

本資料のうち枠囲みの範囲は商業機密等に係る事項
ですので公開することはできません。

核燃料輸送物設計承認申請書の一部補正について

原子力発第19436号

令和2年 3月10日

原子力規制委員会 殿

香川県高松市丸の内

四国電力株式会社

取締役社長 社長執行役員

長井 啓

平成30年5月25日付け、原燃発第18-77号をもって申請（令和元年12月6日付け、原子力発第19316号で一部補正）しました核燃料輸送物設計承認申請書について、下記のとおり一部補正をいたします。

記

別紙記載事項を別紙のとおり補正する。

以上

別紙

別紙 (ロ) 章の一部補正

別紙 (ロ) 章を以下のとおり補正する。

| 頁 | 行 | 補正前 | 補正後 |
|-------------------------------------|-----------------|---|---|
| 別紙 3-資料 1-3 | 下 4 | (c) 1 m 貫通試験等 | (c) 1 m 貫通試験 (d) 火災試験 (e) 0.9 m の水中浸漬試験 |
| 別紙 3-資料 1-43 | 下 4～ 下 1 | (注 1) 緩衝体緩衝材の [] は、-20℃ [] は、-20℃ では常温時に対して強度が上昇する。-20℃の木材強度を用いた場合の自由落下試験時の衝撃加速度は、常温時の木材強度を用いて算出した (ロ)-第 A. 19 表及び (ロ)-第 A. 37 表に示す設計加速度に対して増加するが、輸送物の構造上の健全性が損なわれることはない。 | (注 1) 緩衝体緩衝材の [] は、-20℃ [] は、-20℃ では常温時に対して強度が <u>16～29%</u> 上昇する。 <u>A. 10. 4 に示すように</u> 、-20℃の木材強度を用いた場合の自由落下試験時の衝撃加速度は、常温時の木材強度を用いて算出した (ロ)-第 A. 19 表及び (ロ)-第 A. 37 表に示す設計加速度に対して <u>最大 11 %</u> 増加するが、 <u>各評価部位に発生する応力は低温時の評価基準を満足するため</u> 、輸送物の構造上の健全性が損なわれることはない。 |
| 別紙 3-資料 1-186 ～ 別紙 3-資料 1-212 | 上 1 ～ 下 1 | (記載変更) | 資料 1 の記載に変更する。 |

頁は令和元年 1 2 月 6 日付け、原子力発第 1 9 3 1 6 号で一部補正の頁を示す

| 頁 | 行 | 補正前 | 補正後 |
|-----------------------|-----------|---|---|
| (ロ)-B-19 | 下5～ 下3 | ただし、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 ^(註) 、人が容易に近づきうる表面の温度は全て85℃以下である。 | ただし、外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網(65℃以下(B.6.3参照))を取り付けて輸送するため ^(註) 、人が容易に近づきうる表面の温度は全て85℃以下である。 |
| (ロ)-B-30 | 下4～ 下2 | なお、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ89℃及び101℃であり85℃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℃以下である。 | なお、外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ89℃及び101℃であり85℃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(65℃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℃以下である。 |
| (ロ)-B-58～ (ロ)-B-59 | 上1～ 下1 | (記載変更) | 資料2の記載に変更する。 |

頁は平成30年5月25日付け、原燃発第18-77号で申請の頁を示す

| 頁 | 行 | 補正前 | 補正後 |
|-------------------------|-----------|--|--------------|
| (ロ)-E-6 ^{※1} | 上1～ 下1 | (ロ)-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) | 資料3の同図に変更する。 |
| 別紙3-資料3-1 ^{※2} | 上1～ 下1 | (ロ)-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) | 資料3の同図に変更する。 |
| (ロ)-E-8 ^{※1} | 上1～ 下1 | (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) | 資料3の同図に変更する。 |
| 別紙3-資料3-2 ^{※2} | 上1～ 下1 | (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) | 資料3の同図に変更する。 |
| (ロ)-E-10 ^{※1} | 上1～ 下1 | (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) | 資料3の同図に変更する。 |
| 別紙3-資料3-3 ^{※2} | 上1～ 下1 | (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) | 資料3の同図に変更する。 |
| (ロ)-E-29 ^{※1} | 上1～ 下1 | (ロ)-第E.付1図(b-1) 臨界計算モデル(燃料領域横断面図) | 資料3の同図に変更する。 |
| 別紙3-資料3-4 ^{※2} | 上1～ 下1 | (ロ)-第E.付1図(b-2) 臨界計算モデル(燃料領域拡大図) | 資料3の同図に変更する。 |

※1 頁は平成30年5月25日付け、原燃発第18-77号で申請の頁を示す

※2 頁は令和元年12月6日付け、原子力発第19316号で一部補正の頁を示す

4. 試験結果

(1) 頭部 9.3 m 垂直落下

(ロ)-第 A. 53 図に頭部 9.3 m 垂直落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に頭部 9.3 m 垂直落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(ロ)-第 A. 71 表に緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(ロ)-第 A. 54 図に胴中央の加速度履歴を示す。(ロ)-第 A. 72 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量（参考値）

(ロ)-第 A. 73 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋については蓋の横ずれが確認され、横ずれ量は最大 0.24 mm であった。二次蓋については、蓋の横ずれは生じなかった。

d. ボルトに作用する応力（参考値）

(ロ)-第 A. 74 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率（参考値）

(ロ)-第 A. 75 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 (5×10^{-4} Pa m³/s [= 5×10^{-3} ref cm³/s]) を満足した。また、二次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。

(ロ)-第 A. 71 表 9.3 m 頭部垂直落下時の緩衝体変形量

| 部位 | 変形量 (mm) | 許容変形量 (mm) |
|-------|-------------|----------------------|
| 上部緩衝体 | 259 | <input type="text"/> |

(ロ)-第 A. 72 表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大加速度

| 計測位置 | 方向 | 最大加速度 (G) |
|---------------|------|--------------|
| 胴上部 (0°) | 落下方向 | 59 |
| 胴上部 (180°) | 落下方向 | 63 |
| 胴中央 | 落下方向 | 72 |
| 一次蓋 | 落下方向 | 448 |
| 二次蓋 | 落下方向 | 533 |

(ロ)-第 A. 73 表 9.3 m 頭部垂直落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

| 部位 | 位置 | 横ずれ量 ^(注1) (mm) |
|-----|----------|------------------------------|
| 一次蓋 | 0°側 | -0.24 |
| | 90/270°側 | 0.02 / -0.15 |
| | 180°側 | -0.04 |
| 二次蓋 | 0°側 | 0.0 |
| | 90/270°側 | 0.0 / 0.0 |
| | 180°側 | 0.0 |

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

(ロ)-第 A. 74 表 9.3 m 頭部垂直落下時の最大応力 (参考値)

| 部位 | 位置 | 応力成分 | 最大応力 ^(注1) (MPa) | 基準値 ^(注2) (MPa) |
|--------|-------|------|-------------------------------|------------------------------|
| 一次蓋ボルト | 0°側 | 膜 | 468 | 890 |
| | | 曲げ | 164 | 890 |
| | 90°側 | 膜 | 508 | 890 |
| | | 曲げ | 216 | 890 |
| | 180°側 | 膜 | 413 | 890 |
| | | 曲げ | 201 | 890 |
| 二次蓋ボルト | 0°側 | 膜 | -29 | 890 |
| | | 曲げ | 14 | 890 |
| | 90°側 | 膜 | -27 | 890 |
| | | 曲げ | 11 | 890 |
| | 180°側 | 膜 | -50 | 890 |
| | | 曲げ | 32 | 890 |

(注1) 膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注2) 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT) とした。

(ロ)-第 A. 75 表 9.3 m 頭部垂直落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

| 部位 | 落下試験前 (Pa m ³ /s) | 落下試験後 (Pa m ³ /s) |
|-----|---------------------------------|---------------------------------|
| 一次蓋 | 1.0×10^{-8} | 3.9×10^{-6} |
| 二次蓋 | 2.0×10^{-11} | 1.7×10^{-11} |

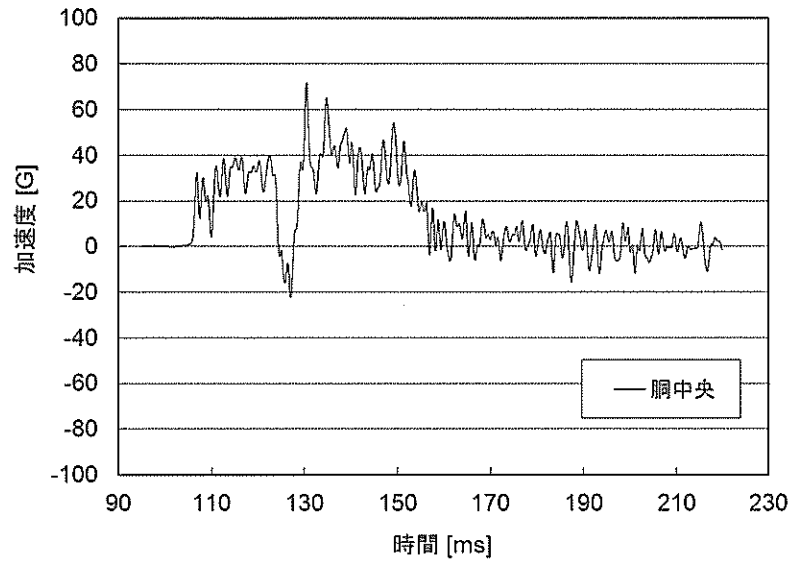


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(四)-第 A. 53 図 9.3 m 頭部垂直落下試験時の落下試験モデル写真



(ロ) -第 A. 54 図 9.3 m 頭部垂直落下時の落下方向加速度履歴

(2) 9.3 m 傾斜落下

(ロ)-第 A. 55 図に 9.3 m 傾斜落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に 9.3 m 傾斜落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(ロ)-第 A. 76 表に各緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は、許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(ロ)-第 A. 56 図に胴上部、胴中央及び胴下部の加速度履歴を示す。(ロ)-第 A. 77 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量 (参考値)

(ロ)-第 A. 78 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋及び二次蓋ともに落下側及び反落下側のずれ量が大きく、最大の横ずれ量は一次蓋の落下側の 0.81 mm であった。

d. ボルトに作用する応力 (参考値)

(ロ)-第 A. 79 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお、応力は、落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト、二次蓋ボルトともに、基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率 (参考値)

(ロ)-第 A. 80 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。二次蓋の落下試験後の漏えい率は、落下試験前に比べ 2~3 桁程度増加したが、密封性能を維持する基準値 (5×10^{-4} Pa m^3/s [$=5 \times 10^{-3}$ ref cm^3/s]) を満足した。

(d)-第 A. 76 表 9.3 m 傾斜落下時の緩衝体変形量

| 部位 | 変形量 (mm) | 許容変形量 (mm) |
|-------|-------------|---------------|
| 上部緩衝体 | 253 | |
| 下部緩衝体 | 174 | |

(d)-第 A. 77 表 9.3 m 傾斜落下時の最大加速度

| 計測位置 | 方向 | 最大加速度 (G) |
|-------------|------|--------------|
| 胴上部 (0°) | 落下方向 | 150 |
| 胴中央 | 落下方向 | 85 |
| 胴下部 | 落下方向 | 77 |
| 一次蓋 | 落下方向 | 149 |
| 二次蓋 | 落下方向 | 148 |

(d)-第 A. 78 表 9.3 m 傾斜落下時の蓋の横ずれ量 (参考値)

| 部位 | 位置 | 横ずれ量 ^(注1) (mm) |
|-----|------|------------------------------|
| 一次蓋 | 落下側 | -0.81 |
| | 側面 | 0.14 / 0.21 |
| | 反落下側 | -0.07 |
| 二次蓋 | 落下側 | 0.09 |
| | 側面 | 0.02 / -0.01 |
| | 反落下側 | -0.79 |

