

核燃料輸送物設計変更承認申請書の一部補正について

三原燃第 23-0178 号

令和 5 年 7 月 13 日

原子力規制委員会 殿

住所 茨城県那珂郡東海村大字舟石川 622 番地 1

氏名 三菱原子燃料株式会社

代表取締役社長 大和矢 秀成

令和5年4月13日付け三原燃第23-0009号をもって申請した核燃料輸送物
設計変更承認申請書について、下記のとおり一部補正します。

記

1. 核燃料輸送物の名称

MFC-1型

2. 核燃料輸送物設計承認番号

J/105/AF-96 (Rev. 3)

3. 変更内容

- ・平成26年8月22日付け原規規発第1408199号（令和元年7月8日付け原規規発第1907085号をもって期間更新）により承認を受けた核燃料輸送物設計変更承認申請書（平成26年2月27日付け三原燃第13-140号をもって申請、平成26年4月22日付け三原燃第14-015号及び平成26年7月1日付け三原燃第14-028号をもって一部補正。以下「既承認申請書」という。）の記載事項について別記のとおり変更する。
- ・既承認申請書について、以下の変更を行う。
 - 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（以下、「外運搬規則」という）」及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（以下、「外運搬告示」という）」の改正を踏まえて、使用予定期間中の経年変化の評価を行った。その結果を（ロ）章F「核燃料輸送物の経年変化の考慮」（追加）及び（ロ）章G「外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価」（従前の（ロ）章F）に記載する。また経年変化の評価に関連して、（ロ）章A「構造解析」に吊り上げによる疲労評価を追加する。
また、知見の更新のため、（ロ）章A「構造解析」に傾斜落下及び運搬中に予想される温度及び内圧の変化に対する影響評価の追加、並びに（ロ）章E「臨界解析」における解析モデルの精緻化を行う。
 - （ハ）章「品質マネジメントの基本方針に係る説明」を削除し、「輸送容器の保守及び核燃料物質の取扱い方法」を（ハ）章に、「安全設計及び核燃料輸送物の取扱い方法」を（ニ）章に変更を行う。
- ・「輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明書」を追加する。なお、既承認申請書の（ハ）章「品質マネジメントの基本方針に係る説明」について組織変更等マネジメントシステムの最新の状況を反映しているが、実質的な品質管理の方法自体に変更はない。
- ・その他記載の見直しを行う。

4. 変更理由

変更理由を以下に示す。

- (1) 法令改正内容を反映させるため
- (2) 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に係る核燃料輸送物設計承認及び容器承認等に関する申請手続ガイドの制定について」（原規規発第2002264号）に従った記載に変更するため

- (3) 知見の更新を図るため
- (4) 当社の品質マネジメントシステムの最新の状況を反映させるため
- (5) 記載を適正化するため

別紙 1 輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書

別紙 2 輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明書

添付 補正内容一覧

以 上

1.核燃料輸送物の名称

M F C - 1 型

2. 輸送容器の外形寸法、重量及び主要材料

(1)輸送容器の外形寸法

長さ : m

外径 : m

高さ : m

(2)輸送容器の重量

約 k g

(3)核燃料輸送物の総重量

k g 以下

(4)輸送容器の主要材料

外 殻 : 炭素鋼

緩 衝 材 : 木材

防振構造部 : 炭素鋼及びボロンステンレス鋼

リング : ゴム

ショックマウント : ゴム

(5)輸送容器の概略を示す図

図 1 のとおり。

詳細形状は、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計変更承認申請書（令和 5 年 4 月 13 日付三原燃第 23-0009 号（令和 5 年 7 月 13 日付三原燃第 23-0178 号をもって一部補正））に係る別紙の(イ)－第 C.2 から図(イ)－第 C.20 図まで及び(イ)－第 D.1 図から (イ)－第 D.20 図までに示されている。

3.輸送物の種類

A 型核分裂性輸送物

4.収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量

表 1 のとおり

5. 輸送制限個数

- (1) 輸送制限個数：制限なし
- (2) 配列方法：任意
- (3) 臨界安全指数：0

6. 輸送中に予想される周囲の温度の範囲

－20℃から38℃まで

7. 収納物の臨界防止のための核燃料物質の構造に関する事項

収納物の臨界防止のための核燃料輸送物の構造は、収納物を保持する防振構造部とこれを覆う外殻及び緩衝材で構成され、収納物である燃料集合体を保護するとともに所定の位置にとどめる構造としている。

8. 臨界評価における浸水の領域に関する事項

臨界評価において燃料容器内を含めて輸送物全体が浸水することを想定している。

9. 輸送物の密封性に関する事項

輸送容器に密封装置はなく、密封境界は燃料棒被覆管が担保する。

10. B M型輸送物にあつては、B U型輸送物の設計基準のうち適合しない基準についての説明

該当しない。

11. 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いに関する事項

輸送容器の保守及び定期自主検査並びに核燃料輸送物の取扱いについては、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計変更承認申請書（令和5年4月13日付三原燃第23-0009号（令和5年7月13日付三原燃第23-0178号をもって一部補正））に係る別紙のとおり。

12. 輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する事項

輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）については、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計変更承認申請書（令和5年4月13日付三原燃第23-0009号（令和5年7月13日付三原燃第23-0178号をもって一部補正））に係る別紙のとおり。

13.その他特記事項

(1)使用予定年数

60年

別紙1 輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書

別紙2 輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明書

添付 補正一覧

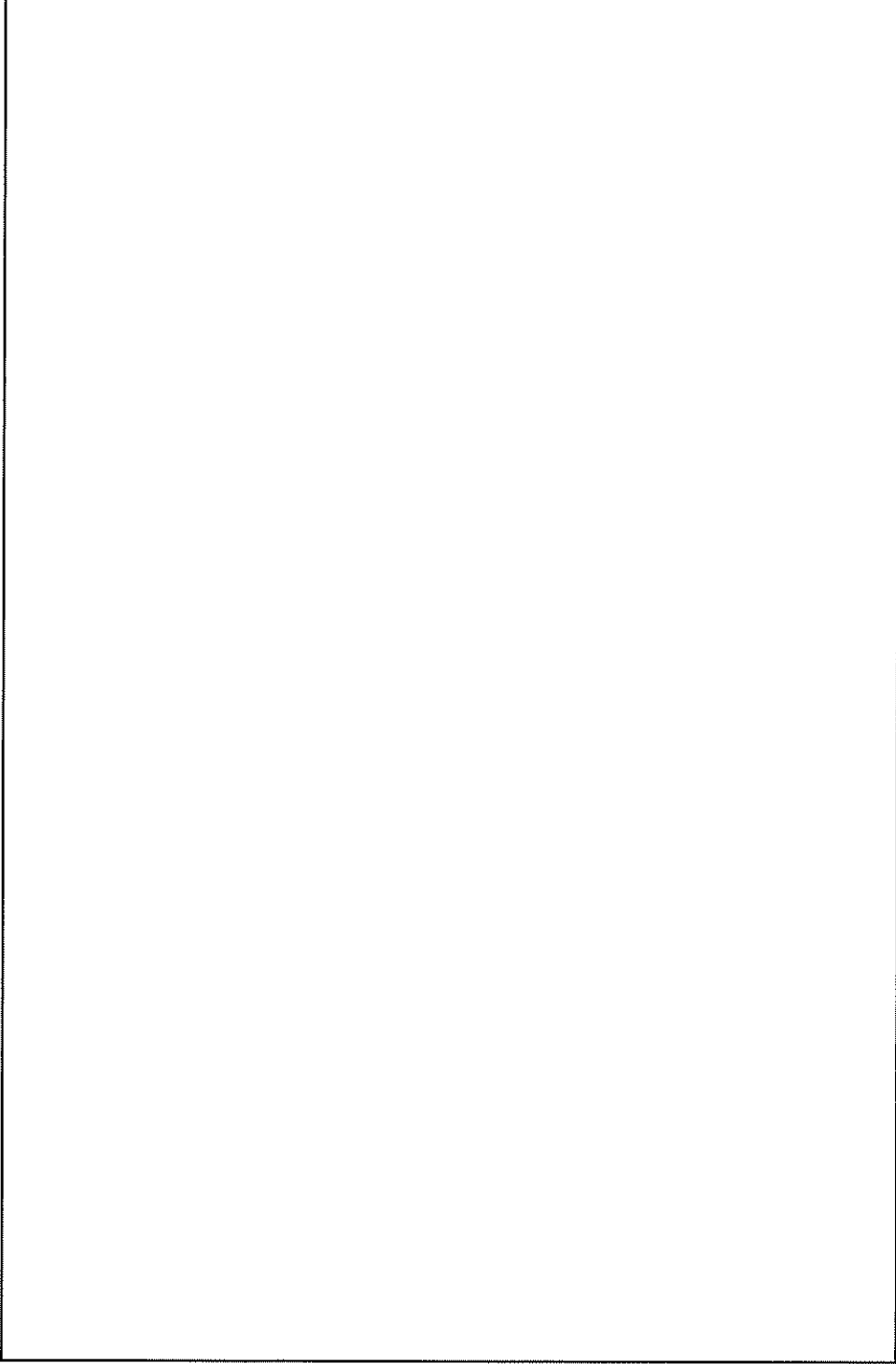


图 1 MFC-1 型输送容器外观图

表 1 核燃料物質の仕様

燃料集合体のタイプ		14×14 (10 フィート)	14×14 (12 フィート)	15×15 (12 フィート)	17×17 (12 フィート)
(輸送容器 1 基当たり)					
種類		軽水炉 (PWR) 用新燃料集合体			
性状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体又は ガドリニア入り二酸化ウラン粉末焼結体)			
重量	収納物重量	□ kg 以下			
	収納体数	2 体以下			
	集合体重量	□ kg 以下			
	UO ₂ 量	□ kg 以下			
放射能の 量	総量	□ Bq 以下			
	主要な 核種	²³² U	□ Bq 以下		
		²³⁴ U	□ Bq 以下		
		²³⁵ U	□ Bq 以下		
		²³⁶ U	□ Bq 以下		
		²³⁸ U	□ Bq 以下		
		⁹⁹ Tc	□ Bq 以下		
濃縮度	二酸化ウラン	5wt%以下			
	ガドリニア入り 二酸化ウラン	3.3wt%以下 (ガドリニア濃度 □ wt%以下)			
燃焼度		該 当 せ ず			
比出力		該 当 せ ず			
最大発熱量		該 当 せ ず			
冷却日数		該 当 せ ず			
(燃料集合体 1 体当たり)					
重量	集合体重量	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下
	UO ₂ 量	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下
濃縮ウラン中の 不純物仕様※	²³² U	≦ □ μg/gU			
	²³⁴ U	≦ □ μg/g ²³⁵ U			
	²³⁶ U	≦ □ μg/g ²³⁵ U			
	⁹⁹ Tc	≦ □ μg/gU			

※ □ の規定に基づき、□ が □ μg/gU 未満の場合は、²³²U 及び
⁹⁹Tc の分析は省略可

輸送容器の設計及び核燃料物質等を
当該輸送容器に収納した場合の
核燃料輸送物の安全性に関する説明書

目 次

(イ)章 核燃料輸送物の説明	(イ)
A. 目的及び条件	(イ)－A－1
B. 核燃料輸送物の種類	(イ)－B－1
C. 輸送容器	(イ)－C－1
D. 輸送容器の収納物	(イ)－D－1
(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析	(ロ)－1
A. 構造解析	(ロ)－A－1
A. 1 構造設計	(ロ)－A－1
A. 1. 1 概要	(ロ)－A－1
A. 1. 2 設計基準	(ロ)－A－2
A. 2 重量及び重心	(ロ)－A－16
A. 3 材料の機械的性質	(ロ)－A－16
A. 4 核燃料輸送物の要件	(ロ)－A－23
A. 4. 1 化学的及び電気的反応	(ロ)－A－23
A. 4. 2 低温強度	(ロ)－A－24
A. 4. 3 密封装置	(ロ)－A－27
A. 4. 4 吊上装置	(ロ)－A－28
A. 4. 5 固縛装置	(ロ)－A－53
A. 4. 6 圧 力	(ロ)－A－53
A. 4. 7 振 動	(ロ)－A－54
A. 5 一般の試験条件	(ロ)－A－56
A. 5. 1 熱的試験	(ロ)－A－56
A. 5. 1. 1 温度及び圧力の要約	(ロ)－A－56
A. 5. 1. 2 熱 膨 張	(ロ)－A－57
A. 5. 1. 3 応力計算	(ロ)－A－57
A. 5. 1. 4 許容応力との比較	(ロ)－A－62
A. 5. 2 水 噴 霧	(ロ)－A－63
A. 5. 3 自由落下	(ロ)－A－63
A. 5. 4 積み重ね試験	(ロ)－A－93
A. 5. 5 貫 通	(ロ)－A－95
A. 5. 6 角又は縁落下	(ロ)－A－96
A. 5. 7 結果の要約及びその評価	(ロ)－A－97

A. 6	特別の試験条件	(口) - A - 101
A. 7	強化浸漬試験	(口) - A - 101
A. 8	放射性収納物	(口) - A - 101
A. 9	核分裂性輸送物	(口) - A - 102
A. 9. 1	核分裂性輸送物に係る一般の試験条件	(口) - A - 102
A. 9. 2	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件	(口) - A - 103
A. 10	付属書類	(口) - A - 120
B.	熱解析	(口) - B - 1
B. 1	概 要	(口) - B - 1
B. 2	材料の熱的性質	(口) - B - 4
B. 3	構成要素の仕様	(口) - B - 6
B. 4	一般の試験条件	(口) - B - 7
B. 4. 1	熱解析モデル	(口) - B - 7
B. 4. 1. 1	解析モデル	(口) - B - 7
B. 4. 1. 2	試験モデル	(口) - B - 8
B. 4. 2	最高温度	(口) - B - 8
B. 4. 3	最低温度	(口) - B - 8
B. 4. 4	最大内圧	(口) - B - 8
B. 4. 5	最大熱応力	(口) - B - 9
B. 4. 6	結果の要約及びその評価	(口) - B - 10
B. 5	特別の試験条件	(口) - B - 10
B. 5. 1	熱解析モデル	(口) - B - 10
B. 5. 1. 1	解析モデル	(口) - B - 10
B. 5. 1. 2	試験モデル	(口) - B - 15
B. 5. 2	核燃料輸送物の評価条件	(口) - B - 15
B. 5. 3	核燃料輸送物温度	(口) - B - 15
B. 5. 4	最大内圧	(口) - B - 15
B. 5. 5	最大熱応力	(口) - B - 17
B. 5. 6	結果の要約及びその評価	(口) - B - 17
B. 6	付属書類	(口) - B - 20

C. 密封解析	(口) - C - 1
C. 1 概 要	(口) - C - 1
C. 2 密封装置	(口) - C - 1
C. 2. 1 密封装置	(口) - C - 1
C. 2. 2 密封装置の貫通部	(口) - C - 1
C. 2. 3 密封装置のガスケット及び溶接部	(口) - C - 2
C. 2. 4 蓋	(口) - C - 2
C. 3 一般の試験条件	(口) - C - 2
C. 3. 1 放射性物質の漏えい	(口) - C - 3
C. 3. 2 密封装置の加圧	(口) - C - 3
C. 3. 3 冷却材汚染	(口) - C - 3
C. 3. 4 冷却材損失	(口) - C - 3
C. 4 特別の試験条件	(口) - C - 3
C. 4. 1 核分裂生成ガス	(口) - C - 3
C. 4. 2 放射性物質の漏えい	(口) - C - 3
C. 5 結果の要約及びその評価	(口) - C - 4
C. 6 付属書類	(口) - C - 7
D. 遮蔽解析	(口) - D - 1
D. 1 概 要	(口) - D - 1
D. 2 線源仕様	(口) - D - 1
D. 2. 1 ガンマ線源	(口) - D - 1
D. 2. 2 中性子源	(口) - D - 1
D. 3 モデル仕様	(口) - D - 4
D. 3. 1 解析モデル	(口) - D - 4
D. 3. 2 解析モデル各領域における原子個数密度	(口) - D - 6
D. 4 遮蔽評価	(口) - D - 7
D. 5 結果の要約及びその評価	(口) - D - 9
D. 6 付属書類	(口) - D - 10
E. 臨界解析	(口) - E - 1
E. 1 概 要	(口) - E - 1
E. 2 解析対象	(口) - E - 1
E. 2. 1 収納物	(口) - E - 1
E. 2. 2 輸送容器	(口) - E - 1

E. 2. 3	中性子吸収材	(口) - E - 2
E. 3	モデル仕様	(口) - E - 2
E. 3. 1	解析モデル	(口) - E - 2
E. 3. 2	解析モデル各領域における原子個数密度	(口) - E - 3
E. 4	未臨界評価	(口) - E - 3
E. 4. 1	計算条件	(口) - E - 3
E. 4. 2	核燃料輸送物への水の浸入等	(口) - E - 4
E. 4. 3	計算方法	(口) - E - 4
E. 4. 4	計算結果	(口) - E - 4
E. 5	ベンチマーク試験	(口) - E - 15
E. 5. 1	試験の概要	(口) - E - 15
E. 5. 2	試験の詳細	(口) - E - 15
E. 5. 3	試験の結果及び評価	(口) - E - 15
E. 6	結果の要約及びその評価	(口) - E - 21
E. 7	付属書類	(口) - E - 22
F.	核燃料輸送物の経年変化の考慮	(口) - F - 1
F. 1	考慮すべき経年変化要因	(口) - F - 1
F. 2	安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価	(口) - F - 2
F. 3	安全解析における経年変化の考慮内容	(口) - F - 11
F. 4	付属資料	(口) - F - 12
G.	外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価	(口) - G - 1
H.	原型容器試験結果報告書	(口) H

(ハ)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法	(ハ)
A. 核燃料輸送物の取扱い方法	(ハ)－A－1
A. 1 装荷方法	(ハ)－A－1
A. 2 核燃料輸送物の発送前検査	(ハ)－A－14
A. 3 取出し方法	(ハ)－A－16
A. 4 空容器の準備	(ハ)－A－18
B. 保守条件	(ハ)－B－1
B. 1 外観検査	(ハ)－B－1
B. 2 耐圧検査	(ハ)－B－1
B. 3 気密漏えい検査	(ハ)－B－1
B. 4 遮蔽検査	(ハ)－B－1
B. 5 未臨界検査	(ハ)－B－1
B. 6 熱検査	(ハ)－B－1
B. 7 吊上検査	(ハ)－B－1
B. 8 作動確認検査	(ハ)－B－1
B. 9 補助系の保守	(ハ)－B－2
B. 10 密封装置の弁, ガasket等	(ハ)－B－2
B. 11 輸送容器の保管	(ハ)－B－2
B. 12 記録の保管	(ハ)－B－2
B. 13 その他	(ハ)－B－2
(ニ)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項	(ニ)－1
参考資料 傾斜落下時に於ける2次衝突について	1
参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明	参－A－1

図 リ ス ト (1)

イ 章

(イ)－第C. 1 図	全 体 鳥 瞰 図	(イ)－C－5
(イ)－第C. 2 図	防振構造部及び外殻	(イ)－C－6
(イ)－第C. 3 図	全体組立図 (タイプA)	(イ)－C－7
(イ)－第C. 4 図	全体組立図 (タイプB)	(イ)－C－8
(イ)－第C. 5 図	上 蓋	(イ)－C－9
(イ)－第C. 6 図	下 部 容 器	(イ)－C－10
(イ)－第C. 7 図	ショックマウントフレーム	(イ)－C－11
(イ)－第C. 8 図	クロスフレーム (タイプA)	(イ)－C－12
(イ)－第C. 9 図	クロスフレーム (タイプB)	(イ)－C－13
(イ)－第C. 10 図	ボトムサポート	(イ)－C－14
(イ)－第C. 11 図	トップ端 (タイプA)	(イ)－C－15
(イ)－第C. 12 図	トップ端 (タイプB)	(イ)－C－16
(イ)－第C. 13 図	クランピングフレーム (タイプA)	(イ)－C－17
(イ)－第C. 14 図	クランピングフレーム (タイプB)	(イ)－C－18
(イ)－第C. 15 図	ショックマウント	(イ)－C－19
(イ)－第C. 16 図	補助的機材 (タイプA)	(イ)－C－20
(イ)－第C. 17 図	補助的機材 (タイプB)	(イ)－C－21
(イ)－第C. 18 図	リリースバルブ	(イ)－C－22
(イ)－第C. 19 図	エアバルブ, 湿度計 (タイプA)	(イ)－C－23
(イ)－第C. 20 図	エアバルブ, 湿度計 (タイプB)	(イ)－C－24
(イ)－第C. 21 図	密 封 境 界	(イ)－C－25

図 リ ス ト (2)

イ 章

(イ)－第D. 1 図	燃料集合体 (14×14, 10 フィート)	(イ)－D－4
(イ)－第D. 2 図	燃料集合体 (14×14, 12 フィート)	(イ)－D－5
(イ)－第D. 2 a 図	燃料集合体 (14×14, 12 フィート) (高燃焼度燃料)	(イ)－D－6
(イ)－第D. 3 図	燃料集合体 (15×15, 12 フィート)	(イ)－D－7
(イ)－第D. 3 a 図	燃料集合体 (15×15, 12 フィート) (高燃焼度燃料)	(イ)－D－8
(イ)－第D. 4 図	燃料集合体 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－9
(イ)－第D. 4 a 図	燃料集合体 (17×17, 12 フィート) (高燃焼度燃料)	(イ)－D－10
(イ)－第D. 4 b 図	燃料集合体 (17×17, 12 フィート) (HTPタイプ)	(イ)－D－11
(イ)－第D. 4 c 図	燃料集合体 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－12
	(高燃焼度燃料 改良タイプ)	
(イ)－第D. 5 図	インサート, ミキシングベーン詳細図	(イ)－D－13
(イ)－第D. 6 図	スケルトン組立体 (14×14, 10 フィート)	(イ)－D－14
(イ)－第D. 7 図	スケルトン組立体 (14×14, 12 フィート)	(イ)－D－15
(イ)－第D. 8 図	スケルトン組立体 (15×15, 12 フィート)	(イ)－D－16
(イ)－第D. 9 図	スケルトン組立体 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－17
(イ)－第D. 10 図	燃料要素構造図 (14×14, 10 フィート)	(イ)－D－18
(イ)－第D. 11 図	燃料要素構造図 (14×14&15×15, 12 フィート)	(イ)－D－19
(イ)－第D. 11a 図	燃料要素構造図 (14×14&15×15, 12 フィート)	(イ)－D－20
	(高燃焼度燃料)	
(イ)－第D. 12 図	燃料要素構造図 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－21
(イ)－第D. 12a 図	燃料要素構造図 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－22
	(高燃焼度燃料)	
(イ)－第D. 12b 図	燃料要素構造図 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－23
	(HTPタイプ)	
(イ)－第D. 12c 図	燃料要素構造図 (17×17, 12 フィート)	(イ)－D－24
	(高燃焼度燃料 改良タイプ)	
(イ)－第D. 13 図	非核燃料炉心構成品概略図 (制御棒クラスタ)	(イ)－D－25
	(14×14, 10 フィート)	
(イ)－第D. 14 図	非核燃料炉心構成品概略図 (制御棒クラスタ)	(イ)－D－26
	(14×14, 12 フィート)	
(イ)－第D. 15 図	非核燃料炉心構成品概略図 (制御棒クラスタ)	(イ)－D－27
	(15×15, 12 フィート)	

図 リ ス ト (3)

イ 章

- | | |
|--|----------|
| (イ)－第D.16 図 非核燃料炉心構成品概略図 (制御棒クラスタ)
(17×17, 12 フィート) | (イ)－D－28 |
| (イ)－第D.17 図 非核燃料炉心構成品概略図 (バーナブルポイズン
アセンブリ) (14×14, 10 フィート) | (イ)－D－29 |
| (イ)－第D.18 図 非核燃料炉心構成品概略図 (バーナブルポイズン
アセンブリ) (14×14, 12 フィート) | (イ)－D－30 |
| (イ)－第D.19 図 非核燃料炉心構成品概略図 (バーナブルポイズン
アセンブリ) (15×15, 12 フィート) | (イ)－D－31 |
| (イ)－第D.20 図 非核燃料炉心構成品概略図 (バーナブルポイズン
アセンブリ) (17×17, 12 フィート) | (イ)－D－32 |

図 リ ス ト (4)

ロ 章



(ロ)－第A. 1 図	輸送物の重心	(ロ)－A－17
(ロ)－第A. 2 図	炭素鋼 () の温度に対する機械的性質の変化	(ロ)－A－20
(ロ)－第A. 3 図	炭素鋼 () の温度に対する機械的性質の変化	(ロ)－A－21
(ロ)－第A. 4 図	ジルコニウム合金 (ジルカロイ－4, MDA, ZIRLO) の温度に対する機械的性質の変化	(ロ)－A－22
(ロ)－第A. 5 図	炭素鋼の低温における機械的性質	(ロ)－A－26
(ロ)－第A. 6 図	吊 上 装 置	(ロ)－A－30
(ロ)－第A. 7 図	ブラケット溶接部	(ロ)－A－31
(ロ)－第A. 8 図	荷 重 条 件	(ロ)－A－34
(ロ)－第A. 9 図	応力評価位置及び解析モデル	(ロ)－A－35
(ロ)－第A. 10 図	半径方向荷重が作用する場合の M_x , M_ϕ , N_x , N_ϕ と α の関係 ($\alpha = 8$ の場合が基準)	(ロ)－A－40
(ロ)－第A. 11 図	締付ボルト組立図	(ロ)－A－49
(ロ)－第A. 12 図	クロスピン解析モデル	(ロ)－A－51
(ロ)－第A. 13 図	第1次モード係数	(ロ)－A－54
(ロ)－第A. 14 図	輸送物の固縛状況及び輸送物の固有振動数解析モデル	(ロ)－A－55
(ロ)－第A. 15 図	燃料棒被覆管解析モデル	(ロ)－A－60
(ロ)－第A. 16 図	1. 2 m水平落下時の評価位置	(ロ)－A－65
(ロ)－第A. 17 図	1. 2 m水平落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－66
(ロ)－第A. 18 図	クランプフレーム解析モデル	(ロ)－A－66
(ロ)－第A. 19 図	スキン解析モデル	(ロ)－A－68
(ロ)－第A. 20 図	長方形板の最大応力の係数 β_1 , β'_1	(ロ)－A－68
(ロ)－第A. 21 図	1. 2 m水平落下時燃料棒被覆管解析モデル	(ロ)－A－69
(ロ)－第A. 22 図	1. 2 m上部垂直落下時の評価位置	(ロ)－A－70
(ロ)－第A. 23 図	1. 2 m上部垂直落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－71
(ロ)－第A. 24 図	ジャッキスクリーンの解析モデル	(ロ)－A－72
(ロ)－第A. 25 図	固定枠の解析モデル(1)	(ロ)－A－75
(ロ)－第A. 26 図	固定枠の解析モデル(2)	(ロ)－A－76
(ロ)－第A. 27 図	スキン解析モデル	(ロ)－A－78
(ロ)－第A. 28 図	被覆管の座屈解析モデル	(ロ)－A－80
(ロ)－第A. 29 図	1. 2 m下部垂直落下時の評価位置	(ロ)－A－82

図 リ ス ト (5)

ロ 章

(ロ)－第A.30 図	1.2 m下部垂直落下時外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－83
(ロ)－第A.31 図	ピボットマウント取付ボルト解析モデル	(ロ)－A－84
(ロ)－第A.32 図	スケルトン組立体(案内シンプル)解析モデル	(ロ)－A－86
(ロ)－第A.33 図	1.2 mコーナ落下時の評価位置	(ロ)－A－89
(ロ)－第A.34 図	1.2 mコーナ落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－90
(ロ)－第A.35 図	曲げ応力解析モデル	(ロ)－A－94
(ロ)－第A.36 図	貫通モデル	(ロ)－A－95
(ロ)－第A.37 図	せん断モデル	(ロ)－A－95
(ロ)－第A.38 図	一般の試験条件試験手順	(ロ)－A－102
(ロ)－第A.39 図	特別の試験条件試験手順	(ロ)－A－103
(ロ)－第A.40 図	9 m上部垂直落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－105
(ロ)－第A.41 図	9 m下部垂直落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－106
(ロ)－第A.42 図	9 m水平落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－107
(ロ)－第A.43 図	9 mコーナ落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－108
(ロ)－第A.44 図	9 mコーナ落下時の外殻の変形量解析モデル	(ロ)－A－110
(ロ)－第A.45 図	半径方向荷重が作用する場合の N_x と β の関係	(ロ)－A－122
(ロ)－第A.46 図	半径方向荷重が作用する場合の M_x と β の関係	(ロ)－A－123
(ロ)－第A.47 図	半径方向荷重が作用する場合の N_ϕ と β の関係	(ロ)－A－124
(ロ)－第A.48 図	半径方向荷重が作用する場合の M_ϕ と β の関係	(ロ)－A－125
(ロ)－第A.49 図	軸方向外モーメントが作用する場合の N_x と β の関係	(ロ)－A－126
(ロ)－第A.50 図	軸方向外モーメントが作用する場合の M_x と β の関係	(ロ)－A－127
(ロ)－第A.51 図	軸方向外モーメントが作用する場合の N_ϕ と β の関係	(ロ)－A－128
(ロ)－第A.52 図	軸方向外モーメントが作用する場合の M_ϕ と β の関係	(ロ)－A－129
(ロ)－第A.53 図	周方向外モーメントが作用する場合の N_x と β の関係	(ロ)－A－130
(ロ)－第A.54 図	周方向外モーメントが作用する場合の M_x と β の関係	(ロ)－A－131
(ロ)－第A.55 図	周方向外モーメントが作用する場合の N_ϕ と β の関係	(ロ)－A－132
(ロ)－第A.56 図	周方向外モーメントが作用する場合の M_ϕ と β の関係	(ロ)－A－133
(ロ)－第A.57 図	締付ボルト解析モデル	(ロ)－A－134
(ロ)－第A.58 図	「SHOCK」コード用解析評価モデル	(ロ)－A－137
(ロ)－第A.59 図	垂直・コーナ落下時の輸送物の解析モデル	(ロ)－A－138
(ロ)－第A.60 図	水平落下時の輸送物の解析モデル	(ロ)－A－138

図 リ ス ト (6)

ロ 章

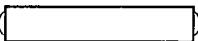
(ロ)－第A.61 図	解析モデルの荷重－変位関係 (1)	(ロ)－A－142
(ロ)－第A.62 図	解析モデルの荷重－変位関係 (2)	(ロ)－A－142
(ロ)－第A.63 図	解析モデルの荷重－変位関係 (3)	(ロ)－A－143
(ロ)－第A.64 図	解析モデルの荷重－変位関係 (4)	(ロ)－A－143
(ロ)－第A.65 図	解析モデルの荷重－変位関係 (5)	(ロ)－A－144
(ロ)－第A.66 図	解析モデルの荷重－変位関係 (6)	(ロ)－A－144
(ロ)－第A.67 図	解析モデルの荷重－変位関係 (7)	(ロ)－A－145
(ロ)－第A.68 図	解析モデルの荷重－変位関係 (8)	(ロ)－A－145
(ロ)－第A.69 図	解析モデルの荷重－変位関係 (9)	(ロ)－A－146
(ロ)－第A.70 図	解析モデルの荷重－変位関係 (10)	(ロ)－A－146
(ロ)－第A.71 図	等価断面係数解析モデル	(ロ)－A－149
(ロ)－第A.72 図	外殻変形量解析モデル	(ロ)－A－151
(ロ)－第A.73 図	力による強制振動の共振曲線	(ロ)－A－157
(ロ)－第A.74 図	ジルコニウム合金 () の応力－歪線図 (上：全体、下：拡大図)	(ロ)－A－159

図 リ ス ト (7)

ロ 章

(ロ)－第B. 1 図	熱的構成図	(ロ)－B－2
(ロ)－第B. 2 図	落下試験 I における変形形状図	(ロ)－B－11
(ロ)－第B. 3 図	特別の試験条件下の解析モデル, 寸法及び領域境界条件図	(ロ)－B－14
(ロ)－第B. 4 図	特別の試験条件下での各部温度履歴	(ロ)－B－19
(ロ)－第B. 5 図	TRUMP フローチャート (1/3)	(ロ)－B－25
(ロ)－第B. 5 図	TRUMP フローチャート (2/3)	(ロ)－B－26
(ロ)－第B. 5 図	TRUMP フローチャート (3/3)	(ロ)－B－27
(ロ)－第B. 6 図	燃料集合体の均質化モデル	(ロ)－B－28
(ロ)－第B. 7 図	燃料棒の断面	(ロ)－B－28
(ロ)－第B. 8 図	燃料棒の対角線方向の配列図	(ロ)－B－28
(ロ)－第B. 9 図	B 値の計算結果	(ロ)－B－35
(ロ)－第B. 10 図	800℃×30分耐火試験時における落下試験 II の影響	(ロ)－B－39

図 リ ス ト (8)

ロ 章

- | | | |
|-----------|-----------------|---------|
| (ロ)－第C.1図 | 密封境界(燃料棒)と密封境界図 | (ロ)－C－5 |
| (ロ)－第C.2図 | 燃料棒溶接箇所 | (ロ)－C－6 |

図 リ ス ト (9)

ロ 章

- | | | |
|-------------|---|----------|
| (ロ)－第D. 1 図 | 燃料集合体と輸送物の表面までの最短距離
(通常 of 輸送条件) | (ロ)－D－4 |
| (ロ)－第D. 2 図 | 通常 of 輸送条件 of 遮蔽解析モデル
(燃料集合体 1 体当り, 1 次元円筒形状) | (ロ)－D－4 |
| (ロ)－第D. 3 図 | 最大変位を考慮した燃料集合体と輸送物表面までの
最短距離 (一般 of 試験条件下) | (ロ)－D－5 |
| (ロ)－第D. 4 図 | 一般 of 試験条件下 of 遮蔽解析モデル
(燃料集合体 1 体当り, 1 次元円筒形状) | (ロ)－D－5 |
| (ロ)－第D. 5 図 | メッシュ分割図 | (ロ)－D－13 |

図 リ ス ト (10)

ロ 章

- | | | |
|-------------|----------------------------|----------|
| (ロ)－第E. 1 図 | 特別の試験条件下の計算形状 (燃料領域横方向断面図) | (ロ)－E－9 |
| (ロ)－第E. 2 図 | 特別の試験条件下の計算形状 (縦断面図) | (ロ)－E－10 |
| (ロ)－第E. 3 図 | 1 4 × 1 4 型燃料集合体断面 | (ロ)－E－11 |
| (ロ)－第E. 4 図 | 1 5 × 1 5 型燃料集合体断面 | (ロ)－E－12 |
| (ロ)－第E. 5 図 | 1 7 × 1 7 型燃料集合体断面 | (ロ)－E－13 |
| (ロ)－第E. 6 図 | 臨界計算の流れ | (ロ)－E－14 |
| (ロ)－第E. 7 図 | 臨界実験に用いられた燃料棒の仕様 | (ロ)－E－19 |
| (ロ)－第E. 8 図 | 臨界実験体系 | (ロ)－E－20 |

ロ 章

- | | | |
|-------------|-----------------------------|----------|
| (ロ)－第F. 1 図 | 経年に伴うショックマウントのばね定数変化(引張方向) | (ロ)－F－13 |
| (ロ)－第F. 2 図 | 経年に伴うショックマウントのばね定数変化(せん断方向) | (ロ)－F－13 |

図 リ ス ト (11)

ロ 章

(ロ)－第H. 1 図	原型容器鳥瞰図	(ロ)－H－7
(ロ)－第H. 2 図	15×15模擬燃料集合体	(ロ)－H－8
(ロ)－第H. 3 図	模擬重量体	(ロ)－H－9
(ロ)－第H. 4 図	模擬燃料集合体用調整重量体	(ロ)－H－10
(ロ)－第H. 5 図	落下試験台	(ロ)－H－13
(ロ)－第H. 6 図	切離し装置	(ロ)－H－14
(ロ)－第H. 7 図	貫通試験治具	(ロ)－H－15
(ロ)－第H. 8 図	クレーン車	(ロ)－H－16
(ロ)－第H. 9 図	耐火試験炉	(ロ)－H－17
(ロ)－第H. 10 図	落下試験要領図 (9 m落下試験)	(ロ)－H－21
(ロ)－第H. 11 図	落下姿勢の概要 (1 m貫通試験)	(ロ)－H－22
(ロ)－第H. 12 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－24
(ロ)－第H. 13 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－25
(ロ)－第H. 14 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－26
(ロ)－第H. 15 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－27
(ロ)－第H. 16 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－28
(ロ)－第H. 17 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－29
(ロ)－第H. 18 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－30
(ロ)－第H. 19 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－30
(ロ)－第H. 20 図	落下姿勢の概要	(ロ)－H－30
(ロ)－第H. 21 図	加速度, 歪測定位置図	(ロ)－H－32
(ロ)－第H. 22 図	垂直落下試験 (9 m, 1 m…ボトム下向) 容器本体 (外部) 変形測定結果 (TEST 1, TEST 2)	(ロ)－H－38
(ロ)－第H. 23 図	水平落下試験 (9 m, 1 m…0° 方向下向) 容器本体 (外部) 変形測定結果 (TEST 3, TEST 4)	(ロ)－H－39
(ロ)－第H. 24 図	コーナ落下試験 (9 m, 1 m…トップ0° 方向下向) 容器本体 (外部) 変形測定結果 (TEST 5, TEST 6)	(ロ)－H－40

図 リ ス ト (12)

ロ 章

(ロ)－第H. 25 図	傾斜落下試験 (9 m, 1 m…トップ180° 方向下向)	(ロ)－H－41
	容器本体 (外部)	
	変形測定結果 (TEST 7, TEST 8)	
(ロ)－第H. 26 図	1 m水平貫通試験 (180° 方向下向)	(ロ)－H－42
	容器本体 (外部)	
	変形測定結果 (TEST 12)	
(ロ)－第H. 27 図	1 m水平貫通試験 (90° 方向下向)	(ロ)－H－42
	容器本体 (外部)	
	変形測定結果 (TEST 14)	
(ロ)－第H. 28 図	1 m水平貫通試験 (180° 方向下向トップへ編心)	(ロ)－H－43
	容器本体 (外部)	
	変形測定結果 (TEST 15)	
(ロ)－第H. 29 図	1 m水平貫通試験 (180° 方向下向ボトムへ編心)	(ロ)－H－43
	容器本体 (外部)	
	変形測定結果 (TEST 16)	
(ロ)－第H. 30 図	1 m垂直貫通試験 (ボトム下向編心)	(ロ)－H－44
	容器本体 (外部)	
	変形測定結果 (TEST 17)	
(ロ)－第H. 31 図	耐火試験要領	(ロ)－H－56
(ロ)－第H. 32 図	耐火試験温度計測位置図	(ロ)－H－57
(ロ)－第H. 33 図	耐火試験温度データ (原型容器本体外側)	(ロ)－H－58
(ロ)－第H. 34 図	耐火試験温度データ (原型容器本体内側)	(ロ)－H－59
(ロ)－第H. 35 図	耐火試験温度データ (原型容器内空間)	(ロ)－H－60
(ロ)－第H. 36 図	耐火試験温度データ (リング部)	(ロ)－H－61
(ロ)－第H. 37 図	耐火試験温度データ (燃料集合体)	(ロ)－H－62
(ロ)－第H. 38 図	模擬燃料棒の取出し	(ロ)－H－67
(ロ)－第H. 39 図	供試体概略図	(ロ)－H－73
(ロ)－第H. 40 図	落下姿勢概略図 (垂直落下)	(ロ)－H－74
(ロ)－第H. 41 図	落下姿勢概略図 (水平落下)	(ロ)－H－75

図 リ ス ト (13)

ハ 章

(ハ)－第A. 1 図	空輸送容器の準備	(ハ)－A－2
(ハ)－第A. 2 図	燃料集合体装荷時のフロー	(ハ)－A－5
(ハ)－第A. 3 図	補助脚使用状態 (タイプA)	(ハ)－A－6
(ハ)－第A. 4 図	補助脚使用状態 (タイプB)	(ハ)－A－7
(ハ)－第A. 5 図	締付ボルト詳細図	(ハ)－A－8
(ハ)－第A. 6 図	締付ボルト受	(ハ)－A－9
(ハ)－第A. 7 図	輸送容器トップ端詳細図 (タイプA)	(ハ)－A－10
(ハ)－第A. 8 図	輸送容器トップ端詳細図 (タイプB)	(ハ)－A－11
(ハ)－第A. 9 図	ボトム端詳細図	(ハ)－A－12
(ハ)－第A. 10 図	防振構造部の組立状態図	(ハ)－A－13
(ハ)－第A. 11 図	燃料集合体取出し時のフロー	(ハ)－A－17

参考資料

図－1	落下衝突による衝突とリバウンド	4
-----	-----------------	---

図 リ ス ト (14)

参 考

参一第A. 1 図	全体組立図 (タイプA)	参一A-5
参一第A. 2 図	全体組立図 (タイプB)	参一A-6
参一第A. 3 図	輸送容器全体製作工程	参一A-7
参一第A. 4 図	防振構造部組立図 (タイプA)	参一A-8
参一第A. 5 図	防振構造部組立図 (タイプB)	参一A-9
参一第A. 6 図	上 蓋	参一A-10
参一第A. 7 図	下 部 容 器 (タイプA)	参一A-11
参一第A. 8 図	下 部 容 器 (タイプB)	参一A-12
参一第A. 9 図	ショックマウントフレーム	参一A-13
参一第A. 10 図	クロスフレーム (タイプA)	参一A-14
参一第A. 11 図	クロスフレーム (タイプB)	参一A-15
参一第A. 12 図	トップ端 (タイプA)	参一A-16
参一第A. 13 図	トップ端 (タイプB)	参一A-17
参一第A. 14 図	ボトムサポート	参一A-18
参一第A. 15 図	クランピングフレーム (タイプA)	参一A-19
参一第A. 16 図	クランピングフレーム (タイプB)	参一A-20
参一第A. 17 図	ショックマウント取付け, 取外し要領図	参一A-21
参一第A. 18 図	エアバルブ, 湿度計 (タイプA)	参一A-22
参一第A. 19 図	エアバルブ, 湿度計 (タイプB)	参一A-23
参一第A. 20 図	リリーフバルブ	参一A-24
参一第A. 21 図	品質保証システムの概要	参一A-40
参一第B. 1 図	外殻組立完成時気密漏えい検査概要	参一B-8

表 リ ス ト (1)

イ 章

(イ)－第A. 1表	核燃料物質の仕様	(イ)－A－2
(イ)－第C. 1表	輸送容器部材一覧表	(イ)－C－26
(イ)－第D. 1表	燃料集合体の型式及びその構成要素数量	(イ)－D－33
(イ)－第D. 2表	燃料集合体及び非核燃料炉心構成品装荷時の 主要部寸法	(イ)－D－34
(イ)－第D. 3表	燃料棒の主要部寸法	(イ)－D－35
(イ)－第D. 4表	制御棒案内シンプル主要部寸法	(イ)－D－35
(イ)－第D. 5表	主要構造材料	(イ)－D－35
(イ)－第D. 6表	濃縮ウラン中の不純物仕様	(イ)－D－37
(イ)－第D. 7表	集合体、輸送容器の線源強度	(イ)－D－37
(イ)－第D. 8表	燃料集合体の主要部重量	(イ)－D－38
(イ)－第D. 9表	燃料棒内圧力及び充填ガス種類	(イ)－D－39

表 リ ス ト (2)

ロ 章

(ロ)－第A. 1表	構造解析に用いる応力評価基準	(ロ)－A－3
(ロ)－第A. 2表	設計負荷及び負荷の組合せ	(ロ)－A－4
(ロ)－第A. 3表	負 荷 条 件	(ロ)－A－5
(ロ)－第A. 4表(1)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－6
(ロ)－第A. 4表(2)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－7
(ロ)－第A. 4表(3)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－8
(ロ)－第A. 4表(4)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－9
(ロ)－第A. 4表(5)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－10
(ロ)－第A. 4表(6)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－11
(ロ)－第A. 4表(7)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－12
(ロ)－第A. 4表(8)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－13
(ロ)－第A. 4表(9)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－14
(ロ)－第A. 4表(10)	輸送容器の構造設計の条件及び解析方法	(ロ)－A－15
(ロ)－第A. 5表	各部の最大重量	(ロ)－A－16
(ロ)－第A. 6表	材料の機械的性質	(ロ)－A－18
(ロ)－第A. 7表	設計基準値となる材料の機械的性質	(ロ)－A－19
(ロ)－第A. 8表	木材 (<input type="text"/>) の圧縮変形応力	(ロ)－A－19
(ロ)－第A. 9表	ショックマウント動的ばね定数	(ロ)－A－19
(ロ)－第A. 10表	接触する異種材料の一覧	(ロ)－A－23
(ロ)－第A. 11表	各地区の最低気温	(ロ)－A－24
(ロ)－第A. 12表	主要材料一覧	(ロ)－A－24
(ロ)－第A. 13表	半径方向荷重が作用する場合の K_1 , K_2	(ロ)－A－38
(ロ)－第A. 14表	周方向外モーメントが作用する場合の C_c , K_c	(ロ)－A－38
(ロ)－第A. 15表	軸方向外モーメントが作用する場合の C_L , K_L	(ロ)－A－39
(ロ)－第A. 16表	吊上げ時に生ずる応力	(ロ)－A－47
(ロ)－第A. 17表	各部の温度	(ロ)－A－56
(ロ)－第A. 18表	燃料集合体の解析仕様	(ロ)－A－59
(ロ)－第A. 19表	内圧力により被覆管に生ずる応力	(ロ)－A－61
(ロ)－第A. 20表	許容応力との比較	(ロ)－A－62
(ロ)－第A. 21表	1. 2 m水平落下時燃料棒被覆管に生ずる応力	(ロ)－A－70
(ロ)－第A. 22表	各部に生ずる応力	(ロ)－A－77
(ロ)－第A. 23表	各被覆管に生ずる圧縮応力	(ロ)－A－80
(ロ)－第A. 24表	被覆管に生ずる衝撃荷重	(ロ)－A－81

表 リ ス ト (3)

ロ 章

(ロ)－第A.25表	スケルトン組立体に生ずる圧縮応力	(ロ)－A－87
(ロ)－第A.26表	コーナ落下時の解析加速度	(ロ)－A－88
(ロ)－第A.27表(1)	1.2mコーナ落下解析結果	(ロ)－A－91
(ロ)－第A.27表(2)	1.2mコーナ落下解析結果	(ロ)－A－92
(ロ)－第A.28表(1)	許容応力との比較	(ロ)－A－98
(ロ)－第A.28表(2)	許容応力との比較	(ロ)－A－99
(ロ)－第A.28表(3)	許容応力との比較	(ロ)－A－100
(ロ)－第A.29表	コーナ落下時の解析加速度	(ロ)－A－109
(ロ)－第A.30表	コーナ落下時の解析加速度	(ロ)－A－111
(ロ)－第A.31表	原型試験の落下試験Ⅱの結果(1)	(ロ)－A－114
(ロ)－第A.31表	原型試験の落下試験Ⅱの結果(2)	(ロ)－A－115
(ロ)－第A.32表(1)	許容応力との比較	(ロ)－A－118
(ロ)－第A.32表(2)	許容応力との比較	(ロ)－A－119
(ロ)－第A.33表	実験値と解析値の比較	(ロ)－A－137
(ロ)－第A.34表	材料の物性値 (SHOCKで使用したもの)	(ロ)－A－139
(ロ)－第A.35表	解析モデル各質点の重量 (垂直, コーナ落下モデル)	(ロ)－A－139
(ロ)－第A.36表	解析モデル各質点の重量 (水平落下モデル)	(ロ)－A－139
(ロ)－第A.37表	解析モデルのばね定数 (垂直, コーナ落下モデル)	(ロ)－A－140
(ロ)－第A.38表	解析モデルのばね定数 (水平落下モデル)	(ロ)－A－140
(ロ)－第A.39表	落下解析結果	(ロ)－A－147
(ロ)－第A.40表	9m落下解析値と実験値の比較	(ロ)－A－148
(ロ)－第A.41表	水平落下時の燃料棒に発生する応力	(ロ)－A－149
(ロ)－第A.42表	水平落下時の変形幅の解析結果	(ロ)－A－152
(ロ)－第A.43表	吊り上げ装置に対する疲労評価結果	(ロ)－A－154

表 リ ス ト (4)

ロ 章

(ロ)－第B. 1表	熱解析条件	(ロ)－B－3
(ロ)－第B. 2表	熱解析の方法	(ロ)－B－3
(ロ)－第B. 3表	炭素鋼の熱的性質	(ロ)－B－4
(ロ)－第B. 4表	木材 (<input type="text"/>) の熱的性質	(ロ)－B－4
(ロ)－第B. 5表	UO ₂ ペレットの熱的性質	(ロ)－B－5
(ロ)－第B. 6表	空気の熱的性質	(ロ)－B－5
(ロ)－第B. 7表	燃料棒被覆管の熱的性質	(ロ)－B－6
(ロ)－第B. 8表	均質化燃料の熱的性質	(ロ)－B－6
(ロ)－第B. 9表	一般の試験条件下の熱的条件	(ロ)－B－8
(ロ)－第B. 10表	特別の試験条件下の熱的条件	(ロ)－B－12
(ロ)－第B. 11表	一般及び特別の試験条件下における輸送物各部の 最高温度	(ロ)－B－17
(ロ)－第B. 12表	一般及び特別の試験条件下における燃料棒及び容器 内空間の最高圧力	(ロ)－B－18
(ロ)－第B. 13表	特別の試験条件下における輸送物の総合的評価	(ロ)－B－18
(ロ)－第B. 14表	均質化燃料部面積比	(ロ)－B－30
(ロ)－第B. 15表	B値の計算結果	(ロ)－B－33
(ロ)－第B. 16表	各部の輻射形態係数	(ロ)－B－36
(ロ)－第B. 17表	外筒の熱伝達係数	(ロ)－B－37
(ロ)－第B. 18表	各材料の輻射率	(ロ)－B－38
(ロ)－第B. 19表	形 態 係 数	(ロ)－B－38
(ロ)－第B. 20表	燃料棒の初期値	(ロ)－B－41
(ロ)－第B. 21表	最高温度時における燃料棒のボイド体積及び内圧	(ロ)－B－41
(ロ)－第B. 22表	最高温度時における燃料棒に発生する周方向応力	(ロ)－B－42

表 リ ス ト (5)

ロ 章

(ロ)－第C.1表 密封境界の構造材(温度)(1/2)	(ロ)－C－7
(ロ)－第C.1表 密封境界の構造材(圧力)(2/2)	(ロ)－C－7

表 リ ス ト (6)

ロ 章

(ロ)－第D. 1表	ガンマ線源強度	(ロ)－D－2
(ロ)－第D. 2表	主要核種の放射能強度	(ロ)－D－3
(ロ)－第D. 3表	遮蔽解析モデル各領域の材料別体積比	(ロ)－D－6
(ロ)－第D. 4表	各材料の原子個数密度	(ロ)－D－6
(ロ)－第D. 5表	ガンマ線エネルギー群構造と線量当量率変換係数	(ロ)－D－8
(ロ)－第D. 6表	最高線量当量率の要約	(ロ)－D－9

表 リ ス ト (7)

ロ 章

(ロ)－第E. 1表	各種燃料集合体の諸元	(ロ)－E－5
(ロ)－第E. 2表	各領域の原子個数密度 (個/cm ³ , 10 ²⁴ 単位)	(ロ)－E－6
(ロ)－第E. 3表	各領域の原子個数密度 (個/cm ³ , 10 ²⁴ 単位)	(ロ)－E－7
(ロ)－第E. 4表	臨界解析条件と解析結果	(ロ)－E－8
(ロ)－第E. 5表	臨界実験における臨界寸法	(ロ)－E－16
(ロ)－第E. 6表	臨界実験に用いられた材料の密度と原子個数密度	(ロ)－E－17
(ロ)－第E. 7表	臨界実験解析の結果	(ロ)－E－18

ロ 章

(ロ)－第F. 1表	ボロンステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性	(ロ)－F－3
(ロ)－第F. 2表	炭素鋼の経年変化の考慮の必要性	(ロ)－F－5
(ロ)－第F. 3表	ゴム () の経年変化の考慮の必要性	(ロ)－F－7
(ロ)－第F. 4表	木材の経年変化の考慮の必要性	(ロ)－F－9
(ロ)－第F. 5表	影響評価解析に使用したショックマウントのばね定数	(ロ)－F－14
(ロ)－第F. 6表	ショックマウントの硬化を考慮した落下解析結果	(ロ)－F－15

別 表	外運搬規則及び外運搬告示に定める技術基準への 適合性の評価	(ロ)－G－2
-----	----------------------------------	---------

表 リ ス ト (8)

ロ 章

(ロ)－第H. 1表	MFC－1型輸送容器試験日程表	(ロ)－H－3
(ロ)－第H. 2表	原型容器試験手順	(ロ)－H－4
(ロ)－第H. 3表	原型容器と実輸送容器の主要部の比較	(ロ)－H－6
(ロ)－第H. 4表	主要測定項目及び測定点	(ロ)－H－31
(ロ)－第H. 5表	測定結果の概要	(ロ)－H－45
(ロ)－第H. 6表	模擬燃料棒仕様	(ロ)－H－66
(ロ)－第H. 7表	ヘリウムリーク試験結果	(ロ)－H－68
(ロ)－第H. 8表	スキン部分モデルの試験結果	(ロ)－H－72

表 リ ス ト (9)

ハ 章

(ハ)－第A. 1表 輸送物発送前検査要領 (ハ)－A－15

(ハ)－第B. 1表 定期自主検査要領 (ハ)－B－3

(ハ)－第B. 2表 交換頻度 (ハ)－B－3

参考資料

表－1 落下時に於ける消費エネルギー比率 2

表 リ ス ト (10)

参 考

参一第A. 1表	詳細図一覧表	参一A-2
参一第A. 2表	□の化学成分及び機械的性質	参一A-25
参一第A. 3表	□の化学成分及び機械的性質	参一A-26
参一第A. 4表	ボロンステンレス鋼板の化学成分及び機械的性質	参一A-27
参一第A. 5表	□の化学成分及び機械的性質	参一A-27
参一第A. 6表	□の化学成分及び機械的性質	参一A-28
参一第A. 7表	被覆アーク溶接棒□の心線の化学成分と 溶着金属の機械的性質	参一A-29
参一第A. 8表	溶接用軟鋼ワイヤ□の化学成分	参一A-30
参一第A. 9表	溶接用ステンレスワイヤ□の化学成分	参一A-30
参一第A. 10表	□の仕様	参一A-31
参一第A. 11表	□の化学成分及び機械的性質	参一A-31
参一第A. 12表	ミルシート記載内容	参一A-33
参一第A. 13表	容器溶接部仕様 (1/2)	参一A-37
参一第A. 13表	容器溶接部仕様 (2/2)	参一A-38
参一第B. 1表(1)	輸送容器製作時及び完成時検査要領	参一B-2
参一第B. 1表(2)	輸送容器製作時及び完成時検査要領	参一B-3
参一第B. 2表	輸送容器の最初の使用前検査要領	参一B-4
参一第B. 3表	製缶加工による製品の無記号公差	参一B-5
参一第B. 4表	機械加工による製品の無記号公差	参一B-6
参一第C. 1表	容器製作スケジュール	参一C-2

写 真 リ ス ト (1)

ロ章H

写真 1	落下試験台	(ロ)－H－18
写真 2	切離し装置	(ロ)－H－18
写真 3	貫通棒	(ロ)－H－19
写真 4	クレーン車	(ロ)－H－19
写真 5	加速度変換器	(ロ)－H－20
写真 6	容器の吊上げ状況	(ロ)－H－24
写真 7	容器の吊上げ状況	(ロ)－H－25
写真 8	容器の吊上げ状況	(ロ)－H－26
写真 9	容器の吊上げ状況	(ロ)－H－27
写真 10	容器の吊上げ状況	(ロ)－H－28
写真 11	容器の吊上げ状況	(ロ)－H－29
写真 12	9 m垂直落下後静止状況 (ボトム下向)	(ロ)－H－46
写真 13	9 m垂直落下試験後端板円周部の変形状況	(ロ)－H－46
写真 14	1 m垂直落下後輸送容器静止状況	(ロ)－H－47
写真 15	1 m垂直落下後締付ボルトボックス状況	(ロ)－H－47
写真 16	垂直落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－48
写真 17	垂直落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－48
写真 18	9 m水平落下後静止状況 (# 2号機0° 方向下向)	(ロ)－H－49
写真 19	1 m水平落下後静止状況 (# 2号機0° 方向下向)	(ロ)－H－49
写真 20	水平落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－50
写真 21	水平落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－50
写真 22	9 mコーナ落下後静止状況 (トップ0° 方向下向)	(ロ)－H－51
写真 23	1 mコーナ落下後静止状況	(ロ)－H－51
写真 24	コーナ落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－52
写真 25	コーナ落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－52
写真 26	コーナ落下後原型容器内部状況	(ロ)－H－53
写真 27	9 m傾斜落下状況 (トップ180° 方向下向)	(ロ)－H－53
写真 28	炉内昇温完了後扉開	(ロ)－H－63
写真 29	台車上原型容器を設置	(ロ)－H－63
写真 30	耐火試験終了後扉開	(ロ)－H－64
写真 31	台車引出し終了	(ロ)－H－64
写真 32	自然放冷状況	(ロ)－H－64

写 真 リ ス ト (2)

ロ章H

写 真 33	<input type="text"/> の状況	(ロ)－H－65
写 真 34	模擬燃料集合体の取出し	(ロ)－H－69
写 真 35	模擬燃料棒の外観検査	(ロ)－H－69
写 真 36	模擬燃料棒の外観検査	(ロ)－H－70
写 真 37	供試体吊下状況	(ロ)－H－73
写 真 38	落下試験後の状況 (P T検査後)	(ロ)－H－74
写 真 39	落下試験後の状況 (P T検査後)	(ロ)－H－75

(イ) 章

核燃料輸送物の説明

イ章A 目的及び条件

(イ)核燃料輸送物の説明

(イ)－A 目的及び条件

(1) 輸送物の使用目的

本輸送物は、三菱原子燃料株式会社において製作される加圧水型軽水炉（PWR）に装荷される14×14型10フィート、14×14型12フィート、15×15型12フィート及び17×17型12フィート新燃料集合体（いずれも非核燃料炉心構成品を内蔵する場合も含む）を三菱原子燃料(株)から原子力発電所までの輸送に使用するものである。また、海外にて製作される17×17型12フィート新燃料集合体を国内の原子力発電所までの輸送にも使用するものである。

(2) 輸送容器の型名

MFC－1型

(3) 輸送物の種類

A型核分裂性輸送物

(4) 輸送容器に収納する収納物の種別及び個数

(イ) 核分裂性物質の種類 核分裂性輸送物

(ロ) 輸送制限個数 制限なし

(ハ) 配列方法 任意

(5) 輸送指数 0.6以下

(6) 臨界安全指数 0

(7) 輸送物の総重量

□ kg以下

(8) 輸送容器の外寸法

長さ : 約□ mm

外径 : 約□ mm

高さ : 約□ mm

(9) 輸送容器の重量

重量 : 約□ kg

(10) 輸送容器の主要材料

外 殻 : 炭素鋼 (□)

緩 衝 材 : 木材 (□)

防振構造部 : 炭素鋼 (□) 及びボロンステンレス鋼

○ リ ン グ : □ ゴム

ショックマウント : □ ゴム

(11) 輸送容器に収納する核燃料物質の仕様

核燃料物質の仕様を(イ)－第A. 1表に示す。

(イ)－第A. 1表 核燃料物質の仕様

燃料集合体のタイプ		14×14 (10フィート)	14×14 (12フィート)	15×15 (12フィート)	17×17 (12フィート)	
(輸送容器 1 基当たり)						
種類		軽水炉 (PWR) 用新燃料集合体				
性状		固体 (二酸化ウラン粉末焼結体又は ガドリニア入り二酸化ウラン粉末焼結体)				
重量	収納体数	2 体以下				
	集合体重量	□ kg 以下				
	UO ₂ 量	□ kg 以下				
放射能の量	総量	□ Bq 以下				
	主要な 核種	²³² U	□ Bq 以下			
		²³⁴ U	□ Bq 以下			
		²³⁵ U	□ Bq 以下			
		²³⁶ U	□ Bq 以下			
		²³⁸ U	□ Bq 以下			
⁹⁹ Tc	□ Bq 以下					
濃縮度	二酸化ウラン	5wt%以下				
	ガドリニア入り 二酸化ウラン	3.3wt%以下 (ガドリニア濃度 □ wt%以下)				
燃焼度		該 当 せ ず				
比出力		該 当 せ ず				
最大発熱量		該 当 せ ず				
冷却日数		該 当 せ ず				
(燃料集合体 1 体当たり)						
重量	集合体重量	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下	
	UO ₂ 量	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下	□ kg 以下	
濃縮ウラン中の 不純物仕様*	²³² U	≦ □ μg/gU				
	²³⁴ U	≦ □ μg/g ²³⁵ U				
	²³⁶ U	≦ □ μg/g ²³⁵ U				
	⁹⁹ Tc	≦ □ μg/gU				

※□の規定に基づき、□が□μg/gU未満の場合は、²³²U及び⁹⁹Tcの分析は省略可

(12) 輸送形態

(a) 輸送方法

陸上輸送の場合にはトラック輸送とし、海上輸送の場合は貨物船を使用する。

(b) 積載方法

トラック輸送の場合にはその積載個数は1台につき2個を並列に積載し、船舶の場合には、1区画に50を輸送指数で除した個数以下を並列または2段積みに積載する。

(13) 冷却方式

自然空気冷却

(14) 輸送中に予想される周囲の温度の範囲 -20℃から 38℃

(15) 使用予定年数 60年

(16) 輸送容器の使用予定回数 360回

イ章B 核燃料輸送物の種類

(イ)－B 核燃料輸送物の種類

(1) 輸送物の型別としての要件

(a) 本輸送容器に収納される核燃料物質は濃縮度 5%以下の未照射ウランである。未照射かつ濃縮度 20%以下のウランの A_2 値は制限なしであり、A型輸送物の要件に該当する。

(2) 核分裂性輸送物としての要件

(a) 本輸送物の収納物は、最大 kg の濃縮度 5 wt%以下の二酸化ウラン燃料であり、当該輸送物には核分裂性核種として最大で約 kg の ^{235}U が含まれ、核分裂性輸送物に該当する。

従って、本輸送物は「A型核分裂性輸送物」である。

イ章C 輸送容器

(イ)－C 輸送容器

C. 1 輸送容器の概要

本輸送容器は、上蓋と下部容器で構成される外殻と、ショックマウントフレーム等で構成される防振構造部及びショックマウント、並びに補助的機材からなる。

輸送時で最大2体の燃料集合体を横2列に収納し、水平状態で輸送する。

燃料集合体が輸送容器に収納されている状態の鳥瞰図を(イ)－第C. 1図に示し、防振構造部及び外殻の構造を(イ)－第C. 2図に示す。

また、本輸送容器は、基本仕様や機能は同一であるがタイプAとタイプBの取扱い性で形状の異なる部位がある。燃料装荷時の輸送容器の全体組立図のうち、タイプAを(イ)－第C. 3図、タイプBを(イ)－第C. 4図に示す。

C. 2 輸送容器の構造

C. 2. 1 外 殻

(1) 上 蓋 ((イ)－第C. 5図参照)

上蓋は長さ mm, 外径 mm, 高さ mmの大きさに、外筒は中央部に mm, 両端部に mm及びドームプレートに mmの鋼板を使用し、内筒には mmの鋼板を使用している。外筒と内筒の間には、緩衝材及び断熱材として を充填している。

上蓋には、 に溶接により取付けられている。また、外筒には24個の溶融栓を設けている。

下部容器との接合面は、(イ)－第C. 3図及び(イ)－第C. 4図に示すように段構造を採用しており、上下面が取扱時に損傷を受けにくいようにしている。

(2) 下部容器 ((イ)－第C. 6図参照)

下部容器は長さ mm, 外径 mm, 高さ mmの大きさに、上蓋と同様に中央部に mm, 両端部に mm及びドームプレートに mmの鋼板を使用し、内筒には mmの鋼板を使用している。

上蓋と同様に外筒と内筒の中間部分には緩衝材及び断熱材として を充填し、外筒には24個の溶融栓を設けている。

下部側端板には、クロスフレーム起立時のストッパを設けている。内筒の長手方向には、ショックマウント取付板に、最大10個のショックマウントを取付けている。

また、下部側にはショックマウントフレームを固定するためのクロスバー固定枠を設

けている。

外筒には、上部側ドームプレート面にバルブ類の取扱い口を設け、その外側に断熱を兼ねた保護カバーを取付けている。外筒下面（180°方向）には、両端に枕木を設け、中央部にはフォークリフトガイドを設けている。

また、輸送容器の外側には燃料集合体の装荷、取出し時に使用するスタビライジングバー、及び補助脚等を取付けている。

C. 2. 2 防振構造部

(1) ショックマウントフレーム（(イ)－第C. 7 図参照）

ショックマウントフレームは、幅 mm、全長 mm である。

ショックマウントフレームは厚さ mm の板を折り曲げたサイドレールを溶接にて、クロスチューブに取付けた構造となっている。長手方向両側面には、それぞれ10個のショックマウントを取付けている。

サイドレール内側には、クロスフレームを固定のためのマウンティングパットを設けている。

(2) クロスフレーム（タイプA (イ)－第C. 8 図参照、タイプB (イ)－第C. 9 図参照）

クロスフレームは、タイプAでは幅 mm、長さ mm、タイプBでは幅 mm、長さ mm である。

クロスフレームは、T型に溶接したクロスチューブの端面にユニバーチャンネルを取付けた構造となっている。

燃料集合体を載せる面には全面にわたり厚さ最小 mm のボロンステンレス鋼板（以下スキンと呼ぶ）を取付け、その上に各燃料集合体の支持格子のピッチに合わせて、クッションゴムを取付けている。燃料を収納したとき、隣接した燃料集合体の間隔は mm としている。

また、トップ及びサイドユニバーチャンネルを使用してクランピングフレームを長手方向にスライドさせ、各燃料集合体の支持格子位置に合わせて固定できる構造としている。

クロスフレームの下部側には燃料集合体を輸送容器に積み込み、取出しを行う際、燃料集合体の重量を支えるボトムサポート（(イ)－第C. 10 図参照）を取付けている。上部側には、輸送中の非核燃料炉心構成品及び燃料集合体の軸方向固定用としてトップ端（タイプA (イ)－第C. 11 図参照、タイプB (イ)－第C. 12 図参照）を取付けている。このトップ端は燃料集合体の積み込み、取出しの際は

ショックマウントフレームのクロスフレームは、輸送時には、固定ボルトにより固定される構造となっている。

(3) クランピングフレーム（タイプA (イ)－第C. 13 図、タイプB (イ)－第C. 14 図）

クランピングフレームはクロスフレームのユニバーチャンネルに金具類を使用して固定する。

燃料集合体の装荷、取出しの際は、

クランピングフレームに組み込まれている

C. 2.3 ショックマウント ((イ)–第C.15 図参照)

ショックマウントは輸送時における燃料集合体への衝撃、振動の影響を軽減するため下部容器に20個取付けられ、防振構造部を支えている。ショックマウントは、燃料集合体の型式に応じて2個または4個を取外すことができる。

C. 2.4 補助的機材

燃料集合体の輸送容器への積み込み、取外しの際の輸送容器の転倒防止のため補助脚を装備している。補助脚の使用及び格納状態をタイプA(イ)–第C.16 図、タイプB(イ)–第C.17 図に示す。

また、燃料集合体及び輸送容器の計測・保管及び管理用装備として(イ)–第C.3 図及び(イ)–第C.4 図に示すショック指示計、(イ)–第C.18 図に示すリリーフバルブ及び(イ)–第C.19 図(タイプA)または、(イ)–第C.20 図(タイプB)に示す湿度計及びエアバルブを設けている。

(イ)–第C.3 図及び(イ)–第C.4 図に示すショック指示計は、防振構造部の上部端と下部端に、下及び軸方向に取付けられ、輸送容器の取扱い、輸送中の燃料集合体への衝突の有無を監視する。

輸送容器には内圧の上昇を制限するため(イ)–第C.18 図に示すリリーフバルブを取付けている。このバルブは、逆止弁構造となっており、内外圧差が $\max 0.049 \text{ MPa}\cdot\text{G}$ に達すると開くよう調整している。

輸送容器には、容器内の湿度を指示するよう、湿度計を取付けている。また容器を加圧または減圧できるよう、エアバルブを取付けている。湿度計及びエアバルブの構造を(イ)–第C.19 図(タイプA)または(イ)–第C.20 図(タイプB)に示す。なおエアバルブはカバーで覆われ、容易に取外すことができないようになっている。このバルブは内圧の上昇では開閉せず、外部から治具を使って押した場合のみ作動する。

リリーフバルブ及びエアバルブは、下部容器の上部側に取付けている。

輸送容器には上蓋と下部容器の間を密封するために ゴムのOリングを設けている。(イ)–第C.6 図参照) Oリングは下部容器のフランジ部に設けている溝にはめ込む形で固定している。

C. 3 輸送容器の主要構成材料の材質及び寸法

主要構成材料の材質，寸法を(イ)－第C. 1表に示す。

C. 4 輸送容器の寸法及び重量

(イ) 輸送容器の外寸法

長 さ： 約 mm

外 径： 約 mm

高 さ： 約 mm

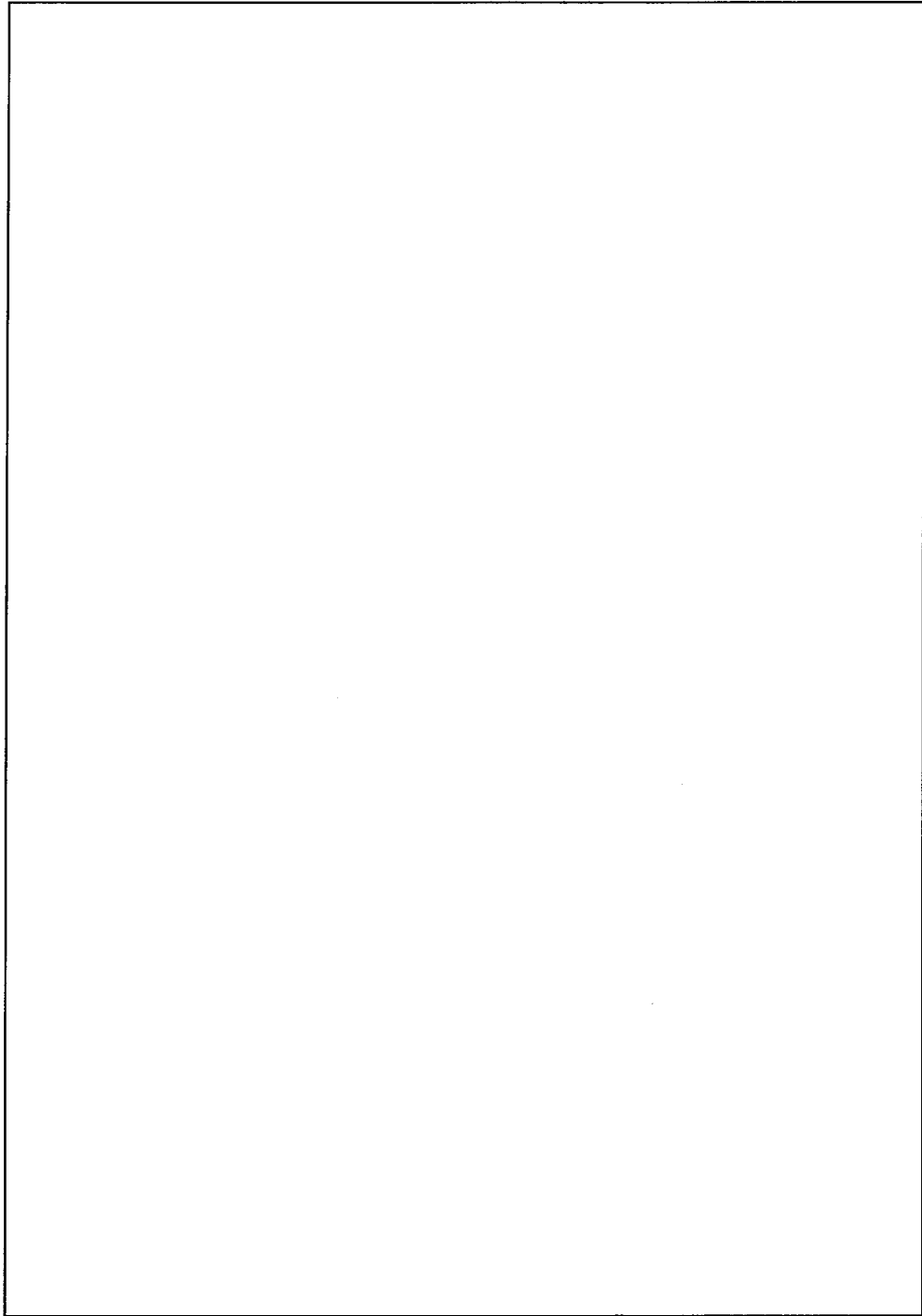
(ロ) 輸送容器の重量

重 量： 約 kg

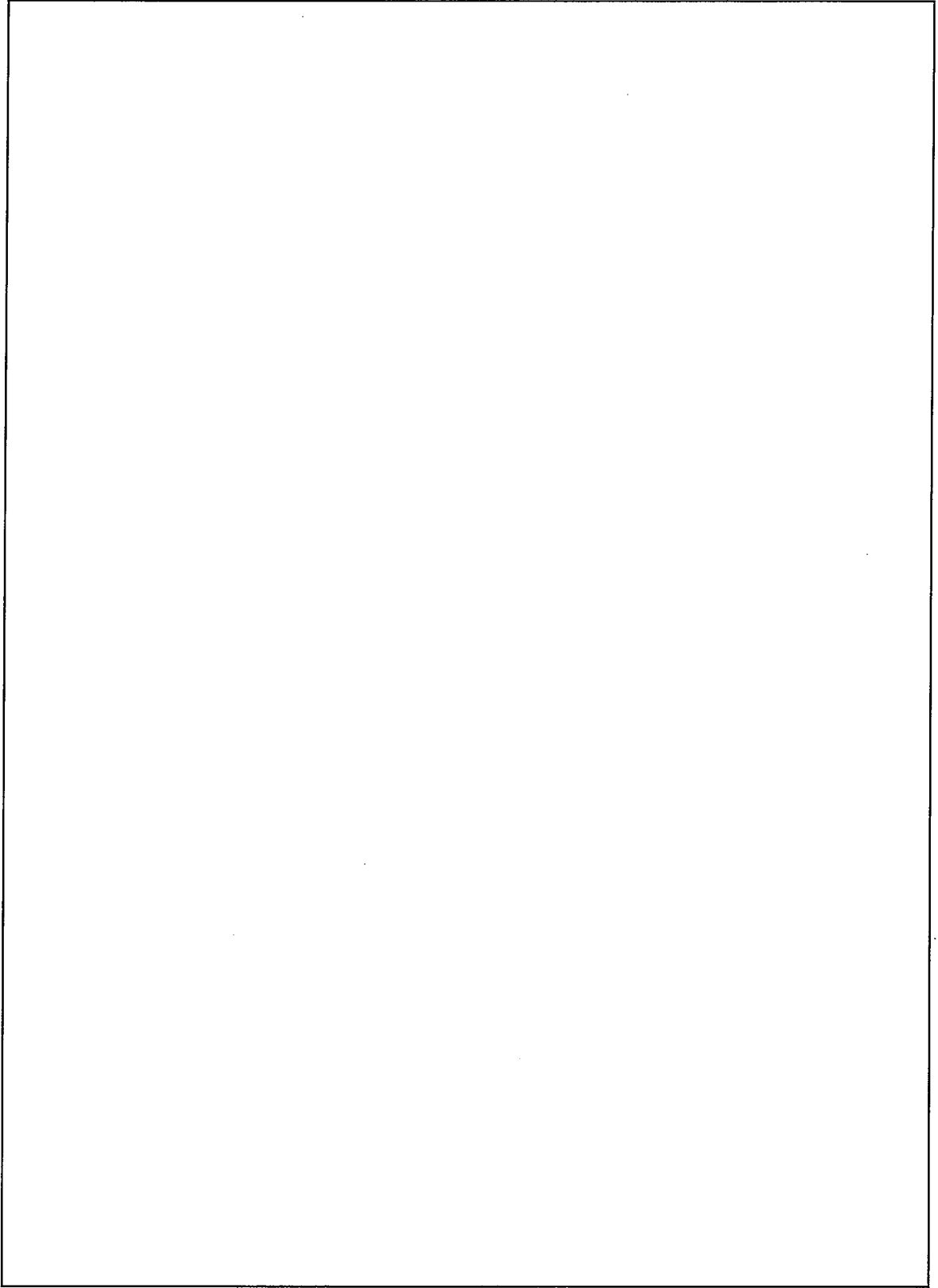
C. 5 密封境界

本輸送容器には密封装置としての構成部品はなく，密封境界は燃料被覆管と燃料棒端栓から構成される。

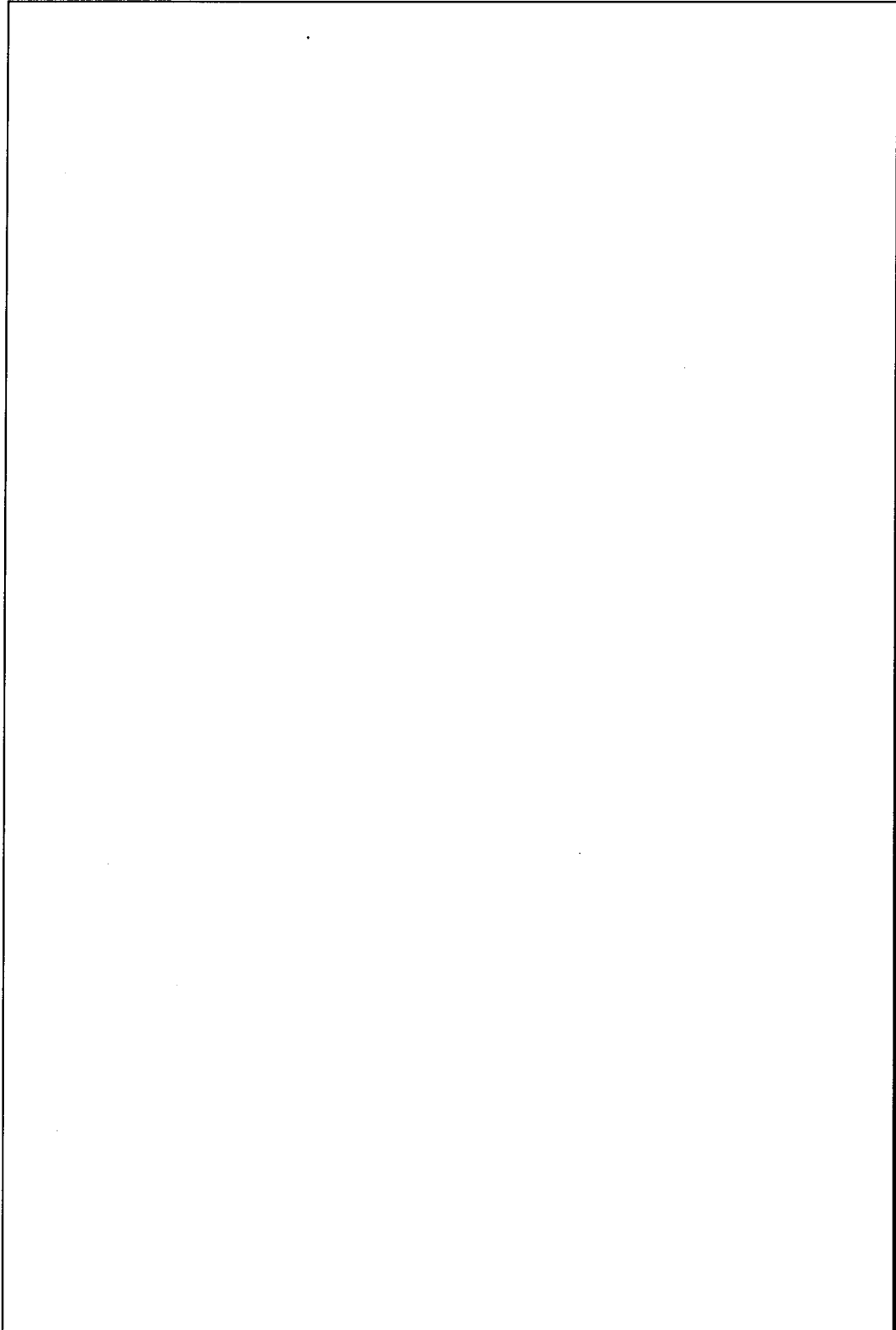
密封境界を(イ)－第C. 21図に示す。



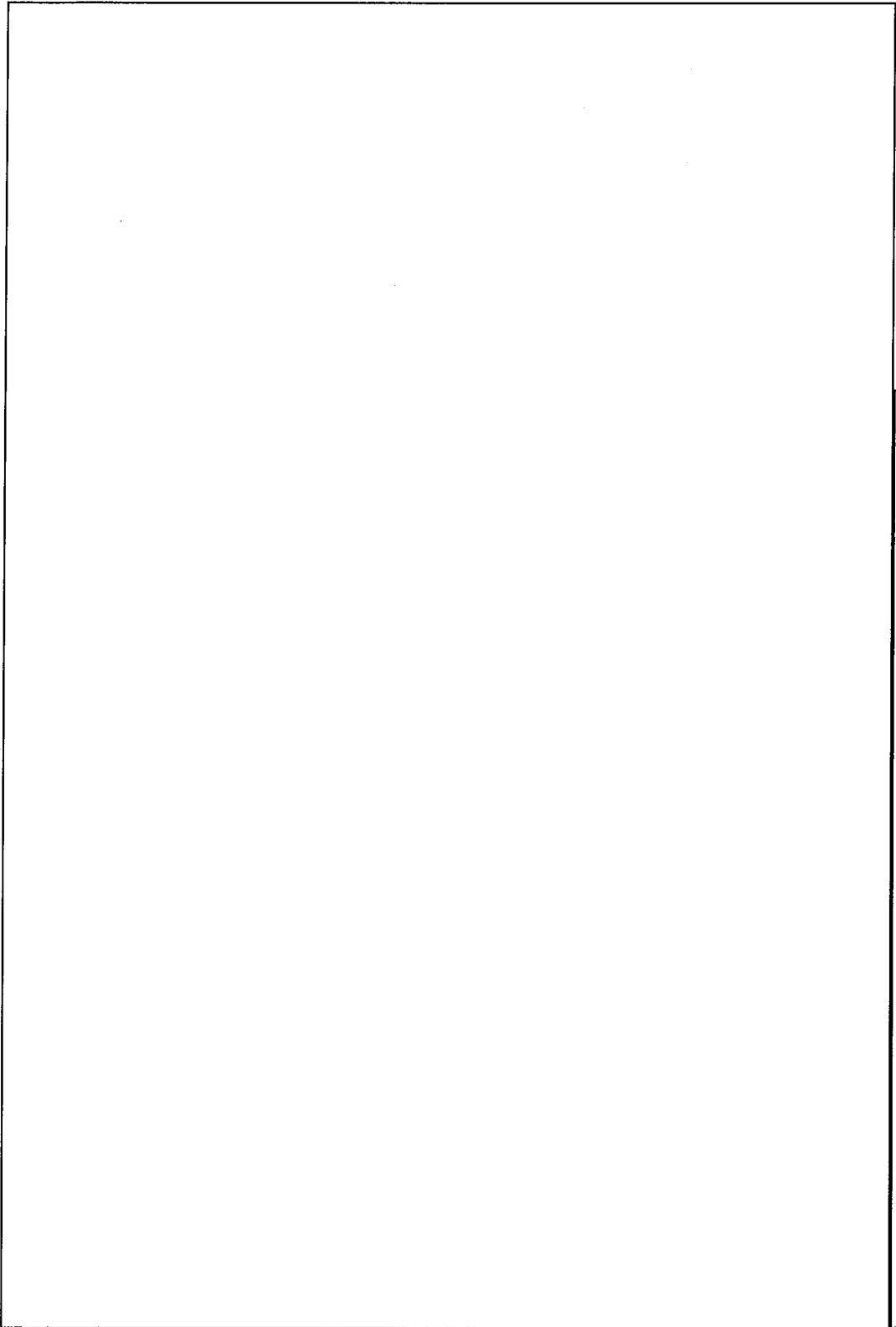
(イ)-第C.1 図 全体鳥瞰図



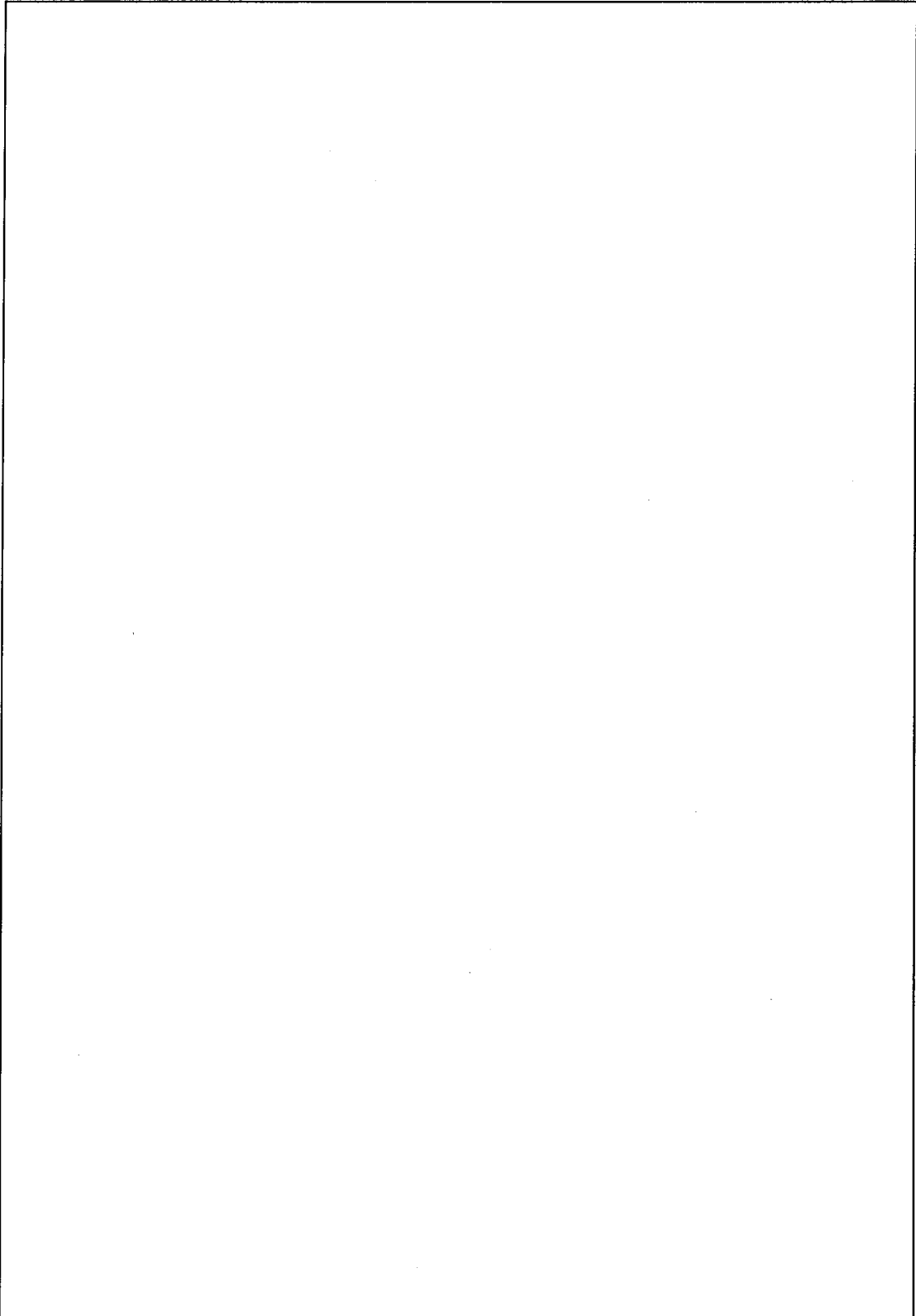
(イ) - 第 C. 2 図 防振構造部及び外殻



(イ)ー第C.3図 全体組立図 (タイプA)



