8	205

表 4-1 密封容器（ボルトを除く。）及び二次蓋の疲労解析不要の評価結果

金属キャスト構造規格 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 $N_1 = 10$	3 S_m に対する許容繰返し回数 $N_a = 3627$	$N_1 \leq N_a$ であり、 本条件を満足
(2)	燃料装荷時及び燃料取出し時並びに耐圧試験時を除く供用状態 A 及び B における圧力変動		10	圧力変動の全振幅 $P = 1.0 \text{ MPa}$	圧力変動許容値 $A_m = 10 \text{ MPa}$	$P \leq A_m$ であり、 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 $T = 808 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であり、 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 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	温度変動許容値 $T = 808 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であり、 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 $T = 3184 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T \leq T$ であり、 本条件を満足
(6)	機械的荷重により生じる応力の全振幅	地震力以外	216	応力の全振幅 $2 \cdot \Delta \sigma_1 = 184 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動回数 216 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S_a = 1034 \text{ MPa}$	$2 \cdot \Delta \sigma_1 \leq S_a$ であり、 本条件に対する評価で考慮する必要がない。
		地震力	10^4	応力の全振幅 $\Delta \sigma_2 = 217 \text{ MPa}$	機械的荷重の変動回数 10^4 回に対する許容繰返しピーク応力強さ $S_a = 262 \text{ MPa}$	$\Delta \sigma_2 \leq S_a$ であり、 本条件に対する評価で考慮する必要がない。

表 4-2 ①の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	374	MPa
ボルト初期締付け時の垂直応力	σ_{b1}	247* ¹	MPa
ボルト初期締付け時のねじり応力	τ_{b1}	141* ¹	MPa
ボルトの初期締付け力	F_b		N
ボルトの最小軸断面積	A_b		mm ²
ボルトの締付けトルク	T_r		N・mm
ボルトの最小径	d_s		mm
ボルトのピーク応力強さ	S	1496	MPa

注記*1：表中では整数位表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用

表 4-3 ②及び③の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		吊上げ時	支持脚への衝突時	貯蔵架台への衝突時	
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4			-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	374			MPa
一次蓋の質量	m_{d1}	3700			kg
鉛直方向の加速度	G_z	-1.3G	-2.5G	-5.0G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665			m/s ²
ボルト最小断面積の合計値	A				mm ²
ボルトの最小軸断面積	A_b				mm ²
ボルトのピーク応力強さ	S	1493	1490	1483	MPa

表 4-4 ④の事象における一次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
一次蓋の質量	m_{d1}	3700	kg
ボルト最小断面積の合計値	A	<input type="text"/>	mm ²
鉛直方向の加速度	G_z	0.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
ボルトのピーク応力強さ	S	2.2	MPa

