

(㉓)-第 B. 8 表 一般の試験条件における胴内圧計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|----------------------|------------|-----|-----------------------|
| 胴内ヘリウムの初期充填圧力 | P_{c0} | MPa | 0.0477 |
| 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度 | T_{0nor} | K | 479.15 (206 °C) |
| 胴内ヘリウムの初期温度 | T_{c0} | K | 293.15 (20 °C) |
| 一般の試験条件における胴内圧 | P_0 | MPa | 0.0780 (-0.0233 MPaG) |

2. 一二次蓋間圧力

一次蓋と二次蓋の間には、二次蓋取付け後、所定の圧力となるまでヘリウムが充填される。一般の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に一二次蓋間ヘリウムの最高温度とすると、一二次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_1 = P_{10} \frac{T_{1nor}}{T_{10}}$$

ここで、

P_1 : 一般の試験条件における一二次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{1nor} : 一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(㉓)-第 B. 9 表に示す。

(㉓)-第 B. 9 表 一般の試験条件における一二次蓋間圧力計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|-------------------------|------------|-----|--------------------|
| 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 | P_{10} | MPa | 0.300 |
| 一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度 | T_{1nor} | K | 381.15 (108 °C) |
| 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 | T_{10} | K | 293.15 (20 °C) |
| 一般の試験条件における一二次蓋間圧力 | P_1 | MPa | 0.390 (0.289 MPaG) |

3. 二三次蓋間圧力

二次蓋取付け時における二三次蓋間の雰囲気は常温、大気圧の空気とし、一般の試験条件における空気の温度は、保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また、保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると、二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2 = \frac{P_{10} V_1 \frac{T_{1nor}}{T_{10}} + P_{20} V_2 \frac{T_{1nor}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで、

P_2 : 一般の試験条件における二三次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)

V_1 : 一二次蓋間体積 (m^3)

V_2 : 二三次蓋間体積 (m^3)

T_{1nor} : 一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(□)-第 B. 10 表に示す。なお、この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に $-20^{\circ}C$ であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 4%増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(□)-第 B. 10 表 一般の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|-----------------------------|------------|-------|----------------------|
| 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 | P_{10} | MPa | 0.300 |
| 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) | P_{20} | MPa | 0.101325 |
| 一二次蓋間体積 | V_1 | m^3 | <input type="text"/> |
| 二三次蓋間体積 | V_2 | m^3 | <input type="text"/> |
| 一般の試験条件における 一二次蓋間ヘリウムの温度 | T_{1nor} | K | 381.15(108 °C) |
| 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 | T_{10} | K | 293.15(20 °C) |
| 三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度 | T_{20} | K | 293.15(20 °C) |
| 一般の試験条件における 二三次蓋間圧力 | P_2 | MPa | 0.253 (0.152 MPaG) |

4. 三次蓋－胴内圧力

保守側に一次蓋及び二次蓋の密封性が失われ、一二次蓋間に充填されたヘリウム及び二三次蓋間空気が胴内に漏えいすると仮定すると、三次蓋－胴内圧力は、以下のとおり求められる。

$$P_3 = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{0nor}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{0nor}}{T_{20}} + P_{c0}V_c \frac{T_{0nor}}{T_{c0}}}{V_1 + V_2 + V_c}$$

ここで、

P_3 : 一般の試験条件における三次蓋－胴内圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)

P_{c0} : 胴内ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

V_1 : 一二次蓋間体積 (m³)

V_2 : 二三次蓋間体積 (m³)

V_c : 胴内体積 (m³)

T_{0nor} : 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度(燃料集合体最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

T_{c0} : 胴内ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(□)-第 B. 11 表に示す。

(㊦)-第 B. 11 表 一般の試験条件における三次蓋-胴内圧力計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|-----------------------------|------------|-------|-----------------------|
| 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 | P_{10} | MPa | 0.300 |
| 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) | P_{20} | MPa | 0.101325 |
| 胴内ヘリウムの初期充填圧力 | P_{c0} | MPa | 0.0477 |
| 一二次蓋間体積 | V_1 | m^3 | <input type="text"/> |
| 二三次蓋間体積 | V_2 | m^3 | <input type="text"/> |
| 胴内体積 | V_c | m^3 | <input type="text"/> |
| 一般の試験条件における 胴内ヘリウムの温度 | T_{0nor} | K | 479.15 (206 °C) |
| 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 | T_{10} | K | 293.15 (20 °C) |
| 三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度 | T_{20} | K | 293.15 (20 °C) |
| 胴内ヘリウムの初期温度 | T_{c0} | K | 293.15 (20 °C) |
| 一般の試験条件における 三次蓋-胴内圧力 | P_3 | MPa | 0.0822 (-0.0191 MPaG) |

B. 4. 5 最大熱応力

一般の試験条件においては輸送物に熱応力が生じるが、A. 5. 1 に示すようにいずれも評価基準を下回る。

B. 4. 6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価を(□)-第 B. 12 表に示す。本輸送物は以下のとおり一般の試験条件の基準を満足している。

- ・最高温度評価条件において、三次蓋 O リングの最高温度は 103 °C であり、使用可能温度 150 °C を超えることはない。
- ・最高温度評価条件において、一次蓋金属ガスケット及び二次蓋金属ガスケットの最高温度はそれぞれ 110 °C 及び 105 °C であり、使用可能温度 130 °C を超えることはない。
- ・最高温度評価条件において、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材、及び底部中性子遮蔽材の最高温度は 127 °C であり、使用可能温度である 149 °C を超えることはない。
- ・最高温度評価条件において、上記を除く構成材料についても、健全性に悪影響を及ぼすような温度には到達しない。
- ・人が近づきうる表面の最高温度評価条件において、容易に人が近づきうる部位としての緩衝体表面の最高温度は 82 °C であり、基準値の 85 °C を超えることはない。一方、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 90 °C 及び 103 °C であり 85 °C を超えているが、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網を取り付けて輸送するため、人が容易に近づきうる表面の温度は 85 °C 以下である。
- ・最低温度評価条件において、周囲温度が -20 °C で、太陽熱放射がなく崩壊熱量が 0 kW であるため、すべての部位が -20 °C に達するが、輸送物の健全性に問題はない。

(ロ)-第 B. 12 表 一般の試験条件の熱解析結果の要約及びその評価 (1/2)

| 項目 | 結果 [°C] | 基準値 [°C] | 評価結果 | 他の解析への条件 |
|----------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 最高温度 | | | | |
| 燃料集合体 | 206 | 275 ¹⁶⁾ | 基準値以下 | 構造解析では □Cを使用 ^(注1) |
| バスケット | 177 | 250 ¹⁷⁾ | 基準値以下 | 構造解析では □Cを使用 ^(注1) |
| 中性子遮蔽材 | 127 ^(注2) | 149 ⁷⁾ | 基準値以下 | — |
| 一次蓋金属ガスケット | 110 ^(注3) | 130 ¹³⁾ | 基準値以下 | — |
| 二次蓋金属ガスケット | 105 ^(注4) | 130 ¹³⁾ | 基準値以下 | — |
| 三次蓋 O リング | 103 ^(注5) | 150 ¹¹⁾ | 基準値以下 | — |
| 外筒 | 114 | 350 ¹⁸⁾ | 基準値以下 | 構造解析では □Cを使用 ^(注1) |
| 胴 | 133 | 350 ¹⁸⁾ | 基準値以下 | 構造解析では □Cを使用 ^(注1) |
| 近接表面 ^(注6) | 82 ^(注7) | 85 | 基準値以下 | — |
| 最低温度 | 輸送物の全部位 が-20 °C | 胴内の凍結 なし | 胴内雰囲気はヘ リウムであるた め凍結しない | — |

(注1) 構造解析における熱応力算出では、容器全体の温度分布を入力するが、(ロ)-第 B. 12 表には、許容値及び内圧計算に使用する温度を代表として示している。なお、この温度は熱解析結果に裕度をみて設定した温度である。

(注2) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度。

(注3) 保守側に評価するため、一次蓋の最高温度とする。

(注4) 保守側に評価するため、二次蓋の最高温度とする。

(注5) 保守側に評価するため、三次蓋の最高温度とする。

(注6) 一般の試験条件のうち、人が近づきうる表面の最高温度評価条件における評価結果である。

なお、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 90 °C 及び 103 °C であり 85 °C を超えているが、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網 (66°C 以下 (B. 6. 3 参照)) を取り付けて輸送するため、人が容易に近づきうる表面の温度は 85 °C 以下である。

(注7) 緩衝体表面の最高温度。

(㍀)-第 B. 12 表 一般の試験条件の熱解析結果の要約及びその評価 (2/2)

| 項目 | 結果 [MPa] | 基準値 [MPa] | 評価 | 他の解析への条件 |
|----------|--------------------------|--------------|--|----------------------------------|
| 最大内圧 | | | | |
| 胴内圧 | 0.0780 (-0.0233 MPaG) | — | 設計評価期間中の ヘリウム内部への 漏えいを考慮し ても 0.097 MPa ^(注) 未満 | 構造解析では -0.101325 MPaG を 使用 |
| 一二次蓋間圧力 | 0.390 (0.289 MPaG) | — | — | 構造解析では 0.31 MPaG を使用 |
| 二三次蓋間圧力 | 0.253 (0.152 MPaG) | — | — | 構造解析では 0.19 MPaG を使用 |
| 三次蓋—胴内圧力 | 0.0822 (-0.0191 MPaG) | — | 設計評価期間中の ヘリウム内部への 漏えいを考慮し ても 0.097 MPa ^(注) 未満 | — |

(注) 気象変化による圧力変動(±0.004 MPa)を考慮した大気圧。

B.5 特別の試験条件

B.5.1 熱解析モデル

輸送物の熱解析は、ABAQUS コードを用いた有限要素法により行った。以下に解析に用いるモデル及び解析条件について示す。

B.5.1.1 解析モデル

1. 解析に用いる各モデル

一般の試験条件と同様に、本輸送物の各部位の温度を算出するために、解析モデルとして以下の2種類のモデルを適用した。

- ・全体モデル
- ・燃料集合体モデル

各解析モデルにおける温度算出部位は次のとおりである。

全体モデル …………… 上・下部緩衝体表面、胴、外筒、下部端板、一次蓋、二次蓋、三次蓋、一次蓋金属ガスケット、二次蓋金属ガスケット、三次蓋Oリング、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、三次蓋ボルト、蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、バスケット^(注)、伝熱フィン、トラニオン

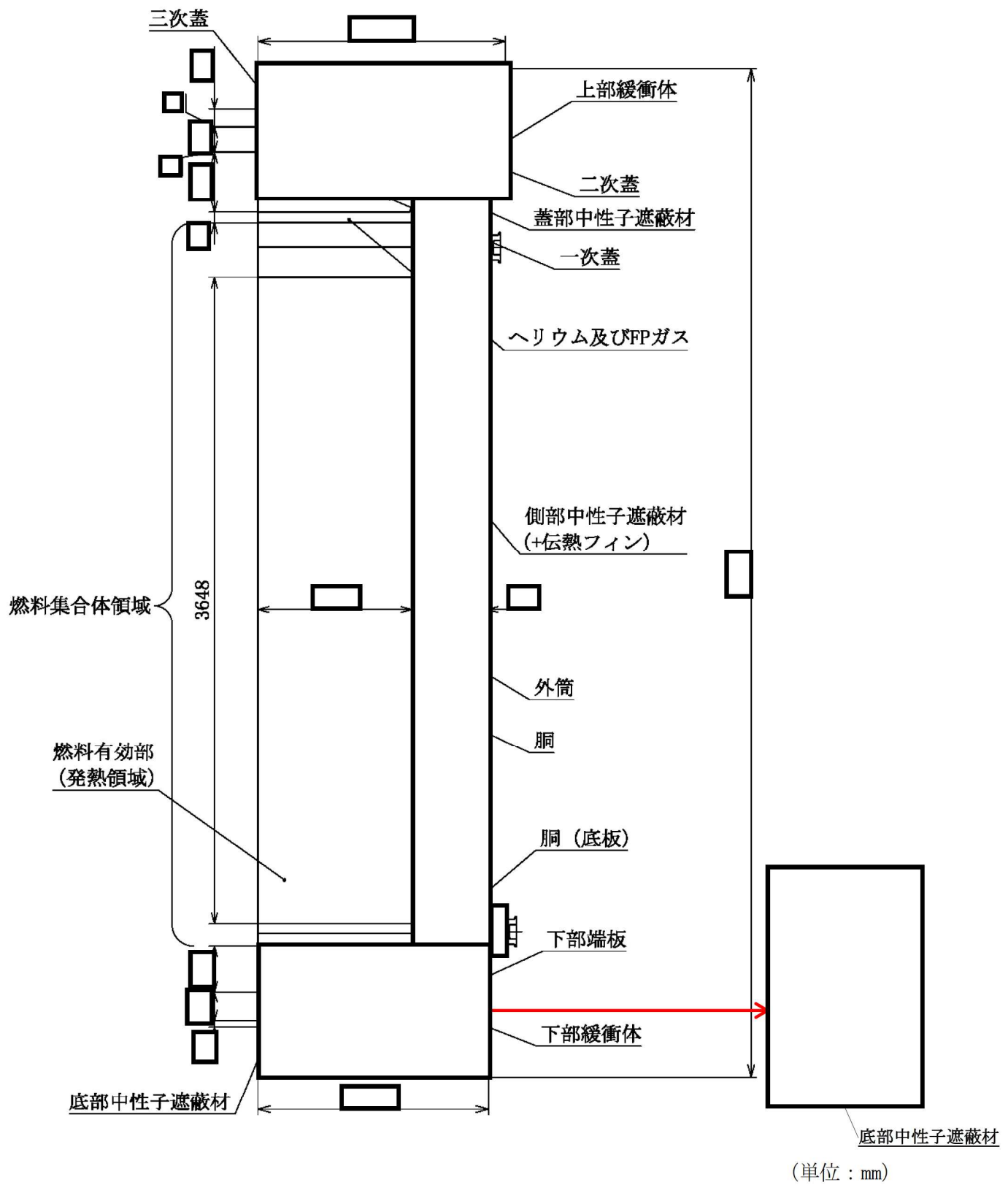
燃料集合体モデル ……… 燃料集合体

(注)バスケットは、アルミニウム合金製のバスケットプレート、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材、アルミニウム合金製のバスケットサポートで構成される。本評価におけるバスケットの最高温度は、これらの構成部材の最高温度とする。

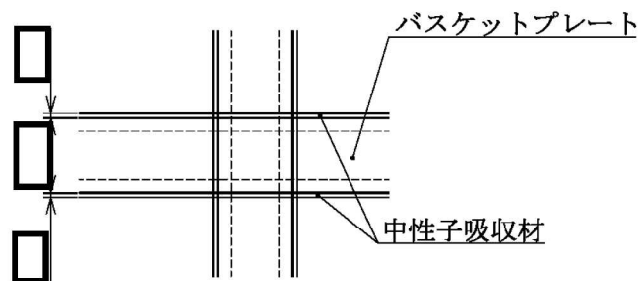
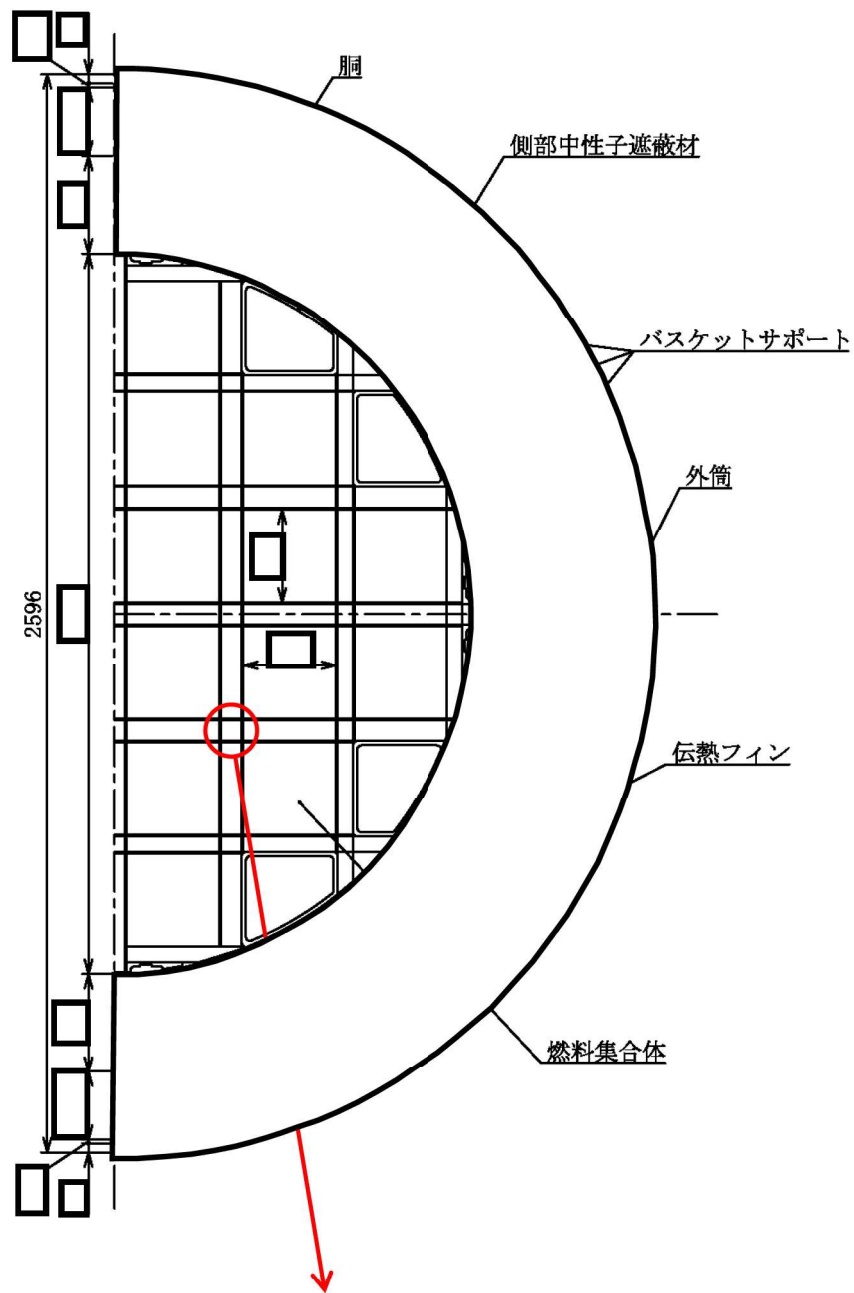
特別の試験条件の熱解析は、輸送物が強度試験（9 m 落下試験及び1 m 貫通試験）条件に引き続いて、火災事故条件下におかれるものとし、落下試験等の影響を以下のように考慮した。

