

(ロ)-第 C.1 表 放射性物質の放出率

| 主要核種             | 収納放射能量<br>(TBq) | 破損率<br>(%) | 放出率<br>(%)       | A <sub>2</sub> 値<br>(TBq) | 放出放射能量<br>(A <sub>2</sub> 値比) | 放射性物質濃度 <sup>(注1)</sup><br>(A <sub>2</sub> 値比/ref cm <sup>3</sup> ) |
|------------------|-----------------|------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| <sup>3</sup> H   | [ ]             | 0.1        | 10 <sup>1)</sup> | 40                        | [ ]                           | 8.12×10 <sup>-11</sup>  |
| <sup>85</sup> Kr |                 |            |                  | 10                        |                               | 4.77×10 <sup>-9</sup>   |
| 合計               |                 | —          | —                | —                         |                               | 4.85×10 <sup>-9</sup>   |

(注1) 三次蓋一胴内ガス体積は [ ] ref cm<sup>3</sup> 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<sub>Rt</sub> 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<sub>Rt</sub> は、輸送容器の三次蓋の被検査部の漏えい率として(ロ)-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。

(ロ)-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<br>(三次蓋及びリリーフバルブカバープレート) |
|--|------------------------------------|-------------------------------|
| L <sub>Rt</sub> : 許容漏えい率 (ref cm <sup>3</sup> /s)  |                                    | 2×10 <sup>-3</sup>            |
| 圧力条件   | P <sub>u,0</sub> : 上流側圧力 (MPa・abs) | 0.760                         |
|  | P <sub>d,0</sub> : 下流側圧力 (MPa・abs) | 0.101 (大気圧)                   |
| T <sub>0</sub> : 温度 (K)  |                                    | 298.15                        |
| L <sub>u,0</sub> : 漏えい試験時のガス漏えい率<br>(cm <sup>3</sup> /s, P <sub>u,0</sub> , T <sub>0</sub> ) |                                    | 2.66×10 <sup>-4</sup>         |

### (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<sub>u,i</sub> : 圧力 P<sub>u,i</sub> における漏えい率 (cm<sup>3</sup>/s at P<sub>u,i</sub>, T<sub>i</sub>)

F<sub>c,i</sub> : 連続流の流動伝導係数 (cm<sup>3</sup>/(MPa・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 (cm<sup>3</sup>/(MPa・s))

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

$P_{u,i}$  : 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)

$\mu_i$  : 粘性係数 (MPa・s)

$R_0$  : 気体定数 (8.3144598×10<sup>7</sup> erg/(mol・K))<sup>4)</sup>

$T_i$  : 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 cm<sup>3</sup>/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 (ロ)-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 <sup>(注1)</sup>   | 部位 | 密封境界   |  |
|--|----|--|--|
|  |    | 三次蓋  | リリースバルブ<br>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 <sup>(注2)</sup>   |  |
| $a_1$ : 漏えい孔長 (cm)   |    | <input type="text"/> <sup>(注3)</sup>                                     | <input type="text"/> <sup>(注3)</sup>                                     |
| $D_1$ : 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<br>( $\text{cm}^3/\text{s}$ at $P_{u,1}$ , $T_1$ ) |    | $5.95 \times 10^{-6}$  | $6.50 \times 10^{-6}$  |
| $L_{x,1}$ : 一般の試験条件におけるガス漏えい率<br>( $\text{cm}^3/\text{s}$ at 0.101 MPa, 25 °C)   |    | $4.82 \times 10^{-6}$<br>( $1.73 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{h}$ ) | $5.26 \times 10^{-6}$<br>( $1.89 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{h}$ ) |

(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<br>(Bq/h) | 基準値 : $A_2$ 値 $\times 10^{-6}/\text{h}$<br>(Bq/h) | 比率                    |
|------------------|---------------------|---|-----------------------|
| $^3\text{H}$     | $6.15 \times 10^1$  | $4 \times 10^7$                                   | $1.54 \times 10^{-6}$ |
| $^{85}\text{Kr}$ | $9.04 \times 10^2$  | $1 \times 10^7$                                   | $9.04 \times 10^{-5}$ |
|                  |                     | 合計  | $9.19 \times 10^{-5}$ |

#### 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、全取

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一胴内圧力は、0.316 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一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 <sub>2</sub> 値 <sup>(注1)</sup> (TBq) | 放出放射能量 (A <sub>2</sub> 値比) | 放射性物質濃度 <sup>(注2)</sup> (A <sub>2</sub> 値比/ref cm <sup>3</sup> ) |
|------------------|--------------|------------------|--|----------------------------|--|
| <sup>3</sup> H   | □            | 10 <sup>1)</sup> | 40                                     | □                          | 2.95×10 <sup>-8</sup>  |
| <sup>85</sup> Kr |              |                  | 100                                    |                            | 1.74×10 <sup>-7</sup>  |
| 合計               |              | —                | —                                      |                            | 2.03×10 <sup>-7</sup>  |

(注1) <sup>85</sup>Kr については A<sub>2</sub> 値の 10 倍である。

(注2) 三次蓋一胴内ガス体積は □ ref cm<sup>3</sup> 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 <sup>(注1)</sup>   | 部位 | 密封境界   |  |
|--|----|--|--|
|  |    | 三次蓋  | リリースバルブ<br>カバープレート   |
| $P_{u,2}$ : 上流側圧力 (MPa)  |    | 0.316  |  |
| $P_{d,2}$ : 下流側圧力 (MPa)  |    | 0.097  |  |
| $T_2$ : 流体の温度 (K)  |    | 453.15 <sup>(注2)</sup>   |  |
| $a_2$ : 漏えい孔長 (cm)   |    | <input type="text"/> <sup>(注3)</sup>                                     | <input type="text"/> <sup>(注3)</sup>                                     |
| $D_2$ : 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<br>( $\text{cm}^3/\text{s}$ at $P_{u,2}$ 、 $T_2$ ) |    | $8.70 \times 10^{-5}$  | $9.21 \times 10^{-5}$  |
| $L_{x,2}$ : 特別の試験条件におけるガス漏えい率<br>( $\text{cm}^3/\text{s}$ at 0.101 MPa、25 °C)    |    | $1.79 \times 10^{-4}$<br>( $1.08 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{week}$ ) | $1.90 \times 10^{-4}$<br>( $1.15 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{week}$ ) |

(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<br>(Bq/week) | 基準値 : $A_2$ 値/week<br>(Bq/week) | 比率                    |
|------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| $^3\text{H}$     | $1.36 \times 10^8$     | $4 \times 10^{13}$              | $3.40 \times 10^{-6}$ |
| $^{85}\text{Kr}$ | $1.99 \times 10^9$     | $1 \times 10^{14}$              | $1.99 \times 10^{-5}$ |
|                  |                        | 合計                              | $2.33 \times 10^{-5}$ |

## 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  $9.19 \times 10^{-5}$  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  $2.33 \times 10^{-5}$  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).

(□) 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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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9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表より構造材放射化ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い下記に示す使用済燃料集合体を収納した場合を対象として遮蔽解析を実施した。

中央部：14×14 燃料 55,000MWd/t 型（B型）

外周部：14×14 燃料 48,000MWd/t 型（B型）

(ロ)-第D.1表 収納物の線源計算条件(1/2)

| 燃料集合体の<br>種類と型式                 |                  | 中央部           |    |               |    |               |    | 外周部           |    |               |    |               |    |
|---------------------------------|------------------|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|
|                                 |                  | 14×14 燃料      |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
|                                 |                  | 55,000MWd/t 型 |    | 48,000MWd/t 型 |    | 39,000MWd/t 型 |    | 55,000MWd/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 | A型            | B型 | A型            | B型 |
| 条件                              |                  |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
| 燃焼度<br>(MWd/t)                  |                  |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
| 照射<br>日数<br>(日)                 | 使用済燃料集合体         |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
|                                 | バーナブルポイズン<br>集合体 |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
| 平均比出力 <sup>(注1)</sup><br>(MW/t) |                  | 33.7          |    | 34.0          |    | 33.7          |    | 34.0          |    |               |    |               |    |
| 初期濃縮度 <sup>(注2)</sup><br>(wt%)  |                  |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
| 冷却<br>日数<br>(日)                 | 使用済燃料集合体         |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
|                                 | バーナブルポイズン<br>集合体 |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |    |
| ウラン重量<br>(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.1表 収納物の線源計算条件(2/2)

| 燃料集合体の<br>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                              |  |  |    |               |    |               |    |               |    |
| 照射日数<br>(日)                     |  | <div style="border: 2px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> |    |               |    |               |    |               |    |
| 使用済燃料集合体<br>バーナブルポイズン<br>集合体    |  |  |    |               |    |               |    |               |    |
| 平均比出力 <sup>(注1)</sup><br>(MW/t) |  | 38.4   |    |               |    |               |    |               |    |
| 初期濃縮度 <sup>(注2)</sup><br>(wt%)  |  | <div style="border: 2px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> |    |               |    |               |    |               |    |
| 冷却日数<br>(日)                     |  |  |    |               |    |               |    |               |    |
| ウラン重量<br>(kg/体)                 |  | <div style="border: 2px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div> |    |               |    |               |    |               |    |

(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                                       | 14×14 燃料<br>55,000MWd/t 型 /<br>48,000MWd/t 型 (注 1) |                        | 14×14 燃料<br>39,000MWd/t 型 (注 2) |                        | 17×17 燃料<br>48,000MWd/t 型 (注 3) |                        | 17×17 燃料<br>39,000MWd/t 型 (注 4) |                        |
|---|--|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
|   | A 型  | B 型                    | A 型                             | B 型                    | A 型                             | B 型                    | A 型                             | B 型                    |
| 燃料有効部ガンマ線<br>(photons/s)                    | $9.112 \times 10^{16}$                             | $9.112 \times 10^{16}$ | $7.064 \times 10^{16}$          | $7.064 \times 10^{16}$ | $9.334 \times 10^{16}$          | $8.044 \times 10^{16}$ | $7.934 \times 10^{16}$          | $6.849 \times 10^{16}$ |
| 構造材放射化ガンマ線 (注 5)<br>( <sup>60</sup> Co TBq) | $3.169 \times 10^2$                                | $4.802 \times 10^2$    | $3.890 \times 10^2$             | $4.117 \times 10^2$    | $4.309 \times 10^2$             | $2.817 \times 10^2$    | $4.282 \times 10^2$             | $2.460 \times 10^2$    |
| 燃料有効部中性子 (注 6)<br>(n/s)                     | $1.164 \times 10^{10}$                             | $1.164 \times 10^{10}$ | $6.601 \times 10^9$             | $6.601 \times 10^9$    | $1.027 \times 10^{10}$          | $8.540 \times 10^9$    | $7.356 \times 10^9$             | $6.121 \times 10^9$    |

(注 1) 中央部 9 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 9 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) 中央部 9 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 4) 中央部 9 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 5) 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 6) 記載値は実効増倍率 keff 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<br>群数 | 平均エネルギー<br>(MeV) | 燃料有効部 (photons/s)      |                        |                        |
|-------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|             |                  | 中央部                    | 外周部                    | 合計                     |
| 1           | 0.01             | $1.104 \times 10^{16}$ | $1.252 \times 10^{16}$ | $2.356 \times 10^{16}$ |
| 2           | 0.025            | $2.215 \times 10^{15}$ | $2.524 \times 10^{15}$ | $4.740 \times 10^{15}$ |
| 3           | 0.0375           | $2.847 \times 10^{15}$ | $3.249 \times 10^{15}$ | $6.096 \times 10^{15}$ |
| 4           | 0.0575           | $2.216 \times 10^{15}$ | $2.542 \times 10^{15}$ | $4.758 \times 10^{15}$ |
| 5           | 0.085            | $1.260 \times 10^{15}$ | $1.429 \times 10^{15}$ | $2.689 \times 10^{15}$ |
| 6           | 0.125            | $1.214 \times 10^{15}$ | $1.374 \times 10^{15}$ | $2.588 \times 10^{15}$ |
| 7           | 0.225            | $1.050 \times 10^{15}$ | $1.191 \times 10^{15}$ | $2.241 \times 10^{15}$ |
| 8           | 0.375            | $4.441 \times 10^{14}$ | $5.065 \times 10^{14}$ | $9.507 \times 10^{14}$ |
| 9           | 0.575            | $1.878 \times 10^{16}$ | $2.158 \times 10^{16}$ | $4.037 \times 10^{16}$ |
| 10          | 0.85             | $8.691 \times 10^{14}$ | $9.734 \times 10^{14}$ | $1.842 \times 10^{15}$ |
| 11          | 1.25             | $5.899 \times 10^{14}$ | $6.650 \times 10^{14}$ | $1.255 \times 10^{15}$ |
| 12          | 1.75             | $1.810 \times 10^{13}$ | $2.042 \times 10^{13}$ | $3.852 \times 10^{13}$ |
| 13          | 2.25             | $8.889 \times 10^9$    | $1.129 \times 10^{10}$ | $2.018 \times 10^{10}$ |
| 14          | 2.75             | $5.651 \times 10^9$    | $5.881 \times 10^9$    | $1.153 \times 10^{10}$ |
| 15          | 3.5              | $5.208 \times 10^8$    | $5.502 \times 10^8$    | $1.071 \times 10^9$    |
| 16          | 5.0              | $1.761 \times 10^8$    | $1.751 \times 10^8$    | $3.512 \times 10^8$    |
| 17          | 7.0              | $2.030 \times 10^7$    | $2.020 \times 10^7$    | $4.050 \times 10^7$    |
| 18          | 9.5              | $2.332 \times 10^6$    | $2.320 \times 10^6$    | $4.652 \times 10^6$    |
| 合計          |                  | $4.254 \times 10^{16}$ | $4.858 \times 10^{16}$ | $9.112 \times 10^{16}$ |

## 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  $^{59}\text{Co}$  の  $(n, \gamma)$  反応により生じる  $^{60}\text{Co}$  が大部分である。

$^{60}\text{Co}$  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 ( $^{60}\text{Co}$ ) の放射能 (Bq)

$N_0$  : ターゲット核種 ( $^{59}\text{Co}$ ) の個数 (atoms)

$\sigma$  : 2200 m/s の中性子による  $^{59}\text{Co}$  の  $(n, \gamma)$  反応断面積 ( $\text{cm}^2$ )

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

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

$\lambda$  :  $^{60}\text{Co}$  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。

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

なお、 $^{60}\text{Co}$  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 ( $^{60}\text{Co}$ TBq)          |                     |  |
|---------|--|---------------------|--|
|         | 中央部 (注)  | 外周部                 | 合計   |
| 上部ノズル部  | $1.055 \times 10^1$<br>( $2.552 \times 10^0$ ) | $5.257 \times 10^0$ | $1.581 \times 10^1$<br>( $2.552 \times 10^0$ ) |
| 上部プレナム部 | $6.264 \times 10^1$<br>( $2.793 \times 10^0$ ) | $7.531 \times 10^1$ | $1.380 \times 10^2$<br>( $2.793 \times 10^0$ ) |
| 燃料有効部   | $1.681 \times 10^2$<br>( $9.570 \times 10^1$ ) | $9.311 \times 10^1$ | $2.612 \times 10^2$<br>( $9.570 \times 10^1$ ) |
| 下部プレナム部 | $9.245 \times 10^0$                            | $1.244 \times 10^1$ | $2.169 \times 10^1$                            |
| 下部ノズル部  | $1.906 \times 10^1$                            | $2.454 \times 10^1$ | $4.360 \times 10^1$                            |

(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 $(\alpha, n)$ 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(□)-第D.5表に示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 $^{244}\text{Cm}$ の自発核分裂線源及び増倍による $^{235}\text{U}$ 及び $^{239}\text{Pu}$ の核分裂線源であり、 $(\alpha, n)$ 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 $^{239}\text{Pu}$ の核分裂スペクトルとした。計算に使用する $^{239}\text{Pu}$ の核分裂スペクトルを(□)-第D.6表に示す。

(□)-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<br>$N_o$<br>(n/s) | $(\alpha, n)$ 反応 | $7.490 \times 10^7$ | $7.956 \times 10^7$ | $1.545 \times 10^8$    |
|                            | 自発核分裂            | $4.010 \times 10^9$ | $3.986 \times 10^9$ | $7.996 \times 10^9$    |
|                            | 合計               | $4.085 \times 10^9$ | $4.066 \times 10^9$ | $8.150 \times 10^9$    |
| 輸送物の実効増倍率<br>$k_{eff}$ (注) |                  | 0.30                |                     |                        |
| 全中性子源強度<br>$N_s$ (n/s)     |                  | $5.836 \times 10^9$ | $5.808 \times 10^9$ | $1.164 \times 10^{10}$ |