(注1) 横ずれ量の符号は、各蓋が胴フランジに対し、内側へずれる場合を+、外側へずれる場合を-として示す。

(ロ)-第 A. 79 表 9.3 m 傾斜落下時の最大応力 (参考値)

| 部位 | 位置 | 応力成分 | 最大応力 ^(注 1) (MPa) | 基準値 ^(注 2) (MPa) |
|--------|------|------|--------------------------------|-------------------------------|
| 一次蓋ボルト | 反落下側 | 膜 | -5 | 890 |
| | | 曲げ | 4 | 890 |
| | 側面 | 膜 | 3 | 890 |
| | | 曲げ | 21 | 890 |
| | 落下側 | 膜 | 74 | 890 |
| | | 曲げ | 82 | 890 |
| 二次蓋ボルト | 反落下側 | 膜 | -14 | 890 |
| | | 曲げ | 141 | 890 |
| | 側面 | 膜 | -18 | 890 |
| | | 曲げ | 181 | 890 |
| | 落下側 | 膜 | 178 | 890 |
| | | 曲げ | 243 | 890 |

(注 1) 膜応力の符号は、引張を+、圧縮を-として示す。

(注 2) 一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は、 S_y (RT) とした。

(ロ)-第 A. 80 表 9.3 m 傾斜落下時の落下試験前後の漏えい率 (参考値)

| 部位 | 落下試験前 (Pa m ³ /s) | 落下試験後 (Pa m ³ /s) |
|-----|---------------------------------|---------------------------------|
| 一次蓋 | $< 1 \times 10^{-11}$ | $< 1 \times 10^{-11}$ |
| 二次蓋 | 7.4×10^{-9} | 1.6×10^{-6} |

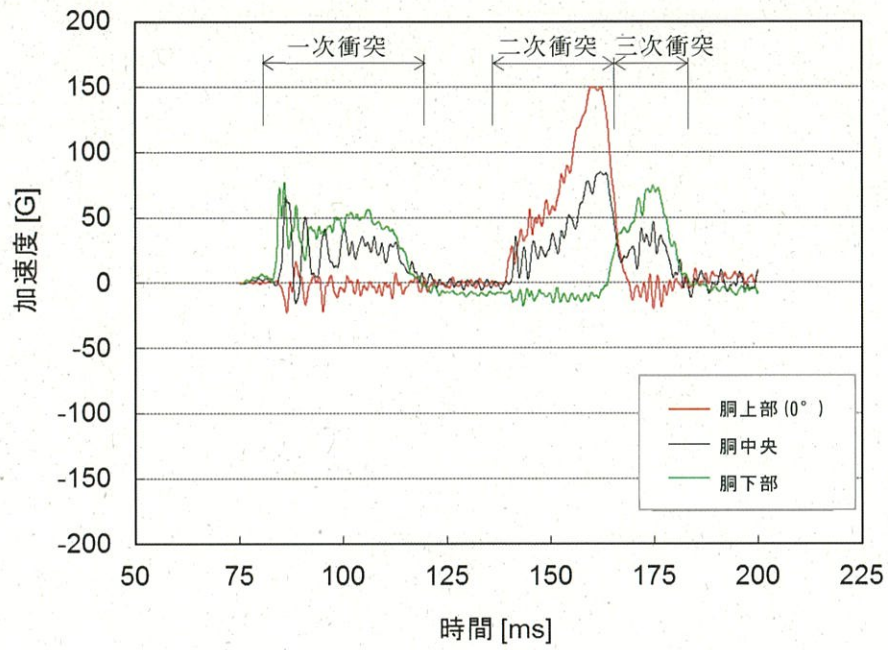


(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(四) -第 A. 55 図 9.3 m 傾斜落下試験時の落下試験モデル写真



(d) -第 A. 56 図 9.3 m 傾斜落下時の落下方向加速度履歴

A. 10.2 CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の検証

MSF-32P 型輸送容器の構造設計は、緩衝体性能及び密封性能の維持の観点から、落下試験モデルをベースに、基本構造が同様となるよう設計している。

本項では、上述の落下試験で得られた試験結果(A. 10.1 4. 参照)に基づき、MSF-32P 型輸送容器の落下解析で使用している CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を確認した。

1. CRUSH 解析手法の検証

落下試験モデルの落下試験結果(A. 10.1 4. 参照)と CRUSH 解析の結果を比較し、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。比較結果を (ロ)-第 A. 81 表及び (ロ)-第 A. 82 表に示す。CRUSH による加速度及び緩衝体変形量の解析結果は落下試験と同等であり、CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。

(ロ)-第 A. 81 表 落下試験結果と CRUSH コードの比較(最大衝撃加速度)

| 試験条件 | 最大衝撃加速度 (m/s ²) | |
|--------------|-----------------------------|-------------|
| | 落下試験 (注1) | CRUSH |
| 9.3 m 頭部垂直落下 | 598 (61G) | 618 (63G) |
| 9.3 m 傾斜落下 | 1451 (148G) | 1510 (154G) |

(注1) 落下試験での計測結果 (A. 10.1 4. 参照)

- ・ 9.3 m 頭部垂直落下 : 胴上部の落下方向加速度の平均値
- ・ 9.3 m 傾斜落下 : 二次蓋の落下方向加速度

(ロ)-第 A. 82 表 落下試験結果と CRUSH コードの比較(緩衝体変形量)

| 試験条件 | 緩衝体変形量 (mm) | |
|--------------|-------------|-------|
| | 落下試験 (注1) | CRUSH |
| 9.3 m 頭部垂直落下 | 259 | 308 |
| 9.3 m 傾斜落下 | 253 | 314 |

(注1) 落下試験での計測結果 (A. 10.1 4. 参照)

2. ABAQUS 解析手法の検証

落下試験で計測された蓋部のひずみを基に、MSF-32P 型と落下試験モデルの寸法差等を考慮して算出した MSF-32P 型輸送容器に発生する応力と、A. 6.1 に記載される ABAQUS 解析結果とを比較し、ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を検証した。

(1) 検証手順

以下に ABAQUS による解析手法の検証手順を示す。(図-第 A. 57 図参照)

- a. MSF-32P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位の寸法を抽出する。
- b. 各部位の設計条件（材質、設計温度、縦弾性係数）を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-32P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の強度比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件（キャスク重量、落下時の衝撃加速度）を抽出し、MSF-32P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- e. 荷重比、各部位の強度比および落下試験モデルの各部位に作用した応力（落下試験で計測したひずみから算出）を用いて、MSF-32P 型輸送容器の各部位に作用する応力を算出する。
- f. e. で算出した応力と、解析結果を比較し、ABAQUS による解析手法を検証する。

(2) 評価結果及びまとめ

9 m 頭部垂直落下時及び 9 m 水平落下時に MSF-32P 型輸送容器に発生する応力について、落下試験結果より算出した結果と解析結果の比較を(図-第 A. 83 表及び(図-第 A. 84 表)に示す。

9 m 頭部垂直落下時の三次蓋ボルトの応力は、落下試験結果より算出した応力が解析結果より大きいのが、基準値に対する裕度に対して十分小さい変動であることから、落下試験結果より算出した応力と解析結果はほぼ同等である。さらに、二次蓋ボルトの応力は、落下試験結果より算出した応力は解析結果より小さく、ABAQUS 解析による評価手法は妥当である。

また、9 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力は、落下試験結果より算出した応力が解析結果より小さく、ABAQUS 解析による評価手法は妥当である。

(ロ)-第 A. 83 表 9.3 m 頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

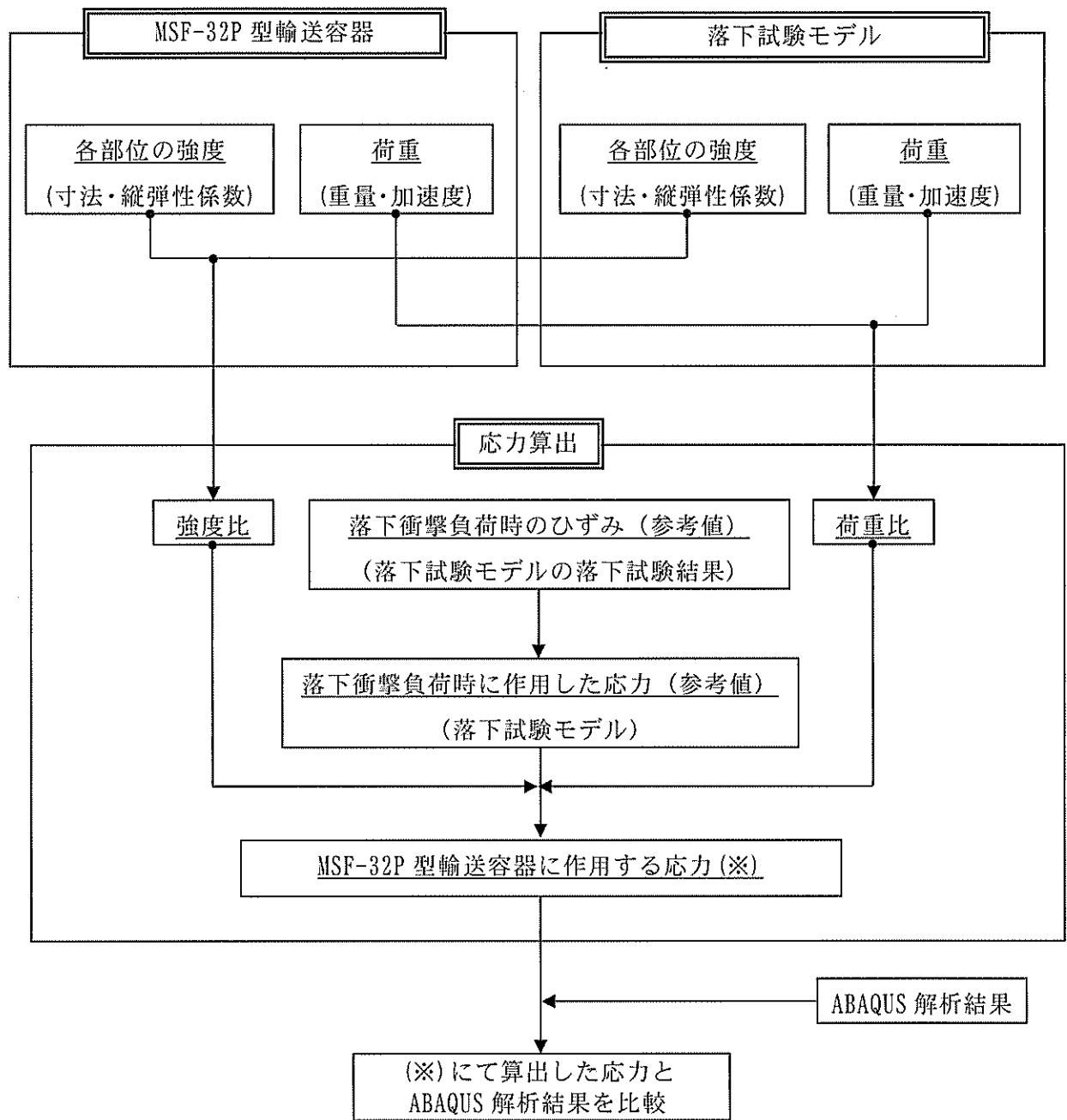
| 部位 | 変形モード | 試験結果より 算出した応力 (MPa) | ABAQUS 解析結果 ^(注 1) (MPa) | 評価基準 (MPa) |
|--------|-------|---------------------------|--|---------------|
| 二次蓋ボルト | 引張+曲げ | 46 | 222 | 848 |
| 三次蓋ボルト | 引張+曲げ | 51 | 47 | 848 |

(注 1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置（軸方向）であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置（軸方向）の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを 0 として測定しているが、ABAQUS 解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。

(ロ)-第 A. 84 表 9.3 m 水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

| 部位 | 変形モード | 試験結果より 算出した応力 (MPa) | ABAQUS 解析結果 ^(注 1) (MPa) | 評価基準 (MPa) |
|--------|-------|---------------------------|--|---------------|
| 二次蓋ボルト | 引張+曲げ | 95 | 183 | 848 |
| 三次蓋ボルト | 引張+曲げ | 283 | 420 | 848 |

(注 1) 落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置（軸方向）であるため、解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置（軸方向）の応力とした。また、落下試験結果は、蓋ボルト締付後のひずみを 0 として測定しているが、ABAQUS 解析結果には初期締付力が含まれているため、記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。