- ・ 9 m 落下試験により緩衝体が変形するため、変形後の形状をモデルに考慮した。
- ・ 1 m 貫通試験における輸送物の変形は外筒、側部中性子遮蔽材及び緩衝体に生じる変形である。外筒及び側部中性子遮蔽材には直径 150 mm の範囲の変形が生じるが、熱解析結果への影響は無視しうるものであることから、解析モデルでは外筒及び側部中性子遮蔽材が変形しないものとした。また、緩衝体に穴があく可能性があるが、局所的であり断熱効果への影響は無視しうるものであることから、解析モデルでは緩衝体の変形しないものとした。
- ・ 9 m 落下試験により全燃料棒からヘリウム及びFP ガスが放出されるものと仮定し、胴内ガスの熱伝導率の低下を考慮した。

以上の条件を考慮した特別の試験条件における、全体モデルの形状及び要素分割図を(a)-第 B. 10 図及び(a)-第 B. 11 図にそれぞれ示す。また、燃料集合体モデルの形状及び要素分割図を(a)-第 B. 3 図及び(a)-第 B. 4 図にそれぞれ示す。なお、燃料集合体モデルにおけるバスケットセル内の充填気体は、全体モデルと同様にヘリウムとFP ガスの混合気体である。

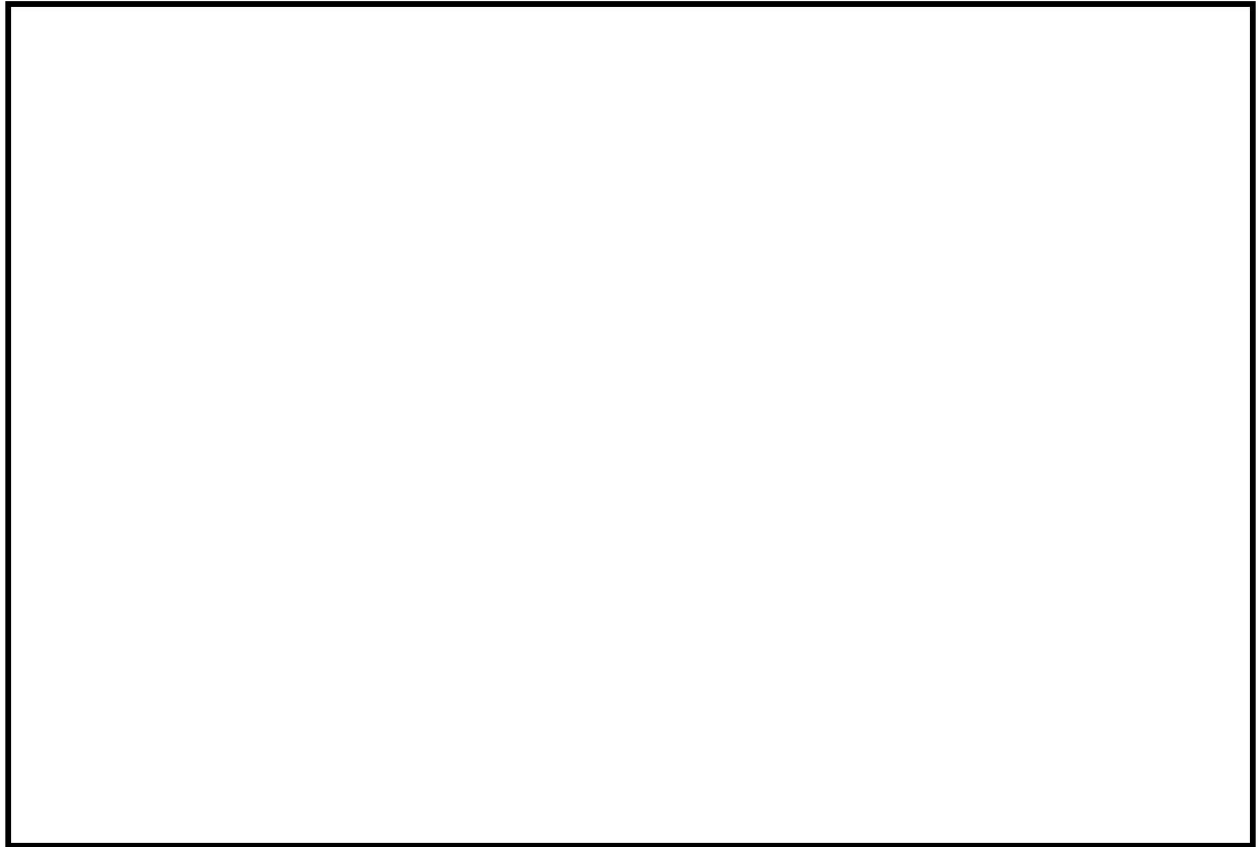


(ロ) 第 B. 10 図 特別の試験条件の全体モデル形状図 (1/2) (縦断面図)



(単位：mm)

(ロ)-第 B. 10 図 特別の試験条件の全体モデル形状図 (2/2) (横断面図)



(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

(ロ)-第 B. 11 図 特別の試験条件の全体モデル要素分割図

2. 解析条件

特別の試験条件における熱解析条件を(□)-第 B. 13 表に示す。火災時は火炎の放射による入熱が主となる。また、太陽熱放射の条件は(□)-第 B. 6 表に示したとおりである。さらに、各モデルにおいて考慮した解析条件は次のとおりである。

- ・特別の試験条件における胴内ガス（ヘリウム及び FP ガス）の熱伝導率は、FP ガス放出後の胴内のヘリウム及び FP ガスのモル分率を考慮して、混合気体の熱伝導率の計算式²⁾を用いて算出した。特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率を(□)-第 B. 14 表に示す。
- ・塗装は火災中に焼損するため、火災後の容器表面に鋼の酸化面の放射率を用いるとともに、火災後に延焼しないとした。
- ・各モデルのその他の解析条件は一般の試験条件と同じである。

(□)-第 B. 13 表 特別の試験条件における熱解析条件

| 項目 | | 火災前 | 火災時 | 火災後 | |
|----------------------|----------|-----|--|--------------------|--------------------|
| 設計崩壊熱量 | 全体モデル | 中央部 | 849 W/体 | | |
| | | 外周部 | 659 W/体 | | |
| | 燃料集合体モデル | | 1.32×10 ⁻⁵ W/mm ³ /本 | | |
| 環境条件 | 周囲温度 | | 38 °C | 800 °C (30 分間) | 38 °C |
| | 太陽熱放射 | | あり | あり | あり |
| | 周囲吸収率 | | 1.0 | 0.9 ^(注) | 1.0 |
| 容器表面 | 放射率 | | 0.8 | 0.8 | 0.64 |
| | 吸収率 | | 0.5 | 0.8 ²⁰⁾ | 1.0 ²¹⁾ |
| 緩衝体、 トランニオン 表面 | 放射率 | | 0.15 | 0.8 | 0.15 |
| | 吸収率 | | 0.5 ¹⁹⁾ | 0.8 ²⁰⁾ | 1.0 ²¹⁾ |

(注)火炎の放射率を示す。

(ロ)-第 B. 14 表 特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率

| 温度 | | 熱伝導率 (W/(m・K)) |
|-----|--------|-------------------|
| (K) | (°C) | |
| 300 | 26.85 | 0.0937 |
| 400 | 126.85 | 0.115 |
| 500 | 226.85 | 0.134 |
| 600 | 326.85 | 0.153 |

B. 5. 1. 2 試験モデル

該当なし。

B. 5. 2 輸送物の評価条件

9 m 落下試験における輸送物の変形は緩衝体に生じる変形である。解析においては、垂直落下、水平落下及びコーナ落下の変形後の形状を包絡する以下の変形量にて緩衝体をモデル化した。

- ・ 頭部垂直落下 : mm
- ・ 底部垂直落下 : mm
- ・ 頭部水平落下 : mm
- ・ 底部水平落下 : mm
- ・ 頭部コーナ落下 : mm
- ・ 底部コーナ落下 : mm

1 m 貫通試験における輸送物の変形は緩衝体、外筒及び側部中性子遮蔽材に生じる変形である。緩衝体は落下時に穴があく可能性があるが、局所的であるため、断熱効果に大きな変化はない。

外筒及び側部中性子遮蔽材の最大変形は直径 150 mm の範囲の変形である。この変形は局所的であるため、輸送物の熱的性能に影響を及ぼすことはない。

B. 5.3 輸送物温度

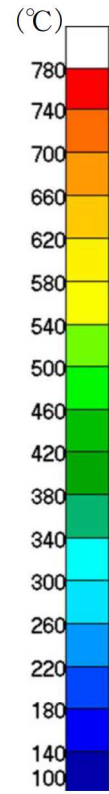
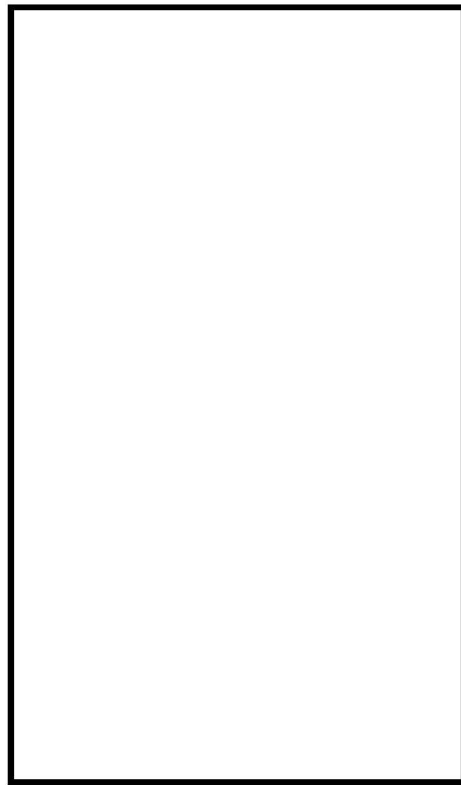
特別の試験条件における B. 5.1 に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた輸送物各部の最高温度、及び火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間を (a)-第 B. 15 表 に示す。

火災事故発生から 30 分後の輸送物各部の温度分布を (a)-第 B. 12 図 に示す。また、燃料集合体温度が最も高くなる火災事故発生から 25.1 時間後における温度分布を (a)-第 B. 13 図 及び (a)-第 B. 14 図 に、さらに、時刻歴温度変化を (a)-第 B. 15 図 に示す。

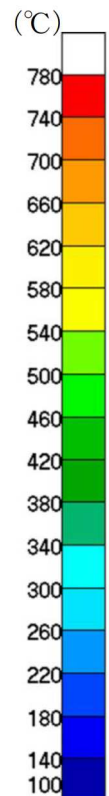
(ロ)-第 B. 15 表 特別の試験条件における最高温度

| 部位 | 温度(°C) | 最高温度算出時間(h) ^(注) |
|-------------|--------|----------------------------|
| 緩衝体表面 | 783 | 0.500 |
| 外筒 | 714 | 0.500 |
| 下部端板 | 655 | 0.500 |
| 伝熱フィン | 491 | 0.502 |
| 側部中性子遮蔽材 | 701 | 0.502 |
| 蓋部中性子遮蔽材 | 138 | 31.1 |
| 底部中性子遮蔽材 | 160 | 3.92 |
| 胴(底板) | 175 | 2.22 |
| 胴(本体部) | 206 | 0.559 |
| 胴(フランジ部) | 224 | 0.524 |
| 一次蓋 | 139 | 31.1 |
| 二次蓋 | 137 | 5.35 |
| 三次蓋 | 186 | 1.32 |
| 一次蓋ボルト | 139 | 13.3 |
| 二次蓋ボルト | 137 | 5.35 |
| 三次蓋ボルト | 153 | 3.11 |
| 一次蓋金属ガスケット | 137 | 19.1 |
| 二次蓋金属ガスケット | 135 | 7.73 |
| 三次蓋 O リング | 149 | 3.56 |
| 蓋部中性子遮蔽材カバー | 137 | 22.1 |
| 底部中性子遮蔽材カバー | 161 | 3.83 |
| トラニオン | 742 | 0.500 |
| バスケット | 218 | 22.1 |
| 燃料集合体 | 254 | 25.1 |

(注) 火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間である。



(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

(ア)-第 B. 12 図 特別の試験条件の全体モデル温度分布 (火災事故発生から 30 分後)

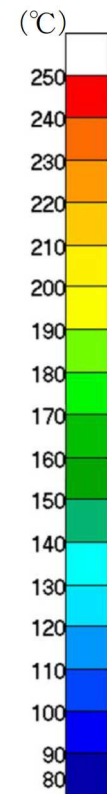
(燃料最高温度位置断面)



(全体)

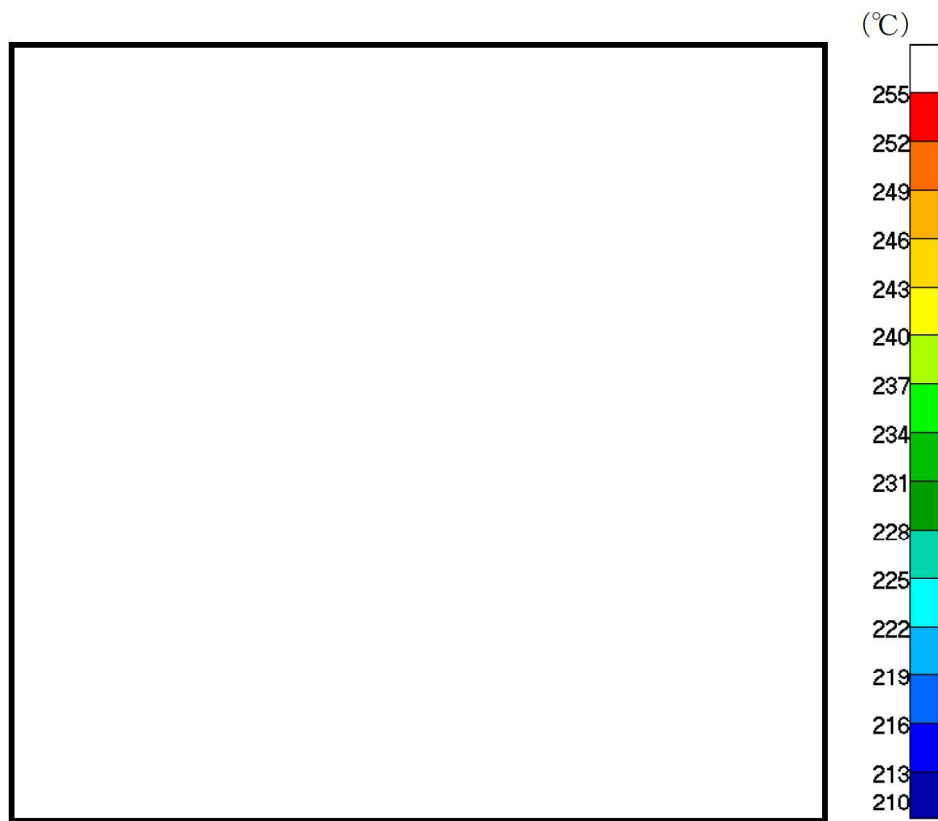


(燃料集合体最高温度位置断面)