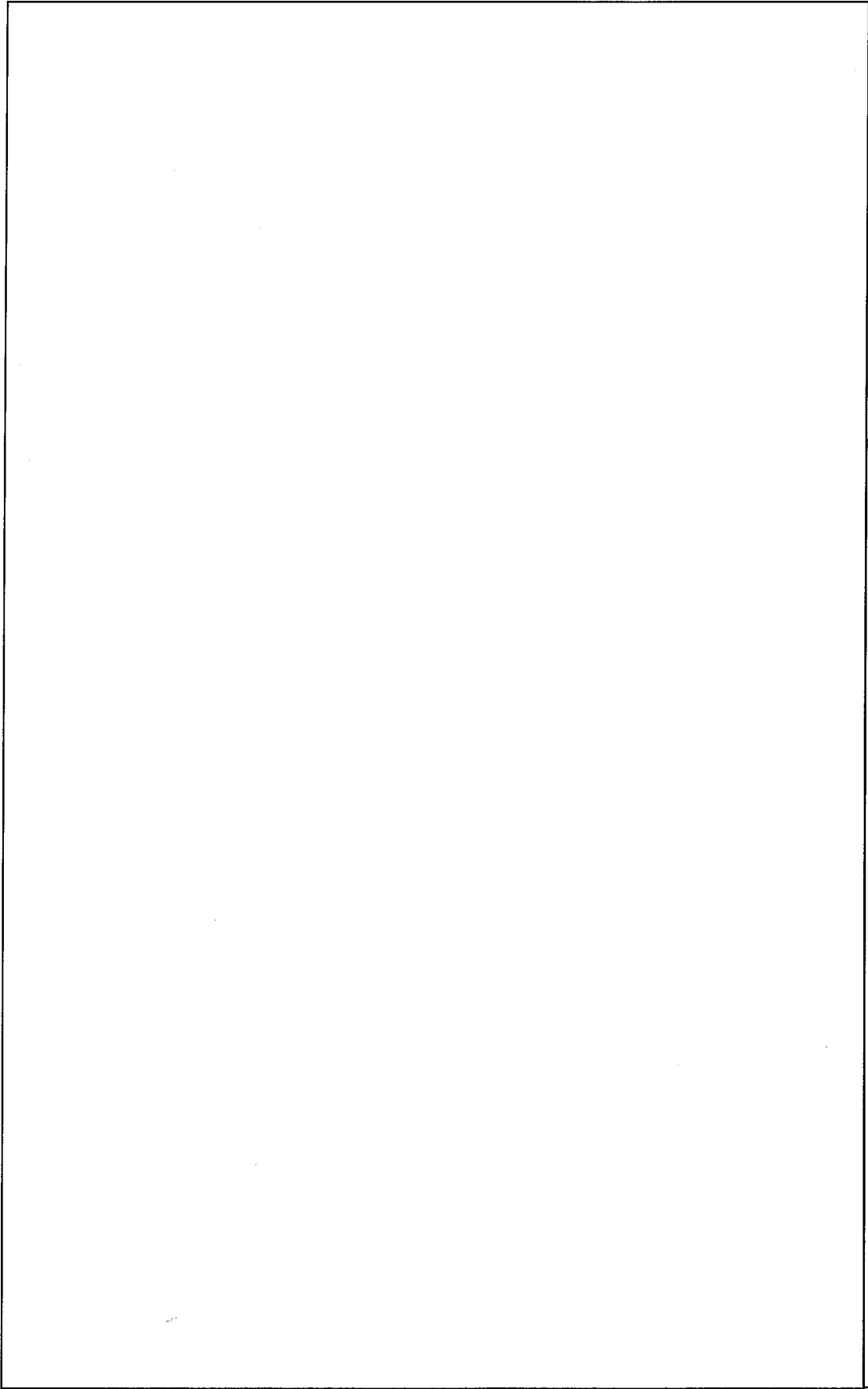
(イ)ー第C.4図 全体組立図 (タイプB)



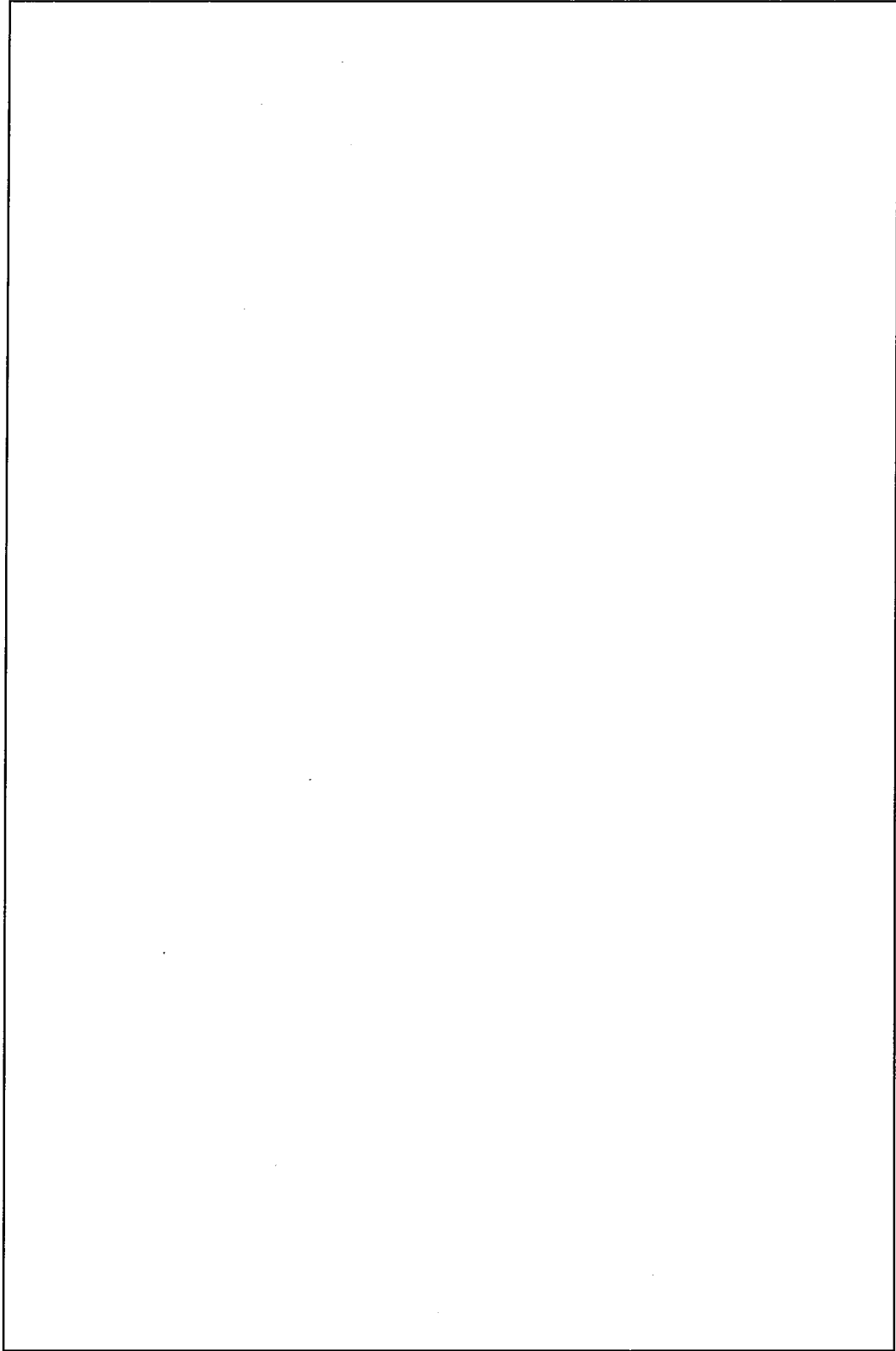
(イ) - 第C. 5 図 上 蓋



(イ) - C - 9

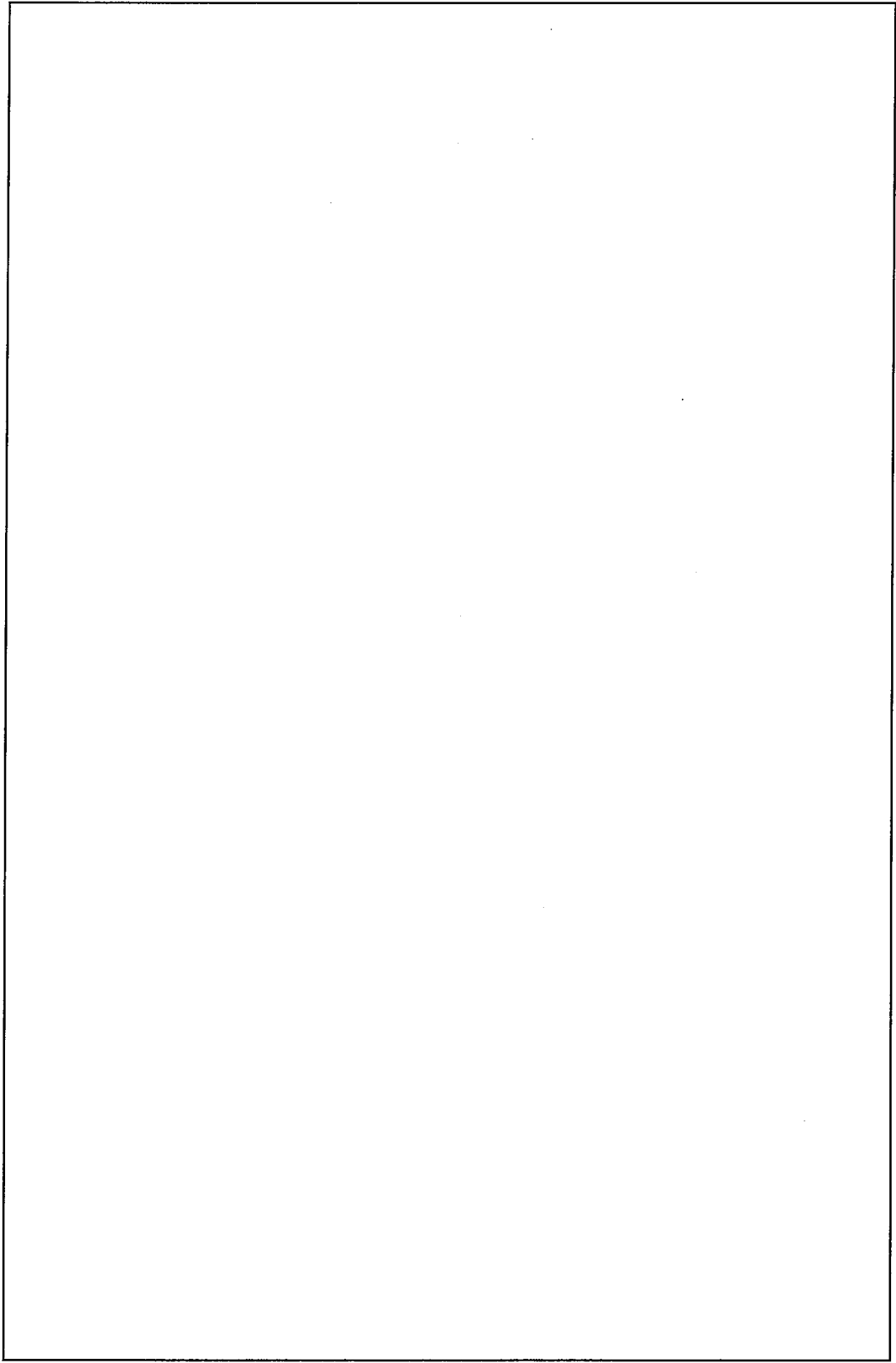


(イ) - 第C.6図 下部容器



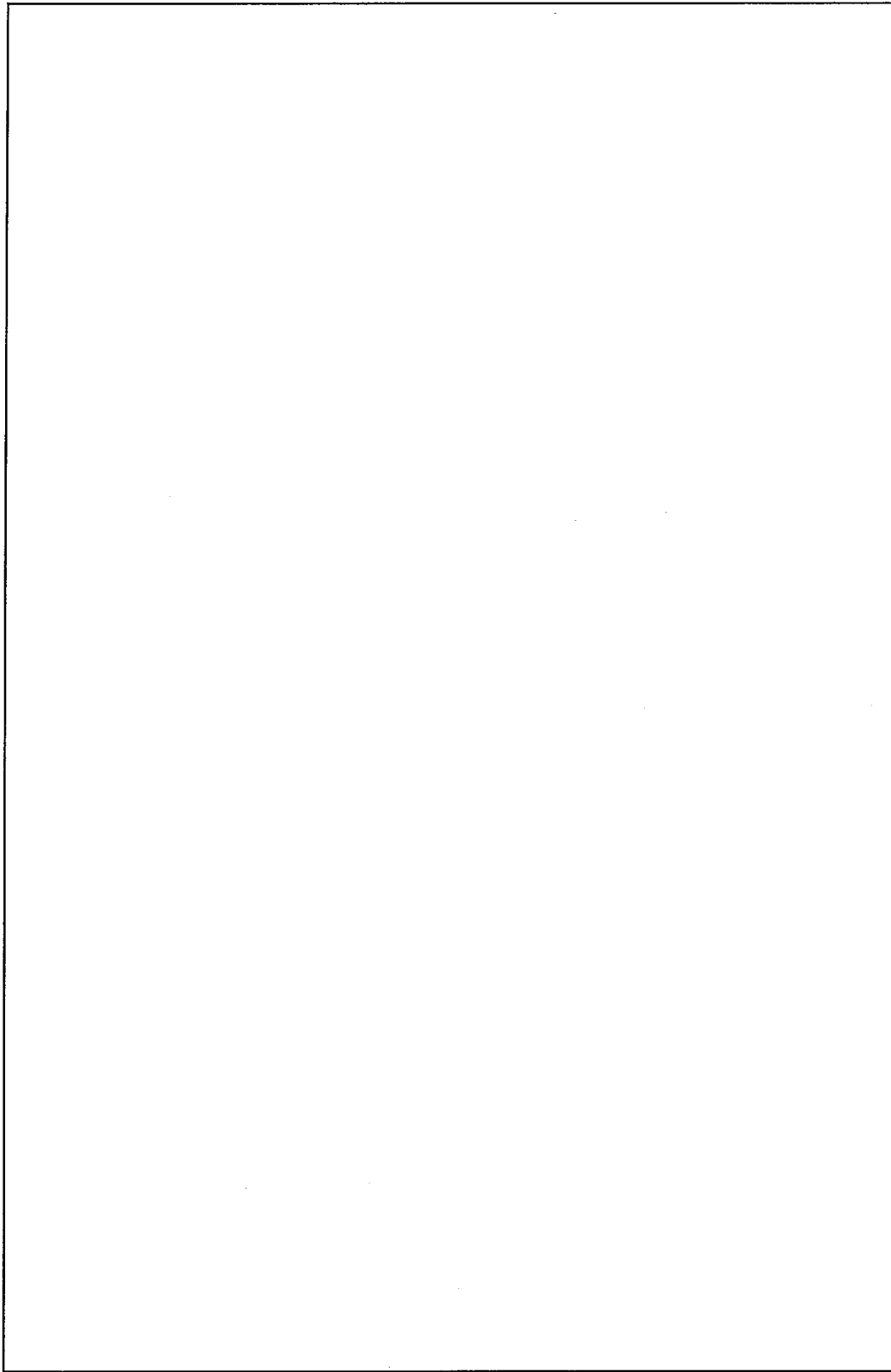
(イ)ー第C.7図 ショックマウントフレーム

単位：mm



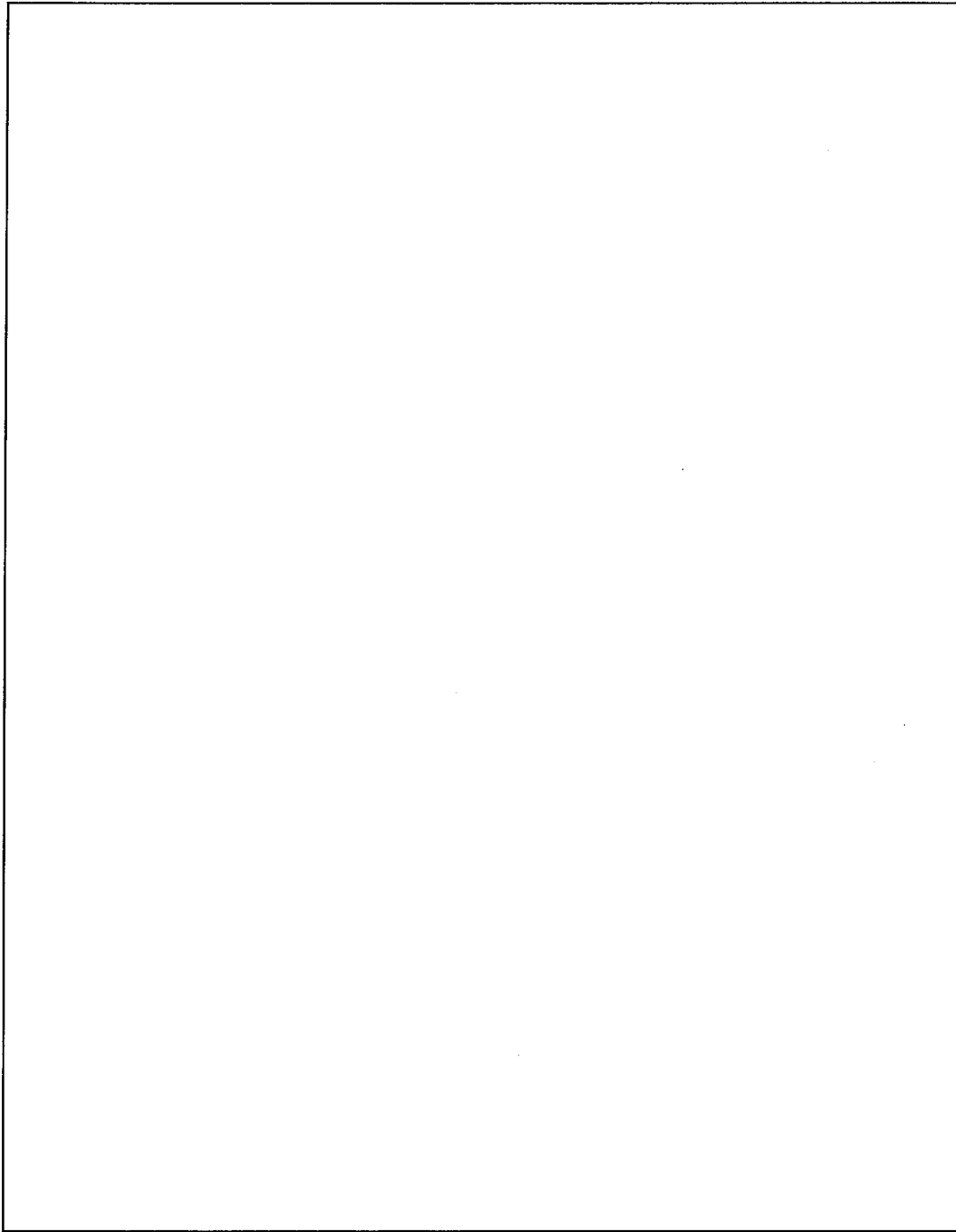
単位：mm

(イ)－第C.8図 クロスフレーム (タイプA)

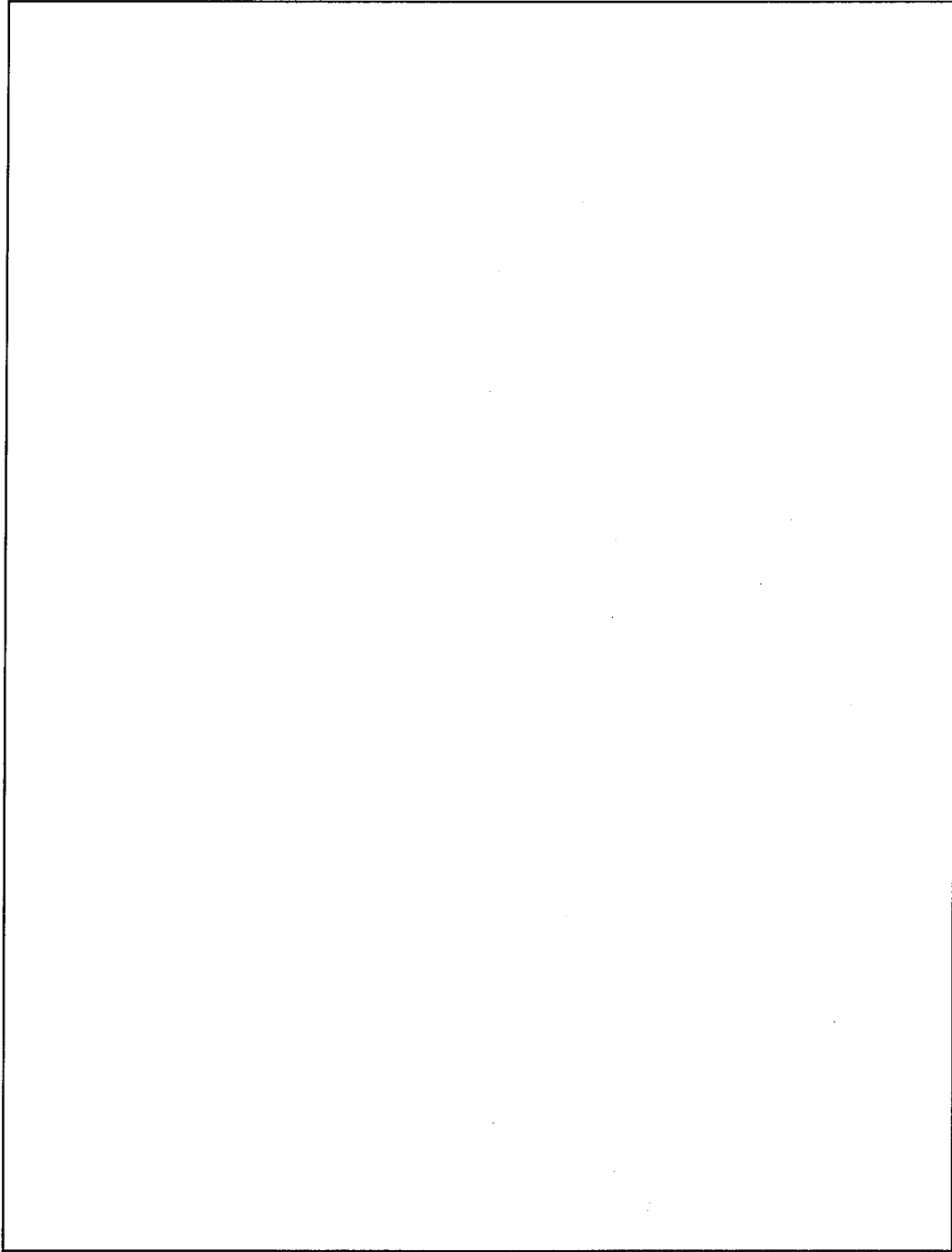


単位：mm

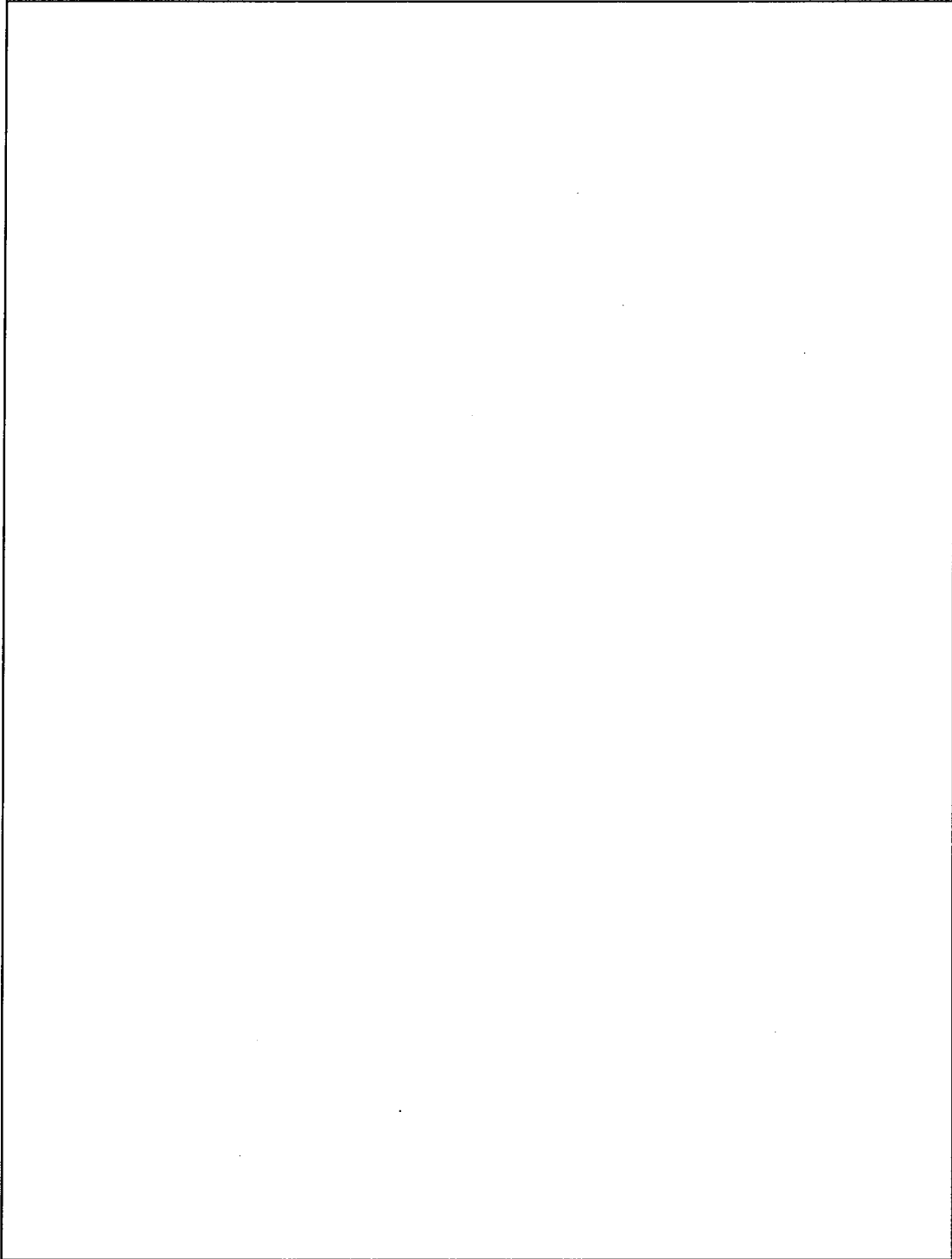
(イ)－第C.9図 クロスフレーム (タイプB)



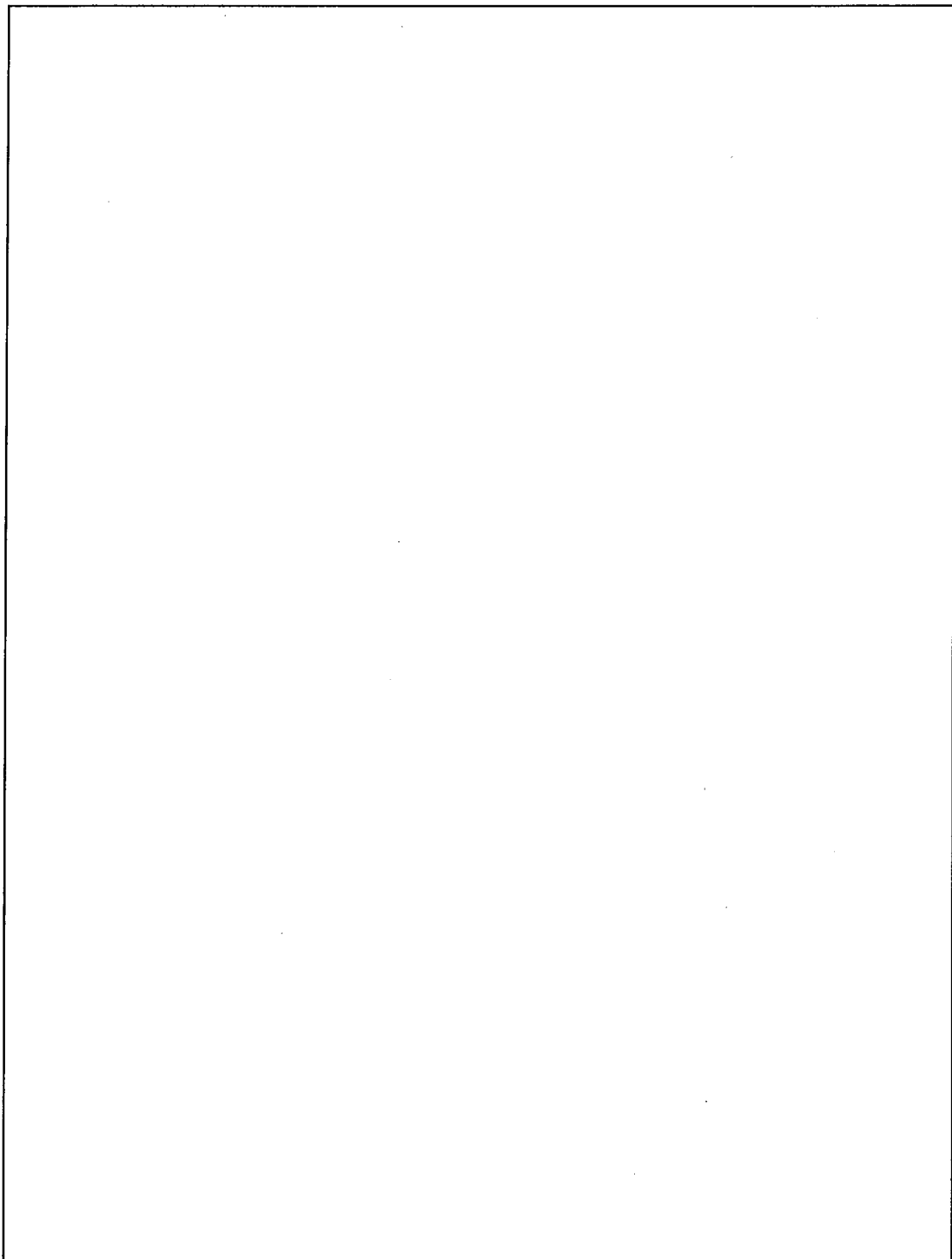
(イ)ー第C.11図 トップ端 (タイプA)



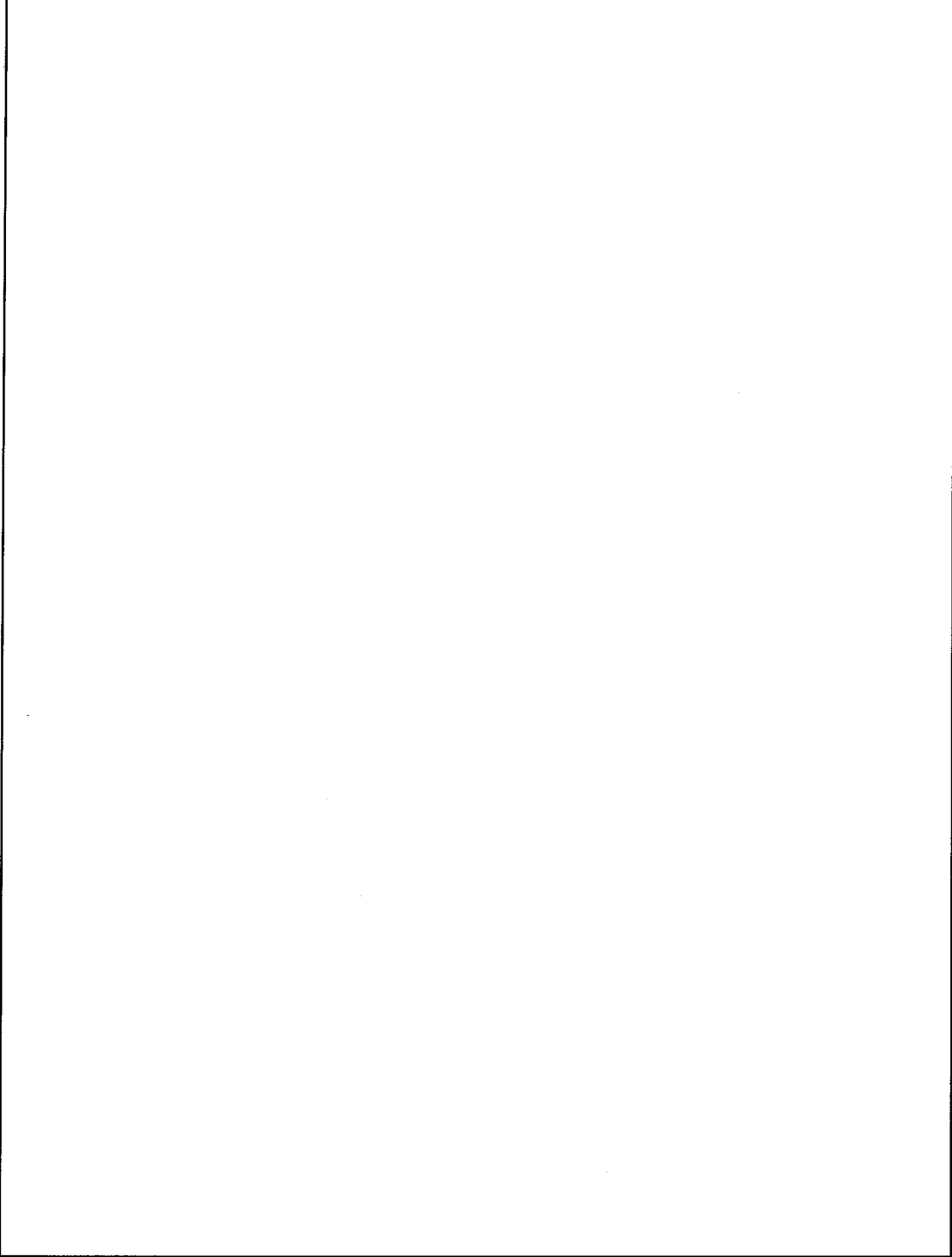
(イ)ー第C.12図 トップ端 (タイプB)



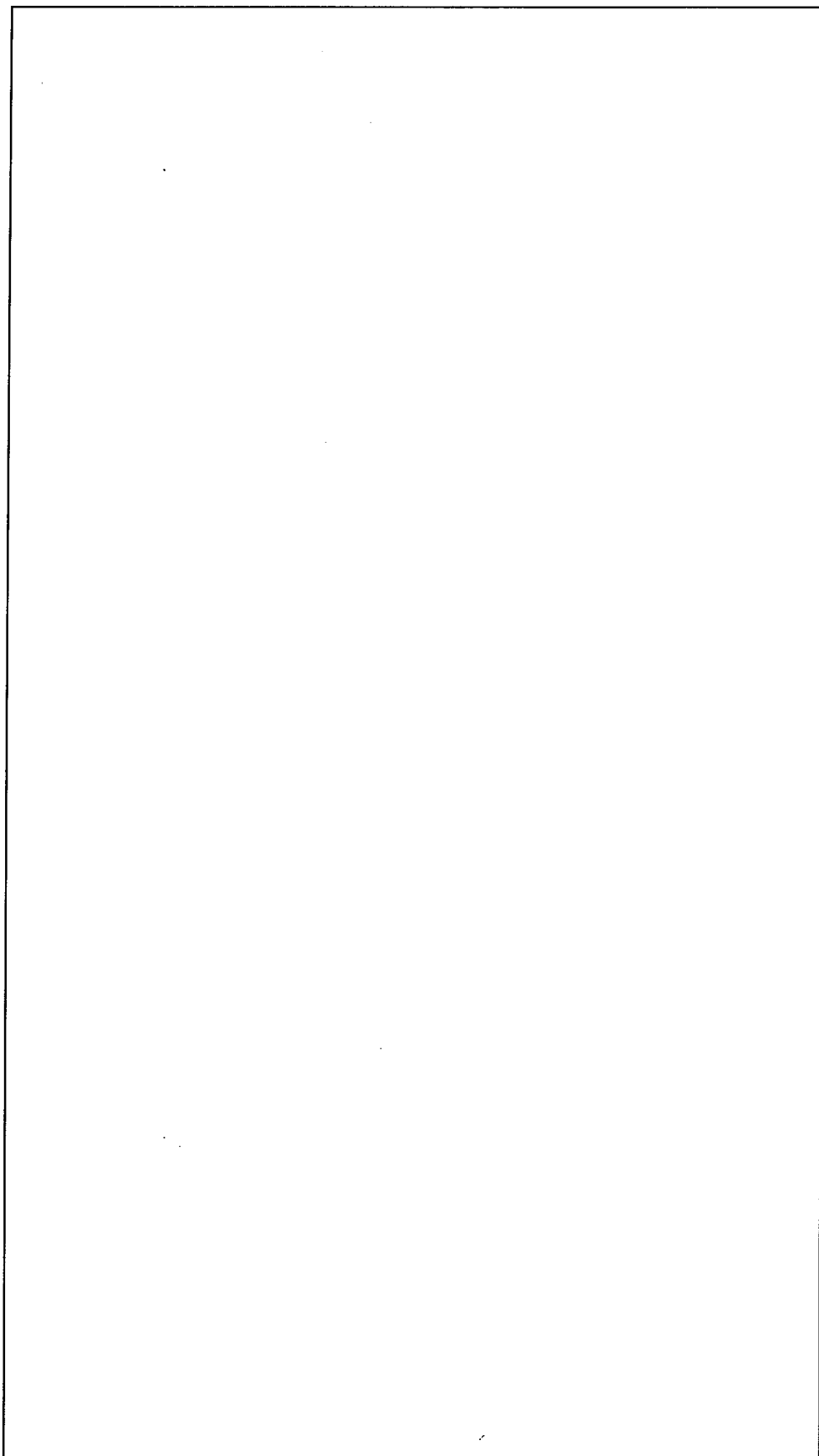
(イ)ー第C.13 図 クラウンピンングフレーム (タイプA)



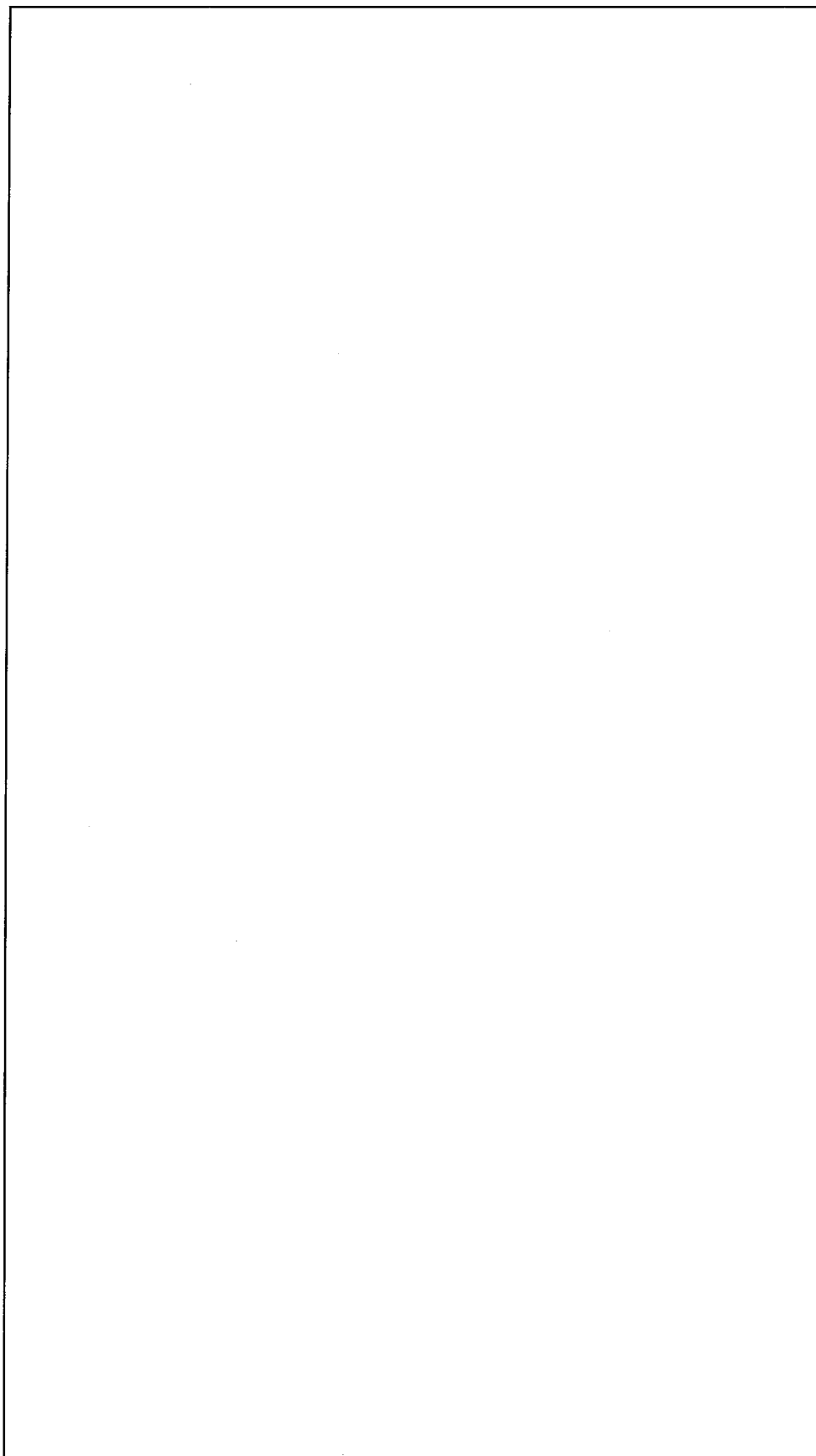
(イ)－第C.14 図 クラッピングフレーム (タイプB)



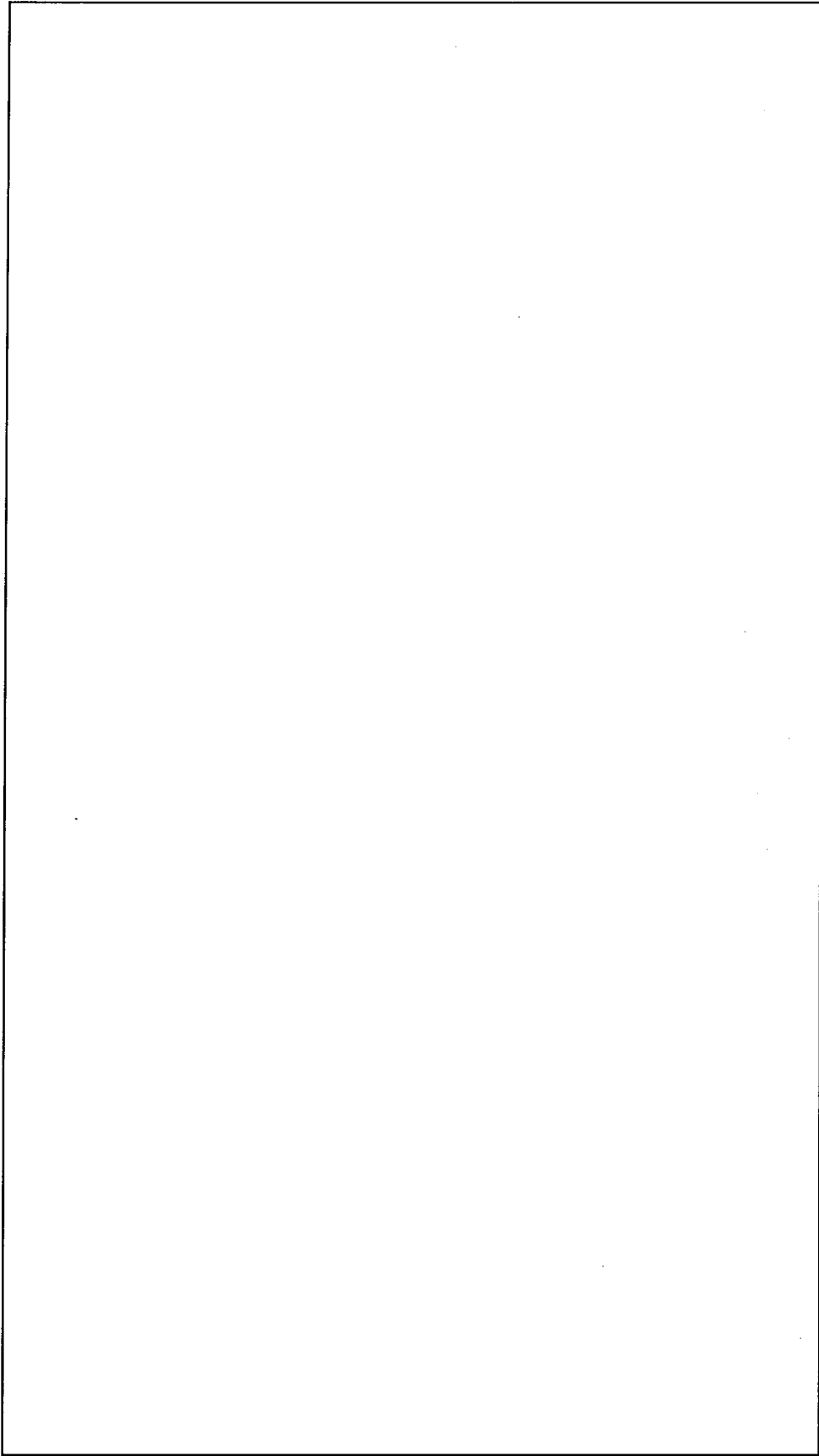
(イ)－第C.15 図 ショックマウント



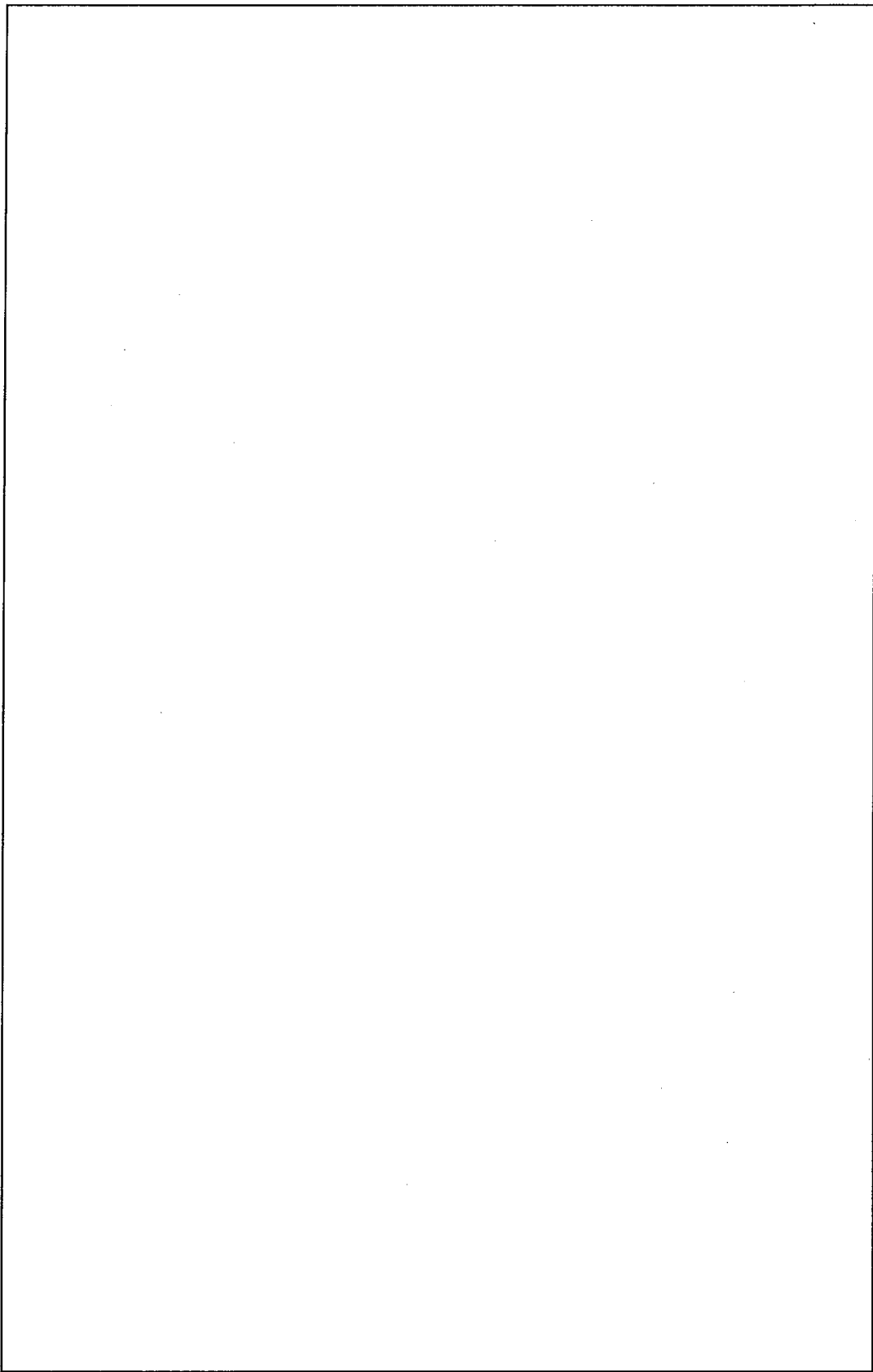
(イ)ー第C.16図 補助的機材 (タイプA)



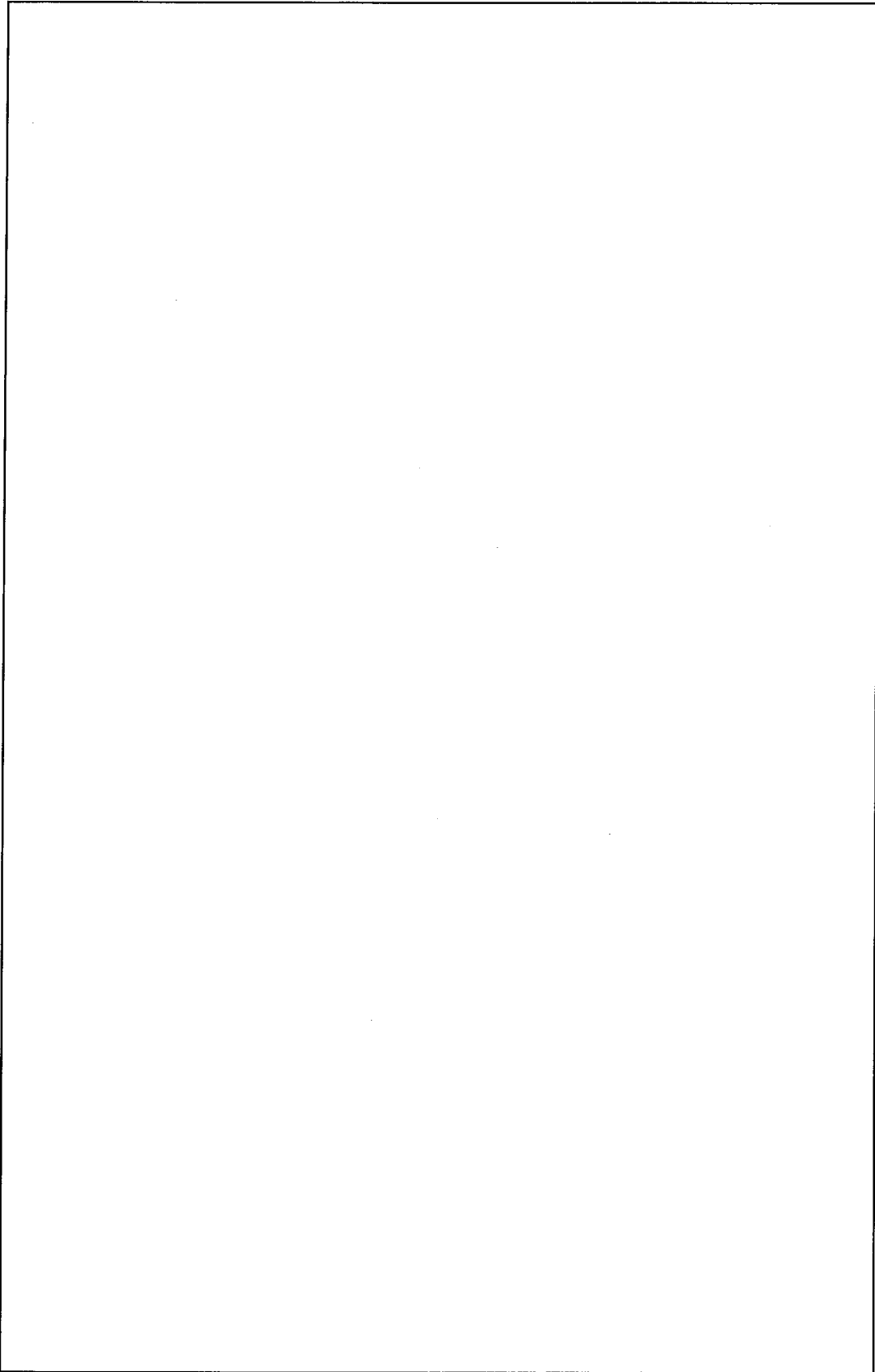
(イ)－第C.17 図 補助的機材 (タイプB)



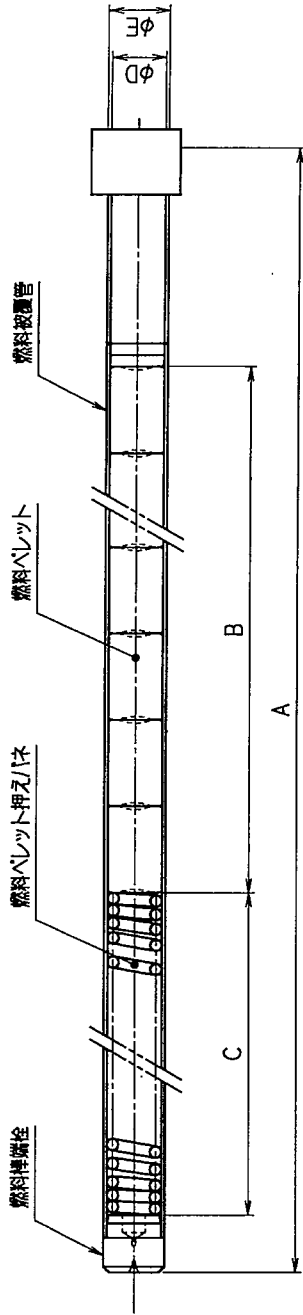
(イ)ー第C.18図 リリーフバルブ



(イ)ー第C.19 図 エアバルブ, 湿度計 (タイプA)



(イ)ー第C.20 図 エアバルブ, 湿度計 (タイプB)



(注記) 形状は代表例

型式	現行燃料棒					高燃焼度燃料棒				
	A	B	C	φD	φE	A	B	C	φD	φE
14×14 1071-ト	3207	約 3048	約 □	9.48	10.72	—	—	—	—	—
14×14 1271-ト	3856	約 3642	約 □	9.48	10.72	3866	約 3642	約 □	9.48	10.72
15×15 1271-ト	3856	約 3642	約 □	9.48	10.72	3866	約 3642	約 □	9.48	10.72
17×17 1271-ト	3852	約 3648	約 □	8.36	9.5	3856	約 3648	約 □	8.36	9.5
17×17 1271-ト (改良タイプ)	—	—	—	—	—	3863	約 3648	約 □	8.36	9.5

単位: mm

(イ) - 第 C.21 図 密封境界

(イ) - 第C. 1表 輸送容器部材一覧表

主たる構造物	主要部材	材質	寸法(mm)	参照図面			
外 殻	上 蓋	外筒	炭素鋼		(イ) - 第C. 5図		
		外筒	炭素鋼		(イ) - 第C. 5図		
		ドームプレート	炭素鋼		(イ) - 第C. 5図		
		内筒	炭素鋼		(イ) - 第C. 5図		
		フランジ	炭素鋼		(イ) - 第C. 5図		
		ブラケット	炭素鋼		(イ) - 第C. 5図		
		締付ボルト	合金鋼		(イ) - 第C. 3図, (イ) - 第C. 4図		
		緩衝材(断熱材)		(イ) - 第C. 5図			
	下部容器	外筒	炭素鋼		(イ) - 第C. 6図		
		外筒	炭素鋼		(イ) - 第C. 6図		
		ドームプレート	炭素鋼		(イ) - 第C. 6図		
		内筒	炭素鋼		(イ) - 第C. 6図		
		フランジ	炭素鋼		(イ) - 第C. 6図		
		ショックマウント取付板	炭素鋼		(イ) - 第C. 6図		
リブ		炭素鋼	(イ) - 第C. 6図				
	オリング	コム	φ10	(イ) - 第C. 6図			
	緩衝材(断熱材)			(イ) - 第C. 6図			
防振構造部	ショックマウント フレーム	サイトレール	炭素鋼		(イ) - 第C. 7図		
		クロスチューブ	炭素鋼		(イ) - 第C. 7図		
		ショックマウント	コム		(イ) - 第C. 15図		
	クロスフレーム	トップフレーム	炭素鋼		(イ) - 第C. 8図, (イ) - 第C. 9図		
		ボトムフレーム	炭素鋼		(イ) - 第C. 8図, (イ) - 第C. 9図		
		クロスチューブ	炭素鋼		(イ) - 第C. 8図, (イ) - 第C. 9図		
		サイトユニバーチャネル	炭素鋼		(イ) - 第C. 8図, (イ) - 第C. 9図		
		トップユニバーチャネル	炭素鋼		(イ) - 第C. 8図, (イ) - 第C. 9図		
		ス	キ		ン	ボロンステンレス鋼	(イ) - 第C. 8図, (イ) - 第C. 9図

備考 []内数値は、タイプBの寸法を示す。

主たる構造物	主要部材		材質	寸法(mm)	参照図面
	クロスフレーム	ク ッ シ ョ ン			(イ) - 第 C. 8 図, (イ) - 第 C. 9 図
		クランピングフレーム	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 13 図, (イ) - 第 C. 14 図
		支持格子用パッド	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 13 図, (イ) - 第 C. 14 図
		支持格子押えボルト	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 13 図, (イ) - 第 C. 14 図
		シヤッキスクリュー	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 11 図, (イ) - 第 C. 12 図
		固 定 枠	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 11 図, (イ) - 第 C. 12 図
		ボトムサポート	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 10 図
		ア ク ス ル	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 10 図
補助的機材		湿 度 計			(イ) - 第 C. 19 図, (イ) - 第 C. 20 図 (イ) - 第 C. 18 図
		リリーフバルブ			(イ) - 第 C. 16 図, (イ) - 第 C. 17 図
		補 助 脚	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 19 図, (イ) - 第 C. 20 図
		エ ア バ ル ブ			(イ) - 第 C. 3 図 (イ) - 第 C. 4 図
		乾 燥 剤 収 納 箱	炭 素 鋼		(イ) - 第 C. 3 図 (イ) - 第 C. 6 図
		枕 木	木 材		(イ) - 第 C. 3 図 (イ) - 第 C. 4 図
		シ ョ ッ ク 指 示 計	ス テ ン レ ス 鋼		

備 考 []内数値は、タイプBの寸法を示す。

イ章D 輸送容器の収納物

(イ)－D 輸送容器の収納物

D. 1 収納物の説明

輸送容器の収納物は、加圧水型軽水炉用燃料集合体（非核燃料炉心構成品を内蔵する場合を含む）である。

燃料集合体の形式は、14×14型10フィート、14×14型12フィート、15×15型12フィート及び17×17型12フィートであり、それぞれの燃料集合体には、二酸化ウラン燃料集合体またはガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体がある。

ガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体は、二酸化ウラン燃料棒（濃縮度5.0wt%以下）とガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒（濃縮度3.3wt%以下、ガドリニア濃度 wt%以下）からなる。

また、各タイプの燃料集合体は燃焼度48GWD/MTUまで燃焼される燃料（以下「現行燃料」と称す）と、燃焼度55GWD/MTUまで燃焼される燃料（以下「高燃焼度燃料」と称す）とが有り、燃焼度48GWD/MTUまで燃焼される燃料棒の材質はジルカロイ-4が用いられ、燃焼度55GWD/MTUまで燃焼される燃料棒の材質はMDA又はZIRLOが用いられている。

構造はいずれの燃料集合体とも型式毎ほぼ同じであり、(イ)－第D. 1図、第D. 2図、第D. 2a図、第D. 3図、第D. 3a図、第D. 4図、第D. 4a図、第D. 4b図及び第D. 4c図に示すように燃料棒、支持格子、上部ノズル、下部ノズル、炉内計装用案内シンプル、制御棒用案内シンプル等から構成されている。支持格子はインコネル又はジルカロイの薄板を格子状に組立て、ロウ付けまたは溶接したものであり、このうち燃料集合体の中央部に用いられる支持格子には原子炉での冷却水の混合を助長し、熱除去の効率を高めるためにミキシングベーンがついているものがある。（(イ)－第D. 5図参照）

燃料集合体の上部及び中間部の支持格子には、14×14型10フィート及び12フィート燃料集合体においては制御棒用案内シンプルを、15×15型及び17×17型12フィート燃料集合体（HTP燃料集合体を除く）においては制御棒用案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルと固定するためステンレス鋼製スリーブがロウ付けまたは溶接され、下部に用いられている支持格子には、制御棒用案内シンプルと固定するためのインサートまたはグリッドロッキングリング（HTP燃料集合体）が取付けられている。（(イ)－第D. 5図参照）

14×14型10フィート及び12フィート燃料集合体の制御棒用案内シンプル及び15×15型及び17×17型12フィート燃料集合体の制御棒用案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルは、上部及び中間部の各支持格子のスリーブと拡管加工により、HTP燃料集合体においては支持格子と直接溶接により接合され、同時に下部支持格子のインサートを通じ

(HTP燃料集合体は直接) 下部端栓と下部ノズルがシンプルスクリューによって固定され、ピン止めまたはかしめにより脱落を防止し、スケルトン組立体が形成されている。

(イ)－第D. 6 図, 第D. 7 図, 第D. 8 図及び第D. 9 図参照)

スケルトン組立体には、14×14型10フィート及び12フィートにおいては、中央部の炉内計装用案内シンプルと燃料棒が挿入されて、また、15×15型及び17×17型12フィートにおいては、燃料棒が挿入されて支持格子押えばねによって支持格子に固定されている。

これらによって燃料棒の相互の位置、すなわち水路間隔を保持するとともに、炉内での温度上昇に伴う燃料棒の熱膨張及び照射成長を許しうる構造になっている。制御棒案内シンプルと上部ノズルは、アダプタプレートに溶接されたスリーブとの拡管加工により、またはロッキング(HTP燃料集合体)により固定される。

燃料集合体の構成要素の1つである燃料棒は、燃料棒被覆管、上部端栓、下部端栓、燃料ペレット押えばね及び核分裂性物質である UO_2 ペレットまたはガドリニア入り UO_2 ペレット(14×14型10フィート(イ)－第D. 10 図参照, 14×14型12フィート, 15×15型12フィート(イ)－第D. 11 図, (イ)－第D. 11 a 図参照, 17×17型12フィート(イ)－第D. 12 図, (イ)－第D. 12 a 図, (イ)－第D. 12 b 図及び(イ)－第D. 12 c 図参照)によって構成されている。なお、二酸化ウラン燃料集合体及びガドリニア入り燃料集合体、構造ならびに各部の寸法に差異はない。また、燃料棒及び燃料ペレットに関しても同様である。

輸送物の密封境界は燃料棒としており、被覆管の両端は端栓で密封溶接され、燃料棒内部には、ヘリウムガスが加圧封入されている。溶接された燃料棒の密封性は、ヘリウムガス漏洩検出装置を使用して全数検査を行い、その密封性を保証している。

燃料集合体に内蔵されている非核燃料炉心構成品とは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズンアセンブリ、シンプルプラグアセンブリ及び中性子源アセンブリをいう。このうち、大きさ及び重量が最大である(イ)－第D. 13 図, 第D. 14 図, 第D. 15 図及び第D. 16 図に示す制御棒クラスタの構造について概略説明する。制御棒クラスタの主な目的は、炉内の出力を調整するものであり、スパイダ組立体及び吸収体棒組立体から構成され、それらの接合は吸収体棒組立体をスパイダ組立体にねじ込み、ピン止めされている。

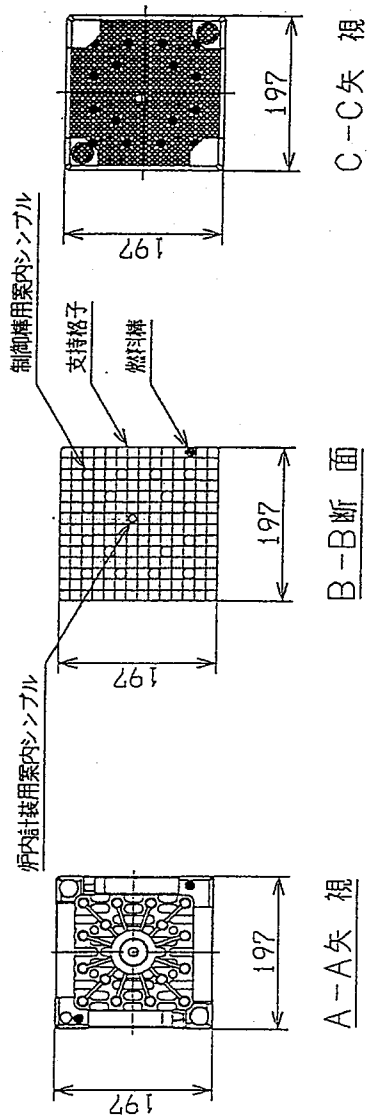
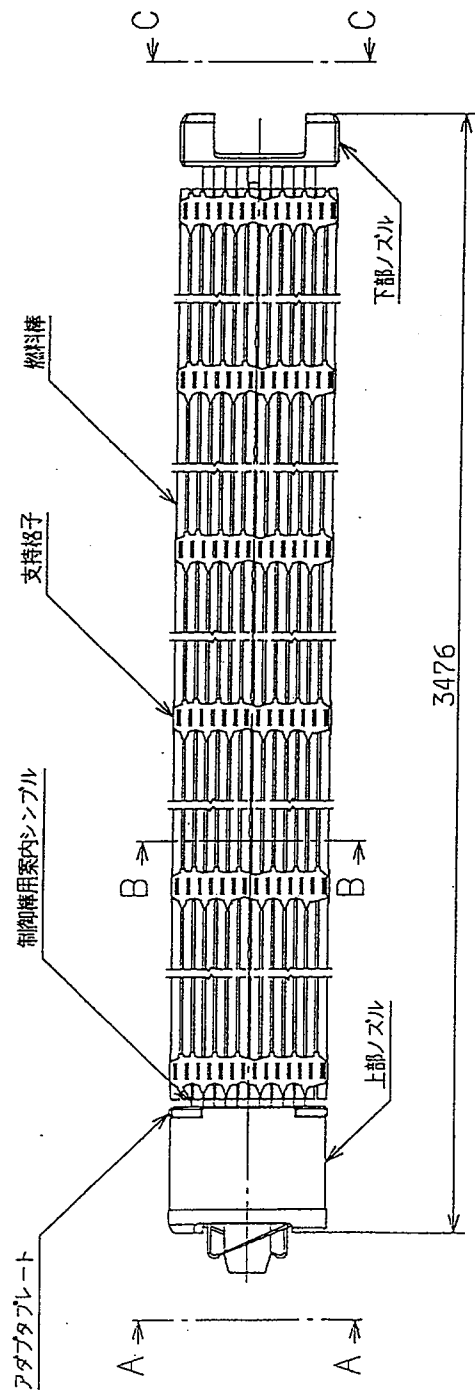
バーナブルポイズンアセンブリは、ホールドダウン組立体及びバーナブルポイズン棒組立体から構成され、それらの接合は、バーナブルポイズン棒組立体をホールドダウン組立体を介してナットで締付け、ピン止めされている。バーナブルポイズンアセンブリを(イ)－第D. 17 図, 第D. 18 図, 第D. 19 図及び第D. 20 図に示す。

中性子源アセンブリは、別送される中性子源棒とホールドダウン組立体から構成され、この輸送容器ではホールドダウン組立体の部分を収納する。ホールドダウン組立体の構造は、バーナブルポイズンアセンブリと同一構造である。この別送された中性子源棒は、発電所内において組立てられ、燃料集合体に挿入される。

シンプルプラグアセンブリは、燃料集合体の制御棒案内シンプルのバイパス流を制限するために挿入するものである。なお、シンプルプラグアセンブリは、燃料集合体の中で制御棒クラスタ、バーナブルポイズンアセンブリ及び中性子源アセンブリを挿入しない制御棒案内シンプルに挿入される。

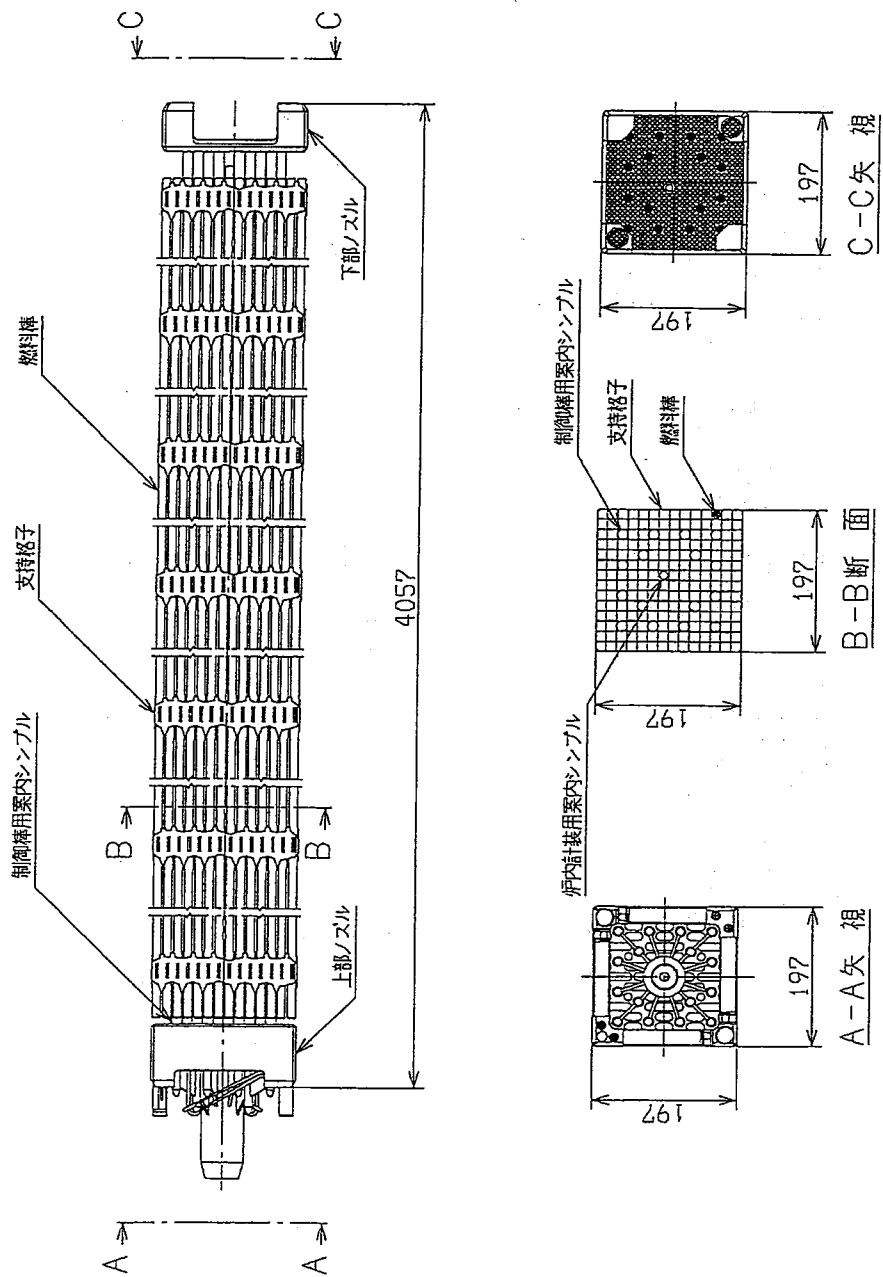
シンプルプラグアセンブリは、(イ)－第D. 17 図、第D. 18 図、第D. 19 図及び第D. 20 図の図中バーナブルポイズン棒組立体にかわり、すべてシンプルプラグとしたものである。

また、14×14型10フィート燃料集合体を収納する場合には、下部側にスペーサを組み込むことで長さを調整し、燃料集合体を固定する。



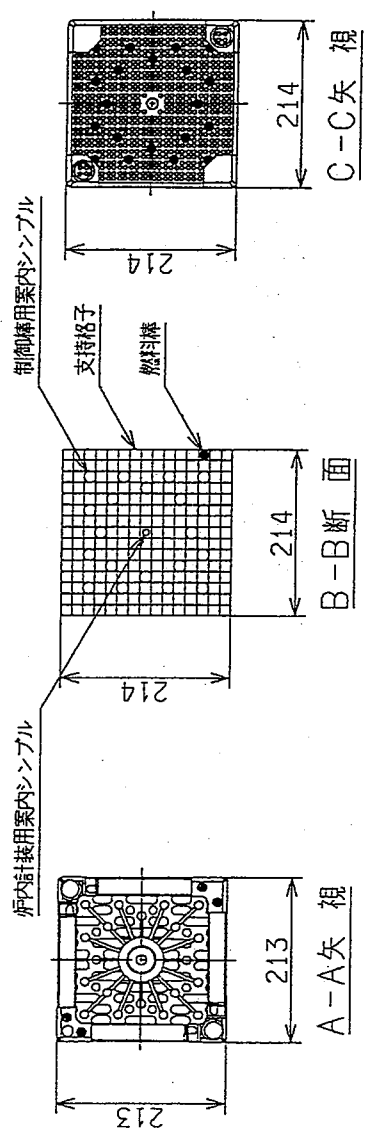
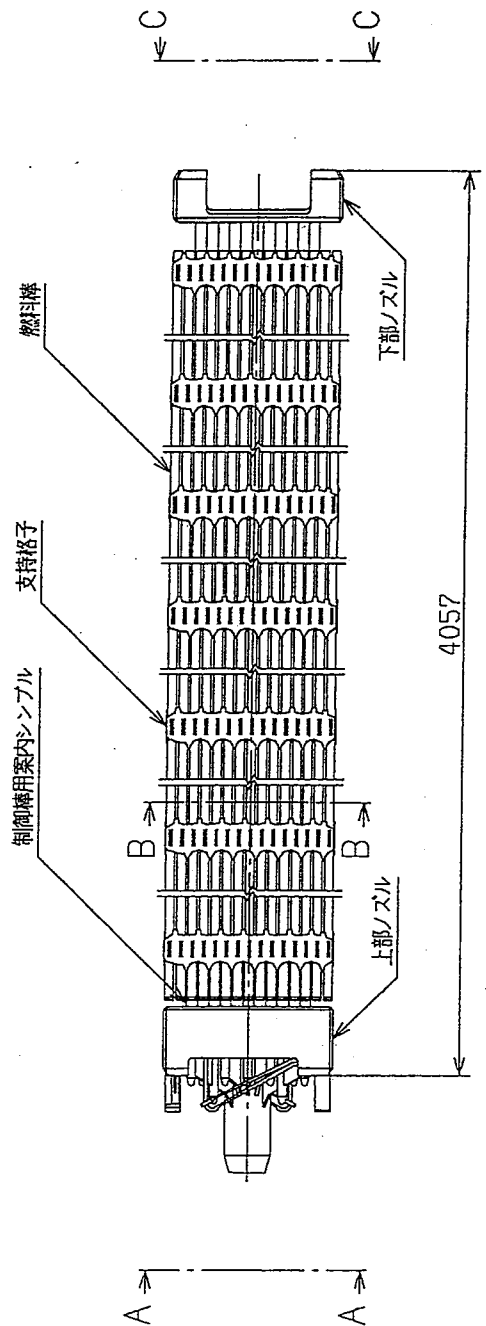
(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ)ー第D.1図 燃料集合体 (14×14, 10フィート)



(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

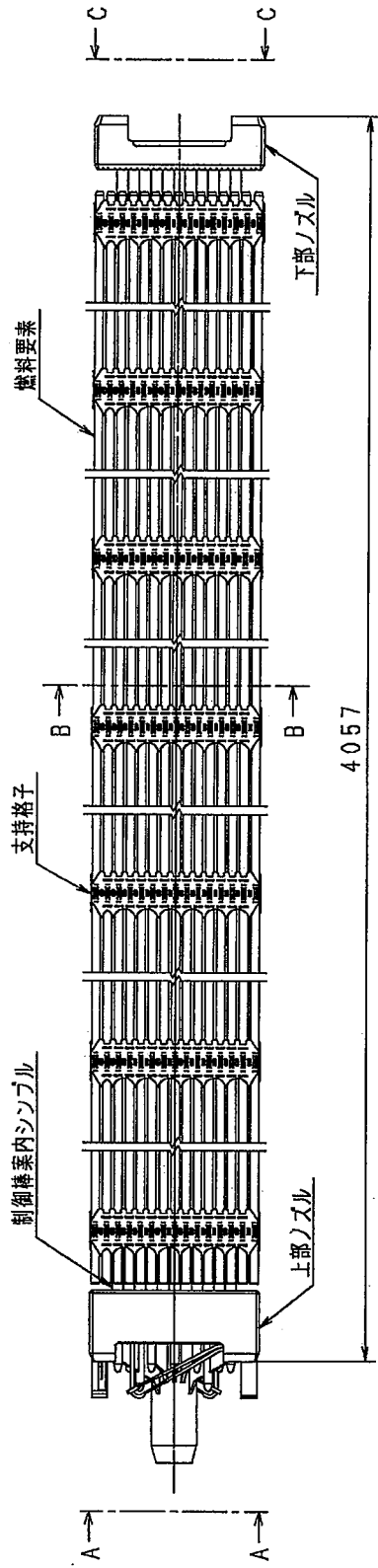
(イ) - 第D. 2図 燃料集合体 (14×14, 12フイート)



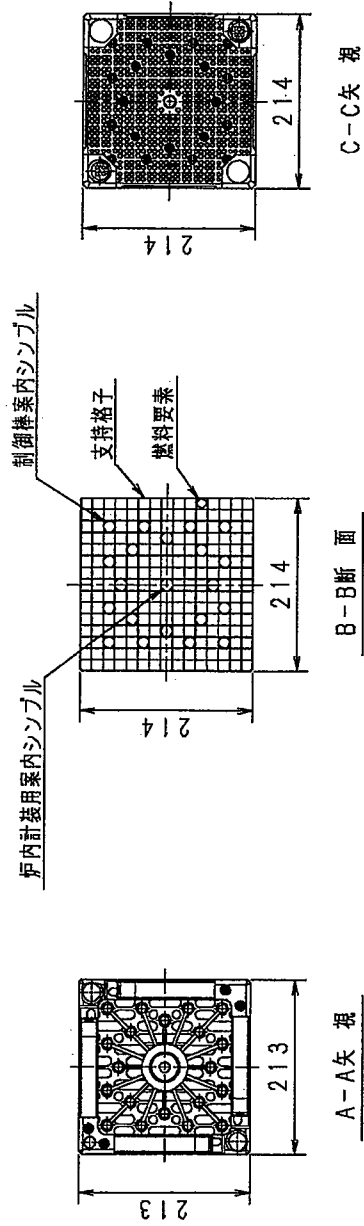
単位：mm

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) - 第D. 3 図 燃料集合体 (15 × 15, 12 フイート)