(ロ)-第 A. 57 図 ABAQUS 解析手法の検証手順

A. 10. 3 MSF-32P 型輸送容器の落下試験結果に基づく密封性能の検証

MSF-32P 型輸送容器の 9.3 m 傾斜落下条件下における密封性能について落下試験結果に基づき評価・検証を行った。

1. MSF-32P 型輸送容器の密封設計

落下試験結果に基づき落下時の蓋密封部挙動について考察し、蓋密封部の漏えいメカニズムを分析した。それら結果に基づき、MSF-32P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目を (ロ)-第 A. 85 表 に示す。また、(ロ)-第 A. 58 図 に MSF-32P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋部構造の比較を示す。

2. MSF-32P 型輸送容器の密封性能評価

9.3 m 傾斜落下において、MSF-32P 型輸送容器の密封性能が維持することを、落下試験により密封性能が維持することが実証されている落下試験モデル及びその落下試験結果を用いて検証する。

落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられた金属ガスケットまたはゴム O リングと胴フランジ面との口開き量の増加、金属ガスケットの相対横ずれ量の増加、金属ガスケットまたはゴム O リングの圧縮量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するリークパスの発生とガスケット線力の低下が原因である。したがって、蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで、MSF-32P 型輸送容器の蓋、胴フランジ及び蓋ボルトの変形量が落下試験モデルに比べて小さいことを示すことにより、MSF-32P 型輸送容器の密封性能を検証する。

また、MSF-32P 型輸送容器の三次蓋構造に対して落下試験モデルは二次蓋構造であるが、荷重の伝達経路と蓋密封部の構造について、MSF-32P 型輸送容器の三次蓋周辺部（最外の蓋）と落下試験モデルの二次蓋周辺部（最外の蓋）は同様であり、MSF-32P 型輸送容器の二次蓋周辺部及び一次蓋周辺部（内側の蓋）と落下試験モデルの一次蓋周辺部（内側の蓋）で同様である。したがって、MSF-32P 型輸送容器の蓋密封部（三次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（二次蓋）と、MSF-32P 型輸送容器の蓋密封部（二次蓋及び一次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（一次蓋）と比較する。

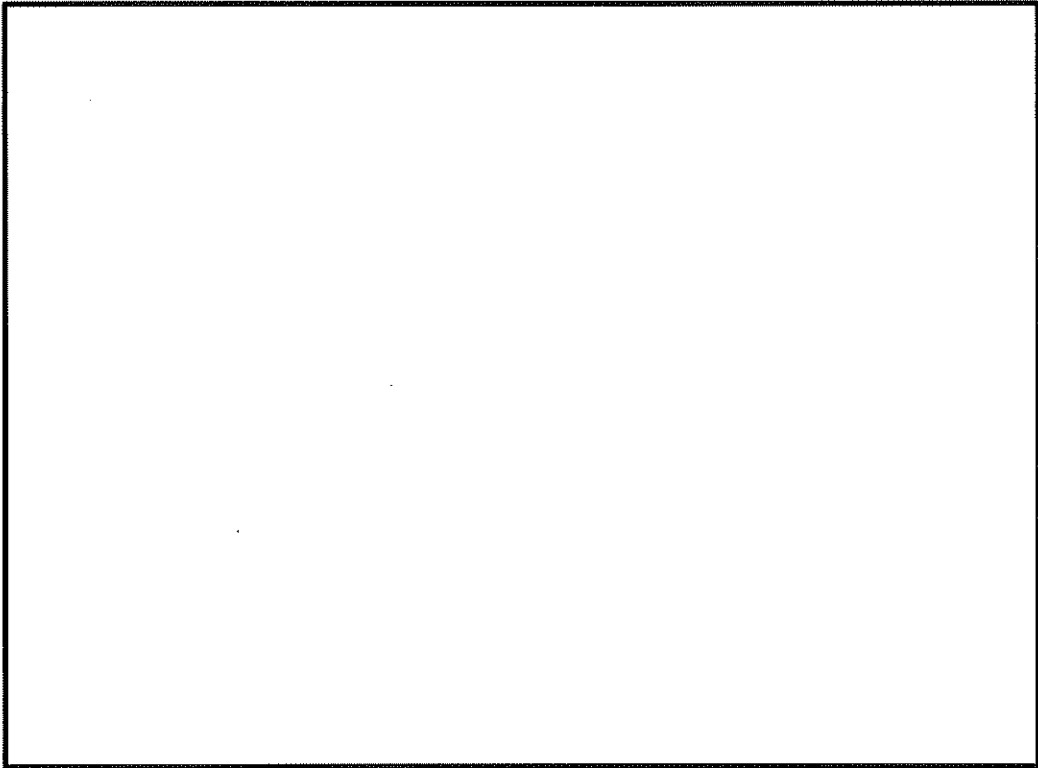
(1) 評価手順

密封性能評価方法の手順を以下に示す。(図-第 A. 59 図参照)

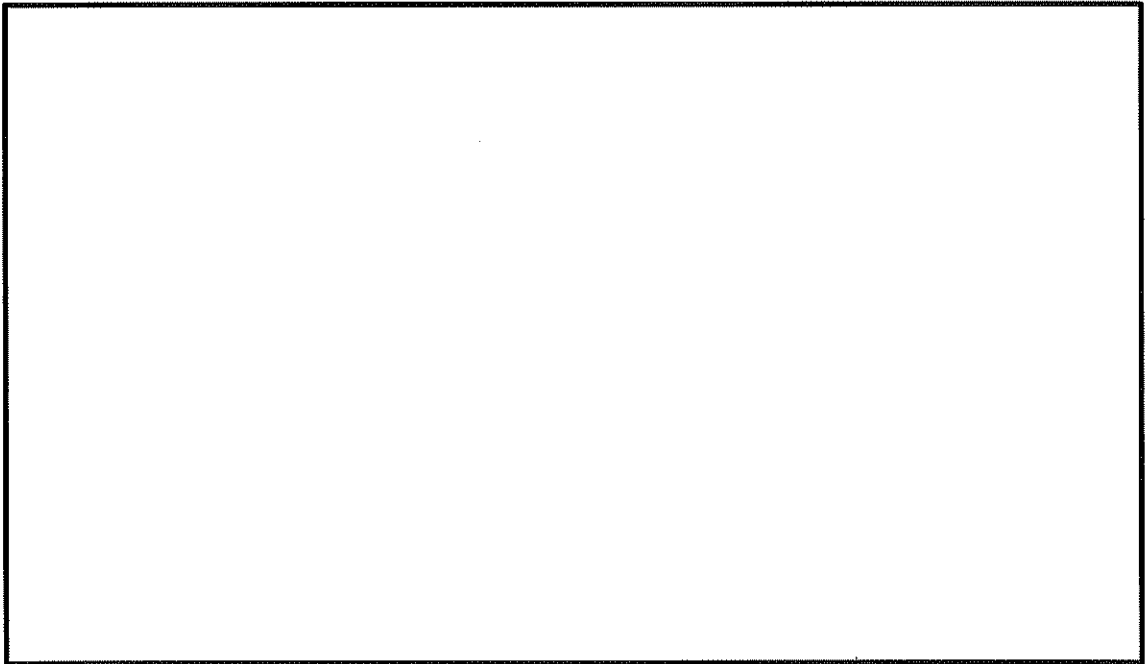
- a. MSF-32P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位(胴フランジ、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、三次蓋、三次蓋ボルト)の各変形モード(曲げ、圧縮、引張、オーバル変形)の剛性に影響する寸法を抽出する。
- b. 各部位の剛性に影響する設計条件(材質、設計温度、縦弾性係数)を抽出する。
- c. 抽出した寸法及び設計条件を基に、MSF-32P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の剛性比を算出する。
- d. 落下衝撃力を決定する設計条件(キャスク重量、落下時の衝撃加速度)を抽出し、MSF-32P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
- e. 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から、落下衝撃負荷時の変形量比を算出する。
- f. e. で算出した変形量比が 1 以下(MSF-32P 型輸送容器の方が小さい)であれば、落下試験モデルに比べて、より高い密封性能を有していることが示される。

(ロ)-第 A. 85 表 MSF-32P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目

| 部位 | 落下試験等の結果 | 蓋密封部設計に反映した項目 |
|------|--|--|
| 蓋密封部 | <p>(1) 落下衝撃荷重が胴フランジ及び蓋側面に作用し、胴フランジ、二次蓋及び二次蓋ボルトが曲げ及び引張変形し、蓋の横ずれ及び口開きが生じた。</p> <p>(2) 上記(1)により、落下試験では、二次蓋(最外蓋)の 9.3m 落下試験後の漏えい率は基準値を満足したものの、試験前より 2~3 桁程度増加した。</p> | <p>以下に示す反映により、落下試験モデルよりも密封性能を向上させる。</p> <p>(1) 胴フランジ、一次蓋及び二次蓋の剛性を落下試験モデルよりも高めることで蓋密封部の変形量を低減させる。</p> <p>(2) 落下試験モデルの二次蓋(最外蓋)に加えて三次蓋(最外蓋)を追加し、密封機能の向上を図る。</p> |
| 緩衝体 | <p>(1) 緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能が有効に機能したため、緩衝体の変形量は許容量以下であることを確認した(但し、許容変形量に対する余裕は小さい)。</p> | <p>(1) 緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能を維持するため、輸送容器の緩衝体構造は、落下試験により検証された基本構造を採用する。</p> <p>(2) 緩衝材高温時の強度低下を考慮した上で、比較的固い木材を適用した上で、外形制限寸法内の範囲内で緩衝体を径方向に大型化し、緩衝性能を向上させる。</p> |

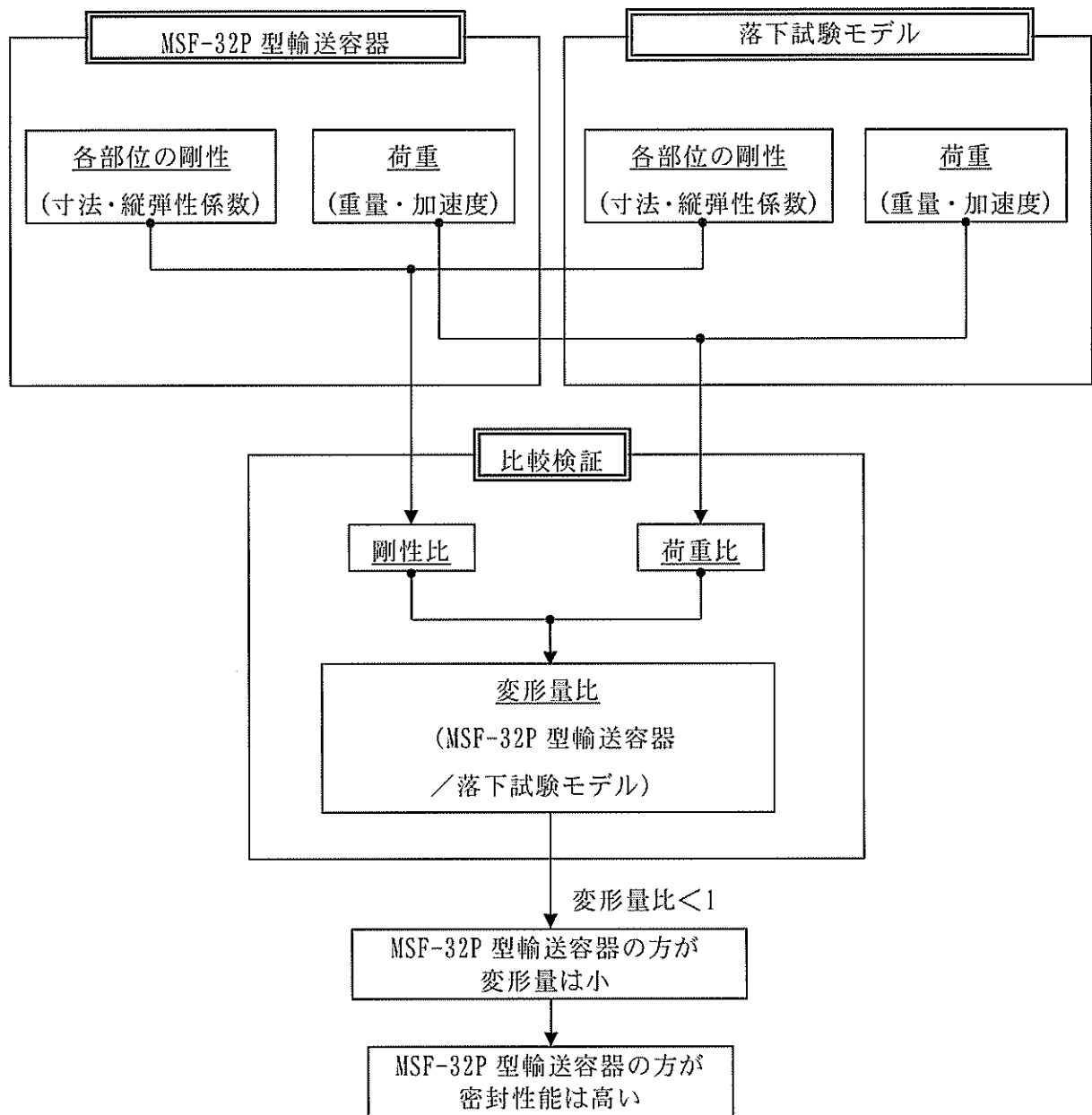


MSF-32P 型輸送容器



落下試験モデル

(ロ)-第 A. 58 図 MSF-32P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋密封部構造の比較