表 4-5 応力差の変動（一次蓋ボルト）

No.	事象	事象	S _P (MPa)
1	C01	C00	1496
2	C06	C04	13
3	CSd	—	4
4	CSs	—	4

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。

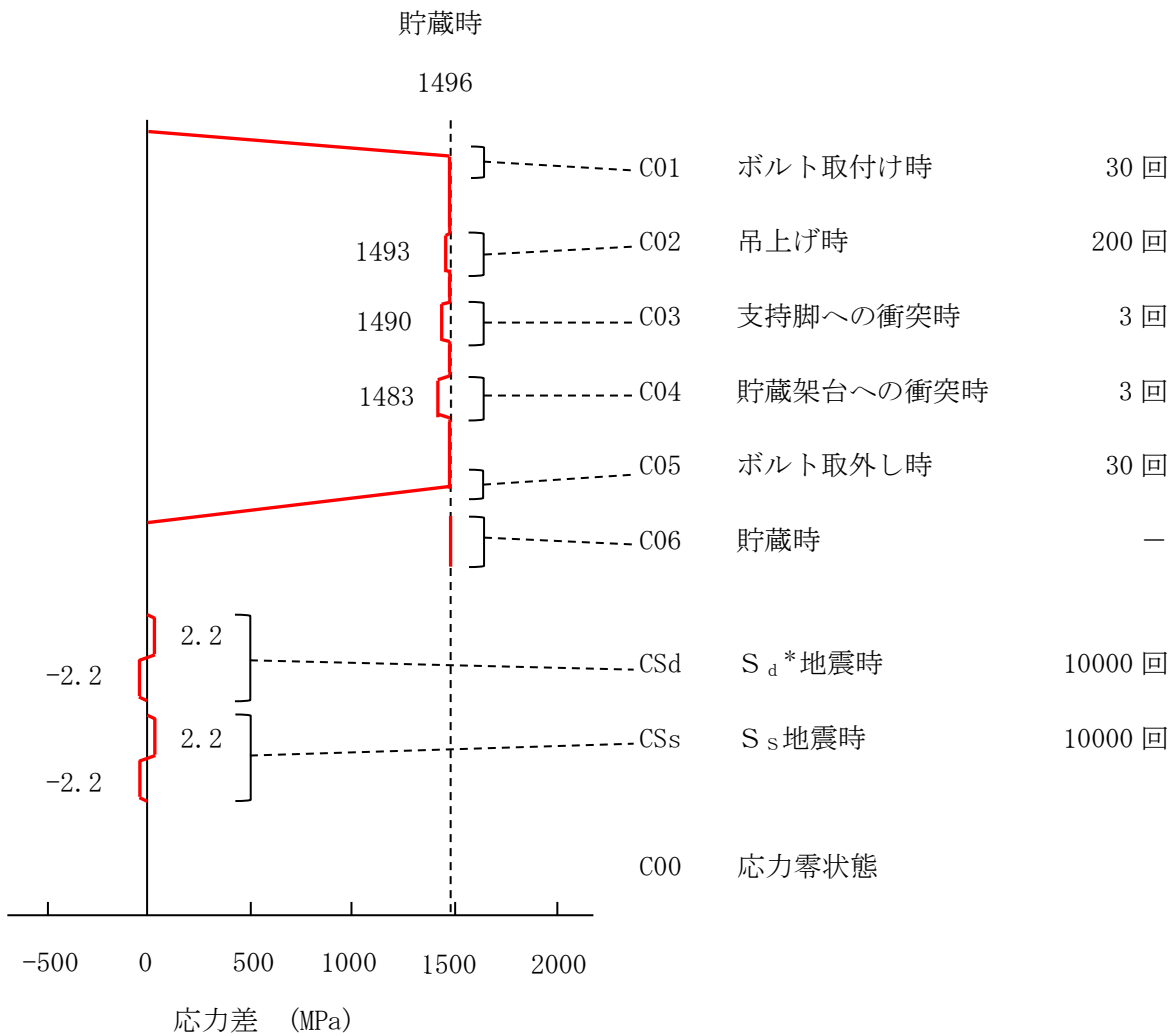


表 4-6 一次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		①の事象	②及び③の事象	④の事象	
ピーク応力強さの範囲	S_P	1496	13	4	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_θ	748	6	2	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_0	2.07×10^5			MPa
解析に用いる縦弾性係数	E	1.84×10^5			MPa
縦弾性係数で補正した繰返しピーク応力強さ	S_θ'	841	7	3	MPa

表 4-7 疲労累積係数（一次蓋ボルト）

No.	S_b (MPa)	S (MPa)	S_P (MPa)	S_θ (MPa)	S_θ' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	374	1496	1496	748	841	679	30	0.0442
2	374	1483	13	6	7	10^6	3	0.0000
疲労累積係数 $U_n = 0.0442$								
3	—	2.2	4	2	3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{sd} = 0.0100$								
4	—	2.2	4	2	3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{ss} = 0.0100$								
疲労累積係数 $U_f = U_n + U_{ss} = 0.0542$								

表 4-8 ①の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	361	MPa
ボルト初期締付け時の垂直応力	σ_{b1}	214*1	MPa
ボルト初期締付け時のねじり応力	τ_{b1}	146*1	MPa
ボルトの初期締付け力	F_b		N
ボルトの最小軸断面積	A_b		mm ²
ボルトの締付けトルク	T_r		N・mm
ボルトの最小径	d_s		mm
ボルトのピーク応力強さ	S	1443.6	MPa

注記*1：表中では整数位表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用

表 4-9 ②及び③の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		吊上げ時	支持脚への 衝突時	貯蔵架台への 衝突時	
ボルトねじ部の応力 集中係数	K	4			-
ボルト締付け時に 発生する応力強さ	S_b	361			MPa
カバープレートの質量	m_{23}	8			kg
鉛直方向の加速度	G_2	-1.3G	-2.5G	-5.0G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665			m/s ²
ボルト最小断面積の 合計値	A				mm ²
ボルトの最小軸断面積	A_b				mm ²
ボルトのピーク応力強さ	S	1443.3	1443.0	1442.3	MPa

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表 4-10 ④の事象におけるカバープレートボルトのピーク応力強さの
計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
カバープレートの質量	m_{23}	8	kg
ボルト最小断面積の合計値	A	<input type="text"/>	mm^2
鉛直方向の加速度	G_z	0.87G	m/s^2
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s^2
ボルトのピーク応力強さ	S	0.23	MPa