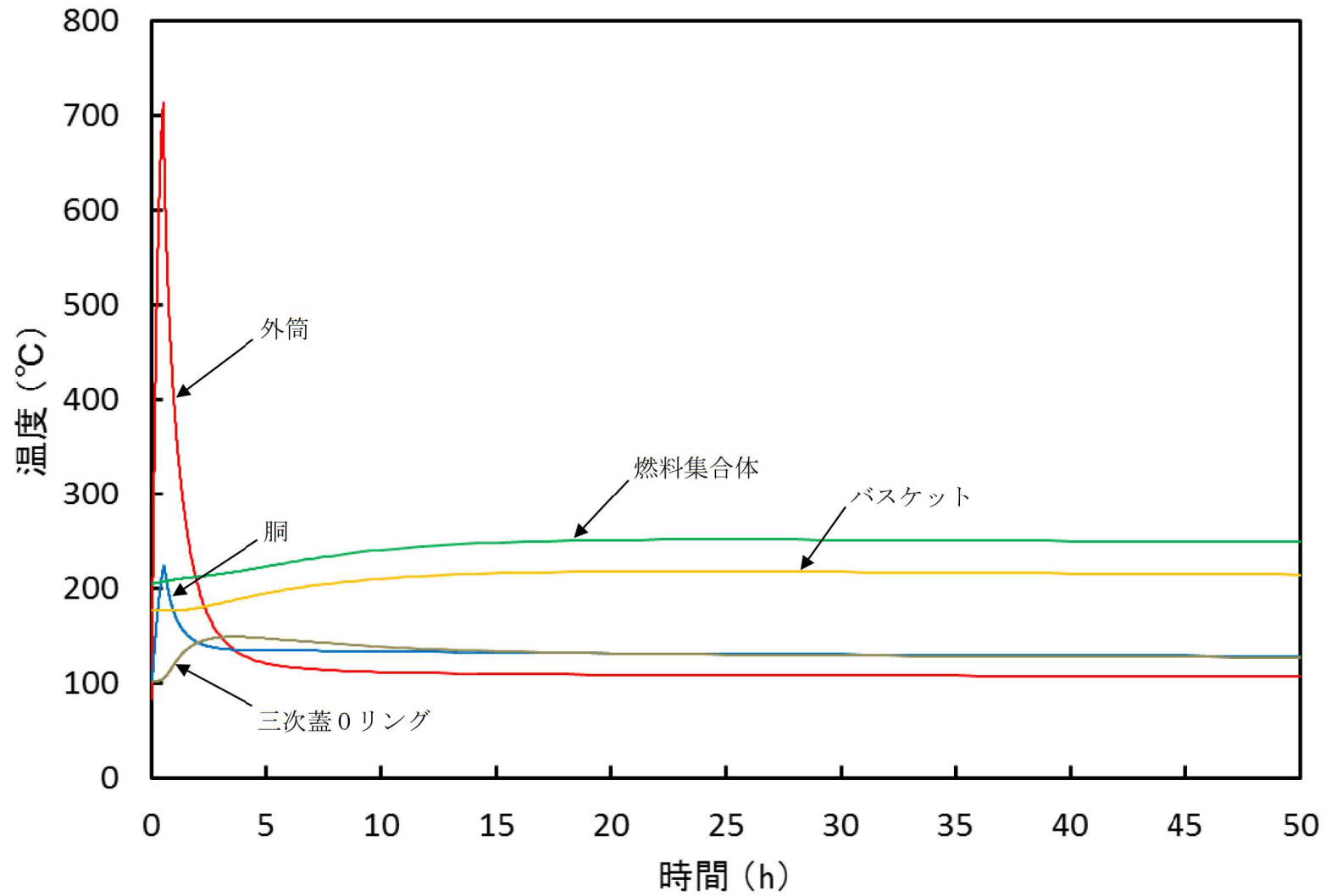


(B)-第 B. 13 図 特別の試験条件の全体モデル温度分布 (火災事故発生から 25.1 時間後)

(燃料最高温度位置断面)



(B)-第 B. 14 図 特別の試験条件の燃料集合体モデルの温度分布 (火災事故発生から 25.1 時間後)



(ロ)-第 B. 15 図 特別の試験条件の時刻歴温度変化

B. 5. 4 最大内圧

輸送物の熱解析から、特別の試験条件における輸送物の洞内圧は、洞内のヘリウム及び FP ガスの温度が最高となる時、つまり燃料集合体の温度が最高となる火災事故発生から 25.1 時間後に最大となる。また、一二次蓋間圧力は、一二次蓋間ヘリウムの温度が最高となる火災発生時から 5.87 時間後に最大となる。さらに、二三次蓋間圧力は、二三次蓋間空気の温度が最高となる火災発生時から 3.56 時間後に最大となる。洞内圧、一二次蓋間圧力、二三次蓋間圧力及び三次蓋－洞内圧力の計算方法及び計算結果を以下に示す。

1. 洞内圧

洞内圧の算出には、全燃料棒の密封機能が失われたと仮定して、燃料棒内に封入されていたヘリウム及び FP ガス放出による圧力上昇を考慮する。特別の試験条件におけるヘリウム及び FP ガスの温度を保守側に燃料集合体最高温度とすると、洞内圧は、以下のとおり求められる。

$$P_0' = \frac{P_0 V_c \frac{T_{0acc}}{T_{0nor}}}{V_c + V_p} + P_{FP}$$

ここで、

- P_0' : 特別の試験条件における洞内圧力 (MPa)
- P_0 : 一般の試験条件における洞内圧力 (MPa)
- P_{FP} : 洞内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力 (MPa)
- V_c : 洞内体積 (m^3)
- V_p : 全燃料棒内部の体積 (m^3)
- T_{0acc} : 特別の試験条件における洞内ガス温度 (燃料集合体最高温度) (K)
- T_{0nor} : 一般の試験条件における洞内ガス温度 (燃料集合体最高温度) (K)

計算条件と計算結果を(Ⅱ)-第 B. 16 表に示す。

(ロ)-第 B. 16 表 特別の試験条件における胴内圧計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|---------------------------|------------|-------|----------------------|
| 一般の試験条件における胴内圧力 | P_0 | MPa | 0.0780 |
| 胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力 | P_{FP} | MPa | 0.223 |
| 胴内体積 | V_c | m^3 | <input type="text"/> |
| 全燃料棒内部の体積 | V_p | m^3 | <input type="text"/> |
| 特別の試験条件における胴内ガス温度 | T_{0acc} | K | 527.15 (254 °C) |
| 一般の試験条件における胴内ガス温度 | T_{0nor} | K | 479.15 (206 °C) |
| 特別の試験条件における胴内圧力 | P_0' | MPa | 0.307 (0.206 MPaG) |

2. 一二次蓋間圧力

特別の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に一二次蓋間ヘリウムの最高温度とすると、一二次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_1' = P_{10} \frac{T_{1acc}}{T_{10}}$$

ここで、

P_1' : 特別の試験条件における一二次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{1acc} : 特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B. 17 表に示す。

(ロ)-第 B. 17 表 特別の試験条件における一二次蓋間圧力計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|-----------------------------|------------|-----|--------------------|
| 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 | P_{10} | MPa | 0.300 |
| 特別の試験条件における 一二次蓋間ヘリウムの温度 | T_{1acc} | K | 410.15 (137 °C) |
| 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 | T_{10} | K | 293.15 (20 °C) |
| 特別の試験条件における一二次蓋間圧力 | P_1' | MPa | 0.420 (0.319 MPaG) |

3. 二三次蓋間圧力

特別の試験条件における空気の温度を保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また、一般の試験条件と同様に、保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると、二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2' = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{1acc}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{1acc}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで、

P_2' : 特別の試験条件における二三次蓋間圧力 (MPa)

P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)

V_1 : 一二次蓋間体積 (m³)

V_2 : 二三次蓋間体積 (m³)

T_{1acc} : 特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B. 18 表に示す。なお、この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に-20℃であった場合には空気の密度が大きくなるため、約 4%増加する可能性があるが、構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(ロ)-第 B. 18 表 特別の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|-------------------------|------------|----------------|--------------------|
| 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 | P_{10} | MPa | 0.300 |
| 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) | P_{20} | MPa | 0.101325 |
| 一二次蓋間体積 | V_1 | m ³ | |
| 二三次蓋間体積 | V_2 | m ³ | 0.0574 |
| 特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度 | T_{1acc} | K | 410.15 (137 °C) |
| 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 | T_{10} | K | 293.15 (20 °C) |
| 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 | T_{20} | K | 293.15 (20 °C) |
| 特別の試験条件における二三次蓋間圧力 | P_2' | MPa | 0.272 (0.171 MPaG) |

4. 二次蓋－胴内圧力

密封解析に使用する三次蓋－胴内圧力は、設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮して一般の試験条件の胴内圧を 0.0970 MPa と仮定し、また、全燃料棒の密封機能が失われたと仮定して、燃料棒内に封入されていたヘリウム及び FP ガス放出による圧力上昇を考慮する。さらに、一次蓋及び二次蓋の密封性が失われたと仮定し、特別の試験条件における胴内ガスの温度上昇に伴う圧力上昇を考慮すると、三次蓋－胴内圧力は、以下のとおり求められる。

$$P_3' = \frac{P_{10}V_1 \frac{T_{0acc}}{T_{10}} + P_{20}V_2 \frac{T_{0acc}}{T_{20}} + \left(P_c \frac{T_{0acc}}{T_{0nor}} + P_{FP} \right) (V_c + V_p)}{V_1 + V_2 + V_c + V_p}$$

ここで、

- P_3' : 特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力 (MPa)
- P_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)
- P_{20} : 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) (MPa)
- P_c : 設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮した一般の試験条件の胴内圧 (MPa)
- P_{FP} : 胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力 (MPa)
- V_1 : 一二次蓋間体積 (m^3)
- V_2 : 二三次蓋間体積 (m^3)
- V_c : 胴内体積 (m^3)
- V_p : 全燃料棒内部の体積 (m^3)
- T_{0acc} : 特別の試験条件における胴内ヘリウム及び FP ガスの温度 (燃料集合体最高温度) (K)
- T_{0nor} : 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度 (燃料集合体最高温度) (K)
- T_{10} : 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)
- T_{20} : 三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度 (K)

計算条件と計算結果を (B)-第 B.19 表 に示す。

(ロ)-第 B. 19 表 特別の試験条件における三次蓋-胴内圧力計算条件及び計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値等 |
|------------------------------------|------------|-------|----------------------|
| 一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 | P_{10} | MPa | 0.300 |
| 二三次蓋間空気の初期圧力 (大気圧) | P_{20} | MPa | 0.101325 |
| 設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮した 一般の試験条件胴内圧 | P_c | MPa | 0.0970 |
| 胴内に放出されたヘリウム及びFPガス圧力 | P_{FP} | MPa | 0.223 |
| 一二次蓋間体積 | V_1 | m^3 | <input type="text"/> |
| 二三次蓋間体積 | V_2 | m^3 | <input type="text"/> |
| 胴内体積 | V_c | m^3 | <input type="text"/> |
| 全燃料棒内部の体積 | V_p | m^3 | <input type="text"/> |
| 特別の試験条件における胴内ヘリウム及び FPガスの温度 | T_{0acc} | K | 527.15 (254 °C) |
| 一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度 | T_{0nor} | K | 479.15 (206 °C) |
| 一二次蓋間ヘリウムの初期温度 | T_{10} | K | 293.15 (20 °C) |
| 三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度 | T_{20} | K | 293.15 (20 °C) |
| 特別の試験条件における 三次蓋-胴内圧力 | P_3' | MPa | 0.330 (0.229 MPaG) |

B. 5.5 最大熱応力

特別の試験条件において輸送物に生じる熱応力は、A. 6.3 で説明したように容器各部位が熱膨張を拘束しあうことで生じ、最大熱応力については、温度差が最大になる火災事故発生時から 30 分後に生じる。

ただし、A. 6.3 で示したとおり、容器に生じる最大熱応力は小さく、容器の構造健全性に問題はない。

B.5.6 結果の要約及びその評価

特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価を(甲)-第 B.20 表に示す。本輸送物の状態は以下のとおりであり、損傷については他の解析に反映している。

- ・密封境界となる三次蓋 O リングの最高温度は 186 °C であり、使用限度 48 時間における使用可能温度である 300 °C を超えることはない。したがって、特別の試験条件において密封性能が失われることはない。
- ・蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度はそれぞれ 138 °C 及び 160 °C であり、使用可能温度 180 °C を超えることはない。一方、側部中性子遮蔽材の最高温度は 701 °C であり、使用可能温度を超えるが全て失われることはない。
- ・遮蔽解析においては、中性子遮蔽材の欠損を密度減少量として考慮する。なお、側部中性子遮蔽材だけでなく、蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材についても密度減少を考慮している。
- ・臨界解析においては、外筒までをモデル化し、中性子遮蔽材は全て失われるとしてモデル化しないことにより、中性子吸収効果を見逃し、保守側の解析を行う。
- ・その他の構成材料については、輸送物の健全性に対し悪影響を及ぼす温度には到達しない。

(ロ)-第 B. 20 表 特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価 (1/2)

| 項目 | 結果 [°C] | 基準値 [°C] | 評価 | 他の解析への条件 |
|------------|---------------------|--------------------|--|---|
| 最高温度 | | | | |
| 燃料集合体 | 254 | — | — | — |
| バスケット | 218 | 250 ¹⁷⁾ | 基準値以下 | — |
| 中性子遮蔽材 | 701 ^(注1) | 180 ¹⁵⁾ | 蓋部、底部：基準値以下 ^(注2) 側部：基準値を超過 ^(注2) | 遮蔽解析では密度減少量として考慮 臨界解析では保守側にモデル化しない |
| 二次蓋金属ガスケット | 137 ^(注3) | 190 ¹⁴⁾ | 基準値以下 | — |
| 三次蓋 O リング | 186 ^(注4) | 300 ¹²⁾ | 基準値以下 | — |
| 胴 | 224 | 350 ¹⁸⁾ | 基準値以下 | 構造解析では □ °C を使用 ^(注5) |

(注 1) 蓋部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち、最高となる温度。

(注 2) 蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度はそれぞれ 138 °C 及び 160 °C であり、使用可能温度 180 °C を超えることはない。一方、側部中性子遮蔽材の最高温度は 701 °C であり、使用可能温度を超えるが全て失われることはない。

(注 3) 保守側に評価するため、二次蓋の最高温度とする。

(注 4) 保守側に評価するため、三次蓋の最高温度とする。

(注 5) 構造解析における熱応力算出では、容器全体の温度分布を入力するが、(ロ)-第 B. 20 表には、許容値及び内圧計算に使用する温度を代表として示している。

(ロ) 第 B. 20 表 特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価 (2/2)

| 項目 | 結果 [MPa] | 基準値 [MPa] | 評価 | 他の解析への条件 |
|----------|-----------------------|--------------|----|--------------------------|
| 最大内圧 | | | | |
| 胴内圧 | 0.307 (0.206 MPaG) | — | — | 構造解析では 0.250 MPaG を使用 |
| 一二次蓋間圧力 | 0.420 (0.319 MPaG) | — | — | 構造解析では 0.340 MPaG を使用 |
| 二三次蓋間圧力 | 0.272 (0.171 MPaG) | — | — | 構造解析では 0.270 MPaG を使用 |
| 三次蓋-胴内圧力 | 0.330 (0.229 MPaG) | — | — | 密封解析では 0.330 MPa を使用 |