(ロ)-第 A. 59 図 密封性能評価手順

(2) 評価結果及びまとめ

9 m 傾斜落下において、MSF-32P 型輸送容器の密封性能が維持されていることを落下試験結果を用いて検証した。検証結果を以下に示す。

a. 9 m 傾斜落下

9 m 傾斜落下時の蓋部の変形量比較結果を (ロ)-第 A. 86 表に示す。全ての評価部位において変形量比は 1 以下であり、MSF-32P 型輸送容器の蓋部の変形量は落下試験モデルに比べ小さい。したがって、MSF-32P 型輸送容器は、落下試験モデルに比べて高い密封性能を有している。

(ロ)-第 A. 86 表 9 m 傾斜落下時の蓋部の変形量評価結果

| 部位 (注 1) | 変形モード | 荷重比 (注 2) | 剛性比 (注 2) | 変形量比 (注 2) |
|-----------------|-------|-----------|-----------|------------|
| 一次蓋 | 曲げ | 0.59 | 1.50 | 0.39 |
| 一次蓋ボルト | 引張 | 0.59 | 0.98 | 0.60 |
| | 曲げ | 0.59 | 0.98 | 0.60 |
| 二次蓋 | 曲げ | 0.47 | 3.69 | 0.13 |
| 二次蓋ボルト | 引張 | 0.47 | 0.86 | 0.55 |
| | 曲げ | 0.47 | 0.86 | 0.55 |
| 三次蓋 | 曲げ | 0.54 | 0.75 | 0.72 |
| 三次蓋ボルト | 引張 | 0.54 | 1.00 | 0.54 |
| | 曲げ | 0.54 | 1.41 | 0.38 |
| 胴フランジ (二次蓋側) | 曲げ | 0.86 | 1.16 | 0.74 |
| 胴フランジ (三次蓋側) | 曲げ | 0.86 | 1.25 | 0.69 |

(注 1) 部位は、MSF-32P 型輸送容器の各部位を示す。

(注 2) 荷重比、剛性比及び変形量比は全て、落下試験モデルに対する MSF-32P 型輸送容器の比を示す。

A. 10.4 緩衝材低温時の強度評価

MSF-32P 型輸送容器の緩衝体緩衝材には木材 を適用している。緩衝材である各木材は、使用最低温度である-20℃では常温時に対して強度が 16%~29%上昇する。-20℃の木材強度を用いて評価を行った場合にキャスクへ発生する衝撃加速度は、(ロ)-第 A. 19 表及び(ロ)-第 A. 37 表に示す設計加速度（常温時の解析結果に裕度を考慮した値）に対して増加する。本項では、その衝撃加速度の増加を考慮しても、キャスクの各部位に発生する応力は評価基準を満足することを確認した。

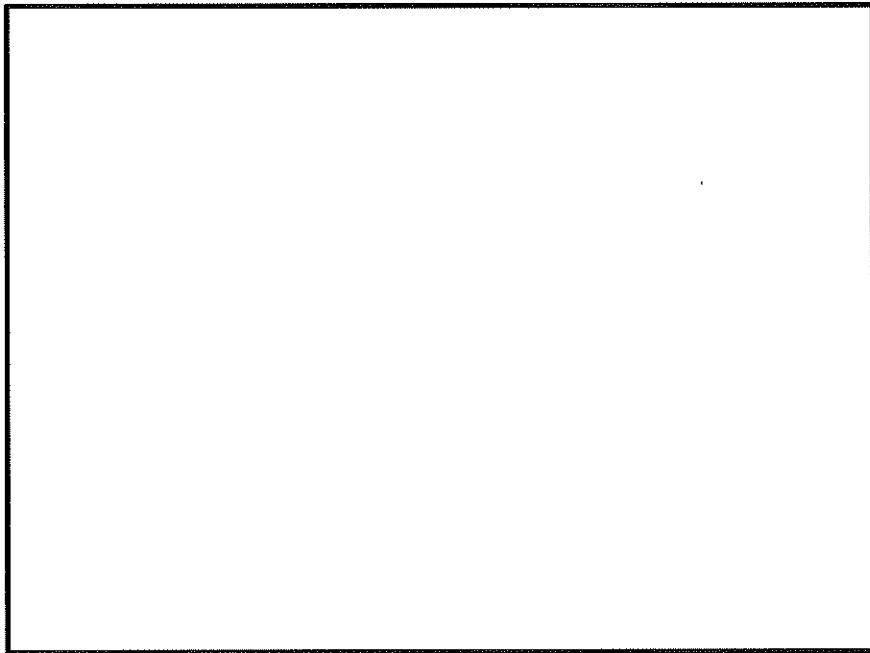
1. -20℃における木材強度の上昇割合

木材は温度が低くなると強度が上昇する。その特性を CRUSH 解析で考慮するために、温度係数として緩衝材の応力-ひずみ特性に考慮する。各木材の温度と温度係数の関係を (ロ)-第 A. 60 図～(ロ)-第 A. 62 図に示す。

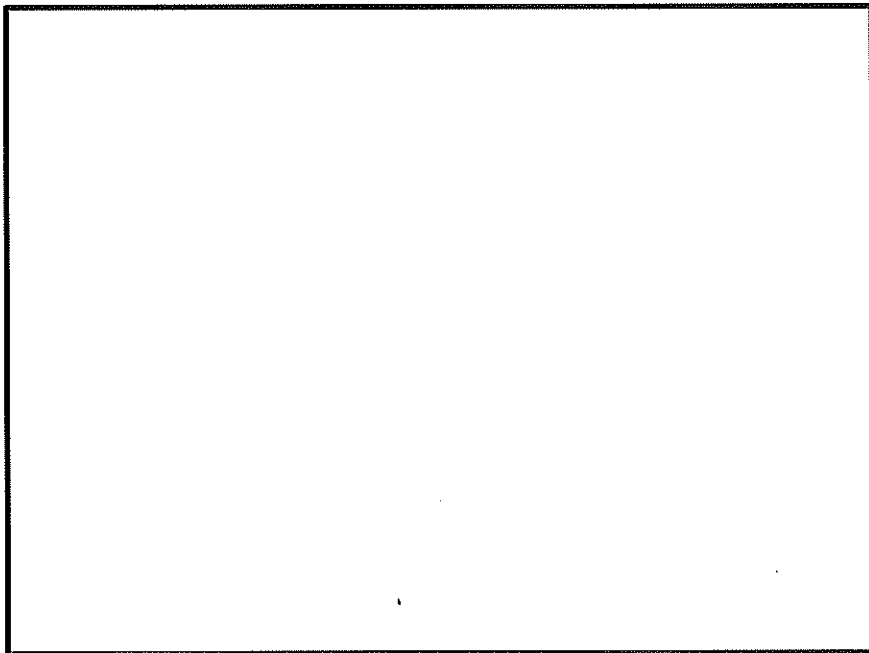
その関係式から、木材の温度を本輸送物の周囲温度-20℃とした場合の温度係数を求めた。木材低温時に木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数を(ロ)-第 A. 87 表に示す。

(ロ)-第 A. 87 表 木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数（低温時：-20℃）

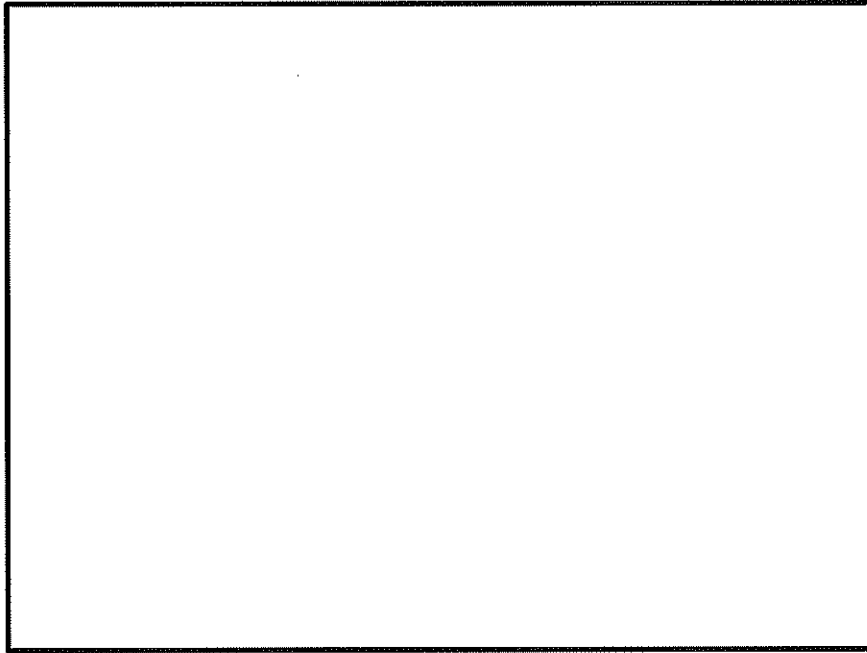
| 木材種 | 温度係数 |
|-----|------|
| | |



(ロ)-第 A. 60 図 温度と温度係数の関係



(ロ)-第 A. 61 図 温度と温度係数の関係



(ロ)-第 A. 62 図 温度と温度係数の関係

2. -20℃における衝撃加速度

1 項に示す木材強度の上昇割合を考慮して CRUSH 解析を行った結果を(ロ)-第 A. 88 表 (0.3m 落下時) 及び(ロ)-第 A. 89 表 (9m 落下時) に示す。その他解析条件は A. 5. 3. 1 及び A. 6. 1 に示す条件と同様である。

木材温度が低くなると木材の強度は上昇するため、(ロ)-第 A. 88 表及び(ロ)-第 A. 89 表に示すとおり、落下時の衝撃加速度は常温時に比べて大きくなる。

(ロ)-第 A. 88 表 0.3m 落下時の衝撃加速度計算結果

| 落下姿勢 | 木材 温度 | 衝撃加速度 (m/s ²) | | |
|------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| | | 計算 結果 ^(注 1) (A) | 設計 加速度 ^(注 1) (B) | (A) / (B) |
| 頭部垂直 | 常温 | 271 | 280 | 0.97 |
| | 低温 | 307 | | 1.10 |
| 底部垂直 | 常温 | 254 | 260 | 0.98 |
| | 低温 | 287 | | 1.11 |
| 水平 | 常温 | 209 | 210 | 1.00 |
| | 低温 | 229 | | 1.10 |
| 頭部コナ | 常温 | 35 | - | - |
| | 低温 | 37 | | - |
| 底部コナ | 常温 | 32 | - | - |
| | 低温 | 34 | | - |

(注 1) 計算結果（常温）と設計加速度は、(ロ)-第 A. 19 表に記載する値。

(ロ)-第 A. 89 表 9m 落下時の衝撃加速度計算結果

| 落下姿勢 | 木材 温度 | 衝撃加速度 (m/s ²) | | |
|------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| | | 計算 結果 ^(注 1) (A) | 設計 加速度 ^(注 1) (B) | (A) / (B) |
| 頭部垂直 | 常温 | 557 | 560 | 1.00 |
| | 低温 | 619 | | 1.11 |
| 底部垂直 | 常温 | 507 | 510 | 1.00 |
| | 低温 | 562 | | 1.11 |
| 水平 | 常温 | 720 | 730 | 0.99 |
| | 低温 | 784 | | 1.08 |
| 頭部コナ | 常温 | 438 | 440 | 1.00 |
| | 低温 | 453 | | 1.03 |
| 底部コナ | 常温 | 469 | - | - |
| | 低温 | 477 | | - |