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

(注)  $^{239}\text{Pu}$  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      | $3.679 \times 10^6$ | $3.674 \times 10^{-2}$ |
| 37      | $3.329 \times 10^6$ | $1.965 \times 10^{-2}$ |
| 38      | $3.166 \times 10^6$ | $2.042 \times 10^{-2}$ |
| 39      | $3.012 \times 10^6$ | $2.108 \times 10^{-2}$ |
| 40      | $2.865 \times 10^6$ | $2.165 \times 10^{-2}$ |
| 41      | $2.725 \times 10^6$ | $2.214 \times 10^{-2}$ |
| 42      | $2.592 \times 10^6$ | $2.252 \times 10^{-2}$ |
| 43      | $2.466 \times 10^6$ | $1.517 \times 10^{-2}$ |
| 44      | $2.385 \times 10^6$ | $3.833 \times 10^{-3}$ |
| 45      | $2.365 \times 10^6$ | $3.812 \times 10^{-3}$ |
| 46      | $2.346 \times 10^6$ | $7.657 \times 10^{-3}$ |
| 47      | $2.307 \times 10^6$ | $1.535 \times 10^{-2}$ |
| 48      | $2.231 \times 10^6$ | $2.310 \times 10^{-2}$ |
| 49      | $2.123 \times 10^6$ | $2.312 \times 10^{-2}$ |
| 50      | $2.019 \times 10^6$ | $2.305 \times 10^{-2}$ |
| 51      | $1.921 \times 10^6$ | $2.290 \times 10^{-2}$ |
| 52      | $1.827 \times 10^6$ | $2.267 \times 10^{-2}$ |
| 53      | $1.738 \times 10^6$ | $2.236 \times 10^{-2}$ |
| 54      | $1.653 \times 10^6$ | $2.200 \times 10^{-2}$ |
| 55      | $1.572 \times 10^6$ | $2.160 \times 10^{-2}$ |
| 56      | $1.496 \times 10^6$ | $2.115 \times 10^{-2}$ |
| 57      | $1.423 \times 10^6$ | $2.059 \times 10^{-2}$ |
| 58      | $1.353 \times 10^6$ | $2.010 \times 10^{-2}$ |
| 59      | $1.287 \times 10^6$ | $1.947 \times 10^{-2}$ |
| 60      | $1.225 \times 10^6$ | $1.892 \times 10^{-2}$ |
| 61      | $1.165 \times 10^6$ | $1.827 \times 10^{-2}$ |
| 62      | $1.108 \times 10^6$ | $3.460 \times 10^{-2}$ |
| 63      | $1.003 \times 10^6$ | $1.367 \times 10^{-2}$ |
| 64      | $9.616 \times 10^5$ | $1.834 \times 10^{-2}$ |
| 65      | $9.072 \times 10^5$ | $1.502 \times 10^{-2}$ |
| 66      | $8.629 \times 10^5$ | $1.437 \times 10^{-2}$ |
| 67      | $8.209 \times 10^5$ | $1.372 \times 10^{-2}$ |
| 68      | $7.808 \times 10^5$ | $1.309 \times 10^{-2}$ |
| 69      | $7.427 \times 10^5$ | $1.247 \times 10^{-2}$ |
| 70      | $7.065 \times 10^5$ | $1.186 \times 10^{-2}$ |

(注)  $^{239}\text{Pu}$  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      | $6.721 \times 10^5$ | $1.127 \times 10^{-2}$ |
| 72      | $6.393 \times 10^5$ | $1.070 \times 10^{-2}$ |
| 73      | $6.081 \times 10^5$ | $1.014 \times 10^{-2}$ |
| 74      | $5.784 \times 10^5$ | $9.605 \times 10^{-3}$ |
| 75      | $5.502 \times 10^5$ | $9.086 \times 10^{-3}$ |
| 76      | $5.234 \times 10^5$ | $8.591 \times 10^{-3}$ |
| 77      | $4.979 \times 10^5$ | $1.576 \times 10^{-2}$ |
| 78      | $4.505 \times 10^5$ | $1.401 \times 10^{-2}$ |
| 79      | $4.076 \times 10^5$ | $6.397 \times 10^{-3}$ |
| 80      | $3.877 \times 10^5$ | $6.017 \times 10^{-3}$ |
| 81      | $3.688 \times 10^5$ | $1.097 \times 10^{-2}$ |
| 82      | $3.337 \times 10^5$ | $9.670 \times 10^{-3}$ |
| 83      | $3.020 \times 10^5$ | $1.040 \times 10^{-3}$ |
| 84      | $2.985 \times 10^5$ | $3.887 \times 10^{-4}$ |
| 85      | $2.972 \times 10^5$ | $7.998 \times 10^{-4}$ |
| 86      | $2.945 \times 10^5$ | $2.159 \times 10^{-3}$ |
| 87      | $2.873 \times 10^5$ | $4.115 \times 10^{-3}$ |
| 88      | $2.732 \times 10^5$ | $7.463 \times 10^{-3}$ |
| 89      | $2.472 \times 10^5$ | $3.378 \times 10^{-3}$ |
| 90      | $2.352 \times 10^5$ | $3.160 \times 10^{-3}$ |
| 91      | $2.237 \times 10^5$ | $2.955 \times 10^{-3}$ |
| 92      | $2.128 \times 10^5$ | $2.763 \times 10^{-3}$ |
| 93      | $2.024 \times 10^5$ | $2.581 \times 10^{-3}$ |
| 94      | $1.926 \times 10^5$ | $2.411 \times 10^{-3}$ |
| 95      | $1.832 \times 10^5$ | $2.254 \times 10^{-3}$ |
| 96      | $1.742 \times 10^5$ | $2.100 \times 10^{-3}$ |
| 97      | $1.657 \times 10^5$ | $1.964 \times 10^{-3}$ |
| 98      | $1.576 \times 10^5$ | $1.828 \times 10^{-3}$ |
| 99      | $1.500 \times 10^5$ | $1.709 \times 10^{-3}$ |
| 100     | $1.426 \times 10^5$ | $1.590 \times 10^{-3}$ |
| 101     | $1.357 \times 10^5$ | $1.485 \times 10^{-3}$ |
| 102     | $1.291 \times 10^5$ | $1.384 \times 10^{-3}$ |
| 103     | $1.228 \times 10^5$ | $1.287 \times 10^{-3}$ |
| 104     | $1.168 \times 10^5$ | $1.202 \times 10^{-3}$ |
| 105     | $1.111 \times 10^5$ | $2.653 \times 10^{-3}$ |

(注)  $^{239}\text{Pu}$  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     | $9.804 \times 10^4$ | $2.219 \times 10^{-3}$ |
| 107     | $8.652 \times 10^4$ | $7.446 \times 10^{-4}$ |
| 108     | $8.250 \times 10^4$ | $5.458 \times 10^{-4}$ |
| 109     | $7.950 \times 10^4$ | $1.324 \times 10^{-3}$ |
| 110     | $7.200 \times 10^4$ | $7.861 \times 10^{-4}$ |
| 111     | $6.738 \times 10^4$ | $1.744 \times 10^{-3}$ |
| 112     | $5.656 \times 10^4$ | $6.216 \times 10^{-4}$ |
| 113     | $5.248 \times 10^4$ | $8.958 \times 10^{-4}$ |
| 114     | $4.631 \times 10^4$ | $7.457 \times 10^{-4}$ |
| 115     | $4.087 \times 10^4$ | $8.384 \times 10^{-4}$ |
| 116     | $3.431 \times 10^4$ | $2.982 \times 10^{-4}$ |
| 117     | $3.183 \times 10^4$ | $3.831 \times 10^{-4}$ |
| 118     | $2.850 \times 10^4$ | $1.659 \times 10^{-4}$ |
| 119     | $2.700 \times 10^4$ | $1.020 \times 10^{-4}$ |
| 120     | $2.606 \times 10^4$ | $1.347 \times 10^{-4}$ |
| 121     | $2.479 \times 10^4$ | $6.373 \times 10^{-5}$ |
| 122     | $2.418 \times 10^4$ | $6.142 \times 10^{-5}$ |
| 123     | $2.358 \times 10^4$ | $1.712 \times 10^{-4}$ |
| 124     | $2.188 \times 10^4$ | $2.461 \times 10^{-4}$ |
| 125     | $1.931 \times 10^4$ | $3.741 \times 10^{-4}$ |
| 126     | $1.503 \times 10^4$ | $2.577 \times 10^{-4}$ |
| 127     | $1.171 \times 10^4$ | $7.100 \times 10^{-5}$ |
| 128     | $1.060 \times 10^4$ | $1.066 \times 10^{-4}$ |
| 129     | $9.119 \times 10^3$ | $1.222 \times 10^{-4}$ |
| 130     | $7.102 \times 10^3$ | $8.411 \times 10^{-5}$ |
| 131     | $5.531 \times 10^3$ | $5.787 \times 10^{-5}$ |
| 132     | $4.307 \times 10^3$ | $2.564 \times 10^{-5}$ |
| 133     | $3.707 \times 10^3$ | $1.416 \times 10^{-5}$ |
| 134     | $3.355 \times 10^3$ | $1.219 \times 10^{-5}$ |
| 135     | $3.035 \times 10^3$ | $1.050 \times 10^{-5}$ |
| 136     | $2.747 \times 10^3$ | $4.685 \times 10^{-6}$ |
| 137     | $2.613 \times 10^3$ | $4.348 \times 10^{-6}$ |
| 138     | $2.485 \times 10^3$ | $7.778 \times 10^{-6}$ |
| 139     | $2.249 \times 10^3$ | $6.696 \times 10^{-6}$ |
| 140     | $2.035 \times 10^3$ | $1.294 \times 10^{-5}$ |

(注)  $^{239}\text{Pu}$  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     | $1.585 \times 10^3$    | $8.896 \times 10^{-6}$  |
| 142     | $1.234 \times 10^3$    | $6.116 \times 10^{-6}$  |
| 143     | $9.611 \times 10^2$    | $4.204 \times 10^{-6}$  |
| 144     | $7.485 \times 10^2$    | $2.890 \times 10^{-6}$  |
| 145     | $5.830 \times 10^2$    | $1.986 \times 10^{-6}$  |
| 146     | $4.540 \times 10^2$    | $1.365 \times 10^{-6}$  |
| 147     | $3.536 \times 10^2$    | $9.385 \times 10^{-7}$  |
| 148     | $2.754 \times 10^2$    | $6.450 \times 10^{-7}$  |
| 149     | $2.145 \times 10^2$    | $4.433 \times 10^{-7}$  |
| 150     | $1.670 \times 10^2$    | $3.047 \times 10^{-7}$  |
| 151     | $1.301 \times 10^2$    | $2.094 \times 10^{-7}$  |
| 152     | $1.013 \times 10^2$    | $1.439 \times 10^{-7}$  |
| 153     | $7.889 \times 10^1$    | $9.893 \times 10^{-8}$  |
| 154     | $6.144 \times 10^1$    | $6.799 \times 10^{-8}$  |
| 155     | $4.785 \times 10^1$    | $4.673 \times 10^{-8}$  |
| 156     | $3.727 \times 10^1$    | $3.201 \times 10^{-8}$  |
| 157     | $2.902 \times 10^1$    | $2.218 \times 10^{-8}$  |
| 158     | $2.260 \times 10^1$    | $1.517 \times 10^{-8}$  |
| 159     | $1.760 \times 10^1$    | $1.043 \times 10^{-8}$  |
| 160     | $1.371 \times 10^1$    | $7.168 \times 10^{-9}$  |
| 161     | $1.068 \times 10^1$    | $4.925 \times 10^{-9}$  |
| 162     | $8.315 \times 10^0$    | $3.385 \times 10^{-9}$  |
| 163     | $6.476 \times 10^0$    | $2.327 \times 10^{-9}$  |
| 164     | $5.044 \times 10^0$    | $1.599 \times 10^{-9}$  |
| 165     | $3.928 \times 10^0$    | $1.099 \times 10^{-9}$  |
| 166     | $3.059 \times 10^0$    | $7.657 \times 10^{-10}$ |
| 167     | $2.382 \times 10^0$    | $5.087 \times 10^{-10}$ |
| 168     | $1.855 \times 10^0$    | $3.568 \times 10^{-10}$ |
| 169     | $1.445 \times 10^0$    | $2.452 \times 10^{-10}$ |
| 170     | $1.125 \times 10^0$    | $1.686 \times 10^{-10}$ |
| 171     | $8.764 \times 10^{-1}$ | $1.158 \times 10^{-10}$ |
| 172     | $6.826 \times 10^{-1}$ | $7.961 \times 10^{-11}$ |
| 173     | $5.316 \times 10^{-1}$ | $5.472 \times 10^{-11}$ |
| 174     | $4.140 \times 10^{-1}$ | $1.060 \times 10^{-10}$ |
| 175     | $1.000 \times 10^{-1}$ | $1.427 \times 10^{-11}$ |

(注)  $^{239}\text{Pu}$  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

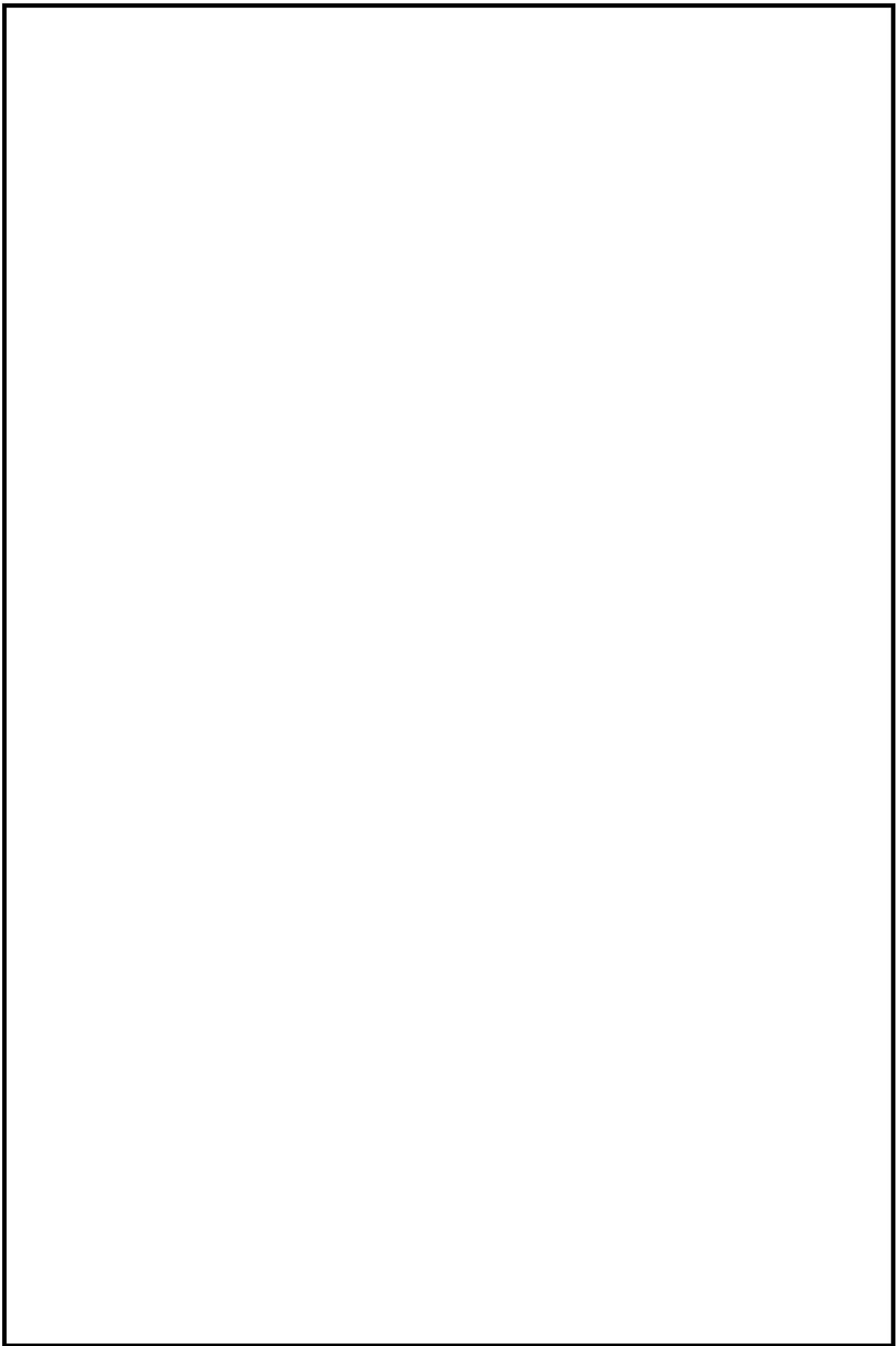
通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルは、一般の試験条件下において 0.3 m 落下における緩衝体の変形を考慮すること以外は同一とし、以下の条件とした。