B.6 付属書類

B.6.1 解析に用いた対流熱伝達率について

B.6.1.1 全体モデルに用いた対流熱伝達率

1. 輸送物表面と周囲の熱伝達率

(1) 外筒表面の自然対流熱伝達率

外筒表面の自然対流熱伝達率は、水平円筒表面の自然対流熱伝達率を表わす次の Schutz の式²⁾を用いる。

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

ただし、

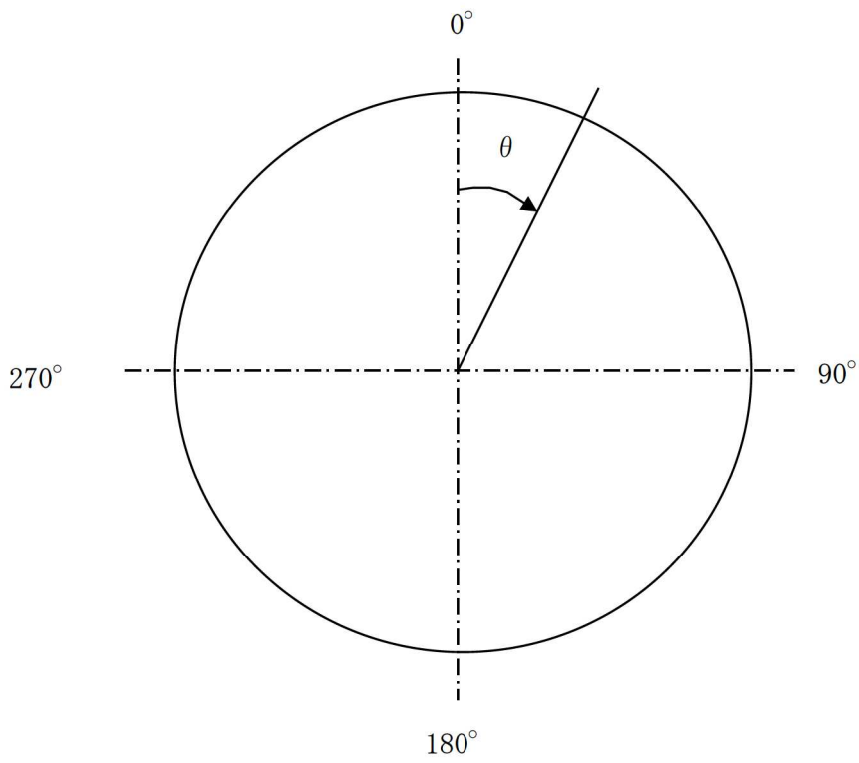
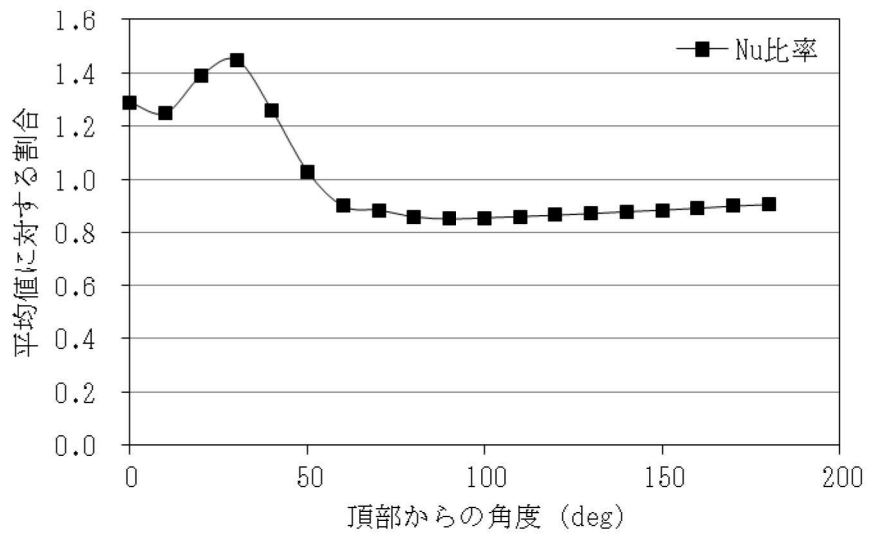
- h : 熱伝達率 (W/(m²・K))
- λ : 熱伝導率 (W/(m・K))
- g : 重力加速度 (9.80665 m/s²)
- β : 体積膨張係数 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数
- Δt : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を(□)-第B.付1表に示す。

ここで、実際に用いた熱伝達率としては、(□)-第B.付1図に示される水平円筒外表面の周方向分布を考慮して、0°～180°の平均値に対する割合のうち、90°～180°の割合を平均化して算出した係数(0.87)を(□)-第B.付1表の値に乗じた値を保守側に設定した。ただし、火災時に対しては入熱が多くなるよう(□)-第B.付1表の値を設定した。

(□)-第B.付1表 外筒表面の自然対流熱伝達率

| 温度(°C) | 熱伝達率(W/(m ² ・K)) |
|--------|-----------------------------|
| -20 | 1.33 Δt ^{1/3} |
| 0 | 1.26 Δt ^{1/3} |
| 20 | 1.20 Δt ^{1/3} |
| 100 | 1.02 Δt ^{1/3} |
| 200 | 0.863 Δt ^{1/3} |
| 300 | 0.760 Δt ^{1/3} |
| 400 | 0.682 Δt ^{1/3} |
| 600 | 0.577 Δt ^{1/3} |
| 800 | 0.500 Δt ^{1/3} |



(B)-第B.付1図 外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布²²⁾

(2) 緩衝体円筒表面の自然対流熱伝達率

緩衝体円筒面に対しては外筒表面の自然対流熱伝達率にて使用した Schutz の式を用いる。(ロ)-第 B. 付 1 表に示す値に周方向分布を考慮した係数 0.87 を乗じて保守的な値を設定した。ただし、火災時に対しては入熱が多くなるように(ロ)-第 B. 付 1 表の値を設定した。

(3) 緩衝体垂直面の自然対流熱伝達率

緩衝体垂直表面の自然対流熱伝達率は、垂直平板に対する次の Jakob の式²³⁾を用いる。

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

ただし、

- 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 (K⁻¹)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数
- Δt : 温度差 (K)

各温度に対して求めた熱伝達率を(ロ)-第 B. 付 2 表に示す。

(ロ)-第 B. 付 2 表 垂直面の自然対流熱伝達率

| 温度(°C) | 熱伝達率(W/(m ² ・K)) |
|--------|-----------------------------|
| -20 | 1.72 Δt ^{1/3} |
| 0 | 1.63 Δt ^{1/3} |
| 20 | 1.55 Δt ^{1/3} |
| 100 | 1.31 Δt ^{1/3} |
| 200 | 1.11 Δt ^{1/3} |
| 300 | 0.980 Δt ^{1/3} |
| 400 | 0.880 Δt ^{1/3} |
| 600 | 0.744 Δt ^{1/3} |
| 800 | 0.645 Δt ^{1/3} |

(4) 緩衝体と輸送容器本体との間の熱伝達

緩衝体と輸送容器本体の間には取合いの関係上ギャップがあり、この間の熱伝達は空気の熱伝導及び放射によるものとした。

B. 6. 2 混合気体の熱伝導率の計算式について

特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率は、ヘリウム及び FP ガス放出後の胴内のヘリウム及び FP ガスのモル分率を考慮して、混合気体の熱伝導率の計算式²⁾を用いて算出する。なお、FP ガスは生成量の多いキセノンとした。

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1}{1 + \phi_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + \phi_{21} \frac{x_1}{x_2}}$$
$$\phi_{12} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\eta_1}{\eta_2} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{3/4} \frac{1 + \frac{S_1}{T}}{1 + \frac{S_2}{T}} \right]^{1/2} \right\}^2 \left(\frac{1 + \frac{S_{12}}{T}}{1 + \frac{S_1}{T}} \right)$$

ここで、

- λ_m : 混合ガスの熱伝導率 (W/m/K)
- λ_1 : ヘリウムの熱伝導率 (W/m/K)
- λ_2 : 核分裂生成ガスの熱伝導率 (W/m/K)
- x_1 : ヘリウムの分圧 (MPa abs)
- x_2 : 核分裂生成ガスの分圧 (MPa abs)
- η_1 : ヘリウムの粘性率 (Pa·s)
- η_2 : 核分裂生成ガスの粘性率 (Pa·s)
- M_1 : ヘリウムの分子量 (-)
- M_2 : 核分裂生成ガスの分子量 (-)
- S : Sutherland 定数

計算条件及び計算結果を(Ⅱ)-第 B. 付 3 表に示す。

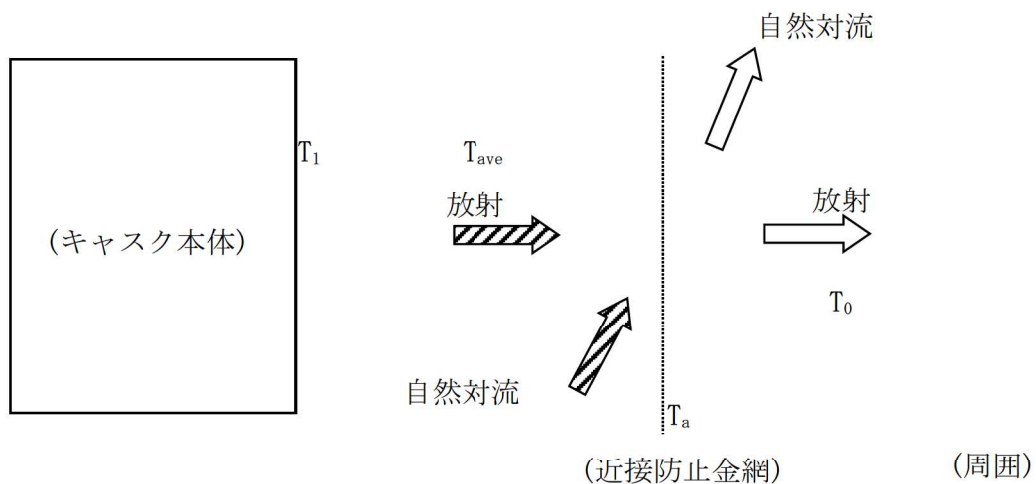
(B)-第 B. 付 3 表 胴内ガスの熱伝導率計算条件及び計算結果

| 項目 | | 記号 | 単位 | T : 温度 (K) | | | |
|-----------|------|-------------|-----------------------------|------------|---------|---------|---------|
| | | | | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 熱伝導率 | ヘリウム | λ_1 | W/(m·K) | 0.1527 | 0.1882 | 0.2212 | 0.2523 |
| | キセノン | λ_2 | W/(m·K) | 0.00562 | 0.00728 | 0.00881 | 0.01025 |
| モル分率 | ヘリウム | x_1 | - | 0.840 | | | |
| | キセノン | x_2 | - | 0.160 | | | |
| 粘性係数 | ヘリウム | η_1 | $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | 19.93 | 24.29 | 28.36 | 32.21 |
| | キセノン | η_2 | $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | 23.30 | 30.29 | 36.80 | 42.81 |
| 分子量 | ヘリウム | M_1 | g/mol | 4.002602 | | | |
| | キセノン | M_2 | g/mol | 131.293 | | | |
| 標準沸点 | ヘリウム | Tb_1 | K | 4.21 | | | |
| | キセノン | Tb_2 | K | 164.1 | | | |
| 混合気体の熱伝導率 | | λ_m | W/(m·K) | 0.0937 | 0.115 | 0.134 | 0.153 |

B. 6.3 近接防止金網の温度評価について

以下の考え方に基づき近接防止金網の温度を評価した。(□)-第B.付2図参照)

- ①近接防止金網温度に対応する規則要件は 38℃の日陰における近接可能な容器表面最高温度を 85℃以下とすることであるから、太陽熱放射を考慮しない。
- ②近接防止金網は、当該輸送容器を架台上に設置した際に近接可能な外筒領域及びトランシオン領域を覆うように取り付けられている。
- ③近接防止金網は容器周りに垂直平板状に設けられているため、厚さを持たない板として考える。
- ④近接防止金網は輸送容器と周囲の自然対流を阻害しない形状とすることにより熱伝達を干渉しないものと仮定する。したがって、近接防止金網温度を求めるために使用する輸送容器表面の温度は一般の試験条件（人の近づきうる表面の最高評価条件）で得られた結果を用いる。
- ⑤温度を求めるに当たっては、自然対流と放射を考慮する。自然対流熱伝達率は垂直平板の自然対流熱伝達率を用いて評価する。これらを考慮して、容器から近接防止金網への入熱量と近接防止金網から大気への放熱量がつりあうように近接防止金網温度を定める。
- ⑥容器と近接防止金網間にある空気は自然対流の評価において、容器と近接防止金網の間の空気の温度は近接防止金網温度と容器表面温度の平均温度とする。



(□)-第B.付2図 近接防止金網周りの伝熱モデル

以上より、キャスク本体から近接防止金網への入熱量 Q_{in} 及び近接防止金網から大気への放熱量 Q_{out} は、それぞれ以下の式で表わされ、近接防止金網温度 T_a は、 $Q_{in}=Q_{out}$ を満たす T_a を求める。

$$\begin{cases} Q_{in}=h_1(T_{ave}-T_a)+\sigma F_{\varepsilon}\{(T_1+273.15)^4-(T_a+273.15)^4\} \\ Q_{out}=h_0(T_a-T_0)+\sigma \varepsilon_2\{(T_a+273.15)^4-(T_0+273.15)^4\} \\ F_{\varepsilon}=1/\{(1/\varepsilon_1)+(1/\varepsilon_2)-1\} \end{cases}$$

ただし、

- Q_{in} : 近接防止金網への入熱量 (W/m²)
- Q_{out} : 近接防止金網から大気への放熱量 (W/m²)
- h_1 : 入熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m²・K))
((ロ)-第 B. 付 4 表参照)
- h_0 : 放熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m²・K))
((ロ)-第 B. 付 4 表参照)
- T_1 : キャスク本体外表面温度 (103 °C)
(キャスク本体外表面において最も温度が高いトラニオンの温度)
- T_{ave} : キャスク本体外表面と近接防止金網の平均温度 (°C)
- T_a : 近接防止金網温度 (°C)
- T_0 : 周囲温度 (38 °C)
- σ : ステファン・ボルツマン定数 (5.670367×10⁻⁸ W/(m²・K⁴))
- F_{ε} : 形態係数
- ε_1 : キャスク本体外表面の放射率 (0.8)
- ε_2 : 近接防止金網の放射率 (0.33 : アルミニウムの酸化面)

(ロ)-第 B. 付 4 表 垂直平板の自然対流熱伝達率

| 境界膜温度 (°C) | 垂直平板の自然対流熱伝達率 (W/(m ² ・K)) |
|---------------|--|
| 20 | 1.55 $\Delta T^{1/3}$ |
| 100 | 1.31 $\Delta T^{1/3}$ |
| 200 | 1.11 $\Delta T^{1/3}$ |

入熱の境界膜温度 : T_{ave}

放熱の境界膜温度 : $(T_a+T_0)/2$

容器表面各部位近傍に設けられた近接防止金網温度を(Ⅱ)-第B.付5表に示す。容器表面に設けられた近接防止金網の温度は基準値(85℃)より低い。

(Ⅱ)-第B.付5表 近接防止金網の温度評価結果

| 評価条件 (°C) | | 評価結果 (°C) |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------|
| キャスク本体外表面温度 (T ₁) | 周囲温度 (T ₀) | 近接防止金網温度 (T _a) |
| 103 | 38 | 66 |

B.6.4 参考文献

- 1) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual(6.12)” , (2012).
- 2) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).
- 3) American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)” , (2010).
- 4) 中性子吸収材メーカー資料
- 5) (公財)原子力安全研究協会, 「軽水炉燃料のふるまい 改訂第5版」, (2013).
- 6) D. L. Hagrman, G. A. Reymann, R. E. Mason, “MATPRO-Version 11(Rev.2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior,” EG&G Idaho Inc., (1981).
- 7) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material” , (1986).
- 8) 木材工業ハンドブック編集委員会, 「木材工業ハンドブック 改訂3版」, (1982).
- 9) (公社)日本化学会, 「化学便覧 基礎編 改訂5版」, (2004).
- 10) 三菱重工業(株), 「化学試験報告書 エポキシ系樹脂の熱特性測定結果」, (2006).
- 11) 産業技術センター, 「複合材料技術集成」, (1976).
- 12) (一財)電力中央研究所, 「輸送キャスク密封装置の耐熱限界性能の評価」, (1998).
- 13) (一財)電力中央研究所, 「平成20年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査) 報告書」, (2009).
- 14) (独)原子力安全基盤機構, 「金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 1/3 最終報告」, (2004).
- 15) Y. Momma, et al., “Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask” , The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (1998).
- 16) (独)原子力安全基盤機構, 「平成18年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」, (2007).
- 17) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 18) (一社)日本機械学会, 「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(JSME S FA1-2007)」, (2007).
- 19) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Third Edition” , John Wiley & Sons, Inc., (1990).
- 20) 平成二年十一月二十八日科学技術庁告示第五号, 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示」.

- 21) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975).
- 22) 三角利之, 鈴木幸治, 北村健二, 「大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱 (空気の場合)」, (一社)日本機械学会, (1999).
- 23) M. Jakob, “Heat Transfer. Volume 1”, John Wiley & Sons, Inc., (1949).