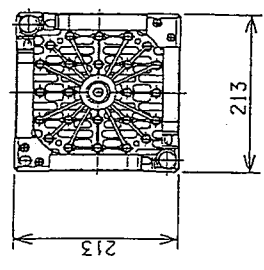
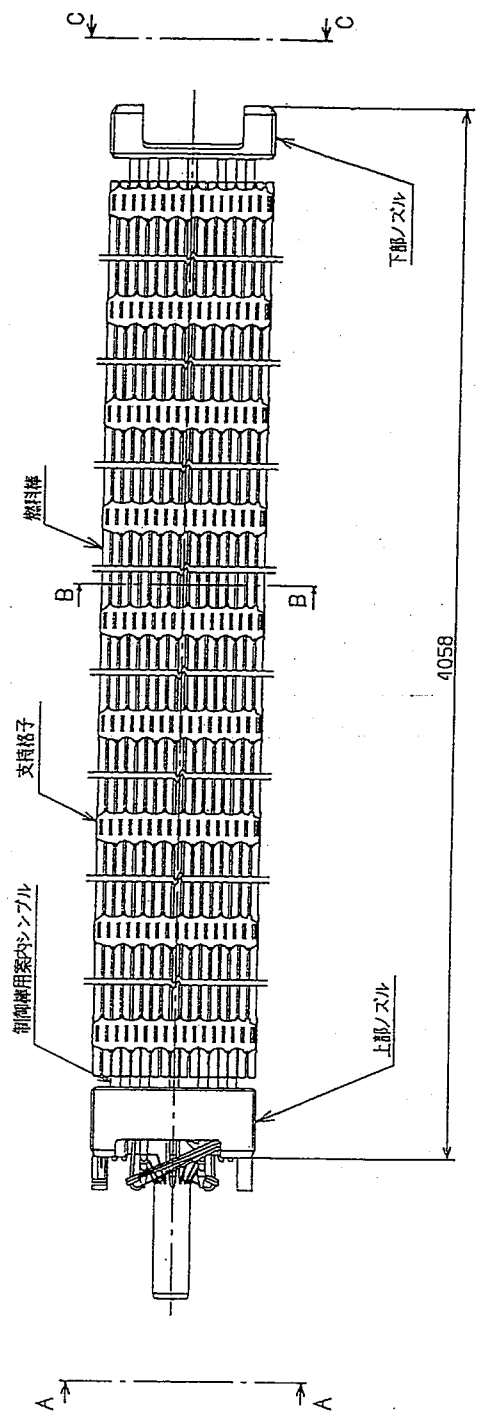
(イ)-D-8



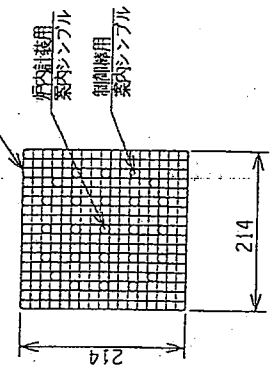
単位：mm

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

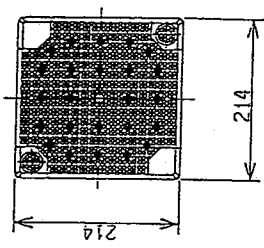
(イ)-第D.3a図 燃料集合体 (15×15, 12フィート) (高燃焼度燃料)



A-A 矢視



B-B 断面

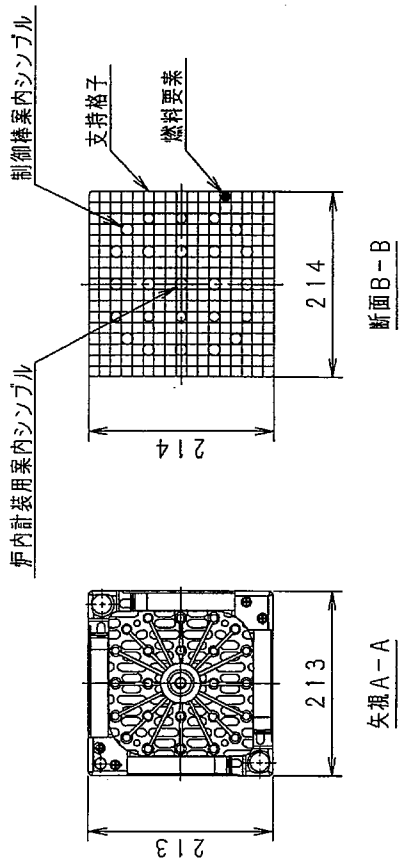
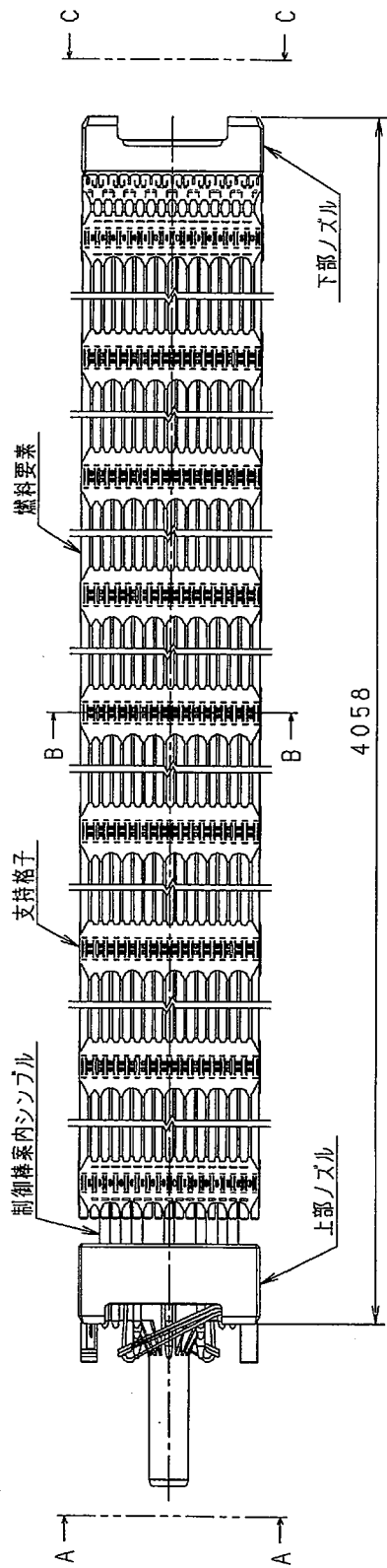


C-C 矢視

単位：mm

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ)-第D.4図 燃料集合体 (17×17, 12フィート)



矢視A-A

断面B-B

現行ノズル

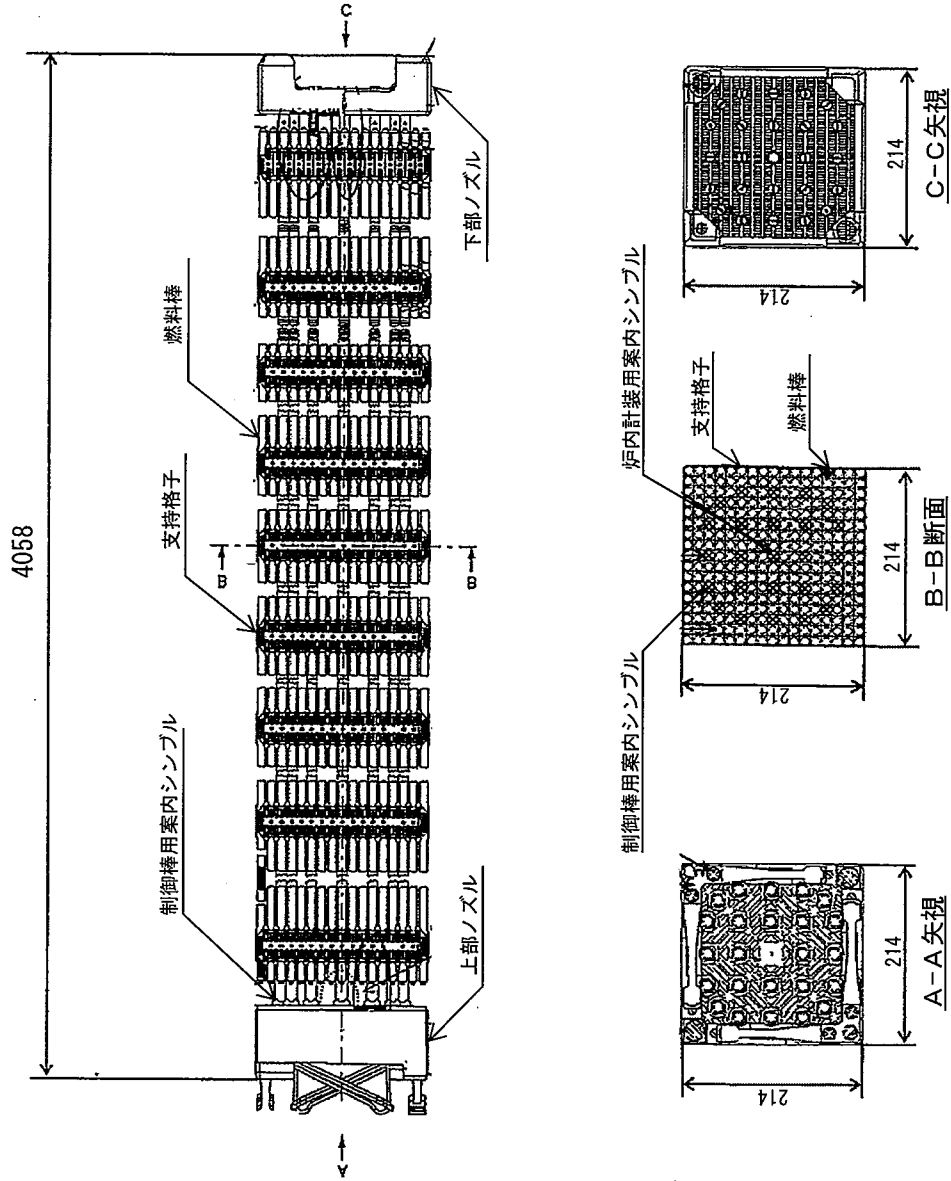
新型ノズル

単位：mm

矢視C-C

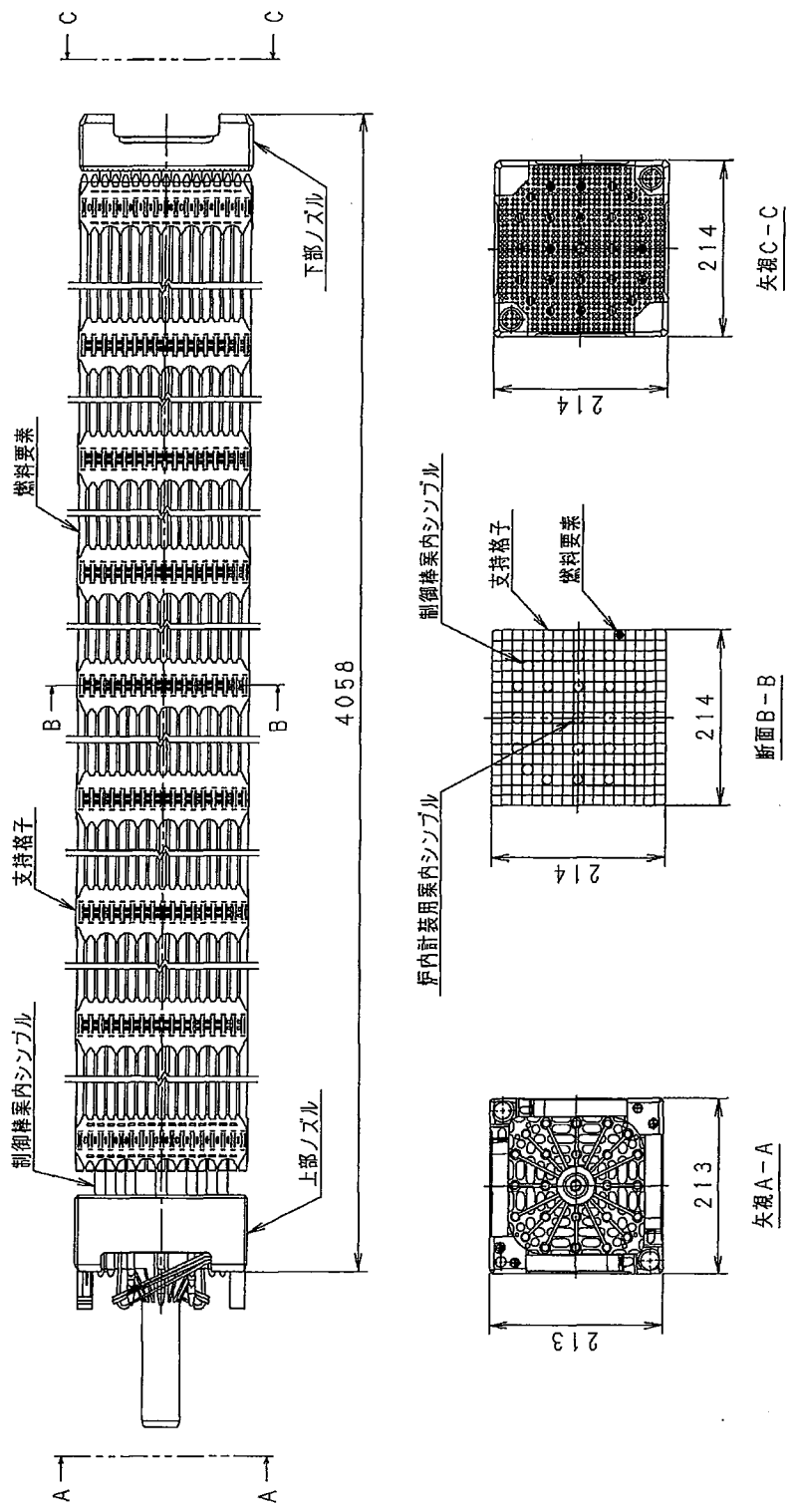
(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) 一第D.4a図 燃料集合体 (17×17, 12フイート) (高燃焼度燃料)



(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

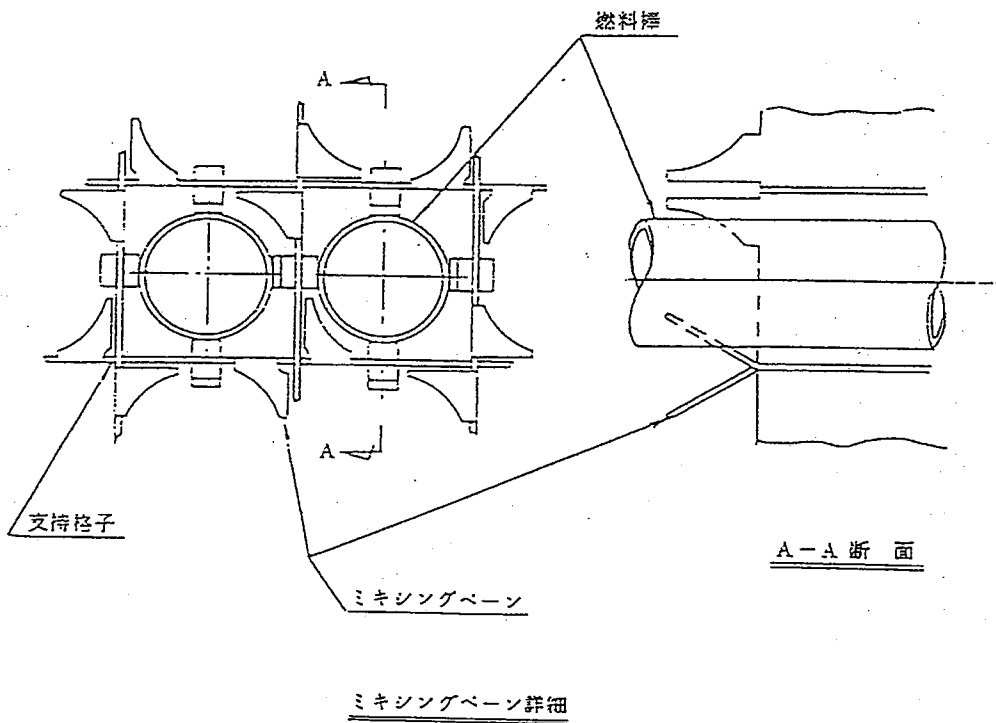
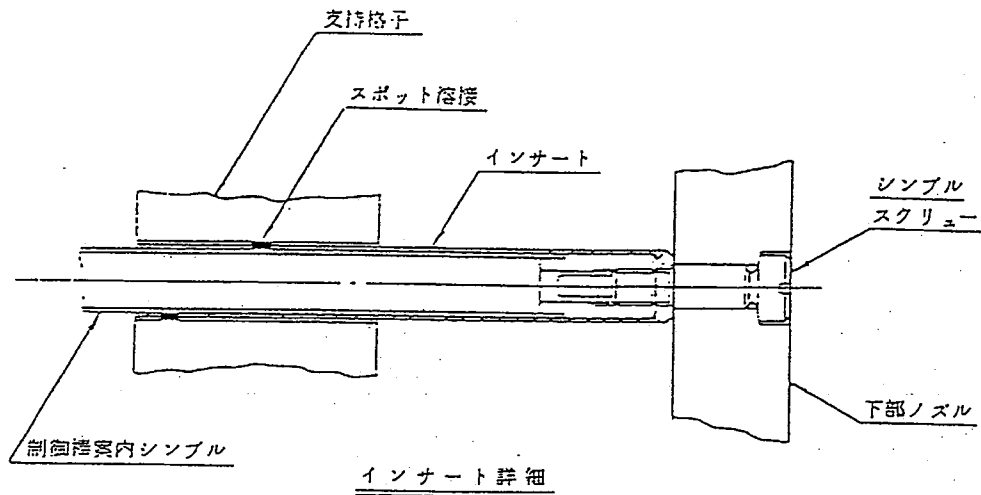
(イ) 一第D. 4 b 図 燃料集合体 (17×17, 12フイート) (HTPタイプ)



単位：mm

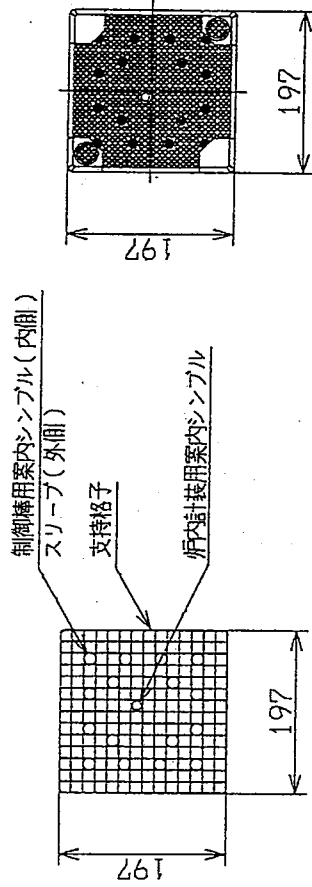
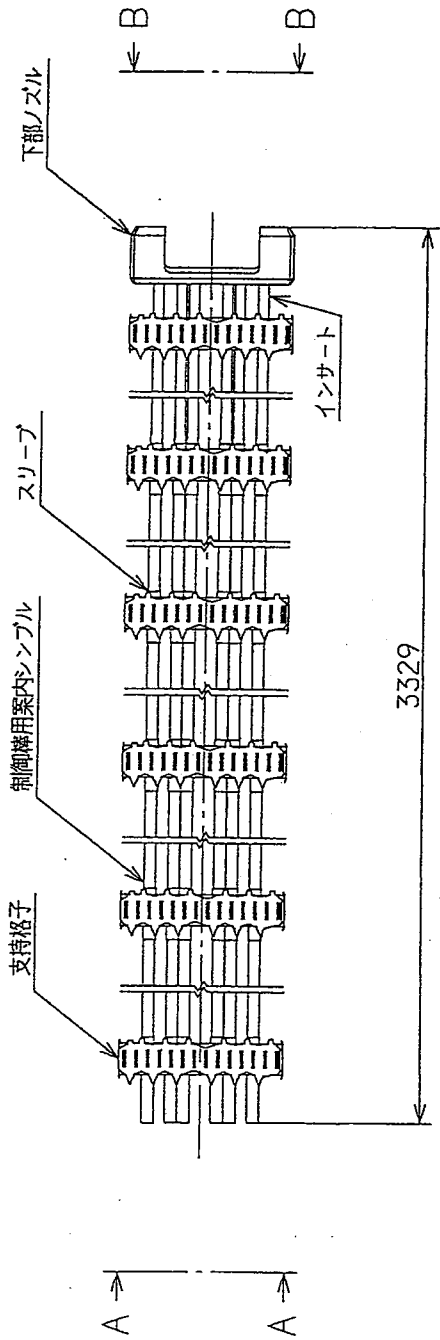
(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) 一第D.4c図 燃料集合体 (17×17, 12フイート) (高燃焼度燃料 改良タイプ)



(注記) 形状は代表例

(イ) - 第D. 5図 インサート, ミキシングベーン詳細図



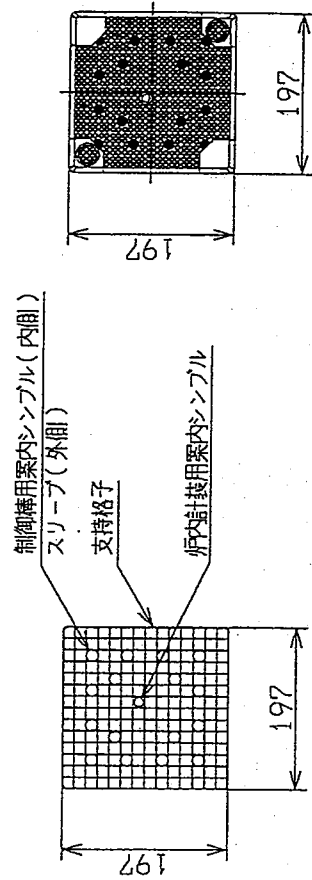
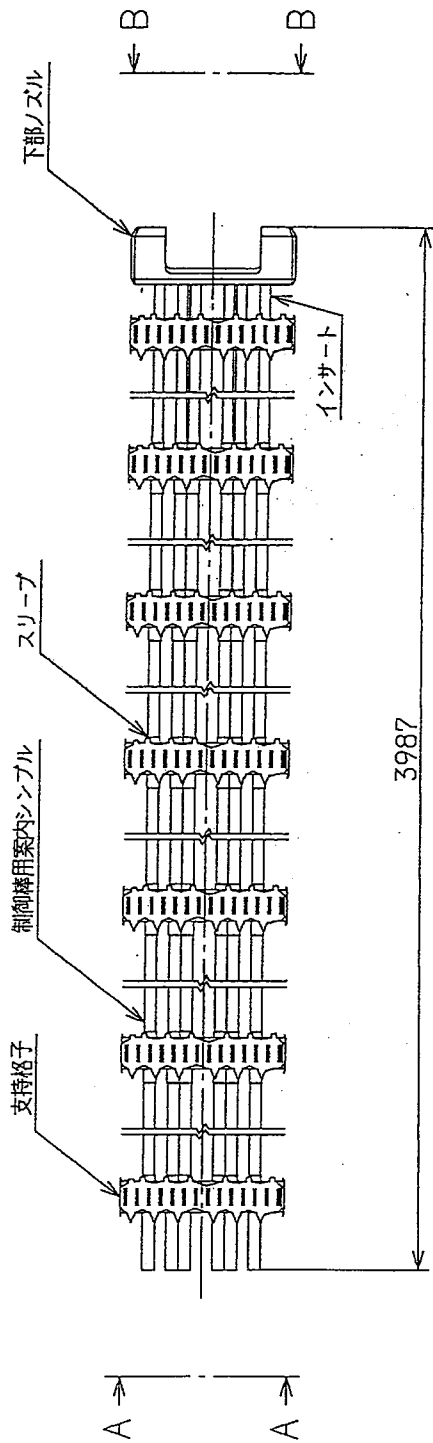
A - A 視

B - B 視

単位: mm

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) - 第D. 6 図 スケルトン組立体 (14×14, 10フィート)



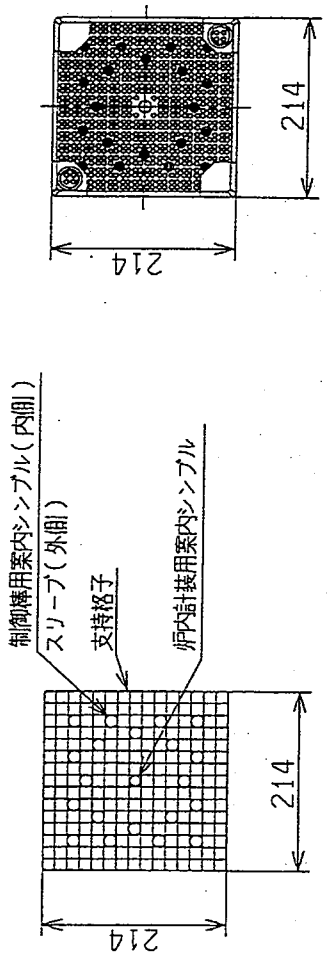
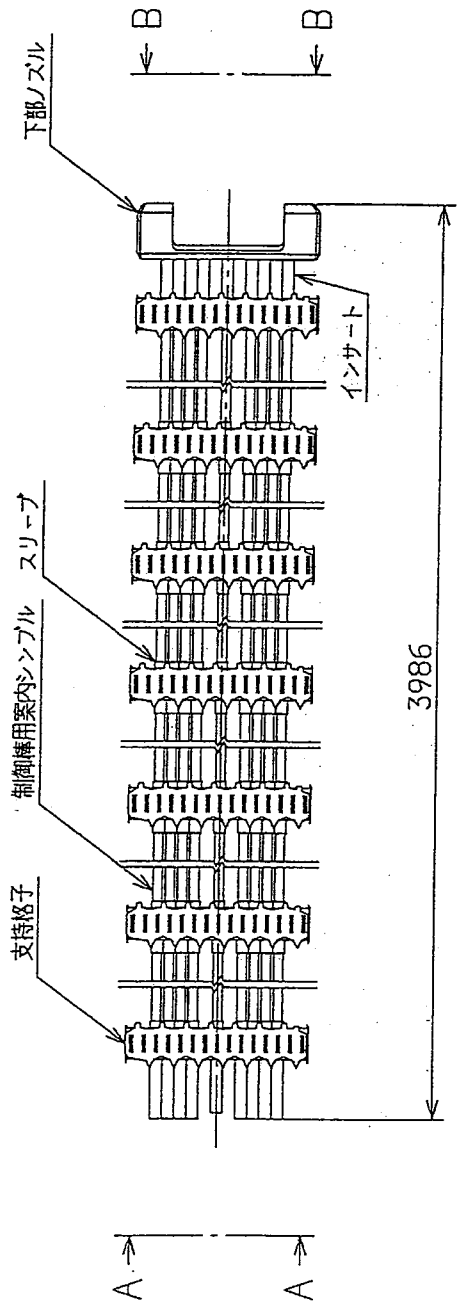
A - A 矢 視

B - B 矢 視

単位: mm

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

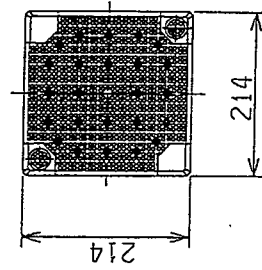
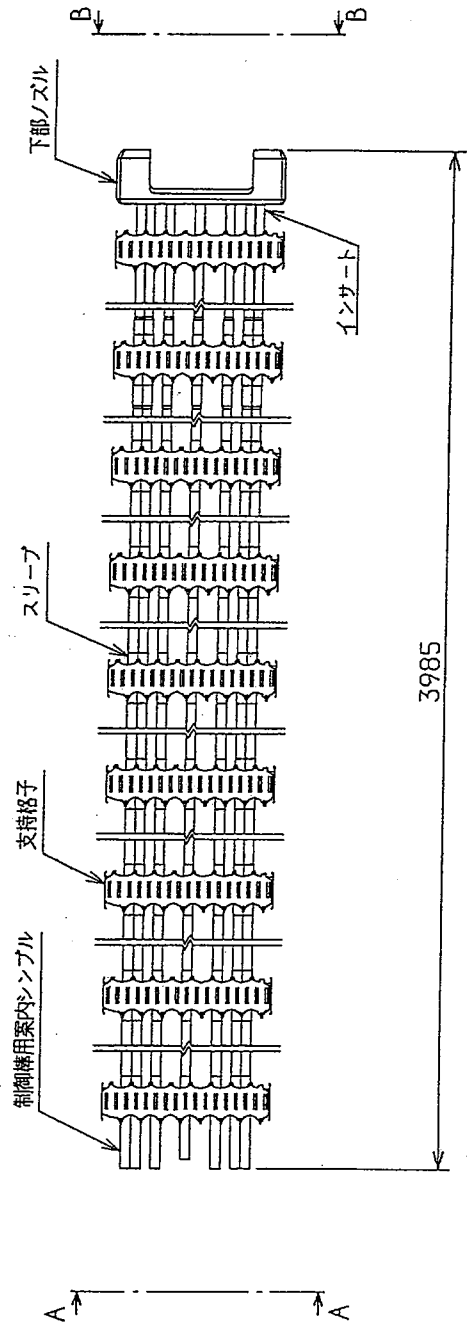
(イ) - 第D. 7 図 スケルトン組立 (14 × 14, 12フィート)



A-A矢視
B-B矢視
単位：mm

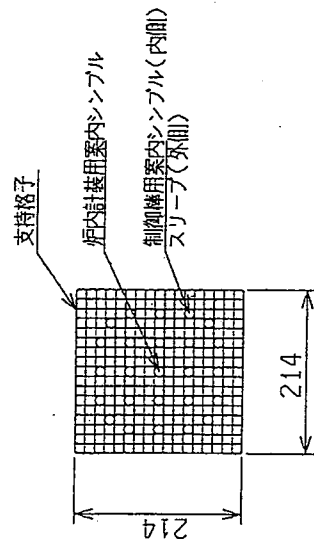
(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) - 第D. 8 図 スケルトン組立 (15×15, 12フィート)



単位：mm

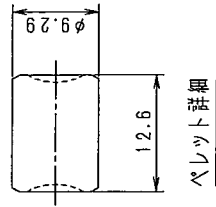
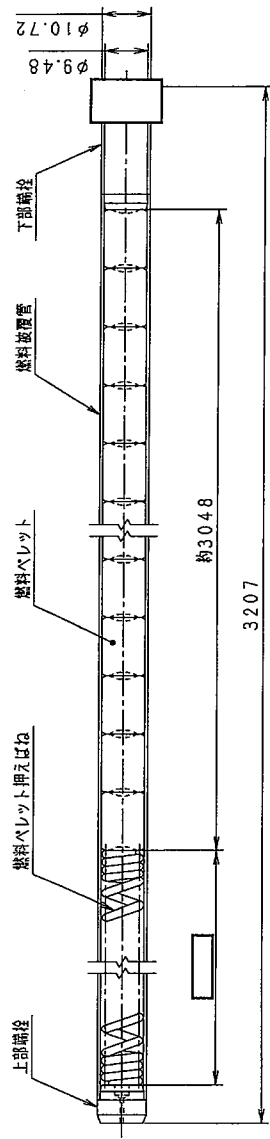
B-B 矢視



A-A 矢視

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

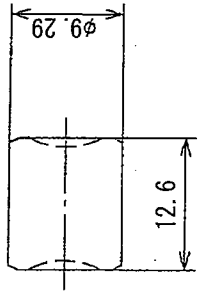
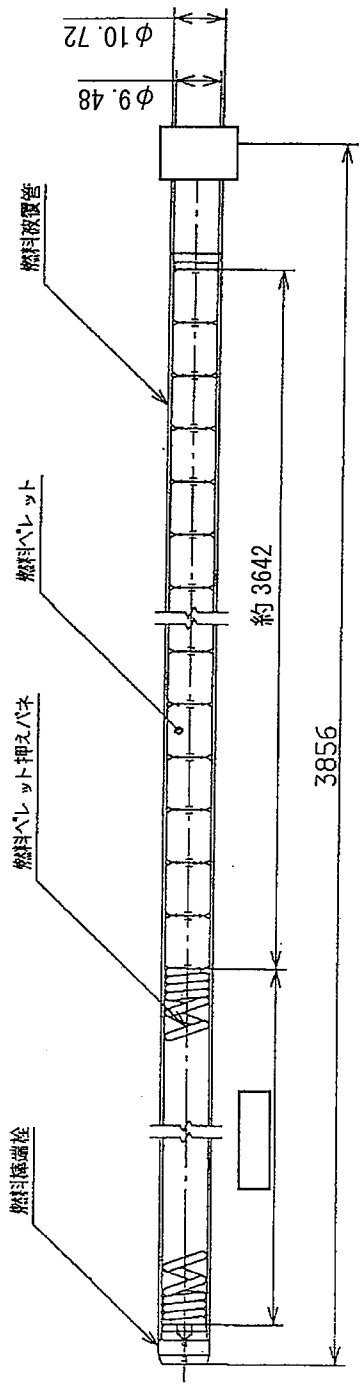
(イ) 一第D.9図 スケルトン組立体 (17×17, 12フイート)



単位：mm

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) ー第D.10 図 燃料要素構造図 (14×14, 10フィート)

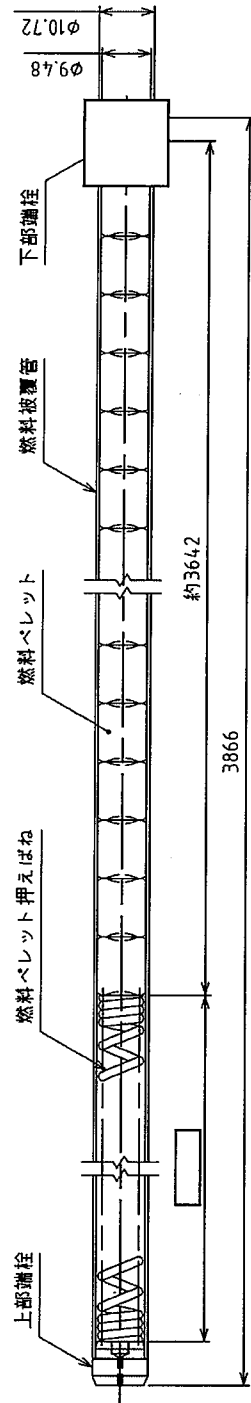


単位：mm

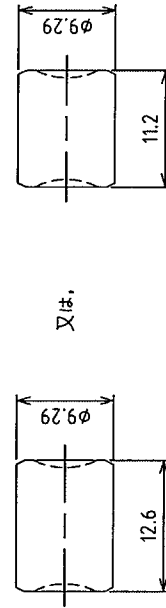
ペレット詳細

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) - 第D.11 図 燃料要素構造図 (14×14 & 15×15, 12フィート)



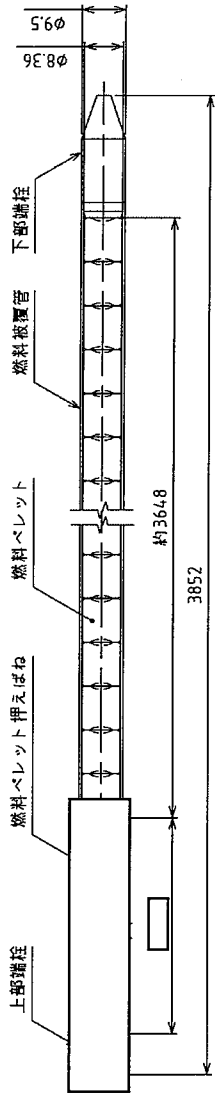
単位：mm



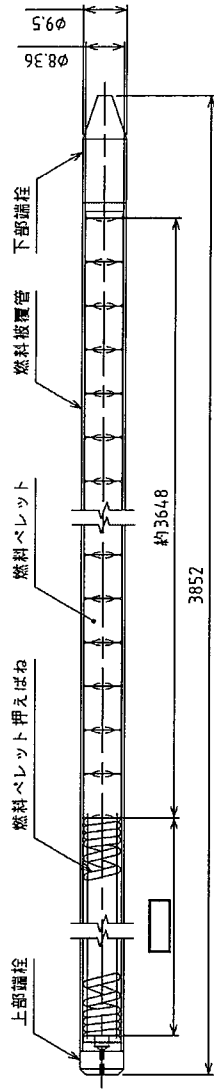
ベレット詳細

(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

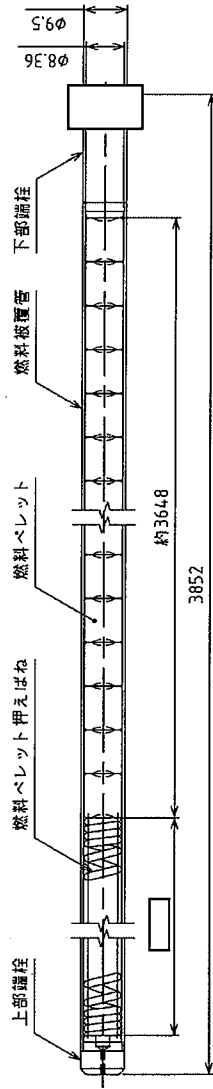
(イ) - 第D.11a 図 燃料要素構造図 (14×14 & 15×15, 12フィート) (高燃焼度燃料)



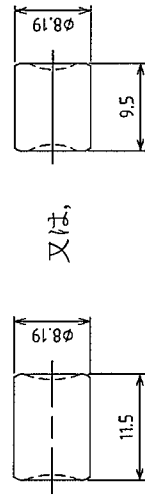
又は、



又は、



単位：mm



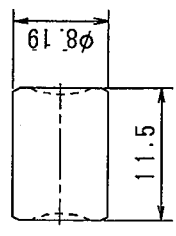
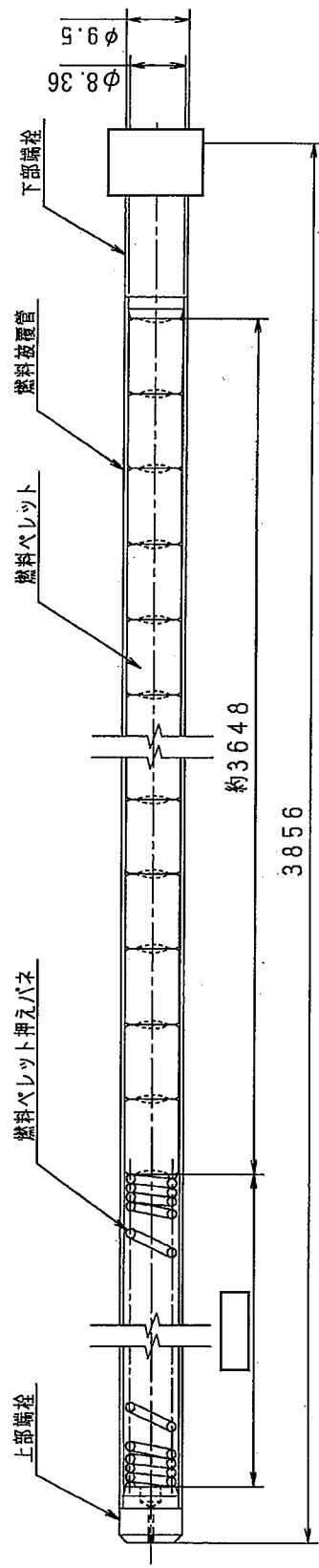
(注記1) 上記燃料棒3種類と

ペレット2種類の組合せは任意

(注記2) 寸法記載のない細部の形状については代表例

ペレット詳細

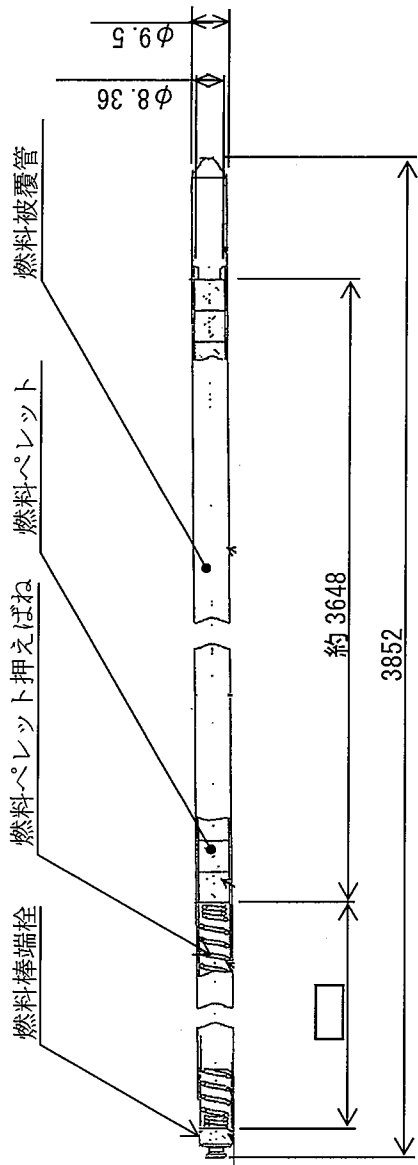
(イ) - 第D.12図 燃料要素構造図 (17×17, 12フィート)



単位：mm

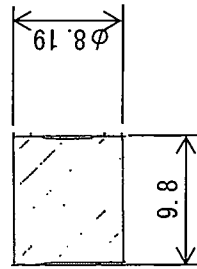
(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) 一第D.12a 図 燃料要素構造図 (17×17, 12フィート) (高燃焼度燃料)



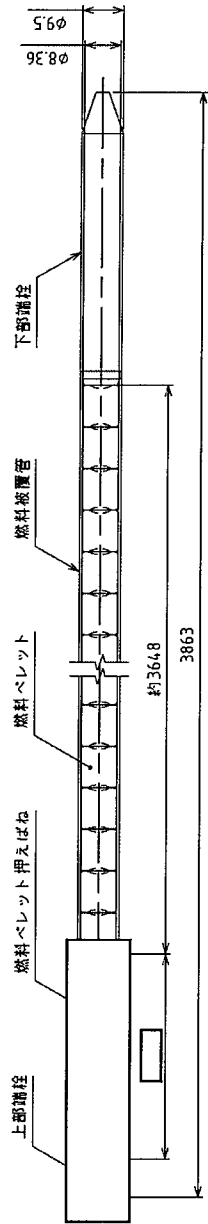
単位：mm

ペレット詳細

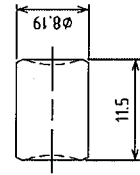
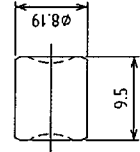
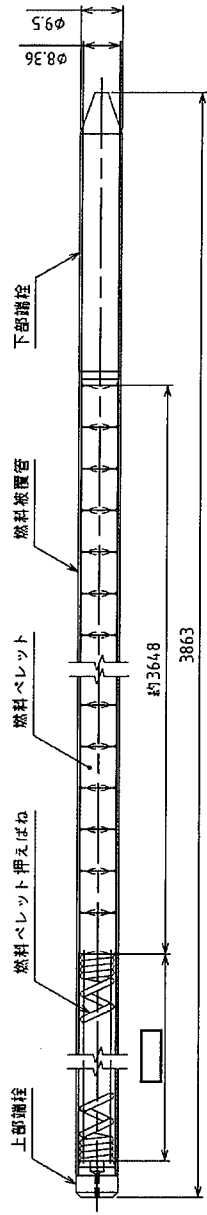


(注記) 寸法記載のない細部の形状については代表例

(イ) - 第D.12b 図 燃料要素構造図 (17×17, 12フィート) (HTPタイプ)



又は,



単位：mm

(注記 1) 上記燃料棒 2 種類と

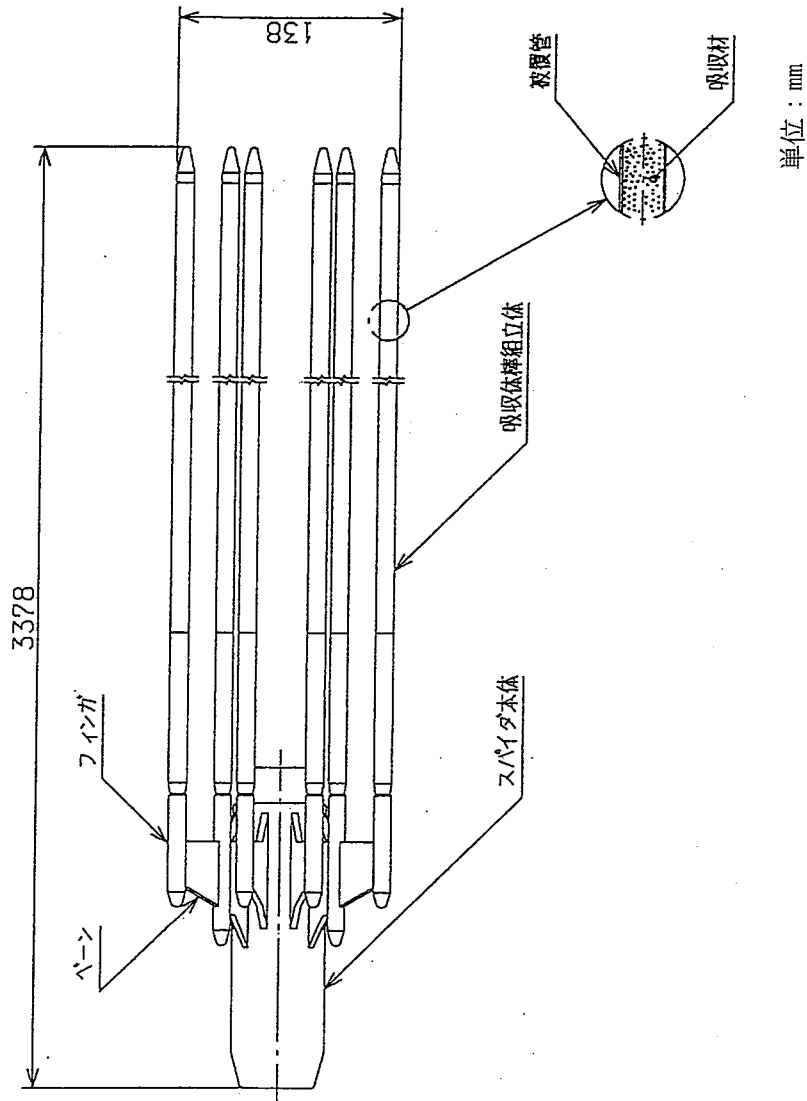
ペレット 2 種類の組合せは任意

(注記 2) 寸法記載のない細部の形状について

ては代表例

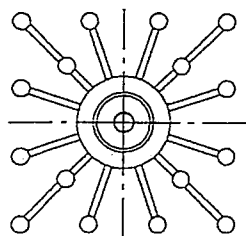
ペレット詳細

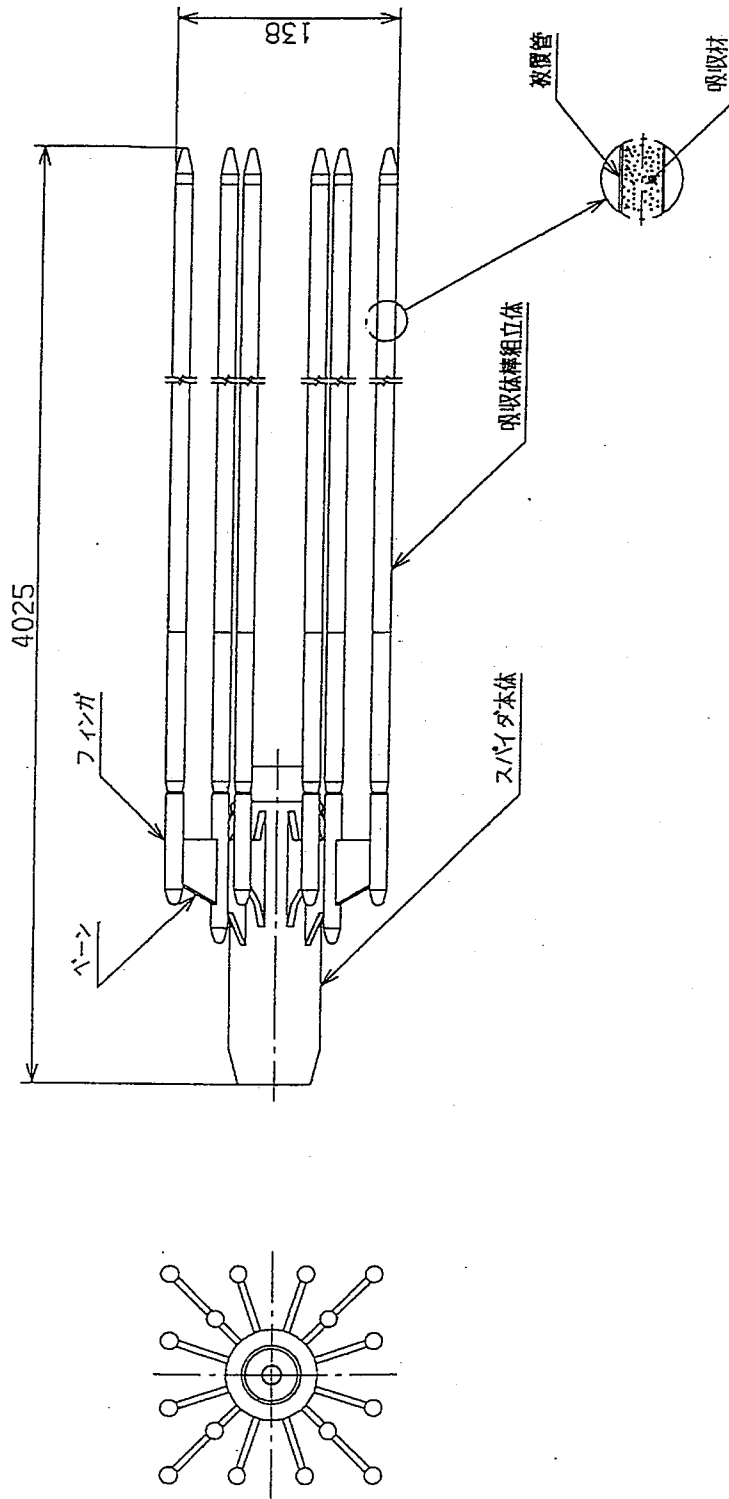
(イ) 一第D.12c 図 燃料要素構造図 (17×17, 12フィート) (高燃焼度燃料 改良タイプ)



(注記) 寸法及び形状は代表例

(イ) - 第D.13 図 非核燃料炉心構成品概略図 (制御棒クラスタ) (14×14, 10フイート)

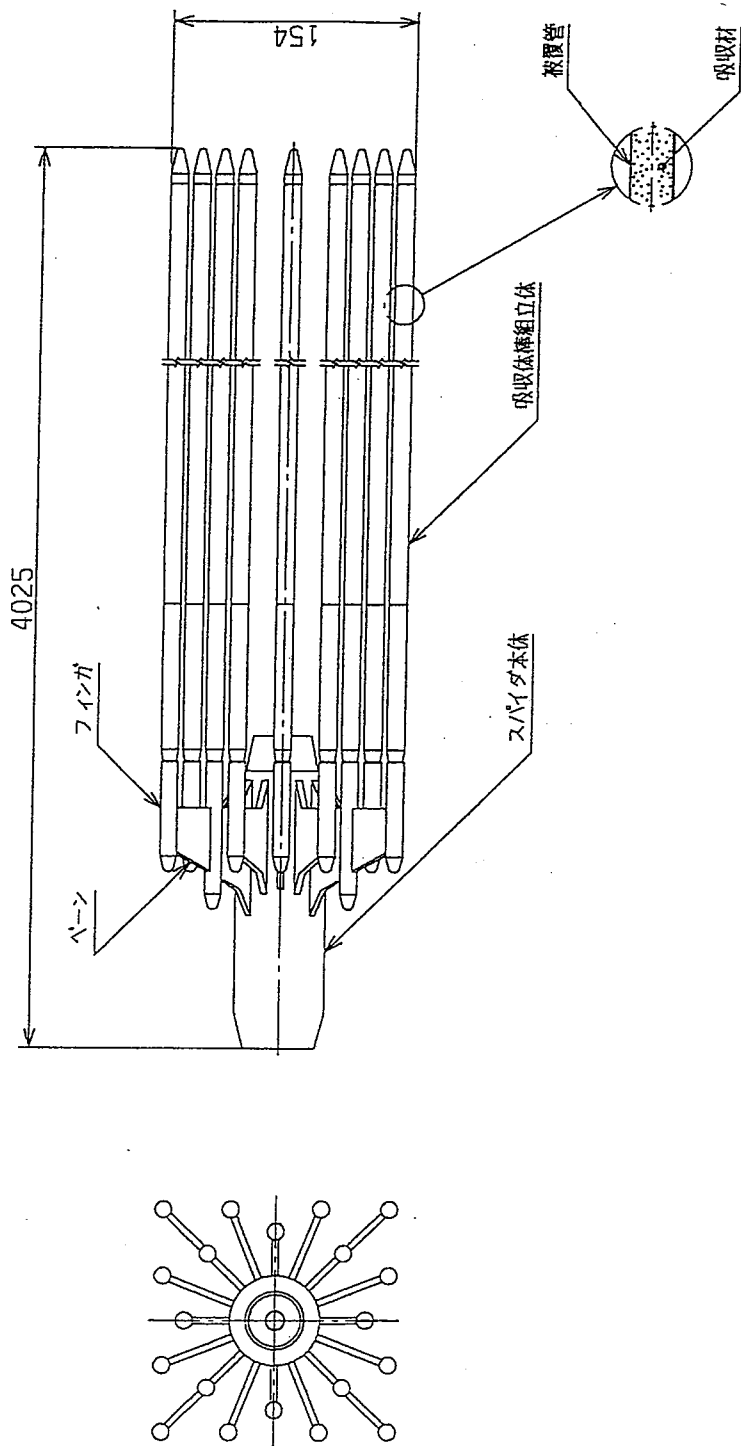




単位：mm

(注記) 寸法及び形状は代表例

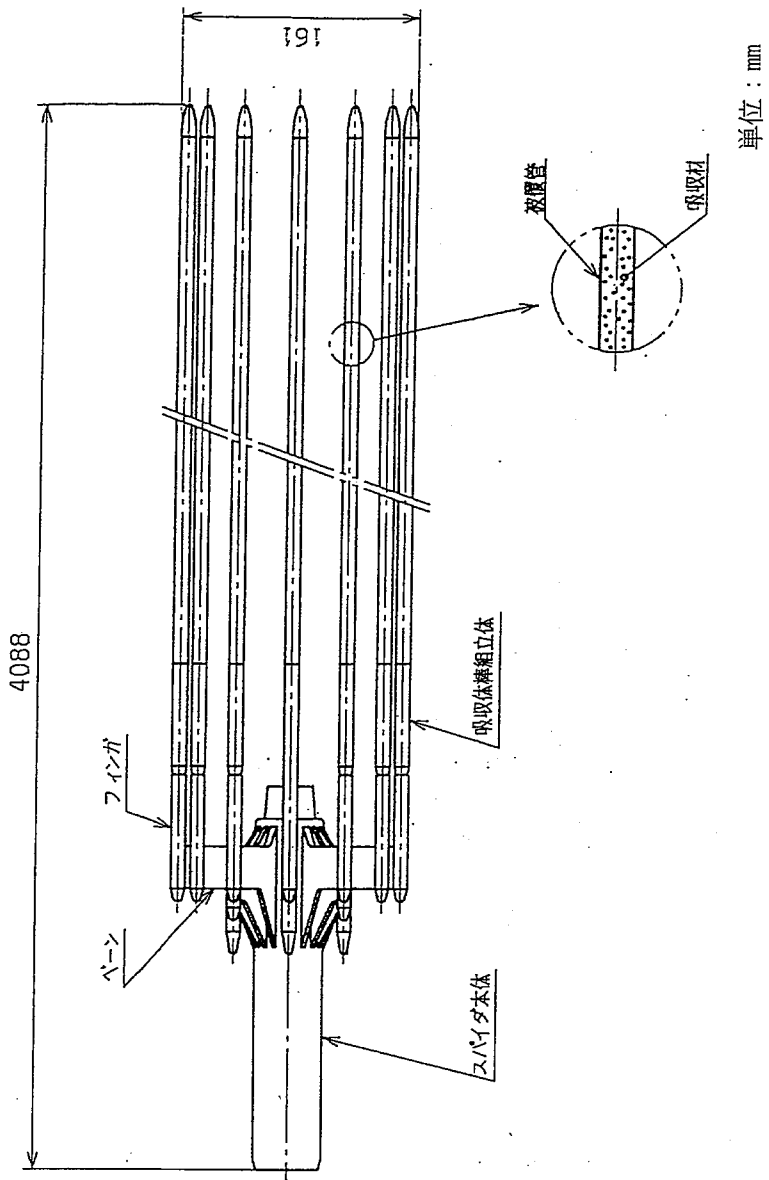
(イ) ー第D.14 図 非核燃料炉心構成品概略図(制御棒クラスタ) (14×14, 12フィート)



単位：mm

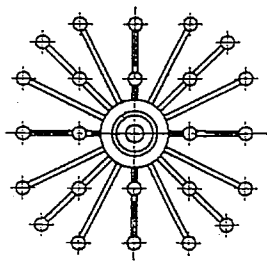
(注記) 寸法及び形状は代表例

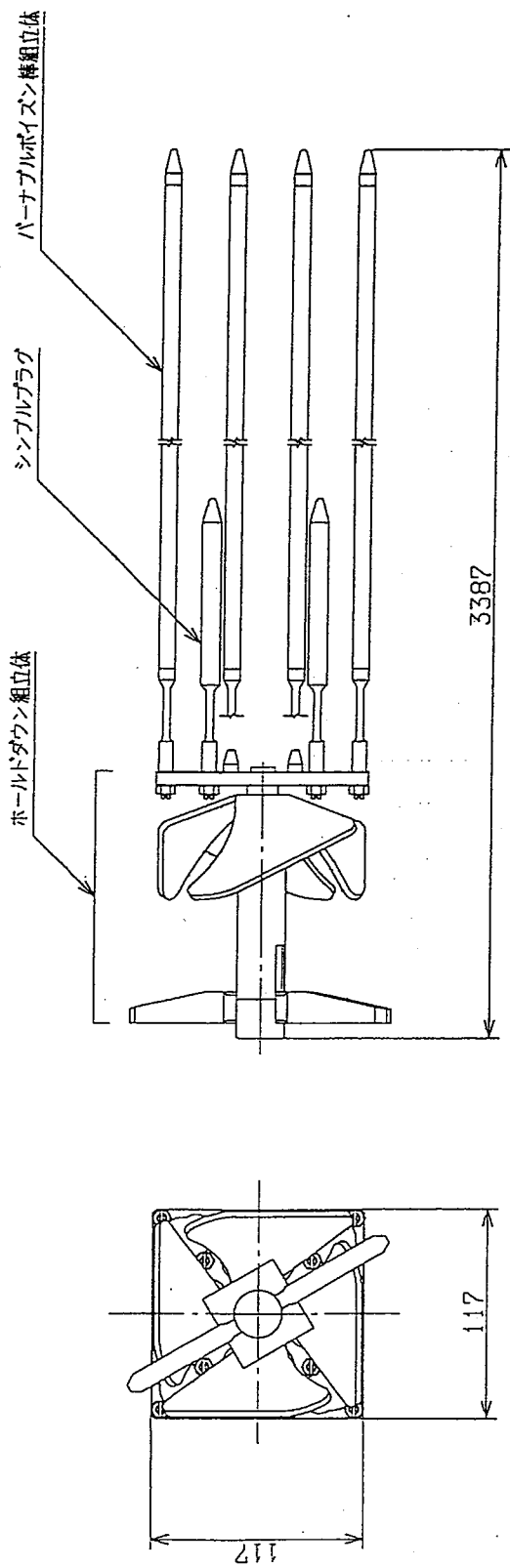
(イ) - 第D.15 図 非核燃料炉心構成品概略図 (制御棒クラスタ) (15 × 15, 12 フォート)



(注記) 寸法及び形状は代表例

(イ) 一第D.16 図 非核燃料炉心構成概略図(制御棒クラスタ)(17×17, 12フィート)

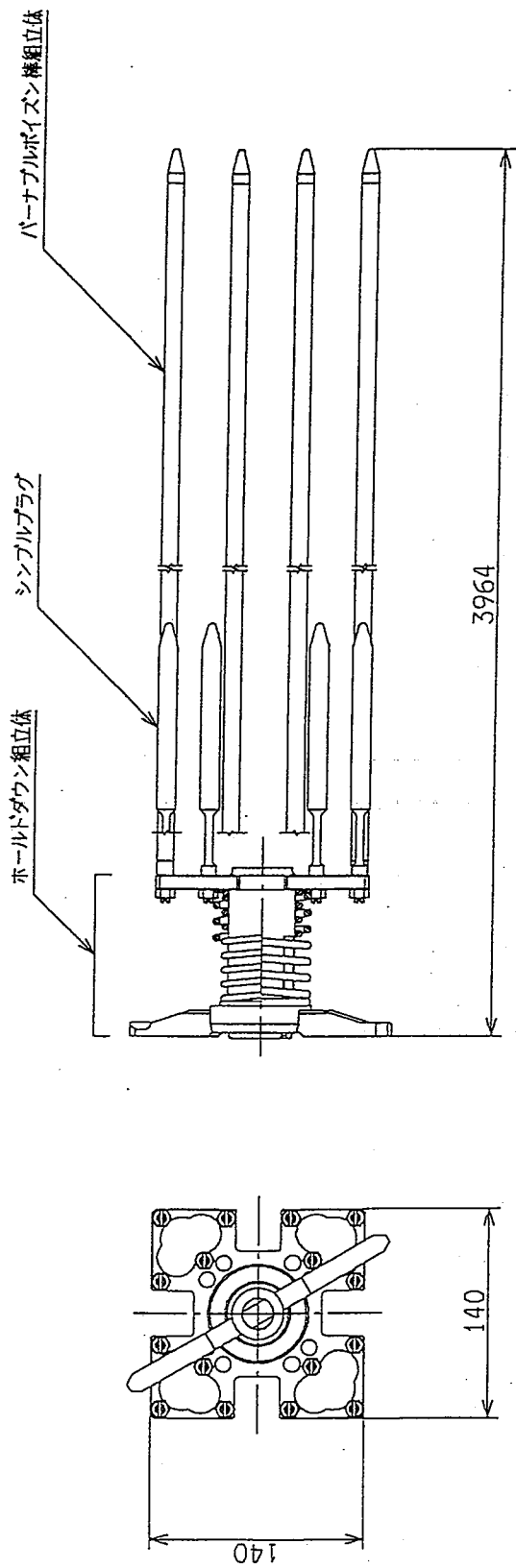




単位：mm

(注記) 寸法及び形状は代表例

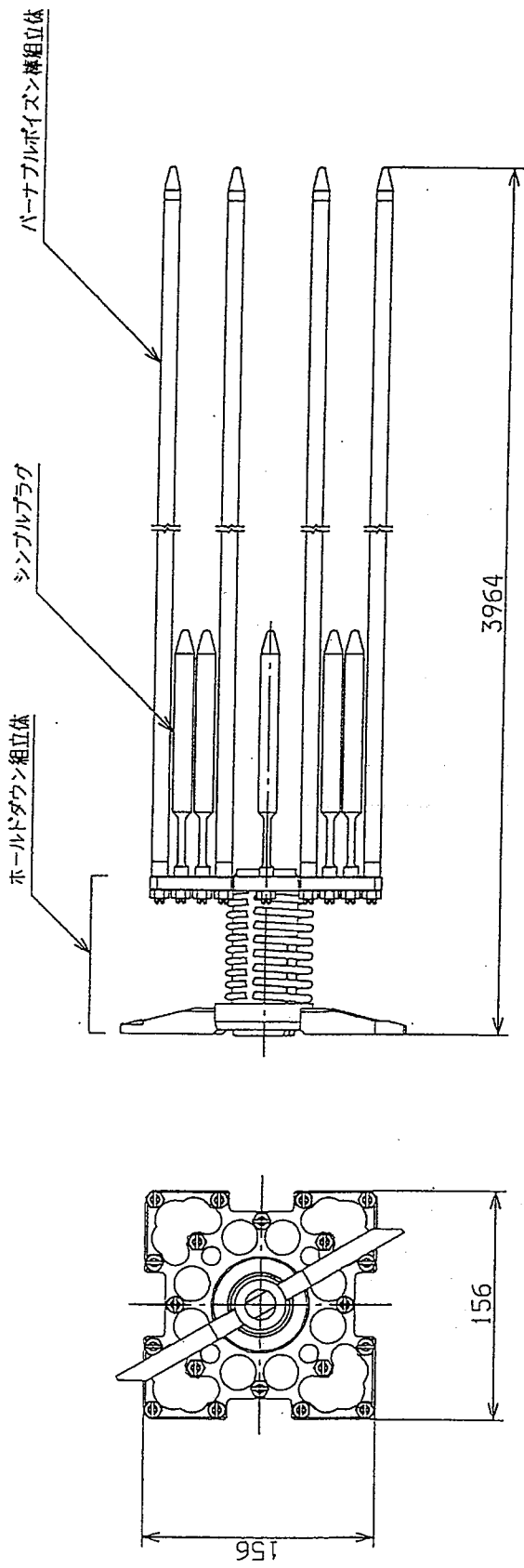
(イ) 一第D.17 図 非核燃料炉心構成概略図 (バーナブルポイズンアセンブリ) (14×14, 10フィート)



単位：mm

(注記) 寸法及び形状は代表例

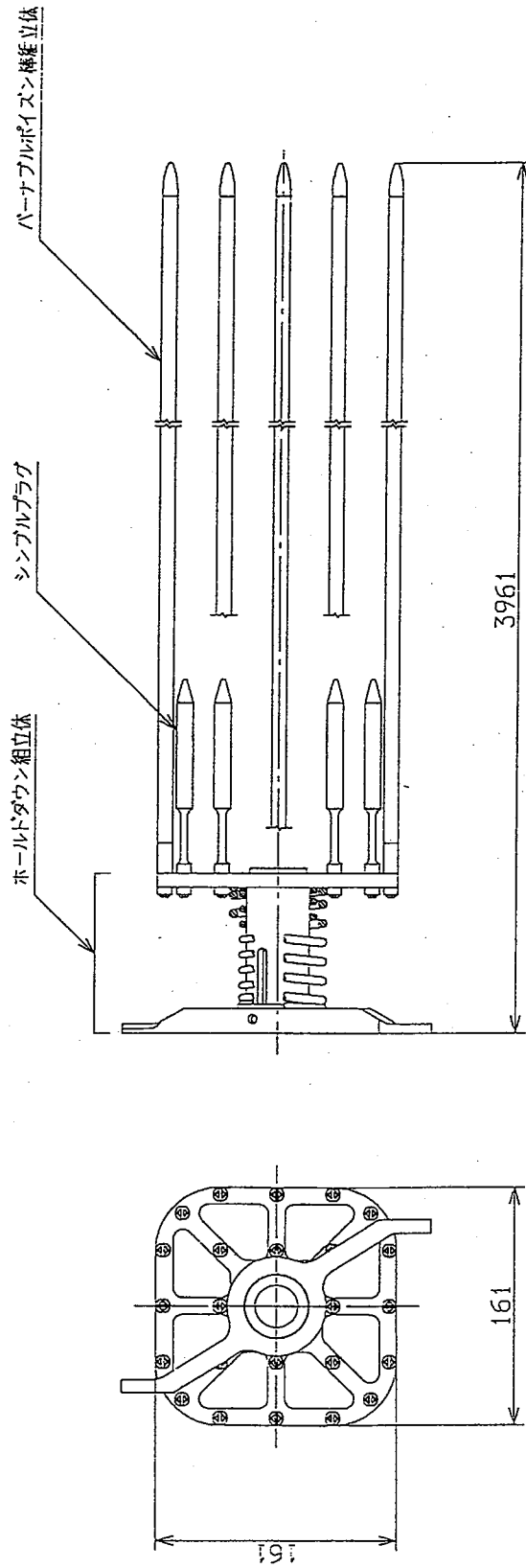
(イ) - 第D. 18 図 非核燃料炉心構成品概略図(バーナブルポイズンセンブリ) (14×14, 12フィート)



単位：mm

(注記) 寸法及び形状は代表例

(イ) 一第D.19 図 非核燃料炉心構成品概略図 (バナナポイズンアセンブリ) (15×15, 12フィート)



単位：mm

(注記) 寸法及び形状は代表例

(イ) - 第D.20 図 非核燃料炉心構成品概略図(バーナブルポイズンセンサー) (17×17, 12フィート)

D. 2 収納物の型式及び構成要素数量

収納物である燃料集合体の型式は、燃料棒の配列及び燃料棒の長さによって決められる。また、燃料集合体を構成する主要要素の数量を(イ)－第D. 1表に示す。

(イ)－第D. 1表 燃料集合体の型式及びその構成要素数量

型 式	燃料棒長さ	燃料棒数	案 内 シブ ル数	炉内計装用 案内シブ ル数	支持格子数
14×14	10フィート	179(12)	16	1	6
14×14	12フィート	179(12[16])	16	1	7または8
15×15	12フィート	204(16[20])	20	1	7
17×17	12フィート	264(16[24])	24	1	9

()内の数字は、ガドリニア入り燃料集合体の場合のガドリニア入り燃料棒の本数で、内数を示し、[]のない数字は現行燃料、[]内の数字は高燃焼度燃料の場合である。

D. 3 収納物の構造及び主要部分の寸法

燃料集合体及びその他の主要構成要素の構造図を(イ)－第D. 1図から第D. 20図に示す。また、燃料集合体及び燃料棒等の主要部寸法の要約を(イ)－第D. 2表、(イ)－第D. 3表及び(イ)－第D. 4表に示す。

(イ)ー第D. 2表 燃料集合体及び非核燃料炉心構成品装荷時の主要部寸法

単位 mm

型式	燃料棒仕様										集合体 全長	A全長 *	集合体 断面寸法
	現行燃料				高燃焼度燃料				燃料棒重量	燃料棒重量			
	燃料棒 全長	燃料 有効長	燃料棒重量 ガドリニウム なし	燃料棒重量 ガドリニウム 入り	燃料棒 全長	燃料 有効長	燃料棒重量 ガドリニウム なし	燃料棒重量 ガドリニウム 入り					
14×14 107型	3,207	約3,048	なし	入り	—	—	なし	入り	3,476	3,527	197×197		
14×14 127型	3,856	約3,642	なし	入り	3,866	約3,642	なし	入り	4,057	4,184	197×197		
15×15 127型	3,856	約3,642	なし	入り	3,866	約3,642	なし	入り	4,057	4,183	214×214		
17×17 127型	3,852	約3,648	なし	入り	3,856	約3,648	なし	入り	4,058	4,247	214×214		
17×17 127型 HTPタイプ	3,852	約3,648	なし	入り	—	—	なし	入り	4,058	—	214×214		
17×17 127型 改良タイプ	—	—	なし	入り	3,863	約3,648	なし	入り	4,058	4,247	214×214		

*、A全長：非核燃料炉心構成品装荷時の全長

(イ)－第D. 3表 燃料棒の主要部寸法

単位 mm

型 式	燃料ペレット*		被 覆 管		燃料ペレット押えばね		
	直 径	高 さ	外 径	内 径	線 径	外 径	自由長
14×14 10フィート	9.29	12.6	10.72	9.48			
14×14 12フィート	9.29	11.2 又は 12.6	10.72	9.48			
15×15 12フィート	9.29		10.72	9.48			
17×17 12フィート	8.19	9.5 又は 11.5 [9.8]	9.5	8.36			
17×17 12フィート (改良タイプ)	8.19	9.5 又は 11.5	9.5	8.36			

*二酸化ウランペレットまたはガドリニア入り二酸化ウランペレット
備 考 []内の数字は、HTPタイプの燃料の数値を示す。

(イ)－第D. 4表 制御棒案内シンプルの主要部寸法

単位 mm

型 式	太径部外径	太径部内径	細径部外径	細径部内径	全 長
14×14 10フィート	13.69	12.83	12.2	11.34	
14×14 12フィート	13.69	12.83	12.2	11.34	
15×15 12フィート	13.87	13.0	12.42	11.56	
17×17 12フィート	12.24	11.43	10.9	10.08	

D. 4 収納物の構造材料

燃料集合体の主要構造材料を(イ)－第D. 5表に示す。

(イ)－第D. 5表 主要構造材料

主 要 部 材	材 質	備 考
燃料集合体		
被 覆 材	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4, MDA, ZIRLO
燃料ペレット押えばね	ステンレス鋼又は ニッケル基合金	
端 栓	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4
支持格子	ニッケル基合金又はジルコニウム合金	インコネル-718 又は ジルカロイ-4
制御棒案内シンプル	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4
炉内計装用案内シンプル	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4
ノ ズ ル	ステンレス鋼	
アダプタプレート	ステンレス鋼	
制御棒クラスタ		
スパイダ本体	ステンレス鋼	
ベ ー ン	ステンレス鋼	
フィンガ	ステンレス鋼	
被 覆 管	ステンレス鋼	
吸 収 材	銀, インジウム, カドミウム合金	
スペーサ		
スペーサ本体	炭 素 鋼	

D. 5 収納物の物理的及び化学的性質

燃料集合体の構造材料のうち、核分裂性物質である二酸化ウランペレットの被覆材料であるジルコニウム合金（ジルカロイ-4，MDA及びZIRLO）の耐熱性，耐腐食性及び電気化学的反応性について述べる。

D. 5. 1 耐熱性

ジルカロイ-4の物理的，機械的，化学的性質は，ジルカロイ-2とほとんど同じである。また，MDA及びZIRLOはジルカロイ-4同様，主成分が約98wt%のジルコニウム(Zr)から成っているため，それらの材料物性はジルカロイ-4とほぼ同等である。

融点は，ジルカロイ-4（約 °C），MDA（約 °C）及びZIRLO（約 °C）であり，MDA，ZIRLO合金の融点はジルカロイ-4に比較して若干増加している。

D. 5. 2 耐腐食性

通常の輸送においては，輸送容器中に乾燥剤の使用等の処置を講じているので燃料集合体の酸化腐食はない。

D. 5. 3 電気化学的反応

輸送中の燃料集合体は乾燥した空気中におかれており，ジルコニウム合金（ジルカロイ-4，MDA及びZIRLO）に電気化学的反応が生じることはない。


D. 6 収納物の収納条件

輸送容器当りの燃料集合体収納数は2体である。

燃料集合体中の燃料棒に装荷されている二酸化ウランペレットの燃料製造時の濃縮ウラン中の不純物仕様を(イ)－第D. 6表に示す。

燃料集合体及び輸送容器の線源強度を、(イ)－第D. 7表に示す。

(イ)－第D. 6表 濃縮ウラン中の不純物仕様

核 種	濃縮ウラン中の不純物仕様	
^{232}U		$\mu\text{g/gU}$
^{234}U		$\mu\text{g/g}^{235}\text{U}$
^{236}U		$\mu\text{g/g}^{235}\text{U}$
^{99}Tc		$\mu\text{g/gU}$

(イ)－第D. 7表 集合体，輸送容器の線源強度

	線 源 強 度	
集 合 体 (Bq 以下/体)	14×14 型 10 フィート	
	14×14 型 12 フィート	
	15×15 型 12 フィート	
	17×17 型 12 フィート	
輸 送 容 器 (Bq 以下/体)	14×14 型 10 フィート	
	14×14 型 12 フィート	
	15×15 型 12 フィート	
	17×17 型 12 フィート	

D. 7 収納物の濃縮度

燃料集合体中の燃料棒に装荷されている二酸化ウランペレットの濃縮度は、燃料集合体が装荷されている炉心の領域，初装荷または取り替えの区分等の諸要因に依存しているが，ここではその濃縮度は5 wt%以下とする。なお，各ガドリニア入り燃料集合体中のガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の濃縮度は，3. 3 wt%以下，ガドリニア濃度は wt%以下である。

D. 8 収納物の重量

燃料集合体及びその他の主要構成要素の重量を(イ)－第D. 8表に示す。

(イ)－第D. 8表 燃料集合体の主要部重量

型 式	14×14型 10フィート	14×14型 12フィート	15×15型 12フィート	17×17型 12フィート
名 称				
燃 料 集 合 体				
装荷ウラン量(UO ₂)				
燃 料 棒				
ペレット(UO ₂)				
被 覆 材				
上 部 ノ ス 〇 ル				
下 部 ノ ス 〇 ル				
制御棒クラスタ				
支 持 格 子				
制御棒案内シンプル				

型 式	17×17型 12フィート (HTPタイプ)	17×17型 12フィート (改良タイプ)
名 称		
燃 料 集 合 体		
装荷ウラン量(UO ₂)		
燃 料 棒		
ペレット(UO ₂)		
被 覆 材		
上 部 ノ ス 〇 ル		
下 部 ノ ス 〇 ル		
制御棒クラスタ		
支 持 格 子		
制御棒案内シンプル		

*含アダプタプレート

なお、各燃料集合体主要部重量は、最大となる二酸化ウラン燃料集合体時の重量を示す。

D.9 収納物の主な構造材料の密度

燃料集合体の主な構成材料である α 相のジルカロイ合金の密度は 6.52 g/cc から 6.57 g/cc の範囲である。

二酸化ウランペレット（ガドリニア入り二酸化ウランペレット含む）の最大密度は理論密度の約97%である。

D.10 減速比

該当せず

D.11 最大崩壊熱量

該当せず

D.12 密封容器最大圧力

密封容器である燃料棒（ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒を含む）の内圧力及び充填ガス種類を（イ）-第D.9表に示す。

（イ）-第D.9表 燃料棒内圧力及び充填ガス種類

燃料タイプ	燃料棒内圧力 (MPa·G)	
	現行燃料	高燃焼度燃料
14×14 型 10 フィート 14×14 型 12 フィート 15×15 型 12 フィート 17×17 型 12 フィート 同上 (改良タイプ)		
—	充填ガス種類	He

(口) 章

核燃料輸送物の安全解析

(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析

本輸送物が、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則第3条の核燃料輸送物の経年変化を考慮した上で、A型核分裂性輸送物の設計条件である以下の、第5条及び第11条の規定を満足することを解析にて評価する。

(1) A型輸送物に係る基準

(a) A型輸送物の通常輸送時

- (イ) 容易にかつ安全に取扱うことができること。
- (ロ) 運搬中に予想される温度及び内圧の変化、振動等により亀裂、破損等の生じるおそれの無いこと。
- (ハ) 表面に不要な突起物が無く、かつ表面の汚染の除去が容易であること。
- (ニ) 材料相互の間及び材料と収納される核燃料物質等との間で危険な物理的作用又は化学反応の生じるおそれの無いこと。
- (ホ) 弁が誤って操作されないような措置が講じられていること。
- (ヘ) 表面の放射性物質の密度が下記を超えないこと。

α 放射性物質 : 0.4 Bq/cm²

β γ 放射性物質 : 4 Bq/cm²

- (ト) 外接する直方体の各辺が10 cm以上であること。
- (チ) みだりに開封されないようにかつ、開封された場合に開封されたことが明らかになるように容易に破れないシールの貼り付け等の措置が講じられていること。
- (リ) 構成部品は-40℃～70℃までの温度範囲において亀裂、破損等の生じるおそれのないこと。ただし、運搬中に予想される温度の範囲が特定できる場合は、この限りでない。
- (ヌ) 周囲の圧力を60 kPaとした場合に、放射性物質の漏えいがないこと。
- (ル) 表面における線量当量率が2 mSv/hを超えないこと。
- (レ) 表面からの1 m離れた位置に於ける線量当量率が100 μ Sv/hを超えないこと。
- (ロ) 核燃料物質等の使用等に必要書類その他の物品(核燃料輸送物の安全性を損なうおそれのないものに限る)以外のものが収納されていないこと。

(b) A型輸送物の一般の試験条件

下記(ロ)項の一般の試験条件の下に置くこととした場合に、(イ)項の要件を満足すること。

(イ) 要件

- (i) 放射性物質の漏えいが無いこと。
- (ii) 表面に於ける線量当量率が著しく増加せず、かつ2mSv/hを超えないこと。

(ロ) 一般の試験条件

- (i) 50mm/hの雨量に相当する水を1時間吹き付けること。
- (ii) (i)の条件に置いた後、次の条件に置くこと。

- ① 1.2m高さから最大の破損を及ぼすように落下させること。
- ② 重量の5倍に相当する荷重又は鉛直投影面積に13kPaを乗じた荷重のうち大きいものを24時間加えること。
- ③ その重量が100kg以下のファイバー板製の円筒形のものにあつては、両縁の四半分ごとに対して最大の破損を及ぼすように、それぞれ0.3mの高さから落下させること。
- ④ 重量6kgで直径が3.2cmの鋼棒であつて、その先端が半球形のを1mの高さから当該核燃料輸送物の最も弱い部分に落下させること。

(2) 核分裂性輸送物に係る基準

輸送中において臨界に達しないものであるほか、下記の(a)～(c)に示す技術上の基準に適合すること。

- (a) 一般の試験条件の下に置くこととした場合に次の要件に適合すること。
 - (i) 構造部に一辺10cmの立方体を包含するようなくぼみが生じないこと。
 - (ii) 外接する直方体の各辺が10cm以上であること。
- (b) 下記の(i)～(v)に示すいずれの場合にも臨界に達しないこと。
 - (i) 孤立系^{*1}の条件の下に置くこととした場合
 - (ii) 一般の試験条件の下に置いたものを孤立系^{*1}の条件の下に置くこととした場合
 - (iii) 特別の試験条件の下に置いたものを孤立系^{*1}の条件の下に置くこととした場合
 - (iv) 一般の試験条件の下に置いたものを配列系^{*2}の条件の下で、かつ、当該核分裂性輸送物相互の間が最大の中性子増倍率になるような状態で、当該核分裂性輸送物の輸送制限個数の5倍に相当する個数積載することとした場合
 - (v) 特別の試験条件の下に置いたものを配列系^{*2}の条件の下で、かつ、当該核分

裂性輸送物相互の間が最大の中性子増倍率になるような状態で、輸送制限個数の2倍に相当する個数を積載することとした場合

- *1 輸送物中の空間を水で満たし、収納物は中性子増倍率が最大となる配置、減速状態とし、密封装置の周囲に厚さ20cmの水の反射を考えること。
- *2 輸送物を任意に配列し、その周囲に20cmの水の反射を考えること。

(c) -40°C ～ 38°C までの温度範囲において亀裂、破損等の生じるおそれのないこと。
ただし、運搬中に予想される温度の範囲が特定できる場合は、この限りでない。

上記(a)及び(b)における核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件は以下の通り

(イ) 一般の試験条件

- (i) 50mm/h の雨量に相当する水を1時間吹き付けること。
- (ii) (i)の後、1.2m高さから最大の破損を及ぼすように落下させること。
- (iii) (ii)の後、重量の5倍に相当する荷重又は鉛直投影面積に 13kPa を乗じた荷重のうち大きいものを24時間加えること。
- (iv) (iii)の後、6kgで直径が3.2cmの鋼棒を1mから落下させること。

(ロ) 特別の試験条件

- (i) 上記(イ)の一般の試験条件の後、9m高さから落下させること。
- (ii) (i)の後、直径が15cmで長さ20cmの軟鋼丸棒上に1mの高さから落下させること。
- (iii) (ii)の後、太陽放射熱を負荷しつつ環境温度 38°C に置き、 800°C の環境に30分間置くこと、太陽放射熱を考慮しつつ自然冷却すること。
- (iv) (iii)の後、深さ0.9mの水中に8時間浸漬させること。
- (v) 上記(i)～(iv)の試験条件とは別に、上記(イ)の一般の試験条件後、深さ15mの水中に8時間浸漬させる場合についても考慮し、最大の破損を受けるいずれかの条件の下に置くこと。