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。

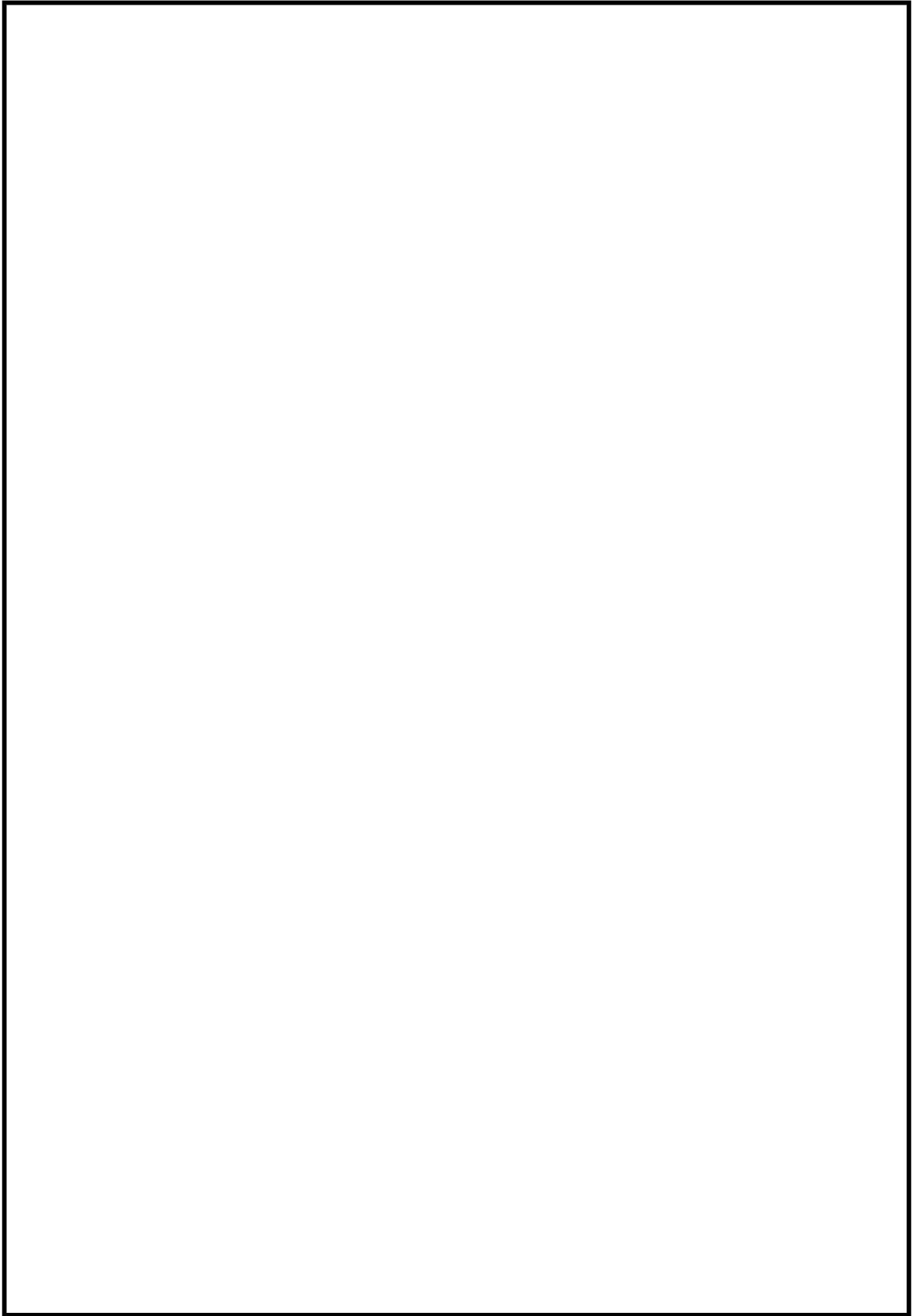
解析モデルでの均質化モデルの妥当性については、D.6.2 に示す。

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。

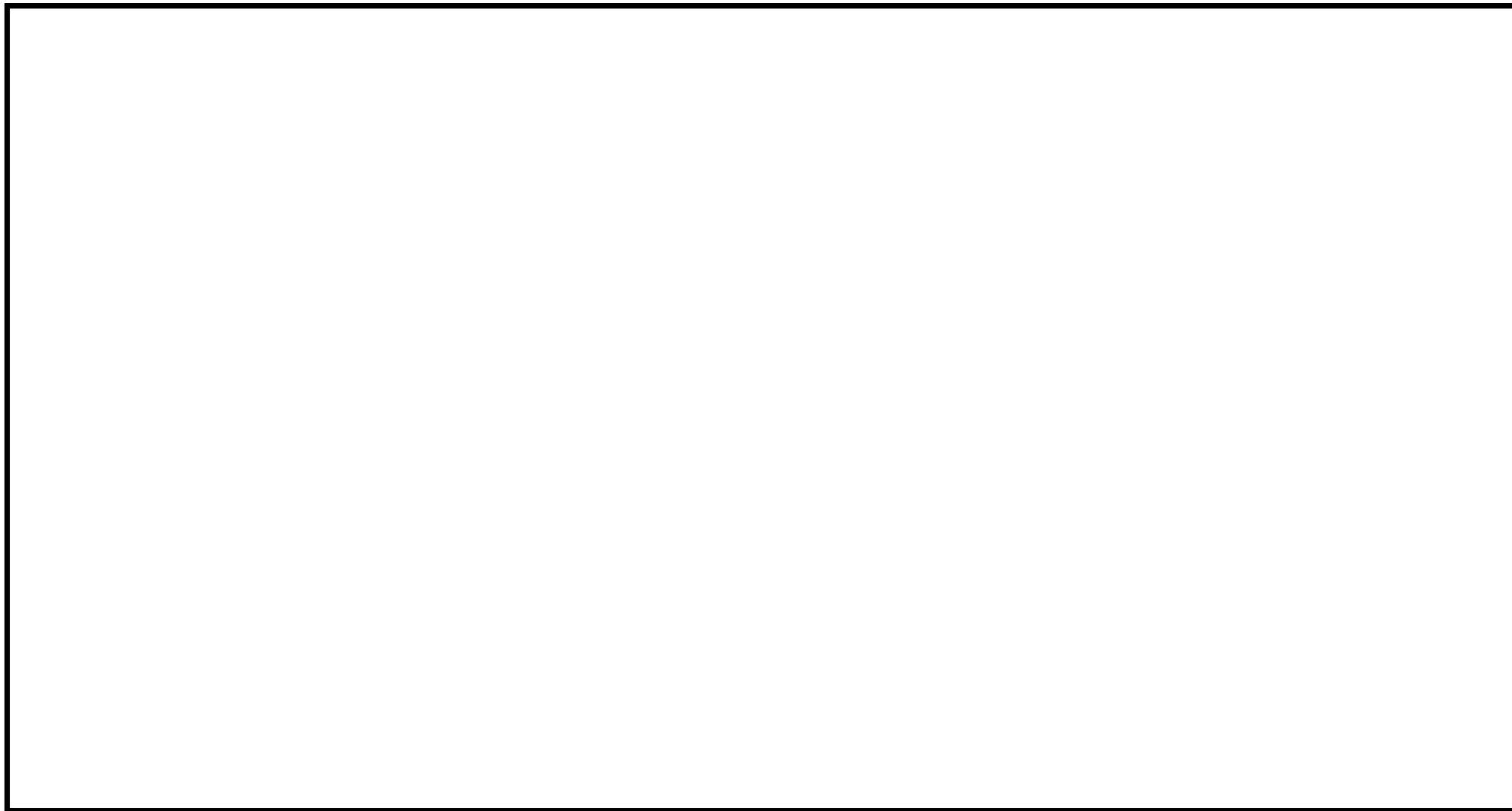


(ロ)-第 D. 1(a) 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (頭部)

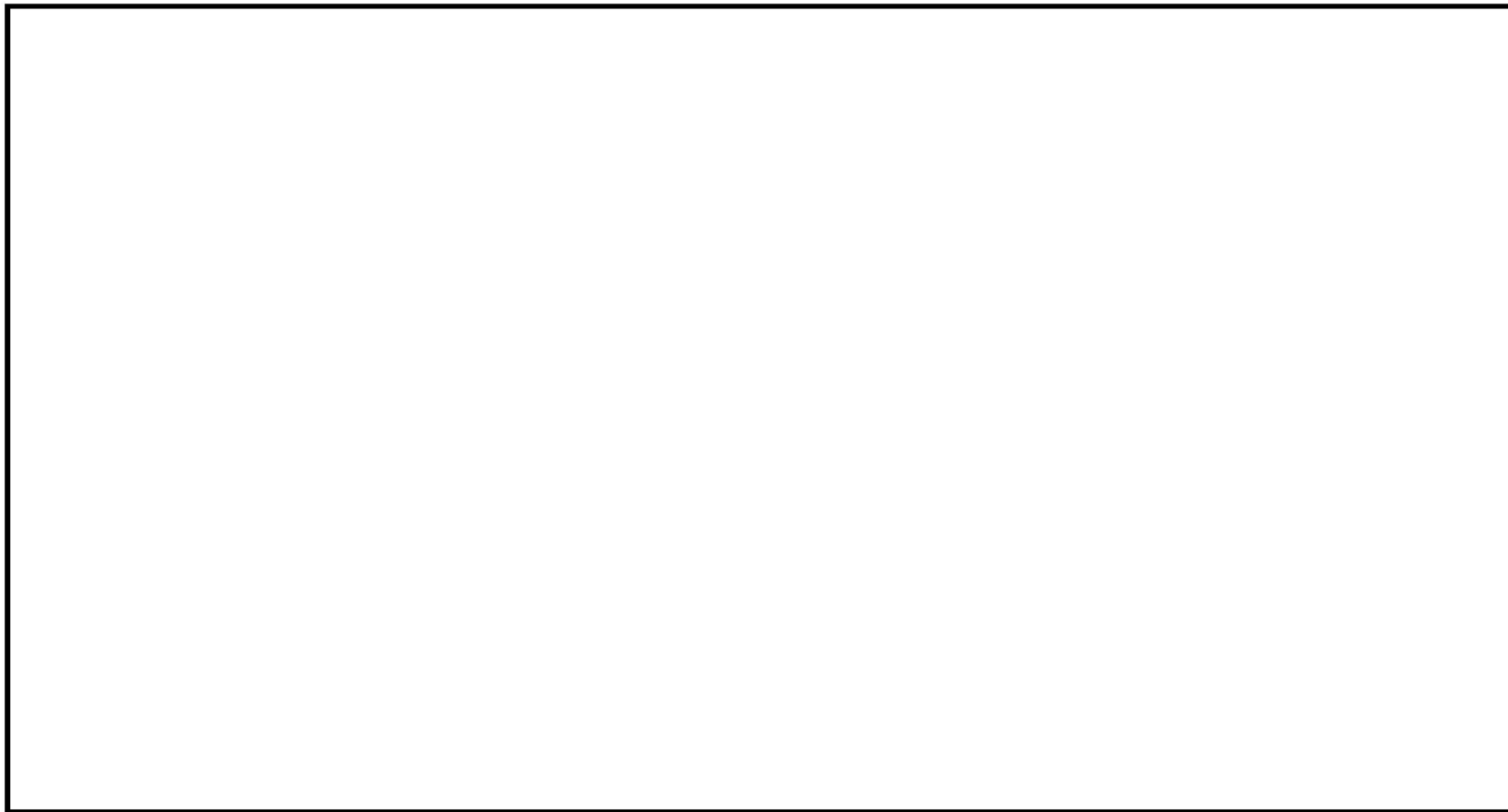




(ロ)-第 D. 1(b) 図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (底部)



(㉓)-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）

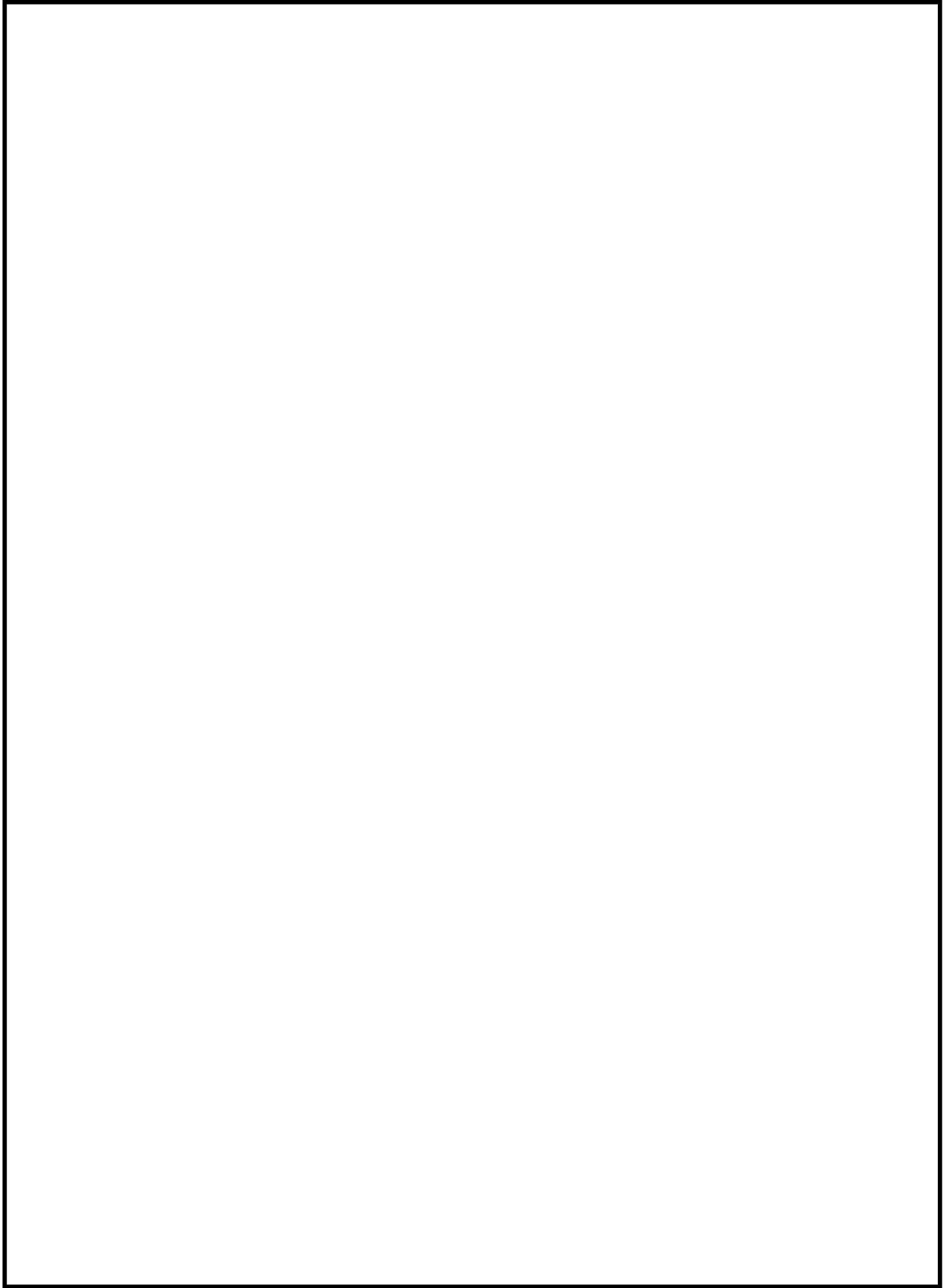


(a)-第D.2(b)図 通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル (下部トラニオン部)

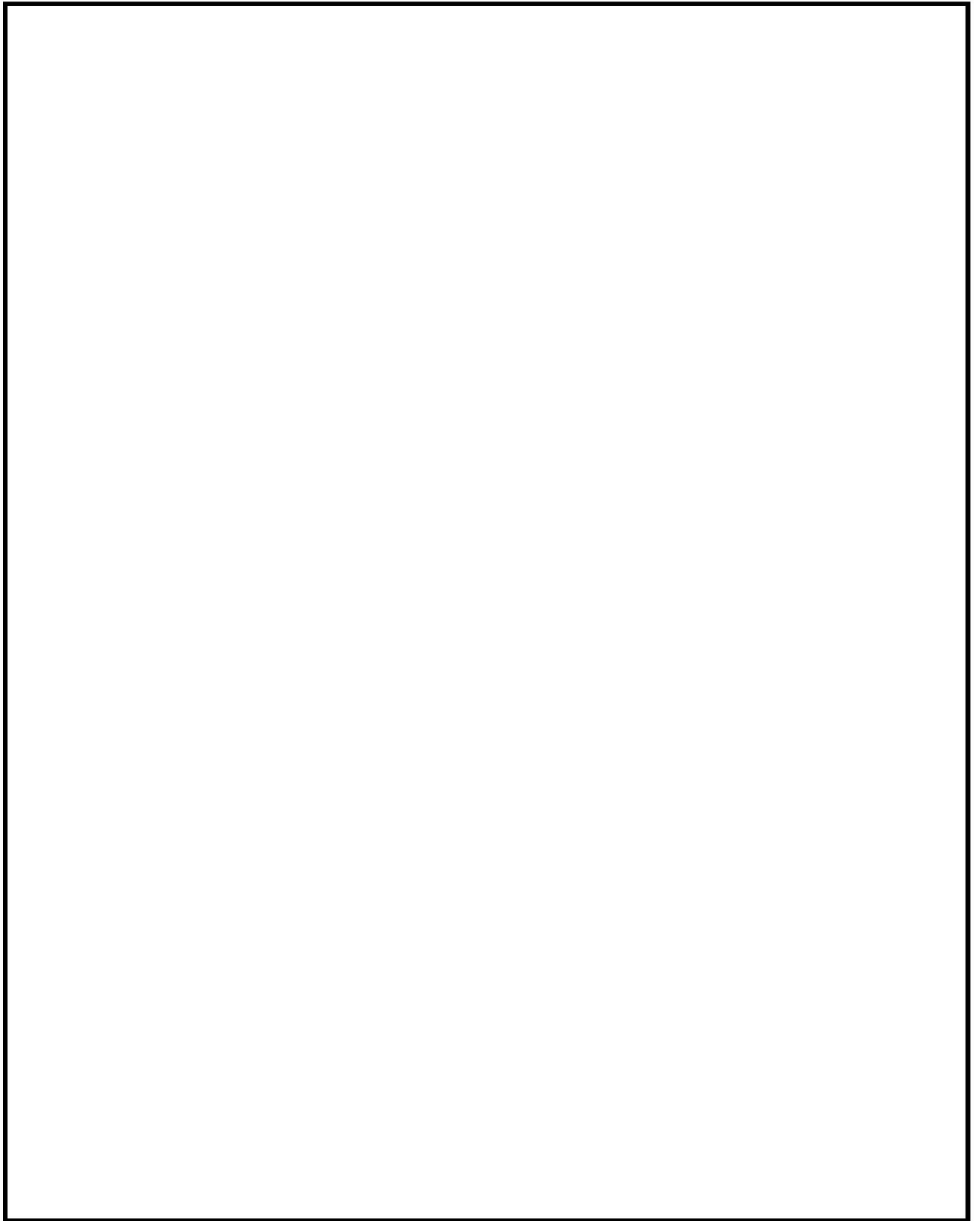
## 2. 特別の試験条件下

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 (1/2)

| 領域<br>構成物質   |                   | 均質化領域          |                |             |       |             |            |
|--------------|-------------------|----------------|----------------|-------------|-------|-------------|------------|
|              |                   | 燃料領域 (中央部)     |                |             |       |             |            |
|              |                   | 上部ノズル部<br>(上側) | 上部ノズル部<br>(下側) | 上部<br>プレナム部 | 燃料有効部 | 下部<br>プレナム部 | 下部<br>ノズル部 |
| 燃料<br>集合体    | UO <sub>2</sub>   |                |                |             |       |             |            |
|              | 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<br>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.7 表 解析に用いた均質化領域の構成物質体積比 (2/2)

| 構成物質         |                   | 領域 | 均質化領域          |                |             |       |             |            | レジン<br>+伝熱フィン |
|--------------|-------------------|----|----------------|----------------|-------------|-------|-------------|------------|---------------|
|              |                   |    | 燃料領域 (外周部)     |                |             |       |             |            |               |
|              |                   |    | 上部ノズル部<br>(上側) | 上部ノズル部<br>(下側) | 上部<br>プレナム部 | 燃料有効部 | 下部<br>プレナム部 | 下部<br>ノズル部 |               |
| 燃料<br>集合体    | UO <sub>2</sub>   |    |                |                |             |       |             | —          |               |
|              | 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<br>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 (1/3)