(四)章 C 密 封 解 析

C. 密封解析


C.1 概要

本輸送物は、B. 4. 6 に示すように一般の試験条件において密封境界の内部は負圧である。したがって、一般の試験条件における放射性物質の漏えいはないが、仮に密封境界の内部の圧力が大気圧になる場合を想定し、漏えい試験によって求めた密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し、その漏えい率が一般の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。また、特別の試験条件においては、密封境界の内部が正圧になる可能性があるため、同様に、漏えい試験によって求めた密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し、その漏えい率が特別の試験条件下における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。

なお、本評価における収納放射エネルギーは、ORIGEN2. 2UPJ コードを用いて求めた。また、データライブラリはPWRU50 ライブラリを用いた。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

輸送容器の密封境界を構成する密封装置は、(イ)-第 C. 4 図に示すように収納物を収納する胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートから構成される。また、密封装置の材質は(イ)-第 C. 1 表に示すとおりである。なお、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートは、共に上部緩衝体で覆われているため、不用意に取り外されることはない。また、緩衝体の取付部には  を施すことができるようになっている。

C.2.2 密封装置の貫通部

密封装置には、(イ)-第 C. 13 図に示すように、三次蓋にリリーフバルブを設けるための貫通部が設けられている。リリーフバルブは二次蓋間と外部との圧力を同圧にするために用いられる。

C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

1. ガスケット

三次蓋及びリリーフバルブカバープレートには、(イ)-第 C. 12 図及び(イ)-第 C. 13 図に示すように EPDM 製の O リングが同心円状に設けられている。ガスケットの寸法は(イ)-第 C. 2 表に示すとおりである。

ガスケットは輸送容器の製作中に気密漏えい試験を行ってその健全性が確認される。

EPDM 製の O リングは、その耐熱性 (B. 4. 6 及び B. 5. 6) 及び耐寒性 (A. 4. 2) により、一般及び特別の試験条件並びに最低使用温度でも蓋の密封性を保つことができる。

2. 溶接部（胴と底板を溶接する場合）

密封境界に係る溶接部は、胴と底板である。胴と底板は、金属キャスク構造規格等に準拠して実施した溶接施工法確認試験に合格した施工法に従って溶接施工される。

溶接部は製作中に放射線透過試験又は浸透探傷試験等を行ってその健全性が確認される。

C.2.4 蓋

三次蓋には、一般及び特別の試験条件の温度、圧力に耐える強度を備え、かつ、密封性を保つことのできるOリングを設けている。三次蓋の密封性を保つため、蓋ボルトを適切なトルクで締付ける。

C.3 一般の試験条件

一般の試験条件において密封装置の構造強度が維持され機能が損なわれないことはA.5により確認している。また、B.4.6に示すように一般の試験条件における三次蓋と胴で構成される密封容器の圧力（以下「三次蓋－胴内圧力」という。）は、0.0822 MPaであり、設計評価期間中のヘリウムの内部への漏えいを考慮しても0.097 MPa未満である。したがって、一般の試験条件において密封装置の加圧を考慮しても三次蓋－胴内圧力は負圧である。また、一般の試験条件において密封装置は健全であり漏えいはない。このように漏えいはないが、仮に密封境界の内部の圧力が大気圧の上限値0.105 MPa、外気圧が大気圧の下限値0.097 MPaであると仮定し、一般の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを確認する。

C.3.1 放射性物質の漏えい

1. 核分裂生成ガス

一般の試験条件において燃料棒の破損がないことはA.5により確認されているが、ここでは全収納物の0.1%の燃料棒の密封性が失われたとし、燃料が有する放射性物質が(ρ)-第C.1表に示す割合及び量で三次蓋－胴内雰囲気中に放出されると仮定する。なお、密封解析の対象とする燃料は、(イ)-第D.4表に示す放射能強度とする。

(ρ)-第C.1表 放射性物質の放出率

| 主要核種 | 収納放射能量 (TBq) | 破損率 (%) | 放出率 (%) | A ₂ 値 (TBq) | 放出放射能量 (A ₂ 値比) | 放射性物質濃度 ^(注1) (A ₂ 値比/ref cm ³) |
|------------------|-----------------|------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| ³ H | □ | 0.1 | 10 ¹⁾ | 40 | □ | 8.53×10 ⁻¹¹ |
| ⁸⁵ Kr | | | | 10 | | 5.03×10 ⁻⁹ |
| 合計 | | — | — | — | | 5.11×10 ⁻⁹ |

(注1) 三次蓋－胴内ガス体積は□ref cm³である。

2. 一般の試験条件におけるガス漏えい率

一般の試験条件におけるガス漏えい率は、漏えい試験における許容漏えい率 L_{Rt} に基づいて求める。

(1) 漏えい試験における許容漏えい率

密封解析の設計基準として設定した許容漏えい率 L_{Rt} は、輸送容器の三次蓋の被検査部の漏えい率として (p)-第 C.2 表に示す値とする。なお、表中の各項目の添え字の 0 は、漏えい試験条件を示す。

(p)-第 C.2 表 許容漏えい率及び漏えい試験条件

| 項目 | | 密封境界 (三次蓋及びリリーフバルブカバープレート) |
|--|-----------------------------|-------------------------------|
| L_{Rt} : 許容漏えい率 (ref cm^3/s) | | 2×10^{-3} |
| 圧力条件 | $P_{u,0}$: 上流側圧力 (MPa·abs) | 0.760 |
| | $P_{d,0}$: 下流側圧力 (MPa·abs) | 0.101 (大気圧) |
| T_0 : 温度 (K) | | 298.15 |
| $L_{u,0}$: 漏えい試験時のガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,0}$, T_0) | | 2.66×10^{-4} |

(2) 一般の試験条件におけるガス漏えい率

密封装置の漏えい孔径は、許容漏えい率に基づいて、以下の漏えい計算式により求める。なお、(1)～(6)式中の添え字の i は試験条件を表し、 $i=0$: 漏えい試験条件、 $i=1$: 一般の試験条件を表す。

$$L_{u,i} = (F_{c,i} + F_{m,i}) (P_{u,i} - P_{d,i}) \left(\frac{P_{a,i}}{P_{u,i}} \right)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$L_{u,i}$: 圧力 $P_{u,i}$ における漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,i}$, T_i)

$F_{c,i}$: 連続流の流動伝導係数 ($\text{cm}^3/(\text{MPa} \cdot \text{s})$)

$$F_{c,i} = \frac{\pi}{128} \times \frac{D_i^4}{a_i \mu_i} \dots \dots \dots (2)$$

$F_{m,i}$: 自由分子流の流動伝導係数 ($\text{cm}^3/(\text{MPa} \cdot \text{s})$)

$$F_{m,i} = \frac{\sqrt{2 \pi R_0}}{6} \times \frac{D_i^3 \sqrt{T_i}}{a_i P_{a,i}} \dots \dots \dots (3)$$

$P_{u,i}$: 上流側の圧力 (MPa)

$P_{d,i}$: 下流側の圧力 (MPa)

$$P_{a,i} = \frac{1}{2}(P_{u,i} + P_{d,i}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$P_{a,i}$: 流れの平均圧力 (MPa)

ただし、

D_i : 漏えい孔径 (cm)

a_i : 漏えい孔長 (cm)

μ_i : 粘性係数 (MPa · s)

R_0 : 気体定数 (8.3144598×10^7 erg/(mol · K))⁴⁾

T_i : 流体の温度 (K)

M : 流体の分子量

また、漏えい試験条件において、 $L_{u,i}$ は次式で与えられる。

$$L_{u,i} = L_{RT} \left(\frac{P_s T_i}{P_{u,i} T_s} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、

L_{RT} : 許容漏えい率(2箇所) (ref cm³/s)

P_s : 基準圧力 (0.101 MPa)

T_s : 基準温度 (298.15 K)

一般の試験条件におけるガス漏えい率は、漏えい孔が漏えい試験時の漏えい孔径を維持するとして、上記の漏えい計算式により求める。

また、次式により上記のガス漏えい率 ($L_{u,i}$) を 25 °C、0.101 MPa (1 atm) の標準状態における漏えい率 $L_{x,i}$ に換算する。

$$L_{x,i} = L_{u,i} \left(\frac{P_{u,i} T_s}{P_s T_i} \right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

一般の試験条件におけるガス漏えい率を(□)-第C.3表に示す。

(ロ)-第 C. 3 表 一般の試験条件におけるガス漏えい率

| 項目 ^(注1) | 部位 | 密封境界 | |
|--|----|--|--|
| | | 三次蓋 | リリースバルブ カバープレート |
| $P_{u,1}$: 上流側圧力 (MPa) | | 0.105 | |
| $P_{d,1}$: 下流側圧力 (MPa) | | 0.097 | |
| T_1 : 流体の温度 (K) | | 383.15 ^(注2) | |
| a_1 : 漏えい孔長 (cm) | | <input type="text"/> ^(注3) | <input type="text"/> ^(注3) |
| D_1 : 漏えい孔径 (cm) | | <input type="text"/> | |
| $L_{u,1}$: 一般の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,1}$, T_1) | | 5.95×10^{-6} | 6.50×10^{-6} |
| $L_{x,1}$: 一般の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at 0.101 MPa, 25 °C) | | 4.82×10^{-6} ($1.73 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{h}$) | 5.26×10^{-6} ($1.89 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{h}$) |

(注1)各項目の添え字の1は、一般の試験条件 (i=1) を示す。

(注2)三次蓋ガスケット部温度

(注3)Oリングの断面直径を採用

3. 一般の試験条件における放射性物質の漏えい率

一般の試験条件における放射性物質の漏えい率は、(ロ)-第 C. 1 表に示す密封装置内にガス状で存在する核種の放射性物質濃度と前項で求めた一般の試験条件におけるガス漏えい率 ($L_{x,1}$) を乗じて求められる。

なお、ここでは保守的に漏えい率の大きいリリースバルブカバープレートにおけるガス漏えい率を用いて評価する。

一般の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めたガス中の放射性物質の漏えい率、基準値 A_2 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$ 及び漏えい率と基準値との比率を(ロ)-第 C. 4 表に示す。密封装置からの放射性物質の1時間当りの漏えい量と各核種の基準値 A_2 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$ との比率の合計は1よりも小さい。

(ロ)-第 C. 4 表 一般の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

| 核種 | 放射性物質漏えい率 (Bq/h) | 基準値 : A_2 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$ (Bq/h) | 比率 |
|------------------|---------------------|---|-----------------------|
| ^3H | 6.46×10^1 | 4×10^7 | 1.62×10^{-6} |
| ^{85}Kr | 9.52×10^2 | 1×10^7 | 9.52×10^{-5} |
| | | 合計 | 9.68×10^{-5} |

C.3.2 密封装置の加圧

密封装置の加圧は、密封装置内のガスの温度上昇及び設計評価期間中の一次蓋と二次蓋間に充填されているヘリウムのキャスク本体内部への漏えいにより生じる。さらに、全収納物の 0.1 %の燃料棒の密封機能が失われ核分裂生成ガスがキャスク本体内部に放出されたと仮定しても、三次蓋と胴で構成される密封装置内の圧力は負圧に維持される。

C.3.3 冷却材汚染

輸送容器は、冷却水を用いない乾式タイプであり、冷却材は使用しない。

C.3.4 冷却材損失

輸送容器は、冷却水を用いない乾式タイプであり、冷却材は使用しない。したがって、冷却材の損失はない。また、密封装置にはベント装置はない。

C.4 特別の試験条件

特別の試験条件において密封装置の構造強度が維持され機能が損なわれないことはA.6により確認している。また、B.5.6に示すように特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力は、0.330 MPaである。

C.4.1 核分裂生成ガス

特別の試験条件において、安全側に全燃料棒の密封性が失われたと仮定し、燃料が有する放射性物質が(□)-第C.5表に示す割合及び量で三次蓋－胴内雰囲気中に放出されると仮定する。

(□)-第C.5表 放射性物質の放出率

| 主要核種 | 収納放射能量 (TBq) | 放出率 (%) | A ₂ 値 ^(注1) (TBq) | 放出放射能量 (A ₂ 値比) | 放射性物質濃度 ^(注2) (A ₂ 値比/ref cm ³) |
|------------------|--------------|------------------|--|----------------------------|--|
| ³ H | □ | 10 ¹⁾ | 40 | □ | 2.96 × 10 ⁻⁸ |
| ⁸⁵ Kr | | | 100 | | 1.75 × 10 ⁻⁷ |
| 合計 | | — | — | | 2.04 × 10 ⁻⁷ |

(注1) ⁸⁵Kr については A₂ 値の 10 倍である。

(注2) 三次蓋－胴内ガス体積は □ ref cm³ である。

C.4.2 放射性物質の漏えい

1. 特別の試験条件におけるガス漏えい率

特別の試験条件におけるガス漏えい率は、(1)～(6)式に特別の試験条件下の圧力、温度条件、ガス物性値及び漏えい孔寸法を代入して求められる。

特別の試験条件におけるガス漏えい率を(□)-第C.6表に示す。

(ロ)-第 C. 6 表 特別の試験条件におけるガス漏えい率

| 項目 (注1) | 部位 | 密封境界 | |
|--|----|--|--|
| | | 三次蓋 | リリースバルブ カバープレート |
| $P_{u,2}$: 上流側圧力 (MPa) | | 0.330 | |
| $P_{d,2}$: 下流側圧力 (MPa) | | 0.097 | |
| T_2 : 流体の温度 (K) | | 468.15 (注2) | |
| a_2 : 漏えい孔長 (cm) | | <input type="text"/> (注3) | <input type="text"/> (注3) |
| D_2 : 漏えい孔径 (cm) | | <input type="text"/> | |
| $L_{u,2}$: 特別の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,2}$, T_2) | | 8.96×10^{-5} | 9.50×10^{-5} |
| $L_{x,2}$: 特別の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at 0.101 MPa, 25 °C) | | 1.87×10^{-4} ($1.13 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{week}$) | 1.98×10^{-4} ($1.20 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{week}$) |

(注1)各項目の添え字の2は、特別の試験条件 (i=2) を示す。

(注2)三次蓋ガスケット部温度

(注3)Oリングの断面直径を採用

2. 特別の試験条件における放射性物質の漏えい率

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率は、(ロ)-第 C. 5 表に示す密封装置内にガス状態で存在する核種の放射性物質濃度と前項で求めた特別の試験条件におけるガス漏えい率 ($L_{x,2}$) を乗じて求められる。

なお、ここでは保守的に漏えい率の大きいリリースバルブカバープレートにおけるガス漏えい率を用いて評価する。

特別の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めたガス中の放射性物質の漏えい率、基準値 A_2 値/week 及び漏えい率と基準値との比率を(ロ)-第 C. 7 表に示す。密封装置からの放射性物質の1週間当りの漏えい量と各核種の基準値 A_2 値/week との比率の合計は1よりも小さい。

(ロ)-第 C. 7 表 特別の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

| 核種 | 放射性物質漏えい率 (Bq/week) | 基準値 : A_2 値/week (Bq/week) | 比率 |
|------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| ^3H | 1.42×10^8 | 4×10^{13} | 3.55×10^{-6} |
| ^{85}Kr | 2.09×10^9 | 1×10^{14} | 2.09×10^{-5} |
| | | 合計 | 2.45×10^{-5} |

C.5 結果の要約及びその評価

密封解析の評価結果は以下に示すとおりであり、輸送容器の密封性能は規則及び告示に定められる BM 型輸送物に係る技術上の基準に適合する。

1. 密封装置

輸送容器の主な密封装置は、胴、三次蓋及びリリーフバルブカバープレートで構成されている。この密封装置は、一般及び特別の試験条件に対して十分な強度を有し、また、ガスケットの密封機能が損なわれることはない。

2. 一般の試験条件

(1) 放射性物質の漏えい

輸送物は一般の試験条件では負圧を維持するため、放射性物質の環境への漏えいはないが、三次蓋－胴内圧力が大気圧上限値まで上昇し、その後大気圧下限値の環境下に置かれたとしても、一般の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は最大 9.68×10^{-5} であり、放射性物質の漏えい率は基準値 A_2 値 $\times 10^{-6}/h$ を満足する。

(2) 密封装置の加圧

密封装置の加圧は、主に密封装置の内部ガスの温度上昇による。A.5 に示したようにこの加圧により密封機能が損なわれるような変形は生じない。

3. 特別の試験条件

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は最大 2.45×10^{-5} であり、放射性物質の漏えい率は基準値 A_2 値/week を満足する。

C.6 付属書類

C.6.1 参考文献

- 1) (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」, (2014).
- 2) American National Standards Institute, Inc., “American National Standard for Radioactive Materials - Leakage Tests on Packages for Shipment”, ANSI N14.5-2014, (2014).
- 3) International Organization for Standardization, “Safe transport of radioactive materials - Leakage testing on packages”, ISO 12807, (1996).
- 4) 自然科学研究機構 国立天文台, 「理科年表(平成28年度版)」, (2015).