口章A 構造解析

(ロ)－A 構造解析

A. 1 構造設計

A. 1. 1 概 要

本輸送容器は、基本仕様や機能は同一であるがタイプAとタイプBの取扱い性で形状の異なる部位がある。

本輸送容器は、収納物である燃料集合体を載せるための防振構造部と上蓋、下部容器の外殻及び補助的機材からなる。

防振構造部は、(イ)－第C. 2図に示すようにショックマウントフレーム、クロスフレーム及びクランピングフレームからなる。

クロスフレームは、燃料集合体を2体載せるようになっており、燃料集合体とクロスフレーム接触面には、ゴム製のクッションを取付け緩衝効果を高めている。また、中性子吸収材としてクロスフレーム全面に渡り最小 \square mm板厚のボロンステンレス鋼（以下スキンと呼ぶ）を取付けている。

クランピングフレームは、輸送時に燃料集合体の支持格子及び上部ノズルを固縛するために使用する。

ショックマウントフレームは輸送時、クロスフレームを固定している。このショックマウントフレームはショックマウントを介して輸送容器内に取付けている。

外殻は、上蓋及び下部容器からなり、各容器の外筒と内筒の中空部には、断熱材及び緩衝材として作用する \square を充填している。

円筒状をした外殻は水密構造となっており、その外面は雨水の溜りにくい構造であり、また、輸送時における容器吊上げのため、 \square にブラケットを取付けている。

\square 容器が開封された場合には、それがわかるようになっている。

A. 1. 2 設計基準

(1) 解析基準値

構造解析において用いる応力評価基準を(ロ)－第A. 1表に示す。

- (a) 通常輸送時（吊上装置，固縛装置は本基準を適用）及び一般の試験条件下で，引張応力，圧縮応力を評価する場合，その使用材料の設計降伏強さ（ S_y ）を基準とし，せん断応力に対しては，設計降伏強さ（ S_y ）の60%を解析基準とする。
- (b) 特別の試験条件下における強度評価に対しては，設計引張強さ（ S_u ）を解析基準とする。
- (c) 密封境界については，(ロ)－第A. 1表による。
- (d) 溶接部で発生する応力を評価する場合は，溶接効率を0.6とする。
- (e) 使用可能温度が明示されている材料については，その使用範囲内で使用し，その温度条件下で満足する機械的性質を解析基準とする。
- (f) その他特別な仕様があるものについては，その解析毎説明する。

(2) 負荷の組合せ条件

負荷の組合せは，設計条件に従い，各解析項目に対して(ロ)－第A. 2表及び(ロ)－第A. 3表に示すように構造の材料，温度及び安全係数などを考慮して決定する。

(3) 余裕率

数式を適用することにより，定量的に求めた結果については，次に示す余裕率（ M_s ）を用いて評価する。

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

余裕率を用いられないものは該当箇所にその基準値等を記述する。以上に述べた設計基準に従い，構造解析の条件，解析項目及び解析手法等をまとめて(ロ)－第A. 4表(1)～(10)に示す。

(ロ)－第A.1表 構造解析に用いる応力評価基準

解析項目	条 件	負荷条件	評価の基準
吊上装置	通常輸送時	・ 自 重	$\sigma < S_y$
ボルト部 防振構造部	一般の試験条件	・ 内 圧 力 ・ 衝 撃 荷 重 ・ 熱 荷 重	$\sigma < S_y$
	特別の試験条件		$\sigma < S_u$
密封境界	一般の試験条件	・ 内 圧 力 ・ 衝 撃 荷 重 ・ 熱 荷 重	$P_m < S_m$ $P_L + P_b < 1.5 S_m$
	特別の試験条件		$P_m < S_y \text{ or } \frac{2}{3} S_u$ $P_L + P_b < 1.5 S_y \text{ or } S_u$

注) σ : 解析応力 P_m : 一次一般膜応力 P_L : 局部膜応力 P_b : 曲げ応力

S_y : 設計降伏強さ S_u : 設計引張強さ $S_m = \frac{2}{3} S_y, \frac{1}{3} S_u$ (小さい方の値をとる)

(ロ) - 第 A. 2 表 設計負荷及び負荷の組合せ

○：負荷の組合せによる評価
 △：単一負荷による評価

要件	条件	解析負荷	負荷分類		重 力	圧 力	その他	
			評価位置					
A 型輸送物の要件	通常輸送時	吊 上 荷 重	吊上装置及び吊上装置取付部本体		△	—	—	
			締付ボルト		○	○	—	
		圧 力	容 器 本 体		—	△	—	
	一般の試験条件	振 動	輸 送 物	輸 送 物		—	—	△
				容 器 本 体		—	△	—
		熱 的 試 験	燃 料 棒 被 覆 管	燃 料 棒 被 覆 管		—	△	—
				輸 送 物		—	—	△
		自 由 落 下	容 器 本 体	容 器 本 体		△	—	—
				防 振 構 造 部		△	—	—
				燃 料 棒 被 覆 管		○	○	—
積み重ね試験	貫 通	容 器 本 体		△	—	—		
		容 器 本 体		—	—	△		
核分裂性輸送物の要件	一般の試験条件	水 噴 霧	輸 送 物		—	—	△	
			容 器 本 体		△	—	—	
		自 由 落 下	燃 料 棒 被 覆 管	防 振 構 造 部		△	—	—
				燃 料 棒 被 覆 管		○	○	—
				容 器 本 体		△	—	—
	積み重ね試験	貫 通	容 器 本 体		—	—	△	
			容 器 本 体		—	—	△	
	特別の試験条件	落 下 試 験 I	燃 料 棒 被 覆 管	容 器 本 体		△	—	—
				防 振 構 造 部		△	—	—
				燃 料 棒 被 覆 管		○	○	—
落 下 試 験 II		容 器 本 体		△	—	—		
熱 的 試 験		浸 漬	燃 料 棒 被 覆 管		—	△	—	
	燃 料 棒 被 覆 管			—	△	—		

(ロ) - 第A. 3表 負 荷 条 件

要件	条件	解析負荷	負荷分類		負 荷 条 件		
			評価位置	重 量	圧 力	そ の 他	
A 型輸送物の要件	通常輸送時	吊上荷重	吊上装置及び吊上装置取付部本体	$\times 3$ 倍 = <input type="text"/> N	—	—	
			締付ボルト	$\times 3$ 倍 = <input type="text"/> N	$\Delta P = *$ 50.0kPa・G	—	
		圧力	容器本体	—	$\Delta P = *$ 50.0kPa・G	—	
		振動	輸送物	—	—	—	
	一般の試験条件	熱的試験	容器本体	—	$\Delta P = *$ 50.0kPa・G	—	
			燃料棒被覆管	—	<input type="text"/> MPa・G	—	
		水噴霧	輸送物	—	—	雨量 50mm/h	
		自由落下	容器本体	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	—	—	
			防振構造部	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	—	—	
			燃料棒被覆管	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	<input type="text"/> MPa・G	—	
		積み重ね試験	容器本体	$\times 5$ 倍 + 自重	—	—	
	貫通	容器本体	—	—	6kg 軟鋼棒の落下		
	核分裂性輸送物の要件	一般の試験条件	水噴霧	輸送物	—	—	雨量 50mm/h
			自由落下	容器本体	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	—	—
防振構造部				\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	—	—	
燃料棒被覆管				\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	<input type="text"/> MPa・G	—	
積み重ね試験			容器本体	$\times 5$ 倍 + 自重	—	—	
貫通			容器本体	—	—	6kg 軟鋼棒の落下	
特別の試験条件		落下試験 I	容器本体	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	—	—	
			防振構造部	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	—	—	
			燃料棒被覆管	\times 加速度 水平落下 垂直落下 コーナ落下 <input type="text"/>	<input type="text"/> MPa・G	—	
		試験落下 II	容器本体	原型試験より評価	—	—	
熱的試験	燃料棒被覆管	—	<input type="text"/> MPa・G	—			
浸漬	燃料棒被覆管	—	0.009MPa・G	—			

* リリーフ弁最大作動差圧

記号の説明

σ : 主応力
 σ_t : 引張応力
 σ_c : 圧縮応力
 τ : せん断応力
 τ_t : ねじり応力
 F : 荷重
 P : 圧力
 A : 断面積

(ロ) 第一A.4表(1) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	解析項目	設計条件				設計方法			備考	
		参照図	材質	温度	設計種類	安全係数	荷要素	適用数式または要素		解析基準
A型輸送物	化学的及び電気的応力	(ロ) 第一A.10表	—	—	腐食	—	活性	活性の有無 水分の有無	活性: 無 水分: 無	
	化学的及び電気的応力	(ロ) 第一A.11表	(ロ) 第一A.12表参照	-20°C	材質	—	低温脆性	低温脆性の有無	低温脆性の有無及び使用可能範囲	
	密封装置 燃料棒	(イ) 第一C.21図	シリコンウム合金 (シ) ルコイ-4, MDA 及びZIRLO	73°C	—	—	密封機能	密封機能の有無	密封機能有	温度 73°Cは熱解析(B.4.2参照)で得られた輸送物最高温度である。 以下同じ。
吊上装置 1. 吊上装置 (1) ブラケット孔部 (2) ブラケット溶接部	(ロ) 第一A.6図 (ロ) 第一A.7図	炭素鋼 炭素鋼	73°C 73°C	輸送物最大重量 輸送物最大重量	3 3	せん断力 合成応力	$\tau = \frac{F}{A}$ $\sigma = \frac{1}{2} \left(\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \right)$ $\left(\sigma_b = \left(\frac{M}{Z} + \frac{P}{A} \right) \right)$ $\left(\tau = \frac{P}{A} \right)$	$0.6 S_y$ ηS_y	σ_b = 曲げ+膜応力 M = 曲げモーメント Z = 断面係数 η = 溶接効率 0.6	

記号の説明

σ : 主応力
 σ_t : 引張応力
 σ_c : 圧縮応力
 τ : せん断応力
 τ_t : ねじり応力
 F : 荷重
 P : 圧力
 A : 断面積

(ロ) - 第A. 4表(2) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	解析項目	設計条件			解析方法		備考				
		参照図	材質	温度	設計種類	安全係数		荷要素	適用式または要素	解析基準	
A型輸送時	(3) 外筒	(ロ) - 第A. 8 図	炭素鋼	73°C	輸送物最大重量	3	合成応力	$\sigma = \frac{1}{2} [\sigma_\phi + \sigma_x + \{(\sigma_\phi - \sigma_x)^2 + 4\tau^2\}^{1/2}]$ $(\sigma_x = \frac{N_x}{T} \pm \frac{6M_x}{T^2})$ $(\sigma_\phi = \frac{N_\phi}{T} \pm \frac{6M_\phi}{T^2})$ $(\tau = \frac{V}{4CT})$	S_y	V = 荷重 σ_x = 軸方向応力 σ_ϕ = 円周方向応力 N = 膜力 T = 外筒板厚 + 座板板厚 C = 荷重領域の長さ	
	2. 縮付ボルト										
	(1) 縮付ボルト	(ロ) - 第A. 11 図	炭素鋼	73°C	輸送物最大重量 + 最大内圧	3	合成応力	$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_t + \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2})$ $(\sigma_t = \frac{P_a}{nA})$ $(\tau = \frac{T_f}{Z_p})$	S_y	P_a = 縮付力 n = ボルト本数 T_f = トルク荷重 Z_p = ねじり断面係数	
(2) クロスピン	(ロ) - 第A. 12 図	炭素鋼	73°C	輸送物最大重量 + 最大内圧	3	合成応力	$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2})$ $(\sigma_b = \frac{M}{Z})$ $(\tau = \frac{P_a}{2nA})$	S_y			
固縛装置											

記号の説明

σ : 主応力
 σ_t : 引張応力
 σ_c : 圧縮応力
 τ : せん断応力

τ_t : ねじり応力
 F : 荷重
 P : 圧力
 A : 断面積

(ロ) - 第一A.4表(3) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	設計条件				解析方法		備考		
	参照図	材質	温度	設計種類	安全係数	荷要素		適用数式または要素	解析基準
圧力筒	—	炭素鋼()	73°C	Δ P = 0.05MPa	1	引張応力	$\sigma_n = \frac{PD}{2t}$	S _y ・η	D = 内径 t = 肉厚
	(ロ) - 第一A.14図	炭素鋼()	73°C	振動	1	共振	$f = \frac{a_1}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{w \cdot \ell^4}}$	10Hz以上	f = 固有振動数 a ₁ = 第1次t-t係数 E = 縦弾性係数 (N/mm ²) ℓ = 輸送容器全長 w = 単位長さ当りの重量 I = 断面2次モーメント
熱的試験 応力計算 (1) 外筒 (2) ドームブレード (3) 燃料棒被覆管 (4) 燃料棒溶接部	(ロ) - 第一A.20表	炭素鋼()	73°C	内圧	1	引張応力	$\sigma_a = \frac{PD}{2t\eta}$	S _y	
	(ロ) - 第一A.20表	炭素鋼()	73°C	内圧	1	組合せ応力	平板のたわみ式	S _y	
	(ロ) - 第一A.15図	ジルコニウム合金 (シ'ルコロイ-4, MDA 及びZIRLO)	73°C	内圧	1	組合せ応力	薄板の円筒の式	S _m	
	(ロ) - 第一A.15図	ジルコニウム合金 (シ'ルコロイ-4, MDA 及びZIRLO)	73°C	内圧	1	組合せ応力	薄板の円筒の式	S _m	溶接効率 1.0
水噴霧	—	—	73°C	水噴霧	1	吸水	給水性 水切り性	無 有	

記号の説明

σ : 主応力
 σ_t : 引張応力
 σ_c : 圧縮応力
 τ : せん断応力
 τ_t : ねじり応力
 F : 荷重
 P : 圧力
 A : 断面積

(ロ) - 第A. 4表(4) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	解析項目	設計			条件			解析方法		備考
		参照図	材質	温度	設計種類	安全係数	負荷要素	適用数式または要素	解析基準	
一般の試験輸送物条件	自由落下									
	(1) 1.2m 水平落下	(ロ) - 第A. 17 図	-	-	1.2m 水平落下	1	変形量	$\delta_o = \delta_o' - (\delta H_i + \delta H_o)$	<input type="checkbox"/> mm	δ_o' = 変形前の厚さ δH_i = 内側変形量 δH_o = 外側変形量
	(イ) 外殻の変形量									
	(ロ) 応力計算									
	(i) クラックの発生	(ロ) - 第A. 18 図	炭素鋼 <input type="checkbox"/>	73°C	1.2m 水平落下	1	曲げ応力	$\sigma_b = \frac{M}{Z}$	S_y	
	(ii) スキン	(ロ) - 第A. 19 図	ボロンステルス鋼	73°C	1.2m 水平落下	1	曲げ応力	周囲単純支持平板の式	S_y	
	(iii) 燃料棒被覆管	(ロ) - 第A. 21 図	ジ'ルコニウム合金 (ジ'ルコイ-4, MDA 及び ZIRLO)	73°C	1.2m 水平落下	1	組合せ応力	両端支持梁の式	1.5 S_m	
	(2) 1.2m 上部垂直落下	(ロ) - 第A. 23 図	-	-	1.2m 上部垂直落下	1	変形量	$\delta_o = \delta_o' - (\delta H_i + \delta H_o)$	<input type="checkbox"/> mm	δ_o' = 変形前の厚さ δH_i = 内側変形量 δH_o = 外側変形量
	(イ) 外殻の変形量									
	(ロ) 応力計算									
(i) ジ'ヤッキスクリュー	(ロ) - 第A. 24 図	炭素鋼 <input type="checkbox"/>	73°C	1.2m 上部垂直落下	1	せん断応力	ねじ山のせん断破壊の式	0.6 S_y		

記号の説明

σ : 主応力
 σ_t : 引張応力
 σ_c : 圧縮応力
 τ : せん断応力
 τ_t : ねじり応力
 F : 荷重
 P : 圧力
 A : 断面積

(ロ) 一第A.4表(5) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	設計条件				解析方法		備考			
	参照図	材質	温度	設計種類	安全係数	荷要素		適用数式または要素	解析基準	
一般の輸送物条件	(i) 固定枠	(p) 一第A.25図	炭素鋼	73°C	1.2m 上部垂直落下	1	合成応力	$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2})$ $(\sigma_b = \frac{M}{Z})$ $(\tau = \frac{W}{A})$	S_y	
	(ii) 固定枠 ねじ部	(p) 一第A.26図	炭素鋼	73°C	1.2m 上部垂直落下	1	せん断 応力	ねじ山のせん断破壊の式	$0.6 S_y$	
	(iv) スキン	(p) 一第A.27図	ボロンステン レス鋼	73°C	1.2m 上部垂直落下	1	圧縮応力	$\sigma_c = \frac{m \cdot N}{A}$	S_y	m = 重量
	(v) 燃料棒 被覆管	(p) 一第A.28図	ジルコニウム合金 (Zircaloy-4, MDA 及びZIRLO)	73°C	1.2m 上部垂直落下	1	圧縮応力	$\sigma_c = \frac{-P}{A}$	S_m	N = 加速度 m_t = 重量
	(3) 1.2m 下部 垂直落下						座屈	$P = m_t \times N$	P_k	
(1) 外殻の 変形量	(p) 一第A.30図	-	-	-	1.2m 下部垂直落下	1	変形量	$\delta_o = \delta_o' - (\delta H_i + \delta H_o)$	<input type="text"/>	δ_o' = 変形前の厚さ δH_i = 内側変形量 δH_o = 外側変形量

記号の説明

σ : 主応力
 σ_t : 引張応力
 σ_c : 圧縮応力
 τ : せん断応力
 τ_t : ねじり応力
 F : 荷重
 P : 圧力
 A : 断面積

(ロ) 一第A.4表(6) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	設計条件				解析方法		備考	
	参照図	材質	温度	設計		適用数式または要素		解析基準
				種類	安全係数			
一般の輸送物条件	(p) 応力計算 (i) ピポットマウント付ボルト	(p) 一第A.31図 炭素鋼	73°C	1.2m下部垂直落下	1	合成応力	S_y	δ_o' = 変形前の厚さ δH_i = 内側変形量 δH_o = 外側変形量 τ_{cr} = 外筒のせん断強さ
	(ii) スケルトン組立体	(p) 一第A.32図 ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4)	73°C	1.2m下部垂直落下	1	圧縮応力	S_y	
	(4) 1.2m上部落下	(p) 一第A.34図	-	1.2m上部コナ落下	1	変形量	\square mm	
	(5) 1.2m下部落下	(p) 一第A.34図	-	1.2m下部コナ落下	1	変形量	\square mm	
	積み重ね試験 外筒圧縮貫通 外筒 角又は縁落下	(p) 一第A.35図 炭素鋼 (p) 一第A.36図 炭素鋼	73°C 73°C	輸送物の5倍荷重 軟鋼棒の落下衝撃	1 1	曲げ応力 吸収エネルギー	$\sigma_b = \frac{M}{Z}$ $E_2 = \tau_{cr} \cdot \pi d \cdot \frac{1}{2} \cdot t^2$	

記号の説明

σ : 主応力 τ_t : ねじり応力
 σ_t : 引張応力 F : 荷重
 σ_c : 圧縮応力 P : 圧力
 τ : せん断応力 A : 断面積

(ロ) 一第A.4表(7) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法


要件	設計条件				解析方法		備考	
	参照図	材質	温度	設計種類	安全係数	荷要素		適用数式または要素
水噴霧								
自由落下								
積み重ね試験								
貫通								

—— 前述の一般の試験条件に対する解析結果を引用して評価

記号の説明

σ : 主応力 τ_t : ねじり応力
 σ_t : 引張応力 F : 荷重
 σ_c : 圧縮応力 P : 圧力
 τ : せん断応力 A : 断面積

(ロ) 一第A.4表(9) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	解析項目	参照図	材質	温度	設計条件			解析方法		備考
					種類	安全係数	負荷要素	適用数式または要素	解析基準	
特 別	(iii) スケルトン組立 体	(p) 一第A.32表	ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4)	73°C	9m下部垂直落下	1	圧縮応力	$\sigma_c = \frac{\sum m}{n} \frac{N}{A}$	S_u	
	(iv) 燃料棒被覆管	(p) 一第A.32表	ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4, MDA 及びZIRLO)	73°C	9m下部垂直落下	1	圧縮応力 座屈	$\sigma_c = \frac{P}{A}$ $P = m \cdot N$	S_u P_k	
輸 送 物 件	水平落下 (i) 外殻の変形量	(p) 一第A.42図	—	—	9m水平落下	1	変形量	$\delta_o = \delta_o' - (\delta H_i + \delta H_o)$	δ_o'	δ_o' = 変形前の厚さ δH_i = 内側変形量 δH_o = 外側変形量
	(p) 応力計算 (i) クラック グロウ (ii) スキン	(p) 一第A.32表 (p) 一第A.32表	炭素鋼  ボロンステ ンレス鋼	73°C 73°C	9m水平落下 9m水平落下	1 1	曲げ応力 曲げ応力	$\sigma_b = \frac{M}{Z}$ 周囲単純支持平板の式	S_u S_u	
	(iii) 燃料棒被覆管	(p) 一第A.32表	ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4, MDA 及びZIRLO)	73°C	9m水平落下	1	組合せ応力	単純支持梁の式	S_u	

記号の説明

σ : 主応力 τ_t : ねじり応力
 σ_t : 引張応力 F : 荷重
 σ_c : 圧縮応力 P : 圧力
 τ : せん断応力 A : 断面積

(ロ) 一第A.4表(10) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	設計条件				解析方法		備考		
	参照図	材質	温度	設計種類	安全係数	荷要素		適用数式または要素	解析基準
上部コーナーナ落 下	(ロ)一第A.43図	—	—	9mコーナーナ落下	1	変形量	$\delta_o = \delta_o' - (\delta H_1 + \delta H_o)$ 応力計算	δ_o'	δ_o' = 変形前の厚さ σH_1 = 内側変形量 σH_o = 外側変形量
	(ロ)一第A.44図	—	—	9mコーナーナ落下	1	変形量	水平成分及び垂直成分に分解して解析する。 この時の要素及び適用数式はA.5.3と同じ。	δ_o'	
落下試験II 貫通	(ロ)一第A.31表	炭素鋼 (<input type="text"/>)	73°C	1m落下衝突	1	原型試験の結果を用いて評価		貫通有無	
	—	—	<input type="text"/> °C	内圧	1	組合せ応力	薄肉円筒の式	S_u	
浸漬	—	—	73°C	0.009MPa・G	1	外圧	密封機能の有無	<input type="text"/> MPa・G	

A. 2 重量及び重心

輸送物の重量は(ロ)－第A. 5表の通りである。

(ロ)－第A. 5表 各部の最大重量

単位：kg

構成機器		収納物の型式		14×14 型	14×14 型	15×15 型	17×17 型
				10 フィート	12 フィート	12 フィート	12 フィート
収 納 物	燃料集合体/1 体						
	非核燃料炉心構成品/1 体						
	収納物 (2 体)						
輸 送 容 器	防 構 造 振 部	ショックマウントフレーム					
		クロスフレーム					
		ショックマウント					
外 殻	上 蓋						
	下 部 容 器						
	補 助 器 材						
輸送物最大重量							

注：燃料棒集合体 1 体あたりの重量は、各タイプのうちでの最大重量を示す。

輸送物の重心位置は(ロ)－第A. 1 図に示す。

A. 3 材料の機械的性質

解析に用いる材料の機械的性質の一覧を(ロ)－第A. 6表に示す。

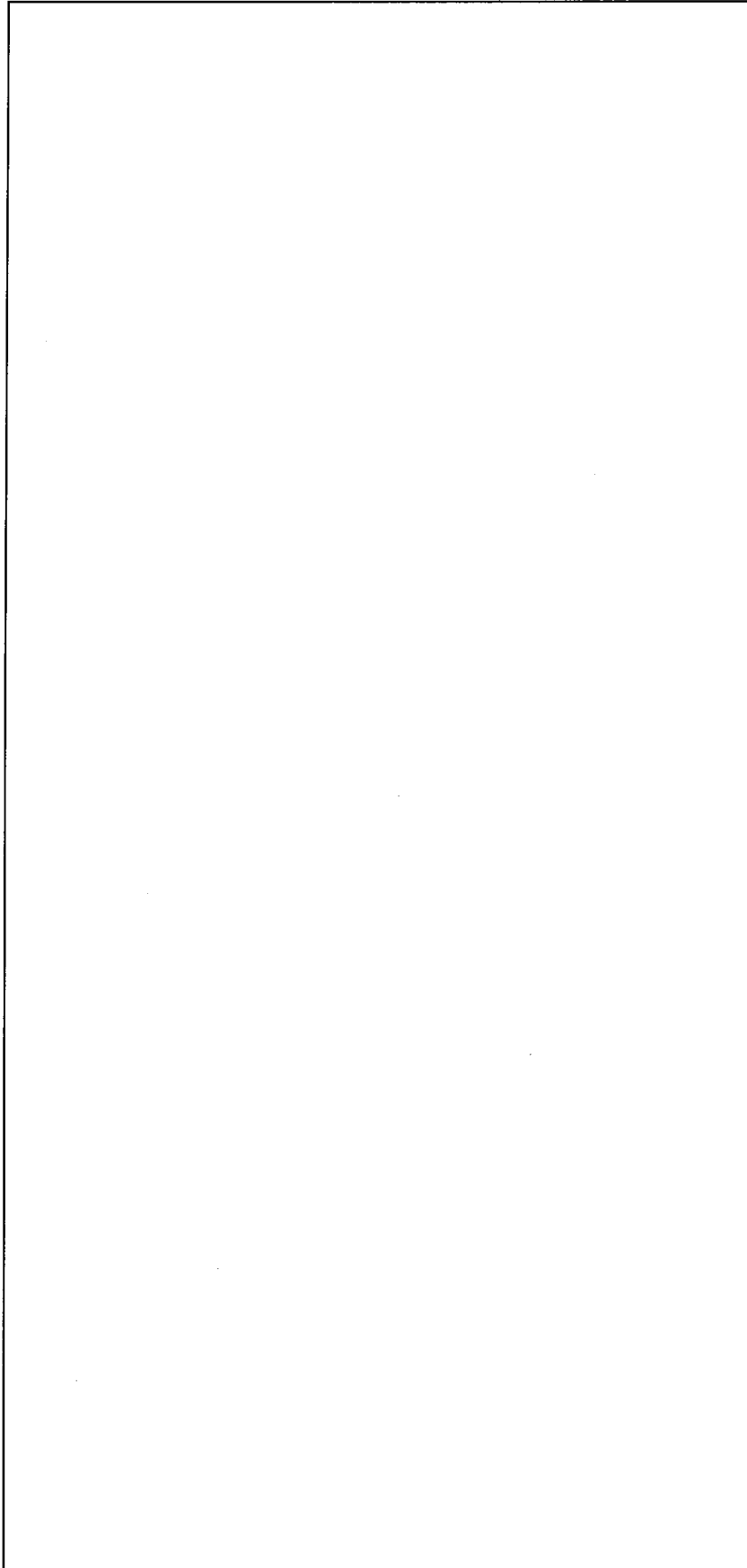
解析基準値となる材料の機械的性質を(ロ)－第A. 7表に示す。

炭素鋼 (), ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4, MDA及びZIRLO) の温度に対する機械的性質の変化を(ロ)－第A. 2図, (ロ)－第A. 3図及び(ロ)－第A. 4図に示す。

(ロ)－第A. 2図, (ロ)－第A. 3図及び(ロ)－第A. 4図からわかるように、各々温度上昇に対して降伏応力は減少する傾向にある。一般の試験条件では、熱解析の結果より輸送物の最高温度は73℃である。そこで、解析基準値として、安全側に80℃の設計降伏強さの値を用いることとする。

尚、緩衝材に使用している()の圧縮変形応力を(ロ)－第A. 8表に示す。

また、防振構造部に使用したショックマウントの動的ばね定数を(ロ)－第A. 9表に示す。



(口) - 第A. 1 図 輸送物の重心

(口) - 第A. 6表 材料の機械的性質

材 料	材 質	主要適用部品	設計応力強さ (N/mm^2)	設計降伏強さ (N/mm^2)	設計引張強さ (N/mm^2)	縦 弾 性 係 数 E (N/mm^2)	圧縮変形圧力 σ_c (N/mm^2)
炭 素 鋼	[]	容 器 外 筒	—	(口) - 第A. 2 図	(口) - 第A. 2 図	(口) - 第A. 7 表	—
	[]	防 振 構 造 部	—	(口) - 第A. 3 図	(口) - 第A. 3 図	(口) - 第A. 7 表	—
ジルコニウム 合 金	ジルカロイ-4, MDA 及び ZIRLO	燃料棒被覆管	(口) - 第A. 4 図	(口) - 第A. 4 図	(口) - 第A. 4 図	(口) - 第A. 7 表	—
木 材	[]	緩 衝 材	—	—	—	—	(口) - 第A. 8 表
ボロンステ ル ス 鋼	—	防 振 構 造 部	—	(口) - 第A. 7 表	(口) - 第A. 7 表	—	—

炭素鋼 [] : 参考文献 [1]
 炭素鋼 [] : " [1]
 ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4) : " [2] [3]
 ジルコニウム合金 (MDA, ZIRLO) : " [18]
 木材 [] : " [4]
 ボロンステルス鋼 : " [17]

(ロ) 一第A. 7表 設計基準値となる材料の機械的性質

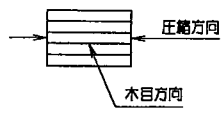
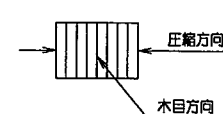
	評 価	材 料	T	S_m	S_y	S_u	E
1	容 器 外 筒 防 振 構 造 部	炭素鋼 <input type="text"/>	80				
2	締 付 ボ ル ト	炭素鋼 <input type="text"/>	80				
3	燃 料 棒 被 覆 管	ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4)	80				
		(MDA)	80				
		(ZIRLO)	80				
4	防 振 構 造 部	ボロン ステンレス鋼	80				

記号の説明

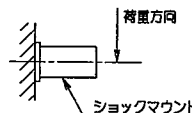
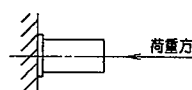
- T : 温度 (°C)
 S_m : 設計応力強さ (N/mm²)
 S_y : 設計降伏強さ (N/mm²)
 S_u : 設計引張強さ (N/mm²)
E : 縦弾性係数 ($\times 10^5$ N/mm²)

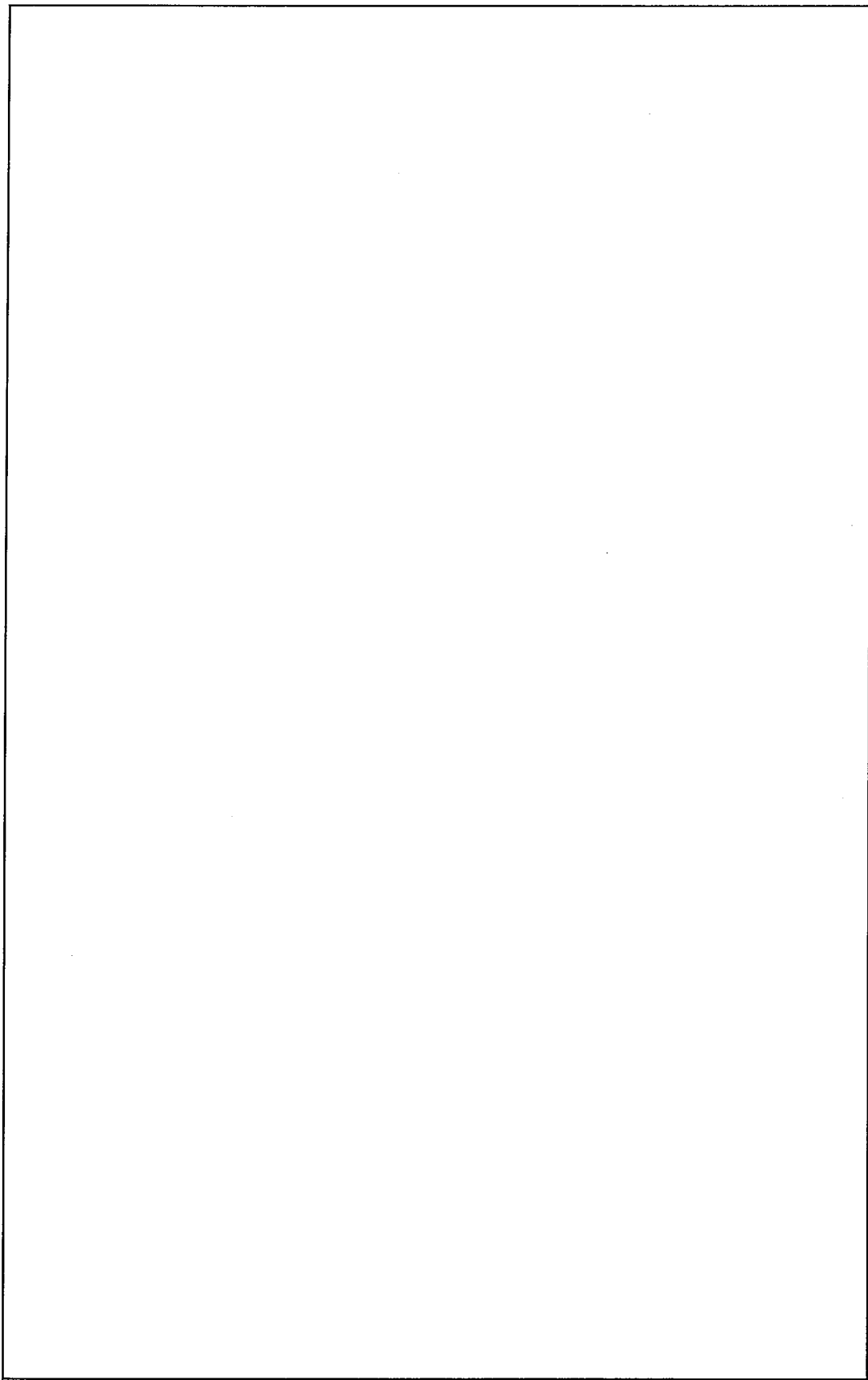
ジルコニウム合金である の解析基準値に用いられる
 S_u 及び S_m は の強度より大きいことから の
機械的性質で評価を行う。

(ロ) 一第A. 8表 木材 () の圧縮変形応力^[4]

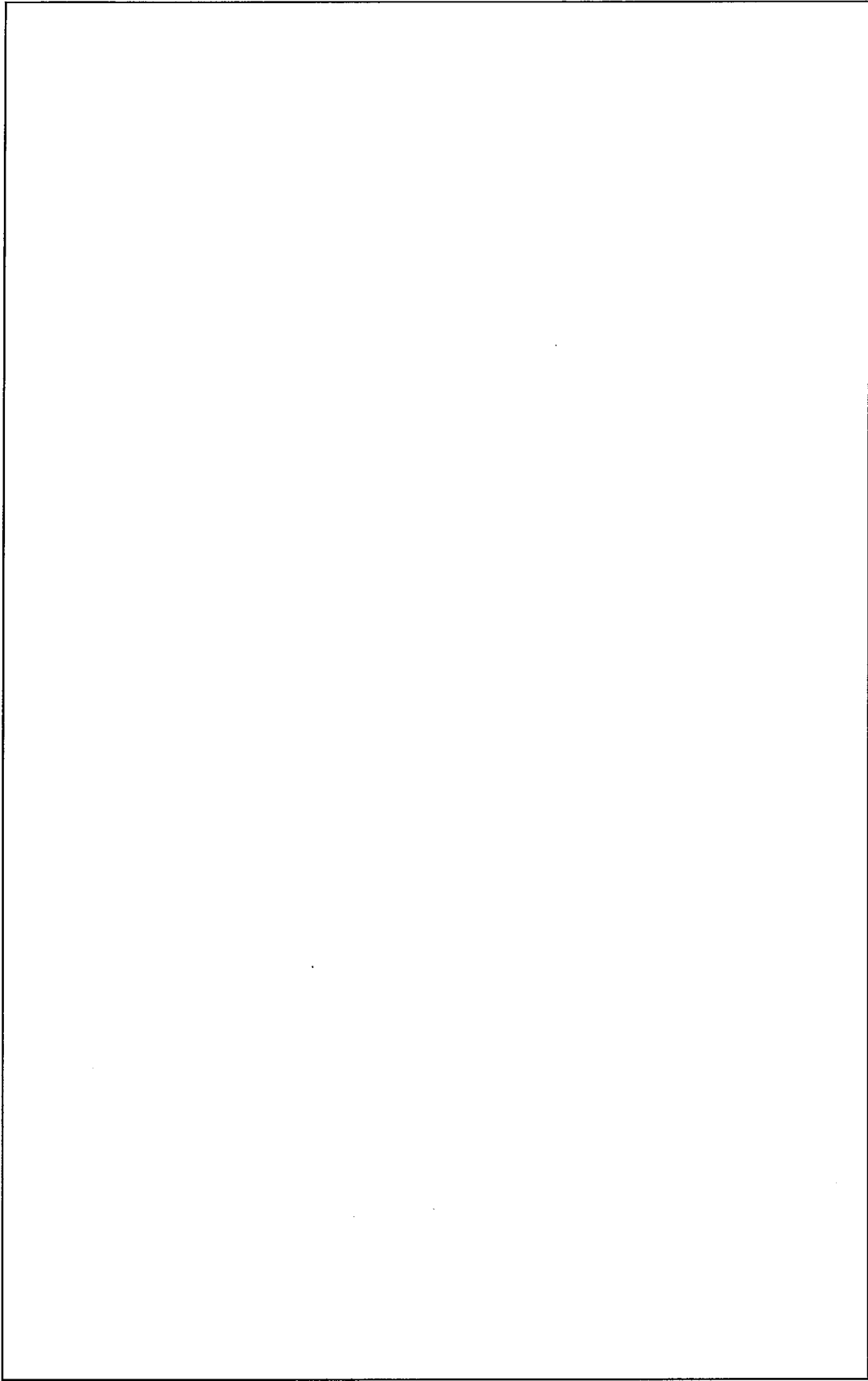
木目方向	圧縮変形応力 σ_c (N/mm ²)	備 考
木目方向に 平行方向圧縮	<input type="text"/>	
木目方向に 直角方向圧縮	<input type="text"/>	

(ロ) 一第A. 9表 ショックマウント動的ばね定数^[5]

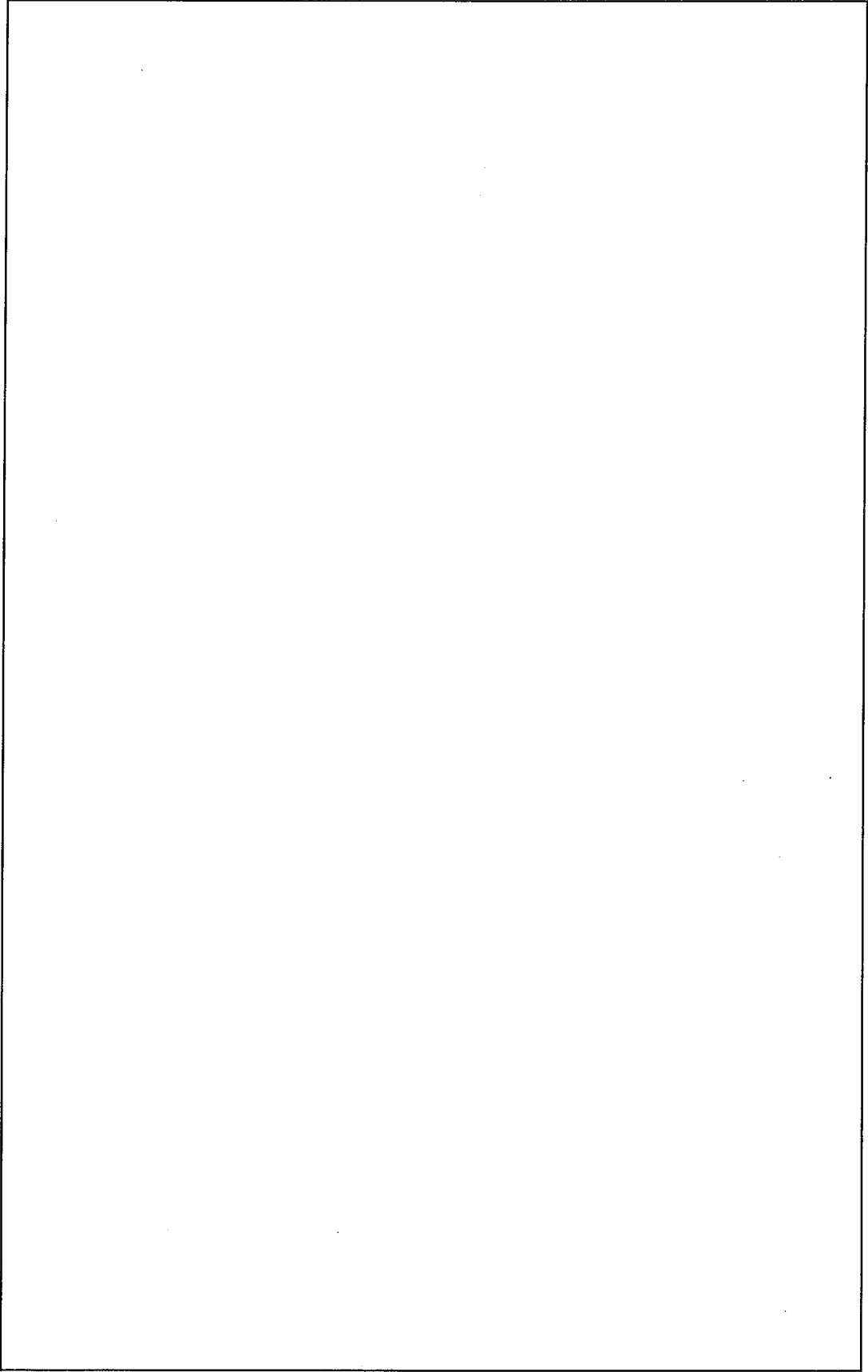
荷 重 方 向	動的ばね定数 K (N/mm)	備 考
せん断方向	<input type="text"/>	
圧縮方向	<input type="text"/>	



(ロ) - 第A. 2図 炭素鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化



(ロ)－第A.3図 炭素鋼 () の温度に対する機械的性質の変化



(ロ)一第A. 4図 ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4, MDA, ZIRLO) の温度に対する機械的性質の変化

A. 4 核燃料輸送物の要件

A. 4. 1 化学的及び電氣的反応

輸送物中の相互接触する異種材料を(ロ)－第A. 10表に示す。

輸送物に使用されている材料は空气中で化学的に安定した材料であり、異種材料の接触により化学的及び電氣的に反応することはない。

(ロ)－第A. 10表 接触する異種材料の一覧

接 触 物	接 触 材 料
外筒 } 内筒 } —緩衝材	炭素鋼—木 材
外筒 } 内筒 } —Oリング	炭素鋼— <input type="text"/> ゴム
内筒 } ショックマウントフレーム } —ショック マウント	炭素鋼— <input type="text"/> ゴム
スキン—クロスフレーム	ボロンステンレス鋼—炭素鋼
スキン—クッション	ボロンステンレス鋼
ボトムプレート—クッション	— <input type="text"/> ゴム
保護ボード—クッション	炭素鋼— <input type="text"/> ゴム
保護ボード—保護シート	カードボード
燃料集合体	— <input type="text"/> ゴム
上部ノズル } 下部ノズル } —保護シート	カードボード—ポリエチレン
燃料被覆管—保護シート	ステンレス鋼—ポリエチレン
燃料被覆管—燃料ペレット	ジルコニウム合金
	(ジルカロイ-4, MDA又はZIRLO)
	—ポリエチレン
	ジルコニウム合金
	(ジルカロイ-4, MDA又はZIRLO)
	—二酸化ウラン

A. 4. 2 低温強度

(ロ)－第A.11表^[9]に、各地区の最低気温を示す。

(ロ)－第A.11表において、寿都地区の最低気温が -15.7°C と最も低い。これより設計温度は -20°C とした。

(ロ)－第A.11表 各地区の最低気温

	最低気温 (°C)	地名
川内	-6.7	鹿児島
玄海	-8.2	福岡
伊方	-8.3	松山
高浜 大飯 美浜 敦賀	-15.1	福井
泊	-15.7	寿都

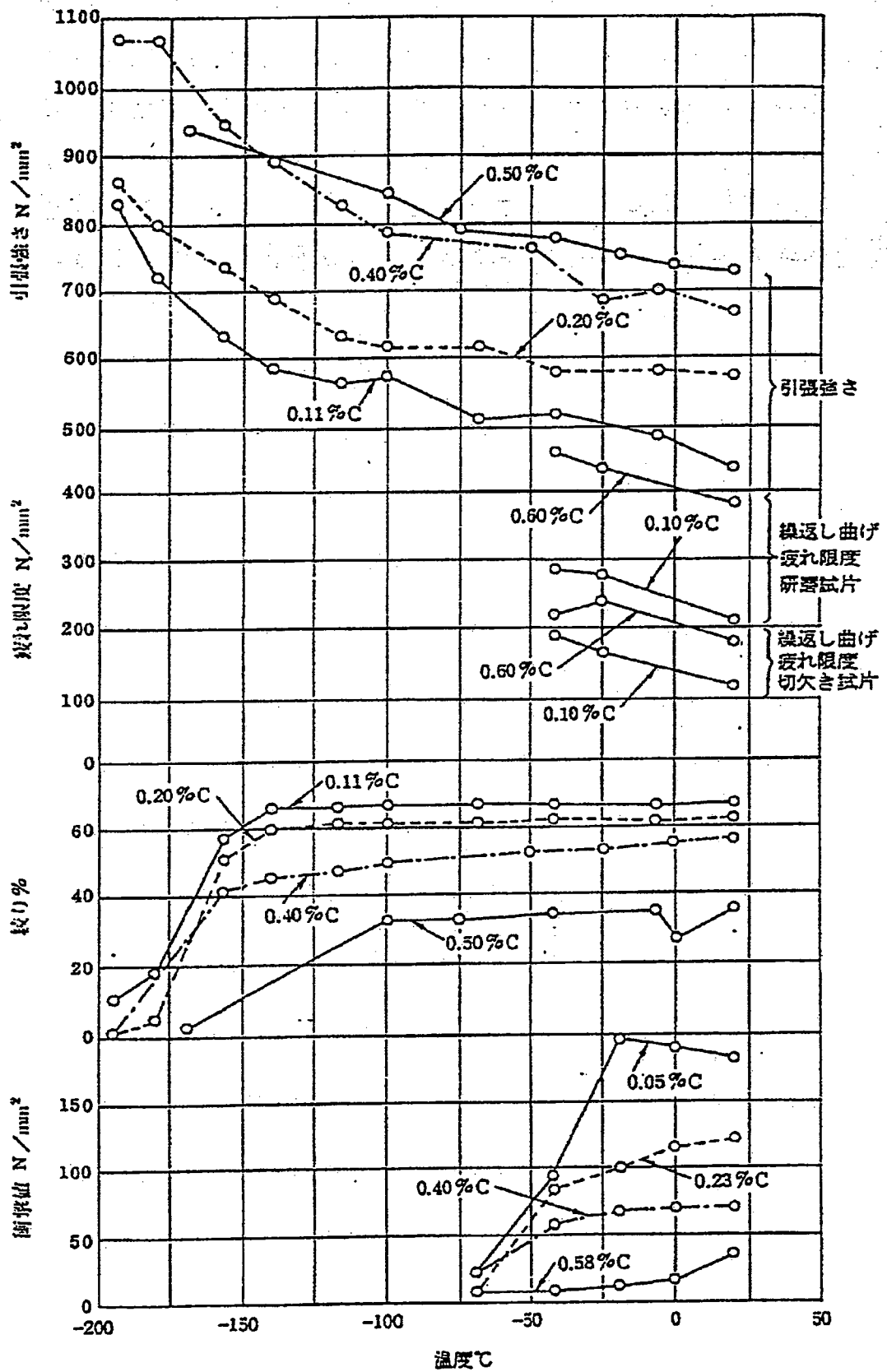
輸送物を構成する主要部材料を(ロ)－第A.12表に示す。また炭素鋼の低温下の機械的性質^[10]を(ロ)－第A.5図に示す。

(ロ)－第A.12表に示すように、輸送物各部の温度が、 -20°C となっても使用材料の脆性遷移温度、または最低使用温度以上であるため、低温強度に対して問題はない。

(ロ)－第A.12表 主要材料一覧

部材	材料	規格	備考
外殻	炭素鋼		C： <input type="text"/> %以下
			遷移温度： -30°C 以下
ゴム	使用温度範囲： <input type="text"/> $^{\circ}\text{C}$ ^[16]		
防振構造部	炭素鋼		C： <input type="text"/> %以下
			遷移温度： -30°C 以下
ゴム	使用温度範囲： <input type="text"/> $^{\circ}\text{C}$ ^[16]		
燃料集合体	ステンレス鋼		面心立方晶構造を有するため低温脆性を示さない
	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4, MDA 及び ZIRLO	遷移温度： -25°C 以下

(ロ)―第A.12表より、輸送物を構成する炭素鋼の炭素含有率は \square %以下であり、(ロ)―第A.5図で明らかなように -20°C の低温下では脆性破壊は発生しない。ステンレス鋼、ジルコニウム合金も -20°C の低温下において脆性破壊は発生しない。また、ゴムについても使用可能温度は $\square^{\circ}\text{C}$ であり -20°C の低温下でもその機能を果たす。



(口) - 第A. 5図 炭素鋼の低温における機械的性質

A. 4. 3 密封装置

_____みだりに輸送容器を開封されないようになっており、開封された場合には、それがわかるようになっている。

また、_____は_____本の_____により_____に締付けられ、_____によってロックされているので容易にゆるむことがなく、偶然にまたは輸送物の内圧によって開くことはない。燃料棒が放射性収納物の密封境界となっているので当該輸送容器には、放射性収納物が外に出る可能性のある弁はついていない。なお、輸送容器内の空気圧が上昇することを避けるため、圧力調整用としてリリースバルブがついている。当該輸送容器には、密封装置としての構成部品はなく、輸送容器から取り外せる密封装置はついていない。

A. 4. 4 吊上装置

本輸送物の吊上装置の構造は(ロ)―第A. 6図に示す通りであり、その名称をブラケットという。ブラケットは、に溶接され、吊具取付部は鋼板を組合せmmの厚さにして、その部分に穴を開けたものである。

ブラケットは輸送物を機械的手段により、安全に取扱える構造になっており、急激な吊上げに対しても耐えるよう輸送物の総重量の3倍の荷重がかかった時でも十分安全な構造となっている。

ブラケットの下記の部材について解析し、強度を検討する。尚、評価は最も厳しい条件である輸送物重量が最大になるよう17×17型燃料(非核燃料炉心構成品を含む場合)の重量で行う。

なお、ロ章Fを踏まえ、A. 10. 9項にて疲労評価を行い、健全性を確認している。

(1) 吊上装置

- (a) ブラケット孔部 (せん断応力)
- (b) ブラケット溶接部 (曲げ応力+膜応力)
- (c) 外筒 (曲げ応力+せん断応力)

(2) 締付ボルト

- (a) 締付ボルト (引張応力+せん断応力)
- (b) クロスピン (曲げ応力+せん断応力)

この時、解析負荷荷重は以下のようにする。

解析負荷荷重 (W_a) は吊上最大重量の3倍とする。

$$W_a = m \times 3 \times g$$

W_a : 解析負荷荷重 (N)

m : 輸送物最大重量 (kg)

$$W_a = \text{} \times 3 \times 9.81$$
$$= \text{} \text{ (N)}$$

本輸送物の吊上時作用する荷重(P)は、ブラケットヶ所を使用するので、ブラケット1個の負担する荷重(P)は、解析負荷荷重(W_a)の1/である。

$$P = \frac{W_a}{N}$$

P : 荷重 (N)

W_a : 解析負荷荷重 (N)

N : 使用するブラケットの個数 (個)

$$P = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \quad (\text{N})$$

この荷重(P)が吊上時にブラケットに加わった時に部材に発生する応力を求め、各部材の強度を検討する。

A. 4. 4. 1 吊上装置

吊上げ時、吊上装置であるブラケットに作用する力は、(ロ)－第A. 6図に示すように、吊上げワイヤ角度45°で作用する。

(1) ブラケット孔部のせん断応力

ブラケットに発生するせん断応力(τ)を次式により求める。

$$\tau = \frac{F}{A}$$

F : ブラケットに働く荷重 $\frac{P}{\sin 45^\circ}$ (N)

P : 荷重 (N)

A : ブラケットのせん断を受ける面積 (mm²)

$$A = h \times t$$

h : せん断を受ける断面の長さ

$$h = \text{}$$

$$= \text{} \quad (\text{mm})$$

t : 板厚 (mm)

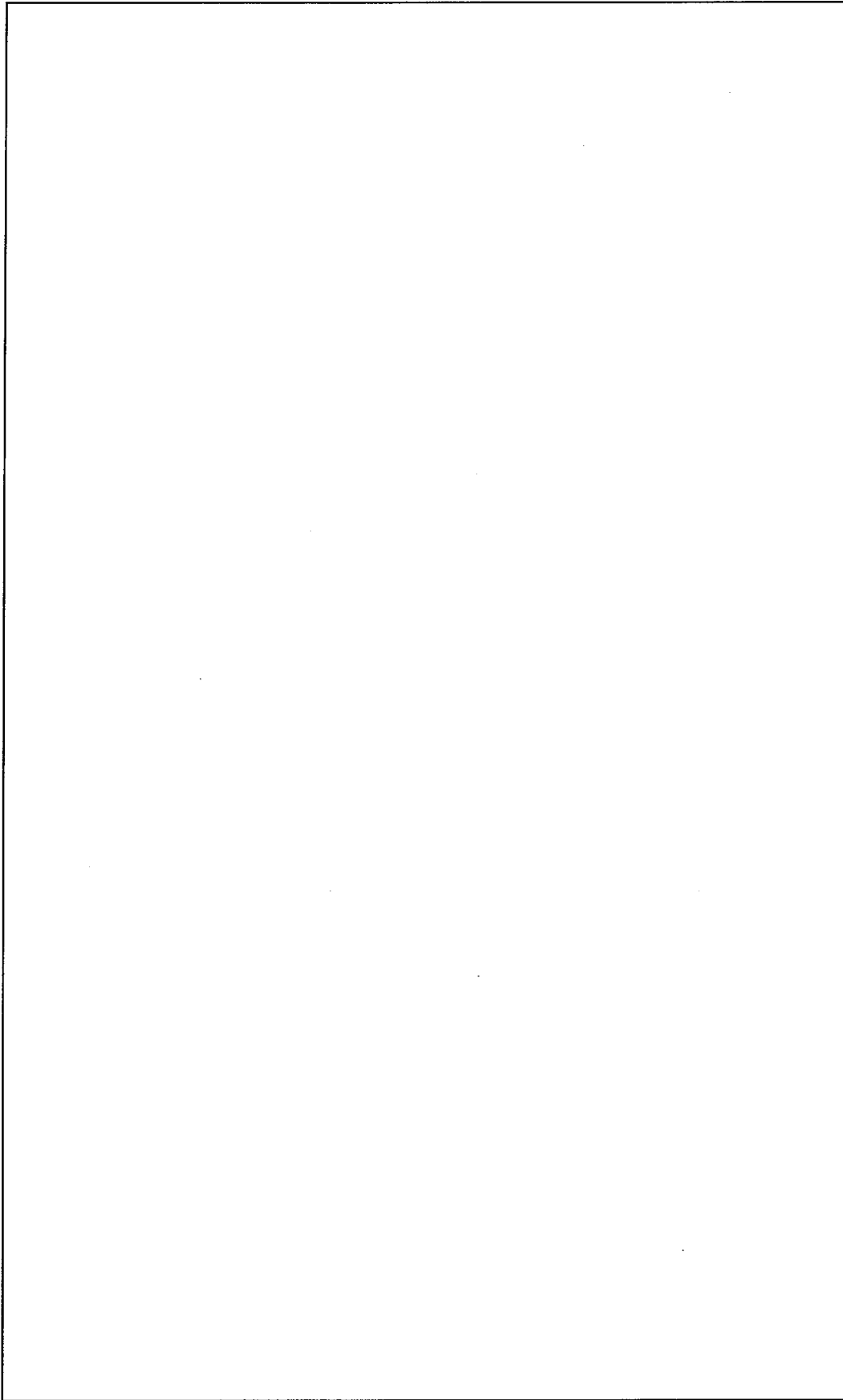
$$A = \text{} \times \text{}$$

$$= \text{} \quad (\text{mm}^2)$$

数値を代入して

$$\tau = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ブラケット () の設計降伏強さ $S_y = \text{}$ N/mm²を用いる。また、せん断応力であるので0.6の係数を考慮すると $0.6 \times S_y = 0.6 \times \text{} = \text{}$ N/mm²となる。従って余裕率M_sは、



单位: mm

(口)-第A.6图 吊上装置

$$M_s = \frac{0.6 S_y}{\tau} - 1$$

$$= \frac{\square}{\square} - 1$$

$$= \square$$

余裕率が正であるので、ブラケット孔部はせん断により破断することはない。

(2) ブラケット溶接部

ブラケット溶接部に発生する応力 (σ_b) は、曲げ応力と膜応力の和となり、次式より求める。溶接部形状を(ロ)－第A. 7図に示す。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} + \frac{P}{A}$$

M : 溶接部に生じる曲げモーメント

$$M = F \cos 45^\circ \times \ell_1$$

F : ブラケットに働く荷重 = $\frac{P}{\sin 45^\circ}$ (N)

P : 荷重 = \square (N)

ℓ_1 : モーメントアーム = \square (mm)

$$M = \frac{\square}{\sin 45^\circ} \times \cos 45^\circ \times \square$$

$$= \square \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

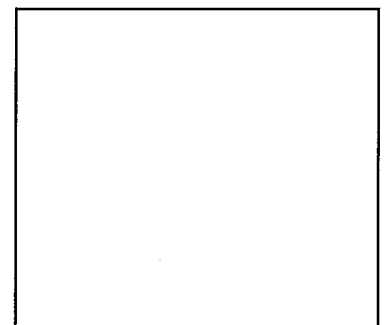
I : ブラケットの溶接部の断面2次モーメント

Z : ブラケットの溶接部の断面係数

$$I = \frac{1}{12} \left\{ \left(b_1 + \frac{2a}{\sqrt{2}} \right) \times \left(h_1 + \frac{2a}{\sqrt{2}} \right)^3 - b_1 \times h_1^3 \right\}$$

$$= \frac{1}{12} \left\{ \left(\square + \frac{2 \times \square}{\sqrt{2}} \right) \times \left(\square + \frac{2 \times \square}{\sqrt{2}} \right)^3 - \square \times \square^3 \right\}$$

$$= \square \text{ (mm}^4\text{)}$$



(ロ)－第A. 7図 ブラケット溶接部

$$Z = \frac{I}{\frac{h_1}{2} + \frac{a}{\sqrt{2}}} = \frac{\square}{\frac{\square}{2} + \frac{\square}{\sqrt{2}}}$$

$$= \square \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$a : \text{溶接脚長} = \square \text{ (mm)}$$

$$b_1 : \text{ブラケット幅} = \square \text{ (mm)}$$

$$h_1 : \text{ブラケット長さ} = \square \text{ (mm)}$$

A : ブラケット溶接部の面積

$$\begin{aligned} A &= \left(b_1 + \frac{2a}{\sqrt{2}} \right) \left(h_1 + \frac{2a}{\sqrt{2}} \right) - b_1 \times h_1 \\ &= \left(\square + \frac{2 \times \square}{\sqrt{2}} \right) \left(\square + \frac{2 \times \square}{\sqrt{2}} \right) - \square \times \square \\ &= \square \text{ (mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

数値を代入して

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{\square}{\square} + \frac{\square}{\square} \\ &= \square \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

また、せん断応力 (τ) は次式にて与えられる。

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{\square}{\square} \\ &= \square \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

ただし、

$$P = F \times \cos 45^\circ = \square \text{ (N)}$$

$$A = \square \text{ (mm}^2\text{)}$$

上述の発生応力 (σ_b) とせん断応力 (τ) との合成応力 (σ) は次式にて与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2} (\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}) \\ &= \frac{1}{2} (\square + \sqrt{\square^2 + 4 \times \square^2}) \\ &= \square \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

ブラケット (\square) の設計降伏強さは $S_y = \square \text{ N/mm}^2$ を用いる。また、溶接効率 ($\eta = 0.6$) を考慮すると、余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\eta \times S_y}{\sigma} - 1$$

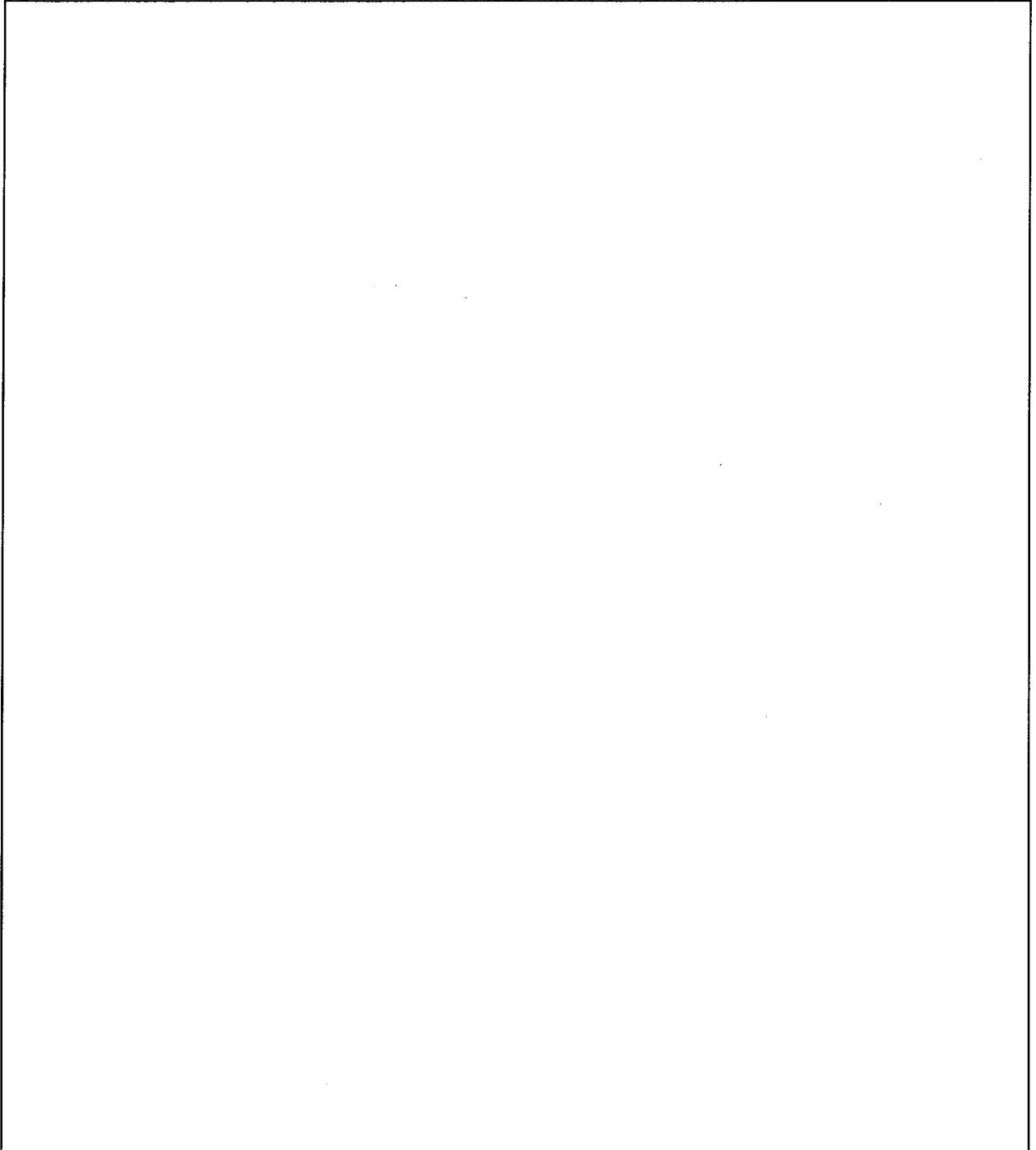
$$M_s = \frac{0.6 \times \square}{\square} - 1$$

$$= \square$$

余裕率が正であるので、ブラケット溶接部は破断することはない。

(3) 外 筒

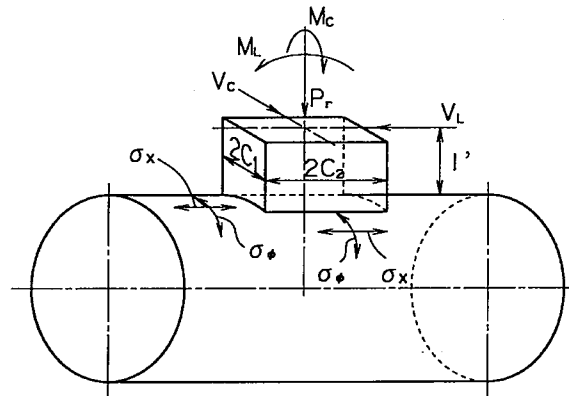
本輸送物の吊上時作用する荷重により、外筒に生ずる応力について解析する。外筒の荷重条件を(口)－第A. 8図に示す。



(口)－第A. 8図 荷 重 条 件

(a) 外筒に生ずる応力評価位置

外筒に生ずる応力評価位置を(ロ)－第A. 9図に示す。



記号説明

P_r	: 半径方向荷重	(N)
M_c	: 周方向外モーメント	(N・mm)
M_L	: 軸方向外モーメント	(N・mm)
V_c	: 周方向せん断荷重	(N)
V_L	: 軸方向せん断荷重	(N)
σ_x	: 軸方向応力	(N/mm ²)
σ_ϕ	: 周方向応力	(N/mm ²)
C_1	: 矩形荷重領域の周方向長さの半分	(mm)
C_2	: 矩形荷重領域の軸方向長さの半分	(mm)
l'	: 荷重作用点からの座板までの距離	(mm)

(ロ)－第A. 9図 応力評価位置及び解析モデル

(b) 荷重条件の算出

ブラケットに作用する荷重条件は(ロ)－第A. 8図から次式より求められる。

半径方向荷重 P_r の傾き θ 。

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \tan^{-1} \left(\frac{l_v}{l_h} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\square}{\square} \right) \\ &= 37.5 \text{ (}^\circ\text{)} \\ &= 0.654 \text{ (rad)} \end{aligned}$$

・半径方向荷重 P_r

$$P_r = f_z \cos \theta_o - f_y \sin \theta_o = \boxed{} \times \cos 37.5^\circ - \boxed{} \times \sin 37.5^\circ \\ = \boxed{} \text{ (N)}$$

・周方向荷重 V_c

$$V_c = f_z \sin \theta_o + f_y \cos \theta_o = \boxed{} \times \sin 37.5^\circ + \boxed{} \times \cos 37.5^\circ \\ = \boxed{} \text{ (N)}$$

・軸方向荷重 V_L

$$V_L = f_x \\ = \boxed{} \text{ (N)}$$

ここで

f_x : ブラケットに働く軸方向荷重

$$f_x = \frac{W_a}{\boxed{}} \times \tan \theta_1 = \boxed{} \text{ (N)}$$

$$W_a : \text{解析負荷荷重} = \boxed{} \text{ (N)}$$

$$\theta_1 : \text{軸方向のワイヤ角度} = 45^\circ = 0.785 \text{ (rad)}$$

f_y : ブラケットに働く水平方向荷重

$$f_y = \frac{W_a}{\boxed{}} \times \tan \theta_2 = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} \times \tan 11^\circ = \boxed{} \text{ (N)}$$

$$\theta_2 : \text{半径方向のワイヤ角度} = 11^\circ = 0.192 \text{ (rad)}$$

f_z : ブラケットに働く鉛直方向荷重

$$f_z = \frac{W_a}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ (N)}$$

$$l_v : \text{水平方向のブラケット取付寸法} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

$$l_h : \text{鉛直方向のブラケット取付寸法} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

(c) 形状係数の算出

外筒に作用する膜力及び曲げモーメントを求めるための形状係数 α , γ , 及び β は, 次式^[6]で与えられる。

(1) 形状係数 α

ブラケット取付位置と外筒端部との距離の関係係数

$$\alpha = \frac{l}{R_m} \quad \text{ただし, } l_o \cong \frac{l}{2} \text{ の時}$$

$$l = \frac{4l_o(l_c - l_o)}{l_c} \quad \text{ただし } l_o \cong \frac{R_m}{2}$$

$$l_c : \text{外筒の長さ} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

l_0 : 荷重領域中心と外筒端部との距離 = mm

l : 外筒相当長さ

R_m : 外筒の平均半径

よって

$$\alpha = \frac{\text{}}{\text{}} = 3.26$$

ただし

$$l = \frac{4 \times \text{} \times (\text{} - \text{})}{\text{}} = \text{} \text{ (mm)}$$

(v) 形状係数 γ

$$\gamma = \frac{R_m}{T}$$

R_m : 円筒殻の平均半径 = (mm)

T : 外筒板厚と座板板厚の合計 = (mm)

$$\gamma = \frac{\text{}}{\text{}} = 54.5$$

(vi) 形状係数 β

$$\beta_1 = \frac{C_1}{R_m}$$

$$\beta_2 = \frac{C_2}{R_m}$$

C_1 : 矩形荷重領域の周方向長さの半分 = (mm)

C_2 : 矩形荷重領域の軸方向長さの半分 = (mm)

$$\beta_1 = \frac{\text{}}{\text{}} = 0.157$$

$$\beta_2 = \frac{\text{}}{\text{}} = 0.349$$

(vii) 半径方向荷重 P_r が作用する場合

$4 \geq \beta_1 / \beta_2 > 1$ の時

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} - 1 \right) (1 - K_1) \right\} \sqrt{\beta_1 \times \beta_2}$$

$1 > \beta_1 / \beta_2 \geq 0.25$ の時

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2} \right) (1 - K_2) \right\} \sqrt{\beta_1 \times \beta_2}$$

K_1, K_2 は(ロ)－第A.13表で与えられる。

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{0.157}{0.349} = 0.45 < 1$$

(ロ)－第A.13表 半径方向荷重が作用する場合の K_1, K_2

	N_ϕ に対して	N_x に対して	M_ϕ に対して	M_x に対して
K_1	0.91	1.68	1.76	1.20
K_2	1.48	1.20	0.88	1.25
β	0.317	0.269	0.214	0.277

(ホ) 周方向外モーメント M_c が作用する場合

膜力 N_ϕ, N_x に対しては、

$$\beta = (\beta_1^2 \times \beta_2)^{1/3} = 0.205$$

曲げモーメント M_ϕ, M_x に対しては

$$\beta = K_c (\beta_1^2 \times \beta_2)^{1/3}$$

K_c は(ロ)－第A.14表で与えられる。

(ロ)－第A.14表 周方向外モーメントが作用する場合の C_c, K_c

β_1 / β_2	γ	N_ϕ に対する C_c	N_x に対する C_c	M_ϕ に対する K_c	M_x に対する K_c	θ に対する K_c
1/4	15	0.31	0.49	1.31	1.84	1.09
	50	0.21	0.46	1.24	1.62	1.04
	100	0.15	0.44	1.16	1.45	0.97
	300	0.09	0.46	1.02	1.17	0.92
1/2	15	0.64	0.75	1.09	1.36	1.00
	50	0.57	0.75	1.08	1.31	0.98
	100	0.51	0.76	1.04	1.26	0.94
	300	0.39	0.77	0.99	1.13	0.95
2	15	(1.7)	(1.3)	(1.20)	(0.97)	(1.00)
	100	1.43	1.12	1.10	0.95	1.19
	300	(1.3)	(1.00)	(1.00)	(0.90)	-
4	15	(1.75)	(1.31)	(1.47)	(1.08)	(1.00)
	100	1.49	0.81	1.38	1.06	1.49
	300	(1.36)	(0.74)	(1.27)	(0.98)	-

備考 () 内数値は近似値である。

$$M_\phi \text{ に対する } \beta = 1.11 \times 0.205 = 0.227$$

$$K_c = 1.11$$

$$M_x \text{ に対する } \beta = 1.37 \times 0.205 = 0.280$$

$$K_c = 1.37$$

(ハ) 軸方向外モーメント M_L が作用する場合

膜力 N_ϕ , N_x に対しては,

$$\beta = (\beta_1 \times \beta_2^2)^{1/3} = 0.268$$

曲げモーメント M_ϕ , M_x に対しては

$$\beta = K_L (\beta_1 \times \beta_2^2)^{1/3}$$

K_L は(ロ)―第A.15表で与えられる。

(ロ)―第A.15表 軸方向外モーメントが作用する場合の C_L , K_L

β_1 / β_2	γ	N_ϕ に対する C_L	N_x に対する C_L	M_ϕ に対する K_L	M_x に対する K_L	θ に対する K_L
1/4	15	0.75	0.43	1.80	1.24	1.14
	50	0.77	0.33	1.65	1.16	1.13
	100	0.80	0.24	1.59	1.11	1.18
	300	0.90	0.07	1.56	1.11	1.31
1/2	15	(0.90)	(0.76)	(1.08)	(1.04)	(1.00)
	100	0.97	0.68	1.07	1.02	1.00
	300	(1.10)	(0.60)	(1.05)	(1.02)	(1.00)
2	15	(0.87)	(1.30)	(0.94)	(1.12)	-
	100	0.81	1.15	0.89	1.07	1.09
	300	(0.80)	(1.50)	(0.79)	(0.90)	-
4	15	0.68	1.20	0.90	1.24	1.39
	100	0.51	1.03	0.81	1.12	1.18
	300	(0.50)	(1.33)	(0.64)	(0.83)	-

備考 () 内数値は近似値である。

$$M_\phi \text{ に対する } \beta = 1.19 \times 0.268 = 0.318$$

$$K_L = 1.19$$

$$M_x \text{ に対する } \beta = 1.06 \times 0.268 = 0.282$$

$$K_L = 1.06$$

(d) 応力解析

(イ) 外筒に働く力が半径方向の場合 ((ロ)―第A.9図参照)

半径方向荷重 (P_r) が働く場合, 円筒殻に生ずる応力は, 次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{N_x}{T} \pm \frac{6M_x}{T^2} \dots\dots\dots (A.4-1)$$

$$\sigma_\phi = \frac{N_\phi}{T} \pm \frac{6M_\phi}{T^2} \dots\dots\dots (A.4-2)$$

σ_x : 外筒軸方向応力 (N/mm²)

σ_ϕ : 外筒円周方向応力 (N/mm²)

M_x : 外筒軸方向の曲げモーメント (N・mm/mm)

M_ϕ : 外筒円周方向の曲げモーメント (N・mm/mm)

N_x : 外筒軸方向の膜力 (N/mm)

N_ϕ : 外筒円周方向の膜力 (N/mm)

T : 外筒板厚と座板板厚の合計 (mm)

(i) 軸方向応力: σ_x

軸方向応力 σ_x (N/mm²) を導く (A. 4-1) 式は次式で与えられる。

$$\frac{N_x}{T} = K_{N_x} \left(\frac{N_x}{P_r / R_m} \right) \times \left(\frac{P_r}{R_m T} \right) \dots\dots\dots (A. 4-3)$$

$$\frac{6M_x}{T^2} = K_{M_x} \left(\frac{M_x}{P_r} \right) \times \left(\frac{6P_r}{T^2} \right) \dots\dots\dots (A. 4-4)$$

ここで,

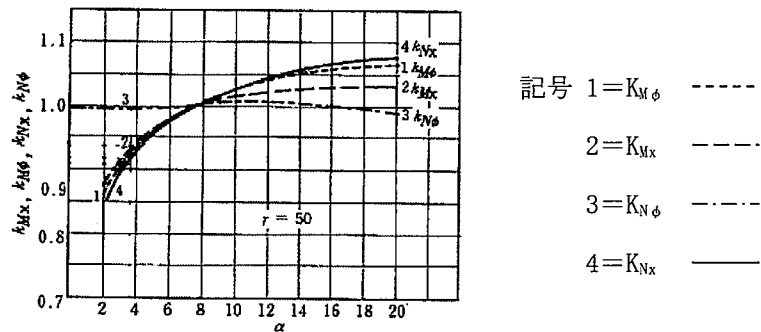
T : (mm)

P_r : (N)

R_m : (mm)

K_{N_x} , K_{M_x} は (ロ) - 第A.10 図で与えられる。

$\gamma = 50$ の場合



(ロ) - 第A.10 図 半径方向荷重が作用する場合の M_x , M_ϕ , N_x , N_ϕ と α の関係 ($\alpha = 8$ の場合が基準)

K_{N_x} : 影響係数 = 0.88

K_{M_x} : 影響係数 = 0.92

従って, 以下の値となる。

$$\frac{P_r}{R_m T} = \boxed{} = \boxed{}$$

$$\frac{6P_r}{T^2} = \boxed{} = \boxed{}$$

A. 10. 2 の(ロ)－第A. 45 図及び(ロ)－第A. 46 図より次の値を得る。

$$\frac{N_x}{P_r/R_m} = \square \quad (\text{表中 } \beta = 0.269)$$

$$\frac{M_x}{P_r} = \square \quad (\text{表中 } \beta = 0.277)$$

これらより (A. 4-3) (A. 4-4) 式の値を求めると次のようになる。

$$\frac{N_x}{T} = 0.88 \times \square \times \square = \square \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\frac{6M_x}{T^2} = 0.92 \times \square \times \square = \square \quad (\text{N/mm}^2)$$

従って軸方向応力 σ_x (N/mm²) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \square \\ &= \square \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{外表面}) \quad \text{または} \\ &= \square \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{内表面}) \end{aligned}$$

(ii) 円周方向応力： σ_ϕ

円周方向応力 σ_ϕ (N/mm²) を導く (A. 4-2) 式は次式で与えられる。

$$\frac{N_\phi}{T} = K_{N\phi} \left(\frac{N_\phi}{P_r/R_m} \right) \times \left(\frac{P_r}{R_m \cdot T} \right) \dots\dots\dots (\text{A. 4-5})$$

$$\frac{6M_\phi}{T^2} = K_{M\phi} \left(\frac{M_\phi}{P_r} \right) \times \left(\frac{6P_r}{T^2} \right) \dots\dots\dots (\text{A. 4-6})$$

$K_{N\phi}$, $K_{M\phi}$ は(ロ)－第A. 10 図で与えられる。

ここで

$K_{N\phi}$: 影響係数=0.99

$K_{M\phi}$: 影響係数=0.90

従って、以下の値となる。

まずA. 10. 2 の(ロ)－第A. 47 図及び(ロ)－第A. 48 図より次の値を得る。

$$\frac{N_\phi}{P_r/R_m} = \square \quad (\text{表中 } \beta = 0.317)$$

$$\frac{M_\phi}{P_r} = \square \quad (\text{表中 } \beta = 0.214)$$

これらより (A. 4-5) (A. 4-6) 式の値を求めると次のようになる。

$$\frac{N_{\phi}}{T} = 0.99 \times \square \times \square = \square \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\frac{6M_{\phi}}{T^2} = 0.90 \times \square \times \square = \square \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

従って円周方向応力 σ_{ϕ} (N/mm²) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{\phi} &= \square \\ &= \square \text{ (N/mm}^2\text{) (外表面) または} \\ &= \square \text{ (N/mm}^2\text{) (内表面)} \end{aligned}$$

(ロ) 外筒に働く曲げモーメントが容器軸方向の場合 ((ロ) - 第A. 9図参照)

軸方向に曲げモーメント (M_L) が働く場合、円筒殻に生ずる応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{N_x}{T} \pm \frac{6M_x}{T^2} \dots\dots\dots \text{(A. 4-7)}$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{T} \pm \frac{6M_{\phi}}{T^2} \dots\dots\dots \text{(A. 4-8)}$$

- σ_x : 外筒軸方向応力 (N/mm²)
- σ_{ϕ} : 外筒円周方向応力 (N/mm²)
- M_x : 外筒軸方向の曲げモーメント (N・mm/mm)
- M_{ϕ} : 外筒円周方向の曲げモーメント (N・mm/mm)
- N_x : 外筒軸方向の膜力 (N/mm)
- N_{ϕ} : 外筒円周方向の膜力 (N/mm)
- T : 外筒板厚+座板板厚 (mm)

(i) 軸方向応力: σ_x

軸方向応力 σ_x (N/mm²) を導く (A. 4-7) 式は次式で与えられる。

$$\frac{N_x}{T} = \left(\frac{N_x}{M_L / R_m^2 \beta} \right) \cdot \left(\frac{M_L}{R_m^2 \beta T} \right) \dots\dots\dots \text{(A. 4-9)}$$

$$\frac{6M_x}{T^2} = \left(\frac{M_x}{M_L / R_m \beta} \right) \cdot \left(\frac{6M_L}{R_m \beta T^2} \right) \dots\dots\dots \text{(A. 4-10)}$$

ここで、

M_L : 軸方向に作用する曲げモーメント (= $V_L \ell'$) (N・mm)

V_L : 作用荷重 = \square (N)

ℓ' : 荷重作用点から座板までの距離 = \square (mm)

R_m = \square (mm)

T = \square (mm)

膜力 N_x に対しては $\beta = 0.268$

曲げモーメント M_x に対しては $\beta = 0.282$

$\gamma = 54.5$

従って、以下の値となる。

$$\frac{M_L}{R_m^2 \beta T} = \frac{\boxed{} \times \boxed{}}{\boxed{}^2 \times 0.268 \times \boxed{}} = \boxed{}$$

$$\frac{6M_L}{R_m \beta T^2} = \frac{6 \times \boxed{} \times \boxed{}}{\boxed{} \times 0.282 \times \boxed{}^2} = \boxed{}$$

A. 10. 2の(ロ)－第A. 49 図及び(ロ)－第A. 50 図より次の値を得る。

$$\frac{N_x}{M_L / R_m^2 \beta} = \boxed{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.268)$$

$$\frac{M_x}{M_L / R_m \beta} = \boxed{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.282)$$

これらより (A. 4-9) (A. 4-10) 式の値を求めると、次のようになる。

$$\frac{N_x}{T} = \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\frac{6M_x}{T^2} = \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

従って、軸方向応力 σ_x (N/mm²) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{外表面}) \quad \text{または} \\ &= \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{内表面}) \end{aligned}$$

(ii) 円周方向応力： σ_ϕ

円周方向応力 σ_ϕ (N/mm²) を導く (A. 4-8) 式は、次式で与えられる。

$$\frac{N_\phi}{T} = \left(\frac{N_\phi}{M_L / R_m^2 \beta} \right) \left(\frac{M_L}{R_m^2 \beta T} \right) \dots \dots \dots \quad (\text{A. 4-11})$$

$$\frac{6M_\phi}{T^2} = \left(\frac{M_\phi}{M_L / R_m \beta} \right) \left(\frac{6M_L}{R_m \beta T^2} \right) \dots \dots \dots \quad (\text{A. 4-12})$$

ここで、

膜力 N_ϕ に対しては $\beta = 0.268$

曲げモーメント M_ϕ に対しては $\beta = 0.318$

$$\frac{M_L}{R_m^2 \beta T} = \frac{\boxed{} \times \boxed{}}{\boxed{}^2 \times 0.268 \times \boxed{}} = \boxed{}$$

$$\frac{6M_L}{R_m \beta T^2} = \frac{6 \times \boxed{} \times \boxed{}}{\boxed{} \times 0.318 \times \boxed{}^2} = \boxed{}$$

A. 10. 2の(ロ)－第A. 51 図及び(ロ)－第A. 52 図より次の値を得る。

$$\frac{N_{\phi}}{M_c/R_m^2\beta} = \boxed{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.268)$$

$$\frac{M_{\phi}}{M_c/R_m\beta} = \boxed{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.318)$$