(単位 :  $10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>)

| 領域<br>元素         | 均質化領域          |                |         |       |         |        |
|------------------|----------------|----------------|---------|-------|---------|--------|
|                  | 燃料領域 (中央部)     |                |         |       |         |        |
|                  | 上部ノズル部<br>(上側) | 上部ノズル部<br>(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                |                |                |         |       |         |        |
| <sup>10</sup> B  |                |                |         |       |         |        |
| C                |                |                |         |       |         |        |
| N                |                |                |         |       |         |        |
| O                |                |                |         |       |         |        |
| Al               |                |                |         |       |         |        |
| Cr               |                |                |         |       |         |        |
| Fe               |                |                |         |       |         |        |
| Ni               |                |                |         |       |         |        |
| Cu               |                |                |         |       |         |        |
| Zr               |                |                |         |       |         |        |
| <sup>235</sup> U |                |                |         |       |         |        |
| <sup>238</sup> U |                |                |         |       |         |        |

(ロ)-第D.8表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (2/3)

(単位 :  $10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>)

| 領域<br>元素         | 均質化領域          |                |         |       |         |        |
|------------------|----------------|----------------|---------|-------|---------|--------|
|                  | 燃料領域 (外周部)     |                |         |       |         |        |
|                  | 上部ノズル部<br>(上側) | 上部ノズル部<br>(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                |                |                |         |       |         |        |
| <sup>10</sup> B  |                |                |         |       |         |        |
| C                |                |                |         |       |         |        |
| N                |                |                |         |       |         |        |
| O                |                |                |         |       |         |        |
| Al               |                |                |         |       |         |        |
| Cr               |                |                |         |       |         |        |
| Fe               |                |                |         |       |         |        |
| Ni               |                |                |         |       |         |        |
| Cu               |                |                |         |       |         |        |
| Zr               |                |                |         |       |         |        |
| <sup>235</sup> U |                |                |         |       |         |        |
| <sup>238</sup> U |                |                |         |       |         |        |

(ロ)-第 D. 8 表 解析に用いた各領域の原子個数密度 (3/3)

(単位 :  $10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>)

| 領域<br>元素        | バスケット<br>外周部 | ステンレス鋼 | 析出硬化系<br>ステンレス鋼 | 炭素鋼 | 中性子遮蔽材        |     | 空気 |
|-----------------|--------------|--------|-----------------|-----|---------------|-----|----|
|                 |              |        |                 |     | レジン<br>+伝熱フィン | レジン |    |
| H               |              |        |                 |     |               |     |    |
| <sup>10</sup> 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<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 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<br>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<br>アルミニウム合金 |                              |      |

(ロ)-第D.9表 各部位の材料密度と密度係数 (2/2)

| 部位   | 材質                | 材料密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 密度係数 |
|------|-------------------|------------------------------|------|
| 燃料領域 | UO <sub>2</sub>   |                              | —    |
|      | Zr                |                              | —    |
|      | ステンレス鋼            |                              | —    |
|      | インコネル             |                              | —    |
|      | アルミニウム合金          |                              | —    |
|      | ほう素添加<br>アルミニウム合金 |                              | —    |

(注 1) 14×14 燃料 55,000MWd/t 型の UO<sub>2</sub> 密度

(注 2) 14×14 燃料 48,000MWd/t 型の UO<sub>2</sub> 密度

#### D.4 遮蔽評価

輸送物の外部の指定場所でガンマ線線量当量率、中性子線量当量率を評価するために使用した基本手法とコードについて以下に説明する。

##### 1. 基本手法

遮蔽計算はガンマ線、中性子ともに DOT3.5 コードを用いて行った。

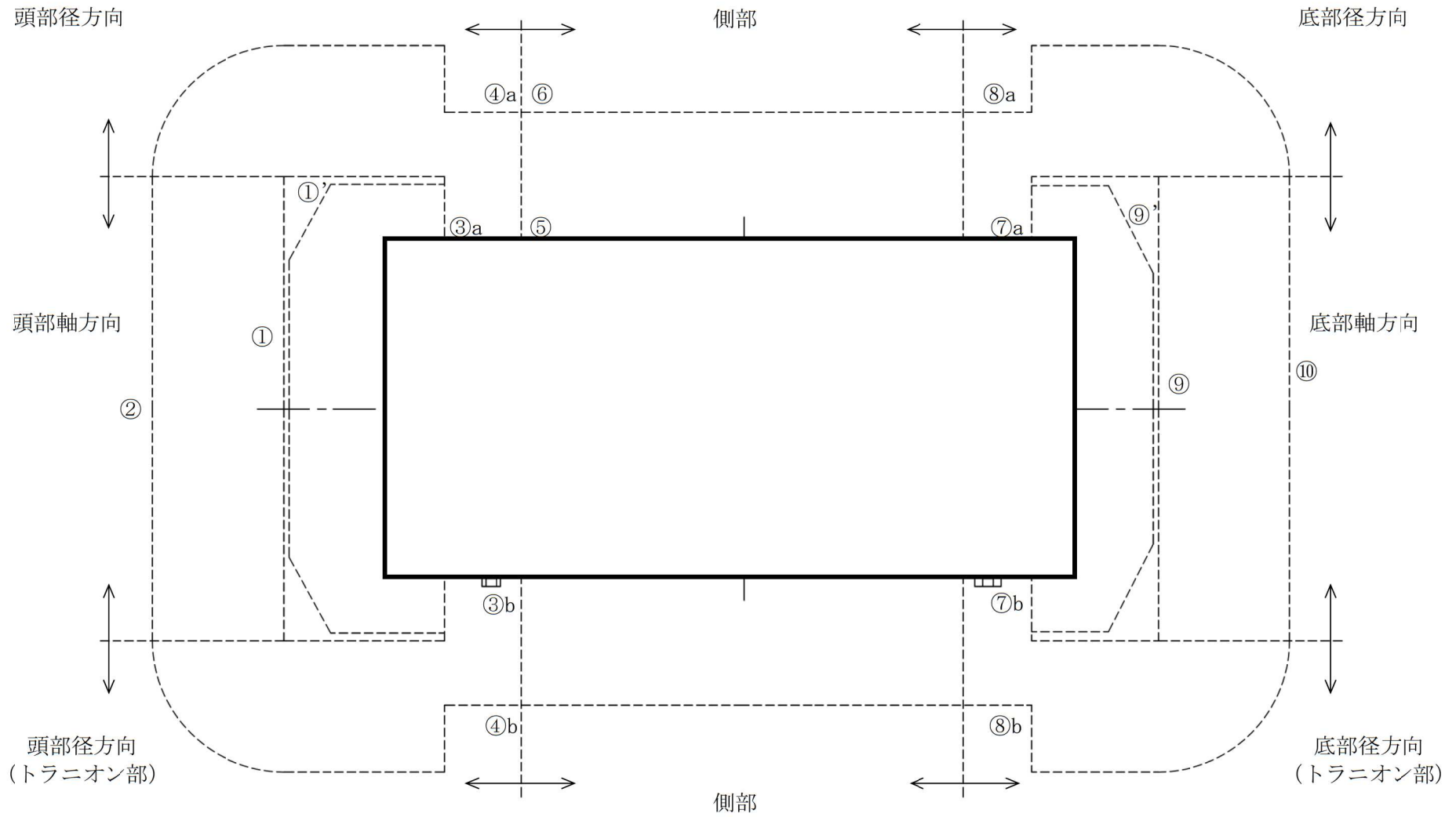
線束から線量当量率への変換係数は ICRP Pub. 74<sup>5)</sup> の 1 cm 線量当量率変換係数に基づく MATXSLIB-J33 の中性子 175 群、ガンマ線 42 群構造に対する値を用いた。

##### 2. 計算結果

各モデルにおける主要部位でのガンマ線線量当量率及び中性子線量当量率の計算結果を (a)-第 D. 4 図、(a)-第 D. 5 図 及び (a)-第 D. 10 表～(a)-第 D. 12 表 に示す。

ここでは、頭部、側部及び底部の各エリアにおいて、輸送物表面及び表面から 1 m で線量当量率が最大となる位置での線量当量率の合計値及びその内訳を記載している。

また、(a)-第 D. 10 表及び (a)-第 D. 11 表に示すように一般の試験条件下に置かれた輸送物表面の最大線量当量率は、著しく増加することはない。



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており、その結果を(マ)-第D. 10表及び(マ)-第D. 11表に示す。

(マ)-第D. 4図 通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率評価位置



(ロ)-第 D.10 表 通常輸送時の線量当量率

(単位：μSv/h)

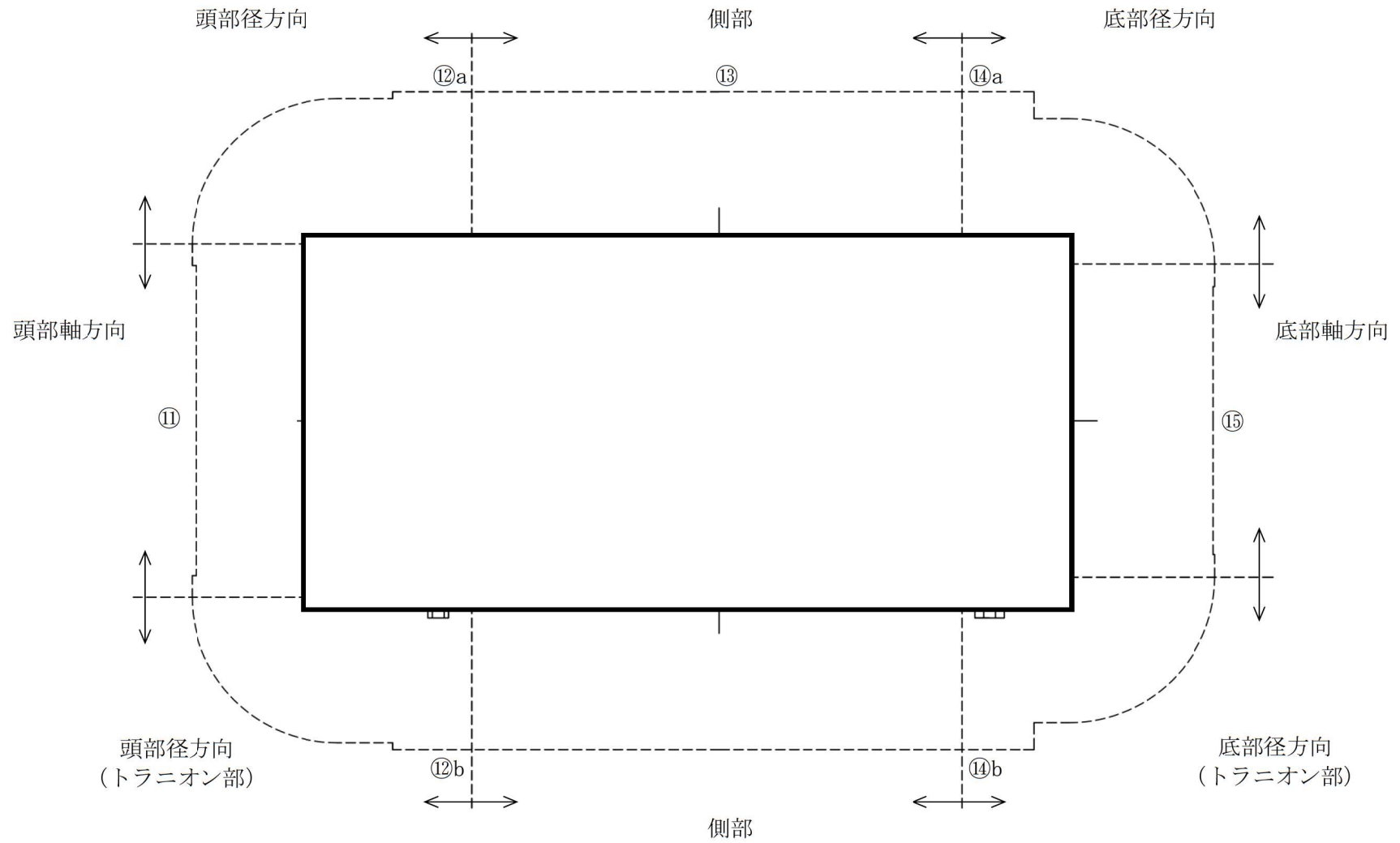
| 評価点         |      |        | 頭部   |       |                  | 側部    | 底部    |                  |      |
|-------------|------|--------|------|-------|------------------|-------|-------|------------------|------|
|             |      |        | 軸方向  | 径方向   | 径方向<br>(トランニオン部) |       | 径方向   | 径方向<br>(トランニオン部) | 軸方向  |
|             |      |        | ①    | ③a    | ③b               |       | ⑤     | ⑦a               | ⑦b   |
| 表面          | ガンマ線 | 燃料有効部  | <0.1 | 0.4   | 10.0             | 34.3  | 3.7   | 3.0              | 4.9  |
|             |      | 構造材放射化 | <0.1 | 7.2   | 41.7             | 107.0 | 16.2  | 11.9             | 52.1 |
|             |      | 二次ガンマ線 | 0.2  | 3.1   | 9.7              | 10.9  | 4.6   | 5.3              | 4.9  |
|             | 中性子  |        | 29.6 | 253.8 | 581.0            | 18.1  | 264.2 | 1067.8           | 29.6 |
|             | 合計   |        | 30.0 | 264.5 | 642.4            | 170.3 | 288.7 | 1088.0           | 91.5 |
| 評価点         |      |        | ②    | ④a    | ④b               | ⑥     | ⑧a    | ⑧b               | ⑩    |
| 表面から<br>1 m | ガンマ線 | 燃料有効部  | <0.1 | 15.5  | 15.0             | 17.5  | 10.9  | 9.8              | 2.1  |
|             |      | 構造材放射化 | <0.1 | 25.6  | 17.7             | 25.3  | 10.4  | 6.6              | 21.0 |
|             |      | 二次ガンマ線 | <0.1 | 5.7   | 5.6              | 6.2   | 4.6   | 4.6              | 1.7  |
|             | 中性子  |        | 14.8 | 21.3  | 31.7             | 20.4  | 26.3  | 41.1             | 18.1 |
|             | 合計   |        | 15.1 | 68.1  | 70.0             | 69.4  | 52.2  | 62.1             | 42.9 |

(注)0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

(ロ)-第 D. 11 表 一般の試験条件下の線量当量率

(単位 :  $\mu\text{Sv/h}$ )

| 評価点 |      | 頭部     |       |                  | 側部    | 底部    |                  |       |     |
|-----|------|--------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-----|
|     |      | 軸方向    | 径方向   | 径方向<br>(トランニオン部) |       | 径方向   | 径方向<br>(トランニオン部) | 軸方向   |     |
|     |      | ①'     | ③a    | ③b               |       | ⑤     | ⑦a               | ⑦b    | ⑨'  |
| 表面  | ガンマ線 | 燃料有効部  | 0.4   | 0.4              | 10.0  | 34.3  | 3.7              | 3.0   | 0.9 |
|     |      | 構造材放射化 | 1.0   | 7.2              | 41.7  | 107.0 | 16.2             | 11.9  | 2.6 |
|     |      | 二次ガンマ線 | 0.4   | 3.1              | 9.7   | 10.9  | 4.6              | 5.3   | 1.3 |
|     | 中性子  | 30.8   | 253.8 | 581.0            | 18.1  | 264.2 | 1067.8           | 95.8  |     |
|     | 合計   | 32.6   | 264.5 | 642.4            | 170.3 | 288.7 | 1088.0           | 100.6 |     |



(注)⑪～⑮の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており、その結果を(㍀)-第D.12表に示す。

(㍀)-第D.5 図 特別の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ)-第 D.12 表 特別の試験条件下の線量当量率

(単位：μSv/h)

| 評価点         |      | 頭部     |      |                  | 側部    | 底部    |                  |       |       |
|-------------|------|--------|------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|             |      | 軸方向    | 径方向  | 径方向<br>(トランニオン部) |       | 径方向   | 径方向<br>(トランニオン部) | 軸方向   |       |
|             |      | ⑪      | ⑫a   | ⑫b               |       | ⑬     | ⑭a               | ⑭b    | ⑮     |
| 表面から<br>1 m | ガンマ線 | 燃料有効部  | <0.1 | 29.3             | 28.4  | 81.7  | 29.8             | 28.1  | 6.4   |
|             |      | 構造材放射化 | 0.2  | 47.4             | 32.8  | 17.2  | 23.2             | 16.1  | 69.0  |
|             |      | 二次ガンマ線 | 0.3  | 12.2             | 12.0  | 23.2  | 13.4             | 13.2  | 7.0   |
|             | 中性子  |        | 51.6 | 135.5            | 144.9 | 688.6 | 139.3            | 149.8 | 122.1 |
|             | 合計   |        | 52.2 | 224.4            | 218.1 | 810.7 | 205.7            | 207.2 | 204.5 |

(注)0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

D.5 結果の要約及びその評価

通常輸送時、一般及び特別の試験条件下の遮蔽解析条件の要約を(ロ)-第 D.13 表に示す。

また、計算から得られた最大線量当量率の要約は(ロ)-第 D.14 表に示すとおりであり、規則及び告示で定められた基準を満足する。

(ロ)-第 D.13 表 遮蔽解析条件の要約

| 項目  |     | 条件   |                         |  |
|-----|-----|--|-------------------------|--|
|     |     | 通常輸送時  | 一般の試験条件下                | 特別の試験条件下   |
| 線源  |     | 軸方向の移動を考慮し、頭部方向評価モデルでは蓋方向に、底部方向評価モデルでは底方向に移動した状態を模擬した。 |                         |  |
| 遮蔽体 | 本体  | 胴、蓋、外筒、中性子遮蔽材  |                         | 同左<br>ただし、外筒、側部中性子遮蔽材(レジン)の貫通孔を考慮。<br>また、中性子遮蔽材密度については半分とする。 |
|     | 緩衝体 | 空気に置換し、距離のみ考慮  | 変形を考慮した上で、空気に置換し、距離のみ考慮 | 無視   |