表 4-11 応力差の変動 (カバープレートボルト)

No.	事象	事象	S _P (MPa)
1	C01	C00	1444
2	C06	C04	1
3	CSd	—	0.5
4	CSs	—	0.5

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。

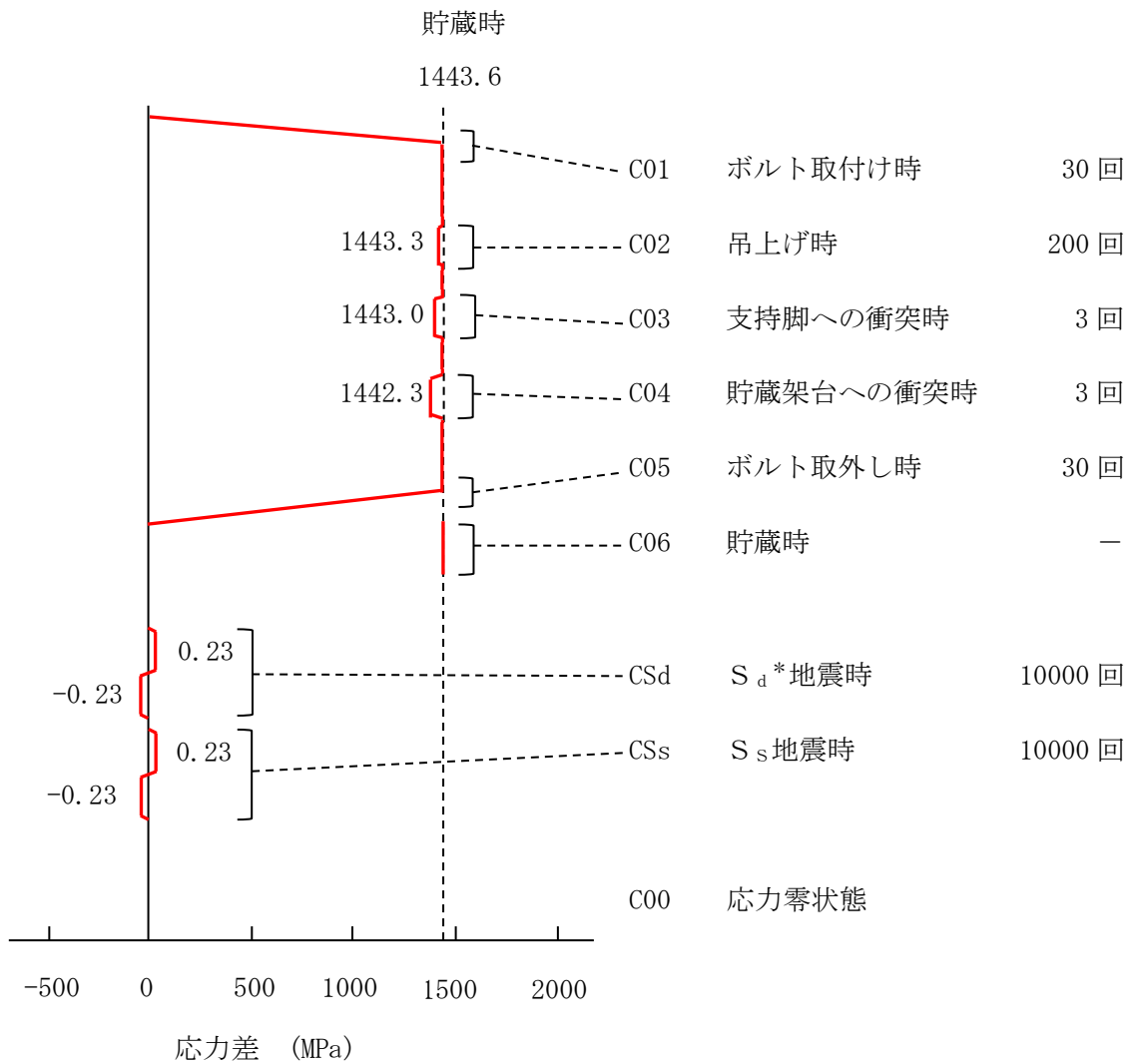


表 4-12 カバープレートボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		①の事象	②及び③の事象	④の事象	
ピーク応力強さの範囲	S_P	1444	1	0.5	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_ℓ	722	1	0.2	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_0	2.07×10^5			MPa
解析に用いる縦弾性係数	E	1.84×10^5			MPa
縦弾性係数で補正した繰返しピーク応力強さ	S_ℓ'	812	1	0.3	MPa