(四)章 D 遮 蔽 解 析

D. 遮蔽解析

D.1 概要

本輸送容器の主要なガンマ線遮蔽材は、(イ)-第C.5図及び(イ)-第C.6図に示すとおり、側部方向には胴及び外筒の炭素鋼であり、軸方向には胴（底部）及び蓋の炭素鋼等である。主要な中性子遮蔽材は、側部方向の胴と外筒間のレジンであり、軸方向の底部及び蓋部のレジンである。また、側部方向の胴及び外筒の炭素鋼、軸方向の胴（底部）及び蓋の炭素鋼等もその役目をする。

線源としては核分裂生成物、アクチノイドによる線源及び構造材の放射化による線源を考えた。線源強度は、ORIGEN2.2UPJ コード¹⁾ 及び放射化計算式により連続照射を仮定して求めた。また、ORIGEN2.2UPJ コードによる線源強度計算で用いるライブラリは、ORIGEN2.2UPJ コード内蔵の PWRU50 及び PWRU のデータを使用した。

一般の試験条件下及び特別の試験条件下においては、想定される輸送容器及び収納物の状態を考慮して線量当量率を評価した。

線量当量率の計算には、DOT3.5 コード²⁾ を用いた。また、線量当量率評価で用いる断面積ライブラリは、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ MATXSLIB-J33（以下、「MATXSLIB-J33」という。）のデータ³⁾ を使用した。

これらの計算から得られた線量当量率は、規則及び告示で定められた基準を満足する。

D.2 線源仕様

線源強度の計算に用いる燃焼度、照射日数、初期濃縮度及び冷却日数を(ロ)-第D.1表に示す。

線源強度の計算は(ロ)-第D.1表に示した平均比出力で連続照射したものとして行った。

なお、バーナブルポイズン集合体は中央部12体に挿入されているものとした。

(ロ)-第D.2表に燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度を示す。(ロ)-第D.2表より、燃料有効部ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い17×17燃料48,000MWd/t型（A型）を収納した場合を対象として遮蔽解析を実施した。

(ロ)-第D.1表 収納物の線源計算条件

| 燃料集合体の 種類と型式 | | 中央部 | | | | 外周部 | | | |
|---------------------------------|------------------|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|
| | | 17×17 燃料 | | | | | | | |
| | | 48,000MWd/t 型 | | 39,000MWd/t 型 | | 48,000MWd/t 型 | | 39,000MWd/t 型 | |
| | | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 | A型 | B型 |
| 条件 | | | | | | | | | |
| 燃焼度 (MWd/t) | | | | | | | | | |
| 照射日数 (日) | 使用済燃料集合体 | | | | | | | | |
| | バーナブルポイズン 集合体 | | | | | | | | |
| 平均比出力 ^(注1) (MW/t) | | 38.4 | | | | | | | |
| 初期濃縮度 ^(注2) (wt%) | | | | | | | | | |
| 冷却日数 (日) | 使用済燃料集合体 | | | | | | | | |
| | バーナブルポイズン 集合体 | | | | | | | | |
| ウラン重量 (kg/体) | | | | | | | | | |

(注1) 比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注2) 初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(ロ)-第D.2表 燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度

(輸送物1基当たり)

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

(注1) 中央部12体の燃焼度を MWd/t、外周部12体の燃焼度を MWd/t とした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注2) 中央部12体及び外周部12体の燃焼度を全て MWd/t とした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注3) バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注4) 記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度とした。

D.2.1 ガンマ線源

1. 燃料有効部のガンマ線源

燃料有効部のガンマ線源は、核分裂生成物及びアクチノイドによるものである。ガンマ線源強度の計算は、ORIGEN2.2UPJ コードを用いて行った。計算においては、付属書類 D.6.1 に示す軸方向の燃焼度分布を考慮した。

燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度を (p)-第 D.3 表 に示す。

(ロ)第 D.3 表 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度

(輸送物 1 基当たり)

| エネルギー 群数 | 平均エネルギー (MeV) | 燃料有効部 (photons/s) | | |
|-------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | 合計 |
| 1 | 0.01 | 1.433×10^{16} | 1.337×10^{16} | 2.770×10^{16} |
| 2 | 0.025 | 2.888×10^{15} | 2.710×10^{15} | 5.599×10^{15} |
| 3 | 0.0375 | 3.729×10^{15} | 3.445×10^{15} | 7.174×10^{15} |
| 4 | 0.0575 | 2.903×10^{15} | 2.725×10^{15} | 5.628×10^{15} |
| 5 | 0.085 | 1.636×10^{15} | 1.528×10^{15} | 3.165×10^{15} |
| 6 | 0.125 | 1.581×10^{15} | 1.445×10^{15} | 3.027×10^{15} |
| 7 | 0.225 | 1.363×10^{15} | 1.275×10^{15} | 2.637×10^{15} |
| 8 | 0.375 | 5.802×10^{14} | 5.452×10^{14} | 1.125×10^{15} |
| 9 | 0.575 | 2.481×10^{16} | 2.278×10^{16} | 4.759×10^{16} |
| 10 | 0.85 | 1.142×10^{15} | 1.003×10^{15} | 2.145×10^{15} |
| 11 | 1.25 | 7.743×10^{14} | 6.784×10^{14} | 1.453×10^{15} |
| 12 | 1.75 | 2.373×10^{13} | 2.089×10^{13} | 4.463×10^{13} |
| 13 | 2.25 | 1.395×10^{10} | 1.289×10^{10} | 2.684×10^{10} |
| 14 | 2.75 | 6.962×10^9 | 5.818×10^9 | 1.278×10^{10} |
| 15 | 3.5 | 6.777×10^8 | 5.046×10^8 | 1.182×10^9 |
| 16 | 5.0 | 2.157×10^8 | 1.477×10^8 | 3.634×10^8 |
| 17 | 7.0 | 2.487×10^7 | 1.703×10^7 | 4.190×10^7 |
| 18 | 9.5 | 2.857×10^6 | 1.957×10^6 | 4.814×10^6 |
| 合計 | | 5.576×10^{16} | 5.152×10^{16} | 1.073×10^{17} |

2. 放射化線源

燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源のうち、容器外部の線量当量率に寄与するものは、構造材中に含まれる ^{59}Co の (n, γ) 反応により生じる ^{60}Co が大部分である。

^{60}Co の放射化線源強度は次式を用いて求めた。

$$A = N_0 \sigma \phi \{1 - \exp(-\lambda T_1)\} \times \exp(-\lambda T_2)$$

ここで、

A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 : ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ : 2200 m/s の中性子による ^{59}Co の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

$$(37.2 \text{ barn} = 37.2 \times 10^{-24} \text{ cm}^2) \quad 4)$$

ϕ : 炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) (注)

λ : ^{60}Co の崩壊定数 ($3.6001 \times 10^{-4}/\text{日}$)

T_1 : 照射日数 (日)

T_2 : 冷却日数 (日)

線源強度の計算にあたって、燃料集合体構造材のガンマ線源強度は、上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部プレナム部及び下部ノズル部の 5 領域に分けて求める。

^{60}Co の放射化線源強度計算結果を (ロ)-第 D.4 表 に示す。

なお、 ^{60}Co は 1 崩壊で 1.17MeV と 1.33MeV のガンマ線を 1 個ずつ放出するものとした。

(注) 炉設計コードによる炉心計算で求められた軸方向炉内中性子束分布の典型例により放射化評価部位での熱中性子束を求めた。

(ロ)-第 D. 4 表 燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度

(輸送物 1 基当たり)

| モデル化領域 | 燃料集合体構造材の線源強度 (^{60}Co TBq) | | |
|---------|--|---------------------|--|
| | 中央部 (注) | 外周部 | 合計 |
| 上部ノズル部 | 9.676×10^0 (5.339×10^0) | 4.046×10^0 | 1.372×10^1 (5.339×10^0) |
| 上部プレナム部 | 4.126×10^1 (6.583×10^0) | 3.235×10^1 | 7.361×10^1 (6.583×10^0) |
| 燃料有効部 | 3.356×10^2 (1.939×10^2) | 1.322×10^2 | 4.678×10^2 (1.939×10^2) |
| 下部プレナム部 | 6.278×10^0 | 5.857×10^0 | 1.214×10^1 |
| 下部ノズル部 | 1.288×10^1 | 1.201×10^1 | 2.489×10^1 |

(注)燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度の合計値 (() 内はバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度)

D. 2. 2 中性子源

燃料中には中性子源となるアクチノイドが生成される。これらの核種から中性子が発生する反応は、自発核分裂及び (α, n) 反応である。一次中性子源強度の計算は、ORIGEN2. 2UPJ コードを用いて行った。計算においては、付属書類 D. 6. 1 に示す軸方向の燃焼度分布を考慮した。

体系の増倍効果を考慮した全中性子源強度 (N_s) は次式で求めた。

$$N_s = N_o / (1 - k_{eff})$$

ここで、

N_o : 輸送物 1 基当りの一次中性子源強度

k_{eff} : 使用済燃料を収納した場合の輸送物の実効増倍率

ここでは乾燥状態において使用済燃料を収納した場合の輸送物の k_{eff} を考慮した。

解析に用いた中性子源強度を (p)-第 D. 5 表に示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源及び増倍による ^{235}U 及び ^{239}Pu の核分裂線源であり、(α, n) 反応による線源はわずかである。

そこで、計算に用いる線源のエネルギースペクトルは、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとした。計算に使用する ^{239}Pu の核分裂スペクトルを (p)-第 D. 6 表に示す。

(p)-第 D. 5 表 中性子源強度

(輸送物 1 基当たり)

| | | 燃料有効部 | | |
|----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| | | 中央部 | 外周部 | 合計 |
| 一次中性子源強度 N_o (n/s) | (α, n) 反応 | 9.369×10^7 | 7.472×10^7 | 1.684×10^8 |
| | 自発核分裂 | 4.909×10^9 | 3.360×10^9 | 8.269×10^9 |
| | 合計 | 5.003×10^9 | 3.435×10^9 | 8.437×10^9 |
| 輸送物の実効増倍率 k_{eff} (注) | | 0.30 | | |
| 全中性子源強度 N_s (n/s) | | 7.147×10^9 | 4.907×10^9 | 1.205×10^{10} |

(注) ORIGEN2. 2UPJ コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法 (KENO-VI コード) により評価して得られた値である。

(ロ)-第D.6表 中性子源スペクトル (1/5)

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル (注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 1 | 1.964×10^7 | 0.0 |
| 2 | 1.733×10^7 | 7.107×10^{-6} |
| 3 | 1.691×10^7 | 7.117×10^{-6} |
| 4 | 1.649×10^7 | 2.368×10^{-5} |
| 5 | 1.568×10^7 | 3.835×10^{-5} |
| 6 | 1.492×10^7 | 2.686×10^{-5} |
| 7 | 1.455×10^7 | 3.351×10^{-5} |
| 8 | 1.419×10^7 | 4.165×10^{-5} |
| 9 | 1.384×10^7 | 5.111×10^{-5} |
| 10 | 1.350×10^7 | 1.392×10^{-4} |
| 11 | 1.284×10^7 | 1.018×10^{-4} |
| 12 | 1.252×10^7 | 1.017×10^{-4} |
| 13 | 1.221×10^7 | 2.917×10^{-4} |
| 14 | 1.162×10^7 | 4.082×10^{-4} |
| 15 | 1.105×10^7 | 5.613×10^{-4} |
| 16 | 1.051×10^7 | 7.571×10^{-4} |
| 17 | 1.000×10^7 | 1.002×10^{-3} |
| 18 | 9.512×10^6 | 1.303×10^{-3} |
| 19 | 9.048×10^6 | 1.668×10^{-3} |
| 20 | 8.607×10^6 | 2.101×10^{-3} |
| 21 | 8.187×10^6 | 2.608×10^{-3} |
| 22 | 7.788×10^6 | 3.191×10^{-3} |
| 23 | 7.408×10^6 | 3.853×10^{-3} |
| 24 | 7.047×10^6 | 4.592×10^{-3} |
| 25 | 6.703×10^6 | 1.708×10^{-3} |
| 26 | 6.592×10^6 | 3.698×10^{-3} |
| 27 | 6.376×10^6 | 6.293×10^{-3} |
| 28 | 6.065×10^6 | 7.243×10^{-3} |
| 29 | 5.770×10^6 | 8.251×10^{-3} |
| 30 | 5.488×10^6 | 9.302×10^{-3} |
| 31 | 5.221×10^6 | 1.039×10^{-2} |
| 32 | 4.966×10^6 | 1.151×10^{-2} |
| 33 | 4.724×10^6 | 1.263×10^{-2} |
| 34 | 4.493×10^6 | 2.859×10^{-2} |
| 35 | 4.066×10^6 | 3.286×10^{-2} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表 中性子源スペクトル (2/5)

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル (注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 36 | 3.679×10^6 | 3.674×10^{-2} |
| 37 | 3.329×10^6 | 1.965×10^{-2} |
| 38 | 3.166×10^6 | 2.042×10^{-2} |
| 39 | 3.012×10^6 | 2.108×10^{-2} |
| 40 | 2.865×10^6 | 2.165×10^{-2} |
| 41 | 2.725×10^6 | 2.214×10^{-2} |
| 42 | 2.592×10^6 | 2.252×10^{-2} |
| 43 | 2.466×10^6 | 1.517×10^{-2} |
| 44 | 2.385×10^6 | 3.833×10^{-3} |
| 45 | 2.365×10^6 | 3.812×10^{-3} |
| 46 | 2.346×10^6 | 7.657×10^{-3} |
| 47 | 2.307×10^6 | 1.535×10^{-2} |
| 48 | 2.231×10^6 | 2.310×10^{-2} |
| 49 | 2.123×10^6 | 2.312×10^{-2} |
| 50 | 2.019×10^6 | 2.305×10^{-2} |
| 51 | 1.921×10^6 | 2.290×10^{-2} |
| 52 | 1.827×10^6 | 2.267×10^{-2} |
| 53 | 1.738×10^6 | 2.236×10^{-2} |
| 54 | 1.653×10^6 | 2.200×10^{-2} |
| 55 | 1.572×10^6 | 2.160×10^{-2} |
| 56 | 1.496×10^6 | 2.115×10^{-2} |
| 57 | 1.423×10^6 | 2.059×10^{-2} |
| 58 | 1.353×10^6 | 2.010×10^{-2} |
| 59 | 1.287×10^6 | 1.947×10^{-2} |
| 60 | 1.225×10^6 | 1.892×10^{-2} |
| 61 | 1.165×10^6 | 1.827×10^{-2} |
| 62 | 1.108×10^6 | 3.460×10^{-2} |
| 63 | 1.003×10^6 | 1.367×10^{-2} |
| 64 | 9.616×10^5 | 1.834×10^{-2} |
| 65 | 9.072×10^5 | 1.502×10^{-2} |
| 66 | 8.629×10^5 | 1.437×10^{-2} |
| 67 | 8.209×10^5 | 1.372×10^{-2} |
| 68 | 7.808×10^5 | 1.309×10^{-2} |
| 69 | 7.427×10^5 | 1.247×10^{-2} |
| 70 | 7.065×10^5 | 1.186×10^{-2} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表 中性子源スペクトル (3/5)

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル (注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 71 | 6.721×10^5 | 1.127×10^{-2} |
| 72 | 6.393×10^5 | 1.070×10^{-2} |
| 73 | 6.081×10^5 | 1.014×10^{-2} |
| 74 | 5.784×10^5 | 9.605×10^{-3} |
| 75 | 5.502×10^5 | 9.086×10^{-3} |
| 76 | 5.234×10^5 | 8.591×10^{-3} |
| 77 | 4.979×10^5 | 1.576×10^{-2} |
| 78 | 4.505×10^5 | 1.401×10^{-2} |
| 79 | 4.076×10^5 | 6.397×10^{-3} |
| 80 | 3.877×10^5 | 6.017×10^{-3} |
| 81 | 3.688×10^5 | 1.097×10^{-2} |
| 82 | 3.337×10^5 | 9.670×10^{-3} |
| 83 | 3.020×10^5 | 1.040×10^{-3} |
| 84 | 2.985×10^5 | 3.887×10^{-4} |
| 85 | 2.972×10^5 | 7.998×10^{-4} |
| 86 | 2.945×10^5 | 2.159×10^{-3} |
| 87 | 2.873×10^5 | 4.115×10^{-3} |
| 88 | 2.732×10^5 | 7.463×10^{-3} |
| 89 | 2.472×10^5 | 3.378×10^{-3} |
| 90 | 2.352×10^5 | 3.160×10^{-3} |
| 91 | 2.237×10^5 | 2.955×10^{-3} |
| 92 | 2.128×10^5 | 2.763×10^{-3} |
| 93 | 2.024×10^5 | 2.581×10^{-3} |
| 94 | 1.926×10^5 | 2.411×10^{-3} |
| 95 | 1.832×10^5 | 2.254×10^{-3} |
| 96 | 1.742×10^5 | 2.100×10^{-3} |
| 97 | 1.657×10^5 | 1.964×10^{-3} |
| 98 | 1.576×10^5 | 1.828×10^{-3} |
| 99 | 1.500×10^5 | 1.709×10^{-3} |
| 100 | 1.426×10^5 | 1.590×10^{-3} |
| 101 | 1.357×10^5 | 1.485×10^{-3} |
| 102 | 1.291×10^5 | 1.384×10^{-3} |
| 103 | 1.228×10^5 | 1.287×10^{-3} |
| 104 | 1.168×10^5 | 1.202×10^{-3} |
| 105 | 1.111×10^5 | 2.653×10^{-3} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表 中性子源スペクトル (4/5)