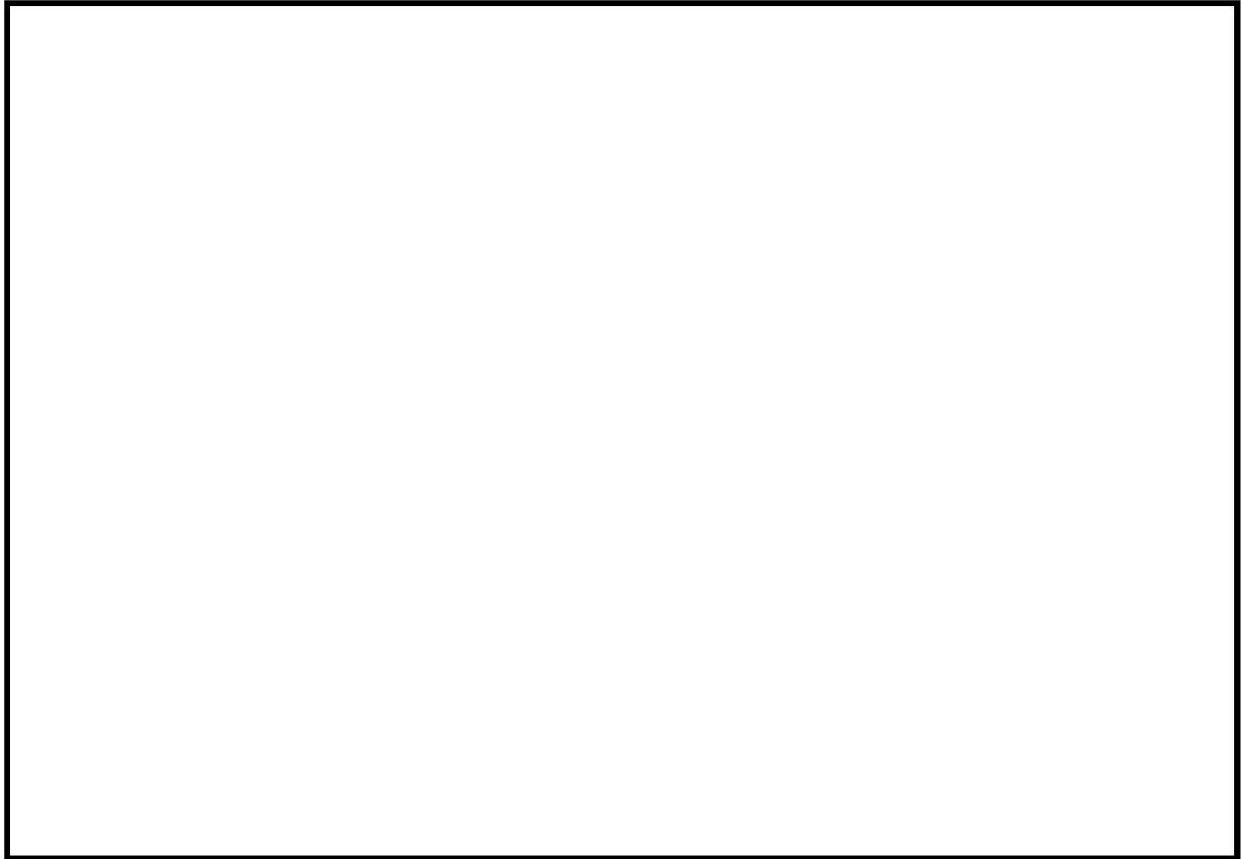
(ロ)-第 D.14 表 最大線量当量率の要約

| 項目       | 部位 | 輸送物表面<br>( $\mu$ Sv/h) |       |       |        |       | 表面から 1 m<br>( $\mu$ Sv/h) |       |       |       |       |
|----------|----|------------------------|-------|-------|--------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
|          |    | 頭部                     |       | 側部    | 底部     |       | 頭部                        |       | 側部    | 底部    |       |
|          |    | 軸方向                    | 径方向   |       | 径方向    | 軸方向   | 軸方向                       | 径方向   |       | 径方向   | 軸方向   |
| 通常輸送時    |    |                        |       |       |        |       |                           |       |       |       |       |
| ガンマ線     |    | 0.4                    | 61.4  | 152.2 | 20.2   | 61.9  | 0.3                       | 38.3  | 49.0  | 21.0  | 24.8  |
| 中性子      |    | 29.6                   | 581.0 | 18.1  | 1067.8 | 29.6  | 14.8                      | 31.7  | 20.4  | 41.1  | 18.1  |
| 合計       |    | 30.0                   | 642.4 | 170.3 | 1088.0 | 91.5  | 15.1                      | 70.0  | 69.4  | 62.1  | 42.9  |
| 一般の試験条件下 |    |                        |       |       |        |       |                           |       |       |       |       |
| ガンマ線     |    | 1.8                    | 61.4  | 152.2 | 20.2   | 4.8   |                           |       |       |       |       |
| 中性子      |    | 30.8                   | 581.0 | 18.1  | 1067.8 | 95.8  |                           |       |       |       |       |
| 合計       |    | 32.6                   | 642.4 | 170.3 | 1088.0 | 100.6 |                           |       |       |       |       |
| 特別の試験条件下 |    |                        |       |       |        |       |                           |       |       |       |       |
| ガンマ線     |    |                        |       |       |        |       | 0.6                       | 88.9  | 122.1 | 57.4  | 82.4  |
| 中性子      |    |                        |       |       |        |       | 51.6                      | 135.5 | 688.6 | 149.8 | 122.1 |
| 合計       |    |                        |       |       |        |       | 52.2                      | 224.4 | 810.7 | 207.2 | 204.5 |
| 基準値      |    |                        |       |       |        |       |                           |       |       |       |       |
| 通常輸送時    |    |                        |       | 2000  |        |       |                           |       | 100   |       |       |
| 一般の試験条件下 |    |                        |       | 2000  |        |       |                           |       | —     |       |       |
| 特別の試験条件下 |    |                        |       | —     |        |       |                           |       | 10000 |       |       |

D.6 付属書類

D.6.1 線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布

線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布を (㍀)-第D.付1図 に示す。



(㍀)-第D.付1図 軸方向燃焼度分布

## D.6.2 均質化モデルの妥当性について

遮蔽解析における二次元 (R-Z) モデルで採用している均質化モデルの妥当性を示す。

### (1) 径方向

本輸送容器の円筒形状を考慮し、許認可実績のある二次元輸送計算コードでモデル化している。円筒形状での入力として、燃料領域については等価な断面積となる円 (円筒) でモデル化し、使用済燃料集合体とバスケット、側部中性子遮蔽材 (レジン) と伝熱フィン (銅) を均質化した物性値を設定している。側部中性子遮蔽材部は、レジンと伝熱フィンのノミナル値に寸法公差を考慮して遮蔽材密度が小さくなるよう設定している。バスケット外周部は、円周方向に不均一な厚さとなっており、バスケット外周部の密度を密度係数で調整している ((a)-第 D. 付 2 図)。

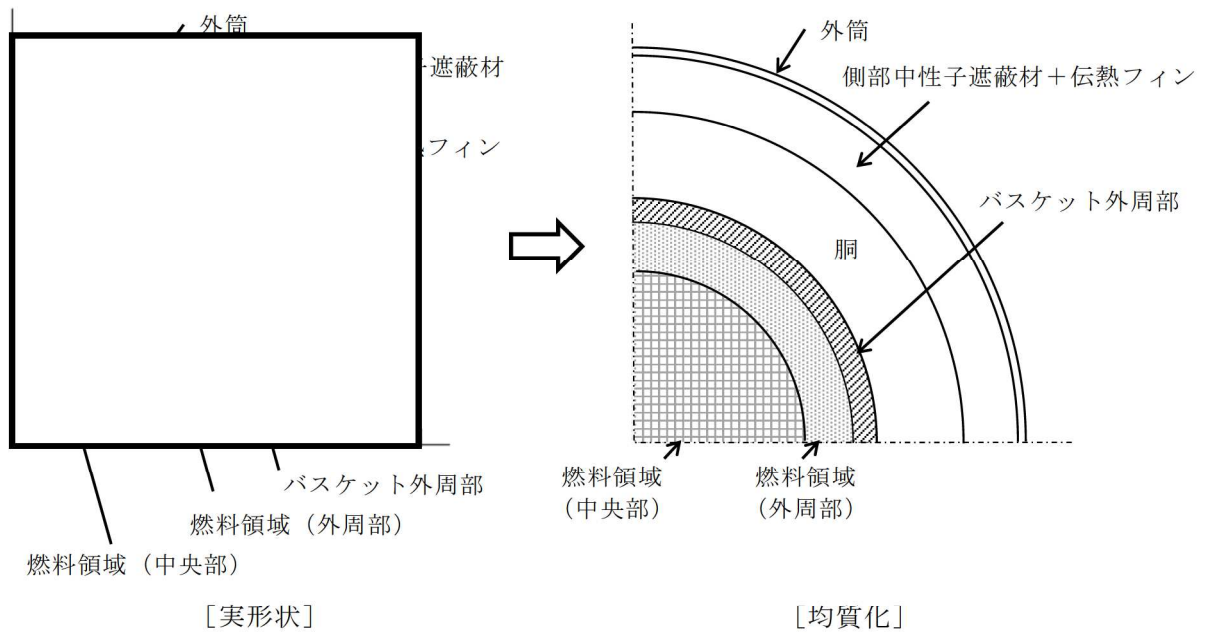
バスケット外周部の円筒形状での均質化にあたって、表面から 1 m 位置の線量当量率が、表面位置に比べ、基準値に対して裕度が小さいため、水平断面 X-Y モデルにて円周方向の表面から 1 m 離れた位置での最大線量当量率を算出し、円周方向の最大線量当量率を包絡するよう、均質化円筒モデルの密度係数を設定している ((a)-第 D. 付 3 図)。この密度係数を遮蔽解析で用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ている。また、参考文献 6) にて本輸送容器と類似形状の MSF-24P 型に対して MCNP5 での実形状を模擬した三次元モデル解析 (以下、「MCNP 解析」という。) と DOT3.5 での二次元モデル解析 (以下、「DOT3.5 解析」という。) の結果比較が実施されている。側部中央周方向の表面について DOT3.5 解析の解析結果が MCNP 解析の解析結果を包絡していることを確認 ((a)-第 D. 付 4 図) しており、径方向に対する均質化モデルは妥当である。

### (2) 軸方向

本輸送容器の円筒形状を考慮し、許認可実績のある二次元輸送計算コードでモデル化している。燃料集合体領域は軸方向に複数の領域に分けて均質化している。参考文献 7) では、MSF-24P(S) 型を対象に、燃料集合体ごとにモデル化 (以下、「詳細モデル」という。) し、三次元モンテカルロコード MCNP5 を用いて軸方向の線量当量率を評価した結果と本モデルと同様に均質化モデルに対して二次元輸送計算コードで軸方向の線量当量率を評価した結果の比較が (a)-第 D. 付 5 図のとおり示されている。比較の結果、均質化モデルと詳細モデルは同等であり、均質化モデルは妥当である。

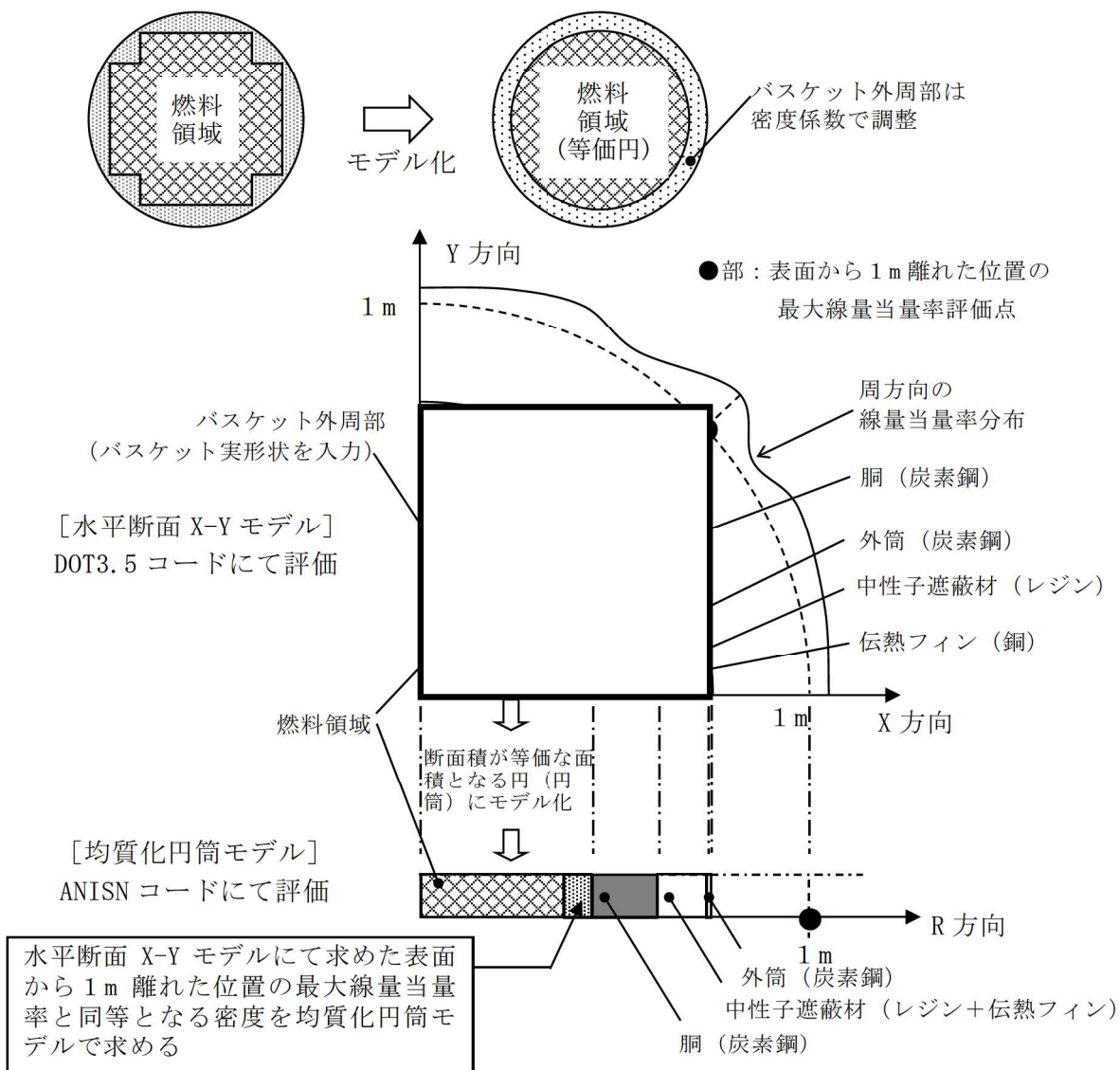
なお、本遮蔽解析モデルでは、蓋部方向付近の線源であるバーナブルポイズン集合体は放射化線源強度のみを考慮して、構造材としての遮蔽効果は無視しているため保守的な設定となっており、線源位置についても、(a)-第 D. 1 図に示すとおり、使用済燃料集合体は蓋部及び底部に接した状態でのモデルとしており、線源である使用済燃料集合体から線量当量率評価点までの距離が近い保守的なモデルとなっている。





遮蔽解析モデルへの入力  
 二次元モデルの解析では、円筒形状での入力となるため、燃料領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化している。その際、燃料領域は使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定した。

(D)-第 D. 付 2 図 燃料領域のモデル化（水平断面）



#### 径方向の均質化 (バスケット外周部、中性子遮蔽材部)

バスケット外周部は円周方向に不均一な厚さの構造であり、中性子遮蔽材部はレジンと伝熱フィンが存在する不均質な構造であることから、本体モデルでは下記に示す手法により、径方向の密度を設定している。

中性子遮蔽材部：

レジンと伝熱フィンそれぞれの寸法 (ノミナル値、寸法公差) を考慮して密度を設定する。

バスケット外周部：

(i) 水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

水平断面 X-Y モデルによる表面から1m離れた位置での最大線量当量率を算出する。

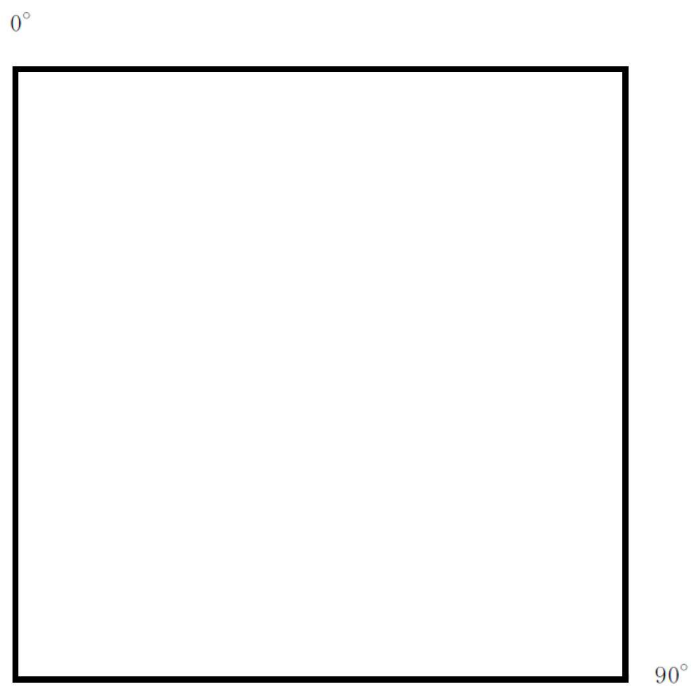
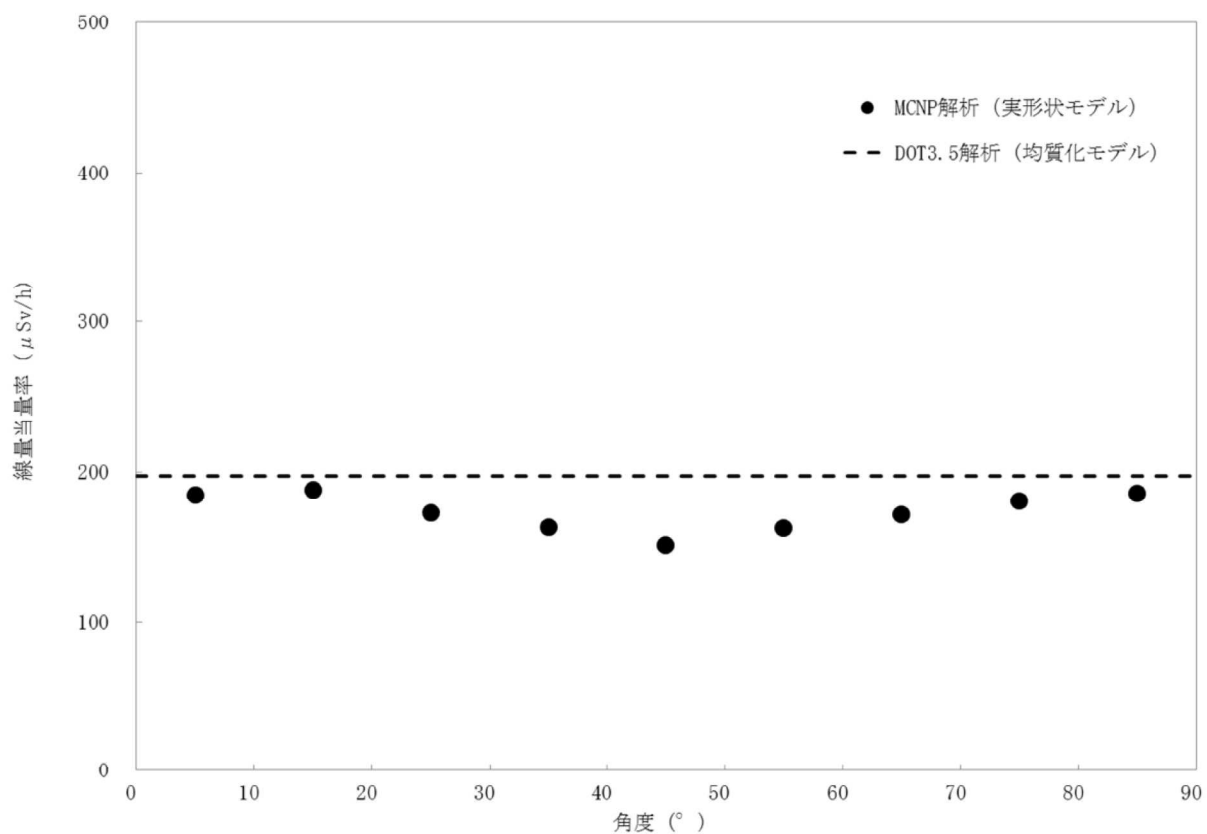
※算出位置を表面から1m離れた位置としているのは、表面位置に比べ、基準線量当量率に対する裕度が少ないためである。