(注 1) 計算結果（常温）と設計加速度は、(ロ)-第 A. 66 表に記載する値（落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果）。また、計算結果（低温）は、落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果。

3. 衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響

木材常温時に対する木材低温時における衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響について以下に示す。

(ロ)-第 A. 88 表及び(ロ)-第 A. 89 表に示すとおり、木材低温時の衝撃加速度は、(ロ)-第 A. 19 表及び(ロ)-第 A. 37 表に示す設計加速度（構造評価に入力する加速度）から増加する。ここで、余裕率が最も小さい部位について、木材低温時の衝撃加速度において発生する応力を評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_1 = (\sigma_2 - \sigma_f) \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \sigma_f \quad (\text{蓋ボルトの評価式})$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (\text{蓋ボルト以外の評価式})$$

ここで、

σ_1 : 木材低温時の 0.3m 又は 9m 落下時に評価部位に発生する応力 (MPa)

σ_2 : 0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度において評価部位に発生する応力 (MPa)

σ_f : 二次蓋ボルト又は三次蓋ボルトの初期締付応力 (MPa)

α_1 : 木材低温時の衝撃加速度 (m/s²)

α_2 : 0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度 (m/s²)

評価条件及び評価結果を (ロ)-第 A. 90 表及び(ロ)-第 A. 91 表に示す。(ロ)-第 A. 90 表及び(ロ)-第 A. 91 表に示すとおり余裕率が最も小さい部位へ発生する応力は評価基準を満足する。

(ロ)-第 A. 90 表 0.3m 落下時の強度評価

| 落下姿勢 | 0.3m 頭部垂直落下 | | 0.3m 底部垂直落下 | | 0.3m 水平落下 | |
|--------------------------|---|--|---|--|---|--|
| 評価部位 | 蓋部中性子 遮蔽材 カバー | 二次蓋 ボルト | 下部端板 | 三次蓋 ボルト | 下部端板 | 二次蓋 ボルト |
| σ_2 | 83 MPa | 331 MPa | 55 MPa | 231 MPa | 75 MPa | 594 MPa |
| σ_1 | - | 200 MPa | - | 190 MPa | - | 200 MPa |
| α_1 | 307 m/s ² | | 287 m/s ² | | 229 m/s ² | |
| α_2 | 280 m/s ² | | 260 m/s ² | | 210 m/s ² | |
| σ_1 | 92 MPa | 344 MPa | 61 MPa | 236 MPa | 82 MPa | 630 MPa |
| 評価 基準 ^(注1) | 168 MPa (f_b : <input type="text"/>) | 885 MPa ($3S_m$: <input type="text"/>) | 164 MPa (f_b : <input type="text"/>) | 590 MPa ($2S_m$: <input type="text"/>) | 164 MPa (f_b : <input type="text"/>) | 885 MPa ($3S_m$: <input type="text"/>) |

(注 1) 評価基準を設定する温度 (キャスク各部位の低温時温度) は、木材温度と同程度低下 (木材温度: 38℃から-20℃へ約 60℃低下) するとし、「低温時温度 = (設計温度) - 60℃」とした。

(ロ)-第 A. 91 表 9m 落下時の強度評価

| 落下姿勢 | 9m 頭部垂直落下 | | 9m 底部垂直落下 | | 9m 水平落下 | | 9m コーナー 落下 |
|--------------------------|---|---|--|---|---|---|---|
| 評価部位 | 二次蓋 シール部 | 二次蓋 ボルト | 下部端板 | 三次蓋 ボルト | 二次蓋 シール部 | 二次蓋 ボルト | 三次蓋 ボルト |
| σ_2 | 82 MPa | 689 MPa | 143 MPa | 442 MPa | 175 MPa | 832 MPa | 248 MPa |
| σ_1 | - | 200 MPa | - | 190 MPa | - | 200 MPa | 190 MPa |
| α_1 | 619 m/s ² | | 562 m/s ² | | 784 m/s ² | | 453 m/s ² |
| α_2 | 560 m/s ² | | 510 m/s ² | | 730 m/s ² | | 440 m/s ² |
| σ_1 | 91 MPa | 741 MPa | 158 MPa | 468 MPa | 188 MPa | 879 MPa | 250 MPa |
| 評価 基準 ^(注1) | 203 MPa (S_y : <input type="text"/>) | 884 MPa (S_y : <input type="text"/>) | 246 MPa ($1.5 f_b$: <input type="text"/>) | 884 MPa (S_y : <input type="text"/>) | 199 MPa (S_y : <input type="text"/>) | 884 MPa (S_y : <input type="text"/>) | 884 MPa (S_y : <input type="text"/>) |

(注 1) 評価基準を設定する温度 (キャスク各部位の低温時温度) は、木材温度と同程度低下 (木材温度: 38℃から-20℃へ約 60℃低下) するとし、「低温時温度 = (設計温度) - 60℃」とした。

A. 10. 5 MSF-32P 型輸送容器のバスケットプレート用材料

アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) に関する説明書

1. 概要

本書は、MSF-32P 型輸送容器のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。

2. 適用範囲

本材料を MSF-32P 型のバスケットプレートに適用するにあたり、本材料及びこれを使用するバスケットは以下の事項に適合すること。

- (1) 設計貯蔵期間 (供用期間) は 60 年以下であること。
- (2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には、設計貯蔵期間中ヘリウムガスを封入し、不活性ガス雰囲気は維持されていること。
- (3) バスケットは耐圧構造でないこと。
- (4) バスケットは溶接部がない構造とすること。
- (5) 本材料はボルト材として使用しないこと。
- (6) 供用状態によらずバスケットプレートの発生応力は、弾性範囲内であること。
- (7) 供用状態によらずバスケットは長期間にわたる熱応力を生じない構造とすること。

3. 材料規定

本規定は、設計貯蔵期間における熱劣化を考慮した設計評価に適用する材料規定である。なお、本規定を適用する材料は、4. に示す製造管理規定を満足しなければならない。

(1) 材料名称

材料の規定名称は (ロ) - 第 A. 92 表 に示すものであること。

(2) 化学成分

化学成分は (ロ) - 第 A. 93 表 に示す百分率の値の範囲内にあること。

(3) 設計応力強さ

設計応力強さは (ロ) - 第 A. 94 表 の規定によること。

(4) 許容引張応力

許容引張応力は (ロ) - 第 A. 95 表 の規定によること。

(5) 設計降伏点

設計降伏点は (D)-第 A. 96 表 の規定によること。

(6) 設計引張強さ

設計引張強さは (D)-第 A. 97 表 の規定によること。

(7) 縦弾性係数

縦弾性係数は (D)-第 A. 98 表 の規定によること。

(8) 熱膨張係数

熱膨張係数は (D)-第 A. 99 表 の規定によること。

4. 製造管理規定

本規定は、製造管理に係る規定である。

- (1) 化学成分は、(D)-第 A. 93 表 に示す百分率の値の範囲内にあること。この場合において、化学成分は溶湯成分分析によること。化学成分の分析試験は、JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」（以下「JIS H 4100」という。）によること。
- (2) 材料の製造は、(D)-第 A. 63 図 に示す製造フローに従い、熱間押出成形加工されたものであること。
- (3) 材料は、熱間押出成形加工後、熱処理は行わず、空冷されたものであること。熱間加工によって得られるか又はごくわずかな冷間加工を加えただけの状態であること。質別 H112 は、JIS H 0001「アルミニウム、マグネシウム及びそれらの合金－質別記号」によること。
- (4) 機械的性質は、(D)-第 A. 100 表 に示す値に適合すること。
- (5) 製品の寸法の許容差は、以下及び JIS H 4100 によること。これを逸脱する寸法を適用する場合、機械的性質が (D)-第 A. 100 表 を満足することを確認すること。
 - ・肉厚 : 16mm 以下
 - ・押出比^(注1) : 10 以上

(注1) ピレットの押出方向に垂直な断面積と押出材の押出方向に垂直な断面積の比
- (6) 本材料は、耐食性向上等を目的として表面処理を行う場合がある。表面処理を行う場合、機械的性質が (D)-第 A. 100 表 を満足することを確認すること。
- (7) 本材料は、(D)-第 A. 63 図 の製造フローの各段階において、(D)-第 A. 101 表 に示す品質管理を行う。

- (8) 上記規定以外の規定については、JIS H 4100 又は EN 755-1「Aluminium and aluminium alloys- Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery」によること。

(ロ)-第 A. 92 表 材料の規定名称

| 材料の名称 | 記号 | 質別 |
|--|----------|------|
| バスケットプレート用材料 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) | MB-A3004 | H112 |

(ロ)-第 A. 93 表 化学成分規定

| 記号 | 化学成分 (mass%) | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------|-----------|------------|------------------------|------------------------|----|------------|------------------------|----|------------|------------|----|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ga, V, Ni, B, Zr など | Ti | その他 | | Al |
| | | | | | | | | | | 個々 | 合計 | |
| MB-A3004 | 0.30 以下 | 0.7 以下 | 0.25 以下 | 1.1 以上 1.5 以下 | 1.0 以上 1.3 以下 | — | 0.25 以下 | — | — | 0.05 以下 | 0.15 以下 | 残部 |

(ロ)-第 A. 94 表 材料の各温度における設計応力強さ S_m (注 1)(注 2)

単位：MPa

| 記号 | 温 度 (°C) | | | | | | | | | | |
|----------|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| MB-A3004 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 36 | 31 | 25 | 21 | 17 |

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 95 表 材料の各温度における許容引張応力 S (注 1)(注 2)

単位：MPa

| 記号 | 温 度 (°C) | | | | | | | | | |
|----------|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 250 |
| MB-A3004 | 37 | 37 | 37 | 37 | 29 | 21 | 15 | 11 | 8 | 8 |

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 96 表 材料の各温度における設計降伏点 S_y (注 1)(注 2)

単位：MPa

| 記号 | 温 度 (°C) | | | | | | | | | | |
|----------|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| MB-A3004 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 52 | 46 | 38 | 30 |

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 97 表 材料の各温度における設計引張強さ S_u (注 1)(注 2)

単位：MPa

| 記号 | 温 度 (°C) | | | | | | | | | | |
|----------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -40 ~40 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| MB-A3004 | 153 | 153 | 153 | 151 | 140 | 126 | 110 | 93 | 77 | 63 | 52 |

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A. 98 表 材料の各温度における縦弾性係数^(注1)

単位：MPa

| 記号 | 温 度 (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 20 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| MB-A3004 | 73900 | 73300 | 72800 | 72100 | 71400 | 70600 | 69800 | 68900 | 67900 | 66900 | 65800 | 64600 |

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(ロ)-第 A. 99 表 材料の各温度における熱膨張係数^(注1)単位： $\times 10^{-6}$ mm/mm \cdot °C

| 記号 | 区分 (注 2) | 温 度 (°C) | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 20 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| MB-A3004 | A | 22.75 | 23.52 | 24.02 | 24.42 | 24.76 | 25.05 | 25.35 | 25.68 | 26.06 | 26.54 | 27.14 | 27.91 |
| | B | 22.61 | 23.14 | 23.48 | 23.76 | 23.99 | 24.17 | 24.33 | 24.48 | 24.63 | 24.79 | 24.99 | 25.24 |

(注 1) 温度の中間における値は、比例法によって計算する。

(注 2) 区分 A は瞬時熱膨張係数、区分 B は常温から当該温度までの平均熱膨張係数を表す。

(D)-第 A. 100 表 機械的性質 (注 1)

| 記号 | 引張試験 (試験温度：常温) | | | シャルピー衝撃試験 (注 2) (試験温度：-40℃) |
|----------|-------------------|----------|--------|--------------------------------|
| | 引張強さ (MPa) | 耐力 (MPa) | 伸び (%) | 吸収エネルギー (J) |
| MB-A3004 | 185 以上 | 85 以上 | 15 以上 | 41 以上 |