故に、(A. 4-11)、(A. 4-12) 式の値を求めると、次のようになる。

$$\frac{N_{\phi}}{T} = \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\frac{6M_{\phi}}{T^2} = \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

従って、円周方向応力 σ_{ϕ} (N/mm²) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{\phi} &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{外表面}) \quad \text{または} \\ &= \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{内表面}) \end{aligned}$$

- (ハ) 外周に働く曲げモーメントが容器円周方向の場合 ((ロ)-第A. 9図参照)
 円周方向に曲げモーメント (M_c) が作用する場合に、円筒殻に生ずる応力は、
 次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{N_x}{T} \pm \frac{6M_x}{T^2} \quad \dots\dots\dots (\text{A. 4-13})$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{T} \pm \frac{6M_{\phi}}{T^2} \quad \dots\dots\dots (\text{A. 4-14})$$

ここで、

- σ_x : 外筒軸方向応力 (N/mm²)
- σ_{ϕ} : 外筒円周方向応力 (N/mm²)
- M_x : 外筒軸方向の曲げモーメント (N・mm/mm)
- M_{ϕ} : 外筒円周方向の曲げモーメント (N・mm/mm)
- N_x : 外筒軸方向の膜力 (N/mm)
- N_{ϕ} : 外筒円周方向の膜力 (N/mm)
- T : 外筒板厚+座板板厚 (mm)

- (i) 軸方向応力： σ_x
 軸方向応力 σ_x (N/mm²) を導く (A. 4-13) 式は次式で与えられる。

$$\frac{N_x}{T} = \left(\frac{N_x}{M_c/R_m^2\beta} \right) \left(\frac{M_c}{R_m^2\beta T} \right) \quad \dots\dots\dots (\text{A. 4-15})$$

$$\frac{6M_x}{T^2} = \left(\frac{M_x}{M_c/R_m\beta} \right) \left(\frac{6M_c}{R_m\beta T^2} \right) \quad \dots\dots\dots (\text{A. 4-16})$$

M_c : 円周方向に作用する曲げモーメント ($=V_c \ell'$) (N・mm)

V_c : 作用荷重= (N)

ℓ' : 荷重作用点から座板までの距離= (mm)

R_m = (mm)

T = (mm)

膜力 N_x に対しては $\beta = 0.205$

曲げモーメント M_x に対しては $\beta = 0.280$

$\gamma = 54.5$

$$\frac{M_c}{R_m^2 \beta T} = \frac{\text{} \times \text{}}{\text{}^2 \times 0.205 \times \text{}} = \text{}$$

$$\frac{6M_c}{R_m \beta T^2} = \frac{6 \times \text{} \times \text{}}{\text{} \times 0.280 \times \text{}^2} = \text{}$$

A. 10. 2 の(ロ)－第A. 53 図及び(ロ)－第A. 54 図より次の値を得る。

$$\frac{N_x}{M_c / R_m^2 \beta} = \text{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.205)$$

$$\frac{M_x}{M_c / R_m \beta} = \text{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.280)$$

これらより (A. 4-15) (A. 4-16) 式の値を求めると、次のようになる。

$$\frac{N_x}{T} = \text{} \times \text{} = \text{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\frac{6M_x}{T^2} = \text{} \times \text{} = \text{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

従って、軸方向応力 σ_x (N/mm²) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \text{} \\ &= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (外表面) または,} \\ &= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (内表面)} \end{aligned}$$

(ii) 円周方向応力: σ_ϕ

円周方向応力 σ_ϕ (N/mm²) を導く (A. 4-14) 式は、次式で与えられる。

$$\frac{N_\phi}{T} = \left(\frac{N_\phi}{M_c / R_m^2 \beta} \right) \left(\frac{M_c}{R_m^2 \beta T} \right) \dots \dots \dots \text{(A. 4-17)}$$

$$\frac{6M_\phi}{T^2} = \left(\frac{M_\phi}{M_c / R_m \beta} \right) \left(\frac{6M_c}{R_m \beta T^2} \right) \dots \dots \dots \text{(A. 4-18)}$$

膜力 N_ϕ に対しては $\beta = 0.205$

曲げモーメント M_ϕ に対しては $\beta = 0.227$

$$\frac{M_c}{R_m^2 \beta T} = \frac{\boxed{} \times \boxed{}}{\boxed{}^2 \times 0.205 \times \boxed{}} = \boxed{}$$

$$\frac{6M_c}{R_m \beta T^2} = \frac{6 \times \boxed{} \times \boxed{}}{\boxed{} \times 0.227 \times \boxed{}^2} = \boxed{}$$

A. 10. 2 の(口)－第A. 55 図及び(口)－第A. 56 図より次の値を得る。

$$\frac{N_\phi}{M_c / R_m^2 \beta} = \boxed{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.205)$$

$$\frac{M_\phi}{M_c / R_m \beta} = \boxed{} \quad (\text{表中 } \beta = 0.227)$$

これらにより, (A. 4-17) (A. 4-18) 式の値を求めると, 次のようになる。

$$\frac{N_\phi}{T} = \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\frac{6M_\phi}{T^2} = \boxed{} \times \boxed{} = \boxed{} \quad (\text{N/mm}^2)$$

従って, 円周方向応力 σ_ϕ (N/mm²) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_\phi &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (外表面) または,} \\ &= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (内表面)} \end{aligned}$$

(三) 外筒に作用する荷重がせん断方向の場合 ((口)－第A. 9 図参照)

(i) 軸方向せん断応力 τ_L

軸方向せん断応力 τ_L は次式にて与えられる。

$$\tau_L = \frac{V_L}{4C_2 T}$$

ここで,

V_L : 軸方向せん断荷重 = $\boxed{}$ (N)

C_2 : 矩形荷重領域の軸方向の長さの半分 = $\boxed{}$ (mm)

T : 外筒板厚と座板板厚の合計 = $\boxed{}$ (mm)

$$\begin{aligned} \tau_L &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(ii) 周方向せん断応力 τ_c

周方向せん断応力 τ_c は次式にて与えられる。

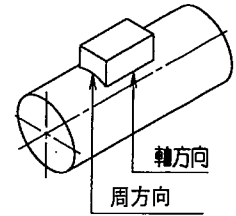
$$\tau_c = \frac{V_c}{4C_1 T}$$

ここで,

V_c : 周方向せん断荷重 = (N)

C_1 : 矩形荷重領域の周方向の長さの半分 = (mm)

$$\tau_c = \frac{V_c}{C_1} = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$



(ホ) 応力の評価

外筒に生ずる応力をまとめて(ロ)－第A.16表に示す。

(ロ)－第A.16表 吊上げ時に生ずる応力

単位 N/mm²

荷重項目 評価位置	周方向応力 σ_ϕ		軸方向応力 σ_x		せん断応力 τ	
	軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向	軸方向	軸直角方向
半径方向荷重によるもの P_r						
軸方向外モーメントによるもの M_L						
周方向外モーメントによるもの M_c						
軸方向せん断荷重によるもの V_L						
周方向せん断荷重によるもの V_c						
合計						

上段－外表面

下段－内表面

合成応力

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[\sigma_\phi + \sigma_x + \left\{ (\sigma_\phi - \sigma_x)^2 + 4\tau^2 \right\}^{1/2} \right]$$

$$= \frac{\text{} + \text{} + \left\{ (\text{} - \text{})^2 + 4(\text{)^2 \right\}^{1/2}}{2}$$

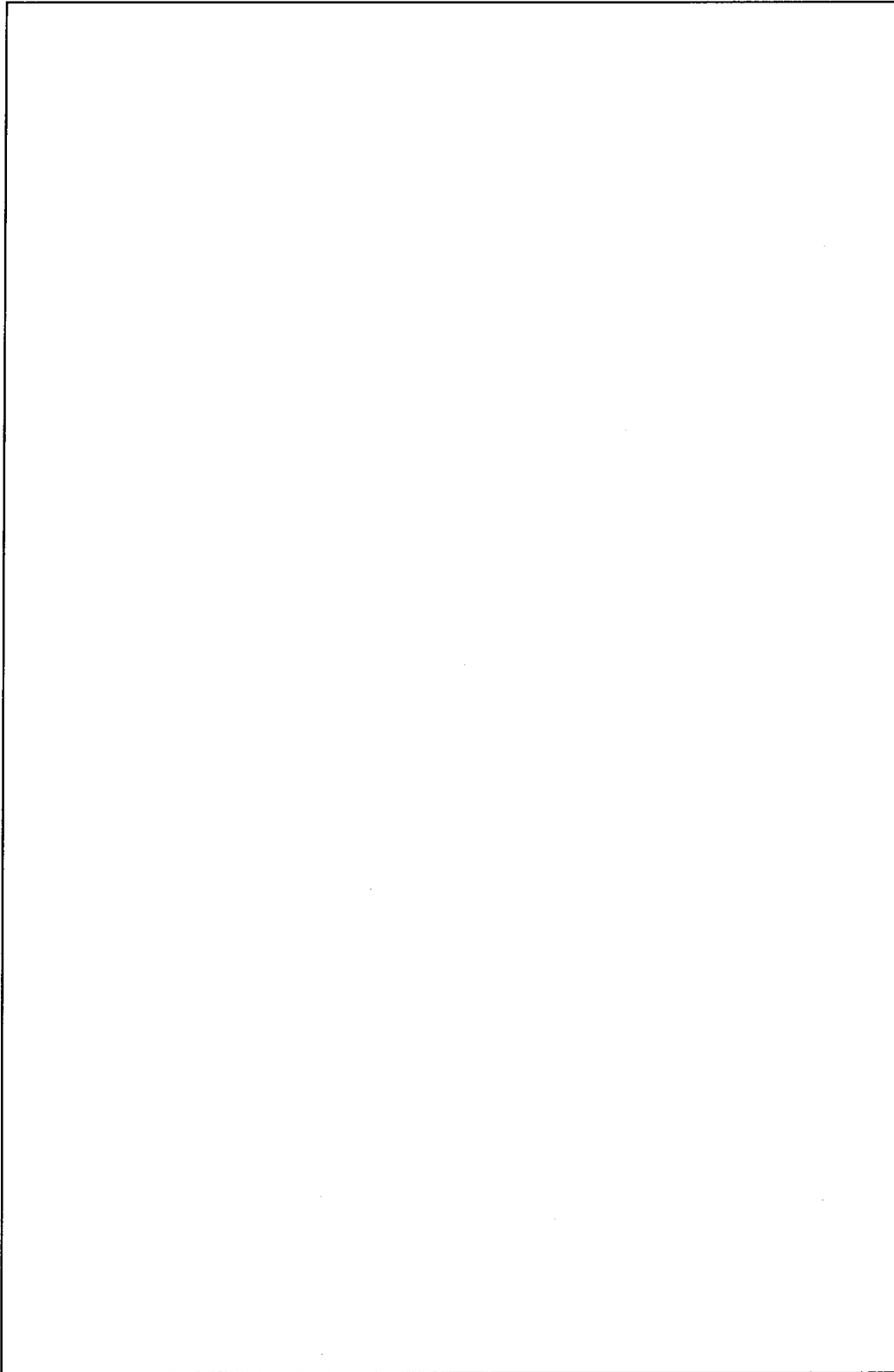
$$= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

外筒 () の設計降伏強さ $S_y = \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ であり、余裕率 M_s は次のようになる。

$$\text{余裕率 } M_s = \frac{\text{}}{\text{}} - 1$$

$$= \text{$$

M_s は正であり、外筒は吊上時、健全性を損なわれることはない。



単位：mm

(口)－第A.11 図 締付ボルト組立図

また、せん断応力（ τ ）は次式にて与えられる。

$$\tau = \frac{T_f}{Z_p}$$

ここで、

T_f : 締付け時のトルク荷重^[7]

$$T_f = \frac{P_a}{2 \times n} \{ d_2 \times (\tan \theta + \mu_s \sec \theta') + d_w \times \mu_w \}$$

P_a : 締付力 = (N)

n : 締付ボルト本数 = (本)

Z_p : ねじり断面係数 = mm³

(付属書類A.10.3)

d_2 : クロスピンの有効径

$$d_2 = \frac{2}{3} \times \frac{D_c^3 - D_p^3}{D_c^2 - D_p^2}$$

$$= \frac{2}{3} \times \text{$$

$$= \text{} \text{ (mm)}$$

D_c : クロスピン外径 (mm)

D_p : テーパー部内径 (mm)

d_w : ナット座面に於ける摩擦トルクの等価直径

$$d_w = \frac{2}{3} \times \frac{D_w^3 - D_i^3}{D_w^2 - D_i^2}$$

$$= \frac{2}{3} \times \text{$$

$$= \text{} \text{ (mm)}$$

D_w : ナット座面外径 (mm)

D_i : ナット座面内径 (mm)

θ : クロスピンの有効径に於けるリード角

$$\theta = \tan^{-1} \frac{P_c}{\ell_3 / 2}$$

$$= \tan^{-1} \left(\text{$$

$$= \text{} (^\circ)$$

P_c : ボルト受けの高さ (mm)

ℓ_3 : ボルト受けの外径 (mm)

$$= \frac{\boxed{} \times \boxed{}}{4} \times \frac{1}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

P_a : 締付力 前項(1)項より = $\boxed{}$ (N)

n : 締付ボルト本数 = $\boxed{}$ (本)

l : クロスピンの曲げを受ける長さ = $\boxed{}$ (mm)

Z : クロスピンの断面係数 (mm^3)

$$Z = \frac{b h^2}{6} = \frac{\boxed{}}{6} = \boxed{} \text{ (mm}^3\text{)}$$

b : クロスピンの厚さ = $\boxed{}$ (mm)

h : クロスピンの高さ = $\boxed{}$ (mm)

数値を代入して

$$\sigma_b = \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

次にせん断応力 (τ) を求める。

$$\tau = \frac{P_a}{2 \cdot n A}$$

ここで、

A : クロスピンのせん断を受ける断面積

$$A = b \times h$$

$$= \boxed{} = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

P_a : 締付力 = $\boxed{}$ (N)

n : 締付ボルト本数 = $\boxed{}$ (本)

b : クロスピンの厚さ = $\boxed{}$ (mm)

h : クロスピンの高さ = $\boxed{}$ (mm)

数値を代入して

$$\tau = \frac{\boxed{}}{2 \times \boxed{} \times \boxed{}}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

合成応力

上述の曲げ応力 (σ_b) とせん断応力 (τ) との合成応力 (σ) は、次式にて与えられる。

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\boxed{} \right)$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

クロスピン ($\boxed{}$) の設計降伏強さ $S_y = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ を用いる。従って、余裕率 M_s は

$$M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

M_s が正であり、クロスピンは健全性を損なわれない。

A. 4. 5 固縛装置

本輸送容器には、容器を締付けるための固縛装置が付随していないので本項は該当せず。

A. 4. 6 圧 力

外気圧が極端に低下した場合を考慮して、外気圧が 60 kPa まで低下したときの本輸送物に及ぼす影響について検討する。

外気圧が 60 kPa まで低下したとき、容器に

$$(19.0 + 101) - 60 = 60 \text{ kPa}$$

の内圧が作用することになる。この時、容器に装備している内圧調整用リリーフバルブ（最大 49 kPa・G にて開）が作動するため容器内に 49 kPa の差圧（運搬中に予想される周囲温度の変動（-20°C～38°C）を考慮した場合にも同じ）が作用することになる。

応力評価については A. 5. 1. 3 「応力計算」項において、容器に作用する内圧を 50 kPa・G として解析し、その健全性を確認しているため、本項での解析は省略する。また、A. 10. 10 項において環境温度 -20°C から環境温度 38°C になった場合及び環境温度 38°C から環境温度 -20°C になった場合の健全性を確認している。

A. 4. 7 振 動

一般の条件時に積載車輛の荷台で受ける振動数域は、0～10 Hz⁽¹¹⁾の範囲であるので、輸送物の固有振動数を求め、共振しないことを示す。

輸送物は、トラックの荷台に [] で固定されているので、輸送物を (ロ) - 第A. 14 図に示すように支持-支持はりと近似して解析する。固有振動数 f (Hz) を次式より求める。

$$f = \frac{a_1}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{w \cdot \ell^4}}$$

a₁ : 第1次モード係数=15.8
((ロ) - 第A. 13 図) を用いて

$$\alpha = \frac{a \ell}{\ell} = [] = []$$

E : 縦弾性係数 = [] (N/mm²)

ℓ : 輸送容器全長 = [] (mm)

aℓ : 支点よりの張出し長さ = [] (mm)

w : 単位長さ当りの重量 (N/mm)

$$w = \frac{m \cdot g}{\ell} = \frac{[] \times 9.81}{[]}$$

$$= [] \text{ (N/mm)}$$

g : 重力加速度 = 9.81 × 10³ (mm/s²)

m : 輸送物重量 = [] (kg)

I : 輸送容器の断面2次モーメント

$$I = \frac{\pi}{64} (D_1^4 - D_2^4)$$

$$= \frac{\pi}{64} ([]^4 - []^4)$$

$$= [] \text{ mm}^4$$

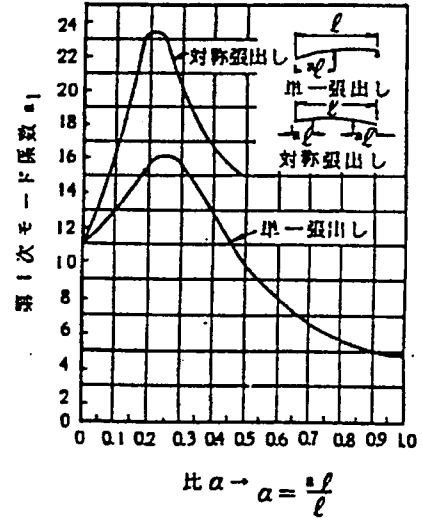
D₁ : 外殻の外径 = [] (mm)

D₂ : 外殻の内径 = [] (mm)

従って、以下の値となる。

$$f = \frac{15.8}{2\pi} \sqrt{\frac{[] \times [] \times 9.81 \times 10^3}{[] \times []^4}}$$

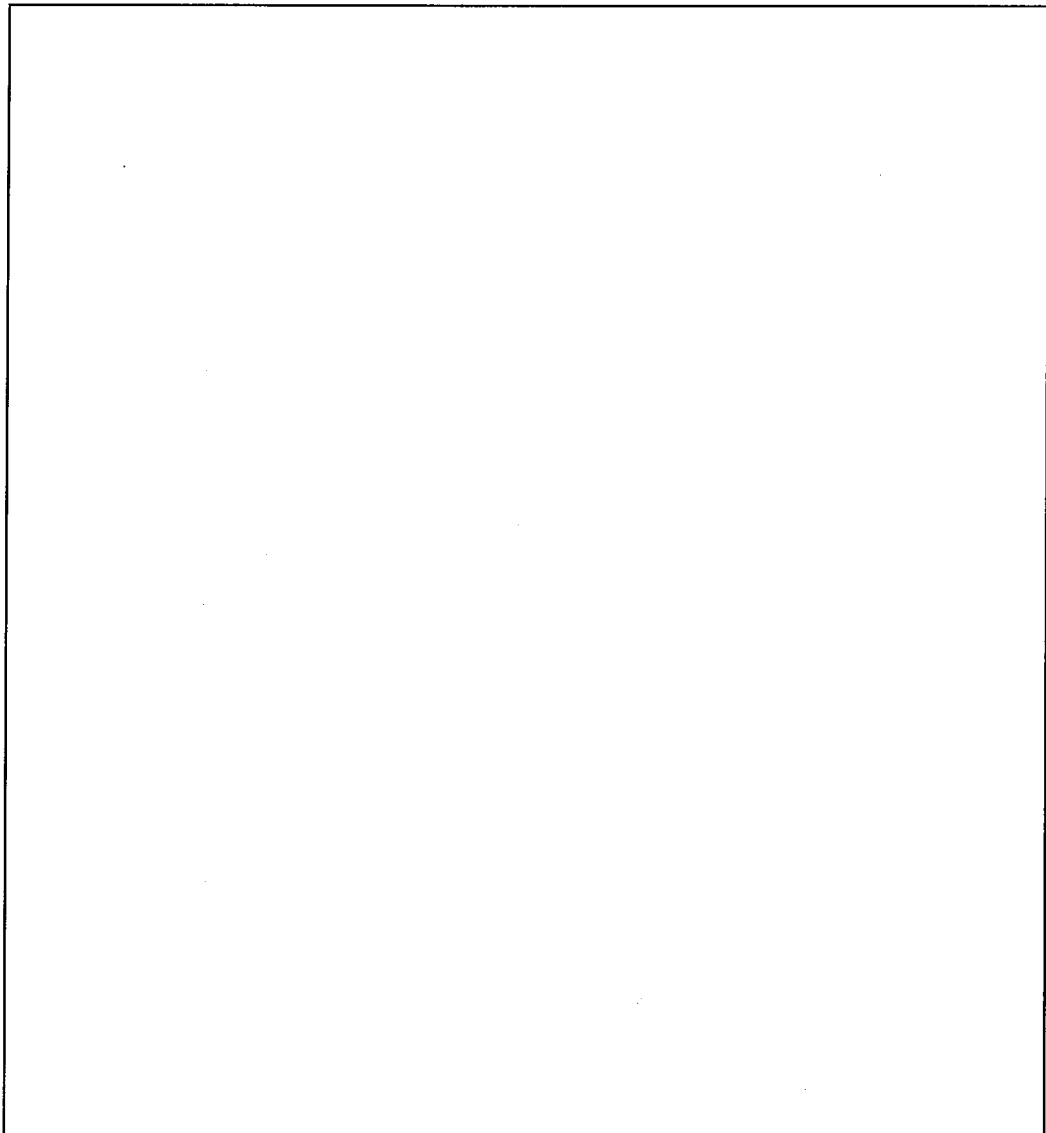
$$= [] \text{ (Hz)}$$



(ロ) - 第A. 13 図 第1次モード係数

このとき、振動数比は□となり、保守的に減衰を考慮しない場合の変位振幅倍率^(注)は□倍 (A. 10. 11 参照) となる。輸送中積載車両に発生する加速度は 3G 以下であり、保守的に倍率を□倍としても輸送容器に負荷される加速度は 4G 以下である。一般の試験条件における落下評価 (A. 5. 3) において負荷される加速度は、水平落下時□、垂直落下時□、コーナ落下時□であり、この加速度に比べ輸送中積載車両に発生する振動による加速度は十分小さく、輸送物が亀裂、破損することはない。

(注) 振動中の最大変位振幅と外力が静的に加わった場合の最大変位振幅との比



(ロ) - 第A. 14 図 輸送物の固縛状況及び輸送物の固有振動数解析モデル

A. 5 一般の試験条件

A. 5. 1 熱的試験

太陽放射を考慮した本輸送物の熱的評価は、B. 4一般の試験条件下の熱解析に示す。

A. 5. 1. 1 温度及び圧力の要約

輸送物の最高温度は、B. 4に述べるように環境温度が最高である38℃のとき、太陽放射熱を輸送物表面に1日につき12時間最大400W/m²（曲面上表面）の伝熱量があるとして求めた。その結果は外筒表面にて73℃である。崩壊熱はないので環境温度が最も低い温度-20℃が輸送物の最低温度である。

他方、内部の温度については、外殻表面と同一温度と考え評価を行った。各部の温度を(ロ)一第A. 17表に示す。

(ロ)一第A. 17表 各部の温度

摘 要	温度 (℃)	
	最 低	最 高
環 境 温 度	-20	38
容 器 外 殻 表 面	-20	73
容 器 内 部	-20	73

また、この場合における容器及び燃料棒の最大内圧は、B. 4. 4項で述べるようにそれぞれ0. 019MPa・G及び \square MPa・Gであるが、本輸送容器の受ける最大内圧はA. 4. 6「圧力」での値より、容器最大内圧を0. 05MPa・Gとする。

A. 5. 1. 2 熱膨張

防振構造部は外殻に懸架されており、本輸送物で熱膨張により拘束されるおそれのあるものはない。したがって、熱膨張により熱応力の発生はない。

A. 5. 1. 3 応力計算

一般の試験条件下における容器及び燃料棒の内圧上昇により生じる各部の応力について検討する。

(1) 外筒

容器外筒が内圧を受ける時に、外筒に生ずる引張応力 (σ_a) を次式より求める。

$$\sigma_a = \frac{P D}{2 t}$$

P : 容器の最大内圧 0.05 (MPa)

D : 容器の最大内径 (mm)

t : 容器肉厚 (mm)

数値を代入して

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{0.05 \times \text{}}{2 \times \text{}} \\ &= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}\end{aligned}$$

容器本体 () の設計降伏強さは $S_y = \text{}$ N/mm² である。従って、余裕率 M_s は溶接効率 (= 0.6) を考慮して次のようになる。

$$\begin{aligned}M_s &= \frac{\text{} \times 0.6}{\text{}} - 1 \\ &= \text{}\end{aligned}$$

余裕率が正であるので容器胴部は内圧力により、健全性が損なわれることはない。

(2) ドームプレート

容器が内圧を受ける時、ドームプレートには歪に伴う曲げ応力 (σ_b) と面内力による膜応力 (σ_o) が生じるので、この時の合成応力 (σ) を次式により求める。ここでは、容器ドームプレートのフランジ部を無視した安全側のモデルで検討する。

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_0 \quad [8]$$

今、周辺固定の円板が等分布荷重を受ける場合、円板の中心に生ずる最大歪（ ω ）と分布荷重（ p ）との関係は次式で求める。

$$\frac{\omega}{t} + A \left(\frac{\omega}{t} \right)^3 = B \cdot \frac{p}{E} \left(\frac{\gamma}{t} \right)^4 \quad [8]$$

t : ドームプレートの板厚 (mm)

p : 分布荷重（最大内圧） 0.05 (MPa)

γ : ドームプレートの半径 (mm)

E : 縦弾性係数 (N/mm²)

A : 等分布荷重を受ける円板の大たわみ理論公式における歪係数
（半径方向変位：拘束） 0.471

B : 等分布荷重を受ける円板の大たわみ理論公式における歪係数
（半径方向変位：拘束） 0.171

数値を代入して整理すると

$$\omega^3 + \text{} \omega - \text{} = 0$$

ω を計算すると

$$\omega = \text{} \text{ (mm)}$$

また、曲げ応力（ σ_b ）及び膜応力（ σ_0 ）は次式で求める。

$$\sigma_b = \beta_\gamma \cdot E \cdot \frac{t \cdot \omega}{\gamma^2}$$

$$\sigma_0 = \alpha_\gamma \cdot E \cdot \frac{\omega^2}{\gamma^2}$$

β_γ : 等分布荷重を受ける円板の最大たわみ理論公式における応力係数
（中心） 2.86

α_γ : 等分布荷重に受ける円板の最大たわみ理論公式における応力係数
（中心） 0.976

E : 縦弾性係数 (N/mm²)

t : ドームプレートの板厚 (mm)

ω : 円板の中心に生ずる最大歪 (mm)

γ : ドームプレートの半径 (mm)

数値を代入して

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 2.86 \times \text{} \times \frac{\text{} \times \text{}^2} \\ &= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\sigma_0 = 0.976 \times \boxed{} \times \frac{\boxed{}^2}{\boxed{}^2}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

従って、合成応力 (σ) は

$$\sigma = \boxed{} + \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ドームプレート ($\boxed{}$) の設計降伏強さは $S_y = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ であり、余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

余裕率が正であるので、内圧力によってドームプレートの健全性が損なわれることはない。

(3) 燃料棒被覆管

本項では燃料集合体を構成する燃料棒被覆管に発生する応力について解析する。解析に使用する燃料タイプを4種類とし、その解析仕様を(ロ)－第A.18表に示す。

(ロ)－第A.18表 燃料集合体の解析仕様

仕 様		燃料タイプ			
		14×14 10ft	14×14 12ft	15×15 12ft	17×17 12ft
現行燃料及び 高燃焼度燃料 の寸法	被覆管外径 d_o (mm)	10.72	10.72	10.72	9.5
	被覆管板厚 t (mm)	0.62	0.62	0.62	0.57
	被覆管平均径 d_m (mm)	10.1	10.1	10.1	8.93
現行燃料の 圧力	燃料棒内初期圧力 P_o (MPa·G)				
	燃料棒内最大圧力 P_i (MPa·G)				
高燃焼度燃料 の圧力	燃料棒内初期圧力 P_o (MPa·G)				
	燃料棒内最大圧力 P_i (MPa·G)				

P_i : 燃料棒の最大内圧 (MPa·G)

$$(P_i + 1.01 \times 10^{-1}) = (P_o + 1.01 \times 10^{-1}) \times \frac{T}{T_o}$$

[標準気圧 : 1.01×10^{-1} MPa として]

P_o : 燃料棒内初期圧力 (MPa·G)

T : 一般の試験条件下における温度

$$= 273 + 73 \text{ (最高温度)}$$

$$= 346 \text{ (K)}$$

T_o : 初期温度

$$= 273 + 20 \text{ (常温)}$$

$$= 293 \text{ (K)}$$

d_c : 燃料棒被覆管の内径 (mm)

t : 燃料棒被覆管の肉厚 (mm)

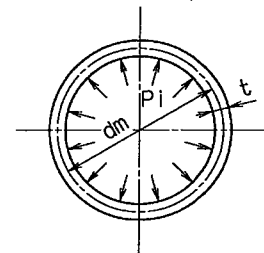
d_m : 燃料棒被覆管の平均径 (mm)

内圧力 (P_i) を受ける燃料棒被覆管に生ずる応力は、薄肉円筒として、次式で与えられる。また解析モデルを(口)－第A.15図に示す。

$$\sigma_\theta = \frac{P_i \cdot d_m}{2t}$$

$$\sigma_z = \frac{P_i \cdot d_m}{4t}$$

$$\sigma_r = -\frac{P_i}{2}$$



ここで、

σ_θ : 周方向応力 (N/mm^2)

(口)－第A.15図 燃料棒被覆管解析モデル

σ_z : 軸方向応力 (N/mm^2)

σ_r : 径方向応力 (N/mm^2)

P_i : 被覆管内圧力=(口)－第A.18表による。

d_m : 被覆管の平均径=(口)－第A.18表による。

t : 被覆管の板厚=(口)－第A.18表による。

従って、燃料棒被覆管に生ずる応力は、(口)－第A.19表に示す値となる。

(ロ)－第A.19表 内圧力により被覆管に生ずる応力

(単位：N/mm²)

圧力区分		記号	14×14	14×14	15×15	17×17
			10フィート	12フィート	12フィート	12フィート
内圧力	現行燃料	σ_{θ}				
		σ_z				
		σ_r				
	高燃焼度燃料	σ_{θ}				
		σ_z				
		σ_r				

(i) 燃料棒

燃料棒で一次一般膜応力 P_m は条件の最も厳しい 17×17 型燃料集合体で次のようになる。

現行燃料の被覆管に対して、

$$\begin{aligned}
 P_m &= \text{Max} |\sigma_{\theta} - \sigma_r| \\
 &= \boxed{} + \boxed{} \\
 &= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

ここで、被覆管の設計応力強さ S_m は $S_m = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ であるから、余裕率 M_s は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 M_s &= \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1 \\
 &= \boxed{}
 \end{aligned}$$

同様に、高燃焼度燃料の被覆管に対しては、現行燃料の被覆管より一次一般膜応力 P_m が小さいことは明らかである。

よって、余裕率は正であり、被覆管が内圧力によって健全性を損なわれることはない。

また、端栓と被覆管の溶接法はサンプルによる強度試験により母材と同等以上の強度であることが確認されている他、非破壊検査により溶接部の健全性が確認されている。従って、端栓と被覆管の溶接部に対しても被覆管と同じ強度基準が適用できる。また、内圧力によって発生する応力は被覆管と同一である。

そのため、被覆管同様、端栓と被覆管の溶接部も内圧力によって健全性が損なわれることはない。

A. 5. 1. 4 許容応力との比較

許容応力との比較を(ロ)－第A. 20表に示す。いずれも許容応力を下回っており、各部の強度は保たれる。

(ロ)－第A. 20表 許容応力との比較

条件	解析項目	解析基準	解析基準値	解析結果	余裕率
通常輸送時	化学的及び電氣的反応 化学的反應 電氣的反應	活性の有無 水分の有無	活性 無 水分 無	活性 無 水分 無	基準に適合 基準に適合
	密装置 燃料棒	密封性能の有無	密封性能有	密封性能有	基準に適合
	吊上装置 1. ブラケット (1) ブラケット孔部 せん断応力 (2) ブラケット溶接部 合成応力	0.6 S _y S _y · η*	[Large empty box]	[Large empty box]	[Large empty box]
	2. 外筒 合成応力	S _y			
3. 締付ボルト 合成応力	S _y				
4. クロスピン 合成応力	S _y				
一般の試験条件	熱的試験 応力計算 1. 外筒 引張応力 2. ドームプレート 合成応力 3. 燃料棒被覆管 一次一般膜応力	S _y · η* S _y S _m			

* η : 溶接効率 (=0.6)

A. 5.2 水噴霧

本輸送容器の外殻は円筒状の容器で、水のたまりにくい形状であり、表面は塗装されているので吸水性はなく、また、容器外殻のフランジ部は水密構造になっているので容器内部に水が入らない。

A. 5.3 自由落下

本輸送物は規則に基づき、A型輸送物の要件に従い評価を行うと、輸送物の重量は最大 kg であり、5000 kg 以下であるから、告示にある一般の試験条件下での自由落下は1.2 m である。

また、本試験前の水噴霧で本輸送物は水密構造となっているため、容器内部に水が入らず重量の変化もないため、水噴霧での影響は全くないものとして評価する。

(a) 解析モデル

本輸送物について1.2 m自由落下試験による評価を解析により行う。また原型容器による9 m落下試験の結果を比較検証することで、その妥当性を立証し、1.2 m自由落下による評価を行う。

ここでは、下記の3ケースについて検討を行う。

- (i) 水平落下
- (ii) 垂直落下（上部及び下部）
- (iii) コーナ落下（上部及び下部）

(1) 解析方法及び結果

本輸送物について、1.2 m自由落下試験を行った場合の加速度と輸送容器の変形量は下記の条件に基づき解析を行う。

- ① 衝突面は剛体であるとし、輸送物の落下エネルギーは容器の塑性変形によって全量吸収されるものとする。
- ② 輸送物は防振構造部がショックマウントで懸架された構造となっているため、防振構造部が外殻によりショックマウントを介し、拘束を受けて落下するものとする。
- ③ 解析に使用する輸送物の重量は「A. 2重量及び重心」で示した通りである。これよりそれぞれがもつ落下エネルギーは次のようになる。

$$E_{a_i} = E_{v_i} = m_i \times g \times h$$

$$E_{a_o} = E_{v_o} = m_o \times g \times h$$

ここで、

E_{a_i} : 防振構造部側の外殻の吸収エネルギー (J)

E_{v_i} : 防振構造部側の落下エネルギー (J)

E_{a_o} : 輸送容器の外殻の吸収エネルギー (J)

E_{v_o} : 輸送容器の外殻の落下エネルギー (J)

m : 輸送容器の重量 = kg

$$m = m_i + m_o$$

m_i : 防振構造部の重量 + 収納物 = (kg)

m_o : 外殻の重量 = (kg)

h : 落下高さ = 1.2 (m)

g : 重力加速度 = 9.81 (m/s²)

よって以下の値となる。

$$\begin{aligned} E_{a_i} = E_{v_i} &= \text{} \times 9.81 \times 1.2 \\ &= \text{} \text{ (J)} = \text{} \text{ (N}\cdot\text{mm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{a_o} = E_{v_o} &= \text{} \times 9.81 \times 1.2 \\ &= \text{} \text{ (J)} = \text{} \text{ (N}\cdot\text{mm)} \end{aligned}$$

全体の落下エネルギー E_T は次式より求められる。

$$E_T = E_{v_i} + E_{v_o} = \text{} \text{ (N}\cdot\text{mm)}$$

- ④ SHOCKコードを用いて求めたA型輸送物に生ずる衝撃加速度及び輸送物の変形量の解析結果を付属書類A.10.5の(ロ)－第A.39表に示す。

(b) 原型試験

原型容器を用いた9m落下試験を実施し、収納物である燃料集合体の安全性及び解析方法の妥当性を確認した。

「MFC-1型輸送容器」の原型容器は、収納物である燃料集合体のみ代替物を使用した実容器相当のものである。原型容器は(イ)章Cで述べたように、上蓋と下部容器で構成される外殻と、ショックマウントフレームとクロスフレーム等で構成される防振構造部及びショックマウントからなり、外寸法は、長さ約mm、外径約mm、高さmmの容器で、輸送物総重量は約kgである。

原型容器を2基使用し、落下姿勢は垂直落下、コーナ落下(#1号機)、水平落下(#2号機)を行った。

(ロ)－(G)「MFC-1型輸送容器に関する原型容器試験結果報告書」参照。

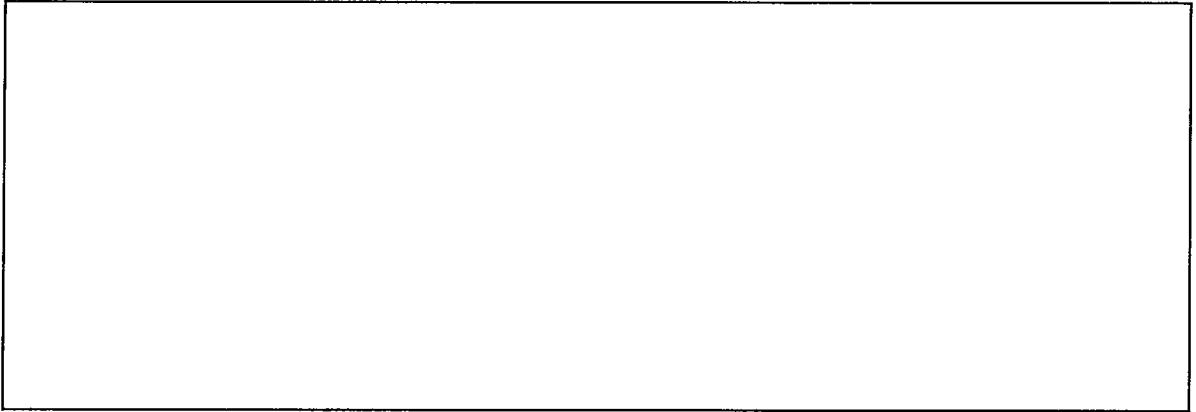
(c) モデル試験

該当せず。

(2) 自由落下時の輸送物の強度評価

(a) 1.2 m水平落下

1.2 m水平落下時の評価位置を(ロ)－第A.16図に示す。

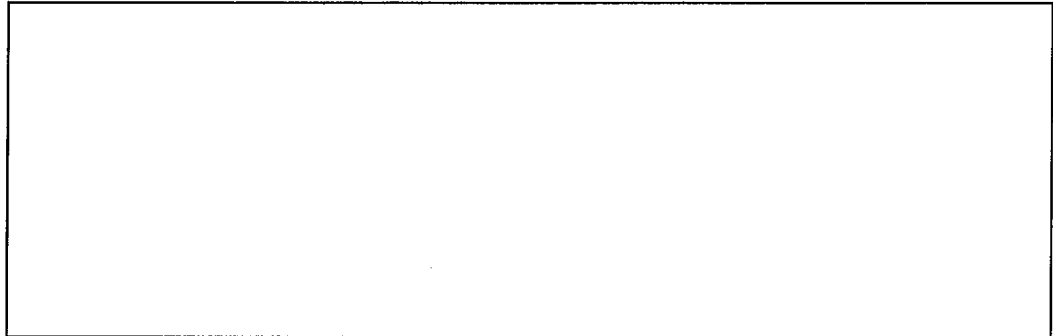


記号	評価位置	評価の有無
㊦	変形量	○
㊧	クランピングフレーム	○
㊨	スキン	○
㊩	燃料棒被覆管	○

(ロ)－第A.16図 1.2 m水平落下時の評価位置

(イ) 外殻の変形量

1.2 m水平落下により外殻に変形が生じて、なお外殻に厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A.17図に示す。



(ロ)－第A.17図 1.2 m水平落下時の外殻の変形量解析モデル

1.2 m水平落下後の外殻の変形量及び残量は、(ロ)－第A.17図より次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - \delta_{H_o} \quad (\text{付属書類A.10.8参照})$$

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{H_o} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{H_i} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

δ_{H_i} は付属書類A.10.8より外殻厚みの残量の評価対象とはならない。外殻の変形残量は δ_{H_o} にて評価する。

$$\delta_o = \square - \square = \square \text{ (mm)}$$

よって1.2 m水平落下においては外殻のみが変形し、防振構造部が直接落下台に衝突することはない。

(ロ) クランピングフレーム

輸送物落下時に、防振構造部が外殻に衝突し、クランピングフレーム固定部に衝撃荷重がかかる。従ってクランピングフレームには、次式で示される曲げ応力 σ_b (N/mm²)が生じる。解析モデルを(ロ)－第A.18図に示す。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

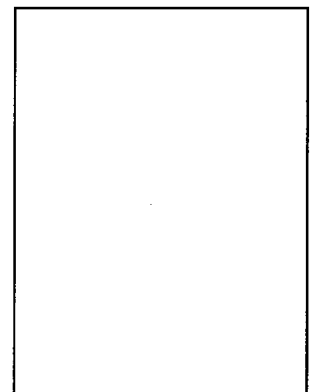
ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

$$M = F \times \frac{l_1 l_2^2}{2l^3} \times (3l_1 + 2l_2)$$

$$= \square$$

$$= \square \text{ (N・mm)}$$



(ロ)－第A.18図
クランピングフレーム
解析モデル

$$F = \left(\frac{m_n}{n} + m_c \right) \times N$$

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N)}$$

m_n : 燃料集合体（非核燃料炉心構成品含む）の重量

$$= \boxed{} \text{ (kg)}$$

m_c : クランピングフレーム重量 = $\boxed{}$ (kg)

n : 支持格子押えボルトの本数 = $\boxed{}$ (本)

N : 衝撃加速度 = $\boxed{}$ (m/s²)

l : クランピングフレームの支点間距離 = $\boxed{}$ (mm)

l_1 : トップレールとの支点間距離 = $\boxed{}$ (mm)

l_2 : クランピングフレームとの支点間距離 = $\boxed{}$ (mm)

Z : クランピングフレームの断面係数 = $\boxed{}$ (mm³)

従って、曲げ応力 σ_b は以下ようになる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

クランピングフレーム ($\boxed{}$) の設計降伏強さは $S_y = \boxed{}$ (N/mm²)

であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

M_s が正であるので水平落下によってクランピングフレームの健全性が損なわれることはない。

(ハ) スキン

輸送物落下時にスキンには、収納物等の衝撃荷重がかかる。この衝撃荷重を受ける時の周囲単純支持板のスキンに生じる曲げ応力 (σ_b) は、次式にて求められる。

解析モデル図を(ロ)－第A.19図に示す。

$$\sigma_b = \beta_1 \frac{P a^2}{t^2}$$

ここで

a : 平板支点間の幅 = (mm)

b : 平板支点間の長さ = (mm)

t : 平板の厚さ = (mm)

P : 平板単位面積当りの荷重

$$P = q \times N$$

$$= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

N : 衝撃加速度 = (m/s^2)

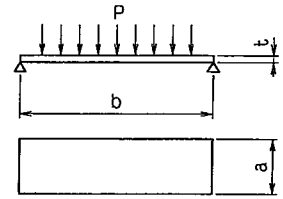
q : 平板単位面積当りの重量

$$= \text{} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

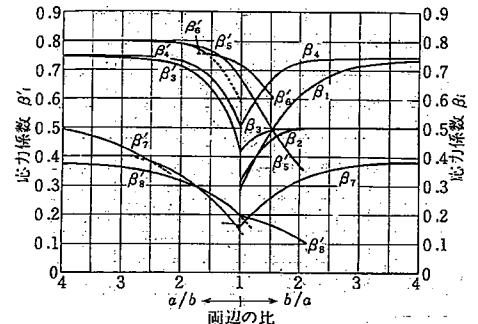
β_1 : 応力係数

$$= 0.64 \text{ ((ロ)－第A.20図より)}$$

$$\frac{b}{a} = \frac{\text{}}{\text{}} = 2.18$$



(ロ)－第A.19図
スキン解析モデル



(ロ)－第A.20図 長方形板
の最大応力の係数 β_1, β_1'

従って数値を代入すれば、曲げ応力は以下の値となる。

$$\sigma_b = 0.64 \times \text{}$$

$$= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

スキン (ボロンステンレス鋼) の設計降伏強さは $S_y = \text{}$ (N/mm^2) であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\text{}}{\text{}} - 1$$

$$= \text{}$$

M_s が正であるので水平落下によってスキンの健全性が損なわれることはない。

(二) 燃料棒被覆管

1.2 m水平落下時に燃料棒被覆管に生ずる応力は、(ロ)－第A.21図に示す等分布荷重を受ける両端支持はりとして、次式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{M}{Z_{e,q}} \cdot N$$

ここで、

σ_z : 曲げ応力

M : 自由端における曲げモーメント
(kg・mm)

$$M = \frac{w\ell^2}{8}$$

w : 燃料棒単位長さ当りの重量 (kg/mm)

ℓ : スパン

N : 加速度 (m/s^2)

$Z_{e,q}$: 燃料棒被覆管の等価断面係数 (mm^3) (A.10.7参照)

A : 燃料棒被覆管の断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)$$

d_o : 燃料棒被覆管外径 (mm)

d_i : 燃料棒被覆管内径 (mm)

(ロ)－第A.21表に各々の燃料棒の仕様、衝撃加速度 (m/s^2) が生じた時の燃料棒被覆管に生ずる応力を示す。

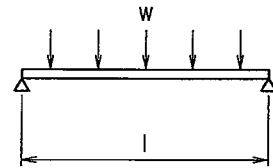
(ロ)－第A.21表より曲げ応力と内圧力によって生ずる応力強さ $P_L + P_B$ は、 $P_L + P_B = \text{}$ (N/mm^2) である。

一方、燃料棒被覆管の設計応力強さは、 $S_m = \text{}$ (N/mm^2) である。ここで、 $P_L + P_B$ の場合の基準値は、 $1.5S_m = 1.5 \times \text{} = \text{}$ (N/mm^2) であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\text{}}{\text{}} - 1$$

$$= \text{}$$

M_s が正であるから1.2 m水平落下による衝撃によって燃料棒の健全性を損なうことはない。



(ロ)－第A.21図 1.2 m水平落下時燃料棒被覆管解析モデル

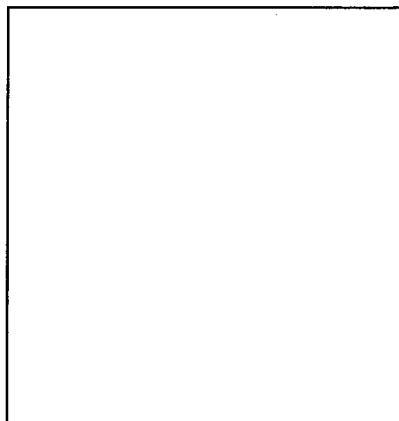
(ロ)－第A.21表 1.2m水平落下時燃料棒被覆管に生ずる応力

燃料タイプ		14×14 10フィート	14×14 12フィート	15×15 12フィート	17×17 12フィート	17×17 12フィート (改良タイプ)
燃料棒重量	W (kg)					
燃料棒全長	L (mm)	3,207	3,856	3,856	3,852	3,863
単位長さ当りの重量	w (kg/mm)					
スパン	ℓ (mm)					
被覆管内径	d _i (mm)	9.48	9.48	9.48	8.36	8.36
被覆管外径	d _o (mm)	10.72	10.72	10.72	9.5	9.5
曲げモーメント	M _{max} (kg・mm)					
等価断面係数	Z _{eq} (mm ³)					
曲げ応力	σ_z (N/mm ²)					
曲げ応力 +内圧力による応力	P _L +P _B (N/mm ²)					

燃料棒内最大圧力は(ロ)－第A.18表から、現行燃料の17×17 12ftが最大であり、自由落下各姿勢での燃料棒被覆管に生ずる応力解析は、安全側に現行燃料の最大圧力 MPa・Gの値を使用し、評価を行う。(17×17改良タイプを除く)

(b) 1.2m上部垂直落下

1.2m上部垂直落下時の評価位置を(ロ)－第A.22図に示す。

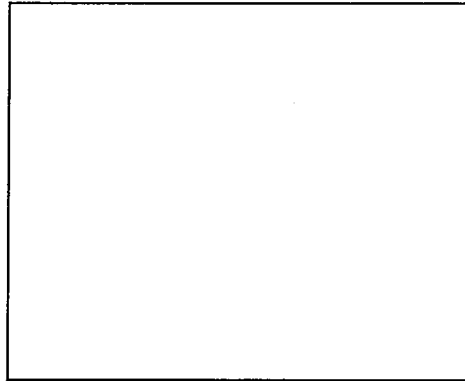


記号	評価位置	評価の有無
㊦	変形量	○
㊧	シヤッキスクリュー	○
㊨	固定枠	○
㊩	スキソ	○
㊪	燃料棒被覆管	○

(ロ)－第A.22図 1.2m上部垂直落下時の評価位置

(イ) 外殻の変形量

1. 2 m上部垂直落下により、外殻に変形が生じて、なお外殻に厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A. 23 図に示す。



(ロ)－第A. 23 図 1. 2 m上部垂直落下時の外殻の変形量解析モデル

1. 2 m上部垂直落下後における輸送容器の変形量及び残量は、(ロ)－第A. 23 図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで、

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

従って以下の値となる。

$$\delta_o = \square - \square = \square \text{ (mm)}$$

よって、1. 2 m上部垂直落下においては外殻のみが変形し、防振構造部が直接落下台に衝突することはない。

(ロ) ジャッキスクリュー

輸送容器が1. 2 mの高さから落下した時、ジャッキスクリューが下向きに落下する。このとき、燃料集合体の衝撃力がジャッキスクリューにかかる。このときのジャッキスクリューの座屈限界荷重、圧縮荷重及びねじ部のせん断強度を求め、ジャッキスクリューが破損しないことを示す。

解析モデルを(ロ)－第A. 24 図に示す。

(i) ジャッキスクリュウの座屈

タイプAとタイプBは、ねじ径及び固定部の長さが同一で結果が同じとなるため、タイプAにて解析を行う。

ジャッキスクリュウが受ける衝撃荷重Pは次式にて与えられる。

$$P = \frac{m \times N}{n}$$

ここで、

m : 燃料集合体（非核燃料炉心構成品含む）の重量

$$= \boxed{} \text{ (kg)}$$

N : 燃料集合体に生ずる衝撃加速度

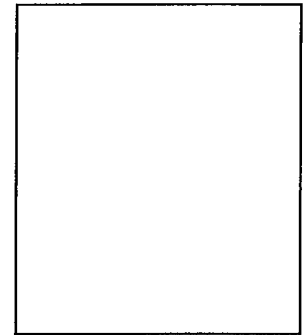
$$= \boxed{} \text{ (m/s}^2\text{)}$$

n : ジャッキスクリュウの本数 $\boxed{}$ (本)

従って以下の値となる。

$$P = \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N)}$$



(ロ) - 第A.24図
ジャッキスクリュウの解析モデル

また、ジャッキスクリュウの座屈限界荷重P_Kは次式にて与えられる。

$$P_K = \frac{\alpha \pi^2 E I}{\ell^2} \quad (12)$$

ここで、

項 目	記 号	タイプA	タイプB
ジャッキスクリュウの状態による係数	α (-)	}	} 同 左
ジャッキスクリュウの縦弾性係数	E (N/mm ²)		
ジャッキスクリュウの断面2次モーメント	I (mm ⁴)		
$I = \pi \times d^4 / 64$	-		
$I = \pi \times d^4 / 64$ のねじ部谷径	d (mm)		
ジャッキスクリュウの固定部の長さ	ℓ (mm)		

従って以下の値となる。

$$P_K = \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N)}$$

座屈限界荷重に対する余裕率 M_s は

$$M_s = \frac{\text{[]}}{\text{[]}} - 1$$

$$= \text{[]}$$

M_s が正であるからジャッキスクリューは健全である。

(ii) ジャッキスクリュー及び固定枠のねじ山の強度

タイプAとタイプBは、ねじ径及び固定枠ねじ部の長さが同一で結果が同じとなるため、タイプAにて解析を行う。

ジャッキスクリュー（おねじ）及び固定枠（めねじ）に働くせん断応力は次のようになる。

$$\text{ジャッキスクリュー} : \tau_B = \frac{W_a}{\pi D_1 \times \left\{ \frac{P}{2} + (d_2 - D_1) \tan \alpha \right\} \cdot Z} \quad (\text{おねじ側})^{(13)}$$

$$\text{固定枠} : \tau_N = \frac{W_a}{\pi d \times \left\{ \frac{P}{2} + (d - D_2) \tan \alpha \right\} \cdot Z} \quad (\text{めねじ側})^{(13)}$$

ここで、

W_a : ジャッキスクリューにかかる荷重

$$W_a = \frac{m \times N}{n} = \text{[]}$$

$$= \text{[]} \text{ (N)}$$

m : 燃料集合体（非核燃料炉心構成品含む）の重量

$$= \text{[]} \text{ (kg)}$$

N : 燃料集合体に生ずる衝撃加速度 = [] (m/s^2)

n : ジャッキスクリューの本数 = [] (本)

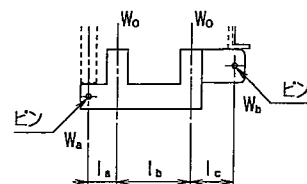
項 目	記 号	タイプA	タイプB		
めねじの内径	D_1 (mm)	}	}		
めねじの有効径	D_2 (mm)				
おねじの外径	d (mm)				
おねじの有効径	d_2 (mm)				
ねじのピッチ	P (mm)			} 同 左	
負荷能力のねじ山の数	Z (-)				
$Z = (L - 0.5P) / P$	-				
めねじ部の長さ	L (mm)				
ねじれの半角	α ($^\circ$)				

タイプAとタイプBの各断面の形状を比較すると、タイプAの方が断面積や断面係数が小さく厳しい評価となるため、タイプAにて解析を行う。

(ロ)－第A.25 図よりピンの部分に生ずる荷重は次のように表わされる。

$$W_a = \frac{W_o(l_b + 2l_c)}{l_a + l_b + l_c}$$

$$W_b = \frac{W_o(2l_a + l_b)}{l_a + l_b + l_c}$$



(ロ)－第A.25 図
固定枠の解析モデル(1)

ここで、

W_o : ジャッキスクリーに生ずる衝撃荷重 (N)

$$W_o = \frac{m}{n} \times N = \boxed{} = \boxed{} \text{ (N)}$$

m : 収納物の最大重量 = $\boxed{}$ (kg)

n : ジャッキスクリーの本数 = $\boxed{}$ (本)

N : 衝撃加速度 = $\boxed{}$ (m/s^2)

l_a : クロスフレーム側支点よりジャッキスクリー中心までの距離 = $\boxed{}$ (mm)

l_b : ジャッキスクリー中心間距離 = $\boxed{}$ (mm)

l_c : ジャッキスクリー中心より反対側支点までの距離 = $\boxed{}$ (mm)

以上より

$$W_a = \boxed{} = \boxed{} \text{ (N)}$$

$$W_b = \boxed{} = \boxed{} \text{ (N)}$$

ところで、固定枠のD部は剛構造であるため、A断面及びB断面に生ずる応力、また、C断面に生ずる応力を(ロ)－第A.26 図のようにモデル化し評価する。曲げ応力 (σ_b)、せん断応力 (τ) は次の式より求められる。

$$\sigma_{bi} = \frac{M_i}{Z_i}$$

$$\tau_i = \frac{W_i}{A_i}$$

M_i : 曲げモーメント

$$M_i = W_i \cdot l_i$$

W_i : ジャッキスクリーにかかる衝撃荷重 (N)

l_i : 解析モデルのはりの長さ (mm)

(ロ)－第A.22 表参照)

Z_i : 断面係数 (mm³)

$$Z_i = \frac{1}{6} b_i h_i^2$$

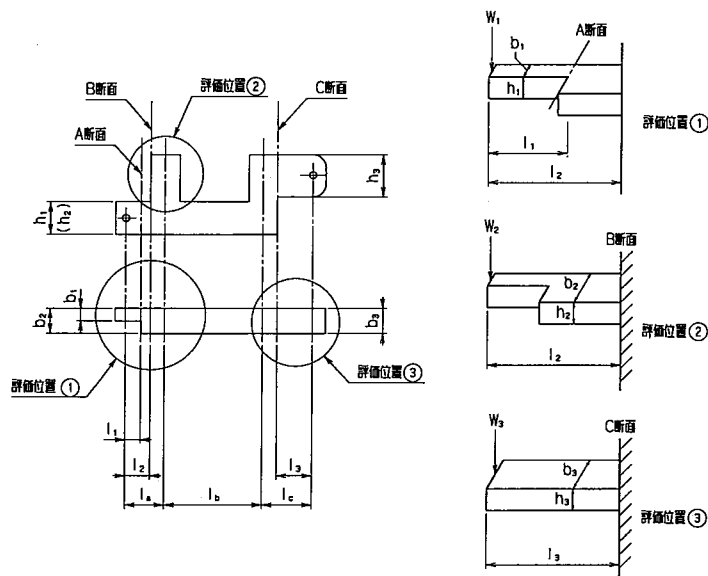
A_i : 断面積 (mm²)

$$A_i = b_i h_i$$

b_i : はりの断面幅 (mm)

h_i : はりの断面高さ (mm)

((口) - 第A.22表参照)



((口) - 第A.26図 固定枠の解析モデル(2)

各評価位置における断面仕様及びこれらより求められる曲げ応力, せん断応力及び合成応力を((口) - 第A.22表)に示す。

(ロ) - 第A.22表 各部に生ずる応力

項 目	記 号	A断面 (i = 1)		B断面 (i = 2)		C断面 (i = 3)	
		タイプA	タイプB	タイプA	タイプB	タイプA	タイプB
衝撃荷重	W_i (N)						
はりの断面幅	b_i (mm)						
はりの断面高さ	h_i (mm)						
はりの長さ	l_i (mm)						
断面面積	A_i (mm ²)						
断面係数	Z_i (mm ³)						
曲げモーメント	M_i (N・mm)						
曲げ応力	σ_{bi} (N/mm ²)						
せん断応力	τ_i (N/mm ²)						
合成応力	σ (N/mm ²)						

以上より最も大きな応力を生ずるB断面について、合成応力を求めると次のようになる。

σ : 合成応力 (N/mm²)

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_{bi} + \sqrt{\sigma_{bi}^2 + 4\tau_i^2})$$

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ここで固定枠 ($\boxed{}$) の設計降伏強さは $S_y = \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ であるので余裕率は M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

余裕率は正であり 1.2 m 垂直落下時に生ずる衝撃荷重によって、固定枠の健全性を損なうことはない。

(二) スキン

輸送物落下時に、長方形板のスキン自重による衝撃荷重がかかる。この衝撃荷重を受ける時に長方形板のスキンに生じる圧縮応力 (σ_c) は、次式にて求められる。

解析モデル図を(ロ)―第A.27図に示す。

$$\sigma_c = \frac{m}{A} \times N$$

ここで、

A : スキンの衝突部断面積

$$A = a \times t \times n$$

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

a : 平板の幅 = $\boxed{} \text{ (mm)}$

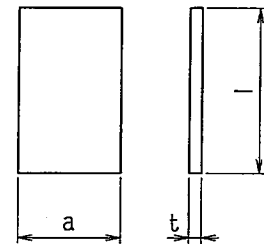
t : 平板の厚さ = $\boxed{} \text{ (mm)}$

n : 平板の枚数 = $\boxed{} \text{ (枚)}$

m : スキンにかかる重量 = $\boxed{} \text{ (kg)}$

N : 衝撃加速度 = $\boxed{} \text{ (m/s}^2\text{)}$

従って数値を代入すれば、圧縮応力 σ_c は以下の値となる。



(ロ)―第A.27図
スキン解析モデル

$$\sigma_c = \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

スキン（ボロンステンレス鋼）の設計降伏強さは、 $S_y = \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

M_s が正であるので垂直落下によってスキンの健全性が損なわれることはない。

(ホ) 燃料棒被覆管

燃料棒の強度は次の項目について評価する。

- (i) 衝撃力により被覆管に生じる圧縮応力
- (ii) 被覆管の座屈

(i) 被覆管に生じる圧縮応力

燃料棒は下部ノズルに落下する。この時、燃料棒の自重による衝撃荷重が被覆管に働く。この衝撃荷重により被覆管に生じる圧縮応力を求め、被覆管が健全であり、燃料棒の密封性が維持されることを示す。

衝撃荷重（ P ）が作用した時、被覆管に生じる圧縮応力（ σ_c ）を次式より求める。

$$\sigma_c = \frac{-P}{A}$$

P ：被覆管に働く衝撃荷重（ N ）

$$P = m \cdot N$$

m ：燃料棒の重量（ kg ）

N ：燃料棒に生じる衝撃加速度・ g （ m/s^2 ）

A ：被覆管の断面積（ mm^2 ）

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

D_o ：被覆管の外径（ mm ）

D_i ：被覆管の内径（ mm ）

各々の燃料棒について燃料棒重量（ m ）、被覆管の外径（ D_o ）、内径（ D_i ）及び $N = \boxed{} \text{ (m/s}^2\text{)}$ の加速度が生じたときの各被覆管に生ずる圧縮応力（ σ_c ）の計算結果を(ロ)－第A.23表に示す。

(ロ)－第A.23表により圧縮応力が最大となるのは14×14型12ft及び15×15型12ft燃料集合体を収納した場合で、 $\sigma_c = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ である。

また、(ロ)－第A.19表に示す内圧力によって生ずる応力を考慮すると一次一般膜応力 P_m は次のようになる。

$$P_m = \text{Max} |(\sigma_c + \sigma_z) - \sigma_\theta| = \boxed{} = \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ここで設計応力強さは $S_m = \boxed{} \text{ N/mm}^2$ であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

余裕率は正であり 1. 2 m 自由落下時において、燃料棒被覆管の健全性は損なわれない。

(ロ) - 第 A. 23 表 各被覆管に生ずる圧縮応力

型 式	燃料棒重量 (m kg)	被覆管外径 (D _o mm)	被覆管内径 (D _i mm)	圧縮応力 (σ _c N/mm ²)
14×14 型 10 フィート		10.72	9.48	
14×14 型 12 フィート		10.72	9.48	
15×15 型 12 フィート		10.72	9.48	
17×17 型 12 フィート		9.5	8.36	
17×17 型 12 フィート (改良タイプ)		9.5	8.36	

(ii) 被覆管の座屈

燃料棒が下部ノズルに落下する時、被覆管に働く衝撃荷重を求め、この衝撃荷重が限界座屈荷重より小さいことを示す。

(ロ) - 第 A. 28 図に解析モデルを示す。

被覆管の座屈荷重 (P_k) を次式より求める。

$$P_k = \frac{n \pi^2 E \cdot I}{\ell^2} \quad [12]$$

n : 端末条件で定まる係数

$$n = \boxed{} \text{ (固定係数)}$$

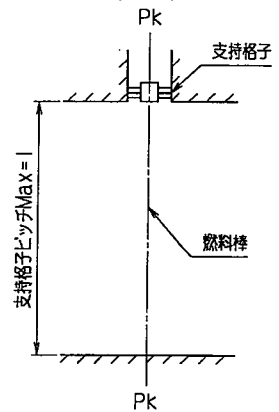
E : 燃料棒被覆管縦弾性係数

$$E = \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

I : 被覆管の断面二次モーメント

$$I = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) \text{ (mm}^4\text{)}$$

D_o : 被覆管の外径 (mm)



(ロ) - 第 A. 28 図
被覆管の座屈解析モデル

D_i : 被覆管の内径 (mm)

ℓ : 支持格子の最長スパン (mm)

また, 被覆管に働く衝撃荷重 (P) を次式より求める。

$$P = m_t \times N$$

m_t : 被覆管の重量 (kg)

N : 被覆管に生ずる衝撃加速度 $\cdot g$ (m/s^2)

以上より, 各々の型の被覆管について, 被覆管の外径 (D_o), 内径 (D_i) 及び重量 (m_t) と支持格子のスパン (ℓ), 衝撃加速度 ($N = \square (m/s^2)$) が生じた時の各々の型の被覆管の限界座屈荷重 (P_k) 及び被覆管に働く衝撃荷重 (P) の計算結果を(ロ)一第A.24表に示す。

被覆管に働く衝撃荷重 (P) は14×14型12ft 及び15×15型12ft の燃料棒被覆管で最も大きい。この時の余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{P_k}{P} - 1$$

$$= \frac{\square}{\square} - 1$$

$$= \square$$

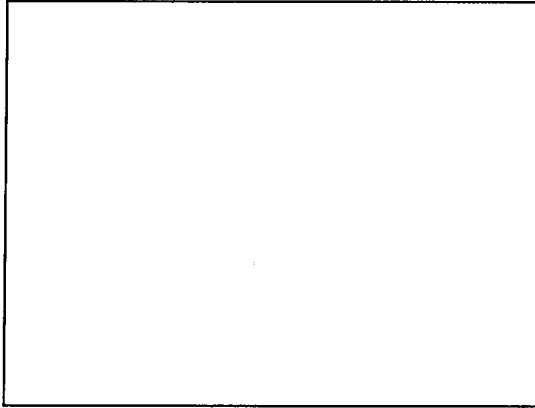
余裕率が正であるので被覆管は落下により座屈することなく健全である。

(ロ)一第A.24表 被覆管に生ずる衝撃荷重

型 式	被覆管 の 外 径 (D_o mm)	被覆管 の 内 径 (D_i mm)	被覆管 の 重 量 (m_t kg)	支持格子 間スパン (ℓ mm)	限界座屈 荷 重 (P_k N)	衝撃荷重 (P N)
14×14型10フィート	10.72	9.48				
14×14型12フィート	10.72	9.48				
15×15型12フィート	10.72	9.48				
17×17型12フィート (改良タイプ含む)	9.5	8.36				

(c) 1.2 m下部垂直落下

1.2 m下部垂直落下時の評価位置を(ロ)－第A.29図に示す。



記号	評価位置	評価の有無
㊦	変形量	○
㊧	ピボットマウント取付ボルト	○
㊨	スキン	○
㊩	スケルトン組立体	○

(ロ)－第A.29図 1.2 m下部垂直落下時の評価位置

(イ) 外殻の変形量

1.2 m下部垂直落下により外殻に変形が生じて、なお外殻に厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A.30図に示す。



(ロ)－第A.30図 1.2 m下部垂直落下時外殻の変形量解析モデル

1.2 m下部垂直落下後における輸送容器の変形量及び残量は、(ロ)－第A.30図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで、

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

従って以下の値となる。

$$\delta_o = \square - \square = \square \text{ (mm)}$$

よって、1.2 m下部垂直落下においては外殻のみが変形し、防振構造部が直接落下台に衝突することはない。

(ロ) ピボットマウント取付ボルト

1. 2 m 垂直落下時, クランピングフレーム自重による衝撃荷重がかかる。この衝撃荷重による取付ボルト部に発生する引張応力 (σ_t) 及びせん断応力 (τ) は, 次式より求められる。

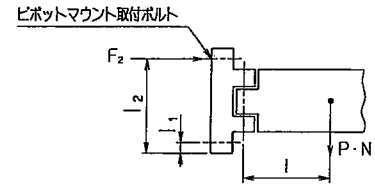
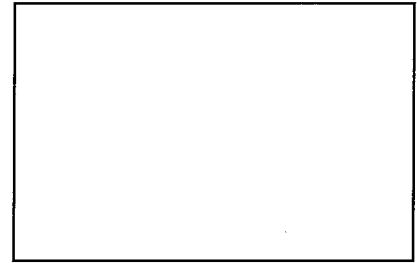
解析モデルを(ロ)－第A.31図に示す。

$$\sigma_t = \frac{F_2}{A} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで

F_2 : 取付ボルトにかかる引張力

$$F_2 = \frac{P}{l_1^2 + l_2^2} \times \frac{l}{\sqrt{2}} \times l_2 \times N$$



(ロ)－第A.31図
ピボットマウント取付ボルト解析モデル

$$= \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N)}$$

P : クランピングフレーム重量 = $\boxed{}$ (kg)

l : クランピングフレーム重心迄の距離 = $\boxed{}$ (mm)

l_1 : ピボットマウント下端から取付ボルトまでの距離 = $\boxed{}$ (mm)

l_2 : ピボットマウント下端から取付ボルトまでの距離 = $\boxed{}$ (mm)

N : 衝撃加速度 = $\boxed{}$ (m/s^2)

A : 取付ボルト ($\boxed{}$) の断面積

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \times \boxed{}^2 = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

d : 取付ボルト ($\boxed{}$) の有効径 = $\boxed{}$ (mm)

従って

$$\sigma_t = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

また, せん断応力 (τ) は次式より求められる。

$$\tau = \frac{P}{n \cdot A} \times N \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで,

P : クランピングフレーム重量 = $\boxed{}$ (kg)

A : 取付ボルトの断面積 = $\boxed{}$ (mm^2)

N : 衝撃加速度 = (m/s²)

n : 取付ボルト本数 = (本)

従って

$$\tau = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

この時の合成応力を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\sigma_t + \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2} \right)$$

$$= \text{}$$

$$= \text{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

σ_t : ピボットマウント取付ボルトに生じる引張応力 = (N/mm²)

τ : ピボットマウント取付ボルトに生じるせん断応力 = (N/mm²)

ピボットマウント取付ボルト () の設計降伏強さ S_y = (N/mm²)

であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\text{}}{\text{}} - 1$$

$$= \text{}$$

M_s が正であるから取付ボルトは健全性を損なわない。

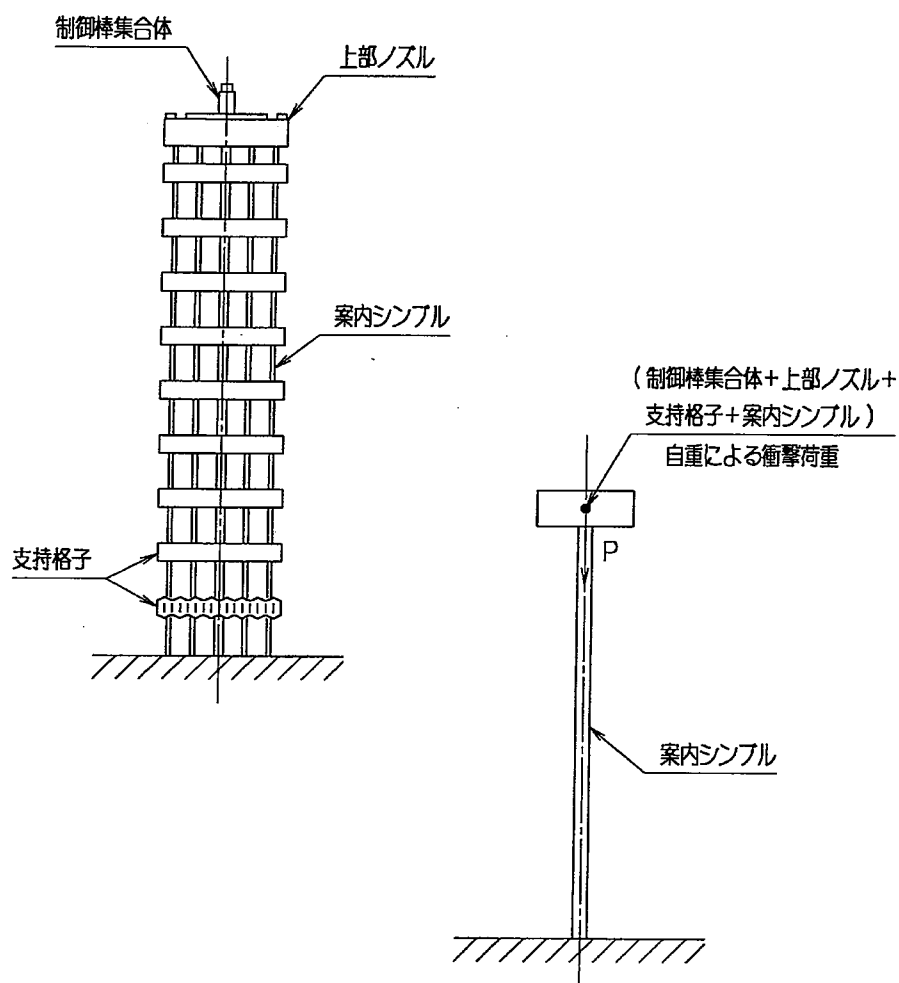
(ハ) スキン

付属書類 A. 10. 5 (ロ) - 第 A. 39 表より 1. 2 m 下部垂直落下に発生する衝撃加速度は 1. 2 m 上部垂直落下と同じであるので、強度計算は省略する。

(二) スケルトン組立体 (下図参照)

燃料集合体の落下により衝撃荷重を受ける時の案内シンプルに生じる圧縮応力を求めることによりスケルトン (案内シンプルで構成する燃料集合体の骨格) に発生する応力を評価する。

ここでは条件の厳しい燃料集合体に制御棒クラスタを内装した場合について評価する。(ロ) - 第A. 32 図に解析モデルを示す。



(ロ) - 第A. 32 図 スケルトン組立体 (案内シンプル) 解析モデル

この場合、案内シンプルには制御棒クラスタ、上部ノズル、支持格子及び案内シンプルの自重による衝撃荷重が働く。この衝撃荷重によって案内シンプルに発生する圧縮応力を求め案内シンプルが健全であることを示す。

案内シンプル1本当りに発生する圧縮応力 (σ_c) を次式により求める。

$$\sigma_c = \frac{(m_s + m_G + m_N + m_c \times n) \times N}{n \cdot A}$$

m_s : 制御棒クラスタの重量 (kg)

m_G : 支持格子の総重量 (kg)

m_N : 上部ノズルの重量 (kg)

m_c : 案内シンプル1本当りの重量 (kg)

N : 燃料集合体に生じる衝撃加速度 = (m/s^2)

n : 案内シンプル (炉内計装用案内シンプルを含む) の本数

A : 案内シンプルの最小断面積 (mm^2)

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

D_o : 案内シンプルの外径 (mm)

D_i : 案内シンプルの内径 (mm)

各々の型の燃料集合体について各部材の重量 (m_s, m_G, m_N, m_c), 案内シンプル数 (炉内計装用案内シンプルを含む: n), 案内シンプルの外径 (D_o), 内径 (D_i) 及び $N = \text{}$ (m/s^2) の加速度が生じた時の案内シンプルに生ずる圧縮荷重を(ロ)－第A.25表に示す。

(ロ)－第A.25表 スケルトン組立体に生ずる圧縮応力

型 式	制 御 棒 クラスタ重量 (m_s kg)	支持格子 総 重 量 (m_G kg)	上部ノズル 重 量 (m_N kg)	案内シンプル(炉内計装案内シンプル含む)				圧縮応力 (σ_c N/mm ²)
				最小外径及び内径		重 量 (m_c kg)	本 数 (n)	
				(D_o mm)	(D_i mm)			
14×14型10フット				12.2	11.34		17	
14×14型12フット				12.2	11.34		17	
15×15型12フット				12.42	11.56		21	
17×17型12フット				10.9	10.08		25	
17×17型12フット (改良タイプ)				10.9	10.08		25	

(ロ)－第A.25表より14×14型12ft燃料集合体が最も厳しくなる。
ここで案内シンプル(ジルカロイ-4)の設計降伏強さ $S_y = \text{}$ (N/mm^2) であるから余裕率 M_s は次のようになる。

$$M_s = \frac{\text{}}{\text{}} - 1$$

$$= \text{}$$

余裕率は正であるため案内シンプルが、1.2m垂直落下時に受ける圧縮によって健全性が損なわれることはない。

(d) コーナ落下

コーナ落下は(ロ)－第A.34 図に示すように、輸送物の落下点と重心を結ぶ線が、剛平面に対して垂直な場合の落下である。

(ロ)－第A.39 表に示すように、上部及び下部コーナ落下での解析加速度は輸送容器外殻で□□□□，防振構造部で□□□□と同じ値である。また、変形量は容器外側で□□□□mm，容器内側は防振構造部と衝突しない。

この時の加速度を垂直成分及び水平成分に分解し、(ロ)－第A.26 表に示す。角度； θ については、(ロ)－第A.34 図に示すように $\theta = \square^\circ$ である。

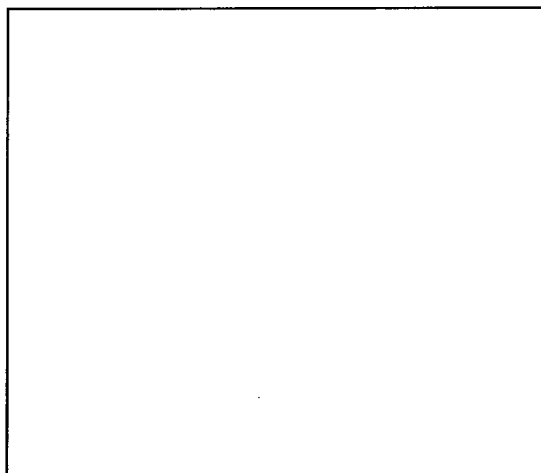
(ロ)－第A.26 表 コーナ落下時の解析加速度

(単位：g (m/s²))

落下方向		落下方向加速度 (N)		垂直方向加速度 ($N_v = N \cos \theta$)		水平方向加速度 ($N_H = N \sin \theta$)	
		輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部
コーナ	上部						
	下部						

(イ) 評価位置

1. 2 mコーナ落下時の評価は、以下の位置について行う。
1. 2 mコーナ落下時の応力評価位置を(ロ)－第A. 33 図に示す。

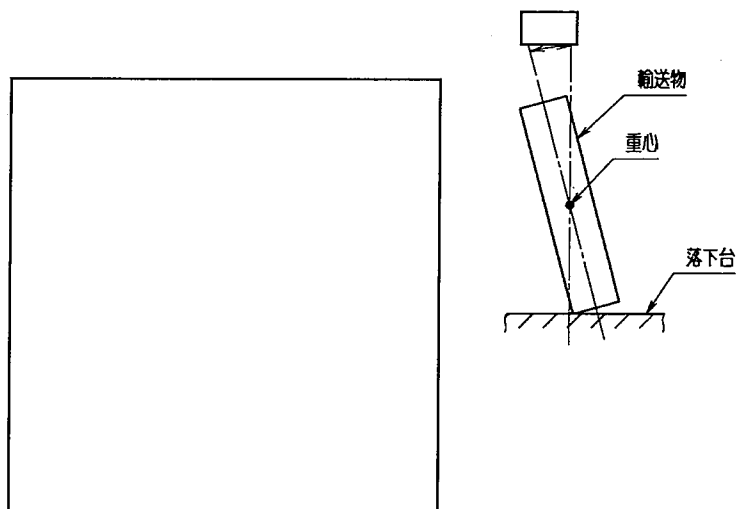


記号	評価位置	評価の有無
①	変形量	○
②	クランピングフレーム	○
③	ジャッキスクリュー	○
④	固定枠	○
⑤	スケルトン組立体	○
⑥	ピボットマウント取付ボルト	○
⑦	スクリュー	○
⑧	燃料棒被覆管	○

(ロ)－第A. 33 図 1. 2 mコーナ落下時の評価位置

(ロ) 外殻の変形量

1.2 mコーナ落下により、外殻に変形が生じても、なお、外殻に厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A.34図に示す。



(ロ)－第A.34図 1.2 mコーナ落下時の外殻の変形量解析モデル

1.2 mコーナ落下後における外殻の変形量及び残量は、(ロ)－第A.34図より次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

従って

$$\delta_o = \boxed{} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

よって変形は外殻のみで、防振構造部が直接落下台に衝突することはない。



(ハ) 防振構造部及び収納物に生ずる応力

(ロ)－第A.26表から各方向加速度成分は、垂直落下時に生ずる加速度よりも大きくなっている。よって本項では、各方向別に各部に生ずる応力を求め、荷重の作用状況により、単独または組合せにより評価を行う。

各部に生ずる応力は、「A.5.3(2)(a),(b)及び(c)項での水平落下、垂直落下」の項で述べたものと同じの評価位置について同一手法の解析を行う。

解析結果を(ロ)－第A.27表に示す。

(ロ) - 第A.27表(1) 1.2mコーナ落下解析結果

要件	条件	解析項目	解析基準値	解析結果			余裕率
				垂直成分応力	水平成分応力	組合せ応力	
A型輸送物	上部コーナ落下	(1) クランピングフレーム 曲げ応力					
		(2) 燃料棒被覆管 ① 曲げ+内圧力+圧縮 (15×15型 12ft)					
		② 座屈荷重					
		(3) ジャッキスクリュー () ① 座屈荷重					
		② ねじ山のせん断応力					
		(4) 固定枠 () ① ねじ山のせん断応力					
		② 本体 (a) 合成応力					
		(5) スキン (ボロンステレス鋼) 曲げ応力+圧縮応力					

(ロ)一第A.27表(2) 1.2mコーナーナ落下解析結果

要件	条件	解析項目	解析基準値	解析結果			余裕率
				垂直成分応力	水平成分応力	組合せ応力	
A型輸送物	下部コーナーナ落下	(1) スケルトン組立体 (ジルカロイ-4) 曲げ応力+圧縮応力 1. 14×14 10ft 2. 14×14 12ft 3. 15×15 12ft 4. 17×17 12ft 5. 17×17 12ft (改良タイプ)					
		(2) ピボットマウント取付ボルト (<input type="checkbox"/>) 合成応力					

A. 5. 4 積み重ね試験

本項では、輸送物に告示で定められた荷重を加えた場合について検討する。告示に従って輸送物重量の5倍にした圧縮荷重（ F_1 ）と輸送物の鉛直投影面に13kPaを乗じた荷重（ F_2 ）を比較し、いずれか大きい荷重を加えた場合に輸送物に生ずる応力について解析する。

(1) 輸送物の5倍荷重（ F_1 ）

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 5 \cdot m \\
 &= 5 \times \boxed{} \times 9.81 \\
 &= \boxed{} \text{ (N)} \\
 m &: \text{輸送物最大重量} \boxed{} \text{ (kg)}
 \end{aligned}$$

(2) 鉛直投影面に13kPaを乗じた荷重（ F_2 ）

$$\begin{aligned}
 F_2 &= 13 \times 10^{-3} \times D \times L \\
 &= 13 \times 10^{-3} \times \boxed{} \times \boxed{} \\
 &= \boxed{} \text{ (N)} \\
 D &: \text{容器幅} \quad \boxed{} \text{ (mm)} \\
 L &: \text{容器長さ} \quad \boxed{} \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

従って、 $F_1 = \boxed{} \text{ (N)} > F_2 = \boxed{} \text{ (N)}$ であるから、容器に作用する圧縮荷重としては $\boxed{} \text{ (N)}$ である。

ここで輸送物にかかる荷重は輸送物の自重プラス5倍荷重（ F_1 ）となり、その値は荷重 $F = \boxed{} \text{ (N)}$ となる。この時、外殻に発生する曲げ応力を求め、外殻の健全性を示す。

輸送物に荷重（ F ）が外殻に作用した場合、外殻を両端単純支持のほりと近似する。解析モデルを(ロ)－第A.35図に示す。外殻に発生する曲げ応力（ σ_b ）を次式より求める。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

M : 曲げモーメント

$$M = \frac{F L}{8}$$

$$= \frac{\boxed{}}{8}$$

$$= \boxed{} \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

F : 荷重 $\boxed{} \text{ (N)}$

L : 容器の長さ $\boxed{} \text{ (mm)}$

Z : 容器の断面係数

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_1}$$

$$= \frac{\pi}{32} \times \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (mm}^3\text{)}$$

D₁ : 外筒の外径 = $\boxed{}$ (mm)

D₂ : 外筒の内径 = $\boxed{}$ (mm)