(ii) 均質化円筒モデル遮蔽解析

均質化モデルにて、表面から1m離れた位置での線量当量率が(i)で算出した最大線量当量率と同等となるバスケット外周部の密度係数を算出する。

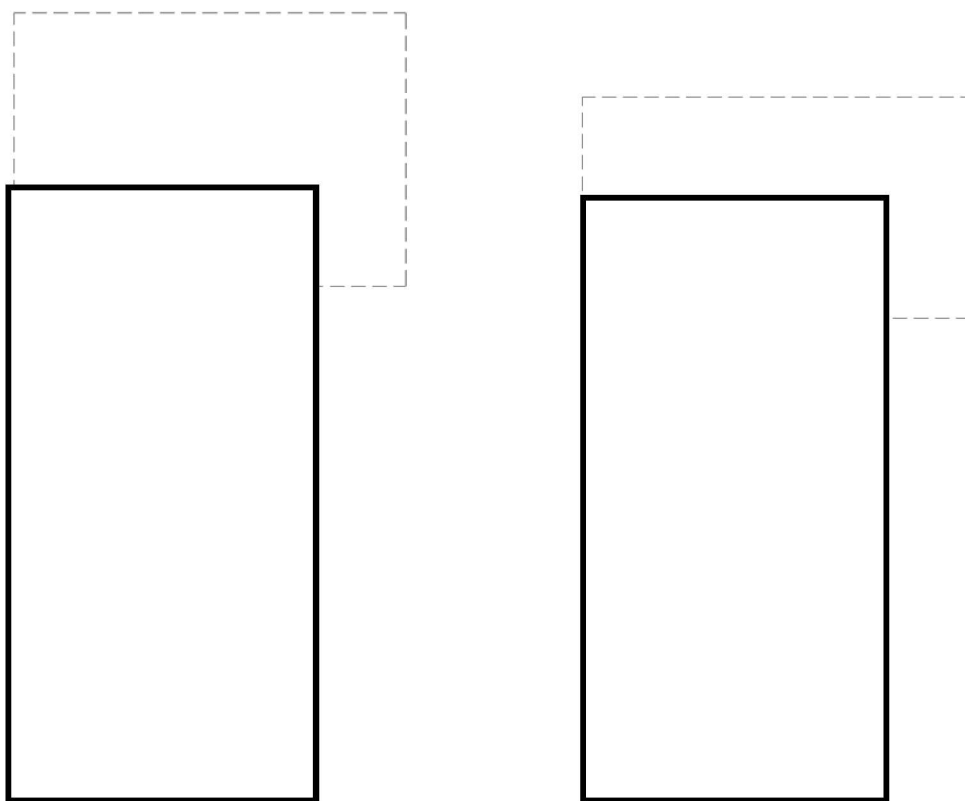
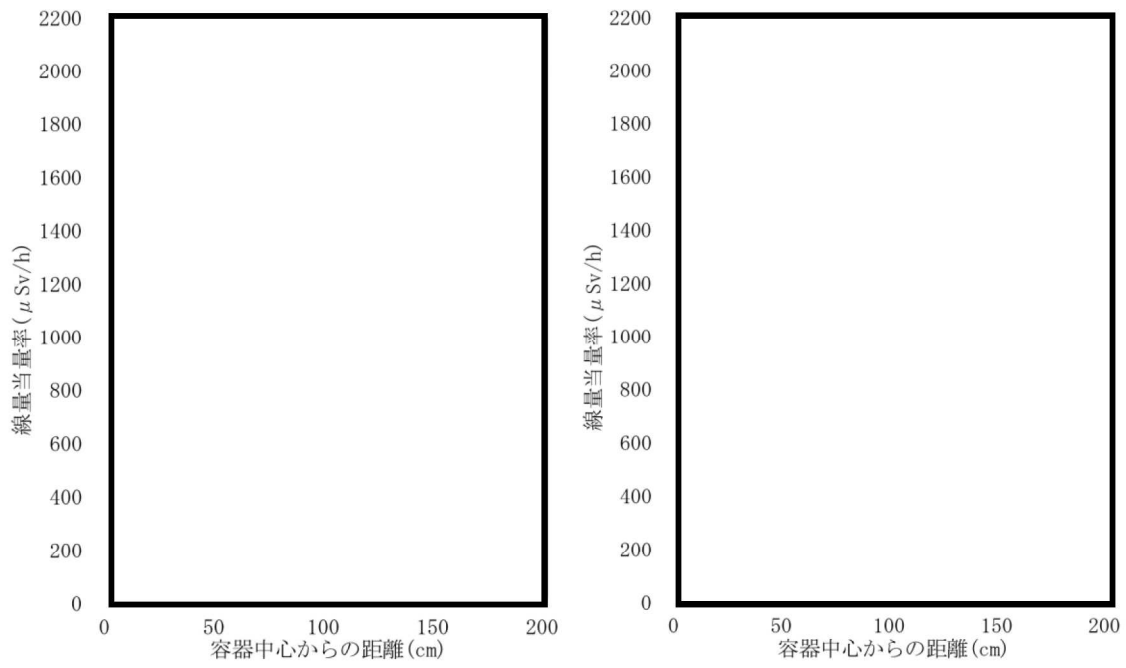
中性子遮蔽材部の密度係数に加え、(ii)にて算出したバスケット外周部の密度係数を用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ることができる。

(ロ)-第D.付3図 燃料領域及び側部中性子遮蔽材と伝熱フィン領域のモデル化の詳細



(注) 赤色部は評価点位置を示す。

(D)-第 D. 付 4 図 側部中央周方向の線量当量率分布比較 (MSF-24P 型)



(ロ)-第 D. 付 5 図 均質化モデル (DOT3.5) と詳細モデル (MCNP5) 表面の線量当量率分布の比較  
(頭部軸方向・底部軸方向)

### D.6.3 中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度と製造時の確認

(ロ)-第 D.8 表に記載の解析に用いる中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度は、中性子遮蔽材の元素組成と、製品仕様として中性子遮蔽材の密度、水素及び B<sub>4</sub>C 含有量の最低値から算出した。

製造時には、中性子遮蔽材の元素組成については、中性子遮蔽材が所定の銘柄又はその相当品であることを確認し、中性子遮蔽材の密度、水素及び B<sub>4</sub>C 含有量については、サンプルによる中性子遮蔽材の密度測定記録及び成分分析記録を確認する。

#### D.6.4 参考文献

- 1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3” , OECD/NEA Databank, (2006).
- 2) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code” , CCC-276, (1977).
- 3) K.Kosako, N.Yamano, T.Fukahori, K.Shibata and A.Hasegawa, “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- 4) Brookhaven National Laboratory, “Neutron Cross Sections” , BNL-325 Third Edition, (1973).
- 5) ICRP, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation” , ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3-4), (1996).
- 6) 四国電力株式会社, 「安全解析等に関するコメント回答」, 平成 30 年 10 月 17 日, <https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000114087/000251262.pdf>.
- 7) 三菱重工業株式会社, 「補足説明資料 26-2 26 条 燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備 遮蔽機能に関する説明資料」, L5-95KV262R6, 2023 年 4 月 3 日.

(二) 章 E 臨 界 解 析

## E. 臨界解析

### E.1 概要

本輸送容器のバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の燃料集合体が輸送容器の所定の位置に収納される。本輸送容器へ 14×14 燃料を収納する場合には、バスケット格子内へバスケットスペーサが設置される。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造としている。

本輸送容器は燃料集合体を収納後、内部水が排出され、さらに真空乾燥が行われる。また、密封性能を有した複数の蓋を有しており、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下においても胴内に水が浸入することはない。したがって、胴内を告示第 25 条第 1 号のただし書きに記載されている「浸水及び漏水を防止する特別な措置が講じられた部分」とし、胴内を水で満たさない条件で臨界解析を行うこととする。

本臨界解析では、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における輸送容器及び燃料集合体の変形を考慮し、境界条件として完全反射を仮定することにより、以下の条件より厳しい評価とする。

① 通常輸送時

② 輸送物を孤立系の条件に置く場合

③ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合

④ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合

⑤ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

⑥ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

臨界解析には、SCALE コードシステム<sup>1)</sup>を用い、中性子実効増倍率 (keff) の計算は多群モンテカルロ法による KENO-VIコード<sup>1)</sup>を用いて行った。その結果、keff は標準偏差( $\sigma$ )の 3 倍を加えても十分未臨界である。

したがって、本輸送物は上記①～⑥のいずれの条件においても未臨界である。

### E.2 解析対象

#### E.2.1 収納物

本輸送容器には PWR 燃料集合体を 21 体収納する。

本輸送容器に収納する燃料集合体の型式と仕様は(イ)-第 A.1 表に示したとおりであり、17×17 燃料及び 14×14 燃料のそれぞれを全数収納した場合の臨界解析を実施する。臨界解析の対象燃料は、中性子実効増倍率が最も大きくなる 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) 及び 14×14 燃料 55,000MWd/t 型 (A 型) とする。燃料集合体の仕様を(ロ)-第 E.1 表に示す。また、14×14 燃料は、バスケットスペーサが設置されたバスケット格子内へ収納される。



本輸送容器に収納する燃料集合体は照射済のものであるが、<sup>235</sup>U濃縮度は未照射のままの減損していない値をとり、安全側の仮定とする。また、燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、ガドリニウムの存在を無視する。さらに、燃料集合体はバーナブルポイズン集合体を挿入した状態で収納される場合があるが、バーナブルポイズン集合体を無視する。

また、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し、輸送容器に収納される全燃料集合体について支持格子 1 スパン間の燃料棒ピッチの変化を仮定する。燃料棒ピッチ変化の中性子実効増倍率への影響を確認するため、燃料棒ピッチが変形前のピッチである場合に加えて、燃料棒ピッチが最小（燃料棒直径と等しい）の場合及び燃料棒がバスケット格子内（17×17 燃料の場合）またはバスケットスペーサ内（14×14 燃料の場合）で均一に広がった場合について評価する。(ロ)-第 E.1 図にピッチ変化部位の燃料モデルを示す。

(ロ)-第 E.1 表 臨界解析に用いる燃料集合体の仕様 (1/2)

| 項目            | 単位    | 17×17 燃料              |
|---------------|-------|-----------------------|
|               |       | 48,000Mwd/t 型         |
|               |       | A型                    |
| 燃料材質          | —     | 二酸化ウラン                |
| 被覆管材質         | —     | ジルカロイ-4               |
| 燃料密度          | %理論密度 | 95                    |
| 燃料棒直径         | cm    | 0.95                  |
| ペレット直径        | cm    | 0.819                 |
| 被覆管肉厚         | cm    | 0.057                 |
| 燃料有効長         | cm    | 364.8                 |
| 燃料棒配列         | —     | 17×17                 |
| 燃料集合体当たりの燃料棒数 | 本     | 264                   |
| 燃料棒ピッチ        | cm    | 1.26 <sup>(注1)</sup>  |
| 燃料集合体の幅       | cm    | 21.42 <sup>(注2)</sup> |
| 初期濃縮度         | wt%   | 4.2                   |

(注1) 燃料棒ピッチ変化なしの場合

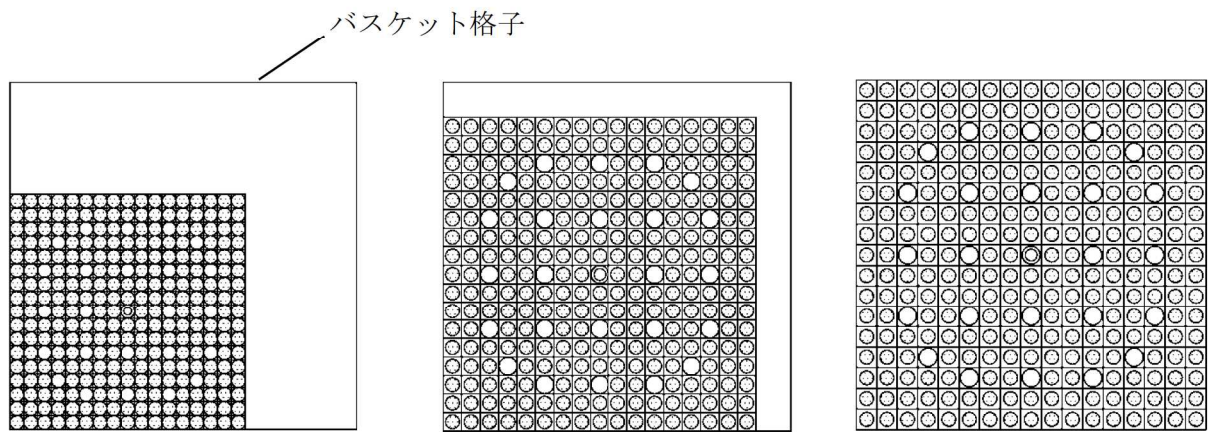
(注2) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。

(ロ)-第E.1表 臨界解析に用いる燃料集合体の仕様 (2/2)

| 項目            | 単位    | 14×14 燃料              |
|---------------|-------|-----------------------|
|               |       | 55,000MWd/t 型         |
|               |       | A型                    |
| 燃料材質          | —     | 二酸化ウラン                |
| 被覆管材質         | —     | MDA/ZIRLO             |
| 燃料密度          | %理論密度 | 97                    |
| 燃料棒直径         | cm    | 1.072                 |
| ペレット直径        | cm    | 0.929                 |
| 被覆管肉厚         | cm    | 0.062                 |
| 燃料有効長         | cm    | 364.2                 |
| 燃料棒配列         | —     | 14×14                 |
| 燃料集合体当たりの燃料棒数 | 本     | 179                   |
| 燃料棒ピッチ        | cm    | 1.41 <sup>(注1)</sup>  |
| 燃料集合体の幅       | cm    | 19.74 <sup>(注2)</sup> |
| 初期濃縮度         | wt%   | 4.9                   |

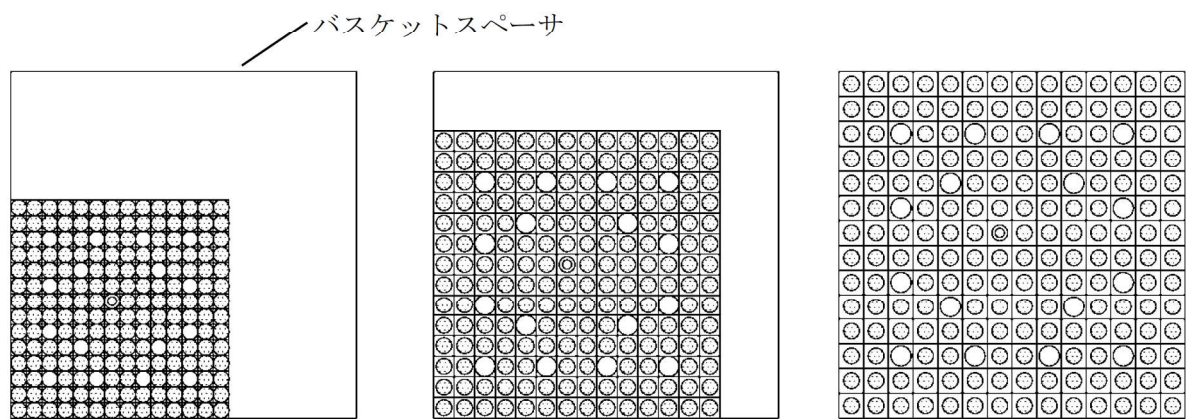
(注1) 燃料棒ピッチ変化なしの場合

(注2) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の集合体の幅とする。



燃料棒ピッチ=最小 (燃料棒直径)      燃料棒ピッチ=変化なし      燃料棒ピッチ=均一拡大

(ロ)-第 E.1 図(a) 燃料モデル (ピッチ変化部位) (17×17 燃料収納時)



燃料棒ピッチ=最小 (燃料棒直径)      燃料棒ピッチ=変化なし      燃料棒ピッチ=均一拡大

(ロ)-第 E.1 図(b) 燃料モデル (ピッチ変化部位) (14×14 燃料収納時)