(注 1) 時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

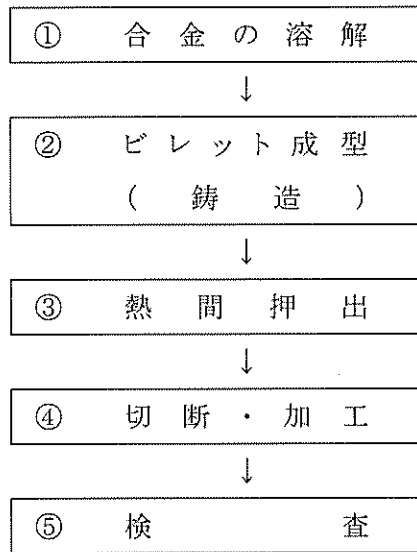
(注 2) 吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

(D)-第 A. 101 表 管理程度表 (注 1)

| 製造工程 (注 2) | 管理項目 | | 材料保証 (規定) | 製造管理 (参考) |
|------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| ①合金の溶解 | 材料特性 (初期材) | 化学成分(溶湯) | ○ | — |
| ⑤検査 | | 引張強度特性 | — | ○ |
| | | シャルピー 衝撃特性 | — | ○ |
| | | 組織観察 | — | ○ |
| ③熱間押出 | 製造条件 | 押出比 | ○ | — |
| | | 押出条件 | — | ○ |
| | | 押出冷却条件 | — | ○ |
| | | 整直条件 | — | ○ |
| | | 質別 | ○ | — |

(注 1) 設計貯蔵期間における設計強度特性保証に係る材料管理程度一覧である。

(注 2) 製造工程は (D)-第 A. 63 図の製造フローに対応する。



(ロ)-第A.63図 製造フロー

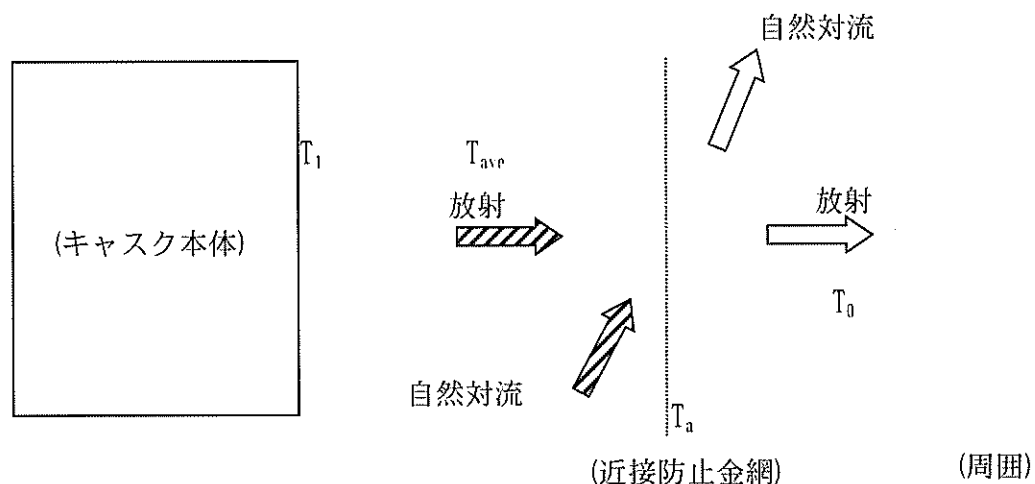
A. 10. 6 参考文献

- 1) (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).
- 2) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2012)」, (2012).
- 3) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 4) “Proving Test on the Reliability for PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan”, Proceedings of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20, (1988).
- 5) (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 (AESJ-SC-F006:2013)」, (2014).
- 6)
- 7)
- 8) 原燃輸送株式会社, 「高性能使用済燃料輸送容器の安全性に関する技術調査 (PWR) H5 年度上半期 (最終報告書)」, (1993).
- 9) 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).
- 10) 産業技術センター, 「複合材料技術集成」(1976).
- 11) 機械設計便覧編集委員会, 「機械設計便覧 (第 3 版)」, (1992).
- 12) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 3”, (2015).
- 13) 西田正孝, 「応力集中 増補版」, (1973).
- 14) 「クレーン構造規格」, 平成 7 年労働省告示第 134 号, (1995).
- 15) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 新版」, (1984).
- 16) 幾島, 浅田, 「放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発 (I) 緩衝体付き輸送容器衝突計算コード CRUSH」, 日本原子力学会誌 Vol. 33 No. 4, (1991).
- 17) (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).
- 18) International Atomic Energy Agency, “Spent Fuel Performance Assessment and Research, Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR-III) 2009-2014”, (2015).
- 19) (独)原子力安全基盤機構, 「中間貯蔵施設健全性評価手法等調査報告書最終報告」, (2005).

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。(D)-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ニ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であるとする。



(D)-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。

$$\begin{cases} Q_{in}=h_1(T_{ave}-T_a)+\sigma F_\varepsilon\{(T_1+273)^4-(T_a+273)^4\} \\ Q_{out}=h_0(T_a-T_0)+\sigma\varepsilon_2\{(T_a+273)^4-(T_0+273)^4\} \\ F_\varepsilon=1/\{(1/\varepsilon_1)+(1/\varepsilon_2)-1\} \end{cases}$$

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))
(□)-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))
(□)-第 B. 付 4 表参照)
- T_1 : キャスク本体外表面温度 (101 °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)

(□)-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 (d) - 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。

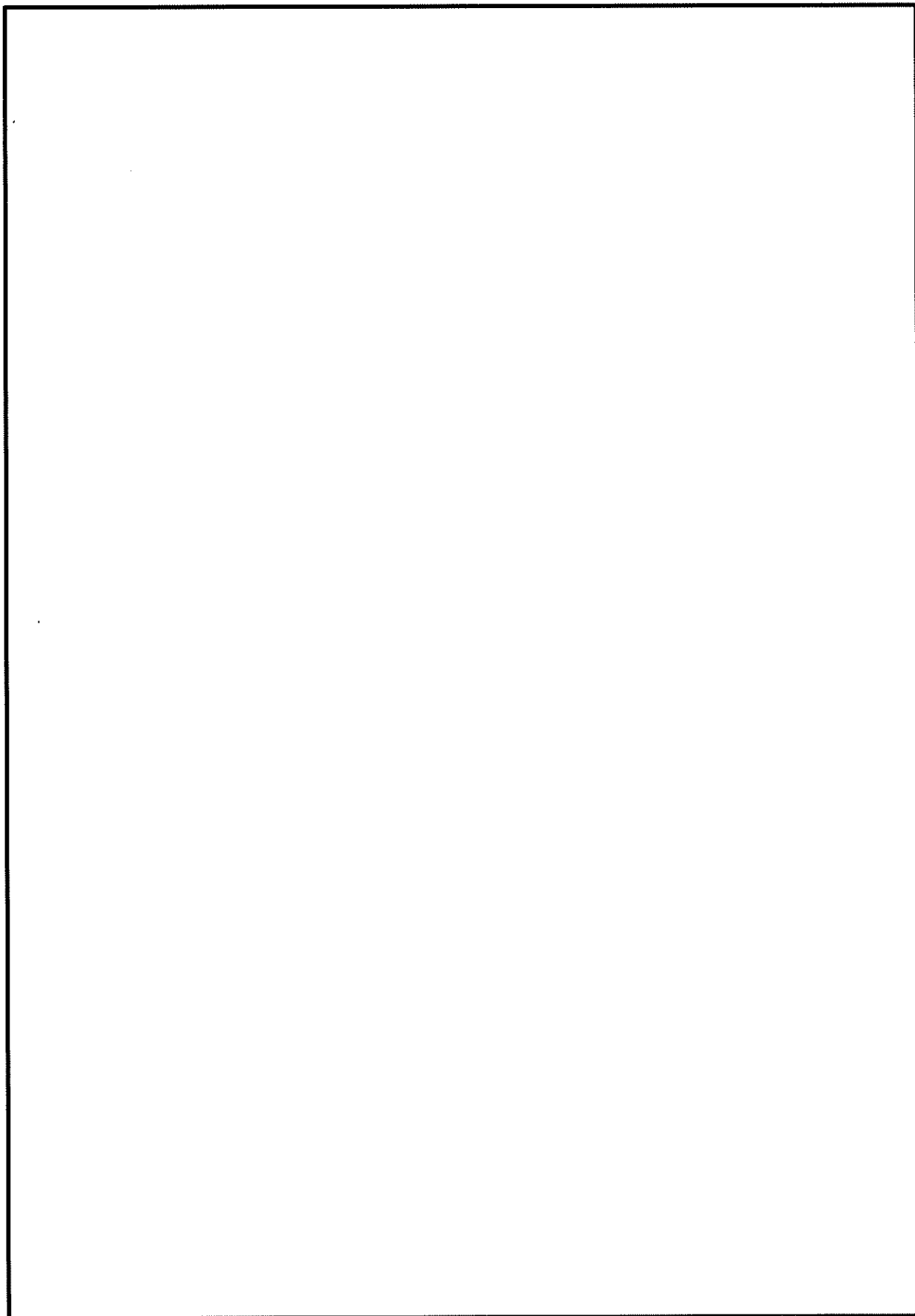
(d) - 第 B. 付 5 表 近接防止金網の温度評価結果

| 評価条件 (℃) | | 評価結果 (℃) |
|-----------------------|----------------|--------------------|
| 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) |
| 101 | 38 | 65 |

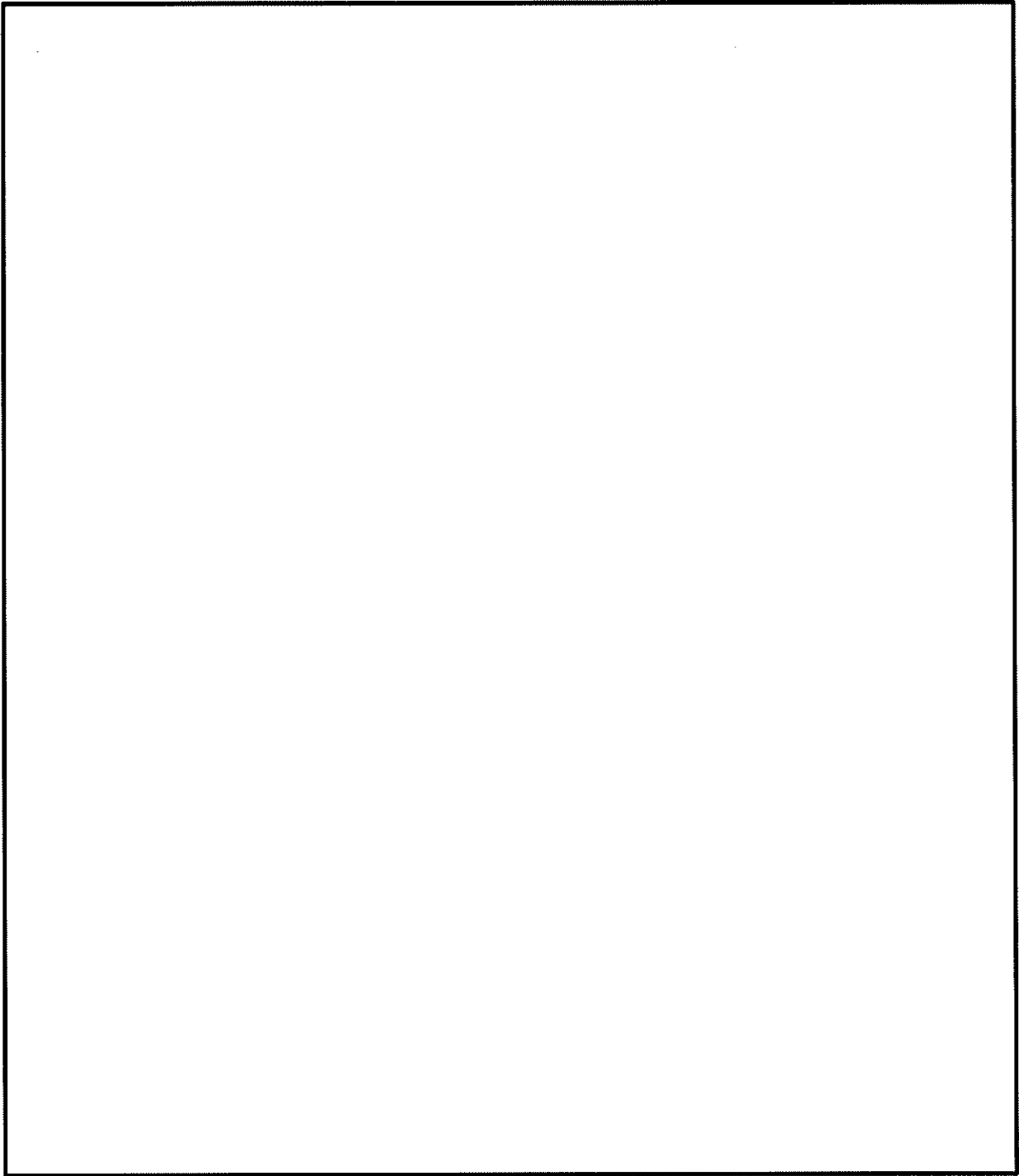
B. 6. 4 参考文献

- 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. Hargren, G. A. Reymann, R. E. Mason, “MATOPRO-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」.