故に求める曲げ応力 (σ_b) は数値を代入して

$$\sigma_b = \boxed{}$$

$$= \boxed{} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

外筒 ($\boxed{}$) の設計降伏強さは

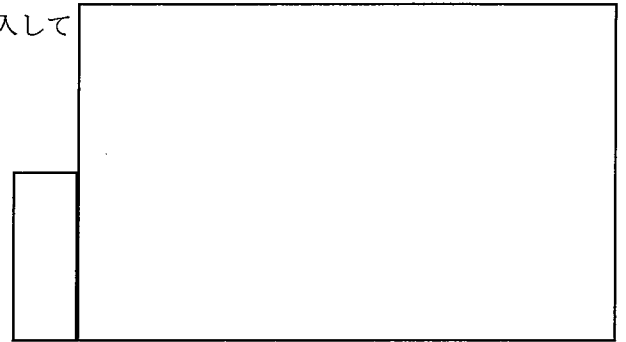
S_y = $\boxed{}$ (N/mm²) である。

従って余裕率M_sは

$$\text{余裕率 } M_s = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} - 1$$

$$= \boxed{}$$

余裕率は正であり，輸送物は自重の5倍の圧縮荷重によって健全性が損なわれることはない。



(ロ) - 第A. 35 図 曲げ応力解析モデル

A. 5.5 貫 通

本項の試験条件として、重量6 kg で直径32 mm の棒をその半球形の先端を下にして、1 m の高さより輸送物の最も弱い部分に落下させた場合にも輸送物の健全性が保持されていることを解析により示す。

本輸送物の密封境界は燃料棒であり、燃料棒で構成されている燃料集合体は、外殻である上蓋及び下部容器に収納されている。この外殻の外筒の板厚は最小 mm である。

ここでは、上記の棒が外殻の外筒を直撃する場合、(ロ)－第A. 36 図に示すように板厚 mm の外殻外筒に棒が外筒を最も貫通しやすい姿勢で衝突する場合について説明する。

落下前の棒の持つポテンシャルエネルギー

E_1 (N・mm) は次式で与えられる。

$$E_1 = m \cdot h \cdot g$$

ここで、

m : 棒の重量 = 6 (kg)

h : 落下高さ = 1,000 (mm)

g : 重力加速度 = 9.81 (m/s²)

従って

$$E_1 = 5.89 \times 10^4 \text{ (N・mm)}$$

となる。

一方、棒が板厚 mm の外筒を貫通するために必要なエネルギー E_2 (N・mm) は次式で与えられる。

解析モデルを(ロ)－第A. 37 図に示す。

$$E_2 = \int_0^t \tau_{cr} \cdot \pi \cdot d \cdot (t - y) \cdot dy$$

ここで、

τ_{cr} : 外筒のせん断強さ (N/mm²)

$$\tau_{cr} = 0.6 S_u = 0.6 \times \text{$$

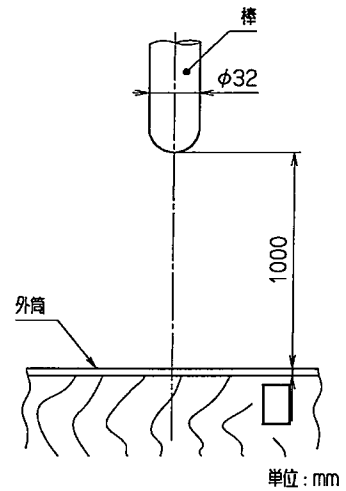
$$= \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

d : 棒の直径 = 32 (mm)

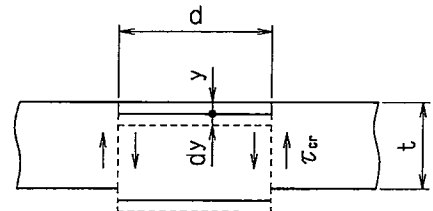
t : 外筒の板厚 = (mm)

積分を行い数値を代入すると

$$E_2 = \tau_{cr} \cdot \pi \cdot d \times \frac{1}{2} \times t^2$$



(ロ)－第A. 36 図 貫通モデル



(ロ)－第A. 37 図 せん断モデル

$$= \square \times \pi \times 32 \times \frac{1}{2} \times \square^2$$

$$= \square \text{ (N} \cdot \text{mm)}$$

となる。

$$E_1 = 5.89 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm} < E_2 = \square \text{ N} \cdot \text{mm}$$

となるから、棒の落下によって外殻の外筒が貫通することはない。

なお、上記エネルギー E_2 は、外筒のせん断によるエネルギーのみを考慮しているが、実際に棒が外筒を貫通するためには外筒の曲げ及び木材の圧縮等にもエネルギーが必要となり E_2 はさらに大きくなるので上記の解析は安全側となっている。

以上に示したように棒の落下により密封境界が影響をうけることはなく、本輸送物の健全性が損なわれることはない。

A. 5.6 角又は縁落下

本輸送物の重量は最大 \square kg であり、本項に該当せず。

A. 5.7 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における本輸送物の要約を各試験項目毎に記述する。

(1) 1.2 m落下

A. 5.3項より、1.2 m各ケースでの落下時の容器外殻の変形量は、mm（水平落下）～mm（コーナ落下）となりその変形はいずれの落下姿勢においても防振構造部に達しない。発生加速度は、容器外筒でG～G，防振構造部でG～
Gであり、この時、密封境界である燃料棒に発生する応力は解析基準値以下であり、燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

(2) 他の要約

自由落下他の圧力、振動、水噴霧及び積み重ね試験に対する解析において、密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

(3) 許容応力との比較

A. 1.2項の設計条件に基づき解析した結果、すべての項目についてA. 1.2項の設計基準を満足している。その結果を、(ロ)－第A.28表(1)～(3)に示す。発生する応力はいずれの場合も解析基準値以下であり、密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

(ロ) - 第A.28表(2) 許容応力との比較

要件	条件	解析項目	解析基準	解析基準値	解析結果	余裕率
A型輸送物	一般の試験条件	3. 1.2m下部垂直落下 (1) ピボットマウント取付ボルト (a) 合成応力 (引張+せん断) (2) スケルトン組立体 (a) 圧縮応力	S_y S_y			
		4. 1.2m上部コーナ落下 (1) クランピングフレーム (a) 曲げ応力 (2) 燃料棒被覆管 (a) 曲げ+圧縮+内圧力の組合せ (b) 座屈荷重 (3) ジャッキスクリュー (a) 座屈荷重 (b) ねじ山のせん断応力 (4) 固定枠 (a) ねじ山のせん断応力 (b) 本体の合成応力 (曲げ+せん断) (5) スキン (a) 曲げ+圧縮の組合せ	S_y $1.5S_m$ P_k P_k $0.6S_y$ $0.6S_y$ S_y S_y			
		5. 1.2m下部コーナ落下 (1) スケルトン組立体 (14×14型 12ft用) (a) 曲げ+圧縮の組合せ (2) ピボットマウント取付ボルト (a) 合成応力 (引張+せん断)	S_y S_y			

(ロ) - 第A.28表(3) 許容応力との比較

要件	条件	解析項目	解析基準	解析基準値	解析結果	余裕率
A 型 輸 送 物	一 般 の 試 験 条 件	積み重ね試験 1. 外筒 (a) 曲げ応力	S_y			
		貫通 1. 外筒 (最少厚さ部)	貫通限界 エネルギー			

A. 6 特別の試験条件

本輸送物は、A型輸送物の要件として本項に該当しない。

A. 7 強化浸漬試験

本輸送物の放射能の量は、 A_2 値の十万倍を超えないので本項に該当しない。

A. 8 放射性収納物

本輸送物の収納物は燃料集合体（非核燃料炉心構成品を内蔵する場合も含む）である。燃料集合体は、(イ)～D項に示すように燃料棒、支持格子、アダプタープレート、上部及び下部ノズル、炉内計装用案内シンプル、制御棒用案内シンプル等から構成されている。

本輸送物の放射性収納物は、二酸化ウランペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットである。

二酸化ウランペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットは、燃料棒を構成する耐熱、耐食性を有するジルカロイ合金（ジルカロイ-4、MDA又はZIRLO）製被覆管に収納され、被覆管の両端は端栓で密封溶接されている。また、被覆管内には、MPa・G～MPa・Gのヘリウムが封入されている。

燃料ペレットの密度は理論密度の約97%であり、最大装荷ウラン量は約kg/燃料集合体〔17×17型12フィート〕、濃縮度は5wt%以下である。

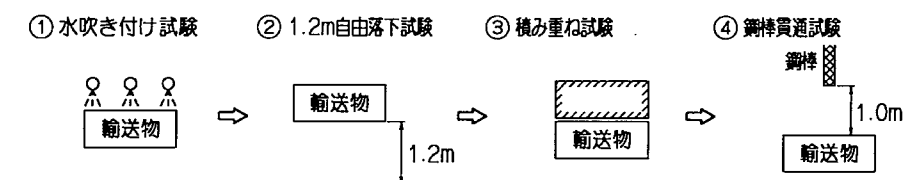
また、1.2m自由落下試験で密封境界である燃料棒は健全性を損なうことはなく、その密封性は維持される。

A. 9 核分裂性輸送物

本輸送物は規則に基づき、核分裂性輸送物の要件に従い、評価する。なお、本輸送物は、A. 4. 2で示すとおり、周囲温度 $-20\sim 38$ 度の温度条件において、亀裂、破損等の生じる等のおそれはない。

A. 9. 1 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

核分裂性輸送物の一般の試験条件としては、(ロ)一第A. 38図に示す試験手順(水吹き付け試験、1. 2 m自由落下試験、積み重ね試験及び鋼棒貫通試験)による重畳効果を考慮し、安全性を評価する。



(ロ)一第A. 38図 一般の試験条件試験手順

A. 9. 1. 1 水噴霧

A. 5. 2と同様、本輸送容器の外殻は円筒状の容器で、水のたまりにくい形状であり、表面は塗装されているので吸水性はなく、また、容器外殻のフランジ部は水密構造になっているので容器内部に水が入らない。

A. 9. 1. 2 自由落下

A. 5. 3と同様であり、その変形は外殻に限られ、いずれも防振構造部に達していない。又密封境界である燃料棒は健全性を保つ。

A. 9. 1. 3 積み重ね試験

A. 5. 4と同様であり、輸送物は健全性を保つ。

A. 9. 1. 4 貫 通

A. 5. 5と同様であり、6 kgの容易に破損しない棒は、輸送物を貫通しない。

以上より、一般の試験条件において、本輸送物が健全性を損なうことはない。

また、一般の試験条件にて、一辺が10cmの立方体を包含するようなくぼみが生じることはなく、外接する直方体の各辺は10cm以上である。

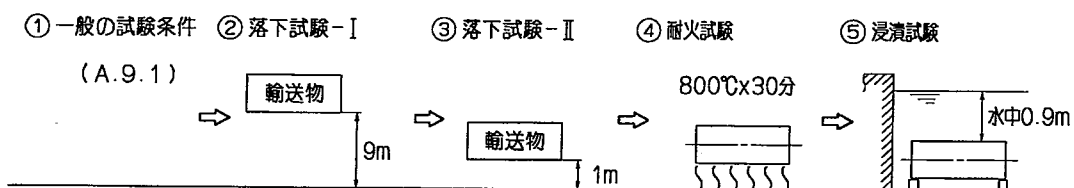
A. 9. 2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

核分裂性輸送物の特別の試験条件としては、(ロ)－第A. 39 図に示す試験手順

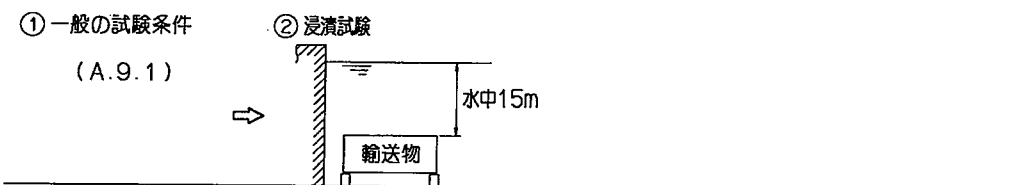
- | | |
|---|--|
| } | ④ 一般の試験条件後の損傷状態 + 9 m 落下試験 + 1 m 貫通試験 + 耐火試験
(800°C × 30分) + 0.9 m 浸漬試験 |
| | ⑤ 一般の試験条件後の損傷状態 + 1.5 m 浸漬試験 |

により、④又は⑤のうち、臨界体系上への影響が大きい9 m落下試験及び耐火試験の緩衝材焼失等による燃料集合体の集合体間隔の近接する④の条件で重畳効果を考慮し、安全性を評価する。

[A]



[B]



(ロ)－第A. 39 図 特別の試験条件試験手順

本輸送物に課せられる特別の試験条件は、以下の通りである。なお、一般の試験条件下で輸送容器は変形するが、輸送物の健全性は維持されている。

1. 強度試験

- ・落下試験 I
- ・落下試験 II

強度試験に関する本輸送物の構造上の評価は、落下試験 I については、一部原型容器試験結果を用いて解析により、落下試験 II については原型容器試験結果を用いて評価している。

まず最初に落下試験 I 及び II において輸送物が最大破損を受けるよう 9 m から自由落下させた時、収納物である燃料集合体の受ける影響と容器の変形について検討する。

強度試験では、落下試験 I と落下試験 II の試験順序が問題となる。たとえば落下試験 I に引続いて落下試験 II を実施した場合、輸送容器の変形は、一様な変形に局所的な変形が累積した形となる。一方、その逆の場合には、落下試験 II によって生じた局所的な変形が落下試験 I の一様な変形に累積せず埋没する形となる。従って、ここでは変形量が大きくなる場合を採用し、落下試験 I に引続いて落下試験 II を実施する場合について行う。

2. 耐火試験

耐火試験は、後述(ロ)－B 熱解析の項に示す。

3. 浸漬試験

浸漬試験は、燃料集合体にかかる外圧との比較によって密封性を検討する。

A. 9. 2. 1 強度試験・落下試験 I (9 m 落下時)

(1) 評価方法

本輸送物において告示第 26 条より一般の試験条件の自由落下 (1.2 m)、輸送物の各落下姿勢での変形を考慮し、9 m 落下による評価を行う。

ここでは、輸送物の落下姿勢として、次の 4 つを考える。

- (i) 垂直落下 (上部, 下部)
- (ii) 水平落下
- (iii) コーナ落下 (上部, 下部)
- (iv) 傾斜落下

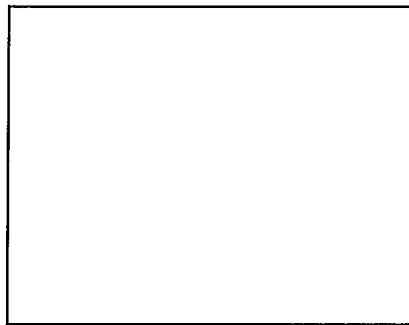
(2) 解析方法及び結果

解析方法はA. 5. 3と同様の手法とし、SHOCKコードを用いて求めた。核分裂性輸送物に生ずる衝撃加速度及び輸送物の変形量の解析結果を付属書類A. 10. 5の(ロ)―第A. 39表に示す。

(a) 9 m上部垂直落下

(イ) 外殻の変形量

9 m上部垂直落下により外殻に変形が生じて、なお外殻の厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)―第A. 40図に示す。



(ロ)―第A. 40図 9 m上部垂直落下時の外殻の変形量解析モデル

9 m上部垂直落下後における外殻の変形量及び残量は、(ロ)―第A. 40図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

(1. 2 m落下後の変形量 (A. 5. 3 (2) (b) 参照) を考慮)

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

従って、以下の値となる。

$$\delta_o = \square - (\square + \square) = \square \text{ (mm)}$$

よって、9 m上部垂直落下の変形は外殻のみで防振構造部が直接落下台に衝突することはない。

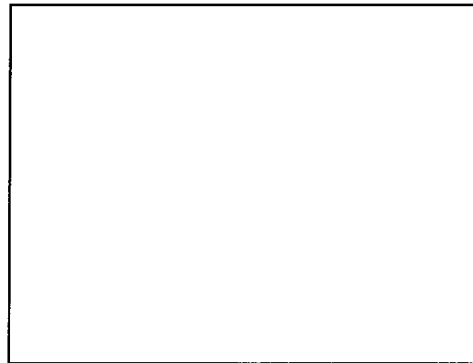
(ロ) 輸送容器及び収納物の強度評価

A. 5. 3項で述べたものと同一の評価位置について同一手法の解析を行う。解析結果を(ロ)―第A. 32表に示す。

(b) 9 m下部垂直落下

(イ) 外殻の変形量

9 m下部垂直落下により，外殻に変形が生じても，なお外殻の厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A. 41 図に示す。



(ロ)－第A. 41 図 9 m下部垂直落下時の外殻の変形量解析モデル

9 m下部垂直落下後における外殻の変形量及び残量は，(ロ)－第A. 41 図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

(1. 2 m落下後の変形量 (A. 5. 3 (2) (c)参照) を考慮)

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

従って，以下の値となる。

$$\delta_o = \square - (\square + \square) = \square \text{ (mm)}$$

よって，9 m下部垂直落下の変形は外殻のみで防振構造部が直接落下台に衝突することはない。

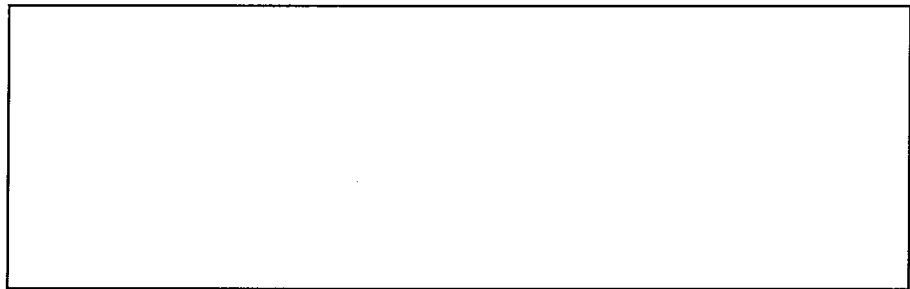
(ロ) 輸送容器及び収納物の強度評価

A. 5. 3 項で述べたものと同一の評価位置について同一手法の解析を行う。解析結果を(ロ)－第A. 32 表に示す。

(c) 9 m水平落下

(イ) 外殻の変形量

9 m水平落下により、外殻に変形が生じて、なお外殻に厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A.42図に示す。



(ロ)－第A.42図 9 m水平落下時の外殻の変形量解析モデル

9 m水平落下後における外殻の変形量及び残量は、(ロ)－第A.42図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - \delta_{Hi} \quad (\text{A.10.8 変形量干渉の有無参照})$$

ここで

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

(1. 2 m落下後の変形量 (A.5.3(2)(a)参照) を考慮)

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

従って、以下の値となる。

$$\delta_o = \boxed{} - \boxed{} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

よって、9 m水平落下時の変形は外殻のみで防振構造部が直接落下台と衝突することはない。

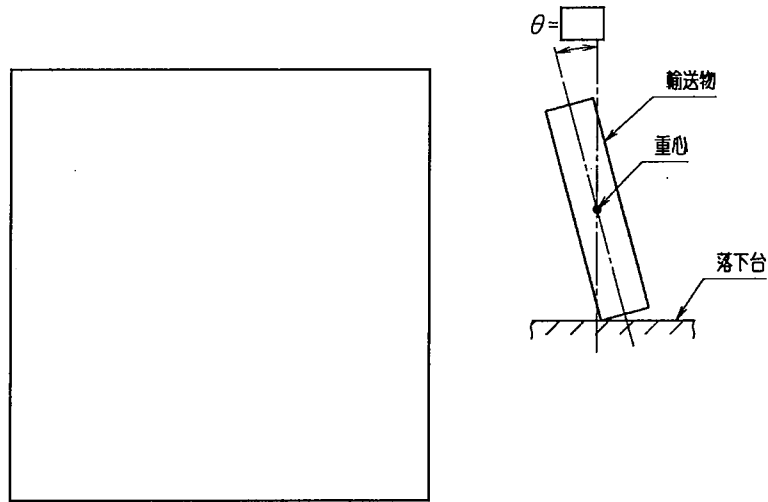
(ロ) 輸送容器及び収納物の強度評価

A.5.3項で述べたものと同じの評価位置について同一手法の解析を行う。解析結果を(ロ)－第A.32表に示す。

(d) 9 m上部コーナ落下

(イ) 外殻の変形量

9 m上部コーナ落下により，外殻に変形が生じても，外殻の厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A. 43 図に示す。



(ロ)－第A. 43 図 9 mコーナ落下時の外殻の変形量解析モデル

9 m上部コーナ落下後における外殻の変形量及び残量は，(ロ)－第A. 43 図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

(1. 2 m落下後の変形量 (A. 5. 3 (2) (d) 参照) を考慮)

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

従って，以下の値となる。

$$\delta_o = \square - (\square + \square) = \square \text{ (mm)}$$

よって，9 m上部コーナ落下時の変形は，外殻のみで防振構造部が，直接落下台に衝突することはない。

(ロ) 防振構造部及び収納物に生ずる応力

(ロ)一第A. 39表より, 加速度を垂直成分及び水平成分に分解し, (ロ)一第A. 29表に示す。角度については(ロ)一第A. 43図に示すように $\theta = \square$ である。

(ロ)一第A. 29表 コーナ落下時の解析加速度

(単位: $g (m/s^2)$)

落下方向	落下方向加速度 (N)		垂直方向加速度 ($N_v = N \cos \theta$)		水平方向加速度 ($N_H = N \sin \theta$)	
	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部
コーナ上部	[Empty Box]					

(ロ)一第A. 39表から各方向加速度成分は垂直落下時に生ずる加速度よりも大きくなる。よって本項では, 各方向別に各部に生ずる応力を求めることとし, 評価は組合せ応力について行う。

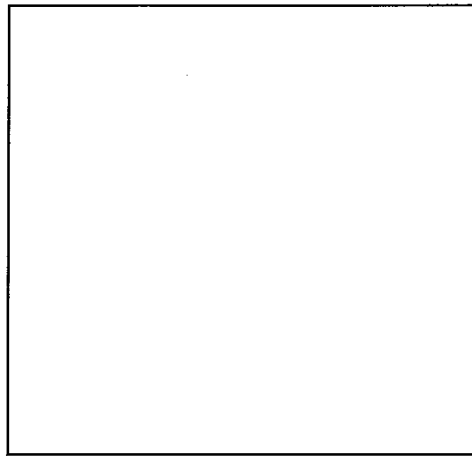
各部に生ずる応力は, 「A. 5. 3自由落下」の項で述べたものと同一の評価位置について同一手法の解析を行う。解析結果を(ロ)一第A. 32表に示す。

なお, 各部の評価位置での余裕率 M_s は正の値であり破損することはない。

(e) 9 m下部コーナ落下

(i) 外殻の変形量

9 m下部コーナ落下により，外殻に変形が生じても，なお，外殻に厚みが残ることを示す。解析モデルを(ロ)－第A.44図に示す。



(ロ)－第A.44図 9 mコーナ落下時の外殻の変形量解析モデル

9 m下部コーナ落下後における外殻の変形量及び残量は，(ロ)－第A.44図により次式で与えられる。

$$\delta_o = \delta_o' - (\delta_{Hi} + \delta_{Ho})$$

ここで

$$\delta_o' : \text{変形前の厚さ} = \square \text{ (mm)}$$

(1. 2 m落下後の変形量 (A. 5. 3 (2) (d)参照) を考慮)

$$\delta_{Hi} : \text{外殻内側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

$$\delta_{Ho} : \text{外殻外側変形量} = \square \text{ (mm)}$$

従って，以下の値となる。

$$\delta_o = \square - (\square + \square) = \square \text{ (mm)}$$

よって，9 m下部コーナ落下時の変形は，外殻のみで防振構造部が，直接落下台に衝突することはない。

(ロ) 防振構造部及び収納物に生ずる応力

(ロ)－第A. 39 表より, 加速度を垂直成分及び水平成分に分解し, (ロ)－第A. 30 表に示す。角度については(ロ)－第A. 43 図に示すように $\theta = \square$ である。

(ロ)－第A. 30 表 コーナ落下時の解析加速度

(単位 : $g (m/s^2)$)

落下方向	落下方向加速度 (N)		垂直方向加速度 ($N_v = N \cos \theta$)		水平方向加速度 ($N_H = N \sin \theta$)	
	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部	輸送容器 外 殻	防 振 構 造 部
コーナ下部	[Empty Box]					

(ロ)－第A. 39 表から各方向加速度成分は垂直落下時に生ずる加速度よりも大きくなる。よって本項では, 各方向別に各部に生ずる応力を求めることとし, 評価は組合せ応力について行う。

各部に生ずる応力は, 「A. 5. 3 自由落下」の項で述べたものと同一の評価位置について同一手法の解析を行う。解析結果を(ロ)－第A. 32 表に示す。

なお, 各部の評価位置での余裕率 M_s は正の値であり破損することはない。

(f) 傾斜落下

9 mの高さからの傾斜落下時, 輸送物の重心は鉛直線上より左右いずれかにずれた位置にくるので, 衝突接点を支点にして輸送物を回転させる力が働く。従って落下衝撃時に発生する衝撃力は, 輸送物の重心を通る鉛直線上の落下であるコーナ落下より軽減することになるので強度計算は省略する。

(3) 結果の要約

(a) 上部垂直落下

上部垂直落下の場合, 外殻の総変形は \square mm である。また, 衝撃加速度は, 防振構造部で $\square \cdot g (m/s^2)$ であり, この時密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので, その密封性は維持される。

(b) 下部垂直落下

下部垂直落下の場合, 外殻の総変形は \square mm である。衝撃加速度は, 防振構造部で $\square \cdot g (m/s^2)$ であり, この時密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので, その密封性は維持される。

(c) 0° 方向下向水平落下

0° 方向下向水平落下の場合、外殻の総変形は□mmである。衝撃加速度は、防振構造部で□・g（最大衝撃加速度は180° 方向で□・g）（m/s²）であり、この時密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

(d) 上部コーナ落下

上部コーナ落下の場合、外殻の総変形は□mmである。衝撃加速度は、防振構造部で□・g（m/s²）〔垂直方向□・g（m/s²）及び水平方向□・g（m/s²）〕であるが密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

(e) 下部コーナ落下

下部コーナ落下の場合、外殻総変形□mmである。衝撃加速度は、防振構造部で□・g（m/s²）〔垂直方向□・g（m/s²）及び水平方向□・g（m/s²）〕であるが密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

(f) 解析結果と原型試験結果の比較

付属書類A.10.6 (ロ)―第A.40表より変形量は、いずれの落下姿勢においても、試験に対応する解析結果より小さい。従って本解析結果は安全側といえる。

また、衝撃加速度についても、変形量と同様いずれの落下姿勢においても、解析結果より小さく解析結果は安全側といえる。

(g) 以上より、いかなる落下姿勢においても容器外殻は塑性変形するが密封境界である燃料棒は健全性を損なわないので、その密封性は維持される。

A. 9. 2. 2 強度試験・落下試験Ⅱ（1 m落下時）

落下試験Ⅱは輸送物が最大破損するように150mm径の200mm長以上の丸鋼に1mの高さから落下させる試験である。

落下試験Ⅱによる輸送物の変形・破損の評価はすべて原型試験の結果を用いて行う。

（ロ）－第A. 31表に原型試験の強度試験・落下試験Ⅱの変形量及び衝撃加速度を示す。

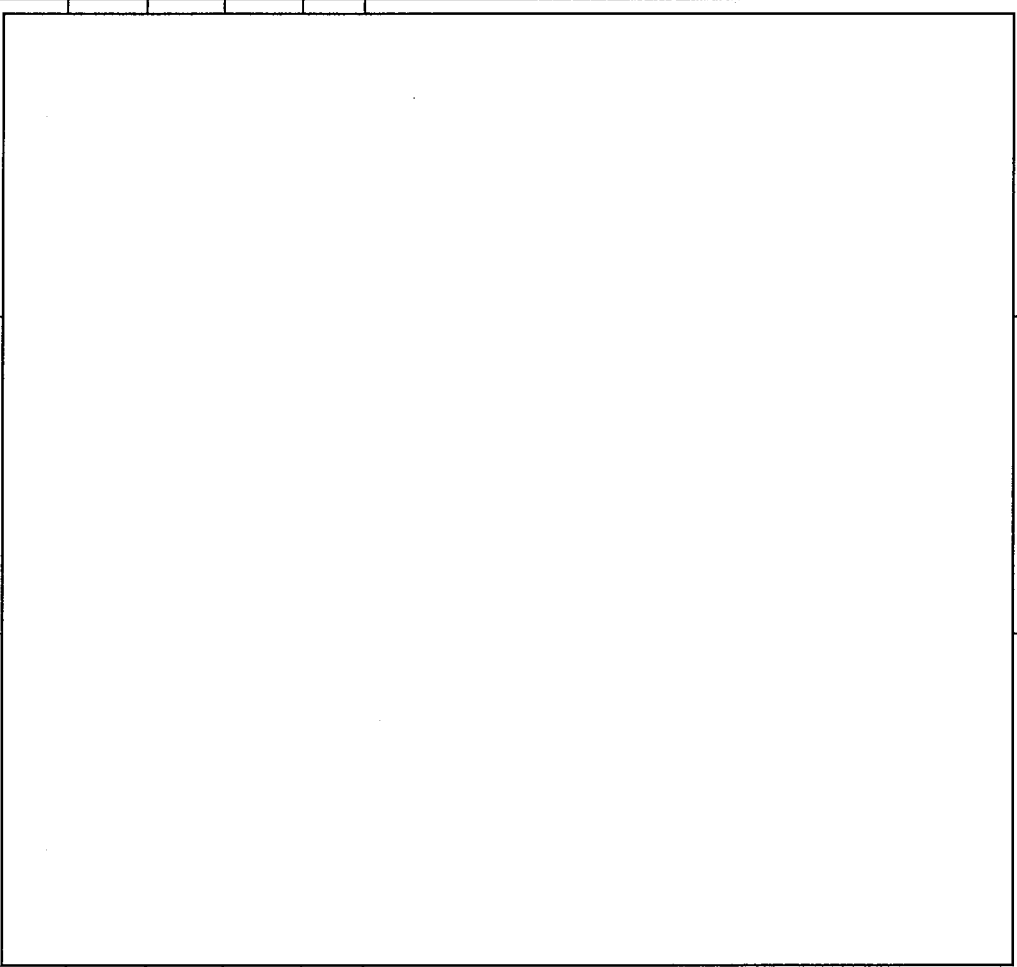
（ロ）－第A. 31表より、外殻及び防振構造部に発生する衝撃加速度はA. 10. 5の（ロ）－第A. 39表の落下試験Ⅰ（9 m落下時）の衝撃加速度より小さく、また発生加速度の大きい落下試験Ⅰでの評価で破損しないと確認されているので、落下試験Ⅱでの評価は省略する。

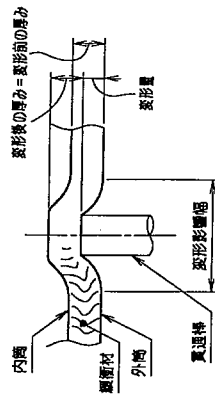
（1）結果の要約と検討

（ロ）－第A. 31表に原型試験落下試験Ⅱの変形量，衝撃加速度の結果を示す。

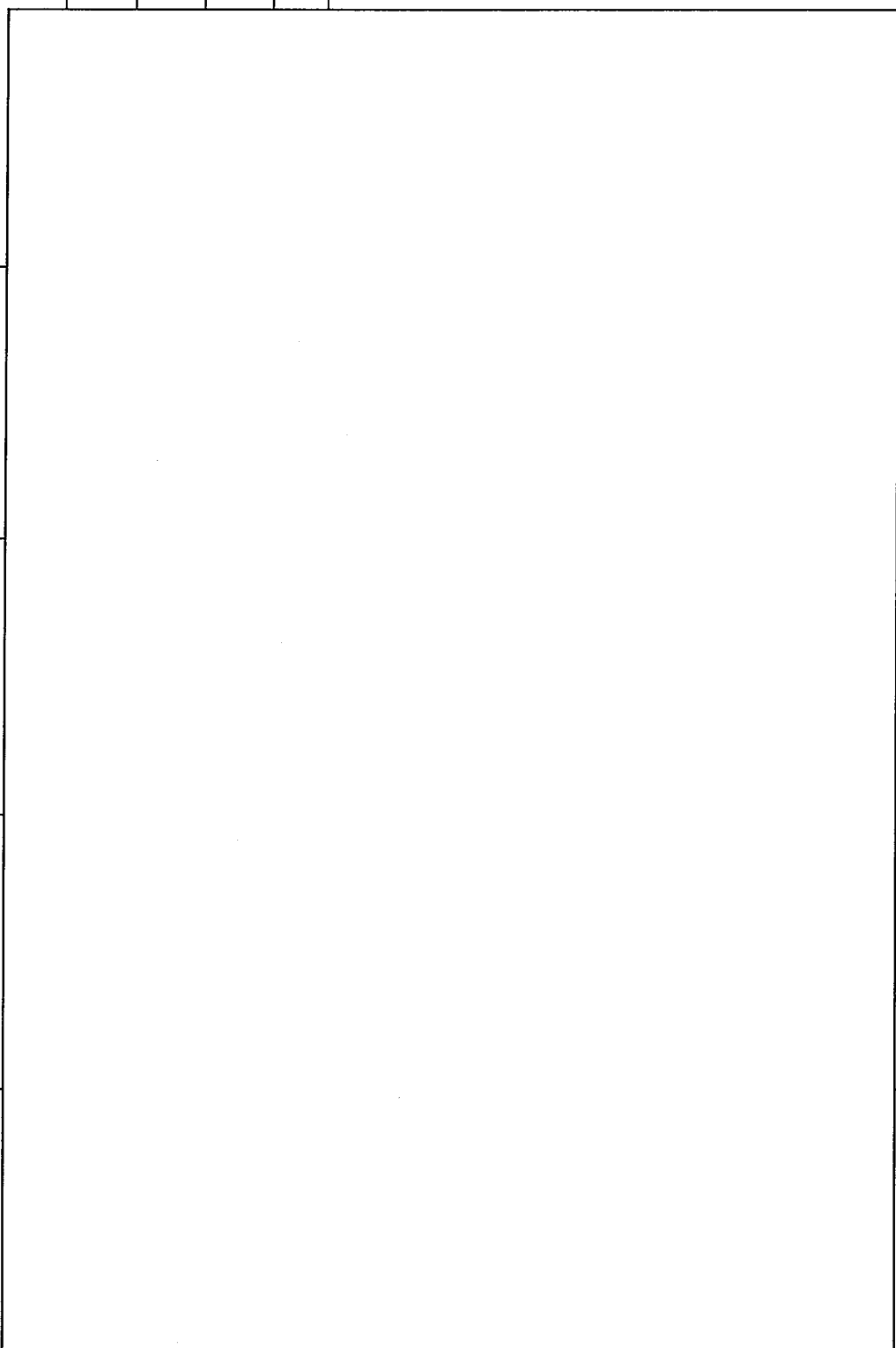
最大破損を受ける落下条件下においても輸送容器外筒に変形は生ずるものの密封境界である燃料棒被覆管は，発生加速度の大きい落下試験Ⅰ（9 m落下）での評価で密封性が損なわれていない。よって落下試験Ⅱで，密封境界である燃料棒被覆管は密封性を保つ。

(ロ) 第一A.31表 原型試験の落下試験Ⅱの結果(1)

落下姿勢		垂直落下 (ボトム 下向)	水平落下 (0°方向 下向)	コーナー落下 (トップ0° 方向下向)
衝撃 加速度 × g (m/s ²)	外殻			
	防振構造部			
容器 変形量 (mm)				
変形量 変形影響幅				
貫通有無				
概略図				



(ロ)一第A.31表 原型試験の落下試験Ⅱの結果(2)

落下姿勢		水平落下 〔90°方向 下 向〕	水平落下 〔180°方向 下 向〕	水平落下 〔180°方向 下 向〕	水平落下 〔180°方向 下 向〕	垂直落下 〔ボトム 下 向〕
衝撃 加速度 × g (m/s ²)	外 殻					
	防振構造部					
	変形量					
	変形影響幅					
容器 変形量 (mm)						
貫通有無						
概略図						

A. 9. 2. 3 熱的試験

熱的試験の評価は、(ロ)－B熱解析で行う。

(1) 温度及び圧力の要約

(ロ)－B. 5 (特別の試験条件) の結果、密封境界である燃料棒被覆管は、最も厳しい状態である °C の雰囲気になってもその密封性が損なわれることはない。

(2) 熱膨張

輸送物全体が加熱され部材間の温度差がなく、かつ、拘束がないため熱膨張による熱応力は発生しない。

(3) 許容応力との比較

A. 1. 2 項の設計条件に基づき解析した結果、すべての項目について A. 1. 2 項の設計基準を満足しており、その結果を、解析項目に従い解析基準値と比較し(ロ)－第 A. 32 表(1)～(2)に示す。表より明らかのように、発生する応力はいずれの場合も解析基準値以下であり、密封境界である燃料棒は健全であり、その密封性は維持される。

A. 9. 2. 4 浸 漬

特別の試験（落下試験Ⅰ・Ⅱ及び熱的試験）後、水深0.9m（0.009MPa）の浸漬状態に収納物である燃料集合体がおかれた場合でも、燃料棒は \square 気圧に耐えるよう設計されているため、燃料棒は強度を保ちその密封性は維持される。

A. 9. 2. 5 結果の要約と評価

特別の試験条件下における本輸送物の破損の要約を各試験項目毎に記述する。

(1) 落下試験Ⅰ（9m落下時）

A. 9. 2. 1項より、落下時の容器外殻の総変形量は、 \square mm（水平落下）～ \square mm（コーナ落下）となりいずれの落下姿勢においても防振構造部には達しない。衝撃加速度は、防振構造部で $\square \times g$ （ m/s^2 ）～ $\square \times g$ （ m/s^2 ）〔容器外殻で $\square \times g$ （ m/s^2 ）～ $\square \times g$ （ m/s^2 ）〕となり、この時、密封境界である燃料棒に発生する応力は解析基準値以下であり、燃料棒は強度を保ち、その密封性は維持される。

(2) 落下試験Ⅱ（1m落下時）

A. 9. 2. 2項より、落下時の容器外殻の変形量は、 \square mm～ \square mmで、容器外殻には変形が生じるものの密封境界である燃料棒に発生する応力は基準値以下であり、燃料棒は強度を保ち、その密封性は維持される。

(3) 耐火試験（800℃，30分間）

B. 5. 6項より、輸送物を800℃の環境に30分間置いたときに、燃料集合体は \square ℃に達する。この温度においても密封境界である燃料棒は強度を保ち、その密封性は維持される。

(4) 浸 漬（0.009MPa，8時間）

A. 9. 2. 4項より、水深0.9mの浸漬状態に燃料集合体がおかれても密封境界である燃料棒は強度を保ちその密封性は維持される。

(ロ)一第A.32表(1) 許容応力との比較

要件	条件	解析項目	解析基準	解析基準値	解析結果	余裕率
核 分 裂 性 輸 送 物	特 別 の 試 験 条 件	落下試験 I 1. 9m上部垂直落下 (1) ジャッキスクリュー (a) 座屈荷重 (b) ねじ山のせん断応力 (2) 固定枠 (a) 合成応力 (曲げ+せん断) (b) ねじ山のせん断応力	P_k $0.6 S_u$ S_u $0.6 S_u$			
		2. 9m下部垂直落下 (1) ヒポットマウント取付ボルト (a) 合成応力 (引張+せん断) (2) スケルトン組立 (a) 圧縮応力 (3) スキン (a) 圧縮応力 (4) 燃料棒被覆管 (15×15型 12ft) (a) 圧縮+内圧力の組合せ (b) 座屈荷重	S_u S_u S_u $2/3 S_u$ P_k			
		3. 9m水平落下 (1) クランピングフレーム (a) 曲げ応力 (2) スキン (a) 曲げ応力 (3) 燃料棒被覆管 (14×14型 12ft, 15×15型 12ft) (a) 曲げ+内圧力の組合せ	S_u S_u S_u			

(ロ) - 第A.32表(2) 許容応力との比較

要件	条件	解析項目	解析基準	解析基準値	解析結果	余裕率
核分裂性輸送物	特別の試験条件	4. 9m上部コナーナ落下 (1) ジャッキスキュルー (a) 座屈荷重 (b) ねじ山のせん断応力 (2) 固定枠 (a) 合成応力 (曲げ+せん断) (b) ねじ山のせん断応力	P _k 0.6S _u S _u 0.6S _u			
		5. 9m下部コナーナ落下 (1) ピボットマウント取付ボルト (a) 合成応力 (引張+せん断) (2) クランピングフレーム (a) 曲げ応力 (3) スキン (a) 圧縮+曲げの組合せ (4) スケルトン (a) 圧縮+曲げの組合せ (5) 燃料棒被覆管 (a) 内圧力+曲げ+圧縮の組合せ				
		落下試験II 1. 貫通 浸漬 2. 外圧	貫通の有無	貫通無	貫通無 (原型試験結果より)	基準を満足
			水深0.9m	<input type="text"/> (MPa・G)	0.009 (MPa)	<input type="text"/>

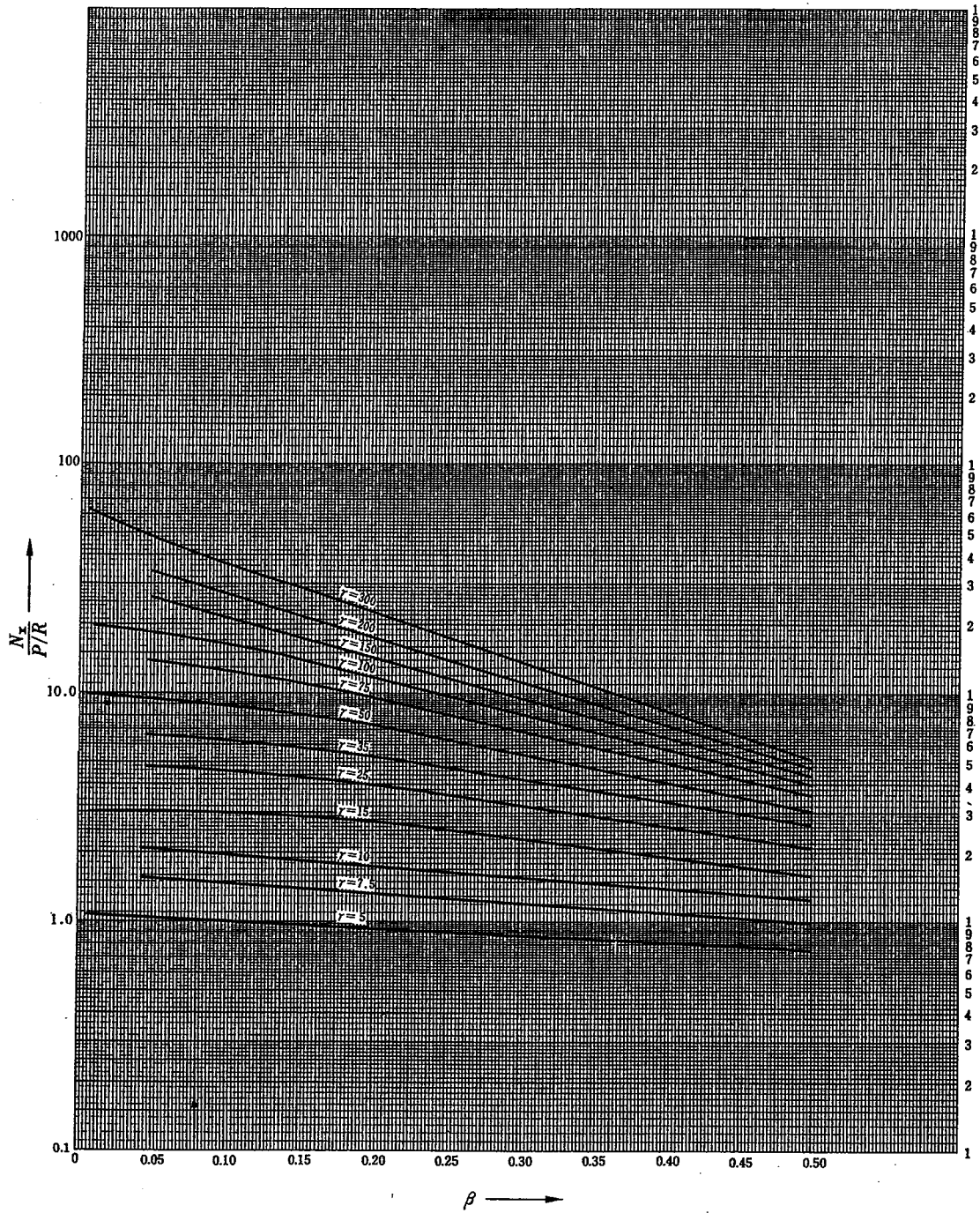
A.10 付属書類

A.10.1 参考文献

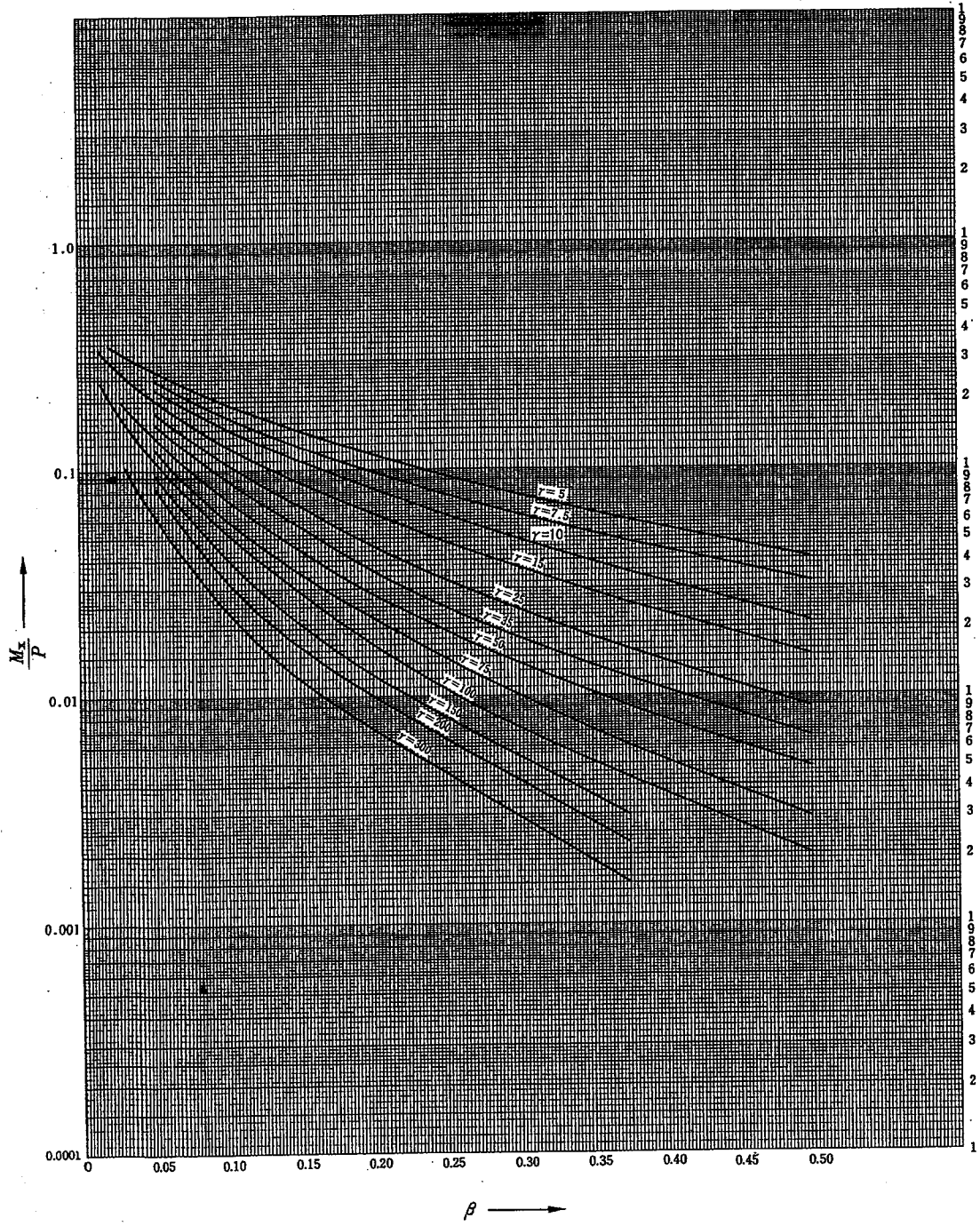
- [1] (社)日本機械学会、“発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第I編 軽水炉規格>”
JSME S NC1-2005 (2007年追補版含む)、(2007)
- [2] Evaluating Strength and Ductility of Irradiated Zircaloy (Task^{6 1})
(BMI-NUREG-1948)
- [3] MATPRO VERSION 09.
- [4] 三菱重工業(株)社内データ
- [5] 三菱重工業(株)社内データ
- [6] “Local Stress in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loading”
K. R. Wichman, A. G. Hopper and J. L. Mershon.
- [7] 機械工学便覧 改訂第6版 日本機械学会 P7-35
- [8] 機械工学便覧 改訂第6版 日本機械学会 P4-78
- [9] 東京天文台“理科年表”丸善(株) (1980)
- [10] 機械工学便覧 改訂第6版 日本機械学会 P5-22
- [11] 三菱原子燃料(株)社内データ
- [12] 機械工学便覧 改訂第6版 日本機械学会 P4-83
- [13] 機械工学便覧 改訂第6版 日本機械学会 P7-36
- [14] Garbrielson. V. K., Reese, R. T. “Shock Code User’s Manual: A Computer Code to Solve
the Dynamic Response of Lumped-Mass Systems “Sandia Laboratories Report SCL-
DR-69-98, 1969.
- [15] 第28基準研究会 放射性物質の安全輸送基準に関する調査研究報告書
(社)日本造船所研究協会
- [16] 化学工学便覧 改訂第3版 化学工学協会 P1338
- [17] 三菱重工業(株)社内データ
- [18] 三菱原子燃料(株)社内データ

A.10.2 円筒シェルに対する無次元カーブ^[6]

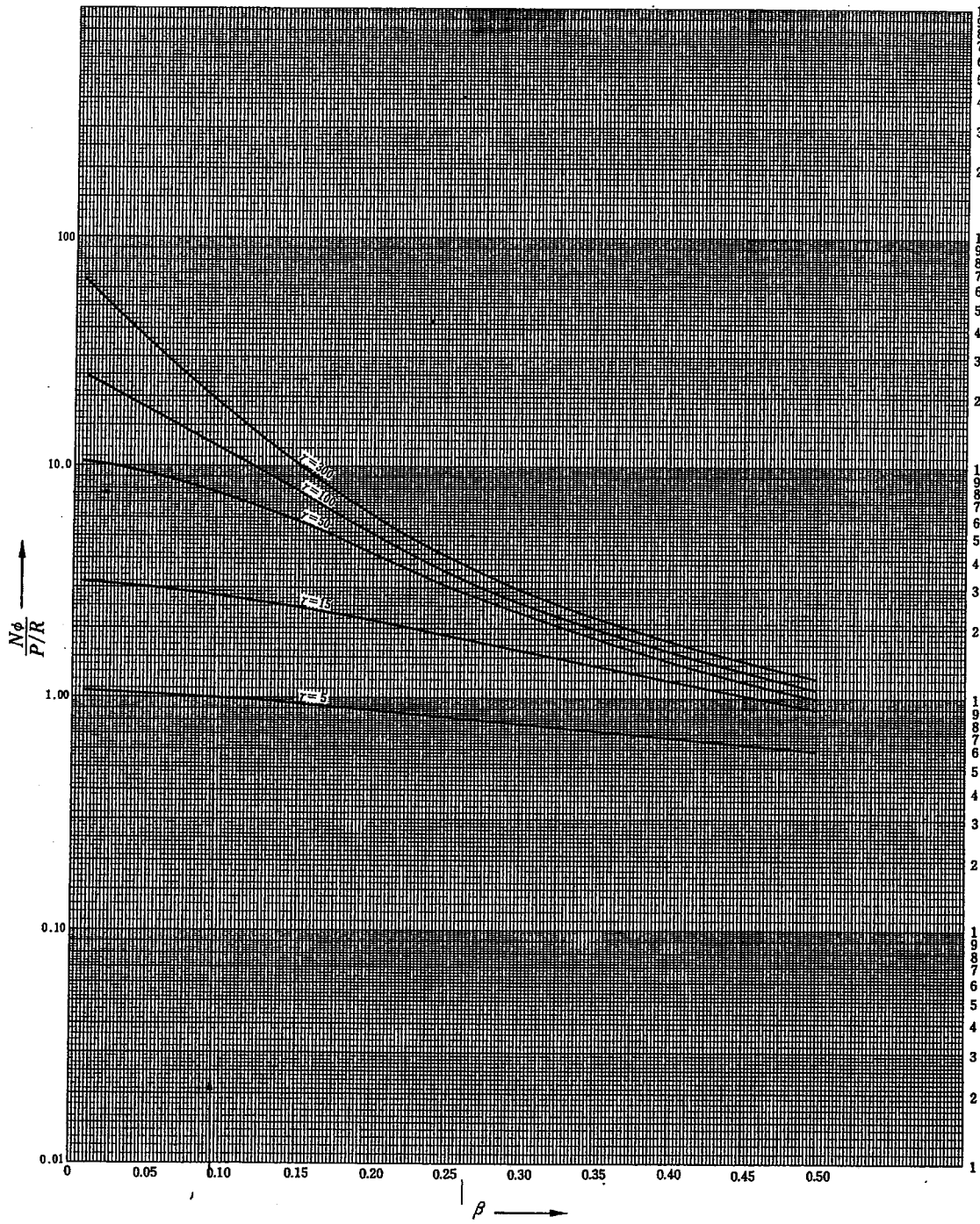
A.4.4.1 (3)項で求むる円筒シェルに対する無次元カーブを(口)–第A.45図から(口)–第A.56図に示す。



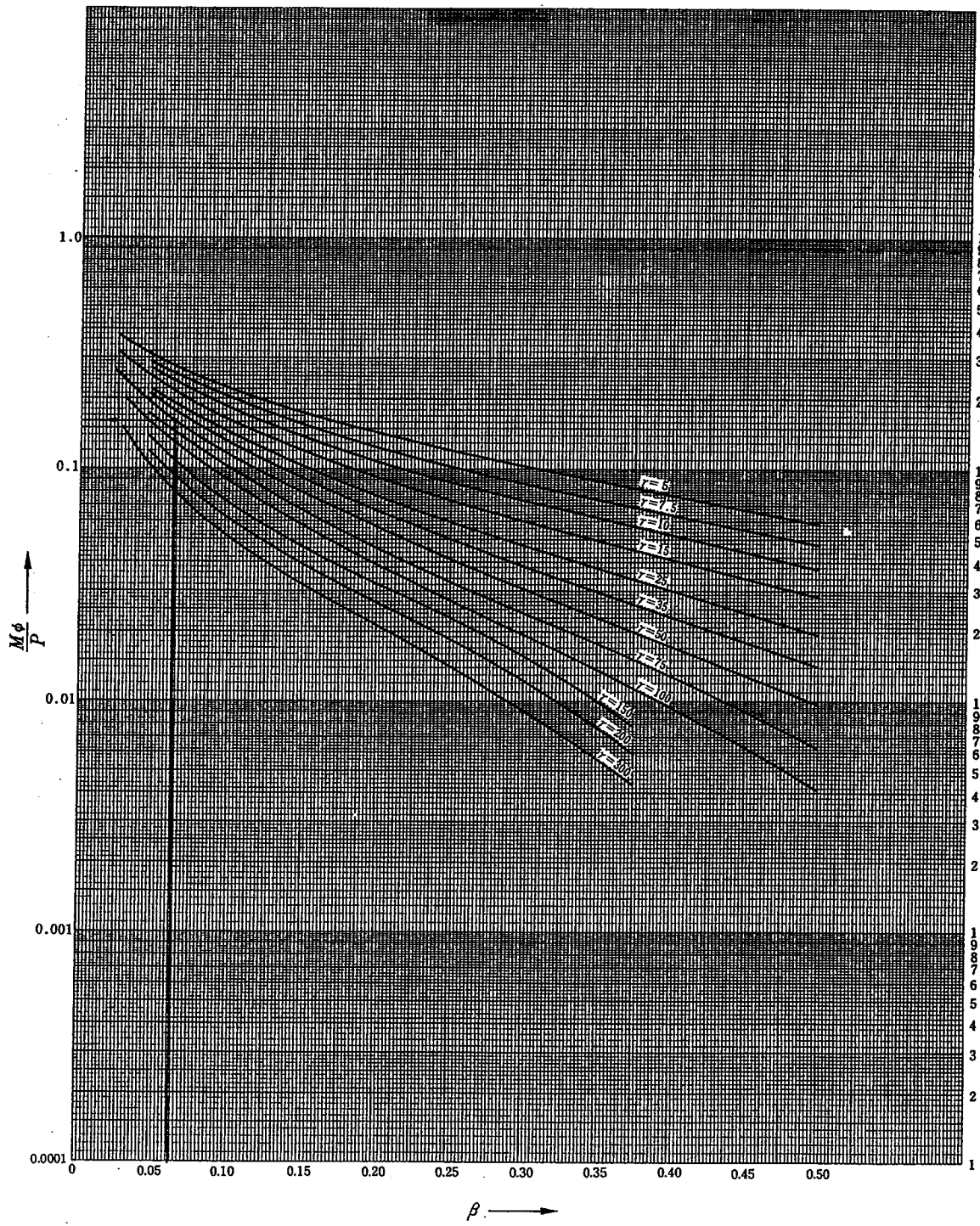
(口) - 第A. 45 図 半径方向荷重が作用する場合の N_x と β の関係



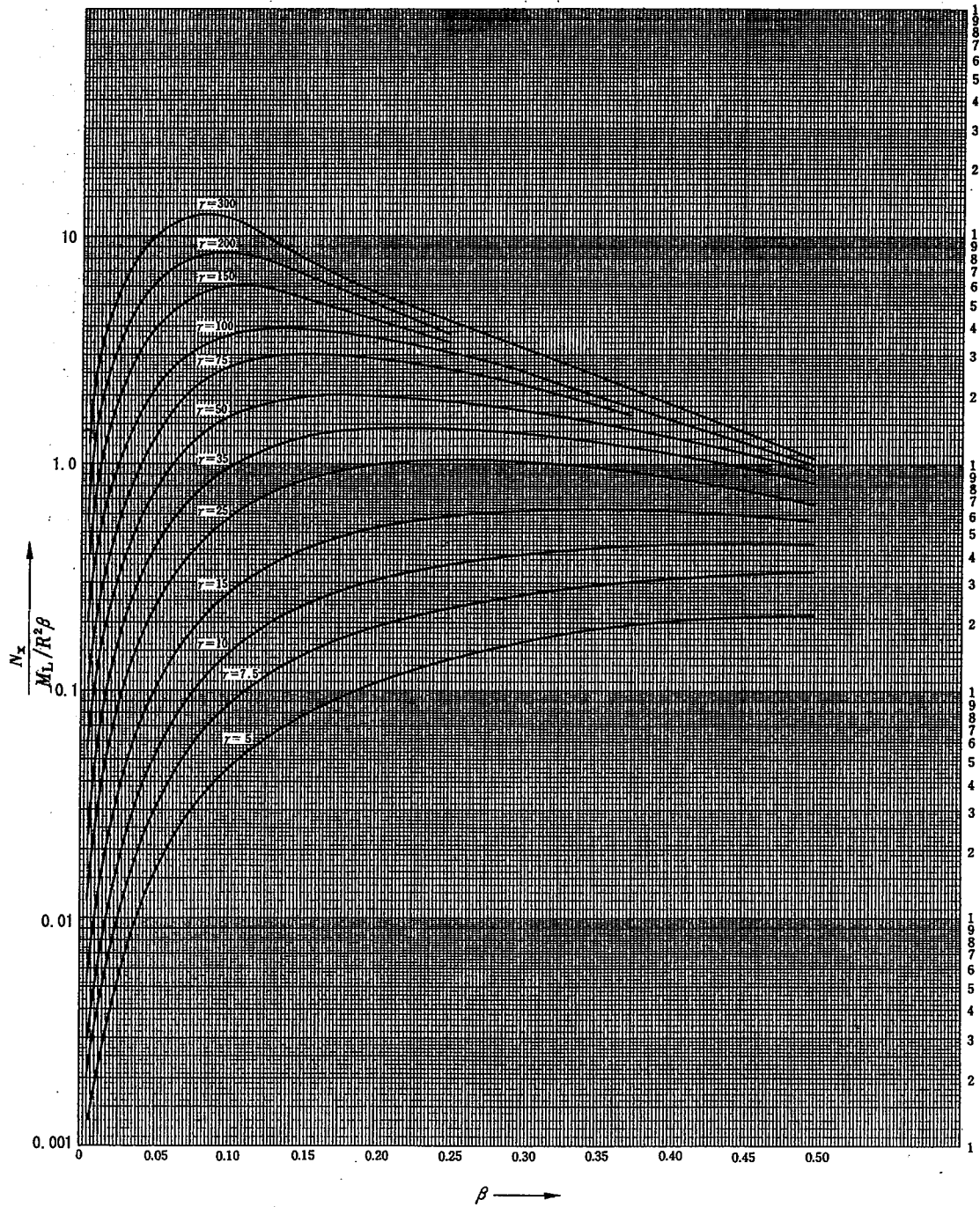
(口) - 第A. 46 図 半径方向荷重が作用する場合の M_x と β の関係



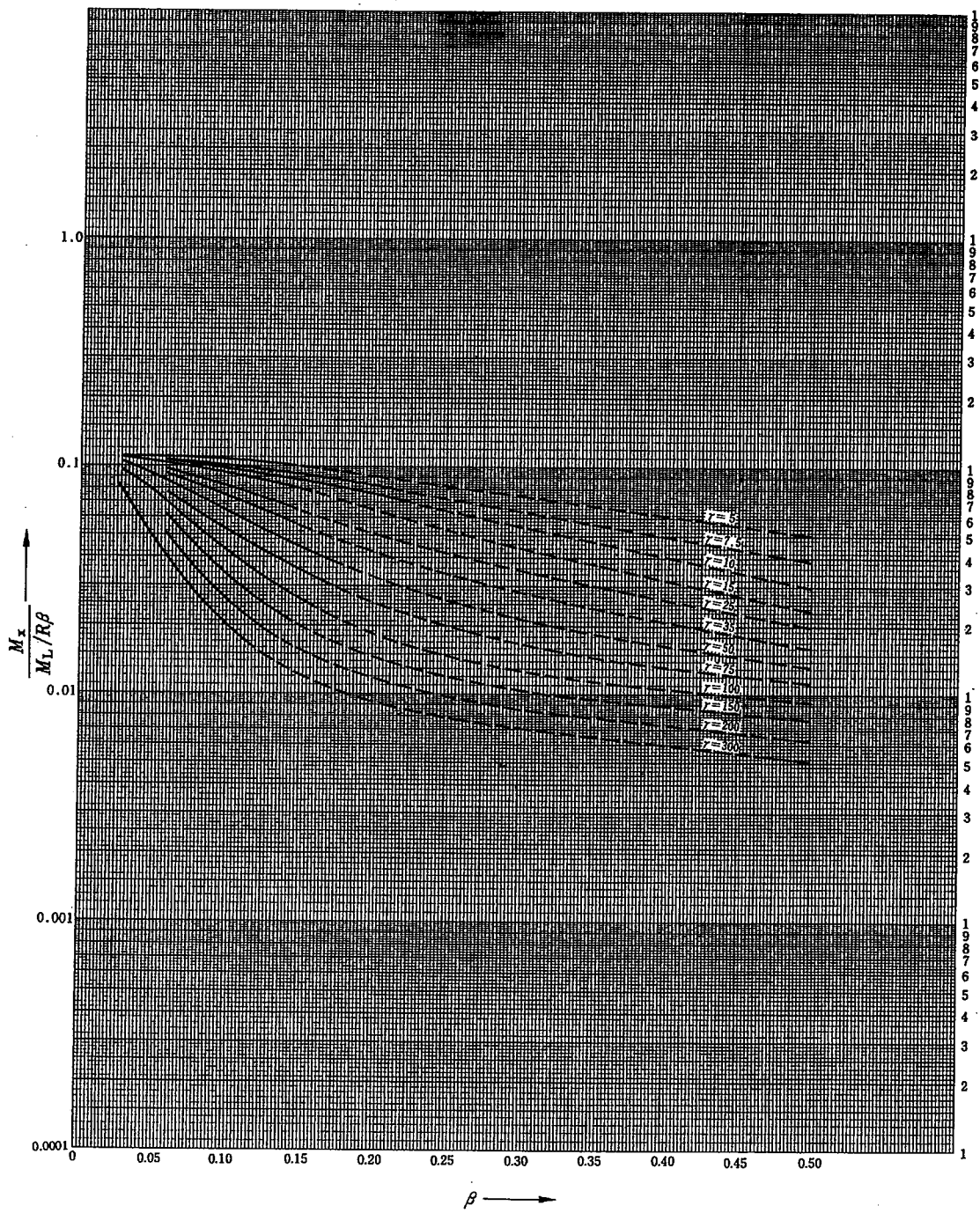
(口) - 第A. 47 図 半径方向荷重が作用する場合の N_ϕ と β の関係



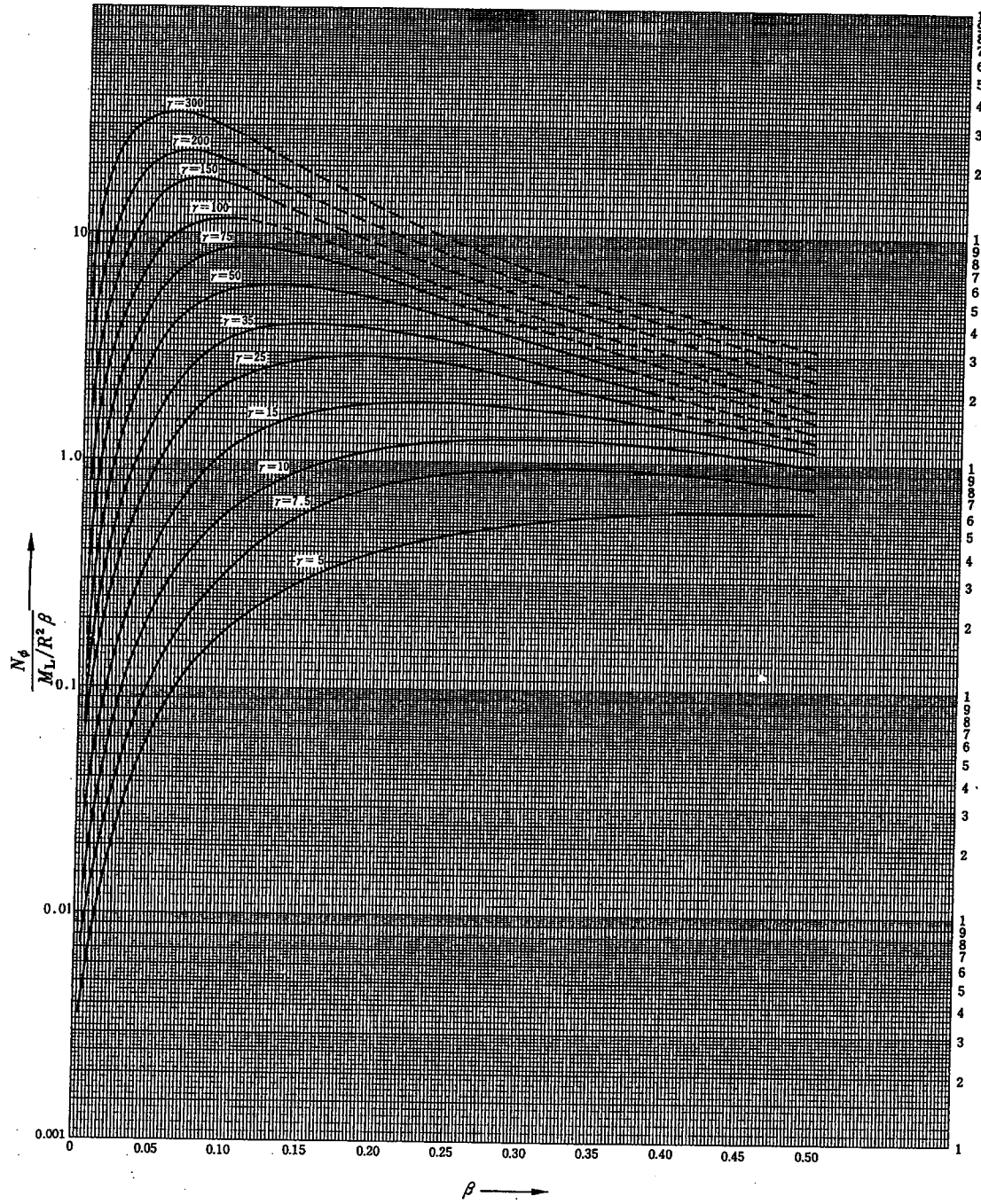
(口) - 第A. 48 図 半径方向荷重が作用する場合の M_ϕ と β の関係



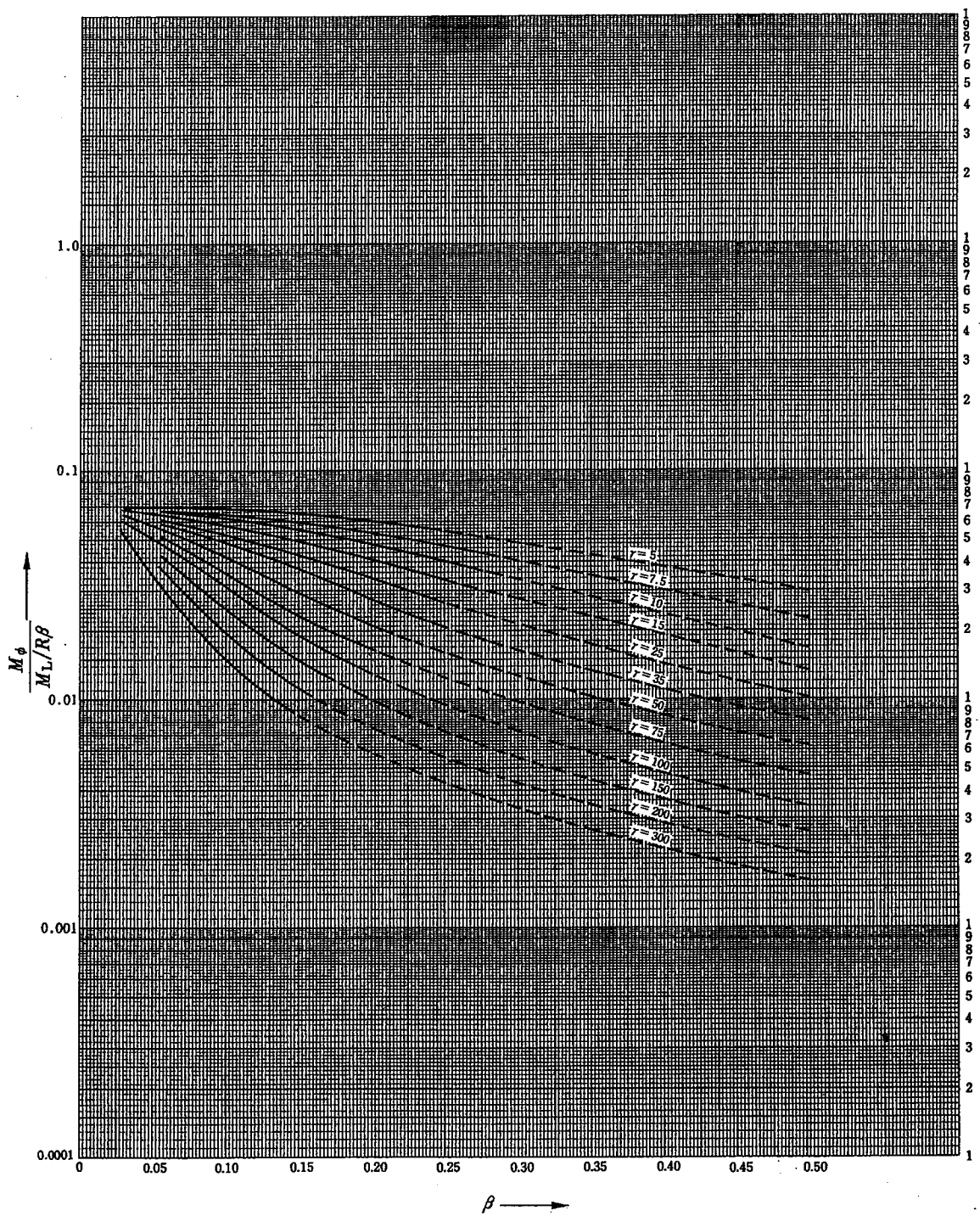
(ロ) - 第A. 49 図 軸方向外モーメントが作用する場合の N_x と β の関係



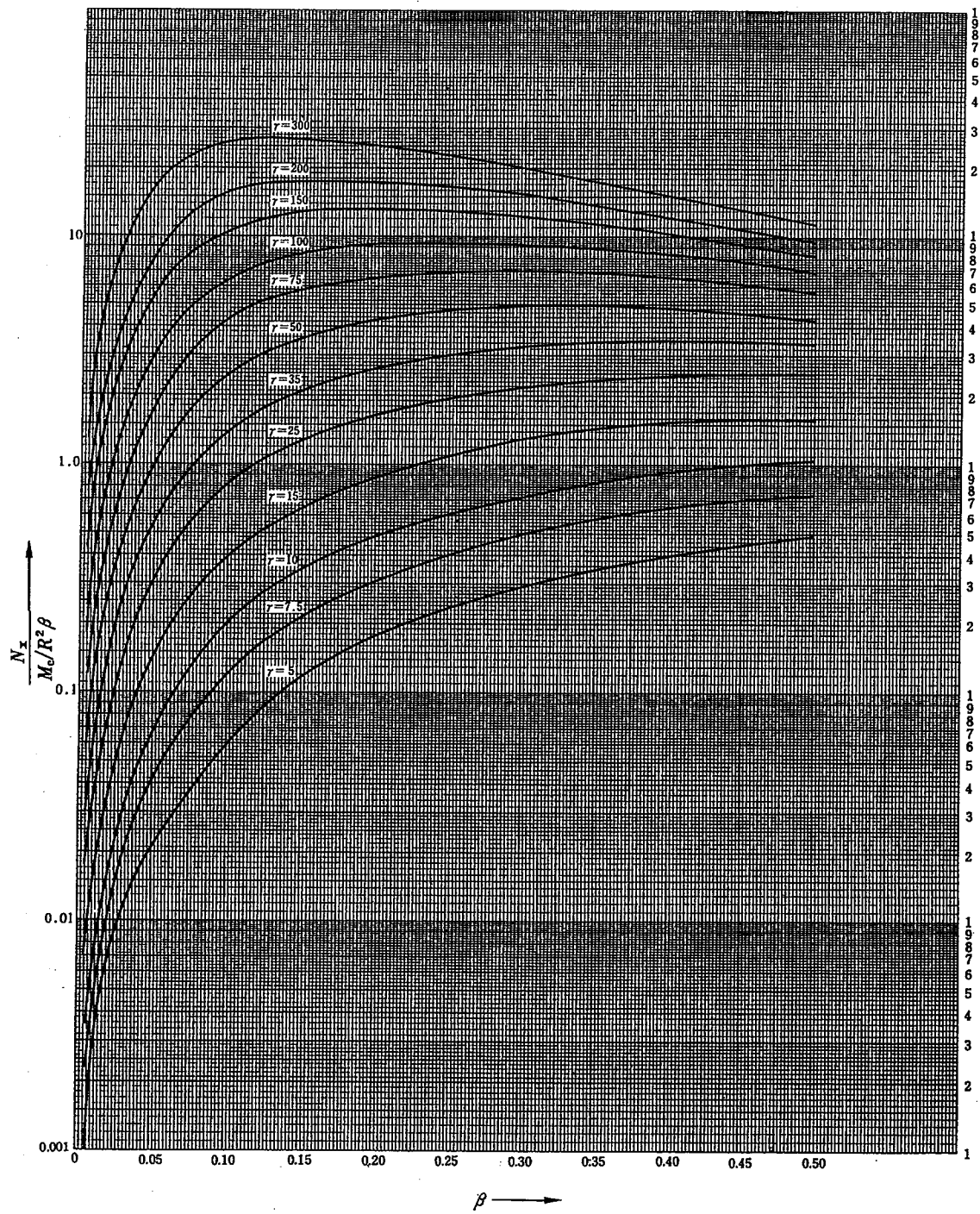
(ロ) - 第A. 50 図 軸方向外モーメントが作用する場合の M_x と β の関係



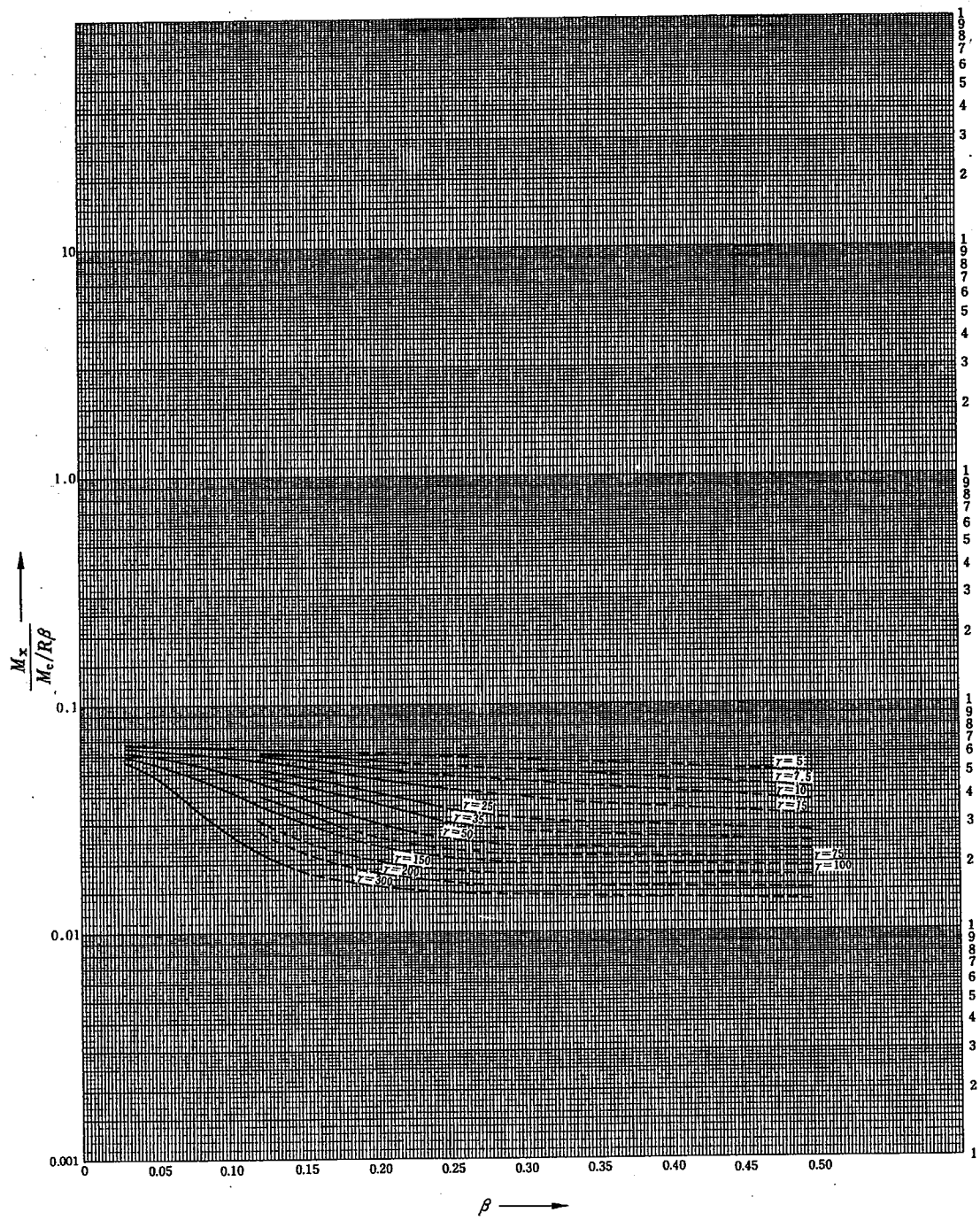
(ロ) - 第A. 51 図 軸方向外モーメントが作用する場合の N_0 と β の関係



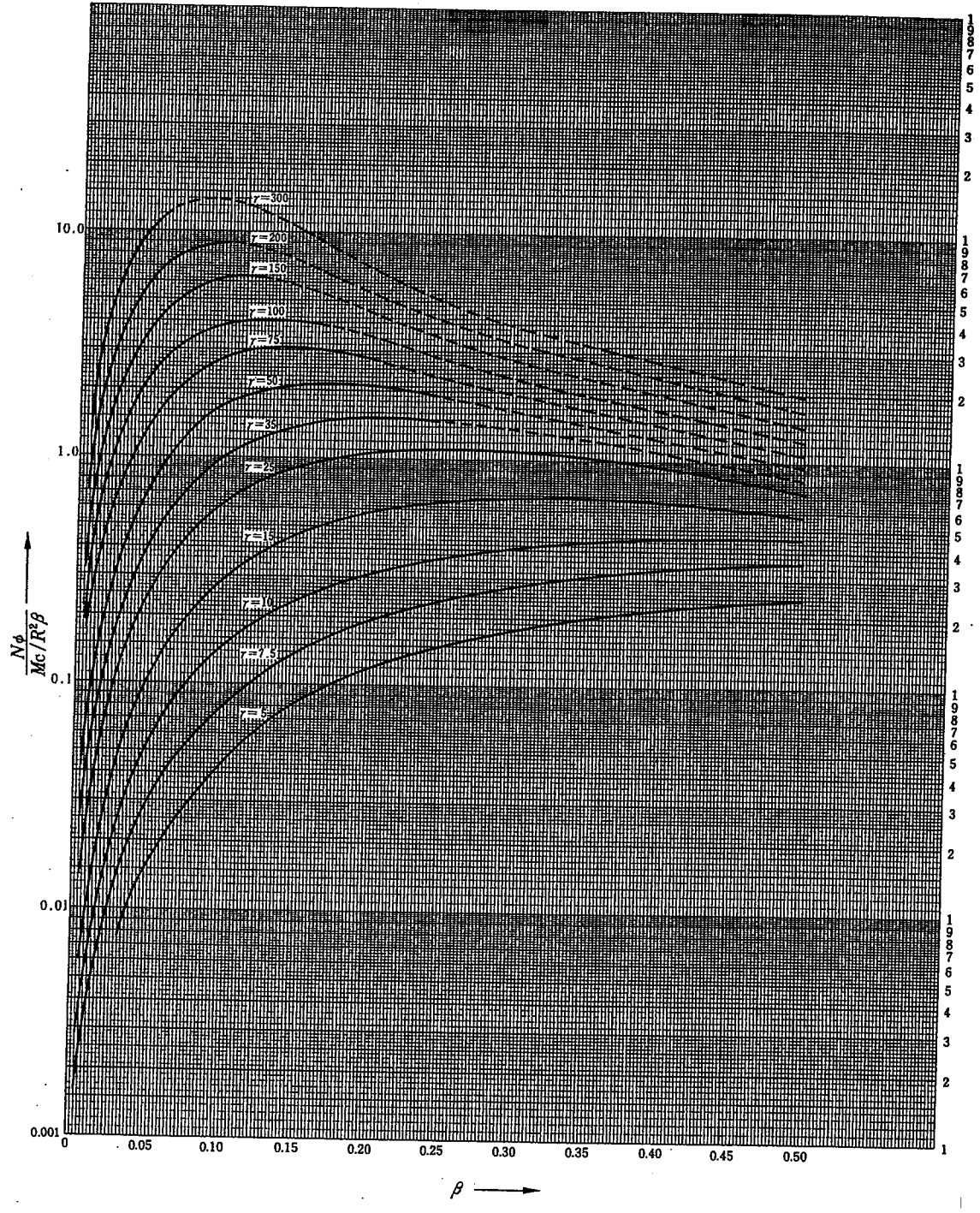
(ロ) - 第A. 52 図 軸方向外モーメントが作用する場合の M_ϕ と β の関係