## E. 2.2 輸送容器

輸送容器本体の形状は、(イ)-第 C. 2 図等に示すとおりである。

本輸送容器は(ロ)章 A. 9 に示すとおり核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下において、臨界評価に影響する構造物の形状変化は生じない。

また、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において、臨界評価に影響するものとして、外筒が 1 m 貫通試験により損傷し、熱的試験において側部中性子遮蔽材のレジンの一部が焼損するが、臨界解析では中性子遮蔽材を無視している。

## E. 2.3 中性子吸収材

(イ)-第 C. 14 図にバスケットの構造を示す。

バスケットプレートは、アルミニウム合金製であり、ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材が併せて配置される。ほう素添加アルミニウム合金の原子個数密度を E. 3. 2 に示す。

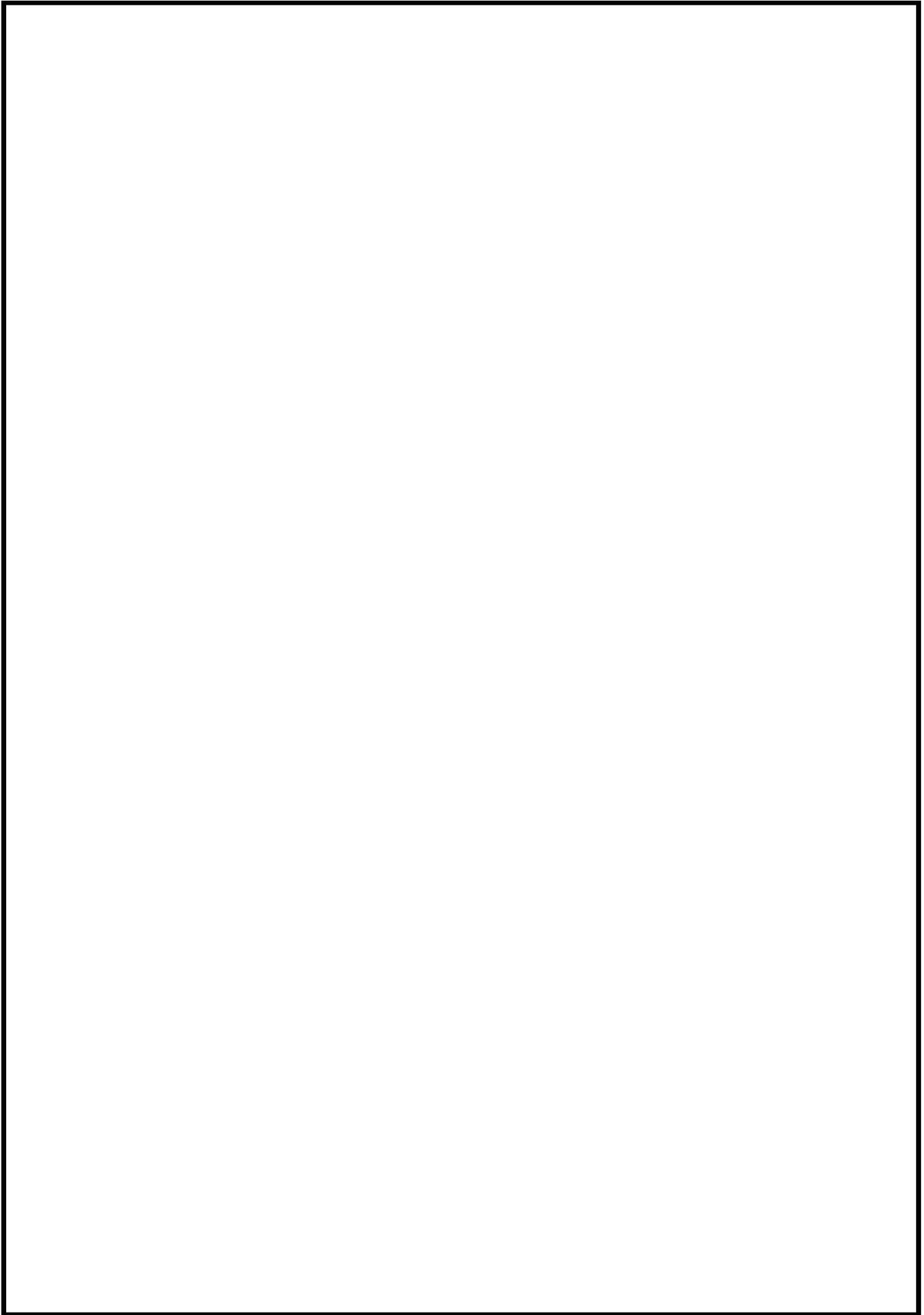
核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において、バスケットプレートは変形しないため、中性子吸収材の配置に変化はない。

### E.3 モデル仕様

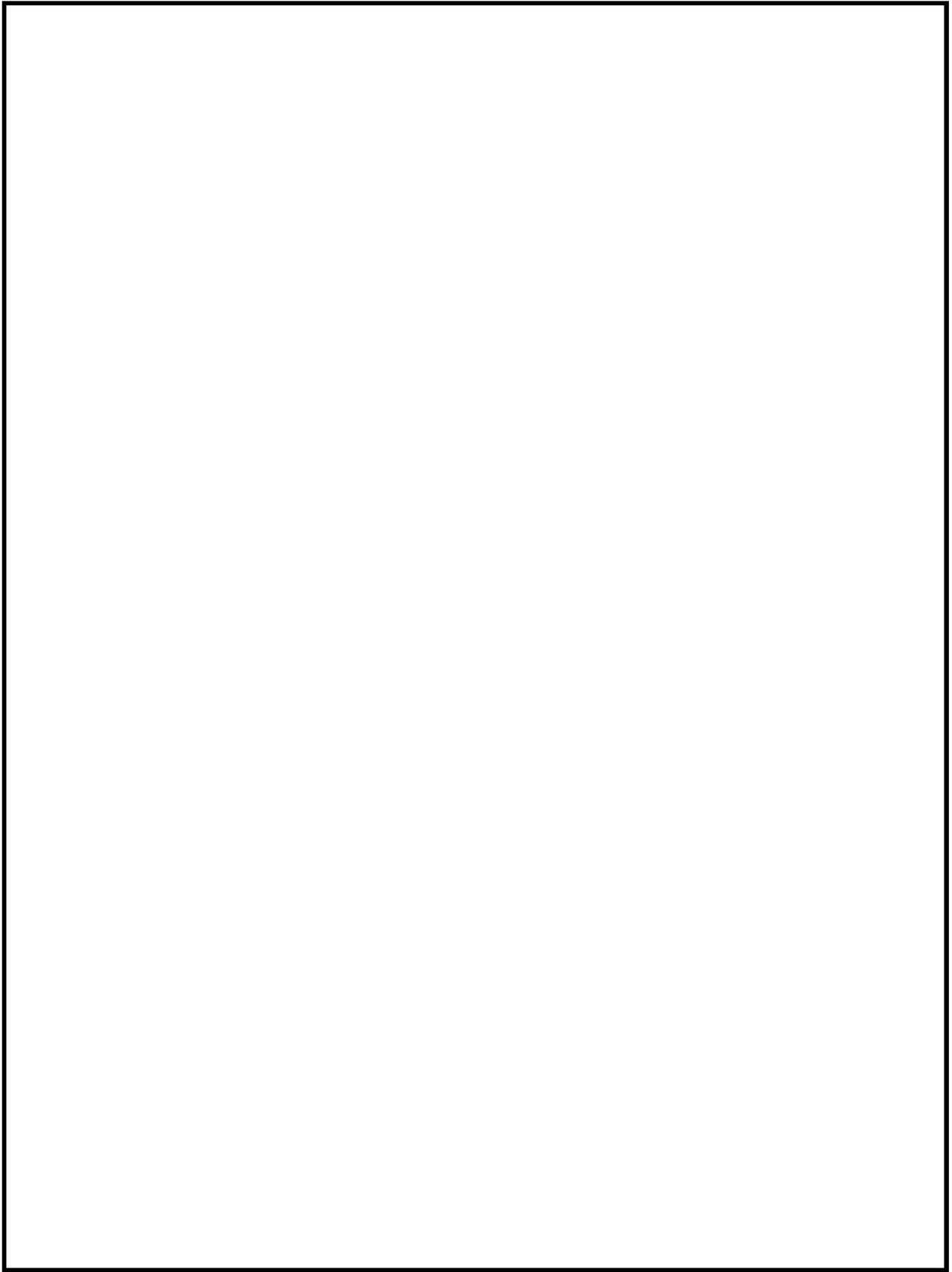
#### E.3.1 解析モデル

(ロ)-第 E.2 図に臨界解析モデルを示す。解析モデルは安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

- ・輸送物が無限に配列している体系とする。
- ・中性子遮蔽材を無視する。
- ・緩衝体及び三次蓋を無視する。
- ・中性子実効増倍率が最大となるように、バスケットプレート板厚、バスケットプレート内幅、中性子吸収材板厚、バスケット格子内のり及びバスケットスペーサの公差を考慮する。
- ・バスケット格子内の燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるように配置する。  
(燃料棒ピッチを拡大しない場合)
- ・支持格子 1 スパン間の燃料棒ピッチの変化を考慮する。
- ・安全側に胴内には 5000 cm<sup>3</sup>の水が均一に分散していると仮定する。
- ・バスケットプレート、中性子吸収材及びバスケットスペーサは、中性子の吸収が小さくなるように、実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し、それ以外の部分は無視する。

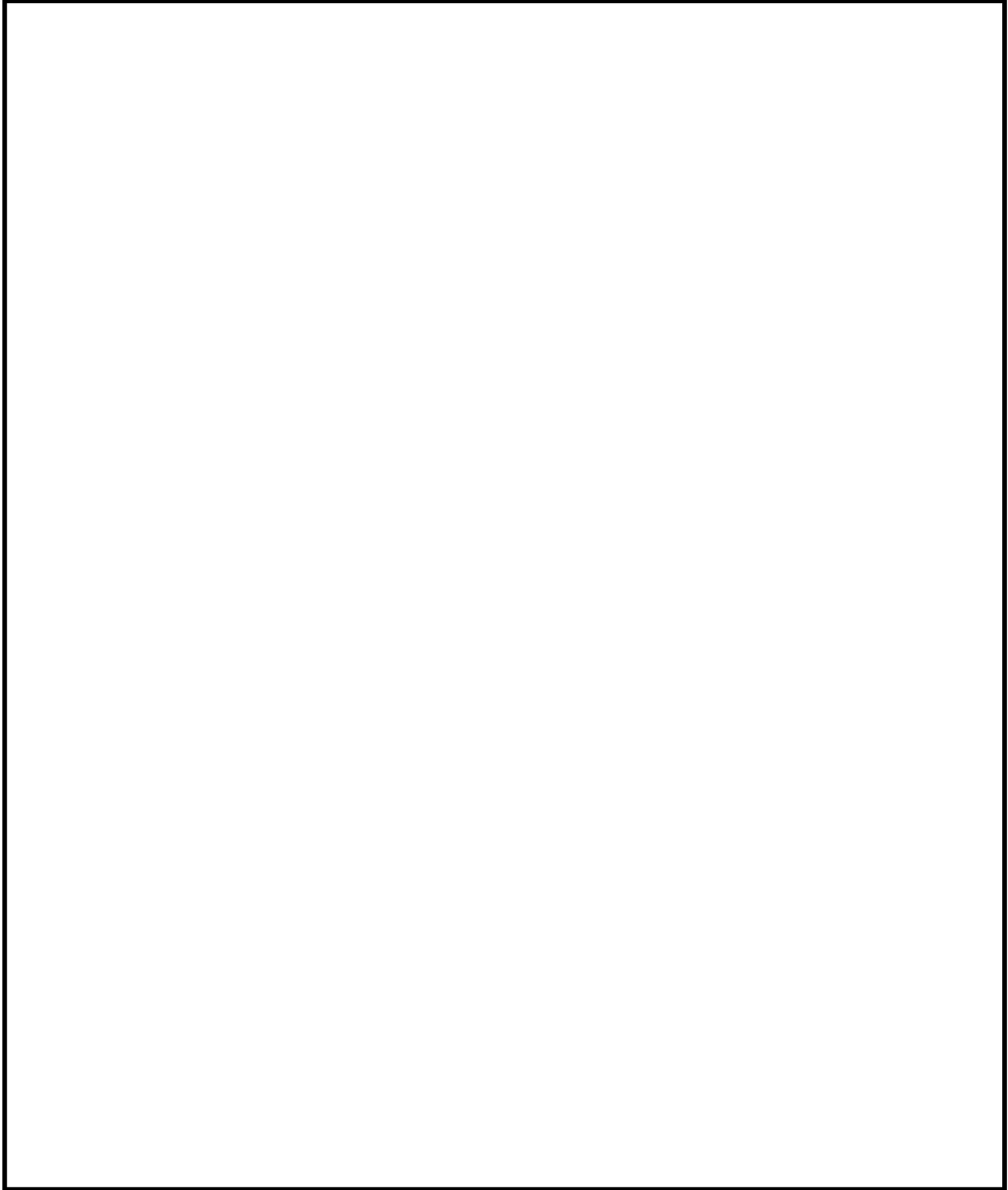


(ロ)-第 E. 2 図(a) 臨界計算モデル (縦断面図) (17×17 燃料収納時)



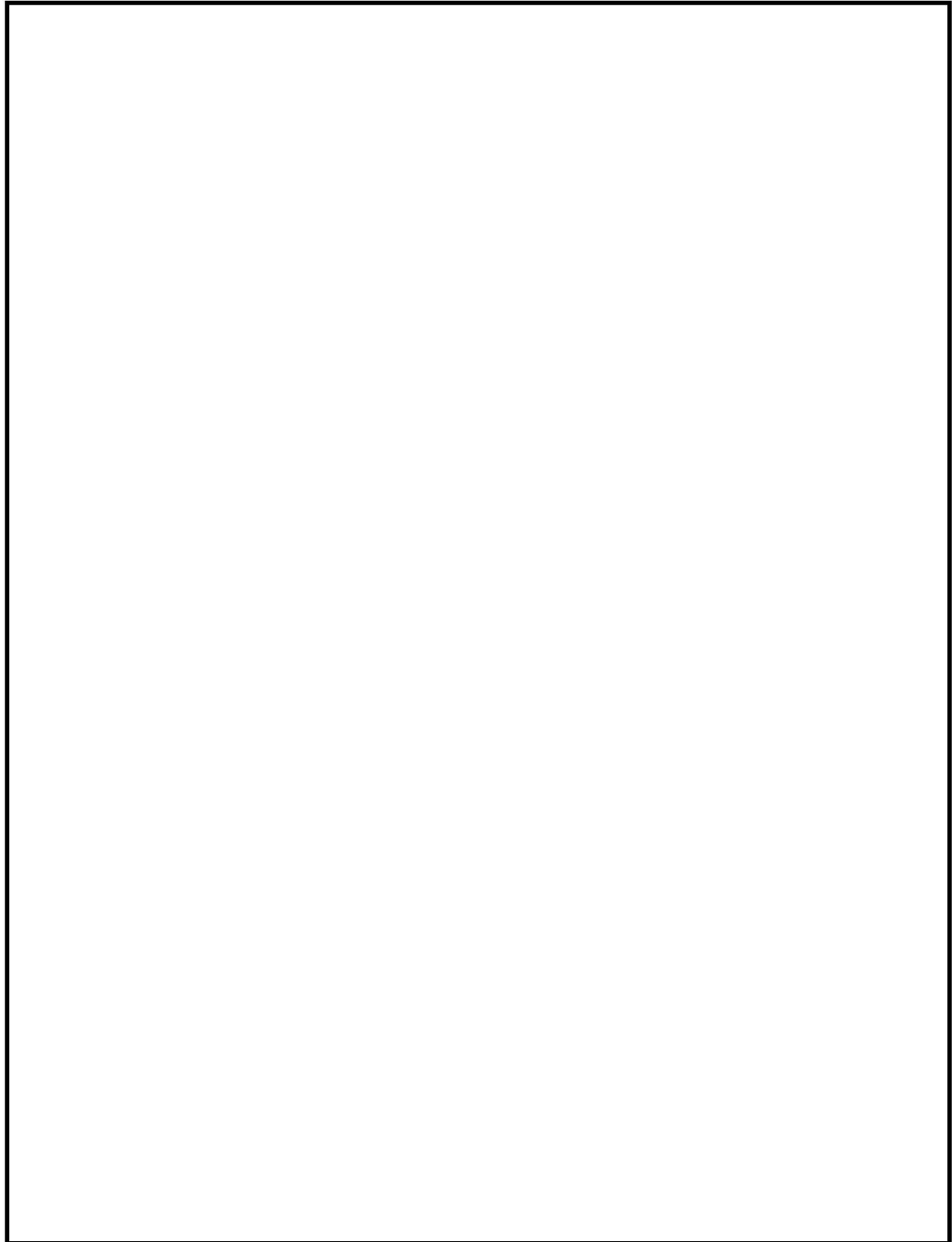
(㊦)-第 E. 2 図(b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ最小)

(17×17 燃料収納時)