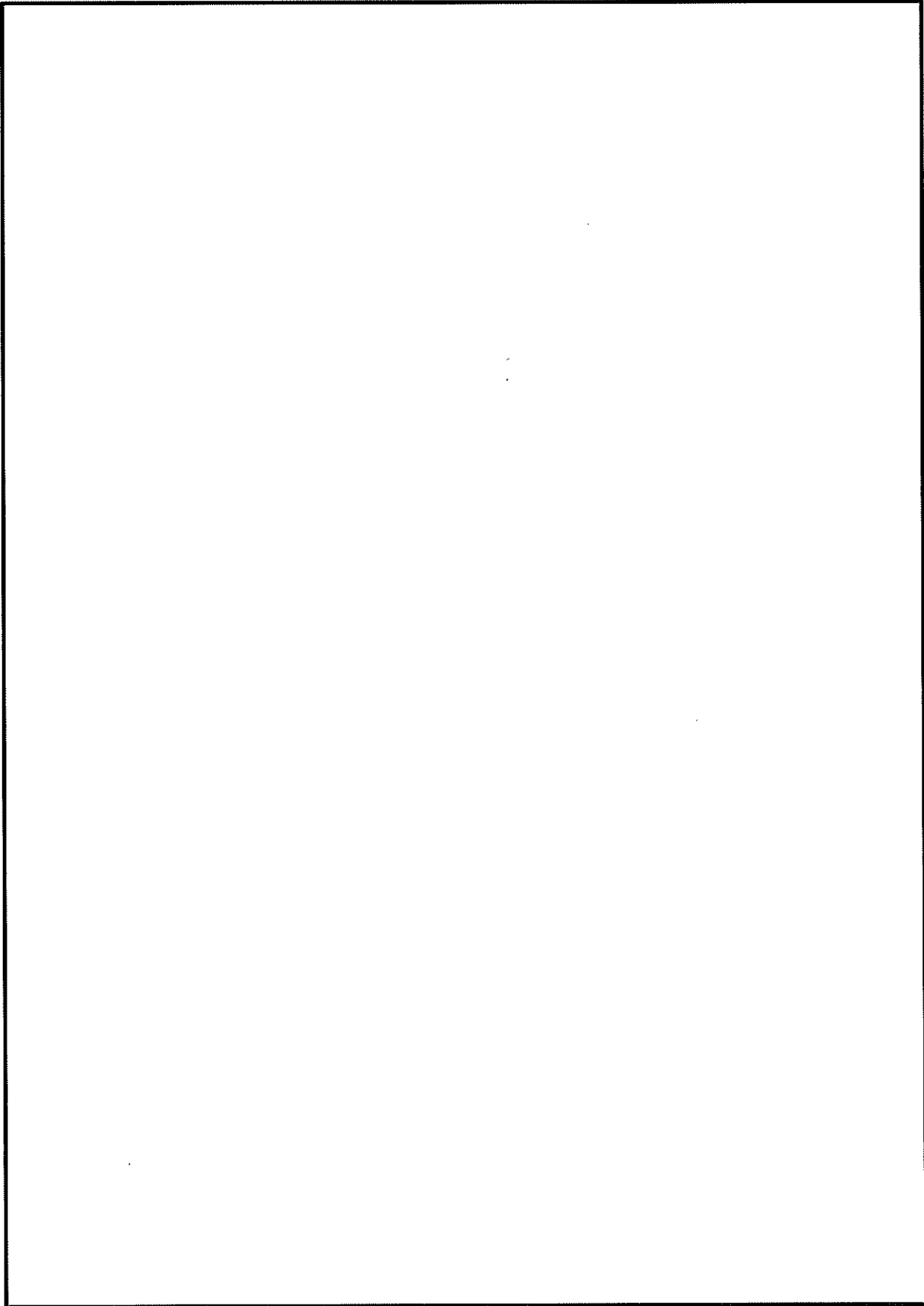
- 21) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975).
- 22) 三角利之, 鈴木幸治, 北村健三, 「大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱(空気の場)」, (一社)日本機械学会, (1999).
- 23) M. Jakob, "Heat Transfer. Volume 1", John Wiley & Sons, Inc., (1949).



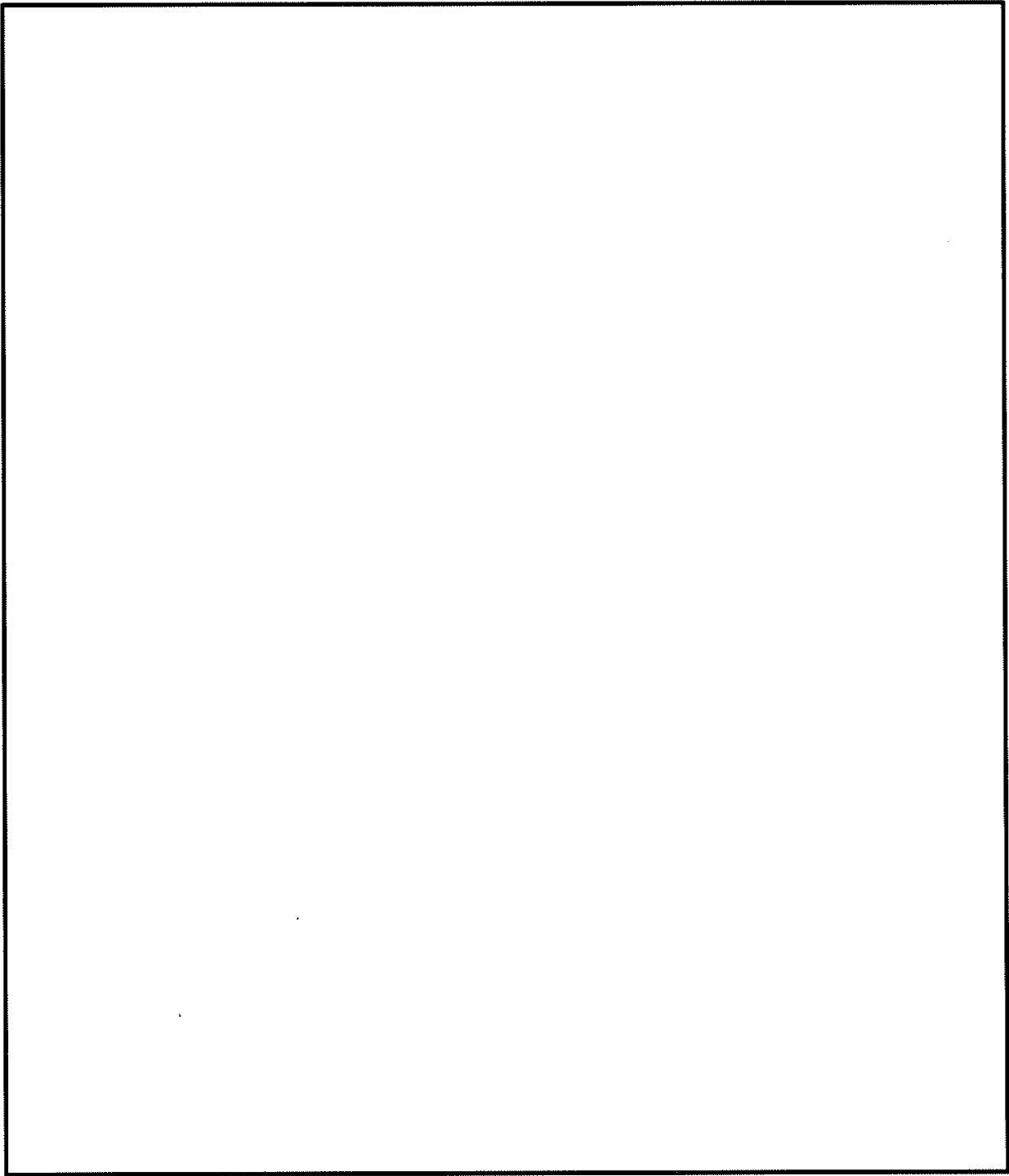
(d)-第 E. 2 図 (b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ最小)



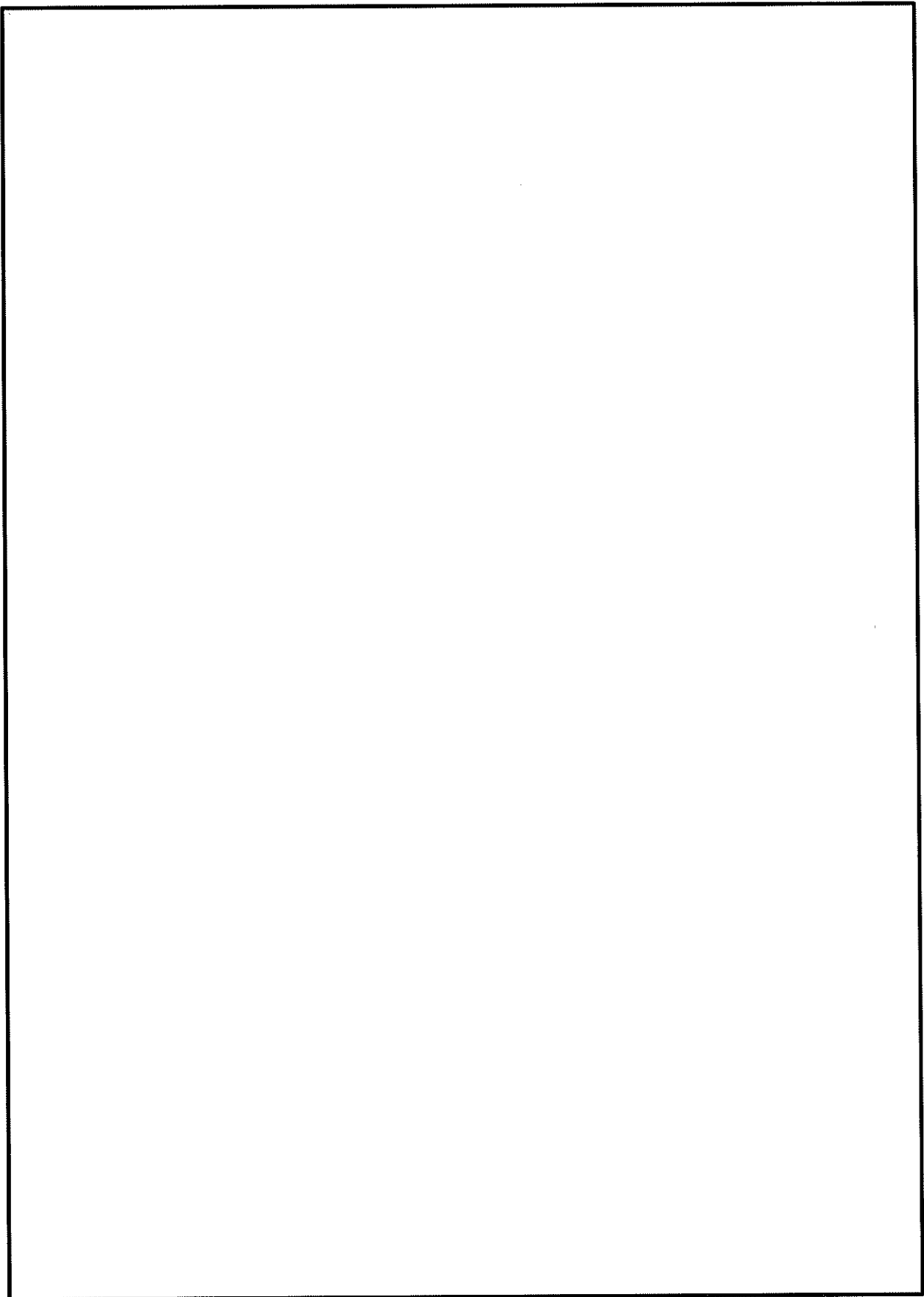
(ロ)-第 E. 2 図 (b-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ最小)