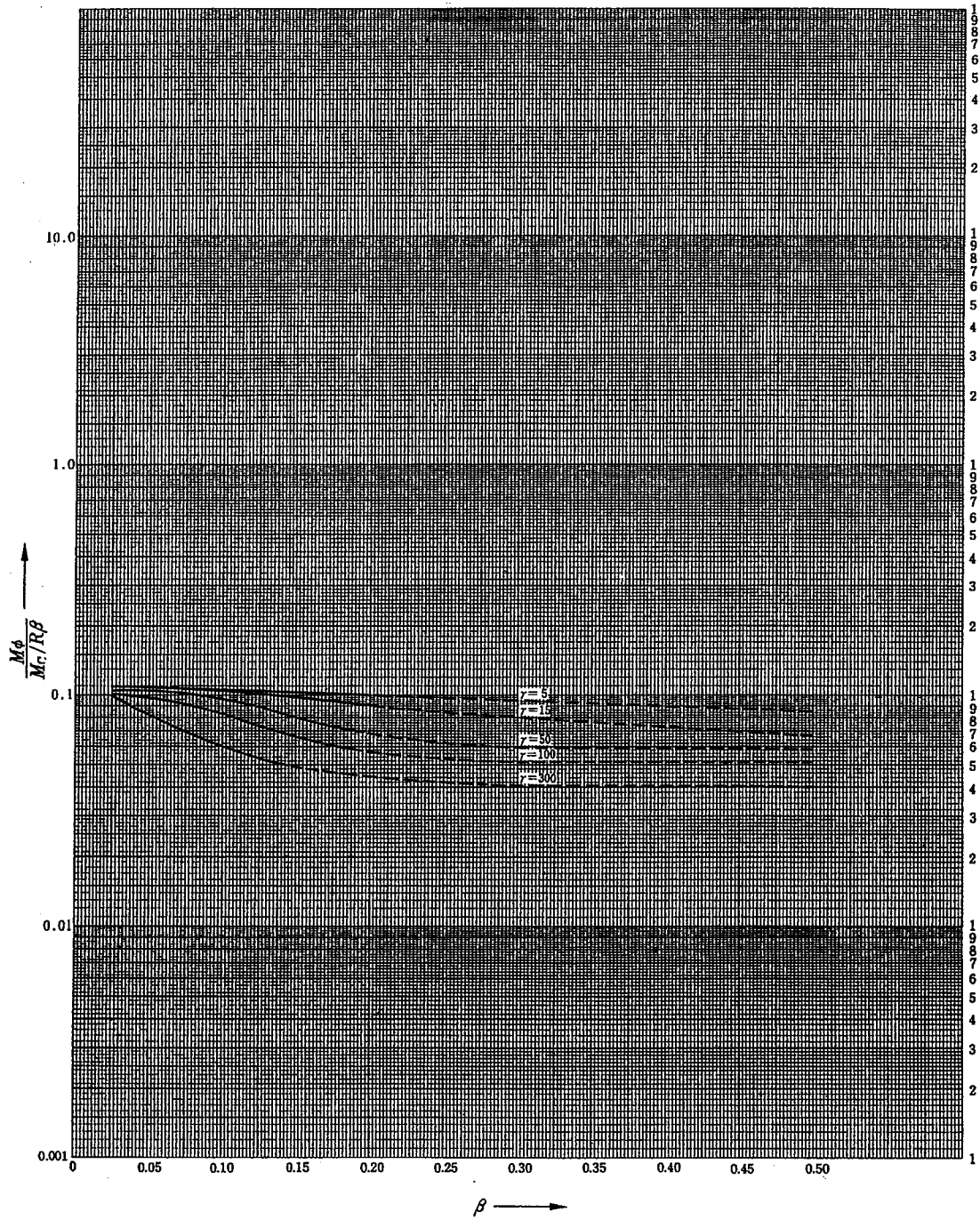
(口) - 第A. 53 図 周方向外モーメントが作用する場合の N_x と β の関係



(ロ) - 第A. 54 図 周方向外モーメントが作用する場合の M_x と β の関係



(口) - 第A. 55 図 周方向外モーメントが作用する場合の N_ϕ と β の関係



(ロ) - 第A. 56 図 周方向外モーメントが作用する場合の M_ϕ と β の関係

$$l = 2 \sqrt{\left\{ r_i^2 - \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right\}} = \boxed{} (\text{mm})$$

t : 締付ボルト肉厚

$$t = r_o - r_i$$

従って

$$I_z = \boxed{} - \boxed{} = \boxed{} (\text{mm}^4)$$

$$Z_p = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} (\text{mm}^3)$$

A. 10. 4 非線型ばね-質点系モデルによる衝撃応答解析コード「SHOCK」^[14]

(1) 概 要

輸送物が自由落下した時の強度評価を行うために用いた計算コード

「SHOCK」は構造物を種々の線型、非線型ばね、質点系モデルにおきかえて、衝撃荷重が構造物に作用した時の各質点の発生加速度、速度、変位及び各質点間に作用する力、相対変位等の時刻歴を Runge-Kutta-Gill 法による時間積分法によって算出するプログラムであり 1969 年 SANDIA LABORATORY で開発されたものである。

(2) 機 能

「SHOCK」は任意の衝撃荷重が作用する構造体の動的応答について、初期速度や初期変位が与えられる初期値問題だけでなく動的な外力が作用する問題についても取り扱うことが可能である。

またばねの配置と変位が平行な場合及び垂直な場合の 2 種類の問題が取り扱える。

なお、SHOCK コードで用いられるばねには次のようなものがある。

- (a) 線形ばね：通常の F (荷重) = kx (変位) で表わされるもの。
- (b) 圧縮・引張ばね：圧縮もしくは引張のみに作用する軸ばね、ガタを取り扱うことが可能
- (c) 非線形ばね：多曲線近似で、荷重変位関係が表わされるもの
- (d) 非線形・非可逆ばね：多曲線近似で、負荷と除荷のカーブが異なるもの

以上のばねを組合せることにより、「SHOCK」では、弾塑性変形を示す金属材料ばかりでなく、土質、コンクリート、木材等の異方性を示す材料等で構成される構造物についても取り扱うことが可能である。

なお、一つの構造物をばね・質点系におきかえる場合、質点で 100 個、ばねは 200 個まで使用することが可能である。

(3) 「SHOCK」コードによるキャスク9m落下解析例^[15]

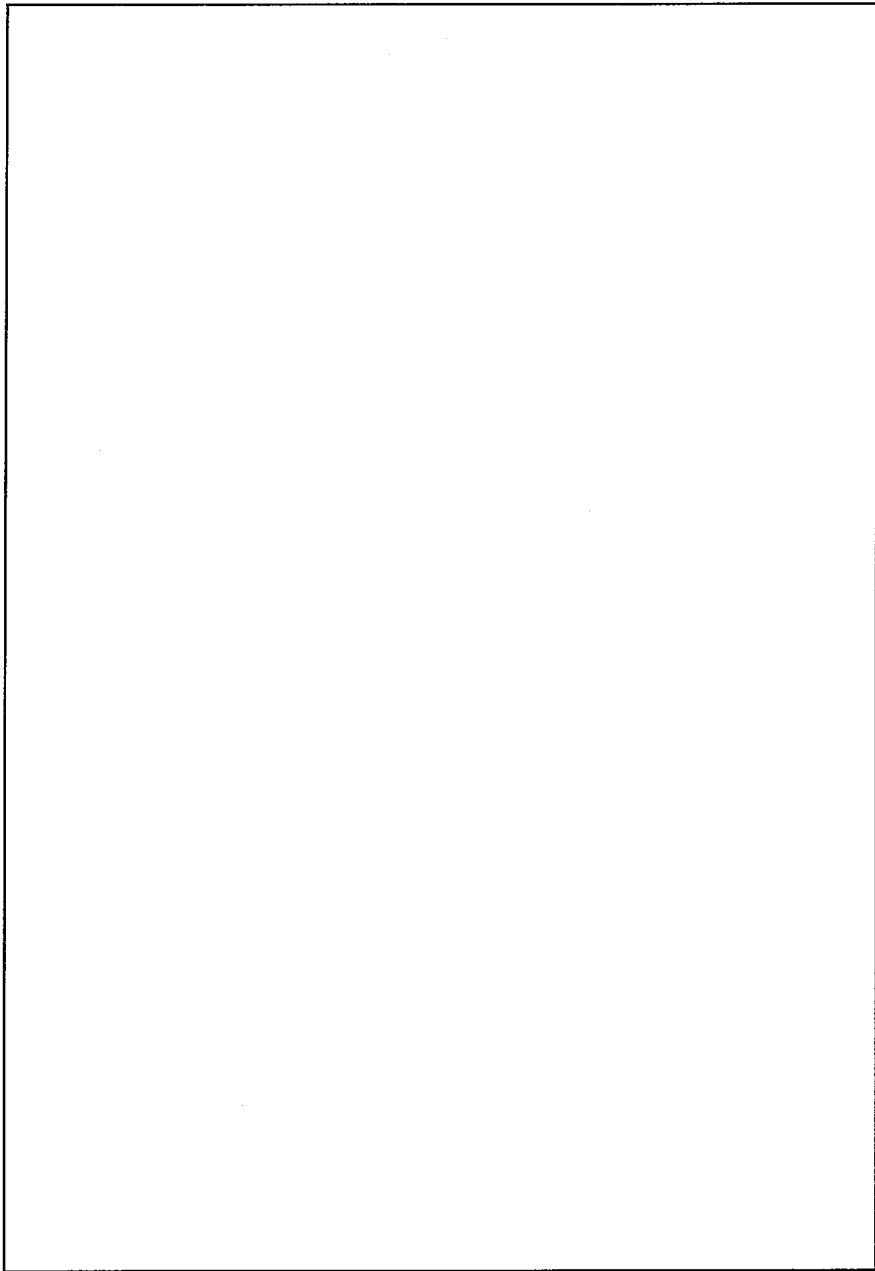
「SHOCK」コードによる評価例として、代表的使用済燃料棒輸送容器（TN-12 A）の1/3スケールモデルの9m垂直落下解析の「SHOCK」コードによる解析例を示す。

まず、計算形状及びモデルを(ロ)－第A.58図に示す。

(ロ)－第A.33表にその解析結果及び実験値を示す。これより次のことがいえる。

- (a) 変形量に関しては、「SHOCK」コードによる解析値の方が実験値に比べ大きく安全側の評価を行っている。
- (b) 加速度に関しても変形量同様、「SHOCK」コードによる解析値の方が実験値に比べ大きく、安全側の評価を行っている。

これらの結果より、「SHOCK」コードを使ったキャスクの自由落下解析は安全側の評価が行えるものといえる。



(口)－第A. 58 図 「SHOCK」コード用解析評価モデル

(口)－第A. 33 表 実験値と解析値の比較

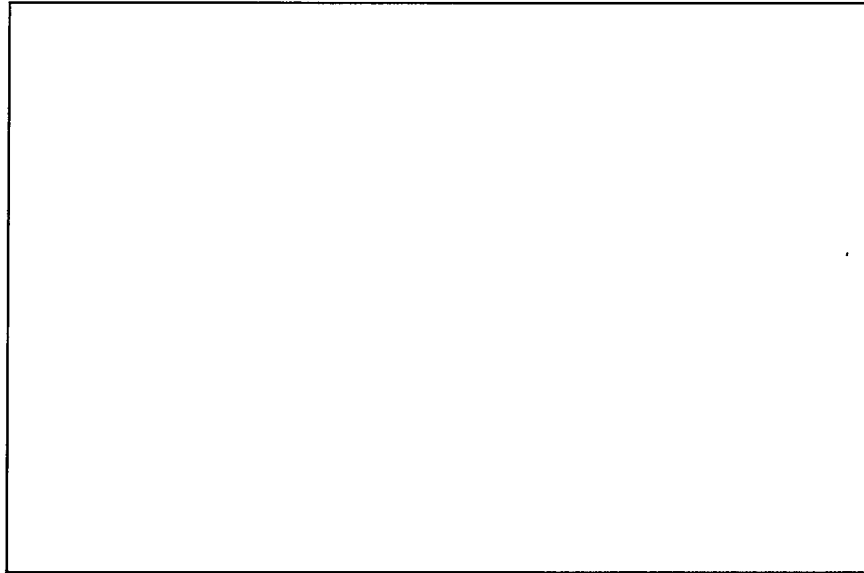
加 速 度 ($\times g$)			変 形 量 (mm)		
解析値	実験値	比 率	解析値	実験値	比 率

A.10.5 MFC-1型輸送物, 1.2m, 9m自由落下の「SHOCK」コードによる解析
MFC-1型輸送物, 1.2m, 9m自由落下の「SHOCK」コードを使用して, 収納物
や容器本体に生ずる加速度, 変形量等を求めた。

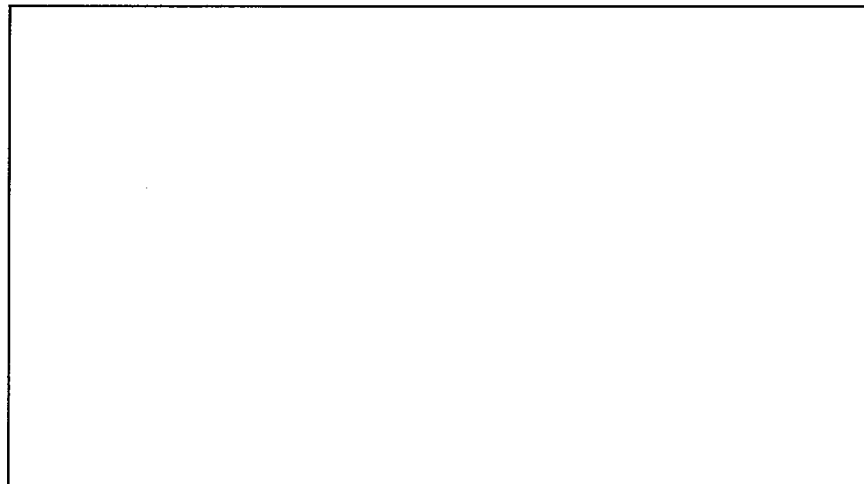
以下に解析モデル, 境界条件及び解析結果を示す。

(1) 解析モデル

各落下姿勢時の輸送物の解析モデルを(ロ)-第A.59図及び(ロ)-第A.60図に示す。



(ロ)-第A.59図 垂直・コーナ落下時の輸送物の解析モデル



(ロ)-第A.60図 水平落下時の輸送物の解析モデル

(2) 材料特性

輸送物を構成する材料の物性値を(ロ)－第A.34表に示す。

(ロ)－第A.34表 材料の物性値 (SHOCKで使用したもの)

材 料	物性値	縦弾性係数 (N/mm ²)	平均圧縮応力 (N/mm ²)	設計降伏強さ (N/mm ²)	ばね定数 (N/mm ²)
炭 素 鋼					
ショックマウント					

(3) 境界条件

外殻と防振構造部の間には実機と同じガタ (ギャップ) が存在するものとする。

(4) 質点の重量

解析モデルの各質点の重量を(ロ)－第A.35表及び(ロ)－第A.36表に示す。

各質点重量の総和は, k g (輸送物の総重量) となる。

(ロ)－第A.35表 解析モデル各質点の重量 (垂直, コーナ落下モデル)

質点番号	
質量(kg)	

(ロ)－第A.36表 解析モデル各質点の重量 (水平落下モデル)

質点番号	
質量(kg)	

* 固定質点であるため輸送物の重量に含まない。

(5) 解析モデルのばね定数 (荷重-変位関係)

解析モデルのばね定数を(ロ)-第A.37表及び(ロ)-第A.38表に示す。なお、非線型不可逆ばねの荷重変位関係については(ロ)-第A.61図～(ロ)-第A.70図に示す。

(ロ)-第A.37表 解析モデルのばね定数 (垂直, コーナ落下モデル)

(単位: N/mm)

姿勢 ばね	下部垂直落下	上部垂直落下	上部コーナ落下	下部コーナ落下

(ロ)-第A.38表 解析モデルのばね定数 (水平落下モデル)

(単位: N/mm)

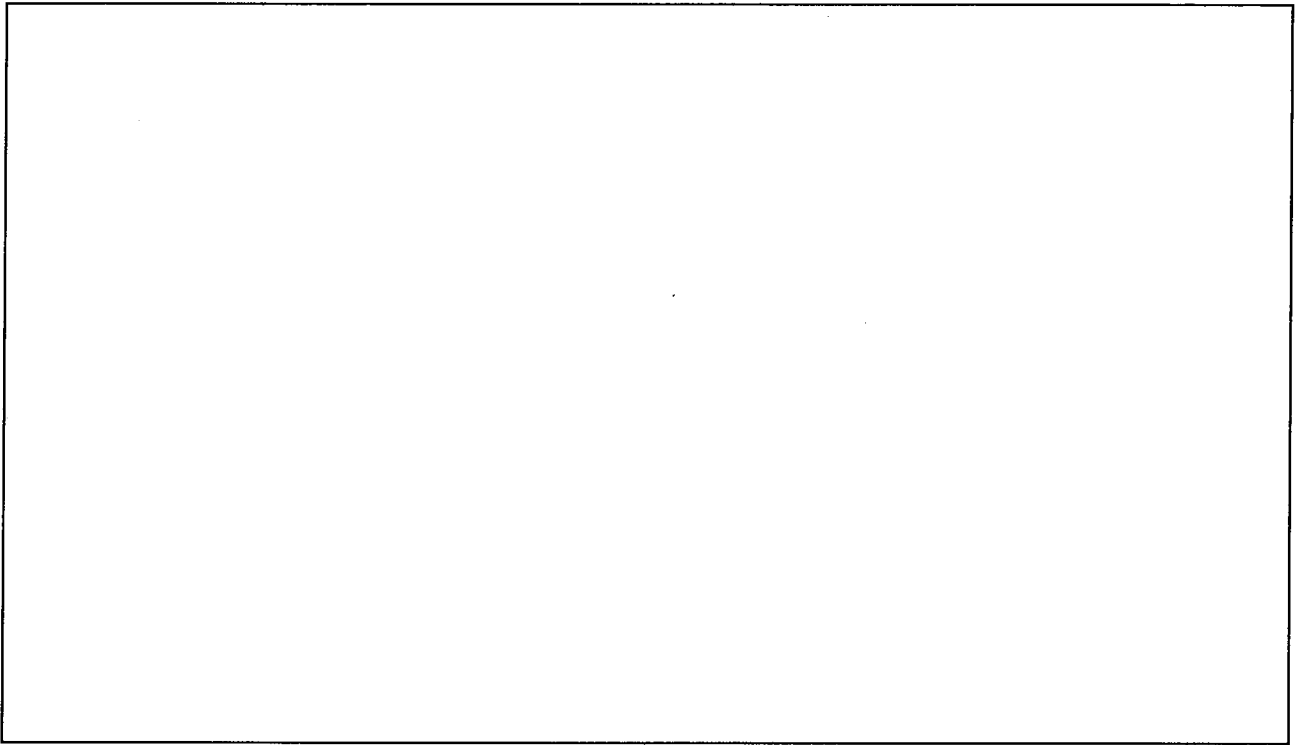
姿勢 ばね	0°下向水平落下	90°下向水平落下	180°下向水平落下	備考

(6) 初期条件

いずれのモデルも①の質点を固定質点とし②以降の質点については9 m落下時には13.28 m/s, 1.2 m落下時には4.85 m/sの初速を与えるものとする。

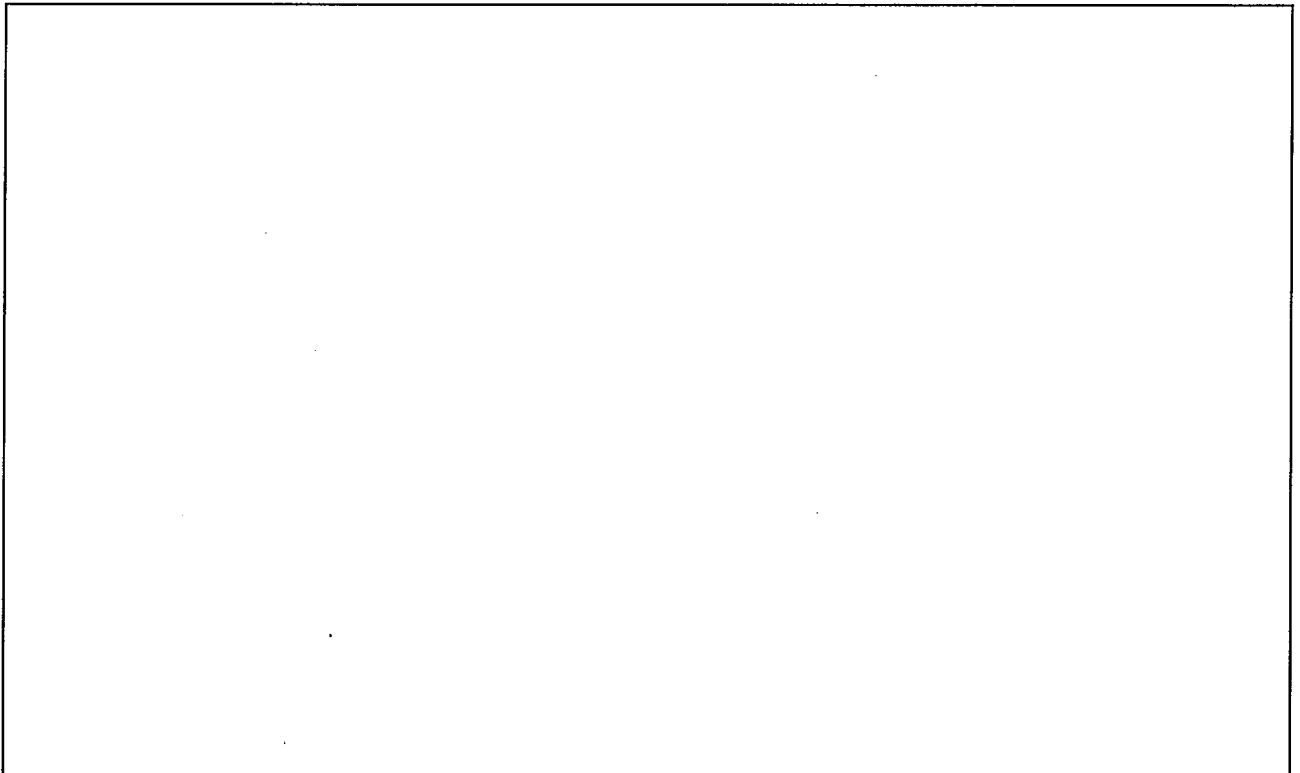
(7) 「SHOCK」コードによる解析結果

(ロ)－第A.39表に1.2 m, 9 m自由落下時の解析結果を示す。



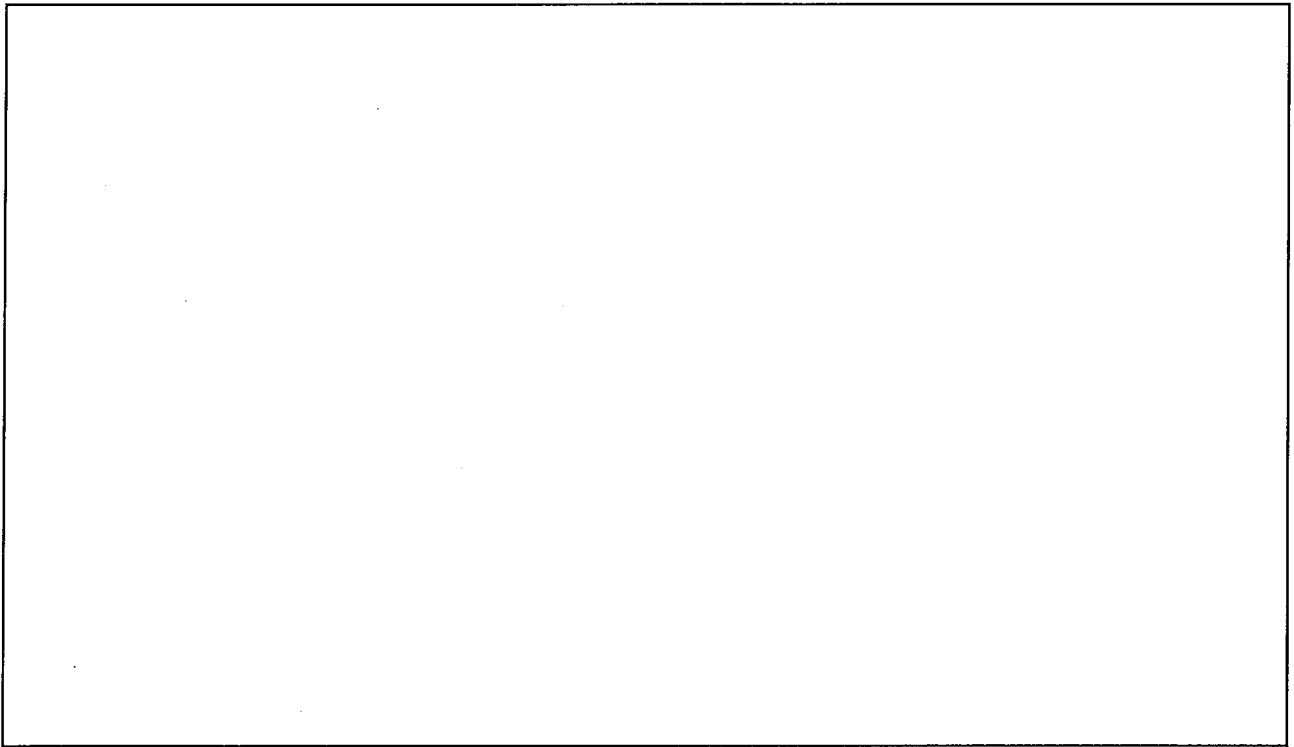
(ロ)－第A.61図 解析モデルの荷重－変位関係 (1)

(上部, 下部垂直落下(a))

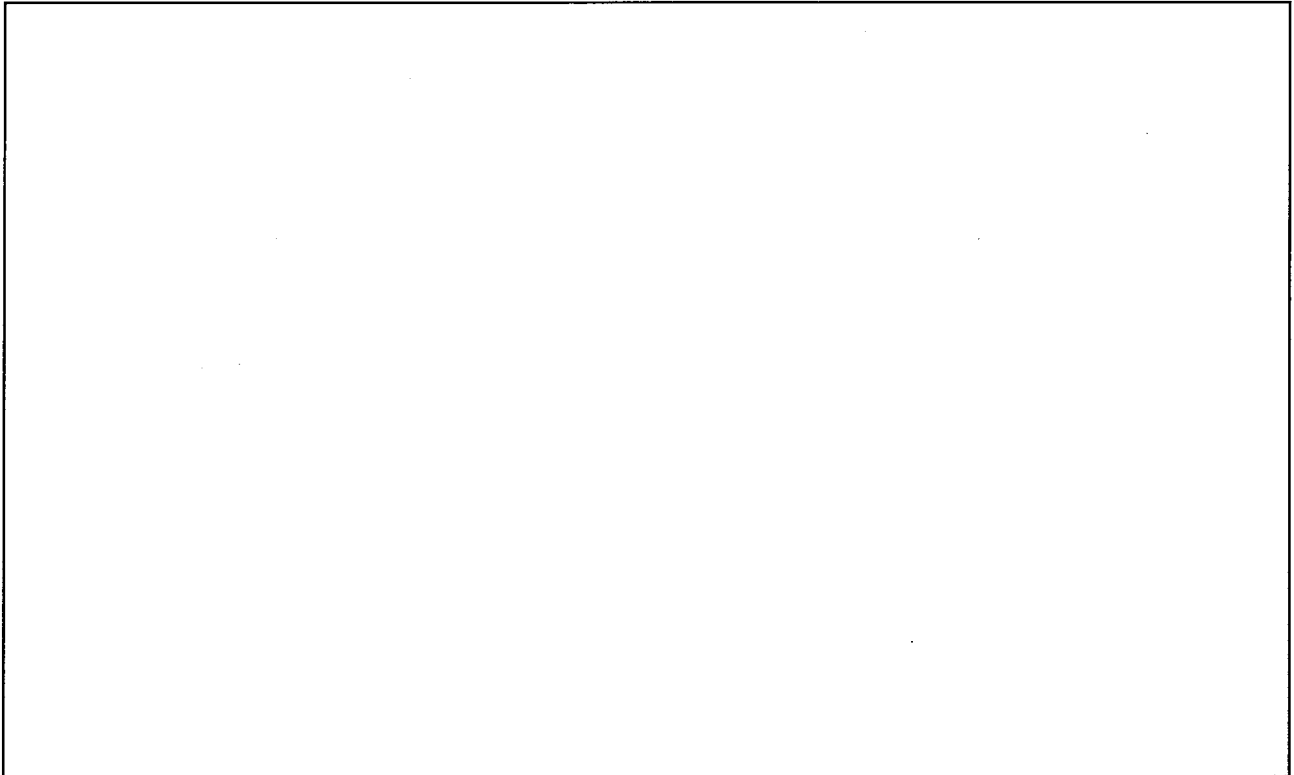


(ロ)－第A.62図 解析モデルの荷重－変位関係 (2)

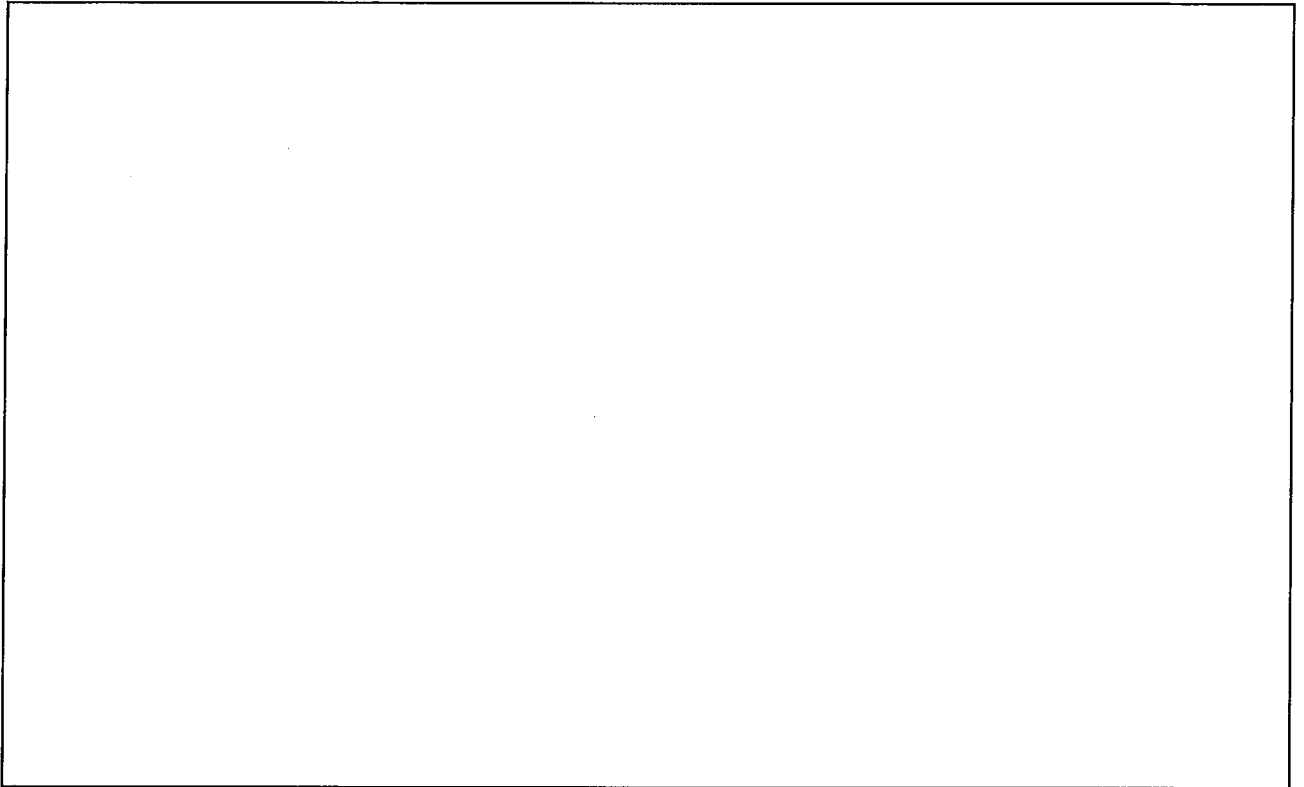
(コーナー落下(a))



(ロ)－第A.63図 解析モデルの荷重－変位関係 (3) δ (mm)
(下部垂直落下(i))

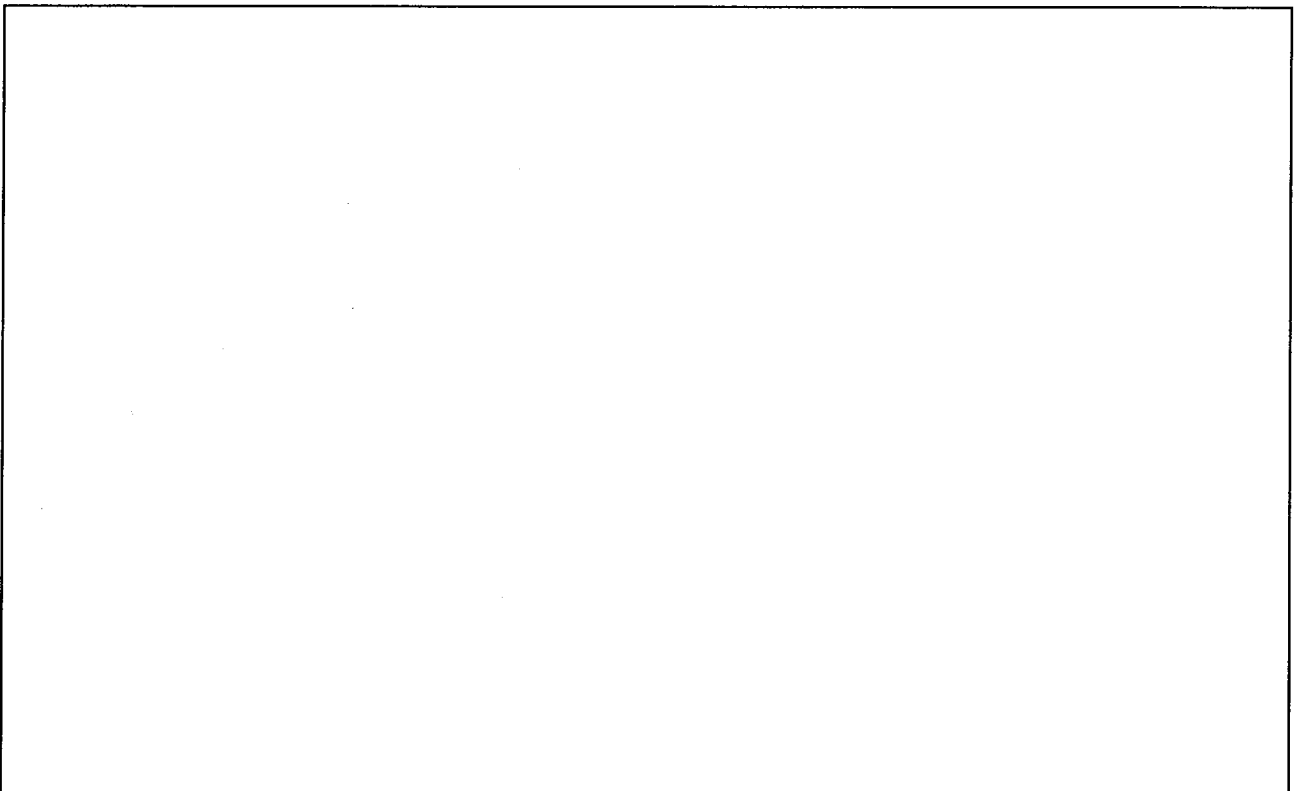


(ロ)－第A.64図 解析モデルの荷重－変位関係 (4)
(上部垂直落下(i))



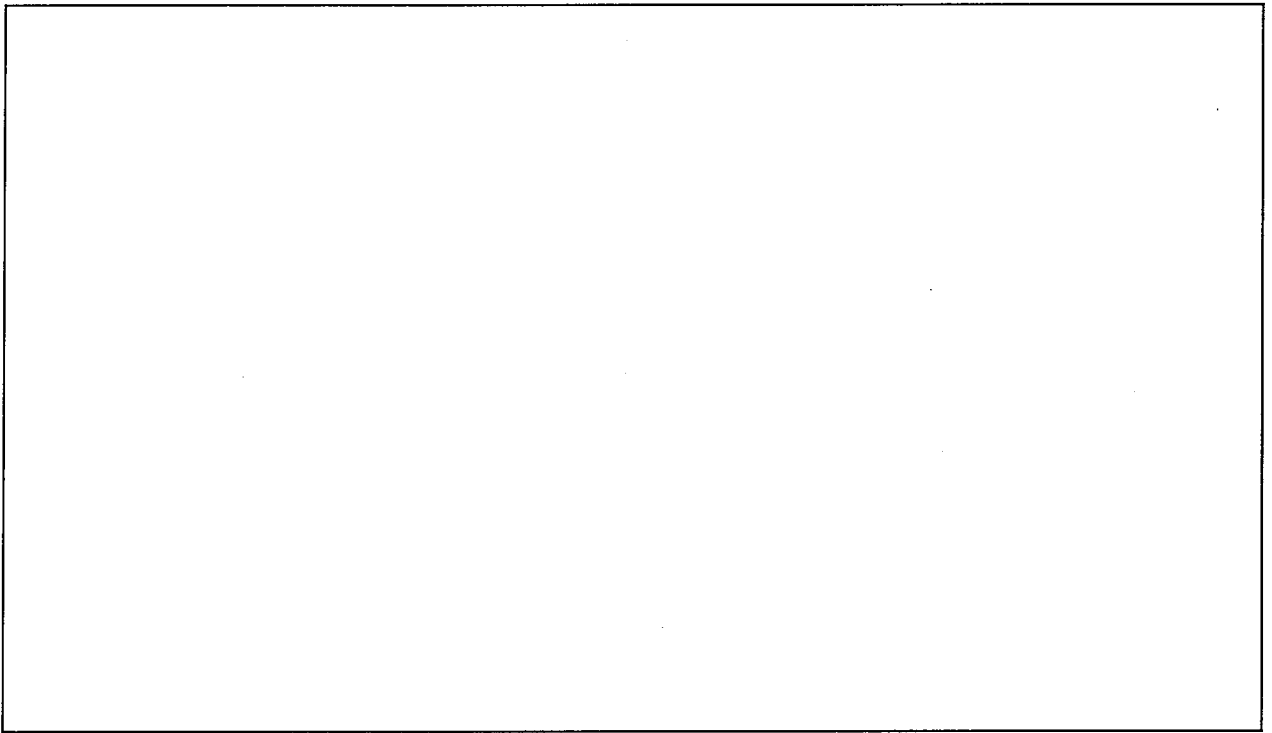
(ロ) - 第A. 65 図 解析モデルの荷重-変位関係 (5)

(上部コーナー落下(i))



(ロ) - 第A. 66 図 解析モデルの荷重-変位関係 (6)

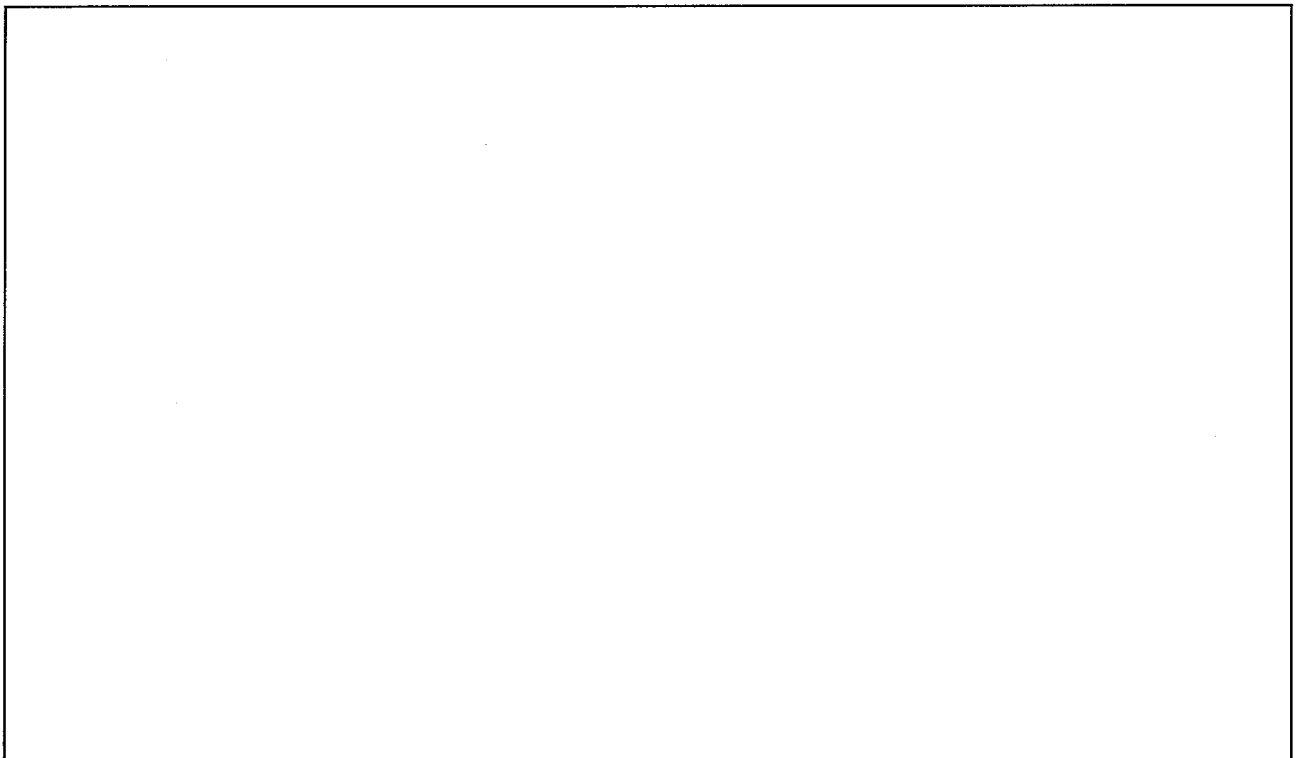
(下部コーナー落下(i))



(ロ) - 第A. 67 図 解析モデルの荷重-変位関係 (7)

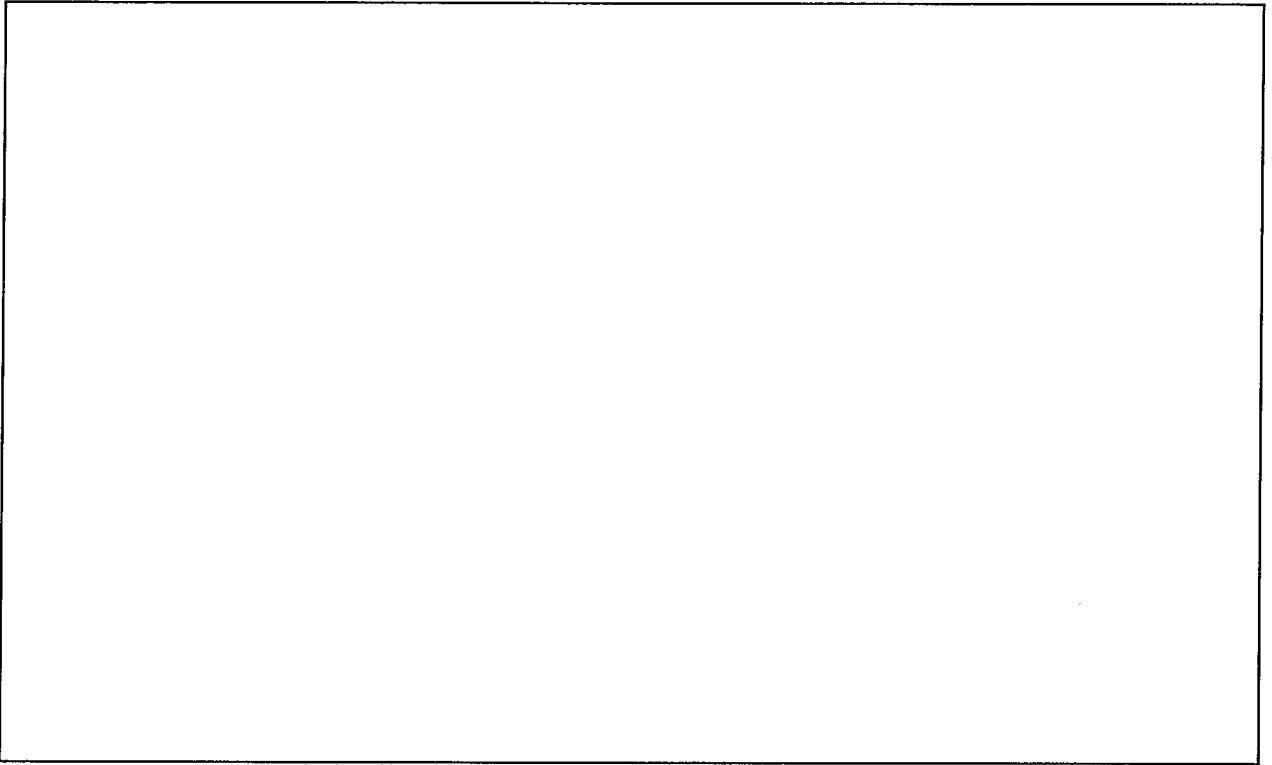
δ (mm)

(水平落下(a))



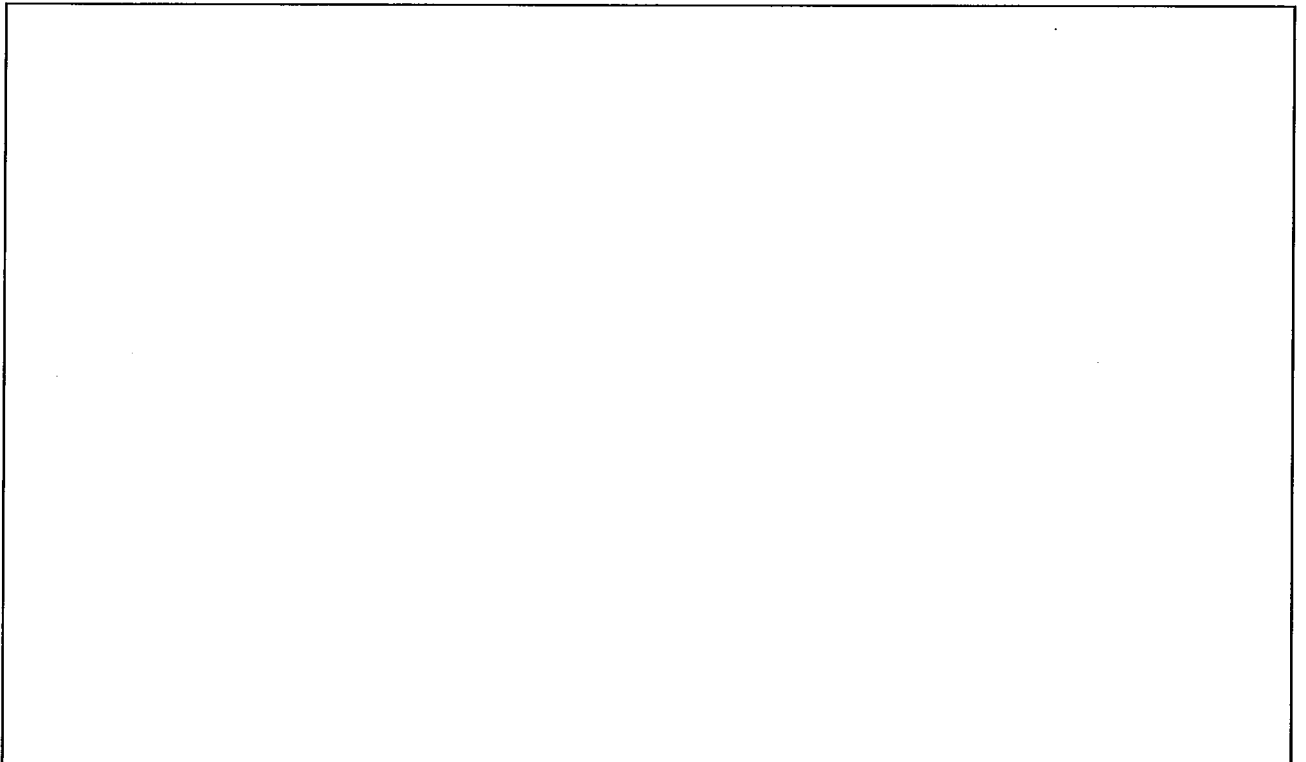
(ロ) - 第A. 68 図 解析モデルの荷重-変位関係 (8)

(0° 下向水平落下(b))



(ロ) - 第A. 69 図 解析モデルの荷重-変位関係 (9)

(90° 下向水平落下(b))



(ロ) - 第A. 70 図 解析モデルの荷重-変位関係 (10)

(180° 下向水平落下(b))

(ロ) - 第A.39表 落下解析結果

〔 A型輸送物としての評価
核分裂性輸送物としての評価 〕

要件	項目		姿勢落下		下 部	上 部	0°方向下	90°方向下	180°方向下	上 部	下 部	
			垂直落下	垂直落下	垂直落下	垂直落下	向水平落下	向水平落下	向水平落下	コーナ落下	コーナ落下	
A型輸送物 (単独評価)	1.2 m落下	加速度 (×g)	外 殻									
			防振構造部									
		変形量 (mm)	外 殻側									
			防振構造部 (注1, 2)									
核分裂性輸送物 (重ね合せ評価)	1.2 m落下	加速度 (×g)	外 殻									
			防振構造部									
		変形量 (mm)	外 殻側									
			防振構造部 (注1, 2)									
9 m落下 (注3)	加速度 (×g)	外 殻										
		防振構造部										
	変形量 (mm)	外 殻側										
		防振構造部 (注1)										

注1 防振構造部の変形量は防振構造部の移動により外殻内面に衝突した時の外殻の変形量を示している。

注2 防振構造部の変形量0 mmは防振構造部と外殻とが衝突しないことを意味する。

注3 (1) 1.2 m落下の変形を考慮し、9 m落下を評価している。

(2) 変形量 () 内は健全時からの総変形量を示している。

A.10.6 「SHOCK」コードによるMFC-1型輸送物自由落下解析の妥当性

A.10.4で示した「SHOCK」コードを用いた9m自由落下解析について、原型容器による落下試験結果と比較することで評価の妥当性を説明する。

(ロ)―第A.40表に「SHOCK」コードによる9m落下解析と原型容器試験結果の比較を示す。

いずれの場合も、加速度変形量共計算値は実験値よりも高目の値を示し安全側の結果となっている。

(ロ)―第A.40表 9m落下解析値と実験値の比較

項目		落下姿勢		下部 垂直落下	0°方向下向 水平落下	90°方向下向 水平落下	180°方向下向 水平落下	上部コーナ 落 下
		外	殻					
加 速 度 (×g)	外 殻	計算結果						
		試験結果						
		比率(計算/試験)						
	防 構 造 振部	計算結果						
		試験結果						
		比率(計算/試験)						
変 形 量 (mm)	外 殻	計算結果						
		試験結果						
		比率(計算/試験)						
	防 構 造 振部	計算結果						
		試験結果						
		比率(計算/試験)						

A. 10. 7 水平落下時の燃料棒等価断面係数

1. まえがき

模擬燃料集合体を使用した原型容器試験のうち水平落下試験結果より燃料棒等価断面係数を求める。

2. 原型容器試験結果

原型容器試験では、ペレット以外はすべて実燃料集合体と同一材料を使用したPWR 15×15型の模擬燃料集合体を使用した。

この模擬燃料集合体の燃料棒には、グリッド間中央部に歪ゲージを貼付け、落下時に発生する歪を測定した。

(ロ)－第A. 41 表にその測定結果を示す。

(ロ)－第A. 41 表 水平落下時の燃料棒に発生する応力

落下姿勢	発生加速度*(×g)	燃料棒発生歪(-)	燃料棒発生応力(N/mm ²)**
0°方向	[]		

(注) * : 発生加速度とは、防振構造物(クロスフレーム)に生じた加速度を示す。

** : 燃料棒応力とは、発生歪より $E = [] \text{ N/mm}^2$ として求めた。

3. 等価断面係数

前項の試験結果より、燃料棒をグリッド部で支持したとみなした場合の等価断面係数 $Z_{e,q}$ を求めると次のようになる。

等価断面係数を求める解析モデルを(ロ)－第A. 71 図に示す。

l : グリッドスパン = [] mm (PWR 15×15)

w : 燃料棒単位長当りの重量 = [] kg/mm

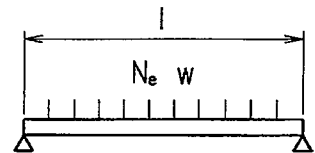
(PWR 15×15)

N_e : 原型容器試験時の発生加速度 (G)

燃料棒に発生する応力は次式で求める。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_{e,q}} \dots\dots\dots (A. 10-1)$$

σ_b : 燃料棒に発生する曲げ応力 (N/mm²)



(ロ)－第A. 71 図
等価断面係数解析モデル

A.10.8 輸送容器の変形量干渉の有無

本項は、1.2 m及び9 m水平落下により外殻に変形が生ずる。外殻の内側の変形及び外側の変形の関係を(□)－第A.72図に示す。

変形量干渉の有無は(□)－第A.72図より次式にて求められる。

$$\ell = \ell_3 - \ell_4$$

(□)－第A.42表にて解析結果を示す。

ℓ : 変形部の干渉寸法

ℓ_3 : 内側の変形幅

$$\ell_3 = 2 \times \sqrt{r_i^2 - (\Delta H + \delta_{Hi})^2}$$

ΔH : 防振構造部幅の内壁と中心との距離

r_i : 外殻内径

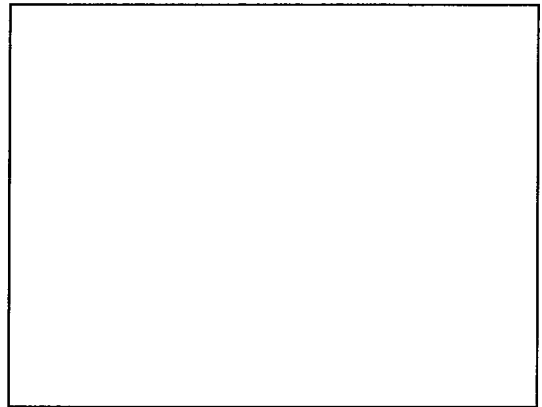
δ_{Hi} : 外殻内側の変形量

ℓ_4 : 外側の変形幅

$$\ell_4 = 2 \times \sqrt{r_o^2 - (r_o - \delta_{Ho})^2}$$

r_o : 外殻外径

δ_{Ho} : 外殻外側の変形量



(□)－第A.72図 外殻変形量解析モデル

(□)－第A.42表より1.2 m水平落下時の内側及び外側変形部の干渉はない。9 m水平落下時の内側及び外側変形部の干渉幅(ℓ)は片側約□mmある。また、干渉部の外殻変形後の残量($\delta_H = \square$ mm)は、変形前の厚み($\delta_o = \square$ mm)より厚いため干渉なしとする。

次に外殻の残量部{内側変形による残量(ΔH_i)及び外側変形による残量(ΔH_o)}の評価に対しては、いずれも外側変形による残量が少ない。よって、外殻外側変形量によって残量(ΔH_o)を考慮する。

(ロ) - 第A. 42表 水平落下時の変形幅の解析結果

項 目	落下高さ	1.2m	9 m
		水平落下	水平落下
外殻外径	r_o (mm)		
外殻内径	r_i (mm)		
防振構造部最大幅	l_1 (mm)		
防振構造部初期衝突部幅	l_2 (mm)		
容器中心と衝突部高さ	ΔH (mm)		
内側変形量	δ_{Hi} (mm)		
外側変形量	δ_{Ho} (mm)		
内側変形部の幅	l_3 (mm)		
外側変形部の幅	l_4 (mm)		
変形幅干渉量 ($l_3 - l_4$)	l (mm)		
内側変形による残量 ($\delta_{oi} - \delta_{Hi}$)	ΔH_i (mm)		
外側変形による残量 ($\delta_o - \delta_{Ho}$)	ΔH_o (mm)		

A.10.9 疲労評価

ロ章Fの検討を踏まえ、A4.4項の吊上装置を対象に、技術基準への適合性を評価する上で、経年変化要因として疲労に対する健全性について記載する。

吊上装置の疲労評価は、応力集中を考慮し繰返しピーク応力強さによる許容繰返し回数と使用計画回数を比較して評価を行う。繰返しピーク応力強さ（ S_p ）は次式にて与えられる。

$$S_p = \frac{S}{2} \cdot k_f \cdot \frac{E_o}{E}$$

S：応力強さ（ N/mm^2 ）

k_f ：疲労強度減少係数

E_o ：設計疲労線図^[1]に示される基本縦弾性係数＝ 2.07×10^5 （ N/mm^2 ）

E：最高温度（80℃）での縦弾性係数

： （ N/mm^2 ） ： （ N/mm^2 ）





ここでの応力強さSは実際に作用する荷重をベースとし、

より想定される負荷係数（）を用いて算出する。

応力強さSの算出方法はA4.4項と同様である。許容繰返し回数 N_a は設計建設規格^[1]中に示される設計疲労線図により算出する。評価対象部位について、クロスピンは定期交換を行うため、それ以外のブラケット、外筒、締付ボルトを評価対象とする。

評価条件及び評価結果を（ロ）－第A.43表に示す。ここで、吊上装置の使用計画回数は6000回（F.1項参照）であり、許容繰返し回数を十分下回っている。従って、吊り上げ装置の疲労強度は十分である。

(ロ)－第A.43表 吊上装置に対する疲労評価結果

	応力強さ S (N/mm ²)	疲労強度 減少係数 kf	縦弾性係数 E (N/mm ²)	繰返しピーク 応力強さ S _p (N/mm ²)	許容繰返数
ブラケット孔部 					
ブラケット 溶接部 					
外筒 					
締め付けボルト 					

A.10.10 運搬中に予想される温度及び内圧の変化に対する健全性について

(1) 外圧評価

最高温度環境で輸送物の蓋閉めを行った後に最低温度環境におかれた場合の外圧評価を行う。なお、外圧変化に対して影響を受ける部位として燃料棒と外筒が挙げられるが、燃料棒は正圧に加圧しており、たとえ最低温度環境で封入作業が行われたとしても正圧は維持されるため、評価対象外とする。

以下、外筒に対する評価を実施する。ここで、蓋締め作業の環境温度としては周囲温度の最大値 38℃を想定し、その後周囲温度が-20℃まで降下することを想定する。温度低下した場合、輸送物外表面に以下の外圧 P_1 が作用する。

$$P_1 = P_0 - P_0 \times T_1 / T_0$$

P_1 : -20℃での外圧 (MPa)

P_0 : 大気圧 = 0.101 (MPa)

T_1 : 最低温度 = 273 - 20 (K)

T_0 : 周囲温度の最大値 = 273 + 38 (K)

$$\begin{aligned} P_1 &= 0.101 - 0.101 \times 253 / 311 \\ &= 0.0189 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

許容外圧 P_2 は以下の式で求められる。

$$P_2 = 4Bt / 3D_0$$

B : 設計建設規格^[1]より求まる値 =

t : 上蓋外筒の板厚 = (mm)

D_0 : 上蓋外筒の外径 = (mm)

$$\begin{aligned} P_2 &= 4 \times \text{} \times \text{} / (3 \times \text{}) \\ &= \text{} \end{aligned}$$

従って、余裕率 M_s は以下の通り計算される。

$$M_s = \frac{\square}{0.0189 - 1}$$
$$= \square$$

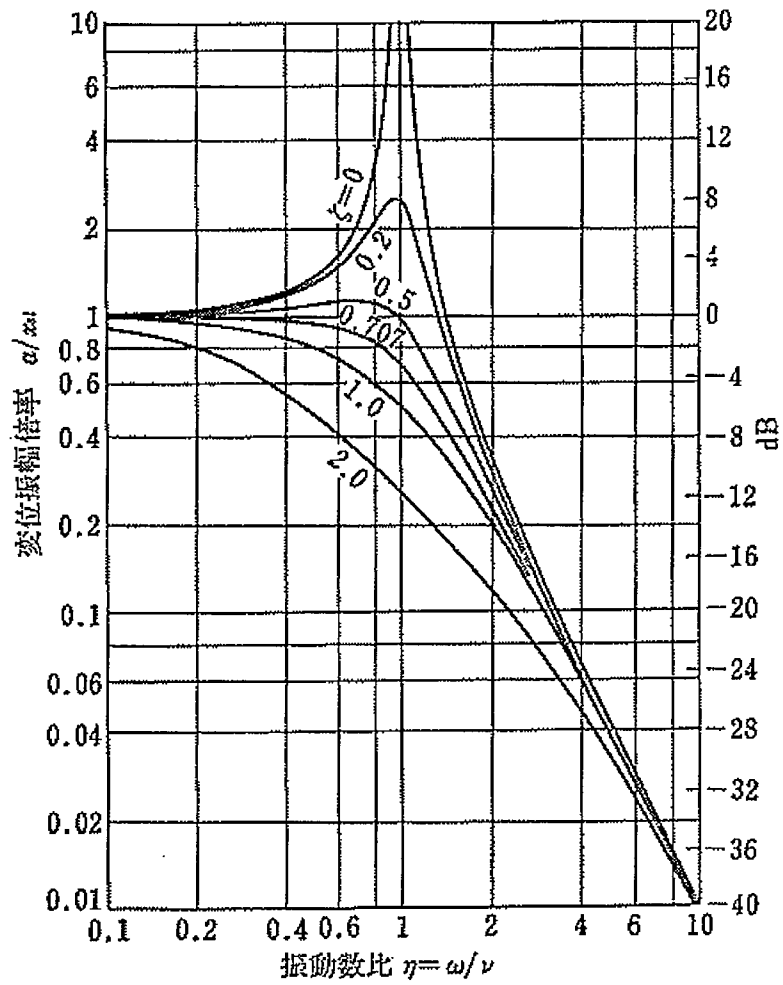
余裕率が正であるので、外圧が作用しても上蓋外筒が破断することはない。

(2) 内圧評価

一般の試験条件下での最低温度 -20°C から最高温度 73°C に上昇した場合でも、容器に装備している内圧調整用リリーフバルブが作動するため、容器内に作用する圧力(差圧 4.9 kPa)は変わらない。そのため、評価は省略する。

A. 10.11 力による強制振動の共振曲線

A. 4. 7 項の補足として変位振幅倍率の設定に用いる力による強制振動の共振曲線の図を(□)－第A. 73 図に示す。



(□)－第A. 73 図 力による強制振動の共振曲線

出典： 國枝正春著，「実用 機械振動学」，理工学社，(1984)

A.10.12 燃料棒被覆管の水平落下時の余裕について

(1)概要

A.9.2.5項に記載する特別の試験条件の9m水平落下において、発生応力(□ N/mm^2)が、許容応力(設計引張強さ□ N/mm^2)に対して余裕率※が□となっているが、以下の通り十分な余裕を有している。

(2)説明

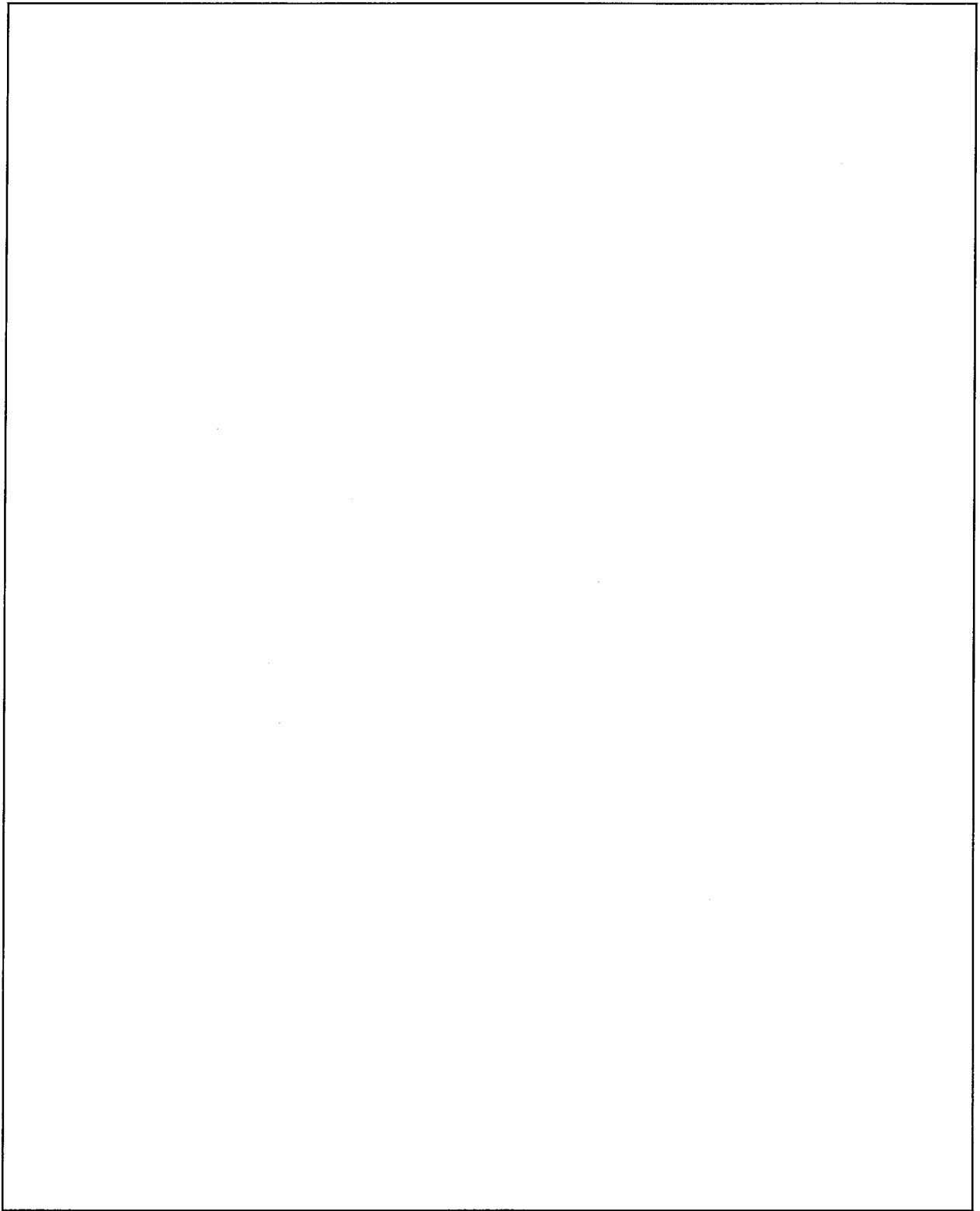
本評価における発生応力(□ N/mm^2)は燃料棒被覆管であるジルコニウム合金が完全弾性変形する(下式が成立)と仮定して評価したものである。

$$(\text{発生応力}) = (\text{発生歪}) \times (\text{縦弾性係数}(=\square\text{N/mm}^2))$$

一方で、試験にて取得したジルコニウム合金の応力-歪線図※※は(ロ)-第A.74図に示すとおりであり、同一歪での発生応力は完全弾性変形を仮定した場合よりも小さくなる。本応力-歪線図に基づく発生応力は□ N/mm^2 程度で十分な余裕(余裕率□程度)を有している。

※：(余裕率) = (許容応力) / (発生応力) -1

※※：三菱原子燃料(株)で実施したジルコニウム合金(□)の常温引張試験結果例



(ロ) - 第A.74図 ジルコニウム合金 () の応力-歪線図

(上: 全体、下: 拡大図)

口章B 熱 解 析

(ロ)－B 熱解析

B.1 概要

B.1.1 熱設計

本輸送物の構成図を(ロ)－第B.1図に示す。

本輸送物は上蓋，下部容器（外筒，木材及び内筒），ショックマウント，クロスフレームより構成されている。

輸送容器は，厚さ□mmの木材を鋼板でサンドイッチした構造であり，外筒鋼板厚さ□mm（一部□mm），内筒厚さ□mmの炭素鋼製で，外径□mm，内径□mm，長さについては全長□mm，容器内空間□mmの円筒形である。

収納物である燃料棒は，ヘリウムガスは最大□MPa・Gの圧力で封入されている。

また，燃料棒は全数ヘリウム漏洩検査を実施している。

収納物と内筒間の熱の流れは防振構造部によって影響を受けることはほとんどない。従って，防振構造部は解析から除外する。また，木材は熱伝導率が小さいので耐火試験時には，収納物を高温雰囲気から保護する断熱材の役目も兼用している。

収納物より発生する熱は微小であるため無視できる。輸送容器外面への太陽放射熱や火災時の熱は輻射及び対流により伝えられる。

一般の試験条件時は容器が健全な水平状態のモデルとし，また，特別の試験条件時は輸送容器が変形したモデルとし，密封境界である燃料棒被覆管の温度に対して安全側になるように解析を行う。

B.1.2 熱解析

熱解析は，規則及び告示に規定された一般の試験条件及び特別の試験条件下における輸送物の熱的特性について行った。

(1) 一般の試験条件下における熱的条件は以下の通りである。

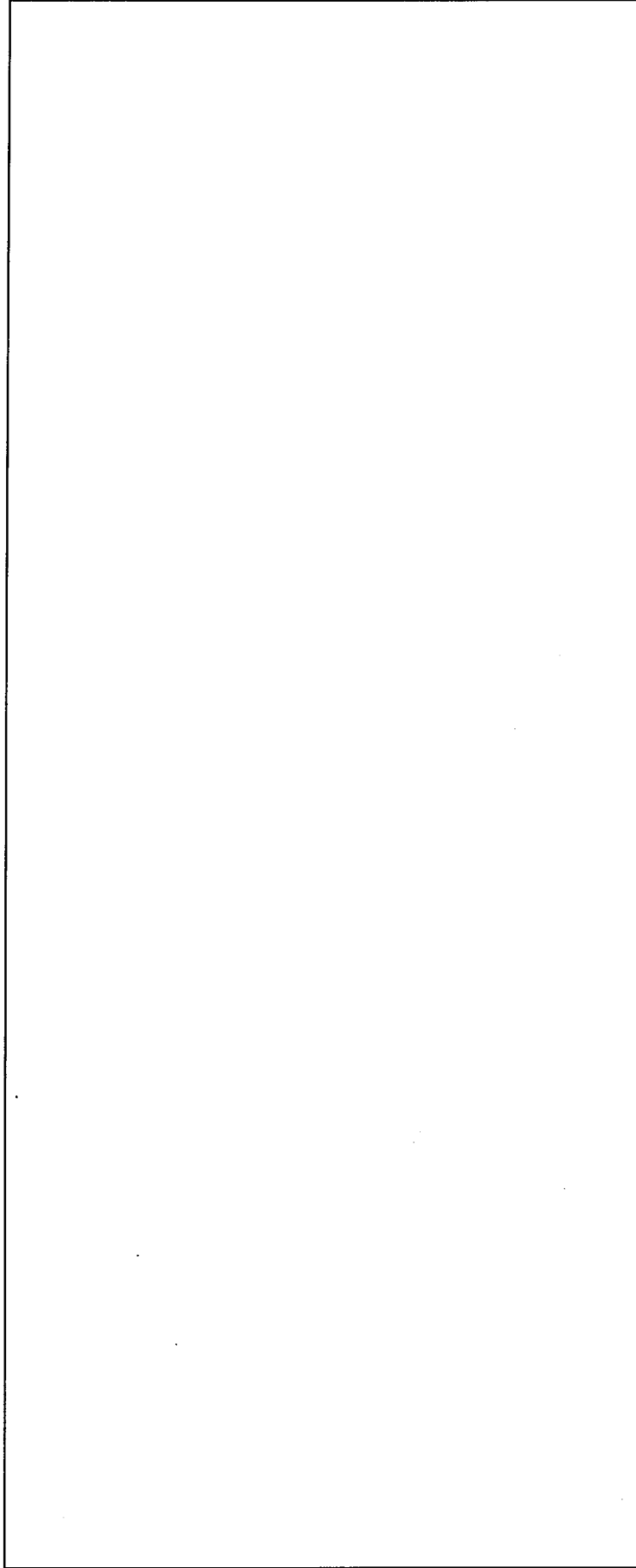
- (a) 輸送物は38℃の大気におく。
- (b) 太陽熱の放射を受けるものとする。

(2) 特別の試験条件下における熱的条件は以下の通りである。

- (a) 輸送物は雰囲気放射率0.9である800℃の環境に30分間さらされる。

この場合，太陽放射熱を受けるものとし，輸送物表面の吸収率は0.8とする。

- (b) (a)の条件下においた後
 - (i) 輸送物は38℃の大気において一週間放置する。
 - (ii) 太陽熱の放射を受けるものとする。



(口)一第B. 1 図 熱 的 構 成 図

B. 1. 3 熱解析の条件と方法

熱解析の条件として用いた収納物の発熱量、一般及び特別の試験条件に対する輸送物の環境条件及び輸送物の輻射率（放射率及び吸収率）を(ロ)－第B. 1表に示す。

(ロ)－第B. 1表 熱解析条件

項目		条件		特別の試験条件		
		一般の試験条件		火災前	火災時	火災後
発熱量		0	0	0	0	0
環境条件	周囲温度	静止空気 38℃	静止空気 -20℃	静止空気 38℃	30分 800℃	静止空気 38℃
	太陽放射熱	有	無	有	有	有
	周囲放射率	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0
輸送物の 輻射率	外筒表面	(a) <input type="text"/>	(a) <input type="text"/>	(a) <input type="text"/>	(d) 0.8	(e) <input type="text"/>
	内筒表面	—	—	(b) <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	燃料棒表面	—	—	(c) <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

- (a) 火災にさらされる前の表面輻射率（塗装表面） 参考文献〔9〕
- (b) 炭素鋼の表面輻射率 〃 〔9〕
- (c) ジルコニウム合金の表面輻射率 〃 〔12〕
- (d) 火災時の表面輻射率（炭素鋼） 〃 〔4〕
- (e) 火災後 〃 （炭素鋼） 〃 〔4〕

また、解析の実施方法を(ロ)－第B. 2表に示す。

(ロ)－第B. 2表 熱解析の方法

項目		
収納物仕様		新燃料集合体(i)章D参照
最大発熱量		0 W
計算モデル	輸送容器	2次元1/4象限モデル
	収納物	均質化近似
温度分布計算		非定常熱解析コード TRUMP (付属書類 B. 6. 3 参照)
使用物性値（熱的性質）		B. 2 材料の熱的性質参照

B.2 材料の熱的性質

本輸送物の構成材料はイ章C.3に示す通りである。これらの材料のうち、熱解析で用いた材料の熱的性質を以下に示す。

(1) 炭素鋼

炭素鋼の熱的性質を(ロ)－第B.3表に示す。このデータは参考文献〔3〕〔4〕より引用している。この材料は内筒及び外筒に用いられている。

(ロ)－第B.3表 炭素鋼の熱的性質

温度 (°C)	密度 (g/cm ³)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (mW/m·K)
0			
200			
400			
500			
800			

(2) 木材

木材の熱的性質を(ロ)－第B.4表に示す。このデータは実験に基づいている。この材料は外筒と内筒との間に用いられ熱的には断熱効果がある。

(ロ)－第B.4表 木材 () の熱的性質

温度 (°C)	密度 (g/cm ³)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (mW/m·K)
0			
50			
100			
150			
200			
250			
275			
320			
350			
500			
900			

(3) UO₂ペレット

UO₂ペレットの熱的性質を(ロ)－第B. 5表に示す。このデータは参考文献〔6〕より引用している。

(ロ)－第B. 5表 UO₂ペレットの熱的性質

適用温度 (°C)	密度 (g/cm ³)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (mW/m·K)
100	10.96	0.264	7.08×10 ³
200		0.281	6.03×10 ³
300		0.293	5.36×10 ³
400		0.301	4.78×10 ³
500		0.310	4.19×10 ³

(4) 空 気

空気の熱的性質を(ロ)－第B. 6表に示す。このデータは参考文献〔4〕より引用している。空気は、容器内空間に存在しており、熱伝達の方法として対流と輻射を考慮している。

(ロ)－第B. 6表 空気の熱的性質

温 度 (°C)	密 度 (g/cm ³)	動粘性係数 (cm ² /S)	熱伝導率 (mW/m·K)	プラントル数 (-)	比 熱 (kJ/kg·K)
0	1.251×10 ⁻³	0.138	24.07	0.72	1.005
40	1.091×10 ⁻³	0.175	27.21	0.71	1.009
100	9.16×10 ⁻⁴	0.239	31.64	0.70	1.013
140	8.27×10 ⁻⁴	0.285	34.54	0.69	1.017
200	7.22×10 ⁻⁴	0.358	38.61	0.69	1.026
500	4.22×10 ⁻⁴	0.810	56.19	0.70	1.093
800	3.19×10 ⁻⁴	1.370	70.92	0.71	1.156

(5) 燃料棒被覆管

燃料棒被覆管（ジルコニウム合金（ジルカロイ-4，MDA及びZIRLO））の熱的性質を(ロ)－第B.7表に示す。このデータのうち密度，比熱は文献〔6〕に，熱伝導率は文献〔8〕に基づいている。

(ロ)－第B.7表 燃料棒被覆管の熱的性質

密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (mW/m·K)	比熱 (kJ/kg·K)

(6) 均質化燃料

均質化燃料の熱的性質を(ロ)－第B.8表に示す。本解析モデルに用いる均質化燃料の物性値及び計算式は付属書類B.6.5に示す。

(ロ)－第B.8表 均質化燃料の熱的性質

温度 (°C)	等価密度 (g/cm ³)	等価比熱 (kJ/kg·K)	等価熱伝導率 (mW/m·K)
100			

B.3 構成要素の仕様

熱解析をする上で関連する構成要素の仕様を以下に述べる。

(1) Oリング

Oリングは容器内への海水等の浸入を防ぐために用いられている。

本輸送物で使われているOリングの材質は ゴムであり，使用可能範囲は °Cである。輸送物の使用温度範囲は-20°C～73°Cであり，Oリングは十分使用に耐える。

(2) リリーフバルブ

リリーフバルブは下部容器上部に取付られており，内圧をある程度一定に保つために設けられている。Oリングの材質は ゴムでありバルブの最大使用圧力は0.20MPa abs，使用可能温度範囲は °Cである。

それに対し容器内空間の最大圧力は0.120MPa abs，温度範囲は-20°C～73°Cでありバルブは十分その使用に耐える。

(3) エアバルブ

エアバルブはリリーフバルブと同じく下部容器上部に取付られており必要に応じ容器内空間を加圧するために設けられている。

その仕様はリリーフバルブと同様であり十分その使用に耐えるものである。

B. 4 一般の試験条件

本輸送物は規則に基づき、一般の試験条件下での評価はA型及び核分裂性輸送物の要件に従い評価する。

なお、構造解析よりA. 5. 3及びA. 9. 1項の一般の試験条件下での評価は共に、輸送物として健全性を保持していること、また(ロ)－第A. 39表より変形量も同一であることより、同一形状にて評価する。

B. 4. 1 熱解析モデル

本輸送物からの崩壊熱は小さく無視できるので、温度上昇は太陽放射熱のみを考慮する。

本解析は、太陽放射熱を熱流入、大気への自然対流及び輻射を熱放出とした平衡状態のモデルを考える。

一般の試験条件下の水平状態のモデルを付属書類B. 6. 2に示す方法により簡易計算で求める。

B. 4. 1. 1 解析モデル

ここでは計算に用いた以下の項目について述べる。

(1) 形状モデル

一般の試験条件下での熱解析は輸送容器の変形がないものとし、水平に置かれた外径

mm, 長さmmの円筒とする。

(2) 解析条件

解析に使用した熱的条件は次の通りである。

収納物の崩壊熱は無視する。周囲環境条件は38℃の静止空気である。輸送容器表面の輻射率は、塗装面として、とする。

太陽放射熱は、輸送容器全面を曲面とし、 $400\text{W}/\text{m}^2$ (1日12時間)の伝熱量があるとする。

以上の解析条件をまとめたものを(ロ)－第B. 9表に示す。

(ロ)－第B. 9表 一般の試験条件下の熱的条件

項目	条件
崩壊熱 (W)	0
輸送容器表面の輻射率	<input type="text"/>
周囲温度 (°C)	38
太陽放射熱 (W/m ²)	400

(3) 輸送物の伝熱

本輸送物の伝熱について以下に説明する。

- (a) 輸送物は、一般の試験条件下では変形が小さいので、変形は無視する。
- (b) 入熱量（太陽放射熱）と熱放出（大気への自然対流及び輻射）が平衡であるモデルの輸送容器表面について定常熱計算を行う。
- (c) 輸送物の最高温度は前記(b)の容器表面最高温度とする。

以上の条件より簡易計算で定常熱計算を実施した。

詳細は付属書類B. 6. 2に示した。

B. 4. 1. 2 試験モデル

該当せず。

B. 4. 2 最高温度

B. 6. 2にて求めた輸送物の最高温度は73°Cである。

B. 4. 3 最低温度

一般の試験条件下における輸送物の最低温度は、収納物の崩壊熱が小さく無視するため、輸送物各部の温度は使用条件上の外気最低温度と平衡状態になり、-20°Cとする。

このとき、輸送容器に使用しているOリング（ゴム）は使用可能温度範囲（
°C）以内にあるので、十分その性能を維持できる。また、輸送容器に使用している炭素鋼及び、燃料被覆管に使用しているジルコニウム合金は-20°Cにおいて低温脆性による破壊は生じない。

以上のように-20°Cにおいて本輸送物の密封性は保たれる。

B. 4. 4 最大内圧

一般の試験条件下における輸送物最高温度は、B. 4. 2項で述べたように73°Cである。一般の試験条件下における最大内圧の評価に当たっては、輸送物が一様に73°Cになったものとして、輸送容器と収納物である燃料棒の上昇圧力を求める。

(1) 輸送容器の内圧上昇

$$\begin{aligned} \text{容器内最高温度} &: T = 273 + 73 \\ &= 346 \text{ (K)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{常 温} &: T_0 = 273 + 20 \\ &= 293 \text{ (K)} \end{aligned}$$

$$\text{常温時の容器内圧} : P_0 = 0.101 \text{ (MPa abs)}$$

とすると、

$$\begin{aligned} P &= P_0 \times \frac{T}{T_0} \\ &= 0.101 \times \frac{346}{293} \\ &= 0.120 \text{ (MPa abs)} \end{aligned}$$

従って最高温度時の輸送容器の内圧上昇 ΔP は、次の通りとなる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= 0.120 - 0.101 \\ &= 0.019 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

(2) 燃料棒の内圧上昇

$$\begin{aligned} \text{燃料棒内最高温度} & T = 273 + 73 \\ &= 346 \text{ (K)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{常 温} & T_0 = 273 + 20 \\ &= 293 \text{ (K)} \end{aligned}$$