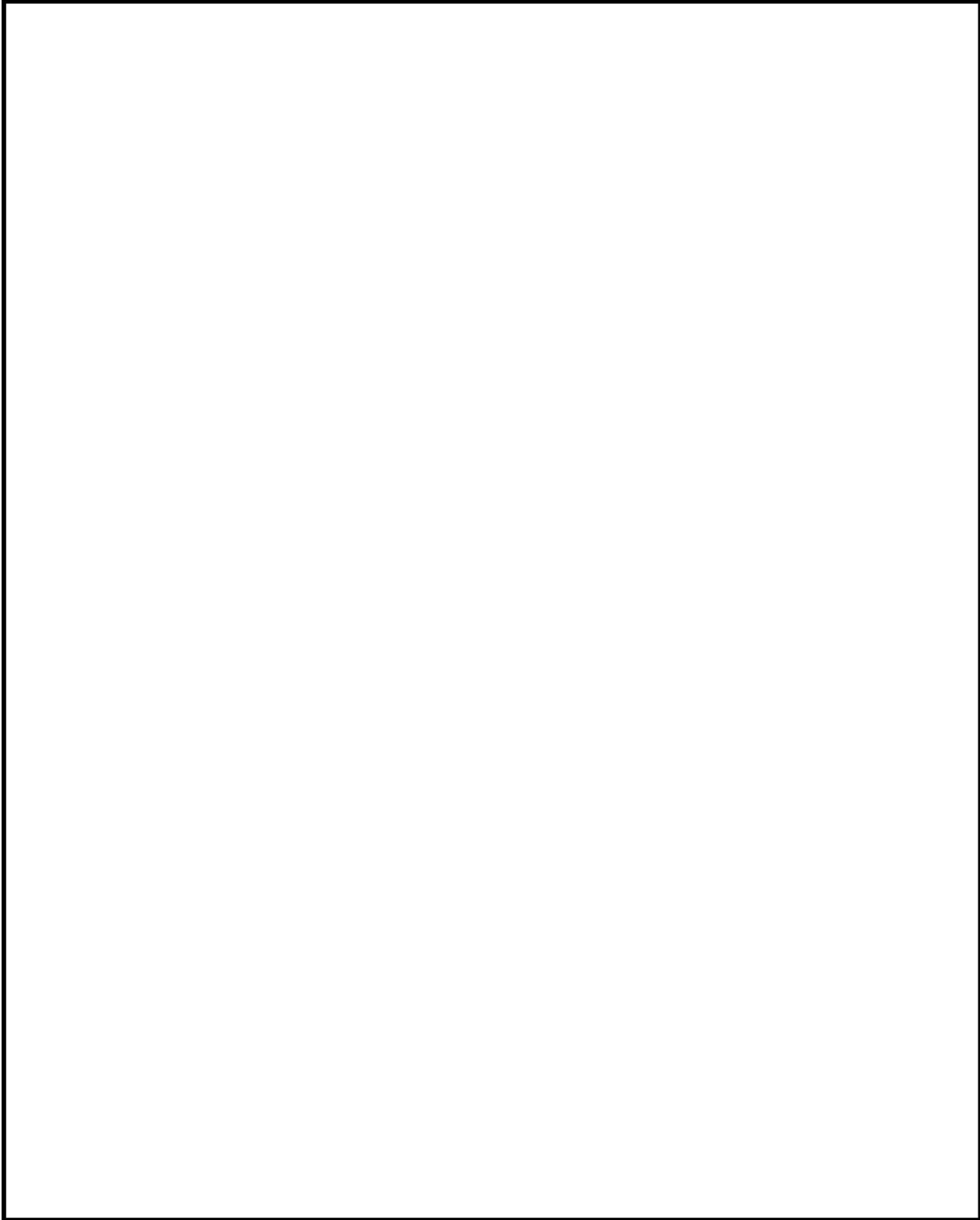


(㊦)-第 E. 2 図 (b-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ最小)  
(17×17 燃料収納時)

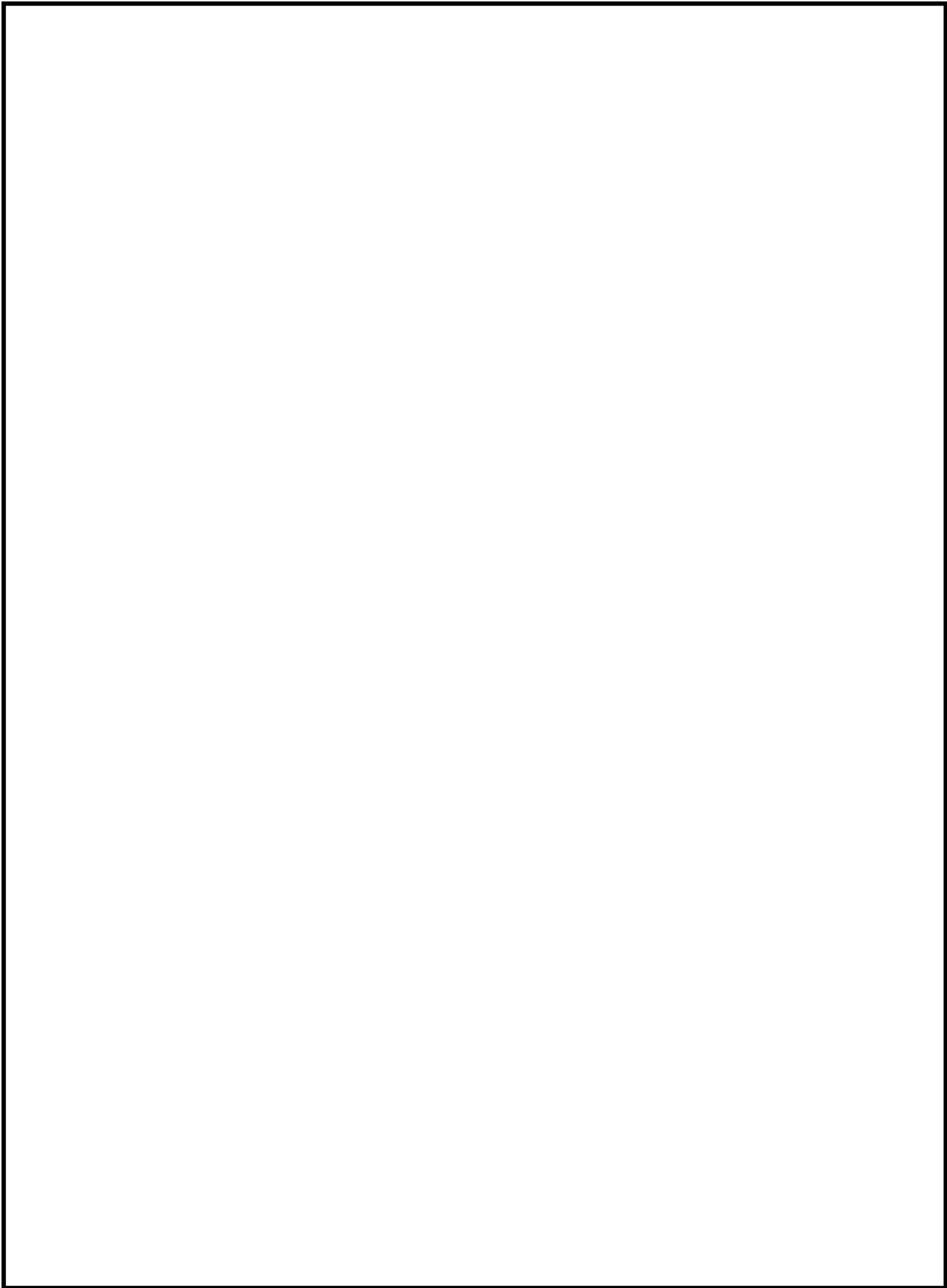




(ロ)-第 E. 2 図 (b-3) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ変化なし)  
(17×17 燃料収納時)

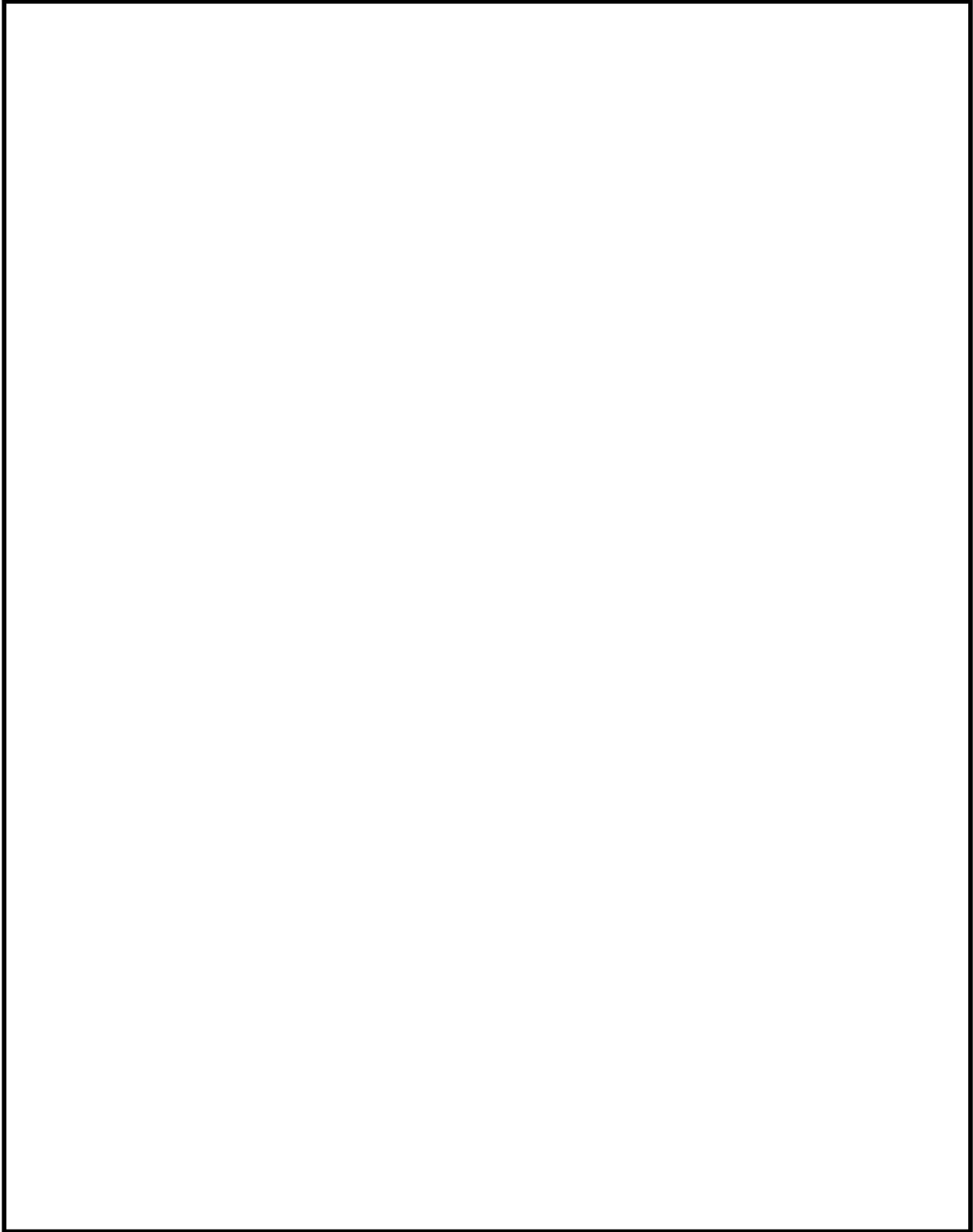


(ロ)-第 E. 2 図(b-4) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ変化なし)  
(17×17 燃料収納時)

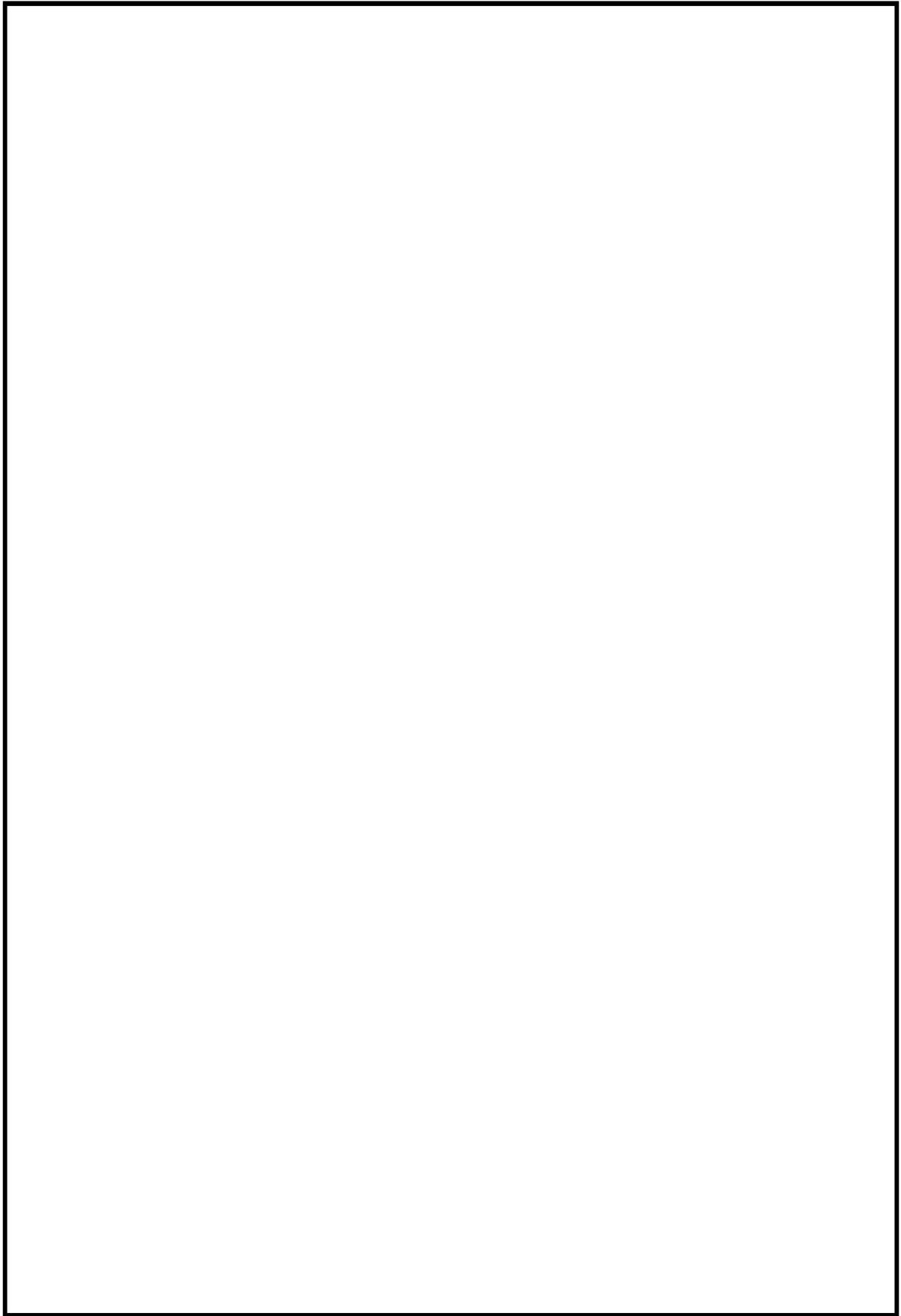


(ロ)-第 E. 2 図 (b-5) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ均一拡大)

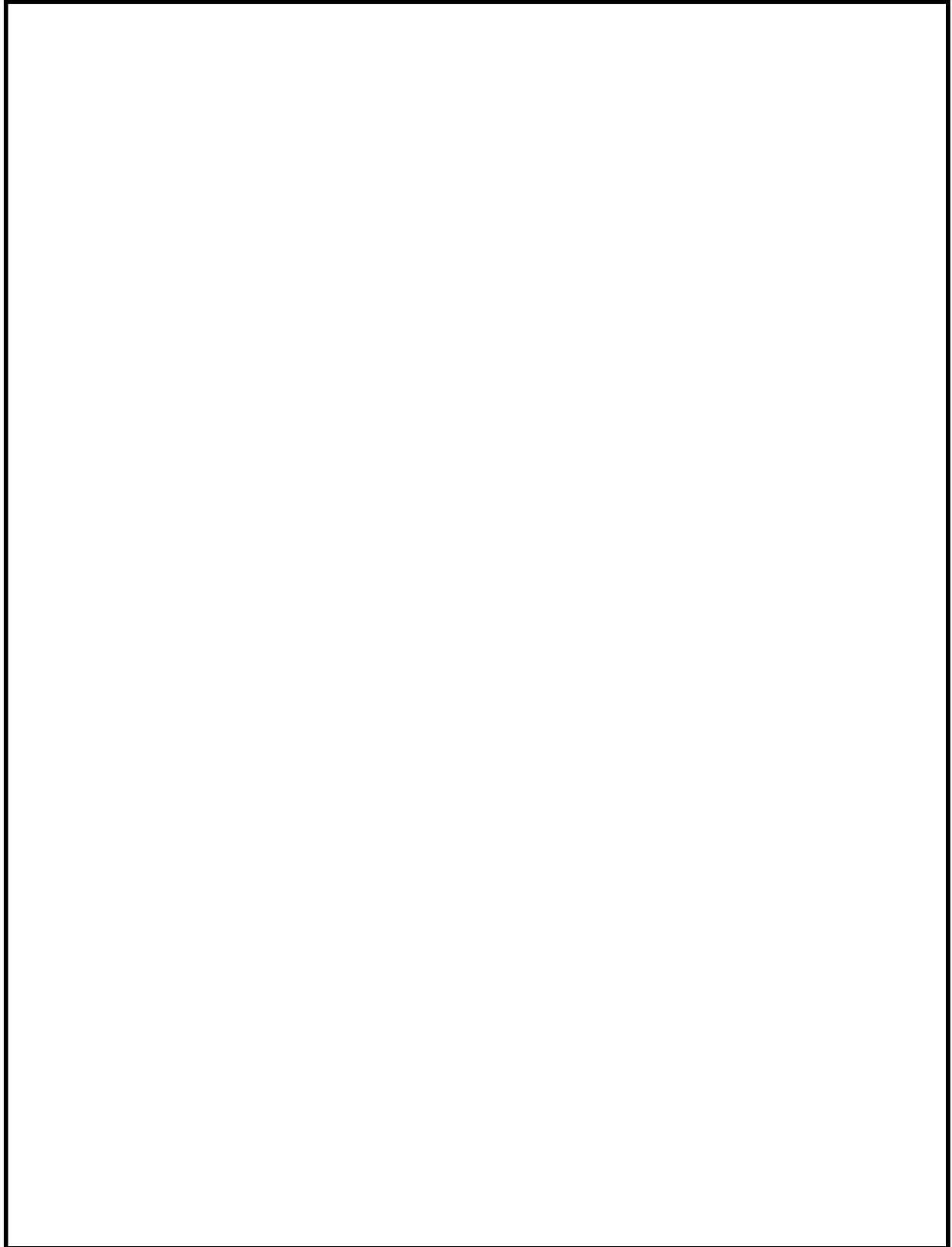
(17×17 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(b-6) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ均一拡大)  
(17×17 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(c) 臨界計算モデル (縦断面図) (14×14 燃料収納時)



(ロ)-第 E. 2 図(d-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ最小)

(14×14 燃料収納時)