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル (注) |
|---------|---------------------|------------------------|
| 106 | 9.804×10^4 | 2.219×10^{-3} |
| 107 | 8.652×10^4 | 7.446×10^{-4} |
| 108 | 8.250×10^4 | 5.458×10^{-4} |
| 109 | 7.950×10^4 | 1.324×10^{-3} |
| 110 | 7.200×10^4 | 7.861×10^{-4} |
| 111 | 6.738×10^4 | 1.744×10^{-3} |
| 112 | 5.656×10^4 | 6.216×10^{-4} |
| 113 | 5.248×10^4 | 8.958×10^{-4} |
| 114 | 4.631×10^4 | 7.457×10^{-4} |
| 115 | 4.087×10^4 | 8.384×10^{-4} |
| 116 | 3.431×10^4 | 2.982×10^{-4} |
| 117 | 3.183×10^4 | 3.831×10^{-4} |
| 118 | 2.850×10^4 | 1.659×10^{-4} |
| 119 | 2.700×10^4 | 1.020×10^{-4} |
| 120 | 2.606×10^4 | 1.347×10^{-4} |
| 121 | 2.479×10^4 | 6.373×10^{-5} |
| 122 | 2.418×10^4 | 6.142×10^{-5} |
| 123 | 2.358×10^4 | 1.712×10^{-4} |
| 124 | 2.188×10^4 | 2.461×10^{-4} |
| 125 | 1.931×10^4 | 3.741×10^{-4} |
| 126 | 1.503×10^4 | 2.577×10^{-4} |
| 127 | 1.171×10^4 | 7.100×10^{-5} |
| 128 | 1.060×10^4 | 1.066×10^{-4} |
| 129 | 9.119×10^3 | 1.222×10^{-4} |
| 130 | 7.102×10^3 | 8.411×10^{-5} |
| 131 | 5.531×10^3 | 5.787×10^{-5} |
| 132 | 4.307×10^3 | 2.564×10^{-5} |
| 133 | 3.707×10^3 | 1.416×10^{-5} |
| 134 | 3.355×10^3 | 1.219×10^{-5} |
| 135 | 3.035×10^3 | 1.050×10^{-5} |
| 136 | 2.747×10^3 | 4.685×10^{-6} |
| 137 | 2.613×10^3 | 4.348×10^{-6} |
| 138 | 2.485×10^3 | 7.778×10^{-6} |
| 139 | 2.249×10^3 | 6.696×10^{-6} |
| 140 | 2.035×10^3 | 1.294×10^{-5} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表 中性子源スペクトル (5/5)

| エネルギー群数 | 上限エネルギー (eV) | スペクトル (注) |
|---------|------------------------|-------------------------|
| 141 | 1.585×10^3 | 8.896×10^{-6} |
| 142 | 1.234×10^3 | 6.116×10^{-6} |
| 143 | 9.611×10^2 | 4.204×10^{-6} |
| 144 | 7.485×10^2 | 2.890×10^{-6} |
| 145 | 5.830×10^2 | 1.986×10^{-6} |
| 146 | 4.540×10^2 | 1.365×10^{-6} |
| 147 | 3.536×10^2 | 9.385×10^{-7} |
| 148 | 2.754×10^2 | 6.450×10^{-7} |
| 149 | 2.145×10^2 | 4.433×10^{-7} |
| 150 | 1.670×10^2 | 3.047×10^{-7} |
| 151 | 1.301×10^2 | 2.094×10^{-7} |
| 152 | 1.013×10^2 | 1.439×10^{-7} |
| 153 | 7.889×10^1 | 9.893×10^{-8} |
| 154 | 6.144×10^1 | 6.799×10^{-8} |
| 155 | 4.785×10^1 | 4.673×10^{-8} |
| 156 | 3.727×10^1 | 3.201×10^{-8} |
| 157 | 2.902×10^1 | 2.218×10^{-8} |
| 158 | 2.260×10^1 | 1.517×10^{-8} |
| 159 | 1.760×10^1 | 1.043×10^{-8} |
| 160 | 1.371×10^1 | 7.168×10^{-9} |
| 161 | 1.068×10^1 | 4.925×10^{-9} |
| 162 | 8.315×10^0 | 3.385×10^{-9} |
| 163 | 6.476×10^0 | 2.327×10^{-9} |
| 164 | 5.044×10^0 | 1.599×10^{-9} |
| 165 | 3.928×10^0 | 1.099×10^{-9} |
| 166 | 3.059×10^0 | 7.657×10^{-10} |
| 167 | 2.382×10^0 | 5.087×10^{-10} |
| 168 | 1.855×10^0 | 3.568×10^{-10} |
| 169 | 1.445×10^0 | 2.452×10^{-10} |
| 170 | 1.125×10^0 | 1.686×10^{-10} |
| 171 | 8.764×10^{-1} | 1.158×10^{-10} |
| 172 | 6.826×10^{-1} | 7.961×10^{-11} |
| 173 | 5.316×10^{-1} | 5.472×10^{-11} |
| 174 | 4.140×10^{-1} | 1.060×10^{-10} |
| 175 | 1.000×10^{-1} | 1.427×10^{-11} |

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS-LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

遮蔽解析モデルは二次元 (R-Z) モデルとし、トラニオンのない方向の断面をモデル化した。

各試験条件下におけるモデル化は以下に示す条件を考慮した。

1. 通常輸送時及び一般の試験条件下

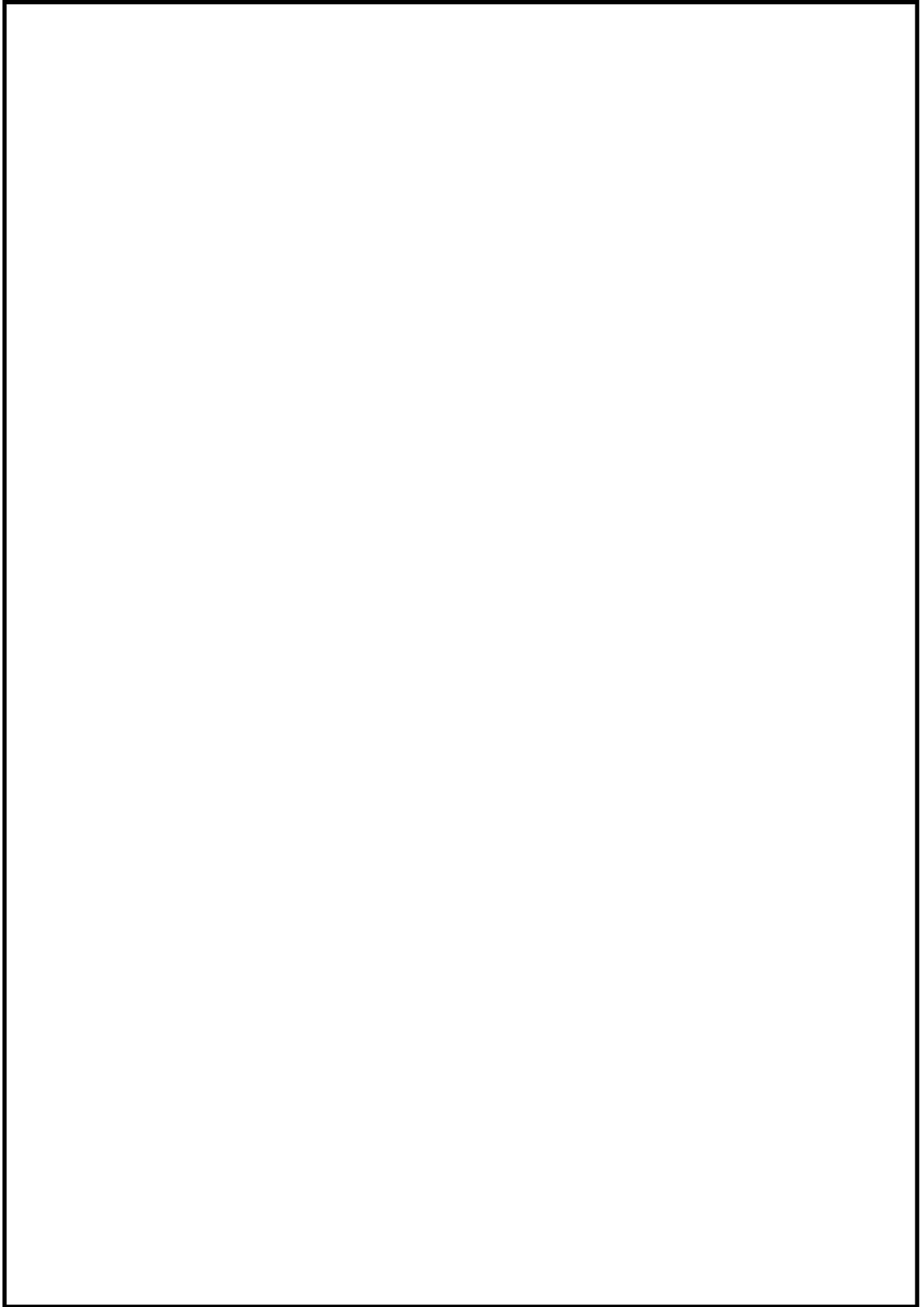
通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルは、一般の試験条件下において 0.3 m 落下における緩衝体の変形を考慮すること以外は同一とし、以下の条件とした。

解析モデルを (ロ)-第 D.1 図に示す。

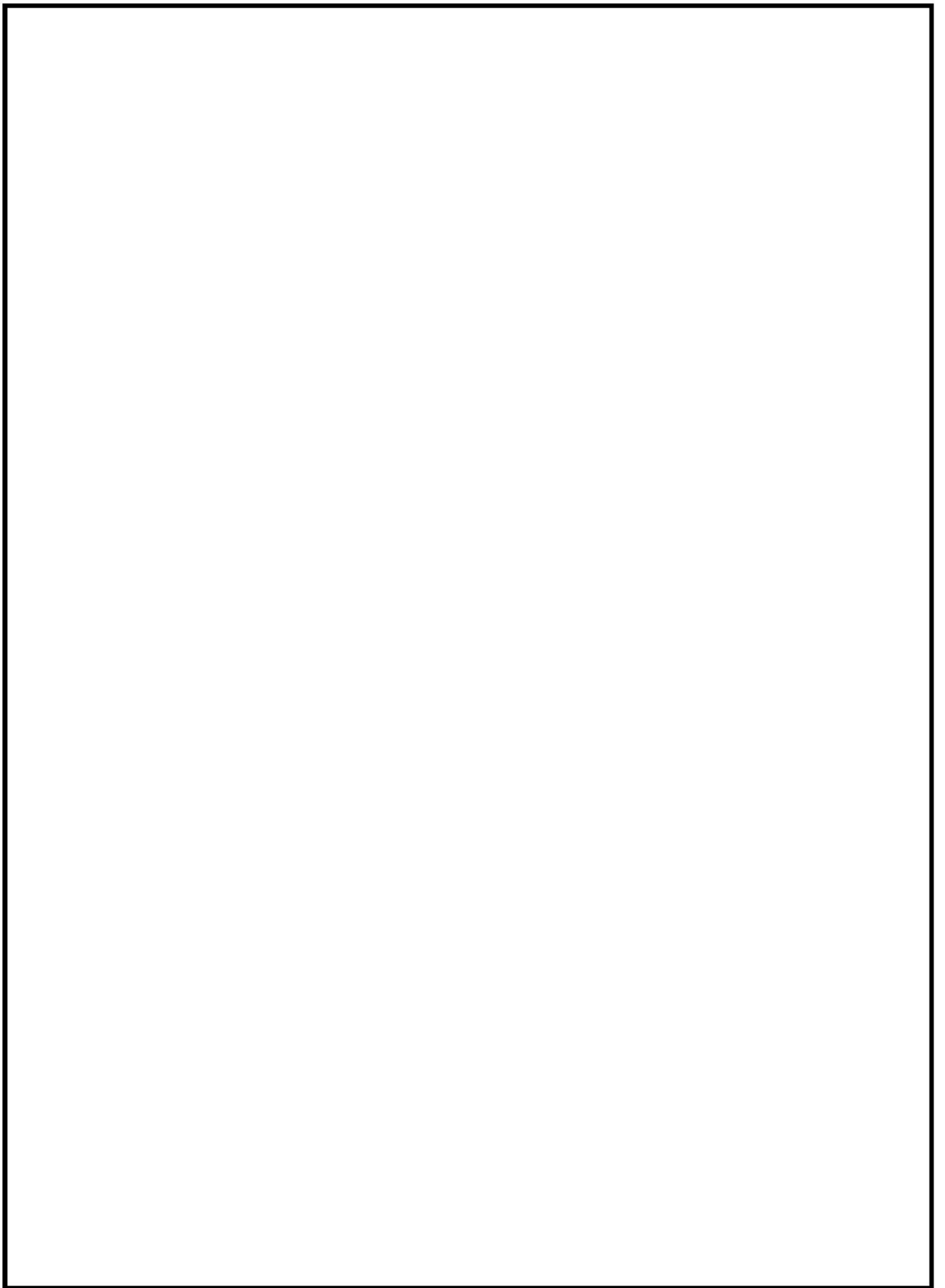
- ① 洞内での燃料集合体の軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとした。
- ② 緩衝体は、安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮した。
- ③ 各部寸法はノミナル値とし、寸法公差は密度係数として考慮した。
- ④ 蓋部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材については保守側の仮定として、中性子遮蔽材の 2.5 % の質量減損を考慮した。
- ⑤ 燃料はバスケットと均質化した。ただし、上部ノズル部の上側についてはバスケット上端より露出するため、バスケットと均質化しない。
- ⑥ 径方向のバスケットの外周部及び中性子遮蔽材の領域は均質化した。
- ⑦ バーナブルポイズン集合体の物性値は安全側に考慮しないモデルとした。

解析モデルでの均質化モデルの妥当性については、D.6.2 に示す。

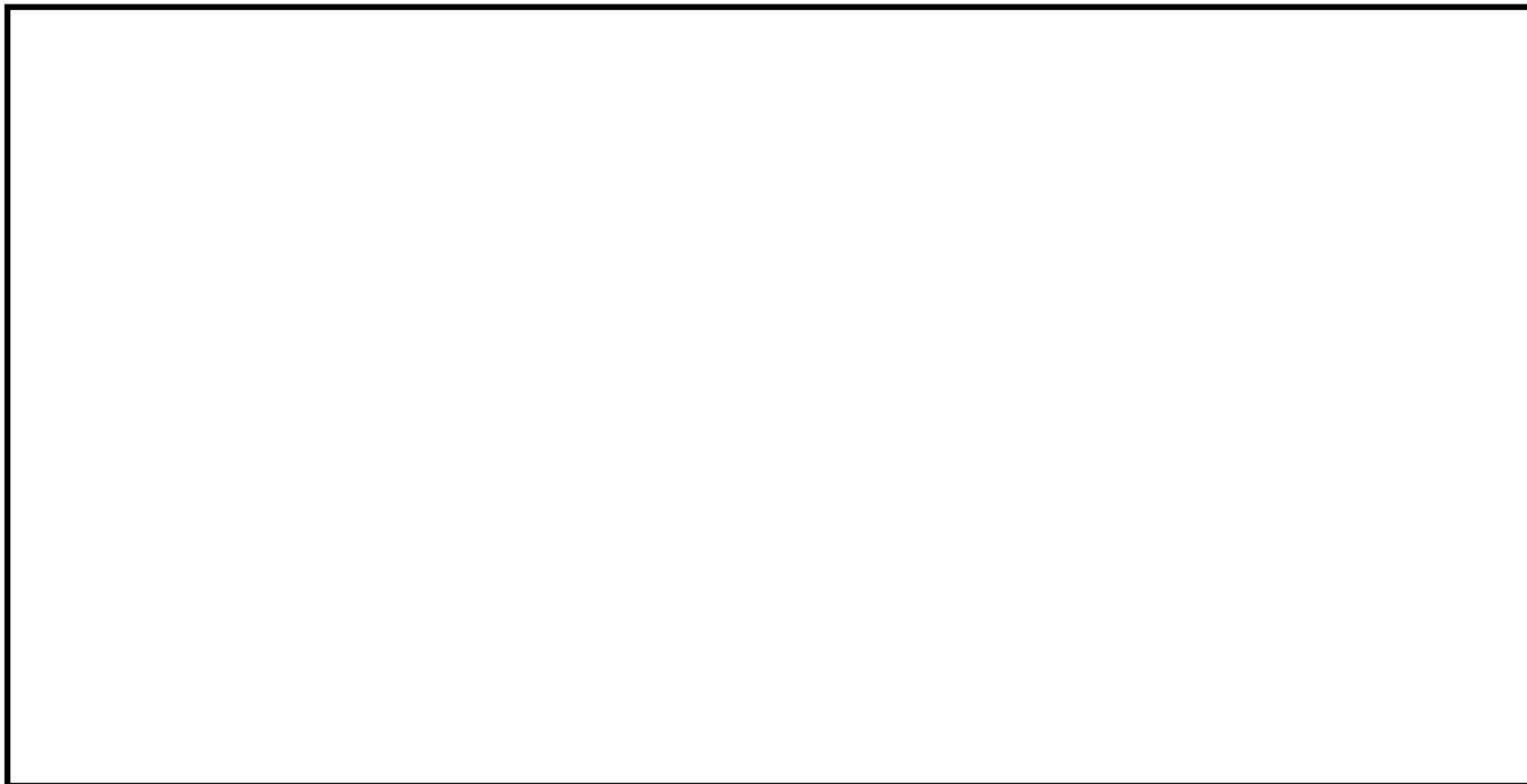
本輸送容器では、上部、下部トラニオンが燃料有効部近傍にあり、中性子ストリーミング箇所となっている。この箇所は上述のモデルに含まれないため、頭部及び底部モデルの当該部近傍の線束を用いて、トラニオン部を模擬したモデルとの線束接続計算により解析を行った。トラニオン部モデルを (ロ)-第 D.2 図に示す。