表 4-13 疲労累積係数 (カバープレートボルト)

No.	S_b (MPa)	S (MPa)	S_P (MPa)	S_ℓ (MPa)	S_ℓ' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	361	1443.6	1444	722	812	727	30	0.0413
2	361	1442.3	1	1	1	10^6	3	0.0000
疲労累積係数 $U_n = 0.0413$								
3	—	0.23	0.5	0.2	0.3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{sd} = 0.0100$								
4	—	0.23	0.5	0.2	0.3	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{ss} = 0.0100$								
疲労累積係数 $U_f = U_n + U_{ss} = 0.0513$								

表 4-14 ①の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	337	MPa
ボルト初期締付け時の垂直応力	σ_{b1}	247* ¹	MPa
ボルト初期締付け時のねじり応力	τ_{b1}	115* ¹	MPa
ボルトの初期締付け力	F_b		N
ボルトの最小軸断面積	A_b		mm ²
ボルトの締付けトルク	T_r		N・mm
ボルトの最小径	d_s		mm
ボルトのピーク応力強さ	S	1345	MPa

注記*1：表中では整数位表示としているが、計算は桁数処理前の数値を使用

表 4-15 ②及び③の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		吊上げ時	支持脚への衝突時	貯蔵架台への衝突時	
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4			-
ボルト締付け時に発生する応力強さ	S_b	337			MPa
二次蓋の質量	m_{e2}	4600			kg
鉛直方向の加速度	G_2	-1.3G	-2.5G	-5.0G	m/s ²
重力加速度	G	9.80665			m/s ²
ボルト最小断面積の合計値	A				mm ²
ボルトの最小軸断面積	A_b				mm ²
ボルトのピーク応力強さ	S	1341	1338	1332	MPa

表 4-16 ④の事象における二次蓋ボルトのピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
ボルトねじ部の応力集中係数	K	4	-
二次蓋の質量	m_{02}	4600	kg
ボルト最小断面積の合計値	A		mm ²
鉛直方向の加速度	G_z	0.87G	m/s ²
鉛直方向設計震度	C_v	0.87	-
重力加速度	G	9.80665	m/s ²
ボルトのピーク応力強さ	S	2.2	MPa