常温時の燃料棒各タイプの内圧は(イ)－第 D.9 表より現行燃料で最大 MPa・G、高燃焼度燃料で MPa・G、高燃焼度燃料改良タイプで MPa・G であり

最高温度時の燃料棒内圧 P は

$$\begin{aligned} P &= P_0 \times \frac{T}{T_0} \\ &= (\text{} + 0.101) \times \frac{346}{293} = \text{} \text{ (MPa abs)} \quad (\text{} \text{ (MPa・G)}) \text{ (現行燃料)} \\ &= (\text{} + 0.101) \times \frac{346}{293} = \text{} \text{ (MPa abs)} \quad (\text{} \text{ (MPa・G)}) \text{ (高燃焼度燃料)} \\ &= (\text{} + 0.101) \times \frac{346}{293} = \text{} \text{ (MPa abs)} \quad (\text{} \text{ (MPa・G)}) \text{ (同上・改良タイプ)} \end{aligned}$$

となる。

B.4.5 最大熱応力

一般の試験条件下においては、熱膨張を拘束するものはないので、熱応力の発生はない。

B. 4. 6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における輸送物の最高温度は73℃、最低温度は-20℃である。最高温度における輸送容器の内圧上昇は0.019MPaである。また、Oリング（ゴム）は使用可能温度範囲内（℃）にあるので十分その性能を維持できる。

収納物である燃料棒の内圧はMPa・Gとなり、この時燃料棒の健全性は保たれる。

熱応力については、熱膨張を拘束するものがないので、熱応力の発生はない。最低温度（-20℃）においては、密封境界を形成する燃料棒被覆管（ジルコニウム合金）の低温脆性による破壊は生じない。

以上より一般の試験条件下において、収納物の密封性は維持される。

B. 5 特別の試験条件

本輸送物は規則に基づき、特別の試験条件下での評価はA型輸送物としての要件はなく、核分裂性輸送物としての要件に従い評価する。

B. 5. 1 熱解析モデル

特別の試験条件下における熱評価を、3次元非定常熱解析コードTRUMPを用いて行った。

B. 5. 1. 1 解析モデル

ここでは、TRUMPによる計算に用いた以下の項目について述べる。

(1) 形状モデル

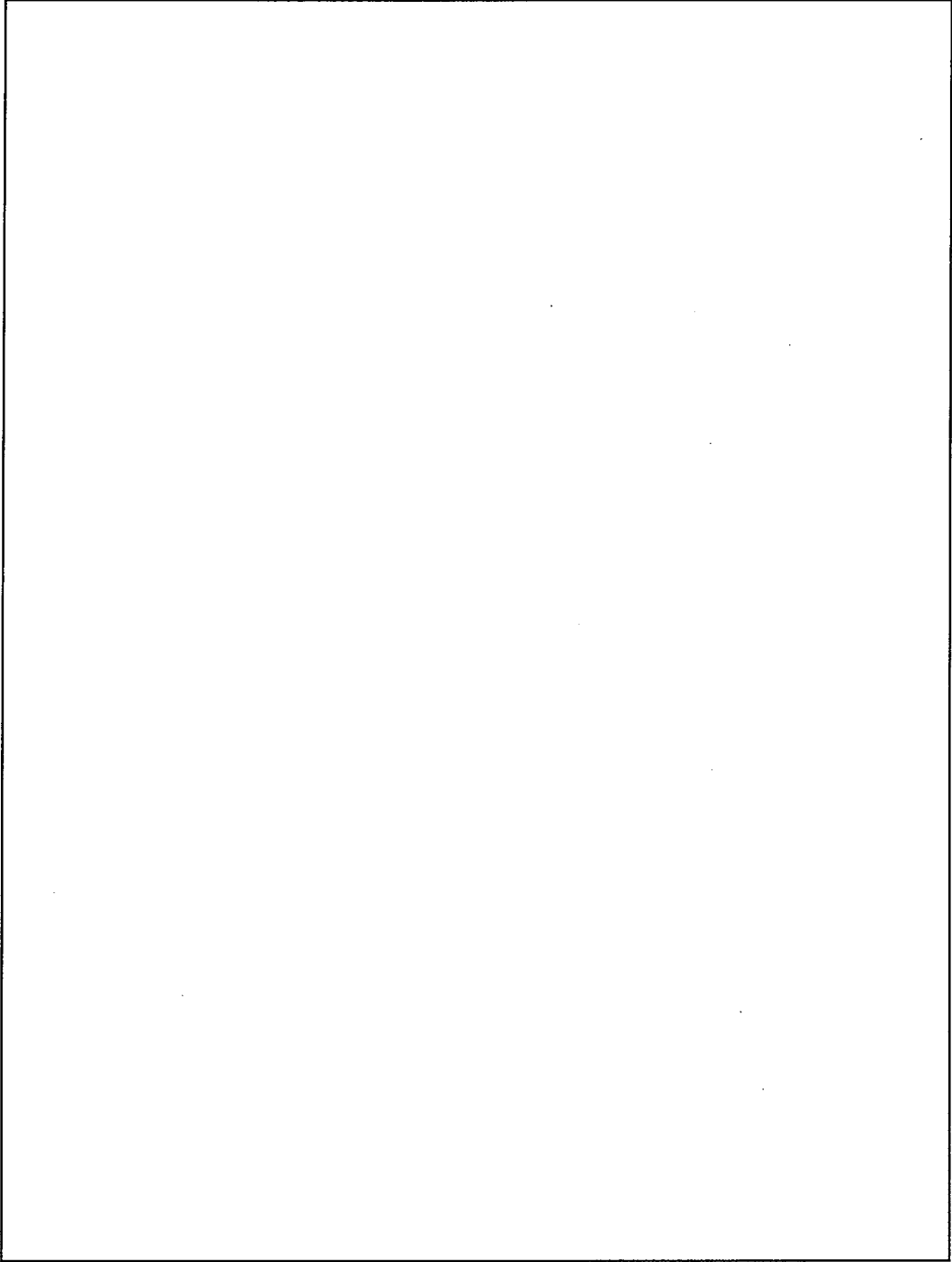
本輸送容器は、(ロ)章A構造解析のA. 9. 2の核分裂性輸送物の条件で示したように特別の試験条件下の落下試験Ⅰ及び落下試験Ⅱにおいて局所的な変形が生じる。

すなわち、外筒及び内筒は落下試験Ⅰにより全長にわたって変形が生じ、落下試験Ⅱにより局所的な変形が生ずる。

熱解析では、構造解析での落下事象の連続性（核分裂性輸送物の要件）を考慮した変形状態をモデル化し、(ロ)－第B. 2図に示すように内外の局所的な変形が全周にわたって生ずる安全側のモデルとした。

外殻の木材の厚さは、落下試験Ⅰの結果を考慮し、安全側にmmとした。

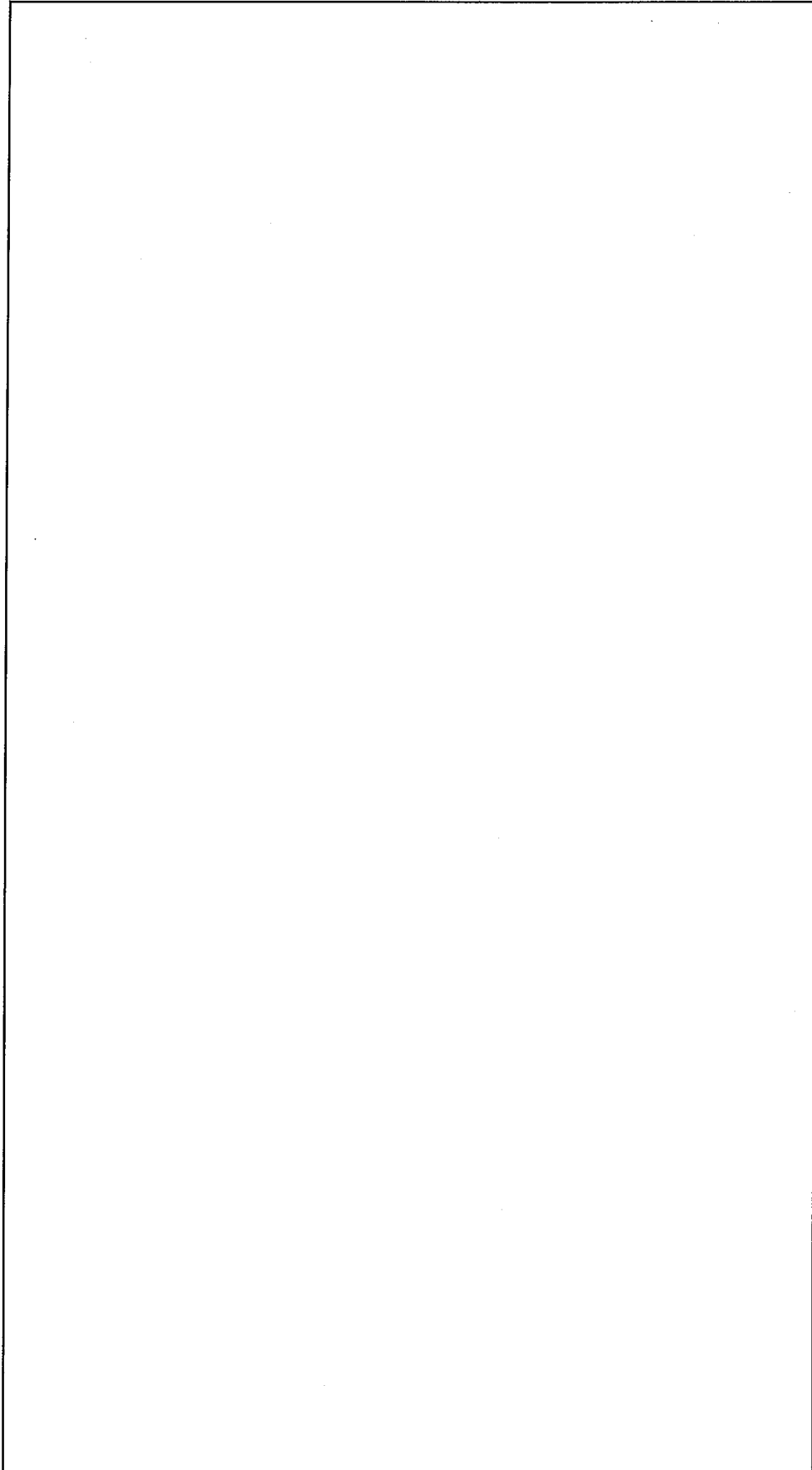
落下試験Ⅱの影響については、付属書類B. 6. 8に示す原型容器試験結果から、落下試験Ⅱを行った部分（断面①－①）と落下試験Ⅱを行っていない部分（断面②－②）と比較すると、耐火試験時の外殻内面の到達温度に有意差はないため、この解析において、落下試験Ⅱの影響については無視した。



(口) - 第B. 2図 落下試験 I における変形形状図

- (b) 木材の伝熱
木材の熱伝導を考慮
- (c) 容器内筒と最外周燃料棒（ロッド）の間の伝熱
空気の自然対流及び輻射を考慮
- (d) 最外周ロッド均質化燃料の間の伝熱
熱伝導を考慮

領域境界条件図を(ロ)－第B. 3図に示す。また、解析に用いた境界条件の関係式等については、付属書類B. 6. 6及びB. 6. 7に示す。



(ロ)一第B. 3図 特別の試験条件下の解析モデル, 寸法及び領域境界条件図

B. 5. 1. 2 試験モデル

該当せず。

B. 5. 2 核燃料輸送物の評価条件

特別の試験条件下の強度試験により生ずる輸送物の変形を考慮した(ロ)一第B. 3図を使用し、さらに、以下に示すような条件にて解析を行った。

- (1) ショックマウントやクロスフレーム等は考慮しない。この仮定はショックマウントが熱の不良導体であり、熱伝導では内筒の温度が収納物へ伝わらないことと、ショックマウント、クロスフレーム等の熱容量を無視し、結果的に燃料棒温度を高め安全側に評価する。
- (2) 火災前の初期温度は、一般の試験条件下における温度の計算結果(太陽放射熱による平衡温度)を考慮し輸送物全域にわたり73℃とする。
- (3) 木材の熱伝導率及び比熱は温度依存であるが、冷却時の比熱のみ火災終了時温度の比熱が維持されるものとした。これは、炭化による熱容量減少を模擬することで結果的に燃料棒温度を高め安全側に評価する。

B. 5. 3 核燃料輸送物温度

B. 5. 1. 1 で述べた解析モデルを用いた計算結果を(ロ)一第B. 4図に示す。これは試験条件下での輸送物の温度を時間経過とともにプロットしたものである。

燃料表面温度は、温度分布の(ロ)一第B. 4図からわかるように燃料では冷却開始後2分でピークとなりその温度は□℃となる。

B. 5. 4 最大内圧

800℃、30分の火災及びそれに続く38℃の環境での放置により、燃料棒の最高温度は□℃になるが、このとき被覆管とUO₂ペレットの熱膨張によるボイド体積の減少及び燃料棒内の気体温度の上昇によって、内圧が上昇する。

温度と内圧の関係はボイル・シャルルの式より、次式にて表される。

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} \dots\dots\dots (B. 5-1)$$

ここで、

- | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|
| P | : 燃料棒最高温度における被覆管内圧 | (MPa) |
| V | : 燃料棒最高温度におけるボイド体積 | (cm ³) |
| T | : 温度 | (K) |
| P ₀ | : 初期圧力 | (MPa) |

V_0 : 初期ボイド体積 (cm³)

T_0 : 初期温度 (K)

また

V_T : 被覆管の体積 (cm³)

V_F : UO₂ペレットの体積 (cm³)

V_{T0} : 初期温度における被覆管の体積 (cm³)

V_{F0} : 初期温度におけるUO₂ペレットの体積 (cm³)

α_T : 被覆管の熱膨張率 (1/°C)

α_F : UO₂ペレットの熱膨張率 (1/°C)

ΔT : 温度差 (°C)

とすれば、ボイド体積は次式にて算出される。

$$\begin{aligned} V - V_0 &= (V_T - V_F) - (V_{T0} - V_{F0}) \\ &= (V_T - V_{T0}) - (V_F - V_{F0}) \\ &= 3 \alpha_T \Delta T V_{T0} - 3 \alpha_F \Delta T V_{F0} \dots\dots\dots (B.5-2) \end{aligned}$$

式 (B.5-2) より、各値を算出すると最大内圧は、MPa・G となり、周方向応力 σ は次式にて与えられる。

$$\sigma = P \times \frac{d}{2t}$$

P : 内圧 (MPa・G)

d : 被覆管内径 (mm)

t : 被覆管内厚 (mm)

各タイプにおける最大応力は付属書類 B. 6. 9 より

$$\sigma = \text{} (N/mm^2)$$

であり、この値は °C における燃料棒被覆管 (ジルコニウム合金) の設計基準値

N/mm² に比べ十分低い値である。

各タイプに対する評価を付属書類 B. 6. 9 に示す。

B. 5.5 最大熱応力

特別の試験条件下においては、熱膨張を拘束するものはないので、熱応力の発生はない。

B. 5.6 結果の要約及びその評価

特別の試験条件下における輸送物の性能評価は、発熱量0W、周囲温度38℃の環境条件下で800℃、30分間の火災事故に遭遇するとして行った。この場合の輸送物各部の温度変化は(ロ)一第B.4図に示す通りである。

(1) 結 果

B.1.2熱解析で示した条件下での輸送物各部の温度及び容器内空間に発生する内圧について以下に述べる。

(a) 温 度

一般の試験条件下及び特別の試験条件下における輸送物各部の温度を(ロ)一第B.11表に、また、特別の試験条件下における輸送物各部の温度履歴を、(ロ)一第B.4図に示す。

一般の試験条件下では輸送物表面温度は73℃であり、従ってリング部は使用温度範囲内(℃)にある。燃料棒温度は73℃であるので、特別な熱除去システムを設ける必要はない。

特別の試験条件下での燃料棒温度は、℃であり、これは、燃料棒の許容温度(約℃)以下である。

(ロ)一第B.11表 一般及び特別の試験条件下における輸送物各部の最高温度

項目 部位	一般の試験条件	特別の試験条件	
		温 度	時 間
燃料棒表面	73℃	<input type="text"/>	<input type="text"/>
内筒表面	73℃		
外筒表面	73℃		

(b) 圧 力

一般及び特別の試験条件下における燃料棒及び容器内空間の最高圧力を(ロ)一第B.12表に示す。

(ロ)－第B.12表 一般及び特別の試験条件下における燃料棒及び容器内空間の最高圧力

(単位 MPa・G)

項目 部位	一般の試験条件下での圧力	特別の試験条件下での圧力
燃料棒	□	□
容器内空間	0.019	—

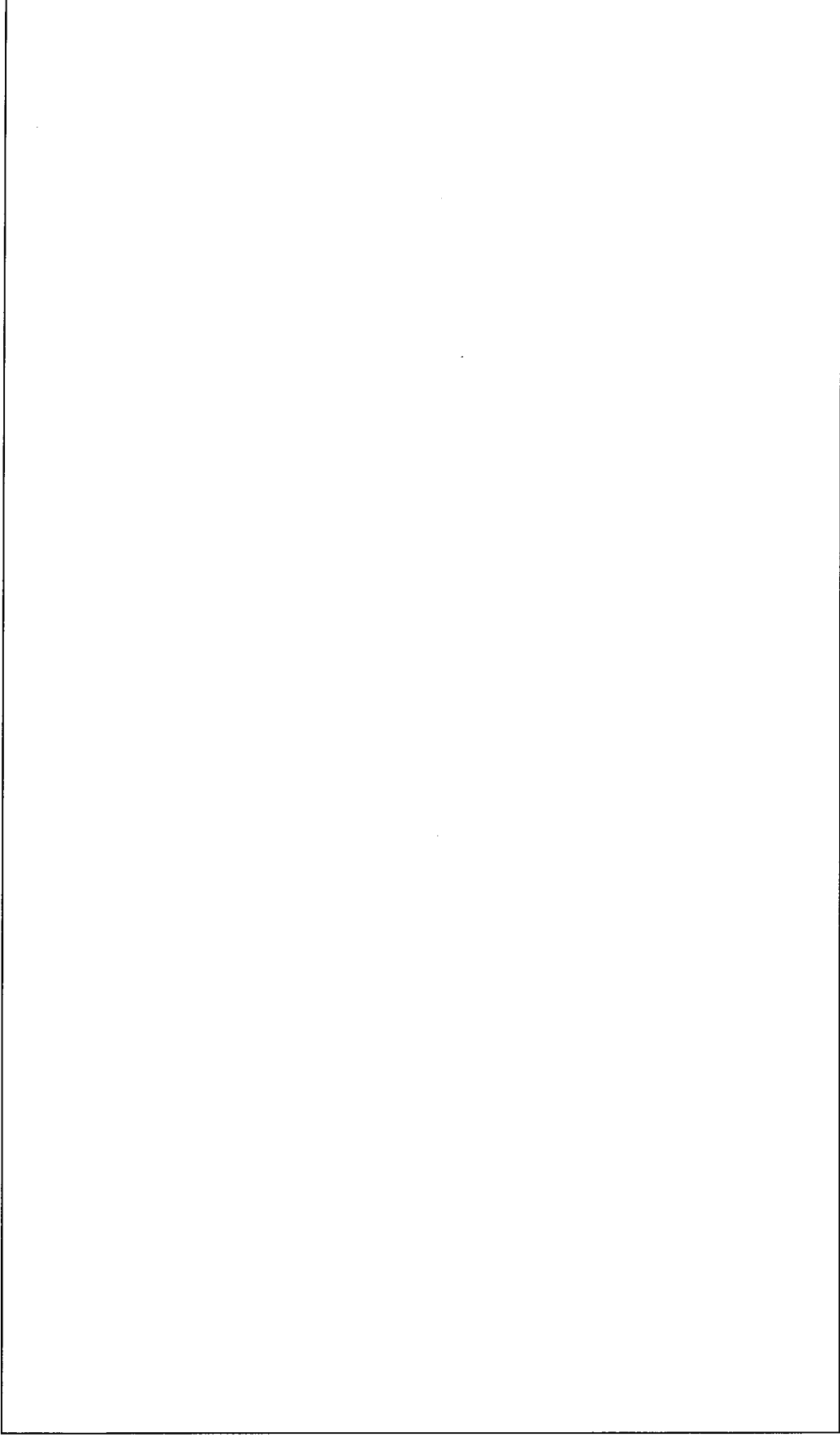
(ロ)－第B.4図に示した各部の最高温度と、火災事故発生からの時間をまとめると、(ロ)－第B.11表に示す通りである。また、密封境界である燃料棒の最大圧力は(ロ)－第B.12表に示す通りである。

以上より、密封境界である燃料棒被覆管は特別の試験条件下においても健全である。特別の試験条件下における輸送物の総合的評価の詳細を(ロ)－第B.13表に示す。

これらの結果より、本輸送物の密封境界である燃料棒被覆管は特別の試験条件下においても健全性を保つ。

(ロ)－第B.13表 特別の試験条件下における輸送物の総合的評価

項 目	基準値	結 果	備 考
最高温度 燃料棒 内筒 外筒 最大応力 燃料棒被覆管 (ジルコニウム 合金)	□		基準値を満足 基準値を満足



(ロ) 第B.4図 特別の試験条件下での各部温度履歴

B. 6 付属書類

B. 6. 1 参考文献

- [1] 放射性物質等の輸送に関する安全基準 原子力委員会 (S50.1.21)
- [2] Edwards A. L., Trump ; A COMPUTER PROGRAM FOR TRANSIENT AND STEADY STATE TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS, Lawrence Radiation Laboratory, University of California Livermore (May 1, 1968)
- [3] Goldsmith A et al.; "Handbook of Thermo Physical Properties of Solid Materials "Revised Edition, Vol. II, The MacMillan Company, New York (1961)
- [4] 伝熱工学資料 改訂第3版 日本機械学会 (1975)
- [5] R. O. Wooton & H. M. Epstein : "Heat Transfer from a Parallel Rod Fuel Element in a Shipping container" Battelle Memorial Institute (1963)
- [6] 長谷川他 "原子炉材料ハンドブック" 日刊工業新聞社 (1977)
- [7] キャスク伝熱特性評価コード研究分科会 "高速実験炉使用済燃料用輸送容器の設計評価" 日本機械学会 (1977.12)
- [8] "THERMAL CONDUCTIVITY" IFI/PLENUM NEW YORK-WASHINGTON (1970)
- [9] 化学工学便覧 改訂第4版
- [10] 熱交換器設計ハンドブック 工学図書株式会社 (1974)
- [11] 燃料設計に必要な物性値及び計算図表 JAERI-M4881
- [12] 三菱重工業(株)社内データ

B. 6. 2 一般の試験条件下における輸送物の最高温度

一般の試験条件下における輸送物の最高温度は、定常状態における熱収支をとり、以下のよう
に求めた。

流入熱量 $Q_{in}(W)$ は、太陽放射熱のみであり、放出熱量 $Q_{out}(W)$ は放射熱 $Q_1(W)$ と自然対
流による放出熱 $Q_2(W)$ の和である。輸送物表面温度を t ($^{\circ}C$) とし、 $Q_{in}=Q_{out}$ となる最
高温度 t_{max} を求める。

t_o : 環境温度 = 38 ($^{\circ}C$)

D : 容器外径 (mm)

A : 伝熱面積 (mm^2)

(1) 太陽放射熱 Q_{in}

$$\begin{aligned} Q_{in} &= 400 (W/m^2) \times A \\ &= 344 (kcal/(m^2 \cdot h)) \times A \end{aligned} \quad (B. 6-1)$$

(2) 容器からの放射熱 Q_1

$$Q_1 = A \times \varepsilon_H \times 4.88 \left\{ \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right\}$$

ε_H : 容器表面の放射率 (塗装面)

$$\varepsilon_H = \boxed{} \quad [9]$$

T : 絶対温度 (K)

$$T = t + 273$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= A \times \boxed{} \times 4.88 \times \left\{ \left(\frac{t + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{38 + 273}{100} \right)^4 \right\} \\ &= A \times \boxed{} \times \left\{ \left(\frac{t + 273}{100} \right)^4 - 3.11^4 \right\} \end{aligned} \quad (B. 6-2)$$

(3) 自然対流による放出熱 Q_2

水平円柱自然対流伝熱とすると

$$Nu = 0.13 \times (Gr \times Pr)^{1/3} \quad [10] \quad (B. 6-3)$$

$$Nu = hD/k \quad : \text{ヌッセルト数} \quad (B. 6-4)$$

$$Gr = g \beta \Delta t D^3 / \nu^2 \quad : \text{グラスホフ数} \quad (B. 6-5)$$

$$Pr = C_p \mu / k \quad : \text{プラントル数} \quad (B. 6-6)$$

ここで

$$h \quad : \text{熱伝達係数} \quad (W/(m^2 \cdot K))$$

D	: 円柱の外径	(m)
k	: 空気熱伝導度	(W/(m·K))
g	: 重力加速度	9.81 (m/s ²) = 1.27×10 ⁸ (m/h ²)
β	: 空気の体膨張係数	(1/°C)
Δt	: 温度差 t - t ₀	(°C)
ν	: 空気の動粘性係数	(m ² /h)
C _p	: 空気の定圧比熱	(kJ/(kg·K))
μ	: 空気の絶対粘度	(kg/(m·h))

(B.6-3), (B.6-5), (B.6-6)式よりヌッセルト数Nu を求め, (B.6-4)式より熱伝達係数hを求める。このhを用いて, 自然対流による放出熱Q₂は次式で与えられる。

$$Q_2 = h \cdot A \cdot (t - t_0)$$

(4) 最高温度 t_{max} の計算

空気温度 38°C で t_{max} = 73°C とすれば, このときの各々の値は

D	= <input type="text"/>	(m)
g	= 1.27×10 ⁸	(m/h ²)
k	= 0.0284	(W/(m·K))
β	= 0.00322	(1/°C)
Δt	= 73 - 38 = 35	(°C)
ν	= 0.0686	(m ² /h)
C _p	= 1.009	(kJ/(kg·K)) = 0.2803 (W·h/(kg·K))
μ	= 0.0715	(kg/(m·h))

従って, (B.6-3), (B.6-5), (B.6-6)式より

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{0.2803 \times 0.0715}{0.0284} = 0.706$$

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot D^3 / \nu^2$$

$$= \frac{1.27 \times 10^8 \times 0.00322 \times 35 \times \text{}^3}{0.0686^2} = \text{$$

$$Nu = 0.13 (Gr \times Pr)^{1/3} = \text{$$

よって, (B.6-4) 式より

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \text{} (W/(m^2 \cdot K)) = \text{} (kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C))$$

従って、

$$\begin{aligned} Q_{out} &= Q_1 + Q_2 \\ &= A \times \square \times \left\{ \left(\frac{t + 273}{100} \right)^4 - 3.11^4 \right\} + A \times \square \times (t - t_0) \\ \frac{Q_{out}}{A} &= \square \times \left\{ \left(\frac{t + 273}{100} \right)^4 - 3.11^4 \right\} + \square \times (t - 38) \end{aligned}$$

一方 (B.6-1) 式より

$$\frac{Q_{in}}{A} = 344 \text{ (kcal/(m}^2 \cdot \text{h))}$$

以上より

$$\frac{Q_{out}}{A} \doteq \frac{Q_{in}}{A}$$

となるから、 $t_{max} = 72.7^\circ\text{C}$ が求められる最高温度であり、一般の試験条件下での輸送物設計温度は 73°C とする。

B.6.3 熱伝導汎用プログラム「TRUMP」の概要

(1) 概 要

TRUMPは1968年 Lawrence Radiation Laboratory で開発されたノード法にもとづく伝熱計算プログラムである。

(2) 機 能

TRUMPは、熱生成、化学反応、相変化及び物質移動を伴う熱伝達を取り扱うことができる。また、TRUMPは、直交座標、円柱座標、回転体座標あるいは極座標を用いて物体を分割することにより、3次元形状の物体を取り扱うことができる。

物性値のうち熱伝導率、比熱は、温度又は時間の関数として表すことができる。

要素間の熱伝達は、伝導、自然対流、強制対流及び輻射による熱伝達を取り扱うことができ、境界条件は自然対流、強制対流及び輻射による熱伝達を取り扱うことができる。また、境界温度は、時間の関数として表すことができる。初期温度は空間での位置によって異なってもよい。TRUMPの出力としては、各時間毎の温度分布のほか、各要素の熱収支等が得られる。

(3) 計算方法 [(ロ) - 第B. 5 図参照]

TRUMPは、空間座標と時間について4個の独立変数及び温度と2つの反応物濃度という合計3個の従属変数をもった連立偏微分方程式を解く。熱生成及び化学反応を伴う熱伝導及び物質移動の方程式は、通常の3次元の場合は、普通のベクトル演算式を用いて次のように表わされる。

$$\begin{aligned}\frac{DT}{Dt} &= \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \Delta T \\ &= \frac{1}{\rho C} \cdot \Delta \cdot k \Delta T + G - \frac{Qa}{C} \cdot \frac{\partial a}{\partial t} - \frac{Qb}{C} \cdot \frac{\partial b}{\partial t} \\ \frac{Da}{Dt} &= \frac{\partial a}{\partial t} + v \cdot \Delta a \\ &= -a \cdot \exp\left(Za - \frac{Ea}{R \cdot T}\right) \\ k_1 \cdot \left(\frac{\partial T_1}{\partial r}\right)_i &= h_{i2} \cdot (T_{2i} - T_{1i}) = k_2 \cdot \left(\frac{\partial T_2}{\partial r}\right)_i \\ h_i &= h_{i0} + h_{ic} \cdot [(T_{2i} - T_{1i})^2]^{P_i/2} \\ &\quad + \sigma \cdot F_i \cdot (T_{1i} + T_{2i}) \cdot (T_{1i}^2 - T_{2i}^2)\end{aligned}$$

境界面のコンダクタンス h_i は、接触コンダクタンス、自然対流、強制対流及び輻射の効果を含んだ一般形である。 σ は、ステファン-ボルツマン定数、 F は総括輻射形態係数である。

$$k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_s = U_{sb} \cdot (T_b - T_s)$$

ここで、 U_b =外部温度

U_{sb} =表面コンダクタンス

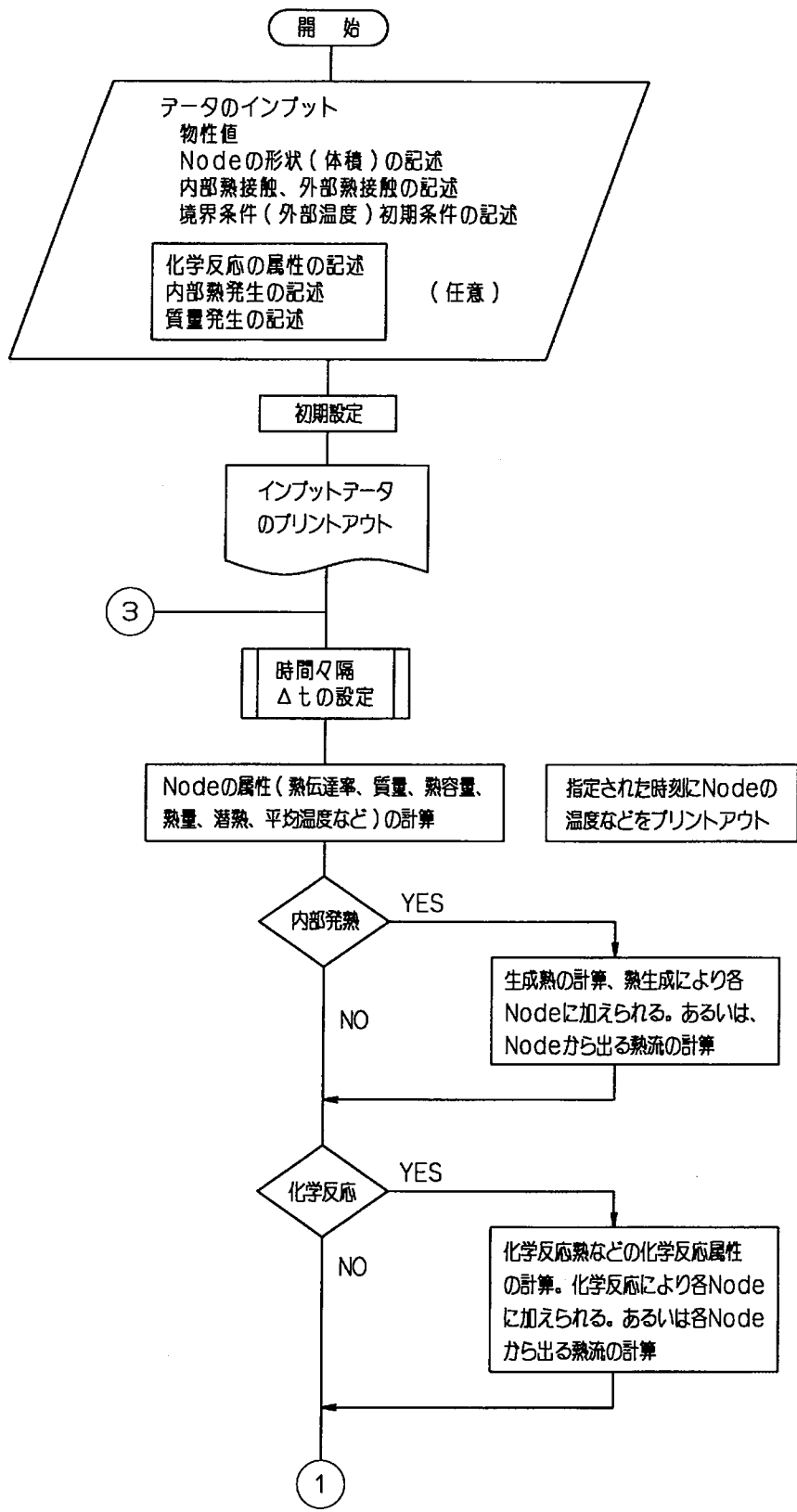
U_{sb} は、物質相の場合と同様に、次のように表される。

$$U_{sb} = h_{so} + h_{sc} \cdot [(T_b - T_s)^2]^{P_s/2} + \sigma \cdot F_b \cdot (T_s + T_b) \cdot (T_s^2 + T_b^2)$$

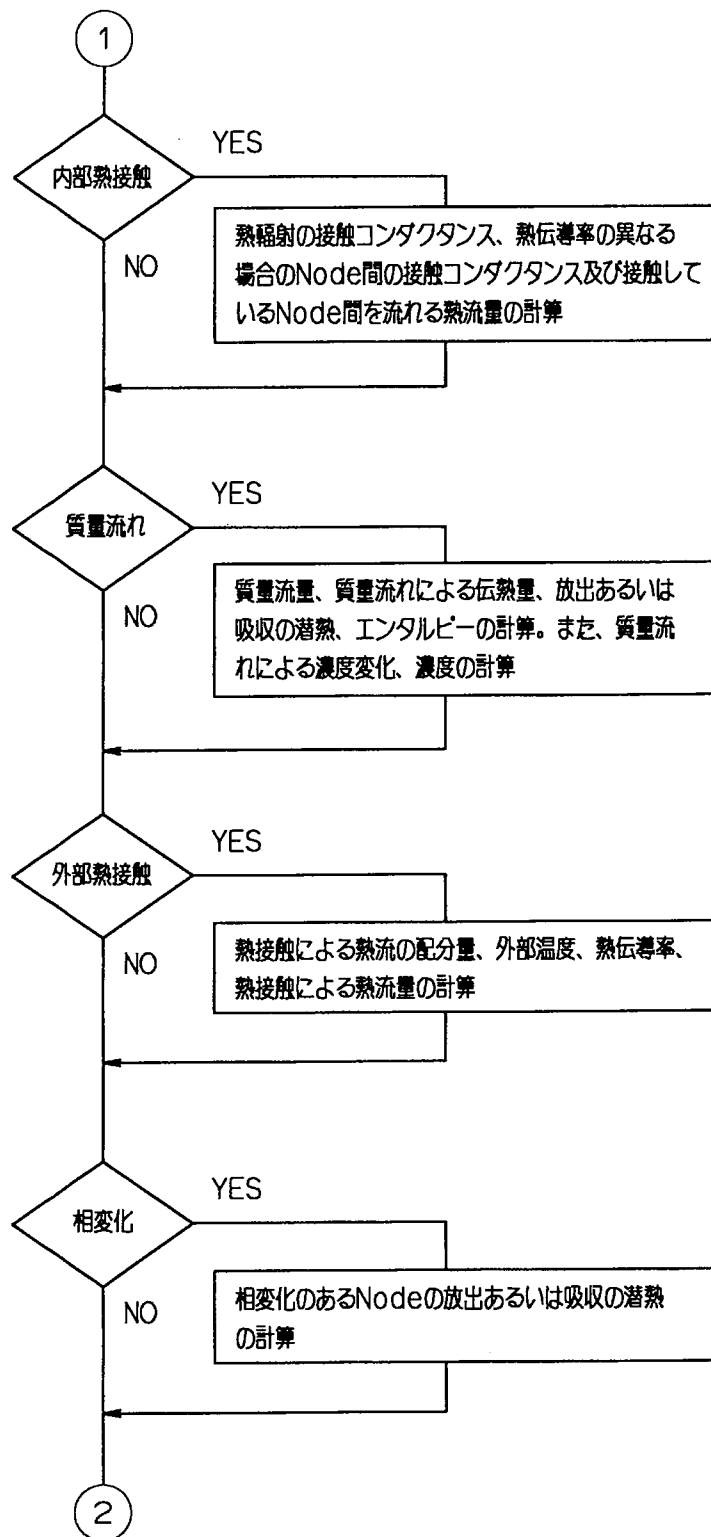
TRUMPで実際に解かれる方程式は、微小時間間隔に対してであり、前述の方程式において時間微分 $\partial u / \partial t$ を $(u' - u) / \Delta t$ と置き換えることにより計算される。ここで、 u' と u は時間間隔 Δt の始まりと終りの値である。

(4) 実績

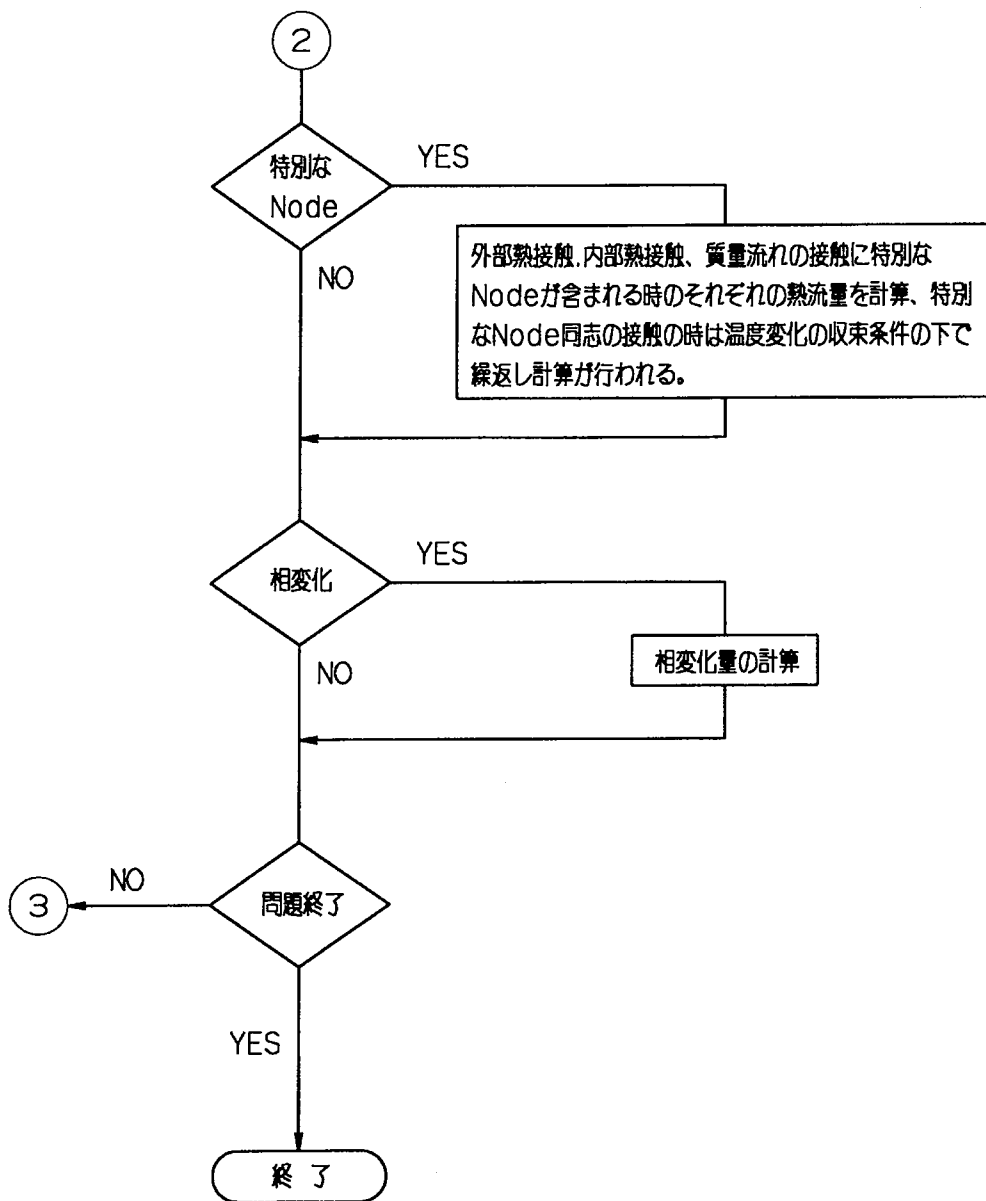
TRUMPプログラムは、Lawrence Radiation Laboratoryで開発されたプログラムであり、現在米国の数多くの研究所等で使用されている。



(ロ) - 第B. 5図 TRUMPフローチャート (1 / 3)



(口)一第B. 5図 TRUMPフローチャート (2/3)



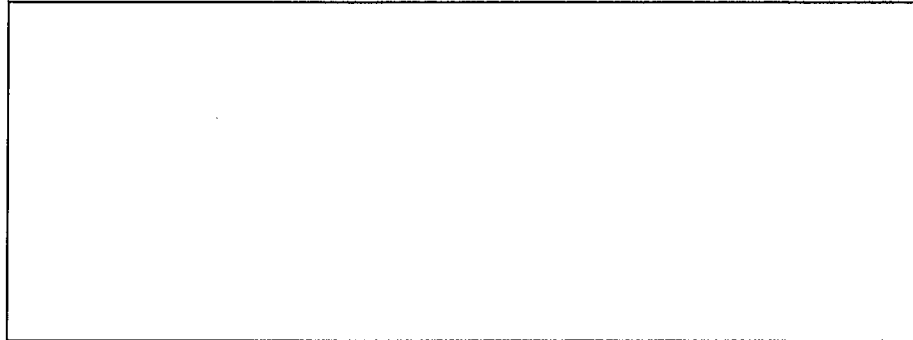
(ロ) - 第B. 5図 TRUMPフローチャート (3 / 3)

B.6.4 燃料集合体のモデル化 (均質化燃料モデル)

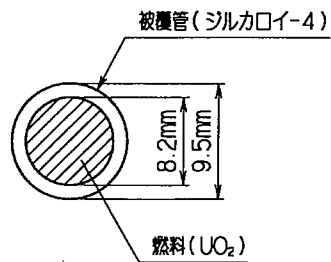
モデルは2次元1/4象限モデルとする。燃料部は、集合体の1番外側に位置するロッド部及び残りの燃料集合体の円筒状に均質化したものに分割する。

燃料集合体の均質化モデルを(ロ)－第B.6図に示す。

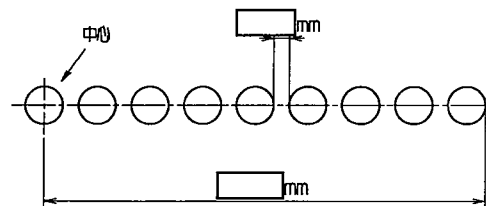
また、燃料棒の断面及び17×17燃料棒の配列を(ロ)－第B.7図及び(ロ)－第B.8図に示す。



(ロ)－第B.6図 燃料集合体の均質化モデル



(ロ)－第B.7図 燃料棒の断面



(ロ)－第B.8図 燃料棒の対角線方向の配列図

集合体の1番外側に位置するロッド27本分のロッド部外半径及びロッド部厚さを求める。

- (1) ロッド部外半径 - 1/4象限内にある集合体の辺長と1/4円周長とが同じとなる円の半径

$$\frac{214 + \square}{0.5 \times \pi} = \square \text{ (mm)}$$

- (2) ロッド部厚さ - ロッド27本分の断面積と同じ断面積となるようにロッド部厚さを決める。

$$\frac{\pi}{4} (\square^2 - r^2)$$

$$= 12.6 \times 17 \times 12.6 + 12.6 \times 9 \times 12.6$$

$$r = \square \text{ (mm)}$$

よってロッド部厚さは $\square - \square = \square$ mm となる。

B. 6.5 均質化燃料部の熱的性質

均質化燃料部の熱的性質を次の要領で決定する。

- (1) 等価密度及び等価比熱

燃料集合体を(口)-第B. 6図及び(口)-第B. 8図のように均質化し、面積比を(口)-第B. 14表で表わす場合、等価密度及び等価比熱は次式で求められる。均質化燃料の等価密度は体積平均、等価比熱は重量平均によって算出できる。

$$d = d_F \cdot W_F + d_S \cdot W_S + d_A \cdot W_A$$

$$C_P = \frac{C_F \cdot d_F \cdot W_F + C_S \cdot d_S \cdot W_S + C_A \cdot d_A \cdot W_A}{d_F \cdot W_F + d_S \cdot W_S + d_A \cdot W_A}$$

(ロ) 第B.14表 均質化燃料部面積比

	断面積 (mm ²)	面積比
均質化燃料部	$214 \times \square = \square$	<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 100px; margin: auto;"></div>
UO ₂	$\frac{\pi}{4} \times 8.2^2 \times 17 \times 10 = 8,977$	
被覆管	$\frac{\pi}{4} \times (9.5^2 - 8.2^2) \times 17 \times 10 = 3072$	
空 気	$214 \times \square - \frac{\pi}{4} \times 9.5^2 \times 17 \times 10 = \square$	

d : 等価密度

d_F : UO₂の密度 = 10.96 (g/cm³)

d_S : 被覆管の密度 = \square (g/cm³)

d_A : 空気の密度 = 9.16×10^{-4} (g/cm³)

C_P : 等価比熱

C_F : UO₂の比熱 = 0.264 (kJ/(kg·K))

C_S : 被覆管の比熱 = \square (kJ/(kg·K))

C_A : 空気の比熱 = 1.01 (kJ/(kg·K))

W_F : 燃料の面積比 = \square

W_S : 被覆管の面積比 = \square

W_A : 空気の面積比 = \square

温度 100℃における計算値として以下の値を得る。

$$d = 10.96 \times \square + \square \times \square + 9.16 \times 10^{-4} \times \square$$

$$= \square$$

$$= \square \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

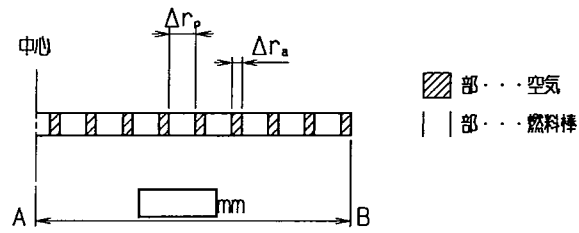
$$C_P = \frac{0.264 \times \square + \square \times \square + 1.01 \times \square}{\square}$$

$$= \frac{\square + \square + \square}{\square}$$

$$= \square \text{ (kJ/(kg·K))}$$

(2) 等価熱伝導率

均質化燃料の等価伝導率を以下の方法^[7]で求める。



AB間の平均熱伝導率λは

$$\lambda = \frac{\Delta r_{AB}}{\frac{8.5 \times \Delta r_p}{\lambda_p} + \frac{8 \times \Delta r_a}{\lambda_a}}$$

ここで Δr_{AB} : AB間の厚さ = (mm)

Δr_p : 燃料棒の厚さ (mm)

Δr_a : 空気層の厚さ (mm)

λ_p : 燃料棒の平均熱伝導率 (W/(m·K))

λ_a : 空気の熱伝導率 = 0.0316 (W/(m·K))

$$\lambda_p = \frac{\phi_p}{\frac{\phi_f}{\lambda_f} + \frac{\phi_c}{\lambda_c}} = \frac{0.0095}{\frac{0.0082}{7.07} + \frac{0.0011}{\text{$$
}} = \text{} \text{ (W/(m·K))}

ここで ϕ_p : 燃料棒の外径 = 9.5 (mm)

ϕ_f : ペレット直径 = 8.2 (mm)

ϕ_c : 被覆管厚さ = 1.1 (mm)

λ_f : = UO_2 の熱伝導率 = 7.08 (W/(m·K))

λ_c : = 被覆管の熱伝導率 = (W/(m·K))

$$8.5 \times \Delta r_p + 8 \times \Delta r_a = \text{} \text{ (mm)}$$

$$\Delta r_p + \Delta r_a = \frac{\text{} - 0.5 \times 9.5}{8} = \text{} \text{ (mm)}$$

これから空気層の面積 S_a を求めると

$$S_a = \sum_{i=1}^8 \pi [2 \{4.75 + (i-1) \text{$$

$$= \pi (\text{} \Delta r_a + 8 \Delta r_a^2)$$

また、燃料棒配列から空気層の面積 S_a' を求めると

$$S_a' = \boxed{}^2 - \frac{\pi}{4} \times 9.5^2 \times 17 \times 17 = \boxed{}$$

$S_a = S_a'$ であるので、

$$8 \Delta r_a^2 + \boxed{} \Delta r_a - \boxed{} = 0$$

ゆえに

$$\Delta r_a = 10.33 \text{ (mm)}$$

$$\Delta r_p = \boxed{} - 10.33 = \boxed{} \text{ (mm)}$$

よって

$$\lambda = \frac{\boxed{}}{\frac{8.5 \times \boxed{}}{\boxed{}} + \frac{8 \times 0.01033}{0.0316}}$$

$$= \boxed{} \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$$

B. 6. 6 解析に使用した環境条件

(1) 均一化燃料部及び容器内筒と、容器内空間と外筒の伝熱

(a) 自然対流伝熱

水平同心円筒間の密閉流体層での自然対流熱伝達として、次式により求める。

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot D^3}{a \cdot \nu} \quad (\text{B. 6-7})$$

$$Nu = 0.20 \times \left\{ \frac{\sqrt{r_o/r_i} \cdot 1 \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{r_o/r_i - 1} \right\}^{0.75} \times Ra^{0.25} \quad (\text{B. 6-8})$$

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (\text{B. 6-9})$$

ここで、

Ra : レイレイ数

Nu : 平均ヌッセルト数

g : 重力加速度 = 9.81 (m/s²)

β : 流体の体膨張係数 (1/°C)

Δt : 内外円筒面の温度差 (°C)

D : 液体層の厚さ (m)

a : 温度伝導度 (m²/s)

ν : 気体の動粘性係数 (m^2/s)

r_o : 外円筒の内半径 (m)

r_i : 内円筒の外半径 (m)

λ : 流体の熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

h : 熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)

(B.6-7), (B.6-8), (B.6-9)式より

$$h = \left[\frac{0.2\lambda}{D} \times \left\{ \frac{\sqrt{r_o/r_i}}{r_o/r_i - 1} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right\}^{0.75} \times \left(\frac{g \cdot \beta \cdot D^3}{a \cdot \nu} \right)^{0.25} \right] \times \Delta t^{0.25}$$

[] をBとおくと

$$h = B \cdot \Delta t^{0.25}$$

$r_i = \square \text{mm}$, $r_o = \square \text{mm}$ とした時のBの計算結果を(ロ)―第B.15表, (ロ)―第B.9図に示す。

(ロ)―第B.15表 B値の計算結果

温度 $^{\circ}\text{C}$	25	300	600	1,000
B	[]			

(b) 輻射伝熱

輻射による熱伝達率は、円筒面の法線方向のみと考える。

TRUMPでは、表面1と2の間の熱交換量(q)は次式によって表わされる。

$$q = A_1 \cdot F_{12} \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4) = A_2 \cdot F_{21} \cdot \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{B.6-10})$$

ここで、 A_1 : 面1の表面積 (外円筒内面)

A_2 : 面2の表面積 (内円筒外面)

T_1 : 面1の表面温度

T_2 : 面2の表面温度

F_{12} : 面1から面2に対する輻射形態係数

F_{21} : 面2から面1に対する輻射形態係数

σ : ステファン-ボルツマン定数

である。

ガス層をはさんだ円筒間の輻射形態係数は、円心円筒の式により求める。

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (\text{B. 6-11})$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

ここで、 ε_1 : 面 1 の輻射率 (外円筒の内面)

ε_2 : 面 2 の輻射率 (内円筒の外表面)

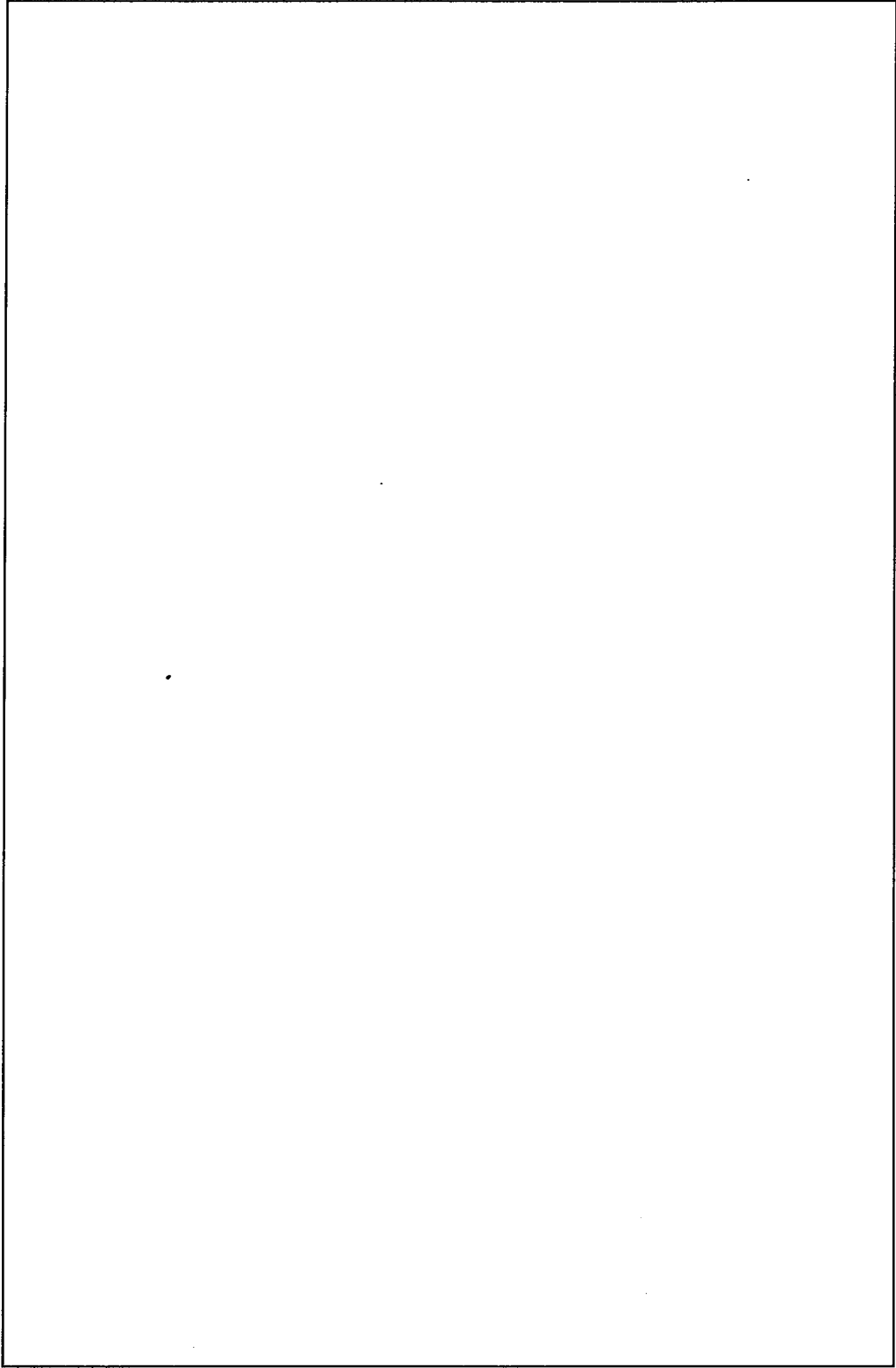
r_1 : 外円筒の内半径

r_2 : 内円筒の外半径

である。

TRUMP への入力では、伝熱面積として外側の面積を用いる。

(B. 6-11) 式の条件毎に数値解析を行った結果を (ロ) - 第 B. 16 表 各部の輻射形態係数に示す。



(口)一第B. 9 図 B 値の計算結果

(ロ) - 第 B. 16 表 各部の輻射形態係数

位 置	ε	F_{12}	備考
内筒～ 最外周均質化燃料 (ロッド)	$\varepsilon_1 = \square$ (ジルカロイ) $\varepsilon_2 = \square$ (鋼板)	$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\square} + \frac{\square}{\square} \left(\frac{1}{\square} - 1 \right)}$ $= \square$	MDA 及び ZIRLO の ε_1 はジルカロイと同 一とする。
フランジ～ロッド	$\varepsilon_1 = \square$ (ジルカロイ) $\varepsilon_2 = \square$ (鋼板)	$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\square} + \frac{\square}{\square} \left(\frac{1}{\square} - 1 \right)}$ $= \square$	MDA 及び ZIRLO の ε_1 はジルカロイと同 一とする。

(2) 輸送物表面の周囲の伝熱

外容器外筒，外容器上蓋部の境界条件を扱う時，TRUMPでは，熱伝達は対流と輻射項によって表される。

$$h_T = h_{conv} + h_{rad}$$

$$= h_{sd} (t_o - t_w)^{P_{sb}} + \sigma \cdot F_{sb} \cdot (t_o - t_w) (t_o^2 + t_w^2) \quad (B. 6-12)$$

ここで， h_T : 全熱伝達率 σ : ステファン-ボルツマン定数
 h_{conv} : 対流熱伝達率 F_{sb} : 輻射形態係数
 h_{rad} : 輻射熱伝達率 t_o : 雰囲気温度
 h_{sd} : 対流熱伝達率係数 t_w : 表面温度
 P_{sb} : 対流項のべき乗数

である。

(a) 対流項

対流熱伝達率係数及び対流項のべき乗数については，管外自然対流の式^[4]により求める。

$$Nu = 0.53 (Gr \times Pr)^{1/4} \quad (B. 6-13)$$

$$(10^8 > Gr \times Pr > 10^4)$$

$$Gr = \frac{g \beta L^3 (t_w - t_o)}{\nu^2} \quad (B. 6-14)$$

$$h_{conv} = \frac{\lambda}{L} Nu \quad (B. 6-15)$$

ここで， Nu : ヌッセルト数
 Gr : グラスホフ数
 Pr : プラントル数

- g : 重力加速度 $=9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$
 β : 気体の膨張係数 $(1/^\circ\text{C})$
 L : 基準長 (m)
 ν : 気体の動粘性係数 (m^2/s)
 λ : 気体の熱伝導率 $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$
 h_{conv} : 管外の自然対流伝達率 $(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$
 t_w : 表面温度 $(^\circ\text{C})$
 t_o : 雰囲気温度 $(^\circ\text{C})$

である。

(B.6-13), (B.6-14), (B.6-15) 式をまとめると次の如くなる。

$$h_{\text{conv}} = 0.53 \times \frac{\lambda}{L} \left\{ \frac{g \beta L^3}{\nu^2} \right\}^{1/4} Pr^{1/4} (t_w - t_o)^{1/4}$$

上式の各温度条件毎に数値解析を行った結果を(ロ)－第B.17表に示す。

(ロ)－第B.17表 外筒の熱伝達係数

耐火試験時		冷却時	
壁面温度 °C	熱伝達率 W/(m ² ·K)	壁面温度 °C	熱伝達率 W/(m ² ·K)
30		30	
160			
170			
300			
500			
700			
775			
800			
800			

(b) 輻射項

輻射形態係数は次式により求める。

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

F_{12} = 形態係数

ε_1 = 面1の輻射率

ε_2 = 面2の輻射率

なお、それぞれの面における輻射率を(ロ)－第B.18表に示す。

形態係数の計算結果を(ロ)－第B.19表に示す。

(ロ)－第B.18表 各材料の輻射率

	一般の試験条件	特別の試験条件	
		火災時	火災後
周囲の空気	1.0	0.9	1.0
外筒表面	<input type="text"/>	0.8	<input type="text"/>
内筒表面	—	<input type="text"/>	<input type="text"/>
燃料棒表面	—	<input type="text"/>	<input type="text"/>

(ロ)－第B.19表 形態係数

	一般の試験条件	特別の試験条件	
		火災時	火災後
外筒表面	<input type="text"/>	0.735	<input type="text"/>
燃料棒表面	—	<input type="text"/>	<input type="text"/>

B.6.7 太陽熱

輸送容器が太陽から受ける放射熱は、放射性物質等の輸送に関する安全基準に定められている値 ($400\text{W}/\text{m}^2$ 1日12h) を用い、表面輻射率は(ロ)－第B.18表に示す値を用いた。

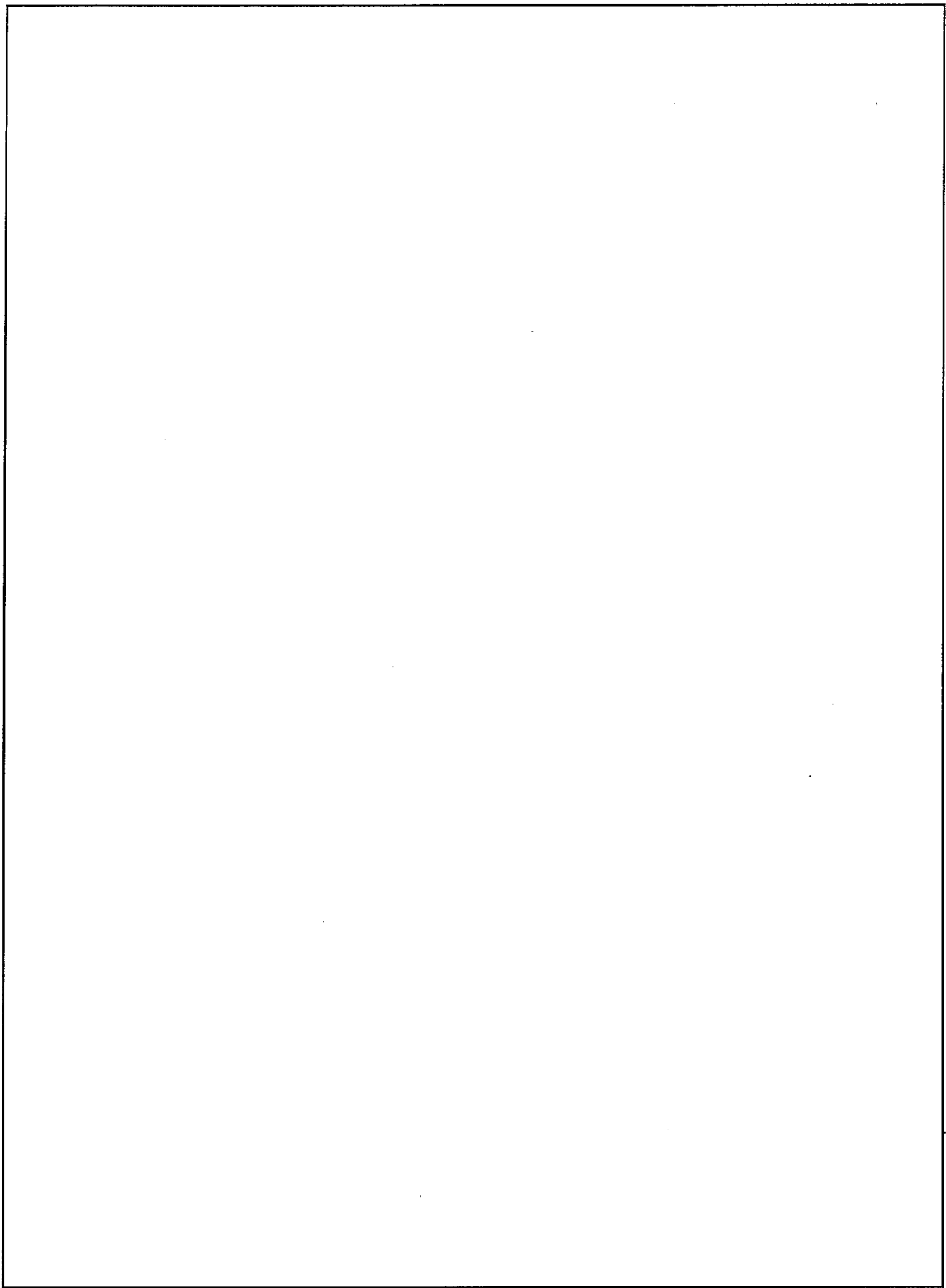
B.6.8 耐火試験時の落下試験Ⅱの影響

原型容器を使用した耐火試験において、落下試験Ⅱの衝突部と非衝突部の温度履歴を(ロ)－第B.10図に示す。

本図では、(A)－(A)断面が、貫通棒の衝突で、(B)－(B)断面は、非衝突部である。

(A)－(A)断面、(B)－(B)断面において外筒表面温度 (TB-1, TB-17) は、ほぼ同一熱挙動を示している。一方、内筒表面温度 (TB-4, TB-20) は立上り部の熱挙動にわずかな相違点を示しているが、到達温度には、有意差はない。

この結果より、落下試験Ⅱは耐火試験に影響を与えないといえる。



(口) - 第. 10 図 800°C × 30 分耐火試験時における落下試験 II の影響

B. 6. 9 燃料棒内の最大内圧

800℃, 30分の火災及びそれに続く38℃の環境での放置により, 燃料棒の最高温度は□℃になるが, このとき被覆管とUO₂ペレットの熱膨張によるボイド体積の減少及び燃料棒内の気体温度の上昇によって, 内圧が上昇する。

温度と内圧の関係はボイル・シャルルの式より, 次式にて表される。

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} \dots\dots\dots (B. 6-16)$$

ここで,

- P : 燃料棒最高温度における被覆管内圧 (MPa)
- V : 燃料棒最高温度におけるボイド体積 (cm³)
- T : 温 度 (K)
- P₀ : 初期圧力 (MPa)
- V₀ : 初期ボイド体積 (cm³)
- T₀ : 初期温度 (K)

また

- V_T : 被覆管の体積 (cm³)
- V_F : UO₂ペレットの体積 (cm³)
- V_{T0} : 初期温度における被覆管の体積 (cm³)
- V_{F0} : 初期温度におけるUO₂ペレットの体積 (cm³)
- α_T : 被覆管の熱膨張率 (1/℃)
- α_F : UO₂ペレットの熱膨張率 (1/℃)
- ΔT : 温度差 (℃)

とすれば, ボイド体積は次式にて算出される。

$$\begin{aligned} V - V_0 &= (V_T - V_F) - (V_{T0} - V_{F0}) \\ &= (V_T - V_{T0}) - (V_F - V_{F0}) \\ &= 3\alpha_T \Delta T V_{T0} - 3\alpha_F \Delta T V_{F0} \dots\dots\dots (B. 6-17) \end{aligned}$$

となる。

$$\alpha_T = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots}$$

参考文献 [11]

= (1/°C)

$\alpha_F =$

参考文献 [11]

=

= (1/°C)

各々の型における P_0 , V_0 , V_{T0} , V_{F0} の値は(ロ)－第B.20表の通りである。

(ロ)－第B.20表 燃料棒の初期値

型 式	現行燃料				高燃焼度燃料			
	P_0 (MPa·G)	V_0 (cm ³)	V_{T0} (cm ³)	V_{F0} (cm ³)	P_0 (MPa·G)	V_0 (cm ³)	V_{T0} (cm ³)	V_{F0} (cm ³)
14×14 10 フィート								
14×14 12 フィート								
15×15 12 フィート								
17×17 12 フィート								
17×17 12 フィート (改良タイプ)								

以上の値を (B.6-17) 式に代入して V を求め、更に (B.6-16) 式より P を求めると(ロ)－第B.21表のようになる。

(ロ)－第B.21表 最高温度時における燃料棒のボイド体積及び内圧

型 式	現行燃料		高燃焼度燃料	
	V (cm ³)	P (MPa·G)	V (cm ³)	P (MPa·G)
14×14 10 フィート				
14×14 12 フィート				
15×15 12 フィート				
17×17 12 フィート				
同上 (改良タイプ)				

周方向応力 σ は、次式で与えられる。

$$\sigma = P \times \frac{d}{2t}$$

P : 内圧 (MPa・G)

d : 被覆管内径 (mm)

t : 被覆管内厚 (mm)

各タイプにおける周方向応力を(ロ)－第B.22表に示す。

(ロ)－第B.22表 最高温度時における燃料棒に発生する周方向応力

型 式	被覆管 内径 d (mm)	被覆管 肉厚 t (mm)	現行燃料		高燃焼度燃料	
			内圧 P (MPa・G)	周応力 σ (N/mm ²)	内圧 P (MPa・G)	周応力 σ (N/mm ²)
14×14 10 フィート	9.48	0.62				
14×14 12 フィート	9.48	0.62				
15×15 12 フィート	9.48	0.62				
17×17 12 フィート	8.36	0.57				
同上 (改良タイプ)	8.36	0.57				

口章C 密 封 解 析

(ロ)－C 密封解析

C.1 概要

本輸送容器には密封装置としての構成部品はなく、燃料棒被覆管及び両端に密封溶接される燃料棒端栓が密封境界を形成するので、これらに係る密封性に着目して密封性の評価を行う。

燃料棒の密封境界は、一般の試験条件下及び特別の試験条件下における本輸送物の構造解析及び熱解析の結果ならびに特別の試験条件下のうち落下試験Ⅰ、落下試験Ⅱ及び耐火試験を実施した原型容器２体の試験結果より健全性が確認されている。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

本輸送容器には密封装置としての構成部品はなく、(イ)－第D.10図～(イ)－第D.12図に示すように燃料棒の構成材である燃料棒被覆管ならびに燃料棒端栓が密封境界を形成する。これらの密封境界（燃料棒）と密封境界図を(ロ)－第C.1図に示す。

次に密封境界の設計仕様の概要を以下に示す。また、密封境界の構造材を付属書類C.6.1の(ロ)－第C.1表に示す。

(1) 燃料棒の設計仕様

燃料棒は、約 \square °C、 \square 気圧の高温高圧下における加圧水型原子炉において長時間（約3年間）使用されても気密性を保持するような設計になっている。

燃料棒内部にはヘリウムガスが充填されており、常温（20°C）で(イ)－第D.9表に示すように最大で \square MPa・Gに加圧されている。

C.2.2 密封装置の貫通部

本輸送容器には、密封装置としての構成部品はなく、燃料棒の構成材である燃料棒被覆管ならびに燃料棒端栓が密封境界を形成する。また、密封境界である燃料棒は溶接で密封されており、貫通部はない。

C. 2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

本輸送容器には、密封装置としての構成部品はなく、燃料棒の構成材である燃料棒被覆管ならびに燃料棒端栓が密封境界を形成する。ゆえに、本輸送物の密封境界は燃料棒であり、溶接により密封されているので、ガスケットはない。燃料棒の溶接箇所を(ロ)－第C. 2図に示す。溶接部は目視(肉眼観察法)によりすべて外観検査をする他、ヘリウムリーク法によって溶接部の健全性を確認する。なお、燃料棒のリークテストに当たっては、cm³/s以上のリークがないこととしている。

これらの溶接箇所は、熱解析(ロ)－Bで述べたように、輸送中に予想される燃料棒の最高温度(73℃)の圧力MPa・Gにおいて、さらに800℃の耐火試験における燃料棒温度(℃)の圧力MPa・Gにおいても破損することなく、密封性は保持される。

C. 2.4 蓋

本輸送容器には、密封装置としての構成部品はなく、燃料棒の構成材である燃料棒被覆管ならびに燃料棒端栓が密封境界を形成する。ゆえに、密封境界である燃料棒には、蓋に相当するものはない。

C. 3 一般の試験条件

(1) 水吹き付け試験

輸送容器は、50mm/hの雨量に相当する水を1時間吹き付けても、A. 5.2項で評価したように、水が浸入する恐れはない。また、密封境界である燃料棒は、原子炉で使用する際、気圧の水中で長期間耐えるように設計されており、水吹き付け試験でも水が浸入する恐れはない。

(2) 自由落下試験

A. 5.3で述べたように、1.2mからの自由落下試験において、落下エネルギーは容器外殻の変形により吸収され、燃料棒の健全性は保たれるので、自由落下試験でも健全性は保たれる。

(3) 積み重ね試験

A. 5.4で解析したように、輸送物の5倍の荷重の積み重ね試験においても輸送容器は健全である。従って、燃料棒の密封性は積み重ね試験においても維持される。

(4) 貫通試験

A. 5.5で解析したように、φ3.2cm、6kgの鋼棒を1mの高さから落下しても、容器外筒には穴があかない。従って、燃料棒の密封性は貫通試験においても維持される。

以上の解析から、一般の試験条件下における輸送物の密封性は健全であり、放射性物質の漏えいはない。

C. 3.1 放射性物質の漏えい

一般の試験条件下では、A. 5で述べたように、輸送物最高温度73℃における各部の圧力及び熱膨張、輸送物重量の5倍の圧縮及び1mの高さからの軟鋼棒の貫通に対して燃料棒に対する影響はなく、燃料棒の密封性は完全に保たれており、放射性物質の漏えいはない。

C. 3.2 密封装置の加圧

本輸送容器には密封装置としての構成部品はなく、燃料棒の構成材である燃料棒被覆管ならびに燃料棒端栓が密封境界を形成する。また、燃料棒の場合、燃料棒内はヘリウムガスで加圧（C. 2.1参照）されているが、放射性物質が未照射の焼結二酸化ウランであるため、FPガスの発生はなく、極く微量の水蒸気が含まれる。一般の試験条件における収納物の温度73℃を用いて解析した最大内圧とも、付属書類C. 6.1に示すように最高使用可能圧力を下回っており、構造解析A. 5.7に示すように、燃料棒に発生する応力は基準値以下であるので、密封境界である燃料棒は破損することなく密封性は維持される。

C. 3.3 冷却材汚染

本輸送物には冷却材を使用しないので、該当しない。

C. 3.4 冷却材損失

本輸送物には冷却材を使用しないので、該当しない。

C. 4 特別の試験条件

構造解析(ロ)－A. 9.2で述べたように、燃料棒は破損することなく密封性は健全である。また、熱解析B. 5.6で述べたように、℃の環境において、燃料棒は破損することなく密封性は保たれる。なお、燃料棒に発生する最大内圧は、最高使用可能圧力未満であり、密封境界である燃料棒の密封性は維持される。

C. 4.1 核分裂生成ガス

本輸送物の収納物は、核分裂生成ガスは含まない。

C. 4.2 放射性物質の漏えい

構造解析A. 9及び熱解析B. 5で述べたように、特別の試験条件下でも燃料棒の密封性は維持される。また、原型試験（落下試験Ⅰ、Ⅱ及び耐火試験）を行っても、燃料棒が破損しないことを確かめている。従って、本輸送物から放射性物質が漏えいすることはない。

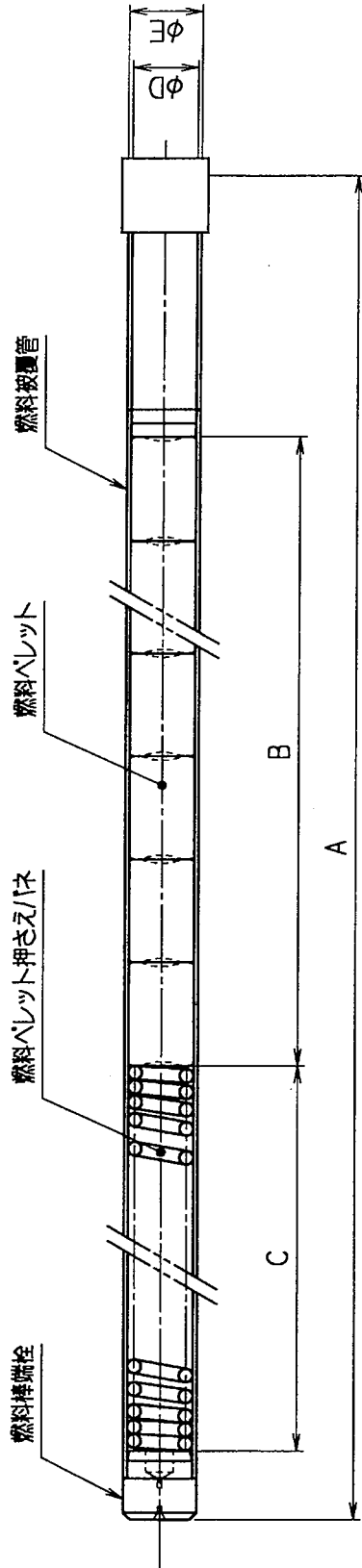
C.5 結果の要約及びその評価

一般及び特別の試験条件下において、構造解析(ロ)－A.5.3及び(ロ)－A.9.2項で述べたように燃料棒は破損することなく、密封性は健全である。

また、熱解析B.4.4で述べたように、輸送中に予想される輸送物の最高温度73℃が燃料棒の内部温度とした場合の内圧は、MPa・Gとなり、燃料棒に発生する一次一般膜応力はN/mm²と、燃料棒被覆管に用いるジルコニウム合金の設計応力強さN/mm²に比べ十分小さいので密封性は確保される。

また、構造解析の特別の試験条件A.9.2で解析し、原型試験で実証されたように((ロ)－G原型容器試験結果報告書参照)9mの落下衝撃に対しても密封境界としての健全性は維持される。

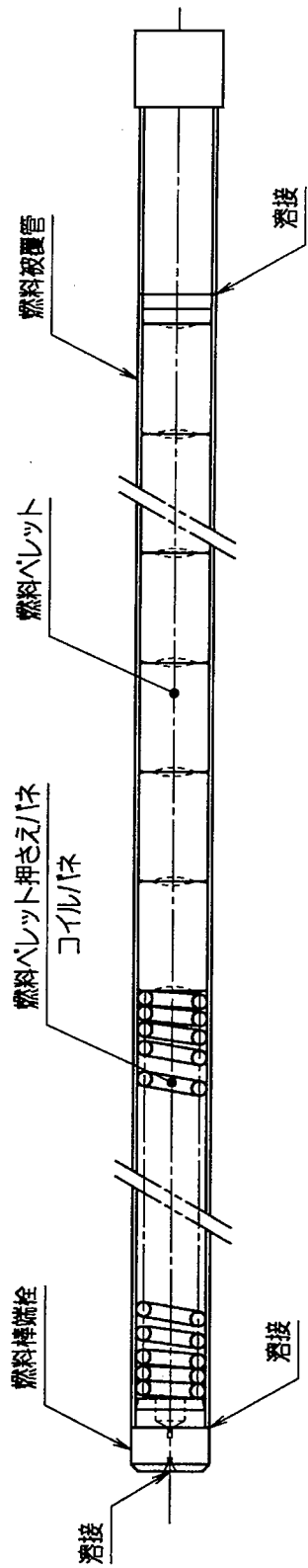
更に、熱解析の特別の試験条件B.5.4で解析したように800℃、30分の環境下にさらされても、燃料棒は破損することなく密封性は維持される。



(注記) 形状は代表例

型式	現行燃料棒					高燃焼度燃料棒				
	A	B	C	φD	φE	A	B	C	φD	φE
14 × 14 10 71-1	3207	約 3048	約 □	9.48	10.72	—	—	—	—	—
14 × 14 12 71-1	3856	約 3642	約 □	9.48	10.72	3866	約 3642	約 □	9.48	10.72
15 × 15 12 71-1	3856	約 3642	約 □	9.48	10.72	3866	約 3642	約 □	9.48	10.72
17 × 17 12 71-1	3852	約 3648	約 □	8.36	9.5	3856	約 3648	約 □	8.36	9.5
17 × 17 12 71-1 (改良タイプ)	—	—	—	—	—	3863	約 3648	約 □	8.36	9.5

(ロ) - 第 C. 1 図 密封境界 (燃料棒) と密封境界図



(注記) 形状は代表例

(ロ) - 第C. 2図 燃料棒溶接箇所

C. 6 付属書類

C. 6.1 密封境界の構造材

密封境界の構造材を(ロ)－第C. 1表に示す。

(ロ)－第C. 1表 密封境界の構造材 (温度) (1/2)

型 式	部品名	温 度 (°C)					
		現行燃料			高燃焼度燃料		
		一般の試験条件	特別の試験条件	最高使用可能 ⁽¹⁾	一般の試験条件	特別の試験条件	最高使用可能 ⁽¹⁾
14×14型 10フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓	73			—	—	—
14×14型 15×15型 12フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓	73			73		
17×17型 12フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓	73			73		

(ロ)－第C. 1表 密封境界の構造材 (圧力) (2/2)

型 式	部品名	圧 力 (MPa・G)					
		現行燃料			高燃焼度燃料		
		一般の試験条件	特別の試験条件	使用可能圧力 ⁽²⁾	一般の試験条件	特別の試験条件	使用可能圧力 ⁽²⁾
14×14型 10フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
14×14型 12フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
15×15型 12フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
17×17型 12フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
17×17型 12フィート (改良タイプ)	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						

(1) ジルコニウム合金の特性から来るZrのβ変態点。また、融点は□°C

(2) 一般の試験条件の場合、被覆管に発生する周方向引張応力が□N/mm²となる内圧(at 73°C)

特別の試験条件の場合、被覆管に発生する周方向引張応力が□N/mm²となる内圧(at □°C)

□章D 遮蔽解析

(ロ)－D 遮蔽解析

D. 1 概 要

本輸送物の収納物は、二酸化ウラン燃料集合体である。従って、ウラン及びその娘核種が線源となる。

収納物である二酸化ウラン燃料集合体の濃縮度は5wt%以下であることから、燃料濃縮度を5.0wt%と設定している。

放射能強度及び線源強度は、濃縮度が高い方が大きく、線量当量率も高くなるので、最大濃縮度5.0wt%のウラン同位体組成を用いて評価する。

通常の輸送条件及び一般の試験条件下の評価は、線量当量率の高くなる半径方向で代表させ、燃料集合体と輸送物の外筒のみを考慮し、燃料集合体と輸送物の表面までの最短距離を用いて行う。また、一般の試験条件下における評価では、自由落下試験による最大変位を考慮する。

D. 2 線源仕様

D. 2. 1 ガンマ線源

本輸送物の収納物である二酸化ウラン燃料中にはウラン同位体の他、これらから生成した娘核種が含まれ、壊変に伴ってガンマ線が発生する。

ガンマ線源の計算は、濃縮度5.0wt%のウラン同位体組成をもとに輸送までの期間として安全側に10年を仮定して、燃焼計算コードORIGEN-2を用いて行う。

ORIGEN-2コードから得られた二酸化ウラン燃料のガンマ線源強度を(ロ)－第D. 1表に示す。主要核種の放射能強度は(ロ)－第D. 2表に示す通りである。

D. 2. 2 中性子源

本収納物の二酸化ウラン燃料からは、ウラン同位体の自発核分裂及び α 崩壊核種と酸素の(α , n)反応により中性子が発生するが、その強度はガンマ線源強度に比べ無視しうる。

(ロ) - 第D. 1表 ガンマ線源強度

(輸送物 1 基当り)

エネルギー群	平均エネルギー (MeV)	ガンマ線源強度 (γ / sec)	
1	0.01		
2	0.025		
3	0.0375		
4	0.0575		
5	0.085		
6	0.125		
7	0.225		
8	0.375		
9	0.575		
10	0.85		
11	1.25		
12	1.75		
13	2.25		
14	2.75		
15	3.5		
16	5.0		
17	7.0		
18	9.5		
合計			

* 燃料集合体 2 体収納時