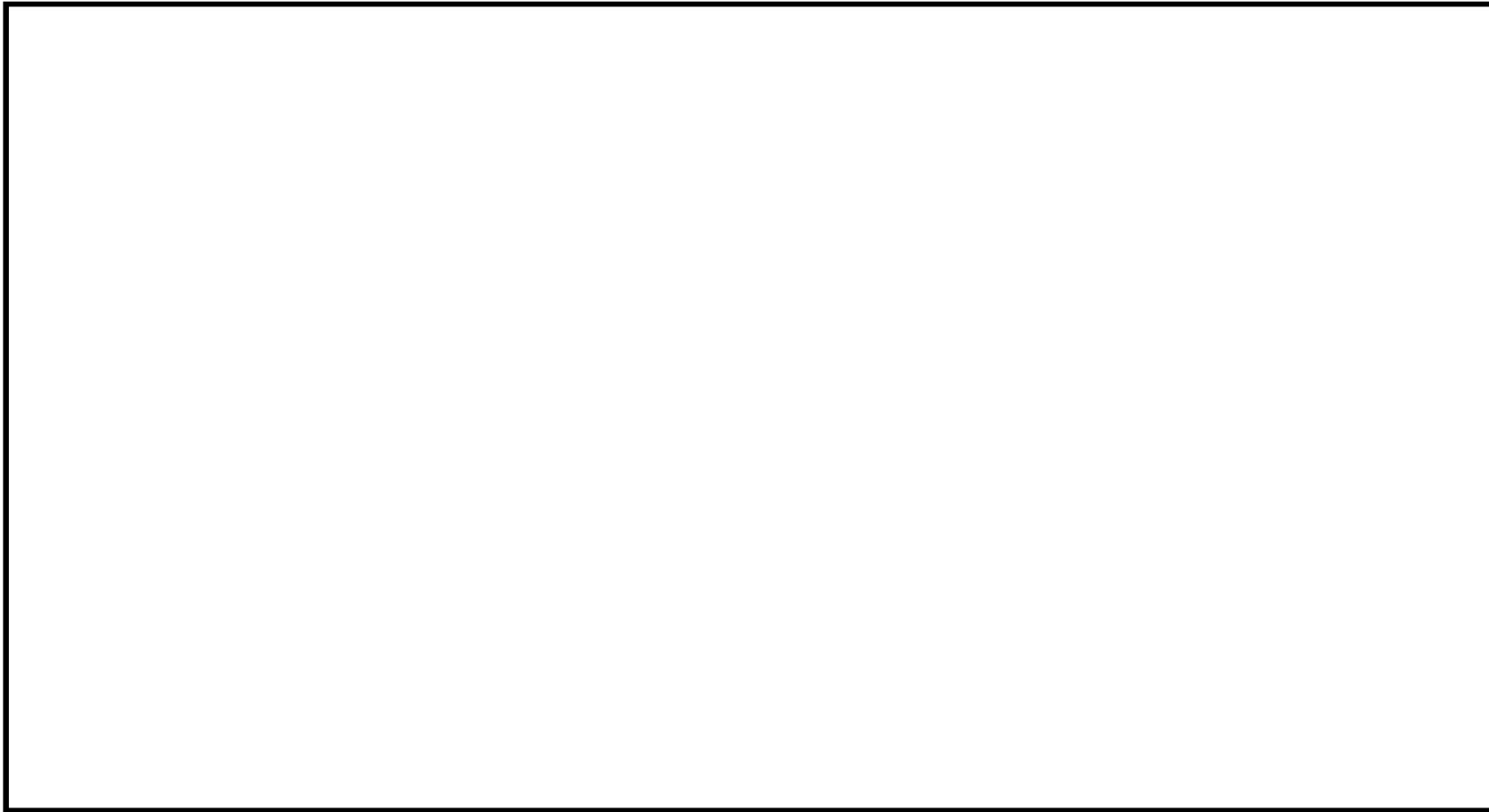
(ロ)-第 D. 1(a) 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (頭部)



(ロ)-第 D. 1(b) 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (底部)



(a)-第D.2(a)図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (上部トラニオン部)

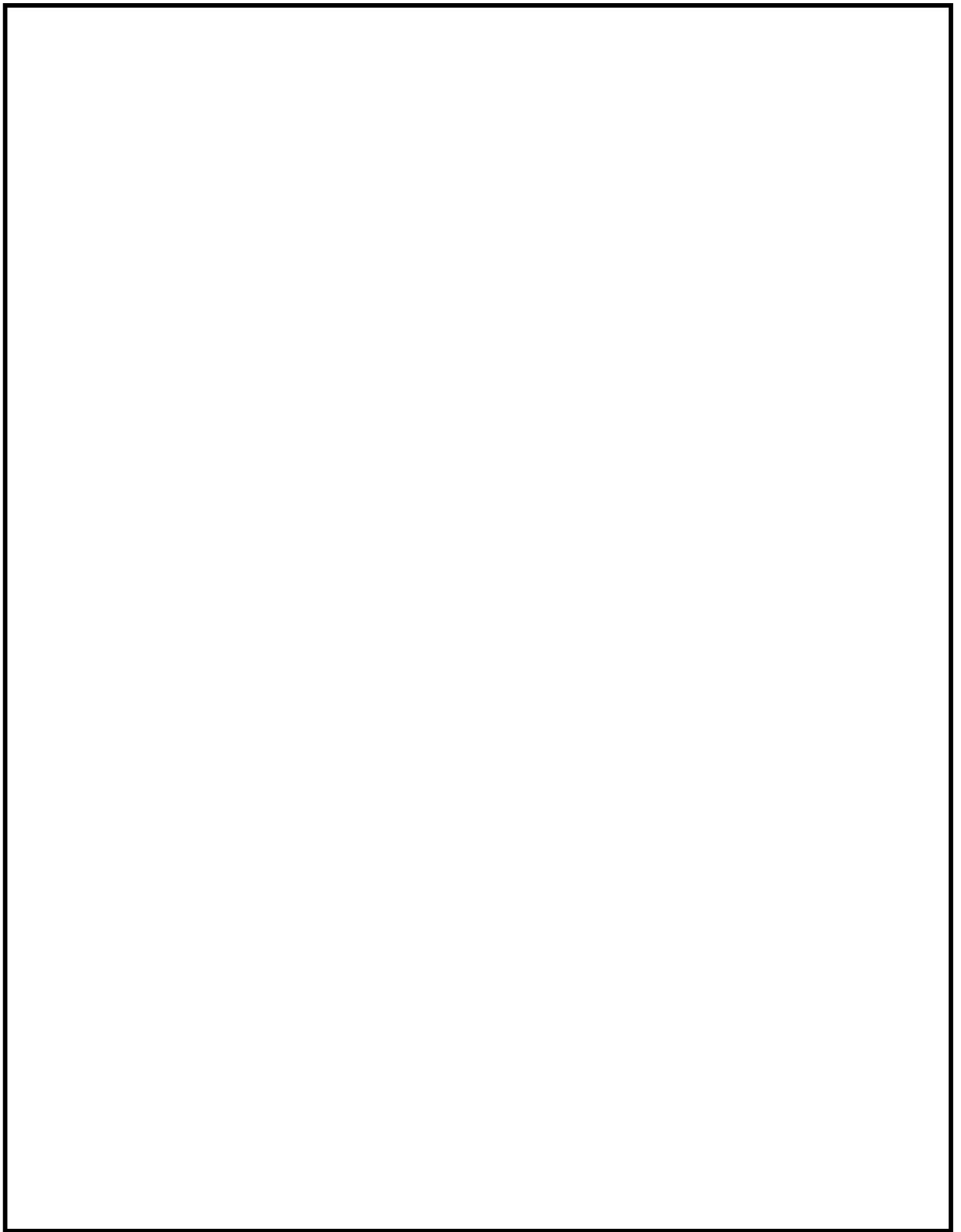


(㉓)-第D.2(b)図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (下部トラニオン部)

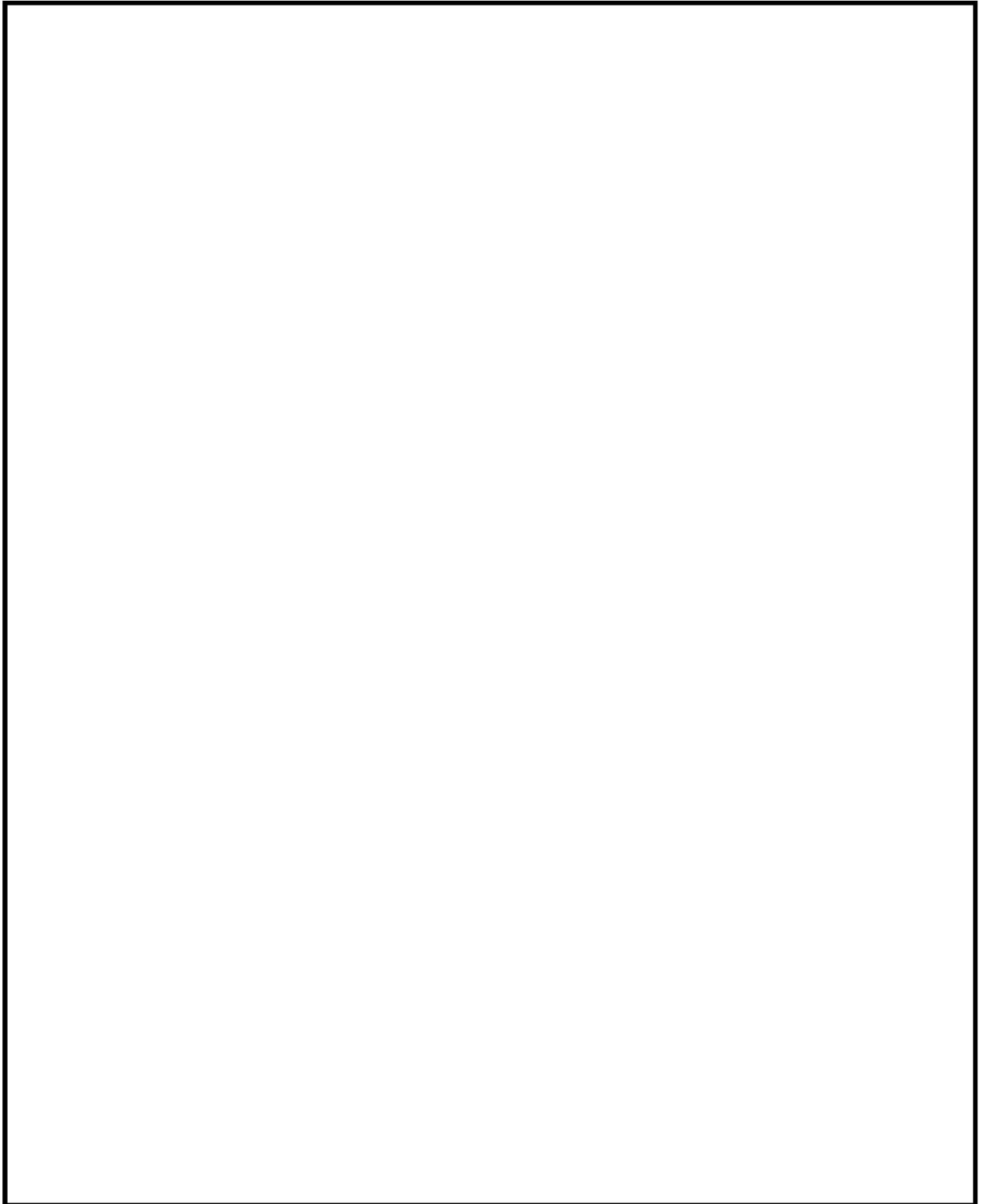
2. 特別の試験条件下

特別の試験条件下における解析モデルは一般の試験条件下の場合と次の点で異なる。
解析モデルを(ロ)-第D.3図に示す。

- ① 熱解析の結果では耐火試験により蓋部中性子遮蔽材、側部中性子遮蔽材、底部中性子遮蔽材及びトラニオン部中性子遮蔽材が著しく焼損することはないが、安全側にその密度が半分に減少するものとした。
- ② 1 m 貫通試験により外筒、側部中性子遮蔽材が部分的に変形することが考えられるので、安全側に貫通すると仮定して外筒、側部中性子遮蔽材に貫通孔を模擬した。
- ③ 落下試験により緩衝体は大幅に変形するので、無視するものとした。



(ロ)-第 D. 3(a)図 特別の試験条件下の解析モデル (頭部)



(ロ)-第 D. 3 (b) 図 特別の試験条件下の解析モデル (底部)

D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽解析に用いた均質化領域の構成物質体積比を(□)-第 D.7 表に示す。また、遮蔽解析に用いた各領域の原子個数密度を(□)-第 D.8 表に、各部位の材料密度と密度係数を(□)-第 D.9 表に示す。

(ロ)-第 D.7 表 解析に用いた均質化領域の構成物質体積比

| 領域 構成物質 | | 均質化領域 | | | | | | レジン +伝熱フィン |
|--------------|-------------------|----------------|----------------|-------------|-------|-------------|---|---------------|
| | | 燃料領域 | | | | | | |
| | | 上部ノズル部 (上側) | 上部ノズル部 (下側) | 上部 プレナム部 | 燃料有効部 | 下部 プレナム部 | | |
| 燃料 集合体 | UO ₂ | | | | | | — | |
| | Zr | | | | | | — | |
| | ステンレス鋼 | | | | | | — | |
| | インコネル | | | | | | — | |
| バスケット | アルミニウム合金 | | | | | | — | |
| | ほう素添加 アルミニウム合金 | | | | | | — | |
| 中性子遮蔽材 (レジン) | | — | — | — | — | — | | |
| 伝熱フィン (銅) | | — | — | — | — | — | | |
| ボ イ ド | | | | | | | — | |

(ロ)-第D.8表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (1/2)

(単位 : 10^{24} atoms/cm³)

| 領域 元素 | 均質化領域 | | | | | |
|------------------|----------------|----------------|---------|-------|---------|--------|
| | 燃料領域 | | | | | |
| | 上部ノズル部 (上側) | 上部ノズル部 (下側) | 上部プレナム部 | 燃料有効部 | 下部プレナム部 | 下部ノズル部 |
| H | | | | | | |
| ¹⁰ B | | | | | | |
| C | | | | | | |
| N | | | | | | |
| O | | | | | | |
| Al | | | | | | |
| Cr | | | | | | |
| Fe | | | | | | |
| Ni | | | | | | |
| Cu | | | | | | |
| Zr | | | | | | |
| ²³⁵ U | | | | | | |
| ²³⁸ U | | | | | | |

(ロ)-第 D. 8 表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (2/2)

(単位 : 10^{24} atoms/cm³)

| 領域 元素 | バスケット 外周部 | ステンレス鋼 | 析出硬化系 ステンレス鋼 | 炭素鋼 | 中性子遮蔽材 | | 空気 |
|-----------------|--------------|--------|-----------------|-----|---------------|-----|----|
| | | | | | レジン +伝熱フィン | レジン | |
| H | | | | | | | |
| ¹⁰ B | | | | | | | |
| C | | | | | | | |
| N | | | | | | | |
| O | | | | | | | |
| Al | | | | | | | |
| Cr | | | | | | | |
| Fe | | | | | | | |
| Ni | | | | | | | |
| Cu | | | | | | | |

(注) () 内は特別の試験条件下の値である。

(ロ)-第 D.9 表 各部位の材料密度と密度係数 (1/2)

| 部位 | 材質 | 材料密度 (g/cm ³) | 密度係数 |
|------------------|-------------------|------------------------------|------|
| 胴 | 炭素鋼 | | |
| 胴 (底部) | | | |
| 胴 (フランジ部) | | | |
| 外筒 | | | |
| 一次蓋 | | | |
| 蓋部中性子遮蔽材カバー (蓋板) | | | |
| 蓋部中性子遮蔽材カバー (側板) | | | |
| 二次蓋 | | | |
| 下部端板 | ステンレス鋼 | | |
| 底部中性子遮蔽材カバー | | | |
| 三次蓋 | | | |
| トラニオン | 析出硬化系 ステンレス鋼 | | |
| 側部中性子遮蔽材 | レジン | | |
| 底部中性子遮蔽材 | | | |
| 蓋部中性子遮蔽材 | | | |
| トラニオン部中性子遮蔽材 | | | |
| 伝熱フィン | 銅 | | |
| バスケット (バスケット外周部) | アルミニウム合金 | | |
| | ほう素添加 アルミニウム合金 | | |