表 4-17 応力差の変動（二次蓋ボルト）

No.	事象	事象	S _P (MPa)
1	C01	C00	1345
2	C06	C04	13
3	CSd	—	4
4	CSs	—	4

以下に、各事象における応力差の変動概念図を示す。

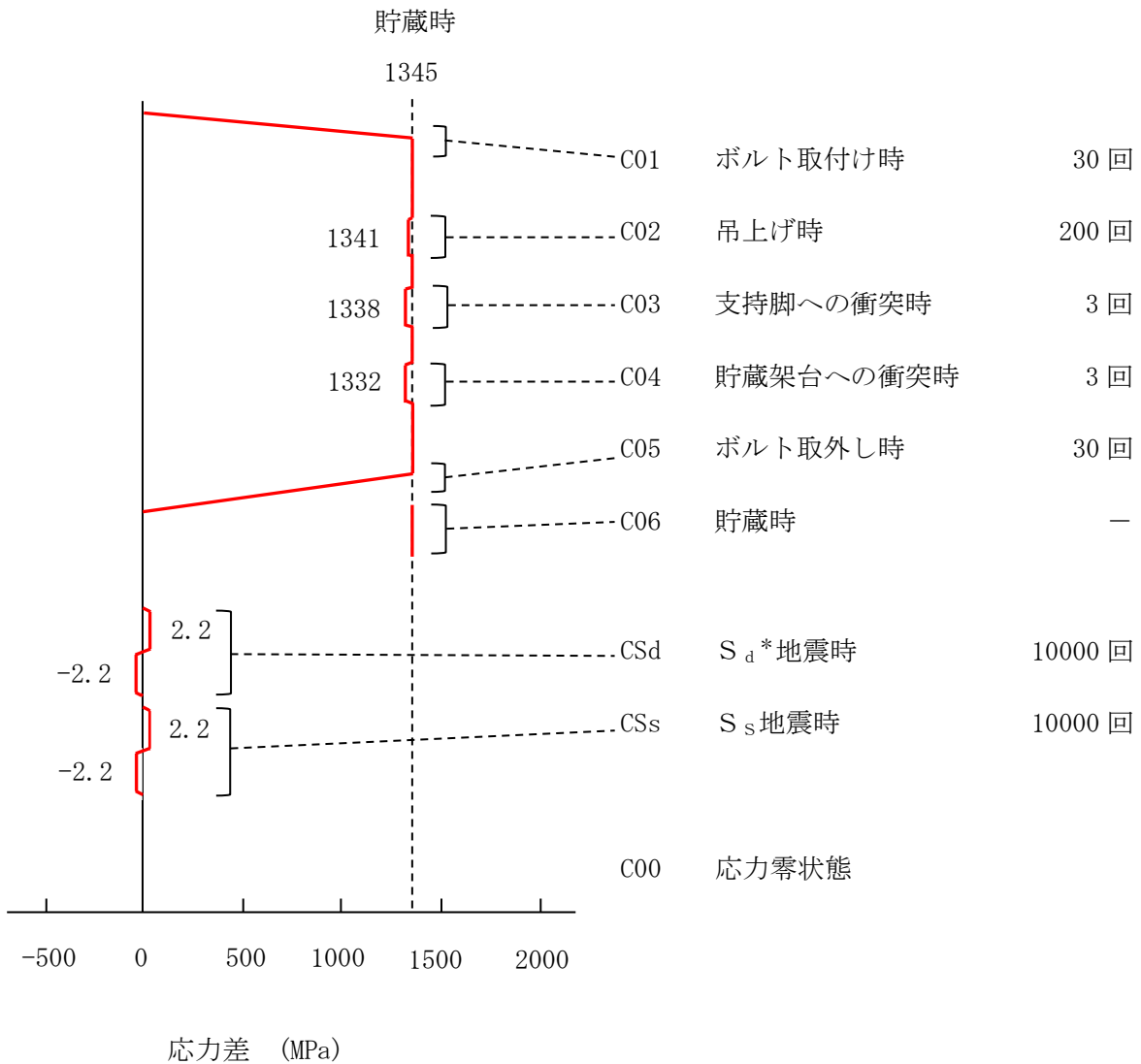


表 4-18 二次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値			単位
		①の事象	②及び③の事象	④の事象	
ピーク応力強さの範囲	S_P	1345	13	4	MPa
繰返しピーク応力強さ	S_ℓ	672	6	2	MPa
設計疲労線図の縦弾性係数	E_0	2.07×10^5			MPa
解析に用いる縦弾性係数	E	1.86×10^5			MPa
縦弾性係数で補正した繰返しピーク応力強さ	S_ℓ'	748	7	2	MPa

表 4-19 疲労累積係数 (二次蓋ボルト)

No.	S_b (MPa)	S (MPa)	S_P (MPa)	S_ℓ (MPa)	S_ℓ' (MPa)	N_a	N_c	N_c / N_a
1	337	1345	1345	672	748	852	30	0.0353
2	337	1332	13	6	7	10^6	3	0.0000
疲労累積係数 $U_n = 0.0353$								
3	—	2.2	4	2	2	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{Sd} = 0.0100$								
4	—	2.2	4	2	2	10^6	10000	0.0100
疲労累積係数 $U_{Ss} = 0.0100$								
疲労累積係数 $U_f = U_n + U_{Ss} = 0.0453$								

表 5-1 一次蓋貫通孔部の応力強さ

(単位：MPa)

許容応力 区分	応力評価 位置	応力分類	貫通孔を無視した 場合の応力強さ (S)	貫通孔部の 応力強さ (S _o)	許容応力
設計条件	⑱	P_L	4	16	183
	⑱	$P_L + P_b$	16	63	183
供用状態 A及びB	⑱	$P_L + P_b + Q$	61	241	366
供用状態 C _s	⑱	$P_L + P_b$	6	22	274
	⑱	$P_L + P_b + Q^{*1}$	7	26	366
供用状態 D _s	⑱	$P_L + P_b$	6	22	377
	⑱	$P_L + P_b + Q^{*1}$	7	26	366
試験状態	⑱	P_L	5	20	279
	⑱	$P_L + P_b$	20	80	279

注記*1：地震力のみによる全振幅について評価する。

表 7-1 二次蓋の計算上必要な厚さの計算条件及び計算結果

項目	記号	数値	単位
二次蓋の計算上必要な厚さ (設計・建設規格の(PVD-5)式から)	t_{21}	48.68	mm
二次蓋ボルトピッチの円の直径	d	2045	mm
最高使用圧力	P	0.4	MPa
最高使用温度における付録材料図表 Part5 表 5 又は表 6 に規定する材料の許容引張応力	S	120	MPa
平板の取付方法による係数	K	0.17	-
直径が $1/2 d$ 以下の穴を設けた場合の 計算上必要な厚さ (設計・建設規格の(PVD-6)式から)	t_{22}	68.85	mm