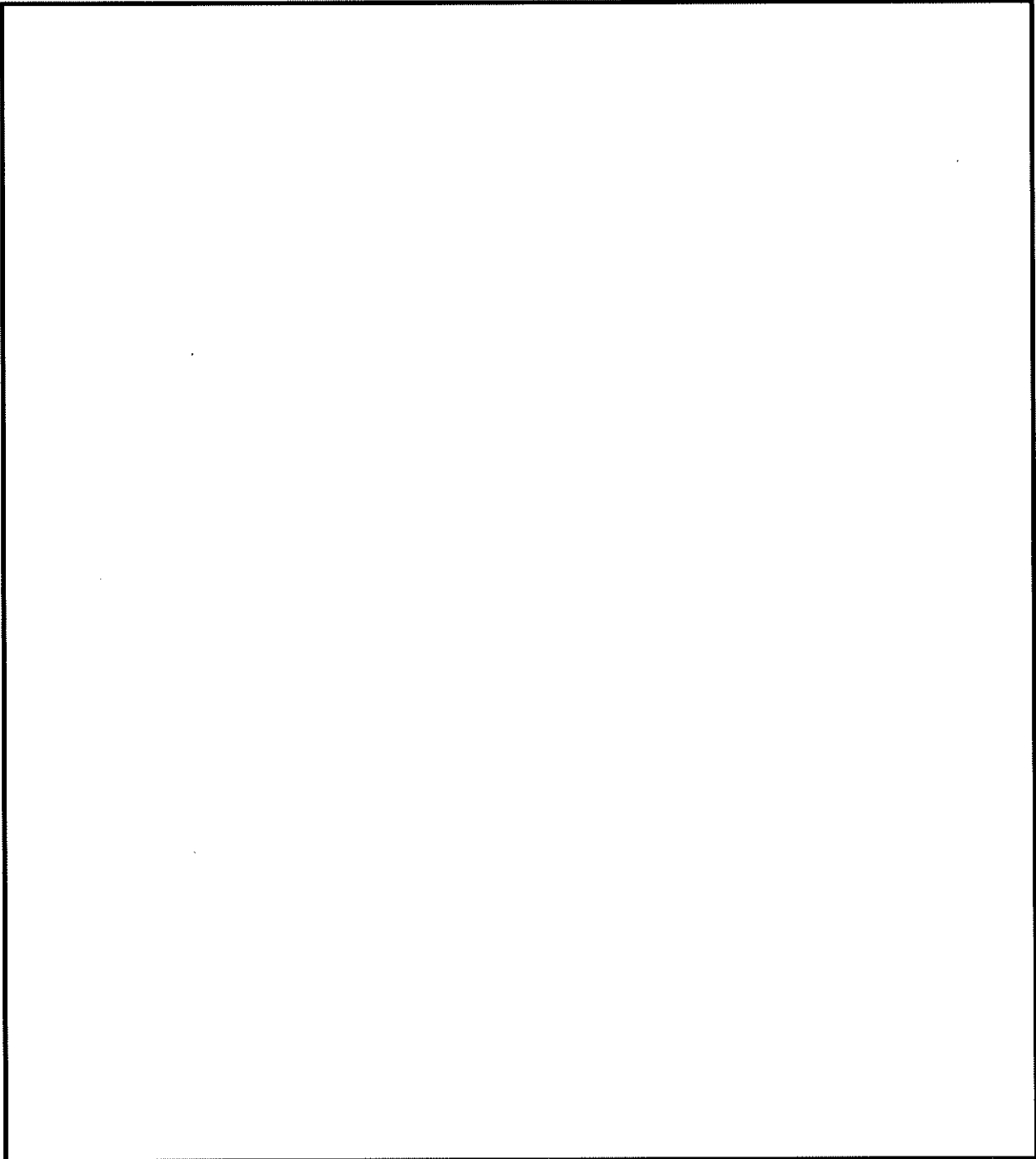
(ロ)-第 E. 2 図 (b-3) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ変化なし)



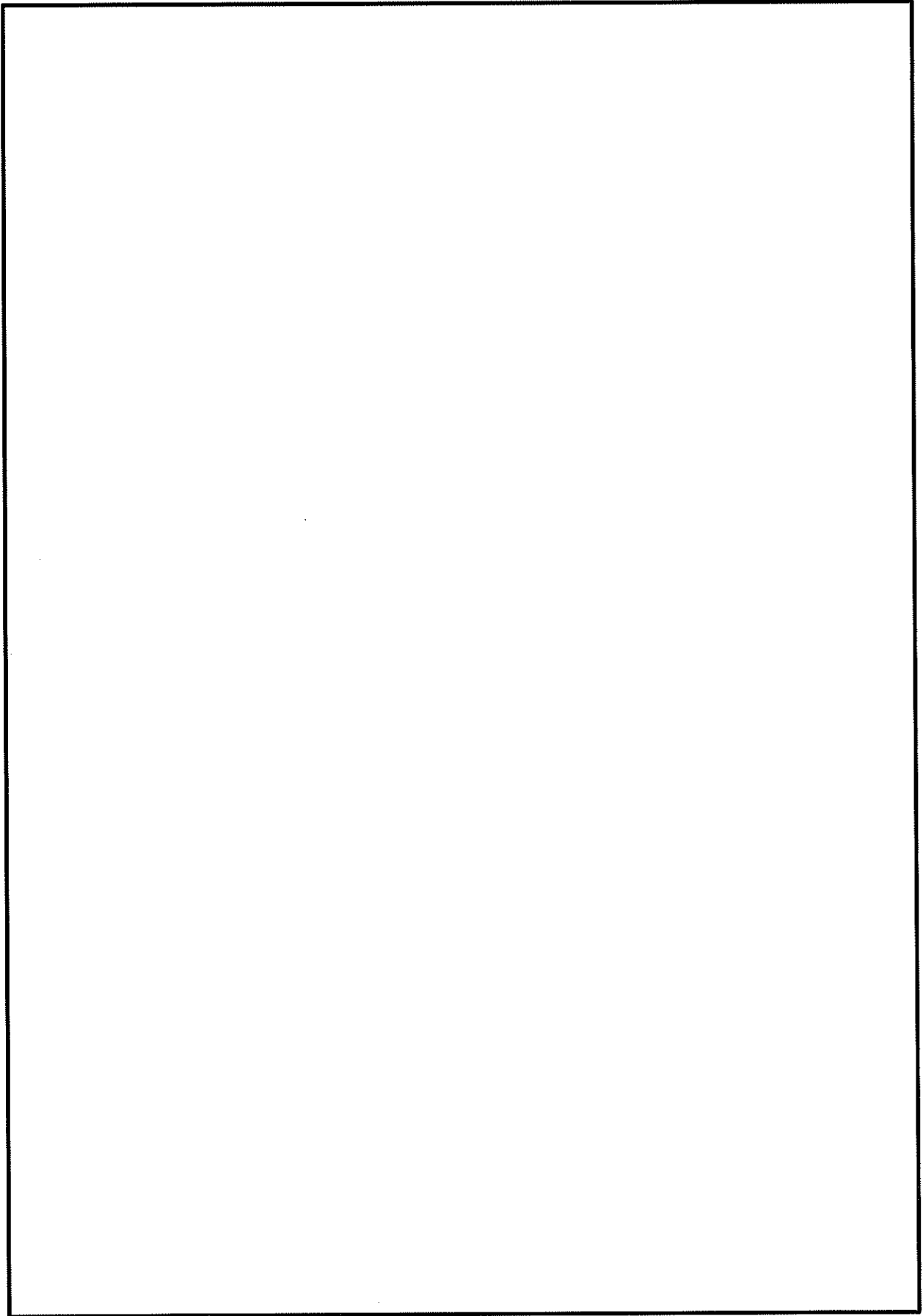
(ロ)-第 E. 2 図 (b-4) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図) (燃料棒ピッチ変化なし)



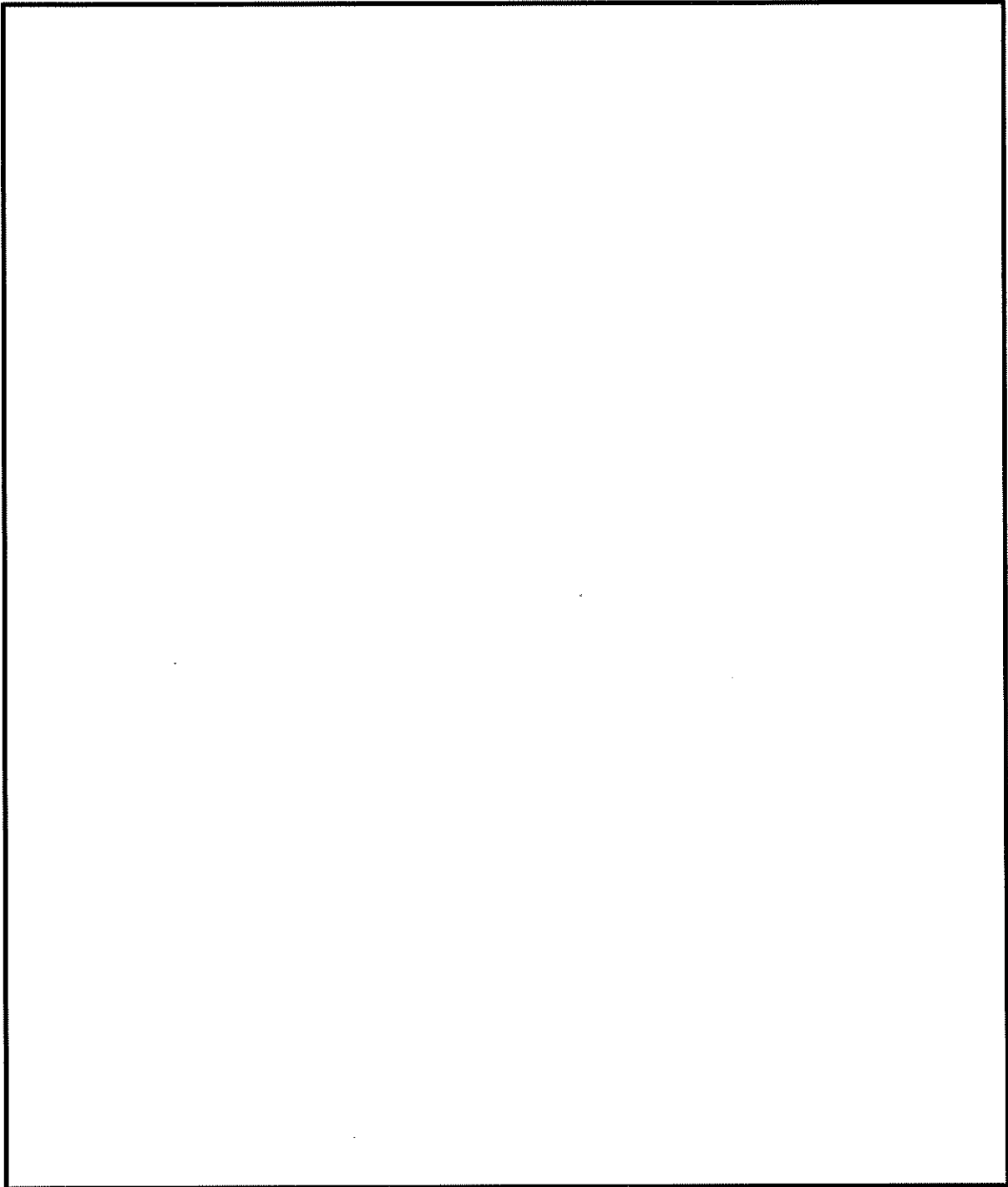
(ロ)-第 E. 2 図 (b-5) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図) (燃料棒ピッチ均一拡大)



(d)-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)



(ロ)-第 E. 付 1 図 (b-1) 臨界計算モデル (燃料領域横断面図)



(ロ)-第 E. 付 1 図 (b-2) 臨界計算モデル (燃料領域拡大図)